

海水淡水化にともなう排出ブラインの拡散予測

Prediction of Diffusion of Discharged Brine in a Desalting Process.

(財)電力中央研究所・土木技術研究所 正会員 ○和田 明
通産省工技院・東京工業試験所 後藤藤太郎
(財)電力中央研究所・土木技術研究所 正会員 片野 尚明

1. まえがき

海水淡水化が海域に与える影響の主なものとは大量のブライン排出である。蒸発法では海水を加熱して淡水を蒸発させるので、大量の濃縮海水を排出する。したがって、周囲の海水より温度および塩分濃度の高い排出ブラインが海域に拡散する範囲を明確にし、環境に与える影響を予測しなければならない。排出ブライン放出による周囲への影響範囲を軽減させる方法として水中放流方式が考えられる。これは排出ブラインを水中噴流させ、周囲水との積極的な混合、稀釈を行わせるものである。本研究は数値モデルによるシミュレーション解析手法を用いて排出ブライン放出による水温上昇ならびに塩分濃度変化の範囲を予測するための数値モデルを展開し、解析結果と水理模型実験結果と比較検討し、この手法の拡散予測への適用性を確立することを目的としたものである。

解析は一様密度を有する静止水域を対象にして、放水口から水面あるいは水底面に到達するまでの排水噴流の挙動に着目して、噴流の拡散特性を求めるものである。数値モデルの内容は現象を支配する流体力学の運動方程式、連続方程式ならびに熱・塩分に関する物質保存式から構成されている。本報告ではこれらの基本式を種々の排水条件に対して解析を実施して噴流経路、噴流の流速、温度および塩分濃度の分布を予測し、次に、この手法を用い、10万 m^3 /日の海水淡水化装置と発電所を併置した若干のケースについて、排出ブライン拡散の状況を検討した結果を述べるものである。

2. 排出ブラインの拡散特性

重力噴流の混合形態は運動量の作用する方向、浮力の作用する方向、周囲流体における流れおよび密度成層の有無によって異なる。噴流の放出方向に関しては、通常稀釈効率を高めるために鉛直方向に対してある角度をもって放出する方法が考えられるが、代表的な放出向きとしてはその両極端である鉛直上向きと水平向きとがあげられる。ブルームの理論展開においては連行係数の概念が導入され、噴出源からの距離に伴ないブルーム軸上の流速、密度およびブルームの広がり幅を相似仮説に基いて求める方式が一般に採られている。この理論においては、水面ならびに水底の境界を考慮することができないので解析解はブルームが水面あるいは水底に到達する過程までにはしか適用できない。

排出ブラインに伴う海域での3次元拡散予測計算を実施するための第一段階として、上述の相似仮説に基づく解析を実施することとした。この解析においては流速、温度ならびに塩分濃度は次の分布形に従うものと仮定する(図-1参照)。

$$\left. \begin{aligned} U &= U_m \cdot \exp \left\{ -\left(\frac{r}{b} \right)^2 \right\} \\ T - T_e &= \Delta T_m \cdot \exp \left\{ -\left(\frac{r}{\lambda b} \right)^2 \right\} \\ S - S_e &= \Delta S_m \cdot \exp \left\{ -\left(\frac{r}{\lambda b} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ΔT_m 、 ΔS_m ：それぞれブルーム中心軸での周囲流体との温度差、塩分濃度差、 U_m ：ブルーム中心軸上の流速、 λ ：物質と流速の広がり幅の比、 b ：ブルーム特性幅($\sqrt{2\sigma}$)、 T_e 、 S_e ：周囲流体の温度、塩分濃度。

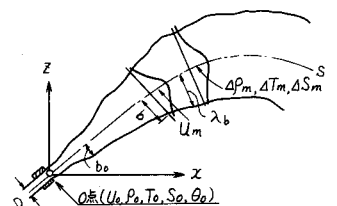


図-1 ブルームの拡散模式図

このモデルにおいて、実験的に定めねばならない係数値として、連行加 入係数値 α と広がり幅の比 λ がある。実験結果から、放出水と環境水との間の密度差が小さい場合において

は、温度分布から決定される経路と染料で着色したブルーム雲の中心位置から決定される経路とは必ずしも一致していないことが確認された。このことは、ブルームの密度を構成している温度と塩分の分布が同一の中心軸を有していないことに起因しているものと考えられる。以上の現象をこのモデルに反映させることは現状では不可能である。従って解析においては、温度と塩分は同一中心軸をとるものとみなす。ブルームの経路と軸上における密度変化率の両者を同時に満足する α および λ の値を見出すことは困難であるが、各種の条件下で実施した18ケースの水理実験と解析結果との照合の結果、 $\alpha = 0.052$ 、 $\lambda = 1.11$ と定められた。図-2は実験結果の一部であって解析結果と実験結果との比較を示したものである。両者は放出水と環境水との間の密度差が小さい場合を除いて良好な一致を示しているものと考えられる。

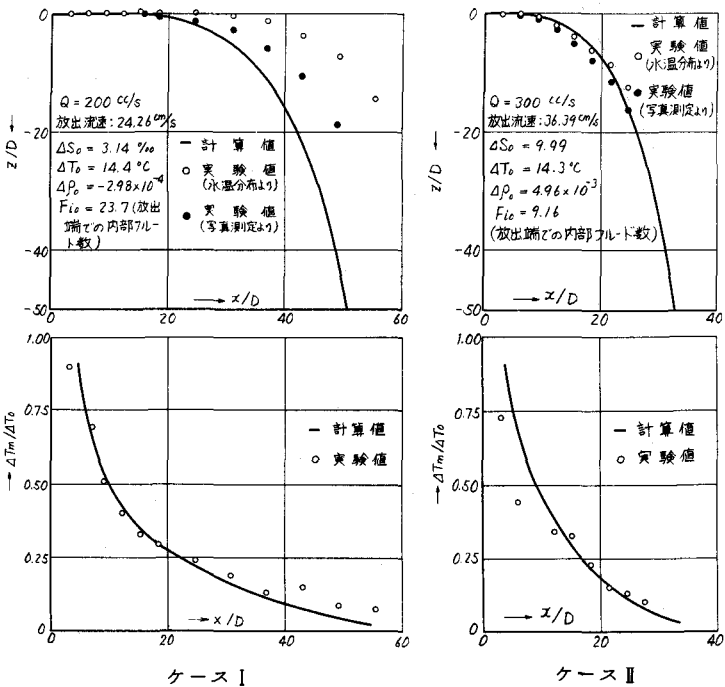


図-2 ブルーム軸の経路および軸上の無次元温度比

3. 排出ブラインの流動・拡散モデル

ブルームの運動を支配する方程式は次式で表わされる。

$$(1) \text{ 運動量輸送式: } \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial \phi_0}{\partial x_i} - g \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \delta_{3i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (A(j) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + A(i) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \quad \dots \dots (2)$$

$$(2) \text{ 連続式: } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 x_i : 直交座標軸、 u_i : 流速成分、 g : 重力加速度、 ρ_0 : 排水規準密度、 $\Delta \rho = \rho_\infty - \rho$ 、 ρ_∞ : 周囲水の密度、 ρ : ブルーム内の任意点の密度、 $A(i)$ 、 $A(j)$: $i, j \neq 3$ のとき水平渦動粘性率、 $i, j = 3$ のとき鉛直渦動粘性率、 δ_{3i} : $i = 3$ に対して 1、 $i = 1, 2$ に対して 0、 ϕ_0 : 圧力と密度との比 ($= P/\rho_0$) で次式で表わされる。

$$\phi_0 = P/\rho_0 - g \int_z^0 (\rho_\infty/\rho) dz \quad \dots \dots \dots (4)$$

排出ブラインの解析においては、状態方程式 $\rho = \rho(S, T)$ が必要とされる。ここに、 S : 塩分濃度、 T : 水温である。このとき、塩分濃度と水温に関する熱・物質保存式と流体の力学的方程式との連立解により、流体の浮力効果をシミュレートすることが可能となる。熱と物質は乱流により同じ過程で輸送されるので、両者を Γ で代表させるとき Γ の保存式は次式により表示できる。

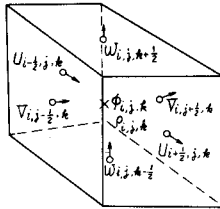
$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + u_i \frac{\partial \Gamma}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (K_{ij} \frac{\partial \Gamma}{\partial x_j}) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 K_{ij} : 拡散係数。

運動量に対する乱流輸送係数Aは流れの場の関数であるので、これらの物理量と平均流系と結びつけることを考える。ここではPrandtlの仮説を導入し、ブルーム軸の半径方向の渦動粘性率の成分を次のようにおく。

$$A_r = C l_r w_{\max} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 l_r : 混合長、 $w_{\max}$: 噴流中心速度、 C 0.0256 に等しい定数。
混合長 l_r はブルームの半幅 $r_{1/2}$ にとるものとする。式(2)の密度と水温および塩分濃度との関係はKnudsenの式を用いた。



本解析手法における流速成分 u_i はセルの面で、圧力および密度はセルの中心位置で定義されている(図-3参照)。式(2)・(3)より u_i の新しい値を図-3 3次元差分格子系を求めるためには ϕ の値が必要となる。圧力に対する方程式は式(2)・(3)より次式のように求められる。

$$\nabla^2 \phi = -R, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここに、
$$R = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + 2 \left(\frac{\partial^2 uv}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 uw}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 vw}{\partial y \partial z} \right) - \left(A_x \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 D}{\partial z^2} \right) - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

上記の方程式群を差分近似により解くために、計算領域を三辺の長さが $\delta x, \delta y, \delta z$ の直方体のセル群に分割する。運動方程式を解いても式(2)を満足する速度場とは必ずしもならない。従ってセルの圧力を修正して速度の発散が0となるような修正がとられる。ここでは、Dの大きさが微小値 ϵ より大きいときには圧力を次の量だけ変化させる。

$$\delta p = -\beta D, \quad \beta = \frac{\beta_0}{2\delta t} \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $\beta_0 < 2$: 加速パラメータ。

セル (i, j, k) で δp を計算して圧力 $P_{i,j,k}$ を補正するとともに、セル (i, j, k) の各面での流速成分を、 $u_{i,j,k} \rightarrow u_{i,j,k} + (\delta t / \delta x) \delta p$ と調整させる過程を繰り返すとき、 $D < \epsilon$ を満足するセル群が得られる。

4. 排出ブラインの3次元拡散計算

排出ブラインの拡散計算の実施に先立って、温排水によるブルーム解析を実施した。温排水に関するブルームの水理実験結果と今回の解析結果との比較によって数理モデルの妥当性について検討を加えた。解析は2種類の放流管配置すなわち、(1)単一鉛直放流管、(2)単一水平放流管について行なった。ブルーム中心軸に沿う流速ならびに温度の低減特性

について検討した結果、水理実験の結果と解析結果とは比較的よく一致しており、ここに展開した解析手法が排出ブラインの予測に十分有効であることが確認された(図-4参照)。

排出ブラインの解析条件は表-1に示す。図-5および6は解析結果の一部でケースV3、H1に対応し、ブルーム中心軸断面の流速、密度分布を示す。V3の場合は放出水と周囲水との間に正の密度差があるが、運動量が比較的大きいため、鉛直上向きの流れは水面に到達している。表層を水平拡

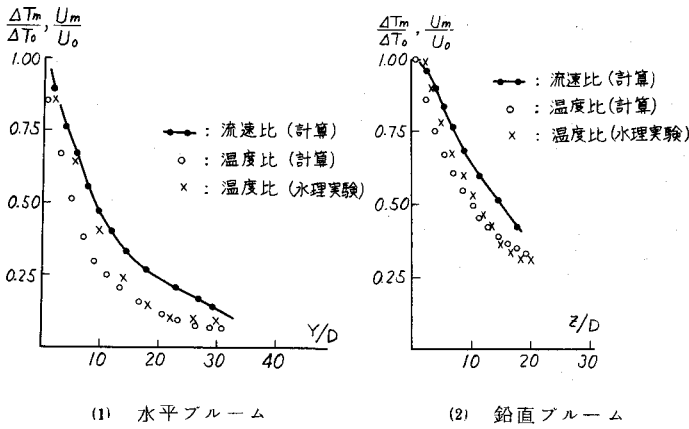
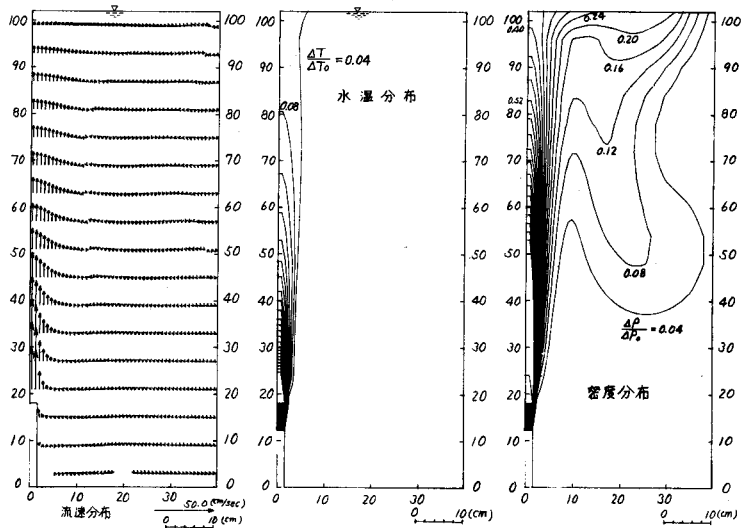


図-4 温排水ブルームの中心軸に沿う流速および温度低減率

がりの状態で移行した後、周囲水との密度差により鉛直下方に沈降する傾向を有している。しかしながら、鉛直上向きの放出流速が大きいために、水底上に沿う連行加入水が存在していてブルームに加入している状態が認められる。

水温、塩分濃度分布から、両者とも移流効果により水面に達していることが認められるが、その分布はかなり相違している。



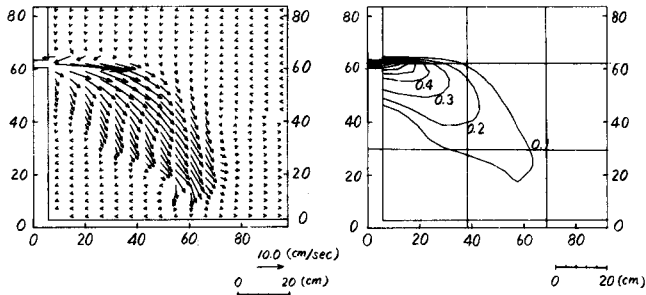
図－５ 排出ブラインの拡散解析結果（鉛直ブルーム）

表－１ 排出ブラインに関する計算条件

計 算 ケ ー ス	流 量 (Q / s)	放出流速 (cm/s)	塩分濃度差 ΔS ($\%$)	放水温度 T_o ($^{\circ}C$)	場の温度 T_e ($^{\circ}C$)	密 度 差 $\Delta \rho = \rho_o - \rho_e$	放出端での 内部フルード数 F_{i0}	水 深 H (cm)	放出方向
V-1	200	24.26	2.93	25.2	10.7	-3.3×10^{-4}	23.26	84	鉛 直
V-2	200	24.26	6.11	25.7	11.4	1.93×10^{-3}	9.81	84	鉛 直
V-3	300	36.39	6.11	25.7	11.4	1.93×10^{-3}	14.71	84	鉛 直
H-1	200	24.26	9.82	24.6	11.0	4.97×10^{-3}	6.12	84	水 平

H1 の場合は放出口直上の周囲水がブルーム内に加入していることが認められる。放出口高さの所では、放出方向の前面水域方向からブルームに加入している。

水温ならびに塩分が希釈されるパターンには相違がみられる。密度分布図によれば、初期の運動量によって放出直後水平状に拡がるが、負の浮力の影響および放出口での内部フルード数が小さいこともあって、鉛



(1) 流速分布 (2) 密度分布

図－６ 排出ブラインの拡散解析結果（水平ブルーム）

直下向きの流速が加速され、水底に達した後は水底に沿いながら周辺外方に向けて分散する傾向を示す。

5. 10万^m³/day海水淡水化プラントの排出ブライン拡散予測

海水淡水化プラントの一例として、10万^m³/day海水淡水化のときの排出ブラインの設計値についてふれてみる。この場合における取水海水、生産淡水ならびに排出海水のフローを図－７に示す。従って、排出ブラインの排出量、温度および塩分濃度は次のようになる。

$$\text{排出ブライン流量} = 1,500 + 11,000 + 4,200 = 16,7000 \text{ m}^3/\text{hr} (= 4.64 \text{ m}^3/\text{s})$$

$$\begin{aligned} \text{排出ブライン温度} &= (35 \times 1,500 + 34 \\ &\quad (11,000 + 4,200)) / 16,700 \\ &= 34.1^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\text{塩分濃縮比} = 20,900 / 16,700 = 1.252$$

いま取水海水の塩分濃度を 32.52 ‰ (Cℓ
= 1.8 ‰) とすると、放出海水の塩分濃度
は 40.7 ‰ となり、塩分の増加量 ΔS =
8.18 ‰ となる。また、取水温度と放水温と
の差 $\Delta T = 9.1^\circ\text{C}$ になる。次に、 ΔT を 7

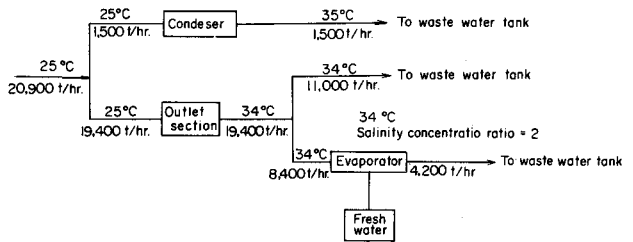


図-7 海水淡水化のフローチャート

$^\circ\text{C}$ 上昇値におさえるためにバイパス希釈を行うとすると、排出量 (Q) および塩分濃度 (S) は次のようになる。

$$Q = 4.64 + 1.33 = 5.96 \text{ m}^3/\text{s}, \quad S = 38.88 \text{ ‰}, \quad \Delta S = 38.88 - 32.52 = 6.36 \text{ ‰}$$

放流方式として単一放流管方式を採用のとし、数値シミュレーションの条件は 10 万 m^3/day の海水淡水化プラントの排出ブラインの設計値に基づいて、表-2 のように設定した。放水口の高さは底面上 $Z = 2.7 \text{ m}$ の位置に設定した。図一

表-2 計算条件

8 および 9 はそれぞれ排出ブルーム中心軸断面の流速分布および密度分布を示す。この場合、放水

流 量 Q (m^3/s)	塩分濃度 差 ΔS (‰)	温度差 ΔT ($^\circ\text{C}$)	密 度 差 $\Delta \rho$	放出端での 内部フルード 数 F_o	H (m) 放水口と水面 との高さの差	D (m) 放流管 口 径	H/D
5.96	6.36	7.0	2.7×10^{-3}	3.0	1.17	3.0	3.9

密度と周囲水の密度との間に正の密度差がある。したがって、排出水による鉛直上向きの流れは水面まで浮上せず、水深の中程のところで鉛直上向きの速度を失う。そして上方から連行してくる周囲水とともにブルーム外縁周囲に下降し始め、水平距離 $r/D = 1.0$ の付近から底層に沿って周辺に分散する傾向を示す。水温ならびに塩分濃度の分布は、排出水の移流効果を受けて密度の分布と類似していることが認められる。排出水の希釈度合は図-9 から判断されるように、 $r/D = 1.0$ のところで約 2.0 ~ 2.5 倍希釈されるものと考えられ、排出水による周辺環境へおよぼす範囲は局所的にとどまるものと判断される。

上記のように、排出ブラインのみによる拡散現象は、放流水と周囲水との間の密度差が正で 2.7×10^{-3} の値をもつために海底に沿った状態を示している。このことは底棲生物への影響を考えると好ましくないものと考えられる。そこで、海水淡水化を発電所との併用運転を考えると、排出水が物理環境へ与える影響について考える。50 ~ 60 万 kW 級の発電所を考えると、冷却水使用水量は約 $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $\Delta T = 7^\circ\text{C}$ となるものとする。自然環境水温を 25°C とするとき、温排水のみによる放出水密度、環境水密度はそれぞれ $\rho_0 = 1.019196$ 、 $\rho_s = 1.021495$ であり、その密度差は -2.299×10^{-3} である。つまり、温排水は正の浮力をもつ表層流れの性質を有する。一方、排出ブラインを温排水に加入させるとき、排出水の流量、放水温、放水塩分濃度は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{流量} &= 3.0 + 5.96 = 8.96 \text{ m}^3/\text{s}, \quad \text{温度上昇} = 7^\circ\text{C}, \quad \text{塩分濃度上昇比} = 1.054 \text{ から}, \quad \text{塩分濃度の増加量} \\ &= 1.756 \text{ ‰} \end{aligned}$$

従って、放出水の密度は $\rho_0 = 1.019982$ となり、環境水との間に $\Delta \rho = 1.513 \times 10^{-3}$ の密度差が生じる。その値は温排水のみによる場合に比して大きい、正の浮力を有している。温排水に関する従来の数理モデルによるシミュレーション解析手法を適用して、半無限海域における温塩排水の拡散予測を行った。その結果、発電所の併用運転においては排出ブラインを含む排水の含有厚さは塩分による密度の増大に伴ない温排水のみによるそれよりも大きくなるが、温排水の拡散と同様な挙動を示すものと判断される。従って従来の温排水の物理環境に与える影響から類推すれば特に問題となることはないと考えられる。

あ と が き

本研究の内容は著者の一人和田が通産省工技院東京工業試験所の流動研究員として工技院大型プロジェクト「海水淡水化と副産物利用」の一分野を担当して実施したものの一部である。研究を実施するに当って御協力をいただいた工技院，日本科学技術研修所および東京久栄の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

1) A. Wada, N. Katano & T. Goto : Prediction of the Diffusion of Discharged Brine by a Simulation Analytical Method. Proc. of the Int. Congr. on Desalination & Water Reuse. 1977.

2) Harlow & Amsden : A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds. Jour. of Comp. Phy.. 1971.

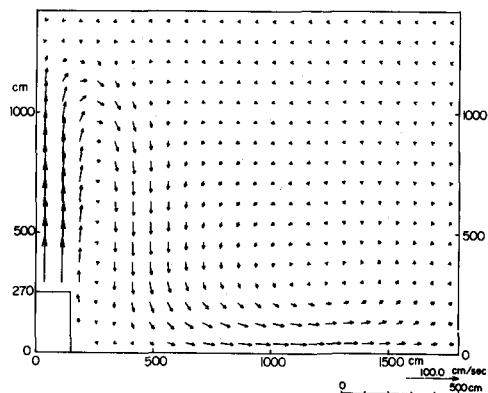


図-8 プルーム中心軸断面の流速分布図
($Q=5.96 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta S=6.36\%$, $\Delta T=7^\circ\text{C}$)

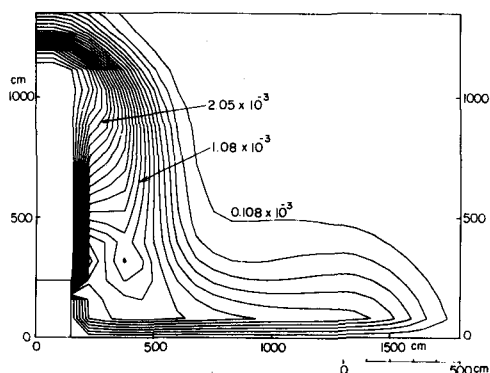


図-9 プルーム中心軸断面の密度分布図
($Q=5.96 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta S=6.36\%$, $\Delta T=7^\circ\text{C}$)