

不規則に変動する流れ場における温排水拡散

Thermal Diffusion in the Flow Varying Irregularly

三菱重工業(株) 高砂研究所 正員 吉井総介

1. まえがき

最近、我国の発電所は日本海、太平洋沿岸など外洋に面した地点に建設されることが多いが、このような外洋沿岸の流れは、内海、内湾における潮流のように、特定の周期成分が卓越することはほとんどなく、海流の長期的な時間変動や風の影響を受けて、時間と共に不規則に変動する流れとなつてることが多い。(以下、このような流れ場を不規則流況場と称する。)そして、日本海沿岸では潮汐の影響が小さく、流れは殆どが不規則に変動する恒流成分で構成され、太平洋沿岸では、潮流と不規則に変動する恒流が地形効果をも含めて複雑に絡みあつた流れの発生がみられる。

一般に、海域における温排水拡散を詳細に予測する手法として、水理模型実験手法と数理解析手法が存在するが、このような不規則に変動する流れ場を対象としては、数理解析手法では不規則流況場の恒流分のみ流れとして再現し、残りの不規則変動成分を拡散係数に置き換えるというモデル化が行なわれ⁽¹⁾、また、水理模型実験手法では、放水口を挟んで左右方向、沖合方向への各々の平均流としての一方向流れ場での拡散範囲を組み合せるという方法が行なわれてきた。これらの予測手法の正しさを確認するには、現地での温排水拡散範囲の実測値との比較検証が必要であるが、不規則流況場での実測には多大の時間を要するため、得られるデータは一時期のものが多く、予測と実測の比較検証は充分であつたとは言ひ難い。

そこで、本研究では、現地で計測した不規則流況を実験室内の水路に再現し、この中で温排水の拡散状況を調査し、従来手法による予測値と比較検証し、種々の観点から検討を行なつた結果、幾つかの興味深い結論が得られたので、ここに報告する次第である。

2. 実験装置と実験条件

2.1 実験装置

図1に実験装置を示す。使用した実験水路は長さ20m、巾6m、深さ0.4mである。水路内の流れは、図中の潮流ポンプと切替弁によつて作られる。切替弁には入口、出口が、各々2ヶあり、ポンプと水路端の整流箱へ接続されており、切替弁の動きによつて水路内の流れが反転できるようになっている。また、切替弁は油圧シリンダを通して、ミニコンピュータ(OKITAC 4300C)により指示される油圧サーボ装置により駆動され

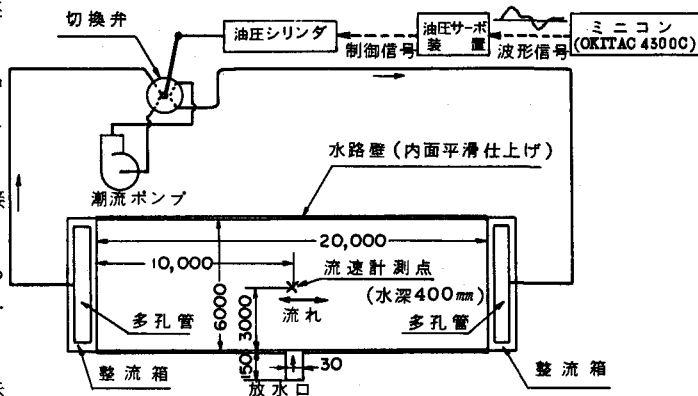


図1 実験装置

コンピュータに出力信号を事前に記憶させておけば、ポンプと切替弁の動きにより、水路内に、所要の流れが発生するようになっている。尚、潮位などの水位変動は再現しない。

模型温排水は表層放流することとし、図1に示すように、水路側壁中央に巾3cm、長さ15cm、水深2cmの放水路を設置した。放水路には温水注入孔のすぐ下流に潜堤が設置されている。

水路内の流速は水路中央に設置された超音波流速計で計測し、温度計測は水面下5mmに設置された約50

本の精密サーミスタにより行なつた。サーミスタはコンピュータに接続され、温度計測結果は約1秒間に10回の計測を行なつた平均値として与えられる。

2.2 実験条件

実験水路内へ再現する流況は、任意に作ることもできるが、ここでは、現地で計測されたものを使うこととし、昭和52年11月14日19時20分～11月29日8時までの約14.5日にわたつて、若狭湾にて計測されたデータを用いた。この流況を図2に示す。この流況が不規則流況であると判断したのは、データのフーリエ解析結果においても、また、エネルギースペクトルにおいても顕著な卓越周期成分がみられなかつたことによる。

また、実験対象とする温排水の流量は現地換算にて $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 、放水差温は 7°C とした。また、その放流方法は水面へ放流する表層放流方式とする。

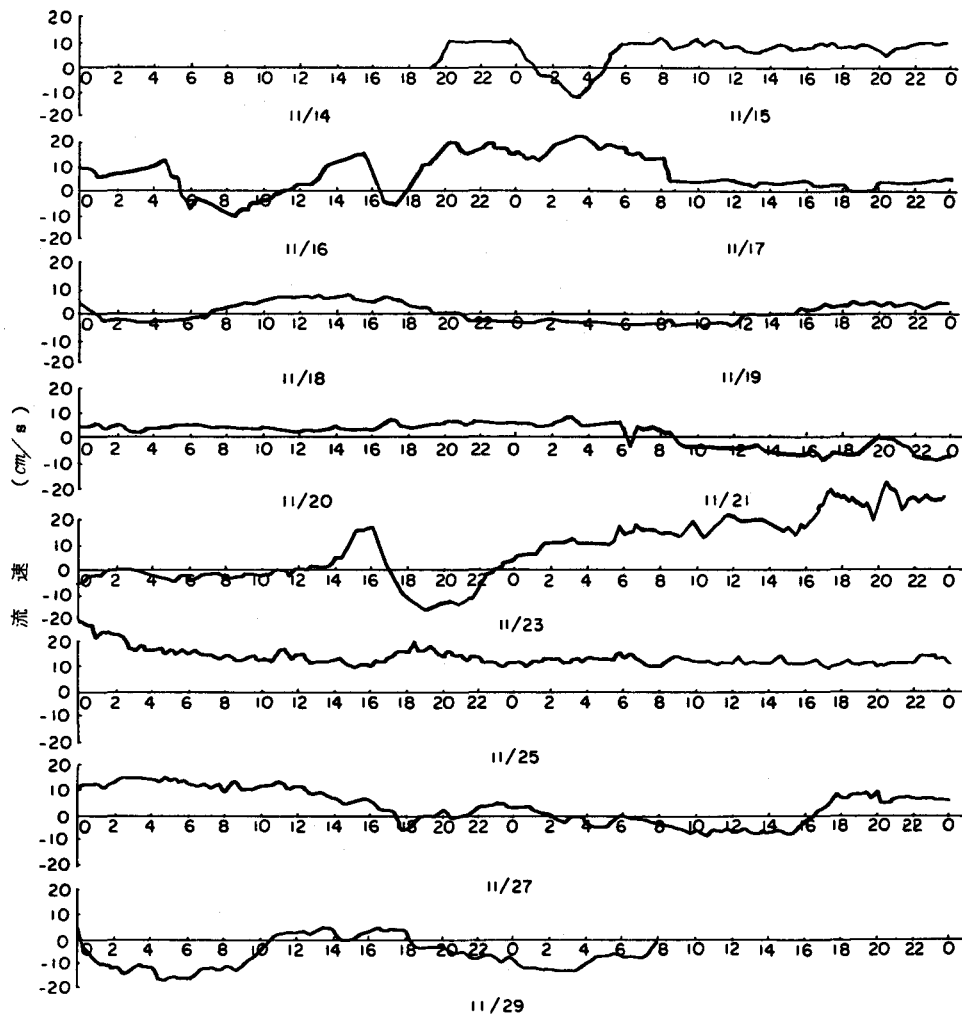


図2 現地海域での不規則流況計測データ

3. 実験相似則と実験方法

現地海域の状況を模型上で実験調査する場合、現象の再現性をしるために実験相似則の検討が必要である。樋口⁽²⁾は、フルード則を主体とした歪水理模型実験の相似則を集大成し、また、和田、加藤⁽³⁾は表層放流温

排水を対象として歪水理模型実験を行ない、現地実測と模型による予測の比較を行ない、その整合性を確認している。以下に、これらの報告による相似則の結果のみを示す。

$$(1) \text{ フルード則} \quad u_r = \sqrt{h_r} \quad (1)$$

$$(2) \text{ 抵抗係数の相似則} \quad f_r = h_r / x_r \quad (2)$$

$$(3) \text{ 拡散係数の相似則} \quad K_r = x_r \sqrt{h_r} \quad (3)$$

$$(4) \text{ 歪率の設定} \quad \begin{cases} x_r = h_r^{3/2} & (\text{樋口による}) \\ h_r / x_r \leq 10 & (\text{和田による}) \end{cases} \quad (4) \quad (5)$$

ここに、 $\begin{cases} x_r : \text{水平方向縮尺} & h_r : \text{水深方向縮尺} & u_r : \text{流速縮尺} \\ K_r : \text{拡散係数試尺} & \text{添字 } r : (\text{模型値/現地値}) \end{cases}$ を示す。

本研究では現地の約 1 4.5 日間の流況を実験水路の中へ再現し、その中で温排水挙動を調べることを目的とする為、上記諸条件を満足するものとして、水平方向縮尺 $1/1000$ 、水深方向縮尺 $1/100$ の歪水理模型を設定した。これによれば、現地の 1 4.5 日は水路の中で約 3.5 時間となる。

そして、現象を単純化して捉えるため、水路の巾方向の流速は一様分布とした。また、図 2 に示す流況の低流速の部分の再現性を良くする為、図 2 に示す流速値を 1.3 倍したものを、水路内へ再現することとした。この結果、水路内での温排水拡散の調査結果は、このようなモデル化された流れ場を有する現地水域を想定し、適用していることになるが、この適用性については既に調査されているから⁽³⁾、この結果を正として従来の予測手法による結果との比較を行なうことができる。

4. 不規則流況の模型水路への再現性

不規則流況を実験水路へ再現するには、図 2 の流速曲線のフーリエ解析による周期成分の抽出と、図 1 に示した実験装置の配管系の応答システムの解析が必要である。

フーリエ解析の結果として、図 2 の流速曲線は顕著な周期成分を有しないことがわかり、かつ、流速振巾が 0.4 cm/s 以上の 60 ケのフーリエ係数を再合成すると、図 2 の流速曲線を良く近似できることが判明した。この 60 ケのフーリエ係数と、実験装置の配管系の信号伝達特性を利用して、水槽内に再現された流れと現地の不規則流れを比較した結果の一例を図 3 に示す。但し、水路内へ再現する流れは図 2 の流速値の 1.3 倍とし、図 3 にはこれが補正されている。

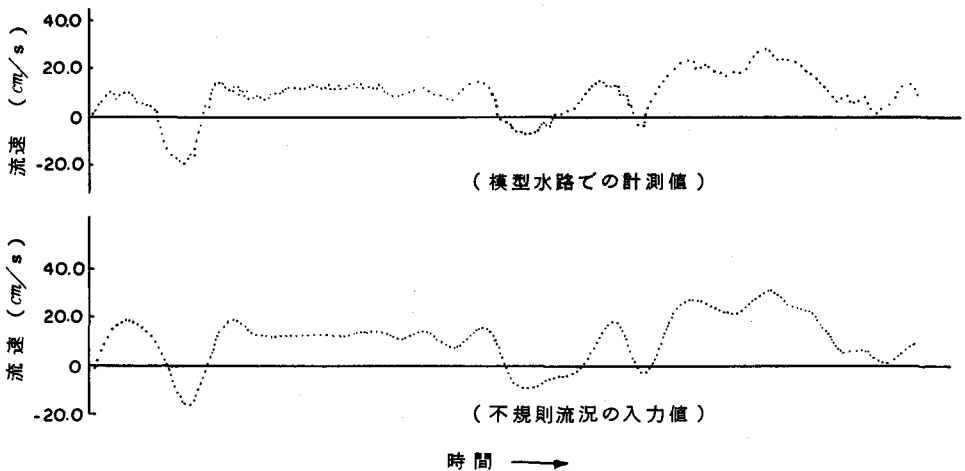


図 3 不規則流況再現度の例

図 3 でわかるように、実験水路内には現地の不規則流況が非常に良く再現されていることがわかるが、これを流れのエネルギースペクトルと比較すると、図 4、図 5 となる。

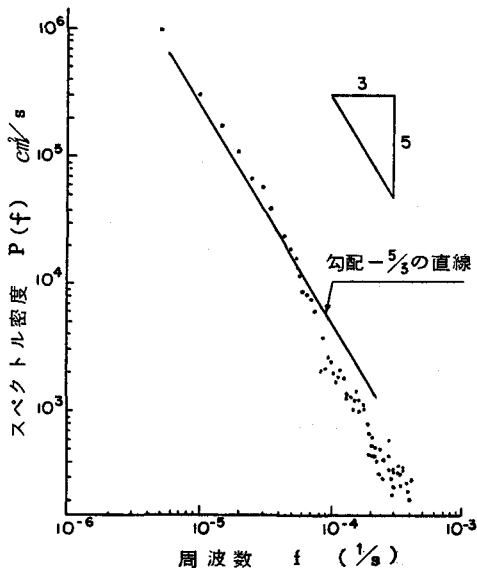


図4 原型データ(図2)のスペクトル密度

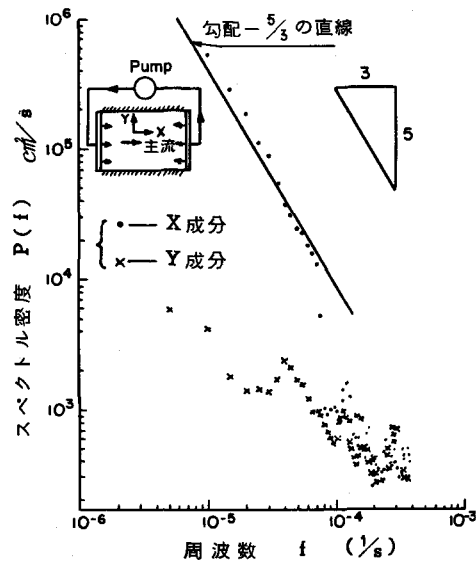


図5 模型実験水路のスペクトル密度

図4の現地のエネルギースペクトルをみてわかるように、顕著なエネルギーピークは全く存在せず、図2に示した流れが不規則流況であることが、これからも確認される。図5は模型実験水路に再現された不規則流況のエネルギースペクトルを表わしている。これによれば水路の主流方向の流れの反転により、沖合方向(図5に示すY方向)への流れがわずかに発生するものの、主流方向のエネルギースペクトルは図4に示す現地のそれとほぼ同じ形態を示している。ただ、図4は図2のスペクトルであり、模型水路には図2の1.3倍の流速値を再現しているため、スペクトル密度の値が少し違っているが、この点を補正すれば、ほぼ同じ値となる。

尚、模型水路には現地の流れをフーリエ解析した結果を60次まで再現しているが、使用したフーリエ波の最小周期が現地換算で約4時間であつた為、これ以下の周期におけるエネルギースペクトルが、現地よりは少し小さいことが図5からわかる。実際に、どの程度の周波数の流れまでを再現すべきかについては、種々、議論のある処であるが、ここでは、図4、図5に示す両者の流れの流速データから拡散係数その他を求めて比較し、両者の一致度からみて、対象とする温排水の拡散状況を調べるのに十分な流れが模型実験水路へ再現されていると判断した。

両者の拡散係数の計算結果を表1に示すが、非常に良い一致がみられる。

表1 拡散係数の計算結果

	12時間以上の周期成分除去の場合	24時間以上の周期成分除去の場合
現地(原型)	$4.1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$	$1.6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$
実験水路(模型)	$4.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$	$1.8 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$

(模型値は現地換算値である)

5. 不規則流況場の温排水拡散

模型実験水路へ再現された不規則流況は現地に換算して約14.5日にわたるものであるが、これを2時間間隔に等分割して、模型水面下5mm(現地換算50cm)における水温分布を計測し、現地換算で流量30m³/s、放水差温7℃の温排水の拡散域を調査した。各々の水温計測点では、現地換算で2時間ごとの計測により、非常に多くの水温上昇計測データが得られる訳であるが、その中の最大値を取り出して、対象水域において、環境水温より1℃、2℃上昇する範囲を求めると図6となる。図6は瞬間ごとの等温線を示し

ているのではなく、温排水の拡がる全範囲を包絡した形で示している。この表示方法は最大包絡拡散範囲といわれ、温排水の拡散範囲を表わすのにしばしば用いられるが、不規則流況の場合、特に有効である。そこで、以下に示す従来の予測手法においても、結果をこの方式で表示して、図6と相互比較することとした。

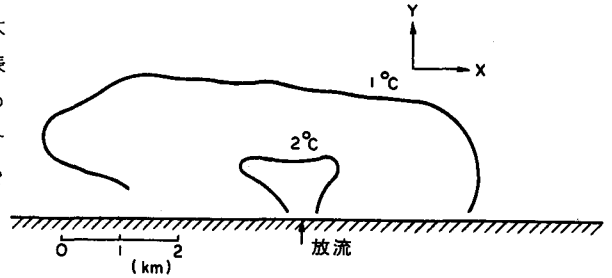


図6 不規則流況場の温排水拡散範囲

6. 従来手法による温排水拡散予測

6.1 数理解析による方法

この方法は和田らにより提唱され⁽¹⁾、不規則な流れを一種の大きな渦の集まりとし、この作用を拡散係数の形で表わして計算を行なうものである。このとき、不規則流況の解析から求めた拡散係数値に自然現象の変動性を考慮して上下にOne Orderの幅を持たせて検討することと、恒流の存在する海域では、これを考慮した場合と考慮しない場合を考えて検討しそれらの解を包絡して拡散範囲とすることになっている。ここでは、実際に数理解析を行わずに、和田ら⁽⁴⁾により提案された計算図表を利用して拡散範囲を求めてみた。

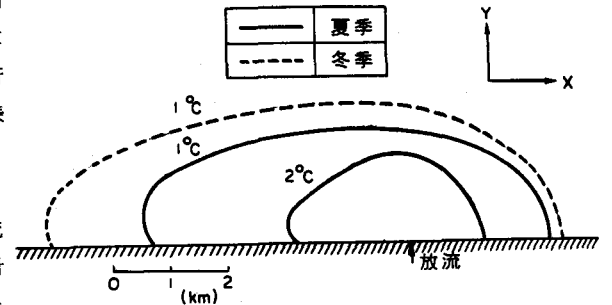


図7 数理解析による拡散範囲予測値

この海域の拡散係数は表1から、 $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度とみてよく、右から左へ約 7 cm/s の恒流が存在する。この条件のもとに、和田らの計算図表から概略の拡散範囲を求めると図7となる。夏季と冬季の解が計算図表から得られる。

図7で、沖合方向へは冬季の解が図6と良く一致し、左方向へは夏季の解が良く一致する。しかし、右方向の拡散については、いずれも少し図6よりも小さい傾向がある。これは恒流値として観測期間全体の平均恒流を用いているためで、観測期間を幾つかの区間に区切って各々の恒流を求め、これによる計算解を加味して検討すれば、図7は図6の拡散域を内に含んだ包絡範囲として一致度がよくなると思われる。尚、2°C上昇の範囲については、夏季のみを示しているが、これは充分、図6より大きな範囲となっている。

6.2 水理模型実験による方法

従来、水理模型実験で温排水拡散予測を行うとき、左右各方向への流れに分けて、一方向流れの実験を各々行なつて得られた拡散範囲を包絡するという方法が行なわれてきた。この場合、各々の方向への流速値が問題になるが、一般的には観測全期間の各々の方向への平均流速が用いられる。

本研究では、この流速値を種々変えて調査したが、拡散範囲がかなり変化することが見出された。そして今回の実験の範囲内では、観測全期間の平均恒流値より20~30%大きい流速値の時に拡散範囲が最も大きくなった。得られたこれらの拡散範囲を全て包絡すると図8の結果が得られた。図8は図6と平均的には一致するが、左方向への拡散範囲が少し小さい。

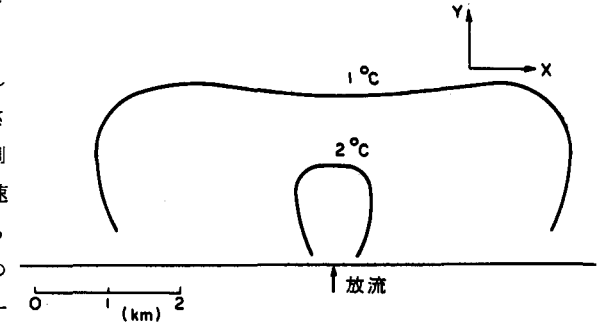


図8 一方向流れの水理模型実験による拡散範囲

このように、一方向流れの流速値を種々変えた実験により、図6と比較的一致する図8の結果が得られるならば、不規則流況場での温排水拡散の挙動を最大包絡拡散範囲という観点で再現しうるような場の流れとして、大きな周期の正弦状に変化する往復流を用いることも可能と考えられる。この往復流の仕様を求めるために、温排水拡散現象を非常にマクロに考え、温排水の拡散能力と、場の流れの移流能力と拡散希釈能力により温排水拡散範囲が定まるとする。図6の拡散範囲はそれらの相互作用により形成されている。

このとき、場の流れの移流距離が、図6の拡散範囲の左右方向への距離より小さいと、温排水は自由に拡がることを阻害され、流れに押し返され、図6とは異なつた拡散範囲が形成される。そこで、対象とする不規則流況の流れの反転ごとに、左右各方向への移流距離を計算し、その最大値を、流れに阻害されことなく自由に拡がった時の温排水拡散範囲の放水口からの距離(以下、これを拡散距離と呼ぶ)と比較し、その小さい方の値を移動距離とする往復流を模型上

へ設定すれば、不規則流況場の最大包絡としての温排水拡散範囲を模型実験で得ることができると考えられる。この考えに沿つて、図2に示す不規則流況から求めた往復流(周期28時間、最大流速 15.6 cm/s 、値は現地換算値)の場で温排水拡散範囲を調べた結果を図9に示す。

図9を図6と比較すると、沖合へのはり出しが少し小さいが、拡散範囲の形状、左右方向への拡がりの大きさは非常に良く図6と一致しており、上に述べた考え方が、ほぼ正しいものであつたと考えられる。

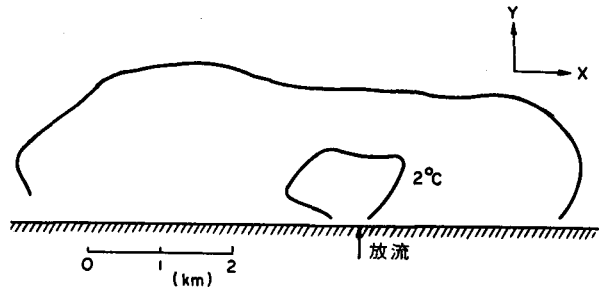


図9 往復流の水理模型実験による拡散範囲

7. まとめ

現地海域で実測された、時間と共に変動する流れを巾6 m、長さ20 m、水深0.4 mの実験水路内に、水平方向 $1/1000$ 、水深方向 $1/100$ の縮尺を設定して再現し、その中での温排水拡散範囲を調べ、この結果を従来からある温排水拡散予測手法による予測結果と比較し、次の結果を得た。尚、水路内へ再現された不規則流況は現地換算にして、約14.5日間の計測流況である。

1. 不規則流況は、フーリエ解析した結果の60次までのフーリエ波を流況再現装置のコンピュータで再合成して、機器を作動させることにより、実験水路内に精度よく再現できる。
2. 不規則流況の再現された水路内では、拡散係数、エネルギースペクトルも再現される。但し、60次をこえるフーリエ波の周波数帯のスペクトル密度は現地より小さい。
3. 従来からある温排水拡散予測手法による温排水拡散範囲の予測結果は不規則流況場のそれと、比較的よく一致する。
4. 水理模型実験手法で、流れの移流距離と温排水の拡散距離の関係を加味した正弦状変化の往復流方式の実験手法を提案し、その予測結果は不規則流況場のそれと良く一致することがわかつた。

〔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回海岸工学講演会論文集, 1975
2. 樋口明生: 潮流水理模型実験, 1974年度(第10回)水工学に関する夏季研修会講義集(Bコース), 1974
3. 和田明, 加藤正進, 片野尚明: 潮汐水理模型による拡散予測(その2), 第20回海岸工学講演会論文集, 1973
4. 和田明, 角湯正剛: 温排水拡散予測汎用計算図表の提案, 電力中央研究所報告No.375008, 1975