

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17970

研究課題名(和文) 風車群上乱流の制御と種々の影響に関する研究

研究課題名(英文) Numerical simulation study on wind-turbine array boundary layers

研究代表者

鈴木 博貴 (Suzuki, Hiroki)

山口大学・創成科学研究科・助教

研究者番号：10626873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、解析方法として数値解析を適用しており、従来導入または提案されてきた解析手法にもとづくのみならず、これまでに無い新しい観点からももついた数値解析を進め、当該研究によって粘性項の発散の影響がはじめて明らかにされている。風車群上乱流に及ぼし得る因子として、上空の乱れ(主流乱れ)があり、われわれは周期的解析解の適用に着目した。従来知の解析解を用いて、新しい解析解を複数導出することができた。また、主流の圧力勾配の影響についても、着目された。二方程式モデルを用いることで、影響を厳密に解析し近似解もまた導かれた。これらの成果は、査読付き論文として、また国内外の学会で発表されている。

研究成果の概要(英文)：We have applied the framework of numerical simulation to solving the present issues, where we firstly investigate effects of non-solenoidal viscous terms on the simulation results. In the present simulation, we introduce the original technique as well as techniques which are previously proposed. We focus on effects of free-stream turbulence, which could affect flow fields of the boundary layer. By using exact solutions previously proposed, we could derive some exact solutions of incompressible flow. Also, we address effects of mean pressure gradient on the turbulent flow. By using two equation modeling, we could analyze the effects and could derive some solutions describing the effects. There results are published in the peer-reviewed journals and are presented in the conferences of fluid mechanics.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 乱流 風車 壁面乱流 数値解析

1. 研究開始当初の背景

風力発電は自然エネルギーを利用した発電方法として認識されており、近年は導入も進んでいる。風力発電では、風車の大型化がすすんでおり、このような風車の設置場所として、洋上が適切と認識されているように見受けられる(洋上ウインドファームとも呼ばれる)。洋上では発電上生じる騒音の影響も小さいことも、適切と認識されている理由の1つである。このような風車群上には、大きいスケールの壁面乱流が形成される。洋上の風車群による出力や風車の疲労を制御するために、風車群上乱流の制御が求められている。この課題は、電力に係る社会インフラに関係し、重大な取り組むべき課題と見受けられる。

風車周り流れについては、風車後流や翼面上の流れがこれまでよく着目されてきている一方で、風車群上乱流については研究が進んでいない様に見受けられる。この要因は、風車群上乱流の実験計測が困難であることにある。近年、LESにもとづく数値解析を適用して、風車群上乱流を解析する研究が着目され始めている。このような解析では、風車をアクチュエータでモデル化して、数値解析の計算領域内に設置している。一方、乱流研究においては、粗面壁上に形成される壁乱流について長らく研究されてきている。これは工学的な観点を多く含み、実験計測から数値解析まで、数多くの研究が存在している。

2. 研究の目的

先行研究は、風車群上乱流の解析を行ったが、この研究はまだ始まったばかりであり、未解決の課題が複数あるように見受けられた。壁面乱流に関する先行研究をフォローすることで、主流乱れの影響や圧力勾配の影響について、解かれるべき課題があるように見受けられた。これらは、乱流研究についてこれまで取り組まれてきた課題である。加えて、数値解析手法自体についても、これまでの研究により十分に知見が蓄積されてきているが、依然として、未解決課題があると見受けられ、それらは、粘性項の発散と解析解の適用である。風車群上乱流の解析は、社会的にも社会インフラの観点や環境問題の観点から、インパクトが大きいと見受けられるため、その数値解析は高い信頼性を有することが必要であると考えられる。

これらを踏まえ、まず粘性項発散の影響についてその理解を深めて影響を明らかにし、加えて、数値解析を十分に検証するため解析解について研究をすすめることに取り組まれるべきである。この中で、数値解析の精度向上の方策についても模索していく。加えて、風車群上乱流の制御および関係する影響を解明するために、主流乱れの影響や圧力勾配の影響に着目し、これを明らかにするように研究に取り組んでいく。ここで我々は、数理解析の強力さに着目し、数式で現象を表せるように、研究に取り組んでいく。

3. 研究の方法

本研究が対象とする流れの流体は非圧縮性を有する。このような流体の流れは、質量保存を表す連続の式と運動量の保存を表すナビエ-ストークス方程式とに従う。ナビエ-ストークス方程式は非線形性を有するために解析的に解を求められる流れ場は極めて限られ、多くの問題においては数値解析でもって求解されることになる。本研究は、両方程式の連立に部分段階法を用い、空間差分には有限差分法を用いている。ここで過去の研究を踏まえ、非線形項に離散化に十分に注意を払っている。これらの方法はこれまでに研究分野において実績があり、信頼性の高い結果を得ることができると期待される。

本研究において用いられる数値解析を検証している。検証は、過去の数ある研究を踏まえて、平行平板間乱流を対象とした解析結果を用いている。図1に、検証結果を示す。

図1には、レイノルズ応力と呼ばれる、流れが乱流状態にある場合に生じるせん断応力を当研究の数値解析で得た結果を、2つの先行研究の結果と比較している。このレイノルズ応力において、乱れの特徴が重大に表されるが、本研究の結果は先行研究のそれと一致していることから、本研究の解析結果の信頼性が十分であることが確認される。

風車群上乱流を数値解析する方法は、Calaf et al. (2011)の数値解析系にもとづき構成した。大気境界層は地衡流平衡が存在するが、それよりも小さいスケールの壁面乱流を対象とし、彼らの研究の中にあるように近似モデルとして、圧力勾配により流れが駆動される物とした。地表面での乱流せん断応力は、先行研究と同様の手法を採用した。ここでは、地表面付近において対数則が成り立つことが導入されている。風車群については、個々の風車をアクチュエータディスクとしてモデル化しており、これを用いて風車群上の乱流を発生させている。流れ場はLES解析によって解かれるが、ここで標準スマゴリンスキーモデルを用いている。このモデルは、長らく大気境界層の数値解析に適用されており、十分な実績があると判断された。

4. 研究成果

まず粘性項発散が数値解析結果に及ぼす影響について述べる。粘性項発散とは、粘性項の発散をとった量である。これまで非圧縮性流体解析では、速度発散が主に着目されてきた。粘性項発散は、速度発散が誤差をもち非ゼロの場合に、その影響を増幅して流れ場を改変させるものと見受けられる。この影響の特徴は、空間分解能の増加とともに影響が大きくなる点である(図2)。通常の数値解析では、空間分解能を可能な限り高めて解析を行うが、粘性項発散の影響が存在する場合には、空間分解能を高めるほどその影響が大きくなり、流体の運動エネルギーを減少させる等の影響を生じさせる。

粘性項発散の影響解析においては、周期的解析解が活用されている。これまで知られているこの解は、流れ場が大域的に等方であり、また非定常であった。本研究は主流乱れを設定する境界条件として、解析解を用いるが、これらの課題を解決させることで、より多様に主流乱れを設定できるかもしれない。本研究の結果、まず先行の解析解を用いることで、異方性を任意に設定できる解析解を導くことに成功した。図3にあるように、2つのパラメータを用いて、大域的異方性を任意に設定できる。加えて、外力項に着目し、リアフォーシング法 (Lundgren, 2003) を用いることで、周期的解析解の流れ場の定常化に成功した。

本数値解析では有限差分法が適用されている。この方法のメリットとして主なものは、風車のアクチュエータディスクを設定する際に外力項の扱いが容易であることや、計算コストや少ないことにある。デメリットは、高波数変動の解析が低下する傾向にあることである。先行研究に着目し、SGS成分を活用した高波数変動の解析精度向上の可能性を模索した。研究の結果、有限差分法に適用に起因する値の過小評価を補償することが可能であり、その補償量は、空間格子刻みのべき関数で表されること、そのべき数は精度次数に依存することが示された。これを用いることで、これまでよりも信頼性ある解析を実行することが可能になった。

加えて圧力勾配の影響についても解析した。圧力勾配は、乱れ自体に対して影響を及ぼすと考えられることから、それを解析することを行った。二方程式モデルを用い、影響を厳密に解析するため、影響の定式化を行った。定式化は、圧力勾配による加速が弱い場合において可能であることがわかり、この場合に、圧力勾配が乱流エネルギーおよび散逸に及ぼす影響を定式化することができた。影響は、乱流の減衰時間スケールに圧力勾配が影響することで、影響が乱流エネルギーと散逸とで異なり (図4)、2つの指数関数の組み合わせにもとづく式で表される。また、影響は、圧力勾配の主流方向変化に形式に依存し、変化の関数の次数が上がるほど影響が大きい。

これらの結果にあるように、またこれらの結果を踏まえて、風車群上乱流に及ぼす種々の影響に関する研究を行った。今後の展望として、当該研究により得られた結果をさらに発展させていくべきと見受けられるが、今後の研究においては、数値解析に加えて実験計測もまた必要であると見受けられる。数値解析では、風車周りの流れにモデルが導入されているため、それは検証されているとはいえ、課題が潜在している可能性を否定できない。しかしながら、実スケールの実験計測は困難であるため、実スケール数値解析と風洞実験の実験計測を接続するような解析、それは数値解析にもとづくかも知れない、が必要だと見受けられる。

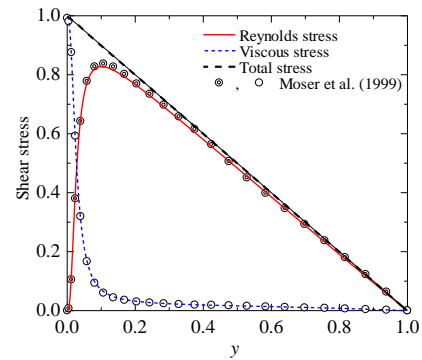


図1 数値解析の検証に関する結果。

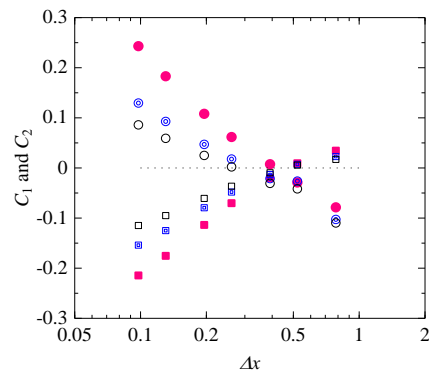


図2 粘性項発散の影響. C_1 および C_2 は影響を定量化する定数. Δx は空間刻み幅。

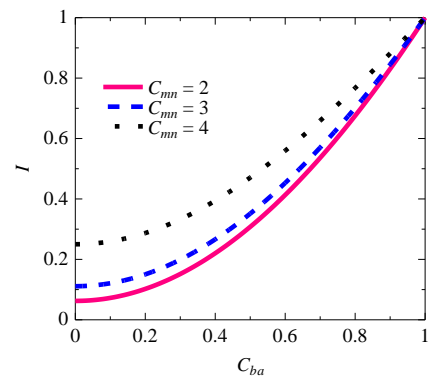


図3 周期的異方性解析解の異方性. ここで、 C_{mm} は波数比、 C_{ba} は振幅比。

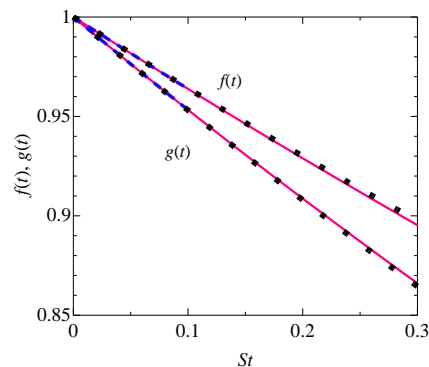


図4 圧力勾配が主流乱れに及ぼす影響. $f(t)$ および $g(t)$ は乱流エネルギー及び散逸に生じる影響. S は加速率. t は時間。

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 5 件)

① Hiroki Suzuki, Shinsuke Mochizuki, and Yutaka Hasegawa, Validation scheme for small effect of wind tunnel blockage on decaying grid-generated turbulence, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.11, 2016, paper No. 16-00257. DOI:http://doi.org/10.1299/jfst.2016jfst0012

② Hiroki Suzuki, Shingo Hattori, Shinsuke Mochizuki, and Yutaka Hasegawa, Basis study on the output-voltage variation of constant-temperature anemometry at freestream velocity, Advanced Experimental Mechanics, 査読有, Vol.1, pp. 36-41. DOI:http://doi.org/10.11395/aem.1.0_36

③ Hiroki Suzuki, Shinnosuke Matsuo, Shinsuke Mochizuki, and Yutaka Hasegawa, Effect of fluid acceleration due to area reduction of a wind tunnel on temporally and spatially decaying grid turbulence, Advanced Experimental Mechanics, 査読有, Vol.1, pp. 15-22. DOI: http://doi.org/10.11395/aem.1.0_15

④ Hiroki Suzuki, Shingo Hattori, and Shinsuke Mochizuki, Numerical investigation using an exact solution of the effects of non-solenoidality of the viscous terms on the incompressible flow, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.12, paper No. 16-00257. DOI:http://doi.org/10.1299/jfst.2017jfst0001

⑤ Hiroki Suzuki, Kenji Fujita, and Shinsuke Mochizuki, Validation scheme for effects of wind-tunnel blockage for spatially varying acceleration parameter, Advanced Experimental Mechanics, 査読有, Vol.2, 印刷中

[学会発表] (計 4 件)

① 野村和伸, 鈴木博貴, 望月信介, 非圧縮性流体解析における空間分解能補償に関する基礎検討, 日本機械学会中国四国学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 6 日, 広島工業大学 (広島県広島市)

② 四方良明, 鈴木博貴, 望月信介, 格子乱流風洞の閉塞効果検証に関する研究, 日本機械学会中国四国学生会 第 47 回学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 6 日, 広島工業

大学 (広島県広島市)

③ Hiroki Suzuki and Shinsuke Mochizuki, Simple model of decay of homogeneous turbulence affected by weak fluid acceleration, The 20th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2016 年 12 月 5 日-8 日, 西オーストラリア大学 (オーストラリア国パース市)

④ 池田隼人, 鈴木博貴, 望月信介, 異方向性を有する解析解を用いた非圧縮性流れにおける粘性項発散の誤差の影響調査, 日本機械学会 第 94 期流体工学部門講演会, 2016 年 11 月 12 日-13 日, 山口大学 (山口県宇部市)

[図書] (計 1 件)

① Fractal Analysis - Applications in Physics, Engineering and Technology [Analysis and Application of Decaying Turbulence with Initial Fractal Geometry], Fernando Brambila 編著, Hiroki Suzuki, Shinsuke Mochizuki, Yasuhiko Sakai, and Koji Nagata, 共著者他, I n T e c h, 査読有, 印刷中

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 博貴 (SUZUKI, Hiroki)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教

研究者番号: 10626873