

温排水拡散予測汎用計算図表の提案

和田 明*・角 湯 正 剛**

1. 目 的

当所において開発した温排水拡散予測のための数理モデルによるシミュレーション解析手法は、海域の特性に対応した数種の手法について、その適用性が国ならびに電力各社で実施した数多くの温排水拡散実態調査との比較照合によって実証されつつある¹⁾。現在、個々の地点の温排水拡散予測を行うに当っては、この手法を適用して解析計算が実施されているが、これに代わる拡散範囲の概略の値を簡単に求めることが要求されている。しかし、種々の海象諸要素が関与する拡散現象の結果として形成される温排水拡散域を、排出水量——拡散面積のような単純な関係式で与えることは実用向きであるが、精度がおちる。このような理由から、本文ではこれに応えるものとして数理モデルによるシミュレーション解析手法に立脚して、直線状の海岸線に沿った半無限状の海域をその拡散特性に応じていくつかのタイプに類型化し、それぞれにつき系統的なシミュレーション解析を行ない、その解析結果にもとづいて、温排水拡散範囲を簡便に予測するための汎用計算図表を作成提案したものである。

2. 温排水拡散範囲予測式¹⁾

流速分布 u, v について、沿岸流成分（記号を T とおく）と温排水放出（記号を O とおく）による成分とに分割すると $u_i = u_{Ti} + u_{Oi}$ のようになる。 u_{Oi} の鉛直方向の分布形状が相似性を有するものとする、次のように書ける。

$$u_{Oi} = U_{si} \cdot f(\eta) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 U_{si} ：放水による表面流速、 $f(\eta)$ ：放流速の鉛直方向の分布形、 $\eta = (S+z)/(S+H_w)$ 、 S ：水面上昇量、 H_w ：温水層の厚さ。

冷却水放水に伴う流動は次式より求められる。

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} + \frac{\gamma}{\alpha} \left(u_{si} \frac{\partial M_j}{\partial x_j} \right)$$

$$= -g(S+H_w) \frac{\partial S}{\partial x_i} + A_N V^2 M_i + f_{kf} u_{si} |V| \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial M_j}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $M_i = \int_{-S}^H u_{oi} dz$ 、 $\alpha = \int_0^1 f(\eta) d\eta$ 、 $\gamma = \int_0^1 f^2(\eta) d\eta$ 、 f_{kf} ：摩擦係数、 $V^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 。

水温分布の算定式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} + \frac{\delta}{\beta} \left(u_{sj} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_j \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) + \frac{Q_0 - Q_1 T_s}{c \rho H_w} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\beta = \int_0^1 g(\eta) d\eta$ 、 $\delta = \int_0^1 f(\eta) g(\eta) d\eta$ 、 T_s ：表面水温。

水温の鉛直方向の分布形は T_0 を自然環境水温とする、次のように仮定してある。

$$T = T_0(x, y) + (T_s - T_0) g(\eta) \dots\dots\dots (5)$$

3. 拡散係数の算定¹⁾

この拡散係数は、本来対象海域で行なった流速・流向変動の観測結果の統計処理に基づいて定めるものである。半日周潮流のような規則的な流れが卓越した海域においては、周期性成分をとり除いた残りの乱れ成分を拡散係数として評価することにする。一方、不規則な流れをもつ海域においては、ある時間スケール以上の長周期の流れは恒流成分などとして扱い、その時間スケール以下の高周波成分の乱れは拡散係数として評価することにする。拡散係数は次式より算定できる。

$$K_{xi} = \overline{u_{xi}^2} \int_0^\infty R_{Eu_i}(\tau) d\tau \beta \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 R_{Eu_i} ：オイラー速度の自己相関係数、 $\overline{u_{xi}^2}$ ：変動速度の自乗平均、 β ：無次元パラメータ。

表一は上述の関係に基づいて実測結果、予測結果を

表一 放水量と時間スケールとの関係

放 水 量	(m ³ /s)	20	40	80	120	200
空 間 ス ケ ー ル (1°C 上昇の相当半径) (km)		0.9	1.3	1.9	2.4	3.1
時 間 ス ケ ー ル	(hr)	約12.5	17.2	23.5	29.5	37.0

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土木技術研究所 海洋開発研究室長

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木技術研究所 海洋開発研究室

表—2 計 算 条 件

海 域 類 型	放水流量 Q (m^3/sec)	放水温と 環境水温との差 ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	沿岸流の条件	拡散係数 (cm^2/s)		気象条件	温水の含まれる 表層厚さ (m)	計 算 ケ ー ス	本文で提 示した計 算図表
				K_x : 汀線に平 行な方向	K_y : 汀線に直 角な方向				
半 無 限 海 域	沿岸の流れの周期性が微弱な海域	50 および 100	恒流成分なし	10^4	10^4	夏 お よ び 冬	3.0 流速と水温の鉛直方向の分布形状としては、諸地点から実測結果から判断して指数関数形の分布形状を採用	12	図—1 (冬季)
				10^5	10^4				
				10^6	10^4				
	沿岸の流れの周期性が顕著な海域	50 100	半日周潮流を考慮、潮流速の振幅 10, 20 および 30 cm/s	10^5	10^5			8	図—2 (冬季)
				10^6	10^5				
				10^4	10^4				
				10^5	10^5			6	図—3 (冬季)
				10^6	10^5				

参考として放水量と時・空間スケールとの関係を参考程度に示したものである。

4. 計算条件の設定

温排水拡散予測のための汎用計算図表を作成するに当たっては、まずわが国周辺海域のうち、直線状の海岸線に沿って外海に面した半無限状の海域を対象に、その流動ならびに拡散特性の観点からこれを表—2 に示すように2つの類型に分類した。このように類型化したそれぞれの海域について、温排水放出水量、気象条件、沿岸の流れおよび場の乱れなどの因子を組み合わせることによって得られる合計 32 ケースについて拡散解析を行なった。

汎用図を作成するための計算条件としては、以下に示す5つの項目が考えられる。

- 1) 海象条件……海象条件としては、式 (6) において与えられる拡散係数を与えねばならない。これまで本邦各地の沿岸海域で実施した流速の観測結果より次の事実が判明している。すなわち、沿岸に直角方向の拡散係数は各地点とも沿岸より沖合 3km までは $10^4 \sim 10^5 \text{cm}^2/\text{s}$ のオーダーである。しかし、沿岸に平行な方向、すなわち流れの主流方向については流速の大きな海域と小さな海域では異なり $10^4 \sim 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ とかなりの幅を有している。
- 2) 気象条件……海域における水温分布を推定する上で、海面よりの蒸発も前項の拡散係数同様影響を与える。

表—3 日本の沿岸部における気象条件

		北 海 道	東日本 太平洋	東日本 日本海	西日本 太平洋	西日本 日本海	九 州
夏 季	気 温 ($^{\circ}\text{C}$)	20~22	24~26	24~26	26~28	26~28	26~28
	相 対 湿 度 (%)	80~90	85~90	80~85	80~85	80~85	80~85
	風 速 (m/s)	1.9~3.9	1.4~4.3	1.9~2.8	1.8~4.7	1.7~3.2	1.6~3.4
	水 温 ($^{\circ}\text{C}$)	15~22	20~25	24~25	26~28	25~27	27~28
冬 季	気 温 ($^{\circ}\text{C}$)	-6~-2	0~4	0~3	4~8	2~6	6~8
	相 対 湿 度 (%)	70~80	65~70	75~80	65~70	70~80	65~70
	風 速 (m/s)	3.7~5.0	2.1~5.4	2.3~6.0	2.2~4.8	1.9~4.5	1.6~3.3
	水 温 ($^{\circ}\text{C}$)	2~4	5~15	6~9	15~18	9~12	13~19

本邦の沿岸域を6つのブロックに分け、夏季、冬季の季節について気象要素の値を表—3 に示す。北海道から九州まで各要素についてかなりの差が認められる。これらの値より、本邦沿岸部の平均的な気象要素を求めた結果を表—4 に示す。この値はほぼ関東から関西地方の太平洋沿岸の平均的な値に相当するものである。

表—4 日本の沿岸部における平均的な気象条件

	夏 季	冬 季
平 均 気 温 ($^{\circ}\text{C}$)	26	5
相 対 湿 度 (%)	80	75
平 均 風 速 (m/s)	3.0	3.5
環 境 水 温 ($^{\circ}\text{C}$)	29	8

- 3) 冷却水放水流量……汎用図の作成にあたっては発電所出力を 100 万 KW, 200 万 KW 級を想定し、放水流量を $50 \text{m}^3/\text{s}$, $100 \text{m}^3/\text{s}$ とする。
- 4) 放水温と自然環境水温との差……これまでの既設発電所の運転状況から平均的な値として 7.0°C とする。
- 5) 温排水が含まれる層の厚さ……これは海域の乱れの状態、放水口周辺の地形的な要素などで変化するがこれまでの実測結果より、3m と設定する。
- 6) 鉛直方向の水温・放水流速の分布……海域の乱れ、放水口周辺の地形的要素等で変化するが、これまでの実測結果より、式 (2)~(5) の $f(\eta)$, $g(\eta)$ は $f(\eta)=g(\eta)=\exp(-2\eta^2)$ という指数分布の相似則を適用する。

5. 汎用図の作成²⁾

以上の32ケースについて得られた解析結果を系統的に整理し、水温上昇範囲の概算値を求めることができるような汎用計算図表を8シート作成した。汎用化のパラメータとしては、放

流量が $40\text{m}^3/\text{s}$ 以上の場合、他の気象・海象要素が一定ならば、水面上昇面積が放水流量にほぼ比例するというこれまでの実測結果より、距離については無次元とはならないが、沿岸に平行な方向およびそれと直角な方向の距離 $X(\text{m})$, $Y(\text{m})$ を $\sqrt{Q}$ (Q : 放水量 (m^3/s)) で除した $X/\sqrt{Q}$ および $Y/\sqrt{Q}$ を採用した。また、パラメータとしては等水温線上的水温を無次元表示した $(T_s - T_0)/(T_{\text{out}} - T_0)$ (T_s : 任意の点での表面水温, T_0 : 環境水温, T_{out} : 放水温) を用いた。汎用計算図表の一部の結果が図-1, 2 および 3 に示してある。

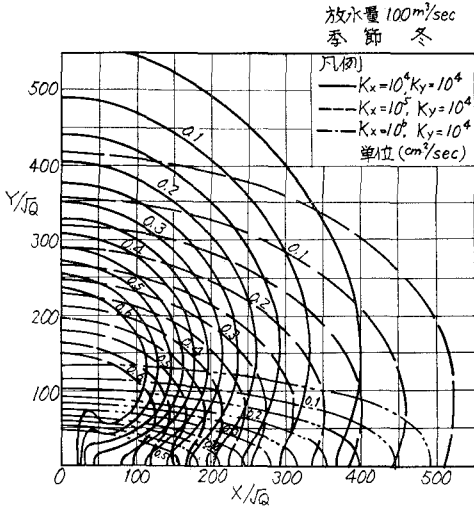


図-1 半無限海域における水温分布 (流れの周期性が微弱な海域)

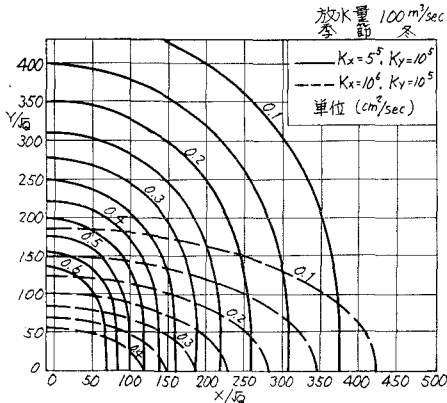


図-2 半無限海域における水温分布 (流れの周期性が微弱な海域)

6. 実際地点への適用性

前節で求めた汎用図を用いて水温拡散分布の予測を行なう場合、次のような限定条件が存在する。まず地形的には直線状の海岸線であること、そして海域の特性としては表-2 に示す2つのタイプのいずれかに属する海域で

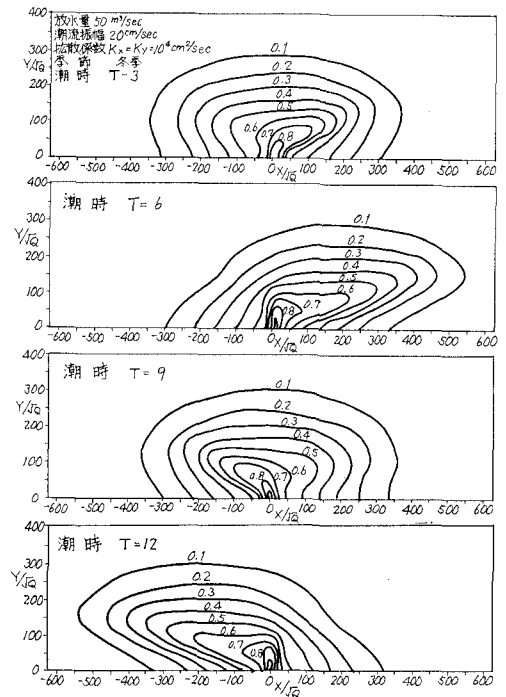


図-3 半無限海域における水温分布 (流れの周期性が顕著な海域)

あることが条件となる。

具体的な例として、沿岸の流れの周期性が微弱な海域として姉崎火力地点、沿岸の流れの周期性が顕著な海域として高砂火力地点を選び、汎用図表を用いて拡散範囲を予測した結果と現地実測結果とを比較検討した。

1) 姉崎地点: 実測時の発電状況ならびに気象・海象条件を図-4 に記入してある。気象条件は16回の実測時の平均的な値である。本海域における拡散係数は、実測結果から現象スケールを考慮するとき $K_x = K_y = 5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ であることが見出されている。拡散予測をするに当っては、海域における自然の変動性を考慮して拡散係

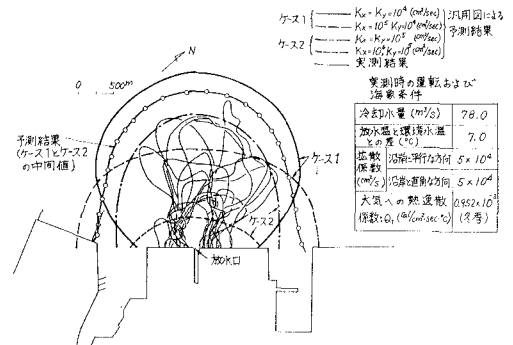


図-4 汎用図を用いた温排水拡散予測結果と実測結果との比較 (3°C 上昇, 海面) (流れの周期性が微弱な海域)

表—5 シミュレーション解析に
用いるべき拡散係数値

拡散係数	K_x (cm^2/s)	K_y (cm^2/s)
計算ケース		
ケース I	5×10^4	5×10^4
ケース II	1×10^5	5×10^4

数の値を半折不いし1桁の幅の範囲で変化させ、表—5に示すようにこれらの値を組み合わせて求めるべきと考える。表—5に示す値は汎用計算図表のなかに該当するものがないので、表—6に示す二通りの拡散場を考え、本地点での温排水拡散範囲は図—3に示すように両者のケースの中間に存在するものと考えることができる。

表—6 汎用計算図表による拡散予測
に用いる拡散係数値

拡散係数	K_x (cm^2/s)	K_y (cm^2/s)
計算ケース		
ケース 1	1-1 1×10^4	1×10^4
	1-2 1×10^5	1×10^4
ケース 2	2-1 1×10^5	1×10^5
	2-2 1×10^6	1×10^5

2) 高砂地点: 本地点においては、2つの発電所の放水口が接近しているが、 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ の水温上昇範囲を予測するに当っては単一の放水口より放出されるものと仮定

した。すなわち、2つの放水口を結ぶ線上の2発電所から放出熱エネルギーの荷重平均点を仮想放水口と考え、そこから両発電所の合計放水量が放出されたと想定して汎用図を用いて水温拡散分布を推定した。図—5に実測結果と推定結果との比較を示す。海岸線を直線状に仮定したことと、実測結果に基づく拡散係数 ($K_x=K_y=10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) と汎用図による予測に用いた拡散係数とが異なるために、予測した拡散範囲は実測結果より若干大きな拡散範囲を示す。

7. ま と め

以上の2カ地点における実測結果と予測結果を比較照合した結果、汎用図表による予測手法は温排水の拡散範囲の概略値を求めるのに有効であることが確認された。

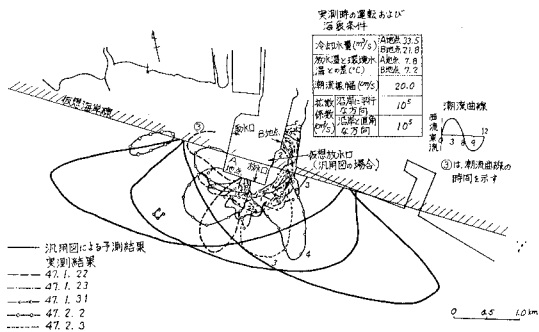
計算図表の適用に当っては、まず対象海域の流れにおいて周期性が顕著か否かを判断し、次に周期性が微弱ならば図—1 および 2 の K_x , K_y の値を海域における既往の資料などを考慮して、どの程度のオーダーであるかを決めれば 1°C 以上水温の上昇する範囲を大略推定することができる。周期性が顕著な場合は図—3を用い同様に行うことができる。

これらの図表は拡散域を概略推測する際に利用すべき性格のものであるので、この点をふまえて適用すべきものと考えられる。これらの汎用図表はプラント建設時の取放水口の配置、再循環問題の検討に利用できるのみならず、事前調査の調査範囲の目安となりうるものと考えられる。

本研究の一部は、資源エネルギー庁依頼研究の結果にもとづくものであることを付記して、関係各位に感謝の意を表します。また、本研究を実施するに当って終始御指導、御鞭撻をいただいた土木技術研究所所長・千秋信一博士に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 和田 明・角湯正剛: 温排水拡散予測汎用計算図表の提案, 電力中央研究所研究報告 No. 375008, 1975.



図—5 汎用図を用いた温排水拡散予測結果と実測結果との比較 (2°C 上昇, 海面)
(流れの周期性が顕著な海域)