

成層化した流水中へ放出される鉛直重力噴流の数値シミュレーション
Numerical Simulation of Vertical Forced Plumes in Stratified Cross Flow

(財)電力中央研究所 正員 水 鳥 雅 文
(財)電力中央研究所 正員 片 野 尚 明
(財)電力中央研究所 正員 和 田 明

1. はじめに

本研究で対象とする現象は、水深Hと放出口直径Dとの比H/Dが極めて大きい条件下における鉛直重力噴流の拡散過程である。このような拡散現象は、重力噴流自身の放出条件とともに、その放出される場（周囲流体）の状態によって様々に変化する。例えば一般の海象条件を考えると、海水の流れや水温成層の存在がその拡散挙動に大きく影響するものと考えられる。特に夏季沿岸海域では、これらの要因が共存するといったきわめて複雑な状況も想定される。

こうした複雑な周囲水環境下における重力噴流の拡散過程を解析するためには、従来から広く用いられている連行現象の概念に基づいた簡便な常微分型のモデルよりも、流体力学と物質拡散に関する基本方程式群を直接数値解析する手法の方がより様々な条件に柔軟に対応でき、より精度の高い解析手法であると考えられる。

そこで本研究は、複雑な周囲条件に放出される重力噴流現象に対して3次元モデルによる数値シミュレーション解析手法を実用的なレベルに到達されることを目的として、以下の3種類の周囲条件で検討を実施する。まず、その拡散過程がほぼ解明されている①静水・成層域および②流水・非成層域について、数値解析結果と筆者らの実験結果ならびに既往の研究成果との比較・検討を行って、本手法の適用性と問題点を明確化する。ついで、周囲条件が最も複雑でその拡散過程がまだ十分に把握されていない③流水・成層域での鉛直重力噴流について数値シミュレーションを実施し、その拡散特性について若干の考察を行う。

2. 基本方程式

本研究で用いる数値モデルの基本方程式は以下の通りである。ただし、熱量と塩分の両保存式が存在するのは、放出水と周囲水との密度差は塩分で、周囲水成層場は温度によって各々形成されていると想定しているためである。

(連 続 式) $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$ (1)

(運動方程式) $\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i \cdot u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - g \frac{\Delta \rho}{\rho} \delta_{3i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\epsilon_{mj} \frac{\partial u_i}{\partial x_j})$ (2)

(熱量保存式) $\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon_{Ti} \frac{\partial T}{\partial x_i})$ (3)

(塩分保存式) $\frac{\partial S}{\partial t} + u_i \frac{\partial S}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon_{Si} \frac{\partial S}{\partial x_i})$ (4)

(密 度 式) $\rho = \rho_s (T, S)$ (例えば、クヌードセン式) (5)

ここで、 x_i, u_i : 直交座標軸と速度成分 ($i, j = 1, 2, 3$) , T : 温度, S : 塩分, P : 圧力, ϵ_{mi} : 渦動粘性係数, $\epsilon_{Ti}, \epsilon_{Si}$: 温度, 塩分の渦動拡散係数, $\rho, \Delta \rho$: 密度および密度差, ρ_s : 参照密度。

ただし、静水・成層域の場合には、その拡散が軸対称的現象であるため、上記の式を円筒座標系 ($r - z$ 系) に変換して取り扱うこととした。

3. 計算諸条件と計算手法の検討

前述の基本式をもとに実際現象をシミュレーションするにあたっては、適切な諸条件の設定および計算手法の選択が重要となる。以下にこれらの点について検討した結果を示す。

(1) 渦動粘性係数と渦動拡散係数

本研究では基本的にブルームの半値半幅を混合長とした混合距離モデルをもとに設定する。具体的

には表-1に示すように各計算領域毎に設定値を変化させることにより良好な計算結果を得た。主な設定上の留意点は、
 ㊶静水域中のブルーム内渦動粘性係数は、放出口近傍の噴流領域に比べそれ以遠の領域の方が乱れの発達が予想されるため、検討の結果式中の定数値を噴流領域の1.5倍とした。
 ㊷乱流シュミット数は0.7とほぼ既往の研究結果²⁾と同程度の値が適当であった。
 ㊸初期設定温度成層を保持するために、成層境界面近傍での鉛直方向渦動拡散係数を $10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 程度に設定する、等である。

(2) 境界条件

本計算で用いた境界条件は図-1に示すとおりである。水表面の境界条件については、別途水位上昇を認めた自由境界での計算を実施し、今回の放出条件では水位上昇の影響は小さいことを確認したため、ここでは固定境界とした。

(3) 初期条件の計算手順

初期条件を設定するための計算手順は以下の通りである。

(i) 成層域の場合、 $u=v=w=0$ 、 $P=0$ として初期設定水温分布から圧力分布を計算する。圧力計算法としては、

HSMAS法を用いた。なお精度を確認するために poisson 方程式より求める方法について

も検討したが、両者の間に有意な差は認められなかった。³⁾

(ii) 流水域の場合、(i)とは別途に密度差を考慮せず、場の流動と放水流動を計算する。

(iii) 静水・成層域の場合には(i)で求めた圧力分布を初期圧力場として放水流動計算を開始する。

(iv) 流水・非成層域の場合には(ii)で求めた流速・圧力分布を、流水・成層域の場合には

表-1 渦動粘性・拡散係数の設定

項目	周囲水条件	ブルーム内 ($0 \leq r \leq b_{1/2}$)		ブルーム外	
		右記領域以外	成層境界面近傍	右記領域以外	成層境界面近傍
渦動粘性係数 ε_m	静水・成層域	$0.0256 \cdot b_{1/2} \cdot W_{\max}$ (噴流領域)	$0.0384 \cdot b_{1/2} \cdot W_{\max}$	$0.00448 \text{m}^2/\text{s}$ ($= 0.0256 \cdot \frac{D}{2} \cdot W_0$)	
		$0.0384 \cdot b_{1/2} \cdot W_{\max}$ (ブルーム領域)			
	流水域	$0.0384 \cdot b_{1/2} \cdot W_{\max}$		$0.00672 \text{m}^2/\text{s}$ ($= 0.0384 \cdot \frac{D}{2} \cdot W_0$)	
渦動拡散係数 ε_T ε_S	静水・成層域	$\varepsilon_m/0.7$ (ただし、 $b_{1/2} < r \leq 2b_{1/2}$ においても、 $0.25 \cdot \varepsilon_m/0.7$ を与える)		$0.0001 \text{m}^2/\text{s}$ (水平方向)	$0.0001 \text{m}^2/\text{s}$ (鉛直方向)
	流水域	$\varepsilon_m/0.7$			$0.00001 \text{m}^2/\text{s}$ (鉛直方向)

注) $b_{1/2}$ 、 $b_{1/2}$: 流速および濃度の半値半幅、 $W_{\max}$: ブルーム中心の鉛直速度、 W_0 : 初期放出流速

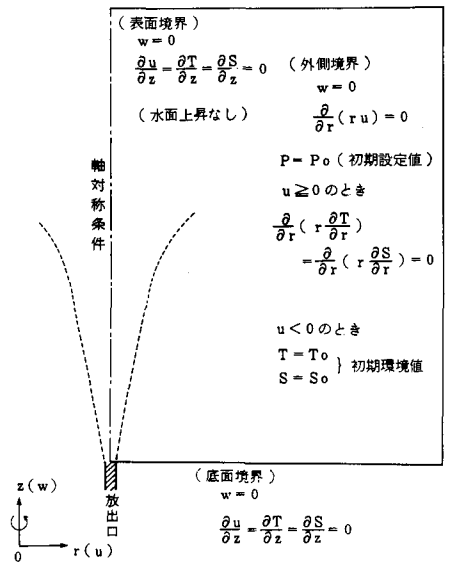


図-1(1) 境界条件(静水域の場合)

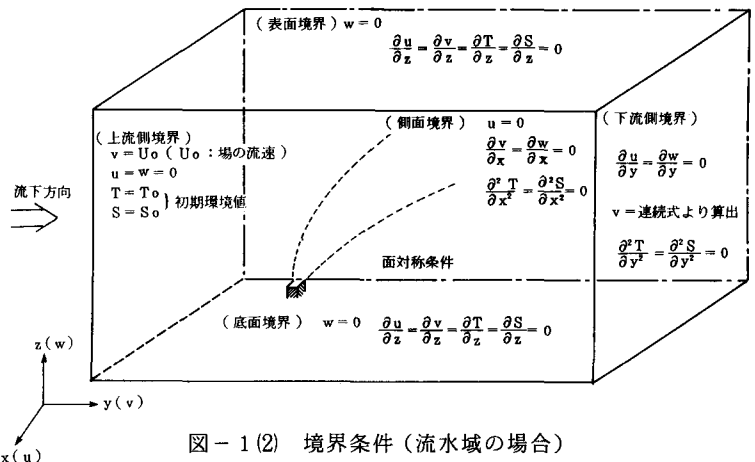


図-1(2) 境界条件(流水域の場合)

これに(i)で求めた圧力分布を加え、これを初期条件として全方程式による計算を開始する。

(4) メッシュ分割

静水域の場合には軸対称現象と考えられるため $r-z$ 平面、流水域の場合には放出口中心を含む縦断面で面対称と考えられるため中心断面から片側を計算領域に設定する。

メッシュ分割は、ブルームの拡がり幅に応じて狭い所ほど細分割する必要があるため、ここでは不等間隔メッシュを採用した。計算格子点数は、静水域の場合 736 点、流水域の場合 35,568 点である。

4. 計算結果とその考察

前述の数値モデルを用い、①静水・成層域、②流水・非成層域、③流水・成層域の 3 種類の周囲水条件下における鉛直重力噴流拡散現象の数値シミュレーションを実施した。ここで取り扱う重力噴流は、海面下 21.5 m に位置する直径 5 cm の円形放出口より初期流速を 7 m/s で放出されるという条件を想定する。放出水は淡水、周囲水は塩水とし、両者の密度差は 0.025 g/cm^3 とする。

以下にシミュレーション結果の概要を示す。

(1) 静水・成層域の場合

周囲水の成層条件は 2 成層型の温度成層とし、上下層の温度差 2°C 、上層厚さ 5 m と設定した。

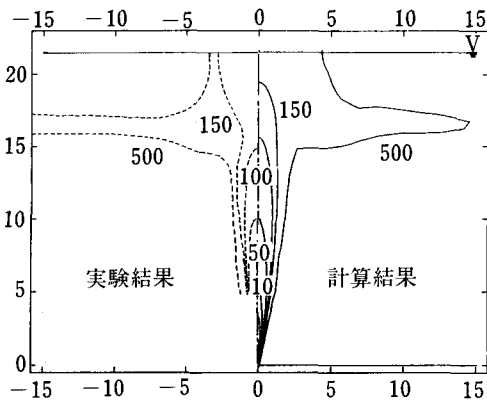


図-2 放水濃度の縦断面分布 (静水・成層域)

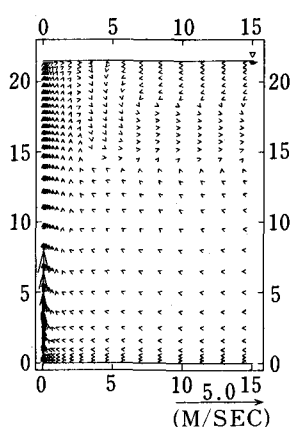


図-3 流速ベクトルの縦断面分布 (静水・成層域)

の縦断面分布について計算結果と筆者らの実施した実験結果との比較を示す。放出水は運動量によって一旦水表面に到達した後、負の浮力によって放出水と等密度を有する成層境界面付近に沈降していく拡散形態が両者よく一致しているものと認められる。

図-3 には流速ベクトル縦断面分布の計算結果を示す。ブルーム上昇域および水平拡散領域における周囲水の連行加入の様子が明瞭に読み取れる。

図-4 は、ブルーム中心に沿った放水濃度の希釈倍率および流速低減率の変化に関して、上述の計算結果とともに別途実施した非成層条件下での計算結果ならびに Abraham の実験式を示す。これらを比較すると、希釈倍率および流速低減率ともに、今回の計算では水表面近くまではほぼ非成層域の場合と同様に变化し、Abraham の実験式とよく一致していると認められる。ただし、流速低減率の変化を見ると、成層化している場合の方が水表面近くでの急速な流速の減衰がより潜った所に出現していることがわかる。

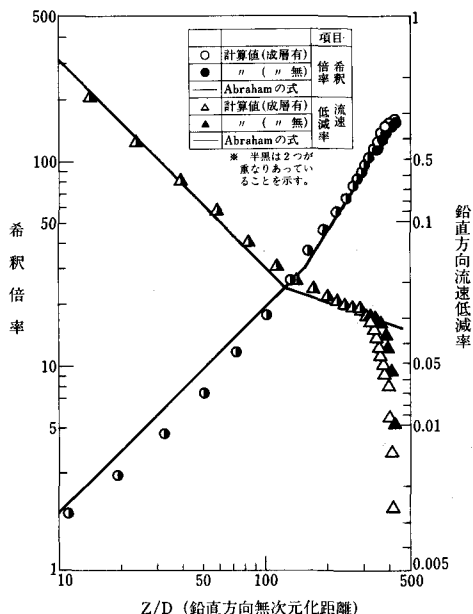


図-4 ブルーム中心の希釈特性、流速低減特性の比較

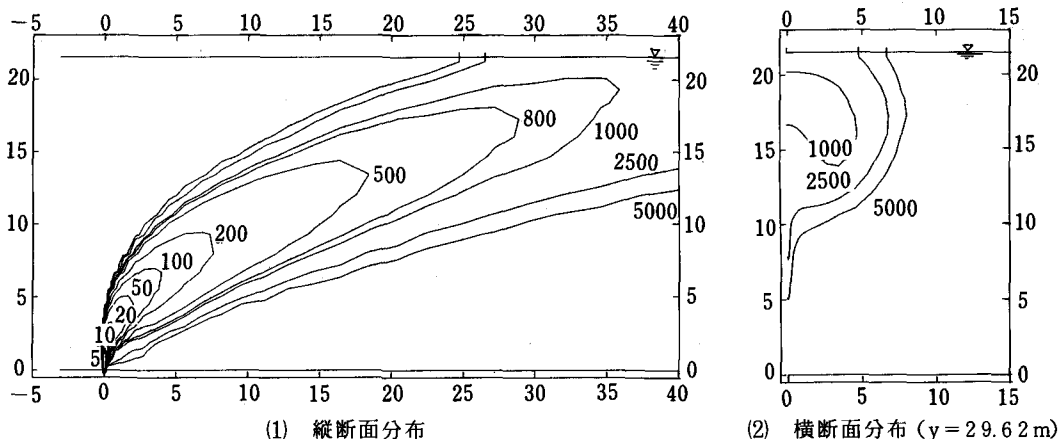


図-5 放出水濃度分布（流水・非成層域）

(2) 流水・非成層域の場合

周囲水の条件は 10 cm/s で全域一様と設定した。

図-5には放出水濃度のブルーム中心に沿った縦断面分布および横断面分布の一例を、図-6にはその横断面内の流速ベクトル分布を示す。放出水が周囲流速によって次第に曲げられていく様子、下方向からの周囲水の連行加入、および既往の研究⁴⁾においても指摘されている横断面分布の馬蹄形への変形が認められる。

図-7は、ブルーム中心の経路および希釈特性について計算結果と先に筆者らが提案した実験式⁵⁾との比較を示す。経路については両者は良い一致を示している。一方、希釈特性についてみると、水表面近くを除いて全体の変動はほぼ同一傾向を示すものの、希釈倍率の計算値は全体的に実験式の値を下回っている。この相違に関する計算上の問題点としては、①円形の放出口をその直径 D を一辺とする正方形形状に置き換えている点、②渦動粘性・拡散係数の設定法、等が考えられる。参考のため、図-7中には一辺 D の正方形と同面積となる円形放出口を想定し、その直径 $D' (=2D/\sqrt{\pi})$ で計算結果および実験式を整理し直した結果を示している。これによると両者の差は若干縮小する傾向にあることがわかる。今後、この希釈特性の相違についてはさらに検討を加えていく予定である。

以上の(1)および(2)の結果より、本報で用いた数値モデルは成層条件下および流水条件下における鉛直重力噴流に十分適用できると判断される。

(3) 流水・成層域の場合

次に、上述の2つの要因が共存する条件下における数値シミュレーションを実施した。成層および流水条件は

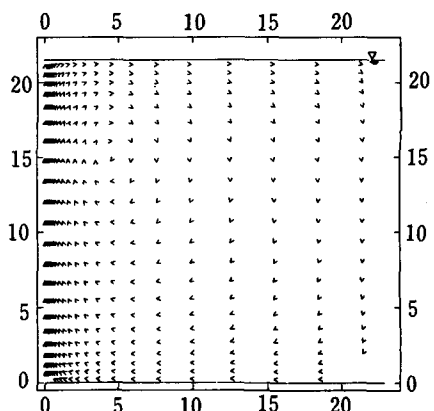


図-6 流速ベクトル横断面分布（ $y = 2.9.62 \text{ m}$ ）

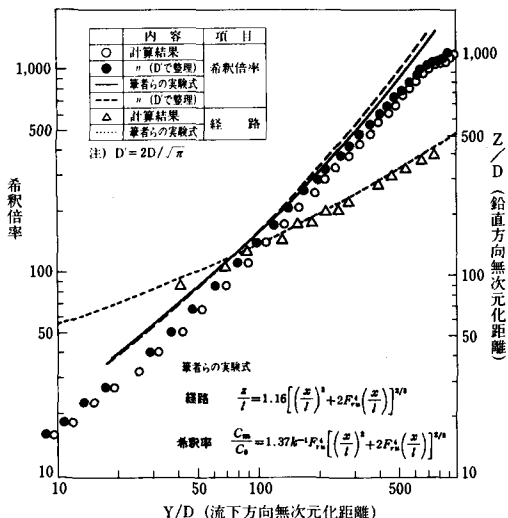


図-7 ブルーム中心の経路、希釈特性の比較

(1), (2)と同様である。すなわち、2成層型の温度成層場（厚さ5 m、温度差2℃）で全域一様の10 cm/sの流動場を与えた。

図-8には、放出水濃度のブルーム中心に沿って縦断面分布を示す。これより、放出されたブルームが成層の影響により水表面へ向う上昇が抑制され、成層境界面付近から水平方向へ拡散していく形態となることが特徴的に認められる。

また、図-9には放出水濃度の横断面分布形状の変化を示す。放出直後は楕円形をしていた分布形状が流下方向に移行するにつれて低希釈倍率（高濃度）の領域から徐々に馬蹄形に変化し、その変化が非成層域の場合よりも明瞭に表われ、ブルームの分岐現象へと発達していく様子がうかがえる。

図-10は、放出口近傍および成層境界面到達後の横断面流速ベクトル分布を示す。噴流内への周囲水の連行状況について両者を比較すると、放出口近傍では噴流の下方からのみ連行しているのに対し、成層境界面到達後では上下2方向からの連行がある点が注目される。これは、前述の非成層域の場合（図-6参照）には認められない現象であり、上述の横断濃度分布形状の変化特性と対応して考えることができる。

図-11にはブルーム中心に沿った希釈特性、噴流幅および厚さについて、本計算結果と前述の流水・非成層域の計算結果とを比較したものを示す。希釈特性は、水表面付近でわずかな相違が認められるものの概ね

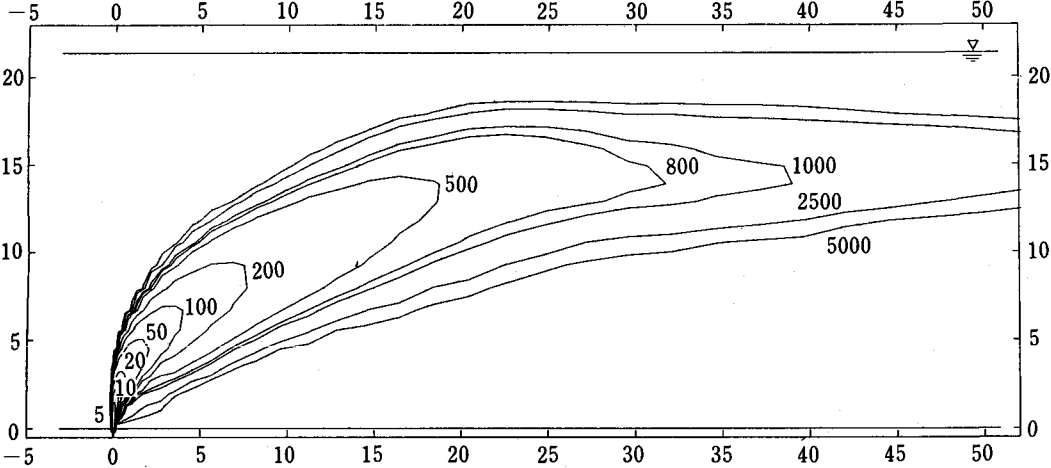
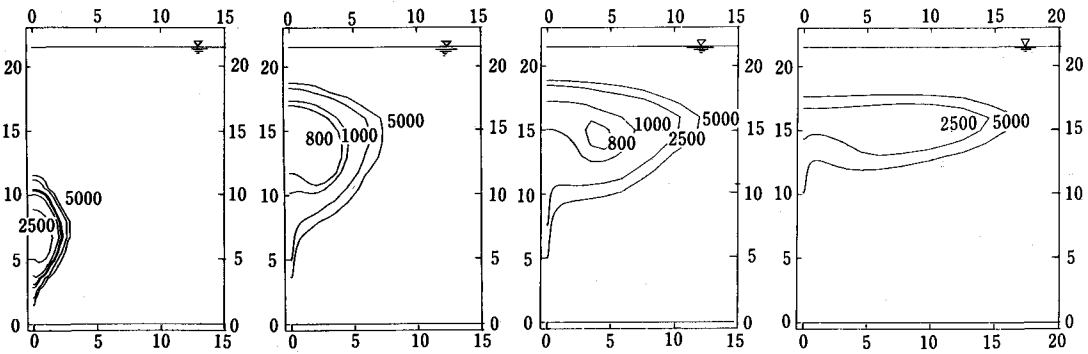
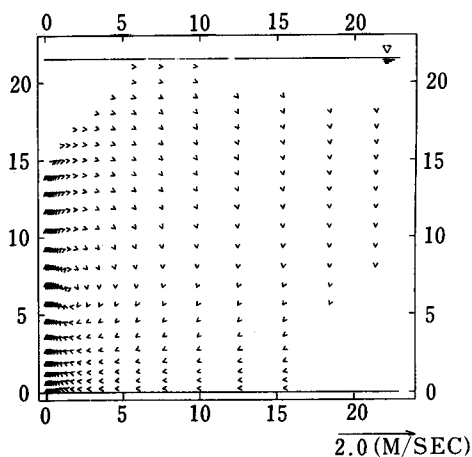


図-8 放出水濃度の縦断面分布（流水・成層域）

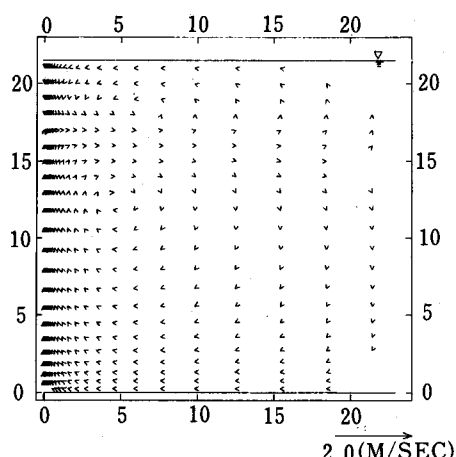


(1) $y = 4.45 \text{ m}$ (2) $y = 20.42 \text{ m}$ (3) $y = 29.62 \text{ m}$ (4) $y = 49.62 \text{ m}$

図-9 放出水濃度の横断面分布（流水・成層域）



(1) 放出口近傍 ($y=4.45\text{m}$)



(2) 成層境界面到達後 ($y=29.62\text{m}$)

図-10 流速ベクトル横断面分布 (流水・成層域)

両者は同様の变化傾向をしている。一方、噴流幅および厚さについては、成層境界面到達後の両者の相違が顕著となり、成層域の場合の方が非成層域に比べ、幅が広く、厚さが薄くなる傾向が認められ、平面的に見るとより扁平な断面形状となっていることがわかる。

5. おわりに

以上の結果より、本報で用いた平均値モデルによる3次元数値解析手法により様々な周囲水条件下における鉛直重力噴流の拡散挙動を比較的精度よく、かつ包括的に再現でき、その適用性についても静水・成層域および流水・非成層域については明確にすることができた。また、成層化した流水中へ放出される鉛直重力噴流に対して本モデルを用いてシミュレーションを行い、非成層域の場合との拡散特性の相違を明らかにした。

今後は、流水・成層場における水理実験的研究を実施するとともに、連続成層条件下での拡散挙動について解析検討していく予定である。

〔謝辞〕

本研究で用いた計算結果は、東京電力株式会社の委託によって実施した研究の一部である。また、本計算作業にあたっては、日本科学技術研修所の方々の協力を得た。ここに記して、関係各位に対して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Wygnanski, I., Fiedler, H., J. Fluid Mech., vol. 38, part 3, pp. 577-612, 1969
- 2) 石垣 博; 日本機械学会論文集 (B編), 48巻, 433号, 1982
- 3) 土木学会編, 土木工学における数値解析/流体解析編, pp. 11-13
- 4) 林・首藤; 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 355-359, 1970
- 5) 水鳥・片野・和田; 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 581-585, 1986

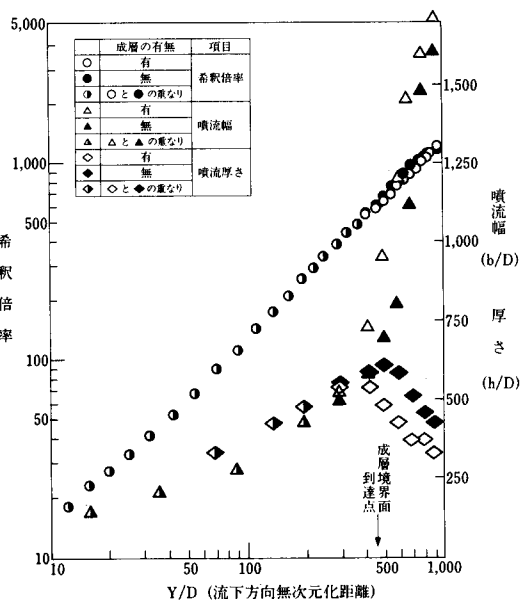


図-11 ブルーム中心に沿う希釈特性、噴流幅および噴流厚さの比較