

波浪推算モデルとその利用

RECENT PROGRESS IN WAVE HINDCASTING MODELS AND THEIR APPLICATIONS

橋本典明¹・川口浩二²
Noriaki HASHIMOTO, Koji KAWAGUCHI

¹正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海洋水理研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 (独) 港湾空港技術研究所 主任研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

In the field of coastal engineering, so far the wave hindcasting has been executed for several limited purposes such as the clarification of the cause of the disaster due to waves, the interpolation of missing wave observation data and the determination of design wave conditions for maritime structures since the wave hindcasting was usually expensive and special knowledge was sometimes required to the executions. Recently, the wave hindcasting models have been improved as seen in the successful development of the third generation wave models such as WAM, SWAN and Wave Watch III. In addition, accurate and reliable meteorological data for several decades has been supplied from the international organizations such as ECMWF and NCEP. Thus the simulation of ocean waves with those wave models and meteorological data for the past of tens of years becomes easier. The accurate and reliable wave information can be obtained for long term in various coastal areas where there is no wave observation data. In this paper, we introduce the recent situation concerning the wave hindcasting models and their applications.

Key Words : Wave hindcasting model, Directional wave spectrum, Wind waves, Swell

1. はじめに

近年, 気象情報の高精度化に伴って波浪推算法の高精度化が進んでいる。特に, これまでは単に波高・周期・波向に関する情報のみであったものが, 現在では, 方向スペクトルに関する情報が精度よく推算可能になりつつある。本稿では, 港湾や海岸の計画・設計・施工・管理・運営等のあらゆる段階において必要不可欠な信頼性の高い波浪情報を提供可能な高精度波浪推算法の現況を紹介する。

2. 波浪推算モデル

近代的な波浪推算法は第2次世界大戦中の研究成果を戦後に発表したSverdrup・Munk¹⁾の有義波法にまで遡る。現在では波浪の不規則性をより直接的に考慮してスペクトルの概念を導入したスペクトル法と呼ばれる波浪推算法が主に用いられている。最近では, 波浪の非線形効果をできるだけ正確に取り入れて波浪推算を行う第3世代のスペクトル法へと移行している。

第3世代モデルの代表にWAMと呼ばれる波浪推

算モデルがある。WAMはドイツのHasselmannやオランダのKomenらが中心になって世界各国の波浪を研究している研究者らを集めて結成したWAMDIグループ^{2),3)}によって開発された。WAMはその後も改良が重ねられ, 現在ではWAM Cycle 4と呼ばれるモデルが用いられている。WAMはヨーロッパ各国を初めとして, 米国, カナダ, オーストラリアなど世界の多くの国々で既に標準的な波浪推算モデルとして用いられている。

WAMは主として深海域を対象とした波浪推算モデルであるが, 浅海域における波浪の特性を考慮した第3世代波浪推算モデルにSWAM⁴⁾がある。この他にも, 米国のNOAAではWave Watch III⁵⁾, 我が国気象庁ではMRI III⁶⁾, 気象協会ではJWA3G⁷⁾などがWAMに基づいて開発されている。これらのモデルの内, WAM, SWAN, Wave Watch IIIのソースコードや利用マニュアルは公開されており, 誰でも自由に使用できる。

WAMでは平面座標系と球面座標系の2種類の座標系を選択できる。また風から波へのエネルギー輸送, 4波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送, 白波砕波によるエネルギー散逸, 海底摩擦によるエネルギー散逸などが考慮されている。

SWANではさらに浅水砕波によるエネルギー散逸、3波共鳴相互作用による成分波間のエネルギー輸送、構造物による反射なども考慮されている。Wave Watch IIIでは、風から波へのエネルギー輸送や非線形相互作用の計算に独自の方法が導入されている。また、これらのモデルにはグリッド・ネスティングが導入されており、これにより粗い計算格子を用いた大領域の計算から細かい計算格子を用いた局所的な地形へと計算を接続して行うことができる。

WAM, SWANおよびMRI IIIの計算精度については橋本ら^{8),9)}, 間瀬ら¹⁰⁾, 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会¹¹⁾が検討している。橋本ら⁸⁾は、WAMは第1世代波浪推算法MRIよりも推算精度が高く、特に周期の精度が高いと報告している。また、MRIでは精度良く推算できなかった風波とうねりが混在する複雑な波浪場の方向スペクトルも精度良く推算可能であると報告している。図-1は、福江島における波浪観測値とWAMによる推算値の時系列比較図の一例である。図-2はいわき沖で観測された方向スペクトルと推算値を比較した一例である。これらの図に見られるように、WAMによる波浪推算は有義波高・周期などのパラメータのみならず、方向スペクトルも精度良く推算できることが分かる。

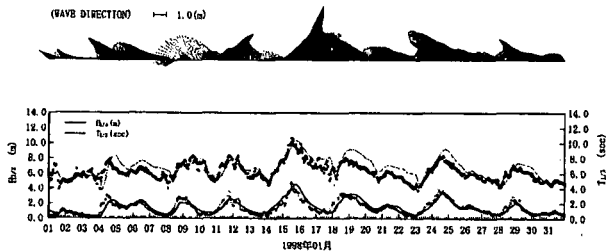


図-1 波浪観測値と推算値との比較(実線：推算値)

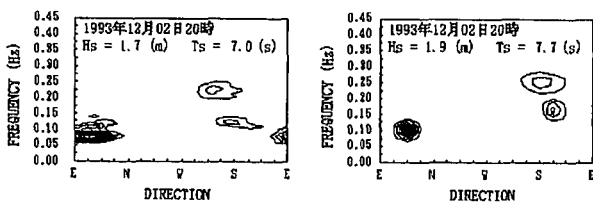


図-2 方向スペクトル観測値(左)と推算値(右)の比較

3. 波浪推算の高精度化を目的とした改良

(1) 移流項の計算

波浪エネルギーのような正で定義される物理量の移流項の計算に中央差分系のスキームを適用すると負の値が生じてしまうため、上流差分系のスキームが用いられる。WAMでは移流項の計算に1次上流差分が採用されている。このスキームは計算時間がかからないという利点はあるものの、エネルギーの拡散が大きすぎるという欠点がある。一方、波浪の方向スペクトルのようにエネルギーを方向について離散化するモデルでは、移流項の差分近似精度を上

げて数値拡散を極力抑えることが必ずしも望ましい計算結果を与えないという問題が生じる。すなわち、波浪エネルギー伝播の等方性を設定していても、波向を離散化して処理したために、遠方ではエネルギーが全く届かない領域が現れるという2次元伝播に特有の「スプリンクラー効果」が現れる。このような問題を解決する目的で、Suzuki⁷⁾は予測子として1次上流差分、修正子として3次上流差分を用いて2段階で差分計算を行うハイブリッド上流差分を採用して差分近似精度を上げて数値拡散を抑えると同時に、伝播方向と直交する方向に人工拡散項を導入してJWA3Gに導入した。SWANやWave Watch IIIも同様に高精度な差分近似を導入すると同時に人工拡散項が導入されている。その他、増田・小松¹²⁾は独自の方法も含む幾つかの差分スキームを用いた検討を行い有用な情報を報告している。

(2) 風から波へのエネルギー輸送

風から波へのエネルギー輸送項には、一般にPhillipsの共鳴機構とMilesの不安定機構が考慮されることが多い。しかし、WAMではPhillips機構が無視されているため、初期状態で波浪スペクトルのエネルギーが0であれば、そこでは波が発生しないので、注意が必要である。また、WAM Cycle 4では、Cycle 3で用いられていた風から波へのエネルギー輸送項を改良し、JanssenのQuasi-linear理論が採用されている。この理論の採用により、同じ風場が与えられた場合でも海面の状態に依存して風から波へのエネルギー輸送量が異なることになり、より現実に近い定式化に改良された。すなわち、波齢の大きい波よりも波齢の小さな波の方が、風から波へのエネルギー輸送が活発に行われる。しかし、最近の著者らの検討によると、Cycle 4で用いられているQuasi-linear理論の採用は必ずしも高精度化に寄与するとは限らない。確かに、ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts) の海上風データを用いてWAM Cycle 4で推算すると、Cycle 4は高精度な波浪場を再現可能である。しかし、気象庁発行の地上天気図から読みとられた気圧データをもとに傾度風モデルや台風モデルで推算した海上風にCycle 4を適用すると、観測値よりもかなり大きい波高が推算される場合がある。このような場合には、Quasi-linear理論の代わりにCycle 3で用いられていたWu¹³⁾の抗力係数 C_D に関する関係式を用いた方が妥当な波高が推算される。このように、WAM Cycle 4にもデータに依存する幾つかのパラメータが残されている。WAMはECMWFの海上風データを用いる場合に精度良く推算できるようにチューニングされたモデルであると言えよう。なお、SWANでは風から波へのエネルギー輸送項は複数のオプションから選択できるようになっている。

(3) 非線形相互作用

第3世代波浪推算モデルは、方向スペクトル形状

の相似性を仮定せずに、波浪方向スペクトル成分波間の非線形相互作用を明示的に評価したモデルである。WAMでは非線形相互作用の計算にHasselmannら¹⁴⁾が開発した離散相互作用近似(DIA)が用いられている。これは成分波間のエネルギー輸送に関する無数の4波共鳴配置を唯一つの配置で代表させて計算するものである。DIAの導入によってWAMでは複雑に変動する風場への応答特性が従来の予報モデルに比べて向上した。しかし、DIAは緩やかなエネルギー分布をもつPierson-Moskowitz(PM)スペクトルに対しては厳密計算値とよく対応するが、エネルギー分布の鋭いJONSWAPスペクトルに対しては近似精度が低下する。このような問題を解消する目的で、Suzuki⁷⁾はDIAのパラメータを修正し、鋭いスペクトル形状への適合性をやや向上させた。また、植野ら⁹⁾は、DIAの組み合わせを3つに増やすことによって精度向上を図り、MRI-III(気象庁)を開発した。橋本ら¹⁵⁾は、植野らの方法を再検討し、複数のDIAの組み合わせに対する最適係数を提案した。一方、このようなDIAを拡張するアプローチとは別に、小松ら^{16),17)}はMasuda¹⁸⁾の厳密計算法の精度を損なうことなく高精度で効率的な非線形エネルギー輸送の計算法(RIAM法¹⁶⁾、SRIAM法¹⁷⁾)を提案した。その他、Wave Watch IIIではニューラルネットワークを利用した計算法が利用されている。

浅海域では非線形相互作用の影響は増大する。WAMやSWANでは深海条件で計算されたDIAに補正係数 $R(k_p, h)$ を掛けて浅海域での非線形相互作用によるエネルギー輸送を計算している。しかし、このような方法では、浅海域でスペクトルのエネルギーピークが低周波数側へシフトする現象を再現することができない。橋本ら^{19),20)}は、小松ら²¹⁾の方法に基づいて浅海域においても高精度で安定した非線形相互作用によるエネルギー輸送が計算可能な方法を開発し、これをSWANに適用してその妥当性を確認している。ただし、この方法は厳密計算法であり、膨大な計算時間を要することから、今後さらに効率的な計算法の開発が望まれる。

(4) リミター

WAMは外洋波浪推算においては多くの実績を持つが、内湾・浅海域においては使用例が少ない。このためWAMに含まれる幾つかのパラメータは主として外洋の推算に適合するようにチューニングされており、必ずしも沿岸域や内湾の推算には適していない。そのようなパラメータの一つにリミターがある。リミターは単位時間当たりのエネルギーの増分に上限を設けるものである。WAMをデフォルトままで内湾の細格子の計算に適用すると、リミターの作用により波は発達しない。そのような問題点を解消する目的で、Hersbach・Janssen²²⁾は細格子に適用できるようにリミターを改良した。しかし、著者らの検討によると、このような改良を導入しても不都合が生じる場合があることから、さらに検討が必要である。

4. 波浪推算の利用

現在のところ、我が国の波浪観測点の数はそれほど多くなく、しかもそのほとんどが沿岸域に集中している。また、計測器による観測が始められてからの期間もそれほど長くなく、非常に長いところでもせいぜい30年程度である。したがって、台風域内の波浪分布、広い海洋全域における波浪の性質、特定海域の波浪の極値あるいは設計波、これらを明らかにするためには観測データのみでは十分ではなく、気象データを用いて波浪推算を行い、そのデータをもとに検討を行わざるを得ない。特に最近では、ECMWFやNCEP(National Centers for Environmental Prediction)などの機関から高精度で高分解能の気象データが提供されるようになってきた。波浪推算の精度は風データの精度に大きく依存するが、最近の風データの精度向上に伴って波浪推算精度も向上し、波浪推算法を利用した種々の工学的な応用が可能になってきた。川口ら^{23),24)}はWAM Cycle 4を参考にして、高精度化を目的とした改良を行い、我が国周辺海域への適用性や推算精度の検討を進めている。

(1) 波浪推算結果の利用環境の整備

WAMやSWAN等を用いて波浪推算を実施する場合、推算結果を実務で有効利用するためには、適切なGUI(Graphical User Interface)があれば便利である。著者らはこのような目的で波浪推算図画処理システムを開発し、自らの研究や実務に用いている。図-3は標準的なメニュー画面の例である。この画面上で地点や期間などのパラメータを指定すれば、任意地点、任意期間の波浪情報が、波高・周期・波向のみならず方向スペクトルも容易に取り出せる。また、期間と海域を設定すれば、メニューに含まれる種々の統計処理を行うこともできる。図-4は波高・周期・波向の時系列図、図-5は方向スペクトル図、図-6は波高の平面分布図の例で図中には波向も矢線で示している。表-1と表-2は波高・周期の出現頻度と波向の出現頻度を示した例である。このように、GUIを用いれば、波浪推算の利用が容易になって、利用範囲が拡大する。

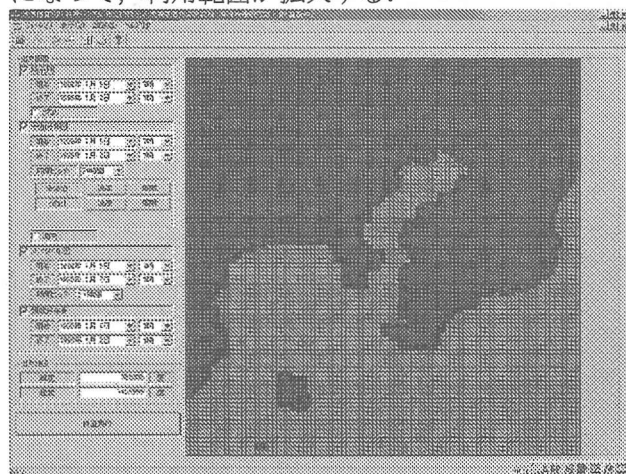


図-3 波浪推算解析処理システムのメニュー画面

表-1 波浪推算解析処理システムの出力例
(波高・周期出現頻度表)

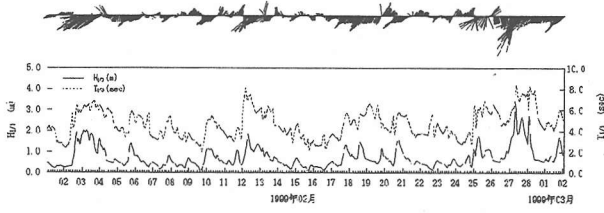


図-4 波浪推算解析処理システムの出力例
(波浪諸元の時系列図)

出力地点：北緯 35.1333度 東経139.6833度

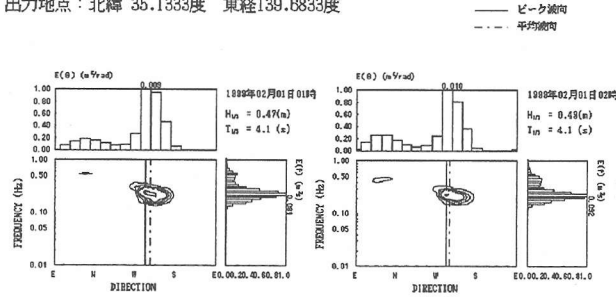


図-5 波浪推算解析処理システムの出力例
(方向スペクトル図)

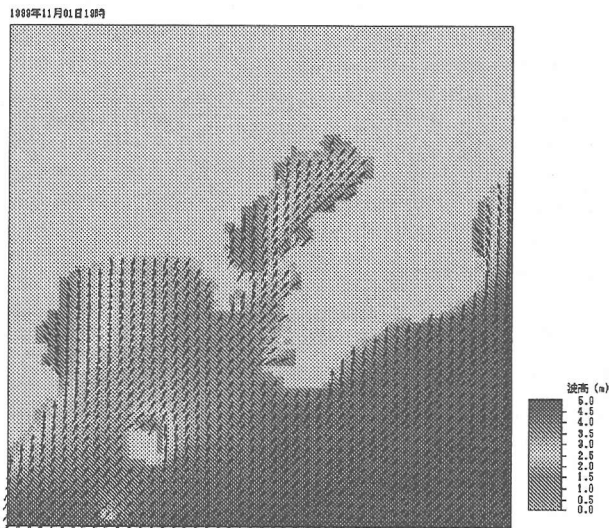


図-6 波浪推算解析処理システムの出力例
(波高・波向平面分布図)

(2) 波浪推算の利用

著者らは、ECMWFの海上風データを利用した長期間にわたる波浪推算を実施し、高精度波浪推算法による我が国沿岸の波浪の出現特性の解明に関する研究を進めている^{23),24)}。

図-7は8年間の波浪推算値を基に有義波高の平均値の空間分布を示したものである。波浪推算を用いれば沿岸域のみならず周辺の広い海域の波浪の出現特性を検討できる。

図-8は8年間の波浪推算値に基づいて日本沿岸の18地点における波向の出現特性を有義波高の大き

統計期間：1999年01月01日01時～1999年12月31日23時

Hw(m)	~4.0	4.0	~5.5	5.5	~7.0	7.0	~8.5	8.5	~10.0	10.0	~11.5	11.5	~13.0	13.0~	合計
~0.5	187 (2.1)	457 (5.2)	112 (1.3)	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	756 (8.7)
0.5	27 (0.4)	123 (1.4)	218 (2.5)	34 (0.4)	117 (1.3)	15 (0.2)	0	0	0	0	0	0	0	0	473 (5.4)
1.0	~1.5 (0.0)	24 (0.3)	471 (5.2)	235 (2.7)	471 (5.4)	235 (2.7)	117 (1.3)	15 (0.2)	0	0	0	0	0	0	1310 (15.1)
1.5	~2.0 (0.0)	0	398 (4.5)	172 (2.0)	118 (1.3)	102 (1.2)	18 (0.2)	0	0	0	0	0	0	0	796 (9.2)
2.0	~2.5 (0.0)	0	0	81 (0.9)	148 (1.7)	38 (0.4)	12 (0.1)	0	0	0	0	0	0	0	249 (2.9)
2.5	~3.0 (0.0)	0	0	0	88 (1.0)	45 (0.5)	13 (0.1)	0	0	0	0	0	0	0	146 (1.7)
3.0	~3.5 (0.0)	0	0	0	15 (0.2)	15 (0.2)	3 (0.0)	0	0	0	0	0	0	0	33 (0.4)
3.5	~4.0 (0.0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	~4.5 (0.0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	~5.0 (0.0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	(2.8)	(27.8)	(40.8)	(17.2)	(7.8)	(2.8)	(3.4)	(0.5)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	375 (4.4)

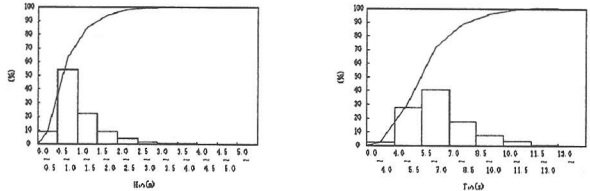
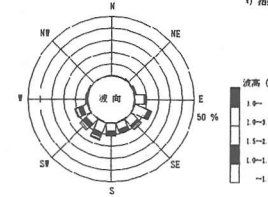


表-2 波浪推算解析処理システムの出力例
(波高・波向出現頻度表)

統計期間：1999年01月01日01時～1999年12月31日23時

Hw(m)	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	合計
~0.5	24 (0.3)	27 (0.3)	77 (0.9)	44 (0.5)	28 (0.3)	29 (0.3)	7 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	204 (2.4)
0.5	22 (0.3)	719 (8.2)	432 (5.0)	41 (0.5)	15 (0.2)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	1164 (13.6)
1.0	27 (0.3)	340 (3.9)	254 (2.9)	282 (3.3)	18 (0.2)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	971 (11.4)
1.5	19 (0.2)	119 (1.4)	152 (1.7)	212 (2.4)	11 (0.1)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	503 (5.9)
2.0	0 (0.0)	12 (0.1)	17 (0.2)	24 (0.3)	1 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	54 (0.6)
2.5	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
3.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
3.5	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
4.0	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
4.5	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
5.0~	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
合計	(0.0)	(15.5)	(13.1)	(11.5)	(1.3)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	375 (4.4)



さとともに示したものである。波向の観測地点は波浪観測地点に比べて少ないが、波浪推算を用いれば図-8に示されるように広い範囲の波高・周期・波向の出現特性を検討できる。

第3世代波浪推算法の長所は、前述のように、これら有義波諸元のみならず、方向スペクトルも精度良く推算可能である点にある。方向スペクトルを用いれば、さらに種々の応用が可能である。その1つの応用例に限界状態設計法への利用がある。港湾の施設の技術上の基準・同解説では、鉄筋コンクリート構造物の部材の安全性の検討は限界状態設計法によることが標準とされている。限界状態設計法による部材の安全性の検討は、終局限界状態、使用限界状態および疲労限界状態について行う。疲労限界状態の検討は、波高と周期の頻度表の全ての波高階級について、疲労寿命を評価し、階級毎の疲労寿命の総和が200万回を越えないことを確認する。

1992年～1999年 通年

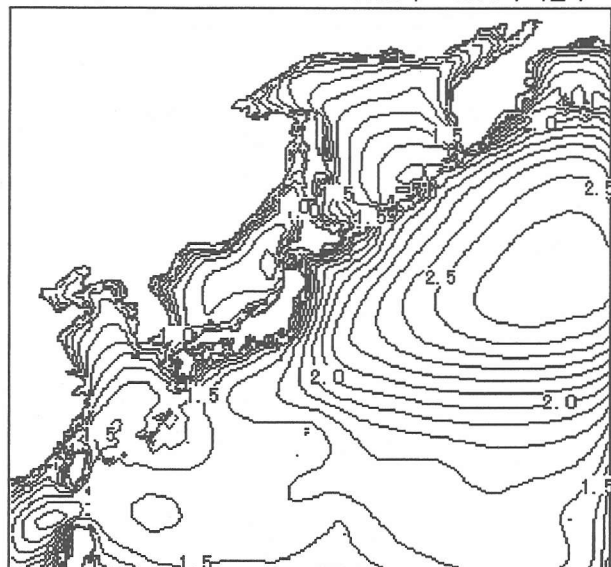


図-7 有義波高の平均値の空間分布図

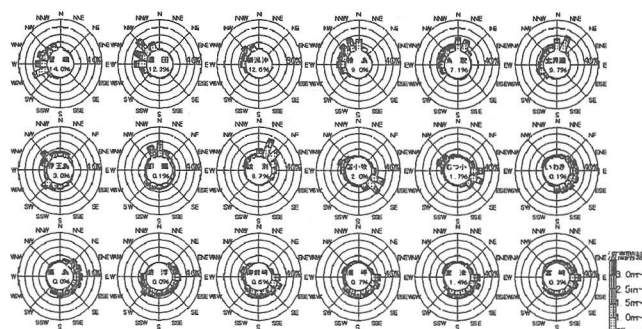


図-8 日本沿岸の波向の出現特性

すなわち、疲労限界状態の検討を行う場合には、供用期間に來襲する全ての波に対する波高と周期の頻度表が必要になる。このような検討を行う場合、波浪観測データが必要不可欠である。しかし、波浪観測データは観測期間が短いという問題があり、また、近くに波浪観測点がない場合にはこのような検討は困難である。一方、不規則な波浪の性質はスペクトル特性から色々導くことができる。特に不規則波の挙動をやや具体的に追求するためには、表面波形や水粒子速度のデータ等の情報が必要になる。このため、与えられた波浪スペクトルに対応する波運動の空間・時間波形を電子計算機上で作成する数値シミュレーション手法が利用される。第3世代波浪推算法では波浪スペクトルを精度良く推算できることから、これに基づいて、表面波形や水粒子速度等をシミュレートすることができる。

図-9は、波浪スペクトルに基づいて1時間分の水位変動をシミュレートした例である。また、表-3は、図-9のデータをゼロ・クロス法で解析し、波高と周期の結合頻度表を作成した例である。このように、波浪推算で推算されるスペクトルを利用すれば、有義波高・周期などの統計値のみならず、限界状態設計法などにも利用可能な詳細な波浪情報を

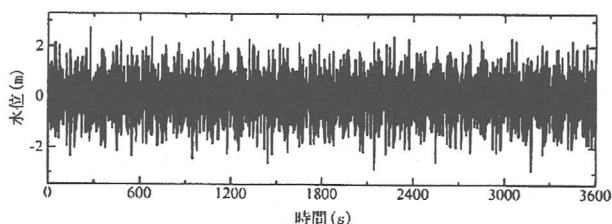


図-9 波浪推算値に基づいて求めた水位変動の時系列の作成

表-3 波別解析による波高と周期の結合頻度表

波高(m) \ 周期(m)	0-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-	TOTAL
0.0-0.5	1	11	1	1	0	0	0	0	14
0.5-1.0	0	18	14	5	2	3	0	0	42
1.0-1.5	0	8	41	24	9	3	0	0	83
1.5-2.0	0	0	26	28	14	11	2	0	81
2.0-2.5	0	0	0	32	29	13	0	0	96
2.5-3.0	0	0	12	38	34	4	0	0	88
3.0-3.5	0	0	5	21	13	1	0	0	40
3.5-4.0	0	0	2	13	8	0	0	0	23
4.0-4.5	0	0	1	6	3	0	0	0	10
4.5-5.0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1	35	124	170	112	35	2	0	479

提供することができる。

この他にも、波浪推算を用いた多くの応用が可能であろう。現在著者らは、波浪観測が行われていない海域を対象として、次のような項目を検討可能な波浪情報の整備を進めている。①港湾荷役等の稼働率を算定するための波浪情報、②港内静穏度の計算を行うための波浪情報、③広域的な汀線変化予測を行うための波浪情報、④設計沖波の算定のための波浪情報、⑤長周期波等の沿岸海象の原因究明のための波浪情報、などである。

5. 波浪推算法の今後の展開

最近の波浪推算法を取り巻く環境での大きな変化は、現地観測や地球観測衛星による波浪・海上風データの利用にある。単に波浪モデルの精度評価への利用だけでなく、現地観測データや衛星データの波浪モデルへの同化といった技術開発が進められており、推算精度もさらに飛躍的に向上しつつある。すなわち、波浪推算モデルによる推算結果には様々な要因による誤差が含まれている。この誤差要因としては、入力となる海上風データに含まれる誤差や、波浪モデルの不備など様々な要因が考えられる。しかしそれらの要因を1つ1つ特定し改善することは困難である。この問題を解決する方法の1つとして、波浪観測データを推算モデルに取り込み、推算モデルで表現される物理プロセスを満足させながら推算結果を観測結果に近づける方法がある。この方法がデータ同化である。データ同化は既に気象予報に取

り入れられており、予報精度の向上に貢献している。データ同化手法には幾つかの方法が提案されている。ブレンディング、ナッジング、最適内挿法、カルマンフィルター法、アジョイント法などである。原理的にはカルマンフィルター法が優れていると考えられるが、波浪推算においては波浪の方向スペクトルに関する初期値を制御変数に選択すると、カルマンフィルター法では膨大な計算容量を必要とすることから、アジョイント法が有望な方法と考えられる。Hersbach²⁵⁾や小林ら²⁶⁾はアジョイント法をWAMに導入し、その有用性を報告している。

6. おわりに

近年、高精度な波浪推算モデルの開発や高精度かつ信頼性の高い気象データが提供されるなど、波浪推算を取りまく環境は著しく進歩した。波浪推算システムは既に信頼性の高い実用的システムの域に達している。今後、波浪推算システムが防災・環境などの種々の分野で有効に活用されることを期待している。

参考文献

- 1) Sverdrup, H.U. and Munk, W.H.: Wind, sea, and swell; theory of relations for forecasting, U.S. Navy Hydrographic Office, H.O. Pub. 601, pp. 1-44, 1947.
- 2) The WAMDI Group (13 Authors) : The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, J.Phys. Oceanogr., 18, pp.1378-1391, 1988.
- 3) Komen,G.J. and 5 authors : Dynamics and Modelling of Ocean, Cambridge University Press, 532p., 1994.
- 4) Holthuijsen, L. H. et al : SWAN Cycle III version 40.11, USER MANUAL, Delft University of Technology, 124p., 2000.
- 5) Tolmann, H. L. : User manual and system documentation of WAVEWATCH-III Version 1.18, NOAA/NWS/NCEP/OMB technical note 166, 110p., 1999.
- 6) 植野耕治・石坂正雄：風波の非線形エネルギー輸送の効率的な計算法，測候時報，第64巻，pp.75-80, 1997.
- 7) Suzuki, Y.: Development and application of a global ocean wave prediction model including nonlinear interactions and dissipation, Dr. Thesis, University of Tokyo, 182p., 1995.
- 8) 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦：第三世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討，港湾技術研究所報告，第38巻，第4号，47p, 1999.
- 9) 橋本典明・杉本彰・川口浩二・宇都宮好博：局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用，海岸工学論文集，第49巻，2002.
- 10) 間瀬隆・平尾博樹・国富将嗣・高山知司：SWANを用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検討，海岸工学論文集，第49巻，pp.236-240, 2000.
- 11) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：新しい波浪推算法とこれからの海域施設の設計法，土木学会，256p., 2001
- 12) 増田彰・小松幸生：波浪予報模型におけるエネルギー伝播項の数値処理に関するいくつかの試み，次世代型波浪予報モデルの開発研究，力学シミュレーション研究センター室内実験分野研究成果集No.3, pp.137-150, 2000.
- 13) Wu, J.: Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, Journal of Geophysical Research, Vol.87, No.C12, pp.9704-9706, 1982.
- 14) Hasselmann, S. and K. Hasselmann : Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part I: A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral, J. Phys. Oceanogr., 15, pp.1378-1391, 1985.
- 15) 橋本典明・川口浩二・鈴木正芳：海洋波の非線形相互作用における離散相互作用近似の拡張，海岸工学論文集，第46巻，pp.231-235, 1999.
- 16) 小松幸生・草場忠夫・増田 章：風波成分波間の非線形エネルギー伝達一新しく開発した効率的な計算法について，九州大学応用力学研究所報，第75号，pp.121-146, 1993.
- 17) 小松幸生：新しい非線形伝達計算法に基づく次世代型波浪予報モデルの開発，九州大学応用力学研究所，学位論文，155p., 1996.
- 18) Masuda, A.: Nonlinear Energy Transfer Between Wind Waves, J. Phys. Oceanogr., 10, pp.2082-2092, 1980.
- 19) 橋本典明・鶴谷廣一・中川康之：有限水深域における海洋波の非線形相互作用に関する数値計算，海岸工学論文集，第43巻，pp.191-195, 1996.
- 20) 橋本典明・I.J.Haagsma・L.H.Holthuijsen：有限水深域における非線形エネルギー輸送の高精度計算法のSWANへの導入，海岸工学論文集，第49巻，2002.
- 21) 小松幸生・増田 章：有限水深域における非線形エネルギー伝達計算法の開発，次世代型波浪予報モデルの開発研究，力学シミュレーション研究センター室内実験分野研究成果集No.3, pp.119-136, 2000.
- 22) Hersbach, H. and P.A.E.M.Jansse : Improvement of the short fetch behavior in the WAM model, J. Atmospheric and Oceanic Technology, 16, pp.884-892, 1999.
- 23) 川口浩二・橋本典明・永井紀彦・久高将信：ECMWF風データとWAMに基づく日本沿岸波浪の推算精度に関する検討，海岸工学論文集，第48巻，pp.231-235, 2001.
- 24) 川口浩二・橋本典明・鈴木勝之：波浪推算値に基づく日本沿岸波浪の出現特性について，海岸工学論文集，第49巻，2002.
- 25) Hersbach, H. : Application of the adjoint of the WAM model to inverse wave modeling, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No.C5, pp.10469-10487, 1988.
- 26) 小林智尚・足立忠行・藤園康弘・安田孝志：データ同化を用いた波浪推算開境界条件の推定法，海岸工学論文集，第47巻，pp.266-270, 2000.