

密度成層場における温排水の水中噴流特性

中部電力（株） 正員 ○服部孝之  
（株）シーテック 正員 佐藤公己

1. はじめに

近年の調査で、海域の低層に存在する豊富な栄養塩を表層へ輸送する湧昇流水域が好漁場となることが明らかにされている。本研究では、汽力発電所の温排水を水中放流することにより低層水を連行しそれを表層へ輸送して植物プランクトンを増殖させ食物連鎖により漁場開発に寄与させることを考えた。従来の水中放流は、水深 10~15m 程度に設置することを目標に研究されており、豊富な栄養塩が存在するといわれている水深約 50m 以深での放流（以降、深層放流と呼ぶ）については研究例が少ない。したがって、本研究では密度成層場における深層放流についての水温低減特性、連行特性等を検討したので報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験装置は図-1 に示す様な幅 4.5m、奥行き 2.5m、高さ 2.2m の鉄筋コンクリート製の水槽、温水供給装置、流量計からなる給水装置、水槽内の水位を一定に保つために設けた取水装置、塩水による密度成層作成用水槽および配管からなる。

相似則はフルード則を適用し模型縮尺 1/100 の無歪模型とした。実験は温度一様な密度成層場の静止水域で行い、取放水温度差  $\Delta T_0 = 7^{\circ}\text{C}$  up、原型量で放水流量  $10\text{m}^3/\text{s}$ 、放水口水深 80m とした。表-1 に実験ケース、図-2 に鉛直放水管断面図、図-3 には塩水で作成した実験前の密度成層鉛直分布を示す。

水温測定は、サーミスタ温度計の先端を水平に並べ自動昇降機を用いて各設定水深まで降下させて測定を行った。

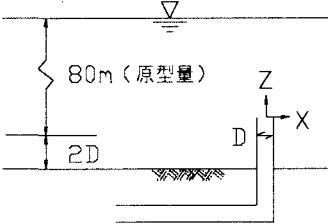


図-2 鉛直放水管断面図

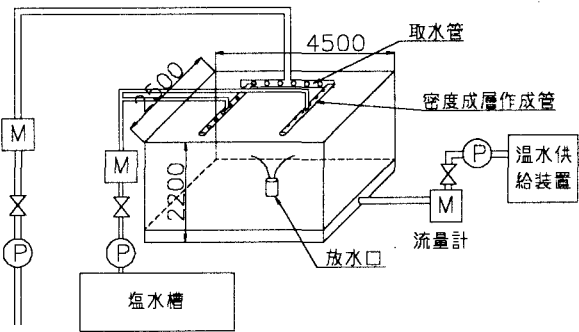


図-1 実験装置の概要

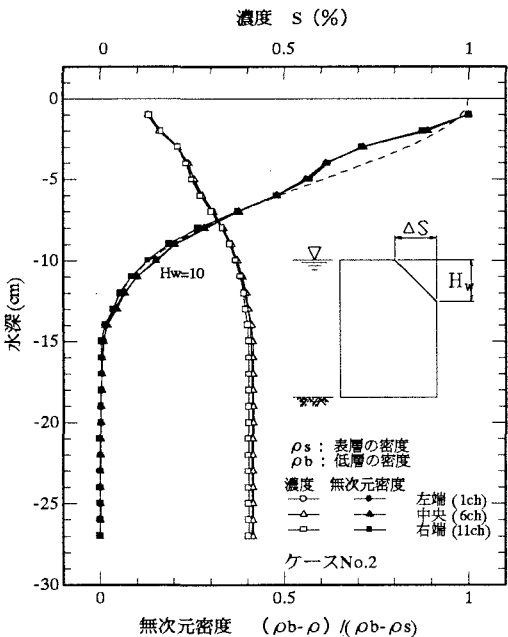


図-3 密度成層（放流前）

表-1 実験ケース表

| ケースNo. | $H_w$ | $U_s$ | $D$  | $\Delta T_0$ | $F_{r0}$ | $\Delta S$ |
|--------|-------|-------|------|--------------|----------|------------|
| 1      | 10.0  | 2.0   | 2.52 | 3.5          | 13.54    | 0.4        |
| 2      | 10.0  | 2.0   | 2.52 | 7.0          | 9.31     | 0.4        |
| 3      | 10.0  | 2.0   | 2.52 | 14.0         | 6.28     | 0.4        |
| 4      | 10.0  | 4.0   | 1.78 | 3.5          | 32.19    | 0.4        |
| 5      | 10.0  | 4.0   | 1.78 | 7.0          | 22.15    | 0.4        |
| 6      | 10.0  | 4.0   | 1.78 | 14.0         | 14.93    | 0.4        |
| 7      | 10.0  | 6.0   | 1.46 | 3.5          | 53.44    | 0.4        |
| 8      | 10.0  | 6.0   | 1.46 | 7.0          | 36.77    | 0.4        |
| 9      | 10.0  | 6.0   | 1.46 | 14.0         | 24.78    | 0.4        |
| 19     | 10.0  | 6.0   | 1.46 | 7.0          | 36.77    | 0.6        |
| 20     | 10.0  | 6.0   | 1.46 | 7.0          | 36.77    | 0.8        |
| 21     | 10.0  | 6.0   | 1.46 | 7.0          | 36.77    | 1.0        |
| 22     | 10.0  | 6.0   | 1.46 | 3.5          | 53.44    | 1.0        |
| 10     | 20.0  | 2.0   | 2.52 | 3.5          | 13.54    | 0.4        |
| 11     | 20.0  | 2.0   | 2.52 | 7.0          | 9.31     | 0.4        |
| 12     | 20.0  | 2.0   | 2.52 | 14.0         | 6.28     | 0.4        |
| 31     | 20.0  | 2.0   | 2.52 | 3.5          | 13.54    | 0.6        |
| 32     | 20.2  | 2.0   | 2.52 | 7.0          | 9.31     | 0.6        |
| 33     | 20.0  | 2.0   | 2.52 | 14.0         | 6.28     | 0.6        |
| 34     | 20.0  | 4.0   | 1.78 | 7.0          | 22.15    | 0.6        |
| 35     | 20.0  | 6.0   | 1.46 | 7.0          | 36.77    | 0.6        |
| 36     | 20.0  | 2.0   | 2.52 | 7.0          | 9.31     | 0.8        |
| 37     | 20.0  | 2.0   | 2.52 | 7.0          | 9.31     | 1.0        |

### 3. 実験結果

#### (1) 噴流中心軸における水温低減特性

図-4,5 に噴流中心軸上の水温低減特性を無次元量で示す。縦軸と横軸は Chen-Rodi の提唱した式(1, 2)で表される無次元量である。

$$\text{水温 } T^* = (\Delta T / \Delta T_0) F_{ro}^{1/2} (\rho_0 / \rho_a)^{3/4} \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{距離 } X^* = (Z / D) F_{ro}^{-1/2} (\rho_0 / \rho_a)^{-1/4} \quad \dots\dots (2)$$

図-4,5 より、多少ばらつきはあるが、各  $F_{ro}$  の  $T^*$  と  $X^*$  は比例関係にあることが分かる。最小自乗法により、 $T^*$  と  $X^*$  の関係を直線回帰した結果を式(3, 4)に示す。また、成層が無い場合について参考に式(5)、式(6)"Chen-Rodi の半経験式"にそれぞれ示す。

$$T^* = 3.7X^{*(0.84)} \quad (\text{成層厚さ 10m の場合}) \quad \dots\dots (3)$$

$$T^* = 2.9X^{*(0.75)} \quad (\text{成層厚さ 20m の場合}) \quad \dots\dots (4)$$

$$T^* = 2.5X^{*(0.80)} \quad (\text{成層無し}) \quad \dots\dots (5)$$

$$T^* = 4.4X^{*(1.25)} \quad (\text{成層無し : Chen Rodi}) \quad \dots\dots (6)$$

$T^*$  は Chen-Rodi の半経験式に比べ低減勾配は緩やかになっている。なお、 $X^*$  の大きい上層域では回帰線は Chen-Rodi の線より上方にあり、低減は悪くなっている。

#### (2) 連行流量特性

噴流における周囲水からの連行流量は、水温低減率に反比例することから、連行流量も水温低減率と同様無次元量表示できると推定出来る。Chen-Rodi の無次元量表示に基づいて連行流量の無次元量を式(7)に示す。

$$R^* = (Q_r / Q_0) F_{ro}^{1/2} (\rho_0 / \rho_a)^{3/4} \quad \dots\dots (7)$$

図-6,7 より、 $R^*$  と  $X^*$  はほぼ比例関係になり、式 (8,9) で表すことが出来る。

$$R^* = 0.39X^{*(0.80)} \quad (\text{成層厚さ 10m の場合}) \quad \dots\dots (8)$$

$$R^* = 0.58X^{*(0.85)} \quad (\text{成層厚さ 20m の場合}) \quad \dots\dots (9)$$

これらの式は単層での実験式 (図中点線で示す) と比較すると切片、傾き共小さく、連行流量が少なくなることが分かる。 $X^* = 10$  程度で  $R^*$  がばらついているが、これは成層の影響で噴流が滞留するためであり、実験式の傾きが小さくなっているのもこの影響と考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では密度成層下において、一部噴流の安定上昇高さについて検討したが、今後機会があれば詳細検討を実施する予定である。

記号の説明  $H_w$  : 成層厚さ,  $U_0$  : 放出流速,  $D$  : 放流管径,  $\Delta T = T - T_a$ ,  $\Delta T_0 = T_0 - T_a$  ( $T$  : 噴流中心軸上の測定水温,  $T_a$  : 環境水温,  $T_0$  : 放流水温),  $F_{ro}$  : 放出内部フルード数,  $\Delta S$  : 成層強度 (塩分濃度),  $\rho_0$  : 放流密度,  $\rho_a$  : 環境水密度,  $Q_r$  : 連行流量,  $Q_0$  : 初期流量

参考文献 室田 明・中辻啓二・中井正則：二次元フォーストブルームの連行係数に関する理論的研究 (土木学会論文集 第 369 号 // II-5, 1986), 水鳥雅文：成層化した沿岸海域における重力噴流の拡散過程に関する研究 (1990 京都大学博士論文)

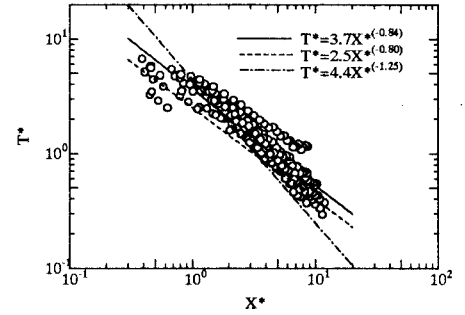


図-4 成層厚さ 10m の場合の無次元水温低減率

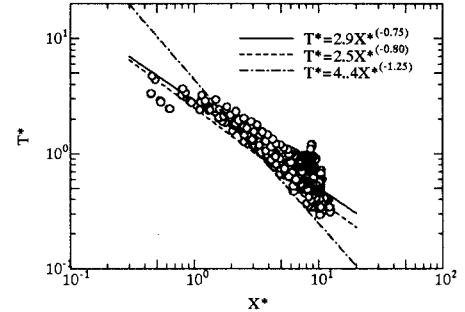


図-5 成層厚さ 20m の場合の無次元水温低減率

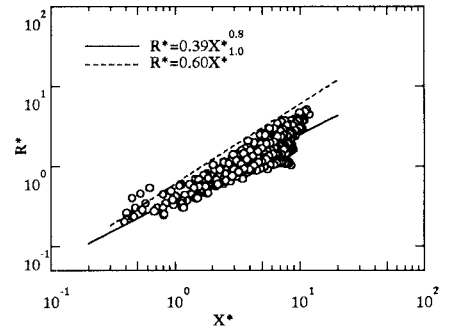


図-6 成層厚さ 10m における無次元連行流量

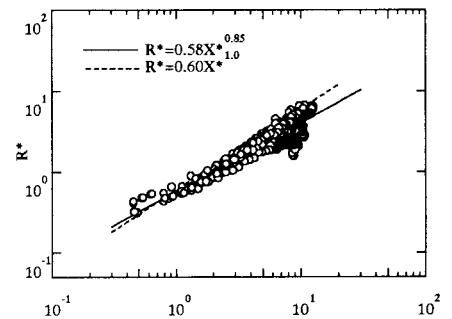


図-7 成層厚さ 20m における無次元連行流量