

5. 三河港周辺域における海域環境評価に関する研究

建築・都市システム学系 教授 井上 隆信, 准教授 加藤 茂, 助教 岡辺 拓巳
客員教授 青木伸一 (H22 年度～H24 年度在籍)

5-1 はじめに

(1) 研究の背景

三河湾の湾奥に位置する三河港は、自動車貿易において国際的な基幹港となっているだけでなく、中部地域の製造業も集積しており、重要な物流・生産拠点として発展してきた。国際および地域的な経済基盤として港湾の役割が増す一方で、近年ではこのような大規模港湾にも環境への配慮が求められるようになってきた。国土交通省¹⁾は生物共生型港湾構造物として整備・維持管理に関するガイドラインを策定・公開しており、経済を支える港湾は地域環境の基盤保全にも目を向ける時代となった。

本研究テーマで対象とする三河港は、外海である太平洋と湾口を2つ隔てて接続することからも、閉鎖性の強い海域であることがわかる。そのため、夏季には港湾内で慢性的な貧酸素水塊の形成がみられ、この水塊の湧昇によって発生する苦潮（青潮）により、湾内の干潟では貝類の大量斃死が頻繁に確認されるなど、漁業被害も多く発生している。陸域に目を向けると、東三河の中核市である豊橋市や豊川市などを流域とする豊川（一級河川）が港湾に流入している。また、全国でもトップクラスの農業生産地域である渥美半島（豊橋市・田原市）には、広大な田畑が広がっている。このような農耕地を集水域とする中小河川も三河港に流入しているが、降雨時に栄養塩の大量流出が生じることや総量規制における面源の扱いなどが環境課題として指摘されている²⁾。こういった陸域と閉鎖性海域の特徴を背景とした三河港の慢性的な水質汚濁は、重要な環境問題として対策が模索されている。

一方、三河港の水環境が懸念される中で、三河湾では多種多様な漁業資源が比較的維持されている。中でも愛知県産のアサリは国内シェアの6割を占めており、三河湾内の沿岸漁業に欠かかせない。近年の全国的なアサリ漁獲量の急減の中で、比較的安定した供給が見込める重要な生産地であることから、三河湾の水質問題は全国的な漁業・食料問題に及ぶリスクとなっている。三河湾内の各漁場では、港湾内の豊川河口に広がる干潟（六条潟）で採捕した稚貝を放流用種苗とすることでアサリを生産しており、稚貝の供給を六条潟のみに依存する高いリスクを抱えた漁業構造となっている。また、港湾区域内でも、スナメリ³⁾やナメクジウオ⁴⁾などの絶滅の危機にある生物の生息が報告されており、生物多様性の保全や里海としての内湾環境の構築が強く求められている。

(2) 研究の目的

大型港湾や内湾における環境問題は、生物相の多様性や水環境の保全が重要である。閉鎖性の高い三河港での水質汚濁については、その発生要因とメカニズムを把握した上での対策が不可欠である。海域の水質保全に対しては、港内に流入する河川からの汚濁負荷を低減するとともに、湾奥全体の窒素、リンといった栄養塩の濃度を低下させる必要がある。また、貧酸素水塊の挙動や発生メカニズム、その影響範囲を明らかにする必要がある。また、生物共生型港湾として重要な役割を担う豊川河口干潟において、特に漁業との関連も深いアサリ稚貝の発生サイクルの解明は、三河港が経済発展と環境保全の両立を達成するためにも欠かせない。特に、港湾区域の埋め立てや豊川上流におけるダム建設といった港湾水域に大きく影響する計画もあり、生態系・漁場保全のための対策手法の確立は急務である。そのためにも、三河港周辺の陸および海域での栄養塩の動態や水理現象、海域での物質輸送の特性を、現地観測や数値計算によって解明することが重要である。

本研究テーマでは、貧酸素水塊の形成に密接に関わる港湾への栄養塩流入について、現地調査に基づいた降雨時の流出負荷を明らかにするとともに、この結果を踏まえた栄養塩の三河港への流入モデルを構築してその特性を検討する。また、港湾内に広がる干潟域における波・流れに加えて土砂動態の観測を行い、豊かなアサリ稚貝発生サイクルの保持のための物質輸送特性を検討した。

湾内の水質汚濁の原因には流入する河川流域や沿岸域における産業活動や、生活の影響が大きいといわれているが、陸域からの発生負荷量は水質総量規制によって減少傾向にある。しかし、現状では

三河湾の水質改善は見られない。この原因として考えられるのが非特定汚染源からの流入負荷量の推定方法である。現在の推定方法は平水時の調査結果を用いて算出しているが、降雨時に多くの栄養塩物質が流出するという報告があり、必ずしも正確な値が用いられていない可能性がある。そのため、正確な発生負荷量を降雨時調査によって明らかにする必要がある。ここでは、詳細な調査に基づく正確な負荷量算定手法およびモデルによる推定手法の構築について報告するとともに、問題となる畑地群における降雨時の栄養塩流出負荷量について検討を行った。これら陸域から港湾への栄養塩流出に関する研究については、5-2で述べる。

港湾内の水質環境は波や流れといった水理特性と強く関連する。六条潟は河川出水や風、高波浪や高潮といった高いエネルギーの自然外力に曝されており、干潟域での土砂移動は活発である。特に底質輸送と、それに関わる波や流れといった輸送外力の短期（気象・潮汐）～中期（季節）特性や干潟域での空間的な特徴は、アサリ稚貝の発生サイクルと密接に関わると考えられており、内湾干潟海域の環境保全に不可欠な情報である。ここでは、六条潟での多点波浪・流況観測を基にその特徴を把握する。また、稚貝発生メカニズムに関連すると推測されている干潟域での土砂動態を解明するため、着色砂をトレーサーとした土砂追跡調査を実施した。この解析方法として、画像解析を用いた低コストの土砂サンプル分析手法を構築して適用した。これら港湾奥部に位置する干潟域での物質輸送に関する研究については、5-3で述べる。

5-2 降雨時の栄養塩流出負荷量の解明

ここでは、三河湾奥部に流入する主要な中小河川である梅田川を対象とした栄養塩流出モデルを構築し、富栄養化の主な原因である窒素、リンの年間負荷量を算出する。また、降雨時における負荷量の影響を考察するため、降雨時、平水時別に流出負荷量を算出し比較検証を行った。面源からの流出負荷量に関しては栄養塩流出モデルに点源からの窒素、リンの発生負荷量を組み込むだけでなく、梅田川流域を土地利用別に分割することで面源からの窒素、リンの流出状況を把握した。

（1）栄養塩流出モデルの構築

①対象流域の概要

栄養塩流出をモデル化するのは、図 5-2-1 に示す愛知県豊橋市雲谷町を源流とする梅田川（二級河川）である。流域面積は45km²であり豊橋市を横断し三河湾へと流入する。流域の土地利用の割合は農耕地が全体の55%を占めており、河川に隣接する地域では水田が多く見られる。そのため流域は豊川用水を導水しており、季節ごとに流入量を操作しているため複雑な水の利用形態となっている。本モデルでは、水位計を設置した畑ヶ田橋（図中の●印）から上流域までを対象として構築を行った。

②モデルの概要

流域の各データを求めるためにまず、GISを用いて計算流域を決定し、500mメッシュに区切った。流域は数値地図25000(空間データ基盤)の50mメッシュ標高を基に落水方向を求め、畑ヶ田橋の集水域を計算した。各メッシュのデータ（降雨量、気温、風速、日射量、日照時間、湿度）をメッシュ毎に入力し、各メッシュの周囲4方向のメッシュとの標高を比較して最も勾配のある方向へ水が流れるとしてメッシュ間の落水方向を求めた。

鉛直方向に対して土壌部分を鉛直方向に3層（表層から順にA, B, Cレイヤ）、河川部分に1層（Rレイヤ）に分割した水分流出モデルを構築した。土壌部分のA, B, Cレイヤにはそれぞれ水平方向、鉛直方向の流出がある。水平方向の流出はすべて落水方向に従い、次のメッシュのRレイヤに流入することとした。鉛直方向の流出はA, Bレイヤの場合、その下層のレイヤが水で飽和していなければ下層のレイヤに移動するものとした。Cレイヤの鉛直方向の流出はそのまま地下水になることとした。また、降水による水分はAレイヤにのみ流入し、Aレイヤに水が存在する場合はAレイヤから蒸発、Aレイヤに水がなくBレイヤに水がある場合はBレイヤから蒸発するものとし、A, Bのどちらのレイヤにも水がない場合、蒸発はないものとした。また、流域内の点在する用水は、該当するメッシュのAレイヤへ入力した。各メッシュの蒸発量は地表面における熱収支式を用いて計算した。

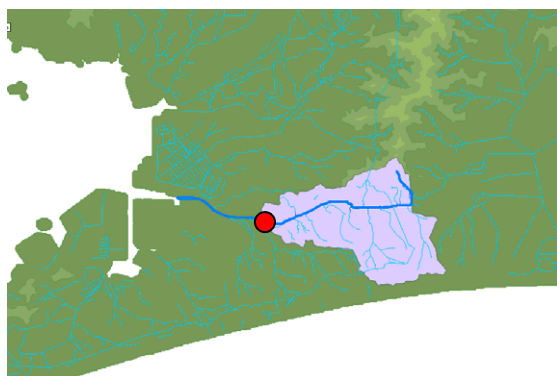


図 5-2-1 本モデルで対象とした梅田川の流域

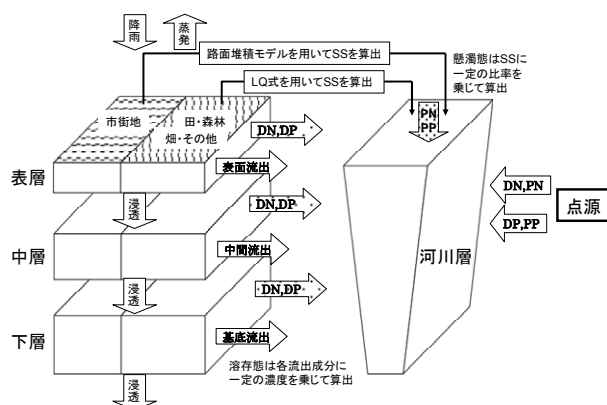


図 5-2-2 栄養塩流出モデルの概要

流量の計算では豊川で用いられたパラメータを初期値として与えた。愛知県によって行われている流量観測結果と、1 時間ごとの観測水位から水位流量曲線を用いて 1 時間ごとの流量を算出しその値を観測流量とした。この値と一致するように梅田川の未知のパラメータ値（水平・鉛直透水係数 α ）を試行計算により求め、このパラメータ値を用いて 2008 年の梅田川における流量を計算しモデルの適応性を検証した。また、2008 年の流量に一致するパラメータ値を求める際に次式の評価基準を用い、各基準で誤差が最小となるようにした。

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{ot} - Q_{st})^2} \quad (5.2.1)$$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{(Q_{ot} - Q_{st})^2}{Q_{ot}^2}} \quad (5.2.2)$$

ここで、式 5.2.1 は平均 2 乗誤差平方根を、式 5.2.2 は相対誤差の平均 2 乗平方根を示している。また、 n ：データ数、 Q_{ot} ：流量の観測値 (m/sec)、 Q_{st} ：流量の計算値 (m/sec) である。

上記の水分流出モデルにより計算した各層からの水分流出量を基に、栄養塩流出モデルを構築した。図 5-2-2 にモデルの概要を示す。栄養塩流出モデルで計算対象とした物質は、溶存態窒素 (DN)、懸濁態窒素 (PN)、溶存態リン (DP)、懸濁態リン (PP)、浮遊懸濁物質 (SS) である。DN, DP の流出量は各層の各土地利用からの水平方向の水分流出成分に一定の濃度を乗じて算出した。

SS の流出量は土地利用に応じて算出方法を使い分けて算出した。土地利用が建設用地の場合は路面堆積モデル、それ以外の土地利用の場合は LQ 式を用いて算出した。PN, PP の流出量はそれぞれ SS の中に一定の割合で存在していると仮定し、SS の流出量に一定の比率を乗じて算出した。ここで、DN と PN の合計を全窒素 (TN)、DP と PP の合計を全リン (TP) とした。また、これらの土壌層から流出した汚濁物質は水分流出モデルと同様に落水方向のメッシュの河川層に流入し運搬されることとした。点源からの窒素、リン流出は環境省による発生負荷量等算定調査報告書の値を用いた。このデータは市町村、流入する河川（支流）ごとに発生源別の負荷量が記載されているので点源からの窒素、リン流出量を当該メッシュの河川層に加えた。

③水分および栄養塩流出モデルの算出精度の検証

2008 年の観測流量に最も適合するパラメータ α を、式 5.2.1 および式 5.2.2 を用いて検討した。平水時や少量の降雨時については、両者による α を用いても精度よく再現できたが、8 月の洪水の前後に生じた流量のピークについては、相対誤差の平均 2 乗平方根を用いると精度よく再現できなかった。モデルに入力する降雨データには、レーダーアメダス解析雨量（1 時間雨量）を計算ステップ（1 分）の降雨量に換算して用いているため、短時間の集中的な降雨ではピーク流量が過小評価されてしまう

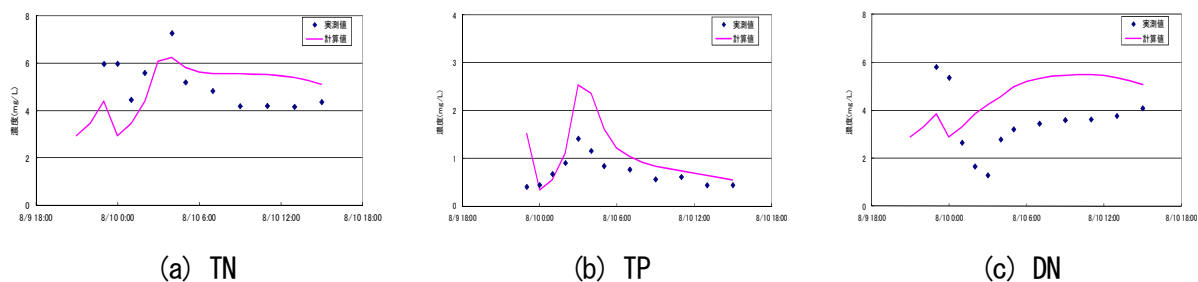


図 5-2-3 栄養塩流出モデルの算出結果（2009 年 8 月 10 日）

表 5-2-1 年間流出負荷量の算出結果と環境省による梅田川流域の発生負荷量の比較

	TN (t/year)	TP (t/year)
2008 年	351.9	24.6
2009 年	334.9	27.7
環境省の算出値	231.2	29.1

表 5-2-2 各土地利用流出負荷削減による 2008 年の年間負荷量比 (%)

	DN-10%	PN-10%	TN-10%
田	99.6	99.7	98.8
畑地等	97.5	96.2	93.9

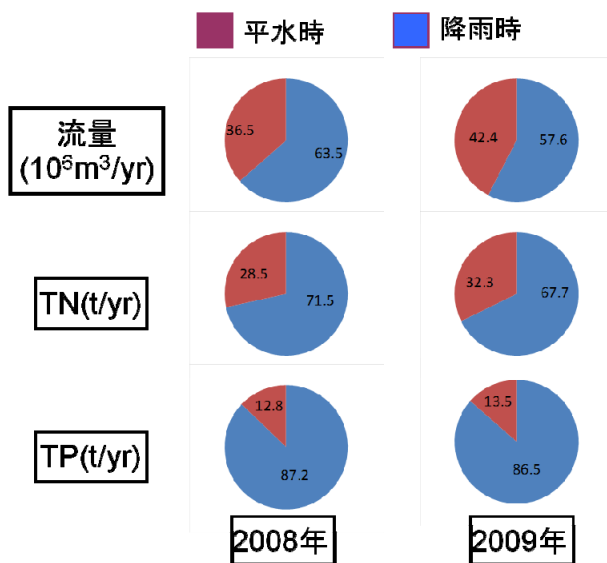


図 5-2-4 降雨時、平水時別の年間流出負荷量

ことが原因であると考えられる。平均 2 乗誤差平方根を用いた場合、低水時の流量を若干過大評価したがピーク流量、年間総流量は最も精度よく再現できており、降雨時の栄養塩流出をより正確に推定するために式 5.2.1 を用いて算出したパラメータ値を採用した。

次に、水分流出モデルで算出した各層からの流量を栄養塩流出モデルの入力として計算を行った。このモデルの畑地等以外の計算パラメータは、過去の研究より豊川の栄養塩流出モデルの値を用いた。畑地等については降雨時（2008 年 8 月 28 日）の観測値を用いてフィッティングを行った。路面堆積負荷流出モデルに関するパラメータは文献値を用いた。これらを用いて、2009 年 8 月 10 日と 2009 年 10 月 7 日の降雨時水質を計算し、観測値と比較してモデルの再現性を検証した。2008 年 8 月 28 日の降雨は時間雨量が 60mm を超え 226mm/日にも達する大きな降雨イベントだったのに対し、2009 年 8 月 10 日の降雨は最大時間雨量 32mm, 44mm/日, 2009 年 10 月 7 日の降雨は最大時間雨量 10mm, 58mm/日と異なる降雨形態であった。図 5-2-3 に 2009 年 8 月 10 日の降雨時の TN, TP および DN の再現結果を示す。これより、TP は実測値の挙動とよく一致しているが、TN は降雨直後に濃度が低下している。また DN は過小評価となり、雨の降り始めでの濃度低下が再現できていない。これは、降雨期間が短いため入力値の影響が大きくなり、実際よりも早く濃度が減少してしまうためである。これらのことより、本栄養塩流出モデルは降雨の形態により再現性に差が生じることがわかった。

④流出負荷モデルを用いた解析結果

本モデルを用いて 2008 および 2009 年における窒素、リンの年間流出負荷量を算定した。まず、各年の TN, TP の年間流出負荷量を算出し、環境省による梅田川流域の発生負荷量との比較を行った（表 5-2-1）。TP は環境省とほぼ等しい結果だが、TN はその 1.5 倍程度となっている。計算領域を梅田川河口まで含めた流域全体に拡大すると、さらに大きな値になると考えられる。

次に豊水流量（1年を通じて95日はこれを下回らない流量）を基準とし、これより多い流量を降雨時、少ない流量の場合を平水時と仮定してそれぞれの年間流出負荷量を算出した。図5-2-4に計算結果を示す。どの年もTNに比べてTPの方が降雨時に流出する割合が高くなった。また、TN、TPともに降雨時の流出量が7割となっていることがわかる。

最後に、梅田川の主要な土地利用である農用地を対象に、溶存態、懸濁態別に流出負荷量を10%削減した際の年間流出負荷量を算出し、各土地利用の削減効果を検討した（表5-2-2）。これより、畑地等での削減量が大きく、その効果が高いことがわかる。なかでも窒素よりもリンが削減されやすく、特に畑地等でのPP削減効果が有効である。これは懸濁態リンの大部分が土壌由来であり、畑地から流出するためと考えられる。

（2）現地調査に基づく流入負荷量算定手法の検討

ここでは、前項でモデル化の対象とした梅田川を対象とし、詳細な調査に基づく正確な負荷量算定手法について検討を行った。

①調査および水質分析の概要

調査は2010年4月から2011年3月までの1年間、潮汐の影響を受けない河口から約7km上流の畑ヶ田橋（図5-2-1中の●印）で実施した。自動採水器を用いて1日1回採水し、1週毎に試水を回収した。試水は平水時に加え、降雨時にも採水したものも含まれる。採水器のトラブルを除き、268日（年間の73%）の採水が実施された。降雨時調査は、水位が10cm上昇すると採水を開始し、その後1～3時間ごとに採水するとともに、試水は速やかに回収した。この調査は全18回（37日）実施し、両調査で計396回の採水を行った。また、調査地点では水位計により10分毎の平均水位を記録した。この水位から流量を算出するために、試水回収時に流量を測定して水位－流量曲線を求め、10分間平均流量を算定した。

試水は全窒素（TN）及び全リン（TP）分析用の試料を分取後、100℃で2時間焼いたガラス繊維ろ紙（GF/F Whatman）でろ過した。ろ液は溶存態窒素（DN）、溶存態リン（DP）の測定をした。TN及びDNはJIS K010に準じて測定した。TP及びDPはJIS K0102に準じて前処理後、リン酸態リンとしてオートアナライザー（Bran+Luebbe）を用いてモリブデンブルー（880nm）法で測定した。

②流出負荷の特徴

調査で得られたTN及びDN、TP及びDP濃度の経日変化を図5-2-5に示す。これらの値は三河湾の環境基準値（Ⅲ類型：TN0.6 mg/L以下、TP0.05 mg/L以下）と比べて10倍以上高い値であった。TN及びDNの濃度は、4月から6月にかけて流量が増加するのに伴い低下し、流量が減少する10月に上昇した後、12月から1月にかけては高く推移していた。この期間の平均濃度はTNで10.7 mg/L、DNで9.1 mg/Lと全期間の1.2倍高い値となっていた。TNに占めるDNは約90%と大部分がDNで存在していた。TPに占めるDPは約70%で窒素と比べて懸濁態の割合が高く、窒素ほど顕著な季節変化は見られないものの、12月から2月にかけて1.14、1.08倍とわずかに濃度が上昇していた。また、NP比について質量比で検討したところ、TN/TP比が年間の平均15.1、DN/DPで17.3でありいずれも窒素過多であった。流量が少なくなる12月ではTN/TP比が24.2、DN/DP比が25.1と更に窒素が過剰に存在していることが明らかとなった。

採水時刻の流量（m³/sec）と濃度（mg/L）を掛け合わせた負荷量（g/sec）を算出した。期間平均値はTNで10.20 g/sec、DNで7.99 g/sec、TPで0.75 g/sec、DPで0.51 g/secであった。降雨に伴い流量が増加すると負荷量が増加するが、それを除く定期調査の結果から負荷量は年間を通じて濃度変化のような経日変化は見られなかった。このことは、汚濁発生量は一年を通じて一定であり、梅田川の水質は、流量の変化に依存していることが明らかとなった。

③流出負荷量の算定

$L=aQ^n$ の関係式を仮定して、回帰により a 、 n を求めた。 n の値によって流出負荷量は $n>1$ で「溶脱型」、 $n \approx 1$ で「濃度一定型」、 $n<1$ で「希釈型」に分類できる。線形回帰より非線形回帰を用いる方が実測値に近ことが知られおり、次に示す推定法1、2により検討した。

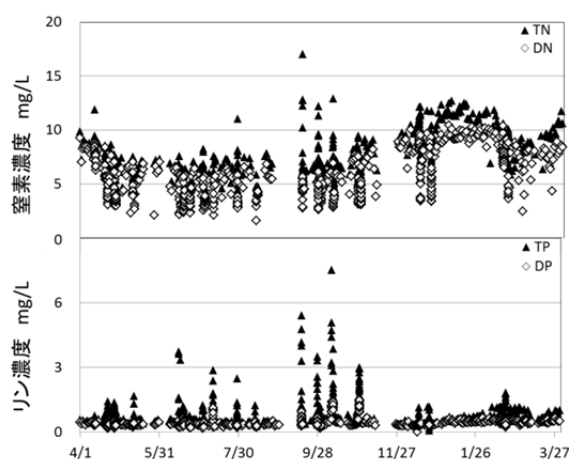


図 5-2-5 窒素・リンの経日濃度変化

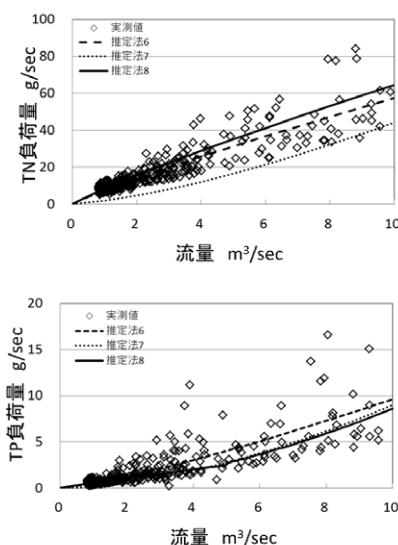


図 5-2-6 流量と負荷量の関係

推定法 1 は、 $\log L = \log a + n \log Q$ の線形回帰により a 、 n を決定した。求めた回帰式に連続流量の値を代入し Q の時系列データにし、年間で積算して算出した。推定法 2 は $L = aQ^n$ の形のまま回帰し、直接最小二乗法により誤差の総和を求め最小となるように a 、 n の値を決定した。推定法 1 と同様に回帰式に連続流量を代入し Q の時系列データにし、年間で積算することにより算出した。

これらの推定手法を用いて算出した窒素負荷量は、推定方法 2 が推定方法 1 より小さい結果となった。低流量時に、負荷量と LQ 式の関係は、TP では分布に即して近似されているが、TN では流量に対して負荷量が小さく算出されていた。そのため、この LQ 式にて算出した TN 年間負荷量は約 70% と過小に評価されたことがわかった。そのため、推定法 3 として、推定法 2 の係数 a 、 n を定期調査と降雨時調査に分けて算定し、両式の交点 x を求め、これを基準として連続流量データを代入する際に Q で評価し用いる係数を場合分けした。実測値および推定法 1～3 による算定結果を図 5-2-6 に示す。

推定法 1 では、TN、TP とともに実測値が多い低負荷量に依存しており、TN は希釈型、TP は溶脱型に分類された。それに対して、推定法 2 では TN、TP の n の値がそれぞれ 1.42、1.70 と「溶脱型」に分類され、流量増大に伴う高負荷量を反映していた。推定方法 3 では、低流量時は n の値が TN では 0.88、TP では 0.91 と希釈型であるのが、高流量時は TN では 1.65、TP では 1.68 と溶脱型になっており、降雨に伴う流量増大時には負荷量が大きくなることが反映された結果となった。

このことより、推定方法 3 では、一つの LQ 式では対応できなかった TN 負荷量との関係を、低流量時において分布に即して近似しており、高流量時では、より高負荷量に近似され実測に即した結果が得られた。この手法にて算出した TN 年間比負荷量は 8.9 t/year/km² であり、TP 年間比負荷量は 1.3 t/year/km² となった。

(3) 降雨時の栄養塩流出負荷量の解明

前項までに、陸域からの栄養塩流出量の正確な推定のためには、降雨時の負荷量算定が重要であり、梅田川においてもその特徴が現れていることを示した。ここでは、問題となる畑地群において降雨時の栄養塩流出負荷量について検討を行った。

①調査および水質分析の概要

調査地点は、豊橋市南部の台地の畑地群の中の農業排水路である。この用水路は晴天時には通常水は流れておらず、降雨に伴い流域の畑地等の表面流出水が流入する。そのため、畑地土壌等の濁水が流入するため、降雨に伴う畑地からの栄養塩流出調査には適している。調査地点には、水位・流速計、自動採水器を設置し、降雨に伴い水位が観測されると、1 時間ごとに自動に採水する。観測した水位と流速から流量を算出している。採水した試水は降雨後速やかに実験室に持ち帰り、懸濁態浮遊物質

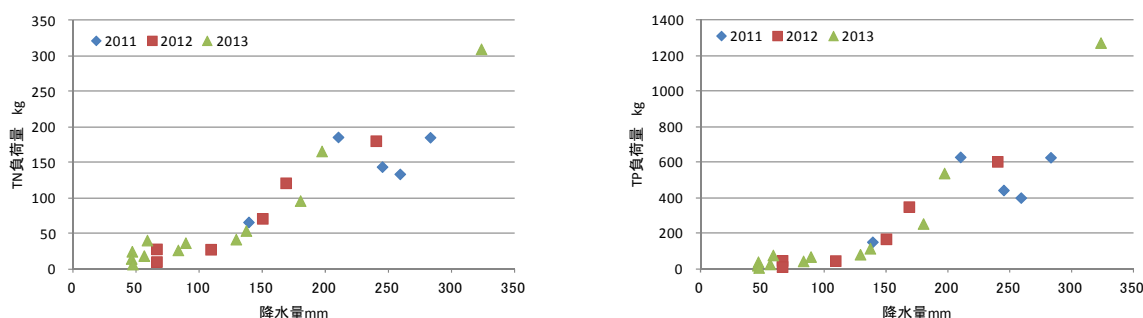


図 5-2-7 降水量と TN および TP 負荷量の関係

(SS)，全窒素 (TN)，溶存態窒素 (DN)，全リン (TP)，溶存態リン (DP) を測定した。TN から DN を差し引いて懸濁態窒素 (PN)，TP から DP を差し引いて懸濁態リン (PP) を算出した。降水量は豊橋気象台の値を使用した。調査期間は 2013 年 1 月から 12 月の 1 年間である。

②調査結果および考察

期間中、計 11 回の降雨時調査を実施した。降雨によって流量が増加すると、PN 濃度の上昇に伴い TN 濃度も上昇し、流量が減少すると PN 及び TN 濃度は減少した。一方、DN は PN 上昇の約 4 時間遅れで濃度が上昇し、そのまま推移する。このことは、PN と DN の流出挙動が異なることを示している。しかし、負荷量の変化は PN、DN 流量の増減と同じ挙動を示し、流量に大きく依存していた。

図 5-2-7 に過去の調査結果も含めた降水量と TN 及び TP 負荷量の関係を示す。降水量が多くなるほど負荷量が大きくなっていることがわかる。このことは、近年問題となっているゲリラ豪雨や猛烈に発達した台風の影響等で短時間に大量の雨が降ると、畑地からの表面流出に伴う栄養塩流出負荷量は降雨に大きく依存し、TN 及び TP 負荷量が増加することを示唆している。

5-3 港湾奥部に広がる河口干潟域での流れと土砂動態

環境共生型の大規模港湾において、干潟域は水質や生態系の保全に関して重要な役割を担う。本研究で対象とする三河港においても、湾奥部に豊川河口干潟（六条潟）が広がっており、漁業面ではアサリ稚貝の発生域として国内的に欠かすことができない干潟である。高潮や貧酸素水塊に曝されながらも毎年大量のアサリ稚貝が発生することから、そのメカニズムの解明することで健全かつ生物の豊かな干潟の構成要素を明らかにすることが求められている。ここでは、干潟域の物質輸送を支える波・流を現地観測データより明らかにするとともに、着色砂をトレーサーとした土砂動態調査を低労力で実施するための解析手法を構築する。

(1) 六条潟の波と流れ

①現地調査の概要

2012～2013 年に図 5-3-1 に示す地点で観測を実施した。図中の丸点で示した干潟上の 2 地点 (L1-2, L2-2) およびその沖側の 2 地点 (L1-4, L2-3) の計 4 地点において、水位変動と底層流速（水平 2 方向）を観測した。L1 および L3 の沿岸方向距離はおおよそ 1 km 離れている。また、L1 から L3 までの 5 本の岸沖測線において、夏場の大潮干潮時（2013 年 8 月 21 日）に断面測量を行った。

②波と流れの観測結果

ここでは、L1-4 地点にて観測された水位変動および流速データを概観する。図 5-3-2 は L1-4 で観測された水位および流速より算出した毎正時からの 10 分間平均水位、有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ 、毎正時からの 5 分間平均流速、流速の変動成分の rms 値の経時変化を示している。これより、冬季の六条潟における有義波高 $H_{1/3}$ は 1 m に満たないものの、0.5 m 程度の波高はかなりの頻度で発生していることがわかる。有義波周期 $T_{1/3}$ は $H_{1/3}$ が小さい時に増大しているが、これは水位変動が小さい条件下での波別解析に起因するものであり、実際にはうねりのような波浪は来襲していない。



図 5-3-1 豊川河口干潟（六条潟）における計測地点

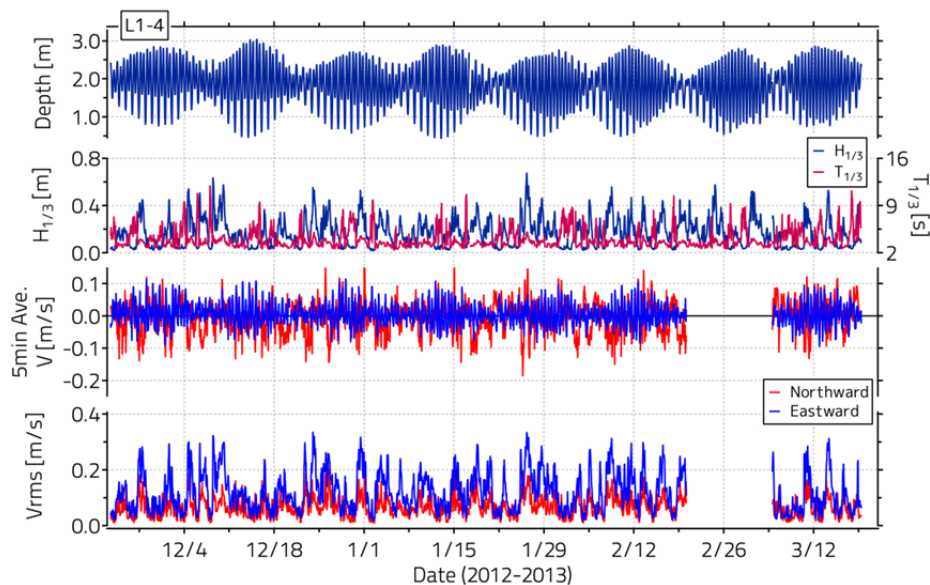
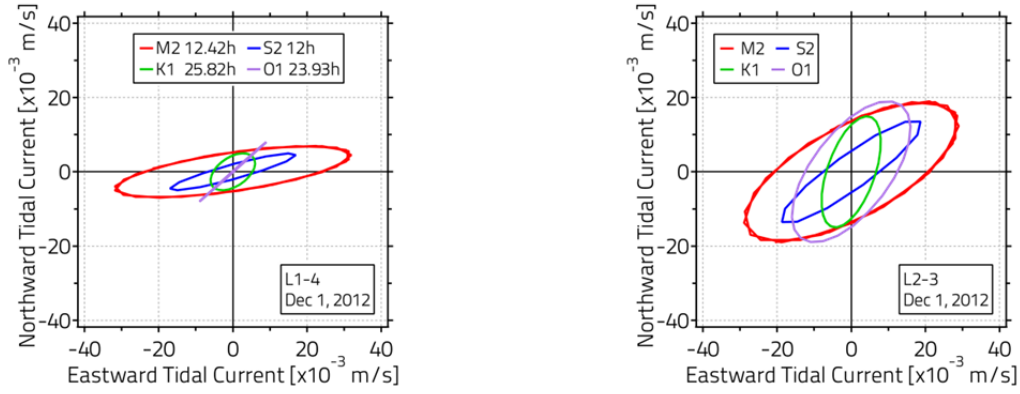


図 5-3-2 観測データ（水位・有義波高・有義波周期・流速）の経時変化（L1-4）

平均流速については、南北成分が東西成分と比較して大きく、 $H_{1/3}$ に対応して増大している。また、南北成分の強い平均流速は南向きに多く発生している。東西成分については周期的な平均流速の増加が見られ、これは朔望の周期と一致する。流速変動の rms 値は $H_{1/3}$ に対応した増大と減少が見られ、その大きさは東西成分の方が大きい。また、rms 値で 0.3 m/s 程度の流速も頻繁に観測されている。

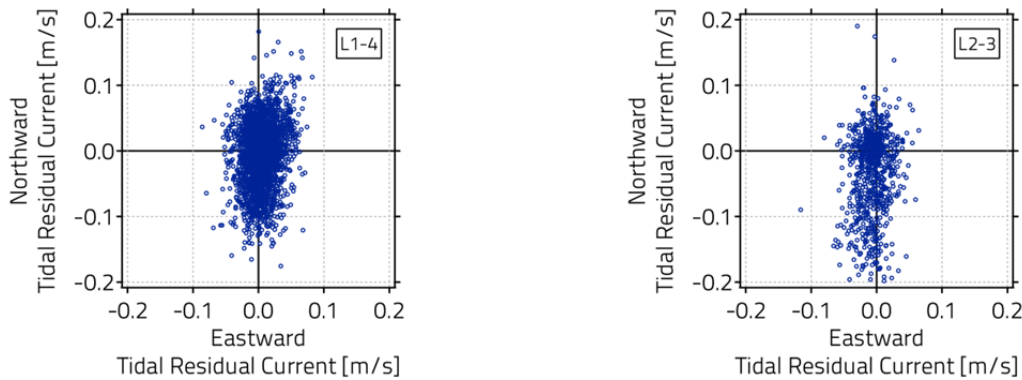
干潟上の中でも干出することのない沖側（L1-4 および L2-3）での冬季の流れについて、潮汐流とそれ以外の成分（潮汐残差流）に着目した解析を行った。潮汐流は観測流速（毎時の 5 分間平均値）の南北および東西成分毎に主要 4 分潮（ M_2 , S_2 , K_1 , O_1 ）で調和解析するとともに、それら潮汐成分を再構成した時系列と観測値の差分を潮汐残差流とした。図 5-3-3 は L1-4 および L2-3 における潮流楕円を、主要 4 分潮について示したものである。L1-4 における潮流楕円（図 5-3-3(a)）は、 M_2 および S_2 の半日周期成分が主に東西方向に強く現れており、長軸方向がやや北に傾いているのは河川（豊川）への入退潮が関連していると考えられる。 K_1 および O_1 の日周期成分については北東－南西方向が長軸となっており、南北成分の潮汐流も東西方向のそれと同等の大きさであることがわかる。L2-3 における潮流楕円（図 5-3-3(b)）は、それぞれの分潮成分の長軸が L1-4 と比較して北に傾いており、扁平率は小さい。日周期の潮汐流については L1-4 と比較して南北成分が大きい、これは解析期間が短いいため北西からの冬季の季節風の日周期変動の影響が含まれている可能性もあり、詳細な検討のために



(a) L1-4

(b) L2-3

図 5-3-3 L1-4 と L2-3 における主要 4 分潮の潮流楕円



(a) L1-4

(b) L2-3

図 5-3-4 L1-4 と L2-3 における潮汐残差流の位相面プロット

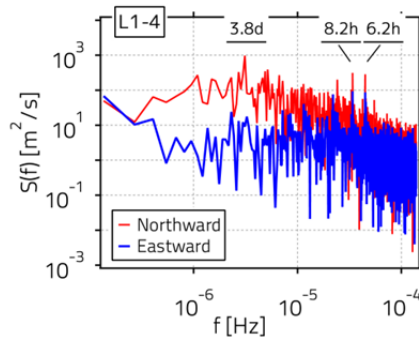


図 5-3-5 L1-4 における潮汐残差流のパワースペクトル

はさらに長期の連続観測データが必要である。

図 5-3-4 は L1-4 および L2-3 における潮汐残差流を位相面プロットで示したものである。両地点とも南北方向に強く、おおよそ南向きへの残差成分が強い傾向がある。ただし、短期的には北向きにも大きな残差流 (0.15~0.2 m/s) が見られる。東西成分は約 0.05 m/s の範囲に収まっており、潮流楕円の値 (図 5-3-3) から潮汐流の占める割合が高いことがわかる。図 5-3-5 は L1-4 における潮汐残差流の東西および南北方向成分についてのパワースペクトルを示したものである。対象とした潮汐残差流は 2012 年 11 月 22 日からの 2048 時間分のデータである。これより、半日程度の変動エネルギーについては、両方向成分ともに同様のピークが現れており、エネルギーも比較的同等である。変動が長周



図 5-3-6 作成した解析サンプル

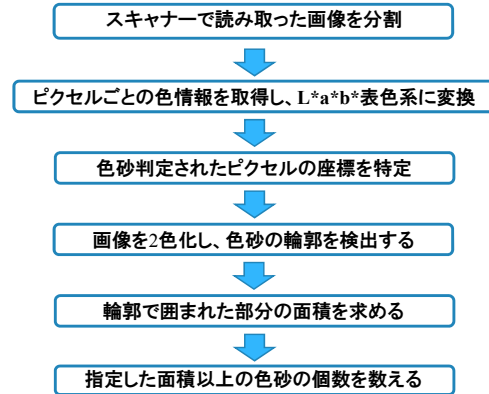


図 5-3-7 画像解析のフロー

期になるに従って南北方向成分のエネルギーが大きくなっており、約 3.8 日周期での変動にピークが見られる。これは、大陸からの移動性高気圧や低気圧が交互に日本付近を通るため変化する秋の天気（3～4 日程度）とおおよそ一致する。これらより、潮汐残差流の南北成分は天候の変化に伴った流れが支配的であることが明らかになった。

（２）着色砂トレーサーを用いた干潟域での土砂動態調査

トレーサーを用いて底質土砂移動をラグランジュ的に追跡する手法は古くから用いられている⁹⁾が、採泥した土砂の中から目視でトレーサーを検出する作業はコストも大きく、ヒューマンエラーが生じる可能性も否定出来ない。近年、画像解析手法を用いて、この検出作業の自動化が取り組まれているが、土砂の撮像方法などに一長一短があった。ここでは、身近にある資材とスキャナーを活用し、低コストのトレーサー検出手法を構築するとともに、これを六条潟での着色砂追跡調査に適用する。

①着色砂検出手法の構築

本手法では、分析に用いる土砂をケント紙の上に両面テープを用いて均して貼り付け、スキャナーでこの貼付け面の画像を取得した後、画像解析により着色砂の検出を行う手順とした。図 5-3-6 に作成した解析サンプルを示す。土砂サンプルを台紙に貼り付ける点が既往の研究と異なる特徴であり、均一に配置することができるため、紙面上の全ての土砂粒子を解析対象とすることができる。特殊な分析機器を必要としないため、安価で手軽に分析を行うことができ、画像解析により検出結果に一定の質を与えることができる。分析に用いる土砂量は、作業量や現地での代表性を検討し、乾燥重量で 100 g を用いることとした。

取得した画像は、図 5-3-7 に示したフローで解析する。画像からピクセルごとの色情報を取得し、RGB 表色系から色域が広く工学系の分野で用いられる $L^*a^*b^*$ 表色系に変換することで、背景となる自然砂と着色砂の弁別を精度よく行うことができる。次に着色砂の色特性とマッチするピクセルとそれ以外を 2 色化し、再度画像解析によって輪郭を検出する。輪郭内の面積によって、ノイズや砂粒子の重複などを判断した後、該当エリアのみを画像ファイルとして保存し、必要があればそれを目視により確認することで検出精度を高める。

この手法の検出精度について、既知の個数の着色砂トレーサーを混ぜたサンプルを作成し、本手法に加えて、通常検出作業で用いられるパレット上でのサンプル目視の検出個数を比較することで検討した。テストサンプルのベースは遠州灘海岸の砂（中央粒径 $D_{50}=0.30\text{mm}$ ）とし、着色砂は青色（山一サンド工業製スカイブルー）を用いた。検出結果を表 5-3-1 に示す。表中の（ ）内は、検出された着色砂画像を目視で確認し、誤検出である数を取り除いた値である。なお、スキャン画像の目視計数により、テストケース B-100-3 は紙面上に着色砂が 98 個しかなく、その他は投入数が計数された。これより、目視による計数では、着色砂数が 10 個までのケースにおいていずれの色も正確に計数されていたが、50 個、100 個と着色砂数が多くなるケースでは投入砂数との差が大きくなる結果となった。主な原因としては、計数する際の着色砂の見落としが考えられる。画像解析による検出では、B-5-1

表 5-3-1 各土地利用流出負荷削減による 2008 年の年間負荷量比 (%)

	着色砂 1 個			着色砂 5 個			着色砂 10 個		
テストケース名	B-1-1	B-1-2	B-1-3	B-5-1	B-5-2	B-5-3	B-10-1	B-10-2	B-10-3
目視による検出個数	1	1	1	5	5	5	10	10	10
画像解析による検出個数	1	1	1	16 (5)	5	5	11 (9)	10	10
誤検出の要因				d			d		
	着色砂 50 個			着色砂 100 個					
テストケース名	B-50-1	B-50-2	B-50-3	B-100-1	B-100-2	B-100-3			
目視による検出個数	46	48	49	97	98	96			
画像解析による検出個数	47	49	49	96 (95)	99	94			
誤検出の要因				c					

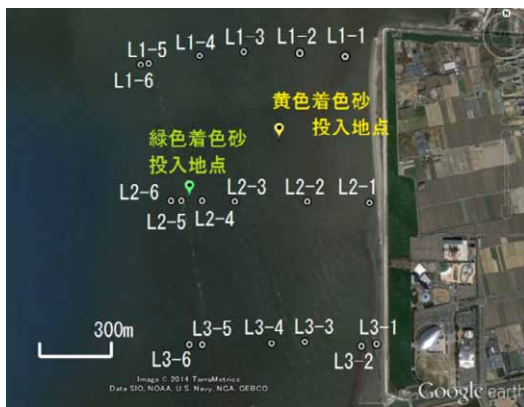


図 5-3-8 着色砂投入および採泥地点

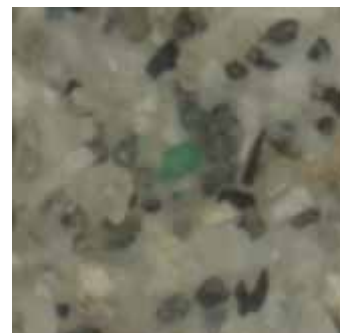


図 5-3-9 検出された緑色着色砂

表 5-3-2 2012 年 11 月 19 日採泥サンプルの緑色着色砂検出結果

地点名	L1-1	L1-2	L1-3	L1-4	L1-5	L1-6
緑色の検出個数	0	0	0	0	0	0
地点名	L2-1	L2-2	L2-3	L2-4	L2-5	L2-6
緑色の検出個数	0	0	0	2	0	0
地点名	L3-1	L3-2	L3-3	L3-4	L3-5	L3-6
緑色の検出個数	0	0	0	0	0	1

および B-10-1 で検出個数が真値よりも上回った。表中の誤検出要因 d は、保護フィルムの反射が着色砂と解析されたことが原因である。フィルム面が皺にならないようサンプルを作成することで防げるため、本手法の致命的な問題ではないと考えられる。また、目視同様に着色砂が多くなるに従って、投入砂数より少なく計数される傾向にある。これは着色砂と認識するための輪郭内面積の基準で変動することから、細かなゴミなどの誤検出を許しつつ検出もれがないよう設定をし、後に誤検出を取り除くような解析手順とすることで改善できると考えられる。

②六条潟での着色砂調査

図 5-3-8 に六条潟での着色砂投入および底質サンプリング地点を示す。ここでは、2012 年 11 月 14 日に投入した緑色着色砂について、5 日後の同年 11 月 19 日採泥した 18 サンプルを本手法で分析した。採泥サンプル内に含まれる着色砂の個数が未知であったが、図 5-3-9 のように本手法によって検出することができた。全体での検出結果を表 5-3-2 に示す。これより、着色砂投入地点に最も近い L2-4 において、2 個検出されている。その他、L3-6 で 1 個検出されているが、活発な土砂移動によって南方に移動したならば、その他の地点（例えば、L2-5 や L3-5 など）で検出される可能性が高いため、そ

の可能性は低いと考えられる。着色砂投入時に、海面に浮かんだ粒子が到達するなど、通常の土砂輸送以外の要因によって L3-6 に到達したと考えるのが妥当である。その他の地点では検出されなかったが、投入から 5 日後ということもあり、着色砂はまだ広範囲に移動していないものと推察される。

5-4 おわりに

本テーマでは、三河港およびその周辺の陸域を対象とし、陸から河川を通じて海域に流出する栄養塩の動態の特徴を数値モデルと現地観測によって明らかにするとともに、環境共生型港湾として湾内の生態系を支える干潟域での波や流れを調査するとともに、そこでの土砂動態を解明するための分析手法を構築・適用した。

栄養塩流出に関しては、三河港に流入する梅田川を対象として、水分流出モデルを基礎とした栄養塩流出モデルを構築し、観測データより計算パラメータを決定した。その結果、流出負荷算定において以前より指摘されている降雨時の栄養塩流出が梅田川でも支配的であり、調査に基づくその正確な量の把握が必要であることを明らかにした。また、流出負荷量算定のための現地観測では、河川流量と負荷量の調査結果を基にした TN および TP 負荷量推定式を、流量の高低に応じて使い分ける推定手法の有用性を示した。ポイントとなる降雨時調査からは、畑地群からの栄養塩流出が降雨強度に比例して増大することを示し、近年問題となっているゲリラ豪雨や巨大台風に伴う大雨によって流出負荷が増加する可能性を提示した。

豊川河口干潟（六条潟）に関しては、波や流れの特徴を現地観測データから検討した。干潟域での東西（岸沖）方向の平均的な流れは潮汐成分が、南北（沿岸）方向は風に対応した成分が卓越しており、特に冬季に強い北西風が吹く東三河地域ではそれに対応した流況が捉えられた。また、土砂動態をラグランジュ的に把握する着色砂調査を低労力で分析するため、画像解析を用いた分析手法を構築した。課題は残るものの、目視による検出に遜色ない手法を構築できた。さらに、この手法を用いて干潟での着色砂調査を実施した。投入から時間が経っていない底質サンプルを分析したところ、投入地点に近い採泥サンプルから着色砂を検出した。その他の採泥地点では検出されなかったが、トレーサーの投入間もない調査で検出されることは考えづらく、こういったことから本手法の有用性を示すとともに、今後の干潟域での着色砂トレーサー調査を低コストで実施できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：「生物共生型港湾構造物の整備・維持管理に関するガイドライン」，69 p.，2014.
- 2) 岩田杉夫・遠藤忠嗣・井上隆信・横田久里子・大久保陽子：「中小河川からの栄養塩負荷の流出特性」，水環境学会誌，Vol. 36，No. 2，pp. 39-47，2013.
- 3) 田口美緒子・吉岡 基・柏木正章：「三河湾湾口部におけるスナメリの分布密度の季節変化」，哺乳類科学，Vol. 47，No. 1，pp. 11-17，2007.
- 4) 堀越増興：「我国および諸外国に於ける海洋の自然保護の現状」，日本ベントス研究会連絡誌，Vol. 1，No. 1，pp. 11-20，1970.
- 5) 橋本宏・宇多高明：「蛍光砂を用いた漂砂の現地観測」，海岸工学講演会論文集，Vol. 22，pp. 335-338，1975.