

浮体式風力発電の実現可能性に関する 総合的評価

COMPREHENSIVE EVALUATIONS ON FEASIBILITY OF FLOATING WIND POWER SYSTEM

矢後清和¹・大川豊²・宮島省吾³・中條俊樹⁴・石井健一⁵・高野宰⁶
Kiyokazu YAGO, Yutaka OHKAWA, Shogo MIYAJIMA, Toshiki CHUJO, Kenichi ISHII,
Osamu TAKANO

- ¹ 正会員 (独)海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)
² 工修 (独)海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)
³ 工博 (財) 日本造船技術センター 技術開発部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 2-1-2)
⁴ 工修 (財) 日本造船技術センター 技術開発部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 2-1-2)
⁵ 工博 古河電気工業(株) 環境・エネルギー研究所 (〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通6)
⁶ 工修 (株) 三井造船昭島研究所 技術統括部 (〒196-0012 東京都昭島市つつじが丘1-1-50)

This paper describes that an alternative fuel production system provided by offshore wind energy is technically and economically feasible. The following knowledge was acquired as a result of studying element technologies aiming at an initial design of an alternative fuel production system using floating wind power. (1) The sea area where the installation of the wind farm was promising was clarified offshore in Japan. And the energy potential was estimated. The amount of the electric power is three times or more the amount that aims by 2010 (2) The box-girder type floating structure mounted two 5MW wind turbines was proposed as a concept. And it was clarified that the structural safety can be kept in a offshore storm set as a design condition. (3) The conceptual design of a new wind turbine which lowered the center of gravity and is suitable for floating body was carried out, and the effect of inertia force was confirmed. (4) EPR of the system was shown to be about 5 or 6 in the evaluation of the energy balance. (5) It was clarified that the maintenance cost plays an important role in the economic evaluation.

Key Words : Wind Power, Deep Water, Floating, Methane, Hydrogen, Alternative Energy

1. 緒言

近年, 地球温暖化や石油資源の衰耗などの問題が大きく取り上げられ, 再生可能エネルギーの利用可能性に関する研究も活発化している。風力, 太陽光といった再生可能エネルギーは, 一般にエネルギー密度が低く広大な設置面積を必要とするため, 効果のある量を求めるには, 広大な洋上への展開が不可欠である。著者等は, 浮体式風力発電による電力で海水を電気分解・改質し, 輸送用燃料としての水素およびメタンを生成するシステムを考え, 個別要素技術の成立性について検証してきた。今回は, 各々の要素技術を集約し, システムとしての有効性を, 技術, 経済性, エネルギー収支, 環境改善効果の面から評価するものである。また, 評価の前提となる洋上風の性質や予測精度は重要項目であるが, 沖合に関するデータが乏しいのも事実である。本論文では, 一例として, 相模湾中央部に浮かべた大型ブイ上で観測された風況データと付近の陸域でのデータを比較して, 従来言われている風力発電に関わる各種知見が妥当かを考察する。

2. コンセプトと設計条件

(1) コンセプト

基本コンセプトの概要を図-1に示す。浮体基盤上に大型風力発電機を設置し, 既存電力系統に接続して直接電力として利用する他, 得られた電力で海水を電気分解して水素を製造し, さらにCO₂と反応させメタンに改質して供給する案を提案している。

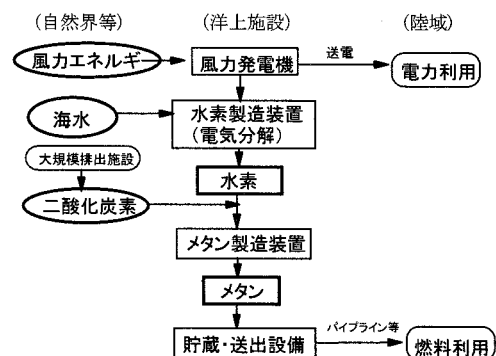


図-1 基本コンセプトの概要

(2) 設計条件

表-1に本研究で設定した設計条件を示す。

設置海域を、沿岸から10～50km、水深100～200mと想定する。波浪条件は、再現期間60年（浮体供用期間30年）として、基本的に海上技術安全研究所の気象海象データベース「北太平洋の風と波」を用いて設定した。

風に関する設計条件は、風力発電機の稼働条件によっても変化するため、定格風速時、カットアウト風速時について考慮した。風速は、一般的な陸上風力発電機の設定値を用い、各々の風速条件時の波浪条件はS-M-B法による波浪予測曲線を用いて求めた。この際、吹送時間は12時間と仮定した。

流速条件は周辺海域の観測資料等に基き決定した。対象海域は黒潮の影響を受ける海域が含まれ、最大4ノット近くになるが、係留への負担を避けるため強流域を除く事とし、2ノットを設計条件とした。

表-1 設計条件

条件	暴風時	発電稼働時	
		定格時	カットアウト前
波	$T_{1/3}$	15sec	7.2sec
	$H_{1/3}$	12.5m	3.0m
風速	50m/s	14m/s	25m/s
流速	2.0knot		
水深	100～200m		

(3) 風力発電ユニット

本研究では、図-2および表-2に示すような、矩形断面を持つBOXガーダを格子状に配置した構造の基盤浮体上に2機の5MW風力発電装置を搭載した施設を考える。浮体幅、断面寸法の変化により動揺特性を設置海域の波浪特性に応じて最適化することができ、シンプルな構造のため経済性に優れると考えられる。

係留は合成繊維索によるトート係留である。索は公称直径200mm程度のテトロン系ロープを想定し、14条の索を図-3のように配置する。近年、海底石油掘削施設で採用され、大水深でも船上から投入設置可能なVertical Loading Anchorと組み合わせ、施工が容易で経済性に優れる工法として注目されている。

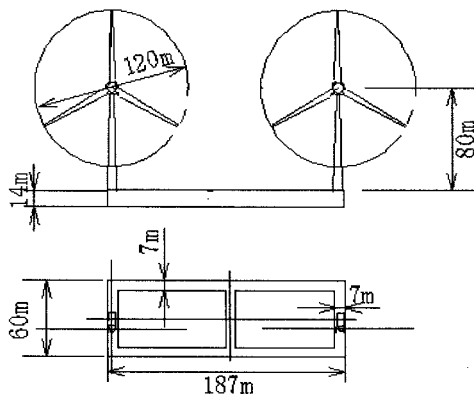


図-2 浮体式風力発電ユニットの概要

表-2 浮体式風力発電ユニットの主要目

形式	BOXガーダ格子構造	
浮体	長さ	187m
	幅	60m
	型深	14m
	喫水	4m
	排水容積	14,336m ³
風力発電装置	定格出力	5MW
	風車直径	120m
	ハブ高さ(デッキ上)	80m
	カットイン風速	4m/s
	定格風速	14m/s
	カットアウト風速	25m/s
	重量	タワー除 3,185kN タワー含 5,635kN

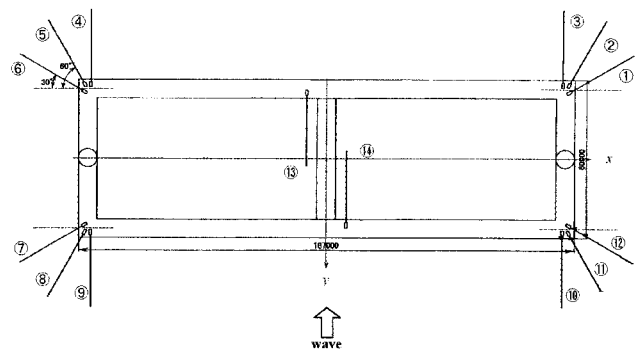


図-3 係留索の配置

(4) ウィンドファームの構成

図-4は、ウィンドファーム構想の一例である。送電またはパイプラインによるエネルギー輸送コストを、一般的に用いられている現状の機器設備を考えて試算した結果、200MWを1単位とする場合が経済効率が良いという結果を得た。この結果に基く配置構想である。

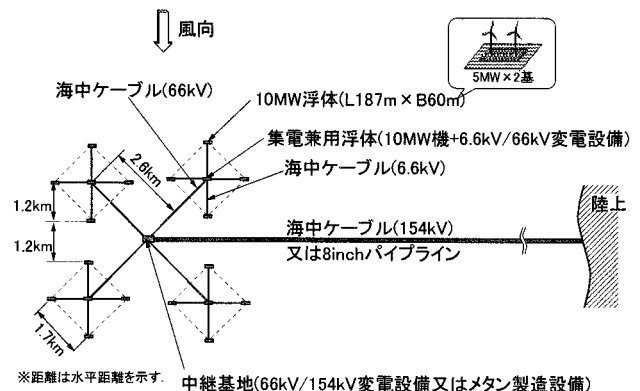


図-4 ウィンドファームの構成

(5) 燃料製造システムと製造能力

燃料製造システムの概要を図-5に示す。電気分解により海水から水素を作り、さらにCO₂と反応させメタンを得る。海水の電気分解は直接電解と淡水化して行う2方法がある。ここでは総合効率の高い淡水化法を想定する。また、メタン生成の際発生する水と熱は回収して一連のシステム中で再利用する。

図中には、各段階での変換効率と生成量等を記す。前提となる風車の設備利用率（年間発電量/風車能力100%稼働での年間発電量）は40%と仮定した。

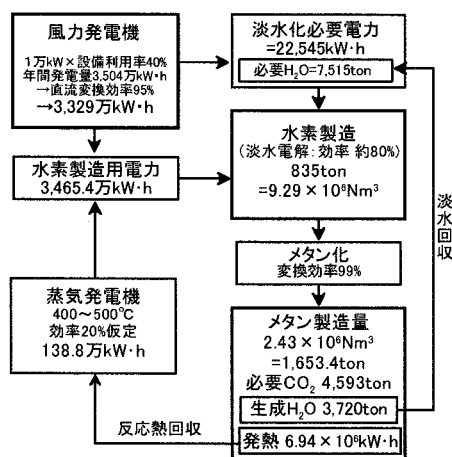


図-5 燃料製造システムの概要

3. 実現可能性評価

(1) 技術的成立性の評価

a) 動揺および傾斜

動揺および傾斜量の増加は風力発電機の発電効率の低下につながり、発電効率を95%以上に維持するには動揺+傾斜角を10°以内とする必要がある。¹⁾

表-3に風車基部における動揺量を示す。各種条件で計算した結果から最大の有義値を抽出したものである。発電効率に関しては平均的要素が高いため有義値を用いて評価している。また、横揺は粘性減衰の影響が顕著であり線形計算との差があるため、実験²⁾の応答関数を用いて補正を行っている。

浮体の傾斜は重心高により変化し、風力発電機の重量に依存する。カットアウト直前の風による転倒モーメントが作用した時の傾斜角は浮体幅が60m程度あれば高重心であっても1°以内に収まる¹⁾。

以上の結果から動揺、傾斜量は許容値を満たす。

表-3 風車基部における動揺の最大有義値

波浪条件	横揺	縦揺	上下揺
定格風速時 (H=3.0m, T=7.2s)	3.5°	0.27°	1.0m
カットアウト風速時 (H=6.8m, T=9.8s)	7.9°	0.83°	3.1m
暴風時 (H=12.5m, T=15.0s)	8.5°	1.92°	7.0m

b) 構造強度

本浮体は、応力集中を考慮すべき接合部を有する構造のため、許容公称応力を98N/mm²と定め、初期算定を行った。浮体を構成するBOXガーダの厚さを変化させ最大応力を求めた。計算は浮体を弾性体として、ポテンシャル理論による流体力を作用させた。応力の評価には1/1000期待値を用いた。許容値を満たすガーダ厚は14mとなった。応力が大きくなる浮体中央部をFEM設計ツールで詳細解析し、実設計可能範囲内の局部応力に収められる事を確認した。

次に、風車基部の構造強度について検討した。表-4は基部動揺加速度の1/1000期待値である。この値を慣性力として風車構造に加えた結果、タワー基部の板厚は約80mmとなった。この算定に疲労強度は考慮しておらず、さらに重厚な構造となる可能性もあり、経済的に不利な要因となる。そのためトラス式など専用のタワー形式の検討が必要という結論に至っている。慣性力算定には既存陸上機の質量データを参考に用いたが、ナセル部の重量の軽減がタワー構造軽減に大きな効果がある事がわかった。

油圧駆動式風車³⁾により約20%のナセル内重量低減が可能な事がわかっているが、この効果によりタワー基部から2/3高さまでの板厚はほぼ半減できることがわかった。図-6にナセル軽量化に伴う板厚分布の変化を比較して示す。

表-4 風車基部加速度の1/1000期待値

波浪条件	上下揺加速度 [m/s ²]	横揺角加速度 [deg/s ²]
定格風速時 (H=3.0m, T=7.2s)	1.587	4.653
カットアウト風速時 (H=6.8m, T=9.8s)	2.225	8.851
暴風時 (H=12.5m, T=15.0s)	2.466	8.285

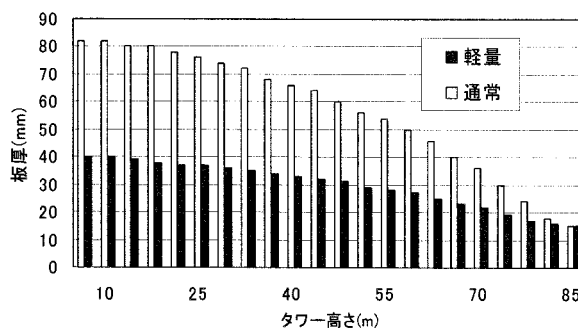


図-6 ナセル軽量化によるタワー板厚変化

c) 係留

浮体に作用する荷重を算定した結果（風6,742kN、定常波漂流4,106kN、流れ980kN、変動張力735kN）を、図-3の配置の係留索に作用させるとφ160mm×831m長の合成繊維索が適合するという結果になった。ここでは最大荷重に対する安全率=3、初期張力=破断荷重の5%とした。当初想定したφ210mm以内×

1,000m長以内という目標を満たす結果となった。疲労寿命に関しては、合成繊維索の疲労試験を行いAPIなどで提案されている疲労設計曲線をほぼ追認できる結果が得られている。この結果はワイヤーロープより良い疲労特性である事を意味し、供用年数30年を充分クリアできる。

アンカーは平板アンカーを想定する。把注力の算定法は関田らの研究⁵⁾で提案されている。それによれば1条あたり14m²以上の支持面を持つ平板アンカーが適合する。

(2) 経済性評価

a) 設置候補海域と賦存量推定

設置候補海域の選定は、長井の洋上風況予測に水深、沿岸距離を考慮して抽出する¹⁾。水深は表-1に従い、距離100km以内として風車の設備利用率40%以上が見込める4海域(北海道西岸、東北日本海沖、房総沖、伊豆諸島沖)を選んだ。総面積は15,198km²となる。浮体間隔を1.2km×1.2km(風車直径の10倍)として、5%面積に展開した時の発電量は2,015,370GWhとなる。2010年陸上導入目標3,000MWで得られる電力(平均設備利用率25%として6,570GWh)の約3倍の量(陸域9,000MW相当)になる。

将来の大規模導入シナリオの1つとして、脱温暖化2050プロジェクトが提案する水素・新エネルギー中心ケースの中で、風力発電導入量は35,000MWと位置付けられている。この場合には、選定海域5%面積の約4倍の約20%面積を必要とする。

b) 浮体ユニットの建造費

浮体ユニットの建造費は、JOIAの研究⁴⁾で用いられた算定方法を基本に、必要箇所を修正して用いる。表-5にJOIAが設定した算定基準を示す。ここで30年供用期間を考えたライフサイクルコストを試算する。風力発電機の耐用年数は15～17年程度とされているので、期間中に一度更新するものとする。係留に関しては合成繊維索と平板アンカーの単価を新たに調査して適用した。浮体ユニット1基についての算定結果を表-6に示す。なお、電力輸送、燃料製造装置等はここでの算定に含めず、別途考慮する。

表-5 JOIAの経済性算定基準

項目	算定基準
設計費	3,000万円/1式
浮体建造費	20万円/鋼材重量t
防食費	150万円/鋼材重量の3%t
機装関係費	64万円/排水量の1%t
モニタリング機器等	3,000万円/1式
係留機材(鉄鎖相当)	40万円/t
アンカー(コンクリート相当)	2.5万円/t
曳航設置費	6,000万円/1式
維持管理費	建造費の3%/年
金利	2%/年
償却期間	30年

表-6 浮体ユニットの建造費

項目	仕様	数量	単位	単価 (千円)	価格 (千円)
風車	風車	4	基	500,000	2,000,000
	タワー	2	基	70,000	140,000
浮体	鋼材重量	4,600	ton	200	920,000
	諸設備	1	式	80,000	80,000
防食	30年耐用	47,00	m ²	4	188,000
係留	アカー	14	基	600	8,400
	ライン	14	本	40,000	560,000
	スッパ	14	台	10,000	140,000
曳航		1	式	30,000	30,000
施工	係留設置	1	式	339,700	339,700
	浮体設置	1	式	10,000	10,000
	完成工事	1	式	5,000	5,000
	On-site Cost (10%)				35,470
設計・現地調査					40,000
合 計					4,496,570

c) 単独浮体の電力コスト試算

b)の結果を用いて電力コストを試算する。償却期間は30年、金利は建造費の2%/年、維持費はJOIAの基準に則って建造費の3%/年とする。

単年度費用＝45億円(建設費)

×(1/30年+0.02金利)＝2.398億円

維持費＝45億円×0.03(建設費3%)＝1.349億円

年間必要費用合計＝3.747億円

浮体ユニット1隻(5MW×2基)の年間取得電力は、設備利用率40%として、3504万kWhとなる。

これらから、電力コストは以下ようになる。

電力コスト＝年間費用/年間取得電力量
＝3.747億円/3504万kWh＝10.7円/kWh

JOIAの維持費3%は数10～数百kWクラスの陸上風力発電設備の報告書等を参考に概略決定したものであり精度に疑問が残る。超大型設備に対するスケール効果も考慮されておらず、絶対額を見ると高額に思える。

そこで、年間維持費を約1～3%範囲で変化させて電力コストを算出してみると次のようになる。

維持費1.35億円/年(3.0%)→¥10.7/kWh

維持費1.10億円/年(2.4%)→¥10.0/kWh

維持費0.60億円/年(1.3%)→¥8.6/kWh

維持費0.40億円/年(0.9%)→¥8.0/kWh

将来の技術進展を見込み維持費を予想すると、

風車保守1,000万円/年，同交換費積立100万円/年，運航費500万円/年程度が考えられ，重大事故発生による確率的増分などを考慮しても年間維持費4,000万円以内達成の可能性はあると考える．いずれにしても維持費がライフサイクルコストにとって重要で，初期設計の段階で保守管理シナリオを想定したライフサイクルメンテナンス法を考える必要がある．これは今後の課題としたい．

d) 電力輸送を考慮したウィンドファームの経済性

電力輸送はウィンドファームで想定する．よって，c)のコスト算定に電力輸送費用は含ませていない．

表-7は図-4の200MWウィンドファームについて，送電線路建設費の離岸距離による変化を示している．距離20kmで浮体ユニット建設費の約10%となる．浮体および陸域への立上げ部の保守が必要であるが，埋設される主幹路の劣化は小さく浮体ユニットよりも保守費は小さいと考えられる．仮に全体維持費3%とすると発電コストは単独10.7円に対し距離10kmで11.5円，30kmで11.9円，50kmで12.2円となる．

表-7 離岸距離と送電路建設費

	離岸距離	設備容量200MW ウィンドファーム
建設費	10 km	75.8億円
	20 km	93.8
	30 km	112.3
	40 km	139.2
	50 km	157.7
建設費 単価	10 km	3.79万円/kW
	20 km	4.69
	30 km	5.62
	40 km	6.96
	50 km	7.89

(3) エネルギー収支および環境改善評価

a) エネルギー取得能力

浮体ユニット1隻でのエネルギー取得量は以下のようになる．電力は設備利用率40%として，燃料製造量は図-5の流れ図に従って算定している．

電力：3,504万kWh/年
水素：835tf/年
メタン：1,653tf/年

b) エネルギー収支

エネルギー収支の評価は以下の定義に従って行う．

$$[\text{エネルギー収支比}] = \frac{[\text{供用期間内取得エネルギー}]}{[\text{設備製造エネルギー}] + [\text{運用エネルギー}]}$$

$$[\text{エネルギー・ペイバック・タイム}] = \frac{[\text{設備製造エネルギー}]}{[\text{年間取得エネルギー}] - [\text{年間運用エネルギー}]}$$

製造時および供用期間中のエネルギー消費量は産業連関表により求めたエネルギー消費原単位を用いて算出した．エネルギー取得量は図-5に従い求める．詳細は参考文献⁵⁾に譲り，ここでは表-8，表-9に結果のみを示す．

表-8 単独浮体のエネルギー収支

利用形態	エネルギー収支比	ペイバックタイム(年)
電力	8.47	3.54
水素	7.89	3.80
メタン	5.36	5.60

表-9 ウィンドファームのエネルギー収支

利用形態	エネルギー収支比	ペイバックタイム(年)
電力	6.9~5.2	4.4~5.8
水素	6.6	4.5~4.6
メタン	4.8~4.7	6.3~6.4

c) CO₂排出量と削減効果

LCA (Life Cycle Assessment) により供用期間中の環境影響を評価する．ここでは産業連関表⁶⁾のCO₂排出原単位に基づき，浮体ユニット1基の供用期間中CO₂量を求める．供用期間30年，風車発電部1回交換を考慮する．エネルギー輸送は考慮しない．発電のみ，水素製造迄，メタン製造迄の場合に分けて試算した結果を表-10に示す．

表-10 浮体ユニット1基のCO₂排出量 (tf-CO₂)

利用エネルギー形態	電力	水素	メタン
浮体・係留系	13,894	13,894	13,894
風車・タワー	5,923	5,923	5,923
制御系	58	58	58
生産施設	プラント	232	923
	タンク	62	2,151
小計	19,875	20,169	22,949

環境改善効果としての削減効果を考える．風力発電は，運用時に化石燃料をほとんど使用しないため，建造時に排出する量のみが主体となる．一方，火力など他の発電で排出したと想定された分が削減されるという考え方が出来る．この考え方に基づいて，環境省から2006年に換算係数が提案されており，電力1kWh当たり0.555kgf-CO₂となっている．また，メタン製造時にはCO₂を消費する．これらを纏めると，年間の削減または消費量は以下のようになる．

年間発電量 3,504万kWh/年=19,477 tf-CO₂/年
メタン製造時CO₂消費量/年= 4,593 tf-CO₂/年
合計 24,070 tf-CO₂/年

製造時に排出するCO₂は22,949tf-CO₂であるので，本研究の風力発電で回収する期間は0.95~1.18年となり，比較的短い期間であることがわかる．

4. 観測に基づく洋上風の特性格評価例

風力発電の事業成立性に影響を及ぼす第1の要因は設置点の風況であろう．我が国の沖合洋上風の性

質について観測に基づいた評価例は少ない。著者等は相模湾中央部の大型ブイ上において観測する機会を得たので観測結果に基づき、これまで言われている洋上風の性質の妥当性について考察を試みる。

観測地点の概略を図-7に示す。城ヶ島沖約20kmの海洋肥沃化装置「拓海」と同10kmの「城ヶ島沖浮魚礁ブイ」が観測点である。

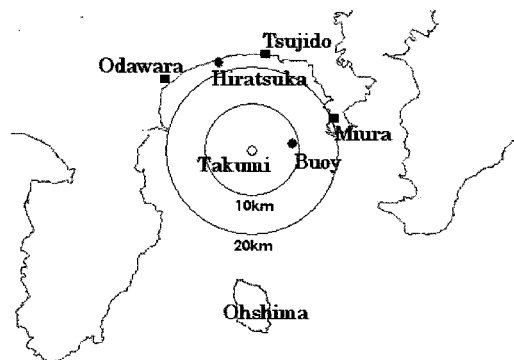


図-7 相模湾周辺の風況観測地点

「拓海」は城ヶ島、初島、平塚、伊豆大島のほぼ中間地点に位置し、それぞれ約20kmの距離にある。経済性評価では離岸距離10～20kmが送電コスト面で有利であることを示したが、ほぼその距離と符合する。

周囲には沿岸観測点として、平塚、三浦、辻堂等がある。平塚は沿岸約1kmに設置された洋上観測塔上である。離岸距離影響評価等の目的で引用する。

なお、拓海は通年観測でないが時系列データが得られており、城ヶ島沖ブイは通年観測された平均風速があるが時系列データがないという特徴がある。

図-8は拓海と城ヶ島沖ブイの月間設備利用率の比較であるが良い相関を示している。平均風速の相関係数は拓海91%，平塚73%，辻堂67%である。離岸距離10km以上では地形影響が小さく一定に近づくと考えられる。また、年間設備利用率は、浮魚礁39%，平塚23%，辻堂9%，三浦8%であった。周囲約50km付近を丹沢、箱根、伊豆、三浦半島、大島などの小高い山地に囲まれた海域であるが、高い設備利用率が得られている。図-9は、拓海の時系列データから求めた乱れ強度TI（標準偏差/10分平均風速）である。IEC基準値を比較して示しているが、これを下回る結果が得られ、極めて乱れが小さい様子がわかる。

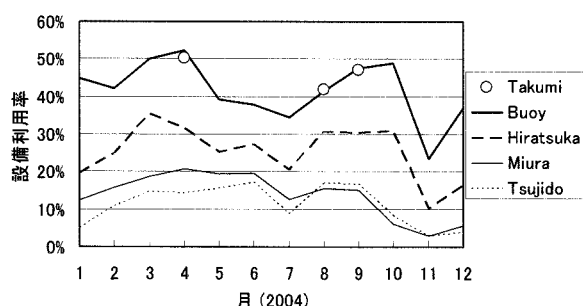


図-8 各観測点の推定設備利用率の変化

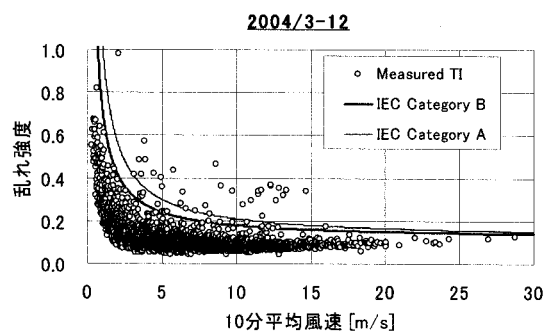


図-9 洋上風の乱れ強度

5. 結 言

格子構造形式の浮体式風力発電ユニットについて、技術安全性、経済性、環境性の面から総合的な評価を行った。得られた主な知見を以下にまとめる。

- 1) 日本近海での設置有望海域を明らかにし、実現可能な賦存量を推定した。
- 2) 5MW風車2基搭載可能な基盤浮体を提案し、暴風時の設計条件下での成立性を明らかにした。
- 3) エネルギー収支比5～6を達成でき、CO₂排出も1.8年で削減に転ずることが確認できた。
- 4) 電力利用では離岸距離10～20kmで既存発電並のコスト達成の可能性がある事を示した。
- 5) 相模湾沖中央部での風観測結果から、洋上風の性質、沿岸部との設備利用率の差異を示した。

謝辞：本研究は、鉄道・運輸機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施した。本研究の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 矢後清和，大川豊，中條俊樹，西村洋佑，日根野元裕，高野宰：浮体式風力発電による代替燃料創出システムの研究，海洋開発論文集，VOL. 21，2005
- 2) 矢後清和，大川豊，日根野元裕，高野宰，砂原俊之：浮体式風力発電用基盤浮体に関する模型実験，海洋開発論文集，VOL. 22，2006
- 3) 飛永育男，山田義則，大川豊，矢後清和：浮体式風力発電による代替燃料創出に関する研究－油圧駆動式風力発電装置の検討－，第26回風力エネルギー利用シンポジウム，2004
- 4) (社)日本機械工業連合会，(社)日本海洋開発産業協会(JOIA)：平成14年度 浮遊式風力発電基地の自然エネルギーの最適輸送技術に関する調査研究報告書，2003
- 5) 鉄道・運輸機構：15年度採択課題研究成果報告書(2003-01 浮体式風力発電による代替燃料創出に資する研究)，2006
- 6) 日本建築学会：建物のLCA指針－環境適合設計・環境ラベリング・環境会計への応用に向けて，2003