

## 漁業協調型浮体式エネルギーファーム －博多湾パイロットステーション－

九州大学応用力学研究所 新エネルギー力学部門 特任教授 大屋 裕二

### 1. はじめに

2010年当時、九州大学応用力学研究所では、集風性能を示す風レンズ技術を基に、「レンズ風車」と呼ぶ風車システムを開発していた。これは風車ロータに輪っか（レンズと呼ぶ）を装着した高効率かつ静かな風車である。当時、風力エネルギーのより有効な利用を模索し、海上展開を構想した。六角形浮体を用いて、風車のほか、デッキ面に太陽光パネルを設置し、さらには内水面を水産の場として利用する多目的な浮体を提案していた。幸い、2010-2012年、環境省地球温暖化対策技術開発等事業「風レンズ技術を核とする革新的中型・小型風車システム導入に関する技術開発」のプロジェクトに採択され、博多湾で海上試験を実施することができた。地球温暖化問題と2011年3月11日の未曾有の東北大震災と原発事故は再生可能エネルギーへの転換が必然という大きな動機づけになった。目的は以下に記す。

- ① 浮体式風力発電施設上で、種々のデータ（海上風、海上での発電状況、浮体の揺動、係留張力、耐塩性変化など）の計測、解析を実施。
- ② 小規模分散型の浮体式風力発電施設の日本全域への普及に向け、浮体発電施設の近辺海域への環境影響調査、日本沿岸の海象・気象・海底地形データ取得、港湾・沿岸風況調査を行い、浮体式レンズ風車発電ファームの海上展開可能性を調査。

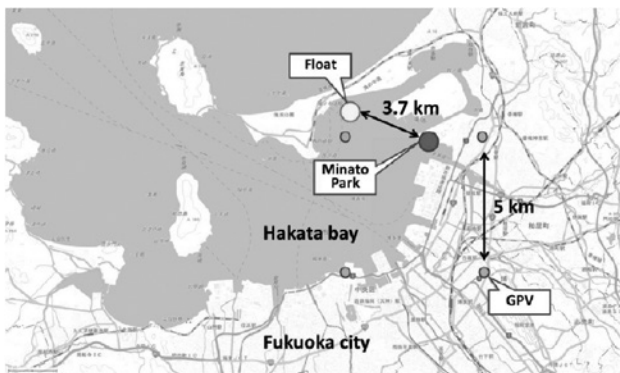


図-1 浮体式風力発電施設導入サイト (Float点)、沖合770m、Minato park点は同型の陸上風車サイト

### 2. 浮体式風力発電施設の導入のための準備

場所の選定は九州大学に近く、いつでも試験の様子を確認でき、かつ耐波浪を考慮し、図-1の博多湾内を希望した。浮体近くの海岸そばに同機種のレンズ風車も建て（図-1）、海上と陸上設置での発電状況を比較できると考えた。Nimby問題という言葉はよく聞かれるが、いくつかの関連機関への説明には大変な労苦、困難があった。福岡市との覚書、環境影響評価書<sup>1)</sup>、極限状態における海上風力発電浮体の挙動について－海上事故、緊急時が起こる確率、および起こった場合の事象－などの分析書<sup>2)</sup>、各方面への研究協力のお願書の提出、説明などはもちろん、福岡市環境局、福岡県、福岡海上保安部、海上保安庁、野鳥の会、干潟を守る会、博多湾の市営渡船、そして福岡市漁業協同組合へ出向き説明を続けた。

福岡市環境局の協力が大きく、説明に同行して頂いた。やはり漁業協同組合の方々との説明、交渉が最も難題であった。しかし、福岡市漁業協同組合理事長のご理解と他の理事の方への説得が功を奏し、福岡市東区のマリンワールド水族館沖合約1kmの位置に係留、実験してよいとの許可を頂いた。私達の風車が静か（陸上風車で体感してもらった）ということ、鳥の衝突は経験したことがない、浮体の規模は18m程度で大きくはない、などの理由で受け入れられた。

### 3. 浮体設計・建造・設置<sup>3)</sup>

#### 3-1. 海域の気象・海象条件

今回の博多湾における浮体の設置位置は、現地の風況、港湾区域、海域の利用状況等を考慮し、図-1のように海の中道の海岸線から約770m (33° 39' 36" N, 130° 22' 36" E) の沖合である。この点における過去数年間の平均風速は4.07m/sであり、卓越風向は北北西である。設置点における波浪については、冬場に卓越する北風に対して、海岸線からの吹送距離が約700m程度しかないので、大きな波高の波は発生しない。なお、福岡地方気象台の風速の統計値

Table-1 主な仕様、寸法

Diameter	18m
Dia. of the column	3.5m
Height of platform	4m
Draft	2.4m
Displacement volume	138.5m <sup>3</sup>
Weight	140t
Depth of water	5m

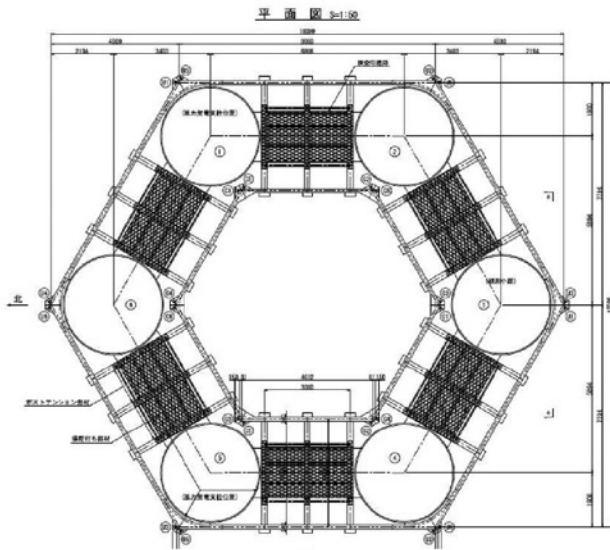


図-2 六角形浮体の平面図

によれば、設置位置の30年最大風速は22m/sであるので、その時の有義波高と有義波周期は約0.9mおよび2.3秒であると推定される。

### 3-2. 設計・建造

浮体の主要寸法 (Table-1) の決定は九州大学で行い、それを受けて基本設計および構造計算を日本港湾コンサルタントが行った。さらに詳細設計および製作・施工については (株) 富士ピーエスが担当した<sup>4)</sup>。図-2は、PCコンクリートで建造された直径18mの浮体の平面図である。図-3のように作業船でつりあげ着水させた。このあと岸壁へ曳航され、そこで風車の搭載、太陽光パネル、バッテリー、観測制御小屋などの諸設備が搭載された。発電した電気はバッテリーへ蓄電されるが、容量の限界のため、残りは捨電された。海上保安庁の指示により、浮体施設の周囲にはオイルフェンスを巡らし、一般の船が近づけないようにした (図-4)。

### 3-3. 係留

設置海域の水深は約5mであり、浮体の設置状況



図-3 進水の様子 2011.11.30



図-4 浮体導入後 2011.12.4

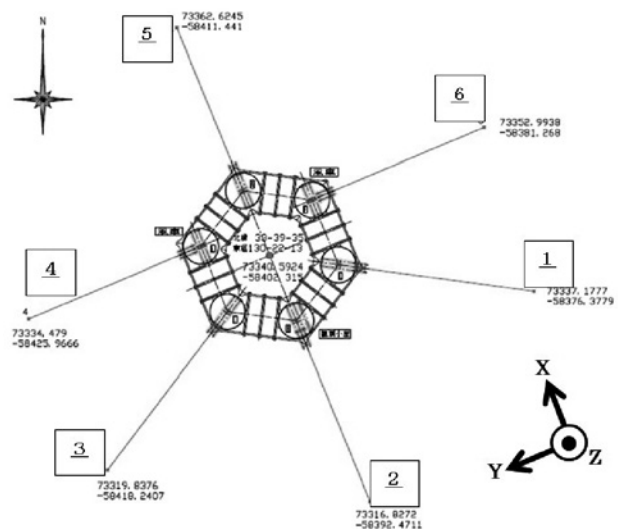


図-5. 係留ロープの配置、係留張力はNo.2で計測

を図-5に示す。係留については、アンカー、ロープを用いている。アンカーとしては、福岡市港湾局が所有する20tonコンクリートシンカーを6個借用した。ロープについては、長さ20m、直径45mmのナイロン

製ロープ（強度31.2ton）を使用した。図-6は、浮体の南側の係留ロープに設置した張力計と係留ロープの写真である。この検力計は最大荷重10tonまでの計測が可能である。もし仮に10ton以上の荷重がかかって検力計の接続部が破断してしまった場合には、これ以後は浮体側係留ロープにかかる荷重の計測ができなくなってしまうが、予備の接続部がバイパス状につないであるため浮体から係留ロープが外れることはない。この接続部は50tonまで耐えられるように作ってある。

図-7は海上設置後の浮体写真である。3kWの可倒式レンズ風車は、支柱と風車本体の合計重量が約3.5tonである。その風車2基の相対位置にあるのが観測小屋であり、風車制御装置、各種計測器、48個のバッテリーなどが入っている。観測小屋の重量が偶然に風車とほぼ同じであったため、特に重量バラン



図-6 係留張力計測用ロードセル



図-7 海上設置後の浮体発電施設

スはとる必要はなかった。浮体のデッキ上には、1kWと0.5kWの2種類の太陽光パネルも搭載されている。

### 3-4. 浮体計測システム

本プロジェクトにおける計測項目は、気温、水温、風向、風速、日射量などの環境項目、風力および太陽光などの発電関係、波浪および浮体動揺加速度と係留ロープ張力などの浮体関係がある。この浮体上には、複数の計測器が積んであり、実海域で各種の計測を行うことが大きな目的の一つになっていた。Table-2は、それらの計測項目をリストにしたものである。気象関係、発電関係は風車担当のスタッフが計測データの管理を行った。浮体の動揺は、クロスボー株式会社製の加速度計NAV440によって計測されている。NAV440は、野外における計測のために屋根付きの透明プラスチック箱内に入れている。これを浮体上の観測小屋の屋根の上に設置してその点の加速度を計測している（図-8）。データのサンプリングは25Hzで行われ、5分（300秒）毎にデータ収録用のPCに記録されるように設定されている（図-9）。

Table-2 観測する物理量、周囲環境状況

Weather	Temperatures, Winds, Solar
Power Gene.	Wind power, Solar power
Motions	Waves, Motions, Tension of rope
Environments	Birds, Marine lives

Acceleration sensors

Network Camera

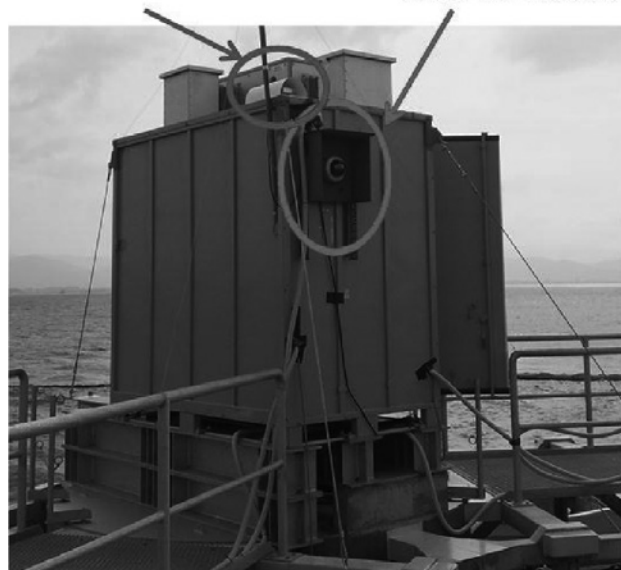


図-8 観測小屋、加速度計とカメラ

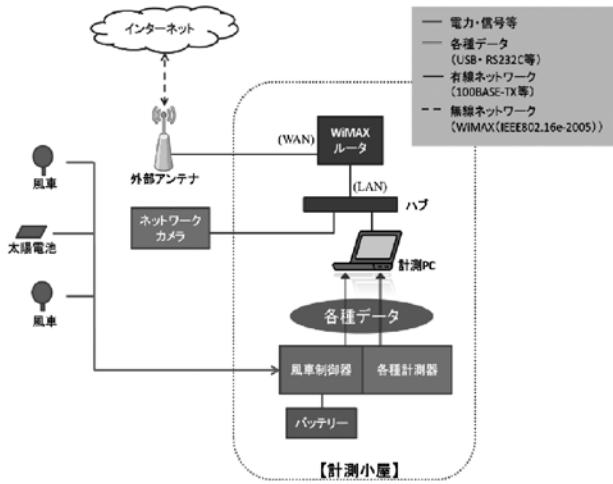


図-9 計測システムとネットワーク



図-11 台風時のカメラ映像

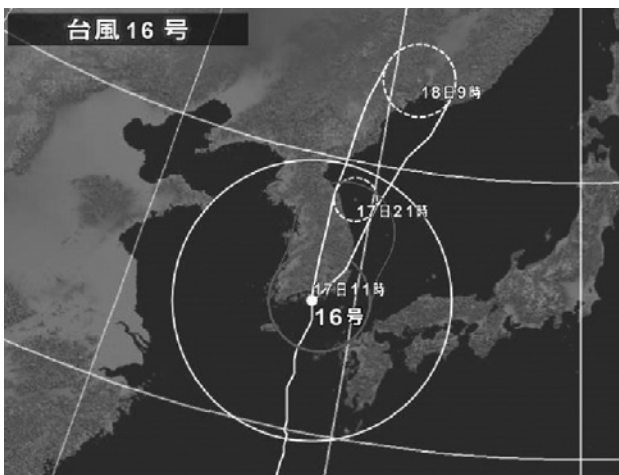


図-10 2012年9月17日台風16号の進路

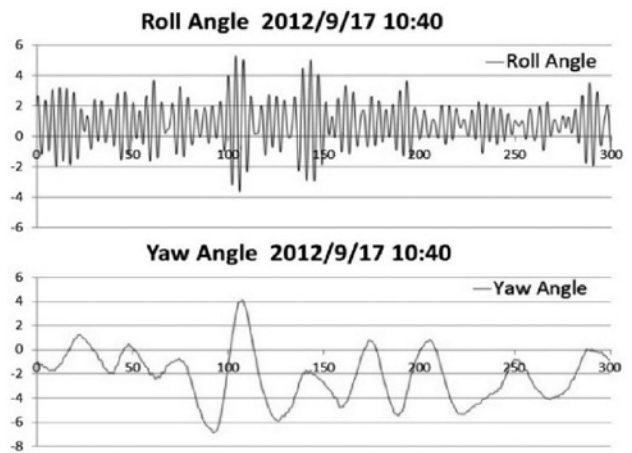


図-12 浮体のローリングとヨーイング変動の時系列

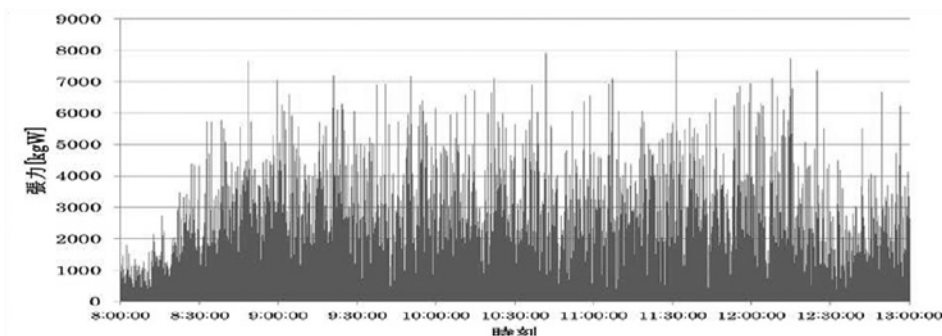


図-13 台風16号 2012.9.17の8:00から13:00の係留張力の時系列

## 4. 2012年台風来襲時の浮体動揺と係留張力

### 4-1. 波浪と浮体動揺<sup>3),5)</sup>

図-10は、2012年9月17日午前11時の台風の位置と風速30m/sの強風域を示しており、博多湾がその境界に位置している。福岡気象台のデータによれば、11時時点では南南東の風、平均風速は13.2m/s、瞬間最大風速は南の風、28.5m/sと発表されている。浮体設置位置では、南風に対しては吹走距離が約6kmあり、南側からの波浪が発達する。図-11は浮体設置の

カメラ映像の一コマであるが、リアルタイムで観察していると大波浪と浮体動揺は迫力があつた。図示していないが12時における波高計の生データとその修正データの時刻歴を調べた。修正したデータを解析すると有義波高1.20m、有義波周期3.80秒となった。

図-12は、浮体の動揺の時刻歴で、10:40からの5分間の記録である。Rollingは、波周期で動揺しているが、Yawingについては波周期の動揺はほとんど見

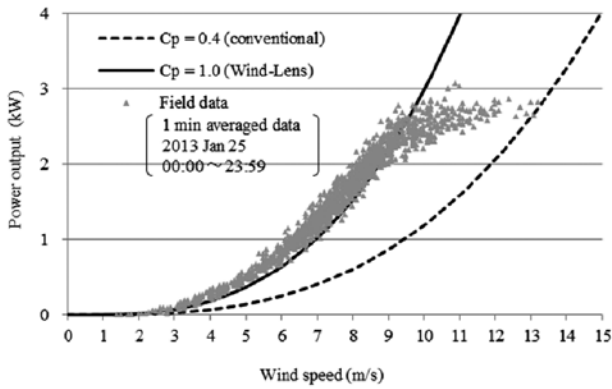


図-14 3kWレンズ風車のパワー曲線

えないが長周期で不規則に動揺していることが分かる。

#### 4-2. 係留張力<sup>3),5)</sup>

図-13は台風時の8:00から13:00までの係留張力の時系列を示す。係留張力は不規則に大きく変動し、最大8000kgW (8ton)であった。

### 5. 浮体上におけるレンズ風車発電試験

浮体上2台の3kWレンズ風車に対し、海上風での風力発電特性を解析した。代表的なパワー曲線を図-14に示す。同時に約3.7km離れた臨海部のみたと100年記念公園に建てられていた同タイプの3kWレンズ風車(図-1)の発電出力と風況を調べ比較した<sup>6,7)</sup>。図-15に2012年11月から2013年10月までの1年間の風力発電データを比較する。上下の図で上の実線のグラフが浮体上風車の月平均風速とその発電量、下の破線グラフが沿岸部(みたと100年記念公園)の月平均風速とその発電量である。両者の発電量(kWh)を比較すると、やはり海上風を浴びる浮体上の風車の方が圧倒的に大きい。みたと100年公園の臨海地も福岡市沿岸部としてそれほど風況は悪くはないが、年間平均風速は約3.43m/s程度である。これに対し、海上の浮体では同じ高さ10m程度で、年間平均風速は4.24m/sである。つまり24%程度高い。全く同じ仕様の風車であれば、風速の3乗則で89%発電量が大きくなる。実際、月間を通して比較ができる月(作業、あるいは何らかの故障で風車が十分稼動しなかった月々を除いて)を取り出してグラフ化した図-15(下図)では、浮体上で約2倍の発電量を達成していることがわかる。以上から、少し沖合(770m程度)に出るだけで、年間平均風速が24%程度高くなり、年間発電量が沿岸部陸地の2倍に達することが実証された。

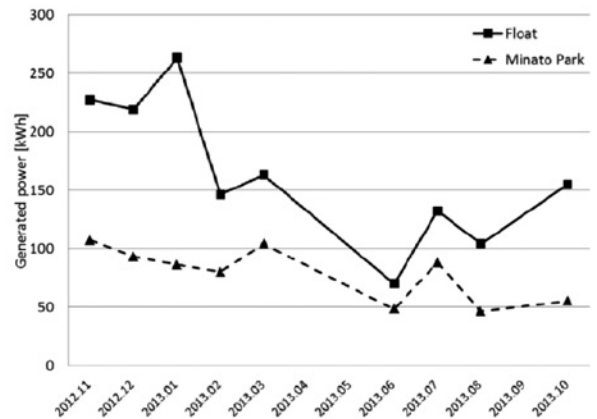
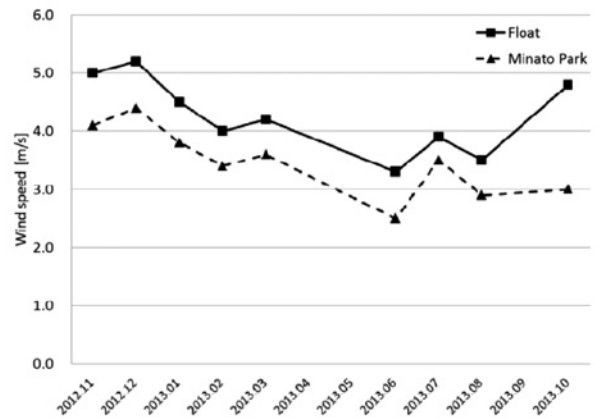


図-15 2012年11月から1年間の月平均風速と月発電量の比較グラフ(浮体とみたと100年公園、距離3.8km)



図-16 2022年2月、浮体発電施設と牡蠣の養殖

### 6. 漁業協調の可能性

2011年12月に博多湾へ設置後、2021年12月で10年が経過した。当初、コンクリート浮体(鉄筋入り)では4-5年程度の耐久性と言われていたが、10年以上の耐久性を示している。現在は福岡市漁業協同組合の箱崎支所(藤野組合長)が浮体風力発電施設を引き取り、六角形浮体の内水面で牡蠣の養殖を行っている(図-16)。もとより、浮体式エネルギーファームは水産業との連携を期待していた。今は理想の姿とも言える。クリーンエネルギーで育った素晴らしい牡蠣がそこにある。図-17に示すように、2012年当

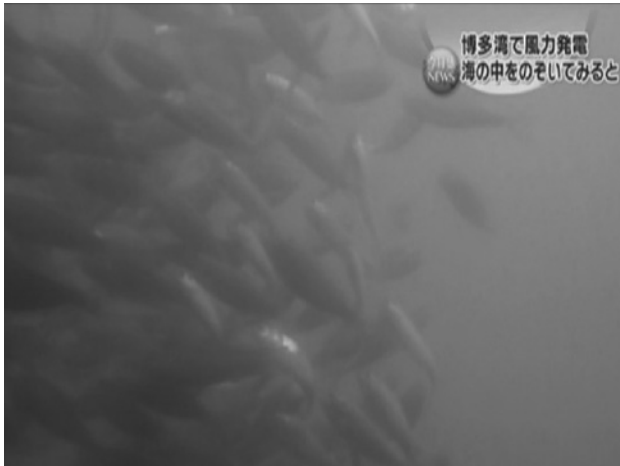


図-17 浮体下の魚の群れ 2012年当時

時の海上試験中でも浮体の下には多種類、多数の魚が集まっていた。日陰になるからであろうか？また、かもめが周辺を飛び交っていたが、風車に衝突したものは一羽もなかった。むしろ風車の輪を止まり木にしていた。環境にやさしい浮体式エネルギーファームの実証と言えよう。また紙面の都合上、紹介できないがマイクロバブルで博多湾水質の浄化試験も行なわれた。溶存酸素の計測を現長崎大学（当時、九州大学総合理工学研究院）の経塚先生が実施された。

## 7. 博多湾の第1ステージから第2ステージへ - 浮体式エネルギーファームと養殖 -

博多湾でのパイロットステーションによる実証実験の成功に続き、浮体式複合洋上エネルギーファームの実用化を目指し、よりスケールアップした第2ステージの洋上実証実験を計画してきた。目標は中型クラス数100kWのレンズ風車を3基搭載し、太陽光パネルも含めてMW級の浮体式洋上風力発電システムの開発である。沖合設置を想定した大型浮体（100m級）は、荒天時の暴風・大波に耐えうる安全設計と低コストが求められる。大型浮体の開発に関して産学連携が不可欠であるため、平成24年度（2012年度）から、学界では九州大学、広島大学、大阪大学、産業界から大島造船、新来島どっく、2013年度からは常石グループも加わり、産学連携共同研究契約を締結して浮体の研究開発を実施してきた<sup>8)</sup>。

当初は100m級で玄界灘を想定したが、設置海域の海象条件が厳しすぎることで、スケールは60m級浮体にし、対象海域は風況が良く、波浪は比較的小

さい気象・海象条件に加え、養殖業が盛んな宇和島周辺海域を想定した。開発設計した浮体の特徴は、3基の風車をそれぞれカラム上に配置した三角形型のセミサブ浮体で、各カラム（風車・カラム・フーティング）について重力と浮力はほぼバランスさせるため、浮体全体構造には初期応力が少ない。また、荒天下でデッキおよび上部構造物に対する波浪衝撃を避けるためにデッキレス構造になっている。浮体の喫水を抑えるためにフーティング構造を使って浮力を確保するなどの特徴がある<sup>8)</sup>。

宇和島の周辺は宇和海と呼ばれ、さまざまな漁業権区域がある。著者は元全漁連副会長で、宇和海漁業協同組合長と面談し、コンセプトを理解して頂いた。高齢化社会で労苦を伴う養殖業を廃業する人が増加し、かつ赤潮等で不安定な収入となっていることなどいろいろ学んだ。組合長からの一番印象に残る言葉は、こういう浮体施設の設置は一つの漁業組合（一つの地先内）を相手にしないととても大変な交渉になると聞かされた。幸い、宇和島市、愛媛県も賛同していただき、九州大学と協定を結び、上記設計マニュアルに基づく製造、実証実験を行うため、予算獲得に努力してきた。

それから早くも5,6年経過した。ここで2022年になって大きな転機が訪れようとしている。昨今の全世界での再生可能エネルギー社会への転換、日本政府による洋上風力発電の飛躍的増大への期待・支援により、日本周辺の海がにわかに活気づいてきた。日本周辺沿岸部で超大型風車の大規模ウィンドファームが次々計画され、導入されようとしている。しかし、そのスタイルは欧米追従そのものであり、導入される大型風車は100%外国製である。周辺環境影響アセスメントはもちろん、漁業協調のための五島方式などの経費支援もある。しかしながら、このコンセプトは、この大型事業は、本当に日本の気候、風土、社会システムに合ったものであろうか？長年、漁業協同組合の方々と話合ってきた筆者は疑念を抱かざるを得ない。

この春2022年4月、九州大学は洋上風力研究教育センター（仮称）を発足させることを決定した。準備のためのワーキンググループにおいて日本における洋上風力発電、洋上の自然エネルギーファームはどのような姿であるべきかを議論してきた。もちろん今の主流である大型洋上風力の産学連携支援と教育は行わねばならない。しかし、日本の気象・海象条件、漁業協同組合という世界で唯一の社会シス



図-18 新しいコンセプトの洋上浮体式エネルギーファーム（風力と太陽光）CG。周辺に自動給餌器、魚・海的环境監視システムを備えたスマート養殖施設を配備。

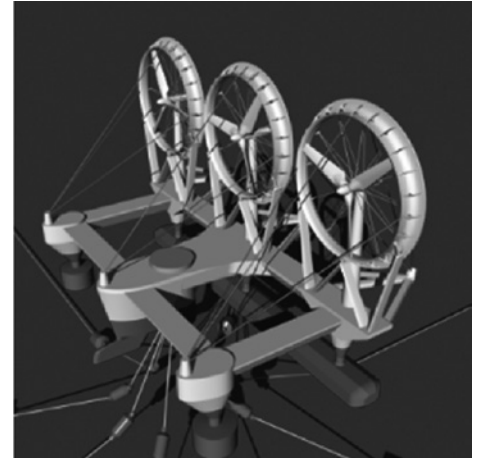


図-19 浮体式エネルギーファームCG。並列配置200kWレンズ風車とデッキの上に太陽光パネル予定。一点係留式で浮体が風向変動に応じて回転する。

テムを有する日本に受け入れられるため、新しいコンセプトも提案する。これが図-18、図-19にイメージする浮体式エネルギーファームと周辺養殖施設との融合である。洋上から豊かな自然エネルギーを確保しながら、同時に「食」という、もう一つの大問題を解決するために、スマートな養殖、AIを使った養殖施設を附設する。このエネルギーと食の融合システムを日本の周辺沿岸部へ展開し、さらに発展、洗練させたビジネスモデルとして東アジアを始めとする全世界へ展開できることを期待する。

## 8. まとめ

2011年12月から約1年半に亘って行われた博多湾における浮体式エネルギーファームの実証実験結果について紹介した。風力発電施設については、海上風は乱れも少なく、風速も陸上よりも何割か大きい。770m程度の少し沖合の海上でも、風力発電に有利であることを博多湾の臨海公園に設置されている同型風車と比較して実証した。浮体上の風車の発電量は陸上臨海地区の風車に比べ約2倍であった。

浮体の安全性を考える上で重要な波浪中の動揺特性および係留張力について、2012年9月17日に来襲した台風16号の暴風雨中での観測結果は大変貴重であった。浮体は事前に想定していた範囲内の動揺値であった。今後計画している外海での大型浮体による実用化プロジェクトに向けて示唆に富むデータを得ることができ、より大規模化、外海への設置について実現可能性を示唆する結果を得た。

今回の浮体式エネルギーファームは、当初から期待していた漁業協調の面でもよい実証ができてい

ると言えよう。2012年の設置当時から浮体の下に多数の魚が集まっており、コンクリートとなじむのか海藻も繁殖していた。10年後の今は、この浮体式海上発電施設は福岡市漁業協同組合箱崎支所が所有し、六角形浮体の内水面で牡蠣の養殖が行われている。設置している位置は河口で栄養源に溢れ、非常に大きく美味しく成長している。

最後に博多湾の次のステージとして、より大型の浮体とその上に搭載する200kWレンズ風車群の姿を紹介した。特徴は周辺に自動給餌器、魚・海的环境監視システムなど備えた先進的な養殖施設を配置することである。世界のエネルギー、食糧、水という三つの大問題のうち、水産業との協調でエネルギーと食の確保に貢献できればと考えている。

## 参考文献

- 1) 博多湾における浮体式海上風力発電実証試験環境影響評価書、平成23年10月、九州大学
- 2) 極限状態における海上風力発電浮体の挙動について－海上事故、緊急時が起こる確率、および起こった場合の対応体制、平成23年6月、九州大学
- 3) 博多湾における浮体式海上風力発電実験について、経塚雄策, 末吉誠, 胡長洪, 大屋裕二, 日本船舶海洋工学会論文集, 第192号, 2011, pp.321-330.
- 4) 洋上風力発電実験用浮体の施工について, 土木学会年會講演集2012, (株)富士ピー・エス 平嶋真二, 堤忠彦, 九州大学 経塚雄策, 日本港湾コンサルタント 吉田賀一
- 5) Demonstration Experiment of Offshore Wind Power Generation by a Floating Platform in Hakata Bay,

Y. Kyojuka, M. Sueyoshi, C. Hu and Y. Ohya,  
Proceedings of the International Symposium on  
Marine and Offshore Renewable Energy, Oct 28-30,  
2013, Tokyo, Japan

- 6) Numerical Prediction and Field Verification Test of  
Wind-Power Generation Potential in Nearshore Area  
Using a Moored Floating Platform, Koichi  
Watanabe, Yuji Ohya, Takanori Uchida, Takashi  
Karasudani, Tomoyuki Nagai, Journal of Flow  
Control, Measurement & Visualization, 2016.
- 7) Wind lens technology and its application to wind  
and water turbine and beyond, Yuji Ohya, Takashi  
Karasudani, Tomoyuki Nagai, and Koichi Watanabe,  
Renew. Energy Environ. Sustain. Vol, No (2017)  
DOI: 10.1051/rees/2016022
- 8) 新型浮体式洋上風力発電システム－浮体設計マ  
ニュアル－ 新型浮体式洋上風力発電システム  
研究会浮体設計ワーキンググループ編（九州大  
学まとめ） 2018年3月15日

## 謝 辞

本業務は環境省委託事業の一部であり、地球環境  
局地球温暖化対策課、福岡市環境局および港湾局、  
多くの企業からの支援、協力を得た。ここに記して  
感謝します。特に浮体施設までの「瀬渡し」につい  
て、海の中道マリーナの方々、博多湾環境整備（株）  
の方々、福岡市漁業協同組合理事、箱崎支所運営委  
員会会長の藤野さまには多大な協力を頂いた。ここ  
に記して感謝申し上げます。