

長期浅海波浪推算システムの適用性の検討と 沿岸波浪エネルギーの推定

山口正隆*・畑田佳男**・旭置武志***

1. 緒 言

海浜変形の研究にあたっては、長期波浪特性（波候）の究明が必須であることから、山口ら（1990, 1993）は、気圧観測結果を入力値とする海上風推算モデルと、エネルギー平衡方程式に基づく1点深海波浪推算モデルより構成される長期深海波浪推算システム（深海システム）を開発し、日本海沿岸8～14地点における2～8年間の波浪追算結果と観測結果との比較から波候推定に対する深海システムの有効性を確認した。しかし、海底地形の影響を受けた沿岸での波浪をより精度よく推定するためには、長期浅海波浪推算システム（浅海システム）を使用する必要がある。

そこで、本研究では浅海システムを利用して、日本海沿岸14地点における1986年～1987年の2年間の海上風および波浪追算を実施し、観測結果や深海システムによる追算結果との比較から、浅海性の影響を考慮した本システムの有効性を検討する。また、その応用例として、新潟県沿岸の海岸域における長期追算波浪時系列を入力条件とする浅海波浪変形計算から、数年単位の碎波点沿岸方向エネルギーフラックスの沿岸分布の推定を試みる。

2. 長期浅海波浪推算システムの概要

本システムの海上風推算モデルは、日本海沿岸の気圧観測点と低気圧・高気圧中心での気圧値を入力データとして、塩野ら（1985）による加重1次補間法（重み係数 $1/\omega^4$ 、 ω は格子点と気圧入力点間の距離）の適用から、日本海全域を覆う格子点上の気圧値を内挿し、場の非定常変化に伴う変圧風まで考慮できる Bijvoet（1957）のモデルから海上風分布の経時変化を推定するものである。

気圧・風計算格子網として、図-1に示す43個の気圧観測点を含む格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 80$ km、格子分割数 28×41 の日本海大領域を使用する。図中の番号は国際地点番号、丸印内番号は地区番号を意味する。気圧デー

タは1985年12月29日3時より1987年12月31日24時に至る2年間に亘り3時間ごとに上記43地点および低気圧・高気圧中心で気象庁日原簿資料、気象庁海洋気象ブイ・ポット観測資料、世界気象資料、アジア太平洋天気図より採録する。海上風の空間分布は図-1の格子網上において3時間間隔で計算し、波浪追算に用いる海上風分布はこれをさらに1時間ごとに内挿する。計算に際しては過大な風速の出現を避けるため、気圧分布を9点加重平滑化式により3回空間平滑するとともに、観測結果との相関を考慮して気温・水温差を地点および年ごとに -1°C ないし -2°C として Bijvoet のモデルにおける係数を与える。

一方、波浪推算モデルは、山口ら（1987）のエネルギー平衡方程式に基づく1点浅海波浪推算モデルに長期間の計算を効率よく行うための、数値計算法に関する改良を加えたものである。計算に用いる周波数は $0.055 \sim 0.75$ Hz 間を不等分割した25個、方向は各波浪追算点に

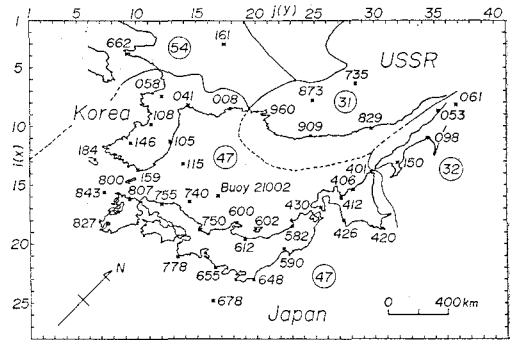


図-1 風計算格子網および気圧入力点

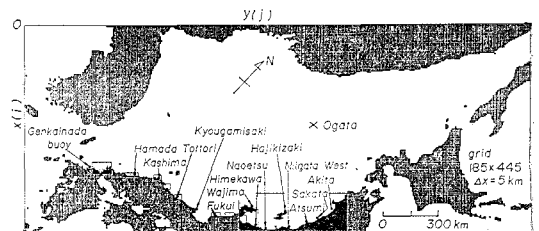


図-2 波計算格子網および波浪追算点

* 正 会 員 工 博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科

** 正 会 員 工 修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科

*** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

おける波向線計算に基づいて、周波数別に決定した波浪の到達範囲を等分割した21~22個である。計算領域は、図-2に示すように、波浪追算結果に及ぼす陸地および水深の影響を詳細に考慮するために、日本海全域を格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ km}$ で、波浪追算点周辺海域を格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$ で近似し、両者を結合した2段階格子網であり、秋田から玄海灘に至る日本海沿岸14波浪観測点を波浪追算点として選択する。境界条件は、日本海全域がすべて陸地境界に囲まれていると仮定し、波浪追算点より出発後陸地境界に達した波向線の先端では、方向スペクトルの値を0とすることにより与える。

3. 長期浅海波浪推算システムの適用性

両システムに基づく有義波・平均波向の追算結果と観測結果との比較を、③波浪時系列、④通年誤差統計量（通年平均波高・周期 $\overline{H_{1/3}}$, $\overline{T_{1/3}}$, 波高・周期の2乗平均誤差 σ_H , σ_T , 波高・周期の相関係数 ρ_H , ρ_T , 波高2m以上の高波出現率 p), ⑤波高・周期の散乱図, ⑥月平均波高・周期と高波出現率の経月変化, ⑦波高・周期出現率, ⑧波高と周期の相関分布, ⑨波向別高波出現率, という形で行い、本システムの精度を検討する。

図-3は鳥取における波浪時系列（3ヶ月）の比較例であり、個々のストームについては若干の時間変化のずれや過大あるいは過小評価傾向もあるが、全般的には浅海システムによる追算結果は観測結果に非常によく追従し、深海システムによる山口ら（1990）の結果よりさらに再現性が向上する。図-4は上述の誤差統計量の沿岸分布図である。波高に関しては両システムとも十分な精度をもつが、とりわけ浅海システムはほとんどの地点で深海システムより、観測結果に近い平均波高、小さい σ_H , 大きい ρ_H を与えることから、再現性がより良好である。また、高波出現率についても浅海システムは温海、輪島、鹿島を除く地点で観測結果により近い値を示す。一方、周期に関しては相関係数が0.1程度低下するものの、波高の場合と同様の結果が得られる。

図-5は有義波に対する追算結果と観測結果との間の散乱図の1例を弾崎について示したものであり、同一時

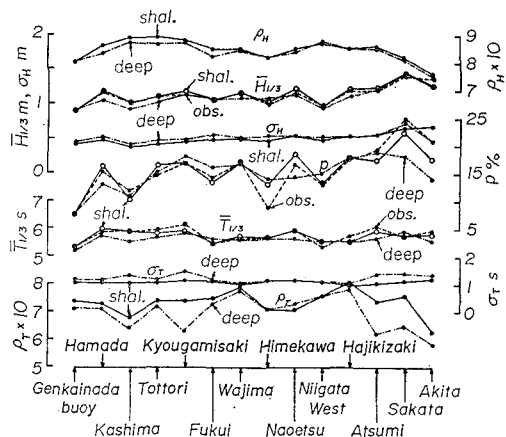


図-4 通年誤差統計量の沿岸分布

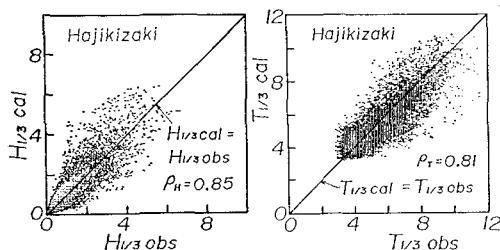


図-5 波高および周期の散乱図

刻の波浪資料がプロットされる。個々の資料は完全相関を表わす直線のまわりに幅広く分布するが、波高および周期に関するそれぞれの相関係数は0.85および0.81であるから、本システムはかなり良好な追算精度を与える。

図-6は日本海沿岸14地点での月平均有義波および月平均高波出現率の経月変化に関する比較図である。まず、月平均波高については、玄海灘・浜田・鳥取でよく一致する。秋田・酒田・温海・直江津では、3月~5月に追算結果が観測結果より大きい傾向にあり、9月・10月ではすべての地点で過小評価傾向にある。高波出現率については、秋田・酒田・温海では冬季・秋季に過小評価、逆に玄海灘・酒田では過大評価の傾向にあり、直江津・姫川では3月~4月における過小評価傾向が目立つ。また、全体的に夏季において過大評価傾向、秋季に

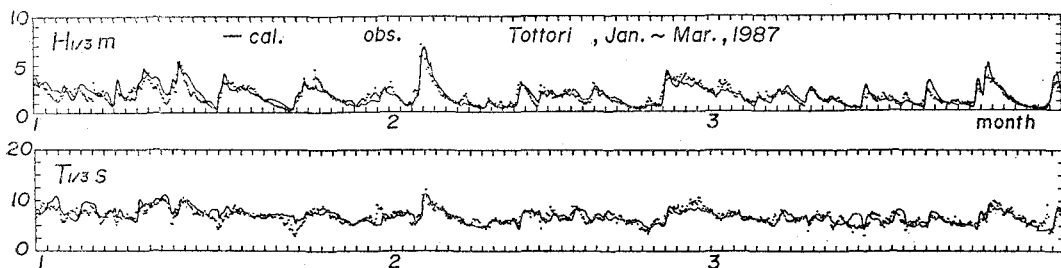


図-3 波浪時系列の比較（鳥取）

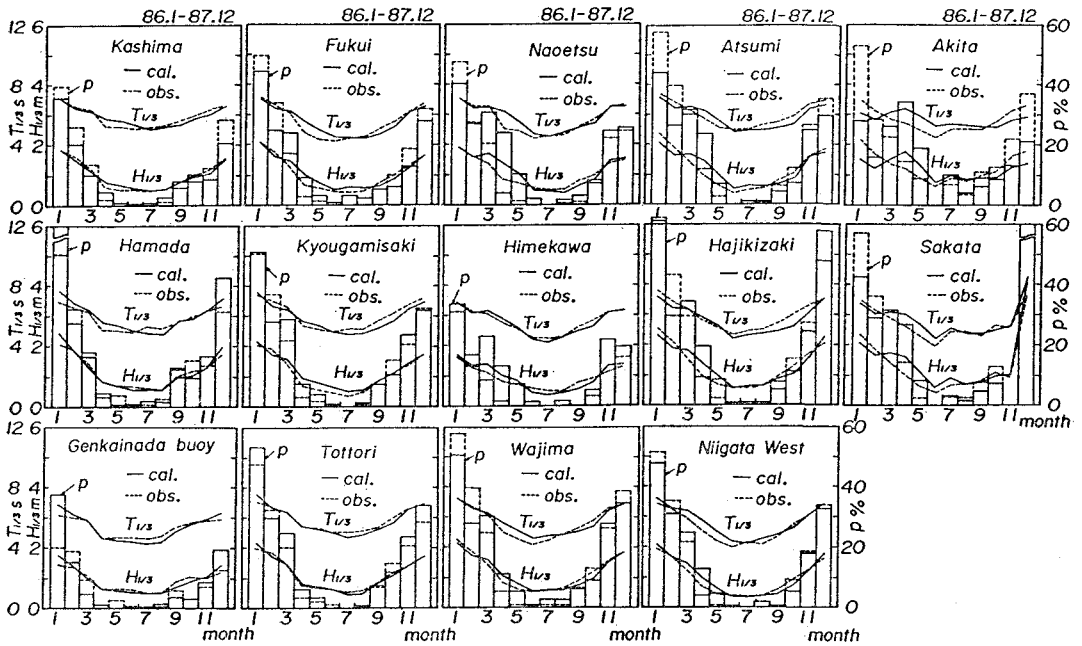


図-6 月平均波おおよび高波出現率の経月変化に関する比較

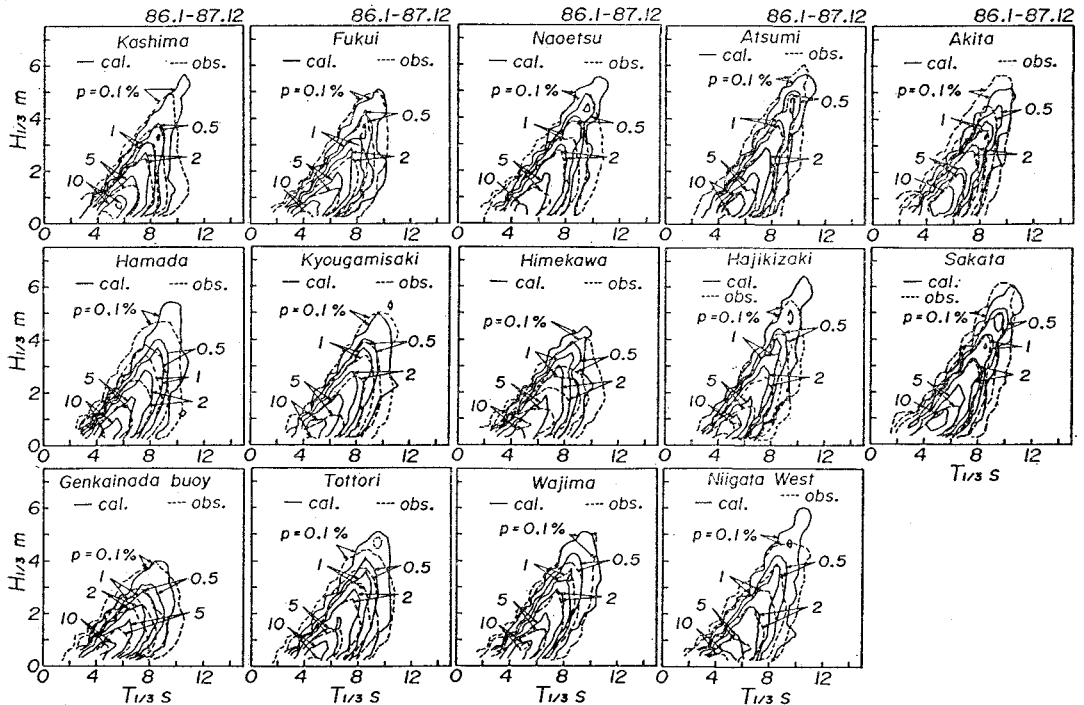


図-7 波高と周期の相関分布に関する比較

において過小評価傾向を生ずる。一方、月平均周期については、秋田・酒田・直江津で3月～6月に過大評価、秋田・温海・経ヶ岬で8月～12月に過小評価傾向にあるが、それ以外の地点では、鳥取をはじめとして各地点における追算結果と観測結果の対応は良好である。これらの結果から、本システムは、冬季・秋季に高波浪が出現し、夏季・春季に静穏な状態が続くという日本海に特有な波特性の経月変化をかなり精度よく再現するといえよう。

図一7は、波高と周期の相関分布に関する追算結果と観測結果の比較図である。玄海灘・姫川における観測結果の等値線は他地点のものに比べて少し下に押しつぶされた形を示すが、いずれの地点においても波高と周期の相関がかなり高いため、観測結果の等値線は右斜め上方に伸びた形をとる。この形は日本海特有のものであり、本システムはこうした特性をよく再現する。しかし、観測結果の相関分布は追算結果の相関分布に比べて、分布

幅が広く、やや右下方に下がり気味である。これは、本システムがほとんどの地点で低波高部あるいは短周期部を過大評価するためである。

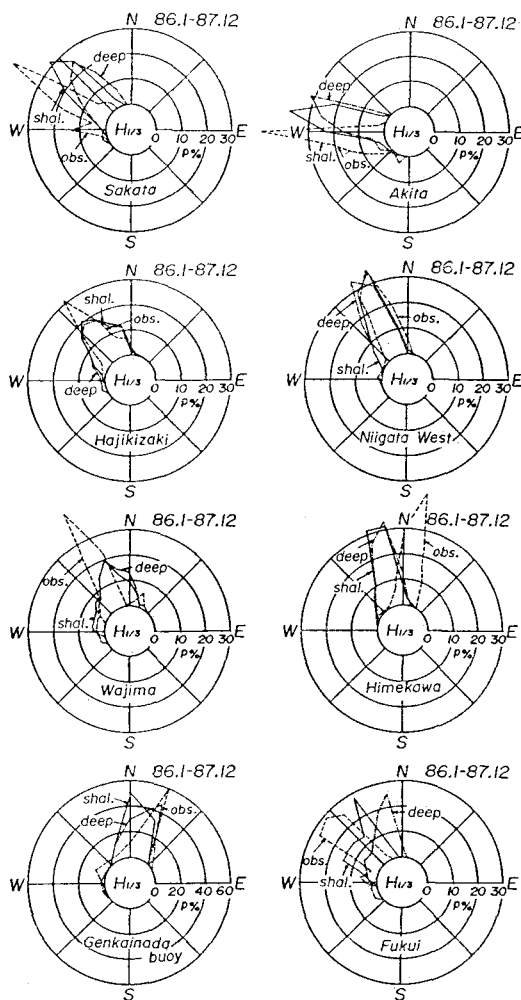
図一8は両システムによる波高2m以上の波向別高波出現率を観測結果（新潟西では、1982年～1989年の8年間資料）と比較したものである。まず波高計設置水深が大きい弾崎では、両システムによる結果はあまり変わらず、方向分布幅が多少広いものの、卓越波向・方向分布幅とも観測結果と比較的よく一致する。こうした傾向は輪島でも見出されるが、方向分布幅を広く評価する。一方、波高計設置水深が小さい秋田・酒田・新潟西・福井では浅海システムの卓越波向は屈折の影響により深海システムの卓越波向に比べて 10° ほど観測卓越波向に近づく方向にずれる。この結果、とくに新潟西では浅海システムによる卓越波向や方向分布幅は観測結果とよく一致するが、秋田・酒田・福井では追算卓越波向と観測卓越波向との間のずれは残る。

玄海灘では、浅海システムは観測結果よりN寄りの波向を与えることから、深海システムに比べて再現性が低下する。また、姫川における追算卓越波向はいずれも観測結果より $1 \sim 2$ 方位反時計まわりにずれる。最近行われた宇多ら（1991）の観測結果によると、冬季（1989年12月25日～1990年3月10日）の主波向はNNWであって、追算結果とはほぼ一致する。したがって、姫川における不一致は追算精度よりむしろ波向観測の精度に問題があることによると推定される。

4. 沿岸方向エネルギーフラックスの推定

特定海岸における長期間の沿岸方向エネルギーフラックスは、代表波高、周期および波向を入力条件とする波浪変形計算結果に各出現率を乗じて推定されることが多いけれども、海浜変形の解析においてはエネルギーフラックスの時系列的な変化特性も必要であるという観点から、本研究では入射波特性を時系列的に与えた波浪変形計算に基づく推定を行う。この場合、数km範囲の沿岸域において数万回の波浪変形計算を行うことになるので、規則波を対象として、計算効率や精度が高くしかも汎用性や安定性に優れた屈折モデルの適用を検討した。

流れを考慮した屈折モデルの基礎方程式は波数の保存則および非回転条件、ドブラーの関係式、wave actionの保存則であり、砕波限界および砕波減衰項は Battjes の砕波条件および段波モデルにより評価する。そして数値解法として差分法および特性曲線法を利用した5種類の屈折モデルを作成し、種々のモデル地形に対する波浪変形計算結果を比較したところ、Dalrymple 差分法は強い指向性により、正負の波向をとる不規則な地形では解を生じない場合もあるが、精度が高く、しかも適用可能な入射角の範囲が 70° 以内と非常に広いことや、2段階



図一8 波向別高波出現率に関する比較

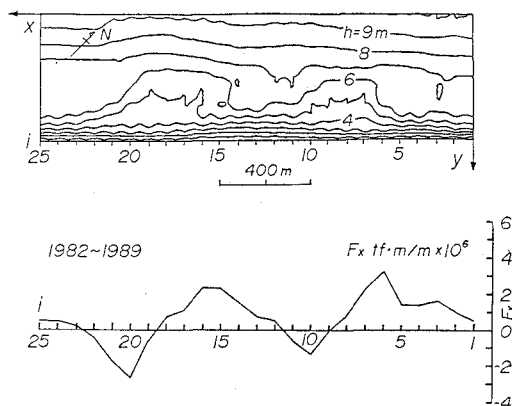


図-9 等深線分布およびエネルギーフラックスの沿岸分布

Lax-Wendroff 差分法は Dalrymple 差分法と同程度の精度をもつが、入射角が 45° 以内に限定されることなどが明らかになったので、両者の特性を考慮して Dalrymple 差分法モデルを優先的に使用し、2段階 Lax-Wendroff 差分法モデルを補助的に併用する屈折計算システムを開発した。

波浪変形計算は深海システムによって8年間(1982年～1989年)にわたり2時間ごとに追算した深海波浪時系列を沖波条件として、新潟県大潟海岸のうち水深10m以浅の海岸域をモデル化した沿岸地形(沿岸方向を格子間隔 $\Delta x = 80$ mで25に、岸沖方向を格子間隔 $\Delta y = 20$ m、汀線部では $\Delta y = 10$ mで33に分割)上でを行い、砕波点における沿岸方向エネルギーフラックスの経時変化および累積値を算出した。また、水深10m以深の海域を平行等深線地形と仮定して沖合での屈折変形を考慮した。

図-9はモデル地形の等深線分布と砕波点における年平均沿岸方向エネルギーフラックス F_x の沿岸分布である。長期的にみれば、エネルギーフラックスは正負の変動を伴いながら東方(座標原点方向)に向けて漸増する挙動を示す。

5. 結 語

本研究で得られた結果はつぎのように要約される。

(i) 日本海沿岸での波候推定に対する長期波浪推算システムの精度は良好であり、なかでも浅海システムは

波向を含めたほとんどすべての検討項目で深海システムより高い適合性を与える。しかし、浅海システムによっても追算波向と観測波向との間にずれが残る傾向にある。

(ii) 浅海システムでは2年間の波浪追算に要する計算時間は FACOM-M-780 で約70分(深海システムでは約22分)であるから、本システムは日本海沿岸任意地点の波向を含む波候をかなり高い信頼性をもって効率的に推定しようという意味で十分実用性を有する。

(iii) 深海システムあるいは浅海システムと波浪変形モデルとの組み合わせにより、数年単位の砕波点沿岸方向エネルギーフラックスの沿岸分布を推定することが可能であり、沿岸漂砂の解析に有力な手段を提供する。

最後に、風および波浪観測資料を提供戴いた運輸省第1, 第3, 第4港湾建設局と新潟県土木部に深甚の謝意を表するとともに、入力データの作成および図の作成を手伝った愛媛大学工学部土木海洋工学科大福 学技官ならびに4回生諸君に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 宇多高明・浅香恵則・湯田 寛 (1991): 糸魚川海岸における人工リーフ周辺の波、流れ、漂砂の現地観測(2)——水位上昇とリーフ上の沖向き漂砂に注目して——, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 151-155.
- 塩野清治・弘原海 清・升本眞二 (1985): パソコンで不規則に分布するデータを格子データに変換してコンターマップを作成する方法(1)——加重一次補間法——, 情報地質, (10), pp. 65-78.
- 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博 (1987): 一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 151-160.
- 山口正隆・畑田佳男・大福 学・西岡賢嗣 (1990): 波浪追算に基づく日本海沿岸での波候の推定, 自然災害科学, 9-3, pp. 18-42.
- 山口正隆・畑田佳男・大福 学・西岡賢嗣・旭置武志 (1993): 日本海沿岸での波候推定に対する長期深海波浪推算システムの適用性, 愛媛大学工学部紀要, 12巻4号(投稿中).
- Bijvoet, H. C. (1957): A new overlay for the determination of the surface wind over sea from surface weather charts, KNMI, Mededelingen en Verhandelingen, Vol. 71, pp. 1-35.
- Dalrymple, R. A. (1988): Model for refraction of water waves, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 114, No. 4, pp. 423-431.