

大規模浮体構造物の開発

Development of a Very Large Floating Structure

鳥井 正 志^{*(1)}
Tadashi TORII
金井 久^{*(5)}
Hisashi KANAI

大久保 寛^{*(2)}
Hiroshi OHKUBO

林 伸 幸^{*(3)}
Nobuyuki HAYASHI

松岡 和 巳^{*(4)}
Kazumi MATSUOKA

抄 録

大規模浮体は数百～数千メートル規模の人工地盤を浮体により洋上に構築する新たな構造物として研究開発が進められている。本構造はオイルタンカー等の船舶とは異なり、構造上の相違から多くの技術的な課題がある。その代表として、長大で薄い形状のため波浪中挙動は弾性体としての評価が必要であり、この数値解析手法を開発し更には鉛直動揺の抑制方法を検討した。また係留された大質量浮体の波浪中応答特性等を考慮した係留設計法の開発や分割された浮体の洋上接合による建設方法、鋼製浮体の超長期防食法等新日本製鐵が取り組んだ課題に焦点を当て研究開発の成果を報告した。

Abstract

Very large floating structures (VLFS) are being developed as a totally new method for creating artificial land on the sea, hundreds to thousands of meters long, in the form of a floating body. Since the VLFS is quite different in structure from large ships like crude oil carriers, lots of technical aspects and problems have to be clarified and solved to construct VLFS a practical reality. One example is that, due to its relatively small thickness in proportion to the huge length, VLFS should be considered as an elastic body as far as its behavior in waves is concerned. Accordingly, a numerical analysis method for clarifying its behavior was developed and measures for reducing its vertical displacement was studied. A mooring design was developed taking into consideration expected response behavior of the large mass floating body on waves when moored. Also were developed methods for joining float units sections into one large unit on the sea and ultra-long period anticorrosion measures. This paper focuses on the results Nippon Steel Corporation achieved regarding these and other aspects which it approached in relation to VLFS.

1. はじめに

海に囲まれた我が国は、平野部、特に経済活動の盛んな都市部を中心に高度に利用されて来ており、利用可能な空間を求めて山間部や海岸部へと空間利用を拡張し続けている。一方、海洋空間は古くから水産や鉱物資源の収穫や生産、物資の運搬や交通、レクリエーション等の場として利用され、また、沿岸部は埋立により陸地の延長として利用されてきた。このような背景のもと、海洋空間の新たな利用形態として近年“大規模浮体構造物(あるいは超大型浮体式海洋構造物)”の研究開発が盛んに行われている。

大規模浮体構造物とは、浮体を人工地盤として空港や物流ターミナル等の施設を海上に立地させようとする新たなコンセプト(図1参照)である。このコンセプトが本格的に世に提案されたのは日本造船工業会による関西国際空港(I期)の浮体式海上空港案であった。当初は基盤部を半潜水(セミサブ)式浮体としていたが、その後

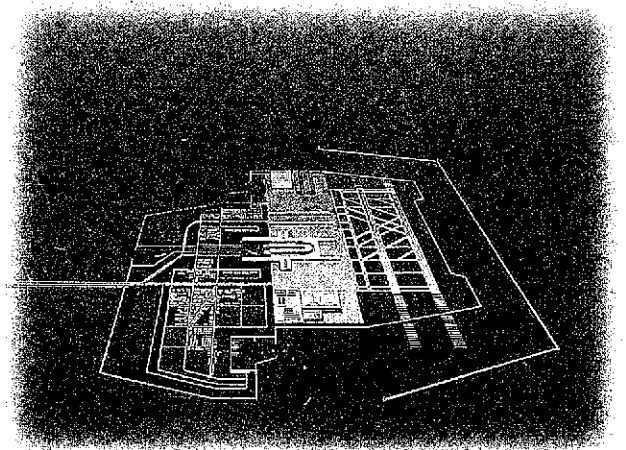


図1 大規模浮体構造物の例(浮体式海上空港)

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 建設・技術部 プロジェクト計画・技術グループマネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 電100-8071 電(03)3275-5453
*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 建設・技術部 開発グループ マネジャー

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 建設・技術部 プロジェクト計画・技術グループ
*⁽⁴⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究センター 土木構造 主幹研究員
*⁽⁵⁾ 開発推進部 鋼材技術グループ グループリーダー

II期工事では低コスト化を図るため箱(ボンツーン)型浮体として提案(マリンフロート推進機構)したものの、種々の課題があり実現に至らなかった。

代表的な浮体構造物は船舶であり、その他に石油掘削リグや各種ブイ、浮桟橋等がある。今日実績のある大型の浮体構造物としては、オイルタンカーの440m長×58.8m幅×29.8m深(Seawise Giant)、洋上石油備蓄タンクの397m長×82m幅×25.4m深(白鳥洋上石油備蓄)等があるが、一般にこれらは造船ドックや陸上ヤードで一体づつ製作されるため、その寸法には製作設備により自ずと制限がある。しかし、大規模浮体構造物は単独では完成寸法に至らない規模、例えば長さで数百mから数kmに及ぶ規模を想定している。また、現存の大型浮体構造物は一部にコンクリート製もあるが材料の強度、加工性、耐久性、経済性等から鋼製が主流であり、その設計・製作技術は造船工学を中心に発展してきた。

しかしながら、浮体がこのように大規模化すると旧来あまり問題とならなかった事項や実績が課題となった。これらの課題の解決と実寸大規模の実証を目的に1995年4月に鉄鋼造船会社17社によりメガフロート技術研究組合を設立し、共同研究も実施している。

本報は、大規模浮体構造物について、鋼構造あるいは海洋構造物の観点から新日本製鐵が独自に、あるいはメガフロート技術研究組合における共同研究で担当したテーマの内、次の項目に焦点を当てこれまでの成果の概要を報告するものである。

- ・波浪中の弾性挙動解析と動揺抑制の方法
- ・係留時の挙動解析と施設設計の方法
- ・洋上での建設方法
- ・鋼構造の超長期的な耐用(防食)方法

2. 波浪中弾性挙動と動揺抑制

2.1 波浪中弾性挙動

大規模浮体は水平方向の長さが浮体の深さに比べ極端に大きく、相対的に曲げ剛性の小さな構造物となる。このため剛体と仮定することができず、波浪中応答は弾性変形が卓越する。また、 L (浮体長)/ λ (波長)が大きくなるため波浪中運動は小さくなり、発生断面力も減少することが考えられる。このような特性の大規模浮体構造において上載施設の稼働予測や経済的な構造設計を行うためには、弾性浮体としての挙動の解明は必要不可欠といえる。

2.1.1 弾性浮体の波浪中応答解析

従来の剛体浮体の動揺解析では、各境界条件を考慮してラディエーション(付加質量力、造波減衰抵抗力)とディフラクション(波浪強制力)のポテンシャルを求め、ベルヌーイの式により流体力を算定して運動を解いている。これに対し大規模浮体では弾性体として全体の撓み性を考慮する必要があるため、浮体に適当な離散化を施し、各運動自由度に対してラディエーションポテンシャルを求める手法を採用した。本研究において、流体力は境界要素法(BEM)により算出し、弾性浮体部には有限要素法(FEM)を用いて流体-構造系の相互作用(造波抵抗力)を考慮した波浪応答解析法¹⁾を構築した。これにより任意形状浮体を弾性体として扱える波浪応答解析が可能となった。

2.1.2 実験による検証

解析結果を検証するため二次元の水理実験²⁾(図2参照)を実施した(新日本製鐵相模原技術センター内造波水路を使用)。模型はポリウレタン製(比重0.22、ヤング率 1.051 kgf/cm^2)で、寸法は長さ

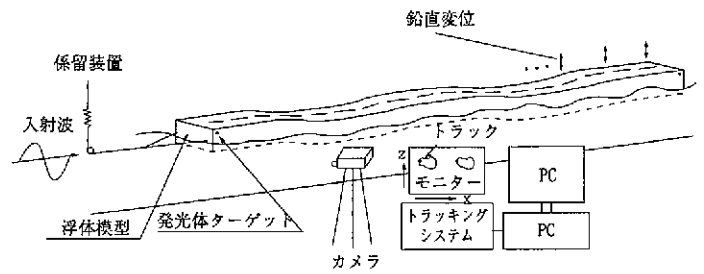


図2 実験計測の概略

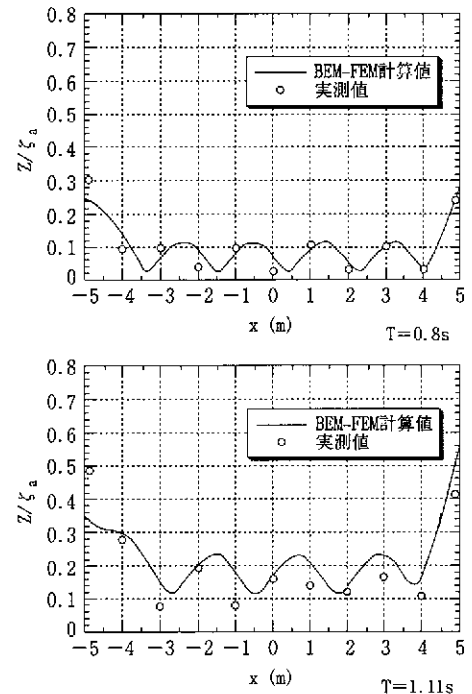


図3 鉛直応答変位分布の比較

10m、幅0.5m、厚さ76mmである。縮尺1/100とすれば実機は1000m長さの浮体となる。実験水深は1.1mである。鉛直応答変位はレーザ式変位計により計測した。

鉛直応答の実験値と解析値の比較例を波周期(T)0.8秒と1.11秒の場合について図3に示す。横軸は浮体の長さ方向の位置(x)、縦軸は鉛直変位Zを波高 ξ_a で除した無次元値である。比較結果から得られた主な結論を以下にまとめる。

- 1) 波浪に対する浮体の鉛直動揺は弾性応答が卓越し、周期依存性が顕著である。
- 2) 鉛直動揺量は波長が長い程大きくなる傾向がある。また、両端部で中央一般部の2~3倍動揺する。
- 3) 解析値と実験値は概ね一致しており、工学的に本解析ツールは十分有用である。

2.2 波浪中動揺抑制

数値解析と実験の結果から、大規模浮体の波浪中動揺は弾性応答が卓越し、両端部の鉛直応答が中央部に比べ相当大きい特性が確認された。大規模浮体施設の基本コンセプトでは防波堤により波浪を低減して浮体動揺を抑制するとしているが、環境上の配慮から波浪透過率の高い防波堤を採用する場合や外洋に面した沿岸に大規模浮体を建設する場合は、この端部応答が上載施設稼働の障害となったり、防波堤建設により不経済となることも考えられる。このため大規模浮体が競争力を得るためには、浮体自身により防波堤の消波効

果に相当する鉛直動揺抑制法の開発が望まれる。

2.2.1 動揺抑制構造の考案

端部の鉛直動揺については中央一般部の動揺を抑制する方法として種々の方法を検討したが、ここでは水理実験により効果が確認できた没水水平板と鉛直消波板を波入射側に取付ける二つの方法(図4参照)について示す。前者は没水させた水平板を浮体端部から吊降ろした形で固定したものであり、後者は浮体端部の下方に壁を取付けたものである。

2.2.2 動揺抑制構造の実験的研究

両抑制構造の効果を確かめるために水理実験³⁾を実施した。浮体模型は硬質塩化ビニル低発泡板製(比重0.7, ヤング率13 000kgf/cm²)で、寸法は長さ10m, 幅0.5m, 厚さ15mmである。これに浮力材として発泡ポリウレタンを下側に接着した構造である。想定実機として1 000mの浮体を仮定し、実験縮尺は1/100とした。実験水深は1.1mである。鉛直応答変位の計測にはレーザ式変位計を用いた。没水水平板(水平板長38cm, 設置水深15, 30cm)または鉛直消波板(没水深さ15, 30cm)がある場合とない場合の鉛直応答結

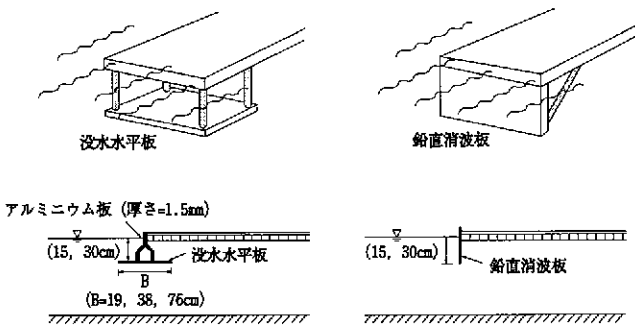


図4 動揺抑制構造

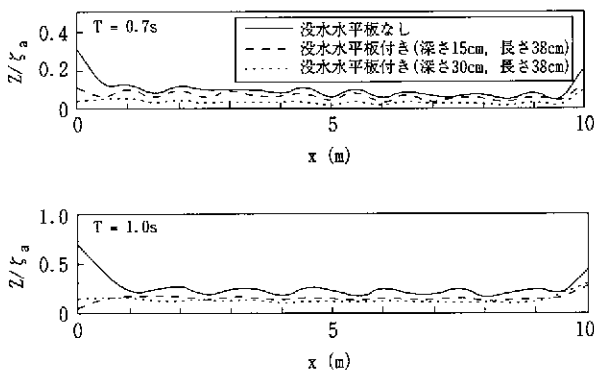


図5 没水水平板の鉛直応答変位分布

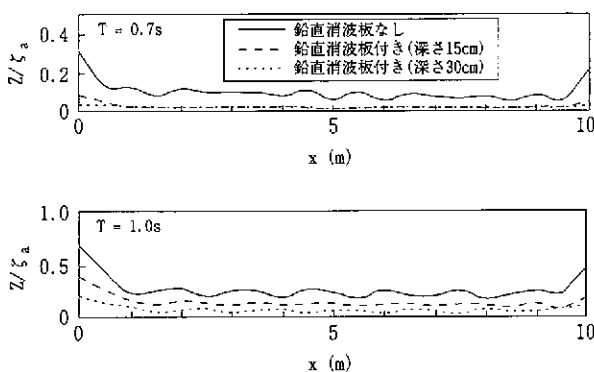


図6 鉛直消波板の鉛直応答変位分布

果の比較例を、波周期0.7秒と1.0秒の場合について図5, 6に示す。横軸は浮体の長さ方向の位置, 縦軸は鉛直変位を波高で除した無次元値である。波は左側から入射している。検討結果から得られた主な結論を以下にまとめる。

- 1) 没水水平板, 鉛直消波板ともに端部動揺抑制効果があり, 最大10~20%に低減したケースもある。
- 2) 動揺抑制効果は浮体端部において顕著であるが, 中央一般中間部においても効果が見られる。
- 3) 両抑制構造の効果が確認でき, 波浪条件の比較的穏やかな海域では防波堤を省略できる可能性がある。

没水水平板の抑制効果は水平板の長さや設置水深の違いによって変化しており, 現時点では水平板が鉛直動揺する際の付加質量力の大きさが一要因と考えている。鉛直消波板による抑制効果は入射波浪の一部が反射波となり, 浮体下へ進入する波浪が減少するために起こる。これはカーテンウォール(壁)式防波堤の消波効果と同様な効果であるので, 短周期となる程効果的となる。

3. 大規模浮体の係留

3.1 大規模浮体の係留の特徴

係留施設は浮体工法の建設総コストに占める割合は比較的小さいが, 台風来襲時において浮体を漂流させないことや, 上載施設の機能に応じて浮体の水平面内挙動を抑制することなど安全性, 信頼性, 機能性に関わる浮体工法の根幹をなす構成施設である。

係留施設には様々な形態があり, 浮体規模, 用途, 海域に応じて係留系の固有周期などを検討し, 合理的な係留方式, 配置を選定する必要がある。また, 防波堤配置による所要静穏度と係留限界の検討, アクセス施設への影響検討, 浮体ユニット接合時の仮係留施設としての利用など, 係留施設を浮体全体システムの中で総合的に検討し, 浮体工法の経済性, 安全性, 信頼性の向上を図るように計画することが必要である。

本章では, 大規模浮体の係留について, 係留方式の概念, 設計事例, 設計法を紹介する。

3.2 係留方式の概念

浮体構造物を係留する事例として, 白島, 上五島での洋上石油備蓄, レクリエーション施設, タンカーバース, 係留船岸の係留施設などがある。いずれの事例も浮体の規模は数百mであり, 大規模ではないが, 海洋環境下において長期にわたり浮体を係留した実績として参考となる。係留方式はドルフィンと定反力フェンダーを組み合わせた方式, 索鎖方式などが用いられている。以下, 大規模浮体の係留施設に要求される機能及び形式の選定について記述する。

3.2.1 要求機能

5 km規模の浮体空港を対象とした係留施設の配置の概念図の一例を図7に示す。ドルフィンにより浮体を多点係留し, また, 日射によって浮体全長で約1mの伸縮が生じるため, 係留ドルフィンを浮体の片側に配置することにより対応し, 浮体の長辺側に50基, 短辺側に20基を配置している。浮体と係留ドルフィンは図8に示すように, 定反力ゴム防舷材を介してガイドフレームにより接続している。

大規模浮体の係留施設に要求される事項をまとめると次のようである。

- ・要求(1): 利用時の風, 波, 潮流に対して浮体の水平面内の動揺変位を上載施設の機能に応じて抑制すること。

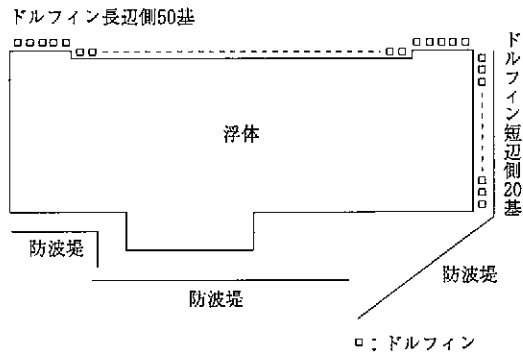


図7 係留施設の配置概念図

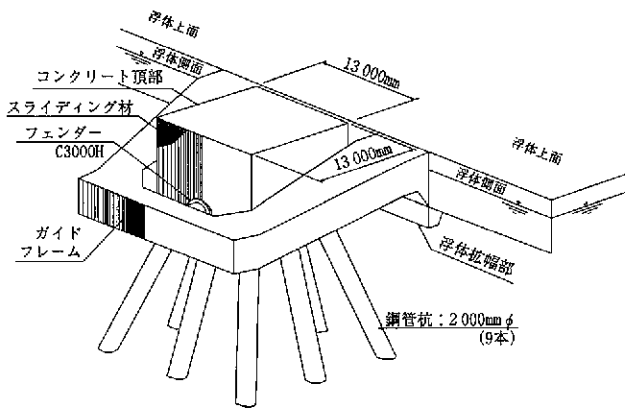


図8 浮体と係留ドルフィンの接続機構

- ・要求(2)：異常時の風、波、潮流及び地震に対して耐荷力を確保するとともに、過大な係留力が生じないように係留力を抑制すること。
 - ・要求(3)：浮体構造物と地盤に固定された係留施設間に生じる水平面内の相対的ずれを吸収すること。
- 相対的ずれの発生原因としては、日射による浮体の伸縮と不均一

日射による浮体の面内変形(そり)がある。大規模浮体の場合、相対的ずれ量が大きくなり、係留方式を質的に変化させる場合がある。

係留施設による浮体の拘束の強さの観点から、上述の要求(1)と要求(2)、(3)は互いに反する事項であり、浮体の動揺変位を抑制するため拘束を強くしすぎると、波浪、地震荷重や面内変形によるずれ量により係留力が増大し、不経済になったり実用上成立しなくなる場合がある。逆に拘束を弱くすると、係留力は小さく経済的となるが利用時の浮体の動揺が大きくなり、上載施設の機能に支障を生じることになる。従って上載施設の機能上の動揺制限、設置海域の海象条件、浮体の変形量に応じて係留方式を選定し、適度な拘束の強さで浮体を係留することが重要となる。

更に要求事項として、(4)潮位変化や波による浮体の上下動への対応、(5)係留施設の設置誤差や浮体の製作誤差の吸収、(6)施設の高さ制限(空域制限など)、(7)津波への対応、(8)施工性、(9)耐久性、(10)メンテナンス性、(11)経済性などが挙げられる。

3.2.2 係留方式の選定

5 km規模の浮体空港を対象とした三つの試設計事例を表1に示す。浮体の規模が大きいことと、浮体の変位を抑制する空港施設の機能上の要求とともに係留施設にとって厳しい条件である。三つの試設計事例はいずれも水深20m程度の内湾に浮体空港を設置することを想定しており、3ケースともに浮体をドルフィンで多点係留する方式としている。防波堤の配置状況により浮体の設置海域の静穏度が異なり、設計条件に応じて浮体とドルフィンの接続機構、緩衝材の種類を選定しており、係留系の固有周期等に応じて支配荷重が異なっている。

3.3 設計方法

係留施設の設計では、まず、基本検討として環境条件、要求機能に応じて、係留方式、基数、配置、緩衝材などの一次選定を行う。次に各種荷重に対する浮体の水平面内の挙動シミュレーションを行い、得られた浮体の動揺量、係留力の算定結果が許容値内に収まる

表1 空港モデル試設計例

	モデルA	モデルB	モデルC
防波堤	有り 浮体の2辺に配置	有り 浮体の3辺に配置	無し
浮体設置位置 設計条件	有義波高 $H_{1/3}=2.2\text{m}$ 有義周期 $T_{1/3}=4.8\text{s}$ 風速 $U_{10}=27.5\text{m/s}$	有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 有義周期 $T_{1/3}=9.6\text{s}$ 風速 $U_{10}=50\text{m/s}$	有義波高 $H_{1/3}=4.6\text{m}$ 有義周期 $T_{1/3}=9.6\text{s}$ 風速 $U_{10}=50\text{m/s}$
設置水深	20m	22m	20m
浮体構造 (長さ×幅×深さ×吃水)	ポンツーン (4 770m×1 710m×7m×1.5m)	ポンツーン (4 560m×1 000m×4.5m×0.72m)	セミサブ (5 000m×840m)
ドルフィン構造	長辺 50基 短辺 20基 設計荷重 1 018tf/基	長辺 108基 短辺 11基 設計荷重 700tf/基	長辺 22基 短辺 15基 設計荷重 2 000tf/基
浮体とドルフィンの 接続機構	ガイドフレーム方式	ガイドフレーム方式	ドルフィンリンク方式
緩衝材	定反力防舷材 高さ3m 2個/ドルフィン	テフロン材	定反力防舷材 高さ2.25m 16個/ドルフィン
支配荷重	波荷重(変動波漂流力)	変動風荷重, 地震荷重	波荷重
参考文献	メガフロート技術研究組合報告書	浮体式海上空港 マリンフロート推進機構編	超大型海洋構造物のテクノロジー アセスメントの一例 日本造船学会誌638~652号

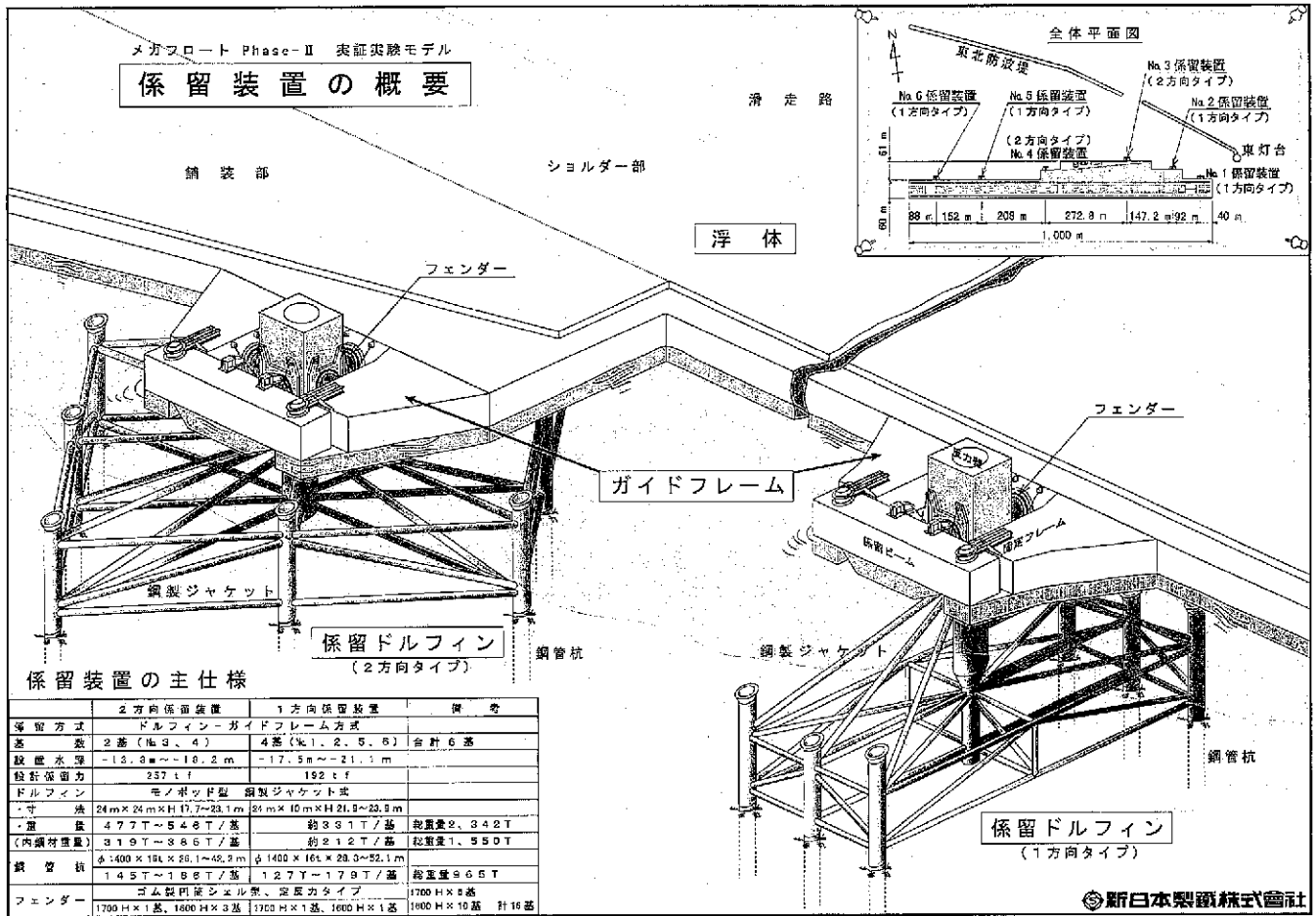


図9 メガフロート実証実験用空港モデルと係留装置の概要

ように配置、基数を調整し、最終的に得られた係留力を用いてドルフィンなどの施設の設計を行う。

基本的には既往の係留構造物の設計要領と同じであるが、その規模の違いから検討にあたっては次の点に留意する必要がある。

- (1)浮体の質量が大きいため、浮体と係留施設からなる係留系の固有周期が数十秒と長い。このため、変動波漂流力、変動風、長周期波浪など変動周期の長い変動荷重と共振する可能性があり、荷重の対象範囲を広げて検討する必要がある。また、地震に対しては係留系の固有周期が長く浮体は免震構造となり揺れないが、係留施設自体は地震荷重が支配荷重となる場合もあり、浮体、係留施設の相互影響を考慮した検討が必要となる。
- (2)大規模浮体の係留系の固有周期は数十秒となるため、支配荷重は変動波漂流力となる場合が多く、波漂流力の算定が重要となる。波漂流力係数は浮体の弾性変形により低減される効果が期待できる。また、浮体の規模が大きいため、浮体自体が波浪場に影響を与えるため、流体力算定にあたっては浮体と防波堤、護岸などの周辺施設を一体とした解析が必要となる。
- (3)浮体が大規模になるため、風荷重算定にあたっては荷重の空間的な変化を考慮する必要がある。変動風荷重については空間相関による荷重減殺効果が期待できる。
- (4)浮体の日射による伸縮量、面内変形量大きい。

3.4 メガフロートPhase-II 浮体空港モデルの係留装置

メガフロート技術研究組合における共同研究⁴⁾(Phase-II, 1998年度~2000年度)では、航空機の離着陸実験を実施するための浮体

式空港モデルを設計し横須賀沖に建設した(図9参照)。本施設は長さ1000m、幅121mの世界最大の浮体構造物である。浮体は鋼製箱型(ボンツーン)で、係留装置は6基の係留ドルフィン、浮体接続用ガイドフレーム、及び緩衝フェンダーで構成される。この設計には施設の全体系を扱う係留システム設計と、個々の機構、構造を設計する係留装置設計を実施した(図10参照)。

3.4.1 係留システムの設計

はじめに浮体とその係留条件として、施設の建設過程から完成状態における自然条件(立地条件、周辺地形・地質、水深、波浪、風、温度等)、運用条件(空港の制限表面、許容変位等)と各条件に対する強度や変位の許容値等の設計クライテリアを設定した。海象

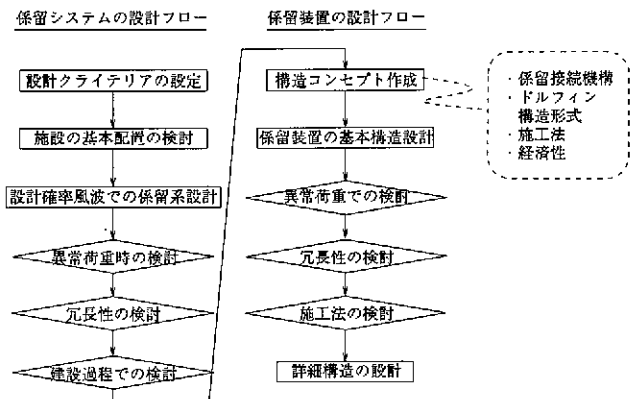


図10 係留施設の設計手順

条件は、常時、暴風波時(遭遇確率0.2)、異常時(異常海象(遭遇確率0.02)、地震、津波)とし、更に事故時としてドルフィン1基の欠損状態を、また建設過程の部分浮体係留状態を設定した。これらの条件下で係留装置の配置、仕様が適正になるよう検討の結果、6基の係留装置を配置した。この内中央2基を主にSurgeとSwayに有効となるよう縦横2方向係留、両外側の各2基を主にYawとSwayに有効となるよう横1方向係留とした。

3.4.2 係留シミュレーション

係留浮体の変動外力下挙動の把握には動的応答解析を実施した。大規模浮体の係留解析は浮体の弾性影響が少ない水平運動の把握を目的とするため、解析に用いる運動方程式は6自由度剛体運動として取り扱い水平3自由度(Surge, Sway, Yaw)の応答を評価した。運動方程式中のラディエーション流体力(付加質量力、造波減衰力)とデフラクション流体力(波強制力)は三次元領域分割法と境界要素法のハイブリッド法⁵⁾で計算し、波漂流力は浮体の弾性影響を考慮して相当矩形弾性体モデルの計算結果を用いた。また、係留フェンダーの復元力特性は非線型性、ヒステリシス、温度影響等の変動要素を考慮した。数値計算は運動方程式中の変動外力に対する時刻歴応答を求めた。再現時間は不規則波1ケースにつき設計波周期の約1000波分に相当する6000秒間とし、その最大応答を1/1000期待値とみなした。不規則波は位相を変え20ケース作成して計算を実施し、各最大応答を統計的に処理して安全性を判定した。

3.4.3 係留装置の設計

係留装置の形式は、潮位と波浪中動揺による浮体の上下動を許容しつつ平面的に浮体を位置保持するドルフィンガイドフレーム方式とし、両者間には緩衝材として定反力型のゴム製セル型フェンダーを装着した。ドルフィンは滑走路浮体に隣接し、空港の制限表面以下の標高となるよう海面上突出を最小限に留めた係留柱と、これを支える鋼製ジャケット式下部構造から構成されるモノポッド型ドルフィン(図9参照)である。各部の寸法決定には潮位と津波の水位変動、浮体の波浪中弾性応答、温度変形等を考慮して浮体の離脱、衝突が生じないようにした。各構造強度は各状態で設定した荷重条件と許容応力等を満たすよう構造部材を決定し、更に事故等を仮定して1構造部材欠損状態の検討、またプッシュオーバー解析により終局耐力を把握し冗長性を確認した。これらを考慮した空港用“低頭拘束型”係留装置は、新日本製鐵が新たに提案し採用されたものである。

3.5 まとめ

大規模浮体の係留施設の設計には既往の浮体構造物の実績や設計法を活用するが、浮体が大規模であるために、前述のように、(1)係留系の固有周期が長いこと変動荷重の検討対象となる周波数範囲

を広げる必要があること、(2)波漂流力などの流体力算定にあたっては護岸や防波堤などの周辺施設と浮体を一体として解析する必要があること、また、(3)口射による浮体の変形量が並はずれて大きいことなどの新たな技術課題があった。更に施設の重要性から設計荷重を越える異常な外力に対する挙動を把握する必要があり、ドルフィンの靱性を考慮した解析により安全性を確認した。メガフロート技術研究組合との共同研究活動⁵⁾⁷⁾を通じて解析ツールを整備し、十分な安全性、信頼性をもって大規模浮体の係留施設を提案できる状況となった。

係留施設の提案にあたっては実績を重視し、既存のハードウェアを組合せることにより信頼性のある構造を提案したが、今後、新たな技術を開発し、更に高機能、経済的な係留施設を適用する余地はある。また、今後の大規模浮体の提案活動を通じて、係留施設単独としての検討に止まらず、浮体構造、防波堤、アクセス施設との相互の関係を全体システムとして捉え、様々なバリエーションの中から、より安全で経済的な係留施設を選定していくことが重要であると考えている。

4. 洋上施工技術

浮体構造物は従来造船ドックや構造物製作ヤード等で一体として完成させ、ドックへの注水またはクレーン、浮ドック/半潜水式台船等により進水させる。しかし、構造物が大型化すると一体での製作は既存の設備能力を越えて不経済となり、更に寸法が数km規模となると一体製作は非現実的である。このため、大規模浮体構造物の建設は100~300m程度の部分浮体(浮体ユニット)を工場製作した後建設現場まで輸送し、現地で一体化していく方法(図11参照)を提案している。

浮揚状態の浮体同士を一体化する工法は船舶の拡大工事(ジャンボージング)や、連結式ボンツーン等静穏域あるいは小型のもので実績がある。波浪のある洋上ではプッシャーバージと押船の接続部等の例はあるが、本報で目標とするような大規模浮体はメガフロートの共同研究以外実績がない。

大規模浮体の建設では特に浮体ユニット同士の一体化に際して次のような課題がある。

- (1)一体化までの浮体相対変位の抑制と拘束
- (2)浮体ユニットの接合方法

4.1 浮体ユニットの係留と引寄せ、固着(移動、位置保持、変位拘束)

工場で作成され建設現場まで曳航された浮体ユニットを係留装置に接続する一方、浮体ユニット同士を順次接合して構造を一体化しながら拡張していく。新ユニットを既設側へ接合する方法はメガフロートの共同研究⁵⁾⁷⁾等で種々の工法を提案し実証しているが、基本

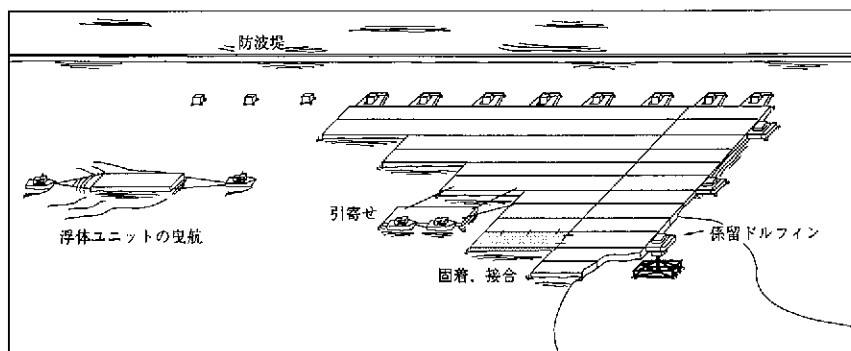


図11 大規模浮体構造物の建設イメージ

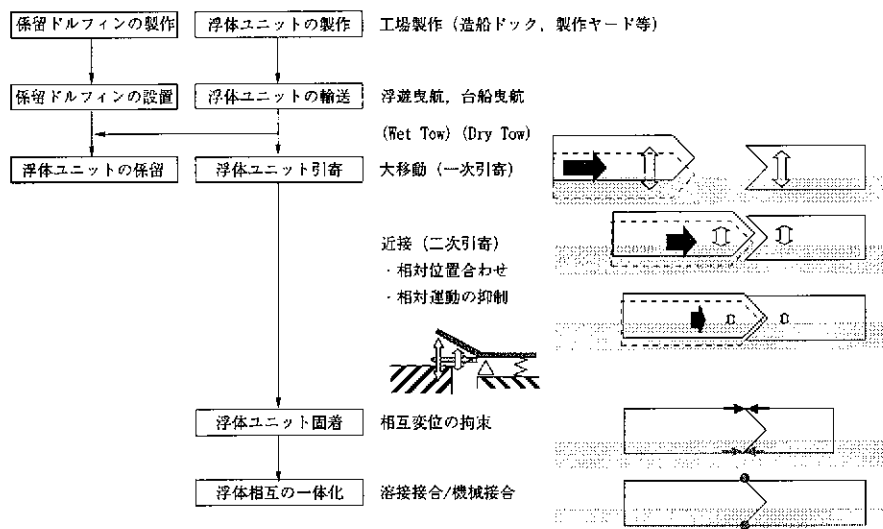


図12 大規模浮体の建設過程

的な施工要領の一例を図12に示す。ユニットを既設浮体へと水平に移動、接近(一次引寄)させた後、浮体の相対位置合わせと相対動揺の抑制(二次引寄)を段階的に行い、最終的に相互に溶接が可能な程度まで変位を拘束して固着する。これらの作業には動揺抑制装置や位置決めストッパー等の各種治具を用いる。

4.2 浮体間固着・接合荷重の推定方法

浮体ユニットの接合段階に応じて浮体ユニット間相互に作用する接合荷重を精度良く推定することは、施工治具の選定、接合作業時の稼働率の推定など施工検討をするうえで重要である。

接合時荷重の支配荷重は波浪による変動荷重であり、推定方法として浮体を剛体と仮定し、連結した浮体の波浪中における動揺解析を行う方法が実用的と考えられる。しかしながら、対象となる浮体ユニットの形状は薄いため、弾性挙動が顕著となり、曲率の大きい高次の固有変形モードを励起し、接合点で予想外の荷重を発生させることが懸念された。また、施工段階に応じた拘束の度合や海象条件が接合荷重特性に及ぼす影響を把握しておくことが重要である。

写真1は浮体接合時の挙動把握のため、基本検討として行った平面水槽実験⁹⁾の概況である。実構造として長さ200mの浮体ユニットを想定し、曲げ剛性を合わせた縮率1/25のプラスチック製モデル

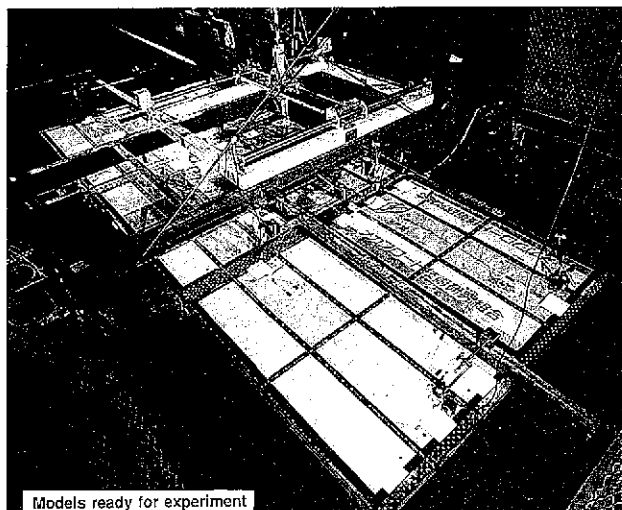


写真1 水槽実験概況

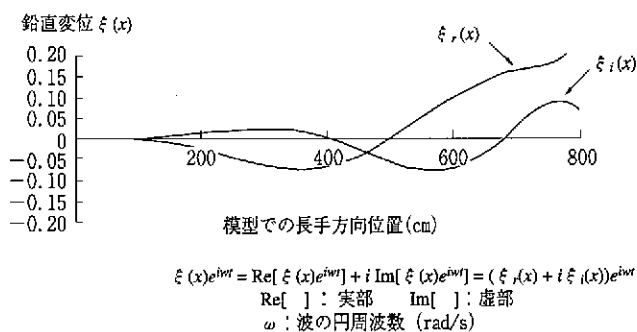


図13 浮体ユニット接合時の長手方向の変位分布

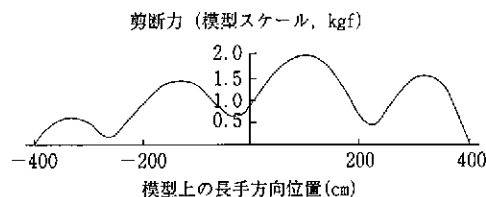


図14 長手方向のせん断力分布

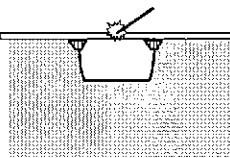
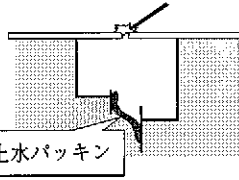
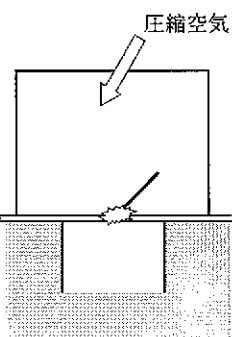
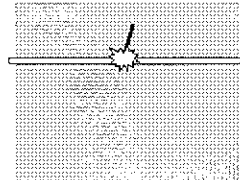
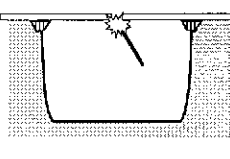
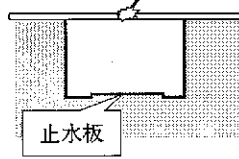
ルを2体製作し、浮体間を連結し、波浪中における動揺実験を行った。

図13は浮体の各点で計測した浮体の長さ方向の変位分布の振幅と位相を表示したものであり、浮体ユニットの弾性変形が顕著であることが分かる。得られた変位分布を弾性変形モードに分解して算定した模型長手方向のせん断力分布は図14のようであり、増幅された四つのピーク点があることが分かる。実験条件ではピーク発生点と接合点がずれていたため、接合荷重は増幅されることはなかったが、このピーク発生位置によっては接合荷重は増大することとなる。このように接合荷重の推定には浮体ユニットの弾性変形の影響が重要であることが分かる。更にメガフロートPhase-I実証モデルの浮体ユニット接合時の荷重計測や流力弾性影響を考慮した波浪応答解析⁹⁾を行い、接合荷重推定の精度は実機に適用できるレベルとなった。

4.3 浮体の洋上接合

浮体相互の接合には大別して溶接接合と機械接合がある。前者は

表2 水面上浮体構造の溶接接合方法

分類	乾式水中溶接			湿式水中溶接 局部乾式水中溶接
	外付けチャンパー	付属の空気室	圧気排水	
概念図				
				
工法概要	底外板接触部のパッキングで止水し、ポンプで排水 小型は浮体内から溶接作業 大型はチャンパー内で溶接作業	浮体引寄せ後、底外板に止水した小室を形成し、ポンプで排水 パッキン工法は浮体引寄せと同時に止水が可能	接合部両側の底外板に空気溜用の囲い板を突出させ、浮体内から圧気して排水	水中で底外板を直接溶接接合 局部乾式水中溶接は自動溶接機による

浮体ユニットの端部断面同士で構造部材(外殻部材と内構材)を連続的に溶接接合して一体化する方法で不連続構造はなく応力も分散されるが、接合部の水密性と溶接の信頼性が要求される。後者は浮体ユニット同士を連結機能と強度を持った部材で相互に結合する方法であり、機械的に結合することで比較的短時間に施工でき、着脱が可能な機構が採用できる。反面、マクロ的には浮体相互は一体化するが部分的に不連続部が残り、接続面で変位を生じたり、結合部材に接合荷重が集中する。このため、これらを許容できる用途、結合・離脱性を必要とする用途に有効である。

空港利用等一体で恒久的に使用し、かつ低コストな接合方法としては溶接接合が有力であるが、洋上での施工上課題となるのは水面下の溶接(水中溶接)である。水中溶接には溶接部周辺の水を排除して溶接雰囲気形成する乾式水中溶接と水中で直接溶接する湿式水中溶接がある(表2参照)。湿式溶接は潜水士により専用の被服アーク溶接棒で直接溶接接合する工法で、品質の良い溶接には技量を要し、また補助要員を必要とする等大規模浮体のように大量の溶接には経済性が課題があるが、周辺水の排除が困難な場合や深い水深等で有効である。

大量の溶接接合には人力資源の豊富な既存の溶接法が適用できる乾式水中溶接の適用が効率的であり、このためには低コストで水面下の浮体外板に溶接環境を形成するための排水工法が必要である。これらの工法として表2のような各種工法を提案^{5,7)}している。それ

ぞれインサートプレートの有無、裏当材の有無等との組合わせで特性があるが各々条件に合わせて適用が可能である。このうち止水パッキン工法は浮体の引寄せ、固着と同時に水面下の浮体間接触部をゴムパッキングで止水し、内部残留水をポンプ排水することで溶接環境を形成する急速施工法として新日本製鐵が開発し、メガフロート共同研究で実証したものである。また自動溶接機による局所乾式水中溶接は共同研究^{5,7)}で開発されているが、施工条件がそろえば有力な工法である。

5. 長期耐用技術

大規模浮体は、恒久的な基盤構造物として100年耐用の寿命が期待されていることから、長期耐用技術は極めて重要であると位置付けられている。このためメガフロート技術研究組合との共同研究⁷⁾では表3に示すような長期耐用技術の開発が行われた。以下では新日本製鐵が実施した主な項目についてその概要を記す。

5.1 最適防食システムの検討

浮体は完成後はドック入りメンテナンスが不可能となることから、基本的に100年耐用を考慮した防食仕様が検討された。浮体の防食仕様を図15に示す。ここで特徴的なことは飛沫部防食にチタンクラッド鋼板を用いたこと、底部防食には塗装プラス犠牲陽極方式、ポイド部は除湿方式を採用していることである。飛沫部防食には、自然環境下で長期耐食性保証が容易で、東京湾横断道路鋼製橋

表3 長期耐用技術に関する共同研究項目と新日本製鐵関連技術

研究課題	共同研究項目	関連独自技術
1.最適防食システムの検討	(1)100年耐用防食システム仕様検討* ①浮体構造物防食仕様の検討 ②係留構造物防食仕様の検討	
2.新素材適用性研究	(1)浮体飛沫部防食へのチタン材料、ステンレス材料の適用技術開発*	(1)チタンを用いた各種防食工法開発
3.長期モニタリング技術開発	(1)電位モニタリング技術開発 (2)水中モニタリング技術開発	
4.水中補修技術開発	(1)浮体底面補修技術開発	

*印は新日本製鐵が実施した項目

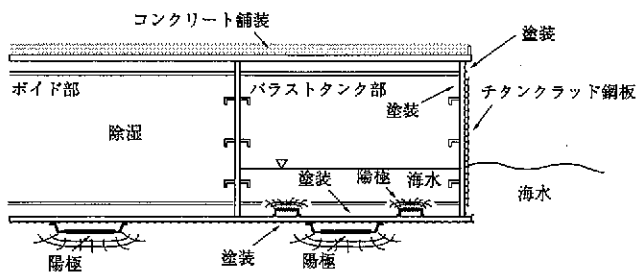


図15 メガフロート防食システム

脚での実績もあるチタンを選定した。浮体底部、内部バラストタンクは海水中での防食で実績もあり低コストな100年寿命陽極を用いた電気防食法を選定した。ボイド部は面積的にも広く塗装のみでは防食費が膨大になることから、低コスト化策として除湿材による防食法を採用した。また、浮体を係留する構造物においても上記と同様の考え方に基づき防食仕様を設定した。

5.2 新素材適用性研究

新素材適用性研究では耐食材料を浮体飛沫部防食に用いる際の課題について行った。耐食材料としてはSUS316, Alloy625, チタンが取り上げられたが、上記に述べた理由からチタンが検討の中心に

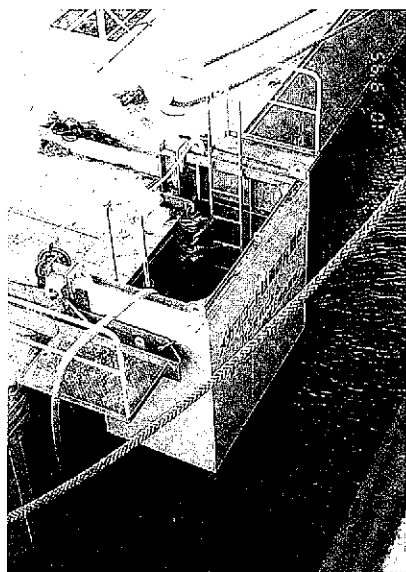


写真2 洋上ライニング施工実証実験

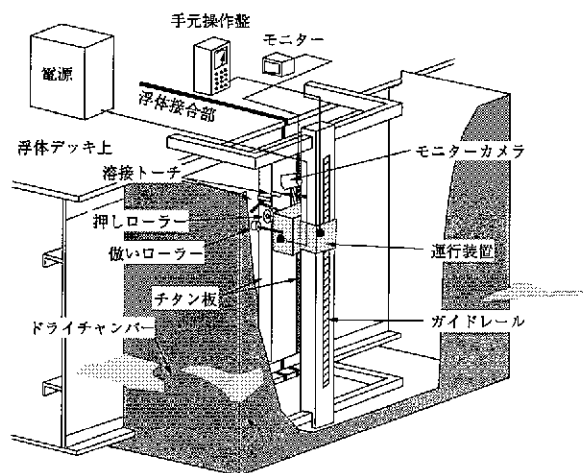


図16 洋上自動溶接機

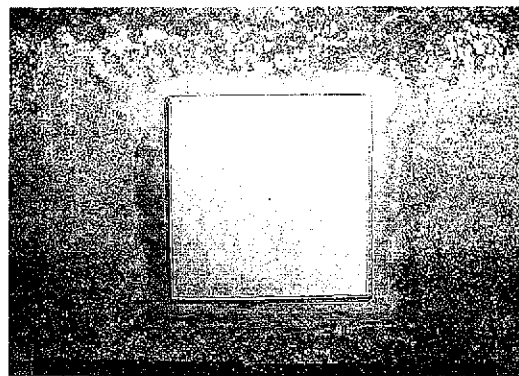


写真3 洋上補修工法実証実験

選ばれ、これを浮体に適用する上での課題、すなわち、(1)実海域での洋上ライニング施工の実証実験、(2)洋上自動溶接機の開発、(3)洋上での補修工法実験の3点について行った。洋上ライニング施工実験の状況を写真2に、開発した洋上自動溶接機を図16に示す。自動溶接機の仕様としては洋上施工条件下で安定なチタン溶接を迅速に行うためにダブルトーチを有したプラズマ溶接方式とした。洋上での補修工法実験では、事前に浮体に取り付けられたチタンクラッド鋼板の人工損傷にチタン板パッチ当て方式の補修(写真3参照)を行った。これら実験を通して、ドライチャンバー方式で大気中環境を実現できれば耐食金属を良好に施工できることを実証した。

5.3 チタンを用いた各種防食工法

新日本製鐵では、鋼構造物の長期防食材料としてチタン材料の有効性に注目し、東京湾横断道路へのチタンクラッド鋼板の適用以降も、独自にチタンを用いた海洋構造物の各種技術開発を行ってきた。以下にその例を示す。

5.3.1 チタンライニング防食鋼管杭

浮体の係留構造物や大型の栈橋等は通常鋼管杭によって支持されており、これらを長期に供用していくためには長期防食が施された鋼管杭の開発が望まれる。そこで低コストで長期防食を実現するために、工場にてチタン薄板を鋼管にライニングするチタンライニング防食鋼管杭(図17参照)を開発した。一次防食層としてチタン薄板、二次防食層として有機樹脂材料を用いている。これら仕様の試作杭による杭打設試験(写真4参照)も実施して良好に施工できることを確認し、実プロジェクトへの適用も行っている。また現地防食施工法としてチタン薄板を現地で被覆し、钢管継手で接合する形式のTP(Titanium lining pipe)工法(図18参照)も開発し、これまで多くの施工実績を有している。

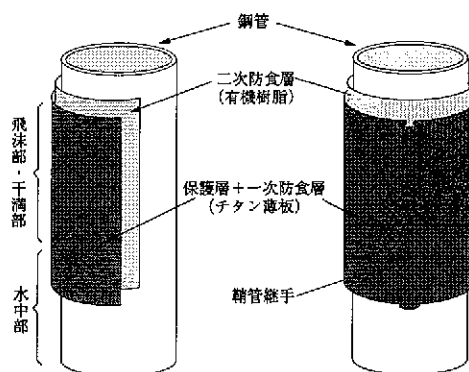


図17 チタンライニング鋼管杭

図18 TP工法

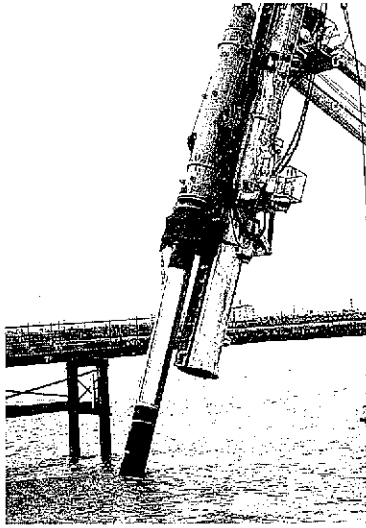


写真4 チタンライニング鋼管杭打設実験

5.3.2 鋼構造物向けチタン薄板ライニング防食法

浮体の海上大気部防食仕様は現状塗装で計画されている。しかし100年耐用の場合、洋上補修が発生し多大なコスト負担が予測される。したがってここでも飛沫部と同様長期防食法が望まれる。そこで、鋼構造物向けに低コストなチタン薄板ライニング防食法(図19参照)を開発した。この防食法は防食対象面に枠材としてチタンクラッド鋼を隅肉溶接した後、チタン薄板を枠材にラップするように配置し、ラップ部をインダイレクト抵抗シーム溶接により密封シールする方法である。この溶接施工用として開発したインダイレクト抵抗シーム溶接機を写真5に示す。この特長は被溶接物の片側からの溶接が可能で、しかも自走機能を有するため構造物加工組立て後も適用できる点である。

。写真6に実物大試験体に施工した例を示す。この防食法はチタン薄板を使用するため材料コストを低減でき、且つ施工能率の高い溶接機を用いるため施工コストも大幅に低減可能となる。

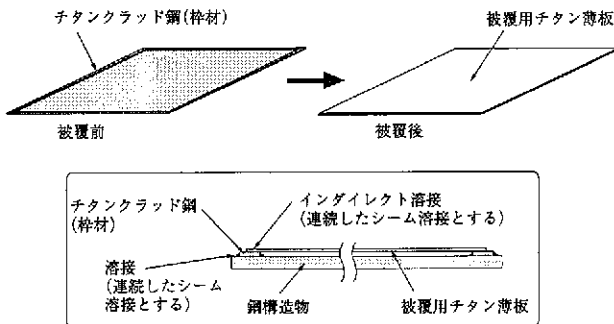


図19 チタン薄板ライニング防食法

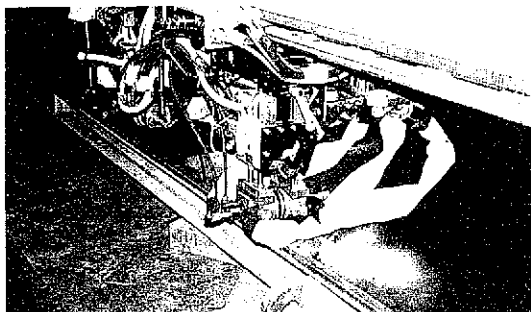


写真5 インダイレクト抵抗シーム溶接機

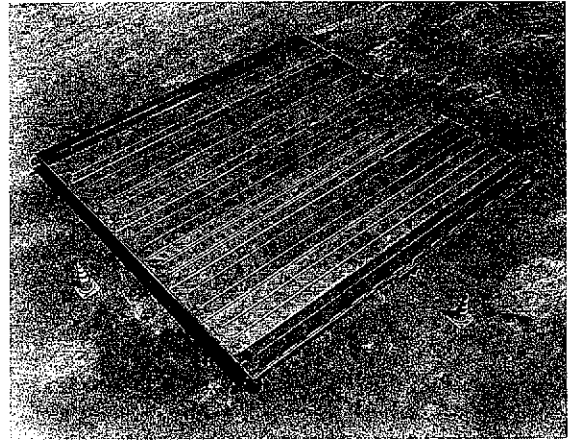


写真6 実体試験体へのチタン薄板ライニング施工

6. おわりに

大規模浮体構造物を海洋で超長期間安全に使用可能な基盤構造物として実用化するための技術開発を進めた結果、これまでに以下の成果を得た。これにより実寸大規模の施設を設計・建設可能な段階に至ることができた。

- (1)大規模浮体構造は扁平で剛性が小さく、波浪中で弾性挙動が卓越する。このため、流体-構造系の相互作用を考慮して任意形状浮体を弾性体として扱える波浪応答解析法を開発した。
- (2)上載施設の稼働低下等を招く浮体端部で顕著な波浪中動揺を抑制するため、動揺抑制構造を考案しその効果を確認した。
- (3)大規模浮体の係留解析法、施設設計法を構築し、これをメガフロートの1000m浮体空港実証モデルの係留施設建設に適用して検証を進めている。
- (4)浮体ユニットの洋上接合法を中心とする一連の大規模浮体構造物の建設工法を開発した。施工条件により多様な工法が提案、実証され、条件に応じて選択適用が可能である。
- (5)海洋鋼構造物の飛沫・干満帯へチタンクラッドの適用により超長期耐用が可能な防食技術を開発した。また、建設時に生じる浮体ユニット防食部間の現場接合法も開発、実証した。

この他、鋼管杭や浮体表面をチタン薄板により被覆する低コストの超長期防食工法も開発し実用段階に至った。

なお、本報告の一部はメガフロート技術研究組合との共同研究として行ったものである。

参考文献

- 1) Utsunomiya, T. et al.: Proc. of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, Hague, 1995
- 2) 中井幸治 ほか: 第13回海洋工学シンポジウム, 東京, 1995
- 3) 太田英美 ほか: 第14回海洋工学シンポジウム, 東京, 1998
- 4) メガフロートの空港利用に関する実証的研究平成10年度研究成果報告書, メガフロート技術研究組合, 1999-3
- 5) 超大型浮体式海洋構造物(メガフロート)平成9年度研究成果報告書, メガフロート技術研究組合, 1999-3
- 6) 超大型浮体式海洋構造物(メガフロート)平成7年度研究成果報告書, メガフロート技術研究組合, 1999-3
- 7) 超大型浮体式海洋構造物(メガフロート)平成8年度研究成果報告書, メガフロート技術研究組合, 1997-3
- 8) Ohkubo, H. et al.: OMAE, 16th, Yokohama, 1997
- 9) Yago, K., Torii, T. et al.: Technocean98, Kobe, 1998