

# 博士論文（要約）

大型風力発電機の複雑地形風況への適応化設計と運転制御

武藤 厚俊

風力発電機（以下、風車）の導入量は世界的に増加傾向にあり、特に近年では中国が欧州や米国を凌ぐ市場の拡大を示している。日本国内においても2003年施行の「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」（Renewables Portfolio Standard: RPS法）、2012年の再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT: Feed in Tariff）などの政策による後押しもあり、今後もリプレイス市場も含めて堅調に推移するものと考えられている。しかしながら、日本国内における風況は、強風、乱流、落雷等の点において欧州と比較すると、風車に対して厳しい風況であり、風車設計の国際規格であるIEC 61400-1に規定されている風況を想定した設計では、日本の風況下においては安全な運転が難しいことが考えられる。これらの問題については、すでに多くの研究が実施されており、特に日本の風況、特に乱流強度等が風車に与える影響や、台風（強風）に対する風車設計方法等、国内の基準として制定され、実際に現在においても運用されている。しかしながら、日本国内の風車サイトに多く見られる複雑地形等における、スペクトルや突風の性状の変化の評価や、それによる風車に対する影響はほとんど理論されていない。

本研究では、日本国内の代表的な風車建設サイトを対象として、特にこれまでほとんど議論されてこなかった、地形による風速変動である乱流のスペクトル形状及び突風の頻度・大きさに対する評価方法を提案し、また、それらの風車荷重に対する影響の評価を通して、風車を安全に運転するための対策を示すことを目的とした。

第1章では、国内外におけるこれまでの大型風力発電機の導入量の推移、及び今後の展望を示した。また、日本国内における近年の風車の事故事例をまとめ、風車の普及が進んでいる欧州と比較して、日本の風車建設サイトが厳しい風況であることを確認し、本研究における目的及び実施内容を示した。

第2章では、日本国内における風車建設サイトの代表的な地形に設置された風況観測塔において測定された風データを分析した結果を示した。風車設計時には、国際規格で示されている風況条件をすることが一般的であるが、そこで規定されている風スペクトルや突風は、欧州における平坦な地形を仮定しており、日本の風車サイトの風況の特性とは大きく異なる。本評価によって、上流側の地形によって風のスペクトル形状が大きく変化することを示した。上流の地形のスケール、さらに増速による影響によりスペクトルのピーク周波数が高周波側にシフトし、また慣性小領域の傾きが急になること、及び風車建設前に取得できるデータによりそれらを予測する手法を示した。また本章では、日本国内の山岳地域において発生する突風の性状を調査した結果も示した。山岳地域のような複雑地形では、上流の地形スケールと相関がある渦が発生し、それによって急激な風速変化が発生しており、その突風の大きさは地表面粗度、及び風速標準偏差と強い相関があることを示した。また、突風の頻度及び大きさに関して、風車建設前に予測する手法を示した。

第3章では、2章で示したスペクトル形状が変化した風が、風車各部の荷重に及ぼす影

響の評価手法を確立した。スペクトル形状を変化させた風を計算機上で作成し、実機風車を模擬した解析モデルに流入させた動解析を実施し、風車各部の疲労荷重を評価した。その結果、同一の乱流強度であっても、スペクトル形状が異なると風車各部の固有振動数によって疲労荷重は変化することが明らかとなった。これらの結果を用いて、標準的なスペクトルであった場合の等価乱流強度を算出し、風車荷重評価の新たな指標を提案した。また本章では、2章で示した複雑地形によって発生する突風が風車に及ぼす影響について解析した結果を示した。風車設計の国際規格に規定を超える突風は、風車ロータの大きな回転数変動を発生させ、風車の強度部材のみならず電装品に対しても影響を及ぼすことがわかった。とくに風速変動速度が大きい場合には、風車ロータが一時的に定格回転数以上に達し、その結果電装品の大きな温度変化を生じ、熱疲労による損傷確率が増加することを示した。

最後に4章では、統計量的風況パラメータ及びスペクトル形状から算出した等価乱流強度、及び定量化した突風による風車の機械的疲労荷重及び熱的疲労荷重の影響と、それに対する対策制御により、山岳地域等の複雑地形における風車運転方法について考察した。複雑地形においては風向ごとに乱流強度が大きく異なり、風車の疲労荷重を低減させるために、風向ごとに風車を運転、停止するセクターマネージメントが一般的である。本論文においては、各風向における風車停止風速を、発電量を最大化するように決定することにより、乱流強度が高い風向においても極力発電を継続し、発電量損失を抑制できる可能性を示した。また、地形によって発生する国際規格に規定されている以上の突風に対しては、突風形状の分類により、約半数の突風が発生する直前には風速の減少が多くみられることから、風速減少を検知して予めピッチを制御することにより、突風によるロータ回転数の上昇を抑制できることを示した。

以上の研究により、日本国内において風車建設が進んでいる山岳地域などの複雑地形における風況の特性、特にこれまで議論されていなかったスペクトル形状の変化や突風頻度、大きさの変化などが明らかになった。また、風況の変化が風車の機械的及び熱的疲労に及ぼす影響が系統的に整理され、厳しい風況における風車制御についても例を示すことができた。これらの結果より、日本国内の多くの地形における風車設計及び運転に関して有用な知見が得られたと考えられる。