

## 〈地域汚染〉

# 鹿児島湾の水質シミュレーション及び 目標水質に対応するりん汚濁負荷削減量の算定\*

山野一幸\*\*・目原克彦\*\*・横孝雄\*\*

## 1. はじめに

鹿児島湾は南北約 80 km, 東西約 20 km の細長く入り込んだ内湾で, かつて活発に活動していた阿多カルデラ火山, 始良カルデラ火山と共に両カルデラ火山の間を結ぶ地域が陥没した跡に海水が流入してできたものといわれている。このため海底は急峻であるとともに, 水深は, 湾口部で約 80 m, 湾中部で最大水深 237 m, 湾中部と湾奥部の境界にあたる桜島水道で約 40m, また, 湾奥部では最大水深 206 m となっており, 湾内水を 2 つに区分するような水深分布となっている。

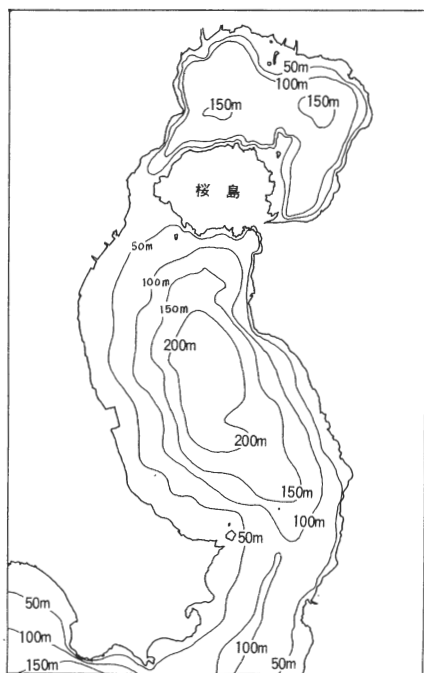


図1 鹿児島湾等水深線

このような水深の分布や海岸地形などが影響し, 湾内の海水は停滞しやすく, 高橋ら<sup>1)</sup>によれば, 海水交換日数は湾全体で約110日とも言われている。

本報は, このように閉鎖性的内湾である鹿児島湾の富栄養化を防止し, 良好な水質を保全することを目的として昭和56年12月に県独自の目標として設定した「りに係る水質保全目標」を達成維持しうる流入負荷量の算定手法についてまとめたものである。

## 2. 目標水質と計算手順

### 2・1 りんに係る水質保全目標

りに係る水質保全目標は次のとおりである。

目標値：全りん濃度 0.030 mg/l

〔評価方法：評価方法の基本的な考え方は, 湾奥および湾中央を代表する点（環境基準点3と13）における, 水面から海底までの連続的な濃度の平均値（以下これを「完全全層濃度」という。）の年間平均値で評価することとしている。〕

### 2・2 計算手順

2・1の水質保全目標に対応する T-P 流入負荷削減量の計算は, 潮位資料<sup>2)</sup>及び別途算定した T-P 流入負荷量をもとに潮流シミュレーション, 水質(拡散)シミュレーションを実施して求めた。計算は, 現況水質再現, 湾域の地域ゾーン別影響濃度算定, 所要流入負荷削減量の算定, 削減後の流入負荷量による水質シミュレーションによる目標濃度達成の確認の順に行なった。

## 3. 計算式

全層平均濃度の年間における平均的な状況を計算対象とすることから, 2次元1層の水理モデルを採用し, 潮流シミュレーションについては非圧縮性流体の運動方程式および連続の式を, また, 水質シミュレーションにつ

\* Simulation Model for Kagoshima Bay and Estimation Method of Phosphorous Loading for Accomplishment of Guideline to Water Quality Control

\*\* Kazuyuki YAMANO, Katsuhiko MEHARA, Takao MAKI (鹿児島県環境センター) Kagoshima Prefectural Institute of Environmental Science

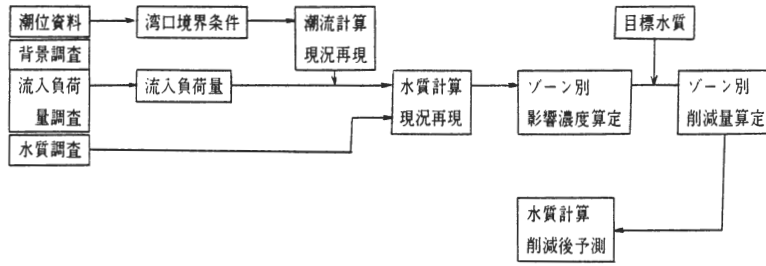


図2 計算手順

いては定常拡散方程式をそれぞれ差分化して数値計算した。

〔運動方程式〕

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f_0 v \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f_0 u \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = -g$$

〔連続の式〕

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

〔定常拡散方程式〕

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (uHC) + \frac{\partial}{\partial y} (vHC) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ & \quad - \phi HC + Hq_1 + Hq_2 + Hq_3 \end{aligned}$$

ここで

$u, v, w$  :  $x, y, z$  方向の流速成分 (cm/sec)  
 $P$  : 圧力 (g/cm<sup>2</sup>)

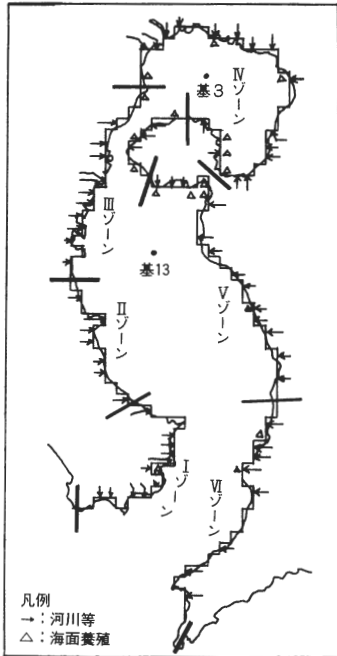


図3 流入負荷投入地点

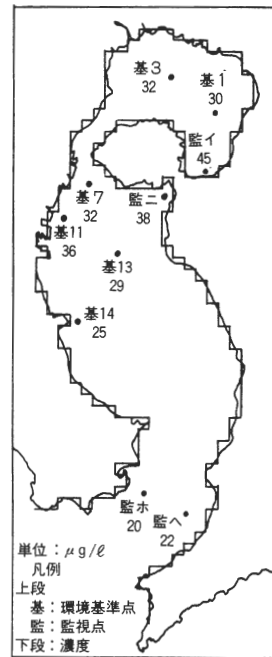


図4 T-P 完全全層濃度 (昭和57年度)

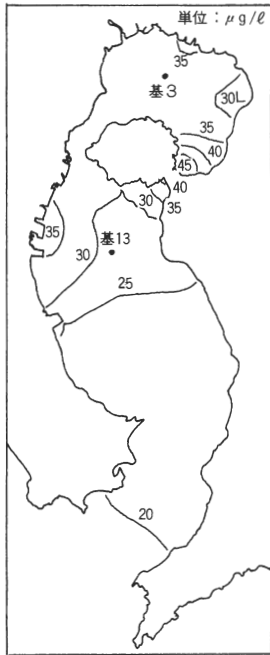


図5 現況等濃度線

- $\rho$  : 流体密度 (g/cm<sup>3</sup>)
- $g$  : 重力の加速度 (cm/sec<sup>2</sup>)
- $f_0$  : コリオリ係数 (rad/sec)
- $N_x, N_y, N_z$  :  $x, y, z$  方向の渦動粘性係数 (cm<sup>2</sup>/sec)
- $C$  : りん濃度 (mg/l)
- $K_x, K_y$  :  $x, y$  方向渦動拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)
- $\phi$  : 沈降等により消失する割合 (自浄係数) (1/sec)
- $q_1$  : 陸上から, または養殖等による流入負荷量 (mg/l・sec)
- $q_2$  : 底質からの溶出量 (mg/l・sec)
- $q_3$  : 降雨からの負荷量 (mg/l・sec)

なお、鹿児島湾の地形を近似するにあたっては、1.5 km の格子幅を有する正方形の格子を用い、各計算量も格子毎に値を持たせることとした。また、計算に使用する潮汐は半日周潮とした。

#### 4. 水質シミュレーション結果

##### 4.1 投入負荷量および湾口境界濃度等

水質シミュレーションに使用した汚濁負荷等の種類は①負荷量調査河川・処理場からの負荷、②調査河川に係る流域外からの負荷、③海面養殖負荷、④海面への降雨による負荷、⑤海底からの溶出による負荷、⑥湾口から流入する湾外水に同伴される負荷の6種類とした。

これらのうち①～③までの負荷 (以下、「流入負荷」という) の投入地点は湾域の地域区分 (ゾーン) 毎に図3のとおりである。また、ゾーン別の T-P 投入負荷量は I ゾーン 343 kg/日、II ゾーン 16 kg/日、III ゾーン 558 kg/日、IV ゾーン 587 kg/日、V ゾーン 346 kg/日、VI ゾーン 99 kg/日、計 1,949 kg/日である。

なお、湾口境界における湾外水の濃度は環境基準監視調査結果や沖縄本島南方水域での濃度<sup>3)</sup>をもとに 15 µg/l とした。

また、降水および海底泥からの溶出に係る負荷原単位は本センターの調査研究結果<sup>4,5)</sup>をもとにそれぞれ 0.05 kg/km<sup>2</sup>・日、1.3 mg/m<sup>2</sup>・日とした。

##### 4.2 観測結果と計算結果

りに係る水質保全目標を海面から海底までの連続的な鉛直分布の年間平均値で基本的な評価を行うことから、観測データを基に鉛直的に連続な濃度曲線を想定し、この全層平均値 (これを、完全全層濃度とみなす) を求めた (図4)。湾奥および湾央の代表点である基準点3と13についてみると、基準点3では 32 µg/l であり、水質保全目標を上回っていることから以下の流入負荷量

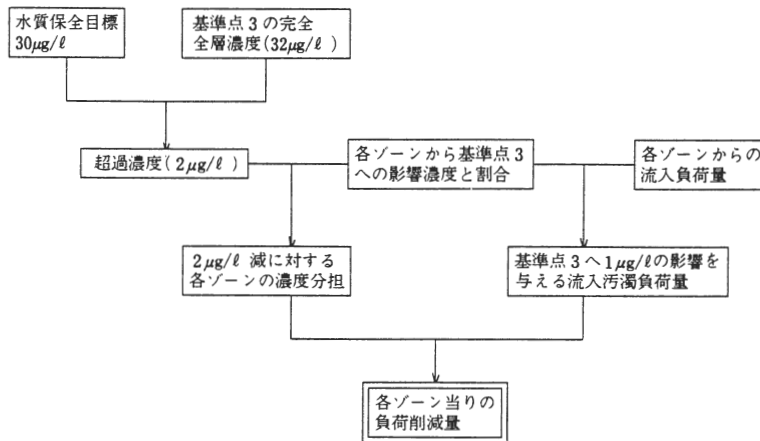


図6 流入負荷削減量計算の手順

の削減に係る計算は基準点3において30  $\mu\text{g}/\text{l}$ となることを目標として行うこととした。

なお、図5に現況(昭和57年度)の水質シミュレーション結果を等濃線図で示したが、現況の完全全層濃度はよく再現されている。また、計算から求めた自浄係数は平均で $-0.199 \times 10^{-7}$ (1/日)であった。

## 5. 流入負荷削減量の計算

### 5.1 考え方と手順

削減量を計算するにあたっては、まず、削減しうる負荷源としては、負荷区分のうちで人為的制御が可能な流入負荷に限定した。つぎに各ゾーンからの基準点3への影響の割合に応じて、目標の超過濃度のうちで各ゾーンが分担すべき濃度減少分を求める。このあと、基準点3において濃度1  $\mu\text{g}/\text{l}$ を形成させるだけの各ゾーンからの流入負荷量(以下これを「単位負荷強度」という)と各ゾーンが分担すべき濃度減少分から各ゾーンの流入負荷削減量を算出する。(図6)

### 5.2 負荷区分別、ゾーン別影響濃度

基準点3における完全全層濃度32  $\mu\text{g}/\text{l}$ の負荷区分別の濃度構成(影響濃度)を明らかにするために、流入負荷、降水、溶出、湾外水の負荷区分についてそれぞれ別個に水質シミュレーションを行い、それらの負荷源が基準点3に及ぼす影響濃度を求めた(表1)。この結果によると、基準点3においては、環境濃度32  $\mu\text{g}/\text{l}$ のうち、削減の対象となる流入負荷によって形成される濃度が14  $\mu\text{g}/\text{l}$ と最も大きく、次いで湾外水に起因する濃度が10  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、海底溶出に起因する濃度が8  $\mu\text{g}/\text{l}$ となっており、人為的な負荷の影響が最も大きくなっているのに

比べ、海面への降水に伴う負荷は基準点3の濃度にはほとんど影響を及ぼしていない。

つぎに、14  $\mu\text{g}/\text{l}$ を形成する流入負荷量についてさらに地域毎の影響の程度をさぐるために、湾内6つのゾーン毎に、各々のゾーンからの流入負荷量が基準点3に対して形成する濃度を水質シミュレーションから求めた。(表2)。湾奥の基準点3に対しては、湾奥の背後地域のIVゾーンからの流入負荷の影響が最も大きく、濃度では14.0  $\mu\text{g}/\text{l}$ のうち8.0  $\mu\text{g}/\text{l}$ を形成させており、濃度の割合では57%を占めている。その他のゾーンでは、基準点3の背後地域のIVゾーンに隣接するIII、Vゾーンまでは影響を及ぼしているものの、それより離れたI、II、VIの各ゾーンからの流入負荷は基準点3に対しては影響が非常に小さくなっている。

### 5.3 ゾーン別影響濃度割合および濃度減少分担

水質保全目標に対する超過濃度(2  $\mu\text{g}/\text{l}$ )を減少させるにあたって、基準点3に影響を与える各ゾーンが分担すべき濃度減少量は、湾域の流入負荷全体の与える影響濃度の割合に応じて配分することとした。なお、I、II、VIの各ゾーンは基準点3に対する影響が非常に小さいことから濃度減少分担量の配分にあたっては0%として計算した。各ゾーンの濃度減少分担を表3に示す。III、IV、Vの各ゾーンでそれぞれ0.6、1.1、0.3  $\mu\text{g}/\text{l}$ の濃度を減少すればよいことになる。

### 5.4 単位負荷強度

特定のゾーンだけからある量の負荷を投入した場合に基準点3で1  $\mu\text{g}/\text{l}$ の濃度が出現するとしたとき、そのときの投入負荷量を単位負荷強度ということとしたが、

表1 湾内への負荷入り込み量と影響濃度

区 分	流入負荷量	降 水	海底溶出	外 洋 水	合 計
湾内への入り込み量 T-P (トン/日)	1.949 (0.3%)	0.058 (0.0%)	1.500 (0.3%)	554.00 (99.4%)	557.500
基準点3への 影響濃度 ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	14	0	8	10	32

表2 各ゾーン毎の影響濃度(対基準点3)

区 分	ゾ ー ン						合 計
	I	II	III	IV	V	VI	
流入負荷量 kg/日	343	16	558	587	346	99	1949
影響濃度 $\mu\text{g}/\text{l}$	0.3	0.0	4.0	8.0	2.0	0.1	14.0

表3 ゾーン別濃度減少分担

区 分	ゾ ー ン						合 計
	I	II	III	IV	V	VI	
影響濃度割合%	0	0	29	57	14	0	100
濃度減少分担 $\mu\text{g}/\text{l}$	0.0	0.0	0.6	1.1	0.3	0.0	2.0

表4 単位負荷強度

区 分	ゾ ー ン						合 計
	I	II	III	IV	V	VI	
影 響 濃 度 $\mu\text{g}/\text{l}$	0.3	0.0	4	8	2	0.1	14
流 入 負 荷 量 $\text{kg}/\text{日}$	343	16	558	587	346	99	1949
単 位 負 荷 強 度 $\text{kg}/(\mu\text{g}/\text{l})\cdot\text{日}$	1143	400以上	140	73	173	990	—

表5 ゾーン別負荷削減量

区 分	ゾ ー ン						合 計
	I	II	III	IV	V	VI	
負 荷 削 減 量 $\text{kg}/\text{日}$	0	0	84	80	52	0	216
流 入 負 荷 量 $\text{kg}/\text{日}$	343	16	558	587	346	99	1949

この強度は、各ゾーン別流入負荷量を各々の影響濃度で除したものであり、その値が小さいほど影響の程度は大きいことを意味する。

基準点3に対する影響濃度が、各ゾーンにおける流入負荷量と、基準点と負荷投入点との間の距離の複数の要素によって規定されるのに対し、単位負荷強度は、 $1\mu\text{g}/\text{l}$ の濃度を形成する負荷量としてその性質を単純化しており、所要の濃度低下量と負荷削減量とを直接結びつける変数として使用できると共に基準点3に対する各ゾーンの影響の強さを示す主要な尺度でもある。

なお、IIゾーンにおいては影響濃度が小数第1位においても0であることから、小数第2位において少なくとも4未満であったとして算定した。

影響濃度(表2)でみると、IIIゾーンはIVゾーンの50%、VゾーンはIVゾーンの25%の影響を示しているが、単位負荷強度で投入負荷量の大小による影響を除外した状態でみると、Vゾーンの影響の強さはIVゾーンの約42%になりIIIゾーンと大差ない影響の強さとなっている。

また、IIゾーンは単位負荷強度の距離依存性からみて1,000前後の値を示すものと想定される。

I, II, VIの各ゾーンは、単位負荷強度の面からみてもIII, IV, Vゾーンに比べて影響の程度は小さい。

5・5 りん負荷削減量

各ゾーン別の濃度減少分担量および単位負荷強度から各ゾーン別の負荷削減量を求める。(表5)

負荷削減量は、全体で216kgで流入負荷量の11%に相当する。ゾーン別ではIIIゾーンが最も多く84kg/日となっており、IVゾーンは80kg/日となっているが、これは、IVゾーンが濃度減少分担が $1.1\mu\text{g}/\text{l}$ と最も大きいものの対象点(基準点3)に対する距離が一番近いこともあって単位負荷強度が大きいことから、少量の負荷削減でも濃度減少が大きいことに由来するものである。

5・6 負荷削減後の水質予測

先に求めた各ゾーン毎の削減量を当初に投入した流入負荷量から差し引いた量(いわゆる削減後の負荷量)を用いて負荷削減後の水質が基準点3において水質保全目標を満足しているかどうかの検証を行った。

計算条件は、流入負荷量以外は当初の計算と同じである。

計算結果に基づく等濃度線図を図7に示す。基準点3における濃度は出力帳票によれば $30\mu\text{g}/\text{l}$ であり、水質保全目標を満足していることを確認した。

6. 考 察

今回採用した流入負荷削減量算定手法は、求められた削減後の負荷量による水質シミュレーションの結果が、

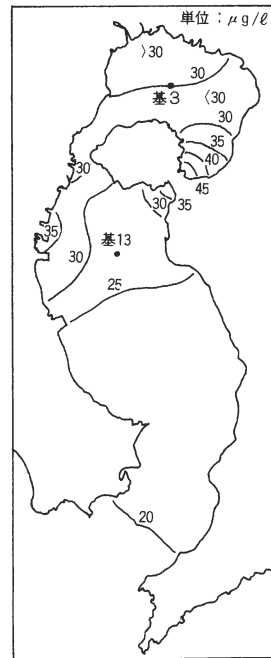


図7 流入負荷削減後の濃度分布

目標とした濃度と合致しており、手法の有効性が確認された。算定手法のうち、各ゾーンの濃度減少分担の設定は行政的な判断の大きく作用する部分であるが、単位負荷強度を用いることによって、各ゾーンの濃度減少分担を任意に変更した場合でも負荷削減量の算定を迅速に行うことができる。

また、水質シミュレーションでは通常、物質の変化に関する諸種のパラメータを既知のものとして調査結果や他水域での事例等をもとに設定するが、物質の変化を表わすパラメータには、その性格どおりに把握するのが困難なものもあり、実際には濃度を再現する面からのパラメータ値の設定が行われている例が多い。

このため、今回は、流入負荷量と調査地点の水質は絶対的なものとして固定し、この2項目をつなぐものとして調査結果に基づく数種のパラメータ値と、各種データの誤差および設定パラメータ以外の物質変動による影響をひとまとめにした係数（ここでは「自浄係数 $\phi$ 」として使用した）を設定した。

このような方法は、自浄係数の値を検討することによって、現況の再現性を確保した上で投入負荷量等の妥当性をみることができるメリットがある。今回の計算にお

いては、自浄係数は平均で $-0.199 \times 10^{-7}$ （1/日）であり、湾に流入させた負荷量は現実よりも低目に見積っていたのではないかと推定される。

## 7. む す び

今回の流入負荷削減量の算定は、目標水質に対応する限度負荷量を、負荷を削減する方向からとらえたものであり、今後は目標水質以下の地点に関連する負荷余裕量算定の手法開発、CODとりんとの関係は握、各種パラメータの精度向上をはかりシステム全体の精度向上を図ることとしたい。

---

### —引用文献—

- 1) 鹿児島県：鹿児島湾水域環境調査報告書，1974.
- 2) 海上保安庁：潮汐調和定数表（1983）.
- 3) 環境庁：日本近海海洋汚染実態調査（昭和56年度）.
- 4) 川島月夫，稲本信隆，福田大三郎，郡山宗晏，目原克彦，横 孝雄：鹿児島県環境センター所報，No. 1, 52～64（1984）.
- 5) 稲本信隆，川島月夫，福田大三郎，郡山宗晏，目原克彦，横 孝雄：鹿児島県環境センター所報，No. 1, 27～51（1984）.