

北海道南西部日本海沿岸水の栄養塩変動特性

VARIATION IN NUTRIENT CONCENTRATIONS IN THE COASTAL WATER OF SOUTHWESTERN HOKKAIDO

足立久美子¹・大澤義之²

Kumiko ADACHI, Yoshiyuki OSAWA

¹正会員 水産修 独立行政法人北海道開発土木研究所環境水工部水産土木研究室
(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

²非会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 水産土木研究室

In order to clarify the variation of nutrients in the coastal area of southwestern Hokkaido, temperature, salinity, nutrient concentrations, and chl.a were measured for various waters from 2002 to February, 2005. Nutrients in sea surface water were low through a year except near the river mouth. Nutrients increased in winter because of vertical mixing especially phosphate-P. Nitrogen and silica supply depends greatly on the river discharge from March to May because of snow melting. Phytoplankton bloom was observed in spring from February to April and nutrients remarkably decreased during bloom. After bloom both nitrogen and phosphorus were depleted throughout the survey area until autumn fall season. Nitrogen was most important factor to limit primary production in the surface and production layer except summer.

Key Words : Ishikari bay, Nutrients, Chl.a, N/P ratio

1. 目的

対馬暖流の影響下にある北海道南西部日本海側の沿岸域は、栄養塩が乏しく生物生産性が低いといわれている。特に近年では、岩礁域のコンブをはじめとする海藻群落の衰退し、長期にわたり回復しない磯焼け現象が顕著にみられ¹⁾、貧栄養塩²⁾もその一因にあげられている。海藻群落の衰退は、海藻の漁獲のみならず、海藻食者であるウニ・アワビ類や藻場を産卵場とするニシン類の資源量減少を招くことから、北海道内の日本海側全体において漁業活動の低下に至り、非常に問題となっている。そこで、動力による深層水取水や湧昇流発生構造物の設置により、栄養塩の豊富な深層水を浅海部へ導入し、植物プランクトンや海藻類による基礎生産の向上を図る手法が模索されている³⁾。道内の日本海側において深層水取水は現在2ヶ所で実施されているが、構造物設置など、今後のさらなる取り組みに向けては、海域の水塊構造、流動環境、栄養塩動態等の海洋特性を基礎知見として集約していく必要がある。

北海道日本海側の沿岸域における栄養塩動態については、北海道立水産試験場による定期観測データや、余市沖および小樽市地先の忍路湾における栄養塩季節変動に

関する報告等^{4) 5)}がある。本報では、道南に位置する江良・熊石海域と石狩湾において2002年から行っている流動および水質等の現地観測のなかから、栄養塩の時空間変動や栄養塩組成について検討した結果について報告する。

2. 調査方法

道南の江良海域では、江良漁港外の島防波堤付近の岩礁藻場で2003年10月から2005年3月まで1ヶ月毎に採水した。また深層水が取水され、海岸部で放水されている熊石海域では年2回程度の採水調査を行っている。

石狩湾東岸岩礁域4点(S1~S8)と小樽市地先の測点(S9)では2002年6月から1年間1ヶ月毎に、水深10m地点で3層から採水を、また2004年7月上旬にも同様の調査を実施した。

石狩湾内の小樽市赤岩沖調査点(水深37m)においては2003年7月以降、流動と水温の多層連続観測を行っている。また同点では2003年には計2回、2004年以降は1ヶ月毎に採水を行っている。

2003年6月には北海道立中央水産試験場調査船おやしお丸に乗船し、湾内のL1~L6測線でCTD観測および各

層採水を行った。これらの調査点を図1に示す。調査で採取した海水について水温・塩分・栄養塩濃度およびchl.aを測定した。試水のうち300mlをWhatman GF/Fフィルターで濾過し、フィルター上に捕捉された粒状物中の植物色素をN-N,ジメチルホルムアミドにより抽出し、クロロフィルaとフェオフィチン濃度を水産工学研究所所有のターナーデザイン蛍光光度計により測定した。栄養塩サンプルは凍結保存し、水産工学研究所所有の栄養塩測定装置TRAACS800 (Bran+Luebbe社)により、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)、珪酸態珪素($\text{SiO}_2\text{-Si}$)を測定した。なお、石狩湾東岸岩礁域の2002~2003年調査サンプルについては、栄養塩分析を外注により分析しており、分析下限値が高く設定されている。

これらから、江良海域や石狩湾沿岸部における栄養塩の季節変動特性、初夏における石狩湾の栄養塩分布特性、栄養塩の構成比の特徴等について考察した。

3. 結果と考察

(1)道南(江良・熊石)海域における栄養塩変動

江良海域における水質変動を図-2に示す。観測点は漁港の島防波堤付近で非常に陸に近い地点であったが、近傍に河川がないこともあり、ほとんど陸水の影響を受けず塩分33.2(psu)を上回っていた。海水密度 σ_t の変動はほぼ水温に依存していた。水温は8月に約25℃と最大、3月に8℃と最低値を示した。Chl.aは3~4月に増大しており、春季ブルーミングであると考えられた。他の時期には0.4($\mu\text{g/L}$)を下回って推移し、生産性が低い海域であると考えられた。栄養塩濃度は水温との逆相関がみられ、冬季混合期には $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ がそれぞれ3月頃に6、0.4、8(μM)と最大値を示した。4月の植物プランクトンブルーミングの後は1~2、0.1、4(μM)程度で推移し、夏季に低栄養塩となった。ただし $\text{NH}_4\text{-N}$ は夏季に高い傾向がみられた。栄養塩構成比は夏季を除いて $\text{Si}:\text{N}:\text{P}=18\sim23:12\sim17:1$ 程度で推移し、 $\text{N/P}=16/1$ (Redfield比)を下回ることが多く、特に植物プランクトン増殖が起こると N/P 比が低下する傾向がみられ、窒素が基礎生産の制限因子となっている可能性が示唆された。7~9月の夏季には $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに非常に低いが、 DIN に対して $\text{NH}_4\text{-N}$ が占める割合が高いため、 N/P 比は26~77の高い値を示した。ただし $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の測定値が分析下限値付近であることや $\text{NH}_4\text{-N}$ の分析精度上の問題から、夏季にはリンが制限因子であると判断するのは困難であった。

なお1月には一時的な水温低下が起きたが、このとき同時に塩分と栄養塩濃度が上昇し、chl.aが著しく減少しており、深層水が岸に差し込んだと思われる。

江良海域より70km北側に位置する熊石海域(表-1)では、まだ観測回数は少ないが、2月に $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ がそれぞれ3月頃に7、0.65、12.5(μM)と、

江良海域よりも若干高かった。塩分はほぼ同程度だった。6月と10月には $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに非常に低濃度になっているが、江良海域に比べると $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の大きな低下がみられなかった。観測点の海岸部に小規模ではあるが河川が存在しており、河川水の $\text{Si}:\text{N}=5\sim22$ と非常に高い値を示していることから、河川からの $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 供給が関与しているかもしれない。なお、当観測点の海岸部には、水深343mから取水した海洋深層水を陸上のアワビ飼育施設で飼育水として利用した後に放水されることとなっており、2005年2月調査時点では放水が少量実施されていた。今後放水量が増加する予定になっている

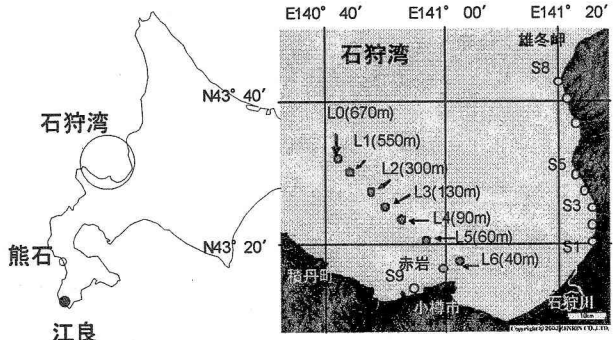


図-1 調査海域

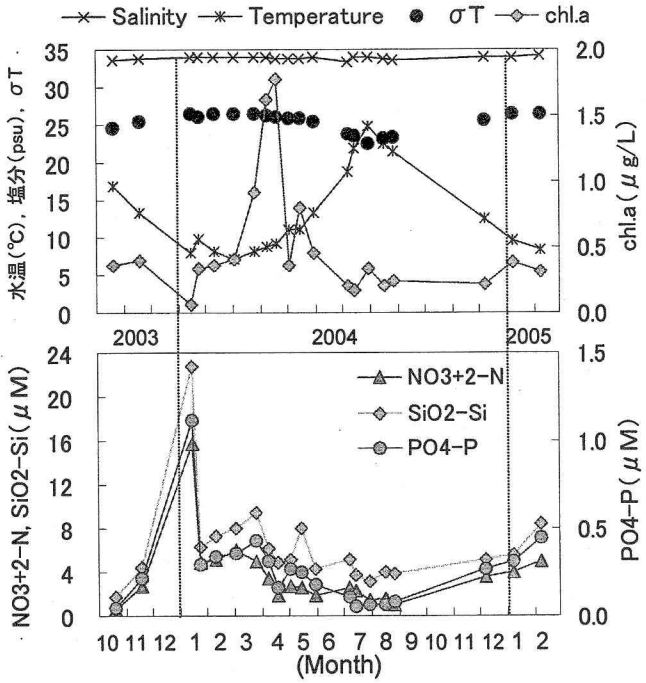


図-2 江良海域における水質変動(2003/10月~2005/2月)

表-1 熊石海域における海洋深層水の水質と漁港南側観測点における水質変動

採水時期	場所	水深 (m)	塩分 (psu)	$\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ (μM)	$\text{PO}_4\text{-P}$ (μM)	$\text{SiO}_2\text{-Si}$ (μM)	chl.a ($\mu\text{g/L}$)
10月	深層水	343m	34.1	21.56	1.71	40.6	
5月	深層水	343m	34.1	22.76	1.75	45.2	
2003/10/31	St-1	3m	33.2	0.95	0.14	7.6	1.4
2004/6/26	St-1	3m	33.5	0.76	0.11	20.8	0.5
2005/2/17	St-1	3m	34.0	7.07	0.65	12.5	0.4

ため、その拡散状況や栄養塩濃度の変化を観測していくこととしている。

(2) 石狩湾東岸部における水質変動

2002年6月～2003年6月に石狩湾東岸岩礁域の水深10m地点(S1, S3, S5, S8の4点)表層部および水深7mにおける塩分・ $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動を図-3、図-4に示す。なお、2003年1月以降は石狩川河口より西側に位置するS9地点における観測値も示す。湾内の東側海域は石狩川河川水の影響を受けやすく、河口に近いS1～S5ではしばしば表層で塩分低下がみられた。水深7mでは30(psu)以上で推移した。融雪期の塩分低下のピークは4月で、表層部で20(psu)を下回った。それに対応して表層部の $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 濃度は、出水期に高濃度となり、最大で15(μM)となった。水深7mでは5(μM)を超えなかつ

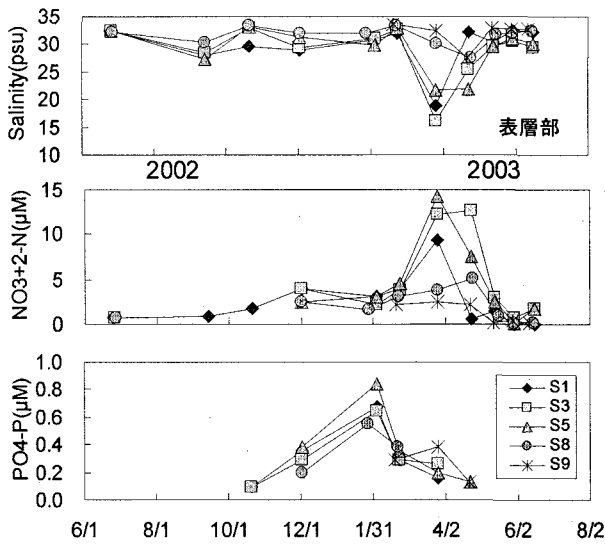


図-3 石狩湾東岸岩礁域観測点の表層部における水質変動 (2002年6月～2003年6月)

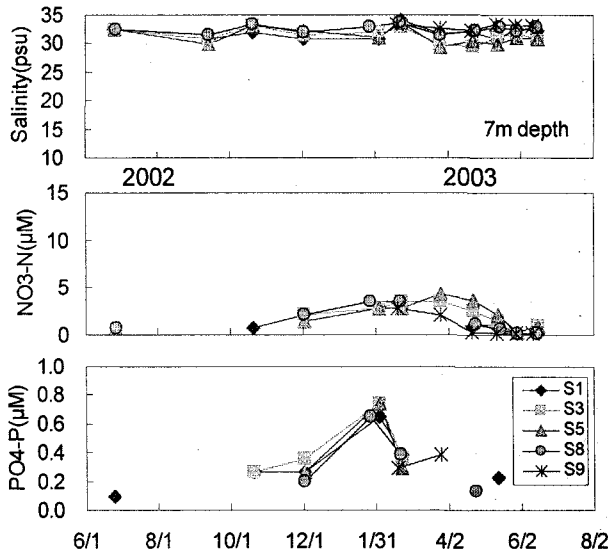


図-4 石狩湾東岸岩礁域観測点の水深7mにおける水質変動 (2002/6月～2003/6月)

た。以上のように、窒素濃度変動は河川からの供給が明らかにみられた。夏季には1(μM)以下と枯渇した。

$\text{PO}_4\text{-P}$ は表層、水深4および7mでほぼ等しく、鉛直的に一様に近かった。また最も高濃度となったのは冬季の1月頃で、出水期での4月には既に低下しており、 $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ に比べると河川出水との関係は明確ではなかった。成層期の夏季には窒素と同様に枯渇状態となり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給は主として冬季鉛直混合に依存すると考えられた。なお、河川域から流入するリンの大半が懸濁粒子に吸着した状態であり、河口沖で沈降、堆積、再懸濁を繰り返して拡がる⁶⁾ため、海底底質中にもストックされており、リン濃度変動に関与していることも考えられる。

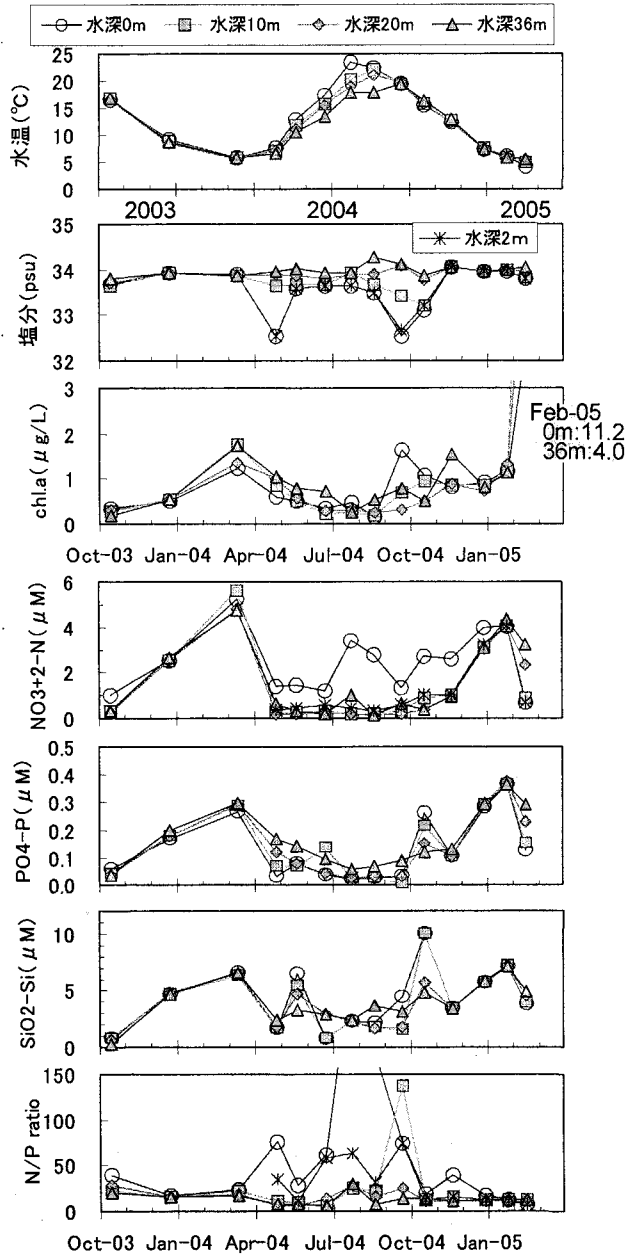


図-5 石狩湾赤岩沖定点における水質変動 (2003/10月～2005/2月、水深0, 10, 20, 36m)

(3) 赤岩沖定点における水質変動

石狩湾小樽市赤岩沖観測点の水深0, 10, 20, 36m (一部2mも表示) における水質の季節変動を図-5に示す。水温の最高値は2004年には8月上旬の25℃ (2003年は9月の22℃), 最低値は3月の5℃であった。塩分は融雪期である4月頃と多雨となる秋季に表層で低下した。水温および塩分成分はそれぞれ4~9, 4~10月に形成され, 11~2月には鉛直的に一様な完全混合状態であった。表層水での最低値は32.5(psu)にとどまり, 湾内東岸側でみられたような顕著な低塩分化は起こらなかった。通常石狩川河川水は湾内への流入後, 北上する傾向が強いといわれており, 赤岩沖においては陸水の影響は比較的に弱いと考えられた。

chl.aは3月前後に春季ブルーミングと思われる極大がみられた。極大値は2004年では1.7($\mu\text{g/L}$)であったが, 2005年は表層で11.2($\mu\text{g/L}$)と非常に大きかった。また, 春季ブルーミングは融雪期より前に生じていた。その後は, 秋季に低塩分水の影響を受け表層で増大するまで低レベルで推移した。

栄養塩濃度は, 冬季混合期には鉛直的に一様であるが, 成層期には上下層でばらつきが生じていた。2月頃に最も高濃度となり, $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ でそれぞれ4~5, 0.3~0.4, 6~7(μM)程度であった。春季ブルーミングの終了とともに栄養塩濃度が著しく低下し, プランクトンによって消費されたと推察された。特に2005年のブルーミング時にはすでに大幅な濃度低下が生じていた。夏季には濃度低下が著しくNおよびPは枯渇状態に近かったが, $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ は表層側で, $\text{PO}_4\text{-P}$ は下層側で高い傾向がみられ, それぞれ主体となる供給源が

異なり, 窒素は陸源水供給に, リンは下層からの供給に大きく依存していると考えられた。 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は明らかに塩分との逆相関がみられた。

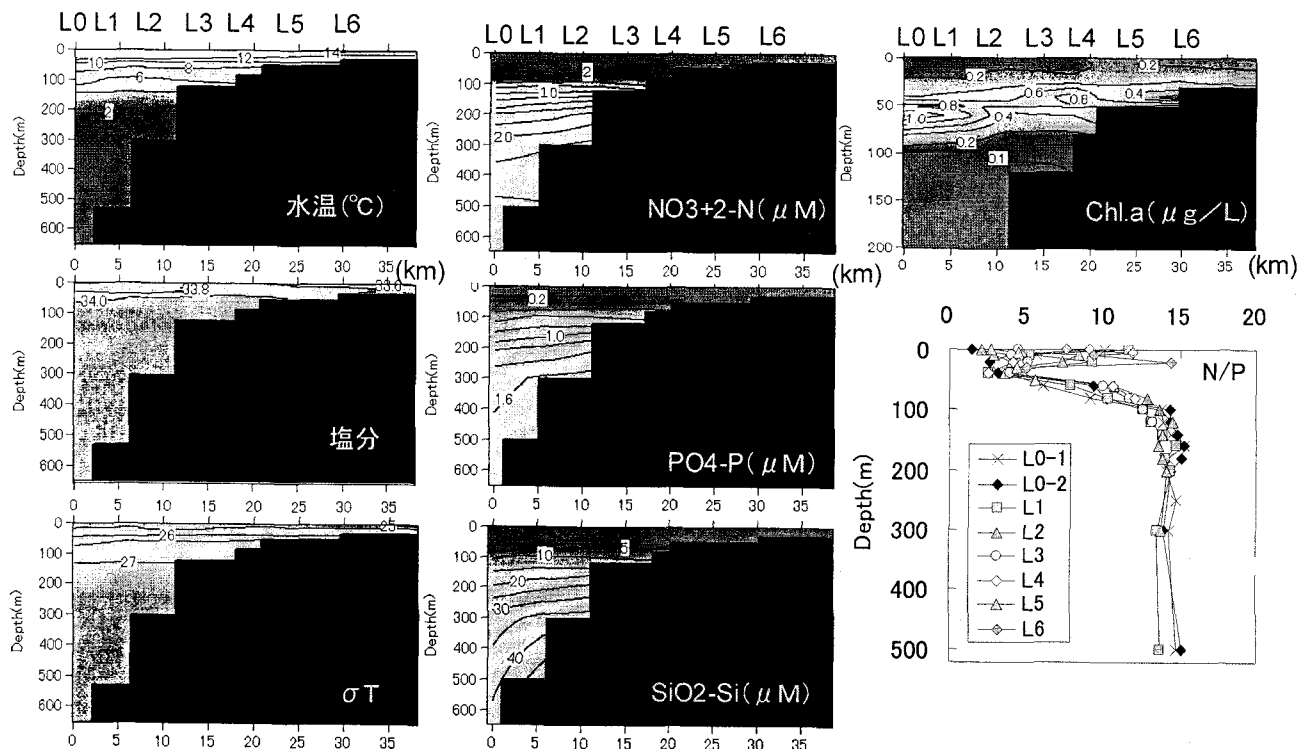
N/P比は混合期に6~20程度とレッドフィールド値に近い値となったが, 基礎生産の盛んな時期や水深で小さくなる傾向がみられ, 窒素が基礎生産の制限因子となる可能性が示唆された。N/P比は, 成層期に表層で大きく, また, ばらつきがみられた。これは成層化や陸水流入の影響のほか, 分析値が検出下限の限界に近いことによる誤差を含むと考えられた。

以上のように, 石狩湾内の栄養塩変動は, 融雪期や秋季の多雨時に湾最奥部に流入する石狩川河川水の影響を受けているが, その影響が大きい範囲は湾内東岸側の表層部であり, 湾の西側や下層部においては河川水の影響は比較的に弱いと考えられた。

(4) ライン観測結果

2003年6月におけるLライン断面における塩分や栄養塩等の分布を図-6に示す。湾口から湾奥側へ向かって表層部で高温, 低塩分となる傾向がみられた。しかし水温, 塩分ともに等値線はほぼ水平に近く, 測点による鉛直分布特性の違いは少なかったといえる。水温は表層で約13~14℃, 水深220mで約2℃となり, 水深50m付近でやや変動勾配が大きかった。また塩分はごく表層でやや低いものの, 全層で変化に乏しく一様に近い分布となり, 海水密度 σ_t の変化は水温に依存していた。 σ_t は表層部から水深200m付近まで増加し, 200m以深で漸増, 400m以深でほぼ一定となった。

栄養塩分布も等値線が水平に分布しており, 測点によ



る特徴の違いはみられなかった。栄養塩は表層部で枯渇状態であり、河川水の影響はほぼなかったと考えられる。濃度は水深が深くなるに従い高くなり、 σ_t が26以下となる水深50m以浅ではほぼ枯渇し、 $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は水深60mでそれぞれ2, 0.3, 4, 水深100mで6, 0.5, 10, 水深500mで25, 1.8, 40(μM)となった。

chl.aは特徴的な分布傾向を示し、水深が50~75m、 σ_t が26~26.5の付近にchl.aが0.5($\mu\text{g/L}$)以上となる極大層がみられた。それより上層側では0.2($\mu\text{g/L}$)と非常に少なかった。本ライン調査は夜間を含む調査であったため透明度の測定は一部測点のみで行われた。その結果から、有光層(海面光量に対し1%光量となる水深)の下限は水深50m前後と推定され、chl.aの極大がみられた水深は、有光層の下限付近あるいはそれ以深に位置しており、植物プランクトンの増殖に好適な光環境ではなかったといえる。また極大層における栄養塩濃度は枯渇状態に近い状況にあった。このような水深にchl.a極大がみられたのは、光条件の好適な表層部においては河川由来水の流入等による栄養塩供給はほとんどなく、有光層の下限となる水深において、かろうじて下部からの拡散や移流により栄養塩が供給された結果であると推察される。

Si : N : Pは水深500mで25 : 15 : 1, 水深100mで20 : 14 : 1程度であり、基礎生産層となる水深50~80mではNの比率が急激に減少しており、ここでも窒素が生産の制限因子であると考えられた。

4. 結論

北海道南西部日本海側沿岸域では、冬季鉛直混合により栄養塩が供給されるほか、河川水流入の影響域では融雪出水と秋季の降雨時に窒素およびシリカ濃度が増加するが、夏季には非常に低栄養塩で推移し、 $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$ は江良海域で1~2, 石狩湾内では、河川水の影響が少ない海域や水深層では1(μM)を下回った。 $\text{PO}_4\text{-P}$ も夏季にはどの海域においても0.1(μM)以下と枯渇した。石狩湾では成層化が始まっている6月には、水深50m以浅で栄養塩が枯渇していた。

沿岸域の栄養塩供給源として、リンは海洋深部側からの供給に大きく依存し、窒素とシリカは深部からの供給以外に陸水流入による供給が多く、冬季の鉛直混合や深層水あるいは底層からの供給がないとリンは枯渇しやすいこと、河川等陸源水の影響の度合いによってN・Si分布が大きく異なること等が明らかとなった。

植物プランクトンの春季ブルーミングは融雪出水期よりも前に生じ、ピークは江良海域で4月に、石狩湾では3月にみられ、同時に海域の栄養塩濃度は速やかに減少した。その後は秋に降雨による栄養塩供給が起こるまで、chl.aが0.5($\mu\text{g/L}$)以下と低レベルで推移した。6月調査において石狩湾湾口部では有光層下限水深付近に極大が存在したことから、夏季においては、栄養塩枯渇により、沿岸表層部で生産性が低下すると考えられた。

石狩湾沿岸および江良海域沿岸の春季ブルーミング時や、石狩湾沖合のプランクトン生産層など、植物プランクトン生産が活発と考えられるところでN/P比が小さくなる傾向がみられ、窒素が基礎生産の制限因子となる可能性が示唆された。夏季には窒素とリンの両者が枯渇し、シリカの存在比が高くなった。

以上のように、北海道南西部日本海側沿岸域では、6月~11月頃まで非常に貧栄養塩状態であり、この間植物プランクトン生産性が低いと考えられたが、これは海藻類の生長にとっても良好な栄養塩環境にあるとはいえない。海藻の繁茂を阻害する要因としては高水温やウニ等による食圧の方が大きく影響していると考えられているが、今後海洋深層水を放水している海域の海藻繁茂状況やプランクトン基礎生産等の推移を追跡し、栄養塩供給効果について検討していく予定である。また、湧昇流発生構造物の設置による生産性向上の可能性等についても併せて検討していくこととしている。

謝辞：本調査研究におけるライン観測および係留調査は北海道立中央水産試験場および同場調査船おやしお丸のご協力により行われた。厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 名畑進一・阿部英治・垣内政宏：北海道南西部大成町の磯焼け、北水試研報, 38, pp.1-14, 1992. など
- 2) 赤池章一ほか：1年目リシリコンブ胞子体の生長に及ぼす窒素、リン施肥の影響、水産増殖, 46(1), pp.57-65, 1998.
- 3) 瀬戸雅文：海洋深層水と漁場形成 1. 海洋深層水の資源性と利用可能性、北水試だより, 50, pp.12-17, 2000.
- 4) 鹿又一良ほか：石狩湾余市沖定点におけるクロロフィルaと栄養塩類の季節変化、北水試報, 28, pp.1-10, 1986.
- 5) 中多章文ほか：忍路湾における沿岸水温と栄養塩の関係、北水試研報, 59, pp.31-41, 2001.
- 6) 山下俊彦ほか：融雪期の石狩川の物質輸送特性と流出物質の河口沿岸域での挙動、海岸工学論文集, 48, pp.1266-1270, 2001.