

(解説)

# チタン建材

屋敷貴司\*・宮本淳之(工博)\*・山本喜孝\*・岡本明夫\*・吉川英一郎\*\*

\*鉄鋼部門・チタン本部・チタン技術部 \*\*技術開発本部・化学環境研究所

## Titanium for Buildings

Takashi Yashiki・Dr. Yoshiyuki Miyamoto・Yoshitaka Yamamoto・Akio Okamoto・Eiichiro Yoshikawa

More than 20 years have passed since titanium materials were firstly used in the building field. At present, about 150-200 tons per year are used in Japan. Kobe Steel has continued to study building titanium. As a result, new high performance titanium materials were developed. This paper introduces the actual applications of these titanium in the building field, and their special properties and advantages.

まえがき = 近年、ウォーターフロント開発の進展や酸性雨の発生にともない、ビルなどの建築物をとりまく環境が厳しくなりつつある。また、メンテナンス費用の高騰も見られる。これらのことから、耐食性に優れ、耐用年数の長い建材としてチタンが注目されている。これは優れた耐食性により、大気環境において腐食の可能性が無いことが最大の理由であるが、ほかに建材として適度な機械的性質を有することもあげられる。当社では1949年にチタンの研究開発に着手して以来、日本におけるチタン展進材産業のパイオニアとして、研究開発と用途開拓に取り組んできた。この中で、建材分野においてもチタンの適用の拡大や高付加価値化などに力を入れてきた。本稿ではチタン建材の採用状況、特長ならびに高付加価値化により達成された当社チタン建材の優位性について解説する。

### 1. 採用状況

表1<sup>1)</sup>にチタン建材の主な採用状況を示す。当社においては、1979年にギリシャアテネのパルテノン神殿のカリアティデス乙女像などへの耐食補強材料として約7トンが使用されたのが最初で、その後多くの案件で当社材が採用されている。当社材の代表的な採用案件を以下に記す。

1987年には写真1の神戸市立須磨海浜水族園屋根に約12トンが使用された。本物件は後述する連続焼鈍酸洗処理材を世界で最初に適用した大型案件であり、チタン建材の記念碑的存在と言える。また1993～94年にかけて、チタン建材としては世界最大物量の140トンを使用した「東京国際展示場・会議棟」通称「東京ビックサイト」に外壁材料を納入した。1996年には、「東京国立博物館平成館」の屋根13トンを完工した。これは皇太子殿下御成婚を記念する建物で、100年設計をコンセプトとして



写真1 神戸市立須磨水族園 / チタン屋根  
Photo 1 Kobe Municipal Suma Aquarium / titanium roofing

表1 チタン建材の採用状況(代表例)  
Table 1 Applications of titanium to building and construction

Year	1975		1980					1985				1990				1995				2000		
	73	74	76	77	78	79	81	82	83	84	86	87	88	89	91	92	93	94	96	97	98	99
Roofs	早吸日女神社							東京電力電力館 須磨海浜水族園				RIC国際展示場 オーシャンドーム マリンメッセ福岡				島根県立美術館 東京国立博物館平成館						
Walls								三栄金属ビル GINZA SEIビル 養命酒製造本社ビル				東京ビックサイト				戦没者追悼平和祈念館 湊町リバー ブレース						
Others			パルテノン神殿					虹の塔(モニュメント)				横浜みなとみらい(親水棚)				鹿島神社(大鳥居)						



写真2 鹿嶋神社 / チタン大鳥居  
Photo 2 Kashima Shinto Shrine / titanium big sacred arch

チタンが採用された。1998年には写真2の兵庫県高砂市の鹿嶋神社に、チタン製大鳥居を納入した。高さ26m、幅35m、柱直径3m、チタン10トンの大型鳥居である。通常、鳥居には木材又は石材を使用するが、大型となると木材の入手も困難であり、コンクリートや鉄鋼製が多い。しかしコンクリートは耐震性や汚れに問題があり、鉄鋼は耐食性に劣ることから10年ごとの塗装が必要になる。同神社では後世に残る鳥居としてチタンを採用した。

## 2. 特長

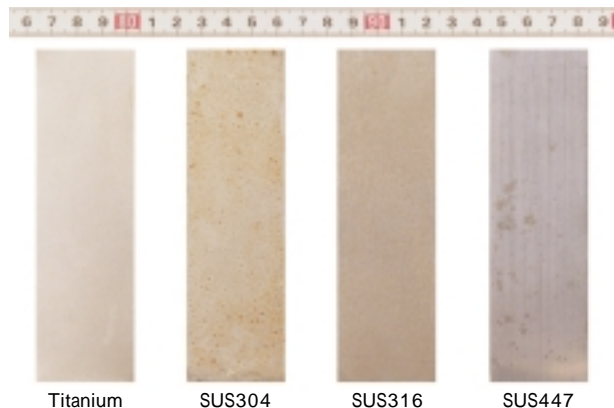
### 2.1 優れた耐食性

チタン表面には厚さ数十～百のチタン酸化物皮膜が存在し、これが多くの環境で非常に安定であるため、大気中、海水中ならびに各種薬品中で優れた耐食性を示す。近年、酸性雨による石や金属の被害が報告されているが、チタンは脱不動態化するpHが約1以下であり、酸性雨では腐食は生じない。また、海塩粒子やもらい錆による腐食も、ステンレス鋼やアルミニウムとは異なりチタンには生じない。最近、SUS447J1に代表される高Crのスーパーステンレス鋼が建材として実用化されてきているが、これらの材料でも過酷な使用環境では発錆しうる。

写真3<sup>2)</sup>はチタン、SUS304、SUS316L及びSUS447J1の耐食性促進試験後の外観である。SUS304、SUS316Lはもちろんのこと、SUS447J1にも発錆が認められるが、チタンには一切認められない。

### 2.2 建材としての適度な機械的性質

チタンの比重は4.51で銅の約50%、ステンレス鋼の約60%と軽いため、高所での作業性に優れる。熱膨張係数はステンレス鋼の1/2、アルミニウムの1/3であり、気温の変化による変形や継目への応力集中が少ない。さらに、ガラス、コンクリートと近似値にあるので、多種の材質を組合わせた建築に適している。また、熱伝導率が低く、保温性に富む。強度は普通鋼と同程度であり、機械加工も同様に可能である。一方、ヤング率は鉄の半分で、たわみやすいため、曲げ加工においてスプリングバックが若干大きくなる。



Titanium SUS304 SUS316 SUS447

[Cycle<sup>3)</sup>]  
Spray (1/10 concentration of artificial seawater)  
Dry (60 , <60% RH, 30min)  
Wet (40 , 95% RH, 60min), total 400 cycles

写真3 複合サイクル腐食試験後のチタンと各種ステンレス鋼の外観

Photo 3 Appearance of titanium and various stainless steels after combined cycle corrosion test

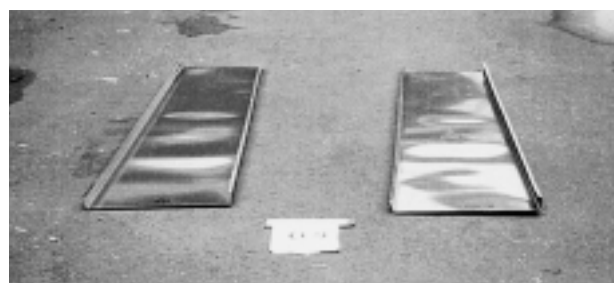


写真4 ポケットウェーブの外観 / ロール成形チタン板  
Photo 4 Appearance of pocket wave / roll formed titanium sheets

## 3. 当社チタン建材の優位性

### 3.1 耐ポケットウェーブ性に優れた材料

ポケットウェーブとは写真4<sup>4)</sup>のような長尺金属屋根に時々見られるペコつき現象のことで、ロールフォーミングなどの加工により面内に生じた残留圧縮応力が素材の座屈限界応力を超えた場合に発生し、美観を損う。当社では、連続焼鈍酸洗ライン(Continuous annealing and pickling line, このラインにより焼鈍、酸洗処理された材料をAP材と称する)により結晶粒径を均一微細にコントロールすることで、ポケットウェーブの大幅抑制に成功している。

一般にチタンコイルの最終焼鈍・表面仕上げ法には上記の連続焼鈍酸洗の他に真空焼鈍(Vacuum annealing, 本法を適用した材料を以後VA材と称す)がある。真空焼鈍は大型コイルをバッチ処理するため、コイル全体の均一組織化に長時間を要し、一般に微細組織を得ることは難しい。一方、連続焼鈍酸洗ラインでは大気焼鈍炉、ソルトバス及び酸洗槽が直列しており、コイルの焼鈍と脱スケールを連続して行える。そのため焼鈍温度とライン速度を制御することで均一な微細組織が得られる。

図1<sup>4)</sup>に結晶粒径とポケットウェーブ高さHpの関係を示す。結晶粒径が小さいほどHpは小さくなる、つまりポケットウェーブが目立たなくなる。結晶粒の微細化によりポケットウェーブが改善される理由は、図2<sup>4)</sup>の応力

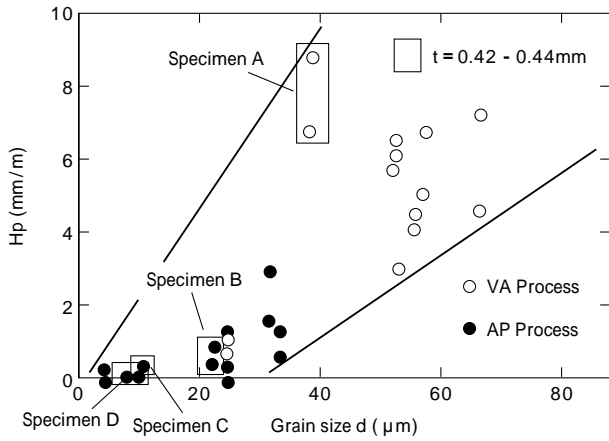


図1 結晶粒径とポケットウェーブ高さ Hp の関係  
Fig. 1 Relationship between the magnitude of pocket wave (Hp) and grain size (d)

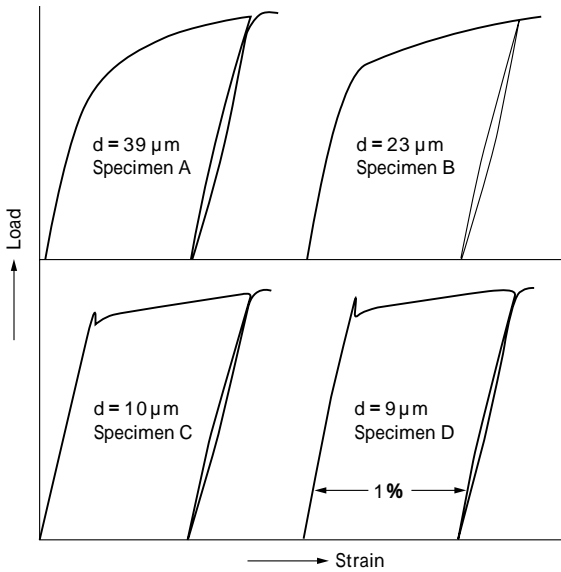


図2 応力 - 歪み曲線に及ぼす結晶粒径の影響  
Fig. 2 Effect of grain size on actual stress-strain curves

歪み曲線の形状で説明できる。すなわち、応力・歪み曲線の変形初期の形状は結晶粒径に依存し、結晶粒径が  $10 \mu\text{m}$  以下では降伏が生じる。また、結晶粒径が  $23 \mu\text{m}$  のものは降伏は見られないが、結晶粒径  $39 \mu\text{m}$  のものに比べ、降伏点近傍での折曲りがシャープである。このように、比較的結晶粒が微細な材料はロール成形時に変形が曲げ部に集中し、平坦部にまで変形が及ばないためにポケットウェーブが発生し難くなる。

### 3.2 光の反射によるギラツキの少ない材料

AP材はつやの少ない銀白色を呈している。一方、VA材は、冷間圧延後、真空焼鈍と軽い冷間圧延を実施しているため、圧延ままの肌となりギラツキ感がある。一般に、VA材のギラツキ感は忌避され、つやの少ない清浄な雰囲気を持つAP材が好まれる。チタン建材の使用量が増えるにつれ、表面意匠性に対する要求が多様化し、AP材の中でもユーザの好みに合ったレベルへの光沢度コントロールが求められるようになってきた。

当社では実生産において光沢度をコントロールする手段の一つとして、焼鈍条件により結晶粒径を制御することが有用であることを見出した。図3<sup>5)</sup>に焼鈍により結

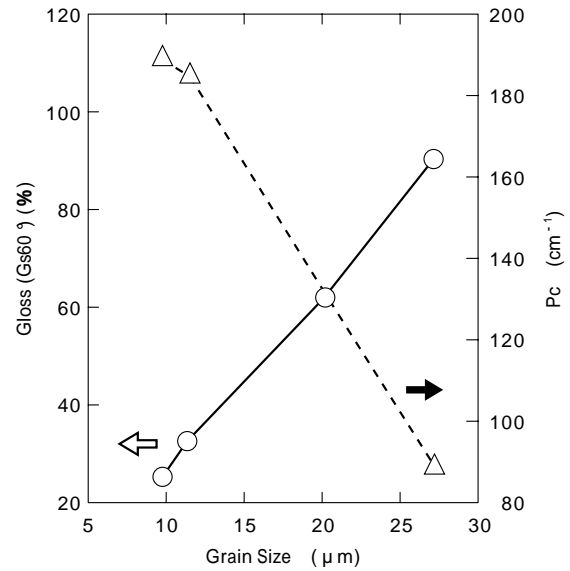


図3 結晶粒径と光沢度及びピークカウント Pc の関係  
Fig. 3 Relationship among grain size, gloss and peak count Pc

晶粒径を種々調整した試料の結晶粒径と、硝酸を用いた酸洗により板厚を  $70 \mu\text{m}$  溶削した後の光沢度及び表面における単位長さあたりの粗さピーク数 Pc の関係を示す。結晶粒径が大きいほど Pc が少なくなる、つまり表面の凹凸が減り、この結果光沢度が高くなる。本知見を連続焼鈍酸洗ラインの実操業に適用し、光沢度のコントロールを試みた。光沢度目標は低 (30~40%)、中 (50~60%)、高 (70~80%) の3種とした。写真<sup>5)</sup>はその結果で、各試料は3種の操業条件で製造した3コイルを切板に加工したものである。光沢度はそれぞれ35%、50%、80%に調整できている。

以上のように当社ではポケットウェーブの発生及び光沢度が結晶粒径と密接に関係していることを明らかにした。この結果、連続焼鈍酸洗ラインを用い、結晶粒径を  $25 \mu\text{m}$  以下の範囲で任意に制御することで、ポケットウェーブが目立たず、かつユーザの好みに合った光沢度を有する外観に優れた建材用純チタンを得ることに成功している。

### 3.3 変色の少ない材料

チタンの表面に存在する厚さ数十~百のチタン酸化物皮膜の皮膜厚さは、自然環境における経年変化により極僅かながら増加する。これが百数十を超えると、皮

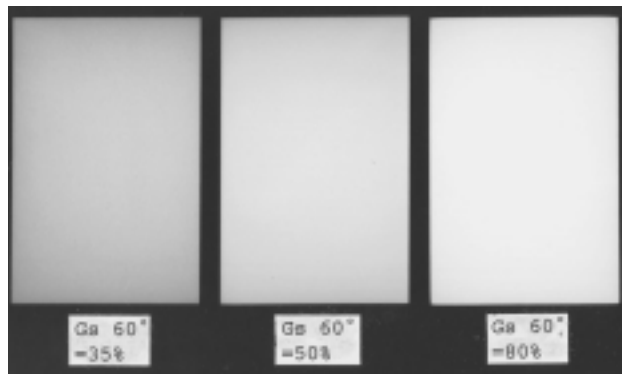


写真5 連続焼鈍酸洗ラインで製造された純チタン板の外観  
Photo 5 Appearance of pure titanium plates manufactured by continuous annealing and pickling line

膜を透過する光が干渉し合うことで、膜厚に応じた色調に発色する。ほとんどの場合、経年変化による皮膜厚の増大は百数十程度で飽和するため、極うっすらと金色になる程度であり問題にはならない。しかし、メカニズムは十分に解明されたわけではないが、大気中に存在する粉塵、亜硫酸ガス、排気ガス、海塩粒子や酸性雨などの化学的作用により酸化皮膜厚さが百数十を超えてしまい、薄金色から薄茶色の変色が生じることがある。また、チタン表面に絶えず水分が接触するような場合、例えば雨道に相当する部分や、くぼみ部に水が溜まるような場合、更には空調の室外機の真上で水蒸気が常に当たるような部分などにおいても上記と同様の変色が生じる場合がある。なお、経年変化による変色はチタンだけでなくステンレス鋼、アルミニウム、さらには大理石などの天然素材でも生じる。

当社では、チタン建材の経年変化による変色の中でも問題となる比較的濃い変色の多くがVA材で生じていることから、素材の表面仕上げにより耐変色性が異なる、つまりAP材の方がVA材よりも耐変色性に優れることを見出した。したがってAP材を使用することでポケットウエーブが目立たず、かつユーザ好みの低光沢度が得られ、その上変色抑制の効果をも得ることができる。

図4はAP材とVA材の表面近傍のオージェ電子分光法による深さ方向組成分析結果である。VA材表面の酸化皮膜中には多量の炭素が存在するとともに、基材のチタンにも炭素が侵入している。この炭素は基材チタンと反応し、TiCとして存在していることを別途X線光電子分光法で確認している。一方AP材の酸化皮膜表面にも炭素が認められるが、これは試料保管時に表面に吸着したものと見なされ、TiCも検出されなかった。TiCはTiO<sub>2</sub>に比べ不安定である。このことから環境的作用によりTiCが溶出し、このチタンイオンが加水分解により酸化チタ

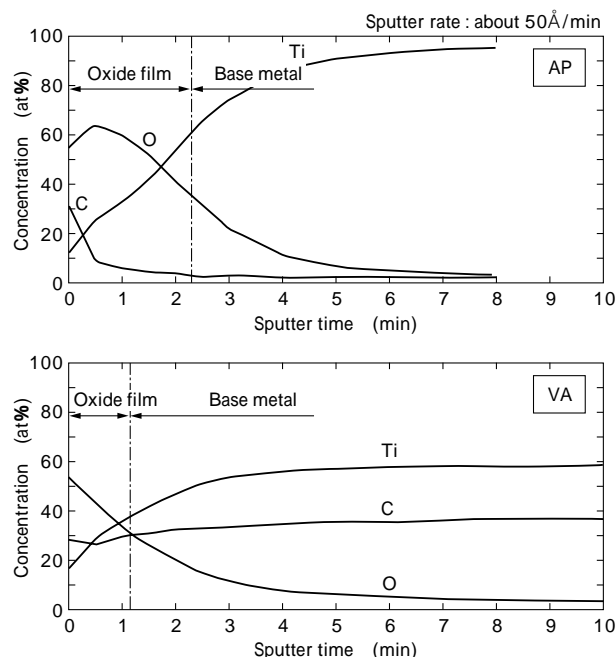


図4 AP材とVA材の表面酸化皮膜のAESによる深さ方向組成分析結果

Fig. 4 AES depth profiles of the surface oxide films on AP material and VA material

ンとなり、酸化皮膜厚さを増大させる結果、変色が進むことがメカニズムの一つとして考えられる。VA材表面の炭素による汚染には製造工程が関与していると考えられる。AP材とVA材の冷延以降の大きな製造工程は次の通りである。

[AP材] 冷延 大気焼鈍 酸洗

[VA材] 冷延 脱脂 真空焼鈍 軽圧延 脱脂

VA材表面の炭素による汚染は、真空焼鈍前の脱脂工程で完全に除去し切れなかった残存油分や、真空焼鈍炉の炉壁に付着した油分などが真空焼鈍時にチタン中に拡散侵入したものと考えられる。一方、AP材は酸洗により表面層が除去されるため、清浄な表面となる。

### 3.4 耐変色性表面処理

従来から金属建材のメンテナンスフリー化と塗替え周期延長のため、疎水性のふっ素樹脂系塗料が使用されている。しかし、ふっ素樹脂系塗料でさえも、都市部では経年汚れが目立つ。そこで最近では塗膜の親水化により、排気ガスなどの疎水性の汚れを雨水によって洗い流すという塗料設計が注目されている。当社ではこの設計を取入れ、チタン建材の経年汚れを軽減し、さらにチタンと環境をこの塗膜により遮断することで、更なる耐変色性を付与すべく、水ガラスを主成分とした新たな親水性無機系クリア塗料を開発した。本開発塗料の低汚染メカニズムを図5<sup>6)</sup>に示す。低汚染性の塗膜を得るには汚染物質除去のための親水化と、付着・固着防止のための塗膜硬さが要求される。これらを満足させるには有機系塗膜よりも無機系塗膜が有効である。無機系塗膜の代表に水ガラス系塗膜があるが、親水機能の持続性に劣ること、加熱による造膜過程でクラックが発生しやすいこと、更には疎水性の基板に塗工する場合、はじきが発生しやすい欠点がある。

そこで当社ではこれら欠点の克服に取組んだ。親水性持続のためには水ガラスを主成分とする塗膜が持つ3次元網目構造をより安定化させ、加水分解し難い構造にする必要がある。このためには低縮合型のりん酸塩化合物であるトリポリりん酸ナトリウム塩が有用であることを見いだした。クラックの抑制には、網目構造中に新たに添加するコロイダルシリカの粒径と添加量の最適化、及

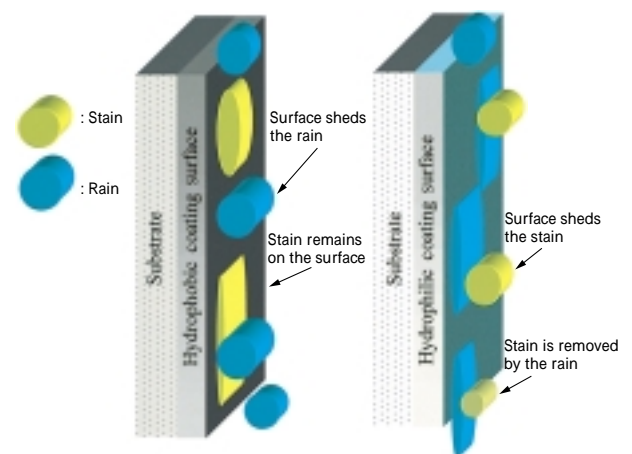


図5 親水性塗装における汚染物質除去メカニズム

Fig. 5 Stain removal mechanism on the hydrophilic surface

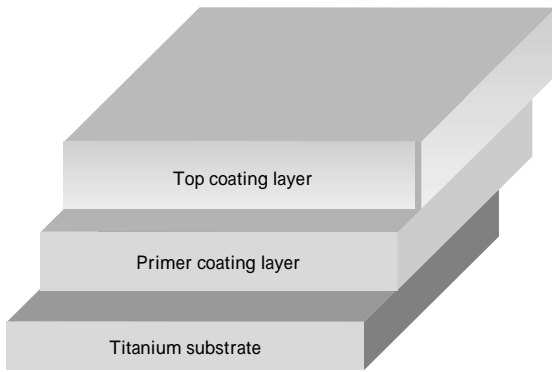


図6 2層構造からなる水ガラス系低汚染型開発塗膜の模式図  
Fig. 6 Schematic structure of developed anti-contamination water glass coating system made up by two-layer structure

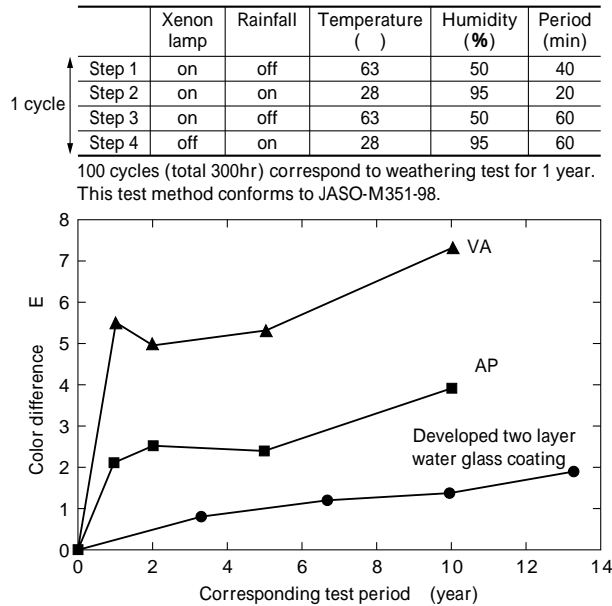


図7 2層水ガラス系低汚染型開発塗膜付き AP 材及び VA 材の耐候性促進試験結果  
Fig. 7 Results of accelerated weathering test of developed two layer anti-corrosion water glass casting on AP titanium, AP titanium and VA titanium

び塗膜の厚み制御が有用であることを見出した。また、はじきの抑制のため下地塗膜層を導入し、この主成分としてカチオン性コロイダルアルミナを適用するととも

に、水ガラス系トップコートとの密着性を高めるためにカチオン性コロイダルシリカを併用した。更に塗膜の焼付け工程で生じる塗膜とチタンの熱膨張差に起因する密着性低下を改善するため、カチオン性の特殊変性エポキシ系樹脂も添加し、これらを下地塗膜層の基本組成とした。

図6<sup>6)</sup>に開発塗膜の構造模式図を示す。図7<sup>6)</sup>に本塗料を適用したチタン建材の耐候性促進試験結果を示す。AP材よりも更にEが小さく、耐変色性に一層優れるのがわかる。なお、本塗膜は耐疵つき性と耐指紋性をも有していることから、人手に触れる門扉やモニュメントなどへの適用も期待される。

むすび=チタン建材の使用量は全国で年間150~200トンの規模に達し、高性能建材として認知されてきている。一方でチタン建材の歴史は本格的に使用され始めてまだ十数年と短く、長期に使用した場合の特性に関するデータは十分とは言えない。従って今後も耐候性や意匠性の追跡調査を行い、建材としての地位を確固たるものにしていく必要がある。また、従来は優れた耐食性を理由にチタンを採用するケースが多かったが、最近では表面意匠性が採用決定の重要なポイントになるケースも見られる。従って、今後多様化する意匠性の要求にかなう表面処理法の開発もチタン建材の更なる発展のために必要と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 芦原幸一：R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.3 (1999) p.61.
- 2) 屋敷貴司ほか：金属, Vol.67, No.2 (1997) p.151.
- 3) 磯尾裕幸ほか：腐食防食協会講演大会予稿集, (1994) p.349.
- 4) 屋敷貴司ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.3 (1999) p.35.
- 5) 屋敷貴司ほか：表面技術, Vol.50, No.6 (1999) p.69.
- 6) 吉川英一郎ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.2 (2000) p.22.