

非線形相互作用の高精度化が波浪推算に及ぼす影響

Influence of Accuracy Improvement of Nonlinear Energy Transfer in Wave Model

橋本典明¹・川口浩二²・鈴木勝之³・山城 賢⁴・児玉充由⁵

Noriaki HASHIMOTO, Koji KAWAGUCHI, Katsuyuki SUZUYAMA
Masaru YAMASHIRO and Mitsuyoshi KODAMA

For the purpose of improving estimation accuracy of swell with the third generation wave models, the effectiveness of EDIA (Extended Discrete Interaction approximation) was discussed for various directional spectra. Then, numerical simulations were carried out to confirm the fact that EDIA can lead to accuracy improvement of swell with long decay distance. Finally, the method was applied to simulate an actual case of 'Yorimawari-Nami'. It turned out that the accuracy improvement of simulating Yorimawari-Nami was not led only by the improvement of nonlinear energy transfer with EDIA. Some other improvement is still necessary. One of the possibilities is considered to be the improvement of computation accuracy of wave energy propagation scheme.

1. はじめに

非線形相互作用は波浪の発達・減衰および伝播過程において常に存在し作用し続ける重要な物理過程であり、異なる周波数・伝播方向を有する無数の成分波間でエネルギー輸送を引き起こすメカニズムである。第三世代波浪モデルWAMでは、Hasselmann (1962) が開発した離散相互作用近似 (DIA) により近似的に導入されている。これは成分波間のエネルギー輸送に関与する4波共鳴する成分波の無数の組み合わせを1組で代表させるものである。DIAの導入により、WAMでは複雑に変動する風場への応答特性が従来の波浪モデルに比べて向上した。しかしDIAは、Pierson-Moskowitz (PM) スペクトルのような卓越したエネルギーの帯域幅が広いスペクトルに対しては厳密解をよく近似するが、JONSWAPスペクトルなどのエネルギー分布の鋭いスペクトルに対しては近似精度が著しく低下する。したがって、DIAはスペクトル幅が広い風波にはある程度の精度を有しているものの、スペクトル幅が狭い“うねり”には精度が不十分であると考えられる。そこで本研究では、非線形相互作用の高精度化が波浪推算精度に及ぼす影響、特にうねりの推算精度に及ぼす影響を系統的に検討し、昨年、富山湾で甚大な被害をもたらした寄り回り波の予測精度の向上に資することを目的としている。

2. 非線形相互作用の厳密計算に関する検討

波浪スペクトルのエネルギー分布の帯域幅によって、

1 フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院環境都市部門
2 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
3 修 (工) (株) エコー 防災・水工部
4 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院環境都市部門
5 九州大学大学院工学部海洋システム工学専攻

近似精度が著しく異なるDIAの問題を解消するため、小松 (1996) は厳密計算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手法として、SRIAM法を提案した。DIAが4波共鳴する成分波の無数の組み合わせを1組で代表させたのに対し、SRIAM法では、有意な20組の組み合わせを採用している。一方、小松ら (1993) はMasuda (1980) の厳密計算法の精度を損なうことなく、4波相互作用の対称性などの非線形エネルギー輸送の特性を最大限利用して厳密計算法の効率化を図ったRIAM法も開発しているが、SRIAM法の精度はRIAM法に遜色ないと報告されている (小松, 1996)。したがって、SRIAM法は精度や汎用性の面で厳密解を近似可能な手法であり、次世代の波浪モデルに適用可能な非線形エネルギー輸送の計算法として期待される。しかし、SRIAM法は20組の組み合わせを用いることから、単純にDIAの20倍の計算時間を要することになり、実用性を考えると現時点では必ずしも実用的ではない。この他、Suzuki (1995) や植野ら (1997) はDIAを改良することでスペクトルの精度向上を図っているが、彼らの方法は、Hasselmannら (1981) や小松ら (1993) によって計算された非線形エネルギー輸送を方向角について積分した量に適合するようにパラメータ設定されており、方向関数の影響が考慮されておらず、しかも、検討したスペクトル形も限られていることから、様々な方向スペクトル形を有する波浪に対する適用性を検討する必要がある。

そこで橋本ら (1999a) は、PMスペクトルとJONSWAPスペクトルを対象として、両方のスペクトルに最適な非線形4波共鳴の成分波の複数の組合せと配置を提案し、DIAを拡張することで高精度化を行った (以下ではEDIAと記す)。また、川口ら (2000) はEDIAをWAMに導入し、非線形相互作用が風波の発達や風波スペクトルの変

化に重要な役割を果たすことを示した。しかし、うねりについては、EDIAによって推算精度が向上する可能性があることを示唆するとどまっていた。

そこで本研究では、種々の波浪場に対してEDIAが推算精度に及ぼす影響を検討するため、周波数尖鋭度パラメータ γ や方向集中度パラメータ S_{max} を変えた幾つかの方向スペクトルを対象として、厳密解 (Exact), DIAおよびEDIAの非線形エネルギー輸送の近似精度を体系的に検討することとした。

(1) 計算条件

表-1に本研究における非線形相互作用の厳密計算の計算条件を示す。検討には周波数分割数30, 方向分割数36の分解能を持つ方向スペクトルを用い、考慮する組み合わせ数は6組とした。また、 λ は4波共鳴する4つの成分波を決めるパラメータであり、 C は相互作用係数を表す。パラメータ λ と C は、方向スペクトルに依存して最適値が異なることから、実務上は幾つかの方向スペクトルに対して平均的に適合する値を選定する必要があるが、橋本ら (1999a) は表-1に示すような最適パラメータ C を提案している。また、Hasselmannら (1985) はDIAにおいて $\lambda = 0.25, C = 3 \times 10^7$ (角周波数 ω で表現した場合、 $C = 3 \times 10^7 / (2\pi)^9 \approx 1.97$) を採用している。

(2) 計算結果および考察

図-1は周波数尖鋭度パラメータ γ や方向集中度パラメータ S_{max} を変えた幾つかの方向スペクトルを対象に、非線形相互作用によるエネルギー輸送の厳密解 (Exact), DIAおよびEDIAの計算結果を示したものである。1~3

表-1 非線形相互作用の厳密計算の計算条件

方向スペクトル分解能		組み合わせ数	λ	C
周波数分割	方向分割			
30	36	6	0.08	8.77
			0.09	-13.82
			0.11	10.02
			0.15	-15.92
			0.16	14.41
			0.29	0.65

段目は非線形エネルギー輸送を周波数と方向角の関数 (細線は負値, 太線は正值) で表示し, 4段目はエネルギー輸送量を方向角について積分し, 周波数の関数 (太線はExact, 細線はDIA, 灰色線はEDIA) として表示したものである。ただし図では, Exactの絶対値の最大値で正規化した結果を示している。図から, $\gamma = 1, S_{max} = 10$ のPMスペクトルに対してはDIA, EDIAともにExactとの適合性は良好であるが, $\gamma = 3, S_{max} = 10$ のうねり性波浪では, 1~3段目の分布傾向から明らかなように, DIAとExactの適合性は著しく低下する。この時, 4段目の非線形エネルギー輸送量を見ると, 細線で表すDIAのエネルギー輸送量はExactおよびEDIAより小さく, 特にピーク周波数 (横軸1.0) より低周波側へのエネルギー輸送量はExactおよびEDIAの半分程度となる。このDIAにおける低周波側 (長周期側) へのエネルギー輸送の過小評価は, うねり性波浪の推算精度に影響を及ぼすと考えられる。また, スペクトル幅がさらに狭くなる条件 ($\gamma = 10$,

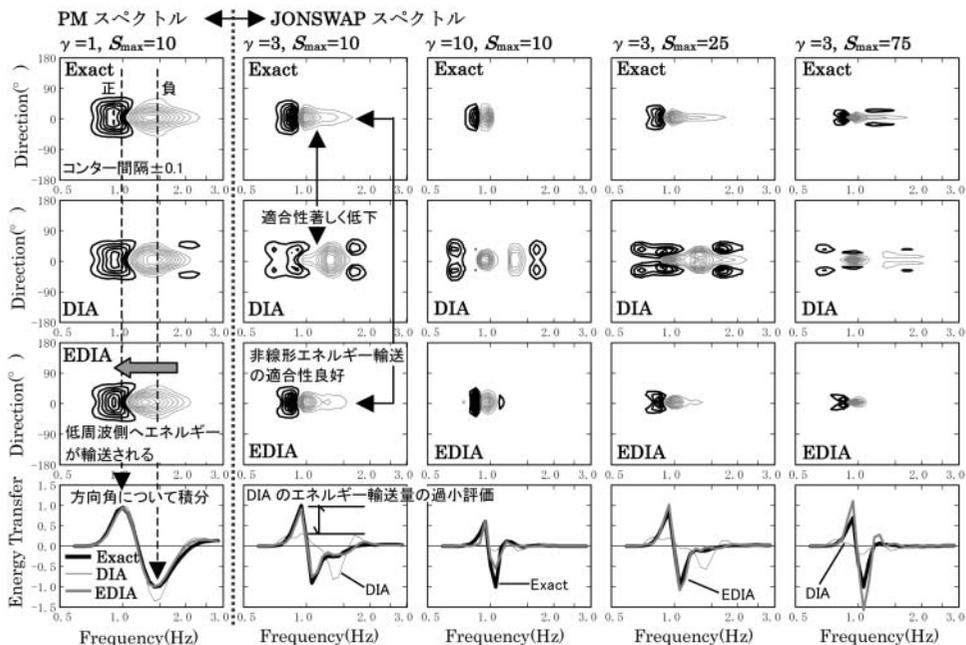


図-1 幾つかの方向スペクトルを対象にした非線形エネルギー輸送の計算例

$S_{max}=10$) では、この傾向が顕著となり、DIAにおける低周波側へのエネルギー輸送量はほぼ0になる。さらに、 S_{max} を変化させ、方向角に関してエネルギー集中度を増大させた $\gamma=3$ 、 $S_{max}=25$ および75を見ると、DIAでは方向集中度の増大とともに低周波側へのエネルギー輸送の過小評価傾向が増す。これに対し、EDIAは何れの条件下においてもExactとの適合性は良好である。

以上の結果から、 γ および S_{max} が増大するにつれて、DIAでは低周波側へのエネルギー輸送量を過小評価するという問題が引き起こされる。すなわち、遠方から来襲するようなスペクトル幅が狭く方向集中度が大きいうねり性波浪（例えば、寄り回り波のような波浪）に対して、その影響は大きくなるものと推察される。

3. 非線形相互作用が波浪推算へ及ぼす影響

(1) うねり性波浪に着目した検討

ここではDIAの精度が不十分と考えられるうねり性の波浪に着目し、非線形相互作用の高精度化が波浪推算に及ぼす影響を検討する。

図-2は波浪推算で用いたモデル海域（正方形海域）の一例であり、強風域で発達した風波が風域を脱してうねりとして伝播する状況を想定し、西風一様風 ($U_{10}=20\text{m/s}$) の風域1と無風域2を設定したものである。図中の黒印の2地点（風域1内のPoint1および無風域2内のPoint2）は推算結果の出力点である。この他にも、無風域2を伝播したうねり性波浪の再発達を想定し、無風域2の後方に再度風域1を配置したモデル海域による検討を実施したが、うねり性波浪の再発達に関しては非線形相互作用の高精度化が及ぼす顕著な違いは見られなかったため、紙面の都合上、割愛する。

図-3はPoint1および2において、DIAを組み込んだWAM（以下ではWAMと記す）およびEDIAを組み込んだWAM（以下ではEWAMと記す）で推算した周波数スペクトルを示したものである。EWAMのスペクトルピークはWAMのスペクトルピークよりも低周波側に移動し、エネルギーピークのレベルも高くなっている。特にエネルギーピークのレベルの差はうねりの場合（Point2）により顕著になることが分かる。

図-4はPoint1および2における方向スペクトルと方向関数を示したものである。WAMではPoint1で既に方向集中度がやや低下しており、Point2では歪んだ形状の方向関数になっている。一方、EWAMでは方向集中度の低下は小さく、うねりを想定した無風域2でも方向関数は歪んだ形状を示しておらず、方向スペクトルの推算精度は良好と考えられる。

以上の結果から、非線形相互作用の高精度化が波浪推算における方向スペクトルの推算精度に影響することが

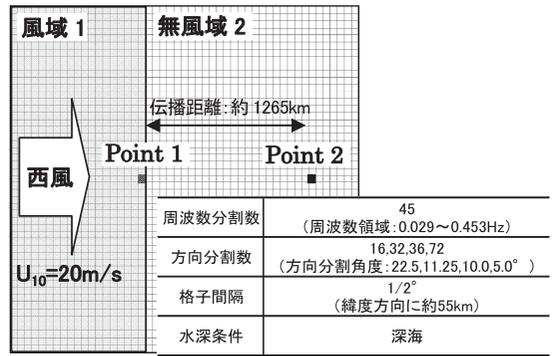


図-2 設定したモデル海域

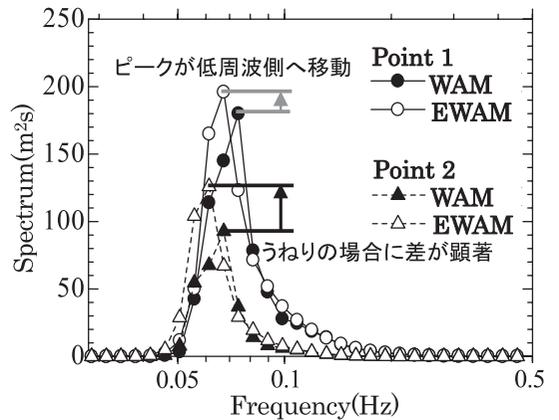


図-3 周波数スペクトルの比較

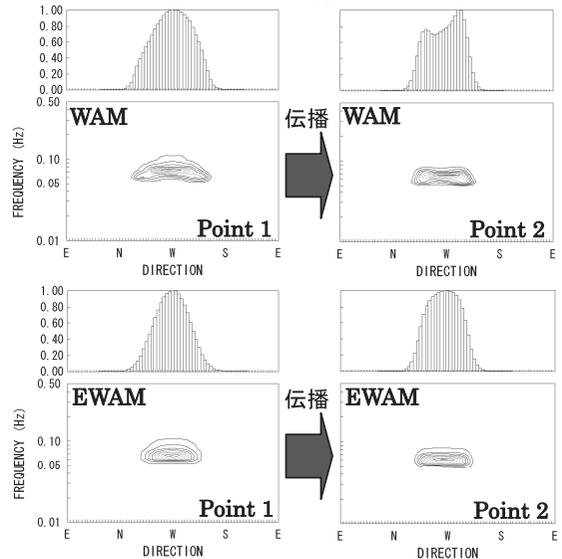


図-4 方向スペクトル（下段）と方向関数（上段）の比較

確認できた。特に、風域を脱して伝播過程にあるうねり性波浪の方向スペクトルに対しては顕著に影響を及ぼすことが明らかとなった。

(2) 方向分割数が及ぼす影響

波浪推算の際、方向スペクトルの分解能、特に方向分割数は波浪の推算精度だけでなく、計算時間にも顕著に影響を及ぼす。小松ら (1993) は波数分解能の違いによる非線形エネルギー伝達の効果を比較することで、実用上許容できる精度が得られる波数分解能として、方向分割数36 ($\Delta\theta=10^\circ$) を提案している。本研究では、波浪推算から推定されるスペクトルに基づき、高精度な非線形相互作用の計算が組み込まれた波浪モデルにおいて、スペクトルの推算精度が得られる最低限必要な方向分割数について検討を行う。ここでは方向分割数を16, 32, 36および72と変化させたEWAMによる波浪推算を行い、Point2における方向スペクトルを比較した。

図-5は方向分割数の違いが周波数スペクトルに及ぼす影響を示したものである。方向分割数16の場合、32以上と比べてピーク周波数付近のエネルギーが過小評価となり、方向分割数32および36の場合はスペクトル形状に有意な違いは見られない。さらに、方向分割数72の場合は、32および36と比べスペクトル形状に若干の違いが見られるがピーク周波数付近のエネルギーの差は小さい。

図-6は方向スペクトルと方向関数を比較した結果である。方向分割数が16の場合、方向集中度がやや低下して、若干歪んだ形状の方向関数となる。一方、方向分割数が32以上の場合はほぼ同様なスペクトル形状を示していることが分かる。

以上の結果より、高精度な非線形相互作用の計算により良好なスペクトルの推算精度を得るためには、32以上の方向分解能が必要であることが明らかとなった。

4. 実海域でのスペクトルの推定精度に関する一考察

WAMはうねり成分を過小評価する問題が報告されている (橋本ら, 1999b) ことから、非線形相互作用の高精度化がうねり成分の推定精度に及ぼす影響の検討を行う。本研究では、2008年2月に富山湾沿岸に甚大な被害を引き起こした寄り回り波を対象に、WAMとEWAMを用いた波浪推算を行い、モデルの違いによるうねり成分の推定精度を方向スペクトルに着目して行った。

図-7に計算領域および計算条件を示す。計算に用いた海上風は気象庁の客観解析値 (メソ解析値) である。

図-8は、NOWPHASの3観測地点 (輪島, 直江津および富山) と、観測地点ではないが寄り回り波の伝播経路上の海上地点において、方向スペクトルから求まる周期帯別エネルギー波高・波向を示したものである。また、最下段には、海上地点における代表時刻 (高波浪時) のWAMとEWAMの方向スペクトルも併せて示す。図では、うねり成分を表す2種類 ($f_3=10.7\sim 14.2s$ (うねり成分) および $f_2=16.0\sim 25.6s$ (うねり~長周期成分)) のエネルギー

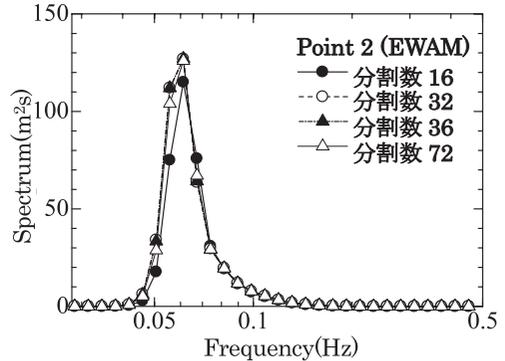


図-5 方向分割数が周波数スペクトルに及ぼす影響

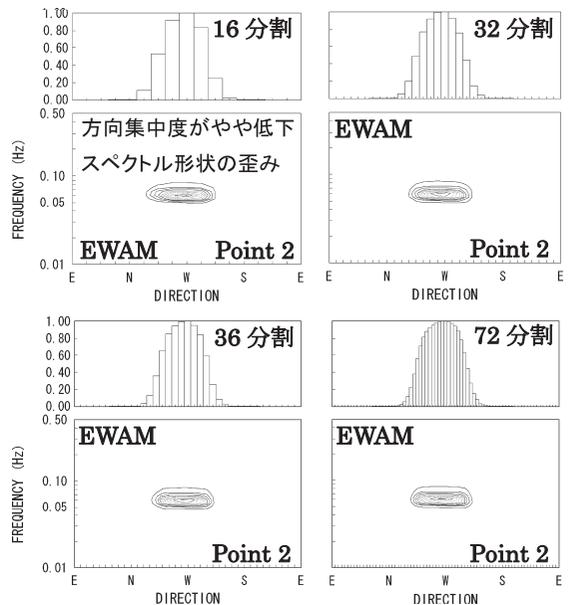


図-6 方向分割数が方向スペクトル (下段) と方向関数 (上段) に及ぼす影響

ギー波高および向きを1時間毎にベクトル表示している。ここで波向は基準線に対して上から下向きを波向Nとしている。WAMとEWAMを比較すると、図左段のf3周期帯のエネルギー波高に大きな差は見られない。次に、右段のf2周期帯を見ると、WAMに比べ、EWAMのエネルギー波高の発達時間は若干速く、その発達量も若干大きくなる傾向が見られるが、直江津、富山では非線形相互作用の高精度化が及ぼす影響は小さい。さらに、方向スペクトルのエネルギー分布形状も若干ではあるが異なる結果が得られた。また、波向の再現性は概ね良好である。以上の結果より、非線形相互作用の高精度化が実海域の波浪推算に対しても影響を及ぼすことが確認できた。ただし今回の実海域の検討は、計算条件や地形近似精度より、非線形相互作用の高精度化が波浪精度に及ぼす影響を定量的に議論できるような検討までは至っていない。

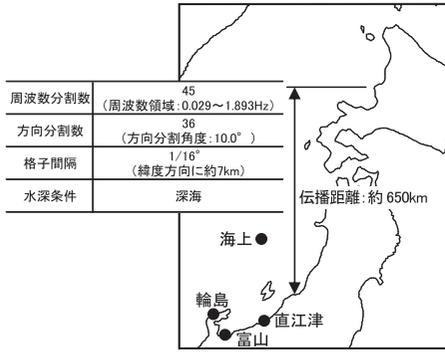


図-7 計算領域および計算条件

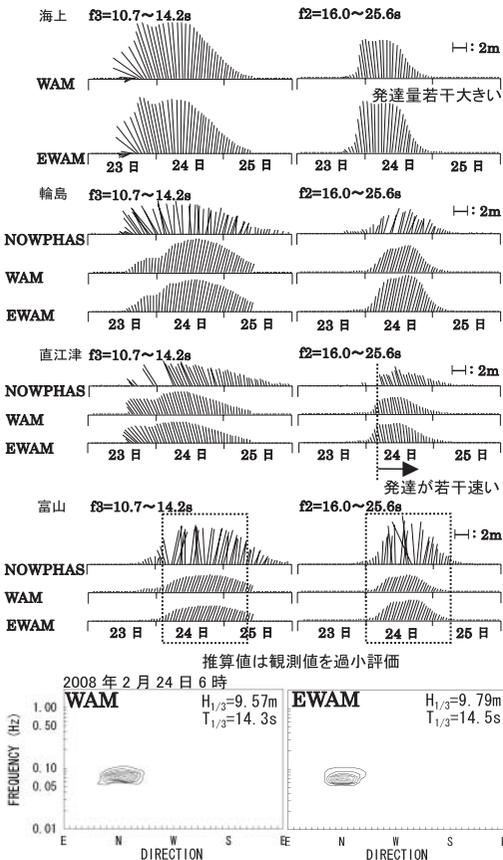


図-8 方向スペクトルに基づいた比較結果 (実海域)

ここで、非線形相互作用の高精度化の効果を低減させる原因の1つとして、エネルギー伝播計算に1次風上差分を採用していることが挙げられる。これにより、伝播過程におけるエネルギーの数値分散が大きくなり、スペクトルの平滑化(エネルギー帯域幅の増加)が引き起こされることが考えられる。さらに、1次風上差分の場合、波向の基準軸を座標軸に合わせて設定するとエネルギー伝播に異方性が発生しやすく、特に斜め方向には相当大きな数値分散が発生する。本研究で用いたWAMでは互い

の軸を方向分割幅の1/2ずらしているが、この場合でも必ずしも十分ではない。図-4および図-8の例にはこの影響による違いも含まれているものと推察される。今後は非線形相互作用の高精度化とともに、このような点についても考慮した波浪モデルの更なる高精度化が必要である。

5. まとめ

本研究では、非線形相互作用の高精度化が波浪推算精度に及ぼす影響を検討した。モデル海域を対象とした検討では、うねり性波浪の推算精度向上に対して、非線形相互作用の高精度化が有効であることが分かった。さらに、実海域の検討では、现阶段では非線形相互作用の高精度化の効果が十分に現れない場合があることを確認し、その原因について考察した。今後も引き続きモデルの改良などを続け、寄り回り波の予測精度の向上に繋げて行く予定である。最後に、本研究の一部は、科学研究費補助金20360222の成果であり、ここに記して謝意を表する。

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.

川口浩二・橋本典明・永井紀彦(2000)：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，海岸工学論文集，第47巻，pp.251-255.

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.

小松幸生(1996)：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.

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 (1981) : A symmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity wave spectrum, Hamb. Geophys.Einzelschriften, Reihe A:Wiss. Abhasand., 52, 138p.

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 Exact Nonlinear Transfer Integral, J. Phys. Oceanogr., 15, pp.1378-1391.

Masuda, A. (1980) : Nonlinear Energy Transfer Between Wind Waves, J. Phys. Oceanogr., 10, pp.2082-2092.

Suzuki, Y. (1995) : Development and application of a global ocean wave prediction model including nonlinear interactions and dissipation, Dr. Thesis, University of Tokyo, 182p.