

## 波浪推算モデル WAM におけるエネルギー逸散に関する研究\*

五洋建設株式会社 琴浦 毅  
 東北大学 大学院工学研究科 田中 仁

### 1. はじめに

海で四方を囲まれた日本では船舶による海上輸送が国民の生活を支えると共に、国際競争力を維持するためには港湾整備が欠かせない。港湾整備には海上工事が必要となるが、雨や風が主要な原因となり作業中止となる陸上の建設現場とは異なり、海上工事ではそれらに加えて波浪条件による作業中止も発生する。特に海上工事では大型の作業船の近傍の海中で潜水士が作業していることも多く、船舶の動揺などが施工安全管理、品質管理に直結する。船舶の動揺の多くは外洋から来襲する波浪によって引き起こされるため、これまでも波浪観測結果<sup>1)</sup>や波浪予報情報の入手をおこなったうえで、これまでの経験を踏まえ、作業の可否判断を行ってきた。

近年では、波浪予報情報の元になる波浪推算モデルの高度化が進んでおり、波浪推算モデルによる予測結果をリアルタイムに配信するシステムも構築され<sup>2)</sup>、作業可否判断に利用され始めている。しかし、これまでの波浪推算モデルに関する研究は高波浪に着目したものが多く、施工可否判断への適用に着目している事例は少ない<sup>3)~6)</sup>。また、筆者らはこれまでの検討から低波浪時に波浪推算モデルの精度が低下する要因を検証し、高周波数側のエネルギー過大評価が予測精度の低下要因であることを示した<sup>7),8)</sup>。

そこで、本研究では高周波数側のエネルギー過大評価の改善を目的とした、エネルギー逸散に関する基本的な検証を実施した。

### 2. 波浪推算モデル WAM の概要

第3世代波浪推算モデルである WAM は、波浪スペクトルに関するエネルギー平衡方程式を基礎方程式として、波浪スペクトルの時空間変動を数値的に求める方法であり、深海条件の球面座標系での基礎方程式は以下の通りとなる。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \cos \phi E) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} E) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} E) = S \quad (1)$$

ここで、 $E$ : 波浪方向スペクトル、 $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$ : 緯度, 経度, 波向き,  $S$ : エネルギーソース項であり、エネルギーソース項については一般的に次式のように示される。

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

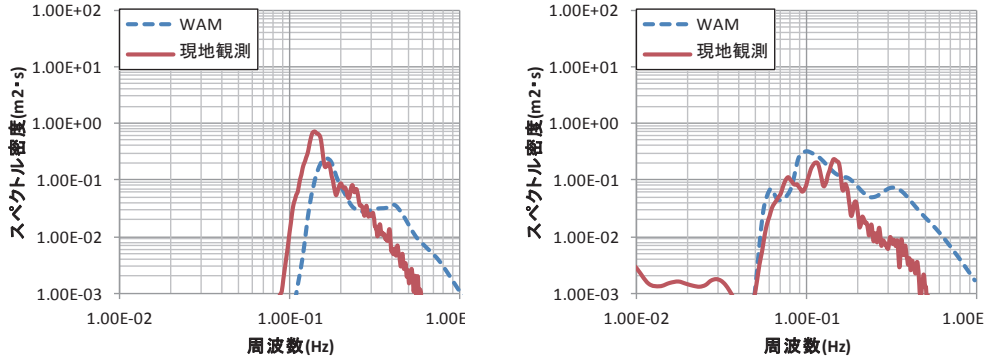
ここで、海上風外力項  $S_{in}$ , 砕波散逸項  $S_{ds}$ , 成分波間同士の非線形相互作用  $S_{nl}$  の3つのソース項である。

海上風からのエネルギーを  $S_{in}$  で評価して波の発達を計算し、風波からうねりへのエネルギー

\* Study on energy dissipation in WAM model by Tsuyoshi Kotoura and Hitoshi Tanaka

変換については  $S_{nl}$  により評価される。また、過剰なエネルギーについては  $S_{ds}$  に基づき計算されたエネルギー逸散により低減されるのが基本的なモデルの思想である。

しかし、現状では図-1 に示すように低波浪時に高周波数側でエネルギーを過大評価することが確認されている。この要因としては、海上風から過剰にエネルギーを授与していることや、エネルギー散逸が不足しているなどが考えられるが、風波の発達時には計算精度が良いことを考慮して、エネルギー逸散に着目して検討を行った。



(1) 直江津港 (2010/12/19)

(2) 鹿島港 (2015/6/16)

図-1 観測データと WAM の周波数スペクトルの比較

### 3. エネルギー逸散項

WAMにおいてエネルギー逸散項はHasselmannの白波理論に基づくKomen et al.の理論が採用されており<sup>9)</sup>、高周波数域での適切なエネルギーバランスを得るため、 $k^2$ に関する項を加えられ、下式で評価される。

$$S_{ds} = (-\gamma_d)E \quad (3)$$

$$\gamma_d = 0.5C_{ds}\langle\omega\rangle\langle k\rangle^2\bar{E}\left(\frac{k}{\langle k\rangle} + \left(\frac{k}{\langle k\rangle}\right)^2\right) \quad (4)$$

$$\bar{E} = \iint E(f, \theta) df d\theta \quad (5)$$

ここで、 $C_{ds}$ : 定数、 $k$ : 波数、 $\langle\omega\rangle$ : 代表角周波数、 $\langle k\rangle$ : 代表波数である。

砕波は複雑な物理過程によって発生することから、WAMを含む数値解析モデルで実現象の砕波を表現するのは非常に難しく、多くの砕波モデルが提案されている。WAMを含む第3世代波浪推算モデルにおいてもいくつかのエネルギー逸散項が提案されているが<sup>10)</sup>、WAMにおけるエネルギー逸散項は全体的なエネルギーバランスを調整して、多様な波浪条件において精度が向上するように調整されている。したがって、本研究の目的である低波浪時の精度に着目した場合、現状のモデルでは不十分である可能性が考えられる。

WAM においてエネルギー逸散項の計算を実施する上式において、オリジナルモデルと、ECMWF が現在運用しているモデルでは使用している  $C_{ds}$ ,  $\langle \omega \rangle$ ,  $\langle k \rangle$  が異なっている<sup>11)</sup>。ここで、 $\langle f \rangle$  を代表周波数,  $\langle T \rangle$  を代表周期とし、深海モデルの条件を考慮すると下式ようになる。

$$\langle k \rangle = \langle \omega \rangle^2 / g, \quad \langle \omega \rangle = 2\pi \langle f \rangle = 2\pi / \langle T \rangle \quad (6)$$

また、周波数  $f$  に対する  $n$  次モーメントを以下のように示す。

$$m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \quad (7)$$

ここで、WAM オリジナルモデルの代表周期  $\langle T \rangle_{org}$ , ECMWF の現行モデルの代表周期  $\langle T \rangle_{ECMWF}$  は以下のように計算される。

$$\langle T \rangle_{org} = T_{1/3} = m_{-1} / m_0 \quad (8)$$

$$\langle T \rangle_{ECMWF} = \bar{T} = m_0 / m_1 \quad (9)$$

既往の研究から上記の周期については以下の関係を有している。

$$\langle T \rangle_{org} = T_{1/3} = (1.1 \sim 1.3) \bar{T} = (1.1 \sim 1.3) \langle T \rangle_{ECMWF} \quad (10)$$

したがって、ECMWF の現行モデルは  $\langle k \rangle$  がオリジナルモデルより大きくなるため、オリジナルモデルの  $C_{ds}=4.5$  に対し、 $C_{ds}=1.33$  を採用し、 $S_{in}$  に関連するパラメタも調整している。

ここで、本研究では以下の式を用いて検討することとした。

$$\gamma_d = 0.33 C_{ds} \langle \omega \rangle \left( \langle k \rangle^2 \bar{E} \right)^2 \left( \frac{k}{\langle k \rangle} + \left( \frac{k}{\langle k \rangle} \right)^2 + \left( \frac{k}{\langle k \rangle} \right)^3 \right) \quad (11)$$

$$\langle T \rangle = T_p \approx 1.1 T_{1/3} = 1.1 \langle T \rangle_{org} \quad (12)$$

この式は代表周期に  $T_p$  を採用することで ECMWF モデルとは逆に  $\langle k \rangle$  が小さくなり、高周波数側において  $k/\langle k \rangle$  の値がオリジナルより大きくなる。また、それに加え、 $(k/\langle k \rangle)^3$  の項を追加することで、ピーク周波数より外れた高周波数になるほどエネルギー逸散が大きくなる。したがって、高周波数側のエネルギー逸散をオリジナルモデルより顕著にすることを目的とした式である。ただし、 $\langle \omega \rangle \langle k \rangle^4$  がオリジナルより小さくなるため、 $C_{ds}=8.0$  とすることで全体のバランスを取ることにした。

#### 4. 提案式の検証

本研究の提案式(11), (12)の検討は、ソース項のみを評価することが望ましい。したがって、WAM の基礎方程式(1)の伝播項である左辺第 2, 3, 4 項は除外した簡易的な式を用いて、表-1 の条件においてオリジナル WAM と比較検証を行った。

表-1 提案モデルの比較条件

ケース名	初期状態	風速・継続時間	計算時間
Case1	$H_{1/3}=0.8\text{m}, T_{1/3}=10\text{s}$	なし	10 日間
Case2	$H_{1/3}=0.5\text{m}, T_{1/3}=5\text{s}$	なし	10 日間
Case3	なし	10m/s・24 時間	10 日間
Case4	$H_{1/3}=0.8\text{m}, T_{1/3}=10\text{s}$	10m/s・24 時間	10 日間
Case5	$H_{1/3}=0.8\text{m}, T_{1/3}=10\text{s}$	5m/s・24 時間	10 日間

図-2 は低波浪のうねりが存在するものの、外部からのエネルギーの入力が無い条件である。この場合、10 日後にはいずれのモデルも波高の変化はほとんど無く、提案モデルは周期が若干増加していることが確認できる。

図-3 は低波浪の短周期波が存在するものの、外部からのエネルギーの入力が無い条件である。この場合、10 日後にはいずれのモデルも波高が低下し、周期は増加していることが確認できる。エネルギーの低減は  $Sds$ 、周期の増加は  $SnI$  のそれぞれの作用による結果であると考えられる。

図-4 は初期に波浪が無い条件で、外部からのエネルギーが入力する条件である。この場合、風が吹いている間の波高の立ち上がりはほぼ同等である一方で、風が停止した後の波高の減衰はオリジナルのほうが早い。しかし、周期は提案モデルの方が大きめに出ている。これは、提案モデルの方は高周波エネルギーがオリジナルモデルより効果的に逸散するのに加え、低周波数側へのエネルギーシフトの作用が大きいことを意味している。しかし、低周波数側へのシフトが顕著である結果、高周波数側でのエネルギー逸散が顕著でなくなっている可能性がある。

図-5 は初期に低波浪のうねりが存在し、外部からのエネルギーが入力する条件である。この場合は、風が吹いている間は提案モデルの方が波高は小さく、周期が長い。しかし、風が停止した後の波高の減衰はオリジナルのほうが早い。また、周期は提案モデルの方が大きめに出ている。これは、波発達時から高周波数側のエネルギー逸散が大きく、風停止後では低周波数側へのエネルギーシフトが顕著となり、高周波数側でのエネルギー逸散が顕著でなくなっていると考えられる。

図-6 は初期に低波浪のうねりが存在し、外部から弱いエネルギーが入力する条件である。この場合は、風が吹いている間は、オリジナルモデルは波高の増大し、周期が低減している一方で、提案モデルの波高の増加は小さく、周期の変動も小さい。また風が停止後についても、提案モデルは高周波成分の低減が早く、波高が初期条件に近い状態に戻るのが早い。

図-1 の WAM のスペクトル形状を見ると、図-6 のオリジナルモデルに近い形状となっている。このとき、提案モデルのスペクトル形状は、高周波成分のエネルギーは逸散していることから現地観測のスペクトル形状に近くなることが期待できる。

なお、図-4、5 の提案モデルの 24 時間後のスペクトル形状は、高周波数側のエネルギーが大きく低減している。これは、ピーク周波数から離れた高周波周波数で、エネルギー逸散が顕著となるようにした目的通りであるが、現地観測では高周波数側は  $f^5$  になることが多く、提案式が物理過程を表現しているわけではない点には留意が必要である。

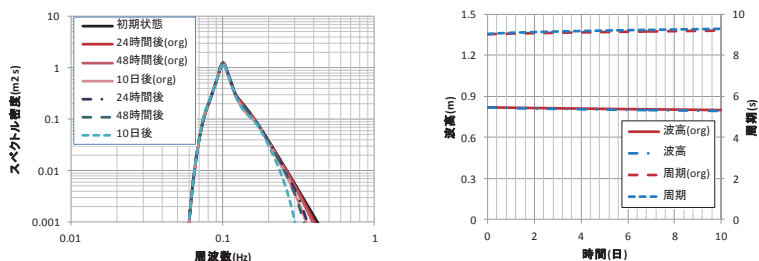


図-2 周波数スペクトル, 波高, 周期の比較(case1)

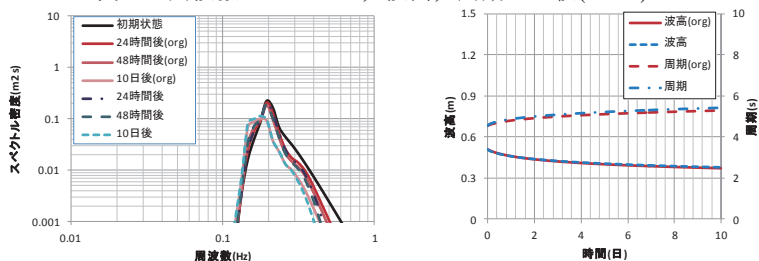


図-3 周波数スペクトル, 波高, 周期の比較(case2)

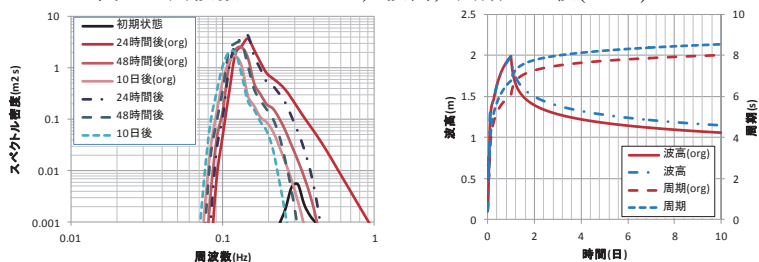


図-4 周波数スペクトル, 波高, 周期の比較(case3)

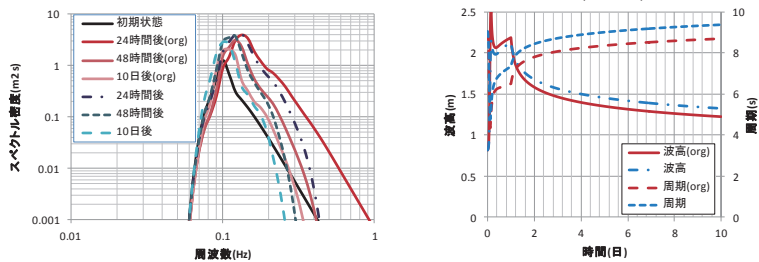


図-5 周波数スペクトル, 波高, 周期の比較(case4)

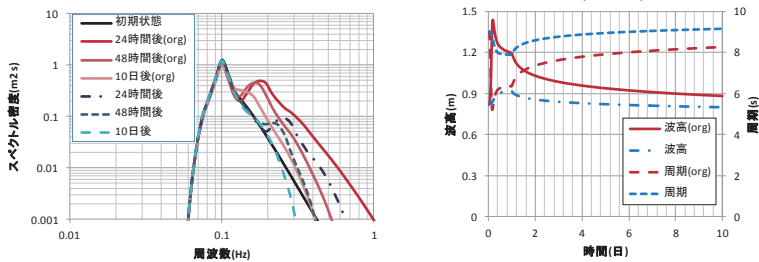


図-6 周波数スペクトル, 波高, 周期の比較(case5)

## 5. おわりに

WAM で計算されるソース項のエネルギー逸散項を提案して検証を行った。その結果、WAM のオリジナルモデルと比較して、特にうねりが存在する波浪場に弱風が作用する気象場において高周波数エネルギーの過大評価が改善されることを確認した。ただし、検証を実施したのは伝播項を除いた簡易的な方程式であるため、伝播を含めた平面的な計算での適用性は今後の課題ではあるが、エネルギー逸散項に本研究の提案式を用いることで低波浪時の計算精度が向上することが期待できる。

## 参考文献

- 1) 川口浩二, 櫻庭敏, 藤木峻: 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2014), 港湾空港技術研究所資料, No.1319, 2016, 126p.
- 2) 江口一平, 岡田弘三, 中田琢志, 内田洋平, 窪田和彦, 宇都宮 好博: 沿岸気象海象情報配信システムの高度化, pp.61-66, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 2014.
- 3) 森屋陽一, 琴浦毅, 関本恒浩: 日本海における波浪推算モデルを用いた海上・潜水作業可否の予測精度, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp.447-452, 2010.
- 4) 琴浦毅, 森屋陽一, 関本恒浩: 波浪推算の計算領域が海上作業可否の判定精度に及ぼす影響, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp.I\_880-I\_885, 2011.
- 5) 琴浦毅, 森屋陽一, 関本恒浩: 瀬戸内海における波浪推算モデルを用いた海上作業可否の判定精度, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp.I\_959-I\_964, 2012.
- 6) 琴浦毅, 片山 裕之: リーフ地形周辺の海上作業可否に着目した波浪予測モデルの検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 71 (2015) No. 2 p. I\_215-I\_220.
- 7) 琴浦毅, 田中仁: 冬期日本海における波浪推算精度の検証, 土東北地域災害科学研究 第 52 巻 (2016) p. I\_115-I\_120.
- 8) 琴浦毅, 田中仁: 波浪推算モデルによる低波浪時の有義波推算精度を低下させる要因の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 72 (2016) No. 2 p. I\_271-I\_276.
- 9) The WAMDI Group : The WAM model – A third generation ocean wave prediction model, Journal of physical oceanography, pp1775-1810, 1988.
- 10) 田村 仁, William M. DRENNAN, Erik SAHLEE, Hans C. GRABER : 短波重力波領域におけるスペクトル形状とソースバランス, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70 , No. 2 p. I\_111-I\_115, 2014.
- 11) IFS Documentation CY41R2 PART VII: ECMWF WAVE MODEL, p.83 ECMWF, 2016.