

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25年5月10日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360365

研究課題名（和文） 海洋再生可能エネルギー開発のための最適プラットフォームシステムに関する研究

研究課題名（英文） Optimal Platform for Ocean Renewable Energy Development

研究代表者

鈴木 英之（SUZUKI HIDEYUKI）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：00196859

研究成果の概要（和文）：

洋上再生可能エネルギーのうち、洋上風力、波力、海流発電について利用可能な資源量の評価を行った。ついで浮体式発電システムの安全性評価のために、風波流れ共存場における発電システムの動的弾性応答解析プログラムを開発した。これを用いて1つの浮体に複数の発電装置を設置する方式と単機能の発電装置を複数配置する方式について、技術的に成立するシステムを提案した。最後にこれらをファームで運用する場合について洋上風力発電を例に連鎖漂流リスク評価手法の構築を行った。

研究成果の概要（英文）：

Resources of offshore wind, wave and current were evaluated. Dynamic analysis code of a floating offshore renewable energy development system was developed. Multiple-Function-Single-Floater concept and Single-Function-Multiple-Floater concept which are technically feasible were proposed. Analysis method of progressive drifting of the floating systems when the systems are operated in a farm was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2011年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

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：海洋再生可能エネルギー、資源量評価、洋上風力発電、海流発電、波浪発電、複合利用、連鎖漂流リスク

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーの開発は、地球温暖化問題および石油価格の高騰を受けて2000年頃から取り組みが活発になり、特にヨーロッパが積極的に取り組みを進め世界をリード

してきた。

わが国は人口に比べて国土面積が小さく、その上、国土の約70%が山地であり、生産活動や居住などの土地利用が平地に集中しているという特徴を有している。一方で、洋上

に目を向けると海岸線は長く、排他的経済水域も世界第6位の面積を有しており、海洋再生可能エネルギーの資源量は膨大であり、早くから有望な資源として注目されてきたが取り組みは進まなかった。本研究は研究開始時点のこのような状況を背景として、技術的に成立し、かつ効率の良い海洋再生可能エネルギー開発システムを検討し提案することを目的として開始された。

一方、研究開始一年後に発生した東日本大震災とこれに起因する福島原子力発電所の事故により、エネルギー政策は見直しを迫られており、海洋再生可能エネルギー利用への期待が高まっている。本研究は、海洋再生可能エネルギーの持つポテンシャルを明らかにし、短所であるコスト高、供給の不安定を軽減するための複合利用、ファームで運用したときの安全性に係るリスクの評価法に着目して研究を実施したものである。

2. 研究の目的

わが国周辺海域の自然環境条件の中で技術的に成立し、安全性を兼ね備えた、大規模な海洋再生可能エネルギー開発に向けて、わが国周辺海域の利用可能資源量を明らかにし、さらに、大規模に海洋再生可能エネルギーの開発を行うための課題である効率向上に向けて、複合利用に関して新形式のプラットフォームを提案し、応答解析プログラムを開発して技術的成立性を検討する。特に設置海域におけるプラットフォームの挙動を明らかにして、技術的成立性を確認するとともに、安全性に関しては、大規模開発にともなうリスクとして、船舶衝突などにより漂流を開始したプラットフォームによって引き起こされる連鎖漂流事故に関するリスク解析法を開発し、浮体式風車によるウインドファームを例に連鎖漂流リスクの解析を行った。

3. 研究の方法

(1) 海洋再生可能エネルギーの利用可能資源量に関する調査

風、波、潮流・海流といった、近い将来洋上に展開が期待されるエネルギー資源について、最新の計測結果、シミュレーション結果を入手して、可能な限り細かな時間解像度で発電装置の出力を評価した。可能な範囲で時系列出力も利用にし、可能な限り高い解像

度で賦存状況を明らかとし、エネルギーポテンシャルマップを作成した。併せてプラットフォーム設置海域の典型的な自然環境条件を明らかにして、プラットフォーム検討に用いた。

① 洋上風況データ (GPV-MSM)

気象庁により運用されているメソ数値予報モデル GPV-MSM を使用した。データセット格子間隔は 5[km]メッシュであり、緯度方向は 0.05[°]間隔、経度方向は 0.0625[°]刻みとなっている。観測データ同化により得られる初期値は 3 時間間隔で存在し、1 日につき 8 つの値が提供される。データ領域は、緯度に関しては北緯 22.4~47.6[°]、経度に関しては東経 120~150[°]である。

利用可能資源量の計算は、定格出力 5MW スパー型風車を 1[km²]あたり 0.63 基設置し、これによって得られる発電電力量から、1[km²]あたりの年間を通じての平均発電量 [kW] を資源量として表示した。評価結果の一例を図 1 に示す。

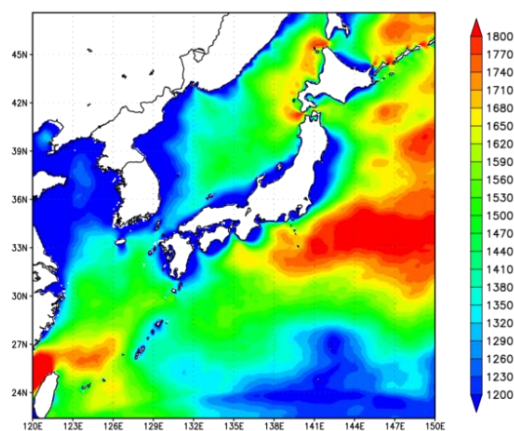


図 1 洋上風力発電利用可能資源量 (年平均 [kW/ km²])

② 波浪データ (GPV-CWM)

気象庁により運用されている沿岸波浪数値予報モデル GPV-CWM を用いた。波浪モデルでは、波浪が風浪として発生し、消滅する一連の現象を数式で表し計算している。予報変数としては、波周波数と波向の関数として表される波の 2 次元エネルギースペクトルである。気象庁では、全球波浪モデルと沿岸波浪

モデルの2種類を運用している。沿岸波浪モデルは日本近海の領域のみを対象としているが、全球波浪モデルと比較して高い解像度で計算されている。本研究においては、沿岸波浪モデルを利用している。

波力発電の資源量評価には、Pelamis Wave Power 社製 Pelamis P2-750 を用いる。1ユニットあたりの定格出力は 750[kW]である。設備利用率は、年間平均で 25~40[%]が想定されている。装置を 1[km²]あたり 40 基を配置して検討を行った。評価結果の一例を図 2 に示す。

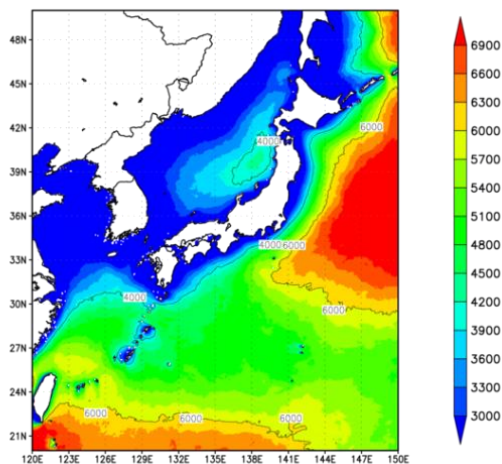


図 2 波力発電利用可能資源量 (年平均[kW/km²])

③ 海流データ (FRA-JCOPE2 再解析データ)

JAMSTECによるFRA-JCOPE2再解析データを使用した。本データはJAMSTEC ダウンスケール沿海変動予測研究チームにより 1993 年から現在まで作成されている。データ作成の目的は、黒潮、黒潮続流、親潮などの変動を記述するためである。データ作成に際しては、衛星データ、現場水温塩分データを海洋循環モデルに同化することにより行っている。データセット格子間隔は水平 1/12[°]である。

海流発電システムは3ロータ型で、各ロータの定格出力は 333[kW]である。ロータ直径は 19.32[m]で、定格流速は 1.7[m/s]である。位置保持は中間ブイを用いた合成繊維索を用いたトート係留である。資源量評価には水深 50[m]における流速を用い、1[km²]あたり 6.94 基設置することとした。評価結果の一例を図 3 に示す。

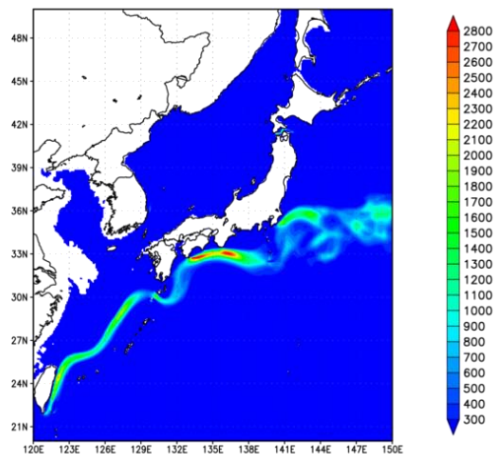


図 3 海流発電利用可能資源量 (年平均[kW/km²])

(2) 新形式プラットフォームに関する検討

① 新形式プラットフォームの提案

本研究では複合利用発電の方式として、一つの浮体に複数の発電装置を設置する単一浮体複数発電装置方式(SFME方式)と、単一機能の発電装置を同一海域に複数設置する単機能装置複数配置方式(SSFE方式)を提案した。SFME方式プラットフォームとSSFE方式プラットフォームをそれぞれ図4と図5に示す。

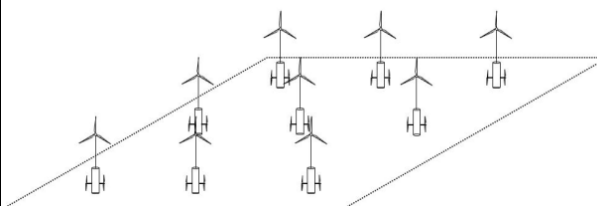


図 4 SFME方式複合利用プラットフォーム

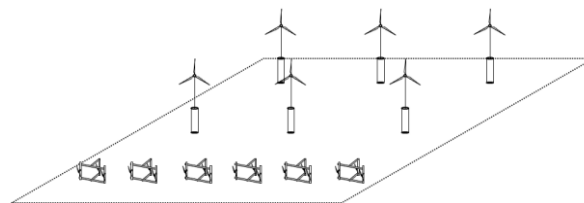


図 5 SSFE方式複合利用プラットフォーム

② 複合利用による利用可能資源量評価

複合利用発電の利用可能資源量評価は、洋上風力発電と海流発電の定格出力構成割合を変化させることにより行った。

利用可能資源量の大きさからすると、複合利用発電に適する海域は紀伊半島南方が最有力となり、次いで伊豆諸島となった。ただし、伊豆諸島に関しては黒潮の流路に依存して利用可能資源量が大きく異なるため、より詳細なデータセットにより解析する必要がある。

出力変動に関しては、洋上風力発電出力と海流発電出力では、その変動の周期特性が大きく異なる。洋上風力発電出力に関しては数時間単位で定格出力から出力なしに変動することもあり、出力変動周期が短い。また、海流発電出力に関しては数日から数週間の間は同程度の出力がある。このように、両発電とも設備利用率の振幅としては 0% から 100% まで変化するが、その時間スケールが異なる。このことから、一方の出力が低くなれば、もう一方の出力が高くなり、全体としての出力は安定的であるような相互補完性はあまり期待できない。

(3) 新形式プラットフォームの応答解析法の開発

SFME 方式や SSFE 方式の複合利用発電システムの応答解析と設計のために動的応答解析プログラムを開発した。

① 動的弾性応答解析プログラム

開発した応答解析法は、発電システムを骨組構造物としてモデル化し、骨組構造の運動方程式を、時間領域で解く非線形時刻歴解法である。発電システムを構成する骨組の情報から剛性マトリクス、質量マトリクスを生成する。次に、骨組部材要素ごとに、風力、波力、潮流力による外力ベクトルを計算し、全体運動方程式をニューマーク β 法により時間領域で解き、変位、応力を求めるものである。

② 応答解析プログラムの検証

応答解析プログラムの検証のために、5MW-NK セミサブ型浮体式風車モデルを用い

て、波浪中動揺計測実験を行い、周波数応答関数を作成して計算結果との比較を行った。併せて、既存の浮体-風車連成応答解析コード FAST との比較も行った。実験では、規則波中動揺実験および不規則波中動揺実験を行った。規則波中動揺実験結果についてヒープ運動に関する比較結果の例を図 6 に示す。図中で UTWind となっているのが、開発したプログラムの結果である。実験と計算の一致度は、その他の結果についても良好であり、FAST と同等以上になっている。

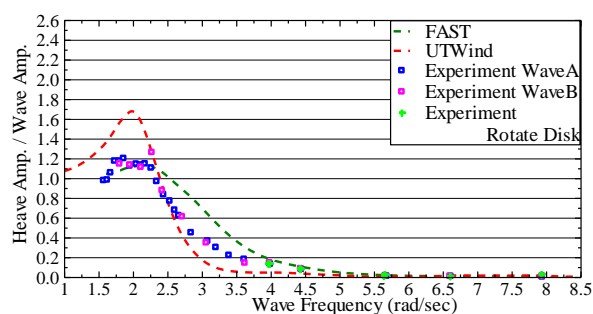


図 6 ヒープ運動に関する実験と計算の比較

(4) プラットフォームの成立性に関する検討

開発した動的応答解析プログラムを用いて、わが国周辺海域の代表的自然環境を条件の下で、許容応力を $18[\text{kgf}/\text{mm}^2]$ とし、機能性クライテリアとして、静的傾斜と動的傾斜を合わせた最大傾斜を $10[^\circ]$ 以下に抑えるという条件の下で、SSFE 方式で用いるスパイ型浮体式風車と SFME 方式で用いる風車と 2 ロータ型海流発電システムを組合せたモデルの評価を行った。搭載する風車はいずれも NREL の 5MW 風車である。SFME 方式の解析モデルを図 7 に示す。

(5) ファームで運用する場合の連鎖漂流リスク評価式

発電装置をファームで運用した場合のリスクの中で、発電装置単体に止まらないシステム全体のリスクとして、連鎖漂流リスクについて検討した。リスクは漂流船舶が、風、流れ、波の条件下で漂流し、WF に進入して浮体式風車と衝突し、さらに衝突によって新た

に漂流を開始した風車が他の風車と衝突して連鎖的に漂流する現象について、風車の稼働期間中の総漂流数を、風向風速発現確率、船舶漂流確率を考慮して評価するものである。

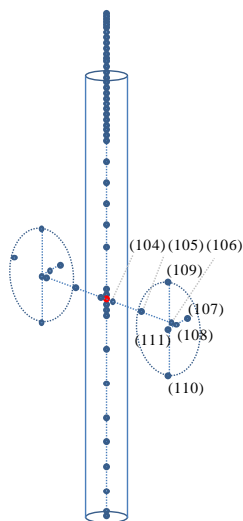


図7 スパー型浮体及び海流タービン骨組構造モデル

① 連鎖漂流シミュレータの開発

本シミュレータでは、ある場所から漂流した船舶が、風と流れと波の条件下で漂流し、WFに進入してスパー型風車と衝突し、これにより漂流を開始した風車が他の浮体式風車とさらに衝突して連鎖漂流するときの漂流風車の総数を求めるものである。

計算手順は、まず海象や船舶などの各種条件を設定した上で、船舶と風車の漂流運動を計算する。始めは船舶のみが漂流しているが、船舶が風車に衝突し風車の係留索が破断と判定された場合、風車も漂流を開始する。このような運動計算を、全ての漂流浮体がウインドファームを抜け出すまで繰り返し行い、特定条件下での風車の漂流基数と係留索の破断本数を求め、それぞれに条件発現確率をかけてリスクの期待値を算定する。条件を変えて同様に計算を行い、最後に全条件での計算結果を足し合わせることで、供用期間内の全漂流風車基数と全破断係留索本数の期待値を算出する。

② 衝突の素過程

衝突シナリオについては、1) 船舶と係留風車の浮体部分が衝突、2) 漂流風車の浮体部と係留風車の浮体部あるいは係留索の衝突、3) 漂流風車の引きずる係留索と係留風車の係留索の衝突の3つに分類した。その上で、シナリオに沿って、係留索破断の可能性を実験的に検討した。漂流風車と係留風車の衝突時の際の、係留索同士の衝突では係留索は破断せず、漂流風車浮体部と係留風車(浮体部または係留索)の衝突の場合にのみ係留風車係留索は必ず破断するということが明らかになった。

風と波の条件に関しては、海上技術安全研究所の詳細版日本近海の波と風データベースを基に、発現確率を設定した。海流については、J-DOSSの海洋データ・情報の閲覧・提供サービスに基づいて設定した。漂流船舶については、各港湾建設事務所の統計年報や海上保安本部の海難状況データなどに基づいて設定した。

③ 解析結果の考察

係留系設計の安全率と、風車漂流基数の期待値とは密接な関係があり、安全率が高いほど連鎖漂流期待数が小さくなることが分かった。安全率が2から3に増えることによって、期待数は1/20になることが分かった。

4. 研究成果

海洋再生可能エネルギーの利用可能資源量評価については、洋上風力、波力、海流発電の原始資源量、利用可能資源量を評価した。

洋上風力発電において、設備利用率の高い海域が稚内沖、津軽海峡沖、伊豆諸島沖、紀伊半島南方沖であることが分かった。波力発電については日本近海で高い設備利用率が期待できないことが分かった。複合利用に関して、洋上風力発電と海流発電の組合せについては、出力変動の周期特性の違いから相互補完性が低いことが分かった。

複合利用発電システムの挙動解析および設計のために、風波流れ共存場における動的弾性応答解析プログラムを開発した。

複合発電方式に関して SFME 方式が有効と

なるためには、利用可能資源量が大きいこと以上に、発電システムの設備利用率がより重要な要因となり、洋上風力発電と海流発電システムの設備利用率がほぼ等しい場合、複合利用発電による発電コスト低減が可能であることが分かった。

風車の連鎖漂流リスク評価手法について、浮体式洋上風車のウインドファーム内での船舶衝突を考慮した風車漂流リスク評価式を提案し、これを計算するシミュレータを開発した。また、風車同士の衝突時における係留索破断条件の明確化を行い、漂流する船舶、風車と係留風車の衝突シナリオを明らかにした上で、係留索破断実験を行い、係留風車の係留索破断条件を明らかにした。

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)

[学会発表] (計5件)

- ① 今村博, 戸塚義孝, 鈴木英之, 岩下智也, NK浮体モデルによる IEC 61400-3 の設計荷重条件の評価、第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム、2012 年 11 月 28 日、科学技術館 (東京)。
- ② 柴田創, 鈴木英之, 平林紳一郎, 石井希実子、浮体式洋上風車の風車-浮体連成応答解析プログラム“UTWind”の開発”、第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム、2012 年 11 月 28 日、科学技術館 (東京)。
- ③ 平林紳一郎, 鈴木英之、格子 Boltzmann 法による高 Reynolds 数 VIM 解析、平成 24 年日本船舶海洋工学会秋季講演会、2012 年 11 月 27 日、東京大学柏キャンパス総合研究棟 (千葉)
- ④ 石井希実子, 鈴木英之, 平林紳一郎、TLP 型浮体式洋上風車の転倒挙動に関する研究、第 23 回海洋工学シンポジウム、2012 年 8 月 2 日、日本大学駿河台キャンパス 1 号館 (東京)。
- ⑤ 藤岡弘幸, 鈴木英之, 柴田創, 平林紳一郎、浮体式洋上風車の風車 - 浮体連成応答解析プログラムの開発、第 23 回海洋工学シンポジウム、2012 年 8 月 2 日、日本大学駿河台キャンパス 1 号館 (東京)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 英之 (SUZUKI HIDEYUKI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号：00196859

(2) 研究分担者

早稲田 卓爾 (WASEDA TAKUJI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：30376488

(3) 連携研究者

高木 健 (TAKAGI KEN)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号：90183433