

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

琴浦 毅¹・片山 裕之²

¹ 正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2735 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Tsuyoshi.Kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2735 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp

海上工事を安全で効率的に進めるために気象予測情報の取得は重要な課題であるが、作業限界波高 1.0 m 程度の波浪推算精度についての検証例は少ない。また、リーフ周辺は地形や波浪場が複雑であるため、数値解析においても課題が多い。そこで、本研究ではリーフ地形周辺の現地波浪観測を行い、その結果を用いて、海上作業可否判断に資する波浪予測モデルの構築を試みた。

現地観測の結果、リーフ周辺の波はリーフエッジ沿いに屈折しながら回りこむ波浪が支配的であったため、浅海域の波浪解析手法としてエネルギー平衡方程式を用いてリーフを回りこむ波を評価し、沖波に対する対象地点の波高比を算出した。WAM で求めた沖波推算波高に、算出した波高比を乗じて予測値を提供する簡易波浪予測モデルを構築し、そのモデルが実務的な精度を有していることを確認した。

Key Words : Wave prediction accuracy, WAM model, marine works, reef

1. はじめに

海上作業を伴う海洋工事を安全で効率的に行うために、国土交通省や工事施工者は気象・海象観測網の整備、予報情報の取得に努めてきた¹⁾。また、近年では、計算機の性能向上や計算手法の高度化などが著しく、観測値と波浪予測値を同化することで予測精度の向上を図れる波浪推算システムなども構築されている²⁾。しかし、波浪推算モデルの推算精度に関しては、高波浪に着目して検討されたものが多く、海上作業の可否判断である波高 1.0 m 程度の精度に関する検証例は十分とは言えない^{3)~5)}。

またサンゴ礁海域では、水深の浅いリーフフラットを有することが多く、さらに、そのリーフ前面の海底勾配は急傾斜勾配となっているなど、地形的に複雑である。サンゴ礁海域での波浪変形を捉える試みは以前よりなされており、津嘉山らは現地観測結果を用いて高山らのリーフ上の波高の実験式を修正している^{6),7)}。また、平山らはリーフ周辺の波浪変形計算にブシネスク方程式を適用し、設計波レベルにおけるリーフ内部の護岸越波量を評価している^{8),9)}。また、高山らはサンゴ礁海域を対象に、施工時の濁り拡散モデルを構築しているが、現地観測との比較までは至っていない¹⁰⁾。

本研究では、リーフ地形周辺における波浪特性を現地観測結果から検証し、その結果からWAMを基本とした

予測モデルを構築することで、リーフ地形周辺の海上作業可否に着目した実務的な波浪予測モデルを確立することを目的とした。

2. 現地観測

(1) 現地観測の条件

対象とした海域は図-1に示す沖縄県那覇地区である。通常、波による施工可否判断を必要とする海上工事は船舶を用いて施工することが多いため、作業船の喫水を考慮するとある程度の水深(概ね5 m程度)以上が施工範囲となることが多い。従って、作業船舶の喫水より浅いリーフフラット(図-1の紫色の範囲)上は今回の研究観測対象とせず、リーフフラット周辺の波浪場に着目して、表-1、図-1に示すリーフ北側に波高計を2台(St.1, St.2)設置した。リーフエッジからの距離はSt.1: 30 m, St.2: 300 m程度となっている。また、St.2の近傍には設置水深より浅い水深15 m程度の島瀬が存在している。観測期間は2014年8月15日~2014年10月26日であり、0.5 sの連続観測データを取得した。

(2) 現地観測の結果

現地観測の結果をNOWPHAS那覇(2014年:速報値)

表-1 観測諸元

地点名	水深(m)	対象期間	観測モード
NOWPHAS那覇	51	2014年8月15日～ 2014年10月26日	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))
St.1	15		
St.2	22		

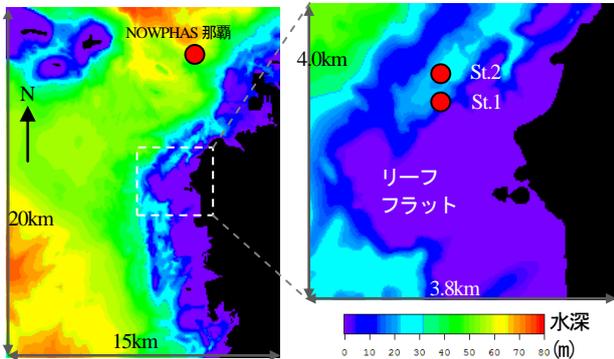


図-1 リーフ地形と波高計位置

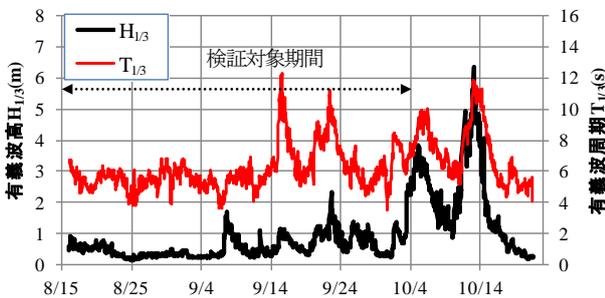


図-2 NOWPHAS 那覇観測時系列

のデータと合わせて検証する。図-2に観測期間中のNOWPHAS那覇の時系列を示す。10月4日以降は台風18号、台風19号による顕著な高波浪が観測されているが、本研究の目的は海上作業可否判断の波高1.0 m付近を対象としているため、明らかに作業不可となるこの期間を除外して検証対象期間とした。

図-3に検証対象期間におけるNOWPHAS那覇と設置した2台の波高計の有義波高、波向の時系列を示す。この観測結果を見ると、NOWPHAS那覇、St.2では作業限界波高1.0 mを上回る高波浪①～④が4回観測されているのに対し、St.1では高波浪②で波高1 mを下回り、高波浪③では他地点と比較して波高が大幅に小さく波高1 m程度となっている。この時のNOWPHAS那覇の波向はSWとなっていることから、南側からの来襲波であることが予想される。そのため、St.1においては南側リーフによる遮蔽を受けるため波高が低減するものの、St.2においては遮蔽による影響が比較的小さいため、結果として波高の低減も小さいと考えられる。

この遮蔽域の影響を定性的に評価するため、図-4にNOWPHAS那覇の波向N、SWにおける、NOWPHAS那覇とSt.1、St.2の波高の相関を示した。NOWPHAS那覇とSt.1、St.2の波高が一致すればその勾配(回帰係数)は1.0となる。波向NはSt.1、St.2の回帰係数0.9程度と

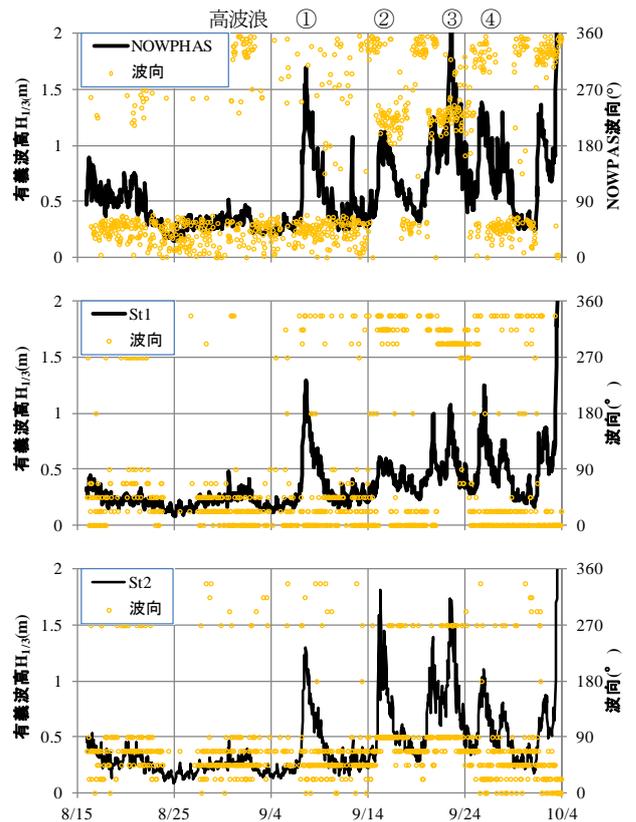


図-3 波高計時系列比較

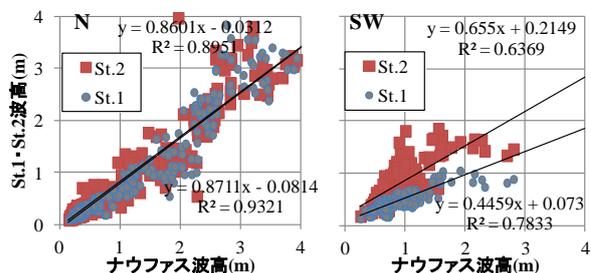


図-4 NOWPHAS 那覇に対する波高比

なり、NOWPHAS那覇とほぼ同程度の波が来襲していると考えられる。しかし、SWではSt.2の回帰係数0.66に対して、St.1の回帰係数は0.45と0.2程度低下しており、NOWPHAS那覇と比較すると低い波高となっている。図-4において、波向SWのSt.2の相関係数はその他のケースと比べると低くなっている。例えば、高波浪②の時にはNOWPHAS那覇の波高が1 m程度なのに対し、St.2では2 m近い波高となっている。NOWPHAS那覇と比較すると南側リーフの遮蔽に近いにも関わらず、St.2の波高の方が大きくなるのは、設置位置近傍の島瀬の影響による波の集中が起こっているものと考えられる。

図-5に各波向のSt.1、St.2の波高比を示した。NOWPHAS那覇の観測波向は速報値であり、20分毎に波向が頻繁に変化している時間帯があるなど不確実性はあるものの、西～南方向の波向時にSt.1、St.2の差が顕

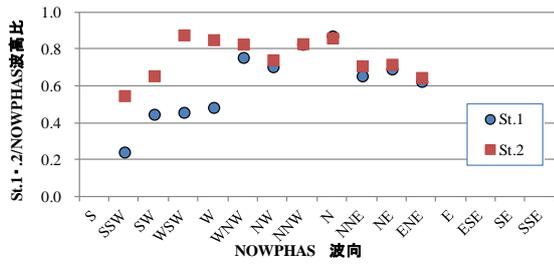


図-5 波向別波高比

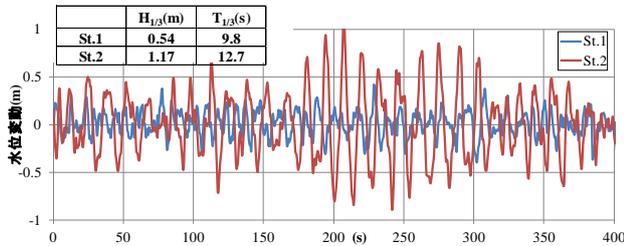


図-6 観測水位時系列の比較
(2014年9月15日12時)

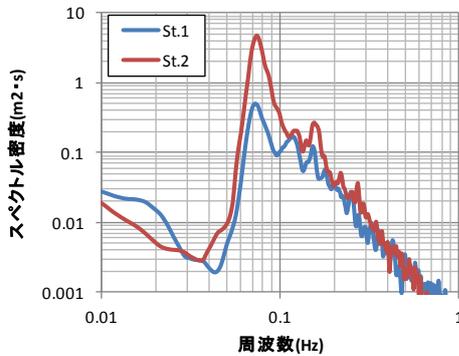


図-7 周波数スペクトルの比較
(2014年9月15日12時)

著になっている。これは、波高計設置位置の南側リーフによる遮蔽が波向によって異なるためと考えられる。

なお、この観測期間中においては NOWPHAS 那覇で波向 S はほとんど観測されておらず、従来の観測結果と同様の傾向となっている¹¹⁾。しかし、沖波では波向 S は存在するのは明らかであるため、NOWPHAS 那覇の地点は南側リーフの遮蔽による影響であると考えられる。つまり、NOWPHAS 那覇で SSW~SW となっている波向の中には、沖波で S の波向が混在していると推察される。

図-6 は St.1 で NOWPHAS 那覇と比較して波高減衰が顕著である高波浪② 9/15 12:00 の St.1, St.2 の観測水位時系列である。St.2 では波群性を有しているものの、St.1 では波群性がなくなり、水位変動は減少している。ゼロクロス解析から算出される有義波高 $H_{1/3}$ は St.2: 1.17 m, St.1: 0.54 m と半分程度に低減しており、有義波周期 $T_{1/3}$ は St.2: 12.7 s, St.1: 9.8 s と 3 秒程度短周期となっている。図-7 は St.1, St.2 の周波数スペクトルであるが、

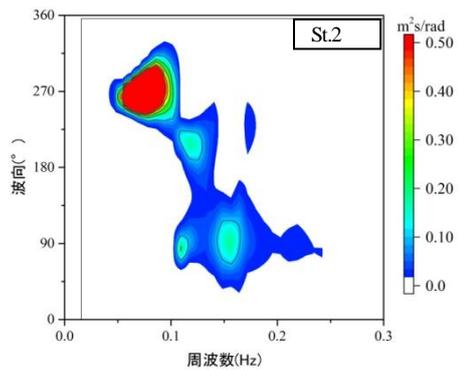
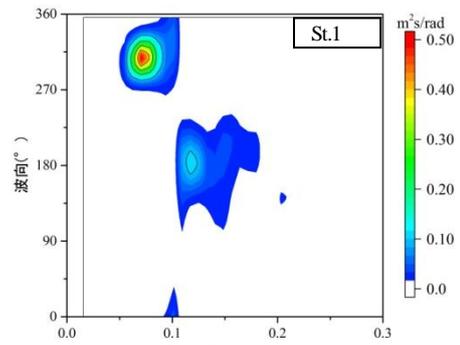


図-8 方向スペクトルの比較
(2014年9月15日12時)

St.1 ではピーク周波数である 0.07 Hz 付近のエネルギーが減少していることが、波高、周期低下の要因であると考えられる。

図-8 は St.1, St.2 の方向スペクトルである。ピーク周波数付近に着目すると、St.2 では W 方向であるのに対し、St.1 ではリーフ直交方向の NW 方向が卓越している。この時の沖波向は後述する WAM の結果を用いると S と推定される。しかし、St.2 は南側リーフ遮蔽による波浪変形により S の波向が W 方向となり、St.1 はさらにリーフ方向へ屈折により波向が変化していると考えられる。また、St.1 では屈折に加え急勾配リーフによる碎波エネルギー逸散が発生していると推察される。

なお、方向スペクトルを確認すると、いずれの地点もピーク周波数の倍周波数付近に S 方向のエネルギーが存在している。波向を考慮すると、冲向き S の波がリーフフラットを伝播、通過した波であると考えられる。つまり、いずれの地点においてもリーフを回り込む波と、リーフフラット上の伝播波が合成されている 2 方向性の波浪場になっていることが確認された。ここで、リーフフラット上の伝播波の H_{m0} は 0.33 m 程度であり、St.1, St.2 のいずれにおいても大きな差はない。仮にこのエネルギーを考慮せずに算出した St.1, St.2 の H_{m0} は 0.43 m, 1.13 m であり、観測値(0.54 m, 1.17 m)と比較して大幅に波高が低減されるものではない。したがって、当該地点においてはリーフを回り込む波を評価できれば実務上の予測精度は有すると考えられる。

表-2 WAMモデルのパラメータの設定

領域	XL	LL
計算領域 (北緯)	-70°~60°	20°~50°
計算領域 (東経)	117°~295°	120°~150°
最小周波数	0.042Hz	
周波数分割数	35	
方向分割数	16	
水深条件	深海	
空間間隔	0.5°	0.1°
伝播計算時間刻み	900 s	300 s
風データ時間間隔	3600 s	

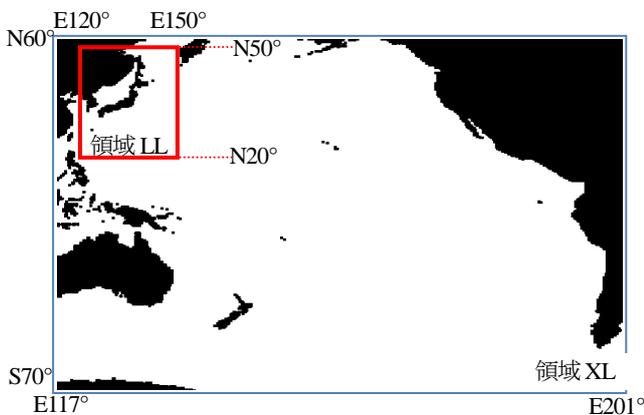


図-9 XL, LL 計算領域図

3. 数値解析

(1) 波浪予測モデル

波浪推算モデルとしてはWAMモデルを用い、モデルのパラメータを表-2、解析領域を図-9に示した。解析領域は既往の検討による計算条件に等しく、太平洋領域XLを計算し、日本近海の計算領域LLに接続するネステージングを行った。入力風は気象庁GPVのうちGSMgl, GSMjpを用い、6時間先までの計算を実施し、それを初期値として随時計算を行った。

WAMは深海モデルであるため海底地形の影響を考慮できず、また、日本近海の計算領域LLの格子サイズは10 km程度であるため地形の詳細な考慮ができない。そこで、WAMの結果を入力とする浅海域の波浪変形モデルを別途検討することとした。

現地観測結果から、リーフフラット上の伝播波の存在は確認したものの、リーフ周辺の波浪場を実務的に予測するには、リーフ上の波高を再現できるモデルは必要なく、リーフエッジに沿って屈折しながら回り込む波を再現可能な簡易なモデルでよいと考えられる。本研究では、

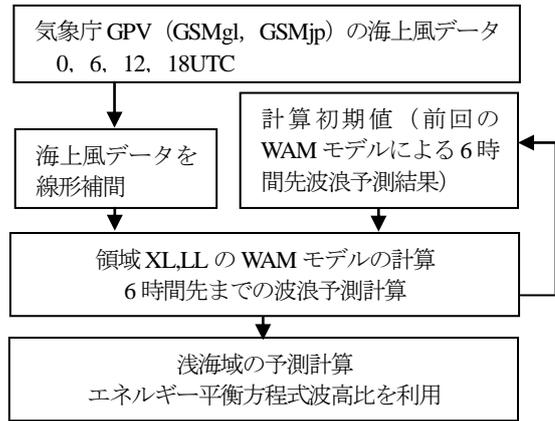


図-10 データ入力から予測までのフロー

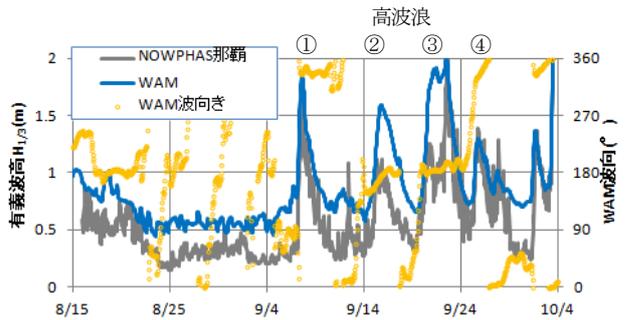


図-11 WAMの結果とNOWPHAS 那覇

リーフ周辺の伝播波を評価するモデルとして、エネルギー平衡方程式を用いることとした。エネルギー平衡方程式を沖波向の周期、潮位を変化させた計算を実施して得られた沖波に対する対象地点の波高比をデータベース化し、WAMで得られた沖波条件(波向, 周期)に応じて波高比を乗じることで対象地点の波高予測値を得ることとした(図-10)。

(2) 波浪予測モデルの精度

WAMの推算値とNOWPHAS那覇の観測値の比較を図-11に示す。地形の影響を受けにくいWAMの波向が北寄りの条件では推算値と実測値が比較的良く対応している。その一方で、南寄りの波向時には、地形による影響により観測値は推算値より波高が低減しており、WAMの結果をそのまま用いるのが難しいことが確認された。

そこで、NOWPHAS那覇を含む浅海域の推算値は以下の手順で算出した。当該地区近傍のWAM計算格子における波高、波向、周期を抽出し、波向、周期に応じてエネルギー平衡方程式で算出した波高比を選定し、WAM波高にその波高比を乗じることで浅海域の推算値に変換した。図-12はその推算値と観測値との比較である。NOWPHAS那覇においては潮位による推算値の差はほとんど見られない。これは、対象位置がリーフから離れた位置にあるため、リーフによる遮蔽、屈折などの影響が潮位の変化に対して有意でないためと考えられる。ま

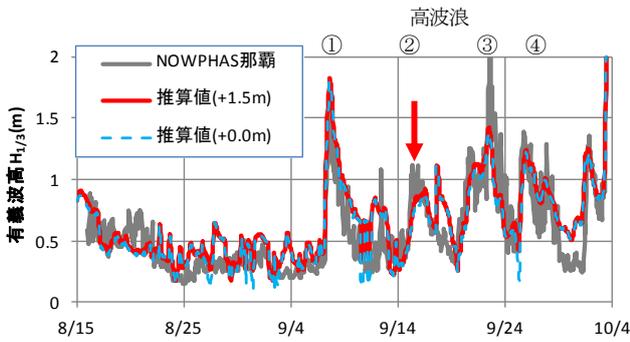


図-12 実測値と予測値の比較 (NOWPHAS 那覇)

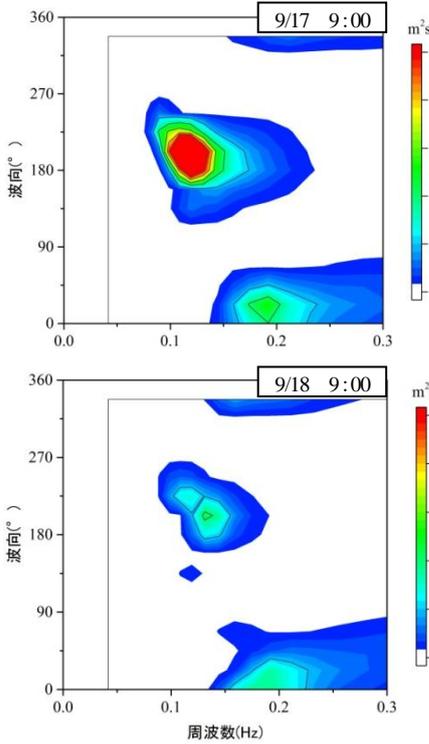


図-13 WAM の方向スペクトルの変化

た、高波浪③についてはピーク時の再現性が良くないものの、1.0 m を上回る予測をしている点で作業可否判断としては有用な情報と考えられる。

しかし、高波浪②の後半の推算値に、観測値には無いピークが存在している (図中の赤矢印位置)。図-11 の WAM 波向を確認すると、南寄りの波が短時間で北寄りに変化している。この時間では北風により北寄りの波が発生していると考えられる。その一方で、高波浪後のうねりが南側から来襲している 2 方向性の波浪場になっていることが、図-13 の方向スペクトルから確認できる。

また、図-13 の 2 枚の図面から、時間経過とともに南寄りのうねりエネルギーが減少し、北寄りの波浪成分が主体的になることが確認されるが、2 方向性は維持されている。しかし、WAM で算出した沖波推算値の波向、周期に応じてエネルギー平衡方程式の波高比を乗じて予

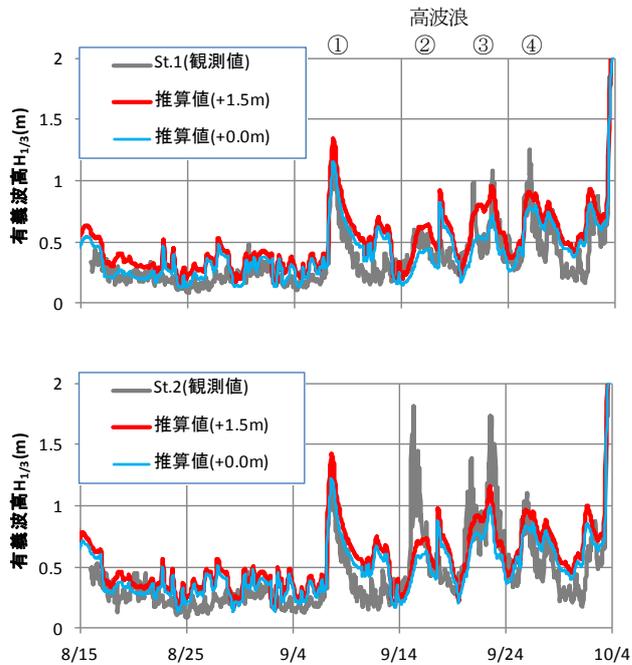


図-14 実測値と予測値の比較

測値を算出する際に、1 方向性の波として波高比が大きい北寄りの波高比を用いたため、推算値が過大評価になったと考えられる。この時、それぞれの波向のエネルギーに対して、対応する波高比を乗じると精度が向上することが確認された。したがって、波向によってリーフの遮蔽が顕著となる地点において波浪が多方向性を有する場合、WAM からの変換時にも工夫が必要であることが分かった。

図-14 は St.1, St.2 の推算値と観測値との比較である。St.1 の推算値は概ね観測値と対応しており、高波浪②、③が波高 1.0 m を下回る結果となっている。つまり、リーフの影響が小さいと考えられる NOWPHAS 那覇のみで判断した場合、波高 1 m を上回るため施工ができない条件であるにも関わらず、リーフの影響を考慮することで、施工可能であることが評価できたことから、施工可否判断への活用が可能なレベルと考えられる。また、NOWPHAS 那覇と比較すると、南寄りの波浪場において潮位による波高差が顕著に見られる。9/15 12:00 は満潮位であったが、潮位+1.5 m 推算値が潮位+0.0 m 推算値と比較してよく対応している。これは、急勾配斜面を有するリーフ周辺海域では、潮位の変化による水深変化が顕著となることから、屈折への影響が変化するためと考えられる。

St.2 の推算値は北寄りの波浪場では概ね対応していると考えられるが、南寄りの波浪場では観測値と比較して過小評価している。ただし、現地観測結果においても触れたが、局所的な地形の影響が出ており、数値解析ではその影響が十分に考慮できていない可能性がある。

4. おわりに

本研究により、得られた結論をまとめると以下となる。

① リーフ周辺の現地観測の結果から、南側リーフによる遮蔽の影響が確認された。また、リーフフラット上を伝播、通過する波が確認されたが、そのエネルギーは小さく、リーフ周辺を回りこむ波浪が支配的であると考えられる。

② リーフ周辺の波浪場は複雑ではあるものの、リーフ周辺を回りこむ波浪に着目すると、浅海域の波浪変形モデルとしてエネルギー平衡方程式を用いて波浪評価したところ、リーフ周辺を回りこむ波浪を含め概ね評価が可能であった。

③ WAM では評価できないリーフ地形による影響は、エネルギー平衡方程式による波高比を活用した簡易モデルを用いることにより、作業限界波高 1.0 m 程度の波浪予測に対する精度検証が実施でき、実務的な精度を有する可能性が確認できた。

以上より、リーフ地形周辺の海上工事において、作業可否を波高で判断する場合の基本的な知見を得た。しかし、波向によっては遮蔽の影響が異なるリーフ地形においてはWAMの波向の精度が重要となる。また、多方向性の波浪場においてはそれぞれの波向に応じた波高比を用いるなどの工夫が必要であることや、簡易モデルを用いる際にはWAMの周期の精度向上が今後の課題と考えられる。なお、今回の検討結果は特定のリーフを対象とした結果であるため、他のリーフ地形も含め、施工限界波高付近の推算精度の検証は今後も必要であると考えられる。

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, 猪股勉, 関克己, 藤木峻: 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2012), 港湾空港技術研究所資料, No.1282, 2014, 125p.
- 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) 津嘉山正光, 河野二夫, 仲座栄三, 大城真一, 福田孝晴: リーフ上の波の変形に関する研究, pp.176-180, 海岸工学論文集, 第 42 巻, 1995.
- 7) 高山知司, 神山豊, 菊池治: リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技研資料, No.278, 1977, 32p.
- 8) 平山克也, 川内清光, 宮里一郎, 田中和広: 平面リーフ上の護岸越波量推定に関する実験的考察, pp.746-750, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2013.
- 9) 平山克也, 春尾和人, 宮里一郎: ブシネスクモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元に関する考察, 港空研報告, 第 48 巻, 第 3 号, pp. 23-74, 2009.
- 10) 高山百合子, 伊藤一教, 織田幸伸, 片倉徳男: 海洋工事における濁り予測のための簡易流況計算手法に関する研究, pp.1140-1145, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 2014.
- 11) 永井紀彦: 全国港湾海洋波浪観測 30 年統計 (NOWPHAS1970-1999), 港湾空港技術研究所資料, No.1035, 2002, 388p.

EXAMINATION OF WAVE PREDICTION ACCURACY FOR MARINE WORKS AROUND THE REEF AREA

Tsuyoshi KOTOURA and Hiroyuki KATAYAMA

In marine works, it is important to get wave prediction results for safety operation and work executable judgment. Recently, the advanced wave prediction method using the WAM model has been utilized generally in marine works. However, the accuracy of the wave prediction results is not clear in marine work conditions.

In this study, we observed field wave around reef area, and constructed of the wave prediction model composed the WAM model (offshore) and an energy balance equation (onshore). From the comparison with the model prediction results and the wave measurement results, we discussed the accuracy of the wave prediction results for marine works around the reef area. As a result, the wave prediction model can estimated precisely the wave height at the coastal wave gauge site, but sometimes differ between before and after the wave direction changes.