

建築・土木用部材へのチタン材の適用開発と今後の展望

Application of Titanium to Construction and Civil Engineering

高橋 康雄^{*(1)} 田所 裕^{*(2)} 武藤 泉^{*(2)} 田籠 直子^{*(3)}
 Yasuo TAKAHASHI Yutaka TADOKORO Izumi MUTO Naoko TAGOMORI
 等 俊 一^{*(4)}
 Syun'ichi HITOSHI

抄 録

建材市場におけるチタンの需要の増加は目を見張るものがあり、そして、この需要開拓は技術開発と密接な関係にある。建築分野ではチタンメーカーの主導による市場の開拓と、加工・施工業者との共同した適用技術の開発、素材の加工性能の改善、陽極酸化・鏡面研磨・ブラスト等による表面技術の開発、等々により支えられてきた。海洋土木分野はチタンの優れた特性である耐食性が最も生かされるが、コスト競争力と施工性が問われる分野である。この開発には、チタン関係者と、土木、防食、接合等の技術者の協力による総合的な研究開発が行われており、その一つの結果が、既に報告された東京湾横断道路（T T B）における鋼製橋脚の飛沫・干満帯へのチタンクラッド鋼被覆防食法の適用であった。これらの需要の開拓の経過と将来の展望について述べ、又、幾つかの研究への取組みと、上記のT T B関連の追跡調査の結果の概略を報告した。

Abstract

Demand for titanium on the building materials market has been remarkably increasing. The creation of demand for titanium is closely related to technology development. Brisk demand for titanium in the construction field has been supported by the positive efforts made for the cultivation of market on the initiative of titanium manufacturers, the development of application technology by titanium suppliers jointly with constructors, the improvement of surface treatment technology, such as anodic oxidation, mirror finish and blasting. Ocean civil engineering is the field in which the excellent corrosion resistance of titanium products can be fully utilized but cost competitiveness and workability are of importance. In this field, extensive R&D efforts have been continued by titanium suppliers with the cooperation of engineering, corrosion protection, and joining. One of the achievements is the application of corrosion protection by titanium-clad steelplates to splash and tidal zones of the Trans-Tokyo Bay Highway bridge piers. The progress of demand creation for titanium products and future prospects are described. Moreover, the progress being made in several studies and the results of the follow-up survey of the titanium products used for the construction of the Trans-Tokyo Bay Highway are described.

1. 緒 言

新日本製鐵はチタン事業の開始にあたり、新しい市場の開拓とその他の技術開発を重要な課題とし、中でも建材・土木分野を事業展開の重要な柱として位置づけてきた。その最初の取組みが、建築分野ではチタンの現場における屋根のシーム溶接工法の開発であり（事業開始の翌年の1985年に腐食環境の厳しい沖縄県の馬天小学校において屋根工事を完成）、土木分野ではチタンとベトロラタムとの複合による鋼管杭の防食工法の開発である（同じく1985年に茨城県波崎の運輸省漂砂観測橋にて実用試験を開始）。いずれもそれまでの

チタンの世界では初めての試みであり、その後のチタンの建築・土木分野での発展の契機となるものであった。

チタンは一般的な自然環境ではほぼ完全な耐食性を持つ金属である。表面の不動態皮膜（数十Åの酸化皮膜）により耐食性能を発揮することはステンレス鋼やアルミニウムも同じ原理であるが、チタンは表1に示すとおり耐食性について顕著な特徴を持っており、特に海水環境では完全な耐食性を持っている¹⁻⁵⁾。

又、他の建材用途に使用される金属素材と比較した物理的特性を表2に示す。その特徴は軽くて柔軟で、熱による伸縮が少ない等の優れた特徴を持っている。更に普通鋼と同等の強度を持っており、

*⁽¹⁾ チタン部 部長代理

*⁽²⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 ステンレス・チタン研究部

主任研究員

*⁽³⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 ステンレス・チタン研究部

研究員

*⁽⁴⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター

主任研究員

表 1 チタンの耐食性の特徴（建材関係の用途を想定）

不動態皮膜による耐食	表面の薄い（数十Å）酸化膜（TiO ₂ ）＝不動態皮膜による耐食。この膜は、極めて強く安定している。
熱力学的に極めて活性	チタンは酸素との結合力が強く、局所的な酸化膜の破壊にも瞬時に補修される。
海水にも安定	海水や海塩粒子、塩化物に対し安定であり、孔食、隙間腐食等が発生しない。
溶接部、加工部も安定	溶接時の熱影響部、冷間加工部においても耐食性は劣化しない。
酸性雨にも安定	NO _x 、SO _x にも安定で、酸性雨に対しても腐食されない。
温泉でも安定	硫化水素に対しても安定、温泉地でも優れた耐食性を示す ⁹⁾ 。

表 2 チタンと他の金属材料との物性比較

金属材料 物理的特性	純チタン	鋼	ステンレス鋼 (SUS304)	アルミニウム (5052)	銅
比 重	4.5	7.9	7.9	2.7	8.9
溶 融 点 (°C)	1 668	1 530	1 400～ 1 420	593～649	1 083
線 膨 張 係 数 (cm/cm/°C)	8.4× 10 ⁻⁶	12×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶	24×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶
熱 伝 導 率 (cal/cm ² /sec/°C/cm)	0.041	0.15	0.039	0.33	0.92
電 気 抵 抗 (μΩ·cm)	55	9.7	72	5.8	1.724
ヤ ン グ 率 (kg/mm ²)	10 850	21 000	20 400	7 030	11 000

非磁性で、又、毒性が無い上にイオンとして溶出しがたく環境を汚染しない等、建材に最も相応しい金属材料と言えよう。開発された製品形状には、薄板、厚板、鋼管、線材、チタンクラッド鋼板、チタン箔がある。二次製品もロープ、金網、エキスパンドメタル、ボルトナット、釘等が開発されており、多様な用途に対応が可能である。

2. 建材市場での開発における問題点とその解決

建材市場での需要は、図 1 に見られるように、建築分野を中心にここ数年大巾に増加してきている。しかし、当初においては新規分

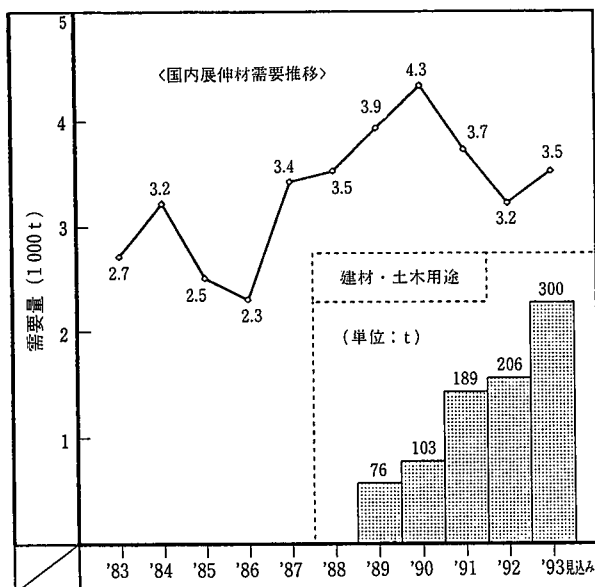


図 1 チタン展伸材の需要推移(チタニウム協会)

野の例にもれず、未経験からくる多くの問題を克服しなければならなかった。

当然のように、さまざまな面でのメーカーの主導性が要求された。当初では、需要家側（施主、設計事務所、総合建設業者）への設計織込みはメーカーの営業によるものがほとんどであった。又、施工時においてもメーカーの工事保証が求められることも多かった。

更に、採用に当たり施工実績が求められ、そのために試作から実用までの計画的な開発への取組みが不可欠であり（図 2 参照）、加工・施工業者との共同開発はもちろんその指導育成（溶接研修は 4 回／年実施し、延べ 24 回開催、加工・施工マニュアル等の作成）にも取り組んできた。

3. 建築分野での開発現状と展望、及び研究報告

3.1 チタン建築分野での適用開発の現状

チタンは前述の通り建材にふさわしい多くの特性を持っており、新日本製鐵では意識的にそれらの特性を生かす適用開発に取り組んできた。その開発の現状について表 3 にまとめた（土木分野も含む）。

耐食性、特に海塩粒子対策が実績的にも最も多いが、その他の耐食性が期待される適用開発例も多く見られ（火山灰対策や温泉地域、酸洗工場、産業廃棄物処理場設備、電子機器製造のクリーンルーム等）、最近では文化財の酸性雨対策にも注目されている。又、陽極酸化発色による美しいカラーチタンの意匠材としての使用も増加している（文化財の酸性雨対策とカラーチタンの安定性についての研究の一部を後述する）。その他、軽量、無毒性、温度差による熱伸縮が小さく石に近いこと等に注目した適用例も見られる。多くの場合複数の要求特性を満たしており、チタンの多様性には驚くべきものがある。

更に、最近ではマイルドな環境でもチタンを採用する例が見られる。これは、メンテナンスフリーの要請からと、屋根、外装等最も傷み易い部位にチタンを使用することにより建築物の耐用年数を長期に伸ばそうとの考え方からの採用である。

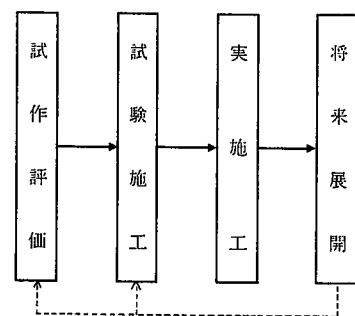


図 2 開発のステップ

表 3 チタンの特性と建材での適用例

適用特性／適用箇所	適用例
耐海水・海塩粒子	東京湾横断道路／鋼製橋脚防食、北九州港／棧橋既設鋼管杭防食
海洋構造物	・外装－首都高速／多摩川沈埋トンネル換気塔、東京国際展示場
海浜・臨海環境	・屋根－新潟・名古屋水族館、ダイエードーム、・防護棚、防風棚、防音壁
高温多湿／離島	沖縄県武道館屋根他、硫黄島燃料タンク、消防設備
海水設備	沖縄海洋博水族館／海水ストレーナー、配管、発電所／海水取水口ストレーナー
海底トンネル	青函・新関門／アンカーボルト類、新関門／架線金物（下束）、海水センサー
耐酸性雨	大理石構造物の補修、文化財の補修
耐火山灰	鹿児島県庁舎屋根・外装
耐温	青森県酸ヶ湯／木造建築のボルト・釘・金具、屋根、山形県上山／ダクト
耐食／耐薬品	廃棄物処理場／ダクト、広島市浄水場／マンホール蓋、防虫ネット
難イオン化（難溶出）	クリーンルーム
低熱膨張	大理石構造物の補修、各種長尺屋根
軽量	広島市浄水場／マンホール蓋、
意匠性	各種モニュメント、寺社屋根、ビル外装－鏡面・陽極酸化発色・プラスト等
無毒性	水槽、浄水場、離島での雨水利用屋根、

3.2 建築分野での市場動向と展望

チタンの建築分野での本格的な採用は、1986年の伊豆の世界真光文明教団の神殿屋根(90t)であった。これを契機として、その後、年間70～90t規模で推移してきたが、1991～92年には福岡ドーム屋根や公共建築への採用の増加により200t規模へと急増し(図1参照)、93年度には東京国際展示場の外装、屋根(図3参照)、首都高速道路湾岸線の換気塔外装への採用等により300tを越える需要が予想され、地域的にも東京、大阪、九州を軸に北海道から沖縄まで全国的な拡がりをみせている。

最近における金属屋根・外装市場の動向は、耐久性に優れた高級材料への強い要請を反映し、高級塗装鋼板やステンレス鋼板の需要が急速に増加している。又、海浜等腐食条件の厳しい環境では、更に高級な素材が求められ、チタンの採用が増加してきている。

将来のメンテナンスコスト増大に対する不安は強く、海岸線が長く海浜開発計画が中心とならざるを得ない日本の環境条件下では高耐食材への期待は大きい。更に、前述のとおりマイルドな一般的な環境においても長期の耐久性の要請が強まっており、チタンの需要も着実に拡大してゆくことが想定される。

3.3 建築へのチタン適用研究の報告

建築材料へのチタン適用に向け、多くの研究がなされているが、カラーチタンの色の安定性と、文化財へのチタン適用に向けた研究について一部を報告する。

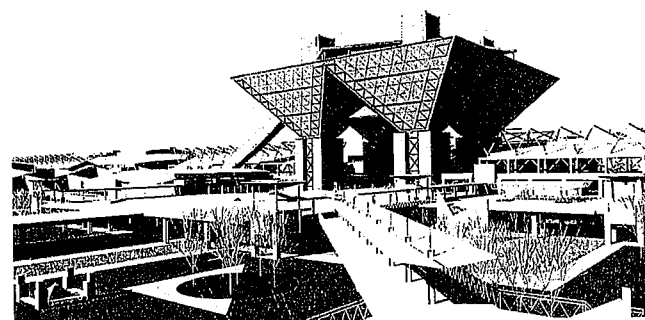


図 3 東京国際展示場 管理会議棟 完成予想図

3.3.1 陽極酸化法カラーチタンの安定性の研究

チタン表面の酸化皮膜(無色透明)を陽極酸化法により成長させ、光の反射・干渉により発色させるカラーチタンは、その美しい金属光沢により、建築の意匠材やモニュメントに注目されている。しかし、高温多湿で海塩粒子量の多い特殊な気象条件では酸化皮膜の成長による変色の懸念がある。このためゴールドとブルーに発色したカラーチタンを沖縄県宜野湾において暴露試験を開始しており、約3年目での観察結果を報告する。

図4は皮膜厚さと暴露期間との関係を示したものである⁷⁾。膜厚は入射光の波長が632.8nmのときの皮膜と下地の屈折率を2.5-0i及び2.89-3.35iとし、それぞれの波長分散などを考慮して計算した干渉色の色度 $L^*a^*b^*$ (JIS Z 8729)の理論値と実測値の整合により求めた。予想される膜厚と色度との関係も示した。

酸化皮膜は時間とともに極くわずかではあるが成長し、ブルー系発色材は色がやや薄くなり、ゴールド系は紫色へ少し変色する傾向にある。ブルー系は膜厚の領域が広くゴールド系に比べ長期安定性に優れており、沖縄海浜環境においても数十年にわたり、初期の色調が維持されるが、ゴールド系は紫色系へ変色することが想定される。しかし、沖縄と平行して全国各地でも暴露試験を開始しており、この結果からは、湿気と気温のより低い本州地域ではゴールド系でも色調の長期安定性は維持できると想定されている。

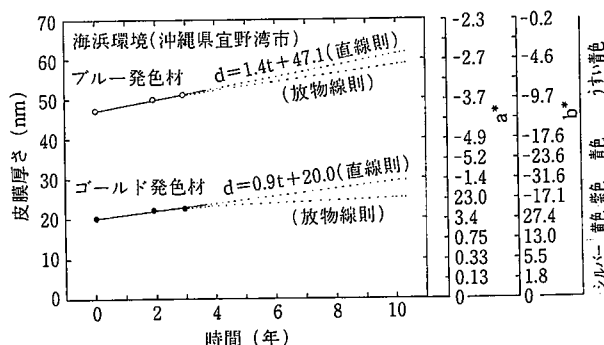


図 4 沖縄海浜環境におけるカラーチタンの酸化皮膜厚さの経時変化

3.3.2 文化財保護に向けたチタン適用研究

銅は表面に厚い緑青が生成することから、神社、仏閣等の屋根材に好まれて使用されてきたが、最近、酸性雨等の環境の悪化により種々の問題が生じてきている。酸性雨による影響は、銅の表面に安定した塩基性炭酸銅（緑青）を生成することができず、不安定な塩基性硫酸銅を生成させることにある^{8,9)}。このことにより、景観上のみならず腐食問題も生じており、特に雨垂れの落ちる部分に穴開き腐食（雨垂れ腐食）が発生している。その他、銅は漆喰やいぶし瓦からの浸出液にも腐食される可能性がある⁹⁾。これらは文化財保護の観点から大きな問題となっており、チタンへの代替が期待される。チタンにプラスト処理を施すと、いぶし瓦同様な色調と濡れ性を有し、日本家屋に調和し、違和感も無く文化財への使用が可能と思われる。

写真1は模擬酸性雨($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HNO}_3:\text{HCl}=1.4:1:4$ (モル比), pH=4.6)滴下による雨垂れ腐食再現実験の結果を示したものである⁹⁾。銅

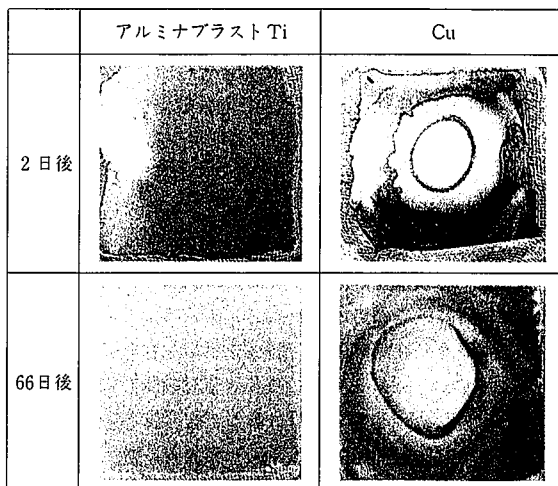


写真1 模擬酸性雨による雨垂れ腐食再現実験後の金属表面

においては腐食が発生したが、プラスト処理チタンでは実験前後で表面状態は変化せず、酸性雨環境下でのチタンの優れた耐食性が実証された。

4. 土木分野での現状と展望、及び研究報告

4.1 土木分野での開発の現状

土木分野、特に海洋土木分野では鋼構造物の腐食、劣化は極めて大きな問題となっており、信頼性における超長期の耐食性を有する構造材や被覆材の強い要請がある。この分野でのチタンの適用はまだ端緒についたばかりであるが、建築での実績や暴露試験等¹⁻⁵⁾の結果から、チタンは最も期待される金属である。特に、鋼構造物の防食被覆材としての適用には、大きな可能性を秘めている。しかし、耐食構造材へのチタンの適用にはコスト制約があり、現状では特殊な条件下でのみ考慮されよう。

土木分野での採用にはコスト競争力と、実環境での実績が不可欠であり、将来の目標を展望し多くの研究開発に取り組んでいる。その内容を表4に示す。

既にいくつかは実用段階で、実プロジェクトにおいて施工されている。東京湾横断道路(TTB)における鋼製橋脚の飛沫・干満帯部にチタンクラッド鋼による被覆防食法はその代表例である(写真2参照)¹⁰⁻¹³⁾。これにより、海洋鋼構造物の超長期耐久性を期待した、チタンによる防食工法の時代が本格的に始まったといえよう。既に海中に設置され2年半になるが、チタンが美しい肌を見せており21世紀の海洋土木における防食技術の中心になると思われる。この1年目の調査については後で概略を述べる。

表4について以下に概要を説明する。

4.1.1 構造物への防食被覆法の適用開発

チタンを防食被覆材として使用し主に鋼構造材の耐用年数を飛躍的に伸ばす方法であり、現状では従来の塗装(大気中)や電気防食(海中)と併用する方法が一般的である。構造物との固定接合法が問題であり、その方法により分類すれば、

表4 チタンの土木分野における開発の現状と展望(新日本製鐵の取組み)

ステップ		I	II	III	IV
用途		試作評価/社内試験使用	実プロ試験使用	プロパー使用	将来ターゲット
構造物の防食	①鋼構造物	(1)チタンカバー(有機材複合防食)	'85 名古屋製鐵所岸壁杭 '85 波崎漂砂観測橋杭 '85 阿賀沖石油リグ	'90 運輸省北九州港棧橋杭	既設鋼管杭の防食工事
		(2)チタンカバー(コンクリート複合防食)			チタン・コンクリート防食杭*1
		(3)クラッド鋼溶接	'90 君津岸壁暴露(鋼管杭)	'91 東京湾横断道路(TTB)鋼製基礎(水中基礎)	鋼製橋脚・ケーソン等の防食 大型浮体構造物の防食 傾斜板式消波構造物
		(4)フォイル貼付(有機粘着テープ)	'91 TTB暴露試験(チタニウム協会)	'88 酸ヶ湯温泉屋根 '90 日東電工勝川寮屋根	橋梁の桁防食 ガスタンク等建築物の防食
	②コンクリート構造物		'91 柏崎流雪構(コンクリート複合パネル)		コンクリート構造物の防食*1 コンクリート埋設型枠
耐食構造材	③トンネル設備		'89 JR新関門トンネル下束 '92 JR羽越トンネル下束(架線支持金物)	'83 JR新関門青函トンネルセンサー JR新関門青函トンネルボルトナット	トンネル諸施設の開発 地下空間開発へのチタン適用 セグメント取り付けボルトナット
	④防護柵等	'85 パンザーマスト地際部	'89 山口県見島漁港防風柵 '90 東京都八丈島手摺	'93 東京臨海新交通駅金具 '85 硫黄島消防設備	超耐久性安全設備
	⑤海水施設		'87 大分共火海水取水スクリーン '91 係留ブイ及びチェーン	'89 海洋博水族館(ストレーナー)	海水取水スクリーン・配管等 海水施設・器具
	⑥橋梁	'92 吊り橋ピン・軸受(Ti-テフロン)			吊り橋ピン類及びケーブル類

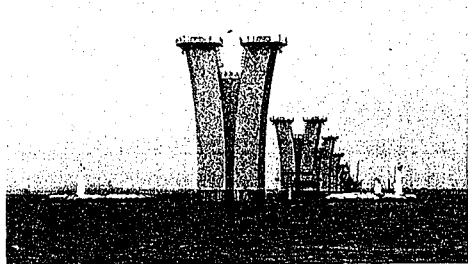


写真 2 東京湾横断道路の橋脚(水面上下部がチタン)

- (1)チタンクラッド鋼を使用し、鋼部分と構造物を溶接する方法(TTBがこの方法で施工された)
- (2)チタンをカバー材として活用しペトロラタム等の防食材と複合し、ボルトナット等で固定する方法。既設の鋼管杭等の防食に適用が可能であり、既に北九州港葛葉岸壁にて施工されている(写真3参照)。
- (3)チタン箔と接着剤(粘着材)の防食テープを構造物に貼り付ける方法。建築の屋根材では実用例があり、土木用途では各地にて試験が開始されている。
- (4)チタン薄板で構造物を覆い、その間に隙間を確保し、そこにコンクリート等を充填する方法。

4.1.2 耐食構造物としての開発

チタンの構造物への適用には、前述のとおりコスト問題が大きな課題となっている。しかし、特殊な条件下では既に使用されており、それらの例について採用の理由とともに紹介する。

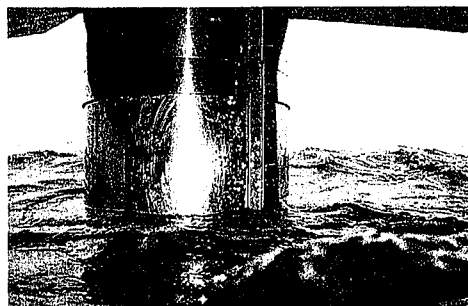


写真 3 北九州港でのチタン防食の鋼管杭
(2年目一貝を除去後)

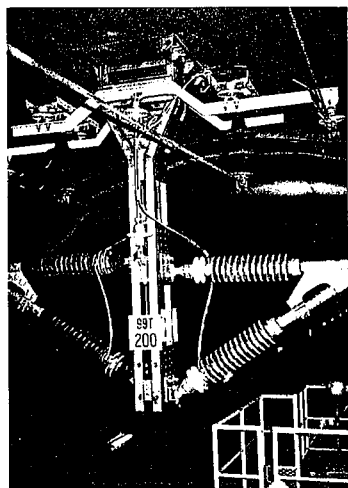


写真 4 JR新関門トンネルでのチタン製下束

JR西日本(株)では新幹線の新関門トンネルで下束(架線金物、写真4参照)のチタン化を本格的に検討中である。4年間の実用試験の良好な結果と、施工及び維持管理上の制約が理由となっている。すなわち、施工時の時間制約と工事費の比率が高く従来の鋼製(亜鉛めっき+塗装)に比較し、総工事費が2.5倍程度でも、耐用年数を考慮すれば十分に採算が取れると判断している。更に、構造物であるトンネル本体を傷めないようメンテナンスフリーの永久構造物への強い要請があり、陸上トンネルでも採用が検討されている。

その他、海浜公園の手摺では、チタンが安全上の信頼性と景観上の要請から実用されている。又、大分共同火力(株)における海水取水口のスクリーンでの暴露試験では貝類の耐付着性と剝離性に優れた結果が報告されており、実用化も近い。

以上より、チタンが耐食構造物として採用される理由は以下の場合にまとめられる。

- (1)メンテナンスが困難かつ工事費の比率が高い場合。
- (2)トンネルや地下構造物の場合のように本体構造物をメンテナンスで傷めないよう、付帯設備を永久構造物とする要請がある場合。
- (3)安全設備で長期間の耐久性に対する高い信頼性が要求される場合。
- (4)景観上の要請がある場合。
- (5)メンテナンスのために操業停止が必要で、そのための経済的損失が大きい場合。

4.2 将来の目標と展望

海洋土木を始めとして、防食に対する大きなニーズから、将来の開発の目標をまとめると以下ようになる。

(1)鋼構造物の防食被覆工法

i) 鋼製橋脚、ケーソンやジャケット等の海洋構造物の超長期防食工法の開発

ii) 大型浮体構造物の超長期防食法の開発

iii) 橋梁等で腐食の激しい部分や補修の困難な部分へチタン箔テープ防食法の開発

iv) 長大橋梁の鋼製ケーブルへの防食法の開発

(2)耐食構造物

i) 海底トンネルの付帯設備及びセグメントの取付ボルト等の開発

ii) 地下空間開発でのチタンの適用開発

iii) メンテナンスフリーの安全施設の開発

iv) 長大橋梁のケーブルへのチタン化(強度と軽量)、あるいはチタンクラッド鋼線の開発

(3)コンクリート構造物の防食法の開発

4.3 東京湾横断道路橋脚チタンクラッド鋼被覆防食部の1年目調査

前述のとおり、東京湾横断道路では鋼製橋脚12基に50~100年耐用に向けた超長期防食法として、5mm厚のチタンクラッド鋼板(チタン1mm+鋼4mm)の溶接被覆による飛沫・干満帯防食法が採用された¹⁰⁻¹³⁾。

このうちもっとも据付けの早かったP7橋脚について、1年経過した時点での調査を実施した。調査項目はチタンクラッド鋼の表面、溶接部、塗装面の外観観察及びチタンクラッド鋼周辺の電位測定による電気防食状況の調査である。

調査時期が7月で貝の成育期に当たり、飛沫・干満部のチタン面にフジツボが多く付着し、海中部ではチタン面、鋼材の塗装面、ア

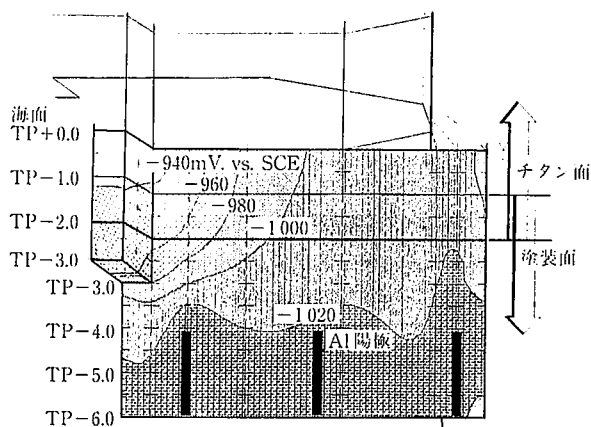


図 5 橋脚P7チタン面近傍の電位分布¹⁴⁾

ルミニウム合金流電陽極にムラサキガイが多く付着していた。しかし、付着物を除去したチタンの表面、溶接部、塗装面に異状は見られなかった。

海水中のチタン面の電位を、飽和甘こう標準電極(SCE)と電位差計を使って測定した。測定範囲は海表面(T.P±0)から、水深6m(T.P-6)までの木更津側にあたる橋脚全周の1/4部分とした。

測定結果を図5に示す¹⁴⁾。電位はアルミニウム合金流電陽極から最も距離の遠い凹部のチタン面で最も高い値を示したが、設計防食電位-770mV(vs. SCE)以下を満足しており、問題となるチタンと鋼の接触部は全く良好な防食状況であることを確認した¹⁴⁾。

4. 結言

社会資本の蓄積は快適な文明社会の建設には不可欠であるが、同

時にメンテナンス費用の増大を招き、将来の新規投資が圧縮されることが強く心配されている。現在におけるわずかなメンテナンスフリーへの投資が、将来の新規投資余力を大きくする。すなわち、社会資本のメンテナンス負担を後の世代に残さないことは現在における最も重要な課題であろう。

チタンは超長期のメンテナンスフリーを実現し、又環境への有害な影響を心配しないでよい等、建材市場で大きな可能性を持った金属である。更に、広範な建材用途への適用に向けた開発に取り組んで行きたい。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所、鋼管杭協会：海洋構造物の防食指針・同解説、1990
- 2) 建築研究振興協会：実海域ばくろ試験評価に関する検討 報告書、1988.3
- 3) 建設省土木研究所 ほか：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同報告書、1990.3
- 4) Convington, L.C.: Corrosion in Natural Environments. ASTM STP 558, ASTM, 1974, p.97
- 5) Convington, L.C., Schutz, R.W.: Corrosion '81. 113, Toronto, 1981-4, NACE
- 6) 大野茂：チタニウム・ジルコニウム、35(4)、10(1987)
- 7) 武藤泉：未発表データ
- 8) 古明地哲人：金属、(2)、p.67(1992)
- 9) 田籠直子：未発表データ
- 10) 田所裕、本間宏二、長谷泰治、等俊一、吉田耕太郎、山谷弥太郎、伊藤徹：新日鉄技報、(344)、p.21(1992)
- 11) 香川裕二、中村俊一、長谷泰治、山本章夫：土木学会論文集、No.435/VI-15, 1991.9, p.69,
- 12) 香川裕二、中村俊一、本間宏二、等俊一、田所裕：土木学会論文集、No.435/VI-15, 1991.9, p.79
- 13) 東京湾横断道路(株)：東京湾横断道路 水中基礎 飛沫・干満帯部チタンクラッド鋼ライニング施工基準(案)、1990.10
- 14) 等俊一、田所裕：未発表データ