

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13861

研究課題名(和文)回転風車まわりの三次元圧力場計測システムの開発

研究課題名(英文)Pressure field measurement system for 3D flows around rotating wind turbines

研究代表者

村井 祐一 (Murai, Yuichi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：80273001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：風力発電は10年で10倍の爆発的成長期にある。従来、経験しなかった問題が急増した。風車出力が期待値を下回る問題、突風や乱流によるブレード破壊や崩落事故、さらには住民からの騒音苦情である。いずれも流体の圧力場が支配する現象に他ならない。一方、PIV(粒子画像流速測定法)は完成域に入り実験流体力学を大きく変えた。しかし風車設計に直接的な貢献を果たしていない。PIVそれ自体は流速計測法であり、力・トルク・音の次元を与える圧力の空間分布の計測に課題があるためである。本課題では自由空間圧力分布を測定可能な実用的な推定ツールを完成させ、風車開発の試行錯誤ピッチを上げることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Wind power now spreads at a pace of ten folds a decade, and experiences various problems which has not been pointed out before such as lack of power estimated, blade damage with sudden unstable airflows, and flow noises claimed by residents. All of them associate to pressure field of flow. Particle image velocimetry has been contributing to experimental fluid dynamics though, it hardly produces problem-solving of the issue above. This is because PIV does not measure pressure field directly despite to its rich information of velocity vector field. In this project, we have developed several numerical and experimental systems that can measure multi-dimensional pressure field as a function of time, to improve the pace of development in trial-and-error designs of various wind turbines.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 風力発電 自然エネルギー 風車 PIV 可視化 圧力計測 風洞

1. 研究開始当初の背景

風力発電は10年で10倍の爆発的成長期にある。並行して従来、経験しなかった問題が急増した。風車出力が期待値を下回る問題、突風や乱流によるブレード破壊や崩落事故、さらには住民からの騒音苦情である。いずれも流体の圧力場が支配する現象に他ならない。一方、PIV(粒子画像流速測定法)は、3次元計測も完成域に入り、実験流体力学を大きく変えた。しかし風車設計に直接的な貢献を果たしていない。PIVそれ自体は流速計測法であり、力・トルク・音の次元を与える圧力の空間分布の計測とは切り離されているためである。自由空間圧力分布の実用的な推定ツールが完成すれば、R&Dにおける試行錯誤ピッチが格段に上がり、逼迫する風力問題が連鎖的に克服されるはずである。流体力学にも新しい章が開ける。

2. 研究の目的

流体法則により一方から他方を推定する技術は、ピトー管などの接触形点計測技術として確立された。これに対して本研究では、1点ではなく、時間・空間の両次元で流れ場を計測する3次元PIVにより、流れの幾何学的対象を限定せず、自由空間中の圧力分布を推定可能とする技術を創る。その実現のために、圧力場推定に適合したPIV技術の開発、PIV特性に適合した圧力場推定方程式の構築、およびこれら両方から可逆解を得る数理論の検定を行う。これらは全て乱流を対象としており、多様な設計思想で製作される風車を、出力・強度・騒音で総合評価することを可能とする基盤技術を構築する。

本課題に関連する技術に、4次元変分法を代表とするデータ同化法(assimilation)がある。同化法は実測データ密度 \ll 計算データ密度 なる条件での数値内挿を目的と

する。比して本研究は、高解像度PIVにより実測データ密度をDNSレベルに上げ、圧力場は変数変換のみに転換できる。出力結果はCFDハイブリッドではなく、圧力方程式を第一原理とする間接計測値を与える。成功すれば風車や流体機械設計のみならず航空工学・海洋工学・水理学にも転用可能となる。時空間多次元情報の扱いで英知が集約されてきた流体力学に、高密度データによる新たな変革をもたらす。

3. 研究の方法

3D圧力場計測の優劣比較表を完成させることを目的として、32通りの試験を実施する。準定常流と非定常流に区別した8種類のPIV法と、4種類の流体基礎方程式の組合せによる。本課題での新規提案は、圧力推定に適した3次元3成分PIVの開発と、ラグランジュ型LES方程式による圧力勾配ベクトルの多重積分である。検定流れ場は、内部流・外部流・共存流に跨り、レイノルズ数は層流域から高乱流域まで調査する。海外3大学とは流動設備で連携し、1年目で基本性能表を完成させる。2年目は風車に応用し、出力・騒音・強度の未解決問題の解明に応用する。特に三次元性が問題となる双発プロペラ風車の非対称振動、ツイスト垂直軸風車の広帯域トルク特性、プロペラ風車ブレード失速線のコリオリ振動を究明する圧力場計測を行う。成果は国際学術雑誌に発表し、新しい3D圧力場計測手法の実用性と将来展開性を産学両分野に公表する。

初年度は、圧力場推定のためのPIVシステム全体の総合的・系統的開発を行う。検定用の流れ場計測は、北海道大学所有の風洞実験室・対流実験室・水流実験室で実施する。マイクロ流路はスイス連邦工科大学、大型回転系流れは英国ウォーリック大学と連携する。PIV/PTV用の画像処理ソフトウ

エアは、本研究組織で過去 10 年間、独自蓄積してきた 60 種以上の解析アプリ・コードから成る LFC-PIV project pack を活用する。

2D 計測では乱流時の面外運動量の未計測と二次元連続式の不成立問題がある。それが圧力推定確度を低下させる。そこで PIV 空間解像度と乱流渦スケールの比率で適合された自由検査体積型の SGS モデルを開発する。これにより圧力場を出力関数とする LES を実現する。PTV の場合では、3 時刻以上の連続追跡により流体実質加速度 Du/Dt を直接取得可能である。これに従い高解像度な p 分布の積分により緻密な圧力場を得る。積分では、固体壁境界条件や PIV ウィンドウ境界の自由流入出条件を導入する。ただしそれらの境界値問題としての数値的整合性の確保を図る。最終的には連続式誤差が最小化する空間多重積分法を開発する。圧力ポアソン方程式を使うスキームでは、非線形対流項の発散を、ラグラジアン加速度関数で置換する。加速度置換はポアソン方程式に粘性項を復元させる。しかし粘性寄与分は双線形のため境界条件だけで再構築可能である。そのため内部動圧空間変動をオイラー運動方程式だけで解くという、新しい型のポアソン方程式解法を試験する。

4. 研究成果

開発された圧力場計測技術を、風車設計における「出力」「騒音」「強度」の 3 大問題の解決に応用した。同時に、応用で生ずる LES ハイブリッド PIV による圧力場推定技術の派生課題に対応して修正を行った。本研究の理念は、あくまで流体機械への実用化である。無限通り列挙されうる流れ場別の検定を繰返すことに時間を費やさないこととした。本技術の将来展開を一般に理解せしめるため、風車技術者が関心をもつ下記 ~ の具体的な問題に適用し、実証

データを取得した。

双発風車は大きな出力特性をもち 17 世紀の欧州でミルとして実在した。絶滅理由は近接 2 風車の負荷の自励振動である。発電機で連結して負荷調整可能となった現在は、製造・設置しやすい中型風車として復活している。高密度配列のウインドファームでも同様な現象がある。これについて風洞モデル実験を行い、下記の結果を得た。

地表近くの剪断流中では双発風車が単発風車より高い性能をもつ。その理由は風車上空の高速流を双発風車固有の渦対が下方に輸送させるためである。その輸送原理は 3 次元 PIV による結果、マクロスケールのレイノルズ剪断応力であることが判明した。双発風車の後流における運動量欠損空間は同じ受圧面積の単発風車より小さく、高密度な配列風車に適合する。

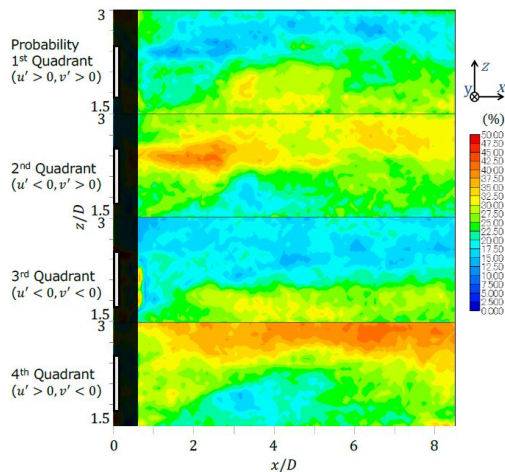


図 1 双発風車による運動量輸送構造

ツイスト垂直軸風車は出力する周速比帯域が 2 次元風車の 2~3 倍に達する。最近 5 年間で爆発的に普及した形式である。従来の運動量反動効果では説明されず、回転軸方向の流れと位相空間で移動境界問題を構成する。これについて風洞実験を実施し、以下の結果を得た。ツイスト風車が周速比について広帯域のトルク特性をもつ理由は、ブレード曲面の三次元的な加速流にあ

る． 加速流は剥離線の後方移動によって誘発される． この後方移動は，三次元コアンダ効果によって説明される． 以上の知見は，カラスモークワイヤ法ならびに Body Fit-PIV という三次元曲面専用の流場の可視化技術の開発によって得られた． また PIV データから圧力場を推算することで，三次元コアンダ効果による揚力向上のメカニズムの説明に成功した．

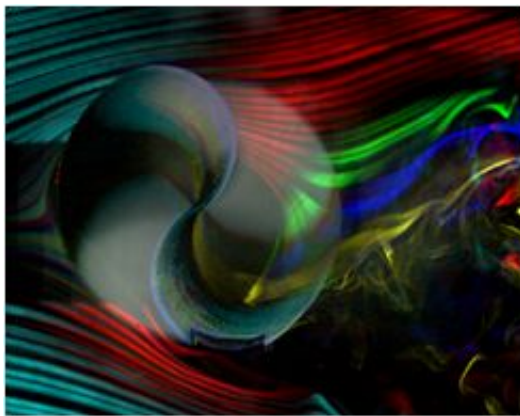


図2 カラスモークワイヤ可視化

大型プロペラ風車では，一時的風速低下や無負荷回転時に固有の問題をもつ．翼表面の剥離線が低周波振動する可能性が指摘されているためである．相対的な淀み領域に遠心加速度が作用し，第二種の高速度流が風車半径方向に成長するためである．これについて以下の結果を得た． 大型プロペラ風車の自然剪断風環境における失速特性を究明するための捻りブレードモデルで風洞実験を行い，失速線が表面で曲線状に分布することを明らかにした． 失速線はレイノルズ数が $10^3 \sim 10^5$ の範囲では時間的に主流方向に低周波で振動した． この振動の原因は，気流場が失速角のまわりで付着流と剥離流の2つの安定解をもつため，その切り替わり周波数は翼弦長を代表長さ，主流速度を代表速度とするストローハル数で $0.01 \sim 0.05$ の範囲であった． Body Fit-PIV による剥離線近傍の境界層内部測

定により，剥離線上では翼のスパン方向に急激に対流加速度を発生させることが判明した．

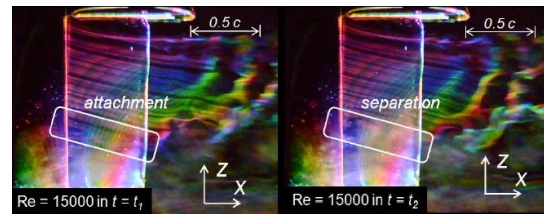


図3 Bod Fit-PIV による剥離線の定量化

渦場の圧力場推定法の開発については，ノズルから発生する間欠噴流がもたらす渦輪を対象として以下の成果を得た． 孤立した渦輪の圧力分布は標準的なポアソン方程式による解が妥当である． ただしポアソン方程式の生成項に PIV データの高階の数値微分を要することから，PIV データを少なくとも C3 レベルの連続性をもたせるノイズ除去処理が重要であることが判明した． 渦輪の中心の局所最低圧力は理論値に一致した． これを壁面衝突渦輪に応用し，壁面にあたえる圧力分布の時間変化の計測に成功した． さらに壁面を 45° の斜めにたときの渦輪の衝突による圧力場を計測した結果，傾斜しない場合よりも瞬時圧力変動が大きいことが分かった．

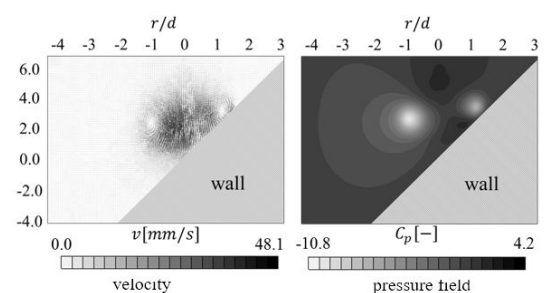


図4 傾斜壁面に衝突する渦輪の圧力場

5．主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文](計3件)
1. T.Shiratori, Y.Tasaka, Y.Murai, Rapid rheological characterization of a viscoelastic

- fluid based on spatiotemporal flow velocimetry, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 71, pp. 1-13 (2016)
2. T.Nakashima, T.Shiratori, Y.Murai, Y.Tasaka, Y.Takeda, E.J.Windhab, Viscoelastic responses of flow driven by a permeable disk investigated by ultrasound velocity profiling technique, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.48, pp.97-103 (2016)
 3. J.Ohkubo, Y.Tasaka, H-J.Park, Y.Murai, Extraction of 3D vortex structures from a turbulent puff in a pipe using two-color illumination and flakes, *Journal of Visualization* (2016)

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 村井祐一, 武田 靖, 糸野博行, 田坂裕司, 大石義彦, 風車バードストライク防止のための鳥種識別機能をもつリアルタイム野鳥検知システム, 第 26 回環境工学総合シンポジウム講演会講演論文集, pp.335-336(2016)
2. 村井祐一, PIV と PTV の双方を利用できるような可逆的な画像変換, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, J0510106, pp.1-2 (2016)
3. 竹内 桃, 大石 義彦, 河合 秀樹, 村井 祐一, 渦輪の固体平壁面衝突時における圧力場変動, 可視化情報全国講演会 2016(日立)講演論文集, No. A106, pp.1-2(2016)
4. 村井祐一, 磯田 龍, 大須賀 侑, 田坂裕司, 西田親文, 双発プロペラ風車がつくる気流構造の風洞モデルによる可視化, 可視化情報全国講演会 2016(日立)講演論文集, No. C110, pp.1-2(2016)
5. 菅野優平, 田坂裕司, 村井祐一, 翼の負圧面により誘起される大流量二次流れの可視化, 可視化情報全国講演会 2016 (日立)講演論文集, No. C111, pp.1-2(2016)
6. 大須賀 侑, 田坂裕司, 村井祐一, ツイストサボニウス風車の出力機構解明に向けた流れ場の三次元可視化解析, 日本機械学会第 94 期流体工学部門講演会講演論文集, No.0911, pp.1-4 (2016)
7. 大友衆示, 大須賀侑, 田坂裕司, 村井祐一, Petr Denissenko 乱流中におけるサボニウス風車周りの流れに関する研究, 日本機械学会北海道支部第 54 回講演会講演論文集, pp.79-80(2016)
8. 村井祐一, 風力発電の光と影, 北海道大学工学研究院主催平成 28 年度市民公開講座 機械工学のフロントライン第 6 回講座 2016.7.27 (2016)
9. Y.Murai, N.Yonezawa, Y.Oishi, Y.Tasaka, T.Yumoto, Color particle image velocimetry improved by decomposition of RGB distribution integrated in depth direction Proc. ASME- JSME- KSME Joint Fluids Engineering Conference, No.20189 (2015)
10. Y.Oishi, T.Oda, Y.Tasaka, Y.Murai, Grid free pressure field measurement by particle tracking velocimetry Book of Abstracts, 11th International Symposium on Particle Image Velocimetry, p.88, Full paper in USB; Pressure II, pp.1-8 (2015)
11. Y.Murai, Y.Takeda, H.Kumeno, and Y.Okamoto, Optical bird detection and species identification for prevention of bird strikes in wind farms, Proc. International Conference of Power Engineering -15 (ICOPE-15 Yokohama), CDROM, No. 1013, pp.1-9 (2015)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

村井祐一 (MURAI, Yuichi)
北海道大学・工学研究院・教授
研究者番号：80273001

(2)研究分担者

田坂裕司 (TASAKA, Yuji)
北海道大学・工学研究院・准教授
研究者番号：00419946

大石義彦 (OISHI, Yoshihiko)
室蘭工業大学・工学研究科・助教
研究者番号：90617078