

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02363

研究課題名（和文）潮流発電の実用化開発に必要な高精度広域CFD解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of a high-resolution CFD method for regional-scale simulation of tidal current farm

研究代表者

胡 長洪（Hu, Changhong）

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：20274532

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：潮流発電の実用化開発に必要な流体解析ツールの提供を目的として、極めて高い並列性能を有する非圧縮性流体ソルバーを開発し、実務への利用が可能な計算負荷で小規模潮流ファーム全体に対する数値解析が行える広域CFDモデルの開発に関する研究を行った。CFD検証用に2機タービン相互干渉の模型実験を実施した。広域CFDモデルの開発は格子ボルツマン法を応用した。潮流タービンモデルとしてアクチュエータライン法を改良して格子ボルツマン法に実装した。開発された広域CFDモデルは、水面波、乱流流入条件を考慮した小規模潮流ファームの高解像度数値シミュレーションに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数機水車が設置される潮流発電ファームを解析する場合は広域CFDモデルによるLESが必要であるが、適切なソフトウェアがなく、関連の研究も少ない。そのために、本研究では極めて高い並列性能を有する格子ボルツマン法の応用に関する研究を行い、計算精度と計算効率の両立ができる広域CFDモデルを開発した。本研究結果により、潮流発電に特有な海面うねりの影響が考慮できる小規模潮流発電ファームの高解像度解析ができるようになり、潮流発電開発に必要な流体解析レベルを向上させるものと思われる。

研究成果の概要（英文）：Researches have been conducted on the development of a regional-scale CFD model with extremely high parallel performance, which enables high-resolution numerical simulation of a small-scale tidal current farm with an acceptable computational cost. A model experiment on the interaction between two turbines has been carried out for validation of the CFD model. The lattice Boltzmann method was applied to the development of the wide-area CFD model. The actuator line model was modified and implemented into the lattice Boltzmann method as a tidal turbine model. The developed regional-scale CFD model has been successfully applied to high-resolution numerical simulation of a small-scale tidal current farm, with the consideration of surface waves, turbulence inflow condition.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：潮流発電タービン 後流影響 水槽実験 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

潮流発電は予測可能で安定的な再生可能エネルギーとして注目が集まっている。欧州では単独装置がすでに実用化の段階にあり、ファーム化された商業発電も開始されようとしている。一方、日本の潮流発電はまだ技術開発の初期段階に位置しており、経産省や環境省の国プロによって研究開発が推進され、基礎技術の確立、実海域でのプロトタイプ機の実証試験が行われている。欧州と異なって日本周辺海域の潮流速は全体的に低く、さらに漁業権や航路等様々な制約から大規模潮流ファームを建設する可能性は低い。一方、潮流発電の適地とされる潮流速の速い海峡は多数存在するため、狭隘な設置海域になるべく多くの発電装置を設置する小規模ファームに対する検討はすでに開始されている。

現在検討中の潮流発電設置場所の多くは狭い海峡で水深も浅く、潮流場は海底乱流境界層、海面のうねり、水車の存在などに強く影響され、それに対する高精度予測は非常に困難である。Navier-Stokes (N-S) 方程式を直接解く CFD (Computational Fluid Dynamics) 手法はこの複雑な潮流場の解析に有効であるが、潮流ファーム解析の場合計算領域が広大であるため、現状では潮流解析モデルを拡張しての定性的な検討に留まっている。しかし、水車間の干渉を考慮した潮流ファーム発電量の高精度予測や環境影響 (海洋生物への影響、底泥巻き上げ、漁業への影響など) の正確な評価を行うには大規模 LES による潮流流速と乱流強度の解析が必要で、そのための広域 CFD モデルの開発が求められている。

大学研究室・企業研究所で実務に使われるミドルレンジ計算機が数千コアを有する高性能化時代になっている。このような高性能計算機の性能をフルに発揮できれば検討している規模の潮流ファームに対する大規模 LES の実現可能性は十分にあるが、問題は既存の CFD ソフトウェアの多くは元々大規模並列計算を想定せず開発されたためボトルネックになっている。この現状を打破するために、最新の CFD 研究成果を結集させて超高並列性能を有する次世代の CFD ソルバーの開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は広域 CFD モデルの開発である。二つのアプローチ、潮流解析モデルの高解像度化と汎用の工学 CFD モデルの広域化が考えられる。これまで殆どの研究は前者であり、精度が低いので定量的解析には不向きである。本研究は、今後の計算機ハードウェアの発展方向性を見越して、学術的にチャレンジ性の高い工学 CFD モデルの広域化によるアプローチを取る。超高並列性能を有する直交格子法と必要な領域だけを局所的に高精細にできる解適合格子法 (AMR) 法を用いて計算の高精度と高効率を両立させる広域 CFD 手法の開発は本研究の開発目標である。

3. 研究の方法

本研究の主要目的である現在検討中の小規模潮流発電ファームに対して LES 解析が行える広域 CFD モデルの開発を推進するために、以下の研究課題を整理した。

- 課題 A: 超高並列性能を有する直交格子ベースに、局所的に格子細分化ができる解適合格子法に対する研究を行い、潮流ファームを解析できる実用的な広域 CFD モデルを開発する。
- 課題 B: 2 機水車を用いた水槽実験を実施し、得られた後流域の流速変化や下流側水車の出力変化などの計測データを使って開発した広域 CFD モデルの精度検証を行う。
- 課題 C: 開発した広域 CFD モデルに対して潮流解析モデル及び汎用の工学 CFD モデルとの連携を研究し、潮流ファームに関する広域 LES 手法の実用化検討を行う。

4. 研究成果

(1) 2 機水車を用いた水槽実験

開発する広域 CFD モデルについてタービン間の相互干渉の高精度評価が求められており、タービンから離れた後流域の高解像度乱流計算が重要となる。このような CFD モデルを検証するために実験データが必要であり、応募当時公表された適切な実験データがないため本研究では水槽実験を実施した。

水槽実験に使用される潮流タービンは、Fig.1 に示す 1MW 級潮流発電装置の 1/50 スケールのモデルである。タービンモデルは 3 枚翼であり、ローター直径は $D = 0.4\text{m}$ 、ナセル高さは 0.4m である。ブレードは NACA4412 翼型を用いて設計されている。タービンの発電効率を評価するためにナセル内に設置されたロードセルによりローターに作用するトルクを計測した。

本研究で実施した水槽実験の主要目的は、2 基潮流タービンの干渉現象及び水面波の影響

Table 1 Regular wave parameters

Wave No.	Height (m) H	Period (s) T	Length (m) λ
I	0.06	1.5	3.512
II	0.045	1.5	3.512
III	0.03	1.5	3.512
IV	0.06	1.25	2.440
V	0.06	1.0	1.561

を調べることであり、実験セットアップの概略図は Fig.2 に示す。2 基のタービンは曳航電車に固定された仮底に 2m の距離を空けて縦列配置されている。ナセルは水深 0.6m の所に位置する。

実験は九州大学応用力学研究所が所有する曳航装置と造波装置が備えられた深海機器力学実験水槽（長 65m、幅 5m）で行われ、曳航装置の曳航速度（潮流速度に対応）は 0.5m/s に設定された。タービンの回転速度はモーターで制御され、実験中一定の回転速度で回っている。潮流流速と翼端速度の比である周速比を 2 から 7 の範囲で変化させた。水面波の影響を調べるために、波無・潮流のみの実験と、Table 1 に示す波高と周期での波有の実験を実施した。計測項目は 2 基タービンのトルク、ナセル高さでの潮流速度、前方タービンの位置における水位などである。



Fig.1 Scale model of horizontal axis tidal turbine.

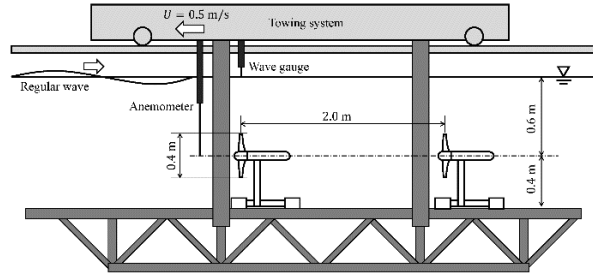


Fig.2 Schematic view of experimental setup.

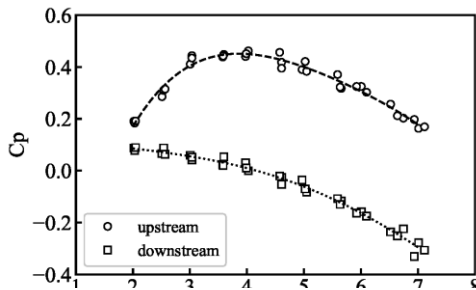


Fig.3 Power coefficients of upstream and downstream turbine from two turbine experiment without wave.

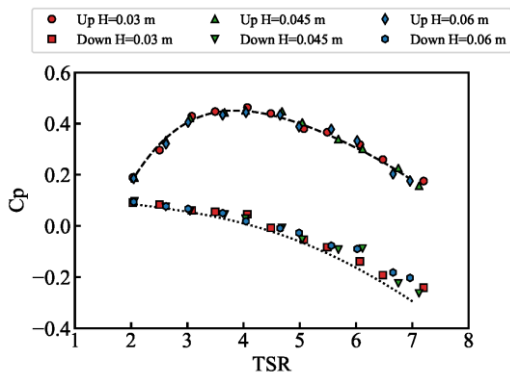


Fig.5 Power coefficients of upstream and downstream turbine at different wave heights.

破線と点線はそれぞれ前方、後方タービンのパワー係数のフィッティング曲線（最小二乗法，4 次式）を示し、これらのフィッティング曲線は Fig.5 に示す波有の結果との比較に用いる。前方タービンのパワー係数は周速比 4 付近でピークとなり、値はおおよそ 0.43 である。後方タービンのパワー係数は、同じ周速比の前方タービンの値より非常に小さい。両タービンが 5D の間隔で設置されたため、前方タービンの後流の影響が大きいと考えられている。

規則波がタービン性能への影響を実験により調べた。ここで、Table 1 の Wave I、II、III に関する計測結果を示す。波高はそれぞれ 0.06m、0.045m、0.03m であり、周期はすべて 1.5s である。Fig.4 には周速比 4 における水位、前方タービンのトルク Q^{up} 、後方タービンのトルク Q^{down} の時系列を示している。なお、水位は前方タービンの横に設置された波高計で計測したものである。前方タービンのトルクはどの波高の条件においても波の周期で変動している。波の進行方向

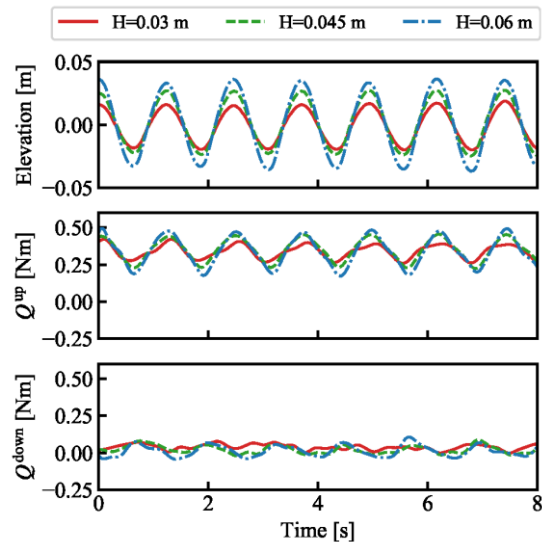


Fig.4 Time-series of wave elevation and torques for TSR = 4 at different wave heights.

波無の実験におけるタービン性能を時間平均したパワー係数 C_p と周速比 TSR の関係から評価する。パワー係数 C_p はロードセルで計測されたトルクの時間平均値 \bar{Q} とナセル高さでの平均潮流速度 \bar{u} を用いて定義されている。

波無の実験におけるパワー係数 C_p は Fig.3 に示す。丸プロットが前方、四角プロットが後方のタービンの計測結果である。実験の再現性を評価するため、各周速比の条件で 3 回ずつ計測を行った。

は潮流方向と同じであるため、水位の最大と最小に対応してトルクもほぼ最大と最小になった。波高が小さい規則波の方がトルクの変動が小さい。トルクの変動はタービンに疲労負荷を与える恐れがあると思われる。一方、前方タービンのトルクの平均値は波高によらずほぼ同程度の値である。後方タービンのトルクはどの規則波の条件でも、前方タービンのトルクよりも非常に小さくとなっている。前方タービンのトルクの時系列で見られた規則的な変動が後方タービンでは確認できず、変動幅も小さい。これは、前方タービンの後流の乱れによりものと考えられる。

規則波 Wave I、II、III の条件における時間平均パワー係数と周速比の関係を図 5 に示す。破線と点線は波無条件の結果のフィッティング曲線である。前方タービンのパワー係数はどの規則波の条件でも同程度の値であり、波無条件の結果と比較しても大きな違いは見られない。したがって、単独タービンの場合、時間平均パワー係数について波の影響がほとんどないと言える。後方タービンのパワー係数は前方タービンの同周速比の場合と比べて非常に小さい値になる。波無条件と比較すると、わずかではあるがパワー係数が向上しており、高周速比ほどその傾向が強い。波の存在により、前方タービンの後流の影響で、速度欠損の回復が早くなったためだと考えられる。

(2) 広域 CFD モデルを開発

複数基潮流タービンの相互干渉に関する高精度数値シミュレーションでは、タービン近傍だけでなく潮流発電ファーム全体に対する高解像度メッシュが必要である。ナビエ・ストークス (N-S) 方程式を解く一般的な CFD 手法では、メッシュ数が十億のオーダーになると大規模並列計算効率が急激に低下するため、広域 CFD モデルとして限界があることが分かった。したがって、本研究で開発する広域 CFD モデルのソルバーは、従来の N-S 方程式を解く手法ではなく、大規模並列計算に適した完全陽解法である格子ボルツマン法 (LB 法) を採用している。

LB 法では流体を仮想的な粒子集団として扱われ、粒子の移流と衝突による速度分布関数の時間発展がボルツマン方程式で記述される。数値計算は、ボルツマン方程式の速度を有限個の速度方向に離散化して格子点上での仮想粒子の移流と衝突の計算により行われ、非圧縮 N-S 方程式の数値計算に必要とされるポアソン方程式での反復計算が不要になり、完全陽解法かつ局所的メモリアクセスのアルゴリズムになるので、GPU を用いた超大規模数値解析が得意である。

LB 法を使って潮流ファームを数値シミュレーションするにはタービンのモデル化及び自由表面の計算が課題となる。本研究では解適合格子法 (ARM) を応用した格子ボルツマン法にタービンモデルであるアクチュエータライン法 (ALM) を導入した。また、自由表面の計算にフェーズフィールド法を使った方法を開発した。

開発された LB 法の計算例として、波有の水槽実験に対応する数値計算結果を示す。Fig.6 には、TSR=2、4、6、8 でのタービンの中央鉛直平面の速度分布を示しており、タービン後流の乱流変動様子が観察できる。上流側タービンの後流が下流側タービンに大きな影響を与えており、波の周期とともに後流が上下に羽ばたく現象が見られている。TSR=6、8 の場合では、より大きいスケールの渦が後流領域に発生している。

波有のケースにおける時間平均パワー係数に関する計算と実験の比較は Fig.7 に示している。傾向的によく一致しているが、高 TSR 域では LBM シミュレーションは実験より高くなっている。その原因は ALM にあると考えられている。大きな翼アスペクト比のブレードを対象として開発された ALM は風力発電タービンのシミュレーションに広く使われており、潮流タービンへの応用実績はまだ少ない。本研究の潮流タービンモデルはブレードのアスペクト比が小さく、従来の ALM 及びその係数の設定方法をそのまま適用すると計算精度が悪くなり、今後潮流タービンへ適用するための ALM の改良が必要と思われる。

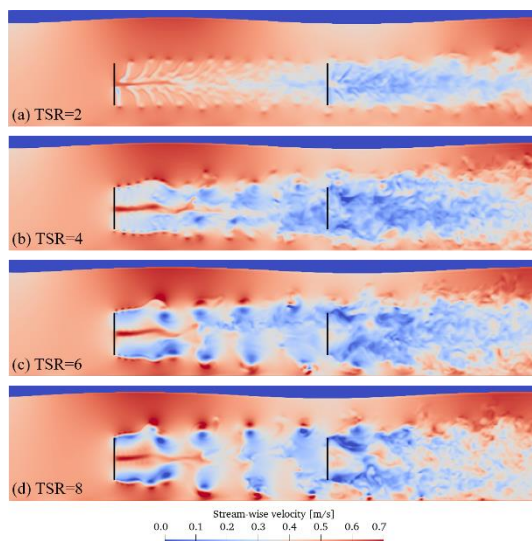


Fig.6 Simulation results for two tidal turbines with surface wave. Black lines indicate rotor planes.

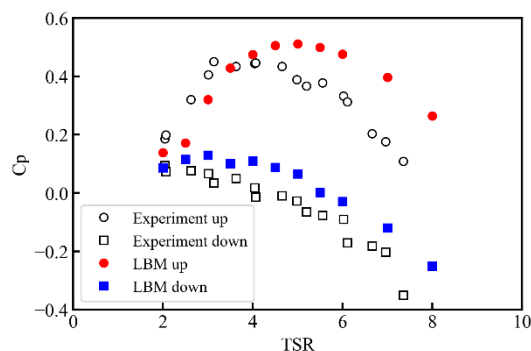


Fig.7 Simulation results for power coefficients of upstream and downstream turbines in wave case compared with experiment.

(3) 潮流ファームの数値シミュレーション

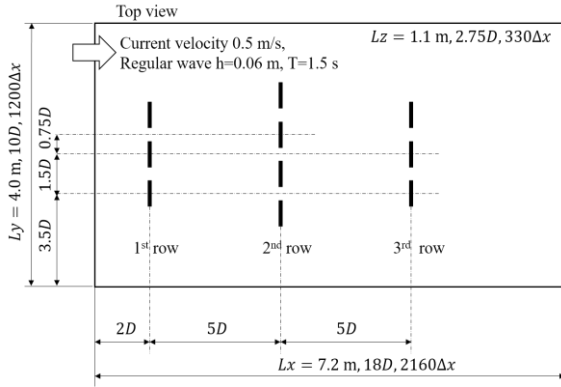


Fig.8 Simulation set up for tidal turbine array.

開発された LB 法に基づく広域 CFD モデルを小規模潮流ファームに対する試計算を行った。計算例は 3 列のアレイ (3 機、4 機、3 機) の潮流ファームである。計算に使われた潮流タービンは 3 ブレード水平軸タービンの水槽試験モデル (ローターの直径は $D=0.4\text{ m}$) である。計算領域とタービンの配置は Fig.8 に示す。タービンは $5D$ の間隔で 3 列に配置され、各列のタービンの軸間の距離は $1.5D$ に設定されている。すべてのタービンの回転速は、潮流速度に対して $TSR=4$ に設定される。

計算メッシュは $2160 \times 1200 \times 330$ の等間隔メッシュが使用され、メッシュサイズは $D/120$ である。数値シミュレーションは九州大学のスパコンで実施され、GPU (Tesla P100) 16 基を使用した。

Fig.9 には計算結果であるハブ高さでの流れ方向の速度分布を示している。最前列タービンの後流は、2 列目と 3 列目のタービンに影響を与える。また、波の存在でタービン後流に大きな影響があることが示されている。

波有の場合と波無の場合について各列タービン後流域の平均流速プロファイルを Fig.10 に示す。各列のローター面から下流側 $4D$ の所のハブ高さの平均流速分布を比較している。波の影響によって、タービン後流域の平均流速が僅かに増加していることが分かった。一方、後流の水平方向の幅は波による影響が見られない。

Fig.11 に各タービンの時間平均トルクの計算結果を比較している。Fig.8 の配置図に対応して、各列のタービンの相対位置について「T」は上、「C」は中央、「B」は下、「CT」はセンタートップ、「CB」はセンターボトムとして表している。最前列では、センタータービンのトルクは、上下のタービンのトルクよりわずかに高くなっている。3 列目のタービンのトルクは 1 列目のタービンの後流の影響により大きく低下している。波有の場合は 3 列目のトルクが大きくなり、波の影響で後流の乱流混合が増強されたためと思われる。

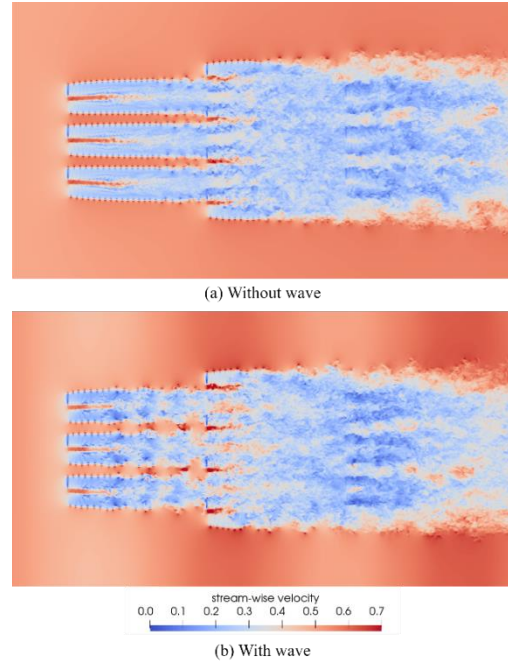


Fig.9 Simulation results for tidal turbine array

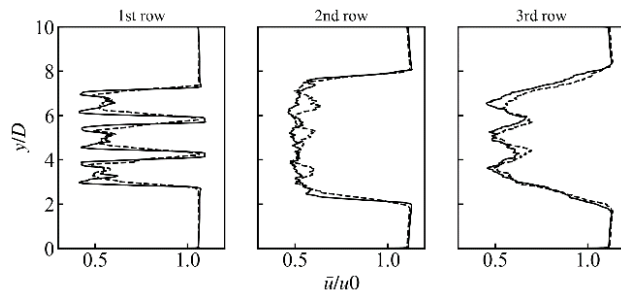


Fig.10 Comparison of mean wake profiles without (solid lines) and with waves (dashed lines) in simulations for turbine arrays.

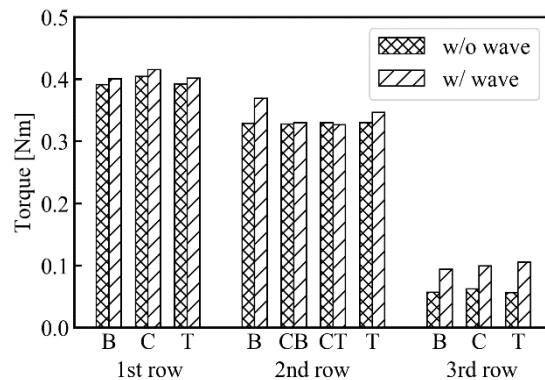


Fig.11 Comparison of time-averaged turbine performance w/o wave and w/ wave condition in turbine array simulations.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Al-Salami Jabir, Kamra Mohamed M., Hu Changhong	4. 巻 438
2. 論文標題 A high order flux reconstruction interface capturing method with a phase field preconditioning procedure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110376 ~ 110376
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcp.2021.110376	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Watanabe Seiya, Fujiaski Shintaro, Hu Changhong	4. 巻 33
2. 論文標題 Numerical Simulation of Dam Break Flow Impact on Vertical Cylinder by Cumulant Lattice Boltzmann Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Hydrodynamics	6. 最初と最後の頁 185 ~ 194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 胡 長洪、福島 総士、カムラ モハメド、渡辺 勢也、野田 穰士朗
2. 発表標題 波の影響を考慮した2基潮流タービンの水槽実験
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和3年春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mohamed M. Kamra, Changhong Hu
2. 発表標題 Numerical simulation of two tidal turbine with free-surface and wave effect
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和3年春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mohamed M. Kamra, Changhong Hu
2. 発表標題 Numerical Study of Sloshing Motion on Unstructured Mesh Using UMTHINC
3. 学会等名 11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusaku Kyoizuka, Daisaku Sakaguchi, Makoto Sueyoshi, Changhong Hu
2. 発表標題 A Floating/Submersible Shrouded Tidal Current Turbine System Applicable in Low Speed Tidal Flow
3. 学会等名 13th European Wave and Tidal Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	カムラ モハメド・ムスタファ・ザ キ・アハメド (Kamra Mohamed M.) (60870699)	九州大学・応用力学研究所・助教 (17102)	
研究 分担者	末吉 誠 (Sueyoshi Makoto) (80380533)	九州大学・応用力学研究所・助教 (17102)	削除：2019年12月18日

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
---------	---------