

# 特集 チタンの 建材としてのポテンシャルを探る



チタン屋根を採用した光悦寺本堂。2003年度グッドデザイン賞受賞

日本鐵板株式会社  
チタン営業室 室長 重石邦彦

航空宇宙開発用の先端素材として重用され、夢の金属と呼ばれたチタン。そのチタンが今、建材としてめざましい躍進を遂げている。

1970年代、優れた耐食性から、まずは厳しい腐食環境での建造物に使用されたが、一般の建材として普及するには、経年による変色の抑制や、意匠ニーズにマッチした表面仕上の開発、また、施工性の向上や歪対策など、越えるべきべきハードルは少なくなかった。しかし、さまざまな試行錯誤の末に課題をクリアし、今や美術館・博物館、神社仏閣はもとより、一般住宅への適用も進んでいる。

本稿では、チタンのポテンシャルに迫るべく、その歴史や製造方法から、建材分野での適用の歩み、それを実現に導いた技術要素、また、代表的な使用例までを総合的に紹介する。

## チタンのプロフィール

チタン (Ti) は地殻中で9番目に多い元素で、その有効埋蔵量は約3億トンと推定される。実用金属としては、鉄、アルミニウム、マグネシウムに次ぐものである。

最も古い金属と言われる銅は約6,000年の歴史があり、鉄は約4,000年の歴史があるのに対し、チタンに関しては、酸化物としてその存在が確認されたのが約200年前、酸化物から金属チタンが誕生したのが約100年前、工業用金属材料として実用化が開始されたのは第二次世界大戦後であるなど、その歴史は極めて浅い。いわば「地球上で4番目に多い金属」でありながら、これまでレアメタル（希少金属）の仲間には位置づけられてきたのは、そういった背景にも一因する。

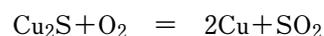
ただし、実用金属としてのチタンのポテンシャルには類い稀なものがある。詳細は後述するが、他の金属と比べ、軽く（比重が銅の約1/2、鉄の約60%）、強く（比強度は鉄の約2倍）、錆びない（ステンレスよりも優れた耐食性）など多くのメリットを有している。まずその実用化が航空機分野で本格化し、宇宙開発用素

材として注目を集めたことなどもあり、一般に「夢の金属」「未来の金属」として知られるようになってきた。

## チタンの製造方法

どんな金属も地球上に元から金属として存在しているのではなく、銅は硫化銅 (Cu<sub>2</sub>S)、鉄は酸化鉄（主にFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）、アルミニウムはアルミニウム酸化物 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) といった具合に化合物として存在している。この化合物が存在している物質が鉱石である。この鉱石から金属分以外を除去し、金属だけを取り出すために、いわゆる「製錬」が行われる。

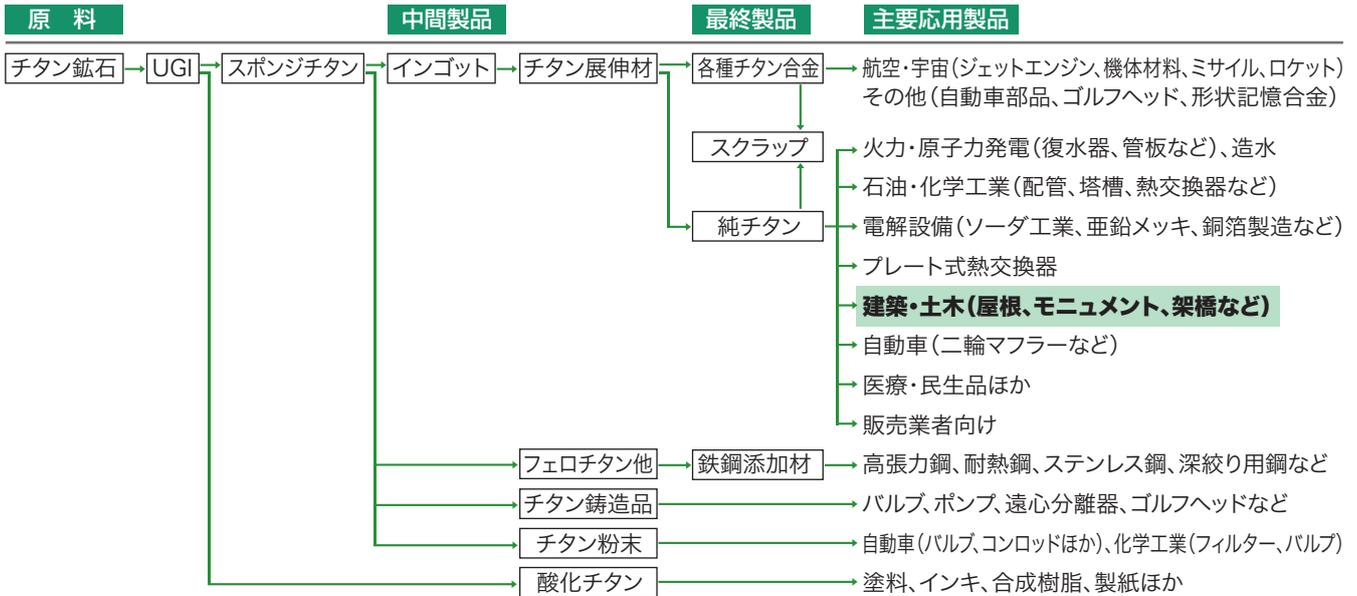
たとえば銅ならば、銅 (Cu) よりも硫黄 (S) と化合物を作りやすい酸素 (O) と、原材料である硫化銅とを反応させることにより、



の反応を生じさせて金属銅を得る。鉄ならば、鉄よりも酸素と化合物を作りやすい炭素と、原材料である酸化鉄とを高温で反応させることにより金属鉄を得る。

アルミニウムの場合も、原理的には鉄と同様、アルミニウム酸化物から酸素を分離させるが、アルミニウ

## チタンのマテリアルフロー



ムと酸素の結合力が強いため、鉄と同様のプロセスでは金属アルミニウムは得られない。そこで、鉄よりも複雑な製錬プロセスが必要となり、また、そのプロセスで膨大な電気エネルギーを要する。

チタンもまた、ルチル（金紅石、 $\text{TiO}_2$ ）、ペロブスカイト（灰チタン石、 $\text{CaTiO}_3$ ）、イルメナイト（チタン鉄鉱、 $\text{FeTiO}_3$ ）など、鉱石の中に酸化物として存在している。金属チタンを得るには、鉄やアルミニウムと同様、酸素を取り除くプロセスが必要となるが、チタンの酸素との結合力はアルミニウムにも増して強固であり、鉄やアルミニウムのような冶金反動的な方法では酸素の分離は不可能である。

そこでチタンの製錬には、これらとはまったく異なる化学製錬法が用いられる。その方法として、まず、チタン鉱石中の酸化物を、約900℃の高温で炭素の共存した状態において塩素と反応させる。

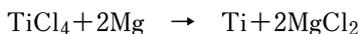
これによって、



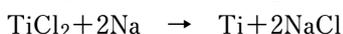
という反応が起こり、四塩化チタン（ $\text{TiCl}_4$ ）が生成される。なお、四塩化チタンは常温では液体である。

さらにこの四塩化チタンから塩素を取り除くことにより金属チタンの誕生となる。その方法としては、マグネシウム（Mg）還元法およびナトリウム（Na）還元法の2つがある。各法における反応は次の通りである。

・マグネシウム還元法



・ナトリウム（Na）還元法



それぞれ開発者の名前をとり、マグネシウム還元法はクロール法、ナトリウム還元法はハンター法と呼ばれる。現在ではクロール法が世界の主流となっている。

## チタンのマテリアルフロー

こうして酸化チタンは金属チタンへと生まれ変わるが、生まれ変わった直後の状態は、外見がスポンジのように多孔質であることから、スポンジチタンと呼ばれる。スポンジチタンを破碎・粉砕し、溶解・凝固を繰り返すことにより、チタンインゴットが製造される。

米国においては、スポンジチタンの製造からその後の最終展伸材まで、チタン専門メーカーが一貫製造しているが、日本においては、一部例外を除き、スポンジチタンおよびインゴットまでをチタン専門メーカーが受け持ち、その後の展伸材は主に鉄鋼メーカーにより製造される。そのプロセスにおいて鉄鋼との相違点はあるものの類似点も多く、鉄鋼製造設備がチタンにも活用できるからである。わが国で、チタン建材が鉄鋼メーカーで開発され製造されているのも、そのことによる。

建材用途においては、当然のことながら、製造された展伸材に、必要に応じた加工がなされて需要先に提供されるが、チタンのすべての用途を見た場合には、さまざまなフローが存在する。

チタン需要の9割以上は、金属チタンに姿を変える前の酸化チタンそのものとして使用され、金属チタンとして使用されるのはわずか数%にすぎない。酸化チタンの大口需要先としては、優れた白色度、耐候性、隠蔽力、着色力などを生かした白色顔料分野であり、塗料、印刷インキ、紙、プラスチック、化学繊維、ゴムなどの業界に原料として供給される。また、近年では帯電防止剤、UV遮蔽材、光触媒材などの機能性材料としても幅広く活用されている。

以下では建材としてのチタンについて紹介するが、参考までに、チタンの原料から主要製品に至るまでのマテリアルフロー図を掲載しておく。

## 建材としてのチタンの展開

さて、建材としてのチタンは、1970年代から日本で適用が開始された。各地の海浜地区や沖縄・鹿児島のような厳しい腐食環境から使用されるようになり、やがて美術館・博物館をはじめとする公共物件や寺社仏閣分野等の恒久建築物へと適用範囲を広げてきた。最近では一般住宅へその裾野を広げつつある。

また、海外ではFrank O. Gehryが設計したGuggenheim museum（スペイン、ビルバオ市）の外装への適用を契機に1990年代から各国で適用が開始されている。

このような発展を遂げてきた理由の第一は、チタンそのものが海浜・海岸を含む大気自然環境下において比類なき耐食性を有しており、通常の建材使用環境で腐食する可能性が皆無であることである。

第二の理由はその優れた意匠性である。素地の色がステンレスと一味違う趣があること、また陽極酸化による発色が行えること、各製造メーカーがさまざまな表面仕上を開発し建築家の要請に応じてきたことなどが挙げられる。

第三の理由は、建材（意匠材）として必要な適用技術の整備が短期間に行われたことにある。具体的には①表面仕上の開発、②ロット間の色のバラつきの低減、③経年変化による変色の抑制、④加工後の歪対策、⑤ステンレス鋼との複合材料の開発への協力、⑥その他クリーニングなどの関連技術の開発である。

以下、チタン建材の基本的特性と経済性について述べたあと、建材への適用技術の現状について報告する。

## チタン建材の基本的特性

### 1. 比類なき耐食性能

チタンは、常温で容易に安定した酸化皮膜（不動態皮膜）を形成し、優れた耐食性を持つ。通常の建材使用環境で腐食する可能性は皆無である。

#### ①海水に対して白金並みの耐食性

海岸地帯での使用にも最適な金属である。

#### ②腐蝕性ガスにも優れた耐食性能（亜硫酸ガス・硫化水素ガスなど）

大都市、工業地帯、温泉地帯等で最も優れた建築材料である。

#### ③酸性雨にも優れた耐食性能

酸性雨など、地球規模での環境汚染にも強い金属である。

### 2. 高強度

鋼とほぼ同程度の強度を持ち、重量当たりの強度、すなわち比強度が高い金属である。建材用としては、加工性の良いJIS 1種の純チタンが主に使用される。

## 建材へのチタン適用の歩み

	日本	海外
1970	海浜地区や厳しい腐食環境等で適用が始まる	
1980	建材用途における弱点の克服 意匠性向上のための技術開発	
1990	美術館・博物館等の恒久建築物での適用が進む 神社仏閣での適用が進む	Guggenheim museum（スペイン）外装に採用、以後各国での適用が始まる
2000	一般住宅分野でも、適用物件が増え始める	ステンレス鋼との複合材料が評価され、中国・台湾他で大型物件への適用相次ぐ

### チタン建材適用の背景

#### ①比類なき耐食性

通常の建材使用環境では、まず腐食しない腐食性ガスや酸性雨にも、優れた耐食性能

#### ②意匠性

特有の素地の色、多彩な発色と表面仕上など

#### ③適用技術の整備

色のバラつきの低減、経年変色の抑制、歪対策、複合材料の開発、クリーニング技術の開発など

### 3. 軽い

比重が4.51で、鋼の60%、銅の1/2、アルミの1.7倍である。軽い金属なので、構造に対する負担が少なく、施工作业も容易である。

### 4. 熱膨張が小さい

線膨張係数は、ステンレス、銅の1/2、アルミの1/3である。ガラス・コンクリートと近い値なのでこれらとの共用ができる。気温変化による伸縮が少なく、長尺施工に有利である。

### 5. 優れた意匠性

素地は、渋みのある落ち着いた銀色で優れた質感を持つ。さらに陽極酸化法によりさまざまな発色が可能である。

### 6. 環境に優しい

金属イオンの溶出が少ないため人体および環境に優しい。

## 各種金属の耐薬品性比較

	チタン	ステンレス SUS 304	ステンレス SUS 316	銅
海水 常温	◎	◎*	◎*	○
塩酸 HCl 10 %常温	○	×	×	×
硫酸 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10 %常温	○	○	○	○
硝酸 HNO <sub>3</sub> 10 %常温	◎	◎	◎	×
苛性ソーダ NaOH 50 %常温	◎	◎	◎	◎
塩化ナトリウム NaCl 20 %常温	◎	○	○	◎
塩素ガス Cl <sub>2</sub> 100 %wet	◎	×	×	×
硫化水素ガス H <sub>2</sub> S 100 %wet	◎	○	◎	×
亜硫酸ガス SO <sub>2</sub> 30-90℃	◎	○	○	×

評価  
 ◎:<0.05  
 ○:<0.05~0.5  
 △:<0.55~1.27  
 ×:>1.27mm/年

(出典:日本チタン協会)

\* 孔食及び隙間腐食が発生する

## チタンとその他の金属との物性比較表

項目	金属材料	チタン	ステンレス SUS 304	ステンレス SUS 316	鉄	銅	アルミニウム
溶融点 °C		1,668	1,398~1,453	1,370~1,397	1,530	1,083	660
比重		4.51	7.93	8.0	7.9	8.9	2.7
線膨張係数×10 <sup>-6</sup> /°C(20~100)		8.4	17.3	16.0	12.0	17.0	23.0
熱伝導率 cal/cm <sup>2</sup> /sec/°C/cm		0.041	0.039	0.039	0.150	0.920	0.490
電気抵抗 μΩ-cm		47	72	74	9.7	1.7	2.7
ヤング率 kg/mm <sup>2</sup>		10,850	19,300	19,300	21,000	11,000	7,050

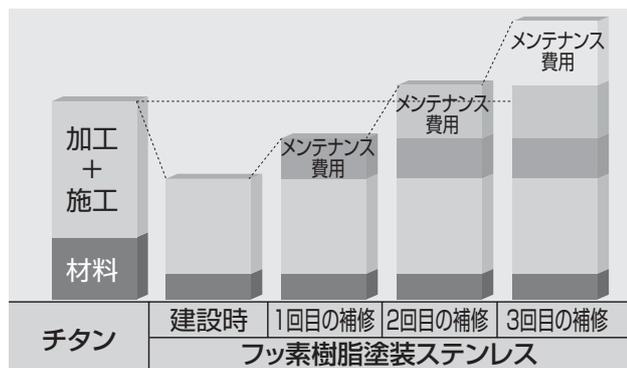
## 7. その他

①ヤング率(弾性係数)が小さい、②熱伝導率が小さい、③溶融点が高い、④非磁性などの特性がある。

## チタン建材の経済性

チタンは、屋根材や外装材として使用される時、素材ベースのイニシャルコストは、他素材に比べて高いものの、塗り替え、葺き替えが不要となるなど、ランニングコストが極めて低くなり、20~30年以上で使用する場合、ライフサイクルコストでは有利となる。特に海岸地帯や工業地帯、都市等の腐食の激しいところではさらに有利となる。

## チタンとカラーステンレスの工事費(累積)の比較例



【条件】 ●工法—溶接工法 ●ステンレスの補修周期—1回目の補修まで15~20年  
 ●使用条件—チタン:素地 ●ステンレスの補修周期—2回目以降は5~10年で  
 ステンレス:フッ素焼付塗装 塗装補修をするものとする

## 建材への適用技術の現状

チタンが建築用の意匠材料として必要とされる機能を満たすため多くの技術開発が行われてきている。

### 1. 表面仕上

チタンの最大の魅力はその意匠性にある。建築家の要請に応えるかたちで各製造メーカーは多くのメニューを作り出してきた。発色だけでも100種類以上の色の作り分けが可能であり、これに数種類の表面仕上を組み合わせると数百種類もの製品が製造可能となる。塗装技術を用いずに金属表面の加工でこれだけ多くのメニューを作り出せるのはチタンの大きな特色である。

チタン冷延製品はおおまかに言えば、①連続焼鈍酸洗(AP process)か②バッチ式真空焼鈍(VA Process)のどちらかの工程で製造され、それぞれの方法から代表的な表面仕上である①酸洗仕上、②ロールダル仕上(真空焼鈍後さらに光沢を下げるためスキンパスでダル加工を行う)が作られる。また建築家の要請に応えるかたちで酸洗とロールダルを組み合わせた製品も作られている。

低光沢で白っぽい酸洗仕上は、建築家の関心を集め、多くの建築に適用されている。チタン使用量で最大の物件である東京ビッグサイト(屋根・外装:16,000㎡/150トン、1995年)に、また最近では、湊町リバープレイス(外装:18,500㎡/56トン、2000年)に使用されている。酸洗とロールダルの組み合わせたものでは、三重県立看護大学(屋根:16,000㎡/30トン、1997年)、

### 酸洗仕上の適用例



東京ビッグサイト



湊町リバープレイス

### ロールダル仕上の適用例



大分スタジアム



杭州大劇院



JR函館駅



Taipei Arena

### 酸洗+ロールダル仕上の適用例

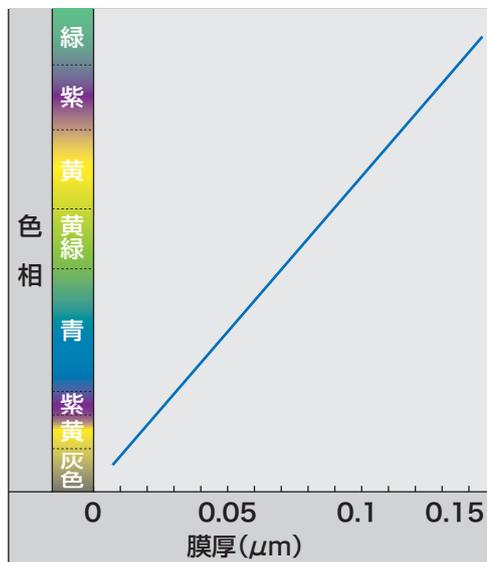


島根県立美術館

### 干渉色の原理



### 膜厚と干渉色の関係 (理論計算値)



島根県立美術館（屋根：10,000㎡/60トン、1998年）などがある。

酸洗仕上よりやや黒っぽく光沢があるロールダル仕上も最近では使用例が増えてきている。大分スタジアム（屋根：32,000㎡/80トン、2001年）、JR函館駅（外装：1,000㎡ 7トン、2003年）、中国国家大劇院（外装：43,000㎡/65トン、2007年竣工）、杭州大劇院（外装：15,000㎡/15トン、2004年竣工）、Taipei Arena（屋根外装：20,000㎡/50トン、2005年）等の例がある。

更に黒っぽく低光沢でいぶし瓦風の肌を求められて開発されたのがアルミナ粉を直接投射するアルミナブラスト仕上である。金閣寺茶室（屋根：1トン、2003年）や浅草寺宝蔵門（屋根：1,000㎡/7トン、2007年）など、寺社仏閣分野で多くの実績があるが、東京国立博物館平成館（屋根：6,000㎡/20トン、1998年）、昭和館（外装：4,200㎡/60トン、1998年）、小倉百人一首殿堂（屋根：1トン、2006年）等の中～大規模な建築にも適用が拡大している。

陽極酸化によってチタン表面の薄い酸化皮膜を成長させるとさまざまな干渉色が現れる。これがチタンの発色である。100分の1ミクロン単位の酸化皮膜の膜厚調整で色のコントロールを行うため、ミクロンオーダーで作られるそれぞれの表面仕上の風合い・色が反映され、表面仕上と発色との組み合わせで多くのメニューを作り出すことが可能となる。すでに、色むらの発生を抑える発色前の原板製造技術や、発色後に曲げ加工を行っても色の変化や脱色等の現象が起こらない密着性の優れた発色技術も開発されており、建築用としては、ロールダル仕上あるいはアルミナブラスト仕上

### アルミナブラスト仕上の適用例

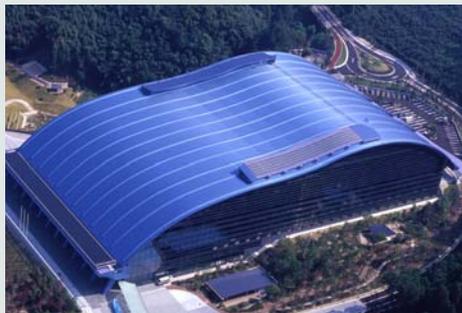


金閣寺茶室



浅草寺宝蔵門  
東京国立博物館昭和館

### ロールダルまたはアルミナブラスト仕上+発色の適用例



九州国立博物館



Hotel Marques De Riscal



北野天満宮宝物殿

を発色したものが多く使用されている。

ロールダル仕上では、九州国立博物館（屋根/ブルー発色：17,000㎡/50トン、2004年）、Frank O. Gehryが設計したHotel Marques De Riscal（スペイン、オブジェ/ピンク・ゴールド：2,000㎡/12トン、2006年）がある。低光沢のアルミナブラスト仕上を発色すると落ち着いた色合いとなる。奈良国立博物館（屋根/コルテン色：6,000㎡/12トン、1998年）、北野天満宮宝物殿（屋根/緑青色：1,000㎡/4トン、1998年）が代表的な物件である。最近、寺社を中心に緑青色の採用が広がっている。

その他にも、既存の表面加工技術と組み合わせて、エンボス、ヘアライン、パイブレイション研磨、鏡面加工された製品が適用されている。

チタンは指紋が目立つという欠点があるが、この問題についても多くの検討がされており近い将来解決されるものと思われる。

チタンの表面仕上については未だ多くの可能性が秘められている。

### 2. ロット間の色のバラツキの低減

金属素地（無塗装）を建築に使用する場合、製造ロットによって微妙に色が異なることがあることはよく知られている。チタンも例外ではない。せっかく苦心してチタン板やコイルを製造しても、建築物に施工して、コイル単位での色違いが発生して建物全体のデ

ザインを台なしにしたり建物の品格を傷つけるようなことになると思匠材としての価値は大きく損なわれる。

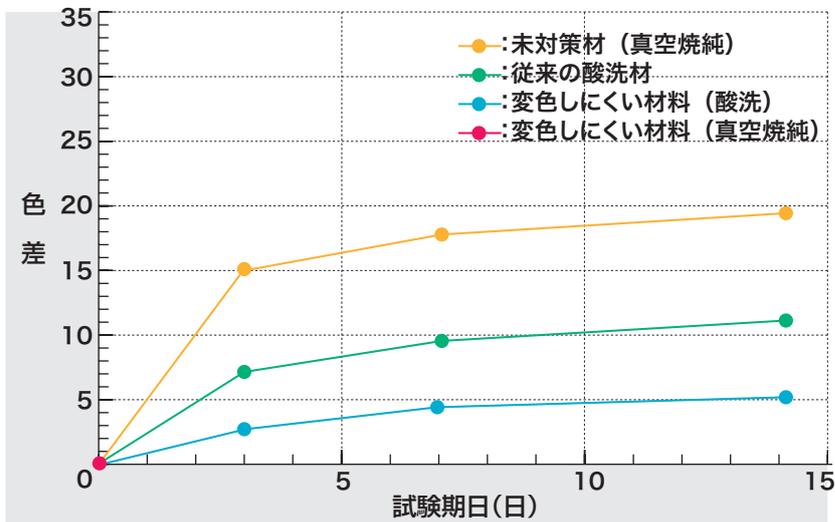
ひとつの物件で複数のコイルが使用される場合にコイル間の色のバラツキをどこまで低減させるかが、いろいろな側面から検討され制御技術が蓄積されている。

これに加えて、屋根や外装の施工会社と協力してロット管理を行う（色の近いコイルから順番に施工する）ことが最近よく行われるようになり成果をあげている。

### 3. 経年変化による変色の抑制

1990年代に入りそれまでに建設された一部のチタン屋根で銀色から茶色に変色する現象が起り始めた。意匠材として致命的にもなりかねないこの課題につい

真空焼純および酸洗のチタン板の変色促進試験結果 (ph4硫酸、60°C)



でも現在では変色しにくい材料が開発されている。

この現象は、チタン表面の酸化皮膜（100分の1ミクロン=10ナノメートル）が数10nm成長して厚くなり光の干渉で茶色に見えているものである。このような変色は、酸化皮膜中あるいは表面に微量な炭化チタン（圧延油残りに起因）やフッ素（酸洗の成分）が残存している場合に、酸性雨と反応して酸化皮膜が成長すると起こりうる。現在ではこれらの微量な炭化チタンやフッ素をチタン表面から適切に取り除く技術が確立されている。

#### 4. 加工後の歪対策

平坦で形状に優れた板やコイルを製造しても、それが加工されて歪が生じると、これも意匠材として大きな欠陥となることは言うまでもない。

チタンの加工は、鋼・ステンレスと同一の道具や機械で可能であり、ヤング率が鉄の50%で、柔らかくたわみやすいため起こるスプリングバックに留意が必要である。かつてはロール成型加工を行う際に、中央部にポケットウェーブと呼ばれる歪が生じることが大きな問題であった。現在では、これを低減させる以下のような技術が開発されている。

##### ①連続焼鈍酸洗（AP process）

- ・結晶粒を微細化する

##### ②バッチ式真空焼鈍（VA Process）

- ・ダルロールを用いてスキンパス圧延を行う
- ・チタン板の端部にあらかじめ耳波を付与する（※耳波なしとありの差は写真参照）

一方、屋根施工会社も、ロール成型の際にリブ加工を行うなどの工夫でこの課題に取り組んでいる。

九州国立博物館では、耳波加工をしたものに、屋根施工会社がリブ付きのロール成型を行うことにより、120mもの長尺屋根で歪の少ない仕上がりとなっている。また、メーカーによっては、複雑なロール成型やプレス加工に対応するための柔らかい材料を提供している。

このような努力が奏功し、現在では、従来金属でのほとんどの工法にチタンが適用されるに至っている。屋根ではシーム溶接工法、たてはげ、フラットルーフ、



耳波なし→ロール成形



耳波付与→ロール成形



耳波付与→ロール成形（リブ付き）→シーム溶接

瓦棒葺、一文字葺、段葺、菱葺そして柔らかい材料で、本瓦葺・鬼瓦への適用にも成功している。また、外装材（外壁・柱など）、モニュメントにも次々と適用が進んでいる。

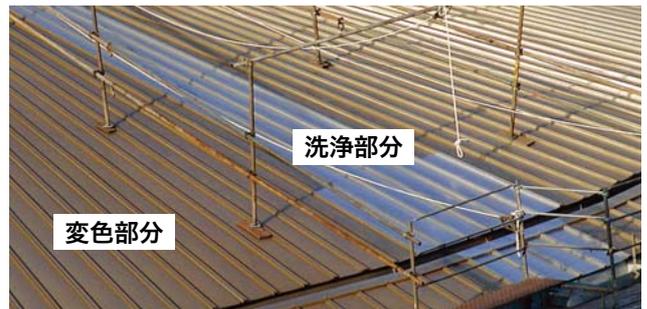
#### 5. ステンレス鋼との複合材料の開発への協力

板厚が厚い（1～1.5mm）材料が必要となる外装パネルの分野は、コスト高になるため需要が伸び悩んでいたが、複合パネルメーカーが、チタン無垢に比べればコストが安く、平滑性に優れたチタンの0.3mmとステンレスの0.3mmの複合パネルを開発した。この商品が海外の建築家に評価され、大型案件での採用が相次いでいる。中国国家大劇院（外装）、杭州大劇院（外装）、Taipei Arena（屋根外装）、クウェートのドーム、米国のバスターミナルなど世界中に広がりつつある。

#### 6. その他技術の開発

##### (1) クリーニング剤の開発

他の金属同様にチタンも汚れる。社団法人日本チタン協会ではクリーニングマニュアルを整理しており、現在ではチタンに適した洗浄剤の開発がなされている。



##### クリーニングの例

##### (2) 保護フィルムの開発

チタンに適した耐候性に優れた保護フィルムも開発されている。

チタン建材は、現在では意匠材として十分な機能を備える製品になっている。今後は認知度をさらに高めてゆくことが課題であろう。いつの日か世界の建材の中でメジャーな素材となることを期待したい。

【参考文献】『現場で生かす金属材料シリーズ チタン』

（社）日本チタン協会編 2007年5月工業調査会刊。

（P3～7）新日本製鐵（株）チタン事業部 清水寛史氏協力