

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：17201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K04195
研究課題名（和文）ダウンウィンド風車のロータ～タワー空力干渉を包含する拡張翼素・運動量理論の開発

研究課題名（英文）Development of Extended BEM Method Which Includes the Rotor-Tower Aerodynamic Interaction of Downwind Turbines

研究代表者
吉田 茂雄（Yoshida, Shigeo）

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授

研究者番号：80620137
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：膨大なケースの時刻歴の空力弾性解析が必要な風車の設計においてはデータの生産性の高い翼素・運動量（BEM）理論が用いられている。本研究では、将来の風車の超大型化・低コスト化に必要な従来の以下の3つのBEMの設計・解析モデルを開発した。1) 薄翼理論による動的失速モデル，風速上昇も考慮するタワー後流モデル等によるロータ～タワーの空力干渉モデル。2) 一つのタワー上に多数の風車を設置するマルチロータシステムの設計に必要な空力弾性解析コード。3) 風車の回転部と固定部の干渉が顕著なディフューザ付風車のディフューザ形状の最適化手法。

研究成果の学術的意義や社会的意義
データ生産性が高く，風車の設計・解析に必要な構造変形や制御との併用に適している翼素・運動量理論に，運動量理論，揚力線理論，薄翼理論などを組み合わせることにより，高フィデリティの解析を再現する従来にないモデルを開発した点で学術的に重要な成果である。
また，本成果は国際エネルギー機関IEA Windに推奨方法として提案しており，将来の超大型の浮体式洋上風車の安全性・経済性の向上に寄与することが期待できる点で，社会的な意味も大きい。

研究成果の概要（英文）：Design and analysis models and methods were developed in this research to extend the blade-element and momentum (BEM) theory, which is a conventional design and analysis method for wind turbines. 1) blade dynamic load based on the dynamic stall model of the thin airfoil theory, with the tower wake model. 2) aeroelastic coupled analysis code which is applicable for multi-rotor systems. 3) definition of the diffuser total efficiency and diffuser optimization method. They are expected to contribute for enlargement and cost reduction of wind turbines in the future.

研究分野：流体機械

キーワード：風力発電 風車 ロータ ダウンウィンド タワーシャドウ 翼素・運動量理論 荷重 モデル

1. 研究開始当初の背景

風力発電の大幅な導入拡大が期待されているが、それには、風車の超大型化と発電コストを半減させるような大きな技術革新が必要である。そのひとつが、タワーの風下側にロータを配したダウンウィンド風車である。今日の風車市場のほぼ 100% をタワーの風上側にロータを配したアップウィンド風車が占める中、ダウンウィンド風車は、空力安定性が高く、ブレード剛性要求が低いことから、将来の超大型風車や浮体式洋上風車の軽量化・低コスト化に適した技術として注目されている。ここで、タワー後流の局所的に低風速・高乱流の領域をブレードが通過する際の空力干渉によって生じるの衝撃的な変動荷重（タワーシャドウ効果）の推定法が課題である。特に、風車の設計においては、風車の空力・構造特性、制御（起動/発電/停止/待機）、風車の状態（正常/故障）、風況（風速、乱れ、突風等）などの数多くの条件（陸上用の風車でも数千ケース）の時刻歴応答解析が必要となるため、設計荷重の計算には、解析負荷の低い翼素運動量（BEM）理論が一般に使用されている。これまで、翼端損失等の様々なモデルが開発され、解析精度と適用範囲を改善させてきたが、ロータとタワーなどの非回転部との空力干渉に関して有効なモデルは確立されていない[1]。また、タワー以外の非回転部との空力干渉についても、十分なモデル化がされていない。

2. 研究の目的

本研究では、将来の風力発電の大型化・低コスト化に有望視されるダウンウィンド風車の最大の技術課題であるロータ～タワー空力干渉を包含する拡張 BEM 理論を開発し、これらの空力干渉を考慮したダウンウィンド風車の設計指針を得る。

3. 研究の方法

本研究の 3 つのサブテーマの研究方法を以下に示す。

3.1 ブレード変動荷重モデル

(1) モデル化

本研究では、以下で構成するダウンウィンド風車ブレードがタワー後流を通過する際の変動荷重のモデルを開発した。

- ・薄翼理論による動的失速モデル。
- ・局所的な風速増加を考慮したタワー後流モデル。
- ・タワー周辺の風速の増加を考慮したタワーウェイクへのブレードの侵入条件。

(2) 検証

上記で定式化したモデルの妥当性を風洞試験で検証する。

3.2 空力弾性解析法の開発

(1) 解析法

以下の特徴を持つ風車の空力特性解析法を開発した。

- ・ブレード、タワーの構造変形、ならびに、風車の制御の考慮（一般的なもの）。
- ・マルチロータシステム対応可能。

(2) 検証

一般的な風車の先行研究で検証し、シングルロータとツインロータの解析により両者を評価した。

3.3 ディフューザ最適化手法

(1) 最適化手法

風車の回転部と固定部の空力干渉問題の代表であるディフューザに関して、以下を特徴とする最適化手法を開発した。

- ・一般化翼素運動量理論によるディフューザ単独でのディフューザ総合効率の定義。
- ・ディフューザ総合効率を最大化するディフューザ形状の最適化手法の確立。

(2) ケーススタディ

上記を使用して、ディフューザ効率とディフューザ総合効率の各々を最大化するディフューザを定義し、両者を比較評価した。

4. 研究成果

4.1 ブレード変動荷重モデル[2]

4.1.1 モデル定式化

(1) 動的失速モデル

本研究では、動的タワーシャドウモデルに薄翼理論[3]を導入する。

(2) タワー後流モデル

本研究では Moriarty[4]のモデルを使用する。このモデルは、他の各種モデルに対して、後述のタワー後流外縁部の増速域を考慮するほか、タワーの抗力係数を陽に含むこと、ならびに、経験的なパラメータを含まない点で、本研究の目的に合致している。

(3) タワーシャドウ侵入条件

タワー後流の判定条件は、式(1)の s の起点を決定する。Munduate は $u < 0$ としていたが、後述のように、タワーシャドウ入口における条件を満たしていない。これを勘案し、本研究では $u \neq 0$ とする。

4.1.2 解析条件

前章のモデルを、Munduate らの風洞試験により検証を行った。試験は、直径 1.0 m の 2 枚翼風車モデルを使用した。これは、翼弦長 0.1m、捩れ角 12 deg で、タワーの直径は 0.07 m と 0.14 m の 2 種類である。これに対して、風速 9.0m/s、ロータ速度 918min⁻¹、周速比 5.3、タワー抗力係数 1.2 の条件で検証を行った。

4.1.3 解析結果

上記を改善するため、本研究では符号にかかわらず u が変化を開始する点 ($u \neq 0$) をタワー後流の基点とした。その結果を Fig 1 の “KU” で示す。なお、“UG” は Munduate による実験・解析の結果である。動的計算 (Unsteady) では静的計算 (Steady) の上昇よりも鈍化し、風洞試験の結果により近づいている。また、タワーシャドウによる揚力係数の最低値は、値、位相ともに、風洞試験とほぼ一致している。なお、タワーシャドウの後半の回復は風洞試験に対して緩慢であるが若干改善している。全般的に、Munduate のモデルよりも風洞試験に対する一致は改善している。

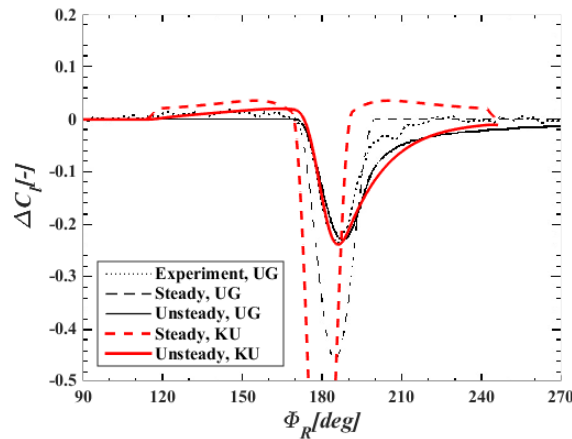


Fig 1 Steady and Unsteady Lift Coefficient around the Tower Shadow ($u \neq 0$)

4.1.4 まとめ

- Moriarty のタワー後流モデル、薄翼理論による動的失速モデル、ならびに、新しいタワー後流侵入条件 ($u \neq 0$) を特徴とするタワーシャドウ中の動的失速モデルを開発した。
- Munduate の風洞試験により、このモデルは、タワー後流への侵入前の揚力の増加、後流への出入りにおける非対称性、揚力係数の最小値とその位相をよく再現することを確認した。
- 本モデルにより、大型風車では、動的タワーシャドウによる荷重の変動は低下することが示唆された。

4.2 空力弾性解析法の開発[5][6]

4.2.1 解析法概要

ブレードとタワーの構造モデルとしてモーダル法を適用した。これは比較的少ないパラメータで振動を表現することができるため、解析負荷の軽減に有効である。また、空力モデルには、BEM を使用し、ここで、構造変形の影響を考慮することで両者をカップリングする。また、本解析法では、ドライブトレインの特性も考慮しており、発電機トルク制御とブレードピッチ制御

の効果を考慮することができる。

4.2.2 検証

5 MW の標準モデルに対して本解析法ならびに、解析モデルを検証した。空力特性、構造特性など、ほぼ一致することを確認した。

4.2.3 ケーススタディ

マルチロータシステムの最も簡単な例として、ツインロータの空力弾性解析を行った。ツインロータでは質量が増加するため、両者のタワー前後方向の固有振動数がほぼ一致するように、タワーの直径と板厚を修正した。

これらのモデルに対して、乱流下の時刻歴応答解析を実施した。

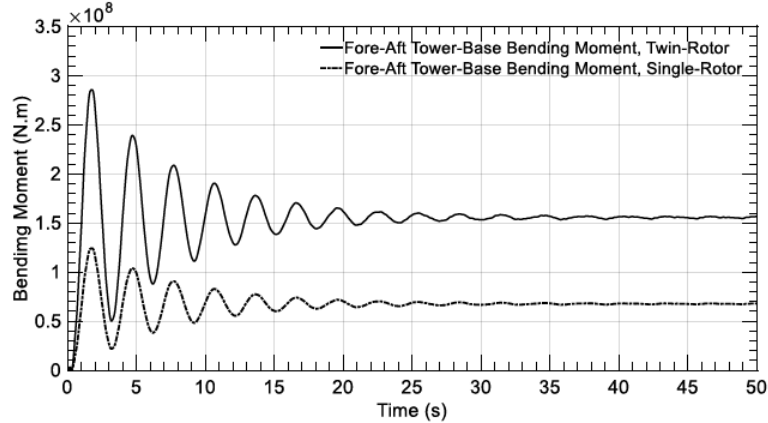


Fig 2 Tower Base Fore-aft Bending Moment

4.2.4 まとめ

- ・マルチロータシステムに適用可能な空力弾性解析ツールを開発し、一般的なシングルロータの風車で従来の解析法とほぼ一致することを確認した。
- ・同じ風車を1基ならびに2基搭載し、タワー前後方向の1次曲げの固有振動数を一致させたシングルロータとMRSのケーススタディを実施し、ツインロータの場合には、タワーの振れが非常に重要になることなどを明らかにした。

4.3 ディフューザ最適化手法[7]

4.3.1 ディフューザ総合効率

(1) ディフューザ効率

$$\eta_D \equiv \frac{C_{p_{\max}}}{16/27} = 2 \int_0^1 (1 - a_0) \eta d\eta = \mu_0 \quad (1)$$

ここで、 μ_0 はディフューザ単独でのロータ面平均の風速の増速比であり、ディフューザ効率はこれと一致する。

(2) ディフューザ総合効率

式(1)より、ロータとディフューザの掃引面積を基準とした総合パワー係数は、 $h/D \ll 1$ の条件で以下のように近似できる。

$$\eta_{TD} \equiv \eta_D \frac{S_R}{S_D} \approx \mu_0 \left(1 - 4 \frac{h}{D} \right) \quad (2)$$

ここで、 S_D は、ディフューザ外縁までの掃引面積である。上式のように、ディフューザ総合効率は μ_0 に比例する項とディフューザ形状の h/D に応じて低下する項の積により得られる。

4.3.2 最適化法

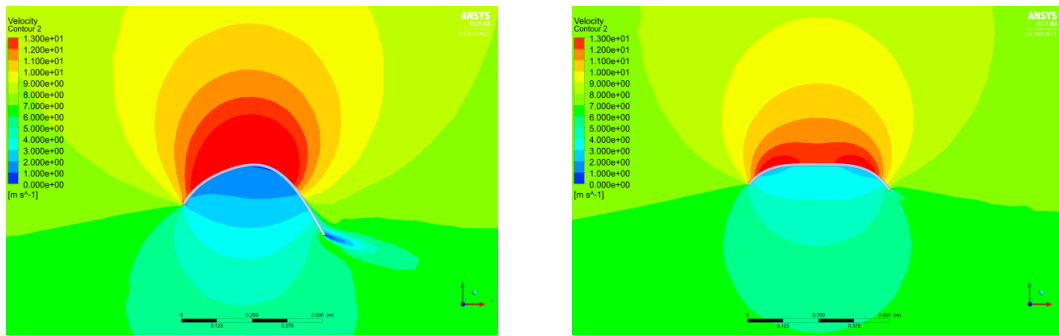
形状の最適化には、ディフューザ総合効率を最大化する形状を遺伝的アルゴリズムで決定した。なお、参考として、ディフューザ効率を最大化する形状についても同様の解析を実施した。

解析には ANSYS CFX を、乱流モデルには $k-\omega$ SST を使用し、風速 7m/s、ディフューザ翼弦長/ロータ直径比 $c/D = 0.10$ にて最適化を行った。

- Leading edge height (y_{CLE}): 0.0 (fixed)
- Crest height at 50% c (y_{CC}): 0.1 c –0.3 c
- Trailing edge height (y_{CTE}): -0.3 c –0.0 c
- Leading edge inclination (y'_{CLE}): 0.0–2.0
- Crest inclination (y'_{CC}): 0.0 (fixed)
- Trailing edge inclination (y'_{CTE}): -2.0–-0.5

4.3.3 最適化結果

ディフューザ効率最大とディフューザ総合効率最大の形状と風速分布を次図(a)と(b)に示す。(a)は大きく湾曲した形状で、ロータ面のある50%翼弦長付近で風速が高くなっている。それに対して、(b)では(a)ほど風速は高くないが、全体的に扁平でディフューザ面積を最小に保ちする高い増速率が得られていることが分かる。



(a) Max. Diffuser Efficiency.

(b) Max. Diffuser Total Efficiency

Fig 3 Wind Speed Distributions of the Typical Diffuser Sections

4.3.4 まとめ

- 一般化アクチュエータディスク理論に基づき、ディフューザ外縁の掃引面積を基準としたディフューザ総合効率を定義し、CFDによりそれを最大化する形状を求めるディフューザ最適化手法を確立した。
- 翼弦長直径比 0.1, クレスト位置 50%翼弦長, 翼厚比 2%の平板によるケーススタディでは、ディフューザ効率最大とディフューザ総合効率最大の断面形状では全く異なることが示された。なお、得られたディフューザ総合効率は最大値 1.087 であった。

参考文献

- [1] Yoshida, S. and Kiyoki, S., Load Equivalent Tower Shadow Modeling for Downwind Turbines, Journal of JSME (B) Vol.73, No.730, 2007, pp.1273-1279.
- [2] Shigeo Yoshida, Dynamic Stall Model for Tower Shadow Effects on Downwind Turbines and Its Scale Effects, energies, 10.3390/en13195237, 1-19, Energies 2020, 13, 5237, 2020.
- [3] Munduate, X., Coton, F.N., Galbraith, R.A.M., An Investigation of the Aerodynamic Responses of a Wind Turbine Blade to Tower Shadow, J. Solar Energy Engineering, 126, 1034-1040, 2004.
- [4] Moriarty, P.J. and Hansen, A.C., AeroDyn Theory Manual, NREL/EL-500-36881, National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [5] Amr Ismaiel, Shigeo Yoshida, Aeroelastic Analysis for Side-Boom of a Coplanar Twin-Rotor Wind Turbine, International Review of Aerospace Engineering, <https://doi.org/10.15866/irease.v13i4.18355>, 14, 4, 2020.
- [6] Amr Ismaiel, Shigeo Yoshida, Aeroelastic Analysis of a Coplanar Twin-Rotor Wind Turbine, energies, doi:10.3390/en12101881, 12, 1881, 1-21, 2019.
- [7] Shigeo Yoshida, Masataka Motoyama, Peter Jamieson, Koji Matsuoka, Diffuser Total Efficiency Using Generalized Actuator Disc Model and Its Maximization Method, Energies, <https://doi.org/10.3390/en14040813>, 14, 813, 16-1, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shigeo Yoshida	4. 巻 13
2. 論文標題 Dynamic Stall Model for Tower Shadow Effects on Downwind Turbines and Its Scale Effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 energies	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en13195237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Amr Ismaiel, Shigeo Yoshida	4. 巻 4
2. 論文標題 Aeroelastic Analysis for Side-Boom of a Coplanar Twin-Rotor Wind Turbine	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Review of Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 135-140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15866/irease.v13i4.18355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Shigeo Yoshida, Masataka Motoyama, Peter Jamieson, Koji Matsuoka	4. 巻 4
2. 論文標題 Diffuser Total Efficiency Using Generalized Actuator Disc Model and Its Maximization Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 energies	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en14040813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Amr Ismaiel, Shigeo Yoshida	4. 巻 12, 1881
2. 論文標題 Analysis of a Coplanar Twin-Rotor Wind Turbine	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 energies	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en12101881	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉田茂雄
2. 発表標題 IEA Wind Task 40 Downwind Turbine Technologies研究成果報告
3. 学会等名 第43回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田茂雄, 賀雨晴, 朱洪忠, Amr Ismaiel
2. 発表標題 マルチボディダイナミクスと遺伝的アルゴリズムによるマルチロータシステムの空力弾性解析・支持構造最適化ツールの開発
3. 学会等名 第42回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田茂雄, 本山雅孝, 劉盈溢
2. 発表標題 CFDと遺伝的アルゴリズムによるディフューザ総合効率の最大化手法の開発
3. 学会等名 第42回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田茂雄, 豊福 皓宣, 本山 雅孝, Amr Halawa, 劉 盈溢, 大屋 裕二
2. 発表標題 ディフューザ付風車の総合パワー係数を最大化するディフューザ形状
3. 学会等名 第41回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Amr Ismaiel, 賀 雨晴, 吉田 茂雄
2. 発表標題 マルチロータ風力発電システムの空力弾性解析ツールの開発
3. 学会等名 第41回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 茂雄, Amr Halawa
2. 発表標題 ダウンウィンド風車の動的タワーシャドウモデルとそのスケール効果
3. 学会等名 第41回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Jorgensen, B.H. et al., Shigeo Yoshida (Task 40分担執筆), ほか	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IEA Wind	5. 総ページ数 54
3. 書名 IEA Wind Technology Collaboration Programme Annual Report 2019	

1. 著者名 Murphy-Levesque, C., et al. (編集), Shigeo Yoshida (Task 40分担執筆), ほか	4. 発行年 2019年
2. 出版社 PWT Communications	5. 総ページ数 57
3. 書名 IEA Wind Technology Collaboration Programme 2018 Annual Report Summary and Task Updates	

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学研究者情報（吉田茂雄）
<https://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K004957/index.html>

九州大学応用力学研究所再生可能エネルギー複合利用分野ホームページ
<https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/REC/reiu.html>

IEA Wind Task 40ホームページ
<https://iea-wind.org/task40/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 International Joint Research, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Downwind Turbine Technologies, Model Development and Verification	開催年 2019年～2021年
--	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------