

# 浮体式洋上風力発電サイト選定のための WRFによる風況解析および波浪推算

WIND AND WAVE SIMULATIONS EMPLOYING WRF FOR SELECTION OF  
FEASIBLE SITE FOR FLOATING TYPE OFFSHORE WIND FARM

安田誠宏<sup>1</sup>・山口達也<sup>2</sup>・島田広昭<sup>3</sup>・森 信人<sup>4</sup>・間瀬 肇<sup>5</sup>

Tomohiro YASUDA, Tatsuya YAMAGUCHI, Hiroaki SHIMADA,  
Nobuhito MORI and Hajime MASE

<sup>1</sup>正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>2</sup>修(工) 日本工営株式会社 統合情報技術部 (〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 関西大学准教授 都市環境工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>5</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Wind power is natural energy for reducing emission of greenhouse gasses and is expected as one of adaptations to global warming. Because sea bottom gradient is steep around Japan and suitable area for offshore wind farm is limited, a floating type offshore wind power station is a promising facility. Evaluation of extreme wind and wave conditions is important for a selection of feasible site for floating type offshore wind farm. In the present study, wind and wave simulations for major ten typhoons at Kyushu, Japan in past decade are carried out by using mesoscale atmospheric model WRF and wave-surge coupled model SuWAT. Simulated results of surface wind by WRF were a little larger even though the correlation of time variation was good. Significant wave heights were well reproduced by using WRF output and SuWAT's simulation.

*Key Words :* offshore wind farm, floating type wind power station, WRF, wind and wave simulations

## 1. 緒 論

2005年2月16日に発効された京都議定書の目標値は各国ごとに設定されており、日本の場合1990年比6%の削減を求められている。しかしながら、最近の報告では、2003年の日本の温室効果ガス排出量が1990年と比較して約8%も増加していたことが明らかになり、目標達成が産業界の削減のみでは厳しいと指摘されている。そのため、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーを使用した発電が注目されている。風力発電は世界的に需要が拡大しているが、日本は海外に比べ導入が遅れている。

日本の複雑な地形条件では、風力発電機を陸上に設置できるエリアが限られるため、洋上への設置ニーズが高い。洋上の風況は陸上風と異なり、山岳や地上構造物の影響がないため、風の乱れが少なく安定しており、陸上よりも風速が強いため、安定的で効率的な発電が期待されている。ヨーロッパでは、国土の広さに制約のあるデンマークが早くから洋上

風力発電への取り組みを始め、現在2000 kW基×80本の超大型ウィンドファームを北海道で稼働させている。日本では、北海道瀬棚町の瀬棚港内に、我が国初の洋上風力発電所「風海鳥(かざみどり)」が完成し、2004年4月1日から本格稼働を開始しているが、それ以外の地域への普及は進んでいない。そのため、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の主導で、洋上風力発電に関するフィージビリティ・スタディ(F/S)が行われている。

陸上と洋上では風車の基本的な構造は同一であるが、洋上風力では基礎部分の構造として着底式と浮体式が考えられる。この基礎部分の構造は、水深・地形に合わせて選択されるが、日本の周辺海底地形は傾斜が急なため、着底式の洋上風力発電は設置可能エリアや規模が限られるという問題点もある。このため、遠浅の海域が少ない日本で洋上風力発電サイトを選定する場合、浮体式の選択肢は魅力的であるが、浮体式が想定されるような大水深域における海洋構造物の設計知見は少なく、風力発電に限ると

実施例がない。

浮体式洋上風力発電において重要なのは、常時の風況、波高および潮流はいうまでもないが、台風来襲などによる極大風および波浪による浮体の動揺特性や係留索の強度などを正確に推定することである。本研究では浮体式洋上風力発電サイトの適地選定の中でも極大値に的を絞り、メソ気象モデルと波浪・高潮結合モデルを用い、大水深域における台風来襲時の風、気圧および波浪の追算を実施し、実測結果との比較検討を行う。

## 2. 適地選定要件

### (1) 風況

NEDO<sup>1)</sup>により「局所的風況予測モデルの開発」が行われ、アウトプットとして500mメッシュの局所風況マップが作成された(図-1参照)。局所風況マップは、風力発電の有望地域を選定するツールとして活用することが可能である。従来、我が国では風況が弱く、風力発電には向いていないという見方もあったが、この全国風況マップにより、洋上には設置有望地域が多く存在する可能性が示された。なかでも九州地方は年平均風速が7m以上のエリアが多く有望であるが、その一方で台風の来襲頻度が高いという問題を抱えている。

台風は、風力発電システムのカットアウト風速以上の風速を伴う場合が多く、タワーが基礎ごと倒壊したり、ブレードやナセルカバーが破損・飛散したりする事故の発生や、ナセルカバーの破損箇所から雨水が侵入して発電機の故障に至る場合もある。そのため、台風時の風速を正しく推算し、設計に生かすことが重要となる。設計風速の基準となる基本風速として、日本建築学会<sup>2)</sup>により作成されている、地上高10mにおける10分間平均風速の100年再現期待値や、NEDO<sup>1)</sup>により作成された、全国の気象官署における瞬間最大風速のデータを基に決められた地上高10mの再現期間50年の確率瞬間風速分布図を用いることが一般的である。しかし、台風が直接通過・上陸する沖縄地方や九州・四国地方においては、過去の最大風速(10分間平均値)または最大瞬間風速(0.25秒間平均値)の50年再現期待値を考慮するのが望ましいとされている。本研究では、九州地方を想定サイトとしているため、過去10年間の台風による最大風速を気象モデルを用いて解析する。

### (2) 海象

海象観測点が近くにある地点では、長期観測値をもとに極値統計解析をすることで、設計波を設定することができる。しかし、ウィンドファームに適した海域には、必ずしも波浪観測機器が設置されているわけではない。そこで、沖波の推算値をもとに設

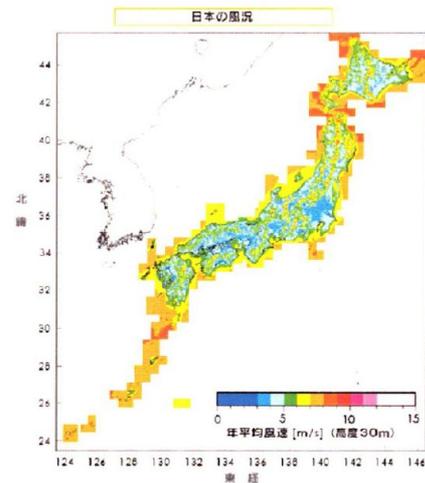


図-1 局所風況マップ (NEDO<sup>1)</sup>)

計波を求める必要がある。国土交通省の地方整備局により、スペクトルモデル(気象庁MRI等)と2次元台風モデルを用いて、過去の擾乱について波浪推算を行った結果から、極値統計解析を行う方法で、全国的に沖波の設計値が決められている<sup>3)</sup>。しかしながら、波浪推算モデルも第3世代モデルへと進化し、高い精度での推算が可能になっており、設計沖波の再評価が必要と考えられる。

また、台風モデルでは中心付近の気圧深度や風速の再現性はよいが、コースから逸れた地点での再現性はよくない。さらに、最大波高も小さめになる傾向があるため、極端値としての波浪推算値の取り扱いには注意が必要である。波浪推算については、台風モデルに代わるものとして気象モデルMM5を用いて、その有用性を示した研究<sup>4), 5)</sup>がいくつかある。本研究では、気象の客観解析データとメソ気象モデルWRFを援用した波浪推算を行うことで、過去10年間の台風による想定サイトでの高波を推定する。

## 3. 気象場および波浪解析条件

### (1) 気象モデル

本研究では、気象モデルとしてWRF (Weather Research and Forecasting model)<sup>6)</sup>を用いる。これは、米国のNCAR, NCEP, NOAA/FSL, AFWAなどの研究機関が共同で開発しているメソ気象モデルである。WRFは、非静力モデルMM5 (Fifth-Generation Mesoscale Model)<sup>7)</sup>の次世代モデルと位置づけられており、MM5同様、非静力の完全圧縮モデルである。さらに、WRFは3次精度のルンゲ・クッタスキームと5次精度の風上差分スキームといった、より高精度な数値計算スキーム、最新の物理モデル、より進んだ変分データ同化システムを採用していることから、局所気象の予測と再現のための有力なツールになると期待されている<sup>8)</sup>。

## (2) 波浪・高潮結合モデル

本研究では、金ら<sup>9)</sup>による潮汐・高潮・波浪の相互作用を考慮した双方向結合モデルSuWAT (Surge, Wave and Tide coupled model) を用いた。この計算モデルは、潮汐計算モジュール、高潮計算モジュールおよび波浪計算モジュールの3つの主要モジュールから成っている。高潮計算モジュールでは、非線形長波モデルにradiation stressによる項を加えたものを基礎式として用いている。潮汐計算モジュールでは、日本周辺海洋潮汐モデル (NAOTIDEJ) を用いているが、本研究では潮汐計算は行っていない。波浪計算モジュールでは、第3世代浅海波浪推算モデルであるSWANを用いている。

## (3) 解析方法

メソ気象モデルWRFを用いて台風来襲時の風や気圧の気圧場の解析を行うとともに、SuWATで波浪推算を実施した。解析対象領域は図-2に示す九州西岸海域であり、浮体式風力発電想定サイトは図中の■の地点である。波浪推算では外洋から九州沿岸部まで3段階の領域ネスティングスキームを適用した。計算格子間隔は、それぞれ12150m, 4050m, 1350mである。WRFの解析ではネスティングをせず、第1領域だけを解析領域とした。

対象海域にある波浪観測点は、図中●で示した長崎県伊王島港のナウファス (全国港湾海洋波浪情報網) 観測点であり、1999年～2007年の間にこの海域で高波を発生させた顕著な台風10個を解析対象とした。解析対象とした台風名と計算期間、各台風の最

低気圧および最大風速、伊王島での最大有義波高と有義波周期を表-1に示す。

メソ気象モデルWRFの入力データに、NCARにより公開されている客観解析データFNL (Final Analysis)を用い、気象場をダウンスケーリングした気圧と10m風速をSuWATの入力データとし、水位変動を考慮した波浪推算を行った。気象場の解析結果と波浪の推算結果を観測値と比較し、再現精度について検討した。

## 4. 気象場の解析結果

### (1) 台風経路および気圧・風速の平面分布

気象場の解析結果から台風経路を抽出 (-▲-) し、気象庁ベストトラック (-●-) と比較した結果を図-3に示した。台風経路については、WRFで概ね再現できている。T0314やT0418の結果のように、経路が若干ジグザグする場合もみられたが、台風の規模が大きいため気圧の低い範囲が広く、ベストトラックの中心と少し離れたところが、解析による最低値となったためと考えられる。逆に、T0215のように、中心の気圧深度低下が小さな弱い台風の場合にも、経路がずれる傾向がみられた。

最低気圧については、図-4のように、いずれの台風についても台風経路に沿う気圧の低いエリアが再現できている。図-5に最大風速の平面分布を示す。T0314やT0416の結果にみられるように、危険半円側での大きな風速、可航半円側での小さな値を再現

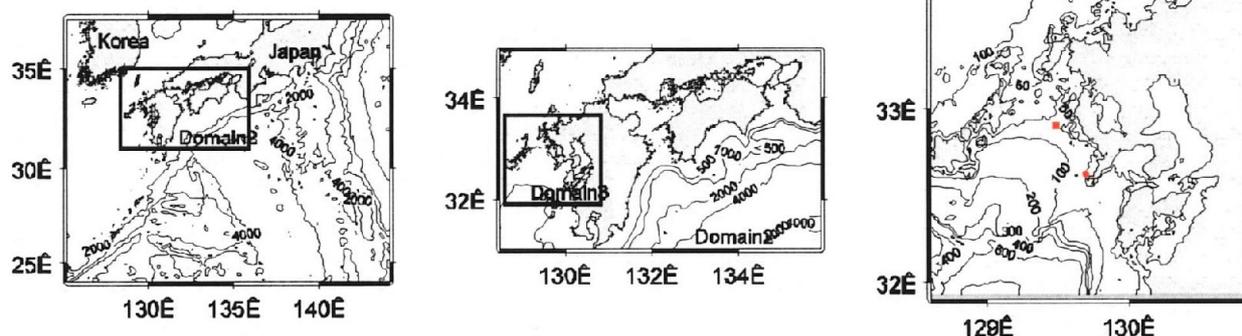


図-2 計算領域と水深データ (格子間隔: 領域1:12150m, 領域2:4050m, 領域3:1350m, ●: 伊王島, ■: 想定サイト)

表-1 解析対象台風と計算期間、最低気圧、最大風速、伊王島での最大有義波高および有義波周期

台風No. (Name)	計算開始日時	計算終了日時	最低気圧[hPa]	最大風速[m/s]	有義波高[m]	有義波周期[s]
T9918 (BART)	1999/9/19 9:00	1999/9/24 21:00	930	46.30	3.56	11.10
T0014 (SAOMAI)	2000/9/ 9 9:00	2000/9/16 9:00	925	48.87	7.01	12.60
T0215 (RUSA)	2002/8/26 9:00	2002/8/31 9:00	950	41.15	6.17	11.2
T0314 (MAEMI)	2003/9/ 8 9:00	2003/9/13 9:00	910	54.01	7.08	12.32
T0415 (MEGI)	2004/8/16 9:00	2004/8/19 9:00	970	33.44	7.12	13.0
T0416 (CHABA)	2004/8/25 3:00	2004/8/31 3:00	910	56.58	欠測	欠測
T0418 (SONGDA)	2004/9/ 2 3:00	2004/9/ 9 3:00	925	48.87	6.13	11.3
T0514 (NABI)	2005/9/ 2 9:00	2005/9/ 8 9:00	925	48.87	2.69	6.6
T0613 (SHANSHAN)	2006/9/12 9:00	2006/9/18 9:00	919	56.58	6.96	14.5
T0704 (MAN-YI)	2007/7/12 9:00	2007/7/16 9:00	930	48.87	1.61	5.3

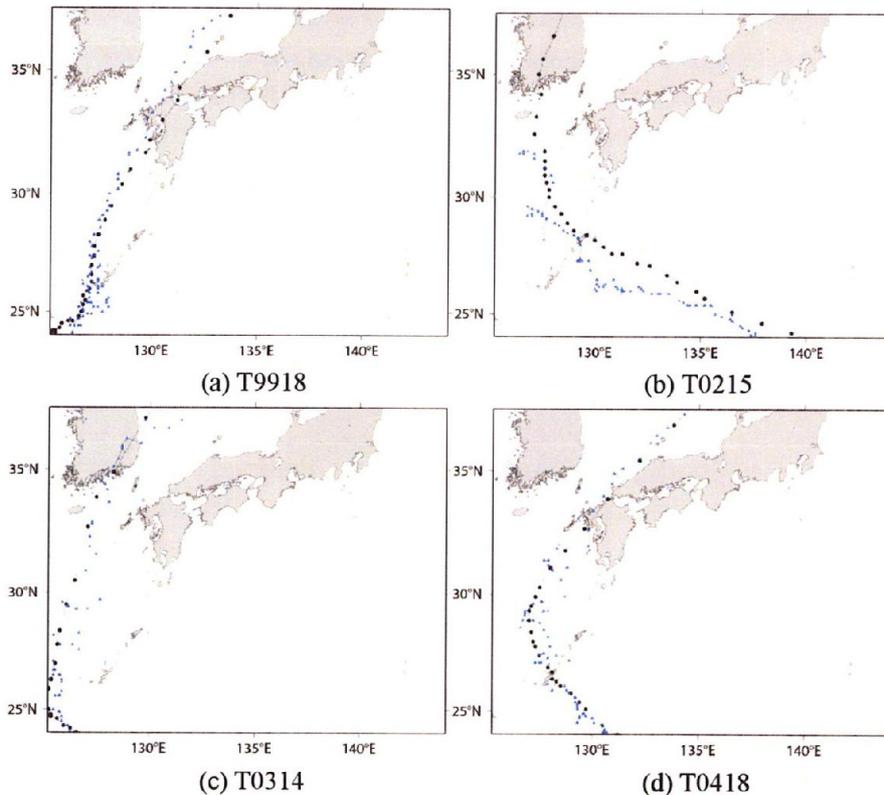


図-3 台風経路の比較 (-●- : 気象庁ベストトラック, -▲- : WRF)

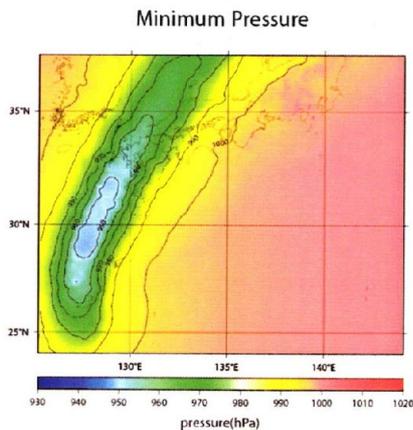


図-4 最低気圧平面分布 (T9918)

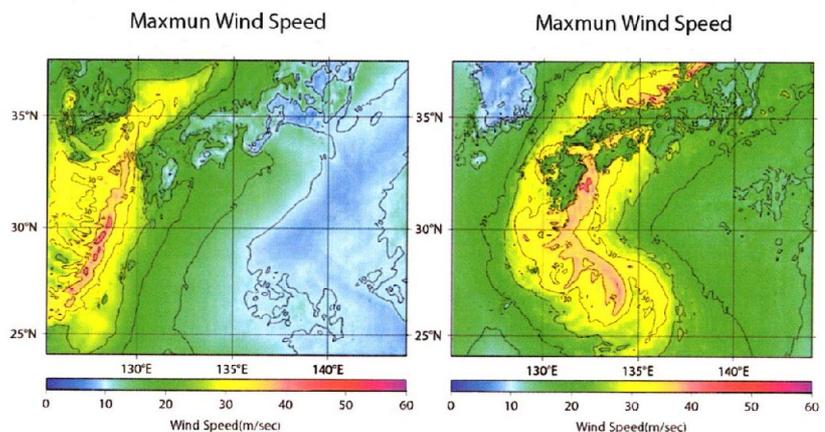


図-5 最大風速平面分布 (左 : T0314, 右 : T0416)

できている。さらに、上陸後の急激な減衰の様子や、地形の影響による風速の減衰も再現されている。

## (2) 気圧

紙面の制約上図示は省略するが、気象官署での観測気圧の海面校正値と比較した結果、最大で10 hPaほど小さくなる場合も稀にあるが、いずれの地点でも、値および時間ともに観測値とよく一致していた。

## (3) 風速

図-6 に10m風速 $U_{10}$ の解析結果の時系列と気象官署での観測値との比較を示す。(a)および(b)はそれぞれ那覇、鹿児島であり、左からT0215, T0416, T0418の結果である。また、すべての台風来襲時の

観測値(横軸)と推算値(縦軸)を比較したものを図-7に示す。

図-6より、那覇や鹿児島では、いずれの台風の場合も、低風時から強風時への変化、および通過後の減少傾向が再現されている。特に、那覇でのT0418時、鹿児島でのT0416時にみられるように、台風が目が近くを通過したことによる風速の急減衰が推算されている。

図-7をみると、那覇では1対1の直線に沿うような結果であるが、やや推算値の方が過大になっている。鹿児島では、低風時には、1対1の直線近傍に分布しているが、観測値が10m/sの付近で大きめに推算している。15m/s以上の事例は少ないが、誤差は小さい。佐世保では、推算値の方が過大になっている。

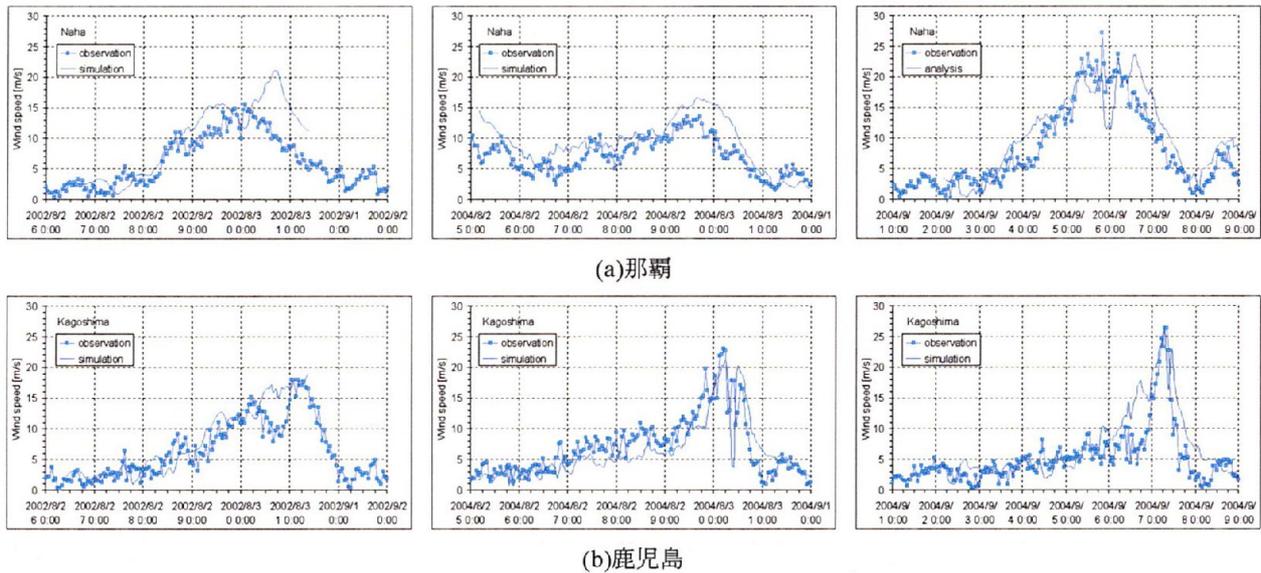


図-6 10m風速の時系列変化 (左から, T0215, T0416, T0418)

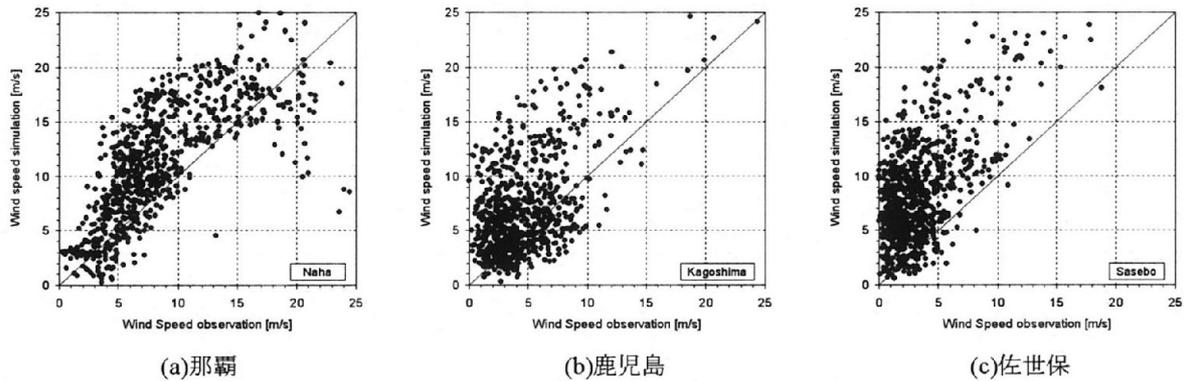


図-7 10m風速に関する推算値と観測値との比較

風速が過大に再現された理由としては、WRFで用いた土地利用データによる地表面粗度の影響、約12kmという空間解像度の粗さが考えられる。観測される地上10m風速は、周辺地形の影響を強く受けるため、土地利用を反映した空間解像度まで上げる必要があると思われる。海上風速については、観測データと比較はできていないが、衛星データとのデータ同化手法を適用すれば、ある程度まで再現できるものとする。

## 5. 波浪の解析結果

図-8にT0314, T0418来襲時の推算結果とナウファスの観測値の時系列変化を、図-9にすべての台風来襲時の有義波高 $H_{1/3}$ の観測値(横軸)と推算値(縦軸)を比較したものをそれぞれ示す。また、観測地点名の括弧内に海象計の設置水深を示した。

那覇でのT0314時、観測値ピークが約4mであったときに、推算値は8mになっており、差がみられた。図-7(a)をみると、那覇では、観測値が5mをほとんど越えておらず、東方沖にある慶伊瀬島周辺の珊瑚

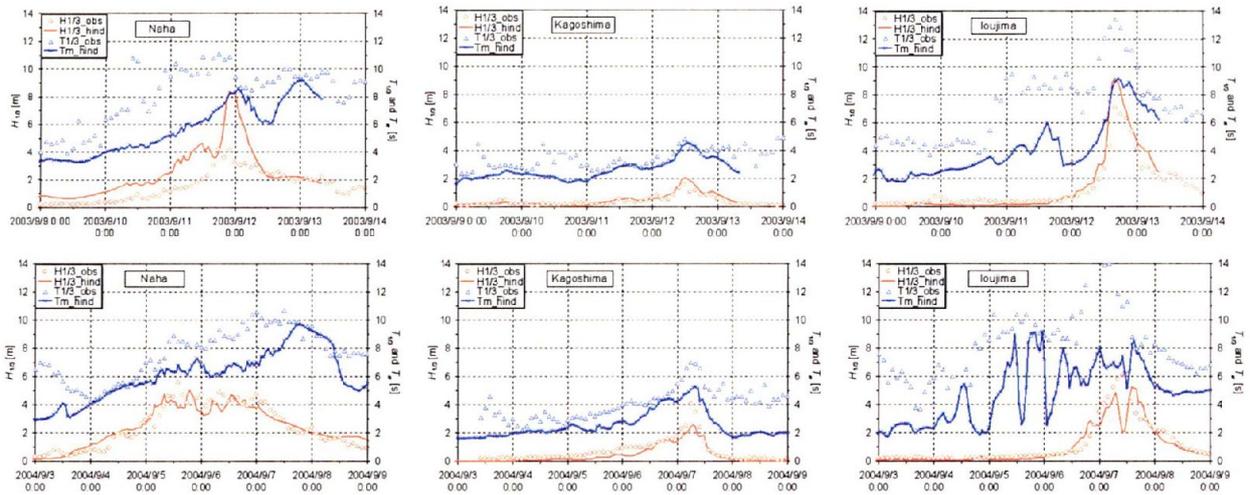
礁による影響と考えられるが、解析では計算格子が12km強で小さな島が再現されていないために、解析値が大きくなったと考えられる。T0418時には、波高約4mの状況が2日間継続しているが、これは解析でもほぼ再現できている。波高がそれほど大きくない台風の際には、解析値の時系列と観測値のそれは概ね良好であった。

鹿児島でのT0314時には、再現期間を通じて、解析結果は観測値とよく一致している。T0418号時には、最大値4mへの急な上昇は再現できていないが、全体的な変動傾向についての両者の対応はよい。

想定設置サイトに最も近い伊王島においては、時間的変化の傾向はよいが、T0314時に観測値に比べて約1m大きく、T0418時には1mほど小さい。この原因としては、解析領域の空間解像度(1350m)が十分でなく、海底勾配が急で複雑な伊王島周辺の地形を再現しきれていなかった可能性が考えられる。

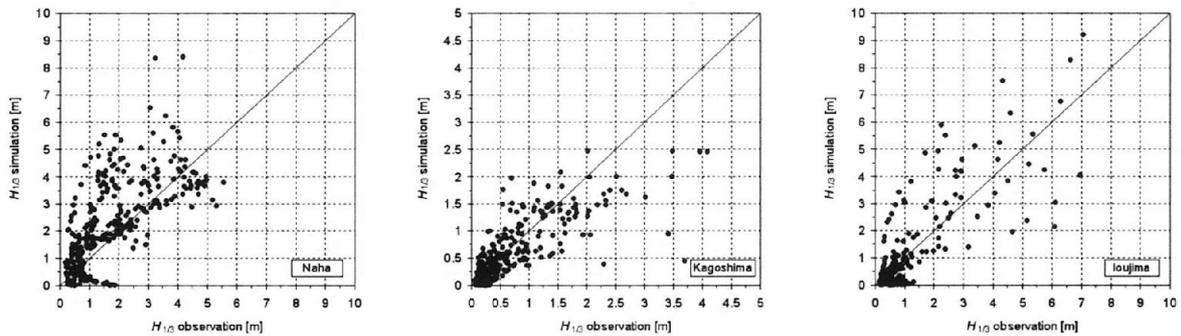
## 6. 結論

本研究の主要な結論を以下にまとめる。



(a)那覇 (水深52.9m) (b)鹿児島 (水深24.1m) (c)伊王島 (水深31.9m)

図-8 波高および周期の時系列変化 (上段: T0314, 下段: T0418)



(a)那覇 (水深52.9m) (b)鹿児島 (水深24.1m) (c)伊王島 (水深31.9m)

図-9 有義波高に関する推算値と観測値との比較

- (1) WRFにより再現した風速を気象官署での観測値と比較した結果、変動の相関がみられたが、推算値の方がやや過大であった。
- (2) 有義波高の変化については、水深データが粗いために、微地形が十分に再現されていない影響がみられたが、変動傾向ならびに値は、観測結果とある程度一致していた。
- (3) 風速・有義波高ともに、台風時の最大値の推定には有意な誤差があった。設計に資するためには、WRFにネスティングやデータ同化を適用し、解析領域の空間解像度の向上と観測データの取り込みによる精度向上が、今後の課題として必要である。
- (4) 本研究で示した気象モデルと波浪モデルを連携させた解析法により、洋上風力発電サイト候補地における暴風や暴浪を算定することで、浮体動揺、タワー、ブレード、浮体函体応力、係留力等の設計に必要な基礎情報を提供可能である。

謝辞：本研究で用いた波浪観測値を提供いただきました港空研の関係者の皆様に謝意を表します。また、本研究は、科研費基盤(B)「浮体式洋上風力発電施設の動的応答と成立性評価に関する研究」(代表：宇都宮智昭)の一部であり、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：風力発電導入ガイドブック，173p，2005。
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，676p，2004。
- 3) 高田悦子，諸星一信，平石哲也，永井紀彦，竹村慎治：我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査），国総研資料，第88号，132p，2003。
- 4) 森 信人・平口博丸・筒井純一：気象モデルを用いた波浪推算の高精度化，海岸工学論文集，第47巻，pp.261-265，2000。
- 5) 橋本典明・杉本 彰・川口浩二・宇都宮好博：局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用，海岸工学論文集，第49巻，pp.201-205，2001。
- 6) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G.: A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, 113p, 2008.
- 7) Grell, G. A., Dudhia, J., & Stauffer, D. R.: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, 122p, 1995.
- 8) 日下博幸：領域気象モデル WRF について，ながれ，第28巻，No.1，pp.3-12，2009。
- 9) 金 洙列・高山知司・安田誠宏・間瀬 肇：高潮と波浪に及ぼす大潮汐変動の影響に関する研究，海岸工学論文集，第54巻，pp.276-280，2007。