

干潟の環境特性調査と生態系数値モデル化への方法

大島 巖*・畑 恭子**・蔵本武明***
堀口孝男****・中田喜三郎*****

1. はじめに

1970年代の後半から北海、英国沿岸、米国東西沿岸部などにおいて、植物、動物を含むプランクトン、そして数は多くないもののベントスの Dynamics に関する研究が活発に行われ、生態系の構造とそれに基づく物理的、化学的、生物的諸量の計量的研究は急速に進展している。一方、わが国においては湾域、特に閉鎖性水域における干潟、浅場の環境面に果たす種々の役割について研究が進められ、開発による環境被害とそれを相殺するミチゲーション手法の展開など、沿岸環境を巡る情勢は著しく変わりつつある。かかる状況から、干潟における現象の把握と解析、それらによる干潟の持つ機能、環境改善への効果、その効果をより大きくさせる方策を検討するとともに、干潟の生態系・物質循環系の計量的な数値モデルの策定を試みたのがこの論文である。本論では東京湾内の盤州干潟を対象にして研究を進めているが、干潟には共通する部分と独自の個性をもつ部分とがあり、これに充分配慮する必要がある。

2. 盤州干潟の環境特性

千葉県木更津市の沖合に展開する盤州干潟は、A. P. 1.0 m 以浅で約 1440 ha の面積をもち、アサリ、バカガイなどの産地として知られている。今回の調査では、干潟南側小櫃川の周辺で図-1 に示すように西側へ測線を設定し、6ヶの測点を設けている。測線に沿う地形の断面と測点の位置、標高並びに潮位との関係は図-2 に示される。

干潟の環境特性調査は夏期（9月）と冬期（2月）に分け、'89年9月から4年間にわたって行われている。以下に述べるのは主に89年9月と翌年2月の調査によるものである。

(1) 干潟上に冠水、干出する水域の水質については、水温、塩分、栄養塩類、懸濁態・溶存態の C, N, P を測

定している。その結果の一例を図-3 に示す。図-3 から判明するように、測点⑥から①に向けて懸濁態の POC, PON, POP 濃度は 1/3~1/2 まで減少し、逆に無機態の DIN, PO₄-P, S₂O₃-S₂が増加している。これらの現象は後述する底生生物の懸濁物食者（アサリ等）と付着藻類が、沖合から岸側にかけて、前者は急減し、後者は増加する傾向と対応しており、干潟上海水域にその影響を現しているものと解釈され得る。

(2) 干潟の底質調査は、含水量、粒度組成、密度、

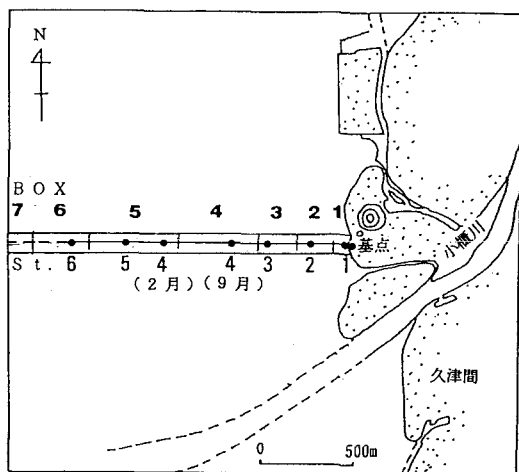


図-1 測線と測点・ボックスの配置

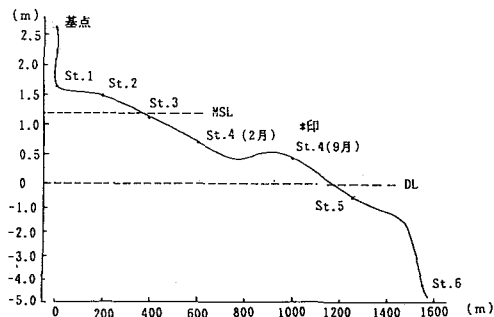


図-2 測線の断面形状と測点、潮位との関係

* 正会員 水修 室長 新日本気象海洋株式会社
** 正会員 工修 研究員 新日本気象海洋株式会社
*** 正会員 水修 部長 新日本気象海洋株式会社
**** 正会員 工博 特任理事 新日本気象海洋株式会社
***** 工博 室長 資源環境技術総合研究所

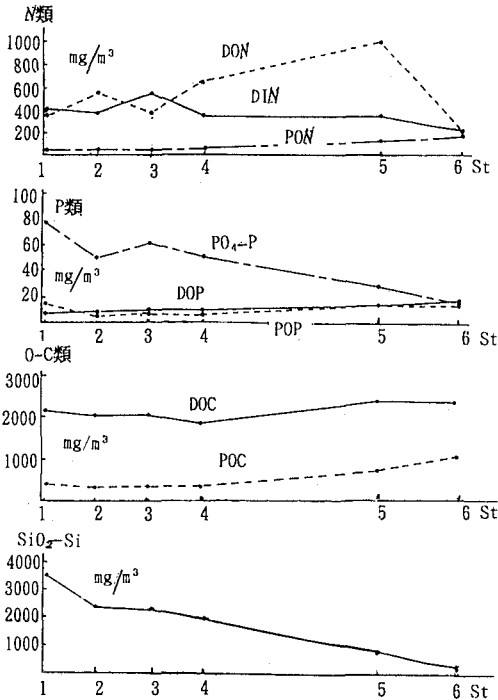


図-3 干潟上水域の水質濃度分布 (1989年9月)

比重, 全有機態のC, N, Pなどである。また間隙水については栄養塩類, 溶存態のC, N, Pについて行っている。さらに90年9月と91年2月には泥温の調査を加えている。泥温は干潟に棲息する生物の活性を大きく左右するので, 干潟の冠水と干出, それによる底質内部の温度分布を経時的に観測した。

総括して言えば, 底質は干潟全体が砂質であり, 平均粒径と間隙率は約0.2 mm, 0.445程度である。測点①, ⑥において好気層は表面から数cm程度であるが, その他の測点では10~15cm以深までであり, 全体的には好気的条件にある。底質のC/N比は夏期・冬期ともに測点⑤で最低となり, そこで5.9である。これより岸側に近づくほどC/N比が高くなる傾向を示しており, 盤州干潟の底質構成上の一つの特徴を表すものとして興味深い。測点⑥のC/N比は沖合の影響を受けてそれなりに大きくなるのは当然とみられるが, 測点⑤のようにL. W. L.近傍の水深から岸側に向けてC/N比が上昇してくるのはベントスとの多種多様な相互関係があるものと推測される。間隙水の水質濃度は, 干潟上の水質濃度に比して夏期, 冬期ともにNO₃-N, NH₄-Nでは大幅に高くなっているが, PO₄-Pではその傾向は小さくなっている。無機態のN, Pは測点①と⑥ではNH₄-N, PO₄-Pの値が大きく, それ以外の測点ではNO₃-Nの値が高い傾向にある。いずれにせよ底質と間隙水, とくに間隙水は干潟

表-1 干潟底質の分析結果 (その1)

測点③ 項目 堆積深度	含水比 (%)	単位体積重量 (g/cm³)	粒度組成 (%)			
			礫分	粗砂分	細砂分	シルト+ 粘土分
0~2 cm	20.2	2.06	0	12	87	1
2~4 cm	17.9	2.06	0	11	87	2
4~6 cm	16.4	2.03	0	10	88	2
6~8 cm	17.9	2.03	0	11	86	3
8~10 cm	17.9	2.02	0	10	87	2

表-2 干潟底質の分析結果 (その2)

測点③ 項目 堆積深度	間隙水			間隙水		
	DOC (μg-at/l)	DON (μg-at/l)	DOP (μg-at/l)	NO ₃ -N (μg-at/l)	NH ₄ -N (μg-at/l)	PO ₄ -P (μg-at/l)
	(175)	(27.0)	(0.32)	(21.7)	(16.5)	(2.00)
0~2 cm	500	140	2.00	149	21.0	1.96
2~4 cm	550	227	2.26	112	22.5	2.35
4~6 cm	750	150	3.29	86.6	24.7	3.03
6~8 cm	733	92.9	2.96	70.0	26.1	3.53
8~10 cm	808	244	3.84	72.0	29.5	3.32

表-3 干潟底質の分析結果 (その3)

測点③ 項目 堆積深度	底泥有機態				
	TOC (μg-at/g)	TON (μg-at/g)	T-P (μg-at/g)	TOP (μg-at/g)	C/N
0~2 cm	40.0	6.43	5.03	0.61	6.22
2~4 cm	40.8	5.00	5.10	0.84	8.16
4~6 cm	43.3	7.14	4.90	0.74	6.06
6~8 cm	54.2	6.43	5.13	1.13	8.43
8~10 cm	64.2	7.86	5.26	0.71	8.17

の栄養塩類の貯蔵庫と補給源を形成しており, 生物系に対し貴重な役割を果たしているものとみられる。

泥温の経時変化をみると, 泥深が深くなるほど泥温の変動幅は小さくなり, -20 cm層の泥温は冬期は水温とほぼ同程度で推移している。夏期では干出時の温度が冠水後1~2時間程度まで影響するが, 冠水によって温度影響を和らげる効果があることは明らかである。上述の調査結果の参考までに, 代表的な測点③における状況を表-1, 表-2, 表-3, 図-4に示す。時期はいずれも活性の大きい夏期のものである。

(3) 生物現存量の調査では, まず干潟上海水内のパクテリア, 植物プランクトン, 動物プランクトン, クロロフィル-a, フェオ色素, ATPを対象とし, 底質中の生物については, パクテリア, 付着藻類, メイオベントス, マクロベントス, クロロフィル-a, フェオ色素, ATPのほか, 海藻・海草類についても行っている。これと同時に水中の照度も測定しており, 数値モデル化に備えて光減衰係数を算定している。

調査結果を平均的な観点から眺めると, 海水内でも現存量が多かったのは植物プランクトンで, 次いでパク

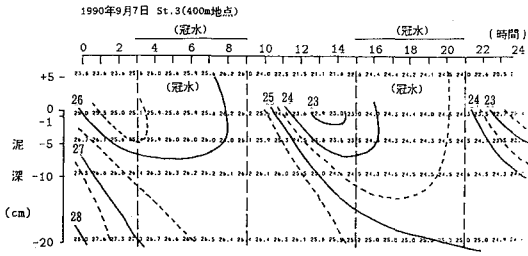


図-4 泥温(°C)の鉛直分布の経時変化(90年9月)

テリア、動物プランクトンの順であった。動物プランクトンの現存量は夏期で植物プランクトンの1/8、冬期で1/6程度である。植物プランクトンは沖合測点⑤、⑥で多く、バクテリアは全体にわたって様にやや大きい値を示している。底質中の生物現存量を見ると、付着藻類とマクロベントスが多く、次いで海藻・海草類、バクテリア、メイオベントスの順であった。測点間の分布を見ると岸側測点①から③で付着藻類が多く、沖合の測点④、⑤、⑥では代わってマクロベントスの現存量が増加している。これが前述(1)の事象に相応している点である。海藻・海草類は測点③を中心に分散し、夏期ではアナアオサ、アオノリ、コアマモ、オゴノリが出現し、冬期では、アナアオサ、ハネモ、コアマモ、オゴノリ、アマノリが出現している。しかし出現量から見ると付着藻類より低目である。

付着藻類で夏期に出現するのは全て珪藻綱であり、冬期も渦鞭毛藻の一種を除いて他は珪藻綱であった。岸側に多く出現し沖合に向けて少なくなり、底質内の鉛直分

布を見ると測点①、②では表層に多く、他の測点では一様な傾向を見せている。メイオベントスは、夏期・冬期ともに線虫綱が優占し、甲殻綱がそれに次いでいる。マクロベントスは夏期に合計83種が出現し、測点①~④では多毛綱から甲殻綱とアサリに変化し、測点⑤、⑥では二枚貝綱が優占する。90年8月の調査では測点②と③の間に小型巻貝の一種であるホソウミニナが多数出現していた。冬期では56種が出現し、全般的な傾向は夏期に類似し、ただ種類数が減少している。図-5に底質中の生物現存量の一部を測点間分布として示した。

3. 盤州干潟における循環物質の収支

今まで述べてきたのはミクロ的な干潟の環境特性であるが、もう一つの観点すなわちマクロ的な物質収支が干潟域内でどのように行われているかを検討することが肝要である。これは干潟のマクロ的機能像を明らかにするとともに、ミクロの調査結果を踏まえて、干潟の計量的な数値モデルの構成に必要な情報を提供するからである。具体的には、図-6に示す領域を対象に12観測点を設けて現地観測を行い、その結果に基づいてボックスモデルにより検討を加えるものである(中央水研が実施)。

ボックスモデルは Matsukawa and Sasaki (1986) の方法によるもので、干潟時、満潮時に2時間以内の調査で得られた干潟海域の物質分布から解析を行う。物質収支の式は、

$$\Delta(VC) = Q \cdot C_a + AK\Delta C / \Delta L + P \dots\dots\dots (1)$$

ここで、V; 干潟海域の海水容積、C; 干潟海域の物質平均濃度、 $\Delta(VC)$; 干潮と満潮の間の物質現存量の変化、Q; 容積変化量、 C_a ; 干潟と沖合との境界における当該物質濃度、 $Q \cdot C_a$; 干潟時の容積変化に伴う当該物質の干潟・沖合間の移流量、A; 境界の断面積、K; 水平拡散

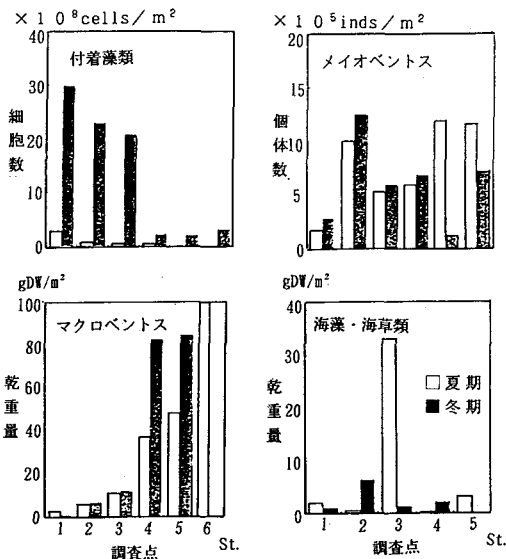


図-5 底質中の測点間分布

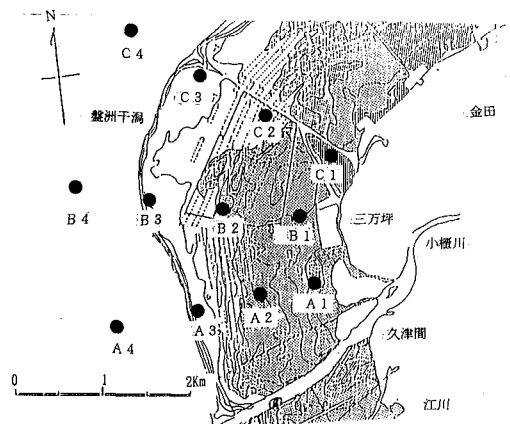
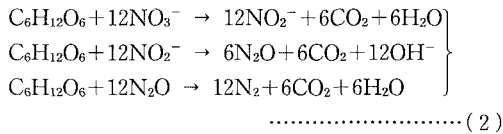


図-6 対象干潟領域と測定点の配置

係数, $\Delta C/\Delta L$; 干潟, 沖合間の濃度勾配, $AK\Delta C/\Delta L$; 境界を通じての物質拡散量, P は当該物質の収支結果に関する状態変数で, 栄養塩の場合マイナスであれば光合成などによる吸収, プラスならば分解による溶出, 懸濁態物質の場合プラスならば光合成などによる生成, マイナスならば, 分解による消失等を意味していると考えられる。

現地観測は92年8月6日, 7日の干潮時と満潮時に合計4回行っており, 観測は干潮時, 満潮時を中心に前後1時間程度で実施されている。水平拡散係数は三河湾一色干潟の例から $K = 5 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ 程度とみなされているので, これに基づいて算定してみると次のような結果が得られた(表-4)。 上記の値は2日間にわたる干潮から満潮を経て干潮に至る過程と, 満潮から次の満潮に至る過程の平均を示したもので, 干潟のマクロ的物質収支は以下のように推定される。

干潮に流入する植物プランクトンは全面的に捕食, 分解される。それに伴い域内で DIN , DIP , $\text{S}_2\text{O}_2-\text{S}_1$ は大量に生成され, 一部は沖合に流出する。流入する懸濁態の N , P は一部はベントスの糞として底質内に形成され, デトリタスに転化されよう。 DIN のうち NH_4-N は域内で分解生成され, 移流・拡散で域外へ流出するが, $\text{NO}_2 + \text{NO}_3-\text{N}$ の挙動はそれと異なり, 拡散で失われる量と PN と NH_4-N の硝化形成・脱窒反応へ向かう量とに別れるように推測される。事実, 水中・底質中に有機物があり脱窒菌バクテリアにより,



の脱窒反応は予想される現象である。上記の最後の式で N_2O と N_2 は1:1で反応するので, N_2O の生成速度で脱窒速度を計測することができる。アセチレン阻害法による実験結果では夏季・冬期を通して $0.22 \sim 15.22 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{hr}$ という結果が得られている。

なお, 生成される DIN , DIP , $\text{S}_2\text{O}_2-\text{S}_1$ は, 付着藻類及び海藻・海草類の生育に大きく寄与しているものと考え

表-4 干潟の物質収支結果

物質名	$\Delta(VC)$	$Q \cdot C_a$	$AK\Delta C/\Delta L$	P (単位)
クロロフィル a	15.2	-9.20	40.6	-16.2 10^3g
DIN	-8.43	-0.65	-30.4	22.6 10^3gN
DIP	-1.69	-0.08	-4.08	2.47 10^3gP
PN	8.30	0.75	7.47	0.08 10^3gN
PP	3.11	0.18	2.25	0.68 10^3gP
$\text{S}_2\text{O}_2-\text{S}_1$	3.35	-1.50	-89.8	94.7 10^3gS_1
NH_4-N	0.94	-1.94	-32.2	35.1 10^3gN
$\text{NO}_2 + \text{NO}_3-\text{N}$	2.05	1.33	4.36	-3.64 10^3gN

られる。また上述したごとく, 干潟は循環物質の Sink (貯まり場) の機能は大きい, 同時に沖合への移流・拡散の場 (Source) ともなっていることに留意すべきである。

4. 干潟の生態・物質循環モデルの検討

干潟における生態系の構成, それらの間を経由する循環物質の諸量が把握されてくると, 干潟の生態系・物質循環係数値モデル化への道が開かれる。Baretta が炭素を循環物質の基本として, エムス河口の潮汐干潟を研究した事例はこの分野で傑出したものといえる。盤州干潟の場合, 外海から沿岸に至る水域浮遊系を主体とする Pelagic submodel, 生物の大きい Migration や鳥類の捕食などを考慮する Epibenthic submodel に対応するものは, 干潟が東京湾にあり, ベントスの Migration や鳥類の捕食も比較的小さいと考えられるので, これらの二つの Submodel は考慮せず, 干潟の Benthic submodel を主体として, 浮遊系はその境界値を与える領域を設定することで, モデルの簡略・充足化を行った。

モデルは領域分割のボックスモデルに依存し, 図-1 に示すような各測点を含む6個のボックスを設定した。ボックス⑦は境界ボックスに相当する。今までに述べた各種の現地調査, 室内実験の結果から考察して, 基本的に第一近似となる浮遊系, 生態系の物質フローは, 図-7 のような構成になるものと想定される。

生態系モデルを構成する状態変数は, 水域中で植物プランクトン, デトリタス, NH_4-N , NO_3-N , 底質では, バクテリア, メイオベントス, 付着藻類, 懸濁物食者, 堆積物食者, 海藻・海草類, デトリタス, 間隙水中の NH_4-H , NO_3-N を対象としている。ここで懸濁物食

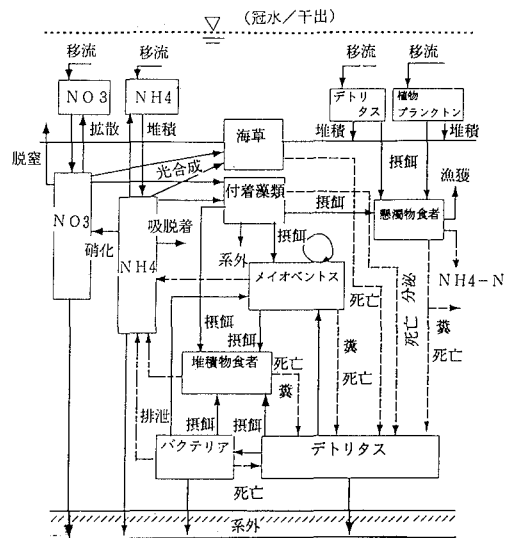


図-7 干潟における生態系モデルの構成

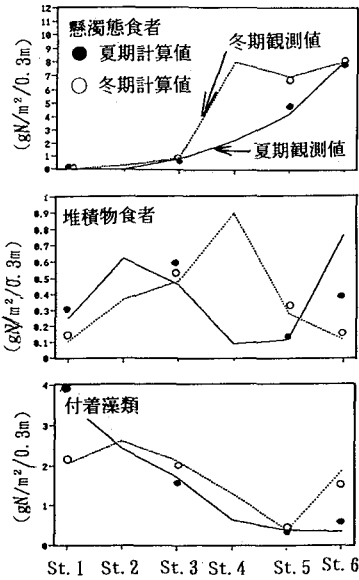


図-8 測点・ボックスの実測値と計算値との比較

者とはアサリ、バカガイ、シオフキガイなどの軟体類、堆積物食者とはホソウミニナ、コメツキガニ、ニホンソナモグリなどである。

各状態変数の現存量に関する時間的変化が数値モデルの内容となるが、これには光合成速度、摂餌速度、排泄・排糞速度など様々な速度係数が含まれるので、観測、実験ならびに文献で示される値から設定しなければならない。一方、これらによっても判明することが難しい係数の場合には、夏季・冬季の現地調査結果を1ヶ月程度の期間であれば定常状態を仮定することができると考えて近似的に推定する方法がある。例えば懸濁物食者(SF)であればそのモデルを以下のように仮定する。

$$\frac{d(SF)}{dt} = \{a7 - a70 - a72e - a72m - cat7\}SF \dots \dots (3)$$

捕食 排泄 排糞 死亡 漁獲

式(3)は幅員を一定とし、泥深は還元層に達する深さを0.3mとしている。実測・実験ならびに文献から

時期	a7	a70	a72e
夏季	0.01818	$0.20 \times a7$	$0.10 \times a7$
冬季	0.04451	$0.20 \times a7$	$0.10 \times a7$

左辺を0とすると、 $a72m + cat7$ を合わせた値は0.01273(夏季)、0.04451(冬季)の値が得られる。この

値から漁獲係数を差し引いて死亡係数を推測することができる。

このようにして得られた速度係数を種々の環境要因(水温、照度、栄養塩、餌濃度ほか)と関連づけることによって季節変化及び日変化にも対応できるようになる。

図-8はこのようにして作成したモデルを用いて、夏季・冬季1ヶ月間の計算平均値と観測値とを対比したものである。

もとより境界ボックスには水温、泥温、照度、栄養塩類などの年間変動と日変動をフーリエ級数の第3高次項展開までを含めた関数を用い、さらに潮位変動が加えられる。計算は $\Delta t = 1hr$ の陽解法により、収束安定条件は $K \leq (\Delta x)^2 / (2\Delta t)$, $K \geq \Delta t U^2 / 2$ で示される。計算はこの条件を満たすように配慮されている。因みに付着藻類(DIA)のモデル式は、

$$\frac{d(DIA)}{dt} = - \text{堆積} + \{a4 \cdot rpho - a40 - a42m$$

光合成による増殖 呼吸による減耗 枯死による減耗

$$- a42e \cdot a4 \cdot rpho\}DIA - a45 \cdot MEI$$

分泌による減耗 メイオベントスによる捕食

$$- a46 \cdot DF - a47 \cdot SF$$

DFによる捕食 SFによる捕食

ここで、 $rpho$ は底質内の有光層に存在するDIAの割合を表しており、これはBarettaのモデルを参考に有光層の深さを2cmとした時の割合を示している。以上のごとく数値モデル化は第一近似の段階ではあるが、実測値との対比で傾向的には比較的良好な結果を示している。今後はモデルを可能な限り現実近づけ、長期に渡る推算にも耐えられるものとしなければならない。そのためにも、不断にわたる観測が重要なものと認識される。

参 考 文 献

日本水産資源保護協会(1992): 漁場保全機能定量化事業報告書, 第一期とりまとめ及び同資料編。
 Baretta, J. and P. Ruardij (1988): Tidal Flat Estuaries, Simulation and Analysis of the Ems Estuary, Springer-Verlag, 353 p.
 中田喜三郎, 畑 恭子 (1994): 沿岸干潟における浄化機能の評価, 水環境学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 158-166.
 Matsukawa, Y. and K. Sasaki (1986): Budget of nitrogen, phosphorous and suspended solid in an intertidal flat. Bull. Japan, Soc. Sci. Fish., 52, pp. 1791-1797.