

# 統計解析に基づいた温排水拡散分布の一予測法について

日 野 幹 雄\*・大久保嘉雄\*\*・大 橋 良 弘\*\*\*・加 藤 辰 彦\*\*\*

## 1. ま え が き

火力・原子力発電所から沿岸海域へ放出される温排水の拡散範囲を予測するための手法は、現在までに数多く提案されているが、大別すると、簡易手法、数値解析的手法および水理模型実験手法に分けられる。これらの手法のうち簡易手法で、海域の特徴や取・放水条件などを考慮して、概略の温排水拡散範囲をよりよく推定できれば、発電所建設時の取・放水設備の設計を行う際の、初期の段階の検討に、非常に有用と思われる。

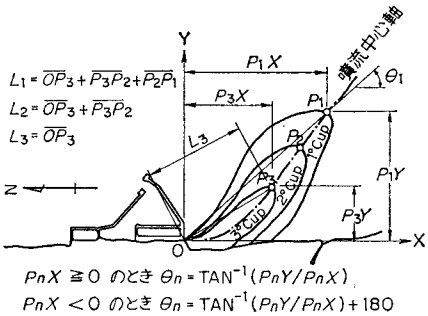
このような観点から、本研究では、現地観測資料の統計解析によって、温排水拡散分布に寄与する気象・海象因子を解明することに主眼を置き、それらの因子を考慮した拡散分布の簡易予測式を作成し、予測分布と実測分布の比較を試みた。本報文は、これらの成果の概要について報告するものである。

## 2. 現地観測資料の統計解析

外海に面した福島第一原子力発電所（以降はA発電所とする）前面海域において、昭和49年度から54年度の福島県温排水調査管理委員会に報告されている、サーミスタ水温計を固定した調査船によって観測された温排水拡散分布調査結果<sup>1),2)</sup> (96 ケース)、およびこれと同時期に観測された気象・海象データを用いて種々の解析を実施した。A発電所の1～4号機の冷却水は、南・北両防波堤によって囲まれた港湾泊地内から取水され、南防波堤の付根に設置された放水口から汀線とほぼ平行に表層放流されている。放流流量は、ユニットの増設に伴って約40～160 m<sup>3</sup>/secまで変化しており、放流流速は約2～3 m/secと比較的速い。

### (1) 拡散パラメータ

温排水の拡がり範囲を定めるためには、環境水温を決定する必要があるが、本研究では、温排水の影響が及んでいないものと考えられる発電所沖合3km地点で、温排水拡散分布調査と同時に観測されている水温を、環境



図—1 拡散パラメータの定義

水温とした。現地調査によって得られた温排水拡散データは、環境水温からの上昇値として取扱い、1℃・2℃・3℃の等温度上昇線と噴流中心軸を描き、図—1に示すように、拡散面積S、拡散主流軸長Lおよび温水噴流の拡散方向を示す拡散主流軸方向角θの3つのパラメータに着目し、整理した。

一方、これらの拡散パラメータとの関係を見出そうとしている気象・海象因子の種類として、表—1に示す拡

表—1 気象・海象因子と記号

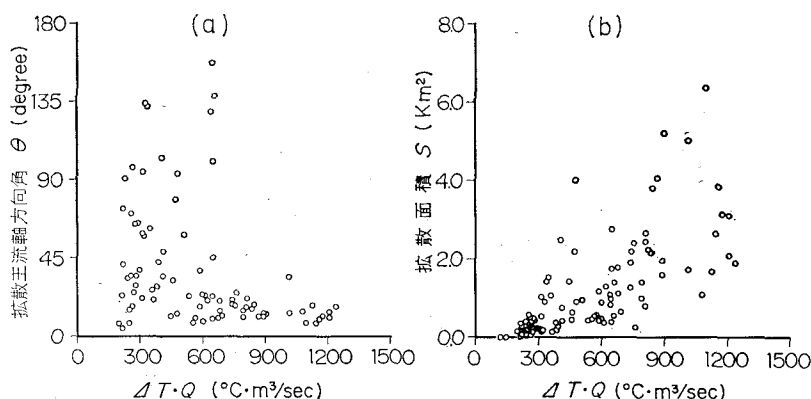
| 気象・海象因子   | 記 号                                               | 観 測 点        |
|-----------|---------------------------------------------------|--------------|
| 環 境 水 温   | TE (°C)                                           | 発電所沖合 3 km   |
| 気 温       | TA (°C)                                           | 取水口付近        |
| 湿 度       | TW (%)                                            | 同 上          |
| 日 射 量     | CA (1y/day)                                       | 同 上          |
| 有 義 波 高 位 | H (m)                                             | 発電所沖合 1.5 km |
| 潮         | ETA (m)                                           | 取水口前面        |
| 風 向・風 速   | 風 速 値 W (m/sec)<br>北方分速 WN ( " )<br>東方分速 WE ( " ) | 北防波堤先端       |
| 流 向・流 速   | 流 速 値 U ( " )<br>北方分速 UN ( " )<br>東方分速 UE ( " )   | 発電所沖合 1.5 km |

散分布調査時間帯（約90～150分）の水温、気温などを選んだ。

### (2) 発電所運転条件の影響について

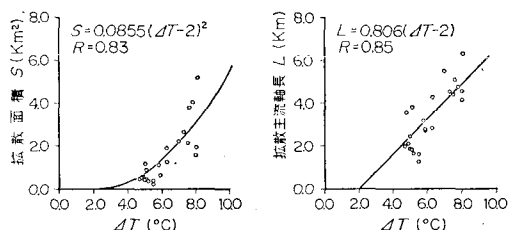
図—2は、拡散主流軸方向角θ (degree)、面積S (km<sup>2</sup>)と放水熱量ΔT・Q (°C・m<sup>3</sup>/sec)との関係を、代表例として2℃以上上昇域について示したものである。ここで、放水熱量ΔT・Qとは、放水温と環境水温の差ΔT (°C)

\* 正会員 工博 東京工業大学 工学部  
\*\* 正会員 東京電力(株) 原子力建設部土木建築課  
\*\*\* 東電設計(株) 原子力土木設計部

図-2  $\Delta T \cdot Q$  と  $\theta, S$  の関係 ( $2^\circ\text{C}$  以上上昇域)

と放流流量  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) との積を各ユニット別に計算し、加え合せた値である。なお、本報文では  $2^\circ\text{C}$  以上上昇域に主眼を置いて記述を進めることにする。

拡散主流軸方向角  $\theta$  は、図-2 (a) に示すように、 $\Delta T \cdot Q$  が約  $700$  ( $^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ ) 以下では非常に大きな幅でバラツキを示しているが、それ以上になると、 $\theta$  の大きなものの出現がみられず、 $0 < \theta < 45$  (degree) の範囲に分布していることが特徴的である。また、図-2 (b) によれば、拡散面積  $S$  は、ある程度のバラツキを示しているが、 $\Delta T \cdot Q$  との間には一定の関係が成り立つようである。

図-3  $\Delta T$  と  $S, L$  の関係 ( $2^\circ\text{C}$  以上上昇域,  $Q=110 \sim 120 \text{ m}^3/\text{sec}$ )

一方、図-3 は、放流流量  $Q$  が約  $110 \sim 120$  ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) とほぼ一定な場合の 23 ケースについて、拡散パラメータ ( $S, L$ ) と  $\Delta T$  との関係を示したものである。この図によれば、拡散面積  $S$  と  $\Delta T$  との関係は 2 次曲線で、拡散主流軸長  $L$  と  $\Delta T$  との関係は直線で近似し得ることが分かる。

ここで、平野<sup>3)</sup> が 1966 年に混合希釈理論から導いた温排水拡散面積を求める式 (1) を参考に、図-3 に示した拡散面積  $S$ 、主流軸長  $L$  の  $\Delta T$  による回帰推定式を求めると以下のとおりである。

$$S = 54.84 \times 10^{-6} (\Delta T / n - 1)^2 \cdot Q^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $S$ : 拡散面積 ( $\text{km}^2$ )、 $\Delta T$ : 放水口での冷却水上昇温度 ( $^\circ\text{C}$ )、 $n$ : 環境水温からの上昇温度 ( $^\circ\text{C}$ )、 $Q$ : 放流流量 ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) である。

図-3 に示したデータについては、 $Q$  はほぼ一定値として良いので、式 (1) は結局、式 (2) に変形できる。

$$S = \alpha (\Delta T - n)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、 $S$  の代表寸法として、 $L$  に着目すると式 (3) が得られる。

$$L = \beta (\Delta T - n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

そこで、式 (2), (3) における回帰係数  $\alpha, \beta$  を求め、図-3 中に回帰曲線あるいは回帰直線を併記した。また、求めた回帰式と実測値との相関係数  $R$  も示してある。これらより、 $Q$  が一定のときには、 $\Delta T$  の  $S, L$  に対する影響が大きいことが確認できる。

### (3) 気象・海象因子の影響に関する重回帰分析

温排水拡散現象に寄与する気象・海象因子は、相互に複合して影響しているものと考えられるので、本研究では、拡散パラメータ ( $\theta, S, L$ ) を目的変数とし、気象・海象因子を説明変数とする変数増加型の重回帰分析を実施した。ただし、この分析では、発電所運転条件の影響を除くため、放流流量  $Q$  がほぼ一定値を示している 2 つの流量グループ (グループ A:  $Q=50 \sim 60 \text{ m}^3/\text{sec}$ , グループ B:  $Q=110 \sim 120 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) について実施することとし、 $\Delta T$  については説明変数の 1 つとして考えた。また、式 (4) に示すように、目的変数  $y$  の回帰推定値  $\hat{y}$  は、単純に説明変数  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の線形結合で表現した。

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  は偏回帰係数である。

さらに、本研究では、 $y$  との相関係数が高い説明変数  $x_i$  から順に重回帰分析に取り入れてゆく、変数増加型の分析を行ったが、説明変数  $x_i$  の中には、目的変数  $y$  にとってあまり重要でない変数もあると考えられるので、説明変数  $x_i$  を新たに加えることによって増加する説明力が、回帰残差に比べて有意に大きいかな否かを判定し (分散分析)、95% 信頼度で有意となったものを重要な説明変数と考えた。

以上のような解析を、グループ A, B について実施し

表-2 重要と考えられる説明変数 (2°C 以上上昇域)

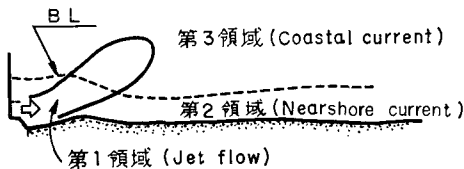
| ステップ<br>拡散<br>パラメータ  | グループ A                    |                      |      | グループ B                   |             |              |              |
|----------------------|---------------------------|----------------------|------|--------------------------|-------------|--------------|--------------|
|                      | 1                         | 2                    | 3    | 1                        | 2           | 3            | 4            |
| $\theta$             | WN<br>(0.78)              | $\Delta T$<br>(0.85) |      | UN<br>(0.58)             | H<br>(0.75) |              |              |
| S                    | CA<br>(0.53)              |                      |      | $\Delta T$<br>(0.77)     | W<br>(0.81) | TA<br>(0.86) |              |
| L                    | CA<br>(0.60)              |                      |      | $\Delta T$<br>(0.77)     | W<br>(0.86) | H<br>(0.89)  | TE<br>(0.91) |
| $\theta$ (degree)    | Ave.=34.8, $\sigma$ =28.3 |                      |      | Ave.=16.3, $\sigma$ =7.1 |             |              |              |
| S (km <sup>2</sup> ) |                           | 0.26                 | 0.15 |                          | 1.51        |              | 1.34         |
| L (km)               |                           | 0.95                 | 0.45 |                          | 3.31        |              | 1.42         |
| $\Delta T$ (°C)      |                           | 4.71                 | 0.95 |                          | 6.19        |              | 1.20         |

(注) カッコ内の数値は、そのステップまでの変数を用いた場合の重相関係数を示す。

た結果、目的変数にとって重要となった説明変数を一覧にして表-2に示した。また、表-2中には、拡散パラメータ ( $\theta, S, L$ ) の平均値と標準偏差も示してある。

表-2に示した分析結果について考察すると以下のようである。

a) 表-2中に示した拡散パラメータの平均値と標準偏差によると、 $\theta$ については、平均値および標準偏差ともグループBよりグループAの方が大きく、S、Lについては両者ともグループBの方が大きく、グループAのLの平均値は0.95km、グループBのそれは3.31kmとなっている。一方、碎波帯内に放水口がある場合の温排水は、図-4に示すような3つの異った領域の流れに

図-4 3つの領域の流れ<sup>4)</sup>

支配されるとされているが<sup>4)</sup>、本研究では、図-4中の第1・2領域の流れについては無視しており、第3領域の流れ、すなわち発電所沖合約1.5kmにおける沿岸流のみを考慮している。このため、拡散主流軸方向角 $\theta$ にとって重要な説明変数が、両グループで異なったものと考えられ、Lが比較的大きいグループBでは、第1ステップでUNが採用されたものと推察される。なお、UNと第2ステップで採用されたHとを用いた場合の重相関係数は0.75と比較的高い。

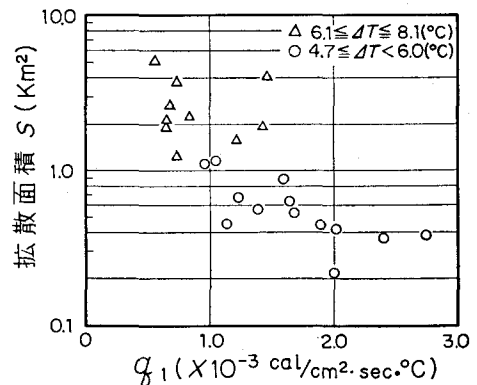
一方、図-5は、放流流量が約69 m<sup>3</sup>/secのときに約



図-5 拡散分布の変化

3時間おきに3ケース連続して観測されたデータの1~3°Cの等温度上昇線を示したものである。3ケースとも流向がほぼ南西流と一定しており、その他波高、気温、水温、湿度、日射量もほぼ一定であった。このような条件下で、風が大きく変化しており、かつ、その変化に対応するかのように拡散分布が変動している。よって、この程度の規模の放流流量の場合には、 $\theta$ は風の影響を強く受けるものと推察され、グループAでは第1ステップでWNが採用されたものと考えられる。なお、WNと第2ステップで採用された $\Delta T$ とを用いた場合の重相関係数は、0.85と高い値を示している。

b) 拡散面積Sおよび拡散主流軸長Lについても、グループAとBとでは重要な変数が異なっている。グループAでは、SおよびLについてCAのみが重要な変数とはなっているが、その相関係数は0.53、0.60と比較的低い。これに対して、グループBでは、Sについて $\Delta T, W, TA$ が、また、Lについて $\Delta T, W, H, TE$ がそれぞれ重要な変数となっている。これら変数を全て考慮した場合の重相関係数は、前者が0.86、後者が0.91と高い。また、Hを除いたW、TAおよびTEは、大気と海面間の熱収支に影響を及ぼす因子であり、ちなみに、グループBのデータについて、温排水暫定指針<sup>5)</sup>で示されている大気と海面間の熱交換係数 $q_1$ を式(5)によって求め、拡散面積Sと $q_1$ との関係を調べてみると、図-6に示すとおりとなる。

図-6  $q_1$ とSの関係 (2°C 以上上昇域)

$$q_1 = a + bW \dots \dots \dots (5)$$

ここで、Wは風速、a、bは水温および水温と気温の差に関する係数である。また、係数a、bは平均的な気象条件下(相対湿度 $f=0.8$ 、雲量 $n=0.6$ )に対して計算されたノモグラフにより与えられている。

図-6によると、 $\Delta T$ の比較的大きなケースと小さなケースとで、Sは大別されるが、 $q_1$ が増大するとSが減少する傾向があるように思われる。

なお、グループAで $\Delta T$ が重要な変数とならなかった

のは、 $\Delta T$  の平均値および標準偏差がグループ B と比べて比較的小さいためと考えられた。

(4) 拡散パラメータと  $Q$ ,  $\Delta T$ , 気象・海象因子

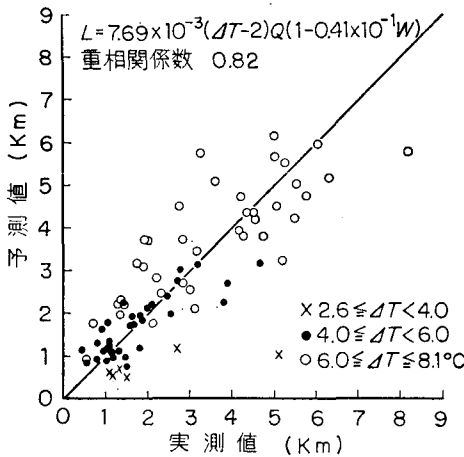
ここでは、グループ A, B のケースを含めた 96 ケースを用いた重回帰分析の結果について記述する。ただし、拡散主流軸方向角  $\theta$  を目的変数とする場合については、放流流量  $Q$  について  $100 \text{ m}^3/\text{sec}$  を境にして、データを 2 つのグループに分けた。また、この分析では、説明変数を  $Q$ ,  $\Delta T$  および表—2 中に示した気象・海象因子とし、これら変数の種々の組み合わせについて分析を行った。

解析の結果から得られた重回帰式と重相関係数を、代表的な説明変数の組み合わせについて、表—3 に示す。ま

表—3 重回帰式, 重相関係数 ( $2^\circ\text{C}$  以上上昇域)

| 重 回 帰 式                                                                                                                  | 重相関係数 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| $\theta = 1.348 \times 10^{-1} (\Delta T - 2) Q - 7.6 W N + 5.8$<br>( $40 < Q < 100 \text{ m}^3/\text{sec}$ )            | 0.75  |
| $\theta = -1.245 \times 10^{-2} (\Delta T - 2) Q + 17 U N + 11.0 H + 15.7$<br>( $100 < Q < 160 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) | 0.45  |
| $S = 0.956 \times 10^{-3} (\Delta T - 2)^2 Q (1 - 0.74 \times 10^{-1} W)$                                                | 0.75  |
| $L = 7.69 \times 10^{-3} (\Delta T - 2) Q (1 - 0.41 \times 10^{-1} W)$                                                   | 0.82  |

(注)  $\theta$  (degree),  $S$  ( $\text{km}^2$ ),  $L$  (km),  $\Delta T$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ),  $W N$  ( $\text{m/sec}$ ),  $U N$  ( $\text{m/sec}$ ),  $H$  (m),  $W$  ( $\text{m/sec}$ )



図—7 重回帰式による予測値と実測値 ( $2^\circ\text{C}$  以上上昇域)

た、これらの重回帰式から求められる予測値と実測値の比較を、一例として拡散主流軸長  $L$  について 図—7 に示す。表—3 によると、拡散主流軸方向角  $\theta$  については、 $40 < Q < 100 \text{ m}^3/\text{sec}$  のとき  $Q$  と  $\Delta T$  のほか  $W N$  を考慮すれば、0.75 と比較的高い重相関係数が得られたが、 $100 < Q < 160 \text{ m}^3/\text{sec}$  のときには、 $Q$  と  $\Delta T$  のほか気象・海象因子として  $U N$  と  $H$  を考慮しても、0.45 と重相関係数はかなり低くなっている。これは、放流流量の増大に伴って、温排水の持つ運動量が増大し、 $\theta$  が気象・海象因子の影響を受けにくくなり、一定値に近くなるためと推察された。一方、拡散面積  $S$ , 主流軸長  $L$  につ

いては、 $Q$  の範囲に関係なく気象・海象因子として  $W$  のみを考慮すれば、0.75, 0.82 と比較的高い重相関係数が得られた。なお、図—7 によれば、 $\Delta T$  が  $2.6 \sim 4.0$  ( $^\circ\text{C}$ ) と小さいケースを除いて、 $L$  の実測値と予測値とは比較的良好一致を示しているものと思われる。

3. 簡易予測式

ところで、3 つの拡散パラメータ ( $\theta$ ,  $S$ ,  $L$ ) が分かれば、温排水の拡散形状を概略推定できる。ここでは、簡易予測式として、式 (6)~(8) を選び、これによる予測結果から推定した拡散分布と実測による分布との比較を試みる。

$$\theta = \alpha (\Delta T - n) Q + \beta W N + C \quad (40 < Q < 100 \text{ m}^3/\text{sec}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

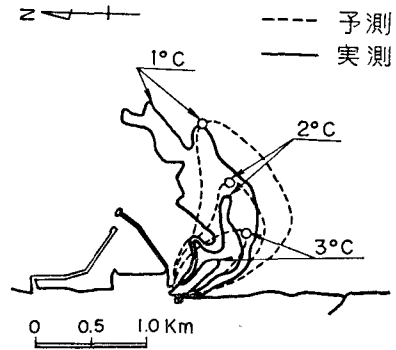
$$S = \alpha (\Delta T - n)^2 Q (1 - \beta W) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$L = \alpha (\Delta T - n) Q (1 - \beta W) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $n$ : 環境水温に対する上昇温度,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $C$ : 表—4 参照。

表—4 簡易予測式に用いた係数

| 拡散パラメータ  | 係数                | $\alpha$               | $\beta$               | $C$  |
|----------|-------------------|------------------------|-----------------------|------|
| $\theta$ | $1^\circ\text{C}$ | $0.795 \times 10^{-1}$ | -9.1                  | 28.0 |
|          | $2^\circ\text{C}$ | $1.348 \times 10^{-1}$ | -7.6                  | 5.8  |
|          | $3^\circ\text{C}$ | $1.740 \times 10^{-1}$ | -5.2                  | -7.5 |
| $S$      | $1^\circ\text{C}$ | $1.189 \times 10^{-3}$ | $0.32 \times 10^{-1}$ |      |
|          | $2^\circ\text{C}$ | $0.956 \times 10^{-3}$ | $0.74 \times 10^{-1}$ |      |
|          | $3^\circ\text{C}$ | $0.719 \times 10^{-3}$ | $0.69 \times 10^{-1}$ |      |
| $L$      | $1^\circ\text{C}$ | $7.47 \times 10^{-3}$  | $0.13 \times 10^{-1}$ |      |
|          | $2^\circ\text{C}$ | $7.69 \times 10^{-3}$  | $0.41 \times 10^{-1}$ |      |
|          | $3^\circ\text{C}$ | $6.78 \times 10^{-3}$  | $0.35 \times 10^{-1}$ |      |



図—8 予測分布と実測分布の比較 ( $Q = 56.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ )

図—8 は  $Q = 56.0 \text{ m}^3/\text{sec}$  のときの拡散分布の予測と実測の比較図である。ここで、拡散予測分布を描いた手順は次のとおりである。まず、 $3^\circ\text{C}$  以上上昇域について、図中の○印を拡散パラメータ  $\theta$  と  $L$  とで求め、つぎに、拡散分布は楕円状に拡がるものと仮定して、 $L$  を長軸とする場合の短軸を  $S$  と  $L$  から求め、その先端と原点 (放水口) および○印を曲線で結んだ。以下、 $2^\circ\text{C}$  以上・

1°C 以上上昇域についても同様の作業を繰り返すが、2°C 以上の等温度上昇線は 3°C 以上のそれを、1°C 以上の等温度上昇線は 2°C 以上のそれを、それぞれ包含するものとした。

図-8 によれば、予測結果は、 $S$  の 1~3°C と  $L$  の 3°C について実測と整合していないが、 $\theta$  は各上昇温度で良い一致を示しており、温水噴流中心軸の曲がりを近似しているものと思われる。

なお、式 (7), (8) で示した拡散面積  $S$ 、主流軸長  $L$  の予測式中における  $\beta$  は、 $Q$ ,  $\Delta T$ ,  $W$  の 3 者に変数の性質上相関がないことから、風速の影響の度合を決定する係数と考えてよい。例えば、本研究で用いた風速データの平均値は約 4 m/sec であり、このとき、2°C 以上上昇の拡散面積は、風速によって約 25% 減少することになる。したがって、風速が微弱な場合には、この項を無視しても良いと考えられる。

#### 4. おわりに

現地観測資料の統計解析によって、温排水拡散分布に寄与する気象・海象因子の解明を行い、それらの因子を考慮した拡散分布の簡易予測式を作成し、予測分布と実測分布の比較を試みた。その結果、A 発電所前面海域の場合には、本研究で着目した拡散主流軸方向角  $\theta$  に寄与する因子が、放流流量の規模に応じて異なることが明ら

かとなり、 $40 < Q < 100 \text{ m}^3/\text{sec}$  のときには、 $WN$  が最も重要な気象・海象因子であることが判明した。また、 $100 < Q < 160 \text{ m}^3/\text{sec}$  のときには、温排水の持つ運動量が卓越するため、気象・海象因子の寄与度は小さいが、 $UN$  と  $H$  が比較的重要な因子であると考えられた。また、拡散面積  $S$ 、主流軸長  $L$  については、発電所運転条件 ( $Q, \Delta T$ ) が第一義的に影響しており、その他大気と海面間の熱収支に関与する気象・海象因子が比較的重要であることが確認された。しかし、本文で示した簡易予測式による拡散分布の予測結果の全てが、実測結果と必ずしも整合しないところがみられた。なお、本研究では考慮できなかった放水流動、海浜流などの影響や、温排水拡散分布を求める際の環境水温の仮定の良否の影響について、今後検討を進める予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 福島県温排水調査管理委員会：昭和 49 年度～昭和 54 年度温排水調査報告書。
- 2) 福島県温排水調査管理委員会：温排水総合調査報告書（昭和 49～53 年度），1981。
- 3) 平野敏行：温排水の拡散影響域推定について，水産海洋研究会報，第 9 号，pp. 73～78，1966。
- 4) 中村義治・堀川清司：開放性海域に放出される温水の拡散について，第 24 回海岸工学講演会論文集，pp. 462～466，1977。
- 5) 資源エネルギー庁：温排水暫定指針，pp. 65～69，1980。