

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

松 梨 史 郎*・今 村 正 裕**

1. はじめに

閉鎖性海域の水質問題や環境容量を考える上で、(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、(3)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、とい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，1993，1994；中田，1993；堀口・中田，1995；松梨，1997；今村・松梨，1997）。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（1997）が実施している。また富栄養化問題については、瀬戸内海（野口ら、1992）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、1997）。しかし全国規模での比較検討は中尾・松崎（1995）の検討があるのみである。

本研究は、データの入手できた全国の湾について、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，1982）を内湾に適用することにより、湾の富栄養化の可能性と許容負荷量の推定の試みを行ったものである。

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

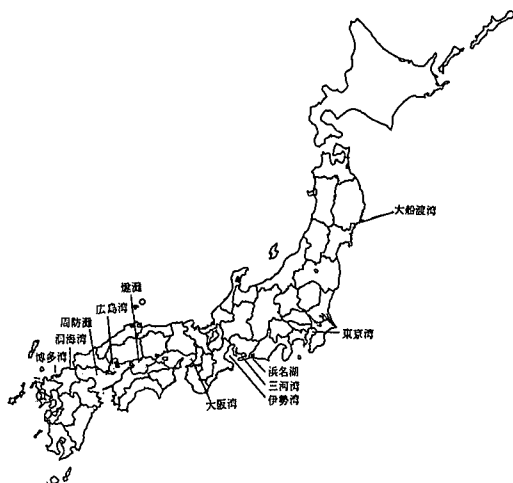


图-1 对象海域

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、物質輸送が一過性の湖沼とは異なることや、外海からの流入物質量の影響についても考慮したこと、である。

2. 对象海域

環境庁が指定した富栄養化の恐れがあるとされる 88 海域を中心に海域を選定した。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。

図一1 に対象海域の位置を示す。

3. 湾の地形特性量, 流入負荷量の比較

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。表一1, 2 に湾の容量, 平面積, 平均水深, 滞留時間, 更新率(滞留時間の逆数), 閉鎖度指標を示す。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。

表-1 湾の諸元 (1)

湾	容量 (km³)	平面積 (km²)	平均水深 (m)*1)
大船渡湾	0.12	7.89	15.2
東京湾	17.0	960	17.7
浜名湖	0.33	72.63	4.5
三河湾	5.54	604	9.2
伊勢湾	33.9	1738	19.5
大阪湾	41.8*2)	1400*2)	28.0*2)
燧灘	23.2	1296	17.9
広島湾	24.2	946	25.6
周防灘	73.6	3100	23.7
洞海湾	0.1	11.9	8.4
博多湾	1.2	134.2	8.9

*1)は (容量)/(平面積)
*2)は中西 (1993), 他は中尾・松崎 (1995) のデータ。

表-2 湾の諸元 (2)

湾	滞留時間 (day)	更新率 (/day)	閉鎖度指標
大船渡湾	17.9	0.056	14.04
東京湾	45.5	0.022	4.52
浜名湖	35.7	0.028	115.96
三河湾	30.3	0.033	1.91
伊勢湾	45.5	0.022	3.63
大阪湾	85.0*3)	0.012*3)	3.4*4)
燧灘	15.9	0.063	0.86
広島湾	47.6	0.021	4.16
周防灘	62.5	0.016	1.86
洞海湾	6.8	0.148	2.16
博多湾	15.9	0.063	2.04

*3)は中西(1993)と合田・村岡(1989)のデータから算出,
*4)は合田・村岡(1989), 他は中尾・松崎(1995)のデータ。

表-3 流入負荷量

湾	淡水流入量 (m³/s)*1)	流入負荷量 (ton/day)		流入負荷量の出典
		全窒素	全リン	
大船渡湾	2.2	0.45	0.04	岩手県 (1990)
東京湾	347.8	320	26	中西 (1993)
浜名湖	13.8	4.0	0.29	中田 (1993)
三河湾	134.8	24.58	3.53	中田 (1993)
伊勢湾	672.8	182.3	20.7	梨境庁 (1995)
大阪湾	272.7	184	22	中西 (1993)
燧灘	56.7	32.4	3.21	中西 (1993)
広島湾	157.1	31.9	3.58	広島湾栄養塩収支調査協議会(1982)
周防灘	175.3	57	5.72	中西 (1993)
洞海湾	10.8	5.96	0.44	柳 (1998); 私伝
博多湾	27.0	11.5	1.4	内田他 (1993)

*1)大阪湾は中西 (1993), 大阪湾以外は中尾・松崎 (1995)。

表-4 面積・容積負荷量

湾	面積負荷量 (ton/km²/day)		容積負荷量 (ton/km³/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	0.1049	0.0119	5.378	0.611
大阪湾	0.1314	0.0157	4.402	0.526
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

ここに、 I : 閉鎖度指標、 S : 湾内の表面積(km²)、 D_1 : 湾内の最大水深(m)、 D_2 : 湾口部の最大水深(m)、 W : 湾口幅 (m) である。

閉鎖度指標が最大となるのは浜名湖、最小は燧灘である。また東京湾と広島湾、伊勢湾と大阪湾や、三河湾、周防灘、洞海湾、博多湾は同程度であった。

次に、表-3、4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。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く、洞海湾は流入負荷量と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

$$V_f = \frac{S_0 - S_i}{S_0} V \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{1}{f} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 V_f : 湾内淡水量 (km³)、 S_0 , S_i : それぞれ湾外塩分、湾内塩分、 V : 湾の容量 (km³)、 R_f : 淡水流入量 (m³/s)、 τ_f : 滞留時間 (day)、 f : 更新率 (/day) である。
滞留時間が最大となるのは大阪湾、最小は洞海湾である。また東京湾、伊勢湾と広島湾、浜名湖と三河湾、燧灘と博多湾は同程度であった。

閉鎖度指標の算出方法は以下の式 (中尾・松崎, 1995) に従った。

$$I = \frac{S^{1/2} \cdot D_1}{W \cdot D_2} \dots\dots\dots (3)$$

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。

4. 許容負荷量の推定の試み

図-2に示すように湾を1ボックスとして、湾の内外における全リンの収支を考えると、

$$V \frac{dC_P}{dt} = R_f C_{P \text{ in}} - Q_{10} C_P + Q_{01} C_{P0} - V \sigma C_P \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_{01} = Q_{10} - R_f \quad \dots\dots\dots (5)$$

であるから、

$$\frac{dC_P}{dt} = \frac{1}{V} R_f C_{P \text{ in}} - \frac{Q_{10}}{V} C_P + \frac{Q_{10} - R_f}{V} C_{P0} - \sigma C_P \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 C_P ：湾内の全リン濃度 (g/m^3)、 V ：湾の容量 (km^3)、 R_f ：淡水流入量 (m^3/s)、 $C_{P \text{ in}}$ ：陸域からの流入リン濃度 (g/m^3)、 Q_{10} ：湾内から湾外への輸送係数 (m^3/s)、 Q_{01} ：湾外から湾内への輸送係数 (m^3/s)、 C_{P0} ：外海のリン濃度 (g/m^3)、 σ ：沈降等による減衰係数 ($1/\text{day}$) である。

更新率 f は、

$$f = \frac{1}{\tau_f} = \frac{R_f}{V_f} = \frac{R_f}{(S_0 - \bar{S}_i)/S_0} \cdot \frac{1}{V} = \frac{Q_{10}}{V} \quad \dots\dots\dots (7)$$

であるから、

$$\frac{dC_P}{dt} = \frac{1}{V} R_f C_{P \text{ in}} - f C_P + \left(f - \frac{R_f}{V}\right) C_{P0} - \sigma C_P \quad \dots\dots\dots (8)$$

定常状態を考えると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} R_f C_{P \text{ in}} &= (f + \sigma) C_P - \left(f - \frac{R_f}{V}\right) C_{P0} \\ &= f(C_P - C_{P0}) + \sigma C_P + \frac{R_f}{V} C_{P0} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる。

$$L_P = \frac{1}{V} R_f C_{P \text{ in}} \bar{z} \quad \dots\dots\dots (10)$$

とすると、

$$L_P = (C_P - C_{P0}) f \bar{z} + C_P \sigma \bar{z} + \frac{R_f}{V} \bar{z} C_{P0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 L_P ：単位面積負荷量 ($\text{ton}/\text{km}^2/\text{年}$)、 $\bar{z}$ ：平均水深 (m) である。ここで例えば、 C_P としてリンについての環境基準値を、 C_{P0} として太平洋表層 (200 m 以浅) の値 (全リンで $0.0133 \text{ mg}/\text{l}$ ；中西, 1984) 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。 $(R_f/V) \bar{z} C_{P0}$ は検討対象の湾の平均値について求めると、

$$\frac{R_f}{V} \bar{z} C_{P0} = 0.1068 \text{ (ton}/\text{km}^2/\text{年}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。また $\sigma \bar{z}$ 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、全リンにして $\sigma \bar{z} = 0.02 \text{ m}/\text{day} \sim 0.05 \text{ m}/\text{day}$ とする。全リンに関する環境基準は、I 類型が $0.02 \text{ mg}/\text{l}$ 以下、II 類型が $0.03 \text{ mg}/\text{l}$ 以下、III 類型が $0.05 \text{ mg}/\text{l}$ 以下、IV 類型が $0.09 \text{ mg}/\text{l}$ 以下であり、それぞれについての L_{Pi} ($i = \text{I, II, III, IV}$) ($\text{ton}/\text{km}^2/\text{年}$) を求めると、

$$L_{Pi} = 0.0067 f \bar{z} + (0.2528 \sim 0.4718) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$L_{PII} = 0.0167 f \bar{z} + (0.3258 \sim 0.6543) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$L_{PIII} = 0.0367 f \bar{z} + (0.4718 \sim 1.0193) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$L_{PIV} = 0.0767 f \bar{z} + (0.7638 \sim 1.7493) \quad \dots\dots\dots (16)$$

これらの式は、それぞれの環境基準値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} ($i = \text{I, II, III, IV}$) を維持できなければならないということを示している。

同様に、全窒素についての外海水質濃度 C_{N0} として太平洋表層 (200 m 以浅) の値 $0.1065 \text{ mg}/\text{l}$ (中西, 1984) を用いて

$$\frac{R_f}{V} \bar{z} C_{N0} = 0.8553 \text{ (ton}/\text{km}^2/\text{年}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

とし、 $\sigma \bar{z} = 0.02 \text{ m}/\text{day} \sim 0.05 \text{ m}/\text{day}$ とする。全窒素に関する環境基準は、I 類型が $0.2 \text{ mg}/\text{l}$ 以下、II 類型が $0.3 \text{ mg}/\text{l}$ 以下、III 類型が $0.6 \text{ mg}/\text{l}$ 以下、IV 類型が $1.0 \text{ mg}/\text{l}$ 以下であり、それぞれについての L_{Ni} ($i = \text{I, II, III, IV}$) ($\text{ton}/\text{km}^2/\text{年}$) を求めると、

$$L_{Ni} = 0.0935 f \bar{z} + (2.3153 \sim 4.5053) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$L_{NII} = 0.1935 f \bar{z} + (3.0453 \sim 6.3303) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$L_{NIII} = 0.4935 f \bar{z} + (5.2353 \sim 11.8053) \quad \dots\dots\dots (20)$$

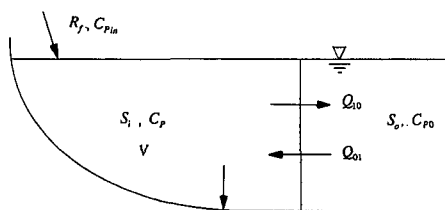


図-2 塩分・全リンの収支

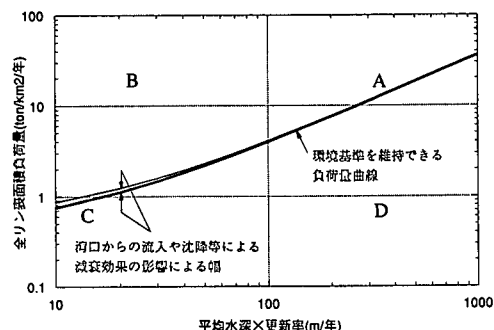


図-3 許容負荷量推定のための概念図

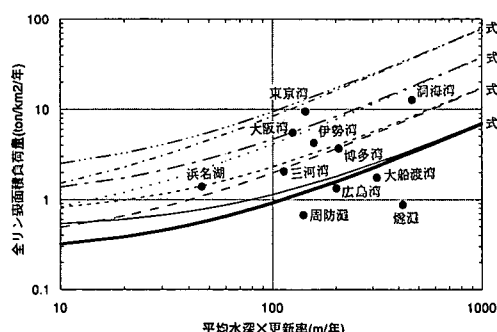


図-4 全リンに関する許容負荷量の推定

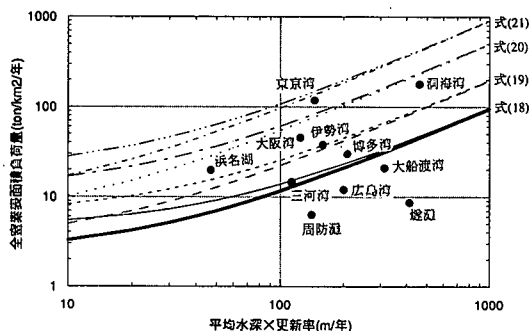


図-5 全窒素に関する許容負荷量の推定

$$L_{NIV} = 0.8935/\bar{z} + (8.1553 \sim 19.1053) \dots\dots\dots (21)$$

となる。

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。

このようにして作成した結果の概念図を図-3に示す。図-3のように海域は4つの領域に区分され、図中の曲線に沿って右上に行くほど富栄養化(領域-A)し、左下に行くほど貧栄養(領域-C)となる。また負荷量曲線に対して、左上方に行くほど富栄養海域(領域-B)に、右下方に行くほど貧栄養海域(領域-D)になる。また負

荷量曲線は、左下に行くほど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く、負荷量の値に幅が生じてくる。

次に図-4, 5に示すように、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、対象海域のデータとの対応を検討した。全リンで見ると東京湾、大阪湾は、湾全体で見てもIII類型を維持するための負荷量を越えているのがわかる。洞海湾、伊勢湾はIII類型、博多湾はII類型程度の負荷量となっており、これらの湾は(領域-A)に属し、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。

また浜名湖は全国規模で見ると(領域-C)に属し、わずかな負荷量の増大によっても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(1993)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。

5. 結 語

閉鎖性海域の許容負荷量の推定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、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。

同解析においては、湾内の成層強度や密度流、吹送流等の効果が十分に生かされているわけではない。しかし今後それらが考慮でき得るような滞留時間の推定など、データの精度を向上させることにより、閉鎖性海域の富栄養化の可能性や環境容量の推定の可能性が示唆された。

参 考 文 献

- 安芸周一・下田 修・白砂孝夫・赤崎俊夫・宮永洋一・坂田弘弘(1982): 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.
- 今村正裕・松梨史郎(1997): 都市河川の流入する湾奥部における水-底質モデルの開発, 電力中央研究所研究報告, No. U 97050, 29 p.
- 岩手県(1990): 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〜, p. 38.
- 内田唯史・浮田正夫・中西 弘・河本昭浩(1993): 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.
- 内田唯史・浮田正夫・関根雅彦・中西 弘 (1994): 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.
- 合田 健・村岡浩爾 (1989): 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.
- 中尾 徹・松崎加奈恵 (1995): 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.
- 中田喜三郎 (1993): 沿岸生態系モデルの開発, 東海大学学位論文, 335 p.
- 中西 弘 (1984): 環境の総合評価と保全へのアプローチ, 小坂淳夫編, 瀬戸内海的环境, 恒星社厚生閣, pp. 284.
- 中西 弘 (1993): 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, 一100年の環境変遷一, 恒星社厚生閣, pp. 157-162.
- 野口仁志・吉口進朗・三浦秀夫・矢沼 隆 (1992): 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, Vol. 20, pp. 101-105.
- 広島湾栄養塩収支挙動調査検討協議会 (1982): 広島湾栄養塩収支挙動調査報告書, p. 9.
- 堀口文男・中田喜三郎 (1995): 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.
- 松梨史郎 (1997): 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.
- 三村信男・小島治幸・川森 晃・喜岡 渉・五明美智男・和田 清・横木裕宗 (1997): わが国沿岸域の特性評価一北海道, 茨城, 神奈川, 愛知, 三重, 福岡を対象として一, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1256-1260.
- 柳 哲雄 (1997): 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.
-