

水理模型による温排水拡散予測手法の適用性

——水中放流の場合——

加藤 正進*・和田 明**

1. はじめに

臨海に立地する火力・原子力発電所の温排水の放流方式は従来表層放流方式が一般的であったが、近年、水温影響の低減化対策として水中放流方式が採用される場合もあり、我国においては現在3カ所の発電所において水中放流が実施されている。

温排水の水中放流構造物は、発電所立地地点の地形条件、海象条件などを考慮して決定されるが、基本的には次の2つのタイプに大別できる。

- ① 護岸、防波堤の下部から温排水を高速で水中放流するタイプ (図-7 参照)。
- ② 温排水を海底パイプを通して沖合へ導き、沖合海域の水中へ高速で放流するタイプ (図-4 参照)。

このような水中放流構造物から水中放流される温排水の混合稀釈過程は、噴流の相互干渉や海面・海底面・陸地境界の存在などのためにきわめて複雑になるものと考えられる。

本研究は、水中放流された温排水が海域に形成する水温分布・流速分布を、水理模型実験手法を適用して予測する場合の相似則とその適用性について、原型における実測結果と模型における実験結果の比較に基づき検討したものである。

2. 水中放流された温排水の水温低減過程

水中放流された温排水は、放流地点の近傍領域において周囲水を行き加入して混合稀釈し、水温上昇値の大部分を低減するために、温排水の水中放流に伴う水温低減過程を模型上に相似に保つ上では、この領域における周囲水との混合稀釈現象の相似性がきわめて重要となる。

以下には、周囲水との混合稀釈現象に及ぼす諸因子について考察するが、水中放流に関連する諸元は図-1の通りであり、放流管における内部フルード数、レイノルズ数は次式で定義する。

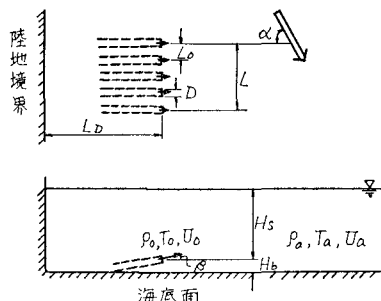


図-1 水中放流に関連する諸元

$$F_{i0} = \frac{U_0}{\sqrt{\varepsilon_0 g D}}, \quad \varepsilon_0 = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a}, \quad R_{e0} = \frac{U_0 D}{\nu_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F_{i0} : 放流内部フルード数

ε_0 : 相対密度差

R_{e0} : 放流レイノルズ数

U_0 : 放流流速

D : 放流管管径

ρ_0 : 放流水密度

ν_0 : 放流水動粘性係数

ρ_a : 周囲水密度

g : 重力加速度

水中放流された温排水の基本的な混合稀釈特性は、単一重力噴流に関する基礎的な研究結果から把握することが可能である。

Frankel と Cumming¹⁾ は、静止一様密度場において

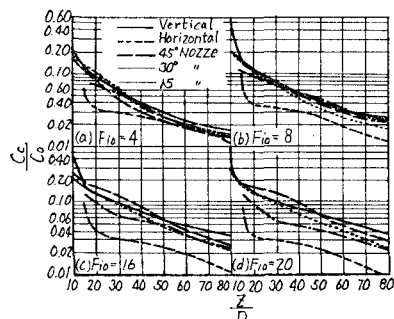
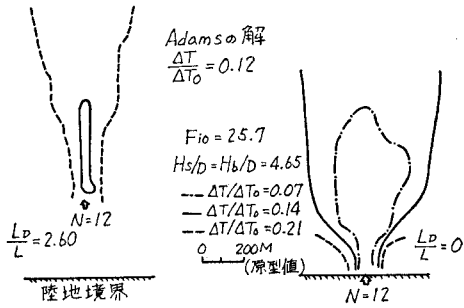


図-2 噴流角度の相違による中心軸稀釈特性の変化 (Frankel らによる)

* 正会員 工修 電力中央研究所土木技術研究所環境水理部 海洋環境研究室

** 正会員 工博 電力中央研究所土木技術研究所 環境水理部長



図—5 水中放流の稀釈特性に及ぼす陸地境界の影響

図—5 は、陸地境界の存在が混合稀釈特性に及ぼす影響を調べるため、陸地境界の影響が無視できる沖合水中放流の場合と、護岸下部からの水中放流の場合について静止水中での実験を実施して得た表層の水温分布を示すものである。なお図中 N は放流管本数、 L_D は陸地境界から放流地点までの距離、 L は放流管列の幅を意味する。

実験結果によれば、沖合水中放流の場合の混合領域における稀釈率は $\Delta T/\Delta T_0=0.14$ 程度であり、式(3)による推定値は $\Delta T/\Delta T_0=0.12$ であるから両者はほぼ一致する。しかし、護岸下部から水中放流する場合には、護岸背後からの周囲水の連行が不可能であること、護岸沿いに連行された周囲水が放水管列の中央部まで十分に達しないこと(特に L が長い場合)などに起因して、混合稀釈効果がきわめて低下する。

以上述べた結果を総合すれば、温排水の水中放流に伴う放流地点近傍の水温低減は、放流の初期条件と放流構造物の形状に関連する無次元数の関数として次式で表わすことができる。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = f\left(F_{10}, \frac{H_s}{D}, \frac{H_b}{D}, \frac{L_0}{D}, \frac{L_D}{L}, \frac{U_a}{U_0}, \alpha, \beta\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

3. 相 似 則

温排水の水中放流に伴う放流地点近傍における水温低減が式(4)により表わされるものとすれば、原型の現象を模型上に相似に保つためには次式が成立しなければならない。なお、次式では式(4)の右辺に放流レイノルズ数を無次元数として加えてあり、添字 r は原型値と模型値との比とする。

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta T_0}\right)_r = f\left(F_{10}, R_{e0}, \frac{H_s}{D}, \frac{H_b}{D}, \frac{L_0}{D}, \frac{L_D}{L}, \frac{U_a}{U_0}, \alpha, \beta\right)_r = 1 \quad \dots\dots (5)$$

式(5)から、混合稀釈現象を相似に保つための基本的条件として次の条件が得られる³⁾。

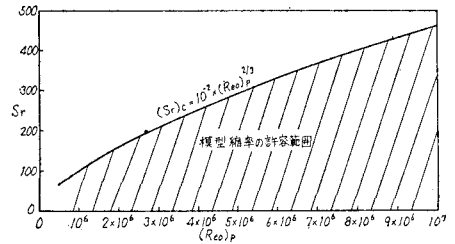
- 1) 水理模型の水平縮率と鉛直縮率は同一とし、幾何学的な相似性を保つ。

- 2) 放流内部フルード数を原型と模型とで一致させるために、相対密度差 ϵ_0 を原型と模型とで一致させ、フルードの相似則を適用する。

- 3) 模型における噴流が乱流噴流となるように模型縮尺を選定する。乱流噴流の限界レイノルズ数を 10^3 程度と考えれば、模型縮尺は次の条件を満たす必要がある。

$$S_r < 10^{-2} (R_{e0})_p^{2/3} (\nu_0)^{2/3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $(R_{e0})_p$: 原型の放流レイノルズ数



図—6 模型縮率の許容範囲と原型レイノルズ数の関係

図—6 には、 $(\nu_0)_r \approx 1$ とした場合の模型縮尺限界を示す。

一方、海域の流動場ならびに放水に伴う流動場は、流体の運動方程式から得られるフルードの相似則と海底摩擦に関する相似条件を適用することにより、相似に保つことができる。

海底摩擦は、海底摩擦係数を用いて一般に次式で表わすことができる。

$$\tau_b/\rho = U_*^2 = K_b U^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 τ_b : 海底摩擦

ρ : 流体の密度

U_* : 摩擦速度

U : 平均流速

K_b : 海底摩擦係数

式(7)から無歪み模型における海底摩擦係数の縮率を求めれば、次式が得られる。

$$(K_b)_r = \left(\frac{U_*^2}{U^2}\right)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、無歪み模型においては、原型と模型での海底摩擦係数は同一でなければならない。

式(7)と粗面水路における平均流公式を用いれば、粗度高さ⁴⁾と摩擦係数との関係は次式で表わすことができる。

$$\frac{1}{\sqrt{K_b}} = A_0 + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{H}{K_s}\right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 H : 水深

A_0 : 常数、 $A_0 \approx 6.0$

κ : カルマン常数

K_s : 粗度高さ

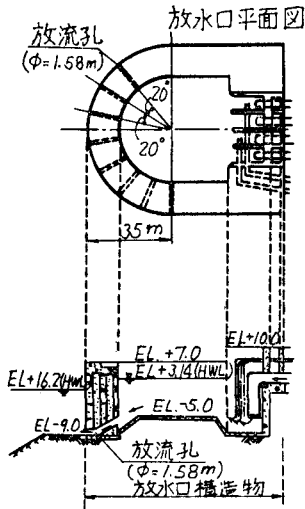
海底摩擦係数の値は、 $K_b=0.002\sim0.003$ 程度の値であることが報告されており、Grace による値 $K_b=0.0026$ が一般に用いられている。

K_b の値および模型水深を与えれば、式 (9) を用いることにより、海底摩擦を相似に保つための粗度高さの概略値を推定することができる。

4. 実験結果と実測結果の比較

水中放流された温排水の拡散範囲を、水理模型実験手法を適用して予測するための相似則は 3. に述べた通りであるが、ここでは原型と模型で得られた水温分布、流速分布の比較に基づいて、相似則の適用性について検討する。

原型としては、図一7に示すような水中放流構造物を有しているA発電所を考える。A発電所においては現在1号機が運転されており、温排水は図一7に示した8個の放流孔の内、1つおきの4個の放流孔から水中放流されている。A発電所においては、放流地点近傍領域において合計4回の水温、流速測定が実施されている。



図一7 水中放流構造物の概要

現地実測時の温排水水中放流条件は次の通りである。

- 温排水量: $38\text{ m}^3/\text{s}$ (放流孔1個当り $9.5\text{ m}^3/\text{s}$)
- 放流流速: 4.85 m/s
- 放流孔径: 1.58 m
- 周囲水水温と放流水水温との差: 6.2°C
- 放流内部フルード数: $28.3\sim30.3$
- 放流孔前面水深: $8\sim9\text{ m}$

実測結果によれば、4個の放流孔から放流された温排水の相互干渉は比較的少なく、単一の放流管からの水中放流現象に近いことが確められている。

荒木⁴⁾らは、A発電所を対象として水理実験を実施したが、上記実測結果を考慮してA発電所の水中放流構造物を単一放流孔の水中放流構造物に単純化し、模型縮尺1/40の無歪み模型を用いた。実験に当っては、3. に述べた相似則を適用し、相対密度差 ϵ_0 を原型と同一の値に保つような放流条件とし、放流流速、放流量はフルードの相似則に従って決定した。

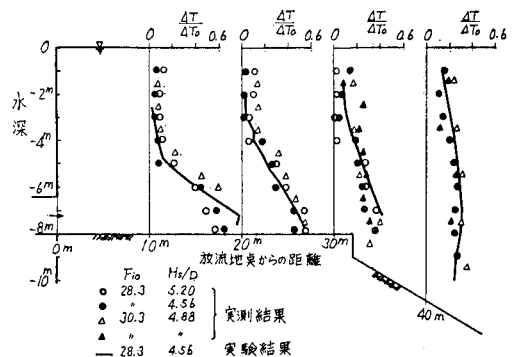
模型における温排水の放流条件は次の通りである。

- 温排水量: 0.94 l/s (放流孔1個)
- 放流流速: 74.8 cm/s
- 放流孔径: 4.0 cm
- 放流内部フルード数: 28.3
- 放流孔前面水深: 20 cm

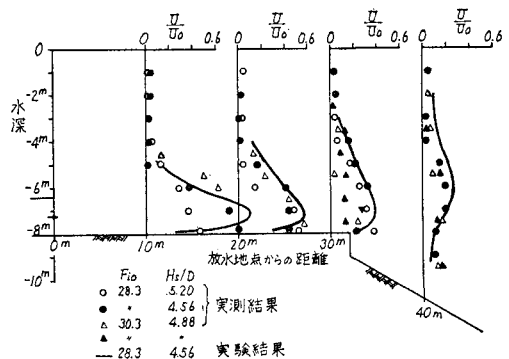
荒木らは、海底面粗度が噴流の挙動の相似性に及ぼす影響を検討するために、人工粗度を付加しないモルタル仕上の場合、人工粗度として金網を付加した場合について実験を実施した。この結果によれば、モルタル仕上の場合には噴流径路が水平方向に引き延ばされ、原型の噴流径路と一致せず、人工粗度として約 1 mm 径、 5 mm メッシュの金網を付加した場合に、原型の噴流径路と比較的良好一致している⁴⁾。

3. に示した粗度高さと海底摩擦係数の関係を表わす式 (9) において、海底摩擦係数の値として前述の $K_b=0.0026$ を用い、模型水深として 20 cm を用いれば、模型における粗度高さの推定値は $K_s\approx 0.9\text{ mm}$ となり、この値は前述の金網粗度高さとほぼ一致する。しかし式 (9) は主として海域流動の相似性に関するものであるから、海底面付近から水中放流された温排水の挙動を相似に保つための海底摩擦条件に関しては、噴流の抵抗則などからさらに検討をする必要があろう。

図一8および図一9は、人工粗度を付加して噴流径路



図一8 水温鉛直分布の比較



図一9 流速鉛直分布の比較

の相似性が保たれた場合の、噴流中心線上での水温分布と流速分布を、実測結果と比較したものである。この結果によれば、水中放流された温排水が海底面に沿って進行する状態がよく再現されており、水温鉛直分布ならびに流速鉛直分布も比較的良好に一致している。

図-10 は、実験で得た噴流の幅と実測結果を比較したものである。噴流幅 B_1 は、噴流横断面における 1°C 水温上昇域の最大幅をもって定義した。 x は放流孔からの距離である。噴流幅についても実験結果と実測結果はほぼ一致している。

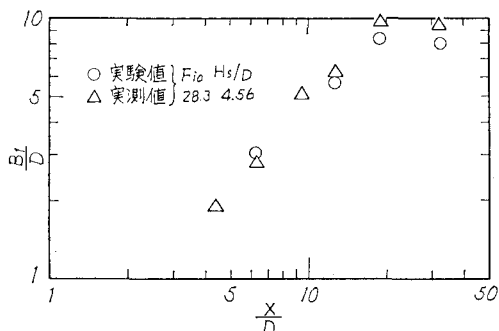


図-10 噴流幅の比較

5. 結 論

A 発電所を対象として実施した水理実験結果によれば、3. に述べた相似則を適用することにより、水中放流された温排水の水温分布、流速分布は水理模型上にほぼ相似に保たれることが確認できた。この結果から判断すれば、水理模型実験手法は水中放流された温排水の拡散予測手法として有用な手法であるものと考えられる。

今後は、現地海域における実測資料を集積し水中放流された温排水の挙動を十分に把握するとともに、実験手法の適用性について詳細な検討を加える必要がある。

参 考 文 献

- 1) Frankel, R. J. and J. D. Cumming: Turbulent mixing phenomena of ocean outfalls, Proc. ASCE, SA2, April 1965, pp. 33~59.
- 2) 片野尚明・河村博美: 単一水平放流管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 No. 376012, 1977.
- 3) 加藤正進・田中伸和: 温排水水中放流実験における歪み模型の適用性, 電力中央研究所研究報告 No. 376013, 1977.
- 4) 荒木 洋・和田 明: 水中放流された温排水ブルームの挙動, 第 35 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部, 1980.