

広域的な視点による瀬戸内海の水質特性および流入負荷の影響割合に関する検討

ESTIMATION OF INFLUENCE OF NUTRIENT LOADING FROM RIVERS AND OUTSIDE OF THE SEA ON CHLOROPHYLLA IN THE SETO INLAND SEA

岡田知也¹・高尾敏幸²・古川恵太¹

Tomonari OKADA, Toshiyuki TAKAO and Keita FURUKAWA

¹正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部海洋環境研究室
(〒238-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修(株)エコー 環境・計画部 (〒110-0014 東京都台東区東区北上野2-6-4)

In the Inland Sea of Japan, influence of nutrient loading from rivers and out of the sea on chlorophyll *a* concentration was estimated. The sea was divided by 24 boxes in the calculation. Sensitivity of each river and outside of the sea, west-side and east-side, to chlorophyll *a* concentration in each box was analyzed. The results of the sensitivity analysis showed the followings. The nutrient loading from the east-side was the most effective for the boxes from the Sea of Aki to the Sea of Harima. The effect of the nutrient loading from the west side was difference between August and October. In addition, although the Takase River, the Asahi River, the Yoshii River and the Ashida River affected the whole the sea, the Ota River, the Oze River affected only the boxes from the Sea of Iyo to the Sea of Hiuchi.

Key Words: Nutrient loading, Chlorophyll *a* concentration, Numerical model, The Seto Inland Sea

1. はじめに

瀬戸内海は潮流の強い瀬戸と潮流の弱い灘により構成され、その複雑な地形が高い漁業生産量を生む日本の代表的な内湾である。しかしながら、1960年頃より瀬戸内海工業地帯に代表される工業化や都市化により陸域からの汚濁物質の流入による海域の汚濁が問題化した。その後、下水道の整備および瀬戸内海環境保全特別措置法等により陸域からの直接負荷は減少し、深刻化していた海域の汚濁は改善されたが²⁾、内部生産による汚濁レベルおよび赤潮の発生回数はここ20年近く横這いである。その対策として、個別水域での水質改善策および自然再生事業等が実施されている。これら個別事業の目標設定および予期される問題の対策を検討する場合、対象範囲は事業実施の湾や灘に限定されがちである。

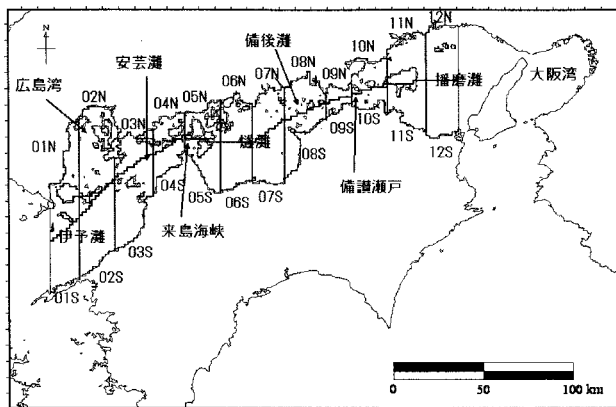
しかし、ある水域の主要な流入負荷が必ずしもその水域の背後地でないと思われる瀬戸内海においては、局所的な視点に加えて水域を跨いだ広域

的な視点が重要であると著者ら考える。そこで本研究では、今後の広域的な視点の参考情報とすべく、伊予灘から播磨灘までの水域(図-1(a))におけるChlorophyll *a* (以下、Chl-*a*)に対する主要河川および外海からの流入負荷の影響割合を明らかにすることを目的とした検討を行った。

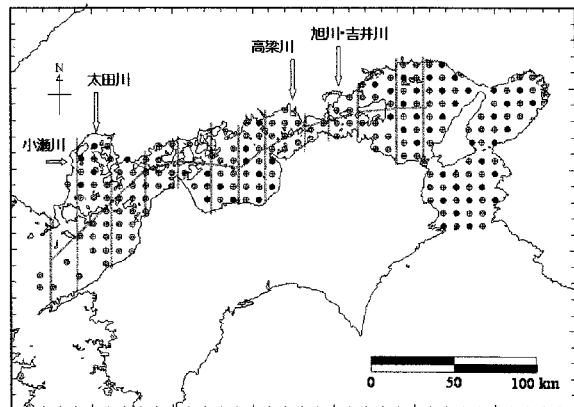
2. データおよび手法

(1) データ

数値モデルの検証用のデータとして、1987年から1999年までの瀬戸内海総合水質測定調査のデータ^{3), 4)}を主に用いた。この調査では、紀伊水道から伊予灘にかけての海域を8 km × 8 km 間隔に区分した地点において、表層(海面-2.0 m)と下層(海底面+2.0 m, 水深50 m以上の水域では水深50 m)で、水温、塩分、溶存酸素濃度(DO濃度)、pH、濁度等(年4回; 5, 8, 10, 2月)が測定されている。また、代表点に対しては、年2回(8, 2月)採水によ



(a)



(b)

図-1 (a) 対象水域およびボックス分割図, および (b) データの測定地点. ○+: 水温, 塩分, DO (年4回); ●: 水温, 塩分, DO (年4回), COD, SS (年2回); ◎: 水温, 塩分, DO (年4回), COD, SS, TN, TP (年2回)

表-1 計算の基本条件

項目	内容	説明
対象範囲	伊予灘から播磨灘	
水平分割	東西に12分割 南北に2分割	(図-1)
鉛直層分割	最大16層	表層から海面下4mまでを2m間隔 海面下4mから60mまでを4m間隔
タイムステップ	300s	
対象潮	M ₂ 分潮	
計算期間	2年間	
境界条件	水温・塩分 海面熱フラックス	観測値から算出 バルク式により算出
初期条件	水位・流速	全域 0
	水温	全域 13℃
	塩分	全域 32.5

る水質測定が行われている (図-1(b)). 本研究では, 水温, 塩分, DO 濃度のデータを用いた.

(2) モデル

MEL1D-MB モデル⁵⁾を計算に用いた. 本モデルは水域をボックスに分割し, マクロスケールで物理・水質の諸現象を検討するものである. 流動場はブシネスク近似を用いた静水圧近似の NS 方程式, 連続式, 水温・塩分の移流・拡散方程式により求める. また, 水平渦動粘性係数, 鉛直渦動粘性係数, 水平渦拡散係数, 鉛直渦拡散係数は, 乱流モデル⁶⁾を適用させることでボックス間のやりとりに関する不確定パラメータの推定を不要にしている. 水質の計算モデルは植物プランクトン, PO₄-P, デトリタス, DO 濃度の4つのコンパートメントを対象としている.

底泥の堆積量はデトリタスが堆積のみを考慮した. 底泥の巻き上げに関する計算は鶴谷ら⁷⁾による泥の沈降・巻き上げに対する式を用いた. このモデルは泥の堆積量をデトリタス濃度と底面せん断力の関数として与えるものである. 本研究は, 水深の深い海域を含む広域を対象に扱っていることから, 底面せん断力は流れのみによる底面せん断力を扱うこととした.

(3) 計算条件

a) 地形条件

表-2 生態系モデルのパラメータ値

項目	名称	記号	単位	値
植物プランクトン	0℃における最大成長速度	α_1	day ⁻¹	0.852
	温度係数	β_1	℃ ⁻¹	0.069
	全無機栄養塩の摂取に関する半飽和定数	K _{Nut}	mmol/m ³	0.2
	最適光量	I _{opt}	ly/day	200
	Chl _a に依存しない消散係数	k ₀	m ⁻¹	0.1
	Chl _a に比例する消散係数	k ₁	(μg/l) ⁻¹ m ⁻¹	1.4×10 ⁻³
	0℃における枯死速度	α_2	day ⁻¹	0.12
	温度係数	β_2	℃ ⁻¹	0.0693
	沈降速度	w _{Phy}	m/day	0.5 (0-4m) 0.2 (4m以深)
	Chl _a /C 比	[Chl _a :C _{Phy}]	—	0.033
栄養塩	植物プランクトンの P/C 比	[P:C _{Phy}]	—	0.786×10 ⁻³
	デトリタスの P/C 比	[P:C _{Det}]	—	0.678×10 ⁻³
	溶出速度	β_4	mgP/m ² /day	0-1500
	溶出し始める DO 濃度の上限値		mg/l	4.0 mg/l
デトリタス	分解速度	α_7	day ⁻¹	0.05
	沈降に関する限界せん断力	τ_d	N/m ²	0.3
	巻き上げに関する限界せん断力	τ_e	N/m ²	0.6
	巻き上げ定数	M	mgC/m ² /s	0.015
	沈降速度	w _{Det}	m/day	1.0 (0-4m) 0.5 (4m以深)
	植物プランクトンの TOD/C 比	[TOD:C _{Phy}]	—	2.00×10 ⁻³
溶存酸素	底泥における 20℃の酸素消費速度	SOD ₂₀	mg/m ² /day	0.163-1.362
	温度補正係数	θ (T=20)	℃ ⁻¹	1.05
	再ばつ気係数	k _a	day ⁻¹	0.15

表-3 各河川の7月の平均流量

河川	7月の月平均流量 (m ³ /s)
小瀬川	32
太田川	138
芦田川	32
高梁川	146
旭川	109
吉井川	133
揖保川	62
肱川	109
重信川	34
土器川	6

対象水域を24個のボックスに分割した (図-1). 鉛直方向には16層 (表層から4mまでを2m間隔に, それ以深を4m間隔に) 最大60mまで分割した (表-1).

b) 潮流

順圧成分に相当する潮汐・潮流は, 瀬戸内海の M₂ 分潮の潮汐振幅の分布⁸⁾をもとに各ボックスの潮汐振幅を設定し, その潮汐振幅を強制的に計算に与えた. 各ボックス間の潮汐振幅の位相差は考

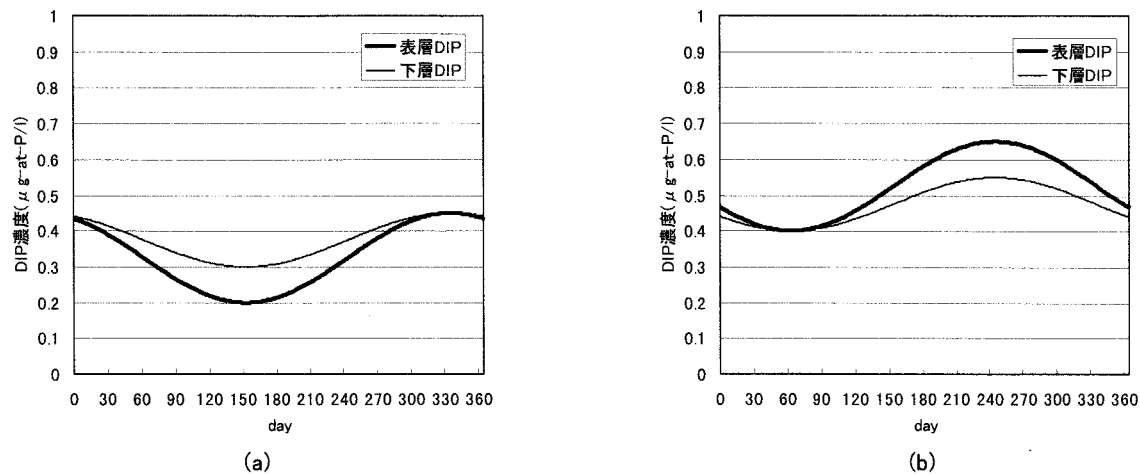


図-2 (a) 西側境界および(b) 東側境界の PO_4 -Pの時間変化

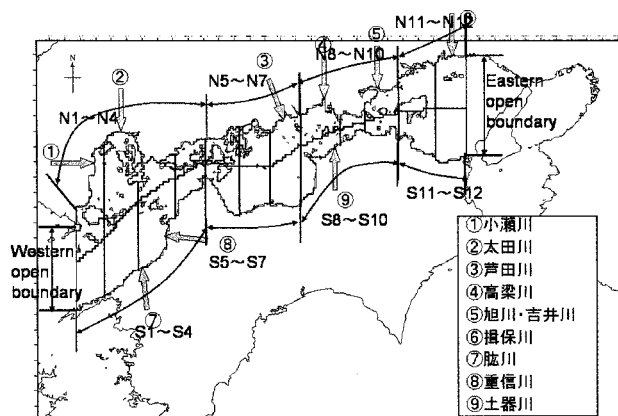


図-3 1級河川の流入位置および河川からの流入負荷の影響範囲の検討のための河川の区分け

表-4 負荷の影響範囲検討のための計算ケース

ケース	計算条件	備考 (1級河川)
1	BOX01N-04N の陸域からの負荷を 0	広島湾-安芸灘 (小瀬川, 太田川)
2	BOX05N-07N の陸域からの負荷を 0	徳島北側 (芦田川)
3	BOX08N-10N の陸域からの負荷を 0	備讃瀬戸北側 (高梁川, 旭川, 吉井川)
4	BOX11N-12N の陸域からの負荷を 0	播磨瀬戸北側 (播磨川)
5	BOX01S-04S の陸域からの負荷を 0	伊予灘 (肱川, 重信川)
6	BOX05S-07S の陸域からの負荷を 0	徳島南側 (なし)
7	BOX08S-10S の陸域からの負荷を 0	備讃瀬戸南側 (土器川)
8	BOX11S-12S の陸域からの負荷を 0	播磨瀬戸南側に流入する河川を対象 (なし)
9	西側開境界の栄養塩の濃度勾配を 0	境界外の栄養塩が内部よりも実源には低い場合は栄養塩を実際よりも供給する。
10	東側開境界の栄養塩の濃度勾配を 0	

慮しなかった。

c) 気象

気象データ⁹⁾は、海面応力の算出およびバルク式による海面熱フラックスの算出に用いられた。広島・松山・高松の1990年1月から2000年12月までの日データから、瀬戸内海の代表的な平均年変動を作成した。平均風速に関しては地点間での差があったが、その他の項目はそれ程大きな差はなかったため、本計算では3地点で平均化された値を用いた。

d) 河川

対象領域に流入する1級河川 (10河川) の1993年1月から1999年12月の流量年表¹⁰⁾の日流量データを用いた。各河川共に7月が最大流量をとり、7月

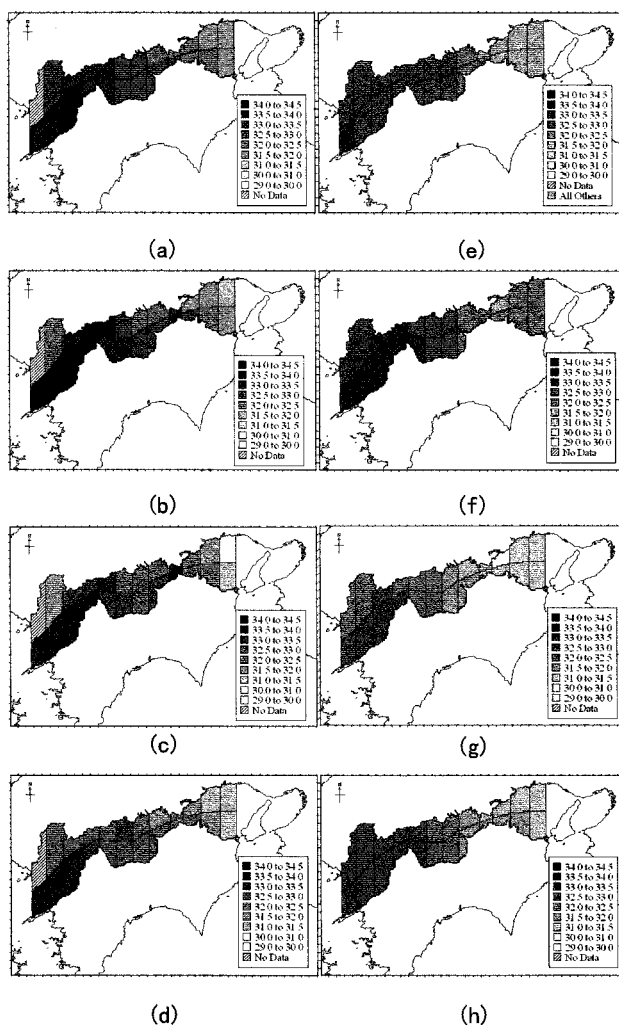
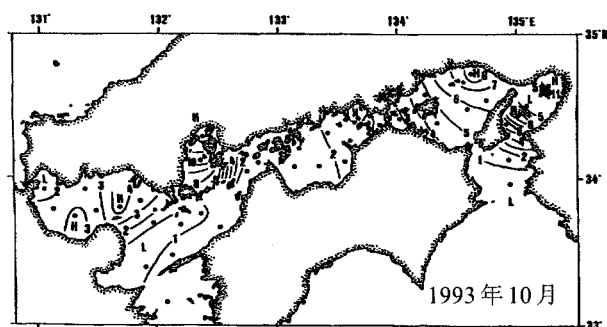
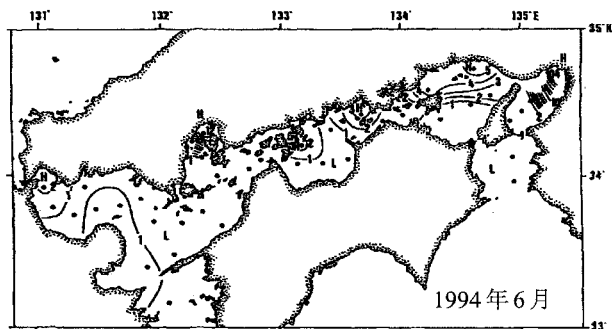


図-4 塩分の観測値 ((a) 2月, (b) 5月, (c) 8月, (d) 10月) および計算結果 ((e) 2月, (f) 5月, (g) 8月, (h) 10月)

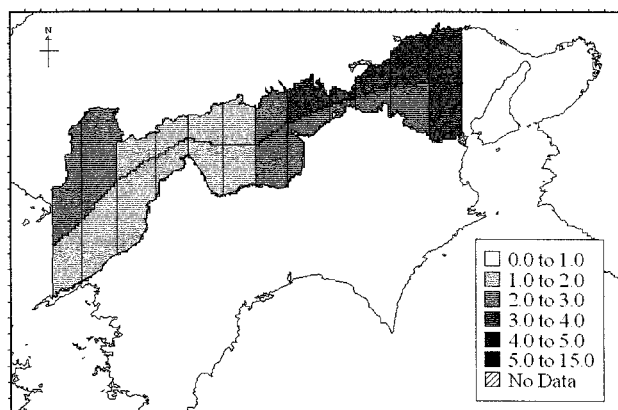
の平均流量が $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の河川は太田川, 高瀬川, 旭川, 吉井川および肱川だった (表-3)。河川流量が計測されている地点は中流域であるので、河口部における流域面積と流量観測所の流域面積の比を掛けたものに、2級河川の流域面積を考慮し



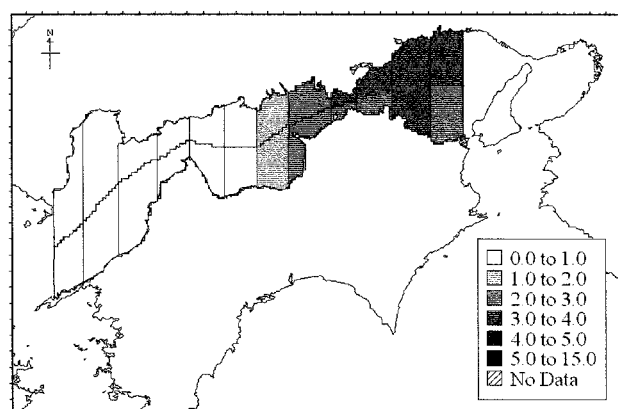
(a)



(b)



(c)



(d)

図-5 Chl-aの観測値¹²⁾ ((a)10月, (b)6月) および計算値 ((c)10月, (d)6月)

た流量に換算した。この換算流量から河川毎に月平均流量を作成した。河川水の水温は季節変化させた。河川からのリンの負荷は0.1 mgP/lの一定濃度とした。

e) 開境界

水温・塩分の開境界値は開境界周辺における水質測定調査データの上層・下層データの月平均値を用いた。

栄養塩濃度に関して、2月および8月の絶対値は水質測定調査データを基に設定し、その他の月の季節変化に関してはフェリー観測による表層栄養塩¹¹⁾に基づいて設定した。播磨灘側の境界では、8月に最大だったが、伊予灘側では12月が最大だった(図-2)。伊予灘側の濃度は表層で0.30 - 0.45 mgP/l、播磨灘側の濃度は表層で0.40 - 0.65 mgP/lだった。

f) パラメータ値

生態系モデルに用いたパラメータ値を表-2に示す。

g) 流入負荷源毎の影響範囲の検討条件

特定区間の河川からの負荷量をゼロとする8ケースおよび開境界からの負荷量を変更する2ケースとした(図-3, 表-4)。計算条件の変更点は境界における栄養塩の流入負荷に関する条件のみとし、水温・塩分の境界条件は変更しなかった。

3. モデル再現性の検証

1年を通じて、伊予灘側で高塩分、播磨灘側で低塩分、また中国地方側で低塩分、四国側で高塩分となる水平分布の特徴は計算結果でも再現された(図-4)。また、5月の安芸灘における高塩分、8月の備讃瀬戸における低塩分などの特徴も観測結果に近い結果が得られた。

1993年10月から1994年6月に測定されたChl-a濃度の観測値¹²⁾と計算値を比較した(図-5)。10月においては、その他の季節では値が低い伊予灘から燧灘にかけての海域で、値が1 µg/l以上となること、播磨灘で3 µg/l以上となること、および他の季節に比べてほぼ全域において値が高いことを再現した。6月においては、伊予灘から燧灘で1 µg/l以下となること、備讃瀬戸から播磨灘で濃度が高く播磨灘北部で4 µg/l以上となることを再現した。

その他、紙面の都合上示していないが、水温、塩分およびDO濃度の鉛直構造およびデトリタス堆積域等対しても、良い再現性を示していた。

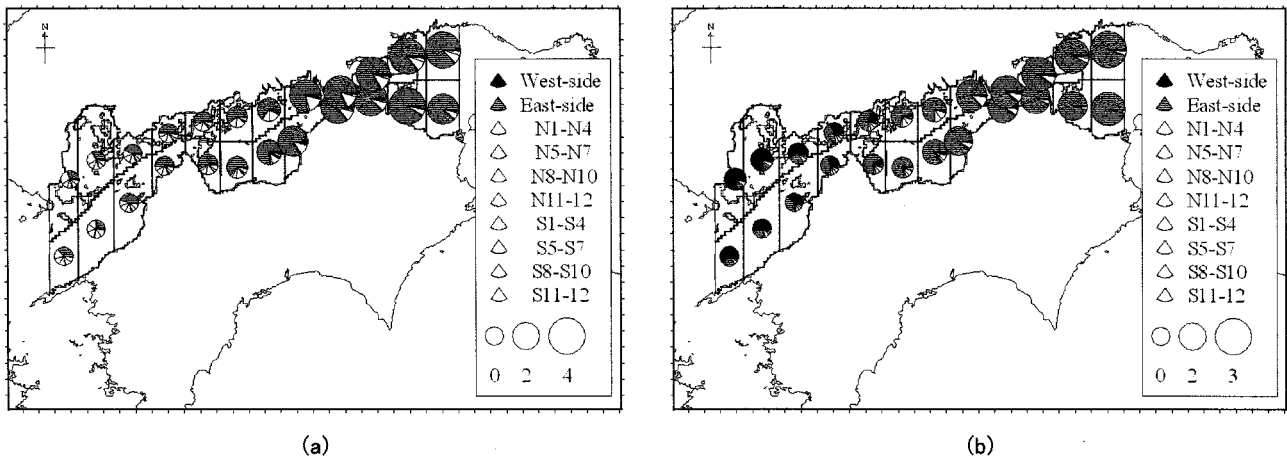


図-6 (a)8月および(b)10月の河川由来の流入負荷および境界からの負荷の影響割合 (単位: $\mu\text{g/l}$)。West-side: 西側, East-side: 東側境界における濃度勾配を0とした場合。西側境界からの負荷の影響と東側境界からの負荷の影響を明瞭にするため、陸域からの負荷の影響分は全て白抜きで示した。

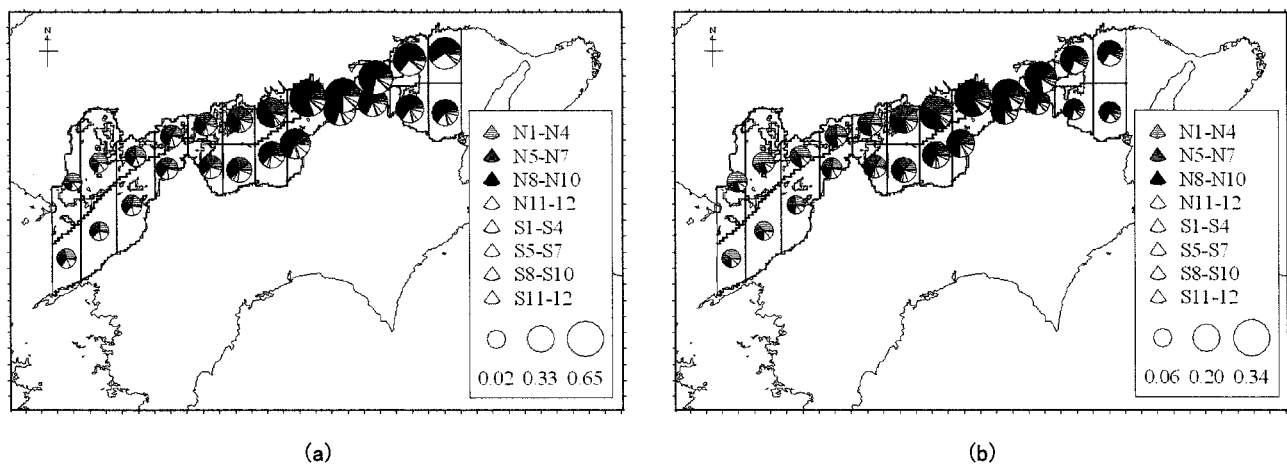


図-7 (a)8月および(b)10月の河川の流入負荷の影響割合 (単位: $\mu\text{g/l}$)。主要な負荷源であったN1-N4, N5-N7, N8-N10の影響を明瞭にするため、その他の負荷源は白抜きで示した。

4. 結果

(1) 境界から負荷の影響

紙面の都合上、図は省略するが、結果は以下だった。東側境界における栄養塩の濃度勾配を0とした場合、8月のChl-*a*は、BOX9 - BOX12 (備讃瀬戸から播磨灘)で90%以上の減少、BOX5 - BOX8 (燧灘 - 備後灘)で50 - 90%の減少、BOX1 - BOX4 (伊予灘 - 安芸灘)においても10%以上の減少だった。一方、10月のChl-*a*は、BOX9 - BOX12 (備讃瀬戸から播磨灘)で80%以上、BOX6 - BOX7 (燧灘)では40 - 60%程度、BOX1 - BOX4 (伊予灘 - 来島海峡)では0 - 30%の減少だった。

西側境界における栄養塩の濃度勾配を0とした場合、8月のChl-*a*は全領域で増加した。一方、10月のChl-*a*は、BOX1 - BOX4 (伊予灘 - 来島海峡)では10 - 40%の減少だったが、BOX7 - BOX12 (燧灘 - 播磨灘)では増加だった。

(2) 各水域における各負荷源の寄与率

式(1)を用いて、特定区間*j*の流入負荷を変化させた場合のボックス*i*におけるChl-*a*の減少量 $\Delta\text{Chl-}a(i,j)$ を減少量の総量 $R(i)$ で割った値 $Z(i,j)$ を求めた。図-6では河川からの流入負荷を0および開境界での栄養塩濃度の勾配を0の場合を、図-7では河川からの流入負荷を0とした場合を考慮した。

$$z(i,j) = \frac{\Delta\text{Chl-}a(i,j)}{R(i)} \times 100 \quad (1)$$

$$R(i) = \sum_k \Delta\text{Chl-}a(i,k) \quad (2)$$

8月および10月共に、BOX3 - BOX12 (安芸灘 - 播磨灘)では東側境界の影響が50%以上、BOX7 - BOX12 (燧灘 - 播磨灘)では70%以上だった(図-6)。また、減少量の大きさは、BOX7 - BOX12 (燧灘 - 播磨灘)の方が大きかった。

8月においては、西側境界の影響は全く無く、BOX1 - BOX3 (伊予灘 - 安芸灘)では、東側境界の影響かもしれない河川からの流入負荷の影響だった。

10月においては、BOX1-BOX2（伊予灘）では、西側境界の影響が70%以上であった。また、西側境界の影響は、BOX5（来島海峡）まで達していた。

河川からの流入負荷の影響割合は、10月よりも8月の方が高かった。河川からの流入負荷が50%以上影響していたのは、8月のBOX1-BOX3（伊予灘-安芸灘）のみだった。10月においては、河川からの流入負荷の影響は、全域において25%以下だった。

河川からの流入負荷の影響で、比較的大きな影響を持ったのは、N1-N4（小瀬川、太田川）、N5-N7（芦田川）およびN8-N10（高梁川・旭川・吉井川）だった（図-7）。中でもN8-N10の影響が最も強く、8月および10月共に、BOX7-BOX12（燧灘-播磨灘）では、河川からの流入負荷に限定した影響割合の50%以上だった。また、その影響はBOX1まで達していた。N1-N4の影響は、8月および10月共に、BOX1-BOX7に及んでいた。しかし、N1-N4の影響が50%以上となるのは、10月のBOX1N-BOX2N（Nは北側のボックスを意味する）だけだった。N5-N7の影響は、8月および10月共に、BOX7を中心に、全水域に及んでいた。

5. 考察

8月および10月共に、東側境界の影響が安芸灘-播磨灘で50%以上だったことから（図-6）、安芸灘-播磨灘においては、Chl-aが高い期間は常に播磨灘側からの流入負荷が主な負荷源であろう。この東側境界の影響が強い要因は、西側境界に比べて、濃度が約2倍であること（図-2）、対象領域内の河川の流量が播磨灘での海水交換量と比べて小さいことだと考えられる。また、この高い負荷は主に大阪湾由来であろう。一方、西側境界の影響は、8月には全く無かったが、10月には伊予灘-安芸灘で70%以上そしてその影響は来島海峡まで及んでいた。この西側境界の影響範囲が8月と10月で大きく異なる要因は、西側境界と東側境界の濃度の季節変動のピークのズレ、すなわち播磨灘側では8月に最大となるのに対して伊予灘側では12月に最大となること（図-2）であろう。

伊予灘から播磨灘の水域のChl-aに影響を与える主要な河川流入負荷は、太田川・小瀬川、芦田川および高梁川・旭川・吉井川だった（図-7）。中でも高梁川・旭川・吉井川の影響が最も大きかった（図-7）。3河川共に7月の平均流量が100 m³/s以上（表-3）であることが要因であろう。高梁川、旭川、吉井川および芦田川の影響は全域に及んでいたのに対して、太田川・小瀬川の影響は、伊予灘から燧灘だった。このような影響範囲および各水域における各河川の影響割合は、10月の広島湾に

おける太田川・小瀬川の影響が強まることを除けば、8月と10月で顕著な差はなかった（図-7）。この要因は、各河川の流量の季節変化が降水に基づいているため、同様だからであろう。

以上の様に、瀬戸内海には幾つかの主だった負荷源があり、各水域の主な負荷源は必ずしもその背後地からの流入負荷ではない。加えて、幾つかの負荷源の影響を受け、各水域にそれらからの影響割合が異なり、また、季節によってその影響割合は変化する。このような広域的な流入負荷の影響割合を念頭に入れた上で、各水域における個別事業の適切な目標の設定を立てること、および事業評価することが重要であろう。

参考文献

- 1) 武岡英隆, 山本民次, 多田邦尚, 上真一, 松田治, 玉井恭一: 漁業生産を支える環境と低次生産, 瀬戸内海の生物資源と環境, 岡市友利・小森星児・中西弘(編), 恒星社厚生閣, pp. 41 - 70, 1996.
- 2) 合田健, 津野洋: 海洋汚染と防止策の歴史, 瀬戸内海の自然と環境, 柳哲雄(編), 合田健(監修), 社団法人瀬戸内海環境保全協会発行, pp. 199 - 222, 1998.
- 3) 運輸省第三港湾建設局: 瀬戸内海総合水質調査活用手法検討業務報告書, 2000.
- 4) 宮野仁, 日比野忠史, 中山恵介, 岡田知也, 細川恭史, 浅井正: 内湾域の水環境に影響を及ぼす物理的要因に関する考察-瀬戸内海総合水質測定調査データによる解析-, 港湾技術研究所報告, 第39巻, 第2号, 2000.
- 5) 古川恵太, 中山恵介, 岡田知也, 宮野仁: 環境施策に資する内湾域の総合的な環境把握を目指したMEL1D-MBモデルの構築, 国土技術政策総合研究所研究報告, Vol. 1, pp. 1 - 16, 2001.
- 6) Mellor, G. L., and T. Yamada: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, pp. 851 - 875, 1982.
- 7) 鶴谷広一, 村上和男, 入江功, 笹嶋博, 糸井正夫: Fluid mudを考慮した三次元シルテーション予測モデルについて, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1011 - 1015, 1994.
- 8) 柳哲雄, 樋口明生: 瀬戸内海の潮汐・潮流, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 555 - 558, 1981.
- 9) 気象庁(編集): 気象年報, 地上気象観測資料CD-ROM, 1990 - 2000.
- 10) 国土交通省(編集): 流量年表, 1993 - 1999.
- 11) 原島省, 紀本岳志, 田中祐志, 若林孝, 利安忠夫, 太田英介: フェリーにより得られた栄養塩の時空間変動とシリカ欠損, フェリー利用による海洋環境モニタリングおよび関連研究に関する総合報告書, 環境庁 国立環境研究所, pp. 85 - 97, 2000.
- 12) Tada, K., K. Monaka, M. Morishita and T. Hashimoto: Standing Stocks and Production Rates of Phytoplankton and Abundance of Bacteria in the Seto Inland Sea, Japan, J. Oceanogr., Vol. 54, pp. 285 - 295, 1998.