

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04579

研究課題名(和文) 帆走式洋上風力発電の提案とエネルギー取得性能評価

研究課題名(英文) Proposal of Autonomous Kite-Sailing Power Generation and estimation of its energy harvesting performance

研究代表者

比江島 慎二 (Hiejima, Shinji)

岡山大学・環境生命科学学域・教授

研究者番号：50284526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：風洞実験と数値流体解析によれば、通常の翼型断面の羽根に比べて、半楕円断面を持つHydro-VENUS羽根は、揚力と抗力が高い傾向が見られた。翼素運動量理論解析から、Hydro-VENUSタービンが正逆両方向に回転可能であること、静止状態からの起動性能が高いことが判明した。また、羽根先端へのウィングレットの導入によりタービン性能の改善に成功した。Hydro-VENUSタービンを搭載した浮体とカイトが連成するカイトシミュレータを構築し、実規模の帆走式洋上風力発電の発電性能について検証したところ、断面アスペクト比6の半楕円断面のカイトの発電性能が高いことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

帆走式洋上風力発電は無人で自律航行する発電ドローン船であり、発電電力は送電せずに浮体内に蓄電するため、陸地から離れた遠洋まで航行し、膨大な遠洋風力を利用した発電が可能になる。固定設置しないため漁業との競合もない。従来の洋上風力発電が、沿岸付近の微弱な風力しか得られず、漁業との競合で導入が進まないのに対して大きなブレイクスルーとなる。さらに、センサーや観測機器を搭載して公海上に多数配備すれば、発電だけでなく、洋上通信網や防災観測・資源探査・海上監視システム等の洋上インフラを構築できる。この広域的なインフラを通してあらゆる海洋ビッグデータを集積すれば、海洋空間の利用をこれまでになく活性化できる。

研究成果の概要(英文)：It is found that the lift and drag force of the Hydro-VENUS blades with semi-elliptical cross-section are higher than conventional airfoil blades. According to the analysis based on the blade element momentum theory, the Hydro-VENUS turbine can rotate both in the forward and reverse direction, and its start-up performance from stationary condition is relatively high. The performance of the Hydro-VENUS turbine is improved by installing the winglet to the tip of the blade. By developing the kite flight simulator coupled with a floating vessel where the Hydro-VENUS turbine is installed, the energy harvesting performance of the full-scale model of the Autonomous Kite-Sailing Power Generation is computed. Then the kite with semi-elliptical cross-section where the aspect ratio is six revealed high performances in energy harvesting.

研究分野：風工学

キーワード：洋上風力発電 高空風力発電 再生可能エネルギー 海洋エネルギー ハイドロヴィーナス 水流タービン パラフォイルカイト 海洋状況把握

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

陸上よりエネルギーが豊富な洋上風力の開発が世界的に盛んである。しかし、離岸距離が長いほど送電コストが上昇するため、ほとんどの洋上風車は陸地に近い沖合約 30km 以内に設置される。ところが、陸地に近いほど洋上風力は弱く、沖合 30km 以内の洋上風力は微弱だ。沖合 30km 以遠にはもっと膨大な洋上風力が存在するにも関わらず、現在の洋上風力発電ではこれを利用できないのである。それに加えて、ほとんどの沿岸海域には漁業権があるため、沖合 30km 以内に風車を設置できるのはごく一部の海域に限られる。洋上風力と同じ海洋エネルギーとして潮流発電の開発も進んでいるが、発電に適した急潮流は一部の海域に限られ、洋上風力と同様、やはり漁業との競合が普及の障壁となっている。

遠洋の膨大な未利用風力を利用して発電したり、潮流のない場所で人工潮流を作り出して発電したり、漁業権の問題も克服可能な、そんな革新的な洋上風力発電や潮流発電を実現できないのか。これが本研究の核心の問いである。特に沖合 30km 以遠の遠洋風力が利用可能になれば、国内すべての電力を賄えるほど膨大なエネルギーが手に入る。

### 2. 研究の目的

本研究では、漁業との競合を回避し、膨大な遠洋の風力を獲得可能な革新的方式として“帆走式”洋上風力発電を提案し、その実現可能性を検討する。このシステムは、浮体、水流タービン、カイト、蓄電池などで構成される(図 1)。数 100m の高々度まで揚げたカイトで強い風力を捉え、その風力で浮体を帆走させて人工水流を作り、水流タービンで発電する仕組みである。カイトは 8 の字飛行させて強い揚力を発生し、曳航力を数倍に高めて浮体を曳航する。発電電力は送電せず、浮体内に蓄電したり、海水の電気分解で水素を製造する。システムの中核である水流タービンとカイトには、独自の Hydro-VENUS 技術に基づく特殊な羽根を採用し、翼型の羽根に比べて高い性能と安定性、単純形状で低コストかつ高強度を実現する。本研究では、水流タービンやカイトの形状最適化や性能評価を行い、帆走システム全体のエネルギー取得性能を試算することで、帆走式洋上風力発電の実現可能性を明らかにする。

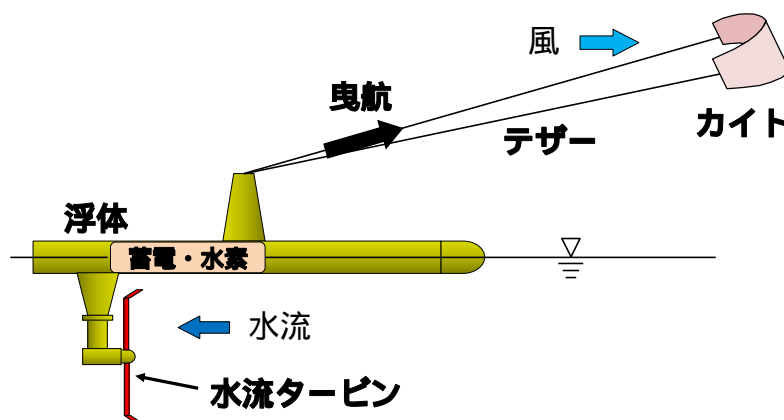


図 1 帆走式洋上風力発電のしくみ

### 3. 研究の方法

帆走式洋上風力発電のコア技術となる Hydro-VENUS 羽根の流力特性の把握には、風洞実験、水槽実験、数値流体解析 (CFD) を用いた。Hydro-VENUS 羽根を用いた水流タービンの性能評価手法として翼素運動量理論による解析を用いた。また、浮体式水流タービンの実証機を製作し、屋外水路において実証試験を行った。さらに、実規模の帆走式洋上風力発電のエネルギー取得性能を試算するため、水流タービンを搭載した浮体とカイトのそれぞれの運動方程式を連成したシミュレータを構築した。

### 4. 研究成果

#### (1) Hydro-VENUS 羽根の揚力・抗力特性の解明

半楕円断面を持つ Hydro-VENUS 羽根 (2 次元翼) について、風洞実験と数値流体解析 (CFD) により揚力係数  $C_L$ ・抗力係数  $C_D$  を求めた結果が図 2 である。揚力係数・抗力係数ともに風洞実験の方が数値流体解析よりも高めであるが、迎角  $\alpha$  に対する変化の傾向などは両方で類似している。図 2 には NACA4415 と NACA0015 の翼型断面を持つ羽根についても揚力・抗力特性を示しているが、Hydro-VENUS 羽根は翼型の羽根に比べて揚力係数  $C_L$ ・抗力係数  $C_D$  がいずれも高い傾向が見られる。

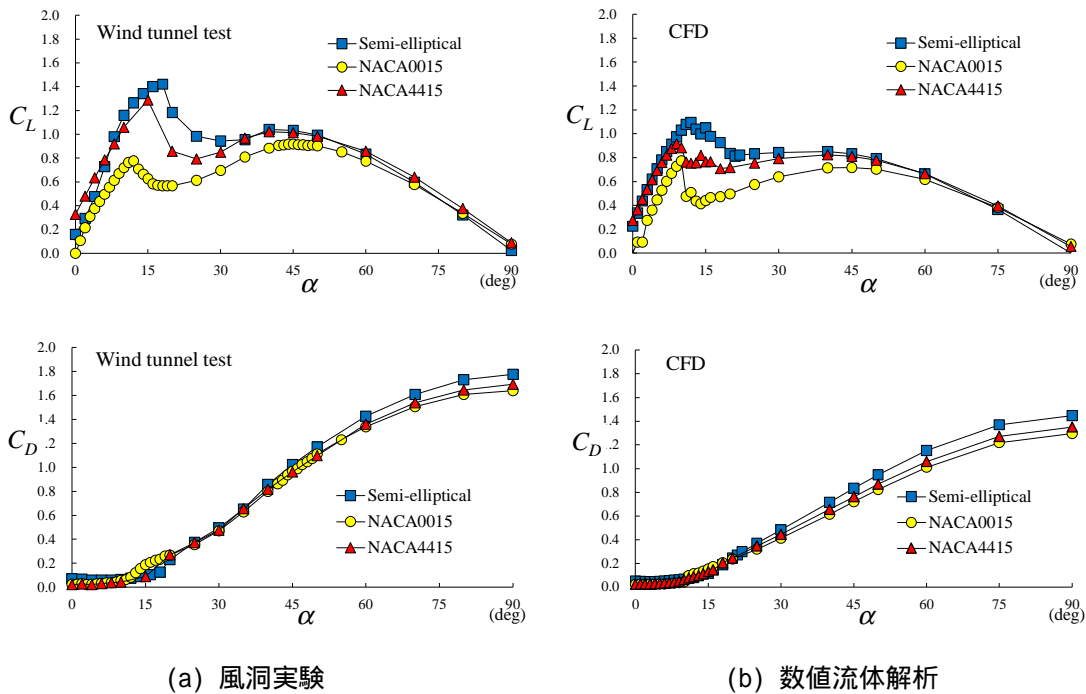


図2 Hydro-VENUS 羽根および翼型羽根の揚力・抗力特性

(2) Hydro-VENUS 水流タービンの開発

Hydro-VENUS 羽根の揚力・抗力特性を元に翼素運動量解析(BEM)を適用し、2枚羽根の Hydro-VENUS 水流タービンのエネルギー取得性能(パワー係数 $C_p$ )を求めた結果を図3に示す。Hydro-VENUS 羽根は図3右上に示すように、断面アスペクト比6の半楕円形状の断面を持ち、ピッチ角 $\beta$ を様々に変化させた。風洞実験あるいは数値流体解析(BEM)で得られた揚力・抗力特性のいずれを用いた場合も、翼素運動量解析(BEM)のパワー係数 $C_p$ は水槽実験値よりもやや過大評価になるものの、ピッチ角 $\beta$ に対する変化は水槽実験値と類似している。同様に運動量理論解析の結果、Hydro-VENUS 水流タービンが正逆両方向に回転可能であること、静止状態からの起動性能が高いことなどが明らかとなった。また、図3の右下に示すようなウィングレットを羽根先端に導入した水流タービンの水槽実験値も示してあるが、ウィングレットなしに比べるとパワー係数 $C_p$ を最大10%程度高めることができた。これはウィングレットにより翼端渦を抑制し、翼端損失を低下させたことが要因と考えられる。ウィングレット付きの Hydro-VENUS 水流タービンを浮体に搭載して水路で発電実験したところパワー係数 $C_p = 30.4\%$ が得られた(図4)。

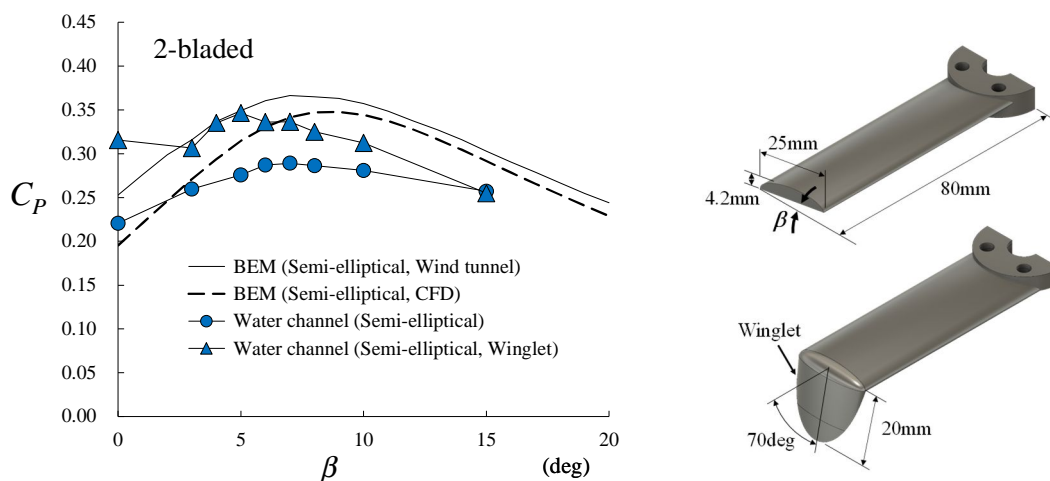


図3 水槽実験と翼素運動量解析による性能評価の比較

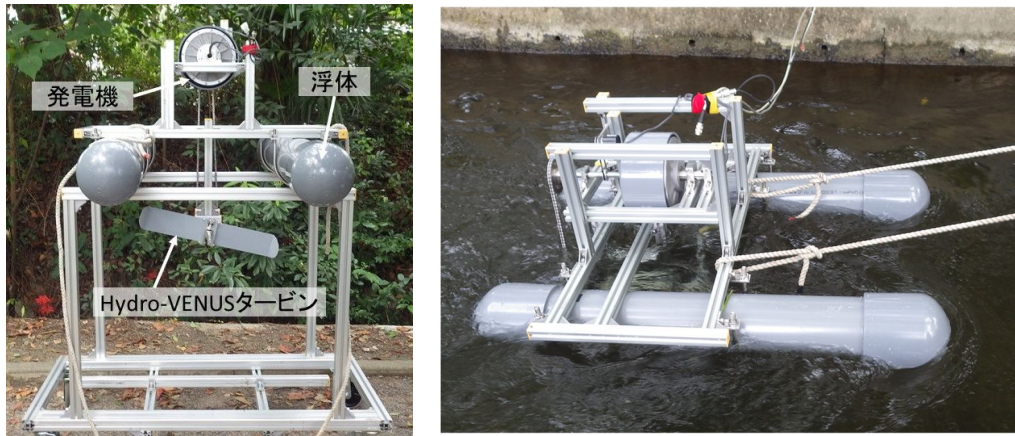


図4 浮体式 Hydro-VENUS タービンの実証実験

### (3) Hydro-VENUS カイトの開発

図5に示すような円弧状の湾曲を持ち、断面が半楕円形状の Hydro-VENUS カイトを用いて風洞実験を行い、迎角 $\alpha$ に対するカイトの揚力・抗力特性を明らかにした。半楕円断面の断面アスペクト比 $e=4 \sim 10$ のカイトについて測定したところ、図5に示すように、断面アスペクト比 $e$ が大きいほど揚力係数 $C_{L,k}$ と抗力係数 $C_{D,k}$ が低下する傾向が見られた。また、比較のため NACA4415 翼型断面を持つカイトの実験結果も示しているが、いずれの断面アスペクト比 $e$ の半楕円断面翼カイトも、NACA4415 翼型カイトに比べて揚力係数 $C_{L,k}$ と抗力係数 $C_{D,k}$ がいずれも高いことが明らかになった。一方、揚力係数と抗力係数の比である揚抗比 $C_{L,k}/C_{D,k}$ で比べると、NACA4415 翼の揚抗比が最も高く、半楕円断面翼は断面アスペクト比 $e$ が大きいほど揚抗比も高くなること分かる。

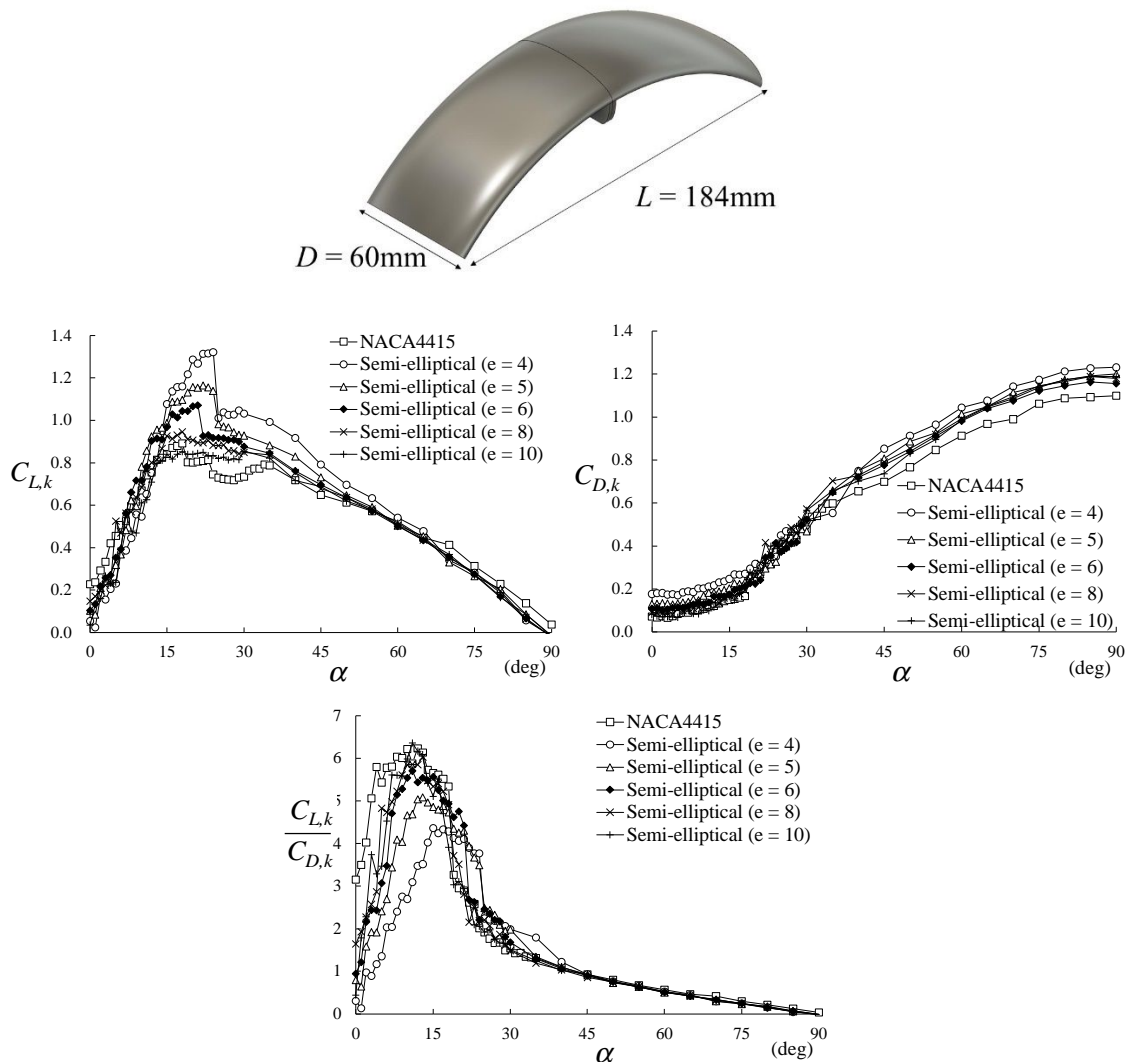


図5 カイトの揚力・抗力特性（風洞実験）

(4) 帆走式洋上風力発電のエネルギー取得性能評価

Hydro-VENUS タービンを搭載した浮体とカイトの運動方程式を連成したカイトシミュレータを構築し、実規模の帆走式洋上風力発電の発電性能を明らかにした(図6)。帆走式洋上風力発電では、カイトを上空で8の字飛行させることで強い揚力を発生し、Hydro-VENUS タービンを搭載した浮体を曳航して発電する。図6には、NACA4415 翼型カイトと半楕円断面を有する Hydro-VENUS カイト(断面アスペクト比  $e=6$ )を用いたときのそれぞれの8の字飛行のシミュレーション結果が示してある。NACA4415 翼型カイトよりも半楕円断面翼カイトの方が目標とする8の字軌道に近い軌道を描いているのが分かる。これは、図5に示したように、断面アスペクト比  $e=6$  の半楕円断面翼の方が、NACA4415 翼よりも揚力係数が大きいため、カイト旋回の小回りが利きやすいのが要因である。さらに、カイト帆走により Hydro-VENUS で得られるパワー  $P$  を見ると、 $e=4 \sim 10$  の断面アスペクト比の中では、Hydro-VENUS タービンと同様に  $e=6$  の半楕円断面翼カイトの性能が最も高く、NACA4415 翼カイトよりも高いことが分かる。

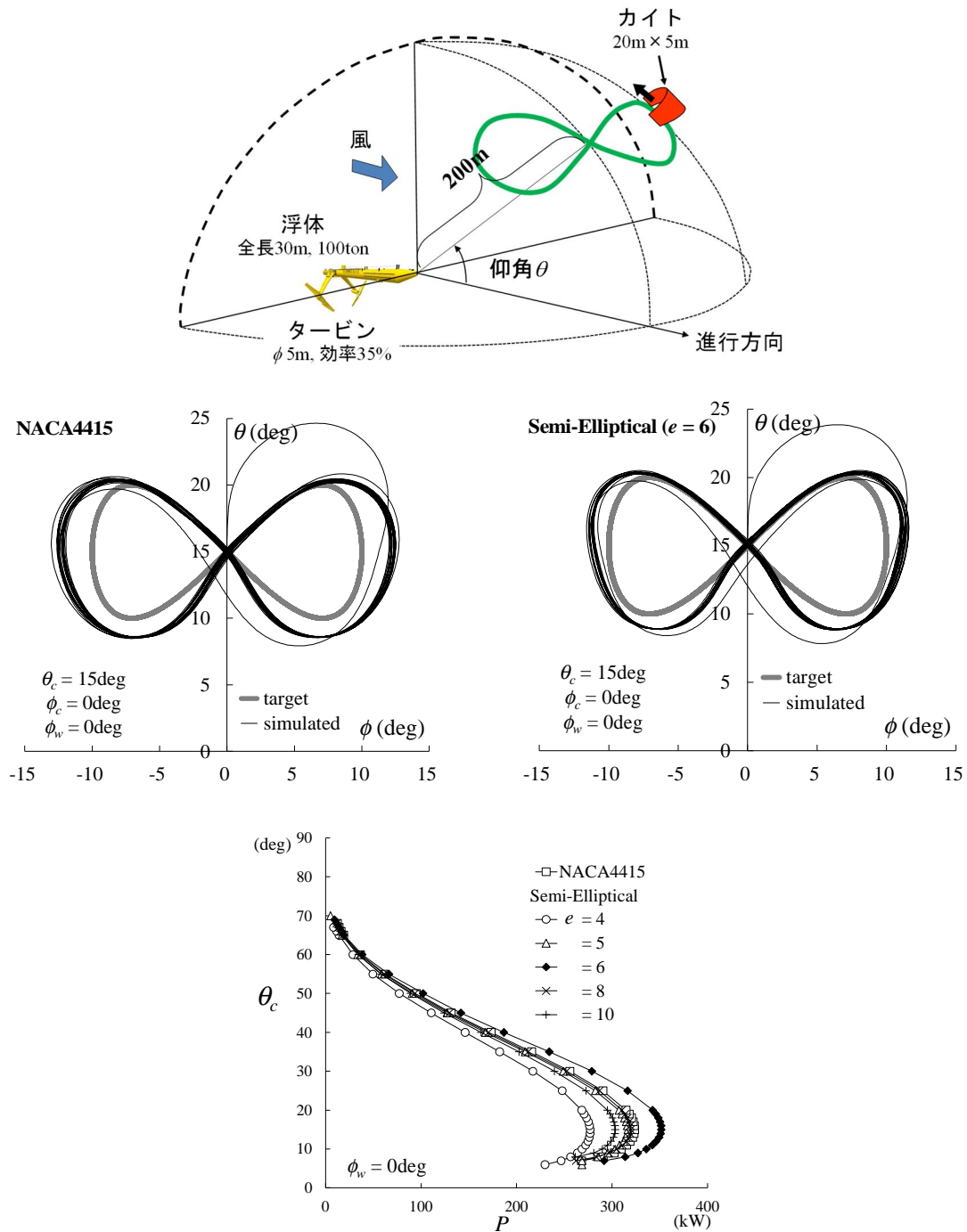


図6 実規模の帆走式洋上風力発電の数値シミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>比江島慎二, 遠藤愛巳, 山本晃大            | 4. 巻<br>137         |
| 2. 論文標題<br>自律高空帆走発電の提案とそのエネルギー取得性能の試算  | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>日本風力エネルギー学会論文集               | 6. 最初と最後の頁<br>10-21 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著<br>-           |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>比江島慎二, 遠藤愛巳, 山本晃大                      | 4. 巻<br>26          |
| 2. 論文標題<br>自律高空帆走発電用パラfoilカイトの空力特性試験と飛行シミュレータの構築 | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>風工学研究論文集                               | 6. 最初と最後の頁<br>86-95 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難           | 国際共著<br>-           |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>比江島慎二, 泉一希                                  | 4. 巻<br>46(1)      |
| 2. 論文標題<br>回転振動翼を用いたギャロッピング発電のエネルギー取得性能に関する実験的及び理論的研究 | 5. 発行年<br>2021年    |
| 3. 雑誌名<br>日本風工学会論文集                                   | 6. 最初と最後の頁<br>1-11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                        | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                | 国際共著<br>-          |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>比江島慎二                          |
| 2. 発表標題<br>翼素運動量理論によるHydro-VENUSブレードの性能評価 |
| 3. 学会等名<br>土木学会年次学術講演会                    |
| 4. 発表年<br>2019年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>比江島慎二                               |
| 2. 発表標題<br>Hydro-VENUS振り子発電とそれをを用いた自律高空帆走発電の構想 |
| 3. 学会等名<br>第32回フラッター研究会セミナー（招待講演）              |
| 4. 発表年<br>2019年                                |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>比江島慎二                 |
| 2. 発表標題<br>自律高空帆走プラットフォームによる海洋立国 |
| 3. 学会等名<br>中国地方建設技術開発交流会（招待講演）   |
| 4. 発表年<br>2019年                  |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>比江島慎二                 |
| 2. 発表標題<br>自律高空帆走発電のエネルギー取得性能の試算 |
| 3. 学会等名<br>第43回風力エネルギー利用シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2021年                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>竹村一樹，比江島慎二                        |
| 2. 発表標題<br>自律高空帆走発電に用いる浮体式Hydro-VENUSタービンの開発 |
| 3. 学会等名<br>土木学会年次学術講演会                       |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

DeepSky構想  
<http://www.cc.okayama-u.ac.jp/~hiejima/pg257.html>

日本風工学会ベストペーパー賞「回転振動翼を用いたギャロッピング発電のエネルギー取得性能に関する実験的及び理論的研究」比江島慎二，泉一希，日本風工  
学論文集 2021年，Vol.46，No.1（通巻第166号），2022年5月25日受賞

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|