

機関番号：18001

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560742

研究課題名（和文）環境融合型浮体式洋上風波浪エネルギー変換のシナジーシステム構築

研究課題名（英文）Establishment of Synergy System of Floating Type Wind and Wave Energy Converters Harmonized with Environment

研究代表者

鈴木 正己（SUZUKI MASAMI）

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：30171250

研究成果の概要（和文）：

波力発電や風力発電などの自然エネルギーは変動が大きく、数値解析方法および設計方法の確立が最も重要であり、実験は数値解析結果の妥当性を検証する上で重要な役割を有している。本研究では数値解析方法や設計方法の確立を目的に研究開発を実施している。このために必要な、(1) タービン特性解析用数値流体計算コード、(2) 微小振幅波線形理論に基づく空気室を有する浮体の特性解析コード、(3) 数値流体計算による空気室特性の予測コードの開発、(4) 総合システムの特性予測と設計方法および評価方法の構築を行っている。

研究成果の概要（英文）：

Natural energies, such as wave power generation and wind power, have a large fluctuation of input power, therefore establishment of a numerical analysis method and a design method are the most important. While an experiment is an important in order to verify the validity of a numerical analysis result. This study performed the research and development for the establishment of the numerical analysis method and the design method: (1) the computational fluid dynamics code for the analysis of turbine characteristics, (2) the numerical analysis code based on the linear wave theory for the floating body with the oscillating water column (OWC), (3) the computational fluid dynamics code in order to analyze the OWC characteristics including the loss, and (4) the design and the prediction of the synthesis system and the evaluation method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：波浪エネルギー変換・波力発電・風力発電・空気タービン・OWC・自然エネルギー・再生可能エネルギー・海洋資源

1. 研究開始当初の背景

風力発電は陸上における適地の減少や洋上の良好な風況に支えられ、ヨーロッパにおいて着底式洋上風力発電ファームが目覚し

い普及を遂げている。近年、国内においても着底式洋上風力発電ファームが建設運用されつつある。しかし、国内の海岸線は急激に水深が増大し、遠浅な海域が乏しいためヨー

ロップのような着底式洋上風力発電ファームの適地は少なく、風力発電の規模を拡大するには浮体式風力発電システムの開発が不可欠となっている。海外においても浮体式洋上風力発電システムの提案はなされているが、本格的な研究が国内で実施され始めたばかりである。現在、検討や研究が実施されているシステムは、水深が深くなるにつれ、着底式、ポンツーン型係留方式、セミサブ型係留方式、深水域でのスパー型係留方式、帆による自航型である。

波力発電は1970年代の石油危機から本格的な研究が実施され、国内においては海洋研究開発機構（旧海洋科学技術センター）を中核とする海明やマイティホエールなどの波力発電船や国土交通省による防波堤設置型などの大規模な実証実験が実施され、発電性能や耐久性、保守管理面についての検証がなされてきた。波浪エネルギー変換システムとして、主流となっている方式は浮体または防波堤前面に設置された空気室により、波の上下動を空気の往復流に変換し、空気タービンを駆動する方式である。ここでの課題は建造、設置、保守管理のコスト削減にあり、最も効果的なことは小型化である。

これら自然エネルギーを利用したシステムは環境に優しい点が強調されがちであるが、化石燃料を利用するシステムに比して、影響が少ないことを意味し、利用方法によっては環境破壊にもつながることに十分な配慮が必要である。このためには、効果的なエネルギー吸収と自然に溶け込み、自然と共存したシステムの構築が望まれ、浮体式システムにその期待は寄せられている。

2. 研究の目的

洋上風力発電と波力発電の相互作用によるシナジー効果を念頭に形状や作動方法の工夫を行い、適切な浮体式洋上風波浪エネルギー変換システムを考案し、考案した装置特性を明らかにするための数値解析システムを構築することを研究の目的としている。このため、浮体やタービン特性を算出する高精度で練成問題にも対応した計算コードを開発する。なお、プロペラなどの推進機による係留力の緩和や無係留化は可能であり、通常の船舶では従来から実施されている。しかし、推進機などの特別な動力を用いず、波や風の相互作用を活用したシンプルな構造で無係留化する方法は、現在までに類がない。これを実現できれば、浮体式洋上風力発電や波力発電システムの経済性が向上し、実用化に大きく進展するとともに、石油掘削リグなどの海洋構造物を係留するうえにおいても効果的であり、係留方法に一石を投じられる。これらの検討に対応した解析システムの構築も本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 数値流体計算コードの開発

①タービン特性

波力発電用空気タービンや風車まわりの流れを推定するため、独自開発中の数値流体計算コードを改善し、計算精度の向上を目指し、計算の安定性、計算速度、複雑な形状、練成問題への対応を視野に開発を進める。数値計算結果に最も期待する点は風洞実験では対応できない高レイノルズ数の計算結果であり、実機の性能予測である。

風車には現在主流となっている水平軸風車と全方位に対して自己整流作用のある垂直軸風車が存在する。水平軸風車は一般に効率が高いことから広く普及している。ただし、洋上浮体式風車は陸上などの固定式と異なり浮体が動揺するため、発電機などの重量物が風車下部の基礎部に設置できる水平軸風車にも期待が寄せられる。このため、水平軸風車用の計算コードとともに垂直軸風車用の計算コードの開発を行う。

②空気室特性

浮体や空気室の特性は従来、微小振幅波の線形理論により解析され、十分な効果を上げてきているが、損失が考慮できないため、損失が考慮できるより高精度な解析が望まれている。短波長や軽負荷において、線形理論による解析結果はエネルギー変換効率が実験結果よりも高い結果が現れることが多く、これについての検討が必要となっている。実験にも多くの誤差が含まれており、これらの違いが実験誤差を主因となる可能性も否定できない。これらを明らかにするため、高精度な数値流体計算コードを開発し、検討を行う。

(2) 総合特性

波力発電では入射波のエネルギーが浮体幅に比例して増大するため、浮体の小型化は船長と喫水を小さくし、エネルギー吸収率の低下が少ない浮体形状を導出することに尽きる。また、タービンの小型化と高回転化のために空気室内圧力を高くすることが要求される。これらの条件を加味した浮体形状やタービンの形状、大きさについて検討を行う。

4. 研究成果

(1) CFDによるタービン特性の解析

タービン特性を解析するために、数値流体計算コード、格子生成コード、計算結果の可視化プログラムの研究開発を行っている。また、計算格子により作成の容易さと計算精度の対応は異なることから、各種計算格子について検討を行っている。これらを基に翼列であるガイドベーンのパフォーマンス評価および計算精度について確認を実施している。風洞実験デ

一タには閉塞効果などの風洞壁影響が内在しており、自由流中での特性を予測するにはこれらの影響を評価することが必要である。このため、CFDの計算精度を確認しつつ、CFDにより風洞壁影響を評価できるように検討を実施している。これら研究成果を踏まえて、風車の3次元計算を行い良好な結果を得た。

①数値計算方法

数値流体計算は著者が開発を行っている非圧縮粘性計算コードで実施している。この計算コードはCollocated Gridによる有限体積法で構成され、連続の式を満たすためにSIMPLE アルゴリズムを用いて圧力補正を行っている。対流項は数値流束が3次精度風上補間となるQUICKスキームを用い、これ以外の項は2次精度の中心差分で離散化されている。乱流モデルはLaunder-Sharmaの低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルを導入している。

②格子構成と計算精度

翼列計算には格子配置的にH型格子が最も馴染むため、良く用いられる。しかし、前縁や後縁では格子配置的に滑らかにできないことから、計算精度が低下することが予測される。これらの課題を克服するために構造格子ではMulti-Block格子や重畳格子が用いられる。H型格子は計算精度を確保するために前縁と後縁に格子を集中させることで、揚力係数は他の計算格子と比較すると、計算精度は多少低くなる。格子点数は増加するものの、格子生成に注意を払うことにより、実用的な計算精度の範囲に収めることが可能と考えられる。Multi-Blockと重畳格子の結果は実験結果とも良く一致し、高い計算精度を確保できている。

③翼列

翼列計算に関する計算精度の確認と波力発電用ガイドベーンのパフォーマンスを目的に円弧翼翼列の計算を行い、実験結果との比較による検証を行っている。実験の翼厚が薄く、剥離位置が前縁に固定されることからH型格子を用いて計算を行っている。轉向角と圧力損失係数について実験結果と比較している。轉向角は無衝突流入角以下の迎え角では実験結果と良く一致することが確認できている。圧力損失係数は実験結果よりも多少低く予測されているが、流入角に対する傾向は実験結果と良く一致している。実験も絶対的な精度は明確ではなく、計測の難しさにもなっており大きな誤差を含むことになり、実験結果との違いが計算誤差とはならないことも付言しておく。

④風洞壁影響

風洞実験は閉塞効果により、自由流中の揚力や抗力よりも一般的に大きな値となる。このため、風洞実験の結果を修正して用いる必要がある。また、数値計算結果の検証に用い

る場合も閉塞効果を考慮した評価が必要となる。また、閉塞効果に対する研究もなされており、修正方法が示されているが、絶対的なものではなく、個々の形状により変化させるべきであるが、詳細な修正方法は示されていない。このため、直接、風洞を模擬した数値計算を行い、風洞実験の結果と比較することが最善といえる。また、実験には計測誤差が含まれることから、数値計算結果との比較は、その妥当性の判断材料としても有効である。

翼列計算は重畳格子を用いたCFDおよび渦分布法によるポテンシャル計算により実施している。実験結果やポテンシャル計算結果との比較により、CFD結果の計算精度や妥当性が十分であることを確認している。

⑤風車性能予測

以上、CFDコードに対する基礎的な検証を踏まえて、風車性能の予測を行っている。なお、風向変化によるヨー角の影響を調べるには非定常計算を実施している。

図1は計算に用いた風車まわりの計算格子で上半分のみを表している。

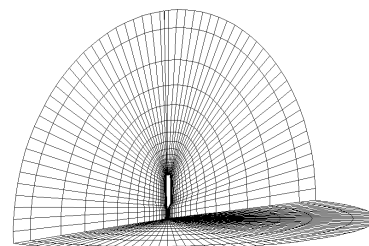


図1 風車まわりの計算格子

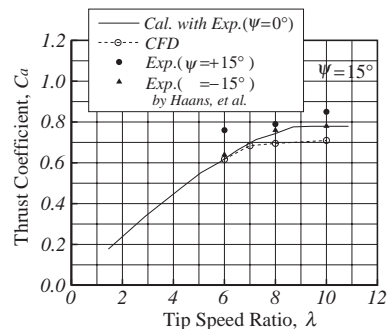


図2 スラスト係数 (ヨー角 15°)

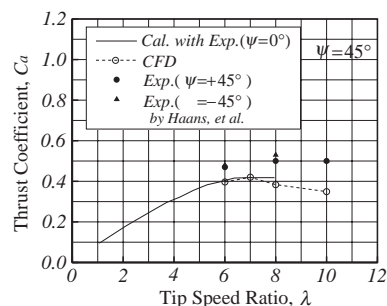


図3 スラスト係数 (ヨー角 45°)

図2はヨー角15度、図3は45度の結果であり、簡易予測(実線)、CFD(○印)、実験結果(●, ▲印)を示している。簡易予測方法は風車の軸流速度成分がヨー角0度の風速に対応するとして、ヨー角0度の実験結果を用いて推定している。ヨー角が大きくなるにつれて、実験結果はCFDや簡易予測結果との差が大きくなっている。ただし、簡易予測方法とCFDの計算結果は良く一致しており、実験の計測誤差(本来、図2中の●と▲印の結果は一致しなければならない)も大きいとも考えられる。このようにCFDの信頼性が増すことで、CFD結果も踏まえて、実験結果の妥当性を総合的に判断できるようになる。

(2) 微小振幅波線形理論による領域分割法

微小振幅波における線形理論の基、領域分割法による空気室を有する浮体特性の解析ツールの構築を行った。

①BBDB特性の予測

図4は後ろ曲げダクトブイの解析モデルを示している。領域分割法は図4のように、幾つかの領域(図4では5領域)に分割し、各領域では海底、船底、自由表面の境界条件(運動学的条件と動力学的条件)が満たされる複素速度ポテンシャルを有限級数として求めておき、未知数となる級数の係数を領域間の速度と圧力が一致するように求める解析方法である。

この波力発電方式は波と浮体運動が同調するときに高いエネルギー吸収率を得ることができるが、同調点前後の作動範囲は狭いといえる。

図5は解析結果を表し、エネルギー吸収率は実験結果とも良好な一致を示している。

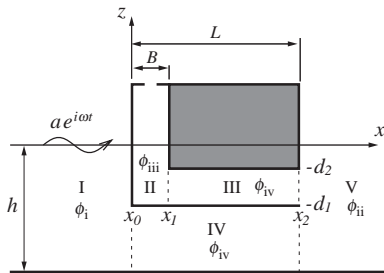


図4 BBDB形状と領域分割

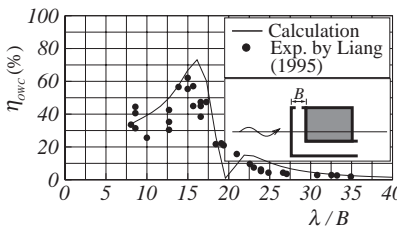


図5 エネルギー吸収効率

②時間領域による非線形負荷特性の解析

通常の解析はタービンなどの負荷特性は線形化して計算が行われるが、実際のタービ

ンは非線形負荷であることから、時間領域での取り扱いがより適している。実験では空気室の負荷としてオリフィスを用いることが多く、実験データの解析も等価線形化して解析がなされている。ここでは差圧が流量の2乗に比例するオリフィス負荷について検討を行っている。

非線形負荷を時系列計算によって解析した結果を基に、等価線形化の手法で解析したエネルギー吸収効率を評価した結果、誤差は時系列計算結果の1割程度に収まった。これより、等価線形化でも十分な解析精度が得られ、線形化して解析されていた従来の実験結果への非線形性の影響は少ないと考えられる。

(3) CFDによる空気室特性の予測

空気室前面のカーテンウォール下端に生じる渦(図6)などの損失により、実際のエネルギー吸収率は線形理論による解析結果よりも低下し、実験結果は解析結果よりも顕著に小さな値を示すことがある。ただし、実験上の誤差も存在するため、損失を考慮できない線形理論の課題として単純には判断できないことから、損失を考慮できるCFD計算を実施している。



図6 空気室まわりの流れ

図7は防波堤などの固定式振動水柱型波力発電装置を解析対象とした結果を示し、空気室前面から10波長波上側で造波し、造波位置(赤線)、造波位置から2波長(緑線)、4波長(青色)、6波長(桃色)、8波長(水色)位置、およびOWC(黒色)の1周期移動平均した波エネルギーを表している。1周期は100時間ステップであり、水深0.4m、波高0.04m、周期1sの計算結果を示している。造波した波には種々の周波数の波が含まれ、計測位置により波エネルギーに変化が現れる。波浪水槽による実験においても波エネルギーは造波機からの距離により変化し、定常な値を得るには難しいと考えられ、1割程度の誤差は容易に生じると予想される。

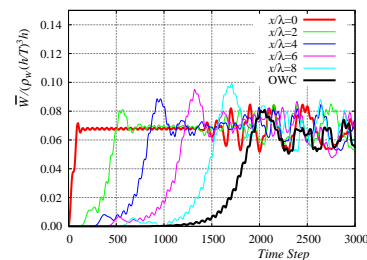


図7 波浪エネルギーと空気室出力の変動

図8は波長について空気室内圧力，空気室内水面変位振幅を表しており，線形理論とCFDによる解析は良く一致した結果となっている．実験結果と比較すると，空気室内の水面変位は良く一致し，圧力振幅も比較的一致しているがエネルギー吸収効率は高めとなっている．ただし，実験データはバラツキが大きく，これらの違いは実験誤差に起因していると考えられる．

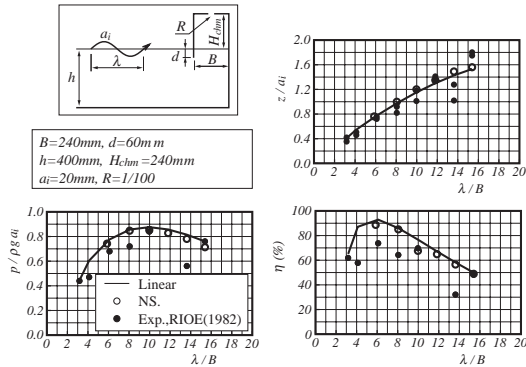


図8 固定型波力発電装置特性

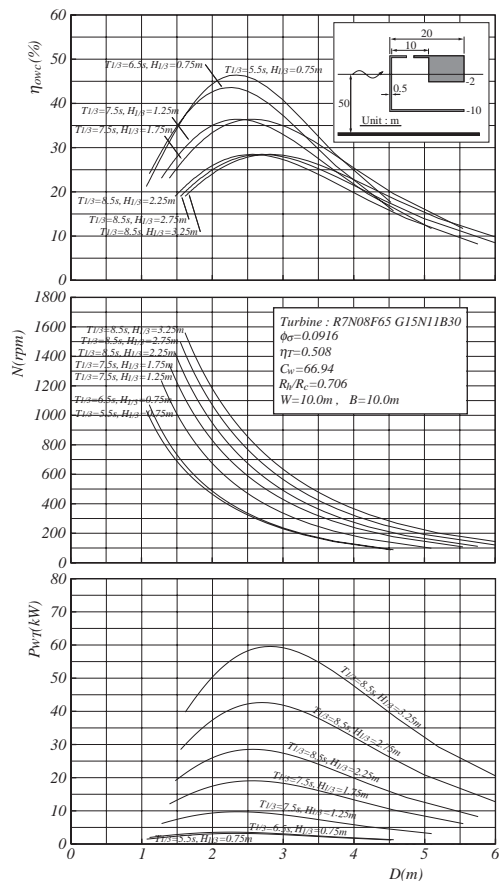


図9 波浪エネルギー吸収効率，タービン回転数，タービン出力へのタービン径影響

(4) 総合特性の予測と評価

以上の結果を踏まえると，微小振幅波の線形理論でも十分にOWCの性能を予測可能

と判断できる．ここでは，微小振幅波の線形理論で解析した総合特性について示す．

図9は海象として山形県酒田港の波浪頻度分布データを用いた基本設計例を示している．波力発電用空気タービンはウェルズタービンとし，タービン径に対する空気室のエネルギー吸収率，タービン回転数，発電出力を表している．波力発電装置の浮体幅は10mとしている．波高や周期が大きくなるにつれて，タービン径が大きい方が高い発電出力が得られる．しかし，製作コストと波の出現頻度が高い低波高ではより小さなタービン径で発電出力のピークが得られる．このため，波浪の出現頻度や製作コストと発電出力との関連により，最適なタービン径，タービン回転数が得られる．これらを考慮するとタービン直径は2m前後が推奨できる．

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6件)

- ① Masami SUZUKI, Toshiari Kuboki, Shuich Nagata and Toshiaki Setoguchi, "Numerical Investigation of 2-D Optimal Profile of Backward-Bent Duct Type Wave Energy Converter," Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, 査読有, Vol.133/041602 (2011-11).
- ② Masami SUZUKI, Toshiaki Setoguchi and Kenji Kaneko, "Prediction of Cascade Performance of Circular-Arc Blades with CFD," International Journal of Fluid Machinery and Systems, 査読有, Vol.4, No.4, pp.360-366 (2011-10).
- ③ 鈴木正己, 天久和正, "数値流体計算による風車の斜め風特性", ターボ機械, 査読有, 39巻, 10号, pp.40-47 (2011-10).
- ④ 鈴木正己, "風車特性の評価と数値流体計算の利用", 査読有, ターボ機械, 38巻, 2号, pp.50-56 (2010-2).
- ⑤ 鈴木正己, "ポテンシャル計算とCFDによる翼に働く風洞壁影響の検討", ターボ機械, 37巻, 査読有, 9号, pp.14-19 (2009-9).
- ⑥ 鈴木正己, "数値流体解析による実験結果へのアプローチ (風車性能の推定)", ターボ機械, 査読有, 36巻, 6号, pp.25-30 (2008-6).

[学会発表] (計17件)

- ① 鈴木正己, "浮体式振動水柱型波力発電装置の非線形負荷特性", 日本船舶海洋工学会講演論文集, 2011年11月15日, 東京.
- ② 鈴木正己, 天久和正, "数値計算によるダ

- リウスタービンの2次元空力特性予測”，日本機械学会 2011 年度年次大会 DVD-ROM 論文集，2011 年 9 月 12 日，東京。
- ③ Masami SUZUKI, “Prediction of Wind Turbine Characteristics in Yawed Flow Conditions by CFD,” Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAI10), 2011 年 7 月 5 日, Brussels, Belgium.
- ④ 鈴木正己, “数値流体計算による風車の斜め風特性”, 第 65 回ターボ機械協会講演論文集, 2011 年 5 月 20 日, 東京。
- ⑤ 鈴木正己, 荒川忠一, “振動水柱型波力発電装置の非線形負荷と実験データ解析”, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 2010 年 11 月 15 日, 神戸。
- ⑥ 鈴木正己, 荒川忠一, “振動水柱型波浪エネルギー変換装置負荷における非線形性の影響と等価線形化”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2010 年 10 月 30 日, 米沢。
- ⑦ M. Suzuki, M. Takao, S. Nagata, T. Setoguchi and C. Arakawa, “Performance Prediction of OWC Type Floating Wave Power Generation Installing Impulse Turbine,” 3rd International Conference on Ocean Energy, 2010 年 10 月 7 日, Bilbao, Spain.
- ⑧ Masami Suzuki, “2D Numerical Simulations of Unsteady Flow around Darrieus Turbine,” Proceedings of 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 2010 年 9 月 11 日, Matsue, Japan.
- ⑨ 鈴木正己, 高尾学, 永田修一, 豊田和隆, 瀬戸口俊明, 荒川忠一, “衝動タービンを用いた振動水柱型浮体式波力発電装置の数値解析”, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋。
- ⑩ Masami SUZUKI, “Prediction of Wind Turbine Characteristics by Practical CFD Simulation Using a Few Grid Points,” Proceedings of the 13th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-13), 2010 年 4 月 6 日, Hawaii, USA.
- ⑪ 鈴木正己, 永田修一, 瀬戸口俊明, 荒川忠一, “後ろ曲げダクト型浮体式波浪エネルギー変換装置の 2 次元特性”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2009 年 11 月 8 日, 名古屋。
- ⑫ 鈴木正己, “翼列計算のための格子構成と計算精度の検討”, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, 2009 年 9 月 14 日, 盛岡。
- ⑬ Masami SUZUKI, “Evaluation of Experimental Results for Wind Turbine Characteristics by CFD,” Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAI9), 2009 年 9 月 9 日, Gyeongju, Korea.
- ⑭ 鈴木正己, “数値流体解析による振動水柱型波浪エネルギー変換装置の性能予測”, 日本混相流学会年会講演会 2009 講演論文集, 2009 年 8 月 7 日, 熊本。
- ⑮ Masami SUZUKI, Toshiari KUBOKI, Shuichi NAGATA and Toshiaki SETOGUCHI, “Numerical Investigation of 2-D Optimal Profile of Backward-Bent Duct Type Wave Energy Converter,” Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, ASME, 2009 年 6 月 1 日, Hawaii, USA.
- ⑯ 鈴木正己, “ポテンシャル計算と CFD による翼に働く風洞壁影響の検討”, 第 60 回ターボ機械協会大阪講演会講演論文集, 2008 年 9 月 19 日, 大阪。
- ⑰ 鈴木正己, “数値計算による波力発電用空気室特性の推定”, 日本流体力学会年会 2008 講演要旨集, 2008 年 9 月 4 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]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 正己 (SUZUKI MASAMI)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号：30171250

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者