

鵒川沿岸の現地観測によるブルーム初期から融雪出水期までの基礎生産の変化について

大橋 正臣¹・三森 繁昭²・三上 信雄³・水垣 滋⁴・山本 潤⁵・門谷 茂⁶

¹正会員 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail:mas_ohashi@ceri.go.jp

²(国研)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail: mimori-s22aa@ceri.go.jp

³正会員 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail: mikami@ceri.go.jp

⁴正会員 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail: s-mizugaki@ceri.go.jp

⁵正会員 (国研)水産総合研究センター 水産工学研究所 (〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7)
E-mail: juny@fra.affrc.go.jp

⁶北海道大学教授 大学院 水産科学研究院 (〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西5丁目)
E-mail: montani@fish.hokudai.ac.jp

鵒川沿岸は一級河川である鵒川および沙流川により、流域全体から底質材料と栄養塩が供給され、生息環境や生産性が良好でウバガイ等の好漁場が形成されている。これまで当沿岸の基礎生産に着目し、夏季出水や融雪出水の調査を行った結果、春季の生産性が大きいことがわかった。これは「春季ブルーム」と「融雪出水」が連続的に生ずることに起因すると考えられた。よって本研究では、ブルーム初期から融雪出水時の環境把握を目的に調査を実施した。本調査より(1)ブルーム前後の基礎生産構造や(2)融雪出水によって高い生産性が持続されることがわかった。また、調査中に生じた(3)沿岸湧昇は、水温低下により植物プランクトンの増殖についてタイムラグがあるが、沖合域の栄養塩が供給されることにより沿岸域の基礎生産を大きくすることがわかった。

Key Words : Spring phytoplankton bloom, Snowmelt flood, Coastal upwelling, Primary production

1. はじめに

河口沿岸域は、河川を通じて供給される有機物や栄養塩などにより生産性が高いことが知られている。対象フィールドである鵒川沿岸(図-1)は一級河川である鵒川・沙流川から栄養塩や二枚貝等の沿岸生物に必要な底質材料などが供給される。

これまでの著者らによる本沿岸の調査から、夏季は密度成層化しており、表層の栄養塩枯渇が夏季出水により解消されるが、濁水により一時的に消散係数が増加し、基礎生産が低下することを明らかにした¹⁾。また、著者ら²⁾は周年で最も生産性が高い春季においても調査を実施し、融雪出水と春季のプランクトンブルームの関係について考察している。しかし、春季ブルーム時のクロロフィル a (Chl- a)は衛星データの表層Chl- a により評価しており、栄養塩や光量子量、Chl- a の

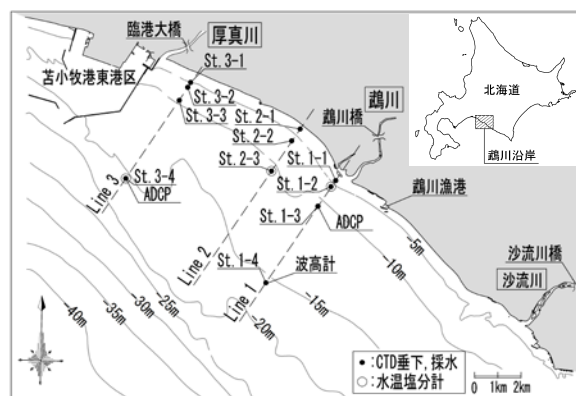


図-1 調査位置

鉛直分布など、この時期の海域の観測結果は十分でない。また、開放的な沿岸域で春季の連続的な基礎生産構造の変化に関する知見も少ない。

そこで本研究では、ブルーム初期から融雪出水期の

環境把握を目的に調査を実施し、基礎生産構造について考察する。

2. 観測方法

鵜川沿岸において流況、水質、動物・植物プランクトン等の観測を2014年2月～6月に6回実施した(図-1, 表-1, 2参照)。また, St.1-2, St.2-3, St.3-4において水温・塩分, Chl-a, 光量子量の連続観測を実施した。

採水はバンドーン採水器を用い水質分析, 植物プラ

ンクトンの試料とした。鵜川橋, 沙流川橋, 臨港大橋(図-1)から河川水を採水し, 各項目の分析を行った。また, 連続観測はJFEアドバンテック社製INFINITY-CTW(水温塩分計), INFINITY-CLW(クロロフィル濁度計), COMPACT-LW(光量子計)を用いた。

3. 基礎生産構造の変化

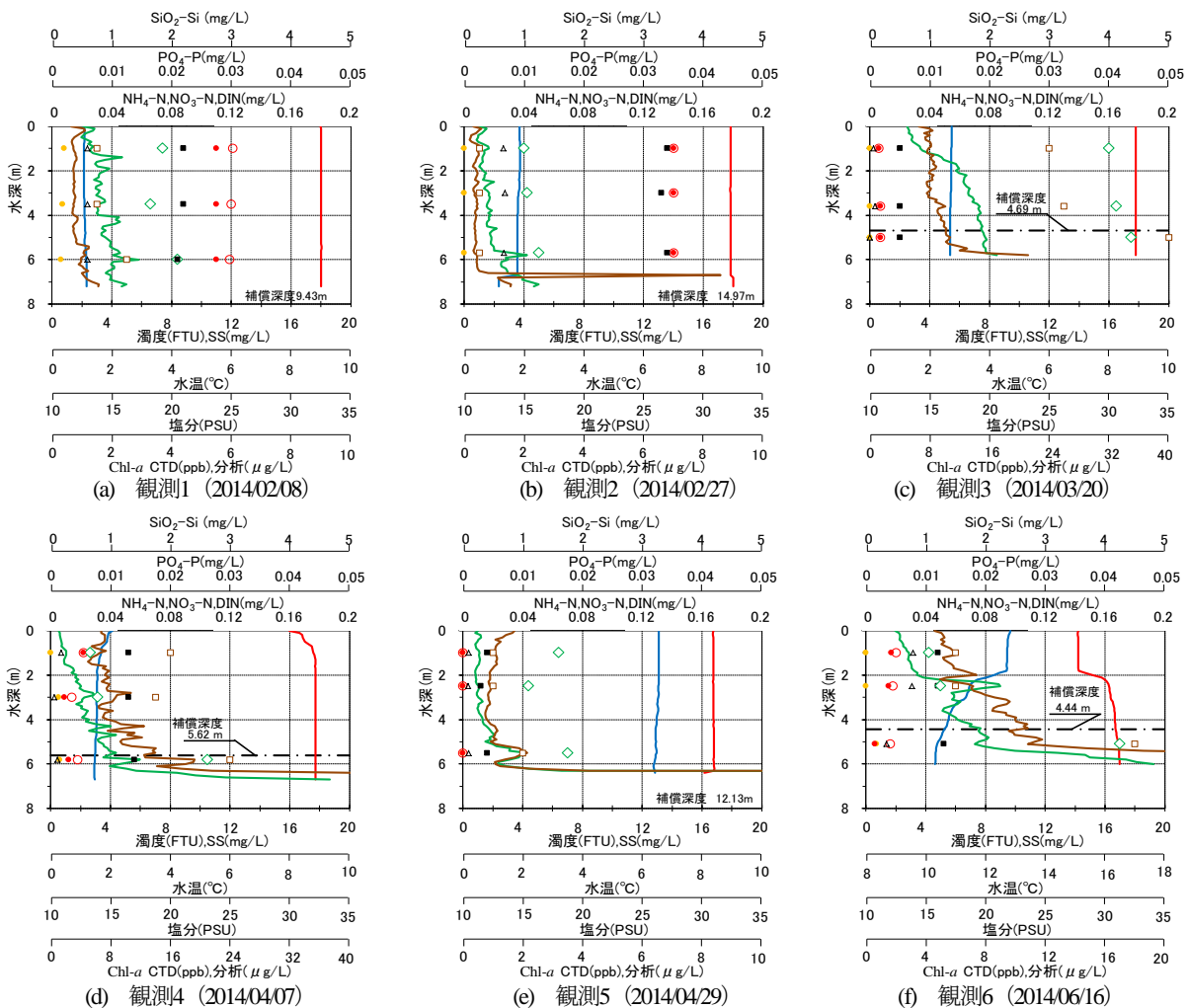
観測結果としてSt.1-2の鉛直分布を図-2に, 時系列の変化については図-3に示す。図-2において補償深度は放射照度が海面の1%となる深度³⁾とした。

表-1 観測日と主な調査項目

観測日	観測1	2014/02/08	観測2	2014/02/27
	観測3	2014/03/20	観測4	2014/04/07
	観測5	2014/04/29	観測6	2014/06/16
調査項目	方法		観測内容	
水質	CTD垂下		水温, 塩分, Chl-a	
	採水, 各測点2~4層		SS, TN, TP, NH ₄ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P, SiO ₂ -Si, TFe, Chl-a	
底質(観測1, 5)	採泥器		粒度	
植物プランクトン	採水器		種毎の細胞数	
動物プランクトン	北原式ネット		種毎の個体数	

表-2 主な調査項目(連続観測)

調査項目	方法	観測内容
波浪	波高計(St.1-4)	波高, 周期, 波向
流況	ADCP(St.1-3)	多層流速
水温・塩分	INFINITY-CTW	St.1-2: 表底層
		St.2-3, St.3-4: 表中底層
Chl-a, 濁度	INFINITY-CLW	St.1-2, St.3-4: 表層
		St.2-3: 表中底層
光量子量	COMPACT-LW	St.2-3: 表中底層



※Chl-a(分析)は吸光度法, Chl-a(CTD)は蛍光光度計による測定

図-2 観測日ごとの水温, 塩分, 栄養塩, 濁度, Chl-aの鉛直分布(St.1-2)

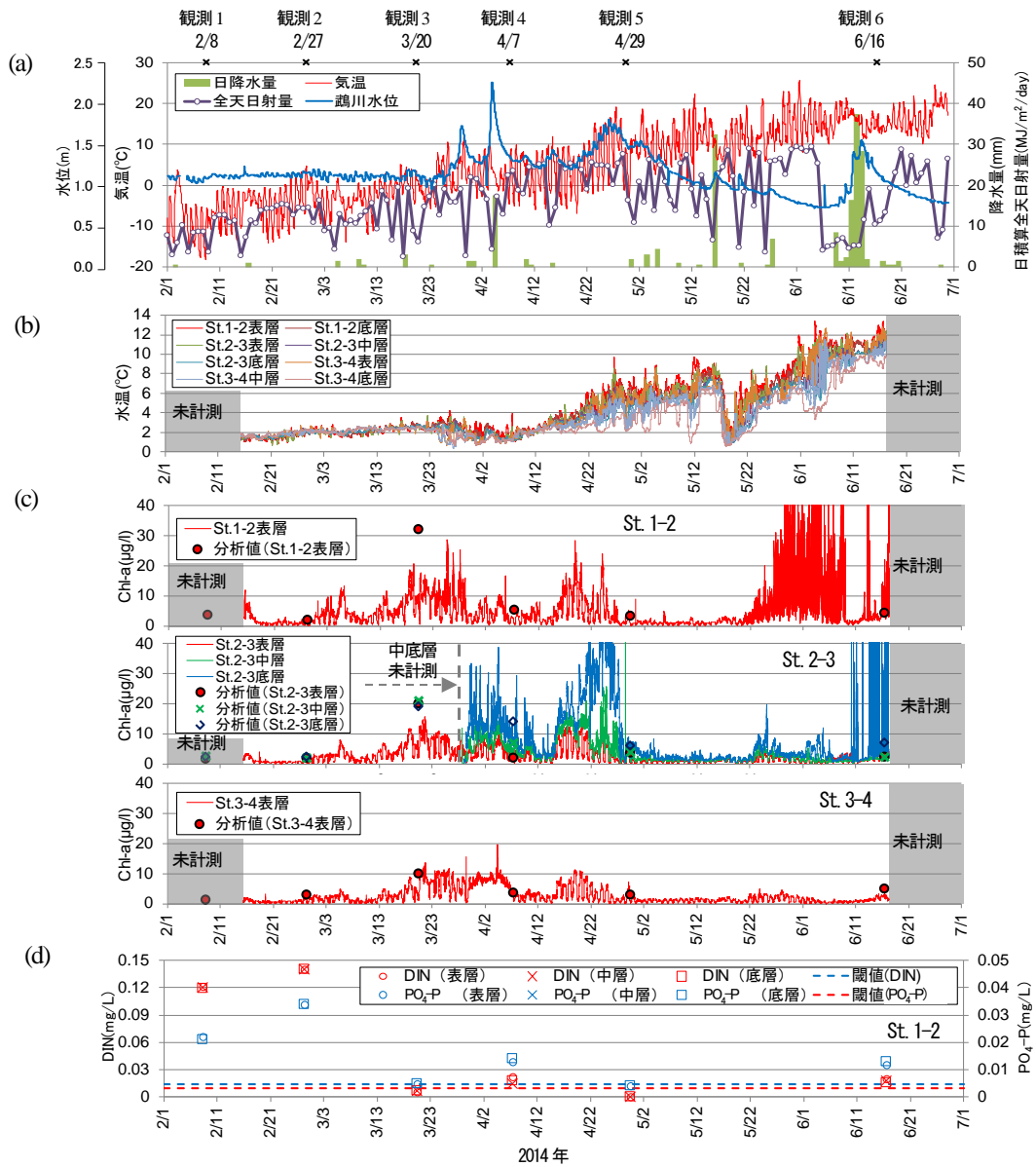


図-3 時系列変化 (a)全天日射量, 河川水位, 気温, 降水量, (b)水温, (c)Chl-a, (d)DIN, PO₄P分析(St.1-2)

(1) 春季ブルーム

図-3(c)より2月から3月初旬はChl-aは小さく, 3月13日から26日頃にChl-aの増加が見られ春季ブルームが発生したと考えられる. 春季ブルーム前の観測1, 2 (図-2(a), (b)) は, 水温, 塩分, 栄養塩, Chl-aともに鉛直方向に同等の値を示しており, 表層冷却に伴う鉛直混合が生じている. このとき一般に光合成に必要な窒素濃度の閾値0.014mg/L⁴⁾を上回っており栄養状態は良好といえる (図-3(d)). 水温については2月から4月中旬まで2℃程度となっている (図-3(b)) ことから, 著者ら²⁾のとおり全天日射量の増加が春季ブルームのトリガとなっていると考えられる(図-3(a)).

春季ブルーム時の観測3は実測されたChl-aの最大が35 μg/L (図-2(c)), 細胞数は1400×10⁴ 細胞数/Lとなっており, 優占種は珪藻類のChaetoceros socialeで50%以上を占める (図-4). このChl-aは赤潮判定の目安である

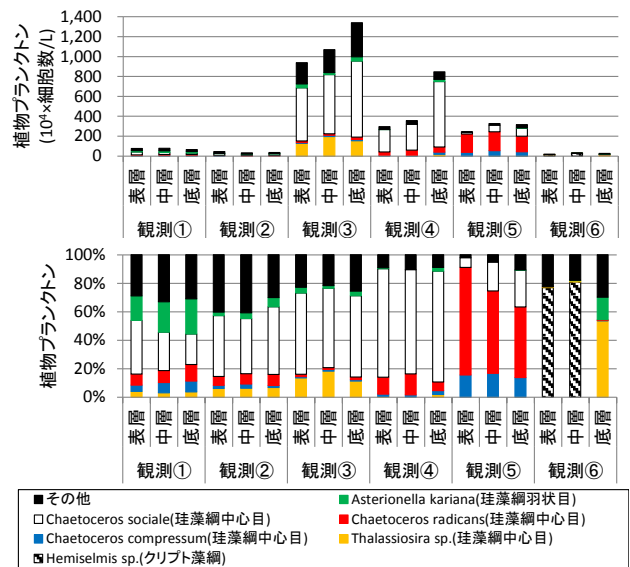


図-4 植物プランクトン (St.1-2, 表層1m) の細胞数と優占種の変化 (上: 細胞数, 下: 組成)

20 $\mu\text{g/L}$ と同オーダで非常に生産性が高いことがわかる。また、この春季ブルームによって沿岸のSt.1-2は全水深で溶存態窒素(DIN)が消費され枯渇状態となっていることがわかる(図-3(d))。

(2) 融雪出水

図-3(a)のとおり河川水位が上昇した3月下旬から融雪出水が始まり、春季ブルーム時に使われた栄養塩が観測4では回復している(図-3(d))。

本沿岸域に流入する鵠川、沙流川、厚真川の河川内のDINは図-5(a)のとおり厚真川の観測1(河川結氷)のみアンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)が大きいですが、これを除いて河川中のDINは観測4、5、6ともに大きな変化はないことがわかる。また、河川中のChl-*a*は沿岸域の時系列変化と異なるが、観測5で鵠川、沙流川が6.7 $\mu\text{g/L}$ 、3.8 $\mu\text{g/L}$ 、観測6の厚真川で2.8 $\mu\text{g/L}$ と大きくなり、海域に流入していることがわかる(図-5(b))。

融雪出水による栄養塩の供給によりSt.1-2のChl-*a*は増加し、表層で5.3 $\mu\text{g/L}$ 、底層21 $\mu\text{g/L}$ (図-2(d))となっている。これはSt.3-4もほぼ同様で表層の塩分低下もあるため融雪出水の影響範囲は沖合5 km付近(St.3-4)まで及んでいると考えられる。時系列では融雪出水中の4月下旬までChl-*a*は大きく維持され、融雪出水の末期と考えられる5月初旬にはChl-*a*が小さくなる(図-3(c))。

融雪出水の末期と考えられる観測5では、表層から底層まで溶存態窒素(DIN)が閾値以下で貧栄養状態となり、表層Chl-*a*が3.2 $\mu\text{g/L}$ と小さくなっている(図-2(e))。また、観測5のDINはSt.1-1、St.2-1、St.3-1以外は定量限界値以下の測点が多くなっている(図-6)。つまり、観測5は河川水位が高く栄養塩の供給はあるが、この影響範囲は水深4 m程度以浅の沿岸域に限られ、これ以深では栄養塩が消費されたと考えられる。

(3) 沿岸湧昇

当海域の水温変化として4月上旬から上昇しているが、5月17日に水温が約8°Cから約1°Cに低下していることがわかる(図-3(b))。これは全観測点、全観測水深で生じており出水の影響ではないと考えられる。

この時の流況観測結果(ADCP, St.1-3)を図-7に示す。この図は本沿岸の代表的な汀線の向きをNW-SE方向と仮定し、岸沖成分(NE-SW方向)流速を示したものである。5月15日午後から表層流速が沖向きで底層流速が岸向きとなり、概ね5月19日まで続いている。特に5月16日18:50に最大18.24 cm/s(標高-2m)となっている。また、同時期のアメダス鵠川(観測所番号21276, 北緯42.59°, 東経141.93°)とGPVデータ(北緯42.55°, 東経141.90°, 初期値)による風向風速を図-8に示す。ここで風向は北から時計回りの角度である。5月16日か

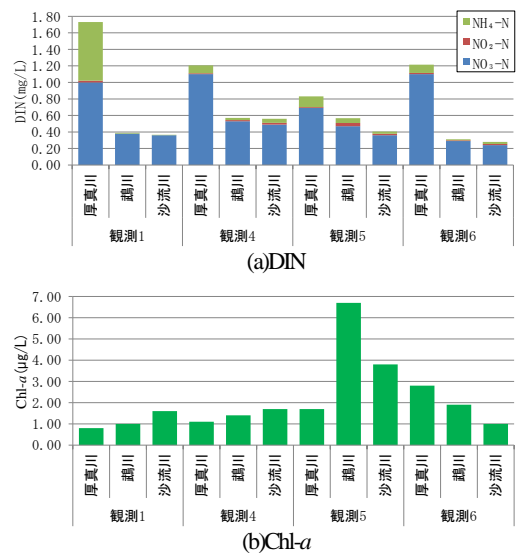


図-5 河川のDINとChl-*a*の変化

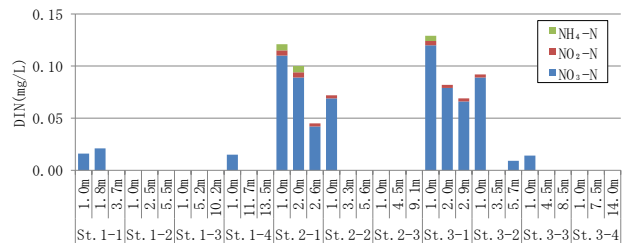


図-6 各測点の溶存態窒素(観測5, 2014/04/29)

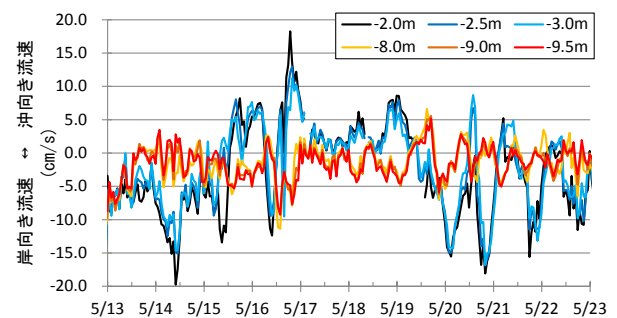


図-7 流況データ(ADCP)

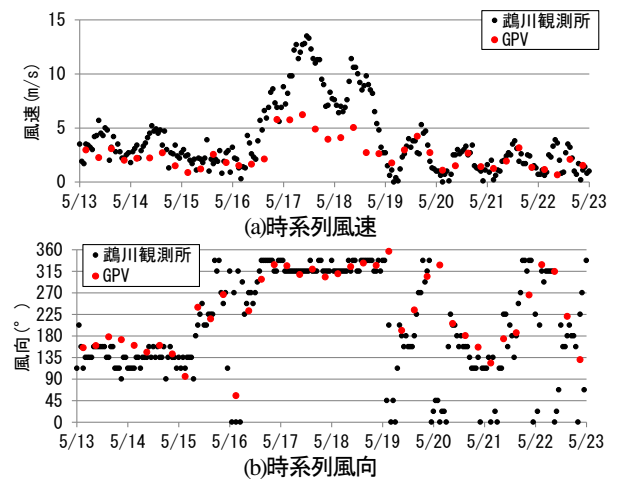


図-8 風況データ(アメダス鵠川, GPVデータ)

ら315° (NW方向)の風向となり、風速も10 m/sを超えていることがわかる。これらのことから沿岸湧昇により沖合底層の冷水塊が沿岸に入り込んだことが示唆される。それから約4日後にChl-aが増加しており(図-3(c))、沖合底層の冷水塊がもつ栄養塩が沿岸へ供給され基礎生産に寄与したと考えられる。4日程度のタイムラグは冷水塊により植物プランクトンの増殖速度が小さいことが原因と考えられる。

4. 生態系モデルを用いた沿岸湧昇の影響検討

上記の観測結果から沿岸湧昇によりChl-aが増大することがわかった。この現象を生態系モデルで再現し、栄養塩の枯渇した時期に発生する沿岸湧昇の影響について検討する。

再現計算は沿岸湧昇が発生した5月18日0時から6月6日0時までの19日間、St.1-2を対象とした。また、沿岸湧昇で下層から栄養塩が供給されたと仮定し、計算条件は現地観測結果(連続観測)を用い低次生態系モデル³⁾の計算を実施した。

(1) 光合成速度

生態系モデルによる再現に際し、光合成速度は現地培養試験の結果を用いた。培養試験の試料は観測5のSt.2-3においてChl-aのピーク水深(-11.7m)で採取しており、植物プランクトンの主な出現種は珪藻類の*Chaetoceros radicans*であり57.8%を占める。これは対象地点St.1-2の優占種と同様(割合は75.3%)である。よって、この培養試験結果をSt.1-2に適用した。

光-光合成曲線として低次生態系モデルで一般的に用いられている以下の式⁹⁾を用いた。

$$P' = \alpha(T) \times \frac{I(t)}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I(t)}{I_{opt}}\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha(T) = \alpha_0 \times \exp(0.0633 \times T) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式の P' は一日あたりに換算された比光合成速度、 $I(t)$ は放射照度(W/m^2)、 I_{opt} は最適光強度(W/m^2)を示す。また、(2)式の $\alpha(T)$ は水温 T °Cにおける最大可能成長速度(1/day)、 α_0 は0°Cでの最大可能成長速度(1/day)である。

培養試験結果と光-光合成曲線を図-9に示す。最小二乗法の適用範囲を $100 W/m^2$ 以下として、0から曲線のピーク位置までの観測値との相関を重視した。本培養試験より最適光強度 I_{opt} は $25 W/m^2$ 、 $\alpha(T)$ は1.50/dayであった。ここで培養水温は7.2°Cである。

これを過年度(2012年5月)調査の培養試験結果⁷⁾と比較すると、2012年5月調査の最適光強度 I_{opt} および培養水温での最大可能成長速度 $\alpha(T)$ は $16 W/m^2$ 、1.38/day

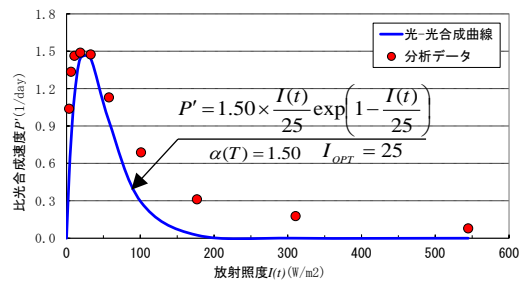


図-9 比光合成速度

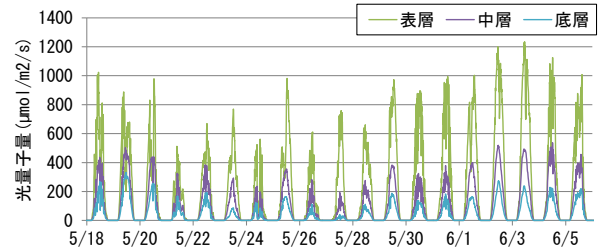


図-10 光量子量の変化 (St.2-3)

(培養水温10.3°C)であり、本調査結果とほぼ同等程度と考えられる。ここで過年度調査の優占種は*Heterocapsa rotundata*(渦鞭毛藻, 19.1%)、*Thalassionema nitzschioides*(珪藻, 32.8%)の2種であった。

(2) その他の計算条件

沿岸湧昇で冷水塊が湧昇(図-3(b))しているが、このときの栄養塩データは無いため、ほぼ同水温であった観測1におけるSt.3-4下層の現地観測値(DIN: 0.157 mg/L, リン酸態リン $PO_4\text{-P}$: 0.029 mg/L)を用いた。

水温、塩分はSt.1-2の連続観測(鉛直方向に2層)結果を用いた。また、光量子量はSt.2-3ではあるが鉛直方向に3層の連続観測を行っているためこれを用いた(図-10)。植物プランクトンの初期値は、Chl-a連続観測結果を採用し、5月18日のChl-aを炭素・クロロフィルa比(C/Chl-a比)⁸⁾として一般的な50を乗じて算出した。

(3) 沿岸湧昇後の基礎生産構造

上記の計算条件で再現計算した表層Chl-aの結果を図-11に示す。実測値は植物プランクトンの局所的な集積、沈降により大きく振動しており、 $40 \mu g/L$ を超え

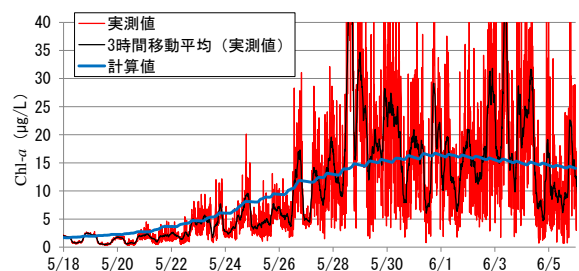


図-11 計算結果 (Chl-a, St.1-2)

る場合もある。なお、センサーに対するゴミや気泡の付着も振動の一因と考えられる。この時系列変化は3時間移動平均より、約4日後から増加傾向となり5月29日から6月4日まで高い状態が継続している。これに対し計算値は振動が小さく、約4日後(5月22日)から増加し5月31日19時に最大の16.73 $\mu\text{g/L}$ となり、数日間高い傾向が続いている。ここで計算値は時間平均などの操作を行っていないが、鉛直メッシュ間(1m間隔)の平均値として計算されるため実測値のような振動が緩和されていると考えられる。しかし、計算値は実測値に示すChl-*a*の変化過程を概ね再現していると考えられる。

このように本再現計算では観測1のSt.3-4下層で観測されたDINとPO₄-Pを採用した場合にChl-*a*の変化過程を再現できたと考えられることから、実際にもDINやPO₄-Pが0.157 mg/L, 0.029 mg/L程度の水塊が沿岸域に移動したと推察される。このことから沿岸湧昇による栄養塩の供給は、低水温であるためタイムラグが生ずるが、基礎生産を増大させることがわかった。

5. おわりに

現地観測によりブルーム初期から融雪出水期の基礎生産構造に関する多くのデータが得られた。これに加え沿岸湧昇の影響を把握することができた。以下に主要な結論を述べる。

- ・春季ブルーム前後の水温・塩分、栄養塩、植物プランクトンの鉛直分布などの詳細な基礎生産構造を明らかにすることができた。
- ・融雪出水は春季ブルームで消費された栄養塩について、出水の影響がおよぶ範囲において基礎生産を持続させることがわかった。
- ・沿岸湧昇は気象擾乱や沖合海流などの影響により発生すると考えられ、本沿岸での発生時期については不明であるが、栄養塩を含む沖合底層の

冷水塊が沿岸域に移動すれば、沿岸域の基礎生産を大きくすることがわかった。

- ・沿岸湧昇とこれによる植物プランクトン増大には、水温低下によりタイムラグが生ずるが、生態系モデルによりこの現象を概ね再現することが可能となった。

謝辞: 本研究は(国研)土木研究所 寒地土木研究所の交付金一般研究「地域環境に対応した生態系の保全技術に関する研究」の一環として実施された。北海道開発局室蘭開発建設部より鶴川と沙流川の流量データ等を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大橋正臣, 山本潤, 須藤賢哉, 水垣滋, 門谷茂, 田中仁: 鶴川沿岸の漁場環境に及ぼす河川出水の影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_1121-I_1125, 2012.
- 2) 大橋正臣, 山本潤, 須藤賢哉, 水垣滋, 門谷茂: 鶴川沿岸の基礎生産に対する融雪出水の効果について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_1191-I_1195, 2013.
- 3) 杉森康宏, 坂本亘: 海洋環境光学, 356p, 1985.
- 4) 高橋正征, 古谷研, 石丸隆: 生物海洋学2「粒状物質の一次生成」, 東海大学出版会, 174p, 1996.
- 5) 中田喜三郎: 生態系モデル—定式化と未知パラメータの推定法—, *Journal of Advanced Marine Technology Conference*, Vol.8, pp.99-138, 1993.
- 6) Steele, J. H.: Environmental control of photosynthesis in the sea, *Limnology and Oceanography*, Vol.7, pp.137-150, 1962.
- 7) 林田健志, 山本潤, 大橋正臣, 河合浩, 坂本和佳, 村上俊哉, 工藤勲: 北方海域に適用する低次生態系モデルのための生物パラメータの取得, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I_1126-I_1131, 2013.
- 8) Kawamiya M., M. Kishi and N. Suginozawa: An ecological-physical coupled model applied to Station Papa, *Journal of Oceanography*, Vol.51, pp.635-664, 1995.

(2015.3.18 受付)

VARIATION OF PRIMARY PRODUCTION FROM SPRING PHYTOPLANKTON BLOOM TO SNOWMELT FLOOD IN MUKAWA COAST, HOKKAIDO

Masami OHASHI, Shigeaki MIMORI, Nobuo MIKAMI,
Shigeru MIZUGAKI, Jun YAMAMOTO and Shigeru MONTANI

To elucidate the variation of primary production from spring phytoplankton bloom to snowmelt flood, field observation of water quality were conducted in the Mukawa coast, the Pacific Ocean of northern Japan. The chlorophyll-*a* concentration during the spring bloom was equivalent to that of a diatom red tide. The snowmelt flood supplies nutrients consumed by the spring phytoplankton bloom, and maintains the primary production. Because of the coastal upwelling, the primary production grows by supplying the nutrients from bottom of the sea. The phytoplankton growth is delayed due to the water temperature decrease.