

12 洋上風力発電による輸送用代替燃料製造システム

海洋開発研究領域 * 矢後 清和、大川 豊

1. はじめに

地球温暖化を始めとする環境問題の顕在化や化石燃料の衰耗が叫ばれる中、エネルギー問題や環境問題に対応した新たな社会システムへの変革が求められている。特に、化石燃料からの脱却は、中期的に見て緊急を要する課題であり、これに代わるエネルギー確保を考え始めねばならない時期に来ている。現代文明は、高い密度を持つ集中型エネルギーに依存していると見ることが出来る。今後、集中型に依存するのであれば、その代表格は原子力になると思われる。しかし、安全性や核廃棄物処理の問題を解決する方法が確立されているとは言えず、世界的にも、あまり過大な依存は困難だろうと見られている。自然エネルギーは、環境負荷が小さく、再生可能であるため注目が集まっているが、これはエネルギー密度が低いという短所があり、自然まかせの不安定なエネルギー源でもある。一般的には大規模な集中型よりは分散型システムとしての利用に向くと考えられている。近年、欧州では大規模な風力発電プラントの商用運転が行われてきており、風況の良いドイツ北部などでは、使用発電量の約 10%を賄う地域もあるといわれる。我が国の導入目標は、2010年300万kWであるが、2004年3月末で67.7万kWに過ぎず、既に適地の減少も指摘されている。風力発電で我が国の全ての電力量を賄うには四国または九州と同等の面積が必要といわれる。将来、電力消費量の10～20%を風力が賄うことを考えれば、陸上での立地が困難である事は容易に推測できる。当然、海上での展開を考えねばならず、この傾向は世界的に共通の課題である。欧州は、沿岸から20kmにも及ぶ遠浅海域があり、着定式風車が多数建設され始めている。これに比べ、我が国沿岸は急峻な海底地形を有するため、着定式の展開は多く望めない。よって、大規模開発を進めるには浮体式工法の技術基盤を確立しておく必要がある。

本研究では、大型風力発電装置を搭載した浮体式風力発電装置を提案し、技術的成立性を主体に検証している。また、浮体内の空間を活かし海水の直接電解により水素を製造し、さらにメタンに改質する装置を搭載したシステムを考えている。これにより、風力エネルギーの不安定さが解消でき、既存のインフラを有効に利用できることから、次世代エネルギー供給システムとして提案している。このシステムの燃料製造能力と、その価値についても試算例を示す。

2. システムのコンセプト

本研究における全体コンセプトの概要を図-1に示す。本研究では、不安定な風力から得た電力を化学燃料に変換し蓄積し、既存インフラに連繫するというコンセプトを考える。

風力発電で得られた電力は、海水を電気分解して水素を製造することに使う。海水の電気分解では通常塩素が発生する。真水であれば問題ないが、電極に大量の白金を使用するため大規模な開発ではその供給量が問題となる。また、陸上の真水は地球上の水の0.65%に過ぎず大量に使用出来ない。東北大学の橋本らは海水の直接電解でも塩素発生のない水素製造方法¹⁾の開発に成功している。この技術を使う。

次世代エネルギーとして水素を核とする社会が標榜されている。燃料電池やそれを搭載した自動車の開発も進められているが、純水素を使用するシステムは運搬・貯蔵の面で解決すべき課題も多く、基盤技術の完成にかかる時間が明確でない。

本研究では、既存のインフラを活用する即応性のある基盤技術を提案する事が2030年頃までを見通して現実的と考えた。そのため、得られた水素とCO₂を反応させメタンに改質し貯蔵する。前出の橋本等は高速で高効率のメタン改質用触媒も開発しており応用できる。メタンは天然ガスの主成分であり、貯蔵・輸送技術および供給体制が完備されている。また、CO₂やNO_xの排出量が少ないため、自動車用燃料として、近年、急速な普及を見せている。CO₂は火力発電などの大規模排出施設から回収し、専用船舶またはパイプラインで輸送する。これによりCO₂を媒介とした循環システムが形成される。

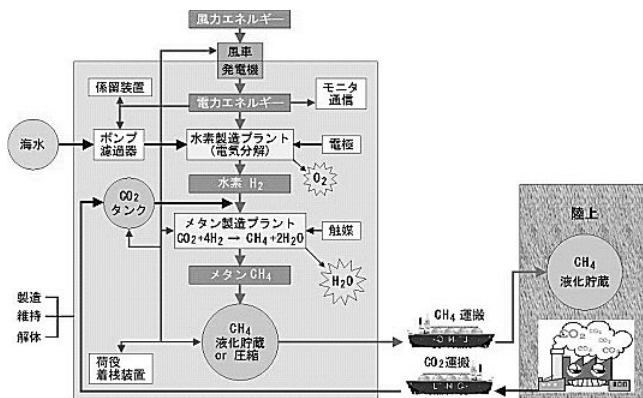


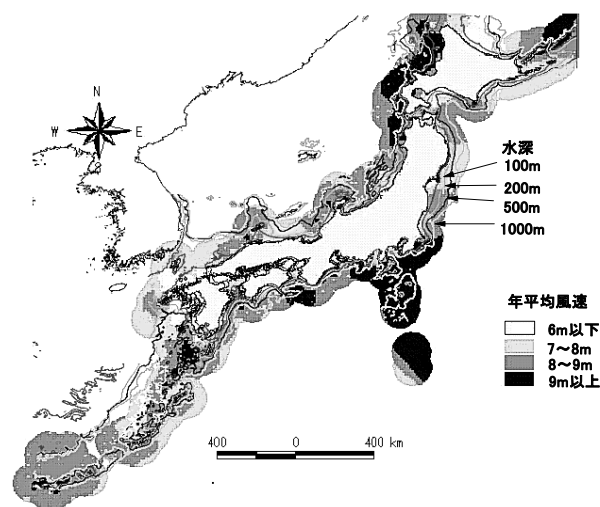
図-1 全体システムのコンセプト

3. 我が国近海の適地と賦存量の推定

我が国近海の風力エネルギーの推定に関してはいくつかの報告があるが、ここではSSM/I衛星と沿岸の観測データから推定された長井の結果²⁾をベースにする。

図－2は長井の結果に沿岸100kmまでの等深線図を重ねたものである。さらに水深100～200m、風力発電機の設備利用率40%という条件を与え、候補地を抽出することにする。但し、海域の波浪予測値が存在することとする。その結果、北海道西岸沖、東北地方日本海沖、房総沖、伊豆沖、沖縄および南西諸島海域が有望海域となる。大型台風の来襲頻度を考慮して伊豆より北を対象に、設置面積、浮体ユニット基数、発電量を推算すると表－1のようになる。風車は5MWとし、風車の設置は風車直径をDとして、10D×10Dの間隔とした。発電量は、年間平均風速から出現確率をレイリー分布で仮定し、5MWのパワーカーブを用いて算出した。風速の高度分布はべき指数=1/10として算定した。表中には、現実性を考慮して全面積の5%を利用の場合を併記した。

陸域2010年度導入目標の3,000MWに陸上の設備利用率を平均20%と仮定して年間発電量を試算すると52.5億kW・hとなる。表－1の結果は、その約3倍をクリアしており、沖合設置の有利さが理解できる。



図－2 日本近海の風況と等深線図

表－1 有望海域面積の賦存量

海域	面積(5%面積) km ²	風車基数 (5MW風車)	発電量 億kW・h/ 年
北海道西岸沖	7,618(381)	520	93.3
東北・日本海沖	2,092(105)	140	23.2
房総沖	1,705(85)	110	20.3
伊豆沖	1,283(64)	80	15.7
合計	12,698(635)	850	152.5

4. 基盤浮体の開発

4. 1 設計条件

表－2に設計条件をまとめて示す。係留を前提に水深は100～200mとした。

現在の陸上用風力発電装置の耐用年数は17年前後と言われているので、風車交換1回を見込み、浮体供用期間を30年と考え、自然環境条件に関する再現期間を60年とした。

風速は、JOIAの設定値³⁾等を参考に10分平均最大風速を50m/s、瞬間最大80m/sとした。

波浪条件は、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」を使用し、波高・波長頻度を基に統計解析を行い設定した。

通常、浮体設計には暴風時の条件を与え安全性を評価するのが一般的であるが、風力発電では発電時の状態によりいくつかの風速条件が与えられる。一定の風速になると回転を始め（カットイン風速：3～4m/s）、定格に達する（定格風速13～14m/s）と以後出力を一定に保つ制御が行われ、風速25m/s以上では安全のため稼働を停止する（カットアウト風速）。動揺による発電性能低下などの機能要件を評価する必要があるため、定格風速とカットアウト直前の風速に見合う波浪条件も与える事にした。すなわち、S-M-B法による波浪予測曲線を用い、吹続時間を12時間と仮定して、風の条件から波浪条件を設定した。

流れの設計条件は、周辺海域の観測資料に基づいたが、候補地の中には、黒潮の影響を受ける海域もあり最大流速は約4ノットになる。しかし、係留への負担が大きくなるため、直接の影響ある区域を避けるものとして2ノットを与えた。

表－2 設計条件

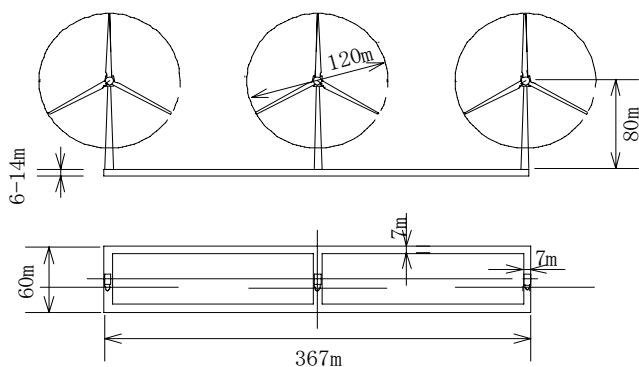
条件		暴風時	発電稼働時	
			定格時	カットアウト前
波	T _{H1/3}	15sec	7.2sec	9.8sec
	H _{1/3}	12.5m	3.0m	6.8m
風速		50m/s (瞬間80m/s)	14m/s	25m/s
流速		2.0knot		
水深		100～200m		

4. 2 基盤浮体の開発

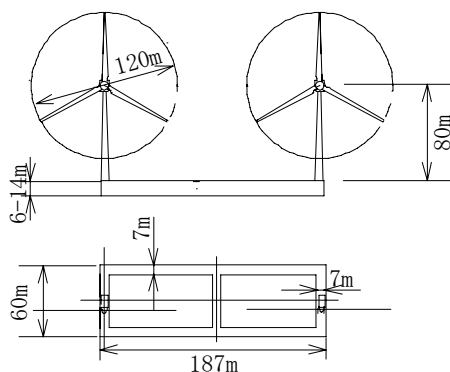
(1) 初期型浮体と改良型浮体

基盤浮体として、BOX ガーダを格子型構造に組んだ構造に、複数の風車を搭載した形式を提案する。建造が簡単で建造コストに優れる他、曳航設置や風車を含むメンテナンスが容易という利点がある。

初期型として図－3に示すような3基の5MW風車を搭載したモデルを検討対象とした。このモデルは、暴風時の波浪条件で強度要件を満足しないことがわかり、図－4に示す改良型に変更された。改良型は、浮体長を約半分にして、2基の風車を搭載したものになっている。それらの主要目を表－3に示す。



図－3 初期型モデル



図－4 改良型モデル。

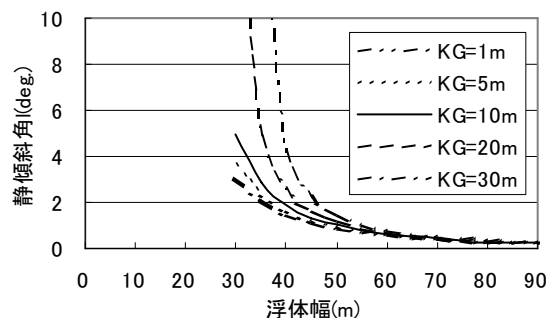
表－3 浮体式風力発電ユニットの主要目

形式	BOX ガード格子構造		
浮体	モデル	初期型	改良型
	長さ	367m	187m
	幅	60m	60m
	型深	6-14m	14m
	喫水	2-4m	4m
	排水容積	12,208-24,416m ³	14,336m ³
	搭載風車数	3	2
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	
	定格風速	14m/s	
	カットアウト風速	25m/s	
	重量	タワー除	325ton (3,185kN)
		タワー含	575ton (5,635kN)

(2) 機能性要件の検討

風力発電装置は、風の流入角により効率が変化する。風洞試験の結果⁴⁾によれば、発電出力は流入角（傾斜角）の余弦の3乗に比例して低下することがわかっており、効率を95%以内にするには10°、回転軸の初期取付角を考慮して、許容傾斜角は5°程度とされている。これを目安として評価する。

5MW風車の発電時の最大風荷重がJOIAの研究³⁾で推定されている。この値から転倒モーメントを求め、改良型浮体の静的傾斜角を計算した結果を図－5に示す。浮体幅と重心高を変化させている。実際の重心高は10m前後であるが、浮体幅を55m以上にとれば傾斜角はあまり変化せず、ほぼ1°以内に収まることがわかる。



図－5 浮体幅と重心高の対する静傾斜角

次に波浪による動揺角を計算した結果を表－4に示す。波との出会角15°刻みで計算し、その中から風車取付部での有義値の最大値を抽出して示している。波浪応答は浮体を弾性体として扱い、流体との連成を考慮して計算した⁵⁾。風車は剛体として扱い、その慣性力を加えた。また、空力荷重を動揺速度に応じた等価減衰力の形で考慮した。この際の抗力係数は $C_d = 0.8$ とした。まず、規則波の周波数応答関数を求め、継いで、線形重ね合わせにより不規則波中の期待値を求めたものである。波スペクトルはBretschneider-Mitsuyasu型を用いた。

この結果から、発電時には許容角5°を満足することがわかる。

表－4 風車取付部での動揺の最大有義値(改良型)

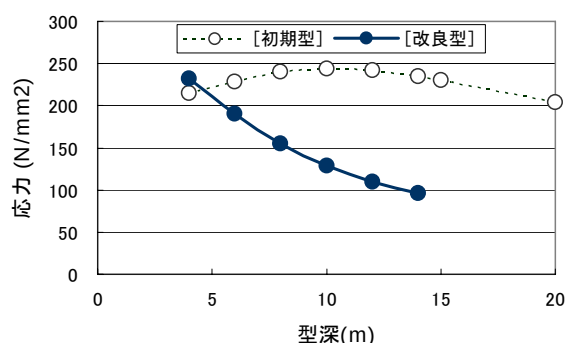
設計条件	横揺	縦揺	上下揺
定格時 (H=3.0m, T=7.2s)	1.71°	0.27°	1.0m
カットアウト時 (H=6.8m, T=9.8s)	4.02°	0.83°	3.1m
暴風時 (H=12.5m, T=15.0s)	4.69°	1.92°	7.0m

*横揺・縦揺は片振幅、上下揺は両振幅で表記。

(3) 強度要件の検討

図－6は、初期型モデルと改良型モデルについて型深さによる最大応力の変化を比較したものであり1/1000期待値で評価している。許容応力は公称応力で98N/mm²と仮定したが、初期型モデルでは

200 N/mm²以上の値を示し、型深さ20 mでも軽減する様子は見られない。これに対し、改良型では型深さの増加による応力低減が顕著であり、型深さ14 mで許容値をクリアする。



図－6 型深さによる最大応力の変化

5. 化学燃料製造システム

5. 1 代替燃料製造能力

東北大学の橋本らの方法¹⁾では、陰極にNi-Fe-C合金、陽極に γ -MnO₂型複酸化物を用い、海水直接電解においても塩素発生が無い電極を実現している。

この電極を用いた実験プラントが建造されている。現在の変換効率は約55%であり、変換効率や耐久性の改善が続けられている。一方、白金電極を用いて真水を電解する方法では80～90%の効率が得られている。これらの値を参考に、今後の技術の発展による改善を見込み、ここでは効率75%として水素製造能力を推定する。なお、変換効率は次式のように定義した。

$$\text{変換効率} = \frac{\text{製造水素の燃焼エネルギー量}}{\text{極板に作用させた電力量}}$$

洋上における風力発電装置の設備利用率は35～45%と目されているが、ここでは40%とする。

この時、5 MW×2基＝10 MWの風車で得られる年間水素量は、7,762kN(8,804,965 Nm³)となる。

次に、CO₂と反応させメタンに改質するのであるが、この反応にはほぼ100%の反応効率を持つ触媒¹⁾が開発されている。この触媒を用いた時、年間メタン製造量は、15,357kN (2,185,916 Nm³)となる。

5. 2 代替燃料の価値の評価

このメタンを、自動車燃料としての価値に置き換えて評価してみる。排気量1.7 Lクラスの乗用車で、同型の天然ガス車とガソリン車が市販されており、それぞれの燃料消費率値が公表されている。ガソリン車16.4 km/L、天然ガス車18.8 km/Nm³である。これらの数値から、10 MWのユニットで年間得られるメタン量は、2,815kLのガソリンと同等の価値を持つということになる。走行距離にすれば41,095,221 kmとなり、年間1万km走行するとして約4,100台分の燃料を供給できることになる。

6. あとがき

浮体式風力発電を用いたメタン製造プラントを提案し、①設置有望海域の調査と賦損量の評価、②浮体ユニットの機能性と安全性に関する評価、③メタン製造能力の試算とその価値に関する評価を行った。主な結果を以下にまとめて示す。

- 1) 有望な設置海域として、北海道西岸沖、東北地方日本海沖、房総沖、伊豆沖があげられる。その5%を利用すると、陸域2010年導入目標の300万kWの約3倍の電力量が得られる。
- 2) 5 MW×3基搭載の初期型は、強度要件を満たせず成立しないことがわかった。浮体長を短縮し、5 MW×2基搭載型とすることで強度を満足した。
- 3) 発電効率を基準に評価した浮体動揺および静傾斜量は許容範囲に入る。しかし、動揺による風車構造への慣性力が強度にとって過大に働くおそれがあり、今後の重要課題となりうる。
- 4) 燃料製造能力を試算し、本ユニット1隻あたり年間約4,100台分の自動車燃料になるメタンが得られることがわかった。

謝 辞

本研究は(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の一環として実施しているものです。関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 橋本功二、山崎倫昭、泉屋宏一、目黒眞作、佐々木昭仁、片桐洋、秋山英二、熊谷直和、幅崎浩樹、川嶋朝日、浅見勝彦：太陽エネルギーと海水電解を利用するグローバル二酸化炭素リサイクル：海洋開発ニュース、Vol.28、No.6、(社)日本海洋開発産業協会、2000.11
- 2) 長井浩、牛山泉、藤本聡：SSMI衛星と沿岸データの風況解析による洋上風力発電の賦存量：太陽／風力エネルギー講演論文集、pp573-576：2002.11
- 3) (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：平成15年3月
- 4) 矢後清和、大川豊、鈴木英之、澤井貴之：浮体式風力発電に関する基礎的検討：第17回海洋工学シンポジウム：平成15年7月：日本造船学会
- 5) 矢後清和：超大型浮体式構造物の弾性挙動における平面形状などの影響：第15回海洋工学シンポジウム：平成12年1月：日本造船学会
- 6) 矢後清和、大川豊、太田真、中條俊樹、西村洋佑：浮体式風力発電用基盤浮体に関する基礎的研究：第18回海洋工学シンポジウム：平成17年1月：日本造船学会