

## 論文の内容の要旨

論文題目 非定常運動による風車後流域の運動量回復構造の研究

氏 名 木村 桂大

地球温暖化や化石燃料枯渇への懸念から，世界中で風力エネルギーの普及が進んでおり，風力発電機（以下，風車）を一箇所のサイトに集約的に配置する大規模な風力発電所の建設が進められている．発電規模の増大に伴う発電単価の低下によって，欧州では既に主電源としての利用がなされている．一方でわが国においては，事業規模が小さいことや，高い建設費によって発電単価が高く，主要電源としての普及はまだまだ難しい状況にある．今後の普及に向けて，発電単価を下げるのが急務であり，より発電効率の高い発電所設計が必要とされている．

風力発電の発電コストを低減するための方策として，大量の風車を一か所に集約配置する大規模な風力発電所の建設が挙げられる．集約配置によって送電線の短縮や変圧器などの共通利用，設置面積がコンパクトになることからメンテナンスのコストも低減できる．一方で集約化によって現れる問題として，風車後流の干渉による発電量損失が挙げられる．これは，風車後流域においては風速が大きく低下しており，これを受ける後続風車が十分な発電量を発揮できないために生じる．風向によっては発電量が半分以下となり，後流干渉による損失の低減が重要である．この後流干渉の影響を評価するため，これまでの研究において風車後流域の速度分布の定量的予測に関する多くの研究が行われてきた．後流域の風速回復は主流から後流域へと運動量束が輸送されることで進行し，後流域に存在する風速変動によってこれが促進されると考えられている．現在，風速変動の代表的パラメータである乱流強度を用いて後流域の風速回復の推移を推定する方法が多く提案されている

一方で、風速変動の長さスケールに着目した整理を行っている研究は極めて少ない。本研究では変動スケールの効果に着目し、風車後流域の運動量回復過程の解明を目的とし、特に、主流からの運動量流入が生じる場合の流体现象（風速変動の長さスケール）に着目した関係性を明らかにする。そのためには後流域における運動量束の流入出について定量的に把握する必要がある。評価手法の開発とともに、主流からの運動量束の流入出量と風速変動の長さスケールの関係性を明らかにする。

第 1 章において以上の研究背景について述べ、後流域における風速変動と運動量回復の関係について既存研究の成果の解説と、本研究における研究目的およびアプローチについて述べた。

第 2 章では、風車後流域の運動量束の評価に関する定式化と、本研究で用いる後流解析手法と解析結果の評価方法について述べた。後流域の運動量収支の関係式については、風車後流域において風速が極小値をとる位置から後続風車位置まで円筒型の検査面を配置し、これを通過する運動量束と検査面上に作用する圧力・応力による運動量増分を算出することで定式化を行った。各項のオーダー評価により、運動量回復への寄与が大きな項として、主流方向に対して流入する平均風速による運動量束に加え、側方から流入する平均風速による運動量束と変動風によって生じるレイノルズ応力項の寄与も無視できないことを確認した。

第 3 章では、流入風速と翼端の回転周速の比で表される周速比を変更した風車後流解析を実施し、本研究で用いる CFD 解析手法と、2 章で立てた運動量評価式の妥当性検証を行った。CFD 解析の妥当性検証は風洞試験データと比較することで実施し、後流域の運動量回復において重要である主流方向速度や半径方向速度について正確な予測が可能であることを確認した。運動量評価式の妥当性検証については、運動量式の右辺の各項を算出して合算した値と、左辺に該当する後続風車位置の風速分布から直接計算した運動量束との差を確認することで検証を行った。定量的評価により、運動量評価式において圧力項と主流方向変動速度の自己相関項による寄与は十分小さく、主流方向に対して側方から流入する平均流による運動量束とレイノルズ応力による運動量束の増大による寄与が大きいことを確認した。また、得られた時系列の後流速度分布に対して DMD (Dynamic Mode Decomposition) 解析を用いることで、後流域に存在する風速変動の周波数を調べた。結果、運動量回復への寄与が大きいのは風車直径と流入風速で無次元化した無次元周波数において 1.0 を下回る低周波数成分であることを確認した。

第 4 章では、後流域に対して様々なスケールの変動を与えるため、周期的なヨー運動を伴う運転条件における風車後流解析を実施した。制御パラメータとして付加する最大ヨー

角の大きさと制御周波数の 2 種類を設定し、これらを変化させることで後流域に対して異なる変動スケールの風速変動を与えた。後流域に存在する風速変動の指標として渦度分布の可視化を行い、周期的なヨー運動によって後流域に蛇行運動が与えられていることを確認した。また、積分特性スケールの導入により、後流域に与えた蛇行運動のスケールについて定量的な確認を行った。これに加えて 3 章で妥当性の検証を行った運動量評価式を用いた運動量回復に関する評価を行った。ヨー運動の周期を適切に設定することで外部流からの平均流およびレイノルズ応力による運動量流入が増大していることが確認できた。つづいて変動スケールの大きさおよび変動が存在する位置に対する運動量流入の大きさの変化傾向について分析した。その結果、翼端渦の螺旋構造が崩壊していく過程の中に一定のスケールの変動が存在している場合において、主流から取り込まれる運動量束が増大することが確認された。

以上の研究により、後流域における主流からの運動量束の流入出量と風速変動の長さスケールの関係性を明らかにするという今回の目的に対して一定の成果を挙げることができたと考える。これらの知見は、将来的には風車後流モデルの改良と風車の非定常制御に対するパラメータ設定に対して応用が期待される。