

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 気象・海象条件の評価

Feasibility study of a offshore windfarm with monopile foundations

1. Assessment of environmental conditions

石原 孟**1 Takeshi ISHIHARA 小川 豪**1 Takeshi OGAWA 林 賜銘***3 Ciming LIN 嶋田 健司**2 Kenji SHIMADA

1. はじめに

近年、ヨーロッパにおいては着床式洋上風力発電が急速に普及しはじめている。一方、わが国においては外洋における本格的な洋上風力発電所はまだ建設されておらず、わが国の自然環境条件に適した洋上風力発電設備支持構造物の設計手法の開発が急務である。わが国における洋上風力発電の導入拡大を図るため、NEDO は昨年度洋上ウィンドファーム・フィージビリティスタディを実施した。本報その 1 では気象・海象条件、その 2 では設計荷重の評価、その 3 では構造設計と施工検討の結果について紹介する。

2. 気象・海象条件評価の考え方

洋上ウィンドファーム(以下、WF)の支持構造物の設計では気象・海象条件の評価が必要となる。現在、洋上風力発電に関する設計指針として IEC 61400-3¹⁾や GL²⁾などの基準があるが、これらの基準は欧州の気象・海象条件に基づいているため、そのまま用いることができない。また気象・海象条件は風車位置によって変化し、特に海象条件は水深がパラメータとなるため、その評価は全ての風車に対して実施する必要がある。しかし、洋上では地表面粗度が均一であり、水深の変化が緩やかな場合には、グループ化して気象・海象条件を評価することは合理的である。本研究ではわが国の自然環境条件を考慮し、洋上ウィンドファーム設置対象海域をいくつかのグループに分けて、気象・海象条件を評価した。

以下に、WF を代表する風車位置の選定手法を示す。まず、WF の四隅を選定し、次に四隅の距離が均一になるように長辺を分割し、WF を正方形に近い領域に分割する地点を選定する。さらに、分けられた正方形に近い範囲の中心に位置する地点を選定する。最後に、最も水深の浅い地点および深い地点を選定する。本研

究では、このようにグループ化された地点について評価した。最終的に、気象条件は代表地点における最大値を、海象条件は水深 10m、15m、17m における値を用いた。また、本研究では様々な荷重ケースのうち暴風波浪時および疲労荷重を評価するための気象・海象条件のみについて述べる。図 1 には、ウィンドファーム設置海域の代表地点と水深³⁾との関係を示す。

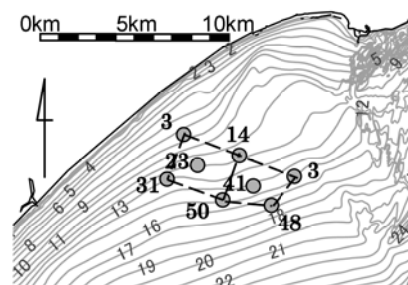


図 1 設置海域における代表地点(コンターは水深)

本研究では極値風と極値波浪は台風シミュレーションや波浪推算により求め、風速の頻度分布は銚子地方気象台の観測データから、波高・波周期と風速の関係は千葉県波浪観測データからそれぞれ推定した。図 2 には WF 設置海域と銚子地方気象台および千葉県の波浪観測地点との位置関係を示す。

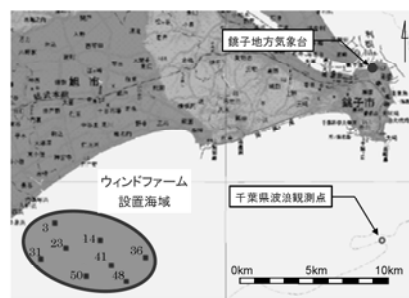


図 2 WF 設置海域と観測地点との位置関係

3. 気象条件の評価

暴風波浪時の評価に用いる極値風速(年最大風速の 50 年再現期待値)は、台風と非台風による年最大風速の非超過確率の合成確率分布から推定し、乱流強度は気流解析から推定した。また、疲労荷重の評価に用いる風速の頻度分布は、銚子地方気象台における観測データから MCP(Measure Correlate Predict)法⁴⁾を用

*平成 24 年 11 月 28 日第 34 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**1 会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

**2 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

***3 非会員 日中コンサルタント(株)東京本社 〒134-0086 東京都江戸川区臨海町 3-6-3

いて推定し、乱流強度は土木学会指針⁵⁾に基づき推定した。

3.1 暴風波浪時の極値風速および乱流強度の評価

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⁶⁾。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極値風速を求めた。台風による年最大風速の非超過確率算出に際しては、観測期間が13年と短いため、1万年の台風シミュレーションにより求めた。図3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。合成した確率分布は広い範囲の再現期間で観測値をよく表していることが分かる。最終的に、台風に起因する強風の不確かさを考慮し、極値風速は50.2m/sと算出した。

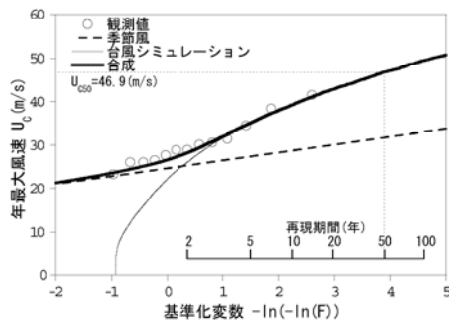


図3 台風および非台風による年最大風速の確率分布関数の合成

50年再現期待風速に対応する風向には、様々な風向になる可能性がある。本研究では50年再現期待風速 $\pm 0.5\text{m/s}$ に含まれる最多風向を照査対象風向とした。

風速の鉛直分布のべき指数は、気流解析により求めた照査対象風向における風速の鉛直分布をべき法則でフィッティングすることにより求め、0.1とした。これはIEC61400-3に規定されている暴風波浪時のべき指数0.11とほぼ同じである。また乱流強度は、照査対象風向のハブ高(72.3m)における気流解析結果を用い、0.11とした。

3.2 風速階級別出現頻度および乱流強度の評価

疲労荷重の評価に用いる風速の頻度分布は、銚子地方気象台における13年間(1995年～2007年)の風観測データをMCP法により代表地点に変換し、ハブ高における風速の時系列から求めた。MCP法の変換係数には3次元非線形気流予測モデルMASCOTによる数値解析の結果を用いた。

風速階級別作用時間は、台風時の風速出現頻度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、代表地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、代表地点における13年間の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から求めた。図4には年間風速階級別作用時間を示す。作用時間は観測値をよく表しているが、高風速域において台風時の作用時間にはバラツキがある。これは、台風の観測期間が13年と短いためと考えられる。疲労荷重評価における風速の範囲は、IEC61400-3に従い、50年再現期待値の0.7倍である35m/sまでとし、風速の鉛直分布のべき指数は、IEC61400-3に規定されている発電時のべき指数0.14とした。

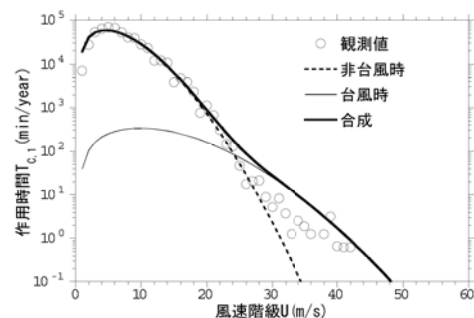


図4 風速階級別作用時間

乱流強度は、土木学会指針に従い求めた。まず、式(1)により設計風速 U_h およびそれに対応する風向別乱流強度 $I_{hl}(\theta)$ から風向別の乱流強度の参照値 $I_{ref}(\theta)$ を求め、次に1年間の風速と風向の時系列から式(2)により各風速、風向に対応する乱流強度 I_{hl} を求めた。最後に、風速15m/sにおける I_{hl} の平均値を求め、これを疲労荷重評価に用いる乱流強度の参照値とした。

$$I_{ref}(\theta) = I_{hl}(\theta) \frac{U_h}{0.75U_h + 3.8} \quad (1)$$

$$I_{hl} = I_{ref}(\theta) \frac{0.75U + 3.8}{U} \quad (2)$$

ここで、 $I_{hl}(\theta)$ は気流解析により求めた代表地点の風向別乱流強度、 U_h は設計風速、 U は10分平均風速の時系列のデータを表わす。

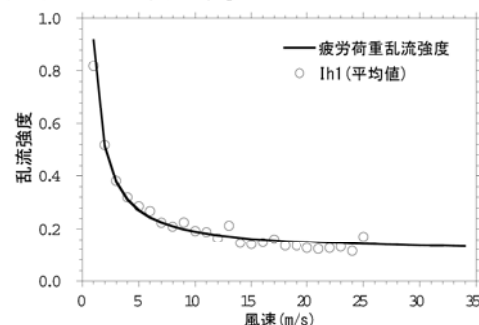


図5 乱流強度と風速との関係

図5には乱流強度と風速との関係を示す。乱流強度の参照値(=0.14)から求めた乱流強度は、各風速における乱流強度の平均値とほぼ等しいことが分かる。

4. 海象条件の評価

暴風波浪時における波浪の評価では、線形不規則波を用いる有義波高・有義波周期の50年再現期待値、非線形規則波を用いる最大波高・波周期の50年再現期待値をそれぞれ求めた。さらに、砕波が発生する場合には砕波波高・波周期を求めた。沖波波高・周期と風速との関係は千葉県波浪観測データを用いて求めた。以下にはこれらの結果を示す。

潮位については土木学会指針に従い平均潮位、朔望平均満潮位および設計高潮位を求めた。海潮流については続・日本全国沿岸海洋誌一解説編・増補編7に記載されている周辺海域での海潮流に関するデータから求め、吹送流については設計風速、沿岸流についてはIEC61400-3に従いそれぞれ求めた。なお、これらの結果については、紙面の関係で割愛した。

4.1 暴風波浪時における波浪条件の評価

表1には暴風波浪時の波浪条件の評価結果を示す。線形不規則波については、有義波波高・有義波周期を求め、また非線形規則波については、最大波高・波周期を求めた。さらに砕波が発生する場合には、砕波の波高・波周期を求めた。

線形不規則波の評価(IEC61400-3のDLC6.1a、6.2aに対応)では、土木学会指針に従い、図6に示す手順および沖波データから式(3)により対象地点における有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ を求めた。

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s K_r H_0, & d/L_0 \geq 0.2 \text{ の場合} \\ \min[(\beta_0 H_0 + \beta_1 d), \beta_{\max} K_r H_0, K_s K_r H_0], & d/L_0 < 0.2 \text{ の場合} \end{cases} \quad (3)$$

ただし、

$$\beta_0 = 0.028 \times (K_r H_0 / L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \alpha)$$

$$\beta_1 = 0.52 \times \exp(4.2 \tan \alpha)$$

$$\beta_{\max} = \max[0.92, 0.32 \times (K_r H_0 / L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \alpha)]$$

ここで、 K_s は浅水係数、 K_r は屈折係数、 H_0 は沖波波高、 d は評価地点における設計潮位、 L_0 は水深 d における波長、 $\tan \alpha$ は海底勾配である。

沖波は千葉東沿岸海岸保全基本計画⁸⁾に示されている波浪推算(スペクトル法)の結果を用い、50年確率波の沖波波高は12.24m、波周期14.5secとした。浅水係数、屈折係数は土木学会の指針に基づき求めた。なお、当該設置海域の海岸線はほぼ直線であるため、回

折の影響を考慮していない。

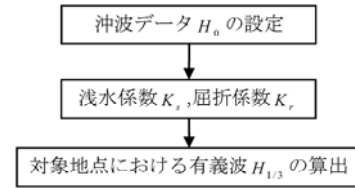


図6 沖波から設計波を求める流れ

非線形規則波(IEC61400-3のDLC6.1b、6.1c、6.2bに対応)については最大波高 H_{50} と波周期 T_{50} は式(4)により求めた。

$$H_{50} = \min(0.9 H_{b,0}, 1.86 H_{1/3}), \quad H_{b,0} = 0.78 d \quad (4)$$

ここで、 $H_{b,0}$ は海底勾配を考慮しない砕波波高である。

砕波については土木学会指針に従い砕波波高 H_b と波周期 T_b を求めた。

なお、有義波周期、最大波周期、砕波周期はともに文献8に示される沖波周期に等しいと仮定した。

表1 暴風波浪時における波浪条件の評価結果

波浪条件	波高 波周期	評価水深		
		10m	15m	17m
線形不規則波 (有義波)	$H_{1/3}$	7.94m	10.56 m	11.26 m
	$T_{1/3}$	14.5sec	14.5sec	14.5sec
非線形規則波 (最大波)	$H_{\max}$	9.04 m	12.55 m	13.96 m
	$T_{\max}$	14.5sec	14.5sec	14.5sec
砕波発生時 (砕波)	H_b	10.38 m	14.36 m	15.94 m
	T_b	14.5sec	14.5sec	14.5sec

4.2 疲労荷重における波浪条件の評価

千葉県波浪観測データは図7の手順に従い沖波波高・波周期に変換した。沖合の風速は銚子地方気象台の観測データを用いてMCP法により千葉県波浪観測地点に変換して使用した。平均波高 $H_{1/3}$ と調平均波周期 $1/T_{1/3}$ は風速ビン毎に変換した沖波データを用いて、式(6)と式(7)により求めた。

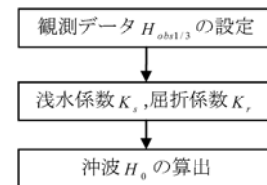


図7 観測データから沖波を求める流れ

$$H_{0,1/3} = H_{OBS,1/3} / K_r K_s \quad (5)$$

$$H_{1/3} = \sum_{i=1}^n H_{1/3,i} / n \quad (6)$$

$$1/T_{1/3} = \sum_{i=1}^n (1/T_{1/3,i}) / n \quad (7)$$

ここで、 $H_{OBS,1/3}$ と $H_{0,1/3}$ は観測波とそれに対応する沖波の有義波高、 $H_{1/3,i}$ と $T_{1/3,i}$ は時刻 i における沖波の有義波高と有義波周期、 n は観測データ数である。以下沖波を表わす添え字 0 を省略した。なお、対象地点における有義波波高と周期は図 6 の手順に従い求めた。

通常、波浪は風波とうねりが混在しているが、SMB 法⁵⁾により推定した波と風との関係式には、うねりの影響が考慮されていない。そこで、本研究では風波とうねりの両方を考慮できる混合モデル式を提案した。この混合モデルでは有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ は、それぞれ式(8)および式(9)により求める。

$$H_{1/3} = \alpha H_{1/3,w} + (1-\alpha) H_{1/3,s} \quad (8)$$

$$T_{1/3} = \alpha T_{1/3,w} + (1-\alpha) T_{1/3,s} \quad (9)$$

ここで、 α は重み係数であり、次式により求めた。

$$\alpha = \min \left[0.463 \tan^{-1} (0.5U_{10} - 5) + 0.636, 1 \right] \quad (10)$$

風速が 0m/s では風波の影響がないと仮定し $\alpha=0$ として、風速が 12m/s 以上では風波が支配的になると仮定し $\alpha=1$ とした。風波の有義波高と有義波周期と風速の関係は、SMB 法により求め、うねりの有義波高と風速の関係は直線、うねりの波周期は一定と仮定し、次式によりもとめた。

$$H_{1/3,w} = \frac{0.30U_{10}^2}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(gF/U_{10}^2 \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad (11)$$

$$T_{1/3,w} = \frac{2.74\pi U_{10}}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(gF/U_{10}^2 \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \quad (12)$$

$$H_{1/3,s} = 1.31 + \frac{(2.46 - 1.31)U_{10}}{12} \quad (13)$$

$$T_{1/3,s} = 8.0 \quad (14)$$

ここで、 U_{10} は海上 10m における 10 分間平均風速、 F は吹送距離であり、 235000 とした。また $H_{1/3,w}$ と $T_{1/3,w}$ はそれぞれ風波の有義波高と有義波周期、 $H_{1/3,s}$ と $T_{1/3,s}$ はうねりの有義波高と有義波周期である。

図 8 には、風波とうねりの混合モデルにより求めた有義波高 $H_{1/3}$ 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有義波波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $1/T_{1/3}$ も併記した。うねりを考慮することにより、低風速域における有義波波高の増大および有義波周期の減少を再現した。本研究で提案した混合モデルにより求めた有義波高および有義波周期は観測値とよく一致し、本提案式の妥当性を示した。

5. まとめ

本研究では、わが国の自然環境条件を考慮し、洋上ウインドファームの支持構造物設計に必要な気象・海象条件を評価した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 気象条件の評価に際しては、台風および非台風の混合モデルを用いることにより、予測された極値風速の確率分布および風速階級別作用時間は観測値とよく一致することが分かった。
- 2) 海象条件の評価に際しては、風波とうねりの両方を考慮した波高・波周期と風速の関係を表す混合モデルを提案し、観測データと比較することにより、その妥当性を検証した。

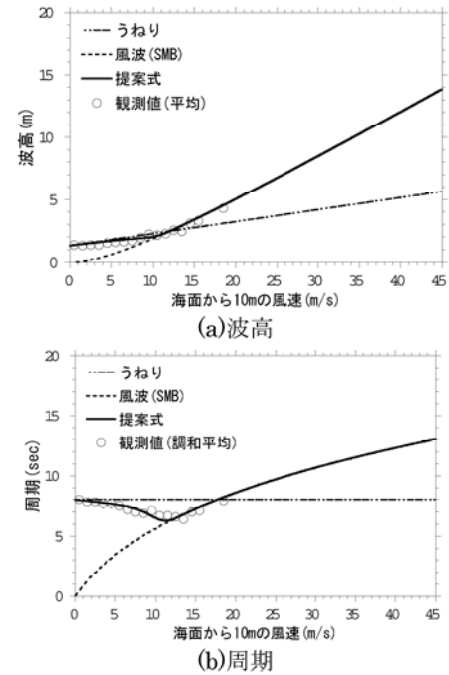


図 8 沖波の波高・波周期と風速との関係

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務である「洋上ウインドファーム・フィージビリティスタディ(FS) 千葉県旭市沖」の研究の一環として実施したものである。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) IEC61400-3: Wind turbines-Part 3, Design requirements for offshore wind turbines Ed.1, 2009.
- 2) GL: GL Wind Guideline, 2005.
- 3) 日本水路協会: 海底地形デジタルデータ M700 シリーズ 関東南部(CD).
- 4) IEC61400-1: Wind turbines-Part 1 Design requirements, Ed.3, 2005.
- 5) 土木学会: 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 (2010 年版), 2011.
- 6) 石原孟、山口敦、老川進: 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、第 33 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.175-178, 2011.
- 7) 日本海洋学会: 沿岸海洋研究部: 続・日本全国沿岸海洋誌一解説編・増補編.
- 8) 千葉県: 千葉東沿岸海岸保全基本計画資料(資料編)、2010.