

# 閉鎖性海域の富栄養化の可能性と許容される窒素・リンの負荷量に関する研究

松梨史郎<sup>1</sup>・今村正裕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学部

<sup>2</sup>正会員 工修 同上

(〒270-1194 我孫子市我孫子1646)

閉鎖性海域の水質問題や環境容量を考える上で、富栄養化のしやすさ、一旦富栄養化した場合の改善のしにくさ、環境基準を維持するための許容負荷量の推定、等の問題点が浮上してくる。本研究では、まず全国の主な閉鎖性海域における湾の地形や滞留時間、負荷量等の特性を比較した。次に湾の平均水深と更新率の積と、全窒素・全リンの表面積負荷量の関係図において、全窒素・全リンの物質収支に基づく検討から環境基準濃度を維持するための負荷量曲線を描き、各湾の富栄養化の特性の相違を比較検討するとともに富栄養化の可能性について検討した。さらに同図を用いて、全窒素・全リンに関する許容負荷量の推定が可能であることを示した。

**Key Words:** enclosed coastal seas, eutrophication, environmental capacity, pollutant load, nutrient

## 1. はじめに

人口や産業の集中する閉鎖性海域は、その閉鎖性のために水質の環境基準の達成率は横這い状態が続いている。また、干潟や生態系の保全に対する社会的関心が高まっている。今後内湾の適切で持続可能な利用を維持していくためには、湾の水質や環境容量を、湾の持つ特性に応じて評価しておくことが必要である。

内藤<sup>1)</sup>は、従来から言われている大気域や水域の環境容量の概念の定義を整理して、表-1に示すように「1)汚染浄化能力」, 「2)環境場の物理的広がり」, 「3)生態系影響の限界」, 「4)許容排出総量」の4つを挙げている。これらについて閉鎖性海域を対象として考えると、「1)汚染浄化能力」と「2)環境場の物理的広がり」については、陸域から流入してきた有機物を湾内でどれだけ分解できるか、また湾外へどれだけ排出できるか、と解釈することができ、「(1)富栄養化しやすい湾、反対に富栄養化しにくい湾とはどのような湾か」、「(2)一旦富栄養化したら

回復しにくい湾とは、すぐに回復する湾とはどのような湾か」、と言った問題を解決することへとつながる。「3)生態系影響の限界」については、「(3)汚濁流入物質の特性や、それに起因する藻類の制限栄養塩の交替、生物の種・生息状況の変化などの生態系の変化」に関する観点が考えられる。また「4)許容排出総量」については、「(4)環境基準を守るためには、流入負荷量はどの程度までしか許されないか」、と言った問題点が浮上してくる。

従来の研究においては、一つの湾について詳細な検討が実施されてきており、湾内の流動や水質・底質の特性、そしてさらにその将来予測・評価について、それぞれにおいて成果が挙げられつつある(内田ら<sup>2),3)</sup>, 中田<sup>4)</sup>, 堀口・中田<sup>5)</sup>, 松梨<sup>6)</sup>, 松梨・今村<sup>7)</sup>)。しかしこれらの解析には多大な入力データやパラメーターと膨大な計算量が必要である。

一方、全国の湾について、湾の特性(地形、流入負荷等)を整理し、富栄養化した海域と富栄養化していない海域や、富栄養化の程度とその原因を相互に比較する検討方法は、湾の特性を大局的にとらえることができ、個々の湾が全国の湾の中でどのような位置にあるのか把握することができる。相互比較というアプローチは、沿岸域の特性評価として三村ら<sup>8)</sup>が実施している。また富栄養化問題については、

本研究の考え方の1部は既に文献13)に発表済みであるが、使用したデータを再検討するとともに、その後の考察内容を加えてまとめ直したものである。

表-1 従来の環境容量概念の定義<sup>1)</sup>

1)汚染浄化能として

- i 対象とする地域内において、種々の自然の汚染浄化因子を集めたものをもって容量とするもの
- ii 自然の浄化因子以外に人為的浄化因子を加えたものをiと区別して定義したもの

2)環境場の物理的広がりとして

大気域や水域の広さ、または体積をもって容量とするもの

3)生態系影響の限界として

- i 自然生態系が変化をうけない限度の汚染レベルをもって規定したもの
- ii 自然生態系以外に、経済・社会・文化的な側面も含む社会生態系を加えた全体に対して影響を生じさせない限度としての汚染レベルをもって規定したもの

4)許容排出総量として

- i 1)iiの浄化能に見合う許容活動量(または排出量)として定義したもの
- ii 対象とする地域内の平均的汚染レベルを、ある基準値内に保持するために許容しうる汚染発生強度の限界をもって規定したもの
- iii 平均的汚染レベルでなく、地域内のいくつかの点における汚染レベルが、すべてのある基準値以下になるために許容しうる汚染発生強度の限界をもって規定したもの

瀬戸内海(野口ら<sup>9)</sup>)や、三大湾(東京湾、大阪湾、伊勢湾)については実施されつつある(柳<sup>10)</sup>)。しかし全国規模での比較検討は、地形と貧酸素水塊の発生との関係を捉えた中尾・松崎<sup>11)</sup>の検討があるのみである。

著者らは既に、データの入手できた全国の閉鎖性海域について、地形的特性、滞留時間、流入負荷量等について比較検討するとともに、湖沼におけるVollenweiderと同様の方法(平均水深と更新率(滞留時間の逆数)の積と全リンに関する表面積負荷量の相関をとる(安芸他<sup>12)</sup>)を閉鎖性海域に適用することによって、閉鎖性海域における許容負荷量の推定の試みを行った<sup>13)</sup>。

本論文では、使用したデータを再検討するとともに、その後の考察内容に基づいて改めてまとめ直し、閉鎖性海域の富栄養化の可能性と許容される負荷量について検討した。

本研究の特徴は、

(i)個々の湾の水質を詳細に解析するのではなく、湾の特性量を収集するとともにそれらを全国規模で比較し、富栄養化の可能性や許容負荷量の推定を試みたこと、

(ii)湖沼におけるVollenweiderと同様の方法を内湾に適用するに当たって、

・内湾での水の更新率(滞留時間の逆数)が、物質輸送が一方向的な湖沼とは異なることや、外海からの流入物質の影響についても考慮したこと、

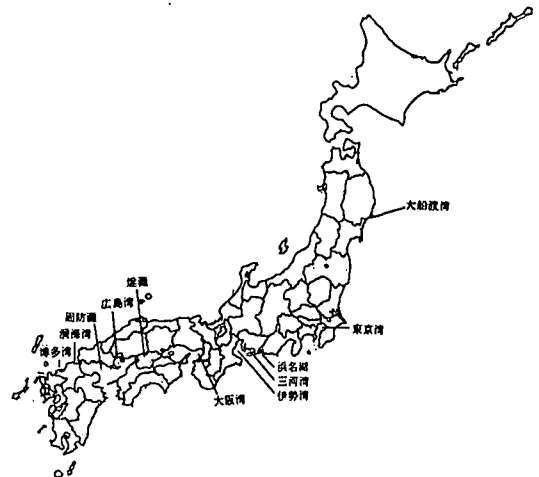


図-1 対象海域

・水一底泥間の物質移動については、海底への沈降量と底泥からの溶出量の両者について考慮したこと、である。

2. 対象海域の地形的特性量、流入負荷量の比較

検討の対象とした湾は、当面データの入手できた湾として、大船渡湾、東京湾、浜名湖、三河湾、伊勢湾、大阪湾、広島湾、燧灘、周防灘、博多湾、洞海湾である。図-1に対象海域の位置を示す。

表-2 湾の諸元 (1)

湾	容量(km <sup>3</sup> )	面積(km <sup>2</sup> )	平均水深(m) <sup>*1)</sup>	領域または 海外との境界
大船渡湾	0.12	7.89	15.2	湾口防波堤両端
東京湾	17.0	960	17.7	富津岬～観音崎
浜名湖	0.33	72.63	4.5	浜松市、湖西市、 浜名郡、引佐郡
三河湾	5.54	604	9.2	羽豆岬～篠島東端～伊良 湖岬
伊勢湾	39.44	2342	16.8	伊良湖岬～大王崎 三河湾を含む
大阪湾	37.9 <sup>*2)</sup>	1400 <sup>*3)</sup>	27.0	友ヶ島水道、 明石海峡
燧灘	23.2	1296	17.9	今治市～三崎
広島湾	24.2	946	25.6	倉橋島～諸島水道～屋代 島～大島瀬戸
周防灘	73.6	3100	23.7	祝島～姫島、関門海峡
洞海湾	0.1	11.9	8.4	若松区響町 ～新日鉄戸畑白地
博多湾	1.2	134.2	8.9	志賀明神鼻～糸島西浦崎

\*1)は(容量) / (面積) , \*2)は合田・村岡(1989)<sup>13)</sup>のデータ,  
\*3)は中西(1993)<sup>14)</sup>、他は中尾・松崎(1995)<sup>15)</sup>のデータ。

表-4 流入負荷量

湾	流入負荷量(ton/day)		データの 取得年	流入負荷量の 出典
	全窒素	全リン		
大船渡湾	0.45	0.04	不明	岩手県(1990) <sup>16)</sup>
東京湾	320	26	1989年	中西(1993) <sup>14)</sup>
浜名湖	4.0	0.29	1990年	中田(1993) <sup>17)</sup>
三河湾	24.58	3.53	1986年	中田(1993) <sup>17)</sup>
伊勢湾	182.3	20.7	1989年	環境庁(1995)
大阪湾	184	22	1987年	中西(1993) <sup>14)</sup>
燧灘	32.4	3.21	1987年	中西(1993) <sup>14)</sup>
広島湾	31.9	3.58	1977年	広島湾栄養塩収支 調査協議会(1982) <sup>18)</sup>
周防灘	57	5.72	1987年	中西(1993) <sup>14)</sup>
洞海湾	5.96	0.44	不明	Yanagi et al(1997) <sup>19)</sup>
博多湾	11.5	1.4	1990年	内田他(1993) <sup>20)</sup>

伊勢湾は三河湾を含む。

表-3 湾の諸元 (2)

湾	湾の平均塩素量 (PSU)		平均淡水 流入量 (m <sup>3</sup> /s)	滞留時間 (day)	更新率 (1/day)	データの 取得年
	湾内	湾外				
大船渡湾	18.07	18.60	2.2	17.9	0.056	1980年
東京湾	17.26	18.75	347.8	45.5	0.022	1979-87年
浜名湖	16.50	18.90	13.8	35.7	0.028	1979-82年
三河湾	16.80	17.93	134.8	30.3	0.033	1979-87年
伊勢湾	16.70	18.09	807.6	43.5	0.023	1979-87年
大阪湾 <sup>*)</sup>	17.53	18.18	335.6	46.5	0.022	1981年8月
燧灘	17.93	17.99	56.7	15.9	0.063	1979-87年
広島湾	17.72	18.20	157.1	47.6	0.021	1979-87年
周防灘	18.02	18.26	175.3	62.5	0.016	1979-87年
洞海湾	17.28	18.44	10.8	6.8	0.148	1990年
博多湾	18.26	18.84	27.0	15.9	0.063	1972年

\*4)は合田・村岡(1989)<sup>13)</sup>のデータから重み付き全層平均値を用いて算出,  
他は中尾・松崎(1995)<sup>15)</sup>のデータ。ただし伊勢湾は三河湾を含む。  
湾の塩素量のデータは、

東京湾、三河湾、伊勢湾、燧灘、広島湾、周防灘：環境庁広域総合水質  
調査資料 (1979-1987)

大船渡湾：岩手県保健研究所、大船渡湾、山田湾における水質調査報告書 (1980)

浜名湖：静岡県水産試験場、浜名湖における海洋観測結果 (1979-1982)

洞海湾：環境衛生研究所北九州市保健局、洞海湾における総合調査報告書 (1990)

博多湾：福岡水産試験場、福岡湾における水産調査 (1972)

平均淡水流入量のデータは建設省の流量年表より年間の平均値を算出。

河川流量のデータの年度は海域のデータの算出年度に対応。

これらの湾について、地形的特性、滞留時間、流  
入負荷量等について比較した。表-2, 3, 図-2～図-6  
に湾の容量、面積、平均水深、滞留時間、更新率  
(滞留時間の逆数)を示す。ただし滞留時間は湖沼  
と異なり、次式で示すような湾の内外における塩分  
値から計算した湾内淡水量から算出した。

$$V_f = \frac{S_o - S_i}{S_o} V \quad (1)$$

表-5 面積・容積負荷量

湾	面積負荷量(ton/km <sup>2</sup> /day)		容積負荷量(ton/km <sup>3</sup> /day)	
	全窒素	全リン	全窒素	全リン
大船渡湾	0.0570	0.0051	3.750	0.333
東京湾	0.3333	0.0271	18.824	1.529
浜名湖	0.0551	0.0040	12.121	0.879
三河湾	0.0407	0.0058	4.437	0.637
伊勢湾	0.0778	0.0088	4.622	0.525
大阪湾	0.1314	0.0157	4.855	0.580
燧灘	0.0250	0.0025	1.397	0.138
広島湾	0.0337	0.0038	1.318	0.149
周防灘	0.0184	0.0019	0.774	0.078
洞海湾	0.5008	0.0370	59.60	4.400
博多湾	0.0857	0.0104	9.583	1.167

$$\tau_f = \frac{10^9 V_f}{86400 R_f} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

ここに、 $V_f$  : 湾内淡水量(km<sup>3</sup>)、 $S_o$ 、 $S_i$  : それぞれ  
湾外塩分(塩素量)、湾内塩分(塩素量)、 $V$  : 湾  
の容量(km<sup>3</sup>)、 $R_f$  : 淡水流入量(m<sup>3</sup>/s)、 $\tau_f$  : 滞留時間  
(day)、 $f$  : 更新率(1/day)である。

本研究では年間の平均的な議論を展開するため、  
淡水流入量や滞留時間の算出には年平均値を用いた。

湾の容量を見ると広島湾と燧灘は同程度となっ  
ている。東京湾、伊勢湾、大阪湾の三大湾を比較する  
と、大阪湾が最も大きく、次いで伊勢湾で東京湾は  
やや小さい。これは本研究での東京湾が富津岬ま  
での狭義の東京湾であることによる。面積を見ると

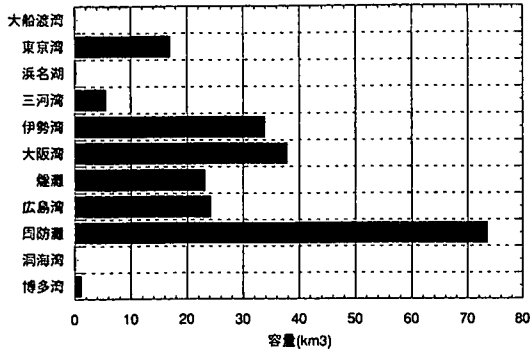


図-2 湾の容量

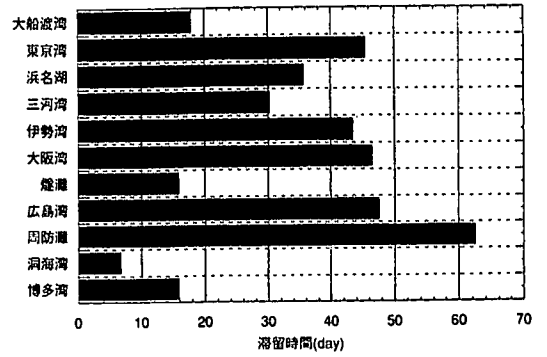


図-5 滞留時間

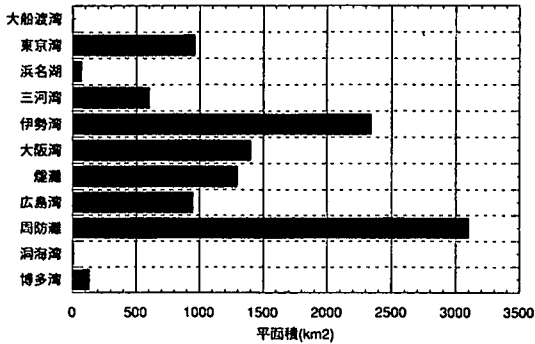


図-3 湾の平面積

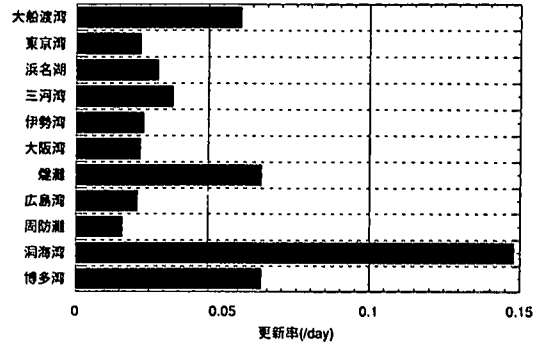


図-6 更新率

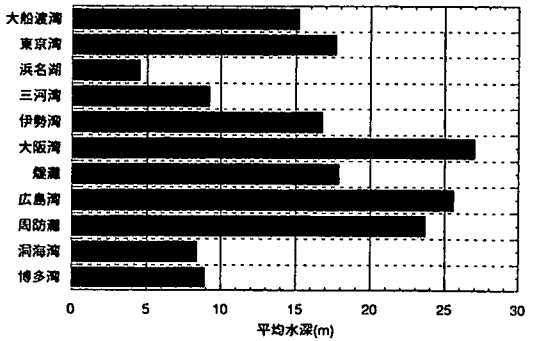


図-4 平均水深

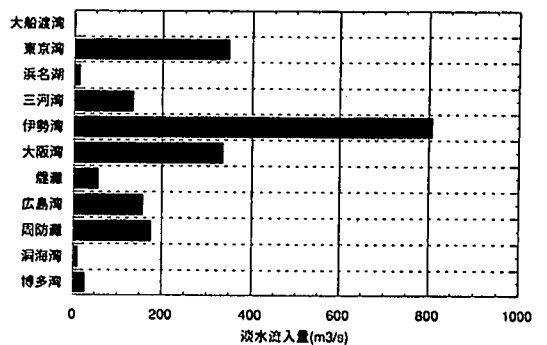


図-7 淡水流入量

容量とは反対に伊勢湾の方が大阪湾よりも大きい。平均水深は大船渡湾、東京湾、伊勢湾、燧灘が同程度であった。

滞留時間が最大となるのは周防灘、最小は洞海湾である。また東京湾、伊勢湾、大阪湾と広島湾、浜名湖と三河湾、燧灘と博多湾は同程度であった。

次に、表-4、5、図-7～図-13にそれぞれ湾へ流入

する平均淡水量、窒素・リンの負荷量、単位面積当たりの負荷量、単位容積当たりの負荷量を示す。

対象海域の中で、淡水量は伊勢湾が最大で、東京湾の倍近い。東京湾と大阪湾は同程度である。流入負荷量は、東京湾は単位面積当たりの負荷量、単位容積当たりの負荷量のどれについても大きい。大阪湾と伊勢湾は同程度である。洞海湾は流入負荷量と

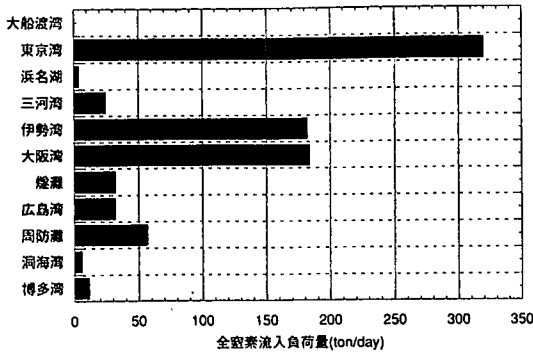


図-8 全窒素流入負荷量

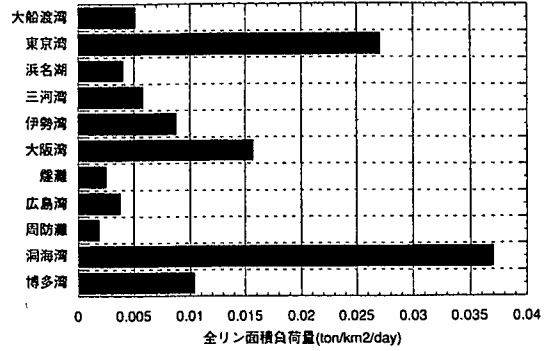


図-11 全リン面積負荷量

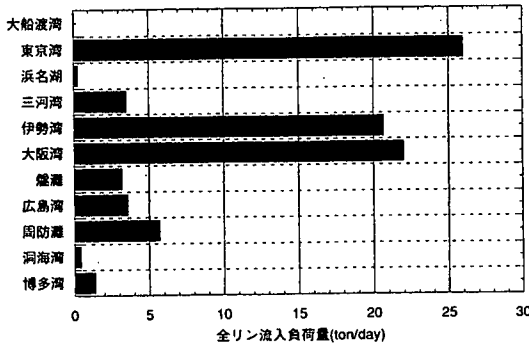


図-9 全リン流入負荷量

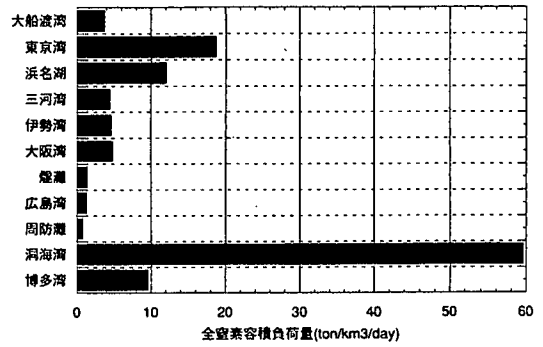


図-12 全窒素容積負荷量

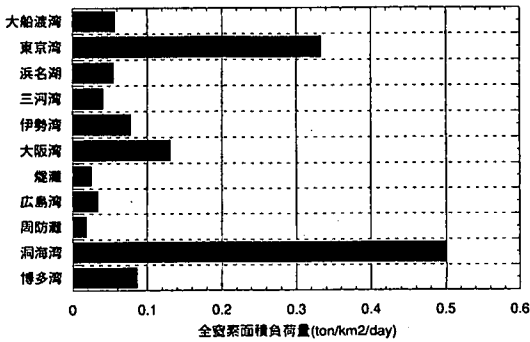


図-10 全窒素面積負荷量

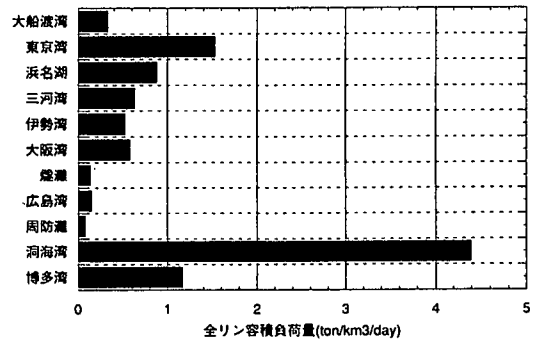


図-13 全リン容積負荷量

しては小さいものの、単位面積当たりおよび単位容積当たりの負荷量で見ると極めて大きく、対象海域の中で最も大きかった。また大船渡湾は、流入負荷量としては最も小さいものの、単位面積当たりの負荷量は三河湾に匹敵するほどの負荷量であった。

このように全国の湾を比較して湾の富栄養化の推定や、許容負荷量を検討するためには、流入負荷量

の絶対値よりも、受け入れ側である湾の面積や容積を考慮した単位面積当たりの負荷量や単位容積当たりの負荷量を対象とする方が適当と考えられる。また湾の平均水深はそれほど大きな差がないため、以下の検討では湾の単位面積当たりの負荷量を対象とすることにした。

### 3. 湾の富栄養化の可能性の推定

#### (1) ボックスモデルによる収支式

次に湖沼におけるVollenweiderと同様の方法（平均水深と更新率（滞留時間の逆数）の積と全リンに関する表面積負荷量の相関をとる（安芸他<sup>12)</sup>）を内湾に適用することによって、湾の富栄養化の可能性や許容負荷量の推定について検討することにする。

図-14に示すように湾を1ボックスとして、湾の内外的全リンの収支を考えると、

$$10^9 V \frac{dC_p}{dt} = 86400(R_f C_{P_{in}} - Q_{10} C_p + Q_{01} C_{P_0}) - 10^9 V \sigma_p C_p \quad (3)$$

$$Q_{01} = Q_{10} - R_f \quad (4)$$

であるから、

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{86400}{10^9} \left( \frac{1}{V} R_f C_{P_{in}} - \frac{Q_{10}}{V} C_p + \frac{Q_{10} - R_f}{V} C_{P_0} \right) - \sigma_p C_p \quad (5)$$

となる。ここに、 $C_p$ ：湾内の全リン濃度(g/m<sup>3</sup>)、 $V$ ：湾の容量(km<sup>3</sup>)、 $R_f$ ：淡水流入量(m<sup>3</sup>/s)、 $C_{P_{in}}$ ：陸域からの流入リン濃度(g/m<sup>3</sup>)、 $Q_{10}$ ：湾内から湾外への輸送係数(m<sup>3</sup>/s)、 $Q_{01}$ ：湾外から湾内への輸送係数(m<sup>3</sup>/s)、 $C_{P_0}$ ：外海のリン濃度(g/m<sup>3</sup>)、 $\sigma_p$ ：リンに関する沈降等による減衰係数(1/day)である。

更新率 $f$ は、

$$f = \frac{1}{\tau_f} = \frac{86400 R_f}{10^9 V_f} = \frac{86400}{10^9} \frac{R_f}{(S_0 - S_i)/S_0} \cdot \frac{1}{V} = \frac{86400 Q_{10}}{10^9 V} \quad (6)$$

であるから、式(5)は

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{86400}{10^9} \frac{1}{V} R_f C_{P_{in}} - f C_p + \left( f - \frac{86400 R_f}{10^9 V} \right) C_{P_0} - \sigma_p C_p \quad (7)$$

となる。定常状態を考えると、

$$\frac{86400}{10^9} \frac{1}{V} R_f C_{P_{in}} = (f + \sigma_p) C_p - \left( f - \frac{86400 R_f}{10^9 V} \right) C_{P_0}$$

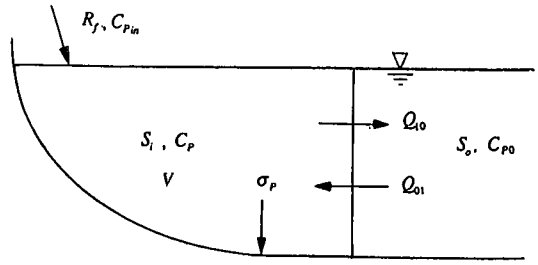
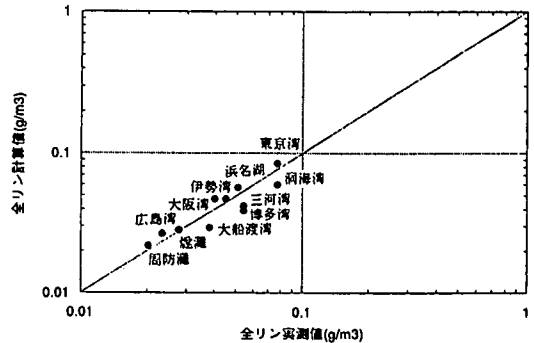


図-14 塩分・全リンの収支

表-6 湾の諸元 (3)

湾	河口濃度		更新率×平均水深 $fz$ (m/day)	淡水流入量/容量 $\frac{86400 R_f}{10^9 V}$ (1/day)	淡水流入量/容量 ×平均水深 $\frac{86400 R_f}{10^9 V} z$ (m/day)
	$C_{P_{in}}$ (g/m <sup>3</sup> )	$C_{P_0}$ (g/m <sup>3</sup> )			
大船渡湾	0.024	0.37	0.8512	$1.6 \times 10^{-3}$	0.02432
東京湾	0.050	0.60	0.3894	$1.8 \times 10^{-3}$	0.03186
浜名湖	0.029	0.30	0.126	$3.6 \times 10^{-3}$	0.0162
三河湾	0.040	0.40	0.3036	$2.1 \times 10^{-3}$	0.01932
伊勢湾	0.040	0.40	0.3873	$1.77 \times 10^{-3}$	0.02979
大阪湾	0.030	0.30	0.594	$7.65 \times 10^{-4}$	0.02066
燧灘	0.026	0.26	1.1277	$2.1 \times 10^{-4}$	0.003759
広島湾	0.020	0.19	0.5376	$5.6 \times 10^{-4}$	0.014336
周防灘	0.017	0.15	0.3792	$2.1 \times 10^{-4}$	0.004977
洞海湾	0.032	1.20	1.2432	$9.3 \times 10^{-3}$	0.07812
博多湾	0.021	-	0.5607	$1.9 \times 10^{-3}$	0.01691

河口濃度は、大船渡湾は1985-87年の平均値（岩手県<sup>13)</sup>）、東京湾、浜名湖は1989年度、三河湾、伊勢湾、大阪湾は1991-1993年度の平均値（公共用水域水質データ）、燧灘、広島湾、周防灘、洞海湾は1991-92年度の平均値（公共用水域水質データ）、博多湾は1990年度の値（内田他<sup>14)</sup>）。



沈降量 $\sigma_p z$ は東京湾は0.14m/day、三河湾、伊勢湾、大阪湾では0.1m/day、他の湾では0m/dayとした。実測値は、大船渡湾は1985-87年の平均値（岩手県<sup>13)</sup>）、東京湾、浜名湖は1989年度、三河湾、伊勢湾、大阪湾は1991-1993年度の平均値（公共用水域水質データ）、燧灘、広島湾、周防灘、洞海湾は1991-92年度の平均値（公共用水域水質データ）、博多湾は1990年度の値（内田他<sup>14)</sup>）。

図-15 全リンに関する実測値と計算値の比較

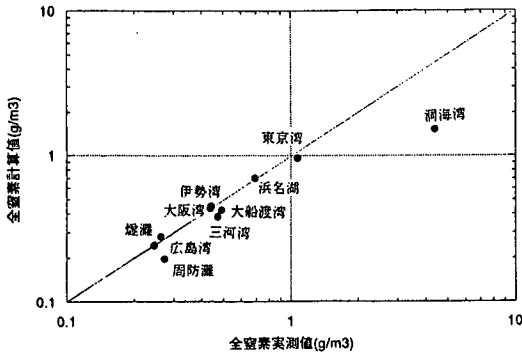


図-16 全窒素に関する実測値と計算値の比較

沈降量  $\sigma_N \bar{z}$  は東京湾は0.18m/day, 三河湾, 伊勢湾, 大阪湾では0.1m/day, 他の湾では0m/dayとした。  
 実測値は, 大船渡湾は1985-87年の平均値(岩手県<sup>10)</sup>, 東京湾, 浜名湖は1989年度, 三河湾, 伊勢湾, 大阪湾は1991-1993年度の平均値(公共用水域水質データ), 燧灘, 広島湾, 周防灘, 洞海湾は1991-92年度の平均値(公共用水域水質データ)

図-16 全窒素に関する実測値と計算値の比較

$$= f(C_p - C_{p0}) + \sigma_p C_p + \frac{86400 R_f}{10^9} \frac{R_f}{V} C_{p0} \quad (8)$$

となる。

$$L_p = \frac{86400}{10^9} \frac{1}{V} R_f C_{pin} \bar{z} \quad (9)$$

とすると,

$$L_p = (C_p - C_{p0}) f \bar{z} + C_p \sigma_p \bar{z} + \frac{86400 R_f}{10^9} \frac{R_f}{V} \bar{z} C_{p0} \quad (10)$$

となる。ただし,  $L_p$ : 単位面積負荷量(ton/km<sup>2</sup>/day),  $\bar{z}$ : 平均水深(m)である。

ここでまずこのような1ボックスモデルによる湾全域の平均濃度の予測精度について検討する。式(10)において各湾の表-6に示す値を代入し, 表面積負荷量から湾内平均水質濃度を逆算し, 実測の平均濃度と比較すると, 図-15, 16に示すように各湾ともに本手法で平均水質濃度が予測可能であることが認められる。一部の湾で若干のずれがあるのは沈降フラックスの見積り影響と考えられる。

## (2) 富栄養化の可能性の概念

上記の知見を踏まえた上で, 横軸に平均水深×更新率(平均水深/滞留時間), 縦軸に全窒素、全リンの面積負荷量を取り, 各湾の富栄養化状況を検討した。

図-17に概念図を示す。海域は図中の曲線に沿っ

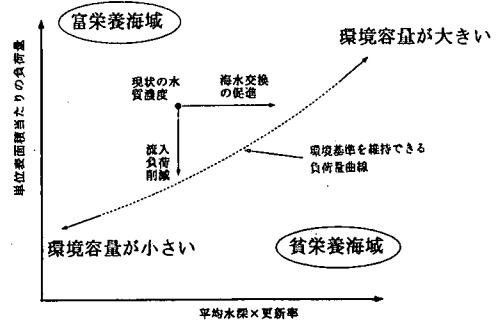


図-17 富栄養化の可能性の概念図

て右上に行くほど湾の水深や更新率が大きいため, 大きな負荷量に耐えられるが, 左下に行くほど湾の水深や更新率が小さくなるため, 負荷量の増大による影響を受けやすく, 富栄養化する可能性があることになる。また負荷量曲線は, 式(10)に示すように, 右辺第1項と第2項を比較すると第1項の小さい領域, すなわち左下に行くほど沈降等による減衰効果や底泥からの溶出負荷の影響(マイナスの沈降量), 外海からの流入物質の影響を受けやすくなる。

また負荷量曲線に対して, 左上方の領域に行くほど富栄養海域に, 右下方の領域に行くほど貧栄養海域になる。従って現在, 左上方の領域にある海域は, 環境基準を満足するためには, 縦軸に平行に鉛直下方に負荷量曲線の負荷量まで流入負荷量を下げること, 横軸に平行に右向きに更新率を上げる方策を講じる必要がある。

## (3) 負荷量曲線の導出

環境基準値濃度について類型別に負荷量曲線を引くと, 各湾が富栄養化レベルとしてどのような位置にあるのかを相互に比較検討することができる。

ここで例えば,  $C_p$ としてリンについての環境基準値を設定し, 環境基準値濃度に対する単位面積負荷量を算出してみる。  $C_p$ として環境基準値を用いるのは, 環境基準値が水の利用目的に応じて意味を持つからである。各湾は湾内の水域の利用目的に応じて環境基準値の類型指定が成されており, 湾全域で1つの類型が指定されているわけではない。しかし上述の方法で海水交換率を算出するならば, 全国の湾を相互に比較することができる。また湾全体として環境基準に対してどのような位置にあるかを探ることができ, これは湾の環境容量を推定する上で重要な視点になるものと考えられる。

式(10)の右辺において,  $C_{p0}$ および  $\frac{86400 R_f}{10^9} \frac{R_f}{V} \bar{z}$ と

して、ここで採り上げた各湾の各平均水質濃度がどの類型程度に相当するかを確認し、各類型に相当する湾の平均値を採用することにする。ここではI類型として周防灘の値、II類型として燧灘と広島湾の平均値、III類型として浜名湖、三河湾、伊勢湾、大阪湾の平均値、IV類型として東京湾の値を用いた。表-7に用いた値を示す。

表-7 全リンの負荷量曲線の算出に用いた値

類型	環境基準値 $C_p$ (g/m <sup>3</sup> )	河口濃度 $C_{p0}$ (g/m <sup>3</sup> )	$C_p - C_{p0}$ (g/m <sup>3</sup> )	$\sigma_p \bar{z}$ (m/day)	$C_p \sigma_p \bar{z}$ (g/m <sup>3</sup> ·day)	$\frac{86400 R_f}{10^9 V} \bar{z}$ (m/day)	$\frac{86400 R_f}{10^9 V} \bar{z} C_{p0}$ (g/m <sup>3</sup> ·day)
I	0.02	0.017	0.003	0	0	0.004977	0.000085
II	0.03	0.023	0.007	0.04	0.0012	0.009048	0.000208
III	0.05	0.035	0.015	0.09	0.0045	0.02149	0.000752
IV	0.09	0.05	0.04	0.14	0.0126	0.03186	0.001593

本検討方法では、外海水の影響は式(10)の右辺第3項のみで決定されるため、湾口幅の差異による影響は議論できない。これは本方法の限界と考えられる。今後さらに、より多くの湾のデータ(負荷量や滞留時間等)が収集できれば、閉鎖度指標等によって場合分けするなど、湾の形状の相違を組み入れていくことも可能かと思われる。

表-8 全窒素の負荷量曲線の算出に用いた値

類型	環境基準値 $C_p$ (g/m <sup>3</sup> )	河口濃度 $C_{p0}$ (g/m <sup>3</sup> )	$C_p - C_{p0}$ (g/m <sup>3</sup> )	$\sigma_p \bar{z}$ (m/day)	$C_p \sigma_p \bar{z}$ (g/m <sup>3</sup> ·day)	$\frac{86400 R_f}{10^9 V} \bar{z}$ (m/day)	$\frac{86400 R_f}{10^9 V} \bar{z} C_{p0}$ (g/m <sup>3</sup> ·day)
I	0.2	0.15	0.05	0	0	0.004977	0.00075
II	0.3	0.23	0.07	0.06	0.018	0.009048	0.00208
III	0.6	0.35	0.25	0.12	0.072	0.02149	0.00752
IV	1.0	0.6	0.4	0.18	0.18	0.03186	0.01912

また  $\sigma_p \bar{z}$  は沈降等による減衰を示すが、ここでは沈降量と底泥からの溶出量の差し引き量としての沈降速度として次のように考える。

沈降速度を  $w_{cp}$  (m/day)、溶出速度を  $W_p$  (g/m<sup>2</sup>/day) とすると、

$$-\sigma_p C_p = -w_{cp} \frac{C_p}{z} + \frac{W_p}{z} \quad (11)$$

従って、

$$\sigma_p \bar{z} = w_{cp} - \frac{W_p}{C_p} \quad (12)$$

と表せる。東京湾のような汚濁の進んだ海域では植物プランクトンの量が多く、沈降量也多ければ、その分底泥からの溶出量も多いと考えられる。ここでは同湾での実測値<sup>19)</sup>(年間の平均値として沈降速度は0.2m/day程度、溶出速度は0.005g/m<sup>2</sup>/day程度)を参考に、環境基準がIV類型では全リンにして  $\sigma_p \bar{z} = 0.14$  m/day (東京湾の平均水質濃度を0.08g/m<sup>3</sup>程度とすると、 $\sigma_p \bar{z} = 0.2$  (m/day) - 0.005 (g/m<sup>2</sup>/day) / 0.08 (g/m<sup>3</sup>) = 0.14 (m/day)) とする。またI類型に相当するような清浄な湾では植物プランクトンの量が少なく、沈降量も少なければ、その分底泥からの溶出量も少ないと考えられるため、I類型では  $\sigma_p \bar{z} = 0$  m/day とした。II類型、III類型ではI類型とIV類型の中間的な値としてそれぞれ  $\sigma_p \bar{z} = 0.04$  m/day、 $\sigma_p \bar{z} = 0.09$  m/day とした。

全リンに関する環境基準は、I類型が0.02mg/l以下、II類型が0.03mg/l以下、III類型が0.05mg/l以下、IV類型が0.09mg/l以下であり、上述の値を考慮してそれぞれについての  $L_{Pi}$  ( $i = I, II, III, IV$ ) (ton/km<sup>2</sup>/day) を求めると、

$$L_{PI} = 0.003 f \bar{z} + 0.000085 \quad (13)$$

$$L_{PII} = 0.007 f \bar{z} + 0.001408 \quad (14)$$

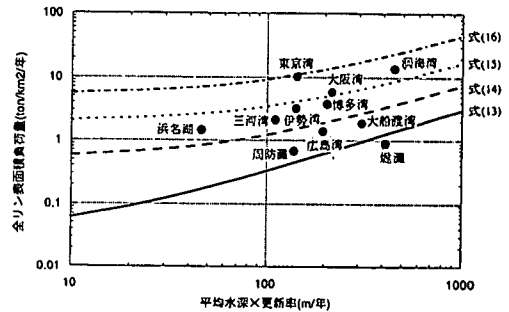


図-18 全リンに関する負荷量曲線

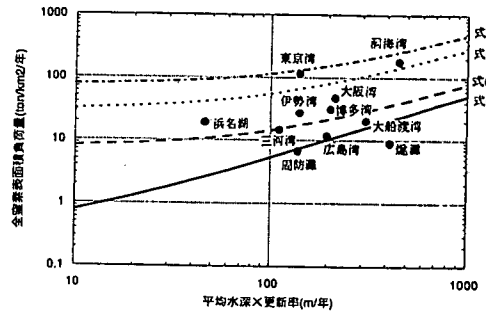


図-19 全窒素に関する負荷量曲線

$$L_{P_{III}} = 0.015 f \bar{z} + 0.005252 \quad (15)$$

$$L_{P_{IV}} = 0.04 f \bar{z} + 0.014193 \quad (16)$$

となる。

これらの式は、それぞれの環境基準濃度を満たすためには、それぞれの湾の固有の値である  $f \bar{z}$  に対して決まる  $L_{Pi}$  ( $i = I, II, III, IV$ ) を維持できなければならないことを示している。

同様に、全窒素についても  $C_{N0}$  および

$\frac{86400 R_f}{10^9 V} \bar{z}$  として、全リンと同様の考え方に基



く値を用いた。表-8に用いた値を示す。

窒素に関する沈降等による減衰係数 $\sigma_N$ (1/day)についても全リンと同様に、ここでは東京湾での実測値(年間の平均値として沈降速度は0.2m/day程度、溶出速度は0.02g/m<sup>2</sup>/day程度)<sup>19)</sup>を参考に、環境基準がIV類型では全窒素にして $\sigma_N \bar{z} = 0.18$ m/day(東京湾の平均水質濃度を1.0g/m<sup>3</sup>程度とすると、 $\sigma_N \bar{z} = 0.2$ (m/day) - 0.02(g/m<sup>2</sup>/day) / 1.0(g/m<sup>3</sup>) = 0.18(m/day))とした。またI類型では $\sigma_N \bar{z} = 0$ m/day, II類型, III類型ではI類型とIV類型の中間的な値として、それぞれII類型では $\sigma_N \bar{z} = 0.06$ m/day, III類型では $\sigma_N \bar{z} = 0.12$ m/day, IV類型では $\sigma_N \bar{z} = 0.18$ m/dayとする。全窒素に関する環境基準は、I類型が0.2mg/l以下, II類型が0.3mg/l以下, III類型が0.6mg/l以下, IV類型が1.0mg/l以下であり、それぞれについての $L_{Ni}$  ( $i = I, II, III, IV$ )(ton/km<sup>2</sup>/day)を求めると、

$$L_{NI} = 0.05f\bar{z} + 0.00075 \quad (17)$$

$$L_{NII} = 0.07f\bar{z} + 0.02008 \quad (18)$$

$$L_{NIII} = 0.25f\bar{z} + 0.07952 \quad (19)$$

$$L_{NIV} = 0.4f\bar{z} + 0.19912 \quad (20)$$

となる。

#### (4)各湾の富栄養化の可能性

図-18, 19に、全リン・全窒素に関する環境基準(I, II, III, IV類型)に対応する負荷量曲線を引き、各湾のデータとの対応を示す。全リンで見ると東京湾、洞海湾は、湾全体で見てもIII類型相当の負荷量を越えており、特に東京湾はIV類型にも匹敵する負荷量であった。大阪湾、伊勢湾、博多湾はIII類型程度の負荷量となっており、これらの湾の水質を改善できるかどうかは、負荷量如何でほぼ決定される海域であると考えられる。

三河湾はこれらの湾に比べると負荷量としては小さいが、平均水深や更新率は小さい。大船渡湾、広島湾はII類型程度の負荷量である。広島湾は湾の北部は汚濁しているが、南部は比較的清浄なため南部も含めた全体ではこのような位置にあるものと考えられる。周防灘と燧灘は上記の中で最も清浄な海域となっている。

また浜名湖は全国規模で見ると、図中の曲線に沿って左下方の領域に属し、負荷量の増大による影響を受けやすく、富栄養化する可能性があるだけでなく、沈降等による減衰効果や外海からの流入物質の影響を受けやすいと考えられる。従って水質を改善で

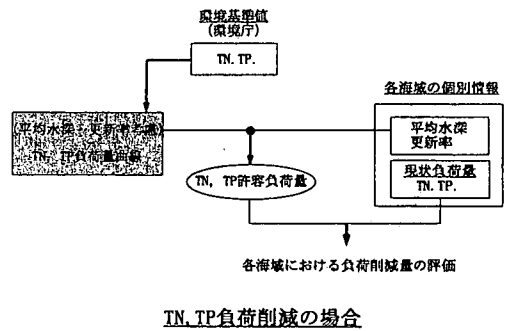


図-20 全窒素、全リンの負荷量削減フロー

きるかどうかは、陸域からの流入負荷量のみならず、沈降等による減衰効果を妨げるもの、すなわち底泥からの溶出量の影響についても留意しなければならない。事実、中田<sup>9)</sup>は浜名湖の湖底全体からの夏季の溶出負荷量を現地調査結果に基づいて算出した結果、底泥からの溶出量が陸域からの流入負荷量に比べて、全リンについては2.6倍、全窒素については同程度であることを示している。

以上のように図-18, 19は、1. に示された検討事項の内、窒素・リンの「(1)富栄養化のしやすさ」に関する1つの回答を与えていると考えられる。

#### 4. 窒素・リンに関する負荷量の削減

図-20に基づいて、全窒素・全リンに関する流入負荷量の削減に関するフローを示す。

すなわちTN, TPに関する許容負荷量曲線を用いて、対象海域の水深および滞留時間と、環境基準値のTN, TP濃度に対するTN, TPの許容負荷量を求め、現状の流入負荷量との比較から削減負荷量を算出することになる。

湾内の水質濃度と負荷量の関係について、対象海域における両者の過去の実測値から求めることによって負荷量の削減量を検討する場合には、実際には濃度-負荷量を示すグラフを広範囲に亘って描くことが困難な場合が多いのではないかと推察される。この点において本研究では物質収支に基づいて、任意の更新率と水深を持つ海域についての濃度-負荷量の関係を求めることが可能である。

既に述べたように、各湾は湾内の水域の利用目的に応じて環境基準値の類型指定が成されており、湾全域で1つの類型が指定されているわけではない。しかし湾全域としてどの程度のレベルまで改善するためにはどの程度の負荷削減が必要かという視点は、水質改善の一応の目安として有用であろうと考える。

以上のように図-20は、1. に示された検討事項の

内、窒素・リンの「(4)許容される負荷量」に関する1つの回答を与えていると考えられる。

## 5. 結 語

内湾における富栄養化現象と許容される負荷量に関する試みとして、全国閉鎖性海域における湾の地形や滞留時間、負荷量等の特性を比較するとともに、平均水深と更新率の積と全窒素・全リンの表面積負荷量の相関図によって、湾全域としての各湾の富栄養化の特性の相違や許容負荷量の推定が可能であることを示した。

以上の内容は、湾全域について1.に示された検討事項の内、「(1)富栄養化のしやすさ」及び「(4)許容される負荷量」に関して1つの回答を与え得たと考えられ、大局的にはあるが、今後、湾の汚濁原因や適切な利用、水質改善対策などの検討を進めていく上での一助となるものと考えられる。

今後は「(2)汚濁した湾の回復」に関して、湾に流入する淡水量の非定常性を考慮しながら検討する予定である。また「(3)汚濁流入物質の特性」に関しては、湾内の制限栄養塩の交替など、湾内水質の応答特性について検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) 内藤正明：環境容量，(社)環境情報科学センター編，図説環境科学，朝倉書店，pp.66-67，1994.
- 2) 内田唯史，浮田正夫，中西 弘，河本靖浩：閉鎖性海域の水質管理システムに関する研究，環境システム研究，Vol.21，pp.428-435，1993.
- 3) 内田唯史，浮田正夫，関根雅彦，中西 弘：富栄養化海域の水質の非線形特性とそのモデリングに関する研究，土木学会論文集，No.503/II-29，pp.187-195，1994.
- 4) 中田喜三郎：沿岸生態系モデルの開発，東海大学学位論文，335p，1993.
- 5) 堀口文男，中田喜三郎：東京湾の水質のモデル解析，Journal of Advanced Marine Science and Technology Society，Vol.1，No.1，pp.71-93，1995.
- 6) 松梨史郎：湾奥水域における水質の時空間変化の解析，土木学会論文集，No.573/VII-4，pp.93-110，1997.
- 7) 松梨史郎，今村正裕：湾奥水域における水一底質予測と負荷削減に伴う水質および栄養塩溶出フラックスの応答，土木学会論文集，No.608/VII-9，pp.31-47，1998.
- 8) 三村信男，小島治幸，川森 晃，喜岡 涉，五明美智男，和田 清，横木裕宗：わが国沿岸域の特性評価ー北海道，茨城，神奈川，愛知，三重，福岡を対象としてー，海岸工学論文集，第44巻，pp.1256-1260，1997.
- 9) 野口仁志，吉口進朗，三浦秀夫，矢沼 隆：瀬戸内海沿岸域における環境特性マップ作成の試み，環境システム研究，Vo.20，pp.101-105，1992.
- 10) 柳 哲雄：東京湾・伊勢湾・大阪湾の淡水・塩分・DIP・DIN収支，沿岸海洋研究，第35巻，第1号，pp.93-97，1997.
- 11) 中尾 徹，松崎加奈恵：地形形状による富栄養化の可能性，海の研究，Vol.4，No.1，pp.19-28，1995.
- 12) 安芸周一，下田 修，白砂孝夫，赤崎俊夫，宮永洋一，坂田昌弘：貯水池水質の調査と解析，電力中央研究所報告，総合報告，No.302，pp.32-36，pp.145-146，1982.
- 13) 松梨史郎，今村正裕：閉鎖性海域の窒素・リンに関する許容負荷量の推定の試み，海岸工学論文集，第45巻，pp.1001-1005，1998.
- 14) 中西 弘：東京湾と瀬戸内海を比較する，流入負荷量，小倉紀雄編，東京湾，ー100年の環境変遷ー，恒星社厚生閣，pp.157-162，1993.
- 15) 合田 健，村岡浩爾：閉鎖性水域水質管理との関係，國松孝男・村岡浩爾編著，河川汚濁のモデル解析，pp.238-239，1989.
- 16) 岩手県：大船渡湾水質管理計画～きれいな湾を守りつづけるために～，pp.38，1990.
- 17) 広島湾栄養塩収支挙動調査検討協議会：広島湾栄養塩収支挙動調査報告書，pp.9，1982.
- 18) Yanagi, T., Inoue, K., Montani, S. and Yamada, M.: Ecological modeling as a tool for coastal zone management in Dokai Bay, Japan, Journal of Marine Systems, Vol.13, pp.123-136, 1997.
- 19) 松梨史郎：都市河川の流入する湾奥部における流動・水質モデルの開発，電力中央研究所研究報告，No.U96009，p.32，1996.

(1999.11.18 受付)

## STUDY ON EUTROPHICATION AND PERMISSIBLE INFLOW LOADS OF NITROGEN AND PHOSPHORUS IN ENCLOSED COASTAL SEAS

Shiro MATSUNASHI and Masahiro IMAMURA

As an attempt on the estimation of the permissible load to enclosed coastal sea, we showed the difference in the characteristics of the eutrophication on each bay and the estimation of the permissible load of TN and TP by using the correlation figure of the loads of TN and TP per unit area and the product of the average water depth and the renewal rate. These results of the study can contribute to the proposition of the water quality improvement plan according to the characteristics of the bay.