

季節間における干潟域の栄養塩類フラックスと 堆積物が直上水に及ぼす影響の検討

Examination of Nutrient Fluxes and Influence of Intertidal Sediments on Coastal Water in a Season

石射広嗣¹・村上和男²・佐々木奈々³・大浦 剛⁴・桑江朝比呂⁵

Hirotsugu ISHII, Kazuo MURAKAMI, Nana SASAKI, Tsuyoshi OHURA and Tomohiro KUWAE

In coastal areas around big cities such as Tokyo Bay, intertidal flats decreased due to man-made reclamation lands constructions. Such a loss of tidal flats make, water quality environments deteriorated. In the study, we carried out field studies to estimate nutrient fluxes between inter tidal sediment and overlying water and intertidal water and neighbor sea water. In conclusion, we found the following results. (1) Function of this tidal flat is net source of phosphorus and net sink of nitrogen and chlorophyll-*a* in summer. And function of net source of phosphorus in summer changes to net sink of that in winter. (2) The fluxes of phosphorus and nitrogen from the intertidal sediment are 20% and 87% of the fluxes through the changes between tidal flat and neighbor sea water.

1. 研究目的

干潟とは満潮時に海面下に水没し、干潮時に海面上に現れる平坦な地形と認識されており、砂泥あるいは粘土等によって形成される。海域における水環境を考えると、干潟の存在は非常に重要である。干潟は潮汐変動によって形成されるため、1日2回長時間空気と接して好気条件が形成され、干潟堆積物中に生息する生物による顕著な分解の場となっていると考えられる(木村; 1994)。従って、干潟による海水の浄化機能は非常に大きいと言われている。加えて、シギ・チドリ・カモなどの渡り鳥やサギ・カワウなどの水鳥は、干潟を餌場や休息場として利用しており、鳥類にとっても干潟は重要な生活空間であると言える。

しかしながら、日本では高度経済成長期における大規模な埋立事業により、多くの干潟が消失し、それによって沿岸の水環境が悪化した。一方、近年では埋立て等によって失われた自然海浜や干潟の保全、再生、あるいは積極的に水と触れあえる場の創出や海洋生物の資源の保護の目的のために人工干潟が造成され、それらに関する調査、研究等が盛んに行われている。東京湾のような富栄養化が進行した閉鎖性内湾において、干潟の水質浄化能力は特に期待が寄せられており、今後更なる研究や知

見が必要とされる。

そこで本研究では、東京都大井埠頭に造成された潟湖型干潟「東京港野鳥公園・潮入りの池」を対象に、水質に関する現地観測を行った。季節間における物質収支の変化を把握するため、夏季と冬季において、干潟-隣接海域間を流入出する水質の2潮汐間の連続観測を行い、リン・窒素・クロロフィル a のフラックス量を求めた。また、栄養塩のフラックスに関して大きく関与していると考えられる干潟内堆積物に着目し、堆積物が直上水に及ぼす影響の検討を行った。

2. 調査対象干潟

東京港野鳥公園は図-1に示すように東京都の沿岸域である大井埠頭の南端に位置する。本公園は野鳥の観察者や地元住民からの自然保護の請願を受け整備され、水域における自然環境の保全、回復を目的としており、都内に数少ない親水空間を提供している。また、東京港野鳥

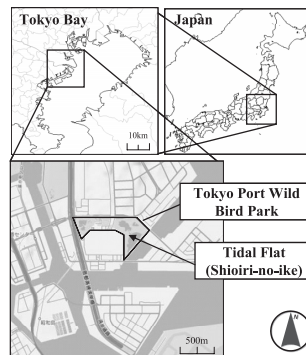


図-1 「東京港野鳥公園・潮入りの池」概要

- | | |
|-------------|------------------------|
| 1 学生会員 | 東京都市大学大学院工学研究科都市基盤工学専攻 |
| 2 フェロー 博(工) | 東京都市大学教授工学部都市工学科 |
| 3 学生会員 | 東京都市大学大学院工学研究科都市基盤工学専攻 |
| 4 | 元武蔵工業大学工学部都市基盤工学科 |
| 5 正会員 博(農) | (独法)港湾空港技術研究所 |

公園潮入りの池は「東アジア・オーストラリア地域フライウェイ・パートナーシップ」に参加しており、渡り性の水鳥（東京港野鳥公園・潮入りの池に関してはチドリ類）とその渡来地である湿地を守る国際協力事業として、このプロジェクトに参加している。干潟内は潮間帯、潮下帯、砂利浜、ヨシ原で構成されており、総面積は約57000m²である。また、隣接海域である東京湾との海水交換は、幅3m程度の2本の水路によってのみ行われ、閉鎖性の強い海域であると言える。干潟に流入する河川等は無く、後背地には淡水池が存在するが、降雨により池の水が溢れ出る場合を除き、淡水池からの水の流入は起こらない。干潟内水深はおおよそ1~2m、隣接海域の水深は4~5m程度であり、潮汐作用によって表層付近の海水が水路を通じ交換されていると考えられる。

3. 調査概要

(1) 干潟-隣接海域間の連続水質観測

調査は季節間における水質の変化を把握するため、夏季と冬季に2潮汐間の連続水質観測を行った。調査日は2009年8月9~10日、12月13~14日の大潮期とした。図-2の丸印に示す水路1、2、干潟内、隣接海域の計4箇所において観測地点を設け、水温、塩分、濁度、クロロフィル a 、水位の連続観測を行い、水路1、2に関しては流速も併せて観測した。使用した観測機器を以下に示す。各観測点について水温塩分計（ALEC；COMPACT-CT）、圧力計（ALEC；COMPACT-TD）、クロロフィル濁度計（ALEC；COMPACT-CLW）を使用した。また、水路内についてのみ流速計（ALEC；COMPACT-EM）を使用した。更に水路1、2に関しては観測期間中2時間ごとに採水を行い、フィルターろ過を行った後、分析室に持ち帰り、PO₄-P、TP、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、TN濃度を吸光光度法により測定した。

(2) 堆積物-直上水間の連続水質観測

干潟域における栄養塩類フラックスにおいて、その堆積物の影響度を把握するため、現地の堆積物を採取し、

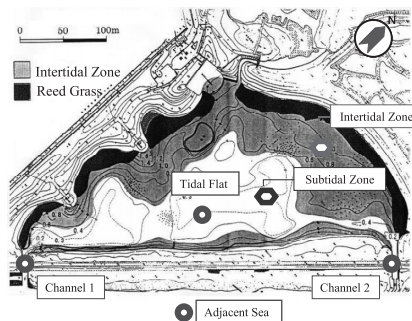


図-2 観測地点概要
(丸：水質観測地点 六角形：堆積物採取地点)

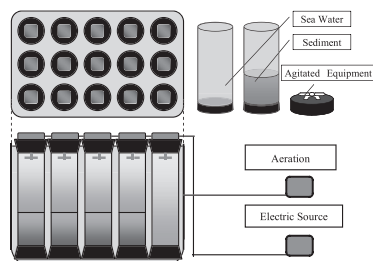


図-3 室内実験器具概略図

室内試験にて堆積物が直上水へ及ぼす影響の検討を行った。調査日は2009年6月22日、8月10日、12月14日、2010年2月15日の計4回とした。

アクリルパイプ（直径8.6 cm、長さ30 cm）を用いて現地における干潟堆積物の採取を行った。採泥地点は図-2の六角形の印に示す潮間帯・潮下帯の2地点とし、各6本ずつ不攪乱状態で採取した。また、直上水の採取も同時に行い、溶存酸素濃度を維持した状態で研究室に持ち帰った。コアサンプルはブランク試験体とともに図-3に示す現地と同程度の気温および水温、直上水と外気間では常に酸素が供給されていると仮定し、曝気を行った状態で水槽の中で半日静置したのち、コア内の海水を新しいものと交換した。その後プルゴムにて栓をし、栓に取り付けられた攪拌機により微弱の攪拌を行った状態で3時間静置し、静置前後の直上水を採水した。またその際、直上水のDO、水温、堆積物内のORP、クロロフィル a を測定した。海水サンプルに関してはNH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-Pの各濃度を吸光光度法により測定した。

また、観測地点の堆積物を別途採取し、含水比、強熱減量、粒度、間隙水内のNH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P濃度の分析を行った。

4. 調査結果および考察

(1) 水質の時系列変化

図-4に2009年8月9~10日、12月13~14日における各水路内の水質の時系列変動を示す。各水路内水位に関して殆ど類似した傾向を示しており、水位差が無いことを確認した。水温に関して、夏季においては14時頃に最高水温31.1（℃）を観測し、翌日6時頃に最低水温27.5（℃）を観測した。一方冬季は14時頃に16.2（℃）、翌日7時頃に最低水温14.0（℃）を観測した。夏季の水温の変動差が3.6（℃）程度であるのに対し、冬季の水温変動は夏季のものよりも緩やかになっており、変動量も2.2（℃）と小さくなった。

塩分に関しては、季節間を通して約15（PSU）程度の差が確認された。これらの原因として夏季における隣接海域の塩分の鉛直分布は、密度躍層の形成により最深度と表層で大きく差があり、水路での海水交換の際に表層

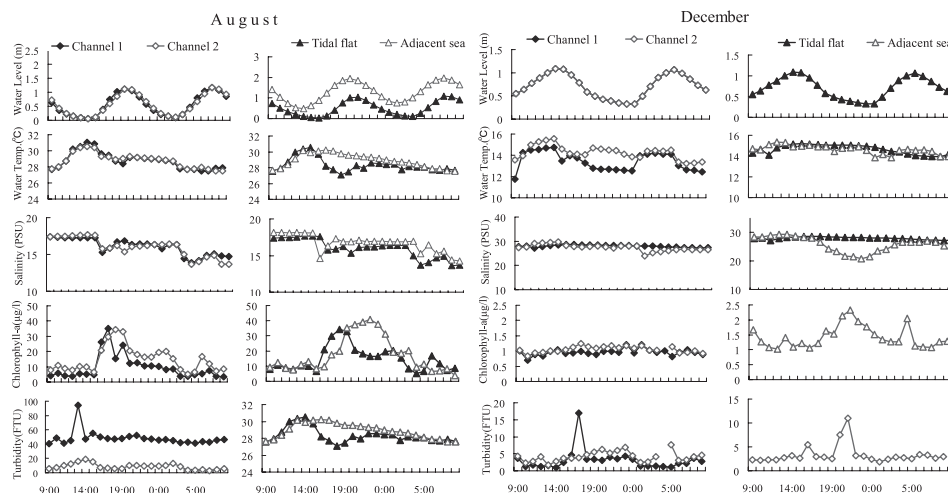


図-4 季節間における水質の時系列変動 ◆：水路1 ◇：水路2 ▲：干潟内 △：隣接海域

部の海水のみが流入したためと考えられる。また、2009年8月10日の早朝に関しては若干の降雨が確認されており、それに伴い若干の塩分低下が生じていることが確認できる。一方、冬季に関しては観測期間中を通して30 (PSU) 付近の値を示しており、時系列によって塩分の変化が極めて少ないことを示している。クロロフィル a については、夏季の午後の上げ潮時に顕著な増加を示し、下げ潮に伴い濃度の減少が見られた。よって、クロロフィル a は隣接海域から干潟内へ流入していると考えられる。冬季にはクロロフィル a の存在量は夏季の1/10程度となり、日中夜間を通して大きな変化が見られなかった。また、濁度についても夏季の方が大きな値を示しており、特に水路1については調査期間を通して40 (FTU) 程度を示したため、これは測器設置地点において測器の測定誤差、あるいは永続的な泥の巻き上げ、クロロフィル a の影響等が考えられる。冬季の水路内の濁度は大凡5 (FTU) 程度の値を示しており、透明度の高いことが確認できた。

(2) 水路における栄養塩類の時系列変化

図-5の棒グラフに2009年8月9~10日、12月13~14日における窒素とリンの濃度、実線に水路内水位の時系列変化を示す。なお、図中において、 $OP = TP - PO_4\text{-P}$ 、 $ON = TN - (NO_2\text{-N} + NO_3\text{-N} + NH_4\text{-N})$ として算出した。水路内においてTNは上げ潮時に増加し下げ潮時に減少、TPは上げ潮時に減少、下げ潮時に増加している傾向が各調査日で確認された。また、夏季においてはTPの濃度が平均して高く、ONの割合も冬季と比較して大きな値となった。TNに関しては、夏季冬季ともに同等程度の濃度となった。

(3) 干潟堆積物の性質と栄養塩含有量

干潟内の堆積物の特性を把握するため図-2に示す潮間帯、潮下帯にて堆積物を採取し、粒度、含水比、強熱減

量、ORP、クロロフィル a 、また間隙水内の栄養塩含有量として $PO_4\text{-P}$ 、 $NH_4\text{-N}$ 、 $NO_2\text{-N}$ 、 $NO_3\text{-N}$ の分析を行った。粒度の組成比については潮間帯で礫0.7%、砂69.5%、シルト18.2%、粘土11.6%であり、砂の優占した底質であることが分かった。一方、潮下帯では砂14.7%、シルト60.4%、粘土24.9%であり、シルトの優占した底質であった。表-1に干潟堆積物の特性の諸データを示す。含水比については調査期間を通して潮間帯で約45%、潮下帯で約120%程度となったが、潮下帯の6月においては44.72%と他の調査日より著しく小さな値となった。強熱減量は含水比と同様の傾向を示し、潮下帯の方が大きな値となった。ORPについては潮間帯平均が-45.9mvであり8月に最大値-89mvを観測した。一方、潮下帯平均は-145.9mvであり、潮間帯の約3倍程度の値となり底質

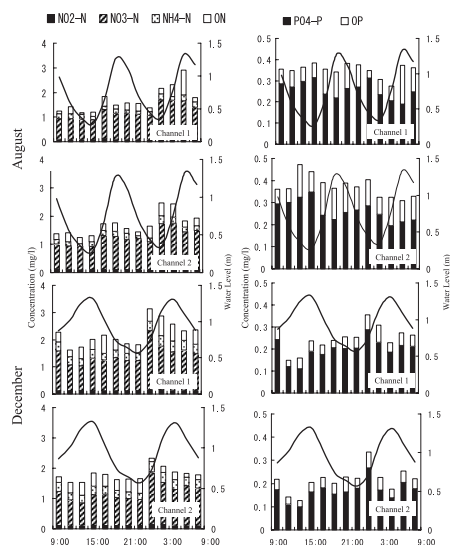


図-5 季節間における水路内の栄養塩類の時系列変動

表-1 干潟堆積物の諸特性

		June		August		December		February	
		intertidal zone	subtidal zone	intertidal zone	subtidal zone	intertidal zone	subtidal zone	intertidal zone	subtidal zone
PO ₄ -P	mg/l	33.12	5.19	4.24	4.06	7.26	148.47	2.46	1.08
NO ₃ -N		0.15	0.22	0.41	0.10	0.17	0.19	0.51	0.30
NO ₂ -N		0.12	0.16	0.15	0.11	0.06	0.03	0.07	0.05
NH ₄ -N		5.08	1.21	4.36	4.16	3.99	6.60	2.45	2.30
DIN		5.35	1.60	4.92	4.37	4.23	6.81	3.02	2.65
Moisture Content	%	40.88	44.72	49.28	111.50	53.94	136.10	46.66	132.59
Ignition Loss		2.72	2.96	3.28	5.56	3.21	6.15	3.34	6.82
ORP	mv	-47.60	-180.50	-89.00	-142.60	-11.67	-135.00	-35.50	-125.30
CHL-a	μg/g	0.57	0.95	3.95	4.38	1.32	2.82	1.25	2.48

の嫌気化が進んでいると推測される。クロロフィル a に関しては両調査地点で8月に最大となり、その値は潮間帯で3.95 $\mu\text{g/g}$ 、潮下帯で4.38 $\mu\text{g/g}$ となった。続いて堆積物の間隙水内の栄養塩類含有率であるが、特に大きな値を示したのはPO₄-PとNH₄-Nであった。PO₄-Pは12月の潮下帯で148.47mg/lと著しく高い値を示した。これは本公園に飛来するカワウ (*Phalacrocorax carbo*) の最大飛来数を記録する時期と一致し、干潟内に設置された杭から排泄を行うことにより、堆積物内にリンが蓄積されたものと考えられる (石射ら; 2009)。また、NH₄-Nは調査期間内にて堆積物中の無機態窒素の中で最も大きな割合を占めた。

(4) 干潟域における栄養塩類フラックスの算定

a) 干潟-隣接海域間の栄養塩類フラックスの算定

水路内で観測されたリン・窒素・クロロフィル a 濃度に水路内流量を乗じ、干潟面積で除することにより、2潮汐間の干潟-隣接海域間の栄養塩類フラックスの算定を行った。流量は、秦野ら (2008) の方法を参考に、干潟内の潮位変動から算出し、図-6の結果を得た。計算期間は、干潟内の潮位が一致する時間 (流入水量=流出水量となる期間) とし、2009年8月9日9:00~10日9:30、12月13日9:10~14日9:40の24.5時間を対象とした。また、各水路における流量比については流速計の平均値より、1:0.9として計算を行った。

表-2に干潟-隣接海域間の栄養塩類フラックスを示す。ここに、なお、正の値は干潟内での対象物質の生産、負の値は消費を表す。夏季においてPO₄-Pは干潟内で生産、OPはとなり干潟内で消費、TPでは41.8 (mg/m²/2tide) で生産する結果となった。一方NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、ONにおいては干潟内で消費傾向となり、TNに関しては-739.9 (mg/m²/2tide) となった。また、クロロフィル a も-11.4 (mg/m²/2tide) となり干潟内で消費されていることが分かった。一方冬季では、PO₄-P、OPともに干潟内で消費となり、TPは-21.8 (mg/m²/2tide) で消費の機能へ

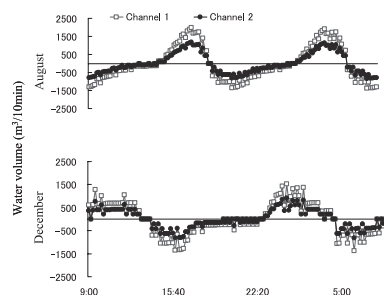


図-6 水量の流入出フラックス
正：干潟に流入 負：干潟から流出

表-2 干潟-隣接海域間の栄養塩類フラックス
(正：干潟内で生産、負：干潟内で消費)

FLUX (mg/m ² /2tide)		August		December	
PO ₄ -P	TP	67.4	41.8	-11.6	-21.6
OP		-25.7		-9.1	
NO ₃ -N	TN	-447.0	-739.9	-263.6	-325.8
NO ₂ -N		-13.8		-23.3	
NH ₄ -N		-20.4		-51.4	
ON		-258.6		18.8	
Chl-a		-11.4		-0.1	

と移行した。またNH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nに関しては夏季同様に消費となり、ONのみ干潟内で生産となった。TNは-325.8 (mg/m²/2tide) となり夏季同様消費傾向を示した。クロロフィル a に関しては夏季と比較してその消費量は著しく少ないものとなった。

以上のことから、本干潟は夏季においてリンの生産源、窒素・クロロフィル a の消費源であり、冬季に向かうにつれて、リンは生産源から消費源として機能している結果となった。なお、本研究によって得られた夏季のフラックスに関しては秦野ら (2008) と類似の傾向を示しており、毎年を通して同様の消費メカニズムを形成している可能性が高い。

表-3 干潟堆積物-直上水間の栄養塩フラックス（正：堆積物から溶出，負：堆積物へ吸収）

FLUX (mg/m/h) ただしO ₂ は(mg/l/h)	June		August		December		February	
	intertidal	subtidal	intertidal	subtidal	intertidal	subtidal	intertidal	subtidal
PO ₄ -P	-0.62	-0.14	1.87	1.09	0.52	0.04	-0.47	-0.26
NO ₃ -N	-11.20	-1.20	-7.64	0.54	-1.49	-2.83	-4.32	-5.21
NO ₂ -N	0.04	0.35	0.15	-0.79	-0.14	-0.19	0.13	0.08
NH ₄ -N	4.28	-1.64	5.66	1.21	-0.34	-0.48	-2.40	-2.18
DIN	-6.88	-2.49	-1.83	0.96	-1.97	-3.49	-6.59	-7.31
O ₂	-2.23	-0.55	-3.25	-0.96	-0.71	-1.55	-0.45	-0.65

b) 堆積物-直上水間の栄養塩フラックスの算定

室内実験によって得られたコアサンプル内の海水濃度変化より、干潟堆積物-直上水間における栄養塩フラックスの算定を行った。表-3に2009年6月22日、8月10日、12月13日、2月15日（以後6月、8月、12月、2月と呼ぶ）の堆積物-直上水間の栄養塩フラックスを示す。PO₄-Pについては8月に潮間帯で1.87 (mg/m²/h)、潮下帯で1.09 (mg/m²/h) となり、最も高い溶出量となった。その際、O₂消費速度も最大となっていることから酸素濃度減少におけるリンの溶出が考えられる。また12月に関しては、O₂消費量は少ないが、表-1に示す通り干潟堆積物内に多量のPO₄-Pが含まれている為、堆積物の溶出が起こった可能性がある。NO₃-Nについては殆どの調査日で吸収傾向を示した。また6月、8月では潮間帯の吸収量が優占し最大で-11.2 (mg/m²/h) となった。一方12月、2月では潮下帯が優占し、吸収量は最大で-5.21 (mg/m²/h) となった。NH₄-Nについては6月、8月で溶出傾向、12月、2月で吸収傾向が見られた。またNH₄-NはO₂消費速度と非常に相関性が高く、石射ら（2008）の生物量の現地調査によると夏季から冬季に向けて底生物量が減少していることから、堆積物内の生物活性が影響している可能性がある。

c) 干潟堆積物が栄養塩フラックスに与える影響の検討

図-7に季節間における各栄養塩類フラックスの比較を示す。堆積物のフラックスに関しては各調査地点の平均値を用い、エラーバーは標準偏差を示す。NO₃₊₂-Nに関して、堆積物フラックスは干潟全体の消費分の18.9~20.6%を占め、一方、PO₄-P堆積物の影響が夏季に

においては87.1%と極めて高い値となり、底質からの影響が強いことが示唆された。また、夏季において堆積物から放出されるNH₄-N、PO₄-Pにより、干潟内でNH₄-Nは微量な消費、PO₄-Pは供給の形を示したが、放出の抑制される冬季にはその他の消費要因によって両者とも消費傾向に移行していることが確認された。

5. まとめ

本研究では、東京港野鳥公園潮入りの池において、夏季冬季の連続水質観測を行い2潮汐間の栄養塩類フラックスを求め、干潟堆積物が直上水に及ぼす影響の検討を行った。主要な結論を以下に示す。(1) 本干潟は、夏季においてT-Pの供給源であり、T-N、クロロフィルaの消費源として機能し、冬季には堆積物からの栄養塩類の放出の減少により、T-Pも消費の傾向を示した。(2) NO₂-N、NO₃-Nは堆積物に吸収され、堆積物中の含有量の高いNH₄-N、PO₄-Pは夏季に放出された。干潟-隣接海域間の栄養塩フラックスとの比較を行った結果、堆積物はNO₃₊₂-Nに関して干潟全体の消費分の約20%を占め、PO₄-Pは87.1%と高い値を示した。また、夏季における堆積物内からのNH₄-N、PO₄-Pの放出は、干潟内におけるその他の消費要因を抑制する働きを示した。

謝辞：現地観測の際には、東京港野鳥公園の金井裕氏、五洋建設(株)の中瀬浩太氏、上田佳奈氏、(独法)港湾空港技術研究所の三好英一氏、並びに東京都市大学・水圏環境工学研究室のゼミメンバーにご協力頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 木村賢史（1994）：人工干潟（海浜）の水質浄化機能，ヘドロ，60，pp.59-81。
 秦野拓見・関口晋太郎・村上和男・中瀬浩太（2008）：東京港野鳥公園干潟における栄養塩類フラックスの現地観測と水鳥負荷，海岸工学論文集，第55巻，pp.1131-1135。
 石射広嗣・秦野拓見・門脇麻人・桑江朝比呂・村上和男（2009）：干潟域における水鳥と底生生物の摂餌による栄養物質除去能力の比較，海洋開発論文集，第25巻，pp.335-340。

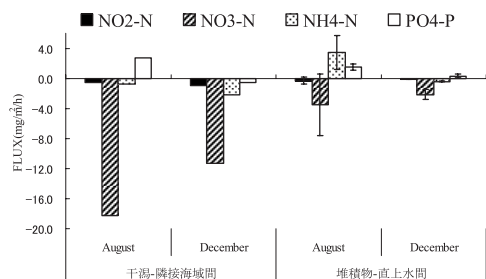


図-7 季節間における干潟-隣接海域間と堆積物-直上水間の栄養塩類フラックスの比較（エラーバーは標準偏差を示す）