

浅海波浪推算モデルとその応用に関する研究

柴木秀之*・渡辺 晃**・磯部雅彦**・三原正裕***

1. はじめに

日本沿岸の高波追算を目的とする実用的な波浪推算モデルが開発され、多数の報告がなされている。しかしながら、波浪の発達・減衰と変形を同時に考慮する平面波浪場の計算を行った例（山口ら、1986）は少ない。さらに、伊勢湾・大阪湾に代表される半閉鎖的な浅海域では、外洋侵入波と湾内発生波が共存するが、このような海域の設計波を決定する上で、2成分を同時に時間追跡する波浪推算法を実用化することも、重要な研究課題である。

本研究では、外洋・内湾域で発達・減衰を考慮し、かつ浅海変形を考慮する波浪推算モデルを提案する。このモデルを用いて、伊勢湾台風時の浅海波浪場の追算を行う。また、多周波数成分波を追跡することで、外洋侵入波と湾内発生波が共存する波浪場を計算し、かつ湾内で2成分の分離を行う。さらに、本モデルの応用例として、時空間的に変化する波浪場から生ずる海浜流の計算を行い、モデル利用の可能性について述べる。

2. 浅海波浪推算モデルと浅海波浪場の計算

(1) 浅海波浪推算モデルの理論

a) 基本式

本研究で用いる波浪推算モデルは、エネルギー方程式を基礎方程式とし、浅海域における波浪の屈折・浅海変形を計算するために、エネルギー輸送速度（群速度）を場所（水深）と周波数の関数として定義する。モデルの原型は、港湾構造物の設計波算定に実績の多い、磯崎・宇治（1974）のMRI法による深海波モデルである。波浪のエネルギー平衡方程式は、エネルギーの保存を主体に表現する形式を採用すると、

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (C_g \cos \theta \cdot S)}{\partial x} + \frac{\partial (C_g \sin \theta \cdot S)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{C_g}{C} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) S \right] = F_{IN1} + F_{IN2} \dots (1)$$

で表される。ここで、 S は周波数 f で伝播方向 θ の成分

波のエネルギー密度($S(f, \theta)$)、 C_g 、 C は各成分波の群速度と波速で場所と周波数の関数($C_g(x, y, f)$, $C(x, y, f)$)である。 F_{IN1} は風から波へ供給される単位時間当りのエネルギー量、 F_{IN2} は各種機構によるエネルギーの消散量であり、 F_{IN1} 、 F_{IN2} を合わせてソース関数項と呼ぶ。

風からのエネルギー供給量 F_{IN1} と消散量 F_{IN2} は、

$$\left. \begin{aligned} F_{IN1} &= A + BS \\ F_{IN2} &= -F_B - F_D - F_W - F_F - F_P \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

で表される。ここで、 A はPhillipsの共鳴理論に対応する関数、 B はMilesの不安定理論に対応する関数である。消散量には、①砕波による消散 F_B 、②内部摩擦による消散 F_D 、③逆風による消散 F_W 、④底面摩擦による消散 F_F 、⑤底面への浸透による消散 F_P が含まれる。なお、深海波浪推算では、水深無限大とするため、群速度 C_g と波速 C は周波数のみの関数となり、エネルギーの消散項は、④と⑤の消散過程を無視する。

式(1)を差分方程式に直し、時間積分して解を求める。時間差分は陽的に、空間差分はスタッガード形式で行う。移流・伝播項の計算は、1次の風上差分を適用する。

さらに、浅海域における砕波減衰については、推算有義波高 $H_{1/3}$ が砕波限界波高 H_b よりも大きい場合に、各スペクトル成分を次式により置き換える方法を用いる。

$$S_b = S \left(\frac{H_b}{H_{1/3}} \right)^2 \quad H_{1/3} > H_b \text{ のとき} \dots (3)$$

ここで、 S_b は砕波後のスペクトル、 S は非砕波推算スペクトル、 $H_{1/3}$ は砕波前の有義波高である。砕波限界波高 H_b は合田（1975）の砕波指標を採用する。

(2) 海上風推算

海上風推算は、天気図の気圧情報を利用して、傾度風モデルと台風モデルを併用するハイブリッドモデルによる自由大気の風推算と、境界層モデルから求められる海上風鉛直分布の解析解を利用した海上風変換を行う。傾度風・台風ハイブリッドモデルは、台風半径内を台風モデルで推算し、それ以外の気圧場を傾度風モデルで推算する。そして、2つのモデルの推算風を経験的関数により空間内挿する（後藤・柴木、1993）。

(3) 浅海波浪推算領域の計算範囲

浅海波浪推算モデルを適用する領域内では、波浪変形

* 正会員 工修 (株)エコー 第一技術部 解析調査課

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

*** (株)エコー 第一技術部 波浪プロジェクト室

の計算精度を高めるために、詳細な地形(水深)近似を行う必要がある。一方、波浪が発達する海域は広範囲の外洋域に及ぶため、計算範囲を広くとる必要がある。そこで、現地海域への適用においては、水深450 m以浅の内湾や沿岸部(判断基準は $h/L_{\max} \leq 1/20$ に該当する海域; h : 水深, $L_{\max}$: 周波数0.04の成分波の波長)を浅海波浪推算モデルの適用範囲とする。適用範囲外となる外洋は、深海波浪推算モデルにより計算し、この結果を浅海波浪推算の沖側境界条件として与える。沖側境界条件の情報は、深海波浪推算により計算される波浪の方向スペクトルとする。ここで、与える方向スペクトルは、周波数 $22 \times$ 方向 $16 = 352$ 個の成分波から構成される。

(4) 浅海波浪場の計算

現地への適用に先立ち、球面浅瀬のモデル地形による波浪伝播計算を行い、浅海波浪推算モデルの波浪変形に関する機能の検討を行う。球面浅瀬の地形条件は、合田・鈴木(1975)にならない、球面浅瀬の半径80 m、浅瀬外の水深15 m、浅瀬中央の水深5 mで、計算に用いる格子間隔10 m、時間間隔0.5 sとする。沖側入射波は、有義波高5.0 m、有義波周期12.0 s、最大方向集中度25とする。入射波の方向スペクトルは、周波数については Bretschneider・光易型、方向分布関数は光易型とする。また、碎波が生ずるように、平均水位を-3.0 mとし、浅瀬上最小水深を2.0 mとする。計算開始後2分ではほぼ定常となり、3分後の有義波高と波向の分布は、図-1のように求められる。波高分布の傾向を見ると、浅瀬前面では、浅水・屈折変形により波高が増大し、浅瀬中央で碎波によ

る波高の急激な減衰が計算される。また、碎波地点の背後において、屈折と移流によりエネルギーが集中し、波高が回復する。波向の変化を見ると、浅瀬背後に波浪エネルギーが伝播する。

3. 浅海波浪推算モデルの現地適用性

(1) 伊勢湾台風に対する波浪追算

浅海波浪推算モデルの現地への適用性を見るために、伊勢湾台風時の波浪場の追算を行う。図-2は、波浪追算領域と格子点水深から描かれる等深線を表す。格子間隔は、陸棚域を1,800 m、伊勢湾内を600 mとする。伊勢湾口を中心に水深200 m以浅の海域が広がり、伊勢湾口の水深20 m程度まで浅くなる。浅海領域の沖側境界には、外洋波浪追算から求められる方向スペクトルを与える。図-3は、外洋波浪追算の領域であり、範囲は北緯 $15^{\circ} \sim 37^{\circ}$ 、東経 $123^{\circ} \sim 147^{\circ}$ 、格子間隔は太平洋を $1/2^{\circ}$ 、沿岸部を $1/24^{\circ}$ 格子で近似する。伊勢湾台風の波浪追算は、

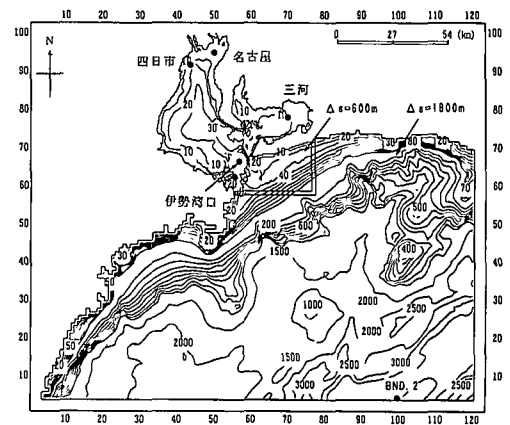


図-2 浅海波浪推算領域の構成および浅海領域の等深線

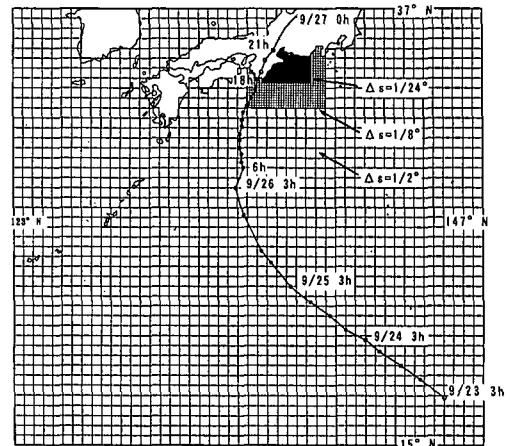


図-3 外洋波浪推算領域と伊勢湾台風経路

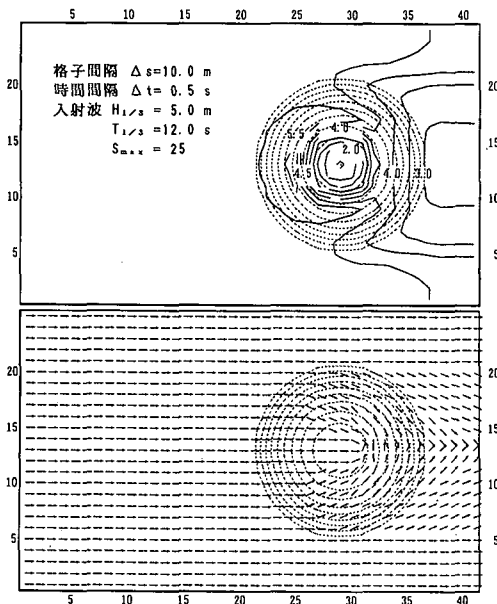


図-1 球面浅瀬上の波浪伝播による有義波高・波向の分布

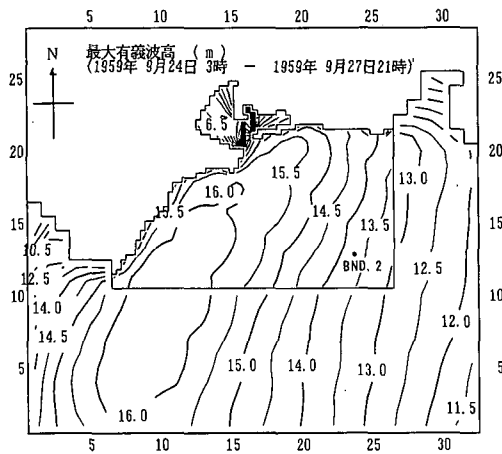


図-4 外洋波浪追算による伊勢湾台風時の最大有義波高の分布

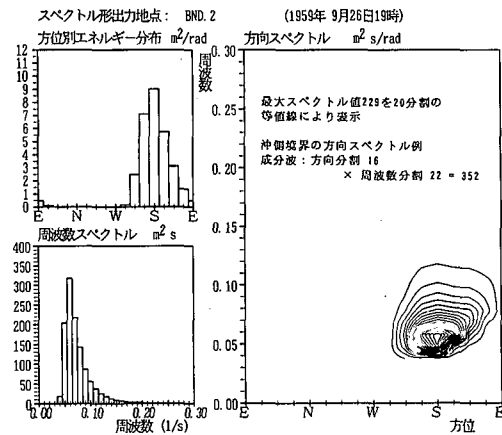


図-5 浅海領域の沖側境界における最大有義波高発生時の方向スペクトル

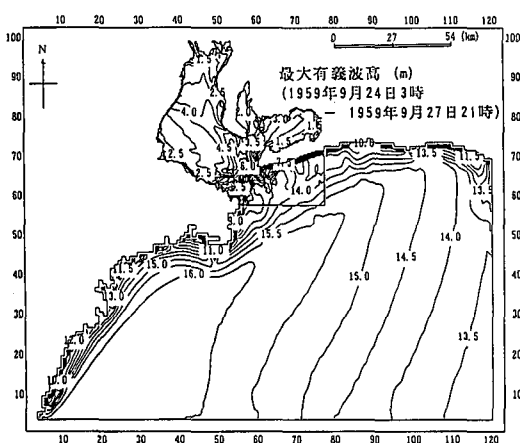


図-6 浅海波浪追算による伊勢湾台風時の最大有義波高の分布

1959年9月24日3:00~27日21:00の66時間とする。

図-4は、外洋波浪追算による沿岸部の最大有義波高の分布である。台風の通過経路に近い熊野灘沖から伊勢湾沖で15m~16m、遠州灘沖で14m~15mの高波が計算される。浅海領域の沖側境界BND. 2における有義波高最大時刻(9月26日19:00)の波浪方向スペクトルは、図-5のように求められる。方位別エネルギーの最大は方位S、周波数は0.06 Hz(周期16.7 s)で生じる。

図-6は、浅海波浪追算による最大有義波高の分布である。水深を考慮すると、200 m以浅の海域において波高の減衰が見られ、汀線直前の格子点では砕波による急激な減衰が計算される。伊勢湾口では、湾口部の半島・島による遮蔽効果と、屈折・浅水変形により、外洋から湾内にかけて急激に波高が減衰する。また、伊勢湾内は、方向分散と屈折の影響により、湾口より見通される海域から遮蔽域へと滑らかに波高が減衰する。

ここで、浅海変形効果を確認するために、浅海領域(一律1,800 m 格子)において、水深無限大とする計算も合わせて行い、浅海追算との比較を行う。図-7は、水深無限大の追算(深海波追算)から求められる最大有義波高の分布である。浅海変形を考慮しない場合、外洋の波高分布は外洋波浪追算(図-4)とほぼ同様である。また、伊勢湾内は、方向分散効果のみ影響するため、遮蔽域への波高減衰は急激である。浅海変形等の水深効果は、沿岸域で発生する波浪場に著しい違いをもたらす。

(2) 数値計算から見た伊勢湾の波浪特性

伊勢湾のように湾口が外洋に面する半閉鎖的な海域では、発達した外洋侵入波と発達過程の湾内発生波が共存する。この点を明らかにするために、前述した外洋・内湾浅海追算と、伊勢湾のみを対象とする内湾浅海追算を

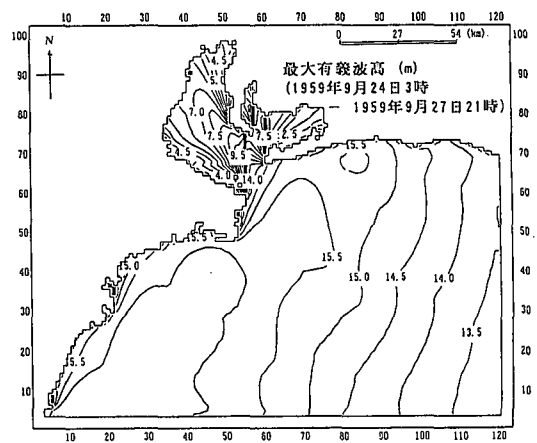


図-7 浅海領域における深海波追算による伊勢湾台風時の最大有義波高の分布

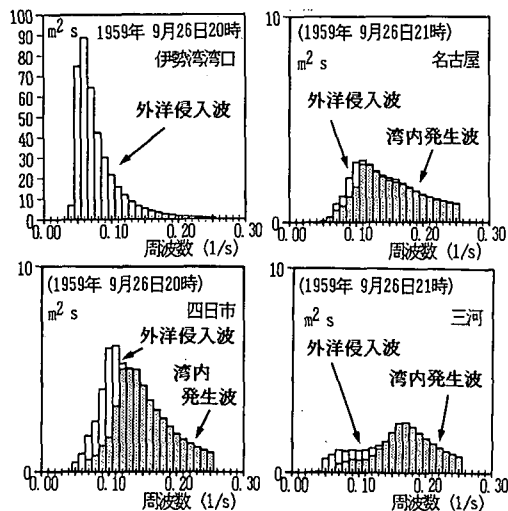


図-8 湾内発生波と湾外侵入波が共存する場合の方向スペクトル (伊勢湾湾口・津・名古屋・三河)

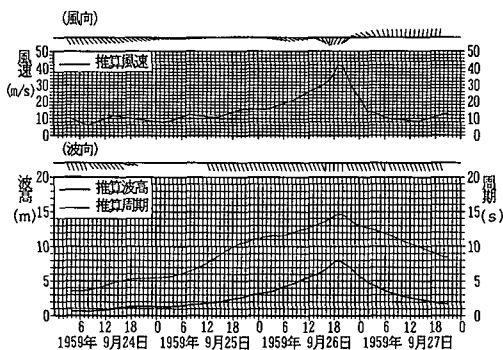


図-9 伊勢湾湾口における浅海波浪推算モデルによる有義波諸元の時系列

行い、発生波浪場と湾内の方向スペクトルの比較を行う。方向スペクトルの比較点は、図-2 に黒丸で表す湾口と湾奥の四日市・名古屋・三河の4点とする。

図-8 は、4 点の最大有義波高発生時の周波数スペクトルである。外洋侵入波を表す湾口のスペクトルは、湾内を伝播するとともに次第に減衰するが、一部は湾奥まで到達する。また、当然ながら、湾口と湾内では波高のピーク時刻は異なることがある。この外洋侵入波は、図-9 の湾口における有義波高の時系列から判断すると、台風通過とともに時間変化する。図の湾奥3点の方向スペクトルにおける陰影部のエネルギーは、内湾浅海追算から計算されたもので、湾内発生波の成分を表す。一方、白抜きで表すエネルギー差が、外洋侵入波の成分である。四日市・名古屋・三河の順に、外洋侵入波の占める割合が多くなり、各点の遮蔽の度合いを端的に表している。

さらに、外洋侵入波が、伊勢湾の波浪場に与える影響

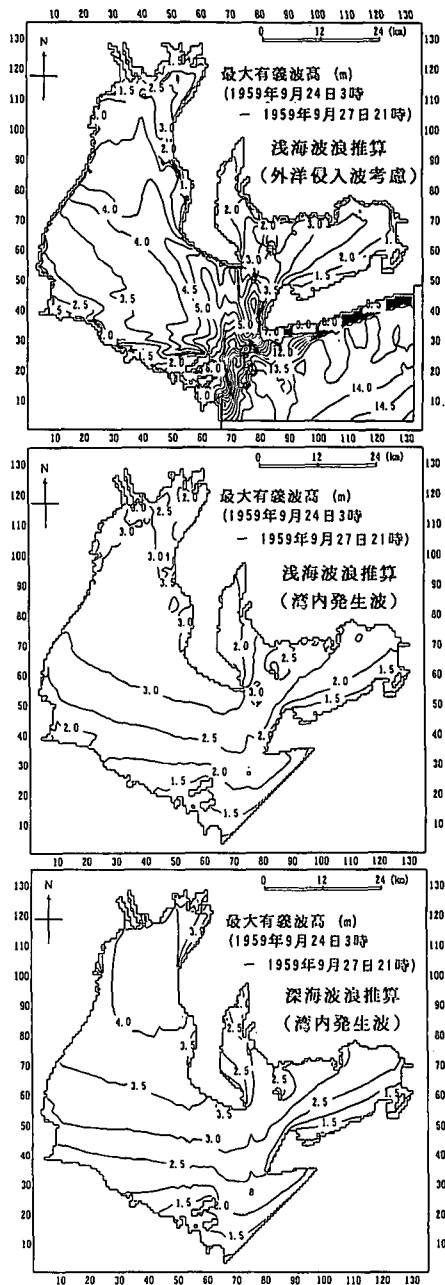


図-10 伊勢湾内の最大有義波高分布の比較

を見るために、外洋・内湾浅海追算・内湾浅海追算と、水深無限大と仮定した湾内の波浪追算 (深海波追算) を行い、波浪場を比較する。図-10 は、3 種類の追算から求められた伊勢湾内の最大有義波高の分布である。外洋・内湾浅海追算は他と比較すると、外洋侵入波の影響により、湾口より見通される海域において波高が大きいが、また、内湾浅海追算は深海波追算と比較して、湾内全域で平均的に波高が小さく、局所的な波高の高低も見られ

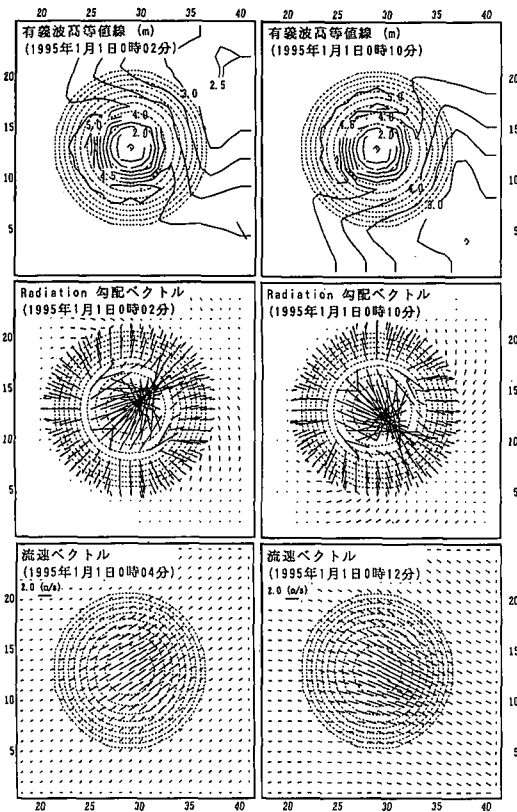


図-11 球面浅瀬周辺の時間変化する有義波高・Radiation 応力項・海浜流の分布

る。すなわち、波の発達量は水深が浅いと小さく、エネルギーは屈折・浅水変形により局所的に集中・発散する水深効果が明らかに認められる。

このように、外洋侵入波の影響と、浅海変形・浅海波の発達・底面摩擦等の水深効果は、発生する波浪場に著しい影響を与える。さらに、外洋侵入波と湾内発生波は時々刻々変化するため、本研究で行ったように、2成分を同時に追跡することが望まれる。

4. 時間変化する海浜流計算への応用

浅海波浪推算モデルによる波浪場を利用する応用問題として、波向が時間的に変化する波が球面浅瀬を伝播する場合を想定し、波高・radiation 応力(勾配ベクトル)・海浜流の分布を計算する。地形条件は前述したものと同様であり、波浪の作用時間は20分で、開始後2分間は225°方向(x 軸正方向を基準に半時計回りにとる角度)から伝播し、その後6分間で135°まで変化する。

図-11は、計算開始後2分と10分の有義波高・radiation 応力の勾配ベクトルの分布と、4分後と12分後の海浜流の流速ベクトルを表す。海浜流は、radiation 応力項

を浅海長波方程式に適用することから計算する。応力は、球面浅瀬斜面上の砕波点から浅瀬背後にかけて強く作用し、浅瀬斜面の砕波点以深では、放射状に外向き応力が作用する。定性的に、波高の高い点から低い点に向かって応力は作用する。海浜流は、浅瀬上から背後にかけて強い流速となり、波向きが変化するとともに、次第に波向と同方向に流向が変化する。流向は、波向の変化から2分程度遅れて変化する。

この例に示すように、浅海波浪推算モデルにより、時間変化する平面波浪場が計算され、この結果をもとに、海浜流計算を行うことも可能である。

5. おわりに

本論文の成果は、次のようにまとめられる。

① 波の発達・減衰と浅海変形(浅水・屈折・砕波変形)を考慮した浅海波浪推算モデルを提案した。このモデルは、MRI法深海波浪推算モデルの発展形である。

② 浅海波浪推算モデルを伊勢湾台風時の波浪追算に適用した。このモデルにより、伊勢湾等の半閉鎖性海域における湾内発生波と外洋侵入波の共存する波浪場を、時間的に追跡することが可能となった。

③ 浅海波浪推算モデルによる計算結果を利用すると、時間変化する波浪・応力・海浜流分布を求めることが可能である。

なお、本研究で行った伊勢湾台風の波浪追算は、検証を行うに足る当時の波浪情報がないことから、定性的な評価に終始せざるを得なかった。推算精度の検証については、今後に残される課題である。

謝辞：本研究を進める過程で、東海大学土木工学科後藤智明教授から多くの御助言を頂いた。また、波浪推算モデルの開発に当たって、(株)テトラ 佐藤勝弘氏、(株)エコー 久高将信氏の御尽力を得た。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄・小淵恵一郎(1986): エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪推算モデルの適用性について, 土木学会論文集, 第369号, II-5, pp. 233-242.
- 磯崎一郎・宇治 豪(1974): 海上風数値モデルの波浪予報への応用, 気象研究所報告, 第25巻, 第3号, pp. 197-231.
- 合田良美(1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻3号, pp. 59-106.
- 後藤智明・柴木秀之(1993): 海上風の特性と陸上地形の影響を考慮した海上風推算モデル, 港湾技術研究所報告, 第33巻3号.
- 合田良美・鈴木康正(1975): 光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.