

## 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 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360413

研究課題名（和文） マルチロータによる潮流発電システムの高出力化に関する研究

研究課題名（英文） Studies on achieving higher output of tidal power generation system with multi-rotor

研究代表者

南 佳成 (Minami Yoshimasa)

海上技術安全研究所 洋上再生エネルギー開発系 主任研究員

研究者番号：60399516

研究成果の概要（和文）：

潮流発電の実用化を進める上で、発電コストが課題となっている。流速が 2.0m/s 以上の適地に設置できれば、他の発電システムと競争出来るコストに低減することができる可能性がある。しかし、日本沿岸域で浅い水深でこのような適地は少ない。本研究では、日本沿岸域で広く利用できる潮流発電システムの開発を目指している。日本沿岸域でも得られる流速 1.0m/s で発電量を確保できるようにマルチロータ(タンデム方式)による高出力化を図る。

研究成果の概要（英文）：

If tidal and ocean current power system can be installed in site where the flow velocity is fast, it may be able to reduce the power generation cost compared with other power generation system. However, suitable sites like this in shallow water around the coast of Japan are restricted. In this study, we investigate a high power tidal and ocean current power system with a multi rotor system. It is important for the tidal and ocean current power generation system to utilize widely in the coastal area of Japan in order to ensure a certain amount of power generated at about 1.0m / s flow velocity. For the multi-rotor system, the back rotor can be collected the flow energy passed from the front rotor. We perform a fundamental study and concept design for multi rotor system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
23 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
24 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：再生可能エネルギー、海洋利用、潮流発電、タンデムロータ、負荷変動

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

### 1. 研究開始当初の背景

海流・潮流エネルギーは、賦存量としては風力エネルギーとほぼ同等であるにも拘わらず、基礎的な研究の段階で実用化まで至っていない。回収可能なエネルギーについて、水の密度は空気の密度の約 800 倍であり、風力発電に用いられる平均風速は潮流のたかだか 6 倍から 7 倍といったところである。したがって、原理的にみても風車及び水車の掃過面積が同じであれば、風力発電より回収可能エネルギーは大きいことが分る。

海外における潮流発電の研究開発の動向は、イギリスで SeaGen Project として 2008 年にアイルランド北部のストランフォード海峡の海岸線から約 400 メートル沖合に実証機が設置されている（図 1）。タービン 1 基当たりの定格出力は 600kW、直径は 16m である。しかしながら、これらの計画では流速 2m/sec 以上の潮流発電に適した海域が選定されている。



図 1 SeaGenProject 実証機

(参照:

<http://www.marineturbines.com/Seagen-Technology/O-M>)

日本では、1980 年代には日本大学が来島海峡で 3kW のダリウス水車、徳島大学が鳴門海峡で 0.8kW のクロスフロー水車で実海域実験を行った実績があるが、このときは実験段階で終了している。しかし、現時点で潮流発電が実用化に至っていない主な原因としては、以下のことが考えられる。

- ① 自然エネルギーに共通であるが、海流や潮流はエネルギー密度が低いいため、流況の良い適地選定が必要不可欠である。しかし我が国では流速 2m/s を超えるような海域は黒潮本流や海峡など極めて限られている。
- ② 海底設置型やジャケットなど固定式構造物を利用したプラットフォームには水深の制約がある。これも適地選定を困難とする要因の一つである。

- ③ 洋上にエネルギー変換装置を設置、固定すると、海中工事となり高コストになる。

これらの課題を解決する方法の一つとして、流速が遅い流域でも高効率にエネルギーを回収する発電システムが重要である。本研究では、タンデム配置にしたマルチロータに着目し、同じ掃過面積からできるだけ多くのエネルギーを回収する潮流発電システムを提案した。

### 2. 研究の目的

潮流発電の実用化を進める上で、発電コストが課題となっている。流速が 2.0m/s 以上の適地に設置できれば、他の発電システムと競争出来るコストに低減することができる可能性がある。しかし、日本沿岸域で浅い水深でこのような適地は少ない。本研究では、日本沿岸域で広く利用できる潮流発電システムの開発を目指している。日本沿岸域でも得られる流速 1.0m/s で発電量を確保できるようにマルチロータ（タンデム方式）による高出力化を図る。2 枚のロータは、同一方向に回転して前ロータで取り逃がした流体エネルギーを後ロータで回収することで高出力化させる。さらに、2 つのロータが独立し、それぞれの回転を 1 つの発電機に伝えることでシステム効率の向上もできることが特徴である（図 2）。本方式は単にロータの翼数を増やすのではなく、前後配置にして各ロータの回転運動を独立させ、2 つの回転運動から差動歯車装置を介することで相対的な回転数を倍増することができる。マルチロータでは、従来のシングルロータと比較して出力増大を目指す。前後配置にすると前翼の後流に後翼が入ってくるために、後流影響が小さくなる翼間距離、位相差、回転方向を明らかにする必要がある。

風車周りの流れ解析には、運動量理論、翼素理論、局所循環理論、渦理論に基づく非粘性解析が多くなされてきた。本研究で開発する潮流・海流発電装置は、流入速度が変化し、タービン後流で作動するロータを評価する必要がある。そこで、本研究では基本設計に利用できる翼素運動量理論にロータ後流影響を組み合わせた計算手法を開発する。また、マルチロータの性能評価を行うために計算格子を必要とせず境界条件の組み込み易さなど非定常解析に適している渦格子法を用いて前後に配置された回転翼周りの非定常流れ解析方法を開発する。さらに、開発した性能計算手法をもとにマルチロータの最適レイアウトを設計し、模型を用いた水槽試験

で検証する。

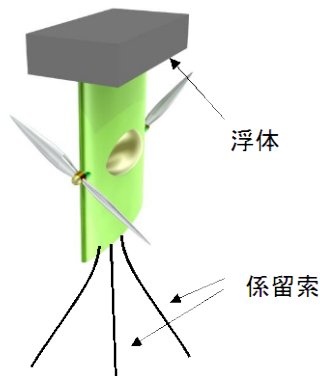


図2 マルチロータ潮流発電システム

### 3. 研究の方法

(1)マルチロータの性能解析を行う上で、タンデム配置にする場合にロータ後流分布を正確に推定する必要がある。そこで、ロータ後流中の渦は互いに影響し合うために、後流渦モデルの開発を行った。海上技術安全研究所内にある試験水槽において、ロータ模型を用いて流速、流向の変化をパラメータとしてロータの翼単独の性能を調査し、PIV試験を用いて後流の流速分布を計測する。本データは開発する数値計算法の検証に用いる。また、ロータは浮体に設置することを考えており、波浪中試験を実施して波浪中動揺が及ぼす性能変化を調査する。ロータ後流計測試験の結果からロータ後流モデル化を行った。

本研究の開始段階で、前方ロータからの後流影響をできるだけ低減するために前方ロータを翼先端部分だけ翼型にし、中心部分部分は一樣流が通過できるレイアウトを考案した。これより、前方ロータの翼先端部だけを翼型とし、翼根部分は支持する支柱だけの模型を製作し、翼先端部分の翼型の占める面積をパラメータとし試験を実施した。

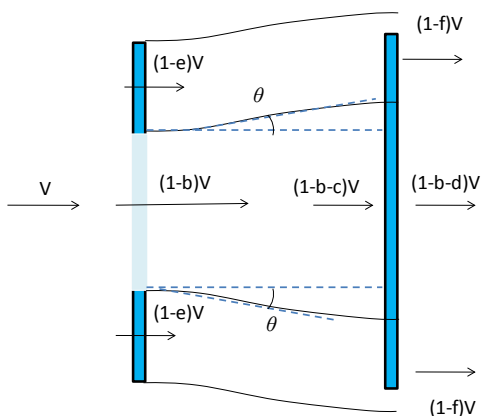


図3 マルチロータにおける流速プロファイルの定義

試験結果をもとに、ロータ間の半径方向をパラメータとした流速プロファイルモデル化した(図3参照)。

(2)マルチロータの性能解析を行うために翼素運動量理論及び渦格子法による数値計算方法を開発する。上記流速分布プロファイルのデータをもとに翼素運動量理論の計算プログラムをマルチロータ用に改良する。マルチロータでは、後方ロータは前方ロータの後流中にあるので前方ロータの作動条件による流入速度分布を後方ロータの初期条件に入れられるようにする。特に、風力用タービン設計条件と異なり、流入流速が常に変化することが分かっているために流速変化域における後影響変化も考慮する。さらに、詳細な性能計算ができるようにマルチロータモデルの渦格子計算プログラムを作成する。まず、ロータ単独の渦格子計算プログラムを開発し、ロータ後流計測結果から後流自由渦モデルの検証を行う。単独ロータの計算プログラムを組み合わせることでマルチロータの性能評価プログラムを作成する。

(3)潮流発電システムは、波浪影響や浮体動揺負荷変動が生じる。この負荷変動が発電システムに及ぼす影響について、負荷変動が評価できる発電機モデルを開発して潮流発電に用いる発電機特性について検討する。

(4)基本設計プログラムを用いて、2翼にした場合のタービン性能、後流分布を推定する。推定結果をもとにマルチロータの最適レイアウトを設計する。設計条件としては、想定海域に対応して発電量が最大になるようにする。最終的には、これらの成果をもとに想定海域が与えられれば、ツインロータ形状、レイアウト、発電システム、係留システムが設計できる設計統合システムを開発する。

### 4. 研究成果

(1)ロータ後流の様子を調査するために、ナノバブルを用いた可視化計測を実施した。曳航台車上の前方よりナノバブル発生装置からホースを介してナノバブルを放出し、マルチロータ模型の翼部分に当たるようにしている

(図4参照)。可視化は、グリーンレーザーシート光にして流れ方向に対して平行に模型の中心線上に当てている。今回、水中高速カメラを用いて連続撮影して後流変化を調査した。観測結果の一例を、図5に示す。試験条件は、流速0.5m/s、最大出力係数付近の周速比 $\lambda$ が6になる回転数に設定している。計測結果から、翼先端から大きな渦が発生しそれが後方へ流れていく様子が分かる。後流に発生した渦による軸方向の流速変化を考慮した設計を行うことが重要である。本研究では、周速比をパラメータにして試験を実施し、後流流速分布のデータベースを作成した。

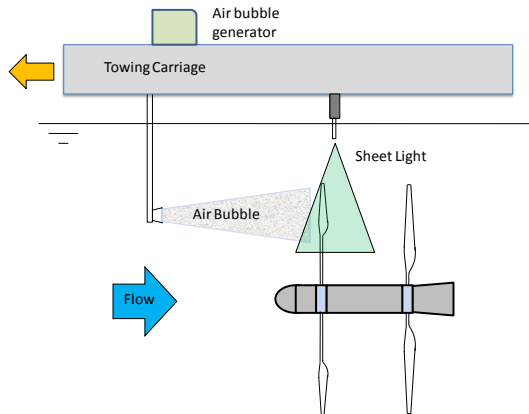


図4 ロータ後流 PIV 可視化試験

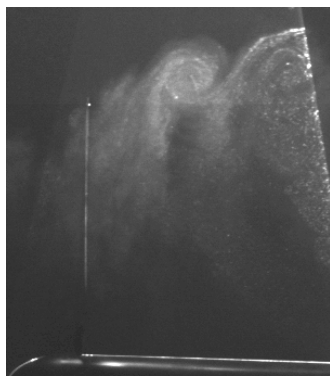


図5 ロータ後流の様子  
(周速比  $\lambda=6$ )

(2) マルチロータの基本性能を確認するために模型を設計し水槽試験を実施した。今回、性能試験を実施するにあたり、前後ロータにかかる荷重、トルクを個別に計測できる装置を製作した。試験装置のイメージ図を図6に示す。マルチロータ模型は、開発した性能計算プログラムを用いて最適設計を実施した。最適設計したマルチロータ模型の要目を表1に、模型の外形を図7に示す。設計パラメータは、前後ロータの翼半径、ロータ間距離、前方ロータの先端部の翼形状部分の面積とした。性能試験では、各ロータを独立で駆動させることが困難であったため、同一駆動軸で同方向に回転させている。このため、マルチロータ模型は前後ロータの相対位相角を変更できるようにしている。相対位相角の定義を図8に示す。

最適設計をした模型を用いて、位相角を変更した試験を実施した。周速比をパラメータに出力係数変化を計測した結果を図9に示す。マルチロータの性能を評価するために、従来の翼素運動理論で設計したシングルロータ模型の試験結果も合わせて表示している。これより、位相角を変更しても全体的に

シングルロータよりも大幅な性能向上が得られていることが確認できた。最大出力係数では、約20%近く出力が増加していることが分かる。当初の目標であるシングルロータに対して出力増加を達成することができた。また、位相角が90度のときに最大の出力増加が見られており、当該位相関係が後流影響の小さいレイアウトであることが考えられる。(3) 性能計算プログラムを検証するために、マルチロータの各ロータの出力結果と比較した。各ロータの出力係数の計測結果を図10に示す。試験結果から、当該マルチロータシステムは前方ロータ:後方ロータが1:4の割合である。前方ロータが全体の出力係数の増加に寄与していることが分かる。計算結果をみると、前方ロータの計算値と計測値は定量的に良く一致していることが分かる。後方ロータは、周速比 $\lambda$ が設計周速比( $\lambda=5.0$ )より低い領域では計算値と計測値は良く一致しているが、設計周速比より周速比が大きくなるにつれてズレが生じてくる。全体の出力係数においても、後方ロータの計算結果の影響を受けて、周速比が設計周速比より大きい領域で計算値が実験値より過小に評価している。この原因は、レイノルズ数影響が考えられ、模型サイズが小さいために周速比を変えるとレイノルズ数も変化するが、現在のコードではレイノルズ数を固定して計算していることが影響している。レイノルズ数を周速比が大きい領域に合わせて計算し直すと計算値と計測値は定性的に一致する方向に変化することを確認した。このため、計算目的に合わせてレイノルズ数を適切に選定することが重要である。

(4) 潮流発電用の発電機システムに新形式の発電機を提案することができた。概念設計を実施し、新発電システムの負荷変動を熱的にヒータや交流電機子で与えた試験を実施した。ただ、試験研究段階であり、システム解析に至っていないのが今後の課題である。

表1 模型の主要目

Diameter	[m]	0.50
Number of Blade		2
Blade section		NACA4409
Distance between the rotors		0.5D

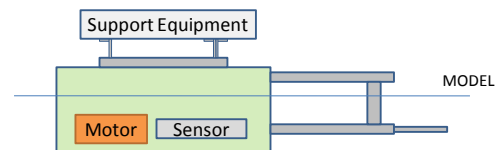


図6 マルチロータ模型性能試験装置



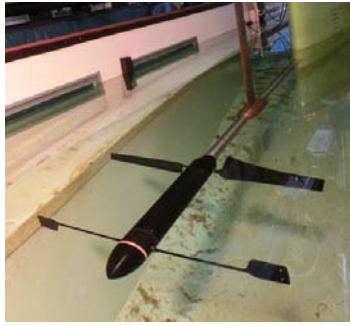


図7 マルチロータ模型

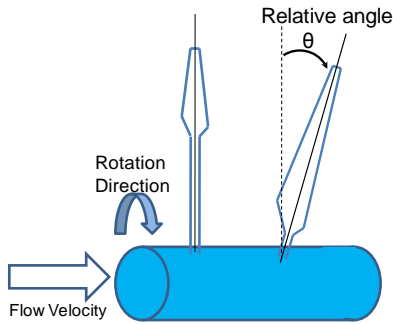


図8 各ロータの相対位相角の定義

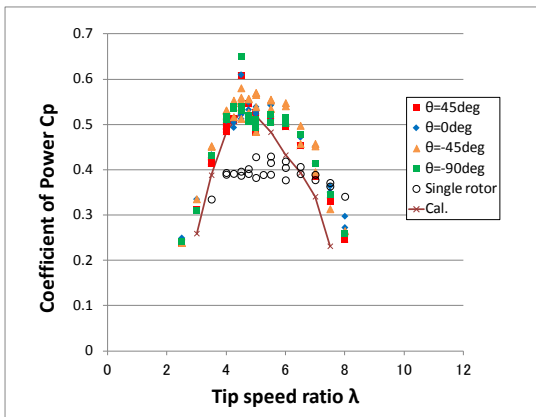


図9 位相角の違いによるマルチロータの出力係数の比較

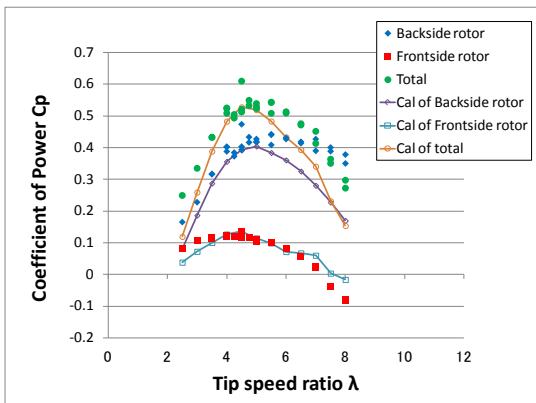


図10 マルチロータにおける各ロータ毎の出力(周速比 $\lambda=5.0$ )

## 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 4 件)

- ① Watasaki, M, Miki, M, Felder, B, Tsuzuki, K, Sato, R, Kase, S, Izumi, M, Ida, T, Trapped magnetic flux of bulk HTS magnets in the external AC magnetic field at low temperatures, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 23, Issue 3, 2013, DOI: 10.1109/TASC.2012.2236874
- ② 南 佳成、石田 茂資、日本周辺海域における風力と潮流力エネルギーの利用の可能性、会誌「日本の科学者」、Vol.47、査読有、2012、Vol.1
- ③ 南 佳成、潮流・海流発電システムの高効率化に向けた研究開発、混層流学会誌「混層流」、第25巻、査読無、2012、第4号
- ④ Miki, M, Felder, B, Tsuzuki, K, Deng, Z, Shinohara, N, Izumi, M, Ida, T, Hayakawa, Influence of AC magnetic field on a rotating machine with Gd-bulk HTS field-pole magnets, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 21, Issue 3 PART 2, June 2011, Article number5624601, Pages 1185-1189 DOI:10.1109/TASC.2010.2084985

[学会発表] (計 5 件)

- ① Yoshimasa Minami, Study on the Ocean Current and Tidal Current Power Generation System using Multi rotors, Proceedings of Asian Wave and Tidal Energy Conference 2012, CD-ROM, 2012
- ② 南 佳成、二村 正、マルチロータを用いた潮流・海流発電システムのプロトタイプ設計、第17回動力・エネルギー技術シンポジウム講演集、査読無、CD-ROM、2012
- ③ Yoshimasa Minami, Development of tidal and ocean current generator system suitable for the sea around Japan, Proceedings of International Research Meeting of Kyushu University Research, CD-ROM, 2011
- ④ B. Felder, M. Miki, K. Tsuzuki, N. Shinohara, H. Hayakawa, M. Izumi, A 100-W grade closed-cycle thermosyphon cooling system used in hts rotating machines, AIP Conference Proceedings, Volume 1434, Issue 57, 2012, Pages 417-424, 2011 Joint

Cryogenic Engineering and  
International Cryogenic Materials  
Conferences; Spokane, WA; United  
States; 13 June 2011 through 17 June  
2011

DOI: 10.1063/1.4706947Document

- ⑤ 南 佳成、二村 正、マルチロータを用いた潮流・海流発電システムに関する基礎的検討、日本船舶海洋工学会 H23 年秋期講演会論文集、査読無、CD-ROM、2011

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

南 佳成 (MINAMI YOSHIMASA)

研究者番号：60399516

### (2) 研究分担者

湯川 和浩 (YUKAWA KAZUHIRO)

海上技術安全研究所・海洋開発系・海洋システム研究グループ・主任研究員

研究者番号：80435776

國分 健太郎 (KOKUBUN KENTARO)

海上技術安全研究所・洋上再生エネルギー開発系・海洋エネルギー研究グループ・主任研究員

研究者番号：50358404

和泉 充 (IZUMI MITSURU)

東京海洋大学・海洋工学部・教授

研究者番号：50159802