

盤洲干潟周辺海域における岸沖方向の水質構造の 観測及びモデル化

神尾光一郎*・野村宗弘**・中村由行***

盤洲干潟周辺海域において, 2001 年及び 2002 年の 8 月に, クロロフィル a・栄養塩類を中心とした水質に関する集中観測を行い, 水質の岸沖方向の時空間変動特性を明らかにした. 次に二枚貝の捕食と排泄を考慮した水平一次元生態系モデルを構築し, 2001 年 8 月の観測データを再現した. 計算結果は, 観測結果の水質変動特性を概ね再現しており, 盤洲干潟は沖合の懸濁物のシンクと同時に無機栄養塩のソースとして機能していることが示された. また, 干潟上で生成した無機栄養塩が沖合の一次生産を維持しており, 干潟と潮下帯を中心とした物質循環が 1 日という比較的短い時間スケールで回転していることが示唆された.

1. はじめに

近年干潟や藻場の水質浄化能に注目が集まり, 各地で現地観測や生態系モデルなどを用いて, 浄化能の評価が行なわれている. しかしながら, 干潟は日射や干満に伴う冠水干出などの環境条件の変動が激しいため, 浄化能も大きく変動していると考えられる. このように干潟上の水質変動は, 日間変動, 特に冠水干出と日射との影響を強く受けると考えられるが, このような特徴に配慮した観測例は少ない (野村・中村, 2002). また, 生態系モデルによる物質循環の解析は, 季節的な変動に主眼がおかれ, 時空間的に詳細な観測データを基に検討した事例は非常に少ない (児玉ら, 2000).

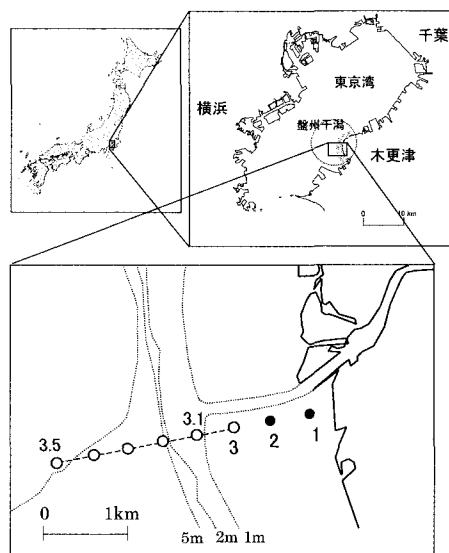
本研究の対象とする盤洲干潟は, 二枚貝が優占しており, これらが干潟周辺海域の物質循環に果たす役割は大きいと考えられる. 干潟に生息する二枚貝は, 大量の懸濁物を除去すると同時に (小沼ら, 2002), 無機栄養塩を排泄するため (Kuwae, 2002), 植物プランクトンの一次生産を促進する効果があることも指摘されている (Nakamura・Kerciku, 2000). このような二枚貝の代謝が盤洲干潟周辺海域の水質分布形成に果たす役割については明らかにされていない.

本研究では, 干潟から潮下帯において潮汐変動に伴う水質構造を明らかにするため, 2001 年及び 2002 年の 8 月に, クロロフィル a (Chl.a)・栄養塩類を中心とした集中観測を行った. これらの観測結果を元にして, 岸沖方向の水質分布を再現できる水平一次元生態系モデルを構築し, 二枚貝が干潟周辺海域の水質分布形成に果たす役割について考察する.

2. 現地観測

(1) 観測概要

現地観測は, 2001 年 8 月 6 日～10 日, 2002 年 8 月 21



図—1 観測測点図

日～23 日の 2 期間に, Chl.a と栄養塩類を中心とした集中観測を実施した. 観測測点は, 図—1 に示すように, Stn. 1～Stn. 3.5 の 8 測点とし, Stn. 1～3 は潮汐の干満によって冠水・干出し, Stn. 3.1～3.5 は常時冠水している. 2001 年では Stn. 1～3 において, 係留観測と自動採水器による栄養塩の採水を行なった. Chl.a については, Stn. 3 で 10 分間隔のデータが得られた. 栄養塩の採水については, Stn. 1 と 3 において自動採水器を設置し, 1 時間毎に海底上から 5 cm 高さの干潟直上水を採水し, 直ちに冷凍保存した. 採水したサンプルは, 実験室に持ち帰り, 栄養塩 (T-N, T-P, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) を分析した. 2002 年では, 干潟上 (Stn. 1～3) において係留観測, 干潟と潮下帯を含む測点において船上からの観測を行った. 係留観測については Stn. 1～3 において 10 分間隔で Chl.a データが得られた. 船上観測は, 船舶に多項目水質計を偽装し, 海面下約 0.5 m の水質観測を行った. 同時に表層水を採水し, 栄養塩分析 ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) に用いた. なお, 本論文では無機態窒素を DIN ($\text{NH}_4\text{-$

* 正会員 修(水) (株)東京久栄 環境創出部

** 正会員 博(工) 東北大学助手大学院工学研究科

*** 正会員 工 博 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部

$N+NO_x-N$) と称することにする。

(2) 観測結果

2002年8月22日における海面下0.5mのChl.a, DIN, PO_4-P の水平分布図を図-2に示す。この期間の潮汐と日射との関係は、朝と夕に冠水し、昼と夜に干出するパターンであった。①～③は下げ潮、④～⑥は上げ潮における水平分布を示す。Chl.aの分布は沖側で高く、岸側で低くなっており、一方、DINについては、逆の分布であった。また、Chl.aの岸沖方向の濃度勾配は、上げ潮時(④～⑥)において、大きくなっていることがわかる。

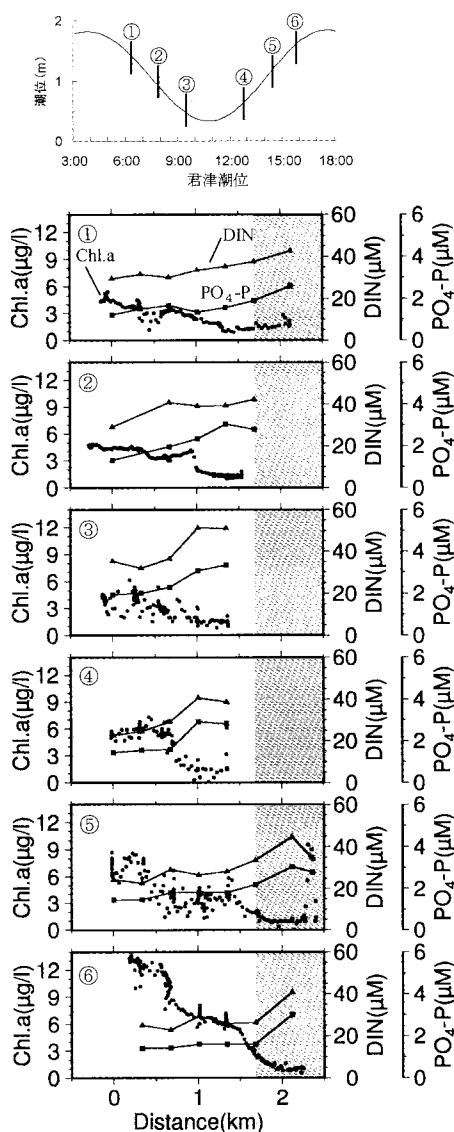


図-2 表層(約0.5m)におけるChl.aと無機栄養塩(DIN, PO_4-P)の水平分布。横軸は、Stn.3.5からの距離を表し、ハッチをかけた領域は、Stn.3から岸側の領域を示す。

次に、2001年8月7日～9日における干潟上のChl.aとDINの各測点における時間変化を図-3に示す。潮汐と日射との関係は、2002年8月と同様であった。Chl.aについては、満潮時に高く、干潮時に低く、DINは逆のパターンであった。これは、潮間帯の岸沖方向に空間的な勾配が形成され、その水塊が流入することにより潮汐に応じた変動があるとした既報(野村・中村, 2002)から説明できる。なお、DINの大部分は NH_4-N であった。このような岸沖方向に水質の濃度分布が形成される原因は、干潟上において、底泥からの供給あるいは消費を受けた結果であると考えられる。また、1潮汐目と2潮汐目を比較するとChl.aについては1潮汐目で高く、DINについては2潮汐目で高くなっていることがわかる。1潮汐目は、昼間沖合で光合成によって増殖した水塊が流入し、2潮汐目では夜間であるため光合成が行われないうまま、干潟内へ流入した結果を反映しているものと推察される。

野村・中村(2003a)は、沖合へ流出した干潟直上水が数時間で増殖し、上げ潮時に再流入してくる可能性を探るため、現地において培養実験を行った。実験は、2001年8月7日の干潟直上水と沖合水との混合水と沖合水のみ2つの試水を同条件下において培養し、Chl.aと無機栄養塩を経時的に測定した。Chl.aについては、両試水とも増加の傾向を示したが、特に干潟直上水との混合水については7時間で約4倍の濃度に達した。同時に無機栄養塩濃度も減少していることから、光合成によって栄養塩を利用した結果を示しており、沖合へと流出した干潟直上水中の無機栄養塩は、沖合で植物プランクトンに取り込まれ、有機態として干潟へと再流入してくる可能性が示唆される。

以上を総合的にまとめると、上げ潮時に沖合から濃度の高い懸濁態有機物が干潟内へ流入し、干潟内へと吸収され、同時に無機態栄養塩が干潟から放出されていることが明らかになった。盤洲干潟において、底生生物は二枚貝が優占していることが報告されている。Chl.aと無機栄養塩の岸沖方向の分布は、二枚貝による捕食(小沼ら2002)と排泄(Kuwae 2002)、干出時に底泥に蓄積した栄養塩の溶出(Kuwaeら, 2003)が関連している可能性が考えられる。また、培養実験結果より、干潟から放出された無機栄養塩は、沖合で植物プランクトンに取り込まれ、再び懸濁態有機物として干潟へ流入してくる可能性が示唆された。

3. 生態系モデルによる解析

(1) 生態系モデルの概要

観測結果によって、盤洲干潟から潮下帯における水質構造は、岸沖方向に濃度勾配をもつことが明らかになっ

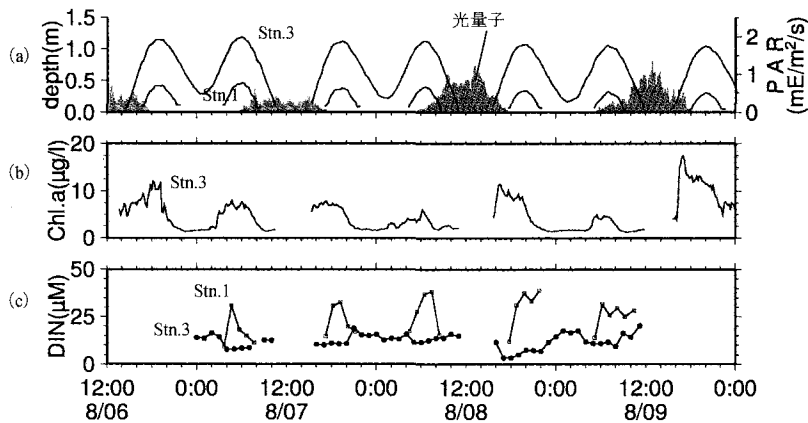


図-3 2001年8月における水質の時間変化。(a) 水深・光量子, (b) Chl.a, (c) DIN.

た。また、干潟から潮下帯における海域は、水深が浅く鉛直方向の水質分布も概ね一様と考えられる。そこで、岸沖方向の水質変化を水平一次元のボックスモデルによって再現することを試みた。ボックスは、図-1に示される測点がボックスの中心となるように8つに分割した。計算範囲は、岸沖方向に干潟から潮下帯を含む約3 kmの範囲の海域とした。再現する期間は、2001年8月8日～9日の2潮汐とした。モデルの変数は、植物プランクトン(PHY)、無機態窒素(DIN)、デトライタス(DET)の3つからなり、素過程として、植物プランクトンの光合成、無機化、枯死、二枚貝の被食と排泄、底泥からの溶出、デトライタスの分解、沈降、水平移流を考慮した。水平移流は、タイダルブリズムによって起こるものとし各ボックスにおける水深変化からボックス間の流量を算出した。水平移流を除いた各素過程のモデル式と用いたパラメータを表-1と表-2に示す。これらの大部分は、中田(1993)を参考にしてしている。底泥からの溶出については、チューニングパラメータとして一定値を与えた。基礎式を(1)～(3)に示す。

$$\frac{\partial(\text{PHY})}{\partial t} = B01 - B02 - B03 - B04 - B05 \dots (1)$$

$$\frac{\partial(\text{DIN})}{\partial t} = -\mu \cdot B01 + \mu \cdot B02 + (\mu \cdot B04 + B05) \cdot (1 - \lambda) + B06 + B07 \dots (2)$$

$$\frac{\partial(\text{DET})}{\partial t} = \mu \cdot B03 - B07 - B08 - B09 \dots (3)$$

二枚貝による被食は、濾水速度にChl.aとデトライタスの濃度を乗じることで求められる。濾水速度については、アサリ個体の大きさと水温に依存した濾水速度の関係(細川ら, 1996)を参考に、観測期間の平均的な水温25°Cにおける濾水速度を求めた。次に小沼ら(2002)によって、潮間帯(BOX 6～8)で得られた1 m²あたりの殻長別の二枚貝(アサリ・シオフキガイ・バカガイ)の個体数

から、各ボックスにおける単位面積あたりの濾水速度を算出した。また、潮下帯においても二枚貝は、生息しているが、ここでは潮下帯(Stn.3.1～3.5)での二枚貝のデータがないため、Stn.3.1においてStn.3の1/3の濾水速度を与えた。各ボックスで与えた濾水速度を図-4に示す。沖合の境界条件は、Chl.aとDINについては、2001年8月の盤洲沖合で得られたデータ、デトライタスについては、Miyataら(1986)を参考にして与えた。

(2) 計算結果

計算のタイムステップは、600(s)で計算し、濃度分布が干満のサイクルに応じた周期的定常解が得られるまで行った。1潮汐目の上げ潮(BOX 8冠水直後)・満潮・下げ潮時(BOX 8冠水直前)における各ボックスのChl.aとDINの濃度分布を示す(図-5)。横軸は、BOX 1の中心からの距離、縦軸は濃度を表す。計算結果は、Chl.a、DINともに岸沖方向の分布特性を概ね再現していることがわかる。Chl.aが常に岸側で低濃度になるのは、二枚貝の捕食によるものであり、DINが岸側で高くなるのは、二枚貝の排泄と底泥からの溶出によるものである。また、計算結果は、沖合ほどChl.a濃度が高くなっており、これは、干潟上で生成したDINが沖合(潮下帯)の一次生産を維持していることを示している。

BOX 6(Stn.3)におけるChl.aとDINの時間変化を図-6に示す。Chl.aの計算値は、上げ潮時に沖合から濃度の高いChl.aの流入、満潮付近でChl.a濃度が最大となり、下げ潮時では低濃度のChl.aの流出しており、観測値とも概ね一致している。DINの計算値は、冠水直後に底泥からの溶出により濃度が大きくなるが、その後沖合から濃度の低い水の流入、満潮付近でDIN濃度が最小となり、下げ潮では岸側から高い濃度のDINが沖合へ流出するため濃度が増加しており、観測値とも概ね一致している。

以上のことから、この水平一次元の単純なモデルでも

表-1 各素過程のモデル式

素過程	モデル式	パラメータ
増殖:	$B01 = v(T) \cdot \mu(N) \cdot \mu(I) \cdot \text{PHY}$ $v(T) = \alpha_1 \cdot \exp(\beta_1 \cdot T)$ $\mu(N) = \frac{N}{K_N + N}$ $\mu(I) = \frac{I_z}{I_{opt}} \exp(1 - \frac{1}{I_{opt}})$ $[I_z = I_0 \exp(-k \cdot z)]$	α_1, β_1 K_N I_{opt} k
無機化:	$B02 = \alpha_2 \cdot \exp(\beta_2 \cdot T) \cdot \text{PHY}$	α_2, β_2
枯死:	$B03 = \alpha_3 \cdot \text{PHY}$	α_3
被食:	$B04 = \frac{V_f}{H} \cdot \text{PHY}$	V_f
沈降:	$B05 = \frac{W_y}{H} \cdot \text{PHY}$	W_y
溶出:	$B06 = \frac{R}{H}$	R
分解:	$B07 = \alpha_4 \cdot \exp(\beta_4 \cdot T) \cdot \text{DET}$	α_4, β_4
被食:	$B08 = \frac{V_f}{H} \cdot \text{DET}$	V_f
沈降:	$B09 = \frac{W_y}{H} \cdot \text{DET}$	W_y

表-2 パラメータ値

パラメータ	記号	値	単位
最大成長速度	α_1, β_1	$0.59 \cdot \exp(0.0633 \cdot T)$	1/day, 1/°C
最大飽和度	I_{opt}	445	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
消散係数	k	0.1	1/m
半飽和定数	K_N	0.014	g/m^3
無機化速度	α_2, β_2	$0.03 \cdot \exp(0.054 \cdot T)$	1/day, 1/°C
枯死速度	α_3	$2.0 \cdot 10^{-4}$	1/gChl.a/day
デトリタスの分解	α_4, β_4	$0.02 \cdot \exp(0.0633 \cdot T)$	1/day, 1/°C
濾過速度	V_f	図-4 参照	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$
植物プランクトン窒素含有量	μ	8.86	$\text{gN}/\text{gChl.a}$
二枚貝同化率	λ	0.5	-
底泥溶出速度	R	600	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$
沈降速度	W_y	0.5	m/day

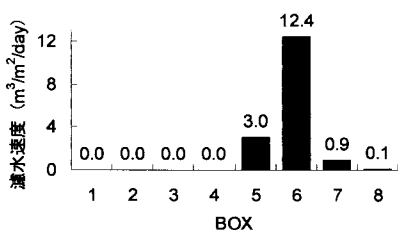


図-4 各ボックスで与える濾水速度

干潟から潮下帯における水質分布をある程度表現できると考えられる。干潟内へ流入してくる植物プランクトンの大部分が、二枚貝の捕食によって干潟へ吸収され、さらに一部は無機栄養塩として潮下帯へ流出し、植物プランクトンに利用され、再び干潟内へ有機態として流入するという循環をモデルによって示すことができた。しかしながら、図-5に示されるように、最も岸側におけるDINの計算値と観測値を比較すると前者が過小評価されていることがわかる。この原因として、各ボックスでの底泥からの栄養塩の溶出の与え方が適切でなかったこ

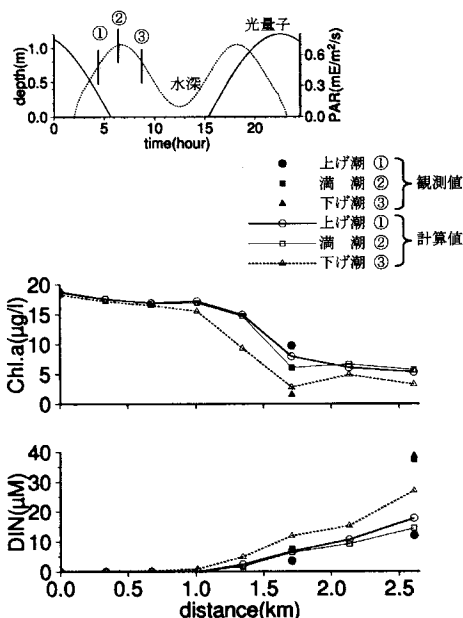


図-5 上げ潮・満潮・下げ潮のChl.aとDINの水平分布。横軸はStn.3.5からの距離を表す。

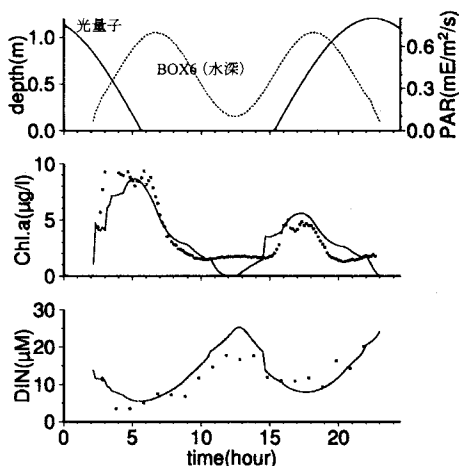


図-6 BOX 6 (Stn.3) におけるChl.aとDINの時間変化。実線は計算値、点線は観測値。

とが考えられる。岸側では二枚貝以外の生物によるホソウミナヤ或多毛類などが優占している場合があり、これらの生物による排泄が大きく寄与しているのか、あるいは干出時間の差異による底泥中の栄養塩濃度の違いによって(Kuwaeら, 2003), 岸側で栄養塩の溶出が大きくなった結果などが考えられるが、現データでは判断し難い。小櫃川からの栄養塩の供給の可能性は、公共用水域の水質データから判断すると、干潟上のDIN濃度変動に与える影響は無視できると考えられる。

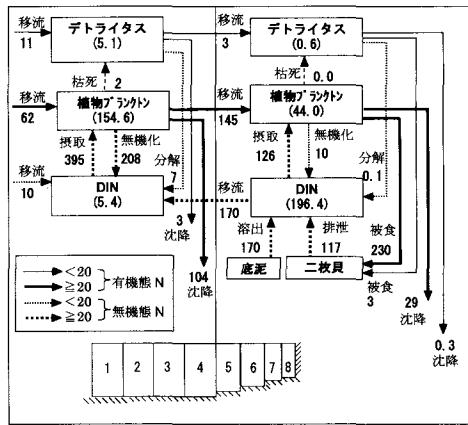


図-7 物質循環図。矢印の単位は $\text{gN}/2$ 潮汐、括弧中の単位は、 $\mu\text{gN}/\text{l}$ を表す

(3) 2 潮汐における物質循環

2 潮汐における物質循環図を図-7 に示す。二枚貝の濾水量を与えた海域である BOX 5 から岸側と、濾水量を 0 とした BOX 4 から沖側の海域に分けて物質循環図を示した。実線は有機態窒素、点線は無機態窒素を表し、値が 20 未満のものは点線、それ以上のものは太い実線で表した(単位: $\text{gN}/2$ 潮汐)。また、括弧中の値は、2 潮汐の平均値(単位: $\mu\text{gN}/\text{l}$)を示している。二枚貝は、取り込んだ植物プランクトンとデトライタスの半分を DIN として排泄し、また底泥から溶出した DIN とともにその場の植物プランクトンにも取り込まれるが、半分強の DIN が沖合へ流出し、沖合の植物プランクトンの維持に用いられる。一方、沖合の植物プランクトンが再び干潟域へ流入し、一部は沈降するが、その大部分は二枚貝に捕食され再び DIN となっていく。盤洲干潟は沖合の有機態懸濁物(主に植物プランクトン)を吸収し、吸収した有機態窒素とほぼ同量の無機態窒素を潮下帯へと放出していることがモデルによって示された。この結果は、干潟と潮下帯を中心として、1 日程度の比較的短い時間スケールで栄養塩が循環していることを強く示唆しており、底生系と浮遊系のカップリングが効率よく機能していることを示している。

4. おわりに

本研究では、夏季の盤洲干潟周辺海域において、Chl.a と栄養塩を中心とした集中観測を行い、潮汐変動に伴う

水質変動を明らかにした。さらに、詳細な観測データを基にモデル解析を行い、干潟-潮下帯における物質循環を定量的に示した。本論文では、日中の大部分が干出ししているケースを対象としたが、日中の大部分が冠水しているケースでは、底生藻類や植物プランクトンによる無機栄養塩の吸収によって、無機栄養塩はシンクとなる場合もある事が報告されている(野村・中村, 2003 b)。今後、日射と冠水干出のタイミングによる影響を表現するためには、底生藻類などの生化学過程なども含めて考慮する必要があると考えられる。

謝辞: 本研究の一部は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」からの助成及び環境省地球環境保全等試験研究費の補助を受けて行なわれたことを付記する。

参考文献

- 児玉真史・水田健太郎・松永信博 (2002): 干潟における一次生産の空間分布, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1106-1110.
- 小沼 晋・五島勇樹・中村由行 (2002): 成長モデルを用いた東京湾盤洲干潟での二枚貝による懸濁物除去量の推定, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1126-1130.
- 野村宗弘・中村由行 (2002): 盤洲干潟における潮汐に伴う水質変動に関する現地観測, 水環境学会誌, 第 25 巻, 第 4 号, pp. 217-225.
- 野村宗弘・中村由行 (2003a): 東京湾盤洲干潟における岸沖方向の水質分布観測, 第 37 回日本水環境学会年会要旨集, pp. 257.
- 野村宗弘・中村由行 (2003b): 盤洲干潟の大潮・小潮における水質観測と栄養塩収支, 用水と廃水, 第 45 巻, 第 11 号, pp. 1053-1061.
- 中田喜三郎 (1993): 生態系モデル-定式化と未知のパラメータの推定法-, 海洋工学コンファレンス論文集, 第 8 号, pp. 99-138.
- 細川恭史・木部英治・三好英一・桑江朝比呂・古川恵太 (1996): 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, 港湾技術研究所資料, No. 844.
- Kuwae, T. (2002): Factors affecting nutrient cycling in intertidal sandflats, Report of Port and Airport Research Institute, Vol. 41, No. 1, pp. 91-134.
- Kuwae, T., E. Kibe and Y. Nakamura (2003): Effect of emersion and immersion on the porewater nutrient dynamics of an intertidal sandflat in Tokyo Bay, Estuar. Coast. Self Sci. Vol. 57, pp. 929-940.
- Miyata, K. and A. Hattori (1986): Distribution and seasonal variation of phosphorus in Tokyo Bay, J. Oceanogr., Vol. 42, pp. 241-254.
- Nakamura, Y. and F. Kerciku (2000): Effects of filter-feeding bivalves on the distribution of water quality and nutrient cycling in a eutrophic coastal lagoon, J. Mar. Syst., Vol. 26, pp. 209-221.