

下水道整備計画に関するシステム論的研究 V

— とくに海の扱いについて —

日本水道コンサルタント 萩原良巳

〇上田晋世

〇中川芳一

要 旨

著者らは、本研究において、下水道整備計画の策定に際し、海への存在を意識しなから、海をいかに取り扱うべきかを検討した。

とくに現在進められている、流域別下水道整備総合計画（このうち流域と略す。）における海の扱いに焦点を合わせた。その結果、下水の放流先としての意識が十分に反映していると思える流域の姿を浮き彫りに出来たと考える。

また、本質的に、下水道整備計画において、海をどのように扱うべきかという点について、多少なりとも著者らの見方を整理出来たと考える。

1. 下水道整備計画における海への存在について

水質汚濁防止法が制定され、公衆用水域に水質環境基準が決められている。

とくに流域において、下水道整備計画を策定する前に次の点について検討を加えねばならない。即ち対象区域が海域に面しており、何らかの負荷がその海域に流入することがわかっていることで、かつその海に環境基準が決められているから、海への汚濁算定を行ない、環境基準適合状況を検討して、各種施策への基礎資料を与える必要がある。この結果をもとに、都市排水の制御が必要であるとの結論が得られなければならない。これは海からだけではなく、他の公衆用水域（河川、湖沼）の水質環境基準適合状況よりも優先されるが、ここでは海のみについて考える。— その施策の一つとして、下水道の整備を考え、その計画を策定する中である。

下水道サイドより、海を眺めてみるならば、流域におけるこの取り扱い、放流先としての意識を有しているに過ぎないと言えよう。即ち、下水道を整備し、処理場より処理水を放流した場合、水質環境基準が守れるが、否の検討が主である。

結論として次のように言えよう。流域における海の見方の基本は、海に環境基準が制定されているならば、下水道整備計画において、『放流先としての海』、環境基準値を満足する計画を策定する必要がある点、という点で、海への存在を意識していることと言えよう。

下に、流域における海への理解の位置付けを示す。

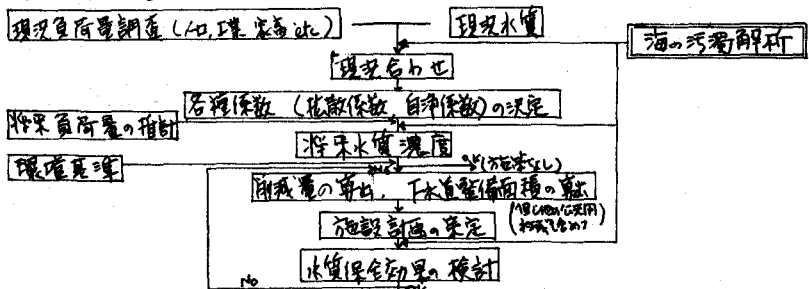


Fig.1-1. 流域における海への理解の位置付け (End)

2. 海の解析の方法 — 潮流及び汚濁解析 —

本研究において用いた、潮流及び汚濁の算定方法は、運動方程式、連続の式及び拡散方程式を基礎としている。これらの式に、渦度と流れ関数を導入し、極座標系で表現した、渦度方程式 — 拡散方程式シミュレーション・システムが本研究に用いた式である。

それらの基礎式を次に示す。

(i) 流れ関数と渦度

$$V_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \quad V_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (2-1)$$

$$\zeta = \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{V_\theta}{r} = \Delta \psi \quad (2-2)$$

(ii) 連続の式

$$A \frac{\partial \eta}{\partial t} + V_r \frac{\partial}{\partial r} \{A(R+\eta)\} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \{A(R+\eta)\} = q \quad (2-3)$$

(iii) 渦度方程式

$$\begin{aligned} A(R+\eta) \left\{ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + V_r \frac{\partial \zeta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} - \nu \Delta \zeta \right\} + \zeta \{ q - \nu \Delta \{A(R+\eta)\} \} \\ = 2\nu \left\{ \frac{\partial \zeta}{\partial r} \frac{\partial}{\partial r} \{A(R+\eta)\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \{A(R+\eta)\} \right\} \end{aligned} \quad (2-4)$$

(iv) 拡散方程式

$$\begin{aligned} A(R+\eta) \left\{ \frac{\partial C}{\partial t} + V_r \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} - D \Delta C + \lambda C - S_0 \right\} + C \{ q - D \Delta \{A(R+\eta)\} \} \\ = 2D \left\{ \frac{\partial C}{\partial r} \frac{\partial}{\partial r} \{A(R+\eta)\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial C}{\partial \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \{A(R+\eta)\} \right\} \end{aligned} \quad (2-5)$$

ここに (i) V_r : r 方向の流速, V_θ : θ 方向の流速, ψ : 流れ関数, ζ : 渦度, R : 水深

(ii) A : 対象メッシュの面積, η : 潮位, q : 単位時間当り流入量

(iii) ν : 粘性係数

(iv) C : 対象物質濃度, D : 拡散係数, λ : 自浄係数, S_0 : 投入負荷量

である。

以上の式を次に示すアルゴリズムに従い計算を行う。なお、計算は上記の基礎式を、陽形前進差分に於てし2行なう。

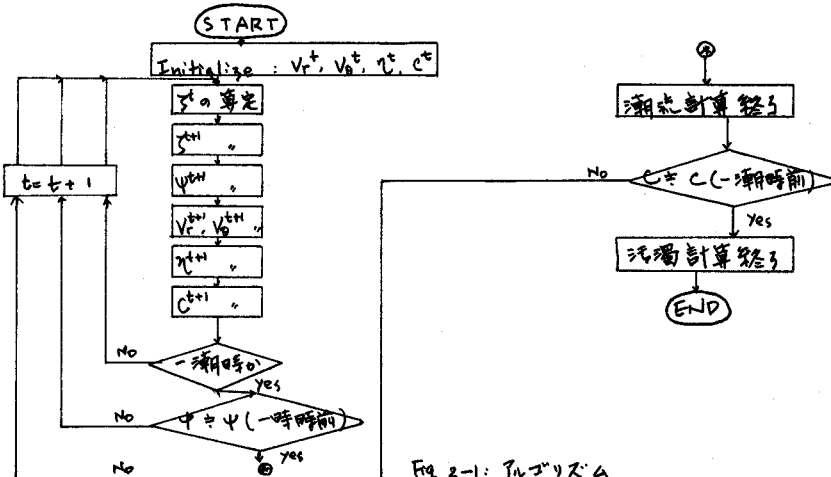


Fig 2-1: アルゴリズム

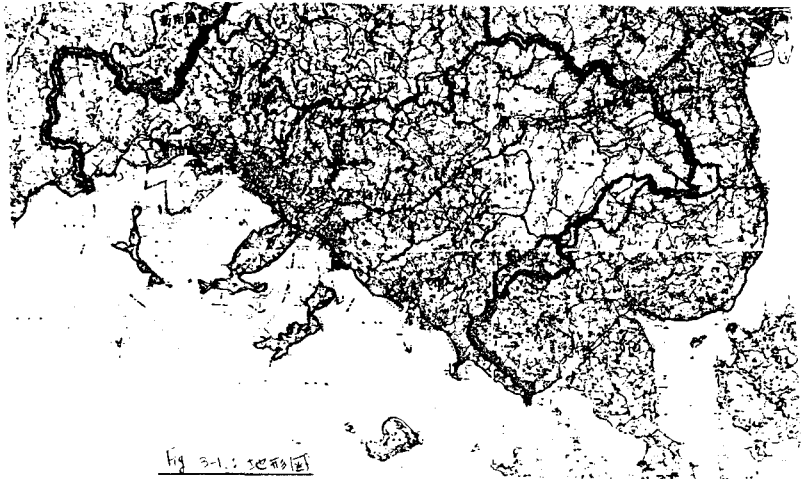
以上のよう、基礎式を差分表示する場合に考慮した点、仮定上の問題は次のようなことである。

- (2-2)式は2次元関係式であるが、実際の海域においては、水深の変化がある。元々水深がメッシュ間の水深差が小さいとは限らないので、(2-2)式を水深方向に種々に修正式で差分表示を行った。
- (2-4)式で、流が理想流体とみなしうるという仮定のもとで、粘性項を無視した。
- (2-2)式の横式($\nabla^2 \phi$)より流れ関数を求める際、水深方向を考慮して算定した水深を用いて、2次元として反復計算(S.O.R法)を行なって収束させることにより、流れ関数を求めた。
- (2-3)式の差分において、元々差えているメッシュの隣接メッシュが、陸あるいは島の場合、隣接海域メッシュの平均値を用いた。
- この海へ解析において、メッシュ間の水深勾配がかわめて小さいということも仮定しているが、このあと示す事例のように、凸凹の激しい海底形状を有する海域を対象とする場合、水深勾配の取り扱いが重要で、(i)水深データを元々保存する。(ii)水深勾配を中央の水深を用いて算定平均する。(iii)水深勾配を中央の水深を用いて幾何平均する。(iv)考えているメッシュの近傍では水深勾配はないとする。というように試行を行った。

3 事例.

まずは、2次元式を元に、近年臨海部に大規模工場群を有し、海の汚濁が表面化している、A湾海域を事例の対象として選んだ。この地域は、大小の島々が海域内に散在するとともに、半島が海を分断するように突き出している。

対象海域及びこの海域へ負荷が流入する地域の図を右に示す。



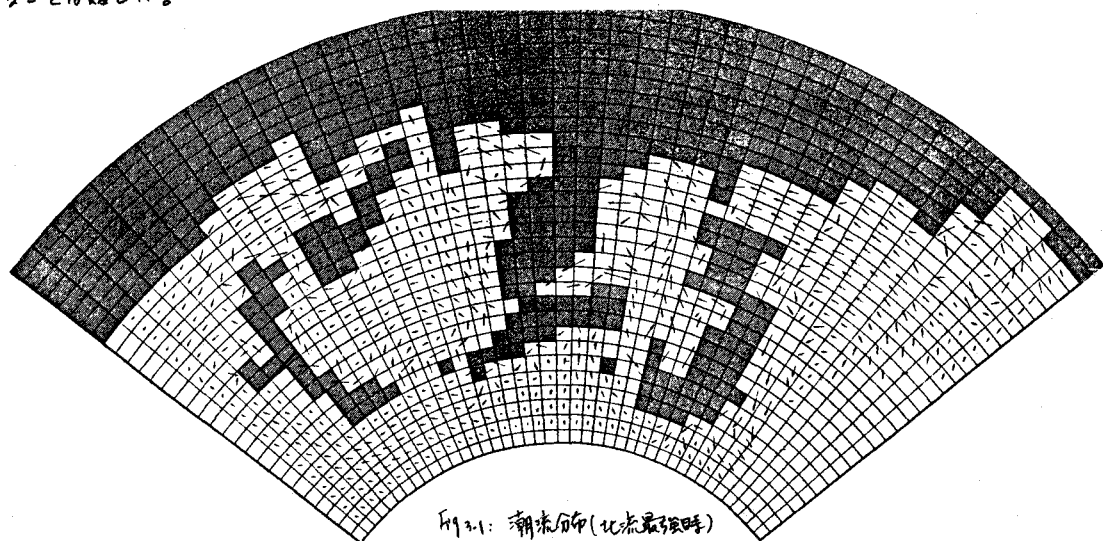
上に述べたように、この海域は地形が複雑で、次に述べる潮流、汚濁解析が必ずしも、元々元々は複雑な地形を有する汚濁解析の一例とも言える。

1) 潮流解析

潮流解析において満足出来る結果が得られたら、海の汚濁解析の大半が完成したと言っても過言ではない。このことは逆に、海の解析における潮流解析の重要性を主張しているのである。流速と潮位及び流れ関数に初期値と振幅を与え、現状のゲータ(海田距離所より得た流速図)と比較しながら潮流解析を行なう。その過程において種々の問題が生じ、その時々問題点を整理しながら進んでいく。例えば、地形が複雑であることにより、Meshの数が多くなり、計算が複雑になる。極座標表示を用いているゆえ、方向で面積が変わる。即ちセントロイド、ポリゴンが変化するゆえ、これを考慮する必要がある。数値計算の場合、安定性が重要である。本事例の場合 $\Delta t = 8 \sim 10$ 分を越えると不安定になることが予測され、最終的に $\Delta t = 300 \text{ sec}$ を採用した。また

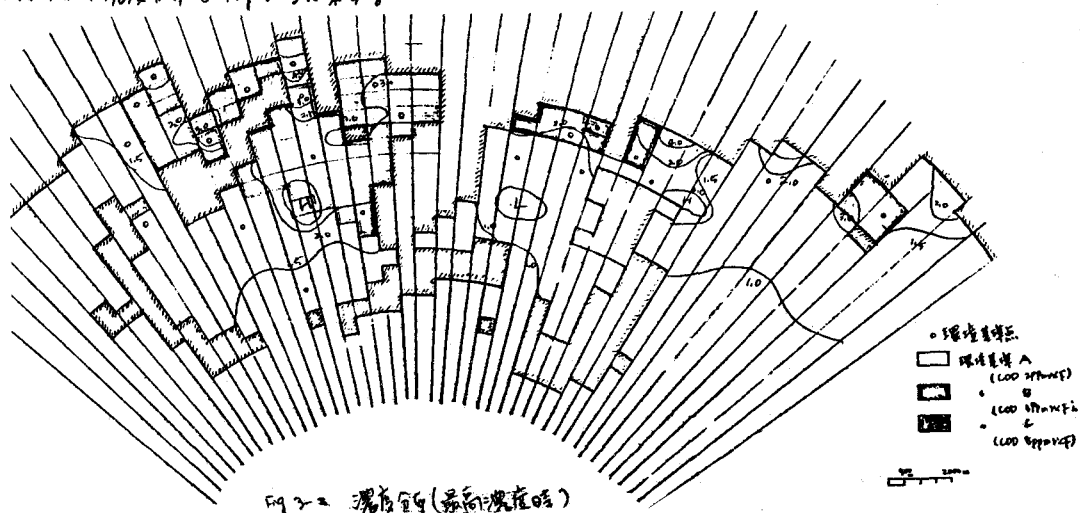
流速の計算結果が何れも、1時間後に満足出来るものであっても、一朝位(12時間)計算した場合満足出来る結果が得られるとは言えず、同様の操作が繰り返されねばならない。等のことである。

こうした結果、Fig 3-2 (北流最強時 - 北流とは海より陸へ向かう流れ) に示す計算結果を得た。海の解析における潮流の扱いは非常に重要である。しかし、地形が複雑な海域においては、細部にわたり、現実と合致させることは難しい。



④汚濁解析

潮流解析の結果をもとに、初期値及び境界値を定めた。初期値については、実測値のあるマッシュについてはその平均値を、空白点については陸から海へ海流が小さくなるように決定した。一方境界値は、対象海域の境界条件が影響を及ぼす配座した。潮流解析同様安定性については、任意に何点かを選択し、一朝位ごとの濃度の變化を呈し、陸上の各点で満足が得られたら、そこで計算時間とする方法をとった。本事例では7潮位であった。境界値との比較において、大域的分布を拡散係数で、局所的分布を自浄係数で考慮した。こうして得られた濃度分布を Fig 3-3 に示す。



4 流域別下水道整備総合計画における海の解析のあり方について

流域における海の見方の特徴は次のように言えよう。海の解析の必要性は、処理場からの処理水の放流水として海を見ているからであると。即ち、海が処理場であり、将来海に処理場よりの処理水を放流する場合、他に工場等が工業処理、農業処理、その他種々の処理が行われる場合、海の水質は環境基準を定めるが否かという点である。こうした方法論的展開には、いくつかの問題を含んでいる。このうち次の2点は主要な問題であり、これらを簡単に述べることにする。

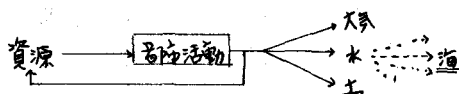
①海の解析をとおして得られる結果のみが意識せられ、その解析結果の精度—解析手法の精度—にはとらわれず、より詳細であれば良い結果であるが如き感がある。海の解析を流域全体の一部として意識するから、全体をとおして同程度の精度が求められるはずである。計画は将来を予測しながら進められるものであり、いくつかの仮定が設定されている。それゆえ海の解析のみで精度の高さを求める必要はなく、このことは、流域全体を通じて言えよう。

②流域は5年ごとの見直しという一文を記している。このことは、流域において水質環境基準の変化、処理規制せられている物質以外の規制、多汚染物質の変化等を意識しているとも予想出来る。しかし、その計画決定の手法は、見直しという同様の次の繰り返しでしかない。即ち、流域は、あらゆる変化に対応しやうシステムではないと着目される。更にこの対応の方向を次に述べてみる。

5 海の解析をとおして見た下水道整備計画への提言と水環境地域計画への指向

下水道はその形が、公営下水道であれ、流域下水道であれ、都市施設の一部であり、下水道の整備をするための計画の決定において、都市の将来のあり方についての考えが基本となる必要がある。ここでは、海の扱いをとおして、交通計画、住宅計画、水需給計画等との有機的つながりの中で、下水道整備計画を考へ直す。

都市は種々の活動を通じて多くの汚染物質が生成され、それらの一部が、水を媒介として下水の処理場へ集積される。またある部分は資源として回収せられるが、このことを単純に模倣化すると下図の如くなる。



このことは、都市の活動が水を媒介として、下水処理場を通じて海に影響を与えていることを示唆している。この点に注目するならば、海の解析は都市の活動に対する、水質環境基準をその判断の材料として、チェックの役割を有していると考えられる。

都市計画のサマ、システムとして下水道整備計画はとらえられるべきであり、海の解析はこの点を意識して行わなければならない。例えば、海の水質環境基準を満たす、地域配分負荷量が満足されるよう都市計画を決定し、その中で下水道整備計画を練ることが望まれる。

即ち、ある都市に海の解析をとおして M (kg/day) なる警正段階の許容負荷量が与えられたとする。都市活動の色々な面で発生する負荷量を $m_1, m_2, \dots, m_n$ とすると

$$M \geq \sum_{i=1}^n m_i \quad (5-1)$$

なる式が成立する。この中で、 m_s が下水処理場に入り、処理場における負荷量についての処理効率を (α) とすると、 (αm_s) 分の都市活動に対する余裕量が生じる。即ち、処理場を建設することにより M より (αm_s) だけ

の都市活動が許される。

このように考えるならば、水質環境基準の変化（数値の劣化→都市活動の見直し）や、各種技術の変化（例えば④の劣化→余裕量の増大）への対応も、都市活動という大まな枠の中での施策の選択といえるから可能だろう。

さらに議論を進めて、公衆用水域の水質環境を保全するという立場を強調すれば、単に水質環境基準を満足すればよいという制約だけでなく、公衆用水域の水環境に与えるインパクトを最小とする地域計画の策定という課題に到達する。次のような課題の解決の第一歩として著者は次の考えを持つに至った。

即ち、公衆用水域の任意の点の水質を、次の水域への（複数個の）負荷放流量と放流量の間数として

$$C = f(Q) \quad C = (C_1, C_2, \dots, C_n) \quad Q = (Q_1, \dots, Q_m) \quad (5-2)$$

C : 点の水質, Q : 点別の放流量

丁→最小（目的関数→最小） (5-3)

と表わし、水質環境基準を制約条件として決定される評価関数を最小にするような見を求める。求まった見を制約条件として地域計画を策定するプロセスである。これは従来の地域計画が産業など代表される人間活動の最適化の結果として策定されてきた傾向があり、水環境は水質環境基準のチェックにとどまっていることへの批判をり出発したものである。以上のことを海の解析と関係付けて述べると、上記の目的のためには精度の高い計算は必要とされる。たとえば

$$C_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} Q_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5-4)$$

なる線形モデルでも十分目的を達しよう。ここに、 a_{ij} は距離、流速、水深、拡散係数、自浄係数等によって決定されると考え、 a_{ij} をこのように解析を通じて探求することが可能になると思われる。また上記の考えは河川に適用し、河川水質環境を保全するという意味での最適な水の地域配分を求めた報告²²⁾もあることを付記する。

6 結 言

本研究において著者は次の点を強調して結論とする。

- ①本研究の解析手前として掲げた潮流、汚濁解析結果は、いくつかの困難な問題を解決して、良好な結果が得られたと見える。特に地形的には非常に複雑でこの点に着目すれば、複雑な海域の一例とも見える。
- ②現在進められている流域計画は、海を放流量として意識することになっている。その意味で計算結果のやや問題視され、全計画を通じて同程度の精度—細かい計算は必要ない—で製図しておけばいい、かつ将来の水質環境基準や技術等の変化についても対応するものが困難である。5年ごとの見直しはあるが。
- ③都市活動の結果として生成される汚染物質の一部が、水を媒介とし、下水処理場より海に放流される。即ち都市活動の結果が、海の汚濁の一因であると意識するから、海の解析は都市の活動に対するチェックであると言える。下水の処理を、都市活動に対する余裕量の増大という立場をとり、都市計画のサブ・システムとして、下水整備計画を見るならば、各種の変化にも対応出来る。但し、将来の各種の変化に対する予測の方法の確立が望まれる。さらに水質環境を保全するという立場を強調するから、公衆用水域の水環境に与えるインパクトを最小にする地域計画の策定という課題に到達する。この解決への一つの考え方を模索出来たと著者は考える。

本研究を進めるに当たり、多大の労を惜しまない協力頂いた日本水道コンサルタント、山形私大、水玉、黒川両様に謝意を表す。

- 参考文献
- ① 萩原良己、奥光局、土木書「汚濁解析による海域汚濁解析」、環境省の国土地理院調査 第2号
 - ② 萩原良己、中川芳一 「下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅱ、本討論会投稿予定
 - ③ 萩原良己、中川芳一、土木書「水環境から見た水資源の配流域配分モデルについて」、環境省の国土地理院調査