

水中放流されたブルームの挙動解析

Analysis on behaviour of discharged plume in submerged outfall system

(財)電力中央研究所 正会員 ○和田 明・片野尚明・荒木 洋

1. まえがき

温排水による水温上昇範囲を低減させる対策の一つに水中放流方式がある。この放流方式の特色は放水口近傍領域、すなわち放流された温排水が噴流の特性を保持している領域における混合稀釈機能にあり、そこは主として放水口および地形を含めた境界条件と放流条件に依存する領域である。水中放流方式において派生する問題として、海底面の洗掘、噴流の相互干渉、効果的な周囲水連行加入を期待できる放水口の配置およびブルームが水面に達した後の流速の低減などがあげられる。このような問題点の解決をはかりながら水理的に効果的な、しかも経済的な水中放流構造物を設計してゆくためには、温排水の混合稀釈過程におよぼす本質的な諸因子の効果を明らかにすることが必要である。

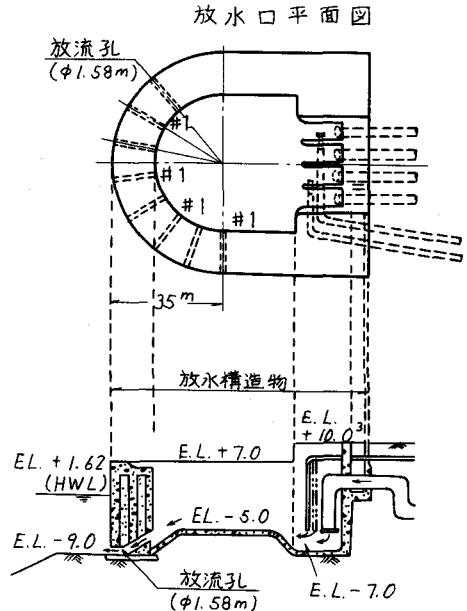
温排水の拡散域を予測する手法については、表層する場合にあっては、すでに数理モデルによるシミュレーション解析手法¹⁾が開発されており、現在広くこの方法により予測が行われている。一方、水中放流する場合にあっては、3次元の現象の取り扱いが比較的容易な無歪模型による水理実験手法が用いられている。²⁾³⁾水中放流の場合には表層放流とは異なり、現象のスケールが小さいために、長時間にわたる流れの再現は必ずしも必要ではない。すなわち、沿岸の流れに周期性がある海域においては卓越周期の往復流を、不規則な流動が卓越する海域においては、対象海域において代表的と考えられるいくつかの流れを模型上に与えて、対象海域の流動特性を再現することに努める必要がある。

なお、温排水が水面に到達した時点での水温低下が十分ではなく、水温上昇範囲が広域となる場合には放流地点近傍を対象とした水理模型のみでは拡散予測が困難となるため、浮上点付近の水理実験結果を入力条件として表層放流の予測モデルに接合し、浮上後の温排水拡散予測を行う手法が最も広く用いられている。⁴⁾

最近、ブルームの挙動を検討するために3次元数理モデルによる解析手法を適用し、水中放流方式による放水口近傍での重力拡散から浮上後の海洋拡散までの一連の挙動を一元的に解析する手法が展開されている。⁵⁾

ここに展開した3次元数理モデルの妥当性については、解析結果と水理実験結果との比較によってなされた。解析は一樣な密度場の静止水域を対象として2種類の放流管配置すなわち単一鉛直放流管と単一水平放流管について放流流量、ノズル口径および水深を変化させて行われた。ブルーム中心軸に沿う流速、温度の低減特性について検討された結果、解析結果は水理実験結果と比較的よく一致しており、ここに展開した解析手法が密度噴流の挙動予測に十分有効であることが確認された。

本文は引き続き、現在水中放流方式を採用しているA発電所を対象として、現地実測結果と3次元数理モデルによる解析結果とを比較し、3次元モデルによるブルーム拡散予測手法の適用性を検討した結果を述べるものである。



図一 A発電所の水中放流口形状・配置図

2. 水中放流された温排水ブルームの実測結果

(1) A発電所水中放水口の概要

図-1は実測の行われたA発電所の水中放水口の形状、配置図である。水中放水口は半径約3.5mの半円形状のコンクリート構造物の周辺底部に4本の放流孔(直径各1.58m)を放射状にうかつたものである。

この放流孔から温排水(最大 $38\text{ m}^3/\text{s}$)を高流速(4.85 m/s)で噴出させて、重力拡散によって周囲水との混合希釈を高め、海面へ浮上するまでの間に十分な水温低減効果を期待するものである。

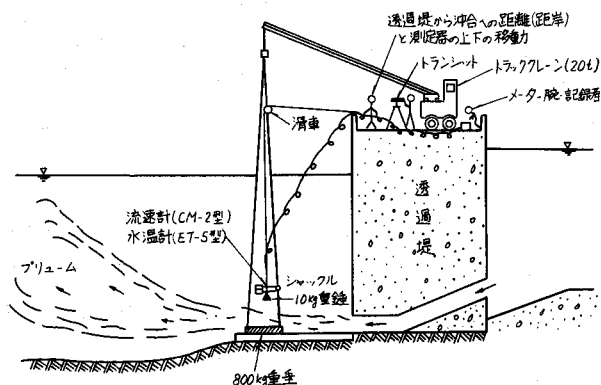
(2) 調査方法と放流条件

温水噴流の調査は、放水口近傍(沖合20mまでの水域)調査と船による調査(沖合20~80mの水域)とに分けて実施した。水温調査にはET-5型電気水温計、流動調査にはCM-2型流向流速計を用い、計測はメーターの指示値を目視することにより行った。

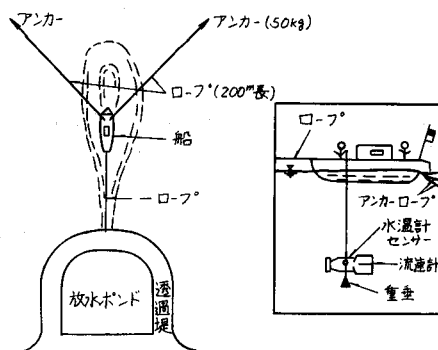
放水口近傍の調査は測定器が高速の温排水噴流に流されないよう、図-2に示すような方法で実施された。800kg鉄製重錘(300cm×50cm×20cm)を20tトラック・クレーンより吊り下げ、その吊り下げ用ワイヤーを張って、流速計・水温計のガイドとした。その吊り下げ用・ワイヤーの上部に滑車を取り付け、その滑車を通したロープの一端に流速計・水温計を設置し、ロープの他端を透過堤上の人間が測定器を上下移動させた。流速計・水温計の支持部は吊り下げ用・ワイヤーを自由にスライドできるようにシャックルを介して固定した。一方、船上からの噴流調査については図-2に示すように流れにより船が移動しないよう放水口からの一点と海底からの2点のアンカーにより船を固定させ、水温および流速の測定を行なった。位置の決定はトラック・クレーンの場合と同様トランシットと目盛り付きロープを使って行なった。実測時の放流条件を表-1に示す。

(3) 調査結果

冷却水量 $38\text{ m}^3/\text{s}$ を中心角 40° で4ヶ所の放流孔から温排水を放流した場合、噴流水脈



(A) トラック・クレーンによる。



(B) 船上による

図-2 調査方法の概要

表-1 実測時の放流条件

測定回数	第1回	第2回	第3回	第4回
放流流量	$38\text{ m}^3/\text{s}$ (放流孔1本当り $9.5\text{ m}^3/\text{s}$)			
放流流速	4.85 m/s			
放流孔本数	4本			
放流孔の直径	1.58 m			
環境水温	23.0°C		18.3°C	
放水温	29.2°C		24.6°C	
温度差	6.2°C		6.3°C	
内部フルード数	28.3 (塩素量18.4%)		30.1 (塩素量18.5%)	
放流孔下端水深	9m	8m	8.5m	8.5m

間の相互干渉はほとんど認められなかった。従って、得られた水温、流動の観測値は単一の放流孔からのブルーム形状およびブルーム内の水温、流速分布を与えるものと考えられる。

(4) 水温・流動に関する調査結果
ブルーム内における水温は大きく変動するため、ある観測点の水温値を決定することは困難であるが、ここではブルームの形状を包絡的に把える意味から観測値の最大値で整理することにした。図-3 (A) にブルーム主軸に沿う水温断面図の一例を示す。水温の観測結果より、ブルームは沖合 30 m

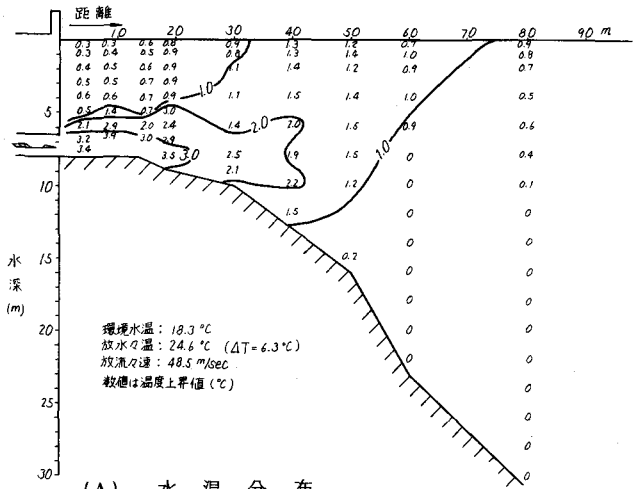
m 付近まで海底面を這いながら成長し、沖合 40 m 付近から徐々に浮上を始め、沖合 90 m 付近では海面に到達し、そこでの水温上昇値は 1℃程度を示している。ブルーム内の流速は水温と同様大きく変動するため、観測値の最大値で整理することとした。その結果、流速鉛直分布はブルームの流程で異なり次の 3 つのパターンに大別され、この分布は水温に関しても当てはまる (図-4 参照)。

パターンⅠ (放水口より沖合 20 m 地先までの範囲) : 初期流速が卓越している領域で、ブルームはまだ浮上をしていない。

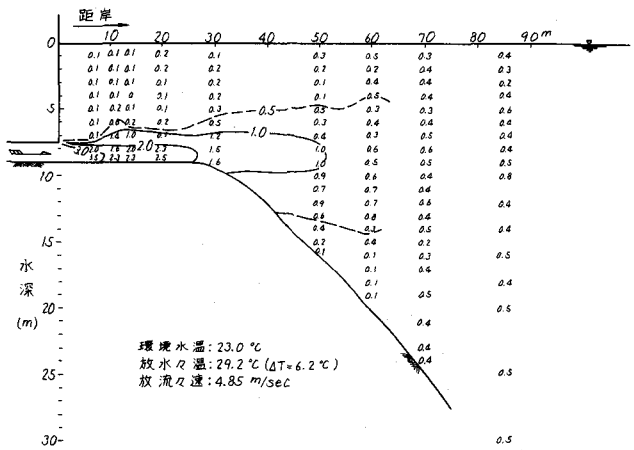
パターンⅡ (沖合 20 m ~ 60 m の範囲) : ブルームが浮上を始め、中層部を進行している領域。

パターンⅢ (沖合 60 m 以遠地先) : ブルームが浮上し、表層流になっている領域。

ブルーム主軸に沿う流速断面図を図-3 (B) に示すが、水温の場合と同様、水中放流特有の形態を示している。しかし測定された流速値はブルーム独自の流れと場の流れが合成されたものであるため、遠方領域では正しいブルームの流速を表わしていない。この点を踏まえた上で、流速の低減状況をみてみると、放流口で 4.85 m/s の流速が、沖合 25 m で約 2 m/s、沖合 40 m 前後で約 1 m/s の流速に減衰している。



(A) 水温分布



(B) 流速分布

図-3 ブルーム主軸に沿う水温・流速断面図

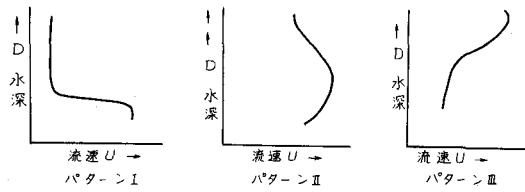


図-4 鉛直流速分布のパターン

3. 解析結果と実測結果との比較検討

本節では、A 発電所で得られた実態調査結果と 3 次元数理モデルによる解析結果とを比較検討し、水中放流された温排水のブルーム拡散予測手法の適用性を検討する。

(1) 3 次元数理モデルの内容

温排水を水中放流方式で海域に放出した場合の放水口近傍領域での温排水の挙動は重力噴流拡散の範ちゅうに属することが知られている。本文で適用した3次元数値モデルの内容は、ブルームの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おり、放流孔の形状、地形変化を取り扱うことが可能である。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) 運動量保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (1)$$

(ロ) 連続方程式
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (D = \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \quad (2)$$

ここに、 x_i : 直交座標軸、 u_i : 流速成分、 ϕ : 圧力(p)と密度(ρ)との比($\phi = p/\rho$)、 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 : 渦動粘性率、 g : 重力加速度、 t : 時間、 ϕ_0 は次式で表わされる。

$$\phi_0 = \frac{p}{\rho_0} - g \int_z^0 \left(\frac{\rho_\infty}{\rho} \right) dz \quad (3)$$

特に、水域の塩分濃度が変化するとき、状態方程式 $\rho = \rho(S, T)$ が必要とされる。ここに、 S は塩分濃度、 T は水温である。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、両者を結合した密度の保存式は次式により表示できる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

ここに $\rho = \rho(S, T)$ 、 K_i : 拡散係数。

海水の密度は水温と塩素量とに関連している。クヌーツセンによれば、塩素量 Cl (%)と温度 $0^\circ C$ のときの密度 σ_0 との間には次の関係がある。

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708 Cl - 0.001570 Cl^2 + 0.0000398 Cl^3 \quad (5)$$

ここに、 $\sigma = (\rho - 1) \times 10^3$ である。一方、塩素量 Cl と塩分量 S との間には次の関係がある。

$$S = 0.030 + 1.8050 Cl \quad (6)$$

任意の温度における密度 σ_t は次式で与えられる。

$$\sigma_t = \Sigma_T + (\sigma_0 + 0.1324) [1 - A_T - B_T (\sigma_0 - 0.1324)] \quad (7)$$

ただし、 Σ_T 、 A_T 、 B_T は温度 $T^\circ C$ だけの関数で

$$\Sigma_T = -\{ (T - 3.98)^2 / 503.70 \} \{ (T + 283) / (T + 67.26) \}$$

$$A_T = T (4.7867 - 0.098185 T + 0.0010843 T^2) \times 10^{-3}$$

$$B_T = T (18.030 - 0.8164 T + 0.01667 T^2) \times 10^{-6}$$

で与えられる。

運動量に対する渦動粘性率 A_x, A_y, A_z 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。ここではプラントルの仮説を導入し、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。

$$A_r = C l_r u_{\max} \quad (8)$$

ここに、 l_r : 混合長、 $u_{\max}$: ブルーム中心速度、 C : 0.0256に等しい定数。

ブルームの拡散現象を記述する基本式は上述の式(1)~(8)から成り立っている。本解析手法における流速成分 u, v, w 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。一般に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 (設定誤差)より大きいときには圧力を次の量だけ変化さ

せる。

$$\Delta p = -\beta D$$

(9)

$$\text{ここに, } \beta = \frac{\beta_0}{2 \cdot \Delta t} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right)$$

β_0 は加速パラメータで 2 より小さい値。

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

$$u_{i,j,k} \rightarrow u_{i,j,k} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \Delta p$$

と調整させる過程をくり返すとき, $D < \varepsilon$ を満足するセル群が得られる。

数値解析は第 3, 4 回目の実測と同一条件

下 (表-1 参照) で行なった。対象とした計算領域は沖合方向 110 m, 汀線方向 32 m, 水深方向 23.8 m で, 2,602 個のセル群 (沖合方向 5.0 m × 汀線方向 1.4 m × 深さ方向 1.4 m) で構成されている。渦動粘性率の値は放水口端で最大値を有するものとし, 以下の値で設定した。

$$A_x = A_y = A_z = 0.0256 \times (\Delta x / 2)$$

$$\times u_{\max} = 896 \text{ cm}^2/\text{s}$$

ブルーム内では流速値として流速最大値 $u_{\max}$, 幅のスケールとしてブルームの断面流速が最大流速値の半分となるまでの距離 $r_{1/2}$ をとって係数値として設定した。

すなわち,

$$A_x = A_z = 0.0256 r_{1/2} u_{\max}$$

一方, ブルーム軸とほぼ一致している方向の A_y については, 放水口端での値を採っている。ブルーム外の値については放水口端での係数値の半分の値を設定した。拡散係数の取り扱いについては, 渦動粘性率値と全く同一の設定によった。

(2) 解析結果

ブルーム主軸に沿う流動ベクトルならびに水温断面図を図-5 および 6 に示す。これによると放水口付近でのブルームはその運動量が比較的大きいため海底を這いながら放流方向に直進する傾向を有することを示している。そのため周囲環境水は水平ならびに鉛直上方からブルームに連行加入してブルームの流量を増大する傾向にある。本手法によると各断面における連行加入量を容易に求めることが可能であり, たとえば沖合 22.5 m 断面では放流量の約 1.9 倍, 沖合 97.5 m 断面では放流量の約 4 倍の水量がブルームに加入して 4 倍の稀釈を示しており, これから算出した水温値は解析結果とほぼ一致している。

(3) 実測結果と解析結果との比較

水温分布と流速分布に関する実測結果と解析結果の比較図をそれぞれ図-7 および 8 に示す。水温分布から判断すると, 2℃, 3℃上昇域に関しては両者は良好な一致を示す。1℃上昇域に関しては, 浮力の効果によりブルームが水面に向かい上昇する遠方領域において, 両者の間に相違が認められる。この原因として, 1℃上昇域付近ではブルームの運動量が減衰し場の流れや乱れの影響を受け易く, それに伴ってブルームの空間的位置が変動する。このため観測値の最大値で描いた分布は観測時間内の包絡範囲を与えることになる

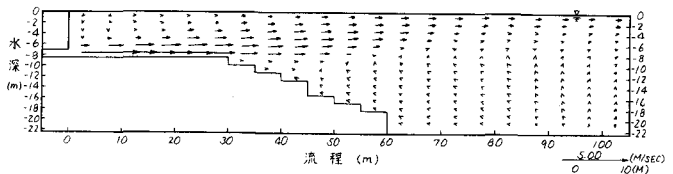


図-5 ブルーム主軸を含む鉛直断面内の流動ベクトル図

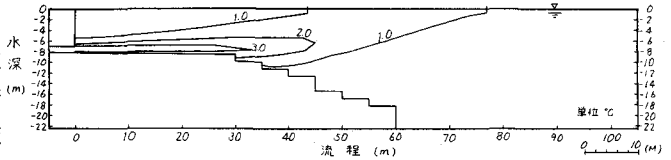


図-6 ブルーム主軸を含む鉛直断面内の水温上昇図

からである。また図-8に示す流速分布も傾向的には水温分布と似ている。流速、水温いずれの場合も速方領域（およそ50m沖合）で解析結果の方が幾分浮力効果が強調されているが、傾向的にはほぼ良好な一致を示していると見なすことができる。

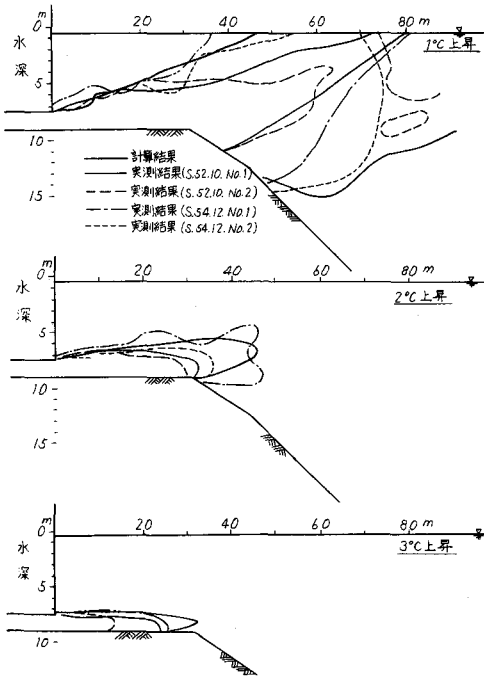


図-7 解析結果と実測結果の比較
(水温分布)

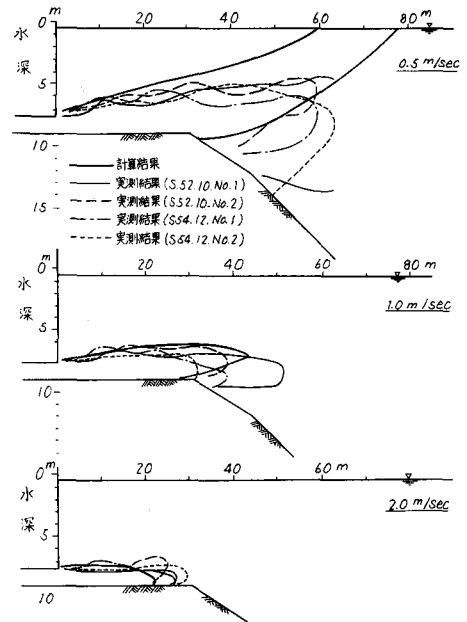


図-8 解析結果と実測結果との比較
(流速分布)

4. むすび

A発電所の放水口下端が一致している特殊な状況にもかかわらず、本文で展開した3次元数値モデルは放水口近傍でのブルームの拡散特性を表現し得ることが認められた。具体的地点での水中放流構造物を用いた場合の拡散予測に当っては未だ解決しなければならないいくつかの問題が残されている。その1つとしては、乱れの表現法の改良が挙げられる。今後現地観測の積み重ねによって乱れの表現式内の係数のモデル化の精度向上が期待できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 和田 明・片野尚明・荒木 洋・角湯正剛(1973):沿岸海域における温排水拡散予測手法の適合性に関する研究, 電力中央研究所報告 ㏼73011.
- 2) 片野尚明・河村博美(1978):スロット型およびマルチパイプ型放水口による温排水の水温低減化に関する研究, 電力中央研究所研究報告 ㏼377021.
- 3) 片野尚明・河村博美(1980):浅水域に放水される温水噴流の混合稀釈特性, 電力中央研究所研究報告 ㏼379032.
- 4) 片野尚明・和田明・荒木 洋(1980):水中放流方式による温排水拡散の実測例と予測手法, 第24回水理講演会論文集, pp.197-202.
- 5) Wada, A.: Prediction of the diffusion of discharged water for submerged outfall system, Proc. of IAHR, Cagliari, 1969.