

環境負荷の小さい基幹エネルギーとしての帆走型洋上発電

正員 木下 健*1	正員 高木 健*2
正員 寺尾 裕*3	正員 井上 憲一*4
正員 田中 進*5	正員 小林 顕太郎*6
正員 山田 通政*7	正員 高橋 雅博*8
植弘 崇嗣*9	内山 政弘*9
江寄 宏至*9	佐藤 増穂*10
正員 岡村 秀夫*10	

Sailing Wind Farm as Main Energy Resource with Small Load on an Environment

by	Takeshi Kinoshita, <i>Member</i>	Ken Takagi, <i>Member</i>
	Yutaka Terao, <i>Member</i>	Ken-ichi Inoue, <i>Member</i>
	Susumu Tanaka, <i>Member</i>	Kentarou Kobayashi, <i>Member</i>
	Michimasa Yamada, <i>Member</i>	Masahiro Takahashi, <i>Member</i>
	Takashi Uehiro	Masahiro Uchiyama
	Hiroshi Esaki	Masuho Satou, <i>Member</i>
	Hideo Okamura, <i>Member</i>	

Summary

The present paper proposes a Sailing Wind Farm as main energy resource with small load on an environment. It sails around EEZ of Japan seeking appropriate breezing and avoiding meeting heavy storm like Typhoon. This is a concept of main energy resource of Japan to minimize environmental load when fuel cell and hydrogen will be available for daily life. A prototype design shows feasibility of safe sailing even in case of Typhoon and structural strength in storm. If Sailing Wind Farms, 3900 units of the prototype replace coal power plants, then we can obtain 18% of total electric power generation of Japan and reduce 10% of exhausting CO₂ of the 2002 level.

1. 緒言

洋上風力発電は現在ヨーロッパで盛んに計画、建設が進められている。しかし、日本の場合、浅い水深で平

均風速の大きい適地が少ない上、自然エネルギー利用の優遇策が不十分であり、洋上風力発電を進める上で不利な条件がいくつも挙げられる。さらに実際の候補地を求めるとなると、大きい変動を含む風力による質の悪い電力を吸収できる強力な電力系統のある適地はさらに限定される。そこで、少し先に目を転じて水素社会などで描かれている燃料電池が一般化する頃、または大容量の蓄電器が実現する頃を考えてみる。何年先かははっきりしないが、地球温暖化を始めとする環境問題を見る時、あるいは化石燃料資源の残存量を考える時、それはそう遠い先の事ではないと思われるが、そのような社会では、エネルギー源は化石燃料起源であってはならず、地球系のエネルギー収支をバランスさせることができる再生可能エネルギーでなければならない。すなわち、循環型

*1 東京大学生産技術研究所
 *2 大阪大学大学院工学研究科
 *3 東海大学海洋学部
 *4 (株)アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド
 *5 (株)三井造船昭島研究所
 *6 (株)住友重機械工業
 *7 (財)日本造船技術研究センター
 *8 (株)川崎造船
 *9 (独)国立環境研究所
 *10 マリンフロート推進機構
 原稿受理 平成17年3月29日

のエネルギー系は自然エネルギーに代表される再生可能エネルギーの基幹エネルギーとしての利用なくしては成り立たない。原子力は事故の危険性や廃棄物処理、さらに核拡散の懸念があり、そもそも地球系のエネルギー収支の上からも疑問がある。核融合は基礎研究を終え、経済活動のスケジュールにのぼるのはまだまだ先の事の様である。まさに、再生可能エネルギーの選択こそが、循環型エネルギー系を目指す我々が求める道であろう。基幹エネルギーの候補になる自然エネルギーには太陽光、バイオマス、そして洋上を含めた風力等がある。これらは利用可能な総量は大きいものの、エネルギー密度が化石燃料のように大きくないのが特徴である。大きな総量の中から、ほどほどに利用させて頂くことになる。地球系のエネルギー収支を崩さないこうしたエネルギー生産を著者の一人である植弘¹⁾は木守り柿型のエネルギー生産と名付けている。木守り柿型のエネルギー生産の観点から非保留式洋上風力発電が考案された。

木守り型のエネルギー生産は、経済性の観点だけに価値基準を置くことはできない。経済性の観点に加えて環境負荷を最小化することを新たな価値基準に据える必要がある。この事をエネルギーのパラダイム転換と呼んでいる。環境負荷としては、例えば実質生涯生成エネルギー当たりの生涯生成 CO₂ が挙げられる。実質生涯生成エネルギーは生涯生成エネルギーから生涯稼働エネルギーとシステム構築エネルギーを差し引いた収支である。一方、生涯生成 CO₂ は文字通りシステムのライフサイクルで生成する CO₂ の総量である。自然エネルギーは当然ながら、実質生涯生成エネルギー当たりの生涯生成 CO₂ の優等生が多いが、誤ってはならないのは、全てが優等生とは限らないことである。例えばバイオマスが脚光を浴びているが、エネルギー生産目的でサトウキビなどを作付けした場合、施肥や農薬の使用などにエネルギーを消費し、サトウキビから生成したエタノールのエネルギー収支はマイナスとなる場合もあるという。非保留式洋上風力発電システムは、新たな価値基準の下で、エネルギー収支比が 2~4 倍、あるいはそれ以上となるエネルギー生産システムを目指している。

2. 移動式洋上風力発電

水素社会が始まる頃、すなわち燃料電池が一般化する頃、あるいは大容量の蓄電器が実現する頃には、もはや電力系統に繋ぐ必要はなく、高価な送電線は不要であり、浮体構造で制約になる送電線の変形も考える必要はない。要は風力発電の現地で蓄電池に充電するか、水素を発生させれば事足りる。蓄電池や水素を船で運ぶと

すると、陸地までの距離も関係ない。そうなれば一層のこと適度の風が吹いている場所を求めて移動出来るようにすれば、水深や海底土質を気にして保留に悩む必要がなくなる。適度な風速を求めて移動するので何時も効率よく発電できるし、台風を避けて移動すれば大波や暴風に遭わずにすむ。移動可能にすることで発電量を増やせる上に、設計荷重を下げられる訳である。²⁾

大容量の蓄電池が開発されるまでは取り敢えず電気でも水素を作らなければならない。普通の塩水の電気分解では陽極で塩素が発生し環境に害を与える。これを防ぐには、塩水を淡水化後電気分解するか、あるいは陽極を工夫することにより塩素ではなく酸素を発生するようにするなどがある。淡水の電気分解は技術的には高効率のものが開発されているが、電極に希少金属の白金を用いているため大規模の基幹エネルギーとしては成り立たない。一方、塩素を発生しない陽極の工夫に関しては東北工大の橋本が希少金属を使わない電極材を開発し、この問題を解決している。少なくとも大容量の蓄電池が開発されるまでは、橋本の開発した塩水電解用陽極と水素発生技術は洋上発電に欠かせないものである。

2.1 洋上プラットフォーム

風車を洋上で移動するプラットフォームに載せることにすると、ある程度の数の風車を纏めたほうが操船上也容易であるし、水素発生装置やその他の周辺機器も纏められて有利である。またプラットフォーム同士の衝突の危険を減らすためにも必要である。纏めるとすると配置が問題となる。風上に向かって横方向には 3D 位 (D: 風車直径)、風下方向に 5D 位間隔を空けるべきであると言われているが、まだ十分に検証されるには至っていない。例えば、風車を 5MW 風車とすると、直径が約 120m であるから、ぶつからないためにも 120m は離れている必要があり、どんなに後流を上手に整流しても、理想流体の場合は $120m * 1.73 = 208m$ より近づけられない。そこで、せいぜい近づけることにして、240m 位としてみる。プラットフォームとして、例えば 5000m のメガフロートを考えて、5000/240 であり、約 21 機の風車しか置けない。これは千鳥に配置しても同じことである。また、風下方向には 5D とすると 600m 離す必要がある。そこで、240m 毎に一列に配置し、双胴の浮体の復原力で支えるか、多数の浮体により、600m づつ離して風車を何列か並べるかの選択になる。しかし 600m 離すとすると、胴間の桁の強度設計から多数のデミハルが必要となり、あまりメリットがない。そこで後流影響を 600m とすると双胴浮体 1 列風車が一つの候補となる。概念図を図 1 に示す。

風車が 1 列では、浮体が長い紐のようになり、操船性

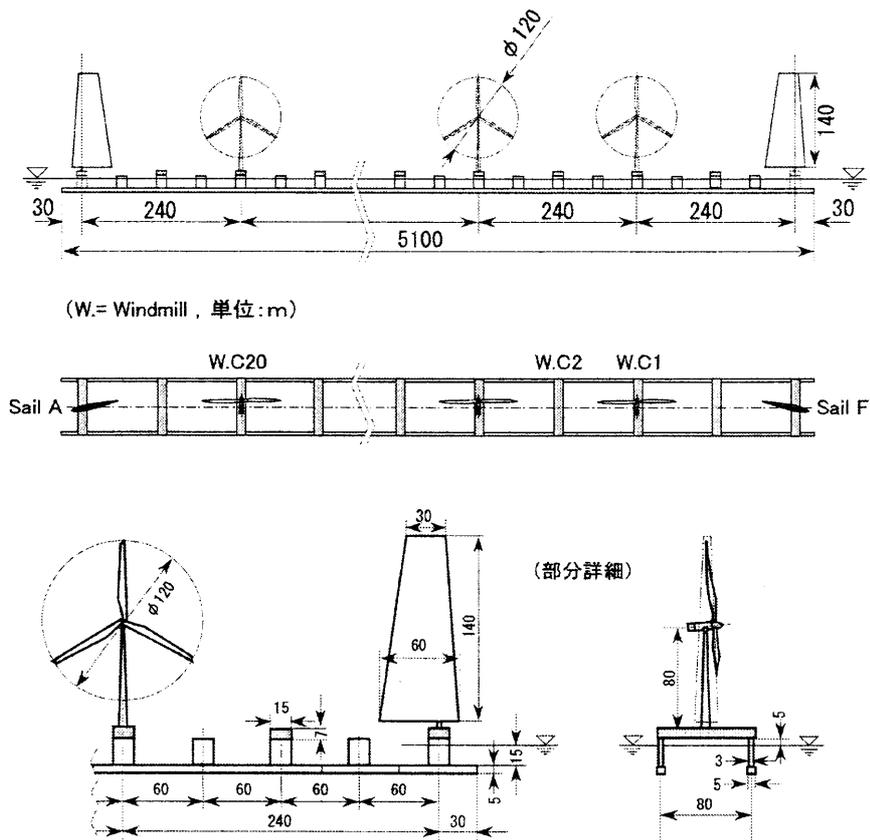


Fig.1 Rope-type catamaran sailing wind farm

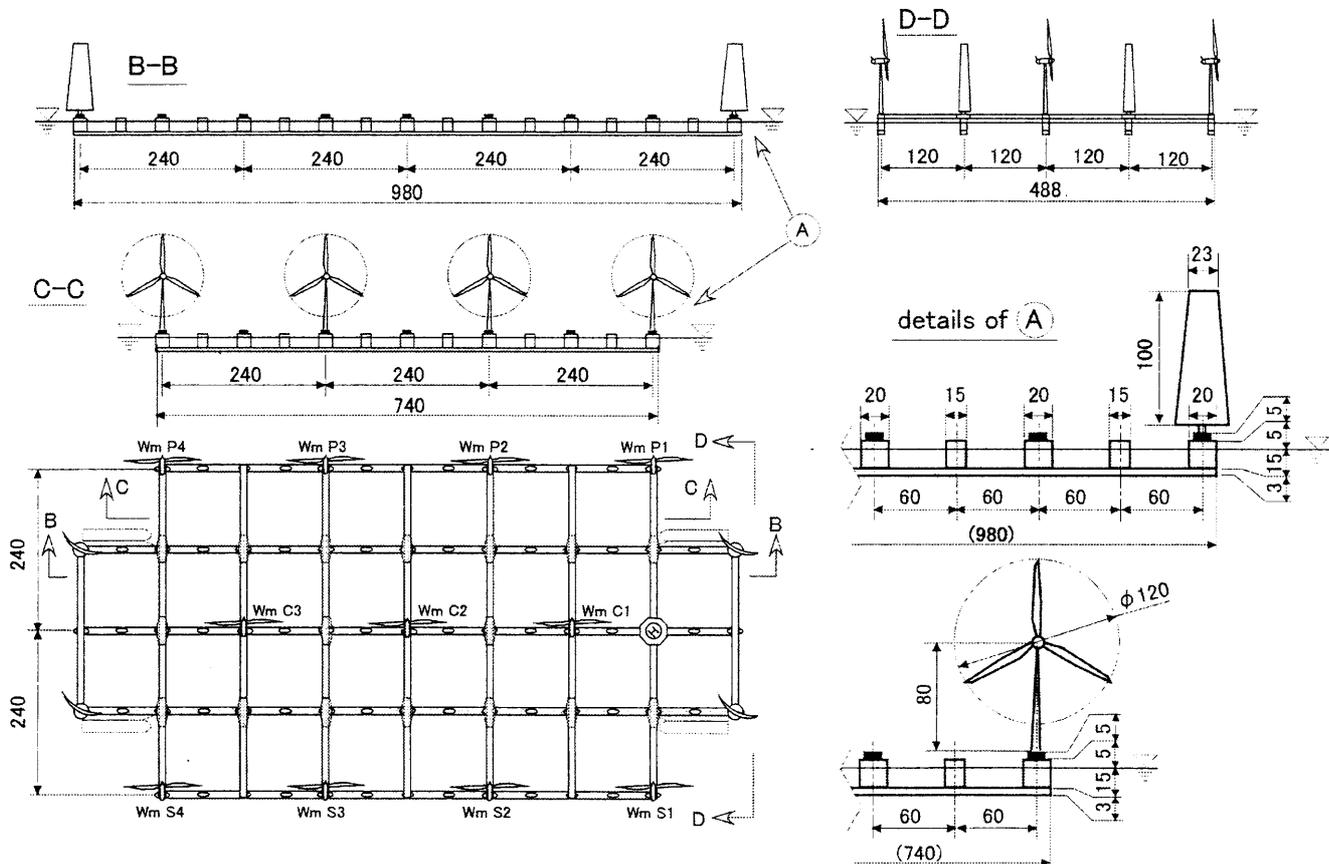


Fig.2 Three-row five lower-hull sailing wind

の観点からは、風車を2列または3列にする方が現実的であるかも知れない。この場合、先ほど述べた風車後流の影響が問題になる。これについては、海上風の渦による上下方向の攪拌効果により、大幅に後流影響が短くなるという見解も一部にある。風力発電の場合は、ヨットレースと異なり多少の後流は許され、構造物の総合経済性、さらにこのコンセプトの場合は実質生涯生産エネルギー収支の観点から決められる。そこで、後流影響を4Dとした場合の幾何学的にコンパクトな風車3列、合計11基の場合の概念図を図2に示す。この2種類の長所短所をまとめてみると、Table 1の様になる。縦曲げと軽量化の観点から柔構造が好ましいが、曲げの中立点を水中に取る場合と、空気中にとる場合が考えられる。水中にとる場合はデミハルが縦通の構造部材となり、空気中にとる場合はガーダーと甲板による構造となる。

Table 1 Comparison of two types

	双胴1列風車超長紐型	5胴3列風車筏型
風車後流	理想的	許容限度内?
鋼材重量	小さい	少し大きい
弾性応答	曲げと振じりだけで単純	多数の2次元振動モードの共振の心配
操船性	少し不安	より簡単

2.2 操船方法

非係留式洋上風力発電は適度な風速を求めて移動し、必要に応じて台風を避けることに最大の長がある。しかし、長さが1000m規模の大きさのため操船は容易ではない。風車抗力、波漂流力はヨットのように水線下のストラットの揚力で支えられる。しかし、この浮体は長大であるため、ヨットのように上手回し(タック)は現実的ではない。さらに下手回し(ウェアリング)にも大変時間を要するため、スイッチバックが現実的である。そのため、ストラットは十分な面積を持つ前後対称翼でなければならない。風上への移動は方向転換を繰り返して間切りながら行うこととなる。

前後対称翼のストラットについては鋼板溶接で作る場合、実際の制作上薄さに制限が生じるが、厚翼に過ぎると揚力特性が極端に悪くなるので注意する必要があることが分かっている。

2.3 浮体形状と帆翼

浮体形状は波無し周波数を利用することにより上下の波強制力を小さく出来る。波の中心周期が例えば9秒

の場合、ストラット断面積がデミハル投影面積の20%位であると、プラットフォームの運動が小さくなることが期待出来る。

風車抗力、波漂流力に十分対抗する揚力をストラットに発生させるためには、それに十分な前進速度が必要である。前進速度を得る方法として帆翼とスラスタが考えられるが、安全性確保の観点から両方を装備することが望ましい。現在知られている風車直径は2MWで80m直径、5MWで120m直径である。風車上面までの高さは140m位になる。帆翼の高さを風車高さと同じ位の約140mとしてみる。140mの帆となると、操作の観点から布帆は考え難く剛体帆となり、大型飛行機の翼より大幅に大きなものとなる。帆翼はかなりの重量になり、迎角の調整機構は特別の考慮が必要となる。現実には当面140mの帆は難しく、70m位が現実的なようである。帆翼の材料は重量当りの強度が優れたものが適しており、アルミ合金等がその候補となり、マストは強度の面で高張力鋼が考えられる。

2.4 波浪中運動、波漂流力

浮体形状を波無し形状にすると造波減衰係数も小さくなり、水中に水平フィンが必要となるが、その時フィンを波喰い推進に有利な位置に設置することが考えられる。それはプラットフォーム全体でなく、一部だけの方が有利かも知れない。後に述べる部分模型による水槽実験の結果では超柔軟プラットフォームの場合、弾性振動を含む固有モードの同調周期以外では波漂流力は小さいが、同調周期では高い波高の時は風車抗力に匹敵する大きい波漂流力が加わることが分かっている。非係留式洋上風力発電の場合、暴風大波高の状況での安全性は極めて重要であり、大波高の時でも波に流されない波喰い推進浮体⁵⁾は安全性を増す上で大切である。

波喰い推進はローハルを翼型にすることで実現できる。水槽模型実験で用いられた形状は、Fig. 3に示す様に、ローハル浮体の円柱の直径と同じ翼厚をもつNACA0030を選択している。これにより、翼に流入する流体の失速角を大きくし波浪中の推力発生を確保し、また全抵抗を小さくすることを狙っている。

Fig. 4の上図状態で図の右側から波を浮体に当て、翼の配置、枚数を通常円筒浮体と変え実験を行い、Fig. 5に示す結果を得た。横軸は波長/船長比であり、上側に推力を取る。図中◆印は、4翼の前縁を波上側に配置することを示し、ほぼ実験周波数全域で波に向かう推力発生を確認している。このときは、波浪推進により波漂流力を打ち消すばかりでなく、それ以上に大きな推力の発生が見られている。しかし、この実験からは翼は4翼前

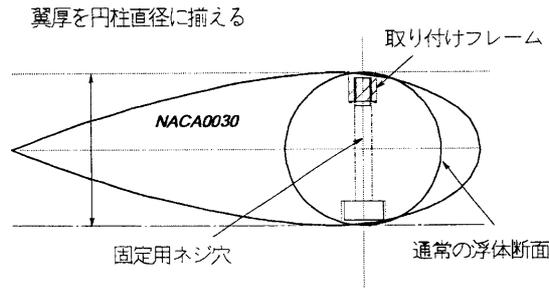


Fig.3 Wave devouring wing

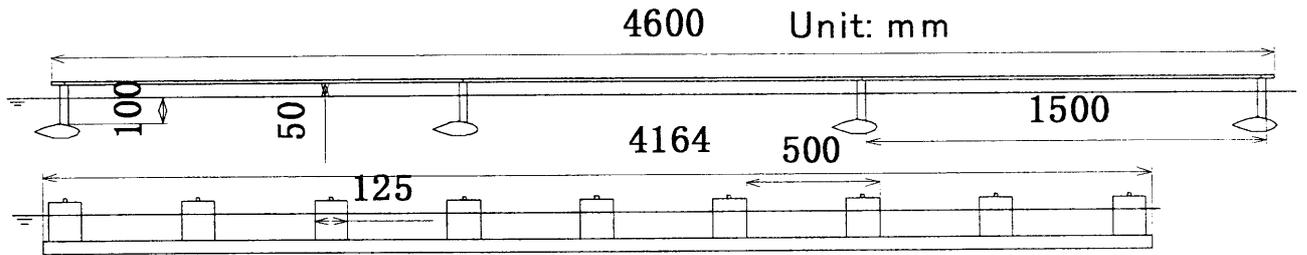


Fig.4 Model wave devouring test

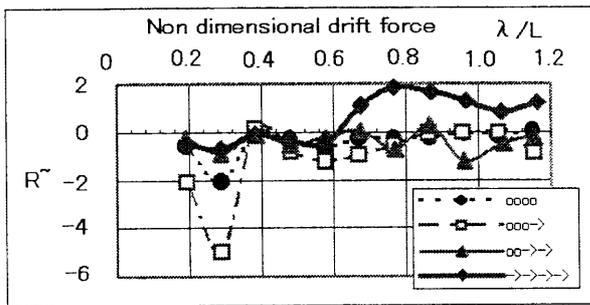


Fig.5 Wave drift force coefficient, o indicates without wing and > with wing

縁をすべて波上側に配置しなければ推力の発生がみられていない。今後さらにこの方面の研究が必要である。

2.5 設計波高の決定法

構造形式、操船性能のさらなる検討には設計波高の設定が不可欠となるが、設計波高は以下の手順による多数の台風回避シミュレーションにより決定される。

- A 構造形式を仮定する。
- B 浮体のポラーカーブとスイッチバック所要時間を計算する。
- C 定時海象情報と予報から次の定時情報までの進路方位を決定し、速度を計算し、次の定時情報時の位置を求め、それを繰り返す。

遭遇可能性のある最大波高、波周期と最大風速が得られたら、Aを修正して、再度B,Cを繰り返し、合理的な

設計を完成する。発電量と逃げ足はトレードオフの関係にある。帆翼の数を増し、補助プロペラの推力馬力を増すと浮体の逃げ足は増すが、その分、風車数が減ったり、エネルギーを消費したりしてしまう。その結果、発電量は少なくなるが、設計波高を小さく出来る。シミュレーションで必要な逃げ足速度と設計波高を割り出し、設計を繰り返し最適なシステムを決定することになる。

3. 設計例

環境研、東京大学、大阪大学、東海大学、マリンフロントの共同研究⁴⁾の設計例では以下の条件の下に検討されている。

- ・外洋環境下で安定した強度を維持し、風力発電に悪影響を与えない配置を提供する浮体構造とする。
 - ・水深が数千mとなる海域でも位置保持可能とする。
 - ・巨大低気圧等による荒天海象にも対応する。
 - ・100年を超える長期耐用性、維持補修性を有する。
 - ・大型浮体を連続建造する建造方法・能力を把握する。
- 特に、外洋の海象条件に対して非係留による位置保持性能の確保と、構造強度の確保が重要である。将来の波浪予測技術の進歩により更に安全性が増すものと考えられる。

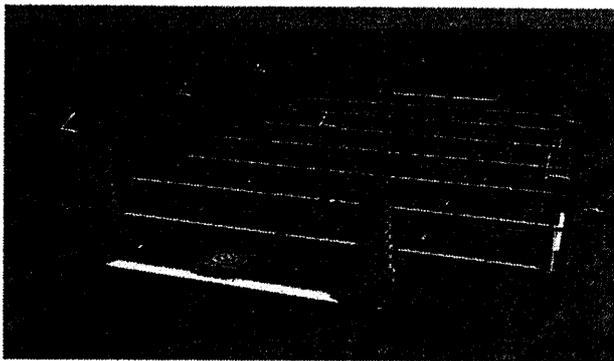


Fig.6 Schematic view of sailing wind farm

Table 2 Design conditions

	常用状態	退避限界状態
有義波高	2.0 m	6.0 m
平均波周期	5 sec	10 sec
潮流	3 knt	3 knt
位置保持性能	1日に1回程度針路変更	
運行速力	6 kts	
供用年数	100年	

3.1 主要目

主要目は次の通りである。

(1) 浮体

基本形状は、図6に示す通り移動時の抵抗を極力少なくするため、筏状のスリムな半潜水型形状となっている。全長1,020m、全幅480m、深さ32m、喫水20m、排水量約166,600tonである。水面を貫通するストラット部は揚力を発生させる目的で翼型断面とし、ローワーハル部分は、波漂流力を受けない左右非対称の断面形状となっている。

(2) 搭載風車

定格出力：5MW（定格風速14m/sec）

寸法：水平軸タイプ、ローター直径120m、ハブ高さ80m

基数：11基/浮体

風車間距離2 x ローター直径

(3) 位置保持システム

帆：4基/浮体

スラスト：旋回型、推力 240ton（合計）

(4) デッキ上構造物

デッキ上の構造物は、図6には図示していない。風車間の広い空間は、必要に応じてデッキを張ることで水素製造等の上載施設を搭載できる。

(5) 維持管理（補修・点検）

風力発電装置を搭載した本システムは、機械類の交換、

メンテナンス等が必要と考えられる。メンテナンスの方法については、外洋上での点検の他、定期的な静穏海域への曳航避泊による点検・補修が必要と思われる。また、没水部を導電塗装し、風力発電による電気を定期的に塗装に流すことで次亜塩素酸を発生させ、生物付着を防止する手段等の対策が検討されている。

3.2 波浪中の応答

波浪中応答および構造強度も検討した。図6の浮体の中央部を長さ400m分だけ切り出した部分弾性模型（縮尺1/100）を製作し、大阪大学船舶海洋試験水槽および東京大学生産技術研究所海洋工学水槽において、規則波中弾性応答実験を実施した。（図7）この実験により、以下のことが分かった。

- (1) 全ての波向きにおいて、横桁或いはローワーハルの2節振動以外に大きな振動は現われない。従って、構造強度検討には、2節の振動モードに注意を払えば良い。
- (2) 横桁の2節振動が顕著に現われるのは横波中の $\lambda/L=0.3$ 付近である。この時、上下変位振幅比は2.4程度に達する。一方、縦波中では $\lambda/L=0.6$ 付近で振幅費1.0程度のピークが見られるが、総じて大きな応答は生じない。

従来の浮体構造物とは異なる上記の性質は、ローワーハルを細長体形状として波力を極力小さくし、中性軸を波力の作用点に近くした浮体形状の特徴ではないかと考えている。

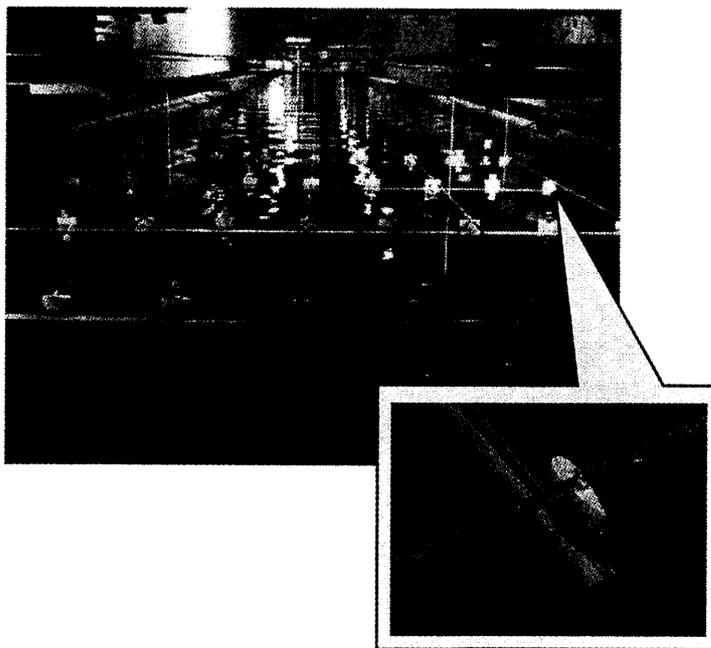


Fig.7 Model test in wave

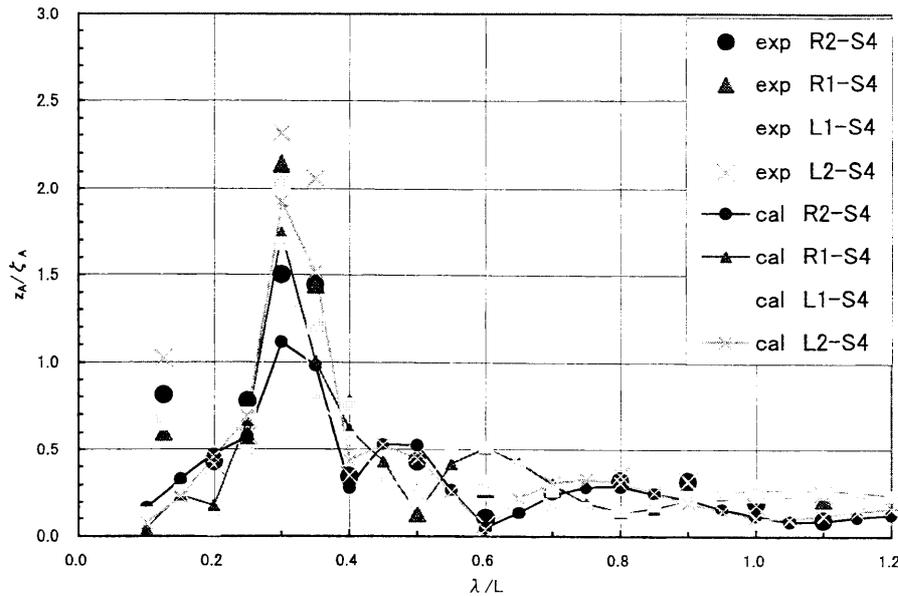


Fig.8 Vertical displacement in Beam Sea

水槽実験結果の一例として、浮体前端部の横桁に沿ったストラット上の4点で計測した、横波中での上下変位応答関数を図8に示す。

3.3 位置保持システムの検討

設計例では基本コンセプトに沿って、帆走による本浮体の位置保持性能をシミュレーションにより確認し、次に荒天回避等、移動速力の観点からスラストについて検討している。位置保持システムは、浮体上の風車の設備利用率を常に高く保つよう、浮体の最適な航路を自動的に求め、危険な海象を回避する機能を持たせている。帆走シミュレーション法は、浮体のデミハル、ストラット、風車、帆、スラストに作用する流体力をベースに、浮体の3自由度（前進、横流れ及び旋回）の運動方程式を時間発展的に解いて求めている。デミハルは摩擦抵抗、ストラットと帆は摩擦抵抗、形状抵抗、揚力及び誘導抗力を考慮し、迎角15度強までは完全失速しないものとした。帆の迎角は相対風向に対して常に前進推力が最大となる角度とし、予め相対風向ごとの浮体に対する前進推力係数と横力係数を求め補間してシミュレーションに用いている。風車間、風車と帆、ストラット間の流体力学的な相互干渉はないものとしている。一本のストラット形状は、幅15m×水面下深さ15m、翼厚3mの前後対称翼、帆の総面積は約12,000m²、帆の揚力係数は迎角15度で1.6としている。

波漂流力は、規則波中水槽試験結果を用い、長波頂不規則波中における波漂流力を求めている。ただし、水槽試験結果は浮体の中央部（長さ400m分だけ切り出した部

分模型）に働く波漂流力であり、浮体全体に作用する波漂流力は中央部に働く波漂流力が全長にわたり等しく作用するものとして求めている。なお、スペクトル形状はISSCとしている。

(1) 位置保持性能と移動速力

風速14m/s、有義波高2m（波周期5秒）の時、帆のみで、風車を何基搭載（風荷重の増加）するまで風上に移動できるかを検討したところ、5MW風車を11基/浮体まで搭載可能な結果となっている。（図9）

また風車11基/浮体を搭載した場合の、帆走ポラー曲線をシミュレーション計算で求めている。風上側に少し上ることができ、風波に対して真横（90度もしくは270度の方向）に移動する時の速度は4.8ノットであり、帆のみで位置保持可能であるとの結果となっている。（図10）

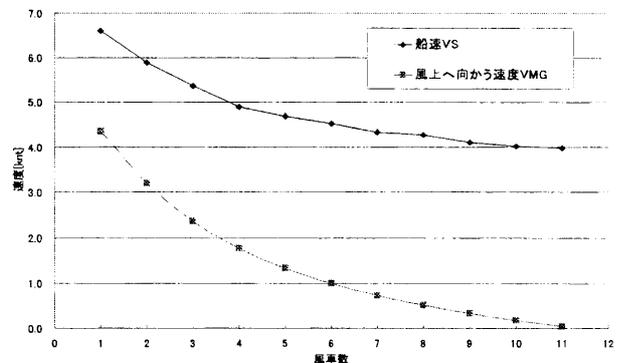


Fig.9 Boat speed and VMG thrust by only sails (wind speed 14m/s, significant wave height 2m)

次に危険海象からの避航を想定し、風速14m/s、有義波高6m（波周期10秒）、風を真横に受けながら、スラストを併用すると何ノットまで速度を上げられるかを検討したところ、最大7.6ノットまでの逃げ足を確保できる結果となっている。（図11）

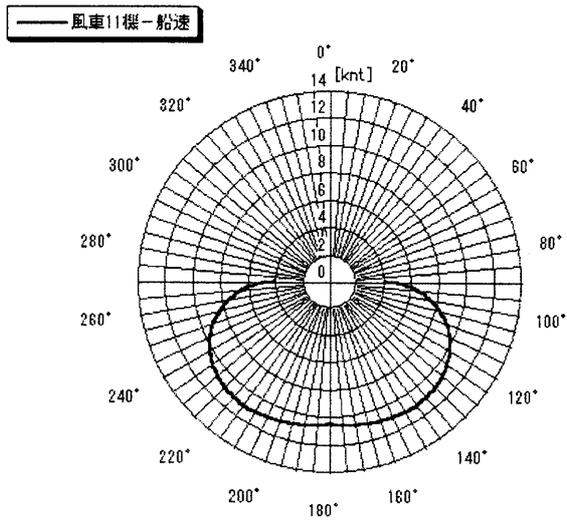


Fig.10 Polar diagram thrust by only sails (wind speed 14m/s, significant wave height 2m)

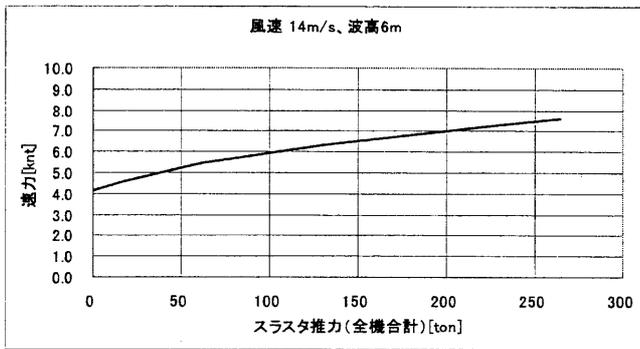


Fig.11 Boat speed vs. thrust of thrusters in case of sails and thrusters (wind speed 14m/s, significant wave height 6m)

また一例として、風速 14m/s、有義波高 2m (波周期 5 秒) の時に帆に加え、240 トンのスラスト推力 (6 基合計) を浮体の前後方向に向け、浮体の速力を増してストラット揚力を大きくしたところ、図 12 に示すように、風上側へ移動可能な範囲が 10 度ほど広がり、浮体の速力は 7.5 ノット (風波に対して 90 度もしくは 270 度方向に移動時) に増し、有義波高 6m (波周期 10 秒) の場合の速力は 7.3 ノットに増す結果となった。すなわちスラストを併用した機帆走によって位置保持能力と移動速力が増し、浮体運航の安全性が向上することが分かる。

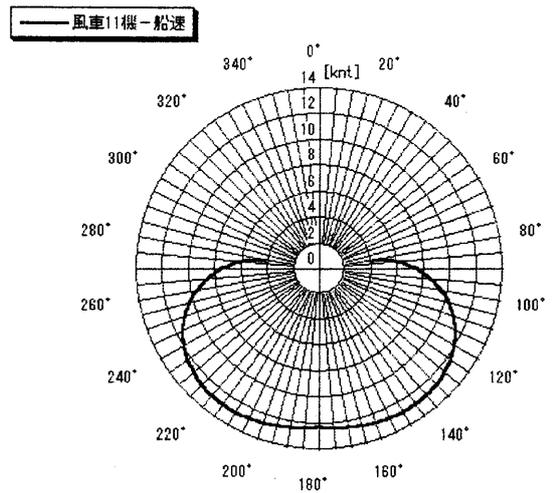


Fig.12 Polar diagram thrust by sails and thrusters

図 1 3 に方向転換の一例を示す。方向転換時の風下への風抗力を最小化するためにまず全風車をフェザリングし、風に対して約 60 度の方向に上り、迅速に逆方向への加速を行うため、帆をうまく使って浮体を減速させたのち風下側へ約 30 度回頭させて真横からの風を捉え、船尾方向 (新しい船首方向) に浮体を加速させる。この時、波なし、全風車フェザリング時の風荷重は風速 14 m/s で風車 1 基分 (120 トン強) としている。この減速開始から加速終了までに約 2 時間 30 分の時間を要している。

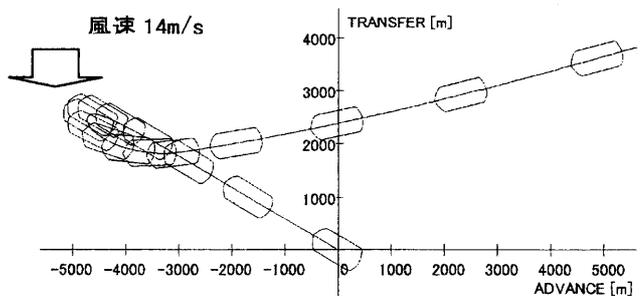


Fig. 13 Switchback trajectory (all wind turbine feathering in still water)

(2) 運航シミュレーションの検討

海・気象データ例を元に、荒天回避のための運航シミュレーションを行い、安全に荒天を回避できるかどうか調べている。荒天回避のための運航シミュレーションは次の航路決定条件によって行っている。

- 1) 台風時期も稼動する。

- 2) 24 時間連続稼動する。
- 3) 台風接近（強風域）は稼動する。（風車 11 基）
- 4) 台風直撃（暴風域）は回避する。
- 5) 沖ノ鳥島を中心とする半径 200 海里（370.4km）の許容円内（以下 EEZ と称す）に留まる必要がある。
- 6) 帆は常時使い続ける。
- 7) 針路は風に対して真横にとることを基本とする。
- 8) 変針、方向転換は帆による。
- 9) 方向転換はスイッチバック式による。ただしスイッチバック時は全風車をフェザリングする。

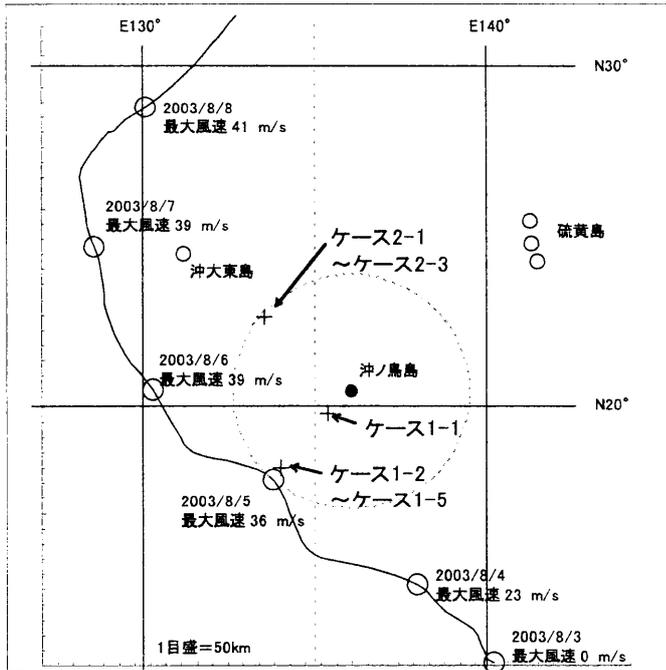


Fig.14 Trajectory of the typhoon and the position of the wind farm on 3 August

図 1 4 に台風経路とシミュレーション時の浮体初期位置（8月3日の浮体位置）との関係を示す。図中の破線は沖ノ鳥島EEZ円を表す。何れのケースも浮体位置は台風の右半円に位置し、ケース1-2~ケース1-5での浮体位置は発達中の台風にもっとも近い。

一例としてケース1-4の場合の8月3日~8月9日までのシミュレーションによる浮体の航跡を図15に示す。図16は浮体が遭遇した風向・風速、図17は有義波高・波周期・波向の時系列、図18は風車の発電電力量とスラストが消費した電力量である。図17に示すように、浮体が遭遇した有義波高は6m以下であり、スラスト併用によって危険な海象を回避できている。なお図18に示すように、1週間（8月3日~8月9日）の風車の積算発電電力量は約330万kwh、台風回避用に消費したスラストの積算電力量は約64万kwh、すなわちスラストの消費電力量は風車の発電電力量の19.2%である。

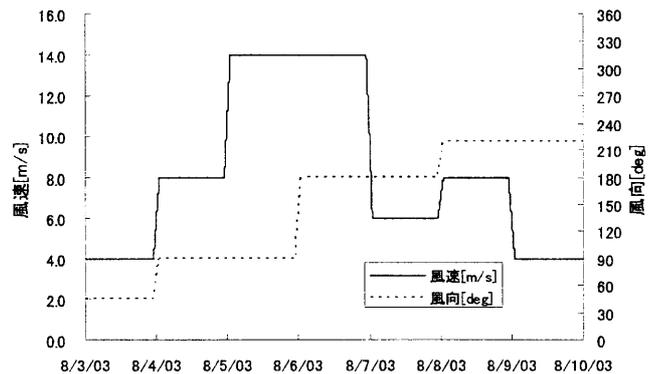


Fig.16 Wind speed and wind direction that the wind farm met

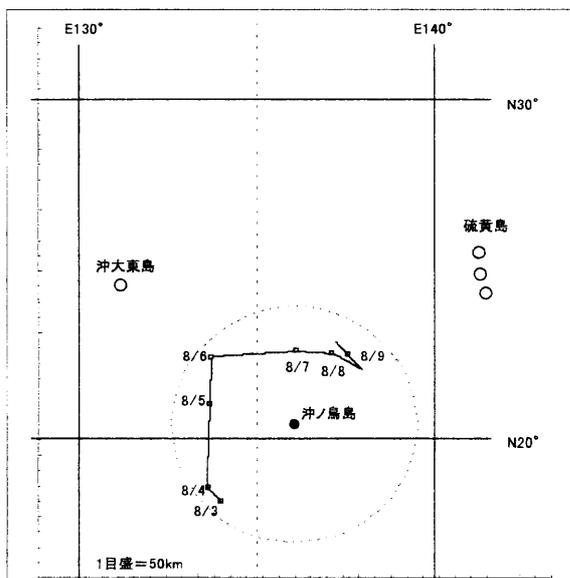


Fig. 15 Trajectory of the wind farm

多数のシミュレーションの結果、スラストに関しては定格出力 4, 200kW×6 基の装備によって最大 7~8 ノットの退避速力が得られること、本浮体の位置保持性能に関しては、通常の稼動条件下において、帆のみを推進力として風に流されずに一定の海域内において運用可能であること、常に風況の良い海域を狙って移動することにより高い設備利用率が期待できること、また事前に荒天を予測することにより、帆とスラストによって安全に荒天を回避できる見通しを得た。

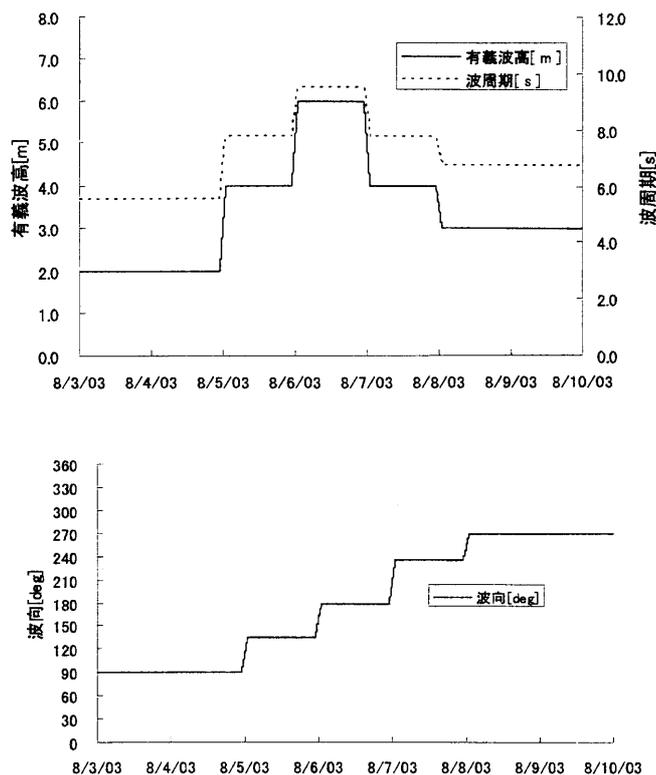


Fig.17 Sea conditions that the wind farm met

3.4 100年供用と運用

経済性および環境負荷低減の観点から長期間の耐用と供用が要求されることは言うまでもない。一方で構造物、機械、装置類については経年劣化、摩耗、衰耗は避けられない宿命であり、長期の供用にはその対策が必要である。機械、装置類の維持補修については現状における実績を考慮し、5年毎に摩耗部品等の交換、20年毎の装置全体の換装することを基本に計画を立てている。浮体構造については繰り返し応力による疲労亀裂と腐食の問題があるが、このうち疲労に関しては疲労限界以下の応力を考慮した構造設計により対処する。腐食に関しては電気防食と塗装によるものとし、5年に一度母港に帰り、定期検査を行い、さらに上架して付着した海洋生物の除去と防汚塗料を含めた塗装の塗り直しすることを考えている。防食のみを考える場合は上架せずに稼働しながら対処できるが、移動式浮体の推進抵抗を増加させる海洋生物の除去が必要を考え、上架することを考えている。上架の方法としては、長さ100m程度の潜水バージ型ドック複数個を使い、一斉に浮上させる等の方法を考えている。今後の付着物の影響の評価次第では、上架装置の省略も考えられ、5年毎から20年毎の母港帰港への変更により、大幅な経費削減、効率アップも考えられる。

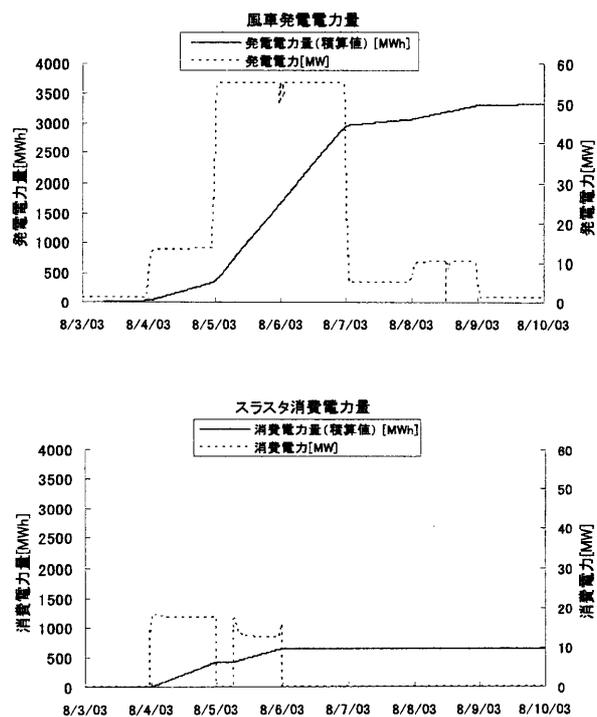


Fig.18 Generated power by wind turbines and spent power by thrusters

4. 非係留超大型浮体式風力発電システムの排他的経済水域における大規模展開⁴⁾

2002年度の日本の総発電量は、 9.45×10^{11} kWhと言われており、この内、18%を占める石炭火力発電に匹敵する発電量を風力発電で賄い、陸上に供給することを考える。現時点で実現が視野に入っている大型風車として5MW級の風車を取り上げる。1基の年間発電量は、洋上の風況が陸上に比べて良いことを考慮して設備利用率を約40%とすれば、 $約1.69 \times 10^7$ kWh/年となる。これに運用効率80%、蓄電ロス10%、浮体施設の位置保持等に要するエネルギー10%を見込むと、 1.69×10^7 kWh \times 0.8 \times 0.9 \times 0.9 = 1.1×10^7 kWhとなる。したがって、日本の石炭火力による発電量を洋上風力発電で賄うには、 9.45×10^{11} kWh \times 0.18 \div (1.1×10^7 kWh) = 約15,500基の5MW風車が必要となる。仮に超大型浮体上に11基の5MW風車を搭載できるとすると、約1,400ユニットの浮体を洋上に展開することになる。安全を見て10km四方(100 km²)に1ユニットを配置するとすると、100 km² \times 1400ユニット = 140,000 km²の面積が必要となる。日本の排他的経済水域 (EEZ) は、約4,050,000 km²なので、単純な計算ながら、約3.5%の水域を浮体式風力発電システムの海域として占めるだけで良いこととなる。さらに、水素

への変換効率を60%、水素を利用した燃料電池の発電効率の60%を見込むと、 $3.5\% / 0.6 / 0.6 = 9.7\%$ (この場合、1400 ユニット / $0.6 / 0.6 = 3,900$ ユニットとなる) の EEZ を利用することとなる。

日本のEEZの水深は殆どが数100m を越えている。非係留式であれば、海域を選ばず水深が1000m~3000m 級の深い海域でも設置可能であり大規模な展開ができる。

この非係留超大型浮体式風力発電システムの見落としてはならない副次的価値は、1,400あるいは3,900のユニットがEEZに配置され、洋上に情報ネットワークが形成される安全保障上の意味である。軍事のみならず資源管理、環境管理の広い意味で、この多数の大型浮体構造物群の安全保障上の価値は極めて大きいものがある。

5. CO₂ 削減効果の試算

このシステムの最終評価基準は環境負荷を最小化することであり、例えば実質生涯生成エネルギー当たりの生涯生成CO₂を最小化することであるが、その前段階としてCO₂排出量に着目し、石炭火力発電の代替として利用された場合のCO₂削減量を試算する。

最新鋭の石炭火力発電では効率40%が達成されており、石炭のCO₂ 排出原単位: 0.0906 kg- CO₂ /MJを考慮すると⁶⁾、供給電力量あたりのCO₂ 排出原単位は0.815 kg- CO₂/kWh となる。水素変換効率にもよるが、約1,400~3,900 の浮体をEEZ 内に展開することで、この石炭火力による発電量を風力発電でカバーできる。すなわち、石炭火力発電で排出していた

$$0.815 \text{ kg- CO}_2/\text{kWh} \times 9.45 \times 10^{11} \text{ kWh} \times 0.18 \\ = 1.386 \times 10^{11} \text{ kg- CO}_2$$

約1.4 億トン-CO₂/年のCO₂ 排出削減量が非係留超大型浮体式風力発電システムで達成出来る事となる。我が国の2002 年度CO₂ 排出量は約13 億トン/年であり、約10%のCO₂排出削減の可能性があるとこととなる。

6. 結言

地球温暖化問題の根本的な解決に向けて、すなわち循環型エネルギー系の実現のために我々が求めるべき基幹エネルギーとしての自然エネルギー利用の基本コンセプトとして、EEZ に展開する外洋利用の非係留超大型浮体式風力発電システムを提案し、位置保持性能および構造強度についての現在までの研究検討結果から判明した結論を以下に示す。

- (1) 循環型エネルギー系は自然エネルギーの基幹エネルギーとしての利用によってのみ成立する。

- (2) 経済性に加えて環境負荷を最小にしたエネルギーをめざすべきである。
 (3) 水素社会では外洋はエネルギーの宝庫である。
 (4) 帆走メガフロートは適度な風を求めて移動し、暴風を回避できる。
 (5) 3900 ユニットで日本の総発電量の18%を賄え、CO₂排出を約10%削減できる可能性がある。
 (6) 洋上に情報ネットワークが形成されることで、副次的に軍事のみならず資源管理、環境管理に有益である。

今後、さらなる水槽実験、構造解析、位置保持シミュレーションに基づく検討を重ねるとともに、環境負荷として実質生涯生成エネルギー当たりの生涯生成CO₂を算定し、このシステムの成立性の詳細が確認され、再生可能エネルギーによる基幹エネルギーの代替の可能性が検証されることが望まれる。

参考文献

- 植弘崇嗣：洋上風力発電を利用した水素製造技術開発，洋上風力発電フォーラム，海上技術安全研究所，2004
- K. Takagi, K. Yamamoto, M. Kondo, T. Funaki and Z. Kawasaki: A Concept of Very Large Mobile Energy Plant, Proc. of Techno-Ocean 2002, Kobe, Japan, 2002
- 橋本功二，熊谷直和，泉屋宏一：グローバル二酸化炭素リサイクル，洋上風力発電フォーラム，海上技術安全研究所，2004
- 井上憲一他：非係留超大型浮体による外洋利用大規模風力発電システムの検討，第18 回海洋工学シンポジウム，日本造船学会，2005
- 寺尾裕：波漂流力を受けない海洋構造物について，第13 回運動性能部会，2004
- 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン，環境省，2004