

熱汚染制御のための温排水による 水温上昇予測の一方式

UDC 628.518
551.463.6

Prediction of Water Temperature Rise for Thermal Pollution Control

大島 康次郎*・荒井 良尚*

Yasujiro OSHIMA and Yoshinao ARAI

1. はじめに

熱汚染とは、工場冷却水(温排水)の放流に伴う放流域の温度上昇により環境に及ぼす汚染のことである。わが国では、冷却用水量全体のうち、80%を火力、原子力発電所で占めており、近年、大規模な原子力発電所の設置に関連して、社会的注目を集めるようになってきている。

熱汚染の問題を科学的に解明し、環境の保全と発電所立地計画の推進とを同時に満足させるために、さまざまな研究が行なわれている。^{1)~4)} わが国の発電所は海岸に設置され、海水を取水し、冷却系を通して温度上昇した海水を再び沿岸海域に放流する貫流方式を採用しているため、温排水の海産生物など環境に対する影響について調査研究が行なわれている。また、放流海域の温度上昇を予測する研究、温排水による水温上昇を低減化する研究、さらには、温排水の積極利用に関する研究も行なわれている。

筆者らは、温排水による湾内水温上昇予測を行ない、これを基にして、温排水量、および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、さらにある限度以下におさえることによって温度上昇の影響を低減化する方法について研究を行なっている。ここでは、計算機シミュレーションによる水温上昇予測、およびそのモデル実験による確認について中間報告する。

2. 水温上昇予測の手法

温度予測は二次元として取り扱った。実際の海域に温排水を放流させたとき、一般に、ある厚さをもつ温度成層を形成し、それより深いところの温度は、外海の温度とほとんど変わらないことが認められている。本研究においても、実験により垂直方向の温度分布を測定したところ、この温度成層が確認された。

温度予測には、平面二次元熱拡散方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -U \frac{\partial T}{\partial x} - V \frac{\partial T}{\partial y} + K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

T : 水温

U, V : x, y 方向の流速成分

K : 拡散係数

を用いた。ここで、拡散係数 K は、領域内一定で方向性をもたないと仮定している。 $\Delta t = h, \Delta x = m, \Delta y = n$ として、クランク・ニコルソン法により差分方程式をたてると、中央差分近似を用いれば、格子点 (i, j) 、タイムステップ k ($x = im, y = jn, t = kh$) において、

$$T_{i,j}^{k+1} = A \cdot T_{i-1,j}^{k+1} + B \cdot T_{i,j-1}^{k+1} + C \cdot T_{i,j+1}^{k+1} + D \cdot T_{i+1,j}^{k+1} + EE$$

ただし、

$$A = \left(\frac{Kh}{2m^2} + \frac{Uh}{4m} \right) / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} \right)$$

$$B = \left(\frac{Kh}{2n^2} + \frac{Vh}{4n} \right) / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} \right)$$

$$C = \left(\frac{Kh}{2n^2} - \frac{Vh}{4n} \right) / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} \right)$$

$$D = \left(\frac{Kh}{2m^2} - \frac{Uh}{4m} \right) / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} \right)$$

$$EE = \left(1 - \frac{Kh}{m^2} - \frac{Kh}{n^2} \right) / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} \right)$$

$$EE = A \cdot T_{i-1,j}^k + B \cdot T_{i,j-1}^k + C \cdot T_{i,j+1}^k + D \cdot T_{i+1,j}^k + E \cdot T_{i,j}^k$$

となるが、格子点の数が、 9×9 と粗いため、低い温度の点から高い温度の点へ流れるようなところでは、極端に温度が低下してしまうという欠陥が生じた。そこで、流れの方向に注目して、前進または後退差分近似を用いて係数 A, B, C, D, E を、

$$A = \left\{ \frac{Kh}{2m^2} + M \left(\frac{Uh}{2m} \right) \right\} / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} + \left| \frac{Uh}{2m} \right| + \left| \frac{Vh}{2n} \right| \right)$$

$$B = \left\{ \frac{Kh}{2n^2} + M \left(\frac{Vh}{2n} \right) \right\} / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} + \left| \frac{Uh}{2m} \right| + \left| \frac{Vh}{2n} \right| \right)$$

$$C = \left\{ \frac{Kh}{2n^2} + M \left(-\frac{Vh}{2n} \right) \right\} / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} + \left| \frac{Uh}{2m} \right| + \left| \frac{Vh}{2n} \right| \right)$$

$$D = \left\{ \frac{Kh}{2m^2} + M \left(-\frac{Uh}{2m} \right) \right\} / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} + \left| \frac{Uh}{2m} \right| + \left| \frac{Vh}{2n} \right| \right)$$

$$E = \left(1 - \frac{Kh}{m^2} - \frac{Kh}{n^2} - \left| \frac{Uh}{2m} \right| - \left| \frac{Vh}{2n} \right| \right) / \left(1 + \frac{Kh}{m^2} + \frac{Kh}{n^2} + \left| \frac{Uh}{2m} \right| + \left| \frac{Vh}{2n} \right| \right)$$

* 東京大学生産技術研究所 第2部

ただし,

$$M(a) = \begin{cases} a & a > 0 \\ 0 & a \leq 0 \end{cases}$$

のように決めると、流速分布を適当にとることにより、良い結果が得られることがわかった。

この方程式は、ガウスの反復法を用いて解く。ディジタル計算機を用いるので、できる限り新しい近似値を採用することにする。第 n 次近似を $T^{(n)}$ で表わせば、

$$T_{i,j}^{(n+1)} = A \cdot T_{i-1,j}^{(n+1)} + B \cdot T_{i,j-1}^{(n+1)} + C \cdot T_{i,j+1}^{(n)} + D \cdot T_{i+1,j}^{(n)} + EE$$

であり、小さな数 R_0 をとり、すべての格子点において、

$$|T_{i,j}^{(n+1)} - T_{i,j}^{(n)}| \leq R_0$$

となったとき、収束したものとみなす。

境界条件としては、外海の温度を常に一定とし、岸に面した部分は断熱、すなわち $\partial T / \partial n = 0$ であるとした。なお、排水口の点では、温排水の流速が大で噴射流の性格をおび、周囲の海水をひき込む連行加入の現象が生じ、温度差が急激に減衰するため、排水口の点のみ、格子間隔を小さくして予測を行なった。

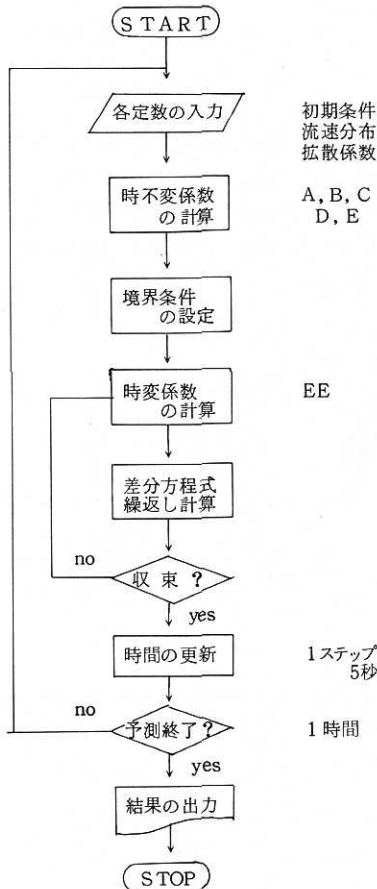


図1 予測計算のフローチャート

温度分布予測の手順をフローチャートで示すと、図1のようになる。流速分布は定常状態を仮定し、実験によりあらかじめ求めた実測値を用いた。拡散係数の値は、後述の方法により求めた最適推定値を用いることにする。

3. 実験装置

温排水を放流する海域として湾を想定し、図2に示すような形状の水槽を製作した。この水槽は、鉄板で枠組

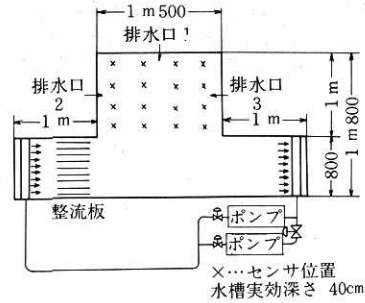
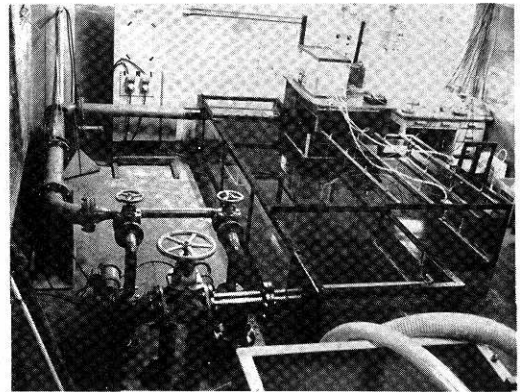


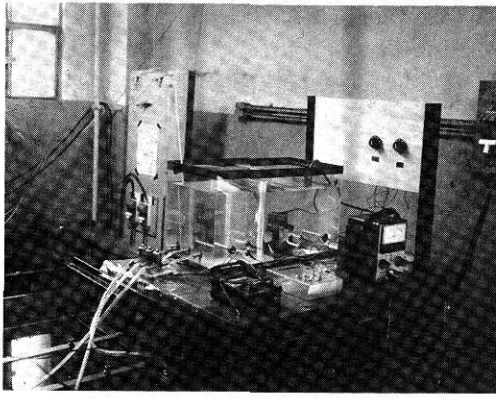
図2 実験装置仕様

をつくり、側面には透明アクリル板をはって、内部の流れの状態が観察できるようになっている。また、ポンプで水を循環させることによって、沿岸流をつくりだすことができる(写真1)。



温排水の供給は、ヒータとサーモスタットにより水温を一定に保ち、定ヘッド差を利用して一定量の温排水を放流域に放流する。温排水の放流は、電磁弁の開閉によって制御できるようにしてある(写真2)。

測定系は、温度センサとして、10℃から30℃までの直線性をもつサーミスタ温度計を16点用意し、温度を電圧に変換したものを、マルチプレクサ、A/D変換器を通じてミニコンにとり込み、出力させる。さらに、予測計算を行ない、結果を出力させ、電磁弁駆動の制御も行なう。ミニコンは、HITAC10IIを使用した。使用メモリ数は8Kである。



4. 拡散係数の推定方法

拡散係数の推定は、温度予測値と実測値とを用いて次のようにして行なった。すなわち、拡散係数 K の値を変化させたときの予測値と実測値との偏差の2乗和が最小となるような K の値をもって、最適な拡散係数としたのである。

実験条件としては、温排水温度 30.0°C 、流量 $5.5\text{cm}^3/\text{sec}$ 排水口流速 $7\text{cm}/\text{sec}$ として、5分ごとに16測定点の水温データをとりこむこととして、1時間にわたり測定を行なった。予測に使用する流速分布は、表面の流れを、おが屑(粉)によって可視化することによって測定した。各格子点における流速分布を図3に示す。流速分布が深度により、どのように変化するかについては、簡単な水素気泡発生装置を用いて実験した結果、温度成層の流れが表面の流れとはほぼ一致することを確認している。拡散係数としては、 $K = 5, 10, 15 (\text{cm}^2/\text{sec})$ の値を用い、1ステップ5秒として、1時間後の予測を行なった。

こうして得られた予測値と実測値とを、領域内の各測定点について比較したものを図4に示す。また、各測定点の偏差の2乗和を5分ごとに求めると、図5に示すようになり、拡散係数の値としては、 $K=10$ が適当であることがわかる。温度予測の結果は、ミニコンのデータタイプライタから、図6に示すように出力している。

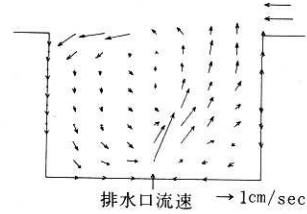


図3 放流域の流速分布

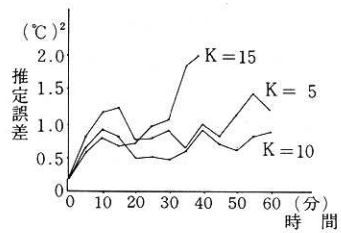


図5 拡散係数と推定誤差

5. 熱汚染制御

流速分布、拡散係数を知ることによって温度分布予測が可能となるから、その予測値をもとにして、適当な評価関数を用いて、熱汚染の最適制御を行なうことが可能になる。現在、その方法について検討中であるが、

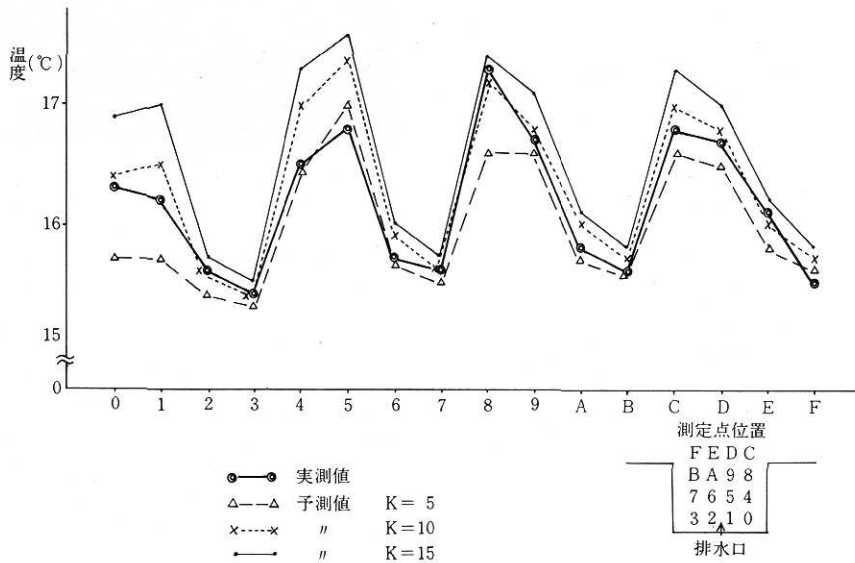


図4 実測値と予測値との比較

*** ESTIMATION				K = 00010											
000				004				008				012			
⁰ 153	¹ 153	² 153	³ 153	159	160	155	154	168	163	156	154	164	165	156	154
⁴ 153	⁵ 153	⁶ 153	⁷ 153	166	171	157	155	168	173	158	156	170	174	159	156
⁸ 153	⁹ 153	^A 153	^B 153	167	166	157	156	169	168	159	157	171	168	160	157
^C 153	^D 153	^E 153	^F 153	167	166	158	156	169	168	160	157	170	168	160	157
** K J = 00014				** K J = 00048				** K J = 00089				** K J = 00087			
001				005				009							
158	157	153	153	160	161	155	154	162	163	156	154				
162	169	153	153	167	172	157	155	169	173	158	156				
164	163	154	154	168	167	158	156	170	168	159	157				
163	163	154	154	168	167	158	156	170	168	160	157	排水口			
** K J = 00065				** K J = 00051				** K J = 00069							
002				006				010				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A B C D E F			
158	159	154	153	161	162	155	154	163	164	156	154				
164	170	155	154	167	172	158	156	169	173	158	156				
166	164	155	155	169	167	159	156	170	168	159	157				
166	164	156	155	168	167	159	157	170	168	160	157				
** K J = 00091				** K J = 00046				** K J = 00061				K J = Σ(実測値-予測値) ²			
003				007				011							
159	159	154	153	161	162	155	154	163	164	156	154				
165	171	156	155	168	173	158	156	169	173	159	156				
167	165	156	155	169	168	159	157	170	168	159	157				
167	165	157	155	169	167	159	157	170	168	160	157				
** K J = 00080				** K J = 00060				** K J = 00081							

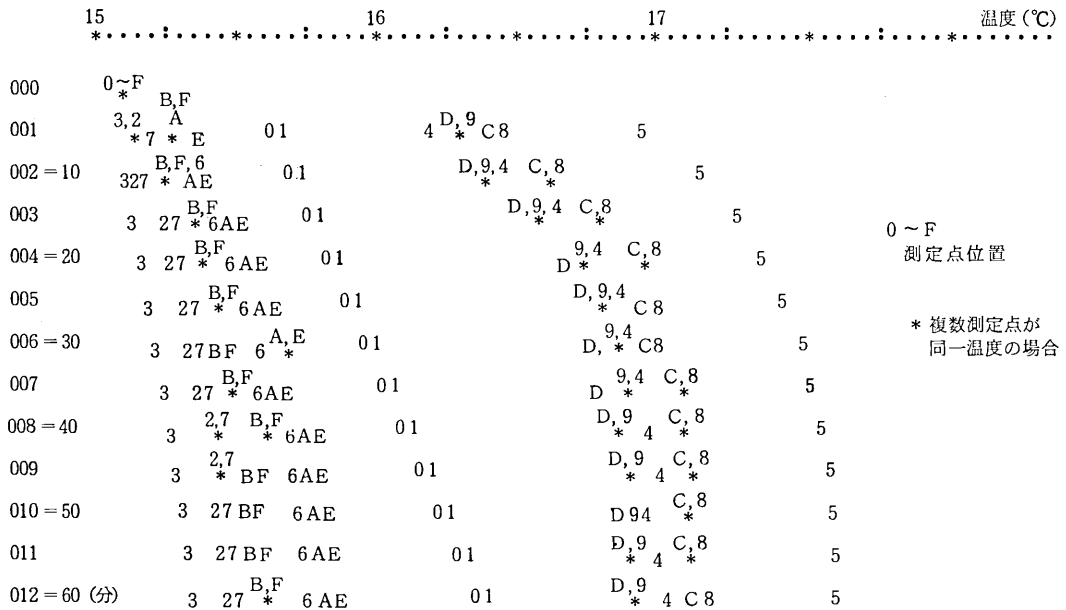


図6 データタイプライタからの出力様式 (K=10における予測結果)

(1) 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。

(2) 温排水量を一定にして、適当に配置した複数個の排水口を切り換えることによって、領域内の温度分布を均等化する。

などの方法が考えられる。このような温排水制御のアルゴリズムについては、今後の研究をまわって、あらためて報告することにする。(1977年1月21日受理)

参考文献

- 1) フランクL・バーカー、ピーターA・クレンケル；熱と温排水の処理技術(ラテイス)
- 2) 有賀祐勝, 川崎建, 渡辺競編；温排水と環境問題(恒星社厚生閣)
- 3) 千秋信一, 谷井潔他編；温排水問題(ISU梅崎)
- 4) 和田明；冷却水放水に伴う流動と熱拡散現象, 中央電力研究所技術研究所報告, 土木66033, 昭和41年10月