

# 連成と分離解法を利用した風車支持構造物に作用する風と地震の組み合わせ荷重の予測\*

Prediction of combined aerodynamic and seismic loadings on wind turbine support structures by coupled and uncoupled approaches

石原 孟\*\*      飯田芳久\*\*\*  
Takeshi ISHIHARA      Yoshihisa IIDA

## 1. はじめに

風力発電の導入拡大に伴い、地震活動の活発な地域にも風車が建設されており、地震時の荷重評価が重要となっている。国際規格 IEC61400-1<sup>1)</sup>では運転時・緊急停止時・停止時の風荷重と地震荷重を組み合わせで最大荷重を評価することとしている。

空力弾性解析を用いた連成解法により、風と地震の組み合わせ荷重を厳密に評価できるが、材料の非線形性を考慮することが難しい。一方、風荷重と地震荷重を別々に計算する分離解法では、材料の非線形性を厳密に考慮した解析を行うことができるが、風と地震応答の相互作用を考慮する必要がある。

Witcher<sup>2)</sup>は、連成解法により運転時・緊急停止時・停止時の応答を計算し、緊急停止時に応答が最大となる可能性を示唆した。一方、Asarehら<sup>3)</sup>は運転時の組み合わせ荷重が最大となると結論付けており、現時点で地震時に最大となる組み合わせ荷重が不明である。

分離解法により地震荷重を評価する際にはロータとナセルを1質点に集約した簡易モデル(Approximate Lumped-mass Model)<sup>4)</sup>(以下、ALMモデルと呼ぶ)が利用されてきたが、ロータ・ナセルの質量および空力減衰の空間分布が風と地震応答に影響を与えるため、より厳密な風車モデルを用いた分離解法が望まれる。

本研究では地震発生時の風と地震の作用方向を変化させ、運転時・緊急停止時・停止時の解析を行うことにより、最大となる荷重ケースを明らかにする。また、ALMモデル及びロータ・ナセルの質量と空力減衰の空間分布を再現した多質点モデル(Sophistical Lumped-mass Model)(以下、SLMモデルと呼ぶ)を作成し、時刻歴応答解析により質量と空力減衰の分布の影響を明らかにする。また、分離解法における風荷重と地震荷重の組み合わせ方法を提案し、連成解法と比較して、提案手法の推定精度を明らかにする。

## 2. 風車モデルと解析条件

本研究では、図1に示す銚子沖の2.4MW風車を対象とする。本風車の諸元を表1に示す。並進・回転方向の地盤ばねと地盤減衰によって地盤と構造物の相互作用を考慮する<sup>5)</sup>。

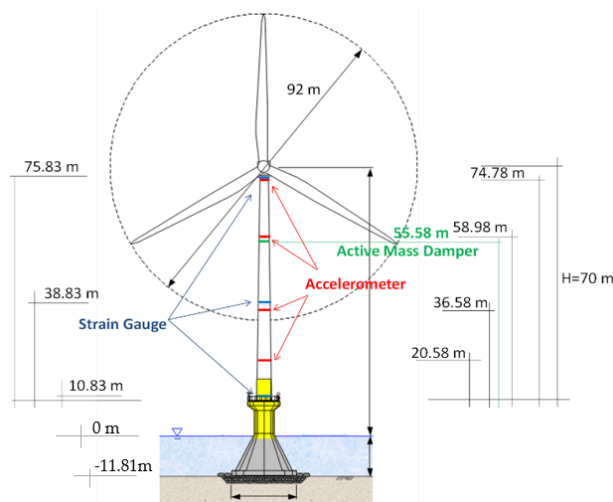


図1 銚子 2.4MW 風車

表1 銚子沖の2.4MW風車の諸元

項目	値
ハブ高さ	80m
ロータ直径	92 m
タワー直径, 板厚	3.00~4.00 m, 0.022~0.038 m
ロータ・ナセル質量	58,724 kg, 110,000kg
タワー質量 (加振機, 計測器込み)	360,000 kg

\* 令和2年11月27日第42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教授 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

\*\*\* 会員 東京電力リニューアブルパワー株式会社 風力部 プロジェクト推進センター

分離解法においては、風荷重は空力弾性解析ソフトを用いて計算し、地震荷重は図2に示されるALMモデルとSLMモデルを用いて計算する。

空力減衰はValamanesh and Myers<sup>6)</sup>により提案された方法を用いて計算した。ALMモデルでは空力減衰をハブ高さで集約された1つのダッシュポットとし、SLMモデルではブレードに分布させて与えた。

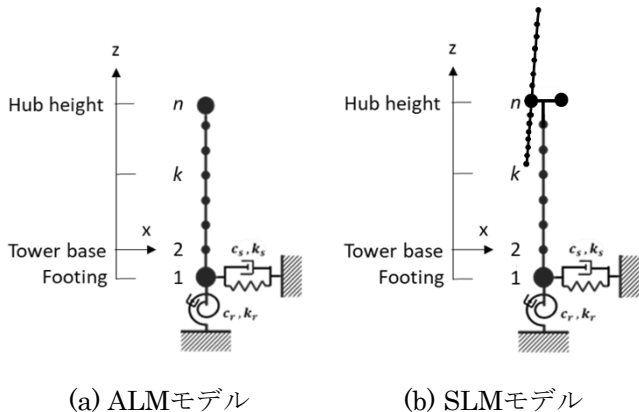


図2 風車のSRモデル

解析に用いる風は一様流の定格風速とし、地震は再現期間約500年の極稀地震動としている。図3に示されるように、工学的基盤に定義される設計用加速度応答スペクトルに適合する地震波を作成し、表層地盤に引き上げて風車のフーチングに作用させた。

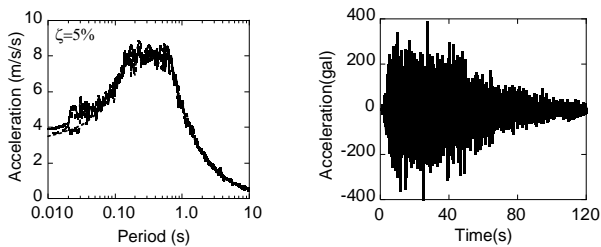


図3 作成された地震波

### 3. 連成解法による地震荷重の評価

#### 3.1. 運転時の荷重

図4に一様流の定格風速11m/sでの運転時における風と地震のなす角0度と90度の場合の、地震方向の曲げモーメント時刻歴の一例を示す。風と地震が同方向(0度)のケースに比べ、風と地震が直角(90度)のケースの荷重が大きくなっていることがわかる。これは、0度時に地震方向における空力減衰が大きく、地震による変動モーメントが小さくなることによる

ものである。15波の地震動を作用させた平均値も同様な傾向を示す。

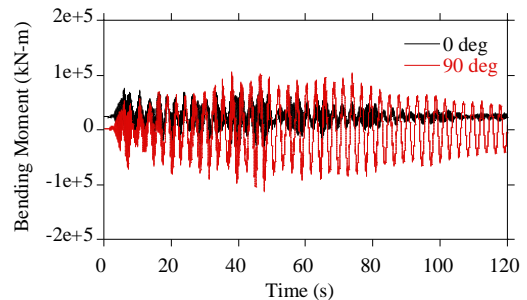


図4 運転時のタワー基部曲げモーメント時刻歴

#### 3.2. 停止時の荷重

図5に停止時における風と地震のなす角0度と90度の場合の、地震方向の曲げモーメント時刻歴(風速0m/sのケース)を示す。停止時にはブレードがフェザーとなっているため、風直角方向に大きな空力減衰が発生し、風と地震のなす角90度の場合に比べ、0度の場合のモーメントが大きくなる。また、無風時とカットアウト風速25m/sでのタワー基部荷重を表2に示す。停止時には風荷重よりも空力減衰の影響の方が大きく、無風時の0度の曲げモーメントが最大となる。

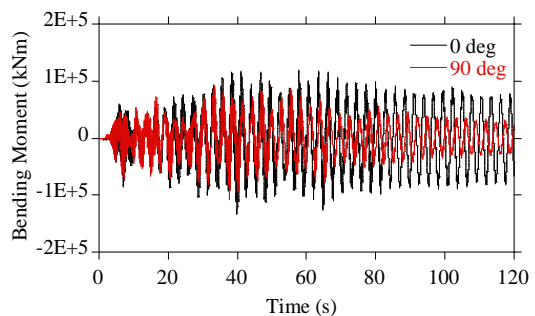


図5 停止時のタワー基部曲げモーメント時刻歴

表2 風速と地震方向ごとのタワー基部モーメント

風速	曲げモーメント(kN-m)	
	0度	90度
0 m/s	99,004	91,347
25 m/s	92,485	77,697

#### 3.3. 緊急停止時の荷重

図6には地震による緊急停止が実施した場合の曲げモーメントの時刻歴を示す。風速は定格風速の11m/s

としている。緊急停止時には風荷重の除荷による振動が生じるため、風と地震のなす角が0度の場合には地震による曲げモーメントと重なり合うことで応答が増大することがある。この場合には緊急停止によりブレードがフェザーとなるため、風方向には空力減衰が小さくなり、風と地震のなす角0度の場合における緊急停止時の曲げモーメントが最大となる。

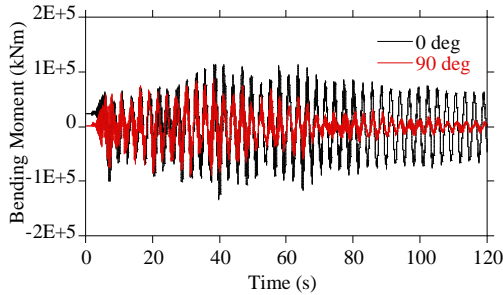


図6 緊急停止時のタワー基部曲げモーメント時刻歴

### 3. 4. 最大荷重となるケース

地震荷重の最大値として、信頼性レベル85%を考える。15個の地震波を用いてそれぞれに対応する荷重を求め、荷重が正規分布に従うと仮定して、以下の式により信頼性レベル85%に対応する最大曲げモーメントを計算した。

$$M_{85} = M_{ave} + 1.04\sigma \quad (1)$$

ここで、 $M_{85}$ は信頼性レベル85%の曲げモーメント、 $M_{ave}$ 、 $\sigma$ はそれぞれ曲げモーメントの平均値と標準偏差である。図7に風と地震のなす角ごとのタワー基部モーメントの最大値を示す。0度では緊急停止時が、90度では通常運転時が最大荷重となることが分かる。

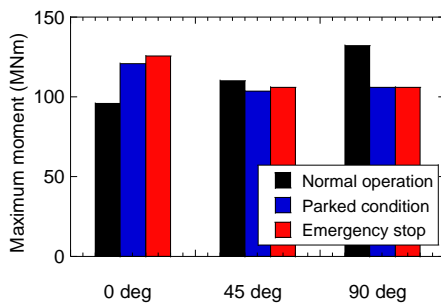


図7 タワー基部曲げモーメント最大値のまとめ

### 4. 分離解法による地震荷重の推定

地震時に最大荷重となる場合は、通常運転時または緊急停止時であるため、この2つのケースに注目して分離解法による地震荷重の評価を行い、連成解法の結果との比較を行った。

### 4. 1. 運転時の組み合わせ荷重

運転時の曲げモーメントは、風荷重と地震荷重のベクトル和として式(2)により計算した。

$$M_i = \sqrt{(|M_{si,x}\cos\theta| + M_{wi})^2 + (M_{si,y}\sin\theta)^2} \quad (2)$$

ここで、 $M_i$ は第*i*層の曲げモーメント、 $M_{si,x}$ と $M_{si,y}$ はそれぞれ地震荷重の主軸方向と主軸直角方向成分の第*i*層の曲げモーメント、 $M_{wi}$ は風による第*i*層の曲げモーメントである。また、 $\theta$ は地震の作用方向と風向がなす角である。

ALMモデルとSLMモデルを用いて分離解法により曲げモーメントを求めた。図8と図9には、地震と風のなす角0度と90度での曲げモーメントの鉛直分布を示す。ALMを用いた分離解法はタワー基部の曲げモーメントを過大評価するが、SLMモデルを用いた分離解法は連成解法に近い結果を示した。ALMモデルの荷重の過大評価は、ロータの慣性2次モーメントと空力減衰の空間分布の影響を無視したことによるものである。

図10には、曲げモーメントのスペクトルを示す。SLMモデルを用いた分離解法から得られたスペクトルは連成解法のそれとよく一致するが、ALMモデルは2次モードによる荷重を過大評価することがわかる。この荷重の過大評価はロータ・ナセルの質量及び空力減衰の分布を無視したことによるものである。

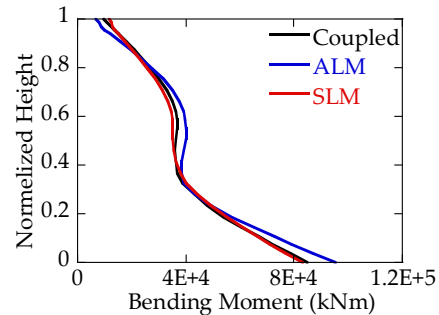


図8 風と地震のなす角0度での曲げモーメント

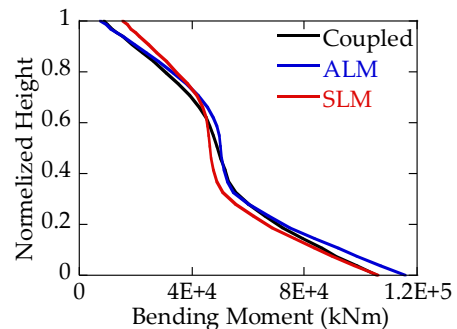


図9 風と地震のなす角90度での曲げモーメント

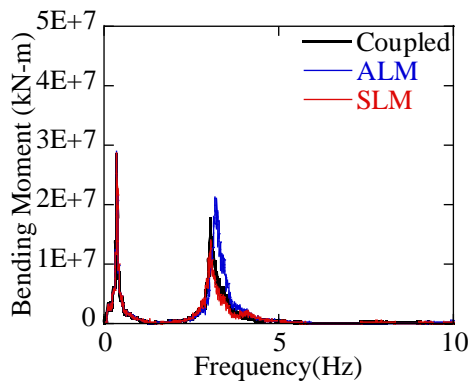


図 10 タワー基部曲げモーメントのスペクトル

#### 4. 2. 緊急停止時の組み合わせ荷重

緊急停止時の荷重は、緊急停止により発生する曲げモーメントと地震による曲げモーメントが重なり合うことにより生じる。緊急停止により発生する最大荷重と地震により発生する最大荷重は無相関であることを考え、分離解法による緊急停止時の最大荷重は、地震荷重の最大値と緊急停止により生じる荷重の最大値を用いた式(3)に示す SRSS 法により算出した。

$$M_i = \sqrt{M_{ES,i}^2 + M_{S,i}^2} \quad (3)$$

ここで、 $M_{ES,i}$ は緊急停止による第*i*層の曲げモーメント、 $M_{S,i}$ は地震による第*i*層の曲げモーメントである。

図 11 には分離解法で推定した緊急停止時の曲げモーメントと連成解法で求めた緊急停止時の曲げモーメントの比較を示す。SLM モデルを用いて分離解法により求めた風と地震の組み合わせ荷重は、連成解法により求めた組み合わせ荷重に比べ、タワー基部において若干大きいものの、鉛直分布は概ね一致する。

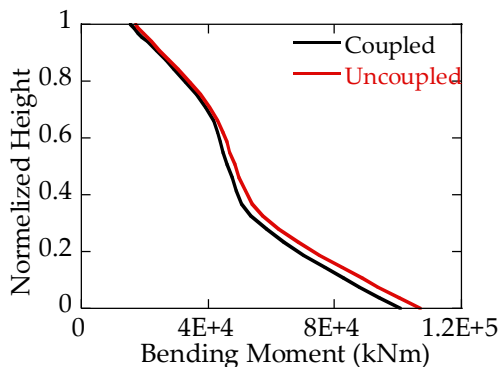


図 11 風と地震が同方向に作用する時における緊急停止時の曲げモーメント

#### 5. まとめ

本研究では、運転時・緊急停止時・停止時の風車について、風と地震の入射角度を考慮した上で、連成解法を行い、空力減衰の違いにより荷重が大きく変化することを示した。風と地震が同方向から作用する場合には緊急停止時が最大荷重となるが、地震が風直角方向となる場合には運転時の荷重が最大となることを明らかにした。また、ロータ・ナセルの質量と空力減衰分布を無視した ALM モデルと、ロータ・ナセルの質量と空力減衰分布を再現した SLM モデルを用いて分離解法により地震時の荷重を求め、連成解法により求めた風と地震の組み合わせ荷重と比較した。SLM モデルは連成解法による最大荷重と一致する結果が得られたが、ALM モデルは最大荷重を過大評価する。さらに、運転時における風荷重と地震荷重のベクトル和及び緊急停止時における風荷重と地震荷重の SRSS 法における合成値は、連成解法の結果と一致することを明らかにした。なお、風車の緊急停止条件によって、運転時の組み合わせ荷重が変わる可能性があり、最大荷重となる荷重ケースを決定する際に注意を有する。

#### 参考文献

- 1) IEC61400-1: Wind Energy Generation Systems - Part1: Design Requirements, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2019
- 2) D. Witcher: Seismic Analysis of Wind Turbines in the Time Domain, Wind Energy, 8, 81-91,2005.
- 3) M. A. Asareh, W. Schonberg and J. Volz: Effects of Seismic and Aerodynamic Load Interaction on Structural Dynamic Response of Multi-Megawatt Utility Scale Horizontal Axis Wind Turbines, Renewable Energy, 86, 49-58, 2016.
- 4) 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, 2010.
- 5) T. Ishihara, L. Wang: A Study of Modal Damping for Offshore Wind Turbines Considering Soil Properties and Foundation Types, Wind Energy, Volume 22, Issue 12. pp.1760-1778, 2019.
- 6) V. Valamanesh and A. T. Myers: Aerodynamic Damping and Seismic Response of Horizontal Axis Wind Turbine Towers, Journal of Structural Engineering, Vol. 140, No.11, 2014.