

— 論文 —

## 亜寒帯汽水湖の火散布沼（北海道）における 栄養塩の時空間分布とその起源\*

菅夏海<sup>†1\*\*</sup>・柴沼成一郎<sup>†1</sup>・山田俊郎<sup>†2</sup>・檜垣直幸<sup>†3</sup>・門谷茂<sup>†1</sup>

### 要旨

北海道道東に位置する火散布沼（ひちりっぶぬま）はラムサール条約登録湿地の一部でありながらも、沼内ではアサリをはじめとする様々な漁業生産活動が行われている非常に特異な汽水域である。本研究ではこの火散布沼にて、潮位、流速などの物理環境を調査するとともに、水温、塩分、栄養塩、クロロフィル *a* 濃度の時空間分布を詳しく示し、火散布沼の水理構造と、その生物過程の基盤となる栄養塩の起源について考察した。一日に供給される淡水量は沼容積の 0.9~8.0%であったのに対し、一潮汐周期にて沼に流入する外海水は沼容積の 34~59%であったことから、火散布沼は淡水供給よりも潮汐による外海水の流出入の方が卓越した系であることが確認できた。また、試料中の窒素/リン (N/P) 比、ケイ素/窒素 (Si/N) 比は、火散布沼は N が制限的に作用しやすい環境であることを示していた。塩分と栄養塩類の相関関係、および潮汐による栄養塩類の流出入フラックスから、火散布沼への無機態 N の供給源として外海水及び沼内生物による再生産の重要性が示唆された。河川（淡水）からの栄養塩供給が汽水域の基礎生産を支えるという報告例が多いが、淡水供給量が小さい火散布沼のような汽水域においては、その基礎生産は外海水や再生産によって供給される栄養塩に支えられており、本稿は火散布沼を淡水から供給される栄養塩に支配されない汽水生態系システムの典型例として報告する。

キーワード：火散布沼，汽水湖，基礎生産，栄養塩起源

### 1. はじめに

陸と海の接点である汽水域は淡水と海水が混合する複雑な環境をもち、かつ人間活動との関わりが強い海域である。汽水域における栄養塩サイクルは、河川水と外海水の流出入といった物理・化学的作用だけでなく、低次生産者による取り込み、高次捕食者の排泄、微生物による分解などの生物相互作用によって非常に複雑化しており、いまだ解明されていない部分も数多く残されている

\* 2010年3月25日受理；2010年10月26日受理

著作権：日本海洋学会，2011

†1 北海道大学大学院環境科学院

〒060-0810 札幌市北区北10条西5丁目

\*\* 主著者 e-mail address : natsumi@fish.hokudai.ac.jp

†2 株式会社 西村組 研究開発室

〒099-6404 紋別郡湧別町 栄町 133-1

†3 北海道立総合研究機構地質研究所

〒060-0819 札幌市北区北19条西12丁目

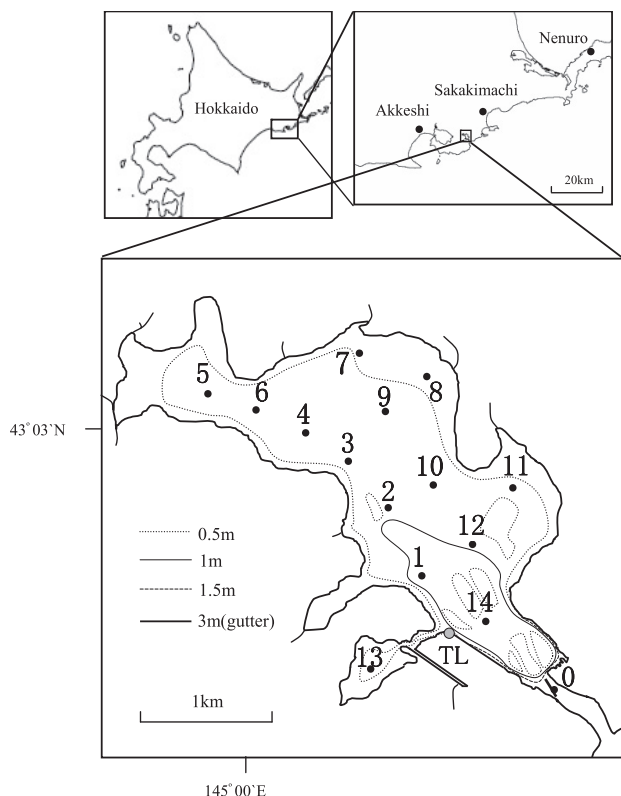


Fig. 1. Location map of sampling stations in Hichirippu-numa.

(Howarth *et al.*, 2003)。近年、富栄養化、貧酸素水塊の発生などの問題を受け、汽水域では、淡水から海水への環境勾配（主要には塩分勾配）にそった様々な研究がなされており、チェサピーク湾、瀬戸内海、黒海などの多く海域において淡水流入による赤潮発生機構や、都市排水のもたらす栄養塩負荷、貧酸素現象などについて明らかにされている（例えば Anderson *et al.*, 2002；Magni and Montani, 2005；Diaz and Rosenberg, 2008 など）。しかし一方で、このような河川流入の影響を強く受けた広大な半閉鎖性汽水域に比べ、淡水流入量の少ない面積の小さな半閉鎖性汽水域の報告例は極めて少なく、国内では面積 5.8 km<sup>2</sup>の松川浦（福島県宇田川河口）における研究にて述べられた程度であり（Kohata *et al.*, 2003）、面積が小さく、且つ淡水流入量のごく少ない系に限っては、その栄養塩サイクルや低次生産構造を述べた学術報告は無い。

北海道東部に位置する火散布沼（ひちりっぶぬま）は、

中貧栄養湖に分類（日本湖沼環境基準, OECD）され、太平洋と最低幅 80 m の水路によって繋がった半閉鎖性汽水域である（Fig. 1）。火散布沼は小さなクリーク以外には流入河川をもたず、集水面積（20.64 km<sup>2</sup>；北海道環境科学研究センター, 2005）が小さいため、淡水供給量が少ない（国土地理院, 2006）。また、沼の面積は 3.58 km<sup>2</sup>と狭小で、平均水深は 70 cm と報告されている（国土地理院, 2006）。沼内に点在する等深線 0.5 m 以浅のアサリ礁ではアサリの採貝漁業が行われており（Fig. 1）、その他にカキ、ウニ養殖漁業とチカの刺し網漁業などが行なわれ、1998 年～2001 年の平均年間総漁獲量は約 90 t（散布漁業協同組合, 2004）である。一方、野生生物も多数生息しており、特に鳥類では絶滅危惧種Ⅱ類のタンチョウ、天然記念物のシマフクロウが生息し、冬季には白鳥やカモ類が多数飛来することで知られている（国土地理院, 2006）。このような良好な自然環境が保たれてきた火散布沼は、北海道が定める『厚岸道立自然公園』に含まれ、環境省が定める『日本の重要湿地 500』に登録されているほか、霧多布湿原とともに国際条約であるラムサール条約の登録湿地として選定されている。すなわち、火散布沼は漁業活動の場としてだけでなく、生態系保全の場としても重要視されているといえるが、火散布沼における学術的な報告例は乏しく、その水理構造や生物生産過程はいまだ十分に解明されていない。

そこで本研究は淡水供給量のごく少ない面積の小さな汽水域として火散布沼を選定し、潮位、流速などの物理環境を調査するとともに、水温、塩分、栄養塩濃度、クロロフィル *a* 濃度の時空間分布を詳しく示し、火散布沼の水理構造及び、その生物過程の基盤となる栄養塩の起源について考察する。

## 2. 調査内容と方法

北海道厚岸郡浜中町に位置する火散布沼にて、観測地点（Stn. 0～14）を設置して水質調査を行った（Fig. 1）。著者らは 2003 年 4 月より、原則として毎月 1 回の観測を行っており、現在も継続中である。火散布沼は湖盆に向かって深くなる単純な地形をしているが、沼中央から沼口には等深線 0.5 m 以浅のアサリ礁が 8 箇所点在して

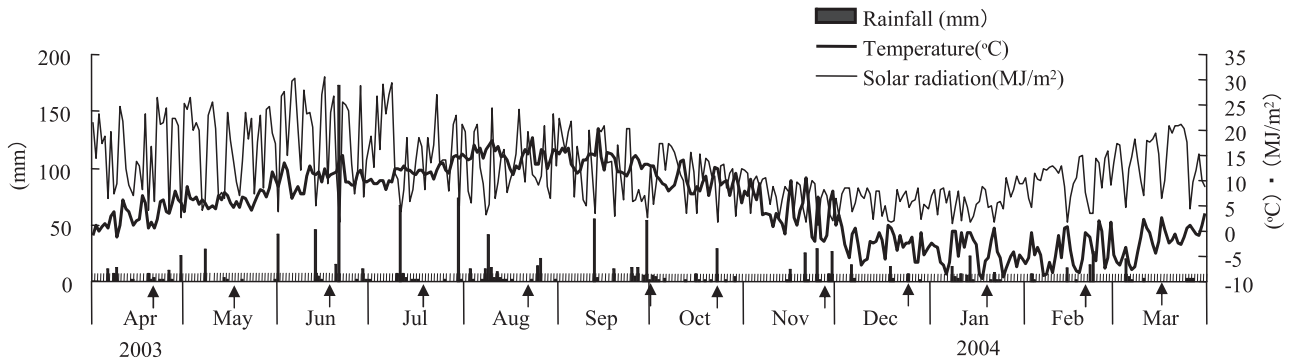


Fig. 2. Temporal variations of rainfall amount (mm) and atmosphere temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) at Sakakimachi, amount of solar radiation ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) at Nemuro, from April 2003 to March 2004. Arrows indicate the date of observation.

いる。また Stn. 0 の位置する水路は幅 80 m, 水深 3 m と滞筋のように深くなっている (Fig. 1)。沼にそそぐ 10 本のクリーク (沢) の位置と長さを実線で示したが (Fig. 1), 降雨直後には存在するものの, 晴天が続いた場合には干上がってしまうような流量の少ないクリークであり, 火散布沼は恒常的な淡水流入源として認められるような河川を持たない。本稿ではこの火散布沼調査にて 2003 年 4 月から 2004 年 3 月までに得られたデータを中心に報告する。Stn.14 は 2003 年 10 月 23 日より設けた地点であるため, それ以前は観測を実施していない。毎月の調査は中潮・大潮の期間に行なわれ, 沼奥部は冬季に結水するため, 12 月~3 月の観測では, 氷上を歩いての観測が不可能な数定点, 欠測となった。それぞれの調査は沼奥部への調査船の進入が容易である中潮位~高潮位時に行ったが, 4, 6 月の調査は低潮位時に行った。便宜上, 観測結果は 2003 年 10 月 1 日に得たデータは 9 月を代表するデータ, 2003 年 10 月 23 日に得たデータは 10 月を代表するデータとして記述する (Fig. 2)。これらの定期観測に加えて, 2003 年 8 月 21 日 12:00~23 日 0:00 の 36 時間, Stn. 0, 6, 10 の 3 定点にて 3 時間間隔の連続水質調査を行った。なお 8 月 22 日 21:00 の観測は視界不良のため調査船が航行不可能となり欠測となった。

水質調査では, 水試料として表層水を手柄付きビーカーにて酸洗浄済みのポリエチレンボトルに採取した。また試料採取時に, 船上から多項目水質計 (YSI, Model 556) を海中に降ろして, 各定点の表層と底層における

水温, 塩分の測定を行った。なお, Stn. 0 は水路上の地点であり, 底層の観測が困難であることから, 表層のみ測定を行った。毎回の調査には 1~2 時間を要したため, 採水した試料はクーラーボックス内に保管され, 保冷剤を用いて調査終了時まで冷蔵保存された。調査終了後 10 時間以内に水試料を GF/F フィルターでろ過し, ろ紙をクロロフィル *a* 分析, ろ液を栄養塩分析に供した。クロロフィル *a* 濃度は  $-20^{\circ}\text{C}$  にて約 24 時間 90% アセトン溶液で抽出後, 蛍光光度計 (ターナーデザイン, 10-AU) にて測定された。ろ液は分析時まで  $-20^{\circ}\text{C}$  にて凍結保存され, Strickland and Parsons (1972) の方法に準じて栄養塩濃度 (硝酸-亜硝酸態窒素, アンモニア態窒素, リン酸態リン, ケイ酸態ケイ素) をオートアナライザー (Autoanalyzer II, Bran+Lubbe) にて比色定量した。

上記の観測に加えて, 観測機器を用いた長期連続観測を行った。潮位については 2003 年 4 月 18 日以降, 沼口部西岸に設置した Stn.TL にて 10 分間隔にて潮位計による測定を行っている (Fig. 1)。また 2005 年 4 月 20 日~26 日の期間には, Stn. 0, 6 に流向・流速計 (ALEC ACM-8 M), Stn. 10 に流向・流速・塩分計 (ALEC ACM-16 M) を設置し, それぞれの項目を 10 分間隔で計測した。これらの機器は Stn. 0 においては流向・流速センサーが海底から約 1 m 程度になるように架台に固定して設置され, Stn. 6, 10 においては本体を海底に埋め, 流向・流速センサー部が海底から約 30 cm 突出するように設置された。

### 3. 結果

#### 3.1 気温・降水量・全天日射量

火散布沼に最も近い厚岸郡浜中町内、榊町アメダスにおける観測期間中の日平均気温、降水量、及び最寄の地方気象台、根室における全天日射量を Fig. 2 にまとめた。日平均気温は $-9.4$  (1月18日)  $\sim 20.2$   $^{\circ}\text{C}$  (9月14日) の範囲で季節変動していた。本稿では観測期間の季節区分を、日平均気温が常に  $10$   $^{\circ}\text{C}$  以下である4月1日から5月31日までの期間を春季、6月1日から日平均気温が  $10$   $^{\circ}\text{C}$  を下回り始める10月5日までの期間(日平均気温はほぼ  $10\sim 20$   $^{\circ}\text{C}$  である期間)を夏季、10月6日から日平均気温が  $0$   $^{\circ}\text{C}$  を下回った11月14日まで(日平均気温はほぼ  $0\sim 10$   $^{\circ}\text{C}$ )を秋季、11月15日から3月31日までの期間(日平均気温はほぼ  $0$   $^{\circ}\text{C}$  以下)を冬季と定義する。全天日射量は  $1.1\sim 30.6$   $\text{MJ}/\text{m}^2$  の範囲で春・夏季に高く、秋・冬季に低いという緩やかな季節変化を示し、最高値  $30.6$   $\text{MJ}/\text{m}^2$  は6月16日に記録されたが、7月8日以降には  $20$   $\text{MJ}/\text{m}^2$  以下の日射量が低い日が14日間続いた。降水量の最大値、 $173$   $\text{mm}$  は6月に記録され、夏季に降水量が多い傾向があった。観測日の一週間以内に  $25$   $\text{mm}$  以上の降水があった観測月は6, 7, 9, 11月であり、4, 10, 12月の観測日の天候は雨もしくは雪であった。

#### 3.2 観測機器による連続観測結果(潮位・流速・塩分)

大潮(満月)から再び大潮(新月)に戻るまでの期間である2003年4月18 $\sim$ 5月1日の Stn. TL における潮位変化は、中潮期間中である4月27日 $\sim$ 30日の期間を

除き、1日に2回起こる満潮・干潮のうち、干満の差が大きい満潮・干潮(最満潮・最干潮)と干満の差が小さい満潮・干潮の区別は明瞭であった。大潮の期間(4月18, 19日, 5月1日)、平均の最満潮位及び最干潮位はそれぞれ  $127, 32$   $\text{cm}$  であった。一方、干満の差が小さくなる小潮期間(4月23 $\sim$ 27日)における平均最満潮位は  $107$   $\text{cm}$ 、平均最干潮位は  $50$   $\text{cm}$  であった。また測定期間中の平均水深は  $80$   $\text{cm}$  であった。

中潮から大潮にかけての期間である2005年4月20日 $\sim$ 26日の Stn. 0 (沼口), 10 (沼中央), 6 (沼奥) における流向、流速を Table. 1 にまとめた。各地点の測定期間中の平均流速は Stn. 0, 10, 6 においてそれぞれ、上げ潮時には  $19.3, 5.5, 2.3$   $\text{cm}/\text{s}$ 、下げ潮時には  $18.6, 6.3, 3.6$   $\text{cm}/\text{s}$  であり、沼奥に向けて急激に流速が弱まっていた。流向は、上げ潮時には沼口から沼奥へ向かう北西方向、下げ潮時には沼奥から沼口へ向かう南東方向を示した。Stn. 0 における日平均流速は、上げ潮時に  $9.5$  (23日)  $\sim 23.8$  (21日)  $\text{cm}/\text{s}$ 、下げ潮時に  $8.8$  (24日)  $\sim 24.1$  (21日)  $\text{cm}/\text{s}$  の範囲で変動し、大潮(25日)の直前に小さい値を記録した。また、中潮期間(21, 22日)の平均流速は上げ潮時  $20.6$ 、下げ潮時  $20.8$   $\text{cm}/\text{s}$  であった。同期間の Stn. 10 における塩分は  $15.0\sim 32.0$  の範囲で変動し、最低値は21日 20:20 に、最高値は24日 3:00 に記録された。また、この期間、塩分が20を下回ったのは21日 19:50 $\sim$ 23:50の時間に限られており、それ以外の時間は  $20\sim 32.0$  の高い塩分範囲で推移し、上げ潮時の平均塩分は  $29.3$ 、下げ潮時の平均塩分は  $28.5$  であり、測定期間中の平均塩分は  $28.9$  であった。

#### 3.3 定期観測結果

2003年4月 $\sim$ 2004年3月の表層水の水温の水平分布

Table. 1. Averaged current direction and speed (cm/sec) at Stn. 0,10,6 between April 20 and 26, 2005.

		Flood		Ebb	
		Direction	Speed (cm/s)	Direction	Speed (cm/s)
Entrance	Stn.0	NW $311^{\circ}$	$19.3 \pm 12.3$	SE $145^{\circ}$	$18.6 \pm 13.9$
Inner	Stn.10	NNW $337^{\circ}$	$5.5 \pm 3.5$	S $177^{\circ}$	$6.3 \pm 3.7$
Innermost	Stn.6	NW $315^{\circ}$	$2.3 \pm 1.9$	ESE $130^{\circ}$	$3.6 \pm 2.6$

を Fig. 3 に示す。水温には明確な季節変化があり、2月に年間最低値、 $-1.4^{\circ}\text{C}$  (Stn. 6) が観測され、6月に年間最高値、 $22.7^{\circ}\text{C}$  (Stn. 5) を示した。水温は4月から10月にかけては沼口から沼奥に向けて高くなる傾向にあったが、11月から3月にかけては、沼奥から沼口に向けて高くなる傾向があった。また6月には空間的温度差は $6.4^{\circ}\text{C}$ におよび、 $16.3$  (Stn.11)  $\sim$   $22.7$  (Stn. 5)  $^{\circ}\text{C}$  の範囲で急激な変化を示した。このような水温の変動パターンをまとめると、春・夏季には沼奥が高温で、秋・冬季には沼奥が低温であるといえる。9月中旬に向けて上昇し、それ以降、2月に向けて低下するという外気温の季節変化と火散布沼の水温の季節変化はほぼ一致していたが、7月には外気温の上昇と一致しない水温低下が見られた (Fig. 2, 3)。

同時期の塩分は  $18.3\sim 33.3$  の範囲で変動し、最低値は4月に Stn.4 にて、最高値は11月に Stn. 0 にて記録された (Fig. 4)。塩分は全期間を通して沼口に近くなるにつれ上昇する空間分布を示したが、明確な季節変化は見られなかった。11月は沼奥部と沼口部の塩分の差

が  $14.5$  と非常に大きかった。水温の水平分布ではフロントが認められなかったのに対し、塩分の空間変化はより大きく、4, 9, 11, 3月には、沼中央でフロントを形成し、沼奥にむけて急激に低下する傾向があった。26以下の顕著な低塩分水は4, 7, 9, 11, 2, 3月において確認された。また、観測期間中、Stn.1 $\sim$ 14における底層水と表層水の塩分の差はほぼ認められなかった。

2003年4月 $\sim$ 2004年3月の表層水における栄養塩類およびクロロフィル *a* 濃度の時系列変化を Fig. 5 $\sim$ 9 に示す。硝酸-亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3+\text{NO}_2-\text{N}$ ) 濃度は  $0.1\sim 9.6\mu\text{M}$  の範囲で変動し、最高値 ( $9.6\mu\text{M}$ ) は1月に Stn.0 にて記録された。また検出限界以下の値 ( $<0.05\mu\text{M}$ ) は9月に Stn.7 にて記録された。 $\text{NO}_3+\text{NO}_2-\text{N}$  濃度の季節変化は明瞭であり、春 $\sim$ 秋季 (4 $\sim$ 10月) よりも冬季 (11 $\sim$ 3月) に高濃度で分布しているのが見てとれる (Fig. 5)。また、沼奥に比べ、沼口にて高い値を示す傾向があった。

同時期のアンモニア態窒素 ( $\text{NH}_4-\text{N}$ ) 濃度は、 $0.1\sim 8.2\mu\text{M}$  の範囲で変化し、検出限界以下の値 ( $<0.05\mu\text{M}$ )

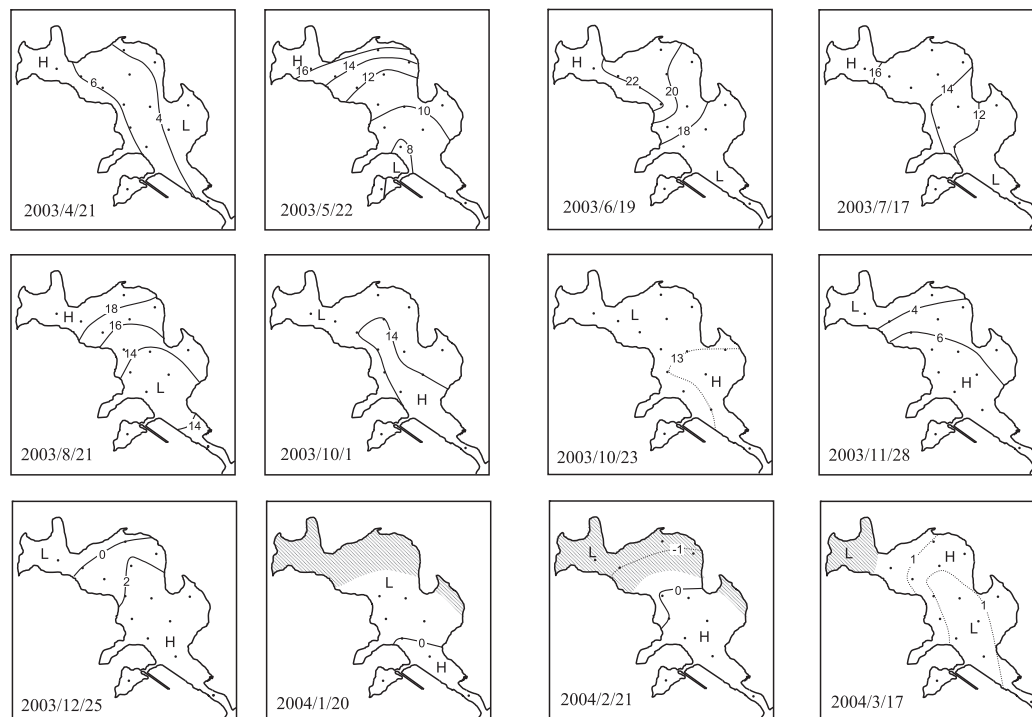


Fig. 3. Horizontal distributions of surface water temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) from April 2003 to March 2004. Shaded regions denote ice covered area. H and L indicates the high and low concentration, respectively.

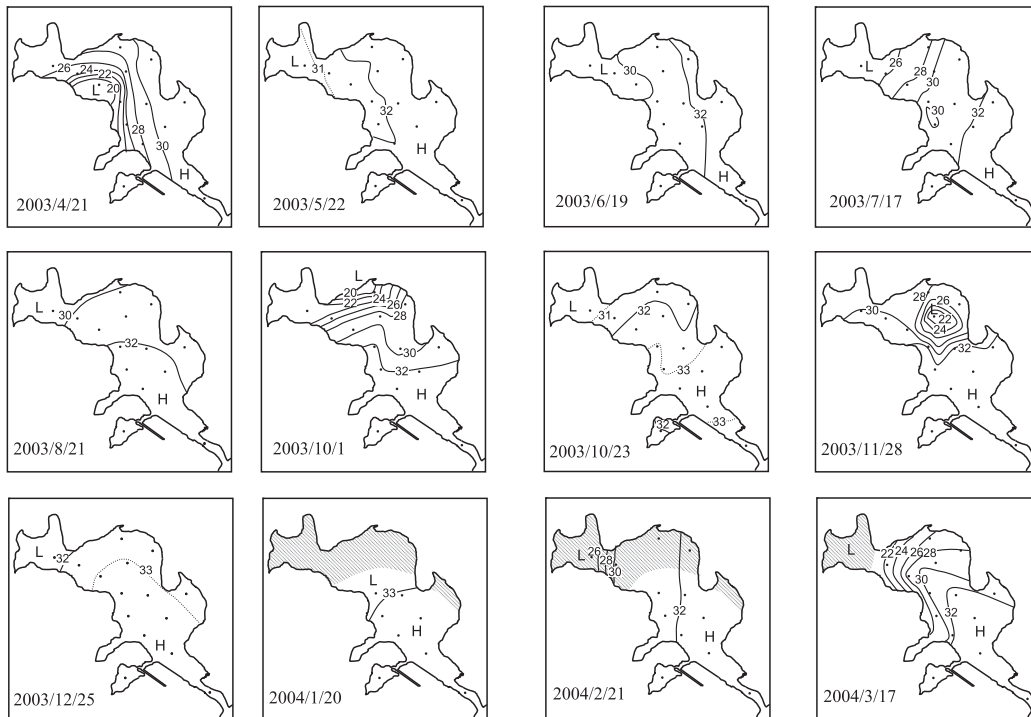


Fig. 4. Horizontal distributions of surface water salinity from April 2003 to March 2004. Shaded regions denote ice covered area. H and L indicates the high and low concentration, respectively.

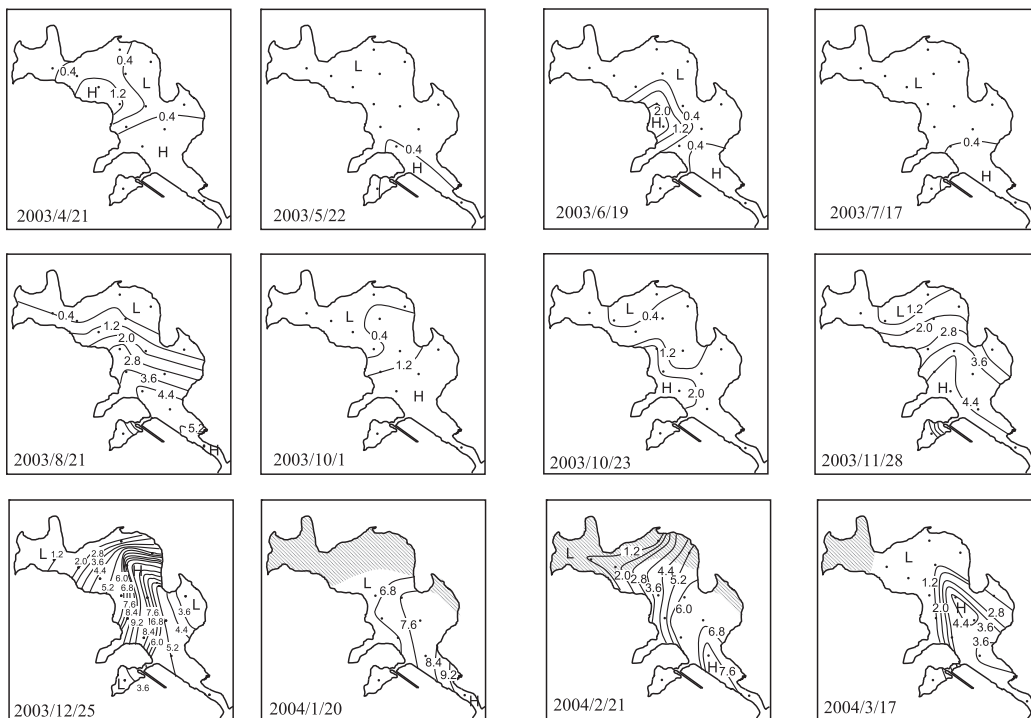


Fig. 5. Horizontal distributions of surface water  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  ( $\mu\text{M}$ ) from April 2003 to March 2004. Shaded regions denote ice covered area. H and L indicates the high and low concentration, respectively.



Fig. 6. Horizontal distributions of surface water  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $\mu\text{M}$ ) from April 2003 to March 2004. Shaded regions denote ice covered area. H and L indicates the high and low concentration, respectively.



Fig. 7. Horizontal distributions of surface water  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $\mu\text{M}$ ) from April 2003 to March 2004. Shaded regions denote ice covered area. H and L indicates the high and low concentration, respectively.

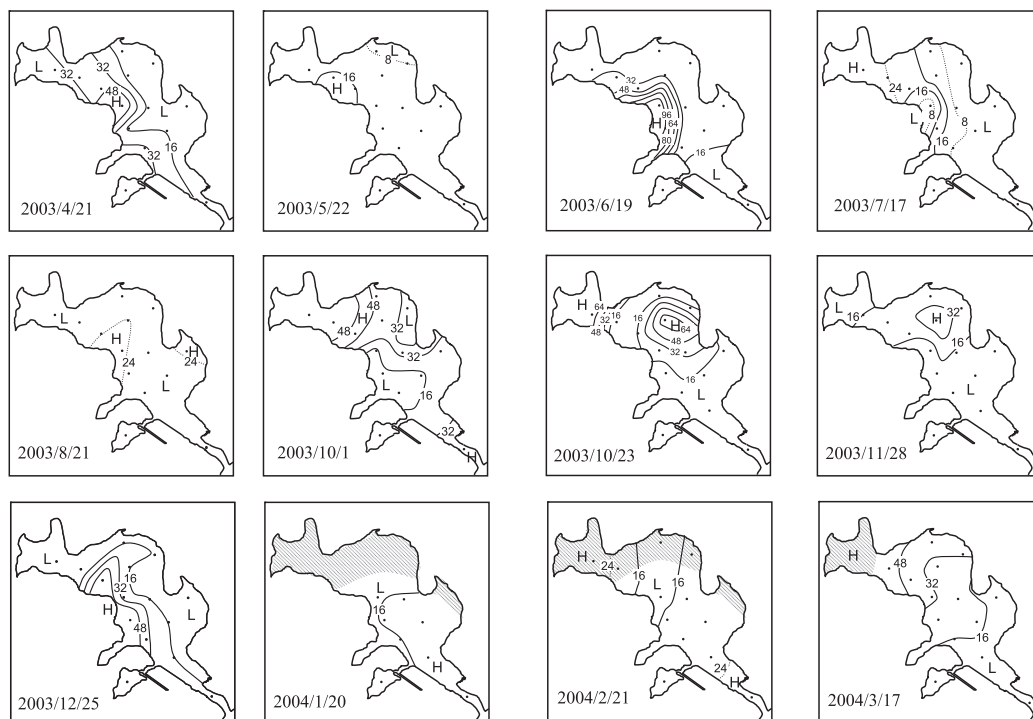


Fig. 8. Horizontal distributions of surface water  $\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$  ( $\mu\text{M}$ ) from April 2003 to March 2004. Shaded regions denote ice covered area. H and L indicates the high and low concentration, respectively.

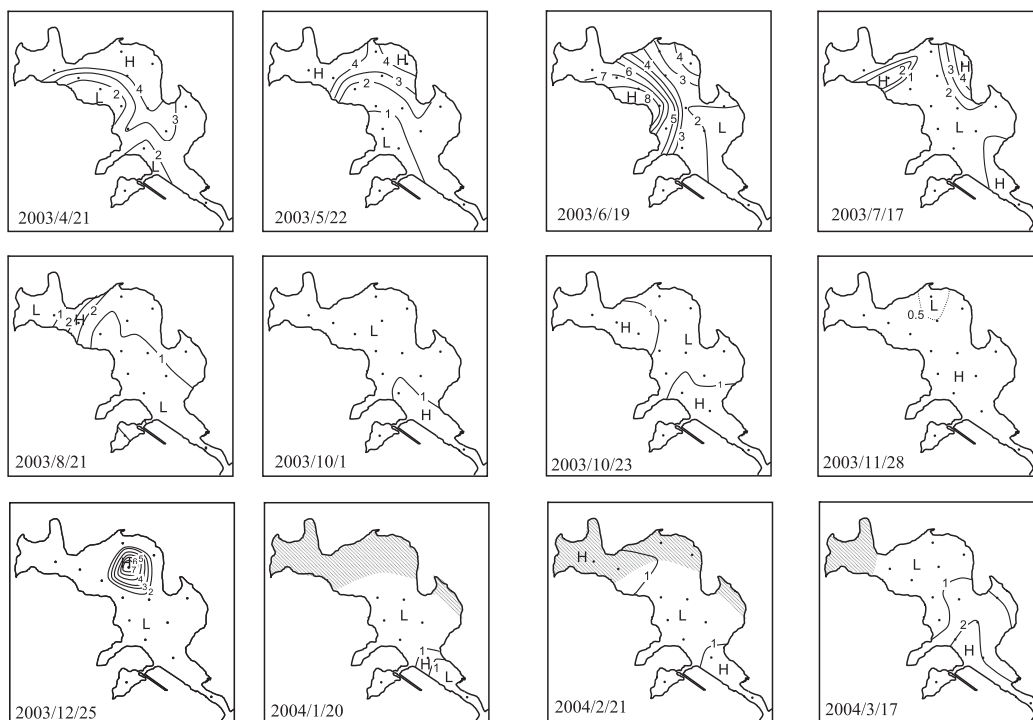


Fig. 9. Horizontal distributions of surface water chlorophyll *a* ( $\mu\text{g/l}$ ) from April 2003 to March 2004. Shaded regions denote ice covered area. H and L indicates the high and low concentration, respectively.



は2月のStn. 0, 1, 8, 12, 3月のStn.10, 14にて記録された。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は空間的な傾向を示さず、夏季の7月(Stn. 3), 8月(Stn. 2), 9月(Stn. 11, 13)に局所的に高い値を示した。このような時空間変動は、硝酸-亜硝酸態窒素とは異なることが分かる(Fig. 6)。

リン酸態リン( $\text{PO}_4\text{-P}$ )濃度は最低値 $0.1\mu\text{M}$ を4月のStn. 4, 5月のStn. 5にて記録し、最高値 $1.4\mu\text{M}$ を8月Stn.5にて記録した。季節変化をみると、夏・秋季(8~11月)に高濃度を示し、春季(4, 5月)に低濃度を示す傾向があった(Fig. 7)。

ケイ酸態ケイ素( $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ )濃度は、 $4.0\sim 103\mu\text{M}$ の範囲で変動し、4月のSt. 3, 6月のStn. 2, 3, 10月のStn. 5, 9, 12月のStn. 2, 4にて $60\mu\text{M}$ 以上の高濃度を記録し、数地点にて局所的に高濃度を示す水平分布を示す傾向であった。また、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ 濃度の季節変化は明らかではなかった(Fig. 8)。

同時期のクロロフィル*a*濃度は、最低値 $0.2\mu\text{g/l}$ を3月にStn. 4にて記録し、最高値 $8.0\mu\text{g/l}$ を6月にStn. 4にて記録した。クロロフィル*a*濃度は春・夏季に高く、秋・冬季に低い値を示す傾向が見られたが、12月には局所的に高濃度を示した。また、空間的な一定の傾向は確認できず、浅い岸よりの数地点にて局所的に高濃度を示すパターンが多く見られた(Fig. 9)。

### 3.4 36時間連続観測結果

2003年8月21日12:00~8月23日0:00のStn.TLにおける潮位変化, Stn. 0, 10, 6における表層水の栄養塩濃度の変化をFig. 10にまとめた。潮位変化は21日21:00および22日21:50に、満潮(131 cm)を記録し、22日6:00に干潮(59 cm)を記録した。この潮位変化にしたがって、本節では観測期間中の21日12:00~21:00, 22日6:00~21:50の間を上げ潮, 21日21:00~22日6:00, 22日21:50~23日0:00の間を下げ潮期間と定義し、試料の特徴を抽出した。なお、転潮時であった21日21:00および22日6:00の試料は下げ潮期間に得られた試料とする。

$\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度は沼口であるStn. 0において21日18:00に $5\mu\text{M}$ を越える高濃度を示した後、22日3:00には最低値 $1.5\mu\text{M}$ を示し、その後再び22日

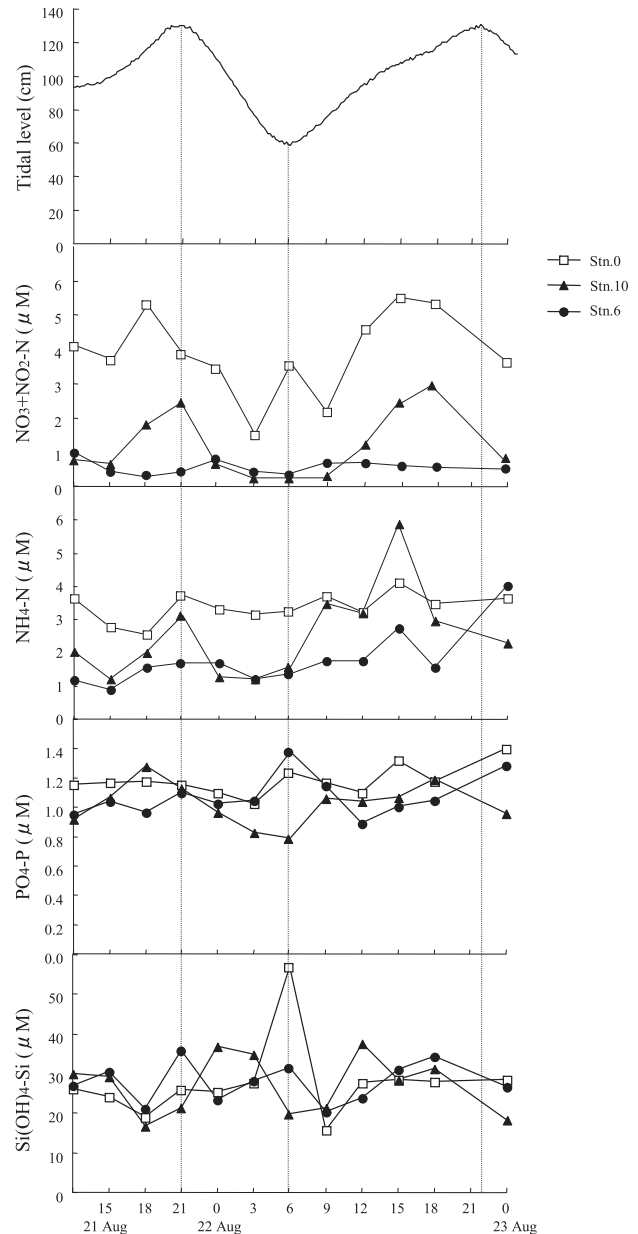


Fig. 10. Tidal level (cm) at Stn.TL and variations of nutrients concentrations ( $\mu\text{M}$ ) of surface waters observed every three hours at Stn.0,10,6 during 36-h period in August 21-23, 2003. Vertical lines indicate the highest tide or lowest tide.

15:00に最高値 $5.5\mu\text{M}$ を示す明瞭な時間変化を示した(Fig. 10)。また、沼中央であるStn.10はStn. 0に類似した時間変化を示し、Stn. 0にやや遅れて、21日21:00に高濃度( $2.4\mu\text{M}$ )を示した後、低濃度で推移

**Table. 2.** Averaged nutrient concentrations ( $\mu\text{M}$ ) and fluxes of nutrients ( $\text{kmol}/\text{half tidal day}$ ) at Stn. 0 during 36-h period in 21–23 August, 2003. Values for water fluxes are computed from averaged current speed at Stn. 0 between April 20 and 26, 2005.

	Water volume ( $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{half tidal day}$ )	$\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$ ( $\mu\text{M}$ ) ( $\text{kmol}/\text{half tidal day}$ )		$\text{NH}_4\text{-N}$ ( $\mu\text{M}$ ) ( $\text{kmol}/\text{half tidal day}$ )		$\text{PO}_4\text{-P}$ ( $\mu\text{M}$ ) ( $\text{kmol}/\text{half tidal day}$ )		$\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ ( $\mu\text{M}$ ) ( $\text{kmol}/\text{half tidal day}$ )	
Influx	1001	4.34	4.34	3.36	3.37	1.18	1.18	24.17	24.18
Outflux	980	3.19	3.12	3.43	3.36	1.19	1.16	32.88	32.21
Budget	21		1.22		0.01		0.02		-8.03

し、その後再び22日18:00に高濃度 ( $3.0 \mu\text{M}$ ) を記録した。すなわち、 $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$  濃度は潮位変化とよく一致し、上げ潮時に上昇、下げ潮時に低下する濃度変化を示していた。Stn. 0, 10における顕著な時間変化に対し、沼奥であるStn. 6は明瞭な変化を示さなかった。また、 $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$  濃度はStn. 10, 6に比べて、Stn. 0 (沼口) にて高濃度で推移していた (Fig. 10)。外海との流出入口であるStn. 0における上げ潮、下げ潮期間中の各栄養塩の平均濃度をTable. 2に示す。Table. 2によると、上げ潮、下げ潮期間中のStn. 0における平均 $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$  濃度は、それぞれ4.3,  $3.2 \mu\text{M}$  であり上げ潮期に高く、下げ潮期に低かった。

$\text{NH}_4\text{-N}$  濃度はStn. 10にて明瞭な時間変化を示し、21日21:00に $3 \mu\text{M}$ 以上の高い濃度を示した後、低濃度で推移し、その後再び22日9:00以降に高濃度 ( $3.0 \mu\text{M}$ ) を記録した (Fig. 10)。このような上げ潮時に上昇、下げ潮に低下といった潮汐周期に同調した時間変化は、 $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$  濃度においてはStn. 0においても同様に確認されたが、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度においては確認されず、Stn. 0における上げ潮、下げ潮期間の平均濃度の差は見られなかった (Table. 2)。 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度は22日15:00, 23日0:00を除く、10回の観測にてStn. 0 (沼口) にて高濃度で推移していた (Fig. 10)。

$\text{PO}_4\text{-P}$  濃度および $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  濃度は明瞭な時間変化を示さず、 $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度において確認されたような空間的特徴を抽出できなかった (Fig. 10)。沼口であるStn. 0における平均 $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は上げ潮、下げ潮期間による違いを示さなかったのに対し、平均 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  濃度は上げ潮期間24.2, 下げ潮期間 $32.9 \mu\text{M}$  と上げ潮期に低く、下げ潮期に高い値を示した (Table. 2)。

## 4. 考察

### 4.1 火散布沼の水理環境

#### 4.1.1 淡水と外海水の流出入

火散布沼は集水面積が小さく流入河川をもたないことから、淡水供給量は少ないとされているが (国土地理院, 2006)、その寄与に関して、外海水と比較した定量的な見積もりは一切行われていない。そこで本節では外海水の寄与と比較して、淡水の寄与が小さいことを定量的に再検討する。降水量の月積算値、及び単位時間当たりの淡水供給量、滞留時間をTable. 3にまとめた。単位時間当たりの淡水供給量は月積算降水量に火散布沼の集水域面積 ( $20.64 \text{ km}^2$ ) を掛けて一ヶ月あたりの淡水供給量として求めた。この淡水供給量 ( $\text{m}^3/\text{month}$ ) を日単位に換算した後、火散布沼の容積 (沼面積  $3.58 \text{ km}^2 \times$  平均水深  $70 \text{ cm}$ , 国土地理院, 2006) で割って一日に沼内に流入する淡水量が沼容積に占める割合を計算した (Table. 3)。また、滞留時間は沼容積を単位時間当たりの淡水供給量で割り算出された (Table. 3)。Table. 3によると、一日当たりの淡水供給量は $22\sim 200 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$  の範囲で変動しており、一日で火散布沼に供給される淡水量は火散布沼容積の0.9~8.0%であった。また、滞留時間は0.4~3.7ヶ月の範囲で変動していた。なお、上述の淡水供給に関する推定値は、降水量と集水面積をもとに計算されていることから、クリークからの流入、地下からの浸出といった複数の経路で沼内に供給される全ての淡水の寄与を考慮した見積もりであるといえる。

前述した解析により、火散布沼への淡水供給の寄与が判明した。そこで、次に火散布沼への外海水の流出入の

**Table 3.** Freshwater input rate and residence time at Hichirippu-numa.

		Total rainfall (mm)	Freshwater input			<sup>b</sup> Residence time (month)	
			( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /month)	( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /day)	<sup>a</sup> (%)		
2003	Apr	75	1548	52	2.1	1.6	
	May	33	681	22	0.9	3.7	
	Jun	290	5986	200	8.0	0.4	
	Jul	161	3323	107	4.3	0.8	
	Aug	125	2580	83	3.3	1.0	
	Sep	166	3426	114	4.6	0.7	
	Oct	59	1218	39	1.6	2.1	
	Nov	100	2064	69	2.7	1.2	
	Dec	39	805	26	1.0	3.1	
	2004	Jan	65	1342	43	1.7	1.9
		Feb	60	1238	43	1.7	2.0
		Mar	34	702	23	0.9	3.6

<sup>a</sup>The percentage of total volume of the lagoon accounted for the daily volume of freshwater input.

<sup>b</sup>Calculated by dividing the total volume of the lagoon by the monthly volume of freshwater input.

寄与について3つの手法にて検討を行った。まず、干満の潮位差から火散布沼への外海水の流出入量を計算すると次のようになった。火散布沼の面積 3.58 km<sup>2</sup>と 2003 年 4 月 18 日～5 月 1 日に行った観測期間中の平均水深 80 cm を用いて、平均沼容積を算出すると 2864 $\times 10^3$ m<sup>3</sup> であると計算できる。同観測期間中の大潮期の最満潮、最干潮時の平均深度はそれぞれ、127, 32 cm であったことから、沼面積 3.58 km<sup>2</sup>を掛けると大潮期間の沼容積は最満潮時、4546 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>、最干潮時、1146 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>と計算でき、上げ潮時に 1683 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>が流入し下げ潮時に 1718 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>が流出していることがわかる。したがって、大潮期間には、上げ潮時に沼容積の 59%が外海から流入し、下げ潮時には 60%が外海へ流出していると推定できる。小潮期間中について同様に解析すると、上げ潮時に沼容積の 34% (967 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>) が外海から流入し、下げ潮時には 38% (1074 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>) が外海へ流出していると計算でき、大潮期間と比べて小潮期間には流出入量が低下することがわかる。これらの計算結果は 1 日 2 回起こる満潮の最高深度 (最満潮位)、干潮の最低深度 (最干潮位) を用いておこなっているため、一潮汐周期 (一回の満潮と干潮の間) で沼内に流出入する外海水の最大の数値であり、1 日 2 回引き起こされる流出入の平均的な値ではない。

次に、水路上の調査地点 Stn. 0 にて測定された流速と Stn.0 の断面積から外海水の流出入の寄与を見積もった。中潮から大潮にかけて期間である 2005 年 4 月 20 日～26 日に観測された Stn. 0 における上げ潮・下げ潮時のそれぞれの平均流速 19.3, 18.9 cm/s と Stn. 0 の断面積 240 m<sup>2</sup>、上げ潮、下げ潮時間を 6 時間として計算すると (Table. 1)、上げ潮時に外海水から 1001 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>流入、下げ潮時に外海へ 980 $\times 10^3$ m<sup>3</sup>流出していることがわかる (Table. 2)。すなわち、火散布沼の容積の 34～35%は外海との流出入を行っているといえる。この見積値は中潮～大潮期間に 1 日 2 回引き起こされる流出入のうち、1 回の潮汐周期によって流出入する外海水の平均した値であり、上記の潮位差から算出される一潮汐周期で流出入する外海水の日最大流出入率 (小潮期 34～38%、大潮期 59～60%) とは異なる性質の値であるため、これらを比較検討することは適当ではない。

さらに、海水交換率の定義式 (1) (柏井, 1984) を用いて、外海水の流出入の寄与を推定した。2005 年 4 月 20 日～26 日に Stn.10 にて測定した塩分データ、及び厚岸沖定線、

$$r_G = S_F - S_E / S_0 - S_B \quad (1)$$

A-line 上の最も陸よりの定点 A 1 にて観測されたデータ (FRA, 2009 A-line Database) によると, 上げ潮時の平均塩分  $S_F=29.3$ , 下げ潮時の平均塩分  $S_E=28.5$ , 内湾の影響が及ばない外海水の塩分 (A 1 にて 2005 年 5 月に得られたデータ)  $S_0=33.8$ , Stn.10 における測定期間中の平均塩分  $S_B=28.9$  であった。これらの数値を式 (1) に代入すると, 海水交換率 ( $r_G$ )  $=0.15$  と求められた。すなわち, 一潮汐周期の間に Stn.10 の水の 15% が外海水と交換すると推定された。ここで求めた海水交換率は潮位差及び流速から解析した一潮汐周期における海水交換率よりも小さかったが, 柏井 (1984) の式を用いると一度外海に出て, 再び沼内に戻ってくる海水の影響が相殺されるためであると理解できる。

先に求めた計算結果をまとめると, 淡水供給量は一日に  $22\sim 200\times 10^3\text{m}^3$  であるのに対し (Table. 3), 潮汐による外海水の日最大流出量は小潮期  $967\sim 1074\times 10^3\text{m}^3$ , 大潮期  $1683\sim 1718\times 10^3\text{m}^3$  と淡水供給量の 5~78 倍大きく, 中潮~大潮期における日平均の流出率 ( $980\sim 1001\times 10^3\text{m}^3$ ) は淡水供給量の 5~45 倍大きかったことから, 大潮, 中潮, 小潮にかかわらず, 外海水の寄与は淡水の寄与を十分に上回ることが確認された。また, 沼体積の 0.9~8.0% の淡水が一日に流入してくる一方で, 一潮汐周期 (約半日) にて外海水に交換される水の割合 (海水交換率) が沼中央 (Stn.10) にて 15% であることと比較しても, 淡水供給の寄与は外海水流入の寄与を下回ることが分かる。以上の解析結果から, 火散布沼は大潮小潮に関わらず常に淡水供給よりも潮汐による外海水の流出入の方が卓越した系であることが確認でき, 火散布沼の物質輸送を検討する基盤となる重要な知見が得られた。

#### 4.1.2 沼口部, 沼中央部, 沼奥部における環境の違い

前節にて火散布沼の物質輸送における外海水流出入 (潮流) の重要性が確認されたことから, ここでは潮汐による外海水の流出入の寄与が空間的 (沼口, 中央, 奥) にどのように異なっているかを検討する。火散布沼内の流速は沼口から沼奥に向かって急激に低下していることから (Table. 1), 潮流の影響は沼奥に向かって弱まっていると考えられる。さらに, 沼奥に位置する Stn. 6

における流速は沼中央付近である Stn.10 の半分程度であることから (Table. 1), 沼口, 沼中央に比べ, 沼奥は一潮汐周期の間に交換する水の率は小さく, 水が停滞しやすいことが推測される。また, 表層水と底層水の塩分差が確認されなかったことから, 平均水深 70 cm と非常に浅く, さらに淡水供給量が少なく潮流による混合が大きい火散布沼は鉛直的な混合が発達した強混合型汽水水域であるといえ, 表層と底層の水はほぼ均質に混合されていると推測された。

次に, この潮流による影響の強弱が沼口, 沼奥における水温・塩分の空間的差異に反映しているのかを確認した。水温の変動パターンは, 春・夏季には沼奥部が高温で, 秋・冬季には沼奥部が低温であった (Fig. 3)。この変動は沼口部の水深が 1~1.5 m であるのに対し, 沼奥部の水深は 0.5~1 m (Fig. 1) と更に浅いことに加えて, 上述した沼口部と沼奥部の潮流による混合の強弱の違いが要因であると考えられる。すなわち, 沼奥部に比較して, 沼口部は一潮汐周期の間に交換する水の率が高いため, その水温は主に外海の水温の影響を受けやすいが, 潮流の弱さにより沼奥部に停滞した水は日射量の多い春・夏季には, 水深が浅いゆえ, 太陽光により海底まで十分に温められるため高温になり, 一方で, 冬季には零下となる外気温の影響を受けやすく, 結氷にいたるため低温になると理解できる (Fig. 2, 3)。また, 6 月や 8 月の水温データと比較し, 観測前 5 日間の全天日射量が平均  $10.9\text{MJ/m}^2$  と小さかった 7 月の水温が顕著に低下していたことから, 夏季の火散布沼の水温変動には日射量が深く関与していると考えられた (Fig. 2, 3)。

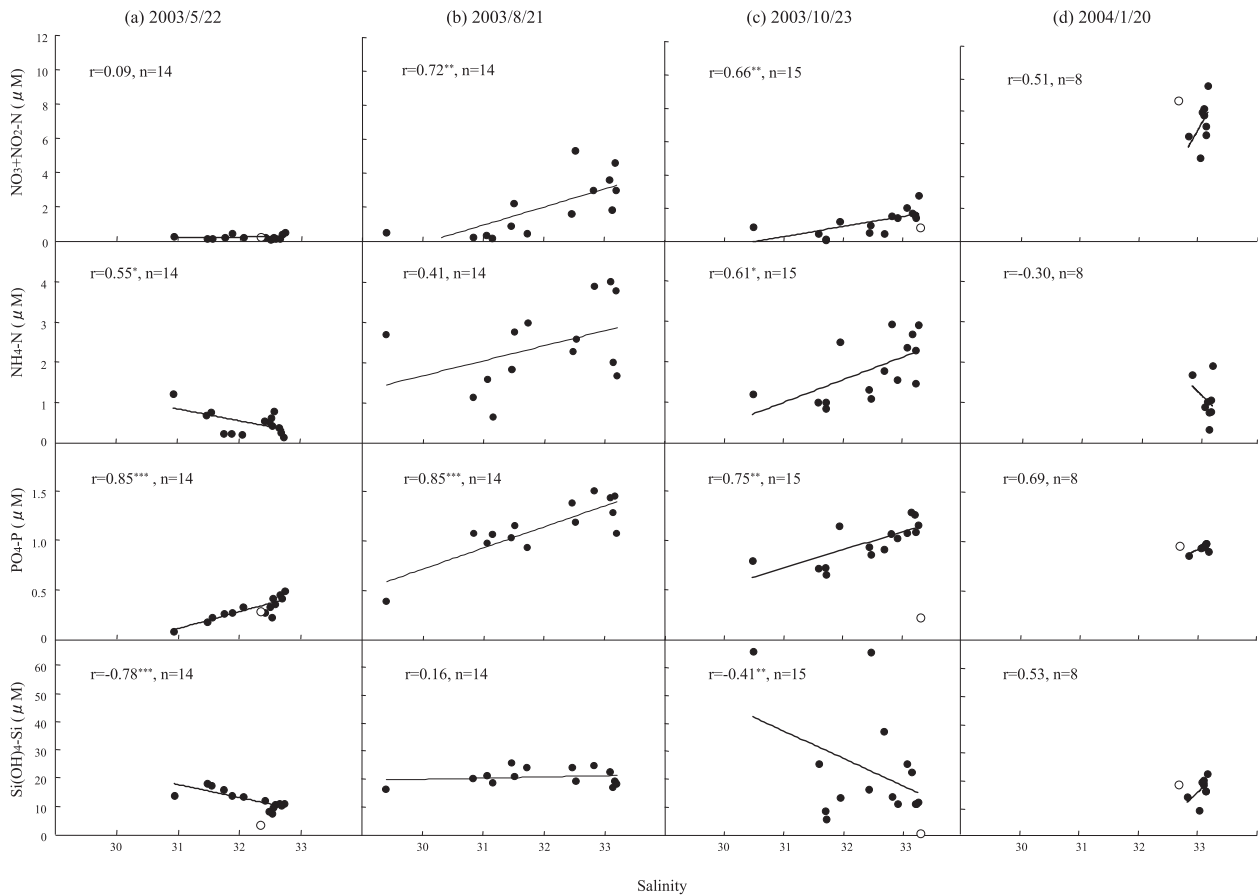
塩分は沼口へ向かって上昇する外海水の影響を受けた勾配を示し, 沼中央でフロントを形成し, 沼奥にむけて大きく低下していた (Fig. 4)。このことは外海水の影響が沼奥に向かって急激に弱まっており, 沼口, 沼中央に比較して, 沼奥においては供給された淡水が停滞しやすいことを反映した結果であるといえる。また, 塩分の時空間分布は降雨の影響を顕著に示しており, 観測日の一週間以内に 25 mm 以上の降水があった観測月のうち, 6 月を除いた 7, 9, 11 月において降雨による影響と考えられる 26 以下の顕著な低塩分水が認められた。低塩分水は 4, 2, 3 月の観測時においてもみられたが, これは降雨に関係しない融雪や沼奥の水の融解に由来する淡

水が観測されたためであると考えられた (Fig. 2, 4)。加えて、上述した解析から沼口部, 沼中央部, 沼奥部の環境は大きく異なり, それぞれを代表する定点として Stn. 0, 10, 6 を抽出した妥当性が確認された。

#### 4.2 各栄養塩の起源

栄養塩と塩分のプロットは栄養塩の起源が陸域 (淡水) であるのか, 外海であるのかを推定するのに広く活用されており, それらに直線関係が成立する場合, 対象成分が淡水-海水の希釈混合によって濃度変化する保存性の強い成分であると判断でき, 逆にその関係が成立しない

場合には対象成分は系内における除去・付加作用を受けていることを意味している (Kemp, 1989)。そこで本研究では火散布沼における各栄養塩と塩分のプロットを Fig. 11 にまとめ, それぞれの栄養塩起源について検討を行う。Fig. 11 には, 観測年の春, 夏, 秋, 冬季を代表するデータとして 2003 年 5, 8, 10 月, 2004 年 1 月の表層水のデータを用いた。また,  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$ , 及び  $\text{PO}_4 - \text{P}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4 - \text{Si}$  と塩分の相関図には厚岸沖定線, A-line 上の最も陸よりの定点 A1 にて同時期 (2003 年 5, 10, 1 月) に得られたデータ (FRA, 2009) を同様にプロットした。また, 4.1.1 節に述べたように, 火散布沼では沼体積の最大 60% の水が潮汐周期によ



**Fig. 11.** Plots of salinity versus nutrients concentrations ( $\mu\text{M}$ ) of surface waters in spring (a), summer (b), fall (c), winter (d). Values observed at A1 shown as open circles. The solid line represents least square regression except for A1 data. The  $r$  represents the Pearson's product-moment correlation coefficient (\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*\*\*:  $p < 0.001$ ). The  $p$  value is based on significance test for the correlation coefficient.

て沼の入口である Stn. 0 から流出入しており、上げ潮時に流入した水の容積のほぼ全量が下げ潮時には外海へ再び持ち去られる (Table. 2)。したがって、火散布沼の栄養塩の流出入を見積もるためには、栄養塩と塩分の相関図に反映される見かけの流入についてだけでなく、正味の供給について議論を行う必要がある。そこで、36 時間連続観測にて記録された Stn. 0 における各栄養塩の上げ潮、下げ潮期の平均濃度に、4.1.1 節にて Stn. 0 の流速から算出された日平均流出、流入水容積を乗算し、それぞれの栄養塩の一回の潮汐周期 (上げ潮、下げ潮の 1 潮汐) あたりの流入フラックス、流出フラックス (mol/half tidal day) を算出し、正味の供給量についての検討を行った (Table. 2)。なお、流出入フラックスの計算に代入された日平均流出、流入水容積は中潮～大潮期に測定された平均流速から算出されているが (4.1.1 節)、その平均流速と中潮時に記録された流速に大きな差異が認められなかったことから (3.2 節)、36 時間観測が行われた時期 (中潮) の流出入水容積として扱うことができる。また、代入された水容積は、その流入量と流出量が同程度であることから (Table. 2)、算出された正味の栄養塩供給量は上げ潮時、下げ潮時の平均栄養塩濃度に依存した値であり、代入された流出入水容積に関わらず、その妥当性を確認できる。これらの流出入フラックスのデータおよび栄養塩と塩分の相関図を用いて、以下にて各栄養塩の起源について考察を行う。

$\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度は 8 月、10 月において塩分と有意な正の相関関係を示したことから (それぞれ  $r=0.72$ ,  $p<0.01$ ,  $r=0.66$ ,  $p<0.01$ )、 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  は外海水を主要な起源とすると考えられた。しかし、外海水 (A 1) の  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度は 0.3 (5 月) ~ 10.8 (3 月)  $\mu\text{M}$  の範囲にて、春～秋季よりも冬季に高濃度を示す明確な季節変動を示し、常に高濃度の  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  を含んでいるわけではなかった (FRA, 2009)。そこで、ほぼ同時期に観測された外海水の  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度と火散布沼内で記録された  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度を確認すると、5 月の火散布沼における  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度は 0.1~0.5  $\mu\text{M}$  の範囲であるのに対し外海水は 0.3  $\mu\text{M}$  であり、3 月の沼内の  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度は 0.7~5.1  $\mu\text{M}$  であるのに対し外海水は 10.8  $\mu\text{M}$  であった (Fig. 5)。したがって、外海水の  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度の季節変動

に合わせて、火散布沼において記録される  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度の最大値も変動しているといえた。これは春～秋季よりも冬季に高濃度を示すという  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度の季節変動が外海水と火散布沼内において同調していることから支持され (Fig. 5)、 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  が周年を通して外海から供給されている可能性が高いと考えられた。なお、塩分と  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  のプロットが常に有意な正の相関関係を示さなかったのは、塩分や  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度の傾斜が小さい場合 (5, 1 月) には、塩分の増加とともに濃度が上昇する傾向を捉えることが出来なかったためと理解できる (Fig. 11)。36 時間観測の結果によると、 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度は潮位変化とよく一致した濃度変化を示していた (Fig. 10)。また、1 潮汐あたりの  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  流入、流出フラックスは、それぞれ 4.3, 3.2 kmol/half tidal day であり、これらの差分である 1.2 kmol が 1 潮汐にて沼内に正味に供給されていた (Table. 2)。すなわち、この 36 時間観測結果は上述の解析結果と整合的であるといえ、 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  は淡水由来成分ではなく、外海を主要な起源としていることが推察された。

$\text{NH}_4 - \text{N}$  濃度は 5 月には塩分と有意な負の相関 ( $r=0.55$ ,  $p<0.05$ ) を示した一方で、10 月に有意な正の相関 ( $r=0.61$ ,  $p<0.05$ ) を示した (Fig. 11)。また、その相関関係はいずれの観測月においても  $p<0.05$  と弱かったことから、 $\text{NH}_4 - \text{N}$  の主要な起源は、淡水もしくは外海水といった系外からの流出入ではない可能性が高いと考えられた。このことは  $\text{NH}_4 - \text{N}$  流入・流出フラックスの差分 (沼への正味の供給) が 0.01 kmol/half tidal day と非常に小さいことと整合的であり (Table. 2)、 $\text{NH}_4 - \text{N}$  は系外 (淡水や外海水) から供給される可能性が極めて小さいことが推測された。系外から汽水域に流入する  $\text{NH}_4 - \text{N}$  よりも系内にて付加される  $\text{NH}_4 - \text{N}$  の影響が大きいとする報告は以前から多くされていることから (例えば Page *et al.*, 1995; Montani *et al.*, 1998 など)、火散布沼においても系内にて  $\text{NH}_4 - \text{N}$  が付加されている可能性が考えられる。Komorita *et al.* (2010) は火散布沼にて夏季 (8 月) のアサリ (*Ruditapes philippinarum*) による  $\text{NH}_4 - \text{N}$  排泄フラックスは 7.7 kmol/day であると報告している。本研究にて観測された火散布沼の 8 月の平均  $\text{NH}_4 - \text{N}$  濃度は 2.4  $\mu\text{M}$  で

あり、これに沼容積を乗じると沼全体の水柱  $\text{NH}_4\text{-N}$  現存量として 8.6 kmol が求められる。したがって、アサリは一日で火散布沼の水柱  $\text{NH}_4\text{-N}$  現存量の 89% を供給するといえる。このような  $\text{NH}_4\text{-N}$  の付加過程が存在するとした場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度は上げ潮時に高く、下げ潮時に低い値を示すはずであるが、本研究にて得られた 36 時間観測結果はそのような傾向を示さなかった。Komorita *et al.* (2010) によると、このことは火散布沼ではアサリが排泄した  $\text{NH}_4\text{-N}$  の 52~96% が底生の基礎生産者により消費されるためと述べている。上記の解析に加えて、アサリによる  $\text{NH}_4\text{-N}$  排泄フラックス (7.7 kmol/day) が  $\text{NH}_4\text{-N}$  流入・流出フラックス (約 3.4 kmol/half tidal day) を大きく上回ることから、 $\text{NH}_4\text{-N}$  の起源としては、外海・淡水といった系外からの流出入よりも、特に夏季にはアサリなどの沼内生物による再生産による寄与が大きい可能性が高いと考えられた。加えて、このことは夏季に局所的に高い値を示す  $\text{NH}_4\text{-N}$  の時空間分布と整合的である (Fig. 6)。

$\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は 5, 8, 10 月において塩分と有意な正の相関関係を示したことから ( $r > 0.75$ ,  $p < 0.01$ ), その起源は外海水であると判断された。しかし、36 時間観測の結果では  $\text{PO}_4\text{-P}$  は潮汐周期に同調した時間変化を示さず (Fig. 10), その流入・流出フラックスの差分 (沼への正味の供給) が 0.02 kmol/half tidal day と非常に小さかった (Table. 2)。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の起源が外海水であるとすると、外海水と火散布沼内の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は類似した季節変動を示す可能性が高いが、外海水 (A1) の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は 0.2 (7 月) ~ 1.0 (3 月) の範囲にて、春~秋季よりも冬季に高濃度を示したのに対し (FRA, 2009), 沼内の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は夏・秋季に高濃度、春季に低濃度を示していた (Fig. 7)。すなわち、36 時間観測の結果や外海水の季節変動は、塩分と  $\text{PO}_4\text{-P}$  のプロットから得られる結論と整合的ではなかったといえる。したがって、 $\text{PO}_4\text{-P}$  は外海水を主要な起源とすると考えられるが、その他に系内での  $\text{PO}_4\text{-P}$  の付加過程が存在する可能性は否定できなかった。

$\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  濃度は 5, 10 月において有意な負の相関関係 (それぞれ  $r = -0.78$ ,  $p < 0.001$ ,  $r = -0.41$ ,  $p < 0.01$ ) を示し (Fig. 11), 外海水の  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  濃度は 0~23  $\mu\text{M}$  の低濃度で推移していた (FRA,

2009)。また、連続観測では  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  濃度は潮汐周期に同調した時間変化を示さず、その流入・流出フラックスは、それぞれ 24.2, 32.2 kmol/half tidal day であり、これらの差分である正味 8.0 kmol が 1 潮汐にて沼から持ち去られていた (Table. 2)。これらのことから判断すると、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  は主に淡水由来の成分であり、外海から  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  が流入する可能性はほぼ無いと推測された。 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2\text{-N}$  及び  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は人為的要因によって変動するのに対し、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  は自然の風化溶出が水域への供給の大半を占めるとされている (原島, 2003)。したがって  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  は人為的要因による栄養塩付加がほぼ無いと考えられる火散布沼において、淡水を主たる起源とする可能性が最も高い成分であるといえる。しかし、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  は全ての観測月において塩分と有意な負の関係を示したのではないことから (Fig. 11),  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  は淡水のみに依存するのではなく、系内での  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  の何らかの付加、除去過程が存在する可能性があるが、これについては今後の検討課題としたい。

#### 4.3 基礎生産過程の制限要因

各栄養塩のうち、基礎生産を主に制限する要因をそれぞれの相対比や濃度から検討する。まず、 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2\text{-N}$  と  $\text{NH}_4\text{-N}$  の和である溶存無機窒素 (DIN) 濃度と  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  濃度の相対比 (N/P, Si/N 比) を確認すると、N/P 比は全試料中の 94% がレッドフィールド比 (N : P = 16 : 1, Redfield, 1963) よりも小さい N 制限の値を示し、Si/N 比は全試料中の 99% が Si/N > 1 の N 制限の傾向を示した (Si : N = 1 : 1, Redfield, 1963; Brzezinski, 1985)。すなわち、N/P 比, Si/N 比ともに窒素 (N) が相対的に著しく小さい傾向を示し、火散布沼の水柱はケイ素 (Si) やリン (P) よりも N が制限的に作用する環境であることが示唆された。次に、各栄養塩の濃度から基礎生産の制限要因を検討する。植物プランクトン種 (珪藻類) の DIN,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$  に対する取り込み半飽和定数はそれぞれ、0.1~5.9  $\mu\text{M}$ , 0.68  $\mu\text{M}$ , 0.42~1.31  $\mu\text{M}$  と報告されている (e.g. Eppley *et al.*, 1969; Conway & Harrison, 1977; Paasche, 1973; Conway *et al.*, 1976; 樽谷・山本,

1994)。そこで、水柱栄養塩濃度がこの半飽和定数以下の場合をそれぞれの栄養塩の制限環境であるとして試料中の栄養塩濃度を確認した。全試料中で各栄養塩濃度が半飽和定数以下を示した割合は、DIN, 80%,  $PO_4-P$ , 57%,  $Si(OH)_4-Si$ , 0%であったことから、火散布沼においては DIN 及び  $PO_4-P$  によって基礎生産が制限される場合があるが、 $Si(OH)_4-Si$  による制限は起こらないことが示唆された。また、DIN,  $PO_4-P$  のどちらが大きく作用しているのかを検討すると、DIN,  $PO_4-P$  とともに半飽和定数以下 ( $DIN < 5.9 \mu M$ ,  $PO_4-P < 0.68$ ) を示したのは試料の 52%, DIN は半飽和定数以下,  $PO_4-P$  は半飽和定数以上 ( $DIN < 5.9 \mu M$ ,  $PO_4-P > 0.68$ ) を示したのは全試料の 29%, DIN は半飽和定数以上,  $PO_4-P$  は半飽和定数以下 ( $DIN > 5.9 \mu M$ ,  $PO_4-P < 0.68$ ) を示したのは全試料の 6%であったことから、P と比較して N が制限するケースが多いことがわかる。これらの半飽和定数から得られた結果は、前述の N/P 比, Si/N 比から推察される結論と整合的であった。一般に海域の基礎生産は N が制限的に作用しやすいが (Howarth, 1988), 生活排水などの人為的汚染の著しい海域では P 制限や Si 制限が見られる事例が報告されている (山本ら, 2002; Xu *et al.*, 2008)。すなわち、人為的要因の N 負荷が見られない火散布沼においては、基礎生産の制限要因として Si や P よりも N が最も重要である可能性が高いといえる。以上の解析結果をまとめると、火散布沼の基礎生産過程には N の時空間分布が最も大きく作用すると判断された。

近年、河川 (淡水) 由来の栄養塩によって基礎生産が支配されているような汽水域の報告例が増加している (Mann, 2000)。しかし 4.3 節に述べたように、火散布沼の基礎生産を制限している N の供給源は主に外海水及び夏季の底生生物による再生産であることから、火散布沼において沼内の基礎生産をコントロールするものは淡水ではないといえる。したがって、淡水供給量が小さい火散布沼のような汽水域においては、その基礎生産は外海水や再生産によって供給される栄養塩に支えられていると考えられ、本稿は火散布沼を淡水から供給される栄養塩に支配されない汽水生態系システムの典型例として報告する。

なお、今回の解析には主に中潮・大潮期のデータを用

いているが、小潮期においても外海水の寄与は淡水の寄与を明らかに上回ることが確認できていることから、この判断は妥当であると思われる (4.1.1 節)。また、火散布沼の集水域において 1980 年以降、大きな土地利用の変化がなく (国土地理院, 2006), 2004 年 6 月~2005 年 8 月に行った観測結果からも同傾向の栄養塩の時空間分布が確認されていることから (石丸ら, 2008), 今回得られた結論は火散布沼の平均像を捉えていると考える。本研究では火散布沼の栄養塩の起源についてさまざまな特徴を見出すことが出来たが、その系内での栄養塩の除去、付加過程について定量的に把握するには至らなかった。今後は栄養塩の除去過程としてアマモ・コアマモなどの大型草藻類による栄養塩消費、栄養塩の付加過程として堆積物からの栄養塩溶出について精度の高い見積もりが必要と考えている。

## 謝 辞

本研究で用いた厚岸沖栄養塩データは、独立行政法人水産総合研究センター (A-line Database; <http://hnf.fra.affrc.go.jp/a-line>) より公開されているものである。本研究を実施するにあたり、貴重なご助言をいただいた北海道大学大学院環境科学院・岸 道郎教授、工藤 勲准教授、熊本県立大学環境共生学部・堤 裕昭教授に深謝いたします。また、観測の実施にご協力頂いた永坂 進氏をはじめとする散布漁業協同組合の皆様によりお礼申し上げます。また、貴重なコメントを頂いた 2 名の査読者と編集委員の方々に感謝いたします。最後に北海道大学環境科学院海洋生物生産環境学研究室にて、共に火散布沼調査に携わった Supaporn Yodnarasri 博士、濱田明美氏、川西稔展氏、小森田智大博士、梶原瑠美子博士、稲葉友理氏、畑中紫臣氏、関口郁恵氏に感謝の意を表します。

## References

- Anderson, D. M., P. M. Glibert, and J. M. Burkholder (2002): Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, **25**, 704–726.
- Brzezinski, M. A. (1985): The Si : C : N ratio of marine diatoms: in *terspecific variability and the effect of some environmental*



- variables. *J. Phycol.* **21**, 347–357.
- 散布漁業協同組合 (2004) : 散布漁業統計. 火散布沼における各種漁業水揚げ実績報告
- Conway H. J. and P.J. Harrison (1977) : Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. IV. Transient response of *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, and *Thalassiosira gravida* to a single addition of the limiting nutrient. *Mar. Biol.*, **43**, 33–43.
- Conway H. J., P.J. Harrison and C. O. Davis (1976) : Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. II. Transient response of *Skeletonema costatum*, to a single addition of the limiting nutrient. *Mar. Biol.*, **35**, 187–199.
- Diaz R. J. and R. Rosenberg (2008) : Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems, *Science*, **321**, 926–929
- Eppley R. W., J. N. Rogers and J. J. McCarthy (1969) : Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton, *Limnol. Oceanogr.*, **14**, 912–920.
- FRA (2009) : A-line data home page, <http://hnf.fra.affrc.go.jp/a-line/>
- 原島省 (2003) : 陸水域におけるシリカ欠損と海域生態系の変質, 水環境学会誌, **26**, 621–625.
- 北海道環境科学研究センター (2005) : 北海道の湖沼・改訂版, 北海道環境科学センター環境科学部地域環境科, p. 112.
- Howarth, R. W. (1988) : Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Annual Review of Ecology & Systematics*, **19**, 89–110.
- Howarth, R.W., R. Marino, and D. Scavia (2003) : *Priority topics for nutrient pollution in coastal waters : An integrated national research program for the United States*. National Centers for Coastal Ocean Science, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, 5 pp.
- 石丸 (菅) 夏海・柴沼成一郎・門谷茂 (2008) : 亜寒帯汽水域干潟 (火散布沼) における栄養塩ダイナミクスについて, 海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, 海底環境研究会, **7**, 87–92.
- 柏井誠 (1984) : 海水交換概念と海水交換率, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**, 135–147.
- Kemp, W. M. (1989) : Chapter 3, Estuarine chemistry, p. 84. In *Estuarine ecology*, edited by Day, J.W. Jr., Hall, C. A. S., Kemp, W. M. and Yanez-Arancibia, A. John. Wiley & Sons Inc.
- Kohata, K, T. Hiwatari and T. Hagiwara (2003) : Natural water-purification system observed in a shallow coastal lagoon : Matsukawa-ura, Japan. *Mar. Pollut. Bull.*, **47**, 148–154.
- 国土地理院 (2006) : 湖沼湿原報告書 (霧多布地区). 国土地理院技術資料 D1-No.440, p. 2–7
- Komorita, T., R. Kajihara, H. Tsutsumi, S. Shibamura, T. Yamada, N. Higaki and S. Montani (2010) : Reevaluation of the nutrient mineralization process by infaunal bivalves (*Ruditapes philippinarum*) in a shallow lagoon in Hokkaido, Japan. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **383**, 8–16.
- Mann, K.H. (2000) : Chapter 2, Estuaries : their physical properties in relation to biological functioning, p. 18–30. In *Ecology of Coastal Waters With Implications for Management*, 2nd ed., Blackwell Science Inc.
- Magni, P. and S. Montani (2005) : Water Encyclopedia, Tidally mediated changes in nutrient concentration. p. 81–85. In *Oceanography*, Vol. 4, edited by J.H. Lehr, J. Keeley, J. Lehr and T.B. Kingery III, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Montani S., P. Magni, M. Shimamoto, N. Abe and K. Okutani (1998) : The Effect of a Tidal Cycle on the Dynamics of Nutrients in a Tidal Estuary in the Seto Inland Sea, Japan, *J. Oceanogr.*, **54**, 65–76.
- Paashe E. (1973) : Silicon and the ecology of marine plankton diatoms. II. Silicate-uptake kinetics in five diatom species. *Mar. Biol.*, **19**, 262–269.
- Page, H. M., R. L. Petty and D. E. Meade (1995) : Influence of watershed runoff on nutrient dynamics in a southern California salt marsh. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **41**, 163–180.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards (1963) : The influence of organisms on the composition of seawater, p. 26–77. In *The Sea*, Vol.2, edited by M. N. Hill. John Wiley & Sons, New York.
- Strickland J. and T. Parsons (1972) : *A Practical Handbook of Seawater Analysis, Bulletin 167 (2nd ed.)*. Fisheries Research Board Canada, Ottawa, Ont., Canada 310 pp.
- 樽谷賢治・山本民次 (1994) : 広島湾産 *Skeletonema costatum* のリン酸塩取り込みおよび増殖の動力学. 広島大学生物生産学部紀要, **33**, 59–64.
- Xu, J., A. Y. T. Ho, K. Yin, X. Yuan, D.M. Anderson, J.H.W. Lee, and P.J. Harrison (2008) : Temporal and spatial variations in nutrient stoichiometry and regulation of phytoplankton biomass in Hong Kong waters : Influence of the Pearl River outflow and sewage inputs, *Mar. Pollut. Bull.*, **57**, 335–348.
- 山本民次・石田愛美・清水徹 (2002) : 太田川河川水中のリンおよび窒素濃度の長期変動—植物プランクトン種の変化を引き起こす主要因として—. 水産海洋研究, **66**, 102–109.

## Spatial-temporal distribution and origin of nutrients in the subarctic lagoon of Hichirippu (Hokkaido, Japan)

Natsumi Suga<sup>†1</sup>, Seiichiro Shibamura<sup>†1</sup>, Toshiro Yamada<sup>†2</sup>,  
Naoyuki Higaki<sup>†3</sup> and Shigeru Montani<sup>†1</sup>

### Abstract

Monthly field observations and a 36-hour survey were conducted in the brackish lagoon of Hichirippu in the eastern part of Hokkaido, Japan (43°02'N, 145°00'E). The lagoon covers an area of 3.58 km<sup>2</sup> and has a mean water depth of ca. 70 cm. It is inhabited by many animals and benthic plants (e.g. short-necked clam, swan, and the Japanese red-crowned crane), and is designated as a wetland under the Ramsar Convention. The rich natural environment of the lagoon, with a catch yield of fish, shellfish and seaweeds of about 90 ton/yr, should therefore be preserved as a fishery area. In Hichirippu lagoon, we investigated the spatial and temporal distribution of nutrients and physical properties. The daily volume of freshwater input was 0.9~8.0% of total volume of the lagoon, while the volume of water entering the lagoon on the rising tide per half tidal day was 34~59%. The N : P and Si : N ratios were nearly below 16 and higher than 1, respectively, indicating nitrogen limitation. Plots of nutrients vs. salinity suggested nitrate+nitrite supply from the adjacent sea (Pacific Ocean), while the origin of ammonium was neither the adjacent sea nor freshwater. The results of the 36-hour survey showed that tidal nitrate+nitrite influx and outflux was 4.3 and 3.1 kmol/half tidal day, respectively. It implicates 1.2 kmol/half tidal day was supplied to the lagoon. Tidal ammonium flux values are nearly conserved. This suggests that ammonium is mainly regenerated by clam excretion in summer. Previous studies generally have shown that the freshwater input plays an important role in controlling estuarine primary production. Our results suggest that in Hichirippu lagoon both the nutrient import from the adjacent sea and the processes of nutrient regeneration within the estuary have an important effect on the primary production rather than the freshwater input.

**Key words:** Hichirippu lagoon, nutrient, estuary, primary production

(Corresponding author's e-mail address: natsumi@fish.hokudai.ac.jp)

(Received 25 March 2010; accepted 26 October 2010)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2011)

---

<sup>†1</sup> Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Kitaku, Sapporo, Hokkaido, 060-0810, Japan

<sup>†2</sup> Nishimuragumi Co. Ltd., 133-1 Sakaemachi, Yubetsu, Monbetsu, Hokkaido, 099-6404, Japan

<sup>†3</sup> Geological Survey of Hokkaido, Kitaku N 19 W 12, Sapporo, Hokkaido, 060-0819, Japan