

海に浮かぶ風車



研究ノート

飯 島 一 博*

Wind Turbine Floating on the Sea

Key Words : Floating Structure, Wind Turbine, Collaboration,
System Engineering

1. はじめに

車を走らせていると突如、山上に風車が出現することに驚いた経験のある読者もいることだろう。いま、風車を海の上に浮かべようとする研究が進められている。海の上に風車を作ることのメリットは例えば、①騒音問題や景観悪化の問題を回避できる、②遮るもののない洋上の方が、風が安定的で強い、③山の上に風車を作る場合は道路を含めて作必要があるが海の上ならその心配がない、ことである。日本の周囲の海は水深が大きく、海底にいわば足の付いた固定構造物は不利で、代わりに浮力を用いた浮かぶ風車が経済的に有利となる。このような背景から、環境省は五島沖に2MW（1000世帯程度の電力を賄う）規模の実証実験のための浮体式風車が稼働している¹⁾。ほぼ同時期に、福島洋上風力コンソーシアムによる Fukushima-Forward プロジェクトとして浮体式風車が多数集まるウィンドファーム（Wind Farm）として運用する試みが行われている²⁾。ウィンドファームを構成する浮体式風車は福島の場合では、2MW, 5MW, 7MW 級の三基である。7MW は陸上の風車を含めて、現段階で世界最大級とされる。海に浮かぶ風車には様々な技術的チャレンジがある。

2. 浮体式風車システム

図1に典型的な浮体式風車のシステムの概略を示す。浮体式風車はローター（羽をブレードと称し、ブレード数枚とそれを束ねるハブをまとめてローターと言う）は風を受け、回転軸はローターで生じるトルクを伝え、その先に増速機、発電機が配置され、増速機や発電機はナセルと言われる筐体に収納される。ナセルはタワーの頂部に位置しており、さらにタワーは支持基盤である浮体上に直立している。浮体は風・波や潮流の中で漂流することを防ぐために、鋼製チェーンロープ数条で構成される係留で海底に繋ぎ止められている。発電された電力は海底ケーブルで陸域に輸送される。それぞれに制御機構が設置されていて、なかなか複雑なシステムである。

複雑であると同時に巨大である。五島沖の環境省

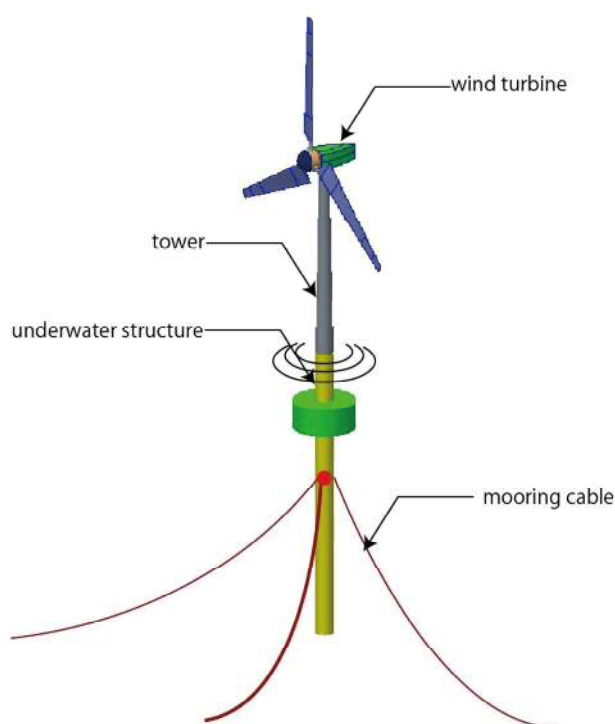


図1：浮体式風車システムの例

* Kazuhiro IIJIMA

1971年3月生

東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻博士課程修了（1998年）

現在、大阪大学大学院 工学系研究科地球総合工学専攻 准教授 博士（工学）船舶海洋工学

TEL：06-6879-7585

FAX：06-6879-7594

E-mail：ijima@naoe.eng.osaka-u.ac.jp



のプロジェクトで用いられた2MW級の風車ではローターの直径は80m程度、現段階で世界最大の7MW級では直径は130mにも達する。タワーはローターの半径＋マージンが必要なので、60-80mほどの高さとなる。高層ビル程度の構造が高いタワーの上で回転している、というイメージが正しい。図1に示したシステムでは、十分な安定性を確保するために、実は海面下の構造もタワーと同じ長さがあるので、タワーと水面下含めると全長200m程度の巨大な柱状構造となっている。浮体式風車システムの複雑さと巨大さ、が同えよう。

3. 共同研究の輪

私の所属する大阪大学大学院地球総合工学専攻で浮体式風車の研究をスタートしたのは2010年前後のことであった。当時、日本の各大学は、浮体式風車の研究に乗り出したところで、手探り状態であった。お互いの情報交換のために、4つの大学から合計4研究室が集まり、研究の体制を作った。この集まりは共同で研究を行うという側面もあり、同時に学生が互いに切磋琢磨する場を作るという意図があった。参加した大学は大阪府立大学（二瓶泰範先生）、横浜国立大学（村井基彦先生）、日本大学（居駒知樹先生）と大阪大学（飯島）であった。後に外部研究資金を得て、本格的な共同研究を実施した。和気藹々、それでいながらお互いがライバルという関係は刺激的であった。

共同研究では各4大学がそれぞれひとつの浮体式風車を設計、縮尺模型を製作し、造波装置と送風装置を備えた試験水槽を使って、同じ条件の下での水槽試験を行った。大阪大学と横浜国立大学はセミサブ型と呼ばれる形式を、大阪府立大学はテンションレグプラットフォーム（TLP）と呼ばれる形式を、日本大学はスパー型と呼ばれる形式をそれぞれ追求した。セミサブ、TLP、スパーはそれぞれ海洋石油資源開発のために開発された形であり、浮体を安定的かつ応答最小化できるという点からコスト競争に生き残ってきたものである。風車でも同様の形式が用いられると考えられる。

大阪大学と横浜国立大学は同じセミサブ型を扱ったが、大阪大学はダウンウィンド型と呼ばれる、風に対してローターがナセルの後方に配置される形式を、横浜国立大学はアップウィンド型と呼ばれるロ

ーターがナセルの前方に位置する形式を選んだ。なお、現在の主流はアップウィンド型の風車である。図2に実験の様子を示す。写真の手前から順に、TLP型（大阪府立大）、左にスパー型（日大）、右がセミサブ型（横浜国立大）、最奥がセミサブ（阪大）である。



図2：浮体式風車の実験の様子

水槽試験は、力学的に縮尺された波や風を縮尺模型に負荷し、縮尺模型の挙動を調べ、実物の挙動を推定する試験である。シミュレーションはせいぜい仮定したモデルに基づいた結果が正しく得られるだけで、モデル化の妥当性を確認するためにはやはり縮尺模型による実験が必要で、これによって入力（＝波と風）と出力（＝応答、タワー上部の加速度やタワー付け根の曲げモーメントなど）の関係がわかる。当時、縮尺模型実験のデータの入手は困難であり、皆がアクセスできるような縮尺模型実験データを得ることを目的とした。得られたデータは数値モデル検証に用いることができるもので、残らず論文化したので、その目的を果たした。

4. 一点係留型浮体式風車

前述の共同研究の中で大阪大学が提案した浮体の

コンセプトを図3左上に示す³⁾。浮体は前述のようにセミサブ型である。浮体形状を除き、図1中のコンセプトと異なるのは、海底とつなぎ止めているのが、一本の線状の構造であること。この線状構造（パイプ）は本体に比べると小さなブイ構造に接続され、ブイからはヨークといわれる部材を経由してセミサブ型の浮体本体に繋がる。この形式の利点は、①磨耗が大きく頻繁なメンテナンスが必要なチェーンを用いないよう係留を鋼製パイプとすること、②小さなブイを先に係留しておき、そこにセミサブ型本体を曳航しブイに接続するだけで簡単に係留でき、インストール時の洋上工事を減らせること、③ブイを中心に風向きに合わせて回転できるので（風見鶏；ウィンドベーン機能）、ヨー制御機構と呼ばれるナセル下の複雑な機構を簡素化できること、であ

り、従来型に比べてコストダウンが可能と考えた。

五島や福島沖でのプロジェクトはいわばお墨付きの技術を集積して浮体式風車を実証したが、提案した新形式の浮体式発電には固有の技術課題がある。a. 係留ブイ（鋼製パイプを含む）とセミサブ本体との間に複雑な相互運動が生じることがないか？、b. ウィンドベーンする機能はどこまで風向きに追従できるか？、c. 風、波と潮流が存在するときに浮体は“ふらふら”と振れ回ることがないか？などである。上記aに対しては、鋼製パイプとブイの系についてサブハーモニックモーションと呼ばれる非線形振動現象が生じる場合があること、さらにその回避方法を解明した⁴⁾。また、課題b, cについてはシミュレーションモデルを作成し、ウィンドベーン機能の向上法や振れ回り運動の性質やその回避方法を調べた⁵⁾。

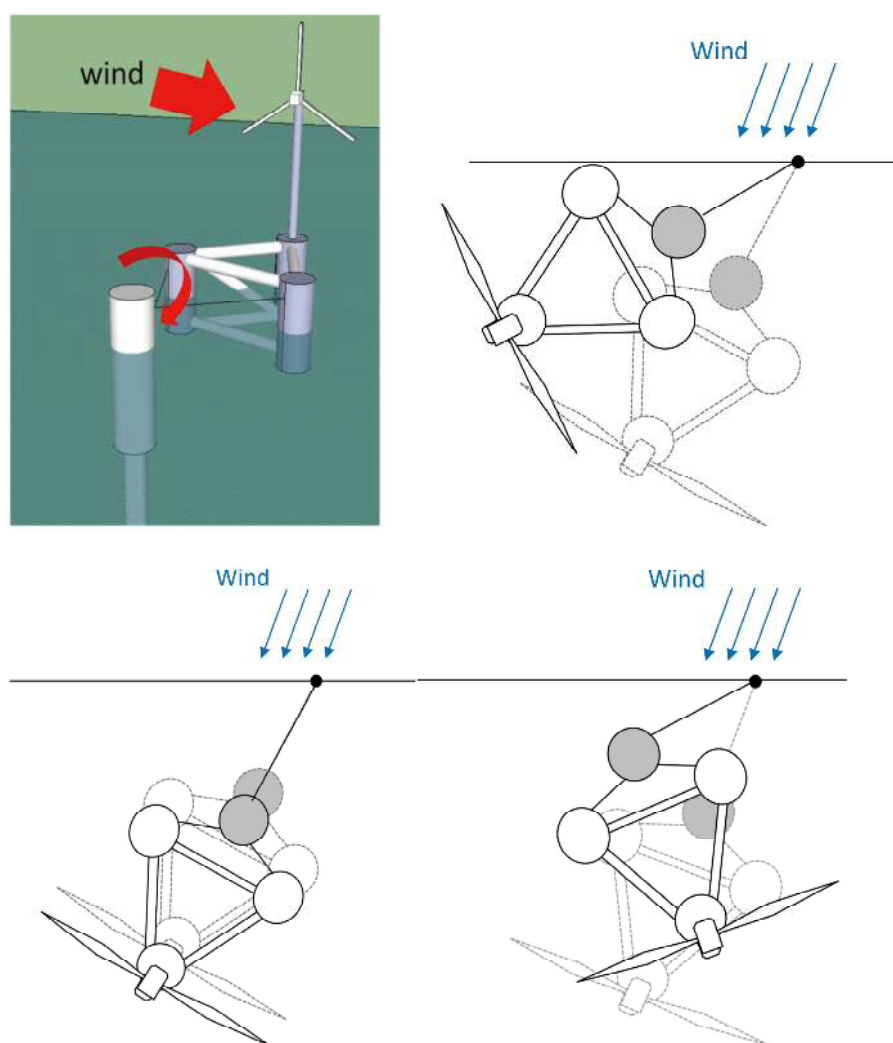


図3：一点係留型の浮体式風力発電と挙動の主要3モード

この成果は米国機械学会が主催する OMAE2015 (Offshore Mechanics and Arctic Engineering) 国際会議で発表を行い、同年の海洋空間利用部門の Best Paper Award として表彰された。図3の右上、下段はこの研究で明らかにした挙動の主要3モードを示す。

5. 国際共同研究

著者は2013年に半年間、フランスの Ecole Centrale de Nantes (ECN) に日本学術振興会「頭脳循環を加速する若手研究者戦略的海外派遣プログラム」による派遣研究者として滞在する機会を得た⁶⁾。滞在中に洋上風車の水槽実験を二つ計画し、うちひとつは浮体式風車が対象であった。帰国後も Dr. P.E. Guillermin 氏を国際共同研究のコンタクトパーソンとして、浮体式風車の研究継続し、ECN を再訪して実験実施する形となった。このときは日本からの学生数名が実験参加した。学生にとっては修学旅行のようなよい経験となったと思う。引率する私にも実りのある楽しい旅となった。浮体式風車は原子力国である欧州フランスでも大きな関心を集めている。



図4：国際共同実験の様子

6. まとめ

洋上浮体式風車は古くて新しい技術である。既存の要素技術を用いるという意味では古いが、集積して技術的・経済的によいシステムとする新たな検討が必要である。これまでの実証研究から、浮体式風車の稼働率や必要なメンテナンスの頻度やコストが明らかになりつつある。高い稼働率が期待できる一方で、初期コスト（設計・建造）と設置後の運用コスト（点検・メンテナンス）を減じてより経済的なシステムにする必要性も判明しつつある。強い要素技術の導入で一気にコストダウンができる可能性も秘めている。再生可能エネルギーは旧来型の資源を持たない我が国が必ず取り組む必要のある分野であり、さまざまな知恵が参入してくることを期待したい。

参考文献

1. <http://goto-fowt.go.jp/>
2. <http://www.fukushima-forward.jp/>
3. K. Iijima, *et al.* : Conceptual design of a single-point-moored FOWT and tank test for its motion characteristics, Proceedings of OMAE2013, OMAE2013-11259.
4. C. Ma, *et al.*: Theoretical, experimental and numerical investigations into nonlinear motion of a tethered-buoy system, Journal of Marine Science and Technology, doi 10.1007/s00773-015-0362-x, 2016.
5. K. Iijima, *et al.*: Comparison of Weathervane Performance between Two Types of FOWT Systems Moored to SPM, Proceedings of OMAE2015, OMAE2015-41137.
6. <http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/kashi/JSPS-Brain/>