

# 波浪推算モデルの 低波浪時推算精度向上に関する研究

琴浦 賀<sup>1</sup>・田中 仁<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 五洋建設（株）技術研究所  
(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: Tsuyoshi.Kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup> フェローメンバ 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻  
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: hitoshi.tanaka.b7@tohoku.ac.jp

WAM や SWAN などの第三世代波浪推算モデルは、設計波の算定、日々の波浪予測などの実務に活用されている。著者らは WAM を用いて海上工事の施工可否判断への適用性について検討を進めるなかで、低波浪時において波高を過大評価、周期を過小評価するケースがあることを確認していた。この要因として考えられるのは高周波数側のエネルギーを過大評価に起因するものであると推察された。

本研究では高周波数側のエネルギーの過大評価の改善を目的とし、エネルギーソース項のうち逸散項に着目して、高周波数側のエネルギー逸散について検討を実施した。その結果、高波浪時期には波高の過小評価となるケースがあるものの、低波浪時には推算精度向上が図れ、WAM を用いた海上工事施工可否判断の精度向上につながる可能性が高いことが確認された。

**Key Words :** wave prediction accuracy, WAM model, marine works, dissipation

## 1. はじめに

海上工事では施工の品質管理、安全管理の観点から気海象情報の現況値の入手は重要であるため、これまで NOWPHAS<sup>1)</sup>などの観測整備網を活用しながら工事が進められてきた。また、気海象の予測値は工程管理の上では重要な役割を有しており、WAM, SWAN, WWIII などの第三世代波浪推算モデルを活用した予測モデルの検討も進んでいる<sup>2)</sup>。著者らは WAM を活用した海上施工可否判断に着目した検討を進める中で、低波浪時において波高を過大評価、周期を過小評価するケースがあることを確認していた。この要因として WAM が算出する波浪のエネルギーのうち、高周波数側のエネルギーが過大評価され、エネルギー全体を過大評価することで波高を過大評価するのに加え、エネルギーバランスが高周波数側にシフトすることで周期を過小評価する事例があることを示した<sup>3)</sup>。この高周波数側のエネルギー過大評価を改善することで低波浪時の推算精度向上につながるとともに、海上作業可否判断への波浪予測モデルのさらなる活用が期待できると考えた。

そこで、この高周波数側の過大評価を改善するために着目したのはエネルギーソース項のうちの逸散項である。逸散項に関する研究は近年でも多くなされているものの

<sup>4)</sup>、数値解析的に逸散項を完全に評価するのは難しく、また、エネルギーソース項は入力項、非線形相互作用項、逸散項のエネルギーバランスによって成立しており、逸散項のみを変更することはエネルギーバランスを崩す可能性がある。

しかし、本研究では逸散項のみを修正することで、海上工事の施工可否判断という実用的な利用に資する結果が得られるかについて基本的な検討を行った。

## 2. 逸散項に関する予備解析

### (1) エネルギー逸散項

本研究で対象とした WAM の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、高周波数域での適切なエネルギーバランスを得るために、 $k^2$ に関する項を加えられ、式(1), (2)で評価される<sup>5)</sup>。また、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いるため、多様な波浪条件において精度が向上しているが、本研究の対象としている低波浪時に特化したものではないと考えられる。

ここで、周波数  $f$  に対する  $n$  次モーメントを式(3)とす

ると、代表周期はWAMのオリジナル（以下WAMorgと表記）が $T_{org}=m_1/m_0$ なのに対し、現在、ECMWFは $m_0/m_1$ を用い、それに伴い $C_{ds}$ 、入力項の値などを調整しているなど、現在でも最適な逸散項に関する検討は継続されている<sup>6)</sup>。

$$S_{ds} = (-\gamma_d)E, \quad \bar{E} = \iint E(f, \theta) df d\theta \quad (1)$$

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

$$m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \quad (3)$$

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。

## (2) エネルギー逸散項の修正

本研究では高周波数側のエネルギー過大評価を改善するために式(4)を導入した。この式は、WAMorgよりさらに高周波数側のエネルギー逸散を期待するために $k^3$ に関する項を追加しているのが特徴である。また、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ の係数を設定することで、 $k$ の項の逸散の寄与分を変更できるようにしている。ここで、 $a=b$ としたのは、ECMWFが既往の検討で $a=0.4$ 、 $b=0.6$ としていたものの、近年ではこの係数をWAMのオリジナルである $a=b=0.5$ に戻したことを探査にし、 $c$ の寄与分の残分を $a=b$ で与えることとした。

$$\gamma_d = C_{ds}\langle\omega\rangle\left(\langle k \rangle^2 \bar{E}\right)^2 \left( a \frac{k}{\langle k \rangle} + b \left( \frac{k}{\langle k \rangle} \right)^2 + c \left( \frac{k}{\langle k \rangle} \right)^3 \right) \quad (4)$$

ここで、 $a+b+c=1.0$ 、 $a=b=0.5(1.0 - c)$

## (3) 予備解析による検討条件

修正した逸散項の影響を確認するために予備解析を行った。予備解析はWAMの支配方程式から伝播項を取り除いた簡易式を用いて実施し、ソース項のみで評価することとした。

表-1が予備検討条件である。Case1は低波浪のうねり、Case2は低波浪の風波が存在する条件で、逸散項、非線形相互作用項のみが作用する条件である。Case3はごく小さい波高、Case4はうねりが存在する条件で10m/sの風が作用する条件である。Case5はうねりが存在する条件で5m/sの風が作用する条件となっている。

## (4) 予備解析による検討結果

図-1は代表周期をWAMorgと等しい $T_{org}=m_1/m_0$ 、 $c=0.10$ 、 $C_{ds}=7.5$ （以下WAMnewと表記）とした時の予備解析とWAMorgのスペクトル、波高、周期時系列の比較図である。

Case1、2ではWAMnewの高周波数側のスペクトルが若干低下しているものの有意な差はない。Case3、4では波浪発達の過程においてWAMnewが小さく評価されており、うねりが波高が低く出ているが、周期への影響は小さい。

Case5は最もモデルの差が発生しているケースであり、波高の発達・減衰のいずれにおいてもWAMnewの波高は小さく、周期は長く評価されている。これはスペクトル形状の推移を見て分かるように高周波数側の発達が抑えられる。

表-1 提案モデル予備検討条件

| ケース   | 初期状態                        | 風速、継続時間     |
|-------|-----------------------------|-------------|
| Case1 | $H_{1/3}=0.8m, T_{1/3}=10s$ | なし          |
| Case2 | $H_{1/3}=0.5m, T_{1/3}=5s$  | なし          |
| Case3 | $H_{1/3}=0.1m, T_{1/3}=3s$  | 10m/s, 24時間 |
| Case4 | $H_{1/3}=0.8m, T_{1/3}=10s$ | 10m/s, 24時間 |
| Case5 | $H_{1/3}=0.8m, T_{1/3}=10s$ | 5m/s, 24時間  |

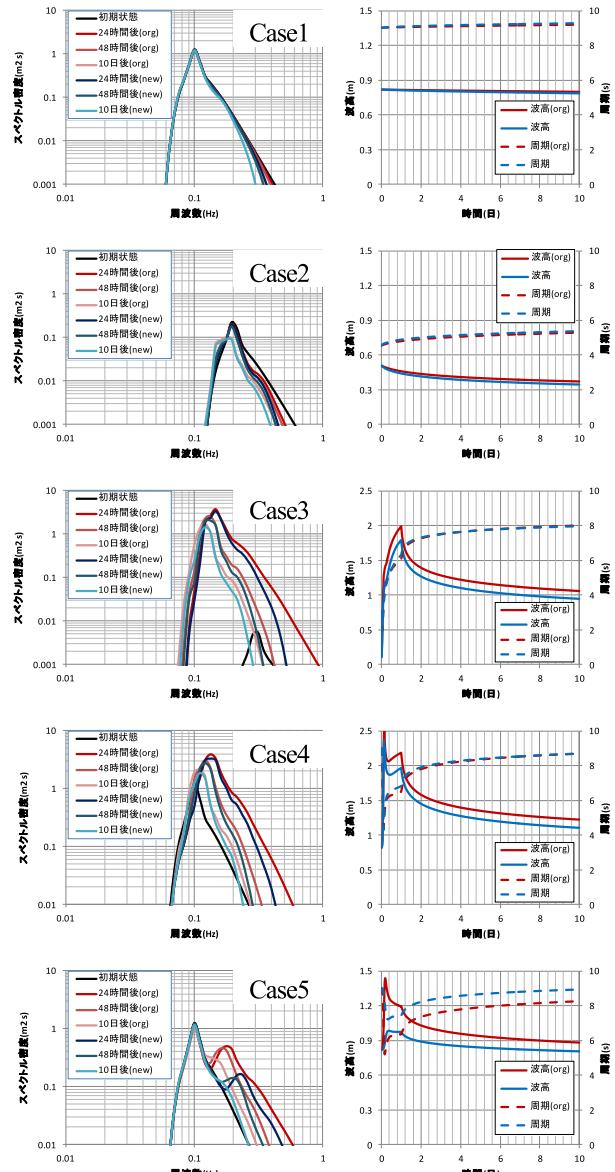


図-1 スペクトル・統計値 ( $T_{org}=0.10f_3-C_{ds}7.5$ )

られるとともに減衰が早いためである。これは、本研究で追加した  $k^3$  項が寄与しているためと考えられる。しかも、 $k^3$  項は強風時よりは弱風時の発達期、減衰期のほうに影響は大きいことが示唆される。

### 3. 新しい逸散項を用いた検討

#### (1) 波浪推算モデルの計算条件

予備解析の検討を踏まえ、伝播項を含めた計算は、太平洋域を図-2 に示す領域 XL の計算を行い、図-3 に示す領域 LL に接続した。領域 XL では  $0.5^\circ$  格子の気象庁 GPV (GSMgl)，領域 LL では約 10km 格子の気象庁 GPV (GSMjp) 海上風データを約 10km 格子に線形補完し、WAM モデルへの入力条件とした（表-2）。

また、伝播項を含めた計算は、式(4)の代表周期： $T_{\text{org}} = m_v/m_0$  の 1.1, 1.0, 0.9 倍,  $c : 0.05, 0.10, 0.15, C_{ds} : 5.5, 7.5, 10.0, 15.0$  と変化させて検証した。

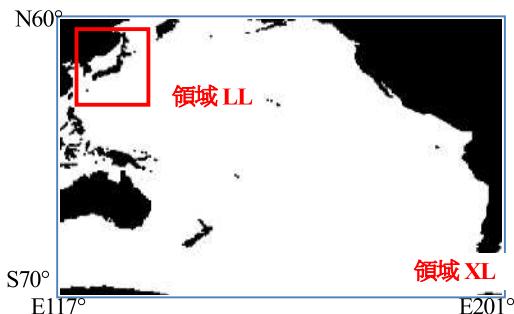


図-2 太平洋計算領域図( $0.5^\circ$  格子)

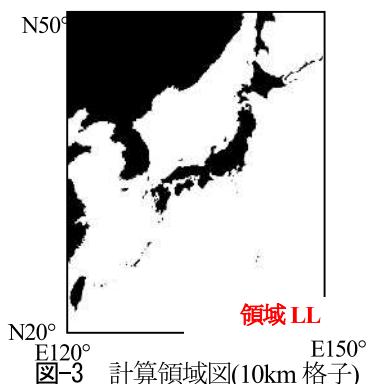


図-3 計算領域図(10km 格子)

| 表-2 WAM 計算諸元 |                 |    |
|--------------|-----------------|----|
| 領域番号         | LL              | XL |
| 最小周波数        | 0.042Hz～1.174Hz |    |
| 周波数分割数       | 35              |    |
| 周波数間隔        | 倍率 1.1          |    |
| 方向分割数        | 16              |    |
| 水深条件         | 深海              |    |

#### (2) 現地観測条件

検証対象は NOWPHAS に加えて表-3 に示す現地観測で得られたスペクトルも用いることとした。

#### (3) 観測値との比較 (直江津)

図-5 に直江津の観測値、 $\text{WAMorg}, T_{\text{org}}=m_v/m_0, c=0.10, C_{ds}=7.5$  (以下 WAMnew と表記) の比較時系列を示した。この時系列からでは波高ではそれほど大きな差は見られないが、周期においては WAMnew のほうが実測値に近い値になっている。これは図-6 に示すとおり、高周波数側のスペクトル形状の改善が寄与しているためと考えられる。

表-3 現地観測諸元

| 項目       | 直江津港                   | 鹿島港            |
|----------|------------------------|----------------|
| 観測期間     | 2009 年 12 月            | 2015 年 6 月～8 月 |
| 水深       | 25m                    | 20m            |
| 観測モード    | 20 分連続観測               |                |
| サンプリング間隔 | 0.5s                   |                |
| 観測成分     | 4 成分 (水位、水圧、流速 (U, V)) |                |

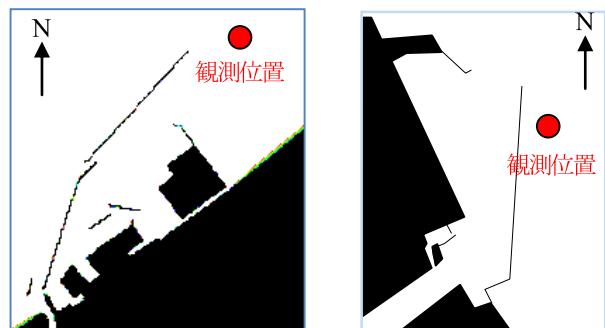


図-4 観測位置図 (左: 直江津港, 右: 鹿島港)

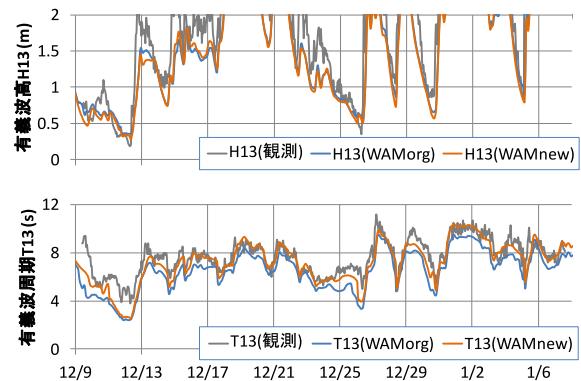


図-5 波高・周期時系列(2009 年直江津)

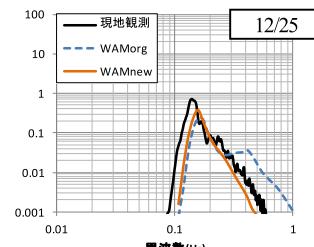


図-6 スペクトル比較

#### (4) 観測値との比較 (鹿島)

図-7に鹿島の観測値、WAMorg,  $T_{org}=m_{-1}/m_0$ ,  $c=0.10$ ,  $C_{ds}=7.5$  (以下 WAMnew と表記) の比較時系列を示した。この時系列には太平洋側で夏期に見られる特徴的な波浪状況が存在する。それは7月後半から8月前半にかけての時期で、波高は1mを下回るものとの周期が8秒を上回る状態である。海上工事での作業中止基準は波高が1m以上、周期8秒以上となることが多く、この時期の波高は小さいが、周期の影響により作業が難しい時期である。

この期間に着目すると、WAMold は周期を8秒以下であると過小評価しているため、この結果を用いると作業可能と判断されてしまう。しかし、WAMnew はほぼ妥当な周期を得られることから作業不可の判断が可能になることが分かる。しかし、波高においてはいずれの WAM も過大評価をしている中で、WAMnew のほうが多少観測値に近い。

この低波浪時期のスペクトルを図-8で確認すると WAMold はこれまでの検討と同様に高周波数側で過大評価をしている傾向が見られることから、波高の過大評価、周期の過小評価となっていることが確認できる。

WAMnew では高周波数側のエネルギーは減少しているが、スペクトルピーク付近のエネルギーを過大評価していることが確認できる。高周波数側のエネルギー逸散は式(4)で期待したとおりの効果が得られていると考えられるが、ピーク付近のエネルギー増大はエネルギーソースバランスが適切ではないことを示唆している。

図-7の時系列において WAMnew は波高 2.0m を上回る条件では WAMold と大きな差はないが、7月9日、8月10日頃の波高 1.5m 程度の条件においては過小評価するケースが確認できる。この時のスペクトルを図-9に示すが、発達期である8月9日の時点では WAMnew も高周波数側のエネルギーが存在するが、8月11日の時点では高周波数側のエネルギーが余分に低減をしている。これは、予備解析 Cace5 の結果の傾向と一致しており、式(4)の影響は弱風時において影響が大きいためと考えられ、伝播項を入れた計算においても同様であることが確認された。しかし、スペクトルピークの周波数は WAMnew のほうが現地観測と対応しているため、周期については WAMnew のほうが精度は良くなっている。

図-10は図-7の有義波高、周期の散布図である。波高においては WAMnew の高波浪域で過小評価をしているが全体的なばらつきは小さい。また、周期については WAMold が全体的に過小評価している一方で、WAMnew では 1:1 の勾配に近づき、過小評価が改善されていることが確認される。

ここで、海上工事の作業中止基準は波高 1.0m を設定することが多く、波高 1.0m を上回るかどうかという点が重要になってくる。また、作業によっては周期が中止

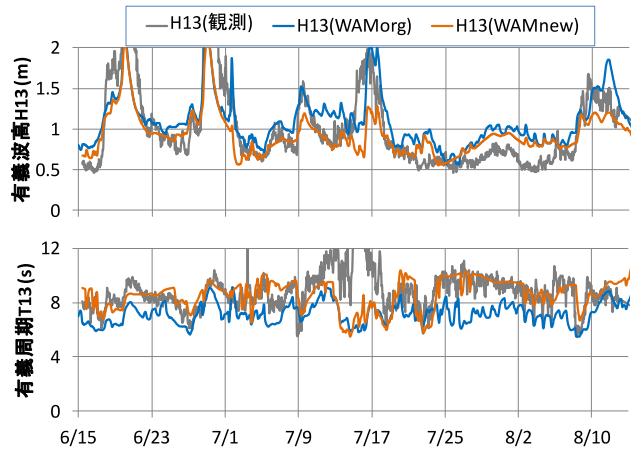


図-7 波高・周期時系列(2015年鹿島)

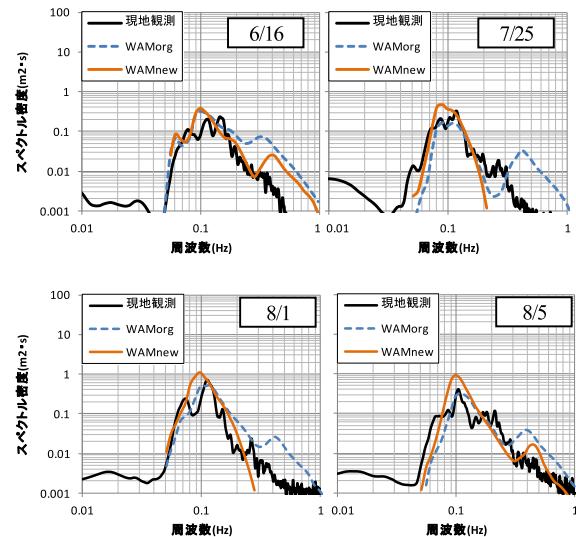


図-8 静穏時スペクトル比較

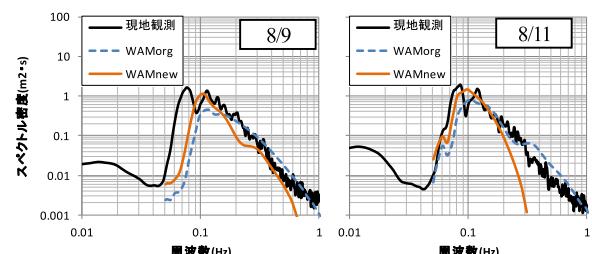


図-9 高波浪時スペクトル比較

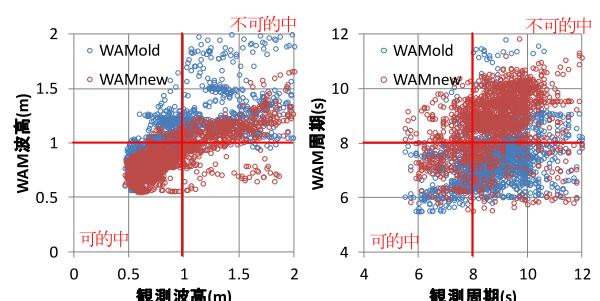


図-10 波高・周期散布図 (Torg-0.10f3-Cds7.5)

**表-4** 的中率%一覧  
(基準波高, 基準周期 : 1.0m, 8秒)

|      | WAMold |      | WAMnew |      |
|------|--------|------|--------|------|
|      | 波高     | 周期   | 波高     | 周期   |
| 可的中  | 25.3   | 19.0 | 49.6   | 8.9  |
| 不可的中 | 45.0   | 31.7 | 32.0   | 59.8 |
| 的中合計 | 70.3   | 50.7 | 81.6   | 68.7 |
| 的中なし | 29.7   | 49.3 | 18.4   | 31.3 |

基準になることが多い。そこで、波高 1.0m 以下、周期 8 秒以下を施工可能条件と設定した場合、WAM を施工可否判断に用いた時の施工可、不可の的中率について評価する。例えば、図-10 に示す波高散布図において、WAM 波高 1.0m 以下かつ観測波高 1.0m 以下の領域は稼働的中、WAM 波高 1.0m より大きくかつ観測波高 1.0m より大きい領域は不稼働的中となる。的中率は全データに対する稼働、不稼働的中データの比率で定義され、図-7 の時系列に対する結果一覧を表-4 に示す。この表から WAMnew の的中率は WAMorg と比較して波高で 10%, 周期で 20% 程度増加していることが確認できる。

#### (5) パラメーターによる影響

式(4)の代表周期 :  $T_{org} = m_1/m_0$  の 1.1, 1.0, 0.9 倍,  $c$  : 0.05, 0.10, 0.15,  $C_{ds}$  : 5.5, 7.5, 10.0, 15.0 と変化させた場合の的中率を表-5 に示した。ここで、WAMold と比較して的中率が増加している条件には赤色でハッキングをしている。これまで検討で使用してきた WAMorg,  $T_{org} = m_1/m_0$ ,  $c=0.10$ ,  $C_{ds}=7.5$  は Case6 にあたり、他と比較して、波高、周期の増加率が高いケースである。

この図を見ると代表周期を 0.9Torg のケースでは的中率の改善しているケースは少ない。ECMWF は代表周期として 0.9Torg に近い  $m_0/m_1$  を用いているが、逸散項以外のパラメーターも調整をした結果であると考えられ、逸散項のみを修正しても精度向上が難しいことを示唆している。

その一方で、 $T_{org}$ , 1.1Torg のケースでは的中率が改善するケースが多く、上述したように Case6 では的中率が 10%以上向上することが確認されている。そのため、このケースであれば逸散項のみの修正でもある程度の精度向上が見込めることが分かった。

なお、これらの検討は数値実験に基づくものであり、これらのパラメーターに物理的な意味を有しているわけではないが、施工可否判断に用いるという目的においては実務的な意味を有していると考えられる。

**表-5** 的中率%一覧

| case | 検討条件                   | 波高的中 | 周期的中 |
|------|------------------------|------|------|
| 1    | Torg-0.05f3-Cds5.5     | 77.6 | 70.6 |
| 2    | Torg-0.05f3-Cds7.5     | 81.0 | 68.4 |
| 3    | Torg-0.05f3-Cds10.0    | 74.8 | 59.2 |
| 4    | Torg-0.05f3-Cds15.0    | 63.6 | 38.3 |
| 5    | Torg-0.10f3-Cds5.5     | 75.1 | 72.4 |
| 6    | Torg-0.10f3-Cds7.5     | 81.6 | 68.7 |
| 7    | Torg-0.10f3-Cds10.0    | 76.5 | 68.6 |
| 8    | Torg-0.10f3-Cds15.0    | 65.4 | 55.0 |
| 9    | Torg-0.15f3-Cds5.5     | 73.7 | 72.8 |
| 10   | Torg-0.15f3-Cds7.5     | 80.4 | 71.7 |
| 11   | Torg-0.15f3-Cds10.0    | 74.8 | 68.7 |
| 12   | Torg-0.15f3-Cds15.0    | 65.4 | 66.5 |
| 13   | 0.9Torg-0.05f3-Cds5.5  | 74.5 | 47.6 |
| 14   | 0.9Torg-0.05f3-Cds7.5  | 65.6 | 35.6 |
| 15   | 0.9Torg-0.05f3-Cds10.0 | 60.3 | 30.7 |
| 16   | 0.9Torg-0.05f3-Cds15.0 | 56.7 | 23.6 |
| 17   | 0.9Torg-0.10f3-Cds5.5  | 74.5 | 47.6 |
| 18   | 0.9Torg-0.10f3-Cds7.5  | 71.7 | 45.5 |
| 19   | 0.9Torg-0.10f3-Cds10.0 | 60.4 | 28.5 |
| 20   | 0.9Torg-0.10f3-Cds15.0 | 57.3 | 30.3 |
| 21   | 0.9Torg-0.15f3-Cds5.5  | 76.8 | 69.2 |
| 22   | 0.9Torg-0.15f3-Cds7.5  | 67.7 | 51.7 |
| 23   | 0.9Torg-0.15f3-Cds10.0 | 60.4 | 28.5 |
| 24   | 0.9Torg-0.15f3-Cds15.0 | 57.9 | 36.4 |
| 25   | 1.1Torg-0.05f3-Cds5.5  | 49.6 | 74.5 |
| 26   | 1.1Torg-0.05f3-Cds7.5  | 62.4 | 73.3 |
| 27   | 1.1Torg-0.05f3-Cds10.0 | 78.3 | 71.2 |
| 28   | 1.1Torg-0.05f3-Cds15.0 | 79.1 | 68.7 |
| 29   | 1.1Torg-0.10f3-Cds5.5  | 49.2 | 75.4 |
| 30   | 1.1Torg-0.10f3-Cds7.5  | 63.0 | 73.6 |
| 31   | 1.1Torg-0.10f3-Cds10.0 | 76.6 | 72.2 |
| 32   | 1.1Torg-0.10f3-Cds15.0 | 77.2 | 68.7 |
| 33   | 1.1Torg-0.15f3-Cds5.5  | 50.5 | 75.5 |
| 34   | 1.1Torg-0.15f3-Cds7.5  | 64.2 | 74.2 |
| 35   | 1.1Torg-0.15f3-Cds10.0 | 75.9 | 72.3 |
| 36   | 1.1Torg-0.15f3-Cds15.0 | 75.7 | 70.9 |

※赤ハッキングは WAMorg より改善

#### 4. まとめ

WAM は低波浪時に推算精度を低下させる要因として考えられる高周波数領域におけるエネルギーの過大評価の改善を目標として、エネルギー逸散項に  $k^3$  に関する項を追加して検討を行った。その結果、高周波数側のエネルギーが低減を得ることが出来たが、波浪の発達後の風速が弱まったタイミングにおいて高周波数エネルギーの低減が過剰気味となり波高を過小評価すること、静穏時ではスペクトルピーク付近でエネルギーを過大評価することで波高を過大評価する傾向があることが確認された。しかし、現状の WAM と比較すると低波浪時における波高、周期の精度、的中率は向上したため、本研究による逸散

項を用いたモデルは海上工事施工可否判断への活用が期待できる。

なお、本研究ではエネルギーソース項のうち逸散項のみに着目をしているためエネルギーバランス全体の検討が十分ではない点は今後の重要な課題である。また、今回対象とした時期・箇所、スペクトル形状以外での検証も含めて多くの課題が山積しており、これらの課題に対して継続的に取り組むことで、実務的で高性能な波浪推算モデルの開発を進める予定である。

**謝辞：**本研究を行うにあたり、九州大学大学院の橋本典明教授には、WAM モデルを用いた波浪予測について有益な助言をいただきました。また、波浪予測結果の検証に利用した NOWPHAS データは国立研究開発法人港湾空港技術研究所海象情報研究チームの HP より入手させていただきました。ここに記して関係者に謝意を表します。

## 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, pp.126, 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所, 2016.
- 2) 江口一平, 岡田弘三, 中田琢志, 内田洋平, 畠田和彦, 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) 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, 2016.
- 4) 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.
- 5) The WAMDI Group : The WAM model – A third generation ocean wave prediction model, Journal of physical oceanography, pp1775-1810, 1988.
- 6) IFS Documentation CY41R2 PART VII: ECMWF WAVE MODEL, p.83 ECMWF, 2016.

(2017.2.2 受付)

## INVESTIGATION ON IMPROVE ACCURACY OF WAM PREDICTION UNDER MILD WAVE CLIMATE

Tsuyoshi KOTOURA and Hitoshi TANAKA

Third generation wave estimation models such as WAM and SWAN are used in practical operations such as wave designing and daily wave prediction. The study on the workability judgment of marine construction through WAM has been conducted and the authors have confirmed that there are cases in which during low wave season, the overestimation of wave height and underestimation of wave period were observed. It is attributable to the factor that energy is overestimated in high frequency region.

In order to improve the overestimation of energy on the high frequency region, we focused on the dissipation term of the energy source term and examined energy dissipation on the high frequency region. Although there are cases in which the wave height is underestimated during the high waves, it is confirmed that the accuracy of estimation can be improved at low waves. As a result, the accuracy of workability judgment of marine construction work made using WAM was improved.