

■文献値：炭素含有率

<https://tnfri.fra.affrc.go.jp/tnf/news65/muraoka.htm>

三陸沿岸の藻場における炭素吸収量把握の試み

村岡大祐

はじめに

現在、大気中の CO₂ 濃度の上昇に伴い、地球温暖化が近い将来に顕在化するとの予測が多くの科学者から出されており、人類の生活や経済活動のみならず、地球環境維持システム全般にも影響を及ぼすことが懸念されている。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。海洋においても相当量の CO₂ 吸収があると推定されているが、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。日本沿岸に広く分布する大型海藻群落、いわゆる藻場も光合成を通じて炭素を吸収しているが、日本沿岸の藻場における総炭素吸収量を試算した例はほとんどない。今回、環境研究「森林、海洋等における CO₂ 収支の評価の高度化」の一環として、三陸沿岸の藻場における炭素吸収量の推定を行ったので、以下にその一端を紹介する。

日本沿岸における藻場の総面積と種類

日本沿岸に広がる藻場の総面積は、201,212ha と算出されている¹⁾。この藻場をタイプ別にみると、ホンダワラ属植物によって構成されるガラモ場が藻場全体の 27.1% を占め、以下アラメ場 20.4%、アマモ場 15.7% の順となる。その中で三陸沿岸（岩手県～宮城三陸海岸）における総藻場面積は 6,101ha であり、タイプ別ではワカメ場が最大で 1,993ha、これにコンブ場の 1,626ha が続いている（表 1）。

単位面積当たりの年間純生産量の推定（ガラモ場を例に）

一口に藻場と言っても、その構成種が違えば当然単位面積当たりの生産量（ひいては炭素吸収量）は異なる。従って、藻場による炭素吸収量を算出するためには、各藻場タイプ別の年間純生産量を知る必要がある。ここでは、ガラモ場を例にその算出方法を紹介する。

三陸沿岸の岩礁域には、ホンダワラ属植物の一種であるエゾノネジモクが生育し、ガラモ場の主要構成種となっている。本種は多年生海藻ではあるが、その主枝部分は冬から春にかけて成長し、夏の成熟期を迎えた後速やかに枯死流失する²⁾。この群落について、層別刈り取り法による単位面積当たりの年間純生産量の推定を行った。これは、坪刈りによって収集した藻体を一定の高さ毎に切断して計量し、各月の生産構造図を作成して、前調査月との比較によって得られる脱落量の累計（1 年間）を年間純生産量と見なす方法である（図 1）。これによって推定されたエゾノネジモクの年間純生産量は乾燥重量で約 2.0kg/m² であり、

7月に記録した年間最大現存量（約 1.8kg/m^2 ）との比（P/B 比）は約 1.1 であった。

P/B 比とは、ある植物体について、年間最大現存量（B）の何倍量が成長によって一年間に生産（P）されるかを示す値である。海藻種によっては成長しながら脱落し続けて最大現存量の何倍もの年間純生産量がある場合もあるため、年間を通じて吸収される炭素量を算出するためには、各海藻種の P/B 比と年間最大現存量からそれぞれの年間純生産量を推定する必要がある。他の藻場タイプについても、主要構成種のデータを元に単位面積当たりの現存量と P/B 比を算出した（表 2）。現存量はアラメ（ 3.73kg/m^2 ）、マコンブ（ 2.53kg/m^2 ）のコンブ目植物がやはり高い値を示した。なお、乾燥重量に占める炭素含有率を元素分析によって測定したところ、いずれの種についても乾燥重量のほぼ 1/3 を炭素量と見なせることがわかった（表 2）。

三陸沿岸の藻場における年間炭素吸収量

各藻場タイプ別の現存量、P/B 比、炭素含有率および藻場面積がわかれば、これらの積によって藻場タイプ別の年間炭素吸収量の推定が可能である。この方法により三陸沿岸の藻場における炭素吸収量を推算したところ、その合計は約 $60,000\text{tonC/year}$ となった（表 2）。藻場タイプ別ではコンブ場が全体の 73%を占めた。

問題点と今後の課題

実験藻場で得た年間純生産量等の数値および既存の藻場面積データを用いて、三陸沿岸の藻場における炭素吸収量の試算を行ってきた。現在他の研究機関と協同で日本沿岸の藻場全体（201,212ha）による総炭素吸収量の試算を進めているが、その過程でいくつかの問題点が明らかになっている。第一の問題として、今回の試算に用いた環境省の藻場データは日本沿岸の藻場面積を集計した唯一の知見ではあるが、調査時期が 1989 年から 1991

年と古いことに加え、海域によっては聞き取り調査を元にするなど精度の点で必ずしも十分とはいえない。今後は衛星画像解析等を利用した、より正確な藻場分布面積をリアルタイムに近い形で把握する技術開発が必要である。次に、大型海藻によって吸収された炭素の分解過程についての知見がほとんどない点が課題として挙げられる。海藻がいかに光合成を行い CO_2 や栄養塩を吸収しても、枯死後速やかに無機化して再び海水中に溶け出すようであれば、その効果は限定的である。大型海藻、特に褐藻類はポリフェノール化合物の含有量が高く、枯死・分解過程においてその一部が難溶性の腐食質となって底質中に埋め込まれていることが考えられるが、その過程や回転時間などの知見はほとんどない。藻場は炭素吸収源のみならず、栄養塩吸収による水質浄化や、水産動物の餌場および生息場として沿岸生態系において重要な役割を果たしているのは周知の通りである。藻場がもたらすこれらの効果を定量的に見積もるためには、藻場分布面積の正確な把握と、藻体の分解

過程の解明が必要不可欠であろう。

引用文献

1) 環境省 (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

2) 村岡大祐 (2003) エゾノネジモク. 藻場の海藻と造成技術 (能登
谷正浩編著, 成山堂書店), pp75-81.

(海区水産業研究部資源培養研究室)

Daisuke Muraoka

表 2 藻場タイプ別各種データおよび三陸沿岸における推定年間生産量

藻場タイプ	主な優占種	現存量(kgD.W./m ²)	P/B比	炭素含有率(%)	面積(ha)	*推定生産量(tonC)
アマモ場	スガモ	0.19	4.0	34.5	502	1316
ガラモ場	エゾノネジモク	1.83	1.1	36.7	353	2608
コンブ場	マコンブ	2.53	3.5	30.0	1626	43195
アラメ場	アラメ	3.73	1.0	33.5	626	7822
ワカメ場	ワカメ	0.38	1.0	32.7	1993	2477
テングサ場	マクサ	0.46	1.1	39.4	102	203
アオサ・アオノリ場	アナアオサ	0.17	1.0	29.5	124	62
その他	タンバノリ	0.48	1.0	32.5	775	1209
合計	-	-	-	-	6101	58892

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 比 x 炭素含有率 x 面積

村岡大祐：国立研究開発法人水産研究・教育機構,水産技術研究所（長崎）,グループ長

令和 3 年度

ブルーカーボン実証実験（波力発電所を
活用した藻場の造成による CO₂ 固定）
に関わる業務

成 果 報 告 書

令和 4 年 3 月

平塚市漁業協同組合

－目次－

I. 実証試験の背景と目的	1
II. 実証試験の内容	3
1. 波力発電所の特性と藻場造成における期待する効果	3
2. 実証試験項目	3
3. 試験・調査位置図	4
III. 実証実験	5
1. 海藻類の育成試験と CO ₂ 吸収量の調査	5
(1) 海藻の育成試験	5
(2) CO ₂ 吸収量の調査	11
2. 平塚波力発電所周辺の深浅測量並びに生物調査	14
(1) 深浅測量	14
(2) 海藻類の植生調査	16
(3) 植食性生物調査	19
(4) 捕食状況調査	23
IV. 考 察	28

I. 実証試験の背景と目的

- ・ブルーカーボンは、気候変動を緩和する手段として世界的に注目されているが、最近の研究では、岩礁や港湾構造物に生息する大型海藻（コンブやホンダワラなど）の藻場にもCO₂吸収機能があることが明らかになりつつある(※1)。
- ・しかし、全国各地の沿岸では藻場の減少が見られ(※1)、相模湾においても2010年に確認されていた大規模なカジメ群落が、2018年までに急激に減少していることが報告されている(※1)。

○藻場の衰退が認められる (※2) 都道府県(2009年～2013年)

- 藻場の衰退が認められる。
- 藻場の衰退が認められない、あるいは不明。

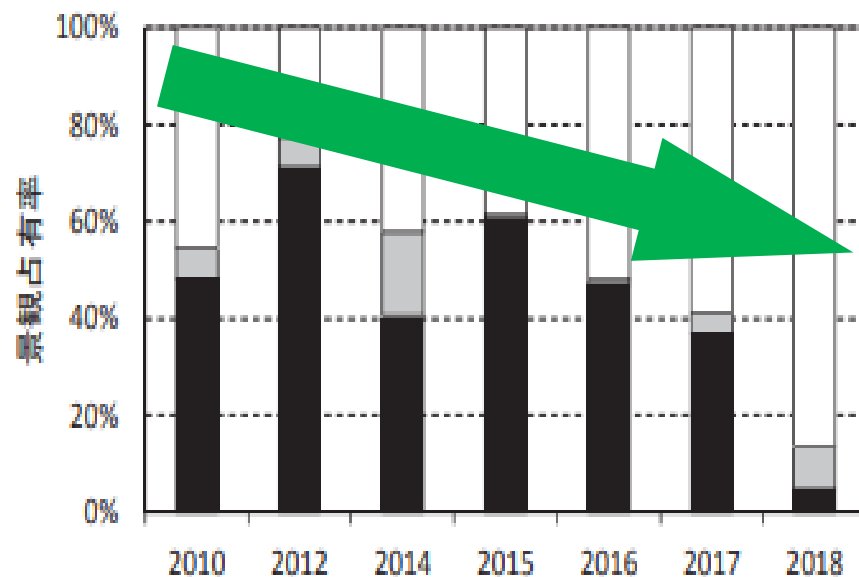


図2: 藻類および裸地占有率の経年推移 (※3)

■ 藻類(カジメ) □ 藻類(カジメ以外) □ 裸地

- ・東京大学生産技術研究所と共同研究企業グループは、令和2年2月から令和4年1月まで、環境省プロジェクトにより、平塚漁港南防波堤の前面海域において平塚波力発電所の海域実証を開始した。
- ・この波力発電所は、沖からの波を反射利用して発電効率を高めるための反射板を設置しており、この反射板背後の消波ブロック帯は、波当たりが緩和された新たな藻場造成の適地としての可能性が生じている。



- ・本実証実験は、波の遮蔽効果等、波力発電所の特性を活用した藻場造成による「新たなブルーカーボン生態系」を創出し、地域から地球温暖化対策として寄与するとともに、水産資源の維持増大や漁場環境の保全・向上を目的とするものである。

波力発電所を活用した藻場造成のイメージ

(※1) 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 <https://www.pari.go.jp/unit/ekanky/research/bluecarbon2.html>

(※2) 水産庁計画課 片石圭介(2020):藻場・干潟ビジョンの策定状況について

(※3) 高村 正造・有馬 史織・西村 竜雄・相澤 康(2019):小田原沿岸海域における藻場景観被度の経年変化と減少要因,神水セ研報第10号)

II. 実証試験の内容

1. 波力発電所の特性と藻場造成における期待する効果

波力発電所の特性	期待する効果	
波力発電所反射板による波の遮蔽	静穏な生育環境	藻類の着底・成長を促進
ラダーの揺動による海底の攪拌	栄養塩、酸素の供給	
ラダーの揺動による乱水流の発生	植食生物の摂食行動を阻害	植食生物による食害を回避
発電所を河口付近に設置したため、淡水流入による塩分濃度の低下	植食生物が忌避する生息環境	
海上のジャケット構造物・アクセス栈橋	陸上から実験海域にアクセスでき、観察・調査が容易	

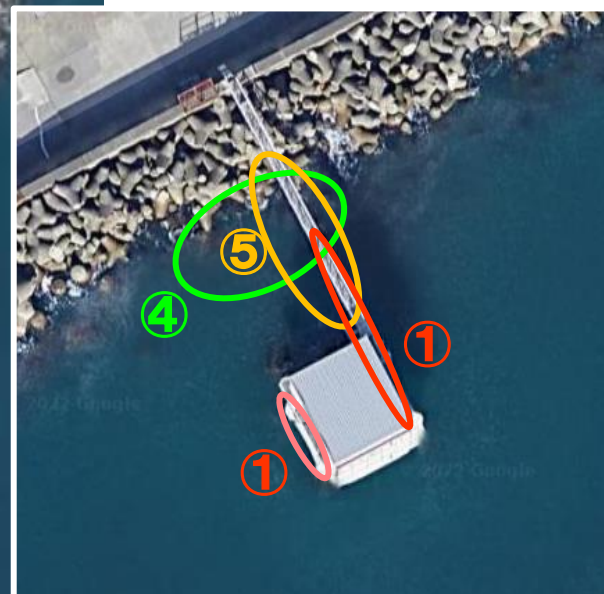
2. 実証試験項目

区 分	試験・調査項目	内 容
1. 海藻類の育成試験とCO ₂ 吸収量の調査	(1) 海藻の育成試験	海藻類(ワカメ)の生育試験
	(2) CO ₂ 吸収量の調査	ワカメ収穫物によるCO ₂ 吸収量の試算
2. 平塚波力発電所周辺の深浅測量並びに生物調査	(1) 深浅測量	波力発電所周辺の海底地形の確認
	(2) 海藻類の植生調査	気力発電所周辺と新港内の海藻類の確認
	(3) 植食生物調査	植食生物の生息状況の確認
	(4) 捕食状況調査	魚類による海藻類捕食状況の観察（追加調査）

3. 試験・調査位置図



- ① 海藻類（ワカメ）の生育試験
- ② 深浅測量
- ③ 藻場の形成状況の経年比較
- ④ 海藻類の植生状況の現状確認
- ⑤ 植食生物の確認と捕食状況の観察



Ⅲ. 実証実験

1. 海藻類の育成試験とCO₂吸収量の調査

(1) 海藻の育成試験

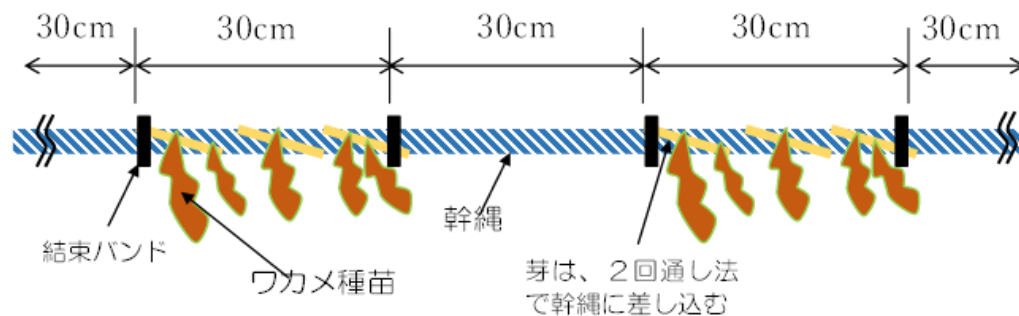
① 試験目的

- ・本試験は、波力発電所の特性を活用した海藻類（ワカメ）の育成試験を行い、藻場造成の実現可能性とブルーカーボン効果を検証することを目的とする。

② 試験方法

《親縄への幼芽の挿し込み》

- ・時期的に種苗の入手が可能な三浦市金田漁港産のワカメの幼芽を使用し、挿芽作業の当日早朝、みうら漁協南下浦支所より、種糸100mを購入し、平塚漁港に搬入する。

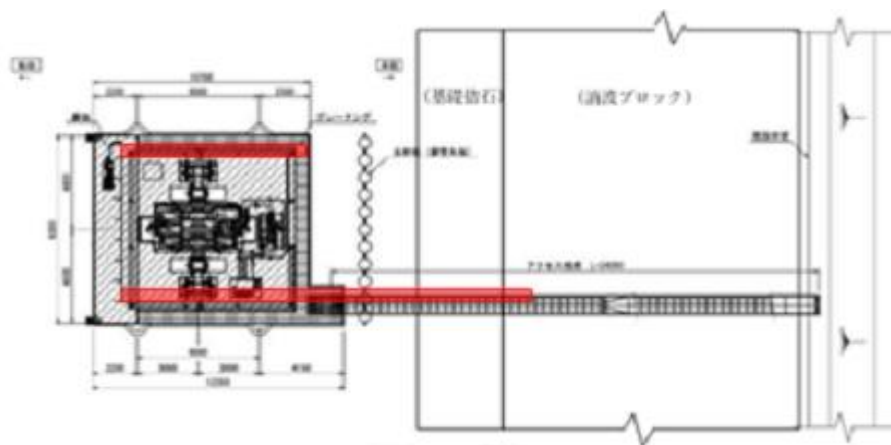


《親縄への挿芽方法》

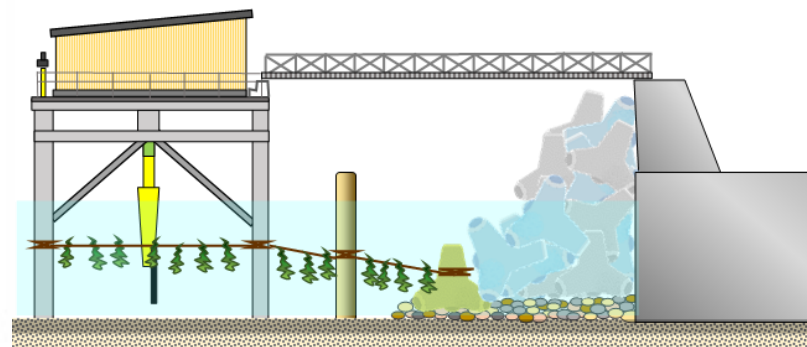
- ・幼芽の付いた種糸を30cm間隔で切断したものを1ユニットとし、30cm間隔で親縄に設置する。
- ・親糸への設置方法は、種糸の片端を2回通し法で挿芽した後に親糸に巻き付け、もう一端も2回通しで挿し込み両端を結束バンドで固定する。

《親縄の設置》

- ・ 親縄は、潜水土により波力発電所の基礎杭にラダーと平行方向で東西2ヶ所、平均水面下約2 mの位置に注連縄状に固定する。
- ・ さらに東側の親縄は、さらに波力発電所から反射板を経由して消波ブロックまで延長して設置する。
- ・ 親縄は、波力発電所の基礎杭間をクレモナ製により、発電所から消波ブロック間は流出や回収困難時の環境への影響を考慮してジュート製を使用する。
- ・ 生育状況を比較するため、新港内及び港外の沿岸域にも親縄を設置する。



《親縄の設置位置》



《親縄の設置イメージ》

③ 生育試験の作業経過

月 日	場 所	作業内容	状 況
12月20日	波力発電所	潜水土による親縄の設置	波力発電所基礎杭の東西方向、発電所～反射板、反射板～消波ブロック
	新港	陸上作業による親縄の設置	新港フィッシャリーナ(西防波堤と浮棧橋の間)
12月21日	沿岸域	漁業者による親縄の設置	烏帽子岩西側
1月 7日	波力発電所	ロッド式水中カメラによる観察	幼芽の根本部分を残して消失(食害?)
	新港	ロッド式水中カメラによる観察	順調に生育
1月21日	波力発電所	ロッド式水中カメラによる観察	一部の幼芽の根本部分を残して消失
	新港	ロッド式水中カメラによる観察	順調に生育
1月22日	新港	防波堤からの目視観察	順調に生育
1月25日	波力発電所	潜水土による親縄の回収と観察	幼芽は全滅し、消波ブロック間の親縄は流失
	新港	防波堤から親縄の回収	収穫量: 8.82kg
1月27日	新港	ブルーカーボン体験事業の試験 (小学生・園児による挿芽体験)	収穫・保管したおいたワカメを、小学生・園児が親縄に再度挿芽して経過を観察
1月31日	波力発電所	漁港内で生育したワカメの再放流	港内で生育したワカメを鉄棒に巻き付け、発電所前面の消波ブロック帯に投入(5セット)
2月 3日	新港	防波堤からの目視観察	再挿し芽のワカメは溶け始める
	沿岸域	漁業者による親縄の回収	収穫量: 228.0kg
2月18日	波力発電所	潜水土による観察	鉄棒に巻き付けたワカメは確認できず

④ 試験結果

《波力発電所周辺での育成試験》

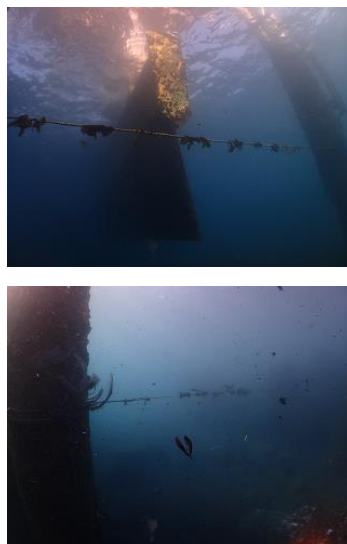
- ・1ユニット30cmで切断した種糸334ユニットは、令和3年12月20日に下表の配分でそれぞれ親縄に挿芽を行い、海域に設置して経過を観察した。
- ・親縄設置後18日目の1月7日の観察では、幼芽の根本部分を残して消失し、さらに1ヶ月後の1月21日には、幼芽の根本部分がわずかに残っている部分もあるが、ほぼ全失しており、1月25日に回収（反射板～消波ブロック間の親縄は消失）した。

■ 設置個所別の種糸ユニット数

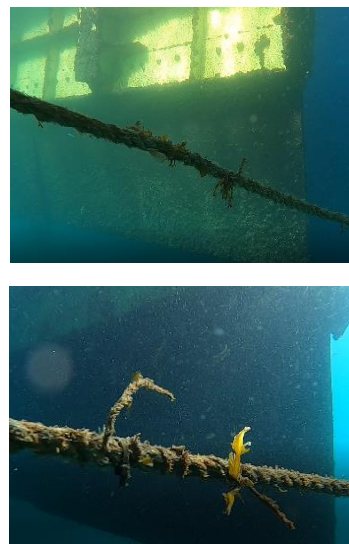
発電所 (西側)	発電所 (東側)	発電所～ 反射板	反射板～ 消波ブロック帯	漁港内	港外 (沿岸域)	合計
18	16	15	15	90	180	334



12月20日（挿芽作業）



12月20日（設置直後）



1月7日（設置後18日目）



1月25日（回収した親縄）
※右：漁港内
左3本：発電所

《新港内での育成試験》

- ・新港内のワカメは順調に生育し、1月25日に収穫した30ユニット分の重量は3kg（1ユニット当り0.1kg）であった。



12月20日（設置直後）



1月7日（設置後18日目）



1月22日（設置後33日目）



1月25日（設置後36日目）

《港外（沿岸域）での育成試験》

- ・港外（沿岸域）のワカメは、新港内より生育状況が良好であり、2月3日の収穫時重量は、新港内と比較して約13倍の228kg（1ユニット当り1.27kg）であった。



12月20日（設置前日）



2月3日（収穫・設置後44日目）



《港内生育ワカメの再放流・追加試験》

① 試験目的

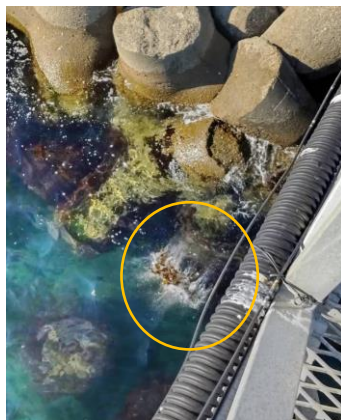
- ・ 捕食状況の観察ために吊り下げたワカメ種苗は、7日間経過後も捕食された形跡が見られなかった（2.-(4) 捕食状況調査を参照）ことから、消波ブロック帯においてに一定期間生育させたワカメの再育成を行い、食害を回避できる可能性を検証する。

② 試験方法及び結果

- ・ 発電所撤去工事開始前日の1月21日、事前に親縄を鉄棒に絡ませた港内生育ワカメを5セット作成し、アクセス栈橋上から消波ブロック帯に投入した。
※ 投入前に回収した捕食状況観察用のワカメ種苗は、ボラ(?)により捕食されていたが、今後の期待を込めて再投入した。
- ・ 2月18日、潜水により再投入箇所を確認したが、確認できなかった。



鉄筋に巻き付けたワカメ



投入



投入後の状況

(2) CO₂吸収量の試算

① 調査目的

- ・海藻類（ワカメ）育成試験による生産物のCO₂吸収量を試算する。

② 調査方法

- ・ワカメの刺し芽時に計測した幼芽重量と収穫時の重量との差を成長量とする。
- ・湿重量の成長量を乾重量に換算する。（乾重量／湿重量＝0.14）
- ・推定炭素吸収量(ton C)＝現存量(kg D.W./m²)×P/B比×炭素含有率(%)×面積(ha)
の式により、現存量×面積を成長量として推定炭素吸収量(kg C)を求める。

■ 算定条件

項 目	数 値	単 位	備 考
湿重量から乾重量への換算係数（ α ）	0.14	—	ワカメ
推定炭素吸収量（A）	試算値	kg C	$A=B \times C \times D$
成長量＜乾重量換算＞（B）	計測値× α	D. W. kg	（収穫重量－幼芽時の重量）× α
P/B比＜Production/Biomass比＞（C）	1.0	—	藻場の現存量に対する純生産量の割合
炭素含有率（D）	32.7	%	

《海藻草類の湿重量から炭素量への換算係数（※4）》

種名		乾重量/湿重量	炭素量/乾重量
ワカメ	<i>Undaria pinnatifida</i>	0.14	0.34
クロメ	<i>Ecklonia kurome</i>	0.12	0.46
ホンダワラ	<i>Sargassum fulvellum</i>	0.25	0.37
ヒジキ	<i>Hizikia fusiformis</i>	0.20	0.34
アカモク	<i>Sargassum horneri</i>	0.13	0.31
ノコギリモク	<i>Sargassum serratifolium</i>	0.10	0.31
アマモ	<i>Zostera marina</i>	0.14	0.32

《混合域・黒潮域藻場での炭素吸収量（※5）》

藻場タイプ	主な優占種	現存量(kgDW/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・アオリ場	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 X P/B ratio X 炭素含有率 X 面積

(※4) 三浦浩・伊藤靖・吉田司(2013): 漁港の生態系構造と生物現存量の推定, 土木学会論文集(海岸工学) B2, Vol.69, N0.2, 1211-1215

(※5) 独立行政法人 森林総合研究所(2004): 混合域・黒潮域の藻場における CO₂ 収支の把握, 森林、海洋等におけるCO₂収支の評価の高度化, 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集3, 101-103,

③ 調査（試算）結果

- ・波力発電所周辺で生育試験を行ったワカメは、魚類による幼芽の捕食により収穫できなかったものと想定されるため、幼芽中のCO₂が0.04g/kg/C排出されたものと試算した。
- ・試験対象区とした新港内、及び港外沿岸域でのワカメは、それぞれ順調に生育して収穫が得られたため、10.73kg/Cを吸収できたものと考えられる。
- ・当初は、アカモクの藻場造成により6.072kg/CのCO₂の固定を計画していたが、本試験でのCO₂吸収量は差し引き10.69kg/Cとなり、トータルでは計画目標を達成したものと考えられる。

■ CO₂吸収量の試算結果

親縄設置場所	UNIT数	幼芽重量 (g)	収穫量 (g)	成長量		CO ₂ 吸収量 (kg/C)
				(g)	(D.W.kg)	
発電所（西側）	18	169.2	0	▲ 169.2	▲ 0.02	▲ 0.01
発電所（東側）	16	150.4	0	▲ 150.4	▲ 0.02	▲ 0.01
発電所～反射板	15	141.0	0	▲ 141.0	▲ 0.02	▲ 0.01
反射板～消波ブロック	15	141.0	0	▲ 141.0	▲ 0.02	▲ 0.01
漁港内	90	846.0	8,820.0	7,974.0	1.12	0.37
港外（沿岸域）	180	1,692.0	228,000.0	226,308.0	31.68	10.36
差引合計	334	3,139.6	236,820.0	122,680.4	32.72	10.69

2. 平塚波力発電所周辺の深浅測量並びに生物調査

(1) 深浅測量

① 調査目的

- ・当組合では、令和3年4月24日に、あらかじめアカモクの幼胚を着底させた重量ブロックを波力発電所反射板背後の消波ブロック帯に設置し、その後の生育状況を随時観察することとしていたが、6月4日の観察時点では、殆どの重量ブロックが砂に埋没した状況となったため、以後の観察を中止した経緯がある。
- ・また、波力発電所のメンテナンス工事に携わる(株)渋谷潜水工業からは、発電所の下部が深く洗掘されている状況が報告されている。
- ・このため、波力発電所の設置に伴う海底の砂の洗掘と移動状況を確認することにより、将来、波力発電所を活用した藻場造成ブロック等の設置に際する基礎資料とする。

② 調査方法

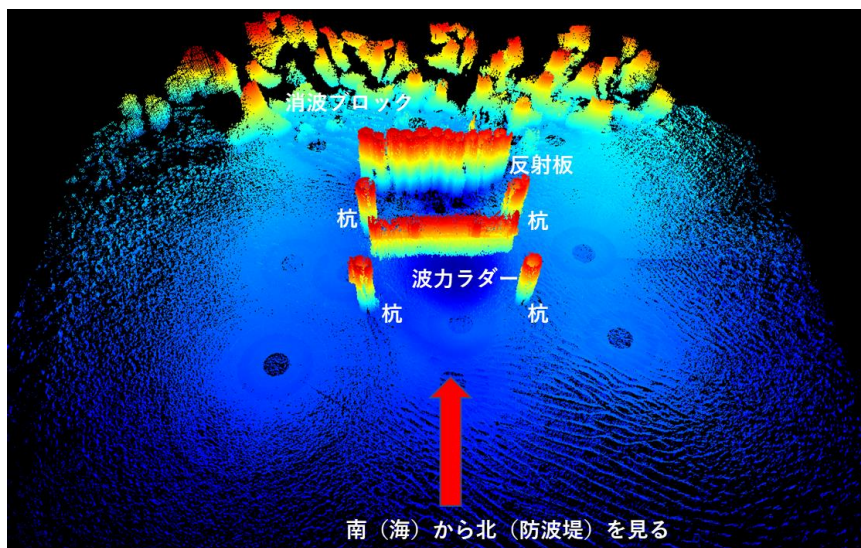
波力発電所周辺の海底を3Dスキャンソナーにより測量調査し、発電所設置に伴う海底地形の変化を確認する。



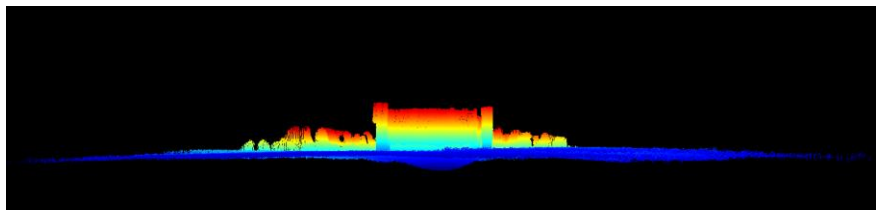
《3Dスキャンソナー》

③ 調査結果 《平塚発電所 3D解析映像は、巻末資料に掲載》

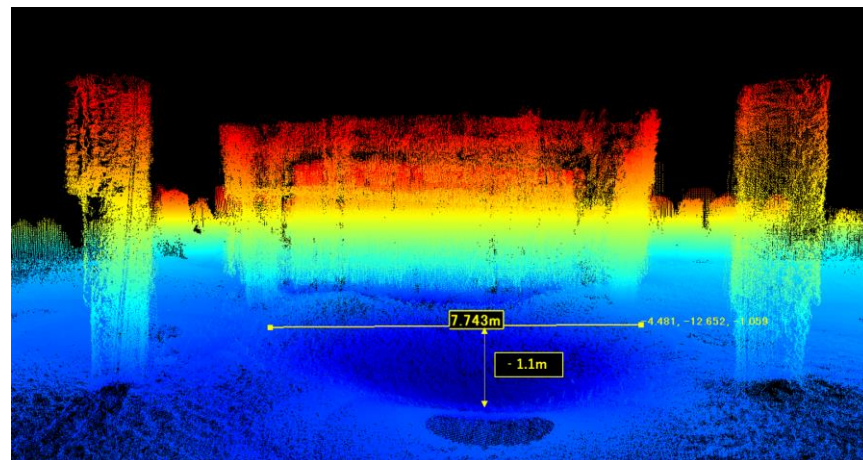
- 波力発電所の設置個所周辺の3D解析映像の結果、海底は、ラダーを中心として円状に長さ7.743m、深さ1.1m洗堀されており、反射板背後の消波ブロック側は、0.7m洗堀され、消波ブロックの捨石が洗堀により落下して溜まっている状況が見られた。



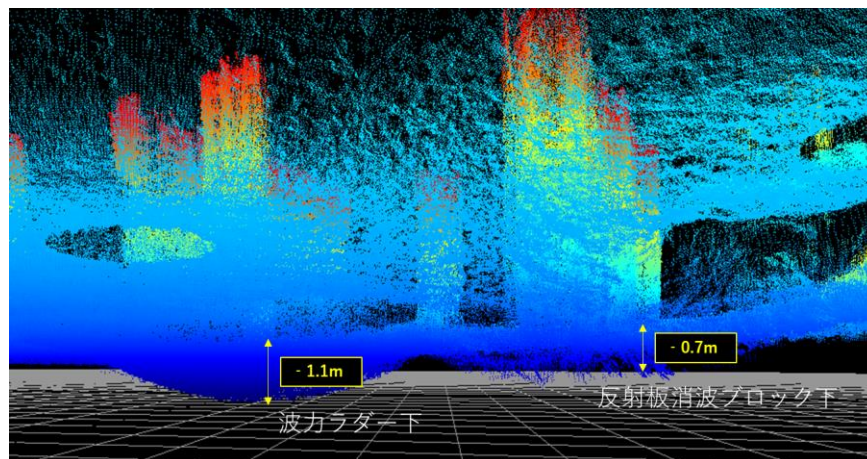
平塚波力発電所構造説明



平塚波力発電所南からの3D



東西方向洗堀長さ7.743m 深さ1.1m



波力ラダー下と消波ブロック側反射板下の洗堀深さ

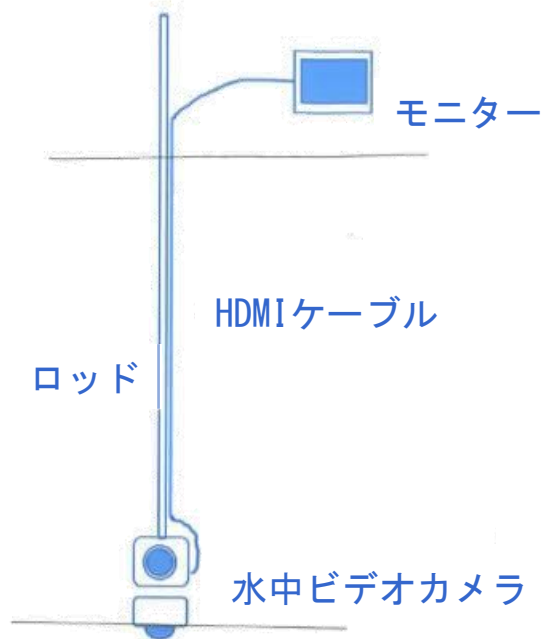
(2) 海藻類の植生調査

① 調査目的

- ・波力発電所周辺の消波ブロック帯と、新港内の海藻類の植生の現況を確認する。

② 調査方法

- ・ロッド式水中ビデオカメラの海中映像及び潜水士が採集したサンプルにより、波力発電所周辺の消波ブロック帯と、新港内防波堤(IV)の港外側に定着している海藻類の状況を確認し比較する。
- ・また、平塚漁港消波ブロック帯における過去の水中写真との比較により、藻場の形成状況を比較する。



《ロッド式水中ビデオカメラ》

③ 調査実施日

調査日	調査場所	調査内容
令和 3年12月15日	消波ブロック帯	水中ビデオカメラによる植生状況の把握
令和 3年12月20日	消波ブロック帯	消波ブロック付着海藻の採集（潜水士による）
令和 4年 1月 7日	消波ブロック帯	水中ビデオカメラによる植生状況の撮影
令和 4年 1月21日	新港内防波堤	水中ビデオカメラによる植生状況の撮影

③ 調査結果

《確認した海藻の種類》

《消波ブロック帯》

緑藻類	アオサ目	アオサ科	アオサ
褐藻類	カヤモノリ目	カヤモノリ科	セイヨウハバノリ属
	コンブ目	コンブ科	アラメ
紅藻類	スギノリ目	スギノリ科	ツノマタ属
		ムカデノリ科	キントキ属
			フダラク
			種不明
		イバラノリ科	カギイバラノリ
		ツカサノリ科	トサカモドキ属

《新港内防波堤（Ⅳ）港外側》

褐藻類	コンブ目	チガイソ科	ワカメ
		コンブ科	アラメ
	ヒバマタ目	ホンダワラ科	オオバモク



ワカメ



アラメ



オオバモク

(※：推定)



セイヨウハバノリ属と
トサカモドキ属※
(根本の紅藻)



ムカデノリ科※



ツノマタ属※



キントキ属※



カギイバラノリ※

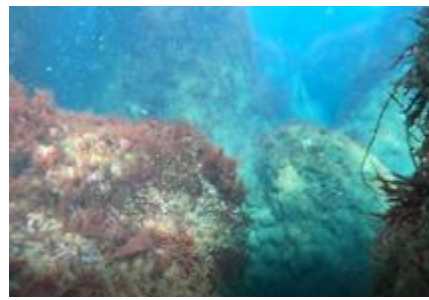


新港浮棧橋に自生するワカメ（幼芽）

《海中景観》

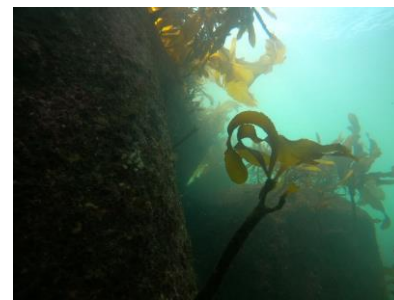
《波力発電所/消波ブロック帯》

- ・消波ブロックでは、海底から約1mの高さから水面近くの位置まで、紅藻類と褐藻類が優先して分布。



《新港内防波堤（Ⅳ）港外側》

- ・ワカメ、アラメ、オオバモクが混生し、藻場を形成。



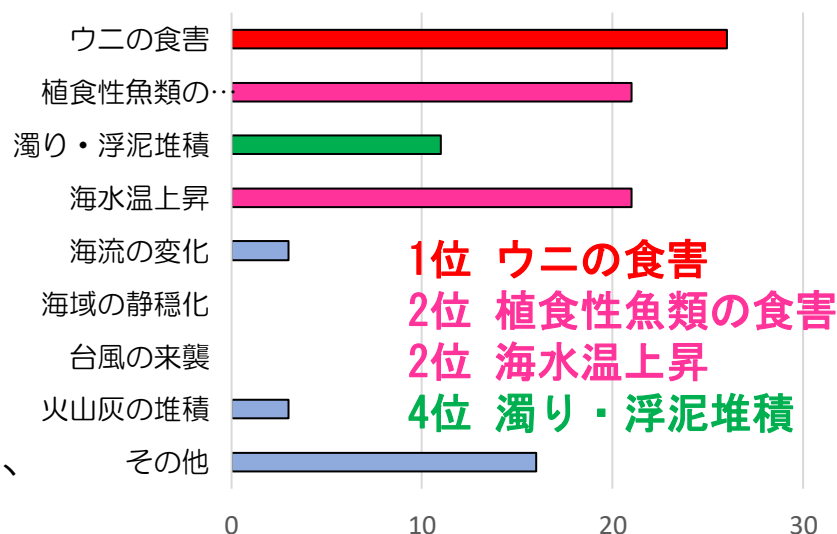
平塚市漁業協同組合/YouTube動画 《配信中》
「ひらつかタマ三郎漁港内で海藻ゾーンがあったので覗いてみた。」
<https://www.youtube.com/watch?v=eOa3HHRJ5qk>

(3) 植食性生物調査

① 調査目的

- ・藻場衰退の持続要因は、ウニと植食性魚類の食害が1、2位であり、代表的な植食性生物は、ウニ類と魚類(アイゴ・ブダイ・ノトリスズミ・ニザダイ)であり、その他腹足類では、カサガイ類、古腹足類、アマオブネ類、タマキビ類、アメフラシ類が示されており(※6)、さらに魚類では、クロダイ、タカノハダイ、メジナもあげられている(※7)。
- ・相模湾西部沿岸海域では、夏～秋にかけてカジメの食害を引き起こす主要魚種はアイゴであることが報告されており(※3)、本県沿岸で越冬をしている可能性も指摘されている(※8)。
- ・このため、植食性生物の生息状況を調査し、藻場造成を効果的に行うための対策の基礎資料とする。

○藻場衰退の持続要因(複数回答)^(※1)



(※6) 水産庁(2021): 第3版 磯焼け対策ガイドライン

(※7) 長崎県(2018): 長崎県における磯焼け対策ガイドライン

(※3) 高村正造・有馬史織・西村竜雄・相澤康(2019): 「小田原沿岸海域における藻場景観被度の経年変化と減少要因」, 神水セ研究報告, 10, 35-41.

(※8) 臼井一茂・櫻井 繁・田村怜子(2017): 2014年に神奈川県沿岸で漁獲されたアイゴの体長組成と体成分変化, 神水セ研究報告, 8, 17-21.

② 調査方法

- ・波力発電所周辺は、ロッド式水中ビデオカメラにより、蛸集する魚類を中心に確認した。尚、本調査は、令和2年度から継続して調査を行っているため、調査を開始した令和2年8月25日～令和4年1月31日までの計17回の調査結果を集計する。
- ・新港内の生物は、ロッド式水中ビデオカメラにより確認した。尚、新港内の生物については、遊漁者への聞き取り調査も合わせて行った。



《新港内の調査位置》

③ 調査実施日

調査箇所	調査実施日（委託期間内）
波力発電所周辺	12月15,20日、1月7,21,31日 計5日
新港内	12月3日、1月7,22,25日、2月1日、3月7日 計6日

③ 調査結果

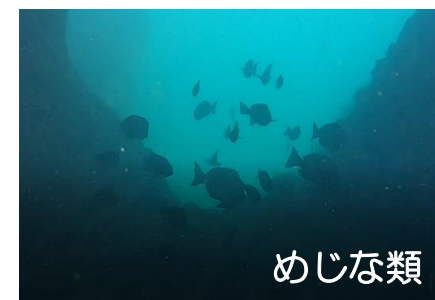
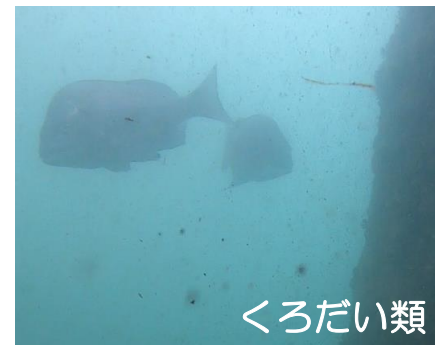
《波力発電所周辺》

- 令和2年8月25日～令和4年1月31日にかけて計17回の観察を行った結果、18科20種の魚類を確認した。
- 確認した植食性魚類は、めじな類とくろだい類が調査期間を通じて多く確認されたほか、季節的にニザダイ、タカノハダイも確認された。
- 一方、相模湾内で増加しているアイゴをはじめブダイ、消波ブロック帯でのウニ類は、確認できなかった

■ 確認魚種

ネズミザメ目	ドチザメ科	ドチザメ	スズキ目	スズメダイ科	オヤビツチャ
ニシン目	カチクチイワシ科	カタクチイワシ		チョウチョウウオ科	ハタタテダイ
ヨウジウオ目	ヤガラ科	やがら類		イシダイ科	イシダイ
スズキ目	ボラ科	ボラ			イシガキダイ
	スズキ科	スズキ		ウミタナゴ科	ウミタナゴ
		ヒラスズキ		タカノハダイ科	タカノハダイ
	アジ科	ぎんがめあじ類		ベラ科	キュウセン
	メジナ科	めじな類		ニザダイ科	ニザダイ
	タイ科	くろだい類	フグ目	フグ科	クサフグ
	カゴカキダイ科	カゴカキダイ		ハコフグ科	ハコフグ

※ 種が同定できない魚は、ひらがな表記した。 ※ 赤字は、植食性魚類



平塚市漁業協同組合/ユーチューブ動画 《配信中》
「波力発電に集まる魚たち（総集編）」

https://www.youtube.com/watch?v=F_rKdKAMkxA

《新港内》

- ・植食性魚類は、くろだい類とタカノハダイが確認された。アイゴ、ブダイ、ニザダイについては、遊漁客へのヒアリングでも確認できなかった。
- ・ウニ類、アメフラシ類、ナマコ類は、漁港施設のコンクリート面に定着しており、特に漁港最奥部の東船揚場でウニ類が多く確認された。
- ・海藻類が繁茂する内防波堤(Ⅳ)港外側は、底質がコンクリートブロックではあるが、ウニ類、アメフラシ類、ナマコ類は確認できなかった。

■ 調査個所別の確認生物

区 分		ボ ラ	くろだい 類	カゴカキ ダイ	タカノハ ダイ	ウミ タナゴ	キタ マクラ	ウニ類	アメ フラシ類	ナマコ 類
①東防波堤基部		—	—	—	—	—	—	—	○	○
②東船揚場		—	—	○幼魚	—	—	—	○	○	—
③東岸壁		—	—	—	○単	—	○単	○	—	○
④西防波堤基部		—	—	—	—	—	—	—	—	—
内防波堤 (Ⅰ)	⑤港内側	○稚魚群	○群	—	—	—	—	—	—	—
	⑥先端部	—	—	—	—	—	—	○	—	○
	⑦港外側	—	○単	—	—	—	—	—	—	○
⑧内防波堤(Ⅳ)港外側		○稚魚群	—	—	—	○単	—	—	—	—



①ウニ類と
アメフラシ類



②ウニ類



③ウニ類



④海底の状況



⑥ウニ類と
ナマコ類

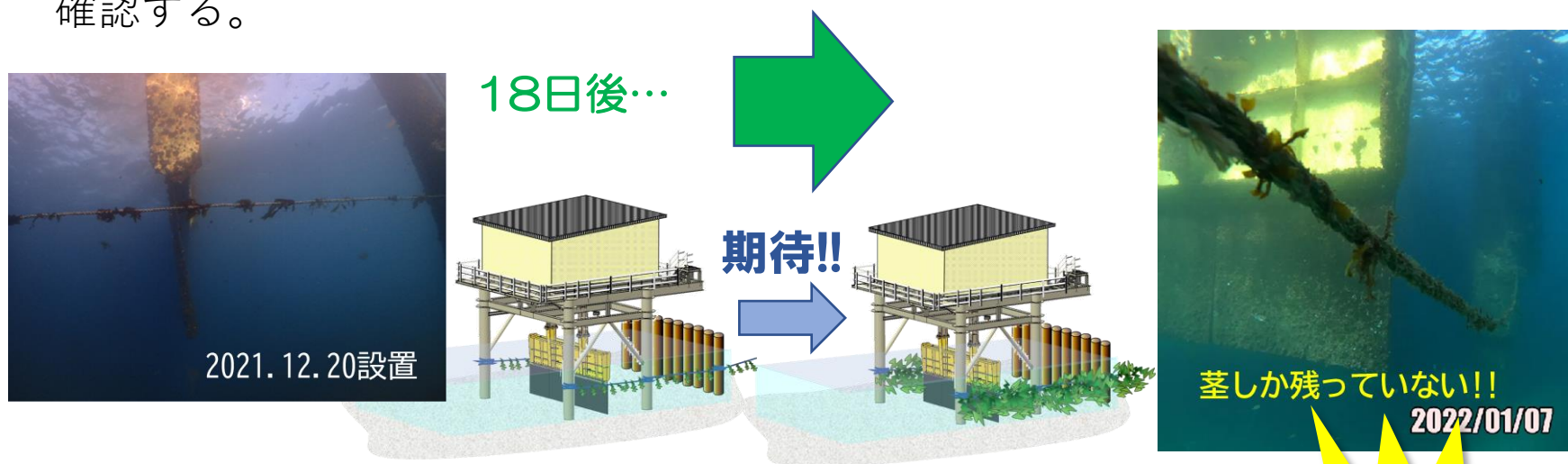


⑦ナマコ類

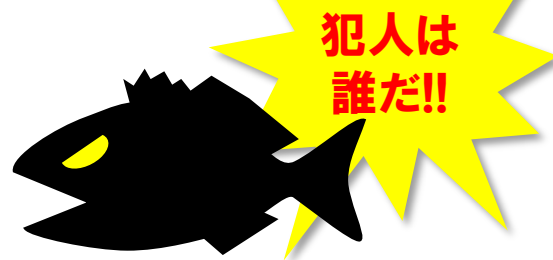
(4) 捕食状況調査

① 調査目的

- ・海藻類の生育試験のため、令和3年12月20日に波力発電所から消波ブロック帯にかけて設置したワカメの幼芽は、18日後の翌年1月7日の観察時点で、根元を残してほとんどが捕食されていた。
- ・このため、今後の藻場造成における食害対策を講じるための基礎資料として、捕食した生物の確認、及びワカメ種苗の生育状況による捕食状況の差の有無を確認する。



平塚市漁業協同組合/ユーチューブ動画《配信中》
「波力発電でのブルーカーボン増殖！」
しかしワカメが無くなった、原因は？魚か？！」
<https://www.youtube.com/watch?v=fshv6Dk5TMk>



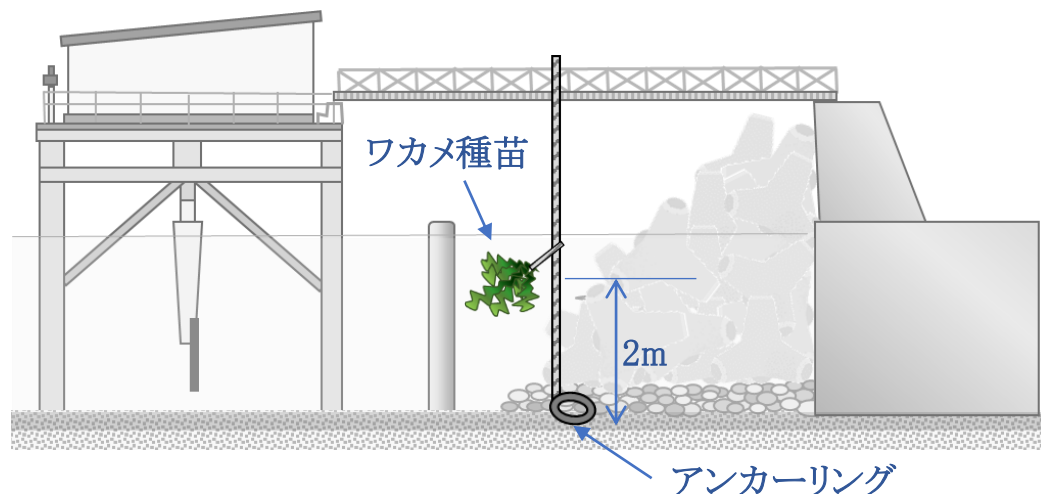
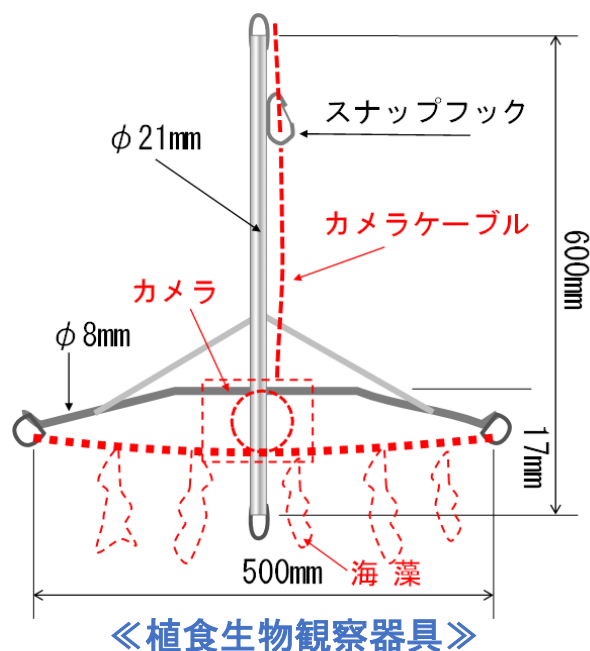
② 調査方法

《捕食生物調査》

- ・カメラレンズの目前に海藻類を垂下して生物の捕食状況を撮影できる専用のステンレス製の捕食生物観察器具を作成し、水中ビデオカメラとタイムラプスカメラにより、海中で一定時間の撮影を行い種類の確認を試みた。

《捕食状況の観察》

- ・ワカメ種苗の生育状態による捕食状況を比較するため、新港内で育成試験中の種苗（52.5 g）を「エサ用ワカメ」として、波力発電所のアクセス栈橋から海底から2 mの位置に吊り下げて設置し、経過を観察した。



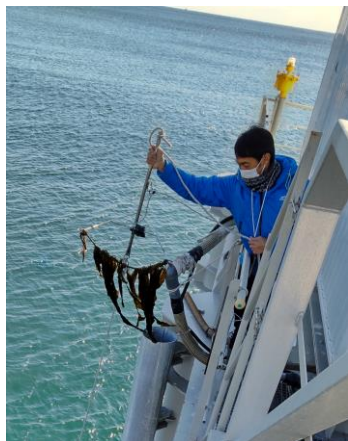
③ 調査結果

《捕食生物調査》

- ・ 1月7日から発電所撤去開始前日の1月31日まで、計7回の観察したが、捕食状況を撮影することはできなかった。

■ 調査実施状況

調査日	1月7日	18日	19日	21日	24日	27日	31日
調査時間	11:35～ 12:31	撮影 できず	9:10～ 14:05	12:13～ 12:57	9:52～ 10:06	9:25～ 12:55	10:21～ 11:07
捕食状況	無	荒天	無	無	無	無	無



調査状況



観察器具



海中での撮影状況



水中ビデオカメラの映像

《捕食状況の観察》

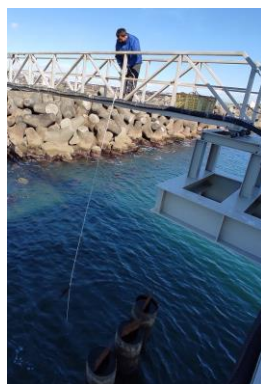
- ・ 1月21日に設置した餌用ワカメは、27日までの3回の観察において、捕食された形跡は全く無かったが、1月31日の観察時に、根と中芯の部分を残して葉体の殆どが捕食されていることを確認した。
- ・ 同日の水中ビデオカメラによる生物観察では、消波ブロックに付着する海藻類をついばむボラの群れを確認した。
- ・ この状況から、今回の捕食はボラによるものと推定されるが、ワカメを吊り下げてから1週間は捕食した形跡が無かったことから、育成試験のワカメの幼芽を捕食した魚種をボラと特定することは難しい。

■ 調査実施状況

調査日	1月21日	24日	25日	27日	31日
状 況	吊下開始	変化無し	変化無し	変化無し	中芯を残し葉体部分の殆どを捕食



ワカメ種苗



吊下げ作業



海中の種苗



捕食された状況



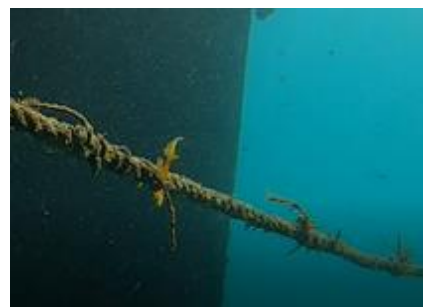
海藻をついばむボラ

■ 波力発電所周辺の藻場造成の食害対策が重要

- ・ 波力発電所周辺のワカメ種苗の育成試験は、令和3年12月20日に幼芽を挿し込んだ親縄を設置したが、18日後の1月7日の観察時に幼芽の消失を確認し、結果的に実証できなかった。
- ・ この間、平塚沖総合実験タワーで1m超の波を観測した日は7日で、うち連続9時間と10時間を記録した日も2日あった。
- ・ このため、波の影響で幼芽がちぎれて流失した可能性は否定できないが、残された幼芽は、①中芯部を残して周囲の柔らかい葉体部分が消失、②親縄に挿し込んだ種糸が引きずり出された状況が散見、③捕食状況調査でボラと推定される食害を観察、④港外沿岸部での育成した幼芽は順調に生育、の4点を考慮すると、確定はできないが、魚類による食害による可能性が高いものと推定される。
- ・ 一方、新港内で育成したワカメは、港外沿岸部の生育状況には劣るものの順調に成長しており、植食性生物は、ウニ類やくろだい類が確認されたものの、消波ブロック帯と比較して少ない印象である。
- ・ また、西泊地の浮棧橋をはじめ各所でワカメが自生しているほか、港内の一部では、良好な藻場が形成されていることが確認された。



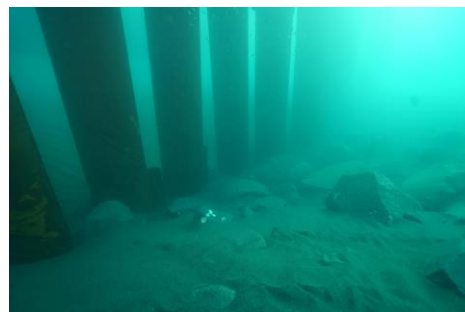
《中芯部を残して
葉体部分が消失》



《引きずり出された種糸》

■ 波力発電所の特性について

- ・平塚波力発電所は、暴風時の損壊を防ぐため、発生しうる最大波浪の力を逃がすように施設の設計を行っている。このため、潮位の変動により通常波がラダーと反射板を越波する状況や、冬季西風により斜め方向から入射する高波によって、波エネルギーがロスする状況が生じた(※9)。このロスした波は、反射板背後の消波ブロック帯に影響を及ぼしたものと推定され、波の遮蔽効果は確認できなかった。
- ・発電所下の海底や反射板背後の洗堀状況から、海底の攪拌による栄養塩や酸素の供給は期待できるが、海藻の定着基盤となるブロック等の転倒や埋没が懸念される。このため、反射板背後に母藻の投入や海藻の移植を行う場合は、海底の砂の移動を考慮する必要がある。
- ・ラダーの揺動による乱水流は、発電所下の洗堀状況から相当発生していると想定されるが、ラダー周辺に蛸集する魚類の行動からは摂食行動を阻害しているとは考えられず、むしろ蛸集効果を高めていると考えられる。
- ・河口付近に設置した発電所には、くろだい類やボラ等の汽水域でも生息する魚類が多く蛸集していることから、塩分濃度の低下による食害抑制効果は乏しいと考える。また、アイゴやブダイが確認できない原因が低塩分によるものか否かは、確認できなかった。



《反射板下は捨石が露出し、洗堀された窪みに溜っている》



《ラダーに寄り添うように蛸集するインダイ》

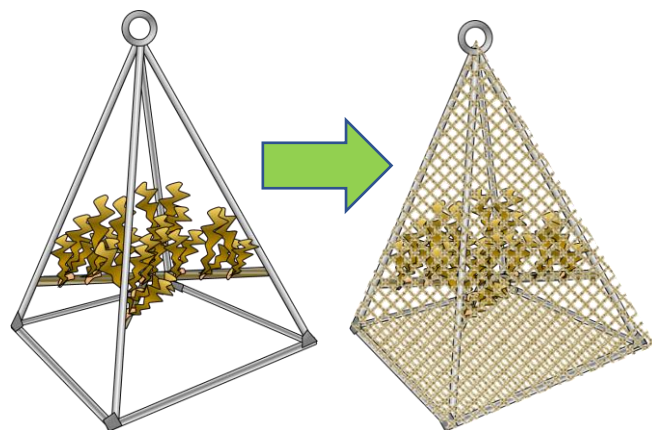
(※9) 2022年2月,第3回平塚波力発電海域実証検討会資料

■ 海藻類の育成手法の検討

- ・ 魚類が多く蟄集する波力発電所周辺での藻場造成は、食害対策が重要となるが、相模湾では、初夏から晩秋にかけてアイゴをはじめ魚類の食害が多く見られ、その後、海水温の低下とともに魚類の活性は下がり、冬場の被害は少なくなる状況である(※10)。
- ・ このため、魚類の活性化が高い時期での幼芽や幼胚の設置・投入を避けるため、種付け時期の調整や、ある程度成長させた種苗の移植等による食害回避策が有効と考えられることから、食害を受けにくい新港を活用して、幼芽や幼胚の初期育成を行った後に、発電所周辺等の藻場造成エリアに移植する手法を検討した。
- ・ ワカメやカジメ等による場合、入手した幼芽は、水温が低下する1月中頃まで新港内で初期育成を行い、その後に造成画エリアに移植して、春に胞子を放出させて再生産させる手法が考えられる。

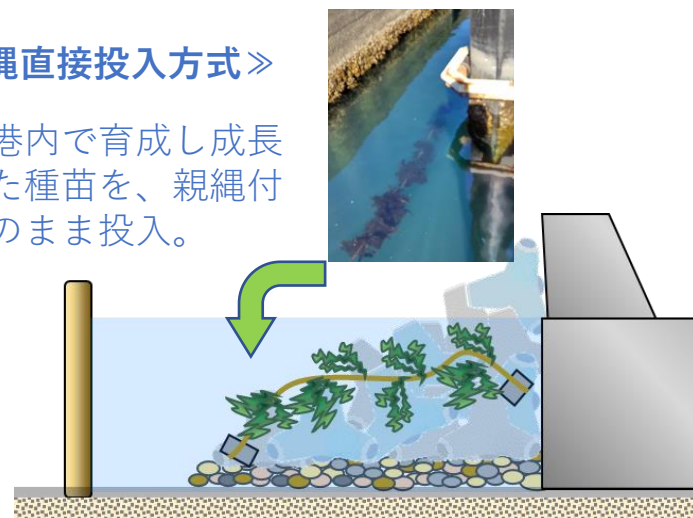
《移植用鉄筋 アングル方式》

親縄をアングルに固定したワカメ等の幼芽は、新港内で育成後、生分解性ネットで覆い、計画エリアに設置。

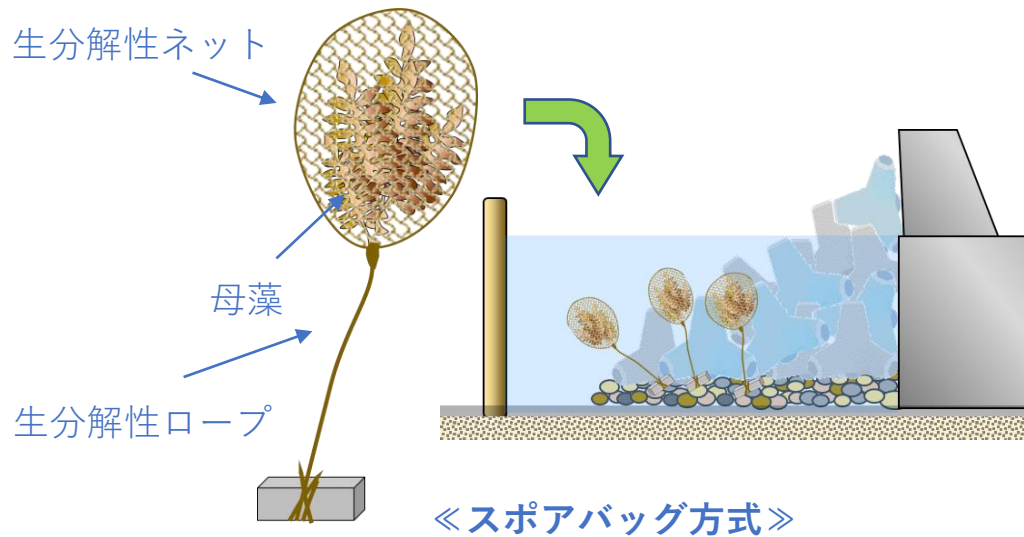


《親縄直接投入方式》

新港内で育成し成長した種苗を、親縄付きのまま投入。



- ・アカモクは、投入した母海藻の流失や幼胚着底ブロックの埋没といった過去（令和2、3年度の実証実験）の反省を踏まえて、幼胚放出段階にある母海藻を生分解性ネット製のスポアバッグに入れて投入する方法、水槽内で母海藻からブロックに幼胚を付着させて幼芽を育成し（※11）、その後、新港内での二次育成を経て造成エリアに再設置する方法、生分解ネットに付着させた幼胚を新港内で初期育成し、消波ブロックに覆いかぶす方法等が考えられる。



（※11）2011年11月,国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産大学校 生物生産学科 村瀬昇教授からの助言

■ 波力発電所を活用したブルーカーボン事業の今後の取組みについて

- ・現在、東京大学生産技術研究所等の共同研究グループは、発電性能を向上させた新型波力発電所の開発研究を進めており、2025年以降のFIT価格設定後に平塚への再設置を目指している。
- ・新型波力発電所は、実証実験で判明した波エネルギーのロス対策として、ラダーや反射板の天端の嵩上げや延長が講じられ、かつ施設規模を拡大したものとなるため、これまで以上に広い藻場造成スペースの創出が期待される。
- ・岩礁域を持たない平塚の沿岸海域において、新型波力発電所を活用した藻場造成によるブルーカーボンの実現に向けた取組みを行うことは、漁場環境の保全や漁場生産力の向上、さらにはカーボンニュートラル漁業の可視化による生産物の付加価値向上につながるため、当組合にとって重要な活動テーマである。
- ・今後、新型波力発電所が設置されるまでの期間は、新港内を中心とした藻場造成に取組み、海藻類の育成技術の向上に取組むとともに、これを活用した子供たちを中心に市民へのブルーカーボン啓発活動を展開していく。

《子供たちのブルーカーボン教室》

1月27日、新港内で育成・収穫したしたワカメを再利用して、小学生と保育園児による親縄に挿し込み体験を行った。

港内の防波堤平場での挿し芽作業は、児童、園児でも簡単に行うことができ、港内に設置したワカメの状況は、防波堤上から明瞭に観察できたため、子供たちを対象とした安全なブルーカーボン教室としての実施が期待できる。



謝 辞

本調査の実施にあたり、神奈川県水産技術センター相模湾試験場の石黒雄一場長、櫻井 繁普及員には有益なご助言とともに、ワカメ種苗の手配や調査に関する技術的指導をいただきました。また、東京大学生産技術研究所の水上洋一シニア協力員には、水中ビデオカメラでの生物の撮影協力を、また橋本産業株式会社の橋本三郎代表取締役社長からは、ジュート製ロープの提供をいただきました。株式会社東京久栄の佐藤航志主査研究員には海藻類の同定について協力をいただきました。また、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産大学校の村瀬昇教授からは、藻場造成に対する考え方や食害生物調査の必要性等について助言をいただきました。

さらに川長水産株式会社の磯崎晴一社長には、ワカメ種苗の育成試験に関わる様々な作業にご協力をいただきました。ここに記して、心から感謝申し上げます。



平塚の漁業PRキャラクター
ひらつかタマ三郎

第1章 ガイドラインの趣旨

藻場は魚介類の生活の場、産卵や稚仔魚の保育場を提供する以外に、海中の栄養塩や二酸化炭素（CO₂）を吸収・固定し、酸素を供給するなどの大きな役割を果たしている。しかし、近年の気候変動による環境変化によって、図 1-1 に示すように、藻場を構成する海藻の生産力と海藻に対する植食動物の食圧とのバランスが崩れる植食動物を介した磯焼けを中心に、全国的に磯焼けが起こるようになってきた。これに対して、漁業者が中心となって、藻場の回復・保全活動に取り組んできたところであるが、漁業者の高齢化や人手不足により従来のような対策を講じることが難しくなっている。このため、良好な藻場を維持・保全し、実効性のある磯焼け対策を推進するため、対策技術の見直しを図るとともに、ドローンでの画像取得に代表される ICT（情報通信技術）等を活用した高度な対策技術の開発にも取り組み、より実践的なガイドラインとして本ガイドラインを改訂することとした。なお、高度な磯焼け対策技術として取りまとめた「広域藻場モニタリング手法」「磯焼け対策における施肥」「捕食者を利用した藻場回復手法」の 3 つの技術については、専門性が高いことから、ガイドラインではその概要や考え方を紹介するにとどめ、別冊の「手引き」として取りまとめている（図 1-2）。本ガイドラインと併せて読んでいただき充実した磯焼け対策を実践してもらいたい。

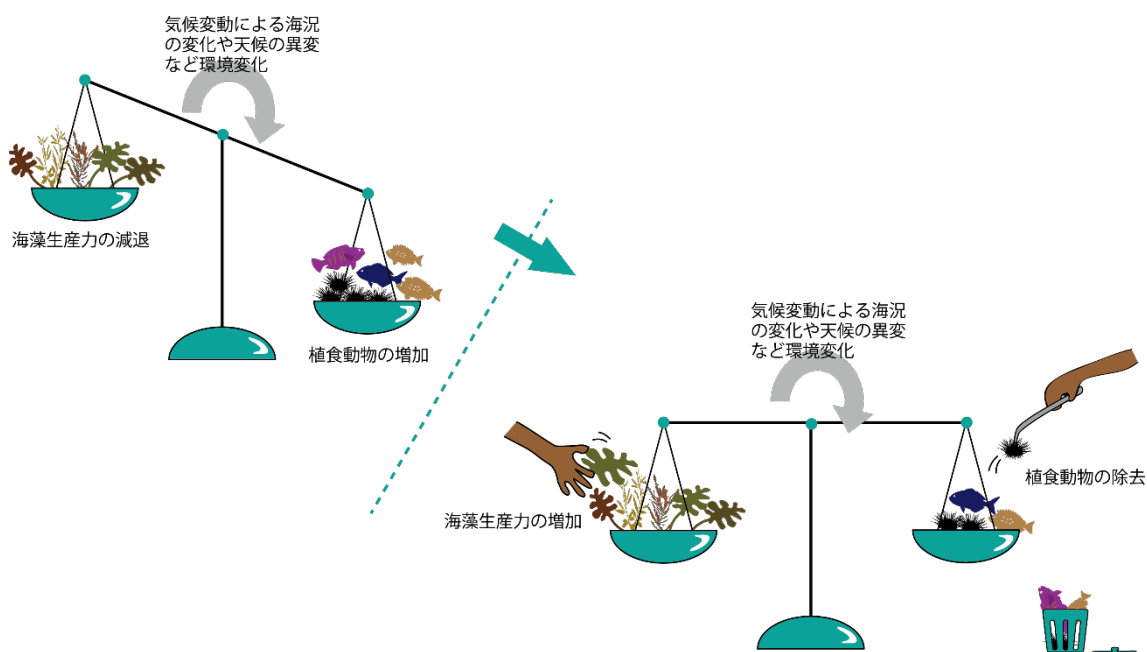


図 1-1 磯焼け対策の考え方

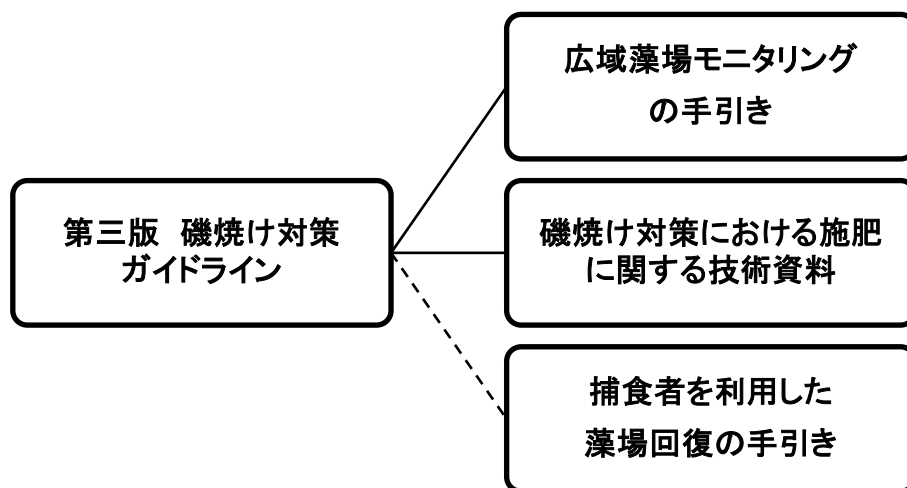


図 1-2 磯焼け対策ガイドラインの構成

また、近年では磯焼けを引き起こす要因が複合化しており、一旦藻場が回復しても再び磯焼けに戻ってしまうなど、環境が不安定な状態であることから、本ガイドラインでは磯焼け対策手法に加えて、持続的に磯焼け対策に取り組むための基本的な考え方と、活動を支える体制づくりのあり方を解説するとともに、その取り組み事例を紹介している。

本ガイドラインは 8 章からなり、その主な内容は以下のとおりである。第 1 章から第 5 章までは、藻場の種類や機能、磯焼けのメカニズム、磯焼けを引き起こす代表的な植食動物の生態、各地の藻場の現状について新たな知見を加えて整理した。第 6 章と第 7 章では、磯焼け対策の調査計画の考え方と進め方の手順、実践的な磯焼け対策手法を記載した。第 8 章では、各地の成果の発現している取り組みと、活動を持続させている取り組みなど、活動のヒントとなる事例を紹介した。また、ガイドラインの末尾には、用語集、活動に関する法令、本ガイドラインを取りまとめるにあたって参考にした文献一覧を整理している。

本ガイドラインが、水産多面的機能発揮対策事業などの活動に活用され、藻場とともに豊かな漁場が回復することを期待している。

第2章 藻場とは

2. 1 藻場の区分

藻場は、沿岸の浅海域において海藻や海草が繁茂している場所、あるいはそれらの群落や群落内の動物を含めた群集のことをいう。藻場は構成する海藻の種類により、主にコンブ場、アラメ・カジメ場、ワカメ場、ガラモ場、テングサ場およびアマモ場に区分けできる（表 2-1-1）。なお、本ガイドラインでは、岩礁域に分布するコンブ場、アラメ・カジメ場、ワカメ場およびガラモ場を対象としている。

表 2-1-1 主な藻場のタイプと構成種および分布域

主な藻場のタイプ	構成種	主な分布域
コンブ場	マコンブ(ホソメコンブ、リシリコンブ、オニコンブはその変種)、ガゴメコンブ、ナガコンブ、ミツイシコンブなどのコンブ類	北海道沿岸から宮城県(太平洋沿岸)までと青森県(日本海沿岸)までの岩礁域
アラメ・カジメ場	アラメ、サガラメ、カジメ(クロメ、ツルアラメはその変種)、アントクメ(暖海性コンブ類、アラメ・カジメ類)	アラメ場: 岩手県から高知県東部までと京都府から長崎県までの岩礁域 カジメ場: 千葉県から宮崎県、島根県から鹿児島県までの岩礁域
ワカメ場	ワカメ(ヒロメ、アオワカメを含む)	オホーツク、沖縄県を除く日本各地の沿岸の岩礁域
ガラモ場	アカモク、ヤツマタモク、ノコギリモクなどのホンダワラ類	日本各地の沿岸の岩礁域
テングサ場	マクサ、オオブサ、ヒラクサ、オバクサなどのテングサ目海藻	オホーツク・道東沿岸を除く日本各地の沿岸の岩礁域
アマモ場	アマモ、コアマモ、タチアマモなどの海産顕花(種子)植物	日本各地の沿岸の砂泥域(スガモ、エビアマモなど一部の種では岩礁域)

その他、緑藻のアオサ・アオノリ類で構成されるアオサ場などの藻場もある。これらの藻場は、海域や水深により複数の種で構成されていることが多い。

日本の藻場を構成する海藻は、生育する海域により亜寒帯性、温帯性および亜熱帯性の海藻に分けることができる(徳田, 1987)。亜寒帯性海藻には、親潮の影響を受ける海域に生育するコンブ類やヒバマタなどが該当する。温帯性海藻には、黒潮や対馬暖流の影響を受ける海域に生育するアラメ・カジメ類やワカメ、多くのホンダワラ類が該当する。亜熱帯性海藻には、黒潮の影響が強い海域に生育するホンダワラ類の一部が該当し、キレバモク、ツクシモク、マジリモク、ヒイラギモク(フタエモク)、ウスバモク、コブクロモクなどを南方系ホンダワラ類と呼んでいる(田中, 2006; 桐山ら, 2012; 長崎県水産部, 2018)。このうち、キレバモクとコブクロモクは分布の中心が九州であることから、厳密には温帯性種とされる(寺田・島袋, 2010)。



マコンブ

Saccharina japonica

葉長 1.5～3m、葉幅 20～40 cm。葉厚 1～5 mmになる。中帯部が幅広い。二年生。



ホソメコンブ

Saccharina japonica var. *religiosa*

浅所に多く葉長 0.4～1m、葉幅 5～10 cm。深所では葉長 1.5m、葉幅 15cm になる。一年生。



リシリコンブ

Saccharina japonica var. *ochotensis*

茎長 5～9cm、葉長 1.5～2.5m。中帯部がマコンブよりも狭い。二年生。



アラメ

Eisenia bicyclis

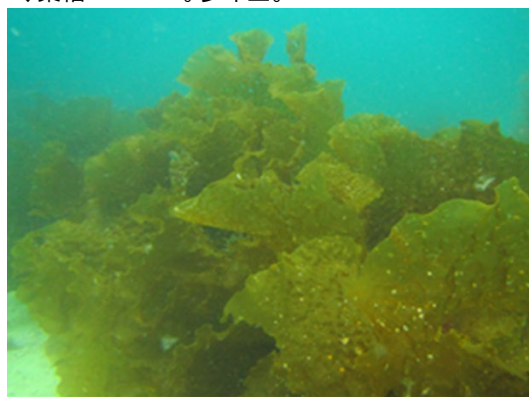
茎長 1～1.5m、まれに 2m を超える。中央葉長 15～25 cm、葉幅 5～10 cm。多年生。



サガラメ

Eisenia nipponica

干潮付近で葉長 0.4～1m、幅 5～10cm、深所では全長 1.5m を超え、幅が 8～15cm になる。多年生。



アントクメ

Ecklonia radicata

全長 1.5～3m、葉幅 20～40 cm。一年生。付着器も成熟する。

図 2-1-1 コンブ場、アラメ・カジメ場を構成する代表的な海藻種



カジメ

Ecklonia cava

茎長 60～100 cm、中央葉長 20～30 cm、葉片幅 5～6 cm になる。太平洋側に生育。多年生。



クロメ

Ecklonia cava var. *kurome*

茎長 3～50cm、中央葉長 15～50cm、葉片幅 3～10 cm。瀬戸内海と日本海・太平洋側の一部に分布。多年生。



ツルアラメ

Ecklonia cava var. *stolonifera*

茎長 5～9cm、葉長 1.5～2.5m。日本海特産。匍匐根が伸びて新芽を形成する(無性生殖)タイプとしないタイプ(クロメ型)がある。多年生。



ワカメ

Undaria pinnatifida

葉長 0.5～1.5m、時に 2m を超える。羽状に葉片が生じ、頂端まで中肋が発達する。成熟すると孢子葉(メカブ)が発達する。一年生。



アオワカメ

Undaria peterseniana

全長 1～3.5m。本州北部～九州の深所に点在する。ワカメのような羽状の葉片はなく、中肋も孢子葉も生じず、成熟すると葉面に子嚢斑が形成される。一年生。

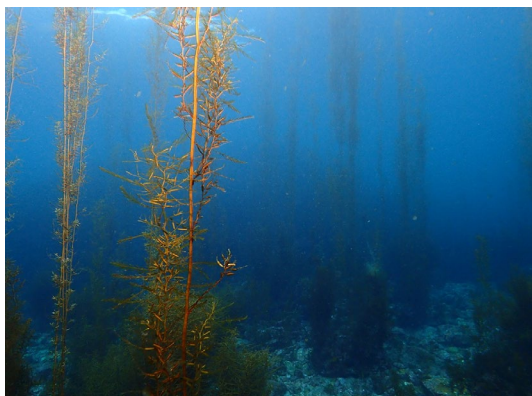


ヒロメ

Undaria undarioides

全長 1m。本州中部～九州に点在。藻体下部に中肋が発達。羽状の葉片はなく、孢子葉も生じず子嚢斑を形成し、ワカメとの中間型も多い。一年生。

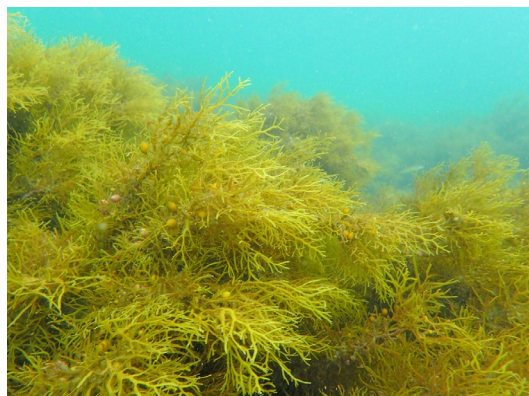
図 2-1-2 アラメ・カジメ場・ワカメ場を構成する代表的な海藻種



アカモク

Sargassum horneri

全長 1～10m。時に 20m を超える。付着器は仮盤状で、主枝が直接伸びる。気胞は円柱状。食用。一年生。



ヤツマタモク

Sargassum patens

全長 1～2m。枝と葉は区別しにくい。付着器は盤状。気胞は紡錘状。多年生。



ノコギリモク

Sargassum macrocarpum

全長 1～4m。付着器は円錐状。鋸状の大きな葉が特徴。気胞は紡錘状で冠葉がある。多年生。



ヒジキ

Sargassum fusiforme

全長 1～2m。潮間帯に生育し、干潮時には横たわりますが、冠水時には立ち上がる。食用。多年生。



ホンダワラ

Sargassum fulvellum

全長 1～2m。付着器は仮盤状。あまり枝を出さず、セイタカアワダチソウのように見える。食用。一～二年生。



マメタワラ

Sargassum piluliferum

全長 3～5m。付着器は盤状。気胞が球形で円頭。春藻場の代表的構成種。多年生。

図 2-1-3 (1) ガラモ場を構成する代表的な海藻種



オオバモク

Sargassum ringgoldianum

葉や気胞が大きい。付着器は円錐状。日本海側の葉が薄いタイプはヤナギモク(亜種か独立種)として扱う。全長 1~2m。多年生。



キレバモク

Sargassum alternato-pinnatum

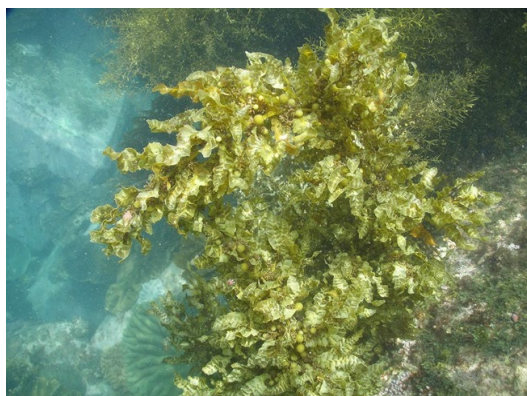
南方系のホンダワラ類。付着器は盤状。葉や生殖器床はしばしば分岐する。全長1m。多年生。



マジリモク

Sargassum carpophyllum

南方系のホンダワラ類。付着器は盤状。葉と気胞と生殖器床が混じる。全長 1~2m。多年生。



ツクシモク

Sargassum assimile

南方系のホンダワラ類。付着器は盤状。葉と生殖器床は分岐する。全長 1m。多年生。

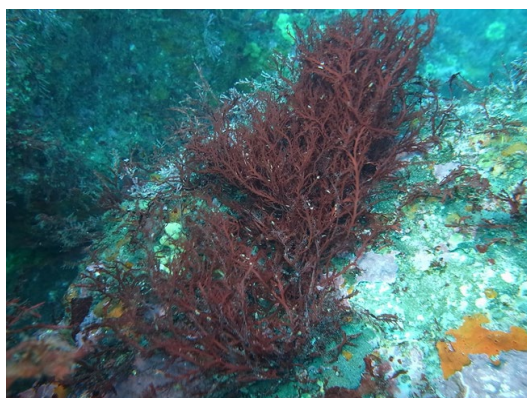
図 2-1-3 (2) ガラモ場を構成する代表的な海藻種



マクサ

Gelidium elegans

テングサ類では最もふつうの寒天原藻。太平洋中部では近縁種オオブサと混生。全長 10~30 cm。多年生。



ヒラクサ

Ptilophora subcostata

主枝に中肋がある。太平洋中南部深所に多い。寒天原藻。全長20~30cm。多年生。

図 2-1-4 テングサ場を構成する代表的な海藻種

2. 2 藻場の役割

藻場は、水産上有用な魚介類やその他の多様な生物にとっての生活の場であるとともに、沿岸の一次生産の場となっている。また、環境保全の場として生態学的に重要な機能を有し(表 2-2-1)、我々に対しても快適な景観や環境学習を提供する場として利用されている。

表 2-2-1 藻場の機能(藤田, 2001)

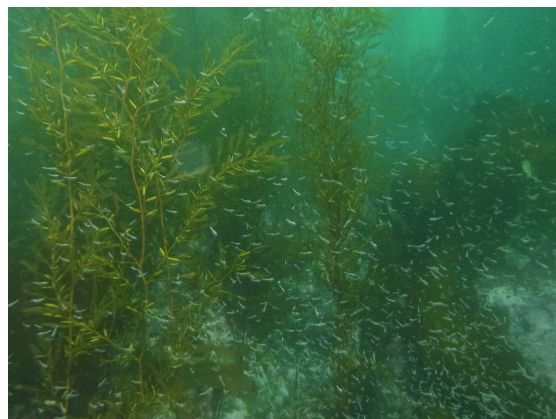
機 能	説 明
① 基礎生産	太陽の光エネルギーを捕捉・炭素固定
② 栄養吸収	栄養塩(窒素、リン、微量元素)を吸収、滞留・循環
③ 食物供給	消費・分解者に食物を提供
④ 環境創生	着生(内生)基質、小空間、隠蔽用の色彩環境を創生
⑤ 環境緩和	光や海水流動など物理的環境を緩和
⑥ 生物選択	優占種の構造・分布・化学シグナルにより利用生物を選択・制限
⑦ 環境輸出	寄り藻、流れ藻、打ち上げ藻を供給

1) 生活の場

藻場は海中で立体的な構造をとるため、魚類や無脊椎動物の生息場(図 2-2-1(1) 左)や隠れ場となり、幼稚仔期においては保護育成場となる。藻場構成種の葉上には、微細藻類などが付着し、それを餌とするアミ類、ヨコエビ類、貝類などの無脊椎動物が生息する(図 2-2-1(1) 右)。さらに、それらを餌とする魚介類の索餌場となる。魚類やイカ類にとっては産卵場になる(図 2-2-1(2) 左)。藻体が流失すると海面を漂う流れ藻となり、モジャコなどの稚仔魚やガザミなどの甲殻類の生息場や餌場となる。また、流失した葉片などが海底を漂うと寄り藻となり、アワビ、サザエ、ウニなどの磯根資源の餌になる(図 2-2-1(2) 右)。テングサ場からは高品質な寒天原料が採取でき、水産だけでなく、医療やバイオテクノロジーの分野にも貢献している。



アラメ場に蟄集する魚



ガラモ場に蟄集するアミ類

図 2-2-1 (1) 藻場を利用する生物



ガラモ場に産卵したアオリイカの卵塊



寄り藻を食べるウニ

図 2-2-1 (2) 藻場を利用する生物

2) 一次生産の場・環境保全の場

海藻は成長に伴い、藻体全体で窒素やリンなどを吸収するため、沿岸海域の富栄養化を防止する。藻場が発達することで波浪を軽減できる。海藻の光合成により海中へ溶け込んだ二酸化炭素 (CO_2) を吸収し、海中に酸素を放出する。そのため、藻場は「ブルーカーボン生態系」として CO_2 の削減効果が期待されている (コラム 2-2-1)。これら藻場の機能を評価するためには、藻場の面積や生産量 (コラム 2-2-2) を把握しておく必要がある。

3) 景観や環境学習を提供する場

海中公園 (ダイビング)、海中展望施設、釣り公園などの景観に含まれる藻場は、観光やレジャー産業の資源となる。藻場とその生態系の重要性や磯焼け対策の理解を深めるための一般市民や児童・生徒への啓蒙や環境学習の場となる。

【コラム 2-2-1】ブルーカーボン

ブルーカーボンとは、海洋生物によって隔離・貯留される炭素のことである (堀, 2017)。大気から海中へ二酸化炭素 (CO_2) が吸収されて海中に溶け込んだ炭素は、海藻や海草の光合成により体内に有機炭素として取り込まれる。この過程を「隔離」と呼ぶ。そして「隔離」された有機炭素が生態系の物質循環から外れて長期間保存されるまでの過程を「貯留」と呼び、次のケースが考えられている (図 1)。まず、藻場では脱落した藻体が「寄り藻」になったり、「流れ藻」として海面を漂って沈降したりした後、分解や無機化が起こりにくい環境下にある海底の土壌中に堆積し埋没する場合がある (堆積・埋没)。さらに、その一部が大気と海洋との CO_2 交換過程から外れた沖合深所へ移送される場合がある (深海輸送)。また、枯死や脱落した藻体の一部が分解されたり、成長に伴い放出された有機炭素のうち、海中で溶けなかったり、溶けるまで長期間かかったりする難分解性の有機炭素を示す場合がある (難分解性有機炭素)。

藻場の CO_2 の隔離量については、年間純生産量 (乾重量) の 30~35% を平均的な炭素量とし、単位面積当たりの CO_2 量に換算して試算されている (表 1)。その量は、コンブ場で $60.5\text{t}\cdot\text{CO}_2/\text{ha}/\text{年}$ 、アラメ場で $24.6\text{t}\cdot\text{CO}_2/\text{ha}/\text{年}$ 、ガラモ場で $16.0\text{t}\cdot\text{CO}_2/\text{ha}/\text{年}$ 、アマモ場で $12.6\text{t}\cdot\text{CO}_2/\text{ha}/\text{年}$ と報告されている (表 1)。各藻場の面

積から総二酸化炭素の隔離された量は、合計約 470 万 t-CO₂/年と見積もられる。この値は、日本の温室効果ガスの総排出量の 12.4 億 t (CO₂ 換算, 2018 年度) と比べるとかなり小さい値である (国環研, 2020)。しかし、水産業により排出される二酸化炭素量は、2008 年度に 574 万 t であり、藻場によって隔離されている量にほぼ匹敵すると試算される。このように藻場における隔離量は大まかに計算されているが、前述した「隔離」のケースごとに実態を明らかにし、定量的な調査研究を進める必要がある。

磯焼け対策による藻場再生や気候変動に適応する藻場形成を各地で取り組み、藻場面積を拡大させることは、水産的なメリットに加えて、藻場が CO₂ を「隔離」して「貯留」できる「ブルーカーボン生態系」として温室効果ガス排出削減に貢献できる。

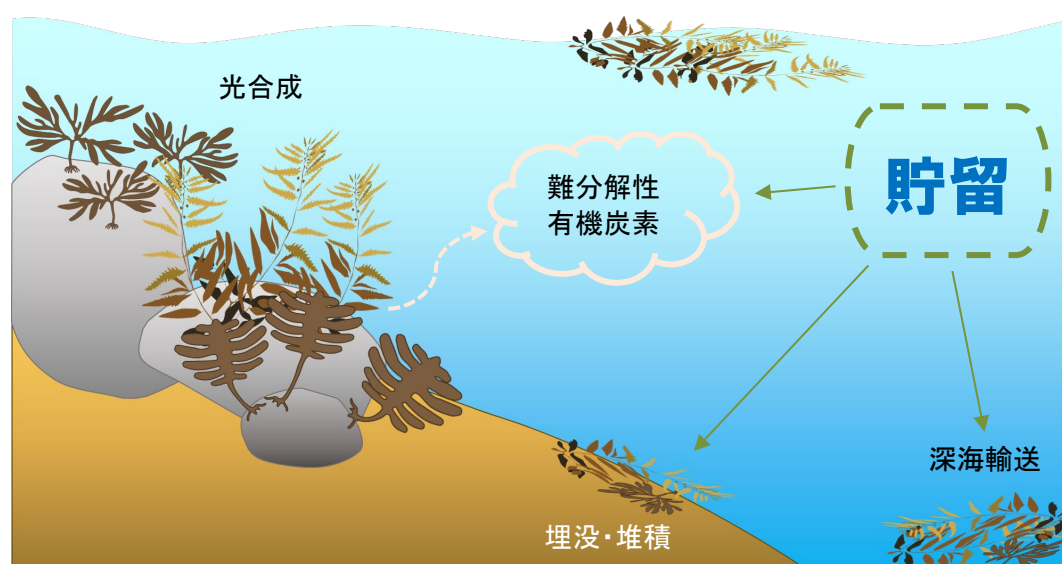


図1 藻場から流失した藻体の堆積、輸送、分解される有機炭素の「貯留」過程のイメージ (堀, 2019)

表1 日本沿岸の藻場における生産量から試算された年間の二酸化炭素の隔離量 (吉田ら, 2017) を改変

藻 場	単位面積当たり 海藻・海草生産量 (kg乾重/m ² /年)	炭素含量 (%乾重)	単位面積当たり 二酸化炭素隔離量 (t-CO ₂ /ha/年)	面積 (万 ha)	総二酸化炭素 隔離量 (万 t-CO ₂ /年)
コンブ場	6.2±6.8	30.0	60.5±71.8	2.0	116.0
アラメ場	2.1±0.4	32.5	24.6±4.7	6.3	163.2
ガラモ場	1.4±0.2	32.0	16.0±2.6	8.8	141.4
アマモ場	1.0±0.7	35.0	12.6±8.9	6.2	50.8

【コラム 2-2-2】藻場の年間純生産量と現存量

藻場の年間純生産量は、コンブ類が約 1.3 kg/m² (乾重量 : d.w.)、60~200 kg/m² (湿重量 : w.w.) とされ、アラメが約 20 kg/m² (w.w.)、カジメとクロメが約 2.8 kg/m² (d.w.)、ホンダワラ類が 0.25~8.3 kg/m² (d.w.) と報告されている (表 1)。生産量は、各種の成長様式の違いのほか、同じ種類でも生育水深、波浪や食害の影響などにより異なることがわかっている。また、年間の最大現存量に対する純生産量の比 (P/B) は、コンブ類が 1.5~2.3、アラメ類が 1.0~2.4、ホンダワラ類が 1.0~1.9 である。南方系ホンダワラ類のキレバモクは、生産量が 0.25 kg/m² (d.w.) と他のホンダワラ類の約 1/4 以下と低い値を示したが、P/B は他と同等であった。

表 1 藻場の年間純生産量、最大現存量と P/B 比

構成種名	海 域	水深 (m)	年間純生産量 (P) (kg・m ⁻² ・y ⁻¹)	最大現存量 (B) (kg・m ⁻²)	P/B	文 献
マコンブ	宮城県女川湾	1~2	1.27(d.w.)	0.83(d.w.)	1.5	中脇ら, 2001
オニコンブ	北海道羅臼	2~4	85.6(w.w.)	37.3(w.w.)	2.3	名畑・酒井, 1996
ホソメコンブ	岩手県門之浜湾	3~5	63.2~206.3(w.w.)	42.1~92.2(w.w.)	1.5~2.3	武蔵ら, 1993
ワカメ	岩手県門之浜湾	記載なし	60.9~92.1(w.w.)	47.8~75.8(w.w.)	1.2~1.4	中井ら, 1993
アントクメ	東京都伊豆大島	7	1.03(d.w.)	0.93(d.w.)	1.1	駒澤ら, 2017
アラメ	宮城県松島湾	2~4	20(w.w.)	15~20(w.w.)	1.0~1.3	吉田, 1970
サガラメ	愛知県知多半島	1	5.23(d.w.)	2.21(d.w.)	2.4	蒲原ら, 2009
カジメ	静岡県下田	5	2.9(d.w.)	3.0(d.w.)	1.0	Yokohama <i>et al.</i> , 1987
カジメ	高知県土佐湾	6~7	2.73(d.w.)	2.57(d.w.)	1.1	富永ら, 2004
クロメ	長崎県壱岐	5~7	2.79~2.88(d.w.)	1.53(d.w.)	1.8~1.9	八谷ら, 2014
ノコギリモク	京都府養老	2~2.5	2.13(d.w.)	1.26(d.w.)	1.7	Yatsuya <i>et al.</i> , 2005
ノコギリモク	石川県飯田湾	4~6	8.25(d.w.)	7.07(d.w.)	1.2	谷口・山田, 1978
ノコギリモク	山口県深川湾	8	1.60(d.w.)	1.16(d.w.)	1.4	Murase <i>et al.</i> , 2000
ヤツマタモク	京都府養老	2~2.5	2.41(d.w.)	1.61(d.w.)	1.5	Yatsuya <i>et al.</i> , 2005
ヤツマタモク	石川県飯田湾	4~6	5.53(d.w.)	4.02(d.w.)	1.4	谷口・山田, 1978
マメタワラ	京都府養老	2~2.5	1.47(d.w.)	0.98(d.w.)	1.5	Yatsuya <i>et al.</i> , 2005
アカモク	宮城県松島湾	1~5	21.42(w.w.)	19.21(w.w.)	1.1	谷口・山田, 1988
フシスジモク	北海道色丹半島	1	0.95(d.w.)	0.90(d.w.)	1.1	津田・赤池, 2001
フシスジモク	京都府網野	4~7	1.11(d.w.)	0.84(d.w.)	1.3	八谷ら, 2007
ヨレモク	京都府舞鶴	1~1.3	4.04(d.w.)	2.12(d.w.)	1.9	八谷ら, 2007
ヨレモク	京都府養老	2~2.5	1.46(d.w.)	1.11(d.w.)	1.3	Yatsuya <i>et al.</i> , 2005
ヨレモク	京都府網野	4~5.5	0.71(d.w.)	0.49(d.w.)	1.4	八谷ら, 2007
エゾノネジモク	宮城県牡鹿半島	1~2	0.90(d.w.)	0.81(d.w.)	1.1	Agatsuma <i>et al.</i> , 2002
エゾノネジモク	宮城県牡鹿半島	2~3	1.96(d.w.)	1.83(d.w.)	1.1	村岡・能登谷, 2003
スギモク	秋田県男鹿半島	1~3	10.48(w.w.)	10.35(w.w.)	1.0	中林・谷口, 2002
ジョロモク	京都府養老	2~2.5	1.20(d.w.)	0.78(d.w.)	1.5	Yatsuya <i>et al.</i> , 2005
ジョロモク	京都府網野	3~4	0.75(d.w.)	0.77(d.w.)	1.0	八谷ら, 2007
アキヨレモク	京都府舞鶴	0.5~1	3.95(d.w.)	3.04(d.w.)	1.3	八谷ら, 2007
キレバモク	長崎県見崎	5~6	0.25(d.w.)	0.23(d.w.)	1.1	村瀬ら, 2017

2. 3 藻場の経済的価値

藻場の水産的経済効果は、藻場のタイプや漁獲される魚介類の種類によって異なる。藻場造成事業における藻場の経済効果について、過去の報告によれば、コンブ場では 1.5 万円/㎡、アラメ・カジメ場ではサザエ・ウニ・アワビ類などの餌場として 1.7 万円/㎡、ガラモ場など磯漁の漁獲から 2.0 万円/㎡が見込まれている（大野，1996）。稚魚期には藻場に生息していながら、成長に伴って別の場所へ移動する種類が多く、算出は難しいが、ガラモ場での稚仔魚生産の経済効果は、瀬戸内海のシロメバルで調べられ 54.0 万～72.5 万円/ha と報告されている（小路，2009）。また、藻場構成種は海中の富栄養化の原因となる窒素とリンを吸収して成長するため、藻場には水質浄化機能がある。窒素とリンの固定量は藻場のタイプにより異なり、コンブ場、アラメ場およびガラモ場では窒素固定量が 112～136 gN/㎡/年、リン固定量が 7.8～8.5 gP/㎡/年である（表 2-3-1 左側）。一方、平成 21 年度版東京都下水道事業年報より、下水処理場における窒素とリンの 1t 当たりの処理費用を推計すると、それぞれ 2,070 万円、1 億 4,820 万円となる（水産庁，2011）。この下水処理コストを適用すると、藻場 1 ha 当たりの水質浄化の評価額は、窒素で 2,312 万～2,812 万円/年、リンで 1,034 万～1,258 万円/年と見積もられる（表 2-3-1 右側）。

表 2-3-1 藻場タイプ別窒素およびリンの固定量と評価額（水産庁，2003，2011）

藻場のタイプ	藻場 1 ㎡当たりの年間固定量		藻場 1 ha 当たりの年間評価額	
	窒素 (gN/㎡/年)	リン (gP/㎡/年)	窒素 (万円/ha/年)	リン (万円/ha/年)
コンブ場	135.85	8.49	2,812	1,258
アラメ場	124.53	7.78	2,578	1,153
ガラモ場	111.70	6.98	2,312	1,034

一方、藻場による CO₂ 隔離量については、アラメ場では年間で 24.6t-CO₂/ha/年と試算されている（コラム 2-2-1 の表 1）。これをもとに CO₂ 隔離量の貨幣化を試みると、EU-ETS（欧州連合域内排出量取引制度）による CO₂ 価格が 2020 年 3 月には 24 ユーロ（約 2,895 円/t-CO₂）であったのが（環境省，2020）、2020 年 7 月には 30 ユーロ（約 3,700 円/t-CO₂）の高値を付けた（ニューラル，2020）。これらの情報から単純に計算すると、1 ha のアラメ場の場合には年間で約 71,217～91,020 円/年と見積もられる。

海藻 1 ha の CO₂ 固定価格

= 欧州連合域内排出量取引制度の CO₂ 価格 × 海藻の CO₂ 固定量

例：アラメ・カジメ場の場合

（欧州排出権取引 2020 年 3 月の価格の場合）

= 2,895（円/t-CO₂）× 24.6（t-CO₂/ha/年） = 71,217（円/ha/年）

（欧州排出権取引 2020 年 7 月の価格の場合）

= 3,700（円/t-CO₂）× 24.6（t-CO₂/ha/年） = 91,020（円/ha/年）

なお、窒素、リンおよび CO₂ の経済的価値の試算については、深海輸送などの貯留過程（コラム 2-2-1）の定量的評価を考慮して、さらなる精査が必要である。

2. 4 藻場構成種の生活史

藻場構成種のコンブ類、ホンダワラ類、テングサ類の生活史を図 2-4-1 に示す。

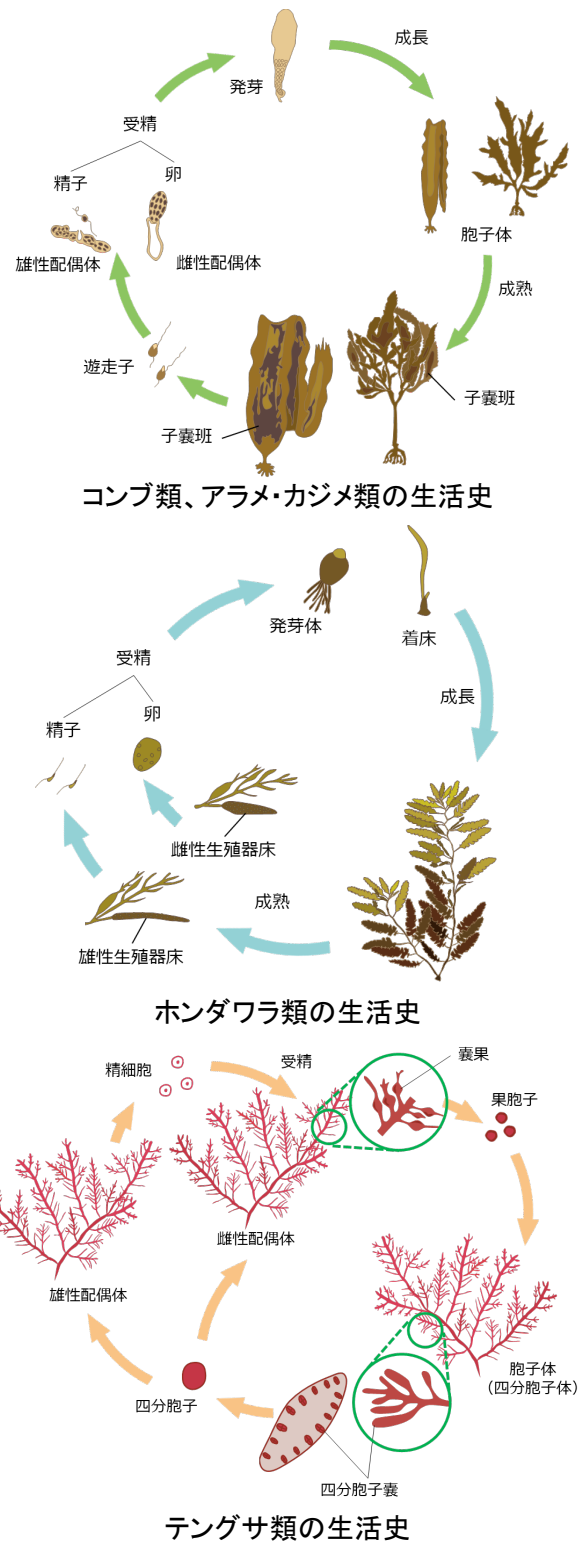


図 2-4-1 コンブ類、ホンダワラ類、テングサ類の生活史

コンブ類（アラメ・カジメ類を含む）では、藻場をつくる藻体は雌雄の区別のない孢子

体である。胞子体は主に秋に子嚢斑を形成し、そこから放出された遊走子は海底に着底し発芽すると雌または雄の区別ができる配偶体になる。雌性配偶体に卵、雄性配偶体には精子が作られ、それらが受精して、発芽すると胞子体へと成長する。胞子体の寿命はマコンブが2年(中原, 1993)、三重県沿岸のアラメが7~8年、カジメが5年(Maegawa, 1990)と報告されている。

ホンダワラ類の多くの種類では、藻場をつくる藻体は雌雄が異なり、主に春~夏に雌性の株と雄性の株の上に生殖器床と呼ばれる生殖器が形成され、それぞれで卵と精子が作られる。受精した卵が発芽すると幼胚となり、海底に着底して大型の雌か雄の藻体に成長する。アカモクは一年生であるが、多くのホンダワラ類は多年生である。多年生の寿命は付着器に形成される成長輪(年輪)から推定できる種があり、利尻島沿岸のフシスジモクが6~7年(名畑ら, 1980)、青森県沿岸ではヨレモクが約9年(桐原ら, 2003)、ノコギリモクが約9年(村瀬, 2005)と報告されている。

テングサ類は、雌または雄の区別がない胞子体(四分胞子体)と雌または雄に区別ができる配偶体の3つの藻体が存在し、それらは基本的に同形同大である。テングサ類のマクサは、各藻体から放出される胞子から発芽するものと、匍匐枝からの栄養繁殖も認められ、多年生で寿命が3年と報告されている(藤田, 2004)。

藻場構成種の生活史を知ることが重要であり、実際の成熟や繁茂、寿命などは海域により異なるため、磯焼け域における回復や藻場造成で母藻を必要とする場合に備えて、事前の現場調査により成熟期や繁茂期を把握しておくことが大切である。

2. 5 藻場の季節的消長

1) 多年生海藻が構成する藻場の季節変化

多年生海藻は、季節変化をしながら一年中枝葉が認められる(図2-5-1)。

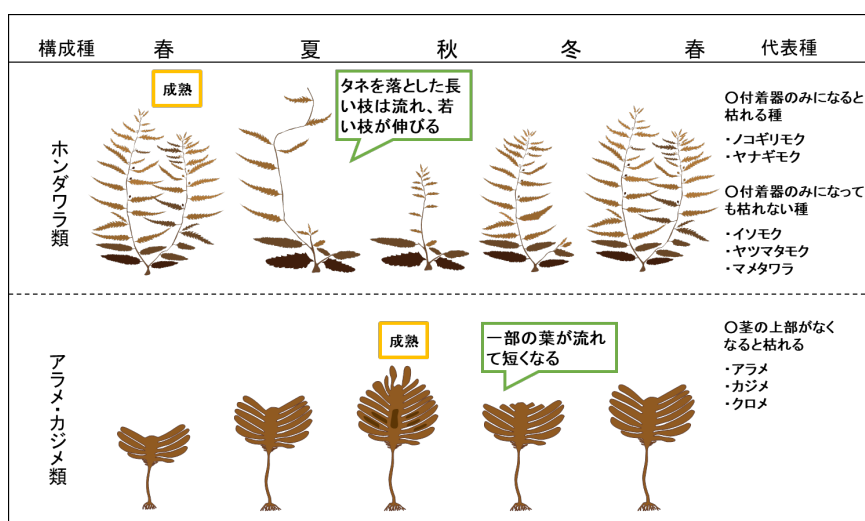


図2-5-1 多年生海藻の季節変化(吉村, 2011を改変)

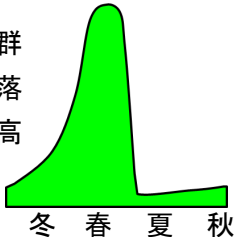
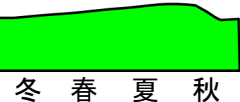
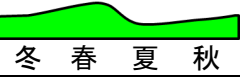
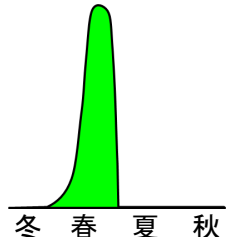
同じ場所で藻場の観察を続けていると、海藻が繁茂している季節と衰退している季節が認められる。一般的に、多年生ホンダワラ類は晩秋~春に伸長し、春~夏に成熟(生殖器床を形成)して幼胚を出すと、枝(主枝)が茎から離れて流失する。しかし、付着器の基

部には、すでに若い枝がある程度伸びている。アラメ・カジメ類は、秋の成熟で藻体量（現存量）が増加するが、秋～初冬に遊走子を出した葉片が流失し、藻体量が減少する。

2) 藻場の類型化

九州沿岸の多年生海藻で構成される藻場が、2000年代より毎年春～初夏だけに形成されるようになり、この藻場を「春藻場」として区別することが提案された（吉村ら，2009）。この春藻場を含めた藻場の類型区分が、表 2-5-1 に示すとおりである。

表 2-5-1 九州沿岸における藻場の類型区分（中嶋，2010 を改変）

植生	大分類	中分類	小分類	定義	主な構成種	景観の変化の 模式図
多年生	四季藻場	大型海藻藻場	ガラモ場	周年維持される藻場	温帯性ホンダワラ類(ノコギリモク、オオバモク、ヒジキなど)	群落高 
			アラメ場		アラメ・カジメ類	
		小型海藻藻場	テングサ、有節サンゴモ類などの多年生小型海藻			
			春藻場		春～初夏に毎年同じ所に形成される藻場	多年生の亜熱帯性と温帯性ホンダワラ類(キレバモク、マメタワラ、ヤツマタモクなど)
	一年生	一年藻場		春～初夏に形成される1年限りの藻場 ※同じ場所に形成されるとは限らないのが特徴	一年生のアカモク、ワカメ、アントクメ	

この類型区分では、多年生海藻で形成される「四季藻場」と春藻場、一年生海藻で形成される「一年藻場」の3つに分けられる。四季藻場は、年間通じて繁茂する大型海藻と小型海藻で構成され、前者はアラメ・カジメ類やホンダワラ類、後者はテングサと有節サンゴモ類などが相当する。一年藻場と春藻場は混同されやすいが、複数年形成される春藻場

は付着器が残るため、同じ場所に形成されるのに対し、一年生海藻は1年ほどで枯れるため、同じ場所に藻場が形成されるとは限らない点が大きく異なる。





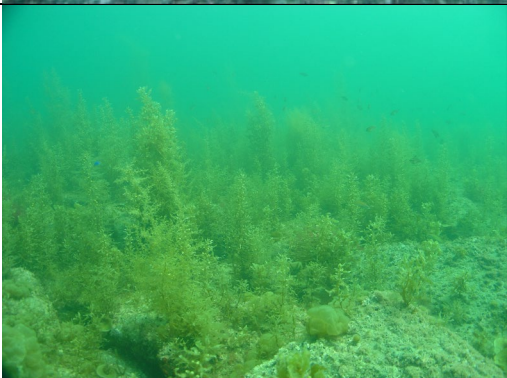



	冬～春	夏～秋
四季藻場 大型海藻		
四季藻場 小型海藻		
春藻場		
一年藻場		

図 2-5-2 四季藻場、春藻場、一年藻場の景観

3) 春藻場の特徴

春藻場は、多年生海藻の枝葉が茂る期間が春を中心とする半年程に限られ、残りの期間はまるで磯焼けのような景観を示す。春藻場は、付着器から栄養繁殖するヤツマタモク、マメタワラなどの温帯性ホンダワラ類やキレバモク、ツクシモクなどの南方系ホンダワラ類で構成される。春藻場の仕組みについては次のように考えられている。四季藻場で植食性魚類の影響が大きくなり、ノコギリモクなどの温帯性ホンダワラ類では茎や付着器の基部、アラメ・カジメ類では茎の末端付近にある成長点（分裂組織）まで食べられると枯れてしまう。また、アラメ・カジメ類は高水温にも弱い（村瀬ら，2018）。この結果、付着器から枝葉を再生できる種だけが生き残り、春から初夏にかけて繁茂する。夏から初冬には岩礁表面に付着器やごく短い藻体のみ残るため、磯焼けそっくりの景観に転ずる（図 2-5-3）。マメタワラなどは高水温下ではごく短い藻体で過ごす場合もある（土屋ら，2011）。南方系ホンダワラ類はタネを出して枝が流失した後、しばらくは基部だけの状態で過ごし、水温が低くなる頃から新しい枝を伸ばすという特徴を持つ（八谷ら，2011）。九州沿岸や高知県（中村，2012）に多く認められるが、伊豆半島内浦湾でもこのような藻場（マメタワラが優占）が知られている。

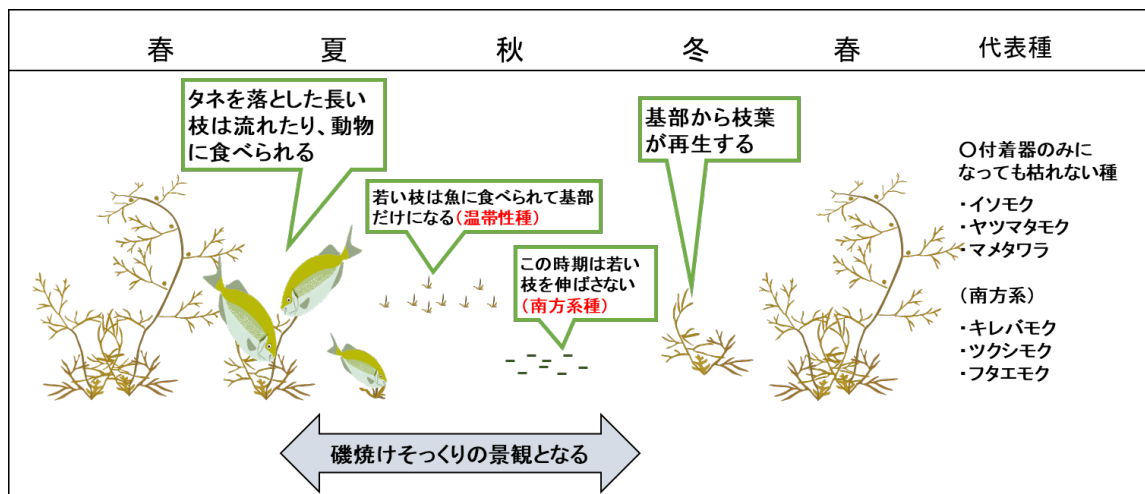


図 2-5-3 春藻場が維持される仕組み（吉村，2011 を改変）

浅海養魚場における栽培ワカメ, *Undaria pinnatifida* の 生長過程とN, P 吸収速度

末代勇樹¹・門脇秀策²

The Growth Process and N, P Uptake Rates of *Undaria pinnatifida* Cultured in Coastal Fish Farms

Yuuki KITADAI¹ and Shusaku KADOWAKI²

Abstract: Biological water purification by culturing *Undaria pinnatifida* in coastal fish farms was estimated as a function of dissolved inorganic nutrients, light intensity, and water temperature. *U. pinnatifida* was cultured from 1 m to 4 m depths in coastal fish farms from November, 2002 to May, 2003. The maximum growth rate and growth of blade length were recorded 4.2 cm/day in growth phase, reached to 182 cm in maturation phase at 2 m depth. Average contents of total nitrogen (N) and total phosphorus (P) in blade part of *U. pinnatifida* reached to 19 mg N/g dry and 2.3 mg P/g dry in all phase. The maximum N, P uptake rates by blade part of *U. pinnatifida* were 3.1 mg N/m²/day and 0.54 mg P/m²/day at 2 m depth. Michaelis-Menten's constants of N, P uptake rates were 17 µg N/l and 6.2 µg P/l. Downward irradiance of 670 µmol/m²/s resulted in the maximum N, P uptake rates. N, P uptake rates by blade part of *U. pinnatifida* at 16°C were 2.5 mg N/m²/day and 0.44 mg P/m²/day. Water temperature coefficients of N, P uptake rates were 1.090 and 1.081. The N and P uptake rates of cultured *U. pinnatifida* were formulated from dissolved inorganic nutrients, light intensity and water temperature characteristics found in coastal fish farms, and the calculated values corresponded well with the observed values.

Key words: *Undaria pinnatifida*; Coastal fish farm; N, P uptake rates; Growth process

ワカメ, *Undaria pinnatifida* はコンブ目 Laminariales チガイソ科 Alariaceae に属し (吉田 1998), 日本の沿岸域で低潮線下から 5 m 深の岩上に生育する (新崎 2002)。我国のワカメ養殖は 1962 年に栽培技術が確立されて以来, 全国各地に普及し (秋山 1992), 2002 年の年間生産湿重量は 53,816 t であった (農林水産省統計部 2004)。栽培ワカメの生長は早く, 種系冲出し 5 ヶ月後で葉長 150 cm に達する (徳田ら 1987)。また, 栽培ワカメの最大養殖密度は幹綱 1 m 当り湿重量で 17 kg と報告されていることから (斎藤 1964), 内湾の富栄養化を低減するためにワカメのバイオマスによ

る海域浄化試験が行われた (五十嵐ら 1991, 1992)。

一方, 浅海養魚場では持続的に生産可能な魚類養殖の確立を目指して, 富栄養化の抑制と同時に貧酸素水の形成を解消する生物的な水質浄化を目的とした具体的な方策が求められている。そこで, 海面給餌養魚場で海藻を周年にわたって栽培し, その海藻を藻食性魚介類に摂餌させて環境負荷物質を循環する環境保全型の複合エコ養殖が提唱されている (門脇 2001, 2004)。

しかし, 海藻の周年栽培による水質浄化を確立するためには, 冬季に生長する海藻による水質浄化能を定

2004年7月24日受付: 2004年10月18日受理。

¹ 鹿児島大学大学院連合農学研究科海洋生産環境学講座 (Laboratory of Marine Production and Environmental Studies, Graduate School of Agricultural Science, Kagoshima University, Korimoto 1-21-24, Kagoshima 890-0065, Japan)。

² 鹿児島大学水産学部資源育成科学講座 (Laboratory of Aquatic Resource Science, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Shimoarata 4-50-20, Kagoshima 890-0056, Japan)。

量化する課題が残されていた。また、浅海養魚場の水質浄化を目的とした海藻の全窒素(N)、全燐(P)吸収速度を環境諸量との関係で定式化した解析は、前報(来代・門脇 2003, 2004)の春季に生長するマコンブおよび夏・秋季に生長するアナアオサの論文以外に見当たらない。

そこで、本研究は浅海養魚場において海藻を周年栽培し水質浄化を図る方策の一環として、冬季に生長するワカメの生長過程を調べ、N、P吸収速度と栄養塩濃度、光量および水温との関係を定式化した。また、本研究で得た算定値と実測値とを比較し算定式の検証を行った。

材料および方法

環境調査

本調査は2002年11月9日～2003年5月14日にわたって実施した。研究水域はFig. 1に示したとおり、八代海南西域に位置する熊本県御所浦町(32°N, 130°E)のSt. A(横浦)、St. B(牧本)およびSt. C(与一浦)の水深13～26 mのブリ、トラフグおよびマダイの養魚場で実施した。各St.の透明度、光量、溶存態無機窒素(以下、DIN)濃度および溶存態無機燐(以下、DIP)濃度は、毎週一回測定分析した。試水は1 m層で採水し、DIN濃度およびDIP濃度をインドフェノール法、ナフチルエチレンジアミン法、カドミウムカラム還元法およびモリブデン法(Strickland and Parsons 1972)により、島津社製UVmini-1240型分光光度計を

用いて分析した。St. Bにおける光量は、LI-COR社製LI-190SA型光量子計を用いて、1.3 m層および2 m層で連続記録した。下方向光量はLambert-Beerの式より消散係数を求め算出した。各St.の水温は、YSI社製600R型センサーを用いて、海面下3 m層で3時間毎に記録した。

生長およびN、P吸収実験

ワカメの種糸(φ2 mm)は長崎県島原市吉田水産から移入した。種糸の固定方法は10 cmに切断した種糸をクレモナ幹綱(φ20 mm)に差し込む方式とした。種糸の差込間隔は10 cm, 25 cm, 50 cmおよび100 cmを設定して、差込間隔による生長の差異を調べた。幹綱は海面下1～4 m層に1 kgの重りを付けて垂下した。

ワカメの胞子体はFig. 2に示したとおり、葉状部、茎部および胞子葉部の三部位に区分して計測した。ワカメの生長は茎部にカラービニール製ネグリで個体識別して計測した(船野・石川 1970)。葉長、茎長および胞子葉長は、1 m層毎の標識ワカメ2個体を対象にして2週間毎に計測した。葉長の生長速度は、葉状部に直径5 mmの孔を2週間毎に開けて孔の移動距離を期間日数で除して算出した(Mann 1973)。生長部位は、葉状部の生長に伴って葉状部の上方に移動することから、孔の開口位置は、葉長75 cm未満の個体では葉状

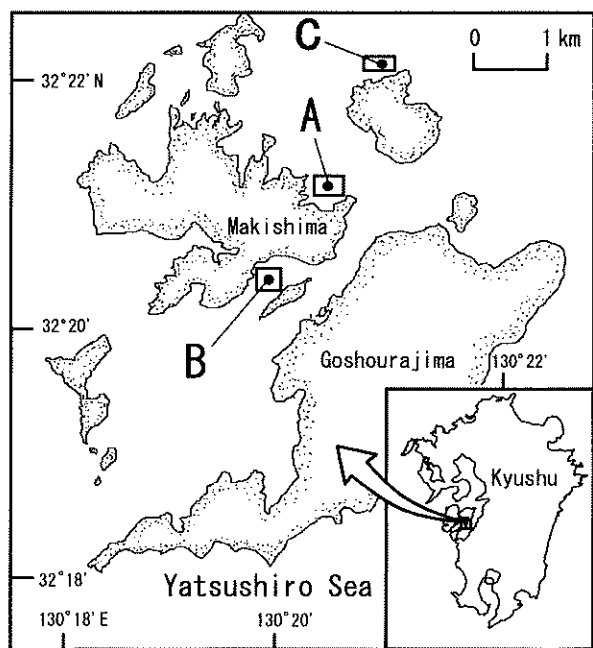


Fig. 1. Map showing Sts. A-C at Goshoura coastal fish farms in the Yatsushiro Sea, Kumamoto, Japan.

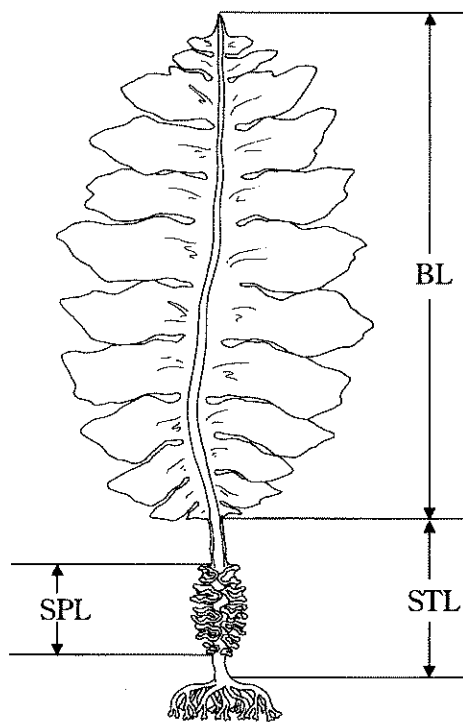


Fig. 2. Lengths of blade (BL), stipe (STL) and sporophyll (SPL) of cultured *Undaria pinnatifida*.

基部の基点から23 cm上方に、葉長75 cm以上の個体では40 cm上方とした(西川 1974; 石川 1993)。

葉状部の湿・乾重量、面積、胞子体三部位の水分量、有機物量、灰分量、カロリー当量、窒素含有量および磷含有量は、差込間隔100 cmの栽培ワカメから1 m層毎に1本ずつ無作為に採取し毎月1回計測した。葉状部の湿重量は淡水に約1分間浸漬して付着物を除去し脱塩後、水分を拭き取り0.01 gの精度で計量し、乾重量は85℃で48時間乾燥後、0.001 gの精度で測定した。葉状部の面積はグラフテック社製KD-4300型デジタイザーで計測した。胞子体三部位の灰分量は400℃で6時間燃焼後に計量した。カロリー当量はYM燃研式デジタル熱量計を用いて分析した。乾燥粉末試料をダイジェスダール分解器で処理後、窒素含有量はケルダール法、磷含有量は硫酸モリブデン法でそれぞれ分析した。

解析方法

ワカメ葉状部の単位面積当りのN, Pの日間吸収速度は、次の実測式で求めた。

$$P_{N,P} = (C_{N,Pt} - C_{N,P0}) \cdot \alpha / t \quad (1)$$

ここで、 $P_{N,P}$ は葉状部のN, P吸収速度 (mg N, P/m²/day), $C_{N,P0}$ は実験開始日の葉状部のN, P含有量 (mg N, P/g dry), $C_{N,Pt}$ はt日後の葉状部のN, P含有量 (mg N, P/g dry), α は葉状部単位面積当りの乾重量を示す定数 (g dry/m²), t は栽培日数 (days) である。

養魚場水のDIN濃度およびDIP濃度とワカメ葉状部のN, P吸収速度との関係は、Michaelis-Mentenの次式(Dugdale 1967)で求めた。

$$P_{N,P} = Pm_{N,P} \cdot S_{N,P} / (K_{N,P} + S_{N,P}) \quad (2)$$

ここで、 $Pm_{N,P}$ は葉状部のN, P最大吸収速度 (mg N, P/m²/day), $S_{N,P}$ はDIN濃度およびDIP濃度 (μ g N, P/l), $K_{N,P}$ は半飽和定数 (μ g N, P/l) である。

光量と葉状部のN, P吸収速度との関係は、Steelのモデル式(Steel 1962)で求めた。

$$P_{N,P} = Pm_{N,P} \cdot (I / Im) \cdot \exp(1 - I / Im) \quad (3)$$

ここで、 I は光量 (μ mol/m²/s), Im は $Pm_{N,P}$ における飽和光量 (μ mol/m²/s) である。なお、Steelのモデル式への解析は、日本ボラロイド社製コンピュータアプリケーションソフト「DeltaGraph 4.0」

を用い、非線形最小二乗法を用いて解析した(増田ら 2003)。

水温と葉状部のN, P吸収速度との関係は、次式(門脇・田中 1994)で求めた。

$$P_{\theta N,P} = P_{16 N,P} \cdot Q_{01 N,P}^{(\theta - 16)} \quad (4)$$

ここで、 $P_{\theta N,P}$ は水温 θ ℃における葉状部のN, P吸収速度 (mg N, P/m²/day), $P_{16 N,P}$ は水温16℃における葉状部のN, P吸収速度 (mg N, P/m²/day), $Q_{01 N,P}$ は温度係数, θ は水温(℃)である。

したがって、栽培ワカメ葉状部のN, P吸収速度(P)は、栄養塩濃度(S)、光量(I)および水温(θ)との関係式を積算した次式で算定される。

$$P^3 = [Pm \cdot S / (K + S)] \cdot [Pm \cdot (I / Im) \cdot \exp(1 - I / Im)] \cdot [P_{16} \cdot Q_{01}^{(\theta - 16)}] \quad (5)$$

結 果

本研究水域におけるワカメの生長過程は、生長期(11~3月, 12~17℃)、成熟期(4月, 16~18℃)および消失期(5月, 18~19℃)の三期に分けられた(Akiyama and Kurogi 1982)。ワカメの栽培期間におけるSt. A~Cの海面下3 m層の水温および透明度は、それぞれ12.2~19.4℃および6.5~12.8 mの範囲であった(Fig. 3I, II)。各St.におけるDIN濃度およびDIP濃度はSt.間で有意差がみられた(Friedman-test, $P < 0.05$)。すなわち、St. Aでは86~156 μ g N/lおよび16~25 μ g P/l, St. Bでは58~113 μ g N/lおよび10~19 μ g P/l, St. Cでは30~69 μ g N/lおよび6.3~11 μ g P/lの順で高く推移した(Fig. 3III, IV)。調査期間中のDIN濃度およびDIP濃度はいずれも水産用水基準第一種の範囲にあった(日本水産資源保護協会 2000)。DIN/DIP比はFig. 3Vに示したとおり4.7~7.2であり、St.間で有意差は見られなかった(Friedman-test, $P > 0.05$)。2 m層における日中の平均下方向光量は、1月, 2月, 3月, 4月および5月でそれぞれ690, 670, 710, 700および750 μ mol/m²/sと算定された。

全St.の平均葉長は、Fig. 4に示したとおり、差込間隔100 cm, 50 cm, 25 cmおよび10 cmの順で高かった。特に、差込間隔を100 cmにした葉長は、25 cmおよび10 cmの差込間隔と比較して有意な生長差が見られた(t -test, $P < 0.05$)。50 cmの差込間隔とでは有意差は見られなかった($P > 0.05$)。

そこで、差込間隔100 cmを対象として胞子体の生長を調べた結果、葉長、茎長および胞子葉長は、

いずれも 2 m 層で最大生長を示した (Fig. 5)。葉長および胞子葉長は, St. 間で生長に差異が見られた (Friedman-test, $P < 0.05$) が, 茎長では St. 間による差異は見られなかった ($P > 0.05$)。葉長は成熟期に

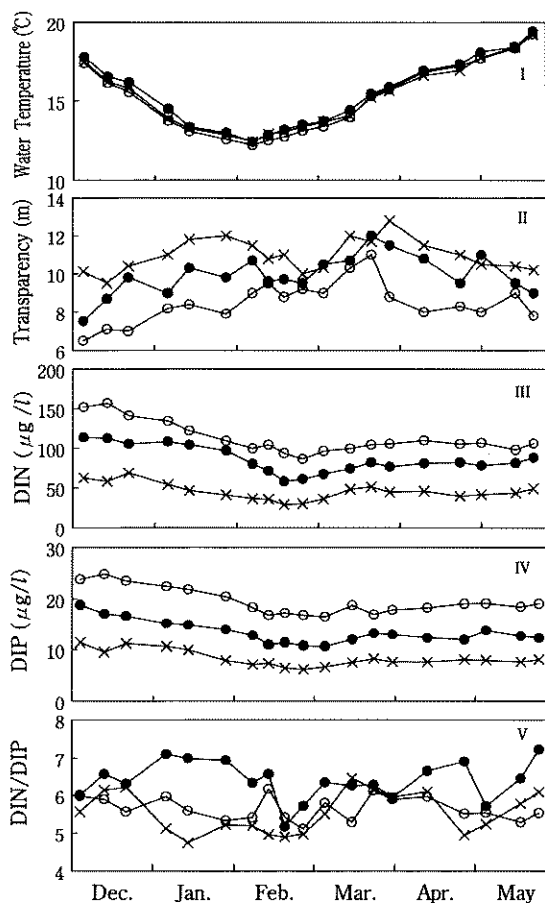


Fig. 3. Weekly changes of water temperature (I), transparency (II), dissolved inorganic nitrogen concentration (III), dissolved inorganic phosphorus concentration (IV) and DIN/DIP (V) in Sts. A-C. ○, St. A; ●, St. B; ×, St. C.

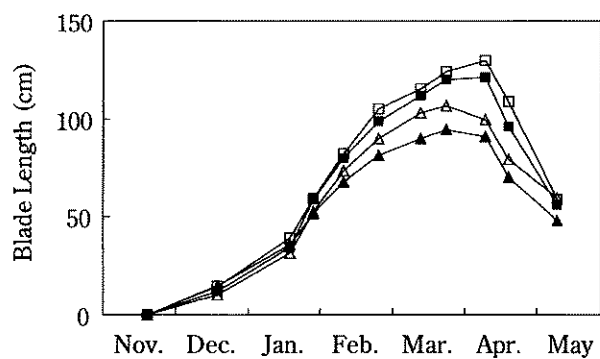


Fig. 4. Average growth of blade length in *Undaria pinnatifida* hanged on ropes at intervals of 100 cm, 50 cm, 25 cm and 10 cm at 1 m, 2 m, 3 m and 4 m depths in Sts. A-C in fish farms. □, 100 cm; ■, 50 cm; △, 25 cm; ▲, 10 cm.

St. Aで最大182 cmに伸長し, 茎長および胞子葉長は消失期に St. Aでそれぞれ最大34 cmおよび33 cmに達した (Fig. 5I, II, III)。また, 葉長, 茎長および胞子葉長の生長速度は生長期に最大を示し, それぞれ4.2, 0.52

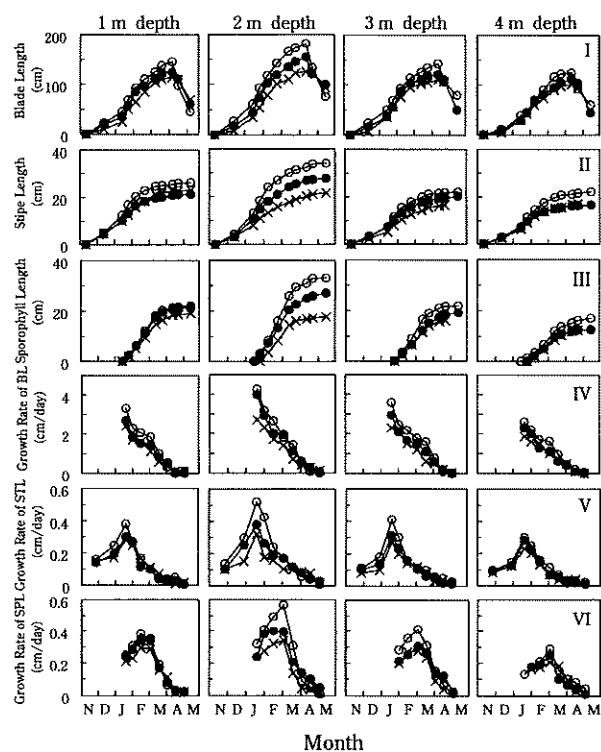


Fig. 5. Lengths of blade (I), stipe (II), sporophyll (III) in *Undaria pinnatifida* hanged on ropes at intervals of 100 cm at 1 m, 2 m, 3 m and 4 m depths in Sts. A-C in fish farms and the growth rates of blade length (IV), stipe length (V) and sporophyll length (VI). ○, St. A; ●, St. B; ×, St. C.

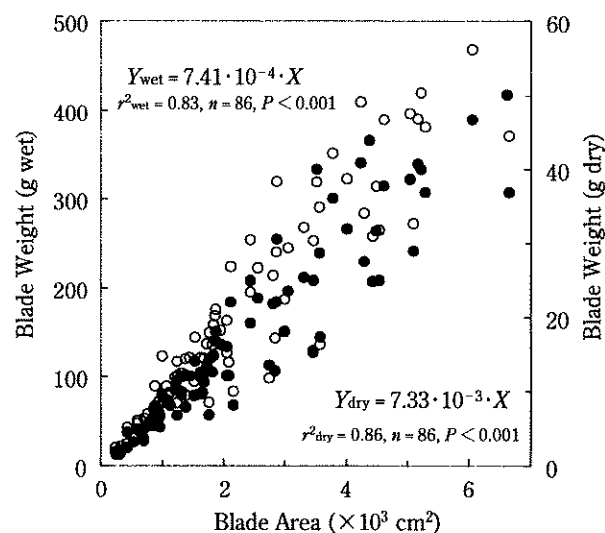


Fig. 6. Relationship between blade area and blade weight of cultured *Undaria pinnatifida*. ○, wet weight; ●, dry weight.

Table 1. Composition of water, organic matter and ash in *Undaria pinnatifida* parts of blade, stipe and sporophyll cultured at Sts. A-C in fish farms from January to May: I, growth phase; II, maturation phase; III, disappearance phase

Phase		I			II	III	
Part	Content	January (%)	February (%)	March (%)	April (%)	May (%)	Mean (%)
Blade	Water	90.5	90.3	90.1	89.8	89.7	90.1
	Organic	6.3	6.6	6.8	7.2	7.1	6.8
	Ash	3.2	3.1	3.1	3.0	3.2	3.1
Stipe	Water	94.2	93.8	93.1	92.2	91.5	93.0
	Organic	2.9	3.2	3.7	4.5	4.2	3.7
	Ash	2.9	3.0	3.2	3.3	4.3	3.3
Sporophyll	Water	ND	93.8	93.1	92.2	91.5	92.7
	Organic	ND	4.3	4.9	6.1	5.6	5.2
	Ash	ND	1.9	2.0	1.7	2.9	2.1

ND: no data.

および0.57 cm/dayであったが、消失期にそれぞれ0.2, 0.03および0.05 cm/day以下に低下した (Fig. 5IV, V, VI)。

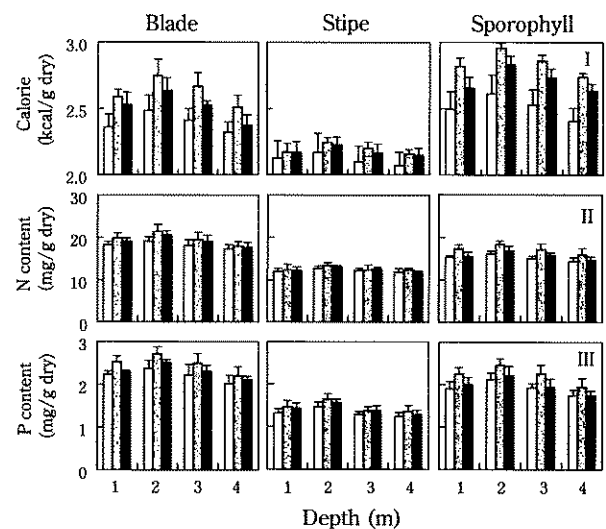
葉状部の面積 (X, cm^2) と湿, 乾重量 ($Y_{\text{wet}}, \text{dry}, \text{g}$) との関係は, Fig. 6に示したとおり, それぞれ次式を得た。

$$Y_{\text{wet}} = 7.41 \cdot 10^{-4} \cdot X \quad (6)$$

$$Y_{\text{dry}} = 7.33 \cdot 10^{-3} \cdot X \quad (7)$$

上式の決定係数 r^2_{wet} は0.83および r^2_{dry} は0.86の値が得られ, いずれも有意であった ($n=86, P<0.001$)。したがって, ワカメ葉状部単位面積当りの乾重量 (g) を示す式(1)の定数 α 値は73.3 g dry/m²を得た。

胞子体三部位の生長過程および部位による水分, 有機物および灰分の含有率は Table 1に表した。葉状部の水分, 有機物および灰分の含有率は, 生長過程による有意差は見られなかった (one-way ANOVA, $P>0.05$)。しかし, 茎部と胞子葉部の水分および有機物含有率は, 生長期と成熟・消失期とで, 灰分含有率は生長・成熟期と消失期とでそれぞれ生長過程による有意差が見られた (t -test, $P<0.05$)。一方, 葉状部, 茎部および胞子葉部の水分含有率は, それぞれ90.1, 93.0および92.7%であり, 葉状部と茎・胞子葉部とで部位による有意差が見られた (t -test, $P<0.05$)。葉状部, 茎部および胞子葉部の有機物含有率は, 部位による有意差がみられ (t -test, $P<0.05$), それぞれ6.8, 3.7および5.2%であった。葉状部, 茎部および胞子葉部の灰分含有率は, それぞれ3.1, 3.3および2.1%であった。すなわち, 葉状部と茎部の灰分含有率の有意差は見られなかった (t -test, $P>0.05$) が, 葉状部・茎部と胞子葉部とで部位による有意差が見られた ($P<0.05$)。

**Fig. 7.** Phenological changes of calorific value (I), nitrogen content (II) and phosphate content (III), in parts of blade, stipe and sporophyll of *Undaria pinnatifida* at 1–4 m depths in Sts. A-C. □, growth phase; ▨, maturation phase; ■, disappearance phase.

胞子体三部位における平均カロリー当量および平均 N, P 含有量は Fig. 7に示した。葉状部, 茎部および胞子葉部の平均カロリー当量は, それぞれ 2.51 ± 0.13 , 2.16 ± 0.05 および 2.69 ± 0.16 kcal/g dry であった (Fig. 7I)。葉状部と胞子葉部のカロリー当量の有意差は見られなかった (t -test, $P>0.05$) が, 茎部とで部位による有意差が見られた ($P<0.05$)。葉状部, 茎部および胞子葉部の平均 TN 含有量は, それぞれ 19.0 ± 1.1 , 12.4 ± 0.4 および 16.1 ± 1.1 mg N/g dry であり (Fig. 7II), 部位による有意差が見られた (t -test, $P<0.05$)。一方, 葉状部, 茎部および胞子葉部の平均 TP 含有量は, それぞれ 2.3 ± 0.19 , 1.4 ± 0.12 および 2.0 ± 0.21 mg P/g dry であった (Fig. 7III)。すなわち, 葉

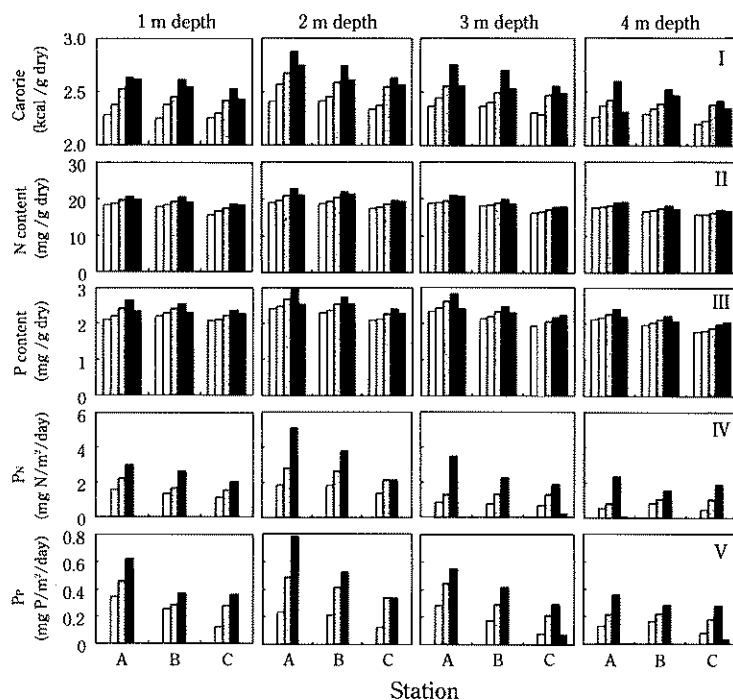


Fig. 8. Monthly changes of calorific value (I), nitrogen content (II), phosphate content (III), uptake rates of nitrogen (IV) and uptake rates of phosphate (V) by blade part of cultured *Undaria pinnatifida* at 1 m, 2 m, 3 m and 4 m depths in Sts. A-C. □, January; □, February; □, March; ■, April; ■, May.

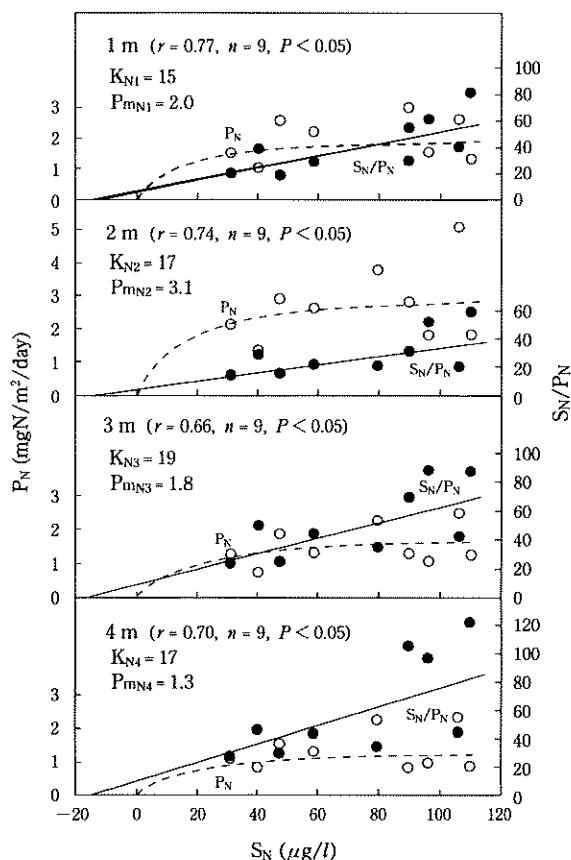


Fig. 9. Relationship between DIN concentration (S_N) and nitrogen uptake rate (P_N) by blade part of cultured *Undaria pinnatifida* at 1 m, 2 m, 3 m and 4 m depths in fish farms.

状部と胞子葉部のTP含有量の有意差は見られなかった (t -test, $P > 0.05$) が、茎部とで部位による有意差が見られた ($P < 0.05$)。

葉状部のカロリー当量は、成熟期に St. A の 2 m 層で最大値を示し、2.87 kcal/g dry を得た (Fig. 8I)。葉状部の N, P 含有量は、成熟期で 21 ± 1.6 mg N/g dry および 2.7 ± 0.19 mg P/g dry に達した (Fig. 8II, III)。栽培ワカメ葉状部の N, P 吸収速度 (P_N , P_P) の実測値は、式(1)より算定し Fig. 8IV, V に示した。

Fig. 9 および Fig. 10 中の白丸は養魚場水の DIN, DIP 濃度 (S_N , S_P) とワカメ葉状部の N, P 吸収速度 (P_N , P_P) との関係を示したものである。両者の関係は栄養塩濃度が低い場合、N, P 吸収速度は栄養塩濃度に大きく依存するが一定濃度以上になると変わらない。そこで、各垂下深度で式(2)の $K_{N, P}$ および $P_{mN, P}$ を見積もることにした。式(2)の展開によって、横軸に S_N および S_P 、縦軸に S_N/P_N および S_P/P_P を取れば、Fig. 9 および Fig. 10 中の黒丸で示したように、横軸を $-K_N$ および $-K_P$ で切る直線が得られる。この直線の勾配の逆数が $P_{mN, P}$ 値に相当する。このようにして、各垂下深度の $K_{N, P}$ および $P_{mN, P}$ が求まる (田中ら 1997)。

DIN 濃度および DIP 濃度と N, P 吸収速度との有意な関係は、Fig. 9 および Fig. 10 に示したとおり、1 m, 2 m, 3 m および 4 m 層の P_{mN} はそれぞれ 2.0, 3.1, 1.8 および 1.3 mg N/m²/day, P_{mP} はそれぞれ 0.47, 0.54,

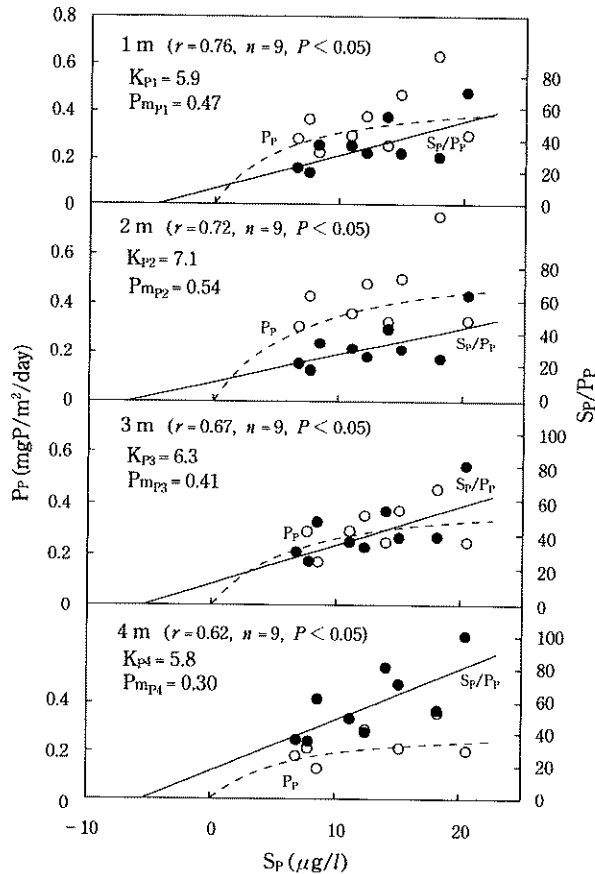


Fig. 10. Relationship between DIP concentration (S_P) and phosphorus uptake rate (P_P) by blade part of cultured *Undaria pinnatifida* at 1 m, 2 m, 3 m and 4 m depths in fish farms.

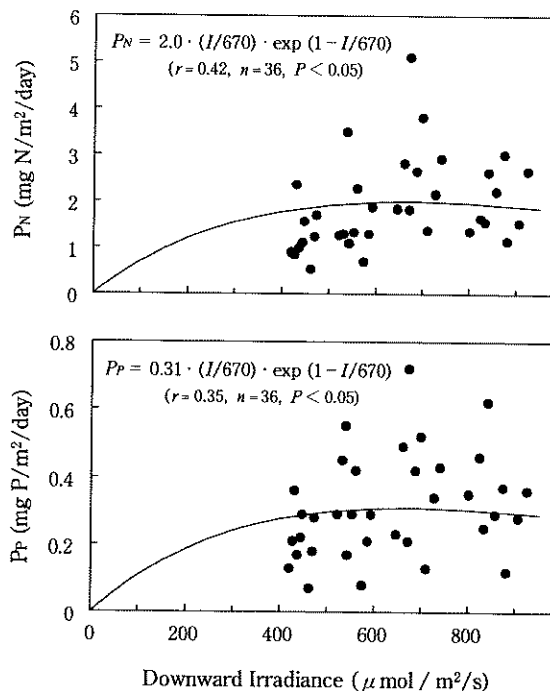


Fig. 11. Uptake rates of nitrogen (P_N) and phosphorus (P_P) - irradiance curves in blade part of cultured *Undaria pinnatifida* at 1-4 m depths in fish farms.

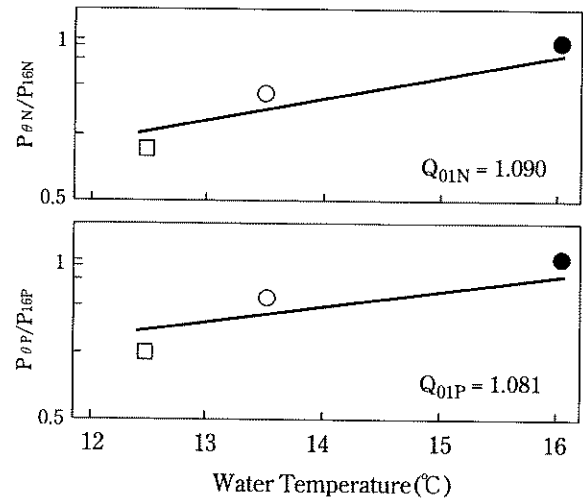


Fig. 12. Effect of mean water temperature on $P_{\theta N}/P_{16N}$ and $P_{\theta P}/P_{16P}$ in blade part of cultured *Undaria pinnatifida* in fish farms. □, January 20 - February 13; ○, February 14 - March 16; ●, March 17 - April 14.

0.41および0.30 mg P/m²/dayと算定された。1～4 m層における DIN 濃度および DIP 濃度の半飽和定数 ($K_{N,P}$) は、それぞれ17μg N/lおよび6.2μg P/lであった。

次に、養魚場水の栄養塩濃度がワカメの生長にとって十分であれば、光量に対して N, P 吸収速度は Steel モデルの曲線関係が描かれる。Fig. 11に示したとおり、式(3)から求めた N, P 吸収速度と光量との関係はそれぞれ有意な関係が得られ ($n=36, P<0.05$), N, P の最大吸収速度を示す飽和光量 I_m はそれぞれ 670μmol/m²/s と算定された。

ワカメ葉状部の N, P 吸収速度が見られた実験期間中の2003年1月20日～2月13日、2月14日～3月16日および3月17日～4月14日の水温は、それぞれ12.4±0.4, 13.4±0.5および16.0±0.6℃であった。水温16℃におけるワカメ葉状部の N, P 吸収速度 (P_{16N}, P_{16P}) は、式(1)を用いて求めそれぞれ2.5 mg N/m²/day および0.44 mg P/m²/day と実測された。温度係数 Q_{01} は Fig. 12で示した一次直線式の傾きで表される。したがって、水温 θ ℃における N, P 吸収速度と水温との関係は次式で示された。

$$P_{\theta N} = 2.5 \cdot 1.090^{(\theta - 16)} \quad (8)$$

$$P_{\theta P} = 0.44 \cdot 1.081^{(\theta - 16)} \quad (9)$$

すなわち、N, P 吸収速度の温度係数 Q_{01N} および Q_{01P} はそれぞれ1.090および1.081と算定された。

以上のことから、栽培ワカメ葉状部の1～4 m層に

における N, P 吸収速度 ($P_{N, P}$) は, 栄養塩濃度 (S), 光量 (I) および水温 (θ) との環境条件を積算した算定式で求められた。各層における N, P 最大吸収速度 ($Pm_{N, P}$) および半飽和定数 ($K_{N, P}$) の諸値は, Table 2 にまとめた。

次に, Table 2 の諸値ならびに環境条件を式 (5) に代入して得た算定値 (P_{Ncal}, P_{Pcal}) と式 (1) および Fig. 8

Table 2. Calculated values of maximum N, P uptake rates ($Pm_{N, P}$) and Michaelis-Menten's constants ($K_{N, P}$) of *Undaria pinnatifida* cultured at 1 m, 2 m, 3 m and 4 m depths

Depth (m)	Pm_N (mg N/m ² /day)	Pm_P (mg P/m ² /day)	K_N (μg/l)	K_P (μg/l)
1	2.0	0.47	15	5.9
2	3.1	0.54	17	7.1
3	1.8	0.41	19	6.3
4	1.3	0.30	17	5.8

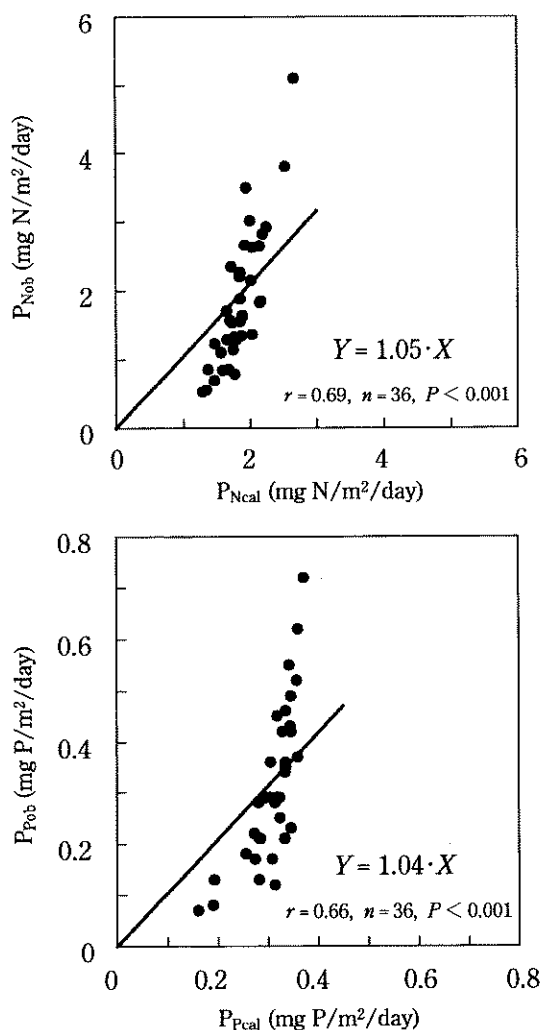


Fig. 13. Relationship between calculated and observed values of nitrogen and phosphorus uptake rates by blade part of cultured *Undaria pinnatifida* at 1–4 m depths in fish farms.

の諸値で求めた実測値 (P_{Nob}, P_{Pob}) とを比較すると, Fig. 13に示したとおり, それぞれの関係は次式で示された。

$$P_{Nob} = 1.05 \cdot P_{Ncal} \quad (10)$$

$$P_{Pob} = 1.04 \cdot P_{Pcal} \quad (11)$$

上式の相関係数 r_N および r_P は, それぞれ 0.69 および 0.66 が得られ, いずれも有意な値であった ($n=36$, $P<0.001$)。以上のことから, 栽培ワカメ葉状部による N, P 吸収速度の算定式 (5) で求めた値は, 実測式 (1) で得た値と良く一致することが判明した。

考 察

ワカメ葉状部の生長水温は 5–20℃ であり (斉藤 1964; 徳田ら 1987), 種糸を移入した島原湾内での養殖ワカメの葉長生長は最大 199 cm と報告されている (西川 1964)。本研究での葉長は, 種糸垂下後 150 日目に最大 182 cm まで伸長し, 島原湾内と同程度の生長が得られた。また, ワカメ葉状部の生長は種糸の差込間隔によって異なることが知られている (松岡 1980)。本研究でも葉長生長は, 差込間隔 50 cm 以上と 25 cm 以下とで有意な差が見られた。一方, 胞子体三部位の生長, カロリー当量, N, P 含有量および葉状部の生長速度や N, P 吸収速度は, いずれも海面下 2 m 層で高い値が得られた。これらの結果は, ワカメの一般的な栽培層は海面下 1–2 m の深度 (渡辺 1993) と近似していた。以上のことから, 本研究水域でのワカメ栽培に適した種糸差込間隔は 50 cm 以上, 垂下層は 2 m と考察された。

従来, ワカメの養殖・天然漁場の DIN 濃度および DIP 濃度は, それぞれ 23–252 μg N/l および 0.0–43 μg P/l と報告されている (日本水産資源保護協会 1992)。本研究水域での DIN 濃度および DIP 濃度は, それぞれ 30–156 μg N/l および 6.3–25 μg P/l であり, 従来の養殖・天然漁場と比較していずれもワカメが生育する栄養塩濃度の範囲であった。

葉状部および胞子葉部のカロリー当量は, 茎部に比べて高い値が得られた。その理由として, 葉状部は茎部に比べてタンパク質が多く, また胞子葉部はタンパク質に加えて脂質も高く含まれる (Agatsuma et al. 2002) ためと考えられる。一般に, ワカメ葉状部の N, P 含有量は, それぞれ 21 mg N/g dry および 3.5 mg P/g dry であり (香川 2002), 本研究水域では成熟期における葉状部の N, P 含有量と近似した値が得られた。

栽培ワカメの N, P 吸収速度の実測値と算定値の関係は一次直線式で示された (Fig. 13)。このことから、浅海養魚場での栽培ワカメによる N, P 吸収速度の実測値 (P_{ob}) は、栄養塩濃度、光量および水温の環境条件を式 (5) に代入して算定値 (P_{cal}) を求め、さらに P_{cal} 値を式 (10) および式 (11) に代入して求められることが検証された。

今後、栽培ワカメへの栄養塩供給速度と水理環境条件との関係を把握するため、養魚場の海水流動と栽培ワカメの N, P 吸収速度との関係を解明することが残された課題といえる。

要 約

ワカメは2002年11月～2003年5月に八代海養魚場の1～4 m層で垂下栽培した。ワカメの葉長は生長期に2 m層で最大生長速度4.2 cm/dayを示し、成熟期に最大182 cmに達した。葉状部の平均 N, P 含有量は、それぞれ19 mg N/g dry および2.3 mg P/g dryであった。葉状部単位面積当りの N, P の最大吸収速度は、それぞれ3.1 mg N/m²/day および0.54 mg P/m²/dayであった。N, P 最大吸収速度をもたらし飽和光量は670 μmol/m²/sであった。DIN 濃度および DIP 濃度の半飽和定数は、それぞれ17 μg N/l および6.2 μg P/lを得た。16℃における葉状部の N, P 吸収速度は、それぞれ2.5 mg N/m²/day および0.44 mg P/m²/dayであり、温度係数 Q_{01} はそれぞれ1.090 および1.081と算定された。栽培ワカメ葉状部の単位面積当りの N, P 吸収速度は、養魚場水の栄養塩濃度、光量および水温の環境諸量で定式化され、算定値は実測値と良く一致した。

謝 辞

本研究に対して、適切な御助言を賜った鹿児島大学水産学部附属海洋資源環境教育研究センター教授の野呂忠秀博士に深く感謝する。環境調査に対して御協力を賜った熊本県御所浦町水産農林課の森 恵慈氏、杉原範春氏ならびに福部智一氏に心から感謝の意を表する。また、本論文で英文の御校閲を賜った鹿児島大学水産学部附属海洋資源環境教育研究センター研究生の Gregory N. Nishihara 博士に厚くお礼申し上げる。

文 献

Agatsuma, Y., Y. Yamada and K. Taniguchi (2002) Dietary effect of the boiled stipe of brown alga *Undaria pinnatifida* on the growth and gonadal enhancement of sea urchin

- Strongylocentrotus nudus*. *Fish. Sci.*, **68**, 1274-1281.
- 秋山和夫 (1992) ワカメ、食用藻類の栽培 (日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 35-42.
- Akiyama, K. and M. Kurogi (1982) Cultivation of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringer, the decrease in crops from natural plants following crop increase from cultivation. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.*, **44**, 91-100.
- 新崎盛敏 (2002) わかめ。原色新海藻検索図鑑, 北隆館, 東京, pp. 52.
- Dugdale, R. C. (1967) Nutrient limitation in the sea. *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 685-695.
- 船野 隆・石川政雄 (1970) コンクリートブロック礁におけるマコンブの生態。北水試月報, **27**, 84-100.
- 五十嵐輝夫・高任 哲・薮 太郎 (1991) 大型植物バイオマスによる海域浄化と生産力向上試験。平成3年度宮城県水産試験場事業報告, 82-83.
- 五十嵐輝夫・高任 哲・薮 太郎 (1992) 大型植物バイオマスによる海域浄化と生産力向上試験。平成4年度宮城県水産試験場事業報告, 78-79.
- 石川 豊 (1993) ワカメ葉状部生長量の簡便測定法。日水誌, **59**, 1331-1336.
- 門脇秀策 (2001) 環境保全型養殖をめざした21世紀の海づくり, 魚づくり, 人づくり。日本造船学会, 第16回海洋工学シンポジウム, 東京, pp. 147-152.
- 門脇秀策 (2004) 浅海養魚場における環境保全型複合エコ養殖のすすめ。日本水産資源保護協会月報, **470**, 7-9.
- 門脇秀策・田中啓陽 (1994) 海水の酸素消費速度の内容構成。水産増殖, **42**, 267-272.
- 香川芳子 (2002) 藻類。五訂食品成分表2002, 女子栄養大学出版部, 東京, pp. 128-133.
- 末代勇樹・門脇秀策 (2003) 浅海養魚場における養殖マコンブ, *Laminaria japonica* の生長過程と N, P 吸収速度。水産増殖, **51**, 15-23.
- 末代勇樹・門脇秀策 (2004) 浅海養魚場における栽培アナアサ, *Ulva pertusa* の生長と N, P 吸収速度。水産増殖, **52**, 65-72.
- Mann, K. H. (1973) Seaweeds: Their productivity and strategy for growth. *Science*, **182**, 975-981.
- 増田育司・酒匂貴文・松下 剛・白石哲朗・切通淳一郎・神村祐司・小澤貴和 (2003) 鹿児島湾産アカカマスの年齢, 成長および年級群組成。日水誌, **69**, 709-716.
- 松岡正義 (1980) ワカメ養殖技術改良試験-II, 種苗の「はさみ込み」間隔がワカメ葉体並びに収量に及ぼす影響について。徳島県水産試験場事業報告書 昭和40年～昭和53年-追補。pp. 83-86.
- 日本水産資源保護協会 (1992) ワカメ類。環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための「判断基準」と「事例」。東京, pp. 24-32.
- 日本水産資源保護協会 (2000) 水産用水基準。東京, pp. 1-20.
- 西川 博 (1964) 有明海におけるワカメ養殖の研究 (II) いかに式養殖ワカメの生長・生産量および企業性について。水産増殖, **12**, 67-83.
- 西川 博 (1974) 有明海におけるワカメ養殖の研究-IX。水産増殖, **21**, 137-142.

- 農林水産省統計部 (2004) 海面養殖業. 第78次 農林水産省統計表 平成13~15年, 農林統計協会, 東京, pp. 512-521.
- 斎藤雄之助 (1964) ワカメの養殖. 水産増養殖叢書, 2, 水産資源保護協会, 東京, 40 pp.
- Steel, J. H. (1962) Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnol. Oceanogr.*, **7**, 137-150.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons (1972) A Practical Handbook of Seawater Analysis, *Fish. Res. Bd. Canada Bull.*, Ottawa, pp. 45-90.
- 田中啓陽・門脇秀策・楠本 立 (1997) 栄養塩濃度からみた真珠養殖漁場の環境診断. 全真連技術研究会報, **12**, 19-27.
- 徳田 廣・大野正夫・小河久朗 (1987) ワカメ類. 海藻資源養殖学, 緑書房, 東京, pp. 133-144.
- 渡辺忠美 (1993) ワカメの栽培, 生産, 加工. 海藻の科学 (大石圭一編), 朝倉書店, 東京, pp. 64-70.
- 吉田忠生 (1998) ちがいそ科. 新日本海藻誌, 内田老鶴圃, 東京, pp. 329-335.