

海流・潮流発電の動向・展望

Trends and Prospects of Ocean Current/Tidal Power Generation

村上天元*

1. はじめに

我が国は2020年10月、国内の温室効果ガスの排出を2050年までに実質ゼロとするカーボンニュートラルを目指すことを決めた。カーボンニュートラルとは、本来、植物由来の燃料を燃やす際に発生したCO₂と、植物が成長過程で吸収したCO₂とが同じ量とする考え方だが、近年は海洋再生可能エネルギーの導入や排出量取引等で全体としてCO₂排出量をゼロとすることもカーボンニュートラルとされている。また、近年は、海藻やマングローブなどの沿岸浅海域の生物が大気中のCO₂を吸収し、結果的に海に貯留されるCO₂の形態、ブルーカーボンと呼ばれるものも注目されつつある。太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスと言った再生可能エネルギーによる発電は2012年の再生可能エネルギー固定価格買取制度FIT（Feed-in Tariff）施行後に普及し始めた。但し、太陽光や風力による発電は、出力の時間変化が激しく、電力の安定供給には一旦電力を蓄えるための蓄電コストが掛かる。また、水力発電は

電力の安定供給に適しているものの、貯水池の建造コストが高く、国内において大規模な水力発電は既に開発済みであり、新たな開発が期待できるような候補地は殆ど見当たらない。一方、地球表面の2/3を覆っている海洋は世界の発電総量を上回る潜在エネルギーを包蔵しており、波、潮汐、海流・潮流、海洋温度差などのエネルギー源がある。その中で、エネルギー密度が大きく、比較的安定なエネルギー源と見なされてきたのが海流・潮流である。

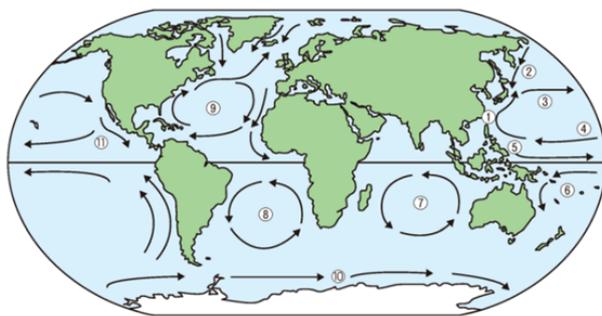
本稿では、海流・潮流発電の技術開発動向や今後の課題について解説する。

2. 海流・潮流発電のポテンシャル

Fig. 1の海流は、海面上を吹く風と地球の自転により駆動され、太平洋および大西洋のいずれも西側において流速は高い。日本近海には黒潮、親潮、対馬海流、リマン海流があるが、黒潮の流速が最も高く、2.0 m/sを超える海域も存在する。黒潮は、台湾の東部から東シナ海を北上してトカラ海峡から太平洋に入り千葉県房総半島沖から東に流れる海流である。安定したエネルギーが得られるところとしては、八重島諸島、トカラ列島、足摺岬沖などが挙げられる。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構NEDOの試算による我が国の海流パワーは約205 GWであり、発電機器の導入に適した流速の高い海域に限定すると約1.3 GWが利用できるものと考えられている。なお、東京大学および国立研究開発法人海洋研究開発機構JAMSTECの海洋エネルギーポータルサイト（Marine Energy-webGIS）では、日本近海における波浪と海流・潮流のエネルギーポテンシャル情報を提供している。

潮流は、地球、月および太陽の天体運動に起因し、

* 佐賀大学 海洋エネルギー研究所 准教授



- ① Kuroshio current ② Oyashio ③ North Pacific current
- ④ North equatorial current ⑤ Equatorial counter current
- ⑥ South equatorial current ⑦ South Indian current
- ⑧ South Atlantic current ⑨ North Atlantic current
- ⑩ Antarctic circumpolar current ⑪ California current

Fig. 1 Global major ocean currents¹⁾.

潮の干満によって規則的に起こる往復流であり、海流と同様に長期にわたって予測可能なため、比較的信頼性の高いエネルギー源と言える。英国貿易産業省 (DTI) の試算によれば、世界の潮流発電のポテンシャルは約 3,000 GW であるが発電に利用できるのは 3% 程度と考えられている。ポテンシャルの高い海域としては、英国周辺海域、カナダ東海岸のファンディ湾 (Fig. 2)²⁾、韓国の珍島群 Uldolmok が挙げられる。また、NEDO の試算による我が国における潮流のポテンシャルは約 22 GW、発電に利用できるのは約 1.9 GW と試算されている。大小多くの島々からなる我が国には、流れの速い瀬戸、海峡が存在する。特に瀬戸内海以西において流速は高く、徳島県鳴門市の鳴門海峡 (最高 5.3 m/s)、愛媛県今治市の来島海峡 (最高 4.9 m/s)、福岡県北九州市の関門海峡 (最高 4.6 m/s)、長崎県佐世保市と西海市との間を流れる針尾瀬戸 (最高 3.6 m/s)、長崎県島原半島と熊本県天草諸島の間位置する早崎瀬戸 (最高 3.4 m/s) が流速の高い水域として挙げられる。

3. 海流・潮流発電用タービン

海流・潮流発電用タービンの形状は基本的に風車と同様であり、高効率が特徴のプロペラ形に代表される水平軸式と 360 度全ての流向に対応できヨー制御を必要としない鉛直軸式がある。揚力を利用するプロペラ形は一般に流速の数倍の翼端周速度で回転し効率は高く、サボニウス形などの抗力により回転するタービンは低流速でも大きなトルクを得られるため起動特性は良いが、最高出力は回転周速度が流速より低い運転範囲で得られる。また、鉛直軸式の長所としては、構造上発電機を水上へ設置できることが挙げられる。現在の海流・潮流発電用タービン形式の主流は、効率がよく、大型化が容易なプロペラ形であり、国内外の実証試験の多くがこのプロペラ形で実施されている。

実海域への設置方法には、海底固定式と係留索を用いて水中浮遊させるタイプがあるが、海底固定の場合はコストが掛かる。一方、水中浮遊式の場合は、



Fig. 2 Bay of Fundy (Left : Low tide, Right : Full tide)²⁾.

安定姿勢を維持するための対策が求められ、例えば互いに逆方向回転するタービン 1 対を搭載することで回転トルクを相殺し、発電ユニット本体にロール方向の力が働かないような構造や係留索のプロペラとの絡まりや発電ユニットと海底、台船等との衝突を回避するための対策、如何なる海象条件下においても壊れ難く堅牢であることなどが求められる。

4. 海流発電の技術開発動向

双発プロペラ形タービンによる 100 kW 規模の海流発電の実証試験は世界に先駆けて我が国の黒潮海域において実施された。先行研究として、東京大学、株式会社 IHI、東芝、株式会社三井物産戦略研究所は水中浮遊式水平軸プロペラタービンを共同で開発し、浮体システムの安定化やタービンの高効率化の研究を行った。その後、2017 年および 2019 ~ 2022 年、株式会社 IHI は NEDO の助成事業として Fig. 3 および Fig. 4 に示す水中浮遊式海流発電システム「かいりゅう」の実証試験を、内閣府総合海洋政策推進事務局から実証フィールドに選定された鹿児島県十島村口之島海域周辺、屋久島北側海域および鹿児島湾内で実施した。ここでの実証試験では、

- (1) システムの構造、機能部品の長期信頼性確認
- (2) 設備利用率の推定



Fig. 3 Modified test equipment "KAIRYU"³⁾.

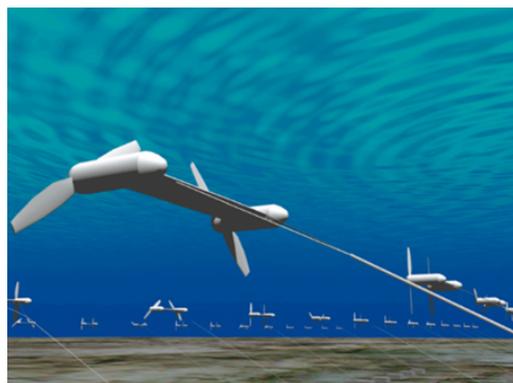


Fig. 4 Floating ocean current power generation system⁴⁾.

- (3) 設置および運用, メンテナンス工事の経済性確認
- (4) 離島環境での電力系統への接続検討
- (5) 事業化した際の経済性評価

が実施された。実証試験機「かいりゅう」は潜航するために海水を吸い込む浮力調整装置やタンクの作動油を移動させて重心位置を変化させ、姿勢を安定化させるための機構を備えている。

Table 1 は実証試験機「かいりゅう」の諸元である。浮体には設計時の強度評価を行うため、様々な場所にひずみセンサが取り付けられ、特にタービン翼周辺には多数のセンサが設置された。実証試験では様々な荷重ケースが検証されて最終的には設計手法に問題がないことが確認された。

また、海流発電システムを離島への電力供給に使用した場合のコストが試算された。条件は Table 2 の通りである。試算の結果、CAPEX (Capital Expenditure: 設備投資のための支出) および OPEX (Operating Expense: 運営のための支出) は約 56.5 円/kWh となり、設備規模あたりの発電コストは約 300 万円/kW となった。内訳は CAPEX が約 77%, OPEX が約 23% を占めている。さらに、コストの約 47% が海流発電システムの製造コスト、約 40% が海上工事・海底ケーブル設置

Table 1 Specifications of field test equipment "KAIRYU".

Rated output power	100 kW
Rated flow velocity	1.5 m/s
Total length	20 m
Total width	20 m
Weight	330 t
Diameter of turbine	11 m
Floating depth	30~50 m

Table 2 Conditions of cost estimation.

Supply destination	Tanegashima island
Scale of power generation	10 MW (2 MW×5 units)
Power generation period	20 years

に関連する費用、約 13% はその他の運営費とメンテナンス費である。上述の発電コストは太陽光やほかの再生可能エネルギーによる発電に比べて高いが、洋上風力などの技術と共通する部分が多いため、今後コストダウンが進んでいくものと考えられている。

5. 潮流発電の技術開発動向

潮流発電に関する研究は、欧州および北米で盛んに行われており、特に欧州は 2000 年代に入り実海域試験を先導して行っている。実証試験サイトとして、スコットランドのオークニー諸島に整備された European Marine Energy Centre (EMEC)、北東イングランドの National Renewable Energy Centre (Narec) などがある。また、カナダには Fundy Ocean Research Center for Energy (FORCE) がある。特に、スコットランド政府およびその他の公的機関の出資により 2003 年に開設された EMEC はフルスケールの実海域試験が可能な 5 つのサイトを有し、海底ケーブルや変電設備、波浪データ、潮汐データ、気象データを収集するための設備、データ解析設備などが充実している。スコットランド政府は 2006 年、EMEC で試験を行う事業者に対する助成制度 WATES (Wave and Tidal Energy Support)、2007 年には海洋エネルギーの電力購入義務制度 MSO (Marine Supply Obligation)、2008 年には事業性のある研究チームに対して賞金 1,000 万ポンドを授与するサルティア賞 (Saltire Prize) を創設するなど、様々な施策を実施している。我が国においては 1983 ~ 1988 年、来島海峡において日本大学の研究グループにより発電実験が行われ、ここでは垂直軸式であるダリウスタービンが採用された。2008 年には九州大学の研究グループが垂直軸式タービンを用いて長崎県平戸市の生月大橋で実海域試験を実施した。

5.1 海外の動向

ペントランド海峡で実施されている世界最大規模の潮流発電事業、MeyGen プロジェクト^{5,6)}では直径約 18 m、出力 1.5 MW のタービンが 4 基導入された。MeyGen プロジェクトは 4 つのフェーズに分けられ、フェーズ毎の出力は、フェーズ 1 が 6 MW、フェーズ 2 は 28 MW、フェーズ 3 は 52 MW、フェーズ 4 は 312 MW と計画され、2018 年 3 月から運用されている。2023 年 3 月、51 GWh 超えを達成した。また、フェーズ 1 では Fig. 5 の SIMEC Atlantis Energy 社 製 AR1500 と Andritz

Hydro Hammerfest 社製 HS1000 MK1 (Fig. 6) の 2 種のタービンが導入された。

英国の Marine Current Turbine 社は、Fig. 7 に示す支柱に 1 機のプロペラを備えた潮流発電ユニット⁷⁾を開発し、1990～2006 年まで Seaflow Project を実施した。この装置は、メンテナンス時にプロペラが空中に出るような昇降機能を備えている。Marine Current Turbine 社は 2003 年に英国の Plymouth においてタービン直径 11 m の発電ユニッ



Fig. 5 Tidal turbine for MeyGen project⁵⁾ .



Fig. 6 Tidal turbine HS1000⁶⁾ .

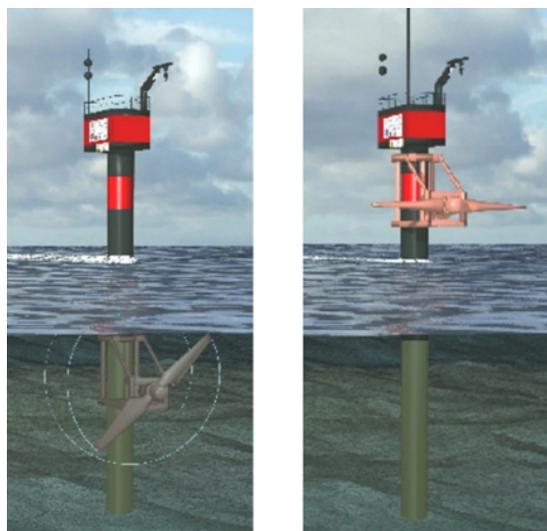


Fig. 7 Turbine system for Seaflow project⁷⁾ .

トにより最大 300 kW の出力を確認している。このプロジェクトは 2008 年からスタートした SeaGen Project に引き継がれ、ここではツインロータ式に改良され、Fig. 8 に示す支柱から伸びたクロスビームの両端にプロペラを配した 1.2 MW (600 kW × 2 機) の発電ユニットが開発された。この潮流発電ユニットは北アイルランドのストラングフォード湖に設置され、一般家庭 1,500 世帯分の年間電力消費量に相当する発電電力量 5 GWh を達成した。この装置は 2018 年に撤去されたが、世界初の商用規模の潮流発電ユニットとして知られている。

Scotrenewable Tidal Power 社 (Orbital Marine Power 社) は 2 MW, 500 t の浮体式潮流発電ユニット SR2000 (Fig. 9) の実証試験を EMEC で実施し、1 週間の発電においてオークニー諸島の約 8% の電力需要を満たす発電能力を確認している。この発電ユニットは 2016 年 10 月、EMEC の Fall of Warness 潮汐試験場に ABB 社、DP Energy 社、Fred Olsen 社、Total SA 社、スコットランド政府、Scottish Enterprise の支援を受けて設置された。一般に浮体式の場合、波浪の影響により発電ユニット本体が動揺し、タービン出力が低下することが危惧されるが、この SR2000 の場合は有義波高 2 m の海域においても定格出力を維持し、有義波高 3.5 m の海域においても高出力を得られることが確認されている。この発電ユニットは、改良された 2 MW 潮



Fig. 8 Turbine system for SeaGen project⁸⁾ .



Fig. 9 Tidal power unit SR2000⁹⁾ .

流発電ユニット Orbital O2 の配備にあわせて 2018 年 9 月に撤去された。

米国では 2000 年に設立された Verdant Power 社が 2006～2009 年、ニューヨーク州のイーストリバーで Roosevelt Island Tidal Energy (RITE) Project を実施した (Fig. 10)。ここで行われたフルスケールモデル試験では 70 MWh の発電電力量が確認された。2020 年には、この第 5 世代の潮流タービン Gen5 が試験のため再びイーストリバーに配備された。

フランスでは、2008 年に設立された SABELLA 社により海底固定型の 1 MW 水平軸式タービン D10-1000 (Fig. 11) が 2015 年にブルターニュ地方沖合、Ushant 島と Men Tensel の Kéréon 灯台との間の Fromveur 海峡に設置され、実証試験が実施された。このプロジェクトはフランス初となる商用機開発への足掛かりとして実施された。

2005 年に設立された OpenHydro 社は、多翼ロータの中心に穴が空いており、ロータの先端に取付けられた永久磁石とダクトに内蔵されたコイルによって発電する Fig. 12 に示す昇降機構付き潮流発電ユ

ニットによる実海域試験を数多く行った。OpenHydro 社は 2006 年タービン直径 16 m の 1 MW 機を EMEC で試験し、2009 年には Nova Scotia Power 社と共同でカナダ東海岸のファンディ湾において 1 MW 機の試験を行った。なお、親会社である Naval Energies 社は OpenHydro 社の清算を 2018 年に決定した。

5.2 国内の動向

2019～2021 年度環境省委託事業として、九電みらいエナジー株式会社が代表者となり、500 kW 潮流発電の実証試験が長崎県五島市奈留瀬戸沖で実施された。実証試験が行われた海域は 2014 年に内閣官房総合海洋政策本部事務局から「海洋再生可能エネルギー実証フィールド」として認定された海域であり、大潮時の最高流速は 3 m/s 以上である。ここでは Fig. 13 に示す SIMEC Atlantis Energy (SAE) 社の着床式プロペラ形潮流発電ユニットが導入された。発電ユニットの高さは 23 m、重量は 1,000 t、定格回転速度は 7 min^{-1} であり、ブレードのヨー・ピッチ制御機能はなく、下げ潮時のみの発電が想定された。ここでは、潮流発電設備の安全性を確保するため、日本海事協会に設計の妥当性評価が依頼さ



Fig. 10 Tidal turbines of Verdant Power¹⁰⁾.



Fig. 12 OpenHydro open centre turbine¹⁰⁾.



Fig. 11 Tidal turbine D10-1000¹¹⁾.



Fig. 13 Tidal turbine AR500 of SAE¹²⁾.

れ、また、法規制等で求められる各種許認可が取得された。この事業は当初、海洋工事を国内の作業船で行う予定であったが、潮流の速い海域での難易度の高い海洋工事を強いられることから、欧州において経験を有する外国人 Supervisor の立会いが条件とされた。しかし、2021 年新型コロナウイルスの影響により外国人 Supervisor の空路での入国ができず、船による入国となり、このとき入国に利用した海外船による設置工事へと変更された。施工船は、自動船位保持機能および重作業が可能な Remotely Operated Vehicle を有し、この他、作業員宿泊船、3,000 t 台船、警戒船 2 隻が導入され、2021 年 1 月 18 日から延べ 6 日間、発電ユニットの設置工事が行われた。また、設置から 2 日後に定格出力 500 kW が確認され、12 月まで約 11 ヶ月間運転が継続された。事業期間中は概ね安定的に発電できていたが、電気事業法に基づく使用前検査、潜水士による外観定期点検、ケーブルおよび負荷装置修繕のため一時運転が中断された。なお、事業期間中の 3 月に爆弾低気圧、9 月には台風 14 号が通過したが、これらの影響は見られず、荒天下でも安定運転できることが立証された。累計発電電力量は 247 MWh、設備利用率は 6.3%であった。

長崎大学も長崎県五島市奈留瀬戸沖の試験サイトで潮流発電の実証試験を行っている。ここでは、潮流が止まる時（憩流時）は装置の浮力により海面近くに浮上し、潮流がある時は装置の抵抗によって降下し、プロペラ回転面が流れに正対する特徴を有する Fig. 14 のディフューザ付き浮沈式潮流発電ユニットが導入された。タービンの直径は 0.64 m である。ディフューザおよびタービンの設計には商用コード ANSYS-CFX 19.1 と VKI (Von Karman Institute for Fluid Dynamics) で開発された最適化

システムが用いられた。この設計システムは、先ず 65 の翼形状を初期値として与え、RANS 解析により初期データベースを構築し、次に人工神経回路網の教師信号として初期データベースの値を与えて誤差逆伝搬学習を行うものである。学習されたメタモデルを用いて最適化ループを実行し、遺伝的アルゴリズムにより最適解の候補を得る。この候補の中から代表 6 個体に対して CFD による制度の高い評価を行い、データベースの再構築およびメタモデルの再学習を行う。メタモデルと CFD の併用により高い精度で最適解を得られるのが特徴である。実海域試験は 2019 ~ 2021 年まで実施された。

株式会社協和コンサルタンツ、アイム電機工業株式会社、前田建設工業株式会社、九州工業大学、早稲田大学は 2013 ~ 2017 年度 NEDO 委託研究開発事業として Fig. 15 に示す相反転プロペラ式潮流発電ユニットの実海域曳航試験¹⁴⁾を長崎県伊王島沖合約 2 km の海域で実施した。相反転方式は、前後段プロペラとそれぞれ連結された回転電機子が互いに逆方向に回転し、磁界を切る相対速度が速くなるため、起電圧の増加が期待できる。また、前後段プロペラ間および回転電機子間で回転トルクが相殺されて外部に反力が働かないので海峡などに 1 本の索だけで容易に係留できる可能性がある。実海域試験に使用された発電ユニットの前段プロペラ径は 1 m、前段に対する後段プロペラ径比は 0.95、発電機にはヒートパイプによる冷却システムが導入された。定格出力は 1.5 kW、定格相反回転速度は 320 min⁻¹である。前段ブレードは 3 枚、後段ブレードは 5 枚である。また、内外二重軸にはメカニカルシールが取付けられ、試験期間中、漏洩ステッカにより海水の発電機内部への侵入がなかったことが確認された。試験では曳航船の速度により試験対象潮流速



Fig. 14 Floating tidal turbine with diffuser¹³⁾.

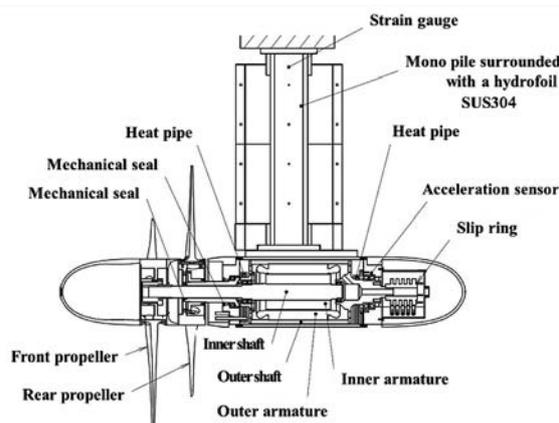


Fig. 15 Counter-rotating tidal power unit.

度が再現され、発電ユニットを設置した台船は抱船形式により一直線方向1 km 牽引された。ここでの実証試験では発電効率43%が確認された。

6. 今後の課題

前述の100 kW 規模の海流発電については世界に先駆けて我が国の黒潮海域において実証試験が行われたが、潮流発電については英国が大規模な開発資金を投入し、世界をリードする形で実証試験が進められている。この背景にはスコットランド周辺海域に流速の高い水域が存在する地形的な特徴がある。一方、日本国内で大規模な海流・潮流発電システムの導入が進まない理由としては、発電の適地選定が困難なことや固定価格買取制度などの市場参入を促す制度がないことなどが挙げられる。また、海流・潮流発電の実海域試験には、地元漁業関係者の理解と協力が不可欠である。今後の本格的な商用化には、過酷な自然環境下における発電システムの高信頼性を担保し、海洋環境に配慮するとともに、発電ユニット導入に向けての社会的なコンセンサスを得ることと実海域試験で得られた知見をデータベース化し、共有することが重要となる。

7. まとめ

本稿では、主に日本国内外において近年実施されてきた海流・潮流発電の実海域実証試験について紹介し、また、今後の課題について述べた。現在、海流・潮流発電システムの開発状況としては、基礎的技術開発段階を経て実海域試験の段階に移行しつつあるものの、商用化に向けては未だ低コスト化、高信頼性化の課題がある。また、環境影響評価、関連産業とのマーケット開拓や教育、実務トレーニング、財政支援など多岐にわたる課題があるが、引き続き実証試験により多くの知見を収集することが望まれる。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 再生可能エネルギー技術白書第2版, 21-25 (2014).
- 2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 再生可能エネルギー技術白

書第2版, 55-56 (2014).

- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, (accessed May 2 2023), <https://www.nedo.go.jp>
- 4) IHI corporation, (accessed May 9 2023), <https://www.ihico.jp>
- 5) ATLANTIS, (accessed May 9 2023), <https://simecatlantis.com>
- 6) ANDRITZ, (accessed May 30 2023), <https://andritz.com>
- 7) J. Thake, P. Clutterbuck, J. Bard, D. Haske, Seaflow Project Synopses, Technical Report, DOI : 10.13140/RG.2.2.17965.20961
- 8) SIEMENS, (accessed May 11 2023), <https://news.siemens.co.uk>
- 9) W.I. Ibrahim, M.R. Mohamed, R.M.T.R. Ismail, P.K. Leung, W.W. Xing, A.A. Shah, Hydrokinetic energy harnessing technologies : A review, Energy Reports, 7, 2021-2042 (2021).
- 10) EMEC, (accessed May 12 2023), <https://www.emec.org.uk>
- 11) Sabella, (accessed May 12 2023), <https://www.oceanenergy-europe.eu>
- 12) Kyuden Mirai Energy, (accessed May 15 2023), <https://www.q-mirai.co.jp>
- 13) Nagasaki University, (accessed May 15 2023), <https://www.nagasaki-u.ac.jp>
- 14) 左村公, 潮流発電装置の開発(相反転プロペラ式潮流発電), ターボ機械, 47 (11), 664-670 (2019).

著者略歴



村上 天元 (むらかみ てんげん)

2006年長崎大学工学部卒業, 2008年長崎大学大学院博士前期課程修了, 2011年長崎大学大学院博士後期課程修了および同年九州工業大学大学院に研究員として着任。2013年佐賀大学海洋エネルギー研究センター(現海洋エネルギー研究所)に助教として着任。2017年より潮流・海流エネルギーシステム分野准教授, 博士(工学)。