

福島沖浮体式洋上風力発電所のための気象・海象条件の評価*

Meteocean design condition for Fukushima FORWARD project

石原 孟**

嶋田 健司***

今北 明彦****

Takeshi ISHIHARA Kenji SHIMADA Akihiko IMAKITA

1. はじめに

東日本大震災および福島第一原子力発電所の事故で被災した福島県の復興のために、政府は福島県沖合の海域で世界初の浮体式洋上ウィンドファームの実証研究を開始した。本論文では第1期工事にあたる2MW風車を搭載した浮体式洋上風力発電設備および世界初の浮体式サブステーションの設計に必要な気象・海象条件（風速・水位・波・流速・津波）を評価し、その結果を示す。

2. 実証研究のサイト

実証研究のサイトは、福島県の東京電力広野火力発電所の沖合約20kmのN37°14'15.18", E141°16'53.656"（WGS84測地系、解析時点）を中心とした水深約120mの海域である（図1）。



図1 実証研究サイト代表点の位置（解析時点）

3. 気象・海象条件の評価

陸上に比べ、わが国の外洋における気象・海象の観測データは不足しているため、本論文では、各種のシミュレーション手法を用いて、気象・海象条件の評価を行った。以下、その詳細について説明する。

3.1 風速の評価

わが国のように熱帯低気圧（台風）および温帯低気圧（非台風）の両方が強風の要因となる混合気候帯では、それぞれの強風の要因を考慮する必要がある。本

研究では台風と非台風それぞれによる年最大風速の非超過確率の合成確率分布から最大風速を求めた¹⁾。

台風による年最大風速の非超過確率は、1万年の台風シミュレーションにより求めた。図2には台風と非台風による年最大風速の確率分布の合成値を示す。積率法によると、85%分位値は次式(1)により、不確かさは式(2)より推定される。

$$\hat{x} = \bar{x} + \sigma_u \quad (1)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sigma_N^2}{N} \left[1 + 0.885(y - \gamma) + 0.6687(y - \gamma)^2 \right]} \quad (2)$$

ここに、 $\hat{x}$ ：50年最大風速の85%分位値、 $\bar{x}$ ：50年最大風速の50%分位値、 σ_u ：求めた再現期間に対応する年最大風速の標準偏差（信頼区間）、 N ：推定に用いた母集団のデータ数、 σ_N ：母集団の標準偏差、 y ：求めたい再現期間に対応する基準化変数=3.9（50年）、 γ ：オイラー定数=0.57722である。推定値をそのまま使う場合には50%の分位値になる。ハブ高さ（60m）における再現期間50年の最大風速は、台風に起因する強風の不確かさを考慮して48.3m/sとした。

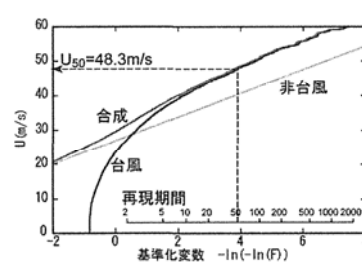


図2 風速の50年再現期待値

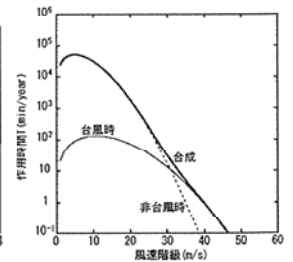


図3 風速作用時間

疲労の評価に用いる風速階級別作用時間は、台風時と非台風時の風速出現頻度を合成した風速出現頻度から求めた。台風時の風速出現頻度は、代表点における台風シミュレーションによる1万年分の風の時系列がワイブル分布に従うと仮定し、非台風時の風速出現頻度は、代表点における風の時系列がワイブル分布に従うと仮定し、それぞれのワイブルパラメータ（台風時： $k=1.99$ 、 $c=15.27\text{m/s}$ 、非台風時： $k=1.73$ 、 $c=8.06\text{m/s}$ 、 k ：形状パラメータ、 c ：尺度パラメータ）から求めた。

*平成25年11月13日第35回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演
** 会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

*** 会員 清水建設（株）技術研究所 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17

**** 会員 三井造船（株）船舶・艦艇事業本部 〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4

図3には年間風速階級別作用時間を示す。

再現期間1年の最大風速は、磐城沖ガス田での2004年10月1日からの730日間の10分間平均風速の観測値を、MCP法によりサイト代表点のハブ高における風速時系列に変換して求めた日最大風速より、積率法により求めた(図4)。MCP法の変換係数には気流解析の結果を用いた。その結果、推定値の変動係数は高々3%であり、平均値のみを考えると U_1 推定値(50%分位)は32.5m/sで、 $U_1/U_{50}=0.67<0.8$ となり、IEC61400-1の第3版による値38.6m/sは安全側の評価であることが確認された。

風速の鉛直分布のべき指数は、3次元非線形気流予測モデルMASCOTによる気流解析によって求めた風速の鉛直分布にべき法則を当てはめることで求め0.1とした。これはIEC61400-3に規定されている暴風時の値0.11とほぼ同じである。基準乱流強度はIEC61400-3の推奨値を採用し $I_{ref}=0.12$ とした。なお、磐城沖ガス田の観測結果²⁾は I_{ref} の値を下回ったので、安全側の評価である。発電時および疲労評価では $I_{90}=\sigma_1/U_{hub}$ 、 $\sigma_1=I_{ref}(0.75U_{hub}+5.6)$ 、べき指数は0.14とした。

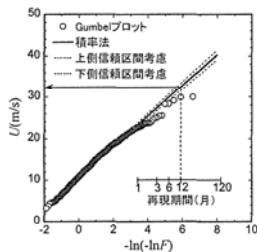


図4 風速1年再現期待値

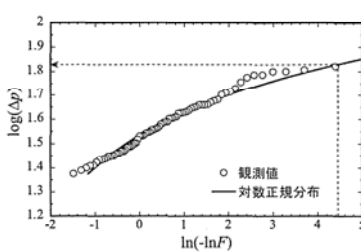


図5 中心気圧低下量

3.2 水位の評価

設計高潮位(H.H.W.L.)は、天文潮に気象潮を加えて算出する。IEC61400-3によれば、天文潮としては最高天文潮位(H.A.T.)を用いることが規定されているが、わが国では港湾基準³⁾のように朔望平均満潮位(H.W.L.)を用いることが多い。したがって、ここでは天文潮としては、港湾基準に準じてH.W.L.を用い、これに気象潮(台風潮位偏差の50年再現期待値)を加えることでH.H.W.L.を求めた。

天文潮は、平成24年潮位表(気象庁発行)⁴⁾の小名浜港におけるデータを用いて設定した。その結果、平均潮位M.S.L.=C.D.L.+0.84m、朔望平均満潮位H.W.L.=C.D.L.+1.44mとなった。

気象潮としては、式(3)に示す台風潮位偏差の50年再現期待値 ζ (cm)を推定した。

$$\zeta = a\Delta p_{50} + bU_{10min}^2 \cos \theta + c \quad (3)$$

ここに、 Δp_{50} (hPa)は中心気圧低下量の50年再現期待値、 U_{10min} (m/s)は海面上10m高さにおける10分間平均風速の50年再現期待値で、台風シミュレーションにより求めたハブ高さにおける10分間平均風速の50年再現期待値48.3m/sを用い、べき指数 α は0.1として求めた。 θ は主風向と U_{10min} のなす角である。式(3)には、低気圧による海面の吸い上げ分および風による吹き寄せ分が考慮されており、 a 、 b 、 c 、 θ は港湾指針によって各地点毎に与えられる定数である。ここでは、 θ は安全側の評価にするため 0° とした。

中心気圧低下量 Δp は、1961年～2007年の47年間に、代表点から半径500km以内を通過し、中心気圧が985hPa以下となった台風の海面気圧データから、台風毎の周辺気圧 P_∞ (hPa)と代表点最接近時の中心気圧 P_C (hPa)を用いて $\Delta p = P_\infty - P_C$ によって求め、その50年再現期待値 Δp_{50} は極値統計解析により算出した。 Δp の確率分布は対数正規分布とワイブル分布に基づく混合確率分布⁵⁾でモデル化できるが、本代表点の緯度は 36° であることから対数正規分布とした(図5)。

再現期間が R 年の非超過確率は、 $F=1-1/(\lambda R)$ で求められる。ここで、 λ は年平均発生率(=N/K)、 N は観測期間に通過する台風の個数、 K (年)は観測期間である。候補海域付近(小名浜特別地域気象観測所)を通過した台風は $N=81$ 個であるため、 $\lambda=1.7234$ 、 $F=0.988395$ 、 $\Delta p_{50}=67.5$ hPaとなる。

表1には潮位の評価結果を示す。高潮パラメータとしては港湾基準に示されている最寄りの港湾として銚子と宮古の値を用いた。その結果、設計高潮位としては大きい方の銚子の値C.D.L.+2.77mを採用した。

表1 朔望平均満潮位・台風潮位偏差・設計高潮位

高潮パラメータ	銚子 $a=0.622$ $b=0.056$ $c=0$	宮古 $a=1.193$ $b=0.012$ $c=0$
U_{10min} (m/s)	40.4	
中心気圧低下量の 50年再現期待値 Δp (hPa)	67.5	
台風潮位偏差 ζ (m)	1.33	1.00
朔望平均満潮位H.W.L.(m)	C.D.L.+1.44	
設計高潮位H.H.W.L.(m)	C.D.L.+2.77	C.D.L.+2.44
採用値	C.D.L.+2.77	

3.3 波浪の評価

極値海況は国や県の資料に基づき、疲労評価のための通常海況は、風波とうねりを考慮して設定した。

極値海況は、表2に示す公表された波高と波周期の値^{6~8)}を比較し、極値有義波高の50年再現期待値には最も大きい値である11.71mを、それに組み合わせる波周期には13秒を基本値として採用した。

表 2 波浪条件の公表値の比較

		波高(m)	波周期(s)
国総研資料 ⁶⁾	富岡	11.71(ALL)	—
	福島	11.0(ENE-ESE)	13
福島県土木設計マニュアル ⁷⁾		8.4(E-SE)	13
磐城沖プラットフォーム設計値 ⁸⁾		20/1.86=10.8	12

疲労評価に用いる通常海況の評価では、海上技術安全研究所の日本近海の風と波のデータベース⁹⁾から沖合の風速、波高、波周期を抽出し、次式に示す平均有義波高 $H_{0,me}$ 、等価有義波高 $H_{0,eqv}$ 、調和平均有義波周期 $T_{0,me}$ を風速ビン毎に求めた。

$$H_{0,eqv} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{0,i}^m}, \quad H_{0,me} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{0,i}, \quad (4)$$

$$T_{0,me} = n / \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{0,i}}$$

なお、等価有義波高では S-N 曲線($m=4$)を考慮した。

通常、波浪は風波とうねりが混在しているが、SMB 法による波と風の関係式には、うねりの影響が考慮されない。図 6 には、式(5)に示す風波とうねりの混合モデル¹⁰⁾から求めた有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ と風速の関係を示す。波浪観測データから求めた平均有義波高、等価有義波高および有義波周期も併記した。

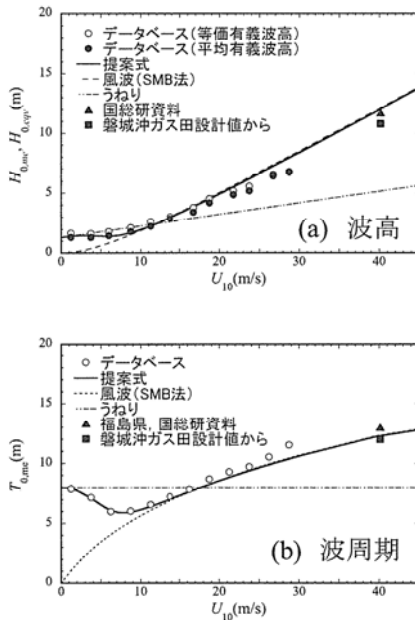


図 6 波高・波周期の評価

$$H_0 = \alpha H_{0,SMB} + (1 - \alpha) H_{0,swell}$$

$$T_{0,me} = \alpha T_{0,SMB} + (1 - \alpha) T_{0,swell} \quad (5)$$

ここに、 $H_{0,SMB}$ 、 $T_{0,SMB}$ ：風波の波高と周期の SMB 法による推算値、 $H_{0,swell}$ 、 $T_{0,swell}$ ：うねりの波高と周期、 α ：混合係数でそれぞれ次式で表される。

$$H_{0,SMB} = \frac{0.3U_{10}^2}{g} \left[1 - \left(1 + 0.004 \sqrt{235000gU_{10}^{-2}} \right)^{-2} \right]$$

$$T_{0,SMB} = \frac{1.37 \cdot 2\pi U_{10}}{g} \left[1 - \left(1 + 0.008 \sqrt{235000gU_{10}^{-2}} \right)^{-5} \right]$$

$$H_{0,swell} = 1.31 + (2.46 - 1.31)U_{10}/12, \quad T_{0,swell} = 8$$

$$\alpha = \max(0.4 \tan^{-1}(0.34U_{10} - 1.88) + 0.39, 0)$$

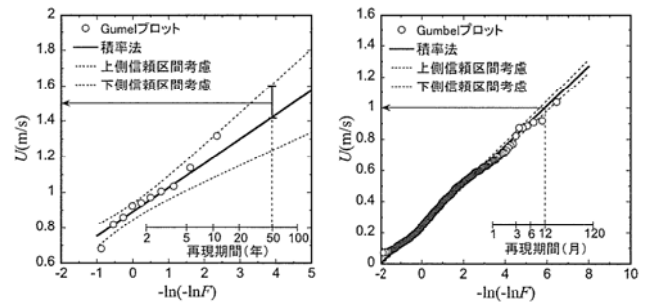
うねりを考慮することにより、低風速域における有義波高および有義波周期の増大を再現した。

3.4 海面流速の評価

海面流速の評価は、海洋研究開発機構の JCOPE（日本沿海予測可能性実験）の海流シミュレーションデータ¹¹⁾を用いて、その極値解析により再現期間 50 年と再現期間 1 年の海面流速を算定することで行った。

検討に用いたデータは、2002 年 3 月 1 日から 10 年の日平均流速から換算して求めた日最大流速からの年最大流速と、2010 年 6 月 1 日から 1 年 9 ヶ月の 1 時間毎データから求めた日最大流速で、格子解像度はそれぞれ $1/12^\circ$ および $1/36^\circ$ である。なお、この海面流速データには海流、潮流、吹送流が含まれているものとして評価を行った。

図 7(a)には海面流速の年最大流速の極値解析結果を示すが、標本数が 10 個と少ないため、不確かさが大きい。IEC では推定値の不確かさが 5% 程度であれば許容範囲内であり、安全係数として 1.1 をとればカバーできる。一方、今回の推定結果の変動係数は $\sigma_u/\bar{x} = 0.19/14.2 = 13.5\%$ であり、IEC の許容範囲を超えている。従って、信頼性を高めるため、標準偏差の半分程度を考慮し、海面流速の 50 年再現期待値は 1.5m/s とした。



(a) 50 年再現期待値

(b) 1 年再現期待値

図 7 海面流速の評価

図 7(b)には日最大流速の極値解析結果を示すが、標本数が 639 個と多く、1 年再現期待値の 50% 分位値は Gumbel 分布を最小二乗近似しても積率法でもほとんど変わらない。積率法で求まる不確かさは約 3% であ

り、IEC の許容範囲内のため不確かさを考慮する必要はなく、海面流速の1年再現期待値は1.0m/sとした。

3.5 津波の評価

津波が浮体に与える影響、特に係留張力を検討するために、非線形長波理論式に基づく津波解析¹²⁾を実施し、サイトでの潮位偏差と水流速度を求めた。

断層モデルにはマンシンハ・スマイリーの断層モデル¹³⁾を用い、断層パラメータには東北大学モデル (version1.2)¹⁴⁾を用いた。解析法の妥当性の検証の詳細は、紙面の都合により割愛するが、検証は設計津波対象群 (明治三陸タイプ地震津波) に対する福島県沿岸域での計算結果¹⁵⁾および、最大クラスの津波 (平成23年東北地方太平洋沖地震津波) でのNOWPHASの福島県 (小名浜) 沖 GPS 波浪計 (図1) による観測結果¹⁶⁾に対して行い、本解析法の妥当性を確認した。

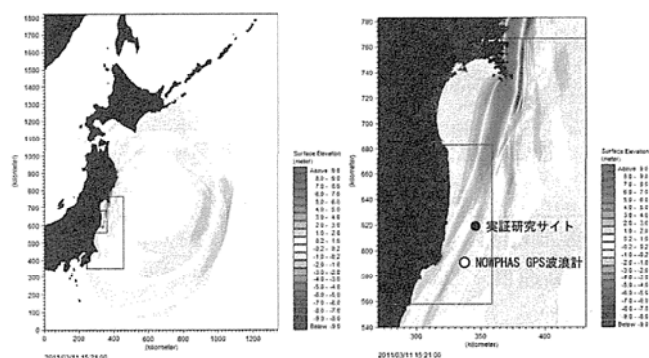


図8 サイト代表点が最大潮位偏差時の潮位分布

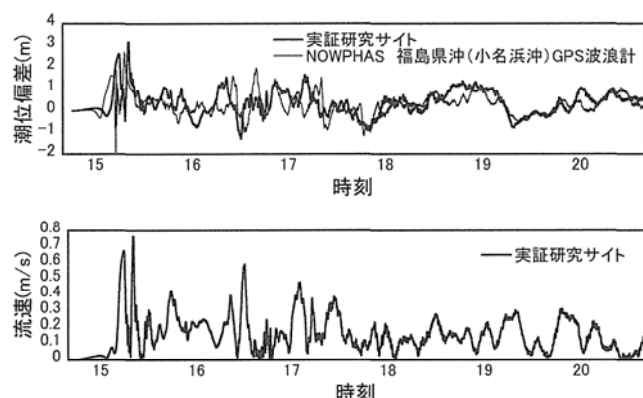


図9 津波の潮位偏差と流速の絶対値の解析結果

図8には今次津波による代表点の最大潮位偏差時の潮位分布を、図9には潮位偏差と水平流速の変化を示す。最大潮位偏差は二つ目のピークで生じ $\eta \approx 3.2\text{m}$ である。最大水平流速は0.77m/sで、これは線形長波理論による値 $u = \sqrt{g/h\eta} = \sqrt{9.8/130 \times 3.2} = 0.88(\text{m/s})$ (g : 重力加速度, h : 水深) よりやや小さいが、この差は線形理論では考慮されない移流と摩擦の効果と考えられる。設計値としては、海面流速の年平均値0.1m/s

(吹送流を含む)¹⁷⁾を組み合わせると0.87m/sとした。

4. まとめ

本論文では福島沖にて実施中の2MW風車搭載した浮体式洋上風力発電設備および世界初の浮体式サブステーションの実証研究のための気象・海象条件の評価結果を示した。今年12月からサブステーションに搭載した各種計測機器を用いて世界初の包括的な浮体式洋上気象・海象観測を開始すると共に、気象・海象データを用いて本研究で提案した様々な予測手法の精度を評価する予定である。

謝辞 本研究は経済産業省資源エネルギー庁の平成24年度浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の一環として行ったものです。設計外部条件の策定では、三菱重工業株式会社の小松正夫氏、ジャパンマリンユナイテッド株式会社の栗島裕治氏にもご協力いただき、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石原孟、山口敦：モンテカルロシミュレーションとMCP法を用いた混合気候における極値風速の予測、日本風工学会論文集、Vol.37、No.3、105-116、2012
- 2) 石原孟、山口敦、老川進、ムハメドワヒードサーワー：洋上風況観測に基づく新しい標準乱流モデルの提案、第32回風力エネルギー利用シンポジウム、175-178、2010
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成19年
- 4) 気象庁：平成24年潮位表
- 5) 石原孟、ホタイホム、チョンチーリョン、藤野陽三：台風シミュレーションのための混合確立分布関数と修正直交変換法の提案、第18回風工学シンポジウム、2004
- 6) 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)、国土技術政策総合研究所資料、No.88、2003
- 7) 福島県土木部：福島県土木設計マニュアル (港湾漁港編)、平成16年4月1日
- 8) (社)日本海洋開発建設協会 海洋工事技術委員会：わが国の海洋土木技術、山海堂、pp.166、1997年5月
- 9) 海洋安全技術研究所：日本近海の風と波のデータベース
- 10) 石原孟、小川豪、林賜銘、嶋田健司、モノパイル式洋上ウィンドファームのフィージビリティスタディ (その1)、第34回風力エネルギー利用シンポジウム、199-202、2012
- 11) (独)海洋研究開発機構のJCOPE (日本沿海予測可能性実験)、<http://www.jamstec.go.jp/frcgc/jcope/>
- 12) 後藤智明、小川由信：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法、東北大学工学部土木工学科河川研究室、1982年7月
- 13) Mansinha, L. and Smylie, D.E., The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, 1433-1440, 1971
- 14) 今村文彦、越村俊一、大家隆行、馬淵幸雄、村嶋陽一：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル (version1.2)
- 15) 内閣府中央防災会議：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会
- 16) 河合弘泰、佐藤真、川口浩二、関克己：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の特性、港湾空港技術研究所報告、第50巻、第4号、3-64、2011.12
- 17) 日本海洋データセンター：経緯度1度メッシュの海流統計 (1953年～1994年)