

中川運河における熱塩成層流の数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLOW STRATIFIED BY HEAT AND SALT IN NAKAGAWA CANAL

中部大学工学部 松尾直規 N・MATSUO

1. はじめに

本研究は、海水と淡水が流入する閉鎖性水路における水質汚濁現象を正しく理解し、その対策案を樹立するための基礎的知見を得ることを目的に、塩分濃度及び水温分布に起因する密度成層流が、水路を取り巻く各種境界条件に応じていかなる挙動を示すかを一次元多層流モデルを用いて数値解析し、その結果を考察したものである。解析対象とした水路は、分岐・合流部を有し、閘門を介して名古屋港に通じている中川運河であり、流入する海水、温排水及び下水排水による複雑な流れの挙動が追跡されることになる。

2. 数学モデルおよび数値解析法

2.1 現象再現のための数学モデル

対象とする水路における流れの運動学的挙動は流出入水及び気象条件といった環境境界条件、水路の幾何形状、ならびに温度と塩分濃度に基く密度分布と密接に関係している。したがって、水理現象を再現するためのモデルは、それらの関連要素との関係をできるだけ忠実に取り扱い得るものでなくてはならない。このうち、流れを特徴づける第一義的な要素は密度分布であり、モデルは密度分布を支配する水温及び塩分濃度の変化と流れの運動学的挙動との相互関係を表し得ることが必要となる。ただしこの場合、対象とする流れの特徴より水深方向に関しては静水圧分布の仮定が成立するものとする。また、各種水理要素の空間的分布の特徴より、水路の幅方向に関する各種要素の変化は縦断方向及び水深方向のそれに比べると極めて小さく無視し得るものとする。さらに、水表面での風による影響や底面・側面での応力の影響は水路形状及び流速の大きさ等より無視し得るものとする。

以上より、対象とする水理現象を解析するための数学モデルとして次に示す一次元多層流モデルが導かれることになる。出発点となる基礎

数学モデルは、水の連続式（非圧縮性流体の連続式）、運動量保存式、水温収支式、塩分濃度収支式の各保存式と、水温及び塩分濃度と密度との関係を表す状態方程式である。

各保存式は、時間平均化操作により平均流に関するものに変形された後、水路を図-1の後述する解析例のように縦断方向及び水深方向に分割して得られるコントロール・ボリュームについて積分され、空間平均値に関する各モデル式に展開される。¹

結局、得られる各保存式は次のようである。

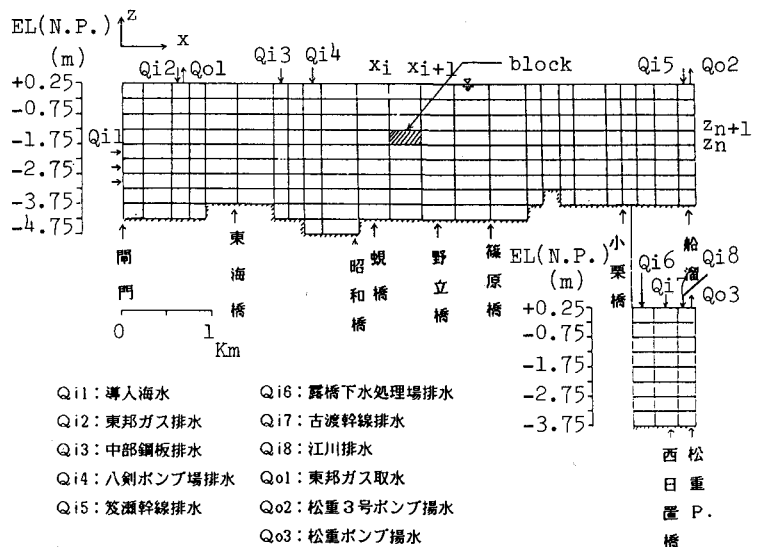


図-1 解析に用いるコントロール・ボリューム（中川運河の例）

1) 水の連続式

$$|uB|_{x_i}^{x_{i+1}} \Delta z + |wA|_{z_n}^{z_{n+1}} + q_b = 0 \quad (1)$$

2) 運動量保存則のx分値

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{1}{A} |uuB|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |uwA|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} u_b q_b - \frac{1}{A} \left| \frac{p}{\rho} B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A} \left| D_{mx} \frac{\partial u}{\partial x} B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| D_{mz} \frac{\partial u}{\partial z} A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} \end{aligned} \quad (2)$$

3) 運動量保存則のz分値

$$p = \int_{z_n}^{z_{n+1}} \rho g dz \quad (3)$$

4) 水温収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{1}{A} |TuB|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |TwA|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} T_b q_b + \frac{1}{A} \left| D_{Tx} \frac{\partial T}{\partial x} B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{\rho c_w A \cdot \Delta z} |\phi A|_{z_n}^{z_{n+1}} \end{aligned} \quad (4)$$

5) 塩分濃度収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & -\frac{1}{A} |cuB|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} |cwA|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} c_b q_b + \frac{1}{A} \left| D_{cx} \frac{\partial c}{\partial x} B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| D_{cz} \frac{\partial c}{\partial z} A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 u, w : x, z 方向の流速成分、 B : ブロック幅、 A : ブロックの水平断面積、 q_b : ブロックより流出する流量、 $D_{mx}, D_{mz}, D_{Tx}, D_{Tz}, D_{cx}, D_{cz}$: x, z 方向の運動量、温度、濃度の各分散係数、 p : 圧力、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 ϕ : 気象要因による熱フラックス、 c : 塩分濃度、 c_w : 水の比熱、添字 b : ブロック側面における値、添字 $i, i+1$: $x=i, x=i+1$ における値、添字 $n, n+1$: $z=n, z=n+1$ における値、 z_n : 水表面における z の値である。

また、密度に関する状態方程式は次式である。

$$\rho = \rho_T + 0.00074 c \quad (\text{g/cm}^3) \quad (6)$$

ここに、 ρ_T : 水温によってのみ規定される密度であり、 c の単位は g/l である。

上述の各式は、分岐・合流部を除くカラムでの中間層ブロック（水表面あるいは底面に接しないブロック）におけるものである。分岐・合流部においては、(1)～(5)式に分岐あるいは合流に基く各項が付加されることになる。²⁾ また、水面及び底面等に接するブロックにおいては、次に述べる各種境界条件により、各式が変形され解析が進められる。

2.2 境界条件

流入水が出入りするブロックを除いては、水路の両端及び側面を通しての水、温度、塩分の交換は固定床とみなす底面と同様でないものとする。自由表面においては、通常の幾何学的条件及び運動学的条件の他に温度に関して蒸発散、大気輻射、熱伝導による熱交換を考える。なお、底面においては摩擦応力が働くものとして運動量分散項と等置する。

2.3 数値計算法

前節に述べた数学モデルによる数値シミュレーションは、求める各水理量を時間的・空間的に交互に配置する staggered scheme を用いるとともに、2ステップの前進差分法である Leap-frog 法を使って行う。このとき、階差式への空間的な展開にあたっては、常に上流側差分をとることにより、数値計算の安定化を図つ

ている。また、Leap-frog 法を使うことにより、数値的な解の振動が抑制されることになる。この計算法の手順は、時刻 $t=n$ の値を例えば $u(n)$ のように表示すれば次のようである。

- 1) 既知量である $u(n)$ 、 $w(n)$ 、 $Z_s(n-1/2)$ 、 $Z_s(n-3/2)$ を用いて最上層ブロックの連続式より、 $Z_s(n+1/2)$ を求める。
- 2) 既知量である $u(n)$ 、 $w(n)$ 、 $Z_s(n+1/2)$ 、 $Z_s(n-1/2)$ 、 $T(n-1/2)$ 、 $T(n-3/2)$ 、 $c(n-1/2)$ 、 $c(n-3/2)$ を用いて水温収支式、濃度収支式より $T(n+1/2)$ 、および塩分濃度 $C(n+1/2)$ を求め、同時に同時刻での密度 $\rho(n+1/2)$ を計算する。
- 3) 既知量である $u(n)$ 、 $w(n)$ 、 $Z_s(n+1/2)$ 、 $Z_s(n-1/2)$ 、 $\rho(n+1/2)$ 、 $u(n-1)$ を用いて流れ方向の運動量保存式より $u(n+1)$ を求める。
- 4) 連続式より $w(n+1)$ を求める。
- 5) 1)～4) を所定の計算範囲で繰り返す。

3. 中川運河における数値解析

3.1 中川運河の概要と水理的特徴

本研究で対象とする中川運河は名古屋市南部に位置し、図-2に示すような幾何形状を有する閘門式運河である。南北に走る幹線の長さは約 6.4 km、幅 64 ~ 91 m、東に位置する堀川へ延びる東支線の長さは約 1.8 km、幅 36 m となっている。運河の水位はほぼ一定に保たれており、水深は 3 ~ 4.5 m である。運河における流入は、図-1に示した矢印の位置にあり、また、同図中に挙げた地名の位置で水質観測が実施されている。

各流入水の全流入水量に占める割合は、平均的にみれば露橋処理場の排水量と導入海水量が同程度であり両者で全体の約7割を越えるが、雨天時には江川幹線からの下水排水が大量に流入する場合がある。一方、流出量の大半は松重ポンプ場からの揚水によるものである。これらの流出量と運河の貯留量との関係は雨水排水量の大小に左右される傾向があるが、その変動はそれ程大きなものではなく、平均的な滞留時間は約9日強である。また、運河内では、年間を通じて塩分濃度に主として支配される安定な密度成層が形成され、その水理条件の下で、特徴的な各種水質変化が生じている。

近年においては、流入する各種排水に含まれる窒素及びリン等に起因する富栄養化現象が顕在化し、このため、現在1日平均約 4.3万 m^3 の海水を名古屋港内より導入して浄化を図っているが、その効果は顕著に現われていないのが現状であり、効果的な対策の樹立が望まれている。

3.2 計算条件

1) 計算対象期間と初期条件；対象期間は、昭和61年4月21日～同年5月22日の32日間である。この計算に際しての初期条件は次のように設定した。

- ・流速はすべて0とし、水面は水平とする。水位はN.P.+0.25m とする。
- ・水温及び塩分濃度の分布は計算開始日の実測値に基いて与えるものとする。

2) 入力資料；気象資料及び流量資料ともに日平均値を用いた。

3) 流入水温及び流入塩分濃度；実測資料に基き、以下のように設定した。

- ・導入海水温度： $T_{11}=14.8+10.3 \sin \{ (t-t_0) \pi/280.0 \}$ (°C)
(ここに、 t ：時間(日)、 t_0 ：計算開始日の t の値)
- ・工場排水の温度：上述の海水温度+7°Cとする。
- ・露橋処理場排水その他の温度： $T_{14}=T_{15}=T_{16}=T_{17}=T_{18}=16.0+8.82 \sin \{ (t-t_0) \pi/280.0 \}$

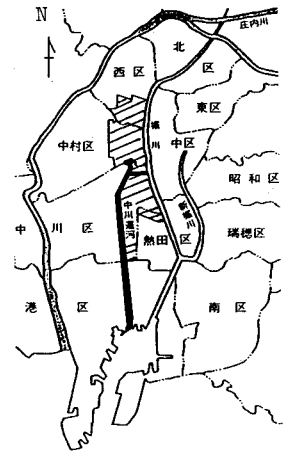


図-2 中川運河の位置図

・塩分濃度：導入海水の観測値より26.0 (g/l)で一定とする。工場排水の濃度は取水濃度（計算値）に等しいとする。その他は、露橋処理場排水中の Cl^- 濃度に関する観測値に基き、1.3(g/l)で一定とする。

4) 各種パラメータ値；各種分散係数の値は Richardson 数の関数と考えられるが³ここでは試行計算の結果より便宜的に設定した次の値を用いた。すなわち、 $E_x = D_{mz} = D_{tz} = D_{oz} = Q_0 \times 0.05 + 0.1$ (m^2/day) (Q_0 は総流出流量)、 $D_{mx} = D_{tx} = D_{cx} = Ez \times 100.0$ (m^2/day)とした。

5) その他；空間分割は前出の図-1のように行い、各ブロックの厚さを0.5 mとしたが、長さは場所により変えている。計算時間間隔 Δt は数値解の安定条件より $\Delta t = 0.0002$ 日とした。

3. 3 再現結果とその検討

以上に述べた数値解析手法及び計算条件の下で求められた再現結果を、図-3～図-7に示す。これらの結果を検討すると次のように述べられるであろう。

(1) 流れの挙動；

(a) 海水の流入がなく、また工場排水、露橋処理場排水以外の流入がない場合の例である図-3（昭和61年4月27日の例）では、流れはいずれの場所においても極めて緩やかである。表水層では、露橋処理場の流入地点から松重ポンプ場、船溜、東海橋方面へ向かう流れがみられ、中水層から深水層にかけては概ね東海橋の方から船溜、松重ポンプ場の方へ向かう流れが卓越している。中部鋼板の排水が流入する地点から中川口閘門にかけての区間、分岐・合流点から船溜にかけての区間では、流出入水及び境界面の影響によると思われる複雑な流れもみられる。

(b) 海水の流入がないときに、(a)に述べた流入水に加え、雨天時の下水排水が流入した例である図-4（昭和61年4月22日の例）では、量の多い江川幹線の排水流入（図中の Q_{i8} ）の影響により、松重ポンプ場から分岐点を経て船溜へ向かう表層流と船溜から運河中央部付近へ至る深水層での逆流が生じている。その他の状況は定性的には(a)に述べた流れの状況とほぼ同様であるとみて良いであろう。

(c) (a)に述べた各種排水の流入状況のもとで、海水の導入があった場合の例である図-5（5月22日の例）では、流入した海水が中層水を連行しながら、その重力効果のために深水層へ入り流下する様子がみられる。その後、海水は希釈等によりその重力効果を失うと松重ポンプ場からの流出の影響を受けて、中水層を中心にほぼ全層にわたって流れ、分岐部から松重ポンプ場へ向かっている。工場排水及び露橋処理場の排水はこうした海水の流れに連行されるようであり、また、分岐部から船溜にかけては、その方向へ向かった一部の流れによる循環が生じている。

(d) (c)の状況に江川幹線からの排水流入が加わった図-6（昭和61年4月23日の例）では、(c)に述べた流れの状況とはやや異なり、江川排水の影響がその流入地点付近の表層に現われている。また、分岐部から船溜にかけての区間の流れ、海水の流下状況（例えば主流の位置）にも異なる点がみられるが、これらは主として密度分布の違いによるものと推測される。

以上に述べたように、運河内での流れの挙動は、密度分布ならびに流出入水の影響を受けて複雑であり一概に言うことはできないが、海水流入があるかないかによってかなり大きな違いが生じることは明らかである。すなわち、各種排水量に比べてかなり大きな海水導入がある場合には、運河内の流れはそれに支配される傾向があり、各種排水の影響は局所的なものにとどまるようである。

(2) 水温及び塩分濃度分布；

図-7より、水温についてはいずれの結果も実測値と良好な一致を示している。塩分濃度に関しても、松重ポンプ場地点を除けば、計算値と実測値との一致の程度は良好である。松重ポンプ場地点での表水層における不一致は、露橋処理場排水による希釈の程度の差によるものとおもわれる。

以上、いずれも、計算値は実測値の示す分布状況を再現していると考えられ、流速分布の結果を含め、計算手法の妥当性が一応検証されたと言えよう。

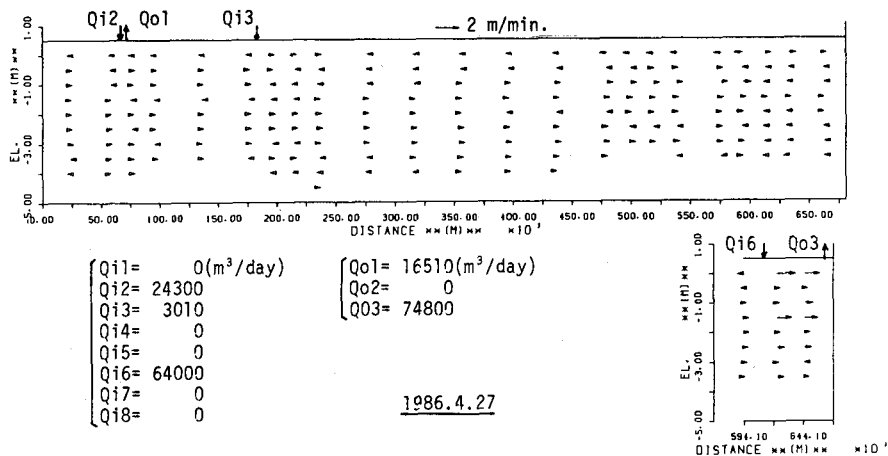


図-3 中川運河における流速分布の計算例 (昭和61年4月27日)

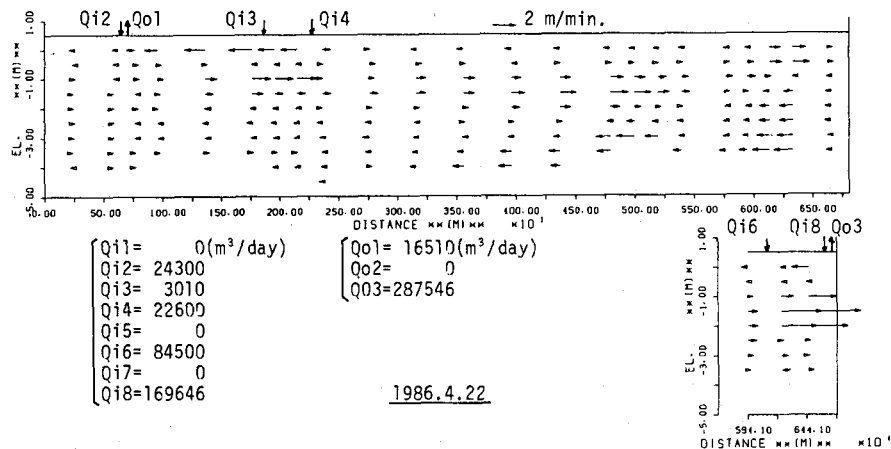


図-4 中川運河における流速分布の計算例 (昭和61年4月22日)

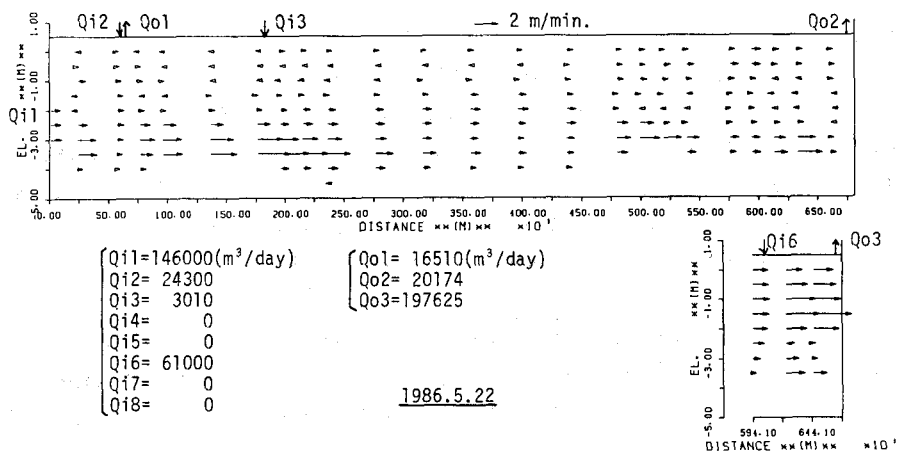


図-5 中川運河における流速分布の計算例 (昭和61年5月22日)

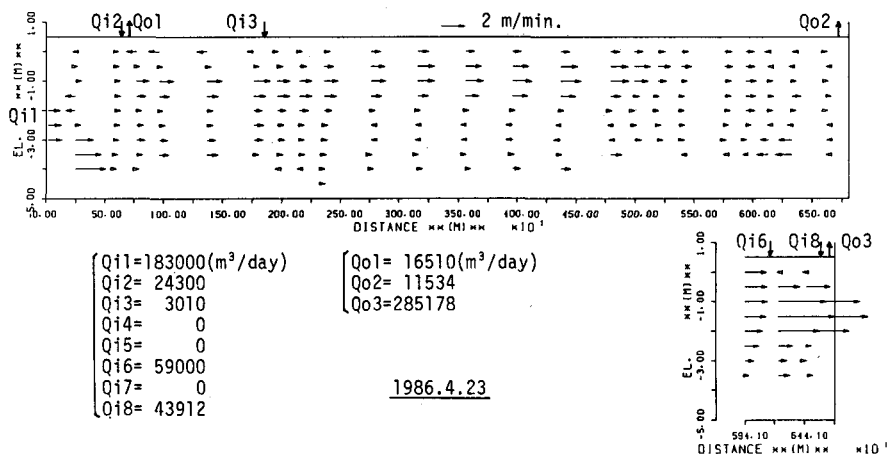


図-6 中川運河における流速分布の計算例(昭和61年4月23日)

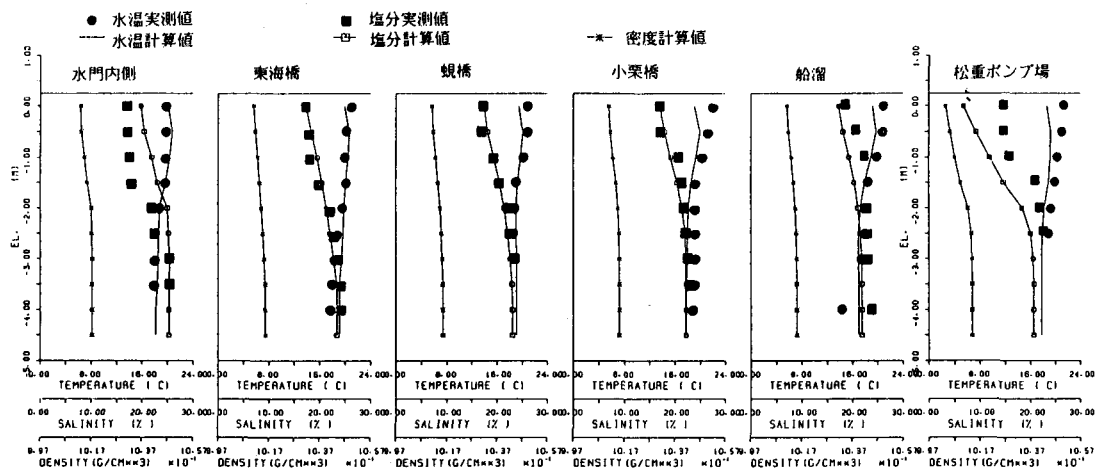


図-7 中川運河における水温及び塩分濃度の再現例(昭和61年5月22日)

5. おわりに

本研究においては、海水、淡水、及び温排水が流入する分岐・合流部を持つ水路に生じる密度成層流を取り扱うための一次元多層流モデルを記述するとともに、水路を取り巻く現実の諸条件の下でのそれによる数値解析法を示し、中川運河の流れにそれらを適用してその結果を考察した。得られた結果は水温及び塩分濃度の分布から見る限りにおいては妥当なものと考えられ、提示した解析法の有用性が一応実証された。

ここに示したモデルを用いた富栄養化関連水質濃度に関する解析も現在進行中であり、今後はこうした水質濃度の分布とその変化に寄与する流れの挙動との関係を中心に検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 岩佐・松尾：貯水池水理の解析モデルとその水温予測への適用，土木学会論文報告集第308号，1981。
- 2) 松尾・岩佐：合流部を有する貯水池での富栄養化シミュレーション，第29会水理講演会論文集，1985。
- 3) 中田・江尻・秋山：エスチャリーにおける塩分、速度分布の数値実験(その1)，公害，Vol13，NO.3，1978。