

北海道における対馬暖流の長期変動が コンブ生産量に及ぼす影響

TEMPORAL VARIATION OF KELP YIELDS CAUSED BY INTERANNUAL
VARIATION OF TSUSHIMA CURRENT ALONG THE SOUTHWEST
COAST OF HOKKAIDO

瀬戸雅文¹・佐藤達明²・山下克己³

Masabumi SETO, Tatsuaki SATO, Katsumi YAMASHITA

¹正会員 水博 福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町1-1)

²地環修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 札幌市西区寒寒9条14丁目516-336)

³福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町1-1)

Numerical simulation was performed on the relation between the interannual variation of the Tsushima warm current along the southwest coast of Hokkaido and the concentration of nitrogen, the production of a kelp *Laminaria religiosa*. The downward tendency of northward volume transport along the southwest coast was maintained at a rate of year 0.036SV in 1986 and afterwards. Reduction of northward flux falls the surface water temperature of the coast, and making nitrate concentration increase was suggested. According to simulation, the year yields of the kelp in the southwest coast increased about 32 times, when northward flux decreased to 60% of the present condition.

Key Words : Annual variation, Tsushima current, *Laminaria religiosa*, barren ground

1. はじめに

北海道の日本海南西海域は、我が国最大規模の磯焼けが持続している海域で、1978～1991年の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、同期間に当該域に現存するコンブ藻場の約4.1%が消滅している。磯焼けは、生活形を異にする海藻間のサイクリックな遷移過程において、大型多年生海藻から無節サンゴ藻などの殻状海藻への遷移が卓越した状態と解釈される。磯焼けの発生原因については海況変動、植食動物の摂餌圧、河川由来の溶存鉄、サンゴ藻の着生阻害など諸説が混在し特定まで至っていないが、著者ら¹⁾は、コンブ配偶体期(2月)の窒素濃度が幼孢子体の発生を左右する制限要因となることを培養実験より確認するとともに、過去20年間に及ぶ北海道におけるコンブ漁場の年生産密度と窒素濃度の相関を記述する近似式を提案している。一方、日本海を北上する対馬暖流は、図-1に示すように龍飛崎周辺で津軽海峡より太平洋へ流出する津軽暖流と北海道南西海域を北上する北上流に分岐し、分岐機構が北部日本海に留

まらず宗谷暖流、沿岸親潮や道東沿岸流の消長とも関連しながら広く北海道沿岸域の環境・資源変動に影響を及ぼすことが指摘されている²⁾。

本研究は、対馬暖流の分岐に伴う北上流量の長期変動が、北海道南西部に形成される磯焼け海域の海洋環境や窒素濃度の沿岸域分布に及ぼす影響を数値解析的に推定するとともに、コンブ配偶体期の窒素濃度の沿岸域分布が当該域のコンブ生産量に及ぼす影響について検討した。

2. 対馬暖流および分岐流の変動特性

対馬暖流は対馬海峡を通過後、日本海を複数の分岐に分かれて北上し、再び津軽海峡西方青森沖の北緯40度付近(例えば、図-1の舳作崎線)で本州側に収束することから、当該域を中心にCTD調査に基づく力学計算や係留系を設置した直接観測など³⁾が実施され、暖流量の変動特性に関する既往知見が集積されつつある。一方、北上流量についても、1988年より北海道立水産試験場によって岬沖合に定点観測線(図-1のJ4線)が設定され約2ヶ月毎に

CTD 観測が継続されている。また、津軽暖流量においては、津軽海峡西口で実施された ADCP 観測をもとに深浦と函館の水位差と日平均流量に関する西田らの相関式⁴⁾が提案されている。

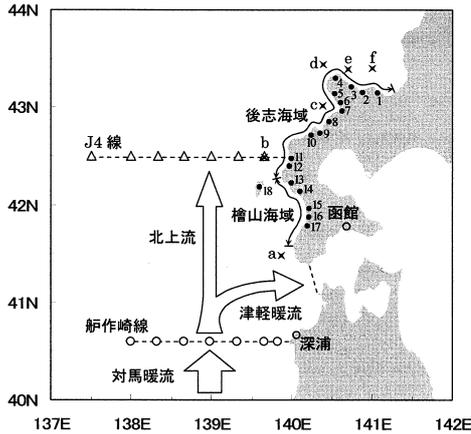


図-1 対象海域の概念図

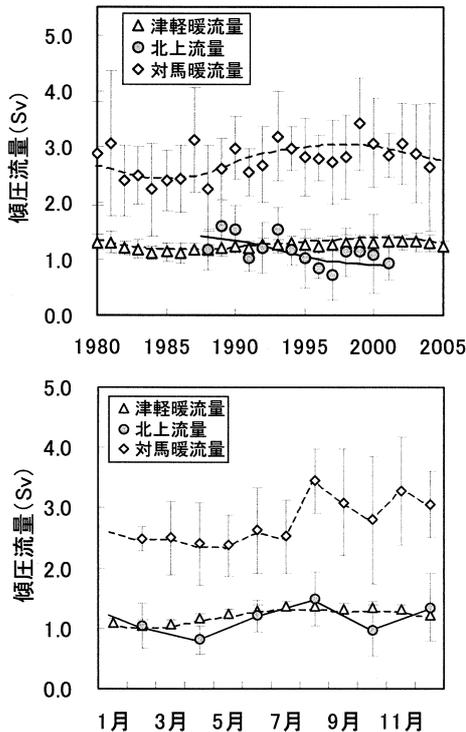


図-2 各暖流量の経年変動および季節変動

図-2 は、1980 年以降に舳作崎線および J4 線で観測された CTD データより水深 300m に無流面を設定した場合の力学計算に基づく傾圧地衡流量、および西田らの相関式に深浦と函館の水位差を代入して計算した津軽暖流量の経年変化と季節変化を示したものである。北上流量の算出期間内（1988～2001 年）における対馬暖流、北上流、および津軽暖流の平均流量は各、2.84Sv、1.15Sv、1.25Sv で、北上流量と津軽暖流量の和は対馬暖流量より 15%程度小さくなる。より詳細な分配機構を検討するためには無流面水深の設定や傾圧流の影響などを考慮する必

要性が認められるが、力学計算より概算的な流量特性は検討できるものと考えられる。また、計算期間内における北上流量は減少傾向を呈し、減少率は年 -0.036Sv で計算期間内の 14 年間で計算開始時（1988 年）と比較して 36%流量が減少している。

一方、同じ期間内の津軽暖流量は年 0.0099Sv の割合で増加し、1992 年以降は北上流量を上回る傾向が維持されている。従来より、対馬暖流量には 5～6 年程度の周期的な経年変化⁵⁾が報告されているが、津軽暖流量が水位差で評価できることに加えて、日本海や太平洋の沿岸水位に約 20 年の準周期的な長期変動⁶⁾の存在が確認されていることから、津軽暖流や北上流の分配機構においても約 20 年を基本モードとする更に長期的な変動が存在する可能性も示唆される。対馬暖流量と北上流量の季節変動には、共に 3～5 月と 10 月に極小値、8 月と 11～12 月に極大値をとる傾向が認められ同様な季節的な変動機構が分岐後も維持されていることが認められる。

図-3 は CTD 観測データの 20 年平均値をもとに舳作崎線における σ_t および傾圧地衡流量の断面分布

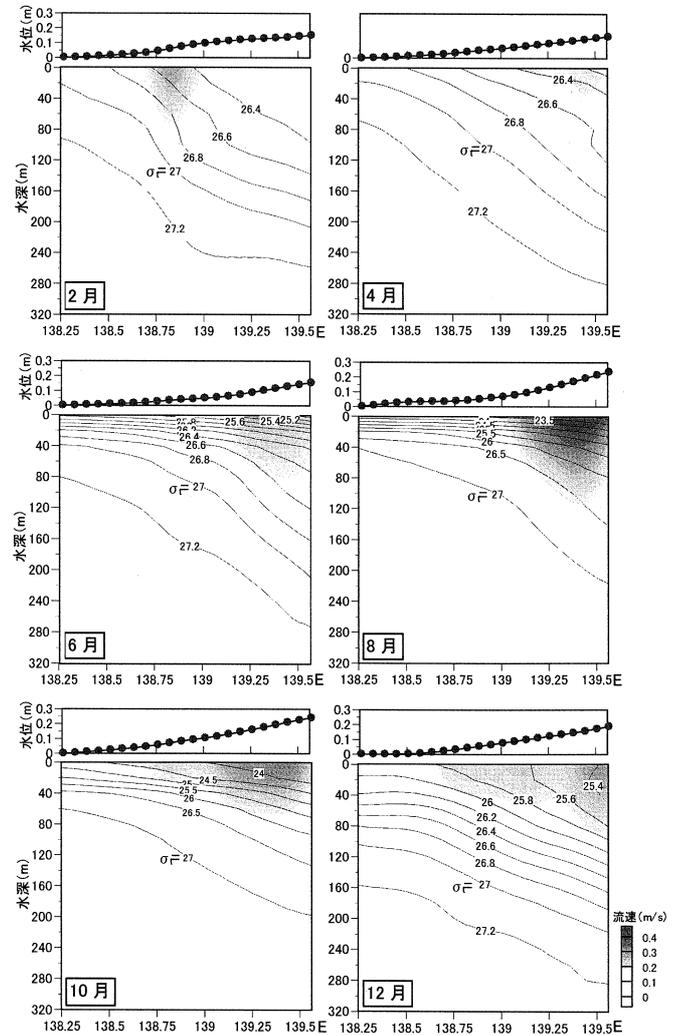


図-3 舳作崎線における断面密度分布、傾圧流量、および海面高度の季節変動

を、観測線西端点を基準水面として算出した海面高度とともに月別に示したものである ($1Sv=10^6m^3/s$)。これより、沿岸境界流としての基本構造を有する対馬暖流も、暖流量の減少期には流軸が西側に移動し、暖水渦に伴う南下流が形成され断面流量を低下させている状況が伺える。

3. 数値シミュレーション

(1) 解析資料

対馬暖流の消長に依存した北上流量の長期的な減少が当該域の海洋環境や生産構造に及ぼす影響を数値解析的に検討することを目的として、海洋情報研究センターより入手した過去 20 年間に亘る水温・塩分・栄養塩類データと北海道立水産試験場の公表する海洋観測データを使用した。計算に使用したデータ数の平面分布を図-4 に示す。

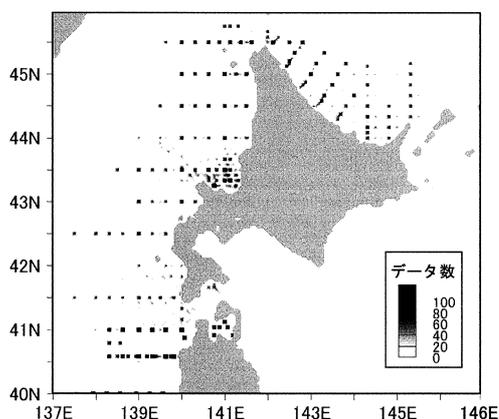


図-4 解析データ数の平面分布

(2) 数値モデルの概要

図-5 に示すように、北緯 $40^{\circ} 00'$ ~ $46^{\circ} 00'$, 東経 $138^{\circ} 30'$ ~ $146^{\circ} 00'$ を対象領域に設定し、緯度・経度を $5km \times 4.5km$ 格子 ($3.75^{\circ}E \times 2.5^{\circ}N$ セル) に水平分割するとともに、水深 $0 \sim 1000m$ までを $40m$ 間隔で、 $1000m$ 以深は同一水塊と見なして水深方向を 25 層に分割し、収集データ (水温・塩分) を月別に 20 年平均後、各計算セルに割り振った。境界条件の設定は、4 面境界の水温・塩分データをもとに力学計算を実施し、境界に直交する地衡流量、及び力学的海面高度を算定した結果、断面流量の少ない西側及び北西側境界は固定壁境界で近似した上で、対馬暖流が収束する青森県沖作崎沖合 (南側境界) に傾圧地衡流速の断面分布を与えた。数値計算にはフル三次元流動モデル (DHI 社製 MIKE3) を使用し、力学的海面高度に松本ら⁷⁾ が公表したモデル (NAO.99JP) をもとに海洋潮汐を作用させて北海道日本海周辺の順圧流場及び傾圧流場を再現

した。数値計算では、南側境界における北上流量を強制的に 20 年平均値の 80%及び 60%に減少させた場合の水塊応答や沿岸域における密度構造の変動特性を月別に数値解析的に検討した。

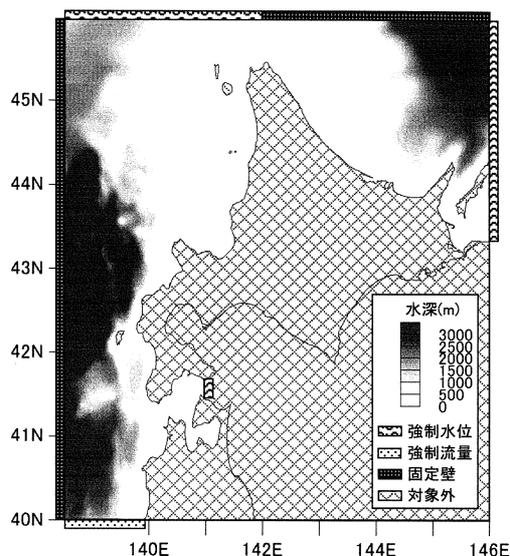


図-5 境界条件の概要

(3) コンプ生産量の推算法

コンプ生産量の推定には、瀬戸らが提案したコンプ年生産密度と海域の窒素濃度の関係式¹⁾を使用し、生産密度にコンプ漁場面積を乗ずることより算出した。コンプ漁場面積は、北海道庁が監修した浅海増殖適地調査報告書、及び環境省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。計算値の比較対象としたコンプの現生産量は、北海道水産現勢の市町村別漁業別生産高の北海道南西海域地先 (後志・檜山海域, 図-1 中の番号 1~18) におけるコンプ採そう漁業に該当する年漁獲量データの 20 年平均値を使用した。

図-6 は、積丹半島沖合定点 (図-1 中 d 点) で計測された硝酸塩断面分布の季節変化を示したものである。当該域の海表面付近における硝酸塩濃度は北上流量がピークを迎える 8~9 月に最小値を記録後、鉛直混合が促進される 10 月以降に増加に転じ、コンプ配偶体期および芽胞体期に相当する 2 月頃に最大値 ($5 \sim 6 \mu M$) に達し混合層は $400m$ 以深まで発達している。北海道の石狩湾以南より南西海域 (図-1 中の a~f 点) における硝酸塩の季節変化はほぼ同様な傾向を呈することから、本研究では $\sigma_t = (\rho - 1) \times 10^3$ (ρ : 海水密度) をパラメータとして次式で評価した。

$$\text{Nitrate-N}(\mu M) = \exp(n_1 + n_2/\sigma_t) \quad (1)$$

ここに、 n_1 と n_2 は季節変動に依存するパラメータで各々 86.8 ± 30.2 , -2290 ± 824.8 の値をとる。

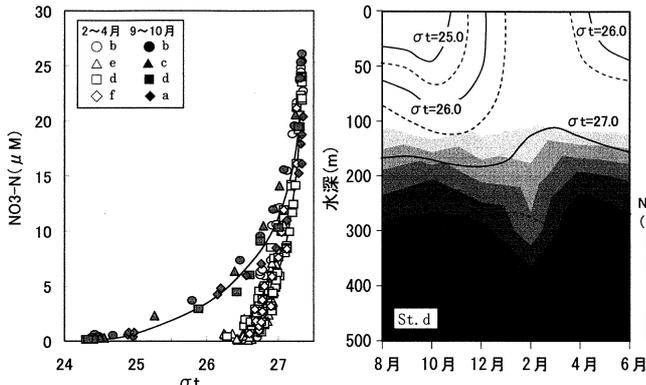


図-6 硝酸塩の経時断面分布と σ_t による変化

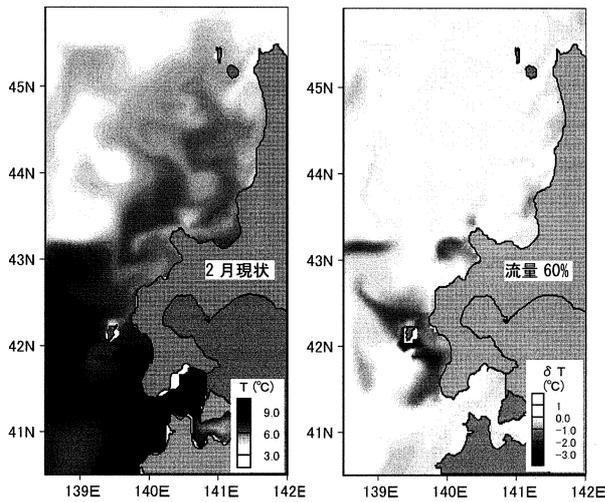


図-7 2月の水温分布と流量60%時の偏差分布

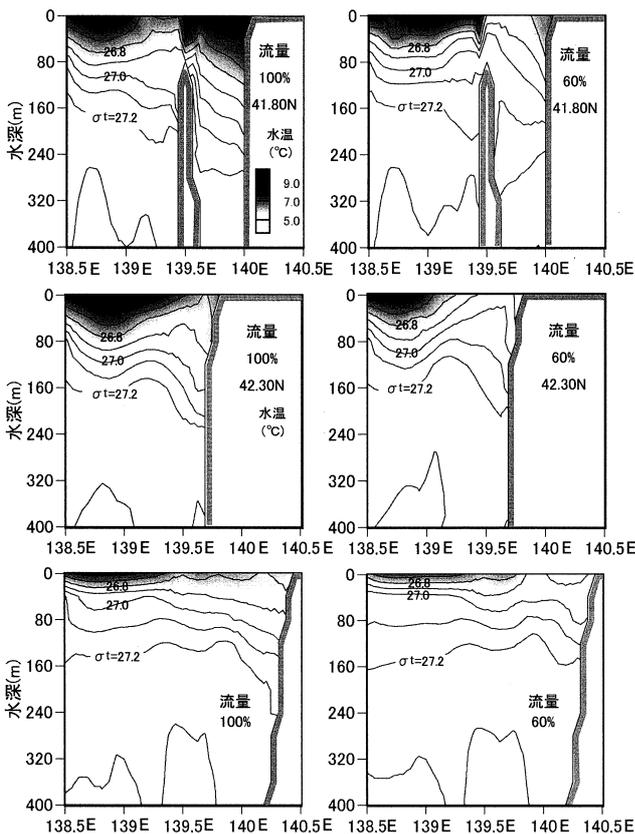


図-8 流量変化に伴う断面密度水温分布の変化

本研究では、数値計算より求まる各地先別の表層 σ_t 値より硝酸塩濃度を計算し、硝酸塩濃度を窒素濃度で代表して各地先別のコンブ生産量を算定した。

4. 対馬暖流とコンブ生産量の関係

(1) 暖流量の変化と水塊応答

図-7 は、北海道南西（後志および檜山）海域におけるホソメコンブの配偶体期に相当する2月の表層水温の平面分布と、対馬暖流量が現状の60%まで減少した場合の水温偏差の平面分布を示したものである。当該沿岸全域の2月の平均水温は6.44℃で北上流が岸に張り付いて流れる茂津多岬以南の檜山海域で高い傾向が認められる。奥尻島北部や積丹半島先端部周辺に認められる水温が5℃未満の低水温域は、島や岬の後流域に相当することから地形性湧昇流の影響が示唆される。暖流量が平年値の60%まで低下すると当該沿岸域の平均水温は0.9℃低下し、特に檜山海域は平均1.6℃と流量減少の影響が顕著に反映されている。また、奥尻島南部や積丹半島南西部など暖流の流軸に直面する海域では大幅な（3～5℃）水温低下が認められる。

図-8 は、暖流量の変化に伴う奥尻海盆、瀬棚沖、および岩内沖における水温と σ_t の東西断面分布を示したものである。これより、何れの断面分布においても、対馬暖流の目安とされる水温5℃以上の水塊は、暖流量の減少とともに沖（西）側へ移動し、岸側境界付近では、当該域における季節躍層の下限を規定する $\sigma_t 27.0$ 等密度面の形成水深が平均70m上昇している。特に、奥尻海脚先端部や瀬棚沖では等密度面の局地的な上昇が顕著に認められる。

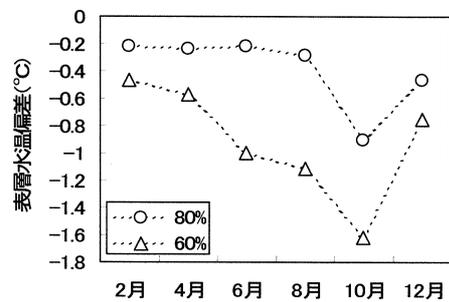


図-9 流量変化に伴う表面水温偏差の季節変化

図-9 は、暖流量の減少に伴い当該沿岸域に発生する水温変化の現状値との偏差を各月毎の海域平均値でプロットしたものである。暖流量の減少に伴う表層水温の低下は、先ず暖流量強流期の極小時期に相当する10月に発生し、暖流量の更なる減少に伴って6～8月の表層水温の低下へと季節的な影響が拡大してゆく状況が認められた。

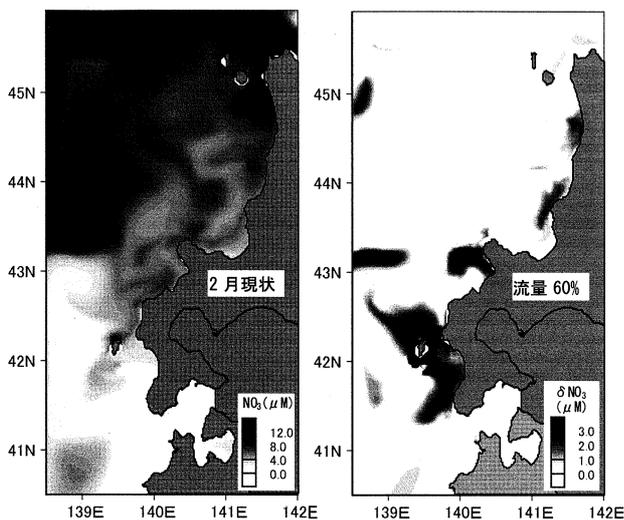


図-10 2月の硝酸塩分布と流量60%時の偏差分布

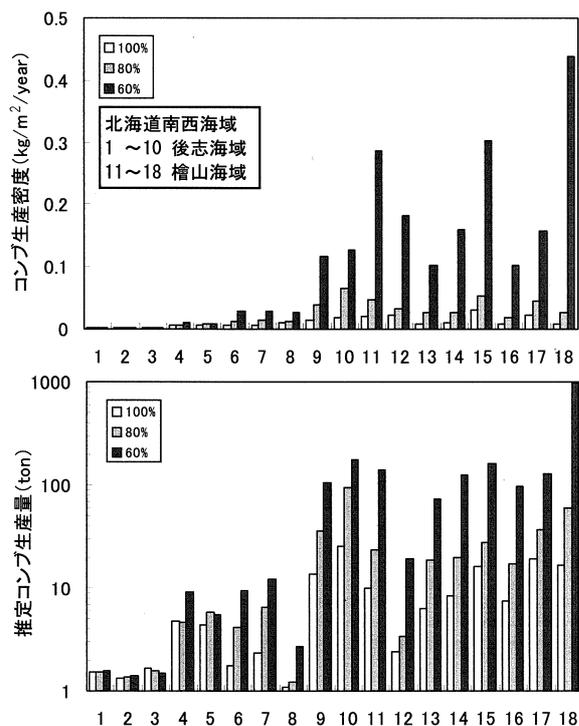


図-11 北海道日本海南西海域におけるコンブの年生産密度および年推定生産量の沿岸分布

(2) 硝酸塩の動態とコンブ生産量

暖流量の減少は沿岸境界流の離岸や陸境界付近の等密度面上昇を促進し、季節躍層以深に高濃度で溶存する栄養塩類を浅海部へ供給する機構を促進するものと考えられる。図-10は、北海道南西海域における2月の表層に溶存する硝酸塩濃度の平面分布と、対馬暖流量が現状の60%に減少した場合の濃度偏差の平面分布を示したものである。当該沿岸全域における2月の檜山海域の平均硝酸塩濃度は後志海域の6割程度に留まり、特に、奥尻海盆東岸は1.0 μM 台の海域も認められ、硝酸塩が比較的高濃度に溶存する積丹半島先端部の3割程度と極端に低い状

況が維持されている。暖流量が平年値の60%まで低下すると当該沿岸域全域の2月の平均硝酸塩濃度は0.62 μM 増加し、特に、檜山海域に属する奥尻島周辺(+1.61 μM)、瀬棚沖(1.02 μM)や後志海域に属する積丹半島東岸から岩内湾に至る海域(+1.60 μM)は栄養塩濃度が局地的に急増している。なお、硝酸塩濃度の年平均値は、夏～秋期にかけて奥尻海峡周辺に発生する $\sigma_t 27.0$ 等密度面上昇や東進の影響を受けて檜山海域(2.46 μM)が後志海域(1.66 μM)より高い値をとる。

図-11は、暖流量が20年平均値の80%および60%に減少した場合の北海道南西海域における硝酸塩濃度の沿岸分布より算出されたコンブ年生産密度、および、コンブ年生産量の沿岸分布を図-1中の地点(1~18)別に示したものである。これより、生産密度の総平均値は暖流量が20年平均値の80%および60%に低下すると、各2.2倍、10.2倍増加し、総生産量は各、5.5倍、31.1倍増加するものと推定された。

最後に、本研究では、比較的既往データの蓄積が認められる硝酸塩を指標として生産量を推定したが、亜硝酸塩やアンモニウム塩など他の無機体窒素についても考慮する必要がある。また、数値計算では力学計算に基づく傾圧地衡流を境界条件としたため、今後、無流面設定の妥当性や境界領域に存在する順圧流が算定結果に及ぼす影響などについて更に詳細な検討を加えることによって、海洋環境の長期的な動態が沿岸浅海域の生産構造に及ぼす諸問題を予測するための簡易的な手法の構築を目指したい。

参考文献

- 1) 瀬戸雅文, 川井唯史, 巻口範人: 海洋深層水の放水による岩礁性藻場造成に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第17, pp.123-128, 2001.
- 2) Onishi, M. and K. Ohtani: Volume Transport of the Tsushima Warm Current, West of Tsugaru Strait Bifurcation Area, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 53, pp.27-34, 1997.
- 3) 磯田豊, 中山智治, 村上敬, 金相祐, 大谷清隆: 津軽海峡西方海域における対馬暖流の係留観測, 海の研究, 7, pp.237-244, 1998.
- 4) 西田芳則他: 津軽海峡を通過する流量の季節・経年変化, 海の研究, 12(5), pp.487-499, 2003.
- 5) Miita, T. and S. Tawara: Seasonal and secular variations of water temperature in the East Tsushima Strait, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 55, pp.585-596, 1999.
- 6) Senju, T., M. Matsuyama and N. Matsubara: Interannual and decadal sea-level variations along the Japanese coast, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 55, pp.619-633, 1999.
- 7) Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe: Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 56, pp.567-581, 2000.