

浮体式風力による代替燃料創出 システムの研究

A STUDY OF ALTERNATIVE FUEL PRODUCTION SYSTEM BY FLOATING WIND POWER UNIT

矢後清和¹・大川豊²・中條俊樹³・西村洋佑³・日根野元裕⁴・高野宰⁵

Kiyokazu YAGO, Yutaka OHKAWA, Toshiki CHUJO, Yosuke NISHIMURA,
Motohiro HINENO, 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)
⁴ 工博 (株)三井造船昭島研究所 事業推進部 (〒196-0012 東京都昭島市つつじが丘1-1-50)
⁵ 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 the technical feasibility study and the economical evaluation of the floating wind power system. The box-girder type floating structure installed two or three wind turbines is proposed as a concept. The 5MW class propeller type turbines are adopted. The simple structures with box girder is favorable in the cost performance. Moreover, the wave induced motion and the righting moment can be optimized easily. The estimations of the static inclination and the wave responses of motion and stress were carried out in technical study. The relations between wind loads and motions or inclinations were investigated by the wind tunnel test. On the numerical analysis of elastic responses, the fluid dynamic forces were calculated using the potential theory with zero draft assumption. The structural model was consisted by bending plates of FEM. At the start, the 370m long floater with 3-turbines was assumed as a target of study. But, It became clear that this floater is hard for the structural realization in the storm condition. The 190m long floater with 2-turbine was considered for an improvement of elastic responses. The improved model showed that the wave responses can be satisfied the criterion.

Key Words : *Alternative Energy, Methane, hydrogen, Wind Power, Deep water, Floating*

1. 緒 言

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懸念される中、石油中心社会から新たなエネルギーへの変革方法が模索され始めている。現在の石油は高密度にして供給が容易であり、集中型エネルギー源として使いやすく経済性に富む、優れたものといえる。高密度という意味では原子力が有望であり、CO₂の排出が小さいことから、今後のエネルギーの一角を占めることは間違いないと考えられる。しかし、これとて安全性や核廃棄物処理の問題など様々な課題を抱えており、大規模な増大は難しい情勢にある。一方、自然エネルギーは一般に低密度であり、変動しやすい不安定さがあるが、環境面からは理想的な資源と言える。そのため、各国で利用可能性に関する研究開発が進められている。風力発電は欧米で大規模プラントによる事業化に成功しており、2003年末におけるドイツの導入量は1,461万kW、米国は635万kWに達し、経済性について

も既存電力並かそれ以上の低コストを収めつつある。

我が国の風力発電は、2010年300万kWという設備導入目標を掲げているが、2004年3月末現在の導入量は67.8万kWに過ぎず、既に適地の減少も指摘され始めている。風力発電で我が国の全ての電力量を賄うには四国か九州と同等の面積が必要といわれる。仮に将来、全体の1～2割を風力が受け持つとしても陸上での立地が困難である事は容易に推測でき、海上への展開が不可欠となる。我が国沿岸は、欧州の洋上風力発電に見られるような広大な浅水海域は少なく、急峻な海底地形を有するため、大規模開発を進めようとすれば浮体工法など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複数搭載する浮体式構造物を提案し、技術的成立性の検証を行う。浮体形式として格子構造を持つ矩形浮体を提案し、波浪に対する動揺および強度性能について論ずる。

また、風力の不安定さを解消し、運搬供給といったエネルギーとしての利用の容易さが既存インフラ

への関係を考えた時に重要となる。そのため、得られた電力を一旦化学燃料に変え、運搬・貯蔵・供給まで考えたシステムの可能性を探る。最終の燃料形態を、天然ガスの主成分であるメタンとし、システムとしての生成・供給能力の評価を試みる。

2. 全体コンセプト

全体コンセプトの概要を図-1に示す。

風力発電は、風の変動により不安定であり、必要な需要量に見合ったリアルタイムの電力供給制御には困難を伴う。現在は、原子力、火力発電等の補完電力であるため影響は小さいが、量の拡大に伴い大きな問題となるものと考えられる。また、洋上風力発電では海底送電ケーブルを敷設する必要がある、沿岸距離によってはコストの負担が増大する。

本研究では、電力を化学燃料に変換し蓄積するというコンセプトを提案する。

まず、風力発電で得られた電力を使い、海水を電気分解して水素を得る。真水でなく海水からということには意味がある。陸上の真水は、地球上の水の0.65%に過ぎず、貴重資源であり、大規模な燃料製造を目的とした使用に供することは出来ない。

続いて、得られた水素とCO₂を反応させメタンに改質し貯蔵する。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ことになる。

化学燃料への変換にはエネルギーロスに伴う。ロスを小さくするには変換過程を最小にする必要があり、水素で留めておく方が有利である。しかし、水素の貯蔵・輸送方法は充分確立しているとは言えず、現在の社会基盤に結び付け易いシステムの開発が即応性という観点から重要と考える。本研究では、現在のインフラに大きな変更を与えることなく、化石燃料に変わるエネルギーを供給することをコンセプト形成の重要事項と位置付ける。

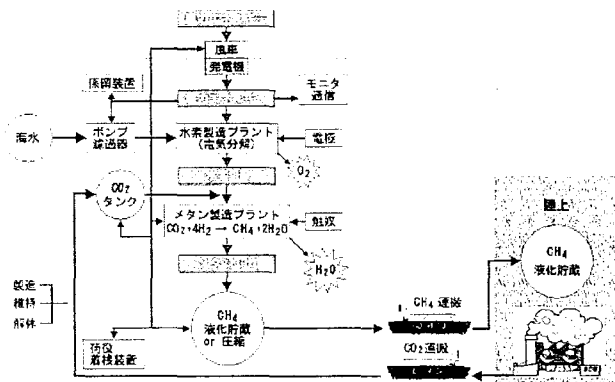


図-1 全体システムのコンセプト

3. 我が国周辺海域における適地の選定と風力エネルギー賦損量の推定

図-2は、SSM/I衛星と海岸線の風速にGISを援用して作成された長井の風況データ¹⁾に沿岸100kmまでの等深線を重ねたものである。これを元に、水深100～200m、設備利用率(実累積発電量/定格累積発電量)40%という条件を与え候補地を抽出する。

設置候補海域として、北海道西岸沖、東北地方日本海沖、房総沖、伊豆沖、沖縄および南西諸島海域が有望である。この内、大型台風の来襲頻度を考慮して、伊豆より北の海域について求めた設置面積、浮体ユニット基数、発電量は表-1のように試算できる。風車の展開は風車直径をDとして、10D×10Dの間隔を要するものとした。発電量は、風速の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。パワーカーブは3MW機(Vestas V90-3.0MW)のものを5MWに引き直した。この際、風速の高度分布をベキ指数1/10として考慮した。また、海域全てを使用するのは事実上不可能であるので、その5%を利用した場合の発電量を表中に併記する。

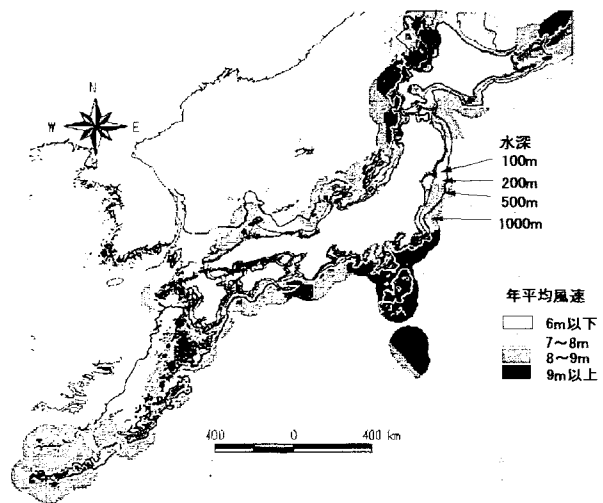


図-2 日本周辺海域の風況と等深線図

表-1 有望海域面積の5%を利用した時の賦存量

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

陸域における2010年度導入目標の3,000MWの能力と比較してみる。陸域の設備利用率を平均20%と仮定すると、年間発電量は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。

4. 基盤浮体の成立性に関する検証

(1) 浮体式風力発電ユニットの提案

浮体式風力発電は、昨今、欧米でも開発研究に取り組み始めており、各種浮体形式が提案されている。浅海域では、欧州で普及している着定式、深度が増し、海象が過酷になるに従って、ポンツーン、セミサブ、スパー型などへ変遷して行くと考えられる。最適形式は、海象条件と経済性を睨みながら選定されることになるが、欧州では、これまでの洋上石油開発の経験を生かしたセミサブ型、スパー型の提案が多い傾向にある。

本研究では、設置施工やメンテナンスの容易性を考慮して、総合的にコスト面で優位と思われる浮体を提案する。スケールメリットのある5MW大型風車を用い、既存ドックで一体建造できる規模の支床浮体上に複数集約搭載した形式である。提案浮体ユニットの概要を表-2および図-3に示す。

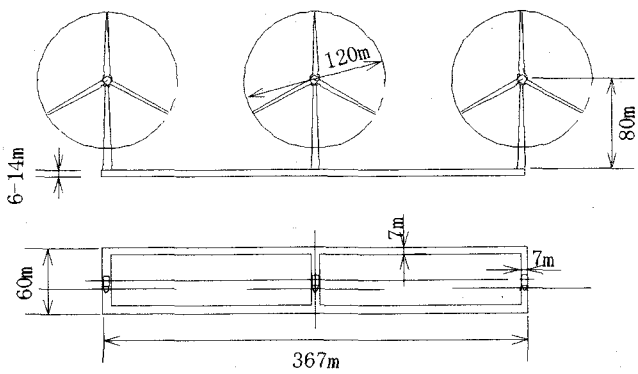
検討対象とした浮体ユニットは、初期型と改良型の2種類ある。与えられた設計条件による強度性能の検証過程で、3基風車搭載型の成立性が困難であることが判明したため、全長を短縮した2基搭載型に改良されたものである。その過程については後述する。基本的に、矩形断面を持つBOXガーダを格子状に配置した構造の浮体である。浮体幅、断面寸法を変えることにより動揺特性を設置海域の波浪特性に応じて最適化することができると考えられる。また、シンプルな形状であるため、建造が容易であり建造コストに優れると考えられる。

係留は大水深であることと施工性を考慮して、繊維ロープを用いたトート係留を考えている。アンカーは船上から投げ込み設置可能なVertical Loading Anchorを採用する計画である。なお、係留については今回の報告では触れない。

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	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)

[初期型]



[改良型]

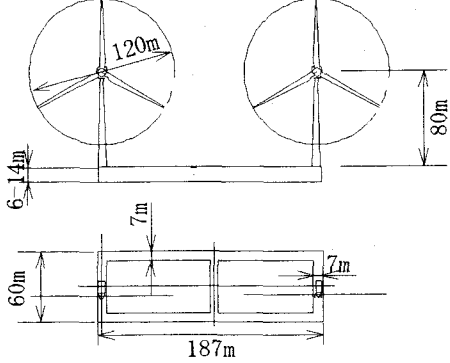


図-3 浮体式風力発電ユニットの概要

(2) 設計条件

表-3 に本研究で設定した設計条件を示す。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」を使用して、浮体共用期間30年、再現期間60年と設定し、波高波長頻度を基に統計解析を行い、確率分布より波浪条件を設定した。

通常、浮体設計条件は、自然環境条件下で破壊しないという安全性基準を前提に検討されるのが一般的である。風力発電の場合は、さらに発電性能を損なわないという機能面からの条件を加える必要がある。表中、発電稼働時の値はそうした意味を持っている。一般に風力発電用風車は、風速13~14m/s前後で定格運転に達し、25m/sより高い風速域では回転を止め、翼のピッチを抵抗最小となるよう風に立てて固定される。(これをフェザリング状態、停止風速をカットアウト風速と呼ぶ。)このような風速条件に基づき、発電稼働時についての波浪条件を考える事にした。具体的には、S-M-B法による波浪予測曲線を用い、吹続時間を12時間と仮定して設定した。

流れの設計条件は、周辺海域の観測資料等に基づき決定した。候補地の中には、黒潮の影響を受ける海域もあり、その場合の最大流速は4ノット近くになる。しかし、係留への負担が大きくなり、そのままでは経済性の悪化につながるため、こうした海域では沿岸に近づけるなどして、直接の影響を極力避けるものとして2ノットを設計条件とした。

表-3 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		200m		

(3) 波浪応答の解析

提案浮体は、型深さ（浮体厚）が浮体長さに対して比較的薄い構造物であるため弾性挙動を示す。従って、流弾性応答プログラム²⁾を用いて波浪応答解析を行なった。浮体構造は有限要素法板曲げ要素で離散化して表現した。流体力・波力は特異点分布法に浅喫水仮定を適用した圧力分布法により計算し、構造モデルに作用させ周波数応答関数を求めた。応力は、計算された弾性変位と要素剛性マトリクスから内力を求め、断面係数を考慮して甲板表面について算定した。風車は剛体として、取り付け点での慣性力の増分として考慮した。風車稼働時の空力荷重は減衰力の形で回転軸中心に加えた。動揺時を模擬した風洞試験結果³⁾によれば、空力的な付加質量は小さく、動揺速度に比例した抗力のみ考慮すれば良いことがわかっている。ここでは実機的设计に使用される抗力係数 $C_d=0.8$ を適用し等価線形化して加えた。なお、抗力算定の時の面積は回転範囲を覆う受風面積を用いる。

浮体の強度要件および機能性要件の評価は統計的期待値を用いて行う。期待値は、線形重ね合わせ法を用いて算出する。この際、波浪は一方向不規則波（Long crested wave）とし、波スペクトルには、Bretschneider-Mitsuyasu型を適用した。波方向は $0 \sim 90^\circ$ の範囲について 15° 刻みで計算し、その中で最も大きい期待値を評価値としている。

(4) 強度要件の検証

図-4は初期モデルと改良モデルの応力振幅分布の代表例を比較したものである。応力が高くなる箇所は縦波中で中央部付近または $1/4$ 長付近であり、周波数により変化するモードが異なる様子がわかる。

計算結果で最も重要になったのが応力である。初期検討モデルについて、喫水、型深さなどを広範囲に変化させてみたが、強度面の成立性が得られなかった。成立性評価の基準は、公称応力で 98N/mm^2 と仮定した。

初期検討モデルの応力の $1/1000$ 期待値を表-4に示す。浮体上各点の応力の最大値を抽出したものである。喫水による変化は小さいが、型深さを6mから20mまで増しても応力はあまり変わらず、14mでも 235.2N/mm^2 という高い値を示している。

この結果から、型深さの変化による応力の低減効果は期待できず、同調回避設計が出来ていないと考えられる。そこで、浮体長を変化させることによる同調回避を試みることにした。

表-5に改良型モデルについて、公称応力の

$1/1000$ 期待値を求めた結果を示す。

型深14mにおいて公称応力許容値の 98N/mm^2 をクリアすることがわかる。

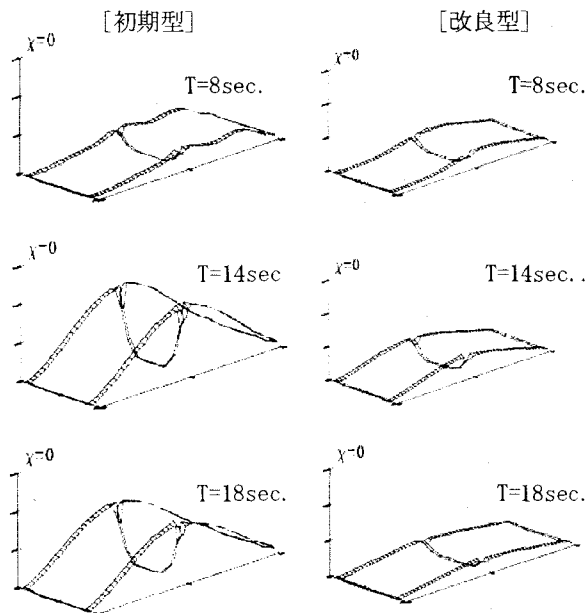


図-4 浮体上応力の振幅分布図

表-4 初期型モデルの変動応力 ($1/1000$ 期待値)

有義波高=12.5m, 有義波周期=15sec., 縦波 (N/mm^2)					
喫水	型深 6m	8m	10m	12m	14m
2m	221.5	233.2	238.1	237.2	231.3
3m	224.4	236.2	241.1	239.1	233.2
4m	228.3	240.1	244.0	242.1	235.2
5m	232.3	243.0	247.0	244.0	237.2

表-5 改良型モデルの変動応力 ($1/1000$ 期待値)

有義波高=12.5m, 有義波周期=15sec., 縦波 (N/mm^2)					
浮体型深	6m	8m	10m	12m	14m
(喫水 4m)	190.1	154.8	129.4	109.8	95.1

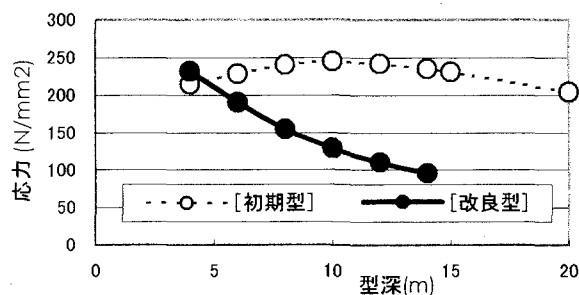


図-5 変動応力最大値の変化の比較

図-5は、初期型と改良型について、型深さによる公称応力の最大値の変化の様子を比較した図である。評価箇所としては、ピークの現れやすい舷側中央付近で比較している。初期型では、型深さ15m付近まで増加させても応力はあまり変化しないが、改良型では型深さが増加するのに伴って応力が大きく

軽減している。これらの結果から、この種の浮体構造では、同調回避設計において浮体長の選定が重要になることがわかる。

(5) 機能性要件の検証

a) 傾斜・動揺角のクライテリア

機能性要件として、動揺および静的傾斜による発電効率の低下について取り上げ議論する。図-6³⁾に傾斜角に対する発電出力の変化を示す。出力は傾斜角余弦の3乗に比例して低下する。効率95%を維持するには10°以内に収める必要があるが、風車は約5°の初期取付角を持たせるため許容角は5°となる。

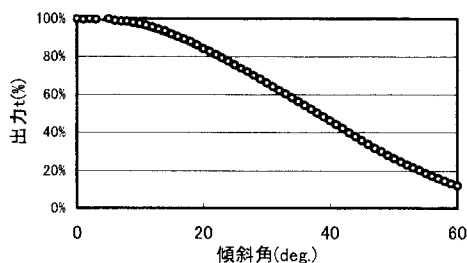


図-6 傾斜角に対する発電出力の変化

b) 風荷重による静的傾斜角

静的傾斜を生起させる外力として、カットアウト直前の風による転倒モーメントが最も重要となる。5MWクラスの風車の風荷重値としてJOIAによる推定結果⁴⁾を引用する。これによれば、風速25m/sにおける水平荷重は1199.5kNである。傾斜量 ϕ は、復原力と荷重の釣合いから次式で求められる。

$$W \cdot GM \cdot \tan \phi = M_{\phi} \quad (1)$$

ここで、 W : 排水重量 M_{ϕ} : 横転倒モーメント
 $GM = KB + BM - KG$ で表され、
 KB : 底面からの浮心高さ KG : 同重心高さ
 $BM = I / V$ I : 水線断面2次モーメント
 V : 排水容積 である。

図-7は改良型モデルの傾斜特性である。浮体幅と重心高による傾斜の変化を比較して示している。初期モデルと改良型モデルでは、風車1基あたりが占める浮体長が異なるため、同条件では改良型モデルの傾斜量の方が大きくなる。しかし、幅60m以上であれば重心高によらず傾斜量は1°以内に収められ、十分な復原性能が得られる。

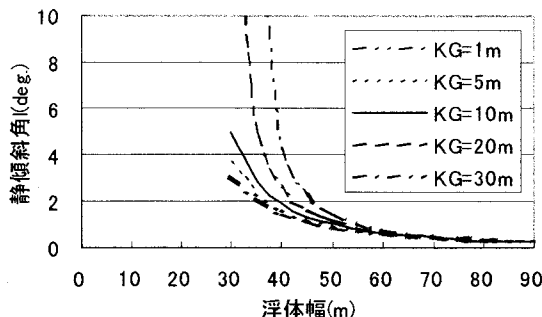


図-7 静的傾斜特性 (改良型)

c) 波浪による動揺角

動揺角は風車基部における有義値で評価することにする。最大有義値の推定結果を表-6に示す。結果は、傾斜許容値5°を満足している。最大値は全て横揺の場合に生じており、当然、横波中で最大となる。横揺時の動揺は、剛体モードが卓越し、初期型と改良型モデルで大きな差は現れていない。但し、縦波または斜波中での弾性挙動には大きな差が見られる。図-8に弾性変位の振幅分布の一例を示す。短周期の領域で改良型はより剛体モードに近い挙動をする様子がわかる。

表-6 風車取付部における動揺の最大有義値(改良型)

設計条件	横揺	縦揺	上下揺
定格 (H=3.0m, T=7.2s)	1.71°	0.27°	1.0m
カットアウト (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。

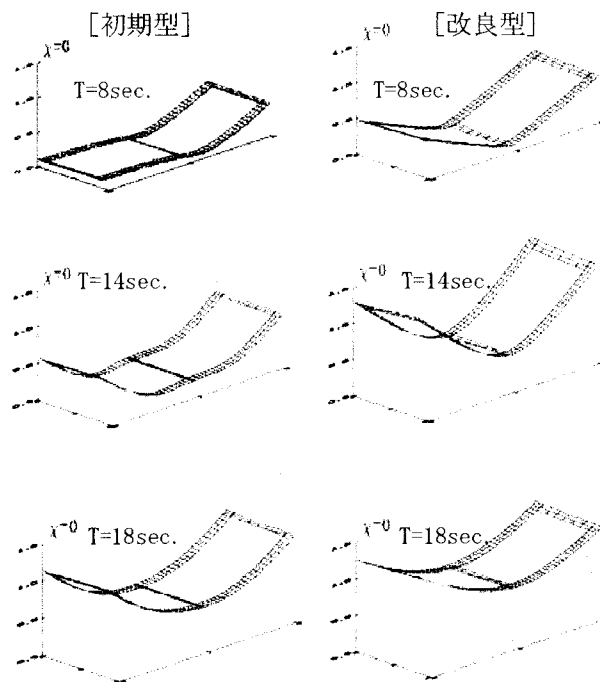


図-8 弾性挙動の計算例 (上下振幅分布)

動揺角は、機能性から与えられたクライテリアを満足することがわかった。しかし、風車の強度については未検討である。タワー上端のナセル部での加速度を概略計算してみると1/1000期待値で約0.6Gという値が得られた。これを慣性力の形にして加え、既存のタワー設計手法にあてはめると、タワー基部肉厚を10~20%増やす必要があるということがわかった。これらの問題については、現在、詳細な検証を継続して実施中である。

5. 化学燃料製造システム

(1) 代替燃料製造能力と価値の評価

海水の電気分解による水素生成は、海水から直接行う場合、従来技術では塩素が大量に出る。東北大学の橋本らは、陰極にNi-Fe-C合金、陽極に γ -MnO₂型複酸化物を用いて、塩素発生のない電極を開発⁵⁾した。また、一旦、真水にする方法もあるが、触媒に大量の白金が必要となり大規模開発には向かない。効率にも差がある。真水からでは80~90%であるが、海水から直接の場合、現状で55%、技術の改良によっても75%程度と推測される。なお、変換効率は次式のように定義する。

$$\text{変換効率} = \frac{\text{製造水素の燃焼エネルギー量}}{\text{極板に作用させた電力量}} \quad (2)$$

ここでは、海水からの直接変換を想定して、変換効率75%を適用する。風力発電装置の設備利用率は40%とする。この時、10MWの風車で得られる年間水素量は、7,762kN(8,804,965 Nm^3)となる。

次に、CO₂と反応させメタンに改質するのであるが、橋本等は反応効率がほぼ100%の触媒開発⁵⁾にも成功している。この触媒を用いた時、年間メタン製造量は、15,357kN(2,185,916 Nm^3)となる。

このメタンの価値について評価してみたい。排気量1.7Lクラスの乗用車について、天然ガス車とガソリン車があり燃料消費率が公表されている。ガソリン車16.4km/L、天然ガス車18.8km/ Nm^3 である。

これから、年間得られるメタンは、2,815kLのガソリンと同等の価値があるということになる。走行距離にすれば41,095,221kmになり、年間1万km走行するとして約4,100台分の燃料に相当する。

(2) 燃料の貯蔵と運搬

メタンを浮体内部に貯蔵するには、現在、3通りの方法が考えられる。圧縮ガス化、液化、ハイドレート化である。圧縮ガス化は変換エネルギーが小さいため、当初、可能性の高い方法と考えたが、現有の圧力ボンベ重量が浮体の排水重量の20%程度になることがわかり、液化方式に変更した。天然ガスの液化装置は、海底ガスプラントに用いられる大規模なものが主流であるが、調査の結果、500 Nm^3/h クラスの適合機があることがわかった。また、本システムに見合う小型の液化天然ガス輸送船についても、近年、「第一新珠丸」という内航LNG船が開発されており、これらのシステムが適用できる。

今後、沿岸距離に応じて、海底ケーブルによる電力送電、パイプラインによる燃料輸送などとの比較を行い、経済性を考慮した評価を進める予定である。

6. 結 言

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。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 有望な設置候補海域を、北海道西岸沖、東北地方日本海沖、房総沖、伊豆沖に絞り、その5%の海域利用に限定しても、2010年陸域風力発電導入目標300万kWの約3倍の電力量が得られる。
- 2) 5MW×3基搭載型浮体は、沖合の暴風時を想定した波浪条件で強度を満たせず、成立しないことが判明した。浮体長を短縮し、5MW×2基搭載型とすることで強度要件を満たした。
- 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、風車構造に対する慣性力が過大となる恐れがあり、さらに検討が必要である。
- 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。
- 5) 浮体内メタン貯蔵は、現状では液化方式が容器重量の点で適用性が高い。また、輸送については内航LNG船の適用が可能である。

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」のプロジェクトとして平成15年度より実施している。本研究の機会を与えていただいた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 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：平成15年3月
- 5) 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
- 6) 大川豊，矢後清和，太田真，山田義則，高野幸，関田欣治：代替燃料創出を目指した浮体式風力発電施設に関する基礎的研究：海洋開発論文集，VOL.20：2004.：(社)土木学会
- 7) 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