

波浪推算における非線形相互作用の働きとその精度が及ぼす影響

川口 浩二*・橋本 典明**・永井 紀彦***

1. はじめに

非線形相互作用は波浪の発達・減衰を支配する重要な物理過程であり, Hasselmann (1962) によって連続スペクトルを対象とした定式化が行われた。この非線形相互作用を離散相互作用近似(DIA)を用いて定式化し, 波浪推算モデルに組み込んだものが WAM に代表される第三世代波浪推算法である。非線形相互作用は, 不規則波浪場を構成する無数の成分波間でエネルギー輸送を起こし, スペクトルピークを低周波側に移動させるなど, スペクトルの自己安定性・相似性と密接な関係があるが, その物理過程は保存的であり, 波浪の全エネルギー量を変化させることはない。しかしながら, 風から波へのエネルギー輸送項, 砕波などによるエネルギー消散項がスペクトル形状に依存するため, これらを介して非線形相互作用が間接的に波浪推算結果に影響を及ぼすものと考えられる。したがって, 今後, 波浪推算モデルをより高精度かつ汎用的なモデルに改良して行くためには, 非線形相互作用の働きやその精度が波浪推算値に及ぼす影響を理解しておくことが必要であろう。

2. 非線形相互作用項および拡張 DIA の概要

Hasselmann (1962) によって定式化された非線形相互作用を厳密に計算するためには, 膨大な計算量・計算時間が必要である。このため, このままでは実用に供し得る形で波浪推算モデルへ組み込むことは困難である。そこで WAM では, 非線形相互作用に関与する無数の共鳴 4 波の組合せの内, 最も寄与の高い 1 組で代表させる離散相互作用近似(DIA)が用いられている(Hasselmann, 1985)。

近年, Suzuki (1995), 小松 (1996), 植野ら (1997), 橋本ら (1999 a) などによって, 従来の DIA の問題点が指摘され, 非線形相互作用のより効率的かつ高精度な計算法の開発や改良が提案された。これらの研究では, 従来の DIA が緩やかなエネルギー分布を持つ Pierson-

Moskowitz (PM) スペクトルに対しては厳密な計算値とよく一致するが, 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著しく低下することを指摘しており, 非線形相互作用において考慮すべき共鳴 4 波の配置を変えたり, 4 波の組合せ数を増やすなどによって従来の DIA よりもよりエネルギー分布の鋭いスペクトル形への適合性を高めた計算法が提案されている。

この内, 橋本ら (1999a) は, 植野ら (1997) が周波数スペクトル上のみで非線形相互作用の精度を検討しているのに対して, 多方向性を考慮に入れた方向スペクトル上で, 実用性を考慮に入れて, いくつかの代表的な方向スペクトル形状に適合する共鳴 4 波の配置や組合せ数を選定し, DIA の拡張(以後, 拡張 DIA と呼ぶ)を行っている。

3. 検討方法

本研究では, 橋本ら (1999a) によって提案された拡張 DIA を既往の WAM (以後, 既往 WAM と呼ぶ) に導入し(以後, 拡張 WAM と呼ぶ), 既往 WAM および非線形相互作用項を無視した WAM による推算結果と比較することによって, 波浪推算モデルにおける非線形相互作用項の働きや DIA の高精度化が及ぼす推算値の特性などについて検討した。なお, 計算領域は地形の影響を考慮しない北緯 20~45 度, 東経 130~155 度の範囲とし, 0.5 度間隔の格子を設定した。気象条件は一様風場・台風モデルによる風場などいくつかのモデル風場を設定し, 任意に設定した格子点上での推算値を求めた。

4. 検討結果

4.1 一様風域場に関する検討

本節では, 計算領域全体に南風一様風 ($U_{10}=20$ m/s) の風域場を与えた場合についての検討結果を示す。なお, 以下では拡張 DIA において考慮した非線形相互作用に関与する共鳴 4 波の組合せ数を 1 組, 2 組…とした場合の拡張 WAM を, それぞれ拡張 WAM1, 拡張 WAM2…と表記する。なお, 図中の S_{n1} 項無視は非線形相互作用を無視した WAM を示している。

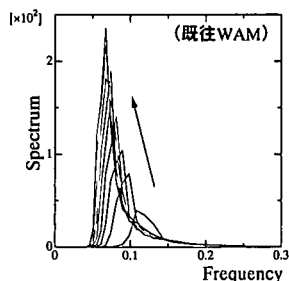
* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部水理研究室長
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室長

図-1は、領域中心において推算開始から3日間の有義波諸元の時系列を示したものである。各図の上段は既往 WAM の推算値を用いて各モデルの推算結果を無次元化したものである。図より、拡張 WAM1 の有義波周期の例を除いては、他の全ての拡張 WAM の推算結果は、有義波高・周期ともに推算開始直後は既往 WAM に比べて低めの値を示すものの、最終的には既往 WAM よりもやや大きめの値に漸近している。なお、拡張 WAM1 は、4 波共鳴の組合せ数は既往 WAM と同様に 1 組を採用しているが、非線形相互作用項の係数を先鋭な形状のスペクトルにも適合するようにチューニングしたモデルである。

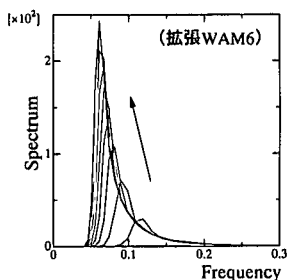
波浪発達初期の発達速度を比べると、発達時の発達速度は既往 WAM に比べて拡張 WAM の方がやや早い。この傾向は拡張 DIA で考慮する組合せ数が多いほど顕著であるが、概ね 4 組ないし 5 組程度考慮すればその値はほぼ一定に落ち着くようである。

一方、図中の破線で示した非線形相互作用項を無視した WAM では、有義波高および有義波周期ともに十分な発達は見られず、しかも非線形相互作用項を考慮した場合に比べて、波高・周期ともにかなり小さい値しか取り得ないことがわかる。

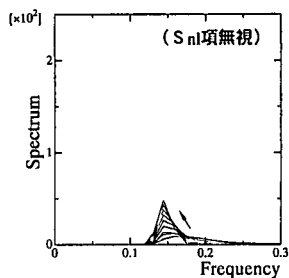
図-2は、既往 WAM、拡張 WAM6 および非線形相互作用項を無視した WAM について、領域中心地点において推算開始から 36 時間（4 時間毎）までの周波数スペクトルの時間変化を示したものである。図より既往 WAM および拡張 WAM6 は、時間の経過と共にピーク周波数が低周波側に移動しながら徐々に発達している。また、両者のスペクトル形状を比較すると、拡張 WAM6 のエネルギー積分値の方がやや大きく、より鋭いスペクトル



(a) 既往 WAM

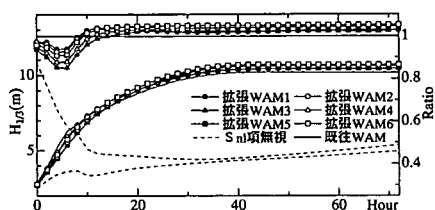


(b) 拡張 WAM6

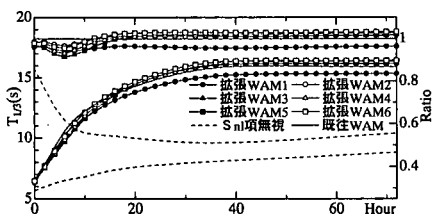


(c) 非線形相互作用を無視した WAM

図-2 一様風域場における周波数スペクトルの時系列変化



(a) 有義波高



(b) 有義波周期

図-1 一様風域場における有義波諸元の時系列変化

形状であることがわかる。一方、非線形相互作用項を無視した WAM では、時間の経過と共にエネルギーの増加はみられるものの、その絶対量は既往 WAM および拡張 WAM6 と比べるとかなり小さく、しかもピーク周波数を殆ど変化させることなく一定のまま発達していくことがわかる。

図-3は、領域中心における既往 WAM、拡張 WAM6 および非線形相互作用項を無視した WAM の方向スペクトルの時系列変化（上から順に推算開始 12, 24, 72 時間後）を示したものである。図より既往 WAM および拡張 WAM6 は、時間の経過とともにピーク周波数が低周波側に移動し、それに伴ってスペクトル形状が S 方向を中心に方向分散を持って広がっていくのがわかる。また、両モデルを比較すると拡張 WAM6 の方向分散の方が小さい。一方、非線形相互作用を無視した WAM では、時間が経過しても方向分散はほとんど変化せず、またピー

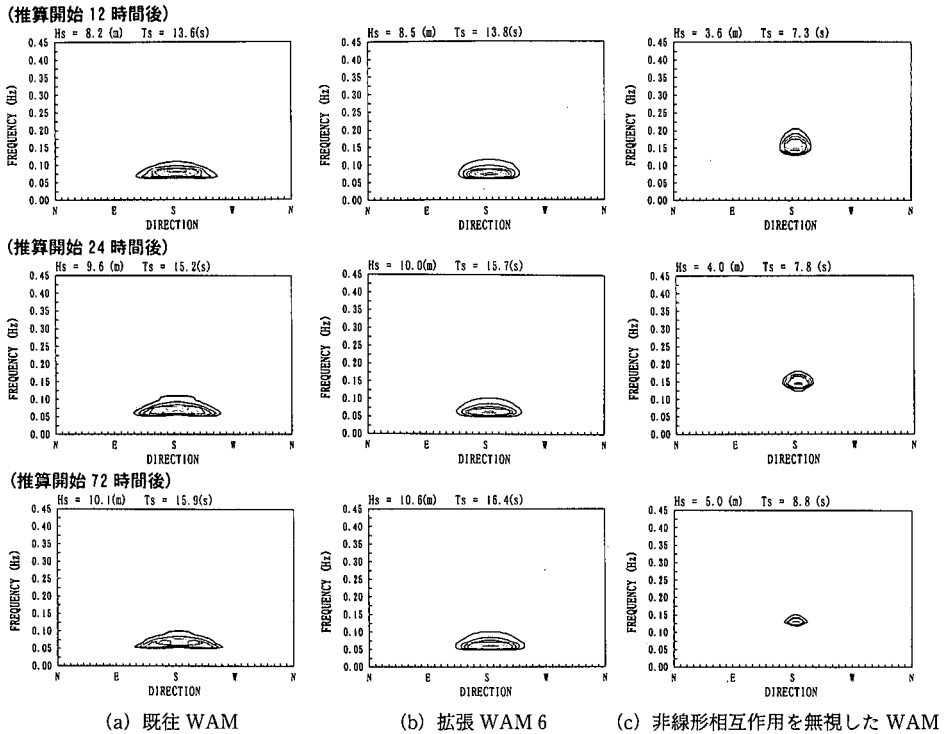


図-3 一様風域場における方向スペクトルの時系列変化

ク周波数も変化しないまま、方向スペクトルのピーク周辺にエネルギーが集中していく様子がわかる。これは非線形相互作用項を無視したことによる影響であることは明らかである。

4.2 急変する風域場に関する検討

本節では、計算領域の南半分の領域のみに南風一様風 ($U_{10}=20$ m/s) を与えた場合の検討結果を示す。

図-4 は、十分に時間が経過した後の領域中心を通る緯度方向 (南から北方向) の有義波高および有義波周期の空間分布を示したものである。図より風域を脱したうねりの波高の減衰は、既往 WAM に比べて拡張 WAMの方がやや緩やかである。橋本ら (1999b) は、既往 WAM ではうねりを過小評価する傾向があることを指摘しているが、拡張 DIA を導入することにより、うねりの過小評価を軽減できる可能性があることを示唆している。また、非線形相互作用を無視した WAM の推算結果では、一様風場の例と同様に、風域内においてもあまり波浪の発達は見られない。しかしながら、風域を脱するとエネルギー消散項の働きによって、非線形相互作用項を考慮した場合と同様に波高が減衰する。一方、風域を脱したうねりの周期を見ると、拡張 WAM1 の例を除き、他の拡張 WAM によるうねりの有義波周期は、既往 WAM よりもやや大きな値となっている。

以上のことから、既往の DIA に比べて、複数の適切な

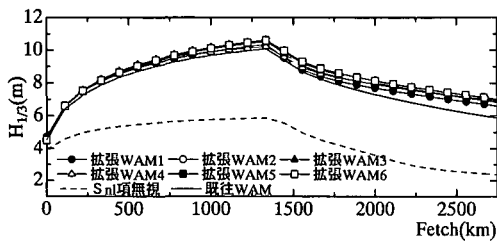
4 波共鳴の組合せを用いた拡張 DIA を導入することによって、うねりの過小評価を軽減できる可能性があることがわかる。

4.3 移動風域場に関する検討

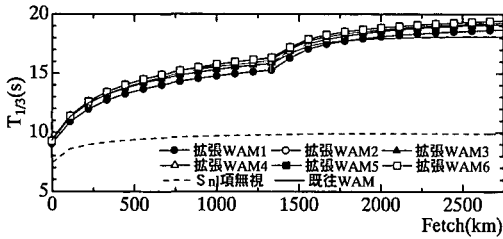
本節では、台風モデル (Myers の式; 中心気圧: 950 hPa, 台風半径: 50 km) による移動風場を対象とした検討結果を示す。なお台風は一定規模・一定速度とし、計算領域南西角から対角線上 (北東) に向かって通過させた。

図-5 は、領域中心における各モデルの有義波高および有義波周期の時系列を示したものである。図の上段は、図-1 と同様に既往 WAM の推算値を用いて無次元化したものである。図より非線形相互作用を考慮した既往 WAM および拡張 WAM では、台風の接近・通過に伴う吹送距離・減衰距離に対応して有義波高および有義波周期が発達・減衰することがわかる。また、4.1 の場合と同様に、発達時の発達速度は既往 WAM に比べて拡張 WAM の方がやや早いことが特徴的であり、特に波浪の発達初期に顕著な差が見られる。一方、非線形相互作用を無視した WAM の推算結果は、台風の移動に伴う風場の変化に対応して波高の発達・減衰は見られるものの、その発達は不十分である。

図-6 は、既往 WAM, 拡張 WAM6 および非線形相互作用項を無視した WAM について、領域中心における方



(a) 有義波高



(b) 有義波周期

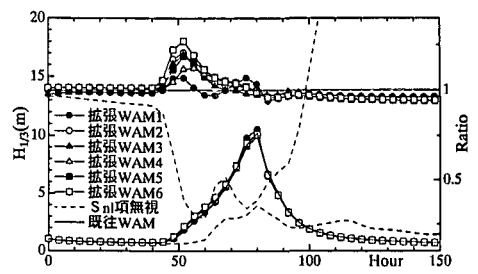
図-4 急変する風域場における有義波諸元の空間変化

向スペクトルの時系列変化を台風の接近・通過に対応して示したものである。ただし、図-6の各図は、それぞれの方向スペクトルのエネルギーピーク値で無次元化して示している。図より既往 WAM および拡張 WAM では、台風の接近・通過と共に方向スペクトルのエネルギー分布が SW, W から NNE 方向へと変化している。一方、非線形相互作用を無視した WAM では、台風の接近・通過に伴う SW, W から WNW までの波向変化は見られるが、NNE 方向への変化は見られない。また、既往 WAM や拡張 WAM と比べるとスペクトル形状も異なり、ピーク周波数は殆ど変化していない。

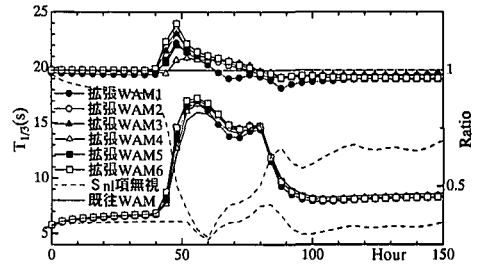
推算対象地点が風域を脱した場合に見られる方向スペクトルのこのような相違は以下の理由によるものと考えられる、すなわち、非線形相互作用を考慮した WAM では、台風通過後に風域外で発達した波浪が NNE 方向からうねりとして来襲し、これが他の成分に比して卓越しているために NNE にピークが現れたものと考えられる。一方、非線形相互作用を無視した WAM では、風域外で発達し、本来、うねりとして来襲するはずの成分波が、非線形相互作用を無視したことで十分に発達しておらず、推算対象地点が風域内にある時に発生・発達した波浪成分の方がこれに比して卓越していたために WNW にピークが現れ、このような相違が生じたものと考えられる。いずれの結果が妥当であるかは明らかでなく、検討の余地はあるが、風場が変化する場合に、非線形相互作用を考慮することによってより妥当な波浪場が推算されている可能性がある。

4.4 WAM における非線形相互作用の働き

非線形相互作用は共鳴条件を満たす成分波間でエネルギー



(a) 有義波高



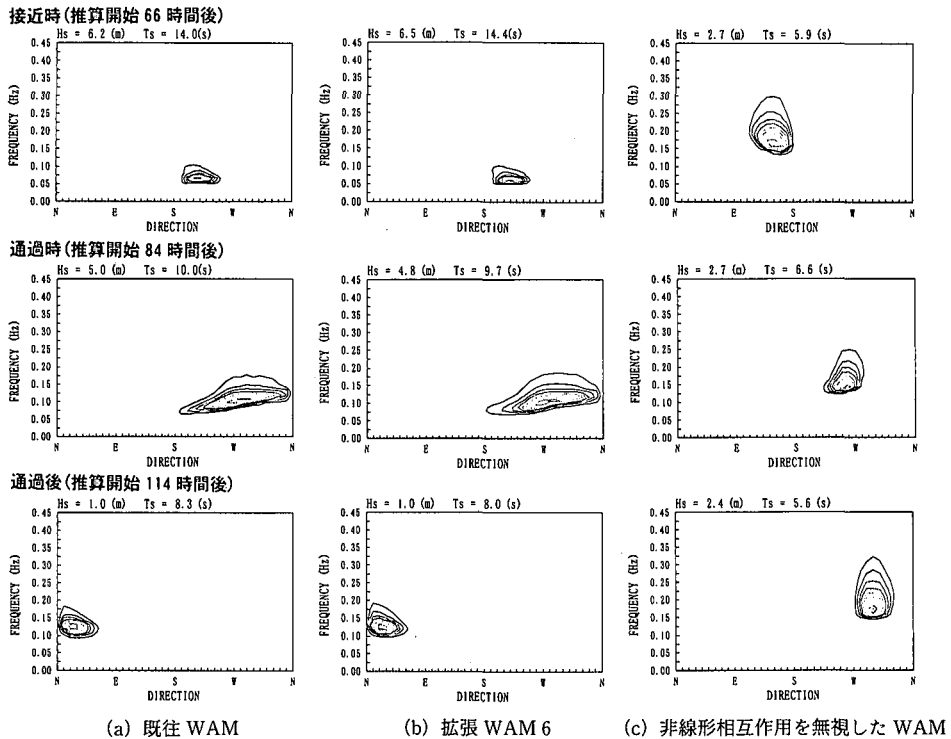
(b) 有義波周期

図-5 移動風域場における有義波諸元の時系列変化

ギー輸送を引き起こすメカニズムで、これを無視すれば波浪の発達が著しく抑えられることから、WAM では重要な働きを有することが分かった。しかしながら、非線形相互作用を高精度化し、既往 WAM の推算結果と比較した結果、その影響は予想よりも小さいものであった。

非線形相互作用は Hasselmann (1962) が 3～5 次の非線形性を考慮して定式化したもので、エネルギーレベルでのオーダーが小さいことから、従来の波浪推算モデルでは無視されていた。これが第三世代モデルで重要な要素として考慮された理由は以下のものである。

波浪の発達は Miles 項が支配的な影響を有し、これによって波浪は指数関数的に発達する。しかしながら、Miles 項が作用するためにはその元となる波浪成分が存在している必要がある。WAM では波浪を発生させる Philips 項が無視されていることから、エネルギーが 0 からは波浪は発達しない。非線形相互作用は、波浪の発生・発達において、もともとエネルギーを持っていない周波数・方向成分にもエネルギーを輸送する働きを有しており、これが風波の発達を支配する Miles 項に重要な働きを有するものと考えられる。すなわち、非線形相互作用は波浪の発達の原因を作り出すという点で重要であり、非線形相互作用によるエネルギー輸送量そのものはあまり重要ではない。本論文では示していないが、別の検討によれば、非線形相互作用の強度を表す相互作用係数を 1/10 倍や 10 倍に変化させても、推算結果にはあまり影響が現れないのはこのためである。しかしながら、非線形相互作用が波浪の発達の原因を作り出すという点で重



図—6 移動風域場における方向スペクトルの時系列変化

要であるならば、その強度よりも、むしろどの周波数・方向成分間でエネルギーを輸送するかという点は重要であり、この点では非線形相互作用の高精度化が意味を持つと考えられる。いずれにしても、本研究で示した拡張 WAM の推算結果は、既往 WAM の推算結果に比べて、改良の可能性があるという点でいくつかの相違が見られることから、より合理的かつ汎用的な次世代波浪推算モデルを開発していくためには、非線形相互作用の高精度化が必要であろうと考えられる。

5. おわりに

既往 WAM に拡張 DIA を導入し、既往 WAM の高精度化を行うとともに、波浪推算モデルにおける非線形相互作用項の働きや DIA の高精度化による推算値の特性について検討した。その結果、波浪推算モデルにおいて非線形相互作用が風場の変化に対応した波浪の発達や減衰、周波数および方向スペクトルの変化に対して重要な役割を果たしていることがわかった。また既往 WAM に用いられている DIA を拡張することにより、既往 WAM に比べて波浪の発達速度が若干ではあるが早くなること、うねりの過小評価を改善できる可能性があることが明らかとなった。

今後は、今回得られた成果を基に、現地観測データ、

特にうねりが卓越するような波浪場を対象として、拡張 WAM による推算結果と現地観測データとの比較を行う予定である。

参考文献

- 植野耕治・石阪正雄 (1997): 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.
- 小松幸生・草場忠夫・増田 章 (1993): 風波成分波間の非線形エネルギー伝達—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.
- 橋本典明・川口浩二・鈴木正芳 (1999a): 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.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999b): 方向スペクトル観測値に基づく第三世代波浪推算法 (WAM) の推定精度に関する検討, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 276-280.
- Hasselmann, K. (1962): On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part I, General theory, J. Fluid Mech., 12, pp.481-500.
- Hasselmann, S. and K. Hasselmann (1985): Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the nonlinear transfer integral, J. Phys. Oceanogr., 15, pp.1378-1391.
- Suzuki, Y. (1995): Development and application of a global ocean wave prediction model including nonlinear interactions and dissipation, Dr. Thesis, University of Tokyo, 182 p.