

(財)電力中央研究所	正会員	和田 明
同 上	正会員	○加藤正進
同 上	正会員	片野尚明
同 上	正会員	田中寛好

1. はじめに

近年、電力需要の急激な増大に伴い、これに対処すべく臨海に立地した大出力の火力・原子力発電所の建設が進められているが、大量に使用される冷却用水は海水に依存しており復水器を通過してあたためられた冷却水は温排水として再び海へと放水される。

拡散予測手法としての水理模型実験は、実現象を模型上に再現するための相似則の適用に誤りがなければ拡散現象や流況を動的現象として直接具視することが可能であり、局所的な現象も再現できるなど数値模型実験とは異なる利点を有している。しかし沿岸海域における温排水の拡散現象はきわめて複雑であり、また拡散過程に影響をおよぼす因子も多種多様であるから、水理模型実験を温排水拡散予測の手法として用いるためには、できうる限り現地での観測調査を実施して拡散過程の資料を集積し、対象とする現象に応じてその現象を支配する諸因子を明らかにしこれらの因子を模型上に再現するための相似則を確立しなければならない。

本研究は、潮流流が卓越した海域に適用される潮汐水理模型において、潮流の流跡や地形性の反流などの平均的な流況がどの程度再現できるか、また沿岸海域における温排水拡散過程において重要な役割を占める数10分から数時間の変動周期を有する中規模な水平乱れがどの程度再現されるかを調べ、沿岸海洋現象の再現性を検討し潮汐水理模型による温排水拡散予測手法の確立を目的とするものである。

2. 実験装置と実験手法

実験に用いた水槽は、長さ20m、巾10m、高さ1mで片端にニューマティックタイプの起潮装置を有する水槽と、長さ15m、巾7.5m、高さ60cmで片端にプランジャータイプの起潮装置を有し、さらにポンプによる往復流発生装置もそなえた水槽である。図-1に実験水槽および起潮装置の概略を示す。潮流の流跡や地形性の反流などの平均的な流況の測定は、抵抗羽根を取り付けたフロートを実測の投入時刻に相当する時刻に投入し、フロートの動きを上方より連続的に写真撮影する方法を用いて行われた。

模型水槽内における水平流速変動の測定は、超音波式流速計を用いて行われた。図-2は超音波流速計のプロブであ

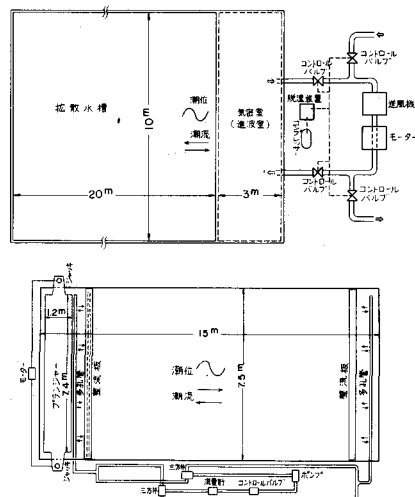


図-1 実験水槽および起潮装置

る。超音波流速計の主な仕様は次のとおりである。

測定範囲：0 ～ ± 10 cm/sec
0 ～ ± 20 cm/sec (レンジ切替方式)

測定成分：2成分 応答度：50 Hz

潮汐水理模型における水平流速変動は、流速計の出力をデーターロガーに送り10秒間隔でサンプリングし原型で1週間程度に相当する2～3時間連続で測定し測定結果を統計解析してその特性を調べた。

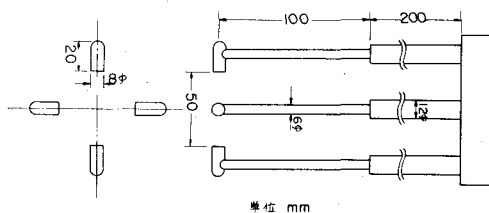


図-2 超音波流速計プローブ

3. 平均的な流況の再現性

水理実験が実際の現象を再現するためには原型と模型との間に力学的相似律が成立しなければならない。平均的な流況は、水平方向に卓越しているから、運動方程式は鉛直方向に平均化したものを考え、圧力は静水圧分布とし海底摩擦だけを考慮すれば次式であらわされる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \alpha U \frac{\partial U}{\partial x} + \beta V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{C}{2h} U^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \gamma U \frac{\partial V}{\partial x} + \delta V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{C}{2h} V^2 \quad (2)$$

ここで、

U, V : x, y 方向の平均流速

η : 水面昇降量, C : 海底摩擦係数, h : 水深

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 流速の鉛直分布に関する係数

g : 重力加速度

上式より、原型と模型との比を $Xr = Xp/Xm$ というように表示すれば次の相似則が得られる。

$$Ur = Vr = h_r^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$tr = Xr \cdot h_r^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$Cr = Xr^{-1} \cdot h_r \quad (5)$$

(4) 式はいわゆるフルードの相似則であり、(5) 式は摩擦抵抗に関する相似則を示している。

(1), (2) 式においては、コリオリの力は考慮していないが、一般に模型においてはコリオリの力は再現できずコリオリの力を無視することができる広さの海域を実験対象とすべきである。

図-3 は、M 地点の潮汐水理模型で得られた平均的な流況と現地実測で得られた平均的な流況とを比較したも

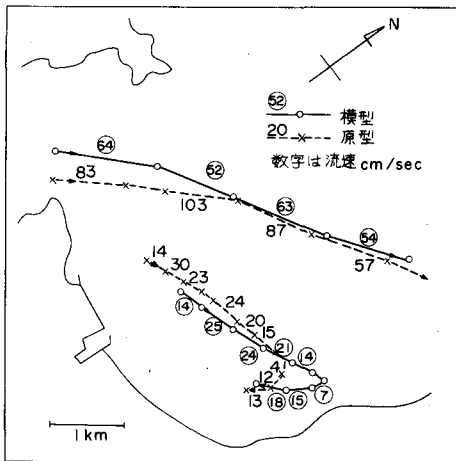
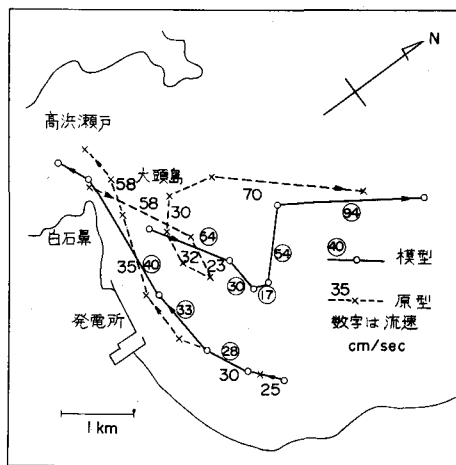


図-3 平均流況の比較

のである。なお流速の値は、フルードの相似則を用いて原型の値に換算してある。

M地点の潮汐水理模型は、水平縮尺 $1/1000$ 、鉛直縮尺 $1/200$ の歪模型であり、原型の摩擦係数は明らかでないため海底はモルタルハケ仕上とした。実験結果によれば沿岸付近の潮流の流跡や沖合での潮流の流跡がよく再現されており、流速の値もよく再現されている。また、漲潮時後期に沿岸付近で発生する地形性の反流がよく再現されており、島の背後に発生する後流もやや不十分であるが再現されている。樋口、杉本の実験結果によっても、潮流流跡や湾口、港口付近に発生する地形性の渦流や反流などの平均的流況がよく再現されており、これら平均的な流況はフルードの相似則を用いることによりほぼ再現することが可能であると思われる。

4. 沿岸海域の水平乱れの構造

沿岸海域における温排水の拡散過程においては、マイクロというよりはむしろメソスケールの水平乱れが重要な役割を占めており、筆者らはわが国沿岸海域における水平流速変動の長時間連続観測記録を統計解析し沿岸海域におけるメソスケールの水平乱流構造の把握につとめてきた。

海域に固定された自記流速計により観測される水平流速の変動は、恒流成分 U_0 、潮流による振動流成分 $U_T(t)$ 、および変動成分 $U'(t)$ の和で表現することができる。

$$U(t) = U_0 + \Sigma U_T(t) + U'(t) \quad (6)$$

水平乱れの構造は、次式で示される自己相関関数やエネルギースペクトル関数に顕著にあらわれる。

$$R(\tau) = \overline{U(t)U(t+\tau)} \quad (7) \quad P(f) = 4 \int_0^\infty R(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau \quad (8)$$

筆者らが得たわが国沿岸海域での自己相関関数は二つの型に分類される。一つは指数関数的に減少するタイプであり、他の一つは余弦関数的に振動するタイプである。前者のタイプはランダムな過程が卓越した海域を意味しており、本邦銚子沖よりむつ海域にかけての太平洋岸、日本海側および北海道沿岸でみられ、後者のタイプは任意の振動周期を有する振動流の上にランダムな過程が重畳されている海域を意味し、瀬戸内海などのように半日周潮流が卓越した海域に特徴的にみとめられる。

潮汐水理模型実験による拡散予測の手法は、後者の余弦関数型の自己相関関数を有する海域に適用される手法であり、ランダムな過程が卓越する海域に適用することはむずかしい。ここで注意しなければならないことは、1日程度の流速記録の調和解析により周期成分を求めても海域の特性は十分把握できないことである。このため十分長時間の観測を実施し海域の特性を把握する必要がある。

観測期間中における水平乱れの強さはきわめて大きく、乱流自身は等方性ではない。つまり沿岸に直角方向の空間スケールが平行なものに比べ小さいことにも起因し水平方向の等方性が失われている。

また水平乱れの強さは海面から海底に向い減衰していることがみとめられる。

エネルギースペクトルは、日周潮流、半日周潮流に相当する周波数においてエネルギーの集中がみられるが、さらに短い周期に相当する周波数においてもスペクトルのピークが存在している。

エネルギースペクトルの高周波側においては、スペクトルは乱流相似理論による $-5/3$ 乗則を近似的に満足して減衰している。これらの特性はのちに述べる M 地点、S 地点においてもみとめられる。

5. 水平乱れの再現性

潮汐水理模型における流速変動の測定は、流れの速度が小さいことや往復流であることなどに起因して筆者らが知る範囲ではほとんど行われていない。

しかし、沿岸海域における温排水拡散過程においては、数10分から数時間の変動周期を有する水平乱れが重要な役割を占めており、潮汐水理模型においてこれらの水平乱れがどの程度再現可能であることを明らかにする必要がある。筆者らは、潮流の流跡や地形性の反流など平均的な流況が十分に再現されている2地点の潮汐水理模型において、超音波流速計を用いて流速変動の測定を試み水平乱れの再現性を調べてみた。

5.1 実験対象地点の特性

実験対象地点は、*M*地点および*S*地点であり両地点とも水平縮尺 $1/1000$ 、鉛直縮尺 $1/200$ の歪模型を用いて実験が行われた。*M*地点は図-4に示すように複雑な海岸地形と海底地形を有しており、島や岩礁の影響も与える急深な地点であり潮流流速もかなり大きい。

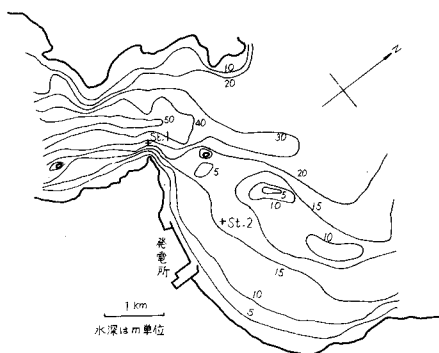


図-4 *M*地点地形図

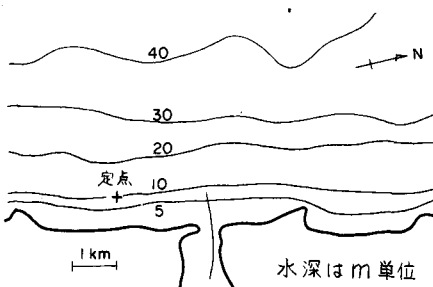


図-5 *S*地点地形図

原型における流速変動の長時間連続観測は、図-4の*St.1*で行われ海面下3mにおける観測値が得られた。一方*S*地点は図-5に示すように直接外海に面し、比較的平坦な海岸線を有し、海底地形もゆるやかな勾配で変化している。潮流流速は*M*地点にくらべ速くはない。流速変動の長時間連続観測は図-5の定点で行われ、*M*地点と同様に海面下3mの観測値が得られた。

原型においては、潮流による乱流境界層が周期的に発達減衰をくり返しているものと考えられ、潮流の振巾 u_0 、水分子の最大移動距離 l_0 を用いたレイノルズ数 Re が $Re = u_0 l_0 / \nu \cong 10^5$ で乱流に遷移するといわれている。このため模型内で十分に乱れが発達するためには $u_{0m} \cdot l_{0m} / \nu > 10^5$ という条件が必要であるといわれている。

*M*地点の潮汐水理模型においては、原型の潮流振巾が大きいため模型におけるレイノルズ数は $Re = 10^6$ で必要条件を十分に満足している。一方*S*地点の潮汐水理模型においては潮流振巾がそれほど大きくないため模型におけるレイノルズ数は $Re = 10^5$ 程度である。

5.2 実験結果

潮汐水理模型における流速変動の測定にあたり、筆者らは当初実験自身の再現性、つまり同一条件の実験において常に同様な水平乱れの構造が得られるかどうかを懸念し2度の実験により実験自身の再現性を調べてみた。この結果、自己相関関数およびエネルギースペクトル関数はほぼ同一であることが明らかとなり潮汐水理実験自身の再現性は十分であることが確認された。

*M*地点の海域で得られた流速変動の自己相関関数は図-6に示すように余弦関数型の自己相関関数を有しており、半日周潮流の振動周期に相当する約12時間の周期で規則正しく振動している。

一方、図-7に示した原型のエネルギースペクトル関数は、約12時間の周期に相当する周波数のところにスペクトルの大きなピークが存在し半日周潮流にエネルギーが集中していることを示している。この結果からM地点の海域においては半日周潮流が卓越していることは明らかであり、潮汐水利模型においては半日周潮流を模型縮尺に従ってニューマティックタイプの潮汐発生装置により模擬発生させた。

図-6は原型および模型で得られた自己相関関数を比較したものである。この結果、模型で得られた自己相関関数は原型のそれとほぼ同一であり約12時間の振動周期で振動している。

図-7は原型および模型で得られたエネルギースペクトルを比較したものである。

図によれば、潮流を含む比較的大きな規模の水平乱れの構造を示すスペクトルの低周波側において半日周潮流の周期に相当する周波数の所で、スペクトルの大きなピークが再現され、流れの主流方向と直角方向での水平乱れの異方性の程度もほぼ再現されている。

原型のエネルギースペクトルの高周波側には地形性の渦流によるものと思われるスペクトルのピークが約2.5, 1.5, 1時間の周期に相当する周波数に存在するが、これらのピークが模型上によく再現されている。

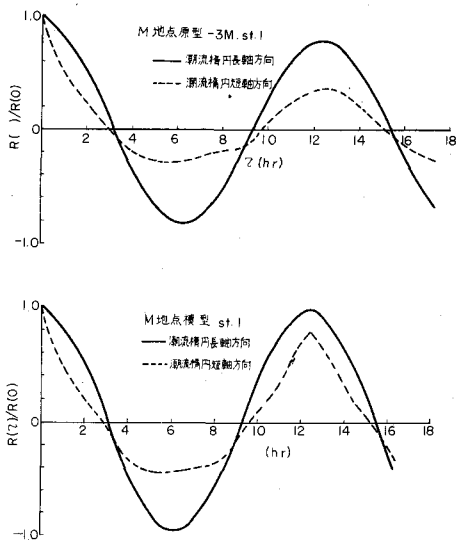


図-6 自己相関関数の比較(M地点)

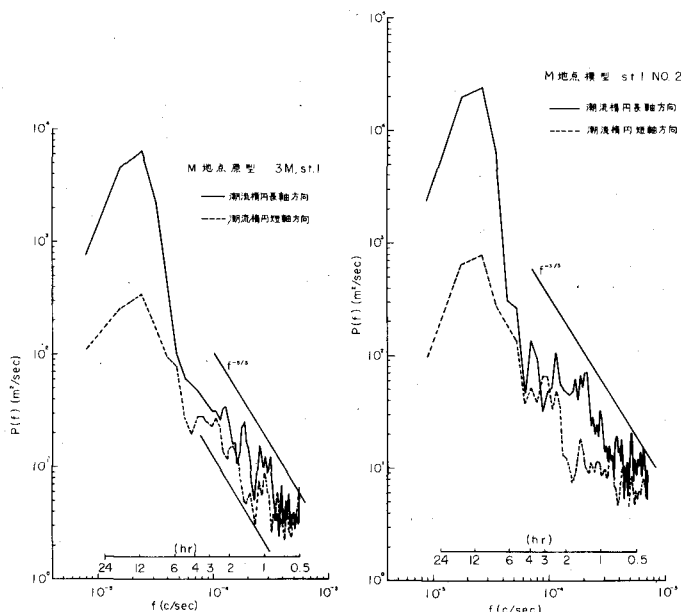


図-7 エネルギースペクトルの比較(M地点)

また、スペクトルの高周波側においては、原型同様水平乱れの構造は等方性に近づき乱流相似理論による $-5/3$ 乗則が再現されている。以上の結果、M地点の模型においては大潮時に相当する潮流振巾で実験が行われたためエネルギーレベルは原型といくぶん異なるが、スペクトルの形はきわめて類似しており水平乱れの特性をよく再現していることが明らかとなった。

図-8は、S地点の原型および模型で得られたエネルギースペクトルを比較したものである。

S地点の海域においては、原型のエネルギースペクトルにみられるように半日周潮流へのエネルギーの集中はM地点ほどではなく、日周潮流などより長い周期の変動成分もかなりのエネルギーを有し

ている。又、 S 地点の海域における水平乱れは比較的低周波側まで等方向性が保たれている。

S 地点の潮汐水理模型においては、プランジャーと潮流発生装置を併用し、半日周潮流のみを模擬発生させて実験が行われた。

実験の結果、 N 方向（沿岸にほぼ平行方向）のエネルギースペクトルは低周波側（変動周期が数時間以上）において原型をよく再現しているが、 E 方向（沿岸にほぼ直角方向）のエネルギースペクトルは原型にくらべエネルギーレ

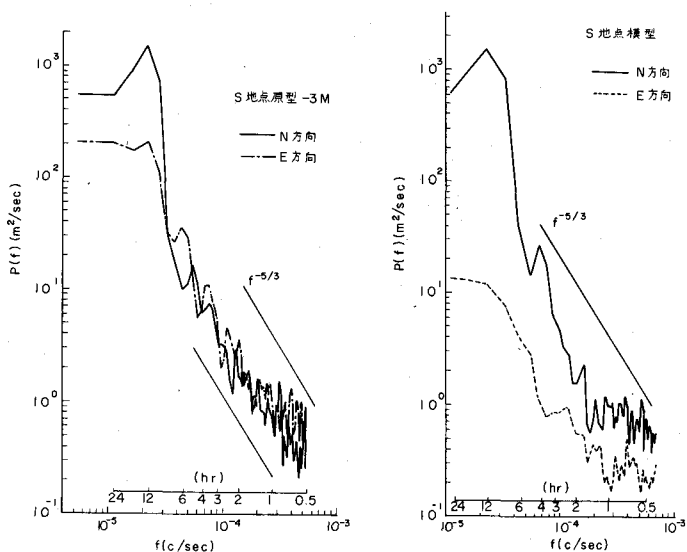


図-8 エネルギースペクトルの比較（ S 地点）

ルがかなり低い結果を示している。このため模型における水平乱れの構造は原型にくらべ異方向性の程度が強いことが見出された。また、スペクトルの高周波側においては、 N 方向、 E 方向とも $-5/3$ 乗則の再現は十分ではない。この原因は模型における乱れの発達が十分ではないことに基づいているものと考えられる。 S 地点同様、比較的 low 周波側まで等方向性が保たれ、半日周潮流成分がそれほど卓越しておらず日周潮流成分もかなり認められる海域の模型における最近の実験結果によれば、半日周潮流と日周潮流を合成して模擬発生することにより異方向性の程度は減少し原型に近い水平乱れの構造が得られるようであり、潮流発生工夫によりより原型に近い水平乱流構造の再現も期待できる。

6. あとがき

潮汐水理模型実験による沿岸海洋現象の再現性を検討した結果、平均的な流況はフルードの相似則により再現可能であり、水平乱れの構造も対象海域の特性により問題点は残されているがほぼ再現可能であることが明らかとなった。しかし、温排水放水による放水口付近での3次元的な連行現象などの密度流現象や、歪の影響さらには大気と海面における熱収支の問題などは今のところ明らかではなく今後の研究課題である。

参考文献

- 1) 和田明・片野尚明：海域での温排水拡散におよぼす流れの影響，電力中央研究所技術第2研究所研究報告 71008，1972.
- 2) 加藤正進・和田明・片野尚明：潮汐水理模型による拡散予測（その2），電力中央研究所技術第2研究所研究報告 73007，1973.
- 3) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水理模型実験について(Ⅳ)，京大防災研年報，13号B，1970.