

	ことうら つよし
氏 名	琴 浦 毅
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成30年9月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	海上施工可否判断に用いる波浪推算モデルに関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 田中 仁
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 田中 仁 東北大学教授 風間 聡 東北大学准教授 梅田 信 東北大学准教授 有働 恵子

論 文 内 容 要 旨

海上・潜水作業を伴う海洋工事では、波浪条件が作業の安全性や可否判断に大きく影響するため、これまでも波浪観測結果や波浪予報の入手に努めてくるとともに、波浪予測を試みてきた。波浪予測は、直接作業時刻の海象条件が把握できるため、精度がよければ作業可否判断に非常に有用である。最近では、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、作業可否判断に利用され始めている。しかしながら、波浪推算モデルの予測精度に関しては、高波浪に着目して検討されたものが多く、海上・潜水作業可否に着目した波高 1m 程度以下の波浪の予測精度に関しては、明確になっているとは言えない。また、工事場所によっては地形による遮蔽の影響を受けるとともに、工事内容によっては7日程度先までの長期の予測結果が必要となる場合もあるが、いずれにしても地形の精度を規定する格子サイズや予測時間が予測精度に及ぼす影響も明確になっているとは言えない。作業可否判断は、工事の安全性だけでなく、工期やコストにも大きく影響するため、現場での波浪予測結果の利用には、予測精度の明確化が非常に重要である。

本研究では、第3世代モデルである WAM の海上作業可否判断に用いられる低波浪時の基本特性を把握したうえで、新しい消散項計算手法を開発し、これを組みこんだ海上作業可否判断に用いる高精度な波浪推算モデルの確立を目的とする。

気象庁 GPV (GSMjp) の海上風データを入力とした WANDI グループによるオリジナル WAM による推算精度については日本海側と太平洋側で基本的な検討を実施した結果、日本海側では海上作業可否に着目した基準波高 0.6m および 1m の場合、1日先および3日先予測的中率は80%以上と比較的実務への対応可能な精度を有するものの、7日先予測では70%以上と低下するため長期予測の改善の必要性が示された。また、太平洋側においては低波浪時の波高、周期の過小評価が確認された。これは、うねり成分の評価不足が考えられるため、計算領域不足が要因として推定された。そのため、複数の太平洋計算領域を用いて常陸那珂港のケーソン据付工事を例に、波浪予測結果と据付日を比較検証したところ、波高値のみで稼働可否判定を行う場合は北太平洋領域で良いが、周期を含めた稼働可否判定をする場合は南緯 70 度までを含む領域が適切であることが明らかになった。その一方で低波浪期間に予測精度が低下する傾向が確認された。

そこで、日本海側、太平洋側のそれぞれの現地観測と WAM の周波数スペクトルの比較をしたところ、WAM が低波浪時に推算精度を低下させる要因は、高周波数領域におけるエネルギーの過大評価であることが確認された。その結果、エネルギー全体を過大評価するため波高も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していた。この過大評価をしているエネルギーは、高波浪時のエネルギーと比較すると相対的にエネルギーが小さいため影響は小さいと考えられるが、全体エネルギーが小さい低波浪時においては、その影響は大きく、精度低下の要因となっていることが確認された。また、日本近海の計算領域と太平洋を含む計算領域の計算結果の比較から、低波浪時に過大評価する時には日本近海の計算領域の高周波数エネルギーが過大であることが要因であること、低周波数であるうねり成分の評価は良好であることが明らかに

なった。つまり、高周波数側のエネルギー評価を改善する手法を新しく開発することで、低周波成分から高周波成分までスペクトル形状が一致する予測結果を得られることが期待できる。本研究においては海上風外力項 S_m 、砕波消散項 S_{db} 、成分波間同士の非線形相互作用 S_{nl} の3つのソース項のうち、砕波消散項 S_{db} に着目した。

WAMのオリジナルのエネルギー消散項はHasselmannの白波理論に基づくKomen et al.の理論が採用されており、下式で評価される。

$$S_{ds} = (-\gamma_d)E, \quad \bar{E} = \iint E(f, \theta) df d\theta, \quad m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \quad (1)$$

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

ここで、 C_{ds} : 定数でありオリジナルWAMでは4.5、 k : 波数、 $\langle \omega \rangle$: 代表角周波数、 $\langle k \rangle$: 代表波数である。

本研究では低波浪時の高周波数側のエネルギー過大評価を改善することを目的とするために、高周波数側のエネルギー消散をさらに効率的に可能とする評価式が低波浪時の高周波数エネルギー消散のみに着目する形で、通常の式(2)を元に改良した式(3)を導入した。この式は、オリジナルの式(3)よりさらに高周波数側のエネルギー消散を期待するために k に関する項を追加しているのが特徴である。

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

ここで、 $a+b+c=1.0$ 、 $a=b=0.5(1.0-c)$ である。

図1は3乗項を加えたことによる消散項係数の影響を示しており、2乗項の場合と比較して代表周波数より離れた高周波数側で差が大きくなっており、高周波数側での消散が期待できる周波数係数分布となっている。図2の2009年の直江津港の観測スペクトルに対して、オリジナルのWAMorgは高周波数側を過大評価しているのに対し、3乗項を組み込んだ新しいWAMnewは高周波数側の過大評価が改善され、低波浪時の波形勾配が0.01以下の条件においても評価できるようになった。また、図3に示す太平洋側の鹿島の時系列においてもWAMnewはほぼ妥当な周期を得られるようになり、波高においてもWAMorgと比較すると改善することが示された。

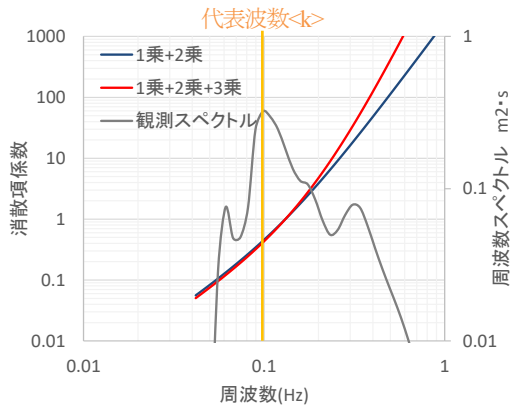


図1 3乗項による影響

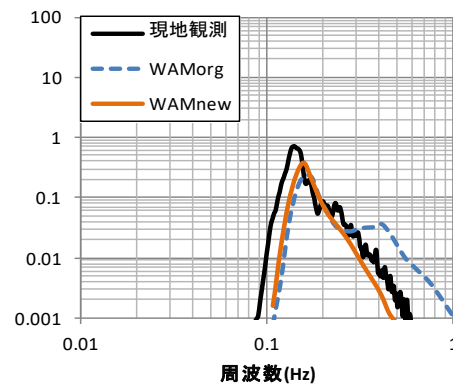


図2 スペクトル比較(2009年直江津)

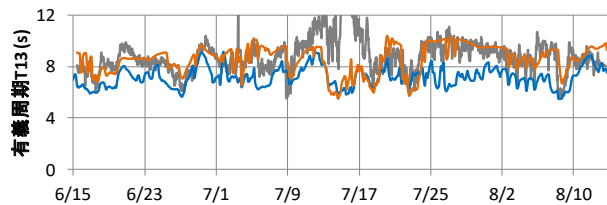
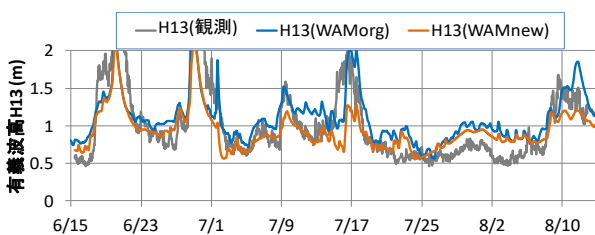


図3 鹿島港における有義波高・周期時系列

図4は波高1.0m, 周期8秒を基準としての的中率を太平洋側のNOWPHAS地点で検討した結果であり, この図からWAMnewで波高は22地点中17地点, 周期は特に東日本側での中率が13地点中10地点の約8割で精度改善することが示された. これは新しい消散項による高周波数側のエネルギー評価改善が寄与した結果である.

図5は波高, 周期の1ヶ月予測アンサンブルデータである. 単独予測に相当するControl runは全メンバー平均ave±σに収まっているケースが多いものの, メンバー最大値Maxに等しいケースも存在するなどばらつきが大きい. その一方で, 全メンバー平均aveは大きな変動はなく, 各メンバーの分散が打ち消される形となっている. また, 全メンバー平均ave±σの範囲を示すことで観測値の6割程度を予測できることを示している. 図6は金沢の波高に対する予測日別アンサンブル検証指標を示しており, 新しいエネルギー消散項を用いたWAMはRMSE, 的中率のいずれにおいても7日後以降ではControl runと比較して平均して10%程度以上精度向上しており, 長期予測精度向上が図られていることが示された. また, BSSを用いた検討により日本海側では気候学的予測と比較してアンサンブル予測を実施することは価値がある結果となった. したがって, 新しい消散項を用いたWAMはアンサンブル予測においても有効であること確認され, より長期間の予測を高精度で得られることを示した.

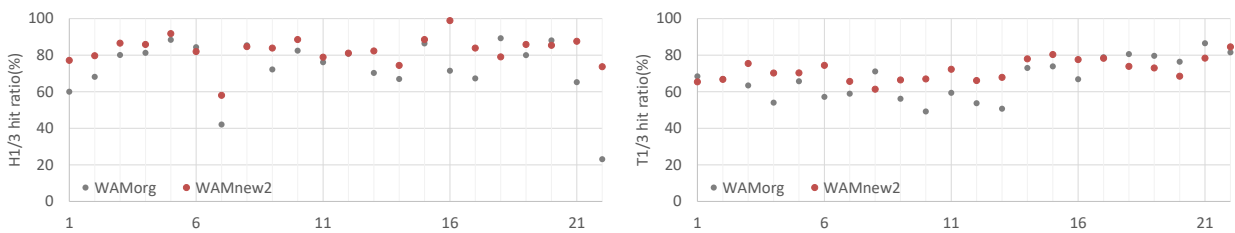


図4 太平洋側の中率 (有義波高, 周期)

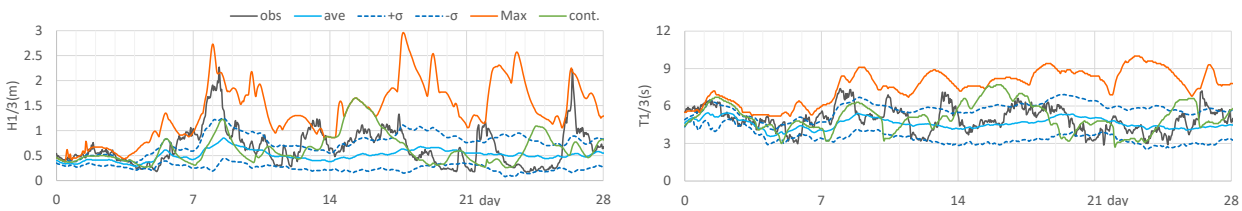


図5 1ヶ月アンサンブル波浪予測 (波高, 周期)

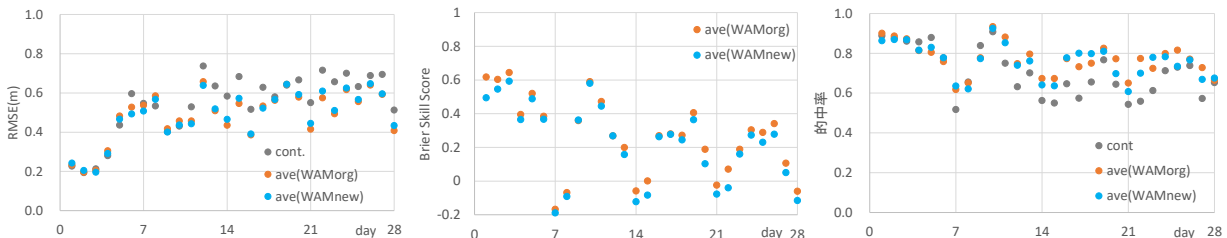


図6 予測日別アンサンブル波高検証指標(金沢: RMSE, BSS, 的中率)

本研究では, 海上工事施工可否判断に必要な波浪予測モデルにおける課題とその解決の方向性を示したうえで, 新しい波浪推算モデルにおいて重要となる低波浪時の精度向上が可能となるエネルギー消散項を開発した. 砕波などのエネルギー消散を物理的に正確に評価できる計算式がない中で, 低波浪時の高周波数成分のエネルギーに着目することで開発を実施したことで, 海上工事施工可否判断へ適用する波浪予測モデルとしては優れた精度と汎用性が確保できたものと考えられる.

論文審査結果の要旨

海上・潜水作業を伴う海洋工事では、波浪条件が作業の安全性や可否判断に大きく影響する。そのため、波浪による作業可否判断は、工事の安全性だけでなく、工期やコストにも大きく影響するため、波浪予測精度の明確化は実務的に重要性が高い。そこで、本研究では、第3世代波浪推算モデルであるWAMの海上作業可否判断に用いられる低波浪時の基本特性、課題を把握したうえで、新しい消散項計算手法を開発し、これを組みこんだ海上作業可否判断に用いる高精度な波浪推算モデルの確立を行った。第1章では、「序論」として本論文の目的と構成について述べている。

第2章においては、WAMに関する既往の研究を紹介し、他の第三世代波浪推算モデルと比較してWAMを用いる優位性について述べている。

第3章においては、日本域を対象としたオリジナルWAMの特性や、作業可否判断に用いる場合の太平洋計算領域の最適化、長期予測の精度低下という問題点を明らかにしている。この結果はモデル改善の方向性においてきわめて重要な成果である。

第4章においては、作業可否判断に用いる場合の太平洋域の最適計算領域を明らかにしている。この結果は、海上施工において重要な知見である。

第5章においては、低波浪時に予測精度が低下する要因が、現地観測データとの比較から高周波数側のエネルギー過大評価であり、それに伴い波高の過大評価、周期の過小評価が生じることを明らかにしている。これは、海岸工学にとってきわめて重要な知見である。

第6章においては、低波浪時に予測精度を向上させる新しい消散項を加味したシミュレーションを実施し、旧来計算手法による計算結果との相違を明らかにしている。これは海岸工学上、重要な成果である。

第7章においては、長期予測について新しい消散項を加味したアンサンブル予測について、旧来計算手法による計算結果との相違を明らかにしている。これは海洋工事の実務において、重要な成果である。

第8章では総括及び今後の課題を述べている。

以上要するに、現地データ及び数値シミュレーションにより、海上作業可否判断に資する改良を加味したWAMを開発し、海上作業可否判断に用いる場合の基本特性と課題を明らかにしており、今後、海上作業可否判断の向上につながる実務的応用の可能性を有している。したがって、海岸・海洋工学分野の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。