

着床式洋上風力発電タワーの運転停止時の風荷重

Wind Loads on a Bottom-mounted Offshore Wind Turbine Tower in the Feathering Condition

○山本 学¹⁾ 福本 幸成²⁾ 石原 孟³⁾
Manabu YAMAMOTO¹⁾ Yukinari FUKUMOTO²⁾ Takeshi ISHIHARA³⁾

1. はじめに

我が国特有の厳しい気象・海象条件に耐える着床式洋上風力発電技術を確立するため、2013年に国内初の沖合着床式洋上風力発電設備¹⁾が銚子沖に完成し、実証研究を実施している。筆者らはこの風力発電タワーを対象として、発電時の風荷重特性および風荷重に及ぼす接近流の乱れの強さの影響を検討した²⁾。本報では運転(回転)を停止したフェザリング時における風力発電タワーの風荷重について検討したので報告する。

2. 実測概要

実測対象は Fig.1 に示す千葉県銚子市の南沖合 3.1km に設置された着床式洋上風力発電設備である¹⁾²⁾。Fig.2 に洋上風力発電設備の概要を示す。歪計(鉛直方向)は Fig.2 に示す 3 高度のタワーの内壁に設置した。歪は有風時から無風時の歪を差し引いた後、ナセル上部に設置された風向風速計(M.S.L.+約 84m)で得た 10 分間平均風向に基づき、三角関数を用いて風方向軸および風直交方向軸に変換した。これらの歪からフェザリング時の風方向曲げモーメント $M_D(t)$ および風直交方向曲げモーメント $M_L(t)$ を下式により求め、10 分間毎に統計値を求めた。なお、フェザリング時においてもヨー制御は機能している。

$$M_D(t) = \frac{EI\{\varepsilon_{Dw}(t) - \varepsilon_{Dl}(t)\}}{D'} \quad M_L(t) = \frac{EI\{\varepsilon_{Lr}(t) - \varepsilon_{Ll}(t)\}}{D'}$$

ここで、 E : ヤング係数、 I : 断面 2 次モーメント
 $\varepsilon_{Dw}(t)$: 時刻 t でのタワー風方向軸上の風上側歪
 $\varepsilon_{Dl}(t)$: 時刻 t でのタワー風方向軸上の風下側歪
 $\varepsilon_{Lr}(t)$: 時刻 t でのタワー風直交方向軸上の右側歪
 $\varepsilon_{Ll}(t)$: 時刻 t でのタワー風直交方向軸上の左側歪
 D' : タワーの内径

10 分間平均風速はナセル上部の風速値を用いたが、風力発電設備から東側 285m の地点に設置された風況観測タワー(Fig.1 参照)の M.S.L.+80m の風速値を用いて、風車ハブ高さでの接近風速 U_H (以下、風速)に補正した。また、風況観測タワーの記録によると、乱れの強さは陸側の風が約 9%、海側の風が約 5%であった³⁾。その他の概要については文献 2) を参照されたい。

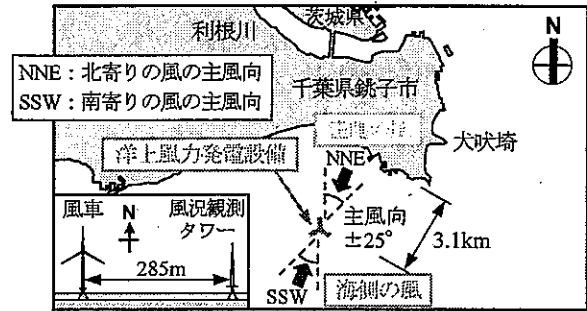


Fig.1 Area of field measurement

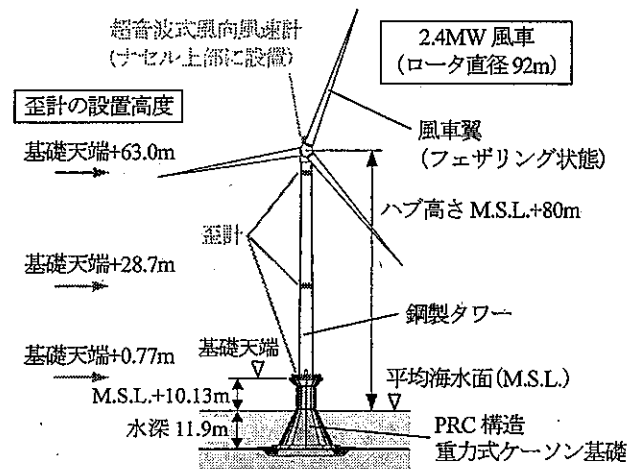


Fig.2 Outline of offshore wind turbine generator system

3. 実測結果

以下ではタワー基部(基礎天端+0.77m)の曲げモーメントに注目する。Fig.3 に風速と風方向平均曲げモーメント(10 分間平均値) M_D の関係、Fig.4 に風速と風方向最大曲げモーメント(10 分間最大瞬間値) M_{Dmax} の関係、Fig.5 に風速と風直交方向最大曲げモーメント M_{Lmax} の関係を示す。図中には接近流の乱れの強さの違いが分かるように、Fig.1 で定義した海側の風と陸側の風の値を示した。なお、図中の値は日射による熱伸びの影響が少ない夜間のデータである。本報の風速範囲は 1~29m/s であり、 Re 数は $3 \times 10^5 \sim 7 \times 10^6$ (代表長さはタワーの平均見付幅 3.5m)である。

M_D は風速の増加に伴い値が増加し、海側の風と陸側の風の値はほぼ同様である。 M_{Dmax} および M_{Lmax} に

1) 鹿島技術研究所 上席研究員
Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute
3) 東京大学工学系研究科 教授
Professor, The University of Tokyo, School of Engineering

2) 東京電力(株)技術開発センター マネージャー
Manager, Tokyo Electric Power Company Research & Development Center

については、海側の風に比べて陸側の風の方が値が大きく、接近流の乱れの強さの影響を確認することができる。また、風方向 M_{Dmax} と風直交方向 M_{Lmax} を比較すると、15m/sを超える風速範囲において、 M_{Dmax} に比べて M_{Lmax} の方が大きくなる傾向が見られる。

ここで、風方向平均曲げモーメント係数 C_{MD} について検討する。 C_{MD} は下式により求めた。Fig.6に風速と C_{MD} の関係を示す。 C_{MD} は風速の増加に伴い、約0.42に漸近することが分かる。

$$C_{MD} = \frac{M_D}{0.5\rho U_H DH^2}$$

ここで、 ρ : 空気密度、 D : タワーの平均見付幅
 H' : 歪測定高さとはブ高さの距離

次に、Fig.7に風速と風方向ガスト影響係数 $G_D (= M_{Dmax}/M_D)$ の関係を示す。図中には風力発電設備支持物構造設計指針⁴⁾の G_D も示した。海側の風の G_D は風速の増加に伴い1.8~2.0程度の値を示し、指針⁴⁾の地表面粗度区分IからIIに相当する値を示した。一方、陸側の風の G_D は風速20m/sを超える範囲において2.0~3.5でばらつき、地表面粗度区分III以上の値を示した。なお、本実測で得られた最大風速は設計風速の1/2程度であり、さらに高風速のデータの蓄積が必要である。

最後に M_{Dmax} に注目して、フェザリング時と発電時²⁾を比較する。Fig.8に風速と M_{Dmax} の関係を示す。図中にはFig.6の C_{MD} 、Fig.7の G_D の値を用いたフェザリング時の予測値も示した。フェザリング時の M_{Dmax} はカットアウト風速25m/s以下では発電時に比べ値が大幅に小さいが、風速の増加に伴い増加することが予測される。図中に示す設計風速(再現期間50年)ではフェザリング時の M_{Dmax} は発電時と同程度の値を示すと考えられる。

4. まとめ

本報では、沖合着床式洋上風力発電タワーを対象として、運転を停止したフェザリング時の風荷重特性および風荷重に及ぼす乱れの強さの影響を検討した。その結果、風荷重は風車が陸地から約3km離れていても陸地による乱れの影響を受けること、陸側の風のガスト影響係数は設計風速未満の風速範囲ではあるが、地表面粗度区分III以上の値になることを示した。

謝辞

本研究は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究の一部として実施したものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 福本幸成, 石原孟, 大窪一正, 林田宏二: 着床式洋上風力発電の実証研究~NEDO洋上風力発電実証研究~, 日本風工学会誌, 第126号, pp.4-8, 2011.1
- 2) 山本学, 福本幸成, 石原孟: 着床式洋上風力発電タワーの発電時の風荷重, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.231-232, 2014.9
- 3) 助川博之, 福本幸成, 山中徹, 大窪一正, 石原孟: 銚子沖3.1kmにおける洋上風況観測, 第35回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.260-263, 2013.11
- 4) 土木学会: 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説, 2010

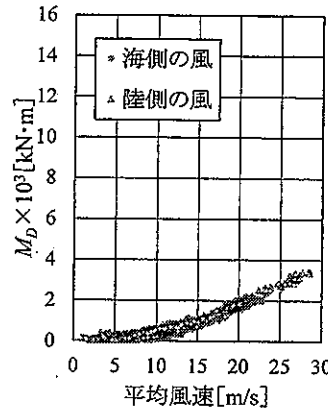


Fig.3 Along-wind static bending moment M_D

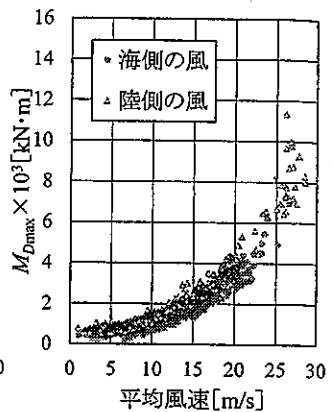


Fig.4 Along-wind maximum bending moment M_{Dmax}

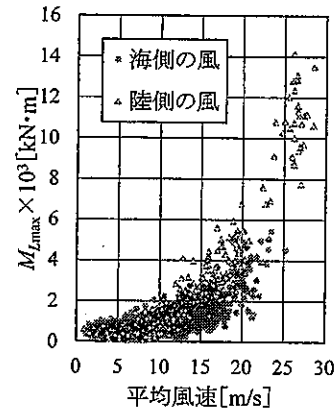


Fig.5 Across-wind maximum bending moment M_{Lmax}

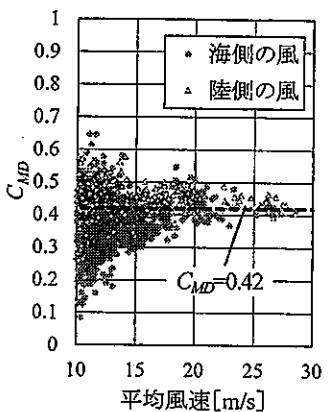
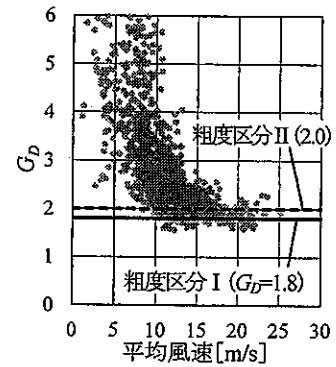
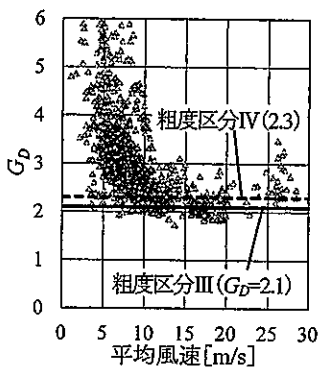


Fig.6 Along-wind static bending moment coefficient C_{MD}



(a) Sea side wind



(b) Land side wind

Fig.7 Along-wind gust effect factor G_D

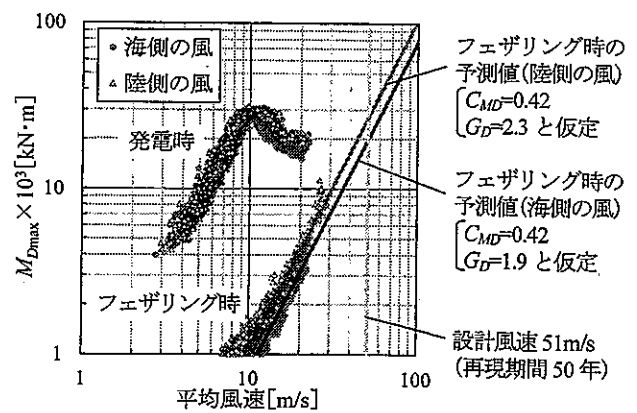


Fig.8 Comparisons between feathering and operational condition about M_{Dmax}