

風力発電を核とする浮遊式洋上エネルギー基地 に関する一考察

A CONCEPTUAL STUDY ON FLOATING OFFSHORE WIND ENERGY BASES

金網正夫¹・川口博靖¹・棚橋滋雄¹

Masao Kanetsuna, Hiroyasu Kawaguchi, Shigeo Tanahashi

¹社団法人 日本海洋開発産業協会

Over the last decade the wind energy technology has dramatically been developing to meet the needs of the times for clean and renewable energy resources and the attributes of offshore wind energy resource have been receiving increasing attention. Our goal in this paper is to raise some key issues that must be evolved in order to realize a large-scale offshore energy base. The concept outlined here is one of the important technological areas identified by the "Committee of Japan Ocean Industries Technological Strategy for the 21st century" (Chairman : Prof. Koichiro Yoshida, October 1999 to March 2001)¹⁾ organized in JOIA (Japan Ocean Industries Association).

The authors expect that the considerations presented in this paper can invite further continuous investigation to realize the projection based on cost effective offshore wind energy technologies.

Key Words : Floating structures for offshore wind energy bases

1. はじめに

日本経済の発展と国際貢献に寄与する重点的技術分野の抽出を目的として、平成11年度及び平成12年度に実施された海洋産業技術戦略会議¹⁾においては、海に対する依存と負荷を増大した20世紀の産業化を反省し、21世紀における化石エネルギーの枯渇や地球温暖化等の諸問題克服のために、生命体としての海との共生という「理念」に基づく海洋産業育成を目指す「視点」として、①経済的フロンティア（エネルギーや食料の確保と生産など、人間の生活の維持と質の向上に直接つながる技術開発・産業創出の視点）②科学的フロンティア（未知なる自然の宝庫である海洋の物理的、化学的、地学的な解明と地球環境問題の解決など、海洋の科学的解明と真理の探究に重点を置く技術開発・産業創出の視点）及び③生態学的フロンティア（生物としての人間と未知の凝集体としての生態系を包み込む環境としての海を、生態学的視点から問題の整理を行い、その解明と解決のための技術開発・産業創出の視点）、以上3つのコンセプトとしてとりまとめている。

さらに本戦略会議においては、以上の「理念」と「視点」に基づいて戦略目標と重点的技術分野候補を整理し、特定の評価項目を設定して重点的技術分野を抽出したが、ここで紹介する調査研究の概要は、経済的フロンティア分野として位置づけられ、資源エネルギー、環境及び国際貢献度などの面で高く評価された重点的技術分野の一つである「海洋資源エネルギー複合的活用技術」、すなわち海洋の資源及びエネルギーを複合的に活用する「風力発電を核とする大規模浮遊式洋上エネルギー基地」に関して実施した調査研究成果の一部である。

2. 「風力発電を核とする大規模浮遊式洋上エネルギー基地」の目的と主要な技術的課題

(1) 目的

化石燃料の枯渇や地球温暖化問題などの社会的要請に応じて、海洋の資源及びエネルギーを複合的に活用し、採算性のあるクリーンエネルギー創出と国内で発生するCO₂排出量の削減に貢献する洋上エ

エネルギー基地を実現することを目的とする。

化石燃料の可採年数は、石油は43年、天然ガスは62年、石炭は231年と予測されており²⁾、今後ともこれらの予測年数は見直し等によって変動するとしても、化石燃料が有限であることには変わりなく、代替エネルギー等の技術開発促進はより一層望まれているところである。また、地球温暖化問題は、64%の寄与度を持つCO₂の削減が世界的課題であり、1997年には京都会議(COP3)において先進国の削減目標値が設定され、我が国も1990年度比6%減が必須となっている。このような状況下において、全世界のCO₂発生量の約5%を占めている我が国においても³⁾、CO₂回収技術、省エネ技術、及び代替エネルギー技術開発が促進されている。

しかしながら、2010年におけるエネルギー起源のCO₂排出量見通しは、試算基準ケースで307百万t-Cとなり、1990年度CO₂排出量を7.1%増加するという試算も示されている⁴⁾。このような状況を考慮した場合、化石燃料の有限性や地球環境問題などの社会要請に対応するクリーンエネルギーの安定供給を図ることは我々にとって緊急の課題であると考えられる。

一方、海洋資源エネルギーの潜在能力(発電システム)については、これまで波力、潮力、潮汐、温度差発電等の各種技術開発が行われてきたが、エネルギーそのものの密度が希薄なため採算性が低く、またエネルギー供給が不安定であることから、我が国においてはこれら海洋資源エネルギーが大規模に導入されるまでには至っていない。

しかしながら前述のような社会的要請を考慮した、新しいエネルギー源、しかも無尽蔵でクリーンな再生可能エネルギー源として、海洋エネルギーの潜在能力に対する期待が高まっているのも事実である。

ここでは、これまで単独で開発されてきた海洋資源エネルギーや海洋構造物関連技術と陸上における発電システム技術を複合的に活用することで、採算性のある安定供給を可能とするシステムを実現することを目的としている。

(2) 主要な検討課題

ここで提案する大規模浮遊式洋上エネルギー基地を実現するためには、技術的課題の他に、海底ケーブル敷設費、設置費並びに発電コスト低減などの経

済的課題及び制度的課題等に関する総合的な調査研究が必要であるが、ここでは紙面の都合上、主要な技術的課題についてのみ以下に概説する。

主要な技術的課題は、①核となるエネルギー発電技術(システム)、②設置海域に適した海洋構造物関連の技術、③エネルギー安定供給化技術、④維持管理・運営技術(遠隔操作技術(システム)を含む)、及び⑤環境保全関連技術、等に分類できる。

まず、①核となるエネルギー発電技術(システム)については、すでに欧州において実用化が進み⁵⁾、我が国においても調査研究段階ではあるが、可能性の高さが示されつつある「洋上風力発電技術」に関する研究が挙げられる^{6)・7)}。風力発電用風車形式についてはプロペラ形式の実用化が最も進んでおり、欧米においてはすでに5MW規模の風車も開発中である⁸⁾。洋上風力発電は、陸上施設に比べて建設コストが増大するにもかかわらず、自然条件の適否、騒音や景観などの環境問題並びに設置問題などから、デンマークなどにおいては洋上風力発電基地が設置された例があるが、これらはいずれも海底着底式の発電システムである⁵⁾。

将来的には、「適地の制約」「漁業・海運の制約」「日本独特の自然条件(水深、海底地形の勾配、地質、地震、乱況等)」「環境の制約」及び「騒音、景観、電波等への障害」等、様々な制約を考慮した場合、大規模化・大容量化が難しく、現在示されているCO₂削減目標値等には到達出来ないことも懸念されるため、これらの制約に対する克服策として、沖合に適した浮遊式洋上風力発電システムの開発要請も強まるものと予想される。しかし、浮遊式構造物に設置される風力発電システムについては未だ概念設計の段階であり、浮体の挙動特性に適合する発電システムに関する調査研究は実施されていないのが現状である。今後、日本の沿岸海域の環境条件や浮遊式構造物の静的・動的応答特性に適合する大型風車形式(従来のプロペラ型に加えて、ダリウス型やジャイロミル型などの垂直軸型)の研究開発も必要である。

つぎに、②設置海域に適した海洋構造物関連の技術については、当面、我が国においても沿岸域着底式洋上風力発電システムの開発が促進されるものと予想されるが、前述した様々な制約を考慮した場合、より沖合での洋上風力発電用架台に適した「浮遊式海洋構造物関連技術」に関する研究も必要である。

浮遊式洋上風力発電システムの架台としては、設置海域の海象・気象条件によっては、図-1に見られるような海洋石油生産用プラットフォームとして実績のある構造物の改良型を適用することも考えられる。これらのうち、SPAR型を採用するケースに関する調査研究例などがあるものの⁹⁾実用化されたものはない。今後、日本沿岸域の特殊条件や地震問題、あるいは風車発電システムの設計条件などに適合し、しかも経済的な構造形状、係留方法、設置方法、長期耐久性、並びに点検・維持方法などの研究開発が必要である。浮遊式構造物に関する検討課題の詳細については次節に記述する。

③エネルギー安定供給化技術については、採算性も考慮した計画的エネルギー供給を可能にするために、エネルギー供給量の変動に対応した水素やメタ

ンなどの「化学エネルギー変換技術」の検討が必要である。我が国においても、海水の電気分解による水素生成技術や金属に貯蔵・放出できる水素の貯蔵方法等に関する研究が促進されており^{10)・11)}、これらエネルギー変換技術を活用し、陸域の施設との関連も視野に入れて、経済的な化学エネルギー生成技術、貯蔵技術、輸送技術を包含する複合的なエネルギー供給システムの構築を促進する必要がある。図-2にエネルギー基地の基本構成案を示す。

最後に、④維持管理・運営技術（遠隔操作技術（システム）を含む）及び⑤環境保全関連技術については、既存の海洋資源エネルギー技術及びIT技術等を取り入れることで技術課題を克服し、さらに本研究に対する社会的認知を得るべく付加価値をつける技術などの研究が必要とされる。

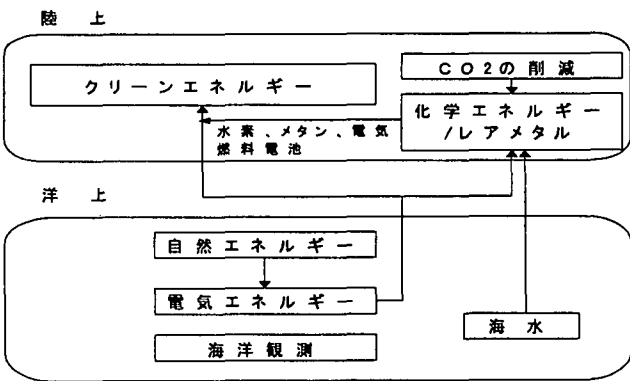
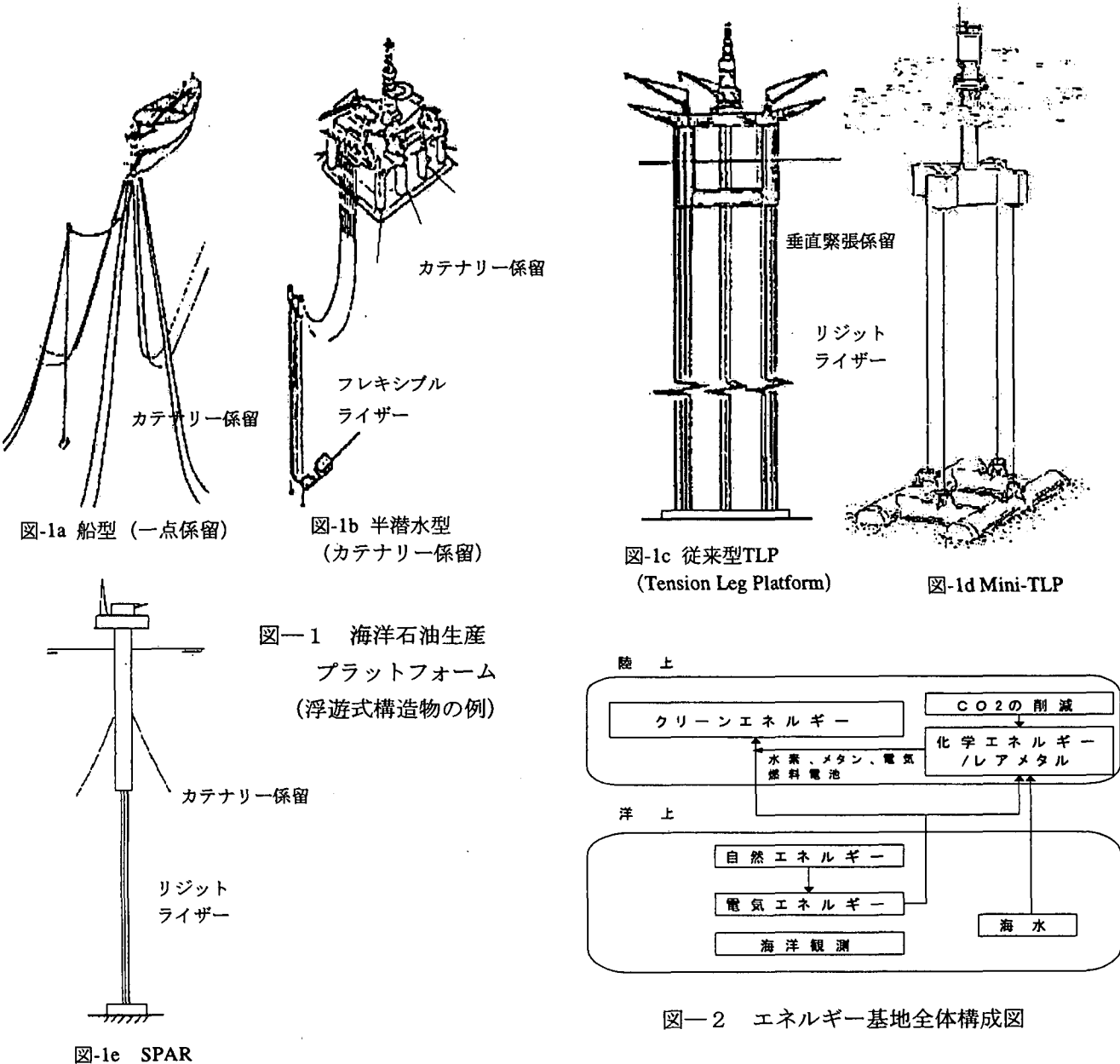


図-2 エネルギー基地全体構成図

3. 洋上風力発電架台用浮遊式構造物について

(1) 浮遊式構造物に設置される風力発電システムに関する特殊な検討事項

我が国の沖合洋上風力発電に適する風車形式の選定については、今後の研究成果を待つ必要があるが、洋上における風況や浮遊式構造物の挙動特性等を考慮した場合、プロペラ型に加えて図-3に示すような垂直軸型風車も有力な候補と考えられる^{1,2)}。垂直軸型の場合、プロペラ型に比較して発電システムの重心高さ及び風圧中心の高さが相対的に低く、システム全体の安定性を維持できるという利点がある。

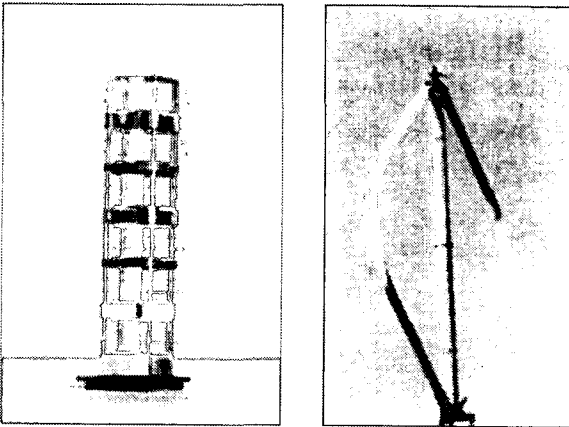


図-3a 多段式ジャイロミル¹²⁾ 図-3b ダリウス型¹³⁾

図-3 垂直軸型風車の例

浮遊式構造物上に設置される発電システムに関しては、①大規模・大容量化、②海洋の特異な自然環境に対する耐久性、③風車配列スペースの最小化、④許容傾斜角及び許容動揺の設定、⑤浮体の運動に伴う風車部における相対的な風速変動許容値の設定、⑥点検・維持補修時以外は、無人による遠隔監視・制御システムによる操業手法の確立等に関する検討が必要となる。

(2) 浮遊式構造物に関する検討事項

浮遊式構造物に関しては、①発電システムの特徴（風車スペース、許容傾斜角、許容動揺、許容風速変動）に適合する経済的な支持構造形状及び位置保持システム、②損傷時においても所要の安全性を保持できる構造及びシステム機能、③極限的な環境条件下（大地震、台風時など）においても主要システムを残存できる機能、④経済的な設置方法、点検・維持補修方法及び撤去方法などが主要な検討課題である。

(3) 浮遊式構造物の課題について

図-1に示した各浮遊式構造物を洋上風力発電の架台として採用する場合の主要な検討課題例を表-1に示す。各構造様式とも利点及び欠点があり、最適な構造様式を選定するためには、制度的及び経済的課題も視野に入れ、設置海域及び搭載される発電システムの特徴や許容条件を満たすための詳細な調査研究を実施する必要がある。箱型（船型）架台の適用海域は静穏海域に限定されるが、その他の形式については厳しい海象条件に対しても適用できる可能性がある。ただし、複数の風車を一体の架台に取り付ける場合には、コラムスペースが広大となるために、構造重量増加や建造ドック幅の制約問題などを解決する必要がある。TLP (Tension Leg Platform) 架台の場合には、上下及び回転運動が無視できるほど小さく最も安定している構造ではあるが、係留システム及び設置コストが最も高価になるものと予想される。

モノタワーは単純な構造であり構造重量の軽量化が可能であるが、経済的な設置方法の開発が必要である。

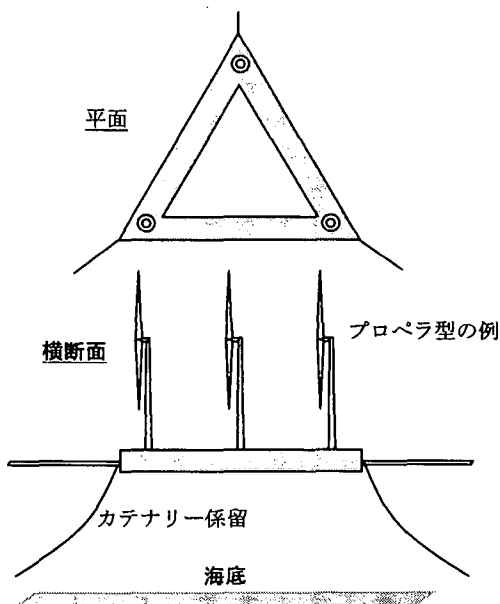
なお、カテナリー係留は平面的な占有面積が大きく、複数の浮体を配列した場合には漁船あるいは各種の作業船との関連を考慮する必要がある。係留占有面積の点では、TLP型及び複合係留モノタワー型が有利である。

4. おわりに

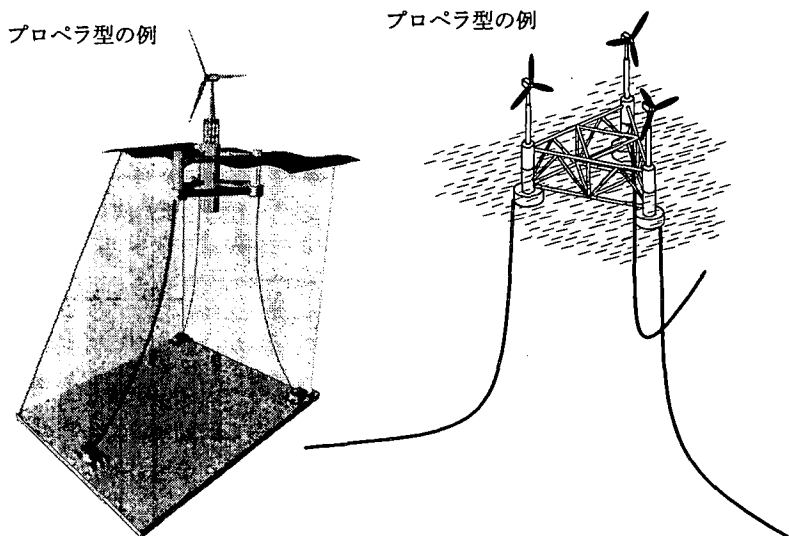
以上、海洋産業技術戦略において重点的技術課題の一つとして抽出された大規模浮遊式洋上エネルギー基地の中核となる浮遊式洋上風力発電の架台に関する調査結果の一部を概説した。関連する技術分野は、発電技術や化学エネルギー変換技術の他に、海底ケーブルやエネルギー輸送技術、景観や環境対応技術、長大海洋構造物設計・建造関連技術、全般的な操業技術及び海洋工事関連技術など広範囲な分野にわたっている。従って、ここで提案した大規模洋上エネルギー基地を実現するためには、地方自治体や住民参加を前提とし、技術的課題のみならず制度的あるいは経済的な課題も重視し、産学官連携のもとに具体的な対応策を検討する必要がある。

表一 洋上風力発電架台としての各浮遊式構造物の主な検討課題例

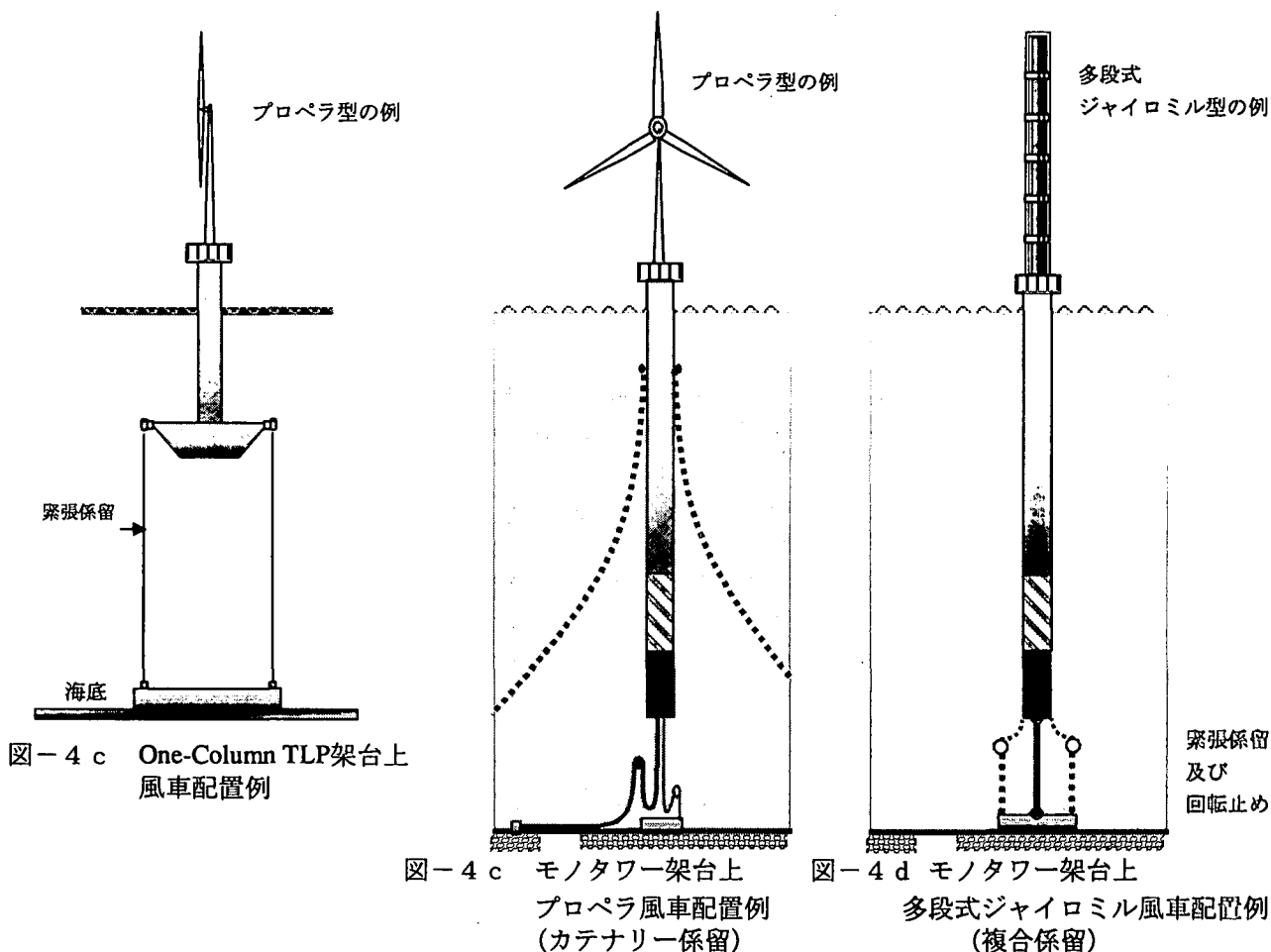
浮体形式	箱 型	半潜水型	T L P型	モノタワー（SPAR）型	
				カテナリー係留	複合係留
概要図例	図－4 a	図－4 b	図－4 c	図－4 d	図－4 e
構造配置	* 単純な箱型構造 * 点検・維持補修は比較的容易。 * 風車許容スペースが大きい場合、経済的に不利、また建造ドック幅の制約もある。洋上接合技術の活用も必要となる。	* 複数風車の場合、コラムスペース大となり、経済的に不利、また建造ドック幅の制約も生じる。 * 構造の単純化により点検・維持補修を容易にする必要がある。	* 係留ラインのスペース及び張力増大により、構造重量も増加し、経済的には不利。 * 構造の単純化により点検・維持補修を容易にする必要がある。	* 単純な円筒構造 * 喫水が深く、耐圧構造となるが、箱型、半潜水型及びT L P型に比べて構造重量の軽量化が可能である。 * 水深の深い海域に設置される。	* 単純な円筒構造 * 喫水が深く、耐圧構造となるが、箱型、半潜水型及びT L P型に比べて構造重量の軽量化が可能である。 * 水深の深い海域に設置される * 円筒構造下端に反力が集中する。
動揺特性	* 6自由度 * 一般的には平穏海域に適用。	* 6自由度 * 厳しい海象条件にも対応可能。	* 3自由度（平面運動のみで、最も安定している形式） * 厳しい海象条件にも対応可能。	* 6自由度 * 厳しい海象条件にも対応可能。	* 5自由度（上下動は極めて小さい） * 厳しい海象条件にも対応可能。
係留システム	* カテナリー係留 * 係留占有面積大	* カテナリー係留 * 係留占有面積大	* 垂直緊張係留 * 係留占有面積小 * 特殊な点検・維持補修方法の開発。	* カテナリー係留 * 係留占有面積大	* 垂直緊張と回転止めラインとの複合係留。 * 係留占有面積大 * 特殊な点検・維持補修方法の開発。
設置方法	* ドックあるいは平穏海域にて風車取付後、現地に曳航、設置することができる。	* ドックあるいは平穏海域にて風車取付後、現地に曳航、設置することができる。	* 浮体の安定性能の問題から、風車は現地取付になると予想される。	* 現地付近の沿岸域において、浮体をほぼ横に浮かせ、特設架台にて風車取付後、現地曳航、設置する方法が考えられる。	* 現地付近の沿岸域において、浮体をほぼ横に浮かせ、特設架台にて風車取付後、現地曳航、設置する方法が考えられる。



図－4 a 箱型架台上の風車の配置例



図－4 b 半潜水型架台上の風車配置例



謝辞：本調査研究に当たり，貴重なご指導をいただいた海洋産業技術戦略会議議長吉田宏一郎東海大学海洋学部教授及び副座長木下健東京大学生産技術研究所教授をはじめ，ご協力いただいた各委員に対して深く感謝の意を表します。

また，本論文作成に際しては，牛山泉教授（足利工業大学）の貴重なご指導を頂くと共に，国松直／今泉博之／神宮司元治／大井健太（産業技術総合研究所）、矢野州芳（三菱重工業（株））、志村正幸／丸山勇祐（前田建設工業（株））並びに日根野元裕（株式会社三井造船昭島研究所）諸氏のご協力も頂いた。記して深甚の謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 平成12年度新規産業創出のための海洋資源・エネルギー複合的活用事業に関する調査研究報告書
ー海洋産業技術戦略策定を目指してー
(社) 日本機械工業連合会
(社) 日本海洋開発産業協会
- 2) <http://enecho.go.jp>
- 3) 橋本ほか：グローバルCO2リサイクル，材料と環境，第45巻，第10号，1996
- 4) 第2回総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会配布資料
- 5) NEDO調査報告書：日本における洋上風力発電の導入可能性調査，NEDO-NP-9801，H11.3
- 6) (社) 日本電機工業会 洋上風力発電新技術開発調査委員会
- 7) 洋上風力発電基礎工法の技術（設計・施工）マニュアル（案），（財）沿岸開発技術研究センター
- 8) 参考：Jacobs 日本代理店ホームページ
- 9) Tong K.C.," Technical and economic aspects of a floating offshore wind firm", Proc. OWEMES Conference, Rome February, 1994
- 10) 橋本ほか：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, 2000年11月号)
- 11) 橋本ほか：グローバル二酸化炭素リサイクル，セラミックデータブック'97・別刷，工業製品技術協会
- 12) 丸山，志村，義江，関：建築物に融合する直線型垂直軸型風力発電装置の開発，2000年11月8日，9日太陽／風力エネルギー講演論文集 2000
Proceedings of JSSES/JWEA Joint Conference
- 13) 牛山 泉 著：さわやかエネルギー 風車入門 三省堂