

降水の水質特性と大阪湾への栄養塩負荷の影響解析

Water Quality of Rainwater and Its Impact on Primary Production in the Osaka Bay

西田修三¹・中谷祐介²・嶋田恭佑²・入江政安³

Shuzo NISHIDA, Yusuke NAKATANI, Kyosuke SHIMADA and Masayasu IRIE

A nutrient load by rainfall has an important role in the primary production in an enclosed bay. We made analyses of rainwater qualities around the Osaka Bay, and calculations for the impact of the precipitation on the water quality and primary production in the Osaka Bay, using a 3D hydrodynamic water-quality model. The rainwater had high concentration of T-N about 0.7mg/L on average for observed rains. The total precipitation loads of T-N, T-P were 1,300, 11 ton/year, which are only about 3% and 0.4% of total inflow load in the Osaka Bay, respectively. However, calculation results show that the precipitation make phytoplankton biomass increase in the surface layer about 3 μ g/L in the southwest area of the bay, where the tidal exchange is small and the DIN concentration is very low.

1. はじめに

閉鎖性内湾の栄養塩の起源としては、陸域からの流入の他に、外洋との海水交換、底泥からの回帰、あるいは大気からの沈着が考えられる。このうち、大気由来の栄養塩負荷については、他の起源の負荷に比べて水域に及ぼす影響は小さいと考えられてきた。しかし、その定量的評価と動態解析はほとんどなされていない。内湾への栄養塩負荷を考える際、特に窒素に関しては集中的に海面に供給される降雨負荷は無視できないものと考えられる。例えば、多田(1998)は播磨灘における降雨負荷について、窒素は陸域負荷の13%、リンは1.5%との見積もりを示し、プランクトン増殖促進の可能性を示唆している。また、大阪湾を対象に降下煤塵による栄養塩負荷量については星加ら(1994)によって算定がなされている。しかし、その動態についての研究はほとんどなされていない。西田ら(2007)は大阪湾を対象に、降雨時の降水水質と淀川河川水質の観測を行い、夏季の大阪湾への栄養塩負荷の算定と一次生産に及ぼす影響について簡易モデルを用いた解析を行っている。

本研究では、一年にわたり降水の採取と分析を行い、降水の水質と負荷特性を明らかにするとともに、三次元流動・水質シミュレーションにより大阪湾に供給された降水起源の栄養塩の動態解析を行い、大阪湾の水質と一次生産に及ぼす影響を明らかにする。

2. 降水の観測

(1) 観測・分析方法

降水の観測は2007年5月から開始し、現在も継続して

実施しているが、ここでは2007年6月から2008年5月までの一年間のデータを使用して解析を行う。観測点を大阪府内3地点に設け、吹田市(大阪大学)のSt.1を主観測点として全降水を採取するとともに、降水の空間変動を把握するために他の2カ所の観測点(St.2:大阪府、St.3:柏原市)においても5月~7月に観測を実施した。採水にはポリ瓶にロートを接続した容器を用い、降雨が予報される度に設置し、一降雨毎に降り始めから降り終わりまでの降水を採取した。回収した試料は、降水量を記録した後に冷蔵保存し、栄養塩分析装置(オートアナライザーSWAAN)で[NO₂-N]+[NO₃-N], NH₄-N, 全窒素T-N, PO₄-P, 全リンT-Pの各栄養塩濃度を測定した。分析結果を基に、降水の水質と栄養塩フラックスの季節変動等の解析を行った。観測された降水は計89回、このうち12月の5回分については窒素分析にエラーが生じたため、同月の観測結果の平均濃度を用いてフラックスを推定した。

(2) 分析結果

a) 降水の水質特性

降水の水質は大気の影響を顕著に受けるため、各地点で異なった値を示すものと考えられる。しかし、3地点の観測結果から降水のT-Nは最大約±30%、T-Pでは最大約±25%の差異にとどまり、水質特性も以下に示すSt.1の特性と同様の傾向を示していた。そこで、ここではSt.1で採取した試料の分析結果を基に解析を進める。

観測された一年間の降水について、一降雨あたりの降水量とT-N、T-P濃度の関係を図-1に示す。なお、観測降雨の平均降水量は14.1mm、T-N、T-Pの最高濃度は12.1mg/L、0.11mg/L、平均負荷量(沈着フラックス)は10.3mg/m²、0.091mg/m²であった。降水量の増加に伴い濃度が低下する傾向にある。これは降雨による大気の洗浄効果(washout)により、物質濃度が減少するためと考えられる(玉置ら, 1985)。降水量と濃度の関係にばらつきが大きいのは、降雨履歴や大気濃度の変動、さらに

1 正会員 工博 大阪大学大学院教授 地球総合工学専攻
2 学生会員 大阪大学大学院 地球総合工学専攻
3 正会員 博(工)大阪大学大学院助教 地球総合工学専攻

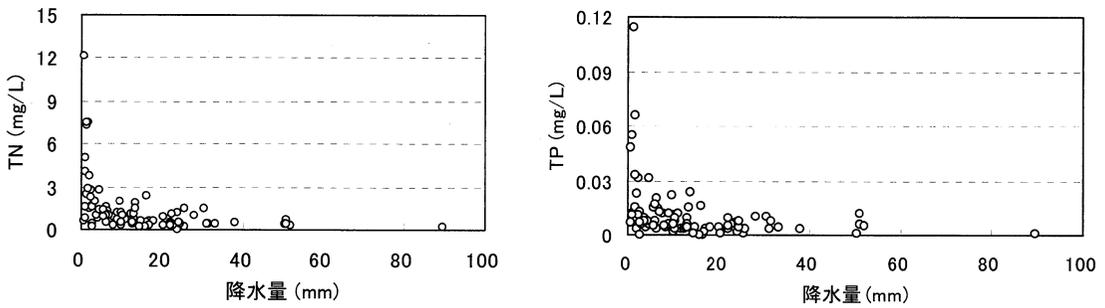


図-1 降水量と栄養塩濃度の関係

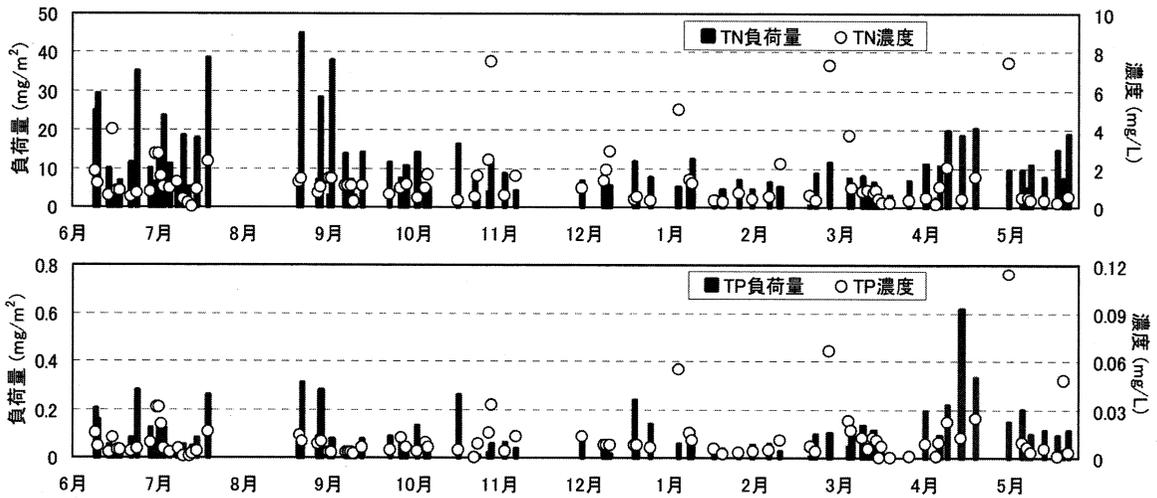


図-2 一降雨あたりの栄養塩濃度と負荷量

は浮遊粉塵量などの影響を受けるためである(和田, 1990; 多田, 2004). 図-2に一降雨あたりのT-N, T-P平均濃度と負荷量の季節変動を示す. また, 図-3には月毎に積算された負荷量とそれを降水量で除した平均濃度の季節変動を示した. 降水のリン濃度は窒素濃度と比較して2桁低い値を示し, 乾性沈着が増加する春季を除き, 負荷量はかなり小さい. 溶存態窒素に関しては夏季に濃度が上昇する傾向がみられる. 2007年秋季の降水量が平年に比してかなり少なかったことを考慮すれば, 8月~10月の年平均負荷量はさらに大きくなるものと思われる. リンについても冬期の負荷量の低下がみてとれるが, 窒素ほどには明確な季節変動は示していない.

b) 栄養塩負荷

表-1に一年間の観測結果より求めた降水の平均栄養塩濃度と大阪湾海面への総負荷量を示す. 前述のように3地点での観測結果から負荷量に大きな空間変動が認められなかったこと, また, 海域における降水の水質は陸域における濃度変動の範囲内であるという藤田(2002)

の研究等より, ここではSt.1における降水の水質を大阪湾海域に適用し, 海面への直接負荷量を算定した. 直接負荷量は, 海面フラックスに大阪湾の面積1,447km²を乗じて年総負荷量とした. なお, 観測期間の年総降水量は約1,250mmであり, 平年に比して若干少なかった.

降水による大阪湾表層への栄養塩負荷は, 陸域からの流入負荷量, T-N 121ton/day, T-P 8.2ton/day(環境省, 2006)に対して, 降水負荷はT-N 3.56ton/day, T-P 0.031ton/dayを示し, 陸域負荷のT-Nは2.9%, T-Pは0.38%であった. つまり, 1年という長期間で捉えた場合, 降水による大阪湾への栄養塩負荷は, 陸域負荷に比して微少であり, 栄養塩収支からは無視しうる量とも考えられる. しかし, 図-3に示されるように負荷量は大きな季節変動を有しており, 7月のT-Nフラックスは最小値を示した11月の約12倍もの値を示していた. 詳細な解析を行った結果(西田ら, 2007), 夏季の降雨による海面への直接負荷量は淀川からの流入負荷量の約20%にも上り, 無視できる量でないことが明らかとなっている.

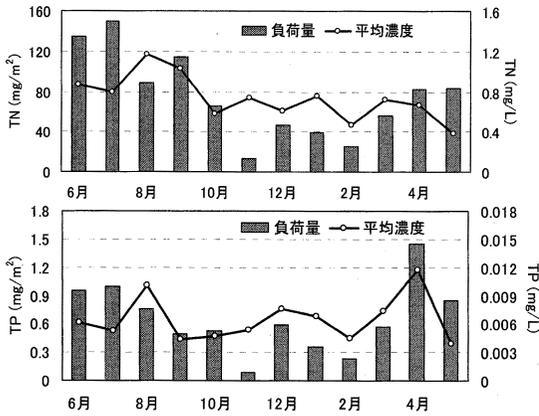


図-3 月毎の負荷量と平均濃度

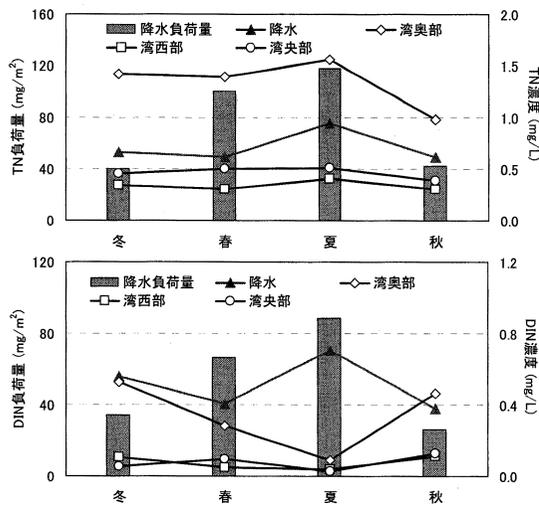


図-4 大阪湾表層水と降水の栄養塩濃度の季節別平均値

季節別の大阪湾の表層栄養塩濃度（浅海定線調査データ、1996～2005年の平均）と今回の観測で得られた降水の栄養塩濃度の季節別平均値を図-4に示す。図には、各季の降水による海面への直接負荷量もあわせて示した。T-Nに関しては、降水の濃度は海域の濃度変動の範囲内であるが、溶存無機態窒素（DIN）では、ほぼ年間を通して大阪湾全域の表層よりも降水の方が高濃度を示し、特に夏季には1桁高い値となることがわかる。植物プランクトンの光合成が活発な夏季に、短時間ではあるが降雨によるこのような窒素の供給は、大阪湾の一次生産を促進する可能性がある。特に、窒素濃度が低く窒素制限が働いているような水域では、より降水の影響を受けやすいものと考えられる。

3. 大阪湾の水質に及ぼす影響

(1) 流動・水質シミュレーション

三次元モデル（POM+水質モデル：入江ら，2004）を

表-1 降水の平均栄養塩濃度と大阪湾への年負荷量

	平均濃度 (mg/L)	年負荷量 (ton)
[NO ₂ -N]+[NO ₃ -N]	0.285	519.8
NH ₄ -N	0.228	414.4
T-N	0.714	1300.6
PO ₄ -P	0.003	5.1
T-P	0.006	11.4

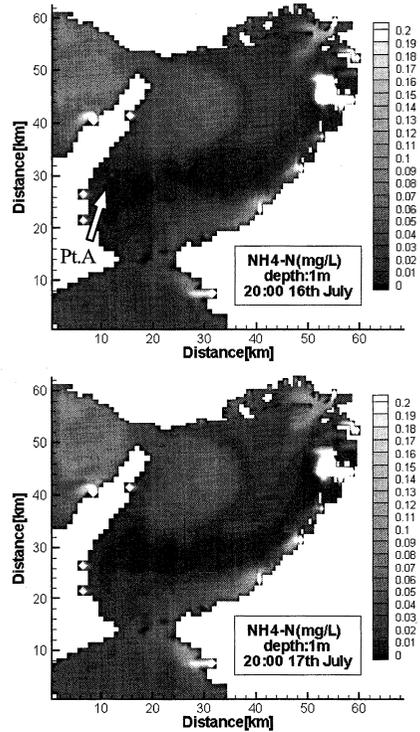


図-5 表層NH₄-N濃度の経時変化

用いて、降雨を考慮した大阪湾の流動と水質のシミュレーションを行った。水質項目は、水温と塩分の他、[NO₂-N]+[NO₃-N]、NH₄-N、O-N、PO₄-P、O-P、COD、Chl.a、DOである。今回は、降水による負荷が最も大きかった7月を対象に解析を行った。日射、気温、降水量・降水水質、淀川流量・負荷量は実測データを用い、15日間の助走計算の後、7月1日～30日の水質計算を行った。計算に用いた降雨状況を後掲の図-6に示す。

(2) 水質変化

図-5は7月16日の降雨直前（20:00）と24時間後のNH₄-N濃度（表層1m）の変化を示したものである。約4時間の降雨により表層濃度が約0.02mg/L上昇した後、潮流による移流拡散と生化学反応が加わり濃度分布は変化した。24時間後にはほとんどの水域で降雨による濃度上昇が解消されているにもかかわらず、降雨の影響が残留している水域も一部に見られる。

図-6は湾南西部（図-5 Pt.A）における水質変動を示し

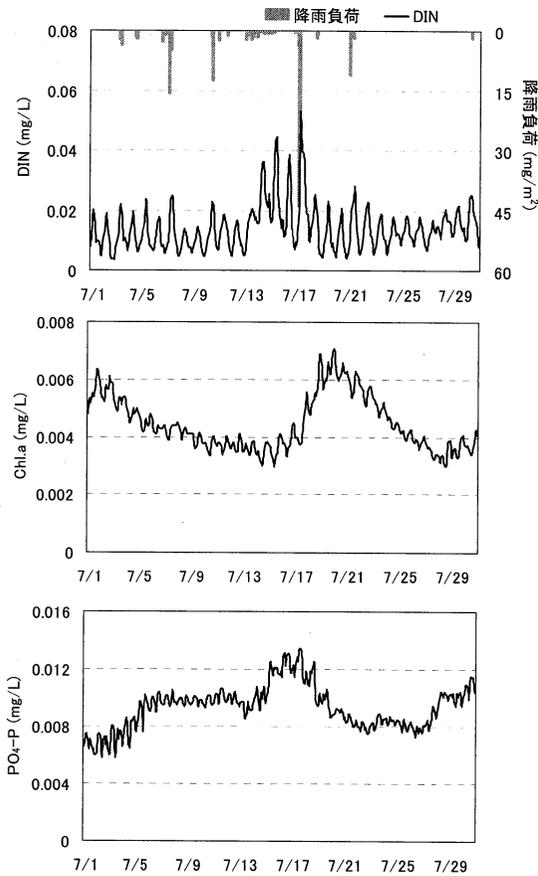


図-6 湾南西部海域表層における水質変動

たものである。7月16日の降雨により表層の窒素濃度が上昇し、その後植物プランクトン (Chl.a) の増殖とともに栄養塩が消費され、濃度減少が生じていることがわかる。さらに、出水の影響も加わって短期間に大きな変動が生じているのがみとれる。なお、7月15日のリン濃度の上昇は、降雨の影響ではなく移流によるものである。また、この地点の日純生産量は、降雨の前後で約2倍の増加を示した。

(3) 一次生産への影響

図-7は7月16日の降雨直前 (20:00)とその24時間後の表層のChl.a分布を描いたもので、あわせてその変化量も示している。湾南西部と沖ノ瀬環流の外縁部において、降雨後にChl.aの上昇が見られる。湾南西部においては、もともと窒素濃度が低く比較的停滞性の強い海域であるため、降水の窒素供給によりプランクトンの増殖が促進されたものと考えられる。一方、沖ノ瀬環流の外縁部の上昇は、湾奥部の高濃度Chl.aが移流し、沖ノ瀬環流にトラップされたものと考えられる。

海面への直接負荷の影響を抽出するために、降雨はそのままに出水を抑えて平水流量とした場合の計算も実施

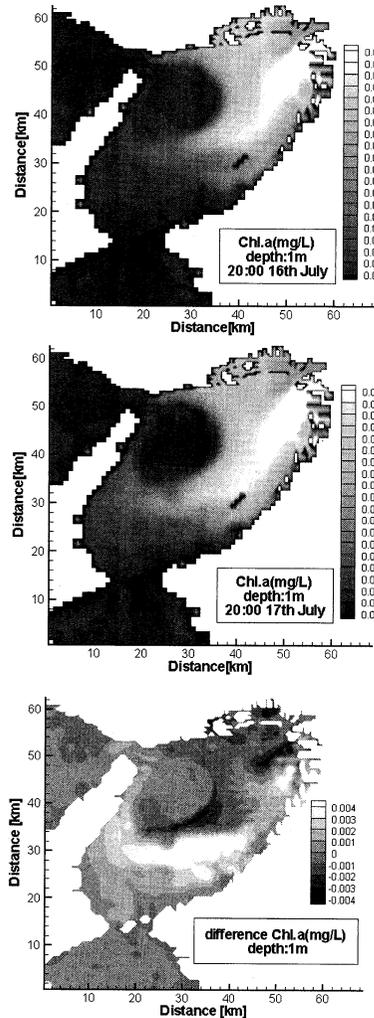


図-7 表層Chl.a濃度分布 (上段, 中段) と変化量 (下段)

した (図-8)。図-7と同じく7月16日20:00とその24時間後の表層のChl.a分布と、その変化量を示している。出水を抑えた場合には停滞性が増すため、南西部海域などで出水を考慮した場合に比して、広範囲でプランクトンの増殖傾向が見られる。

また、降水量を0mmとして海面への栄養塩フラックスを無視した計算を実施し、Chl.a分布の差異について検討も行った。計算結果には、計算開始日からの降雨の履歴と短期長期の生物化学的な水質応答が反映されているが、降雨は図-7に示したような短期的な水質変化を生じさせ、その一次生産への影響は無視できないが、長期的巨視的な大阪湾の水質構造に及ぼす影響は軽微であった。これは、T-Nの年間の降雨負荷が陸域負荷量の僅か3%であることによる。

窒素濃度が低く、さらに鉛直混合が弱く停滞性の強い

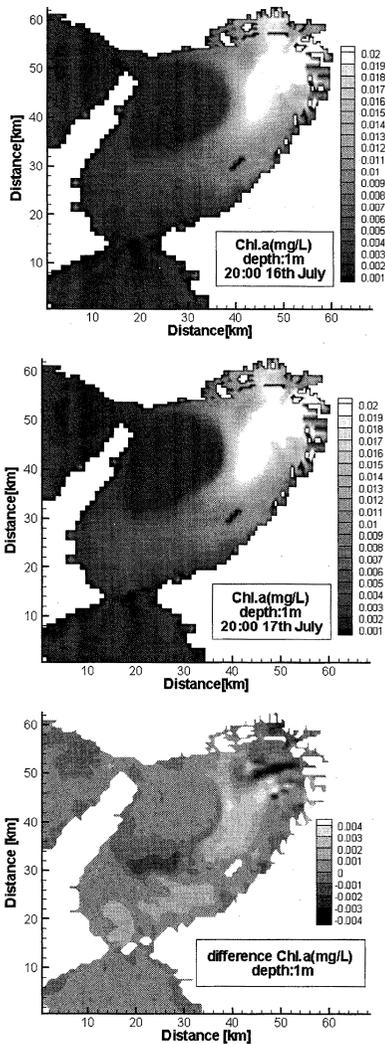


図-8 表層 Chl.a 濃度分布 (上段, 中段) と変化量 (下段) (出水なし)

海域において、降雨の一次生産への影響が顕著に現れるものと考えられる。一方、リン制限が働いている海域では、降水のリン濃度が低いため一次生産への影響はほとんどないものと考えられる。しかし、黄砂による春季の乾性沈着によるリン供給は、ブルーミングによって欠乏したリンの供給に寄与する可能性もある。筆者らの観測では4月初旬に降雨による湿性沈着量の2倍以上の乾性沈着量を記録していた。現在、観測データの蓄積とあわせて影響解析も進めている。

4. おわりに

本研究では、降水の観測データを基に、その水質特性

を明らかにするとともに、大阪湾の水質と一次生産に及ぼす影響について解析を行った。本研究で得られた主たる結果は以下のとおりである。

- (1) 各季節ともに降水の窒素濃度はリン濃度と比較して2桁高く、また降水量の増加に伴って濃度は減少する傾向を示した。
- (2) 溶存態窒素は夏季に濃度が上昇する傾向がみられた。リンについては夏季に低下する傾向がみられるが、濃度が低く有意な季節変動の把握には至らなかった。
- (3) 負荷量の変動は降水量の大きな季節変動の影響を顕著に受けて、梅雨期に大きな値を示し、その窒素フラックスの最大値は7月に約150mg/m²に達した。
- (4) 降水による大阪湾への直接負荷量は、流入する陸域負荷に対して全窒素は約3%、全リンは約0.4%と小さい値を示し、大阪湾の栄養塩収支を1年という長期で捉えた場合には、降水の影響は軽微であると言える。
- (5) 一降雨当たりのおお阪湾表層への窒素負荷量は最大で陸域からの日平均負荷量の約37%に相当する約45tonを示し、降雨によって集中的に供給される栄養塩負荷が無視できない量であることがわかった。
- (6) 流動・水質シミュレーションの結果、表層の栄養塩濃度が減少し降雨の栄養塩濃度の方が高くなる夏季には、降雨負荷により表層濃度の急激な上昇がみられ、停滞性が強い湾南西部等の海域において、その後の日射の作用によりプランクトンの増殖が認められた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、今井文乃君と柴田剛志君の多大な助力を頂いた。ここに感謝の意を表するとともに、本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(C) No.19560512)により行われたことを付記する。

参 考 文 献

入江政安・中辻啓二・西田修三(2004)：大阪湾における貧酸素水塊の挙動に関する数値シミュレーション，海岸工学論文集，第51巻，pp.926-930。
 環境省(2006)：化学的酸素要求量，窒素含有量及びりん含有量に係る総量削減基本方針(瀬戸内海)。
 多田邦尚(1998)：降水中の窒素・リン濃度と内湾への栄養塩負荷，海と空，第73巻，pp.125-130。
 玉置元則・平木隆年・渡辺弘(1985)：大気中の窒素酸化物による雨水の質的变化，大気汚染学会誌，Vol.20，pp.71-81。
 西田修三・中谷祐介・嶋田恭佑・入江政安(2007)：大阪湾の水質と一次生産に及ぼす降雨の影響，水工学論文集，第52巻，pp.1345-1350。
 藤田慎一(2002)：東アジアの酸性雨一広域観測データによる降水化学の総合評価一，大気環境学会誌，Vol.37，pp.1-22。
 藤田慎一(2004)：ガス状・粒子状物質の沈着に関する研究，大気環境学会誌，Vol.39，pp.107-118。
 星加章・谷本照巳・三島康史(1994)：大阪湾における懸濁粒子の堆積過程，海の研究，Vol.6，pp.419-425。
 和田安彦(1990)：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版，pp.22-23。