

大阪湾の水質と一次生産に及ぼす降雨の影響

IMPACT ANALYSIS OF RAINFALL ON WATER QUALITY AND 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

¹正会員 工博 大阪大学大学院准教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²学生会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³正会員 博(工) 大阪大学大学院助教 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Water quality and primary production in an enclosed bay are dependent on inflow loads from rivers and outer ocean, and nutrients released from sea bottom. A nutrient load by rainfall also has an important role in the primary production. We here focused on the influence of the precipitation on the water quality and primary production in the Osaka Bay, and then conducted water quality analyses of rainwater and river water.

The rainwater had high concentration of dissolved inorganic nitrogen, and the ratio of rainfall load to Yodo River load was about 20% on average for observation period. This result suggests that the precipitation make phytoplankton biomass increase in the surface layer with nitrogen limitation. Furthermore we examined the changes of water quality and primary production using a system dynamics model to make a quantitatively evaluation of precipitation effect.

Key Words : Osaka bay, Yodo river, Rainfall, Nutrient, Water quality, Primary production

1. はじめに

東京湾や大阪湾に代表されるような閉鎖性内湾では、総量規制等の負荷削減施策によって水環境の改善を図ってきた。しかし、30年余におよぶ規制にも拘わらず未だに赤潮や青潮といった水質汚濁現象の発現が多く見られる。

内湾の水質は、主として陸域からの流入負荷によって決定されるが、長年にわたり海底に堆積した有機物の分解・溶出に伴う栄養塩の回帰により、流入負荷の削減効果は期待されたほど顕著には現れていない。

また、外洋起源の栄養塩の流入が内湾の水質に大きく関わっているとの指摘もなされている¹⁾。著者らが実施した観測においても、黒潮離岸時に外洋起源の高濃度の栄養塩が紀淡海峡の底層を通じて大阪湾に流入しているのが捉えられている²⁾。

このように、陸域起源の負荷ばかりではなく、底泥起源や外洋起源の栄養塩の動態が閉鎖性内湾の水質を決定していると言える。

しかし、このような水圏における栄養塩動態の他に、大気起源の栄養塩物質の動態も、少なからず水質に影響

を及ぼしている(例えば多田³⁾)。特に貧栄養の海域では大気からの窒素や鉄の供給が海域の一次生産に寄与していると言われている。

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⁴⁾によって算定がなされているものの、その動態についてはほとんど研究はなされていない。また、星加ら⁴⁾は大阪湾に堆積する懸濁粒子の77%が洪水期に負荷されるとの結果を示しているが、出水時の負荷流入についても未だ観測データが少なく、正確な見積りがなされていない。

そこで、本研究では降雨による海面への直接的な負荷流入について調査解析を行うとともに、出水時に淀川下流部において水質観測を実施し、流入負荷量の算定も行うこととした。これらの観測データを基に、降雨が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う。

2. 降雨および出水の観測

(1) 降雨の観測と分析結果

雨水のサンプリングは大阪府内の3地点で実施した。2007年5月16日から観測を行い、1降雨毎に採取された

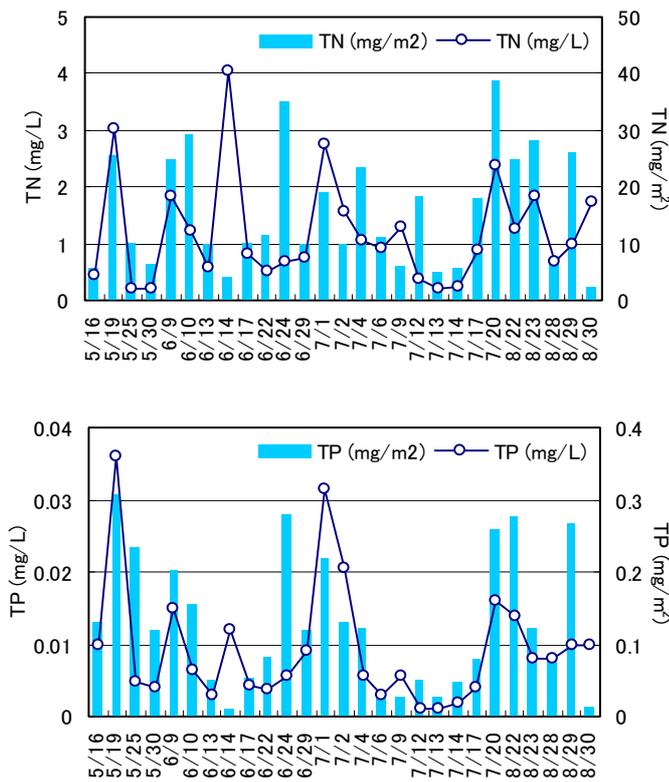


図-1 1降雨あたりの全窒素・全リン平均濃度と各フラックス

雨水は栄養塩分析装置（オートアナライザー）によってリン酸態リンと溶存態窒素（アンモニア態、亜硝酸態、硝酸態）、および、全リンと全窒素の分析を行った。ここでは、データ欠損のなかった大阪大学（吹田市）で採取された雨水の分析結果を用いて解析を行う。

観測された8月30日までの雨水について、1降雨あたりの全リンと全窒素の平均濃度、および、そのフラックスを図-1に示す。

雨水のリン濃度は極めて低いが、窒素濃度は大気中の窒素酸化物（NOx）を吸着・溶存するためにかかなり高いことがわかる。その結果、1降雨あたりの窒素負荷量は30mg/m²を超える場合もあるが、リンは2桁低い値を示している。このことは、特に窒素制限が働いている水域において、降雨が内部生産に寄与する可能性があることを示唆している。

1降雨あたりの降水量と平均濃度の関係を図-2に示す。降水量の増加に伴って濃度が減少する傾向にあることがわかる。大気中の窒素酸化物が雨水に取り込まれ徐々に大気濃度が減少するため、降水量の増加に伴い雨水中の窒素濃度が減少したと考えられる。しかし、実測された大気濃度と雨水中の窒素濃度には明瞭な関係は見出せなかった。これは、NOxの観測が地上でなされていることに加え、観測された濃度は大気の影響を受けて時空間的に大きく変動していることによる。

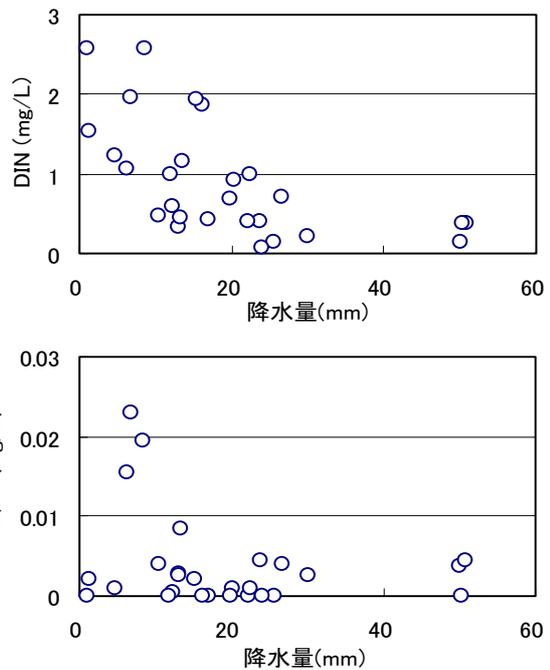


図-2 1降雨あたりの降水量とDIN・PO₄-P平均濃度

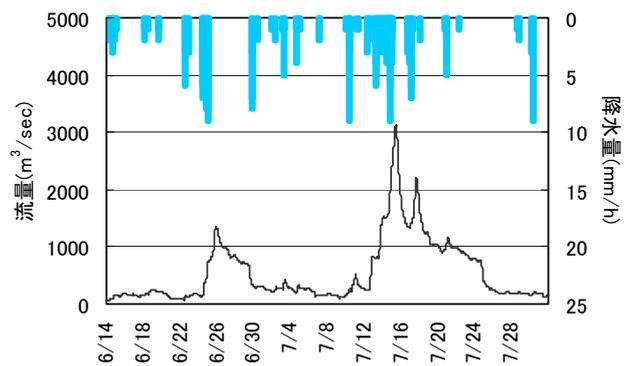


図-3 流量と降水量の時系列変化（枚方）

(2) 出水の観測と流入負荷量の算定

出水の観測は、淀川河口より上流約14kmの豊里大橋にて実施した。中央部において表層水を採取し、持ち帰って雨水と同様に窒素とリンの分析を行った。さらにSS分析とあわせて粒度分析も行った。観測は2007年5月から出水時を狙って実施した。

観測期間中に1,000m³/secを超える出水が2回発生し、最大流量は7月15日の3,120m³/secであった。枚方観測所において観測されたこのときの降雨と流量の変化を図-3に示す。台風4号の影響を受けて、最大時間雨量は9mmであったが総雨量は121mm（7月13～17日）に達した。

最大流量を記録した7月の水質分析結果を表-1に示す。また、表には採水時の流量（枚方）と算定された負荷量もあわせて記載した。この結果を基に描いたL-Q曲線を図-4に示す。図には平水時の観測データとして、豊里大橋の上流約3.5kmおよび下流約2.5kmにおいて大阪府に

表-1 水質分析結果

	流量 (m ³ /sec)	SS (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	DIN (mg/L)	TN (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	DIP (mg/L)	TP (mg/L)	PP (mg/L)	DOP (mg/L)	SiO ₂ -Si (mg/L)
7月14日	1568	43.7	0.060	0.005	0.580	0.645	0.86	0.027	0.045	0.11	0.065	0.018	2.69
7月15日	3109	99.6	0.027	0.006	0.714	0.747	1.2	0.026	0.045	0.16	0.115	0.019	3.38
7月16日	1396	34.2	0.024	0.003	0.579	0.606	0.74	0.012	0.028	0.073	0.045	0.016	2.68
7月18日	1231	23.1	0.022	0.003	0.574	0.599	0.92	0.015	0.023	0.049	0.026	0.008	2.22
7月20日	908	18.0	0.017	0.003	0.495	0.515	0.76	0.012	0.018	0.046	0.028	0.006	1.88

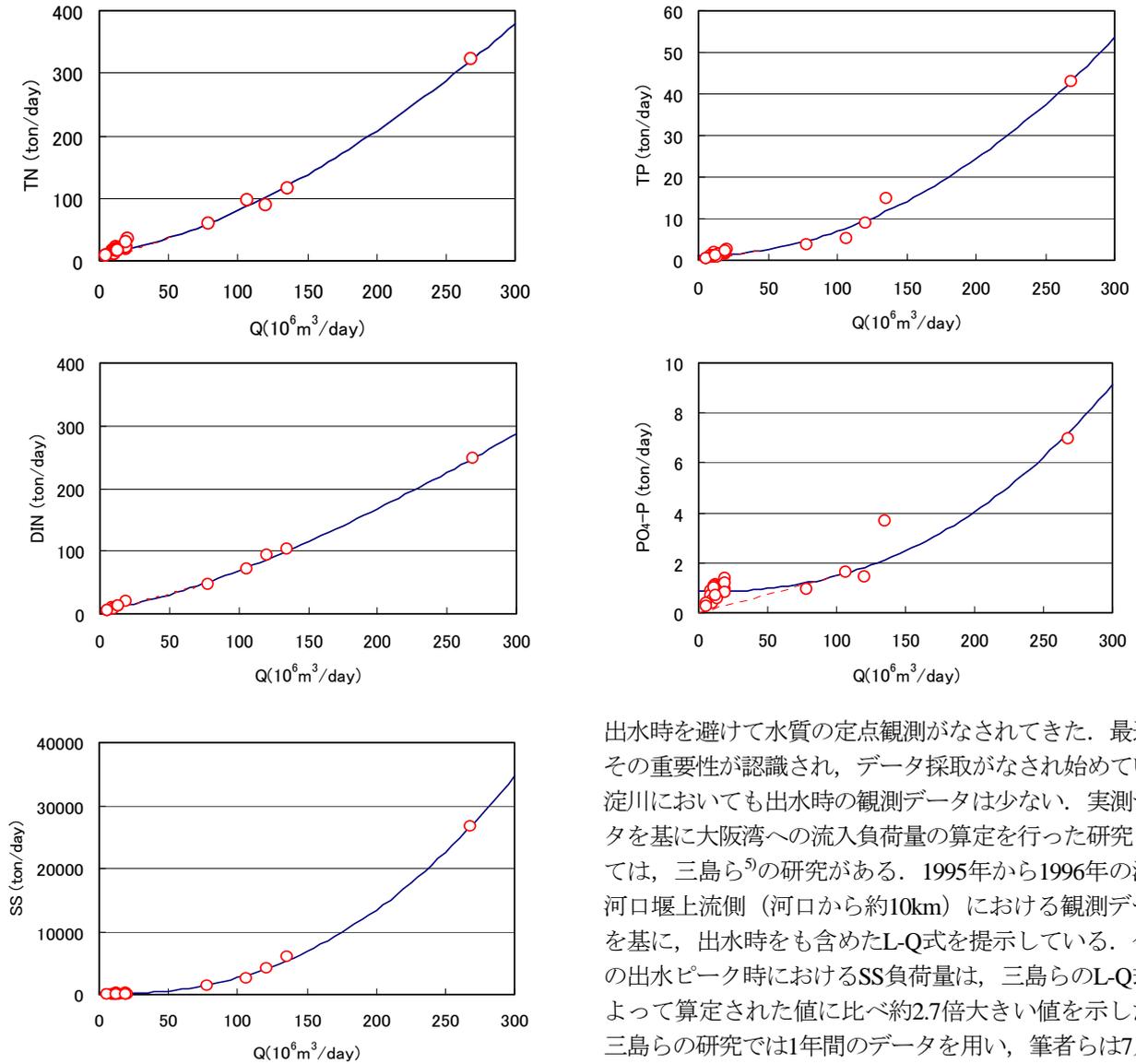


図-4 観測値とL-Q曲線

よって観測された2005年と2006年の7月および8月の観測値も載せている。

これまで言われているように出水時の流入負荷量は非常に大きな値となる。また、短期間に淡水、SS、栄養塩の供給がなされるため、海域へのインパクトは極めて大きい。しかし、これまで観測が困難であったことと、発生頻度が低いため河川の代表水質を表わしていないとの認識から、出水時の観測はほとんど実施されず、むしろ

出水時を避けて水質の定点観測がなされてきた。最近はその重要性が認識され、データ採取がなされ始めている。淀川においても出水時の観測データは少ない。実測データを基に大阪湾への流入負荷量の算定を行った研究としては、三島ら⁹⁾の研究がある。1995年から1996年の淀川河口堰上流側（河口から約10km）における観測データを基に、出水時をも含めたL-Q式を提示している。今回の出水ピーク時におけるSS負荷量は、三島らのL-Q式によって算定された値に比べ約2.7倍大きい値を示した。三島らの研究では1年間のデータを用い、筆者らは7月の大出水時のデータを用いて算定した違いに加え、観測年や観測地点の違いを考慮したとしても、その差は大きい。

今回の出水においては、流量が500m³/secを超える期間が約2週間継続しており、この期間に負荷されたSSは約53,000tonに達した。三島らは淀川から大阪湾への年間総流入負荷量が142,000tonと報告している。今回はこのうちの約37%にあたるSS量が短期間のうちに負荷されたことになる。

今後、大阪湾への流入負荷量の算定精度向上に向けて、琵琶湖の水質も含めた出水時の観測データの蓄積を行う

表-2 毎月における淀川からの流入負荷と降雨負荷およびその割合

(ton/month)	5月(16~31日)			6月			7月			8月			計(5~8月)		
	淀川負荷(a)	降雨負荷(b)	b/a	淀川負荷	降雨負荷	b/a	淀川負荷	降雨負荷	b/a	淀川負荷	降雨負荷	b/a	淀川負荷	降雨負荷	b/a
NH ₄ -N	5.51	32.02	5.8	26.13	62.99	2.4	59.44	82.33	1.4	14.08	32.40	2.3	105.16	209.74	2.0
NO ₂ -N	3.44	0.80	0.23	6.96	0.64	0.09	9.88	0.45	0.05	6.68	0.69	0.10	26.97	2.58	0.10
NO ₃ -N	210.63	23.14	0.11	567.16	57.01	0.10	1116.84	109.17	0.10	424.54	66.80	0.16	2319.17	256.12	0.11
DIN	219.59	55.96	0.25	600.25	120.63	0.20	1186.15	191.96	0.16	445.31	99.89	0.22	2451.30	468.44	0.19
TN	248.96	71.08	0.29	698.51	201.69	0.29	1535.78	215.75	0.14	498.54	128.29	0.26	2981.79	616.81	0.21
PO ₄ -P	13.51	0.71	0.05	27.08	0.74	0.03	38.89	0.47	0.01	26.19	0.26	0.01	105.67	2.18	0.02
TP	18.88	1.24	0.07	53.04	1.40	0.03	140.57	1.45	0.01	37.11	1.11	0.03	249.60	5.20	0.02

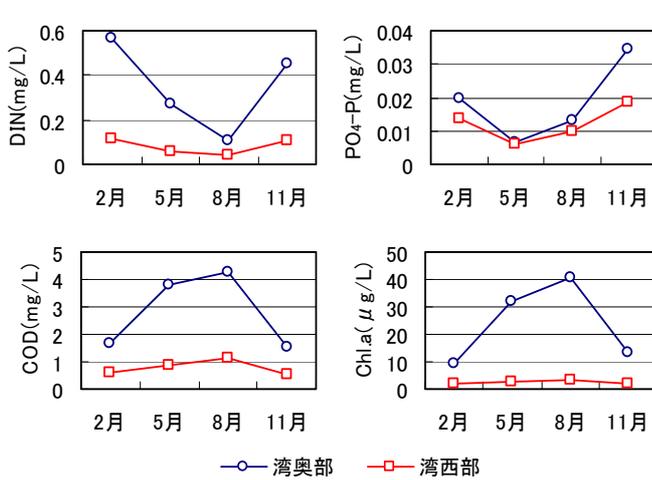


図-5 大阪湾における表層水質の季節変化

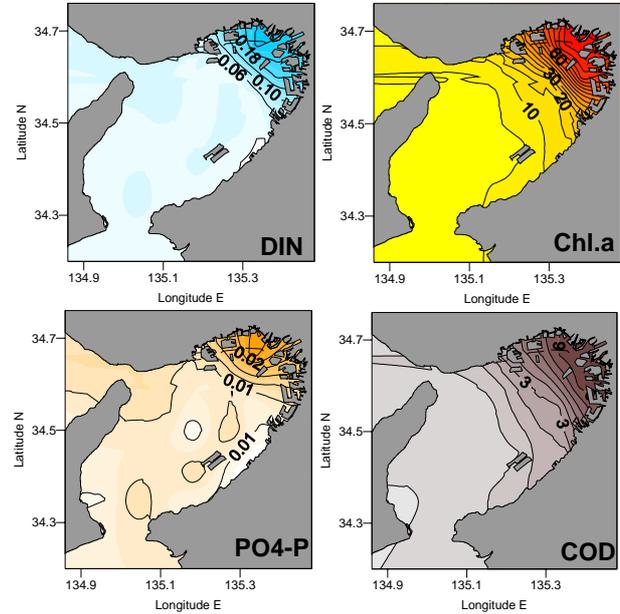


図-6 8月における平均的な水質の空間分布

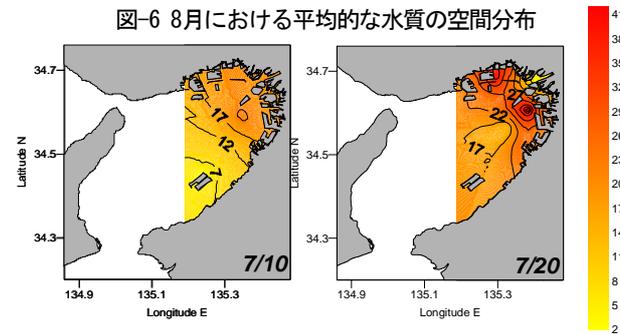


図-7 出水前後の表層Chl.a分布

とともに、観測方法等についても検討を行う必要があると考える。

図-1に示すフラックスに湾面積を乗じて得られた降雨による大阪湾への直接負荷と、淀川からの流入負荷の月毎の割合を表-2に示す。海上での観測データがないため、ここでは陸域データを用いて算定した。なお、陸域3地点の負荷量の差異はTNについて約±30%であった。出水が生じた6、7月には他月に比して淀川から大量の負荷が大阪湾に流入している。また、Pに関しては、淀川からの負荷に比べ降雨負荷の割合は微少であった。一方、Nについては降雨負荷の影響は無視できない程度であり、特にNH₄-Nにおいては淀川からの負荷を上回る値を示した。

3. 大阪湾への影響解析

(1) 水質の現況

図-5に浅海定線調査データ(1996~2005年)を季節別に10年平均した大阪湾の表層水質(N, P, COD, Chl.a)を示す。また、図-6には8月の平均的な空間分布を示す。湾奥部においては、N, Pとも富栄養状態にあり、降雨による直接的なN, Pの増加や塩分の低下等の影響は少ないと考えられるが、湾西部海域では、N, P濃度が低く、降雨による栄養塩の供給によって一次生産が増加する可能性がある。例えば、N=0.04mg/L, P=0.01mg/Lの海域に、7月20日に観測された降雨によりN,

Pが海面に供給された場合、表層1mに混合拡散したとしても、N, Pはそれぞれ0.038mg/L, 0.0003mg/L増加し、N=0.078mg/L, P=0.0103mg/Lとなる。これは、クロロフィルa(Chl.a)の増殖速度にしておおよそNに関しては14%の増加、Pに関しては0.7%の増加を意味する。

一方、出水に伴う河川からの流入負荷に関しては、湾奥河口域においては栄養過多の状態にあるため、出水による栄養塩濃度の変化が、一次生産の増加に大きな影響を及ぼすとは考えにくい。むしろ、高SSの淡水が多量に流入するために、増殖率の低下や増殖種の変化が生じる可能性がある。また、SSの沈降により、吸着態リンの底層への供給と海底への堆積が生じ、長期的に一次生産に影響を及ぼすものと考えられる。

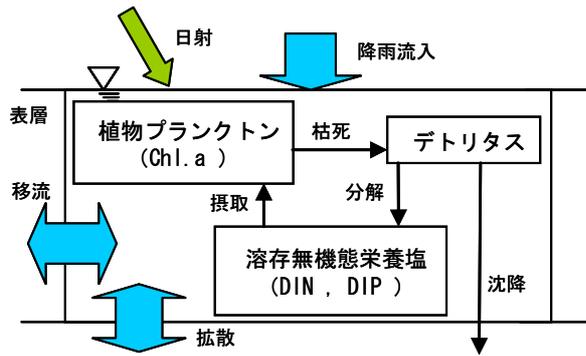


図-8 SDモデルの概念図

しかし、河口から流出した河川水が沖合へと拡がるため、沖合では栄養塩濃度の上昇が生じ、一次生産がより活発になるものと考えられる。

図-7に大阪府公共用水域水質調査(7/10)および大阪湾環境保全調査(7/20)によって得られたChl.aの表層分布を示す。7月15日の出水後に観測された分布を見ると、沖合においては出水前に比してChl.a濃度の上昇が顕著に現れている。

(2) モデル解析

降雨および出水の海域への影響を明らかにするために、簡単なシステムダイナミクスモデル(SDモデル)を用いた解析を試みた。モデルの概要を図-8に示す。気象変化に対する表層1mの水塊の水質応答性を調べた。

降雨による一次生産への影響が予想される湾西部海域を対象に、水塊の初期栄養塩濃度を $N=0.02\text{mg/L}$ 、 $P=0.005\text{mg/L}$ 、 $\text{Chl.a}=3\mu\text{g/L}$ に設定し、気象(降雨、日射)は実測された値を用いて、7月1日～7月31日の水質計算を行った。

出水時の河口沿岸域の水質応答性についても、同様のモデルを用いて解析を行った。河口流出によって塩分が半減(15psu)した場合の水質変化を調べた。降雨は無視し、その他の条件は上記の場合と同じに設定した。また、有害赤潮ラフィド藻*Chattonella antiqua*を対象とした研究⁶⁾を参考にプランクトンの最大増殖速度に塩分依存性をもたせ計算を行った。

いずれの計算においても、水質計算に用いたパラメータは既往の水質計算⁷⁾に使用したものを採用した。

(3) 解析結果

SDモデルによる解析結果を図-9に示す。降雨を無視した場合には、窒素制限の働いた安定した状況を示し、植物プランクトンの変動も小さい。一方、降雨による窒素の供給を考慮すると、表層窒素濃度の上昇に伴い植物プランクトンが増加していることがわかる。特に窒素の供給が多かった7月17日は、降雨後に晴天が続いたこともあり急激な植物プランクトンの増加が見られ、降雨の影響を無視した場合の2倍以上に達している。再び窒素

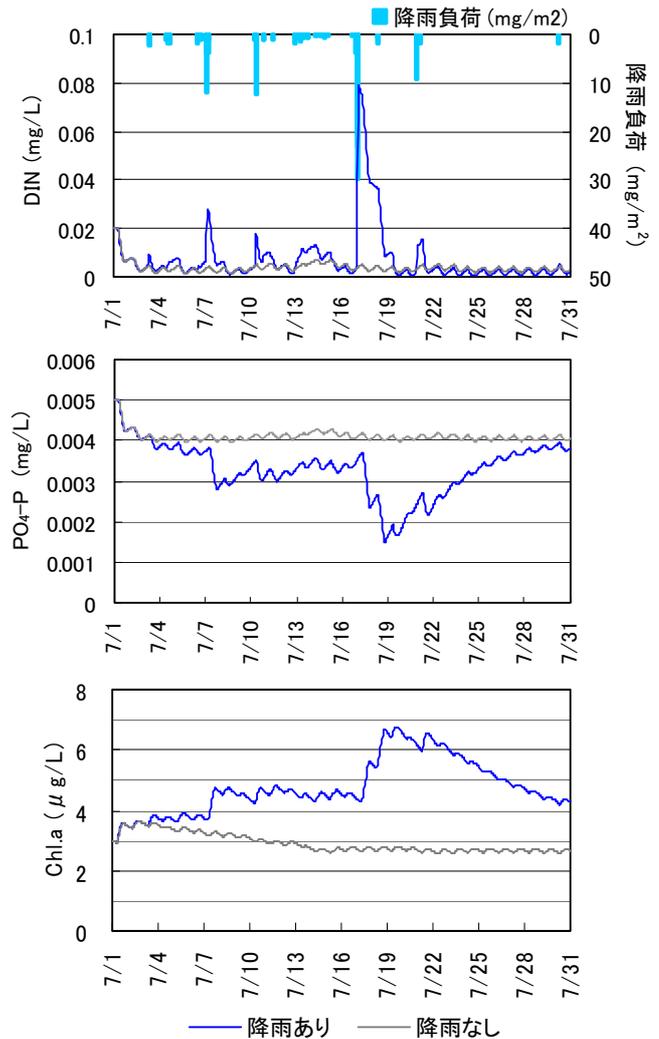


図-9 SDモデル結果(降雨の影響)

が枯渇するまでこの増殖が続き、降雨による窒素の供給がなくなると、プランクトン量は減少に転じ、窒素制限を受けた安定状態へと移行する。降雨の頻度が低く、また、窒素の負荷量も少ない場合には、僅かなプランクトンの増殖と短期の影響にとどまるが、本計算を行った2007年7月は降雨の頻度が高かったため、プランクトン量は高い状態に保持され、プランクトン増加の影響が長期に及んでいることがわかる。

このように富栄養化が進んだ大阪湾においても、海域によっては降雨による栄養塩の直接流入が一次生産に影響を及ぼしている可能性があることがわかった。このことは窒素制限がかかり生産性の低い海域では、降雨が生産性の維持に僅かながら寄与していることを示している。今後、移流拡散を考慮した3次元モデルによる検証が必要と考えられる。

出水時における河口沿岸域の水質応答性についての解析結果を図-10に示す。出水を無視した場合には湾西部と同様に窒素制限下の安定した水質を示し、植物プランクトン量の変動も小さい。一方、出水による影響を考慮

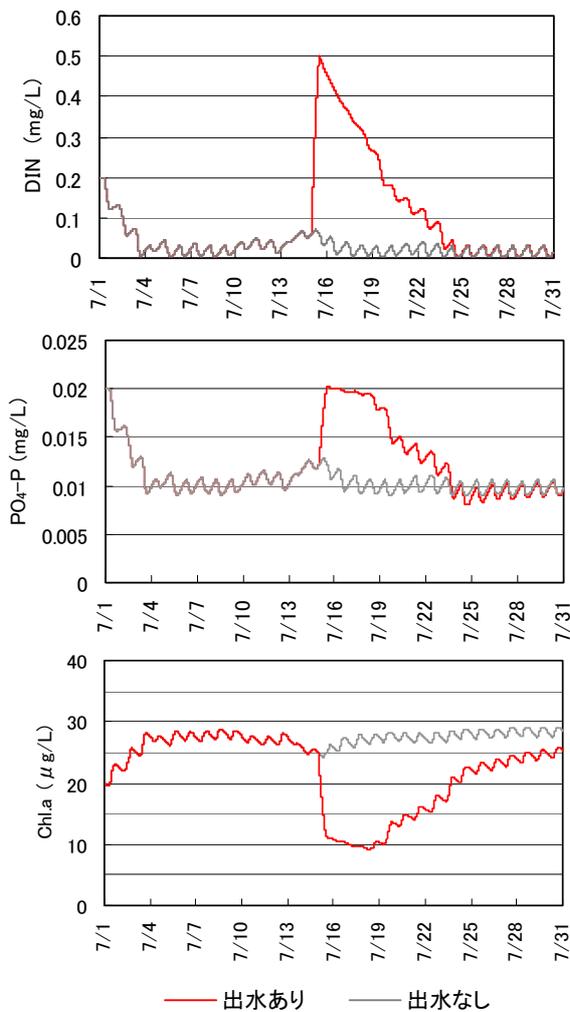


図-10 SDモデル結果（出水の影響）

すると、栄養塩濃度の高い河川水の流入により、N、Pは増加し、また淡水との混合による希釈効果を受けて塩分、Chl.aは低下する。加えて、出水時には河川由来のSSが多量に供給されることにより、水中日射量が減衰する。その結果、出水時における河口沿岸域においては、出水後約3日間は植物プランクトンの増殖が制限される。その後、SS濃度の減少とともにプランクトン増殖が活発化し、1週間程度で出水前の栄養塩濃度にまで回復する。

以上のように、河口沿岸域において出水による淡水供給は、表層の栄養塩濃度および植物プランクトン量に短期的かつ大きな影響を及ぼすことがわかる。

4. まとめ

本研究では、雨水と淀川河川水の水質観測データを基に、降雨が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) 1降雨あたりの窒素負荷量は $30\text{mg}/\text{m}^2$ を超える場合

もあったが、リンは2桁低い値を示していた。このことは、窒素制限が働いている水域において、降雨が内部生産に寄与する可能性があることを示唆している。

- (2) 出水時の観測結果を基に、淀川下流域のL-Q式を構築したが、既往の結果と異なる結果を示していた。
- (3) 湾奥部においては、N、Pとも富栄養状況にあり、降雨の影響は小さいと考えられるが、湾西部海域では、N、P濃度が低く、降雨による栄養塩の供給によって一次生産が増加する可能性がある。
- (4) SDモデルを用いて湾西部海域における降雨の影響を解析したところ、降雨による窒素の供給を考慮すると、植物プランクトンが増加し、その量は降雨の影響を無視した場合の2倍以上に達していた。
- (5) SDモデルを用いて河口沿岸域における出水の影響を解析したところ、河川水流入の影響を受けて表層栄養塩濃度および植物プランクトン濃度は、短期間に大きな変動を示していた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、観測と水質分析に際し寺中恭介君および今井文乃君をはじめとする研究室学生の助力を、また、試料分析では（株）福田水文センターのご協力を頂いた。あわせて感謝の意を表する次第である。なお、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。

参考文献

- 1) 沿岸環境研究会：シンポジウム「沿岸海域に存在する外洋起源のリン・窒素」、沿岸海洋研究、43巻、第2号、2006。
- 2) 西田修三・金漢九・高地慶・入江政安・中辻啓二：紀淡海峡における水質変動特性と栄養塩輸送、海岸工学論文集、第53巻、pp.996-1000、2006。
- 3) 多田邦尚：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、1998。
- 4) 星加章・谷本照巳・三島康史：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、1994。
- 5) 三島康史・星加章・谷本照巳・Shettapong MEKSUMPUN：淀川河川水の化学組成とその大阪湾への流入負荷量、中国工業技術研究所報告、No.52、1999。
- 6) 山口峰生・今井一郎・本城凡夫：有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella antiqua* と *C. marina* の増殖速度に及ぼす水温、塩分および光強度の影響、日本水産学会誌、57(7)、pp.1277-1284、1991。
- 7) 入江政安・中辻啓二・西田修三：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、2004。

(2007.9.30受付)