

ISSN 1349-0605

森林総合研究所
交付金プロジェクト研究 成果集 3

森林、海洋等におけるCO₂収支の
評価の高度化

独立行政法人 森林総合研究所
2004. 3

序 文

地球温暖化防止は今や人類最大の課題であろう。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は第三次評価報告書（2001）において、過去 20 年間の人為起源による CO_2 排出のうち、約 4 分の 3 は石油など化石燃料の燃焼によるもの、残りの大部分は土地利用の変化、とりわけ森林減少によるものであると結論づけている。そして、90 年代における人為起源による CO_2 排出量の約半分が、海洋と陸域（主に森林）で吸収されていること、さらに、近年の大気中 CO_2 濃度増加率の変動は、エルニーニョなど気候変動にともなう陸域と海洋の CO_2 収支の変動による可能性が高いことを推測している。

このように、森林と海洋は、その挙動によって大気 CO_2 濃度に大きな影響を及ぼす吸収（放出）源であり、その CO_2 収支を解明することが喫緊の課題となっている。また、森林においては、京都議定書の第 1 約束期間の始まる 2008 年までに、科学的データに基づいた森林生態系の CO_2 吸収量を算出することが求められている。しかし、森林生態系の CO_2 収支は、非常に多くの要因が複雑に関与しているために定量的評価が遅れている。一方、海洋においても、日本近海域の CO_2 吸収量やこれに関与する生物プロセスすなわち沿岸の生物の炭素収支についてはほとんど未解明の状態であった。

本プロジェクト研究「森林、海洋等における CO_2 収支の評価の高度化」は、これらの問題に対処するため、農林水産省農林水産技術会議が平成 11 年度～14 年度の 4 カ年計画で立ち上げたものであるが、平成 13 年度以降は、研究機関の独立行政法人化に伴い（独）森林総合研究所と（独）水産総合研究センターが交付金プロジェクト研究として、以下の課題を継続実施した。

- 1 森林における CO_2 収支の総合評価
 - （1）森林資源量及び生産力の全国評価
 - （2）主要樹種の光合成・呼吸特性の解明
 - （3）森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明
 - （4）多様な森林構造における CO_2 固定量の定量化
 - （5）森林における炭素貯留機構と CO_2 収支の総合評価
- 2 海洋における CO_2 収支の総合評価
 - （1）藻類による CO_2 収支の評価
 - （2）貝類、サンゴ類による CO_2 収支の評価
 - （3）大気／海洋系における CO_2 収支の総合評価

本プロジェクトでは、森林生態系による CO_2 収支とその年変動、森林の総炭素貯留量と年間固定速度およびその地域的分布、経済水域内での年間 CO_2 吸収量および沿岸域の貝類および藻類による年間炭素固定量、等を明らかにすることができたので、成果を刊行し、広く関係者の参考にする次第である。

平成 16 年 3 月

独立行政法人 森林総合研究所 理事長
田 中 潔

目 次

研究の要約	1
第 1 章 森林における CO ₂ 収支の総合評価 森林の CO ₂ 収支問題の特徴と研究の焦点	19
1. 森林資源量及び生産力の全国評価 (1) 森林バイオマス推定手法の開発による森林賦存量の全国評価.....	21
(2) 生育環境特性を考慮した林地生産力の全国評価	24
(3) 森林土壌における炭素貯留量の全国評価	28
2. 主要樹種の光合成・呼吸特性の解明 (1) 野外における樹木の光合成特性の解明	33
(2) 微細環境が光合成・呼吸特性に与える影響の解明	36
(3) 主要樹種の個体レベル呼吸特性の解明	38
(4) ヒノキ林および主要広葉樹木部器官の呼吸特性の解明	40
(5) 照葉樹の光合成生産に及ぼす環境要因の解明	44
3. 森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明 (1) A ₀ 層から供給される溶存及び粒子状有機物の蓄積過程の解明	48
(2) 森林土壌における難分解性有機物の長期的な蓄積過程の解明.....	51
(3) 土壌呼吸における微生物と根呼吸起源の寄与率の推定	53
(4) 枯死木や根株の腐朽分解による CO ₂ 放出量の評価.....	56
(5) 主要林相における土壌呼吸特性の解明	58
(6) 森林土壌における炭素循環と根系の解明	60
4. 多様な森林構造における CO ₂ 固定量の定量化 (1) 北方系落葉樹広葉樹林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	64
(2) ブナ林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	68
(3) コナラ・ソヨゴ林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	71
(4) 暖温帯スギ林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	75
(5) 温帯アカマツ天然林・暖温帯落葉広葉樹林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明.....	78
5. 森林における炭素貯留機構と CO ₂ 収支の総合評価 (1) 林分成長モデルによる樹種別・地域別 CO ₂ 固定・貯留量の評価.....	82
(2) ブナ林における生理・生態的プロセスと CO ₂ 収支の解明	86
(3) 森林動態レベルによる CO ₂ 固定能の評価手法の開発	90
(4) 炭素循環プロセスの定量化による森林 CO ₂ 収支の全国評価	93

目 次（続き）

第2章 海洋における CO_2 収支の総合評価	
海洋の CO_2 収支問題の特徴と研究の焦点	97
1. 藻類による CO_2 収支の評価	
(1) 亜寒帯藻場における CO_2 収支の解明	98
(2) 合域・黒潮域の藻場における CO_2 収支の把握	101
(3) 内海域藻場における CO_2 収支の把握.....	104
(4) 沿岸藻場分布の広範調査手法の開発.....	108
2. 貝類、サンゴ類による CO_2 収支の評価	
(1) 貝類の CO_2 固定量評価に関する算定手法の開発.....	112
(2) 貝類の代謝実験に基づく炭素収支の解明	116
(3) 貝類による CO_2 固定量評価のための漁獲動態に関わる調査.....	119
(4) 貝類の生理と CO_2 の固定に関する生化学的機構に関する文献調査.....	122
(5) 貝類による CO_2 固定量評価のための主要個体群の動態に関わる調査	124
(6) 二枚貝の物質循環を通じた CO_2 固定量の評価に関する研究.....	128
(7) サンゴ類による CO_2 収支の把握.....	132
(8) 地域重要資源の現地実態調査	
1) アサリ	134
2) ウバイガイ	136
3) シジミ	138
4) サザエ	140
5) サルボウ.....	142
6) ホタテガイ	144
3. 大気／海洋系における CO_2 収支の総合評価	
(1) 親潮域・混合域における大気／海洋の CO_2 収支の把握.....	146
(2) 混合域・亜熱帯域における大気／海洋の CO_2 収支の把握	149
(3) 日本太平洋岸の CO_2 収支推定のための交換係数とフラックスの評価	152

研 究 の 要 約

I. 研究年次及び予算区分

研究年次：平成 11～14 年（4 カ年）

予算区分：平成 11～12 年 農林水産技術会議 環境研究

平成 13～14 年 運営費交付金（交付金プロジェクト）

II. 主任研究者

主査 森林総合研究所所長 大貫仁人（平成 11 年 4 月 1 日～平成 11 年 9 月 30 日）
廣居忠量（平成 11 年 10 月 1 日～平成 13 年 3 月 31 日）

森林総合研究所理事長 廣居忠量（平成 13 年 4 月 1 日～平成 15 年 3 月 31 日）

副主査（森林部門）

森林総合研究所研究管理官 堀田 庸（平成 11 年 4 月 1 日～平成 12 年 3 月 31 日）
桜井尚武（平成 12 年 4 月 1 日～平成 13 年 3 月 31 日）
佐々朋幸（平成 13 年 4 月 1 日～平成 15 年 3 月 31 日）

副主査（海洋部門）

水産工学研究所水産土木工学部長

高木伸雄（平成 11 年 4 月 1 日～平成 13 年 3 月 31 日）

水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部長

中村義治（平成 14 年 4 月 1 日～平成 15 年 3 月 31 日）

リーダー（森林部門）

森林総合研究所植物生態科長 埴田 宏（平成 11 年 4 月 1 日～平成 13 年 3 月 31 日）

同 植物生態研究領域長 石塚森吉（平成 13 年 4 月 1 日～平成 15 年 3 月 31 日）

リーダー（海洋部門）

水産工学研究所水産土木工学部環境分析研究室長

中村義治（平成 11 年 4 月 1 日～平成 13 年 3 月 31 日）

水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部長

中村義治（平成 14 年 4 月 1 日～平成 15 年 3 月 31 日）

取りまとめ責任者

森林部門 森林総合研究所植物生態研究領域長 石塚森吉

海洋部門 水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部長 中村義治

III. 研究担当機関

森林部門

森林総合研究所 本所、北海道支所、東北支所、関西支所
四国支所、九州支所

（委託先）

静岡大学 農学部 森林資源科学科 造林学研究室

海洋部門

水産総合研究センター 北海道区水産研究所、東北区水産研究所
瀬戸内海区水産研究所、水産工学研究所
中央水産研究所

(委託先)

東京大学 海洋研究所 漁業測定部門

島根大学 生物資源科学部 生態環境工学講座

東海大学 海洋学部

(財) 海洋生物環境研究所 中央研究所

日本海洋株式会社、海洋科学株式会社、株式会社フィスコ

千葉県水産試験場、北海道立釧路水産試験場

青森県内水面水産試験場、山口県水産研究センター

佐賀県有明水産振興センター、青森県水産増殖センター

IV. 研究目的

1950年代の後半より開始された、ハワイのマウナロアにおける大気CO₂濃度の長期観測の結果、その濃度は着実に上昇していることが明らかとなった。このため、地球温暖化が近い将来に顕在化すると予測が多く、多くの科学者から出されている。温暖化が顕在化した場合、その影響は人類の生活や経済活動に重大な影響を及ぼすだけでなく、地球環境維持システム全般にも影響を及ぼすことが予測されている。このため、排出源対策だけでなくCO₂吸収・固定のメカニズムを明らかにして、その評価を行うことが求められている。

平成9年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）で採択された京都議定書においては、各国の総排出量から森林のCO₂吸収分を差し引く、いわゆるネット方式の導入が盛り込まれたが、森林のCO₂吸収能力については、現段階では科学的な評価に耐えうるデータが十分とはいえない状況にある。京都議定書においては、1990年以降の植林等に限定してCO₂の吸収源として認められているが、今後IPCC等における検討をふまえて、さらに追加的な活動についても吸収源として認められる余地が残されている。このため森林のCO₂吸収・固定に関する科学的データを蓄積し、国際的な検討に反映させることが必要である。

一方、海洋においても相当量のCO₂が吸収されていると推定されている中で、わが国の経済水域は国土面積の10倍以上に相当していることから、森林と並んで海洋のCO₂固定能は大きな期待が寄せられているところである。しかし、現在把握されている海洋のCO₂吸収量は総排出量から陸域での吸収量を差し引いて求めた推定値にすぎず、海洋における炭素の動態には未解明の部分が多い。

このような状況に対応するため、わが国の森林及び海洋におけるCO₂収支に係る様々な要因を解析・整理し、森林及び海洋のCO₂吸収・固定量を精度高く推計するとともに、固定能の評価法を開発する。このことをもって、今後の国際交渉等への対応及び森林、海洋の持つ公益的機能に対する国民理解の醸成に資する。

V. 研究方法

第1章 森林におけるCO₂収支の総合評価

1. 森林資源量及び生産力の全国評価

わが国の森林の炭素固定機能について、森林バイオマスにおける炭素貯留量、森林域における潜在炭素固定能、森林土壌における炭素貯留量の3つの視点から評価した。行政資料、植生図、気候メッシュデータ、林野土壌調査報告などの既存情報を用い、それぞれの視点から森林タイプの炭素量を推定・集計して、国土地理院の三次元メッシュ上に分布図を作成した。

2. 主要樹種の光合成・呼吸特性の解明

落葉広葉樹としてブナ、イヌブナ、ミズメ、常葉広葉樹としてコジイ、針葉樹としてカラマツ、

ヒノキについて、光合成や呼吸特性に影響を与える気象要因や季節性などを調べ、個体や林分へのスケールアップを検討した。呼吸については、ヒノキ幹呼吸の季節性や個体呼吸のサイズ依存性、光合成については、陽葉や陰葉の分化と樹冠全体の光合成速度に与える影響を解析した。また冷温帯系樹種の苗木に対して CO_2 付加実験を行い、高 CO_2 に対する反応特性を解析した。

3. 森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明

土壌炭素の初期蓄積過程として、堆積有機物層からの溶存有機物の流出とその分解特性を調べた。中～長期的な有機物蓄積過程として、テフラに挟まれた土壌有機物の ^{14}C の年代測定から有機物の蓄積速度を推定した。土壌呼吸における根呼吸と微生物呼吸の寄与率を、安定同位体法、トレンチ法、コンパートメント法で比較した。放置間伐材の炭素蓄積量を測定するとともに、スギ、ヒノキの角材を全国に設置し分解速度を測定した。全国25箇所です土壌呼吸を測定し、土壌特性との関係を解析した。コジイ林の炭素収支をコンパートメントモデルで検討した。

4. 多様な森林構造における CO_2 固定量の定量化

気候帯や森林タイプの異なる国内6カ所の森林（落葉広葉樹林サイト：札幌、安比、川越；常緑針葉樹林サイト：富士吉田、鹿北；混交林サイト：山城）に観測タワーを設置し、微気象を長期間連続してモニタリングした。超音波風速温度計とclosed-path型赤外線ガス分析計を用いた風速・ CO_2 の乱流変動観測データから、渦相関法により森林－大気間の CO_2 フラックスを求めた。また、森林群落スケールでの CO_2 吸収量とその変動を明らかにために、森林群落の CO_2 貯留変化量、短波・長波・光合成有効放射量、気温・湿度、土壌水分、樹液流速度などをあわせて測定した。

5. 森林における炭素貯留機構と CO_2 収支の総合評価

森林資源の既存情報による炭素固定量の緊急評価を行うため、森林バイオマスおよび収穫資料などに基づいて主要樹種の現存量成長や部位別割合などの成長モデルを開発して、全国の人工林の地域別炭素貯留量・固定量を評価した。さらに、光合成・呼吸等の生理特性、枯死脱落、有機物分解等に関するパラメータを用いた生態系レベルの炭素固定プロセスモデルを開発して、主要樹種で構成される森林の林分構造や生育環境に応じた炭素固定量と環境応答特性を検討した。

第2章 海洋における CO_2 収支の総合評価

1. 藻類による CO_2 収支の評価

北海道、混合域・黒潮域、瀬戸内海の各沿岸における現地調査から、タイプ別藻場（コンブ場、アラメ場、アマモ場、等）について、主要な海藻類の面積当たり現存量、年間生長量（炭素換算）を基にしたP/B比（生産量／現存量）を求めた。環境省集計の海域別・タイプ別藻場面積統計値にそれらを乗じて、当該沿岸における炭素固定総量を推算した。藻場タイプ別あるいは海域別に、音響、衛星画像、航空写真等の手法の適不適を調査し、各々について最適な広域分布調査手法を検討した。

2. 貝類、サンゴ類による CO_2 収支の評価

評価対象8種の現存量、漁獲、漁場、餌料環境、生態学的パラメータに関するデータベース化と個体代謝、個体群動態、炭素収支についてのモデル化、必要な生理代謝実験などから我が国沿岸域に生息する貝殻の生物機能を評価する。このうち、ヤマトシジミについては人工湿地における実証的比較試験から個体群による CO_2 固定量を推定する。サンゴ類についてはモデル海域フィールド調査や環境省のデータベース、その他の文献情報等から現存量の分布とP/B比の推定など

から炭素収支解析を行う。

3. 大気／海洋系におけるCO₂収支の評価

通常、観測は点や線で行われるが、海域の大気/海洋間の収支を求めるためには、点や線で得られた結果を面に拡張する必要がある。リモートセンシング（リモセン）を用いれば海洋における様々な現象を面的に捉えることができる。現在、表面水温やクロロフィルaはリモセンを用いて日常的にモニタリングされている。そこで、表面水温とクロロフィルaからpCO₂を推定する式を作成し、リモセンのデータをもとにして日本太平洋岸における大気/海洋間のCO₂フラックスを見積もる。

VI. 研究成果

第1章 森林におけるCO₂収支の総合評価

1. 森林資源量及び生産力の全国評価

森林蓄積の行政資料をもとに全国の森林バイオマスにおける炭素貯留量を評価したところ、1990年は0.98Gt、2000年は1.18Gtと推定され、その差から森林バイオマスによる炭素固定量は20Mt/yrと推定された。また、全国の森林土壌には、堆積有機物中に0.17Gt、鉍質土壌深さ0.3mまでに2.18Gt、深さ1mまでに4.57Gtの有機炭素を貯留していると推定された。さらに、立地環境要因と森林タイプ毎のバイオマス生長量の回帰分析から、現存植生上での日本の森林の潜在的な炭素固定能は38.8Mt/yrと推定された。また、これらの結果を、国土地理院の三次元メッシュマップに出力した。

2. 主要樹種の光合成・呼吸特性の解明

冷温帯林の主要樹種について、光強度、CO₂濃度に対する光合成の馴化過程が明らかになった。葉温－電子伝達速度－光合成速度の関係を用いて、樹冠各層の個葉の電子伝達速度、葉温の測定から樹冠全体の光合成速度を推定する方法を開発した。熊本の50年生コジイ林の総光合成生産量は2.74 C kg land m² year⁻¹、そのうち葉の暗呼吸量は1.21 C kg m² year⁻¹と推定された。一方、樹木の「個体呼吸－個体サイズの関係」に、熱帯から亜寒帯にわたり同一の巾乗式で表せる傾向を見いだした。また、50年生のヒノキ成木幹の呼吸速度の日変化を季節別に測定した結果、林分あたりのヒノキ幹の年間呼吸量は15.5 mol CO₂ m⁻² yr⁻¹と推定された。

3. 森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明

土壌炭素は、短～中期的には落葉分解からの溶存態有機物や枯死根の影響が大きく、鉍質土壌に入る溶存有機物は年間数百kg/ha、細根からはコジイ林で370kg/haと推定された。ただしその大部分は分解され、実際に土壌に蓄積する炭素は東北の土壌では年間80kg/ha程度であった。土壌呼吸における根呼吸の割合は24-62%と立地条件や季節で異なっていた。各地の土壌呼吸速度は基本的に温度に依存するが、地域間の変動は温度だけでは説明できないことが示された。一方、倒木や切株の分解の半減期は10年程度と遅く、重要な炭素プールであった。コジイ林で炭素循環のコンパートメントモデルを作成し、各プロセスの定量関係を明らかにした。

4. 多様な森林構造におけるCO₂固定量の定量化

気候帯・森林タイプの異なる国内6カ所の森林において、タワーフラックス観測による3～5年間の森林の生態系純生産量と微気象観測データが蓄積された。すべてのサイト・年において、生態系純生産量は正の値を取り、年単位で森林が大気からCO₂を吸収していることが分かった。

また、開葉～落葉のフェノロジーの年変動を反映した落葉広葉樹林の CO_2 吸収量の変化、気温・放射量に対する光合成・呼吸の生理反応を反映した常緑針葉樹林の CO_2 吸収量の変化などが解析され、森林の CO_2 吸収量の季節変化、年々変動とその要因が明らかとなった。

5. 森林における炭素貯留機構と CO_2 収支の総合評価

主要樹種の CO_2 貯留・固定量を既存の森林資源データから推定し、スギ・ヒノキについては全国の市町村別炭素貯留量をマッピングした。また、個体ベースの森林動態モデルにより関西の広葉樹二次林、シイ・ヒノキ混交林の動態をシミュレートし、長期的に見ると林分バイオマス・純生産量は増減を繰り返すことを予測した。さらに森林群落における炭素循環過程の時間的空間的なスケールリングを可能とするため、ブナ林光合成の環境応答特性を明らかにし、森林群落の種組成、個体成長、光合成、呼吸、枯死・分解過程などの生理生態的パラメータを組み込んだ森林動態モデルを構成し、フラックス観測サイトでのデータと比較し得る結果が得られた。

第2章 海洋における CO_2 収支の総合評価

1. 藻類による CO_2 収支の評価

北海道沿岸では、代表的なコンブ場で **679 ktC/y**、全タイプ藻場総計 **779 ktC/y**、混合域・黒潮域沿岸では、アラメ場で **348 ktC/y**、全タイプ藻場総計 **647 ktC/y**、瀬戸内沿岸では、ガラモ場で **35.6 ktC/y**、全タイプ藻場総計 **66.5 ktC/y**、であった。本課題で用いたパラメータを日本海、東シナ海、南西諸島沿岸にあてはめ、日本沿岸の全藻場による年間炭素固定量は **1960 ktC/y** と推算された。対象海藻種、水深、濁度から最適な広域調査手法を選択することができた。

2. 貝類、サンゴ類による CO_2 収支の評価

ホタテガイ（養殖および地蒔き）、マガキ（養殖）、アサリ、ヤマトシジミ、サザエ、ウバガイ、サルボウ、アコヤガイ（養殖）の個体群を対象に、炭素収支による生物機能の全国評価を行った結果、8種の生物量は **1.7Mt(143ktC)** あり、炭素収支は排出が **420 ktC/y**、固定が **467 ktC/y** で、差し引き年間 **47 ktC/y** の炭素が貝類によって固定される。ヤマトシジミが優占する人工湿地を造成し、ヤマトシジミを通じた CO_2 固定量の測定を行った結果、取り込まれた炭素の **34%**、分解を考えてもその **1/3～1/4** は、長期固定もしくは人間に利用可能な炭素であると評価された。わが国周辺における造礁サンゴ類の無機炭素生産量は **75.2ktC/y**、有機炭素純生産量は **43.4ktC/y**、計 **118.6ktC/y** となった。また、無機生産の余剰分は **1.7ktC** に相当するものと推定された。

3. 大気／海洋系における CO_2 収支の評価

植物プランクトンの大増殖時期を除くと、表層水中の CO_2 分圧を水温、あるいは水温とクロロフィル **a** から推定することができた。得られた推定式を用いて、リモセンにて得られる表面水温とクロロフィル **a** から、日本太平洋岸域における大気／海洋間の CO_2 フラックスを算出した。その結果、年間でおおよそ **0.02GtC** の炭素が海洋に吸収されていることが分かった。

VII. 今後の課題

第1章

1. 森林資源量及び生産力の全国評価

森林バイオマスの炭素貯留量の評価においては、基礎となる森林簿の精度調査と精度向上策の検討が求められる。潜在炭素固定能の評価においては、成長にかかわる調査データセットの違いによって炭素吸収量に大きな差が出るため、精度の高いデータセットを構築する必要がある。森

林土壌における炭素量貯留量の評価においては、地下部の現存量推定のデータが極めて少ないため、地上部の器官サイズから地下部の現存量を推定するアロメトリー作成のための調査・研究が必要である。

2. 主要樹種の光合成・呼吸特性の解明

高 CO_2 に対する馴化を調べる場合、ポット苗を用いた実験では根系が制限要因になるおそれがあり、野外での CO_2 付加実験が必要である。ヒノキ人工林の地上部の木部器官として幹の呼吸特性の日・季節変化を明らかにできたが、枝の呼吸特性については今後の課題に残された。コジイ林の群落光合成モデルについては、機能パラメータなどの樹種による違いを反映させ、複数の樹種が混在する林分へも適応可能なモデルへ拡張することが今後の課題である。

3. 森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明

A_0 層から粒子状有機物が溶存有機物の 3 割程度生成することが明らかになったが、土壌中における動態の解明が今後の課題である。根呼吸の推定には、 A_0 層量と根量の季節変化や環境要因との関係の検討が必要である。全国レベルの CO_2 放出量の推定には、測定データを増やすとともに広域の推定手法を開発する必要がある。土壌炭素循環における細根の重要性が認識されたが、日本では斜面の水分条件に応じて細根量の違いが認められるため、斜面に対応した土壌循環モデルの構築が必要である。

4. 多様な森林構造における CO_2 固定量の定量化

観測データのデータベース化とともに、データの **quality control** による生態系純 CO_2 交換量観測精度の向上、とくに夜間を中心とする大気安定成層時の生態系呼吸量評価精度の向上が今後の課題である。また、群落構成要素の呼吸・吸収 CO_2 フラックス、生態学的生産量測定結果との比較による、群落スケールでの生態系純生産量評価精度の向上が必要である。生態系純 CO_2 交換量に関連するパラメタリゼーションの向上と、群落微気象、樹木生理過程を記述するモデルを用いたパラメタリゼーションの検証をおこなう必要がある。

5. 森林における炭素貯留機構と CO_2 収支の総合評価

日本全体の森林の炭素貯留・固定量の推定精度を高めるためには、全国規模の森林資源モニタリングデータの整備が必要である。ピンポイント的な固定試験地のデータをより大きな空間的・時間的スケールに展開できるよう、最新のリモートセンシング情報との統合化を図る必要がある。プロセスモデルを基に全国レベルの森林の炭素収支を評価するためには、樹種別のパラメータの整備とともに森林資源および気象因子の詳細なメッシュデータの整備が必要である。

第2章 海洋における CO_2 収支の総合評価

1. 藻類による CO_2 収支の評価

海藻藻場分布の迅速かつ正確な把握、リモートセンシング等を用いた広域分布調査の実施とともに、光合成特性と環境データを用いた生理生態学的手法による炭素固定量の推定をおこなう必要がある。本課題で調査できなかった海藻種を含めた、海藻類の生産量、 P/B 比のより正確な見積もりが必要である。

2. 貝類、サンゴ類による CO_2 収支の評価

主要生物のバイオマスと環境情報のモニタリングとデータベース化、生物機能評価のためのモ

データベース化が必要である。また、物質収支から物質循環へ評価方法を高度化する必要がある。

3. 大気／海洋系におけるCO₂収支の評価

親潮域の植物プランクトン大増殖時期における表層CO₂分圧の空間的な不均一性の解明とともに、植物プランクトン大増殖時期における水温とクロロフィルからpCO₂を推定する式の確立が必要である。また、植物プランクトン大増殖時期におけるpCO₂推定式の精度の向上をはかることが必要である。

VIII. 研究発表（論文等）

第1章

1. 森林資源量及び生産力の全国評価

松本光朗・鹿又秀聡（2001）日本の森林炭素蓄積分布図の作成、日本林学会大会学術講演集、**112: 182**

松本光朗（2001）日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量、森林科学、**33: 30-36**

松本光朗・鹿又秀聡・福田未来（2002）日本の森林炭素吸収量とその分布 - 2000年と1990年の林業センサスの比較から - 、日本林学会大会学術講演集、**113: 91**

松本光朗・鹿又秀聡・福田未来・野田巖（2002）日本の森林炭素吸収量とその分布、森林総合研究所平成13年度成果選集、**18-19**

野田巖（2002）地籍調査成果の導入による森林簿面積の変化、森林総合研究所九州支所年報、**13: 34**

野田巖（2004）林地における地籍調査前後での面積の変動と調査の進捗状況、九州森林研究、**57: 67-72**

田内裕之・宇都木玄・右田千春（2000）公表データを用いた森林の炭素固定量推定システム、植生学会大会講演要旨集、**5: 40**

右田千春・田内裕之・宇都木玄・中村徹（2001）相対成長関係の係数を規定する要因の解析、第日本林学会大会学術講演集、**112: 85**

田内裕之・宇都木玄（2002）植生データを用いた日本の森林の炭素固定量推定、日本生態学会大会講演要旨集、**49: 287**

田内裕之・宇都木玄（2003）植生データに基づく日本の森林における炭素固定量のマッピング、日本林学会大会学術講演集、**114: 261**

田内裕之・宇都木玄・高橋正義・田中永晴（2003）北海道における森林の炭素吸収量、森林総合研究所北海道支所リサーチパンフレット、森林総合研究所北海道支所

森貞和仁（2000）土壌のCO₂貯留量をはかる、森林科学、**29: 47**

森貞和仁（2000）八ヶ岳大月川岩屑流堆積地に発達した土壌の炭素貯留量、環境情報科学論文集、**14: 285-288**

高宮立身・諫本信義・森貞和仁・松本光朗（2001）大分県における森林土壌の炭素貯留量について、日本林学会九州支部研究論文集、**54: 165-166**

Mbrisada, K., Imaaya, A., and Ono, K. (2002) Temporal changes in organic carbon of soils developed on volcanic andesitic deposits in Japan, Forest Ecology and Management, **171(1-2): 113-120**

小野賢二・鹿又秀聡・森貞和仁（2002）日本の森林における堆積有機物量の評価手法の検討、日本林学会関東支部大会論文集、**53: 143-144**

小野賢二・今矢明宏・鹿又秀聡・森貞和仁（2002）森の落ち葉はどのくらい炭素を貯めているか？、森林総研平成13年度研究成果選集、**20-21**

森貞和仁・小野賢二(2003) 森林土壌の細土容積重と理化学性との関係について、日林関東支部大会発表論文集、 54: 169-170

森貞和仁(2003) 森林土壌の炭素蓄積機能、森林総研所報、25: 3

Morisada, K., Ono, K. and Kanomata, H. (2004) Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma* 119: 21-32

2. 主要樹種の光合成・呼吸特性の解明

Kitao M. et al. (2000) Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional traits raised under various light regimes, *Plant, Cell and Environment* 23: 81-89

Uemura A., Ishida A., Nakano T., Terashima I., Tanabe H., and Matsumoto Y. (2000) Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiance. *Tree Physiology* 20: 945-951

Yazaki K., Funaka R., Mori S., Maruyama Y., Abaimov A. P., Kayama M. and Koike T. (2001) Growth and annual ring structure of *Larix sibirica* grown at different carbon dioxide concentrations and nutrient supply rates. *Tree Physiology* 21: 1223-1229

荒木眞岳・川崎達郎・千葉幸弘(2002) ヒノキの幹における呼吸速度の垂直分布と季節変化、日本林学会関東支部大会発表論文集 53: 93-94

原山尚徳・矢崎健一・上村章・小池信哉・石田厚(2003) ブナ科樹木の葉フェノロジーと光合成速度の季節変化、日本林学会関東支部大会発表論文集 54: 159-160

齊藤哲(2003) 林冠頂部の葉の光合成および暗呼吸の一日の変動と環境要因、九州森林研究 56: 78-81

飛田博順・北尾光俊・丸山温(2003) ケヤマハンノキの根粒形成に及ぼす高 CO₂ 濃度と窒素供給量の影響、日林北海道支部論文集 51: 24-26

横田岳人・森茂太(2003) 樹木における呼吸消費器官レベルから個体レベルを経て群落レベルの呼吸消費へ、日本生態学会誌 53: 61-66

3. 森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明

Nambu, K. and Yonebayashi, K. (1999) Acidic properties of dissolved organic matter leached from organic layers in temperate forests. *Soil Science and Plant Nutrition* 45: 65-77

Nambu, K. and Yonebayashi, K. (1999) Role of dissolved organic matter in translocation of nutrient cations from organic layer materials in coniferous and broad leaf forests. *Soil Science and Plant Nutrition*. 45: 307-319

Nambu, K. and Yonebayashi, K. (2000) Quantitative relationship between soil properties and adsorption of dissolved organic matter onto volcanic ash and non-volcanic ash soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 46: 559-569

Nambu, K., Waku, Y., Mori, K., Kaneko, S. and Yonebayashi, K. Generation of DOC from organic layers of forest soils controlled by biotic and abiotic processes(2002), *Transactions of 17th World Congress of Soil Science, CD-Book*, 503-1 - 503-11

阪田匡司(1999) 地表面のガスフラックス、森林立地調査法、209-211、博友社

高橋正通(1999) 森林土壌の環境保全機能、北海道農業と土壌肥料(1999)、280-282、北農会

高橋正通(2000) 森林土壌の有機物と炭素貯留量の推定、森林立地 42: 61-69

袴田共之・波多野隆介・木村真人・高橋正通・坂本一憲(2000) 地球温暖化ガスの土壌生態系との

関わり 1. 二酸化炭素と陸域生態系、土壤肥料学会誌 71: 263-274

石塚成宏・田中永晴(1999) 北海道の森林土壌におけるCO₂発生量及びCH₄吸収量、日本林学会北海道支部論文集48: 157-159

石塚成宏(1999) 土壌中のガス採取とガス拡散係数、森林立地調査法、212-215、博友社

稲垣善之(2001) 木材の初期分解における窒素負荷の影響、森林応用研究10: 43-50

稲垣善之・深田英久 (2003) 四国地域において森林土壌の炭素貯留および養分動態に影響を及ぼす要因 I. 井上・岩川・吉田 (1973) のデータセットを用いた解析、森林応用研究 12: 7-14

稲垣善之・深田英久 (2003) ヒノキ林における放置間伐材の分解にともなう重量減少と窒素動態、森林応用研究 12: 159-162

稲垣善之・山田毅・篠宮佳樹・鳥居厚志・吉永秀一郎(2003) 林内における枯死材分解速度の推定、四国情報29: 5-6

酒井佳美・田中永晴・高橋正通 (2003) 北海道の主要樹種における材の初期分解速度、日本林学会北海道支部論文集51: 64-66

酒井佳美・真田悦子・田中永晴・高橋正通(1999) 北方針葉樹林の根系の直径サイズと炭素、窒素濃度、日本林学会北海道支部論文集48: 154-156

Sakai, Y., Takahashi, M. and Tanaka, N. (2001) Belowground biomass of coniferous species in Volcanogene Regosols. Proceedings of the 6th Symposium of the International Society of Root Research: 486-487

Takahashi, M., Sakai, Y., Ootomo, R. Shiozaki, M. (2000) Establishment of tree seedlings and water-soluble nutrients in coarse woody debris in an old-growth Picea-Abies forest in Hokkaido, northern Japan. Canadian Journal of Forest Research 30: 1148-1155

酒井正治・伊藤江利子(1999) コジイ林とスギ林における土壌呼吸速度—温度との関係— 日本林学会九州支部論文集53: 145-146

酒井正治・伊藤江利子(2001) コジイ林における細根量とその土壌炭素蓄積量への影響、日本林学会九州支部論文集54: 161-162

Sakai, M. and Ito, E. (2001) Soil respiration in two forest stands, 6th International Carbon Dioxide Conference, Extended Abstracts, 306-309

酒井正治・佐藤保 (2003) コジイ林における土壌呼吸とリターフォール、九州森林研究、56: 242-243

4. 多様な森林構造におけるCO₂固定量の定量化

Kominami, Y., Miyama, T., Tamai, K., Nobuhiro, T. and Goto, Y. (2001): Seasonal variation of CO₂ flux over a deciduous broad-leaved forest in Japan -Preliminary result from observation 2000-. CGER-Report-M-011-2001 (Proc.International workshop for advanced flux network and flux evaluation), CGER, Tsukuba, 149-152

Kominami, Y., Miyama, T., Tamai, K., Nobuhiro, T., and Goto, T. (2003) Characteristics of CO₂ flux over a forest on complex topography. Tellus. 55B: 313-321.

Miyama T., Kominami Y. Tamai K., Nobuhiro T., and Goto Y. (2003) Automated foliage chamber method for long-term measurement of CO₂ flux in the uppermost canopy. Tellus 55B: 322-330

溝口康子・大谷義一・渡辺力・安田幸生・岡野通明 (2003) 自動開閉型チャンバを用いた林床面からのCO₂放出速度の長期連続測定、日本生態学会誌 53: 1-12

中井裕一郎 (2000) 森林総研 FluxNet による CO₂ フラックス観測—北方系落葉広葉樹林サイトの観測概要と今後の課題—、北方林業 52(5): 13-16

- Nakai, Y., Kitamura, K., Suzuki, S., and Abe, S (2001) Carbon dioxide flux above a secondary-successional broadleaf deciduous forest in a snowy region of Hokkaido, northern Japan. Extended abstract of 6th international CO₂ conference, Vol.1: 477-480.
- 中井裕一郎・三枝信子・平野高司・Robert Evans・大谷義一・平田竜一・鳥山 敦・北村兼三・鈴木 寛・山本 晋(2002):2001 年 8 月、苫小牧と札幌で行われた日米フラックス比較観測、水文・水資源学会誌、15: 665-672.
- Nakai, Y., Kitamura, K., Suzuki, S., & Abe, S. (2003) Year-long carbon dioxide exchange above a broadleaf deciduous forest in Sapporo, Northern Japan, Tellus 55B: 305-312.
- Nobuhiro, T., Tamai, K., Kominami, Y., Miyama, T., Goto, Y., and Kanazawa, Y. (2003) Development of the IRGA enclosed-chamber system for soil CO₂ efflux measurement and its application to a spatial variation measurement. J. For. Res. 8: 297-301
- 大谷義一 (2001) 森林総研フラックスネットで CO₂ 吸収量を測定、現代林業 415: 54-56
- Ohtani, Y., Mizoguchi, Y., Watanabe, T. Yasuda, Y. and Okano, M. (2001) Seasonal change of CO₂ flux above an evergreen needle leaf forest in temperate region, Fujiyoshida, Japan. CGER-Report-M-011-2001 (Proc. International workshop for advanced flux network and flux evaluation), CGER, Tsukuba, 129-132
- Ohtani, Y., Mizoguchi, Y., Watanabe, T., Yasuda, Y., and Toda, M. (2001) Carbon dioxide flux above an evergreen needle leaf forest in a temperate region of Japan. Extended abstract of 6th international CO₂ conference Vol.1: 469-472
- 大谷義一 (2001) 二酸化炭素フラックス、森林科学 33: 10-17
- 齋藤武史 (1999) ブナの森が吸い込む二酸化炭素の量を測る、フォレストウインズ 4: 1-2
- 齋藤武史 (2000) 森の息を測る、「東北の森－科学の散歩道－」、54-56、森林総合研究所東北支所編、森林総合研究所東北支所
- Shimizu, T., Shimizu, A., Miyabuchi, Y. and Ogawa, Y. (2001): Observation of CO₂ exchange over artificial coniferous forest stands in the warm temperate region, Kyushu, Japan. CGER-Report-M-011-2001 (Proc. International workshop for advanced flux network and flux evaluation), CGER, Tsukuba, 153-156
- Shimizu T., Shimizu, A., Ishizuka, S., Daimaru, H., Miyabuchi, Y. and Ogawa, Y. (2001): Seasonal variation of CO₂ exchange and its characteristics over artificial coniferous stands in warm temperate region, Japan. Extended abstract of 6th international CO₂ conference Vol.1: 416-419
- Suzuki, S., Kitamura, K., Nakai, Y., Abe, S., Shirai, T. and Terajima, T. (2001): Measurements of CO₂ and energy fluxes above a secondary-successional deciduous forest in a cool-temperate and snowy zone, Northern Japan. CGER-Report-M-011-2001 (Proc. International workshop for advanced flux network and flux evaluation), CGER, Tsukuba, 139-143
- 高木健太郎、溝口康子、鈴木智恵子 (2001) Report of International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation -Kick off Meeting of AsiaFlux Network-. 生物と気象 1 (1): 23-28
- Tamai, K., Kominami, Y., Miyama, T., Nobuhiro, T., and Goto, Y. (2001) Seasonal variation in the CO₂ flux at the forest floor of a deciduous secondary broad-leaved forest measured by the automatic IRGA enclosed-chamber method, Extended abstract of 6th international CO₂ conference, Vol.1: 294-297

渡辺 力 (2001) 落葉広葉樹林への適用例. 気象研究ノート 199: 177-182.

Watanabe, T., Y. Yasuda, K. Yamanoi, Y. Ohtani, M. Okano and Y. Mizoguchi (2001) Seasonal variations in energy and CO₂ fluxes over a temperate deciduous forest at Kawagoe, Japan. CGER-Report-M-011-2001 (Proc. International workshop for advanced flux network and flux evaluation), CGER, Tsukuba, 11-17

Yasuda, Y. and Watanabe, T. (2001) Comparative measurements of CO₂ flux over a forest using closed-path and open-path CO₂ analyzers. Boundary Layer Meteorol. 100: 191-208

5. 森林における炭素貯留機構とCO₂収支の総合評価

鷹尾元・小木和彦・石橋聡・石原康宏 (2000) 空中写真による天然林の林型区分. 日林北支論 48: 178-180

石原康宏・和孝雄・石橋聡・小木和彦・鷹尾元 (2000) 林型区分を利用した林況の解析- 森林の分布と地形要因との関係. 日林北支論 48: 181-183

福田未来・家原敏郎・松本光朗 (2001) スギ、ヒノキにおける部位別現存量と林齢との関係. 日林関東支論 52: 13-16

福田未来・家原敏郎・松本光朗 (2002) アカマツ、カラマツにおける部位別現存量と林齢との関係. 日林関東支論 53: 59-60

Fukuda M, Iehara T, Matsumoto M. (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forest in Japan. Forest Ecology and Management 184: 1-16.

Kakubari Y, Kubota M, Naramoto M, Sato H, Tenhunen J, Zimmermann R, Chiba Y. (2000) Primary productivity changes for a thirty-year period of Naeba mountains IBP beech (*Fagus crenata*) forests (Japan). IAVS 43 Nagano.

Kakubari Y, Kubota M, Naramoto M, Fukasawa H, Iio A, Nose Y, Tenhunen J, Zimmermann R, Chiba Y (2001) Altitudinal changes of photosynthesis and transpiration in Naeba mountains IBP beech (*Fagus crenata*) forests (Japan). IAVS 44 114 in Freising-Weihnestephan Germany.

Naramoto M, Han Q, Kakubari Y. (2001) The influence of previous irradiance on photosynthetic induction in three species grown in the gap and understory of a *Fagus crenata* forest. Photosynthetica. 39(4):545-552

Naramoto M, Han Q, Kakubari Y (2002) Photosynthetic responses to lightflecks of *Fagus crenata* seedlings grown in a gap and understory of a deciduous forest. J. For. Res. 7:193-199.

伊東宏樹 (2001) シミュレーションモデルによる広葉樹二次林の遷移の予測- 銀閣寺山国有林について-. 森林応用研究 10(2): 27-35.

伊東宏樹・隅田明洋 (2001) アラカシの枝のサイズ分布. 日本林学会関西支部第 52 回大会研究発表要旨集: 21.

伊東宏樹 (2002) POV-Ray を使用した林分データの可視化. 森林応用研究 11(2): 63-67.

伊東宏樹 (2003) 森林の遷移をアニメーション化する. 森林総合研究所関西支所年報 3、 67.

伊東宏樹 (2003) 林分データを 3 次元でみる. 森林総合研究所関西支所研究情報

千葉幸弘 (2003) 地球温暖化を防止するための森林施業の意義と課題. 山林 1425: 17-24.

Chiba Y. (2003) Forestry and CO₂ absorption by forests. Farming Japan 37(1): 18-20.

Chiba, Y. (2002) Nature in growth in tree stems derived from ring analysis. Design and Nature: comparing design in nature with science and engineering, WIT Press, 17-25.

Chiba, Y. (2001) Modelling seasonal changes of forest canopy gross photosynthesis against air temperature and radiation. IUFRO "Canopy process" workshop, Linking the complexity of forest canopies to ecosystem and landscape function. Oregon, USA

千葉幸弘 (2001) 植物への炭素蓄積のメカニズムと評価. 森林科学 33:18-23

Han Q, Kawasaki T, Latahata S, Mukai Y, Chiba Y. (2003) Horizontal and vertical variations in photosynthetic capacity in a *Pinus densiflora* crown in relation to leaf

nitrogen allocation and acclimation to irradiance. Tree Physiology 23: 851-857.

第2章 海洋におけるCO₂収支の総合評価

1. 藻類によるCO₂収支の評価

- 坂西芳彦（印刷中） 海藻・海草の調査 光合成・呼吸測定法．地球環境調査辞典（沿岸域編）、フジテクノシステム
- 坂西芳彦（印刷中） 海藻・海草の調査 クロロフィル定量法．地球環境調査辞典（沿岸域編）、フジテクノシステム
- 坂西芳彦・鈴木健吾・宇田川 徹・飯泉 仁・山本正昭（印刷中） 釧路市沿岸における夏季のナガコンブの日補償深度．北海道区水産研究所研究報告 65 号
- 坂西芳彦（印刷中） 褐藻ナガコンブの群落形成と光環境．北水研ニュース 60 号
- 坂西芳彦・飯泉仁（2001） 北海道東部沿岸に生育する寒海産コンブ目数種の夏季の光合成－光特性．藻類（日本藻類学会和文誌） 49: 1-6.
- 坂西芳彦・鈴木健吾・宇田川徹・飯泉仁・山本正昭（2001） ナガコンブの光合成及び生産力と関連した水中の光環境について．藻類（日本藻類学会和文誌）、49: 117-123.
- 坂西芳彦（2001） 水中の光環境からコンブ群落の成立条件を考える．養殖、38（8）：78-80.
- Miraoka, D.（2003） Seaweed resources as a source of carbon fixation. Symposium on aquaculture and stock enhancement of algae and filter feeders, Proceedings（印刷中）
- 村岡大祐（2003） エゾノネジモク．海藻の生物学と藻場造成、能登谷正浩編、成山堂書店（印刷中）
- 寺脇利信（1999）藻場の変化．瀬戸内海、19: 8-12.
- 寺脇利信・吉川浩二・吉田吾郎・内村真之・新井章吾（印刷中） 広島湾における大型海藻類の水平・垂直分布様式．瀬戸内水研研究報告、3: 73-81.
- 吉田吾郎（2000） ホンダワラ類の繁殖・生態と藻場造成技術－生活史と環境要因－．日水誌、66: 746-747.
- 内村真之・新井章吾・吉川浩二・吉田吾郎・寺脇利信（印刷中） 広島湾の岩礁性藻場をつくる海藻体中の炭素および窒素総量．藻類
- Yoshida, G., K. Yoshikawa and T. Terawaki（2001） Growth and maturation of two populations of *Sargassum horneri* (Fucales, Phaeophyta) in Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea. Fish. Sci., 67: 1023-1029.
- 寺脇利信・吉川浩二・吉田吾郎・内村真之・新村陽子：広島湾における藻場の生態と回復技術．水産海洋研究、66: 195-197.
- Uchimura M, Yoshida G., Hiraoka M., Komatsu T., Arai S., Terawaki T.（印刷中） Ecological studies of *Ulva* spp. in Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea. Algae 2002（つくば）.
- 小松輝久・立川賢一（1999）藻場と水産資源．月刊「海洋」号外、17: 30-37.
- 小松輝久、立川賢一（1999）藻場と水産資源．月刊海洋、29: 494-499.
- 菅原顕人・小松輝久・瀬戸雅文・佐藤博雄（1999）大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅱ－アラメ・カジメの垂直分布と光環境．海洋開発論文集、15: 141-145.
- 菅原顕人、小松輝久、瀬戸雅文（2000）大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅲ－アラメ・カジメ幼体に作用する流体力と流動環境－．土木学会海洋開発論文集、16: 351-355.
- 菅原顕人、小松輝久、瀬戸雅文（2001）大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅳ－アラメ・カジメ1齢個体に作用する流体力と流動環境－．土木学会海洋開発論文集、17: 159-164.
- Komatsu, T., K. Ishida, H. Iizumi, M. Okamoto and T. Belsher（2001） Utilization of ALOS

data for mapping coastal ecosystem and managing fishery activity. *In Proceedings of 1st ALOS PI Workshop*. pp. 384-386. Earth Observation Research Center and National Space Development Agency of Japan, Tokyo.

Komatsu, T., C. Igarashi, K. Tatsukawa, M. Nakaoka, T. Hiraishi and A. Taira (2002) Mapping of seagrass and seaweed beds using hydro-acoustic methods. *Fisheries Science*. 68, suppl. I, 580-583.

Komatsu, T., K. Tatsukawa, K. Ishida, C. Igarashi, S. Sultana, M. Takahashi and Y. Matsuoka (2002) Development of methods mapping coastal zone along Sanriku Coast using satellite imagery and acoustic survey. *In Conserving our coastal environment. UNU-ORI-Iwate Symposium Marine Ecology and Environment*. pp.33-47. United Nations University, Tokyo.

Komatsu, T., K. Tatsukawa and K. Ishida (2002) Cartography of seagrass beds using hydro-acoustic methods. *In Proceedings of the second SEASTAR 2000 workshop*. pp. 39-52. Informatics Research Center for Development of Knowledge Society Infrastructure, Kyoto University, Kyoto.

Komatsu, T., C. Igarashi, K. Tatsukawa, S. Sultana, Y. Matsuoka and S. Harada (submitted) Use of multi-beam sonar to map seagrass beds in Otsuchi Bay, on the Sanriku Coast of Japan, *Aquatic Living Resources*.

Komatsu, T., A. Mikami, S. Sayeeda, K. Ishida, T. Hiraishi and K. Tatsukawa (submitted) Hydro-acoustic measurements as a practical tool for mapping seagrass beds, *Otsuchi Marine Science*.

2. 貝類、サンゴ類によるCO₂収支の評価

中村義治・寺澤知彦・中村幹雄・三村信男 (2001) 宍道湖ヤマトシジミ個体群の水質浄化機能の評価解析. *海岸工学論文集、土木学会*、48: 1236-1240

中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男 (2001) 生活史に沿った二枚貝個体群の生物機能評価法. *海岸工学論文集、土木学会*、48: 1231-1235

中村義治・寺澤知彦・中村幹雄・山下俊彦 (2002) 物質循環スペクトルによる汽水湖生態系の健康度評価. *海岸工学論文集、土木学会*、49: 1446-1450

中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男 (2002) 貝類の生物機能と水域環境への影響に関する全国評価. *海岸工学論文集、土木学会*、49: 1371-1375

中村義治・深町孝子・真崎邦彦・関根幹男・三村信男 (2003) 有明海奥部のサルボウガイ漁場における炭素固定量の評価. *海岸工学論文集、土木学会*、50: 1111-1115

中村義治・関根幹男・山口毅・湯浅龍彦・阿保勝之・三村信男 (2003) 養殖漁場 (アコヤガイ) における炭素固定機能の全国評価. *海岸工学論文集、土木学会*、50: 1116-1120

中村義治・奥出壮・寺澤知彦・関根幹男・三村信男 (2003) CO₂ 固定量評価に係わる貝類代謝モデルの開発. *海岸工学論文集、土木学会*、50: 1166-1170,

金網紀久恵・中村義治・上月康則・村上仁士・柴田輝和 (2003) 炭素収支による東京湾アサリ個体群の生物機能評価. *海岸工学論文集、土木学会*、50: 1291-1295,

中村義治・金網紀久恵・磯野良介・三村信男 (2003) 我が国における主要貝類の生物量と生物機能の分布特性. *海岸工学論文集、土木学会*、50: 1296-1300

磯野良介・中村義治 (2000) 二枚貝による海水濾過量の推定とそれによぼす温度影響の種間比較. *水環境学会誌*、23(11): 683-689

- 磯野良介・喜田 潤 (2000) 酸素消費量からみたイガイ類 3 種の温度特性. *SESSILE ORGANISMS*, 17(1):6
- 前田伊佐武・相崎守弘・山口啓子・藤田直樹 (2000) 汽水湖水を連続供給した屋外水槽でのヤマトシジミの水質浄化能に関する研究. 水環境学会誌, 23(11):716-720.
- K. Fujioka, I. Maeda, K. Yamaguchi and M. Aizaki (2000) Utilization of Bivalve, *Corbicula japonica*, for Renovation of Brackish Water Environment. Fifth International Symposium on Environmental Biotechnology.
- K. Fujioka, I. Maeda, K. Yamaguchi, Y. Sanpei, K. Takayasu and M. Aizaki. (2001) Cost-Benefit Analysis on the Fixation of Carbon in Artificial Lagoon Under Dominance of *Corbicula Japonica*. The 5th International Conference on the Environmental Management of Enclosed Coastal Seas, Abstracts, p273.
- K. Fujioka, I. Maeda, K. Yamaguchi and M. Aizaki (2000) Utilization of Bivalve, *Corbicula japonica*, for Renovation of Brackish Water Environment. Proceedings of the Fifth International Symposium on Environmental Biotechnology. p. 589-592.
- 相崎守弘・高橋愛・山口啓子 (2001) ヤマトシジミの大量斃死機構に関する基礎的研究. I. LAGUNA (汽水域研究), 7:31-37.
- 末光健治・山口啓子・相崎守弘 (2001) ヤマトシジミの大量斃死機構に関する基礎的研究. II. LAGUNA (汽水域研究), 7:39-46.
- 山口啓子 (2001) 汽水域のベントス. 「汽水域の科学 (高安克己編)」所収, たたら書房, p. 65-75.
- 藤岡義三・澁野拓郎 (2000) 白化が造礁サンゴの群集構造に及ぼす影響. 造礁サンゴ群集の白化が海洋生態系に及ぼす影響とその保全に関する緊急調査報告、3-13
- 藤岡義三 (2000) 造礁サンゴ群集の多様性構造に関する研究. サンゴ礁における生物多様性構造の解明とその保全に関する研究、23-35
- 藤岡義三・大葉英雄・越智晴喜・澁野拓郎 (印刷中) 造礁サンゴ群集の健全度指標に基づく生態系管理手法の開発. サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究
- 並河洋・藤岡義三 (2000) 刺胞動物. 土佐湾における深海性動物相の解明と海洋汚染の調査研究、6-7
- 藤岡義三 (2000) 造礁サンゴの白化、その後. 中央水研ニュース 24:1-3
- 藤岡義三 (印刷中): 見残湾の造礁サンゴ 土佐の動物たち—天然記念物
- Fujioka, Y. (2000) Species-area curve of some coral communities in southwestern Japan. Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, 306p.
- Fujioka, Y. (2000) Diversity of hermatypic coral communities. Global Environmental Research of Japan.
- 大葉英雄・藤岡義三 (2001) 石垣島東～南岸礁池内の海藻植生. 日本サンゴ礁学会第4回大会講演要旨集
- Nami kawa, H & Y. Fujioka (2000) Ahermatypic corals collected from Tosa Bay, southwestern Japan. National Science Museum Monographs, 20: 11-17
- Fujioka, Y. (2001) Community structure and species diversity of some hermatypic coral communities in southern Japan. Proceedings of the Seventh International Conference on Coelenterate Biology
- Fujioka, Y. (1999) Mass destruction of the hermatypic corals during a bleaching event in Ishigaki Island, southwestern Japan. Galaxea, JCRS, 1:41-50
- Fujioka, Y. (2000) Species-area curve of some coral communities in southwestern

Japan. Proceedings of the Ninth International Coral reef Symposium, 306
Fujioka, Y. (2002) Destruction and recovery of hermatypic coral communities after the mass bleaching event at Ishigaki Island. Galaxea, JCRS, 4:53-61
Ohba, H, H. Ochi & Y. Fujioka (2002) The decline of reef-coral community and the luxuriant growth of benthic marine algae in the moat of Ishigaki-Island, Ryukyu. Proceedings of Algae 2002

3. 大気／海洋系におけるCO₂収支の評価

Inoue, R. and Akiyama, M. (2002) Validation of CO₂ exchange coefficient using Air-Sea gas Exchange model. SCOR-JOS Joint Assembly in Sapporo abstract, 258.
Ono, T., T. Saino, N. Kurita and K. Sasaki (2003): Basin-scale extrapolation of shipboard pCO₂ data by using satellite SST and Chla. Int. J. Rem. Sens. (投稿中)

担当課題別年次計画（森林）

研 究 課 題	研究実施年度				担 当			委託先
	11	12	13	14	場所	領域・支所	研究代表者	
I. 森林における CO₂ 収支の総合評価								
1. 森林資源量及び生産力の全国評価								
(1) 森林バイオマス推定手法の開発による森林賦存量の全国評価	○	○	○		森林総研	林業経営・政策研究領域 九州支所	松本光朗 野田巖	
(2) 生育環境特性を考慮した林地生産力の全国評価	○	○	○		森林総研	北海道支所	田内裕之	
(3) 森林土壌における炭素貯留量の全国評価	○	○	○		森林総研	立地環境研究領域	森貞和仁	
2. 主要樹種の光合成・呼吸特性の解明								
(1) 野外における樹木の光合成特性の解明	○	○	○	○	森林総研	植物生態研究領域	石田厚	
(2) 微細環境が光合成・呼吸特性に与える影響の解明	○	○	○	○	森林総研	北海道支所	丸山温	
(3) 主要樹種の個体レベル呼吸特性の解明	○	○	○	○	森林総研	東北支所	森茂太	
(4) ヒノキ林および主要広葉樹木部器官の呼吸特性の解明	○	○	○	○	森林総研	植物生態研究領域	荒木眞岳	
(5) 照葉樹の光合成生産に及ぼす環境要因の解明	○	○	○	○	森林総研	九州支所 四国支所	斉藤哲 倉本恵生	
3. 森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明								
(1) A0 層から供給される溶存及び粒子状有機物の蓄積過程の解明	○	○	○	○	森林総研	関西支所	金子真司	
(2) 森林土壌における難分解性有機物の長期的な蓄積過程の解明	○	○	○	○	森林総研	東北支所	池田重人	
(3) 土壌呼吸における微生物と根呼吸起源の寄与率の推定	○	○	○	○	森林総研	立地環境研究領域	高橋正通	
(4) 枯死木や根株の腐朽分解による CO ₂ 放出量の評価	○	○	○	○	森林総研	四国支所 北海道支所	鳥居厚志 酒井佳美	
(5) 主要林相における土壌呼吸特性の解明	○	○	○	○	森林総研	北海道支所	石塚成宏	
(6) 森林土壌における炭素循環と根系の解明	○	○	○	○	森林総研	九州支所	酒井正治	

担当課題別年次計画（森林）（つづき）

研 究 課 題	研究実施年度				担 当			委託先
	11	12	13	14	場所	領域・支所	研究代表者	
3. 多様な森林構造における CO ₂ 固定量の定量化								
(1) 北方系落葉樹広葉樹林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	○	○	○	○	森林総研	北海道支所	中井裕一郎	
(2) ブナ林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	○	○	○	○	森林総研	東北支所	斉藤武史	
(3) コナラ・ソヨゴ林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	○	○	○	○	森林総研	関西支所	小南裕志	
(4) 暖温帯スギ林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	○	○	○	○	森林総研	九州支所	清水貴範	
(5) 温帯アカマツ天然林・暖温帯落葉広葉樹林における大気-森林系 CO ₂ フラックスの解明	○	○	○	○	森林総研	気象環境研究領域	大谷義一	
4. 森林における炭素貯留機構と CO ₂ 収支の総合評価								
(1) 林分成長モデルによる樹種別・地域別 CO ₂ 固定・貯留量の評価	○	○	○		森林総研	森林管理研究領域 北海道支所	家原敏郎 石橋聡	
(2) 炭素循環プロセスの定量化による森林 CO ₂ 収支の全国評価					森林総研			
(3) ブナ林における生理・生態のプロセスと CO ₂ 収支の解明	○	○	○	○	森林総研		角張嘉孝	静岡大学
(4) 森林動態モデルによる CO ₂ 固定能評価手法の開発	○	○	○	○	森林総研	関西支所	伊東宏樹	
(5) 炭素循環プロセスの定量化による森林 CO ₂ 収支の全国評価		○	○	○	森林総研	植物生態研究領域	千葉幸弘	

担当課題別年次計画（海洋）

研究課題	研究実施年度				担当			委託先
	11	12	13	14	場所	部	研究室	
Ⅱ．海洋における CO₂ 収支特性の総合評価								
1. 藻類による CO ₂ 収支の評価								
(1) 亜寒帯藻場における CO ₂ 収支の解明	○	○	○	○	北水研	地区水産業	地区産業研	東大海洋研
(2) 混合域・黒潮域藻場における CO ₂ 収支の把握	○	○	○	○	東北水研	研究部	資源培養研究室	
(3) 内海域藻場における CO ₂ 収支の把握	○	○	○	○	瀬戸内水研	瀬戸内海海洋環境部	藻場・干潟生産研究室	
(4) 沿岸藻場分布の広範調査手法の開発	○	○	○		北水研			
2. 貝類、サンゴ類による CO ₂ 収支の評価								
(1) 貝類の CO ₂ 固定量評価に関する算定手法の開発	○	○	○	○	水工研	水産土木工学部	環境分析研究室	海生研
(2) 貝類の代謝実験に基づく炭素収支の解明	○	○	○	○	水工研			
(3) 貝類による CO ₂ 固定量評価のための漁獲動態に関わる調査	○	○	○	○	水工研			
(4) 貝類の生理と CO ₂ 固定に関する生化学的機能に関する文献調査	○	○			水工研			
(5) 貝類による CO ₂ 固定量評価のための主要個体群の動態に関わる調査	○	○	○	○	水工研			日本海洋科学フイスコ島根大
(6) 二枚貝の物質循環を通じた CO ₂ 固定量の評価に関する研究	○	○	○	○	水工研			
(7) サンゴ類による CO ₂ 収支の把握	○	○	○	○	中央水研	黒潮研究部	生物生産研究室	
(8) 地域重要資源の現地実態調査		○	○		水工研			
3. 大気／海洋系における CO ₂ 収支の評価								
1. 親潮域・混合域における大気／海洋の CO ₂ 収支の把握	○	○	○	○	東北水研	混合域海洋環境部	生物環境研究室	東海大
2. 混合域・亜熱帯域における大気／海洋の CO ₂ 収支の把握	○	○	○	○	中央水研	海洋生産部	物質循環研究室	
3. 日本太平洋岸の CO ₂ 収支推定のための交換係数とフラックスの評価	○	○	○	○	中央水研			

第1章 森林におけるCO₂収支の総合評価

森林のCO₂収支問題の特徴と研究の焦点

森林部門における達成目標は、主要な森林の炭素循環プロセスおよび森林-大気間のCO₂フラックス特性を明かにし、炭素循環モデルや統計的アプローチを用いて、全国レベルの森林のCO₂収支を評価することである。そのため、光合成・呼吸、土壌、タワーフラックス観測、モデリング、データベースの整備を軸に5つの柱(中課題)をたて、CO₂収支の総合評価に取り組んだ。

残された課題(後述)は少なくないが、北海道から九州に至る全国6カ所の森林でタワーフラックスの同時連続観測が行われたこと、さらに京都議定書への対応に向けて、全国レベルの森林の炭素貯留量やCO₂収支の評価が試みられた意義は大きいと言える。

具体的な成果は各課題の報告に委ねるとして、ここでは前段として、森林のCO₂収支の特徴と課題の構成、残された問題点について述べる。なお、森林のCO₂収支に関連した用語、概念には紛らわしいものがあるため、末尾に簡単な解説を付した。

森林のCO₂収支と炭素収支

森林は炭素を大気中のCO₂から光合成によって取り込むが、森林生態系(植物-土壌系)の炭素のほとんどが大気由来であるため、CO₂収支と炭素収支は実質的に同じものと見なすことができる。そのため、対象により、プール間のCO₂フラックスを直接測る方法と炭素量の変化を測る方法の2通りのアプローチが取られている。

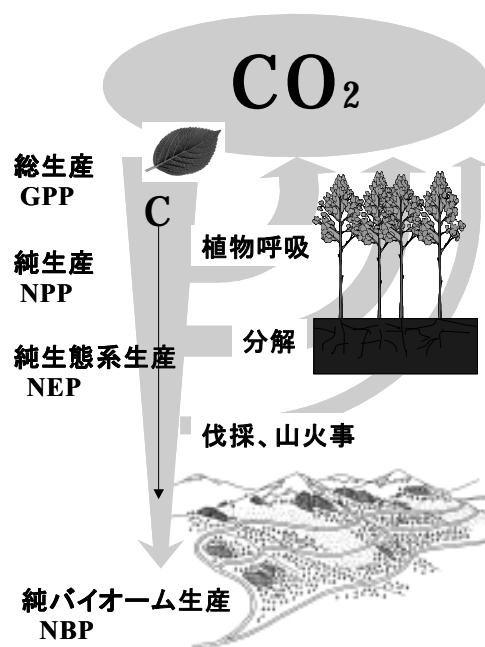
森林のスケールとCO₂収支

森林のCO₂(炭素)収支の絶対量は、図1-1のように対象とする森林の空間的スケールで異なってくる。すなわち、炭素収支の絶対量は、葉の総光合成による吸収量(GPP) > 植物群集の炭素収支(NPP) > 生態系の炭素収支(NEP) > バイオームの炭素収支(NBP)の順に少なくなる。

炭素固定量は空間スケールが大きくなるほど減少し、グローバルスケールではNBPはおおまかにNEPの10%、GPPの1%程度でしかない(Steffen et

al.1998)。また、空間スケールが大きくなるほど、時間スケールや炭素の貯留時間が長くなる。例えば、通常、山火事、伐採などの発生は年単位であるが、葉の光合成や呼吸は秒単位のプロセスである。

なお、一般に国レベルの収支の算定では、伐採はCO₂の放出とカウントしている。これは、伐採した木材が製品化されても、古い製品は焼却されると仮定されているからで、京都議定書においても第1約束期間は、森林の伐採を排出にカウントすることとしている。



総一次生産(GPP):ある生態系の植物の総光合成量(吸収された炭素の総量)

純(一次)生産(NPP):GPPから植物体(葉、枝、幹、根)の呼吸による消費量を引いた量。植物群集の炭素収支

純生態系生産(NEP):NPPからリターの分解、土壌有機物の分解による炭素放出量を引いた量。生態系の炭素収支

純バイオーム生産(NBP):ある地域(バイオーム、生物圏)における森林火災、伐採などによる炭素放出量を引いた量

図1-1 森林のスケールとCO₂の吸収と放出、炭素固定の関係

課題の構成とCO₂収支のスケール

森林部門の5つの中課題それぞれが対象とする空間的スケールは、表1-1のとおりである。なお、同じ中課題(1)「森林資源量および生産力の全国評価」においても、ある期間の成長量を吸収量、伐採量を放出量として炭素固定量を推計(NBP)した小課題(1-(1))

と、伐採がない場合の森林の成長ポテンシャルから推計(NEP)した小課題(1-(2))があり、単純にこれらの数値は比較できないことをお断りしておきたい。

表 1-1 研究課題の対象とそのスケール

研究課題	研究対象	スケール
(2)主要樹種の光合成・呼吸特性	個葉～林分 光合成、植物体呼吸	GPP～NPP
(3)森林土壌における有機物の蓄積過程と土壌呼吸特性	土壌呼吸(根呼吸+分解) 枯死材の分解	(NEP)
(5)森林における炭素貯留機構とCO ₂ 収支の総合評価	モデルによる森林のCO ₂ 収支の総合評価	NPP～NEP
(4)多様な森林構造におけるCO ₂ 固定量の定量化	タワーによるCO ₂ フラックスの観測	NEP
(1)森林資源量および生産力の全国評価	統計的アプローチによる炭素貯留量・固定量の全国評価	NEP～NBP

表1-1のとおり、森林部門の中課題の構成は、(1)統計的アプローチによる全国評価のほか、(4)タワーフラックス観測によるNEPの直接的測定、それをクロスチェックするための、(2)光合成・呼吸(3)土壌の炭素収支および(5)スケーリングアップという組み立てになっている。

残された主な問題点

課題の個別の目標はほぼ達成されたと考えられるが、全体として統合化が不十分であり、以下のような課題が後継プロジェクト等へ引き継がれた。

- 1) フラックス観測サイトにおける生態系の炭素収支(NEP)について、光合成法、積み上げ法によるクロスチェックが不十分である。
- 2) 炭素循環プロセスの群落へのスケールアップは一部試みられたが、地域(バイオーム)レベルへのスケールアップは残されたままである。
- 3) 土壌有機物や粗大有機物の分解は遅いため、中長期的な観測を継続する必要がある。また、粗大有機物の面的な評価が残されたままである。

森林のCO₂収支関連用語と補足

IPCCの特別報告書LULUCF(Watson et al., 2000)やMultilingual environmental glossary (EEA)を参考した。

吸収(uptake) : ある炭素プールへの炭素の付加

一時的な付加から長期的な付加(蓄積)まで広く用いられているため、ときに混乱を招くことがある。

固定(隔離)(sequestration) : 大気以外の炭素プールの炭素含有量を増加させるプロセス (LULUCF)

炭素の吸収(uptake)と蓄積(stock) (EEA)

一般に吸収(uptake)よりも長期的な増加に用いる。

同様の意味でstorageを用いることも多い。

プール(pool) : 炭素を蓄積、放出する能力をもった系森林バイオマス、土壌、大気、木材製品等

蓄積量、貯留量(stock) : ある時点での炭素プールの絶対量

フラックス(flux) : あるプールから他のプールへの炭素の移動量/(単位面積・単位時間)

吸収源(sink) : 温暖化ガスを削減するプロセスまたはメカニズム。与えられた期間で入ってくる炭素が出てくる炭素よりも多ければシンクとみなされる。

補足: バイオマス成長量とNEP

IPCCグットプラクティス・ガイダンス(2003)は、国別のCO₂吸収量の算出で森林バイオマス成長量(ΔB)を森林(生態系)のCO₂吸収量(NEP)と見なすことを認めており、本報告書にもこれを用いた推定がある(1-(1))が、この仮定の成立条件についてふれておきたい。

NEPとΔBの関係は、以下のように表される。

純生産量(NPP)=バイオマス成長量(ΔB)+枯死量(L)

純生態系生産量(NEP)=純生産量(NPP)-分解量(D)

従って、NEP=ΔB+L-D

つまり、枯死量(L)と分解量(D)が等しいときに、バイオマス成長量はNEPと等しくなる。このような仮定が成り立つのは、枯死量(落葉落枝や枯死木)が少ない森林(例えば、比較的若い森林や管理された人工林など)で、枯死量が多い場合は過小評価になる可能性があるだろう。

引用文献

European Environment Agency (EEA) multilingual environmental glossary

(<http://glossary.eea.eu.int/EEAGlossary>)

Steffen W.I et al. (1998) The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. Science 280, 1393-1394

Watson R.T. et al. (2000) Land use, land-use change, and forestry. A special report of the IPCC. pp. 377. Cambridge Univ. Press, Cambridge

(森林部門リーダー 石塚森吉)

1. 森林資源量及び生産力の全国評価

(1) 森林バイオマス推定手法の開発による森林賦存量の全国評価

ア 目的

地球温暖化を背景に二酸化炭素吸収源としての森林の役割が注目されており、我が国においても森林による炭素貯留量および炭素吸収量を正確に把握することが求められている。森林による炭素貯留量・吸収量の推定には様々な方法があるが、森林資源に関する統計情報を利用する方法は、地域的にも時系列的にも満遍なく情報が得られることから、全国規模の推定手法として利点を持ち、IPCCガイドライン (IPCC 1996) においても同様な方法が提示されている。

このような背景から、本研究では既存の統計情報や調査データ、地理情報等を活用し、日本の森林バイオマスによる炭素貯留量・吸収量を推定するとともに、その分布図を作成した。

イ 研究方法

(ア) 基礎情報と計算式

1990年および2000年林業センサス（農林水産省統計情報部 1992、2002）の森林面積データを利用し、次式により樹種・市町村・齢級区分ごとの炭素貯留量を算出した。

炭素貯留量(t) = 森林面積(ha)

× ha当り幹材積 (m³/ha) × 拡大係数

× 容積密度(t/m³) × 炭素含有率

樹種区分を林業センサスの分類にしたがい、スギ、ヒノキ、マツ、カラマツ、エゾマツ・トドマツ、その他針葉樹、落葉広葉樹、常緑広葉樹という8区分とし、対応するha当り幹材積と拡大係数について、成長モデルおよび拡大係数モデルを適用した。容積密度は木材工業ハンドブック (林業試験場編 1982) を参照し、スギ0.32、ヒノキ0.34、マツ0.43、カラマツ0.44、エゾマツ・トドマツ0.35、その他針葉樹0.37、落葉広葉樹0.47、常緑広葉樹0.61とした。炭素含有率はいずれの樹種も0.50を用いた。

(イ) 成長モデル

1997年の森林資源現況 (林野庁 1998) には樹種・都道府県・齢級別の面積および蓄積が示されている。この蓄積を面積で除して齢級別ha当り蓄積を算出し、これにゴンペルツ曲線を当てはめて樹種・都道府県別成長モデルを求めた。このゴンペルツ曲線は他の成長曲線よりも良いあてはまりを示したことから成長モデルとして採用した。

(ウ) 拡大係数モデル

拡大係数 (幹に対する林木全体の重量比) は幼齢時に大きく、成長にしたがって低減していく。このことから、既存の資料を利用し、スギ、ヒノキ、マツ、カラマツ、針葉樹、広葉樹の6樹種区分について林齢と拡大係数の関係を表す拡大係数モデルを導き、拡大係数を求めた (福田ほか 2001、2002)。

(エ) 広葉樹の区分

広葉樹に関してはバイオマス量の算出は一括して行った。しかし、落葉広葉樹と常緑広葉樹の容積密度の差が大きいため、広葉樹賦存状況調査結果を利用して市町村ごとに落葉広葉樹と常緑広葉樹の割合を求め、これによりバイオマス量を配分したのち、それぞれの容積密度を適用して炭素貯留量を求めた。

(オ) 分布図

森林炭素貯留量の分布図は約1km四方に当たる国土数値情報3次メッシュを基礎区画とし、各メッシュが属する市町村のha当り炭素貯留量とメッシュ内の森林面積を乗じてメッシュ内の炭素貯留量を算出した。

(カ) 炭素吸収量

林業センサスに対応する1990年と2000年における炭素貯留量を推定し、その差を炭素吸収量とした。この吸収量には森林の成長による炭素吸収と伐採等による排出を含んでおり、正味の炭素吸収量と見なすことが出来る。この方法は、IPCCグッドプラクティス・ガイダンス (IPCC 2003) に示されている算定手法の一つでもあるが、林木の伐採を即ち炭素の排出と見なす考え方が根底にあり、このことから生態系の炭素循環をふまえた炭素吸収量とは差異があることに注意が必要である。

(キ) 推定フロー

以上の各項目の議論をふまえ、推定作業をフローチャートに示した（図1-1）。

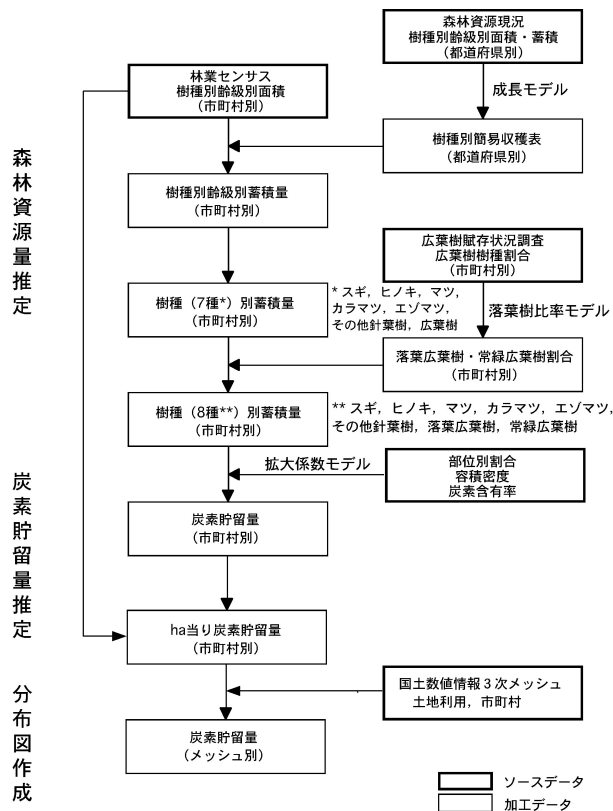


図1-1 森林炭素貯留量・吸収量の推定フロー

ウ 結果

(イ) 炭素貯留量・吸収量の推定

炭素貯留量・吸収量の推定結果を表1-1に示した。森林による炭素貯留量は1990年において0.98Gt、2000年において1.18Gtであり、その間に0.20Gtの炭素吸収がなされた。つまり、森林バイオマスによる炭素吸収量は年間20Mt/yrであった。森林ha当たりの炭素吸収量は0.86t/ha/yrであった。

炭素吸収量の73%は針葉樹によるものであり、41%はスギによるものであった。これは、全国的にスギの造林面積が多いことと、スギの成長が速いことによるものと考えられた。

表1-1 森林バイオマスによる炭素貯留量と炭素吸収量

樹種		炭素貯留量		炭素吸収量
		1990年	2000年	
		M t		M t/yr
針葉樹	スギ	222	305	8.2
	ヒノキ	103	124	2.1
	マツ	95	106	1.1
	カラマツ	51	59	0.8
	エゾトド	10	20	1.0
	その他針葉樹	45	59	1.4
小計		526	672	14.6
広葉樹	落葉樹	378	409	3.2
	常緑樹	80	102	2.2
	小計	458	511	5.4
合計		984	1,184	20.0
		t/ha		t/ha/yr
森林haあたり		41.4	50.0	0.86

(イ) 炭素貯留量の分布

図1-2、図1-3に1990年と2000年の炭素貯留量の分布を示した。1990年、2000年のいずれにおいても、中部、紀伊半島や山陰、四国山地、九州の周辺において炭素貯留が高かった。これらの地域は有名林業地を有しており、スギを筆頭とする人工林のha当りの炭素貯留量の多さと、森林面積の多さが反映されたものと考えられた。反面、天然林が多い北海道や東北地方においては、炭素貯留量は相対的に低かった。

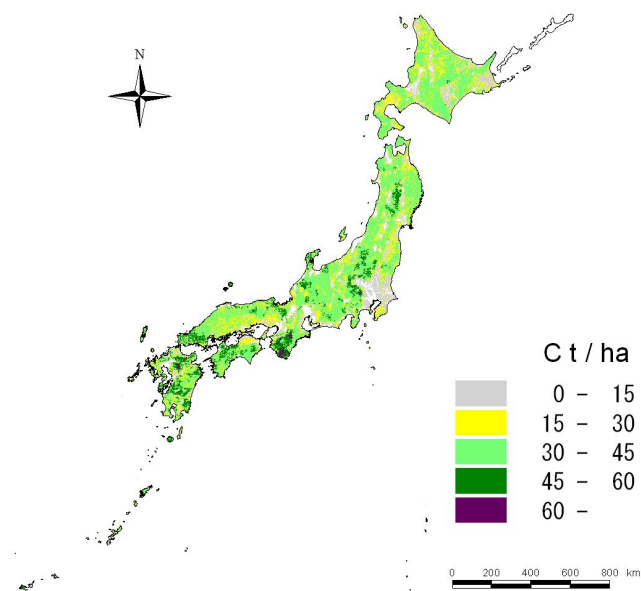


図1-2 1990年における森林炭素貯留量の分布

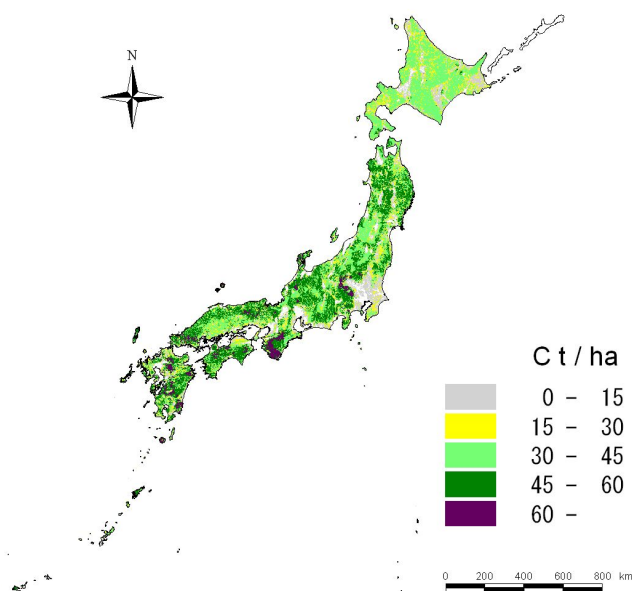


図 1 - 3 2000年における森林炭素貯留量の分布

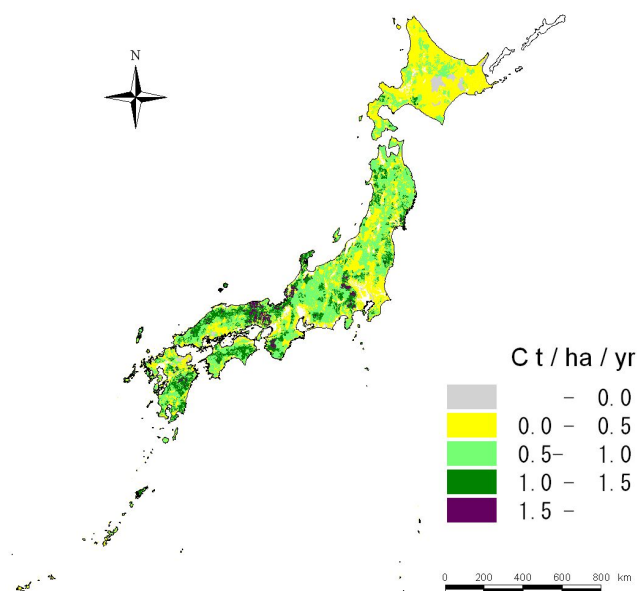


図 1 - 4 森林バイオマスによる炭素吸収量の分布

(ウ)炭素吸収量の分布

図 1 - 4 に炭素吸収量の分布図を示した。全国的にほとんどの地域で森林による炭素吸収がなされていることが分かった。その中でも、東日本地方に比べて西日本地方の方が、比較的高い炭素吸収が見られ、特に関西地方北部から山陰地方にかけて高い吸収が見られた。また、紀伊半島、四国山地、九州中南部においても炭素吸収が高かった。これは、これらの地域は成長の速いスギ人工林が多いことが反映されたものと考えられた。

吸収量がマイナス、つまり炭素が排出された地域が、少ないながらも点在していた。北海道中央に排出が見られたが、同地域は高性能林業機械によるカラマツの伐採が盛んであり、このことが反映されたものと推察された。関東や瀬戸内周辺の排出は、都市周辺に点在しているため、林地開発によるものであろう。九州北部はスギ林が多く、本来ならば高い吸収量が見られるはずであるが、この図では排出が点在し、その周辺も九州中南部と比較して吸収量が低かった。これは1991年の19号台風などの気象害による蓄積の減少が、排出として反映されたものと推察された。

エ 考察

本研究で開発した推定手法は、林業センサスという統計情報を基礎に、周辺情報を関連づけながら炭素量を推定するものである。森林蓄積量から炭素貯留量・吸収量へ変換するという方法は、IPCCグッドプラクティスガイダンス (IPCC 2003) の手法と基本的に同等なものであるが、樹種、市町村、年齢といった細分化や、成長モデルや拡大係数モデルを採用は、これまでの手法と比較して詳細なものである。また、約1kmの解像度を持つ分布図は、森林による炭素貯留量・吸収量分布についての新しい知見と言えよう。

さて、COP7 (気候変動枠組み条約第7回締約国会議) におけるマラケシュ合意 (UNFCCC 2001) において、我が国は3条4項の森林管理による炭素吸収量として13Mt/yrを上限として排出から差し引くことができることとなった。我が国は京都議定書における削減目標6%を達成するために、森林による吸収量を最大限利用することとしている (農林水産省 2002)。本研究において森林による炭素吸収量は20Mt/yrと推定されたので、この13Mt/yrという上限を達成するだけのポテンシャルを我が国の森林は持つものと考え

えられる。しかしながら、3条4項の対象森林は1990年以降に森林管理が行われた森林という条件があるため、このポテンシャルをいかにして確保していくかが、京都議定書の目標達成のためのポイントとなるものと考えられる。

オ 今後の課題

京都議定書報告においては精度（不確実性）の評価と、精度向上のための取り組み（QA/QC）が求められている（IPCC 2003）。本研究における手法は基礎となる数値を林業センサスに求めているが、林業センサスは森林簿の積み上げ値であるため、サンプリングのように精度を評価することはできない。このことから、今後、森林簿の精度調査手法とともに、森林簿の精度向上のための手法が求められる。

カ 要約

1990年および2000年林業センサスを初めとした既存の統計情報や地理情報等を活用し、日本の森林バイオマスによる炭素貯留量・吸収量を推定するとともに、国土数値情報3次メッシュを基礎としてそれらの分布図を作成した。

その結果、森林バイオマスによる炭素貯留量は1990年において0.98Gt、2000年において1.18Gtと推定された。これら2時点の差は成長による吸収と伐採による排出を含んだ正味の吸収量と考えられ、森林バイオマスによる炭素吸収量は20Mt/yrと推定された。この炭素吸収の73%は針葉樹によるものであり、41%はスギによるものであった。

炭素吸収量の分布図を作成したところ、全国的にほとんどの地域で森林による炭素吸収がなされていることが分かった。地域的には、西日本地方において比較的高い炭素吸収が見られた。同地方はスギ人工林が多く広がる地域であり、スギの速い成長が炭素吸収の高さをもたらしたものと考えられた。

引用文献

福田未来・家原敏郎・松本光朗（2001）スギ、ヒノキにおける部位別現存量と林齢との関係。日林関東支論，52，13-16

福田未来・家原敏郎・松本光朗（2002）アカマツ，カラマツにおける部位別現存量と林齢との関係。日林関東支論，53

IPCC(1996) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual

IPCC(2003) Good Practice Guidance for Land use, Land-use Change and Forestry

農林水産省（2002）地球温暖化防止森林吸収源10カ年対策

農林水産省統計情報部（1992）1990年世界農林業センサス都道府県統計書（林業編）、農林統計協会

農林水産省統計情報部（2002）1990年世界農林業センサス都道府県統計書（林業編）、農林統計協会

林業試験場編（1982）木材工業ハンドブック，丸善

林野庁（1998）森林資源現況

UNFCCC（2001）Decision 11/CP.7 Land use, Land-use Change and Forestry

（森林総合研究所 林業経営・政策研究領域 松本光朗、鹿又秀聡、九州支所 野田巖）

（2）生育環境特性を考慮した林地生産力の全国評価

ア 目的

既存のデータセットを活用して、時点修正が容易な森林の炭素吸収能力算出システムを構築する。本研究では、現存植生データセット(環境省)を植生単位の基礎にする。公表されている環境要因についてのメッシュデータを調製し、光量子量などの計算されていない環境要因については本課題内で解析・データベース化を図る。さらに、主要な樹種の現存量推定にかかわる相対成長式の統一を図り、林分の経年成長量データから、植生タイプ別の炭素固定量を求める。そして、環境要因と森林タイプとの関係を明らかにした上で、炭素吸収能力のマッピングを行い、集計する。

イ 研究方法

(ア) 基本数値データセットの調製

データ精度を3次メッシュ（約1km四方）とし、必要なデータセットの収集・整備・修正を行った。まず、環境データとして、地形データ（国土地理院）、気象データ（気象庁）、立地データ（森林総研）を利用した。光合成量を決定すると考えられる重要な光データは、公表値がなかったため本研究で作成した。植生データは環境省の調査による第5回現存植生データを用いた。

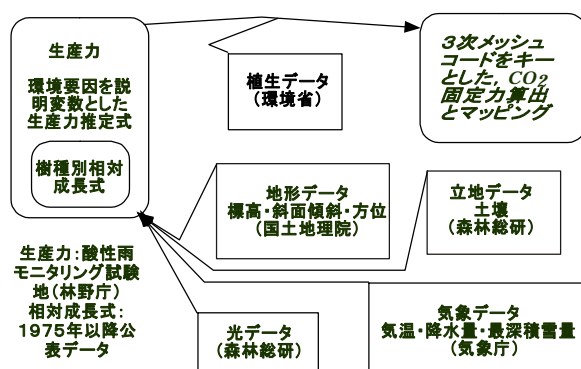
(イ) 成長に関するデータ解析

樹体の炭素量を算出するためには、樹木の現存量を正確に推定することが重要である。一般に、現存量は胸高直径（D）と樹高（H）からアロメトリー関係（相対成長式）によって推定される。ここでは、樹種群ごとの統一アロメトリーの作成を行った。まず、林学関係誌（1950年～）、林業・林産関係国内文献データベース（1977年～）の文献検索を行い、アロメトリー（ $Wi = a D^2 H^h$ ）に関する全ての文献を収集した。そしてその係数に関わる環境要因や樹種間・地域間差を検討し、統一的なアロメトリーが出来るかを検討した。一方、森林の実測成長量・現存量データとして、全国規模で多くのサンプルデータが得られるものが必要である。本研究では、林野庁による酸性雨等衰退モニタリング事業（1990～1994年と1995～1999年2期分）の毎木データ（1035地点）を用いた。これらによって得られた主要樹種のアロメトリーや林分の年間成長量から、炭素吸収量を算出した。また、その地点の環境要因から炭素吸収能力を求める推定式を作成した。これを植生データ上に展開し、炭素吸収能力のマッピングおよび全国集計を行った。

ウ 結果

(ア) 解析のためのデータセットを整備し、時点修正が容易なシステムを構築した（図1-5）。生育環境要因として、地形データ（標高、傾斜角度）、気象データ（成長期間の積算温度、成長期間の積算雨量、最深積雪）、光データ（成長期間の積算

光合成有効光量子量）、土壌データ（炭素蓄積量による土壌タイプ区分）を利用した。



3次メッシュをキーとしたCO₂吸収能力算出システム

図1-5 算出システムの概要

(イ) 光環境に関しては、植物の成長により関与しているPPFD（光合成有効光量子量）の解析・計算を行った。算出パラメータとして、緯度・経度・標高・斜面方位・斜面角度を用い、日照時間を考慮した計算式を構築し、3次メッシュ単位での値を算出した。さらに植物成長期間における積算PPFDを計算し、この値を本システムの環境要因として採用した。

表1-2 森林区分別の面積

森林区分	面積 (1000ha)
エゾマツ・トドマツ林	1,328
カラマツ林	1,231
スギ・ヒノキ林	6,250
その他針葉樹林	1,542
マツ林	3,537
常緑広葉樹林	1,395
落葉広葉樹林	9,554
総計	24,837

第5回環境省現存植生データによる。スギ・ヒノキ林については混交林として分類されている面積が多いため一括した。

(ウ) 樹木の現存量推定には、アロメトリー（相対成長式）が用いられるが、その係数（ a 、 h ）には林分間差があるといわれていた。そこで、検

索した文献からアロメトリーの係数や調査地点の環境条件を抽出し、整理・解析した。地域間差と考えられる気温や雨量、立地間差である土壌条件や斜面傾斜等の環境要因に対して、これらの係数は有意な影響を与えていなかった。一方で、密度や平均樹高など林分自体が持つ要因が係数に違いを生じさせることが解った。しかし、幹量や地上部全体の推定式は樹種別に高い精度で全国同一の式（係数）で表すことができ（表 1－3）。

表 1－3 各樹種の相対成長式の係数および地下部配分比

樹種	幹		枝		葉		地下部/ 地上部
	a	h	a	h	a	h	
落葉広葉樹	0.0497	0.8990	0.0039	1.0086	0.0040	0.7693	0.22
常緑広葉樹	0.0372	0.9552	0.0042	1.0572	0.0057	0.8337	0.24
スギ	0.0308	0.9106	0.0032	0.9004	0.0840	0.5791	0.27
ヒノキ	0.0217	0.9722	0.0219	0.7036	0.1296	0.4813	0.29
アカマツ・クロマツ	0.0356	0.9188	0.0055	0.9555	0.0094	0.8058	0.27
その他針葉樹	0.0620	0.8402	0.0409	0.6542	0.0461	0.6178	0.27

相対成長式：器官乾重(kg) = aD^2H^h ； D^2H は胸高直径(cm)² × 樹高(m)，a,hは係数。地下部/地上部は地上部バイオマスに対する地下部の割合。

(エ) 上記相対成長式をモニタリング事業の毎木データに当てはめ、林分の現存量および年間成長量(林齢を無視した最大成長量)を算出した。成長量とその場所の環境要因とを重回帰分析(ステップワイズ法)を行った結果、有効な環境要因は、成長期PPFD・成長期降水量・土壌炭素量・温量指数であることが解った。しかし、樹種によって、各環境要因の説明率は異なり、いずれの場合も説明変数(R^2)は高くなく、全ての種に有効な環境要因は見出せなかった。

(オ) 求められた回帰係数から、各 3 次メッシュ上の植生における年間成長量(最大成長量)を算出し、それを炭素吸収量(能力)に変換した。それによると、年間炭素吸収能力は最大**3.8t/ha/yr**で平均は**1.8t/ha/yr**であった。日本の森林は、毎年**37.8Mt**の炭素を吸収可能である(表 1－4)。

(カ) 上記で求められた、メッシュごとの炭素吸収能力をマッピングし、日本の森林の炭素吸収マップを作成した(図 1－6)。

表 1－4 森林区分別の炭素吸収能力

森林区分	年平均炭素吸収量 (t/ha/yr)	年間炭素吸収量 (Mt/yr)
エゾマツ・トドマツ林	1.03 ±0.54	1.36
カラマツ林	1.86 ±0.28	2.29
スギ・ヒノキ林	2.04 ±0.20	12.75
その他針葉樹林	1.03 ±0.54	1.58
マツ林	1.54 ±0.68	5.45
常緑広葉樹林	1.90 ±0.42	2.65
落葉広葉樹林	1.23 ±0.32	11.74
総計		37.84

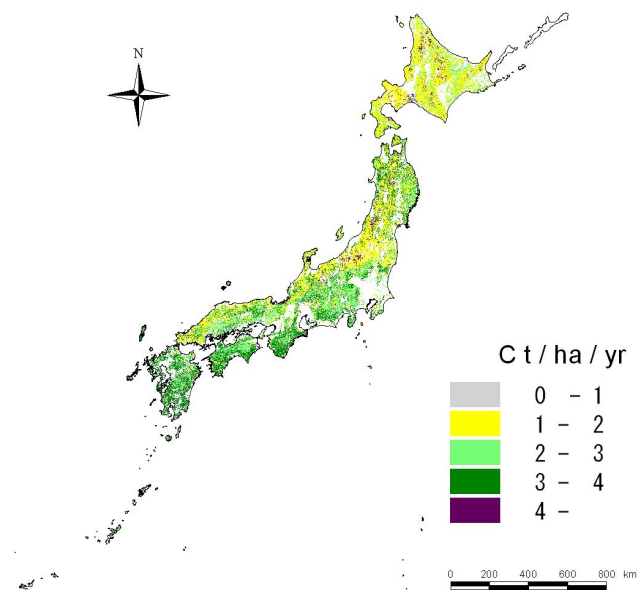


図 1－6 現存森林による炭素吸収能力マップ

エ 考察

(ア) アロメトリーの係数は、生育環境によって異なる値を示すとされてきたが、得られた文献から解析した結果、そのような関係は見出されなかった。一方で、平均樹高や立木密度など、林分に内在する要因によって係数が変化した。特に葉量や枝量ではその影響が強かった。これは、葉量が個体サイズよりも階層構造や林冠のうっ閉度によって左右されることを示唆しており、葉量に直接的に由来する当年から若年生枝の量

にも影響してくるためであろう。これらを明らかにするため、それぞれの林分で得られた個体ベースのアロメトリーから得られた林分現存量を、その林分の平均 H や D との関係を解析した。すると、林分現存量と平均値の D^2H との間にはより強い相関が認められた。ただし、これは測定値点数の多いスギ・ヒノキにおいて得られて結果で、現状では他の樹種に展開するにはデータ数が不足している。また、これは各林分の代表値であるため、個体の相対成長関係を表しているわけではない。そのため、本研究では個体ベースのアロメトリーを使用している。

(イ)環境要因に対する成長量の反応では、マツとその他針葉樹を除くすべての樹種群で土壌中の炭素量と有意な相関を持った。その他の環境は特定の樹種群、つまり温量指数はヒノキとその他針葉樹に、傾斜角度はカラマツに、PPFDはスギに、降雨量はマツにのみ有効であった。これらから、土壌条件が最も成長量に影響を及ぼす要因であることが解った。逆に言えば、日本のような温暖湿潤な気候帯では、気候由来の環境要因による明確な成長量差は現れ難いことを示唆している。また、このような環境要因は造林樹種に有効な場合が多く、自生地と異なる場所に生育していることが、影響要因として現れるものと考えられた。

(ロ)樹種群別の炭素吸収量は、主要な造林樹種であるスギとヒノキ林で約30%の吸収量を占めることが解った。面積では落葉広葉樹より少ないが、成長量がそれを上回るためである。カラマツやマツ（多くが植林）なども成長量が高く、人工林が炭素吸収にはより有効に機能する能力を持つことが解る。地域的な吸収量分布を見ると、その能力は九州から四国にかけて高く、古くから林業地帯とされている地域の吸収能力が高かった。また、山岳地帯、日本海側は値が低かった。北海道においては、中央部の山地帯から道東にかけての地域が、気象条件が厳しいにもかかわらず高い固定能力を示し、面的に見ても土壌条件がより強く影響していることが解った。

オ 今後の課題

成長にかかわる調査データセットの違いによって炭素吸収量に大きな差が出ることが予想された。一例として、トドマツの成長量を本調査でのデータセット（箇所）からと、別の固定調査試験地のデータセット（箇所）の二つの試験地群から求め、炭素吸収量を推定した。すると両者間に+18%（本試験に対して）の差が生じた。また、吸収量の場所間差が生じることも認められた。本研究で使ったデータは、モニタリング事業として、全国にランダムに1000箇所以上配置された固定調査地における値である。このように同じ設定・測定方法によって多地点の情報が得られるデータは他になく、最も有効なデータセットであると思われるが、現時点で1期分（5年間）の現存量差のデータしかなく、モニタリング調査の常として初期に測定の誤りを起こす確率が高い。精度の高いデータセットを構築することが課題である。

一方、地下部の現存量推定については、既存のデータが極めて少ない。そのため、少ない事例の地上部／地下部の配分比から求めるしか方法がなかった。地上部の器官サイズから地下部の現存量を推定するアロメトリー作成のための調査・研究が必要である。

カ 要約

国土地理情報などで利用されている、汎用性を持つ3次メッシュデータセットを利用して、時点修正および変更が容易な森林の炭素固定量算出システムの構築を試みた。3次メッシュサイズ（約1km²）の数値情報として、地形、気象、光、土壌のデータを用いた。基礎となる植生データは現存植生データ（環境省）を用いた。一方、森林の現存量推定式を作成するため、公表されている文献からその測定値を収集した。樹木の現存量推定には、相対成長式（アロメトリー）が用いられるが、その係数には林分間差があるといわれていたが、係数を決定するのは外的環境要因ではなく密度や平均樹高などの内的要因である事がわかった。また、その推定式は樹種別に全国同一の係数で表すことができた。林分成長量を求めるために、定期的に調査が行われている林分の成長量とその場所の環境要因との

関係を多変量解析によって調べ、環境要因による成長量推定式を作成した。これらから、現存植生上での日本の森林の年間炭素固定量は、**38.8 Mt/yr**と推定された。計算したメッシュ単位での炭素吸収能力のマッピングを行った結果、九州から四国にかけて値が高く、古くから林業地帯とされている地域での吸収能力が高かった。

(森林総合研究所 森林植生研究領域 田内裕之、北海道支所 宇都木玄)

(3) 森林土壌における炭素貯留量の全国評価

ア 目的

わが国の森林下にある堆積有機物および鉱質土壌による炭素貯留量を全国集計するための類型区分法を開発して、全国貯留量を推定するとともに堆積有機物を含む森林土壌による炭素貯留量分布図を作成する。

イ 研究方法

(ア) 堆積有機物 (小野ほか 2002)

a データセット 既往の報告から堆積有機物量に関するデータを収集しデータセットを作成した。入力項目は以下の通りであった；調査地概況（緯度、経度、標高、土壌型、表層地質、斜面方位、傾斜）、林分概況（樹種、林齢、立木密度、平均樹高、胸高断面積合計、材積）、現存量データ（幹・枝・葉・根重、堆積有機物量）、出典。
b 堆積有機物量と炭素含量 データを1990年林業センサス（以下、センサス）の林相区分に準じてスギ林、ヒノキ林、カラマツ林、アカマツ林、北方針葉樹林、その他針葉樹林、広葉樹林の7区分で集計し単位面積あたり堆積有機物量(kg m^{-2})に関する代表値を求めた。

堆積有機物の炭素含量(C%)は文献値および実測データから代表値を求めた。

c 集計方法 センサスにおける各市町村の林相ごとの森林面積と林相ごとの堆積有機物量の代表値から、以下の式により市町村ごとの単位森林面積あたりの堆積有機物量 $M(\text{kg m}^{-2})$ 、およびわが国

の森林全体に蓄積されている堆積有機物量 $M(\text{kg})$ を算出した。

$$M_c = (\sum (A_f \times M_f)) / S_c$$

$$M = \sum (M_c \times S_c)$$

ただし、 A_f ；各市町村における林相ごとの森林面積(km^2)、 M_f ；林相ごとの堆積有機物量代表値(kg m^{-2})、 S_c ；各自治体における森林面積(km^2)。

d 分布図 市町村コードを介して市町村ごとの単位森林面積あたりの堆積有機物量に堆積有機物の炭素含量代表値を乗じた値($C \text{ kg m}^{-2}$)を国土数値情報の3次メッシュに関連づけ松本・鹿又(2002)に準拠し堆積有機物量の炭素貯留分布図を作成した。

(イ) 鉱質土壌

a データセット 全国規模で行われた林野庁各営林局による国有林林野土壌調査報告および道府県による民有林適地適木調査を中心に全国の森林土壌に関する断面調査記録からデータを収集しデータセットを作成した。入力項目は調査地に関する項目として土壌型、座標（緯度、経度、標高）、傾斜、表層地質（母材）、林相・土地利用（人工林／天然林、針葉樹／広葉樹、森林／原野・伐採跡）、および断面ごとの層厚、炭素含量、容積重、レキ量に関するデータを収集した。

b 土壌炭素量 (Mbrisada et al. 2004) 断面ごとに以下の式により、埋没土層を除いた鉱質土壌各層の炭素貯留量を深さ方向に積算して深さ0.3m、0.7m、1mまでの単位面積あたりの炭素貯留量($C \text{ kg m}^{-2}$)を算出した。ただし黒色土をのぞいて炭素含量20%未満の土層を積算対象とした。

$$SOC_d = \sum (OC_i \times BDi \times Di \times (1 - Si))$$

ただし、 SOC_d ；深さ dm までの単位面積あたり炭素貯留量($C \text{ kg m}^{-2}$)、 OC_i ； i 層の炭素含量(C%)、 BDi ； i 層の容積重(kg m^{-3})、 Di ； i 層の厚さ(m)、 Si ； i 層のレキ含量(%)。

c 集計方法 (Mbrisada et al. 2004) 深さごとの単位面積あたり炭素貯留量は国土数値情報－土地分類ファイルにおける土壌分類を林野土壌分類に準じた15区分（森林土壌区分）で集計した。

土壌区分ごとの面積は3次メッシュコードを介して国土数値情報－土地分類ファイルの土壌

区分と国土数値情報－土地利用面積ファイルを関連づけ、土地利用面積ファイルの各メッシュに収録されている森林面積を当該森林土壌区分の面積とした。

鉱質土壌における炭素貯留量全国値は森林土壌区分ごとの代表値と面積から計算した。

d 分布図 国土数値情報 3 次メッシュにおける単位面積当たり土壌炭素貯留量($C \text{ kg m}^{-2}$)を以下の式により算出し、鉱質土壌の有機炭素貯留量分布図を作成した。

$$\begin{aligned} & \text{メッシュ・単位面積当たり土壌炭素貯留量} \\ &= \text{当該メッシュにおける} \\ & \text{「森林土壌区分」の単位面積当たり炭素貯留量} \\ & \times (\text{メッシュ森林面積} / \text{メッシュ面積}) \end{aligned}$$

ウ 結果

(ア) 堆積有機物による炭素貯留

堆積有機物量については279件の調査事例からなるデータセットを作成した。堆積有機物量は樹種によって大きく異なっていた。土壌型、標高や林齢と堆積有機物量の間に明瞭な関係が認められなかった。そのため、林相別集計とした。

堆積有機物の炭素含量代表値は文献値及び実測データ (57件) の平均から42.7%となった。

林相区分ごとの平均 (表 1－5) を堆積有機物量の代表値として炭素貯留量を積算した結果、1990年時のわが国の森林に存在する堆積有機物による炭素貯留量は約0.17Gtと推定された (小野ほか 2002)。

(イ) 鉱質土壌

約10000件の断面データを収集し、それらのうち3369断面について深さ0.3mまでの炭素貯留量を算出した。深さ0.7mおよび1mまでの炭素貯留量を算出した断面はそれぞれ1294、236件であった。断面ごとの深さ別炭素貯留量を森林土壌区分ごとに集計した結果を表 1－6 に示した。単位面積当たりの炭素貯留量は土壌の種類によって異なるが、同じ土壌区分でも変動幅が大きかった。

単位面積あたり炭素貯留量を地域別にみるとおおむねどの地域でも黒色土、ポドゾルが褐色森林土より高くなる傾向にあり、赤黄色土や未熟土は明らかに低かった。分布面積が最も広い褐色森林

土の炭素貯留量は東北日本から西南日本にむかって低く傾向がみられたが、九州本島では高い値を示す地点が多く、炭素貯留量に地域差がみられた。しかしながら、炭素貯留量と温度 (標高、地温)、表層地質、林相の間に明瞭な相関関係がみとめられず、地域差を説明するのに有効な指標がみられなかった。そのため、土壌区分別集計とした。

「森林土壌区分」毎の面積と、それぞれの有機炭素貯留量を表 1－7 に示した。この集計から、日本の森林土壌による炭素貯留量は深さ0.3mまでで2.18Gt、1mまでで4.57Gtとなった (Mbrisada et al. 2004)。

エ 考察

(ア) 堆積有機物による炭素貯留

堆積有機物における炭素貯留分布図 (図 1－7) は林相による堆積有機物量の違いを反映していた。堆積有機物量による炭素貯留は北海道で比較的高く、東海から瀬戸内地方にかけての低山帯に高い傾向が見られた。北海道では堆積有機物量の多い北方針葉樹林が主として分布することを、東海から瀬戸内地方の低山帯にアカマツ林の分布面積の割合が高いことを反映したものと考えられた (小野ほか 2002)。

(イ) 鉱質土壌による炭素貯留

鉱質土壌による炭素貯留を土壌区分別にみると、適潤性褐色森林土が森林土壌の約半分を占め、その炭素貯留量の推定や分布特性の解明がわが国の森林土壌における炭素貯留を評価する上で重要である。また、鉱質土壌の炭素貯留における深さ別分布をみると、どの土壌区分においても深さ0.3mまでの貯留量が深さ1mまでの貯留量の約半分を占めた。土壌による炭素貯留は表層に集中しており、表層の炭素貯留評価も重要である。

単位面積当たりの平均炭素貯留量 (Mbrisada et al. 2004) は深さ30cmで9.0 kg m^{-2} 、深さ1mで18.8 kg m^{-2} となり、これらの値がわが国の森林土壌における炭素貯留の代表値と推定された。

表 1 - 5 林相区分ごとの堆積有機物量 (小野ほか (2002) の表-1)

林相区分	堆積有機物量 平均±標準誤差 kg m ²	林分数	林齢 年	備考
スギ	1.66±0.12	59	11-250	
ヒノキ	1.00±0.10	64	12-100	
アカマツ	2.30±0.26	21	12-150	
カラマツ	1.46±0.63	14	9-63	
北方針葉樹	4.41±0.63	26	29-40	エゾマツ, トドマツ, アカエゾマツ
その他針葉樹	2.67±0.55	10	不明	コウヤマキ, ヒバ*, オオシラビソ, ツガ*
広葉樹	1.48±0.15	85	不明	コシイ, カシ, コナラ, フナ, ミスナナなど

表 1 - 6 森林土壌区分ごとの深さ別炭素貯留量 (Mbrisada et al. (2004) のTable 3に加筆)

森林土壌区分	深さ 0 - 0.3 m				深さ 0 - 0.7 m				深さ 0 - 1 m			
	N	Med.	Mean	CV	N	Med.	Mean	CV	N	Med.	Mean	CV
		kg m ²	kg m ²	%		kg m ²	kg m ²	%		kg m ²	kg m ²	%
乾性ポドゾル	199	9.4	10.1	38	48	18.4	18.7	32	6	21.5	20.8	30
湿性ポドゾル	92	10.7	11.4	38	20	23.1	22.8	41	2	n. a.	34.0	n. a.
乾性褐色森林土	753	7.2	7.9	48	240	13.2	14.0	45	36	15.5	17.2	42
適潤性褐色森林土	1259	8.9	9.2	39	552	15.0	16.0	46	96	18.5	19.5	39
湿性褐色森林土	316	8.4	8.8	37	152	15.6	15.9	37	33	21.7	22.0	36
暗色系褐色森林土	35	9.2	9.6	30	8	13.4	14.3	52	1	n. a.	13.8	n. a.
赤褐色系, 黄褐色系褐色森林土	82	6.4	7.4	55	30	10.0	11.5	60	5	8.6	9.0	30
赤・黄色土	58	6.5	6.7	48	20	12.5	13.2	56	2	n. a.	13.7	n. a.
黒色土	414	13.3	13.8	35	165	24.7	25.9	38	29	32.9	33.0	36
淡黒色土	24	10.3	10.6	24	12	17.1	17.9	30	0	n. a.	n. a.	n. a.
暗赤色土	9	8.1	8.9	21	2	n. a.	15.7	n. a.	0	n. a.	n. a.	n. a.
グライ	25	8.7	9.2	42	3	17.0	18.9	53	0	n. a.	n. a.	n. a.
泥炭	3	17.4	17.2	12	1	n. a.	34.9	n. a.	0	n. a.	n. a.	n. a.
未熟土	88	4.0	3.9	44	44	5.9	5.9	46	23	8.4	8.2	41

N ; 断面数, Med. ; 中央値, Mean ; 平均, CV ; 変動計数, n. a. ; 計算不可

表 1 - 7 森林土壌区分ごとの面積と炭素貯留量 (Mbrisada et al. (2004) のTable 1, Table 5を合成)

森林土壌区分	数値情報面積		土壌有機炭素貯留量			
	面積比	%	0 - 0.3 m	0 - 1 m	量比	%
			Tg	Tg		
乾性ポドゾル	5752	2	58	120		3
湿性ポドゾル	4151	2	47	94	*	2
乾性褐色森林土	28919	11	228	497		11
適潤性褐色森林土	110271	44	1010	2149		47
湿性褐色森林土	4490	2	40	99		2
暗色系褐色森林土	4383	2	42	63	*	1
赤褐色系, 黄褐色系褐色森林土	24238	10	179	278		6
赤・黄色土	4610	2	31	61	*	1
黒色土	24550	10	340	810		18
淡黒色土	7753	3	82	139	*	3
暗赤色土	491	0	4	8	*	0
グライ	4067	2	37	77	*	2
泥炭	742	0	13	26	*	1
未熟土	18523	7	73	152		3
(該当なし)	9262	4	---	---		
合計	252202	100	2180	4570		100

*; 0-70cmの単位面積あたり土壌有機炭素量を用いて計算

深さ1mまでの炭素貯留量分布図（図1-8）によると、東北部や九州中部で炭素貯留が高く、西南日本で炭素貯留が低い傾向がみられた。これらはそれぞれの地域に広く分布している「森林土壌区分」における炭素貯留量の違いを反映しており、作成した分布図は全国規模で炭素分布を概観するには適していると考えられた。

(ウ) 森林土壌による炭素貯留

(ア)、(イ)からわが国の森林土壌は堆積有機物および深さ30cmまでに約2.3Gt、深さ1mまでに約4.8Gtの炭素を貯留していると推定された。ただし、鉱質土壌の推定には埋没土を含んでいないので、これらは控えめな推定値である。堆積有機物

層を含む森林土壌表層部は伐採など土地利用変化の影響を受けやすい。森林土壌による炭素貯留は堆積有機物を含めて表層に集中しているので、土壌による炭素貯留では表層土の保全が重要である。

オ 今後の課題

土壌炭素の推定精度を改善するため、土壌炭素貯留量における地域変異を説明できる指標を検討すること、および埋没土層の分布やその炭素貯留を推定する方法を検討することが今後の課題である。

カ 要約

堆積有機物および鉱質土壌の炭素貯留量を全国推定した。その結果、堆積有機物中に0.17Gt、埋没土層を除いた鉱質土壌深さ0.3mまでに2.18 Gt、深さ1mまでに4.57Gtの有機炭素を貯留していると推定された。

また、それぞれの単位面積あたりの炭素貯留量を国土数値情報と関連づけて作成した炭素貯留分布図は炭素貯留における全国的な傾向を概観するのに適していた。

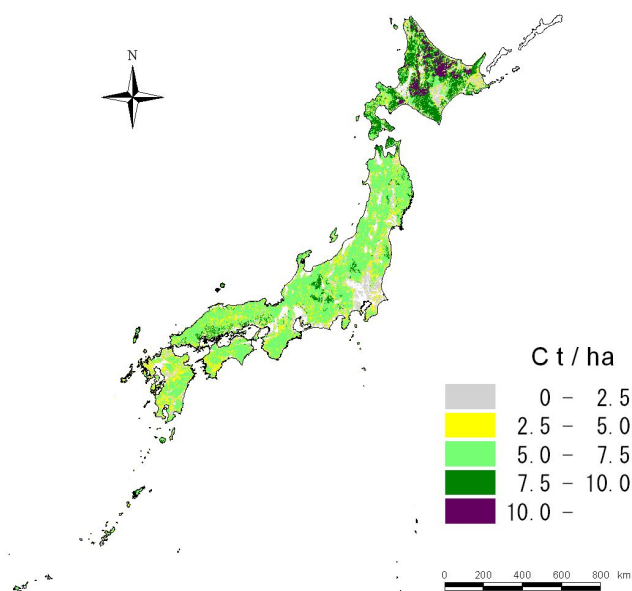


図1-7 堆積有機物層による炭素貯留量分布図

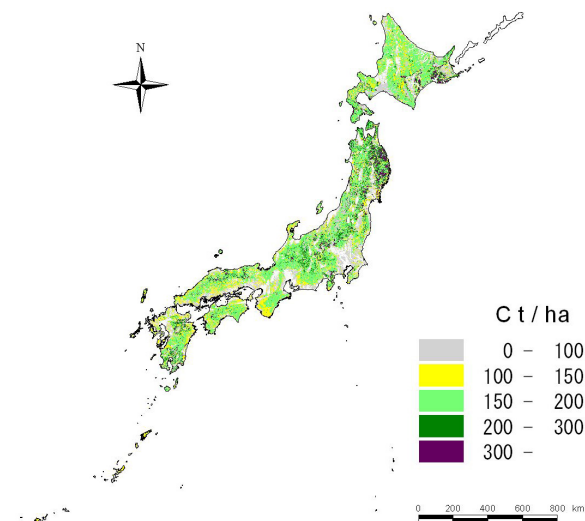


図1-8 森林土壌深さ1mまでの炭素貯留量分布図

引用文献

松本光朗・鹿又秀聡（2001）日本の森林炭素蓄積分布図の作成．第112回日林学術講，182．

MDRISADA K., ONO K., & KANOMATA H. (2004)

Organic carbon stock in forest soils in
Japan. *Geoderma* 119 : 21-32

小野賢二・鹿又秀聡・森貞和仁（2002）日本の
森林における堆積有機物量の評価手法の検討.
第53回日本林学会関東支部大会論文集, 143-
144

（森林総合研究所 立地環境研究領域 森貞和
仁、藤本潔（現：南山大）、小野賢二、今矢
明宏（現：九州支所））

2. 主要樹種の光合成・呼吸特性の解明

(1) 野外における樹木の光合成特性の解明

ア 目的

地球環境問題の一つである大気中の二酸化炭素濃度の増加は、自然や人間活動に大きな影響を与えつつある。従って野外樹木において、二酸化炭素の吸収特性を調べることは重要である。この担当課題では、主要樹種の野外における葉の光合成特性を測定し、葉のガス交換特性に影響を与える物理的・生物的要因を明らかにする。

イ 研究方法

福島県いわき市の落葉広葉樹林に生育する、ブナとイヌブナの成木の光合成速度の日変化を季節を通じて測定し、葉のガス交換特性に影響を与える物理的・生物的要因を明らかにした。そして樹冠上部の個葉（陽葉）の光合成速度を、物理的環境要因から予測できるようモデルを構築した。

樹冠上部の葉が、成木個体全体の光合成速度にどれぐらい寄与しているかを調べるため、樹冠上部から下部まで、葉の垂直分布や、樹冠層別の葉のガス交換特性や形態的特性を測定した。また、陽葉と陰葉の分化の意義が遷移後期樹種のブナとイヌブナと遷移前期樹種のミズメにおいて異なっているかを調べた。また、日中の葉の電子伝達速度を測定し、電子伝達速度と光合成速度の関係から、樹冠内の葉の光合成速度の垂直分布を推定した。

ウ 結果

(ア) 個葉の光合成の季節変化

ブナとイヌブナ成木の陽葉と陰葉に関して、光や温度といった気象要因から、単位葉面積当たりの光合成速度をシミュレーションできるモデルを作った。そのシミュレーションにより推定された林冠上部の葉の年間（生育期間）の光合成量は、ブナで $30.1 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 、イヌブナで $22.3 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ であった（図1-2-1-1）。また樹冠上部の葉の年間（生育期間）の蒸散量は、

ブナで $10900 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 、イヌブナで $5267 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ であった。その結果、生育期間の葉の水利用効率（光合成量/蒸散量）は、ブナで $2.8 \text{ mmol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ 、イヌブナで $4.2 \text{ mmol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$ になった。

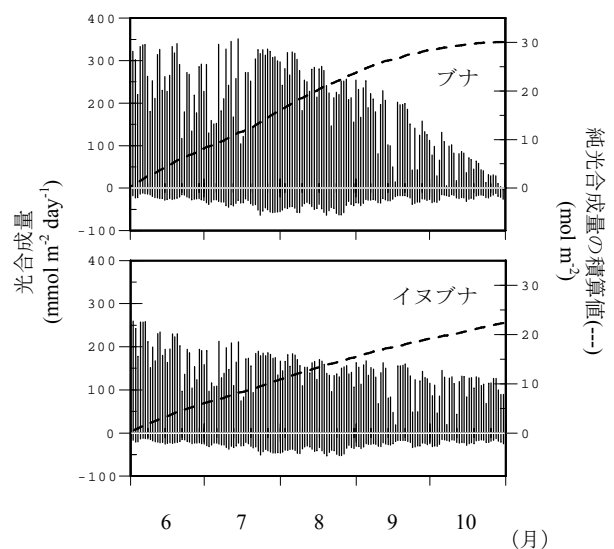


図1-2-1-1 ブナ、イヌブナ樹冠上部の個葉の単位葉面積当たり光合成量の季節変化（マイナスの値は夜間の呼吸量を示す）

(イ) 個葉の形態、光合成特性の樹冠内変化

遷移後期樹種であるブナ、イヌブナと前期樹種であるミズメの成木の葉群構造が明らかになった（図1-2-1-2）。

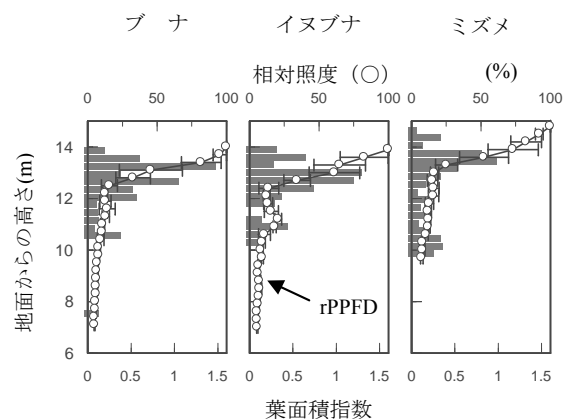


図1-2-1-2 葉群各層の葉面積指数と相対光強度（rPPFD：上軸、%）の高さに伴う変化

葉群各層の葉の形態的、生理的特性を測定した。その結果、比葉面積、クロロフィル濃度、窒素濃度などの特性は、ブナ、イヌブナと比べてミズメで、陽葉と陰葉の間の可塑性は小さかった(図1-2-1-3)。炭素安定同位体の陽葉と陰葉の間の違いもまた、ブナ、イヌブナと比べてミズメで小さかった(図1-2-1-4)。

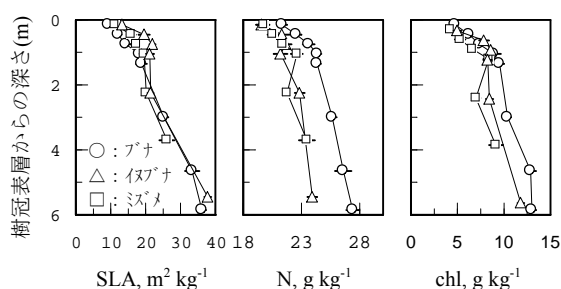


図1-2-1-3 比葉面積(SLA)、クロロフィル濃度(chl)、窒素濃度(N)の高さに伴う変化

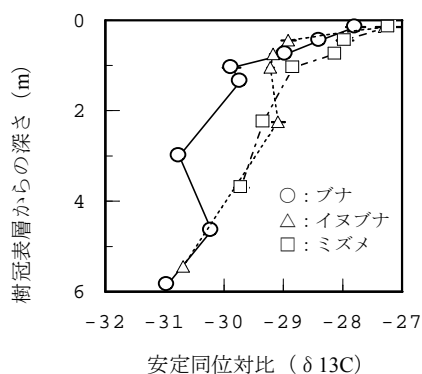


図1-2-1-4 炭素安定同位体の高さに伴う変化

(ウ)樹冠の光合成速度の推定

クロロフィル蛍光とガス交換速度の同時測定により、葉温別の電子伝達速度と光合成速度の関係が得られた(図1-2-1-5)。この関係を用いて、樹冠部表層から下層までの各個葉の電子伝達速度、葉温を測定することにより、夏の良く晴れた日中の樹冠部全体の光合成速度を推定することができた(図1-2-1-6)。

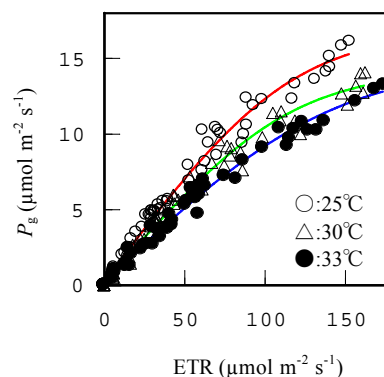


図1-2-1-5 電子伝達速度(ETR)と総光合成速度(P_g)の関係(ブナ、イヌブナ、ミズメの3樹種含む)

夏の良く晴れた日中の、単位地面面積当たりの総光合成速度は、ブナ、イヌブナ、ミズメでそれぞれ21.8、16.5、18.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。またこの時の単位地面面積当たりの純光合成速度は、ブナ、イヌブナ、ミズメでそれぞれ18.1、12.6、16.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。またこの時の単位地面面積当たりの呼吸速度は、ブナ、イヌブナ、ミズメでそれぞれ3.7、3.8、2.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。

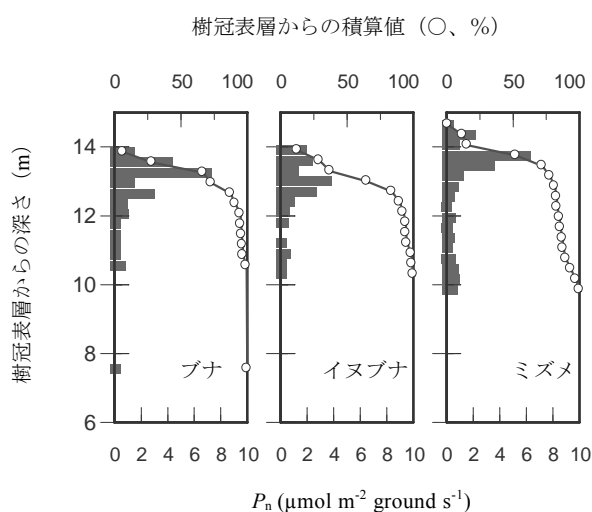


図1-2-1-6 ブナ、イヌブナ、ミズメの樹冠層別の単位土地面積当たり純光合成速度(P_n)

エ 考察

気象要因からブナ、イヌブナ陽葉の炭素獲得量を季節を通じて見積もることが可能になった。葉のガス交換速度に影響を与える生物的要因として、葉や幹の水分特性の季節的変化が重要であることがわかった (Uemura *et al.* 投稿中)。Uemura *et al.* (2000) は、葉の形態的特性 (柵状組織の層数) は、前年の葉原基形成段階の環境で決まっているが、葉の水分特性の変化は、その年の葉のおかれた環境により順化できることを示している。その馴化の結果、夏期の飽差の増加に対しても気孔の開度を維持し、光合成に対する気孔リミテーションを低くしていることがわかった。しかし、夏期においては、前期生育期や後期生育期と比べ、高い呼吸量を持っていたので、特に夏に炭素を獲得するわけではなかった。

遷移前期樹種であるミズメは、陽葉と陰葉間の形態的・生理的可塑性が小さかった。炭素安定同位体の陽葉と陰葉の間の違いが、ミズメで小さかったことは、ミズメの陰葉の光合成がより光の制限が小さくなるような条件 (明条件) で行われているからだと考えられる。すなわち、ミズメの陰葉の光合成は、光の制限が少なくなるような条件で行われ、比較的葉群全体で光合成をしていることがわかった。遷移系列の異なる種において、樹木個体 (樹冠) レベルでの炭素獲得様式が異なることが示唆された。

光強度と葉温を変化させることにより、3 樹種の葉温別の電子伝達速度 (ETR) と光合成速度 (P_g) の関係を得ることができた。これらの関係は、3 種の間で違いがなかった。このことは、光強度の変化に伴う葉内二酸化炭素濃度の変化が3 種の間で同じであることを示す。クロロフィル蛍光測定装置による ETR の測定は、赤外線分析計による P_g の測定より非常に迅速であるので、比較的定常状態が続く環境下での葉の炭素獲得速度の推定には有効であることがわかった。

幹、枝の呼吸を除いた葉群の単位地面面積当たりの純光合成速度は、単位葉面積当たりの最大光合成速度の約 1.3~2 倍に当たることがわかった。この夏の良く晴れた日中において、ブナ成木の葉群全体の総光合成速度のうち 90% の

光合成は、林冠最上部から約 1.8 m の範囲の葉で、一方ミズメ成木においては、林冠最上部から約 4.2 m の範囲の葉で行われていた。

オ 今後の課題

環境変動に対する樹木の CO_2 吸収能力の応答を明かにすることが求められており、今後は水分環境などの変化に対する個体レベルでの馴化の仕方を樹種間で比較する必要がある。

カ 要約

日本の落葉広葉樹木の主要構成樹種であるブナとイヌブナの陽葉の二酸化炭素吸収能力を推定できるようになった。また林分の構成樹種組成がわかれば、その陽葉の最大光合成速度から、まだ荒くではあるが、葉による単位地面面積当たりの二酸化炭素吸収速度を推定できるようになった。また葉群の垂直分布と葉群全体の中の光合成分布が明らかになってきたため、樹木個体の光合成と木の形との関係を知り、林冠生態学への新しいアプローチを築いた。

引用文献

- UEMURA A., ISHIDA A., TOBIAS D.J., KOIKE N. & MATSUMOTO Y. (投稿中) Linkage between seasonal gas exchange and hydraulic acclimation in the top canopy leaves of *Fagus* trees in a mesic forest in Japan.
- UEMURA A., ISHIDA A., NAKANO T., TERASHIMA I., TANABE H. & MATSUMOTO Y. (2000) Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances. *Tree Physiology* 20:945-951.

(森林総合研究所 植物生態研究領域 上村章、石田厚)

(2) 微細環境が光合成・呼吸特性に与える影響の解明

ア 目的

林内の環境は均質ではなく、樹冠上層から林床にかけて光や温・湿度、CO₂濃度が部位によって異なり、葉群はその着生部位の環境に応じた形態的、生理的特性を持つ。葉群のCO₂吸収・放出過程は、葉群を取り巻く微細環境だけでなく、その環境に適応した葉の特性によって影響を受ける。CO₂収支評価の高度化には、環境条件に対する葉の馴化過程を明らかにし、これら生理生態的特性を基礎にして環境条件と光合成・呼吸特性の関係を解明する必要がある。本研究では、冷温帯林を構成する主要樹種の苗を対象に、光環境、CO₂濃度に対する葉の形態的、生理的馴化過程を明らかにし、環境条件に応じた光合成・呼吸特性を解明する。

イ 研究方法

材料には主要落葉広葉樹およびカラマツの2～3年生ポット苗を用いた。光に対する馴化では、苗を裸地（対照）と庇陰下（相対光強度約10%）で育て、展開した葉の光合成・呼吸特性を調べた。庇陰下で育てた苗の一部については、光環境変化に対する適応能を評価するため、生育途中で裸地へ移し、光合成特性や形態的特徴の変化を調べた。大気CO₂に対する馴化では、CO₂濃度を360ppmと720ppmに制御した環境調節施設（温度26/16℃（昼/夜）、自然光）で育て、展開した葉の光合成・呼吸特性を調べた。大気CO₂濃度が上昇しても貧栄養条件では光合成が抑制される場合があるので、一部の苗の窒素施肥量を制限して育て、栄養条件とCO₂濃度が光合成に与える影響を調べた。

ウ 結果

庇陰下では、いずれの樹種もSLA（葉面積/葉乾重）が大きかった（表1-2-2-1）。SPAD値（クロロフィル含量の目安）は、シラカンバが対照区で大きかった他は、いずれも庇陰区が大きかった。光飽和の光合成速度(Pn^{max})は対照区が高くなる傾向が見られたが、ミズナラ、イタヤカエデでは光前歴の間に有意差はなかった。データは示して

いないが、光合成能の目安となるCO₂飽和の光合成速度も庇陰区で低くなった。Pn^{max}を樹種間で比べると、シラカンバがやや高く、イタヤカエデがやや低く、ハルニレ、ヤチダモ、ミズナラが中間であった。庇陰下から裸地に移した場合、いずれの樹種も裸地の葉と同じ光合成特性を獲得したが、シラカンバでは速やかに変化したのに対し、ヤチダモ、シナノキでは変化に遅れが見られた。

表1-2-2-1 比葉面積（SLA）、SPAD値、光飽和の光合成速度（Pn^{max}）

樹種	処理	SLA cm ² g ⁻¹	SPAD	Pn ^{max} μmol m ⁻² s ⁻¹
シラカンバ	対照	215*	33.8*	14.72*
	庇陰	646	22.7	6.96
ハルニレ	対照	198*	31.6ns	11.86*
	庇陰	358	34.7	8.10
ヤチダモ	対照	130*	32.4ns	11.31*
	庇陰	402	36.7	8.73
ミズナラ	対照	132*	34.3*	12.14ns
	庇陰	274	41.2	10.64
イタヤカエデ	対照	208*	38.7ns	8.65ns
	被陰	425	43.0	6.31

*:処理間に有意差有り (p<0.05)

ns: 処理間に有意差なし

ブナ、ケヤマハンノキでは、CO₂濃度とPn^{max}の関係は生育時のCO₂濃度の影響を受けていなかった。しかしシラカンバ、ミズナラ、イタヤカエデ、カラマツでは、720ppmの高CO₂濃度条件で育てた場合、360ppmで育てた苗と比べて同じCO₂濃度に対するPn^{max}は低く、生育時のCO₂濃度条件下でのPn^{max}はCO₂処理間で差がなかった。成熟葉の光合成速度に対するCO₂濃度と窒素供給量の影響は樹種により異なった（図1-2-2-1）。イタヤカエデでは、窒素供給量に関わらず高CO₂の葉の光合成活性が低下し、生育時と同じCO₂濃度下での光合成速度はCO₂処理間で差がなかった。ミズナラでは、窒素供給量が多い場合に、高CO₂条件下での葉の光合成活性の低下が遅れる傾向が認められた。一方、ケヤマハンノキは窒素固定能をもつことから、窒素供給量が少ない場合でも高CO₂濃度下で光合成速度を比較的高く維持していた。

エ 考察

いずれの樹種も、 Pn^{max} は強光下の対照区が高い傾向があったが、これはSLAの小さい、厚い葉を展開していたことが一因であろう。こうした傾向はブナでも知られている (Uemura *et al.* 2000)。庇陰条件ではSLAが大きい (薄い葉) シラカンバを除いてクロロフィル量も多く、弱光に対する形態的適応が認められた。

光合成速度は大気 CO_2 濃度によって左右され、 CO_2 濃度が高いほど Pn^{max} は高くなるが、 CO_2 濃度が高い環境で生育すると光合成活性が低下し、同じ CO_2 濃度に対する Pn^{max} が低下する場合がある

(古川 1991)。これはダウンレギュレーションと呼ばれる反応で、このような樹種では将来的に大気 CO_2 濃度が上昇しても光合成は変化しないことになる。今回得られた結果によると、大気 CO_2 濃度が上昇した場合、ブナとケヤマハンノキでは光合成の増大が予測されるが、シラカンバ、ミズナラ、イタヤカエデ、カラマツでは光合成速度は変化しないと考えられる。またミズナラの場合、貧栄養条件では大気 CO_2 濃度の上昇による光合成の増大と成長の促進が期待できる。

オ 今後の課題

高 CO_2 に対する馴化を調べる場合、ポット苗を用いた実験では根系が制限要因になるおそれがあり、野外での CO_2 付加実験が必要である。

カ 要約

冷温帯林を構成する主要樹種について、光強度、 CO_2 濃度に対する光合成の馴化過程が明らかになった。得られた光合成速度は、個体、林分レベルでの CO_2 収支予測モデルのパラメータとなる。

引用文献

古川昭雄 (1991) 個葉の光合成と環境要因. 日生態会誌41: 279-297.

UEMURA A, ISHIDA A., NAKANO T., TERASHIMA I., TANABE H. & MATSUMOTO Y. (2000) Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances. *Tree Physiology* 20: 945-95.
(森林総研北海道支所 植物土壌系研究グループ 丸山温、北尾光俊、飛田博順)

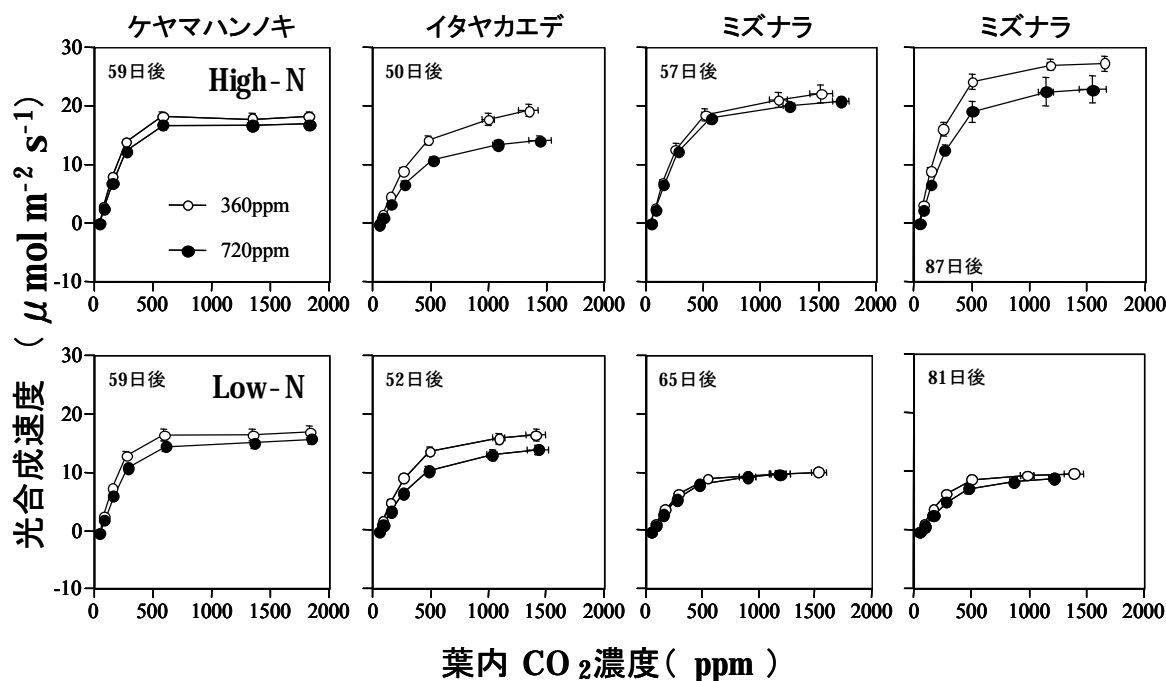


図1-2-2-1 葉内 CO_2 濃度と光合成速度の関係

光量 $1200 \mu mol m^{-2} s^{-1}$. 棒は標準誤差 ($n = 5 - 6$). 日は処理開始後の日数を表す

(3) 主要樹種の個体レベル呼吸特性の解明

ア 目的

ヨーロッパ各地のCO₂モニタリングタワーサイトの研究から、森林生態系の炭素バランスの主要決定要因は呼吸消費であることが指摘された (Valentini *et al.* 2000)。しかし、様々な点で解決すべき問題が多く、こうした物理的方法を検証するため樹木への直接測定によって生態学的な解明を行う必要がある。個体レベルの生理学的情報は植物群落全体の機能的モデルなどの基礎的情報として価値が高く、タワーメソッドの検証を行う際に威力を発揮する。しかし植物個体呼吸のサイズ依存性に関して Bertalanffy (1949) や Thornley (1970) によりモデルが出されているが、これらは個体サイズのレンジが小さな生物による検討であり、実生から大型樹木まで広いレンジの樹体呼吸に関する明確な結論は出していない。また巨大な樹木を直接測定した研究は非常に少ない (Yokota & Hagihara 1998; Mori & Hagihara 1991)。

本研究では個体レベルの呼吸が、樹種、立地条件、環境条件、林齢、地上部、地下部などによりどのように変化するか明らかにし、森林生態系において「個体呼吸のサイズ依存性」を検討することを目的とした。またこうした法則性を元に林分全体の森林生態系の炭素収支の特性を検討した。

イ 研究方法

(1) 大型樹木の個体レベルの呼吸を測定する方法を新たに開発した。測定システム内部の空気を循環させた閉鎖方式で、内部の二酸化炭素の上昇速度から個体呼吸を測定した。チャンバーは日中の暗呼吸速度を測定できるように内部を暗条件にした。高さ 10m 程度までの個体は立木のまま切断せずに大型の個体チャンバーに入れた。これ以上の大型個体に対しては、切断の影響が無いことを確認した樹種に関して個体をいくつかの部分に切り分けて、個体全体を数回に分けて個体全体の呼吸速度を測定した。また地下部もできる限り傷つけないように土壌から掘り出し、大型チャンバーに入れ測定した。

(2) 様々な樹木の個体呼吸の個体サイズ依存性

を熱帯～亜寒帯、実生～老齢木で比較検討した。インドネシア東カリマンタンのフタバカキ科樹木の実生、岩手県八幡平のブナ林、岩手県盛岡市森林総合研究所構内のニッポンカラマツ、青森県北津軽郡の青森ヒバ、ロシア中央シベリアクラスノヤルスク州のカラマツ (連続永久凍土地帯) などを材料とした。個体サイズのレンジは数グラムから約 700 kg、樹高レンジは約 2 cm から約 20m、樹齢は 2 年から約 250 年であった。

(3) 岩手県安比高原のブナ林では個体の根呼吸も測定した上で土壌呼吸も測定した。さらに年間の地温の変動も測定して、根の年間呼吸速度、土壌呼吸速度を推定して土壌への炭素蓄積速度推定のパラメーターを検討した。

ウ 結果

(ア) 個体呼吸速度の温度依存性

個体を暗環境に置いて個体呼吸速度の温度依存性を検討したところ、個体サイズに関わりなく個体呼吸のQ₁₀はほぼ一定であり、2に近い値であった。この際、個体内の温度差は蒸散が活発な時に見られるような幹下部の地下水による冷却現象は無かった。このため樹木体は明条件よりも個体内での温度の差は少ないと考えられ、個体呼吸の温度依存性を測定するより良い測定条件になっていた。

(イ) 個体呼吸－個体サイズの関係

小さな樹木個体の「個体呼吸－個体サイズの関係」は巾指数が 1.2 の巾乗式($r^2=0.94$)で、大きな個体における関係は 0.8 の巾指数の巾乗式($r^2=0.97$)で近似された。個体呼吸のサイズ依存性はこれら 2 つのフェーズに分かれた (図 1-2-3-1)。

(ウ) 安比ブナ林の土壌への炭素蓄積速度の推定ベースの作成

年土壌呼吸(R(soil))に占める年根呼吸(R(root))の割合を亜寒帯林のシベリアカラマツ林と温帯のブナ林で比較した。シベリアカラマツ林では根呼吸の土壌呼吸に占める割合は32%と高い割合であったが、温帯のブナ林では15%とその半分であった。

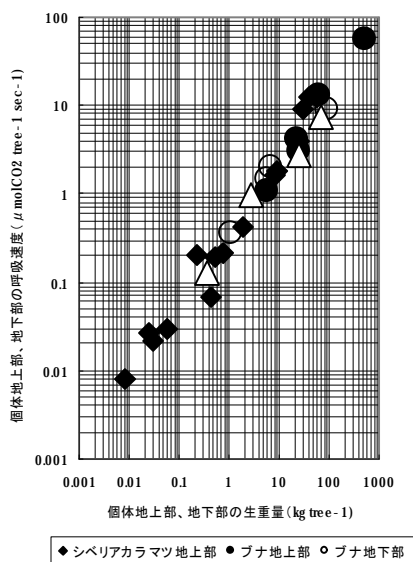


図1-2-3-1 安比ブナ林、シベリアカラマツ地上部の
個体地上部、地下部の生重量と呼吸速度の関係

エ 考察

本課題で、閉鎖循環系の個体呼吸測定法を開発した。本方法ではこれまでの開放循環系の測定システムでは評価出来なかった水分中に溶けたCO₂に対して注意を払う必要が無く、CO₂の積算値から呼吸を推定するためより正確な測定が可能となった。また暗条件であるため樹体内の温度差が小さく個体呼吸を安定した温度条件下で測定できた。

熱帯～亜寒帯、実生～老齢木の根を含んだ個体呼吸を実測した結果、一般法則的な「個体呼吸－個体サイズの関係」を見いだした。大型の樹木個体の幹では、呼吸活性が高い部分は幹では表面部分であり、個体呼吸は樹体表面により制御されている傾向が見られた。一方小型個体では、幹内部に呼吸活性の低い部分が少ないと考えられた。

(1) 個体スケーリングでは樹種、バイオームによらず個体呼吸は一定である。(2) 個体スケーリングでは地下部、地上部の呼吸は一定である。

(3) 個体スケーリングでは成長の早い個体も、遅い個体も個体呼吸は一定である。これまで器官のスケーリングでは重要な呼吸、成長の制御要因と考えられていた窒素含量などは、幅広い個体サイズ間では誤差の範囲内とも考えられた。

本研究で材料とした実生～老齢木の個体サイズ

間には概ね10⁶倍の差があり、同一個体サイズの個体呼吸間には約2倍～3倍の差があった。しかし個体サイズ幅を大きく比較した場合、個体呼吸とサイズは一定傾向を示し、これはValentini *et al.* (2000)により示された、森林二酸化炭素収支の主な決定要因は呼吸であるという結論を支持する。

日本のブナ林に対しシベリアカラマツでは、根への炭素分配が高く、また栄養塩類不足のため、根系共生微生物の活動が活発であり根呼吸の割合が高いと推測された。こうした根の呼吸測定は非常に少ないが、土壌への炭素蓄積速度推定の主要パラメーターの一つである。

オ 今後の課題

本課題の方法とタワーによるCO₂フラックス測定、土壌呼吸、土壌への炭素蓄積調査などと組み合わせ、データを検証する必要がある。

カ 要約

樹木の幅の極めて広い個体スケーリングでは樹種、バイオームによらず個体地上部、地下部の呼吸は同一サイズの個体で一定の傾向が見られた。これは呼吸が森林のCO₂収支の決定要因であることを示すものであろう。

引用文献

- BERTALANFFY L.V. (1949) Problems of organic growth. *Nature* 163:156-163.
- MORI S. & HAGIHARA A. (1991) **Root respiration in *Chamaecyparis obtusa* trees.** *Tree Physiology* 8:217-225.
- THORNLEY J. H. M. (1970) Respiration, growth and maintenance in plants. *Nature* 227:304-305.
- VALETINI R. *et al.* (2000) **Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests.** *Nature* 404: 861-865.
- YOKOTA T. & HAGIHARA A. (1998) Changes in the relationship between tree size and aboveground respiration in field-grown hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) trees over three years. *Tree Physiology* 18:37-43.
- (森林総研東北支所 育林技術研究グループ 森茂太)

(4) ヒノキ林の木部器官の呼吸特性の解明

ア 目的

樹木は光合成によって二酸化炭素を吸収する一方、呼吸により一年を通じてCO₂を排出している。特に発達した森林では、木部器官が現存量に占める割合が大きいため、森林生態系における二酸化炭素収支を評価するためには、木部器官による呼吸は重要な要素である。しかし、幹などの木部器官の呼吸特性については未解明な部分も多い。

本課題では、約50年生のヒノキ人工林において、ヒノキ成木の幹を対象に、地上高約2mおきに7つの高さで幹表面からのCO₂放出速度を定期的に測定した。幹呼吸速度の日変化、季節変化および垂直分布のパターンを明らかにし、幹温度や幹成長量などこれらのパターンに影響をあたえる要因について検討した。また、個体あたりの幹の年間呼吸量を求め、ヒノキ人工林における林分あたりの幹の年間呼吸量を推定することを目的とした。

イ 研究方法

茨城県加波山に位置する、森林総合研究所天岳良実験林の約50年生ヒノキ人工林で調査を行った。調査地の林分密度は1087本/ha、標高は270m、年平均気温、年降水量はそれぞれ13.1度、1350mmである。

7つの呼吸チャンバー・電磁弁・赤外線ガス分析器・データロガーなどで構成される、通気法を用いた自動的な幹呼吸速度測定システムを構築した。被圧木から優占木を含むヒノキの成木5本（胸高直径14.9~27.5cm、樹高15~19m）をサンプル木とした。幹にそって地上高約1.3, 4, 6, 8, 10, 12, 14mの位置にチャンバーを取り付け、各高さの幹表面からのCO₂の放出速度を33分おきに約24時間測定した。同時に、熱電対により幹温度（深さ約1cm）を測定した。この幹呼吸速度の測定を、各サンプル木について、2000年12月から2003年2月まで計18回行った（2001年はほぼ毎月、2002年はほぼ2ヶ月に1回）。なお、地上高12, 14mは樹冠内、10mはほぼ樹冠基部（生枝直下）、1.3~8mは樹冠より下の幹にあたる。また、呼吸測定部位は合計34ヶ所である。

サンプル木に地上高2mおきにデンドロメーターを取り付け、各高さの幹の直径を毎月測定した。1本の幹を1~3m, 3~5m, … 13~15mというように長さ2mずつに区切り、それぞれの幹表面積と幹体積を円錐台で近似して計算した。各2m丸太の幹表面積にその高さにおける幹表面積あたりの呼吸速度をかけて、2m丸太あたりの呼吸速度を求めた。それらを足し上げることで個体あたりの幹呼吸速度とした。

ウ 結果

(ア)呼吸速度の日変化

1秒あたりの呼吸速度 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) は、幹温度の上昇・下降にともなった日変化パターンを示し、次の指数関数で近似できた（図1-2-4-1）。

$$R = R_0 Q_{10}^{(T/10)} \quad \cdots (1)$$

R : 呼吸速度 R_0 : 温度0℃の時の呼吸速度

Q_{10} : 温度係数 T : 幹温度 (℃)

呼吸速度は、温度が上昇していく時と降下していく時とでは反応が若干異なり、同じ幹温でも夜の方が昼よりも高く、ヒステリシスを示す場合が多かった。温度係数 Q_{10} （温度が10℃増加した時の呼吸速度の増加比）は大体1.5~2.5の範囲（平均1.9）にあり、冬に大きく夏に小さい傾向が認められた。 Q_{10} に幹の高さによる差は認められなかった。一方、 R_0 は季節や幹の高さによって大きく異なった。

しかし、温度変化の幅が小さい時など、測定日の天候によって、有意な指数関係が得られないことがあった。そこで1秒あたりの呼吸速度を24時間分積分することで、測定日における1日あたりの呼吸速度を求めた。

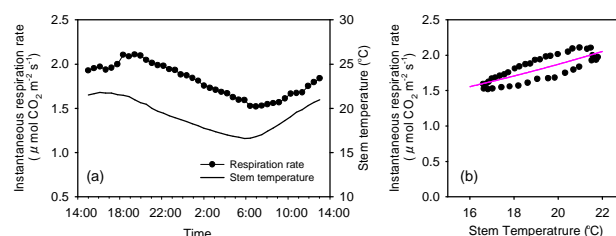


図1-2-4-1 1秒あたりの呼吸速度と幹温度の日変化(a)と、1秒あたりの呼吸速度と幹温度の関係(b). 最大個体、地上高12m、2001年5月14日の例。(b)図の曲線は(1)式による。

(イ)呼吸速度の季節変化

1日あたりの呼吸速度 ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は、冬に最も低く、春に増加して6月に最大となった。夏に減少したのち、秋から冬にかけてゆっくり減少していくことがわかった (図1-2-4-2(a))。この季節変化パターンは、木や高さによらず、また年によらず同じであった。測定日における日平均幹温度は、月平均気温と同様7、8月にピークを持つゆるやか増減する季節変化パターンを示したのに対し (図1-2-4-2(c))、直径成長速度は4月から急激に増加して5、6月にピークを持つ季節変化を示した (図1-2-4-2(b))。

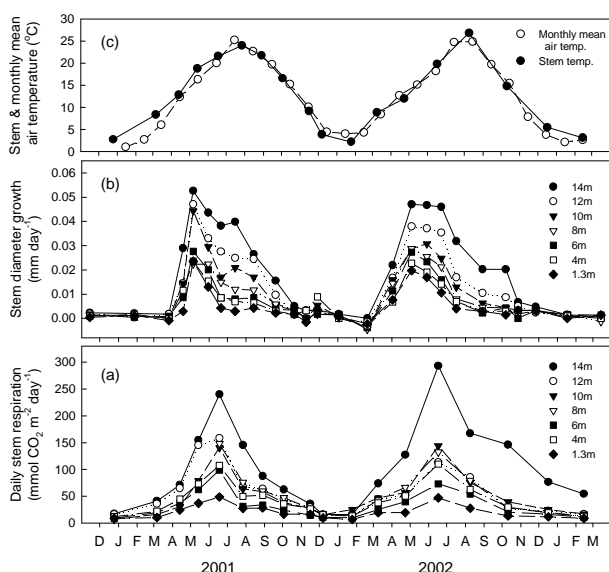


図1-2-4-2 1日あたりの呼吸速度(a), 直径成長速度(b), 日平均幹温度と月平均気温(c)の季節変化. 最大個体について示す。

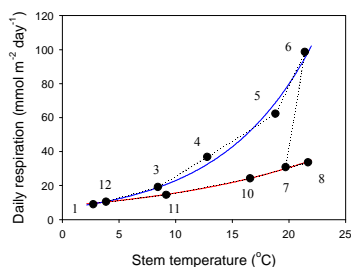


図1-2-4-3 1日あたりの呼吸速度と日平均幹温度の関係. 最大個体, 地上高6mの例. 図中の数字は2001年の月を表す. 図中の曲線は, 上が1~6月, 下が7~12月の値に(1)式をあてはめたもの。

1日あたりの呼吸速度と日平均幹温度の関係を見ると (図1-2-4-3), 同じ温度でも春の方が秋よりも呼吸速度が高かった。しかし前半 (1月から6月) と後半 (7月から12月) とに分けると, それぞれ(1)式がよくあてはまった。そこで, 測定部位34ヶ所それぞれについて, 前半と後半の R_0 と Q_{10} を求め, 2001年の日平均気温を用いて年間の呼吸量 ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) を推定した。

(ウ)呼吸速度の垂直分布

単位幹表面積あたりで表現した1日あたりの呼吸速度 ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は, 地上高によって異なり, 季節を通じて幹の上部ほど高い傾向を示した (図1-2-4-2(a))。特に5, 6月には樹冠内の幹で呼吸速度が高く, 樹冠より下の幹との差が大きかった。また, その差は被圧木より優占木で大きかった。単位幹表面積あたりの年間呼吸量も, 樹冠内の幹では上部ほど高かったが, 樹冠より下の幹ではそれほど差がないことがわかった (図1-2-4-4(a))。この年間呼吸量の垂直分布パターンは, 幹の直径成長量の垂直分布パターンとよく対応した (図1-2-4-4(b))。

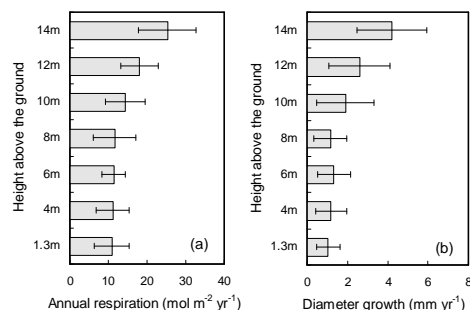


図1-2-4-4 年間呼吸量(a)と年間直径成長量(b)の垂直分布. 高さごとにサンプル木5本を平均したもの. エラーバーは標準偏差。

(エ)林分あたりの年間幹呼吸量の推定

個体あたりの幹の年間呼吸量 ($\text{mol CO}_2 \text{ tree}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) と個体の幹重の関係は, べき乗式で近似できた ($R^2=0.96$) (図1-2-4-5)。この関係式と林分の幹現存量のデータから, 2001年における林分あたり (土地面積あたり) の年間呼吸量を推定した。その結果, 50年生のヒノキ人工林におけるヒノキ成木幹の年間呼吸量は, $15.5 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ($682 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) と推定された。

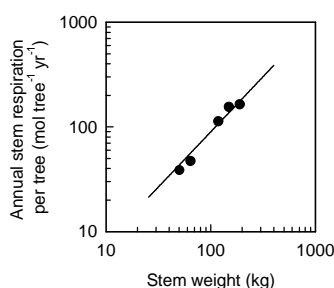


図1-2-4-5 個体あたりの年間幹呼吸量と個体幹重の関係。

エ 考察

(ア)呼吸速度の温度依存性

一般に、幹呼吸における温度係数 Q_{10} は2.0前後といわれている。今回ヒノキの幹について得られた Q_{10} の値は、枝葉も含めたヒノキ地上部の値(1.5~3.2) (Paembonan *et al.* 1991) や、他の針葉樹や広葉樹についての既往の報告(例えば, Ryan 1990 ; Damesin *et al.* 2002) の範囲内であった。 Q_{10} が季節によって変化しないという報告 (Damesin *et al.* 2002) もあるが、 Q_{10} が変動するという報告(例えば, Lavigne 1996) も見られる。本研究では、 Q_{10} は季節で変動し冬に大きく夏に小さい傾向をもち、Paembonan *et al.* (1991) と同様に気温との間に強い負の相関が認められた。このことは、地球温暖化などによって温度環境が変化すると、呼吸速度が変化するだけでなく、呼吸速度の温度依存性も変化することを示唆している。

(イ)成長呼吸と維持呼吸

植物体の呼吸は、成長量と関係が深い成長呼吸と、植物体の維持にともなう維持呼吸に分けて考えることができ (Sprugel 1990) , 総呼吸量 Rt は次式で表現される (Heskesh *et al.* 1971 ; Amthor 1989)。

$$\frac{Rt}{w} = g \cdot \frac{1}{w} \frac{dw}{dt} + m \quad \cdots (2)$$

g , m はそれぞれ成長呼吸係数, 維持呼吸係数, w は生物量である。そこで2m丸太(方法参照)を単位とし、年間相対成長率($1/w \cdot dw/dt$: RGR)に対して単位幹重あたりの年間呼吸量(Rt/w)をプロットすると、両者の関係は有意な直線で回帰できた(図1-2-4-6)。成長呼吸係数 g (直線の傾き)は41 mol CO₂ kg⁻¹, 維持呼吸係数 m (直線の切片)

は0.32 mol CO₂ kg⁻¹であった。8年生のヒノキ個体の地上部呼吸量について、同様の解析を行った Adu-Bredu *et al.* (1997) の結果($g = 39$ mol CO₂ kg⁻¹, $m = 5.2$ mol CO₂ kg⁻¹) と比較すると、成長呼吸係数は同程度であったが、維持呼吸係数は小さかった。このことは、林齢によらず単位重さの材を生産するのに必要なコスト(成長呼吸)は変わらないが、単位重さの材を維持するのに必要なコスト(維持呼吸)が林齢によって異なることを示唆している。50年生の林分で維持呼吸係数が小さかったのは、個体の成長にともない幹の内部に枯死部が蓄積していくためだと考えられる。

2m丸太あたりの年間呼吸量を成長呼吸と維持呼吸に分離すると、幹の上部ほど成長呼吸が占める割合が大きく、幹の下部ほど維持呼吸の割合が大きかった。しかし、その割合は優占木と被圧木で大きく異なり、最大個体では成長呼吸が63%を占めたのに対し、最小個体では維持呼吸が82%を占めた。5個体分の年間総呼吸量では、成長呼吸が48%, 維持呼吸が52%であった。

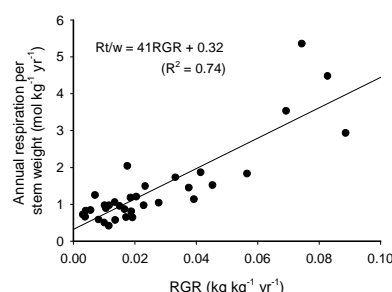


図1-2-4-6 単位幹重あたりの年間呼吸量と年間相対成長率の関係。図中の直線は(2)式による。

(ウ)呼吸速度の季節変化と垂直分布

維持呼吸は温度に依存した季節変化を示し、成長呼吸は成長速度に依存した季節変化を示す。よって、呼吸速度の季節変化に見られたパターンは、維持呼吸と成長呼吸が複合したものであり、全体的な傾向は維持呼吸によって決定されるが、春の急激な増加と6月のピークは成長呼吸によって特徴づけられていた。1日あたりの呼吸速度と日平均幹温度との関係(図1-2-4-3)が2相に分かれたのは、後半の曲線が主に維持呼吸を表現しているのに対し、前半(主に成長期)の曲線は成長呼吸も含んでいるためと考えられた。

幹の中で維持呼吸活性の高い部分は辺材だといわれている (Ryan 1990)。ヒノキの辺材量は幹の下部ほど多いが、幹表面積あたりの辺材量 (辺材の厚さ) は、高さによってそれほど変わらない (荒木 *et al.* 2003)。一方、幹表面積あたりの成長量 (直径成長量) は幹の上部ほど大きかった。よって、表面積あたりの年間呼吸量の垂直分布パターン (図1-2-4-4) は、維持呼吸よりも成長呼吸によって強く影響を受けていると考えられた。

(エ) 成長量と呼吸量の配分比

2m丸太について、年間の成長量 Δw と年間の呼吸量 R_t を炭素量に換算し、配分された炭素量 $P (= \Delta w + R_t)$ に対して呼吸量が占める割合、 R_t/P 比について検討した。2m丸太34本の R_t/P 比の平均は0.55であった。相対成長率RGRが非常に小さい丸太では、 R_t/P 比が0.80程度であったが、RGRの増加にともない急激に減少し、0.45前後でほぼ一定となった。被圧木など配分される炭素量 P が少ない丸太や、幹量が大きい丸太では、維持呼吸による消費が相対的に多くなる (成長に配分される炭素量が減る) ため、RGRは小さく、 R_t/P 比が大きくなると考えられた。一方、維持呼吸をまかなう以上に十分な炭素量が配分されると、成長量が増加して R_t/P 比が減少していくが、成長量に比例して成長呼吸も増加するため、 R_t/P 比が一定に近づくと考えられた。林分あたりの R_t/P 比は0.55であった。よって、幹に配分された炭素のうち、45%が幹の成長に使われ、55%が呼吸で消費されたと示唆された。

オ 今後の課題

ヒノキ人工林の枝部の呼吸特性については、今後の課題に残された。

カ 要約

50年生のヒノキ成木幹の呼吸速度の日変化を、7つの高さで定期的に測定した。呼吸速度は幹温度と指数関数の関係を示し、 Q_{10} は1.9前後であった。呼吸速度は、冬に低く、春に増加し6月に最大となり、秋から冬にかけて減少した。呼吸速度は幹の上部ほど高く、特に樹冠内の幹で高か

った。この垂直分布パターンは、幹の直径成長量の垂直分布とよく対応していた。個体あたりの年間幹呼吸量は幹の重さとべき乗の関係にあり、林分あたりのヒノキ幹の年間呼吸量は、 $15.5 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と推定された。

引用文献

- AMTHOR J. S. (1989) Respiration and crop productivity. Springer-Verlag, New York.
- ADU-BRED S., Yokota T. & Hagihara A. (1997) Long-term respiratory cost of maintenance and growth of Field-grown young hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*). Annals of Botany 80: 753-758.
- 荒木眞岳・千葉幸弘・宇都木玄 (2003) ヒノキ樹幹における辺材面積の推定および辺材面積と葉面積の関係. 日林関東支論 54: 109-110.
- DAMESIN C., CESCHIA E., FOFF N. L., OTTORINI J. -M. & DUFRENE E. (2002) Stem and branch respiration of beech: from tree measurements to estimations at the stand level. New Phytologist 153: 159-172.
- HESKESH J. D., BAKER D. N. & DUNCAN W. G. (1971) Simulation of growth and yield in cotton: respiration and the carbon balance. Crop Science 11: 394-398.
- LAVIGNE M. B. (1996) Comparing stem respiration and growth of jack pine provenances from northern and southern locations. Tree Physiology 16: 847-852.
- PAEMBONAN S. A., Hagihara A. & HOZUMI K. (1991) Long-term measurement of CO₂ release from the aboveground parts of a hinoki forest tree in relation to air temperature. Tree Physiology 8: 399-405.
- RYAN M. G. (1990) Growth and maintenance respiration in stems of *Pinus contorta* and *Picea engelmannii*. Canadian Journal of Forest Research 20: 48-57.
- SPRUGEL D. G. (1990) Components of woody-tissue respiration in young *Abies amabilis* (Dougl.) Forbes trees. Trees 4: 88-98.
- (森林総合研究所 植物生態研究領域 荒木眞岳)

(5) 照葉樹の光合成生産に及ぼす環境要因の解明

ア 目的

照葉樹林の光合成生産に及ぼす環境要因と葉の適応機能を明らかにし、林分スケールの総光合成生産量、葉の暗呼吸量の推定を目的とする。

イ 研究方法

50年生コジイ林のある高さにおける葉面積（構造パラメータ）、その高さにある葉の光合成能力（機能パラメータ）および光強度（環境パラメータ）からその高さにおける林分光合成速度を求め、林冠頂部から林床までを積算することによって林分全体の光合成速度を推定した。そしてモニタリングした環境データから年間林分総光合成量を計算した。

構造パラメータについては15mx20mの区画内の全個体（樹高1.3m以上）の樹高、胸高直径を測定し各個体の葉の垂直分布パターンと個体全葉量（只木 1995）から林分スケールの葉の垂直分布を推定した。

機能パラメータについては式(1)で表される光-光合成曲線をベースとした。式(1)の初期勾配 j 、光飽和光合成速度 u および曲率 v と環境要因との関係を調べ、環境要因によって j 、 u および v を変化させた。

$$p = (j \cdot i + u - ((j \cdot i + u)^2 - 4 \cdot v \cdot j \cdot i)^{0.5}) / (2 \cdot v) \quad (1)$$

(p : 総光合成速度、 i : 光強度、 p 、 i 、 u の単位は $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

林分光合成量推定モデルでは環境要因によって光飽和光合成速度 u が $1/\alpha$ 倍になった場合、初期勾配 j も $1/\alpha$ 倍した光-光合成曲線を使用した。

環境パラメータについてはある高さの葉が受ける光強度の平均値 i を式(2)で表した (Saeki 1960)。

$$i = k \cdot i_0 / (1 - m) \cdot \text{Exp}(-k \cdot f) \quad (2)$$

(k : 吸光係数、 i_0 : 林冠上の光強度、 m (=0.022): 葉の光透過率、 f : その高さまでの積算葉面積指数)

また、林齢の異なる林分で2001年と2002年に毎木調査を行い地上部への炭素固定量の林齢による

違いも比較した。

50年生林分においては優占木の伐採を想定し、林分光合成量推定モデルを用い、樹高10m以上の個体の3本に1本を除いた場合の林分総光合成量、暗呼吸量および純光合成量をシミュレーションした。その際、機能パラメータは伐採しない場合と同一条件とした。

ウ 結果

(ア) 構造パラメータ

林分内の各個体の総葉面積および葉の垂直分布パターンから林分スケールの葉の垂直分布を推定した結果、林分の葉の垂直分布はふた山型を示し、林分高の $x\%$ における葉面積指数 $g(\text{m}^2 \text{m}^{-2})$ は式(3)で表された (図1-2-5-1)。

$$g = L/2 \left((b/a) \left(((100-x)/a)^{(b-1)} \right) \text{Exp}(-(((100-x)/a)^b)) + (d/c) \left(((100-x)/c)^{(d-1)} \right) \text{Exp}(-(((100-x)/c)^d)) \right) \quad (3)$$

(L (=8.29 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$): 林分葉面積指数、 a =33.3、 b =2.41、 c =76.3、 d =4.19)

林内の異なる4つの高さで測定した相対光強度と式(3)を積分して得られる積算葉面積指数から各高さにおける吸光係数 k を求めると、 k は高さ(x :%)によって変化し式(4)で表された (図1-2-5-2)。

$$k = -0.00158x + 0.459 \quad (4)$$

(イ) 機能パラメータ

光-光合成曲線で相対高 x (%)に着いている個葉の光飽和光合成速度 u' 、曲率 v は式(5)、(6)で表された (図1-2-5-3)。

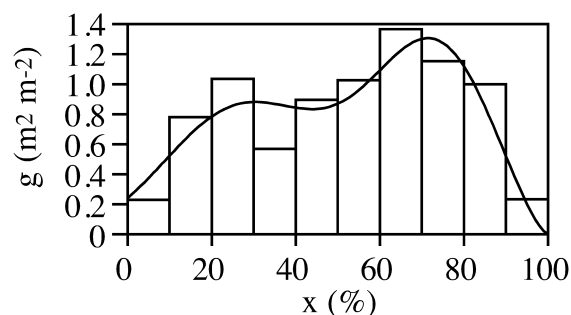


図1-2-5-1 林分内の葉の垂直分布

$$u' = 5.97 \text{Exp}(0.0123x) \quad (5)$$

$$v=0.727\text{Exp}(-0.00682x) \quad (6)$$

光-光合成曲線の初期勾配 j' は着葉高によらず一定($j'=0.04849$)であった。大気の水蒸気圧と実際の水蒸気圧の差 $w(\text{kPa})$ をとると、光飽和光合成速度 u は w の増加とともに低下し

(図1-2-5-4)，式(1)における初期勾配 j 、光飽和光合成速度 u を式(7)、(8)で表した。これら式(7)、(8)により本研究の林分総光合成量推定モデルにおいて日中の光合成速度低下現象を表現した。

$$j=j'\text{Exp}(-0.118w) \quad (7)$$

$$u=u'\text{Exp}(-0.118w) \quad (8)$$

相対高 $x(\%)$ に着いている個葉の暗呼吸速度 t は式(9)で表された(図1-2-5-5 左図)。

$$t=t'(0.267\text{Exp}(0.0132x)) \quad (9)$$

式(9)において気温 $T_a(^{\circ}\text{C})$ 時の葉の暗呼吸速度 t' は式(10)で表された(図1-2-5-5 右図)。

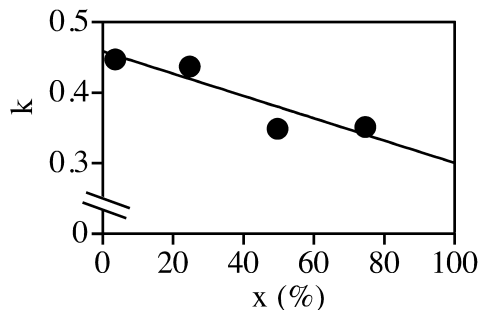


図1-2-5-2 吸光係数 k の高さによる違い

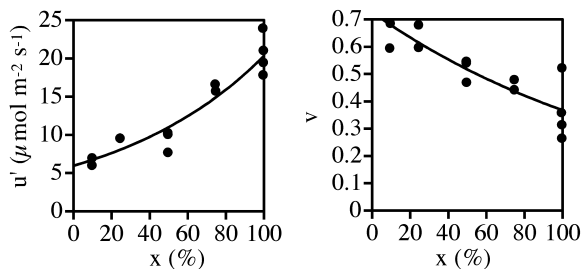


図1-2-5-3 光飽和光合成速度 u' 、曲率 v の着葉高による違い

$$t'=0.214\text{Exp}(0.0608T_a) \quad (10)$$

個葉の光飽和光合成速度 u 、暗呼吸速度 t は8月をピークとする季節変化を示した(図1-2-5-6)。

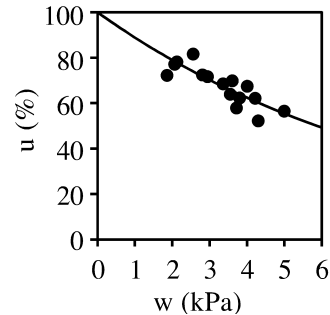


図1-2-5-4 光飽和光合成速度 u と大気水分欠差 w との関係

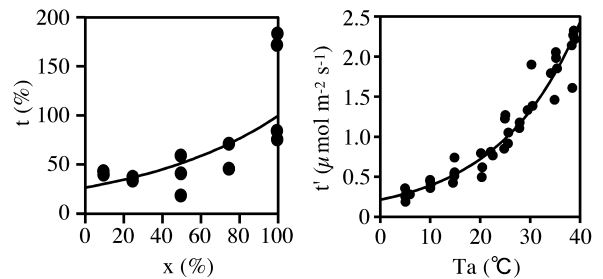


図1-2-5-5 暗呼吸速度の着葉高による違い(左図)と温度依存(右図)

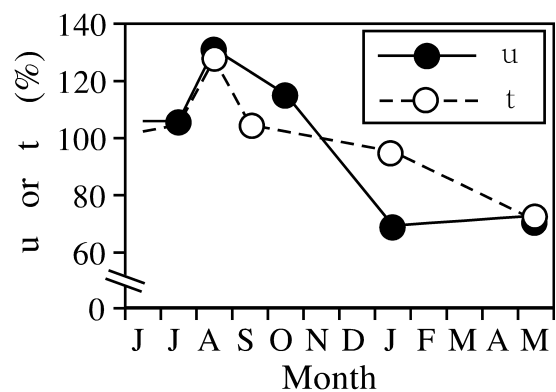


図1-2-5-6 光飽和光合成速度 u 、暗呼吸速度 t の季節変化。光-光合成曲線の測定を行った11月を100%とした割合で表す。

(ウ) 林分光合成生産量

以上の結果とモニタリングした環境データ(i_o 、

w) から林分の年総光合成生産量は $2.74 \text{ C kg Land m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 、そのうち葉の年暗呼吸量は $1.21 \text{ C kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ と推定された。林分材積増加分として地上部に固定された量は $0.50 \text{ C kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ であった。10年生、14年生林分の地上部固定量はそれぞれ $0.79 \text{ C kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 、 $0.80 \text{ C kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ となり50年生林分の約1.6倍であった（図1-2-5-7）。

(エ) 伐採シミュレーション

50年生林分の伐採（シミュレーション）の有無による一日の総光合成量、暗呼吸量および純光合成量の垂直分布の違いを、よく晴れた2001年7月3日を例に示した（図1-2-5-8）。総光合成量は林分高の60%以上の高さで伐採ありが伐採なしに比べ小さく、林分高の20%付近では逆に大きかった。暗呼吸量はいずれの高さも伐採ありの場合が小さく、特に林分高の60%以上の高さでその差が著しかった。純光合成量は林分高の70%以上の階層で伐採ありが伐採なしに比べ小さく、70%未満の階層で伐採ありが大きかった（図1-2-5-8）。

モニタリングした環境データ（ i_o , w ）から伐採ありの場合の年間総光合成量、暗呼吸量および純光合成量を推定すると、伐採なしの場合の推定量の、それぞれ91%、54%および121%であった。

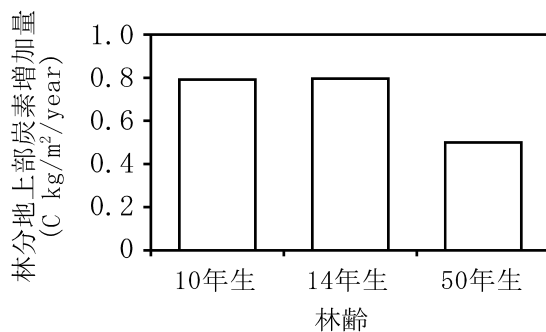


図1-2-5-7 林齢による林分地上部炭素増加量の違い

エ 考察

50年生のコジイ林は10年生前後の若齢林に比べ炭素固定能力の低下がみられるが、上層木を適度に伐採してやることにより炭素固定能力を上げることが可能であることを本研究は示唆した。スギ

人工林では放出される CO_2 フラックスが間伐後一時的に上昇し、間伐がない場合のレベルに回復するまで数年かかるというシミュレーション結果が報告されている（Chi ba 1998）が、本研究では伐採直後においても同じ環境条件下（ i_o , w ）では純光合成量が増加することを示した。本研究のシミュレーションでは機能パラメータを変化させなかったが、伐採により下層の光環境が改善され下層の葉の明るい環境への適応化（Uemura *et al.* 2000）が進めば純光合成量の更なる増加も期待できる。伐採直後でも純光合成量が増加した理由のひとつは豊富な下層木の存在と考えられる。本研究の50年生コジイ林の葉の垂直分布はふた山型を示し、下層にも多くの葉が存在した（図1-2-5-1）。上層木の伐採により暗呼吸速度の大きい上層の葉（図1-2-5-5、右図）が減ったことと（図1-2-5-8、Rd）、そのためにより多くの光が下層まで到達するようになり下層の総光合成量が大きくなったこと（図1-2-5-8、Pg）が、純光合成量を増加させた主要因であった。

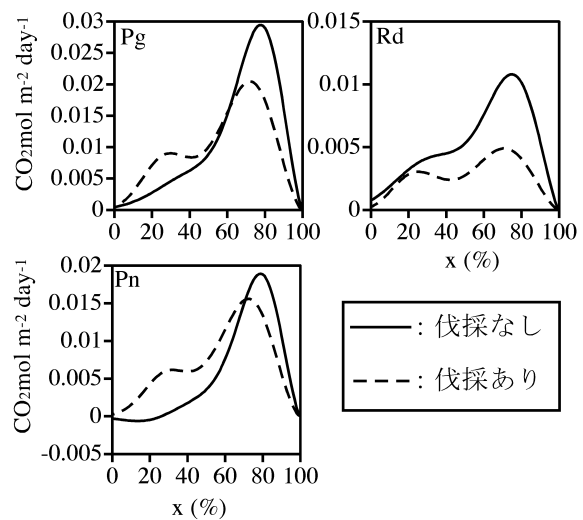


図1-2-5-8 伐採の有無による総光合成量Pg、暗呼吸量Rd、純光合成量Pnの垂直分布の差

本研究で示したような二次林や天然の照葉樹林ではL字型のサイズ構造をもち（Tanouchi & Yamamoto 1995）、下層にも豊富に葉が存在している。そのため下層木の少ない人工林と異なり照葉樹の天然林や二次林では、適度に上層の老齢木を伐採してやれば、下層の生産力改善により伐採直

後においても炭素固定能力の増加が期待できる。

オ 今後の課題

機能パラメータなどの樹種による違いを反映させ、複数の樹種が混在する林分へも適応可能なモデルへ拡張することが今後の課題である。

カ 要約

50年生コジイ林を対象に林分光合成生産に影響を及ぼす要因をパラメータ化し、林分光合成量を推定した。林分の葉の垂直分布はふた山形を示し、積算葉面積と光強度の実測値から求めた吸光係数は林内の高さの増加とともに減少した。葉の光合成機能は着葉高によって異なり、着葉高の増加とともに光飽和光合成速度は増加し曲率は減少したが、初期勾配は一定であった。また、光飽和光合成速度は大気水分欠差の増加とともに減少した。葉の暗呼吸速度は着葉高や気温の増加とともに増加した。光飽和光合成速度、暗呼吸速度とも開葉後増加し8月をピークに以降漸減する季節変化を示した。以上の結果とモニタリングした環境データから林分の総光合成生産量は $2.74 \text{ C kg Land m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 、そのうち葉の暗呼吸量は $1.21 \text{ C kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ と推定された。林分材積増加分として地上部に固定された量は $0.50 \text{ C kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ であり、10年生、14年生林分（それぞれ 0.79 、 $0.80 \text{ C kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ）に比べ炭素固定能力の低下がみられた。シミュレーションの結果、50年生コジイ林でも上層木を適度に伐採してやることにより炭素固定能力の改善が可能であることを示唆した。

引用文献

- CHIBA Y. (1998) Simulation of CO_2 budget and ecological implications of sugi (*Cryptomeria japonica*) man-made forests in Japan. Ecological modelling 111:269-281.
- SAEKI T. (1960) Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. Botanical Magazine of Tokyo 73:55-63.
- 只木良也 (1995) 立木密度の違うコジイ幼齢林の構造と物質生産. 名古屋大学演習林研究報告 14:1-24.

TANOUCHI H. & YAMAMOTO S. (1995) Structure and regeneration of canopy species in an old-growth evergreen broad-leaved forest in Aya district, southwestern Japan. Vegetatio 117:51-60.

UEMURA A., ISHIDA A., NAKANO T., TERASHIMA I., TANABE H. & MATSUMOTO Y. (2000) Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances. Tree Physiology 20:945-951.

(森林総合研究所 九州支所 齊藤哲、佐藤保、小南陽亮、永松大、森林総合研究所 四国支所 倉本恵生、酒井武)

3. 森林土壌における有機物の蓄積過程及び土壌呼吸特性の解明

(1) A0 層から供給される有機物の蓄積過程の解明

ア 目的

Ao 層の分解にともなって生成する溶存態有機炭素(DOC)や粒子状有機炭素(POC)は、無機土壌に吸着されて安定な有機無機複合体を形成する。このため、Ao 層からの DOC, POC の生成およびそれらの無機土壌への吸着は、森林土壌における炭素蓄積の初期過程を解明する上で重要である。本研究では、Ao 層から DOC および POC 生成量を明らかにするとともに、それらの無機土壌に対する吸着特性を明らかにすることを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 野外における DOC, POC 生成量の測定

A0 層の堆積様式および樹種の異なる 7 地点において、A0 層直下にプラスチック製テンションフリースイメータを設置して A0 層通過水を採取した(表 1-3-1-1)。ライシメータは各地点とも DOC, POC 用をそれぞれ 3 個設置した。DOC 用のライシメータは粒子状物質が流入しないようにガラスウール及びガラス繊維ろ紙を流路に備えた。DOC は燃焼-赤外吸収法(Simadzu TOC-5000)で定量した。POC は乾燥後、NC アナライザー(Sumigraph NC-900)で定量した。調査期間は積雪期を除く 1999-2001 年の 3 年間である。POC は篩別および遠心分離によって、 $>200\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}-20\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ の 3 画分に分けた。

表 1-3-1-1 DOC, POC の採取地の概要

サイト名 (府県名)	A0 層堆積様式 (Oi, Oe, Oa の厚さ cm)	主な樹種	標高 (m)
大弛(山梨)	Mor(4,3,4)	シラベ	2000
高知(高知)	Mull(4,1,0)	スギ	730
丹後(京都)	Mor(3,5,2)	ブナ	670
芦生3(京都)	Moder(5,4,0)	ブナ	650
大文字(京都)	Mull(3,1,0)	コナラ	210

(イ) DOC および CO₂ 発生試験

A0 層(Oi, Oe1, Oe2, Oe3)を培養して、定期的に脱イオン水で抽出して DOC 生成量を測定するとともに、培養中の CO₂ 発生量をアルカリ吸収法で測定した。培

養温度および抽出間隔はそれぞれ3水準で行った(15, 25, 30℃、3.5、10、28 日)。

(ウ) DOC 吸着・脱着試験

日本と熱帯地域の森林土壌6地点(30 層位)に、DOC 濃度の異なる溶液を加えて、DOC の吸着実験を行った。次式から a(吸着効率)を求め、土壌特性値との関係を重回帰分析で解析した。

$$(\text{DOC 吸着量}) = a \times (\text{DOC 投入量}) + b$$

土壌に脱イオン水を加えて土壌からの DOC の脱着量を調べて、吸着の場合と同様に脱着効率を求めた。

ウ 結果

(ア) 野外における DOC, POC 生成量の測定

DOC 発生量(150 日換算)は針葉樹では 11~29 gCm⁻²、落葉広葉樹は 9-21gCm⁻²であり、針葉樹の発生量が全般に高かった(図 1-3-1-1、図 1-3-1-2)。堆積様式で比較すると、針葉樹、落葉広葉樹ともモル型>モダー型=ムル型であった。

POC の発生量は DOC の3割程度と少ない上に、ばらつきも大きかった。POM のサイズごとの存在比(重量ベース)は 200 μm 以上 9%、200-20 μm 68%、20 μm 以下のものが 23%で、サイズの大きいもののほど炭素含有率と CN 比が高かった(表 1-3-1-2)。

表 1-3-1-2 POC の各サイズ画分の炭素含量と CN 比

Size	$>200\mu\text{m}$	$200-20\mu\text{m}$	$<20\mu\text{m}$
C(%) *	40.5 ± 8.4 (39)	27.2 ± 9.2 (45)	21.3 ± 12.9 (24)
C:N ratio *	19.2 ± 9.9 (37)	13.2 ± 3.2 (40)	10.8 ± 5.3 (22)

* mean ± S.D. (n)

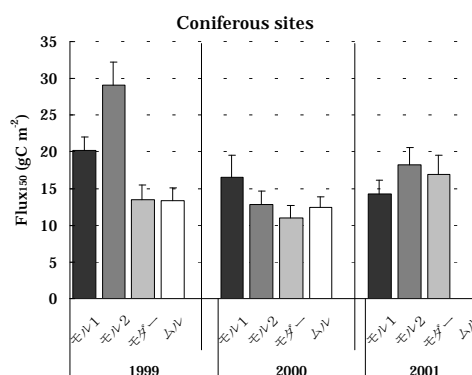


図 1-3-1-1 針葉樹の A0 層からの DOC 発生量

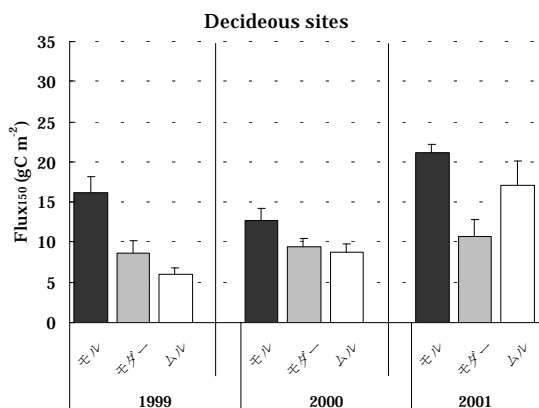


図 1-3-1-2 落葉広葉樹の A0 層からの DOC 発生量

(イ) DOC および CO₂ 発生

培養温度が異なる場合、A0 層から生成する DOC 生成量は各層位とも 15℃ < 25℃ < 30℃ の順に多いことが明らかになった(図 1-3-1-3)。また抽出間隔が異なる場合、抽出間隔が短い場合ほど同一期間の DOC 生成量が多いが、1回の抽出操作で抽出される DOC 量は抽出間隔にかかわらずほぼ一定であることが明らかになった。温度や培養時間による生成量の増加は微生物の分解によるもの(Gbio)と仮定した。一方、抽出回数に依存する DOC 生成は非生物的抽出過程による生成(Gabio)と仮定した。以上の仮定に基づき解析を行った。

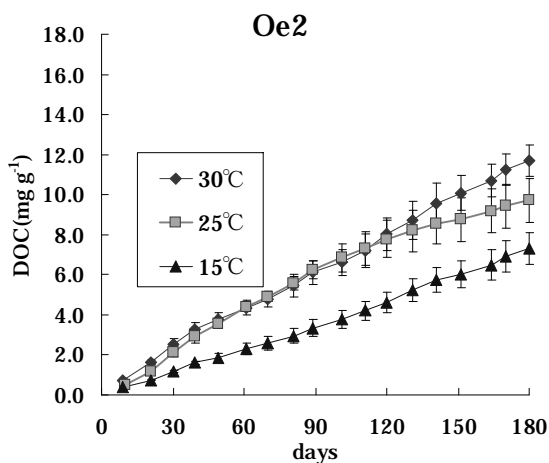


図 1-3-1-2 培養温度による DOC 生成量の違い

Oi 層(L層)では培養初期(80日まで)に Gbio の生成は起きず Gabio のみが生成され、後期になって Gbio の生成も加わった。それに対して、Oe1、Oe2、Oe3 層(F1、F2、F3 層)では、培養当初から Gbio と

Gabio の両方が発生した。Gbio の DOC 総発生量($G_{gross} = G_{bio} + G_{abio}$)に占める割合は、Oe 層において最も高かった(図 1-3-1-4)。

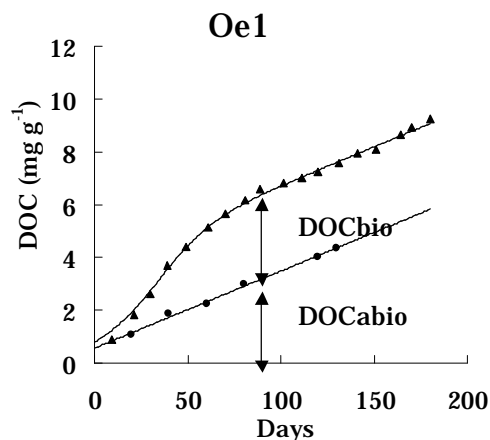
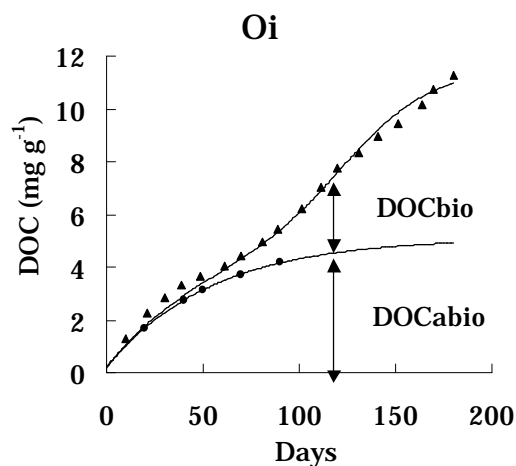


図 1-3-1-4 培養期間における Oi 層および Oe1 層における Gbio と Gabio の変化

Gbio の発生はロジスティック式でほぼ近似されたので、15℃および 25℃の発生量に基づいてアレニウス則による解析を行って、Gbio の発生予測式を作成した。Gabio は抽出間隔の異なる処理区間の DOC 生成量を比較して、抽出回数に対する Gabio 発生量の関係から、Gabio の発生予測式を作成した。以上の予測式を用いて、京都府内のブナ林における Ggross を推定して実測値と比較した結果、両者はほぼ一致した(図 1-3-1-5)。しかし京都府内の他の落葉広葉樹林の場合は実測値に比べて予測値が過大となった。

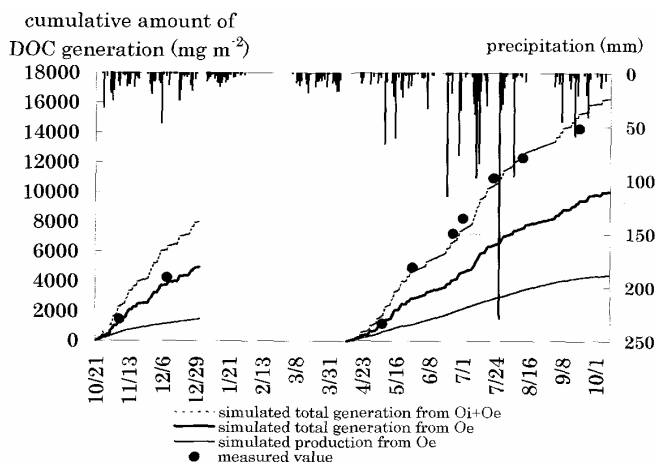


図 1-3-1-5 DOC 発生量の予測値と実測値の比較

(ウ) DOC 吸着・脱着試験

加えた DOC 量と吸着量との間には直線関係が認められた(図 1-3-1-6)。吸着効率は有機物含量の高い土壌で低く、表層土は下層土に比べて高かった。

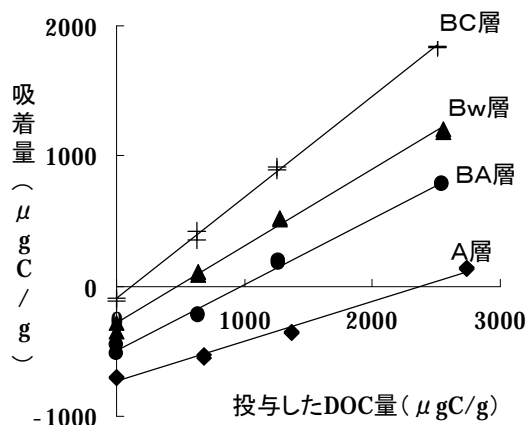


図 1-3-1-6 DOC の投与量と吸着量の関係

吸着効率と脱着効率には負の相関関係が認められた(図 1-3-1-7)。日本の土壌は有機物含量が高いにもかかわらず、熱帯の土壌に比べて吸着効率が低いことが明らかになった。DOC 吸着特性に係わる土壌特性値を主成分分析した結果、①非晶質 Al・Fe 含量、②炭素含量、③pH、④結晶質 Fe、⑤正電荷量の順に吸着にかかわる寄与が大きいことが判明した。

エ 考察

(ア) 野外観測と室内実験による DOC 生成量の比較
A0 層からの DOC 生成に関して、欧米諸国を中心に

野外における観測と室内実験による発生試験が行われてきた(Kalbitz et al, 2000)。それらの研究の多くは有機物の組成や性質の解明を目的としており、発生量を定量的に解釈しようとする試みはなされていない。本研究では、DOC 発生過程が生物過程(Gbio)と非生物過程(Gabio)に区別されることを明らかにした上で、それぞれの発生量の予測式を開発し、DOC 生成量を予測した。京都府内のブナ林においては予測値と実測値がよく一致したが、京都府内の落葉広葉樹林では予測値が実測値より大きかった。この理由として実験室と野外における水分状態の違いが考えられる。室内の培養実験では試料は常に湿った状態にあるが、野外ではかなり乾燥する場合もあるので、乾燥によって DOC 生成量が少なかった可能性がある。

欧米の森林土壌における DOC 吸着に関する研究から、DOC 吸着が pH に依存し特に低 pH における吸着が強いこと、土壌の表面特性に関係すること、B 層における吸着が大きいこと、酸化鉄の DOC 除去能力が高いことなどが明らかにされている(Herbert and Bertsch 1995)。今回の結果から、我が国の森林土壌の場合も DOC 吸着に係わる要因は欧米の森林と同じであると考えられる。我が国の土壌は有機物含量が高いにもかかわらず、DOC 吸着効率が高かった。その理由として非晶質 Al・Fe 含量が高いことや pH が低いことが関係していると推察される。ただし、今回用いた吸着効率は、土壌固層への DOC 吸着の潜在能力を示すもので、土壌の DOC 吸着容量を示すものでない。森林土壌にさらにどの程度の炭素が蓄積されるかを評価するためには、土壌の DOC 吸着容量を調べる必要がある。

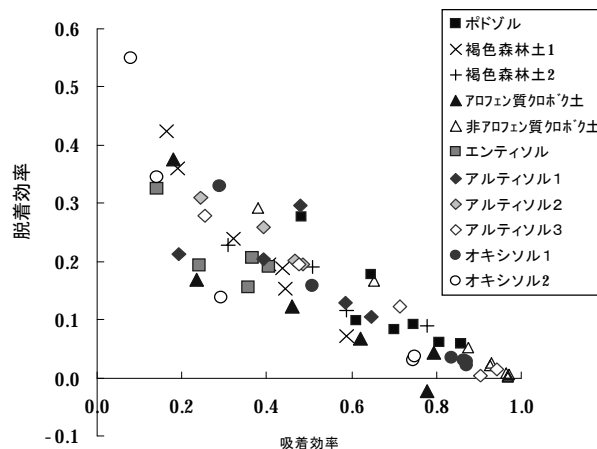


図 1-3-1-7 吸着量と脱着量の関係

オ 今後の課題

本研究ではA0層からのDOCの発生および土壌固層へのDOCの吸着のメカニズムはほぼ概要を明らかにすることができた。POCはDOCの3割程度の生成することが明らかになったが、土壌中における動態は未解明のままである。今後は研究方法を含めてさらに研究する必要がある。

カ 要約

A0層からの溶存態有機炭素(DOC)の発生量は、針葉樹、落葉広葉樹ともモル型>モダー型=ムル型に発生量が多いことが明らかになった。粒子状有機炭素(POC)の発生量はDOCの3割程度であり、粒径の大きいものほど炭素含量が高いことが判明した。A0層からのDOCの発生過程は生物分解過程と非生物分解過程に区分され、それぞれの過程に対して予測式を開発し、野外におけるDOC発生量の推定を行った。DOC吸着特性に係わる寄与率は①非晶質Al・Fe含量、②炭素含量、③pH、④結晶質Fe、⑤正電荷量の順に大きいことが判明した。

引用文献

- Kalbitz K., Solinger S., Park J. H., Michalzik B. and Matzner E. (2000) Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science* 165: 277-304.
- Herbert and Bertsch (1995) Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: A review. *In* McFee WW and Kelly JM (ed.) *Carbon forms and functions in forest soils*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin USA, p. 63-88

(森林総合研究所 関西支所 金子真司、南部桂)

(2) 森林土壌における難分解性有機物の長期的な蓄積過程の解明

ア 目的

森林土壌中に存在する膨大な量の炭素の中で、その貯留という観点からは難分解性有機物中の炭素が重要な役割を果たしているといえる。そうした難分解性有機物が土壌中においてどのような形で存在し、どのように変化しているかを明らかにするために、土壌断面中の炭素量を層位ごとに求めて炭素蓄積速度の変化を把握するとともに、分画した試料の年代を求めてどの画分が古い値を示すかについて検討した。

イ 研究方法

(ア) 炭素蓄積速度とその変化

東北地方各地の火山噴出物を母材とする土壌を対象に、土壌中に挟まれている噴出年代既知の火山灰や測定した¹⁴Cの年代値を時間指標として用い、一定期間に堆積した土壌中の炭素量を明らかにした。また、その値をもとにして、一定期間あたりの炭素蓄積速度を求めた。こうした値は、温度条件や水分条件等の立地環境によって大きく異なることが予想されるため、さまざまな環境条件下の土壌を対象として調査を行った。

(イ) 土壌の分画と各画分の年代

土壌の分画法を検討した結果、粒径による分画法を採用した。これは、土壌中において腐植物質はとくに粘土と複合体を形成して安定するとされていることから、粒径による分画は分解性の難易を指標すると考えられること、また、物理的操作だけによる分画によれば、分画後の試料の年代測定値に影響しないこと、などの理由による。

試料は超音波処理(300w, 30min)によって溶液中で土壌粒子を分散させた後、沈降法により、粘土(~2 μm)、シルト(2~20 μm)、砂(20 μm~)の各画分に分けた。それぞれの画分について、依頼分析によりAMS法による¹⁴C年代の測定を行った。

ウ 結果と考察

(ア) 炭素蓄積速度とその変化

年代既知の火山灰を利用して炭素蓄積速度を求めた一例として、岩手山東麓に位置する岩手県玉山村

好摩のコナラ林における調査結果を示した(図 1-3-2-1)。

この土壌断面では、深さ2mに及ぶきわめて厚い黒色のA層が発達しており、断面中に二つのテフラ層が挟まれていた。土壌断面における深さ別の乾燥密度と炭素含有率の変化を見ると、スコリアを含む層付近では明らかに密度が大きく炭素含有率が小さかった。また、**Melanic Index** および $\Delta \log K$ 値から、最表層(0-10cm)と最下層(220-240cm)だけがB型腐植酸で、あとはすべてA型の腐植酸であることが明らかとなり、この断面付近では比較的最近まで草原植生が長く続いていたことがわかった。

好摩土壌断面中に挟まれていたテフラ層の年代は、刈屋スコリアが **AD1686** 年であり、生出スコリアについてはテフラ直下の腐植の年代がいくつか測定されているが(土井ほか 1986)、ここでは平均的な値として仮に **3500yBP** とした。また、A層下部の170~180cmの ^{14}C 年代を求めた結果、**7920 \pm 70yBP**であった。これらの値をもとに各層位間における炭素蓄積速度を求めた結果、下部より順に、A層下部より生出スコリアまでが **0.080 t C ha $^{-1}$ yr $^{-1}$** 、生出スコリアから刈屋スコリアまでが **0.101 t C ha $^{-1}$ yr $^{-1}$** 、刈屋スコリアから表層までが **0.333 t C ha $^{-1}$ yr $^{-1}$** 、という値が得られた(図 1-3-2-2)。

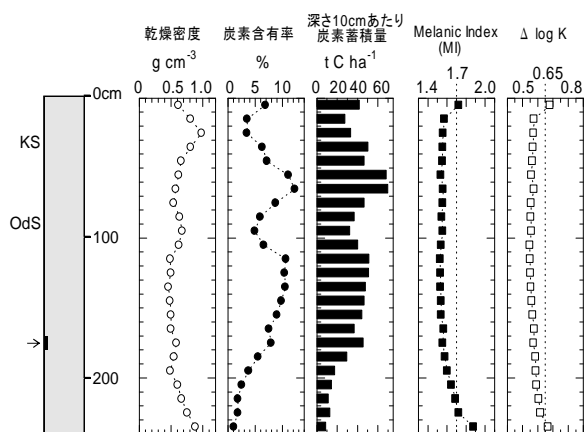


図 1-3-2-1 好摩コナラ林の黒色土断面における乾燥密度、炭素含有率、炭素蓄積量、MI、 $\Delta \log K$ の変化
KS: 刈屋スコリア, OdS: 生出スコリア, 矢印: ^{14}C 年代測定位置。年代値は図 1-3-2-2 に示す。

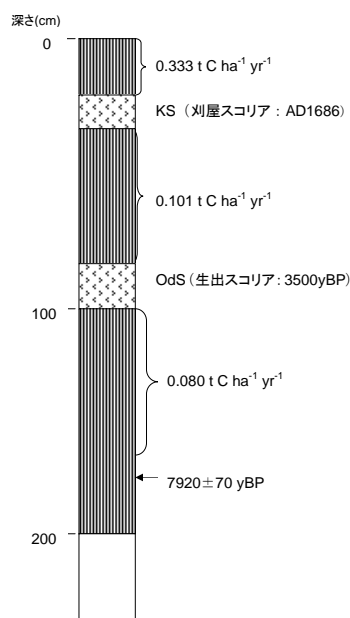


図 1-3-2-2 好摩コナラ林土壌への炭素蓄積速度の変化

上記と同様の調査を、温度や水分等の環境条件の異なる各地の土壌試料について行った。表 1-3-2-1 にその結果をまとめて示した。炭素蓄積速度は、**0.02 ~ 0.3 t C ha $^{-1}$ yr $^{-1}$** 程度の範囲にあり、地点ごとのばらつきが大きい。同じ土壌断面中では表層ほど値が大きかった。このことは、ここで示した炭素蓄積速度が、有機物の集積と分解の収支の差を表したものであるためといえる。つまり、表層ほど易分解性の有機物が多いことを示している、ということができる。

これらの中で最も大きい値を示した好摩コナラ林の炭素蓄積速度について、世界各地のさまざまな環境条件下における土壌の炭素蓄積速度をまとめて示した結果(Schlesinger 1997)と比較すると、好摩コナラ林の表層の値はいずれよりも大きかった。これには堆積年代が新しいことが影響している。表層以外については火山灰を母材とした常緑温帯林の土壌の値に比較的近かった。このことは、累積的に堆積する火山灰母材の土壌において堆積速度が大きくなるという特徴を示すものといえよう。

(イ) 土壌の分画と各画分の年代

上記の好摩黒色土に加え、褐色森林土および湿性ポドゾル試料を、粘土、シルト、砂に分画し、それぞれの試料の ^{14}C 年代値を求めた(表 1-3-2-2)。

分析した3地点の試料ではシルト画分が最も古い値を示し、粘土画分と砂画分では試料によって順位が異なっていた。粘土画分が最も古い値を示すという予

想とは異なる結果であったが、この原因は明らかではなく、今後さらに分析を進める必要がある。3試料ともシルト画分が最も古い値を示したことには何らかの意味があるかもしれないが、分析点数が少なすぎるためこれを評価することはできなかった。

表 1-3-2-1 異なる環境条件下の土壌炭素蓄積速度

地点名	現植生	土壌型	WI	年代 (y BP)	炭素蓄積速度 (tCha ⁻¹ yr ⁻¹)
好摩	コナラ	Blb	74	315 - 0 3500 - 315 7920 - 3500	0.333 0.101 0.080
稲庭岳	フナ	dBb	51	1085 - 0	0.032
乳頭	フナ	dBb	50	1085 - 0 2500 - 1085	0.067 0.043
湯ノ台	スギ	Blb	58	1085 - 0 5500 - 1085	0.061 0.025
仙人平	カラマツ	gBb	58	1085 - 0 5500 - 1085	0.080 0.021
小田越	アオモリ トドマツ	Pwh(III)	39	1085 - 0 5500 - 1085	0.122 0.048
葡萄森	ミズナラ	Bb	45	5500 - 0	0.033
岩洞	シラカンバ	Blc	51	2700 - 0	0.092
(参考)					
奥瀬	サワグルミ オニグルミ	Bf	60	1085 - 0	0.085
〔大政(1951)の分析値をもとに計算〕					

表 1-3-2-2 沈降法により分画した土壌試料の ¹⁴C 年代値

画分	好摩コナラ林黒色土 A層 40-50cm	乳頭フナ林褐色森林土 A層 14-15cm	湯森山アオモリトドマツ 林湿性ボドノル A層 7-8cm
粘土	1020 ± 40 yBP	820 ± 40 yBP	370 ± 40 yBP
シルト	1240 ± 40 yBP	950 ± 40 yBP	490 ± 40 yBP
砂	1170 ± 50 yBP	740 ± 40 yBP	410 ± 50 yBP

エ 今後の課題

土壌中への炭素蓄積速度および分画した土壌の年代ともに、できるだけ多くの試料を用いて解析を行いたかったが、費用や手間の問題から、この課題の目的に適した試料を多く集めることは難しかった。この課題で明らかにできなかった点については、今後も継続して調査を行い究明する必要がある。炭素蓄積速度の調査に関しては、既存の資料から目的に合ったデータを得ることを試みたい。表 1-3-2-1 の欄外に、大政(1951)のデータから推定した炭素蓄積速度の値を示した。これは、この課題で得られた値と調和的であり、今後の解析の可能性を示すものとする。

オ 要約

温度条件や水分条件などが異なるさまざまな環境条件下において、火山噴出物を母材とする土壌中への炭素蓄積速度とその変化を調べた。その結果、炭素蓄積速度はおおむね **0.02~0.3 t C ha⁻¹yr⁻¹** の範囲にあり、地点ごとのばらつきが大きい。同じ地点では表層ほど大きい値を示した。3地点の土壌試料を用いて、粒径により粘土、シルト、砂に分画し、それぞれの画分の ¹⁴C 年代値を求めた結果、いずれもシルト画分が最も古い値を示した。これは予想に反する結果であったが、分析点数が少ないため、さらに分析を進めて検討する必要がある。

キ 引用文献

土井宣夫・大石雅之・川上雄司(1986) 岩手火山, 分火山灰の ¹⁴C 年代と完新世の火山活動—岩手火山噴出物とそれに関連する堆積物の ¹⁴C 年代(その2)—. 岩手県立博物館研究報告 4. 29-38.

Schlesinger W. H. (1997) Biogeochemistry : An analysis of global change. Academic Press.

(森林総合研究所 立地環境領域 池田重人、岡本透、相澤州平、東北支所 橋本徹)

(3) 土壤呼吸における微生物と根呼吸起源の寄与率の推定

ア 目的

土壤からのCO₂発生は有機物分解(土壤微生物呼吸)によるものと植物根呼吸によるものに大きく分けられ、土壤有機物の動態及び土壤呼吸のメカニズムを明らかにするためには、それぞれの呼吸の特性を明らかにする必要がある。本研究では、土壤微生物呼吸と根呼吸の推定手法の比較検討を行い、それらの妥当性を検証した。さらに、得られた手法を複数の地点に適用し、日本の森林土壤における土壤微生物呼吸と根呼吸起源の寄与率のレンジを示した。

イ 研究方法

土壤微生物呼吸および根呼吸の推定手法について、積み上げ法と根除去法と同位体法の比較検討を茨城県加波山天岳良試験地のヒノキ林で行った。

積み上げ法は室内培養によって土壤微生物および根呼吸の温度特性をそれぞれ求め、それらの温度特性と現場の地温から根および土壤微生物呼吸を推定する方法である。土壤微生物呼吸の室内培養は深度別(0-5,5-10,10-20cm)に土壤を採取し、乾かないように手早く1mmメッシュの篩を通し根を除去した試料を用いて行った。根呼吸は出来るだけ攪乱しないように現地から採取し、速やかに水洗して土壤粒子を除去し根の径を0-2,2-5,5-20mmに分けて培養を行った。培養温度は5,15,25℃で行い、密閉容器に試料を入れCO₂発生速度を測定し、呼吸速度の温度特性を得た。土壤容積重と根量は100mL採土円筒ないしは内径4.7cmの採土オーガーを用いて深度別に採取、測定した。それぞれの呼吸速度の温度特性、容積重、根量に連続観測して得られた深さ5cmの地温データから現地における土壤微生物と根呼吸を推定した。また、A₀層からのCO₂発生速度を現地において静置密閉チャンバー法で測定した。

根除去法は、土壤にトレンチを設けて根切断処理を行い、その場所と対照土壤との差引によって根呼吸を推定し、全体の土壤呼吸から根呼吸を差し引くことによって微生物呼吸を推定する方法である。地表面CO₂フラックス測定用チャンバーの

周りを幅20cm、深さ50cmにトレンチを掘り、根切断した後、土壤を埋め戻した。その際、再び根が進入してこないようにビニールシートをトレンチに沿って敷いた。根を切断した土壤とそうでない対照土壤の地表面CO₂フラックスを静的密閉チャンバー法(3連)にて測定し、差し引きによって根呼吸の推定を行った。

同位体比法は土壤有機物の炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$ 値)と根の $\delta^{13}\text{C}$ 値が異なる場合、土壤有機物由来のCO₂と根由来のCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値がそれらの由来する有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値と同じであると仮定すると、土壤呼吸によって放出されたCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値を測定することによって、それぞれの寄与率を推定することが出来る。土壤呼吸によって放出されるCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ 値はGC/C-MSにて、土壤有機物と根の $\delta^{13}\text{C}$ 値をEA-MSにて測定した。

ウ 結果

積み上げ法によって推定された土壤微生物と根呼吸の総和がチャンバー法によって得られた土壤呼吸とほぼ同じ値を示し(図1-3-3-1)、積み上げ法が妥当な方法であることが明らかになった。根除去法は根切断処理後も対照土壤と比べてほとんど変わらず(図1-3-3-2)、本試験地においては根呼吸の推定は行えなかった。同位体比法による推定の結果からはA₀、土壤微生物、根呼吸の寄与率が季節によって変化することが示された(図1-3-3-3)。

温度、植生、土壤型が異なる5地点(北海道落葉広葉樹林(SAD)、茨城ヒノキ林(KAH)および落葉広葉樹林(KAD)、山梨カラマツ林(ODL)、沖縄常緑広葉樹林(OKE))において土壤微生物呼吸と根呼吸の温度特性、土壤容積重、根量、深さ5cmの地温を用いて、積み上げ法を適用した結果、土壤呼吸に占める根呼吸の寄与率が24~62%と、地点によって大きく異なっていることが示された(表13-3-1)。

エ 考察

積み上げ法は土壤や根の攪乱の影響が予想されたが、本結果からはそれほど大きな影響でないことが示された。積み上げ法は土壤および根の温度特性といった各コンパートメント毎のパラメータにより寄与率の推定ができることから、より多く

の地点においての既往の情報を用いると寄与率推定が可能になる。

根除去法は原理や処理自体が単純でありその点
が長所だが、根切断処理による影響評価が難しく、
本件も根切断処理による影響のため適用できなかつ
たと思われる。

安定同位体比を用いた同位体法については、冬
季などCO₂フラックスが小さいと土壌呼吸の同位
体比の分析精度が悪くなるため、寄与率の推定精
度も悪くなり、また、ガスの拡散移動による同位
体分別だけでは土壌凍結や積雪時に説明できない
値を示すこともあるなど、定性的な寄与率の変化
を見るには良いが、定量的な評価にはさらに検討
が必要なことも分かった。

土壌微生物呼吸および根呼吸の寄与率は季節に
よって異なっており、夏季に根呼吸の寄与率が低
下し、冬季に上昇する地点が多かった。これは室
内培養による土壌微生物呼吸のQ₁₀値が根呼吸の
Q₁₀値より高く(例えばKADでは微生物呼吸3.4、根
呼吸2.5)、土壌微生物呼吸の方が温度に対する感
受性が高く、根と土壌微生物の温度に対する反応
性の違いに起因しているものと思われた。

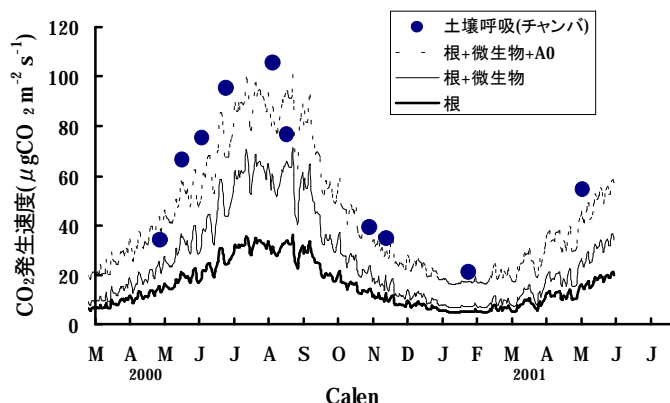


図1-3-3-1 土壌呼吸の季節変化(チャンバー法と積み上げ法)

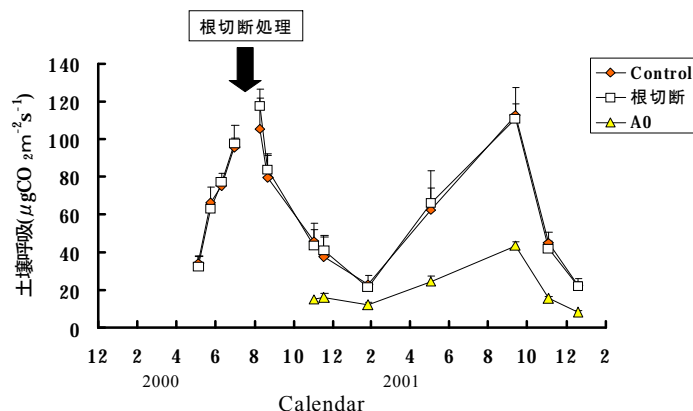


図1-3-3-2 根切断処理による土壌呼吸の変化

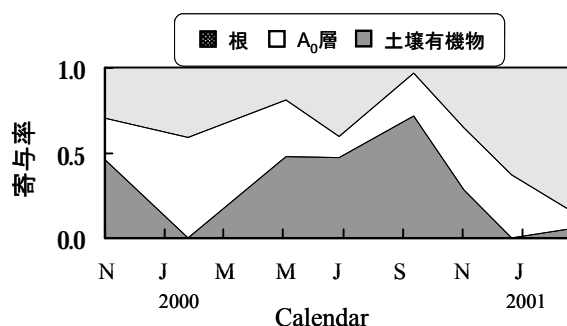


図1-3-3-3 同位体比法による土壌微生物・根呼吸寄与率の推定

表1-3-3-1 土壌微生物と根呼吸の割合

	土壌微生物	根
	tC ha ⁻¹ y ⁻¹	
SAD	3.27 (76)	1.03 (24)
KAH	1.02 (59)	0.72 (41)
KAD	0.89 (38)	1.48 (62)
ODL	1.16 (55)	0.95 (45)
OKE	6.59 (57)	4.94 (43)

オ 今後の課題

本研究ではA₀層と根量の季節変化を考慮して
いない。今後はA₀層と根量の季節変化を測定する
とともに環境要因との相互関係を明らかにする必
要があろう。

カ 要約

土壌呼吸における微生物と根呼吸寄与率の寄
与率の推定方法について3つの異なる手法を比
較検討し、積み上げ法の妥当性を示した。積み
上げ法を用いて全国5地点で土壌微生物と根呼
吸の割合を推定したところ、根呼吸は24～62%
の幅を持つことが示され、地点によって大きく
異なっていた。

(森林総合研究所、立地環境研究領域、
阪田匡司、高橋正通)

(4) 枯死木や根株の腐朽分解によるCO₂放出量の評価

ア 目的

森林において枯死した材、放置された間伐材、伐採後の根株などは、炭素の貯蔵庫として機能し、森林生態系の炭素循環において重要な役割を果たしている。しかし、これまでに粗大有機物の蓄積量と分解速度を明らかにした事例は限られている。森林の炭素収支を明らかにするためには粗大有機物の分解速度を推定するとともに温度などの環境要因が分解に及ぼす影響を評価することが必要である。本課題では1)粗大有機物の分解速度を樹種別に明らかにすること、および2)スギとヒノキ材について全国での分解試験を実施し、気候要因が分解速度に及ぼす影響を評価することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 樹種別の分解速度を明らかにするため、高知県四万十森林管理署森が内国有林および東津野村の民有林において、間伐後1～18年間放置されたスギ、ヒノキ枯死材の試料を採取した。枯死材の容積重の経年変化を指数式で回帰し分解速度を推定した。北海道支所実験林において、カラマツ、トドマツ材の試験片を設置して、2.5年間の初期分解速度を求めた。

(イ) 気象条件の影響を明らかにするために角材から作成したスギとヒノキの材試験片(4.5×4.5×10cm)を全国6地域9林分(北海道・岩手・茨城・京都・高知・沖縄)に設置した。設置した試験片を半年毎に7回収し、3.5年間の重量変化を求めた。

ウ 結果

(ア) 本研究で推定した主要樹種の枯死材の重量半減期をこれまでの報告の結果とともに表1-3-4-1に示す。重量半減期はシラカンバの平均値2.5年からシラベの107.8年まで約43倍の差があった。重量半減期はスギでは10.1～12.1年、ヒノキでは7.6～8.6年であった。

(イ) 全国6地域9林分の材分解試験において、設置3.5年後に回収した材試験片の重量残存率の平均

(範囲)は、スギ材で85.2(74.3-93.8)%,ヒノキ材で88.8(77.8-96.5)%であった。スギ材では茨城のスギ林の重量残存率が最も小さく、極端に分解が速かった。この値を外れ値として除外した場合、分解定数と調査地の年平均気温の関係は指数式によって回帰できた(スギ材 $R^2=0.87$ 、ヒノキ材 $R^2=0.75$ 、図1-3-4-1)。

表1-3-4-1 主要樹種における枯死材の重量半減期

樹種	場所	半減期 (年)	試験期 間(年)	文献*
針葉樹				
スギ	森が内	12.1	18	1
スギ	奈良	10.1	8	2
ヒノキ	森が内	8.3	18	1
ヒノキ	東津野	7.6	8	3
ヒノキ	山梨	8.6	-	4
ヒノキ	奈良	8.5	8	2
カラマツ	札幌	15.0	2.5	5
カラマツ	山梨	4.1	-	4
アカマツ	埼玉	3.5-9.9	4	6
シラベ	秩父	107.8	80	7
トドマツ	札幌	16.0	2.5	5
広葉樹				
シラカンバ	札幌	2.3-2.7	4	8
ミズナラ	札幌	2.6-20.5	4	8
コジイ	水俣	3.1-4.5	3	9
イチイガシ	水俣	6.1	3	9

*1 稲垣ら(2003)、2 中村ら(1990)、3 稲垣・深田(2003)、4 河原(1985)、5 酒井ら(2003)、6 河原・佐藤(1977)、7 河原・佐藤(1975)、8 酒井ら(2001)、9 Yoneda and Kirita(1978)

エ 考察

(ア)材の重量半減期は樹種によって43倍の差があった。スギ材とヒノキ材における重量半減期の同一樹種内の差は1.2倍以下と小さかった。したがって、同一樹種内の違いに比べて樹種間の違いが大きく、樹種による材の性質の違いが分解速度に強い影響を及ぼすと考えられた。

(イ)全国6地域におけるスギとヒノキ材の分解試験

において分解定数は茨城のスギ林に設置したスギ材で0.080であり極端に大きかった。この林分では、設置直後から材の窒素量が急激に上昇する傾向がみられ、特異的に窒素資源が豊富であると考えられた(稲垣2001)。同じ林分に設置したヒノキ材の分解定数は0.039と高くないので、スギ材を特異的に分解する微生物がこの林分に存在することが示唆された。

茨城のスギ林に設置したスギ材を除外すれば、年平均気温と分解定数の関係を指数式で回帰することができた。一方、降水量と分解定数には明確な関係はみられなかった。したがって、平均気温は降水量よりも強い影響を及ぼす環境要因であった。

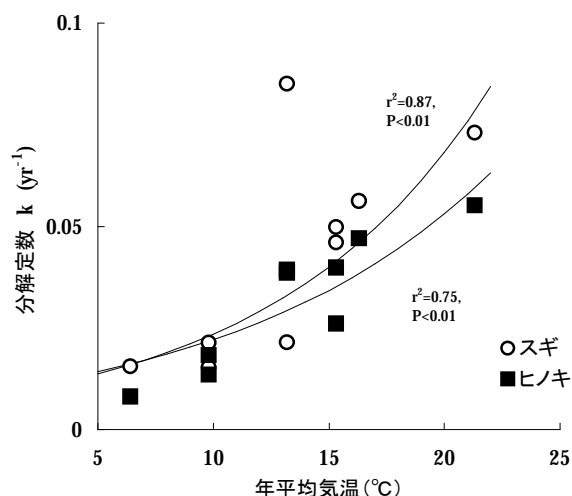


図1-3-4-1 年平均気温と分解定数の関係。

オ 今後の課題

スギとヒノキ材の分解速度を長期間にわたって推定できたのは限られた地域であったので、今後、気象条件の異なる林分において分解速度を推定することが必要である。北海道における材の分解試験では試験期間が2.5年と短かったため、今後も継続して試験を実施することが必要である。

カ 要約

本研究で主要樹種の分解速度を推定した。樹種によって分解速度が異なることが明らかになった。全国6地域における分解試験でスギとヒノキ材の分解速度は年平均気温の影響を強く受け

ていた。

キ 引用文献

- 稲垣善之(2001) 木材の初期分解における窒素負荷の影響. 森林応用研究 10: 43-50
- 稲垣善之・深田英久 (2003) ヒノキ林における放置間伐材の分解にともなう重量減少と窒素動態. 森林応用研究 12: 159-162
- 稲垣善之・山田毅・篠宮佳樹・鳥居厚志・吉永秀一郎(2003) 林内における枯死材分解速度の推定. 森林総研四国情報 29: 5-6
- 稲垣善之・高橋正通・阪田匡司・酒井佳美・池田重人・金子真司・漢那賢作 (2003) 全国6地域におけるスギとヒノキ材の分解. 日林学術講 114: 276
- 河原輝彦(1985) 森林生態系における炭素の循環ーリターフォール量とその分解速度を中心として. 林試研報 334: 21-51.
- 河原輝彦・佐藤明(1975) Litterの分解について(III) 亜高山帯での材の分解について. 日林誌 57: 357-360.
- 河原輝彦・佐藤明(1977) リターの分解について(V) アカマツの葉、幹および根の分解率の推定. 日林誌 59: 321-326.
- 中村嘉明・花尾英男・小林伸隆 (1990) 林地内に放置された間伐木の腐朽・分解. 奈良林試木材加工資料 19: 15-19.
- 酒井佳美・高橋正通・田中永晴 (2001) 落葉広葉樹材の分解速度. 日林学術講 112: 207.
- 酒井佳美・田中永晴・高橋正通 (2003) 北海道の主要樹種における材の初期分解速度. 日林北支論 51: 64-66
- Yoneda T and Kirita H (1978) Fall rate, accumulation and decomposition of wood litter. In: Biological production in a warm-temperate evergreen oak forest of Japan: IBP Synthesis Vol.18 (eds. Kira T, Ono Y. and Hosokawa T.) pp.258-273. University of Tokyo Press, Tokyo.

(森林総合研究所、四国支所、稲垣善之、鳥居厚志、篠宮佳樹、北海道支所、酒井佳美、田中永晴、立地環境研究領域、吉永秀一郎、山田毅、)

(5) 主要林相における土壌呼吸特性の解明

ア 目的

土壌は大量の炭素を蓄積しており、これを徐々に分解してCO₂として放出する役目を持っている。生態系の炭素固定能を評価するためには、森林土壌から放出されるCO₂量、特に土壌有機物分解によって放出される量を推定することが重要である。過去にも土壌呼吸量の測定は行われているが測定方法は統一されておらず、さらに北東一南西に長い日本列島を縦断するような広域の観測は行われたことはなく、地域差を検討することはできなかった。そこで、本研究では北海道から沖縄までの日本の主要林相からの土壌呼吸速度を同一の手法で実測し、各種土壌パラメーターとの関係を明らかにし、我が国の森林土壌からの土壌呼吸量を概観することを目的とした。

イ 研究方法

フラックス測定にはクロードチャンバー法（内径40cm、高さ15cm、阪田（1999）を参照）を用い、ガスの採取時間は0、10、20、40分の4回とした。チャンバー数は原則として5つとし（小川、加波山、大弛、常陸太田、簾舞、筑波山、荃崎、沖縄は3反復）、ガスの採取は1ヶ月に1回を基本とした。この方法により、表-1に示した25箇所においてフラックス観測を行った。5cmの地温をおんどりJr.（ティーアンドイー製）を用いて連続観測し、フラックスとの関係を解析した。各試験地から3深度（0～5cm、5～10cm、10～15cm）の土壌および100mL土壌円筒試料を採取し、一連の土壌分析をおこなった。いくつかの試験地では、土壌からのCO₂発生量を室内培養実験より明らかにし、土壌有機物分解によるCO₂生成量の割合を算出した。各土壌パラメーターと土壌有機物分解によるCO₂放出量の関係を解析した。

【分析方法】採取したガスはあらかじめ真空引きをしたバイアル瓶に封入し、北海道支所あるいは本所・養分環境研に郵送し分析をおこなった。CO₂の分析には赤外線分析計またはGC-TCDを使用した。

【解析方法】観測された土壌呼吸速度 y (gC m⁻² d⁻¹) と5cmの地温 T (°C) との関係を次式で回帰し、残差の平方和が最小になるようにパラメーター a および b を決定した。

$$y=a \cdot e^{bT} \quad (1)$$

ウ 結果

(7) 土壌呼吸速度の傾向

過去の研究例でもみられるように、土壌呼吸量速度と地温の間には指数関数的な関係が成立し、各試験地の(1)式における係数 a および b は異なった。同じ温度（例えば15°C）であれば概ね年間積算地温が少ない地点ほど土壌呼吸速度は高かった。この関係を用いて地温から推定した各プロットの年間土壌呼吸量は3.6～10.6 Mg C ha⁻¹であり、沖縄を除いて概ね北に行くほど大きくなる傾向が認められた（表-1-3-5-1）。また、標高別では、標高が高くなるほど年間発生量が少なくなる傾向が認められた（図-1-3-5-1）。土壌円筒試料の培養実験結果から推定された、土壌有機物分解による土壌表面からの年間CO₂生成量を表-1-3-5-2に示す。土壌有機物分解によるCO₂生成量はほぼ積算地温と指数関数の関係にあった。また、北に行くほど土壌有機物分解以外からのCO₂生成量の割合が多くなる傾向が認められた。つまり、根の呼吸によって生成するCO₂とAo層分解によって生成するCO₂の量は、沖縄を除く関東以

表-1-3-5-1 各地のCO₂発生量温度依存性パラメータと温度および年間発生量

	緯度	標高	パラメータ ^a		平均地温	年間発生量
		(m)	a	b	(°C)	(Mg C ha ⁻¹)
層雲峡	43.7	1000	0.795	0.090	5.70	5.71
定山溪	43.0	322	0.973	0.082	8.70 ^b	7.66
羊ヶ丘1	43.0	240	0.541	0.100	9.00 ^b	6.32
羊ヶ丘2	43.0	260	0.579	0.092	9.00 ^b	6.52
羊ヶ丘3	43.0	175	0.894	0.085	9.00 ^b	8.51
簾舞	42.9	440	1.005	0.085	9.00 ^b	9.27
安比	40.0	825	0.546	0.123	8.90	6.69
阿仁向山	40.0	200	0.720	0.069	9.56 ^b	6.56
田沢湖	39.8	350	0.419	0.114	9.56	7.02
小川学参1	36.9	650	0.213	0.156	11.14 ^b	4.68
小川学参2	36.9	650	0.238	0.126	10.09 ^b	6.76
小川学参3	36.9	650	0.503	0.105	9.47 ^b	6.53
小川学参4	36.9	650	0.322	0.136	11.19 ^b	6.80
常陸太田	36.6	380	0.190	0.150	11.80 ^b	5.79
筑波山	36.3	330	0.689	0.053	11.77 ^b	5.83
加波山1	36.3	470	0.187	0.124	11.80 ^b	4.34
加波山2	36.3	250	0.489	0.063	11.80	4.18
荃崎	36.0	22	0.832	0.056	13.40 ^b	6.90
御嶽	35.9	1350	0.268	0.125	7.80 ^b	3.56
大弛1	35.9	2090	0.560	0.094	5.19	3.60
大弛2	35.9	2080	0.552	0.121	4.18	4.35
瀬戸	35.2	630	0.564	0.050	10.83	4.05
稲武	35.2	1010	0.323	0.083	8.95	3.06
鹿北	33.1	165	0.140	0.129	14.23	4.29
沖縄	26.5	100	0.062	0.168	21.99	10.57

^a $y=a \times e^{bT}$ の回帰式 ^bはアメダスによる推定

表-1-3-5-2 土壌呼吸量のうち土壌有機物分解からのCO₂発生量が占める割合

	Rt	Rs	(%)
	(tC ha ⁻¹)	(tC ha ⁻¹)	
羊ヶ丘3	8.2	3.2	40
田沢湖	6.5	1.7	26
安比	6.8	0.9	13
加波山2	4.2	1.5	35
大弛1	3.8	0.9	24
大弛2	4.3	0.7	17
瀬戸	3.8	1.5	39
稲武	3.0	0.8	28
鹿北	4.7	2.3	49
沖縄	10.6	6.5	61

Rt, 土壌呼吸量; Rs, 土壌有機物分解由来のCO₂発生量

西ではほぼ一定であるのに対し、東北と北海道ではこれらのCO₂生成量が大きくなり、土壌呼吸量が大きくなることを示している。

(イ)土壌有機物分解に関与するパラメーター

土壌有機物分解由来のCO₂生成量（表-1-3-5-2のRs、但し羊ヶ丘3と沖縄は除く）に関して、土壌分析値との相関関係を解析したところ、セルラーゼ活性（CMCase）と最も相関が高かった（R=0.848）。CO₂の生成速度を従属変数とし、土壌のpH、CN、粒径組成、気相率、微生物諸量、無機態窒素量、窒素無機化速度などの微生物活性、有効態リン量、CEC、各交換性塩基量、Waksman分画による各画分の糖量、窒素リグニン比などを独立変数とした重回帰分析（ステップワイズ法）では、CMCase、リン酸酵素活性、砂含量を変数とし、決定係数0.857で推定可能であった。このことは、主として土壌の微生物活性が土壌有機物からのCO₂生成速度を決定していることを示しており、このため積算地温との高い指数関数関係を示したと考えられる。

エ 考察

年間積算地温が低い北方や高標高の場所ほど、全体のCO₂発生量に対する土壌有機物分解以外（根の呼吸およびAo層の分解）からのCO₂発生量の占める割合が高くなる傾向があったこと、Ao層や土壌中の易分解性成分と考えられる土壌糖量は北方や高標高ほど多いことなどから、気温の上昇によって地表面に存在する炭素源の分解が促進された場合、土壌からのCO₂生成速

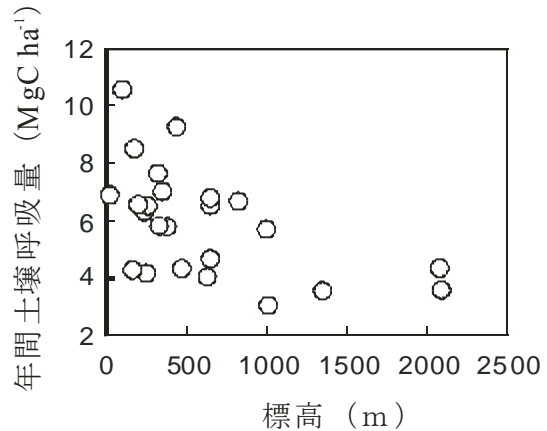


図-1-3-5-1 標高と土壌呼吸量の関係

度が顕著に増加するのは北方や高標高地域であると予測される。

オ 今後の課題

日本全国を対象とするような広域のCO₂放出量を推定するにはまだ基礎データが不足しており、データ収集を行うと共に広域推定の手法を開発する必要がある。

カ 要約

土壌からのCO₂発生速度と地温は指数関数的な関係があり、この関係から各地の年間CO₂発生量を計算した。その結果、年間土壌呼吸量は3.6～10.6 Mg C ha⁻¹であった。土壌培養の結果から推定された土壌有機物分解からのCO₂発生量は積算地温と指数関数的な関係があったが、Ao層および根呼吸由来のCO₂発生量は高緯度・高標高地域で大きく、将来温暖化した場合には、これらの地域のCO₂発生量が顕著に増加することが示唆された。

引用文献

- 阪田匡司（1999）地表面のガスフラックス．
（森林立地調査法，森林立地調査法編集委員会編）、209-211、博友社、東京
- （森林総合研究所 北海道支所 石塚成宏）

(6) 森林土壌における炭素循環と根系の解明

ア 目的

森林の地下部蓄積量は地上部に匹敵するといわれており、森林生態系の炭素循環を構築する上で、地下部での炭素蓄積過程を解明することは重要である。ここでは九州地域を代表する照葉樹林のコジイ林において、森林土壌の炭素循環を構築し、炭素蓄積過程に及ぼす細根の役割を解明することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 試験地の概要：九州支所構内の立田山実験林内の50年生コジイを調査地とした。標高は90m、方位は南西、傾斜は18°、土壌は弱乾性褐色森林土(Bcタイプ)である。平均樹高は17.5m、平均胸高直径は26.4cmである。

(イ) 土壌の炭素循環モデル(コンパートメントモデル)の構築：土壌をAo層、鉍質土壌、細根の3つのコンパートメントから構成されるものと仮定し、それぞれのコンパートメントの炭素蓄積量を測定すると同時に、土壌からの支出源として土壌呼吸と根の呼吸速度、土壌への収入源として落葉落枝速度を測定した。また、根のリターフォール速度を推定するために、細根量の季節変化を調べた。

a Ao層、鉍質土壌、細根の炭素現存量：方形枠内(0.5m×0.5m)のAo層を採取し、5方形枠の平均値をAo層量とし、この値に0.5を乗じてAo層の炭素量とした。また、深さ1mまでの鉍質土壌を13層(0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, 90-100cm)にわけ各層の土壌(採取面積は0.5m×0.5m)を採取した。実験室で採取土壌から水洗で根を選別し、風乾後、根の直径サイズ別(2mm以下, 2-5mm, 5mm以上)に分画し、それぞれの根重を測定した。また、土壌の一部を化学性サンプル用に採取し、CNコーダー(Yanaco MTA-600)で風乾細土の土壌炭素含有率を分析した。各層位の土壌炭素含有率に容積重を乗じて炭素量を求め、各層位の炭素量を積算して全土壌炭素量を算出した。

b 土壌呼吸速度：アルカリ吸収法の一つである桐田スポンジ法を使って、土壌呼吸速度を月2回の頻度、つまり月中旬および下旬に測定した。測定チャンバーおよび野外での操作法は酒井・伊藤(2000)の通りである。なお、土壌の各コンパートメント(Ao層および鉍質土壌)の呼吸速度を測定するために、自然状態の林床(自然区)からの測定を行う同時に、Ao層を除去した区(処理区)を設けそこでの土壌呼吸速度も測定した。なお、自然区(KA)および林床処理区(KB)を1セットにして、各林分で10セットの測定容器を設置した。さらに環境要因として土壌呼吸測定時に気温およびAo層と鉍質土壌の含水率を測定した。

c 根の呼吸速度：土壌呼吸測定容器を設置した区の周囲に溝を掘りその区と無処理区との比較から根の呼吸速度を推定した。一定期間土壌呼吸速度を測定後、一方の方形枠の周りの土をほりあげ根切断区とし、もう一方の無処理区を対照区とした。ここでは対照区の土壌呼吸と根切断区のそれとの差を根に由来するCO₂であると考えた。

d 落葉落枝速度：2種類のトラップを使って落葉落枝を測定した。すなわち直径5mm未満の落枝を含むリターは、受け面積0.5m²の小型円形トラップを各林分に10個設置し測定した。さらに、直径5mm以上の大枝は5m x 5mの大型リタートラップを各林分2箇所に設けた。月末に落葉落枝を回収し、乾重を測定した。

e 細根量の季節変化：土壌サンプラー(スプリット採土器、DIK-130A)を使って、表層から40cmまでの鉍質土壌を4層にわけ土壌を採取した。なお、地形や立木配置の不均一性を考慮して20ピットの採取を行った。1999年6月初旬、1999年8月下旬、1999年11月下旬の3回採取した。採取土壌は水洗、風乾、分画後に、根の直径サイズ毎(2mm以下, 2-5mm, 5mm以上)の重量を測定した。

(ウ) 今回使用した土壌呼吸測定法(スポンジ法)を、ほかの2法(通気法、循環法)と比較検討した。

ウ 結果

(ア) Ao層、鉾質土壌、細根の炭素現存量
各コンパートメントの炭素量はそれぞれ0.49, 6.86, 0.47 Ckgm²と算出された。細根量について詳細にみても、深さ1mまでの根量合計値は0.93 Ckgm²となった。Karizumi (1978) は水俣の照葉樹林で5mm以下の細根量は1.9～6.5t/ha (0.19～0.65 Ckgm²と同等値) と推定している。測定土壌深さや分画法が異なるため、正確な比較は困難であるが、本結果はKarizumiの結果より大きい値を示した。なお、多くの森林の結果をまとめてみると、林齢で約10年を超えた林分で径5mm位の細根量はおおよそ5～10t/ha (0.5～1.0 Ckgm²と同等値) の範囲内にあるものが多い (Santantonio1977) が、本結果はおおよそこの範囲内であった。

根の径級毎の割合は、2mm以下、2～5mm、5mm以上でそれぞれ40, 40, 20%となり、5mm以下の細根が全体の8割を占めていた。5mm以上の根は各層全てに存在しないため明確な垂直分布を示さないが、5mm以下の細根はほぼ指数関数的に減少した。堤・酒井 (1984) も細根は地表面に多く、深さとともに指数関数的に減少すると報告している。同様に土壌表層40cmまでに2mm以下、2～5mmの細根量のそれぞれ80%, 89%が存在し、細根は表層に集中分布した。

今度は土壌炭素の垂直分布をみしてみる。それは深さ40cmに変曲点をもつ曲線を示した。つまり、深さ40cmまでは指数関数的に急速に減少したが、それ以深では減少速度が極端に小さくなった。

(イ) 土壌呼吸速度

土壌呼吸速度は明確な季節変化を示し、気温の季節変化と一致した (図1-3-6-1)。なお、夏の一時期に低い含水率による土壌呼吸速度の低下を引き起こしたが、年を通してみればほぼ温度と同調していた。自然区における3年間の最高値 (2001年7月) は0.026 CO₂kgm⁻²day⁻¹であった。最低値 (2001年1月) は0.003 CO₂kgm⁻²day⁻¹であった。水俣の照葉樹林 (Yoneda and Kirita 1978) において同じ手法で測定した土壌呼吸速度の結果 (0.003～0.025 CO₂kgm⁻²day⁻¹) とほぼ同じであった。各測定時の平均変動係数は19.0～23.3

%

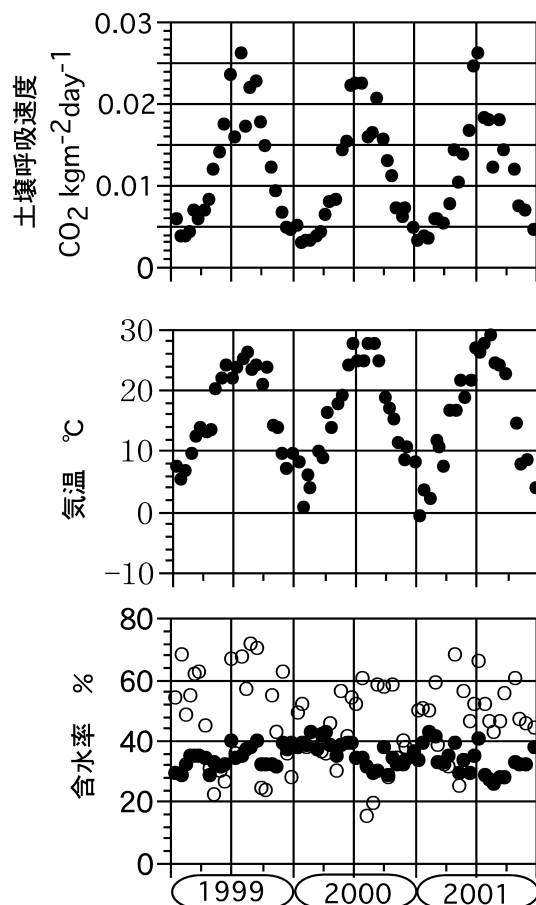


図1-3-6-1 土壌呼吸速度、気温および含水率の季節変化

と算出され、設置必要個数を信頼限界95%, 抽出誤差20%で推定すると3～5個となり、今回の設置数10個からみて土壌呼吸速度の測定値はかなりの精度で代表値を現していると考えられた。土壌呼吸速度は気温の上昇に伴って指数関数的に増加した (図1-3-6-2)。

土壌呼吸速度 (Y) と気温 (Xair) との回帰式と相関係数は次式で表された。

$$Y(KA) = 2.8e^{0.0758x_{air}} \quad R^2=0.874$$

$$Y(KB) = 2.5e^{0.0674x_{air}} \quad R^2=0.879$$

3年間の測定でおおよそ一つの直線に回帰できたことから、温度に対する土壌呼吸速度の関係において年変動は極めて少ないとみられた。この関係と日平均気温から年間土壌呼吸速度を推定した所、コジイ林の自然区 (KA), 処理区 (KB) でそれぞれ1.14, 0.86 Ckgm²year⁻¹となった。

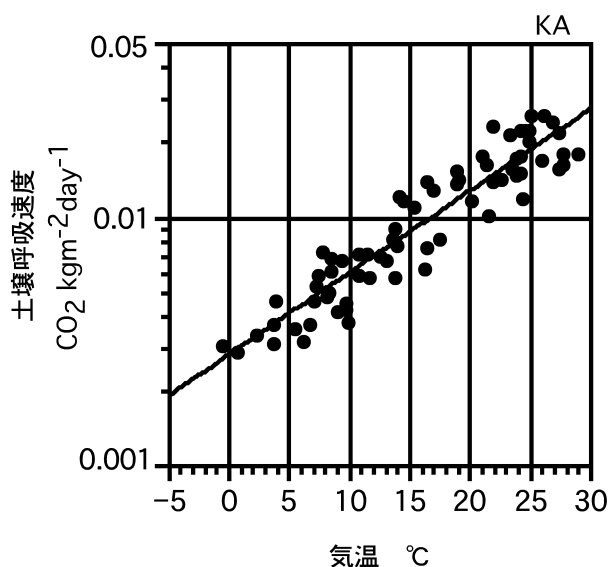


図1-3-6-2 土壌呼吸速度と気温との関係

照葉樹林における土壌呼吸速度の測定例のうち、今回と同じスポンジ法による年間土壌呼吸速度を求めると(桐田1971, 中根1975, Yoneda1978), $0.84 \sim 1.29 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ で今回の測定結果はその範囲内であった。なお、間接的に求めたAo層からの呼吸速度はコジイ林で $0.29 \text{ Ckgm}^2\text{year}^{-1}$ となった。

なお、アルカリ吸収法(スポンジ法)は他2法(通気法、循環法)とよい関係を示した。現在いずれの測定法も長所と欠点をもつ状況下では、無電源で多点測定できるアルカリ吸収法(スポンジ法)は信頼性のある方法であると確認できた。

(ウ) 根の呼吸速度

根切断直後は、根切断区の土壌呼吸速度が対照区のそれより高くなった。これは切断による根の異常代謝が原因と考えられた。これ以後は対照区と根切断区との比率は徐々に低下し、根切断後約1ヶ月以降はほぼ65%に収束した。言い換えれば、根の呼吸速度は全呼吸速度の35%と推定された。つまり、年間の根の呼吸速度は $0.40 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ と算出された。

(エ) 落葉落枝速度

小型リターは年平均 $0.33 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ 、大型リターは $0.04 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ となり、落葉落枝全体で $0.37 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ が毎年土壌に供給された。

(オ) 細根量の季節変化

深さ40cmまでの細根量(径5mm以下)は1999年6月初旬、1999年8月下旬および1999年11月下旬にそれぞれ 0.95 kgm^2 、 0.76 kgm^2 、 0.48 kgm^2 となり、約6ヶ月間に半減した。このことは半年の間に最低限 0.48 kgm^2 の細根量が土壌に供給されたことを示していた。

エ 考察

地上部からの土壌への年間炭素収入速度(年間落葉落枝速度)は $0.37 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ 、一方土壌からの年間炭素放出速度(年間土壌呼吸速度)が $1.14 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ であるから、放出速度が収入速度に比べて3倍高いことになる。これは土壌呼吸速度に根の呼吸を含むことと、細根の枯死による土壌への炭素供給が考慮されていないことに起因する。

一般に定常状態の森林における土壌炭素循環では次式が成り立つと考えられる。

土壌呼吸=落葉落枝+根リターフール+根呼吸

従って、比較的安定したこの林分で定常状態が成り立つとすれば、土壌呼吸のうち、落葉落枝が33%、残りの67%が根の呼吸と根のリターフールが占める結果になる。前述した通り、根の呼吸速度は全呼吸速度の35%を占めることから、根のリターフールは土壌呼吸の32%、つまり、 $0.37 \text{ Ckgm}^2\text{yr}^{-1}$ と算出された。この値は地上部からの土壌への収入速度(落葉落枝速度)と同じで、細根は土壌へ炭素収入源として重要な役割をしていることを示した。なお、土壌炭素含有率は細根量の増加に従い増加する傾向があり、特に、径2mm以下の細根量と土壌炭素含有率との間に密接な関係が認められた(図1-3-6-3)。このことは土壌の炭素供給源としての根の重要性を示唆するものである。

これらの結果を基に、コジイ林の土壌炭素コンポートメントモデルを構築した(図1-3-6-4)

オ 今後の課題

土壌炭素循環における細根の重要性が認識されたが、日本では斜面地形に対応して現れる土壌水分環境の違いに応じて細根量の違いが認められるため、斜面に対応した土壌循環モデルを

構築する必要がある。

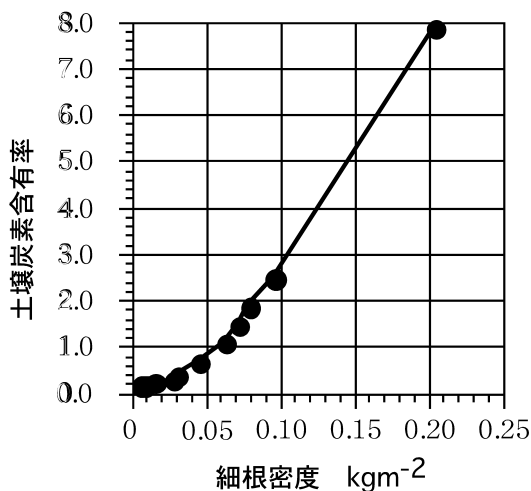


図1-3-6-3 細根密度と土壌炭素含有率との関係

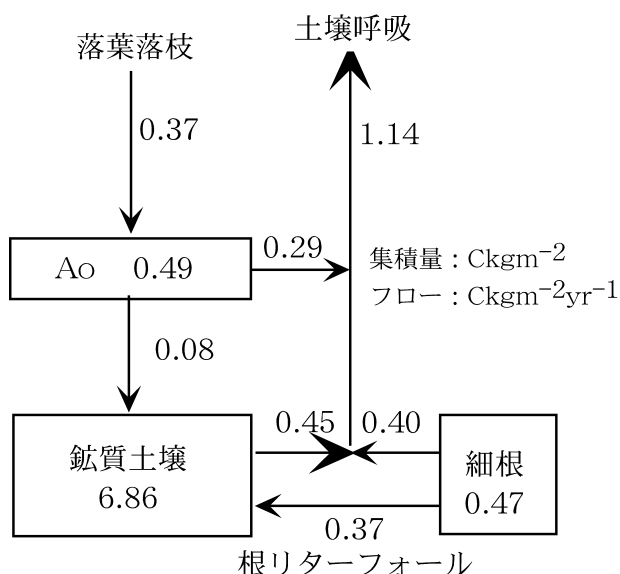


図1-3-6-4 コジイ林における土壌炭素コンパートメントモデル

カ 要約

コジイ林において、炭素の大きなプールである森林土壌を中心とした炭素循環を構築し、炭素蓄積過程に及ぼす細根の役割を解明することを目的に、土壌からの炭素支出として土壌呼吸速度、Ao呼吸速度、根呼吸速度、土壌への炭素収入として落葉落枝速度、根リターフォール速度を測定あるいは算出し、炭素コンパートメントモデルを構築した。

土壌呼吸速度は明確な季節変化を示し、気温の季節変化と一致した。土壌呼吸速度は温度に対して指数関数的に変化するので、この関係を使って年間の土壌呼吸速度を推定した結果、年間土壌呼吸速度は1.14 Ckgm²yr⁻¹となり従来の測定範囲内にあった。また、Ao呼吸速度は0.29 Ckgm²yr⁻¹、根の呼吸速度は0.40 Ckgm²yr⁻¹、落葉落枝速度は0.37 Ckgm²yr⁻¹となり、定常状態を仮定した場合、根のリターフォール速度の0.37 Ckgm²yr⁻¹と算出された。

土壌への炭素供給源の一つである根のリターフォール速度の推定値(0.37)は各実測値の誤差を含んでいるが、地上部のリターフォール速度(0.37)と同値を示し、炭素循環に及ぼす根系の影響がおおきいことを示した。これは土壌断面における炭素量と細根量との密接な関係および細根量の季節変化の結果からも支持された。

キ 引用文献

- Karizumi M a H (1978) JIBP SYNTHESIS vol. 18 82-88
- 桐田博允 (1971) 照葉樹林の土壌呼吸に関する研究, 日生態会誌21: 230-244
- 中根周歩 (1975) 森林者斜面における土壌有機物のダイナミックス, 日生態会誌25: 206-216
- 酒井正治・伊藤江利子: (2000) コジイとヒノキ林における土壌呼吸速度, 日林九支研論文集53: 145-146
- Santantonio D., Hermann R. K. and Overton W. S. 1977) : Root biomass studies in forest ecosystems. Pedobiologia 17: 1-31
- 堤利夫・酒井正治 (1984) 2つのタイプの天然性落葉広葉樹林の細根量と曽於垂直分布, 京大農演報56: 60-66
- Yoneda T. and Kiritani H (1978) JIBP SYNTHESIS vol. 18 239-250

(森林総合研究所 九州支所 酒井正治 佐藤保, 伊藤江利子)

4. 多様な森林構造におけるCO₂固定量の定量化

(1) 北方系落葉樹広葉樹林における大気―森林系CO₂フラックスの解明

ア 目的

微気象学的方法を用いて北方系落葉広葉樹林上の正味CO₂吸収量とその季節変化・年変動を群落レベルで明らかにすることが本研究の目的である。

イ 研究方法

対象とした観測サイトは森林総研フラックスネットの札幌森林気象試験地(森林総合研究所北海道支所羊ヶ丘実験林内)である。森林は山火事後に自然再生した落葉広葉樹2次林で、主な構成樹種はシラカンバとミズナラである。シラカンバは樹齢90年を越え衰退しつつある。地上(林床)には常緑のササ類が密生する。

森林上のフラックスは主に渦相関法を用いて観測した。CO₂の乱流変動および平均濃度の測定には、川越森林気象試験地で開発された技術を採用入れた、クローズドパス赤外線ガス分析計システムを用いた。

微気象要素に関しては、日射量・光合成有効放射量・赤外放射量に関する放射収支を樹冠上と林内ササ群落上で、また、気温・湿度・風速を樹冠上4高度と樹冠内部4高度で、それぞれ測定した。これらの気象要素の測定・記録には大谷(Ohtani *et al.* 2001)による計測・制御プログラムを用いた。

土壌物理・水文要素に関しては、地温(深さ0.8mまで)、土壌水分吸引圧、TDR土壌水分体積含水率、地下水位、積雪深などの計測を行った。

フラックス計算に関しては、遅れ時間の最適化、高周波域の補正などを組み込んだ大谷・渡辺ら(Ohtani *et al.* 2001; Watanabe *et al.* 2001) によるプログラムを使用してフラックス解析をルーチン処理化した。

開葉―落葉の季節性を捉えるため、川越試験地(渡辺 2001)にならってリターフォール測定による夏から秋の葉面積指数変化をもとに吸光係数を定め、日射減衰比から葉面積指数(LAI)を推定した。大気と森林との間のCO₂交換量NEEは、森林上の

フラックスに森林内のCO₂貯留変化量を加えたものとした。

着葉期間の昼間に関しては、30分毎のNEEと光合成有効放射量(APAR)の関係を適切な曲線で近似し、欠測値を補間することとした。夜間及び積雪期間に関しては風の強い条件(Suzuki *et al.* (2001)による検討から摩擦速度 0.3ms^{-1} 以上のとき)における地温とNEEの関係を求め、欠測値の補間ならびに風の弱い場合の補正に用いることとした。

ウ 結果

(ア) 連続観測システムの確立

観測の先行している川越森林気象試験地、富士吉田森林気象試験地における開発成果を導入することによって、迅速に観測システムを確立した。

AmeriFlux標準測定法との比較観測では、当試験地観測システムとAmeriFlux観測システムの観測値は相互に良好な一致を示し、測定・解析方法の妥当性が検証された(中井ほか 2002)。

(イ) NEEの日変化

昼間に吸収($\text{NEE} < 0$)・夜間に放出($\text{NEE} > 0$)というNEEの日変化が5月から9月にかけて見られた。典型的な晴天日にはNEE日変化の吸収のピークは正午よりも午前側に來ることが多かった。あるいは吸収のピークが午前と午後に分かれる場合もよく見られた。30分平均で年間最大の吸収量は7月に見られ、約 $1.8\text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達した。樹木の開葉前10日間前後、樹木の落葉後10日前後の間にもNEEの日変化が見られた。

(ウ) NEEの季節変化

図1-4-1-1に2000年の日積算NEEの季節変化をLAI、微気象要素などともに示す。着葉期の日積算NEEが日毎に激しく上下するのは、光合成によるCO₂吸収が日射量の変動(晴れか曇りか)に鋭敏に反応しているからである。NEEとLAIの季節変化を同時に見ると、樹木の開葉(5月)から7月上旬まではNEEの変化はLAIの変化とよく同調しているが、それ以降9月にかけてLAIがあまり変化していないのに対してCO₂吸収量は徐々に減少している。

積雪期間中は、比較的安定した少量のCO₂放出が継続した。CO₂吸収は、融雪終了後5月の樹木開葉に伴ってLAIが1を越えた付近から始まり、

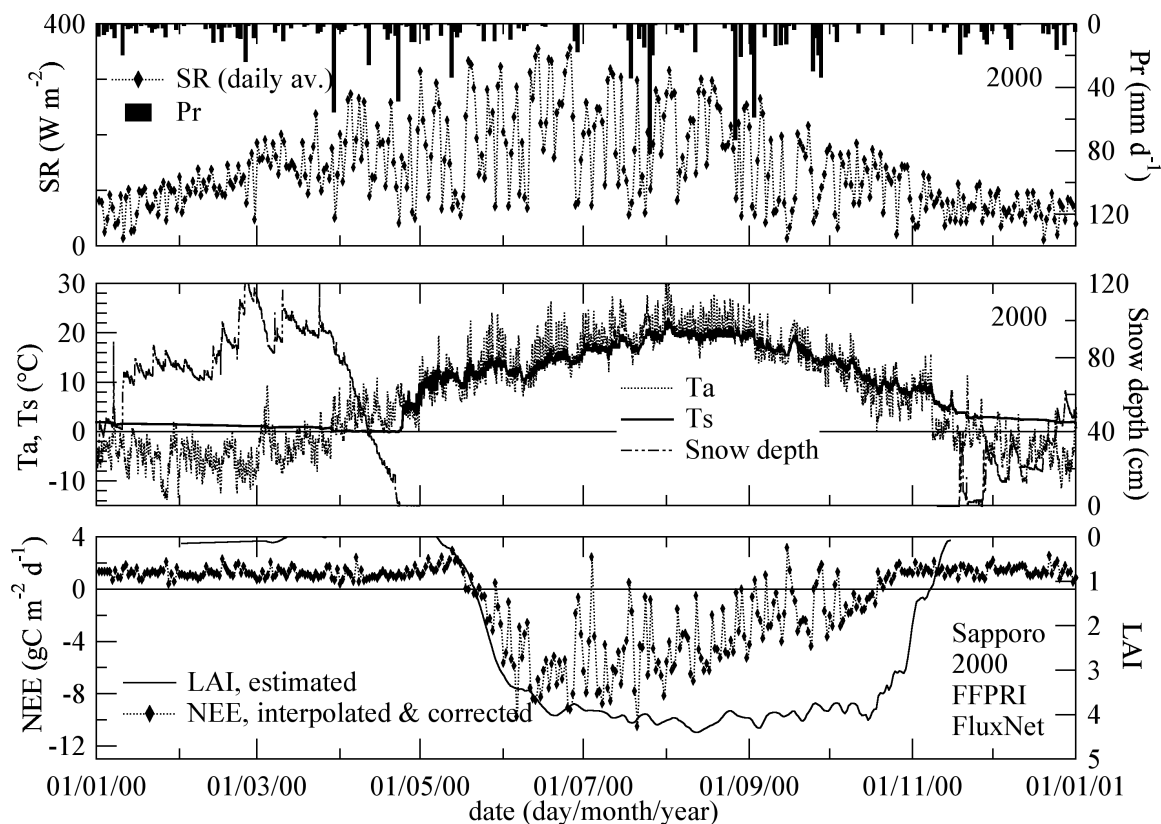


図1-4-1-1. 2000年におけるCO₂交換量(NEE；炭素換算)、葉面積指数(LAI)、気温(Ta)、5cm深の地温(Ts)、積雪深(Snow depth)、日射量 (SR)、降水量(Pr)の季節変化

7月にピークに達したのち漸減し、秋期LAIが3以下になると急減してCO₂放出に転じた。

(エ) 生態系呼吸量(RE)の温度依存性

夜間や積雪期間中のNEEと地温(深さ5cm、Ts)との関係を摩擦速度 0.3ms^{-1} 以上の風の強い期間のデータに基づいて指数関数で表した。RE は同じ温度に対して4～7月により大きくなった(Nakai *et al.*, 2003)ため、1年を4～7月とそれ以外の期間に分けてRE-Tsの関係を求めた。

(オ) 補間と補正

(エ)のRE-Ts関係を用いて夜間のNEEの欠測値の補間や風の弱い期間の値の補正を行った。同様に、11日分の昼間のNEEに基づいて得られたNEE-APAR関係(直角双曲線関数)を用いて11日間中日の昼間NEEの欠測値を補間した。

(カ) NEPの年変動

上記の補正と補間を実施して得られた3カ年のNEEを図1-4-1-2にLAIとともに示す。年間の炭

素収支算定に当たり、NEEの符号を逆にしてNEP(生態系純生産量)とした。昼間のRE推計に夜間のRE-Ts関係を適用して年間の生態系呼吸量を積算するとともに総光合成生産量(GPP)をNEPとREの和とした。得られた年間収支は次表のようになる。

表1-4-1-1. 炭素年収支量($\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$)
(摩擦速度 $u_* = 0.3 \text{ms}^{-1}$ を閾値としたとき)

年	NEP	RE	GPP
2000	269	1067	1336
2001	420	990	1410
2002	508	932	1440

エ 考察

積雪期は約4ヶ月以上継続するので、年間のNEPを減少させる大きな要因となる。樹木の開葉前・落葉後のNEE日変化は常緑のササ群落による光合成活動を反映したものと考えられる。

生態系呼吸量REを地温Tsの関数とすると、回帰式のまわりに非常に大きなばらつきが存在した。このことがタワーフラックス法によるCO₂吸収量の推定を不確定なものとしている。RE-Ts関係を年周期で見ると明らかなヒステリシスが存在した。すなわち、同じ地温に対して春先4月〜7月ごろまでは8月以降と比べてより高い生態系呼吸量が算出された。原因として春期には植物の構成呼吸による放出フラックスが大きいことが推察されるが、具体的なメカニズムの解明には個別放出フラックスの観測等を行い、構成要素を明らかにする必要がある。

樹木の開葉をLAIで見ると2002年が最も早く、続いて2001年、2000年の順であった。落葉広葉樹林の場合、年間CO₂吸収量に関して着葉期間の長さが直接影響を及ぼす。特に、CO₂吸収の立ち上がりは北方へいくほど急激になる (HARDING *et al.* 2001)ので、開葉時期は重要と考えられる。当試験地の開葉時期5月のNEPを3カ年で比べると、2000年は-20、2001年が40、2002年は60gC m⁻²で年々の差が大きい。

7〜9月にかけてLAIが一定であってもCO₂吸収量が徐々に減少する原因は、日射量の減少による光合成速度の低下、気温や地温の上昇による土壌呼吸など放出フラックスの増大、葉の光合成能力そのものの低下、などによる。このような要因が年によって異なることからCO₂吸収量の年々変動が生じると推察される。例えば、2000年の8〜9月のCO₂吸収量は他の2ヶ年同月期に比べて小さかった。このことは温度と日射量の違いによって定性的には矛盾無く説明できる。年間のCO₂吸収量は2002年が2000年の約2倍であり、年々変動が大きいことがわかる。

オ 今後の課題

得られたNEEの日変化、季節変化などについては、生態学的調査結果やバイオマス調査結果との総合化・個別CO₂フラックスの同時観測などを進

めるとともに、モデルを使って炭素循環の理解を図ることが課題である。

CO₂吸収量の年々変動は今後の観測継続やモデルシュミレーションにより、より確かな議論が可能になるであろう。

カ 要約

北方系落葉広葉樹林群落のCO₂吸収は樹木の開葉後すみやかに開始され1〜2ヶ月でピークとなった後、落葉期まで漸減していった。積雪期間は緩やかな放出が安定継続した。年吸収量は主として気候変動の影響を受けて3ヶ年で相対比最大2倍もの変動を示した。

引用文献

- HARDING, R.J., GRYNING, S.-E., HALLDIN, S., & LLOYD, C.R. (2001) Progress in understanding of land surface/atmosphere exchanges at high latitudes. *Theoretical and Applied Climatology* 70: 5-18.
- 中井裕一郎・三枝信子・平野高司・Robert EVANS・大谷義一・平田竜一・鳥山 敦・北村兼三・鈴木 寛・山本 晋 (2002) 2001年8月、苫小牧と札幌で行われた日米フラックス比較観測. *水文・水資源学会誌* 15: 665-672.
- NAKAI, Y., KITAMURA, K., SUZUKI, S., & ABE, S. (2003) Year-long carbon dioxide exchange above a broadleaf deciduous forest in Sapporo, Northern Japan, *Tellus* 55B: 305-312.
- OHTANI, Y., MIZOGUCHI, Y., WATANABE, T., YASUDA, Y., & OKANO, M. (2001) Seasonal change of CO₂ flux above an evergreen needle leaf forest in temperate region, Fujiyoshida, Japan. *Proceedings of "International workshop for advanced flux network and flux evaluation"*, CGER, Tsukuba, Japan, 129-132.
- SUZUKI, S., KITAMURA, K., NAKAI, Y., ABE, S., SHIRAI, T., & TERAJIMA, T. (2001) Measurements of CO₂ and energy fluxes above a secondary-successional deciduous forest in a cool-temperate and snowy zone, Northern Japan. *Proceedings of "International workshop for advanced flux network and flux evaluation"*, CGER, Tsukuba, 139-143.

渡辺 力 (2001) 落葉広葉樹林への適用例. 気象研究ノート第199号- 地表面フラックス測定法 -, 177-182., (塚本 修・文字信貴編), 日本気象学会, p.1-242.

WATANABE, T., YASUDA, Y., YAMANOI, K., OHTANI, Y., OKANO, M., & MIZOGUCHI, Y. (2001) Seasonal variations in energy and CO₂

fluxes over a temperate deciduous forest at Kawagoe, Japan. Proceedings of "International workshop for advanced flux network and flux evaluation", CGER, Tsukuba, Japan, 11-17.

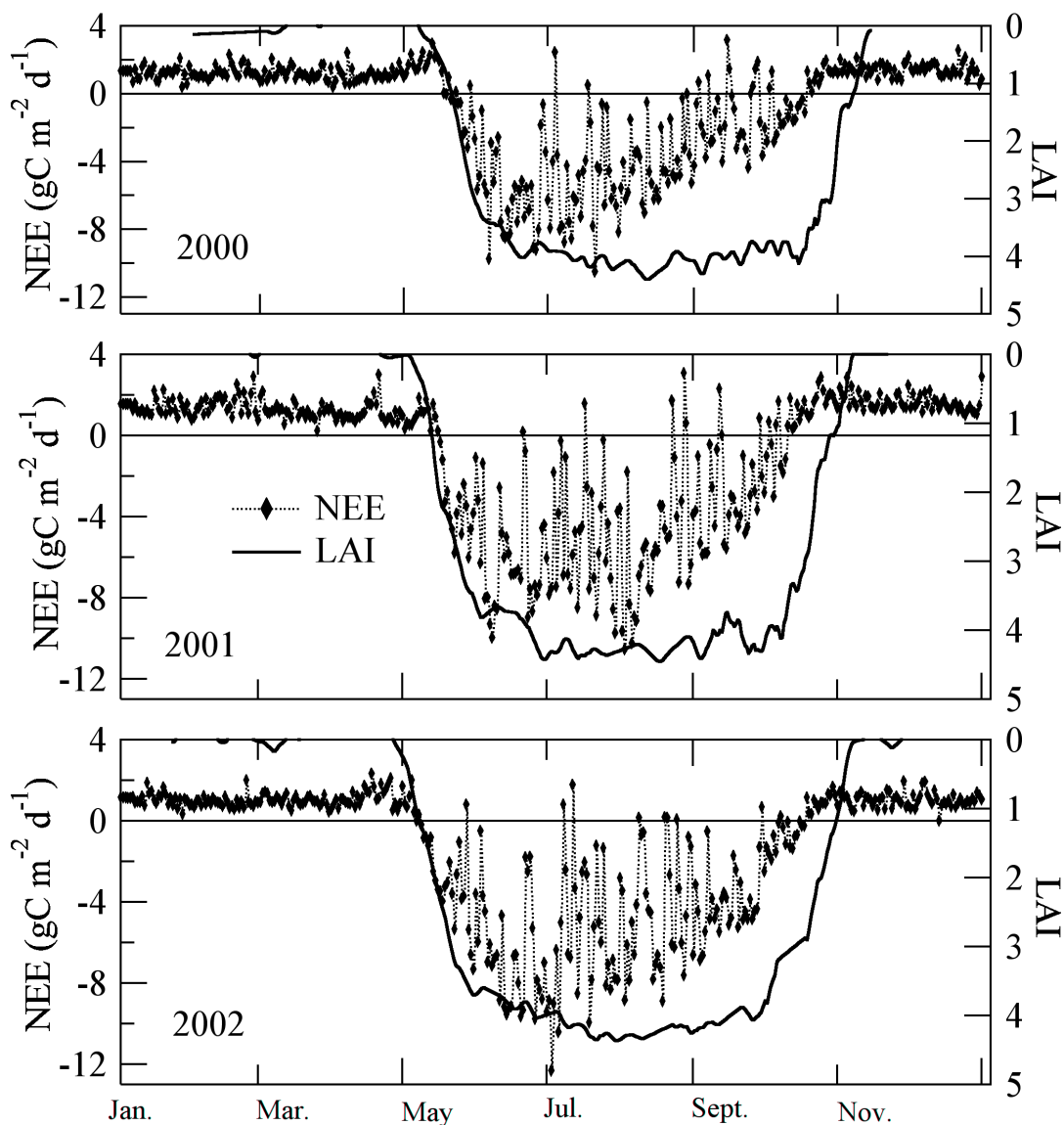


図1-4-1-2. 2000～2002年のCO₂交換量(NEE)と葉面積指数(LAI)の季節変化

(森林総合研究所、北海道支所、中井裕一郎、北村兼三、鈴木 覚、坂本知己、寺嶋智巳、白井知樹、阿部 真)

(2) ブナ林における大気－森林系CO₂フラックスの解明

ア 目的

本課題は、渦相関法を用いた微気象学的な観測手法によりブナ林群落上のCO₂フラックスを測定し、ブナ林の正味CO₂吸収量とその季節変化を明らかにし、CO₂フラックスの形成過程について検討を行うことを目的に研究を行った。

イ 研究方法

岩手県二戸郡安代町の岩手北部森林管理署管内安比岳国有林内のブナ林（北緯 40.0 度、東経 140.9 度、標高 825m、傾斜 5.7 度、群落高 17～19m、フェッチ 300～600m）に安比森林気象試験地を設定した。試験地内に地上高 31m の観測塔と観測小屋とを建て、観測塔の頂部に超音波風速温度計（KAJJO、DA-600-3T）とサンプル空気取り入れチューブとを設置し、クローズドパス方式の渦相関法による CO₂ フラックスの観測を行った。

サンプル空気は観測小屋内に一定の速度で吸引し、Yasuda & Watanabe (2001)の方法にならって水蒸気を除去したのちに、二酸化炭素濃度計（LiCor、LI-6262）で CO₂ の濃度変動を測定した。三次元の風速および CO₂ の濃度はそれぞれ同時に 10Hz で測定記録して研究室に持ち帰り、森林総合研究所気象研究室で開発した解析プログラムを用いて計算を行い、ブナ林群落上の CO₂ フラックスを得た。フラックス計算の時間単位は 30 分とした。また、クローズドパス方式の測定方法にともなう高周波域の変動成分の減衰を補正するため、Ohtani *et al.* (2001) の方法にならない、超音波風速温度計によって測定した顕熱の変動と二酸化炭素濃度計で測定した CO₂ 濃度の変動とのコスペクトル（共に規準化して計算）を求め、高周波域（概ね 0.01Hz～10Hz）における CO₂ 濃度変動の減衰分を補正した。なお、本解析では、群落の CO₂ 貯留変化量を考慮していない。また、夜間の CO₂ フラックスについて、摩擦速度等を用いたデータの検証を行っていない。したがって、生態系の CO₂ 吸収・放出に関わる数値は、暫定値として CO₂ フラックスの観

測値で示す。

CO₂ フラックスの観測は、1999 年 9 月に開始し、現在まで継続している（ただし、1999 年度の冬季は、豪雪による被害を避けるために機材を撤収したので、本格的に長期連続観測を開始したのは 2000 年 4 月からである）。そのうち、2000 年 10 月 1 日から 2001 年 9 月 30 日までの 1 年間については、半日以上の長時間の欠測を含まない 1 シーズンの CO₂ フラックスの連続観測結果を得ることができた。この連続観測結果から、安比のブナ林における 1 年間の正味 CO₂ 吸収量とその季節変化を明らかにした

ウ 結果

(ア) 日積算CO₂フラックスの季節変化

安比のブナ林群落上において観測したCO₂フラックスの日積算値は、図1-4-2-1に示すように推移した。2000年、2001年、2002年ともに、11月から翌年4月までの間は、日積算CO₂フラックスは比較的安定したプラスの値を示し、多くの日でおよそ1～2g m⁻² d⁻¹のCO₂（炭素量でおよそ0.5gC m⁻² d⁻¹ 前後）がブナ林から上空に放出されていた。安比では例年、ブナは10月初旬に落葉を開始し、10月下旬にはほぼ落葉を完了する。翌年、5月初旬に春の開葉を開始し、5月下旬には葉の展開を終える。したがって、11月から翌年4月までの間はブナが落葉している期間であり、ブナ林群落内では光合成はほとんど行われていなかったため、CO₂の吸収はほとんど見られなかった。2000年、2001年、2002年ともに、ブナの開葉とともに日積算CO₂フラックスの値は急激にマイナスに転じ、その後の緑葉季には大きな日変動を伴いながら概ねマイナス（上空からブナ林群落内部にCO₂を吸収）の値を示した。日積算CO₂フラックスがプラスからマイナスに転じた日は、2000年は5月19日、2001年は5月16日、2002年は若干の変動を伴いながら、5月8日から5月15日にかけての頃であった。緑葉季のCO₂の吸収量は、月別に積算すると6月が最も大きく、7月、8月、9月にかけて順次少なくなった。

(イ) 安比のブナ林における1年間の積算CO₂収支

図1-4-2-1に示した安比ブナ林群落上における

CO₂ FLUX (gC m⁻² d⁻¹)

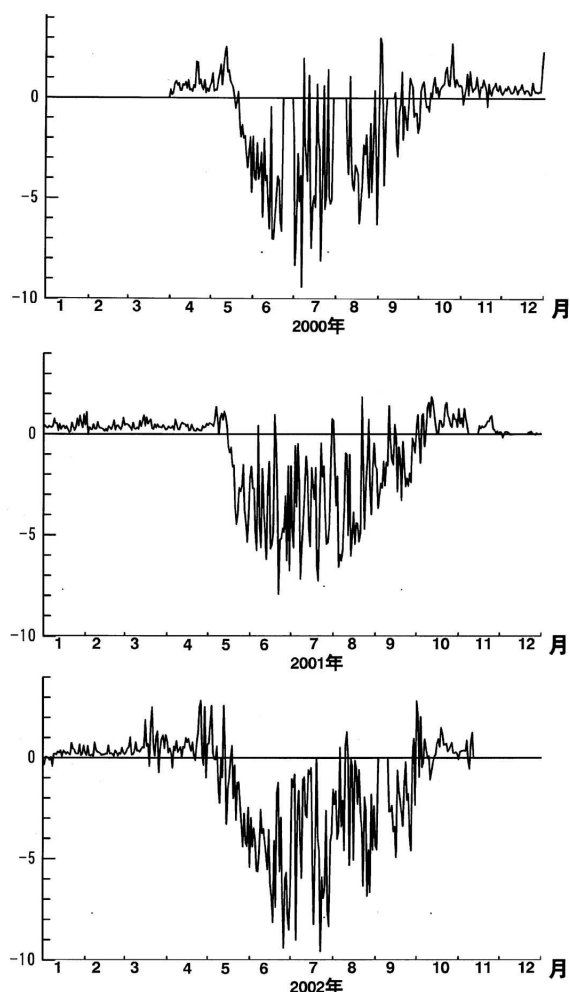


図1-4-2-1 安比ブナ林群落上における日積算CO₂フラックスの季節変化

2000年～2002年の日積算CO₂フラックス観測値には、年間20～115日の欠測日を含む。安比サイトは例年最深積雪深がおよそ2.5mに達する多雪地に位置するため、冬季の微気象観測が難しく、欠測は冬季（CO₂放出期間）に多く発生した。本試験地におけるCO₂フラックスの長期欠測に対する補完法は確立されていないので、仮に各暦年における欠測を含むCO₂フラックスを積算すると、237 gCm⁻²y⁻¹～371 gCm⁻²y⁻¹の範囲となった。今後、夜間のCO₂フラックスデータに対する解析と冬季の欠測値補完を行えば、これらの積算値は下方へ修正される可能性がある。

こうした中で、2000年10月1日から2001年9月

30日までの1年間については、半日以上の長期間の欠測を含まない連続データを得ることができた。なお、この期間内においても、観測機器のメンテナンス、測定精度維持のための調整などの作業に伴い、複数回の短時間の欠測（合計の欠測時間は観測期間全体の1%未満）が発生したが、これらは前後の観測データを用いて補完した。

長期欠測を含まない2000年10月1日から2001年9月30日までの1年間について、安比のブナ林群落上において吸収または放出されたCO₂の量を積算すると、図1-4-2-2のようになった。2000年10月から2001年5月中旬までは安比のブナ林はCO₂のソース（放出源）となっており、この間に合計104gCm⁻²y⁻¹のCO₂の放出が観測された。その後安比のブナ林はCO₂のシンク（吸収源）となり、2001年9月末までの間に合計405gCm⁻²y⁻¹のCO₂の吸収が観測された。1年間積算すると合計301gCm⁻²y⁻¹のCO₂の吸収が観測された。

積算CO₂収支 (gC m⁻²)

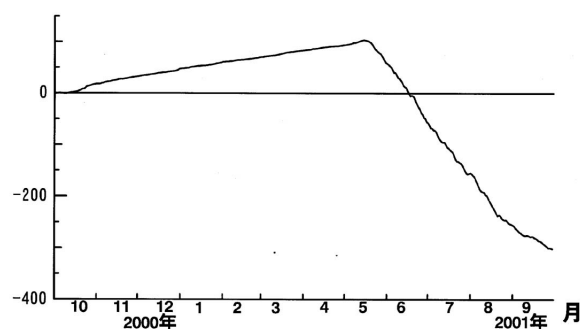


図1-4-2-2 安比ブナ林群落上における年間積算のCO₂収支

エ 考察

ブナの落葉が終わった11月から春の開葉が始まる前の翌年4月までの間は、群落内部には緑の葉はほとんどなく、光合成によるCO₂の吸収はほとんどないものと考えられる。したがって、この期間のブナ林群落上におけるCO₂フラックスは、植物体および土壌層の呼吸によるCO₂の放出のみが観測されたものと考えた。

一方、緑葉季のCO₂の吸収は葉群の光合成によるもので、呼吸による放出量との差し引きが群落上における吸収量として観測されたものと

考えられる。安比のブナ林はブナの優占度が高く、下層植生が少ないので、この期間の群落によるCO₂の吸収の多くは、ブナの葉の光合成によるものと考えた。また、緑葉季の日積算CO₂フラックスに日変動が大きいのは、ブナの葉群の光合成活性が天候や水分条件など多くの要因の影響で変動するためと考えた。これらの季節変動および日変動の要因については、今後さらに解析を進め、因果関係を解明する必要がある。

今回の観測結果からは、これらの季節変動および日変動を含めて、ブナ林群落上における1年間（2000年10月1日から2001年9月30日まで）のCO₂収支が積算で301gCm⁻²y⁻¹の吸収となったことから、安比のブナ林はCO₂の吸収源として機能していることが明らかになった。

オ 今後の課題

今後は、ブナ林における大気～森林間のCO₂収支のメカニズムを明らかにするために、さらに観測データを蓄積し、さまざまな気象条件下におけるブナ林のCO₂収支と環境要因との相互作用を解明する必要がある。そのためには、今後はブナ林群落内におけるCO₂貯留量の変化についても観測、解析を行い、1時間程度の短い時間スパンでブナ林群落内の生態系レベルでのCO₂収支を解明する必要がある。

さらに現在は、地球温暖化など長期間にわたる大規模な気候変動が森林に及ぼす影響の解明が求められており、ブナ林CO₂収支についても、長期間のモニタリングによってその影響を明らかにする必要がある。

そのためには、引き続きCO₂フラックスの観測を継続し、欠測の少ない長期間の連続データを得る必要がある。

また、本課題で適用した渦相関法を用いたCO₂収支の測定手法については、降雨、降雪時の観測精度の低下、夜間等の測定結果の過小評価など、現在なお未解決の検討課題がいくつか指摘されている。安比試験地においても、今後は現場観測データに基づいてこれらの問題点を検討し、観測精度を高めることが望まれる。

カ 要約

岩手県安代町のブナ林内に地上高31mの観測塔を建て、クロードパス方式の渦相関法によるCO₂フラックスの観測を行った。CO₂フラックスの観測は、1999年9月に開始し、現在まで継続している。その結果、図1-4-2-1に示したようなCO₂フラックスの長期変動が測定され、安比試験地におけるCO₂フラックスの長期連続測定法を確立することができた。

安比試験地のブナ林は冬季間には完全に落葉するので、2000年、2001年、2002年ともに冬季間はCO₂を放出し、緑葉季にはCO₂を吸収するといった明瞭な季節変化が見られた。

そのうち、2000年10月1日から2001年9月30日までの1年間については、半日以上の長時間の欠測を含まない1シーズンのCO₂フラックスの連続観測結果を得ることができた。その期間の観測結果から、安比のブナ林における1年間の積算CO₂収支を求めたところ、2000年10月から2001年5月中旬までの間に合計約104 gCm⁻²y⁻¹のCO₂の放出が観測され、その後2001年9月末までの間に合計約405 gCm⁻²y⁻¹のCO₂の吸収が観測された。2000年10月1日から2001年9月30日までの1年間について積算すると合計301 gCm⁻²y⁻¹のCO₂の吸収が観測され、安比のブナ林はCO₂の吸収源として機能していることが明らかになった。

引用文献

- OHTANI Y., MIZOGUTI Y., WATANABE T., YASUDA Y., & OKANO M. (2001) Seasonal change of CO₂ flux above an evergreen needle leaf forest in temperate region, Fujiyosida, Japan. Proc. International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation: 129-132.
- YASUDA Y. & WATANABE T. (2001) Comparative measurements of CO₂ flux over a forest using closed-path and open-path CO₂ analyzers. Boundary-Layer Meteorol. 100: 191-208.

（森林総合研究所、東北支所、齋藤武史）

(3) コナラ・ソゴ林における大気-森林系CO₂フラックスの解明

ア 目的

京都府相楽郡山城町の北谷水文試験地（山城試験地）のコナラ・ソゴ落葉広葉樹二次林において、主に微気象学的手法を用いて森林のCO₂交換量の長期観測を行った。研究目的は主に二つの項目に分けられる。一つは本研究を通して得られるCO₂フラックスの連続観測結果によって、近畿中国地方に広く分布する落葉広葉樹の二次林の炭素固定量評価を行うことである。またもう一つは日本の森林が一般的に立地する起伏に富んだ地形において、渦相関法によってCO₂フラックスを測定することの問題点の評価と妥当な観測手法の確立である。

近年、大気安定時の移流によるフラックス過小評価が、傾斜地においては大きくなることが指摘されている（Wofsy *et al.*, 1993; Jarvis, 1994; Ruimy *et al.*, 1995; Baldocchi *et al.*, 1997; Goulden *et al.*, 1996a; Black *et al.*, 1996）。そのため夜間の呼吸量が過小に測定され、結果として森林生態系のCO₂交換量は吸収側に過大評価されてしまう可能性が考えられる。そこで本研究では渦相関法観測と並行して、土壌表面と葉群において連続観測可能な自動チャンバを開発し、それぞれの結果を比較することによって上述の問題に関する評価を試みた。

イ 研究方法

(ア) 試験地

観測は京都府相楽郡山城町の山城試験地(北緯34度47分, 東経135度51分)において行われた。試験地は数十mの比高で尾根谷が連続する複雑地形上に位置する。平均標高は220mで、コナラとソゴが優先する落葉常緑広葉樹二次林である。落葉樹と常緑樹の断面積合計はそれぞれ6.3 m² ha⁻¹と13.3m² ha⁻¹で、DBHが3cm以上の毎木本数は5953本、平均樹高は約12mである。中古生層の風化花崗岩が母材であり、明治期の植林が行われるまで森林が荒廃していたと考えられているため森林土壌は全般的に未発達である。試験地には尾根と谷

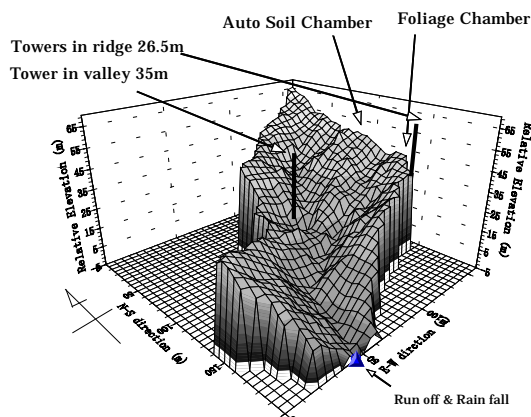


図1-4-3-1 試験地流域図

の2か所に観測タワーを設置した。流域の地形と各測定場所を図1-4-3-1に示す。

(イ) 渦相関法によるCO₂フラックス測定

CO₂フラックスの連続測定は尾根タワー(26.5m)において、クローズドパス式渦相関法と8点サンプリングによる貯留変化量測定によって行われた。測定期間は2000年1月から2002年12月までである。赤外線ガスアナライザはLicor社のLi-6262を用い、超音波風速計はKaijo社のDA-600-3TVを用いた。乱流変動観測のサンプリング周波数は10Hzで測定を行った。空気サンプリングはタワー最上部でおこなわれ、内径6mmのテフロンチューブによってタワー下部に設置されたガスアナライザに送られた。ポンプ吸引流量は約9.6L min⁻¹で、遅れ時間はおよそ9.6sから10.2sであった。測定に用いた空気は水蒸気補正を避けるためにエアドライヤを用いて乾燥させた。また一日に一度、N₂=80%、O₂=20%、CO₂=0ppmとN₂=80%、O₂=20%、CO₂=400 ppmの基準ガスを用いて測器校正を行った。

CO₂貯留変化量観測において、CO₂濃度の測定機器構成は渦相関法と同様のものを用いた。測定は26.5mから1.2mまでの8高度のCO₂濃度変化を、電磁弁によって3分毎に切り替えて測定し、30分毎の高度別濃度勾配の変化を求めた。

(ウ) チャンバ法

葉面や土壌面からのCO₂交換量を連続的に観測し、交換表面付近でのCO₂交換特性を理解するために、土壌と葉群の自動連続観測チャンバシステムの開発と測定を行い（Nobuhiro 2001, Miyama 2003）、渦相関法とチャンバ法によるCO₂フラックスの比較を行った。土壌チャンバ、葉群チャン

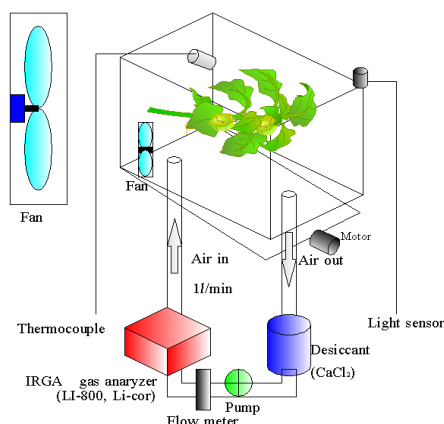


図1-4-3-2a. 葉群チャンバの構造

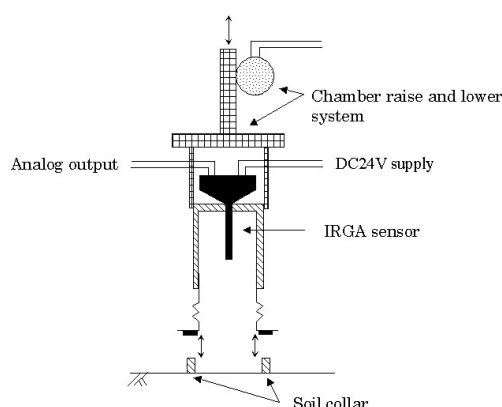


図1-4-3-2b. 土壌チャンバの構造

バとも、密閉した箱内のCO₂濃度の変化勾配から箱内の媒体のCO₂交換量を測定する、密閉法を用いた。それぞれのチャンバの上部は可動式になっており、通常は開いた自然状態で保持され、1時間に1回5～10分程度閉まることによって、CO₂フラックスの測定を行うものである（図1-4-3-2）。

ガスアナライザは、土壌チャンバではVisala社のGMD-20を、葉群チャンバではLicor社のLI-800を用いた。葉群チャンバはコナラの陽葉に設置された。また、土壌呼吸に関してはその値の場所による変動を評価するために、複数の手動チャンバによって、その空間分布の評価を行った。

ウ 結果

連続測定を行った尾根タワーでのCO₂交換量は次式によって算出された。

$$NEE_{(ridge)} = F_{eddy(ridge)} + \frac{dC_{(ridge)}}{dt}, \quad \frac{dC}{dt} = \frac{d}{dt} \int c(z) dz$$

F_{eddy} は乱流変動項、 dC/dt は貯留項である。これ

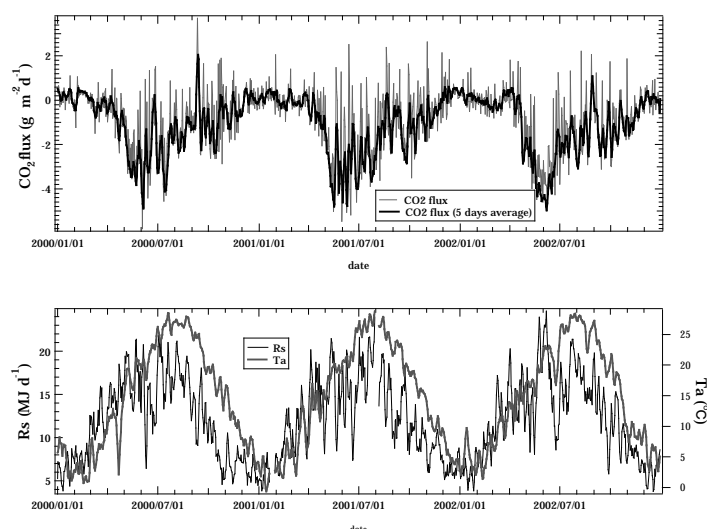


図1-4-3-3. 測定結果 CO₂フラックス（上段）、気温・日射（下段）

によって算出された森林上のCO₂交換量の季節変化を日射、気温とともに図1-4-3-3に示す。

欠測期間に関しては、昼間は欠測期間前後のPPFDとCO₂フラックスの関係、夜間に関しては地温との関係から推定した。年間の欠測期間は平均35日程度であった。以上の条件で得られたCO₂交換量は2000年から2002年の3年平均で312 gCm⁻²y⁻¹のCO₂吸収があるという結果が得られた。季節変化に関しては、落葉樹の開葉が完了した5月のはじめからCO₂吸収量は急激に増加し、5月～7月までが吸収のピークを示す。気温のピークを示す8月に入ると吸収量は急激に減少する。また2000年のように9月に渇水によって蒸散抑制が生じ、光合成がいったん停滞し10月にはいつてから再び増加するといった年もある。本試験地における落葉期は11月の後半なので、12月に入るとそれまで吸収側であったCO₂フラックスはほぼ0付近となる。また、落葉期の12月から3月までの平均CO₂交換量はほぼ0であり、大きなCO₂放出が観測されることはなかった。

エ 考察

(7) チャンバ法との比較

図1-4-3-4にチャンバ法で推定したCO₂フラックスと渦相関法によるCO₂フラックス、貯留量変化量のそれぞれを、大気安定時と不安定時について示す。

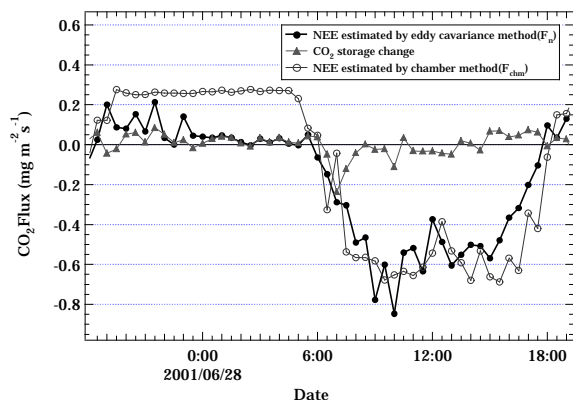


図1-4-3-4a. 大気安定時のCO₂フラックス

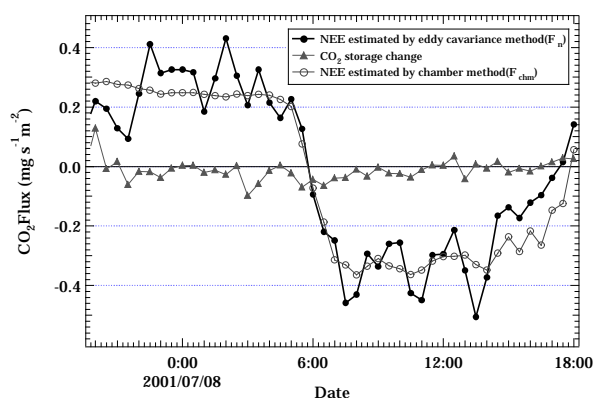


図1-4-3-4b. 大気不安定時のCO₂フラックス

チャンバ法によるCO₂フラックスの推定に関しては、葉群交換量を単独で流域平均交換量に変換することが現時点では困難なため、日中のフラックスに関して渦相関法、チャンバ法ともに良好に測定が行われていると仮定して、乱流変動フラックスと土壌呼吸量の差の日中積算値と葉群交換量が同じになるようにして夜間呼吸量の推定を行った。大気不安定時は夜間の混合が順調に進むために、日中－夜間ともに両者の関係は良く、午前中の放出から吸収への時間変化のパターンもほとんど一致する。しかし大気安定時については、夜間の乱流変動＋貯留量変化量による観測値は、午前0時以降は放出がほとんど観測されず、また貯留量の増大もほとんど見られない。午前中の放出－吸収の切り替わり時には、平坦な森林でよく見られるような貯留されたCO₂の消費によるフラックスが観測されるが、その量は、チャンバ法から予想される値よりも明らかに小さい。これは大気安定時の移流現象によって林床面付近に下降してきたCO₂が系外へ移動していることを示唆するもので

ある。

(4) 大気安定度による呼吸量の変動

大気安定時のCO₂フラックス過小評価の補正方法として一般に考えられているのは、大気安定時の値を大気不安定時のCO₂フラックスと他の気象要素の関係から推定するというものである。ここでは其中で比較的良く用いられる、摩擦速度をしきい値にして、混合が十分に進んでいるとき(大気不安定時)の気温－フラックス関係から大気安定時のフラックスを推定する場合を考える。図1-4-3-5に摩擦速度(u_*)をしきい値にしたときの気温－CO₂フラックス関係を示す。

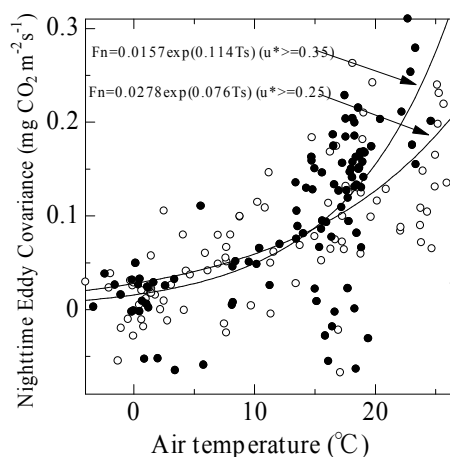


図1-4-3-5. 夜間呼吸量と気温の関係

u_* のしきい値を0.25以上0.35未満にした場合と、 u_* のしきい値を0.35にした場合、両者ともべき乗関数で近似が可能であった。しかし、しきい値の u_* を変化させると補正関数の高温域での変動が非常に大きくなった。通常夜間は風が弱く、表面付近が冷やされるため大気が安定になりやすい条件がそろっており、長期的に観測を行っても十分な観測点数を集めることが難しく、これが夜間呼吸量の推定を不確実にする大きな要因となっている。また u_* が0.25から0.35までのデータを用いて回帰した関数を用いて2001年の夜間呼吸量を推定したところ、推定値はチャンバ法による推定値の67%程度になり(Kominami 2003)、年間総吸収量は炭素換算で約210gC m⁻² y⁻¹まで減少する。このように夜間の交換量を十分な精度で評価することが、森林のCO₂吸収量の推定をする上で重要な課題であると考えられる。

オ 今後の課題

渦相関法によるCO₂フラックス法観測では大気安定時のCO₂交換量の補正精度向上と降雨時のCO₂交換量の評価が必要である。またチャンバ法に関しては、単点での測定はできるものの場所による変動が激しいため、土壌、葉、幹などの各表面での交換量の空間分布の測定、評価を行い、変動の原因と平均値の推定が必要である。また、生産生態学的手法を用いた樹体、土壌等への炭素蓄積量の測定を導入し、相互の比較評価を行うことによって、各推定法の中で用いられているパラメータの妥当性の検討を行い、全体としての精度向上を図る必要がある。

カ 要約

京都府南部山城試験地の落葉常緑広葉樹二次林において渦相関法を用いた森林のCO₂交換量の連続観測を2000年から2002年にかけて行った。また渦相関法による測定の検証を行うために土壌と葉群に自動観測チャンバを設置し連続観測を行った。渦相関法によって求められた試験地森林のCO₂吸収量は2000年から2002年の3年間の平均で312gCm⁻²y⁻¹であった。しかし、チャンバ法との比較を行った結果、大気安定度が高い夜間に呼吸量を過小評価している可能性が示唆され、夜間呼吸量の高精度な測定の必要性が必要であることがわかった。

引用文献

- BALDOCCHI D. D., VOGEL C. A. & HALL B. (1997) Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 83: 147-170.
- GOULDEN M. L., MUNGER J.W., FAN S. M., DAUBE B. C. & WOFSY S. C. (1996a) Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability. *Science* 271: 1576-1578.
- GOULDEN M. L., MUNGER J.W., FAN S. M., DAUBE B. C. & WOFSY S. C. (1996b) Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol.* 2: 169-182.
- JARVIS, P. G. (1994) Capture of carbon dioxide by a coniferous forest. in "Resource Capture by Crops". Eds: Monteith, R. K. Scott, and M. H. Unsworth, Nottingham Univ. Press, Nottingham, U.K., 51-374.
- KOMINAMI Y., MIYAMA T., TAMAI K., NOBUHIRO T. & GOTO Y. (2001) Seasonal variation of CO₂ flux over a deciduous broad-leaved forest in Japan -Preliminary result from observation 2000-. *Proceedings of International workshop for advanced flux network and flux evaluation*: 149-152.
- LAVIGNE M. B., RYAN M. G., ANDERSON D. E. & coauthors (1997) Comparing nocturnal eddy covariance measurements to estimates of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at six coniferous boreal sites. *J. Geophys. Res.* 102(D24): 28977-28985.
- MIYAMA T., KOMINAMI Y., TAMAI K., NOBUHIRO T. & GOTO Y. (2003) Automated foliage chamber method for long-term measurement of CO₂ flux in the uppermost canopy, *Tellus* 55B: 322-330
- NOBUHIRO T., TAMAI K., KOMINAMI Y., Miyama T., Goto Y. & KANAZAWA Y. (2003) Development of the IRGA enclosed-chamber system for soil CO₂ efflux measurement and its application to spatial variation measurement, *J. For. Res.* 8: 297-301
- RUIJMY A., JARVIS P. G., BALDOCCHI D.D. & SAUGIER B. (1995) CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: A review. *Adv. Ecol. Res.* 26: 1-68.
- WOFSY S. C., GOULDEN M. L., MUNGER J. W. & coauthors (1993) Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science* 260: 1314-1317.
- (森林総合研究所、関西支所、小南裕志、玉井幸治、深山貴文、後藤義明)

(4) 暖温帯スギ林における大気－森林系CO₂フラックスの解明

ア 目的

森林地にタワーサイトを設置し、微気象学的手法に基づいて取得した観測データからCO₂交換量を算出する方法は、森林の正味CO₂交換量(NEE)を直接的かつ包括的に測定しうる唯一の手段である。こうした測定は現在世界中で行われており、観測サイト間のネットワークを通じて、情報の交換も進んでいる(例えばBaldocchi, *et al.*, 2002)。しかし、我が国でも特に温暖・湿潤で、植物の成長に好適な条件を備えた九州地域の森林を対象とした、CO₂フラックスの長期観測例は未だ無い。また、スギは日本の森林における植栽木としては、最もポピュラーな樹種である。そこで、九州地域におけるスギ林上のNEEと、その季節変化を明らかにするとともに、CO₂フラックス形成過程について検討を行うことを目的として、本課題を遂行した。

イ 研究方法

熊本県鹿北町の鹿北流域試験地(33°08'N, 130°43'E)に、高さ50mの気象観測タワーを建設し、これを用いて観測を行った。試験地は起伏に富んだ複雑地形地である(図1-4-4-1)。タワー直下のスギは、周囲の林分の中では最も成長が良好で、樹高30mに達する。タワー最上部には超音波風速計と大気サンプルの吸引口を設置し、得られたデータから渦相関法によってCO₂フラックス(F_e)を算出するとともに、樹冠上から地表面近くのCO₂濃度の高度分布から算出したCO₂貯留変化量(S_e)とを和して、NEEの観測値とした。また、並行して観測した樹冠上の放射量、気温(T_a)及び地温から得た土壌呼吸量推定値を用いて、観測値の補正・補完を行った。これらに基づいて、暖温帯スギ林流域におけるCO₂交換量について定量化を行い、季節変化の傾向を明らかにするとともに、その変動に影響を及ぼす要因について、考察を行った。

ウ 結果

(ア) 光合成量・呼吸量のパラメタリゼーション
2000年のデータより、対象とする森林の光合成量

・呼吸量 R_e と気象環境要因との関係について検討した。光合成量については気温を指標として季節毎に分類し、そのうえで日射量との関係式を得た(図1-4-4-2)。また R_e については、夜間の風の強いときのデータを用いて、気温との関係について定式化した(図1-4-4-3)。

(イ) NEEの定量化と季節・年々変動の傾向

上記で得られた経験式を用いて、停電や機器の故障による欠測値の補完を行った。また、夜間で風の弱い場合に、 R_e の観測値($=F_e+S_e$)が過小に算出される可能性が高いため、その場合には呼吸量の経験式で補完した。夜間の R_e が妥当であるか否かを判定する閾値としては、土壌呼吸量推定値を用いることを提案し、試行した。

以上の手続きを経て、試験地におけるNEEを定量化し、季節変動の傾向を得た(図1-4-4-4)。さらにNEEの積算値を年毎に算出し(図1-4-4-5)、2000年－2002年での気象環境の相違が、NEE積算値の推移や年間合計量に与える影響について考察した(表1-4-4-1、表1-4-4-2)。

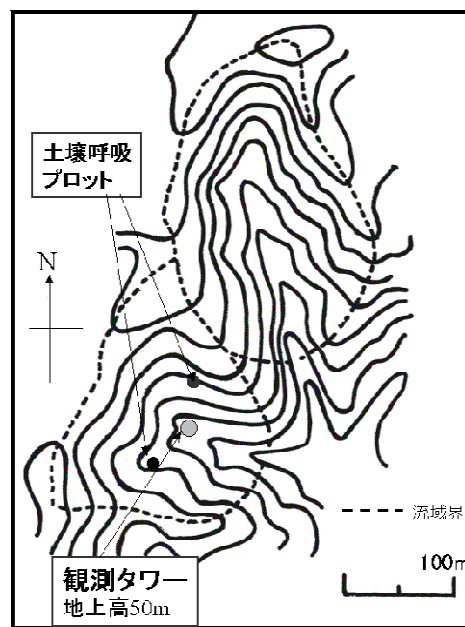


図1-4-4-1. 試験地の地形図と観測地点

エ 考察

日射量と光合成量との関係より、春季の展葉時に光合成量は大きくなり、冬季で気温が2.5℃以

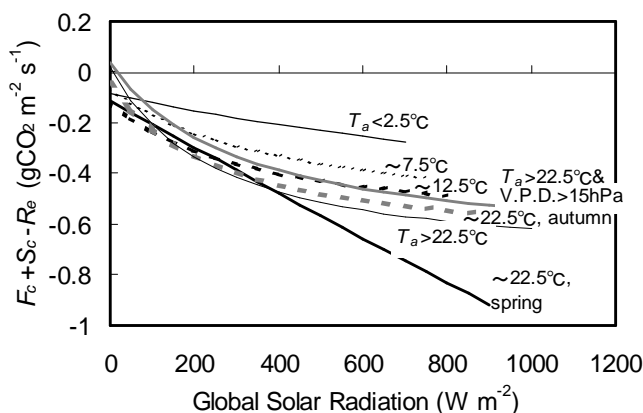


図1-4-4-2. 日射量と光合成量の関係

下が見られた。しかし、それ以外の時期には光合成量に大きな差異が生じないことが明らかになった。また、 R_e は気温の上昇に対して、指数関数的に増大することが確認された。

この結果は、NEEの季節変動にも反映されていた。試験地では、ほぼ年間を通じて CO_2 吸収が生じており、その値は春季が最も大きかった。夏季には呼吸量の増大に伴う CO_2 吸収量の減少が見られたが、秋季には再び増加に転じた。こうした傾向は、対象とする観測期間中で共通であり、暖温帯多雨地域のスギ林の特徴であるといえる。

年毎の変動に関する考察は、以下の通りである。NEE積算値の推移について、対象期間の3年で年毎の傾向を抽出した結果、(1) 2000年は他の2年に対して秋季にNEEの伸びが鈍化する、(2) 2001年は夏季にNEE積算値の伸びが停まる傾向が顕著である、(3) 2002年は1月のNEEがほとんど0である、という点が主な差異として明らかになった。これらの期間について、気象要素との比較を行ったところ、(1) については、9–10月の平均日射量が2000年で最小であったこと、(2) については、7月下旬から8月中旬の平均気温が、2001年のみ 27°C を超える高温の夏であったこと、(3) については、1月の平均日射量が2002年で最小であったことが、差異をもたらした一因であると推察された。

このように各年では季節毎に気象環境の違いがあったが、年毎を単位として集計した日射量及び気温の値には、ほとんど相違が無かった。ただし年降水量は、2001年が2000年より約20%多く、逆に2002年は2000年よりも20%以上少なかった。

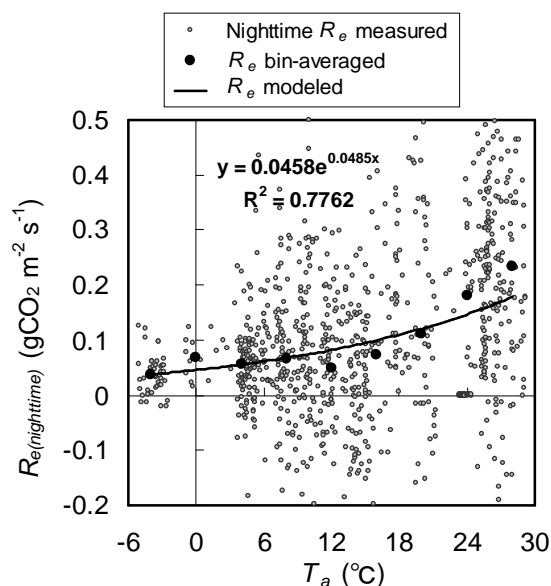


図1-4-4-3. 気温と夜間の呼吸量の関係

2002年は特に夏の降雨量が少なく、6-8月の降雨量は計407mmで、2000年・2001年の同期間（それぞれ計936mm・計1440mm）と比較して45%–30%程度であった。しかし、2002年の少雨がNEE積算値の推移に及ぼす影響は、抽出できなかった。これには、九州地方の中部から南部は元来多雨であるため、2002年程度の降雨量の減少では樹木の成長に支障を来さない、という理由が考えられた。

また、NEEの年間合計値は、2000年 ($-500\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$) と比較して夏季高温・多雨であった2001年 ($-570\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$) や、少雨であった2002年 ($-520\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$) でもNEEの年間合計値の差は15%以内で

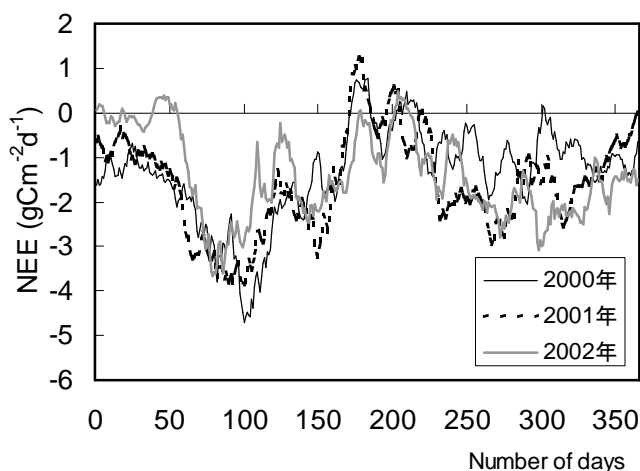


図1-4-4-4. 2000年–2002年のNEEの季節変動 (10日移動平均値)

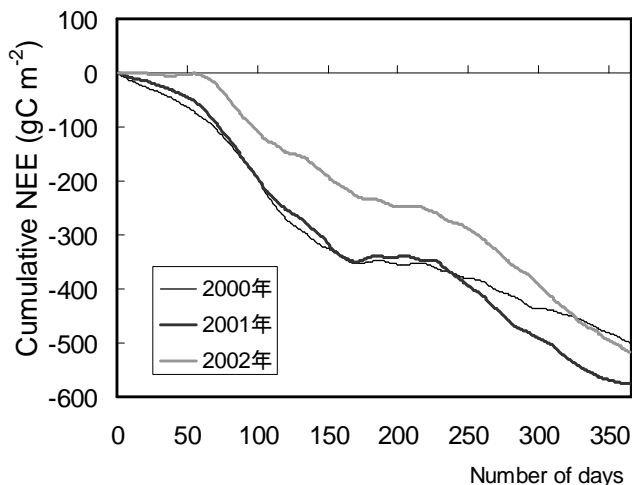


図1-4-4-5. 2000年－2002年のNEE積算値の推移

あった。以上より、年毎に気象環境が多少変動しても、それが偏った傾向や極端なものでない限り、NEEの年々変動にはそれほど大きく影響しない可能性が高いと考えられた。

オ 今後の課題

将来の気候変動に対する森林のCO₂交換特性の変化を予測するためには、今後も観測を継続して、平年値から極端に逸脱する気象条件が現れた際の影響をモニタリングする必要がある。測定手法に関しては、試験地での渦相關法の適用精度を再検証するために、熱フラックスの総和の値と放射収支との比較を行うべきである。また、試験地が複雑地形にあることやタワー周辺の植栽木の林齢・成長状態に違いがあることを考慮して、観測値を風向別に分類して整理する必要性についても検討する余地がある。さらに、NEEの算出に際しては、特に複雑地形地における夜間の呼吸量の扱いについて引き続き検討を重ねる必要がある(Kominami *et al.*, 2003)。

カ 要約

九州地域のスギ人工林を対象に、微気象学的手法に基づく長期連続観測データから正味CO₂交換量(NEE)を算出した。試験地では年間を通じてCO₂吸収が生じており、そのピークは春季で、夏季には呼吸量の増大によるCO₂吸収量の一時的な減少が見られた。観測期間中のNEE積算値の推移には、年毎に異なる傾向が見られたが、

表1-4-4-1. 2000年－2002年内での気象環境の相違
(NEE積算値の差異が顕著であった期間)

年	1月日射量 (MJ m ⁻² day ⁻¹)	同気温 (°C)	9-10月日射量 (MJ m ⁻² day ⁻¹)	同気温 (°C)	7/20-8/20 気温 (°C)
2000	7.70	5.3	13.19	20.3	26.0
2001	7.72	3.5	14.75	20.3	27.5
2002	6.69	5.1	14.66	19.5	26.8

表1-4-4-2. 2000年－2002年の気象環境 (年単位の集計)

年	平均日射量 (MJ m ⁻² day ⁻¹)	年平均気温 (°C)	年降水量 (mm)
2000	13.79	15.1	1988.5
2001	13.71	15.2	2397.5
2002	13.70	15.3	1538.0

この理由については、日射量や気温との対比による考察が可能であった。一方、観測期間中で年単位での日射量・気温平均値にはほとんど差は無く、これを反映してNEEの年間合計値には、極端な変動は無かった。

引用文献

- BALDOCCHI, D. D., FALGE, E., GU, L., OLSON, R., HOLLINGER, D., RUNNING, S., ANTHONI, P., BERNHOFER, CH., DAVIS, K., FUENTES, J., GOLDSTEIN, A., KATUL, G., LAW, B., LEE, X., MALHI, Y., MEYERS, T., MUNGER, J. W., OECHEL, W., PILEGAARD, K., SCHMID, H. P., VALENTINI, R., VERMA, S., VESALA, T., WILSON K., & WOFSY, S. (2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of American Meteorological Society*. 82: 2415 - 2434.
- KOMINAMI, Y., MIYAMA, T., TAMAI, K., NOBUHIRO, T., & GOTO, T. (2003) Characteristics of CO₂ flux over a forest on complex topography. *Tellus*. 55B: 313-321.

(森林総合研究所 九州支所 清水貴範、大丸裕武、宮縁育夫、小川泰浩)

(5) 温帯アカマツ天然林・暖温帯落葉広葉樹林における大気－森林系CO₂フラックスの解明

ア 目的

森林生態系は植物個体や生態系の面積が大きい
ため、陸域生態系における最も大きなCO₂吸収源
と考えられているが、森林生態系におけるCO₂吸
収の特徴・メカニズムはまだまだ解明されてい
ない点が多い。本研究では、おもに微気象学的な方
法により森林生態系の刻々のCO₂吸収量・放出量
を観測し、その季節変化、年々変動を明らかにす
る。

イ 研究方法

本研究では渦相関法といわれる微気象学的な手
法により森林上におけるCO₂フラックスを測定し、
CO₂吸収量の評価を試みた。CO₂フラックスとは森
林一大気間の単位時間・単位面積あたりのCO₂輸
送量を表す。

観測は山梨県富士吉田市にある常緑針葉樹林
(森林総合研究所富士吉田森林気象試験地)、お
よび埼玉県川越市にある落葉広葉樹林(森林総合
研究所川越森林気象試験地)で行った。

富士吉田森林気象試験地は、35.5°N、138.8°E、
標高約1030mの富士山北麓にあり、傾斜約3.5°の比
較的一様な緩斜面上に位置する。アカマツが上部
樹冠を構成する常緑針葉樹林には、ミズナラ・カ
ラマツ・ハリモミがわずかに混交し、ソヨゴ・ダ
ンコウバイなどが下層に分布する。樹高は約20m
で、LAI-2000で測定された葉面積指数は最大で約
5m²/m²である。この森林内に高さ32mの観測タワ
ーを設置し、高度26mの位置において渦相関法に
よるCO₂フラックス測定を行った。観測には超音
波風速計(DAT-600-3T/ KAIJO)とClosed-path型CO₂
分析計(Li6262/Li-Cor)を用いた。

川越森林気象試験地は、35.9°E、139.5°Nに位置
し、標高約30mの平坦地形上にある。落葉広葉樹
林の構成樹種は、コナラ・アカシデ・リョウブ・
サクラなどで、樹高は約15mである。葉面積指数
は最大で約5.5m²/m²に達する。この森林内に高さ
25mの観測タワーを設置し、高度20mの位置にお
いて渦相関法によるCO₂フラックス測定を行った。
観測には、超音波風速計とClosed-path型CO₂分析
計を用いた。なお、この森林では毎年1月頃に落ち
葉かきが行われ、集められた落葉は近隣の農家に
堆肥として利用されている。このため林床には落
葉層が存在しない。

両試験地ともに30分を単位としてフラックス
を計算した。渦相関法によるCO₂フラックス(F_c)
と、群落内CO₂貯留変化量(Sc)の和を、生態系純
CO₂交換量(NEE ; $NEE=F_c+Sc$)とし、富士吉田試験
地についてはNEE、川越試験地については F_c を用
いて森林のCO₂吸収量を評価した。両試験地とも
夜間の生態系呼吸量を気温でパラメタ化した。
富士吉田については日中の生態系純CO₂交換量
を群落で吸収された光合成有効波長域放射量
(APAR)で、川越についてはCO₂フラックスを全天
日射量(S_d)でパラメタ化し、それぞれ欠測値を補
完した。

また川越試験地では、森林群落上のCO₂フラッ
クスへの群落構成要素からの寄与を明らかにする
研究の一環として、上部を自動開閉することによ
って長期測定の影響を軽減したチャンバを用い
て、林床面CO₂放出量の連続測定を行った。群落
内の林床に2台の自動開閉型チャンバを設置し、
チャンバ毎に1時間に3回の測定を行った。同時
に白金抵抗温度計およびTDR土壤水分計を深さ
5cmに埋設し、地温および体積含水率を測定し、
林床面からのCO₂放出速度の日変化、季節変化
と地温、土壤水分との関係を解析した。

ウ 結果

(7) アカマツ林樹冠上におけるCO₂フラックス の季節変化と年々変動

2001年～2002年の3年間に観測された、生態系
純CO₂交換量(NEE)の変化を図1-4-5-1に示す。図で
負のNEEは群落によるCO₂吸収を表す。生態系純
生産量(NEP)とNEEの関係は、 $NEP=-NEE$ で表され
る。

NEEは、冬季の休眠による連続したCO₂放出の
あと3月から吸収に転じ(2000年、2001年)、5月に
CO₂吸収の最大値が観測された。その後冬季に向
かって徐々に吸収量は減少した。

2001年は、梅雨季(6月)のCO₂吸収量の減少が
2000年ほど顕著ではないのに対して、夏季の吸
収量は逆に2000年よりかなり少なく、とりわけ
2001年は9月のCO₂吸収量の減少が顕著であつた。
冬季の休眠期間は2001年が2000年より約1か月
長かった。2002年は、暖冬につづき春の訪れも
早かったため、2000年、2001年には呼吸による
放出が吸収量を上回っていた1月、2月でも、2002
年は逆にCO₂の吸収が見られた。3月は、まだ気
温が低く生態系呼吸量が小さいことと相まって、
盛夏の8月よりも大きな吸収を示した。これによ

り、2002年の年間のNEPは3年間で最も大きく、2000に対して28%の増加となった。このような年間のNEPの大きな変動は、年単位の気象要素の違いでは説明出来ず、NEPの季節変化の年による違いが大きく影響していると考えられた。2000年～2002年の年間のNEPは、それぞれ $371\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ 、 $391\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ 、 $475\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ となった(Quality control と夜間の呼吸量パラメタリゼーションの見直し作業が進行中のため暫定値)。

(イ) 落葉広葉樹林樹冠上におけるCO₂フラックスの季節変化と年間炭素吸収量

川越森林気象試験地の落葉広葉樹林上におけるCO₂フラックスの季節変化を図1-4-5-2に示す。図示したデータは、1997年6月から2001年12月までの5年半の測定結果である。単位は1日あたりのCO₂フラックス($\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)で表した。なお、CO₂フラックスが下向き(マイナス)のときは森林によるCO₂吸収を表し、上向き(プラス)のときは森林からのCO₂放出を表す。

CO₂フラックスの値には、かなりのばらつきが見られるが、春から秋にかけて森林がCO₂を吸収し、冬期にCO₂を放出するという季節変化の傾向をよく捉えている。CO₂フラックスは4月中旬に上向きから下向き(CO₂の放出から吸収)に変わり、11月中旬に下向きから上向きに変わった。いずれの年においてもCO₂フラックスの季節変化は、樹木の展葉直後からはじまる急激な下向きフラックスの増加と、その後の緩やかな下向きフラックスの減少によって特徴付けられる。

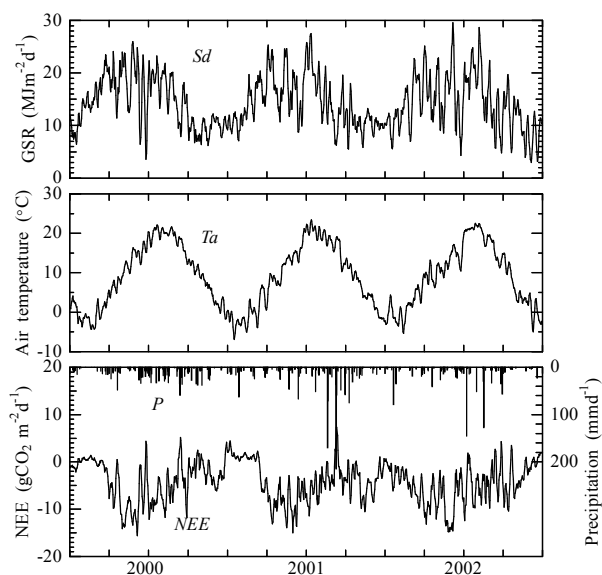


図1-4-5-1. 全日日射量(*Sd*)、気温(*Ta*)、降水量(*P*)と生態系純CO₂交換量(NEE)の季節変化(2000～2002年、富士吉田試験地)

図1-4-5-3に各年のCO₂フラックスを累積した結果を示す。1997年については、1997年6月～1998年5月までの累積結果で示した。この図から各年のCO₂吸収速度および吸収量の特徴を見ることができる。すなわち、春から夏にかけてのCO₂吸収速度は、1999年を除いてほぼ等しいこと、1997年は秋のCO₂吸収量が他年と比べて大きいこと、1999年は5月以降の生長期間中CO₂吸収速度が低いこと、2001年は夏期にCO₂吸収速度の減衰が起こっていること、などがわかる。各年の年間CO₂フラックス(森林の正味年間炭素吸収量に相当する値、炭素量換算)は年ごとに変動しており、最も多い年で1997年の $357\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ 、最も少ない年で1999年の $212\text{gCm}^{-2}\text{y}^{-1}$ であった(1997年は1997年6月～1998年5月までの結果、数値はQuality control前の暫定値)。

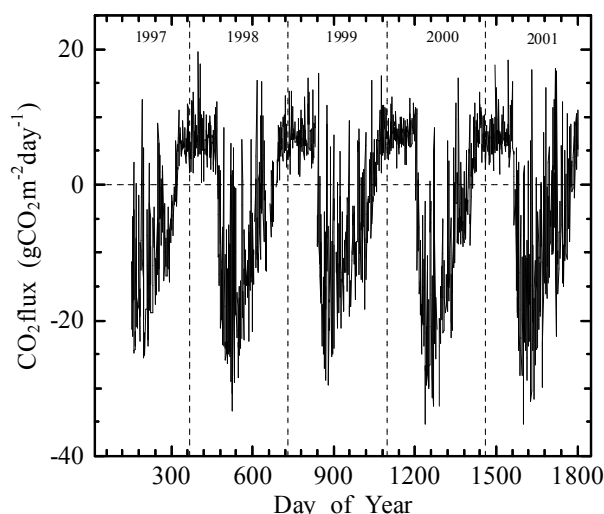


図1-4-5-2. 日積算CO₂フラックスの季節変化(1997年～2001年、川越試験地)

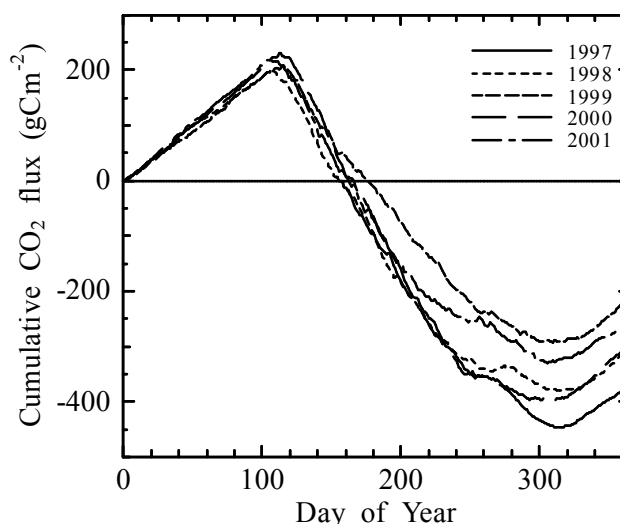


図1-4-5-3. 各年のCO₂フラックスの累積

(ウ) 林床面CO₂放出速度の日変化・季節変化

林床面からのCO₂放出速度の日変化は、夏季に大きく、冬季に小さかった。夏季には、日中に明瞭なピークが現れたが、夜間にもピークが現れる場合もあり、降雨のない日でも地温の日変化傾向と一致しなかった。図1-4-5-4のように、降雨によってCO₂放出速度が減少する場合と、逆に増加する場合がみられた。

2台の自動開閉型チャンバによる2000年のCO₂放出速度の年変化を図1-4-5-5に示す。2台のチャンバの林床面CO₂放出速度は、年間を通してC1よりC2の方が大きかったが、相対的な変化はよく似ていた。CO₂放出速度の最小値は冬季に現れ、C1、C2それぞれ0.47gCm⁻²d⁻¹、0.71gCm⁻²d⁻¹であった。春から秋にかけてCO₂放出速度は増加し、7月にそれぞれ6.6 gCm⁻²d⁻¹、10.8 gCm⁻²d⁻¹と最大値を示した後、冬に向かって減少した。8月下旬から9月上旬にかけて土壌の体積含水率の大幅な減少があった期間、CO₂放出速度も大きく減少した。

エ 考察

アカマツ林で観測されたNEEの季節変化は、温度環境に対応したCO₂放出量と、主に日射量に対応したCO₂吸収量との収支で概ね説明できる。気温の季節内変動は比較的小さいのに対し、放射量の変動は大きく、CO₂吸収量の大きな季節内変動は、主に日射量（光合成有効放射量）の変動によると考えられた。気温が高い時期（生態系呼吸

量の多い時期）にどの程度の日射量が得られるか、冬季の気温に影響される休眠期間がどの程度の長さになるか、これらが年間のCO₂吸収量に大きく影響することが分かった。富士吉田のアカマツ林で得られた年間のNEPは、EUROFLUX・AmeriFluxプロジェクトの成果として報告された(Falge *et al.*, 2002)北方常緑針葉樹林の値より大きく、温帯常緑針葉樹林の値の範囲内にあった。

川越の落葉広葉樹林上におけるCO₂フラックスの季節変化と同様の变化傾向が、他の落葉広葉樹林においても観測されている (Greco & Baldocchi 1996; Valentini *et al.* 1996; 小栗・檜山 2002)。このことから、春にみられる急激なCO₂吸収速度の増加と夏から秋にかけてのCO₂吸収速度の緩やかな減少は、落葉広葉樹林の特性といえる。

しかし、年間の正味炭素吸収量は観測サイト毎に大きな違いがみられる。たとえばGreco & Baldocchi (1996)はアメリカ・テネシー州の温帯落葉広葉樹林において525gCm⁻²y⁻¹の炭素吸収量を、またValentini *et al.*(1996)はイタリアのブナ林において472gCm⁻²y⁻¹の炭素吸収量を観測した。本研究の観測結果はそれらの値よりも小さい。また本試験地では落葉が除かれているため、観測値には落葉の分解により生じるCO₂量が含まれていない。1997年における川越試験地の落葉に含まれていた炭素量は175gCm⁻²y⁻¹と推定されており (安田・渡辺 1999)、林床に落葉が自然状態で残されていた

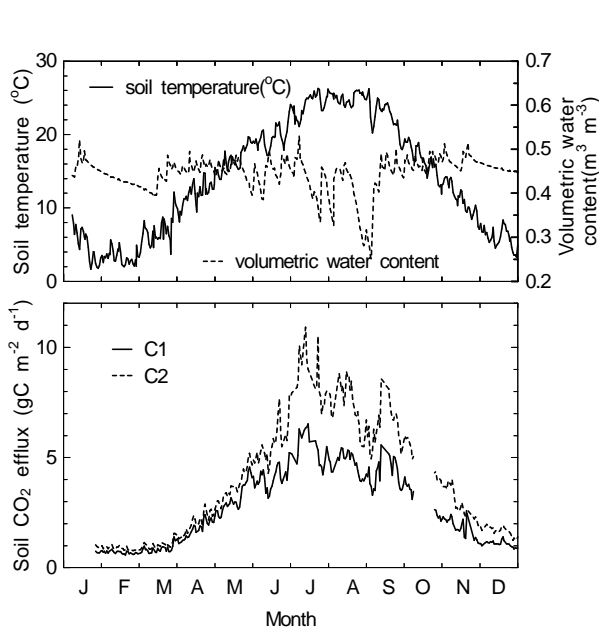


図1-4-5-5. 2000年の地温，土壌体積含水率，チャンバ毎のCO₂放出速度の季節変化

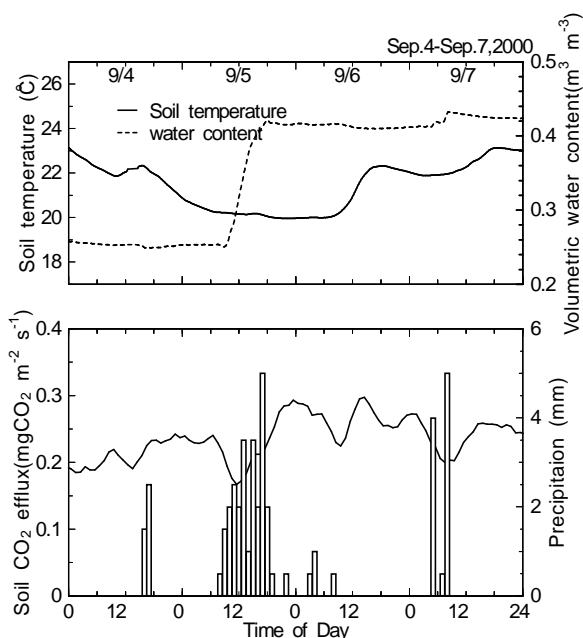


図1-4-5-4. 地温と体積含水率，降水量，CO₂放出速度の日変化の例

ならば正味の年間炭素吸収量はさらに小さくなることが予想される。

地温と林床面CO₂放出速度の相関は高く、地温によるパラメタ化が可能であった。しかし、日変化でみると、ある深さにおける地温と林床面からのCO₂放出速度は、必ずしも対応しなかった。また、土壌水分とCO₂放出速度の関係は、夏季に土壌水分の低下と林床面からのCO₂放出速度の低下が一致している一方で、降雨時において一時的にCO₂放出速度の低下が観測されるなど、地温との関係よりも複雑であった。

オ 今後の課題

森林におけるCO₂吸収機構を解明するためには、年間炭素吸収量の変動がどのような原因で生じているのかをより詳細に解明する必要がある。また、CO₂フラックスを構成する各要素（葉群光合成・呼吸、幹・枝呼吸、土壌呼吸）のフラックスに対する寄与を明らかにし、各CO₂交換過程におけるCO₂吸収・放出の変動特性を明らかにする必要がある。

タワーフラックス観測による生態系のCO₂吸収量測定において、夜間の大気安定成層時におけるフラックスの過小評価が問題となっており、データのQuality controlを行い、観測精度を向上する必要がある。

土壌水分のCO₂放出速度に対する影響の定量化のためCO₂発生速度や、ガス拡散係数の変化などを考慮した解析が必要である。

カ 要約

山梨県富士吉田市のアカマツ林および、埼玉県川越市の落葉広葉樹林上においてCO₂フラックスの長期連続測定手法を確立し、3年～5年にわたる連続観測を行いデータを蓄積した。この観測により、常緑針葉樹林、落葉広葉樹林それぞれのCO₂吸収量の実態、季節変化、年々変動などの特性が明らかとなった。

自動開閉型チャンバを用いた、林床面CO₂放出速度の長期連続測定手法を確立した。観測により、降雨中も含めて長期にわたる連続した林床面CO₂放出速度の測定データが得られ、地温による林床

面CO₂放出速度のパラメタ化を行った。林床面からCO₂放出速度の日変化は、晴天日でも地温の変化と単純には一致しなかった。また、CO₂放出速度の変化は、日変化、季節変化ともに土壌水分の影響を無視できないことがわかった。

引用文献

- FALGE, E., BALDOCCHI, D., TENHUNEN, J., AUBINET, M., BAKWIN, P., BERBIGIER, P., BERNHOFER, C., BURBA, G., CLEMENT, R., DAVIS, K. J., ELBERS, J. A., GOLDSTEIN, A. H., GRELLE, A., GRANIER, A., GUTHMUNDSSON, J., HOLLINGER, D., KOWALSKI, A. S., KATUL, G., LAW, B. E., MALHI, Y., MEYERS, T., MONSON, R. K., MUNGER, J. W., OECHEL, W., PAW U, K. T., PILEGAARD, K., RANNIK, U., REBMANN, C., SUYKER, A., VALENTINI, R., WILSON, K., AND WOFSY, S. (2002) Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agric. For. Meteorol.* 113: 53-74.
- GRECO, S. & BALDOCCHI, D. (1996) Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology* 3: 183-198.
- VALENTINI, R., DE ANGELIS, P., MATTEUCCI, G., MONACO, R., DORE, S. & SCARASCIA MUGNOZZA, G. E. (1996) Seasonal net carbon exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Biology* 3: 199-208.
- 安田幸生・渡辺 力 (1999) 「落葉広葉樹林上におけるCO₂フラックスの季節変化」へのコメントに対する回答. *水文・水資源学会誌* 12: 251.

(森林総合研究所、気象環境研究領域、大谷義一、渡辺 力、溝口康子、安田幸生)
(科学技術特別研究員 現北海道大学、戸田 求)

5. 森林における炭素貯留機構とCO₂収支の総合評価

(1) 林分成長モデルによる樹種別・地域別 CO₂ 固定貯留量の評価

ア 目的

温室効果ガス削減のルールを定めた京都議定書では、3条3項で新規造林、再造林、森林の他土地利用への転用に関わる温室効果ガスの排出・吸収は必ず報告しなければならないとし、また3条4項に森林管理による温室効果ガス吸収分を排出からひくことができると定められた。

日本では、新規造林、再造林には主にスギ等の針葉樹造林樹種が用いられる。また、日本においてどういう森林を「森林管理」と定義するかについては、具体的には定まっていないが、人工林はこれに該当する可能性が高い。人工林の成長量は森林簿によっても算出が可能だが、森林簿の材積算出の基礎となる収穫予想表がかなり以前に作成されたものが多くやや問題がある。そこで、本課題ではスギ、ヒノキなど主要造林樹種について実測データに基づいて簡単な成長モデルを作成し、地域別・樹種別に全国の地下部を含む林木バイオマスの炭素固定・貯留量を推計した。

イ 研究方法

主要造林樹種（スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ、エゾマツ、トドマツ）について、林分密度管理図の原資料を用い、地域別に平均的な成長曲線を求めた。成長曲線のパラメータがほぼ等しかった地域は統合した。成長曲線はミッチャーリッヒ式を用いた。

次に、主要造林樹種について既存文献から林分の幹、枝、葉および根のバイオマス量に関する資料・データを収集し、データベースを作成した。データベースから、林分総現存量に対する幹、枝、葉、根現存量の占める割合である部位別現存量割合と林齢との関係を解析した。

上記の主要樹種について、成長曲線と部位別現存量に、林業センサス等の樹種・齢級別面積統計をかけ、1990年時点での日本全国での樹種別炭

素貯留量を求め、年間の炭素固定量を推計した。市町村別統計が十分であったスギ、ヒノキについては、炭素貯留量の市町村別分布図を作成した。分布図は、スギ、ヒノキが植林されない高地を除いて、市町村別スギ、ヒノキ面積を国土地理院3次メッシュのメッシュ別森林面積に応じて配分する手法で作成した（FUKUDA et al.2003）。

ウ 結果

(ア)スギおよびヒノキ、アカマツ、カラマツ、エゾマツ、トドマツの幹材積成長曲線を地域別に推定したところ図-1～4のようになった。スギの成長曲線は、5地域に統合された。ヒノキでは九州の成長曲線が成長が大きく他は統合できると考えられた。

(イ)文献よりスギおよびヒノキ、アカマツ、カラマツについて、部位別現存量割合と林齢との関係を求めた（福田ほか 2001、2002、図-5～9）。根はこれまでの知見と同様に林齢によらずほぼ一定となった。枝・葉は林齢とともに比率が減少し現存量割合に対してミッチャーリッヒ成長曲線がほぼよく当てはまった。この結果からある林齢における各部位の現存量を推定できる可能性が示された。

なお、アカマツ、カラマツ、トドマツについては、根のバイオマス量に関するデータが多くなかったため、データから表-1のような定数を求めた。また、エゾマツはバイオマスの測定例が大変少なかったため、(ウ)の計算には生活型が類似しているトドマツの配分比を使った。

表-1. アカマツ、カラマツの根の配分比

根のデータ数 総現存量に対する根の割合(%)		
アカマツ	12	21.0
カラマツ	33	21.9
トドマツ	8	18.6

(ウ)成長曲線と幹・枝・葉・根の配分比によって日本全国の主要造林樹種の樹種別の炭素貯留・固定量は、表-2のように推定された。炭素固定量は、成長モデルによって1990年から5年間の成長を推計し、それから伐採量分をひくことによって求めた。1990年の年炭素固定量は人工林全体で約18.4GgCで、スギが固定量の約半分、ヒノキが約1/4を占めると推定された。スギ、ヒ

ノキの市町村別炭素貯留量は図－10 のようになった。スギ、ヒノキの炭素貯留量は九州、四国、紀伊半島で多かった。

表－2．主要造林樹種(人工林)の炭素固定量

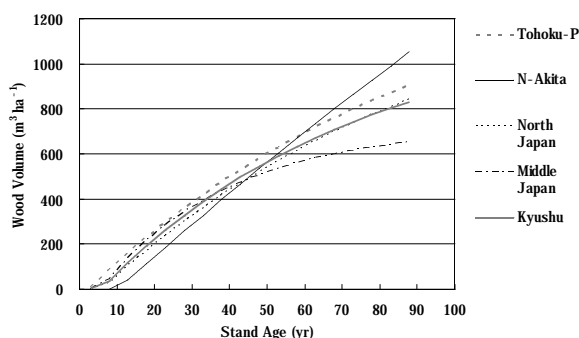
樹 種	1990 年 貯留量 (GgC)	1995 年 貯留量 (GgC)	1990 ～ 1995 年 年伐採量 (GgC)	年固定量 (Gg/C)
スギ	349.80	411.55	13.91	9.57
ヒノキ	138.24	165.24	5.39	4.32
カラマツ	61.68	71.87	2.96	1.45
アカマツ	60.88	71.88	4.72	1.26
エゾマツ・トドマツ	27.80	40.56	3.97	1.76

エ 考察

日本の人工林の炭素貯留・固定量が、カラマツ、エゾマツ、トドマツなど今まで知見がとぼしかった樹種を含め、より詳細なレベルで明らかとなった。この成果は国際交渉を行う上での、基礎資料となると考えられる。

オ 今後の課題

本研究では、人工林の立木バイオマス中の炭素貯留・固定量の評価をテーマとしたが、日本の森林全体の炭素貯留・固定量を評価するためには、天然性の広葉樹林についても評価する必要がある。また、より正確な評価には林野庁が現在行っている森林資源モニタリング調査データを使った推計も必要である。



図－1．スギの成長曲線

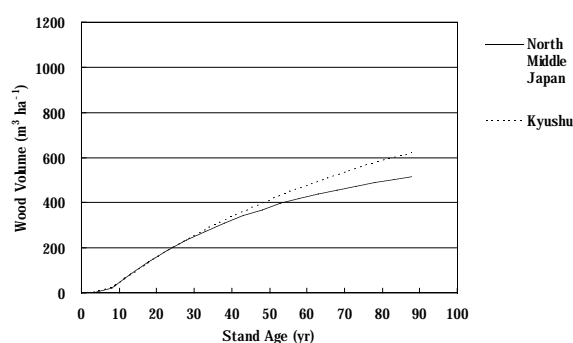
Tohoku-P: 東北地方太平洋側民有林、N-Akita: 旧秋田局国有林、North Japan: 東北地方日本海側民有林、旧青森局国有林、北関東・東山地方、Kyushu: 九州地方、Middle Japan: その他の地域

カ 要約

スギ、ヒノキなど主要造林樹種について実測データに基づいて簡単な成長モデル（成長曲線、部位別バイオマス配分比モデル）を作成し、地域別・樹種別に全国の地下部を含む林木バイオマスの炭素固定・貯留量を推計した。1990 年の年炭素固定量は人工林全体で約 18.4G g C、そのうちスギが 9.57GgC と約半分、ヒノキが 4.32G g C で約 1/4 を占めると推定された。

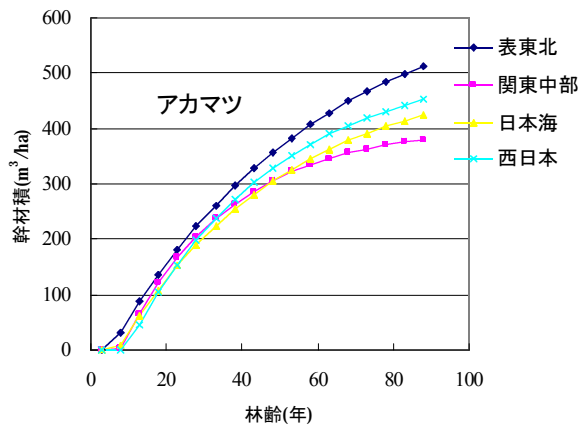
引用文献

- 福田未来・家原敏郎・松本光朗（2001）スギ、ヒノキにおける部位別現存量と林齢との関係．日林関東支論 52：13-16.
- 福田未来・家原敏郎・松本光朗（2002）アカマツ、カラマツにおける部位別現存量と林齢との関係．日林関東支論 53：59-60.
- Fukuda M., Iehara T., Matumoto M. (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forest in Japan. Forest Ecology and Management 184: 1-16.
- （森林総合研究所 森林管理研究領域 家原敏郎・福田未来、北海道支所 石橋聡・鷹尾元）

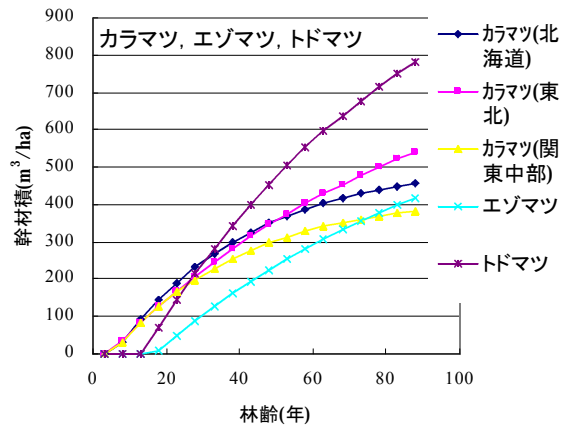


図－2．ヒノキの成長曲線

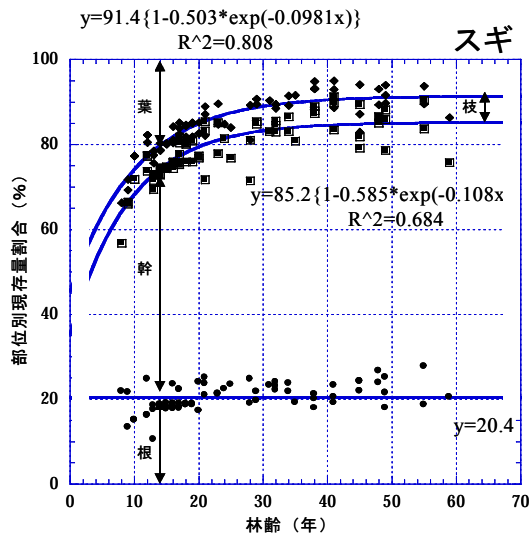
Kyushu: 九州地方、North Middle Japan: その他の地域



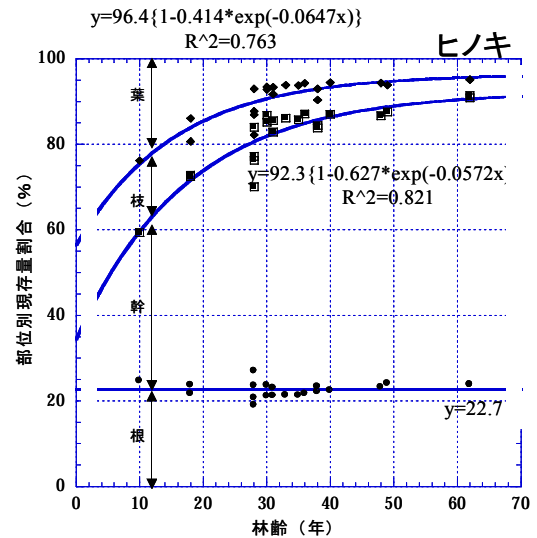
図－３．アカマツの成長曲線



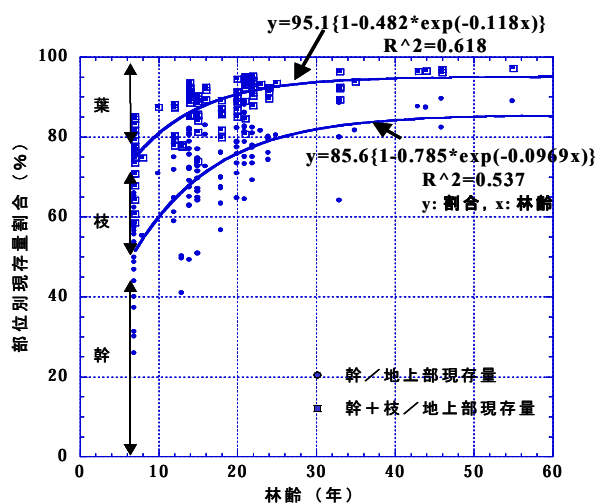
図－４．カラマツ、エゾマツ、トドマツの成長曲線



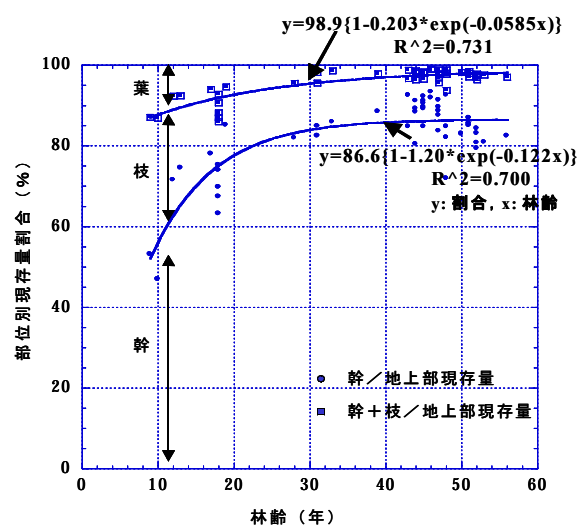
図－５．スギの幹・枝・葉・根の割合



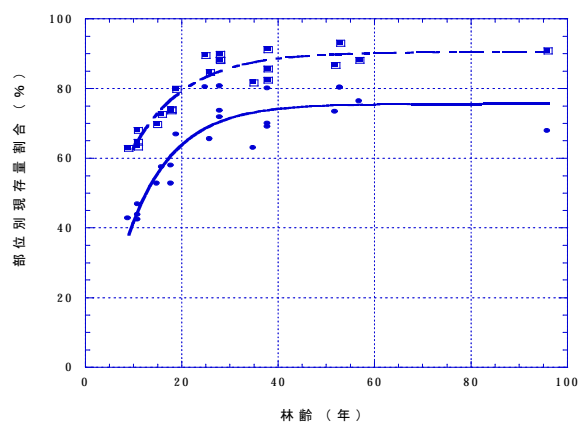
図－６．ヒノキの幹・枝・葉・根配分比



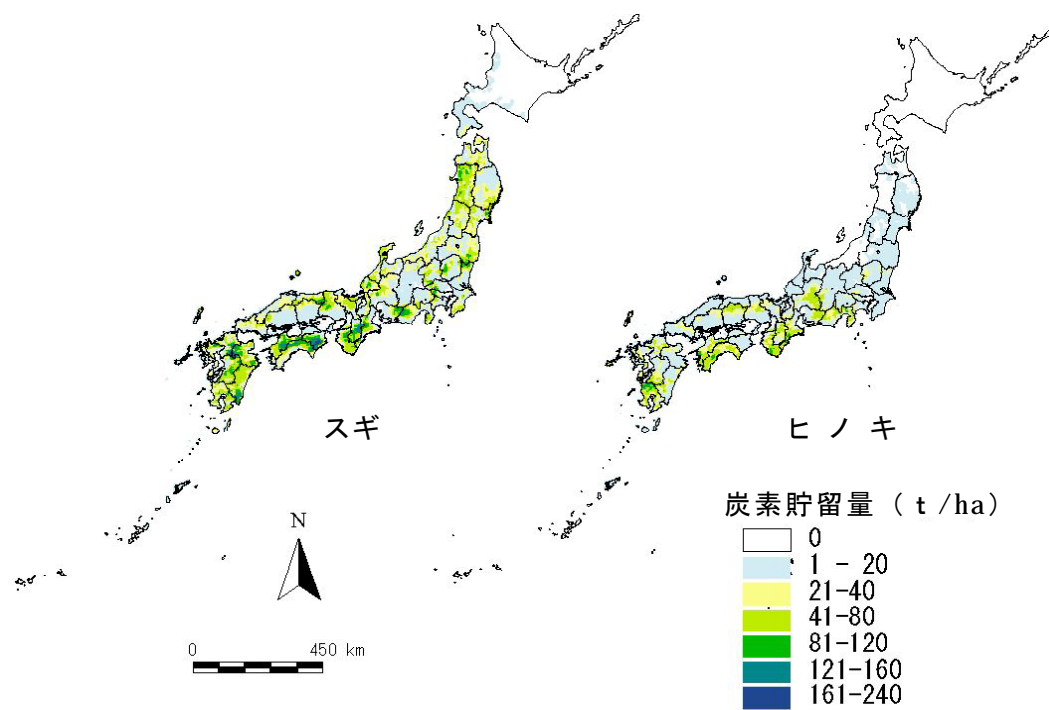
図－７．アカマツの幹・枝・葉配分比



図－８．カラマツの幹・枝・葉配分比



図－9．トドマツの幹・枝・葉配分比



図－10．スギ、ヒノキの炭素貯留量の分布

(2) ブナ林における生理・生態のプロセスとCO₂収支の解明

ア 目的

日本の冷温帯の森林を代表するブナの標高別炭素固定能力およびその生理・生態学的な特性について、苗場山ブナ林を例として研究する。

イ 研究方法

試験地概要：試験地は新潟県南魚沼郡湯沢町にある苗場山ブナ国有林で、苗場山の北東斜面の押し出し地形で、異なる標高（550mから1500m）において、林冠が完全に閉鎖したブナ林を対象に成長固定試験地（長期生態観察試験地）が設置された。1970年から個体レベルで成長や枯死の動態が記録されている。冬季日本海側の天候の影響を受け、積雪は3~5mにも達する。積雪期間は4ヶ月に及ぶ。

（ア）標高別光合成の季節変化：標高550mおよび1500mから供試葉を長枝付きで採取。ミニキュベットシステム(CMS-400, Walz社製)を使用。気温・湿度・炭酸ガス濃度・光強度を制御しながら光合成・蒸散速度を測定。標高700mにある現地実験室で実施。チェンバー内の光強度は7段階（0, 50, 100, 200, 400, 700, 1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）。温度は測定時期の月平均気温による。湿度70%。得られた結果を非直角双曲線で近似し、各種パラメータを決定。葉温と光合成速度の関係は光強度700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、大気飽差を一定（3~5hPa）で、温度を5℃間隔で4~5段階。見かけ

の光合成速度の90%を越える範囲を最適温度域とした。また暗呼吸速度も測定。CO₂濃度は350ppm。開葉から落葉までほぼ2週間おきに実験。4年継続。供試葉は比葉面積（S.L.A. 葉面積/乾重量）、クロロフィル量とそのa/b比、窒素含有量などを測定した。

（イ）標高別光合成日変化の比較：異なる標高の陽樹冠と陰樹冠で季節を通して測定。使用機種は携帯光合成蒸散測定装置（HCM-1000；WALZ社製）、水ポテンシャルはDew point microvoltmeter（HR-33T；WESCOR社製）、量子収率はMini-PAM（WALZ社製）を用いた。6月上旬、8月上旬、9月下旬に3~5日間それぞれ実施した。

（ウ）ブナ樹冠内光合成速度の垂直的・水平的変異：供試葉は鉄塔を囲んでいる3個体の高さ21、15、10mの位置から採取。HCM-1000を使用。チェンバー内を光700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、温度25℃、湿度70%、CO₂濃度350ppmに制御。樹冠内水平的変異はジャングルジム型タワーを利用。樹冠方位を4分割。樹冠内を上位、中位、下位にさらに3分割。北側と南側の生理特性および光環境要因を調べる。

光強度および葉肉内CO₂濃度と光合成速度の関係を携帯用光合成蒸散測定装置Li-6400（LICOR社製）で測定。チェンバー内を光1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、温度23~25℃、湿度70%、CO₂濃度350ppmに制御した。

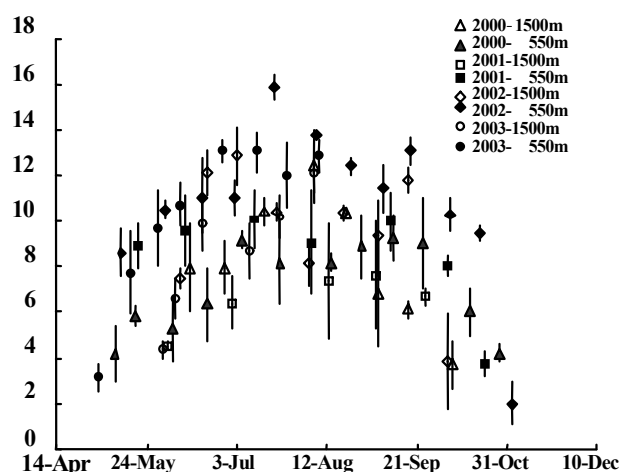


図-1 異なる標高における最大光合成速度の季節変化と年変動

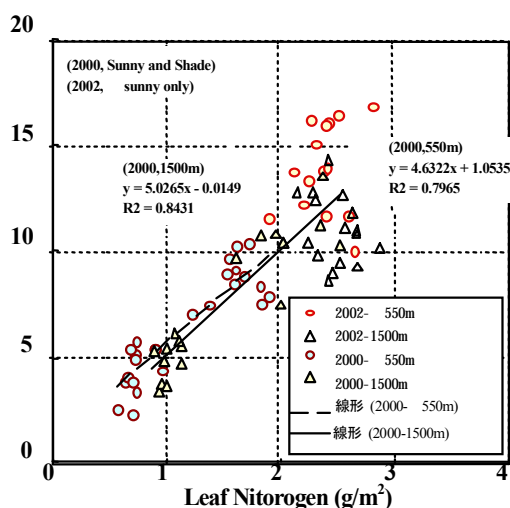


図-2 光合成速度と葉窒素濃度の関係

(エ) 稚樹レベルにおける光合成応答と光阻害：模擬的な **Sunfleck (lightfleck)** を再現し、**Sunfleck** に対する光合成応答について調べた。ブナ・ムシカリ・ウリハダカエデの 3 樹種について、**Gap** と **Understory** で光強度の変化に対する光合成の応答時間の測定。Li-6400 を利用。光以外の環境は気温 22℃、相対湿度 70%、CO₂ 濃度 350ppm。baseline となる光強度は、25,50,100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、対象として 0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 4 段階。**Sunfleck** に見立てた強い光は 1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。各光強度の baseline 下で約 1 時間の前照射の後、1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の光を 1 時間照射し、最大光合成速度に至る過程を調べた。光阻害については、ブナ林床において生育するブナ稚樹をポットに移植して実験。ポットを移動することで稚樹の生育する光環境の変化を再現し、葉の形態的・生理的特性について時系列的に測定。林床の光環境を樹冠の閉鎖した林床から林縁にかけて 3 段階設定し、明るい方から、**H (high light)**、**M (medium light)**、**L (low light)** とした。それぞれの光環境は光量子センサーを用いて測定を行った。

(オ) ブナ個体および林分レベルの光合成量推定：林分を構成する個体を 3 次元で解析できるモデル (Kakubari、1987) を利用して、実験ア～エで、個々に得られた実測値をもとに、生育期間全体の標高別光合成生産量と年変化を推定した。モデルの検証には実測値と比較した。

ウ 結果

(ア) 標高別光合成の季節変化：各標高別に得られた年度別光合成(最大値)の季節変化を図-1 に示す。年変動が非常に大きい。全体的にみると、開葉後から徐々に能力が上がり、夏に最大値をとり、秋に急速に低下する。550m における光合成は 3 ヶ月程度高い値を維持するが、1500m では短い。光飽和点・補償点および暗呼吸速度は標高によって大きな違いはない。量子収率、曲率についても明確な傾向はない。550m の光合成の窒素利用効率が高い。2000 年は標高差で窒素利用効率に差がない(図-2)。光合成特性と形態：光合成速度と葉肉組織の厚さと密接な関係があり、葉の厚さと光合成能力の関係には強い正の相関がある。

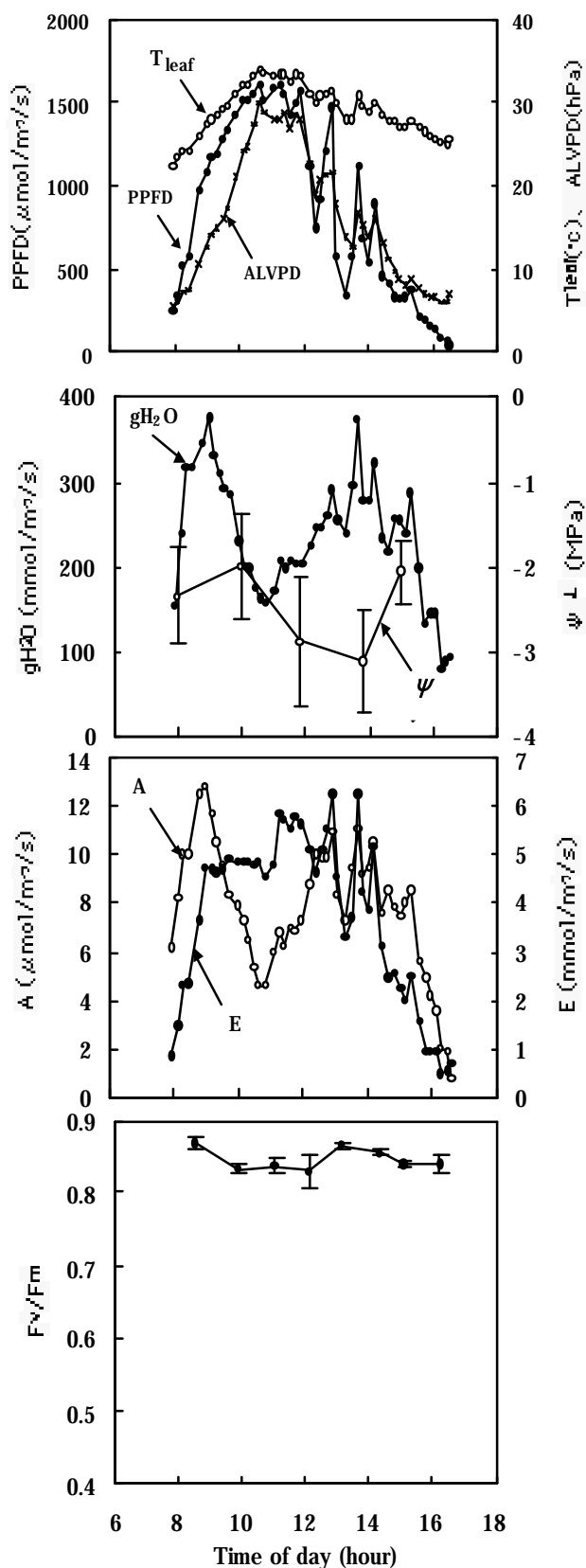


図-3. 環境要因とガス交換速度、葉内水ポテンシャル、最大量子収率の日変化

(イ) 光合成速度の日変化および日中低下の原因：図-3 に 550m の陽樹冠で測定された光合成速度 (A)、蒸散速度 (E)、気孔コンダクタンス (gH_2O)、光量子束密度(PPFD)、葉温(T_{leaf})、飽差(ALVPD)、葉内水ポテンシャル(ΨL)、最大量子収率(F_v/F_m)の日変化を示す。A が日中に大きく低下するのは光阻害ではなく、ALVPD の増加によって gH_2O が低下し、葉肉内炭酸ガス濃度(Ci)が低下して光呼吸が増加するためである。1500m の結果も 550m と同様の傾向。1500m では A、E、 gH_2O が全体的に低く ALVPD に対する A や gH_2O の反応が小さい。光合成速度の日変化の推定には飽差が重要である。葉面飽差が 5 ~ 20hPa に上昇するにつれて光合成速度は約 70%も低下した。

(ウ) 樹冠内の光合成の空間変異：相対的な光強度 (R-PPFD) は上層から下層にむかって 98 ~ 16%まで低下した。上層と中層では水平方向にそれぞれ 98 ~ 25%、78 ~ 16%まで低下した。光環境は垂直方向だけでなく水平方向にも大きく低下する。北側と南側を比較すると、上層と下層には大きな違いはないが、中層の内側では南側の R-PPFD が 62%も大きい。太陽光は南側から入射するため、上層や南側の樹冠によって光が遮られるためであると考えられる。樹冠内の最大光合成速度 (A_{max}) は $6.2 \sim 17.3 \mu mol m^{-2}s^{-1}$ であり、R-PPFD と同様に垂直方向だけでなく水平方向、方位によって大きく変化した。

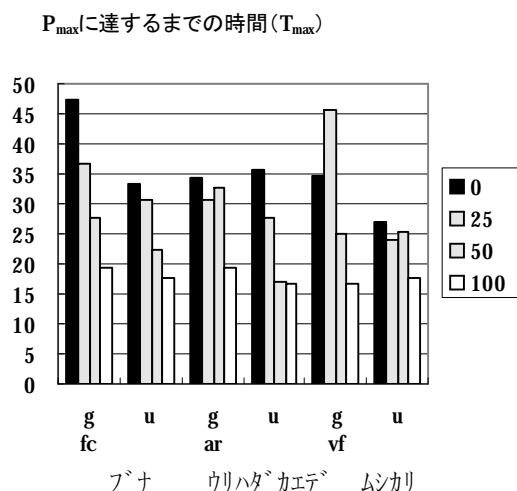


図-4 ブナ林床3種（ブナ、ウリハダカエデ、ムシカリ）の光応答 g : Gap、u : Understory を示

(エ) 稚樹レベルの光合性応答：background PPFD が同じ場合、sunfleck に対する光合成応答は

understory の方が gap より速やかであり、understory の方が gap より低い background PPFD で速やかな光合成応答が可能な状態を維持することができる。自然条件下において、この background PPFD に相当する散乱光強度は under-story の方が gap より低く、sunfleck に対する光合成応答は最大光合成速度に対する相対値で、ほぼ同じであると考えられる (Naramoto et al. 2002, 図-4)。

光阻害：光阻害の程度は光環境の勾配によって異なり、明る過ぎる光環境では P_{Nmax} の低下が見られた。 P_{Nmax} が低下することなく光合成適応が起こるには適切な光環境があることがわかった (図-5)

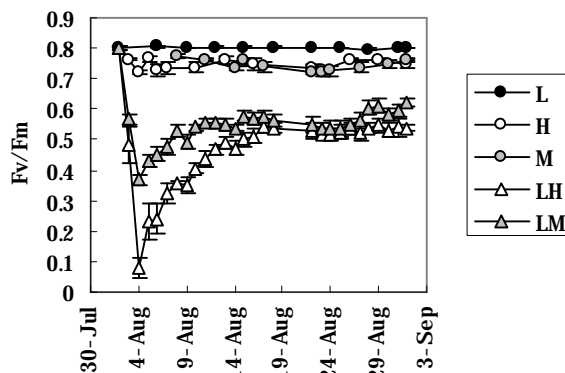


図-5 ブナ稚樹レベルの光阻害

(オ) 苗場山ブナ林による林分レベルの炭素固定量：GPP レベルで 550mにおける 30 トンから 1500mの 17 トンまで大きく変化する。その大半は呼吸消費量である。2002 年における標高別総光成量は図-6 に示したように、 $18.8 CO_2ton$ と $10.3 CO_2ton$ で、暗呼吸量を引いた純生産量は $14.4 CO_2ton$ 、 $8.1 CO_2ton$ である。これらの値を炭素に換算すると $3.9 Cton$ および $2.2 Cton$ となり、成長固定試験地の成長量と比較してもほぼ妥当な値になる (Kakubari 1977)。

エ 考察

(ア) 年間の光合成速度はサンプル個体および天候の変化などの影響を受け、その変動が非常に大

きい。光合成の固定量推定する際には、偏差に配慮する必要がある。

(イ) 光合成の日変化に影響を与える要因は光阻害ではなく、大気飽差による気孔閉鎖にともなう葉肉細胞内の炭酸ガス不足による光呼吸の増大である。したがって、光合成速度の推定には、大気飽差のモデル化がさけられない。

(ウ) 樹冠内の光環境の変化は垂直方向ばかりでなく、水平方向にも大きく変化する。南北の違いで光合成速度は大きく変化しないが、中間層でしかも南側で大きな変化が認められる。樹冠形状と生理的特性との相互関係を調べる必要がある。

(エ) サンフレックによる光合成応答は光環境の履歴によって影響を受けるが、自然条件において gap と understory に応答速度の違いはない。日中では、主に気孔開閉による CO_2 の供給が制限要因になることが多く、(イ) 同様に大気飽差を考慮したコンダクタンスモデルが重要になる。

(オ) 光合成速度の季節変化などと、葉の空間分布、光の空間分布などを盛り込んだモデルによって、標高による物質生産機構と機能の違いを評価した。これらの見解は、長期生態観察試験地に基づいた地上部生産量 (GPP) のデータで評価が可

能になった。モデルの柔軟性およびその先進性を高く評価できると思われる。

オ 今後の課題

最新のリモートセンシング情報とのリンケージにより、ピンポイント的な固定試験地のデータによって、より大きなサイズスケールやより大きな時間スケールにで展開できるように、新たなモデルの改良とこれらの情報のアップスケーリングが必要である。近い将来、個葉レベルの事象をベースに、より大きなスケールサイズの事象を予測しうるようなモデルへと進化させたい。

カ 要約

日本の冷温帯を代表するブナ林において、特に標高が異なる場合の物質生産機構を明らかにし、炭素固定能力を高度に評価する場合に必要な環境要因と樹冠および林床においてブナの生理特性について詳細に調べた。それぞれの反応をモデルとして関連付け、最終的には推定された光合成がよく日変化を再現し、生育期間を通して光合成を推定できるモデルができた。モデルは個体の空間関係を考慮しているので、気温の上昇、除間伐や択伐といった施業の変化にともなう炭素固定量の変化を予測しうるものとなっている。

キ 引用文献

- Kakubari, Y. (1977) Distribution of primary productivity along the altitudinal gradient JIBP Synthesis 16:201-212
- Kakubari, Y. (1987) Modelling the productive structure and function of natural forests of *Fagus crenata* at different altitudes in Naeba mountains An analysis of dry matter production with an eco-physiological computer simulation model based on an individual tree Bull. Tokyo Univ. Forests 76 107-162
- Naramoto, M. et al (2001) The influence of previous irradiance on photosynthetic induction in three species grown in the gap a understory of a *Fagus crenata* forest Photosynthetica 39:545-552
- Naramoto, M. et al (2002) Photosynthetic responses to lightflecks of *Fagus crenata* seedling grown in a gap and understory of a deciduous forest. J. For. Res 7:193-199

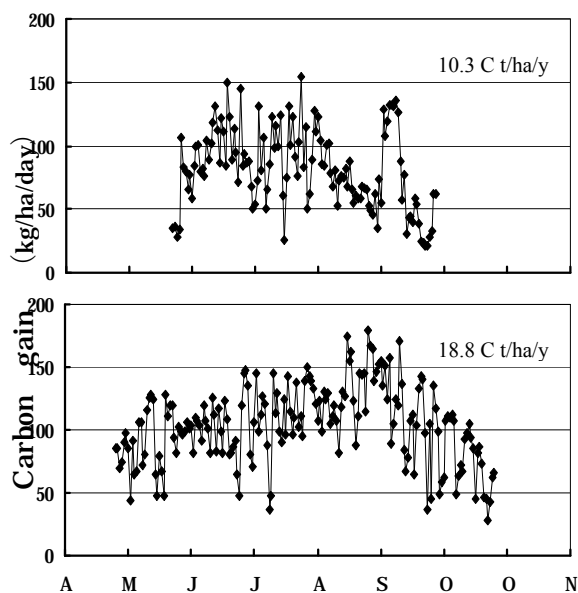


図-6 林分レベルの炭素固定量 (2002 年の例)
上図が 1500m、下図が 550m、単位：
kg/ha/day

生育日数：1500m	5/25---9/27	126 日
900m	5/7---10/14	161 日
550m	4/28---10/25	183 日

(3) 森林動態モデルによる CO₂ 固定能評価手法の開発

ア 目的

現在の時間断面における森林の CO₂ 固定能については、本プロジェクトの他課題などにより、さまざまなタイプの林分について推定がなされている。しかしながら、林分の CO₂ 固定能は、林分を構成する単木のサイズ分布や樹種構成の変化にともなって変化しうるものと考えられる。したがって、将来にわたって CO₂ 固定能がどう変化するかはまた別に予測をおこなう必要があるが、日本国内の森林についてそのような予測をおこなった例は多いとはいえない。本課題では、こうした森林の動態をシミュレーションモデルを用いて予測し、その上で CO₂ 固定能の時間的変化を予測する手法を開発することを目的とした。

開発にあたっては、個体ベースモデル (Individual-based model, DeAngelis and Gross 1992) を採用することとした。個体ベースモデルは、その名の通り、個体群や群集を個体に還元してシミュレートするものである。行列モデルなどでは、すべての個体が同じように振る舞うことを仮定しているが、個体ベースモデルではそのような仮定を置く必要はなく、また局所的な効果をモデルに取り込むことができる。計算時間がかかるという難点があったが、近年のコンピュータの発達により、これはそれほど問題ではなくなっている。

イ 研究方法

- (1) 個体ベースの森林動態シミュレーションモデルとして実績のある ZELIG version 1.0 (Urban 1990) を基本としてシミュレーションモデルを開発した。ZELIG は、個体ベースモデルであり、個々の単木の加入・成長・枯死をシミュレートすることで、林分全体をシミュレートする。
- (2) (1)のシミュレーションモデルを改良し、幹材積・枝量をサイズ別に計算するようにした。また葉量についても計算させるようモジュールを組み込んだ。一方、枯死部分についても、そのサイズ分布を計算するモジュールを組み込んだ。

Yoneda (1982)の推定式を用いてサイズ別にその分解をシミュレートし、枯死部分の蓄積・分解を評価するようにした。純生産量・分解量を計算し、これにより、林分全体の炭素固定能を評価できるようにした(図-1)。

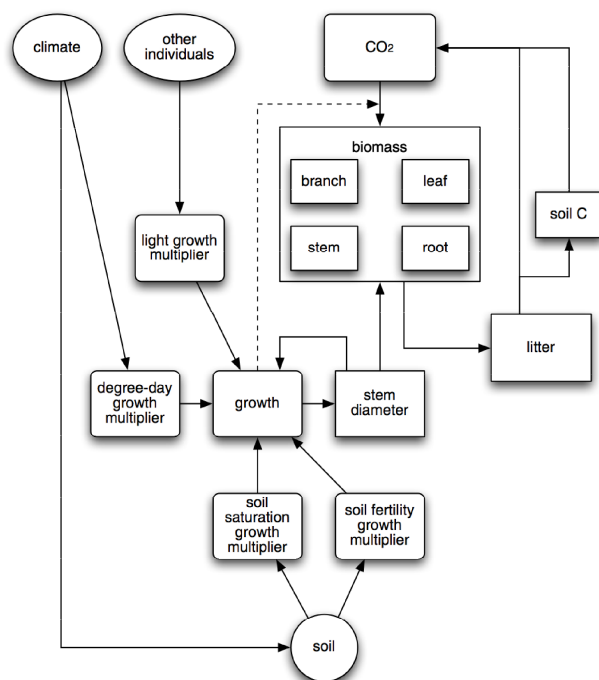


図-1 シミュレーションモデルの構成図

- (3) 京都市左京区の銀閣寺山国有林を対象とし、この林分で設置している固定調査区の資料および新たに実測したデータを用いてシミュレーションをおこなった(伊東 2001)。この林分は広葉樹二次林であり、現在落葉広葉樹林から常緑広葉樹林への遷移が進行しつつある。林分レベルの純生産速度と分解速度のバランスを検討し、実測資料と比較・検討をおこなった。このとき、未分解リター残存量の初期値は、実測値が存在しないため、便宜的に 0 として計算した。
- (4) (3)と同様のシミュレーションを京都府山城町の山城試験地を対象としておこなった。結果を伐倒調査による推定値と比較した。
- (5) そのほか、3 次元グラフィックソフトをもちいて、林分データの可視化をおこない、林分の構造及び動態を視覚的に把握することを可能とした。

ウ 結果

(1) 銀閣寺山国有林のデータにもとづくシミュレーションについて、図-2には樹種構成の変化の予測結果を、図-3には純生産量および分解量の予測結果をそれぞれしめした。両者とも5000回の試行の平均値であり、図-3については95%信頼限界を点線でしめした。

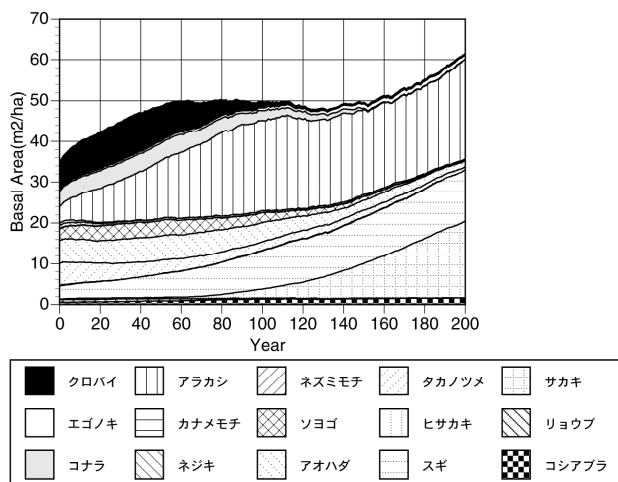


図-2 シミュレーションによる、銀閣寺山国有林の樹種構成の変化の予測

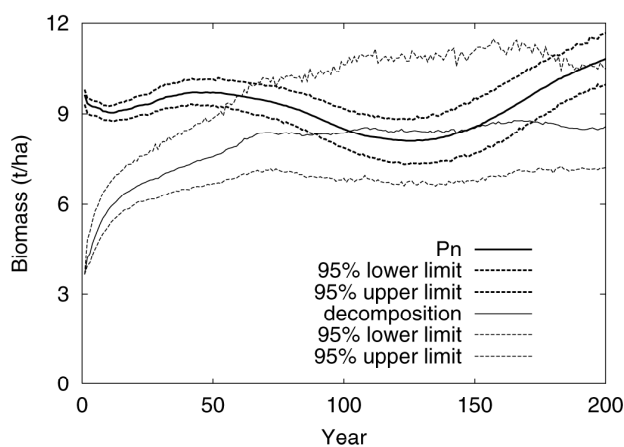


図-3 シミュレーションによる、銀閣寺山国有林の純生産速度および分解速度の変化の予測（平均値および95%信頼限界、値は乾重相当値）

50年目ほどで現存量が頭打ちとなるが、これは、コナラ・アオハダなどの、上層にある大径の落葉広葉樹が枯死するためであると考えられる。そして、100年目ころには純生産量が分解量と同

程度になるという予測が得られた。その後、アラカシ・サカキ・スギといった常緑樹の蓄積の増大とともに純生産量が回復し、ふたたび純生産量が分解量を超えるという過程が予測された。

純生産量の予測値は、およそ $8 \sim 11 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ($40 \sim 55 \text{ C kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) の間の値であった。1993年～1999年の間の実際の対象林分の純生産速度は $9 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 程度と推定されたが、それと比較するとシミュレーションによる初期の予測値は同程度であると判断された。平均の未分解リター残存量は、70年目頃からおよそ $8 \sim 9 \text{ t ha}^{-1}$ ($40 \sim 45 \text{ C kg m}^{-2}$) 前後で安定する傾向がみられた。

(2) 山城試験地についてのシミュレーション結果も、銀閣寺山国有林についてのシミュレーションと同様のパターンを示すことが予測された(図-4)。ただし、伐倒調査の結果では、胸高直径3cm以上の林木による現在の地上部純一次生産量は $9.53 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と推定されており(後藤ほか2003)、シミュレーションによる推定値はやや過小となった。

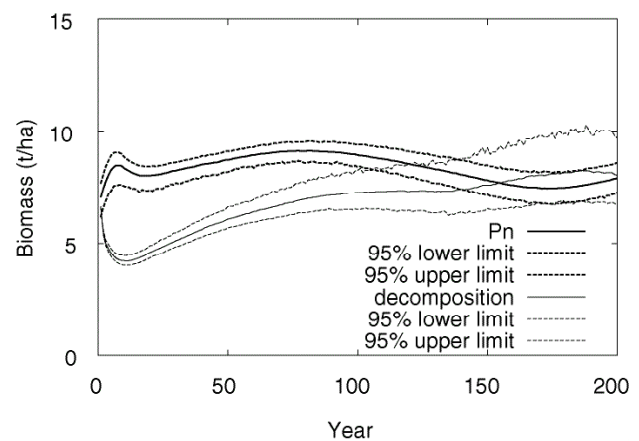
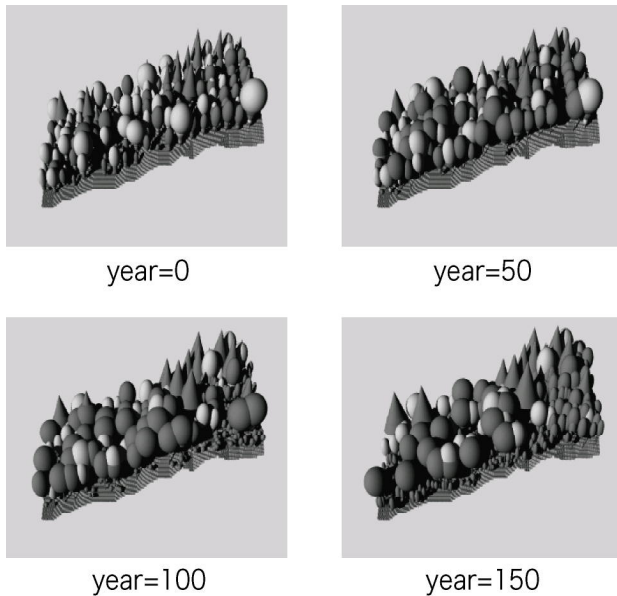


図-4 シミュレーションによる、山城試験地の純生産速度および分解速度の変化の予測（平均値および95%信頼限界、値は乾重相当値）

(3) シミュレーションの経過をアニメーション化して、視覚的に表現することができた(図-5、伊東2002a, 2002b)。



図ー 5 3次元グラフィックによるシミュレーション経過の表示例。

エ 考察

銀閣寺山国有林のシミュレーション結果からは、大径の落葉広葉樹の減少にともないおよそ100年後にはいったんCO₂固定能が失われるものの、その後の遷移にともなうふたたびCO₂固定能が回復することが予測された。現時点での純生産量は、現地調査による推定値とほぼ一致した。樹種としてはアラカシの優占度が高まることが予測されたが、これはその後の現地調査の結果と一致している(伊東 未発表)。

山城試験地の結果については、予測結果が、現地調査による推定値よりも過小となったが、この原因についてはさらに解析をおこなう必要がある。

いずれにおいても、モデルの挙動としては、シミュレーションが破綻するような結果とはならなかった。したがって、今後パラメータやモデル構造の精緻化などにより精度の高い予測も可能になるものと考えられる。

オ 今後の課題

地下部での動態および枯死部分の分解に関しては、さらに検討する必要がある。また、シミュレーションの精度を高めるには、長期観測などによりシミュレーション対象樹種の生活史パラメータ

に関するデータを蓄積することが必要である。

カ 要約

個体ベースシミュレーションモデルを基盤として、森林動態にともなうCO₂固定能の変化を予測するモデルを開発した。京都府内の2カ所の林分について、モデルを当てはめてモデルの挙動を検証したが、特に破綻するようなことはなく、パラメータの精緻化などにより精度よい予測も可能になるものと考えられられた。

引用文献

- DEANGELIS, D. L. and GROSS, L. J. (1992) Individual-based models and approaches in ecology. 525pp. Chapman & Hall, New York.
- 後藤義明・小南裕司・深山貴文・玉井幸治・金澤洋一 (2003) 京都府南部地方における広葉樹二次林の地上部現存量および純生産量. 森林総合研究所研究報告 2(2): 115-147.
- 伊東宏樹 (2001) シミュレーションモデルによる広葉樹二次林の遷移の予測—銀閣寺山国有林について—. 森林応用研究 10(2): 27-35.
- 伊東宏樹 (2002a) POV-Rayを使用した林分データの可視化. 森林応用研究 11(2): 63-67.
- 伊東宏樹 (2002b) 森林の遷移をアニメーション化する. 森林総合研究所関西支所年報 43: 26.
- URBAN, D. L. (1990) A versatile model to simulate forest pattern: a user's guide to ZELIG version 1.0. Department of environmental sciences, University of Virginia, Charlottesville, VA, 108 pp.
- YONEDA, K. (1982) Turnover of live and dead woody organs in forest ecosystems — an assessment based on the changes in the frequency distribution of their diameter (studies on the rate of decay of wood litter on the forest floor. IV). Japanese Journal of Ecology 32: 333-346.

(森林総合研究所 関西支所 伊東宏樹、四国支所 竹内郁雄)

(4) 炭素循環プロセスの定量化による森林CO₂収支の全国評価

ア 目的

森林によるCO₂吸収量を評価するためには、森林による炭素吸収の仕組みを理解した上で、個々の現象をモデル化し、シミュレーションを行わなければならない。しかも広域森林の炭素収支を推定するためには、テストサイトにおける炭素循環の測定やインベントリーだけではなく、気象・土壌などの森林立地環境因子を組み込んだ炭素循環のプロセスモデルによる収支計算が有効である(Falge ほか 1996; 千葉 2001)。本研究では、これまでに得られている炭素収支に関するパラメータと環境因子との定量的関係をもとに炭素循環プロセスのスケーリング手法を開発するとともに、森林バイオマスの分布や気象・土壌などのメッシュ情報を組み込んで、森林CO₂収支プロセスの面的なスケーリング手法を明らかにする。

イ 研究方法

- (ア) 森林群落の炭素循環に関するパラメータとして、樹種または森林タイプごとのバイオマス量、生理パラメータ（光合成、呼吸）、物質配分、枯死・脱落、有機物分解等について、既存データを収集・整理するとともに、欠測するものについては補完法を考案してデータセットを完成させる。
- (イ) 炭素循環モデルによる森林CO₂収支評価
林木の生育環境特性と林地生産力に関する既往データと炭素循環モデルにおける生育環境因子を分析して、生理生態的機能のスケーリングを行うとともに、各種パラメータの環境応答、経年変化などを定量化する。炭素循環モデルを構成して、主要パラメータを森林タイプごとに決定して林分スケールでの炭素循環およびCO₂収支を評価する。
- (ウ) 炭素循環プロセスの考え方

大気中の二酸化炭素は、植物の葉が行う光合成によって樹体に取り込まれ、有機物に変換される。葉に取り込まれた炭素（光合成産物）の一部は、葉それ自体の維持と成長のために呼吸として消費され大気中に戻るが、その残りの有機物が枝や幹などの木部器官に転流される。そしてこれら各器官でも転流物の一部は呼吸消費され、その残りが

木部などに固定・蓄積される。これが植物体の成長（炭素固定量）である。その一方で、植物は成長とともに枝や葉を枯れ落とし、ときには植物個体そのものが枯死し、それらの遺体（リター）は林床や土壌中で徐々に分解し、CO₂となって大気へと戻る(依田 1982; 千葉 2001)。

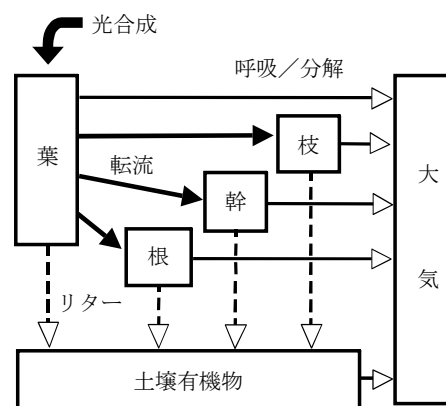


図-1. 森林生態系におけるCO₂フラックス
光合成産物が葉が枝、幹、根へと転流して成長するが、生きている器官は呼吸消費し、さらに枯死分解に伴ってCO₂が大気へと戻る

図-1に示したこのようなCO₂の森林生態系における動きは、森林を構成する樹種や木の大きさあるいは林齢など、森林の状態によって大きく異なる。葉の占める割合が相対的に多ければ光合成量が呼吸量を大きく上回るであろう。また同じ葉量でも、生理的なストレスによって、光合成能力が低下する場合もあり得る。以上の視点から、樹木の生理生態的な環境応答機構および森林動態を取り入れたCO₂収支モデルを構成する。

ウ 結果

(ア) 森林構造のモデル化

森林の枝葉量と立木密度には、樹種を問わず密接な関係が存在する。平均個体葉量と立木密度との関係は、両対数グラフ上で直線近似（べき乗関係）される。枝についても同様に、平均個体枝量と林分密度との間に明確なべき乗関係が認められる。したがって、林冠がほぼ閉鎖した林分であれば、葉量および枝量は林分密度によって一意的に与えられるという基礎仮定が得られる。

人工一斉林では植栽後、林冠閉鎖するまでは、

林木の生枝下高はほぼゼロ（枝が枯上らない）だが、林冠閉鎖とともに枝が枯上り、生枝下高は樹高成長とともに上昇して樹冠長はほぼ一定で推移する。しかし間伐によって林冠閉鎖が解除されると、林冠の再閉鎖までは生枝下高は再び一定で推移するが、再閉鎖すると再び生枝下高が上昇して樹冠長は一定となる。間伐を伴う人工林の樹冠構造とその動態は、このようなプロセスを繰り返すことになり、森林のこうした様子をシミュレートした（図-2）。

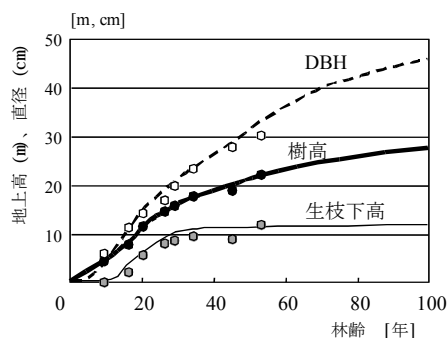


図-2. スギ林分における平均個体の成長

吉野や国有林などの実測データと比較しても、立木密度の違いを反映した樹冠長や直径成長経過がよく再現された。こうした森林構造のモデル化によって、針葉樹人工林に限らずすべての森林について、森林構造を反映させた動態を再現することが可能と考えられる。

一方、光合成量を計算するためには森林群落内の葉量分布を知る必要がある。図-3に安比ブナ林の葉面積垂直分布を例示した（葉面積指数LAIは3.5であった）。従来の報告（依田 1982ほか）を参考に、ブナ個葉が生存可能な相対光強度を5%と見なすと、葉群内を透過する光分布の指標となる吸光係数 K が求められる（約0.7）。つまり、林冠内あるいは林床における光環境をもとに、その林分の葉群の垂直分布を推定することが可能である。

そのほかブナ林など天然生落葉広葉樹林を含めた森林について、個体サイズ分布や葉群分布等の林分構造を解析し、光合成や呼吸推定の基礎となる葉面積の垂直分布、林冠光環境、木部表面積・直径サイズ分布がモデル化され、森林群落の空間構造を表現することができるようになった。

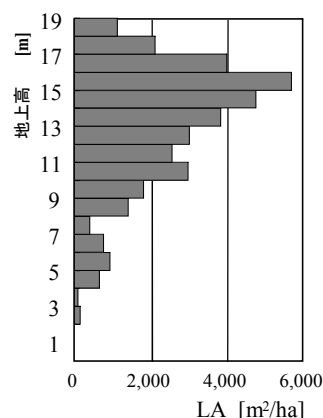


図-3. 安比ブナ林の葉面積垂直分布

伐倒調査木の着葉分布をもとに、各個体の胸高断面積で案分して求めた。葉群内の光透過についてはBeer-Lambert則に従うものとし吸光係数 K は0.7とした。各葉層の光条件はこれをもとに推定した。

(イ) 光合成プロセスモデル

光合成の評価では生化学プロセスモデル（Farquharほか 1980）による手法が現在では一般的である。その理由は、気象条件や林分構造等に応じたモデル化が可能であり、環境応答特性を表現できるためである。ブナ等の光合成特性を表す生化学的パラメータを収集・整備するのは容易ではなく、まだ十分ではないが、既報を利用するなどしてある程度類推していくことは可能である。

個葉の光合成速度 A と葉内 CO_2 濃度 C_i との関係（ $A-C_i$ 曲線）から V_{cmax} 、 J_{max} 及び R_d が得られる。これらのパラメータは季節変化し、主として気温に対する依存性があり、 V_{cmax} と J_{max} は季節を問わずほぼ比例関係にある。また、陽葉や陰葉などと呼ばれるように、葉はその置かれた環境条件によって生理特性を変えるので、これらパラメータも明瞭に変化する（図-4）。

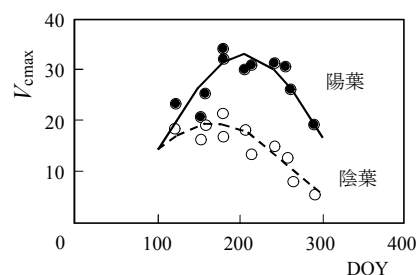


図-4. 陽葉と陰葉の V_{cmax} の季節変化

そこで、こうしたパラメータの季節変化や環境条件を反映した変異を定量化して、樹冠構造や季節変動など光合成量の時間的空間的な変動が表現される(Harley & Baldocchi 1995)。

シミュレーションの事例として安比ブナ林の結果を示す。気象条件として月ごとの平均気温、気温較差及び日射量を与え、さらにそれらの日変化を与えて、葉群の光合成および呼吸量を計算した。ただし、林冠内の葉面積分布に応じた光減衰の効果も考慮してある。図-5は、林分全体の剰余生産速度(総光合成-葉群呼吸)の日変化である。

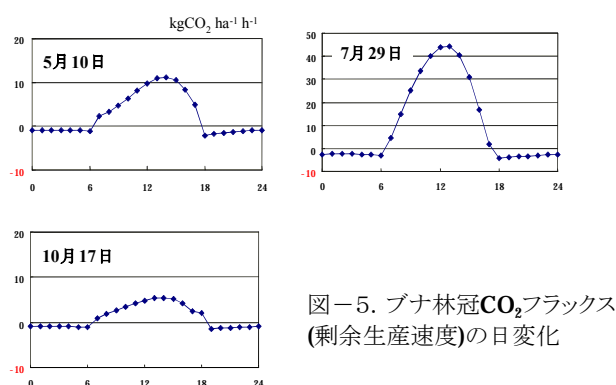


図-5. ブナ林冠CO₂フラックス(剰余生産速度)の日変化

(ウ) 木部器官の呼吸

植物体からのCO₂放出として、木部器官からの呼吸消費があるが、樹種あるいは個体によって、呼吸速度の温度依存性は日変化あるいは季節変化する。樹種ごとに呼吸速度と温度との関係はほぼ指数関数で近似できる。光合成シミュレーションと同様に、気象メッシュデータ(気温及び日射量)を利用して、前述した群落構造モデルによってスケールしながら、木部呼吸量が計算される。

ただ、木部呼吸速度を推定するためには、枝・幹・根の重量または表面積を推定しなければならない。面積ベースの木部呼吸速度は、一般に、木部直径に関係なくほぼ一定と見なすことができる。そこでブナなど数樹種の木部表面積の推定式を考案した。樹冠内では枝が規則正しく分岐していると仮定すると、枝・幹の直径階の頻度分布はべき乗式で近似できる。材の比重 σ が樹種ごとに一定と見なし、生枝下高における樹幹直径DBとその上部(樹冠内)の全重量Wが与えられると、樹冠内の枝および幹の全表面積を計算することができ

る。なお根系についても同様である。生枝下高(樹冠)以下の幹については、切頭円錐体とみなして表面積を算出すればよい。

安比ブナ林の木部呼吸量について、枝・幹・根を問わず、木部単位面積あたりの呼吸速度を一定と見なし、毎日の気象条件を与えて計算した結果、安比ブナ林の年間木部呼吸量は790 gCO₂ m² yr⁻¹と推定された。

(エ) 群落CO₂収支の推定

上述したように、森林スケールの光合成、葉群呼吸、木部呼吸の季節変化を計算することができたので、植物体のみによるCO₂吸収量(NPP:純一次生産量)が推定できる。図-6の実線は安比ブナ林でのシミュレーション結果である。図中の○印は、同試験地でのタワー観測によるCO₂フラックス(正味のCO₂吸収量)の概略値である(実際のCO₂フラックスは短時間の間に大きく変動する)。こうしたタワー観測によるCO₂フラックス(正味のCO₂吸収量)では、土壤からのCO₂放出量(土壤呼吸)がすでに加味されている点に注意が必要である。上で述べたNPPは植物体のみによるCO₂吸収量である。生態系としての評価では、NPPからさらに土壤呼吸(有機物分解、根系呼吸、土壤動物の呼吸)を差し引く必要がある。この値が、生態系純生産量(NEP)であり、タワー観測によるCO₂フラックス(正味のCO₂吸収量)に相当するわけである。

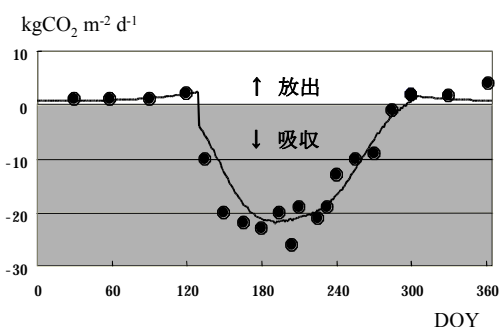


図-6. 安比ブナ林におけるCO₂フラックスの季節変化
森林からのCO₂放出として葉群呼吸および木部(地上部+地下部)呼吸、CO₂吸収として葉群の光合成とした。土壤呼吸や有機物の分解についてはここでは一切考慮されていない。CO₂の放出をプラスとして表した。図中の○印は安比フラックス観測データ(斉藤、2002)のうちの最大吸収量の概略値を参考までに示した。

エ 考察

森林の物質生産過程に関するプロセスモデルにはいくつかのレベルが考えられる。過去にデータが存在する場所については、暫定的に、気象データなどを一切使用せずに林分成長をモデル化することは可能である。しかし過去のデータが欠落している場合には、気象条件や地位などのデータから補完して林分成長を類推せざるを得ない。その場合、樹種特性や林分構造を如何に反映させるかという問題が生じる。

今回得られたシミュレーションモデルはそうした問題を解決して、炭素収支推定の汎用性を高めるものである。図-6のシミュレーション結果に土壤呼吸の季節変化を加算すればNEEが推定できる。安比ブナ林のほか、川越試験地等についても土壤呼吸速度のデータが揃いつつあり、生態系スケールの炭素収支を明らかに出来るであろう。

森林の構造と気象条件等が与えられれば、今回のモデル計算方法によって、様々な森林生態系のCO₂吸収量や放出量の季節変動、さらには環境変動に伴う影響等の評価が可能になる。しかし、こうした評価結果についてはその妥当性を検証する必要があり、各地で実施されているタワーフラックス観測データとの整合性を図って、モデルが内包すべきパラメータの時間的変動などをより精緻なものへと改良することが望まれる。

オ 今後の課題

本課題は、森林の環境応答などを組み込んだ炭素循環プロセスの定量化を目指し、それによって全国の森林CO₂収支の評価を目標としていた。森林動態モデルと環境因子のメッシュデータをカップリングすることによって、全国一律に森林のCO₂収支計算が可能になるが、現実には森林資源および気象の詳細なメッシュデータを整備することができなかった。

プロセスモデルを基本にした全国の森林CO₂収支を評価するためには、特に光合成に関する生化学プロセスのパラメータを整理する必要がある、少なくとも主要な樹種について生育環境に順化したパラメータ特性の把握が急務である。

カ 要約

(ア) 森林群落構造とその発達過程のモデル化

森林群落構造の主たる規定要因のひとつである林分密度 ρ を変数として、間伐施業を加味した林分動態をモデル化し、群落成長に伴う各器官（葉・枝・幹・根）の発達過程、林冠内のSLA分布や吸光係数等を推定・評価できた。

(イ) 植物体を評価対象として、森林群落内の構造と物質移動等に関する生理生態的パラメータをもとに、炭素循環過程のシミュレーションモデルを構成した。具体的には、代表的な森林の群落構造に対して、気温、日射量、相対湿度の季節変化を与えることで、林分あたりのCO₂収支が計算される。

引用文献

- Chiba Y (2001) Modeling seasonal changes of forest canopy gross photosynthesis against air temperature and radiation. IUFRO "Canopy process" workshop, Linking the complexity of forest canopies to ecosystem and landscape function. Oregon, USA
- 千葉幸弘 (2001) 植物への炭素蓄積のメカニズムと評価. 森林科学 33 : 18-23
- Falge E., Graber W., Siegwolf R., Tenhunen J.D. (1996) A model of the gas exchange response of *Picea abies* to habitat conditions. *Trees* 10: 277-287.
- Farquhar G.D., von Caemmerer S. & Berry J.A. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 plants. *Planta* 149: 78-90.
- Harley O.C. & Baldocchi D.D. (1995) Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. I. Leaf model parameterization. *Plant, Cell and Environment* 18: 1146-1156.
- 依田恭二 (1982) 森林の生態学、築地書館、東京、pp331
- (森林総合研究所 植物生態研究領域 千葉幸弘)

第2章 海洋におけるCO₂収支の総合評価

海洋のCO₂収支問題の特徴と研究の焦点

水産部門における達成目標は、海洋生物の活動特に代謝機能による海水中のCO₂分圧の変化を予測し、結果的に海洋と大気とのCO₂交換量を水域的、時間的に算定し、我が国周辺の経済水域全体の収支を定量評価することにある。

本プロジェクトの最終目標については、概ね達成されたと考えられる。ただし、幾つかの問題点が残されている。第一は、対象水域として、人間活動の活発な沿岸域が十分評価されていない事、第二に海洋と大気とのCO₂交換量の算定の背景にあたる海水におけるCO₂分圧の性状変化と生物活動の対応関係が示されていない点である。特に、海洋の炭酸平衡に主体的役割を果たす植物プランクトンの生産機能の評価が抜けている点は最大の問題点である。

評価技術的には、このような問題点が指摘できるが、全国的レベルにおける藻類、貝類、サンゴなど主要な海生物の現存量とその分布が初めて整理され、同時にこれらの基本的な生物機能が炭素収支として定量的に評価された意義は大きいといえる。本プロジェクトで構築されたデータベースや開発したモデルは地球環境問題の解決に寄与するだけでなく、沿岸の環境保全や資源管理のツールとしても活用されることを期待する。

課題構成の説明

海洋におけるCO₂固定機能を含めたCO₂収支における海洋の役割を評価するため、2つの中課題を設定した。第一の課題は海洋生物によるCO₂収支の総合評価で2つの小課題（藻類によるCO₂収支の評価、貝類・サンゴ類によるCO₂収支の評価）から構成されている。第二の課題は海洋におけるCO₂収支の総合評価で1つの小課題（大気系/海洋系におけるCO₂収支の評価）で構成している。

またそれぞれの小課題には複数の実施課題が存在しており、プロジェクト全体の課題構成を表2-1に示した。

今後の課題

本プロジェクトでは海洋生物の現存量とその分布把握のため、調査と既往データベースを活用し、また生物機能評価のための生物実験とモデル開発を行い、更に広域なCO₂分圧の測定等から大気との交換量を推定した。その結果、海洋におけるCO₂収支に関して重要な知見が得られた。しかし、評価の高度化のため下記事項について今後の改善が求められる。

- 1) 主要生物のバイオマスと環境情報のモニタリングとデータベース化を推進する。
- 2) 生物機能評価のための実験方法及びモデル開発を高度化する。
- 3) 海洋におけるCO₂収支を評価するため物質収支研究から沿岸における物質循環研究へ転換する。

(海洋部門リーダー 中村義治)

表 2-1 海洋における CO₂ 収支の総合評価の課題一覧

中課題	小課題	担当課題	評価対象	対象海域	調査方法	担当者(所属)
海洋生物によるCO ₂ 収支の総合評価	藻類によるCO ₂ 収支の評価	2111	コンブ類	亜寒帯域藻場	室内実験、現場調査	北水研
		2112	アラメ	混合域・黒潮域藻場	現場調査	東北水研
		2113	アマモ、ホタテワラ類	内海域藻場	現場調査、水槽実験	瀬戸内水研
		2114	海藻類・海草類	日本沿岸域	資料調査(衛星画像等) 調査手法、GISDBシステム開発	東大海洋研
	貝類・サンゴ類によるCO ₂ 収支の評価	2121	有用貝類	日本沿岸全域 (含汽水域・潮沼)	数値モデル開発	水工研
		2122	ウバガイイ、アザリ	日本沿岸域	室内実験、文献調査	(財)海生研
		2123	有用貝類	日本沿岸全域	統計資料調査、文献調査 数値計算	日本海洋(株)
		2124	有用貝類	日本沿岸全域	文献調査	海洋科学(株)
		2125	有用貝類	日本沿岸全域	文献調査、アンケート調査(水試) 現地実態調査(水試)結果整理	(株)フィスコ
		2126	シジミ、アザリ	日本沿岸全域	フィールド実験、文献調査	島根大
		2127	サンゴ類	亜熱帯海域	現場調査、文献調査 数値モデル開発	中央水研
海洋におけるCO ₂ 収支の総合評価	大気系/海洋系におけるCO ₂ 収支の評価	2211	CO ₂ 分圧	親潮域・混合域	航海調査、統計解析	東北水研
		2212	CO ₂ 分圧	混合域・黒潮域	航海調査、統計解析	中央水研
		2213	大気系/海洋フラックス	日本太平洋岸	資料調査(航海調査結果等) 数値モデル開発	東海大

1. 藻類によるCO₂収支の評価

(1) 亜寒帯藻場におけるCO₂収支の解明

ア 目的

海洋における生物活動によるCO₂収支にかかわる環境因子を解析し、CO₂固定量を精度高く推計するとともに、その評価手法を開発する一環として一次生産者として重要な役割を果たしている亜寒帯沿岸の大型海藻群落によるCO₂収支を評価する。

イ 研究方法

北海道沿岸に形成される大型褐藻群落を対象として、フィールド調査（北海道根室市の太平洋沿岸）により現存量を求めるとともに、海藻のCO₂固定特性に関わる主な環境要因である水中光量子量と水温をメモリー式測器により周年にわたり測定した。また、野外調査の際に採集したコンブ目藻類を持ち帰り、クラーク型酸素電極を用いて、種々の温度・光条件での光合成・呼吸速度を測定し、季節ごとの光合成-光曲線を作成した。最終的には、現存量、P/B比、炭素含量、タイプ別藻場面積の実測値と文献値をもとに北海道沿岸の藻場における年間炭素固定量を推定した。

ウ 結果

- (ア) 北海道東部太平洋岸沿岸の釧路・根室地方における藻場タイプ別の最大現存量はナガコンブ群落では3.7～5.4 kg m²、ウガノモク群落では2.3 kg m²であった。ナガコンブ藻体の炭素含量は25～31%の範囲内であった。
- (イ) 海藻群落のCO₂固定に関わる主な環境要因のひとつである水中光量子量（基準水面下5m）を根室半島太平洋岸においてモニタリングしたところ、6月で3.7 mol m⁻² day⁻¹（月平均の最高）、3月で0.2 mol m⁻² day⁻¹（月平均の最低）となり、同時にモニタリングした水温（月平均）は9月に最高（16.5℃）、2、3月に最低（-1.0℃）となった（図2-1-1-1）。

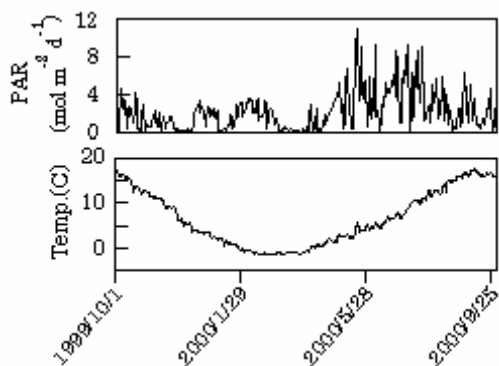


図2-1-1-1 根室半島太平洋岸の水中光量子量（1日の積算値）（上）と水温（下）の日別値の季節変動。

- (ウ) 釧路・根室地方沿岸に生育するコンブ目藻類7種（ミツイシコンブ、ナガコンブ、ガツガラコンブ、ゴヘイコンブ、スジメ、ネコアシコンブ、アイヌワカメ）のCO₂固定特性（光合成-光特性）を明らかにした（図2-1-1-2）。純光合成速度は14.5～49.5 μL O₂ cm² h⁻¹、呼吸速度は1.3～6.0 μL O₂ cm² h⁻¹、I_kは27～77 μmol m² s⁻¹となった。
- (エ) 網かごに入れて野外に放置したナガコンブ藻体重量の減少から推定した分解による藻体の炭素放出速度は-0.004～0.018 g g⁻¹ day⁻¹の間で周年変動した。
- (オ) 北海道沿岸の類型別藻場面積はアマモ場17071ha、ガラモ場4227ha、コンブ場26590ha、アラメ場854ha、ワカメ場2980ha、テングサ場107ha、アオサ・アオノリ場1199ha、その他3623haであり（環境庁自然保護局 1994）、これらの値と実測値（未発表データを含む）及び文献値（有賀 1986、Duarte 1989、村瀬 2001、名畑・酒井 1996、中井ら 1993、吉田ら 2001）をもとに決定した最大現存量、P/B比、炭素含有率から計算した類型別藻場の年間炭素固定量（ton C）はアマモ場61456トン、ガラモ場27898トン、コンブ場678843トン、アラメ場1281トン、ワカメ場5811トン、テングサ場161トン、アオサ・アオノリ場647トン、その他2717トンとなった。（表2-1-1-1）。

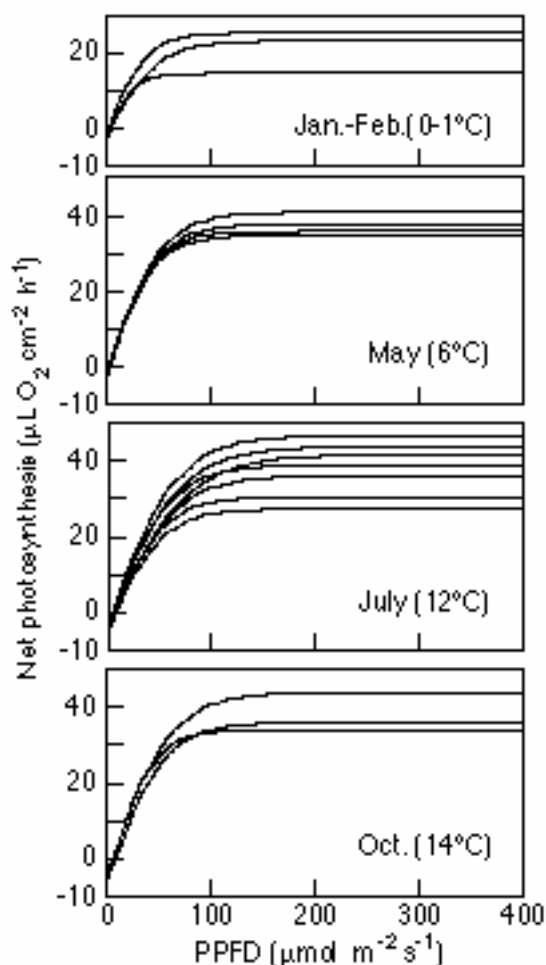


図2-1-1-2 コンブ目藻類の光合成一光曲線。光飽和純光合成速度が高い順に、（1-2月）アイヌワカメ、ナガコンブ、ガッガラコンブ、（5月）ミツイシコンブ、ナガコンブ、スジメ、アイヌワカメ、（7月）スジメ、ミツイシコンブ、アイヌワカメ、ガッガラコンブ、ナガコンブ、ネコアシコンブ、ゴヘイコンブ、（10月）アイヌワカメ、ナガコンブ、ガッガラコンブの光合成一光曲線を示す。

エ 考察

本課題で得られた炭素固定量（推定値）の信頼性を高めるためには、海藻種のP/B比、生長特性などに関する調査研究をすすめる必要がある。また、日本沿岸全域における海藻の分布状況は本課題で使用した環境省データベース（環境庁自然保護局 1994）の調査年代から変化しているので、

表2-1-1-1 北海道周辺海域の藻場の年間炭素固定量（推定値）

藻場タイプ	優占種	現存量	P/B	C(%)	面積	固定量
アマモ場	アマモ・オオアマモ	0.3	4	30	17071	61456
ガッガラ場	ウカノモク	2	1.1	30	4227	27898
コンブ場	ナガコンブ	3.7	2.3	30	26590	678843
アラメ場	スジメ	0.5	1	30	854	1281
ワカメ場	ワカメ	0.5	1.3	30	2980	5811
テンゲサ場	マゲサ	0.5	1	30	107	161
アオサ場	アオサ	0.18	1	30	1199	647
その他	クシバ・ニヒバ	0.25	1	30	3623	2717
合 計						778814

炭素固定量の単位はton C.

炭素固定量=現存量(kgDW/m²)×P/B比×C含有率(%)×面積(ha).

「その他」の藻場タイプでは、クシバ・ニヒバ以外に、クロハギ・ナソウ、カワハギ・ニヒバ、カキガサに関するデータを使用した。

現状の推定には、より迅速な手法による藻場の広域分布調査が必要である（小松 2003）。

モデル式に曲線近似した現場水温における光合成一光曲線と現場の光量子量の日周変動データから1日あたりのCO₂固定量を求めたところ、出現頻度が高いコンブ類5種はほぼ同じ値を示した。光合成能力の季節変化や葉齢の問題を含めて検討の余地はあるが、北海道東部沿岸に大規模な群落を形成する寒海産コンブ目藻類は繁茂期においてはほぼ同様なCO₂固定能力を示すものと判断された。現場水温（0～14℃）における寒海産コンブ目藻類の光飽和時の純光合成速度（坂西・飯泉 2001、Sakanishi *et al* 2003）は、暖海産コンブ目藻類のそれ（12～25℃）（Sakanishi *et al*. 1989、倉島 1996）とほぼ同様であった。この高い光合成能力は、中・高緯度海域の低水温環境においてもコンブ目藻類の群落が高い炭素固定を示す生理的背景の一つと考えられる。

オ 今後の課題

海藻の分布状況を迅速かつ正確に把握するための手法の開発が急務である。今後、空中写真解析や衛星画像解析による光学的手法や魚群探知機、サイドスキャンソナー、ナローマルチビームソナーによる音響学的手法を組み合わせた広域

分布調査の実施が望まれる（小松 2003）。

13年度報告会で推定手法の統一が検討されたため、今回は固定量推定には至らなかったが、基礎データの取得方法がほぼ確立されたので、光合成特性と現場の光などの環境データをもとにした生理生態的手法による炭素固定量の推定についても、今後、研究を進める必要がある。

カ 要約

北海道の東部太平洋岸のコンブ群落を対象とした調査と文献から北海道沿岸の藻場の現存量、P/B比、炭素含量、藻場の面積を求めた。それらの値から北海道沿岸の藻場の年間炭素固定量を推定したところ、778814 ton C/yearであった。

寒海産コンブ類の光合成－光特性と現場の水光量子量の季節変動を明らかにすることができた。これらのデータは生理生態的手法による炭素固定量推定のための基礎資料となる。

引用文献

有賀祐勝(1986) 水界生態系における藻類の役割. p. 1-13. 秋山優他(編) 藻類の生態. 内田老鶴圃. 東京.

Duarte, C. M (1989) Temporal biomass variability and production/biomass relationships of seagrass communities. Mar. Ecol. Prog. Ser. 51: 269-276.

環境庁自然保護局(1994) 第4回自然環境保全基礎調査. 海域生物環境調査報告書(干潟、藻場、サンゴ礁調査) 第2巻 藻場. 400pp.

小松輝久(2003) 沿岸藻場分布の広域調査手法の開発. 公開シンポジウム「森林、海洋等におけるCO₂・炭素収支研究最前線」講演要旨集. p29-32

倉島 彰(1996) 褐藻アラメ及びカジメの光合成と生育に関する生理生態学的研究. 132pp. 東京水産大学博士学位論文.

村瀬 昇(2001) 褐藻ノコギリモク *Sargassum macrocarpum* C. Agardh の生態学的研究. 水産大学校研究報告 49: 131-212.

名畑進一・酒井勇一(1996) 2年目オニコンブの年間純生産量. 北海道水産試験場研究報告. 49: 1-6.

中井一宏・坂下 薫・武蔵達也(1993) 天然ワカメの生活様式と生産量に関する研究. 平成4年度岩手県南部栽培漁業センター事業報告書.

80-84.

坂西芳彦・飯泉 仁(2001) : 北海道東部沿岸に生育する寒海産コンブ目数種の夏季の光合成-光特性. 藻類(日本藻類学会和文誌) 49 : 1-6.

Sakanishi, Y., Ito, H. and Iizumi, H. (2003): Photosynthetic light-response curves in cold water species of Laminariales at the eastern Pacific coast of Hokkaido. Jpn. J. Phycol. (Proceedings of 26th annual and 50th anniversary congress of Japanese Society of Phycology and 3rd Asian Pacific Phycological Forum)

Sakanishi, Y., Yokohama, Y. and Aruga, Y. (1989): Seasonal changes of photosynthetic activity of a brown alga *Ecklonia cava* Kjellman. Bot. Mag. Tokyo 102: 37-51.

吉田吾郎・内村真之・吉川浩二・寺脇利信(2001) 広島湾に生育する海藻類の炭素・窒素含量とその季節変化. 瀬戸内水研報 3: 56-61.

(水産総合研究センター 北海道区水産研究所 海区水産業研究部 海区産業研究室 坂西芳彦、同所 亜寒帯海洋環境部 高次生産研究室 飯泉 仁(11~13年))

(2) 混合域・黒潮域の藻場におけるCO₂収支の把握

ア 目的

日本沿岸に分布する藻場の中で、混合域では黒潮・親潮および津軽海峡を抜けた対馬暖流の影響を受け、コンブ類など寒流系の海藻とテングサ類など暖流系の海藻が混在している。黒潮域は日本の太平洋沿岸の大半が含まれる広い区域で、ここにはアラメやホンダワラ類など温帯性の海藻が生育する(徳田 1987)。コンブ類やアラメ、ホンダワラ類の単位面積当たりの現存量は、陸上植物群落と同等かそれ以上であることが知られており(谷口 1998)、混合域・黒潮域における藻場全体の生産量は大きいと考えられるが、大型海藻群落を対象に全球的な炭素固定量の試算が行われた例はあるものの(Smith 1981)、この海域の藻場面積をタイプ別に集計し、それぞれの現存量、P/B比、炭素含有率のデータから炭素吸収量を試算した例はない。本課題では藻場における正確な炭素収支の把握を目的に、混合域・黒潮域の藻場において最大の割合を占めるアラメ場と、それに次ぐガラモ場などに関し、炭素固定量の試算に必要なデータを集積した。同時に上記海域の藻場タイプ別面積の把握を行い、これらの結果から総炭素固定量(吸収量)の試算を行った。

イ 研究方法

- (ア) 牡鹿半島沿岸の岩礁域をモデル海域に選定し、アラメ群落およびエゾノネジモク群落(ガラモ場)を対象に、計10回(1999年6,8,9,10,12月、2000年4,6,7,8,10月)のフィールド調査を行った。アラメについては群落内に50cm x 50cmの方形枠を任意に3カ所設定し、その中に出現する海藻の現存量測定を行った。エゾノネジモクについても同じく50cm x 50cmの方形枠を3カ所設置して現存量の測定を行うと共に、層別刈り取り法による年間純生産量の推定とP/B比の算出を行った。さらにこの海域に出現したマクサおよびタンバノリについても現存量調査を行った。
- (イ) アラメ、エゾノネジモク、ワカメ、マクサ、タンバノリについて元素分析(FISONS EA1108)による炭素含有率の測定を行った。
- (ウ) モデル海域で得られなかった海藻(草)種のデータについては、既往の知見によった。
- (エ) 藻場タイプ別に集計されている藻場面積の既存データ(環境庁1994)を用いるため、(ア)

～(ウ)において現存量、P/B比、炭素含有率を決定した海藻(草)種を各藻場タイプに対応させ、対象海域藻場における総炭素固定量(吸収量)を試算した。

ウ 結果

- (ア) モデル海域では緑藻1種、褐藻4種、紅藻14種の計19種の出現を確認し、この中にはアラメ、エゾノネジモク、ワカメ、マクサ、タンバノリが含まれた。
- (イ) アラメ群落内に出現した海藻の現存量を測定した結果、調査期間を通じてアラメが全体の9割前後を占めたため、本種の現存量をもって群落の値とした。アラメの年間最大現存量は3.73kg/m²(乾燥重量; 以下同じ)であった。なお、アラメ群落内に出現したマクサおよびタンバノリの年間最大現存量はそれぞれ0.46 kg/m²、0.48 kg/m²であった。
- (ウ) エゾノネジモク群落内におけるエゾノネジモク現存量の割合は調査期間を通じて全体の94.6%以上を占めたため、本種の現存量をもって群落の値とした。エゾノネジモクの年間最大現存量は7月に記録した1.83kg/m²であった。一方、層別刈り取り法を用い、年間流失量の合計から推定した年間純生産量は2.0 kg/m²となり(図2-1-2-1)、これらより算出したP/B比は1.1であった。

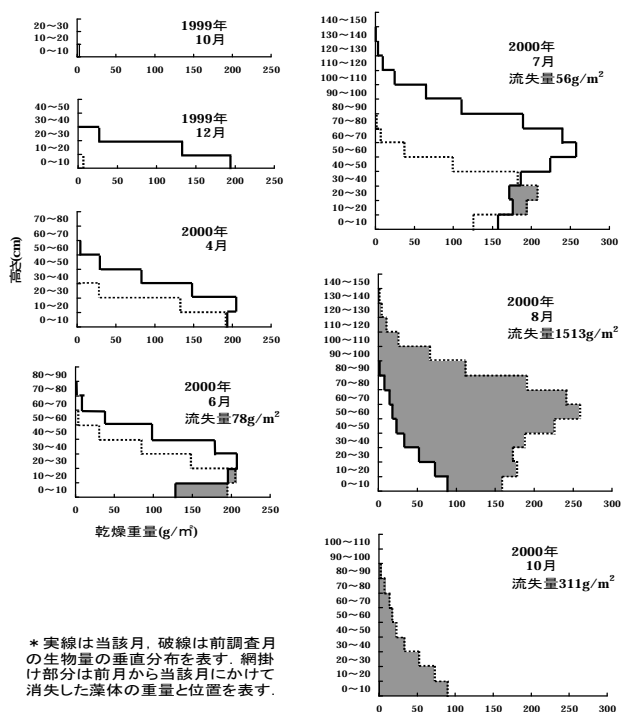


図2-1-2-1 エゾノネジモク群落の生産構造の季節変化

- (エ) モデル海域で得られなかった海藻（草）種の年間最大現存量は、アマモ0.19 kg/m² (Kohata *et al.* 2003)、マコンブ2.53 kg/m²・ワカメ0.38 kg/m²、(岩手県水産技術センター 未発表)、アナアオサ0.17 kg/m² (工藤 1999) とした。
- (オ) エゾノネジモク以外のP/B比については既往の知見よりアマモ4.0 (Iizumi 1996)、マコンブ3.5 (Fuji and Kawamura 1970)、アラメ1.0 (吉田 1970) とし、文献情報のない一年生のワカメ、アナアオサ、タンバノリは1.0、マクサは1.1とした。
- (カ) エゾノネジモク、アラメ、ワカメ、マクサ、タンバノリの炭素含有率（乾燥重量ベース；以下同じ）を測定した結果、藻体部位や季節等による差はあるものの、その平均値は32.5~39.4%の範囲内にあり、乾燥重量のおよそ1/3を炭素量と見なせることがわかった。それ以外の海藻（草）種については、既往の知見よりアマモ34.5% (Umebayashi and Sasaki 1985)、マコンブ30.0% (Mizuta *et al.* 1998)、アナアオサ29.5% (吉田ら 2001) とした（表2-1-2-1）。
- (キ) 混合域・黒潮域における総藻場面積は、環境庁（1994）からの集計により86,935haとなった。藻場タイプではアラメ場が最も大きく27,881ha、以下ガラモ場18,975ha、ワカメ場14,251haと続いた（表2-1-2-1）。
- (ク) 各藻場タイプに現存量、P/B比、炭素含有率を決定した海藻（草）種を対応させて算出した藻場タイプ別の推定吸収量を合計し、混合域・黒潮域における年間炭素固定量（吸収量）を合計647,000tonC/yearと推定した（表2-1-2-1）。

表2-1-2-1 混合域・黒潮域藻場での炭素吸収量

藻場タイプ	主な優占種	現存量(kgD.W./m ²)	P/B ratio	C %	面積(ha)	*推定吸収量(tonC)
アマモ場	アマモ	0.19	4.0	34.5	2,523	6,615
ガラモ場	エゾノネジモク	1.83	1.1	36.7	18,975	140,182
コンブ場	マコンブ	2.53	3.5	30.0	3,757	99,805
アラメ場	アラメ	3.73	1.0	33.5	27,881	348,387
ワカメ場	ワカメ	0.38	1.0	32.7	14,251	17,708
テングサ場	マクサ	0.46	1.1	39.4	12,184	24,291
アオサ・アオリノメ	アナアオサ	0.17	1.0	29.5	1,394	699
その他	タンバノリ	0.48	1.0	32.5	5,970	9,313
合計	-	-	-	-	86,935	647,000

実験藻場における実測値、一部は既存データを使用

*推定吸収量(tonC) = 現存量 × P/B ratio × 炭素含有率 × 面積

エ 考察

本研究は、混合域・黒潮域の藻場における炭素吸収量を、現存量、P/B比、炭素含有率の実測値および既往の知見から推定した初めての試みである。

今回算出した混合域・黒潮域における推定炭素固定量（吸収量）の647,000tonC/yearは、単位面積あたりに直すと0.74kg/m²/yearとなり、内海域藻場における値（課題番号2113）よりも大きい。これは混合域・黒潮域では、アラメ場、ガラモ場といった単位面積あたりの現存量が大きいタイプの藻場が高い割合を占めることに起因すると考えられる。

今回の算出に用いた牡鹿半島沿岸における海藻類の現存量実測データ（村岡 2003、Muraoka 2003）は、国内の異なる海域における他の文献の平均的な値と大差のない場合が多かった

(Murase *et al.* 2000, 津田・赤池 2001, 有賀 1974)。藻類のP/B比については、特にホンダワラ類について多くの研究があり、ヤツマタモクの1.4（谷口・山田1978）、ノコギリモクの1.2（谷口・山田1978）、アカモクの1.1（谷口・山田 1988）、フシスジモクの1.1（津田・赤池 2001）という値が得られている。今回エゾノネジモクで算出したP/B比1.1は、これらの値と大きな差はなく、ガラモ場の概算値として妥当である。

主要種の炭素含有率を測定した結果、海藻種や季節等による差はあるもののおおむねその値は30%台であった。これは瀬戸内海域で吉田ら

(2001) が複数の海藻種を対象に行った測定結果と大差のないものであり、表2-1-2-1の実測値をもって炭素量を算出するのは妥当である。

以上より、混合域・黒潮域における藻場をタイプ別に集計し、この海域での総炭素固定量（吸収量）を試算することができた。

オ 今後の課題

今回の試算は、モデル海域での実測値および既往知見から代表的な値を係数として用いている。しかし、特にガラモ場については、海域および海藻種によって現存量が大きく異なる（谷口・山田1978, 谷口・山田 1988）。今回用いた藻場面積の資料（環境庁1994）は、日本沿岸の藻場面積を藻場タイプ別に集計した唯一の資料ではあるが、海藻種ごとに集計したデータではない。各藻場タイプは複数の構成種を含み、海域によってその構成種は異なるため、試算に用いる現存量などはこれら複数種の代表的な数値を採用せざるを得ず、これによる誤差の可能性も否定で

きない。加えて、今回用いた面積データは、複数の藻場面積が重複して集計されており、総吸収量が過大評価となっている。今後試算精度を高めるためには、藻場タイプ別面積ではなく、海藻種別藻場面積の正確な把握と集計方法の検討、および異なる海域・海藻種について多くの実測値を収集することが必要である。さらに、経時的に変化する藻場分布をリアルタイムで把握するために、航空写真や衛星画像等の解析による藻場分布把握の試みについても検討すべきである。

カ 要約

混合域・黒潮域の藻場における正確な炭素収支の把握を目的として研究を行った。牡鹿半島沿岸の岩礁域をモデル海域として、そこに生育する主要種の現存量、P/B比、炭素含有率の測定を行った。同時に異なる海域における既往知見から、今回得られた数値の妥当性の検討を行うと共に、モデル海域で得られなかった海藻（草）種についての係数を決定した。これらの結果及び藻場面積の既存データより、混合域・黒潮域における年間炭素固定量（吸収量）を合計647,000tonC/yearと推定した。現存する藻場面積のより正確な把握と集計方法の検討、および各水域における藻場構成種の情報収集等が今後の課題として残された。

引用文献

- 有賀祐勝 (1974) 資源としての海藻。遺伝 28: 49-54.
- Fuji A. and Kawamura K. (1970) Studies on the biology of the sea urchin-VII. Bioeconomics of the population of *Strongylocentrotus intermedius* on a rocky shore of southern Hokkaido. Bull. Japan. Soc. Sci. Fish. 36: 763-775.
- Iizumi H. (1996) Temporal and spatial variability of leaf production of *Zostera marina* L. at Otsuchi, northern Japan. In Seagrass Biology (eds. J Kuo, RC Phillips, DI Walker, and H Kirkman), University of Western Australia, pp143-148.
- 環境庁 (1994) 第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書 第2巻 藻場。pp.401.
- Kohata K., Hiwatari T. Hagiwara, T. (2003) Natural water-purification system observed in a shallow coastal lagoon: Matsukawa-ura, Japan. Marine Pollution Bulletin 47: 148-154.
- 工藤孝浩 (1999) 横浜市海の公園では。p.55-70.
- 能登谷正浩 (編) アオサの利用と環境修復。成山堂書店、東京。
- Mizuta H., Hayasaki J. and Yamamoto H. (1998) Relationship between nitrogen contents and sorus formation in the brown alga *Laminaria japonica* cultivated in southern Hokkaido, Japan. Fish. Sci. 64: 909-913.
- 村岡大祐 (2003) エゾノネジモク。海藻の生物学と藻場造成 (能登谷正浩編), pp.75-81. 成山堂書店、東京。
- Muraoka D. (2003) Seaweed resources as a source of carbon fixation. Symposium on aquaculture and stock enhancement of algae and filter feeders, Proceedings (in press) .
- Murase N., Kito H., Mizukami Y. and Maegawa M. (2000) Productivity of a *Sargassum macrocarpum* (Fucales, Phaeophyta) population in Fukawa Bay, Sea of Japan. Fish. Sci. 66: 270-277.
- Smith (1981) Marine macrophytes as a global carbon sink. Science 211: 838-840.
- 谷口和也・山田悦正 (1978) 能登飯田湾の漸深帯における褐藻ヤツマタモクとノコギリモクの生態。日水研報告。29: 239-253.
- 谷口和也・山田秀秋 (1988) 松島湾におけるアカモク群落の周年変化と生産力。東北水研報 50: 59-65.
- 谷口一也 (1998) 磯焼けを海中林へ。pp. 201. 裳華房。東京。
- 徳田 廣 (1987) 海藻の生育環境。p.13-33. 徳田 廣ら著。海藻資源養殖学。緑書房、東京。
- 津田藤典・赤池章一 (2001) 北海道積丹半島西岸におけるフシスジモク群落の生活年周期と生産力。SUISANZOSHOKU 49: 143-149.
- Umebayashi O. and Sasaki, K. (1985) Distributional pattern of phosphorus, nitrogen and carbon in a leaf blade of eelgrass, *Zostera marina* L. Bull. Tokai. Reg. Fish. Res. Lab. 118: 21-32.
- 吉田吾郎・内村真之・吉川浩二・寺脇利信 (2001) 広島湾に生育する海藻類の炭素・窒素含量とその季節変化。瀬戸内海水研報 3: 53-61.
- 吉田忠生 (1970) アラメの物質生産に関する2,3の知見。東北水研報 30: 107-112.
- (水産総合研究センター 東北区水産研究所 海区水産業研究部 資源培養研究室 村岡大祐、斉藤憲治)

(3) 内海域藻場におけるCO₂収支の把握

ア 目的

海草・藻類によるCO₂収支評価手法の高度化のため、瀬戸内海域における主要な藻場として、砂泥底で海草・アマモ類がつくるアマモ場および岩礁底で海藻・ホンダワラ類がつくるガラモ場等に関し、海草・藻体による炭素固定の総量を把握する。

イ 研究方法

- (ア)瀬戸内海を代表するモデル海域として選定した広島湾において、湾北部から湾口・安芸灘部にかけての、砂泥底のアマモ場3地点および岩礁底のガラモ場等5地点での結果から、海草・藻類の水平・垂直分布様式を把握した。
- (イ)上述の定点から、海草・アマモおよび主要な海藻7種が優占する群落を選定し、季節別の枠取り採集により、最大現存量および時期を調査した。
- (ウ)海草・アマモおよび主要な海藻各種の草・藻体内の炭素含量を、時期別、部位別等に分析・測定した。
- (エ)広島湾内で海草・藻類現存量の主要部分を占めるホンダワラ類について、ノコギリモクを選定し、現存量の季節変化の実測から、年間生産・脱落量を推定した。
- (オ)海草・藻類の生産量と現存量比(P/B比)について、広島湾での現地調査および文献値より、計算に使用する数値を決定した。
- (カ)広島湾内における種類別の藻場について、面積を集計し、現存量、P/B比、炭素含量などから、広島湾における海草・藻類での炭素固定量(または吸収量)を算出した。
- (キ)瀬戸内海域内における種類別の藻場について、上述の広島湾と同様の方法で、海草・藻類での炭素固定量(または吸収量)を算出した。

ウ 結果

- (ア)砂泥底のアマモの垂直分布域は、湾北部では潮間帯のD.L.基準水深+0.5mから1mまで、湾中央部では0.5mから4mまでと最も広く、湾口・安芸灘部では1mから3mと上限が下がり狭

くなった。ガラモ場の主要な出現種は7種であった。緑藻のアナアオサは湾奥部の潮間帯(+1m付近)の岩上、フサイワズタは湾中央部の5～6mの礫上～砂泥上、紅藻のマクサは湾奥部の潮間帯(0～+1m)の岩上が分布の中心であった。藻場をつくる大型褐藻では、ヒジキが湾中央部から湾口部の潮間帯(+1m付近)の岩上、アカモクが湾中央部0m付近の岩と石～礫の境界、ノコギリモクが湾中央部の1～2mの石～礫上、クロメが湾口部の3～9mの石～礫上が分布の中心であった(図2-1-3-1)。

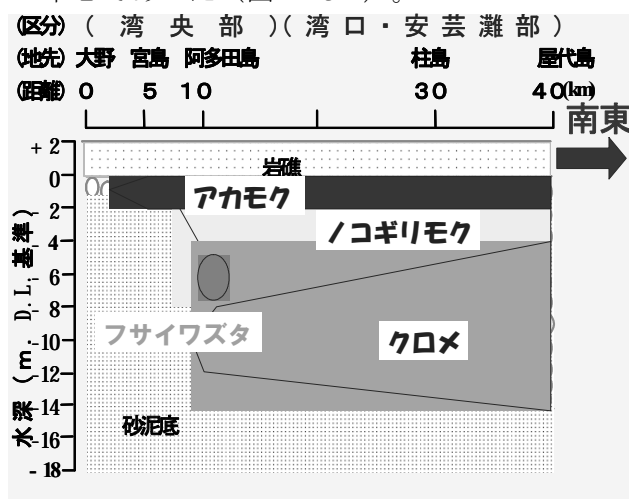


図2-1-3-1 海藻類の水平・垂直分布様式の例

- (イ)広島湾における海草・藻類の現存量(乾重/m²)は、現地調査結果から、砂泥底のアマモ場で繁茂期と衰退期の平均0.1kg、岩礁底のガラモ場で最大2.3kg(春)、アラメ場で最大1.1kg(夏)、ワカメ場で最大0.5kg(冬)、テングサ場で最大0.6kg(春)、アオサ・アオノリ場で0.3kg(冬)、その他で最大0.6kg(春)であった(表2-1-3-1)。これらの値は、異なる海域で調べられた文献値の変動範囲内が多かった。

表2-1-3-1 海藻類の現存量と最大時期

優占種名	最大現存量(湿重量g/m ²) ()内は標準偏差	季節	地点
アナアオサ	1390.8(187.6)	冬	大野(湾奥部)
ヒジキ	11585.2(6435.2)	夏	屋代島(湾口部)
マクサ	2202.8(188.0)	春	阿多田島(湾中央部)
アカモク	16764.0(11610.4)	春	柱島(湾中央部)
ノコギリモク	12162.4(3756.8)	春	柱島(湾中央部)
フサイワズタ	5540.0(1680.8)	春	阿多田島(湾中央部)
クロメ	9782.8(1010.8)	夏	屋代島(湾口部)

(ウ)砂泥底のアマモ草体内では、炭素含量（乾燥重量基準）が32%であった。岩礁底の主要種7種の藻体内では、炭素含量（乾燥重量基準）は、アナアオサ28-32%、ヒジキ30%、マクサ36-40%、アカモク33%、ノコギリモク37%、フサイワズタ23-30%およびクロメ31%であった（表2-1-3-2）。以上の広島湾の現地試料および文献値から、海草・藻類体の炭素含有率30%と見なして用いることとした（表2-1-3-2）。

表2-1-3-2 海藻体中の炭素含量

種名	炭素含量(%)	季節
アナアオサ	27.5 - 31.5	春
ヒジキ	29.9	春
マクサ	36.1 - 40.1	春
	36.9	夏
アカモク	32.9	春
ノコギリモク	37.1	春
フサイワズタ	23.1 - 30.4	春
クロメ	31.4	春

(エ)阿多田島におけるホンダワラ類の主要種ノコギリモク群落の現存量・脱流量の季節変化（図2-1-3-2）から、年間生産量を2.0kg/m2とし、最大現存量の1.3倍であった。ノコギリモクの生産量と最大現存量の比は、日本海北部および南部における既存値と、ほぼ等しかった。

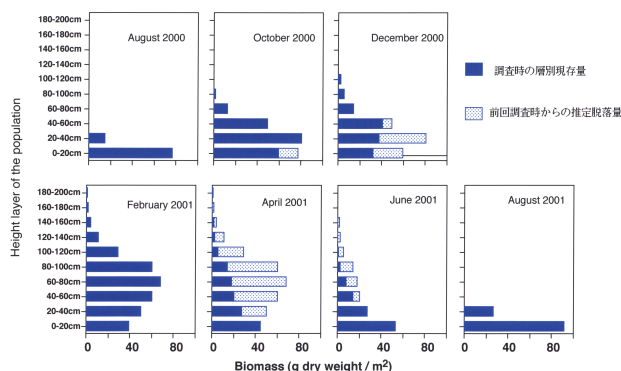


図2-1-3-2 ノコギリモク群落の層別現存・脱流量

(オ)海草・藻類の生産量と現存量比（P/B比）は、広島湾での現地調査および文献値より、アマモが平均現存量に対する4、ガラモ場が最大現存量に対する1.2とし、アラメ場が1、文献情報のほとんど無い一年生のワカメ場が1、テングサ場が1、アオサ・アオノリ場が1、そ

の他が1とした。

(カ)広島湾内の類型別の藻場面積は、広島県倉橋島以西および山口県屋代島以北の対象範囲内で、呉湾部11ha、湾北（奥）部38ha、湾央部63haおよび湾口・安芸灘部647haであり、湾口・安芸灘部で広がった。藻場類型別の単位面積あたり年間最大現存量（乾重/m²）は、ガラモ場（ホンダワラ類3種6定点の平均）2.3kgが最も大きく、次いでアラメ場（クロメ3定点の平均）1.1kgであった。広島湾内で藻場をつくる海草・藻体の総重量は年間最大値で6257トンであり、ガラモ場3933トンが最も大きく、特に湾口・安芸灘部に集中していた。以上から、広島湾内の藻場をつくる海草・藻体中の炭素総量は年間最大値で1993トンであり、ガラモ場1278トンが最も大きく、特に湾口・安芸灘部に集中していた（表2-1-3-3）。

表2-1-3-3 広島湾での海草・藻類の炭素固定量

藻場類型(環境庁1994)	呉湾部	湾北(奥)部	湾央部	湾口・安芸灘部	合計(トン/全面積)
1 アマモ場	3.9	22.0	28.4	109.8	164.1
2 ガラモ場	15.0	15.0	142.0	1106.3	1278.2
4 アラメ場	0.0	0.0	0.0	132.3	132.3
5 ワカメ場	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6 テングサ場	0.0	0.0	0.0	64.4	64.4
7 アオサ・アオノリ場	2.5	0.0	0.0	102.3	104.8
8 その他	0.0	6.0	0.0	243.0	249.0
合計(ha)	21.3	43.0	170.4	1758.0	1992.7

(キ)瀬戸内海域における藻場面積は、既存統計資料により23,584haであり、アマモ場が6,377haで最も広く、次いでアオサ・アオノリ場が4,594haであった（表2-1-3-4）。上記の、類型別の藻場面積、現存量、P/B比、および炭素含有率データ等を用いて推定される瀬戸内海域の海草・藻類による炭素固定量（または吸収量）は66,545tonC/yearであった（表2-1-3-4）。

表2-1-3-4 瀬戸内海域の海草・藻類での炭素固定量

藻場タイプ	主な優占種	現存量(kgD.W./m ²)	P/B ratio	炭素含有率(%)	面積(ha)	*推定生産量(tonC)
アマモ場	アマモ	0.1	4.0	30	6377	7652.4
ガラモ場	ノコギリモク	2.3	1.2	30	4299	35595.7
アラメ場	クロメ	1.1	1.0	30	3220	10626.0
ワカメ場	ワカメ	0.5	1.0	30	898	1347.0
テングサ場	マクサ	0.5	1.0	30	1216	1824.0
アオサ・アオノリ場	アナアオサ	0.3	1.0	30	4595	4135.5
その他	フサイワズタ	0.6	1.0	30	2980	5364.0
合計	-	-	-	-	23585	66544.6

実験藻場における実測値。一部は既存データを使用

*推定生産量(tonC) = 現存量 X P/B ratio X 炭素含有率 X 面積

エ 考察

広島湾における砂泥底のアマモの水平・垂直分布域は本研究で初めて明らかにされた。岩礁底の主要な海藻類の水平・垂直分布様式は、本研究で初めて明らかにされ、太平洋岸および日本海岸とも異なる特徴を示した(寺脇ら 2001)。

広島湾における海草・藻類の現存量(乾重/m²)の実測データ(寺脇ら 2002, 内村ら 2003)は、異なる海域で調べられた文献値の変動範囲内

(川端ら 1990, 向井 1982, 谷口・山田 1979, 道家ら 2000, Umebayashi 1989, 水島 1985, McRoy 1970, 片田 1940, 片田 1952, 西川・小川 1977, 当真 1993, 村瀬・大貝 1996, Murase and Kito 1998, 谷口・山田 1978, Mukai 1971, 谷口・山田 1988, 中村・宮後 1983, 野中ら 1962, 工藤 1999, 大野 1988, Casabianca de and Posada 1998, Ohno and Mairh 1982, Uno *et al.* 1983, Meinesz *et al.* 1994, Zavodnik *et al.* 1998)が多く、瀬戸内海全域への適用が妥当と考えられる。

砂泥底のアマモおよび岩礁底の主要種7種の藻体内の、実測データ(寺脇ら 2001, 吉田ら 2001)に基づく炭素含量30%(乾重基準)は、異なる海域で調べられた文献値の変動範囲内

(Aioi and Mukai 1980, Umebayashi and Sasaki 1985, Rosell and Srivastava 1985, Flores-Moya *et al.* 1995)であったことから、妥当と考えられる。

広島湾中央部におけるノコギリモクの年間生産量および生産量と現存量比(P/B比)1.3は、初めて実測され、日本海北部および南部における既存値(谷口・山田 1978, Murase *et al.* 2000)と、ほぼ等しかった。海草・藻類のP/B比は、広島湾での取得データおよび文献値(Iizumi 1996, 谷口・山田 1978, Murase *et al.* 2000, 谷口・山田 1988, 吉田 1970, Yokohama *et al.* 1978)より決定し、妥当と考えられる。

広島湾内では、藻場の大部分が湾口・安芸灘部に集中し、年間最大現存量ではガラモ場(ホンダワラ類)が最大で、次いでアラメ場(クロメ)であり、海草・藻体の総重量は年間最大値で6257トンであった。以上から、広島湾内の海草・藻体中の炭素総量は年間最大値で1993トンであり、ガラモ場1278トンが最も大きく、特に湾口・安芸灘部に集中していた。

これに対して、瀬戸内海域における藻場面積23,584haの内、アマモ場が6,377haで最大で、次いでアオサ・アオノリ場が4,594haと広く、広島湾の場合とは異なっていた。これらの理由として、広島湾においては、呉湾部および湾奥(北)部において都市化が進み、アマモ場またはアオノリ・アオサ場が形成されやすい、干潟に続く勾配の緩やかな水深の浅い砂泥底の大部分が、海面埋め立てによって、陸化されている(瀬戸内の環境を守る連絡会 1997)ことから、現存する藻場の主要部分が湾口・安芸灘部の岩礁底のガラモ場などによって、代表されがちとなったと考えられる。

瀬戸内海域の海草・藻類による炭素固定量(または吸収量)66,545tonC/yearは、上述のように、計算の対象となった藻場が、浅所に限られ現存量の小さなアマモ場およびアオノリ・アオサ場を主体とし、現存量が大きなガラモ場等の寄与が小さかったことに影響を受けていると考えられる。

オ 今後の課題

広島湾内および瀬戸内海域としての藻場をつくる海草・藻体中の炭素固定(吸収)総量が算出された。ただし、藻場面積は、1991年度以前の時点であり、さらに、重複して集計した面積を含むものである。今後は、現存する藻場面積の正確な把握、および、海草・藻類の生産量と現存量比(P/B比)を、より正確に見積もることが、藻場におけるCO₂収支の把握においてきわめて重要である。

カ 要約

瀬戸内海域における主要な藻場をつくる海草・藻類によるCO₂収支評価手法の高度化を目的とした。広島湾をモデル海域とした実測等により、海草・藻類の水平・垂直分布様式、現存量、草・藻体内の炭素含量、主要種の年間生産量、生産量と現存量比(P/B比)等のデータを取得した。以上と現存藻場の面積データから、瀬戸内海域の海草・藻類による炭素固定量(または吸収量)66,545tonC/yearが得られた。今後は、藻場面積の正確な把握、および、海草・藻類の生産量と現存量比(P/B比)の正確化が重要である。

引用文献（業績および主要な引用文献）

- Aioi K. and Mukai H.(1980)On the distribution of organic contents in plant of eelgrass (*Zostera marina* L.) Jap. J. Ecol. 30: 189-192.
- Casabianca M.L. de and Posada F.(1998)Effect of environmental parameters on the growth of *Ulva rigida* (Thau Lagoon, France). Bot. Mar. 41: 157-165.
- Flores-Moya A. Fernandez A. and Niell F. X. (1995)Seasonal variations of photosynthetic pigments, total C, N, and P content, and photosynthesis in *Phyllariopsis purpurascens* (Phaeophyta) from the strait of Gibraltar. J. Phycol. 31: 867-874.
- Iizumi H.(1996)Temporal and spatial variability of leaf production of *Zostera marina* L. at Otsuchi, northern Japan. In Seagrass Biology (eds. J Kuo, RC Phillips, DI Walker, and H Kirkman), University of Western Australia, pp143-148.
- 片田実(1952)ヒジキの生態学的研究. 第1報 小湊に於けるヒジキ及びウミトラノオの群落に就いて. 農水講研報 2: 40-47.
- 工藤孝浩(1999)横浜市海の公園では. p.55-70. 能登谷正浩（編）アオサの利用と環境修復. 成山堂書店, 東京.
- McRoy C. P.(1970)Standing stocks and other features of eelgrass(*Zostera marina*) populations on the coast of Alaska. J. Fish. Res. Brd. Canada 27: 1811-1821.
- Meinesz A. Benichou L. Blachier J. Komatsu T. Lemee R. and Mari X.(1994)Note Preliminaire sur les variations saisonnieres de *Caulerpa taxifolia* en Mediterranee. p.285-290. In : Boudouresque C.F. Gravez V. and Meinesz A. (eds.) First international workshop on *Caulerpa taxifolia*. GIS Posidonie, France.
- 向井宏(1982)アマモの生態と生理. 海草藻場（特にアマモ場）と水産生物について. 日本水産資源保護協会 1-48.
- Murase, N., Kito, H., Mizukami, Y. and Maegawa, M. 2000. Productivity of a *Sargassum macrocarpum* (Fucales, Phaeophyta) population in Fukawa Bay, Sea of Japan. Fish. Sci. 66: 270-277.
- 西川博・小川英雄(1977)ヒジキの移植効果について. 水産増殖 24(4) : 123-127.
- 野中忠・大須賀穂作・佐々木正(1962)天草増産に関する基礎的研究 (7) 天草の生育と採取後の回復について. 静岡水試伊豆分場研報 18: 1-4.
- Ohno M. and Mairh O.P.(1982)Ecology of green alga Ulvaceae occurring on the coast of Okha, India. Rep. Usa mar. biol. Inst. 4: 1-8.
- Rosell K.-S. and Srivastava L. M.(1985) Seasonal variations in total nitrogen, carbon, and amino acids in *Macrocystis integrifolia* and *Nereocystis luetkeana* (Phaeophyta). J. Phycol. 21: 304-309.
- 瀬戸内の環境を守る連絡会(1997)触まれた海浜. 伊藤印刷, 神戸, pp1-224.
- 谷口和也・山田秀秋(1988)松島湾におけるアカモク群落の周年変化と生産力. 東北水研研報 50: 59-65.
- 寺脇利信・吉川浩二・吉田吾郎・内村真之・新井章吾(2001)広島湾における大型海藻類の水平・垂直分布様式. 瀬戸内海水研報 3: 73-81.
- 寺脇利信・玉置仁・西村真樹・吉川浩二・吉田吾郎(2002)広島湾におけるアマモ草体中の炭素および窒素総量.水研セ研報 4: 25-32.
- 内村真之・新井章吾・吉川浩二・吉田吾郎・寺脇利信(2003)広島湾の岩礁性藻場をつくる海藻の現存量とその季節変化. 藻類 51:123-129.
- Umebayashi O.(1989)Eelgrass productivity on an intertidal flat of central Japan. Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab. 127: 17-30.
- Uno S. Sakai Y. Yoshikawa K.(1983) Distribution of *Ulva pertusa* and amount of nitrogen in Yamaguchi Bay, Japanese Journal of Phycology, 31: 148-155.
- 吉田吾郎・内村真之・吉川浩二・寺脇利信(2001) 広島湾に生育する海藻類の炭素・窒素含量とその季節変化. 瀬戸内海水研報 3: 53-61.
- 吉田忠生(1970)アラメの物質生産に関する2, 3の知見. 東北水研研報 30: 107-112.
- (水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所 生産環境部 藻場・干潟環境研究室 寺脇利信、吉田吾郎、吉川浩二)

(4) 沿岸藻場分布の広域調査手法の開発

ア 目的

日本周辺の沿岸域における藻場によるCO₂収支を正確に見積もるためには、藻場を構成する海藻・海草類のそれぞれの炭素固定量や枯死分解による炭素放出などに関する知見とともに、藻場の種類ごとの分布とそのバイオマスを正確に把握する方法の確立が必要である。日本の藻場分布に関する全国的な資料は、環境庁（当時）により1992年にまとめられた第4回自然環境保全基礎調査しかない。この資料は、環境庁から委託を受けた各県の担当者が漁業者から聞き取ったものなどで、客観的に調べられたものではない。本研究では客観的な広域藻場調査手法の開発および検討を行った。調査にあったっては、本課題を分担する各水産研究所の現場調査海域を対象とすることとした。また、それぞれの調査手法により得られた結果は、地理情報システムを利用して整理した。

イ 藻場分布域調査手法の分類

藻場分布域の調査手法は、調査者による藻場分布の観察による直接的手法とリモートセンシングによる間接的手法に分類される。直接的手法には船上からの観察、棹による海草採集、潜水観察、海岸からの観察がある。間接的手法には光学的手法と音響学的手法がある。しかし、間接的手法を使用する場合には、直接的手法での確認（ground-truthing）を行なう必要がある(Komatsu et al., 2002)。直接的手法は時間がかかり効率が悪いため、藻場の広域調査には間接的手法であるリモートセンシングを使用しなければならない。そこで、光学的手法と音響学的手法に分け、得られた結果について述べる。

ウ 光学的な藻場分布域の広域調査手法

藻場分布域の広域調査に使用される光学的手法の最も一般的な方法は、空中写真と衛星画像の利用である。詳細な藻場分布調査や藻場の長期的変化の調査には前者を、大規模な調査には後者が使用されている(Komatsu et al., 2002)。これらの手法は高密度の広域藻場を特定するには効率はよいが、シュート密度が低い藻場や小さなサイズの藻場、

濁りが大きい場合や深い底深に分布する藻場の検出は必ずしもうまくいかない(Komatsu et al., 2002; Komatsu et al., 2003)。近年、下向きに設置したカメラを曳航体に取り付け藻場調査を行なう場合があるが、濁りが大きい場合には使用が困難である。

(ア) 空中写真解析

北海道根室市歯舞地区のコンブ場を対象に空中写真を用いて調査を行なった。調査開始前には、親潮の影響を受けた沿岸水が分布し、霧の発生や海水の濁りが大きいために藻場分布域の特定は困難と思われた。漁期前に行なわれる棹前コンブ調査時期にあたる6月に撮影した空中写真の解析を行なった。空中写真をスキャナーでコンピュータに取り込み、画像解析ソフト（ERDAS）を用いて藻場の教師付き判別を行なった。その結果、コンブ場の分布域を特定でき、それらの面積を推定できることが明らかになった（図2-1-4-1）。

岩手県船越湾にある海草アマモの一種のタチアマモ場でも空中写真による解析を行い、底深およそ7-8mまでの分布が確認できた。また、宮城県泊地先ボーダ浜において褐藻類の藻場であるアラメ場でも空中写真解析によりアラメ分布面積を推定することができた。さらに、褐藻類ホンダワラ科植物で構成されるガラモ場とアラメ・カジメ場の両方の型の藻場が分布する静岡県下田市鍋田地先を対象として撮影した空中写真を解析した結果、両者を区別することが可能であった。

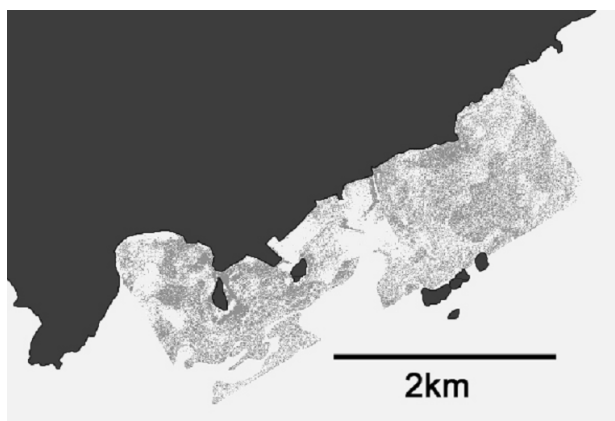


図2-1-4-1. 根室市歯舞地区コンブ場の水平分布。黒色、濃い灰色、薄い灰色はそれぞれ、陸上、コンブ場、コンブ場以外の海域

(イ) 衛星画像解析

一般的に入手できる衛星画像には、LANDSAT-TM (7バンド)、SPOT XS (4バンド)、IKONOS (4バンド) などがある。それぞれの画像の空間解像度、時間解像度、走査幅は、LANDSATが30m x 30m、16日、185km、SPOTが20m x 20m、26日、60km、IKONOSが4m x 4m、3日、11kmである。本課題の研究には比較的低価格で入手可能なSPOTの衛星画像をもとに藻場分布域の特定を行なった。

岡山県倉敷市の味野湾のアマモ場に本手法を応用したところ、アマモの分布を密なアマモ場と疎なアマモ場にとに分けて分布面積を特定することができた(図2-1-4-2)。さらに能登半島の富山湾のガラモ場を対象とした場合にも、SPOT衛星画像を使用して藻場を特定することができた。

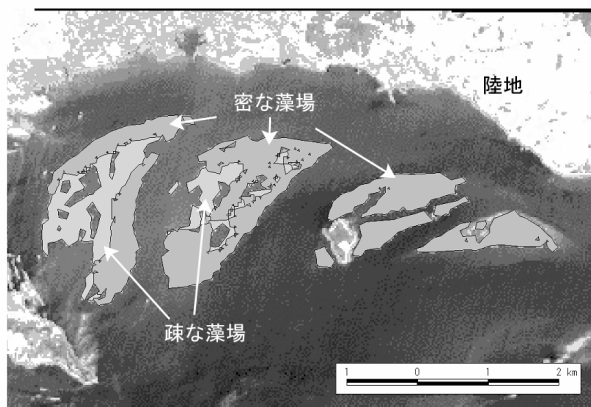


図2-1-4-2. SPOT衛星画像の解析により得られた岡山県倉敷市味野湾のアマモ場の水平分布。黒い色、濃い灰色、薄い灰色、白色はそれぞれ、アマモ以外、密なアマモ場、疎なアマモ場、陸地を示す

エ 音響学的な藻場分布域の広域調査手法

音響学的な海底底質の調査手法には魚群探知機や音響測深機による手法、サイドスキャンソナーによる手法、ナローマルチビームソナーを使用した手法がある。そこで、それぞれの手法を藻場分布域の調査に用いた結果について述べる。

(ア) 魚群探知機による手法

超音波を用いて魚群分布や海底地形の計測に使用する目的で開発された装置として魚群探知機あるいは音響測深機がある。葉の中に気体をも

つ海草や海藻群落は超音波を強く反射するため藻場と海底とを明瞭に判別することが可能である。長所は、藻場の鉛直プロファイルを連続して取得でき、サイドスキャンソナーに比較して安価で、取り扱いが簡単なことである。

この手法は、アマモ場(Komatsu and Tatsukawa, 1998)に使用されている。使用する超音波の周波数が3.5kHzと低い場合には明瞭に海草場を捉えることはできないが、200 kHzの周波数を使用した場合には明瞭に判別可能であった。アラメ場への応用について検討するため、D-GPSと魚群探知機(Simrad, EY-500)を用いて、宮城県泊地区のボーダ浜地先で調査した。超音波の周波数は70kHzであり、200kHzよりも低かったが、海底とアラメ場を区別して捉えることができた(図2-1-4-3)。

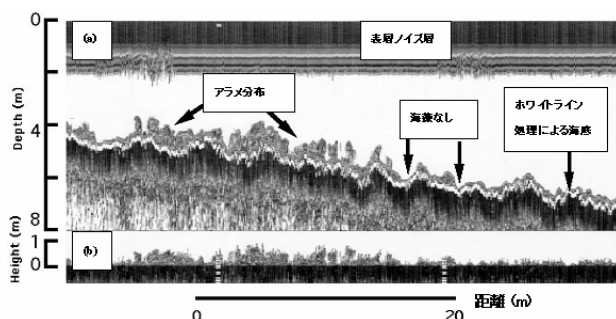


図2-1-4-3. 計量魚群探知機による宮城県泊地区のボーダ浜のアラメ場のエコグラム。(a)は、海底の深度に沿ったアラメ分布を、(b)は、海底を平坦にした場合のアラメ分布を示す

Komatsu and Tatsukawa (1998) は、ほぼ同じ速度での航走により得られた音響調査のエコグラムと方形枠を使用した坪刈により得られた海草の生物量データとの関係を用いて定量化した。エコグラムの反射強度を高密度、中密度、低密度の海草にわけ、対応する海草の単位面積当たりの平均生物量を求めた。そして、調査定線の海草密度を高、中、低密度、および海草なしの4ランクに分けて平面図上に描き、分布密度の水平分布図を作成した。それぞれの密度の面積と、単位面積当たりの海草の平均生物量と面積を掛け合わせて藻場全体の生物量を得た。今後、海草や海藻の反射強度と生物量の関係を定量化し、計量魚探機を使用し藻場生物量を推定する方法を開発する予定である。

(イ) サイドスキャンソナーによる手法

サイドスキャンソナーは50-500mの範囲で海底を走査し、空中写真のようなイメージで海底の状態を検出することが可能である(Komatsu et al., 2003)。欠点として、装置が高価、マッピングに際して位置精度が他の手法よりも低いことなどがあげられる。

神奈川県三浦市の小網代湾で行なった調査では、タチアマモ場と砂地とを区別することができた

(図2-1-4-4)。しかし、岩礁上に分布するアラメ・カジメと岩礁を区別することは困難であった。

また、アラメ・カジメ場とガラモ場が混在する和歌山県御坊市地先での調査では、これら2種類の藻場も岩礁も区別することができなかった。



図2-1-4-4. サイドスキャンソナーを用いた神奈川県三浦市の小網代湾におけるタチアマモ場の水平分布

(ウ) ナローマルチビームソナーによる手法

ナローマルチビームソナーは超音波を用いて水路や港湾の海底の深さを広域に精密に調査することができる装置である。本研究で使用した装置は60本の455kHzの超音波を直下を中心に一度に1.5度間隔で60本を送信し、水深の2倍の範囲で精密に測定できるものである(Komatsu et al., 2003)。ビーム幅が1.5度で、5mの海底では約13cmの水平方向の分解能がある。リモートセンシングによる結果については1辺が50cmの方形枠を用いた潜水による海草の坪刈調査によって確認した。

このナローマルチビームソナーを用いて岩手県大槌湾のタチアマモ場の分布を測定した。調査結果を処理し、タチアマモの分布を3次元的に示した

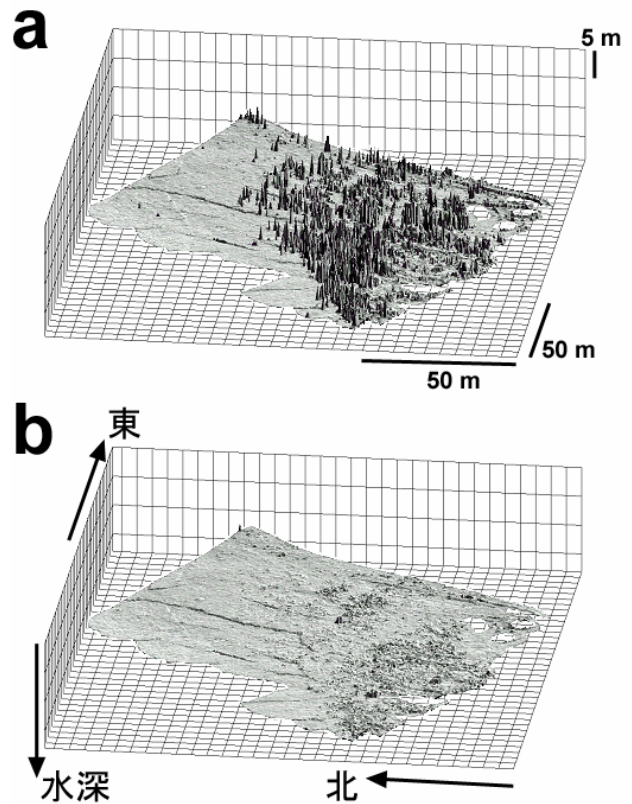


図2-1-4-5. ナローマルチビームソナーを使用して得られた岩手県大槌湾根浜地先タチアマモ場。aは海底上に分布するタチアマモ群落を、bは海草を除去した海底

海草タチアマモの
水平分布と等底深線 (m)

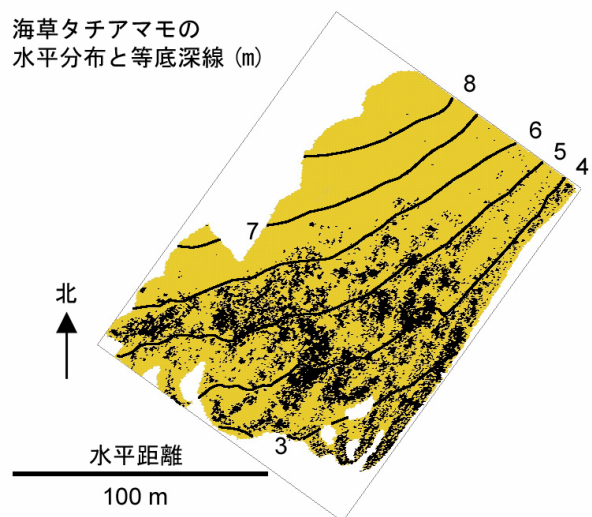


図2-1-4-6. ナローマルチビームにより得られた岩手県大槌湾根浜地先の等深線とタチアマモの水平分布。黒い点が海草の分布を示す

(図2-1-4-5a)。海草タチアママモが海中で森林のような景観を作り出していることがこの図から理解できる。海草の生えている海底の水深を知るとは生態学的にも藻場保全のためにも重要である。そこで、海草からのエコーをノイズとして除去し、海底をもとめる方法を開発した(図2-1-4-5b)。それにより、海草の占める体積および面積を推定できるようになったばかりでなく、底深と海草の水平分布図(図2-1-4-6)も作成できるようになった(Komatsu et al., 2003)。根浜では、タチアママモの分布下限がおおよそ6 m等深線と一致することが分かる。また、海草群落が不定形なまとまりをもった塊の状態で分布しており、これらの塊の間には空間があることが、初めて明らかになった。さらに、坪刈データをもとに、藻場のバイオマス推定方法を開発した(Komatsu et al., 2003)。

オ 第4回自然環境保全基礎調査データの検討

第4回自然環境保全基礎調査は全国的な藻場分布面積に関する唯一のデータベースである。この調査は1988年～1992年度に収集されたデータを下にしており、埋立、磯焼けなどによる消滅、未報告藻場の存在により現在と異なっているものと考えられる。そこで、計測した藻場分布と基礎調査データとを比較検討した。未報告藻場の分布(タチアママモ場)、分布面積過少報告(コンブ場)や確認できなかった藻場分布(タチアママモ場)、消滅藻場(ガラモ場)などがあり、今後、本研究により開発された手法を用いて、全国的データを取得する必要がある。

カ 今後の課題

本研究により海草・海藻類の種類に応じた藻場分布面積の広域計測手法を開発することができた。したがって、今後、日本全国の藻場分布を計測するプロジェクトを立ち上げ、データベースを構築する必要がある。また、季節的、あるいは、経年的な藻場の消長について各海域の代表的な藻場を対象に長期モニタリングすることで、藻場分布面積の変動幅を知る必要がある。

藻場を構成する海草・海藻類の分布量をリモートセンシングによって計測する手法については一部の音響リモートセンシングを除いて十分に検討することができなかった。今後、生物量

の定量的リモートセンシング手法について検討する必要がある。

キ 要約

各種リモートセンシングによる広域藻場調査手法による現場観測と潜水によるGround Truthを通じて、それぞれの藻場の種類に適切した手法を検討した。その結果、底深の浅い場所では空中写真および衛星画像解析による手法を使用する方が、音響学的手法より精度は落ちるが効率は良い。濁りがあつたり、水深の深い場所では音響学的手法による調査手法を適用しなければならない。音響学的手法においては、サイドスキャンソナーの利用が効率的であるが、アマモ場にしか適用することができなかった。ナローマルチビームソナーは広範囲に分布水深およびバイオマスを推定できる点で有効であるが、水深が浅い藻場には効率が落ちるため適用が困難である。魚群探知機の使用は、ソナーに比べて水平分布の解像度が悪くなるが、簡単なシステムで取り扱いがやさしく、バイオマスを推定できる点ですぐれている。資金や時間といった条件と藻場の分布水深を考慮し、適した広域調査手法とGISと組み合わせることにより、精度の高い藻場分布を得ることが可能である。

引用文献

- KOMATSU T., IGARASHI C., TATSUKAWA K., NAKAOKA M., HIRAISHI T. & TAIRA A. (2002) Mapping of seagrass and seaweed beds using hydro-acoustic methods. *Fisheries Science* 68: 580-583.
- KOMATSU T., IGARASHI C., TATSUKAWA K., SULTANA S., MATSUOKA Y. & HARADA S. (2003) Use of multi-beam sonar to map seagrass beds in Otsuchi Bay, on the Sanriku Coast of Japan. *Aquatic Living Resources* 39: 223-300.
- KOMATSU T., MIKAMI A., SAYEEDA S., ISHIDA K., HIRAISHI T. & TATSUKAWA K. (2003) Hydro-acoustic measurements as a practical tool for mapping seagrass beds. *Otsuchi Marine Science* 28: 72-79.
- KOMATSU T. & TATSUKAWA T. (1998) Mapping of *Zostera marina* L. beds in Ajino Bay, Seto Inland Sea, Japan, by using echo-sounder and global positioning systems. *Journal de Recherche Oceanographique* 23: 39-46.

(東京大学海洋研究所 行動生態計測分野、小松輝久)

2. 貝類・サンゴ類による CO₂ 収支の評価

(1) 貝類の CO₂ 固定量評価に関する算定手法の開発

ア 目的

化石燃料の燃焼による地球温暖化に対して、海洋における炭素循環の解明が注目されている。海洋の物理的循環に比べて生物過程を通した物質循環は複雑であり、高い生物生産と生物多様性を有する沿岸域における炭素循環の解明が課題となっている。中でも沿岸域に高密度に分布する貝類は、個体群への物質貯留、濾水による水質浄化、漁獲による物質の系外除去等の生物機能によって、沿岸環境に極めて重要な役割を果たしている。

我が国沿岸域の主要な有用貝類 8 種について、分布範囲、生物量、代謝特性等についてのデータベースを作成し、炭素収支による貝類個体群の生物機能に関する解析等から、生物活動が水域環境に果たす役割について全国評価を行なった（中村他 2003）。

イ 研究方法

種類別・海区別に年間の炭素収支を算定し生物機能の評価した。貝類の評価対象は①生物量が大きく沿岸域の炭素収支に及ぼす影響が大きいこと、②機能評価を行うためのパラメータなど既往知見が多いこと、③有用水産生物であり生産活動における資源管理が可能であることを基準に選定した。評価対象種は、ホタテガイ（*Patinopecten yessoensis*）、マガキ（*Crassostrea gigas*）、アサリ（*Tapes philippinarum*）、ヤマトシジミ（*Corbicula japonica*）、サザエ（*Turbo cornutus*）、ウバガイ（*Spisula sachalinensis*）、サルボウ（*Scapharca kagoshimensis*）、アコヤガイ（*Pinctada martensii*）である。上記 8 種は 1998 年度の貝類漁獲量上位 8 種に該当し、貝類全漁獲量の 9 割以上を占めている。評価対象のうち、サルボウ、シジミ、ウバガイ、ホタテガイ（地蒔き）については、主要漁場の資源量調査を元に現存量を算出し、アサリ、サザエ、アコヤガイ、ホタテガイ（養殖）、マガキについては、

主要都道府県の漁獲量から現存量を推定して算出した。

評価方法は、ウバガイ個体群の機能評価モデル（中村他 2001, 2002）を元に 8 種類毎の代謝パラメータを考慮して作成したモデルを用いている。なお、藻食性のサザエの摂餌速度については二枚貝のモデルを適用できないため、日間摂餌率を用いて定式化を行った。

ウ 結果

(ア) 主要貝類の生物量分布

主要貝類の生物量を図 2-2-1-1 に示した。我が国沿岸に生息する主要 8 種の 1998 年における漁獲量は 0.8Mt であり、生物量はおよそ 1.7Mt と推定された。生物量のうちホタテガイは 7 割近くを占め、次いでウバガイ、マガキが各々 1 割、アサリ、ヤマトシジミが各々 3% を占めている。ウバガイは 1995 年の大量発生群の加入により生物量が大きくなっているが、漁獲量には反映されていない。アコヤガイは 1997 年以降数年続いた大量斃死により収穫量が小さくなっている。分布面積は全国で延べ 3000 km² で、ウバガイや地蒔きホタテガイなど砂浜に生息する貝類の面積が大きい。海区別にみると、主要貝類の生物量は北海道オホーツク海区が卓越しており、その 9 割以上がホタテガイで占められる。次いで太平洋中区と道東区の生物量が大きく、太平洋中区はアサリが 8 割を、道東区はホタテガイ（6 割）とウバガイ（4 割）が占めている。瀬戸内海区はこれに次いで生物量が大きく、9 割以上がマガキの養殖である。

(イ) 主要貝類の炭素収支

貝類の種類毎の炭素収支を図 2-2-1-2 に示した。評価対象種 8 種のうち、ホタテガイ（地蒔き）、ウバガイは外海砂浜性の貝類であり、サザエは岩礁性、アサリ、サルボウは内海砂泥性、ヤマトシジミは汽水性、ホタテガイ、マガキ、アコヤガイは垂下養殖である。

生物量中の炭素は 143ktC あり、炭素収支は排出側 420ktC/y、固定側 467ktC/y で、いずれも僅かに固定側が大きくなっている。養殖貝と他の貝を同一に並べることはできないが、種類毎に比較すると以下の通りである。

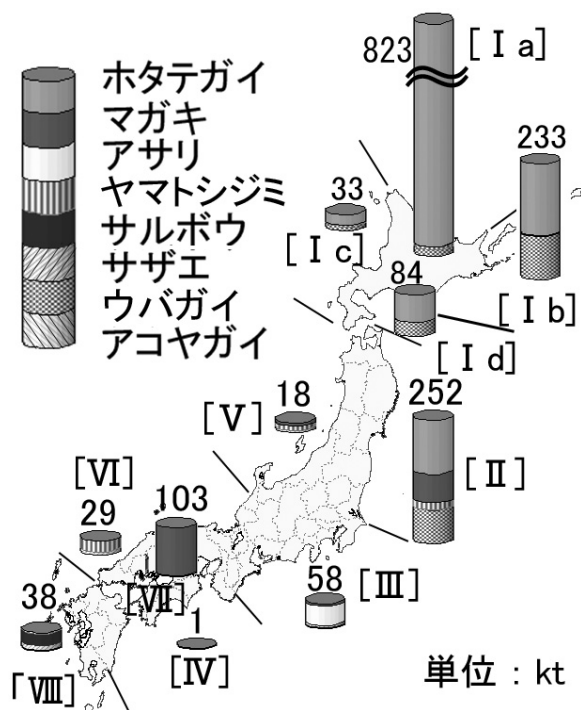


図2-2-1-1 主要貝類の生物量

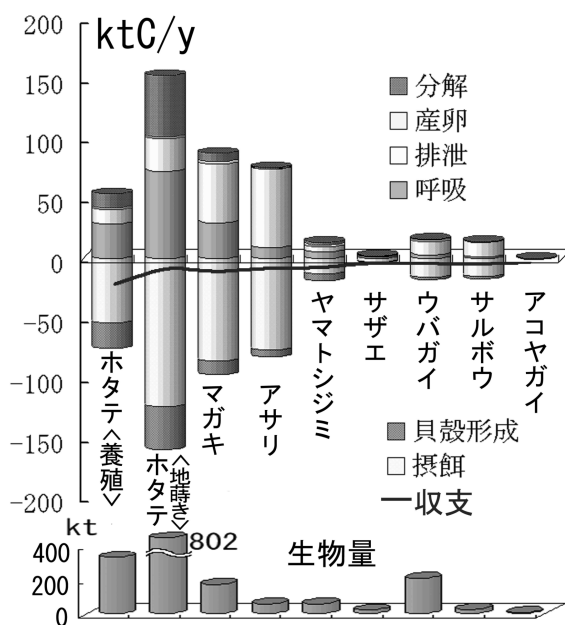


図2-2-1-2 貝の種別生物量と炭素収支の特性

個体群への炭素の出入りは生物量に概ね対応するが、濾水速度や呼吸速度などの代謝機能の大きい種は生物量に比して炭素の出入りが大きい。ヤマトシジミとアサリは生物量がほぼ同等

であるにもかかわらずアサリの炭素の出入りが大きいのは濾水速度の違いによるものである。

機能毎にみると、呼吸、産卵、分解及び貝殻形成は生物量を反映しているが、養殖のマガキとホタテガイは天然貝に比べて呼吸が大きい。天然貝のうち生息水温が低く個体の大きいウバガイは、ヤマトシジミやアサリに比べて代謝機能が相対的に小さい。摂餌及び排泄は富栄養化の進んだ内湾域に生息するアサリが卓越している。

エ 考察

(ア) 炭素収支の海区域特性

海区毎の炭素収支は図2-2-1-3に示すとおり、いずれの海区も僅かに固定側が大きい。海区域別炭素収支は生物量と環境条件を反映し、生物量が最大のオホーツク海区は貝類個体群への炭素の出入りが最も大きく、排出側で155ktC/y、固定側で161ktC/y、収支は固定側で6ktC/yとなっており、ほぼ両者が均衡している。この海区はホタテガイが大部分を占めており、呼吸及び分解による排出と貝殻形成は全国で最大である。排出される炭素のうち約半分が呼吸による排出で、次いで分解、排泄となっている。固定側では約2割を貝殻形成が占めている。道東区および太平洋北区はオホーツク海区に次いで生物量が大きい、炭素の出入りは太平洋中区や瀬戸内海区に比べて小さい。この2海区はホタテガイ、ウバガイ、マガキ、アサリ等で構成され、ホタテガイの占める割合が大きい海区である。太平洋中区は排出側で72ktC/y、固定側で76ktC/yであり、アサリが大部分を占める海区である。アサリの主な生息地である東京湾と伊勢・三河湾の富栄養化が進んでいることと、アサリの濾水速度が比較的大きいことから、有機物濃度の高い環境条件を反映して摂餌および排泄による炭素の出入りが最も大きい海区となっている。瀬戸内海区はマガキが主体で、東京湾等の内湾に比べてChl. a濃度が低いため、生物量が太平洋中区より大きいにも係わらず炭素の出入りは同区より若干小さい。

(イ) 生物生産の海区域特性

表2-2-1-1に海区域の生物量、漁獲量、P/B比、

有機物・無機物生産量および環境条件を水温と *Chl. a* の年平均値で表した。我が国沿岸の貝類による生物機能を生産力の面からみると、北海道から太平洋北区にかけての寒流の影響を受ける海域と、本州から南の暖流の影響を受ける海域の2つの海域に大別される。

寒流の影響を受ける北海道から太平洋北区にかけての海域における貝類の生物生産は、生物量が大きく生産力も高い一方で、P/B比（回転率）が暖流域に比べて小さいことが特徴である。これは海域の水温が低く生物の生息域として厳しい環境にあることが要因と考えられる。特にオホーツク海区や道東区のように低水温の海域では、このような環境条件に耐えるホタテガイやウバガイ等の大型の貝類が他の貝類を凌駕し、極めて大きな生物量をもつ。これらの大型種は寿命が比較的長く、低水温の海域でゆっくり成長するため、P/B比（回転率）が暖流域に比べて小さくなっているものと考えられる。この海域では南の海区ほど水温が高く生物量が小さくなるかわりに、生産速度（P/B比）が大きくなる傾向がみられ、地理的な条件を反映した生物生産の様式を表している。

一方暖流の影響を受ける本州から南の海域では、温暖な環境下で様々な貝類が競争状態にあり、比較的小型で寿命の短い貝類が多く生物量

は寒流域に比して小さい。この海区で最も生物量が大いのは瀬戸内海区で、マガキ養殖が主体であるため生産力およびP/B比がいずれも高い。次いで餌料濃度が高い太平洋中区や東シナ海区の生物量が大いだが、P/B比は比較的小さ

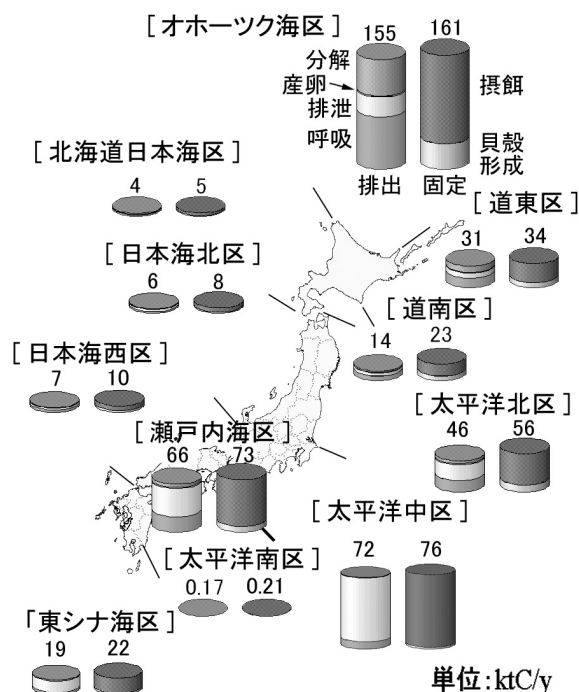


図 2-2-1-3 貝類炭素収支の海区特性

表 2-2-1-1 貝類生物機能の海區別特性

海区	生物量	収穫量 漁獲量	有機物生産		無機物生産	生産比	水温	<i>Chl. a</i>
	(t)	(t)	P/B比	生産量 (tC/y)	生産量 (tC/y)	有機／無機	年平均値 (℃)	年平均値 (ng/m ³)
北海道 ホツツ海区	823,473	258,071	0.85	23,083	36,243	0.64	8.1	1.3
道東部	233,120	38,326	0.75	4,835	7,867	0.61	7.4	3.3
日本海区	33,092	5,643	0.85	721	1,175	0.61	10.2	1.6
道南部	83,741	109,800	1.35	4,143	7,360	0.56	10.0	2.5
太平洋北区	251,858	194,990	1.39	6,167	10,397	0.59	10.7	4.3
太平洋中区	58,395	37,402	1.07	1,205	4,399	0.27	19.0	12.0
太平洋南区	1,340	1,153	1.60	22	59	0.37	21.3	3.9
日本海北区	17,923	11,366	2.28	858	1,567	0.55	16.3	1.1
日本海西区	28,826	11,135	2.07	1,205	2,736	0.44	19.0	5.0
瀬戸内海区	103,199	118,913	2.20	4,580	9,044	0.51	17.8	4.1
東シナ海区	38,498	15,958	1.07	1,375	2,688	0.51	17.3	8.5
全 国	1,673,465	802,757	1.02	48,194	83,535			

い。日本海側は汽水性のヤマトシジミが多く分布し、P/B比が大きいことが特徴的である。この海域における生物生産の空間分布は、地理的な要因よりも海区毎の構成種や栄養条件が生物生産に反映したものとなっている。

オ 今後の課題

生物生産力が地球上の中で、最も大きい水域である沿岸域は人間の経済活動も活発な地域である。沿岸域における人間活動と生物活動の結果、地球環境にもたらされる恩恵と影響を適正に評価することは大気中に放出されたCO₂の行方と温暖化対策を考える上で重要である。しかし、沿岸域のCO₂収支を検討する場合は、今回のプロジェクトで取り扱った主要貝類と水域との炭素収支だけでは不十分で、食物連鎖、貝殻形成に伴う炭酸平衡による海水性状変化、大気との交換に加え沖合い由来、陸上由来、養殖など水域由来のCO₂収支についても複合的に解析することになる。そのためには、今後三つの課題に取り組む必要がある。

- 1) 主要生物のバイオマスと環境情報のモニタリングとデータベース化
- 2) 生物機能評価のためのモデルベース化
- 3) 評価方法を物質収支から物質循環へ

カ 要約

ホタテガイ（養殖および地蒔き）、マガキ（養殖）、アサリ、ヤマトシジミ、サザエ、ウバガイ、サルボウ、アコヤガイ（真珠養殖）の個体群を対象に、炭素収支による生物機能の全国評価を行なった結果、8種の生物量は1.7Mt(143ktC)あり、炭素収支は排出が420ktC/y、固定が467ktC/yで、差し引き年間47ktCの炭素が貝類によって固定される。

種類別の炭素収支はホタテガイ>マガキ>アサリ>ウバガイ>ヤマトシジミ>サルボウ>サザエ>アコヤガイの順で炭素の出入りが大きく、いずれも固定側がわずかに上回った。有機物除去機能はアサリが最も大きかった。

海区別の炭素収支は、生物量の大きいオホーツク海区に次いで、富栄養化の進んだ太平洋中部と養殖主体の瀬戸内海区における炭素の出入りが大きい。生物機能は、有機物の大きい内湾の

アサリが多い太平洋中部に有機懸濁物の除去機能が卓越し、次いでマガキ養殖主体の瀬戸内海区における有機物除去機能が大きい。

生物生産の空間分布特性は寒流域と暖流域に大別され、生物量の大きい寒流域に対して暖流域のP/B比が大きいことが特徴的であった。

引用文献

中村義治・金綱紀久恵・磯野良介・三村信男

(2001) 生活史に沿った二枚貝個体群の生物機能評価法, 海岸工学論文集, 第48巻, 土木学会, pp. 1231-1235.

中村義治・金綱紀久恵・磯野良介・三村信男

(2002) 貝類の生物機能と水域環境への影響に関する全国評価, 海岸工学論文集, 第49巻, 土木学会, pp. 1371-1375.

中村義治・金綱紀久恵・磯野良介・三村信男

(2003) 我が国における主要貝類の生物量と生物機能の分布特性, 海岸工学論文集, 第50巻, 土木学会, pp. 1296-1300.

(水産工学研究所、水産土木工学部、中村義治)

(2) 貝類の代謝実験に基づく炭素収支の 解明

ア 目的

本研究は、日本沿岸に生息する有用貝類について、それらの CO_2 固定量を個体レベルで明らかにすることを目的とする。得られた成果は本研究の上位課題「貝類の CO_2 固定量評価に関する算定手法の開発」に組み込まれることで、日本沿岸に生息する有用貝類による CO_2 固定量が算出される。

イ 研究方法

ウバガイについて、炭素収支を解明する上で不可欠な生物学的パラメータ（摂餌量、同化量、呼吸量等）を温度と体サイズを考慮して詳細に測定した（図2-2-2-1）。さらに貝殻の炭素源を明らかにするため、炭素安定同位体を用いて調査した。また、アサリのパラメータ収集のための補完実験、約1000万件のデータ・ベースを検索し他の貝類のパラメータ収集を行った。

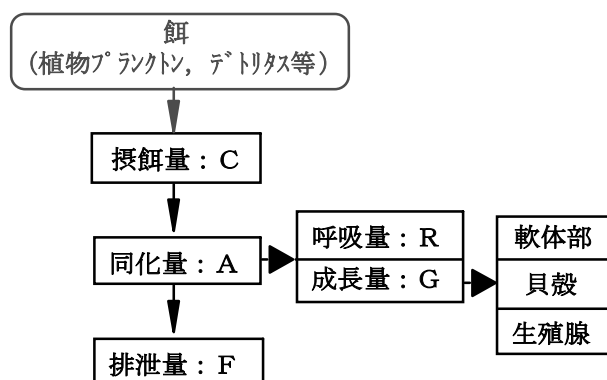


図2-2-2-1. 個体レベルにおける貝類の炭素収支

$$C = A + F = (R + G) + F, \quad C \text{ は濾水量} \times \text{餌濃度}$$

ウ 結果

(ア) 生物学的パラメータ

本研究で測定されたパラメータの概要を表2-2-2-1に示した。また、これらのパラメータを用いて見積もったウバガイの1個体当たりの炭素収支の一例を表2-2-2-2に示した。

表2-2-2-1. ウバガイおよびアサリに関する生物学的パラメータ

種	項目	数値	温度 (°C)	殻長 (mm)
ウバガイ	殻長(L, mm)と軟体部湿重量(W, g)の関係	$W = 3.37 \cdot 10^{-5} L^{3.13}$ ($r^2 = 0.996$, $n = 26$)	-	16.4-119.3
	軟体部乾重量: 湿重量比	0.208 ± 0.012 ($n = 26$)	-	"
	軟体部炭素含有量 (乾重量比, %)	39.7 ± 1.1 ($n = 25$)	-	"
	殻長(L, mm)と殻乾重量(SW, g)の関係	$SW = 1.60 \cdot 10^{-5} L^{3.45}$ ($r^2 = 0.994$, $n = 26$)	-	"
	殻乾重量: 湿重量比	0.936 ± 0.013 ($n = 18$)	-	30.0-92.5
	殻炭素含有量 (乾重量比, %)	12.3 ± 0.2 ($n = 26$)	-	16.4-119.3
	軟体部湿重量(W, g)と濾水量(F, l/indiv./h)の関係	$F = 1.20 \cdot W^{0.446}$ ($r^2 = 0.977$, $n = 15$)	15.0	25.4-108.3
	濾水活動停止クロロフィルa濃度 ($\mu\text{g/l}$)	$0.2-0.4$ ($n = 14$)	15.0	38.0 ± 5.1
	軟体部湿重量(W, g)と組織呼吸量(R_1 , $\mu\text{l/indiv./min}$)の関係	$R_1 = 2.33 \cdot W^{0.822}$ ($r^2 = 0.996$, $n = 29$)	15.0	16.6-118.1
	個体としての呼吸量(R_2 , $\mu\text{l/indiv./min}$)の変動幅	$0-13.0$ ($n = 120$)	15.0	39.0 ± 1.1
	組織呼吸量(R_1)と個体としての呼吸量(R_2)の関係	$R_1 \approx 0.8 \cdot R_2$ (最大値)	15.0	"
	組織呼吸量の温度係数 (Q_{10})	$Q_{10} = 2.54$	5.0-20.0	17.8 ± 0.3
	炭素同化率(%)	46.6 ± 9.5 ($n = 6$)	15.0	46.8 ± 1.5
	"	59.0 ± 4.5 ($n = 3$)	15.0	75.7 ± 1.9
	"	50.5 ± 4.7 ($n = 9$)	20.0	47.4 ± 1.7
アサリ	殻炭素の由来 (呼吸: 海水)	$0.1 : 0.9$	15.0, 20.0	34.0 ± 1.6
	殻長(L, mm)と軟体部湿重量(W, g)の関係	$W = 2.05 \cdot 10^{-5} L^{3.29}$ ($r^2 = 0.995$, $n = 61$)	-	6.1-46.4
	軟体部乾重量: 湿重量比	0.218 ± 0.007 ($n = 20$)	-	10.9-41.8
	軟体部炭素含有量 (乾重量比, %)	38.5 ± 1.1 ($n = 20$)	-	"
	殻長(L, mm)と殻乾重量(SW, g)の関係	$SW = 2.78 \cdot 10^{-5} L^{3.37}$ ($r^2 = 0.971$, $n = 20$)	-	"
	殻炭素含有量 (乾重量比, %)	12.0 ± 0.03 ($n = 20$)	-	"
	軟体部湿重量(W, g)と組織呼吸量(R_1 , ml/indiv./min)の関係	$R_1 = 3.08 \cdot W^{0.791}$ ($r^2 = 0.992$, $n = 41$)	-	6.1-46.4
	組織呼吸量の温度係数 (Q_{10})	$Q_{10} = 2.04$	5.0-25.0	31.1 ± 0.7
	炭素同化率(%)	48.2 ± 10.8 ($n = 8$)	20.0	36.3 ± 2.2

- : 未設定

表2-2-2-2. 各発育段階のウバガイの
1 個体当たりの炭素収支

発育段階 殻長 (mm)	未成貝 26	成貝 75
摂餌量	13.7 (100%)	60.2 (100%)
呼吸量	1.7 (13%)	25.3 (42%)
成長量	4.7 (34%)	10.2 (17%)
排泄量	7.3 (53%)	24.7 (41%)

単位：mg-C/日、カッコ内は摂餌量に対する
割合を示す(水温15℃、餌濃度0.5mg-C/l)

表2-2-2-2に示される炭素収支に係わる各パラメータは、貝の大きさ、水温および餌濃度により異なってくる。各大きさのウバガイについて、それらの個体反応と環境（水温と餌濃度）との関係を図2-2-2-2に示した。図中の曲線は各大きさのウバガイが各水温において生存に必要な餌濃度（有機炭素濃度）を示す。各生息水温において環境中の餌濃度が曲線を上回れば、それらの炭素は成長あるいは成熟に利用される。

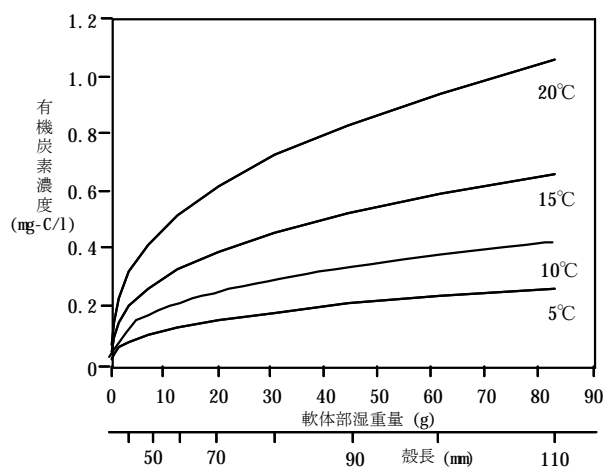


図2-2-2-2. 各水温において各大きさのウバガイの生存に必要とされる餌濃度
呼吸商を1、同化率を0.5として算定

(1) 貝類による炭素収支の全国評価

本研究で得られた結果は「貝類のCO₂固定量評価に関する算定手法の開発」に組み込まれ、日本沿岸に生息する貝類によるCO₂固定量が算出された。

エ 考察

図2-2-2-2に示されるように、殻長50mm付近を境にウバガイが必要とする餌濃度の増加率は急激に低下している。佐々木（1993）によれば、ウバガイでは殻長50mm前後から成熟個体が出現する。従って、これらの殻長以上で生存に必要な餌の要求量が体サイズの増加に比べて低下することは成熟に配分する炭素の割合を増加させることに有利に働くと考えられた。

二枚貝殻の炭酸塩について、その炭素源を明らかにすることを目的とした研究は5例と少ない。このうちMcConnaughey *et al.* (1997)の総説によれば水生無脊椎動物の貝殻炭素はほとんどが海水由来であった。残りの4件中の3件によれば、二枚貝種により呼吸代謝由来の炭素の割合が5～58%含まれていた（表2-2-2-3）。これらに対し山本・赤野（1997）ではアコヤガイ殻の炭素はほぼ100%が呼吸代謝由来であったが、炭素安定同位体比の測定値に疑問点が残る。

表2-2-2-3. 貝殻の炭酸塩に占める呼吸代謝
由来の炭素の割合

種	呼吸由来炭素 の割合 (%)	引用
<i>Pseudocardium sachalinensis</i>	10	本研究
<i>Crassostera virginica</i>	43-45	Tanaka <i>et al.</i> (1986)
<i>Mytilus edulis</i>	24-58	"
<i>Mytilus trossulus</i>	18-25	Klein <i>et al.</i> (1996)
<i>Aequipecten opercularis</i>	5-20	Hickson <i>et al.</i> (1999)
<i>Pinctada fucata marutensii</i>	100	山本・赤野 (1997)

本研究と山本・赤野は室内飼育実験、その他は野外試料を測定

オ 今後の課題

矢野ら（1990）によれば、ホタテガイの同化率は35～75%と季節により変化した。温度以外に同化率が変化する要因として、餌の質的および量的な変化、餌濃度に対応して濾水活動が停止することで消化管内における餌の滞留時間（消化率）が変化することが挙げられる。

カ 要約

貝類の個体レベルにおける炭素収支を明らかにするため、これらに係わる生物学的パラメータを実験および文献により収集した。得られた結果は「貝類のCO₂固定量評価に関する算定手法の開

発」に組み込まれ、貝類による炭素収支の全国評価がなされた。

引用文献

- Hickson J. A., Johnson A. L. A., Heaton T. H. E. & Balson P. S. (1999) The shell of Queen Scallop *Aequipecten opercularis* (L.) as a promising tool for palaeoenvironmental reconstruction: evidence and reasons for equilibrium stable-isotope incorporation. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 154: 325-337.
- Klein R. T., Lohmann K. C. & Thayer C. W. (1996) Sr/Ca and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in skeletal calcite of *Mytilus trossulus*: Covariation with metabolic rate, salinity and carbon isotopic composition of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 4207-4221.
- McConnaughey T. A., Burdett J., Whelan J. & Paull C. K. (1997) Carbon isotopes in biological carbonates: Respiration and photosynthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 611-622.
- 佐々木浩一 (1993) 水産研究叢書42 ウバガイ (ホッキガイ) の生態と資源. 85pp. 日本水産資源保護協会, 東京
- Tanaka. N., Monaghan M. C. & Rye D. M. (1986) Contribution of metabolic carbon to mollusc and barnacle shell carbonate. *Nature* 320: 520-523.
- 山本雅祥・赤野 徹 (1997) 貝類の炭酸ガス固定に関する基礎研究. 関西電力株式会社総研報告. 54: 107-115.
119-142.
- 矢野 豊・伊藤 博・酒井保次 (1990) 地まき放流漁場におけるホタテガイ *Patinopecten yessoensis* (Jay) の消化率とその季節変化. 北水研報告. 54: 25-32.

(海洋生物環境研究所 実証試験場 磯野良介)

(3) 貝類によるCO₂固定量評価のための漁獲動態に係わる調査

ア 目的

深刻化する地球温暖化の防止のために、地球規模でのCO₂排出量の削減が求められている。生物資源を用いた対策を講じるには、まず、生物資源のバイオマスとその変動を定量的に評価することが必要である。本課題では、わが国における貝類資源のうち、全国規模で情報の把握が可能である有用貝類のうち8種を評価対象とし、①日本沿岸の有用貝類の生産諸関係に関する諸データの整備を行い、資源動態に関する漁業関係のパラメータを求める②沿岸域の貝類によるCO₂固定量評価のために資源量を推計することを目的とした。

イ 研究方法

平成10年度を評価対象年次とし、貝類資源と当該資源を利用する漁業に関する既存の資料・文献および漁場に関する諸データを用い、個体群動態モデルを運転して評価対象8種の総個体数、総資源量の評価を行った。

(ア) 資源及び漁獲パラメータの整理

既往知見の収集及び水試へのアンケート調査(課題2125)の結果を整理し、漁法(養殖方式)、C P U E(収穫量)、年齢別組成、年齢別資源密度、加入年齢・加入殻長等の資源・漁業に関する情報等の資源動態に係わるパラメータを整理した。

(イ) 資源量の推定

漁獲量データは①資源量の算出②個体群動態モデル計算結果の検証③漁業による貝殻取り上げ量推定の3点に必要である。資源量の推定は、漁獲量や漁獲努力量などの漁獲統計及び年齢組成や成長速度、自然死亡係数などの生物資料から解析した。

その他、水試および漁協が実施した試験操業による資源量調査結果が入手可能な漁場については、その成果を用いて資源量を設定した。

ウ 結果

(ア) 全国の貝類生産量は、海面漁業41万トン、海面養殖業43万トン、内水面漁業2万トンである

(平成10年農林水産統計)。評価対象種8種(サザエ、アサリ類、ホタテガイ、ウバガイ、サルボウ、ホタテガイ養殖及びカキ類養殖)で、海面漁業では約9割、海面養殖業では10割近くの生産量を占めており、内水面漁業ではシジミが9割以上を占めている。

魚種別の漁獲量分布は図2-2-3-1に示すとおり、ホタテガイ及びウバガイは北方性、サルボウ及びアコヤガイは南方性であり、マガキ、アサリ、サザエは全国に広く分布している。

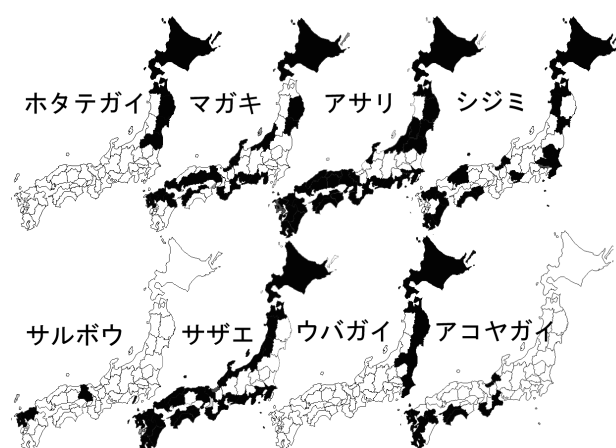


図2-2-3-1 全国の漁獲量分布図

(イ) 主要魚種の漁法は、サザエは刺網及び採貝(磯見、潜水、貝突き、徒手採取等)、アサリ類は採貝(腰まき、マンガ、じょれん等)、ホタテガイは小型底曳網(桁網)、固定式刺網、潜水器、ウバガイは小型底曳網(噴流水式桁網、桁曳き網、貝桁網、マンガ)、シジミは採貝(シジミ搔き、手搔き、じょれん)、等である。

(ウ) 評価対象8種の資源量は、1,673(10³ton)と推計された。各種の占める割合は、ホタテ:67.8%、ウバガイ:12.3%、マガキ:10.2%、ヤマトシジミ:3.3%、アサリ:3.3%、サルボウ:1.4%、サザエ:1.2%、アコヤガイ:0.4%の順となった。

(エ) 海区別にみると、北海道オホーツク海区が卓越しており、その9割以上がホタテガイで占められる。次いで太平洋中区と道東区が大きく、太平洋中区はアサリが8割を、道東区は6割をホタテガイが、4割をウバガイが占めている。瀬戸内海

区はこれに次いで大きく、9割以上がマガキの養殖である（図2-2-3-2）。

表2-2-3-1 評価対象8種の資源推計

評価対象種		分布面積 ^{*1} (km ²)	総個体数 (10 ⁶ 個)	生物量 (t)	収穫量 ^{*2} 漁獲量 (t)	漁獲・収穫率
ホタテガイ	垂下養殖	39.3	5,664	331,975	226,142	0.68
	地蒔き	1,067.0	19,544	802,571	287,802	0.36
マガキ	養殖	13.9	3,275	171,096	199,460	1.17
アサリ	天然	390.8	25,304	55,487	36,807	0.66
ヤマトシジミ	天然	148.9	47,247	55,753	19,932	0.36
サザエ	天然	566.8	298	20,185	12,556	0.62
ウバガイ	天然	881.0	1,051	206,528	8,227	0.04
サルボウ	天然	48.4	4,553	23,871	5,364	0.22
アコヤガイ	真珠養殖	21.5	194	5,998	1,962	0.33
合 計		3,177.5	107,131	1,673,465	798,252	0.48

注) *1の合計欄は、延べ数である。

*2は計算対象年次の漁獲量（平成10年 漁業・養殖業生産統計年報 農林水産省統計情報部）に基づく。

サルボウは平成13年度の佐賀県漁獲量を示す。アコヤガイは、真珠の浜揚げ量から算出した。

(オ) 年間の平均資源量と年漁獲量の比を見かけの漁獲率Eとして、 $E = \text{獲量} / \text{年間平均資源量}$ とした。Eの値は、垂下養殖のホタテガイ：0.68、地まき養殖のホタテガイ：0.36、マガキ（養殖）：1.17、アサリ：0.66、ヤマトシジミ：0.36、サザエ：0.62、ウバガイ：0.04、サルボウ：0.22、アコヤガイ：0.33、評価対象8種の平均値は、0.48となった。

(カ) 養殖のマガキの収穫率が大きく1以上と算出されているのは、1年で収穫される養殖個体群が多いためである。垂下養殖のホタテガイは2年間で収穫するので、在庫があるため、その比率は1以下となっている。地まき養殖のホタテガイやサルボウの収穫は漁獲による収穫形態であることや、輪番制によるため、在庫資源が大きく、その比率は1以下である。その他の貝類も同様な理由のため、1以下の値となっている。このなかで、ウバガイの比率が特に小さい。これは生産の中心地である北海道における資源管理が徹底し、漁獲圧力が非常に小さいことを示している。（表2-2-3-1）

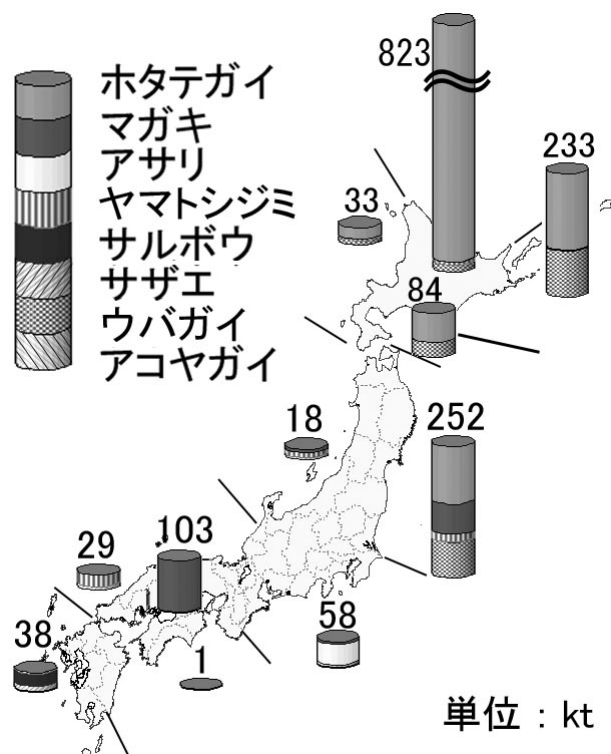


図2-2-3-2 海区別の貝類のバイオマス

表2-2-3-2 評価対象種の漁業

評価対象種	漁業種	全減少係数		自然死亡係数		漁獲係数	
		最小値	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値
ホタテ	垂下養殖	-	-	0.11		-	-
	地まき養殖	2.14		0.22		1.92	
マガキ	養殖	-	-	0.34		-	-
アサリ	天然	0.51	1.50	0.33	0.93	0.19	1.18
ヤマトシジミ	天然	0.40	0.60	0.20	0.30	0.15	0.30
サザエ	天然	0.99	1.35	0.36		0.70	0.81
ウバガイ	天然	0.37	0.76	0.30	0.51	0.003	0.55
サルボウ	天然	0.88	1.52	0.29	0.97	0.30	0.76
アコヤガイ	養殖	-	-	0.83	1.39	-	-

注) ホタテおよびサルボウの全減少係数、漁獲係数は、養殖形態を考慮し生物資源統計学的に算出した。

(キ) 殻長組成を年齢組成におきかえ、各海域での全減少係数を算定した。サンプル数が少ないために、推算値は過大な値をとることが多い。このため、個体群モデルによる資源計算を行って、妥当と考えられる全減少係数を確定した。これによると、天然では、全減少係数が0.37～1.52、自然死亡係数が0.2～0.97、漁獲係数で0.003～1.18の範囲となった。一方、養殖業では、全減少係数が2.14(ホタテ地まき養殖)、自然死亡係数が0.11～1.39、漁獲係数が1.92(ホタテ地まき養殖)となった。アコヤガイの自然死亡係数は、評価対象年次において大量斃死が発生しているため非常に高い数値となっている。(表2-2-3-2)

わが国沿岸の炭素固定量の計算に際して定量的評価が可能となった。またこれらのデータはGISデータとして保存されたので、今後、干潟、藻場、砂浜などの沿岸環境の保全や環境修復などのほか、漁業・資源管理に係わる生物学的な管理に利活用されることが期待される。

(日本海洋株式会社、金網紀久恵)

エ 今後の課題

本調査では、試験研究期間において情報の把握が可能な有用貝類8種のみを調査の対象としたが、「わが国におけるCO₂の収支評価」を考慮すれば、評価対象外の貝類についてもムラサキイガイなどのバイオマスの大きい種類からデータベースを構築してゆくことが必要である。

オ 要約

有用貝類の資源量を整理・推計したことにより、

(4) 貝類の生理とCO₂の固定に関する生化学的機構に関する文献調査

ア 目的

本研究は、評価対象貝類によるCO₂の固定に関わる生理的及び生化学的機構の文献学的検討を行い、個体の代謝を通じたCO₂固定のモデルを構築して、CO₂固定量を評価することを目的としている。

イ 研究方法

(7) 炭素収支に基づく貝類のCO₂に関わる代謝モデルの構築を行った。

(i) 平成11年度収集の文献類の整理による、摂餌、同化、呼吸、排泄等の代謝パラメータを評価対象種ごとに行った。

ウ 結果

(7) 前年度の研究報告に基づき、餌を通じた炭素収支に基づく二酸化炭素収支モデルとする。アコヤガイ、ヒオウギガイ、マガキでは消化-呼吸を経て約45%程度が炭酸ガスとして環境中に放出され、貝殻部には8~20%の炭素がCaCO₃の形で固定される。本研究では炭酸ガス固定能は後者の貝殻部への固定量を扱うことになる。

近年、安定同位体を利用した研究において、貝殻部(炭酸カルシウム)の炭素は上述のような代謝起源よりは環境海水中の溶存無機炭素(HCO₃⁻)

が主たる供給源であるとの報告があるが、一方では、ロングアイランドのNew Haven Harborにおいて、貝類の石灰質部と有機質部の両者について、また、無機態炭素、プランクトン、他の炭素利用生物についての¹⁴C/¹²C比と¹³C/¹²C比を組み合わせた測定によると、

① δ¹³Cによると代謝系の炭素の固定割合は 35~85%、平均56%

② ¹⁴Cによると代謝系の炭素の固定割合は 23~68%、平均42%

であり、ほぼ50%に落ち着くことが分かった。アラゴナイトへの分配係数及び同位体平衡における問題などがあるが、貝類の石灰質部への炭素の固定は、¹⁴C/¹²C比と¹³C/¹²C比からは代謝経路の割合は~50%である。この他、ほとんどが代謝経路であるという報告もなされている。

これらの実験から、安定同位体分別において、生物学的過程の介在が複雑であり、貝類のδ¹³Cは時空間における摂餌環境の変動によっても、容易に変化することが分かった。

従って、本研究の課題と関連する二酸化炭素収支とは代謝過程におけるCO₂の組織と体外の収支を扱う。貝類は直接二酸化炭素を利用することはないので、二酸化炭素の収支は内呼吸により形成されるCO₂を扱う。

(i) 貝の代謝活動による貝殻形成は無機化学的には図に示すような過程を経る。

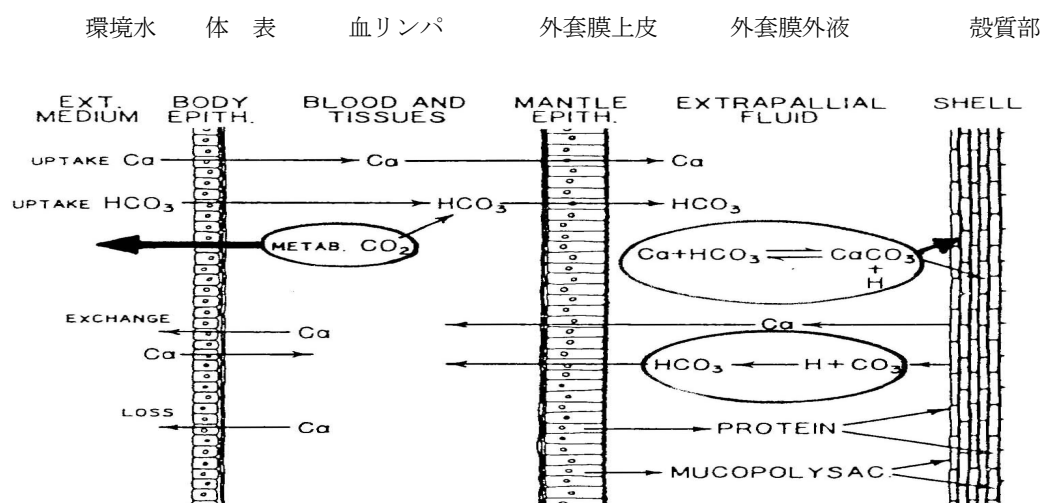
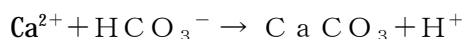


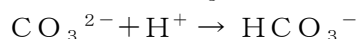
図2-2-4-1 Shell-calcification model, showing pathways of ion transport (After Greenaway, 1971)

すなわち、石灰化のイオンフラックスは2通りある。

I. 石灰化フラックス: Ca^{2+} と HCO_3^- の貝殻形成部位への正味の輸送



II. H^+ イオンの除去フラックス: 貝殻形成部位での H^+ イオンによる CaCO_3 の溶解による Ca^{2+} と HCO_3^- の再生



ここでは、内部呼吸による CO_2 は、体外への排出と貝殻形成（石灰化）に分配され、後者は体外からの無機炭素（ HCO_3^- ）と合わせて石灰化反応過程にはいる。

(ウ) 呼吸量と濾水量、同化量の代謝パラメータに関する研究成果を総合的にとりまとめ、下表に示す実験式を得た。

呼吸量式、濾水量式が温度関数式を含んで確立できているものとして、ウバガイ、アコヤガイ、マガキ、温度関数式を含んでいないものが、アサリ、実験式が確立していないものとして、サルボウ、ホタテガイ、サザエ、ヤマトシジミの4種がある。ウバガイ、アコヤガイ、マガキ以外の5種については類縁種の式を用いて作成するものとする。

表2-2-4-1 評価対象貝類の資源生態学的パラメータ

貝 類	呼吸量	濾水量
サルボウ ¹⁾	18.8~27.8 $\text{O}_2\text{ml/hr/100g}$	0.07~0.25 l/hr/個 (濁度300ppm下)
ホタテガイ ²⁾	16.7~24.2 ml/kg/hr	不詳
アサリ ³⁾	$R=2.72W^{0.534}$ (内呼吸、湿重量) ($\mu\text{l-O}_2/\text{分}/\text{個}$)	$F=1.44(0.0000619L^{2.85})^{0.798}$ ($\text{l}/\text{個体}/\text{h}$)
ウバガイ ⁴⁾	$R=0.0174T^{0.785}W^{0.741}$ (外呼吸、乾重量) ($\text{O}_2\text{ml/hr/ind}$) $R=2.33W^{0.822}$ ($\mu\text{l-O}_2/\text{min}/\text{ind}$)	$F=1.20W^{0.446}$ (l/hr/ind 身肉湿重量g)
サザエ ⁵⁾	18.5~30 $\text{O}_2\text{ml/kg/hr}$	—
ヤマトシジミ ⁶⁾	2~8 $\text{mgO}_2/\text{g/h}$	2.5~8 l/g/h
アコヤガイ ⁷⁾	$R=0.023149T^{2.4932}W^{0.75}$ ($\mu\text{atoms/h/ind}$)	$F=0.00211W^{0.4513}$ ($\text{m}^3/\text{h/ind}$)
マガキ ⁸⁾	$R=(69.7+12.6T)W^{b-1}$ ($\mu\text{lO}_2/\text{hr/g dry wt}$)	$F=1/2.95 \cdot L^{0.96}T^{0.95}$ ($\text{ml}/\text{min}/\text{ind}$)

1) (財)海生研(1995), 2) (財)海生研(1995), 3) 磯野(1998), 4) 加藤(1976)、磯野(2000), 5) 二村・大島(1966), 6) 相崎・福地(1998), 7) 阿保他(2000), 8) Ekeen E. Hofmann et.al 1992

オ 今後の課題

資源変動の機構を明らかにする上で、資源に加入するまでの再生産過程の把握が重要な課題である。

(海洋科学株式会社、小田秀夫)

(5) 貝類によるCO2固定量評価のための主要個体群の動態に関わる調査

ア 目的

貝類は貝殻形成時の石灰化によって海洋の炭素循環に深く関わっており、海水中の重炭酸イオン等を固定する働きがある。貝類の摂餌を通じて固定される炭素や炭酸カルシウム形成に消費される炭酸類の量を把握するためには、主要な貝類個体群の動態についての調査研究が不可欠である。本調査では、有用貝類を対象とした炭素固定量を算出し評価するための基礎資料として、既往知見及び試験研究機関による実態調査等から主要な有用貝類の個体群動態のメカニズムに係わる生態学的パラメータに関する情報を整備し、炭素収支の定量評価に関わる貝類個体群の動態を把握することを目的とした。

イ 研究方法

(ア) 生態学的パラメータの確定

貝類の個体群動態と生理代謝を関連付けるために、貝類バイオマスの変動をサイズと個体数の関係で表現することが有利である。このため、中村(1989)のモデルをベースに個体群変動を扱うこととし、モデルの運転に必要なパラメータは、評価対象8種について水産試験場へのアンケート調査及び地域重要資源調査、既往の文献調査、水産試験場、漁業協同組合、水産技術普及指導所等から提供を受けた資料をもとに、必要となるパラメータ群を確定した。

(イ) 有用貝類生息域の環境データの整備

評価モデルの利用に不可欠な環境情報として、有用貝類の主要漁場周辺域の水温及びクロロフィルaの情報を収集し、月別に整理した。

ウ 結果

(ア) 生態学的パラメータ

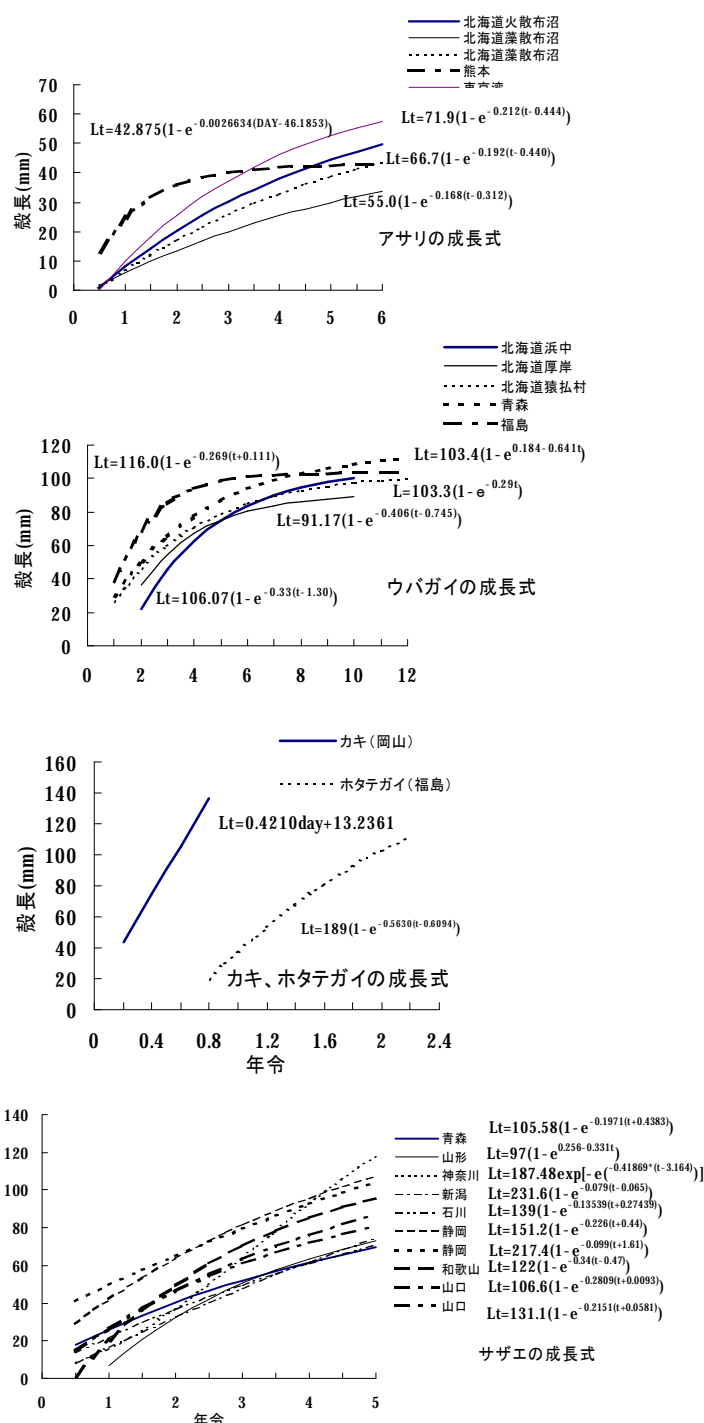
a 水産試験場へのアンケート調査結果

生態学的パラメータに関しては、年齢別殻長及び重量、成長式、殻長または殻高と重量の関係式、自然死亡係数等の生態に関する情報が得られた。

(a) 年齢別殻長は、ホタテガイ(天然・養殖)、

アサリ、ウバガイ、サザエ、カキについて、年齢別重量はウバガイ、サザエ、ホタテガイ(養殖)、カキについて一部の漁場における情報が得られた。

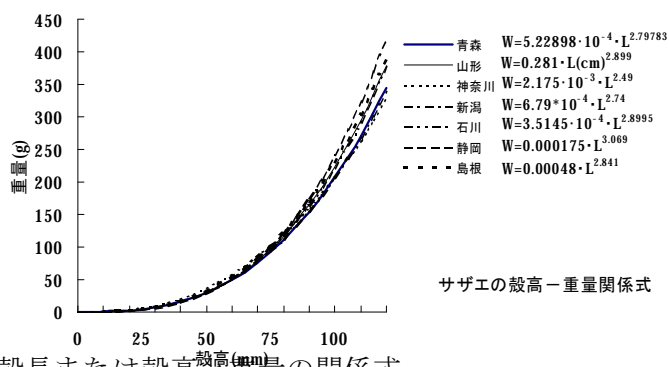
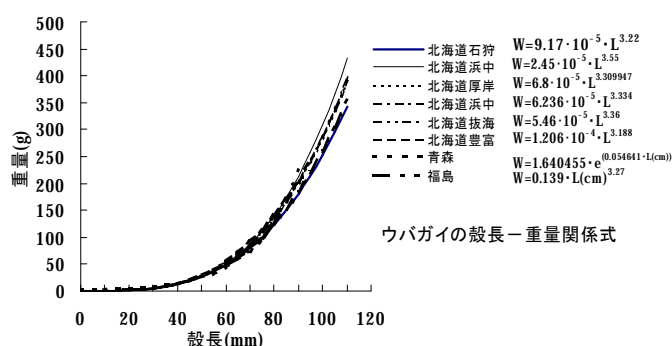
(b) 成長式は、ホタテガイ(天然)、アサリ、ウバガイ、サザエ、カキについて一部の漁場における情報が得られた。(図2-2-4-1)



($Lt=Lm(1-ea-bt)$)に当てはめたパラメータは、 Lm が4.288~7.19cm、 a が0.052~0.123、 b が0.168~0.972、ウバガイの成長式は Lm が9.117~11.6cm、 a が-0.0299~0.429、 b が0.269~0.641、サザエの成長式は Lm が9.7~23.16cm、 a が-0.159~0.256、 b が0.079~0.331であった。

殻長(殻高)－重量関係式($W=aL^b$ L : cm)については、アサリはaが0.140～0.277、bが2.76～3.16、ウバガイはaが0.087～0.186、bが3.188～3.55、サザエはaが0.205～0.672、bが2.49～3.069であった。

(a) Bertalanffyの成長式のパラメータのうち、 L_{∞} の最小がヤマトシジミで32.6mm、最大がホタ



b 生態学的パラメータの確定

水試へのアンケート調査の結果及び及び地域重要資源調査、既往知見の収集から、評価対象8種の個体群動態モデルに必要なパラメータを

海区別に集約して、パラメータ群を整備した。(表2-2-4-1)

(a) Bertalanffyの成長式のパラメータのうち、 L_{∞} の最小がヤマトシジミで32.6mm、最大がホタ

テガイの187.8mmであった。サザエを除き、北方ほど殻長の大きな種を評価対象種として扱っていることになる。なおマガキについては、実測値から成長を検証したため成長式を考慮していない。殻長(殻高)体重の関係はアロメトリー式を用い、地域性や測定時の肥満度などによっても異なった関係が現れるので、できる限り実測値によった。

(b) 漁獲加入殻長は、天然発生群の貝類では、10～90mmである。種類による差があるが、現在では多くの種類が資源管理上定められているものばかりであり、概ね生物学的最小形の1～2倍が採用されている。

(c) 生残率や漁獲係数、全死亡係数から推計した自然死亡係数は、0.3前後の場合が多い。アコヤガイ（養殖真珠）及びサルボウ、アサリなど

計算対象年次に大量斃死が発生した場合は、1.0前後の高い値となっている。

(d) 生物学的最小形は、アサリやサザエのように全国に広く分布する種では、海区毎に設定したが、他の種では全国一律として計算に供した。

(e) 餌料については、ろ過食性の二枚貝とサザエのように海藻を餌料とする種に分けられる。前者は表2-2-4-2に示す換算式によってクロロフィルaをPOCに換算した。後者では餌料海藻の飽食度を100%として、日間摂餌率で表現して計算した。

(f) 上記以外には、殻長と軟体部湿重量、乾重量、貝殻乾重量アロメトリー式等のパラメータを設定した。

表2-2-5-1 評価対象8種の生態学的パラメータ

評価対象貝類	サルボウ	ウバガイ	アサリ	サザエ	ホタテガイ(養殖)		アコヤガイ 養殖真珠	マガキ 養殖ガキ	ヤマトシジミ
					垂下養殖	地まき			
対象海区の数	1	2	4	5	2		3	3	7
対象県の数	1	5	7	11	2		5	6	5
成長式	$L_{\infty}(\text{mm})$	43.698	92.45～131.56	38.39～71.9	122～151.2	127.54～187.8		88.5～102.9	32.6～47.2
	k	0.9374	-0.0048～0.729	0.212～1.197	0.135～0.337	0.8414～0.2674		0.571～0.74	0～0.1012
	t0	-0.03463	-0.4969～1.3	-0.238～0.444	-0.058～0.663	0.1256～0.994		-0.121～0.33	-0.22～-0.132
殻長(高)一体重	a	2.66×10^{-4}	2.66×10^{-5} ～ 2.15×10^{-4}	1.09×10^{-4} ～ 2.01×10^{-4}	1.75×10^{-4} ～ 2.175×10^{-3}	2.63×10^{-4} ～ 1.72×10^{-4}	9.73×10^{-5}	7.6×10^{-4}	2.78×10^{-4} ～ 9.23×10^{-4} 5.8762×10^{-4} ～ 3.778×10^{-4}
	aL(mm) ^b	3.0106	3.055～3.55	2.865～3.165	2.631～3.069	2.89～3.341	3.0188	3.132	2.8395 ～2.953
加入殻長 (mm)	30	70～90	25～40	60	82		65	60	10
自然死亡係数	0.29～0.97	0.3～0.511	0.33～0.93	0.357	0.1053～0.2231		0.83～1.39	0.3396	0.2～0.3
生物学的最小形 (mm)	15	76	15～24	35～40	38		26	30	10
餌料パラメータ	POC=a×Chla+b (a,b:定数)			海藻摂餌率	POC濃度×a (a:定数)		アサリ等と同じ	炭素/Chla比	POC濃度×a

(イ) 環境データ

本研究で開発した個体群動態モデルは代謝系による成長モデルを内挿してある。このため、呼吸・同化、成長に関わりの深い水温とクロロフィルaの濃度をデータベース化し、計算に供した。調査対象年は平成10年を基準年とし、公共用水域の観測データや水試等の観測データを主として収集し、整理した。データ不足の海域については、周辺海域のデータを与え、平成10年のデータが不足している場合は前後年のデータで補間した。

各海域で得られた水温とクロロフィルaの分布を図2-2-4-3に示す。水温は、-1.43～31.4℃、クロロフィルaは0.09～110μg/lである。全国的にクロロフィルaは春季と夏季～秋季に増大する海域が多い。また、水温、クロロフィルaが共に低い北方海域では本州以南よりも貝類生産力が大きい。

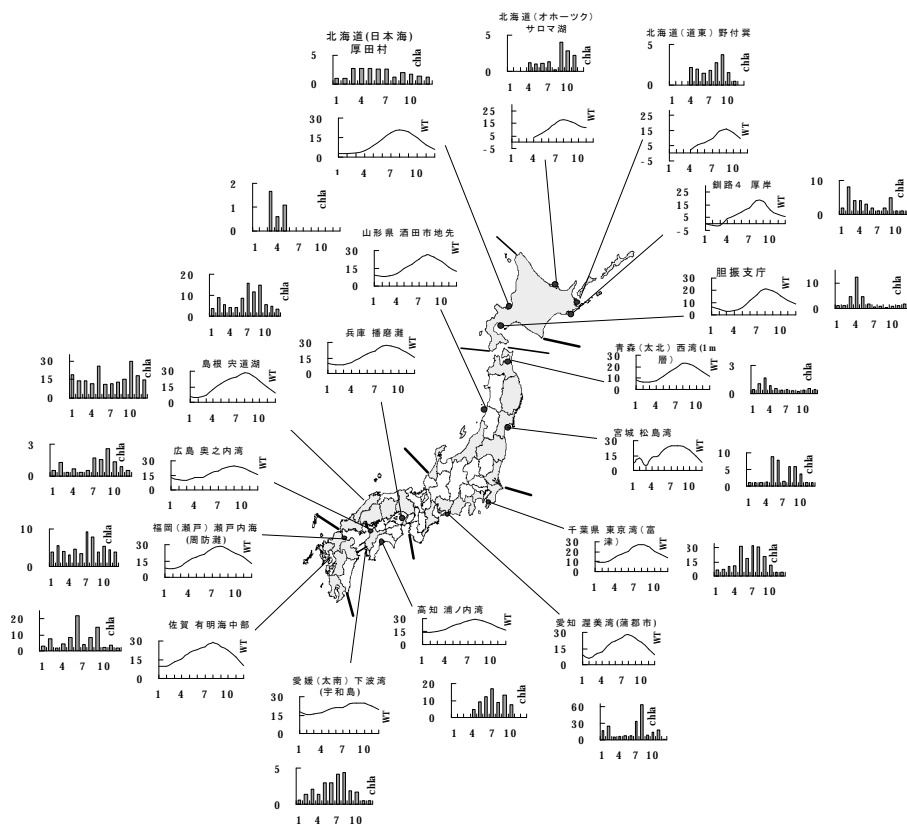


図2-2-5-3 月別水温(°C)と
クロロフィルa ($\mu\text{g/l}$)の分布

エ 今後の課題

本研究で整備したパラメータは、実験や現地調査によって今後とも検証を必要とするものが多い。また、評価対象8種以外の種類に関しても生理・代謝のパラメータ群や資源状況に関するデータの整備を行い、GISデータベースの活用範囲を広げる必要がある。

(株式会社フィスコ、関根幹男)

オ 要約

代謝モデルや個体群動態モデルのパラメータ群のうち、代謝機能に関するパラメータや資源変動に関するパラメータは、知見の整備されていない他の貝類による CO_2 固定量の推算に援用が可能と考えられる。決定したパラメータ群はGIS情報として整備された。

引用文献

中村義治・平山信夫・秋元義正(1989)動的モデルによるウバガイ資源変動の解析方法。(日水誌), 55巻, 第3号, pp. 417-422.

(6) 二枚貝の物質循環を通じたCO₂固定量の評価に関する研究

ア 目的

ヤマトシジミ *Corbicula japonica* を含む濾過摂食性二枚貝は水中の植物プランクトンなど懸濁物を餌として体内に取り込み、殻や軟体部に炭素を固定すると同時に、その一部を糞や擬糞として堆積させること（堆積促進効果）で水中の炭素を底質として固定する（e. g. Dame, 1996）。図-1の(A)→(C) (D) (E) (G) への移動がそれに当たり、温暖化ガスであるCO₂の固定に大きく寄与している。一方、二枚貝は呼吸(B)あるいは貝殻を形成する石灰化反応の結果(F)として、水中にCO₂を放出する作用を同時に持っている（関西総合環境センター、1995；鈴木、1997）。また、固定された堆積物など有機物も時間を経て分解(H)によってCO₂を放出する。このような生物を通じた移動量は季節や環境によっても変化する。これまでの二枚貝を通じた物質移動の研究は、室内飼育実験で得られた測定値と、少ない現場調査からの実測値を用いて計算されているが、室内の短期的な実験と野外の長期的な変化にはしばしば大きな隔りがある（山口・相崎、2003）。しかし、野外において季節を通じ、二枚貝個体群を通じた炭素移動を詳細に追跡した研究はほとんどない。

本研究では、ヤマトシジミが優占する人工湿地を造成し、二枚貝中心の生態系を構築して長

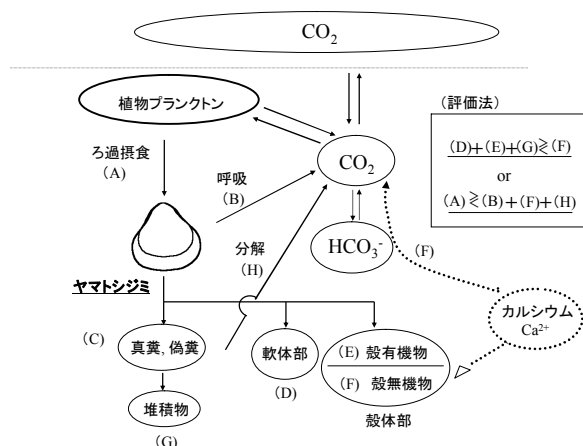


図2-2-6-1. ヤマトシジミを通じたCO₂固定評価に関する概念図

期調査を行い、季節を通じた炭素フラックスから

二枚貝のCO₂固定を評価した。

イ 研究方法

島根県の神西湖湖畔に造成した2つの人工湿地（図-2：横5m、縦10m、深さ20-60cm）に、神西湖より汲み上げた湖水を5m³・m²・day⁻¹に調整して連続供給した。1つの人工湿地には2.0kg・m²の初期密度でヤマトシジミを投入して「シジミ系」とし、もう1つはシジミを投入しない「対照系」とした。これら人工湿地において水質（塩分、水温、D₀、pH、SS濃度、Chl-a濃度、栄養塩濃度）を週一度の頻度で、ヤマトシジミの濾過活性（酸素消費速度）・個体数・現存量・個体重量（殻体および軟体部）・殻体の強熱減量ならびにSS・堆積物・ヤマトシジミ殻体・軟体部・排出物（糞と擬糞）に含まれる炭素含有率をCHNコーダを用いて月に一度の頻度で測定した。それらの結果から、ヤマトシジミが優占する人工湿地における堆積物・シジミ殻体および軟体部の炭素フラックスを求めた。



図2-2-6-2. 人工湿地の様子

【算出方法】それぞれの算出概念を示す。

図-1の(A)はシジミが水を濾過することで捕獲した有機物である。湿地への懸濁物沈降量として、流入水と流出水のPOCの差を測定し、シジミ系と対照系の沈降量の差を「シジミによる懸濁物取り込み量」とした。

次に、呼吸による炭素排出量(B)は、温度に強く依存することが知られており、現場で測定した酸素消費速度を温度に回帰させ、 $R/Q=1$ として算出した。

シジミからの排出量(C)は、取り込みSS量に「糞・擬糞の炭素含有率」を乗じて算出した。

シジミの中に蓄積される炭素は、軟体部(D)と殻体の有機物(E：殻皮など)と無機物(F：主に炭酸カルシウム)とに分けて算出した。

堆積物(G)は、実際の湿地で毎月砂を入れ替えた容器に堆積した底質を採取し、シジミ系と対照系

の炭素量の差をとり、これを「シジミ効果による底質への炭素蓄積」とした。

【調査期間】第一期（2000年3月から2001年3月）を事前調査期間とし、おおよその季節的变化傾向を把握した。2001年3月にいったんヤマトシジミを回収し、湿地の水を抜き、砂の入れ替えを行った。その上で、第二期（2001年4月～2003年3月）を開始し、新たなシジミ個体群で詳細な炭素移動量を測定した。

第二期は、2001年4月10日に平均個体重量2.8 gの成貝個体群（年級①）を密度 $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ で均一に散布した。シジミ系では2001年度に稚貝の自然加入が少なく、現存量の低下が著しかったため、2002年1月に別の水槽で捕獲された稚貝個体群（年級②）を $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ の密度で放流した。

ウ 結果

(ア) 現存量変化

図-3に調査期間における現存量（全重量）の変化を示す。現存量は春から7月にかけて急激に増加した後、7～8月（ $\text{max} \approx 2.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ）でほぼ横ばいとなり、9～10月に現存量が大きく低下する傾向があった。この初秋の現存量低下は生残率の低下（斃死）に起因していた。環境収容力の限界が斃死の一因と考え、2001年には、初秋9-10月の斃死を防ぐ目的で、7月に漁獲を行い、現存量を低下させたが、やはり、秋に斃死による現存量の低下が起こった。

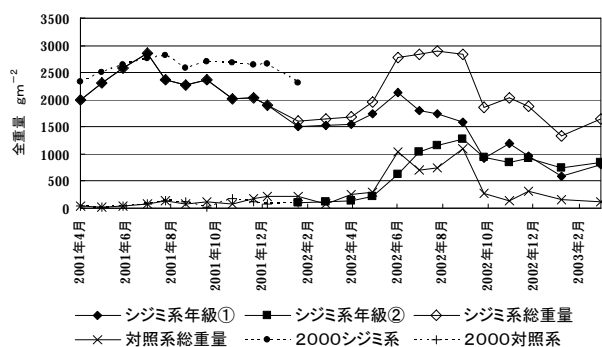


図2-2-6-3. 現存量の変化（全重量 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ）

1月から3月の冬季にも現存量の低下が見られる傾向があったが、これはシジミが冬季には堆積物中に深く潜没するため、調査時の回収率が低下していると判断された。

対照系においては、2001年10月にヤマトシジミ稚貝の加入が認められた。対照系では随時、稚貝を除去していたが、この加入個体の成長によって、除去を上回る速度で2002年5月から9月に現存量が急激に増加した。

(イ) 懸濁物取り込み量の変化(A)

流入水の懸濁物濃度は冬から6月まで非常に高く、夏から秋は低い値を維持し、11月ごろから、再び上昇する傾向を示した。人工湿地における両系の炭素沈降量（流入と流出の差）とヤマトシジミによる取り込み量（シジミ系と対照系の差）を図-4に示す。シジミによる取り込み量は、5月～6月に高い値を示すが、7月以降は低い値を維持した。

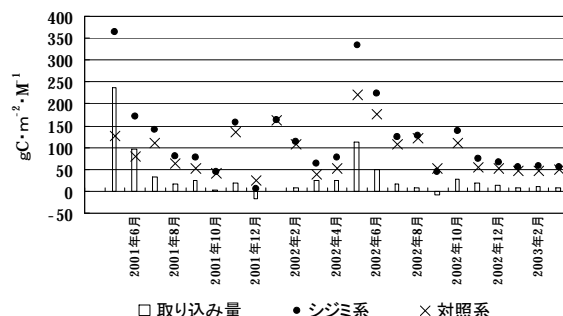


図2-2-6-4. シジミ系および対照系における月間POC沈降量とシジミによる湿地内への取り込み量の季節変化（ $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Month}^{-1}$ ）

(ウ) 呼吸量(B)

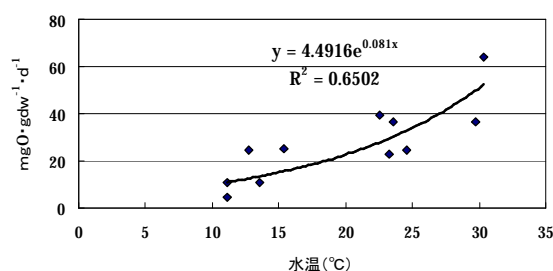


図2-2-6-5. 酸素消費速度と水温との相関

軟体部乾燥重量1 g当たりの酸素消費速度と水温 T （ $^{\circ}\text{C}$ ）との相関は図-5のようになり、酸素消費速度（ $\text{mg O}_2 \cdot \text{gdw}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ ） $= 4.49e^{0.081T}$ の関係式を得た。この酸素消費速度と、現場の水温

および軟体部乾燥重量の変化から、各月の呼吸による炭素排出量を計算し、図-6に示した。

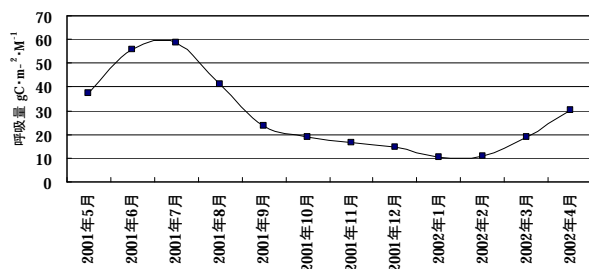


図2-2-6-6. 呼吸量（酸素消費速度から算出した炭素排出量： $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{M}^{-1}$ ）の季節変化

(エ) 糞と擬糞による排出量(C)

糞の炭素含有率は5%～14%であった。ヤマトシジミからの排出量の多い5月前後は炭素含有率も高い傾向があったが、測定値回数が少ないのに対して分散が大きかったため、ここでは一律に平均値 $8.71 (\pm 3.41) \%$ を採用し排出量を計算した。そのため、季節的傾向はおよそ(A)の6割程度の値で推移した。

(オ) ヤマトシジミへの取り込み量

○軟体部炭素量(D)

図-7にシジミの軟体部乾燥重量の変化を示した。軟体部は6月まで増加した後、6-9月に減少し、11月に大きく増加する顕著な傾向があった。その結果、軟体部の生産量（固定される炭素量）は図-8のようになり、6-8月には大きくマイナスの値を取った。

○殻体部炭素量 (E・F)

殻の全炭素含有率は、季節を通じてほぼ一定の値を示したため、平均値である殻体無機炭素含有率 $11.6 (\pm 0.047) \%$ 、殻体有機炭素含有率 $0.82 (\pm 0.25) \%$ を全期間において採用し、平均重量の変化から殻の生産量を算出した。図-8には殻体の無機物生産量変化について示した。殻体有機物はこれに約0.07を乗じた値となる。殻体は5-6月前後と10月前後に生産が高く、7月および冬季は低かった。

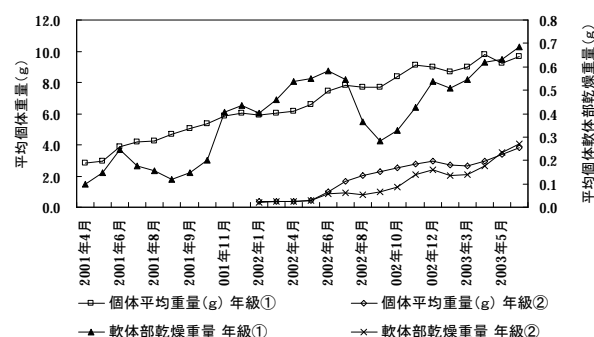


図2-2-6-7. 個体重量と軟体部乾燥重量の変化

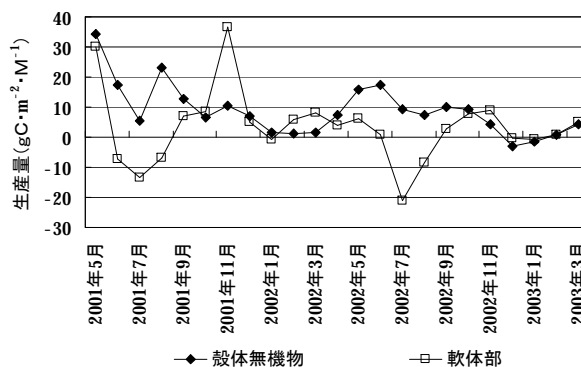


図2-2-6-8. 軟体部および殻体部無機物における月間生産量（ $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{M}^{-1}$ ）の季節変化

(オ) 堆積量(G)

毎月の堆積物量は、2001年度は全般にシジミ系において対照系よりも高い値を示し、毎月 20 g C/m^2 前後の底質への蓄積がみられた（図-9）。2002年の7月以降は対照系においてシジミが増加したため（図-3）、両系の差は小さく、マイナスの値をとる月もあった。

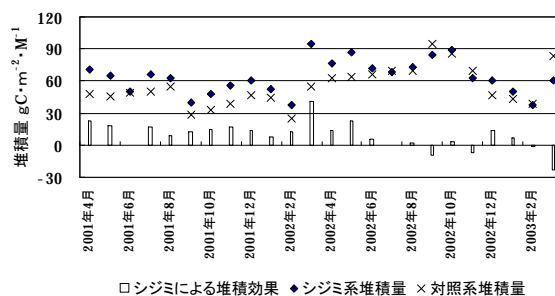


図2-2-6-9. シジミ系および対照系における月間堆積物量およびヤマトシジミによる底質蓄積量（ $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{M}^{-1}$ ）

エ 考察

各項目の炭素移動量を年間で積算した値を図-10に示す。2002年は5月以降、対照系におけるシジミの現存量が増加したため、対照系として不適当となったことから、積算期間は2001年5月から2002年4月の一年間とした。

シジミにより取り込まれる懸濁物の炭素量は、年間で $472\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ となった。これを100とした相対値を図のボックス内に、()内には実際の積算値($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)を示した。

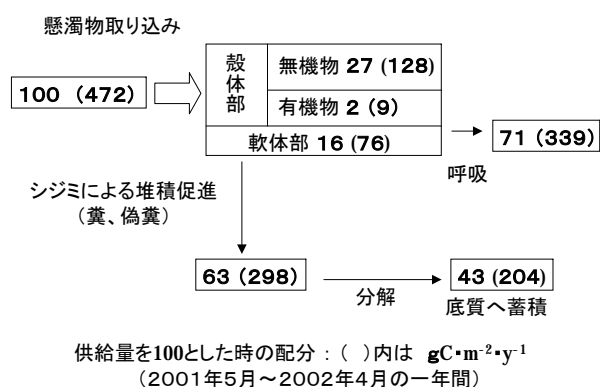


図2-2-6-10. ヤマトシジミの優占する人工湿地における炭素の流れ

図-1において、 $(D)+(E)+(G) > (F)$ または $(A) > (B)+(F)+(H)$ となった場合、シジミを通じて CO_2 は固定されたと評価する。ここでは(H)が測定不能のため、前者で評価した。その結果

軟体部(16)+殻体有機物(2)+堆積物(43)
 > 殻体無機物(27)

となり、シジミを通じた炭素移動では植物プランクトンにより固定された炭素の34%は長期固定もしくは人間に利用可能な炭素であることが示された。殻は少なくとも数年、化石化すると数千年・数万年間保存される。また、堆積物は分解で徐々に減少するが、佐々木(1993)などによると、新生堆積物のTOCは3%程度であるが、堆積物深部のTOCは1%程度でほぼ一定の値となる。このことから、シジミによる堆積促進効果として堆積した48のうち、1/3~1/4である12~16程度が堆積物中に長期保存される可能性がある。

オ 今後の課題

本研究は、シジミを通じた系内流入炭素の移動という視点からフラックスを求めたが、実際に CO_2 が移動するのは湿地としての「場」である。そのため、一次生産などをふくめ、浅場という「場」全体としてどのような炭素の流れになっているかを明らかにする必要がある。

カ 要約

ヤマトシジミが優占する人工湿地を造成し、ヤマトシジミを通じた CO_2 固定量の評価を行った。その結果、ヤマトシジミの体や底質堆積物として固定される炭素量が、ヤマトシジミの殻にCaが取り込まれたことで放出されると予測される量を上回り、ヤマトシジミを通して取り込まれた炭素の34%、分解を考えてもその1/3~1/4は、長期固定もしくは人間に利用可能な炭素であると評価された。

引用文献

- DAME R. F. (1996) Ecology of Marine Bivalves; An Ecosystem approach. 254pp, CRC Press, Florida.
- 関西総合環境センター報告書(1995) 流水域の底生動物の生産力測定法. 135pp, 関西総合環境センター.
- 佐々木克之(1993) 内湾および干潟における物質循環と生物生産【5】. 海洋と生物, 88 pp319-324.
- 鈴木 款(1997) 海洋生物と炭素循環. 194pp, 東京大学出版会, 東京.
- 山口啓子・相崎守弘(2003) 底生動物の浄化作用：ヤマトシジミを中心として. エコテクノロジーによる河川・湖沼の水質浄化(嶋谷幸宏ほか編), pp. 31-43. ソフトサイエンス社, 東京.
- (島根大学生物資源科学部 生態環境工学講座 相崎守弘、山口啓子、藤岡克己)

(7) サンゴ類によるCO₂収支の把握

ア 目的

サンゴ類は、共生藻による光合成と骨格形成時の石灰化という二つの主要な経路によって炭素循環に関わり、大気中の二酸化炭素や海水中の炭酸イオン等を固定する働きがある。わが国周辺における造礁サンゴ類は、トカラ列島以南の熱帯域のサンゴ礁域に分布するものと、薩南諸島から房総半島域および能登半島域までの亜熱帯の非サンゴ礁に分布するものがある。

本課題では、造礁サンゴ類の現存量および生産量を推定し、炭素収支のメカニズムを整理し、これらのことに基づいてわが国全体における造礁サンゴ類による年間の炭素収支、および造礁サンゴ類に固定される炭酸カルシウム量を明らかにするを目的とした。

イ 研究方法

我が国周辺における造礁サンゴ類の現存量と生産量は、定点調査による群体カテゴリー別の成長速度に関するフィールド調査などを行いこれらの結果と既存のデータベースにより求めた。造礁サンゴの生態分布と群集特性に関するフィールド調査は、南四国(非サンゴ礁)および八重山諸島(サンゴ礁域)において、トランセクト法(Loya 1972)および方形枠法(Weinberg 1981)を用いて行った。スキューバ潜水によりサンプル採集、写真撮影などを行った。サンゴ類の分布に関するこれまでの研究知見は、環境省、海上保安庁、都道府県水産試験研究機関による調査結果、統計資料および文献情報などによった。

また、骨格および組織の成分分析により炭素含有率を推定して、造礁サンゴ類による年間の炭素収支、および造礁サンゴ類に固定される炭素量の試算精度の向上をはかった。

ウ 結果

(ア) 南四国の74地点のフィールド調査により、造礁サンゴの分布特性、分類群組成、群体型などについて明らかにした。72地点においてイシサンゴ類の生息が確認され、分布パターンは浅海型(*Pocillopora*, *Stylophora*)、局所型(*Porites*、

Pavona)、大規模群集型(*Acropora*)、広域型(*Montipora*, *Hydnophora*, *Faviidae*)に分けられた。出現した分類群は14科41属84種であり、群体型は卓状(32.4%)、被覆状(23.8%)、塊状(23.0%)、枝状(20.7%)の順に多かった。最大水深は約25mであったが、高被度帯は3-7m、高多様度帯は8-12mの範囲に集中した。

(イ) 南四国および八重山諸島においてフィールド調査を行い、造礁サンゴの分布特性、分類群組成、群体型、被度と重量の関係などについて明らかにした。石垣島で確認された造礁サンゴは16科59属234種に達した。群体型の順序は南四国と異なり、枝状(41.4%)、被覆状(23.5%)、卓状(20.0%)、塊状(15.5%)の順に多かった。主要な12群集における、造礁サンゴの平均被度は5.1-89.8%の範囲であり、礁原上では内側から外側に向かって増加し、礁縁付近の*A. digitifera*や*A. kyacinthus*が優占する群集で極大値に達した後、礁斜面を下るにつれ減少し、最大水深は40mに及んだ。定点において継続的に追跡調査した26種113群体の年間成長面積は5.5-186.5cm²、平均増加率は約22.3%であり、分類群別では*Acoropora*>*Montipora*>*Pavona*>*Faviidae*>*Porites*、群体型別では卓上>枝状>被覆状>塊状の順に高かった。

(ウ) 主要な群体の単位面積当たりの乾燥重量は14.4kg/m²(枝状)から40.7kg/m²(塊状)であった。また定点調査から得られた年間増加率は、非サンゴ域で10.5-19.1%、サンゴ礁域で17.8-114.9%であり、被度を10%と仮定した場合の年間生産量は0.018-0561kgC/m²となった。この値はアルカリ法などによって得られた結果とオーダーにおいて一致している。

(エ) 年間平均海水温(t)と造礁サンゴ類の面積(S)との関係は、 $S=(1.009E-12e^{1.141t}) \cdot L/100$ (Lは岩礁海岸線長)という指数であらわされ、分布情報DB(環境庁1994)とこの関係式から、全国の造礁サンゴ類は合計59.3km²(サンゴ礁域55.2km²、非サンゴ礁域4.1km²)で、その現存量を1,421ktと推定した。酸分解および熱分解により骨格と組織の炭素成分を定量し、炭酸塩が全乾燥重量の92.3%を占め無機炭素は11.1%と推計した。また有機炭素は0.9%を占めた(表2-2-7-1)。このため、

炭素現存量を171ktCと推定した。一方、南四国における実測値に基づいて推定した造礁サンゴ類の総面積はこの約50倍の2969.4km²に達した。

表2-2-7-1 造礁サンゴの成分組成（乾燥重量%）

骨格	96.2
炭酸カルシウム(CaCO ₃)	92.3
炭素(C)	11.1
カルシウム(Ca)	37.0
ストロンチウム(Sr)	0.8
マグネシウム(Mg)	0.2
組織	3.8
炭素(C)	0.9

※水分は、骨格の約18%、組織の約95%を占める

(ウ)以上の結果と既往知見から、わが国周辺における造礁サンゴ類の無機炭素生産量は75.2ktC/y、有機炭素純生産量は43.4ktC/yであり、計118.6ktC/yとなった。また、無機生産の余剰分は1.7ktCに相当するものと推定された。これにより、わが国周辺における造礁サンゴ類による炭素収支が、概算ではあるが定量的に示されたことにより、炭素固定に果たす役割について貝類や藻類などの他の生物との比較が可能となった。

エ 考察

本研究では、有機炭素生産量は無機炭素生産量を大きく下回った。既往の知見によれば、本研究と同じように、有機炭素生産量が無機炭素生産量を下回っている事例が多い。炭素収支についてはこのように対象とする時空間スケールや測定方法により、異なる結論が得られている(kayanneet al 1996)。このため特定種の生物特性をサンゴ群集全体に適用するさいには、注意が必要であるが、現時点では本研究で行ったように、分布情報のデータベースに基づいて、試算精度を向上させる方法が適切であると考えられる。

表2-2-7-2 日本周辺におけるサンゴの生産量

	非サンゴ礁	サンゴ礁	計
総面積(km ²)	4.1	55.2	59.3
無機炭素			
現存量(ktC)	10.7	147.4	158.1
生産量(ktC/y)	2.4	72.8	75.2
生産力(kgC/m ² /y)	0.6	1.3	1.9
有機炭素			
現存量(ktC)	0.9	12.0	12.9
総生産(ktC/y)	8.3	111.9	120.1
総生産(ktC/y)	3.0	40.4	43.4

オ 今後の課題

サンゴ群集は多様性が高く、自然条件下においては様々な攪乱にさらされているため群集構造が安定せず、常に非平衡状態にある(Connel 1979)。このため現地調査例を増やし、現存量や大きな年変動を行うであろう増加率のデータを増やし、生産量についての精度をさらに高めていくことが必要である。

カ 要約

南四国、石垣島で調査を行い、造礁サンゴ類の群集構造や増加率について検討を行い、さらにこれらの結果や分布情報DBを利用し我が国周辺における造礁サンゴ類による生産量について試算した。

引用文献

- CONNELL J. H. (1978) Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science* 199: 1302-1310.
- KAYANNE H., SUZUKI A. & SAITO Y. (1996) Coral reefs and carbon dioxide. *Science* 271: 1299-1300.
- LOYA Y. (1972) Community structure and species diversity of hermatypic corals at Eilat, Red Sea. *Marine Biology* 13: 100-123.
- WEINBERG S. (1981) A comparison of coral survey methods. *Bijl. Dierk* 51: 199-218.

(水産総合センター中央水産研究所 黒潮研究部 藤岡義三)

(8) 地域重要資源の現地実態調査

1) アサリ

ア 目的

本課題は、貝類によるCO2収支の評価に用いる貝類個体群の動態モデルを開発する上で、必要となる検証用データを取得するために、アサリ資源を対象として、分布量および生息環境を把握する。

イ 研究方法

(ア) 調査対象

千葉県の大東京湾沿岸の木更津地区および富津地区の干潟のアサリ漁場

(イ) アサリおよび底生生物の分布量

アサリ分布調査を、2ヶ月に1回の頻度で、調査対象内にある7漁協地先の合計67～156調査点で行った。アサリの採取には、腰まき簀（間口50cm、2mm目の金網を内張り）を用いて、これを2m曳いて1㎡の範囲の底生生物を採取した。採取物は7段階の篩（目合い2、3.6、5、10、14、18、21mmで、各々の篩に留まるアサリの殻長は、3.8～7mm、7～11mm、11～16mm、16～23mm、23～27mm、27～30mm、30mm以上）に通し、各々の篩に残ったアサリの個体数を計数した。

また、アサリの精密測定と底生生物の分布を、アサリ分布調査のうち、牛込、久津間、富津の3漁協地先の各3調査点での採取試料について調査した。アサリの精密測定は、殻長10～20mm、20～30mm、30mm以上の3階級ごとに、最大10個体

の殻長、殻幅、殻高、湿重量、殻重量、軟体部重量を測定した。底生生物については、種類、個体数、重量を計測した。

(ウ) 生息環境

調査対象水域のアサリ漁場の地形や底質環境について、既往資料を整理した。

また、水質環境については、盤洲干潟沖の2点と富津干潟沖の1点において、1～4回/月の頻度で、表層の水温、塩分、溶存態窒素、溶存態リン、クロロフィルaを観測した。

ウ 結果

(ア) アサリの分布量および相対成長

木更津地区の盤洲干潟と富津地区の富津干潟におけるアサリ資源の分布は、平均密度が327～420個体/㎡、平均分布重量が1.5～1.9 kg/㎡で、現存量は19,600～25,000トンと推定された。サイズ別では4月には殻長16～27mmの種貝の割合が高かった。また、6月と8月には新規加入した殻長7mm以下の稚貝が出現した（表2-1-2-8-1）。

アサリの相対成長について、殻長と体重の関係は、 $\text{体重(g)} = 0.183 \times \text{殻長(cm)}^{3.13}$ 、殻長と殻重量の関係は、 $\text{殻重量(g)} = 0.094 \times \text{殻長(cm)}^{3.18}$ であった。いずれも、地先および時期による明確な違いはなかった。

(イ) 底生生物の分布

底生生物の分布は、牛込地先では密度が640～2,432個体/㎡、現存量が2,758～12,733g/㎡、久津間地先では297～1,228個体/㎡、973～3,578g/

表2-2-8-1-1 盤洲干潟と富津干潟におけるアサリの殻長組成と現存量の変化

年月	調査	分布密度（個体/㎡）							合計	現存量	
		殻長（mm）別の内訳								(kg/㎡)	（トン）
3.8- 点数		7	7-11	11-16	16-23	23-27	27-30	30-			
2000/04	80	4	2	25	115	149	66	59	420	1.9	24,954
2000/06	155	18	2	2	53	120	66	55	316	1.6	21,438
2000/08	156	22	19	63	24	101	90	82	400	1.8	23,330
2000/10	67	1	3	32	68	76	60	88	327	1.5	19,622

m²、富津地先では15～295個体/m²、106～2,286g/m²で、牛込、久津間、富津の順で多かった。また、4月から10月までの間では、底生生物の密度と現存量に明確な季節変化は見られなかった。

底生生物として腔腸動物、環形動物、軟体動物、および節足動物が出現したが、密度、現存量とも軟体動物が90%以上を占めた。

(ウ) 生息環境

①地形

調査対象である木更津地区の盤洲干潟および富津地区の富津干潟では、アサリは主に地盤高がA.P.（荒川工事基準面、潮位表基準面とほぼ同じ）0～0.8mの範囲に分布している。アサリ漁場の面積（A.P. 0m以浅）は、盤洲干潟では1,180ha、富津干潟では140haであり、増殖のための稚貝移植を行っているいわゆる「養貝場」として、各々345ha、29haが利用されている。

②粒度組成

底土の粒度組成は、盤洲干潟では昭和59年の調査によると、0.074～0.42mmの細砂が80%以上を占め、0.074mm以下の泥分は、北部の岸側の一部で10%以上の区域があったが、ほとんどの区域では5%未満であった。また、富津干潟も盤洲

干潟とほぼ同様で、昭和63年の調査で0.074～0.42mmの細砂が平均86.8%、泥分は1.4%であった。

③水質

4月から12月までの間で、表面水温は13.0～28.9℃であり、7月中旬から9月下旬までは25℃以上であった。塩分は概ね27以上であったが、木更津地区では9月中旬に降雨の影響で20前後に低下した。クロロフィルa量は5月中旬以降多くなって9月下旬までは概ね10～60 g/lで推移したが、10月以降は再び10 g/l以下に減少した。

エ 考察

東京湾の盤洲干潟および富津干潟における、アサリの分布の実態とその変動を明らかにした。また、当該アサリ漁場における、地形、底質、水質、および底生生物相などの環境を把握した。

オ 今後の課題

資源変動の機構を明らかにする上で、資源に加入するまでの再生産過程の把握が重要な課題である。

（千葉県水産試験場、柴田輝和）

(8) 地域重要資源の現地実態調査

2) ウバガイ

ア 目的

本調査は、「貝類による二酸化炭素収支の評価」に関する研究を推進するためウバガイを評価対象貝として北海道東海岸浜中町琵琶瀬湾内での分布量、資源動態、生息環境および湾内の底生動物現存量等を調査した。

イ 研究方法

(ア) ウバガイの分布量、資源動態および底生動物の現存量を把握するため、小型噴流式桁網(桁幅50cm、袋網目合い4mm)にて試料を採取し、ウバガイの体計測、個体数計数、年齢査定および底生動物群別重量の測定を行った。1990年から2000年に実施されたウバガイ資源量調査結果等から資源量を推定した。また、死貝の貝殻重量を測定し、その分布資料を得た。なお小型噴流式桁網は、5、8、11月に湾内の9定点で10mないし20m曳網した。

(イ) 生息環境はウバガイ漁場を中心に底質環境と餌料環境を把握した。調査点は湾に流入する河川に3点、湾内に14点を設定し、底質環境は田村式採泥器ないしSM採泥器を使用し、試料を採取し、粒度組成、COD、ILについて分析した。また、餌料環境は調査時に各点で透明度、水温、塩分を観測し、上層と底層から北原式採水器にて採水し、DO、栄養塩類、クロロフィル量、フェオフィチン量について分析をした。

ウ 結果

(ア) 主要漁場位置は湾西部から北部にあり、その面積は416haで漁場のほぼ68.4%を占めていた。また、漁場は、干潟(干潮汀線以浅の干潮時に干出：手堀りで漁獲)から水深10mの範囲にあつて、主要漁場は水深2～7m前後に形成されていた。

(イ) 年齢別平均殻長(Lt; mm)は、Bertalanffyの成長式 $Lt = 108.2838 (1 - e^{0.05847 - 0.22191 t})$

(tは年齢、 $t \geq 1$)として求められる。また、殻長と体重(W: g)および貝殻重量(SW: g)の関係は、それぞれ $Wt = 335.8008 (1 - e^{0.05847$

$-0.22191 t)$ 3.3172 (tは年齢、 $t \geq 1$)、 $SWt = 175.4192 (1 - e^{0.05847 - 0.22191 t})$ 3.4456 (tは年齢、 $t \geq 1$)と求められた。

(ウ) 主要漁場における個体数は16,126,667で、年齢組成は6齢30.69%、7齢23.58%、5齢16.78%、8齢11.54%、9齢5.83%、3齢2.41%、10齢2.27%、20齢以上1.85%、11齢1.82%の順に高く、この年齢群で96.77%を占めた。また、主要漁場の資源量は2,571.6トンで、その年齢別資源量は6齢667.8トン、7齢614.6トン、8齢354.3トン、5齢282.3トン、9齢205.0トン、20齢以上127.3トン、10齢95.2トン、11齢76.2トン、12齢34.2トンの順に多く、これらの年齢群で95.51%を占めた。さらに殻長組成、加入年齢(6齢)、加入時の殻長

(77.97mm)、漁獲サイズ(殻長90mm以上)、漁獲量(31.8～72.4トン; 平均51.3トン)、生残率(0.4618～0.6855: 0.5682)、全減少係数(0.3776～0.7727: 0.5519)、漁獲係数(0.3052～0.7003: 0.4795)、自然死亡係数(0.0724)、漁獲努力量(総曳網回数: 846～1687: 1283)などの資源情報や資源特性値を得た。

(エ) 二枚貝の密度、湿重量で表した底生動物の現存量および死貝の貝殻重量はそれぞれ0.0～32.8個体/m²、0.0～2139.6 g/m²、0.0～515.8 g/m²の範囲であった。一方、密度と現存量の間には統計的に有意な正の相関(n=27、r=0.923、有意水準p<0.001)が認められたが、貝殻重量と密度や現存量の間には有意な相関が認められなかった。

(オ) 底質環境

a ウバガイの主要漁場での粒度組成は、細粒砂と微粒砂が卓越していて、この両者でほぼ90%以上を占めた。一方、河川、港湾部入り口、湾口部の地点では地点により差があるものの、礫、極粗粒砂、粗粒砂、シルト・粘土が優占していた。

b CODは1.48～25.01mg/g dry・w.の範囲で、ウバガイの主要漁場では1.48～4.57mg/g dry・w.と低く、河川では17.67～25.01mg/g dry・w.と高かった。

c IL(強熱減量)は1.64～18.71%の範囲で、ウバガイの主要漁場では4.96%以下であった。一方、湾口部や湾央部では7.94～18.71%と高い値

を示した。

(カ) 餌料環境

a 表層水温は0.3~22.6℃の範囲で、その中で琵琶瀬湾の表層水温は1.9~19.9℃であった。また、底層水温は0.6~19.8℃の範囲であった。当湾は、例年表面水温が-1℃台（厳冬期）~16℃台（晩夏から初秋期）の間で、水深20mの底層では0~15℃台の間で変動するが、本年は夏期の高気温の影響で水温も例年に比較して高く、最高温期の9月初旬には湾内全域の表層で18~19℃台の高水温が観測された。その後の10~11月も例年に比較して高水温で推移した。

b 琵琶瀬湾の塩分の範囲は、表層と底層でそれぞれ25.7~33.5‰、27.3~33.5‰であった。降水直後の調査となった7月の表層では湾の沿岸域に25‰台の低塩分も観測されたが、それ以外には表層でも30~31‰台、底層では31~33‰台のことが多く、北海道道東沿岸域の沿岸水としては比較的高かった。特に10、11月は表層でも33‰台の高塩分を観測し、宗谷暖流水の影響を強く受けたものと推察した。

c 透明度は1.3~12.5mの範囲にあった。例年、透明度の季節変化は春先にもっとも低く1~2m台、その後秋に向けて高くなり、初冬に5~7m台に達する。本年は、調査時および地点ごとの変動が大きいものの、湾口部に近い点では春期でも4~5mと比較的高く、また秋期は時化等による低下もあり、季節的な変化は小さかった。ただし、11月には湾口部で12.5mを観測し、本湾としてきわめて高い透明度を示した。この時の塩分は33.5‰と高く、きわめて高い透明度は宗谷暖流水の影響に因るものと推察した。

d 琵琶瀬湾のDOとDO飽和度の範囲は、それぞれ8.35~13.93mg/l、90.9~160.5%で、湾に流入する河川のDOとDO飽和度は、それぞれ4.56~12.65mg/l、46.9~130.0%であった。湾内では春と秋のブルーミング期に120~160%台の過飽和状態の地点も観測されたが、琵琶瀬川の上流では腐植性のいわゆるやち水の影響を強く受け、水温の高い夏期には飽和度46.9%の値を示した。

e 栄養塩類のなかでケイ酸は、河川に極めて多量に溶存しているが、当湾への流入河川は霧多布湿原からの小河川（6.5~261.8 μg-at/l）

平均80.7 μg-at/l）のみで大きな河川がないため、沿岸域としてはケイ酸濃度は低くかった

（0.9~31.9 μg-at/l : 7.6 μg-at/l）。湾内の全リンは港内の底層などで4.0 μg-at/lの高溶存もみられたが、全般的には1 μg-at/l台の地点が多く（0.3~4.0 μg-at/l : 1.1 μg-at/l）、河川（0.3~1.74 μg-at/l : 0.8 μg-at/l）も含めて低溶存であった。無機態リンも0.5~1 μg-at/lの地点が多く（0.1~1.5 μg-at/l : 0.5 μg-at/l）、河川（0.1~1.3 μg-at/l : 0.5 μg-at/l）も含めて低溶存であった。一方全窒素は10~30 μg-at/l台の地点が多く（3.3~54.3 μg-at/l : 18.4 μg-at/l）、河川（8.9~71.0 μg-at/l : 27.0 μg-at/l）も含めて比較的高溶存であった。アンモニア態窒素は5 μg-at/l未満

（0.1~20.4 μg-at/l : 4.1 μg-at/l）、硝酸態窒素は1 μg-at/l前後（0.1~4.6 μg-at/l : 0.7 μg-at/l）の地点が多く、全窒素に比較して低溶存であった。河川の無機窒素は高溶存であった。

f クロロフィル-a量は湾内で0.2~49.3 μg-at/l（平均：7.38 μg-at/l）、河川で0.2~31.9 μg-at/l（平均：4.06 μg-at/l、河川の中で琵琶瀬川上流は、0.2~8.0 μg-at/l、平均：1.96 μg-at/l）の範囲であった。一方、湾内では4月と10月のブルーミング期に10~49.3 μg-at/lもの著しい高濃度の地点が多かった。また、他の月も2 μg-at/l未満の地点は少なく総じて湾内で値は高かった。さらに、表層（5.6 μg-at/l）と底層（9.2 μg-at/l）の平均値に有意な差が認められた。

g フェオフィチン量は湾内で2.8~104.1 μg-at/l（平均：12.25 μg-at/l）、河川で2.7~14.2 μg-at/lの範囲であった。表層（6.8 μg-at/l）と底層（17.7 μg-at/l）の平均値に有意な差が認められた。

（北海道立釧路水産試験場、中川義彦）

(8) 地域重要資源の現地実態調査

3) シジミ

ア 目的

本課題は貝類によるCO2収支の評価に用いる貝類個体群の動態モデルを開発する上で必要となる検証用データを取得するために、青森県小川原湖のヤマトシジミ資源を対象として分布量、生息環境等を把握するものである。

イ 研究方法

(ア) 分布調査

平成11年8月2日～10月12日にかけて湖内289点で分布調査を行った。採取にはエクマンバージ採泥器（採泥面積0.0225m²）を用い、各点2回の採取を行った後、目合1mmの篩上に残ったシジミについて殻長、殻高、殻幅及び体重を測定した。

(イ) 精密測定

平成12年4月19日、6月19日、9月20日及び11月10日の4回、湖内7地点においてエクマンバージ採泥器を用いて、各点3回の採取を行った後、目合0.5mmの篩上に残ったシジミについて、そ

の全個体の殻長、殻高、殻幅、体重、軟体部重量及び殻重量を測定した。

(ウ) 漁業情報、パラメーター

水揚量、延べ操業者数を小川原湖漁協からの聞き取りにより、また、各種パラメーターは既往文献により調査した。

(エ) 生息環境

調査対象水域の生息環境について既往資料を整理した。水質調査については平成11年4月～平成12年3月の間、小川原湖内6調査点において1回/月の頻度で表層、5、10、20m層及び湖底直上1mの水温、溶存酸素、pH、塩素イオン濃度、COD等を調査した。

ウ 結果

(ア) 分布調査

湖内289点のうち分布が見られたのは198点であり、生息水深は10m以浅にほぼ限定されていたため漁場を10m以浅とした。また、図1に示したように湖内を4区分し、区分毎の平均生息密度を求め、密度-面積により漁場全体の資源量を求め結果を表1に示した。湖全体の漁場面積は25.9km²、平均生息密度が927個/m²であり、資源量は24,940トンと推定された。湖全体の殻長組成を図2に示した。殻長モードは14mmであった。

また、殻長-体重関係を検討した結果、湖北部、湖央東部、湖央西部のシジミについては1群にまとめられると判断された。それぞれの殻長-体重関係式は以下のとおりであった。

湖北部+湖央東部+湖央西部

$$\text{体重(g)} = 0.0002906 \times \text{殻長(mm)}^{3.038}$$

湖南部

$$\text{体重(g)} = 0.0002421 \times \text{殻長(mm)}^{3.103}$$

(イ) 精密測定

殻長-殻重量関係については、殻長-体重関係での区分に従って取りまとめた。

北部(St.4,5,6,7)

$$\text{殻重量(g)} = 0.0001210 \times \text{殻長(mm)}^{3.159}$$

南部(St.1,2,3)

$$\text{殻重量(g)} = 0.0001279 \times \text{殻長(mm)}^{3.160}$$

(ウ) 漁業情報、パラメーター

平成11年4月～平成12年3月のシジミ水揚量は2,496トン、延べ操業者数は38,895人であった。

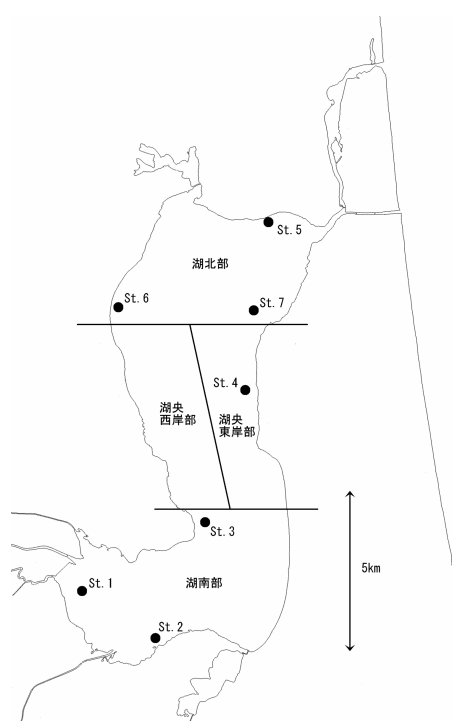


図2-2-8-3-1 小川原湖

表2-2-8-3-1 小川原湖における漁場面積と資源分布状況

	湖北部	湖中央東岸部	湖中央西岸部	湖南部	計
漁場面積 (km ²)	9.5	2.6	3.1	10.8	25.9
平均生息密度 (個/m ²)	1,015	1,888	1,239	530	927
生息個数 (10 ⁶ 個)	9,600	4,882	3,791	5,731	24,004
資源量 (t)	8,028	4,921	5,362	6,629	24,940

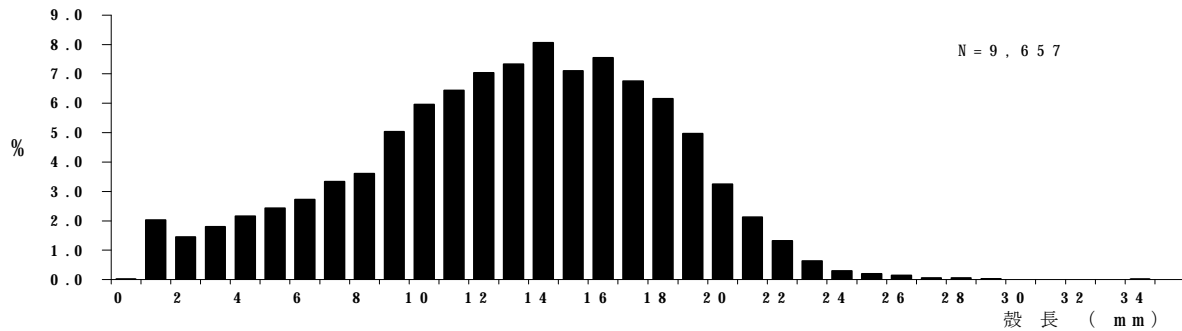


図2-2-8-3-2 殻長組成

成長式、自然死亡係数については過去に報告（富士 1997）があり、成長式については、湖北西部

$$Lt=27.97(1-e^{-(0.195(t-0.403)})$$

湖南部（St.1付近）

$$Lt=36.12(1-e^{-(0.250(t-0.318)})$$

また、自然死亡係数については、湖北西部では0.30、湖南部では0.34と推定している。

(エ) 生息環境

シジミの生息する水深10m以浅の底層水温はほぼ周年24℃以下であるが、水深5mの地点では8月に28～30℃の水温が観測された。シジミ漁場底層における溶存酸素飽和度は概ね80%以上を示すが、8月の湖南奥部で40%以下となっていた。また、小川原湖中央部の水深20m以深ではほぼ周年無酸素状態となっていた。

エ 考察

小川原湖におけるヤマトシジミの分布の実態等を明らかにした。また、当該漁場における水質、底質などの環境を把握した。

オ 今後の課題

年毎の稚貝発生量の調査、各種パラメーターの見直しなどを行う必要がある。

引用文献

富士 昭（1997）ヤマトシジミの生態と資源（総合報告）。平成8年度小川原湖漁業調査報告書、東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所

（青森県内水面水産試験場、天野勝三）

(8) 地域重要資源の現地実態調査

4) サザエ

ア 目的

本課題は、貝類によるCO₂収支の評価に用いる貝類個体群の動態モデルを開発する上で必要となる検証用データを取得するために、サザエ資源を対象として分布量および生息環境等を把握することを目的とする。

イ 研究方法

(ア) 調査対象

北長門海岸（山口県大津郡日置町黄波戸地先）の磯根漁場

(イ) 漁獲量等調査

農林統計資料及び漁協資料をとりまとめた。

(ウ) サザエ及び底生生物の現存量調査

5・7・10・12月に調査対象内に設けた3ラインにおいて、スキューバ潜水によりベルトトランセクト法およびコードラート法で調査した。

a ベルトトランセクト法では、各ライン1m巾で、水深10mまでのサザエ、アワビ、ウニ類の個体数と大きさを測定した。

b コードラート法では、各ラインの水深2m、5m、7m、10mの点で、0.5m² (0.5×0.5m×2カ所) 内の付着生物を採取した。サザエは、殻高、全重量、貝殻蓋重量、身重量、生殖腺熟度指数を測定し、その他の生物は、個体数、湿重量を測定した。また、海藻に付着するマクロベントスは、種類、個体数および湿重量を測定した。

(エ) 生息環境調査

a 漁場環境（水質等）調査

5～11月の間、各ラインの沖側で、上、中、底層の水温、塩分および透明度を測定した。波高は、地元漁業者に目視観測を依頼した。

b 餌料環境調査

5・7・10・12月の調査時に、ベルトトランセクト法では各水深帯の海藻被度を目視観測し、コードラート法では、海藻の種類、株数、湿重量を測定した。なお、7月には、採集した海藻に付着する葉上珪藻類の現存量としてクロロフィル-aを測定した。

ウ 結果

(ア) 漁獲量等

H3～12の山口県のサザエ漁獲量は1,177～1,606トンであり、全国の9.9～16.1%（平均13.36%）を占め、調査対象地先では38～63トン漁獲されており県全体の2.4～4.6%（平均3.46%）を占めていた。月別に見ると5・6月の漁獲量が多く、素潜り、建網で漁獲されていた。漁場面積は77haで、よく利用される漁場は45haであった。なお、当地では資源管理のため素潜りは年間操業日数を45日、建網は4～6月の操業と定められている。

(イ) 漁獲量等

a ベルトトランセクト法

サザエの3ラインにおける平均分布は、密度1.88～4.54個体/m²、重量89.6～216.4 g/m²であった。ライン1（内湾）では、0～8個体/m²のサザエが出現し10月期の水深3m帯の8個体（平均殻高65.6mm）が最高であった。ライン2（湾口）では、7・10月の6・9m帯に多く出現し（6～13個体）、7月期の水深9m帯の13個体（同53.6mm）が最高であった。ライン3（外海）では、0.8～7.5個体出現し、10月期の1m帯が最高（7.5個体、平均殻高65.7mm）であった。（表1）。表2に調査時期毎の殻高組成を示した。7月に資源の加入があったことが認められる。

b コードラート法

サザエは、0.5m²当たり0～3個（殻高20.7～79.4 mm）出現した。これらのサザエを精密測定し、殻高60mm以上のもの13個体の生殖腺熟度指数を見たところ5月71.16、7月75.83、12月27.23であった。出現したマクロベントスの種数は、ライン1では29～39種、ライン2で37～43種、ライン3で31～44種であり、巻貝類のヒメクボガイ、二枚貝類のヒバリガイが優占種であった。また、海藻に付着していたマクロベントスは、0～10種の巻貝、0～3種のウニ類が付着していた。最も多かったのは、5月期のライン2の10m地点で、アラメ、クロメ、ノコギリモク計14本、2225.5 gにヒメクボガイ、サザエ、オオコシダカガンガラ等が計66個体、387.2 g付着していた。

表1 水深帯別調査時期別サザエ分布量

(個体/m²)

	ライン 1					ライン 2					ライン 3					平均
	1m	3m	6m	9m	平均	1m	3m	6m	9m	平均	1m	3m	6m	9m	平均	
5月	1.0	3.5	2.5	1.5	2.13	2.0	1.0	4.5	2.0	2.38	0.8	1.0	2.2	1.4	1.35	1.95
7月	0	0.7	1.7	3.5	1.48	0	0.6	6.0	13.0	4.90	1.5	3.0	6.0	5.0	3.88	3.42
10月	3.0	8.0	2.0	1.5	3.63	1.5	2.0	9.0	10.0	5.63	7.5	5.0	2.0	3.0	4.38	4.54
12月	0.8	1.2	1.6	0.4	1.00	2.5	2.0	2.0	3.0	2.38	2.5	3.0	2.5	1.0	2.25	1.88
平均	1.2	3.35	1.95	1.73	2.06	1.50	1.40	5.38	7.00	3.82	3.08	3.00	3.18	2.60	2.96	2.95

表2 調査時期毎の殻高組成

	40mm未満	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90mm以上	個体数
5月	0	2	5	8	8	19	5	6	6	3	1	0	63
7月	0	4	7	18	29	19	8	2	4	0	1	0	92
10月	0	1	2	15	25	19	20	17	5	3	1	1	109
12月	0	0	0	7	3	5	15	14	7	4	2	0	57

(ウ) 生息環境調査

a 水質等

a) 水温・塩分

表層水温は、16.8～28.61℃、中層16.9～26.7℃、底層16.8～26.5℃であった。

塩分は、期間を通じ、表層から底層で32.39～34.36を示し、7月にやや低く32代を示した。

b) 透明度

調査期間を通じ、8.2～14.4mで、ほとんどの調査点、調査時期で海底まで見えた。

c) 波高

黄波戸地先の波高は、0.5～2.5mであった。ライン3付近では、西北西から北北東の風やうねりの影響を受けた場合は、4m以上の波になっていたと思われる。

b 餌料環境

a) 海藻被度

海藻被度は、表3に示すとおり、一部に磯焼け状態の場所があるものの海底のほとんどが海藻に覆われている状況で、優占種は、アラメ、ノコギリモク等であった。

表3 水深帯別調査時期別海藻被度

(%)

	ライン 1				ライン 2				ライン 3			
	0-2m	2-5m	5-7m	7-10m	0-2m	2-5m	5-7m	7-10m	0-2m	2-5m	5-7m	7-10m
5月	70	50	100	70	100	100	80	80	100	100	100	100
7月	50	100	90	80	100	90	2	5	90	70	70	10
10月	70	100	100	30	80	30	1	1	50	90	90	50
12月	80	100	100	80	100	60	60	14	80	80	70	70

b) 海藻の種数、湿重量

0.5m²当たりの海藻の種数、湿重量は、ライン1では12～22種、1016.9～3070.9g、ライン2では12～16種506.4～4776.2g、ライン3では13～17種658.3～5040.4gであり、アラメ、カジメ、クロメ、ノコギリモクが優占していた。

c) 珪藻類現存量

珪藻類現存量として測定した葉上珪藻類のクロ

ロフィル-aは、葉体1g当たり0.2104～2.6886μgであった。

(山口県水産研究センター 中野義久)

(8) 地域重要資源の現地実態調査

5) サルボウ

ア 目的

本課題は、貝類によるCO₂収支の評価に用いる動態モデルを開発する上で必要となるサルボウ資源を対象として、分布量および生息概況を把握する。

イ 研究方法

(ア) 調査対象

本県有明海の干潟域を主とする浅海域におけるサルボウ漁場

(イ) サルボウの分布量および成長

分布量：分布量調査は、じょれんを用いて10月16、19、30、31日に、ヘルメット式潜水により、同9、11日に実施した。じょれんは間口60cm×21cm、目合い10.5mmのものを用い、干潟部を中心とした海域の32地点について調査を行い、1地点について20mの距離を2回曳いた。ヘルメット式潜水の調査は、水深-2m以深部の12地点について行い、幅1m、長さ100mの範囲を手探りでサルボウを採集した。なお、じょれんによる漁獲効率を調べ、分布密度の精度を増した。

成長：4月から12月にかけて調査対象域内養殖漁場で延べ49回のサンプリング調査を行った。モガイの採集は、漁期である4月から7月にかけてはモガイ採集専用漁具のじょれんで水揚げされたものを買い上げ、7月以降については同漁具を用いて当センターで調査した。成長は原則的には100個体以上の殻長、殻高、殻幅、重量を測定し、サンプルにより30～100個体のむき身重量、殻重量についても測定した。

(ウ) 漁業情報

サルボウの漁獲量を、モガイ養殖業（第一種及び第三種区画漁業権漁業）を営んでいる13漁協へのアンケート調査により把握した。

(エ) 生息環境

底質環境：サルボウは一般的に泥分の多い漁場に分布がみられ、既往の調査資料を基に、底質の粒度組成を含め、H₂S、IL、CODについて検討した。

底生生物：11月20日にエクマンバーガー採泥器

を用い、種類別に個体数、質重量を測定した。また、季節的消長を検討するため、既往の資料も用いた。水質環境：毎月1回漁場内の8定点で、水温、塩分、クロロフィルa等の観測を行った。

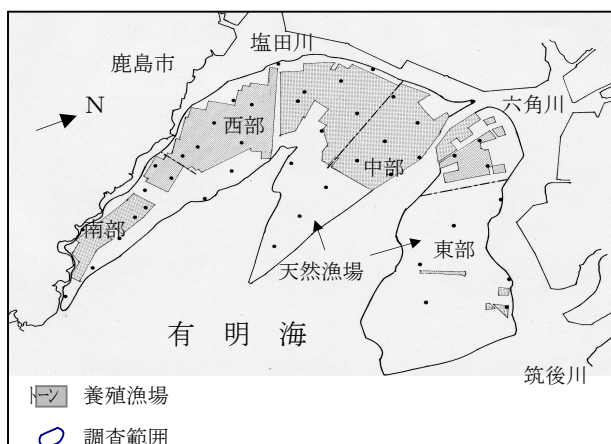


図1 サルボウ養殖漁場及び分布量調査地点

ウ 結果

(ア) サルボウの分布量および成長

分布量：サルボウの分布は底質類型により分布量が大きく異なる。分布は粘土～シルト質に多く、砂質、砂泥質で極めて少ない。また、分布は干潟部を中心に多く、水深が深くなるにつれて少なくなるのが特徴的である。このようなサルボウの分布域を利用して、含泥率の高い中西部の海域を中心に、地蒔き養殖が行われている。底質類型の特性から図1に示すように養殖漁場を東部、中部、西部、南部にわけ、養殖漁場以外の干潟部と沖合部を合わせた天然漁場のサルボウの分布状況(2001年10月現在)を表1に示した。

砂質、砂泥質である有明海東部では、養殖漁場も85haと狭く、現在この漁場も利用実態がないためサルボウの分布量もわずか2トと少なかった。中部では、0～206個体/m²(平均37個体/m²)の密度で654×10⁶個、3,332ト、西部は0～327個体/m²(平均63個体/m²)の密度で1,566×10⁶個、8,656ト、南部は0～60個体/m²(平均17個体/m²)の密度で102×10⁶個、1,033トの生息が推測された。養殖漁場全体では、4,923haの面積に2,322×10⁶個、13,022トの生息が推測された。天然漁場では、生息密度は0.3個体/m²と極めて低く、

2001年10月の佐賀県有明海域におけるサルボウの分布状況

漁場区分	養 殖 漁 場					天然漁場	合計
	有明海東部	有明海中部	有明海西部	有明海南部	計		
調査地点数	1	9	9	4	23	21	44
漁場面積(ha)	85	1,754	2,480	604	4,923	7,193	12,116
生貝分布量	個数(10 ⁶ 個)	0.3	654	1,566	102	2,322	19
	重量(ト)	2	3,332	8,656	1,033	13,022	216
斃死貝分布個数(10 ⁶ 個)	-	871	670	67	1,607	24	1,631

生息量も推定216トと全体からすると少なかった。佐賀県海域全体では2,340×10⁶個、13,238トと推定された。

成長及び養殖漁場での生態：養殖漁場においては、大半が2年を周期とした輪作で漁獲されており、漁獲期間の4月から6月には2年貝（前々年夏期発生）と1年貝（前年夏期発生）が存在するが、7月までに殆どの2年貝と殻長3cm以上の1年貝が漁獲されてしまい、漁場により生息密度も大きく異なる。このため、成長もばらつきが大きく当県海域での基本的な成長が把握しにくい。測定した1年貝49サンプルの成長についての近似曲線を求め以下の3次式が得られた。7～9月の産卵期に成長の停滞がみられ、この頃から秋期にかけ各漁場で大量斃死が発生したが、斃死数は1,631×10⁶個と推定された。また、殻長と体重、殻長と殻重の関係について以下の式を得た。

成長式

$$\text{殻長} Lx = 0.000001653 x^3 - 0.00206036 x^2 + 0.85835 x - 91.054$$

x：前年（2000年）8月1日をふ化日と仮定したときのふ化後日数、242≤x≤500

殻長－体重の関係

$$\text{体重(g)} = 0.0002660 \times \text{殻長(mm)}^3.0106$$

殻長－殻重の関係

$$\text{殻重量(g)} = 0.0001308 \times \text{殻長(mm)}^3.0389$$

(イ) 漁業情報

漁協へのアンケート調査による、2001年のサルボウ水揚量の集計は、5,363トであった。

(ウ) 生息環境

底質環境：中央粒径値（Mdφ）は、東部4.22(1.96～7.96)、中部7.09(5.45～7.94)、西部

7.73(6.83～8.42)、南部7.05(2.74～8.35)と、サルボウの分布が多い中西部はシルト～粘土質に限られる。

H₂S、CODは、年、季節変動が大きく、モガイ分布との判然とした相関はみられないが、夏期に大量斃死が起こった地点では、H₂Sが1mg/g以上の高い値もみられた。ILは、概して含泥率が高いモガイ分布漁場が高い値を示した。

底生生物：マクロベントスの密度は、個体数では133～544個体/m²で、東部で少なく中・南部が533、544個体/m²と多かった。質重量では、3.66～107.58g/m²と東部が少なく西部が多かった。モガイの分布状況から見ると質重量との正の相関が見られる。

水質環境：4月から12月までで、表層水温（調査全地点の平均）は10.6～28.7℃の間で変化し、7月～9月の間は25℃以上の値を示した。表層の塩分（同平均）は、5.93～31.21‰の間で変化し、7月は降雨の影響で六角川、筑後川等河口域では10‰以下に低下した。表層のクロロフィルa量は9～432μg/lの間で変化し、概ね100μg/l以下で推移したが、6月～9月の赤潮発生時には200μg/lを超える値を多くの地点で観測した。

オ 今後の課題

サルボウは、4～7月に漁獲され、また、斃死も5～9月にかけ突発的に起こる。このことから、漁獲や斃死を勘案した季節毎の分布量を検討する必要がある。

（佐賀県有明水産振興センター 普及室、真崎邦彦）

(8) 地域重要資源の現地実態調査

6) ホタテガイ

ア 目的

「貝類による二酸化炭素収支の評価」に関する研究を推進する上で不可欠な評価対象貝であるホタテガイについて、陸奥湾における現存量、生息環境を把握する。

イ 研究方法

(ア) 現存量に関する調査

ホタテガイ養殖漁場、施設数、養殖貝保有数量について、養殖実態調査結果等の既存資料を整理した。

また、ホタテガイの成長を把握するため、当センター実験漁場のホタテガイを用いて、殻長、全重量、軟体部重量、貝殻重量の測定を2ヶ月に1回行った。測定は、1年貝（耳吊り）は5月から、0年貝は8月から、それぞれ実施した。なお、養殖貝に付着する生物の種類を肉眼で観察するとともに、湿重量の測定を併せて行った。

(イ) 生息環境に関する調査

実験漁場の水深、水温、塩分、栄養塩、透明度、クロロフィルaの測定を毎月1回行った。

ウ 結果

(ア) 現存量に関する調査

陸奥湾におけるホタテガイ養殖漁場の総面積は約500km²で、陸奥湾の総面積1,660km²の約1/3を占めている。

平成13年10月1日現在、養殖施設の総延長は、12年産貝が2,010,900m（1ヶ統200m換算10,054ヶ統）、13年産貝が1,996,830m（同9,984ヶ統）となっており、また、ホタテガイ保有数量は12年産貝が21,474万枚、14,998トン、13年産貝が103,596枚、2,914トンとなっている（表1）。ホタテガイの殻長、全重量について、平成12年産1年貝の結果を図1に、平成13年産0年貝の結果を図2に示した。1年貝については5～11月にかけて殻長77mmから96mmに、全重量52gから114gに増加した。0年貝については8～12月にかけて殻長17mmから52mmに、全重量0.6gから13.9gに増加した。

表2-1-8-6-1 養殖施設数、保有数量

	施設数	養殖種類	平均重量 (g)	保有枚数 (万枚)	総重量 (トン)
平成12年産 (1年貝)	2,010,900m (10,054ヶ統)	パールネット	59.50	7,543	4,488
		耳吊り	88.20	8,047	7,097
		丸籠	58.00	5,884	3,413
		小計		21,474	14,998
平成13年産 (0年貝)	1,996,830m (9,984ヶ統)	養殖用	2.88	59,153	1,706
		地まき	2.49	14,892	371
		半成貝	2.83	29,551	837
		小計		103,596	2,914
合計			125,070	17,912	

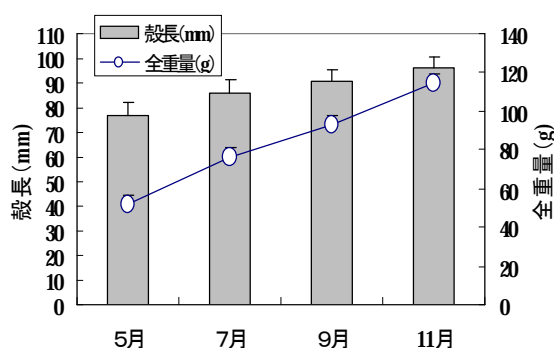


図1 1年貝の殻長、全重量の推移

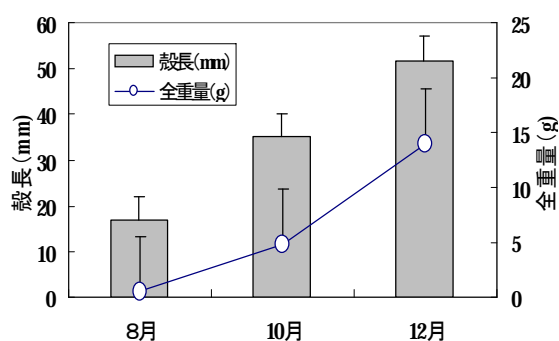


図2 0年貝の殻長、全重量の推移

養殖に伴う付着生物としては、ムラサキイガイ、キヌマトイガイ、ワレカラ、ハイドロゾア等が観察された。時期別にみると、春から夏はワレカラ、ハイドロゾアがごく少数付着している程度であったが、秋にはムラサキイガイが大量に付着しているのが観察された。11月の付着生物の種類、湿重量について測定を行った結果、ホタテガイの2.3倍の付着物が見られ、そのうち96%がムラサキイガイであった（表2）。

表2 養殖付着生物の種類、湿重量

	湿重量 (g)	
ホタテガイの重量	10,391	
付着物総重量	24,250	
ムラサキイガイ	23,312	(96%)
キヌマトイガイ	938	(4%)

(イ) 生息環境に関する調査

実験漁場の水深は45mで、水温は8月に19.8℃と最も高い値を示した。また、栄養塩はNO₃+NO₂、NH₄は5月に0.95μmol/l、2.0μmol/l、PO₄は7月に0.17μmol/lと最も高い値を示した。クロロフィルaについては6月に5.09μg/lと最も高い値を示した。

オ 今後の課題

ホタテガイの現存量、成長、生息環境については、年変動が見られることから、継続して調査を行う必要がある。

(青森県水産増殖センター、ほたて貝部、吉田達)

3. 大気／海洋におけるCO₂収支の評価

(1) 親潮域・混合域における大気／海洋のCO₂収支の把握

ア. 目的

海洋は、主たる地球温暖化物質であるCO₂の大気中分布に対し、大気とのガス交換を通して大きな影響を与えていることが想定され、海洋表層のCO₂分圧の測定による大気－海洋間のCO₂収支の正確な見積りが急務とされている。親潮域および混合域は、生産力が高く、海洋環境の時空間的変動が大きいという特徴を持つが、CO₂収支の見積もりはほとんど行われていない。

本研究では、当海域におけるCO₂収支の正確な見積りのための基礎データの獲得を目的とし、海洋表層のCO₂分圧とCO₂収支へ影響を与えている海洋環境を水塊別、季節別に実測し、季節変動を明らかにする。さらに、CO₂収支の見積もりのため、海洋表層のCO₂分圧と海洋環境要因との関係を季節毎に解析する。

イ. 研究方法

海洋表層のCO₂分圧と環境要因を航走しながら連続的に観測するために、表層環境モニタリングシステムを改良・確立した(図2-3-1-1)。

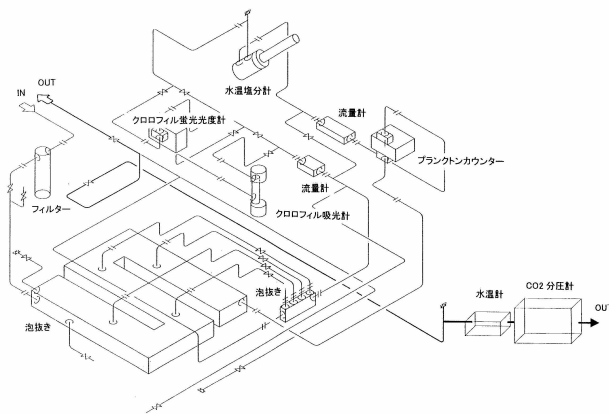


図2-3-1-1 CO₂分圧計を組み込んだ海洋表層環境連続モニタリングシステム

系統的な観測を行うため、親潮域から混合域にかけて広域にわたるOICEライン（42° 20' N, 143° 40' E - 38° N, 146° 50' E、通常測点23点）を

定線として設置した(図2-3-1-2)。

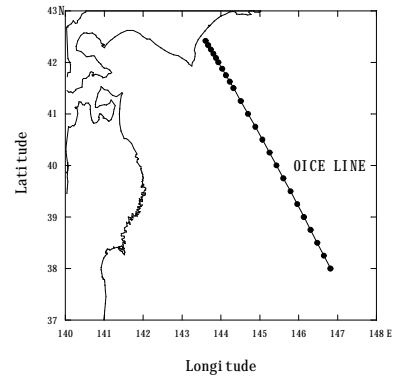


図2-3-1-2 親潮・混合域における観測定線（OICE line）

この定線上を中心に、海洋表層のCO₂分圧と同時に水温、塩分、植物色素量等の海洋環境の連続観測を2001年冬季（1月下旬）より、春季（4月中旬から下旬）、夏季（6月下旬から7月上旬）、秋季（11月中旬）の各季節で行った。また、各測点では海洋環境の鉛直分布測定のため、CTD観測と各層採水を行った。

ウ. 結果

2001年の冬季、春季、夏季、秋季のOICEライン上の親潮・混合域表層における水温の分布を見ると、観測海域では、各季節ともフロントを境に低温と高温の海域に分かれた(図2-3-1-3)。塩分を見ると、低温の水域では低塩分、高温では高塩分を示した。一年を通し観測海域は、親潮フロントを境に低温・低塩分の親潮水域と高温・高塩分の黒潮影響下の暖水域の二つの海域で構成されることが明らかになった。

2001年冬季では、親潮域では1～5℃の範囲で、暖水域では10～15℃の範囲で表層から150m以上の深さで鉛直混合をしていた。植物プランクトンの現存量の指標であるクロロフィルa濃度の表層における値は、親潮域・暖水域全域で低く、0.4 mg m⁻³前後であり、比較的高い値を示す親潮フロント周辺でも0.6 mg m⁻³以下であった。鉛直分布も100m以浅ではほぼ一様という特徴的な分布を示した。植物プランクトンはサイズが0.2～2μmの小型のピコプランクトンが優占した。表層のCO₂分圧を見ると、冬季では全域で300～350ppmの範囲の値を示し

た。水温の変化が著しい親潮フロント周辺では水温の低下に対応して CO_2 分圧は高くなり、親潮域の方が暖水域よりも高い値を示した(図2-3-1-3)。

春季になると、親潮域の表層から 50m 付近にわたり珪藻主体としたサイズが $10\mu\text{m}$ 以上の大型植物プランクトンによるブルームが形成された。クロロフィル *a* 濃度は表層ほど高く、最大 20 mg m^{-3} 以上の水塊が見られた。一方暖水域では表層付近のクロロフィル *a* 濃度も 1 mg m^{-3} 前後で少なく、ピコプランクトンが優占していた。表層の CO_2 分圧を見ると、親潮域では空間的な不均一性が顕著であり、150~300ppm の値を示した。それに対し、暖水域では 300ppm 前後ではほぼ一定であった。表層の CO_2 分圧は親潮域の方が暖水域よりも低く、特に親潮フロント付近では 150ppm 以下の低い値を示した(図 2-3-1-3)。

夏季になると、全域で成層化が進み、水深 30m 前後に温度躍層が形成された。表層では植物プランクトンの現存量は減少し、クロロフィル *a* 濃度は親潮域で $1.5\sim3\text{ mg m}^{-3}$ 、暖水域で 0.5 mg m^{-3} 前後であった。温度躍層付近には亜表層クロロフィル極大の形成が見られ、ピークのクロロフィル *a* 濃度は親潮域で 10 mg m^{-3} 、暖水域では 3 mg m^{-3} であった。植物プランクトンは全域でピコプランクトンが優占していた。表層の CO_2 分圧を見ると、親潮フロント周辺で水温の上昇に対応して CO_2 分圧も高くなり、夏季でも親潮域の方が暖水域よりも低い値を示した。暖水域では 320ppm 前後ではほぼ一定、親潮域では 180~250ppm の値を示した(図 2-3-1-3)。

秋季になると、全域で表層から 50m 前後の深さで鉛直混合が始まり、クロロフィル *a* 濃度は、各水域の鉛直混合層内ではほぼ均一に分布した。表層のクロロフィル *a* 濃度は親潮域では北ほど高く、 $0.4\sim1.5\text{ mg m}^{-3}$ 、暖水域では $0.6\sim0.8\text{ mg m}^{-3}$ の低濃度であった。秋季においても、親潮域と暖水域どちらにおいてもピコプランクトンが優占していた。表層の CO_2 分圧を見ると、冬季同様親潮フロント周辺で水温の低下に対応して CO_2 分圧も高くなり、親潮域の方が暖水域よりも高い値を示した。暖水域では 300ppm 前後ではほぼ一定であり、親潮域では 300~350ppm の値を示した(図 2-3-1-3)。

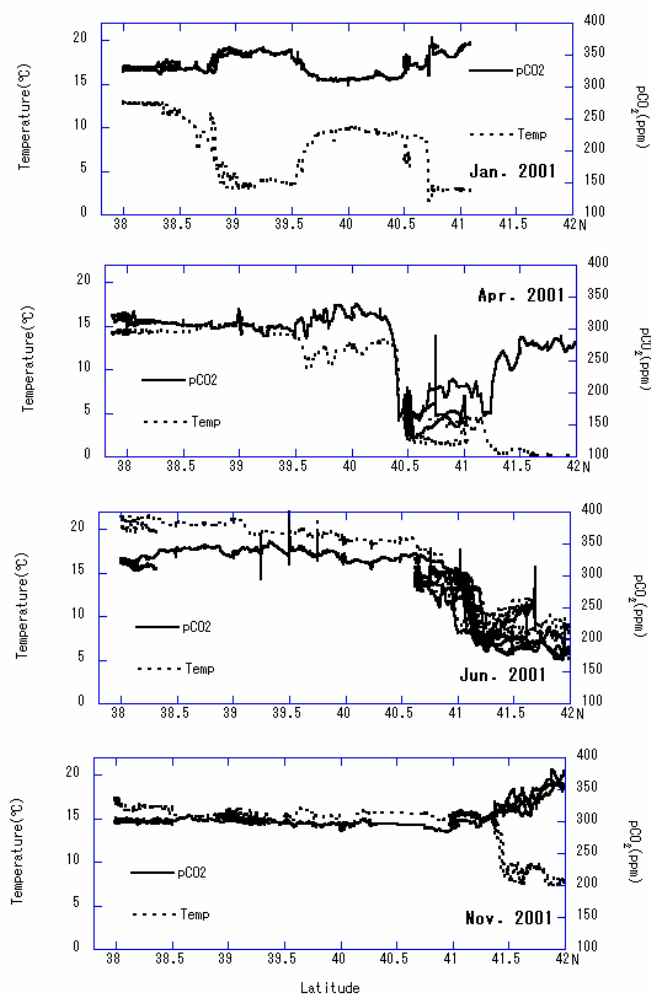


図2-3-1-3 OICEライン上における表層の水温と二酸化炭素分圧の季節変化

エ 考察

これまで親潮・混合域における表層の CO_2 分圧と海洋環境に関する知見は、冬季から春季にかけての時期に限られていた (Sasaki et al. 1998, Midorikawa et al. 2003)。本研究により初めて親潮・混合域における表層の CO_2 分圧と海洋環境の年間を通じた季節変動を捉えることができた。

年間を通じた表層の CO_2 分圧と水温のプロットを見ると(図2-3-1-4)、両海域とも表層の CO_2 分圧は、最大を示す冬季でも大気の370ppm以下の値であり、両海域とも春から夏に CO_2 を吸収し冬季でも CO_2 を放出せず、年間を通じて効率よく CO_2 を海面から吸収する海域であることが示唆された。

表層のCO₂分圧の年変動を見ると、親潮域のCO₂分圧は年変動幅が230ppmと大きく変動したのに対し、暖水域では年変動幅が70ppmと小さく、年間を通じて300ppm前後ではほぼ一定であった。

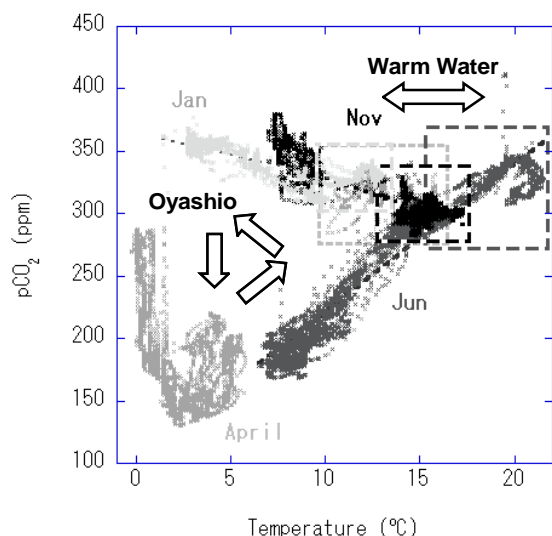


図2-3-1-4 親潮・混合域における各季節の水温と二酸化炭素分圧の関係。点線四角で囲われた部分は暖水域を示す。

親潮域で見られた表層のCO₂分圧の大きな季節変動は、年間を通じて以下のプロセスが起きていることによるものと考えられる。

- 1) 冬季から春季にかけての大規模な珪藻ブルーム形成に伴う、珪藻の活発な光合成によるCO₂吸収とその後の深層への沈降（生物ポンプ）による表層のCO₂分圧の急激な低下
- 2) 夏季の成層化に伴う大気と海洋表層のガス交換、あるいは高CO₂分圧の暖水域水塊との水平混合による表層のCO₂分圧の上昇
- 3) 秋季から冬季にかけての盛んな鉛直混合に伴う深層の高CO₂分圧水との混合による表層のCO₂分圧の上昇

それに対し、暖水域では表層のCO₂分圧の値が年間を通じほぼ一定に保たれているのは、常に小型のピコプランクトンが優占しており、微生物ループが一年を通して表層の炭素循環を担っていることによるものと考えられる。そこでは植物プランクトンの成長と微小動物プランクトンによる捕食がバランスしており、植物プランクトンの光合成によるCO₂の吸収と微小動物プランクトンの呼吸

によるCO₂の放出との間に常にバランスが取れていることによるものと考えられる。

両海域全体で水温とCO₂分圧との相関を見ると、冬季と秋季では負の、夏季では正の強い相関が見られた。表面水温と表層のCO₂分圧を一次式で表すことができ、関係式は、冬季： $Y = 364 - 3.5 X$ ($r = 0.80$)、夏季： $Y = 104 + 11.8 X$ ($r = 0.95$)、秋季（11月）： $Y = 377 - 5.0 X$ ($r = 0.83$) となった。これは、親潮・混合域の夏季・秋季・冬季では、表面水温から表層のCO₂分圧が推定できることを示している。しかしながら、春季の親潮水域内では、大きな値のバラツキが見られ、水温との相関は見られなかった。これは、その時期の表層CO₂分圧が、水温よりも珪藻のブルーム形成過程に伴う生物ポンプの影響をより強く受けていることによるものと考えられる。

オ 今後の課題

親潮域の春季で見られた表層CO₂分圧の空間的な不均一性については、栄養環境と植物プランクトンのブルームの進行過程の関係などからさらなる解析が必要と考える。

カ 要約

親潮・混合域を対象に、表層のCO₂分圧と海洋環境の季節変動を捉えるため、定線観測を定期的に1年間行った。その結果、西部太平洋混合域において、親潮フロント北の親潮域では、春季の珪藻の大規模なブルームに伴う生物ポンプによる表層CO₂分圧の大幅な減少により大きな季節変動が起き、それに対しフロント南の暖水域では、一年を通じて常に小型のピコプランクトンが優占し、表層のCO₂分圧の季節変動が小さく保たれていることが明らかになった。

キ 引用文献

- Midorikawa T., Iwano S., Saito K., Takano H., Kamiya H., Ishii M., & Inoue H. Y. (2003) Seasonal changes in oceanic pCO₂ in the Oyashio region from winter to spring. *Journal of Oceanography* 59: 871- 882.
- Sasaki K., Ono T., Tanaka K., Kawasaki K. & Saito H. (1998) Variation of the partial

pressure of CO₂ in surface water from Kuroshio to Oyashio and the relation between environmental factors and the partial pressure at 144°E off Sanriku, northwestern North Pacific in May, 1997. Journal of Oceanography 54: 593-603.

(東北区水産研究所、混合域海洋環境部、生物環境研究室、桑田 晃)

(2) 混合域・亜熱帯域における大気／海洋のCO₂収支の把握

ア 目的

地球温暖化ガス二酸化炭素 (CO₂) が大気中に増加しているため、その吸収源としての海洋の役割に関心が集まっている。日本周辺海域は植物プランクトンの生産力が高く、大気からCO₂を吸収している可能性が高いが、定量的な取り扱いがなされていない。本課題では、日本太平洋側の混合域から亜熱帯域を中心とする海域における表層の二酸化炭素分圧 (pCO₂) を測定し、点や線で得られたデータを該当海域全体に広げる方法を検討する。そのために表面水温とクロロフィルaからpCO₂を推定する式の作成を目的とした。

イ 研究方法

通常、観測は点や線で行われるが、海域の大気／海洋間の収支を求めるためには、点や線で得られた結果を面に拡張する必要がある。一方、リモートセンシングを用いれば様々な海洋における現象を面的に捉えることができる。現在、表面水温やクロロフィルaはリモートセンシングを用いて日常的にモニタリングされている。そこで、表面水温とクロロフィルaからpCO₂を推定する式を作成することが必要となる。そのため、船舶調査においてpCO₂、水温やクロロフィルa等のデータの収集を行った。

船舶による調査は、1997年～1999年における中央水研の蒼鷹丸によって親潮域から黒潮域にかけて行われた。pCO₂は平衡器にゴアテックスチューブを用いた測器を用いて連続的に測定された (Sasaki et al., 1998)。

pCO₂は表面水温 (SST) とクロロフィルa濃度 (Chl) から下記の重回帰式を用いて求める。

$$pCO_2 = a \times (SST) + b \times (SST)^2 + c \times (Chl) + d \times (Chl)^2 + e \quad (1)$$

この式でa、b、c、d及びeは定数である。

ウ 結果

(ア) 水温並びにクロロフィルとpCO₂

水温とpCO₂との関係の例として1997年1月に襟裳岬沖から144°E線を33°Nまで測定した結果を図2-3-2-1に示した。水温が低いほどpCO₂が高いことが示されている。これは、冬季鉛直混合によって、全炭酸濃度の高い亜表層の海水が表層に運ばれたためである。

表2-3-2-1に1月、5月、8月並びに11月の観測結果について、水温やクロロフィルaとpCO₂との関係を1次の回帰式で表した結果を示した。1月は水温と逆相関が、5月、8月及び11月は正相関が見られた。相関係数が高いのは冬季 (1月) と夏季 (8月) であり、春 (5月) と秋 (11月) の相関係数は比較的低かった。クロロフィルaとの関係では、総じて水温との関係に比べて相関係数は低い、すべて負の関係が見られた。すなわちクロロフィルa濃度が高いとpCO₂は低くなる。これは、植物プランクトンによる全炭酸の消費 (光合成) がpCO₂の減少を引き起こしている結果と判断された。1月の相関は著しく低く、5月が最も高い値を示した。1月は植物プランクトンが最も少なく、5月は植物プランクトンの大増殖 (ブルーム) のため最も多かった。このため、1月は植物プランクトンの影響が弱く、5月は強かったことが反映されたものと考えられる。

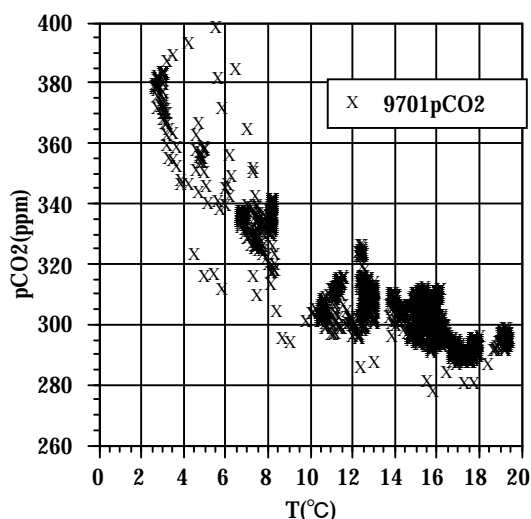


図2-3-2-1 表面水温 (T) とpCO₂との関係例

表2-3-2-1 pCO₂と表面水温 (SST) 並びにクロロフィルa (Chl) との1次相関

Month	SST(°C)		Chl(mg m ⁻³)	
	a	R	a	R
1	-5.08	0.93	-6.0	0.04
5	11.77	0.71	-35.9	0.72
8	4.45	0.92	-71.7	0.52
11	1.80	0.85	-26.6	0.58

a : 回帰係数、R : 相関係数

(イ) pCO₂の推定式

次に、研究方法で述べたようにpCO₂をリモートセンシングによる表面水温とクロロフィルaから推定するために、式(1)の係数について検討した。その結果を表2-3-2-2に示す。

表2-3-2-2 pCO₂推定式の係数と標準誤差

Month	a	b	c	d	e	S
1	-12	0.29	-16	7.3	417	7.4
5	77	-4.3	-128	36	-9.2	32
8	2.7	-0.04	190	-221	229	5.6
11	-8.7	0.30	12	3.5	350	3.1
1, 8, 11	-15	0.45	-64	37	438	11
1-11	-4.4	0.20	-66	3.7	348	25

a~e : 係数、S : 標準誤差 (μ atm)

各月ごとに標準誤差を見ると、5月以外は一桁であるが、5月は大きな値であった。5月を除く月すべてを用いて求めた回帰式の標準誤差は11 μ atmであったが、5月を含めると25 μ atmとな

った。5月は植物プランクトンのブルーム時またはブルーム後の状態であった。ブルーム時期においては、pCO₂を水温とクロロフィルaから推定する場合に誤差が大きいことが分かった。

1月、5月、8月及び11月のすべてのデータを用いると、pCO₂を推定する回帰式は表2-3-2-2の最下段のように、

$$pCO_2 = -4.4 \times (SST) + 0.20 \times (SST)^2 - 66 \times (Chl) + 3.7 \times (Chl)^2 + 348 \quad (2)$$

となった。この式で計算したものと実測値との関係を図2-3-2-2に示した。pCO₂が高い時は多くの場合かなり一致しているが、低い時(実測値が180~230 μ atm)には比較的大きな不一致が見られる。これは、先に述べたように植物プランクトンのブルームをうまく再現していない結果によるものと考えられる。ブルームによって植物プランクトン(クロロフィルa)が増加してpCO₂が減少するが、その後クロロフィルaが減少しても直ぐにはpCO₂は変化(増加)していないこと等によるものと考えられる。

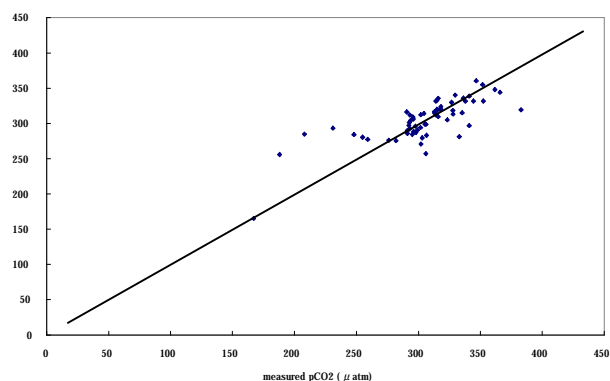


図2-3-2-2 pCO₂の実測値(横軸)と推定値(縦軸)との比較。直線: Y=X.

エ 考察

Ono et al. (2003)は、中央水研による1997年から1999年の日本近海調査とNEDO・産業総合研究所による1992年から1996年の175° E線に沿った北太平洋中央部の調査の合計約28,000点のデータを用いて式(1)の係数a~eを求め、表面水温とクロロフィルaからpCO₂の推定を行った。リモートセンシングによる月平均の表面水温とクロロフィル

aを用いて亜熱帯域と亜寒帯域に分けて回帰式を求めた。亜熱帯域での回帰式（データ数：21,073）は下記の通りであった。

$$pCO_2 = -10.84 \times (SST) + 0.365 \times (SST)^2 - 50.65 \times (Chl) + 6.989 \times (Chl)^2 + 401 \quad (\text{標準誤差：} \pm 14 \mu \text{ atm}) \quad (3)$$

表2-3-2-2に示す1月、8月及び11月のデータを用いた回帰式の係数を式（3）の係数と比較すると、係数dは大きく異なったが、他の係数はほぼ同じであった。これに対して、1～11月のすべての月のデータを用いて得られた回帰式の係数を式（3）の係数と比較すると、係数aとdは異なったものの2倍程度の違いであった。他の係数はほぼ同じであった。本研究における式（2）は限られた海域、データ数から得られたものの、Ono et al. (2003) の式（3）と大差のないことが分かった。したがって、日本近海域の調査結果から求めた回帰式を北太平洋の亜寒帯域全域に及ぶ pCO_2 の推定に用いてもさほど大きな誤差は生じないものと思われる。今後、日本近海の親潮域から黒潮域において多くのデータを集めることにより、日本近海域はもちろん北太平洋亜熱帯域全域において現在よりも正確な pCO_2 を推定する式を作成することが可能となる。

ブルーム時期においては、 pCO_2 を水温とクロロフィルaの回帰式から推定する場合、実測値との間に比較的大きな不一致が見られた。Ono et al. (2003) も亜寒帯域のブルーム時（4月から6月）には、推定値と実測値とが大きく異なることを報告している。そこで、Ono et al. (2003) は、クロロフィルa濃度を月平均値ではなく、月最大値を用いて pCO_2 を推定したところ、推定された値にある程度の改善が見られた。Ono et al. (2003) が用いたクロロフィルa濃度のデータは水色衛星ADEOSからによるものであった。しかしながら、ADEOSは運航半ばで停止したため、クロロフィルaの最大値を求めるにはデータ数が不十分であった。それで十分な改善が行われなかったと考えられる。現在稼動している水色衛星SeaWiFSからは十分な数のクロロフィルaデータを得ることができるので、SeaWiFSを用いれば、ブルーム時期におけるさら

なる改善が期待できる。

オ 今後の課題

植物プランクトンの大増殖時における、水温とクロロフィルaから pCO_2 を推定する回帰式の確立が必要である。

カ 要約

表面水温（SST）とクロロフィルa（Chl）から二酸化炭素分圧（ pCO_2 ）を推定するため、親潮域から黒潮域にかけての船舶による調査結果をもとに、これら3者の関係を検討した。その結果、下記の回帰式を用いて pCO_2 をSSTとChlから推定することができることが分かった。

$$pCO_2 = -4.4 \times (SST) + 0.20 \times (SST)^2 - 66 \times (Chl) + 3.7 \times (Chl)^2 + 348$$

引用文献

Ono, T., T. Saino, N. Kurita and K. Sasaki (2003): Basin-scale extrapolation of shipboard pCO_2 data by using satellite SST and Chla. (submit), Int. J. Rem. Sens.

Sasaki, K., T. Ono, K. Tanaka, K. Kawasaki, and H. Saito (1988): Variation of the partial pressure of CO_2 in surface water from Kuroshio to Oyashio and the relation between environmental factors and the partial pressure at 144°E off Sanriku, Northwestern North Pacific in May, 1997. J. Oceanogr., 54, 593-603.

（中央水産研究所、海洋生産部、物質循環研究室、塩本明弘、佐々木克之（平成14年退官））

(3) 日本太平洋岸のCO₂収支推定のための交換係数とフラックスの評価

ア 目的

化石燃料の大量消費による大気中のCO₂濃度の上昇に関係した地球温暖化が議論となっている。一方、海洋は大気中のCO₂の吸収源だといわれているが、その吸収の物理過程が複雑なうえ、CO₂は海水に吸収されると解離し炭酸物質に変化する。この様な理由から測定が困難で、定量的な扱いが難しいのが現状である。本研究では、生産力が高くCO₂の吸収が予測される日本沿岸海域について、観測データによるCO₂フラックスの算出およびリモートセンシングデータを用いたより時空間的に密なCO₂フラックスの推定を試み、当該海域のCO₂の収支について総合的な解析を行った。

イ 研究方法

(ア) 日本沿岸域のCO₂船舶観測データを収集し大気—海洋間のCO₂交換係数およびフラックスの算出を行った。交換係数算出は既存の交換係数算出式についてその精度について検討を行った。大気—海洋間のCO₂フラックス F は、

$$F=E(PCO_2-pCO_2) \quad (1)$$

で示される。ここで、 E はCO₂交換係数、 PCO_2 、 pCO_2 はそれぞれ大気、海洋のCO₂分圧である。上記式で得られたフラックスについて、季節ごとのマッピングを行い当該海域の季節変動について解析を行った。

(イ) 人工衛星による海面水温、海上風速、表面クロロフィルの観測データを用い、太平洋沿岸のCO₂交換係数、海水中のCO₂分圧(pCO_2)を月ごとに推定し、この海域のCO₂フラックスの見積もりを行った。さらに月ごとのCO₂収支について解析を行った。海水中の pCO_2 の推定について、Ono et al. (2003)は、中央水研による1997年から1999年の日本近海調査とNEDO・産業総合研究所による1992年から1996年の175E線に沿った北太平洋中央部の調査の約28,000点のデータを用いて、(2)式による pCO_2 推定を行った。月平均の値を用いて得られた推定式は以下の通りである。

亜熱帯域は

$$pCO_2 = -10.84 T + 0.365 T^2 - 50.65 C + 6.989 C^2 + 401 \quad (2)$$

$$(\pm 14 \mu \text{ atm}, n=21073)$$

亜寒帯域は4月から6月の結果を除いて

$$pCO_2 = -0.04 T - 0.174 T^2 - 50.69 C + 3.191 C^2 + 394 \quad (3)$$

$$(\pm 17 \mu \text{ atm}, n=7484)$$

であった。両式をおよび親潮フロントの温度データ用い海水中 pCO_2 の推定を行った。

ウ 結果

(ア) CO₂交換係数の評価と観測データによるマッピング

交換係数 E は、観測で求めることができないため、実験などにより様々な値が報告されてきた(Zha, C., Akiyama, M 1998)。秋山ら(井上、秋山、2002)は pCO_2 を決めている海水中の全炭酸 TCO_2 が大気との交換によって変動する状態のモデルを作成して、このモデルに基づき、Station Papaで得られていた結果を用いて、いくつかの報告されてきた方法でシミュレーションした。

表2-3-3-1 各モデルの pCO_2 推定値と観測値の残差

風速(m/s)	残差 (ppmv)			
	Tans	Liss	Wanninkhof92	Whitcap
3.0-6.9	6.09	3.88	4.5	3.66
7.0-10.9	5.56	3.46	3.73	3.02
11.0-14.9	5.13	3.52	3.68	3.29
15.0-18.9	4.04	4.12	3.94	3.55
19.0-21.9	5.66	2.48	3.26	2.34

表2-3-3-1の結果を見ると、Tansは残差が大きいが、その他のモデルでは大きな差が見られないため、

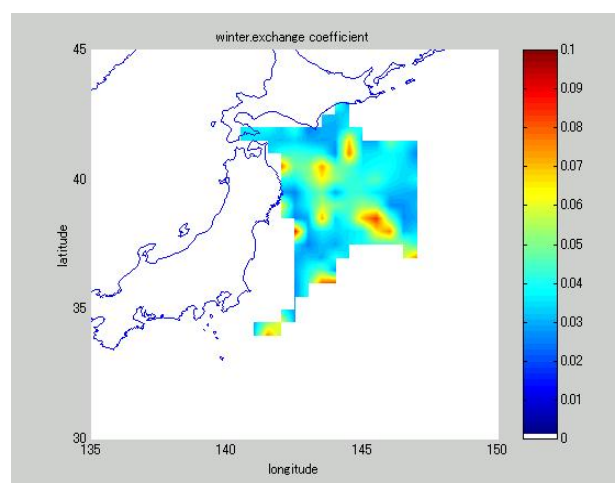


図2-3-3-1 大気—海洋間のCO₂交換係数 (冬季)

本研究では、WhitcapモデルによってCO₂交換を求めた。

(イ) 船舶観測データを用いたCO₂交換係数とフラックスのマッピング

およそ4万点の船舶観測データを収集し、季節毎のCO₂交換係数(図2-3-3-1)、CO₂フラックスの算出とマッピング(図2-3-3-2、図2-3-3-3)を行った。マッピングは0.5度格子間隔および補間法を適用し、0.01度格子間隔について検討した。この結果、CO₂交換係数は、冬季において北海道南方

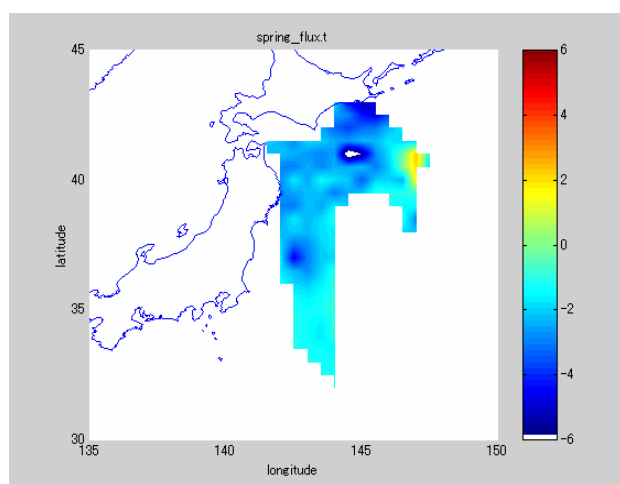


図2-3-3-2 大気—海洋間のCO₂フラックス (春季)

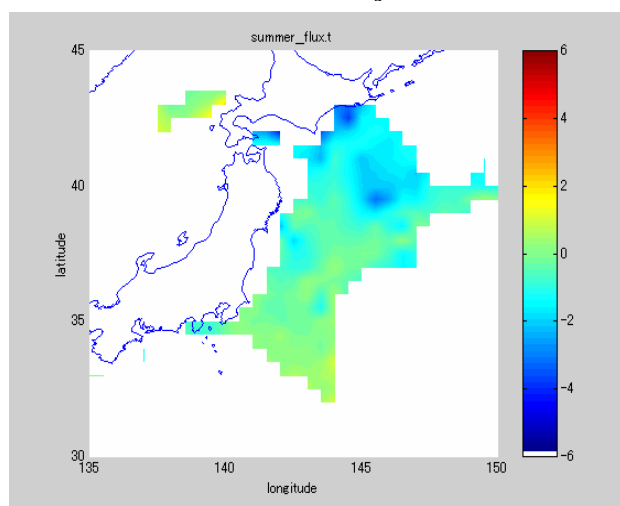


図2-3-3-3 大気—海洋間のCO₂フラックス (夏季)

から三陸沖にかけておよそ0.05~0.07(mol/m²/yr/uatm)の値となっており、夏季ではおよそ0.04(mol/m²/yr/uatm)となっていることがわかった。これはCO₂交換係数が海上風速に大きく依存しているためで、冬季に大きな交換が行われていることを示している。一方、CO₂フラックスは、冬季、三

陸沖東方から北海道東方沖にかけて海洋から大気へ放出されており、その値は、1.5~2(mol/m²/yr)であった。一方、春季は海洋が非常に大きな吸収域となっており、その値は、4~6(mole/m²/yr)となっている。また、房総沖では夏季に海洋から大気へ1~2(mol/m²/yr)の放出が行われていることがわかった。

(ウ) 人工衛星観測データを用いた大気—海洋間のCO₂収支の見積もり

上記のフラックスの変動特性を時空間的にさらに詳しく解析するため、人工衛星観測データを用いた月ごとの格子間隔0.1°の解析を行った。観測データは1998年~2002年の月ごとの海面水温

(NOAA/AVHRR)、海上風(DMSP/SSM)、クロロフィル(SeaWiFS)を収集し、CO₂交換係数の算出、海水中のpCO₂の推定とマッピングを行った。

CO₂交換係数は既存の算出式の精度の検討よりWhitcapモデルによる算出を行った。また、海水中のpCO₂の推定は、Ono et al. (2003)の推定式と東北海域の親潮前線データを用い、黒潮域と親潮域の識別を行い算出した。次に、これらのpCO₂とCO₂交換係数を用いた月毎のCO₂フラックスを算出し、そのマッピング(図2-3-3-4、図2-3-3-5)を行った。この結果、年間でおおよそ0.02(GtC)が海洋に吸収されていることがわかった。一方、夏季では7月~9月の間、おおよそ0.0005(GtC)が海洋から大気中に放出していることがわかった。

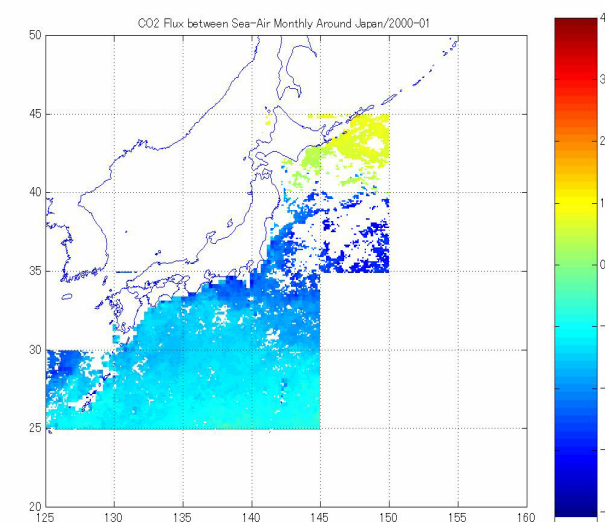


図2-3-3-4 太平洋沿岸域のCO₂フラックス (2000年1月)

さらに、日本太平洋沿岸域におけるCO₂収支の計算を行った(図2-3-3-6)。この結果、この海域では1998年から2002年にかけて毎年冬季に海洋が大きな吸収をしていることが示された。その値は0.00

3～ 0.004 (GtC) で、大気から海洋に炭素が移動していることがわかった。一方、夏季には弱い放出がみられることがわかった。

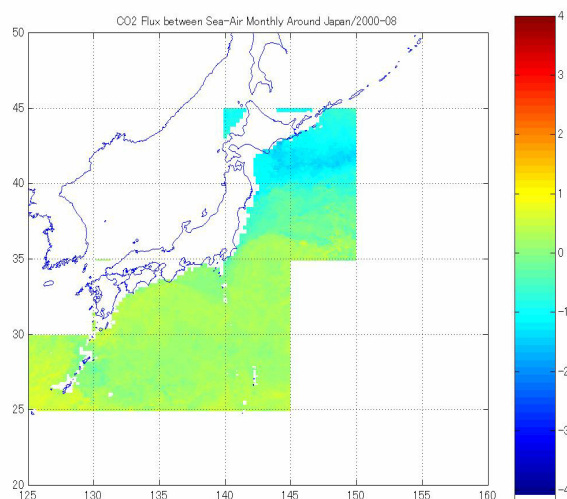


図2-3-3-5 太平洋沿岸岸域のCO₂フラックス
(2000年7月)

エ 考察

日本周辺太平洋海域のCO₂吸収について、観測データによるマッピングで季節変動について示した。さらに、 $233 \times 10^4 \text{ km}^2$ の水域において年間約0.03 (GtC)の炭酸ガス炭素吸収していることを示した。国立環境研の材木運搬船Skaugranを用いた研究では、北太平洋34N以北(面積: 海洋総面積(3億1300万 km^2)の4%)の年間CO₂吸収量を0.26 (GtC)と述べている(Zeng, et al. (2002))。IPCCによれば、全球の海洋による年間CO₂吸収量は誤差が多いとしてはいるが、約2GtCである。北太平洋34N以北の吸収量はその13%であり、単位面積あたりの年間吸収量は、20万tC/1万 km^2 となる。全海洋では6.4万tC/1万 km^2 となる。我々が推定した吸収量は、これらと比較すると、全海洋の1.5%、34N以北の13%、面積あたりにすると13万tC/1万 km^2 となった。日本の経済水域面積は約450万 km^2 であり、今回推定できなかつた東シナ海と日本海が面積あたり同様の吸収能力をもつとすると、年間CO₂吸収量は5800万tCとなる。日本の年間CO₂排出量は約3億tCなので、日本周辺経済水域のCO₂吸収量は年間排出量のおおよそ20%ということになる。

オ 今後の課題

人工衛星のリモートセンシングによるフラックス推定は時空間的に密な資料を提供できる点で利点が多い。しかしながらこれらのデータを用いた海水中のpCO₂推定のアプローチは未だ解決されていない点が多い。特に春先のブルーム時などその推定について課題が多い。今後は多数の観測データを用いpCO₂推定式の精度を上げることが必要とされる

カ 要約

日本太平洋沿岸域のCO₂の海水中への取り込みについて、既存のCO₂交換係数の検討、船舶観測データによるCO₂フラックスの季節変動の把握を行った。さらに、リモートセンシングデータを用い月毎のCO₂フラックスおよび炭素移動量について示した。

引用文献

- Inoue, R., Akiyama, M., Validation of CO₂ exchange coefficient using Air-Sea gas exchange model, 2002 SCOR-JOS Joint Assembly in Sapporo abstract, 258.
- Ono, T., Saino, T., Kurita, N and Sasaki, K. (2003) Basin-scale extrapolation of shipboard pCO₂ data by using satellite SST and Chla, (submit), Int. J. Rem. Sens., 2003.
- Sasaki, K., Ono, T., Tanaka, K., Kawasaki, K., and Zeng, J., Nojiri, Y., Murphy, P., P., and Wong, C., S. (2002) A comparison of ΔpCO_2 distribution in the northern North Pacific using results from a commercial vessel in 1995-1999. Deep-Sea Res., 11, 49, 5303-5315.
- Zeng, J., Nojiri, Y., Murphy, P., P., and Wong, C., S. (2002) A comparison of ΔpCO_2 distribution in the northern North Pacific using results from a commercial vessel in 1995-1999. Deep-Sea Res., 11, 49, 5303-5315.
- Zha, C., Akiyama, M., Sugimori, Y., and Suwa, J. (1998) Estimation Air-Sea CO₂ Flux in the North Pacific Using the Satellite Data, AMSTEC special Issue for PORSEC98, 1998.

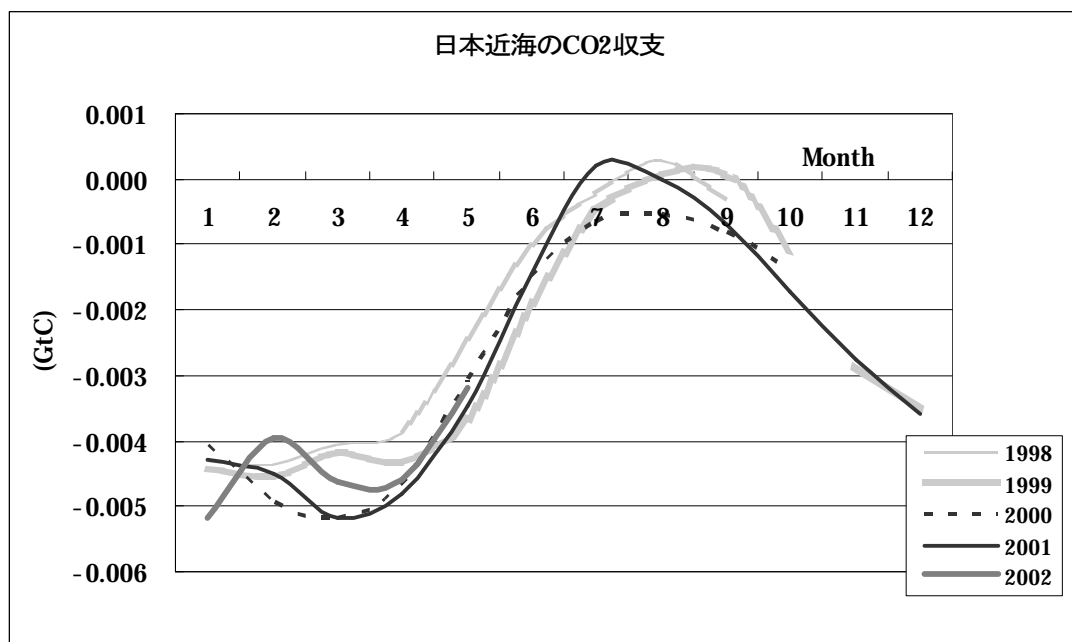


図2-3-3-6 太平洋岸の月毎の炭素収支

(東海大学、海洋学部、秋山正寿)

「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものである。

この冊子は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集」として刊行するものである。

なお、本成果集 **3** は、編集を（独）森林総合研究所と（独）水産総合研究センターが共同で実施し、（独）森林総合研究所が発行したものである。

ISSN 1349-0605

森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集 3
「森林、海洋等における CO₂ 収支の評価の高度化」

発行日 平成 16 年 3 月

編集 独立行政法人 森林総合研究所

独立行政法人 水産総合研究センター

発行 独立行政法人 森林総合研究所

郵便 305-8687 茨城県つくば市松の里 1 番地

印刷所 株式会社エムディー