

## 熱汚染制御の一方

A Method of Thermal Pollution Control

大島 康次郎\*・荒井 良尚\*\*・能瀬 博康\*

Yasujiro OSHIMA, Yoshinao ARAI and Hiroyasu NOSE

## 1. はじめに

海岸に設置された火力、原子力発電所では海水を取水して冷却に利用し、復水器で温度上昇した温排水を海域に放流するため、海水の温度上昇を結果することになる。特に原子力発電所では復水器からの排熱量が火力の場合と比べて倍近くあるので、その影響が大きい。温排水による海水温度上昇は海産生物や自然環境に影響を及ぼすので、熱汚染として、その影響や対策が研究されている。温排水を外海に放流する場合と比べて、湾内に放流する場合にはその影響が大きいのは当然である。筆者らはさきに温排水による湾内水温上昇予測の一方について発表した<sup>1)</sup>。これは平面二次元熱拡散方程式を用い差分近似により数値解を求める簡単なものであった。熱拡散方程式における流速成分についてはモデル水槽による流速分布の実測データを利用した。水温上昇の予測値はモデル水槽内の16点における実測値(サーミスタ温度計による)とかなりよい一致を示した。この水温上昇予測に基づいて、湾内水温上昇すなわち熱汚染を制御する方式について考察したのであるが、ここでは次のような事柄を前提とした。

1) 熱汚染制御においては、領域内温度(排水口近傍を除く)をある基準値以下に保つように、温排水量を制御することが考えられるが、これは熱汚染によって排熱量すなわち発電所負荷を規制する問題であるので、そのような立場をとらず、放流温排水は、排出量、排出温度とも一定として、適当に配置した複数個の排水口の切換えを制御し、湾内の温度上昇をなるべく均等化し、温度上昇の影響を低減し、できるだけ環境保全をはかろうという最適制御の方式を開発するという立場を取った。

2) 温排水による湾内水温上昇は、排熱量一定としても、排水口位置が異なれば、その影響を受ける領域の広さが異なってくる。排水口位置を湾の奥深くと限定してもその相違は著しい。そこで、湾内温度上昇について、その影響が比較的小さくなるような位置に排水口がある場合について、その地点での放流の方向を切り換えることによって湾内水温上昇を低減化する方式について研究することにした。

3) 温排水を放流する海域は湾とし、事柄を簡単にするため、湾内の流れは一定の沿岸流によって生ずる時間に対して一定の流れとみなし、周期的に変動する潮汐の影響や風による吹送流の影響などは無視した。

以上のような問題設定のもとに、温排水放流による水温上昇の予測を行ない、その結果を評価関数によって評価し、方向の異なった2個の排水口を切替える制御方式につき制御アルゴリズムを作成し、モデル水槽による実験によりその有効性を確認したので、以下に報告することにする。

## 2. 異なった排水口位置による水温上昇の測定実験

実験に使用したモデル水槽は、前報のとおり、図1に

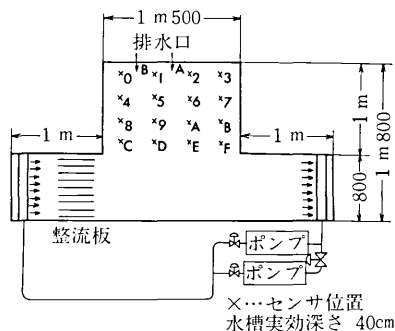


図1 モデル水槽

示すような構成で、ポンプによる水の循環で沿岸流を模擬するようになっている。沿岸流の吐出管からの流れは整流板によって乱れをとりのぞいている。1.5 m × 1.0 mの四角の囲まれた領域が湾を想定した部分で、この図に示すA(横幅の中央)およびB(横幅の1/4)の位置に排水口を取り付け、温排水を放流する。温排水の供給はヒータとサーモスタットで温度を一定に保った温水を定ヘッド差で一定流量で放流するようにしている。湾を想定した領域には、サーミスタ温度計を16点設けて、その出力電圧をマルチプレクサ、A/D変換器を介してミニコンピュータ(HITAC 10 II)にとり込み、結果をタイプアウトさせるようにしている。

実験条件としては、沿岸流の流速を2 cm/sec、温排水排出温度を30.0°C、流量を8 cm<sup>3</sup>/secとし、10分ごとに1時間にわたり水温上昇の測定を行なった。実験結果

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

\*\* 日立製作所 生産技術研究所

をデータタイプライタからの出力形式のままですと図2および図3のとおりである。図中の出力に打たれてい

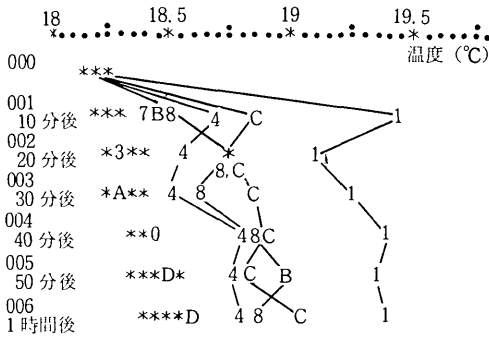


図2. 排水口Aより温排水を放流したときの温度分布実測値

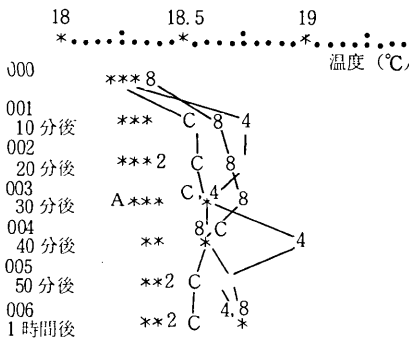


図3. 排水口Bより温排水を放流したときの温度分布実測値

るローマ数字0～9およびアルファベットA～Fは図1に示したサーミスタ温度計の位置（コード番号）を示している。なお、\*印は複数測定点が同一温度を示すことを指示している。

図2, 3から解るように、データタイプライタの出力プログラムは16点のサーミスタ出力をスキャンして、その出力電圧に相当するキャリッジの横送り位置で、サーミスタのコード番号をタイプするように作成されている。

このように、温排水排出量、排出温度が同一であっても、排水口位置によって領域内の水温上昇の影響は異なっている。温度上昇の影響を16測定点の温度上昇の2乗和

$$J_k = \sum_i (T_k^i - T_o^i)^2 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $T_k$ : 時刻  $k$  における  $i$  点での温度実測値で評価することになると、結果は図4に示すようになる。これより解るように、中央の排水口Aの場合に比べ、片

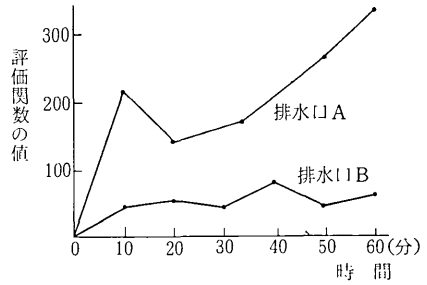


図4. 評価関数の値

側に寄った排水口Bの方が、沿岸流により生ずる湾内流れに放流温排水がのってすみやかに外海領域に運び去られるため、領域内水温上昇に対する影響が少なく好ましいといえる。

### 3. 熱汚染制御の方式

前節で述べたように、温排水放流による領域内水温上昇は排水口位置によって異なるから、湾内奥深いところで水温上昇の影響が少ないB位置に排水口を設けるとして、図5に示すように、側壁と平行の排水口1と側壁と

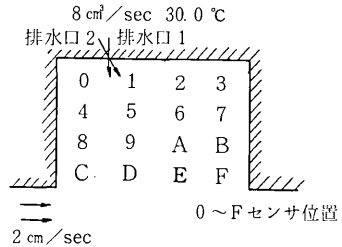


図5. 温排水放流方向

30°の傾きをもった排水口2の二つを取り付け、前報で述べた水温上昇予測に基づいて、この二つの排水口を切り換えるという制御方式について制御アルゴリズムを作成した。その概要は次のとおりである。

各タイムステップにおいて

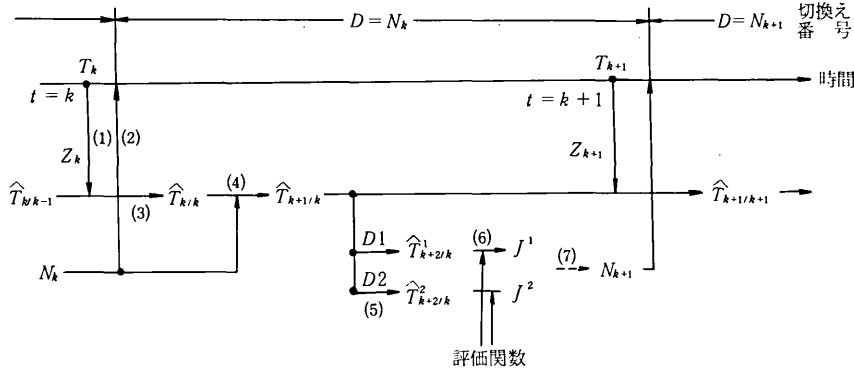
- (1) タイムステップ  $t = k$  における温度分布の実測を行ない、実測値  $Z_k$  を得る。
- (2)  $t = k - 1$  で決めた排水口から温排水を放流する。
- (3)  $t = k - 1$  で予測した  $t = k$  での温度分布予測値  $\hat{T}_{k/k-1}$  と  $t = k$  での温度実測値  $Z_k$  とから  $t = k$  での温度分布を推定する。
- (4)  $t = k$  での温度分布推定値  $\hat{T}_{k/k}$  をもとに  $t = k + 1$  での温度分布予測値  $\hat{T}_{k+1/k}$  を求める。
- (5)  $\hat{T}_{k+1/k}$  から  $t = k + 1$  で温排水放流の方向を1, 2の二通りにしたときの  $t = k + 2$  での温度分布予測  $T_{k+2/k}^1$  および  $T_{k+2/k}^2$  を求める。

- (6) 評価関数を導入し、 $\hat{T}_{k+2/k}^1$  および  $\hat{T}_{k+2/k}^2$  についてその値  $J^1$  および  $J^2$  を計算する。
- (7)  $J^1$  および  $J^2$  を比較し、その小さい方を選択し、 $t=k+1$  において放流する排水口を決定する。

以上のように、各タイムステップで(1)~(7)の操作を実行することによって、温排水放流方向を切り換え、領域内の水温上昇を低減化するのである。時間の経過に対する操作手順の進行状態を流れ図にしたものを図6に示す。

大) によって得られる利益と周辺海域の温度上昇によって生ずる損失を考慮して評価関数を決定するのが妥当と思われる。現在、温度上昇によって生ずる環境への影響に対する研究が各方面で行なわれているが、統一的な結論は導かれておらず、いろいろな面での影響を一つの値すなわちコストにまとめてあらわすことは不可能である。

温排水による温度上昇の影響が個々の場合によって全く異なり、ある場合には僅かな温度上昇でも有害である



- $T_k$  :  $t=k$  における実際の温度分布
- $Z_k$  :  $t=k$  における温度実測値
- $\hat{T}_{k/k}$  :  $Z_k$  を得た後の  $t=k$  における湾内温度分布推定値
- $\hat{T}_{k+1/k}$  :  $\hat{T}_{k/k}$  より予測した  $t=k+1$  における湾内温度分布予測値
- $\hat{T}_{k+2/k}^1$  :  $\hat{T}_{k+1/k}$  をもとに、 $t=k+1$  で  $i$  に切り換えたときの  $t=k+2$  における湾内温度分布予測値
- $\hat{T}_{k+2/k}^2$  :  $\hat{T}_{k+1/k}$  をもとに、 $t=k+1$  で  $j$  に切り換えたときの  $t=k+2$  における湾内温度分布予測値
- $J_i$  : 評価関数により計算した値
- $N_k$  :  $t=k$  において、切り換える放流方向 (1または2)

図6 制御方式の流れ図

なお、上記手順において領域内の水温上昇の推定、予測には、前報で述べたように、領域を  $9 \times 9$  の格子に分割し、前進または後退差分近似を用いて平面二次元熱拡散方程式の数値解を求めるという方法を用いた。

以上のように、予測を2段にしたのは、測定データを入力してから予測計算を行ない、評価関数を算定する演算時間を考慮したためである。放流方向の切り換えを行なう時間間隔が演算時間に比べて十分大きいものであれば、このように2段さきの予測による結果を比較する必要はない。本実験においては、演算時間は5秒程度であり、切り換え時間間隔1分に比べて小さいから、1段の予測によってでもよいと思われるが、今後流速分布の予測計算を加えた場合はさらに演算時間がかかるし、予測の精度をあげるために格子点の数を増加させることを考慮すれば、計算時間はさらに増大するから、そのためにも、この方法で制御を行なうことにした。

#### 4. 評価関数

熱汚染における評価は、電力出力の増大 (排熱量は増

のに、ある場合には周辺海域の温度上昇がかえって好ましいということもあり得るからである。

ここでは、こうした評価の問題に深入りすることは避け、温排水の排出量、排出温度は常に一定 (排熱量一定) と設定した場合の評価について考えることにした。この評価も環境保全という観点から最も簡単に湾内領域の各点での温度上昇分をおさえ、なおかつ、ある点での温度上昇分がきわだって高くなるようにとの基準に従うことにした。このような考え方のもとに、各測定点における温排水放流前の温度実測値  $T_0$ 。およびタイムステップ  $k$  における温度予測値  $T_k$  とから温度上昇分  $\Delta T = T_k - T_0$  を求め、 $\Delta T$  の2乗の値をもって温度上昇の環境への影響を示す値と考えることにした。また、水温上昇に対し何らかの基準値が定められる場合を考慮し、基準温度上昇  $\Delta T_0$  を定め、温度上昇分  $\Delta T_k$  を越える場合には  $\alpha (>1)$  倍のペナルティを与えることとした。各測定点について、この和を求め、これを評価関数とすればタイムステップ  $k$  における評価関数  $J_k$  は

$$J_k = \sum_i \alpha_i (T_k^i - T_o^i)^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{ただし, } \alpha_i = \begin{cases} 1 & 0 \leq T_k^i - T_o^i < \Delta T_s \\ \alpha (>1) & T_k^i - T_o^i > \Delta T_s \end{cases}$$

のようになり、 $J_k$ を最小にする方を最適方策とした。

5. 熱汚染制御のモデル実験

以上に述べた熱汚染制御の制御アルゴリズムの有効性をしらべるため、モデル水槽による実験を行なった。前述のように、16測定点の温度をマイクロコンピュータに取りこみ、水温上昇予測、評価関数の演算を行なわせ、その結果、排水口1、2のいずれかを決定して、排水口1、2の電磁弁を開閉している。使用しているミニコンピュータの記憶容量が8Kで不足しているため、水温上昇予測のための熱拡散方程式の流速成分はオフラインで流れの可視化によって測定した流速分布の実測値を用いることにしている。実験条件としては沿岸流の流速を2cm/sec、温排水の排出温度を30.0℃、流量を8cm<sup>3</sup>/secとしている。このときの排水口1または2から温排水を放出したときの流速分布の実測値は図7および図8に示すように

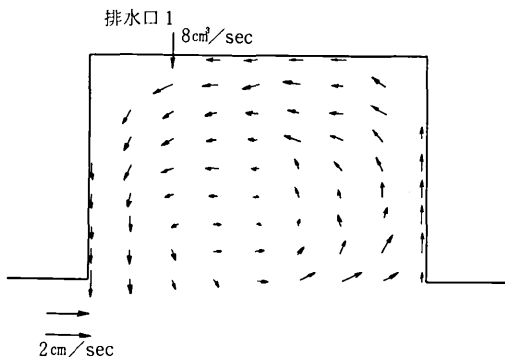


図7 排水口1から温排水を放流したときの流速分布

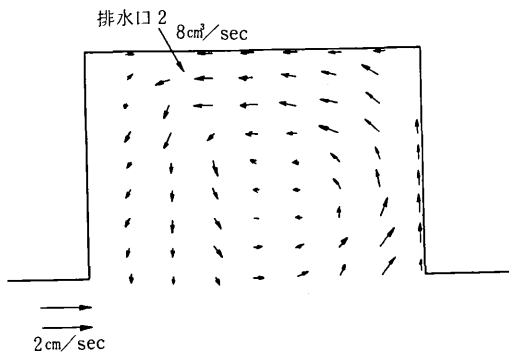


図8 排水口2から温排水を放流したときの流速分布

なっている。これらはいずれも沿岸流と排水口からの温排水放流の両方で生ずる領域内の定常流れの場を示している。これらの流速成分の実測値を用い、拡散係数の値を30mm<sup>2</sup>/secとし、 $t = 0$ で排水口1から放流することにし、基準温度上昇 $\Delta T_s = 1^\circ\text{C}$ 、ペナルティ $\alpha = 2$ として、上記制御方式に従い、切換時間間隔を1分として12分間隔にわたって、排水口の切換え制御の実験を行なった結果を図9に示す。図中には、排水口1または排水口2から

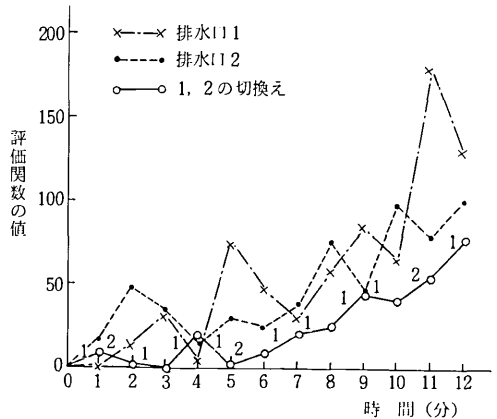


図9 排水口切換制御の実験結果

単独に放流した場合の温度上昇実測値にもとづく評価関数の値の時間的変化も示されている。切換え制御を行なった場合のカーブに付記してある1、2の数字は排水口1、2のいずれかに切り換えられたことを指示している。この実験結果から排水口の放流方向を切り換える熱汚染制御の方式の有効性が一応確認されたとみなすことができよう。

6. おわりに

温排水の放流による熱汚染に関し、湾内奥深くの領域内水温上昇の影響の少ない地点に放流方向の異なる二つの排水口を設け、水温上昇予測、評価関数の演算に基づき排水口の放流方向を切り換える制御方式につき制御アルゴリズムを作成し、モデル水槽による実験によりその有効性を一応確認した。今後、流れの場の解析、潮汐の影響などについても研究を展開することを計画している。

大気汚染と異なり、熱汚染ではモデル実験が比較的容易にできるので、拡散方程式の数値解析、拡散係数の最適推定など拡散による汚染問題の研究に役立つものと思う。  
(1977年9月12日受理)

参考文献

1) 大島, 荒井; 熱汚染制御のための温排水による水温上昇予測の方式, 生産研究, 29-3 (1977-3) 182