

洋上ウインドファームサイトにおける波浪と風の解析

Wave and Wind Analyses at a Site of Floating Type Wind Farm

間瀬 肇¹・紺野晶裕²・森 信人³・安田誠宏⁴・Sheng DONG⁵

Hajime MASE, Akihiro KONNO, Nobuhito MORI, Tomohiro YASUDA and Sheng DONG

The design wave and wind at a target site of floating type wind farm were estimated by using wind and wave re-analysis data in the North Pacific. The wave analysis database was made from WAM's output calculated by using NCEP wind data. Since the wind data of NCEP and ERA-40 showed the difference in magnitude due to the resolution, the proper correction coefficients should be required to transform the re-analysis wind data to a target grid point data. Hourly wave predictions were carried out for one year and it was found through comparison with the observed data that those predicted waves were valid. In addition, a statistical method was proposed to estimate a short term return wave height and wind speed by using hourly predicted or measured data.

1. はじめに

新エネルギーの中でも、風力エネルギーは二酸化炭素、硫黄酸化物等の大気汚染物質の排出を伴わないクリーンなエネルギーであり、経済的にも有望であることから、その導入促進が進められている。洋上風力発電の実用化にあたっては、対象海域における広域風速分布観測による発電賦存量の事前評価技術開発、海鳥や渡り鳥のバードストライクの危険性把握技術開発、発電量変動の対処技術開発、事業性・雇用創出評価等が必要である。

なかでも、洋上風力発電の導入には、設計条件として対象サイトにおける風と波浪の極値（極値分布）の推定、発電量として風と波浪の日々変動（確率分布）の推定、オペレーションに必要な風・波のリアルタイム情報の取得が必要である。

間瀬ら（2009）は、日本近海の任意の地点（洋上ウインドファームサイト候補地点）における最大波高や平均波高を推定するための手法を提案したが、本研究では引き続き、洋上浮体式発電施設の設置対象サイトにおける設計波や設計風速の算定、毎時波浪予測値の精度検証、ならびに、年間の波浪と風の出現特性の把握を行う。また、毎時波浪予測値を用いて、数年を対象とした短期再現確率波高を算定する方法を提案する。

2. 設計波・設計風速算定システムおよびリアルタイム予測システム

(1) 気象・海象資料

長期の風や波浪観測資料に基づいて対象海域の設計風および設計波を算定することが望ましいが、対象とする海域にはそうした長期の観測データがないことがほとんどである。それを補うために気象データおよび波浪推算データを用いることが有用である。風のデータは直接保存されているが、波浪に関しては、海上風データを用いて波浪推算値を求める必要がある。本研究で用いたデータは、以下の通りである。

海上風データは、NCEP/NCARの6時間間隔海上風解析値資料（NCEP風資料と略記）の内、1948-2001年までの54年間分を使用した。また、ECMWFの1957-2002年の46年間のERA-40を用いた（6時間毎）。NCEP風資料の海上風の空間解像度は、約2.5°とECMWF風資料の空間解像度に比べて低く、衛星データを取り込んでいない1979年以前の品質に問題があるものの、現在利用可能な気象の再解析データとしては最も長期間を対象としており、これをそのまま利用した。

波浪推算データは風資料を入力条件としてWAMモデルを用いて作成した。領域は、北緯0度～65度、東経120度～西経110度、格子間隔は0.5度である（森ら、2009）。

(2) 北太平洋波浪解析値を用いる設計波浪の算定システム

北太平洋波浪解析値を用いる設計波浪の算定システムをまとめると、以下のようである。

- 1) 設計対象地点に近い波浪解析値を沖側の条件として選定する。この際、陸の影響を受けていない波浪解析値を選ぶが、まず、対象地点の地図を元に判断する。
- 2) 波浪解析値が海・陸の区別といった解像度の影響を受けているかの検討は、より詳細な解像度を持つ波

1 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻
2 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所
3 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所
4 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所
5 Professor Ocean University of China

浪推算結果をもとに判定する。

- 3) 用いる波浪解析値の地点が確定した後は、周辺に波浪観測地点があればその観測データを利用して、バイアス補正を行う。波浪観測地点がない場合には、高解像波浪推算結果を利用する。
- 4) バイアス補正に当たっては、波浪解析値のある地点および波浪観測地点における波高の関係を、別途、波浪予測モデルにより求める。
- 5) バイアス補正された波浪解析値から対象地点での年最大有義波高を算定し（2地点における波高の関係をを用いて）、累積分布から50年再現確率波高を求める。また、波高と周期の散布図から、50年再現確率波高に対応する有義波周期を求める。

(3) リアルタイム予測システム

リアルタイム波浪予測システム（Tomら, 2008; 2009）は、外部領域（北緯5度～55度，東経120度～175度，計算格子間隔0.25°）に対して，NCEPの全球GFS（Global Forecast System）データを用いて，第3世代波浪モデルSWANにより波浪計算を行い，また内部領域に対する境界条件を作成し，内部領域（北緯24度～47度，東経126度～149度，計算格子間隔0.02°）に対して，気象庁毎時大気解析GPVの10m風データを用いて，SWANにより波浪計算を行うものである。

このようなリアルタイムの風と波のデータは，風力発電所内のオペレーションに利用することができる。

3. 設計風速，設計波および短期の風と波の出現特性

(1) 設計風速

図-1は例として取り上げた対象海域の地図であり，図中のTarget Locationと示した地点の設計風速を求める。最も対象サイトに近い#5'地点と近傍の#6'，#3'，#4'地点

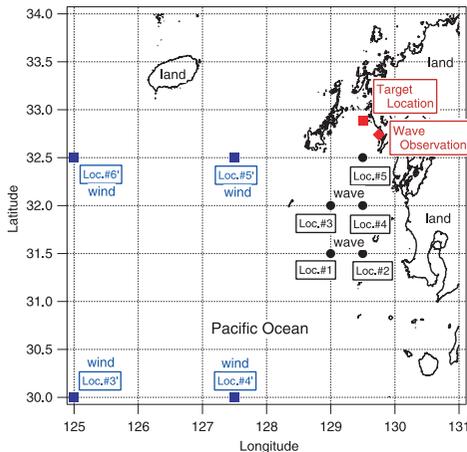
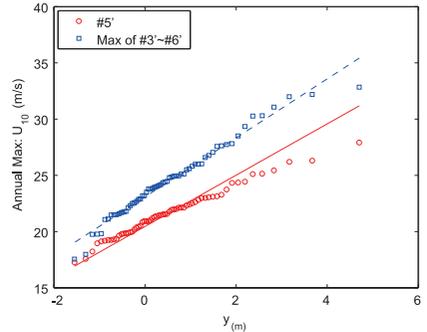
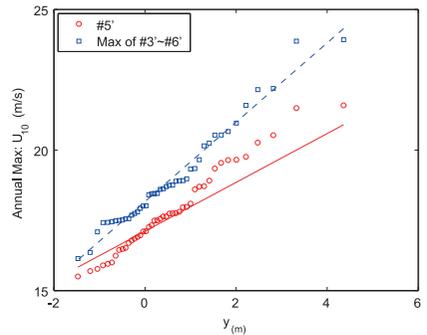


図-1 洋上風力発電サイトの周辺地形

におけるNCEP風資料やERA-40風資料の風速には差が見られた。図-2は，#5'地点の最大風速値および#3'～#6'地点における同時刻でのどれかの最大風速値に対して，風の極値分布に通常使われるGumbel分布を当てはめた結果を示した。上段の図はNCEP風資料に対して整理した結果，下段の図がERA-40風資料に対して整理した結果であり，横軸は基準化変量である。4地点での最大値を用いた結果は，地点#5'での値に比べて，NCEP風資料の場合で約20%，ERA-40風資料の場合で約10%大きな



(a) NCEP 風資料



(b) ERA-40 風資料

図-2 洋上風力発電サイトにおける風速の極値分布

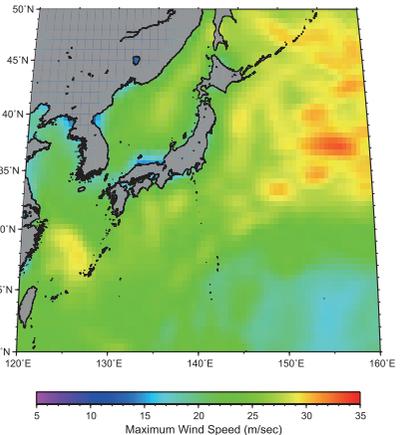


図-3 日本周辺の50年再現確率風速（NCEP風資料）

っている。また、同じ基準化変量に対しては、NCEP風資料が、ERA-40風資料より風速値が30%以上大きくなっていることがわかった。グリッド平均値としての50年再現確率風速は、NCEP/NCARの#5'を用いると30.7m/s、#3'~#6'最大値を用いると34.9m/sとなり、またERA-40の#5'を用いると21.0m/s、#3'~#6'最大値を用いると24.5m/sとなった。これらのデータの差は、解像度と質によるものである。どちらを用いるかは施設の重要度によるが、海域での施設の安全性を重視して、大きな値を採用するのが良いと思われる。もちろん解析値が近辺で得られていれば、バイアス補正が可能であるが、本研究ではそのような観測資料を得ることができなかったため、バイアス補正は行っていない。その他の方法として、10分間平均風速に換算する際に、空間解像度を考慮することにより、NCEPおよびERA-40風資料に適切な補正係数を設定して、グリッド点での値に変換する。そのような補正係数を求めるのは、今後の課題である。

図-3は、NCEP風資料から求めた日本周辺の50年再現確率風速である。こうした風データベースを用いることにより、容易に日本近海での設計風速を求めることができる。

(2) 設計波

間瀬ら(2009)は、波浪解析値のバイアス補正に当たって、波形勾配を一定とし、波高毎に周期を設定して波浪変形計算を計算を行い、波浪解析値が得られている地点と波浪観測地点における波高比を求めた。しかし、この波高比には周期の影響が大きい可能性を指摘され、その後の解析により、周期が重要であることがわかった。周期別の波高比を図-4に示す。波高比を求めるに当たっ

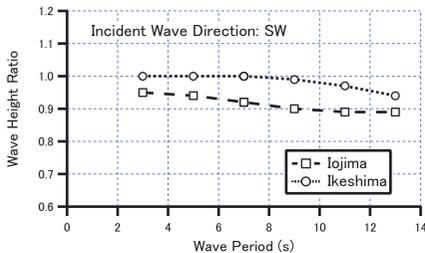


図-4 Location #5を基準とした波浪観測地点と対象サイトにおける波高比

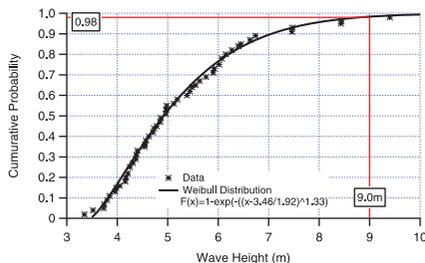


図-5 50年再現確率波高

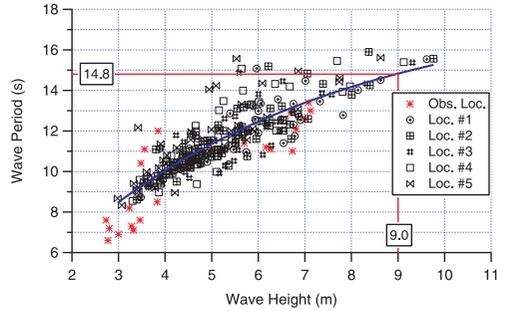


図-6 50年再現確率波高に対応する周期

て、1つの周期に対して波高を4種類変えたが、波高による差は小さいことがわかった。

図-4の波高比を用いてバイアス補正を行い50年再現確率波高を求めた結果、図-5に示す通り9.0mとなった。この結果は、間瀬ら(2009)のそれに比べて0.1m大きくなった。また、50年再現確率波高に対応する周期は、図-6に示す通り14.8sとなり、間瀬ら(2009)と変わりはなかった。

(3) 短期の波と風の出現確率

毎時の風資料を用いて、リアルタイム波浪予測を2008年5月1日から1年間行った。それらのデータを用いて年間(短期)の出現確率特性を調べる。これは発電量の日々変動予測等に必要である。

まずは、波浪予測値の妥当性の検討を行う。図-7は、1年間の対象サイトの有義波高予測値とナウファス伊王島における観測値の時系列を示したものである。対象サイトでの波浪観測は行われていないので、ここでは伊王島における観測値を用いて、統計的観点からその精度を調べる。対象サイトでの波高と伊王島での波高比は、夏季にはSW系の図-4、また冬季にはNW系の図-8を用いて、予測波高を伊王島における波高に換算して観測値と比較した。

図-9は、年間および夏季、冬季における波高の超過確

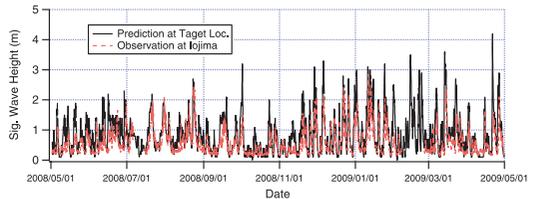


図-7 対象サイトにおける予測波高時系列と伊王島での観測値

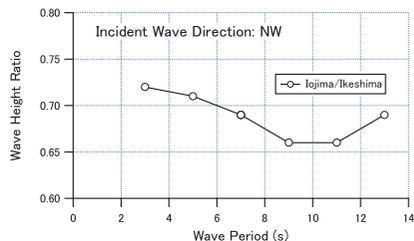


図-8 冬季を対象とした波高比

率を予測値、換算値、観測値に対して示したものである。実線で示した換算値と破線の観測値を比較すると、両者

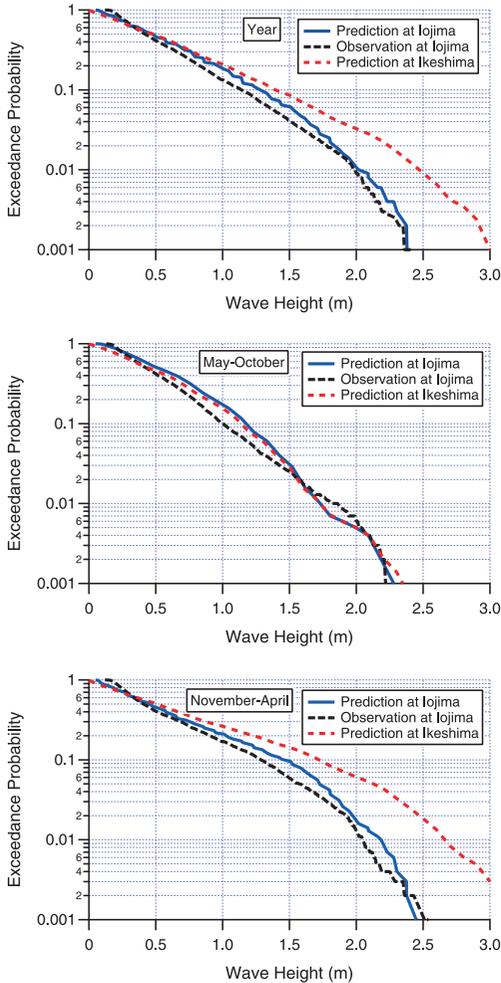


図-9 伊王島での観測値と対象サイトにおける予測値および伊王島での換算値の超過確率 (上から、年間、夏季、冬季)

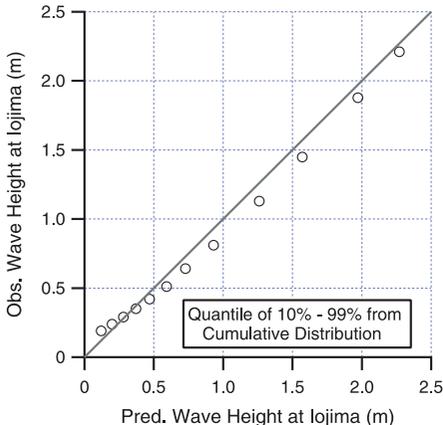


図-10 伊王島での波高観測値と予測換算値との比較

の対応は良いことがわかる。さらに、年間出現波高に関して quantile を用いて、わかりやすく両者を比較した結果を図-10に示すが、観測値と予測換算値の一致が良いことがわかる。なお、図-9のような風についての超過確率分布の図は省略するが、毎時風データと波予測データから年間出現特性と把握することができる。

(4) 年間毎時波高と風速を用いた数年度の極値の推定

対象サイトにおける年間の風や波のデータを得られるので、年間の波高分布や風速分布は、得られたデータを用いれば容易に整理することができる。さらに、これらデータの活用を考えることとする。ここでは、1年間の日最大値データを用いて、POT (Peaks Over Threshold) 解析により、数年度の再現確率値を求める方法を提案する。

いま、極値分布関数 $F(x)$ を、離散関数と連続関数との合成関数で表す。離散確率密度関数として、閾値を超える日数が2項分布 p_k で表されるものとして、これを用いる。

波高あるいは風速はある連続分布関数 $G(x)$ に従うとし、極値分布関数を

$$F(x) = \sum_{k=0}^{+\infty} p_k [G(x)]^k \dots\dots\dots (1)$$

と表す。ここで、 k は閾値を超えた日数である。 p_k は、次式で表される。

$$p_k = \binom{m}{k} \bar{p}^k (1-\bar{p})^{m-k} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 \bar{p} は閾値を超える確率である。これを用いて式(1)を書きなおせば、

$$F(x) = \sum_{k=0}^{+\infty} \binom{m}{k} \bar{p}^k (1-\bar{p})^{m-k} [G(x)]^k \dots\dots\dots (3) \\ = [\bar{p} \cdot G(x) + 1 - \bar{p}]^m$$

となる。また

$$G(x) = 1 - \frac{1}{\bar{p}} \left\{ 1 - F(x)^{1/m} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。 $m=365$ 、 \bar{n} を閾値を超える平均日数とすると、式(4)は以下のようなになる。

$$G(x) = 1 - \frac{365}{\bar{n}} \left\{ 1 - F(x)^{1/365} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

連続分布関数として、対数正規分布、ゲンベル分布、ワイブル分布を用いる。

フィッティングの良し悪しは、以下の指標で判定した。

$$Q = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N [\hat{G}_k - G(x_k; \mathbf{a})]^2} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 N はデータ数、 $G(x_k; \mathbf{a})$ は、パラメータを \mathbf{a} とするフィッティングされた分布関数である。

確率年 T を決めれば、 $F=1-(1/T)$ より F の値が決まり、フィッティングされた分布関数 $G(x)$ を用いて、式 (5) より再現確率値 x_T が求められる。

図-11 は、波高の閾値 H_c を 0.8m とした時の分布関数の当てはめ結果を示したものである。3つの分布関数に大きな差は見られないが、式 (6) の指標によれば、Weibull 分布が最も良い分布形と判断された。閾値を 0.4 ~ 0.8m の 8 段階に分けて分布形を求めて推定した、5 年再現確率波高を整理した結果を表-1 の上の表に示した。グンベル分布では閾値の取り方で確率波高はほとんど変化しないが、対数正規分布やワイブル分布では確率値が変化する。対数正規分布では、閾値が大きくなるほど、確率波高が小さくなったが、ワイブル分布では閾値が 0.8m と 1.0m で大きくなっている。式 (6) のフィッティング指標をもとにすると、5 年再現確率波高として 4.63m が得られた。風速についても同様の手法で、5 年再現確率風速を求めたものが表-1 の下の表である。風速に対し

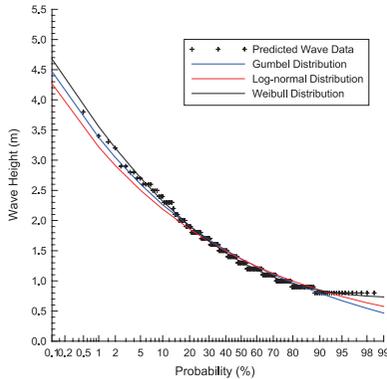


図-11 閾値波高を 0.8m とした極値分布関数の当てはめ結果

表-1 5 年再現確率波高と風速 (単位: 上表は m, 下表は m/s)

H_c	Gumbel	Log-Normal	Weibull
0.4	4.59	5.59	3.22
0.6	4.50	4.67	3.11
0.8	4.42	4.22	4.63
1.0	4.34	3.92	4.45
1.2	4.30	3.78	3.85
1.4	4.25	3.71	3.61
1.6	4.21	3.69	3.46
1.8	4.17	3.72	3.37

W_c	Gumbel	Log-Normal	Weibull
0.6	22.6	20.6	24.0
0.7	22.2	20.0	31.5
0.8	21.8	19.7	25.9
0.9	21.3	19.5	22.4
1.0	20.9	19.3	20.4
1.1	20.4	18.9	20.0
1.2	20.0	18.8	18.1
1.3	19.6	18.6	18.6

表-2 再現確率値の比較 (WH: Wave Height; WS: Wind Speed)

	WH (m)		WS (m/s)	
	anal. data	year data	anal. data	year data
5 years	6.2	4.6	25.4	18.1
10 years	7.1	5.0	27.0	18.4
50 years	9.0	5.7	30.7	18.9

ても最も式 (6) の指標が良くなったのはワイブル分布であり、5 年再現確率風速は 18.1m/s となった。その他、再現期間を長くした算定結果 (year data) と 3. (1) および (2) の方法で求めた結果 (analysis data) を表-2 に示す (風データは NCEP #5' の地点を使う)。2008 年は台風が来襲していないので、この年のデータだけを使って算定した再現確率値は、解析値を用いたものより小さくなっているが、数年間のデータを用いることにより、短期間の再現確率値を求めることができると考えられる。

4. まとめ

本研究では、洋上浮体式ウィンドファームサイトにおける設計波や設計風速の算定、毎時波浪予測値の精度検証を行い、また、毎時波浪予測値を用いて、短期再現確率波高を算定する極値統計解析法を提案した。主要な結果は以下の通りである。

- 1) 対象サイトの設計波と設計風速を算定した。ただし、グリッド平均としての設計風速を対象地点のグリッド点での 10 分間平均風速に換算する際には、適切な補正係数が必要となる。
- 2) 毎時波浪予測データに対して波高修正を行い、伊王島での観測値と比較したところ、超過確率および quantile 値に対して両者は良く一致することが確かめられた。
- 3) POT (Peaks Over Threshold) 解析によって、数年程度の再現確率値を求める手法を提案した。

本研究は、環境省地球温暖化対策技術開発等事業、国土交通省建設技術研究開発助成制度、および科学研究費補助金による研究の一部であることをここに付記し、感謝いたします。

参考文献

間瀬 肇・森 信人・安田誠宏・作中淳一郎・宇都宮智昭 (2009) : 北太平洋波浪解析値を利用した沿岸海域における設計波浪の算定システム, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.146-150.

森 信人・安田誠宏・間瀬 肇 (2009) : NCEP/NCAR 再解析値を用いた北太平洋波候の解析, 京都大学防災研究所年報, 第 52 号, pp.501-507.

Tracey H. Tom・間瀬 肇・安田誠宏 (2008) : 毎時大気解析 GPV を用いたリアルタイム波浪予測システムの開発とその検証, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.186-190.

Tracey H. Tom・間瀬 肇・安田誠宏・森 信人 (2009) : リアルタイム波浪予測と仮想波高計による配信システムの開発, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.1471-1475.