

2006年3月24日

平成17年度 COE 成果報告書

陸圏排出物質の近海への影響：北海道河川から北太平洋

十勝沖海域における栄養塩と懸濁態有機物の挙動について

碓井敏宏（北海道大学地球環境科学研究所・COE 研究員）

担当教官：南川雅男

1. はじめに

水深が200mより浅い沿岸域は海洋面積の7%を占めるに過ぎないが、海洋における基礎生産の14-30%、堆積物への有機物の埋没の80%が起こるなど物質循環において重要な場であると考えられている（Gattuso et al., 1998）。河川からの栄養塩と懸濁態有機物（POM）の供給は沿岸域の物質循環における重要な過程の一つである。しかし沿岸域における他の様々な過程と同様、時空間変動が大きく、海洋物質循環におけるそれらの役割を理解するためには様々な海域での研究が必要である（Chen et al., 2003）。

河川水が沿岸に流出してできるプリュームは陸と海の境界として重要な場である。プリュームにおける物質循環研究は主に亜熱帯で行われ亜寒帯での研究は少ない（Dagg et al., 2004）。亜寒帯では春季ブルームが起こるなど環境の季節変化が大きく、それに対応した調査が必要である。

十勝川は北海道で2番目、全国でも6番目の流域面積をもつわが国の主要河川の一つである。十勝地域の沖には亜寒帯の海流である親潮が流れている。本研究では十勝川及びそのプリューム域を中心とする十勝沖で調査を行い、十勝沖の栄養塩とPOMの起源と挙動、その季節変化、さらにそれらに対する河川の影響について解析を行った。POMは起源（陸上・海洋）により炭素及び窒素安定同位体比（ ^{13}C 、 ^{15}N ）とC/N比が異なる（Wada et al., 1987; Tyson, 1995）。それらの項目の測定によりPOMの起源に関する考察を行った。

2. 試料および方法

十勝沖で2003年5、8、11月にうしお丸（北海道大学水産学部附属練習船）により海岸線と直角方向の3-5観測線で鉛直採水を行った。中心の観測線は十勝川河口沖で、観測線間の間隔は5海里（9.3km）、海岸から沖方向に2.5-20海里（4.6-37km）の海域で観測を行った。1観測線5-6地点で、水深の範囲は21-707mであった。また2003年5月から2005年9月までの期間、十勝川下流域の茂岩橋もしくは河口橋で採水を行った。さらに夏～初秋の大雨による増水の影響を調査するため、2005年9月7日の台風（帯広の日降水量100mm、前10日間は降水無し）の後、9月8-14日に河口橋で、また9月9日に傭船により河口沖の観測線の5地点（23km沖まで、水深6-101m）で採水を行った。さらに増水していない状況での観測を、2003年9月25-26日に茂岩橋、9月17日に傭船により河口沖の観測線で行った。

採取した水をGF/Fフィルターで濾過してPOMを採取し、酸処理後、元素分析計付きの質量分析計（Fisons NA1500 - Finnigan MAT252）により有機炭素・窒素濃度と安定同位体比を測定した。またそれらの水の栄養塩とクロロフィルa（Chl.a）濃度も測定した。2003-2005年の河川流量としては、北海道開発局より提供された茂岩橋での速報値を用いた。

3. 結果と考察

3-1. 十勝川の流量と水質

観測期間中、十勝川においては、春季の融雪期と、夏～初秋の台風等の大規模な降雨の時に流量の増大が見られた。非増水時は $100\text{-}200\text{ m}^3/\text{s}$ 程度であったのに対し、融雪期は $300\text{-}600\text{ m}^3/\text{s}$ 、台風翌日の 2005 年 9 月 8 日には $2070\text{ m}^3/\text{s}$ という高い値が観測された。観測期間中の河川水の NO_3^- (DIN、すなわち NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ の合計の 67-98% が NO_3^-)、 PO_4^{3-} 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 、懸濁態有機炭素・窒素 (POC・PN) 濃度はそれぞれ $28.4\text{-}221$ 、 $0.31\text{-}1.23$ 、 $248\text{-}593$ 、 $14.4\text{-}2430$ 、 $1.81\text{-}192\text{ }\mu\text{M}$ であり、おおむね十勝沖表層水より高濃度であった。

3-2. 十勝沖海域の表層の栄養塩と Chl.a の挙動

低塩分水は十勝川河口近くを中心分布し、鉛直的には水深 10m まで影響が及んでいた。十勝川プリュームの沖方向への広がりには河川流量に対応して変化した。すなわち融雪期の 2003 年 5 月と台風による増水後の 2005 年 9 月に大きく、2003 年 8 月に最小となっていた。

表層の低塩分水では栄養塩濃度の上昇が見られ、河川水の影響と考えられた(図 1、2)。水温、密度、栄養塩、Chl.a の鉛直分布から、2003 年 5 月には春季ブルームとそれに伴う表層の栄養塩濃度低下、2003 年 8、9 月は、水温上昇による成層の強化による表層の低栄養塩環境の春季ブルーム後の継続、2003 年 11 月には秋季の鉛直混合による表層へ栄養塩の供給が起こっていたことが示唆された。

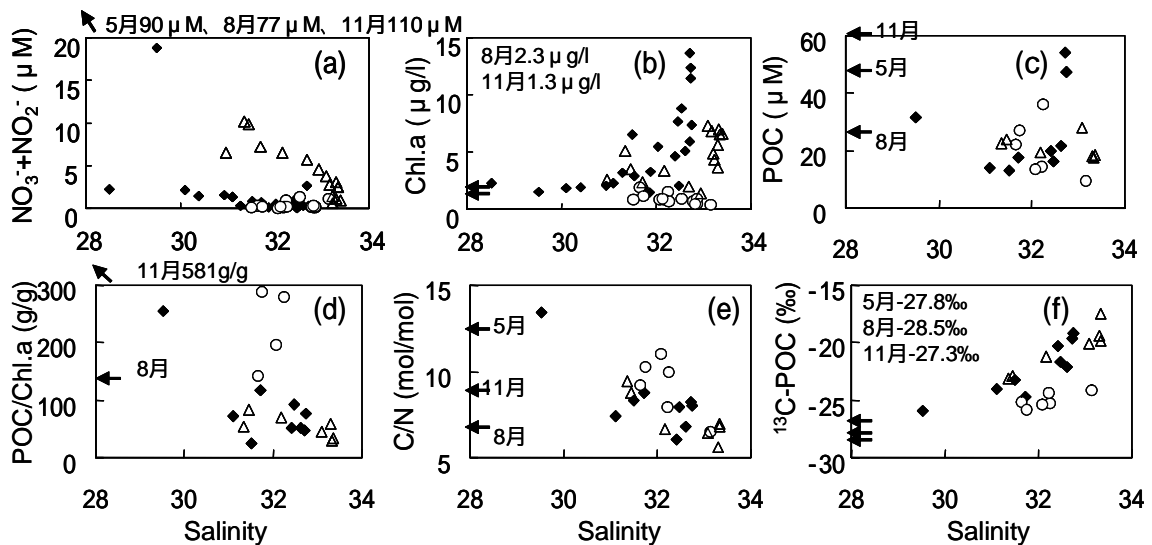


図 1. 十勝沖の表層水(0m)の水質を塩分に対して図示したもの。2003 年 5 月(○)、8 月(△)、11 月(◇)。十勝川の値は矢印(→)と数値で図中に表示。

河川からの栄養塩の供給があったにも関わらず、2003 年 5 月の Chl.a 濃度は高塩分側で高かった(図 1b)。表層 Chl.a 濃度から推定される (Saito et al., 1998) 5 月の有光層深度は最大約 20m であったが、0-20m の積算 Chl.a 量を表面水塩分に対してプロットしても図 1b と同様の傾向であった。これは十勝沖を含む親潮域では、冬季鉛直混合で表層に供給された栄養塩により大規模な春季ブルームが起こるため、河川からの栄養塩供給の影響が顕著には現れにくいことが原

因と考えられた。2003年8、11月には低塩分な河口近くの観測点で Chl.a 濃度が上昇する傾向が見られ、河川からの栄養塩供給の影響が現れていたと考えられる(図1b)。一方11月の高塩分な観測点での Chl.a の増加は、秋季の鉛直混合による栄養塩供給のためと考えられた。

台風後の2005年9月9日には低塩分水が広がると共に表層の栄養塩濃度の上昇が見られた(図2a)。最も沖の地点の Chl.a 濃度は $9.9 \mu\text{g/l}$ であったが(図2b)、これは春季ブルームの値(図1b)に近く、成層が発達し表層の栄養塩が枯渇する十勝沖の夏-初秋(2003年8、9月)には見られなかった高い値であった。河川ブルームの発達によりこの地点まで植物プランクトンが運ばれた(河川水由来、また降雨前においても河口近くには栄養塩が供給され Chl.a が高い水塊があった可能性もある)、もしくは栄養塩が供給されたことにより降雨後に Chl.a の増加が起こった、これらのことが原因として考えられた。

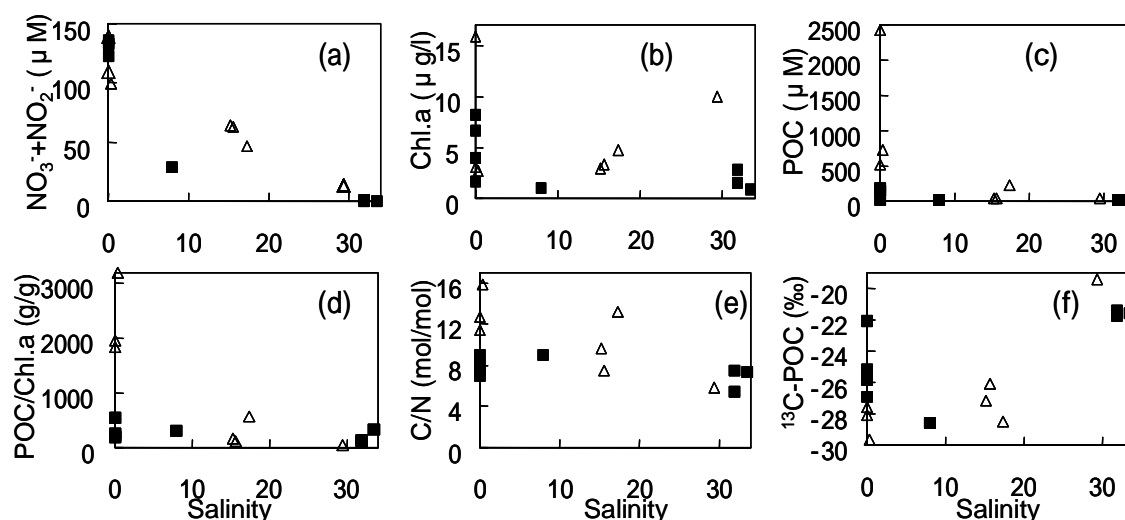


図2. 十勝沖の表層水(0m)の水質を塩分に対して図示したもの。2003年9月(十勝川非増水時)、2005年9月(十勝川増水時)。十勝川の値は塩分0の所に図示。

3-3. 十勝沖海域の表層の懸濁態有機炭素の挙動

^{13}C 、 ^{15}N 、C/N の鉛直分布から、観測期間を通し十勝川由来 POM は十勝沖の表層の低塩分水にのみ分布していることが明らかになった。十勝沖表層水ではおおむね低塩分側で POC/Chl.a (植物プランクトンは 200 以下、それ以外の有機物が多いと上昇)と C/N (植物プランクトンで低く陸上高等植物で高い)が高く、 ^{13}C と ^{15}N が低い(陸域の有機物で低い)傾向が見られ、十勝川から供給された POM の影響であると考えられた(図1、2)。

しかし2003年8月の十勝沖では塩分が比較的高いにも関わらず、POC/Chl.a と C/N が高く、 ^{13}C が低く、陸起源の POM を思わせる値になっていた(図1)。一方 ^{15}N は(4.1-6.0‰)と高く十勝川(おおむね 4‰以下)とは異なる値となっていた。この時、十勝沖では栄養塩の不足が植物プランクトンの増殖を制限したため ^{13}C が低下し(Laws et al., 1995) また POM 中のデトリタス等の割合が相対的に高くなって POC/Chl.a と C/N が上昇したと考えられる。 ^{15}N の違いから POM の主体は海洋で生成されたものと考えられた。

2003年8月の十勝川では POC/Chl.a 及び C/N に他の時期より低い値が見られた。これらは河川植物プランクトンが十勝川 POM に占める割合が高かったためと考えられ、流量低下と水温上昇が植物プランクトンの増加に好適であったことが原因と思われる。

2005年9月の表層水の POC 濃度は最も河口に近い地点で 717 μM と極めて高く、沖に行くに従い急激に低下した。同位体比、POC/Chl.a、C/N の分布から、川から高濃度の POM が供給され、沿岸で希釈や沈降により沖に行くに従い川由来の物が除去されることにより、POM 濃度が低下したと考えられた。

以上のことから、十勝沖表層の POM 濃度分布は、十勝川からの POM の供給、十勝川由来の栄養塩を使った POM 生成、春季及び秋季のブルームによる POM 生成、これらにより制御されていると考えられた。

3-4. 十勝川を通じた沿岸への栄養塩と POC のフラックス

河川観測の頻度が最も高かった 2004年10月-2005年9月のデータを用い、十勝川を通じた年間の DIN、 PO_4^{3-} 、 Si(OH)_4 、POC のフラックスを算出した(表1)。十勝沖で水平的な観測を行ったうしお丸での調査の中で、プリューム面積が最大であった 2003年5月の範囲(十勝川河口を中心とした海岸方向 37km × 沖方向 28km)を、十勝沖で河川水の影響が及ぶ最大の広さとして、十勝川由来の栄養塩及び POC の単位面積あたりの年間負荷量を計算した。その値は親潮で報告されている年間の基礎生産量のそれぞれ 36、3.5、146、6.7%にあたり、十勝川からの物質供給が十勝沿岸の基礎生産と炭素循環に有意に寄与していると考えられた。

表1. 十勝川を通じた年間の栄養塩及び POC フラックス (2004年10月-2005年9月)

	(A)十勝川から沿岸への フラックス ($\text{mmol}/\text{m}^2/\text{yr}$)	(B)A を炭素あたり の値に変換* ($\text{mmolC}/\text{m}^2/\text{yr}$)	(C)親潮水の 基礎生産量** ($\text{mmolC}/\text{m}^2/\text{yr}$)	(B)/(C) (%)
DIN	684	4410	12200	36
PO_4^{3-}	4.18	430	12200	3.5
Si(OH)_4	2770	17800	12200	146
POC	837	814	12200	6.7

*: 基礎生産における炭素固定量と栄養塩消費量の等量比から計算。

レッドフィールド比及び窒素とケイ素の取り込み比(1対1と仮定)を使用。

** : 葛西(2000)より。

また年間のフラックスに対する2つの増水期間、すなわち春季融雪期(4-6月)と台風による増水期(9月8-14日)の寄与を表2に示した。両期間とも、栄養塩での値は河川水の値に近いものであった。これは栄養塩濃度の季節変化が比較的小さく、河川流量の変化がフラックスを制御する主な要因であったためであった。一方 POC に関しては流量が顕著に増大した9月観測において濃度も大きく上昇したため、年間の POC フラックスに対する寄与は 63.2%に達した。一日あたりのフラックスを見てみると、融雪期の POC を除き、(1日/365日)の 0.27%を越えており、これらの期間の寄与が大きいことがわかる。特に、POC の輸送に関して大雨による増水が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

表2.十勝川を通した年間の物質フラックス(2004年10月-2005年9月)に対する、春季融雪期と台風による増水の寄与

項目	融雪期 (4-6月) の寄与 (%)	台風による増水 期間(9/8-14) の寄与 (%)	融雪期 (4-6月) の寄与 1日あたり(%)	台風による増水 期間(9/8-14) の寄与 1日あたり(%)
DIN	32.0	8.68	0.35	1.24
PO ₄ ³⁻	25.7	5.68	0.28	0.81
Si(OH) ₄	29.0	6.06	0.32	0.87
POC	13.8	63.2	0.15	9.03
河川水	34.4	7.20	0.38	1.02

4.まとめ

年間を通し成層し表層の栄養塩濃度が低い亜熱帯域では、川から供給された栄養塩によりプリューム中に Chl.a ピークが生じることが多いが (Dagg et al., 2004)、亜寒帯域の十勝沖では春季及び秋季ブルームの時期に Chl.a 濃度の最大値がプリューム外で観測された。一方、成層が発達する夏～初秋には川からの栄養塩供給の影響が見られた。十勝沖の POM の挙動にも、流量の変化に伴う河川からの POM 及び栄養塩の供給の変化と共に、春季・秋季ブルームの影響が見られた。このように海洋環境の季節変化の影響が大きいことが、亜寒帯のプリューム域の物質循環の特徴であることが本研究により示された。

十勝川を通した栄養塩と POM の供給は、沿岸の基礎生産と炭素循環に有意に寄与していると考えられた。河川を通した物質フラックスは流量の季節変化に対応し春季融雪期と大雨の後に増加したが、特に POM の輸送に関して大雨による増水が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

5.謝辞

この研究は、北海道大学地球環境科学研究所の南川雅男、長尾誠也、山本正伸、入野智久、工藤勲、門谷茂、鈴木光次、三浦喜典の各氏との共同研究により行いました。試料の採取にあたっては、うしお丸及びおしよる丸の船長と乗組員の皆様、各研究航海の乗船者の皆様、特に北海道大学大学院水産学研究所の池田 勉、山口 篤、清藤秀理の各氏にお世話になりました。十勝沿岸の備船観測においては笹木敏雄氏及び大津漁協にお世話になり、また北海道環境科学研究センターの福山龍次氏と濱原和広氏には観測機器をお借りしました。栄養塩試料の分析にあたっては北海道大学地球環境科学研究所の渡辺豊氏にお世話になりました。十勝川の流量データは北海道開発局の五十嵐拓氏より提供していただきました。厚くお礼申し上げます。

6.引用文献

- Gattuso JP, Frankignoulle M and Wollast R, 1998. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 405-434 .
- Chen CTA, Liu KK and MacDonald R, 2003. Continental margin exchanges. In: Fasham MJR (ed.) *Ocean biogeochemistry: the role of the ocean carbon cycle in global change*, Springer, Berlin, pp. 53-97.

- Dagg M, Benner R, Lohrenz S and Lawrence D, 2004. Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. *Continental Shelf Research*, 24, 833-858.
- Gattuso JP, Frankignoulle M and Wollast R, 1998. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 405-434 .
- Laws EA, Popp BN, Bidigare RR, Kennicutt MC and Macko SA, 1995. Dependence of phytoplankton carbon isotopic composition on growth rate and $[CO_2]_{aq}$: Theoretical considerations and experimental results. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1131-1138.
- 葛西広海, 2000. 親潮水域における栄養塩と基礎生産の季節変動. *日本プランクトン学会報*, 47: 116-118.
- Saito, H., Kasai, H., Kashiwai, M., Kawasaki, Y., Kono, T., Taguchi, S. and Tsuda, A., 1998. General description of seasonal variations in nutrients, chlorophyll a, and netplankton biomass at A-line transect, western subarctic Pacific, from 1990 to 1994. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.*, 62: 1-62.
- Tyson RV, 1995. *Sedimentary Organic Matter*, Chapman & Hall, London, 615 pp.
- Wada E, Minagawa M, Mizutani H, Tsuji T, Imaizumi R and Karasawa K, 1987, Biogeochemical studies on the transport of organic matter along the Otsuchi River watershed, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25, 321-336.

7. 平成 17 年度の研究成果発表

7-1. 学術雑誌論文

- Usui T, Nagao S, Yamamoto M, Suzuki K, Kudo I, Montani S, Noda A and Minagawa M, 2006. Distribution and sources of organic matter in surficial sediments on the shelf and slope off Tokachi, western North Pacific, inferred from C and N Stable isotopes and C/N ratios. *Marine Chemistry*, 98, 241-259.

7-2. 学会口頭発表

- 碓井敏宏、工藤 勲、長尾誠也、南川雅男 . 十勝沖海域における懸濁態有機物の起源と挙動について . 2005 年度日本海洋学会秋季大会、仙台市戦災復興記念館、2005 年 9 月 30 日 .
- 碓井敏宏、三浦喜典、入野智久、長尾誠也、南川雅男 . 降雨による十勝川の増水が沿岸の栄養塩と POM の挙動に与える影響 . 2006 年度日本海洋学会春季大会、横浜市立大学金沢八景キャンパス、2006 年 3 月 29 日 .