

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05355

研究課題名（和文）浮体式洋上風力発電の新技术開発に向けた出力および浮体動揺の安定化

研究課題名（英文）Stabilization of float oscillation and power output for new technology development of a floating offshore wind turbine generator

研究代表者

天久 和正（Ameku, Kazumasa）

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：40284955

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）：水平軸風車用数値流体計算コードを開発し、計算格子の解像度に関する知見を得た。開発した数値流体計算コードを用いて、風車ブレード表面の流れを詳細に調べ、低レイノルズ数における特異性を示した。また、浮体式洋上風車について、各ピッチ角の定出力における風速とスラストの関係を示し、高速時の風速変化に対する定出力・定スラスト制御運転を行うときの風車回転数とピッチ角の関係を示した。浮体の動揺解析については、港湾施設で製作容易なバージ型浮体を考え、領域分割法を用いて円柱浮体の付加質量係数等の各種係数を計算し、これら係数を利用して洋上風車を考慮した浮体の動揺特性を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水平軸風車用数値流体計算コードの開発では、流体力に関して通常の計算格子よりも1/10～1/100倍程度の粗い計算格子でも実用的に十分な解析結果が得られる可能性が高いことが示され、得られた成果はコンピュータの計算負荷低減につながる。

浮体式洋上風車の運転において、高速時の風速変化に対する定出力・定スラスト制御運転時における風車回転数とピッチ角の関係が得られ、従来の定回転・定出力運転を行う風車制御に関して自由度を増すことができる。

研究成果の概要（英文）：A calculation code of computed fluid dynamics for horizontal wind turbine has been developed and we gained knowledge about the resolution of computational grids. Using the calculation code, the flows on the blade surface were calculated in detail and showed a singularity in low Reynolds number. It was shown the relationship between wind speeds and thrust forces of a floating offshore wind turbine at constant power of each pitch angle.

Considering a barge-type float that could be easily manufactured at port facilities, various coefficients such as the added mass coefficient of a cylindrical float were calculated using the area division method and then the oscillation characteristics of the float setting the offshore wind turbine were analyzed using these coefficients.

研究分野：流体工学

キーワード：洋上風力発電 浮体式 ネガティブダンピング ピッチ角制御

1. 研究開始当初の背景

浮体式洋上風力発電では、波浪や風速変動による浮体の動揺が必ず生じる。このとき、風車特性と定出力制御の連成により浮体運動の自励振動（ネガティブダンピング現象）が生じ、浮体の揺れが増幅して浮体および風車が転倒する事態に至ることがある。ネガティブダンピングは T.J.Larsen 等(2007 年)が指摘し、対応方法に関する研究が国内外で実施されている。この対応策として、浮体ダンピングの増強とともに、タワーの傾斜角や角速度信号を検知して定回転と動揺安定化のバランスを計った制御手法が取られているが、最適な制御方法はまだ確立されていない。

ネガティブダンピングは、風車の定回転・定出力運転時に、風車のスラストが風速の増加につれて減少することにより生じる現象であり、定出力運転による制御から生じた問題である。これらの問題を回避するための制御量は、風車のブレードピッチ角と発電出力であるが、従来、研究開発されてきた方法は定回転という制約下で、ブレードピッチ角のコントロールを行い、発電出力と浮体動揺の安定化を図る方法のみである。通常、発電出力は一定周波数、一定出力であることが望まれ、回転数を一定とするブレードピッチ角制御に自ずと着想が至り、定回転運転としたブレードピッチ角制御による安定化の研究が実施されてきたものと推測される。しかし、本来の風車は定出力や定回転の運転はしておらず、風力エネルギーが余剰となる高風速域においてのみ定出力運転に移行させていることを考えると、定回転運転に固執する必要性は少ない。また、変動風中で稼働する風車は完全な定出力運転を行うことは不可能であり、かつ、風車による発電電力はインバーター・コンバーターによる電圧、周波数変換を行うことが大前提であり、利便性の立場から定出力運転を行うことが望ましい程度と考える。

2. 研究の目的

本研究が対象とするネガティブダンピングの課題は、洋上風力発電の実証実験において確認され、過度な揺れが生じないように制御を行い、技巧（定出力と安定化のバランス）的に運転が成されている。これらは浮体構造の改変（建造コスト高）や完全な定出力運転を実施しないという条件で成立している。商業化へのステップでは数多くの風車が様々な海象で運転されることから高い安定性が求められ、これらを達成するには風車側でのネガティブダンピングの攻略が重要である。高度な制御手法を取り入れる前に、個別要素の安定化によって効果的な制御が実施でき、シンプルな制御でも高安定化の達成が可能と考える。本研究の目的は、浮体式洋上風力発電において安定かつ高効率な電力供給を行うことを目標とし、高風速域での定出力運転とともに、より受動的な方法でネガティブダンピング（風車特性と出力制御の連成による自励振動、浮体の振動振幅増加）を抑制し、高度な運転安定化を図ることである。

3. 研究の方法

定格風速以上の高風速時における定回転・定出力運転から脱却して、風車回転数は限定せずに定出力運転のみを運転条件とした研究を実施する。従来の制御方法では、一定回転での風車特性のみ、既知であれば良いが、本研究では、回転変化に対応した風車特性が必要となるため、風車特性を見直すことから始め、水平軸風車用数値流体計算コードの開発を行う。これらの後、運転制御方法の提案および構築に結び付ける。また、他の観点からのアプローチとして、汎用数値流体計算コードを用いて、翼まわりの流れや垂直軸風車まわりの流れについても計算を行う。

浮体式洋上風車について、高風速時の定出力運転においては、ネガティブダンピング防止策の観点から、定回転に限定しない運転制御を考える。すなわち、定格出力を保持してスラストを一定に保ち運転することを考え、新しい運転制御方法を提案する。

また、浮体揺動の解析として領域分割法を用い、円柱形状に近似した浮体のポテンシャル計算を行い、まず浮体の揺動特性を調べる。さらに、付加質量係数等の各種係数を計算し、これらの係数を利用して洋上風車の浮体モデル（図1参照）に関する運動方程式から揺動計算をし、スラスト変化による動揺への影響を調べる。

浮体は6自由度の運動方程式、

$$\sum_{j=1}^6 (M_{ij} + m_{ij})\ddot{x}_j + (D_{ij} + d_{ij})\dot{x}_j + (c_{ij} + k_{ij})x_j = F_i \quad (1)$$

で表され、添え字は1:前後揺、2:左右揺、3:上下揺、4:横揺、5:縦揺、6:船首揺を表し、各運動モードの変位は x_j 、浮体に働く*i*モード方向の力やモーメントは F_i で表している。また、 M_{ij} は風車を含む浮体の質量や慣性モーメント、 m_{ij} は付加質量や付加慣性モーメント、 D_{ij} は風車による減衰力係数、 d_{ij} は造波減衰力係数、 c_{ij} は復元力係数、 k_{ij} は係留によるバネ定数である。

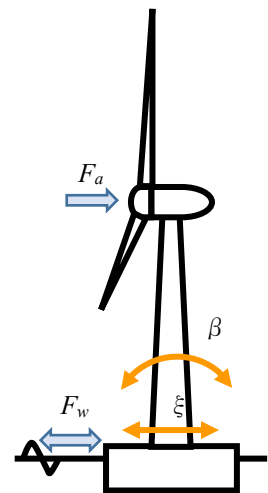


図1 浮体式洋上風車モデル

風車が発生するスラストおよびモーメントは線形近似すると、

$$F_a(V_a - (\dot{x}_1 - l\dot{x}_5)) = F_a(V_a) - (\dot{x}_1 - l\dot{x}_5) \frac{\partial F_a(V_a)}{\partial V_a} \quad (2)$$

$$F_a(V_a - (\dot{x}_1 - l\dot{x}_5))l = F_a(V_a)l - (\dot{x}_1 - l\dot{x}_5)l \frac{\partial F_a(V_a)}{\partial V_a} \quad (3)$$

で表される。ここで、 V_a ：風速、 l ：浮体重心位置から風車回転軸までの距離である。これらを式(1)の D_{ij} に適用し、浮体動揺の解析を行った。

4. 研究成果

(1) 水平軸風車用数値流体計算コードの開発

計算負荷が少ない水平軸風車用の数値流体計算(CFD)コードを目指した開発を進め、低解像度計算格子の効果に関する知見が得られた。2枚翼水平軸風車(デルフト工科大学およびNREL)に関する性能予測では、周期境界条件を用いた半球状の計算領域(タービン半径5倍)により、通常の計算格子よりも1/10~1/100倍程度、粗い計算格子でも、実験結果と良好な一致が得られることを示した。このように、粗格子でも実用に供する精度の流体力が得られる可能性も高く、細密格子による解析前に、粗格子による解析の実施が推奨される。図2は一例として、開発した水平軸風車用CFDコードを用いて、Vermeer(1991)による風洞実験の風車(2枚翼、直径1.2m、翼弦長0.08m、NACA0012)を対象に解析し、実験結果と比較したスラスト係数を示している。実験結果とCFDによる解析結果は良好な一致が得られている。また、図3は周速比 $\lambda=9.75$ における翼面上の限界流線を示している。

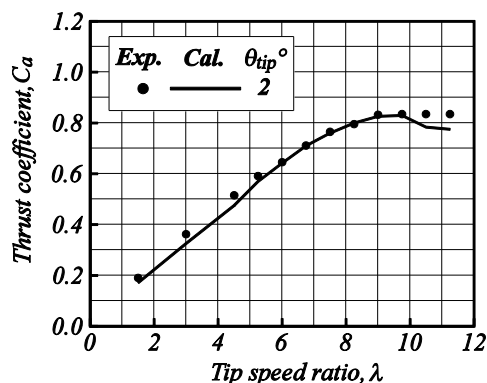
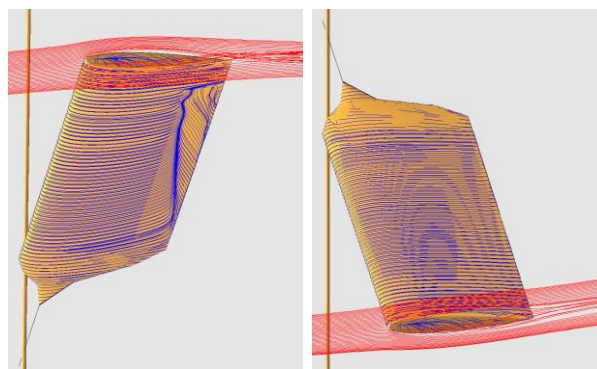


図2 スラスト係数と周速比の関係 ($Re=V_a R/\nu=2 \times 10^5$)



(a) 圧力面 (b) 負圧面

図3 ブレード表面の限界流線 ($\lambda=9.75$)

(2) 高風速時における定出力・定スラスト制御方法の提案

提案する運転制御である定格出力・定スラストの特性を把握するため、基準風速(定格風速) V_{a0} で無次元化したパラメータ、風速比 V_a/V_{a0} 、周速比 λ_0 、スラスト係数 C_{a0} 、出力係数 C_{P0} を導入する。

$$\lambda_0 = \frac{U_{tip}}{V_{a0}} = \lambda \left(\frac{V_a}{V_{a0}} \right) \quad (4)$$

$$C_{a0} = \frac{F_a}{\frac{1}{2} \rho V_{a0}^2 \pi R^2} = C_a \left(\frac{V_a}{V_{a0}} \right)^2 \quad (5)$$

$$C_{P0} = \frac{T \Omega}{\frac{1}{2} \rho V_{a0}^3 \pi R^2} = C_P \left(\frac{V_a}{V_{a0}} \right)^3 \quad (6)$$

ここで、風速 V_a 、ブレード先端の回転速度 $U_{tip}(=R\Omega)$ 、風車スラスト F_a 、風車トルク T 、ロータ角速度 Ω 、風車半径 R 、空気密度 ρ である。基準風速 V_{a0} は定数と考えるため、例えば出力係数 $C_{P0} = const$ は、風速変化($V_a/V_{a0} \neq const$)によらない一定出力を表す。

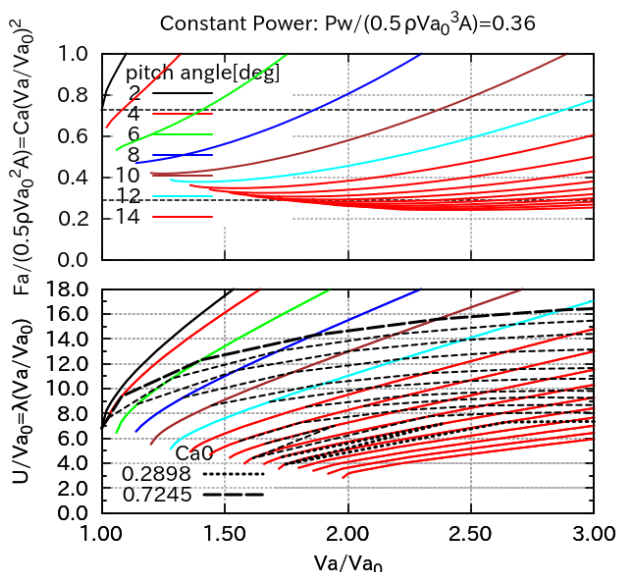


図4 定出力の風車特性

導入したパラメータを用いて各ピッチ角の定出力 ($C_{P0} = const$) における風速比とスラスト係数の関係を示した。さらに、高速時の風速変化に対する定出力・定スラスト制御運転 ($C_{P0} = const, C_{a0} = const$) を行うときの風車回転数とピッチ角の関係を示した (図4参照)。また、風車効率 $\eta = (\text{風車トルク } T \times \text{ロータ角速度 } \Omega) / (\text{風車スラスト } F_a \times \text{風速 } V_a)$ を提案し、出力係数 $C_P = \text{スラスト係数 } C_a \times \text{風車効率 } \eta$ を導入した。この風車効率 η を用いることによって、他のターボ機械との性能比較が可能となり、他のターボ機械と比べて風車効率 η が低いことが確認できる。これより、風車には改善の余地が未だ多く、性能向上の可能性が高いことを示せた。

(3) 翼素運動量理論および汎用数値流体計算コードを用いた計算

風車特性全般について、高精度で効率的な性能予測ツールの構築を目指して、翼素運動量理論や汎用数値流体計算コードによる解析および評価を垂直軸風車や低レイノルズ数翼についても実施した。

垂直軸風車については、単管流モデルによる翼素運動量理論の計算コードを構築し、実験結果 (Sandia Lab Report SAND76-0130) と比較検証を行った。この結果、2次元数値流体計算による単独翼性能データを得ることで、垂直軸風車においても概略性能の取得が可能となった。今後、これらの成果を活用した洋上大型垂直軸風車解析への展開も計画している。

また、汎用数値流体計算コードを用いて、開閉式垂直軸風車まわりの流れを3次元計算し、風洞実験結果と比較したところ、図5に示すように良好な一致が得られた。図6は風車まわりの圧力分布を示しており、ブレード位置による生成トルクへの寄与関係を把握することができる。

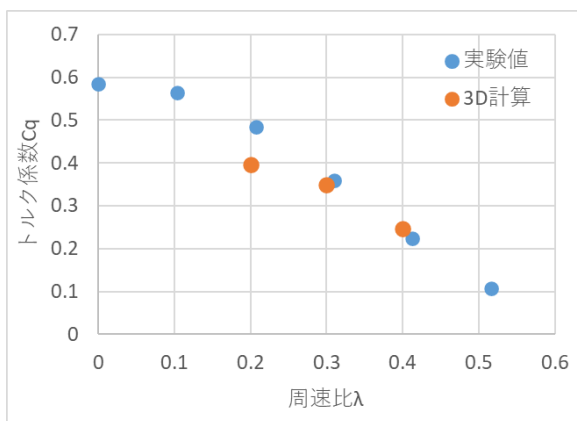


図5 開閉式垂直軸風車のトルク係数と周速比の関係

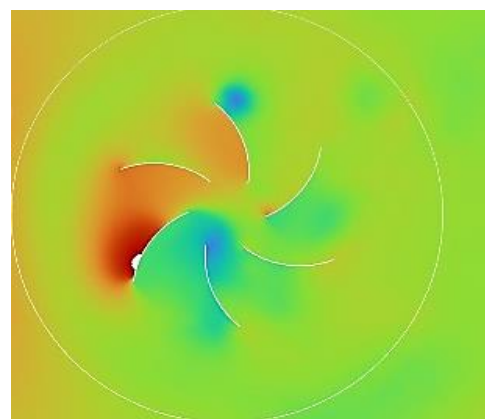


図6 開閉式垂直軸風車まわりの流れ (λ=0.4)

汎用数値流体計算コードを用いた計算では、2次元薄翼まわりの流れについて、解析を行った。まず既存の翼型 (例えば NACA6409) の実験結果と比較を行い、計算精度を検証した。その後、低レイノルズ数における薄翼 (図7および表1参照) の特性を改善するため、随伴法機能 (アジョイントソルバー) を用いて前縁付近の厚みを変化させつつ翼形状を変更する解析を行い、翼性能の向上を図った (図8参照)。今後、これらの成果を踏まえて、低レイノルズ数領域を含めた薄翼特性の改善に反映させる予定である。

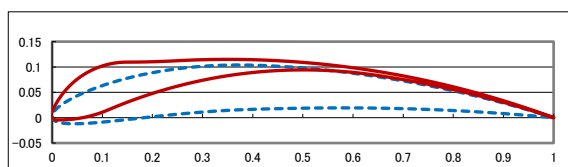


図7 NACA6409 と薄翼の形状比較

表1 各翼の概要

	反り位置	反り	厚み位置	厚み
薄翼型	0.35	0.11	0.10	0.085
NACA	0.396	0.06	0.293	0.09

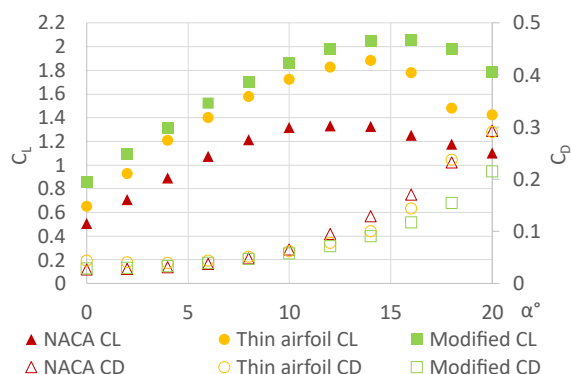


図8 迎え角 α と揚力係数 C_L および抗力係数 C_D の関係

(4) 洋上式風力発電の揺動解析

港湾施設で製作容易なバージ型浮体を考え、領域分割法を用いて円柱浮体(喫水 8m, 直径 40m)の付加質量係数等、各種係数を計算し、これらの係数を使用した浮体の運動方程式(縦揺と前後揺の連成方程式)を解いて動揺を調べた。また、風車には NREL(National Renewable Energy Laboratory)5MW 風車モデルを用い、各ピッチ角の風車特性から強風時の定出力・定回転数制御および定出力・定スラスト制御による振る舞いを予め調べた。

まず、波浪により固定浮体に作用する力およびモーメントを求めた(図 9 参照)。つぎに、波浪によって振動する浮体のみの場合(風車スラストを含まない)について調べた。その結果、縦揺(ピッチング)の共振点は無次元波数 $kh = 2.7$ で、波浪出現頻度の最頻値である波数 $kh = 5.7$ (沖縄県中城湾を計算対象)よりも小さい値であった(図 10 参照)。さらに、定格風速以上で定ロータ回転制御を行う洋上風車の動揺計算を行った。その結果、浮体の縦揺振幅 β および前後動揺の振幅 x/ζ_0 (入力波の振幅 ζ_0 で無次元化)は時間とともに大きくなり、定出力・定回転数制御によるスラスト変化がネガティブダンピングとして、浮体に作用することで振動振幅が急激に増大する結果となっている(図 11 参照)。

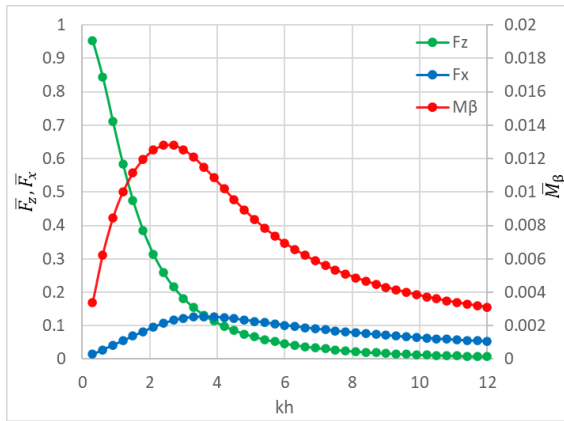


図 9 固定浮体に作用する波力

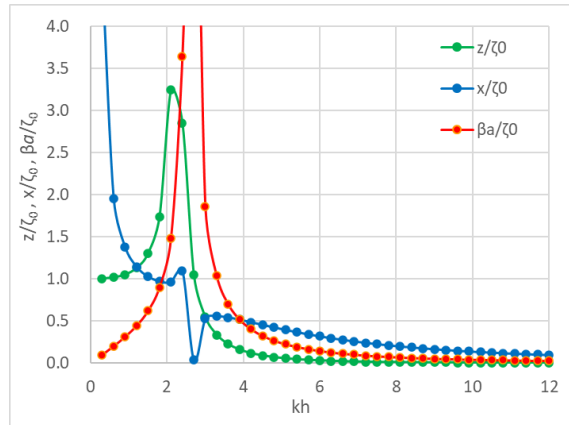


図 10 円柱浮体の運動変位

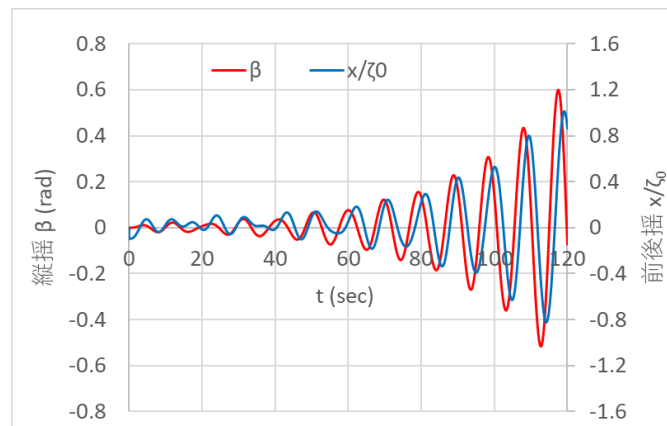


図 11 浮体の揺動(定出力・定回転制御)

前述の(2)項に示した定出力・定スラスト制御では、風車スラストが変化せず、造波ダンピングおよび粘性やその他の減衰力により、必ず正のダンピングとなるため、自励振動は抑制される。

今後はさらに、風車本来の特性を効果的に活用しつつ、各変動幅を抑え、安定した出力を生成可能な運転方法の構築に努める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木正己, 天久和正
2. 発表標題 数値流体計算から見た低レイノルズ数における水平軸風車特性
3. 学会等名 第17回 海洋エネルギーシンポジウム (OES2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木正己, 天久和正
2. 発表標題 粗格子利用による風車性能の推定
3. 学会等名 日本機械学会九州支部沖縄講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村栄貴, 鈴木正己, 天久和正
2. 発表標題 数値流体計算による風車翼特性の推定
3. 学会等名 日本機械学会九州支部沖縄講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	鈴木 正己 (Suzuki Masami) (30171250)	琉球大学・工学部・客員研究員 (18001)	

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0件

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
---------	---------