

# エスチュアリー循環による河口浅海域への物質輸送に関する研究

## Estuarine Circulation and Associated Material Transport in Shallow Waters around a River Mouth

陸 眞姫<sup>1</sup>・青木伸一<sup>2</sup>・井上隆信<sup>3</sup>・杉山佳幸<sup>4</sup>

Jin-Hee YUK, Shin-ichi AOKI, Takanobu INOUE and Yoshiyuki SUGIYAMA

The estuarine circulation and the material transport associated with that in shallow waters around the mouth of Toyogawa River was studied through the field measurement of currents and chemical analysis of waters, carried out in summer, 2008 and 2009. The estuarine circulation was observed throughout the measurement period. The circulation was driven mainly by the wind and was not strongly correlated with the river discharge. Nutrients released from the bottom sediment under the hypoxic condition of bottom waters are transported by the estuarine circulation into the shallow waters, which may contribute to the primary production around the river mouth.

### 1. はじめに

内湾に流入する河川の河口部に広がる干潟および浅海域は、陸と海をつなぐ境界領域であり、陸地から流出した栄養塩等の物質はここでの生物・化学的プロセスを経て海洋へ放出される。そのため、干潟や浅海域は生産性の高い場所であり、内湾の生物生産や物質循環において非常に重要な役割を担っている。さらに、干潟や浅海域は潮汐や風、波などの物理的影響を受けやすい場所でもあり、物理・生物・化学的プロセスが物質循環に複雑に影響する場所となっている (Montani, 1994)。

愛知県の豊川河口部に位置する六条潟および周辺の浅場についても、三河湾全体のアサリ生産を支える稚貝の生育の場であることが指摘されており (鈴木ら, 2002)、内湾の生態環境を維持する上で適切に保全すべき重要な海域である。このような干潟・浅海域の生産を支える栄養塩の供給は、河川のみならず、エスチュアリー循環による海域からの寄与も大きいと考えられる (八木ら, 1998; 山根ら, 1998; 山尾ら, 2002)。一方で、エスチュアリー循環は夏期には沖合で発達した底層貧酸素水塊を浅海域へ輸送することによって青潮 (苦潮) を引き起こす要因ともなっており、その現象の解明は重要な研究課題である。

本研究は、夏期から秋期にかけて実施した豊川河口沖合での流速分布の観測値をもとに、エスチュアリー循環の実態を明らかにすること、さらに同時期に行った水質

観測データを用いて、エスチュアリー循環による栄養塩の輸送特性を検討することを目的としている。

### 2. 現地観測

豊川河口沖での流れおよび水質の観測を、2008年 (8/27-9/26) および2009年 (9/4-10/24) に実施した。流れの観測には両年ともADCPを用い、流速 (1分平均値) の鉛直プロファイルを0.5m間隔で10分ごとに連続観測した。ADCPの設置位置を図-1に示す。2008年は「2008-St.1」に、2009年はSt.4の位置にそれぞれ設置した。両者の距離は700m程度である。また図中には豊川の流軸上での海底断面地形および2009年9月27日に観測した密度分布を示してある。ADCPを設置した点は、河口から約3km沖合の水深8-9mの地点であり、出水時には表層塩分が10PSU以下になるような場所である。水質観測は、2008年は「2008-St.1」を含む沖合までの全6地点で、2009年は図-1の豊川の流軸上の9地点で実施した。観測項目は、塩分、水温、クロロフィル濃度であり、鉛直方向に0.5m間隔 (2008年) および0.1m (2009年) 間隔でデータを取得した。また、期間中4、5回の頻度で、表層および底層 (2008年は水表面下0.5mと海底面上0.5m, 2009年は水表面下1mと海底面上1m) で採水を実施し、TN (全窒素)、DTN (溶存態全窒素)、NH<sub>4</sub>-N (アンモニウム態窒素)、NO<sub>2</sub>-N (亜硝酸態窒素)、NO<sub>3</sub>-N (硝酸態窒素)、TP (全リン)、DTP (溶存態全リン)、PO<sub>4</sub>-P (リン酸態リン) の栄養塩濃度分析を行った。また、SS (浮遊物質)、TOC (全有機体炭素)、DOC (溶解性有機体炭素)、POC (懸濁性有機体炭素) の濃度も求めた。

流速データは河川流軸方向 (東西・南北軸を25度反時計まわりに回転) とその直角方向に成分分離した。さらに、潮流成分を除いた流速分布から表層と底層の流量を求め、これらを豊川河川流量および風速データと比較し

|   |      |                                |
|---|------|--------------------------------|
| 1 | 博(工) | 韓国成均館大学校研究員                    |
| 2 | 正会員  | 豊橋技術科学大学教授<br>建築・都市システム学系      |
| 3 | 正会員  | 豊橋技術科学大学教授<br>建築・都市システム学系      |
| 4 |      | 国土交通省中部地方整備局<br>豊橋河川事務所調査課計画係長 |

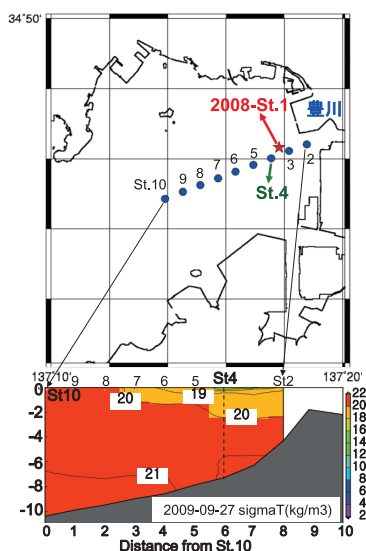


図-1 観測地点の概要。★は2008年のADCP位置。下図は流軸断面上での密度分布の一例

てエスチュアリー循環の主要外力を検討した。また、求めた流量と水質観測結果から、エスチュアリー循環に伴う栄養塩の輸送フラックスを求め、河口浅海域への栄養塩輸送の特徴を明らかにした。

### 3. 観測結果と考察

#### (1) 平均流の特性

図-2に、2008年と2009年の河川流軸方向の流速の25時間移動平均流速の水深-時間分布を示す。図中、振動している水面は、潮位変化に対応している。ただし、2008年は最表層の流速データがなく、図にはグレーで表示している。また、2009年10月8日(図中281日)には台風18号による高潮により、水位の急激な上昇と高潮に伴う強い流れが観測されている。2008年は、表層で沖向きの流れ(負の流速、グレー系)、中層で河口向きの流れ(正の流速、白色系)、底層でもほぼ河口向き流れが卓越する傾向が見られた。一方、2009年は、底層は河口向きとなっているが、表層だけでなく中層でも沖向きの傾向にあり、全層平均では沖向きの流量の方が大きかった。流速分布における2008年と2009年の差異は、ADCP設置地点の相違、観測期間中の河川流入量の相違などが原因と考えられる。ちなみに、2009年については表層と底層の流れは河川流軸方向の成分よりその直角方向成分の方が大きかった。図-3に、2008年と2009年のADCP観測期間の風(平均風速、1時間間隔)、降水量(1日降水量)、豊川の河川流量(1日流量)の分布を示す。

次に、エスチュアリー循環のメカニズムを明らかにし、それによる物質輸送量を定量化するために、河川流軸方

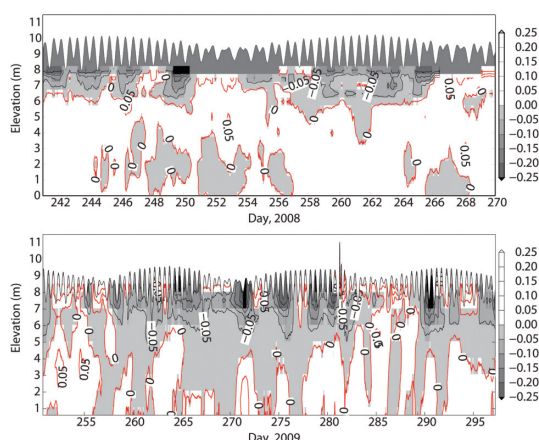


図-2 2008年「2008-St.1」(上)と2009年「St.4」(下)で河川流軸方向の流速(m/s)の分布。+: landward (河口方向)

向の表層と底層での流量を見積もった。計算方法は、河川流軸方向の流速データを各ADCP-bin(0.5m)ごとに求め、これを1日平均し、1日平均値の鉛直分布から流速の符号が変わる水深で、表層(surface)と底層(bottom)に分けて単位幅あたりの流量を計算した。この算定結果を図-3に時系列で示してある。ただし、流量は河口に向かう向きを正とした。2008年と2009年を比較すると、2009年は表層で沖に向かう流れが大きく、またエスチュアリー循環が2008年ほど明確でないこともわかる。図-4は、2008年の観測データをもとに河川流軸方向の表層流量(縦軸)と底層流量(横軸)の相関を見たものである。これより、両者は負の相関を示しており、表層では海側へ、底層では河口側へ流れる明確なエスチュアリー循環が期間を通して生じていることがわかった。

図-5は、日平均風速の河川流軸方向成分と日平均の表層流量および底層流量の相関を示したものである。これより、エスチュアリー循環の流量は流軸方向の風速と比較的良好な相関を示していることがわかる。一方、同様に河川流量との関係を調べたところ、両者に相関はほとんど見られなかった(図-3参照)。これより、観測を実施した時期においては、エスチュアリー循環の直接的な要因は風であり、河川からの淡水流入は、表層と底層で逆向きとなる明確な循環を引き起こす密度場の形成に寄与していると考えらるべきであろう。

#### (2) 水質特性

図-6および図-7は2008年の水質観測によるSt.1での水質分布を示す。4回のサンプルは、採水前日にあまり気象的なイベントのない日に実施している(図-3)。そのため、4回の水質データに大きな差異はなく、夏期の平均的な水質が得られていると解釈できる。濃度としては、表層でTNが $0.37 \sim 0.84 \text{ mg/L}$ 、DTNが $0.22 \sim 0.45 \text{ mg/L}$ 、底層

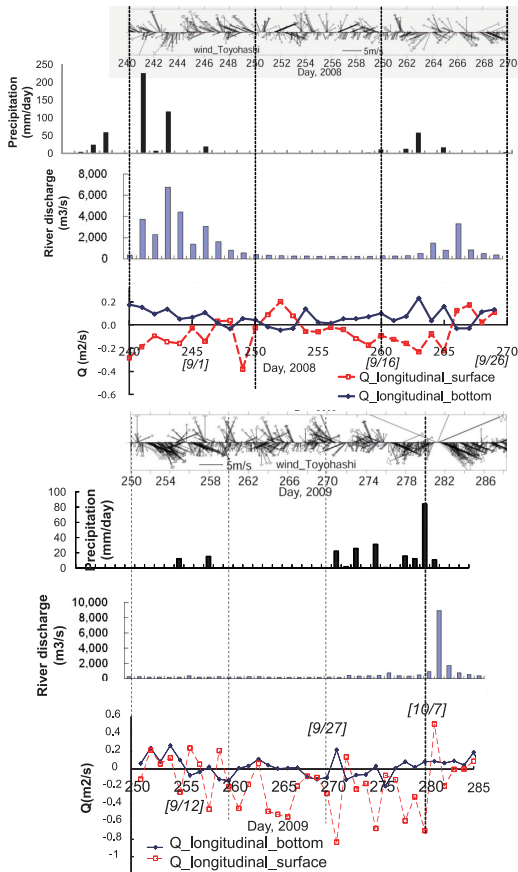


図-3 2008年(上)・2009年(下)の豊橋の風・降水量・河川流量・ADCPによる単位幅あたりの流量の分布

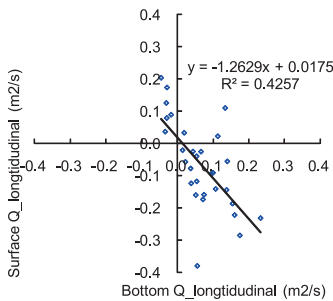


図-4 日平均の表層流量と底層流量の関係

では、TNが $0.38\sim 0.84\text{mg/L}$ 、DTNが $0.33\sim 0.60\text{mg/L}$ であった。リンについては、表層でTPが $0.04\sim 0.10\text{mg/L}$ 、DTPが $0.016\sim 0.069\text{mg/L}$ 、また底層では、TPが $0.06\sim 0.12\text{mg/L}$ 、DTPが $0.050\sim 0.094\text{mg/L}$ であった。なお、窒素については降雨後の濃度が高くなっているのに対し、リンについてはその傾向が見られないなど、窒素とリンの濃度の増減は必ずしも同期していないことがわかった。

2009年は、流軸上のポイント(図-1のSts.3-10)の表

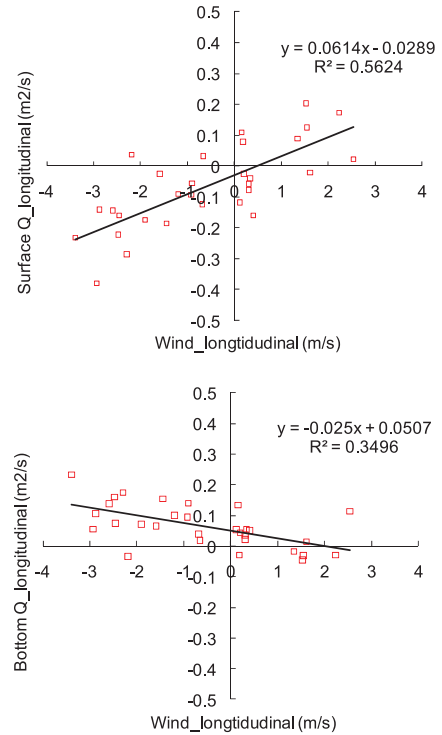


図-5 表層(上)および底層(下)の日平均流量と日平均風速の関係

層および底層で計5回の採水・分析を行った。これらの中から、9月4日(少雨期)と台風後(降雨後)の10月12日の栄養塩濃度の分布を図-8, 9, 10に示す。St.3は河口からの河川水の影響により、降雨の有無によらず表層の栄養塩濃度が他の地点より高かった。少雨期(9月4日)は河口付近のSt.3は表層で窒素とリンの濃度が高かったが、St.4で急激に低くなり、沖合まで低い状態であった。St.4~沖合は少雨期には河川水の影響が小さい範囲にあることや、流入した栄養塩が河口部に広がる干潟および浅海域で利用されたこと等が推察された。一方、底層ではこの時期にDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が非常に高かった。底層の栄養塩とDOを比較してみたところ、 $\text{PO}_4\text{-P}$ とDOの相関が $R^2=0.79$ であり、底層の高い $\text{PO}_4\text{-P}$ は底層での有機物分解や海底面からのリンの溶出がもたらしたものと推察された。ただし、DIN( $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ )については相関が低かった。降雨後の水質(10月12日)については、窒素とリンは全地点の表層で高くなっており、9月4日の濃度に比べると、2~40倍高かった。また、表層・底層間の濃度差も9月4日ほど大きくなかった。これは、降雨により栄養塩が多量に流入したことや、台風による強風のために鉛直混合が生じたためと思われる。図-10は、両時期のDINと $\text{PO}_4$ のモル比(DIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$ )を示しているが、少雨期には表層・底層とも、河口~沖合でほぼ

16以下となって窒素が植物プランクトンの成長制限になっているのに対し、降雨後にはいずれの地点でも16以上の値を示していることから、降雨による淡水流入により窒素が多量に供給されていることが推察された。以上より、河川流軸上での水質の短期的な変化としては、少雨期には密度成層下での有機物分解や貧酸素化の影響で、河口沖合底層でリン酸態リンの濃度が高くなるが、降雨後は逆に河川水の流入の影響で河口近くの表層で栄養塩の濃度が上昇することがわかった。

### (3) 河口浅海域への栄養塩輸送量の推定

エスチュアリー循環に伴う物質輸送の特徴を明らかにするために、循環が明確に捉えられた2008年の観測結果をもとに、循環による栄養塩の輸送量を推定した。ただし、物質輸送は2008年のSt.1と河口を結ぶ流軸上の断面内で2次元的に生じているものとして、単位幅あたりの流量と観測された栄養塩濃度から輸送フラックスを求めた。計算では、河口部沖合との交換のみを考察するため、河川からの流入、海底への堆積・栄養塩の再生、シ

ステム内の生物・化学的作用などは考慮していない。

図-11は、2008年の水質観測データとデータ取得期間ごとの平均流量をもとに算出した観測期間平均(夏期平均)の栄養塩の輸送フラックスを示したものである。水は表層が単位幅あたり $6,074\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$  沖合へ流出し、 $6,054\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$  底層から流入しており、netとして $20.2\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ が流出(+の場合が河口部への流入に対応)となった。TNとDIN( $=\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3$ )はそれぞれ、 $0.38$ 、 $0.02\text{kg}/\text{day}/\text{m}$ が流出したが、DTNは $0.39\text{kg}/\text{day}/\text{m}$ の

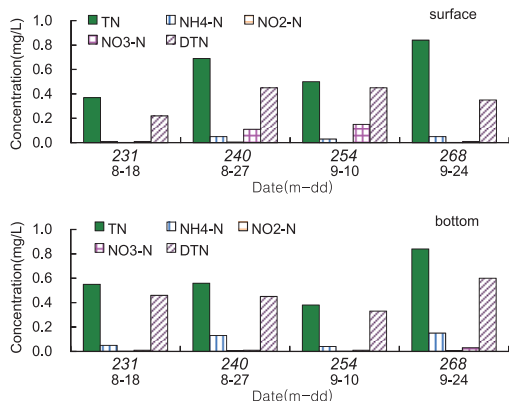


図-6 2008年の水質観測による「2008-St.1」の窒素の濃度分布 (上段: 表層, 下段: 底層)

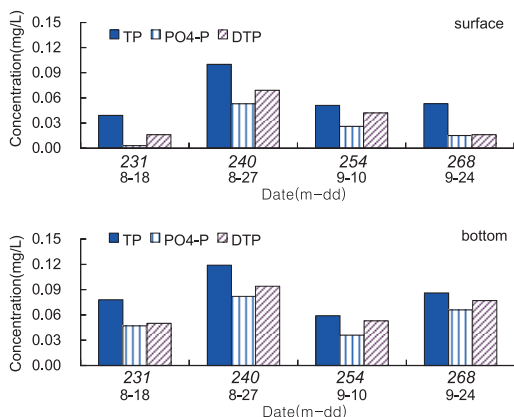


図-7 2008年の水質観測による「2008-St.1」のリンの濃度分布 (上段: 表層, 下段: 底層)

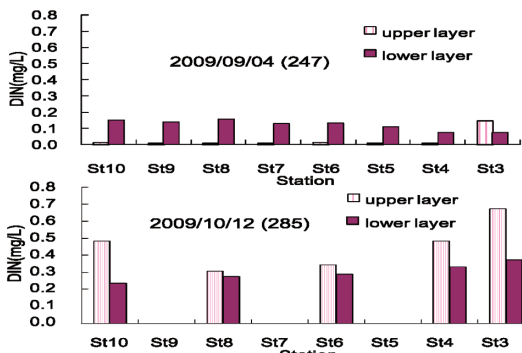


図-8 2009年の水質観測によるDINの流軸上の空間分布

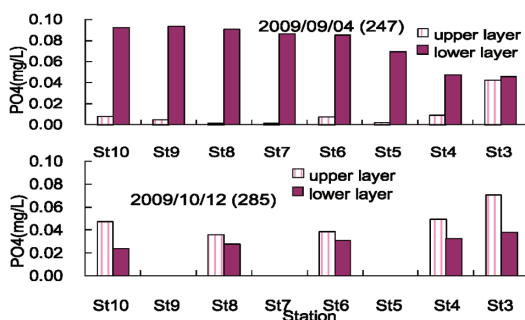


図-9 2009年の水質観測による $\text{PO}_4\text{-P}$ の流軸上の空間分布

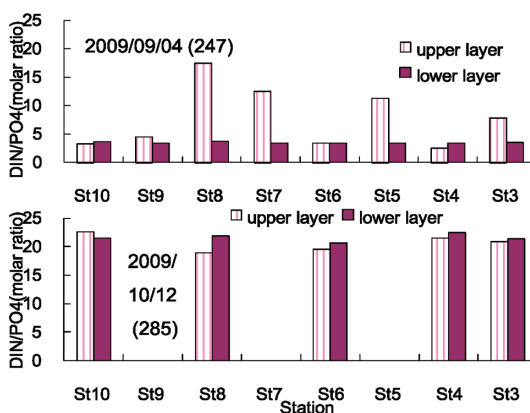


図-10 2009年の水質観測によるDIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$ のモル比の流軸上の空間分布



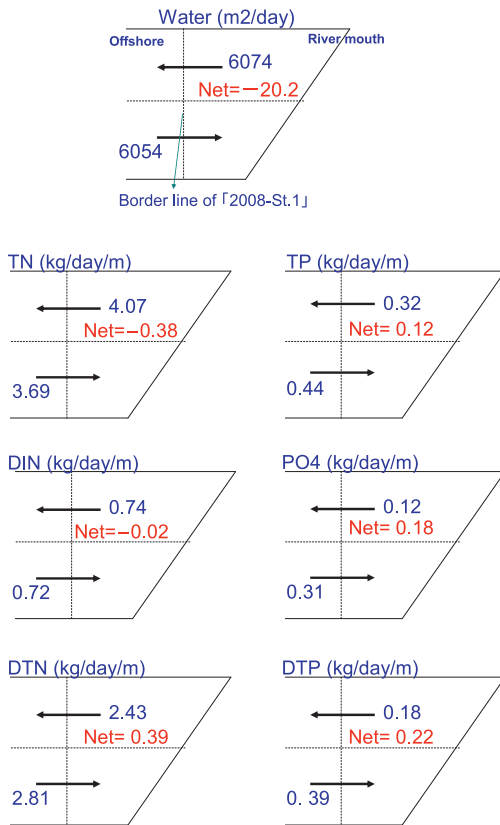


図-11 エスチュアリー循環による物質輸送フラックスの推定値（各図の右上が河口部に対応）

流入であった。一方、TP、PO<sub>4</sub>-P、DTPはnetで0.12、0.18、0.22kg/day/mの流入であったが、これは底層からの溶存態リン、特にPO<sub>4</sub>-Pの流入が多いことによる。以上より、エスチュアリー循環による栄養塩の輸送については、沖合底層水の高濃度のリンを浅海域に供給する機能を有しており、これにより浅海域の高い生産性が維持されていることが推察された。

#### 4. おわりに

夏期から秋期にかけて豊川河口沖で実施した2回の流れ及び水質の観測により得られた知見をまとめると以下

の通りである。

- (1) 2回の観測で差違が見られたものの、河口部浅海域においては、表層では沖側へ、底層では河口側へ流れる明確なエスチュアリー循環が期間を通して生じていた。この循環は流軸方向の風速成分と比較的よい相関を示すのに対し、河川流量との関係が明確でないことから、エスチュアリーを引き起こす直接的な要因は風であることがわかった。
- (2) エスチュアリー循環による栄養塩の輸送については、特に底層での有機物の分解や貧酸素化に伴って底泥から溶出した高濃度のリンを河口部に戻す機能を有しており、これにより河口浅海域の高い生産性が維持されていることが推察された。

**謝辞：**本研究に利用した現地データの一部は、国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所が豊川河口干潟に関する調査の一環として2008年度に取得したものである。データの利用および研究の実施に当たりご配慮いただいた、山崎真一前所長および畠山慎一現所長に感謝致します。また、本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費（B-0908）の支援により実施された。ここに記して謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 鈴木輝明・市川哲也・桃井幹夫（2002）：リセプターモードモデルを利用した干潟域に加入する二枚貝浮遊幼生の供給源予測に関する試み－三河湾における研究事例－。水産海洋研究，66（2），pp. 88-101.
- 八木 宏・鯉渕幸生・日向博文・灘岡和夫（1998）：東京湾湾奥部の水環境に与える河川水の影響について，海岸工学論文集，第45巻，pp. 986-960.
- 山根信之・寺口貴康・中辻啓二（1998）：大阪湾湾奥部のエスチュアリー循環と栄養塩収支，海岸工学論文集，第45巻，pp. 1061-1065.
- 山尾 理・笠井亮秀・藤原建紀・杉山陽一・原田一利（2002）：河川流量の変動にともなう伊勢湾のエスチュアリー循環流量・栄養塩輸送量の変化，海岸工学論文集，第49巻，pp. 961-965.
- Montani, S. (1994) : Scavenging processes of marine particles in the eutrophic coastal sea. NRCT-JSPS Joint Seminar on Marine Science., Chulalongkorn Univ., Bangkok 254 p.