

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06688

研究課題名(和文) 二重反転垂直軸タービンを用いた浮体式洋上風力発電システムの連成解析による基礎検討

研究課題名(英文) Basic study on a floating offshore wind power generation system using a counter-rotating vertical axis-type wind turbine through a coupled analysis

研究代表者

涌井 徹也 (Wakui, Tetsuya)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40339750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：風力発電の普及促進を図るために二重反転型垂直軸タービンを用いた浮体式洋上風力発電システムの開発を念頭に置いた空力-弾性-制御連成解析モデルの開発を行った。開発の第1段階として直線翼垂直軸型風力タービンを用いた陸上設置式システムの乱流変動風況下での連成挙動の解明を行った。これより、二重反転垂直軸型タービンを設計する際の有益な知見を得ることを目的とした。数値解析を通して、高風速下では回転周波数の翼枚数倍の変動がタービントルクに大きく現れ、弾性振動や荷重変動に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the present study, an aero-elastic-control coupled simulation model for a vertical axis wind turbine-generator system was developed to with the analysis of a floating offshore wind power generation system using a counter-rotating vertical axis-type wind turbine in mind. As the first phase of our study, the coupled behavior of a land-based straight-wing-type vertical axis wind turbine-generator system under turbulent wind variations was analyzed to obtain basic knowledge for a counter-rotating vertical axis-type wind turbine. The numerical analysis revealed that the variations in the turbine torque with the frequency corresponding to three times as much as the rotation frequency greatly influence the elastic vibration and load variations at high wind speeds.

研究分野：エネルギー学

キーワード：浮体式洋上風力発電 洋上風力発電 垂直軸型風力タービン 連成解析

1. 研究開始当初の背景

化石燃料の使用によるCO<sub>2</sub>排出量の増加を低減するべくウィンドファーム(集合型風力発電設備)の建設が世界中で進んでいる。日本でも2014年3月に策定されたエネルギー基本計画に基づいて、風力発電の中・長期的な視野での大規模な導入が求められている。ウィンドファームの建設には、良好な風況、広大な土地、大容量送電線、道路インフラの全てが必要になる。日本でこれらの条件を満たす場所は陸上では既に限界に達しつつあり、今後は建設場所を洋上に移行せざるを得ない状況にある。しかし、日本の沿岸部はわずかな離岸距離で水深が深くなるという特徴がある。水深の深い洋上では、海底に設備基礎を設置する『着床式』を導入するとコストが高くなるため、浮体の上に風力発電設備を設置する『浮体式』が有効と考えられている。しかし、浮体式システムでは風や波により浮体が大きく動揺することから、風力発電設備の運転特性も考慮した浮体の安定化技術の確立が必要となっている。

浮体式洋上風力発電は開発段階にあり、研究開始当初は日本でも実証試験が始まった所であった。商用機として普及が進んでいる水平軸型タービンをを用いているため、風力タービン、増速機、発電機などの重量物が浮体の最上部に設置されることになり、浮体の安定性の確保に大きな課題がある。一方、垂直軸型タービンを浮体式に用いる場合には、重量物をタワー底部(浮体の動揺中心付近)に設置できること、風向に依存せず出力を発生できること、さらにはジャイロモーメントを利用できることなど優位な点が多い。しかし、垂直軸型タービンは陸上式でも普及が進んでいないことから実証段階には程遠く、国内外で縮小モデル実験が進められているに過ぎなかった。また、垂直軸型タービンを浮体に搭載した場合には、回転時に生じるカウンタートルクによって浮体にねじり動揺が発生する。その結果、タワー基礎部と係留チェーンの強度を上げる必要があり、導入コストの増加に繋がると考えられる。

2. 研究の目的

申請者は、相反転する2つの垂直軸型タービンを鉛直方向に直列配置することでカウンタートルクを相殺させることに着目している。二重反転式の回転軸および発電機の研究開発も進んでいるため、技術的な実現可能性は高いと考えられる。二重反転垂直軸型タービンをを用いた浮体式システムを実用化するためには、様々なタービンの設計条件および運転条件下でのシステムの静・動特性を解明する必要がある。そこで本研究では、二重反転垂直軸型タービンの基本特性を解明することを念頭に置いた空力-弾性-制御連成解析モデルを開発し、第1段階として直線翼垂直軸型風力タービンをを用いた陸上設置式システムの乱流変動風況下での連成挙動の解

明を行った。これより、二重反転垂直軸型タービンを設計する際の有益な知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 対象システム

解析対象とする直線翼垂直軸型風力発電システムの構成を図1に示す。直線翼垂直軸型タービンには増速機を介して発電機が接続される。増速機および発電機は電力変換機器や制御装置と共に低位置に設置される。システムの主要な弾性要素として、タービン翼、ストラット翼、回転軸、およびドライブトレインなどが挙げられ、ローターの回転中に曲げやねじりなどの弾性振動が生じる。

タービン翼は固定ピッチとするため、発電機トルクを操作することでローター回転数を制御する。低風速域ではパワー係数が最大となる周速比で運転が行えるように可変速運転を行う。高風速域では風速によらず定格回転数を保持する定速運転を行う。

(2) 連成解析シミュレーションモデル

空力-弾性-制御連成解析の概要を図2に示す。連成解析モデルは垂直軸型タービンの空力サブモデル、弾性振動サブモデル、および制御サブモデルより構成され、非線形連立微分代数方程式で表せる。垂直軸型タービンの空力特性は流入風速、ローター回転数、アジマス角、弾性要素の変位などに対する非線形性が強く、その演算負荷が高い。そこで、弾性振動・制御サブモデルから算出した弾性変位を空力サブモデルに受け渡し、これに基づ

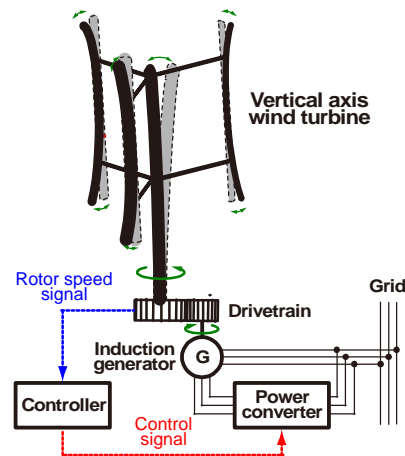


図1 垂直軸型風力発電システムの構成図

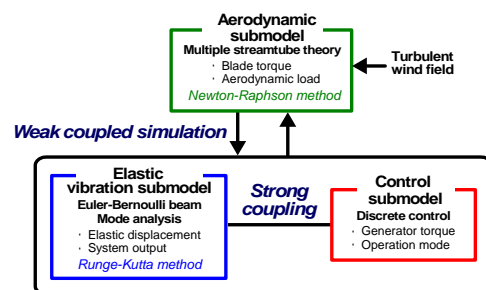


図2 空力-弾性-制御連成解析フロー図

き算出した空力特性を弾性振動・制御サブモデルに引き渡す弱連成手法を採用する。

空力サブモデルでは、流入風速、弾性振動・制御サブモデルで算出したローター回転数、アジマス角、弾性要素の変位に応じた空力特性を流管理論に基づいて算出する。小形の垂直軸型タービンでは、ローター上流側と下流側での2段階の風速減衰を考慮する二重多流管理論を用いることが少なくない。しかし、大型タービンは回転数が低いことから、流入風からの1段階の風速減衰を考慮する。

弾性振動サブモデルでは、弾性要素の曲げ振動とねじり振動をモデル化する。タービン翼およびストラット翼の曲げ振動では、翼に作用する空力荷重ならびに翼の遠心力と慣性力を考慮し、回転軸の曲げ振動ではタービン翼の空力荷重、タービン翼およびストラット翼の遠心力、ならびに回転軸に作用するローター内風速による抗力を考慮する。曲げ弾性要素はオイラー・ベルヌーイ梁でモデル化し、モード解析手法を適用する。ドライブトレインのねじり振動に関しては、ねじり角を風力タービンと増速機を介した発電機のアジマス角差で表現する。

制御サブモデルでは、回転数を制御するため、発電機トルクを電力変換機器を介して制御周期ごとに操作する。低風速域では発電機トルクをローター回転数の2乗に比例して操作することで、可変速運転を行う。高風速域ではローター回転数の変動に応じて発電機トルクを操作することで定格ローター回転数を保持する。ローター回転数の応答には風速変動に対する回転慣性モーメントによる遅れ特性が支配的となる。しかし、研究を通して回転周波数の翼枚数倍で変動するタービントルクに起因する変動が重畳することが判明した。そこで、一次遅れフィルタを介したローター回転数を制御量とすることでタービントルクの変動に伴う発電機トルクの過剰な操作を抑制することとした。

空力サブモデルでは各流管において翼に作用する誘導速度をニュートン-ラフソン法を用いて算出する。また、弾性振動・制御サブモデルでは、制御周期ごとに変化する発電機トルクを与条件に、振動の運転方程式（微分方程式）をルンゲ-クッタ法を用いて解く。

### (3) 計算条件

3枚翼の直線翼垂直軸型タービンを用いた陸上設置式システムを解析対象とする。構築

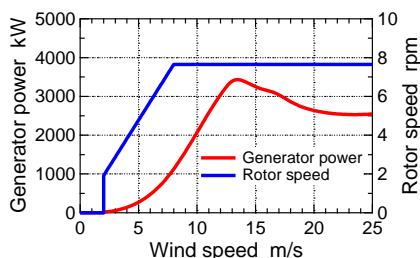
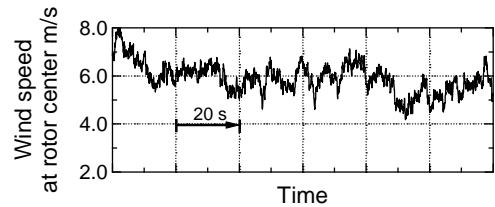
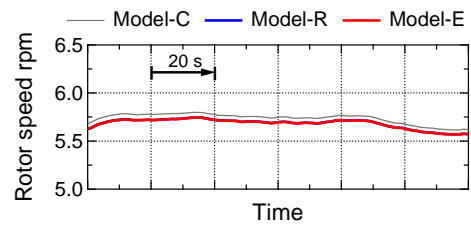


図3 対象システムの定常特性

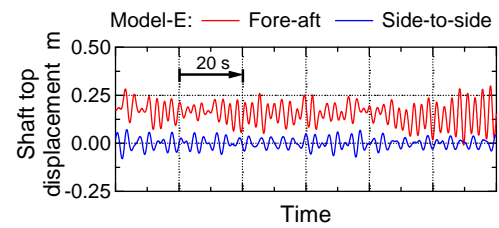
した連成解析モデルを浮体式洋上システムに適用することを視野に入れ、直径 86 m、翼長手方向長さ 103 m の大型風力タービンを想定する。ストラット翼はタービンの上端および下端からそれぞれ 25.8 m の位置に取り付けるものとする。タービンの主要諸元は複数



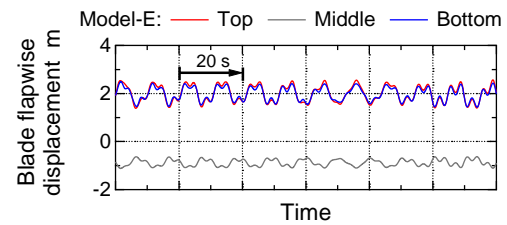
(a) タービン中心位置での流入風速



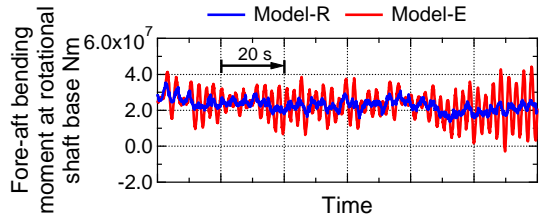
(b) ローター回転数



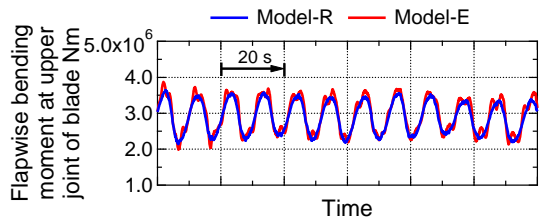
(c) 回転軸頂部変位



(d) タービン翼フラップ方向変位



(e) 回転軸基部前後方向荷重



(f) タービン翼支持部フラップ方向荷重

図4 低風速域での連成挙動



の設計荷重ケースにおける空力荷重解析に基づいて決定した．対象システムの定常特性を図3に示す．決定したシステム諸元より算出されたタービン翼のフラップ方向とエッジ方向の1次共振周波数は0.312, 1.58 Hz, 回転軸の曲げの1次共振周波数は0.421 Hz, ドライフトレインのねじり振動の共振周波数は3.47 Hzである．

風力タービンへの流入風にはNRELが開発したTurbSimにより作成した模擬乱流変動風況を使用し,高さ方向の風速分布(ベキ乗則)を考慮する．制御サブモデルにおける一次遅れフィルタのカットオフ周波数はタービントルクによる回転数の変動成分が減衰するように0.3 Hzとする．

#### 4. 研究成果

##### (1) 低風速域での連成挙動分析

低風速域(平均風速5 m/s)での連成挙動解析結果の一部を図4に示す．構築した連成解析モデル(Model-E)の比較対象として,従来解析モデル(Model-C)および連成解析モデルにおいて弾性要素を剛体と見なしたモデル(Model-R)の結果についても示す．

連成解析モデルではアジマス角位置に応じてタービントルクや空力荷重が周期的に大きく変動することでタービン翼に弾性振動が生じる．しかし,低風速域ではローター回転数や発電機出力の応答への影響はわずかである．これは可変速運転下でのローターの応答を回転慣性モーメントが支配しているためである．回転軸基部やタービン翼支持部における曲げ荷重は回転中の空力荷重変動の影響を大きく受ける．また,回転軸基部の曲げ荷重には共振周波数や翼枚数に応じた周波数成分の変動が,また,タービン翼支持部のエッジ方向曲げ荷重にはローター回転数の2倍の周波数成分の変動が現れる．

6通りの600秒間のシミュレーションより算出したシステム性能値を表1に示す．ローター特性および荷重特性の変動はそれぞれRMS値および疲労等価荷重を用いて評価し,剛体解析(Model-R)の結果で正規化する．空力特性の回転中の変動ならびに弾性振動を考慮することによるRMS値への影響はわずかであるが,疲労等価荷重は弾性振動に起因する振動荷重によって大きく増加する．特

表1 低風速域でのシステム性能

評価性能		値
RMS	回転数	0.999
	タービントルク	1.001
	発電機トルク	0.999
	発電機出力	0.999
DEL	低速軸ねじり	0.999
	回転軸基部前後方向曲げ	4.081
	回転軸基部左右方向曲げ	2.778
	翼支持部フラップ方向曲げ(上部)	1.305
	翼支持部エッジ方向曲げ(上部)	1.186
	翼支持部フラップ方向曲げ(下部)	1.305
	翼支持部エッジ方向曲げ(下部)	1.186

に,質量の大きな回転軸において顕著になる．

##### (2) 高風速域での連成挙動分析

高風速域(平均風速18 m/s)での連成挙動解析結果の一部を図5に示す．低風速域と同様に3通りの解析モデルについて取り上げる．

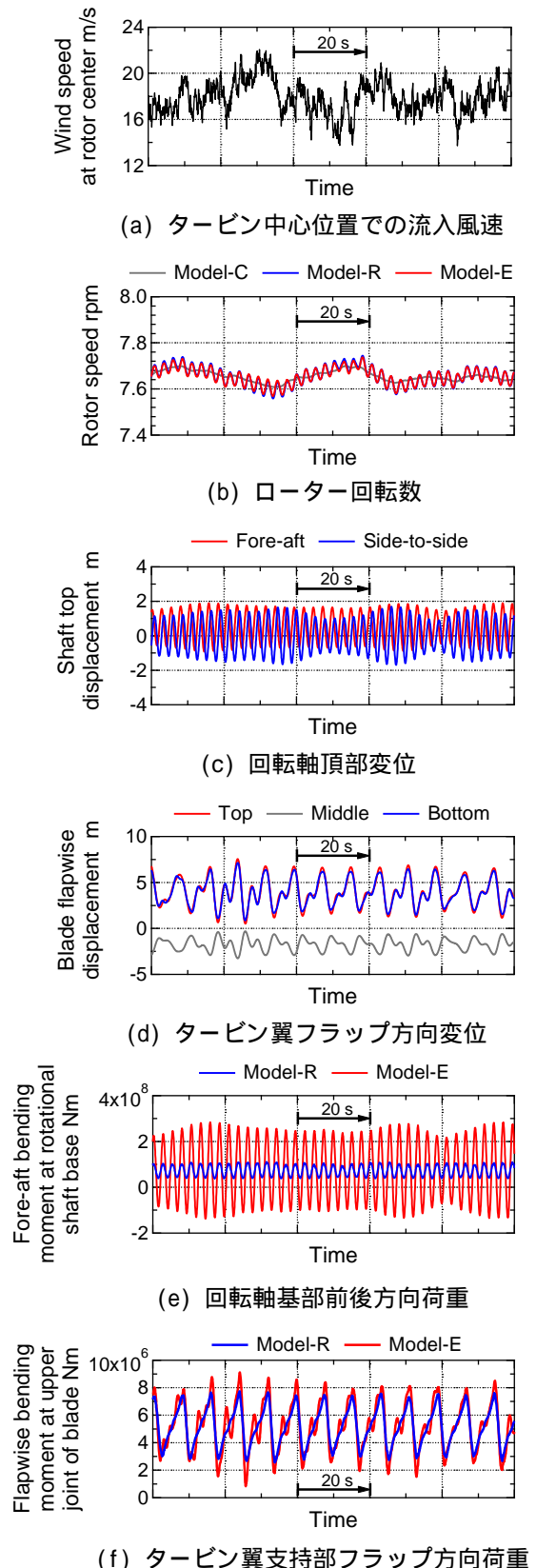


図5 高風速域での連成挙動

定速運転下ではパワー係数が最大となる周速比よりも低周速比側に運転動作点を持つため、ローター回転中の翼の迎え角変動が顕著になる。その結果、アジマス角の変化に応じたタービンの空力特性を算出できる連成解析では、タービントルクが回転周波数の翼枚数倍（約 0.382 Hz）で大きく変動し、ローター回転数、発電機トルク、発電機出力にもこの周波数の変動が重畳することがわかった。この変動は弾性変位の影響を受けて、剛体解析（Model-R）よりも弾性解析（Model-E）の方が小さくなる。回転軸頂部の変位はタービントルク変動の影響を受けて回転周波数の翼枚数倍で振動する。タービン翼フラップ方向変位は、翼に作用する空力荷重変動が励振源となるため、回転周波数（約 0.127 Hz）で振動する。タービン翼の上、下端は遠心方向外側に、タービン翼中心部は内側に変位している。回転軸基部の曲げ荷重には回転周波数の翼枚数倍の変動が現れ、弾性解析では振動荷重によってその変動が増大する。タービン翼支持部のフラップおよびエッジ方向曲げ荷重には回転周波数およびその 2 倍の周波数での変動が重畳しており、弾性振動に対応している。

6 通りの 600 秒間のシミュレーションより算出したシステム性能値を表 2 に示す。低風速域と同様に、空力特性の回転中の変動ならびに弾性振動を考慮することによる RMS 値への影響はわずかである。しかし、タービントルクの回転中の変動を考慮できない従来解析モデルでは、ローター特性の RMS 値が過小評価となることを確認している。また、疲労等価荷重は弾性振動に起因する振動荷重によって弾性解析の方が大きくなる。特に、質量の大きな回転軸の基部の疲労等価荷重において顕著になる。タービン翼支持部の曲げ疲労等価荷重は高さ方向の風速分布の影響を受けて上部の方が大きくなる。

### (3)得られた研究成果のまとめ

垂直軸型風力発電システムの空力-弾性-制御連成解析モデルを構築し、直線翼垂直軸型風力タービンを用いたシステムの連成挙動ならびに疲労荷重特性を分析した。連成解析を行うことで回転中のタービントルクおよび空力荷重の変動が弾性振動に及ぼす影

表 2 高風速域でのシステム性能

評価性能		値
RMS	回転数	0.953
	タービントルク	0.941
	発電機トルク	0.927
	発電機出力	0.933
DEL	低速軸ねじり	0.999
	回転軸基部前後方向曲げ	6.600
	回転軸基部左右方向曲げ	6.037
	翼支持部フラップ方向曲げ（上部）	1.548
	翼支持部エッジ方向曲げ（上部）	3.629
	翼支持部フラップ方向曲げ（下部）	1.301
翼支持部エッジ方向曲げ（下部）	2.198	

響を解明することができるようになった。特に、高風速下では風力タービンが低周速比域で運転を行うために、回転周波数の翼枚数倍の変動がタービントルクに大きく現れ、弾性振動や荷重変動に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。以上に得られた本研究の成果は、今後二重反転垂直軸型タービンの基本特性を解明するための重要な知見となる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

T. Wakui, M. Yonesugi, R. Yokoyama, Performance analytical model of vertical axis wind turbines for floating offshore systems, Proc. of the EWEA Annual Event Conference 2015, (2015), Paper No. PO.194, 10 pages, 査読有。

T. Wakui, M. Yonesugi, R. Yokoyama, Aero-elastic-control coupled simulation of a vertical axis wind turbine-generator system, Proc. of the WindEurope Conference 2017, (2017), Paper No. PO.055, 10 pages, 査読有。

T. Wakui, M. Yoshimura, R. Yokoyama, Multiple-feedback control of power output and platform pitching motion for a floating offshore wind turbine-generator system, Energy, Vol. 141, (2017), pp. 563-578, 査読有。

〔学会発表〕(計 15 件)

涌井徹也, 西岡拓哉, 横山良平, 垂直軸型風力発電システムの空力-弾性-制御連成解析（高風速域での荷重変動解析）, 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2017 年 12 月 6, 7 日, 科学技術館（東京）。

涌井徹也, 米杉政則, 横山良平, 垂直軸型風力発電システムの空力-弾性-制御連成解析（可変速運転下での疲労荷重分析）, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017 年 9 月 3 日～6 日, 埼玉大学（さいたま）。

涌井徹也, 西岡拓哉, 米杉政則, 横山良平, 垂直軸型風力発電システムの性能に対する設計パラメータの影響分析, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017 年 9 月 3 日～6 日, 埼玉大学（さいたま）。

涌井徹也, 米杉政則, 横山良平, 垂直軸型風力タービンの回転軸傾斜時の特性解析, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 13 日～16 日, 北海道大学（札幌）。

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

涌井 徹也 (WAKUI Tetsuya)  
大阪府立大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：4 0 3 3 9 7 5 0

### (2)研究協力者

米杉 政則 (YONESUGI Masanori)  
大阪府立大学・工学研究科・博士前期課程  
西岡 拓哉 (NISHIOKA Takuya)  
大阪府立大学・工学研究科・博士前期課程