

# 水理模型による拡散予測手法の適用性に関する研究

(財) 電力中央研究所 正会員 ○加藤 正進  
同 上 同 上 和田 明

## 1. はじめに

沿岸海域における拡散過程は、拡散過程に影響をおよぼす因子が多様であることに起因してきわめて複雑であるため、数値シミュレーションや水理模型を用いて拡散予測を実施するにあたっては、対象とする海域での実測調査にもとづき、対象とする現象の時間・空間スケールに応じてその現象を支配する主要な因子を明かにし、適正なモデルを組立てることがきわめて重要である。

水理模型による拡散予測手法は、実現象を支配する主要な因子を模型上に再現することができれば数値シミュレーションとは異なる利点を有する有用な手法であるが、海域に形成される拡散域の水平スケールは鉛直スケールにくらべてきわめて大きいために、拡散域の水平方向のひろがりを対象とする水理模型は、実験に必要な水深を維持し粘性や表面張力の影響をさける意味で、水平方向と鉛直方向の幾何学的縮率が異なるいわゆる歪み模型となる場合が多く、実現象を模型上に再現するための条件がさらに付加される。

筆者らは、<sup>1)</sup>潮流が卓越する海域へ放出される温排水の拡散現象を対象とした水理模型実験を、歪み模型(水平縮尺  $1/1000$ 、鉛直縮尺  $1/100$ 、歪み度  $10$ )を用いて実施した結果から、温排水放水にともなう水温分布の形成過程で重要な役割を占める海域の流れと水平乱れは模型上に再現可能であり、温排水の影響範囲もほぼ再現可能であることを示したが、現象の再現性におよぼす歪みの影響については明らかにすることができなかった。

本研究は、潮流が卓越する海域へ放出される温排水の拡散現象を対象とした水理模型実験を、歪み度の異なる三種類の模型を用いて実施し、実験結果と現地実測結果とを比較して現象の再現性と歪みの影響を調べ、歪み度の許容範囲と水理模型による拡散予測手法の適用性を検討したものである。

## 2. 沿岸海域における拡散過程と相似則

沿岸海域へ放出される温排水や汚染物質の拡散過程はきわめて複雑であるが、主要な過程は次のように考えることができよう。放出点の近傍においては、放水自身の有する流れや乱れが海域に存在する流れや乱れにくらべ支配的であり、水温分布や物質分布の形成は、放水自身による連行加入混合稀釈過程に支配され、放出の方法や放出口の形状・配置にも影響される。放出点近傍に形成される水温分布や物質分布を対象とする水理実験においては、この過程を再現するため、幾何学的な相似条件と内部フルード数の一致条件を適用するのが一般的であり、次の関係が得られる。なお添字は模型( $m$ )および原型( $P$ )を意味する。

$$F_{iP} = F_{im} = \frac{u_p}{\sqrt{(\Delta\rho_p/\rho_p) \cdot g \cdot h_p}} = \frac{u_m}{\sqrt{(\Delta\rho_m/\rho_m)}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$F_i$  : 内部フルード数       $u$  : 放出水の流速       $\Delta\rho/\rho$  : 周辺水と放出水の密度差と放出水密度の比  
 $h$  : 放出水の厚さ       $g$  : 重力加速度

一方、放出点から離れた海域においては、放水自身の有する流れや乱れよりも海域に存在する流れや乱れが支配的となり、水温分布や物質分布の形成は現象の時間・空間スケールに応じた海域の流れや乱れによる拡散・分散過程に支配され、温排水の場合には大気と海面間の熱収支過程も水温分布の形成に影響をおよぼす。時間・空間スケールが大きな物質分布の形成過程においては、潮流の非線形性に起因する潮汐残渣流が重要な役割を占めていることが指摘されているが、<sup>2)</sup>温排水規模の時間・空間スケールの現象においては、潮

流の平均的な流況とメソスケールの水平乱れが重要な役割を占めており、放水口から離れた海域に形成される水温分布を対象とする水理実験においては、これらの因子を模型上に再現するための条件が必要となる。

潮流の運動方程式が、原型および模型で成立する条件から、次の関係が得られる。

$$\frac{U_p}{U_m} = \left(\frac{Z_p}{Z_m}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (2), \quad \frac{t_p}{t_m} = \left(\frac{x_p}{x_m}\right) \left(\frac{Z_p}{Z_m}\right)^{-1/2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{C_p}{C_m} = \left(\frac{x_p}{x_m}\right)^{-1} \left(\frac{Z_p}{Z_m}\right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで

U : 水平方向の流速            t : 時間            C : 海底摩擦係数  
 X, Z : 水平および鉛直距離

式(2)および(3)はいわゆるフルードの相似条件であり、式(4)は海底摩擦に関する条件である。

フルードの相似条件と海底摩擦の条件を適応して実施された既往の実験結果によれば、潮流や地形性の流れが歪み模型上に再現可能であることが示されており、筆者らも同様の結果を得ている。<sup>1), 3)</sup>

一方、歪み模型上でのメソスケール水平乱れの再現性を検討した実験結果から、筆者らは、メソスケール水平乱れの統計的特性や構造が、レイノルズ数や地形特性の影響は受けるようであるが、フルードの相似条件を適用することにより再現可能であることを示している。

これらの結果から、潮流やメソスケール水平乱れは、フルードの相似条件を基本とする水理模型上に再現可能であるものと考えられるが、再現性におよぼす歪みの影響は明かではない。

大気と海面間の熱収支は、太陽・天空からの短波放射、大気および水面からの長波放射、顕熱・潜熱の移動、温排水による付加熱の収支により決定される。自然水温からの水温上昇値を $\Delta T$ とし、水温と流速の鉛直分布を次のように仮定する。なお、添字 S は水面での値を意味し、 $H_w$  は温排水の厚さとする。

$$\Delta T = \Delta T_s \quad F_1 \left(\frac{Z}{H_w}\right) \dots\dots\dots (5) \quad u = U_s \quad F_2 \left(\frac{Z}{H_w}\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$v = V_s \quad F_3 \left(\frac{Z}{H_w}\right) \dots\dots\dots (7)$$

式(5)~(7)の仮定を用い熱拡散方程式を水深方向に積分し、水面での熱収支を熱交換係数を用いて表現すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\alpha H_w \Delta T_s] + \frac{\partial}{\partial x} [\beta H_w U_s \Delta T_s] + \frac{\partial}{\partial y} [\gamma H_w V_s \Delta T_s] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} [K_x \frac{\partial}{\partial x} (\alpha H_w \Delta T_s)] + \frac{\partial}{\partial y} [K_y \frac{\partial}{\partial y} (\alpha H_w \Delta T_s)] - \frac{K_T \Delta T_s}{C \rho} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで、

$K_x, K_y$  : x, y 方向の渦動拡散係数             $K_T$  : 熱交換係数            C,  $\rho$  : 水の比熱と密度  
 $\alpha, \beta, \gamma$  : 水温および流速の鉛直分布型に関する係数

原型および模型における水温、流速の分布型が相似であるものとすれば、式(2)、(3)の関係を適用して、熱交換係数の縮率に関して次式が得られる。

$$\frac{K_{Tp}}{K_{Tn}} = \left(\frac{X_p}{X_m}\right)^{-1} \left(\frac{Z_p}{Z_m}\right)^{3/2} \dots\dots\dots (9)$$

この関係は、模型と原型との熱交換係数が同一であれば模型を歪ませる必要があることを示しているが、模型の熱交換係数は風の効果が含まれていないことから一般には原型にくらべ小さく、熱交換係数の把握が正しければ歪み度の決定に対して一つの目安を与えるものである。しかし、熱交換係数の把握がむずかしいこと、数 10 m<sup>2</sup>/sec 程度の温排水による水温分布の形成に対しては、熱収支の影響がそれ程大きなウェイトを占めないことから、一般には式(9)の条件を付加しない場合が多い。

### 3. 実験対象地点での実測結果

実験対象地点は、瀬戸内海播磨灘の北東部に位置し、現在当地点には二つの発電所が隣接して立地しており運転中である。図-1 に実験対象地点の概略地形を示す。冷却用水は発電所西側海域より取水され、発電

所前面海域と東部入江部へ表層放出されている。

実験対象地点で実施された流れの長時間連続観測結果を統計解析して得た流れの自己相関とエネルギースペクトルを図-2, 3に示す。

この結果から、実験対象地点は約12時間の周期を有する半日周潮流が卓越した海域であることがわかる。

発電所周辺海域で実施された浮標追跡による平均流況の実測結果によれば、潮流の流向は、漲潮時に北西、落潮時に南東であり、ほぼ沿岸に平行である。(図-4参照)

温排水放水による水温上昇域の実測調査はおだやかな海況条件で実施され、実測時の潮流流速振幅はほぼ30cm/secであった。

水温上昇域の実測結果については、実験結果と比較し後にのべる。

4. 実験装置と実験方法

実験に用いた拡散水槽は、長さ20m、巾10m、高さ1mで、片端にニューマティックタイプの潮汐発生装置がそなえつけられている。

潮流の流跡などの平均的な流況は、抵抗羽根を取りつけたフロートの動きを上方より連続写真撮影する方法を用いて測定し、水平乱れの測定は、超音波式流速計を、水温測定はサーミスタ水温計を用いて実施した。

水理模型の水平縮尺は $1/1000$ とし、発電所を中心として沿岸方向約1.5Km、沖合方向約6Kmの海域を拡散実験水槽内にとり入れ、鉛直縮尺は $1/50$ ,  $1/100$ ,  $1/200$ と変化させ、歪み度の異なる三種類の水理模型を用いて実験を実施した。

この模型縮尺から、原型値と模型値との関係は、フルードの相似条件を適用して次表のようにあらわすことができる。

表-1 原型値と模型値との関係

|                                          | ケースⅠ               | ケースⅡ   | ケースⅢ               |
|------------------------------------------|--------------------|--------|--------------------|
| 水平距離 $X_p/X_m = Y_p/Y_m$                 | 1000               | 1000   | 1000               |
| 鉛直距離 $Z_p/Z_m$                           | 200                | 100    | 50                 |
| 歪み度 $(X_p/X_m)/(Z_p/Z_m)$                | 5                  | 10     | 20                 |
| 水平流速 $U_p/U_m = V_p/V_m$                 | 14.14              | 10     | 7.07               |
| 流量 $Q_p/Q_m = (X_p/X_m)(Z_p/Z_m)^{3/2}$  | $2.83 \times 10^6$ | $10^6$ | $3.54 \times 10^5$ |
| 時間 $t_p/t_m = (X_p/X_m)(Z_p/Z_m)^{-1/2}$ | 70.71              | 100    | 141.42             |

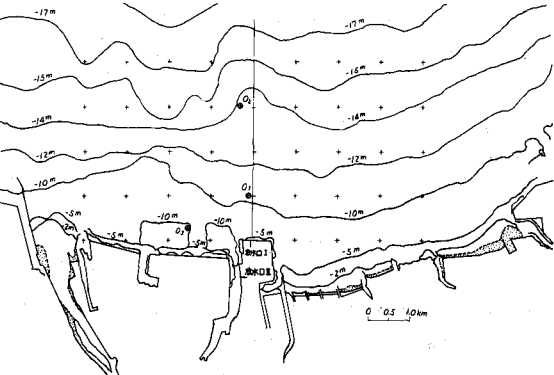


図-1 実験対象地点の概略図

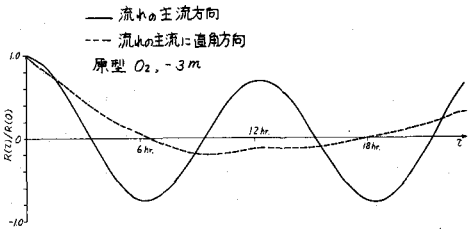


図-2 原型の自己相関

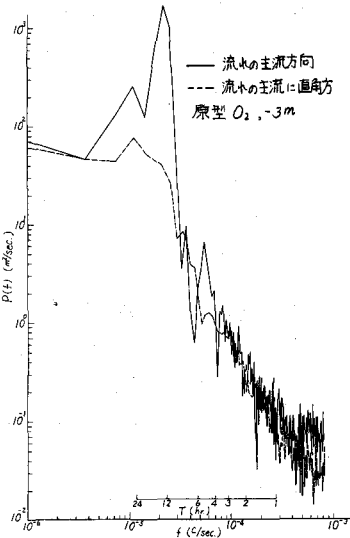


図-3 原型のエネルギー  
スペクトル

実験は、式(2), (3)で示されるフルードの相似条件を基本相似則とし、放水口においては、式(1)で示される

内部フルード数一致の条件を適用した。式(1)は、式(2)を用いて書きなおせば次式となる。

$$\frac{\rho_a p}{\rho_p} = \frac{\rho_{am}}{\rho_m} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$\rho_a$  : 環境水の密度

式(1)は、環境水と放出水の密度比を原型と模型とで同一に保つ条件である。

本実験では、放水口において環境水温と放出水温との差 $\Delta T$ を同一に保つ条件を採用したため、内部フルード数一致の条件は厳密には満足されていない。

表-1に示した関係を用い、実測時の条件を実験条件に換算すれば、表-2となる。

表-2 実験条件

| 実験ケース | 歪み度 | 温排水放水量<br>( $\text{cm}^3/\text{sec}$ ) |         | 環境水温と放出水温との差<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |         | 潮流振幅<br>( $\text{cm}/\text{sec}$ ) |
|-------|-----|----------------------------------------|---------|----------------------------------------|---------|------------------------------------|
|       |     | 放水口(I)                                 | 放水口(II) | 放水口(I)                                 | 放水口(II) |                                    |
| I     | 5   | 11.7                                   | 4.7     | 8.0                                    | 12.5    | 2.1                                |
| II    | 10  | 33.1                                   | 13.3    |                                        |         | 3.0                                |
| III   | 20  | 93.5                                   | 37.6    |                                        |         | 4.2                                |

## 5. 実験結果

### 5.1 平均流況とメソスケール水平乱れの再現性

温排水拡散実験にさきだち、潮流が卓越した海域における水温分布の形成過程で重要な役割を占める潮流などの平均的流況と、メソスケール水平乱れの再現性を検討した。

図-4は、歪み度の異なる三種類の水理模型で得られた平均流況と、現地実測で得られた平均流況とを比較したものである。実験結果は、フルードの相似則に従って原型の値に換算してある。

図-4は、落潮時における平均流況の比較であるが、歪み度の異なる三種類の水理模型で得られた平均流況は、原型で得られた南東流をほぼ再現しており、歪み度の相違による影響は顕著にあらわれていない。漲潮時における実験結果も、落潮時と同様である。

速水らは、<sup>4)</sup>層流モデルを考え、模型の海底摩擦係数 $C_m$ がレイノルズ数 $Re$ の関数であること、すなわち

$$C_m = a (Re_m)^{-\frac{1}{2}} \quad a = 1.328 \dots\dots\dots (1)$$

原型と模型とのレイノルズ数が次式の関係にあること、

$$\frac{Re_p}{Re_m} = \left( \frac{X_p}{X_m} \right) \left( \frac{Z_p}{Z_m} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

を用い、式(4)、(1)、(2)から次の関係を得ている。

$$\frac{C_p (Re_p)^{\frac{1}{2}}}{a} \cdot \left( \frac{X_p}{X_m} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{Z_p}{Z_m} \right)^{\frac{5}{4}} \dots\dots\dots (3)$$

速水らは、水平縮尺を $\frac{1}{500}$ とし、歪み度を2, 4, 8と変化した水理実験から、式(3)の関係を満足する歪み度2の模型において、潮流の再現性が良好であることを述べている。<sup>5)</sup>しかし、堀川らも指摘しているように、レイノルズ数は場所により異なるからどのような $Re_p$ をとるかが問題である。

これら既往の研究結果と本実験結果から判断して、潮流などの平均的な流況は、フルードの相似条件を適用することにより、歪み度の相違による顕著な影響を受けず模型上に再現可能であるものと考えられる。しかし、模型の歪み度がきわめて大きい場合には、模型内の三次元的な流動が顕著になる恐れもあるため、注意する必要がある。

水平乱れの特性や構造は、流速変動の長時間連続観測結果

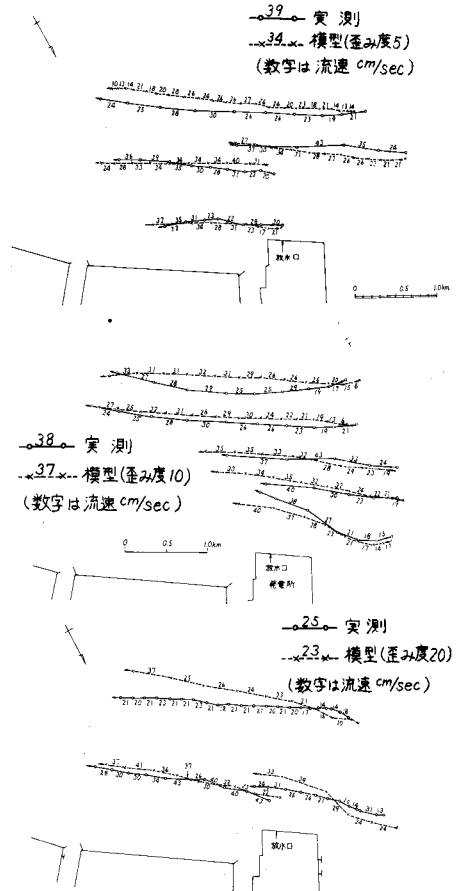


図-4 平均流況の再現性

を統計解析して得られるエネルギースペクトルに顕著に表現されるが、水平乱れの再現性を調べるため原型と同一地点において流速変動の長時間連続測定を実施しエネルギースペクトルを求めた。

図-5は、歪み度の異なる三種類の水理模型で得られた流速変動のエネルギースペクトルと、原型のエネルギースペクトルを比較したものであるが、模型においては半日周潮流成分、原型においては半日周潮流と日周潮流成分を除去して得たものであり、模型の値はフルードの相似則にしたがって原型の値に換算して示してある。

水理模型で得られた流れの主流方向のエネルギースペクトルは、原型とほぼ同様なエネルギーレベルを有し、スペクトルの高周波側および低周波側とも比較的良好に原型と一致している。一方、水理模型で得られた流れの主流に直角方向のエネルギースペクトルは、スペクトルの高周波側では比較的良好に原型と一致しているが、低周波側においては原型にくらべエネルギーレベルが低い結果を示している。

これらの結果は付加粗度の調整を経て得たものであり、数時間以下の変動周期を有する水平乱れは歪み度の相違による影響を顕著に受けずに模型上に再現可能であるものと考えられるが、長周期の変動周期を有する水平乱れは、模型の歪み度や実験対象地点の地形特性・実験の規模などの制約によりその再現性には限界が存在することも考えられる。

## 5.2 温排水影響範囲の再現性

海域の平均流況と水平乱れの再現性を検討したのち、所定の流量と温度上昇値を有する温排水を放水口より放水し、模型内に形成される水温分布を測定し、温排水影響範囲の再現性を検討した。

図-6は、水理模型（歪み度1.0）で得られた温排水拡散パターンの一例であるが、温排水の拡散パターンは潮流の経時変化に対応して変化し、水温上昇値は、漲潮から満潮にかけては発電所北西海域へ、落潮から干潮にかけては南東海域へとひろがっている。この傾向は、歪み度の異なる他の模型においても同様であった。

水理実験および現地実測で得られた各潮時の温排水拡散パターンには、比較的類似した拡散パターンも認められるが、実測値には実験結果と異なるパターンが多数認められる。

この結果は、自然現象はきわめて複雑でありむしろ不規則性が卓越する現象であるのに対し、模型においては原型の拡散過程における主要な因子を再現し現象も単純化しているため比較的規則性が保たれていることに起因するものと考えられ、さらに現地実測においては一つの拡散パターンの測定に長時間

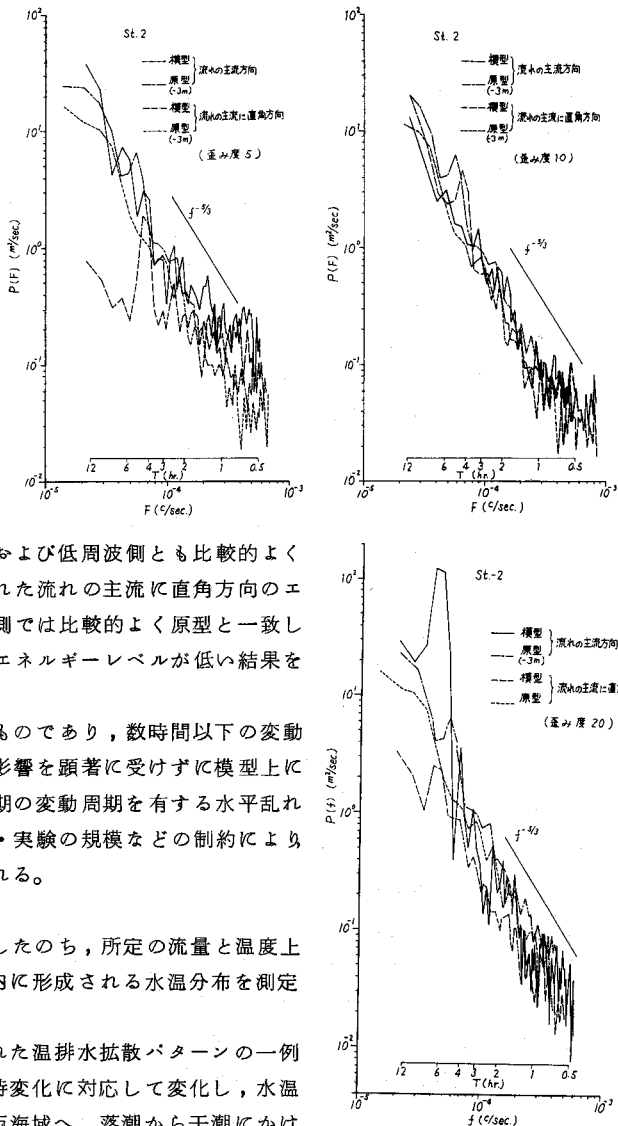


図-5 エネルギースペクトルの再現性

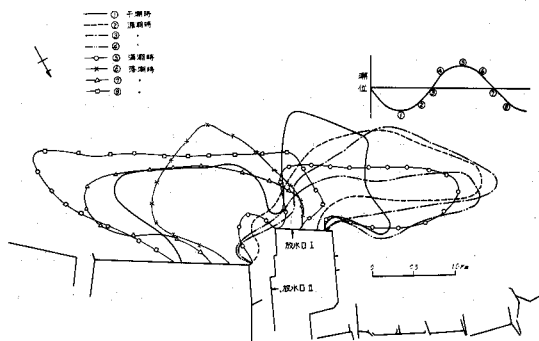


図-6 温排水拡散パターンの一例（模型）

を必要とするため、データ間の同時性が失なわれていることも原因する。

このため、実験結果と実測結果とを比較し実現象の再現性を検討する上では、個々の拡散パターンの再現性を調べるのではなく、実測で得られた種々の拡散パターンを包絡する範囲を原型における温排水の影響範囲と考え、この範囲の再現性を検討すべきであろう。図-7、図-8に、歪み度の異なる三種類の模型で得られた表層1℃および2℃の包絡範囲と、現地実測結果とを比較して示す。

歪み度5および10の水理模型で得られた水温上昇範囲には大差がなく、実測結果をほぼ包含しており、模型上に原型の水温上昇域がほぼ再現されているものと考えられる。一方、歪み度20の水理模型で得られた水温上昇範囲は、他の2つの模型で得られた結果にくらべきわめて大きく、歪み度の相違による影響が顕著にあらわれ、実現象の再現度はきわめて低い。

樋口らは、乱流拡散現象を再現するため、拡散係数の $\frac{1}{3}$ 乗則と、原型・模型でのエネルギー逸散率が等しいとの仮定から、次式を提案している。

$$\frac{Z_p}{Z_m} = \left( \frac{X_p}{X_m} \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)によれば、水平縮尺が $\frac{1}{1000}$ の模型においては歪み度は10となるが、本実験結果によれば式(4)を満足しない歪み度5の模型においても再現性は良好であり、模型の歪み度の決定に際しては、ある程度の自由度が許容されるものと考えられる。しかし、模型の歪み度はフルードの相似則に従う放水量を大きく変化させるため、特に温排水実験の場合には歪み度の設定に十分注意を必要とする。歪み度20の水理模型における実現象再現度の低下は、この原因によるものと考えられる。

以上の結果から判断して、潮流が卓越する海域での温排水拡散現象は歪み模型上に再現可能であり、この程度の時間・空間スケールを有する拡散現象に対しては、水理模型による拡散予測手法の適用が可能であるものと考えられる。しかし、温排水の場合には、模型上でもかなりの放水量を有しており、通常用いられる水平縮尺 $\frac{1}{1000}$ 程度のフルード模型においては、粘性や表面張力の影響が無視できる範囲内で模型の歪み度を10以下に設定する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 和田明, 加藤正進: 第22回海岸工学講演会論文集, 1975, pp. 227~231
- 2) 樋口明生, 柳哲雄, 柏井誠: 第21回海岸工学講演会論文集, 1974, pp. 361~365
- 3) 和田明, 加藤正進, 片野尚明: 第20回海岸工学講演会論文集, 1973, pp. 215~220
- 4) 速水頌一郎, 樋口明生, 吉田幸三: 京大防災研究所年報第2号, 昭和33年12月, pp. 83~95.
- 5) 堀川清司, 梶浦欣二郎, 相田勇, 長谷直樹: 第11回海岸工学講演会講演集, 1964, pp. 118~125
- 6) 樋口明生, 杉本隆成: 京大防災研究所年報第13号B, 昭和45年3月, pp. 457~470

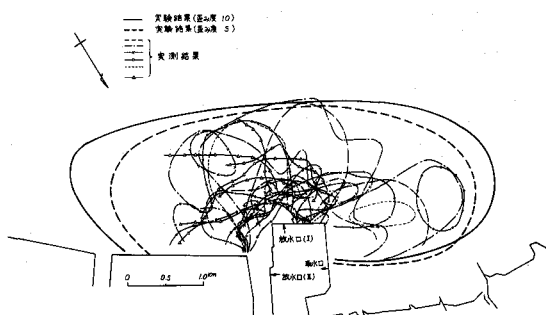


図-7 表層1℃上昇域の再現性

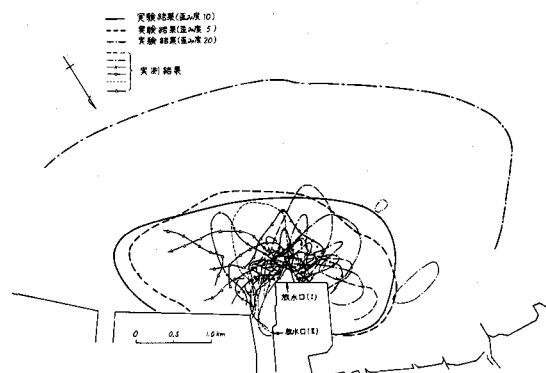


図-8 表層2℃上昇域の再現性