

STUDY ON THE SEAWEED BED FORMATION BY WATER-DRAINAGE DEEP SEA WATER

Masabumi SETO, Tadashi KAWAI, Norito MAKIGUCHI

³ (社)北海道栽培漁業振興公社 調査設計部 (〒060-0003 札幌市中央区北3西7-1)

Key Words: *Laminaria religiosa*, Gametophyte, Deep sea water, Diffusive concentration

— 123 —

また、図-2において、 $\sigma_t 27.0$ 等密度面は、ほぼ水温 5°C の等温面に対応しているが、同値は対馬暖流量の算定に関わる下限水温に相当することから、 $\sigma_t 27.0$ 等密度面は栄養豊富な日本海固有水上層水の上限に相当し、当該域において冬季の沿岸表層水層水の鉛直混合が促進され、沿岸表層域の栄養塩濃度が増加することを意味している。

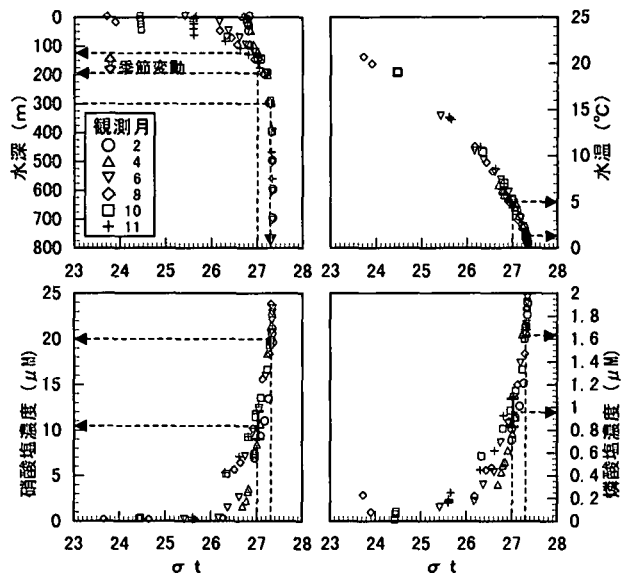


図-2 海洋深層水の取水水深と水質特性

北海道日本海沿岸に位置する檜山海域及び後志海域は我が国最大規模の磯焼けが持続している海域で、1978～1991の13年間に国全体で消滅したコンブ藻場の70.2%が北海道日本海側で占められている。磯焼け現象は、これまで発生原因と持続要因について多角的に検討されているが、前者については海洋環境、特に水温と海藻群落の消長を中心に議論されている。阿部³⁾は実海域におけるホソメコンブ群落の観測結果より、本種の成長が低水温期に促進されると指摘し、松山⁴⁾は北海道南西岸積丹半島付近の冬季の沿岸水温とホソメコンブ漁獲量に負の相関を見出した上で、当該域における沿岸水温の長期的な温暖傾向がコンブの成長を抑制し、食害動物であるウニの活性を顕在化させた結果、コンブ群落の衰退を招いた可能性を指摘している。一方、室内試験によるホソメコンブの発生に関わる温度依存性について、岡田⁵⁾は配偶体の成長と孢子体の形成率をもとに最適水温を8～13°C、Iizumi⁶⁾は配偶体の光合成活性をもとに15～20°Cに適水温ピークの存在を指摘し、何れも実海域に基づく観測結果と矛盾する報告を行っている。しかしながら、室内試験結果は何れも、高濃度の栄養塩が溶存した海水強化培地(PESI)内での培養結果であり、栄養塩無添加下で実施された殖田⁷⁾の実験結果が6～

9°Cと岡田らの結果より低水温に適温帯が移行していることに着目すれば、ホソメコンブの発生は水温よりも海域の栄養条件に大きく依存する可能性が示唆される。近年、Mizuta⁸⁾はホソメコンブ配偶体の卵形成、及び孢子体形成期における複合制限下における窒素閾値を $5.0\mu\text{M}$ と報告している。

本研究は、既往データをもとに、北海道の沿岸域一円に亘るコンブの生産状況と水温、及び栄養環境との相関を解析するとともに、培養試験を実施してホソメコンブ配偶体の成長に関わる栄養依存性について検討することによって、コンブの発生、及び成長に及ぼす栄養制限条件について検討した。更に、これらの結果をもとに、海洋深層水を日本海沿岸域に放水した場合の、放水諸条件とコンブの発生や生産増など放水効果との関係について検討した。

2. コンブ生産量と栄養塩濃度の関係

(1) 調査資料

北海道におけるコンブの現存量に関わる既往知見は極少ないため、本解析では、基本的にはコンブ漁獲量がコンブ現存量を反映するものとした上で、コンブ価格の変動などに伴う経済要因、他の漁業との競合要因などによる漁獲努力量の変動に伴う影響を極力排除するために、各地先における生産量の20年平均値と環境因子との関係について検討した。コンブ生産量は、北海道庁が監修する水産統計資料(北海道水産現勢)の市町村別・漁業別生産高のコンブ採そう漁業に該当する年漁獲量を1975年～1995年まで平均した。また、年生産密度の算出に必要となる市町村別コンブの増殖適地面積は、北海道庁が監修した浅海増養殖適地調査報告書及び、環境庁が実施した自然環境保全基礎調査報告書をもとに決定した。北海道一円の沿岸水温データは、(社)北海道栽培漁業振興公社が養殖漁場海況速報として公表している北海道沿岸52地点における旬別データを1975年～1995年まで地域別旬別に平均した。また、沿岸域における栄養塩データについては、北海道庁が浅海域を対象に過去実施した環境調査より四半期毎の値が複数年に亘って蓄積されたものを抽出して使用した。

(2) 調査結果

図-3は、北海道の沿岸域に位置し、コンブ生産量に関わるデータの蓄積が認められる各市町村におけるコンブの年生産密度(20年平均されたコンブ生産量をコンブ増殖適地面積で除した値)と20年平均された最低月及び最高月の沿岸水温値、及び冬季(2月で代表)の主要窒素濃度(硝酸塩+亜硝酸塩)

の沿岸分布を示したものである(図-1 参照)。海藻の栄養塩制限については、硝酸塩などの窒素濃度が燐酸塩など他の栄養塩類と比較して主要な制限因子となることが指摘されている⁹⁾。図-3 より、磯焼けが進行し、生産性の低い石狩湾以南日本海は高水温、低栄養であるのと対照的に、生産性の高い道東海域は低水温、高栄養の環境条件を形成していることがわかる。特に、日本海で観測された冬季の地先別平均窒素濃度は何れも $5 \mu\text{M}$ を下回っており、他の海域と比較して低位で推移している。

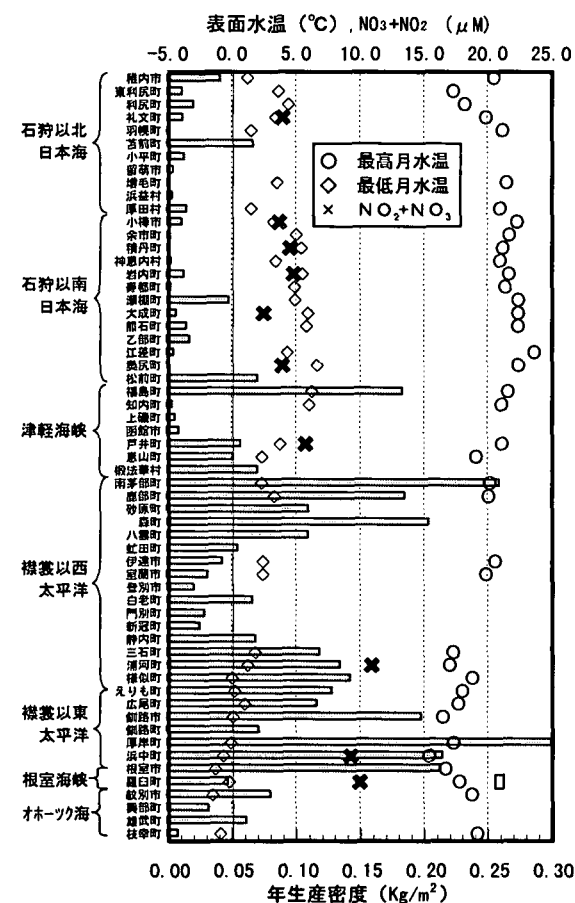


図-3 コンブ年生産密度の沿岸分布

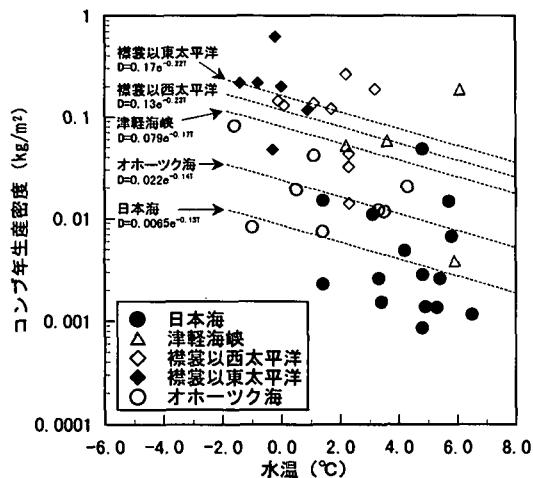


図-4 海域別コンブ年生産密度と水温の相関性

図-3 をもとに各地先別の冬季最低水温値とコンブ年生産密度の関係を整理すると図-4 となる。これより、水温と生産密度の間には海域毎に負の相関が認められ、同一の水温条件下においては、日本海、オホーツク海、津軽海峡、エリモ以西太平洋、エリモ以东太平洋(道東)の順で、水温値に対する生産密度が増加し、日本海は生産密度は道東の1割程度以下に留まっている。更に、同一海域内においても地域的なばらつきが認められ水温と年生産密度の相関は小さい。

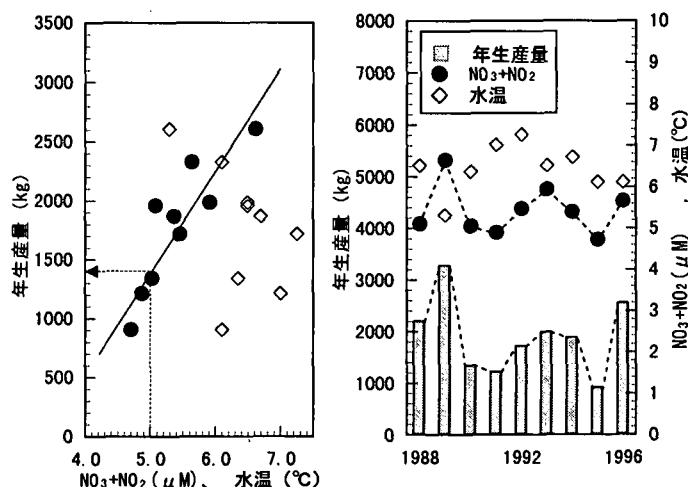


図-5 コンブ生産量と窒素濃度の時系列(岩内)

図-5 右は岩内町におけるコンブの年生産量と、岩内町に隣接する泊村周辺海域で実施された2月の窒素(硝酸塩+亜硝酸塩)濃度、及び水温の時系列を1988年~1996年に亘って示したものである¹⁰⁾。更に、生産量と窒素濃度及び水温との相関性を図示すると図-5 左となる。これより、水温と年生産量の相関性に比べて、窒素濃度の増減と年生産量の消長に強い相関が認められる。北海道日本海においては、泊村地先および石狩湾内に位置する忍路湾で、比較的長期の栄養塩時系列データが蓄積されており、両者とも2月の窒素濃度の最大値はほぼ隔年的に $5.0 \mu\text{M}$ 程度を維持するものの、平均値は $4.4 \mu\text{M}$ 程度に留まり、Mizuta ら⁸⁾の知見に基づけば、磯焼け海域に分類される当該域は、ホソメコンブの発生に関わる窒素濃度が周期的に不足傾向を呈する海洋環境が持続されていることが示唆される。

図-6 は、北海道沿岸の浅海域において、既往の栄養塩データが存在する10地点におけるコンブの年生産密度と年平均窒素濃度との関係を示したものである。図中には泊村地先(岩内湾)で観測された、各年平均された時系列データも同時に示してある。これより、コンブ年生産密度は窒素濃度の増加とともに指数関数的に増大し、海域によらず統一的に同一曲線上に整理され、海域の年平均窒素濃度がコン

ブの生産量を規定し、図中の近似式で概ね評価できることがわかった。

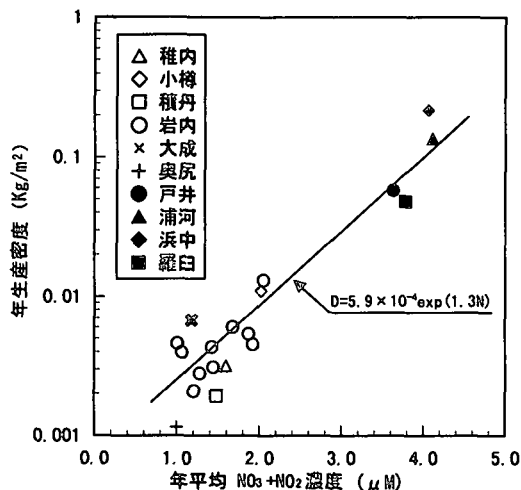


図-6 コンブ年生産密度と窒素濃度の関係

3. コンブ配偶体の栄養塩依存性

(1) 実験方法

本研究では、Mizuta ら⁸⁾の報告より更に初期発生段階に相当するホソメコンブ配偶体の成長（細胞分裂）期における窒素閾値について培養試験を実施して検討した。供試母藻は2000年10月に石狩湾内に位置する余市町地先で採取したホソメコンブで、乾湿刺激により遊走子を放出させ滅菌海水による洗浄で珪藻を除去後、窒素濃度の異なる細胞培養用容器（容量200cc）底部に着底させて、振揺培養装置（タイテックNR-30）で培養した。培養液は、窒素成分の少ない黒潮表層水に窒素成分を除去したPESIを添加して一次標準海水を作成後、硝酸カリウムを準じ加えることにより1.75~6.75 μMの範囲内で窒素濃度の異なる6通りの培養液を作成し各濃度毎に2ケース、計12ケースで培養した。培養期間中の光条件は光量子で約30 μM、12LDに設定し、水温は10℃に固定した上で7日毎に培養液を交換し、培養期間内の約1ヶ月間に亘って容器内窒素濃度をほぼ一定に保った。容器内に着底した遊走子に由来する配偶体の細胞数は、7日毎に雄性配偶体と雌性配偶体を各5個体無作為抽出した上で倒立顕微鏡で計数した。更に、2000年8月29日に石狩湾湾口部（図-1参照）の水深300mより取水後凍結保存した海洋深層水（窒素濃度15.8 μM）、及び2000年12月28日、余市町地先で取水後砂濾過した表層海水（窒素濃度6.6 μM）についても、取水時の栄養状態を維持したまま同様の培養実験を実施した。

(2) 実験結果

図-7は、各培養条件下において経時的に増加する

配偶体の細胞数の計数結果をもとに、培養開始直後より30日経過した時点までの細胞数の日平均増加数（成長速度）を算定した上で、成長速度と培養液の窒素濃度との関係を図示したものである。

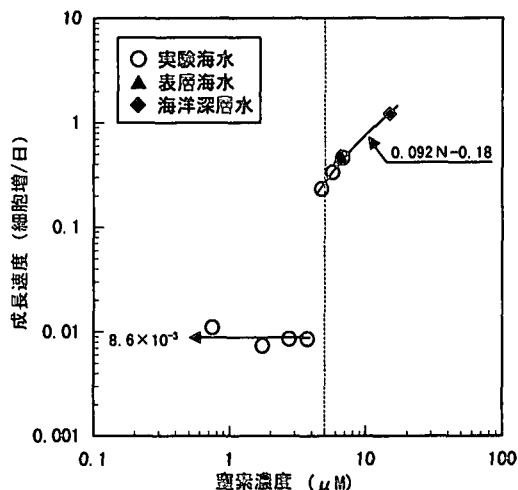


図-7 コンブ配偶体の成長速度と窒素濃度の関係

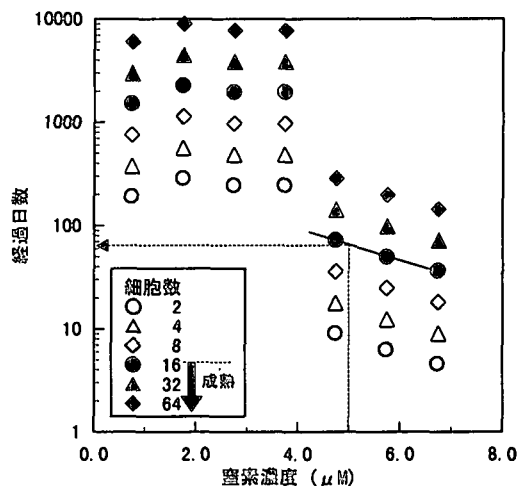


図-8 コンブ配偶体の成熟日数と窒素濃度の関係

図-7より、配偶体の成長速度は培地の窒素濃度が約5.0 μMを境として、窒素濃度に依存する領域と依存しない領域に明瞭に区分され、濃度5.0 μM以上の窒素依存領域においては、PESI内で窒素濃度のみを変化させた場合の成長速度と、実海域より取水した海洋深層水及び表層海水で培養した場合の成長速度が同一直線上で統一的に整理された。本結果は、窒素濃度が5.0 μM以上で配偶体の成長が促進されるとともに、配偶体の成長は実海域に溶存する各種栄養塩類の中で、窒素が制限要因として作用していることを示唆している。一般に配偶体は細胞数が二桁以上で成熟期に達するものとされるが、図-8は、成長速度をもとに推算される各窒素濃度別の細胞数と培養開始以降の経過日数の関係を示したものである。図中の実線は細胞数が16に到達する日数を示しているが、窒素濃度5.0 μMに対応する日

数は図中点線で示すように、約 2 ヶ月程度となり、同値は実海域における観測結果とほぼ一致していること、及び北海道日本海で窒素濃度が比較的高い値を示す時期が冬季の最大 3 ヶ月程度であることから、ホソメコンブの発生は海域の窒素濃度に強く依存し、配偶体の成長を規定する閾値が $5.0 \mu\text{M}$ 付近に存在することが明らかとなった。即ち、ホソメコンブ発生期における海域の窒素濃度が $5.0 \mu\text{M}$ 以下では、配偶体の成長が抑制され配偶体の成熟や幼芽の形成まで至らない可能性が示された。

4. 海洋深層水の放水に伴うコンブ藻場造成効果

(1) 数値モデルの概要

海洋深層水の放水後の挙動については、水鳥ら¹¹⁾により開発された、放水流量が少量の場合の冷廃水挙動推定モデルを改良して使用した。水鳥らのモデルは周辺海水との密度差が比較的小さい冷廃水の小規模放水後の拡散特性が平面 2 次元的な挙動を示すことに着目し、拡散諸元の断面分布に関わる相似性を実験的に検証した上で、平面 2 次元モデルを適用することによって拡散予測を簡素化したもので、本研究では、冷廃水の躍層を境として海洋深層水と表層水の上下 2 層のレベルモデルをスタググートメッシュで離散化することにより、海洋深層水に溶存する窒素濃度の放水後の拡散状況を数値解析した。計算では、海洋深層水は底層より放出されるものとし、層ごとに積分された以下の運動方程式（ x 成分のみ表示）、連続方程式、及び拡散方程式をもとに計算した。

a) 上層の基礎式

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{H} \right) = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon_H H \nabla^2 \left(\frac{Q_x}{H} \right) + \tau_{xw} - \tau_{xi} + uw \Big|_{z=-Hb}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = w \Big|_{z=Hb}$$

b) 下層（放水層）の基礎式

$$\frac{\partial Q_{wx}}{\partial t} + \frac{\delta}{\alpha^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{wx}^2}{H_w} \right) + \frac{\delta}{\alpha^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_{wx} Q_{wy}}{H_w} \right) = -gH_w \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon_H \nabla^2 Q_{wx} + \tau_{xi} - \tau_{xb} - uw \Big|_{z=-Hb}$$

$$w \Big|_{z=-Hb} + \frac{\partial Q_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{wy}}{\partial y} = 0$$

c) 下層拡散の基礎式

$$\beta \frac{\partial T_m}{\partial t} + (\gamma U_m + \beta u) \frac{\partial T_m}{\partial x} + (\gamma V_m + \beta v) \frac{\partial T_m}{\partial y} = \beta \left(\kappa_x \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \kappa_y \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} \right) + \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-Hb}$$

ここに、 Q_x, Q_y, Q_{wx}, Q_{wy} ：上層、及び躍層内の線流量、 η ：水位変動量、 u, v, w ：層間流速成分、 H ：上層層厚、 H_w ：躍層層厚、 g ：重力加速度、 ε_H ：水平渦粘性係数、 T_m ：躍層内の代表水質値（最低水温、栄養塩濃度最大値）、 U_m, V_m ：躍層内の最大流速、 $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z$ ：水平及び鉛直拡散係数、更に、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は躍層内の流速分布及び水質分布を規定する係数で、これら諸係数は水鳥ら¹³⁾と同様な値を与えた。

(2) 推定結果と考察

本モデルを、磯焼け現象が進行している北海道日本海沿岸域へ適用した場合を想定して、一様水深（コンブの適正生息水深などに配慮して 5m に設定）下に海洋深層水を放水した場合の栄養塩の拡散状況について検討した。本研究で明確化されたコンブの生産量及び配偶体の成長と窒素濃度との関係をもとに、海洋深層水の放水効果の算定条件として、放水によって冬季のコンブ発生期における窒素閾値（ $5.0 \mu\text{M}$ ）以上の栄養塩濃度が確保される領域を再生面積と定義した上で、再生面積内のコンブ生産増を、当該域内における窒素濃度の年平均値と生産量の関係式である図-6 中の近似式より推定した。

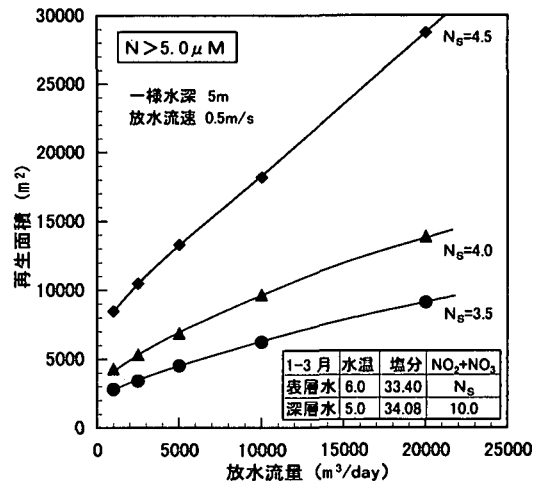


図-9 放水流量とコンブ再生面積の関係

図-9 は、冬季日本海の平均的な沿岸条件として、表層水温 6°C 、塩分濃度 33.40psu で、表層の溶存窒素濃度 (N_s) が $3.5, 4.0, 4.5 \mu\text{M}$ の各海域に海洋深層水（取水・陸上利用時の昇温、栄養塩の消費を見込んで水温 5°C 、塩分 34.08psu、窒素濃度 $10.0 \mu\text{M}$ と想定）を放水流速 0.5m/s で放水した場合の、放水流量に対する再生面積の計算結果を示したものである。これより、現在北海道日本海側で想定されている海洋深層水の取水流量（日量 $3000 \sim 4000\text{m}^3$ ）程度では放水海域の N_s 値にも依存するが、 $N_s=4.0$ に対応する再生面積は 0.6ha 程度に留まることから、海

洋深層水を開放領域に放水する場合には、潜堤などの外郭施設で積極的に滞留させる方策を検討する必要が示唆された。なお、図-9において放水流量が減少しても造成面積がそれに比例して縮小されないのは、流量縮小に伴い躍層の厚さも減少するためである。図-10は、北海道日本海の年平均水質条件（水温 12.0℃、塩分 33.3psu、窒素濃度（ N_{sm} ）1.5 μM と想定）下に海洋深層水を放水した場合の、放水流量に対する窒素濃度の増加量（+1.0~8.0 μM ）毎の海域面積（生産増面積）の関係を示したものである。更に、これらの生産増面積をもとに、放水海域の年平均窒素濃度（ N_{sm} ）をパラメータとして図-6の近似式よりコンブの生産増を推定すると図-11となる。これより、当該域の想定流量に対応するコンブの年生産増は 600kg 程度となる。図-3より北海道日本海の平均的な年生産密度が 0.014kg/m² 程度であることから、日量 3000~4000m³ 程度の放水による生産増は、日本海沿岸域では 4.3ha 程度、道東の好漁場と比較すれば 0.2ha 程度の新たなコンブ藻場の創造に匹敵する。

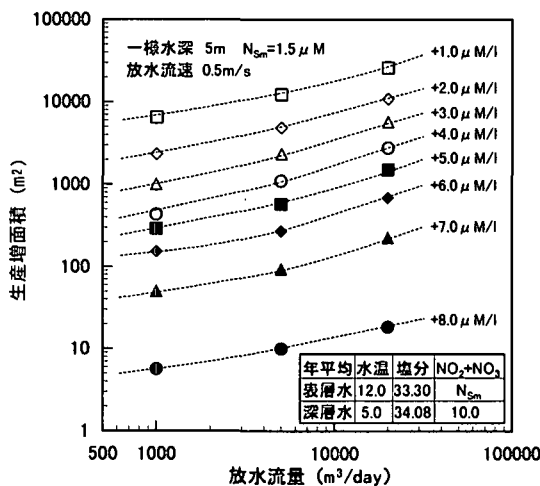


図-10 放水流量と生産増面積の関係

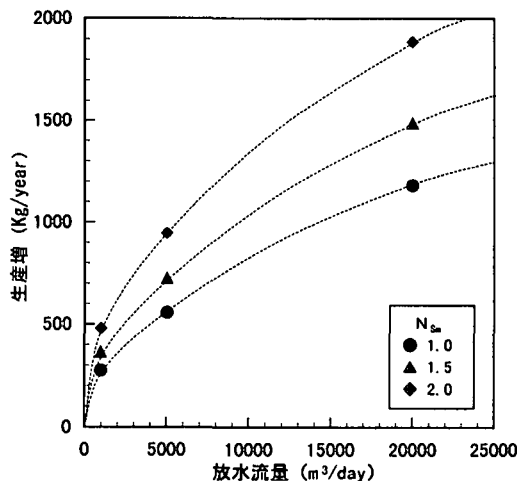


図-11 放水流量とコンブ生産増の関係

5. おわりに

北海道沿岸の岩礁域に着生するコンブ群落は、磯焼け海域においてはサンゴモ類をはじめとする他の海藻による競合や、キタムラサキウニを中心とした植食動物による食害の影響下に在るにも関わらず、コンブ生産量が海域の栄養塩（窒素）濃度に強く依存しながら消長している事実は注目に値する。このことは、コンブ等有用藻類に関わる既往水産統計に基づく海域の環境変動推定へ向けた新たな解析手法の開発可能性を暗示している。磯焼けの発生原因が海域の無機環境の変動に依存するのであれば、人為的に解消するのは困難を極めるが、海洋深層水の放水に伴う藻場造成技術の開発は小規模ながら制御可能な数少ない解消手法の一つとして今後更なる進展が期待される。なお、放水された冷水の周辺環境への影響評価については、稿を改めて報告する予定であるが、日量数千トン程度の放水量では、概して影響は認められなかった。

最後に、配偶体の培養実験に御助言いただき、実験の便宜を図って下さった瀬戸内海区水産研究所の寺脇利信室長他の海洋環境部の皆様に深謝します。

参考文献

- 1) 瀬戸雅文, 大竹臣哉, 奥野充一, 中村充: 日本海深層水と内部波の挙動解析, 海洋開発論文集, 第 14 巻, pp5-10, 1998.
- 2) 瀬戸雅文, 大竹臣哉, 奥野充一, 中村充: 石狩湾周辺海域における内部波の形成と湧昇流の発生機構, 海洋開発論文集, 第 16 巻, pp285-289, 2000.
- 3) 阿部英治, 垣内政宏, 松山恵二, 金子孝: 忍路湾産ホソメコンブの成長について, 北海道水産試験場報告, 第 27 巻, pp101-110, 1985.
- 4) 松山恵二: 北海道の磯焼け対策, 育てる漁業, 第 217 巻, pp2-12, 1991.
- 5) 岡田行親, 三本菅善昭: コンブ類の雌性配偶体の成長と成熟に及ぼす温度の影響, 北海道水産研究所報告, 第 47 巻, pp51-56, 1980.
- 6) Iizumi, H. and Y. Sakanishi: Temperature dependence of photosynthesis-irradiation relationship of gametophytes of *Laminaria religiosa*, Bull. Hokkaido Nat. Fish. Res. Inst. 58, pp45-52, 1994.
- 7) 殖田三郎: ホソメコンブの発生と温度との関係について, 水産試験場報告, 第 24 巻, pp174-180, 1929.
- 8) Mizuta et al.: Effect of nitrate and phosphate on the growth and maturation of gametophyte of *Laminaria religiosa* Miyabe, Suisanzoshoku, (投稿中)
- 9) Lobban, C. S. and P. J. Harrison: Nutrients, in Seaweed Ecology and Physiology: Cambridge University Press, New York, pp163-209, 1994.
- 10) 北海道庁: 泊発電所周辺温排水影響調査結果の概要, 北海道庁, pp. 1-120, 1998.
- 11) 水鳥雅文, 首藤啓: 冷廃水の拡散特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1051-1055, 1995.