

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360434

研究課題名（和文） 大規模洋上風力発電のためのセミサブ型六角形浮体群の最適設計

研究課題名（英文） Optimum Design Method of the Group of Hexagonal Floating Platforms for Ocean Wind Farm

研究代表者

経塚 雄策 (KYOZUKA YUSAKU)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：80177948

研究成果の概要（和文）：

本研究は、再生可能エネルギーの利用促進のために、六角形浮体を要素浮体として考え、それを多数連結することによって大規模洋上風力発電ファームとして構築することを最終目的として実施された。対象とする浮体の形式は、洋上風力発電のみを行うスパーブイ式浮体ではなく、デッキが存在し、海上において揺れが少ない安定したプラットフォームであり、風力発電以外にも太陽光発電や波浪発電などが行え、さらには六角形の内水面を水産目的でも利用可能な浮体群である。要素浮体は、6本の円柱カラムで支えられる六角形浮体とし、浮体の流体力の計算は円柱カラム間の相互干渉理論によって効率的に行われた。浮体の安全性に関わる環境条件としては、風と波が複合的に作用するときの浮体に加わる流体力および動揺であるが、極限的な環境下においてそれらを考慮するために計算流体力学（CFD）を用いて予測可能とするためのツールの開発を行った。また、風車を搭載した大型の模型によって風と波が複合的に働く条件を水槽に作り実験を行った。最後に、博多湾において直径18mの六角形浮体を設置して海上風力発電を行うプロジェクトのための浮体の基本設計を行った。この浮体は、平成23年12月に完成し、現在、博多湾において1年間の予定で実証実験を行っている。

研究成果の概要（英文）：

Final goal of the present study was planned to develop the large scale offshore wind farm consisting of the many numbers of the hexagonal floating platforms for the utilization of the ocean renewable energies. The floating platform of the present study is stable to the rolling and pitching motions among waves, deferent from the spar-type floating offshore wind buoy, and it is used for the multi-purpose such as the base of the solar panels and the wave power apparatus, including the fishery activities inside the hexagonal platform. A unit platform is supported by the 6 vertical cylinders which are connected by the truss. The hydrodynamic forces/moments of the platform among waves are calculated by the interaction theory for many numbers of floating bodies. For the safety of the floating platforms, the wave and wind loads acting on the platforms should be considered under the extreme environmental condition. The computational fluid dynamics (CFD) analysis is applied and developed for such severe conditions. The model tests under the winds and waves were conducted in the tank. Finally, the principal dimensions of the floating platform in Hakata Bay were determined on the basis of the present study. The hexagonal platform of 18m diameter has been installed in Hakata Bay since December 2011 and the various measurements including the meteorology data, the electric powers by the wind turbines and solar panels, and motions of the platform are undergoing in the real sea for one year.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	10,500,000	3,150,000	13,650,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：洋上風力発電、セミサブ型浮体、六角形浮体、波浪強制力、係留力

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策の一環として再生エネルギーの利用拡大が急務となっており、特に地表の7割が海洋であることから、海洋エネルギーに対する期待が高まっている。九州大学においても平成18年度に「SCF (Second-Generation Carbon Fiber)研究会」を立ち上げて、洋上風力発電の実用化を目指した研究を開始した。その基礎となる革新的な技術は、鋼材と同等以上の強度・剛性をもつ第2世代炭素繊維強化プラスチック (SCFRP) とコンクリートによって浮体を建造することであり、従って、鋼材を用いる場合に重要となる海水による腐食とメンテナンスの問題は最小化できることになる。本研究では、長期にわたりメンテナンスフリーの大規模洋上風力発電ファームを実現するために「セミサブ型六角形浮体群」を提案し、それらの浮体群の波浪中動揺および係留力を最小化するための設計法の確立を目指す。現在、日本周辺海域における洋上風力発電のためにいくつかの形式が提案されているが、設置海域の地理的な条件、特に水深および周辺の海流・潮流の状況によって最適な浮体形式は変わりうると思われる。また、発電した電力の利用法については陸上への送電が可能であれば形式は問題ではないが、それが難しい場合には電力を別の形、例えば、水素やエタノールあるいは圧縮空気などに変換して輸送する必要がある。その目的には「スパブイ式」などの適用は難しく、一定以上の浮力が確保可能な浮体形式によって各種プラント装置を搭載しなければならない。一般に外洋においては波浪の作用が大きいため排水量大きな浮体は不利となるが、浮体形状を半潜水式 (セミサブ式) にすることによって波浪の影響を最小にすることが出来る。

本研究では大きな排水量のローワーハルについては SCFRP を骨材とするコンクリート

によって製造し、これと甲板上構造物をつなぐコラムをトラス構造とするセミサブ式浮体を想定している。近年建造される海洋石油掘削のためのセミサブ式浮体の多くはローワーハルとコラムの組み合わせが単純化されていて、ポテンシャル理論による流体力計算が良い精度をもっているが、トラス構造のコラムについては、粘性流体力の影響が大きくなるのでポテンシャル理論のみでは不十分であると考えられる。また、海洋石油掘削のためのセミサブ式浮体は単体として用いられることが多く、本研究で想定しているような多数の浮体群としての波浪応答については報告がない。六角形浮体とすることは下図のように多数連結して用いる場合には有利である。

本研究の学術的な興味をまとめると、六角形浮体という従来にない形状の浮体、トラス構造による複雑構造物、多数の浮体群としての干渉影響、洋上風力発電時の風力モーメントの評価と浮体の安全性確保、などの課題をどのように取扱うかということになる。



2. 研究の目的

本研究において考察する大規模洋上風力発電ファームの実現性に関する大きな要素は、設置海域における構造物の長期の安全性である。特に、日本の周辺海域では台風によ

る影響が避けられず、中でも波浪による影響は最大のものである。本研究では、3年間の期間において以下の課題について取り組む。

1. 円柱トラスを含む複雑形状浮体の波浪流体力の計算法を確立する。具体的には、ローワーハルについてはポテンシャル理論に基づく特異点分布法、円柱トラス構造コラムについてはクーリガン・カーペンター数(KC数)による粘性流体力を考慮した算定式を足し合わせる予定である。この方法の妥当性を検討するために模型実験を行う。
2. 多数の浮体群の流力特性および動揺応答を単体の浮体の場合と比較し、浮体間干渉について考察する。
3. 単体浮体の波浪漂流力の推定法を確立し、多数の浮体群へと拡張する。波浪漂流力については、通常、ポテンシャル理論を用いた運動量理論によって波の反射波係数から求められているが、円柱トラス構造のコラム部についてはポテンシャル理論による取扱いでは不十分であるため、その取扱法が課題である。
4. 波、風、流れの複合外力下における風車稼働時の転倒モーメントによる浮体運動の安全性について検討する。
5. 浮体の係留システムは、アンカー・チェーンが用いられることが多いが、チェーンの動的挙動は非線形であり、その解析は数値解析によって行われる。浮体の最適形状に関する設計法は係留システムを考慮して行う。

### 3. 研究の方法

平成21-23年度における主な研究課題は以下であった。

(1) 浮体間の流力干渉を考慮した複数浮体の流体力の計算法の開発 (経塚)

円柱コラム型六角形浮体は、6本の鉛直円柱の浮力によって支えられており、流力干渉は円柱間の反射波によって発生する。このような問題については、Kagemoto-YuのMatrixを用いた解析手法が効率的であることが知られており、本研究ではこれを適用して多数の六角形浮体の波浪外力の解析を行う。

(2) 風と波浪の複合外力下における六角形浮体の動揺シミュレーション (経塚・胡)

暴風時の六角形浮体の流体力および動揺応答について、波浪と風を考慮した3次元CFD(Computational Fluid Dynamics)によるシミュレーションを行う。これによって、複合外力時の洋上風力発電浮体の安全性について考察を行う。

(3) 発電時の風車に加わる転倒モーメントおよび六角形浮体の動揺 (経塚・大屋)

洋上風力発電浮体の安全性を考える場合に重要となるのは、風車に加わる風荷重およびモーメントであるが、定常風については昨年の研究によって明らかとなった。ただし、実際の風は変動するので、その影響を考慮する必要がある。そこで、2.4mの浮体模型に風車模型を搭載して実験的な研究を行う。

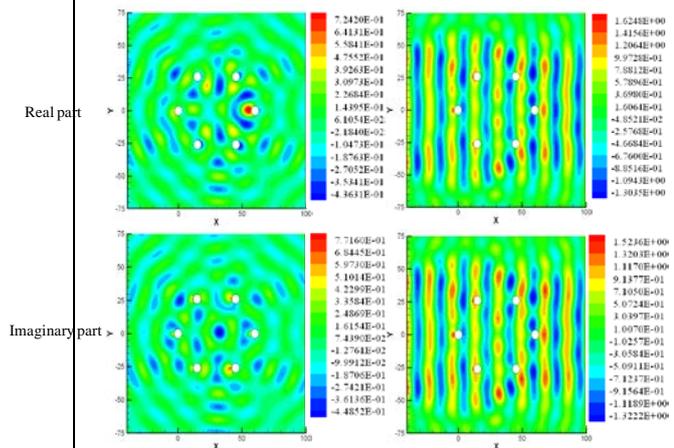
(4) 博多湾における洋上風力発電の実証実験のための六角形浮体の試設計 (経塚・大屋・胡)

博多湾内に直径約18mの六角形浮体を浮かべて、洋上風力発電の実証実験を行う。そのための六角形浮体の試設計を行う。まず、設置位置の水深、地形、航路、漁場との利害を考慮して候補地を絞り込む。次に、その地点での環境条件として、風、波浪を過去の統計データを元にして推定し、浮体の動揺、風力発電量、稼働率などの算定を行う。また、建造費、維持運営費と発電量からコスト評価を行い実現可能性について考察を行う。

### 4. 研究成果

(1) 浮体間の流力干渉を考慮した複数浮体の流体力の計算法の開発 (経塚)

Kagemoto-Yuの理論によって、6本円柱コラムによって支えられる六角形浮体の波浪中の解析を行った。下図は、その結果の一例であり、水深16mの浅海域に設置された直径60m、円柱コラム直径6mの六角形浮体が周期3.5秒の規則波を左側から受ける時の水面変位を図示したものである。左図は、入射波を除いた波紋であるが、現象は周期的に変動するので複素数によって表現した場合に、上が実部、下が虚部の水面変位を表している。右図は、入射波も含めた水面変位であり、この結果をみるとこの周期の入射波については、

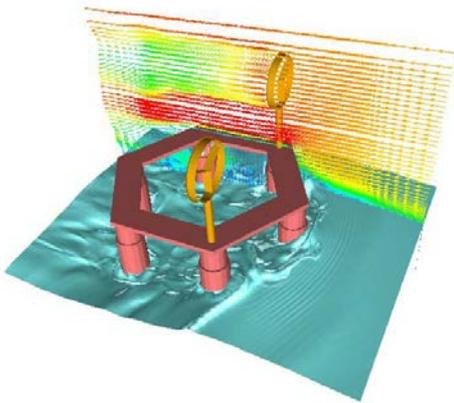


円柱コラム間の波の干渉効果が明瞭であり、場所によって水面変位が変化してことが分かる。このような円柱コラム間の波の干渉効果は入射波の波長と浮体の直径の比に強く依存しており、入射波長が大きくなると円柱コラムによる波の反射は小さくなり、円柱カ

ラム間の干渉効果も無視できるようになることなどが分かった。

### (2) 風と波浪の複合外力下における六角形浮体の動揺シミュレーション

洋上風力発電浮体の暴風雨時の安全性については、強風下の風車に加わる風荷重および大波高時の浮体運動が重要となる。従来は、これらの風荷重と波浪荷重は別々に解かれた後、足し合わせて近似されていたが、現実には複合外力として同時に考慮すべき問題である。本研究においては、計算流体力学(CFD)によって、気液2相流体問題として解くことを試みた。下図は、その結果の一例であり、強風と大波高の波が同方向から作用する場合の六角形浮体の周りの風速ベクトルと水面変位の様子を示したものである。浮体の係留はアンカー・チェーンによっており、浮体の動揺とチェーンの張力も求められている。本研究で開発されたCFD手法によれば、さらに浮体のデッキに波が乗り上げるような極限的な状況下においてもシミュレーション可能である。

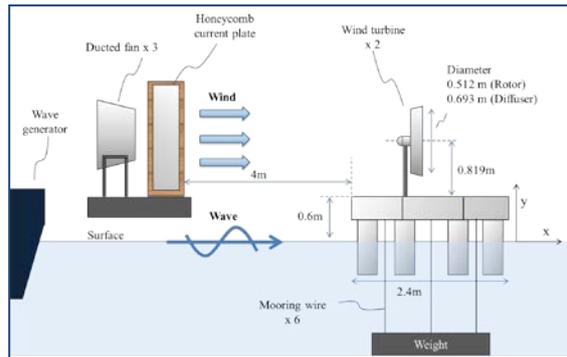


### (3) 発電時の風車に加わる転倒モーメントおよび六角形浮体の動揺

浮体式洋上風力発電の実用化のためには、実海域における浮体および風車の安全性を確保することが必要である。通常浮体については、波浪のみを考慮すれば良いと考えられているが、洋上風力発電用浮体については、浮体上の風車に働く風荷重の影響が大きい



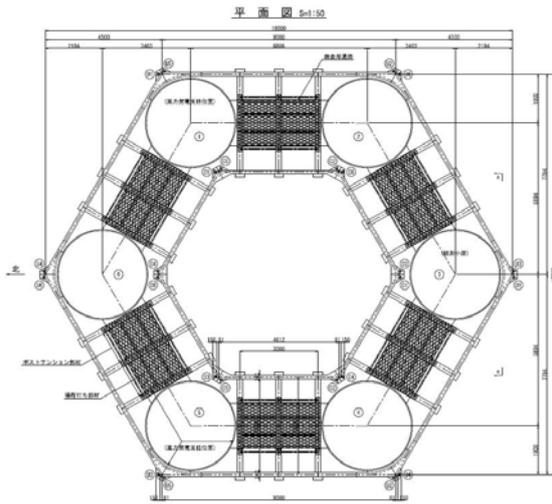
ので風車と浮体の連成運動を考慮する必要がある。本研究では、洋上風力発電用の浮体の模型を用いて水槽実験を実施した。下図は、今回の実験で用いられたブレード直径 512mm、ディフューザ直径 693mm の風レンズ風車を搭載した直径 2.4m の六角形浮体の模型の写真である。水槽は、応用力学研究所の長さ 65m、幅 5m の深海水槽であり、水槽内に送風機を一時的に設置して実験を行った。浮体の係留は、6本のピアノ線を用いて TLP(Tension Leg Platform)法によった。模型実験の概略を下図に示す。



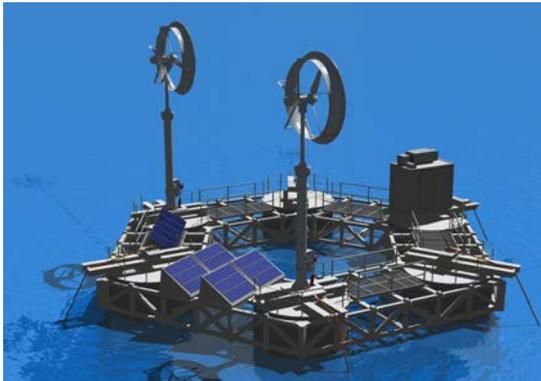
模型実験のケースとしては、風と波をそれぞれ単独で作用させる場合と複合して作用させる場合について行った。複合外力下については、風速を2種類、入射波は波高を2種類、周期を12種類、風車については発電/停止モードで風との正対角を3種類変えて実験を行い、浮体の変位と TLP の張力を計測した。その結果、風のみ浮体の運動から、風車の風荷重の大きさが明確となった。波単独の実験については、通常行われているポテンシャル理論との比較が行われた。この浮体については、波漂流力は小さく、波・風共存場における定常変位はほぼ風荷重だけを考慮してもよい近似となった。ただし、この結果については係留システムが変わった場合には再チェックが必要であろう。

### (4) 博多湾における洋上風力発電の実証実験のための六角形浮体の試設計

博多湾において、海上風力発電の実証実験を行うために直径 18m の六角形浮体の基本設計を行った。この事業は、環境省の委託事業である「平成 23 年度地球温暖化対策技術開発事業」「風レンズ技術を核とする革新的中型・小型風車システム導入に関する技術開発」(研究代表者：大屋裕二)において行われたが、本研究テーマとも重なる部分が多く、浮体の設計および係留システムについては、本研究の成果が活かされた。上図は、直径 18m の六角形浮体の詳細図を示しており、直径 3.5m のコンクリート製鉛直円柱 6本の浮力体とそれらを繋ぐトラス材からなっている。甲板上には、3kW の風レンズ風車 2基と 1kW お



よび0.5kWの太陽光パネルが搭載されており、最終的な排水量は140トンとなった。この浮体の設置位置は、博多湾内の水深約5mの海域であり、係留法は20トンのコンクリート製アンカーブロック6個とナイロン製ロープ（直径45mm）を用いて行われている。この浮体は、平成23年12月に博多湾内に設置され、1年間の予定で実海域での性能試験を行うことになっている。下図は、浮体および風車のスケール比を忠実に表現したCGである。



## 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3件）

- ① 末吉誠、胡長洪、経塚雄策、他2名：六角形型洋上風力発電プラットフォームの水槽実験、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第12号、2011, pp.39-40.
- ② 胡長洪、末吉誠、経塚雄策、他1名：大波高波浪中洋上風力発電用浮体に関する数値シミュレーション、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第12号、2011, pp.41-42.
- ③ 経塚雄策、粕谷 翔、長沼弘樹：洋上風力発電用六角形浮体の波浪中動揺性能、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第11号、2010, pp.153-156.

〔学会発表〕（計6件）

- ① 経塚雄策：浮体式洋上風力発電の最新動向と今後の期待、学士会夕食会、平成24年3月9日、東京都。
- ② 末吉 誠：六角形型洋上風力発電プラットフォームの水槽実験、日本船舶海洋工学会、平成23年5月20日、福岡市。
- ③ 胡長洪：大波高波浪中洋上風力発電用浮体に関する数値シミュレーション、日本船舶海洋工学会、平成23年5月20日、福岡市。
- ④ 経塚雄策：洋上風力発電用六角形浮体の波浪中動揺性能、日本船舶海洋工学会東部支部講演会、2010年11月12日、東京都。
- ⑤ 経塚雄策：洋上風力発電用六角形浮体の波浪中動揺性能について、日本船舶海洋工学会、平成21年11月20日、熊本県荒尾市。
- ⑥ 経塚雄策：洋上風力発電用六角形浮体の波浪中動揺性能について、佐賀大学海洋エネルギー研究センター全国共同利用研究成果発表会、平成21年9月4日、佐賀大学海洋エネルギー研究センター、伊万里市。

〔その他〕

NHK教育テレビ、「サイエンス・ゼロ」にて放送、2012年2月4日放送分

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

大屋裕二 (OHYA YUJI)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号：00150524  
胡長洪 (HU CHANGHONG)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号：20274532

### (3) 連携研究者

なし