

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360394

研究課題名（和文）帆走式洋上風力発電施設の基本計画技術確立に関する研究

研究課題名（英文） Research on the Establishment of the Basic Design Technology for the Sailing Type Offshore Wind Power Plant

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：帆走式洋上風力発電施設は帆の力により浮体を航走させ、排他的経済水域の中の風況の良い場所で効率的に風力発電を行い、得られた電力を水素に変換して我が国へシャトルタンカーにより運搬するというコンセプトである。ここで計画している浮体は長さが約 2,000m に及ぶ超大型の浮体で、帆走だけで十分な操縦性能が得られるのか、また強度は大丈夫なのかなどの課題がある。本研究により模型試験と数値計算のレベルではあるが、それらが大丈夫なことが確認された。

研究成果の概要（英文）：Concept of the sailing type offshore wind power plant is that the structure moves by sails around Japan's Exclusive Economic Zone pursuing to maximize obtained wind energy. Obtained energy is transferred to the hydrogen and carried by shuttle tankers. The length of planed structure is very large and its length is around 2,000 meters. Thus, the maneuverability during the sailing, and structural strength for safe navigation were uncertain. These problems are focused on in this study, and are solved by means of model experiment and numerical simulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

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：帆走式、非係留、浮体式、洋上風力発電、自然エネルギー

1. 研究開始当初の背景

風力発電は持続可能なクリーンエネルギーの一つとして、世界各国で競って導入が進んでいる。特に、早くから導入を進めていたヨーロッパでは陸上の適地が限られてきた

ため、洋上風力発電が盛んに計画、建設されている。我が国もヨーロッパに倣って洋上風力発電を大規模に導入すべきであるが、ヨーロッパの方式は遠浅の海底に直接風車を据付ける着底式であり、浅い水深で平均風速の

大きい適地が少ない我が国では、この方式をそのまま取り入れることはできない。そこで、我が国では浮体式の洋上風力発電施設の研究が開始された。しかし、従来の浮体技術は係留することを前提としているため、設置区域は係留が可能な水深や海底土質の海域に限定される。つまり、この方式も導入規模に限界があるのである。

一方、少し先の社会に目を転じると、水素社会が始まると言われている。あるいは大容量の蓄電器が実現するとも言われている。水素社会で描かれている燃料電池が一般化する頃、あるいは大容量の蓄電器が実現する頃には、もはや電力系統に繋ぐ必要はなく、高価な送電線は不要であり、浮体構造で制約になる送電線の変形も考える必要はない。要は風力発電の現地で蓄電池に充電するか、水素を発生させれば事足りる。蓄電池や水素を船で運ぶとすると、陸地までの距離も関係ない。そうなれば一層のこと適度の風が吹いている場所を求めて移動出来るようにすれば、水深や海底土質を気にして係留に悩む必要がなくなる。適度な風速を求めて移動するので何時も効率よく発電できるし、台風を避けて移動すれば大波や暴風に遭わずにすむ。移動可能にすることで発電量を増やせる上に、設計荷重を下げられる訳である。

係留式の洋上風力発電に関する研究は各所で行われているが、移動式の超大型エネルギープラントの構想は高木と河崎が初めて提案したものである。つづいて、平成 15～19 年度に(独)国立環境研究所で実施されている「洋上風力発電を利用した水素製造技術開発」で提案された帆走式洋上風力発電施設の構想は移動式のコンセプトをさらに発展させ、移動にエネルギーを費やさないことに腐心したものである。さらに、平成 16～18 年度には科学技術研究費基盤 B (代表：高木) で「超大型移動式海洋構造物の波浪中弾性挙動解析と減揺に関する研究」が行われ、波浪中での弾性挙動が解明された。

本研究はこのような背景の下、帆走式洋上風力発電施設の基本計画技術確立を第一の目的として実施した。なお、この研究プロジェクトは現在のところ世界で唯一行われている帆走式洋上風力発電施設に関する研究である。

2. 研究の目的

NEDO の「平成 16 年度風力発電利用率向上調査委員会の風力発電ロードマップ検討結果報告書」によれば、無係留セーリング型の洋上風力発電施設は 2030 年頃から導入と予想されている。これに間に合わせるには、2010 年頃にはプラントを構成する各要素技術がおおよそ確立されていなければならない。特に、浮体システム基本計画技術がまず

初めに確立されなければならない。それは、浮体システムの基本計画がこの発電コンセプトを実現できるかどうかの鍵となる部分であり、エネルギープラントとして重要な EPR 値に直接影響を与えるからである。

この浮体システムの基本計画においては以下の 2 つの機能要件がコンセプトの根幹に係わる重要なものである。

- 係留無しで自己位置を維持できる機能
- 台風や巨大低気圧に伴う荒れた気象・海象下でも安全を確保できる機能

前述の NEDO のタイムスケジュールに合わせて、本研究計画ではこの重要な 2 つの機能要件に焦点を当てて研究を行う。この 2 つの機能要件を達成しつつ、且つ EPR 値を最大限向上させるために、次の事項を明らかにしなければならない。そこで以下の 3 項目を明らかにすることを具体的な研究目的とした。

- 2,000m クラスの超大型浮体が帆に働く風力だけで航行でき且つ進路保持が可能か
- スイッチバックモーションに適したストラット形状とはどのようなものか
- 荒天下で制限応力以下となり且つ使用鋼材が最小となる全体構想とはどのようなものか

3. 研究の方法

本研究で取り扱う浮体は長さが 2,000m 近くある超大型浮体であり、実物の製作や実海域での試験は難しい。そこで、従来から船舶海洋分野で用いられてきた手法に倣い、本研究では、模型試験と適切な数値計算を組み合わせ、基本設計に必要な情報を得た。具体的には以下の項目について研究を実施した。

- (1) 模型の抵抗試験・斜航試験・自航試験
大阪大学と東京大学の水槽に合わせた全体模型の設計を行った。模型の縮尺は 1/100 としたが、使用水槽の寸法の制約により、(独)国立環境研で提案されたものの 1/4 の長さに短くした形状となった。実物と模型との形状の違いによって生じる差は数値計算で推定した。

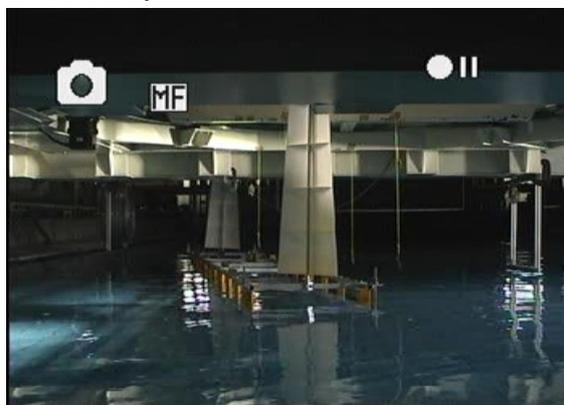


図 1 模型試験の様子

抵抗試験・斜航試験を行い、斜航時にローハルに働く抵抗、横力及び回頭モーメントの計測を行った。この実験では特にストラット間の干渉効果とストラットとローハル間の干渉影響がどの程度現れるのかを把握することに注力した。さらに、送風機と帆を用いた自航試験を実施し、帆走時の速度や安定性を計測した。

(2) 航行ロジック・発電量再検討

模型の抵抗試験・斜航試験で得られたストラット間干渉効果及びストラットとローハルの干渉影響を用いて、操縦性シミュレーションに必要な操縦性微係数を推定した。これらの値を用いて、一般的な操縦性方程式である MMG モデルに従って操縦性シミュレーションを実施し、帆走性能を表すポーラ曲線を得た。

このポーラ曲線を用いて航行シミュレーションを実施した。航行シミュレーションにおいては気象予想データを用いて、最適航路を見つけるためのロジック構築を行った。これによって、(独) 国立環境研の提案浮体形式 (以後 Twin-hull Type と呼ぶ) の発電電力量の再検討を行った。

(3) ストラット形状検討

ストラットの翼厚比が大きいと大きな後縁剥離のため揚力が発生しない恐れがあった。そのため、構造強度やストラット内交通性確保の観点から翼厚を厚くすると、不必要な翼弦長の延長が必要になっていた。そこで、ストラット断面の形状を変化させて、翼弦長一定のもとに、模型実験と境界層理論を基にした計算コードにより翼厚最大となる断面形状を追求した。

(4) 新形式浮体形状の提案

pFFT-FE 法による流力弾性応答解析コードを活用し、波浪中の流力弾性応答解析を実施し、構造要素のうち弱点と考えられるストラット部分に荷重の掛からない全体構想を検討した。それに基づいて新しい浮体形式 (以後 Mono-hull Type と呼ぶ) を考案した。考案したプラント形状と (3) で得られた最適形状ストラットを用いて、帆走性能のポーラ曲線を推定した。また、それに基づいた航行シミュレーションを実施し、発電電力量の検討を行った。さらに、そこで得られた波浪の長期分布データを用いて疲労強度の推定を行った。

4. 研究成果

(1) 航行性能

図 2 と図 3 に模型試験によって得られた抵抗値と横力を示す。これによると前述の干渉影響 (点線と菱形の差) が相当あることが分かる。実線はストラット間の干渉影響を揚力線理論に基づいて修正した値である。これらの図によれば、ストラット間の干渉影響を修

正した値と実験値が良く一致しており、ストラット間の影響がこの推定法で推定できることと、ストラットとローハルの影響がそれほど大きくないことが分かった。

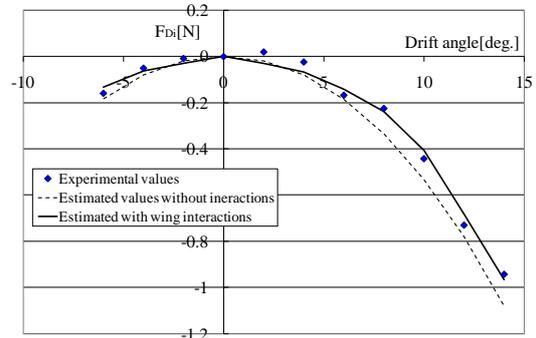


図 2 模型に働く抵抗とその推定値

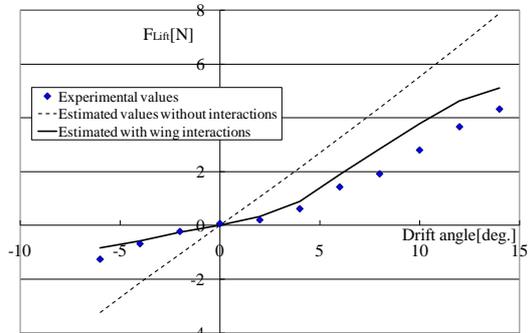


図 3 模型に働く横力とその推定値

これにより、航行性能の推定に重要な操縦性微係数がストラットの揚力係数さえ分かれば推定可能ようになった。さらに、この推定値に基づいて作成したポーラ曲線 (図 4) によれば Twin-hull Type は横風で定格の発電を行いながら帆走のみで位置保持が可能になったことが明らかになった。

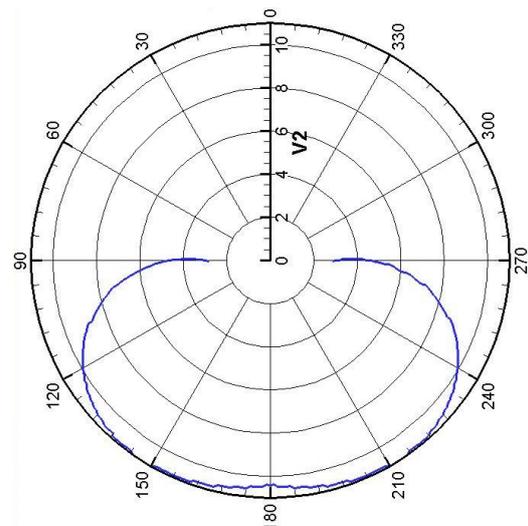


図 4 Twin-hull Type のポーラ曲線

(2) 航行ロジックと発電量

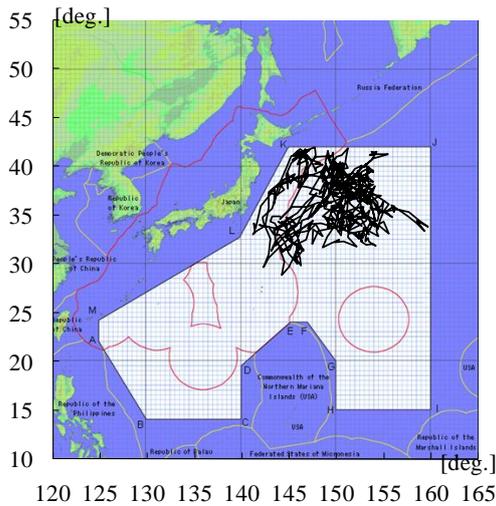


図5 航行シミュレーションの例

得られたポーラ曲線に基づいて発電量が最大となる航行ロジックについて検討した。その結果、基本的には気象予測に基づいて風向きが横風になるように浮体姿勢を向け、なおかつ発電量が多くなる方向に向かって進むという単純なロジックが効果的なことが分かった。ただ、この方法だけであると、台風や冬季の急激な低気圧の発達に対応できないケースがあることが分かった。そこで、これらの海運界では常識的にしられている季節毎の特徴ある海象に合わせて海域を大きく移動するロジックを組み込んだ。これにより、危険海象域に踏み込むことなく、高い設備利用率で運航でき、年間平均で40%以上の設備利用率を簡単に達成できることが分かった。

(3) ストラット形状

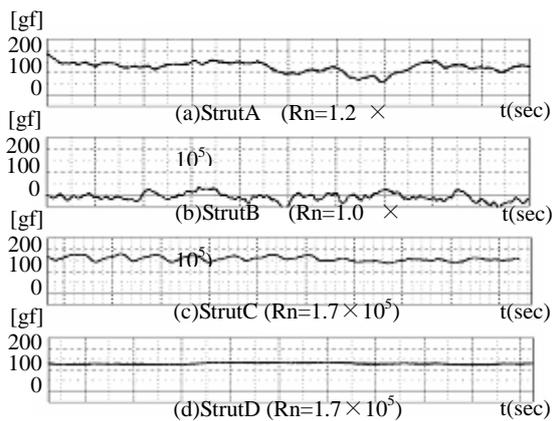


図6 厚さ比ごと揚力の時系列

このコンセプトではスイッチバックモーションという特殊な動きをするため、前後にエッジがある翼断面がストラットの断面形

状として採用されている。この形状の問題は図6に示すように厚さが厚い場合、後縁で流れが剥離し振動を起こすことである。様々な厚さ比の翼型に対し、可視化、揚力計測、推定計算により、安定的な揚力を得られる厚さ比が得られた。また、その値を数値計算で略推定可能なことも明らかになった。

(4) 新形式浮体形状

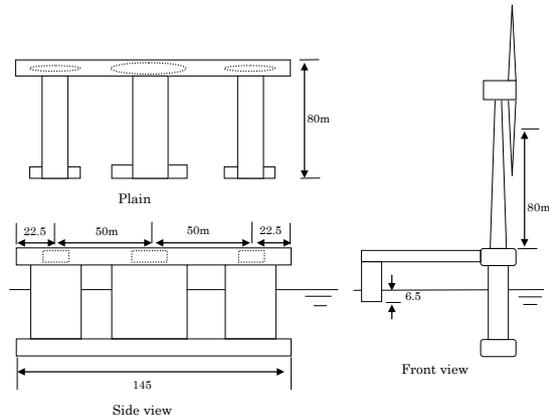


図7 Mono-hull Type

ここまでの研究で Twin-hull Type は後列のストラットが揚力を発生しないという問題があり、最適な形状ではないことが分かった。そこで、図7に示す Mono-hull Type の浮体形式を提案した。また、操縦性能、推進性能の推定を行い、この浮体形状が Twin-hull Type と遜色ない性能を持つことを確認した。また、さらに、この浮体の構造強度の検討を行った。その結果 Mono-hull Type は Twin-hull Type よりも疲労強度が少し劣るが20年毎の入渠を仮定すれば十分な強度を有していることが分かった。図8に不規則は中での Twin-hull Type と Mono-hull Type の応力の分散値の比較を示す。

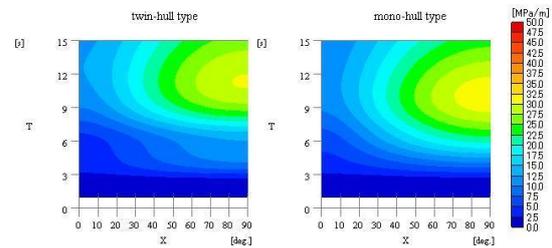


図8 応力の分散値の比較

一方、発電端における発電単価を検討した結果、Mono-hull Type は Twin-hull Type より軽量なため、Twin-hull Type だと ¥12.1/kWh が Mono-hull Type では ¥11.1/kWh になることが分かった。

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)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ①平松拓郎、興梠有人、高木健：風力発電のための VLMOS の航行性能：日本船舶海洋工学会論文集、第 10 号、掲載確定 印刷中、2010.
- ②Takagi, K., Hotta, J. and Korogi, Y. : Improvement in capacity factor and fatigue assessment of VLMOS for wind power generation based on navigation simulation, J. of Marine Science and Technology, Vol.15, No.1, 2010、査読有
- ③Takagi, K., Hiramatsu, T. and Korogi, Y. : Experimental Study on the Sailing Performance of a VLMOS for Wind Power Plant, OCEANS' 09 MTS/IEEE, Biloxi, 2009. (CD-R のためページ記載なし)、査読無
- ④平松拓郎、高木 健：セイリング式洋上風力発電の可能性、第 21 回海洋工学シンポジウム、日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会、2009. (CD-R のためページ記載なし)、査読無
- ⑤Korogi, Y., Hiramatsu, T. and Takagi, K. : Sailing Performance of a Very Large Mobile Offshore Structure for Wind Power Plant, Proc. of 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2009, Honolulu, 2009. (CD-R のためページ記載なし)、査読有
- ⑥Takagi, K., Hotta, J. and Korogi, Y. : Hydroelastic Behavior and Fatigue Damage of a Very Large Mobile Offshore Structure in a Realistic Sea Condition, Proc. of 23rd Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Jeju, 2008. (メモリースティックのためページ記載なし)、査読有
- ⑦Korogi, Y., Takagi, K. and Hotta, J. : Experimental Study on Maneuverability Coefficients for the Navigation Simulation of VLMOS, OCEANS' 08 MTS/IEEE Kobe-Techno-Ocean' 08, 2008. (CD-R のためページ記載なし)、査読無
- ⑧高木健、堀田純平、興梠有人：帆走式洋上風力発電浮体の運航シミュレーション、第 20 回海洋工学シンポジウム、日本船舶海洋工学会、2008 (CD-R のためページ記載なし)、査読無
- ⑨Hotta, J., Takagi, K., Kinoshita, T., Tanaka, S., Yamaguchi, H., Tsujimoto, M., Okamura, H., and Uehiro, T., : Navigation Simulation of a VLMOS for Wind Power Generation, OCEANS' 07 MTS/IEEE, Vancouver, 2007. (CD-R のためページ記載なし)、査読無
- ⑩Takagi, K. : Hydroelastic Behavior of a Long Flexible Structure in Irregular Waves, OCEANS' 07, IEEE Aberdeen, 2007. (CD-R のためページ記載なし)、査読無

(11) 高木 健、吉武優一郎：超大型移動式海洋構造物のスイッチバックモーションに適した翼断面に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、第 5 号、pp.27-33, 2007、査読有

[学会発表] (計 1 件)

- ① 平松拓郎、興梠有人、高木 健：風力発電のための VLMOS の航行性能：日本船舶海洋工学会講演論文集、第 8 号、pp1-2, 2009 年 5 月 29 日、神戸.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

箕浦宗彦 (MINOURA MUNEHIKO)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30294044
(H20→H21：連携研究者)
河崎善一郎 (KAWASAKI ZENICHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60126852
(H20→H21：連携研究者)
木下 健 (KINOSHITA TAKESHI)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：70107366
(H19→H20：連携研究者)

(3) 連携研究者

なし