第24回水理講演会論文集　1980年2月

水中放流方式による温排水拡散の実測例と予測手法

Prediction method and a few examples of survey for thermal diffusion caused by warmed water discharge from submerged outlet.

(財) 電力中央研究所　正　員　○片野尚明・和田　明・荒木　洋

1. まえがき

海域に放出される温排水の水温上昇および水温上昇範囲の軽減対策として、二三の発電所で水中放流方式が採用されている。水中放流方式の特色は、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。

この放水口近傍領域の拡散予測を実施するには、筆者らが既に展開してきた基礎的水理実験並びにプルームモデルによる数値解析結果[1),2)]などを利用する方法もあるが、通常、正3次元の縮尺水理模型実験による手法が用いられている。一方、遠方領域に対しては水理実験結果を入力条件として、表層放流の予測数理モデルに接続する方法が有効視されている。

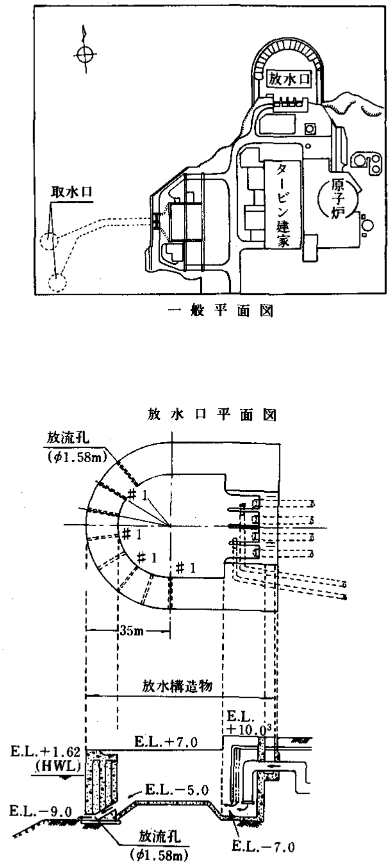
本文は、まず水中放流方式が採用されている2つの発電所における放水口近傍領域における実測例を紹介し、つづいてプルームモデルによる数値解と実測結果の比較および遠方領域に対する拡散予測手法の概要とその適用例について述べたものである。

2. 水中放流方式による温排水拡散の実測例

(1) 有孔堤方式による場合

図－1は、A発電所の一般平面図および水中放水口の縦断面形状図を示したものである。冷却水は水深15 mの地点に設置してある海底取水管より下層低温水が取水され、復水器通過後昇温されて発電所敷地前面海域へ放出される。放水口は、半径約35 mの半円形状のコンクリート構造物の周辺底部に、直径1.58 mの放流孔を8個放射状にうがったものである。現状では、8個の放流孔のうち4個の放流孔（図－1参照）を用いている。温排水（最大38 m^3/sec）は、これらの放流孔より平均水深9 m、流速4.9 m/sec で噴出されることにより周囲水と混合稀釈の過程を経て、海面上での水温上昇の低減化が達成できるものと期待される。

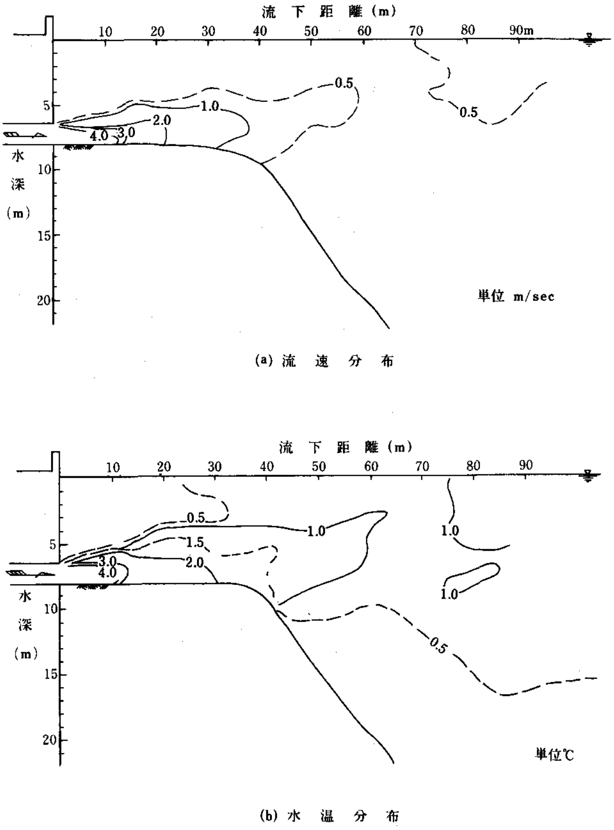
図－2は、温水噴流軸に沿う流速および水温分布の実測結果を示したものである。ただし、実測においては、4条の温水噴流の相互干渉が弱いものとして、そのうち1条を実測対象とした。また、実測時の放流条件を表－1に示す。



図－1　A発電所の水中放水口形状・配置図

表－1　A発電所実測時の放流条件

放　流　量	1孔当り9.5 m^3/sec
放流孔数	4孔
放流孔径	1.58 m
放　流　速	4.85 m/sec
上昇温度	6.2℃（放水温－環境水温）
放流端水深	8.0 m
放出内部フルード数	28.3（塩素量18.4‰）

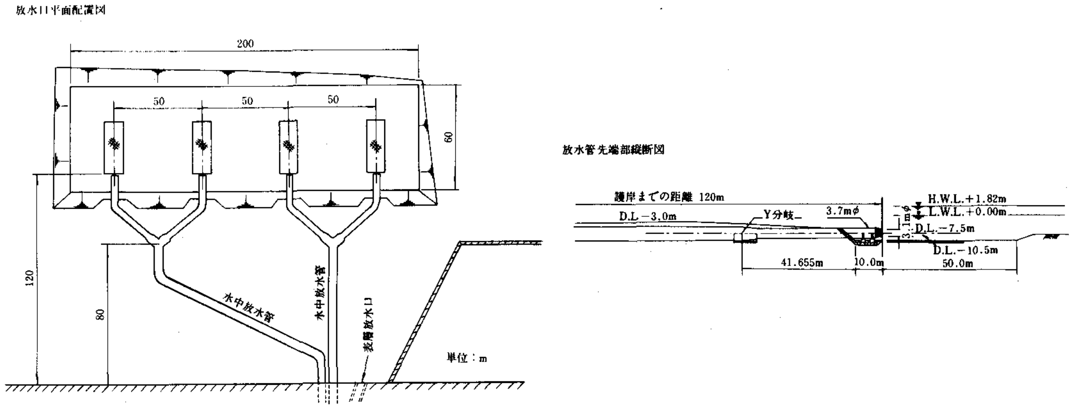


図－2　温水噴流軸に沿う流速および水温分布に関する実測結果（A発電所）

図－2より，放流孔より噴出された温水噴流は，主として水平方向の連行加入現象に伴う周囲水との混合稀釈により，流速および温度とも急激に低下しながら海底面上を拡がり，海底地形が急深になる40 m付近から水面へ向って浮上する傾向が認められる。しかし，水面へ浮上する温水噴流の径路は，流速および温度分布が変動しているために明確でないが，結局，海面における流速値は0.5 m/sec，水温上昇値は1℃程度に低減している状況が確認できる。

(2)　放流管方式による場合

図－3はB発電所の放水口の形状および配置図を示したものである。当発電所の冷却水は，総流量の約2割弱が表層放流，残りの8割が水中放流方式で潮流の速い海峡部へ放水されている。水中放水口は2本の放流管をそれぞれ50 m間隔で2条に分岐させ，計4本の放流管として護岸より沖合120 m離れた水深10.5 m（LWL）に設置されている。それぞれの放流管先端部の直径は3.1 mであり，水中放水口からは一条当り14.5 m^3/sec，放流速約2 m/secで放出されている。したがって，A発電所の水中放水口に比較して放流管口径は約2倍と大きく，放流速は約0.4倍と小さいため，放出



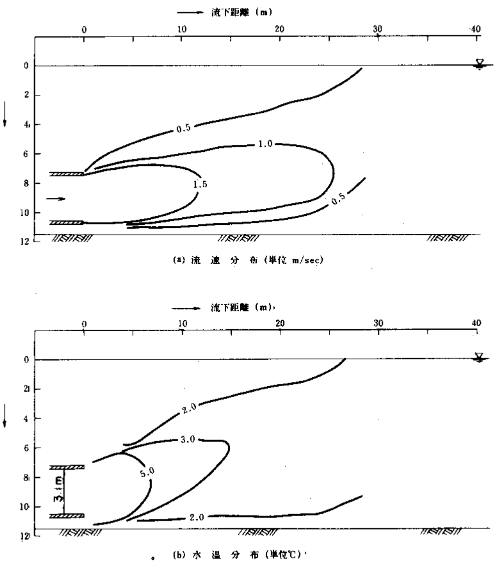
図－3　B発電所の水中放水口の形状・配置図

内部フルード数は小さくなり，初期稀釈程度は低下するものと予想される。その反面，放流管先端部を護岸から離しているため，放流管背後からの周囲水の連行加入が期待できる方式となっている。

表－2　B発電所実測時の放流条件

放　流　量	1本当り 14.5 m^3/sec
放流管本数	2条
放流管口径	3.1 m
放　流　速	2.0 m/sec
上 昇 温 度	6.2 ℃（放水温－環境水温）
放 流 水 深	11.5 m
放出内部フルード数	8.0

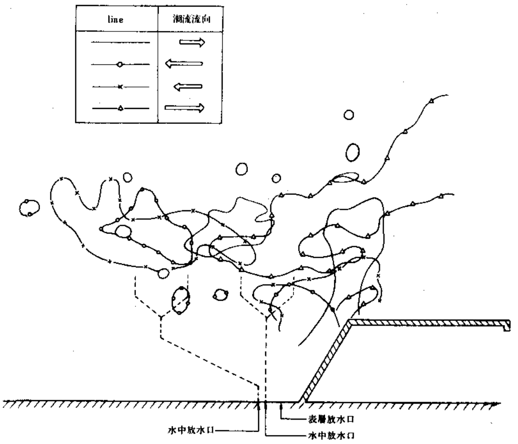
図－4は，温水噴流軸に沿う流速および水温の縦断面分布に関する実測結果を示したものである。表－2はその実測時の放流条件を示す。実測は比較的潮流の微弱な転流時をねらって実施したが，当該地点の潮流の強さと測定上の困難さとが相まって，明らかに噴流中心軸から逸脱したと思われる実測結果も認められる。しかしながら，海面における流速値は約60 cm/sec，上昇温度は約2℃程度となり，水中放流に伴う水温低減効果は明瞭に確認できる。



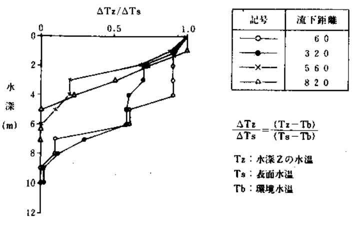
図－4　温水噴流軸に沿う流速および水温分布に関する実測結果（B発電所）

一方，A発電所の実測例と比較すると，前述したように放出内部フルード数がA発電所の約30％程度と小さいために，噴流径路は早く水面に達し，またその温度稀釈効果も低下する。これらのフルード数に基づく特性は，基礎実験やプルーム解析結果から推測されるところである。[1)]

図－5は，当発電所の定格負荷運転時における表層での2℃上昇パターンの実測例を示したものである。この拡散パターンから明らかなように，水温分布は潮流の作用によって非常に複雑な形状を示すことが認められる。また，図－6は温排水主軸に沿う鉛直水温分布の変化の実測例を示したものである。温水の含まれる厚さは，放水口近傍領域で8 m，遠方領域で5 m程度と求められ，表層放流方式の一般的な厚さ3 mに比べて約2倍厚くなっている。これらの現象は，水中放流に伴なう拡散状況として水理実験からも裏付けされている。[3)]



図－5　表面層における2℃上昇域分布例（B発電所）



図－6　温排水主流軸に沿う鉛直水温の一例（B発電所）

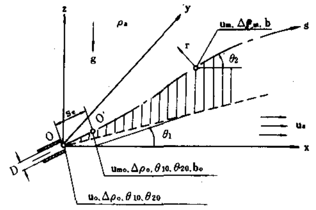
3. プルームモデルによる放水口近傍領域における拡散予測

温排水の水中放流に伴う放水口近傍領域の拡散現象は，局所的な非線形作用が強い3次元現象であるために，一般に水理模型による実験手法が有効とされている。しかし，単純な放水口形状や周囲水条件下では，ここに述べる簡便なプルームモデルによる解

析手法でも，放水口から水面へ浮上する迄の拡散過程を近似的に予測することが可能である。

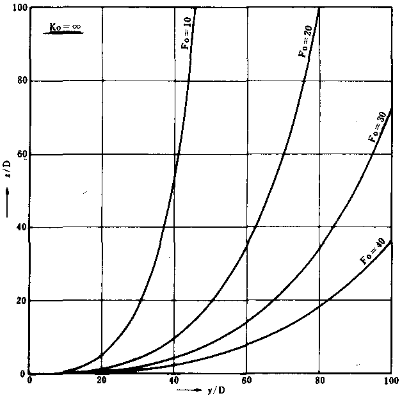
(1) モデルの内容とその解析結果

ブルームモデルの設定条件としては，図－7に示すように，x，y，z座標系に一様密度で一方向（x方向）の定常的な流れが存在する無限水域中に，任意の角度で放出する円形温水噴流を考える。基礎方程式は，流速および密度差（温度差）に対して軸対称のガウス型の相似分布形を仮定し，半径方向rで積分した質量，運動量および熱量の保存式から構成されている。数値解析においては，初期放出角度 θ_{10}，θ_{20}，放出内部フルード数 F_0（$u_o/(g\frac{\Delta\rho_o}{\rho_a}D)^{\frac{1}{2}}$）および流速比 K_0（$=u_o/u_a$）がパラメータとなる。ただし，θ_{10}・θ_{20}：それぞれ初期の水平および鉛直方向の放出角度，u_o：放出流速，$\Delta\rho_o$：放出水 ρ_o と周囲水 ρ_a との密度差，D：放流管口径，g：重力の加速度，u_a：周囲水の流速。これらの詳細については参考文献1）を参照されたい。



図－7　ブルームモデルの記号説明図

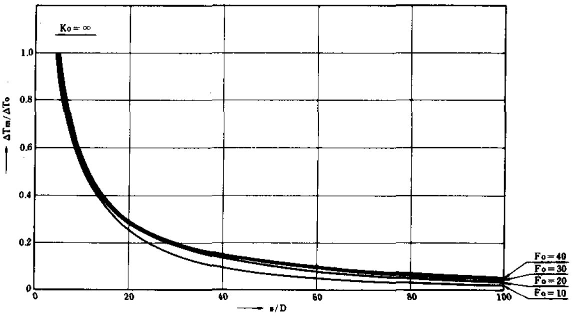
図－8および9は，$\theta_{10}=90°$，$\theta_{20}=0°$（水平）および $K_0=\infty$（$u_o=0$）で F_0 をパラメータにした計算結果の一部を示したものである。図－8は噴流径路，図－9は噴流径路に沿う温度低減率を示す。ただし，図－9の横軸sは噴流径路長，縦軸 $\Delta Tm/\Delta To$ は温度低減率を意味し，ΔTm，ΔTo はそれぞれ噴流中心軸および放流管出口における周囲水との温度差を示す。これらの図表を適用することにより，温水噴流の浮上点の位置およびその上昇温度を予測することができる。



図－8　噴流径路特性（$K_0=\infty$）

(2) 解析結果と実測結果の比較

ブルームモデルによる数値解の適用例として，A発電所の実測結果を用いることにする。図－10は，噴流中心軸に沿う流速および温度分布に関する数値解析結果を示したものである。計算条件は図中に示してある。この図－10と前掲の図－2に示した実測結果を比較すると明らかなように，噴流径路は多少異なっているが，温度および流速の低減状況は実測結果と良い一致を示している。噴流径路の異なる原因は，実測の温水噴流が海底面の影響を直接受けていることにあると考える。すなわち，放水口が底面に接して設置されている場合，周囲水の連行加入が下方から全ったく期待できずに上方および側方からのみとなり，その連行速度の影響により噴流は浮上しにくくなることが知られている。その結果，噴流径路は水平方向に引き伸ばされる。さらに，拡散幅は鉛直方向にくらべて水平方向により拡がり，噴流横断は扁平化する。[1)]



図－9　噴流径路に沿う温度低減率（$K_0=\infty$）

以上の検討結果から，温水噴流およびそれを取り巻く境界条件が単純であれば，簡便なブルームモデルによっても放水口近傍の拡散特性を推測できる。

4. 遠方領域における拡散予測

(1) 予測手法の概要

温排水の拡散域を予測する手法については，表層放流の場合にあっては，既に数理モデルによるシミュレーション解析手法が開発されており，現在広くこの方法により予測が行なわれている。[4] 一方，水中放流する場合にあっては，現在，図－１１に示すような予測手法がとられている。特に，水理模型実験手法が有効とされているが，初期稀釈効果が十分でなく水温上昇範囲が広域となる場合，あるいは大容量発電所の大量の温排水を対象とした場合には，放水口近傍領域の拡散特性の把握を主眼とした無歪模型のみでは拡散予測が困難となる。

そこで，歪模型の採用や数理モデルとの接続が考えられる。歪模型の採用に当っては，放水口形式や配置，放流条件などによって歪度の許容限界が存在すると思われるが，[5] 一般には歪度の影響をなくすために試行錯誤の過程が必要となり，現在種々の試みを行なっている。一方，数値モデルに接続する方法は，水理実験から得た放水口近傍領域の拡散特性に基づいて仮想放水口を設置し，表層放流方式の数理モデルに接続する方法である。この方法については，以下に具体例で示す。

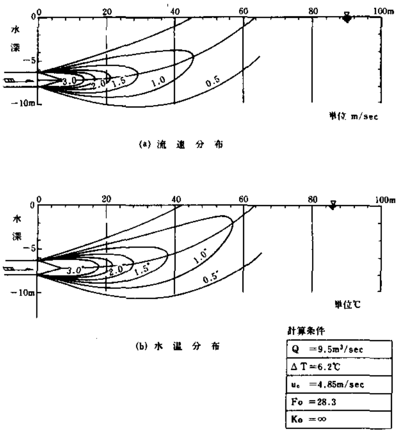
(2) 仮想放水口による遠方領域の拡散予測

数理モデルに接続するための仮想放水口においては，熱量保存と仮想放水口での流量が温度稀釈倍率に従うことを仮定する。すなわち，

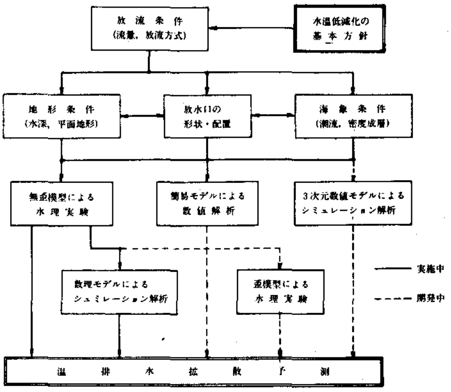
$$Q_0 \Delta T_0 = \int_A u \, \Delta T \, dA \cdots (1) \qquad \frac{\Delta T_0}{\Delta T} = S_0 = \frac{Q}{Q_0} \cdots (2)$$

ただし，Q_0：放水量，ΔT_0：放水口における温度上昇，u，ΔT：それぞれ温水噴流内の流速および温度上昇，A：噴流断面積，$\Delta \bar{T}$：仮想放水口における噴流断面内の平均温度，S_0：温度の稀釈倍率，Q：仮想放水口における流量。

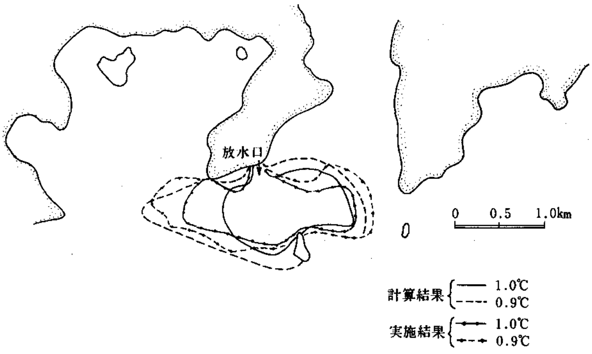
式(1)，(2)の関係式を実験結果に適用してQを求め，流速および温度の分布形を考慮して，最終的に熱量保存を満足するよう仮想放水口での流速および温度分布を設定する。図－１２は，C発電所の水中放水口に対する水理模型実験結果と仮想放水口による数理モデルのシミュレーション結果とを比較したものである。C発電所の水中放水口は図－１３に示すように，マルチパイプ



図－１０　温水噴流中心軸に沿う流速および温度分布に関する解析結果（A発電所実測結果に対応）



図－１１　水中放流方式による温排水拡散予測手法

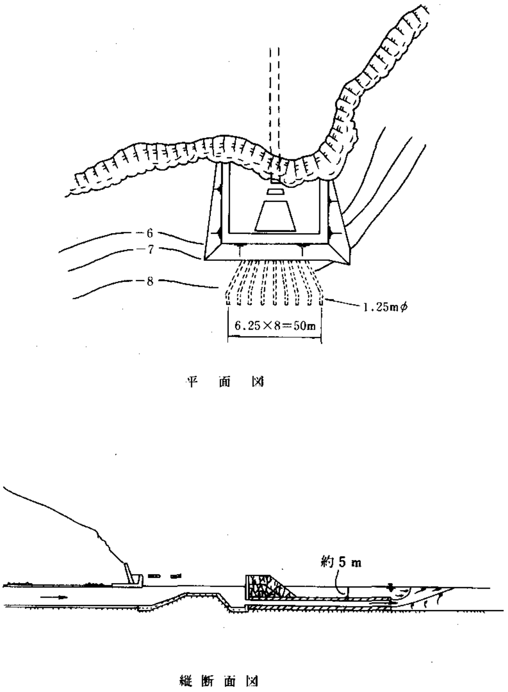


図－１２　仮想放水口モデルによる遠方領域の拡散予測結果と水理実験結果の比較

型で1.25 *m*の放流管8本で構成され，水深7 *m*（ＬＷＬ）の位置に設置する計画である。実放水口および仮想放水口での放流条件を表－3に示す。また，当該地点では半日周潮流が卓越しているので，拡散範囲はすべて一潮時にわたる包絡範囲を示してある。計算結果は実験結果とほぼ良い一致を示し，仮想放水口モデルによる遠方領域の拡散予測手法の適合性があると判断される。

表－3　実放水口および仮想放水口での放流条件

実放水口	放流量	50.1 m^3/sec
	上昇温度	7.0 ℃
	放流速	4.5 *m*/sec
仮想放水口	稀釈倍率	6.4
	放流量	320 m^3/sec
	上昇温度	1.46 ℃
	放流速	1.04 *m*/sec



図－13　C発電所の水中放水口の概略図

5. むすび

水中放流方式による温排水拡散の実測例とその予測手法について検討した結果，以下の知見が得られた。

i）水中放流方式を採用している発電所の実測例から，明確な水温低減効果が認められた。

ii）放水口近傍領域の拡散予測に当って，放水口形状や地形条件が単純であれば，簡便なプルームモデルによる予測結果でも適用性があると認められた。

iii）遠方領域の拡散予測においては，水理実験を入力条件として数理モデルに接合する手法が有効であると認められた。

今後，数多くの実測を重ねて予測結果の整合性を確認すると共に，大容量発電所に対する予測手法の確立および効率的な水中放水口の設計問題を検討してゆかねばならないと考える。

参考文献

1）片野尚明・河村博美・和田　明：水中放流方式による温排水の水温低減化に関する研究，第24回海講論文集，pp.476－480，1977．

2）片野尚明・和田　明・落合　実：スロット状温水噴流の混合稀釈特性について，第25回海講論文集，pp.528－532，1978．

3）片野尚明・河村博美・和田　明：浅水域に放出される温水噴流の拡散特性について，第26回海講論文集，pp.587－590，1979．

4）和田　明・片野尚明・角湯正剛・荒木　洋：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，第22回海講論文集，pp.191－196，1975．

5）加藤正進・田中伸和・和田　明：温排水水中放流実験における歪み模型の適用性，第24回海講論文集，pp.481－485，1977．