

次世代の洋上風力発電としての自律高空帆走発電の提案と DeepSky 構想 ～ 2050 年までの温室効果ガス排出ゼロの実現に向けて ～

岡山大学大学院 環境生命科学研究科 教授 比江島 慎二

1. 2050 年までの温室効果ガス排出ゼロ達成のために ～ 沖合 30km 超の洋上風力の活用

菅義偉総理大臣は就任後初の所信表明演説の中で「2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことをここに宣言する」と表明した。この実現のためには、再生可能エネルギーの導入をさらに加速する必要があるが、それを賄えるほどの再生可能エネルギー資源が果たしてわが国に存在するのだろうか。それを実現する可能性が最も高いエネルギーの 1 つが洋上風力であると、われわれは考えている。環境省¹⁾や NEDO²⁾の試算によれば、日本周辺の洋上風力は 1200 ～ 1500GW に相当する。これは単純に原発 1200 ～ 1500 基分に相当し、国内の原発が 50 基程度であることを考えれば膨大なエネルギー量であることが理解できよう。もちろん、これらのエネルギーをすべて取り出すことは不可能だが、その一部だけでも取り出せれば、国内のエネルギーの多くを賄える可能性がある。しかも、これらは陸地に近い沖合 30km 以内の海域の洋上風力にすぎない。洋上風力は陸地から沖合に離れるほどエネルギー量が多くなり、沖合 30km 以内の洋上風力はむしろ洋上風力の中では微弱である³⁾。沖合 30km を超える海域には、日本のすべての電力を賄えるほど膨大な風力が眠っているのである。

しかし、国内に限らず海外も含めて、ほとんどの洋上風力発電は沖合 30km 以内に設置される。これは、沖合に離れるほど、送電ケーブルの敷設距離が長くなり、水深も深くなるため送電・設置・維持コストが高くなることなどが主な要因である。一方、沖合 30km 以内では沿岸漁業と競合しやすいことから、風車の導入が進まないというジレンマがある。もし、沖合 30km 超の洋上風力にアクセスできれば、漁業との競合を回避し、温室効果ガス排出ゼロの実現に十分な量のエネルギーを手に入れられる可能性がある。そのためには、風車を用いた現在のエネルギー変換方式に代わる、何らかの技術的なブレークスルーが必要である。

2. 次世代の洋上風力発電としての自律高空帆走発電の提案

われわれは、送電距離や水深に関係なく発電が可能で、沖合 30km 超の洋上風力を取り出すことも可能な次世代の洋上風力発電として図 1 の「自律高空帆走発電」(Autonomous Kite-Sailing Power Generation) じりつこうくうはんそうはつでん を提案している。洋上の浮体からカイト(凧)を揚げて上空の風力を捉え、その曳航力によって浮体を帆走させながら、浮体下部に搭載した水流タービンで発電する仕組みである。このとき、カイトは 2 本のテザーの操作によって自由自在に操縦が可能で、8 の字の軌道を描きながらカイトを高速飛行させることにより、強力な揚力を発生し浮体を帆走させる。テザーを長くすれば、風車よりも高々度のより強力な風力を捉えることも可能である。海底ケーブルによる送電は行わず、発電した電力は浮体内の電池に蓄電したり、海水の電気分解により水素を製造して浮体内に貯蔵することを想

定している。係留アンカーで固定せずに洋上を自由に帆走しながら発電するため、離岸距離や水深に制約されず、沖合 30km 超の海域へのアクセスが可能になるのである。また、風車のように特定の海域を占有しないため、洋上風力導入の最大の障壁の 1 つである漁業との競合を避けられる。

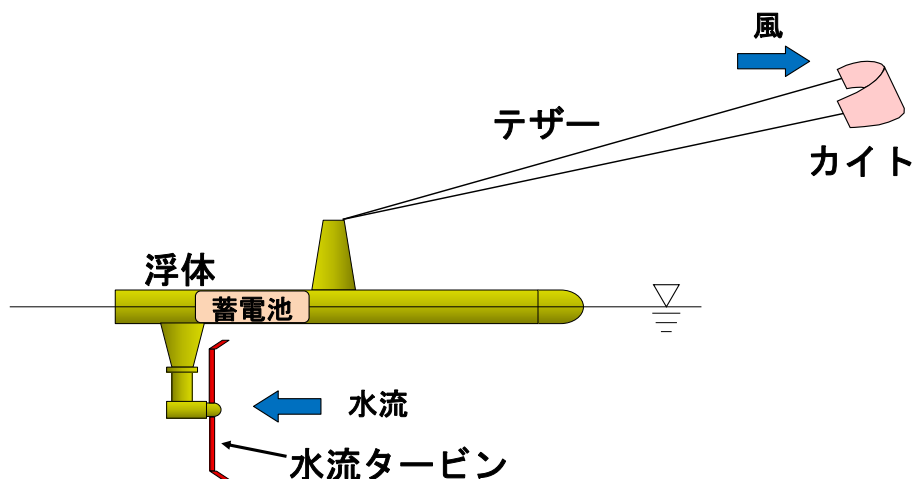


図 1 自律高空帆走発電の仕組み

自律高空帆走発電のエネルギー源は風力であるが、風力をそのまま電力に変換するのではなく、いったん水流のエネルギーに変換し、水流タービンを使ってエネルギーを回収する。風力タービン（風車）にせよ水流タービンにせよ、一般にタービンで得られるエネルギーは（流体の密度）×（タービン直径の 2 乗）×（流速の 3 乗）に比例する。したがって、例えば、風速の 1/5 ～ 1/4 の速度で自律高空帆走発電装置が帆走した場合、水密度は空気密度の約 800 倍であることから、水流タービンはその 3 ～ 4 倍のサイズの風車と同等の発電が可能と考えられる。つまり、水流タービンは風車よりもコンパクトなサイズで風車と同等の発電ができる可能性がある。水流タービンや浮体がコンパクトになるだけでなく、巨大な風車を支える強固なタワーや係留アンカーも必要ないため、風車に比べてシステム全体の低コスト化が期待できる。

さらに、将来的には自律航行機能を備えることで、ドローン船として完全な無人運用を想定している。沖合で発電し、十分な電力を蓄えたら自動的にステーションに戻って電力を供給した後、再び沖合に移動して発電するという往復を繰り返す。つまり、自律高空帆走発電はそれ自身が、沖合の洋上風力を陸地に供給し続けるエネルギーキャリアとして機能することになる。動力はカイトで捉えた風力であり、推進のための燃料を必要としないため、海底ケーブルを敷設するコストに比べてエネルギー伝送の低コスト化を実現できる可能性がある。

以上より、風車方式の洋上風力発電と比較したときの自律高空帆走発電のメリットをまとめると以下ようになる。

- 固定設置することなく洋上を自由に帆走しながら発電する方式により、沖合 30km 超の膨大な洋上風力にアクセスできるようになる
- 風車よりも高々度のより強い風力にアクセスできる
- 特定海域を占有しないため漁業と競合しない

- 小型の水流タービンでより大型の風車と同等の発電が可能
- 水流タービンや浮体を小型化でき、係留アンカーや風車タワーなどの付加構造が不要
- 自身がエネルギーキャリアとなるため、高コストの海底送電ケーブルが不要

3. 自律高空帆走プラットフォームに基づく DeepSky 構想の提唱

さらに、自律高空帆走発電は、単に洋上風力発電にとどまらない、国の基盤に関わる重要な機能を担う可能性を秘めている。既述のように、自律高空帆走発電はドローン船として、無人で長期連続の稼動が可能であり、燃料不要で広範囲を機動的に航行できる。この特長を活かし、図2のように各種のセンサー・観測装置・監視装置・情報通信機器などを搭載して広大な海域に多数配備すれば、互いに連携しながら下記のような様々な「洋上インフラ」の共通プラットフォームとして機能することができる。

- 気象・海象観測装置の搭載により、台風や津波などの情報を高精度で捉え、早期警戒を可能にする洋上防災観測システム
- 監視装置の搭載により、海難救助、不審船監視、離島防衛など、24時間体制で危険な監視任務にあたり、海の安全・安心を守る海上保安システム
- ソナー等の搭載により、海底のレアメタルなどの希少資源を無人探索する海底探査システム
- ウナギなどの希少生物の生態を長期間かつ広範囲にわたり無人調査する水産資源調査システム
- 情報通信機器の搭載により、カイトを高々度アンテナとして通信する洋上インターネット網
- 海水によりサーバを自然水冷する省エネ型の洋上クラウド・データセンター
- 洋上に漂う海洋プラスチックごみの自動回収システム
- 電動船に電力を供給し、電動船の長距離航行を可能にする洋上給電ステーション

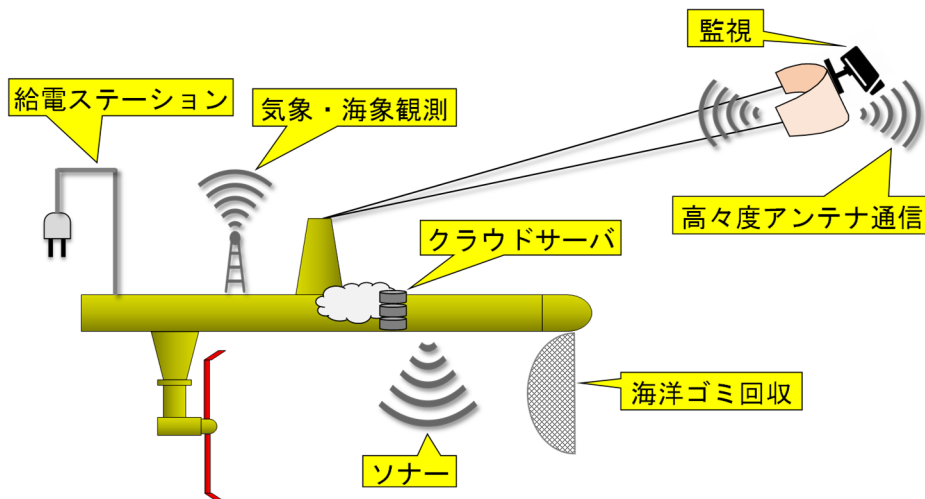


図2 自律高空帆走発電へのセンサー・観測装置・監視装置・情報通信機器の搭載

日本の排他的経済水域を含む海洋は世界第6位の広大な面積にもかかわらず、ほとんど利用されていない現状において、自律高空帆走プラットフォームは海洋空間の高度利用をこれまでになく活性化できると考えられる。上記のような多用途の洋上インフラが構築されれば、そこから得られる海洋ビ

ビッグデータを活用した新たなビジネスが創出される可能性もある。また、海外に比べてコストが高く普及が進まないわが国の洋上風力発電に対して、発電単一のビジネスではなく、上記のような複合的なビジネスとして展開することにより、採算性の高い新たな洋上風力発電ビジネスモデルを確立できるかもしれない。

このように、われわれは、水深の深い遠洋海域（Deep Ocean）の高空風力（Sky-high Wind Energy）を活用して、エネルギー自給率 100%を目指すとともに、自律高空帆走発電を共通プラットフォームとして様々な洋上インフラを構築することで広大な海洋空間を仮想的な国土のように利用しようとする「DeepSky 構想」を提唱している（図 3）。政府の掲げる 2050 年までの温室効果ガス排出ゼロの実現に貢献する他、外国船侵入、東南海・南海地震、気候変動、水産資源管理などに関わる多様な海洋ビッグデータの集約・共有を目的として政府が進める海洋状況把握⁴⁾（Maritime Domain Awareness）を実現するための強力なツールにもなり得ると考えている。



図 3 自律高空帆走発電を共通プラットフォームとした洋上インフラの構築（DeepSky 構想）

4. 研究開発の現状

(1) カイトを用いた国内外の類似技術

自律高空帆走発電と同じくカイトを用いた風力発電方式は Airborne Wind Energy（高空風力発電、空中風力発電）⁵⁾として知られ、ヨーロッパを中心に盛んに研究開発が行われている⁶⁾。一般的にはカイトのテザーを巻き付けたリールを地上に固定し、リールからテザーを繰り出しながらカイトを上昇させ、リールに接続した発電機を回転させて発電する。テザーが充分伸びきったところで、逆にモーターを作動させてテザーをリールに巻き取っていく。巻き取るときに電力を消費するが、カイトをゆっくり降下させながら巻き取れば、低電力で巻き取ることができる。このようにテザーの長さを伸縮させながら、カイトの上昇・降下を繰り返すポンピング方式により発電する仕組みであり、洋上でカイトを飛ばしてタービン付きの浮体を曳航する自律高空帆走発電とは発電方式が大きく異なる。その他に、風車と発電機をカイトに搭載して飛行させるタイプの高空風力発電もある。その場合、搭載できる風車と発電機は軽量のものに限られるが、風車よりも高々度にカイトを揚げることにより、強力な風力を利用した発電が可能である。

一方、発電用途ではないものの、自律高空帆走発電に非常に近い方式として、カイトを用いた船舶推進システムがある⁷⁾⁸⁾。自律高空帆走発電と同様に、上空でカイトを8の字飛行させ、強い揚力を発生させることで船舶を曳航する。これらは古来の帆船の代替と見なすことができるが、マストが必要ないため船体の安定性が高く、マストを用いるより高々度の強い風力を捉えられるなどのメリットがある。すでに商用段階にあり、船舶の燃費向上に高い効果を発揮することが知られている。これに水流タービンを搭載すれば、比較的容易に自律高空帆走発電と同等のシステムを構築できると考えられる。自律高空帆走発電と類似の浮体曳航式の発電システムを Kim ら⁹⁾が提案しているが、カイトを浮体の側方上空で静止飛行させる方式を採っており、カイトの引張力の一部しか浮体の曳航力として使われない。そのため、自律高空帆走発電のように浮体の進行方向でカイトを8の字飛行させる方式よりも効率が低いと考えられる。

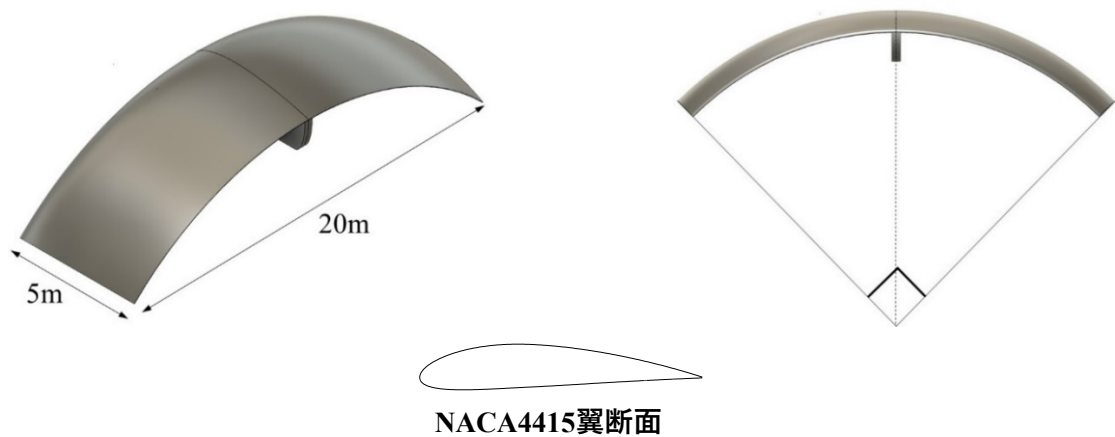


図4 シミュレーションで想定したカイトの外観と翼断面

(2) 自律高空帆走発電の発電性能シミュレーション

8の字飛行するカイトとそれによって帆走する浮体の連成方程式に基づいた自律高空帆走発電シミュレータを構築し、実規模の自律高空帆走発電の発電性能について検討した¹⁰⁾。シミュレーションで想定したカイトは図4に示すように、翼幅20m、翼弦長5m、NACA4415翼型の断面を持ち、翼幅方向に中心角90°の円弧状の湾曲を与えた。パラグライダーなどで用いられるのと同様な翼形状であり、高空風力発電の分野では、翼内部に空気を取り込んで翼形状を維持するパラフォイルカイトなどと呼ばれるものもある。カイトを使って曳航する浮体は Orbital Marine Power(前 Scotrenewables Tidal Power)社の浮体式潮流発電機 SR250 を参考にして¹¹⁾、直径5mの水流タービンを2基搭載した重量100トンの浮体を想定した。自然風は高度10mで風速15m/sとし、対数則に従って高度とともに風速が漸増すると仮定する。その他、シミュレーションで想定した各種諸元を表1に示す。

図5に示すように、カイトが飛行する天球上のカイト位置を仰角 θ と方位角 ϕ で表し、カイトの8の字軌道の中心位置を仰角 θ_c 、方位角 ϕ_c とする。このとき自然風の風速と浮体の進行方向は方位角 $\phi=0^\circ$ の方向とする。8の字軌道の中心位置の仰角 $\theta_c=15^\circ$ 、方位角 $\phi_c=0^\circ$ としてカイトを飛行させるとき、カイトの飛行軌跡および浮体の帆走速度 v_s と水流タービンで得られるパワー P の時刻歴を図6に示す。カイトの2本のテザーを操作することによってカイトにロール角を与えると、ロール角の大きさに応

じてカイトが旋回し、天球上においてカイトを自在に操縦することができる。図 6 を見ると、目標とする 8 の字軌道に比べるとやや大回りの軌跡を描いているものの、ほぼ 8 の字を描きながら飛行できているのが分かる。この飛行により生じた曳航力で帆走したときの浮体速度は平均で $v_s = 3.6\text{m/s}$ となり、それによって $P = 324\text{kW}$ のパワーが得られている。このシミュレーション結果は一例にすぎないが、より大きなサイズのカイトや水流タービンを用いることでさらに大きなエネルギーの獲得が可能である。

表 1 シミュレーションで仮定した各種諸元

カイト	質量	77 kg
	翼面積	100 m ²
	翼幅	20 m
	翼弦長	5 m
テザー	長さ	200 m
	直径	0.03 m
	抗力係数	1.2
浮体	質量	100 ton
	海面下断面積	3.14 m ²
	形状抵抗係数	1.0
水流タービン	基数	2 基
	タービン面積 (2 基)	39.27 m ² (直径 5m)
	パワー係数	0.35

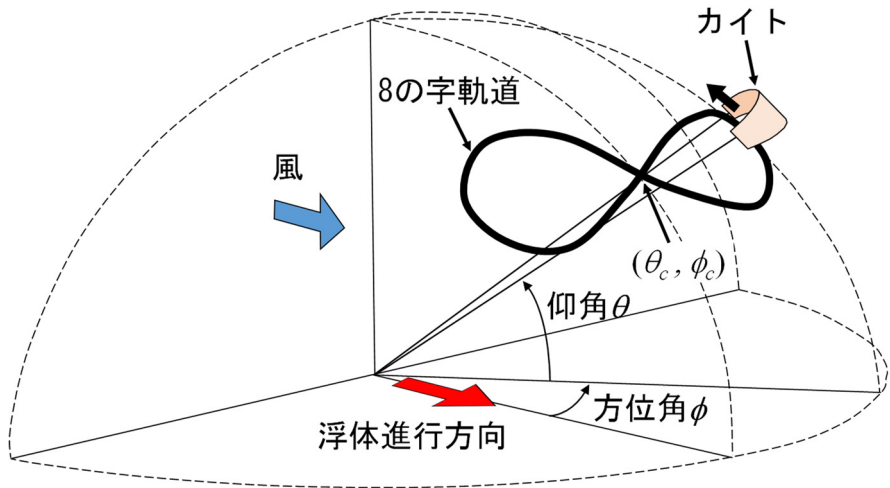


図 5 シミュレーションの外観

(3) 流体励起振動を原理とする Hydro-VENUS 水流タービンの開発

自律高空帆走発電に適した水流タービンとして、われわれは図 7 に示す独自の Hydro-VENUS (Hydrokinetic Vortex ENergy Utilization System) を開発している。Hydro-VENUS は柱状体の振り子を水流や風で流体励起振動させることで発電機を駆動する発電方式である。円柱を振り子として用いると渦励振と呼ばれる流体励起振動が発生するが¹²⁾¹³⁾、円柱を縦に半分にした半円柱などを用いると渦励振よりも激しいギャロッピングと呼ばれる流体励起振動が発生し、より大きなエネルギーを取り出

すことができる¹⁴⁾。

ギャロッピングは剥離流フラッターと呼ばれる自己増幅的な流体励起振動の一種であり、半円柱の振り子を例にすると、図8の断面両端の鋭い角部（エッジ）における流れの剥離（流れが物体表面から剥がれること）が振動の要因となる。角部で生じた2つの剥離流れは、振り子の運動方向（図の左方向）と逆方向にたなびいて振り子断面に対して非対称な剥離流れを形成し、振り子の両側面の間に圧力差を生じる。この圧力差は流れと直角方向（図の左方向）に振り子を回転させる回転力となる。この剥離流れの非対称性とそれに伴う圧力差は振り子速度とともに増大し、振り子自身の運動によって自己増幅する回転力となって、振り子のさらなる加速と圧力差の増大を繰り返すことになる。振り子の振動速度と振り子に作用する回転力との間に生じるこのようなフィードバック増幅機構によって、ギャロッピングは大振幅の発散振動を発生することになる。

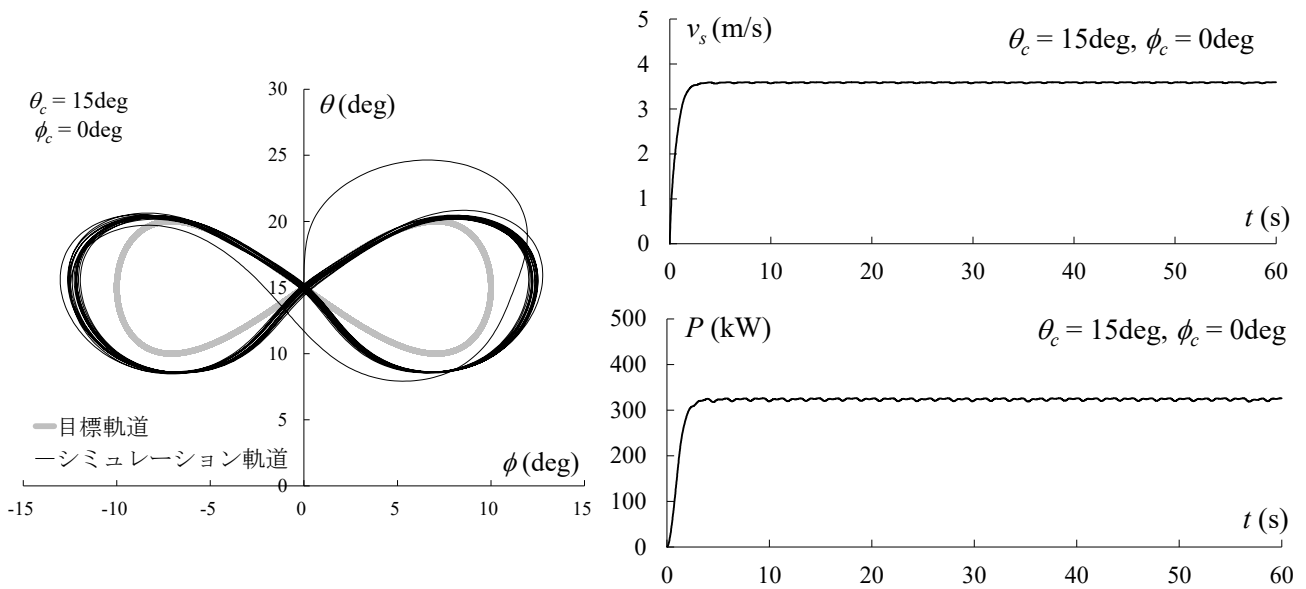


図6 シミュレーションの一例（8の字軌道中心の仰角 $\theta_c = 15^\circ$ のケース）

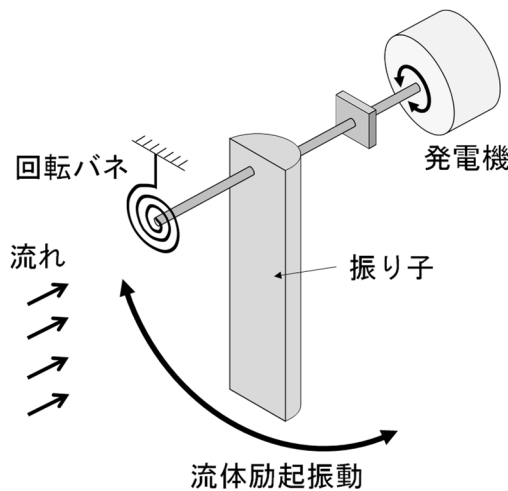


図7 Hydro-VENUSの仕組み

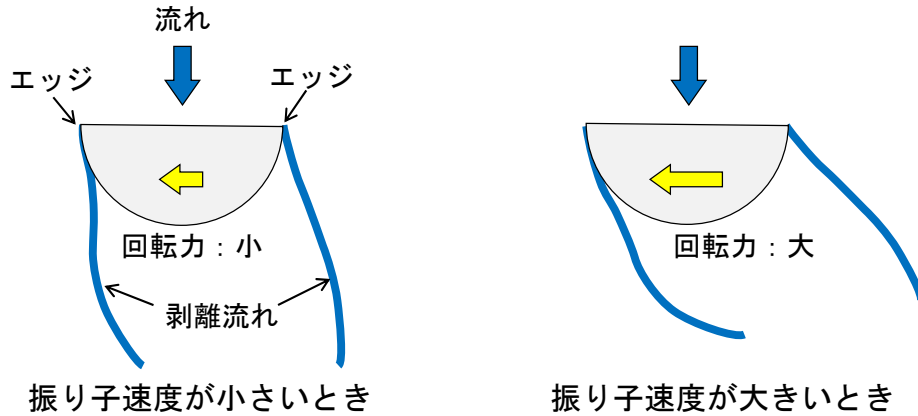


図8 ギャロッピングのメカニズム

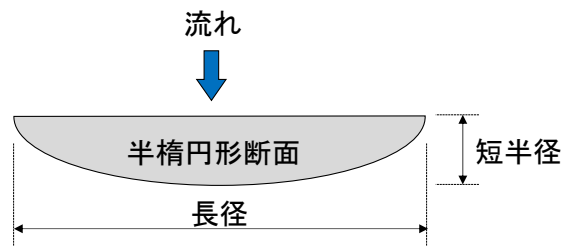


図9 断面アスペクト比6の半楕円形の断面形状

これまで様々な断面形状の振り子を試したところ、図9に示す断面アスペクト比（短半径に対する長径の比率）が6程度の半楕円形の断面形状を持つ振り子が、特に激しい大振幅のギャロッピング振動を励起し、円柱振り子の10倍以上のエネルギー取得性能を達成した。このとき、Hydro-VENUSの振り子の振動は図7の回転バネによって維持されるが、この回転バネのバネ定数を小さくするほど、ギャロッピング振動による振り子の振幅が大きくなる。断面アスペクト比6の半楕円柱の振り子を用いたHydro-VENUSでは、数回転にも及ぶ大振幅の回転振動に至る。さらに、究極的に回転バネを取り除いてバネ定数を0にしたところ、振り子周期が無限大となり、振動せずに通常のプロペラタービンのように片方向に回転することが判明した。

半楕円柱振り子を用いたこの回転型のHydro-VENUSは、一般的な翼型プロペラに匹敵するエネルギー取得性能が得られることが明らかになっている¹⁵⁾¹⁶⁾。ただし、流体励起振動を原理とする回転型Hydro-VENUSは、流れに対して正逆両方向に回転可能という、翼型プロペラにはない特異な性質がある。このため、自然河川のように乱れの強い流れでは流れ性状に応じて回転しやすい方向に常に回転方向を変えながら回転することが可能で、回転自由度が高いため、上流から流下してくる草やゴミなどを巻き込みにくく、小水力発電などに有用である。また、ギャロッピングと同じフィードバック増幅機構が働くことから、静止状態からの起動性能が高い。さらに、回転型Hydro-VENUSの羽根（振り子）は等断面の柱状体でねじりも与えないため、一般的な翼型の羽根に比べて形状が単純で製造しやすく、内部に補強構造を組み込みやすいため、軽量かつ高強度のタービン羽根を実現できる可能性がある。特に、高強度が要求される水流タービンには有利となる。

5. 研究開発の課題

自律高空帆走発電は既述のように、2本のテザーの操作により8の字軌道を描きながらカイトを高速飛行させることで、強い揚力を発生し浮体を曳航する。カイトを自動操縦するには、高速飛行するカイトの位置や風速などを各種センサーで常に捉えながらリアルタイムで制御する必要があり、測定誤差やタイムラグなどの影響を受けやすい。このようなカイトの操縦には様々な方式が Airborne Wind Energy (高空風力発電) の分野で提案されている⁵⁾。すでに商用化されたカイト飛行操縦システム⁷⁾⁸⁾¹⁷⁾もあるが、自律航行への対応が今後の課題となる。自律航行技術については、カイト帆走ではないものの、国内外では様々な自律航行船¹⁸⁾¹⁹⁾の開発・商用化も進んでいる。

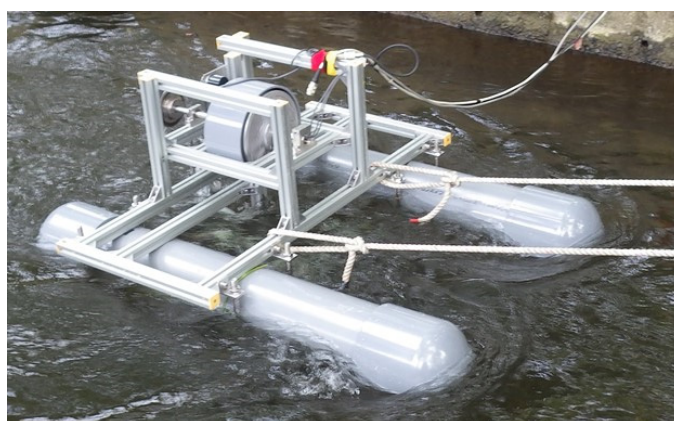
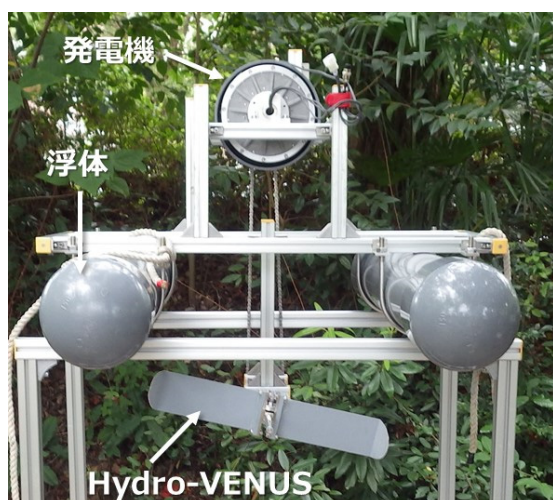


図 10 回転型 Hydro-VENUS 水流タービンを搭載した浮体の小型実証機

自律高空帆走発電の浮体については、海面の波浪の影響の他、変動するカイトの曳航力や水流タービンのスラスト力に対して安定した姿勢を保持する必要がある。潜水式や半潜水式、あるいは波浪貫通型（ウェーブピアサー）の浮体を用いるなどの方法が考えられる。水流タービンを搭載した浮体式の潮流発電装置²⁰⁾²¹⁾²²⁾²³⁾などが開発されており、それらを自律高空帆走発電に流用できる可能性もある。われわれは、回転型の Hydro-VENUS 水流タービンを搭載した図 10 のような小型実証機を用いるなどして発電試験を実施している。その他、過酷な洋上環境において安定的に蓄電が可能な電池技術なども開発が望まれる。

参考文献

- 1) 環境省：平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書，2011
- 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)：着床式洋上風力発電導入ガイドブック，2018
- 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(NEDO)：NeoWins（洋上風況マップ），
https://appwcd1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/index.html
- 4) 総合海洋政策本部：我が国における海洋状況把握(MDA)の能力強化に向けた今後の取組方針，2018
- 5) Schmehl, R.: Airborne Wind Energy, Springer, 2018

- 6) 日本風力エネルギー学会：空中風力発電の現状と未来，日本風力エネルギー学会誌，Vol.44, No.2, pp.173-229, 2020
- 7) SkySails : <https://skysails-group.com/index.html>
- 8) Airseas : <https://www.airseas.com>
- 9) Kim, J. and Park, C.: Wind power generation with a parawing on ships, a proposal, Energy, Vol.35, pp.1425-1432, 2010
- 10) 比江島慎二，遠藤愛巳，山本晃大：自律高空帆走発電に用いるカイトの空力特性試験と飛行シミュレーション法の構築，風工学研究論文集，Vol.26, pp.86-95, 2020
- 11) Scotrenewables Tidal Power: Scotrenewables Tidal Power Ltd SR250 Deployment Fall of Warness: Environmental Statement Volume II - Appendices, 2010
- 12) 比江島慎二，岡圭人，林健一，井上浩男：倒立振り子の流力振動を用いた発電のための基礎的実験，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.69, No.1, pp.12-21, 2013
- 13) 比江島慎二，大熊広樹：振り子式潮流発電機の円柱振り子に作用する流体力特性，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.72, No.2, pp.315-321, 2016
- 14) 比江島慎二，高松宏彰，大熊広樹，上田剛慈：ギャロッピング振動を用いた振り子式水流発電，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.73, No.1, pp.24-34, 2017
- 15) 比江島慎二，高松宏彰，大熊広樹，上田剛慈：流体励起振動の励振機構を利用した革新的な水流発電用タービンブレード，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.74, No.1, pp.1-12, 2018
- 16) 比江島慎二，伊藤隼，栗岡大滋，坂平薪志，花房夕里子，上田剛慈：翼端渦抑制による VENUS ブレードのエネルギー取得性能の向上，第 25 回風工学シンポジウム論文集，pp.91-96, 2018
- 17) Kitepower: <https://kitepower.nl>
- 18) ASV: <https://www.asvglobal.com>
- 19) Maritime Robotics: <https://www.maritimerobotics.com>
- 20) Orbital Marine Power: <https://orbitalmarine.com>
- 21) Bluewater: <https://www.bluewater.com>
- 22) Magallanes Renovables: <https://www.magallanesrenovables.com>
- 23) Sustainable Marine Energy: <https://www.sustainablemarine.com>

プロフィール

比江島慎二（ひえじましんじ）

1996 年東京大学大学院工学系研究科において博士（工学）取得、同年九州大学助手、1998 年岡山大学講師、2001 年に同大学助教授を経て、2020 年から同大学教授を務める。流体励起振動を原理とする振り子式タービン技術を元に、大学発ベンチャー株式会社ハイドロヴィーナスを 2015 年に立ち上げた。