人工島式発電所背後の波浪場・海浜流場に関する実験的研究

池野正明*・鹿島遼一**・松山昌史***
榊山　勉***・窪　泰浩****

1. はじめに

沖合人工島上に原子力発電所を建設する人工島式海上立地方式の場合，燃料運搬船の物揚げ場と大量の冷却水を取水するための取水口を人工島背後の静穏海域を利用して陸側護岸に設ける可能性が高い．清水・平口（1991）は，実際の波浪に近い多方向不規則波による人工島背後の循環流の特性について実験的に検討しているが，冷却水取水流の影響は検討していない．

そこで，本研究は，一様斜面上に設置された人工島式発電所模型を対象として，多方向不規則波を用いた水理模型実験を実施し，人工島の建設および冷却水取水流が人工島背後の波浪場・海浜流場に及ぼす影響を検討し海底地形変化を引き起こす外力を把握するとともに，単一方向波の場合の実験結果との差異を比較したものである．

2. 水理模型実験

(1) 実験設備および人工島模型

本水理模型実験には，図—1に示す長さ35 m，幅45 m，深さ1.1 mの平面水槽と，48枚の造波板（全長19.2 m）から成る多方向不規則波造波機を有する平面水槽を用いた（平口ら，1990）．水槽内の造波機前面岸方向に5.5 mの地点から，2 mの区間に勾配1/10の一様斜面をさらに18 mの区間に勾配1/50の一様斜面を設置した．造波機設置地点の水深は所定の波が造波しやすいように52 cmとした．

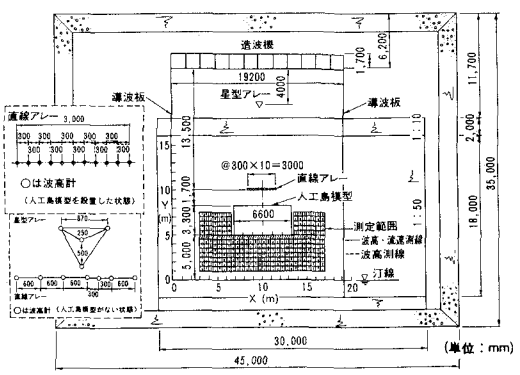
人工島模型は長方形であり，実スケールで沿岸方向に1 km，岸沖方向に0.5 kmの人工島の1/150縮尺に相当する．図—2のように，人工島の沖側および側面防波護岸に消波ブロックを被覆した場合と被覆しない直立護岸の場合の両方について検討した．消波ブロックの模型は，下層部に砂利を用い，上層部をテトラポット模型で被覆した．テトラポット模型は，沖側護岸に重量300 gおよび380 g，側面護岸に重量175 gのものを使用した．

* 正会員　工博　(財)電力中央研究所　我孫子研究所　水理部
** 正会員　工修　(財)電力中央研究所　我孫子研究所　参事
*** 正会員　工修　(財)電力中央研究所　我孫子研究所　水理部
**** 正会員　東京電力株式会社　原子力建設部　土木建築課

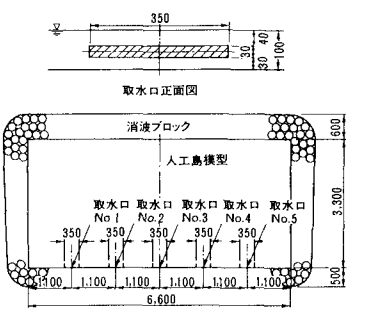
人工島の設置水深は実スケール換算で20 m相当であるため，模型の設置水深は15 cm程度になる．この条件を満たすには，図—1に示すように，造波機前面から岸側に約16 mと比較的離れた斜面上に人工島模型を設置しなければならない．この場合，有限な長さの造波機で造波した入射波は，単一方向であっても，人工島設置地点に到達するまでに，伝播に伴いそのエネルギーが周囲に拡散してしまう．そこで，本研究では，これを防ぐため，造波機の両端から斜面上に導波板を配置した．

(2) 実験条件

本研究では，上記の寸法の人工島上に1基当たりの出力1100 MWeの原子力発電所を数基建設することを想定している．この場合，1基当たりの冷却水として78 m^3/sを取水する必要がある．そこで，本研究では図—2



図—1　平面水槽と人工島模型の配置



図—2　人工島模型（消波護岸の場合）

に示すように，陸側直立壁に幅35 cm，高さ3 cmの長方形の取水口を等間隔に5箇所(No. 1～No. 5)設けた．各取水口は人工島模型の内側でホースに接続されており備え付けられた流量計と流量調節バルブで所定の取水流量に調節した．また，各ホースを通過した取水流は1本のホースに合流させポンプにより導波板の外へもどした．本研究では，取水しない場合，取水口No. 1のみあるいは取水口No. 3のみで基本取水量（実スケール換算で78 m^3/s）の3.5倍を取水する場合および取水口No. 1～No. 5で同時に基本取水量を取水する場合の4種類を検討対象とした．

実験波は，規則波，単一方向不規則波，多方向不規則波を用いた．単一方向波の波向きおよび多方向波の主波向きは斜面上へ直方向(0°)とした．規則波の諸元は沖波波高 H_0 を4.2 cm，周期 T を1.1 sとし，不規則波の諸元は平均周期と沖波波高の2乗平均値が規則波と等しくなるように設定し，沖波有義波高 $H_{0 1/3}$ を6.1 cm，有義波周期 $T_{1/3}$ を1.2 sとした．不規則波の周波数スペクトルはBretschneider－光易型，方向関数は光易型を用い，方向集中度パラメータの最大値 S_{max} を25（多方向波）と∞（単一方向波）の2種類に設定した．不規則波の造波信号はエネルギー等分割のダブルサンメーション法により周波数512個×波向き90個の成分波を合成して計算した．人工島模型のように比較的大きい構造物を対象とした水理実験では，構造物からの反射波が造波機まで到達し造波板により再反射された波が入射波とともに構造物へ作用することが懸念される．これを極力避けるため低反射制御方式で造波することにした．

（3） データの計測および解析方法

まず人工島模型がない状態で，造波機中心軸上岸方向に4 m離れた水深52 cmの水平床上に，星型アレーを配置し，発生波の方向スペクトルの検定を行った．つぎに，不規則波の方向分布特性が，人工島設置地点付近の浅海域に達するまでの間に屈折によってどのように変化するかを調べるため，人工島模型がない状態で，$Y=9$ mの斜面上水深18 cmの地点に直線アレーを造波機に平行に配置し，方向スペクトルを推定した．方向スペクトルはベイズ型モデル（橋本，1987）および最尤法（磯部ら，1984）により解析した．つぎに，人工島沖側護岸からの反射波を方向スペクトルレベルで検出するため，人工島模型を設置した状態で，斜面上中央 $Y=10$ mの水深20 cmの地点に，**図—1**に示す直線アレーを造波機に平行に配置し，入反射波共存場における方向スペクトルを推定した．方向スペクトルは，入反射波共存場に拡張されたベイズ型モデル（橋本・小舟，1987）により解析した．

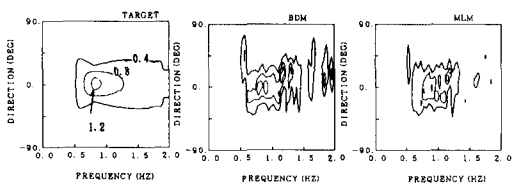
人工島背後斜面上の波高と流速の測定範囲は，**図—1**に示すように $X=3$ m～17 m，$Y=1$ m～7.5 mの区間を対象とした．容量式波高計により水面変動を，X方向に25 cm間隔，Y方向に50 cm間隔で測定した．また，電磁流速計により，海底面上2 cmの高さおよび取水口中心軸の高さ（$Z=-5.5$ cm）の流速水平2成分を，X，Y方向に50 cm間隔で測定した．さらに，取水口中心軸上の流速を底面上2 cmの高さから鉛直方向に最大7箇所測定した．ただし，水深3 cm以下すなわち汀線からの距離Yが1.5 m以内では，浅すぎて電磁流速計による計測ができなかったため，染料を用い測定格子点上に一滴滴下して染料雲の移動時間をストップウォッチで計測した．なお，規則波実験では，0.06 s刻みで1024個のデータを，不規則波実験では0.06 s刻みで8192個（400波分に相当）のデータを計測した．

3. 多方向不規則波の方向分布特性

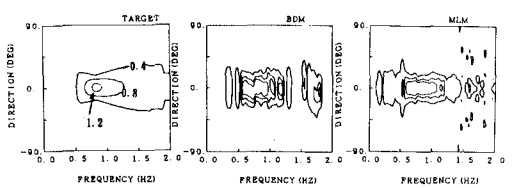
（1） 発生波と斜面上における入射波の方向関数

図—3は，人工島模型がない状態で，星型アレーで計測した発生波の方向関数の推定値コンター図を目標値と比較したものである．3つの図面は，各々目標値，最尤法(MLM)による推定値，ベイズ型モデル(BDM)による推定値に対応する．**図—3**によると，MLMとBDMの推定結果とも1.5 Hz以上の高周波数帯では，造波機の性能限界に近いため，発生波の再現性が良くないが，ピーク周波数が存在する1.5 Hz以下の周波数帯では，方向関数の概略値の再現性が良好であり，ほぼ目標とする波が造波されていると判断できる．

図—4は，人工島模型がない状態で，直線アレーで計測した斜面上の多方向不規則波の方向関数の推定値コンター図を目標値と比較したものである．3つの図面は，各々屈折変形計算による目標値（合田・鈴木，1975），MLMによる推定値，BDMによる推定値に対応する．**図—4**の



図—3　発生波の方向関数のコンター図
（人工島模型がない場合）

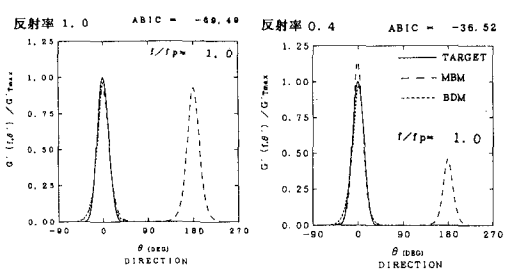


図—4　斜面上の入射波の方向関数のコンター図
（人工島模型がない場合）

屈折変形後の方向関数の目標値と，図—3に示した発生波の方向関数の目標値とを比較すると，屈折変形により波向きが集中し方向集中度が高くなっている．屈折変形後の目標値のピーク周波数（$f/f_p=1.0$）付近における方向集中度はSに換算すると50程度となった．図—4の方向関数の目標値と推定値を比較すると，方向集中度が高くなる傾向をMLM，BDMによる推定結果とも再現しているが，両方の推定値には，低周波数側と高周波数側で，目標値のピーク周波数以外にいくつかのピークが認められる．これは屈折変形の理論値には考慮されていない砕波の影響であると考えられる．

（2） 入反射共存場における方向関数と反射率

図—5(a)は，人工島沖側直立護岸前面で計測した多方向不規則波のピーク周波数における方向関数と反射率の推定結果を示したものである．図中の実線が図—1の直線アレー設置地点における屈折変形後の入射波の方向関数の目標値，破線が入反射波共存場に拡張されたベイズ型モデル（MBM）による入射波と反射波の方向関数の推定値，点線が人工島模型が無い場合に計測した入射波の方向関数のBDMによる推定値（図—4に示したBDMのコンター図のピーク周波数における断面図）に対応する．図中の3曲線は，目標値の方向関数の最大値が1.0になるように，目標値の方向関数の最大値$G'_{T\max}$で除して表示している．破線のMBMによる推定値では，$-90°$～$90°$の波向範囲が入射波成分に，$90°$～$270°$が反射波成分に対応する．反射率を0.05刻みに変化させてMBMにより計算した結果，この実験ケースでは，反射率が1.0（完全反射）の時にABICが最小となったため，この場合の反射率を1.0と推定した．図によると，MBMによる入射波の推定値は，BDMによる入射波の推定値および目標値とよく一致している．従って，人工島から造波機へ向かう反射波は低反射制御方式により十分吸収されており，造波板による再反射は生じていないと判断できる．



(a) 沖側直立護岸前面における推定結果　(b) 沖側消波護岸前面における推定結果

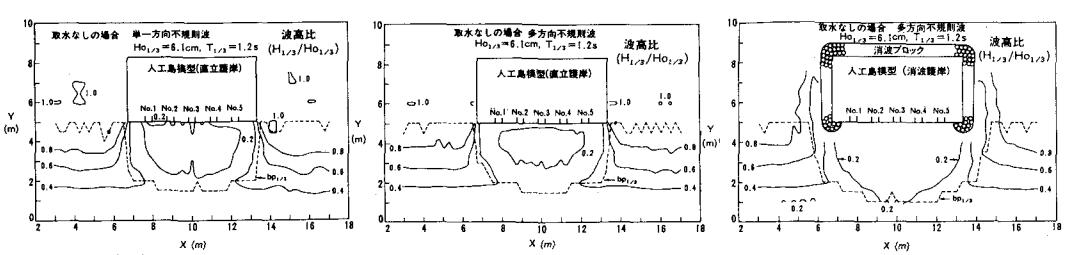
図—5　入反射波共存場における斜面上の方向関数

図—5(b)は，人工島沖側消波護岸前面で計測した多方向不規則波のピーク周波数における方向関数と反射率の推定結果を示したものである．反射率を0.05刻みに変化させてMBMにより計算した結果，この実験ケースでは，反射率が0.4の時にABICが最小となったため，この場合の反射率を0.4と推定した．図によると，MBMによる入射波の推定値は，BDMによる入射波の推定値および目標値とよく一致している．

4. 人工島背後の波高分布の特性

以下の節では，紙面の都合上不規則波を対象とした図面を掲示して議論する．図—6に取水しない場合の人工島背後の波高分布を示す．図(a)(b)は直立護岸の人工島に，各々単一方向不規則波，多方向不規則波が作用する場合であり，図(c)は消波護岸の人工島に多方向不規則波が作用する場合である．

まず，直立護岸の場合の図—6(a)と(b)を比較する．遮蔽領域中心部（$8m\leqq X\leqq 12m$，$2m\leqq Y\leqq 5m$の領域）では，単一方向不規則波および多方向不規則波の場合とも，沖波波高比にして0.2程度である．また，遮蔽領域から人工島の側面領域に向かって次第に波高比が増加しており，単一方向不規則波の場合には人工島背後の遮蔽領域境界部（$X=6.7$ mと$X=13.3$ m）で0.5程度となっている．多方向不規則波の場合の遮蔽領域中心部の0.2のコンターに注目すると，単一方向不規則波の場合に比べ沖波波高比が0.2以下となる領域が狭くなっている．また，人工島背後の遮蔽領域境界部では沖波波高比が0.6に増加している．これは，多方向不規則波の方向分散性により，人工島側面領域から遮蔽領域への波浪の回り込みが単一方向不規則波の場合よりも顕著になるためであ

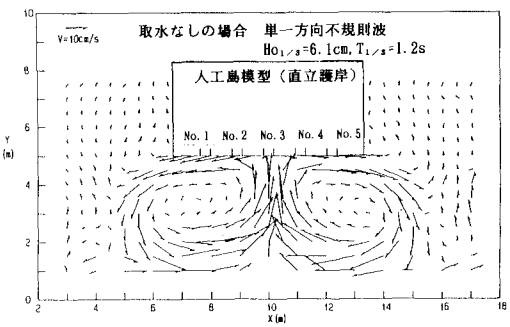


（a） 直立護岸の人工島に単一方向不規則波が作用する場合　（b） 直立護岸の人工島に多方向不規則波が作用する場合　（c） 消波護岸の人工島に多方向不規則波が作用する場合

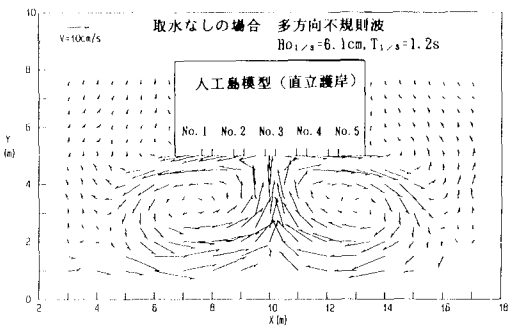
図—6　人工島背後の1/3最大波高比分布

ると考えられる．また，図中の破線で示した $bp_{1/3}$（不規則波の砕波する割合が増加し1/3最大波高が減少し始める点）に注目すると，人工島の背後では $bp_{1/3}$ が緩やかな円弧を描いて側面領域よりも岸側に移動している．

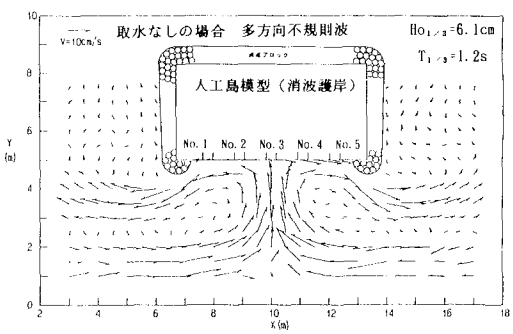
つぎに，消波護岸の場合の**図—6**(c)と直立護岸の場合の**図—6**(b)を比較する．人工島の沖側および側面護岸に消波ブロックを被覆した場合には，直立護岸の場合に比べ人工島背後の遮蔽領域の沖波波高比0.2以下の領域がかなり広がっている．また，人工島背後の遮蔽領域境界部（$X=6.7$ m と $X=13.3$ m）では沖波波高比が0.4程度となっており，人工島背後の静穏度が向上している．



(a)　直立護岸の人工島に単一方向不規則波が作用する場合



(b)　直立護岸の人工島に多方向不規則波が作用する場合



(c)　消波護岸の人工島に多方向不規則波が作用する場合

図—7　取水しない場合の人工島背後の海浜流の平面分布

5.　人工島背後の海浜流場の特性

(1)　取水しない場合

図—7に取水しない場合の人工島背後の海底面上2 cmの位置における海浜流の平面分布を示す．図(a)(b)は直立護岸の人工島に，各々単一方向不規則波，多方向不規則波が作用する場合であり，図(c)は消波護岸の人工島に多方向不規則波が作用する場合である．

まず，直立護岸の場合の**図—7**(a)と(b)を比較する．単一方向不規則波および多方向不規則波の場合とも人工島背後に2つの対称な循環流が発生している．単一方向不規則波の場合の循環流の直径は沿岸方向に5.5 m，岸沖方向に4 mであり，海浜流の最大値は20 cm/sで規則波の場合の8割程度となった．一方，多方向不規則波の場合の循環流の直径は沿岸方向に6 m，岸沖方向に4 mであり，単一方向不規則波の場合と比べて若干沿岸方向に延びた形状となっている．この場合の海浜流の最大値は単一方向不規則波の場合と同程度である．

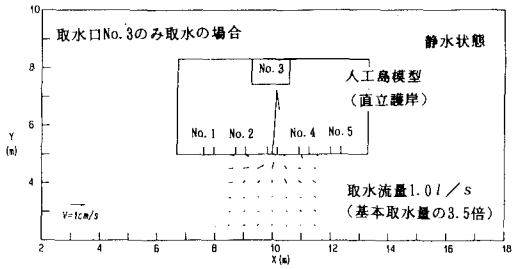
つぎに，消波護岸の場合の**図—7**(c)と直立護岸の場合の**図—7**(b)を比較する．消波護岸の場合には，直立護岸の場合に比べ陸側護岸隅角部への消波ブロックの巻き込みの影響により，直立護岸の場合に比べて人工島背後の2つの循環流の形状がかなりひずんでいるが，海浜流の最大値は直立護岸の場合と同程度である．

(2)　取水を伴う場合

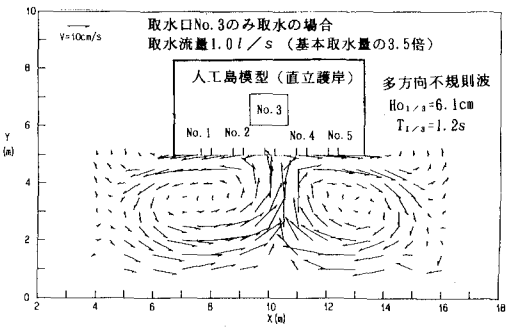
まず，**図—8**(a)は，取水口No.3のみで基本取水量の3.5倍を取水する場合を対象とし，波浪が作用しない人工島背後の海底面上2 cmの位置における取水流の平面分布を示したものである．**図—8**(a)によると，取水流は取水口から離れると急激に減少し，取水口から0.5 m離れた $Y \leqq 4.5$ m の範囲では流速が1 cm/s以下である．また，**図—7**に示した海浜流の結果と比較すると，$Y \leqq 4.5$ m の範囲の取水流の値は波浪により発生する海浜流の値の1割以下である．

つぎに，直立護岸の場合を対象として，取水口の位置が異なる場合の人工島背後の海浜流を比較する．**図—8**(b)(c)は，多方向不規則波作用下で，各々取水口No.3のみおよび取水口No.1のみで基本取水量の3.5倍を取水する場合の海底面上2 cmの位置における海浜流の平面分布を示したものである．**図—8**(b)(c)と**図—7**(b)を比較すると，$Y \leqq 4.5$ m の範囲の海浜流分布に取水流の影響は認められず，取水しない場合の実験結果とほぼ一致している．

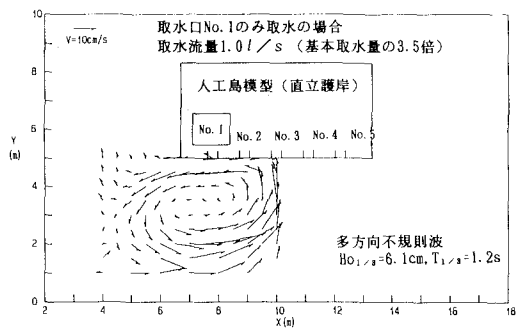
図—9は多方向不規則波が作用する場合の取水口No.3の中心軸と一致する $X=10$ m の位置における人工島背後の循環流（離岸流）の鉛直分布を示したものである．図(a)が取水しない場合，図(b)が取水口No.3のみで基



(a)　静水中における人工島背後の取水流の平面分布



(b)　取水口 No. 3 のみで取水する場合の海浜流の平面分布



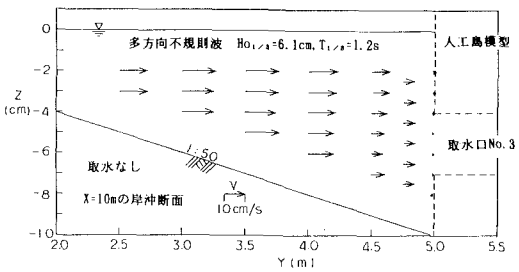
(c)　取水口 No. 1 のみで取水する場合の海浜流の平面分布

図—8　取水流を伴う場合の人工島背後の海浜流の平面分布

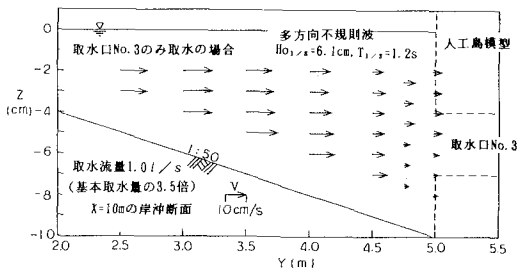
本取水量の 3.5 倍を取水する場合に対応する．**図—9** によると，取水口から 0.5 m 離れると（$Y \leqq 4.5$ m に範囲で），取水流の影響は認められず，鉛直分布もほぼ一様となっている．また，紙面の都合上，図は割愛するが，取水口 No.1～No.5 で基本取水量を同時に取水する場合と取水しない場合の海浜流分布を比較したところ，$Y \leqq 4.5$ m の範囲の海浜流分布に取水流の影響は認められず，取水しない場合の実験結果とほぼ一致していた．

6. おわりに

以上，本研究では，人工島式発電所を想定して水理模型実験を実施した．その結果，単一方向波と多方向波が作用する場合の人工島背後の波高・海浜流分布の差異が明かとなった．また，1 基当たり 78 m^3/s の冷却水を取水する人工島背後の取水流は，実スケール換算で取水口から



(a)　取水しない場合



(b)　取水口 No. 3 のみで取水する場合

図—9　人工島背後の循環流（離岸流）の鉛直分布

ら 75 m 程度離れると急激に減少するため，高波浪時には取水口近傍以外の海浜流分布に及ぼす取水流の影響は無視できるが，波浪により比較的速い循環流が発生することが明かとなった．

本研究は電力 9 社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施したものであり，土木学会原子力土木委員会海域分科会（主査　合田良実横浜国立大学教授），同耐波浪設計 WG（主査　西村仁嗣筑波大学教授）の各位には多くの御助言を賜りました．また，(株)土木技術開発下田隆男氏，(株)CRS 下村　一氏，田山英樹氏，(株)電力計算センター岡本直樹氏には図面作成に協力して頂きました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司（1984）：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 173-177.

合田良実・鈴木康正（1975）：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技研資料，No. 230, 45 p.

清水隆夫・平口博丸（1991）：多方向不規則波を用いた実験による人工島背後の循環流に関する研究，海岸工学論文集，第 38 巻，pp. 156-160.

橋本典明（1987）：ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定，港湾技術研究所報告，第 26 巻，第 2 号，pp. 97-125.

橋本典明・小舟浩治（1987）：ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定—入・反射波共存場を対象として—，港湾技術研究所報告，第 26 巻，第 4 号，pp. 3-33.

平口博丸・清水隆夫・池野正明・田中寛好（1990）：多方向波造波システムの効率化とその造波特性，海岸工学論文集，第 37 巻，pp. 140-144.