浮遊軸型風車 (浮体式に特化した垂直軸型風車)



秋元 博路 合同会社アルバトロス・テクノロジー CEO

1.アルバトロス・テクノロジーと浮遊軸型風車

洋上風力発電の中で、今後の発展が期待できる浮体式風車への関心が欧米を中心に高まっている。しかし、背が高い風車を浮体の上に立てるデザインに不安を感じないだろうか。常識的に考えれば、小さなボートに乗っているときに立ち上がってはいけない。本稿では、このような素朴な疑問から浮体式風車を考え直し、コストを削減するコンセプトを紹介する。

筆者が所属する合同会社アルバトロス・テクノロジー(以下アルバトロス)は、2011年の東日本大震災をきっかけに、持続可能な社会を実現する海洋再生可能エネルギーの実用化を目指して設立された。洋上風車以外には、潮流・海流タービン、波力発電のコンセプトを提案している。海洋再生可能エネルギーの実用化の鍵は、時として過酷になる海上環境での耐久性を保証しながら、製造コスト・運用コストを最小化することにある。このため単純で軽量(出力当たりの鋼材使用量が少ない)なコンセプトを追求している。

アルバトロスが提案する浮遊軸型風車(Floating Axis Wind Turbine; FAWT)を図1に示す^{1,2}。これは垂直軸型風車ローターを円筒浮体に固定し、「風車と浮体を一緒に回転させる」コンセプトである。浮

体の首のところに、複数の発電機ユニットを搭載する 架台がある。係留索の張力により発電機架台の回転角 度を制限し、その中央で回転する風車ローターから電 力を取り出す。海水浮力が回転軸を支えるので、浮体 の内部に軸受けや機械類は無い。

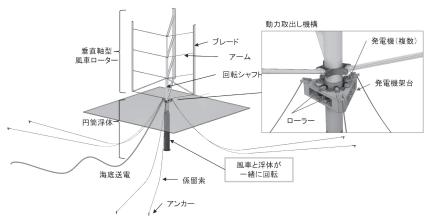
一般に馴染みのある風車は、水平軸型風車 (Horizontal Axis Wind Turbine; HAWT) である (日本ではプロペラ型と呼ばれることが多いが、日本以外では通じない)。しかし、HAWTは後述するように浮体式向きでないため、提案技術では、揚力型の垂直軸型風車 (Vertical Axis Wind Turbine; VAWT) を使う。風車ブレードに作用する揚力で回転する原理はHAWTと同じである (図 2 右)。

よく混同される抗力型VAWT(図2左)は、抵抗を受けるバケットの重量とコストのため大型化が困難である。基本的に大型VAWTは揚力型であり、ブレードの幅は、HAWTのブレードと同程度である。風力エネルギーの吸収は、ブレードの幅ではなく、回転するブレードが描く風車円筒の前面投影面積で決まる。

2.コスト面の考察

現在の浮体式風車開発の主流は、陸上風車や着床 式洋上風車で実績のあるHAWTを、係留した浮体に

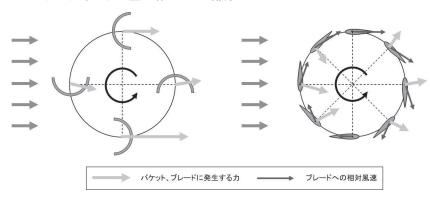
浮遊軸型風車(FAWT) 釣りのウキに風車ブレードをつけて回転させるイメージ ター



載せるものである。しかし高い タワーの頂上に風車本体を置 くHAWTのデザインは、本質 的に浮体式風車に向いていな い。これに対するFAWTの主 な特長を以下に列挙する。

- 1. 浮体の小型・低コスト化 (軽量で低重心の風車ローター、大きな許容傾斜角による)
- 2.保守コストの削減(構造の 単純化、揺れが小さい低い 位置での保守作業)

図2 VAWTの仕組み:(左) 抗力型と(右) 揚力型 大型風車は、重量が増えにくい揚力型



3.大型化がHAWTよりも容易(両持ち梁ブレード、 海水浮力による回転支持、クレーンを使用しない設 置工程)

1は、発電機などの重量物を下方に置くため、HAWTよりも風車ローターを軽量に作れることによる。HAWTのブレード自体は比較的軽量だが、発電機、ブレードピッチ制御、ヨー制御(風向に合わせた首振り)の機構があるため、5MW風車のヘッド重量は350トンに達し、これを支えるタワー重量も347トン。で、合計697トンが浮体の上に立ち上がる。これに対して、FAWTの風車ローターは、350トンと半減するため、小型の浮体で支えられる。浮体のコストは、風車本体に匹敵するため、この削減は大きい。

またHAWTは、風に対して傾斜すると出力が低下するため、発電中の傾斜角度を3度程度に抑える必要がある。これは浮体構造物には厳しい条件であり、浮体の大型化につながっている。一方、垂直軸型の風車は、傾斜によって風車円筒の前面投影面積が増えるため、傾斜20度程度までは、むしろ出力が増加する。傾斜を許容することで浮体はさらに縮小されるため、浮体の大きさ(排水量)は、一般的な半没水(セミサブ)型HAWTの半分以下になる。海洋構造物のコストは、ほぼ鋼材使用量と加工箇所の数で決まるため、軽量で単純な円筒構造のFAWT用浮体のコストは、セミサブ浮体の半分、円筒(スパー)型浮体との比較では約30%の削減が期待される。浮体部の縮小と軽量化は、係留設備と設置作業のコスト削減にもつながる。

2の保守コストの削減は、主要な電気機械が、単純構造で低い位置にあるためである。HAWTでは、3度振幅程度の動揺でも、保守作業を行う高さ100mのタワー頂は、5m振幅で動くため、荒天待

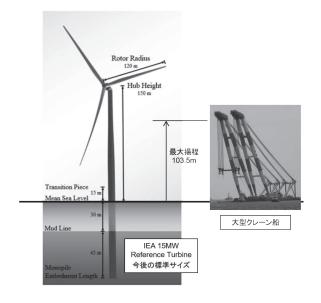
機日数が増え、人員増を必要とする。 これに対しFAWTの保守作業は揺れ の小さい低い位置であるため、保守 作業の稼働率が高い。

3の大型化は、出力当たりの設備 費用、保守費用を低減するために重 要であるが、HAWTの大型化は急速 に難しくなる。HAWTのブレードは、 根元の一端のみを支える長大な「片 持ち梁」であり、風による推力、上下 に振り回されることにより変動する自

重が掛かる。この曲げ荷重に耐えるため100m長のブレードを一体成形で作る。一方、FAWTのブレードは、複数の支持アームで支えられる「両持ち梁」の連続であるため、耐風設計はHAWTよりも容易であり、一体成形の必要も無い。ブレード断面形状が一定であるため、複合材料の連続成形によりコスト競争力も高い。

大型化のもうひとつの課題は、タワー頂での風車へッドの組立である。国際エネルギー機関(IEA)は、発電コスト低減に向けた風車大型化の研究開発を促進するため、IEA 15MW Reference Wind Turbine 4 の 仕様を2020年2月に公開した。これまで研究開発で参照されてきた風車は、NREL 5MW Baseline Turbine 3 であったため、基準となる風車サイズが一気に3倍に拡大したことになる。世界最大の風車は実証試験中の12MW風車 (GE Haliade X^5) であることから、15MWは妥当な目標である。しかし、図3に示すように、15MW風車のタワーは、既存のクレーン船の高さを上回り、15MWの浮体式HAWTを設置する手段が無い。

図3 IEA 15MW風車⁴と国内最大級クレーン船の大きさ比較



I⊕I Ventures

これに対しFAWTは、図 4に示すようにクレーン船を 使わずに組立・海上設置を 行う。この手順の概略は、以 下のとおりである。

1. 風車の組立は、傘を閉じた ような形態で横置きのまま 平地で行う。陸上クレーン と組立足場は不要である。

2.組み上がった風車を、台

- 船上に移動してから台船 を沈める、あるいは傾斜路を使用して海面に出す (進水)。喫水を超える水深の場所まで短距離を曳航 する(wet曳航)。
- 3. バラスト水を注水して風車を立ち上げる。さらに砕石バラストなどを浮体下部に投入し所定の復原性を与える。
- 4. ウインチ・ワイヤーによって制御しながら風車ローターを開く。作業者は、風車シャフト内の梯子を登って、点検口からアーム上に出る。

展開したローターは、少数のタグボートで長距離曳航でき、設置海域で、あらかじめ係留してある発電機架台に挿入する。吊り作業を含まないため、荒天待機が少なくなり工期も短縮される。

またローターが損傷した場合は、係留索と送電ケーブルの接続はそのままに、主要部だけを外して回航、修繕後に再び発電機架台に挿入する。従来の考え方では、浮体式HAWTを回航する際に、係留索、送電ケーブルを外し、復帰後に設置作業のほぼすべてをやり直す。これは海上工事のコストを考えると現実的でないため、20~30年の設計寿命にわたって大規模修繕が起こり得ない高信頼性が要求され、設備費を上昇させている。

以上のような考え方により、FAWTは設備費の削減、保守コストを削減し、なおかつ将来の大型化のポテンシャルが大きいコンセプトである。現状は、Technology Readiness Level (TRL) 3の水槽実験の段階である(YouTube動画https://youtu.be/qub-aRbkXy8)。次の段階としてTRL 4の海上スケール実験のための資金獲得を目指している。

図4 風車の組立・設置作業 陸上クレーンやクレーン船に依存しない



出典:筆者作成

3. 競合する浮体式風車

浮体式風車の開発競争は加速しているが、先述のとおり、浮体式HAWTのコスト削減、大型化には限界があると分析している。浮体式VAWTを検討する主要なグループとして、米国のサンディア国立研究所、デンマーク工科大学のDeepWind、スウェーデンのSeaTwirl社を紹介する。DeepWindとSeaTwirlは、FAWTと同様に円筒浮体が回転するコンセプトである。

米国のサンディア国立研究所は、エネルギー省 (DOE) の資金を獲得して、欧米の研究機関が参加する浮体式VAWTの実現性検証プロジェクトを実施している⁶。いくつかの候補から選び出されたコンセプトは、Tension Leg Platform (TLP) 浮体の上に、曲線翼のVAWTを搭載するものである。高価だが揺れにくいTLPを採用して、風車部のコストを下げる戦略である。ただし風車ローター重量を支える軸受けの耐

図5 水槽模型実験(風車直径・高さ1.4m, 浮体を含む全高3m)



出典:筆者作成

久性が問題となるだろう。

デンマーク工科大学が主導するDeepWind7 は、EU委員会の補助を受けたプロジェクトが終 了し、実機開発のパートナーを探している。回 転する円筒浮体の下端に発電機があり、この部 分から3方に伸びたアームを係留する。その下 端にある発電機の保守と回転軸の水密が技術課 題になると考えられる。

SeaTwirlは、シンプルなデザインの30kW実 験機を海上でテストしながら、次のステップと なる1MW機の開発を行っている8。発電機は、 浮体の首の部分に搭載されている。

これらの競合コンセプトに対するFAWTの優位性 は、組立・設置コストを削減する風車の折り畳みと、 波浪荷重から発電機軸を保護するデザインである。こ れらはFAWTの実現性を検討する産学連携プロジェ クトの成果としてPCT出願済みである。

4. 新しいコンセプトや事業の創造

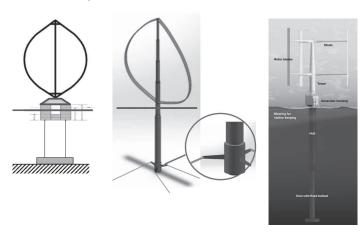
洋上風力発電は、多数の企業の水平分業で成り立 つため、協力を必要とする業種の範囲は広い。また FAWTは、現在の大型HAWTよりも単純な構造であ るため、これまで風力発電との関連が無い異業種にも 参入の可能性がある。現時点では、小型風車の海上実 験を実施し、実用サイズの風車開発への道筋をつける ことが急務である。

新しい浮体式風車のコンセプトは、海上でのスケー ル実験レベルに達しないと投資検討の対象にならない との見方が多い。しかし、海上で実験を行うコストは、 一般の想像よりも高い。この海上実験の壁を一緒に乗り 越えるため、初期段階での投資、あるいは公的助成金 の獲得で協力できる個人・企業があれば大歓迎である。

洋上風力の需要が浅海に恵まれた欧州以外の国々に 拡大していくに伴い、浮体式風車の開発は活発化して いく。しかし、安定した基礎を築けない「浮体式」の 環境に、陸上基礎の上で発展してきたHAWT技術を 延長することは、長期的にみてよい戦略ではない。浮 体式では、HAWTよりも優位性があることを発信し、 手遅れとならないうちに海上実証で賛否を問うことは、 発案した技術者の社会的責任であるともいえる。

洋上風力発電は大資本を必要とする事業であるが、 各国で行われている浮体式風車実証事業の多くは、ス タートアップ企業の提案がもとになっている。開発の 初期段階では、大企業の参加は望ましくはあっても必 須ではない。しかし残念ながら国内では、洋上風力に

浮体式 VAWT の競合コンセプト:(左から) Sandia (想像 図)、DeepWind ⁷、SeaTwirl ⁸



見合う大企業の参加が無いと、小型海上実験のための 助成金審査にも通りにくい実情がある。このため、海 外企業との連携も検討を続けている。私たちがみる将 来の浮体式ウインドファームのイメージは、明らかに 従来のものとは異なっている。このビジョンに興味の ある方はご連絡ください。

IOIでは、アルバトロス・テクノロジーとの連携、協 業、意見交換などのサポートを行っております。照会 などは、JOI総務部 (TEL: 03-5210-3311、メール: pca@joi.or.jp) までお願いします。

参考文献

- 1.秋元, "垂直軸×起き上がり小法師で浮体式風力発電に新風", 日経エレクトロニクス 2020年5月号
- 2.H. Akimoto et al., "Floating axis wind turbines for offshore power generation—a conceptual study", Environmental Research Letters, Vol. 6, No. 4, 2011.
- 3. Jonkman, Jason, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. No. NREL/TP-500-38060. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- 4.NREL, "New Reference Turbine Gives Offshore Wind an Upward Draft", https://www.nrel.gov/news/ program/2020/reference-turbine-gives-offshore-windupdraft.html, 2020.
- 5.GE, "World's most powerful offshore wind turbine, https://www. ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-xoffshore-turbine
- 6.Brandon L. Ennis. An engineering judgment and systems engineering perspective from Sandia's floating offshore vawt project. In 5th Systems Engineering Workshop 2019.
- 7.DeepWind website, http://www.deepwind.eu/
- 8.SeaTwirl AB, https://seatwirl.com/

