

博士論文（要約）

精緻化した乱流モデルと空力弾性モデルを用いた

風車の動的応答予測に関する研究

(Prediction of dynamic response of wind turbines by using
updated turbulence model and aero-elastic model)

福王 翔

近年風車の大型化が急速に進んでいる一方で、日本国内において疲労による風車の倒壊事故が多発しており、設計荷重の合理化および疲労寿命の予測精度向上のために風車の動的応答予測の高精度化が必要不可欠となっている。設計や事故調査における風車の動的応答予測には一般的に空力弾性解析が広く用いられ、これは FEM やマルチボディダイナミクスを用いて構築した構造モデルに対して風速場モデルから空気力の評価を行い、空力弾性により動的応答を得るものである。このうち、構造モデルの構造パラメータおよび風速場モデルの乱流モデルは風車設計や既往研究において設計指針に従って一般的に定められる場合が多く、これらの規定値についていくつかの問題点が挙げられる。まず構造モデルの構造パラメータについて、風車 1 次モードの減衰比は欧州、米国、日本における設計指針および国際設計指針において 1.0% から 0.2% の間で大きくばらついている。また、2 次モードの減衰比は風によって励起されにくい周波数であり常時微動解析による評価が困難であることから特に大型風車に関して観測値が希少であり、そのため各指針では明確な定義が行われておらず設計では経験的に 1 次モードと同じ値が用いられることが多い。次に風速場モデルについて、平均風速分布や乱流強度等のパラメータに関する規定が建設地の風況等を考慮しているのに対し風速場の乱流構造を表す乱流モデルおよび乱れスケールに関してはモデルが比較的簡易であり、異なる風況におけるモデルの適用性が不明である。さらに乱流モデルについては、風直角方向成分と鉛直方向成分の空間相関に対する考慮が不十分であることや時間領域での風速場の生成に適していないこと、また乱れスケールに関しては三方向三成分に対する評価例が少ないこと等の問題点が挙げられる。

そこで本研究では、空力弾性解析における風車の構造パラメータおよび三次元風速場の乱流モデルについてそれぞれ観測値に基づいた精緻化を行うことにより風車の動的応答予測の精度を向上させることを目的とした。またモデルの精緻化による風車荷重への影響として地震荷重および発電時変動荷重による疲労寿命について定量的に評価を行った。

第 1 章においては、以上の背景と既往研究について整理を行いその問題点について議論すると同時に、本研究の目的と論文構成を述べた。

第 2 章においては空力弾性解析における三次元風速場の生成手法、構造物に作用する空気力の評価手法、発電制御モデルの概要および構造計算手法について記述した。

第 3 章においては、2.4MW 風車において 2 種類のブレード姿勢に対してアクティブマスダンパーを用いた強制加振試験を実施し、ピッチフェザー時の 1 次モード減衰比が 0.2%、2 次モード減衰比が 2.4%であったのに対し、ピッチファイン時の 1 次モード減衰比が 1.0%、2 次モード減衰比が 2.4%であるとの結果を得た。また、ブレード振動に伴って生成される渦による非定常効果を考慮した非定常等価空気力係数を用いて空力弾性解析を行うことにより風車の減衰比の異方性を再現することができ、この結果を用いて構造減衰が 0.15%であると評価した。またこの結果と既往の強制加振試験の結果をまとめ、1 次のモード減衰に対する外挿式を $\zeta = 2.0e - 0.9T$ と提案した。最後に、構造パラメータの精緻化による設計荷

重への影響を評価するために 500kW の中型風車モデルと 2MW 大型風車モデルを用いて地震荷重の評価を行った。1 次モードの増加分と 2 次モードの減少分により大型と中型で異なる結果が得られたが、今後主流となる MW 級の大型風車について既往の地震荷重とほぼ不変であった。

第 4 章においては、スペクトルと相関関数の両方を持ち応用性の高いカルマンモデルについて、自己相関モデルの風方向成分の式を他成分に拡張しその際に乱れのスケールを各成分のものを用いることで修正式の提案を行った。また、洋上風況観測の結果を用いて空間相関モデルの検証を行った。次に、大気が中立状態である時の洋上風況観測の結果からカルマンモデルにおける三次元三成分の乱れスケールを評価し、 u 成分の時間スケールとの比および鉛直分布についてモデル化を行った。得られた乱れスケールは設計指針の規定より小さい値となった。最後に、風車変動荷重に対する乱流モデルの影響について、静止時の風車に対する空力弾性解析の結果と観測値の比較を行い、提案モデルにより予測精度が向上することを示した。

第 5 章においては、倒壊事故が発生した太鼓山風力発電所の風車を対象に精緻化した空力弾性解析を適用するとともに、導入軸力が低下したタワー高力ボルトにおける応力の評価を行うために立体要素を用いた FEM 解析を行い、ボルトの導入軸力の低下とともに応力の変動幅が増加した。疲労評価の結果、軸力が 30%以下に低下した高力ボルトは 1 年ほどで疲労破壊し、定期点検記録と一致した。また、高力ボルトおよびタワー筒身の疲労寿命における乱流モデルの影響について、乱流モデルにおける乱れスケールを系統的に変化させ疲労寿命への影響について定量的に評価を行った。

第 6 章では、これまでの章で得られた結論についてまとめた。