

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04215

研究課題名(和文)複数機風車搭載の洋上風力発電浮体の最適化設計に関する解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of analysis method for optimization design of a floating platform with multiple wind turbines on the deck

研究代表者

胡 長洪 (Hu, Changhong)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：20274532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,400,000円

研究成果の概要(和文)：セミサブ型浮体1基に風車数機が設置される中型洋上風力発電システムの最適化設計に必要である浮体動揺と風車間干渉を一体的に解析できるCFD手法及びポテンシャル理論手法に関する研究開発を行った。CFD手法の開発について、風車のブレードから放出された渦の高精度計算にAMR法のコードを開発し、風車の相互干渉に関する計算精度を向上させた。ポテンシャル理論手法の開発について、浮体動揺計算の境界要素法に対して計算効率が向上するスキームを提案し、トラス構造浮体の粘性流体力評価に異なる計算手法の有効性を調査した。また、風車解析のBEMTモデルについてレンズ風車の対応及び風車後流のモデル化に関する拡張を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to develop an efficient tool to analyze hydrodynamic and aerodynamic performance of a floating platform on which multiple wind turbines are installed, two numerical approaches, a CFD simulation method and a potential flow theory method, are studied. On the CFD method, an AMR (Adaptive Mesh Refinement) scheme is developed to increase the local resolution. The actuator line (ACL) method is implemented into the AMR code to solve the multiple wind turbine interactions. On the potential flow theory method, a new algorithm for numerical solution of the finite depth free-surface Green function in 3D is developed based on multiple series representations. A standard panel method and a Morison stick method have been developed and combined together to form a hybrid model to account for the viscous forces on the floating body with many slender trussed members. The BEMT model has been extended to treat the wind-lens and the wake effect.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：浮体式洋上風力発電 風車間干渉 レンズ風車 CFDシミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

日本の再生可能エネルギーで最もポテンシャルが大きいのは洋上風力発電である。その中で特に有望とされているのが浮体式であり、大規模な実証プロジェクトが長崎県と福島県の沖合で始まっている。これらの浮体式洋上風力発電装置は、浮体1基に風車1機を搭載されており、浮体の技術はほぼ確立され、風車の大型化開発が研究の中心となっている。一方、将来のエネルギー社会は、大規模・集中化電源と中・小規模分散型電源の二つの方向へ展開していくと予想され、地産地消目的の分散型電源システムの開発が求められ、その主役が再生可能エネルギーになることが期待されている。

九州大学を中心に図1に示す地域分散型電源として中型洋上複合エネルギーシステムを提案しており、三角形浮体1基に中型レンズ風車3機を設置し、さらに広大な甲板面積を利用して太陽光パネル、波力発電装置なども搭載できることから、高密度自然エネルギーの利用を目指している。この洋上風力発電構想は、高効率レンズ風車の使用、大型作業船不要の設置作業、容易なメンテナンス作業、中手造船所による大量生産、さらに漁業との共存を実現しやすいなどのメリットがあるが、それを実現するために、ドックを使わない建造・組立できる浮体の設計、浮体動揺および風車間干渉による発電損失の最小化、大型作業船を使わない洋上設置方法、浮体のヨーを制御できる係留設計など新しい課題について研究を行わなければならない。



図1 複数風車搭載浮体システム概念図

複数機風車搭載の洋上風力発電用浮体の開発に際して、最重要研究課題の一つは浮体と風車の流体力学性能に関する連成解析である。各風車の効率を考えると風車間距離をより広く取ることが望まれるが、浮体も大きくなることで建造コスト、係留・設置費用が上がってしまう。システムの最適化設計の際、風車出力の推定と空力性能の評価が必要であり、解析方法は浮体動揺と風車間の干渉を一体にして取り扱う能力が求められている。本研究がスタートした時点、風車間の影響を考慮できる有効な解析ツールが欠けている。また、当時浮体の波浪中性能評価に広く使われている数値計算手法である FAST や WAMIT などでは複数風車間干渉の評価とレンズ風車の計算はできない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は浮体の最適化設計に必要な複数機風車間干渉及びレンズ風車のデフューザーの影響を正確に評価できる解析ツールの開発である。これまで開発してきた CFD 解析手法をベースにして、風車モデルの改良と適切な乱流モデルの応用により風車後流の計算精度を高め、風車間の干渉を高精度に計算できるようにする。さらに、大規模並列計算機の性能をフル活用できるように最新の CFD 手法を取り入れ計算コードの高度化を行う。一方、洋上風力発電用浮体の性能評価に実用的に使われているポテンシャル理論の計算法について、デフューザーのモデル化開発によりレンズ風車の計算法の確立及び風車後流モデルの開発により複数機風車相互干渉の解析に関する研究を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は複数機風車搭載の洋上風力発電システムの開発に必要な解析手法の整備を目的として、高精度計算法である直交格子 CFD 手法と実用的設計ツールとしてのポテンシャル理論手法に対する開発・拡張を実施する。具体的な研究方法は以下に示す。

(1) 風車間干渉を高精度シミュレーションする CFD の開発について、CIP・直交格子法の改良・拡張を行った。過去の研究では荒天下暴風・大波の環境において洋上風力発電用浮体に加わる最大風荷重・波浪荷重、最大浮体の動揺量・加速度などを推定する目的として、ロバストな計算スキームの構築、波浪衝撃のような強非線形現象に対する計算安定性の強化に重点を置いて CFD 開発をしてきた。本研究の重点は複数風車間干渉現象であり、風車に対する効率的な計算及び風車後流の高精度計算が求められている。風車ブレードの計算については計算効率と計算精度ともに優れている ACL (Actuate Line) 法を応用しており、風車のナセルと支持ポールの計算は課題となり、それに対して新しい計算方法を開発した。風車後流の高精度計算について、直交格子法を使用しているので、通常の方法では後流を含める広大範囲の領域において均等に細かい格子を用いることになり、必要とする計算機のメモリと計算時間が膨大になる。本研究はこの問題を解決するために、解適合格子 (Adaptive Mesh Refinement, AMR) 手法を導入することにした。AMR では、計算領域内に計算解の勾配が急な場所に細かい格子を配置し、勾配が緩やかな場所に粗い格子を配置することで、制限される計算機リソースの中で効率的に計算精度を上げることが可能である。しかし、AMR の導入は困難で、プログラミングに手間がかかることから、研究期間中多くの時間を費やすことになった。

(2) 実用的なポテンシャル理論の計算法の拡張開発に関して、図1に示す複数機風車搭載の浮体へ応用する際、風車間の干渉解析と

レンズ風車の対応が求められており、また細い部材が多く含まれる浮体構造に対して、粘性影響の評価と計算効率の向上が研究課題となる。本研究ではまず、ポテンシャル理論に基づく境界要素法 (Boundary Element Method、BEM) の高度化について、有限水深自由表面グリーン関数に関する新しい級数展開法を開発した。また、流体粘性を考慮するために、Morison 式を応用するハイブリッド手法に対して検討を行った。風車計算手法である翼素運動量理論 (Blade Element Momentum Theory、BEMT) に対して、レンズ風車のディフューザーの影響に関する評価方法、複数風車の干渉を評価するために風車の後流モデルの開発を行った。

#### 4. 研究成果

(1) CFD 開発の主な研究成果は AMR 法の開発と風車計算の ACL モデルの高度化である。

① AMR 法の開発に関して、本研究では重点的に複雑内部境界 (物体表面及び自由表面) の処理に取り込んだ。物体の処理についてこれまで開発してきた高次界面埋込 (Immersed Boundary, IB) 法を AMR コードで実現し、境界層の解析精度を向上させた。自由表面捕獲法について Adaptive THINC-GFM (Tangent of Hyperbola for Interface Capturing - Ghost Fluid Method) を開発して、自由表面の高精度計算を実現した。これらの CFD 開発の研究成果を応用して、複数機風車干渉解析のための ACL-IB 法を開発した。風車の計算に使われた ACL モデルはブレードのみに対する計算法であるため、本研究では風車のナセルと支持ポールに対して IB 法による計算手法を開発した。また、開発された ACL-IB 法を AMR コードで実現し、また乱流モデルの適用について研究を行った。

② 開発された ACL-IB 法の性能を示すために、広く利用されている 2 基潮流発電用タービンの実験に対して数値シミュレーションを行った。図 2 は局部細分化された格子、図 3 は単機タービンに対する乱流強度および平均流速分布の計算結果を示している。開発された ACL-IB 法は公表されたほかの数値計算法より精度が高いことが分かった。図 4 は 2 機タービンに対する ACL-IB 法の計算結果で、下流側タービンに関する後流域の乱流強度および平均流速の分布を示す。3 種類の乱流モデルを試した結果、 $k-\omega$ -SST が最も良い性能を示している。

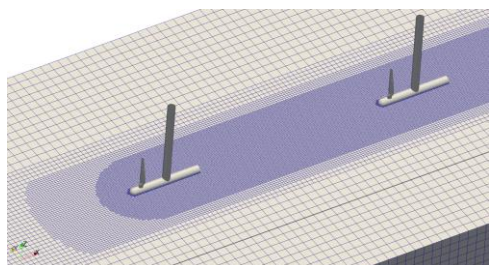
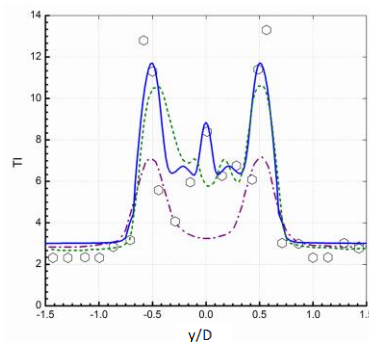
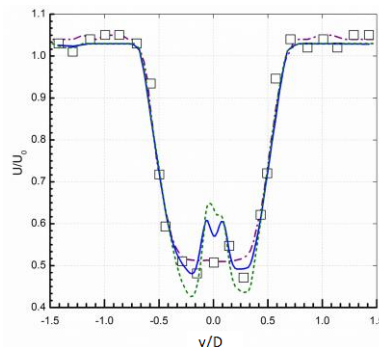


図 2 縦列 2 基タービンの計算格子

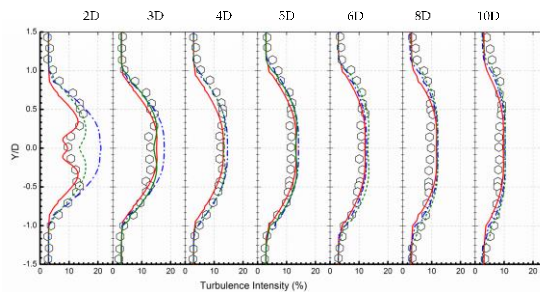


(a) 乱流強度分布

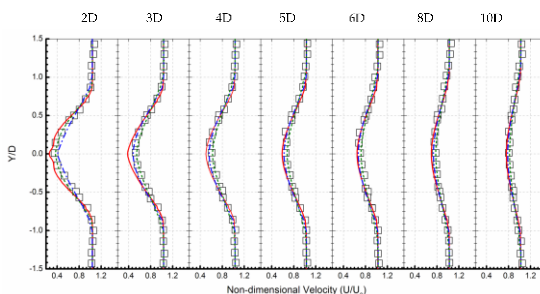


(b) 平均速度分布

図 3 背景乱流強度 3%、タービンから 2D 断面における計算結果：○ □は実験値、— は本計算、他は文献の計算結果。



(a) 下流タービンの乱流強度分布

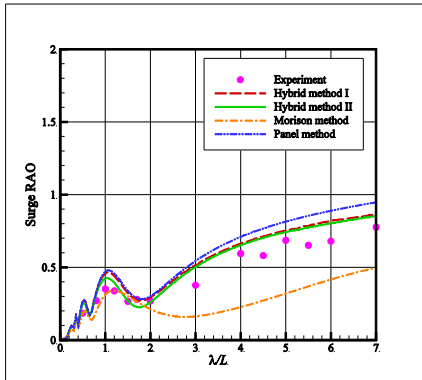


(b) 下流側タービンの平均流速分布

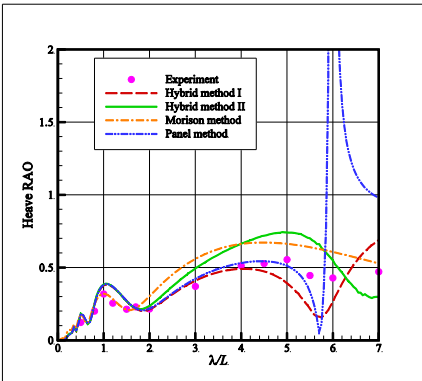
図 4 背景乱流強度 3%、2 機タービンの場合下流側タービンの後流計算結果：○ □は実験値、--- は Corrected  $k-\omega$  model、-.-.- は  $k-\omega$  model、— は  $k-\omega$ -SST model。

(2) ポテンシャル理論の方法の拡張開発に関して図1に示す洋上風力浮体に対する高精度計算を実現するために研究を行い得られた主な成果は浮体計算のBEM手法に対する改良スキームの考案、粘性流体力の評価法の開発、風車モデルであるBEMTに対するレンズ風車のディフューザーのモデル化及び風車後流モデルの開発が挙げられる。

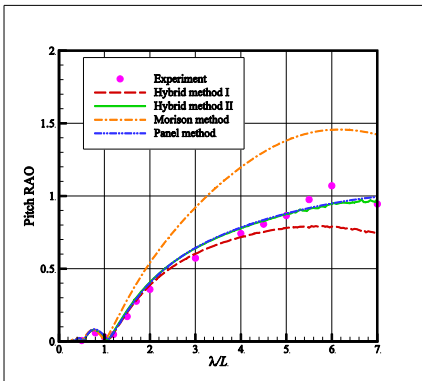
① BEMによる浮体動揺解析のための有限水深自由表面グリーン関数の数値計算に関して新しい多極展開法を提案した。計算領域を浮体からの距離によって四つに分けて、それぞれ最適なスキームを適用した上で、連立方程式に対してGMRESスキームの適用とOpenMPによる並列化などにより、従来の方法と比較して計算精度が維持しながら計算効率の改善ができた。



(a) Surge motion response



(b) Heave motion response



(c) Pitch motion response

図5 粘性影響を考慮する四つの数値計算方法による浮体運動計算結果の比較

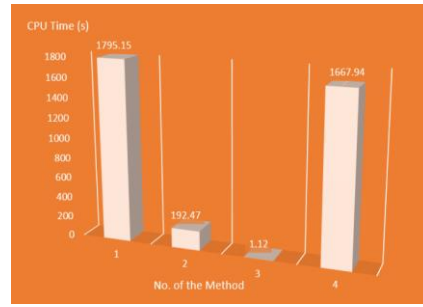


図6 四つの数値計算方法の計算時間比較

1: Hybrid method I, 2: Hybrid method II  
3: Morison stick method, 4: Panel method

② 多くの細い部材が使用された浮体に対する計算は粘性の影響が無視できない。細い部材の粘性流体力の評価にMorison式が一般に使われている (Morison Stick Model)。本研究ではポテンシャル理論のパネル法 (BEM) と Morison 式方法を組み合わせる方法 (Hybrid method) について検討を行った。開発中の三角形トラス構造の浮体 (図1) に対して四つの数値計算方法、BEMのみ、Morison式のみ、すべての部材に対して BEM+Morison 式 (Hybrid method I)、主要部材に BEM+残りの細い部材に Morison 式 (Hybrid method II)、を使って数値計算を行った。図5と図6に示すように、BEMは浮体の大きい部材 (カラムとローハル) のみに適用、トラス構造の細い部材に対してMorison式を適用する計算法 (Hybrid method II) は計算効率と計算精度ともに優れており、バランスの良い方法であることが分かった。

③ 浮体に設置した風車の計算に対して、一般化されたBEMTに対してレンズ風車のディフューザーの影響を適切に考慮できる改良モデルを提案した。また、風車の後流モデルを新たに考案し複数風車の干渉現象を評価できるようにした。この新しい風車モデルを使って複数レンズ風車に対する数値計算を行い、合理的な結果が得られた。

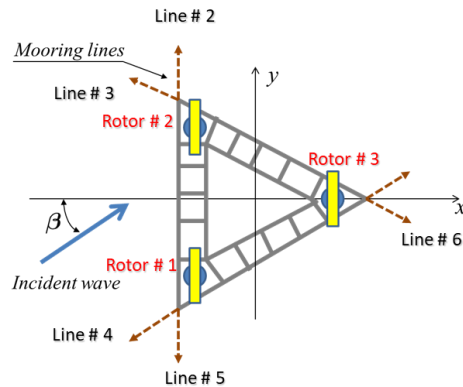
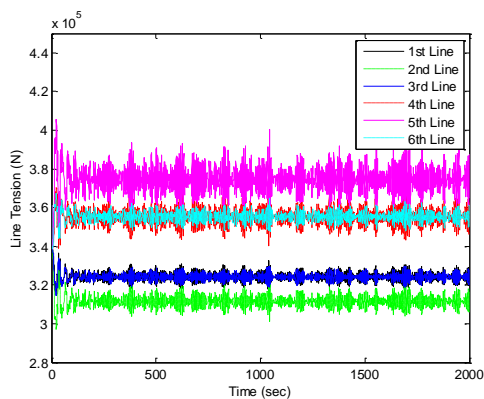


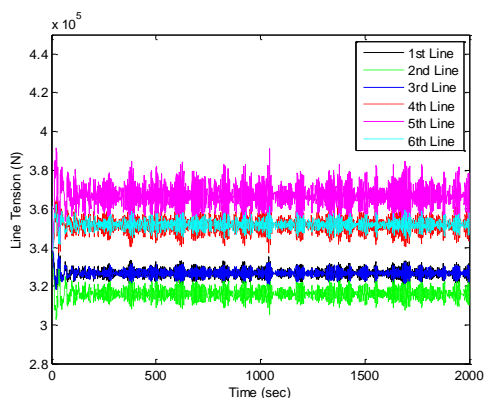
図7 3機レンズ風車搭載した浮体の数値シミュレーション、風向 $\beta=90^\circ$ 。

④ 拡張開発された浮体の計算法、風車計算法、係留計算法などを応用して、図7に示す

九州大学が開発している三角形浮体に対して想定した設置海域の海象条件で時間領域の数値シミュレーションを実施した。図8は計算結果の一例を示す。風車の後流モデルを応用しており、デフューザーモデルの適用有無によって計算された係留ラインの張力に大きな差が見られる。提案したポテンシャル理論の計算手法は複数機レンズ風車を搭載した浮体システムに対して、設計ツールとして利用できる可能性が示された。



(a) with both diffuser and wake



(b) without diffuser, with wake

図8係留索の張力の時間変化計算結果

## 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 Yingyi Liu, Hidetsugu Iwashita, Changhong Hu: A Calculation Method for Finite Depth Free-Surface Green Function, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.7 No.2, pp.375-389, 2015 (査読有) DOI: 10.1515/ijnaoe-2015-0026
- ② Yingyi Liu, Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, Hidetsugu Iwashita, Masashi Kashiwagi: Motion Response Prediction by Hybrid Panel-Stick Models for a Semi-Submersible with Bracings, Journal of Marine Science and Technology, Vol.21, pp742-757, 2016 (査読有) DOI: 10.1007/s00773-016-0390-1

- ③ Changhong Hu, Cheng Liu: Development of Cartesian Grid Method for Simulation of Violent Ship-Wave Interactions, Journal of Hydrodynamics, Vol.28, No. 6, pp.1003-1010, 2016 (査読有) DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60702-3
- ④ Cheng Liu, Changhong Hu, Adaptive THINC-GFM for Compressible Multi-medium Flows, Journal of Computational Physics, Vol. 342, pp.43-65, 2017 (査読有) DOI: 10.1016/j.jcp.2017.04.032
- ⑤ Cheng Liu, Changhong Hu, An immersed boundary solver for inviscid compressible flows, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.85, No.11, pp. 619-640, 2017 (査読有) DOI: 10.1002/fld.4399

[学会発表] (計 3 件)

- ① Yingyi Liu, Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, Hidetsugu Iwashita: Hydrodynamic Analysis of a Semi-Submersible FOWT by Hybrid Panel-Stick Models, 25th International Offshore and Polar Engineering Conference, June 21-26, 2015, USA
- ② Changhong Hu, Cheng Liu: Improvement of Immersed Boundary Method for Simulation of Fluid-Structure Interaction, 31st International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 3-6 April, 2016, Michigan, USA
- ③ Changhong Hu, Cheng Liu: Simulation of Violent Free Surface Flow by AMR-IBM Method, 10th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, November 5-8, 2017, Keelung, Taiwan

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

胡 長洪 (Hu Changhong)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号：20274532

### (2)研究分担者

末吉 誠 (Sueyoshi Makoto)  
九州大学・応用力学研究所・助教  
研究者番号：80380533

### (3)研究分担者

吉田 茂雄 (Yoshida Shigeo)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号：80620137