

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

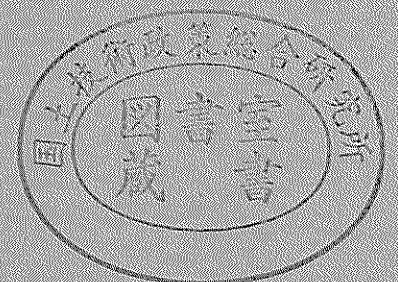
No.1020      June 2002

盤州干潟における潮汐に伴う栄養塩収支に関する現地観測

野村	宗弘
小沼	晋
桑江	朝比呂
三好	英一
中村	由行

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 観測方法 .....	4
2.1 対象干潟の概要 .....	4
2.2 観測方法及び実験方法 .....	4
(1) 観測概要 .....	4
(2) 栄養塩収支実験 .....	6
3. 干潟内外における水質変動 .....	6
3.1 水質の時系列変化 .....	6
3.2 干潟内における流れ及び河川水の影響 .....	8
3.3 干潟内における水質の空間分布 .....	9
3.4 干潟沖合における水質変動 .....	9
4. 干潟に対する流出入フラックスの算定 .....	11
5. 底泥からの栄養塩フラックスの算定 .....	12
6. 栄養塩収支のモデルによる検討 .....	13
6.1 ボックスモデルの概要 .....	13
6.2 干潟上における栄養塩収支の時系列変化 .....	13
6.3 栄養塩濃度分布のモデルによる検証 .....	15
7. 結論 .....	16
8. あとがき .....	17
謝辞 .....	17
参考文献 .....	17
付録 Stn. 1, 2における連続データ .....	19

# Estimation of Nutrient Budget during a Tidal Cycle in Banzu Tidal Flat

Munehiro NOMURA\*  
Susumu KONUMA\*  
Tomohiro KUWAE\*\*  
Eiichi MIYOSHI\*\*  
Yoshiyuki NAKAMURA\*\*\*

## Synopsis

Field observations were carried out in Banzu intertidal flat in Tokyo Bay throughout two days in the summer of 2000, in order to clarify the spatio-temporal fluctuations of water quality during a tidal cycle. Concentrations of DO, ON (TN-DIN) or OP (TP-PO<sub>4</sub>-P) at the offshore station were higher than those at the onshore station, whereas DIN and PO<sub>4</sub>-P had an inverse trend, during submergence. During flood tides, an abrupt increase in the concentrations of DIN and PO<sub>4</sub>-P was observed around a shoreline.

We constructed a box model, incorporating both the release flux of inorganic nutrients from sediment and the nutrient uptake rate by overlaying water, that were experimentally obtained *in situ* at each tide. The observed fluctuation of nutrients during ebb tide was well reproduced by the model. However, agreement was poor during flood tide. These results strongly indicate that the increase in nutrient concentrations during flood tide was attributed to the temporally increased effluxes of nutrients from the sediment and/or the physical resuspension of sediments at the shoreline.

The mass balance of TP during a tidal cycle showed that the tidal flat acted as a sink of TP ( $1 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) during daytime, in turn, source of TP ( $30 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) during nighttime. The influx of organic N and organic P to the tidal flat and the efflux of inorganic nutrients from the tidal flat were commonly dominant processes when evaluated through a tidal cycle. Possibility that the light intensity during exposure affect the sediment-water flux of nutrients was indicated.

**Key Words:** Tidal flat, Nutrient Cycling, Continuous Observation, Box Model

---

\* Member of Coastal Ecosystems Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

\*\*\* Head of Coastal Ecosystems Division, Marine Environment and Engineering Department

# 盤洲干潟における潮汐に伴う栄養塩収支に関する現地観測

野村 宗弘\*  
小沼 晋\*  
桑江 朝比呂\*\*  
三好 英一\*\*  
中村 由行\*\*\*

## 要 旨

干潟域の岸沖方向の時・空間的な水質変動に関する現地観測を2000年夏季に2日間にわたり東京湾盤洲干潟において実施し、潮汐サイクルに伴う直上水の水質変動の特性を明らかにした。

冠水時においてDO, pH, ON (有機態窒素) およびOP (有機態リン) は、沖側で高く岸側で低い空間分布が得られ、DIN (無機態窒素),  $PO_4\text{-P}$  (リン酸態リン) は逆の分布傾向をとる観測結果が得られた。また、上げ潮時には汀線近傍において急激なDIN,  $PO_4\text{-P}$  の増加がみられた。同時に現地で栄養塩溶出実験を行い、その溶出フラックス値を入力値として、簡単なボックスモデルを使って解析した。下げ潮の水質変動に関しては、モデルは観測の変動をよく再現したが、上げ潮時の変動は再現できなかった。これらのことから、上げ潮時には汀線部の巻き上げや一時的な底泥からの溶出フラックスの増加過程が重要である可能性が示唆された。さらに一潮汐あたりの栄養塩収支を求めた結果、TPについて昼間の冠水時で $1\mu\text{molm}^{-2}\text{h}^{-1}$ の干潟内への蓄積、夜間冠水時で $30\mu\text{molm}^{-2}\text{h}^{-1}$ の干潟外への放出があった。1潮汐の平均としては干潟沖合からはON, OPの流入、干潟からはIN, IPの流出の傾向が認められるとともに、冠水前の時間帯(日昼か夜間か)の違いが栄養塩フラックスに影響している可能性が示された。

キーワード：干潟，潮間帯，栄養塩収支，連続観測

\* 海洋・水工部沿岸生態研究室

\*\* 海洋・水工部主任研究官

\*\*\* 海洋・水工部沿岸生態研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：0468-44-5047 Fax：0468-44-6243 e-mail:nomura\_m@ipc.pari.go.jp

# 1. まえがき

干潟は潮汐の干満周期により露出と水没のサイクルを繰り返す場であり、その特異な環境が故に高い生物生産力を有し、我々に様々な機能を見せている<sup>1)</sup>。その機能の中で物質を除去する水質浄化能力は大きいとされ<sup>2)</sup>、富栄養化海域からの窒素、リンといった栄養塩除去、赤潮藻類などの懸濁態物質除去にも期待が寄せられている<sup>3)</sup>。その浄化能力の大きさは季節、時間によって異なり、逆に隣接海域に対して物質の供給源となることもある<sup>4,5)</sup>。

これまで干潟の水質浄化能力の算定など物質循環に関する議論は、干潟内外といった大きな空間を通じての解析や微小な空間での干潟面と直上水間の収支から評価したものが多い<sup>6-10)</sup>。潮間帯において時・空間的に連続した水質変動を実測した例は少なく<sup>11-13)</sup>、従来まで実施されてきたような干潟上1点での定点観測や潮汐に応じた数時間スケールの観測では<sup>14,15)</sup>、代表性の問題に伴う水質浄化能力の適正な評価や潮汐に伴う現象を明確に把握できていない可能性がある。また、干潟上の岸沖方向においては直上水中の栄養塩をはじめとする水質に濃度勾配が生じていることが予想され、波あたりなど他の環境因子と同様、干潟の持つ主要な機能である生物生産・生息機能、水質浄化機能など<sup>2,3)</sup>への影響を考察する上でも潮間帯における中間スケールでの観測が重要と考える。

さらに湾内への水質浄化の波及効果を考えた場合、干潟域を直接覆う水塊および隣接海域との相互作用を把握することは、今後、干潟造成の効果の予測やその最適な配置を議論する上でも重要な課題といえる。すなわち隣接する海域も含めて広域的な観点から物質循環の解明を

目指していくことが必要とされる。以上、本研究が最終的に目指す目標ならびにイメージを図-1に示した。

本研究では、潮間帯ならびに沖合といった干潟の岸沖方向の観測を実施するとともに現地での栄養塩収支実験を通じて、潮汐に伴う直上水の水質変動について時・空間的特性を把握することを目的とした。

## 2. 観測方法

### 2.1 対象干潟の概要

本研究の対象とした盤洲干潟は東京湾の東岸に位置する前浜干潟である。その規模は長さが約8km、沖側に約2kmの大きさを持ち、地形勾配は約0.001と傾斜の緩やかな干潟である<sup>16)</sup>。底質は潮間帯全域にわたり中央粒径0.17mmの粒度組成で砂質干潟として分類される。また、東京湾におけるアサリ、ノリの主産地となっており、漁業生産の場としてだけではなく、潮干狩りなど親水の場としても利用されている(写真-1)。これまで盤洲干潟に関しては、水質・生物調査ならびに物理環境調査などが報告されており、数少ない自然干潟としての貴重なデータが収集されている<sup>16-19)</sup>。

### 2.2 観測及び実験方法

#### (1) 観測概要

観測は、大潮にあたる2000年8月30日~31日の2日間にわたり測器の連続設置による係留観測を図-2に示すStn. 1からStn. 3において実施した。これらは既報<sup>15-17)</sup>と同じ観測点とし、標高別の調査地点を図-2に示すように小櫃川左岸の干潟上に3点設定した。8月30日には、干潟上だけでなくL1からL5の干潟沖合においても船上

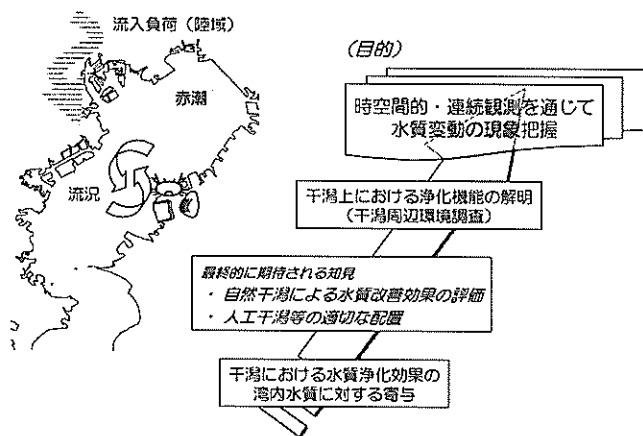


図-1 本研究の背景及び目的



写真-1 東京湾盤洲干潟

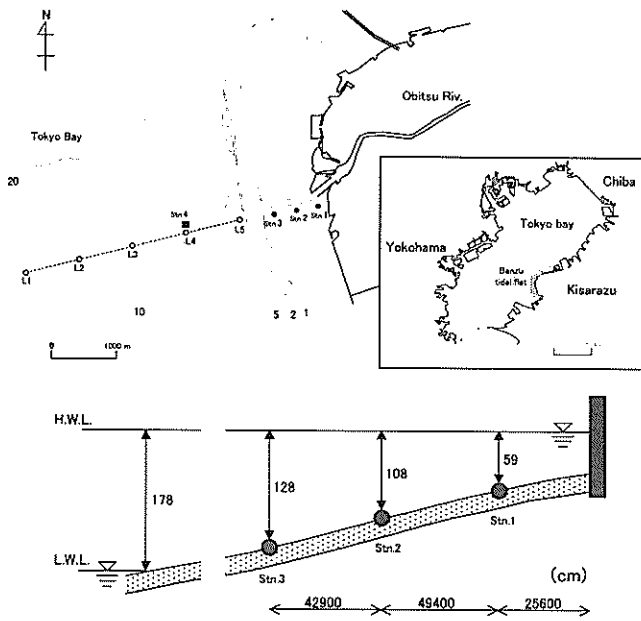


図-2 観測地点及び各点における調査日の干満水位差

観測を並行して行った。さらに沖合水の環境をモニタリングする目的で Stn. 4 にドップラー流速計を海底設置した。

各点においては、水温、塩分、深度（大気圧補正済）を共通項目として 10 分間隔で測定した。加えて Stn. 1, 3 において 1 時間毎に採水、10 分毎に流向・流速を、Stn. 2 では溶存酸素（以下、DO）、濁度を 10 分毎に、Stn. 3 では、DO を 10 分毎にそれぞれ測定した。使用した測定機器は、メモリー式の観測機器で、水温塩分計（ALEC 電子；MDS-CT）、水温深度計（ALEC 電子；MDS-TD）、DO 計（三洋測器；MDO）、濁度計（ALEC 電子；MTB）、流向流速計（ALEC 電子；ACM16M）、ドップラー流速計（ALEC；ADP）、多項目水質計（HORIBA；U-22）ならびに自動採水器（ISCO；

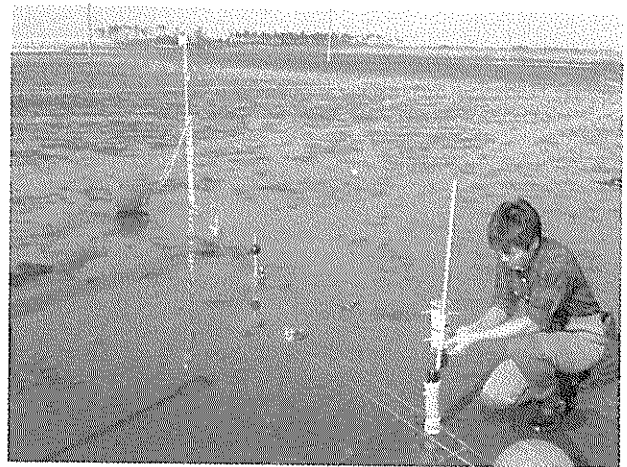


写真-2 水質計など設置状況



写真-3 自動採水器の設置状況

Model6700) である。各機器は図-3 に示すように埋没設置、あるいは脚立上に固定設置した。観測機器の設置風景を写真-2, 3 に示した。特に採水装置については、水位

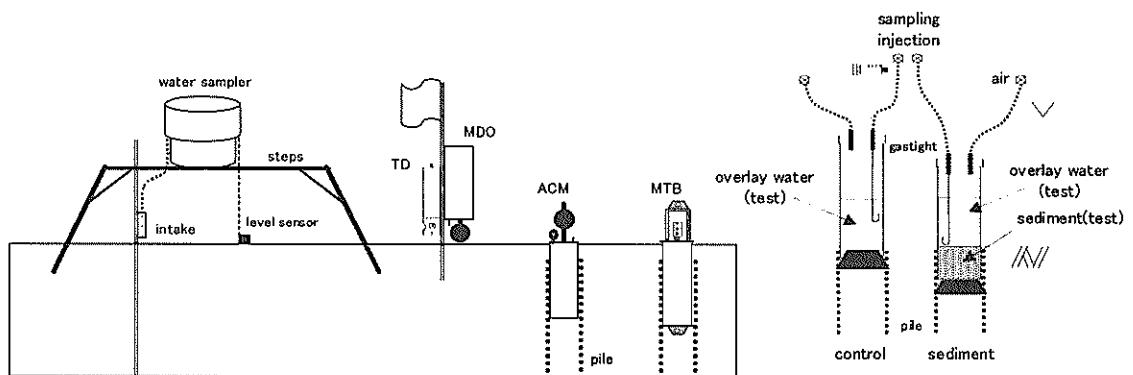


図-3 観測機器設置及び現地コア実験に関する模式図

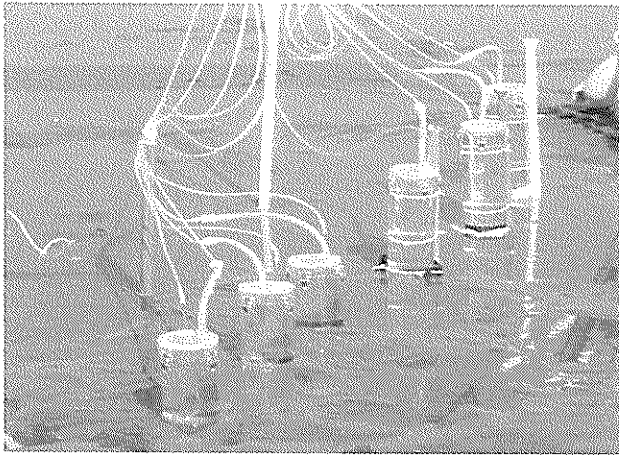


写真-4 現地におけるコアを用いた栄養塩収支実験の様子

レベルセンサーにより冠水を検知した場合に底泥上15cmの直上水を1時間毎に採水できるように設定した。なお、採水したサンプルは数時間冷蔵保存し、現場で過後、実験室において栄養塩( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , TN, TP)について栄養塩自動分析装置(BRAN+LUEBBE; TRAACS800)を用いて分析を行った<sup>20)</sup>。

船上観測は、30日の早朝から夕刻まで、Stn. 1-3の延長上に約1km間隔で設けた測点L1-L5において実施し、水温、塩分、深度、光量子、D0ならびにクロロフィルaのセンサーを搭載した多項目水質計(ALEC電子; ACL220)を用いて各種水質の鉛直分布を約2時間毎に観測した。なお、クロロフィルaは吸光法により校正した<sup>20)</sup>。

## (2) 栄養塩収支実験

8月30日にはStn. 2において底泥からの無機態栄養塩の収支を見積もるための現場実験を行った。底泥と直上水間の栄養塩フラックスは、水温、照度、干出時間および直上水濃度に依存して変化すると考えられる。ここでは現場条件での値を知るため、他の測定項目と同期的なデータの収集を目指して現場に実験装置を持ち込んで測定を行った。

内径84mm、長さ265mmのアクリルコアを用いて、前日の干出時に厚さ約100mm採泥したものをすぐに泥面に埋め戻した。図-3に示すようにコアは満潮時においても浸水しない状態にあり、浮上しないよう底面に固定した。ここでは底泥による寄与を調べるため、底泥を除いたコアも同様に設置し対照系とした。コア設置状況等、実験の様子を写真-4に示した。

翌朝、満潮時に直上水を900ml注入して実験を開始し、コア内の直上水を0.5-1時間毎に30mlの採水を行った。

なお、海水の注入は、U字形に細工した注入管を用いて注意深く行い、底泥の巻き上げが生じないように細心の注意を払った。干出時刻後、コア内の直上水を廃棄し、数時間放置した後に上げ潮時の水を定量注入して実験を再度開始した。現地実験は6:00-9:30までの下げ潮時と15:00-17:40までの上げ潮時の2回実施した。さらにStn. 2の直上水を1時間毎に採水し、Stn. 1, 3での自動採水によるデータと合わせて評価した。各々の系は3連で実行し、対照系との差から底泥からの溶出速度を算出した。

## 3. 干潟内における水質変動

### 3.1 水質の時系列変化

図-4にStn. 3における水位および各種水質の時系列データをまとめた。観測2日間における潮汐は、朝と夕に冠水し、昼と夜に干出する干潮パターンであった。観測日において31日には降雨が記録されたが、30日は快晴であった。

塩分は観測期間中、約30psuとほぼ一定した値を示した。Stn. 1においては約29psuを示すことから、岸沖方向で約1psuの塩分勾配を持つことが分かった。

水温は、夕方の冠水時に1~2℃高く、全期間でも27~29℃を示した。夜間は気温に比べ水温が高く、昼間は逆であることが分かる。

水温、塩分について、冠水始めと終わりには若干の変動が見られる。これはセンサー部の浸水状態の影響と思われるが、1時間程度の連続的な低下も見られる。

D0は、満潮時の濃度を早朝と夕方で比較すると昼間の光合成作用のために夕方の方が約 $1\text{mg l}^{-1}$ 高く、飽和度で約100%に達することが確認された。また、満潮時をピークとした潮汐と連動する周期的な変動であることが読みとれる。これは沖合の高D0水が干潟内に流入し、低D0水が沖合へ流出することを意味している。このことは干潟干潮帯においてベントスの呼吸による酸素消費が一次生産を上回っていることを示している<sup>21)</sup>。さらにStn. 2におけるD0データも同様の傾向で、かつ同時刻のStn. 3よりも低い濃度を示すことから岸沖方向でD0に差があることが分かった。pHについても7.8から8.3の間で変動し、満潮時に高ピークを持ち、D0値と同調した変動を示すことが確認できた。濁度に関しては、既往の報告同様<sup>16)</sup>、冠水始めと終わりに流速の増大に伴って底泥を巻き上げ、大きな値を示すことが明らかとなった。

DIN( $\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_{2+3}\text{-N}$ )、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動をみると、満潮時に低く、干潮時に高い傾向が分かる。このパターンは既往

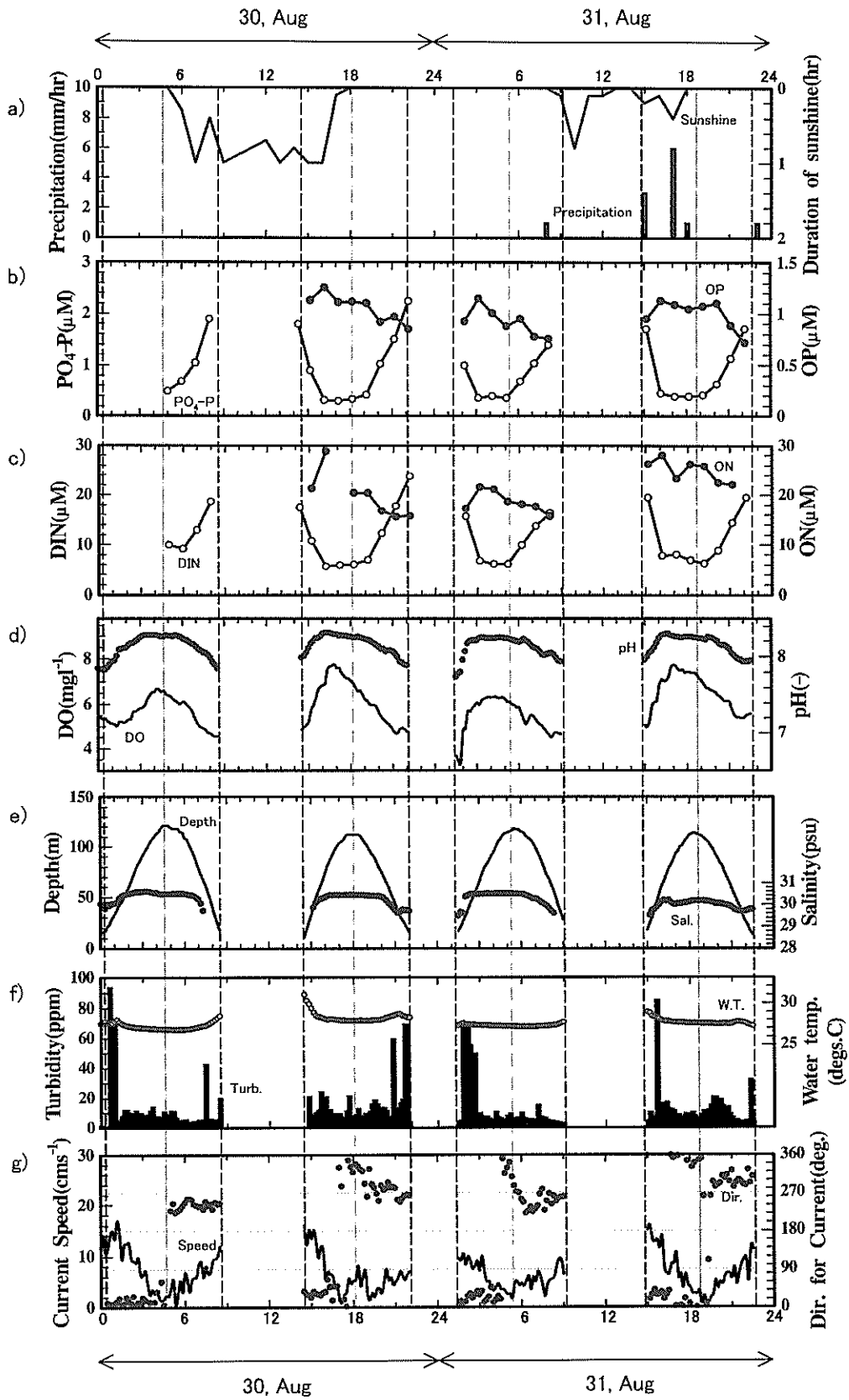


図-4 Stn. 3における水位、流向・流速及び栄養塩など各種水質の時系列データ



の報告と同様である<sup>14,15)</sup>。その変動幅は、Stn. 1, 2と比較してStn. 3の方が大きいことが分かった。DINの大半はNH<sub>4</sub>-Nであった。昼間と夜間では、他の項目についてそれほど大きな差はないが、PO<sub>4</sub>-Pが30日深夜の干潮時には特に高くなっていることが分かる。同じ時間帯のON (=TN-DIN), OP (=TP-PO<sub>4</sub>-P) についてみると、いずれもその濃度が低下していく様子がみられることから、懸濁態の有機物が干潟内で無機化された結果であると解釈できる。また、夏季に行われた別の観測より得られたクロロフィル a の時系列データも潮汐に応じて変動することからON, OPの主体は藻類としてみる事ができる。

### 3.2 干潟内における流れ及び河川水の影響

図-4のStn. 3における流速データから、上げ潮時と下げ潮時それぞれについて、ほぼ一様な岸沖方向の流れが卓越しているとみなせる。確認のため、Stn. 3の流速と潮位から岸方向への流出入率について次式を用いて試算した。

$$X_f = \int_{T_L}^{T_H} U(t) \cdot h(t) \cdot dt / A_b \quad (1)$$

$$X_e = \int_{T_H}^{T_L} U(t) \cdot h(t) \cdot dt / A_b \quad (2)$$

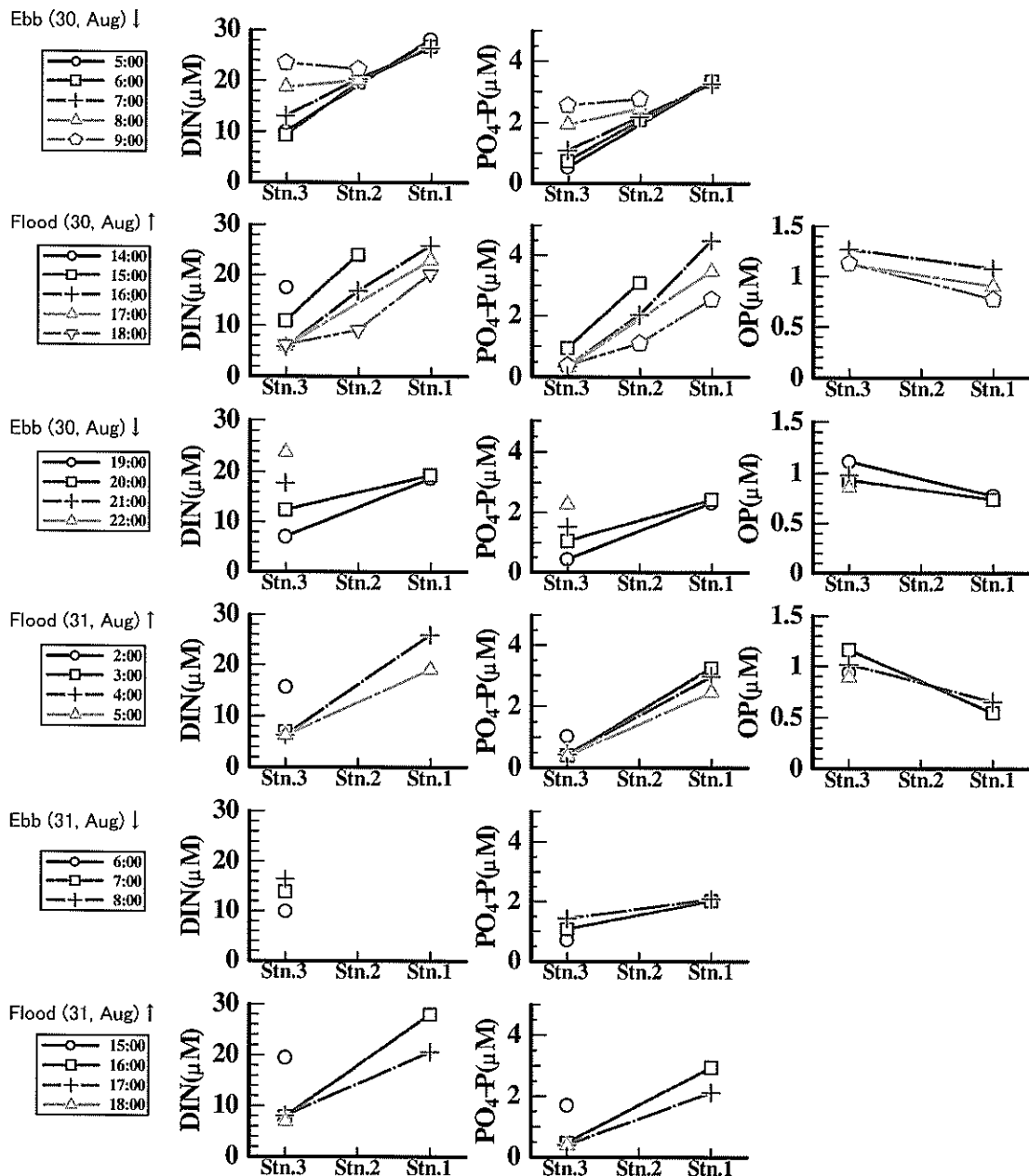


図-5 DIN, PO<sub>4</sub>-P及びOPに関する空間濃度分布

$J_i$ : 流入率

$J_o$ : 流出率

$T_H$ : 満潮時刻

$T_L$ : 干潮時刻

$U(t)$ : Stn. 3 における岸沖方向成分流速値 (ml<sup>-1</sup>)

岸方向: 正

$h(t)$ : Stn. 3 における実測潮位 (m)

$A_b$ : Stn. 3 以浅の満潮時における縦断面積 (m<sup>2</sup>)

計算の結果, 流入時に 0.8, 流出時に 0.7 となった。

計算では底面付近での流速の観測値を採用しているため流量が過小評価であることを考慮すれば, 岸沖方向への移流が主であったと考える。

また, 他に栄養塩の供給源として小櫃川の影響も考えられる。Stn. 3 の塩分は約 30psu であったのに対して, Stn. 1 と Stn. 3 の塩分濃度の差は 1psu 程度の差であった。このことから河川水による 1/30 の混合があったと考え, 河川の公共水質データ TP 値 0.1mg l<sup>-1</sup> を用いると, 河川水による変動分は 0.11 μM に相当する。これは両地点間の PO<sub>4</sub>-P 変動の数%程度であることが分かる。したがって今回の観測では河川からの供給の影響を無視した。

### 3.3 干潟内における水質の空間分布

両観測日における下げ潮, 上げ潮時の DIN, PO<sub>4</sub>-P および OP 濃度の空間分布について図-5 に示した。両潮時ともに岸側で高く, 沖側で低い濃度分布を示し, 観測点においては時間の経過とともに下げ潮時では濃度が上昇, 上げ潮時では低下する様子が認められる。また, 夜間における分布や他の栄養塩項目についても同様の傾向がみられた。以上, 図-4, 5 を通じて, 冠水時において定常的に DO, pH, ON および OP は, 沖側で高く, 岸側で低いことが, DIN, PO<sub>4</sub>-P は逆の傾向で分布していることが分かった。さらに潮汐に応じてこのような勾配を持った水塊が干潟内を移流している可能性が見出された。

次に岸側で高く, 沖側で低い濃度の空間分布を形成する機構を考察する。上げ潮時, Stn. 3 において流入水の水質をみた場合, しばらくは各栄養塩に濃度減少の傾向が見られ, その後ほぼ一定の水質となることから海水の輸送初期において水質が大きく変化し, 干潟上の空間分布を支配していることが考えられる。例えば PO<sub>4</sub>-P の連続データによると Stn. 3 で 14 時に 1.78 μM であったが, Stn. 1 では 16 時に 4.45 μM を示した。Stn. 1 の濃度が 2 時間前の Stn. 3 での濃度に比べて数倍大きい。このことは汀線付近の水塊が単に岸側方向に平行移動した結果だけではなく, 栄養塩濃度を増加させながら岸側に移動していることを示している。

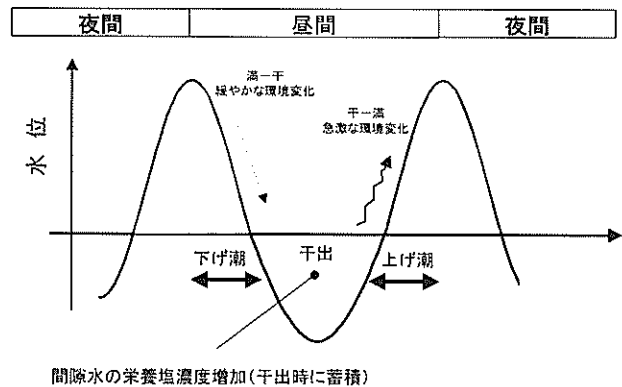


図-6 潮汐パターンの違いによる直上水と干潟泥面との関係

つまり, 岸側で高く, 沖側で低い濃度の空間分布を示す状態は, 上げ潮時, 沖合から同じ傾向を持つ水塊が干潟に単純に移流して来た結果であるというよりも, 干潟上を移動する過程において, 物理的な巻き上げや底泥からの溶出などにより栄養塩が蓄積した高濃度水塊が生成され, 岸側に運ばれて行くことが主因であると考えられる。図-4 の濁度の変動をみると上げ潮時の初期に特に高濃度であることがわかり, これは巻き上げを伴う強い攪乱が生じていることを示唆している。

また, 水位の上昇とともに巻き上げや一時的に急増した溶出フラックスも再び低下するため, さらに水位が上昇すると希釈される割合が相対的に大きくなることなどから, 上げ潮時の後半では濃度の増加が生じないものと考えられる。

さらに図-6 に示すように底泥中で一定の DIN, PO<sub>4</sub>-P の生成速度があると仮定すると干出時間の長い岸側ほど干出中に無機栄養塩が底泥間隙水中に蓄積することになる。上げ潮時, 直上水との濃度差で DIN, PO<sub>4</sub>-P が溶出すると溶出フラックスは汀線部で急激に大きくなり, フロント通過後には減少することが考えられる。したがって干潟の上げ潮時の水質変化を再現するには, 冠水前の干出時間を関数として一時的な溶出フラックス増加を表現できるモデルの構築が必要であると思われる。このことはまた, 干潟の栄養塩収支を実験的に評価する場合, 干出時間など泥面の履歴を考慮して採泥を行う必要があることを意味している。

### 3.4 干潟沖合における水質変動

測線 L1-L5 および干潟上 Stn. 1-3 の断面において観測した水温, 塩分, DO ならびに Chl. a の等濃度線図を図-7 に示す。L1 と L5 の観測には最大 30 分の差がある。図-8

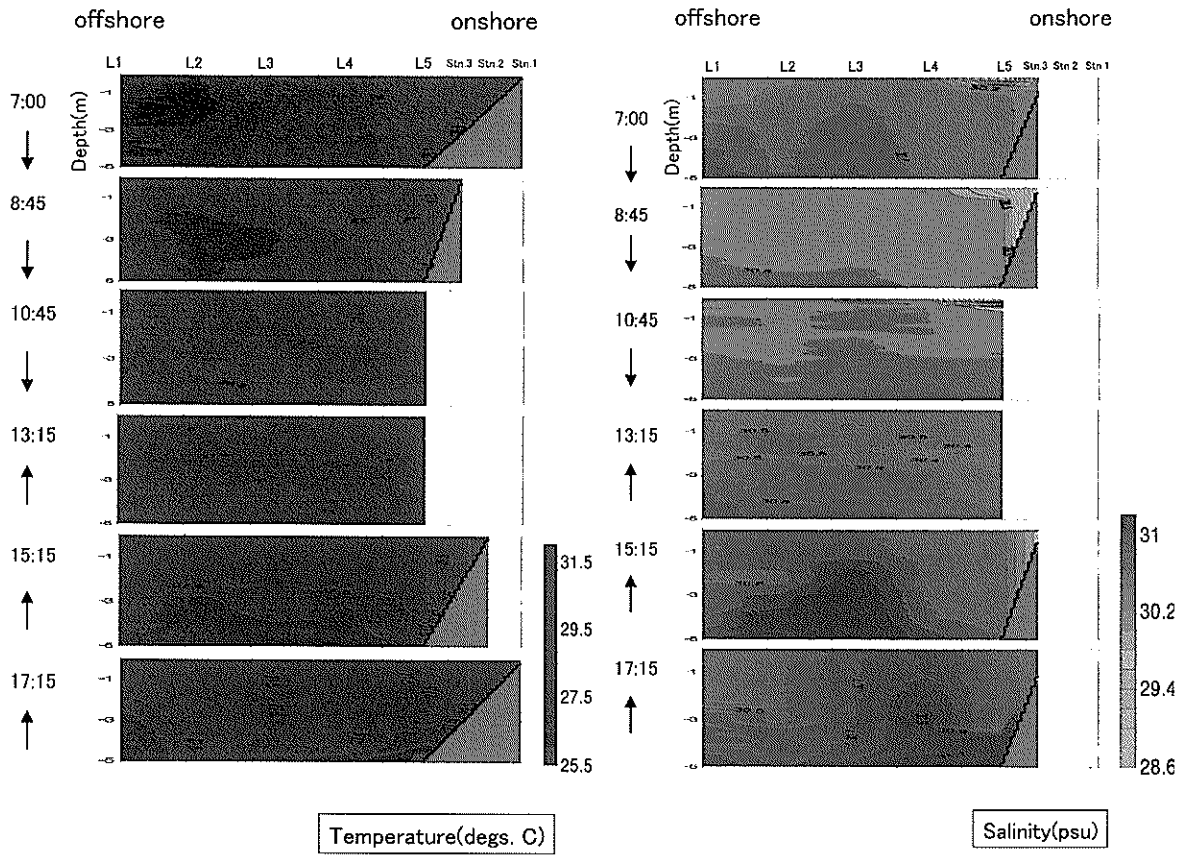


図-7 (a) 下げ潮, 上げ潮に伴う干潟-沖合 (L1-L5-Stn. 1) における水温及び塩分の等値線図

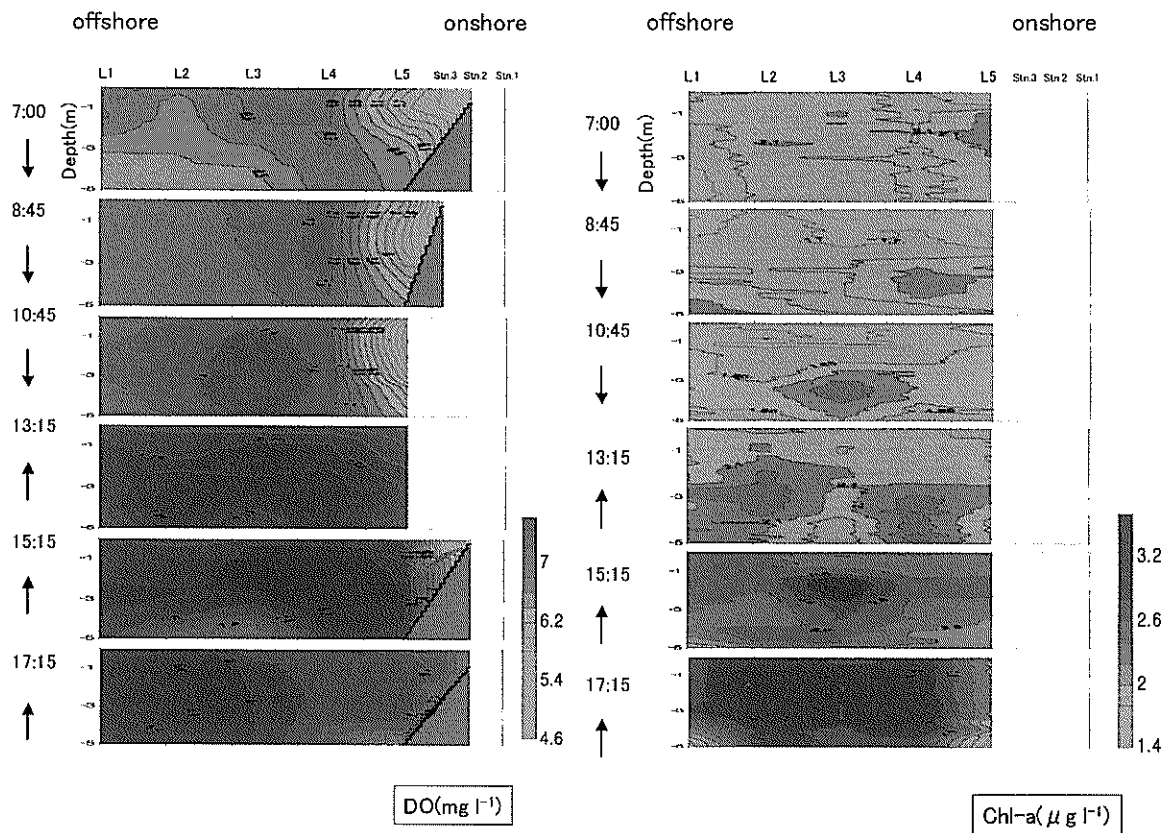


図-7 (b) 下げ潮, 上げ潮に伴う干潟-沖合 (L1-L5-Stn. 1) における溶存酸素及びクロロフィルaの等値線図

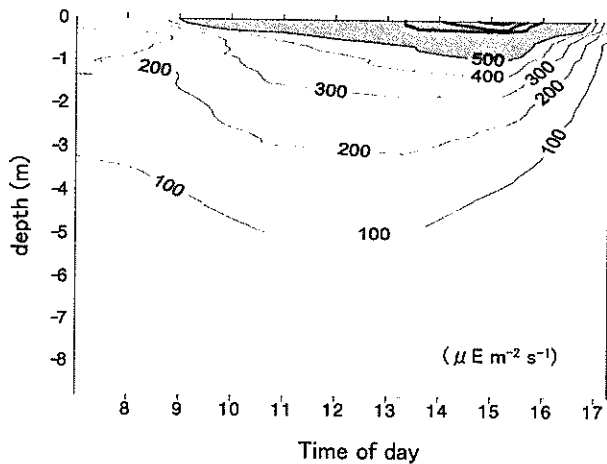


図-8 水中光量子の時系列データ

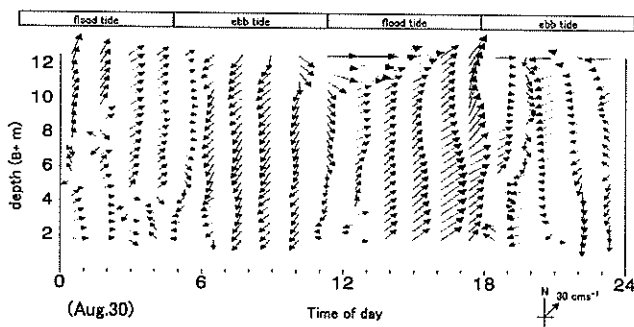


図-9 Stn. 4における鉛直流速プロファイルの時系列データ

に水中光量と時間との関係も示した。これらによると下げ潮時において干潟域から低塩分・低 Chl. a 濃度の水塊がほぼ 1km 沖合にまで広がっていく様子が伺える。他の観測項目から、この水塊は周辺に比べて高温、高濁度、低 DO であることが確認できた。午後からは日射が強くなったことから、午後の上げ潮時には高い Chl. a, DO, 水温の傾向を持つ水塊が干潟内に流入していったことが分かった。この結果からも 3.1 の考察を裏付けることがで

きる。特に低塩分水塊が約 1km 先まで張り出すことから、沿岸部においては僅かな塩分差があり、3.1 の定点観測において冠水始めと終わりに観測された水塊であると考えられる。同日、Stn. 4 で得られた流速の鉛直分布を図-9 に示したが、下げ潮、上げ潮ともにほぼ北東-南西方向に安定した流れ場があったことが確認できた。

#### 4. 干潟に対する流出入フラックスの算定

ここでは、Stn. 3 において時系列的に観測された栄養塩データを用いて、水・干潟堆積物間のフラックスを算定してみる。干潟には Stn. 3 を経由して流出入するものとし、冠水（水没）時間帯における栄養塩収支を見積もることとする。下げ潮時に潮間帯から流出する栄養塩の量から上げ潮時に流入する量を引けば、それが潮間帯上から放出された量になる。それを潮間帯の面積で除算することにより、見かけ上、干潟堆積物に移行したフラックスが求められる。以上を数学的に表現すれば式 (3) のように書くことができる。

$$F = \left( \int_{T_f}^{T_e} C(t) \cdot Q(t) \cdot dt \right) / (L \cdot \pi) \quad (3)$$

$Q(t)$ : 干潟への単位幅あたり流出量 (=  $dA/dt$ ) ( $m^2 h^{-1}$ )

$A(t)$ : Stn. 3 より岸側の干潟直上水の縦断面積 ( $m^2$ )

$C(t)$ : Stn. 3 における栄養塩濃度 ( $mmol m^{-3}$ )

$T_f$ : Stn. 3 における冠水初めの時刻

$T_e$ : Stn. 3 における冠水終わりの時刻

$L$ : Stn. 3 から護岸までの水平距離 (= 1179) (m)

$T$ : 冠水時間 (=  $T_e - T_f$ ) (h)

$F$ : 見かけの栄養塩フラックス ( $mmol m^{-2} h^{-1}$ )

ここで、 $Q$  は下げ潮時には正、上げ潮時には負となる。例えば、上げ潮と下げ潮において、同じ流速、同じ濃度であれば流入量と流出量がつり合い、 $F$  は 0 となる。また、下げ潮時の方が高濃度であれば  $F$  は正の値をとり、

表-1 1 潮汐間における干潟内への見かけの流出入フラックス  
(負の値は干潟への吸収)

Date	Submerged period	TN	DIN	ON	TP	PO <sub>4</sub> -P	OP
30, Aug	14:00 } 22:00	-100	322	-422	-1	29.2	-30.2
31, Aug	01:30 } 09:00	169	388	-219	30	42.2	-12.2

Unit:  $\mu mol m^{-2} h^{-1}$

表-2 コア実験による底泥からの栄養塩溶出速度 (+) 及び直上水中における吸収速度 (-)

	Tide	Unit	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P	DIN
Sediment (B)	ebb	μmol m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	209±14	41±6	24±4	251±17
	flood		338±14	85±10	26±2	362±28
Control (R)	ebb	μmol m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup>	1722±22	257±38	147±39	1843±472
	flood		1969±177	611±113	249±23	2793±237

底泥から直上水側へのフラックスがあることを示唆する。なお、深度は 10 分毎のデータを用い、栄養塩濃度は 1 時間毎のデータを内挿して 10 分データとした上で積算した。

表-1 に、2 回の潮汐について積算した結果を示す。データは冠水時間が上段では昼一タ、下段では夜一朝にあたる潮時のものである。表中、負の値は干潟域での吸収を意味している。上段のケースでは、ON, OP について吸収、DIN, PO<sub>4</sub>-P は放出、TN, TP では吸収を示している。下段のケースでは、全体的にその値が小さくなり、有機態、無機態それぞれの正負の符号は変わらないが、TN, TP では正の値を示し、干潟からの放出を表している。何れのケースも沖合から懸濁態を多く含む海水が流入し、干潟上から無機態の形で沖に流出していくことが確認できた。これは前述した時系列データの考察を支持するものでもある。

また、Kuwaie ら<sup>19)</sup>は盤洲干潟底泥を用いて明・暗条件下での培養実験を行い、昼間には泥面の付着藻による直上水からの無機態栄養塩の吸収がある一方、夜間には呼吸・分解や底生動物の排泄などに伴う直上水中への放出があるという結果を得ている。Kuwaie らの実験は冠水時を対象としているが、同様な生物活動が干出時にもあるとすれば、干出時間帯が昼か夜かの違いは間隙水中の栄養塩濃度を大きく左右し、夜間の方が栄養塩の蓄積がより高濃度になる可能性がある。表-1 において冠水直前の干出時間帯は上段が昼間、下段が夜間であり、下段の方が栄養塩の溶出フラックスが大きい。したがって昼間と夜間の違いが本実験における栄養塩収支の結果に影響している可能性が示唆された。これら潮汐の時間帯が干潟栄養塩収支に及ぼすイメージを示すと図-10 のようになる。この結果から干潟域を水質浄化の面から評価すれば、夜間-栄養塩放出、昼間-栄養塩吸収というパターンが明らかとなった。

### 5. 底泥からの栄養塩フラックスの算出

表-2 に現場コア実験の結果から整理した下げ潮、上げ潮時における底泥からの無機態栄養塩 (NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, DIN) の溶出速度を示した。同時に実施した対照系の無機態栄養塩濃度の減少速度より、直上水柱内での栄養塩の吸収速度についても算出した。比較的日射が強かったにもかかわらず両潮時とも底泥から放出の傾向を示していた。さらに溶出速度は既往の報告と同レベルにあった<sup>18, 19)</sup>。

各項目とも下げ潮時よりも上げ潮時の速度が大きいという傾向が認められたが、これは干潟面が日中、干出して放置されていたため、各項目について底泥中の間隙水濃度が上昇し、直上水中との濃度勾配が大きくなり溶出速度として反映されたものと考えられる。直上水柱内に

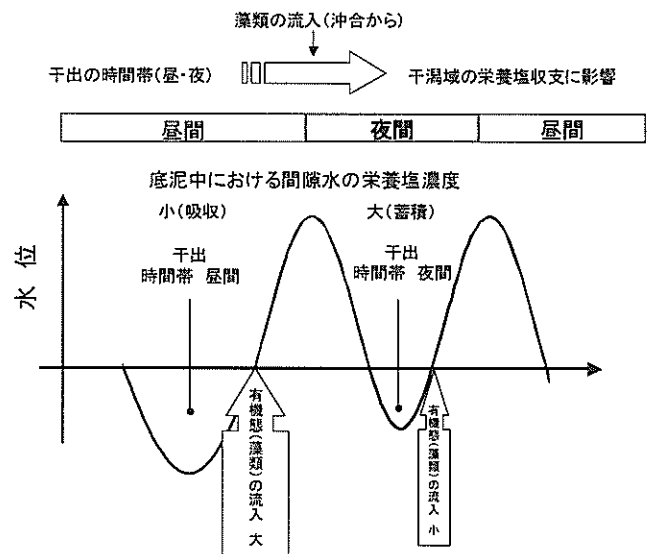


図-10 冠水の時間帯と干潟における栄養塩収支との関係

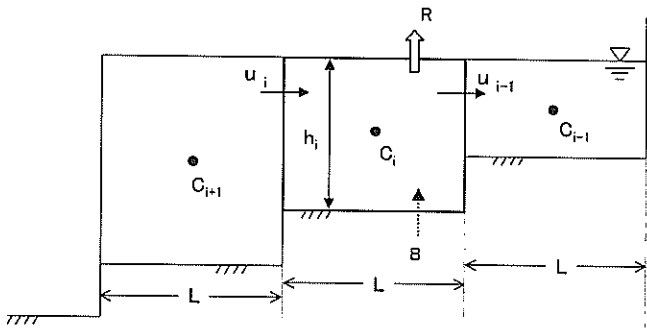


図-11 BOXモデルについての概要図

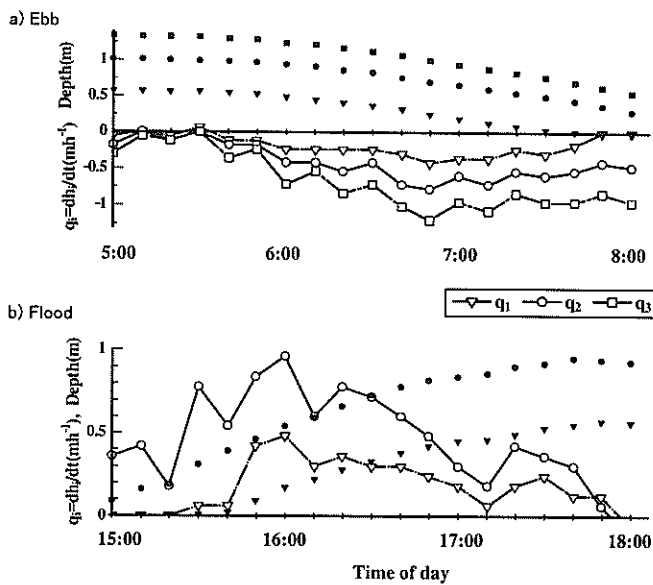


図-12 実測水位から求めた単位面積あたりの流出入量

における吸収速度についても、上げ潮時の方が大きいという傾向を示した。これは栄養塩の吸収が主として藻類によるものであり、かつ光合成と同時に行われたためであると考えられる。何故なら、水温、照度ともに上げ潮時の方が大きかったためである。さらに汀線付近の海水を実験水として採用したことも影響している可能性がある。汀線付近では干出時に干潟泥面で生成される付着藻類<sup>9)</sup>が剥離することにより高いChl. a濃度を保持した水塊であることが濁度の連続データから推定される。すなわち満潮時の海水と比べて栄養塩濃度や濁度（藻類を含む）が高濃度を示すことから本傾向が強くなったものと考えられる。

## 6. 栄養塩収支のモデルによる検討

### 6.1 ボックスモデルの概要

本観測データから無機態栄養塩濃度は岸側で高く沖側で低い傾向を示し、定点での時系列変化は潮汐と逆のパターンが現れることや上げ潮固有の栄養塩供給過程の存在の可能性が確認された。そこで単純なモデルを構築し、観測データより潮汐に伴う干潟上での栄養塩収支について検討するとともに栄養塩変動について検証した。

モデルの構成要素は、図-11に示すように底泥からの溶出速度、直上水中の吸収速度および実測潮位から換算した単位面積当たりの流量とした(図-12)。Stn. 1から3の各々同面積を持ったボックスと仮定した。

上げ潮時

$$h_i \cdot dC_i/dt = q_i(C_{i+1} - C_i) + B - R \cdot h_i \quad (3)$$

$$(i \neq 3)$$

下げ潮時

$$h_i \cdot dC_i/dt = q_{i-1}(C_i - C_{i-1}) + B - R \cdot h_i \quad (4)$$

ともに

$$q_i = q_{i-1} + dh_i/dt \quad (5)$$

ここで

$i = 1 \sim 3$

$C_0 = 0, q_0 = 0$

$C_i$ : Stn.  $i$ における栄養塩濃度 ( $\mu\text{M}$ )

$h_i$ : Stn.  $i$ における実測潮位 (m)

$B$ : 底泥からの溶出速度 ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )

$R$ : 直上水における藻類等による吸収速度 ( $\mu\text{mol m}^{-3}\text{h}^{-1}$ )

$q_i$ : 沖側からBOX $_i$ に流入する単位面積当たり流量 ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ )

以上の関係式を上げ潮時にはStn. 3における30日15時の実測値を境界値ならびにStn. 2の15時およびStn. 1の16時のデータを初期値とし、下げ潮時には各点における30日5時の観測値を初期値として、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{DIN}$ について数値的に解いた。

### 6.2 干潟上における栄養塩収支の時系列変化

底泥からの溶出速度ならびに直上水柱における栄養塩吸収速度を合わせて、単位時間・面積あたりの評価を行った。ここでは底泥や直上水、各々の寄与分は明らかでない。図-13(a), (b)に各潮時における干潟上での $\text{DIN}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 収支についての計算結果を経時的に示した。 $\text{DIN}$ のStn. 2についてみると15時から17時までの約2時間の上げ潮の初期には、 $6000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$ といった大きな放出側の傾向を示した。その後、栄養塩フラックスは吸収側に転じるが、その大きさは初期の半分程度であった。岸側のStn. 1については水位の差によりその大きさは異なる

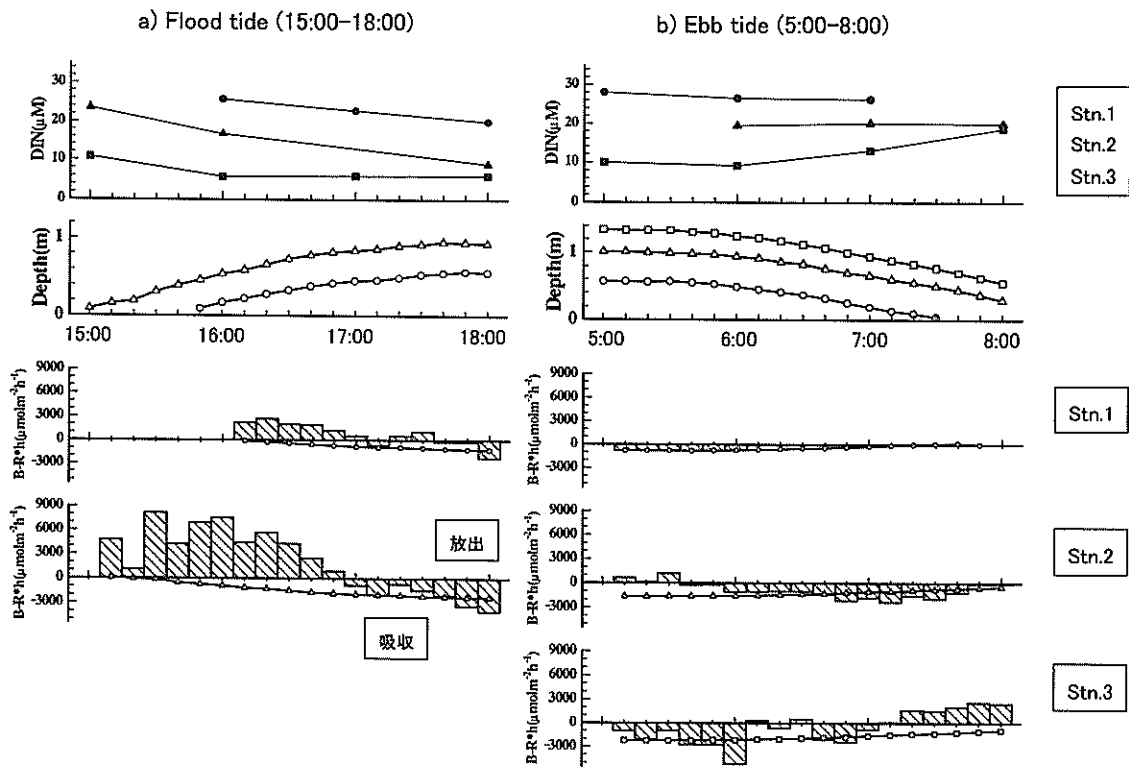


図-13 (a) 上げ潮、下げ潮に伴う干潟上での栄養塩収支 (DIN)

るが、ほぼ同様の傾向を示す結果といえる。先に述べた現地コア実験から求めたフラックスも併せて同図に示した。直上水柱における吸収速度が大きかったために水深が大きくなるにつれて吸収の傾向を示した。その大きさのオーダーは Stn. 1, 2 とともに吸収側のそれでは同レベルだが、放出側では大きく異なることが分かった。

一方、下げ潮については期間中、各地点でほぼ吸収側

の傾向を示すことが伺える。コア実験値との比較では同傾向に同レベルの大きさであることが分かる。Stn. 3 の後半には一時、放出側の傾向を示したが、これは濁度の流速の増大に伴う底泥からの流出フラックスの増大など上げ潮時と近い物理環境にあったことが要因と考えられる。

以上、干潟上での栄養塩フラックスの傾向をまとめる

表-3 上げ潮、下げ潮における干潟上での流出入フラックス

TIDE		DIN	PO <sub>4</sub> -P
FLOOD 15:00~18:00	Max	8182	1348
	Avg.	1374	220
	Min	-4044	-632
EBB 5:00~8:00	Max	2615	300
	Avg.	-574	-45
	Min	-5230	-538
FLOOD + EBB	Avg.	400	87

Unit:  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$

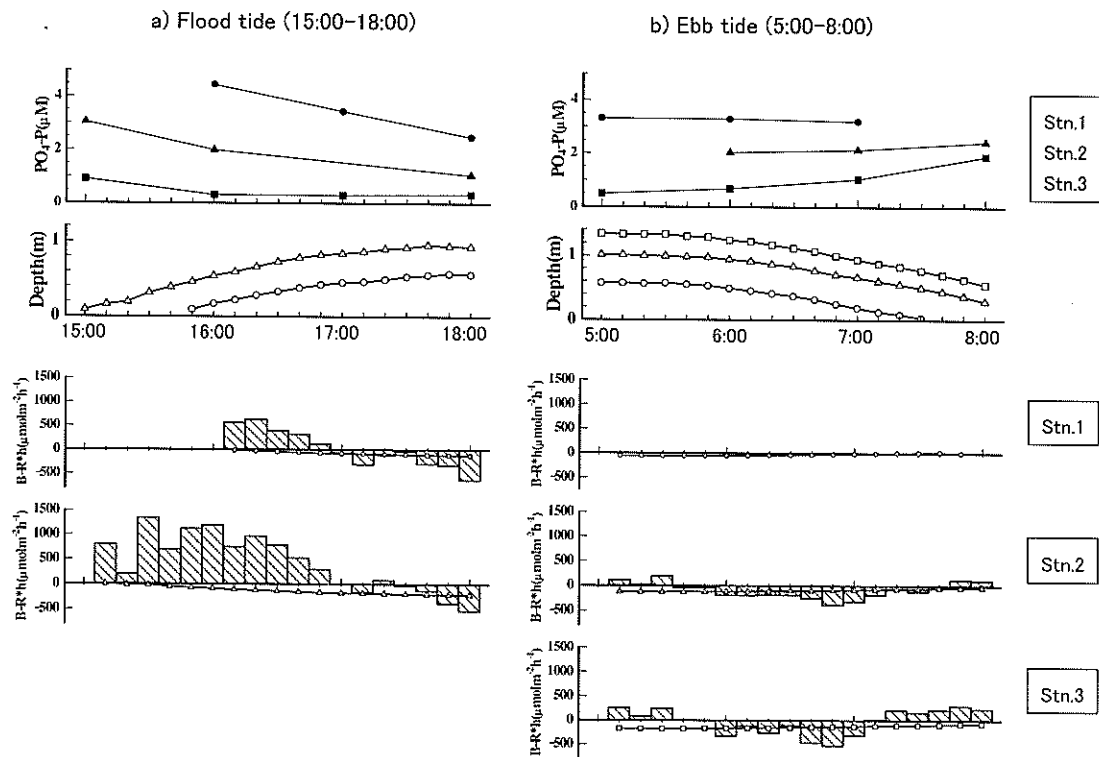


図-13 (b) 上げ潮、下げ潮に伴う干潟上での栄養塩収支 ( $PO_4-P$ )

と上げ潮初期には大きく放出し、冠水している間は吸収するが、干出直前には再び放出の傾向を見せることがモデル計算より示された。栄養塩について、上げ潮、下げ潮といった潮汐に対応した干潟の浄化能力の算定ができたとともにその内訳が明らかになった。すなわち、これまで浄化能力の算定は、4章のような上げ潮から下げ潮までを通じての1潮汐あたりによる評価が主であったが、このような時空間的に連続した観測結果を通じて、その内訳として上げ潮初期に生じる底泥もしくは直上水からの栄養塩の供給が、その1潮汐間の栄養塩収支に大きく影響していることが示唆された。

モデルより求めたフラックスを時系列データから統計的にまとめて表-3のように整理した。DINについて、上げ潮で  $1374 \mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 、下げ潮で  $574 \mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$  となった。本データは連続した潮汐のセットではないものの1潮汐としてみると  $400 \mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$  を示し、これは干潟外への流出を意味している。先に表-1で求めた1潮汐あたりの干潟内へ流入フラックスと比較してもDINでほぼ同レベル、 $PO_4-P$ でも同じオーダーにあり、両者による浄化能の算出が比較的近いことが確認された。

### 6.3 栄養塩濃度分布のモデルによる検証

次にコア実験において算出した底泥からの溶出速度および直上水中の吸収速度を用いて栄養塩の時系列変化の再現を試みた。ここでB、Rについては、Stn.2において観測された下げ潮、上げ潮の速度値(表-2に示した)を場所的、時間的に変動しないものと仮定して用いた。

図-14(a)にDINならびに $PO_4-P$ の時系列データに関して、下げ潮時の各点の計算値と実測値の比較を示したが、ほぼ再現できていることが分かる。Stn.2およびStn.3については時間とともに経時的に濃度が高くなる様子が確認できる。一方、上げ潮のDINならびに $PO_4-P$ の計算結果を図-14(b)に示した。岸側の方が高濃度になることは再現できたが、絶対値は大きく異なる結果となった。これは前述した底泥からの一時的な拡散フラックスの増加、巻き上げなど上げ潮固有の栄養塩供給の過程をモデルに組み込めなかったことが原因と考えられる。下げ潮時には、このような影響を干出間際にしか受けないことから、本モデルにおいても実測値がほぼ再現できたと考える。無機態栄養塩を定点観測した場合、下げ潮時で濃度が上昇するパターンがあったが、これは岸側で高く、沖側で低い濃度分布をした水塊が干潟から流出することにより生じていることがモデルからも示された。また、



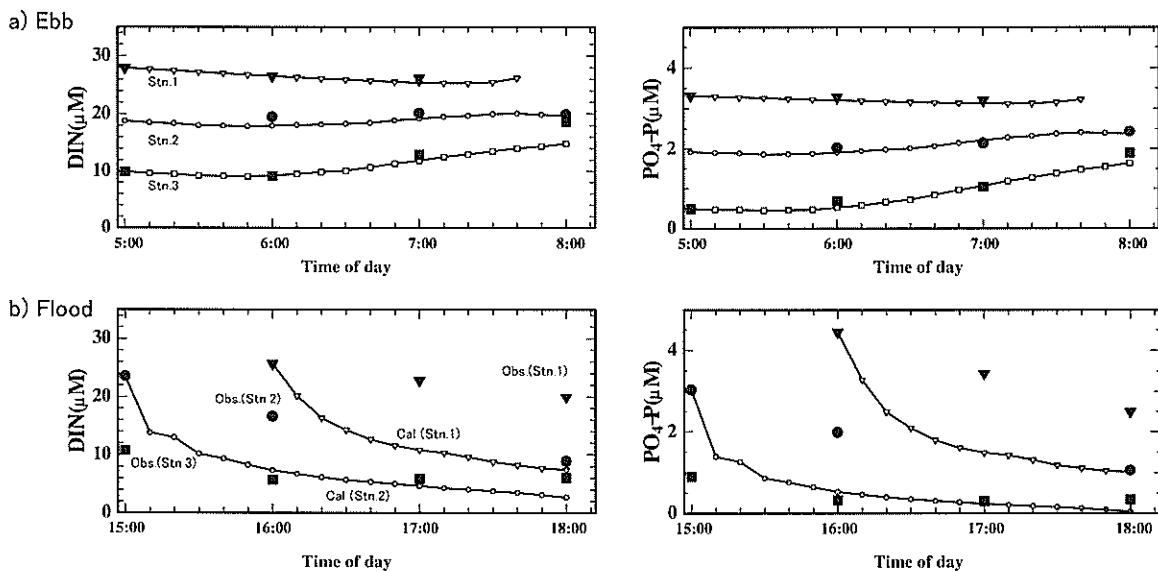


図-14 現地コア実験値を入力した場合の下げ潮、上げ潮におけるDIN, PO<sub>4</sub>-Pの計算結果

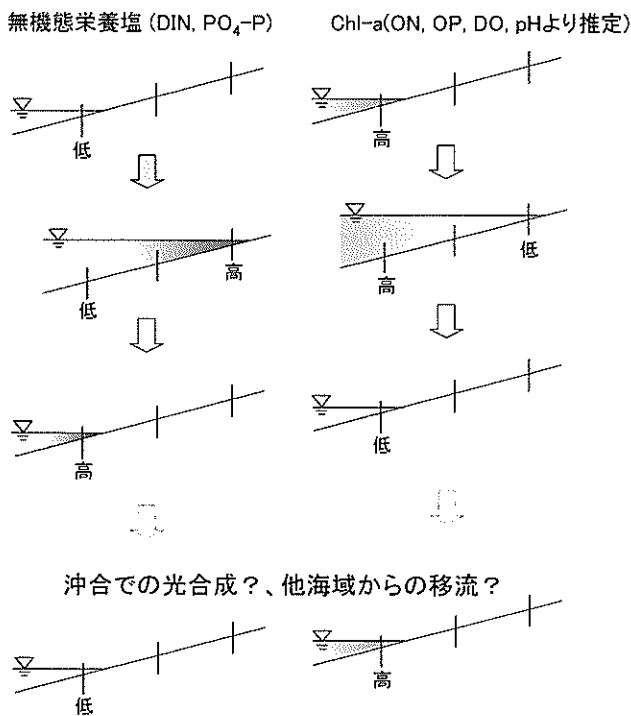


図-15 潮汐に対応した各水質濃度分布変遷のイメージ図

本稿ではモデル内に組み込まなかったが、水質変動には非線形な構成要素である直上水中のプラクトン、二枚貝などの底生生物、付着藻類を含んでおり、同時にその役割を明確にしておくことが重要と考える。

沖合での観測データも含めた水塊の挙動に関して定

性的にみてきた。図-15 に本研究より推定された潮間帯を出入りする水塊の各種水質の濃度分布のイメージ図を示す。干潟から沖合に流出した水塊が、本傾向を維持したまま再流入して来るとは考え難いが、何れも非保存系物質を対象としての議論であり、沖合で混合、移流に伴いリセットされた水塊なのか、光合成に利用され栄養塩が枯渇した水塊として再び干潟内に戻ってくるのかといった周期性を持った現象が干潟と沖合の間で進行しているかは現データでは評価が難しく検討すべき点と考える。

## 7. 結論

2000年夏季、干潟域ならびにその隣接海域において時間的、空間的に密な間隔での観測を2日間実施し、その変動プロセスに考察を加え、以下のような知見を得ることができた。

- 1) 潮間帯における観測から、冠水時にDO, pHおよび有機態窒素・リンは、沖側で高く、岸側で低くなった。DIN, PO<sub>4</sub>-Pは逆の分布となる結果が得られた。下げ潮時には岸沖方向に水質勾配を持った水塊が潮汐に応じて移流するため、定点観測においてはDIN, PO<sub>4</sub>-P濃度が増加することが分かった。
- 2) 干潟からの窒素・リン収支を解析した。その結果、TN, TPについては、夜間に干潟から放出、昼間では吸収となった。また、昼夜を問わず、沖合からは有機態窒素・リンの流入、干潟からは無機態窒素・リンの流出の傾向が明らかとなった。ただし、干出時間帯が日昼か夜間

かによって栄養塩収支が影響されることが示唆された。  
3) 上げ潮初期段階において汀線付近での巻き上げ、一時的な底泥からの溶出フラックスの増加が干潟域の水質分布に影響を及ぼしている可能性があり、それらを定量化する必要性が示された。

## 8. あとがき

広域的・連続的というキーワードの下に干潟直上水の水質変動の現象解明、強いては干潟の水質浄化機能の評価を試みた。無機態栄養塩について、特に上げ潮初期段階において直上水中に放出が生じていることが示されたが、その原因としては現時点では未解明であり、本稿で提唱した一時的な溶出フラックスの増大の他にも巻き上げの効果、直上水の流速の考慮や底生生物の寄与などが考えられる。今後、各々の寄与分を明らかにするとともに、特に干出した干潟泥面中での無機態栄養塩の蓄積速度や冠水直後に一時的に増加すると予想される溶出フラックスの定量的把握を干出時間帯（昼間・夜間）の違いや干出時間の長さについてのパラメータ化に向けて現地データの蓄積が必要と思われる。以上の検討を通じて干潟浄化能力の算定に向けた汎用性手法の確立が可能になるものと期待される。

また、この水質変動の詳細な機構は、沖合から流入してくる有機物の取り込み（捕食や沈降）、光合成に伴う栄養塩類の吸収など、二枚貝、付着藻類や微生物をはじめとする生物化学的な作用が大きく効いており、これらの役割を整理することも大きな課題の一つといえる。

さらに干潟流出水が沖合で光合成など再利用されて再び有機物の形で干潟内に流入してくるか、あるいは全く別の水塊が流入して来るかなど、我々が水質の浄化能力を期待する中で湾内に対する寄与、湾域のどの範囲までまたどの程度浄化されるのかが最も大きいとすれば、沖合と干潟との相互作用の関係を明確にすることが最終的な目標とされる。そのためにも観測点を沖合に延長するなど観測範囲を拡げての検討や数値計算による評価において本稿で指摘した冠水と干出を繰り返す干潟上での特異的な現象をモデル上考慮することが重要と思われる。

## 謝辞

本現地調査を実施するにあたり、江川漁業協同組合、久津間漁業協同組合の方々のご協力をいただいた。また、沿岸生態研究室研修生（当時）の藤野智亮氏、奥宮英治氏ならびに日本大学生物資源科学部生（当時）の宮澤登美子嬢には、現地実験、現地観測、水質分析に多大なる

ご尽力をいただいた。ここに記して深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 栗原 康：干潟環境の破壊と修復および生物群集の動態，人間生存と自然環境，3，東京大学出版会，1975年，306pp.
- 2) 菊池泰二：干潟生態系の特性とその環境保全の意義，日本生態学会学会誌，43，1993年，pp. 223-235.
- 3) 小倉紀雄：東京湾，恒星社恒星閣，1993年，193pp.
- 4) 森本研吾：潮間帯の物質収支と水循環，沿岸海洋研究ノート，30(2)，1993年，pp. 208-223.
- 5) Valiela, I. and J.M. Teal：The nitrogen budget of a salt marsh ecosystem, *Nature*, 280, 1979, pp. 652-656.
- 6) Baretta, J. and P. Ruardij：Tidal flat estuaries Simulation and analysis of the Ems estuary, Springer-Verlag, 1988.
- 7) 佐々木克之：干潟の物質循環，沿岸海洋研究ノート，26(2)，1989年，pp. 172-190.
- 8) 中田喜三郎・畑 恭子：沿岸干潟における浄化機能の評価，水環境学会誌 17(3)，1994年，pp. 158-166.
- 9) Kuwae, T., Hosokawa, Y. and Eguchi, N.：Dissolved inorganic nitrogen cycling in Banzu intertidal sand-flat, Japan, *Mangroves and Salt Marshes*, 2, 1998, pp. 167-175.
- 10) Cowan, J.L.W., Pennock, J.R. and Boynton, W.R.：Seasonal and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen fluxes in Mobile Bay, Alabama (USA), *Marine Ecology Progress Series*, 141, 1996, pp. 229-245.
- 11) 佐々木克之：内湾および干潟における物質循環と生物生産(2) 夏季の盤洲干潟の窒素，リンおよびクロロフィル a の分布，*海洋と生物*，19(2)，1997年，pp. 128-134.
- 12) 青山裕晃・今尾和正・鈴木輝明：干潟域の水質浄化機能—色干潟を例にして—，*月刊 海洋*，28(2)，1996年，pp. 178-188.
- 13) Montani, S., Maguni, P., Shimamoto, M, Abe, N and Okutani, K.：The effect of a tidal cycle on the dynamics of nutrients in a tidal estuary in the Seto inland sea, Japan, *Journal of Oceanography*, 54, 1998, pp. 65-76.
- 14) 児玉真央・松永信博・水田健太郎：干潟底泥—海水間の栄養塩フラックスに関する現地観測，*海岸工学論文集*，47，2000年，pp. 1126-1130.
- 15) 桑江朝比呂・細川恭史・江口菜穂子：夏季の盤洲干潟

- における直上水の潮汐に伴う変化, 日本海洋学会春季研究発表会講演概要集, 1997年, p. 205.
- 16) 藤野智亮・古川恵太・三好英一・桑江朝比呂・野村宗弘: 干潟の地形変化に関する現地観測, 日本海洋学会秋季大会講演概要集, 2000年, p. 175.
- 17) 細川恭史・木部英治・三好英一・桑江朝比呂・古川恵太: 盤洲干潟(小櫃川河口付近)におけるアサリによる濾水能力分布調査, 港湾技研資料, No. 844, 1996年.
- 18) 細川恭史・桑江朝比呂・三好英一・室善一朗・木部英治: 干潟実験施設を用いた物質収支観測, 港湾技研資料, No. 832, 1996年.
- 19) Kuwae, T., Nakamura, Y. and Hosokawa, Y. : Sediment-water exchange of nutrient in an intertidal estuarine sand flat. Proceedings of 4th International Symposium on Sediment Quality Assessment, 2000, pp. 170-171.
- 20) 気象庁: 海洋観測指針(第1部), 1999年.
- 21) Nakamura, Y. and Kerciku, F. : Effects of filter-feeding bivalves on the distribution of water quality and nutrient cycling in a eutrophic coastal lagoon, Japan. Journal of Marine Systems, 26, 2000, pp. 209-221.

付録 Stn. 1, 2における連続データ

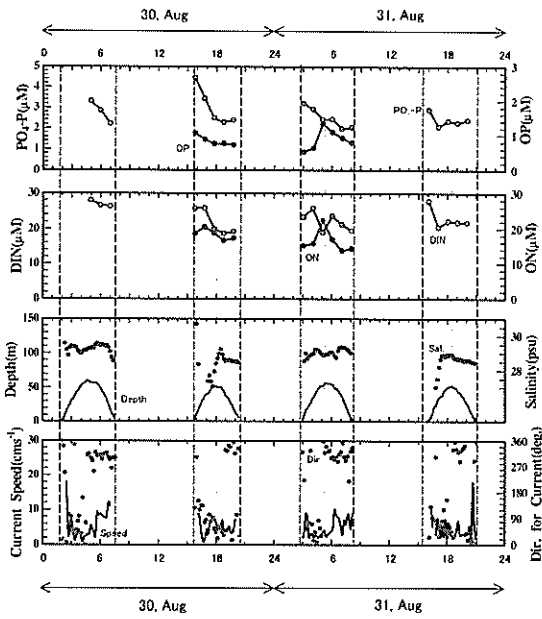


図-1 Stn. 1における水位、流向・流速及び栄養塩など各種水質の時系列データ

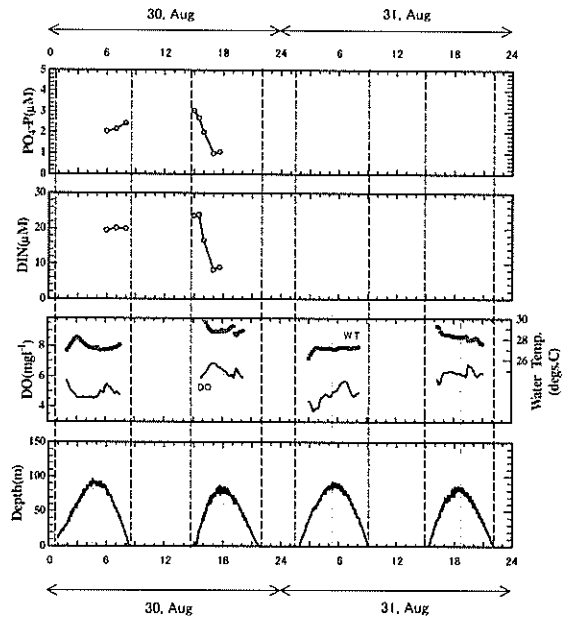


図-2 Stn. 2における水位、溶存酸素及び栄養塩など各種水質の時系列データ

港湾空港技術研究所資料 No.1020

2002.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 0468(44)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 アベイズム株式会社

Copyright © (2002) by PARI

All right reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。