

平成 27 年 4 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360358

研究課題名(和文) 浮体式洋上風力発電システムに関する波浪安全性評価のためのCFD手法の開発

研究課題名(英文) Development of CFD Method for safety assessment of floating offshore wind turbine systems

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) 6,400,000円

研究成果の概要(和文)：荒天下で洋上風力発電システムに加わる最大風荷重と最大波浪荷重を推定するCFD手法の開発に関する研究を行った。これまで開発してきたCIP・直交格子法を改良して、さらに風車計算モデルと係留計算モデルを追加することで、洋上風力発電用浮体の安全性を評価するための数値シミュレーションができるようになった。また、開発したCFD手法を検証するために暴風・大波に対応する条件で水槽実験を実施した。

研究成果の概要(英文)：Researches have been carried out on development of the CFD method for predicting maximum wave loads and maximum wind loads on floating offshore wind turbine systems. The CIP based Cartesian grid method has been improved and a wind turbine model and a mooring line model have been implemented. Model experiments on the floating wind turbine platform under strong wind and large wave conditions have also been carried out for validation of the CFD code.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：洋上風力発電 安全性評価

### 1. 研究開始当初の背景

従来の石油掘削用の洋上構造物の開発で厳しい操業条件に対応する技術開発はすでに進んでおり、浮体式風力発電開発の技術的な可能性には問題がない。しかし、洋上風力発電用浮体は経済性の観点から軽量化が厳しく求められ、従来の石油掘削プラットフォームと異なる浮体構造・係留方式になる設計が多く、新たに安全性評価に関する課題が出てくる。特に浮体・係留・風車で構成される洋上風力発電システムの安全性確立のために荒天下での浮体システムに加わる最大風荷重と最大波浪荷重に関する高精度推定法の開発が求められている。

洋上風力発電用浮体の流体解析に、波浪荷重はポテンシャル理論に基づく方法で計算され、風荷重と係留力は近似式で求められる実用的な解析手法があり、システムの固有周期の計算や波浪中における疲労荷重の評価などに使われる。一方、荒天下暴風・大波に遭遇した際、浮体に加わる波浪衝撃力及び最大波浪荷重の推定や、浮体の最大動揺量及び最大加速度の推定に必要な、安全性評価に関わる高精度動解析手法がまだ欠けている。

研究代表者はこれまで、荒天下中の船舶耐航性能推定法として、グローバルな船体応答とローカルな波浪衝撃荷重を同時に扱える CIP・直交格子法を開発して、強非線形船舶・波浪相互作用に関する研究を行い、その研究成果は国内外から高く評価が得られている。これらの研究成果を生かして、CIP・直交格子法に新たに風車と係留に関する計算モジュールを開発して洋上風力発電用浮体の波浪安全性推定ツールとして開発していくことが本研究の着想である。

### 2. 研究の目的

本研究は、洋上風力発電用浮体の安全性を評価するために、荒天下の設計条件で浮体に加わる最大風荷重と最大波浪荷重を推定する CFD 手法の開発を目的としている。主要研究項目はこれまで開発してきた CIP・直交格子法の拡張と CFD 手法を検証するために暴風・大波環境に対応する水槽実験の実施である。

### 3. 研究の方法

洋上風力発電用浮体の波浪安全性評価に関する数値シミュレーション方法の開発を目的として、以下の方法で研究を推進してきた。

#### 3.1 CIP・直交格子法の拡張

CIP・直交格子法は、自由表面と船の強非線形相互作用の解析に焦点を当てて開発されたコードであり、波浪衝撃荷重や船の大振幅動揺の計算に成功している。浮体・風車・係留索で構成された洋上風力発電システムを解析するには、この方法に対してさらに機能拡張が必要となり、関連の研究開発を行う。

#### 3.2 水槽実験

開発される CFD 手法の有効性を検証するには、水槽実験のデータが必要である。そのために、九州大学応用力学研究所の水槽に送風機を設置し、暴風・大波に対応する水槽実験を実施する。

### 4. 研究成果

#### 4.1 CFD 開発

浮体・風車・係留索で構成された洋上風力発電システムをシミュレーションするために、CIP・直交格子法に対して機能拡張を行った。図1は拡張される CFD モデルの概要である。この拡張開発に関連する研究成果を以下のようにまとめる。

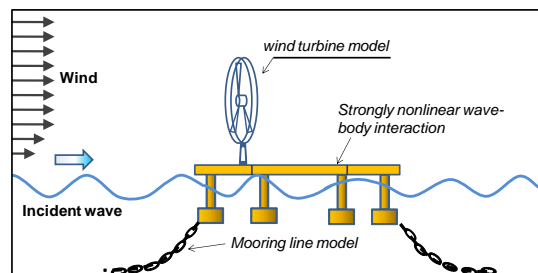


図1 洋上風力浮体の CFD

##### 4.1.1 風車モデルの構築

浮体システム全体の動揺特性を推定するには風車に加わる風荷重を動的に計算する必要がある。風車モデルについて、これまで使っていた Actuator disc 法の代わりに、より計算精度の高い Actuator line 法を新たに導入した。

単機風車に対してシミュレーションを行い、計算精度の確認を行った。図2に風車の翼端渦のシミュレーション結果の一例である。

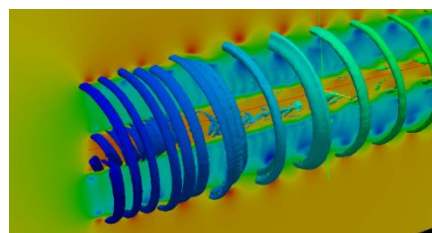


図2 Actuator line 法による風車計算

##### 4.1.2 係留計算法の検討

カタナリー係留の場合、便利のため係留索をバネで近似することが多い。しかし、悪天候時浮体が大振幅動揺を行う場合は、線形のバネ近似を使うと大きな計算誤差が生じる可能性がある。したがって、強非線形現象へも対応できるランプドマス法の導入が必要と考えられている。

ランプドマス法は係留索のように長さに

比べて構成要素の径が小さく、剛性も小さい場合の解析に有効で、汎用性の高い解析法である。この方法では、係留索を有限個の要素に分解して各要素の質量および外力を質点に集中化した「質点系」でモデル化し、これらの質点を質量のないバネで連結して各質点の挙動を差分法により解くことになる。

ランプドマス法を RIAM-CMEN に組み込む方法を検討した。各時間ステップに、係留索の各質点における流速は RIAM-CMEN の計算から求め、係留索との相対運動から質点に加わる流体力を近似的に計算し、質点系に関する方程式を解くことで係留索の運動と張力を求める計算手順を構築した。

#### 4.1.3 浮体運動計算法の改良

風力発電浮体の軽量化を図るために、九州大学ではトラス構造の新型浮体を開発している。直交格子法でトラス構造のような細い部材の計算精度を高めるために、浮体運動計算法を改良した。浮体の計算についてこれまで仮想粒子法で行ったが、計算効率と精度を向上するために、新たにパネル法を開発した。これは構造の形状をパネルで近似する方法で、仮想粒子法と比較してメモリの使用量は大幅減少し、境界周りの流れの計算精度も1次から2次に上げることができるようになった。図3に九州大学が開発したトラス構造の海洋浮体に対して新開発のパネル法により構造表面をパネルで覆う様子と得られた密度関数の等値面を示している。直交格子上細いトラス構造が良く再現されたことがわかる。

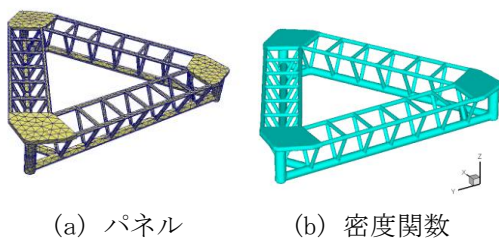


図3 浮体をパネルで表現する方法

#### 4.1.4 並列コード開発

CFD の計算精度は基本的に空間解像度、或いは使える格子数に比例している。洋上風力発電浮体の数値シミュレーションには波と浮体の相互作用のみならず、風と風車の相互作用も考慮されるため、非常に大規模な数値計算になる。それを実現するために、PC クラスタでの並列計算が有効と考えるので、シリアルコードである RIAM-CMEN に対して MPI を利用した並列化開発を行った。

RIAM-CMEN は直交格子を使用したため、一般に計算領域は直方体であり、PC クラスタによる並列計算は図4のように領域分割し、各分割領域の計算は異なる計算ノードで担

当する方法で行っている。開発された並列計算コードに対して十分な検証を施した。

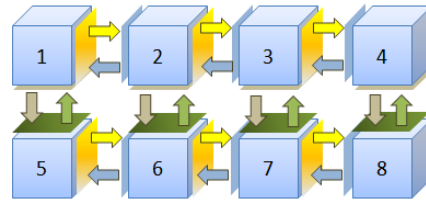


図4 並列コードの領域分割

並列コードの性能調査の一例として波と船の相互作用問題に対してテスト計算を行った。図5に並列化効率を表す加速係数 (Speedup factor) を示しており、高い並列計算効率が得られたことがわかる。

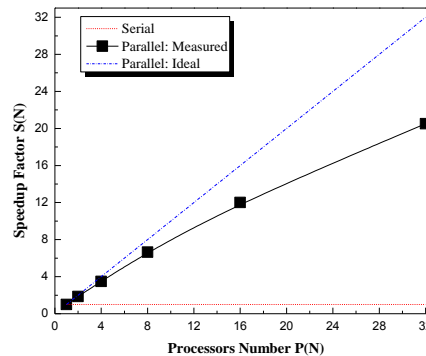


図5 開発された並列コードの加速率

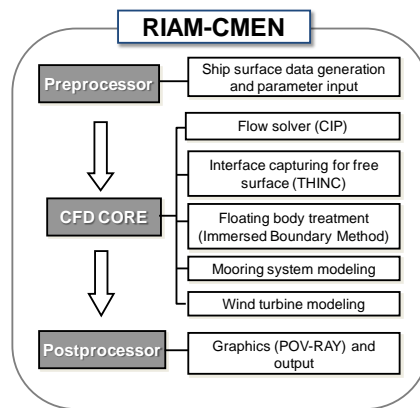
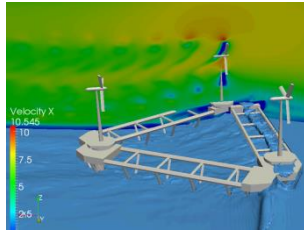
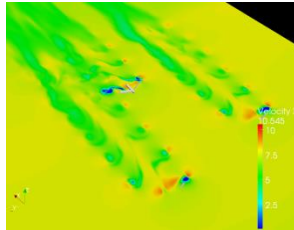


図6 拡張された RIAM-CMEN

本研究で開発された拡張版の RIAM-CMEN の概要は図6に示し、また図7に一計算例として、九州大学が開発された複数風車搭載の洋上風力発電浮体に対する大波・強風条件の数値シミュレーションを示している。空気、水及びその界面を統一コードで計算するために、図7(b)に示すように搭載された複数機風車の干渉も調べることが可能である。



(a) 波と浮体の強非線形相互作用



(b) 複数風車の干渉

図7 拡張された RIAM-CMEN の計算例

#### 4.2 水槽実験

開発された CFD 手法を検証するために、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽（長さ 65.0m、幅 5.0m、深さ 7.5m）で二つの水槽実験を実施した。

##### 4.2.1 波浪中動揺実験

この実験は風を除く波浪中動揺特性を各種数値シミュレーションが再現できるかどうか確認することが大きな目的であった。係留はカタナリー方式を想定しており、水槽幅の制限で実験では係留索をバネで模擬した。水深を実海域に合わせるために水槽に仮底も設置した。浮体の係留方法は図8に示す。

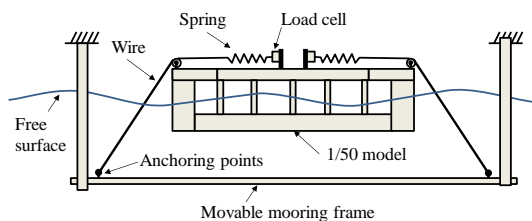


図8 浮体の係留状態の概略

係留機構のバネ定数などの選定については係留設計ソフトウェアにより計算された設置想定海域に対応した風波状態で耐えうるチェーンに相当する値を採用している。図9に実際の浮体の設置状態と甲板上の係留バネ機構の写真を示す。

入射波は規則波で風車稼働時の波高から非常時の大波高まで考慮した。実験結果に対して CFD や線形理論解析の精度検証用に解析・整理を行った。また、高速デジタルビデオカメラにより撮影された実験映像もデータベース化した。

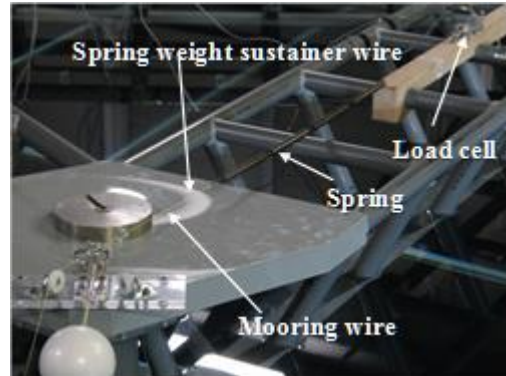
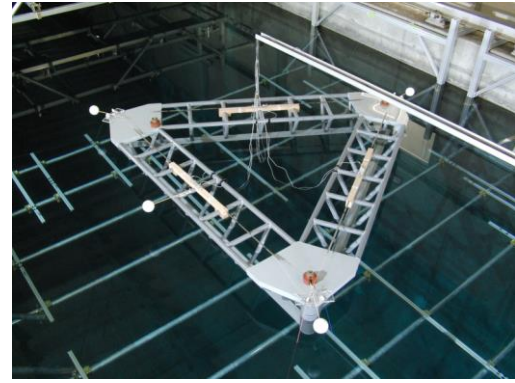


図9 浮体設置状態(上)と係留バネ機構(下)

##### 4.2.2 風波両存の水槽実験

強風・大波の海況は風力発電浮体の安全性を評価するために非常に重要な要素で、CFD 開発の目標でもある。波浪中動揺実験の機構に対して、新たに水槽に送風機を設置し、風波両存の実験を実施した。図10は水槽のレールの上に設置した送風装置の写真である。



図10 送風装置

実験に使う浮体模型は九州大学応用力学研究所を中心とした産学連携研究チームが開発している新型洋上風力発電浮体であり、図9に示した浮体模型の改良版である。模型はアクリル製で、縮尺は 1/50 である。図11は実験中の模型の写真で、風車は抵抗板で近似した。

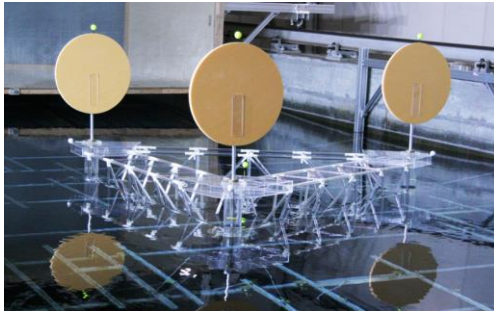
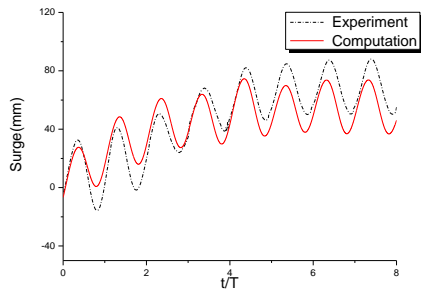
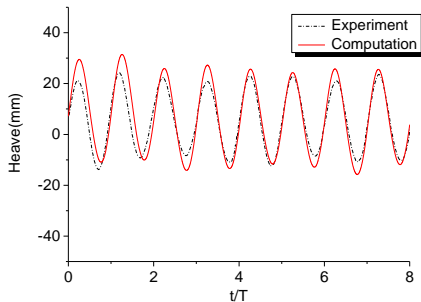


図 11 実験中の浮体模型

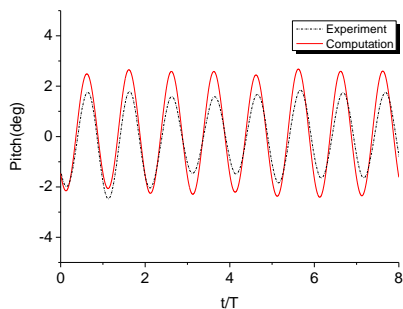
#### 4.3 CFD と実験の比較



(a)



(b)



(c)

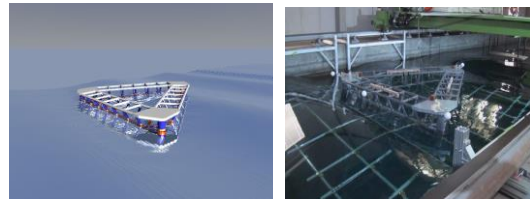
図 12 浮体運動に関する実験とCFDの比較  
( $\lambda/L = 1.3$ ,  $H/\lambda = 1/25$ )

開発された拡張版のRIAM-CMENを使って、4.2.1節に示した実験に対応する計算を行った。

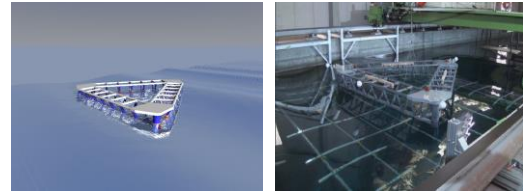
計算条件は次のように設計した。

数値水槽寸法 :	x: $-2.1L \sim 4.9L$ y: $-1.4L \sim 1.4L$ z: $-0.6L \sim 1.6L$
格子数 :	400×280×230
最小格子間隔 :	$\Delta x = 0.00625L$ $\Delta y = 0.005625L$ $\Delta z = 0.00125L$
時間刻み :	$\Delta t/T_w = 1/2000$

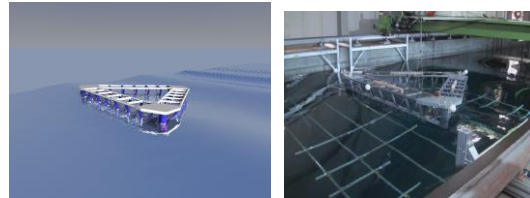
並列バージョンのRIAM-CMENを使用し、計算領域を40分割 (x-axis:10, y-axis:4, z-axis:1) で計算を行った。



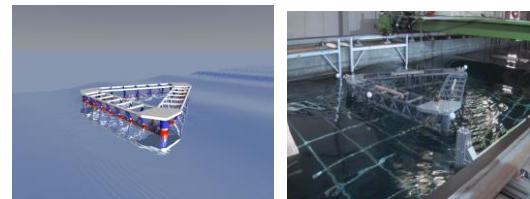
(a)  $t=t_0$



(b)  $t=t_0+0.25T$



(c)  $t=t_0+0.5T$



(d)  $t=t_0+0.75T$

図13 浮体周り自由表面に関する実験とCFDの比較 ( $\lambda/L = 1.3$ ,  $H/\lambda = 1/25$ )

図12に波向き $0^\circ$ 、 $\lambda/L = 0.9$ 、 $H/\lambda = 1/25$ のケースについて浮体運動の比較を示している。RIAM-CMENによる計算結果は計測値と全体的に良く一致していると言える。

しかし、詳細をみると計算したHeaveとPitchの振幅は計測値より大きい。原因の一つは

CFDに使用された浮体模型の慣動半径は直接に計測されたものではなく、構成部材から計算されたものを使用したため、誤差が生じたと考えられる。

一方、Surgeの計算値について最初は計測値より大きく、時間が経つと計測値より小さくなる現象がある。その原因は、係留索に加わる粘性減衰力の評価に問題があると推測される。

このケースに対して計算した自由表面と実験写真の比較は図13に示している。

## 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] Kangping Liao, Changhong Hu: A coupled FDM-FEM method for free surface flow interaction with thin elastic plate, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 18, No. 1, Page 1-11 (doi: 10.1007/s00773-012-0191-0), 2013 (査読有)
- [2] Cheng Liu, Changhong Hu: An Efficient Immersed Boundary Treatment for Complex Moving Object, Journal of Computational Physics, Vol. 274, pp. 654-680 (doi: 10.1016/j.jcp.2014.06.042), 2014 (査読有)
- [3] 胡長洪, 高野 裕文: 洋上風力発電用浮体の安全性評価手法に関する研究, 日本海事協会誌, Vol. 300, pp.27-32, 2012 (査読無)
- [4] Yingyi Liu, Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, Shigeo Yoshida, Yuichiro Honda, Yuji Ohya: Time domain simulation of a semi-submersible type floating wind turbine, Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.1, pp. 288-293, 2014 (査読有)
- [5] Cheng Liu, Changhong Hu: CFD Simulation of a Floating Wind Turbine Platform in Rough Sea Conditions, Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.1, pp 325-329, 2014 (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- [1] Cheng Liu, Changhong Hu: Parallel Implementation of CIP-based Method for Wave-Ship Interaction Simulation, 日本船舶海洋工学学会講演会, 神戸, 2012年5月18日, 神戸
- [2] 胡長洪, 末吉 誠, 劉 成, 経塚 雄策, 大屋 裕二: 波浪中洋上風力発電用浮体の CFD シミュレーション, 日本船舶海洋工学学会講演会, 2013年5月28日, 広島
- [3] Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, Cheng Liu, Yusaku Kyoizuka, Yuji Ohya:

Numerical and Experimental Study on a Floating Platform for Offshore Renewable Energy, 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 12 June 2013, France

- [4] Cheng Liu, Changhong Hu: CFD Simulation of a Catenary Moored Floating Wind Turbine Platform in Large Waves, 第18回計算工学講演会, 2013年6月19日, 東京
- [5] Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, Yusaku Kyoizuka, Shigeo Yoshida, Yuji Ohya: Development of New Floating Platform for Multiple Ocean Renewable Energy, GRAND RENEWABLE ENERGY 2014, 28 July 2014, Tokyo
- [6] Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, Cheng Liu, Yingyi Liu: Hydrodynamic Analysis of a Semi-Submersible Type Floating Wind Turbine, the 11th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS-2014), 12 October 2014, China

[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

経塚 雄策 (KYOUZUKA YUSAKU)  
九州大学・総合理工学研究院・教授  
研究者番号: 80177948