

メガフロート長期防食法へのチタンクラッド鋼の適用技術開発

Application Research on Corrosion Protection of Mega-Float by Titanium Clad Steel Lining



松 岡 和 巳^{*(1)}
Kazumi MATSUOKA



木 下 和 宏^{*(2)}
Kazuhiro KINOSHITA



鳥 井 正 志^{*(3)}
Tadashi TORII

抄 録

メガフロートとは大規模な浮体構造物で、その規模は一辺が数キロメートルにも及ぶ。その用途としては、空港、ヘリポート、発電所等の重要な社会インフラとして利用が検討されている。従って、これらに要求される耐久性は、100年耐用の寿命が期待されている。このメガフロートを実現するために、鉄鋼、造船各社は1995年にメガフロート技術研究組合を設立し、その課題解決のための研究プロジェクトに6年間にわたって取り組んで来た。このプロジェクトでは、浮体の長期耐久性を確保するために浮体飛沫部の防食工法としてチタンクラッド鋼板を被覆する工法を採用した。そして洋上におけるチタンの自動溶接や補修技術に関する各種の技術開発をおこない、最終的には大規模な浮体モデル(300m×60m×2m)を用いてこれら技術の実用性を確認した。これら一連の実験結果からチタンクラッド鋼板被覆工法がメガフロートの長期防食工法として有効であることが実証された。

Abstract

Mega-Float is a ultra large floating structure, whose size can be several kilo-meters scale and planned to be used for city infrastructures, such as the airport, the heliport and the power plant, etc. and then expected to have ultra long durability over 100 years. Mega-Float Research Union was established in 1995 for the realization and the research project is now going to overcome some difficulties. In this project, titanium clad steel lining was adopted as the corrosion protection method for the splash zone of the around side wall, considering ultra long durability. Various techniques for the lining work, such as automatic titanium welder and the repair method for some type of damages of titanium clad steel lining, were developed and tested using the proto-type large-scale floating model (300m length, 60m width, and 2.0m height) which was constructed in a real sea area. It was, from these results, confirmed that the titanium clad steel lining was a very useful corrosion protection method for Mega-Float.

1. はじめに

日本は四方を海に囲まれており経済活動の基盤を臨海部に置き、流通施設、交通施設、都市機能施設等の空間を海域利用により確保してきた。経済社会、国民生活の高度化はその要請をますます増大させており、従来の内海、内湾の浅海域の利用から沖合の水深や外洋に面した海域への拡大が課題となっている。こうした状況において、浮体の利用が今注目されている。浮体は図1に示すようにその構造特性から水深によるコスト影響が僅かで、環境への影響も小

さく、多くの工場での分割製造が可能で工期が短縮できる等の優れた特性を持っており、更に耐震性が良いことも注目すべき特徴となっている。

この浮体実現に向けて1995年4月に造船、鉄鋼を中心としたメガフロート技術研究組合が設立され、“数km規模、100年耐用の超大型浮体式海洋構造物(メガフロート)”に関する研究が行われた。1995年度から1997年度のフェーズI開発では浮体設計に関する理論的研究を進めるとともに、各種要素実験を行いつつ実海域において部分浮体を結合し、300m×60m×2mの大型浮体モデルを完成

^{*(1)} 鋼構造研究開発センター 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 ☎293-0011 ☎0439-80-3090

^{*(2)} チタン事業部 マネジャー

^{*(3)} 鉄構海洋事業部 建設・技術部 マネジャー

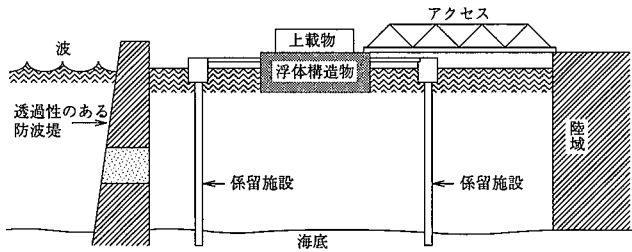


図1 浮体式海洋構造物の略図

させる実証実験が行われた。ここでの開発課題¹⁻⁴⁾は以下のようであった。

- (1) 超大型浮体(深さ/長さ比1/1000分の1規模)の浮体設計解析技術の確立
- (2) 500ha規模の浮体構造物を3年程度で完成させる洋上施工技術の確立
- (3) 100年保証の長期耐用技術の確立
- (4) 陸上設置施設と同等機能を有する上載機能保証技術の確立
- (5) 流況、生態系の環境影響システムの確立

1998年度から2000年度のフェーズII開発では、(2)及び(4)の課題に関して更に研究を継続するとともに、最終的に1,000m×60m×3mの大型浮体モデルの施工実験、航空機による離発着実験が行われた。

長期耐用技術の研究はフェーズI開発の中で行われ、100年耐用の防食システムの仕様を検討するとともに、新素材適用研究という課題で浮体飛沫部への各種耐食金属の適用性研究、そして浮体を長期間維持管理するための各種モニタリング技術、水中補修技術、等の研究開発を行った。この研究では期間が3年間であるため材料の耐久性評価試験は行わず文献調査にとどめ、防食法に関する研究課題としては耐食金属材料の浮体構造物への適用性実証に絞って研究を行った。

本報では、この内耐食金属材料としてチタンクラッド鋼板に関する研究をとりあげ以下に記す。

2. 浮体構造物の底面側面の防食システム

メガフロート技術研究組が提案する浮体構造物の防食システムと、従来の海洋構造物の防食システム(東京湾横断道路橋の例)との比較を表1に示す。この浮体構造物の防食システムは、浮体が完成後においてはドック入り等によるメンテナンスが不可能となること、浮体構造物自体が重要な社会インフラとなること、等を考慮して100年耐用の仕様⁵⁾とされた。すなわち、海上大気部はメンテナンスが容易な塗装、飛沫帯近傍は将来にわたるメンテナンスフリーを志向した耐食金属被覆とした。そして海中部は、コスト、信頼性ともに優れた電気防食を基本としている。上記の各防食区域の設定は、以下の通り定義されている。

- (1) 海上大気部は、飛沫帯の上限以上の範囲をいう。
- (2) 飛沫帯の上限は、平均満潮面(H.W.L.)に波高の半分を加えたものを目安とする。波高はその海域の波浪特性、構造物の供用年数などを考慮して定める。従来の海洋鋼構造物の平均干潮面(M.L.W.L.)より深では電気防食が有効であるとの考え方に沿って、飛沫帯の下限は浮体構造物の海水面(W.L.)とする。
- (3) 耐食金属被覆の上限は飛沫帯上限とするが、端部の異種金属接触腐食防止の観点から必要に応じて余裕をもたせるものとする。下限はW.L.直下付近の集中腐食を防食する目的で、W.L.ー

表1 浮体構造物と従来の海洋構造物との防食システム比較

従来の海洋構造物の例 [東京湾横断道路水中基礎]		浮体構造物 [浮体側面]	
腐食環境	防食システム	腐食環境	防食システム
海上大気部	塗装	海上大気部	塗装
飛沫帯	チタンクラッドライニング	飛沫帯	高耐食金属被覆
干満帯	チタンクラッドライニング	干満帯	高耐食金属被覆
海中部	電気防食	海中部	電気防食
海底面	塗装	海底面	塗装
海底土中部	塗装	海底土中部	塗装

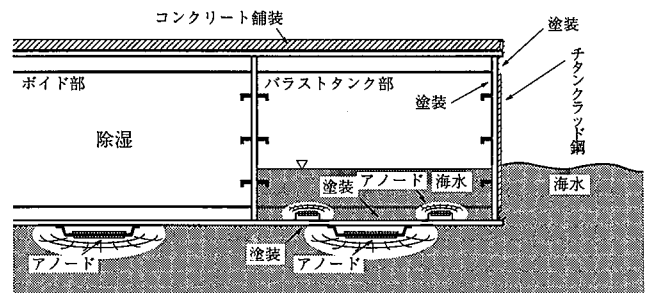


図2 メガフロートの防食システム(100年耐用)

1mまでとする。

上記の防食システム仕様を浮体構造に展開したものを図2に示す。

3. チタンクラッド鋼板ライニング試験の概要

実証実験では、工場にて製造した100m×20m規模の9ユニット(部分浮体)を実海域の洋上に溶接結合し300m×60mの大型浮体構造物を実現させた。この浮体構造物の高さは2mである(5,000m規模の大規模浮体では深さは5m程度が考えられている)。長期耐用技術でのチタンクラッド鋼板ライニング実証実験は1995～1997年に以下の課題で取り組んだ。

- (1) 実海域での洋上ライニング施工の実証
- (2) 自動溶接機の開発
- (3) 洋上での補修工法の開発

4. チタンクラッド鋼板ライニング施工技術の実証

海洋構造物へのチタンクラッド鋼板の防食ライニング技術については、既に報告されているように^{6,7)}、東京湾横断道路橋(TTB)において鋼製橋脚の飛沫、干満帯防食にて採用されている。このチタンクラッド鋼板の鋼構造本体へのライニング工事は、全て工場にて施工されており現場では行われていない。今回のメガフロートでは側壁部の飛沫帯にTTBと同様にチタンクラッド鋼板(厚さ5mm:チタン1mm+鋼4mm)の防食ライニングが検討されているが、前述の通り実海域での洋上ライニング施工という新しい課題が発生する。即ち、洋上に施工されるユニット間の溶接接合部へのチタンクラッド鋼板ライニングであり(図3、4に示す)、実証が必要とさ

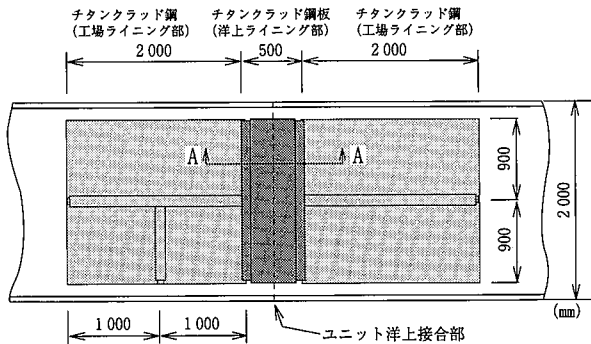


図3 洋上でのチタンクラッド鋼板ライニング部

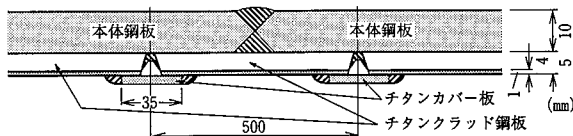


図4 チタンクラッド鋼板ライニング断面 (A-A)

れた課題は以下の通りである。

- (1) 実海域洋上での現場施工性の検証、工程上の制約から波浪による揺れ等が推定される。
 - (2) 洋上での狭いドライチャンバー内作業の検証。
 - (3) 2 m (将来的には 5 m) の高い立て向き溶接の検証。
- (なお、本研究では工場でのライニング溶接技術は既にTTBにて開発されていること、及びチタンの耐食性には問題がないこと、等から側壁の全体的なライニングは行わず写真1に示す通り洋上接合部の左右2mのみの工場ライニングとした。)

洋上のチタンクラッド鋼板ライニング工事の施工は、写真2に示すサイドチャンバー内のドライ環境でTIG溶接にて実施した。チャンバーは浮体本体のユニット間の溶接工事に使用した後、続いてこのラ



写真1 工場でのチタンクラッド鋼板ライニングの外観

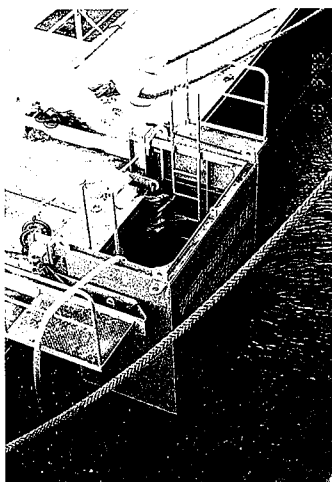


写真2 サイドチャンバーの取り付け状況



写真3 チャンバー内でのライニング作業

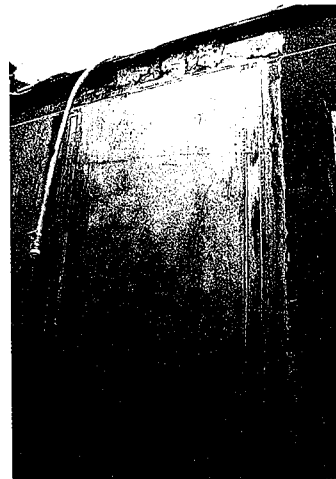


写真4 洋上でのチタンクラッド鋼板ライニング状況

イニング溶接施工に使用し、その後、水線以下のタッチアップ塗装にも使用する。写真3に施工作業を、写真4に施工後の写真を示す。

試験は1995年10月にドック内に浮体を浮かした静水中と、1996年7月に実海域にて実施した。実海域試験当日の天候条件は風雨、波浪ともに激しかったが、チャンバーは大型浮体に固定されているため動揺は小さく、その構造からも防風はほぼ完全であったため、いずれも溶接作業への影響は僅かで全く問題はなかった。溶接の検査結果は、いずれも外観検査(WES 8104)、浸透探傷検査(JIS Z 2343VC-S)、リークテスト(0.2kg/cm²)ともに良好であった。

5. 立て向きチタンカバーの自動溶接機の開発

浮体の製造工程、及び作業環境と溶接姿勢について表2に示す。ブロック製造段階での一般側壁部へのチタンクラッド鋼板ライニングは、ブロックの分割法と仮置き法を考慮すれば下向き溶接が可能であり、既存の溶接機器や治具の簡単な改造にて容易に自動化が可能である。

しかし、乾ドック内でのブロックを溶接接合しユニットを組み立てるときと、洋上でのユニット本体を溶接接合し浮体を組み立てるとき(チャンバー内作業)には、2 m (将来的には 5 m) の立て向き溶

表2 浮体の製造工程とチタンクラッド鋼板ライニング作業

	工程	ライニング部位	作業環境	溶接姿勢
(1)	ブロック製造	ブロックの側壁部	工場建屋内	下向き
(2)	ユニット組立	ブロックの側壁部	乾ドック内	立向き/横向き
(3)	浮体接合	ユニット間溶接部	洋上チャンバー内	立向き/横向き

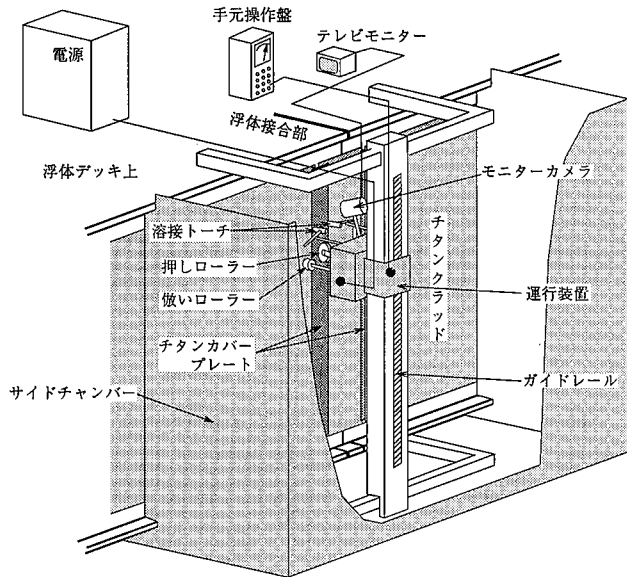


図5 洋上自動溶接機のスケッチ図

接作業となる。この立て向き溶接の工期の短縮と、溶接の信頼性確保(特に洋上では動揺が予想されるため)のために自動化する必要がある、この溶接機の開発を行なった。洋上自動溶接機のスケッチを図5に示す。1995年度にその基本開発を行い、1996年度には実海域での洋上接合試験、室内での動揺下での性能評価試験を行った。その基本仕様は以下の通りである。

基本仕様：

- (1) 浮体またはチャンバーにフレームを固定し、溶接トーチや倣いローラー等の装置はこのフレームに取り付ける構造とする。
- (2) トーチの先端位置は、前後はチタンカバー板をチタンクラッド鋼板に押しつける押しローラーにより、左右はチタンカバー板の両端をなぞる倣いローラーにより決定される(写真5に示す)。
- (3) 立て向き溶接の高さ範囲を4mと想定し、遠隔操作が可能なペンダント方式とする。
- (4) チタンカバー板(巾35~50mm)の両側2ヶ所の溶接線を同時に溶接するツイントーチ式とする。
- (5) 仮付け溶接を省略する、押しローラー方式とする。
- (6) アークの干渉、溶接性向上を考慮したプラズマ溶接方式とする。

基礎試験は外観検査、浸透探傷検査、断面観察を行った。溶接ビード外観を写真6に、断面を写真7に示す通り良好な結果を得ている。

更に、1996年度には最大波浪条件(洋上での工事実施が限界とされる有義波高50cm、周期6.5s)を想定した人工的な上下動揺条件下での自動溶接の施工試験を実施している。この結果においても溶接

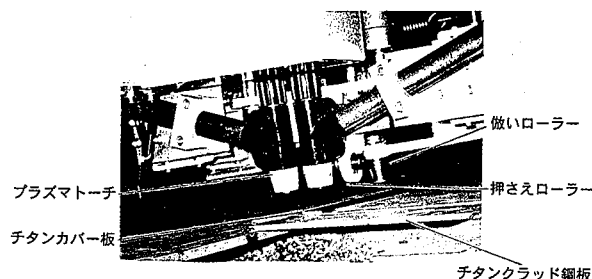


写真5 自動溶接機のトーチ部及びローラー部

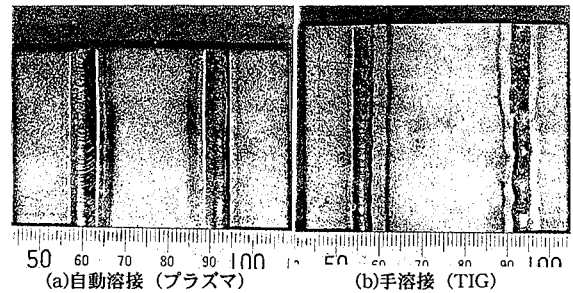


写真6 自動溶接ビード外観

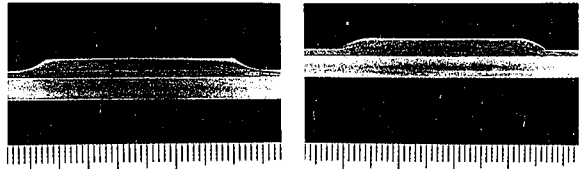


写真7 自動溶接ビードの断面

速度を15.5cm/min程度に設定すれば、欠陥なく良好に溶接できることを確認した。

6. 洋上での補修工法の開発

大規模浮体は防波堤により囲まれた静穏域に設置されるため大型船の衝突は考えられないが、流木等の浮遊物や、維持管理調査目的の小型船舶、釣り船等の衝突によるチタンクラッド鋼板の損傷の可能性がある。この場合の補修法は損傷の程度により表3の三段階の方法が考えられる。いずれもチャンバーを取り付けたドライ環境での施工が前提となる。

1996年の実証実験では、中程度の損傷を想定して補修試験を実施した。試験は表面に人工損傷部(直径150mm)を付加したチタンクラッド鋼板を図6に示す通り事前に浮体側壁に取り付けておき、一定期間暴露された(写真8参照)後にこれの補修を行った。試験直前の外観を写真9に、試験の条件を表4に示す。補修試験中、溶接作業は順調に行われた。終了後の外観を写真10に示す。

鋼露出部は、直径150mmの円形で、円中心が水面レベルになるように取り付けられており9ヶ月間海水に暴露され、常時、貝及び藻類が付着している状況下にあった。実験直前に測定された防食電

表3 チタンクラッド鋼板の損傷と補修方法

損傷の大きさ		補修法
小 (3mm以下) 損傷がチタン部分のみ		肉盛り溶接 (1) 損傷部の表面を洗浄 (2) TIG肉盛り溶接
中 (3mm以上) 損傷がチタンクラッド鋼板内		チタン板のあて板溶接 (1) 損傷部にTiプレートをあてる (2) TIG肉盛り溶接
大 (3mm以上) 損傷がチタンクラッド鋼板を越えている		チタンクラッド鋼板の一部取り替え (1) 損傷部のTiクラッド鋼板を切断除去 (2) 新しいTiクラッド鋼板を側面に溶接 (3) チタンプレートをTIG隅肉溶接

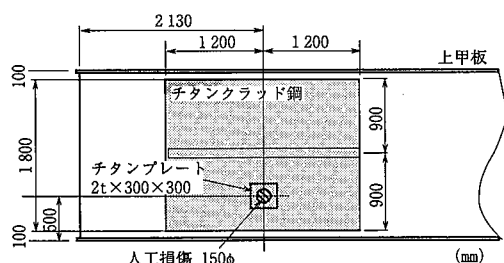


図6 洋上補修試験用人工損傷部



写真8 付加した人工表面損傷の状況

表4 人工損傷の状況

項目	条件及び内容
傷の寸法	直径150mm
傷の深さ	1.5mm(鋼に達する)
傷の設置位置	円中心が海水面
放置期間	9ヶ月(1995年10月～1996年7月)
補修チタン板寸法	2mmt×250mm×250mm

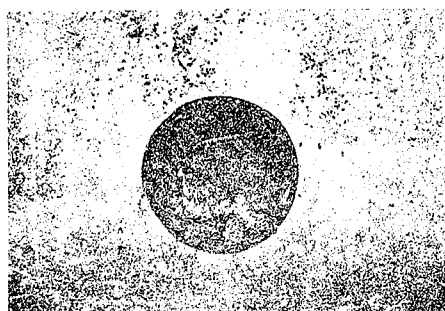


写真9 補修前(生物除去後)の損傷部の状況

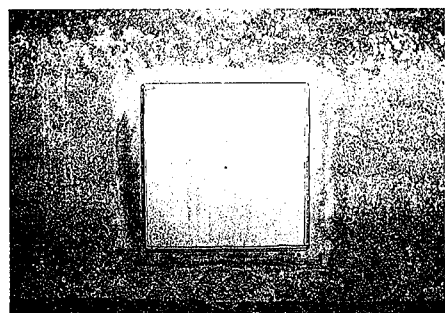


写真10 洋上補修部(チタン当て板補修後)

位は -970mV.vs.SCE であった。また、ドライチャンバー内での外面観察の結果では、錆の発生は認められず(写真9参照)、型取りによる腐食深さ測定の結果でも、円形のどの位置においても明確な減肉の痕跡は認められなかった。従って水面部においても電気防食効果が十分に発揮され、異種金属接触(チタン-鋼)腐食による腐食促進も防止できたものと思われる。

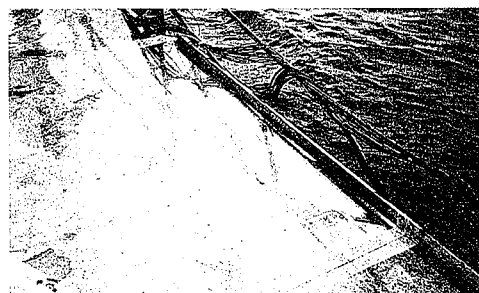


写真11 チタン箔シートライニング状況

7. チタン箔シートによる防食施工試験

浮体側面の大気部塗装にかわる長期防食法を検討する目的で、チタン箔シートによる防食施工試験を1997年10月に実施した(写真11参照)。チタン箔シート(0.1mm)には、予め粘着加工したブチルゴム(0.7mm)を貼り付けておき、現地にて剥離シートを剥がしローラーで押しつけながらライニングした。一枚のチタン箔シートの大きさは $540\text{mm}\times 180\text{mm}$ で、お互いにラップさせながら施工した。下地処理としては、既存塗膜をディスクサンダーで完全に除去したものと、既存塗膜を残したものと2種類について行った。

これら施工試験の結果、平坦な面への施工は良好に実施できることが示された。一方、複雑な形状を有する溶接部等においては、チタン箔シートの剛性が高く、追従性が悪く十分に密着させることが困難であることが明らかとなった。施工後1.5ヶ月の現地調査の結果では特にふくれや剥がれ等の変状は認められていない。この防食工法は、今後更に長期の耐久性を確認する必要があるが、コスト面では従来の重防食塗料と同等であることから、今後大規模面積での施工法を確立することで浮体側面大気部への適用は十分可能であると判断された。

8. おわりに

メガフロートとしては、大型国際空港、地方空港、ヘリポート、港湾物流基地、発電所、原油・LNG備蓄基地、橋梁基礎、廃棄物や汚水処理場、住宅やオフィス、公園や緊急避難所、ホテルや各種スポーツ・レジャー施設、養魚施設や漁業水産加工基地、等々が考えられており、既に実用化されているものや、計画中のものもある。

地球環境の維持に果たす海洋の役割は大きく、自然を守り様々な生物との共存をはかりながら、人類の生活、生産活動を拡大して行くことが今まさに問われており、メガフロートを始めた浮体式海洋構造物への期待には大きなものがある。また同時に、社会資本の蓄積は維持更新費の増大をも招いており、維持費が少ない良質の社会資本を後世に残すことが現在の我々の大きな課題でもある。従って、LCAの観点からのより耐久性の高い、低コストの鋼構造物を実現させるべく今後とも新技術を取り込み、積極的な検討を進めていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) メガフロート研究組合:平成7年度研究成果報告書-概要-, 1996.3
- 2) 中戸弘之:日本深海技術協会報, 7(4), (1995)
- 3) 磯部英一:造船界, (1996.3)
- 4) 岡村秀夫:ふえらむ, 1(1), (1995)
- 5) メガフロート研究組合:平成9年度研究成果報告書-概要-, 1998.3
- 6) 本間宏二, 田所裕, 香川祐次, 中村俊一 ほか:チタニウム・ジルコニウム, 39, 79 (1991.4)
- 7) 山本章夫, 長谷泰治, 高橋康雄, 添田精一, 鎌田啓一:チタニウム・ジルコニウム, 42, 274 (1994.10)
- 8) (社)日本チタン協会:建設・海洋部会TTBワーキンググループ最終活動報告書,