

砕波帯近傍における温排水の移流拡散に関する検討

(Study on Thermal Dispersion in and near the Surf Zone)

(財)電力中央研究所	正会員	○小森修蔵
同 上	同 上	田中寛好
同 上	同 上	和田 明

1. はじめに

温排水拡散予測に関する研究においては、対象地点海域の流れや乱れの特徴を把握した上で、その海域の拡散特性に応じた適切な拡散モデルを設定する必要がある。その拡散モデルの解明手法として、従来から、主として数値シミュレーションが行われてきており、潮流流等の恒流成分の卓越する海域での拡散現象については、水理模型実験をも併用してより確実な拡散予測を目指してきた。

しかるに、福島原子力地点のように潮流等による流れが微弱で恒流成分が明瞭でなく、しかも砕波帯内に温排水を放流しているような場合(図-1参照)は、波によって発生する海浜流の影響を受けて、従来のシミュレーション解析手法では説明が困難な拡散分布を呈する場合がある。このような地点では、海岸での砕波に伴う海浜流や段波さらには砕波帯外の不規則波浪が温排水拡散過程に及ぼす影響の把握が必要であり、そのためには、現地実測で確認を行ないながら模型実験によって現象の素過程を理解してゆく必要がある。

本報告では、東京電力K.K.の福島第一原子力発電所地点地先海域を対象として、現地の代表的な波浪スペクトル(平常時および高波時)を模型水槽内に再現し、それらの不規則波作用下での砕波帯内およびその近傍での温排水拡散、流動特性の総合的な考察を試み、あわせて現地実測による温排水拡散範囲を比較し、模型上での移流拡散挙動の再現性について検討するものである。

2. 福島海岸の海象調査結果の検討

2.1 流れの特性

福島海岸での温排水の拡散現象を数値的に解析するため、和田等¹⁾は沖合0.5 km~1.5 kmの範囲の数点(図-1参照)でこれまで10回以上にわたって実施した流速の長時間連続観測結果に基づいて統計的取扱いにより流れの各特性(自己相関係数、エネルギースペクトル等)を求めている。その一例として、図-2(a)に流れの自己相関曲線を、また、(b)には、それらの自己相関に基づいて算出したエネルギースペクトル分布を示したものである。この統計解析から、本海域においてはきわめて長期間にわたり相関が保たれていることが認められる。このような自己相関の挙動は、対象とする流れの中に大規模な速度変動が存在することを示している。したがって、前面海域の流れの特性としては、周期成分をもたない不規則な過程が卓越している乱れの場合であることが見出されている。また沿岸方向の乱れのエネルギー密度は、沿岸に直角方向のそれより数倍大きく、実測した長周期域

では等方向性がないといえる。沿岸方向の流速の時間的変化の様相は正弦的というよりはむしろ矩形的に変化している。なお、平均流速は、南北方向とも1.5~2.2 cm/secであり、南流が卓越している。

2.2 波浪の特性

福島地点における波浪観測は、昭和40年2月より実施されている。昭和40年2月より49年3月までの観測記録を検討す

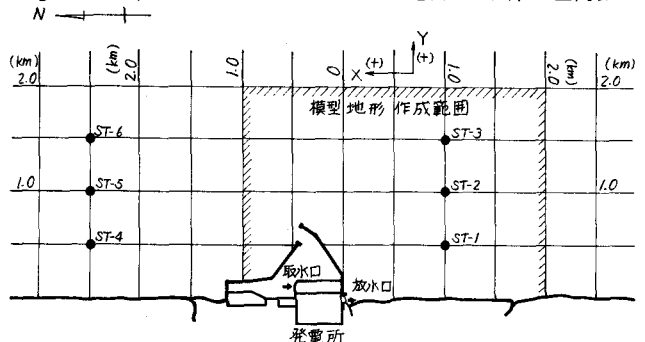


図-1 福島海岸における沖合流速調査定点位置図

ると、有義波高の出現頻度は1 m 近辺が最も多く、波高が大きくなるに従って出現頻度は低下する。周期の出現頻度についてみると、9.5～10.5 sec が最も多く27%，以下8.5～9.5 sec が21%，10.5～11.5 sec が19%，11.5～12.5 sec が12%であり、8.5～12.5 sec で全体の79%を占めている。波向については、E方向が61%で最も多く、冬季、夏季にそれぞれ頻度が高くなるENE、ESE方向がいずれも18%でこれに続いている。

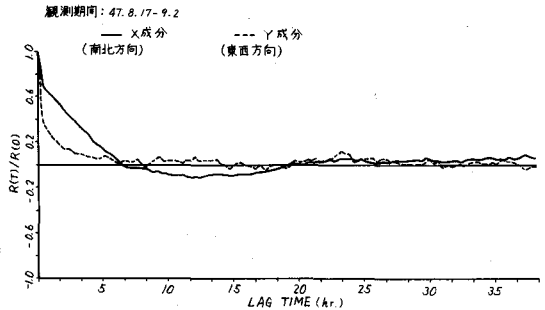


図-2 (a) 流速変動の自己相関曲線 (ST-1)
〔和田等による〕

3. 外海波浪実験設備による現地波浪の再現²⁾

現地の不規則波浪が海洋・海岸工学上の諸現象に与える影響を実験的に研究し解明するにあたっては、まず、現地の波浪を模型上に再現しなければならない。

現地波浪と同様な特性を有する波浪を実験室内で再現する試みは、これまで種々行なわれているが、その手法を大別すると、

- 1) 風洞水槽による方法 (すなわち、水面に風を吹かせて風波を発生させるかあるいはこれに規則波を重ねさせる方法)
- 2) 造波板を駆動するモーターの回転数を時々刻々変化させる方法
- 3) 数種類の正弦波を重ね合わせる方法
- 4) ランダム波を発生させる方法

になる。1)、2)は波浪スペクトルを任意に設定することはできないが、3)、4)の手法を用いると任意のスペクトル形をもつ波浪を実験室内で再現することが可能である。しかしながら、これまで報告されている研究成果では、スペクトル形の中高周波数領域についてはほぼ満足される結果となっているが、低周波数領域での近似についてはいまだ一歩の感がある。

実験に用いた外海波浪実験設備は任意のスペクトルを有する波浪を発生させることができる装置である。

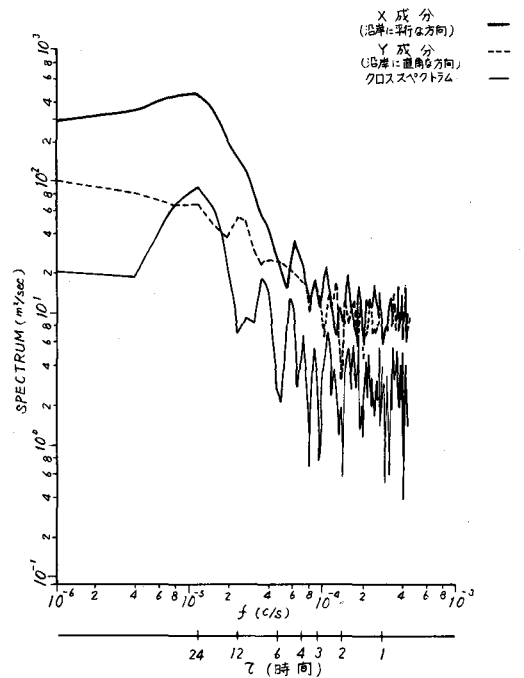


図-2 (b) 流速変動のエネルギースペクトル (ST-1) 〔和田等による〕

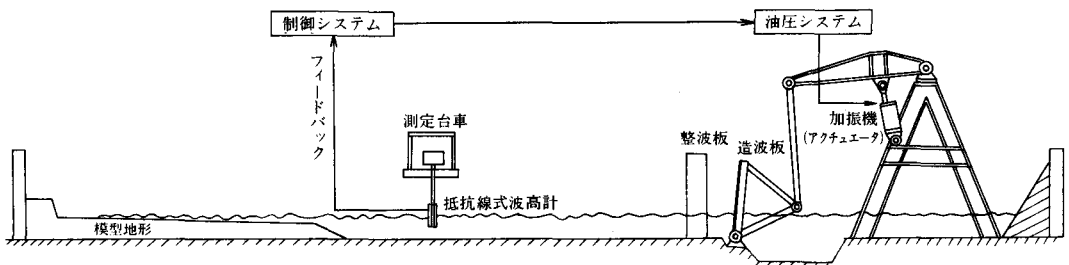


図-3 外海波浪実験設備の構成

外海波浪実験設備の構成は、図-3のようになっており、長さ50m、幅2.6m、高さ1.5mの平面水槽内に設置されている。

この設備は、

- (i) 直立フラップ型造波板（水中起伏式フラップ型造波板に取り替え可能）を有する造波機本体
- (ii) 電気—油圧サーボ機構を有する造波機駆動装置
- (iii) 電子計算機（HITAC 10）を本体とする制御システム

より成り立っている。

3.1 造波特性

まず、規則波の造波特性を求めるために、造波板の振幅と周波数との組合わせを変えて種々の規則波を起こし、発生波高を電気抵抗線式波高計で計測し、ペン書き記録計に収録した。水深は30cmであり、波高計を造波板の前面約30mの位置に設置した。一方、加振機のアクチュエーターの振幅から造波板の静水面での振幅を換算する。こうして求めた規則波の造波特性（ $f \sim H/S$ の関係、ここに、 H ：波高、 S ：造波板の静水面位置での全振幅）は、過去にBiéssel³⁾が理論的研究を行なって得た曲線とおおむねよい一致を示したが、長波領域（低周波数域）では実験値はかなり小さくなる傾向にある。このことから、直立フラップ型造波機は表面波発生には適しているが、長波発生に対しては効率が悪く、適していないことがわかる。

不規則波の造波特性は、造波板の平均水面における変位スペクトル Φ_S および発生波のスペクトル Φ_H を求め、 $\sqrt{\Phi_H/\Phi_S}$ と周波数の関係で示した。エネルギースペクトルの形、大きさの違いによる造波特性への影響を検討するために、エネルギースペクトルが大きく違う波を3種類発生させ、それぞれの $\sqrt{\Phi_H/\Phi_S}$ を求めたところ、 $f \sim \sqrt{\Phi_H/\Phi_S}$ の関係は、水深30cmでは、波浪スペクトルの形、大きさには関係なく、 f の一価関数になることが判明した（図-4参照）。また、造波特性の実験結果は、規則波に関するBiésselの理論値よりかなり小さくなっているが、これは不規則波では周波数相互間でのエネルギー移行がおこるため、また、造波運動の周期、振幅の変化に抗して波を起こすことになり、エネルギー消失が大きくなるため、造波効率が低下してくるものと考えられる。この結果は、規則波の造波特性がそのまま不規則波にも適用できるとしている従来の研究結果とは異なるものである。

3.2 波浪スペクトルの再現

次のとき過程で波浪スペクトルの再現を試みた（図-5参照）。

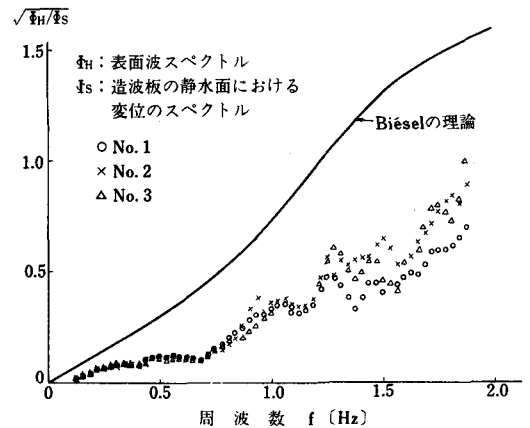
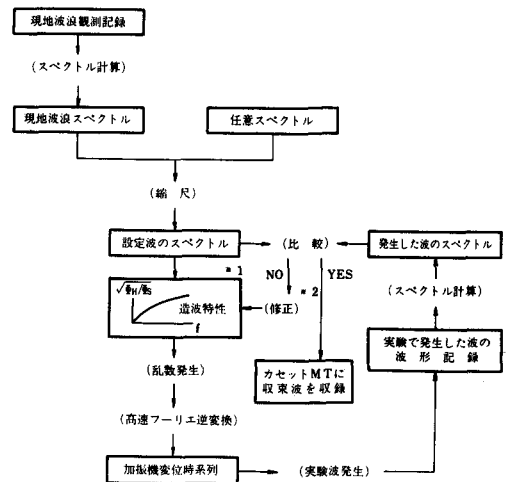
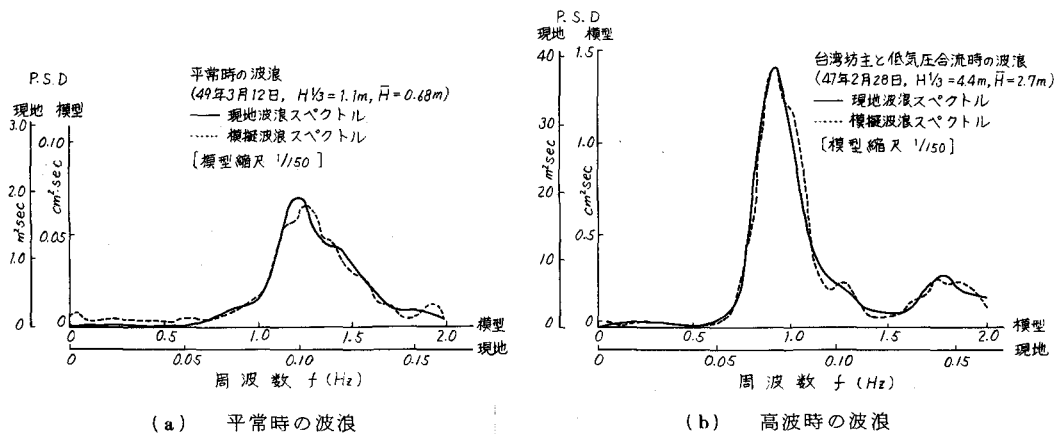


図-4 不規則波の造波特性（水深30cm）



- *1 造波特性の表中 Φ_H ：表面波スペクトル、 Φ_S ：造波板の静水面における変位のスペクトル、 f ：波の周波数
- *2 (修正)では「実験波のスペクトル」と「発生した波のスペクトル」の差の半分を修正する。

図-5 現地波浪発生手順ならびに収束過程



図一六 現地波浪のスペクトル近似（福島第一原子力発電所地先海域の波浪）〔実験に使用した波〕

- (i) 設定波スペクトルを $f \sim \sqrt{\phi_H / \phi_S}$ 造波特性曲線を用いて造波機の動きのスペクトルに変換し、乱数を発生させ、高速フーリエ逆変換をほどこして造波機の動きの時系列に直す。
- (ii) この時系列に従って造波機を動かし、発生する波を波高計で計測し、発生波のスペクトルを計算する。
- (iii) 設定波スペクトルとの違いが生じた場合は、差の $1/2$ だけ修正する。
- (iv) (i)～(iii)の手順を繰り返し、誤差が所定の値以下となった時に収束波スペクトルが得られたものとして、その時の時系列をカセットMTに収録する。

以上の手続きに従えば、設定波スペクトルに対する収束波スペクトルが得られるはずである。

図一六は、福島第一原子力発電所地先海域でこれまで10年間ほど取得されている波浪観測データの中から、波浪が平均的な場合と高い場合を選び、縮尺 $1/150$ の模型上に再現させるように試みた結果である。発電所地先海域の沖合1km、水深11.3mに設置された水圧式波高計（受圧部水深9.3m）により得られた波形記録から、 $\Delta t = 2.94$ sec間隔で384点（ 3×2^7 ）を読み取り、スペクトル計算した。誤差許容値としては、設定波スペクトルのピーク値の $1/10$ 以上のスペクトル密度値をもつ周波数範囲内では相対誤差評価として20%をとり、それ以外のところでは絶対誤差評価とした。図一六の(a)、(b)ともかなりよく近似できており、現地波浪を十分よく模擬しているものと判断される。

4. 碎波帯近傍における温排水拡散実験

4.1 実験方法ならびに実験条件

外海波浪実験水槽（50m×22.6m）内に福島第一原子力発電所地先海域の地形を縮尺 $1/150$ で製作した。模型に取り入れた範囲は、沿岸方向には放水口から南へ約2km、北へ約1kmであり、沖合方向には約2kmである。本実験は表層放流でありしかも波の作用が卓越するため、水中放流の場合と比較して浮力効果による混合希釈は少なく、内部フルード数にはさほど影響されないと思われる。表層放流の場合には、放水口近くにおける放流流速による周囲水の連行が主な希釈要因となる。従って、フルードの相似則に基づいた無歪模型で可能な限り大きな縮尺 $1/150$ を採用した。水温の測定は、原則として放水口近傍で100m間隔の格子点、沖合で200m間隔の格子点にサーミスター水温計を配置して行なったが、重要度に応じて随時測定点の間隔を密にし、実験精度を上げた。測定点の数は90点であり、実験開始後定常状態に達した後のデータを採用した。実験ケースは、沖合恒流の条件として、(1)流れなし、(2)南向恒流、(3)北向恒流を考え、波の条件として、(i)波なし、(ii)平常時の不規則波浪、(iii)高波時の不規則波浪（波向きは

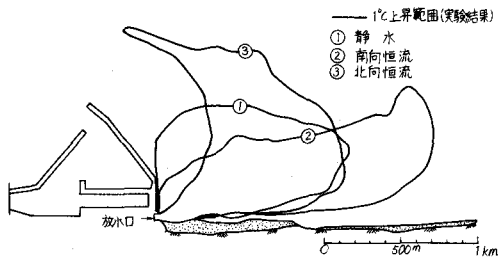


図-7 波のない場合の温排水拡散分布

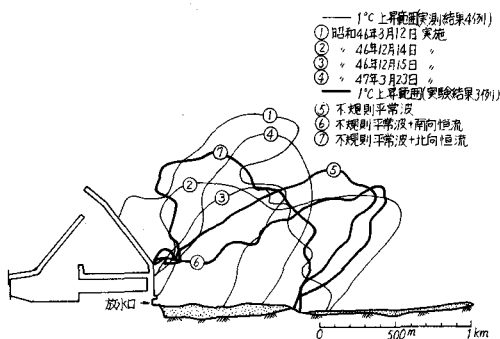


図-8 不規則平常波を作用させた場合の温排水拡散分布 (実測例との比較)

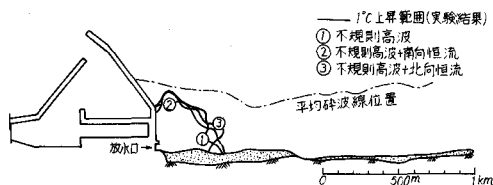


図-9 不規則高波を作用させた場合の温排水拡散分布

いずれもE)を考え、これらを組合わせたケースを対象とした。なお、この他に不規則波と同等のエネルギーを有する規則波についても検討した。放出流量は $25.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり、 ΔT は 8.8°C である。

4.2 実験結果と考察

前項で述べた方法に従って実験を行ない、得られた結果を図-7～12に示す。

図-7～9には、温排水拡散分布に及ぼす波の影響を示している。図-7は波がない場合であり、 1°C 水温上昇範囲は、他の場合に比較して最も大きくなっている。波が大きくなるに従い、図-8、9で明らかのように、水温上昇範囲は小さくなってゆく。不規則平常時の波浪の場合、温排水は放水口を出てから、砕波帯内を岸に沿って進んだ後、放水口の南側 800 m ～

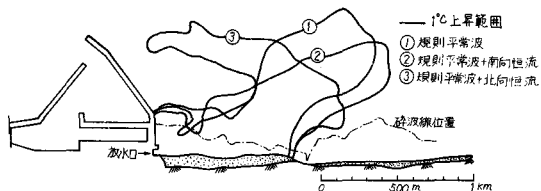


図-10 規則平常波を作用させた場合の温排水拡散分布

1 km 付近に生じている離岸流に乗って沖の方へ流れ出てゆく。この時に温排水は急激に温度を下げるが、これは、深いところに温排水が流れ出るることによる混合希釈効果と、離岸流の南側から沿岸流によって北向きにおこる冷水加入のためである。波がさらに大きくなった高波時の不規則波浪の場合には、砕波が沖の方で起るため、砕波帯の幅が広くなり、波によって温排水が広い範囲で混合希釈をうけるので、温度低下は波が小さい場合よりもかなり大きくなる。波が大きくなる

につれ、温排水が海浜流の作用により沿岸におしつけられたような形で南下するため、南側からの冷水加入はだんだん期待できなくなる。しかしながら、波のエネルギーが大きくなるため、温排水の水温低下は大きくなる。図に示した分布形は、定常状態に達してから現地時間で数時間のあいだの分布形を包絡したものであり、この間、波浪や海浜流の影響をうけ、分布形状はわずかに形を変えている。すなわち、波浪や海浜流により温排水の拡散分布パターンが息づいているといえよう。

図-10は、不規則平常波と同等のエネルギーをもつ規則波を作用させた場合の温排水拡散範囲である。これを図-8の不規則平常波の場合と比較すると、各時刻での拡散パターンの平均範囲は等しいが、包絡をとると不規則波の方がやや大きくなる。これは温排水パターンを支配する海浜流が規則波の場合には準定常的に起るが、不規則波の場合には定常的でなく、時間的変動がかなり大きいためである。このことは、実験をするにあたっては、現地の波浪を忠実に再現させて行なわねばならないことを示唆している。

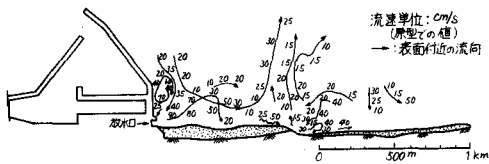


図-1 1 流況（不規則平常波）

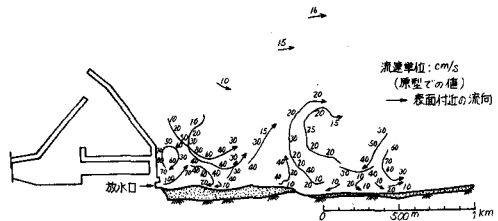


図-1 2 流況（不規則平常波＋南向恒流）

図-8には、現地実測データも同時に示した。この時の放出流量は、 $25.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり、実験で取り扱ったケースと同じである。波浪条件もほぼ同様の場合を選んで示した。実測結果は実施日より、パターンが汀線に沿う場合、沖合方向に扇状に広がる場合、防波堤にはりついている場合等様々に異なり、複雑な変化をしている。代表的な条件のみを採用し、単純化して行なった実験結果と自然現象とは差違が生ずるのは当然であるが、不規則平常波作用時に限しては実測パターンの中に似た形のものがある。若干実測値の方が大きい場合もみられるが、面積的にはかなり近い状態にある。図-8中の①は夏季パターン、②～④は冬季パターンと考えてよく、前者は防波堤にはりついた形を呈する。一方後者の中には実験で得られたパターンとよく似たものがある。①と②～④では波浪条件がやや異なるため、離岸流の発生位置が異なり、温度パターンの相違となって現われてくるものと思われる。温排水を支配する離岸流は、夏季には放水口近くに存在し、冬季には実験におけるのとはほぼ同じ場所に生じていたものと考えられる。防波堤と汀線とに囲まれた水域では、吹送流が温排水の移流にかなりの影響を及ぼす可能性がある。夏季には南からの季節風が卓越しており、そのため、防波堤にはりつくパターンが出現したものと思われる。模型では吹送流の効果を取り入れなかったため、このようなパターンはみられなかった。

図-1 1、1 2には、温排水を放流した場合の前面海域の流況の代表例を示した。図-1 1が不規則平常波の場合であり、図-1 2が不規則平常波に南向恒流が加わった場合である。いずれの場合も放水口南側800m～1kmのところに強い離岸流が存在しており、すでに述べたように、温排水の大部分はこの離岸流に乗って沖合へ運ばれる時に、南側からの冷水加入によって混合希釈効果をうける。恒流の有無による流況の変化はほとんど見られないが、南向恒流の場合には離岸流の頭の部分が恒流の作用により南に流されるような現象が流況に現われている。

謝 辞

実験にあたっては、電力技術整備K.K. 竹内 出氏ならびに日本海洋計測K.K.の諸氏の協力を得たことを記し、謝意を表するものである。

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，電力中央研究所技術第二研究所研究報告№73017，1974。
- 2) 小森修蔵・田中寛好・和田 明：外海波浪実験設備による現地波浪のスペクトル近似と波圧問題への適用，第24回海講論文集，pp.318～322，1977。
- 3) Biéssel, F. et F. Suquet : Les appareils générateurs de houle en laboratoire La Houille Blanche, mars-avril, pp.145～165, 1951。