

審査の結果の要旨

氏名 木村 桂大

木村桂大氏の「非定常運動による風車後流域の運動量回復構造の研究」は、風車の大規模配置における課題となっている風車後流の構造と後続風車へ流入する流れ場の運動量回復構造について、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics : CFD）を用いた解明を試みた論文である。風車後流とは、自然の風からエネルギーを取得したのちに風車後方に形成される流れ場で、流入する流れに比べて風速が下がる（風エネルギーが減少する）。風車後流は、大気からの豊富なエネルギーが流入することで回復する。風車が複数配置される場合には、このエネルギー回復過程を正しく見積もる必要があり、見誤るとエネルギー回復が十分ではない位置に配置した場合には、発電量の低下や故障トラブルの要因になる事例が報告されている。これらの課題から、風車後流の流体的構造およびエネルギー回復に至るメカニズムの解明が求められ、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。空間的に大規模かつ連続している流体場であるため、実験的に計測することの困難さや自然の変動する風況下において運転されるため、膨大な状況を考慮したアプローチが必要となる。

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した。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した。

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。

木村氏の研究では、数値流体力学を用いて複数の代表的な変動を与えて、風車後流の構造を解き、渦の Q 値による可視化のみならず渦の長さスケールに着目した運動量交換との関連性に関する定量的な分析評価を行い、風車後流の翼端渦崩壊過程と風車半径スケールに関連する渦の代表的な長さスケールの存在の重要性について、知見を獲得した。翼端渦の崩壊過程に風車半径スケールの渦変動が存在する場合に、エネルギー回復が活発になされる結論を得るに至った。

今後、洋上風力発電が国内市場で展開が期待される中、風車配置を検討する技術に対して新たな有益な知見を提示することとなった。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。