

論文の内容の要旨

論文題目 On Wind Turbine Blade Noise Reduction by Large-Scale Numerical Simulation (大規模数値解析を用いた風車の騒音低減について)

氏 名 フライク オリバー

本論文は、従来の経験則などでしか行われていなかった風車の高周波空力騒音の予測を精度の細かい CFD（数値解析）により世界で初めて実現したものである。具体的には、世界最大規模の LES (Large-Eddy Simulation) 解法を地球シミュレータで実施し、騒音直接計算によって風車翼の空力騒音発生プロセスをシミュレートした。又、翼端付近で発生する空力騒音に着目し、翼端形状の変化による空力騒音の低減を計算で再現した。本論文で構築した騒音数値解析ツールを適用することにより大型風車の空力騒音低減に向けた新翼型の設計に貢献することが可能になり、風車の更なる普及に繋がると確信する。

本論文は、5つの章から構成されている。

第1章は、序論で風力エネルギーの背景、既存の騒音解析モデルの概要と問題点、水平軸風車周り流れ解析の従来研究、そして本研究の目的を述べる。風力発電はクリーンな自然エネルギーとして大きく期待されている。しかし、風車翼の回転に伴い空力騒音が発生する。風車が生活環境に近い場所で運転し、更なる風力発電の普及には空力騒音の低減に向けた設計方法が必要とされている。風車の騒音の大部分は翼端付近に顕著に現れる。翼端渦騒音は、翼端渦による乱れと、その渦と翼後縁の干渉からなるといわれている。今後の大型風車の設計にあたっては、コスト低減のため、ローター直径と周速比が一層大きくなることが予想され、翼端付近で発生する空力騒音の研究は更に重要な意味をもつ。実機での観測によると、翼端の形状は風車の空力騒音と密接に関係している。しかし、実験やフィールドテストによって翼端渦騒音の詳細な物理現象を捕らえることは困難である。そのため、風車翼の高周波空力騒音の予測と翼端形状の騒音への影響について CFD へ期待が高まっている。数値計算は風洞実験やフィールドテストで得られない物理現象を詳細に求めることが出来、設計への情報を提供できる。風車翼周りの流れの数値解析はこれまでに経験則、翼素・運動量理論、RANS（レイノルズ平均式）と渦法により行われてきており、空力性能においては風洞実験で得られたデータとよく一致している。しかし、計算機能力の問題から、風車翼の空力騒音についての数値解析は行われていない。流体音の発生は渦の非定常運動に起因し、その流体音圧スペクトルを定量的に予測するためには、LES 解析により流れの変動と複雑な渦構造を高精度にとらえる必要がある。LES 解析は RANS に比べてはるかに大きな計算資源を必要とするが、翼面近傍の流体渦による高周波の騒音源と音波の伝播を予測することができる。

第 2 章は本研究で用いた数値流体解析の基礎式と数値解法について述べている。本研究では、LES 圧縮性解析手法、騒音直接解析手法と音響学的類推のモデルを用いた。翼面近傍の音波の伝播を流体の圧力振動から直接計算した。又、遠距離場における空力騒音はモデル計算により求めた。基礎方程式には保存形圧縮性ナビエ・ストークス方程式を用い、時間微分には陰解法・Beam-Warming 法による近似因子化を、空間微分には 3 次精度風上差分法を採用した。SGS 粘性はスマゴリンスキーモデルを用いた。従来は、計算機の問題から、格子点数がとれず大規模な CFD が不可能であったため Lighthill などの音響学的類推モデルを用いて翼面上の圧力変動から遠距離場の騒音が予測されてきた。しかし翼面付近の流れ場は非線形であり、モデルで捕らえにくい領域が存在する。音波の直接シミュレーションを行うことによって音波の壁での反射や屈折、非線形な効果などが考慮でき、より精度高い騒音予測が可能になった。本研究では、翼面上から 1-2 翼弦長の領域において騒音を直接計算し、遠距離場は流れ場解析から得られた圧力変動を用いる Brentner らによって改良された Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) の方程式によって求めた。これは、従来の FW-H 方程式に対して音場情報を有するもので、任意の空間において解析が可能である。従来のモデル計算では取り扱いの難しかった翼面近傍の 4 重子音源も、実質的に直接計算可能とし、高周波騒音をより精度よく計算できる解析ツールを構築した。

第 3 章では計算コードの検証を行った。NACA0012 単独翼において数値解析結果と実験結果を比較している。実際の風車の稼動状態に相当する高レイノルズ数で LES による非定常大規模計算を行った。結果から、翼面上圧力分布及び後縁圧力スペクトルが実験結果と非常に良く一致していることが分かった。負圧面の前縁で遷移を再現した。これは、本計算において負圧面に格子点を非常に細かく集めることによって得られた結果である。風上スキームによる数値粘性の影響を、格子依存性や SGS 定数の効果を調べることによって検討した。細かな渦スケールまで解像することによって、SGS 渦粘性が散逸に影響していることを示し、本計算において数値粘性の影響が低いことを示した。又、微小な圧力の波動の伝播について解析解と比較し、本解析ツールでの音波の伝播に必要な格子解像度を求めた。更に、翼端を含む NACA0012 翼型周りの流体および空力騒音について検証した。翼端渦と翼端渦によって発生する音場における音源大きさが実験値と定量的に一致した。また、翼端での速度場変動と計算結果が定性的に一致した。翼端渦に関わる複雑な渦構造を捕らえられることができ、翼端渦による騒音の発生プロセスを定量的に計算可能にした。図 1 は、直接計算による 3 次元的な音場を可視化したものである。以上、本章では、実際の風車のレイノルズ数に対応する単独翼における翼端渦空力騒音を計算し、風車翼の計算で着目する翼端を発生源とした空力騒音の伝播について、正しい結果を得ることができることを示した。

第 4 章は、水平軸風車に対し、流れ場と空力騒音の数値解析を行った。回転風車翼の翼端付近で発生する空力騒音を第 2 章で述べた計算手法を用いて解析した。翼端の形状の違いによる遠距離場での空力騒音レベルの低減が数値解析で再現できたことを述べている。従来の数値解

析ツールや経験則などではこのような形状の詳細な影響が再現できなかった。計算対象は産業技術総合研究所で開発された WINDMELIII 風車とした。WINDMELIII は図 2 のモデル図に示すように、2 枚翼・アップウィンド型、出力は 16.5 kW である。翼先端の形状(以下 Actual)と風車の騒音観測実験で騒音を抑えた実績をもつ ogee 型翼端形状を示す。レイノルズ数は、翼端付近で 1.0×10^6 である。計算での総格子点数は世界最大規模の 3 億点である。計算により、Actual の翼端と ogee 型翼端との翼端形状の違いによるパワー係数の差はないことを確認した。図 3 は Actual の翼端と ogee 型翼端における渦度等値面を示す。いずれの翼端においても後縁近傍で翼端渦により発生する非常に複雑な渦構造が観察された。渦の構造としては、Actual の翼端では、多くの渦が翼端近傍に発生しており、ogee 型では、少し離れた位置で渦構造が発達している。ogee 翼端において翼端渦と翼との干渉が抑えられることがわかった。風車翼の翼端付近で翼端渦と後縁との干渉が空力騒音に大きく関わっていることが明らかになった。図 4 は ogee 型翼端において LES 直接計算から得られた瞬間の圧力変動場を示す。音源が翼端にあることがわかる。図 5 は、Actual の翼端と ogee 型翼端に対して近距離場で LES 騒音直接計算と遠距離場で FW-H を用いた手法を適用し、風車から上流方向に 20m を観測点とする音圧レベルの計算結果を表示したものである。翼端形状の違いによる高周波騒音の傾向が異なることを示した。計算により、ogee 型翼端では 3kHz 以上の周波数で音圧レベルが 5 dB 減少し、騒音低減の効果があることを確認できた。これは ogee 型翼端において、翼端剥離渦と翼の後縁との干渉が減少したことによると考えられる。この結果は ogee 型翼端と類似な曲線を後縁にもつ観測実験と同様な傾向を見せている。従来のモデル計算ではこのような形状の差が認められなかった。

第 5 章は、以上単独翼周り流れ、風車周り流れ、数値解析によって明らかにした各章の結論をまとめ、本研究では、開発した LES・圧縮性・騒音直接計算コードで複雑な水平軸風車周り流れと空力騒音が高精度に解析でき、設計への大きな貢献を果たした。特に翼端付近に着目し、翼端形状の空力騒音への影響を明らかにした。風車の騒音解析において、遠距離場では高周波域において ogee 型翼端を用いることにより、騒音が低減されることを示した。一方、従来のモデル計算では翼端形状の差が認められなかった。つまり、遠距離場への音波の伝播を直接計算により求めることで従来解析が不十分であった風車近傍の騒音について本研究で構築された数値手法により解析ができることを示した。高周波の空力騒音の低減により、風力発電は更に普及し、安定したエネルギー需給の確保とエネルギーの使用に伴う環境負荷の低減への貢献が期待される。風車における空力騒音プロセスをシミュレートすることによって風車の空力騒音低減に向けた新翼型の設計への貢献が可能になった。

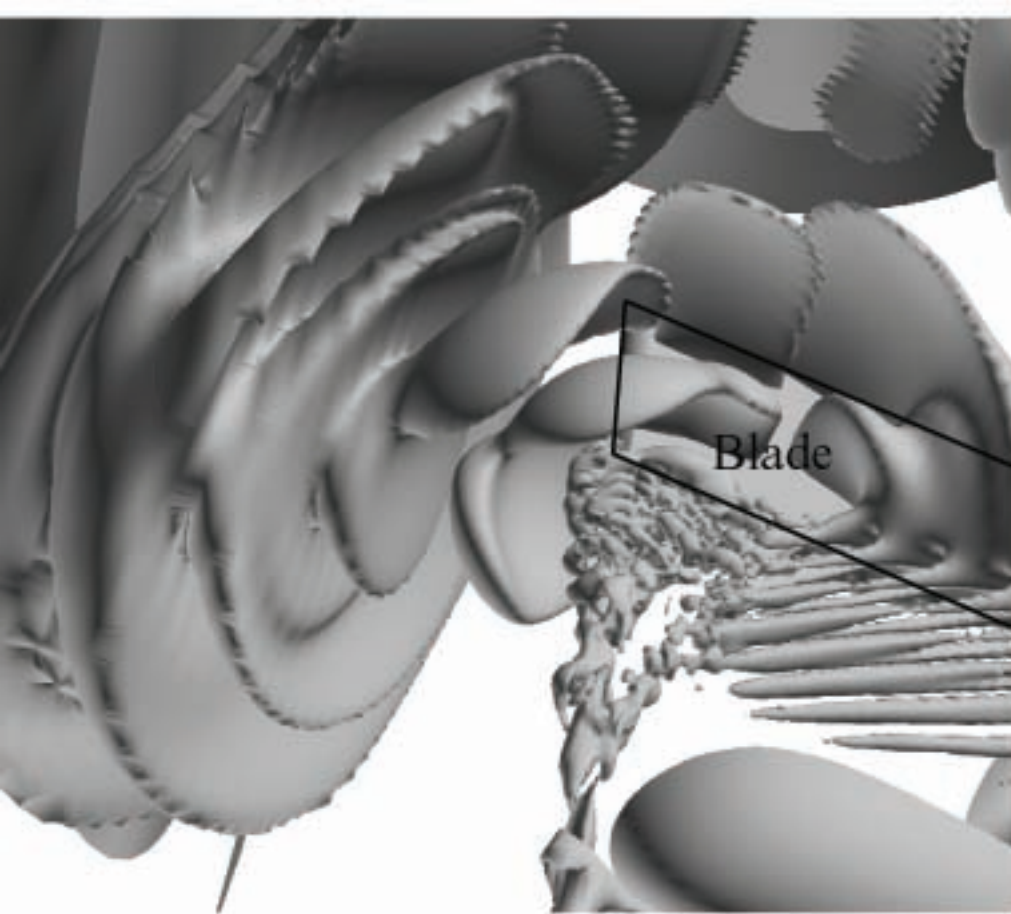


Fig. 1

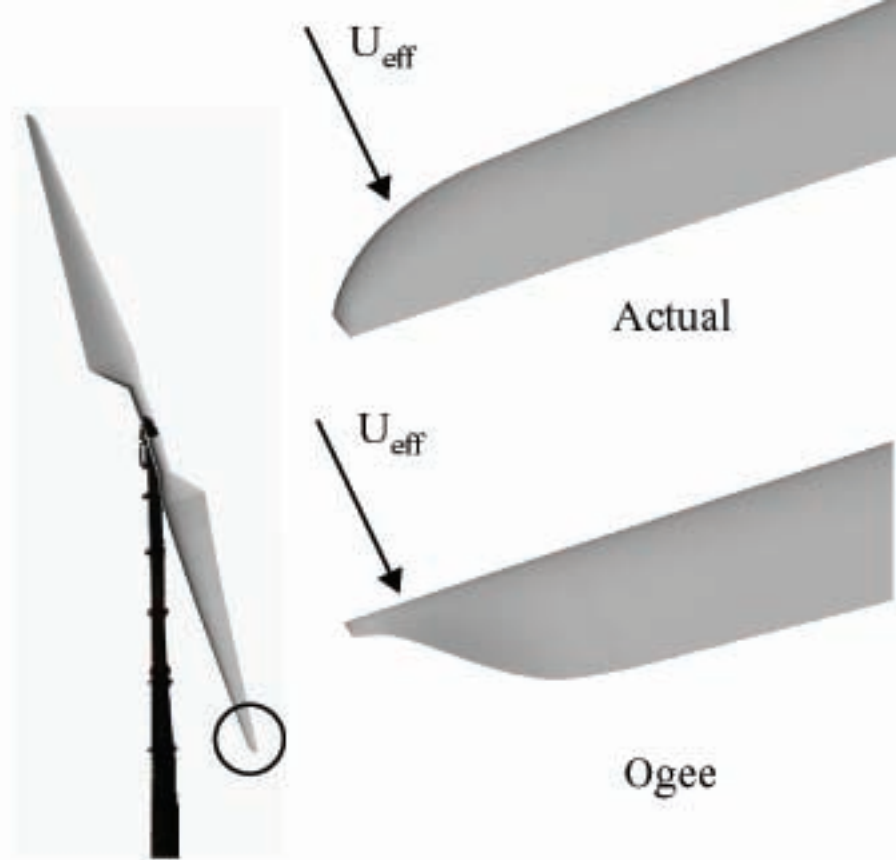


Fig. 2

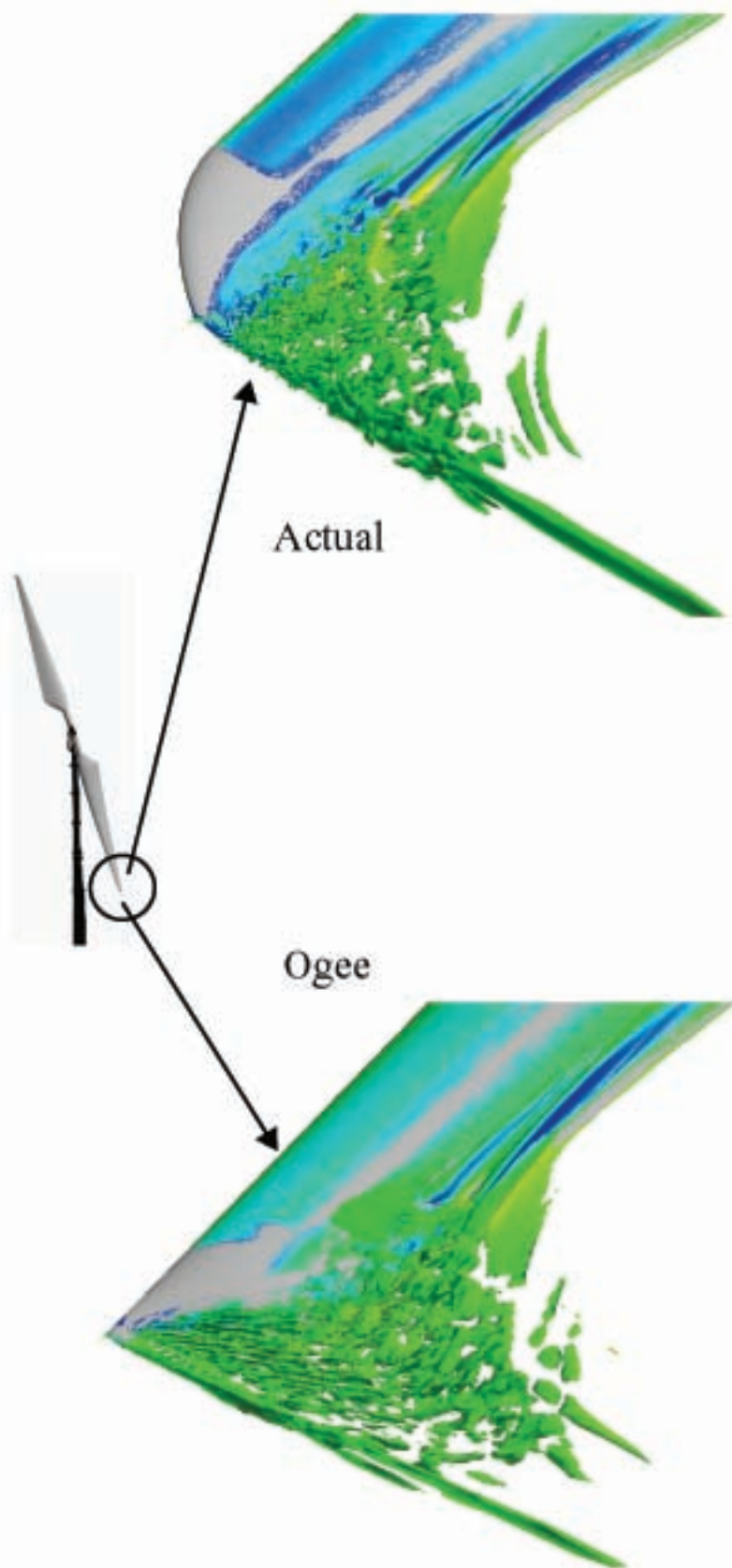


Fig. 3

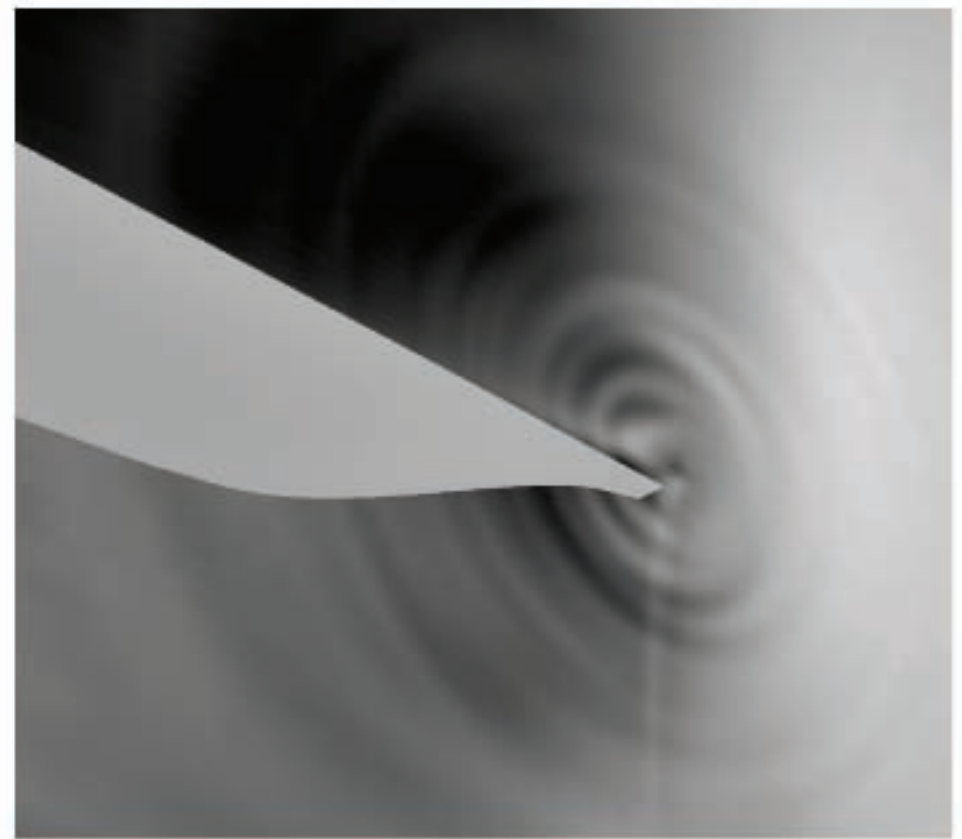


Fig. 4

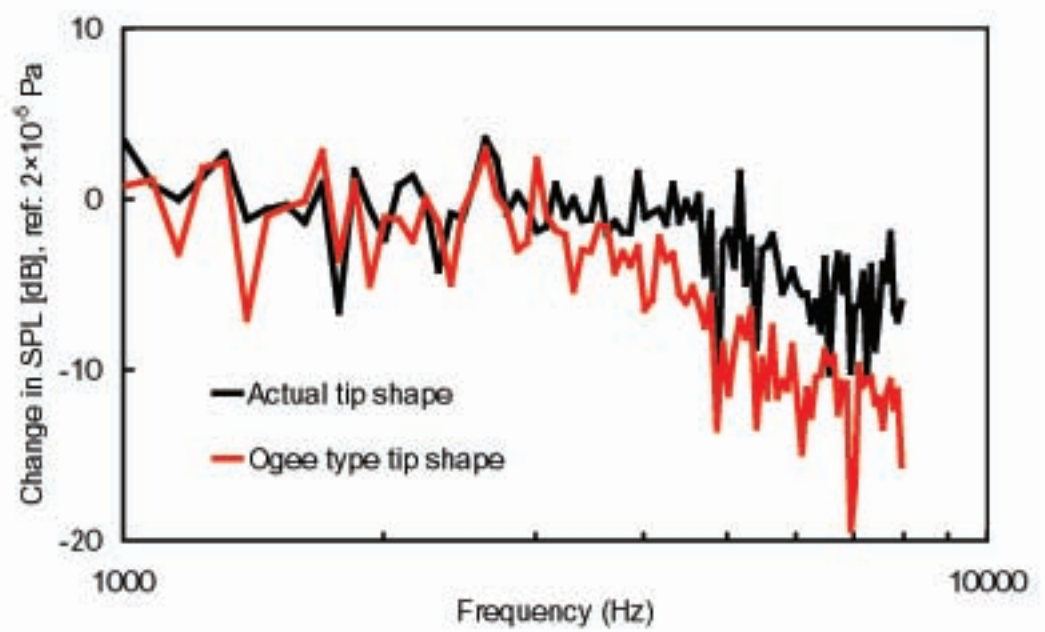


Fig. 5