

大型褐藻群落の海水浄化機能の定量化の検討

(独) 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 坂西芳彦・伊藤 博

1. 調査実施年度：平成 14 年度～平成 16 年度

2. 緒言

適度に富栄養化した内湾で養殖されている紅藻アマノリ類（いわゆる海苔の原料）の例で知られているように、海藻は海水中に含まれる窒素、リン等を大量に吸収するとともに、光合成により温室効果ガスである CO₂ も吸収する。沿岸の藻場構成種であるコンブ類、ホンダワラ類といった大型褐藻も同様な機能を持つと予想されることから、水産基盤整備事業の中で行われている藻場造成では、従来、重視されてきた漁業生産の向上に資する効果以外に、海水の浄化や大気中の CO₂ の安定化といった環境保全効果も期待できると考えられる。

岸 (1993) は、東京湾の浅瀬に海藻、海草を植えた場合とそうでない場合について、富栄養化した海水の浄化の程度をシュミレーションすることにより、大型植物の海水浄化の可能性を証明している¹⁾。一方、山口 (1993) は、アラメ、カジメを含むコンブ目、ホンダワラ類を含むヒバマタ目藻類の群落生産力は陸上生態系で最も生産力が高いとされる熱帯雨林のそれに匹敵するレベルであり、コンブ目やヒバマタ目の大型褐藻群落の窒素、リン除去力は、平均してかなり高く、環境保全効果について大きな可能性をもっていると結論している²⁾。しかしながら、効果の推定に必要な海藻群落についてのデータは極めて限られている。北海道東部沿岸は大規模な大型褐藻群落が形成され、一部は産業的な利用が進んでいるにもかかわらず、それらの藻場が持つ様々な機能については未解明な部分が多い。そこで、この海域の大型褐藻の藻場が持つ窒素、リンの貯留効果を基礎とした海水浄化機能を明らかにするために、本調査を実施した。本調査では、北海道東部の根室半島太平洋岸の代表的な藻場構成種であるウガノモク (*Cystoseira hakodatensis* (Yendo) Fensholt) の現存量と藻体内の窒素・リン含量の季節変動、藻体の分解速度を明らかにするとともに、藻類の窒素・リン吸収能に影響を与える温度、光、栄養塩濃度などの環境要因^{3) 4) 5)} についても、モニタリングを行った。また、この海域は日本を代表するコンブの産地であることから、ナガコンブ (*Laminaria longissima* Miyabe)、ガッガラコンブ (*Laminaria coriacea* Miyabe) の漁獲データをもとに、有用コンブの漁獲によって、どの程度の窒素・リンが海水中から回収されるかについても試算し、漁業活動を通じての大型褐藻群落の海水浄化機能についても考察した。

3. 調査方法

根室市友知地先 (43° 29' N, 145° 43' E) (図 1) の海域の水深約 3m のウガノモク群落において、毎月 1 回、SCUBA 潜水により藻体の採集を行った。50cm×50cm の方形枠を 1 または 2 箇所、群落内に設置し、枠内に生育するウガノモクを全て刈り取った。また、ウガノモク群落周辺において現存量が多いコンブ目藻類も採集し、ウガノモクとともに元素分析を行った。採集したウガノモク藻体は 85℃ で 24 時間乾燥させた後、重量を測定し、1m × 1m あたりの現存量を求めた。

元素分析では、乾燥させた藻体はブレンダーを用いて細かく砕き、粉末とした。これら

の粉末を試料として、ケルダール法とバナドモリブデン酸吸光光度法により窒素、リンを定量し、乾燥藻体重量の窒素リン含量を求めた。



図1 根室市友知地先の沿岸の地図。右の地図の赤い楕円がウガノモクの調査海域を示す。地図の色は底質を示す。ピンクは岩礁、薄緑は礫、水色は砂を示す。(左は秋庭(1997)⁶⁾、右は漁協管内漁場基本図)

天然の群落においても実際に脱落が起きるような時期に採集したウガノモク藻体を用いて、藻体の分解流失量を求めた。ナイロン製の網袋に入れて、海水を掛け流したグリーンハウス内の水槽(図2)に放置した藻体の重量を、一定期間ごとに秤量し、藻体重量の減少を藻体の分解流失量とみなした。Enriques *et al.* (1993)⁷⁾の方法を参考として、分解速度(k (d^{-1}))を求めた。



図2 グリーンハウスの外観(左)と海藻の分解実験を行ったハウス内の水槽(右)を示す。

根室市友知地先(図1)のウガノモク群落周辺の海域の表層および近底層の海水を採集した。グラスファイバーフィルター(GF/F, Whatmann)で濾過した海水を試水とし、オートアナライザー(Model Traacs 800)により硝酸塩、亜硝酸塩、リン酸塩濃度を定量した。根室市友知地先(図1)の海域においてメモリー式の水中光量子計(MPQ-I, 三洋測器)(図3)と水温深度計(Compact-TD, アレック電子)(図3)を設置し、水中光量子量と水温を連続観測した。水中光の光質(分光分布)を明らかにするために、水中分光放射計(PER-2700, Biospherical instruments)(図3)により、波長別の水中光を測定した。

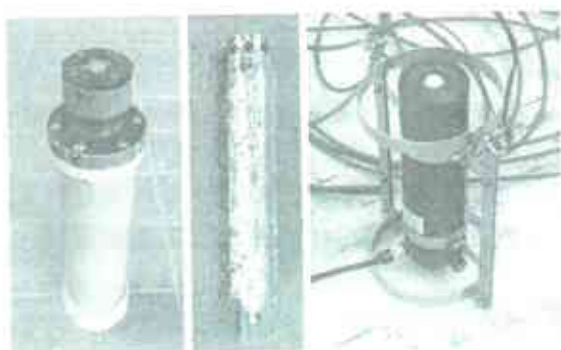


図3 本調査で使用した海洋環境観測機器。メモリー式水中光量子計(左, 海底に設置), メモリー式水温水深計(中, 海底に設置), 水中分光放射計(右, 船上よりケーブルにて垂下して使用)

北海道東部太平洋岸の単一漁協管内の海域で漁獲される食用コンブ（ナガコンブ，ガッガラコンブ）の漁獲データ，製品の歩留まり（製品重量/湿重量），藻体の乾燥重量：湿重量の比，藻体の窒素，リン含量から，コンブ漁業による窒素，リンの回収効果を試算した。また，環境庁（1994）⁸⁾の全国の藻場面積データと本調査で取得したデータを用いて，北海道周辺海域の大型褐藻群落（ガラモ場，コンブ場）における最大現存量期の窒素，リンの貯留量を試算した。

4. 調査結果

ウガノモク群落の現存量は7月に最大値（2.85 kg (D.W.) m⁻²）を示し，その後8月に急激に減少し，11月まで減少し，その後も低い状態を保った（図4）。7月から8月にかけての現存量の急激な減少は，成熟後の主枝の流失によるものである。ウガノモク藻体の窒素含量（乾燥重量ベース）は4月は2.4%であり，徐々に減少し，9，10月に1.4%となり，その後増加した。リン含量は，4月では0.27%であり，7月に極大（0.38%）を示した後，減少した（図4）。

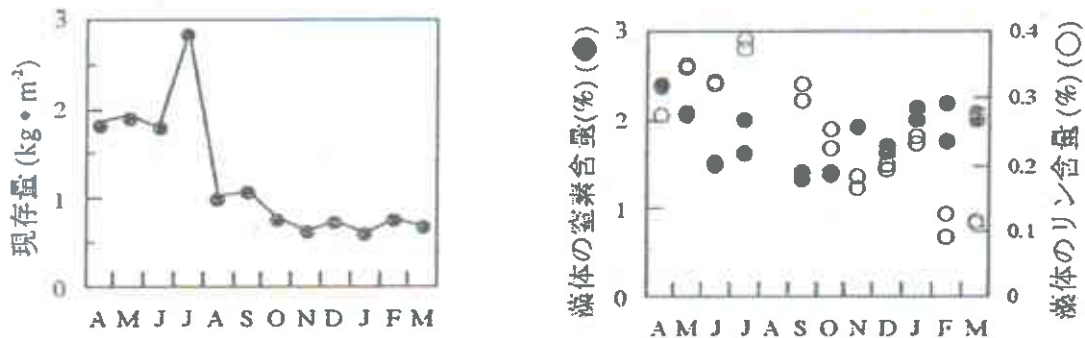


図4 ウガノモク群落の現存量の季節変動（左）とウガノモク藻体内の窒素（●）及びリン（○）の含量（藻体の乾燥重量ベース）の季節変動。

海水中の硝酸塩は4～8月に低く，その後徐々に高くなり，低水温期に高かった。亜硝酸塩は10，11月に高い値（0.2～0.3 μM）を示した。リン酸塩は0.2～0.7 μMの間で変動し，明瞭な季節変化の傾向を示さなかった（図5）。

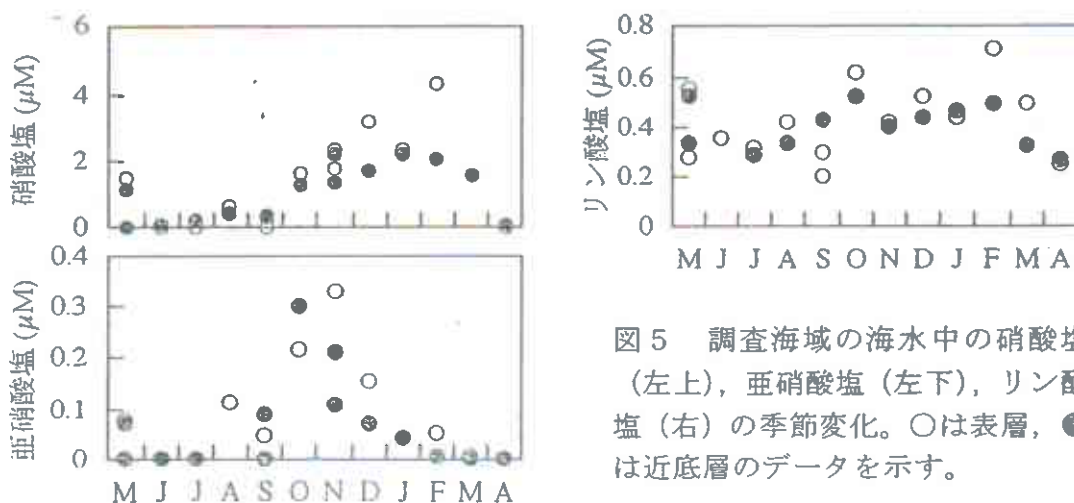


図5 調査海域の海水中の硝酸塩（左上），亜硝酸塩（左下），リン酸塩（右）の季節変化。○は表層，●は近底層のデータを示す。

現存量調査と成分分析の結果から概算される吸収可能な窒素、リンの量はそれぞれ 0.5 ton/ha, 0.1 ton/ha となった (表1)。また、現場海水の平均的な窒素、リン濃度とウガノモク藻体の平均的な窒素、リン含量から計算した窒素、リンの濃縮率はそれぞれ 1.1×10^6 倍, 1.9×10^5 倍であった (表1)。

調査海域において現存量の多いコンブ目藻類4種の藻体内の窒素、リン含量はそれぞれ 1.5~3.3%, 0.09~0.27% であり、種による差異がみられた (表2)。

表1 ウガノモク群落による窒素、リン吸収量と濃縮率

	吸収量 (ton/ha)	濃縮率
窒素	0.5	1.1×10^6
リン	0.1	1.9×10^5

表2 根室半島太平洋岸の主なコンブ目藻類の窒素、リン含量 (乾燥重量%)

種名	窒素	リン
ナガコンブ	1.8	0.19~0.21
ガッガラコンブ	1.5~1.6	0.09~0.24
アナメ	3.0~3.3	0.24~0.27
アイヌワカメ	1.8	0.19

データの汎用性を考慮して、海藻の窒素・リン吸収に影響を与える環境要因である光、温度についてのモニタリングを行った。調査海域は濁りが強く、水中光は水深 1.5m で水面上の 50%, 4m では 20%以下に減衰し (図6), 550nm 付近にピークを持つ緑色光主体の光であることがわかった (図6)。水温は -1.7°C (3月上旬) ~ 14.8°C (10月上旬) の間で変動した (図6)。

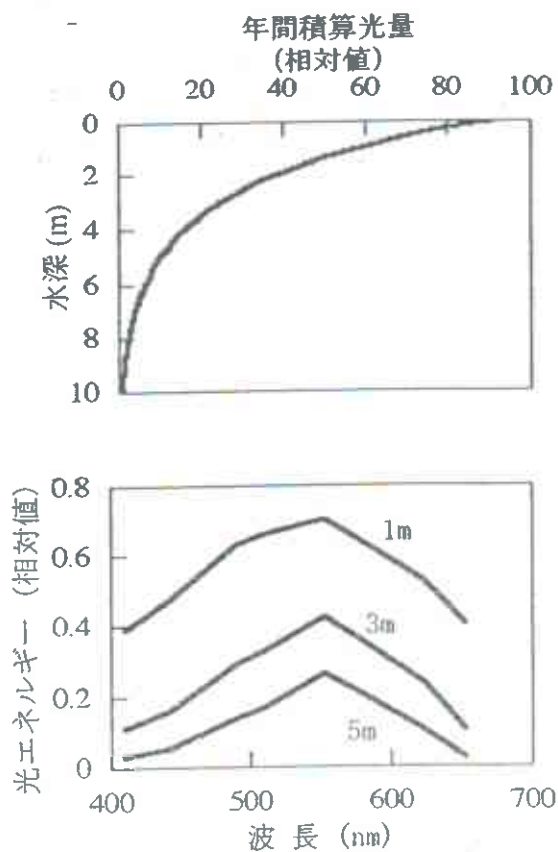


図6 ウガノモク群落周辺の水中光の減衰 (左上), 水中光の分光分布 (左下), 水温の季節変動 (右)。

海水をかけ流した水槽で行ったウガノモク藻体の分解速度に関する結果を図7に示す。指数関数的に減少するウガノモク藻体重量と時間(日)との関係を曲線近似($W_t = W_0 e^{-kt}$; W_0 , W_t は0日後及びt日後の藻体重量, tは時間(日), kは分解速度を示す)したところ, 重量の絶対値及び相対値あたりの分解速度 k (d^{-1}) はそれぞれ, 0.0531, 0.0536 となった。

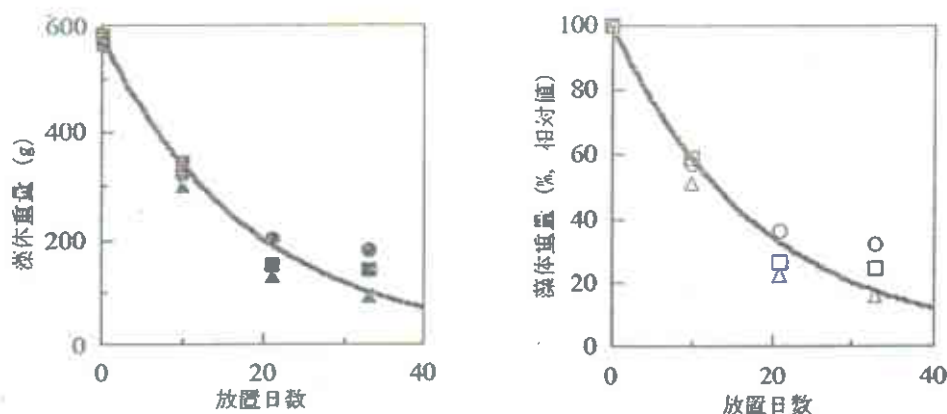


図7 グリーンハウス内の水槽に放置したウガノモクの藻体重量と放置日数との関係。左は湿重量の絶対値, 右は実験開始時の湿重量を100%とした場合の相対重量の変化を示す。藻体重量と時間との関係を曲線($W_t = W_0 e^{-kt}$; W_0 , W_t は0日後及びt日後の藻体重量, tは時間(日), kは分解速度を示すパラメーター)近似して, 藻体の分解速度に関する定数kの値を求めた。

ウガノモクの調査海域近傍の単一漁協管内におけるコンブの漁獲データを入手し, それらのデータに, 藻体の窒素・リン含量, 漁獲統計での製品の歩留まり(製品重量/湿重量), 実際の藻体の乾燥重量:湿重量の比に関するデータを加えて, 環境が均一な海域(図8)(直線距離で約15kmの沿岸)におけるコンブ類の漁獲による海水浄化機能を推定した。その結果, 単年度あたり単一漁協管内での窒素, リンの回収量はそれぞれ27トン, 3トンであった(表3)。

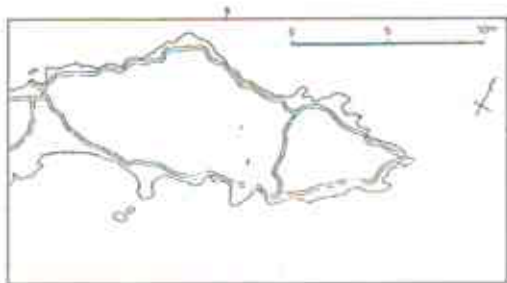


図8 北海道東部太平洋岸における単一漁協管内のコンブ漁場のスケールを示す。グレーの太線で示された海岸線がコンブの漁場。

表3 単一漁協管内のコンブの漁獲による窒素, リンの回収量(単年度あたり)

コンブの漁獲による 窒素, リンの回収(単年度)	
窒素:	27 トン
リン:	3 トン

全国のタイプ別藻場面積データ⁸⁾, 平均的な現存量, 藻体の窒素, リン含量に関するデータを用いて試算した北海道周辺海域における大型褐藻群落の窒素, リンの貯留量を表4

に示した。北海道周辺海域のガラモ場の窒素、リン貯留量は、それぞれ 1520 トン、320 トン、同じくコンブ場では、それぞれ 19680 トン、1970 トンであった。

表 4 北海道周辺海域の大型褐藻群落（最大現存量期）が持つ窒素、リンの貯留効果。

	面積 (ha)	窒素 (ton)	リン
ガラモ場	4227	1521	320
コンブ場	26590	19677	968

5. 考察

多くの海藻は、現存量が最大となる時期を中心に生殖細胞を放出し、その後藻体の大部分を流失させてしまう。本調査の対象種であるウガノモクも、8月になると藻体基部を付着基質に残して、藻体のかなりの部分が基質からはずれてしまい、藻体が流れ藻となって沿岸海域に漂っている様子が観察される。窒素・リンの貯留という点から見れば、一度、海藻に吸収・固定された窒素とリンは比較的短時間のうちに分解されて海水中にもどると考えられるが、ウガノモクを含むホンダワラ類の場合は、藻体に気胞を持ったため、徐々に分解されるものの、藻体は浮いたままの状態ですぐ遠く離れた海域まで運ばれるものも少なくない。従って、ホンダワラ類は、一定量の窒素・リンを生育海域から他の海域へ運び去る効果があるものと考えられる。但し、流れ藻として、「どの程度の窒素・リン」を、「どの程度離れた海域」まで運び去ることができるかは、流れ藻が海面上を漂うコース及び速度と藻体の分解速度によって決まると考えられる。

本調査では、水温や光条件が海表面の条件に近いグリーンハウス内の水槽を用いた実験結果からウガノモク藻体の分解速度のパラメーター (k (d^{-1})) を推定した。本調査で得られたウガノモクの分解速度 (0.05) は、植物プランクトンで得られた値 (0.0126, 23 編の論文から引用した値の平均値)⁷⁾ とほぼ同様であったが、大型藻類である褐藻 *Macrocystis* (ジャイアントケルプ)、緑藻 *Ulva* (アオサ) で報告されている値 (0.023~0.032)⁷⁾ に比べて高い値であった。分解速度は藻体の構成成分の影響を強く受けると想像されることから、既往の成果として比較しうるデータは同じ褐藻 *Macrocystis* に関するもののみであり、更なる検討が必要である。今後、流れ藻として海表面を漂流する速度やコースに関する知見と組み合わせることにより、生育海域から運び出される窒素、リンの量が推定可能となろう。

また、一般に、付着基質からはずれて流失した海藻は、生育現場の近傍で被食・分解されると考えられがちだが、米国カリフォルニアのモンタレー沿岸では、ジャイアントケルプ (*Macrocystis*) の藻体片は 400m の海底まで達することが知られている⁹⁾。この場合、藻体由来の炭素フラックスは $45 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度であると見積もられており、400m の海底まで到達する粒状有機炭素 (POC) のうちの 20~83% がケルプ由来のものであると考えられている。したがって、岸近くから急激に深くなるような海底地形を持つ沿岸海域では、藻場は予想を超える深海までの炭素供給源となっている可能性が高い。本調査でも明らかのように、藻場を構成する海藻の流失量は極めて大きく、「流失した藻体の行方」に関する調査研究は学術的にも興味深いテーマであるが、藻場の多面的な機能を把握しながら、その利用を計る上でも、今後解明すべき重要な課題である。

一般に、藻類の栄養塩吸収は光、温度、栄養塩濃度などの環境要因の影響を受けること

が知られている¹⁰⁾。光は栄養塩吸収における能動輸送のエネルギー源である ATP の供給、吸収した栄養素を取り込む炭素骨格の合成といった光合成への影響を通して、間接的に栄養塩吸収速度に影響を与えることが知られている。温度は拡散のような物理的な吸収に関しては影響が少ないが、最適温度を含めて、栄養塩吸収に与える影響は、藻類の種によって大きく異なるようである。

具体的な例として、本邦産の代表的なコンブ目藻類であるマコンブ (*Laminaria japonica*) の栄養塩吸収速度は光・温度の影響を強く受けることが知られている³⁾。硝酸塩、リン酸塩の吸収速度は、光量子束密度とともに増大する。また、5~20℃までの範囲では、マコンブの栄養塩吸収速度は温度上昇とともに増大することがわかっている (図9)。さらに、珪藻 (*Chaetoceros muelleri*) でも、窒素の吸収速度は光強度の影響を受けることが知られており、栄養塩吸収に必要なエネルギー源が光合成過程で作られる ATP によるものと考えられている。

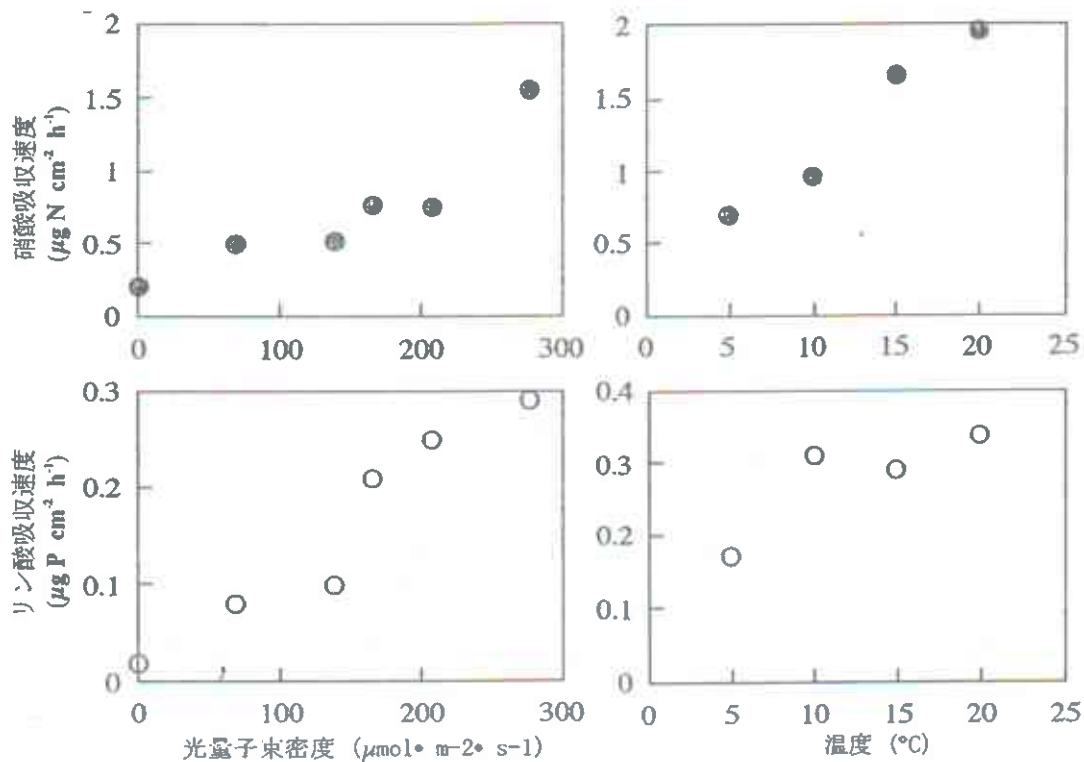


図9 マコンブ (*Laminaria japonica*) の硝酸塩 (上段) とリン酸塩 (下段) の吸収速度に及ぼす光 (左列), 温度 (右列) 条件の影響。Ozaki *et al.* (2001) のデータをもとに作図。

微細藻類では、環境水中のリンが制限された場合、N:Pは30以上、窒素が制限された場合、N:Pは10以下となることが知られており¹¹⁾、環境水中の栄養塩濃度も藻類が吸収・蓄積する窒素、リンの量に大きく影響を与える。

今回、ウガノモク群落で行った環境調査と藻体の窒素、リン含量のデータだけでは、藻体の窒素、リン含量と物理化学的環境要因との具体的な関係を求めることはできないが、今後、様々な海域で環境データを伴った藻類の体成分データが集積されることにより、環境条件の差異に対応した藻体成分の差異を予測することも可能となり、窒素、リンを含む

藻体の体成分に関する取得データの汎用性が向上するものと考えられる。

北海道東部太平洋岸の単一漁協管内におけるコンブの漁獲による窒素、リンの回収量は、単年度あたり、それぞれ27トン、3トンと見積もられたが(表3)、この算定基礎となった単一漁協内でのコンブの漁獲量は、日本におけるコンブ生産量の1/10に達する。直線距離で15km程度の海岸線に沿った極めて狭い海域で、このような莫大な有機物生産が実現されるという事実は、条件を整えば、コンブ目藻類は極めて効率的に有機物生産を行い、その過程で窒素、リン等を大量に吸収できることを物語っている。必ずしも、この海域で期待される環境保全効果ではないし、数字の取り扱いには一定の配慮が必要であるが、表3に示したデータは「コンブ漁業」という産業活動を介した形での「藻場」が有する環境保全効果を端的に示すものである。

6. 摘要

- 1) 北海道東部の根室半島太平洋岸における最大現存量期のウガノモク群落が貯留する窒素、リンの量は、それぞれ0.5 ton/ha, 0.1 ton/haであった。
- 2) ウガノモク藻体の窒素、リン含量は、それぞれ1.4~2.4%, 0.09~0.38%であった。
- 3) 藻体中および海水中の平均的な窒素、リン濃度から計算したウガノモクによる窒素、リンの濃縮率は、それぞれ 1.1×10^6 , 1.9×10^5 であった。
- 4) コンブ目藻類の藻体の窒素、リン含量は、それぞれ1.5~3.3%, 0.09~0.27%であった。
- 5) 栄養塩吸収に影響を与える物理化学的環境要因のうち、水中光、水温、海水中の栄養塩濃度について調べた。海水は濁りが強く(吸光係数0.4)、水中の光強度は、水深1.5mで海表面の50%、4mで20%以下となった。水中光は550nm付近にピークを持つ緑色光が主体であった。水温は-1.7~14.8°Cであった。海水中の硝酸塩は0~4.3 μ M, 亜硝酸塩は0~0.33 μ M, リン酸塩は0.21~0.71 μ Mであった(栄養塩の値「0」は分析機器の検出限界以下という意味)。
- 6) グリーンハウス内の水槽を用いた実験結果から推定した大型褐藻ウガノモクの分解速度に関するパラメーター($W_t = W_0 e^{-kt}$ におけるkの値)は0.05であった。
- 7) 北海道東部太平洋岸の単一漁協管内(直線距離で15kmの沿岸浅海域)におけるコンブ類の漁獲データをもとに、コンブの漁獲による窒素、リン回収量を推定したところ、単年度あたり、それぞれ27トン、3トンであった。
- 8) 北海道周辺海域における最大現存量期の大型褐藻群落が貯留する窒素、リンの量は、ガラモ場(ホンダワラ類)では、それぞれ1500トン、300トン、コンブ場では、それぞれ19700トン、2000トンであった。
- 9) 今後、流失藻体の分解過程、より大きなスケールでの流失藻体の輸送経路、大型褐藻類の窒素・リン代謝と環境要因との関係についての知見の集積が必要である。

7. 引用文献

- 1) 岸 道郎・堀江 毅・杉本隆成, 1993: 東京湾—100年の環境変遷—(小倉紀雄 編), 恒星社厚生閣, 139-153
- 2) 山口征矢, 1993: 東京湾—100年の環境変遷—(小倉紀雄 編), 恒星社厚生閣, 61-77
- 3) MacIsaac, J.J. & Dugdale, R.G. 1969: The kinetics of nitrate and ammonia uptake by natural population of marine phytoplankton. Deep-Sea Research, 16, 45-57.
- 4) Ozaki, A., Mizuta, H. & Yamamoto, H. 2001: Physiological differences between the nutrient uptakes of *Kjellmaniella crassifolia* and *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). Fish. Sci. 67,

415-419.

- 5) Leonardos, N. & Geider, R.J. 2004: Responses of elemental and biochemical composition of *Chaetoceros muelleri* to growth under varying light and nitrate: phosphate supply ratios and their influence on critical N:P. *Limnol. Oceanogr.* 49(6), 2105-2114.
- 6) 秋庭 隆 (編), 1997: 日本列島大地図館. 小学館, 東京
- 7) Enriques, S., Duarte, C.M. & Sand-Jensen, K. 1993: Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C:N:P content. *Oecologia*, 94, 457-471.
- 8) 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.
- 9) Harrold, C., Light, K. & Lisin, S. 1998: Organic enrichment of submarine-canyon and continental-shelf benthic communities by macroalgal drift imported from nearshore kelp forests. *Limnol. Oceanogr.* 43(4), 669-678.
- 10) Lobban, C.S. & Harrison, P.J. 1994: *Seaweed ecology and physiology*. Cambridge University Press.
- 11) Atkinson, M.J. & Smith, S.V. 1983: C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnol. Oceanogr.* 28(3), 568-574.