

# 浮体式洋上風力発電施設の 係留システム開発

～海洋向け高張力ケーブルを適用した新たな浮体係留システムの提案～

Development of advanced mooring system for offshore floating wind turbine  
～Proposal of new mooring system using the High Tensile Parallel Wire  
Strand Cable for Marine～

鳥井 正志 Tadashi TORII

海外海洋事業部 海洋設計技術部  
設備企画技術室長 博士(工学)

山崎 伸介 Shinsuke YAMAZAKI

技術開発第一研究所 構造商品開発室  
シニアマネジャー

佐々木信博 Nobuhiro SASAKI

技術開発第一研究所  
溶接・防食・材料評価技術室 マネジャー

大久保 寛 Hiroshi OOKUBO

技術開発第一研究所 機械商品開発室  
シニアマネジャー

山下 篤 Atsushi YAMASHITA

海洋鋼構造部 洋上風力事業化推進室長  
博士(工学)

堺 浩二 Kohji SAKAI

海洋鋼構造部 洋上風力事業化推進室  
シニアマネジャー

岩本 力 Chikara IWAMOTO

海洋鋼構造部 洋上風力事業化推進室  
マネジャー

## 抄 録

再生可能エネルギーの一つとして有望な浮体式洋上風力発電が広く実用化されるには、基礎構造である浮体と係留施設の経済性が重要である。しかし、既存の方式では、発生する係留力が大きいため係留部材コストと、海象の影響を受けやすい海上工事のコストが高く、競争力低下の要因となっている。そこで、新日鉄住金エンジニアリング(株)の海洋事業のノウハウを活かし、係留力を抑制しつつ占有面積の小さい新形式のTaut係留システムと、軽量でコンパクトな海洋向け高張力ケーブルを使用し、海上施工性にも優れた係留施設コンセプトを提案する。

## Abstract

To promote the floating offshore wind turbine which is one of the potential measures of utilization of renewable energy, the economical foundation of floating structure and mooring system is desired. The high cost of fabrication and construction for the existing foundation system due to the large mooring force and low efficient offshore installation affected by ocean environment is a factor of less competitiveness. Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., LTD. proposes a new concept of taut mooring system with small area of possession, compact parts using High Tensile Parallel Wire Strand Cable and efficient offshore workability.

## 1 緒言

再生可能エネルギーの一つとして導入が促進されている風力発電は、残された陸上の適地の減少によりその設地場所を洋上へ展開しつつある。世界では累積7GW(2013年)が導入され<sup>1)</sup>、英国では既に630MW級の洋上風力発電所<sup>2)</sup>が建設されている。2004年我が国においても、北海道瀬棚町の港湾区域内で陸上からアクセスが可能な浅水深に最初の風車が設置<sup>3)</sup>され、その後より風況の良い海域を求めて沖合へと展開<sup>4)</sup>している。風力発電施設は風力発電機とそれを支持する基礎、および送電施設で構成されるが、設置海域の水深により大きな影響を受けるのが基礎構造で、その形式はモノパイルや重力式等の着底式からジャケット式へ、更におよそ50m以深では浮体式が適しているとされる。これは、海洋石油・ガス生産施設と同様で、水深、海象、海底土質、上載物等の条件に対して最も経済的な形式が選択される。浮体式風力発電施設には各種浮体とその係留形式が提案されているが、世界的に開発段階にあり、その安全性と経済性により実用化が左右される。

新日鉄住金エンジニアリング(株)は、1960年代(当時、新日本製鐵(株))から港湾施設や海洋石油・ガス生産施設の設計・製作・建設事業に取り組み、その中で、沖合施工現場における作業船の位置保持(係留)、および係留部材への鉄鋼製品の適用を発端として係留技術を培ってきた。本稿では、海洋事業で蓄積した技術を基に、洋上風力発電施設の浮体式基礎とその係留技術について、当社が開発した経済性に優れたシステムについて報告する。

## 2 浮体係留に関わる当社実績の紹介

これまで当社が取り組んできた、浮体と係留技術に関わる施設建設および係留材料商品を紹介する。

### 2.1 浮体と係留施設

海洋事業の主力商品である海洋石油・ガス生産プラットフォーム設置や海底パイプライン敷設等の海洋工事に用いる作業船は、施工現場で海底に打設した複数のアンカーとワイヤーロープを用い、多点カ

テナリー係留で位置保持される。そこで、波浪、潮流、風の環境や敷設中の海底配管等の外力条件下で、作業船の運動と係留解析を行い、施工計画や安全操業の管理に適用してきた。この技術を応用した港湾施設の例として、久慈国家石油備蓄基地(岩手県)の浮標式多点係留設備を図2-1に示す。本施設は原油受払に用いる10万DWTタンカーバースで、久慈湾内において、津波来襲時に緊急離脱できるよう沖合に船首を向けて係留するため、海底のアンカーからチェーンでカテナリー係留された6基の係留ブイに係留索で位置保持する多点ブイ係留方式を採用し、太平洋から侵入する波浪環境下で係留系の長周期動揺を考慮した動的解析を実施して設計・建設した<sup>5)</sup>。



図2-1 10万DWTタンカー浮標式多点係留設備(岩手県久慈湾、日本地下石油備蓄(株)提供)(写真)  
Fig. 2-1 Multi-Buoy Mooring berth for 100,000 DWT class tanker in Kuji bay, Iwate pref. (Photo by Japan Underground Oil Storage Co.,Ltd.)

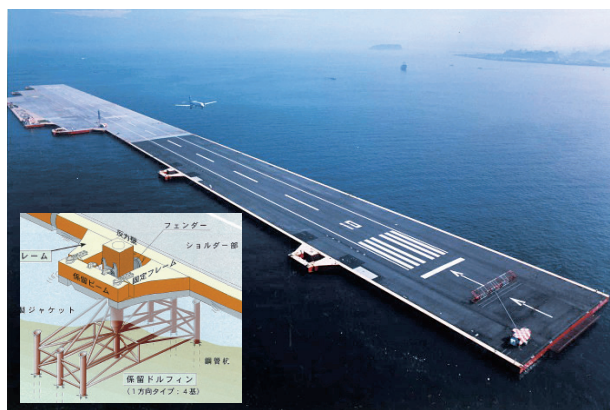


図2-2 メガフロート浮体式海上空港実証試験モデル(神奈川県横須賀港)(写真)  
Fig. 2-2 Mega-Float Floating Airport fieldtest model (in Yokosuka port, Kanagawa pref.) (Photo)

図2-2は海上空港等を適用対象とした大規模浮体構造物(メガフロート)の共同研究<sup>6)</sup>において、神奈川県横須賀港内に建設した長さ1000mの浮体式海上空港実証試験モデルである。当社は係留技術の開発を担当し、浮体の挙動や変形を考慮して、6基のドルフィン・フェンダー方式の係留施設の設計・製作・建設を担った<sup>7)</sup>。

一方、1999年からは風力発電施設の建設事業として、風車タワーの製作を開始し、その後2002年には北九州響灘地区に(株)エヌエスウィンドパワーひびきを設立して自ら風車を建設すると共に、発電事業を開始した。更に、NEDOの補助事業において響灘海域で鋼管トラス・重力式ハイブリッド基礎による着底式洋上風車の技術開発<sup>8)</sup>に携わり、環境省の浮体式風車開発では長崎県五島列島の杵島におけるSpar型浮体の係留設計を担当<sup>9)</sup>、また、NEDOの「福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」<sup>10)</sup>における浮体式風車の係留工事や、使用する係留チェーンの耐久性に関する研究に従事している。

## 2.2 係留部材

当社は新日本製鐵(株)当時、製鉄会社として鉄鋼製品の用途開発に取り組み、それまで斜張橋の吊り部材として使用していた橋梁向けの高張力ケーブルをベースとして、海洋用途向けの高張力ケーブルを開発した。具体的にはCONOCO HUTTON TLPを目標とした係留部材仕様である。

### (1) 橋梁向け高張力ケーブル

橋梁向け高張力ケーブル(NEW-PWS)は、吊橋のメインケーブル架設に適用されたPWS(Parallel Wire Strand)工法から派生した商品である。ケーブル素線として、 $\phi 7\text{mm}$ の高強度亜鉛めっき鋼線を用い、僅かに撚りを加えて集束し、ポリエチレン被覆したもので、撚りによる強度低下がないことから他のロープと比較して強度効率が優れている(図2-3)。ケーブルサイズとして素線数19本~491本、公称破断荷重1150kN~30150kN(素線強度1570MPaの場合)、1290kN~33990kN(素線強度1770MPaの場合)の製造が可能である。最近では、2000MPa級高強度亜鉛めっき鋼線も開発<sup>11)</sup>され、さらなる高強度化に向けた検討が進められている。これ

ら高強度亜鉛めっき鋼線は、高い引張強度に加え、高い疲労強度、耐クリープ性能、耐遅れ破壊性能、耐食性を兼ね備えている<sup>12)</sup>。

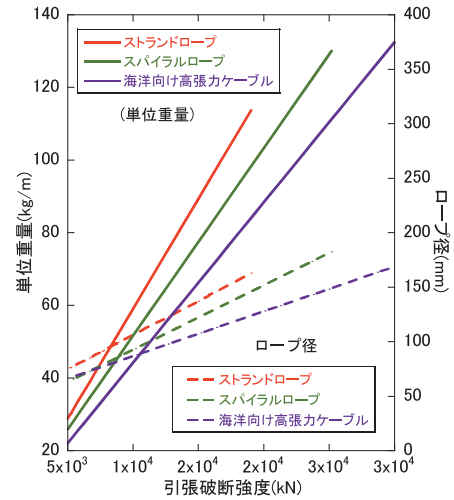


図2-3 各種ロープの単位重量、径と引張破断強度  
Fig. 2-3 Unit weight, diameter to tensile strength of ropes

### (2) 海洋向け高張力ケーブル<sup>13)</sup>

海洋向け高張力ケーブルは橋梁向け高張力ケーブルと基本的な構成は同じであるが、より海中での耐久性能を考慮して開発された。海洋向けとして特に求められる仕様は、①係留中における過酷な使用状態に対する耐久性、耐疲労性能の確保、②海中における水密性、耐食性、耐損傷性の確保、③施工性、維持管理性の確保等である。

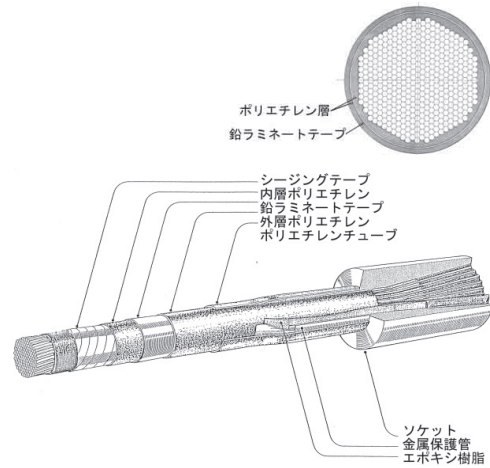


図2-4 海洋向け高張力ケーブルの構造  
Fig. 2-4 Structure of New PPWS Cable for marine use

海洋向け高張力ケーブルは前述の高い疲労強度を持つ高強度亜鉛めっき鋼線の集合体であるが、ケー

ブル全体としての疲労強度はケーブル末端部のソケット構造を含めて決定される。当社のケーブル末端部(図2-4)は、ソケット内部におけるワイヤ配列の最適化と、二層鋳込み方式により疲労強度を向上させている。図2-5はこれまで実施した引張疲労試験結果をまとめたものであるが、アメリカPTI基準<sup>14)</sup>などを参考として破断本数2%以内を疲労強度と考えると、本ケーブルの疲労強度は約250MPa程度ということが出来る。これは一般的な係留用ワイヤーロープの1.5～2倍程度の高い疲労強度である<sup>15)</sup>。海洋向け係留ケーブルについては、上記の引張疲労に加え、係留時の浮体動揺に伴うケーブル定着部の曲げ変形も考慮する必要がある。当社ケーブルはソケット口元部にエポキシ樹脂を充填し定着部の耐曲げ特性を向上させ、疲労を考慮した許容折れ曲げ角度を0.6度程度<sup>16)</sup>まで高めている。これに加え、末端部をピン定着として、末端部に曲げ変形を極力生じないようにする接続方法が一般的である。

なお、当社は最近より耐食性、耐久性を向上させた樹脂鋳込みケーブル末端定着構造について、今後実機に適用していく予定である。

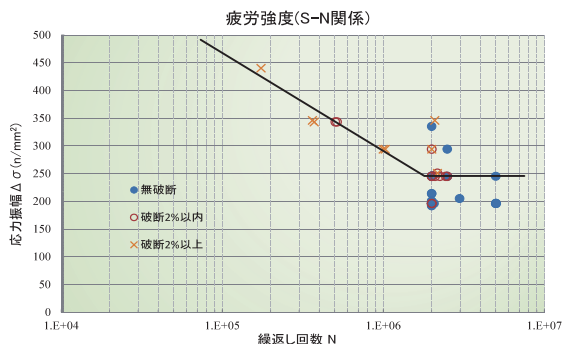


図2-5 海洋向け高張力ケーブルの疲労特性  
Fig. 2-5 Fatigue characteristics of High Tensile Parallel Wire Strand Cable

海水中の使用における腐食対策としては、①素線1本1本への溶融亜鉛めっき、②ケーブル外周への高密度ポリエチレン被覆といった防食のほか、海洋での適用にあたって、さらに、③被覆の損傷による素線と海水の接触に備えて、電気防食を施している。①溶融亜鉛めっきは、ケーブル製造時に取り込んだ水分と酸素によって生じる健全被覆下の素線腐食を抑止するためのもので、300g/m<sup>2</sup>の溶融亜鉛めっきで対処する。②高密度ポリエチレン被覆は、

海水や溶存酸素といった腐食因子の浸入を遮断するためのもので、厚みは防食性能上1mmで十分だが、外力に対する耐衝撃性を考慮して10mm程度としている。③電気防食は、被覆の損傷により素線が海水に露出した場合のみ作用するように、ケーブル両端のソケット近傍にアルミニウム合金陽極を設置して対処している。

### (3) 施工性と維持管理

海洋向け高張力ケーブルは強度が低下しない程度(撚り角度3.5度)に撚りを加えて素線を束ねているため、リールに巻き取ることが可能である。洋上においてはリールに巻き取ったケーブルを展開するのみで容易に施工できる。図2-6に施工用にリールに巻き取ったケーブル(後述の愛媛 TLP 用テンドン)を示す。

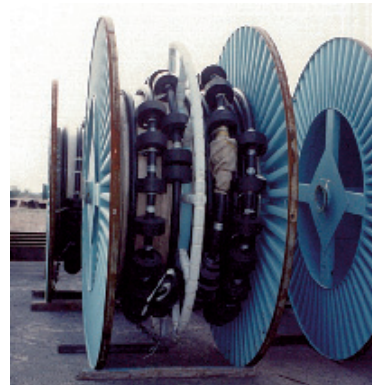


図2-6 海洋向け高張力ケーブルを用いた TLP テンドン(写真)  
Fig. 2-6 TLP tendon with high tensile cable for marine (Photo)

本ケーブルは、被覆と防食対策により基本的にメンテナンスフリーであるが、被覆の損傷が電気防食設計で想定した損傷より大規模な場合、ケーブルが防食状態に達しない状況が想定される。このような場合にはケーブルを回収して補修する必要がある。損傷は電位測定では判別できない可能性があるため、被覆損傷の有無を直接検知することが望ましく、当社では、海水浸入検知システムを開発している。本システムの原理は、ポリエチレン被覆内にケーブル全長・全周に亘って組み込んだ鉛ラミネートテープを検知層とし、この検知層と素線間のインピーダンスを測定することにより、海水浸入前後のインピーダンスの低下から海水浸入と損傷面積を把握するものである。

#### (4) 海洋向けケーブルの適用例

図2-7は、浮魚礁の係留に本海洋向け高張力ケーブルを適用した例<sup>17)</sup>である。浮魚礁となる直径8~10mのブイを、海底に設置したアンカーとチェーン(海底着底部)に、両端ソケットの本ケーブルを接続して一点カテナリー係留している。これまで高知県沖を始めとして、宮崎県沖から神奈川県沖まで、太平洋沿岸で約40基の実績があり、最大設置水深は1300mである。

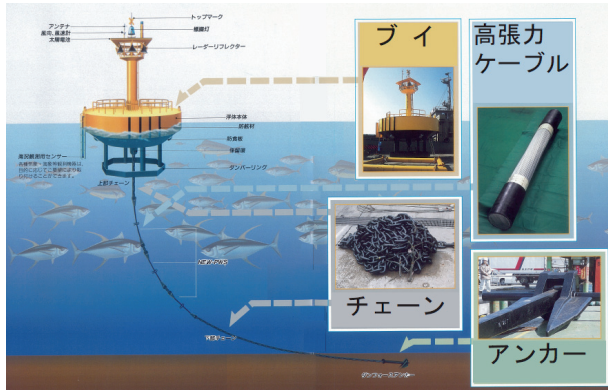


図2-7 一点係留式浮魚礁  
Fig. 2-7 Artificial floating reef buoy moored by single cable line

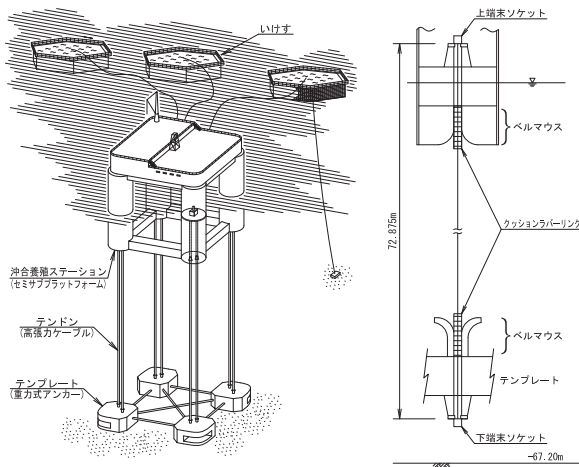


図2-8 ケーブル tendon 式愛媛 TLP  
Fig. 2-8 TLP 'Ehime' and Cable tendon system

図2-8は、本ケーブルを緊張係留プラットフォーム(TLP)の tendon (係留索)として適用した事例<sup>18),19)</sup>である。緊張係留は、 tendon に常時下向き張力を与えて浮体を係留する方法で、 tendon 上端を浮体に、下端をアンカー(テンプレート)に固定する。この例では、複数の tendon の張力調整が可能のように各端末ソケットをピン結合せず、そ

れぞれソケットの支圧部で固定している。ケーブルは軸張力に加え浮体の移動・動揺により末端部で曲げを受けるため、曲部の疲労がクリティカルとなる。このため、設計耐用年数の疲労被害度が許容値内となるよう、ケーブル放出部(ベルマウス形状)の曲率を決定した。また、ケーブルとベルマウスの側方接触圧の均等化と防損のためにクッションラバーリングを用いた応力緩衝部品を取付けしている。(図2-6)

### 3 浮体式洋上風力発電施設と係留技術

#### 3.1 浮体構造物とその係留<sup>20)</sup>

海洋石油・ガス生産で用いられるプラットフォームは、上載するプラントとそれを支持する下部構造物で構成される。構造形式から観た分類を図3-1に示す。水深が浅い場合には、重力式やジャケット・杭式など海底固定式のプラットフォームが用いられ、概ね150~200m以深の海域では支持構造物の製作と施工の経済性から浮体式が用いられている。図3-2は浮体構造物の位置保持方法を分類

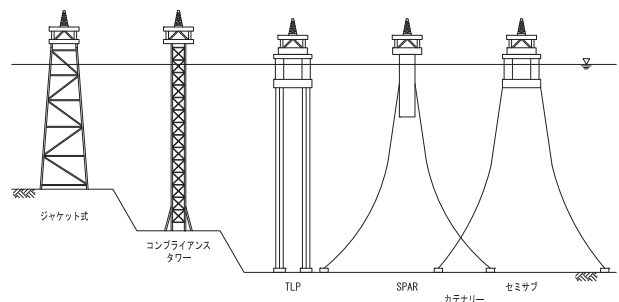


図3-1 海底石油・ガス生産施設の構造形式  
Fig. 3-1 Structure type of oil and gas facilities

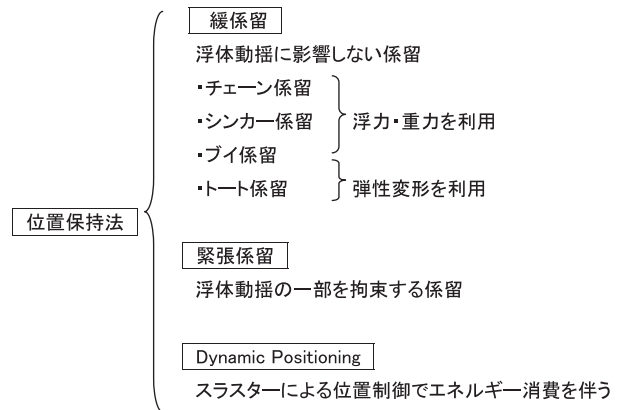


図3-2 位置保持法の分類<sup>20)</sup>  
Fig. 3-2 Category of station keeping method

したものであり、緩係留と緊張係留、および Dynamic Positioning System (DPS) に大別できる。緩係留は位置保持のばね係数が小さく、漂流力などによる変位を抑える係留で、波による周期の短い浮体運動を抑えることは主たる目的としない。前述の久慈多点ブイ式係留バースのようなチェーンを用いたカタナリー係留が代表例である。一方、緊張係留 (TLP) は鋼管等剛性の高い係留部材によって、浮体を海底に設置した杭基礎やサクシオンパイルなどの強固な基礎につなぐもので、浮体の復元力と位置保持の両方に寄与する。

### 3.2 洋上風力発電施設の変遷

洋上は風況が良く大きな賦存エネルギーを有することや、風車の大型化を進めるうえで大型重量物の海上輸送が可能であることから、風力発電は陸上から洋上へと向かっている。海外の洋上風力発電ではイギリスなど着底式に適した遠浅が多いが、日本沿岸域では急峻な海域が多く、僅かな離岸距離で水深が深くなる。一方、着底式が浮体式に対して経済的に有利な境界水深は50m程度とされ、着底式の適地は限られている。このため、洋上風力発電の拡大には自ずと更なる沖合域への展開が必要となり、水深50～200m程度の大陸棚を利用できる浮体式風車が着目されている。

### 3.3 浮体式洋上風力発電施設の係留<sup>21)</sup>

近年、風車の大型化が急速に進み、着底式で7～8MWの風車の実証機が既に製作されている。大型風車を支える浮体基礎構造も大きくなり、例えば5MWを想定した場合、その重量は1万トン前後になる。石油・ガス生産施設では既に10万トン級の浮体施設が建造され、海上輸送して設置されており、その係留施設は水深数百～3000mが対象とされている。このことから、水深200m程度以浅を対象とする浮体式洋上風力発電の係留施設の建造は一見容易なように思えるが、一施設への生産集約や大規模化と大型作業船の投入を前提としうる石油・ガス生産施設とは状況が大きく異なる。浮体式洋上風力発電における係留施設費用の全体工費に占める割合は大きく、風車搭載、係留施設の設置、浮体への取り付け工事、メンテナンス作業では海象などの不

確定要因を抱えるため、全体工費を大きく左右する一因になっている。

これらの点を踏まえ、風車の大型化と沖合展開した場合に浮体係留施設に要求される機能を整理し、合理的な係留技術の実現可能性について提案する。

#### (1) 浮体式基礎に求められる機能

浮体式基礎に要求される主な機能は、以下の3つに集約できる。

- ① Rotor Nacelle Assembly (RNA) の自重の支持
- ② 発電性能の確保 (揺れの抑制)
- ③ 水平面内における位置保持

①が本来の機能であるが、5MWを例とすればRNA重量は500ton程度であり、1万ton規模の浮体の排水量(浮力)に比べて小さく、風車の搭載などの建設過程やタワーの断面設計では重要であるものの、浮体の大きさを決める支配要因ではない。②の機能は、波、風によって浮体施設に生じる揺れを抑制し発電性能を保つ機能であり、浮体施設の傾きを制限することが排水量を1万ton規模にしなければならない主な理由である。③の機能は係留施設によって水平面内の位置を保持する機能であり、主として暴風時の波荷重が支配荷重となる。従来の海洋構造物の設計手法を適用でき、発電時に作用する大きな風荷重の作用頻度が大きいことが特色である。

図3-3は風荷重による転倒モーメントと浮力による復元モーメントとの釣合を示したものである。5MW機の場合の発電時には、ハブ高さ100m程度の位置に約1000kNの荷重が水平方向に作用し、

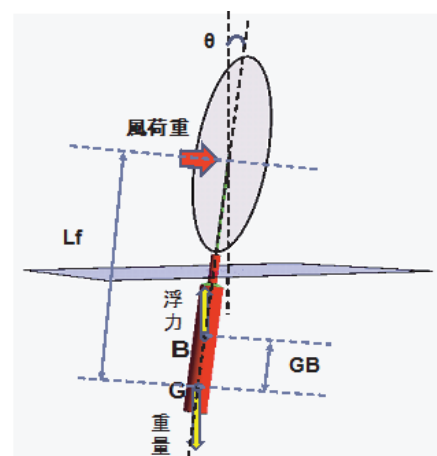


図3-3 風荷重と浮体の復元力との釣合  
Fig. 3-3 Balance of wind force and stability of floating structure

100,000kN・m 程度の大きな転倒モーメントを生じさせることが特徴であり、浮体の大きさ、形式の決定要因となる。

(2) 浮体と係留の形式

近年 Hywind (Spar)、WindFloat や Mono-Column TLP など多くの浮体式基礎形式(図3-4)が考案されており、実証実験がなされている。浮体式基礎に求められる機能は、前項で述べたように「浮体の傾斜の抑制」と「水平面内の浮体の位置保持」である。

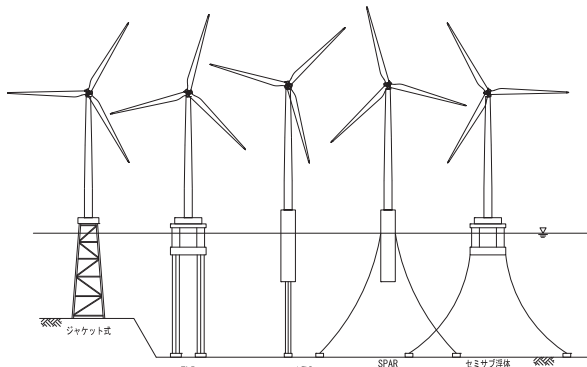


図3-4 洋上風力施設の構造形式  
Fig. 3-4 Structure type of floating wind mill

「風荷重による浮体の傾斜の抑制」を行う復元力が何に起因するかの観点から浮体式基礎形式を分類(図3-5)することができ、Sparのように重心を低くして傾斜時の復元艇を利用する「低重心型」、セミサブ形式やポンツーン形式のように水線面による静力学的復元力を利用する「高メタセンター型」、さらにTLPのように係留ラインの復元力を利用する「係留安定型」に大きく分類される<sup>20)</sup>。一方、「水平

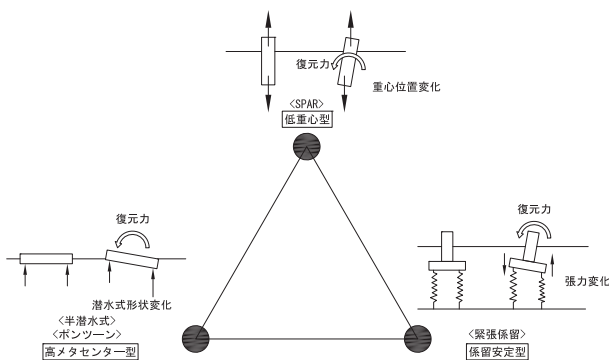


図3-5 復元力特性から観た形式分類<sup>20)</sup>  
Fig. 3-5 Category of floating structure by stability characteristics

面内での浮体の位置保持」は浮体の形式に関わらず係留施設に要求される。

(3) 行政、船級協会の対応

浮体式風力発電施設を日本領海内に設置する場合、船舶安全法が適用される。国内外で各種基準<sup>22)</sup>が刊行されており、国内では日本海事協会からガイドラインが刊行されている。また、着底式風車に関しては International Electrotechnical Commission の IEC61400-3 や、土木学会の設計指針<sup>23)</sup>があり、さらに浮体式風車を取り込んだ国際基準が策定されようとしている。係留施設に関しては、これらの基準の中で石油・ガス関連施設に関する ISO19901-7 などの「Station keeping systems」に規定される設計要件が準用されている。例えば、1つの係留ラインが破断した状態でも漂流しない冗長性や長周期動揺に対する検討などの設計要件は、石油生産施設向け浮体構造物に関する要求事項を踏襲し、経済性を高めることができるように安全率など照査方法に配慮がなされている。

(4) 各係留方式の特徴と課題

近年、国内外で浮体式風力発電の実証実験がなされており、確実に建造が進められ、データが蓄積されている。しかし現状では、建設単価が陸上や着底式より高く、コストダウンが重要課題である。以下、各形式とその課題を上げる。

①カテナリー係留形式

カテナリー(懸垂線)係留方式はチェーン重量の幾何学的釣合を利用し水平方向の係留力特性を得ることを原理とした方式であり、浮体に作用する荷重の大きさに応じて着底部のチェーンを浮き上がらせて係留力を円滑・連続的に変化しうる合理的な構造である。国内の浮体式風車の実証実験では、これまで本方式が中心となっている。水深50~200m程度において有効であり、これより浅い海域で大型の風車を係留する場合、十分な係留力が得られず、逆に深い場合、チェーン重量が大きくなり、浮体の有効浮力確保に負担が大きい。係留設計では暴風時に発生する張力に対して係留部材の所要強度と海底部での着底量を確保することが要件となる。国内事例では、チェーンの呼径が国内製造限界に近い132mmを使用していることが多い。その長さは水深の2~

3倍程度となる場合が一般的で、波、流れの条件によってはその展開長さが700m以上となる事例もあり、大きな占有面積を要するため、漁業等の海域利用に影響が大きい。また、約380kg/mというチェーン重量故に、大規模な設置工事を伴う。今後、さらに風車の大型化が想定され、チェーン係留方式に限界が生じる可能性がある。また、チェーンのリンクの摩耗・腐食などの耐久性に関する課題がある。チェーンは主に船舶や石油・ガス関連施設であるMODU(Mobile Offshore Drilling Unit)の係留部材として利用されており、その場合、移動を前提とし、チェーンを引き上げ、検査・交換を行うものとしている。ブレード直径が100mを上回る浮体式風車の場合、近年の設計思想では交換を避け20年間の使用を前提とし、それに見合う耐久性と共に海域に設置した状態での海中検査と損傷時の交換が課題になっている。

### ②TLP方式

海外の石油ガス生産施設では1000m以上の水深で実績があるが、国内実績例では前述の水産用実証施設である愛媛TLP(マリノフォーラム21)が挙げられる。一方、風車を対象としたTLP方式は石油生産施設で使用されているMini-TLP形式と類似の構造が提案されており、浮体の主要浮力部分を水面下に没することで受ける波力を抑制し、経済性を高めている。しかし、5MW程度の風車を想定すると、風荷重により、10,000～20,000KN程度の鉛直上向き荷重を海底部の基礎で支持する必要があること、また、風車の運転時の張力変動頻度が高いため、アンカーおよびテンドン上下端接合点の疲労強度などの耐久性の確保、さらに曳航時や据付け時の安定性確保が課題である。

### ③Taut係留

Taut係留方式は緊張させた複数のケーブルを浮体に斜めに取り付けて係留する方式であり、カタナリー係留方式とTLP方式の中間に位置する係留方式である。大水深海域ではチェーン重量増を軽減し、占有面積を小さくする方式として有効であり、石油ガス生産施設の係留には鋼索や繊維索を用いた実績がある。しかし、これまでの実績では、ケーブル材料の伸びにより浮体の動揺変位を吸収する構造であるため、水深が大きければ有効であるが、対象

の水深が200m以浅と比較的浅い浮体式風車の場合には、浮体の動揺変位を吸収するために必要なケーブルの伸びが得られない。一方、伸び率の高い繊維索を用いると、耐久性や施工中の損傷部位の強度に課題がある。

## 4 新しい浮体式洋上風力発電施設の係留システムの提案

浮体式洋上風力発電施設が広く実用化されるためには、建設単価の縮減が必須である。全体コストにおいて係留施設を中心とした施工コストの比率は高く、浮体のコンパクト化による建造費縮減のみならず、発生係留力を低減する浮体構造の採用と、これに伴う係留施設のコンパクト化が重要である。さらに量産化には、海象影響を受け易い大型海上クレーン船の使用が望まれないことが海洋石油生産施設と異なる点であり、洋上での設置工事(アンカー・係留部材の設置、浮体への接続)において、海象に影響され難く、かつ急速施工を可能ならしめることが肝要である。また、係留部材の長期耐久性、維持管理性についても考慮が必要である。

### 4.1 新しい係留方式の提案

#### (1) 係留力を縮減する浮体構造形式

係留施設に要求される機能を水平面内位置保持に絞ることができれば、係留力を縮減することが可能である。このためには、浮体傾斜の抑制を浮体自身の復元力を最大限利用する「低重心型」と「高メタセンター型」を対象とし、中でも、浮体を水線面積が小さい「低重心型」にすれば波による影響を小さくできる。

#### (2) 新しい係留方式

前項の各方式の課題の解決策として、円柱部材とケーブルを組み合わせた係留方式を提案する。高張力ケーブルを介して海底に固定した円柱部材を浮体に接続する方式で、カタナリー係留とTaut係留を組合わせた方式(図4-1)であり、以下の特色を有する。①カタナリー係留ではチェーンの重量が係留力特性に寄与しており、そのチェーンの重量相当を円柱部材の浮力に置き換えたものであり、その幾何学的特性により、ケーブル自体に伸びが無くても軟



らかい係留力特性を実現できる。②占有面積を小さくできる。③ケーブルを用いることにより、浮体との接続時の作業性を高めることができる。④円柱部材の浮力を調整することで、自在に係留力特性を設定できる。図4-2は係留特性の一例を示したものであり、横軸に係留点の変位、縦軸に係留力の水平成分を示したものである。図中には合わせて Taut 係留の係留特性を示した。新しい係留方式では暴風時などの大きな係留点の変位に対して係留力が過剰にならないような係留特性を有することができる。

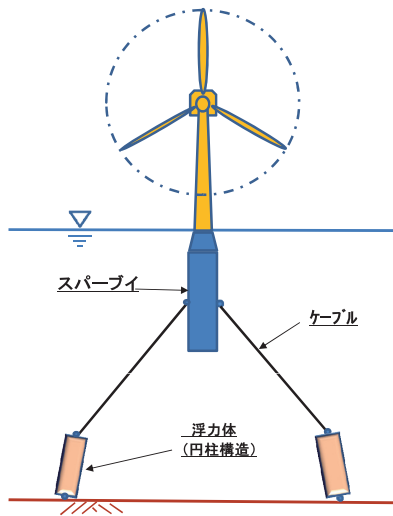


図4-1 新係留方式 模式図  
Fig. 4-1 New concept of Taut mooring

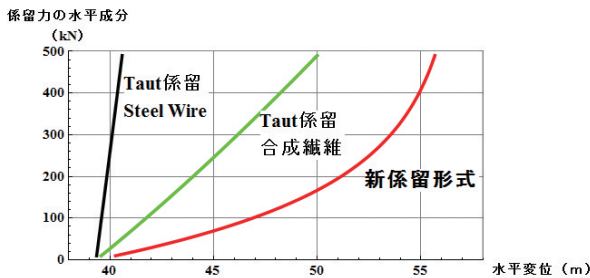


図4-2 係留特性  
Fig. 4-2 Mooring characteristics

図4-3は5MW風車を搭載したスパーバイに新係留方式を適用したモデルについて、暴風時の発生張力の時刻歴の一例を示したものである。張力応答に併せて、修正モリソン式、不規則波に対して Wheeler 式を適用し算定した波(青線)と風荷重(赤線)を示している。張力応答は Pitch の固有周期に対応した周期約16秒で変動し、波荷重に共振していることがわかる。張力は3300KN程度であり、大型

クレーン船を使用せずに設置できる程度のシンカー重量で可能である。

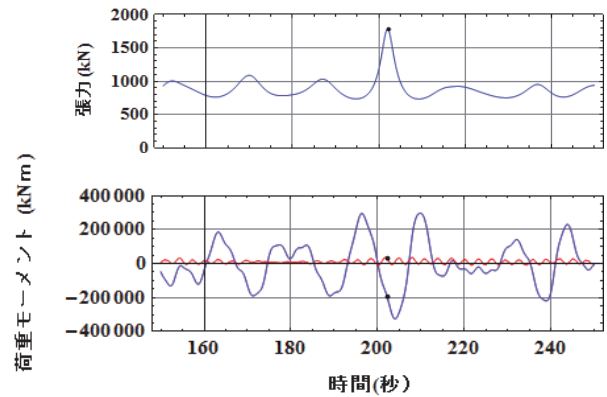


図4-3 張力応答(暴風時)  
Fig. 4-3 Response of mooring tension (Storm condition)

### (3) 施工性を向上する海洋向け高張力ケーブル

係留索に使用する海洋向け高張力ケーブルは、チェーンに比べて軽量、かつドラム巻き取りが可能であるため、製造工場からドラム巻の状態ですトレーラーや作業船に搭載して輸送し、現地で展設できる。また、両端ソケットにはクイックカプラー等を装着することで、現地での洋上接続工事の施工性を高めることができる。

## 5 結言

再生可能エネルギーの一つとして有望な浮体式洋上風力発電の実用化には、基礎構造である浮体と係留施設の経済性が重要である。そこで、既存のチェーンカタナリー形式等に対し、経済競争力を向上させるために以下の技術とコンセプトを提案した。

- (1) 係留施設のコストダウンのために、浮体の自立性を確保し、係留施設には位置保持機能を優先することで、発生する係留力を抑制することができる。
- (2) 従来の Taut 係留のように係留索の伸びに反力特性を期待せず、円柱部材と高張力ケーブルを用いて反力特性を調整しうる新形式の Taut 係留を提案した。これにより、200m 以浅の比較的浅い海域においても周辺海域利用への影響を抑制する占有面積の小さい浮体式風車の係留が実現可能となった。

- (3) 係留部材として、軽量で高耐久性の海洋向け高張力ケーブルを提案した。これにより、海象条件の影響を受けやすい海洋工事の作業効率が改善され、経済的競争力も向上できる。

以上から、浮体式洋上風力発電に、当社の係留技術と係留部材を適用し、経済的な施設の建設に貢献可能である。

参考文献, 引用文献

- 1) GWEC Global Wind Report Annual Market update 2013 P.55  
[http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report\\_9-April-2014.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf)
- 2) London Array ホームページ <http://londonarray.com>
- 3) せたな町公式サイト [www.town.setana.lg.jp](http://www.town.setana.lg.jp)
- 4) 例えば, アジア・バイオマスエネルギー協力推進オフィス, [www.qwiqbiomass.jp/topics/1401\\_02.html/](http://www.qwiqbiomass.jp/topics/1401_02.html/)
- 5) 関田欣治, 西村一人, 鳥井正志, 多点係留ブイバースの設計, 新日鉄技報 No. 350号 pp.21-26, 1993年7月
- 6) メガフロート技術研究組合, 超大型浮体式海洋構造物(メガフロート)研究成果報告書, 平成7～9年度メガフロートの空港利用に関する実証的研究, 成果報告書, 平成10～12年度
- 7) 鳥井正志, 大久保寛, 林伸幸, 松岡和巳, 金井久, 大規模浮体構造物の開発, 新日鉄技報 No.372, pp.23-32, 1999年10月
- 8) 犬飼他, 洋上風力発電設備基礎の設計技術の確立, 新日鉄エンジニアリング技報 Vol 4\_技術論文6.
- 9) 宇都宮智昭ら, 環境省 浮体式洋上風力発電実証事業, 第34回風力エネルギーシンポジウム 平成24年11月 日本風力エネルギー学会
- 10) 福島洋上風力コンソーシアムホームページ, <http://www.fukushima-forward.jp/>
- 11) 樽井敏三, 西田世紀, 吉江淳彦, 大羽浩, 浅野厳之, 落合征雄, 高橋稔彦, 2000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2300MPa級PCストランド用線材の開発, 新日鉄技報第370号, 1999
- 12) Tarui, Toshimi; Maruyama, Naoki; Eguchi, Tatsuya; Konno, Shinichi, Development of High Strength Galvanized Steel Wire for Bridge Cable. IABSE Symposium Report, IABSE Conference, Seoul 2001, pp. 33-40
- 13) 増田一広, 石田次雄, 鈴木嘉秋, 高橋英生, 井上純一, 岡村秀夫, 藤原友夫, 土居一幸, TLP係留用重防食NEW-PWSについて, 製鉄研究 第326号, 1987
- 14) Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, 5th, Post-Tension Institute
- 15) DNV-OS-E301 2013 Position Mooring, Oct.2013
- 16) 坂本良文, 北條哲男, 江口立也, 矢野守俊, 斜張橋用プレ防食型ケーブルの二次応力および曲げ疲労強度に関する検討, 土木学会論文集 No.446, 1992. 4
- 17) 関田欣治, 大久保寛, 鳥井正志, 上野敏之, 大型浮魚礁の開発, International Conference on Ecological Sys-

- tem Enhancement Technology for Aquatic Environments, '95. (ECOSSET '95), 1995年10月29日11月2日
- 18) 井上一正, 菊池省吾, 鳥井正志, 吉田 正, テンションレグブラットフォームの曳航と据え付け, 土木学会誌 Vol.76, pp.18-20「技術最前線」, 1991年6月
- 19) 金網正夫, 関田欣治, 関本恒浩, 島田潔, TLP動的応答の実海域計測結果及び係留ラインの強度, 日本造船学会論文集 第175号, pp227-239, 1994年
- 20) 鈴木 英之 浮体式洋上風車の開発動向, 日本風力発電協会誌, 2012年8月
- 21) 大久保 寛, 浮体式基礎の設計・建造について, 日本風力エネルギー学会誌 第37巻第4号 通巻108 2013年2月
- 22) 各種ガイドライン NK, DNV, ABS, GL など
- 23) 土木学会, 2010, 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年版], 構造工学シリーズ 2