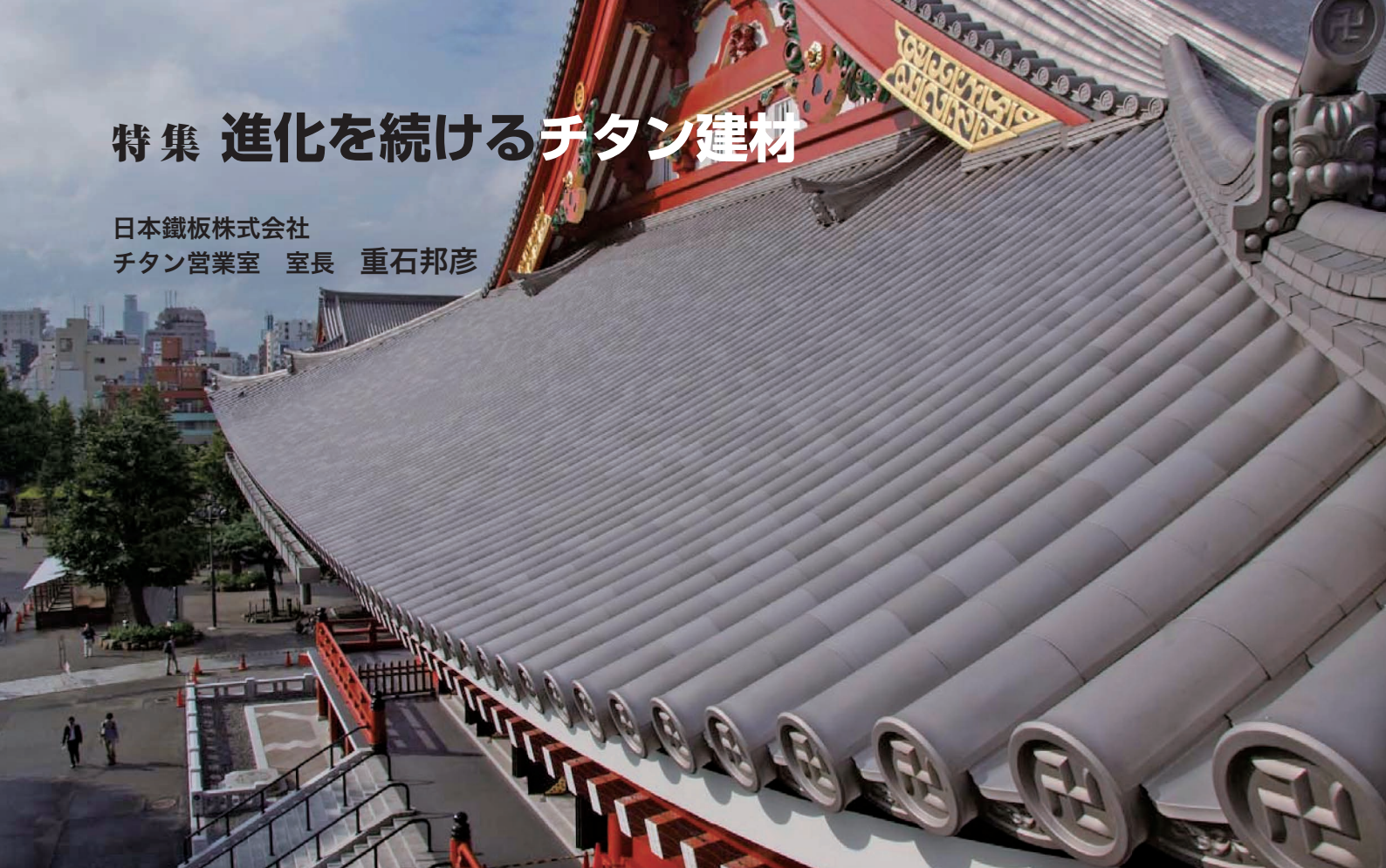


特集 進化を続けるチタン建材

日本鐵板株式会社

チタン営業室 室長 重石邦彦



チタン本瓦を採用した浅草寺本堂。意匠性と安全性が評価され平成22年度大谷美術館賞の栄誉に輝く

1970年代に、わが国において適用が始まったチタン建材。当初指摘のあった、硬くて加工性に劣る、高温多湿地では場合によって変色する等の問題点も克服され、2000年代に入って以後は、成長の基調を確立する。以後もなお、品質の改良や新規技術の追求が鋭意続けられ、チタン瓦やイオンプレーティング法による高品位・高耐久のゴールドチタンなど、チタンならではの特性である意匠性と耐久性を兼ね備えた新製品が開発される。日本のチタン建材は適用実績、技術力ともに世界をリードする存在である。

航空・宇宙用の素材というイメージが強く、まったくのニューカマーとして建材市場に登場して以来のチタン建材躍進のプロセスを振り返りながら、地球環境保全や文化財の維持継承、また防災性など「新しい時代の価値観に合致し、社会に貢献できる建材」としての今後の可能性について考察する。

建材用チタンの歩み

建材分野へのチタン適用が開始されたのは1970年代の日本であった。

それまでチタン材は、耐食性にすぐれ、高強度かつ軽量、熱膨張が小さいなどの理由から、主に航空機や宇宙開発に使用されてきた。ハイテク金属、夢の金属などと称されるのはそれに負うところが大きい。

建材用チタンにおいても当初は、海水に対しても白金とほぼ同等の耐食性を有し、通常の建築環境ではまず腐食することがありえないとされることから、各地の海浜地区や沖縄・鹿児島のような厳しい腐食環境において使用されることとなる。

また、通常のさほど苛酷ではない使用環境においても、金属を含めたあらゆる建築材料の中で、比類なき長期耐用性を発揮し、腐朽の危険性も乏しいため、美

術館や博物館、神社仏閣等に、主に屋根材として適用範囲を広げていく。

神社仏閣においては、すでにこの時期、檜皮、コケラといった伝統的屋根材の入手が年々難しくなるとともに、良質のものが得られにくくなり、その耐用年数が短期化していた。加えて、金属屋根材として重用されてきた銅においても、経年とともに本来形成されるはずの緑青が形成されずに黒ずんで腐食するなど、寿命が短期化していく傾向にあった。

その原因として、酸性雨や瓦の釉薬の影響であるとの指摘もあるが、いずれにせよ、檜皮、コケラ、銅などに代わる恒久的屋根材が施主である神社仏閣から求められていたことを背景に、耐久性にすぐれたチタンの屋根材としての適用が開始されたのである。

なお、神社仏閣へのチタン建材の浸透は、この耐久性とともに、チタンが元来秘めていた豊かな意匠性が



金閣寺茶室・常足亭。アルミナブラスト仕上の適用



北野天満宮・宝物殿。陽極酸化法により、緑青の色・風合いを再現

両輪となって進展する。

建材として使用される金属の中でもチタン特有の性質として、表面に形成される酸化被膜の膜厚により、茶色から紫、青、金、緑とさまざまな干渉色を得ることができる。チタン材のメーカーではこの特質に着目し、膜厚を陽極酸化法によりミクロンオーダーでコントロールすることにより、多彩な発色の建材用チタンを実用化していく。

その一例として、チタン屋根材に緑青色の発色を与えることで、緑青の形成された銅屋根さながらの質感を有し、なおかつ恒久的な使用の可能な屋根材が得られるようになっている。

また、チタンの基材そのものは、金属の中では光沢が少なく渋味のある銀色をしており、和風の意匠にもマッチするが、ロールダルと呼ばれる素地が開発され、表情にバリエーションが付加される。そういう中で、さらに和風色の濃い、侘びた雰囲気を求める声が高まってきた。

そこに登場したのが、アルミナブラストによる表面処理技術である。この技術は、チタン材メーカーの技術陣と数寄屋建築の棟梁という異色の組み合わせにより開発されたものであるが、これによりチタン建材にいぶし瓦のような落ち着いた風合いが実現され、寺院あるいは茶室等への適用が進展する道筋が開かれた。

一方、海外においては、1997年、スペインにビルバオ・グッゲンハイム美術館が完成する。アメリカの建築家フランク・O・ゲーリーの設計によるこの美術館

は、屋根とも外壁とも区別がつかない3次元的な外装すべてにチタンを使用したもので、意匠材としてのチタン建材に金字塔を打ち立てる。

これにより世界的にもチタン建材に注目が集まると同時に、このチタンによる意匠がビルバオ観光のシンボルとなって年間100万人の見学者を動員し、地域経済に貢献するという副産物まで産むこととなる。

チタン建材需要拡大の原動力

ただし、以後、加速度的にチタン建材が浸透していったかというとはそうではなく、たとえば国内の主力分野である神社仏閣において、その適用の嚆矢を1990年代前半とするならば、一定量の受注がコンスタントに発生するようになるまでには、10数年を待たねばならない。

また、チタン建材が市場に認知されるようになった現在においても、一般の量産製品のように市場ニーズを受けて半ば自動的に受注が発生するというまでには至っておらず、たゆまず行われている需要の発掘と、一件一件の個別営業に負うところが大きい。

それでもやはり、チタン建材の需要は確実に増大しており、とくに近年の需要の伸びから、チタン建材は着実に市場に浸透していると判断される。これまでを振り返り、なぜチタン建材が需要を拡大してきたかについて簡単な分析を行ってみたい。

1) 技術的側面

チタン建材が需要を拡大してきた理由としては、やはりまず第一に、耐食性にすぐれ、高強度かつ軽量であるなど、チタンが本来的に有している建材としてのポテンシャルが挙げられる。

耐食性については既述の通りであり、強度については建材として当然求められる要素であるが、チタンの場合は比強度すなわち単位重量当たりの強度が強いという利点をもつ。軽くて強いということから、瓦は言うに及ばず、檜皮、コケラなど植物性屋根材からの代替時においても、建物本体への荷重を抑えられる。と



奈良国立博物館・第二新館。コルテン色の適用例

くに本体強度の劣化した木造建築の葺き替え時において、屋根重量を軽減できるということは、安全性・耐震性においても多大なメリットを生み出す。

この屋根の軽量化については、同じ金属屋根材との比較においても、比重が銅の8.9に対してチタンは4.51と約半分であり、しかも、強度が勝るチタンの場合、板厚も0.3ミリで十分であることから、銅葺きとの比較においても、屋根の素材重量を半分をゆうに下回るまでに軽減できることとなる。

さらにもう1つ付け加えておくべきは、チタンそのものが無害な金属であり、金属イオンの溶出が少ないため人体にやさしく環境に負荷を与えないという点である。それを表す好例として、寺院や茶室等では銅屋根の短寿命化と同時進行的に、銅製の屋根や雨樋を伝って流れる雨水により苔が枯れるという被害が発生していたが、それをチタンに置き換えることで、苔の枯れが食い止められたという事例が報告されている。

一方、上記とは逆に、チタンのもつ本来的な特性の中には、建材として使用される場合にマイナスに作用する要素も存在する。

たとえば当初は、チタンは銅などに比べて硬いために切断用工具にダメージを与える、スプリングバックが大きい加工性がすぐれず、ハゼなどの曲げ加工を施すと割れが生じやすい、といった理由で現場作業員から敬遠され、それがチタンの適用を妨げる大きな要因となっていた。だが、それもやがてメーカーの研究開発により、従来よりも柔らかく加工性にすぐれたチタン材が開発される。加工性の追求は以後も継続して行われ、現在では鬼瓦などの複雑な形状もチタンで製作可能となっている。

すなわちチタン建材が需要を拡大してきた第二番目の理由を挙げるとするなら、このマイナス要素を技術的に克服してきたことであろうと考えられる。

また、チタン建材が市場に登場して時を経る中で、当初は想定されなかった問題点が浮かび上がる。1990年代に入り、初期のチタン適用例の一部の屋根で銀色から茶色に変色するという現象が見られた。

変色部位を調査した結果、この原因はチタン表面および酸化皮膜中に残存した微量の炭素やフッ化物が酸性雨等と反応して酸化被膜を成長させていることにありと判明する。前述した通りチタンの場合、表面の酸化被膜の膜厚が変わることで、異なる発色をするという性質を有するためである。また、この現象は高温多湿な環境で起こりやすいものであった。

そこでメーカーとしてはチタン製造工程を洗い直し、炭素やフッ化物の残存メカニズムを解明。その改善を行うことにより、酸化被膜の成長速度を著しく遅延化することに成功する。こうして変色しにくいチタン建材が開発され、2000年代に入って以降のチタン建材適用例からは変色の問題は報告されていない。

このようにユーザーあるいは適用例からのフィード

バックを受け、その問題点を的確かつ迅速に克服してきたこともチタン建材の適用を促進した大きな理由と言えるだろう。現実の営業サイドの感触としても、チタンの特性について理解を得ることは比較的やすいが、チタンのもつマイナス要素に関する不安を取り除くことこそが困難であり、これらが技術的に解消されたことは需要を拡大する大きな原動力となっている。

なお、耐食性に関しては当初より期待された通りの良好なパフォーマンスが得られており、2009年12月に実施された奈良国立博物館・第二新館チタン屋根への実地調査でもそれが証明されている。同館は1998年の竣工であるが、11年を経たその時点においても、変色、変形、腐食等の性能劣化は一切生じていなかった。

2) 市場開発的側面

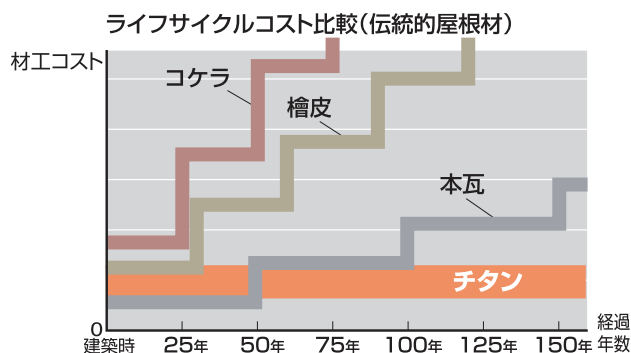
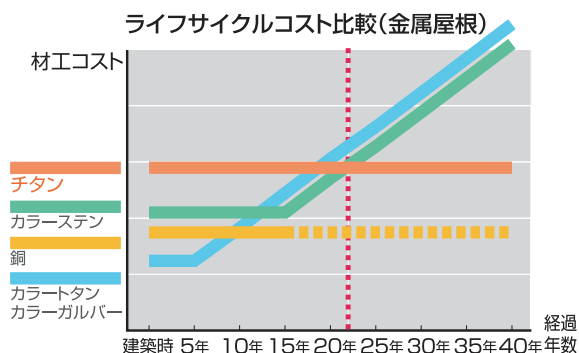
チタン建材が需要を拡大してきた技術的側面としては、このほか大面積施工の際にも意匠の均質性を確保するためのロット間の色のバラツキの低減、ポケットウェーブ（ペコ付き）などの歪みを抑える加工技術や成形技術の開発、変色を元に戻すためのチタンに適合したクリーニング材の開発など、施工性や意匠性も視野に入れた包括的な使い勝手の向上は図られたことが挙げられるが、建材としての地位を確立するまでには、これら技術的側面のみならず、市場開発というソフトウェア的側面も無視することはできない。

要するに、いくら有用な商品でもマーケットへの認知・啓蒙を的確に行わなければ、それを必要とする需要家の手元に届かないわけであるが、とくにチタンの場合、建材としてはきわめて新規性の高い商品であり、航空・宇宙分野用のハイテク金属というイメージや、一般消費財でもゴルフクラブや眼鏡フレーム、カメラといった高級品のパーツとしてごく少量使用されるといったイメージが浸透していた。また、それがゆえに「高価な金属である」という先入観がひとり歩きして、ユーザーの受け入れを強く阻んでいた。

そのため、チタン建材の市場開発は、まず、チタンが建材として使用できるという基本的な事実を世に知らしめるというところから着手せねばならなかった。

それにあたっては、インフラ分野や大型公共建築の案件が発生するごとに、行政・企業等の施主やゼネコンに対して、技術資料等を用いた認知促進が行われるとともに、常日ごろからも通常の一般消費財と同様、ホームページやDMなどのツールを駆使して、建築家、一般住宅の施主への認知促進活動が行われている。

建材にしても一消費財であり、大型案件向けを除いては、社会一般に向けたPRは当然のことと考えられるが、建材メーカーや商社からの情報発信は、流通や施工会社、工務店に向けてが大半であり、施主サイドでは、施工会社、工務店等からの提案を受けて商品選択をするというのが通例である。その際、施主に建材に関する専門知識が乏しい場合は、価格が最大の判断要



素であるというのが現実であり、性能にすぐれていても価格競争力をもたない商品は、選択の対象外となりがちであった。

そういう中で、施主層に向けてチタン建材のダイレクトマーケティングが行われたことは、「エンドユーザーに選択の余地を与える」という意味で非常に画期的であり、神社仏閣や茶室、一般住宅向けのチタン建材の需要の伸びは、こういったダイレクトマーケティングにより形成された部分が大い。

また一方、視点を建材市場からチタン展伸材市場全体へと転じてみると、火力・電力・製造業向けの大ロット供給がメインであり、比較的多品種・小ロットにならざるを得ない建材市場への供給ルートは未整備のままであった。

この点に関しても、日本鉄板が常時在庫を負担するなど、チタンにおいても多品種・小ロットにフレキシブルに対応できる供給態勢を整備したことが、チタン建材の需要の拡大に寄与している。

ライフサイクルコストという価値観の提案

一般の屋根にチタンを使用した場合の材工コストは、銅やステンレスの2～3倍、カラートタンやガルバリウム鋼板等との比較においてはさらなる開きがあり、「チタンは高い」という市場の評価は否定できない。

だが、これはあくまでもイニシャルコストの問題であって、建材の場合は一般的に、長期間使用する中で補修や再塗装、取り替えなどのランニングコストが発生する。ところが、チタンに関しては耐久性にすぐれるため、通常の建築環境では半永久的に使用でき、その間メンテナンスもほぼ不要であるため、長期的に考えればむしろ経済的であるという側面がある。

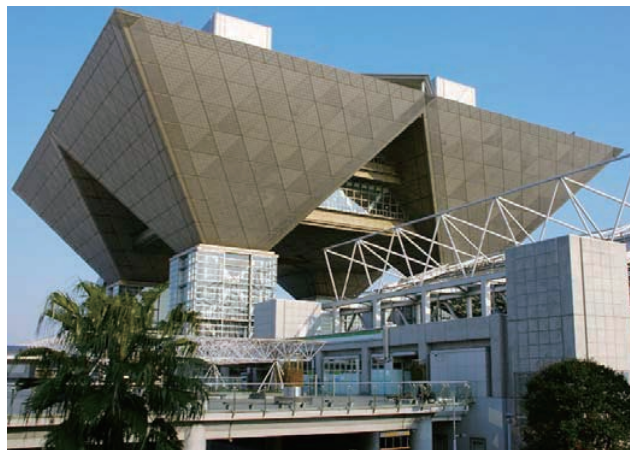
このように、イニシャルコストとランニングコストの双方を加味し、長期的なスパンで捉えた経済性については「ライフスタイルコスト」と呼ばれているが、補修や取り替えにおいてはつねに資源やエネルギーの消費が伴うことから、このライフスタイルコストは、地球に与える負荷の軽重の指標であるとも見ることができる。

取り替えやメンテナンスが必要とされるまでの期間は材料によってまちまちであるが、ある試算によれば25年以上使用される場合、通常使用されるいかなる建築材料よりもチタンの方がライフスタイルコストでは有利であるとの結果が出ている。

さらにこれに類する問題として、フジテレビ本社・球体展望室や、逆三角形の壁面と広い底面をもつ東京ビッグサイトのように、補修や劣化した部材の取り替えが構造上困難を極めるといふ建造物においても、ほぼメンテナンスフリーであるチタンのメリットが発揮される。



フジテレビ本社・球体展望室



東京ビッグサイト



中国国家大劇院



台北アリーナ

チタン建材の市場開発においても、このライフサイクルコストという価値観やメンテナンス性のよさが強く提案されてきており、低ライフスタイルコストすなわち低環境負荷という観点ともあいまって、こうしたチタンの優位性は市場にも、かなりのレベルまで浸透してきた感がある。

チタン建材先進国ニッポン

建材分野へのチタン適用に関して、わが国はそれに先鞭をつけたのみならず、神社仏閣等の伝統建築への適用というきわめて日本的な事情も手伝い、各種表面処理による意匠性の追求や精緻な品質管理技術の陶冶がなされてきた。全世界の物件動向を微細にわたり把握できるわけではないが、チタンの適用件数においても、日本は世界の頂点に立っている。

また、2004年に完成のホテル・マルケス・デ・リスカルといったフランク・O・ゲリー氏によるチタン建築の代表作にも日本から新日本製鐵製のチタン建材が供給され、その高度な発色技術に注目が集まるなど、わが国で培われた表面処理技術は、西欧の建築の最前線でも高い評価を打ち立てている。

このように日本はチタン建材の最先進国と言っても過言ではなく、現在では海外からの引き合いも増加している。

経済成長著しい中国においては、杭州大劇院、中国国家大劇院、合肥大劇院が相次いで竣工するほか、新たな大型物件への適用が加速している。台湾でもすでに2005年に1万5000平方メートル・15トンのチタンを使用した台北アリーナが完成、近隣の韓国においてもアモレパシフィック支社ビル、長興オブザベーションタワーが竣工している。

また、中東やヨーロッパ、アメリカなど他地域からの引き合いに関しても、大型物件がその中心をなしている。

成熟化する日本のチタン建材マーケット

日本国内においても、民間・公共の双方で大型物件の需要が増加の勢いを得ており、建築から土木、屋根材から壁材その他へと使途も広がりを見せている。その要因としては、環境への配慮やライフサイクルコストという考え方が理解され、「よいものを長く使う」という価値観が次第に浸透してきたことが挙げられよう。

中でもホットな話題としては、2010年10月、羽田空港新国際線ターミナルの開業に伴い建設されたD滑走路へのチタン適用の事例がある。このD滑走路は多摩川の河口域に位置するため、一部は埋め立てによらず栈橋形式が用いられたが、その栈橋底部の防食のため、チタン薄板製のカバープレート約1000トンが用いられ



ホテル・マルケス・デ・リスカル



JR函館駅。壁面への適用例



チタン本瓦（浅草寺宝蔵門）



チタン平瓦（空也寺）

た。建設分野でのチタン使用量としては、最大級の規模となったが、あえてこれだけもののチタンが使用されたのは、耐用年数100年を期してのことであった。

一方、神社仏閣を中心とする中・小型物件に関しても、マーケットは着実に成長を遂げている。それと同時に、新たな製品開発が進展し、多様な製品が送り出されるようになってきた。その代表例の1つとしてチタン瓦の開発が挙げられる。

チタン瓦とは文字通り、チタンを瓦の形状に成形したものであるが、鉛や銅などチタン以外のさまざまな金属材料を瓦型に成形した屋根材はすでに存在しており、鉛瓦に関しては17世紀初頭に徳川家康が築いた江戸城天守閣に使用されたという記録がある。

いずれの場合も金属瓦は、瓦そのものが金属製というわけではなく、木材で施工された下地の上に瓦型に成形した金属板を配置していくという工法が取られる。そのため土製瓦と比べて屋根重量が著しく軽量化できるほか、土製瓦のような割れや落下の危険を回避できるなどのメリットがある。

だが、チタンの場合は硬くてスプリングバックが強いため、瓦状の加工品を量産することが不可能であったが、加工しやすいチタン材の開発やプレス技術の研究により、チタン瓦の量産化が実現した。

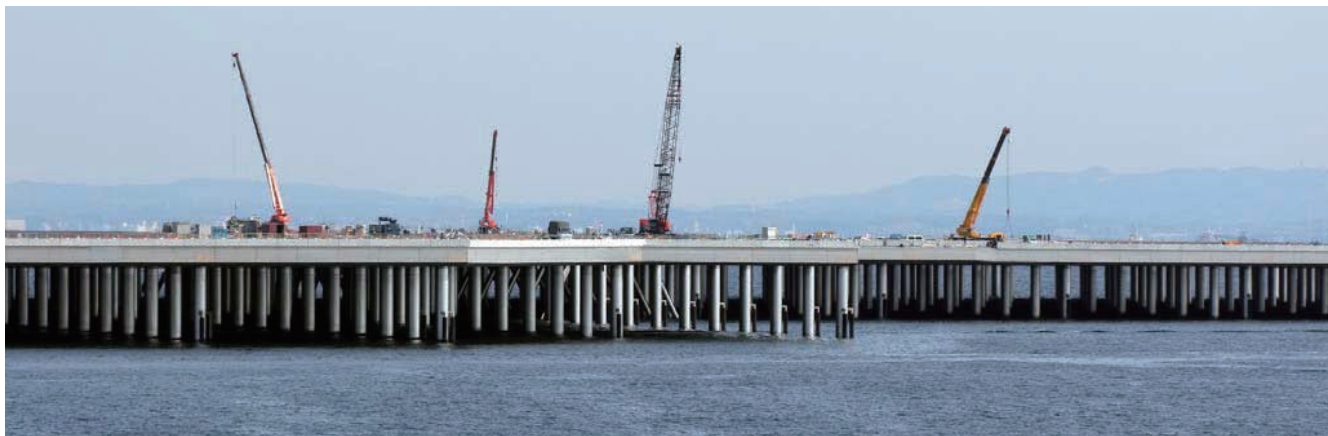
他の金属瓦に比べてチタン瓦は耐久性が群を抜き、有害物質を生成しないなどの優位性をもつのみならず、

アルミナブラスト加工によりいぶし瓦さながらの質感が得られる。さらにはブラスト仕上の光沢度をコントロールすることで異なる光沢のチタン瓦を製造し、それを屋根面にランダムに配置することで、まさに土製のいぶし瓦に迫る意匠性が再現される。

チタン瓦はまず本瓦タイプで実用化され、2007年6月竣工の浅草寺宝蔵門への適用がその第1号となった。またその評価が高かったことから浅草寺では引き続き本堂屋根にもチタン本瓦を採用、2010年12月に落慶となった。なお、浅草寺本堂では、土製瓦からチタン瓦に変更することによって、屋根重量を約930トンから約180トンへと低減されている。



昭和館。壁面への適用例



羽田空港D滑走路。建設分野ではチタン適用の最大規模となった工事風景



銅製谷樋の孔食とチタン谷樋の適用例

また、本瓦タイプに続き平瓦タイプのチタン瓦も開発された。こちらも加工性のよいチタン材とプレス技術の開発により6枚一体成形を実現し、他の金属製平瓦と同等の施工性を確保している。

チタン瓦の誕生以前の段階では、日本建築におけるチタンは、銅に代わる高級金属屋根材、あるいは良質の植物性屋根材の確保が難しくなる中でのポスト檜皮、ポストコケラに相当する屋根材という色彩が濃かったが、チタン瓦の誕生によって適用範囲が拡大され、屋根材としてより一般性を帯びてきた。とくにチタン平瓦の実用化は、一般住宅へのチタン屋根の普及を拡大するものと期待される。また、本瓦葺においては山瓦



宮地獄神社。発色によるゴールドチタンの適用例

を土製瓦で、雨の受け皿となる谷瓦をチタン瓦で施工するというハイブリッド工法により、土瓦の真正性とチタンによる耐久性を併有させる事例も生まれている。

さらに、適用範囲の拡大という点では、鬼飾り、雨樋、谷樋、水切りなど、屋根に付帯する役物へのチタン適用も進んでおり、意匠性の向上や建物本体の耐久性向上に貢献している。

初期の技術的問題点からも解放されたチタン建材は、



イオンプレーティング法によるゴールドチタン、寺院内壁への適用例

2000年代に入って以降、このようにマーケットにおいても成長基調を確立し、ニーズの裾野を拡大する方向に向かっている。今一度そのポジショニングを確認すると、「意匠性と耐久性を兼ね備えた高級金属建材」と位置づけることができ、従来の素材では満たされなかったニーズをチタンが満たすという方向で、技術開発、市場開発の双方が展開されている。

その最近の例としては、イオンプレーティング法によるゴールドチタンが挙げられる。前述の通り、チタンには塗装によらずとも、陽極酸化法により多彩な発色を得られるという特質があり、この方法によりゴールド色のカラーチタンがすでに商品化されているが、この新技術は、本物の金さながらの輝きをもつ窒化チタンをイオン化して帯電させ、電気的な吸引力を負荷することで、チタン表面に強固なゴールド色のコーティングを施すというものである。

イオンプレーティング法により窒化チタンのゴールドコーティングを施すという技術は、すでに他の金属やセラミック等に対して実用化されているが、異種の素地との結合に比べ、チタン素地と窒化チタンとの結合は強固であり、曲げ加工や絞り加工に対してもすぐれた耐性が得られる。

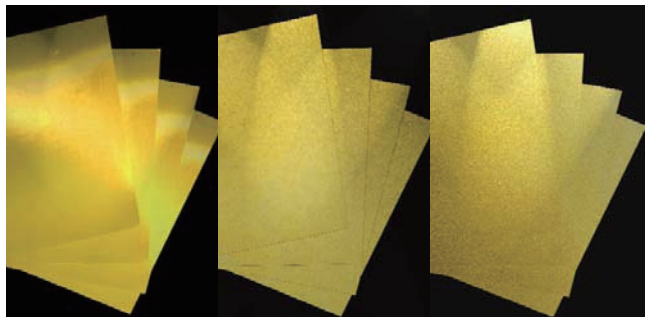
一般にゴールド仕上の内外装材としては、銅の下地に金箔貼りを施したものなどが用いられているが、それらは接着層の劣化が不可避であり、その都度メンテナンスや再施工を要している。イオンプレーティング法によるゴールドチタンはこのような負担を回避でき、なおかつ曲面加工にも耐え得ることから、神社仏閣の内外装や宝珠、海外ではモスクのドームの外装など、意匠性・荘厳性を要求される部材への展開が期待され



イオンプレーティング法と陽極酸化法を表裏に併用したチタンの発色例

ている。

また、イオンプレーティング前に研磨等の下地処理を施すことにより多彩な質感が得られることから、近代建築においても新たな意匠の可能性を提示している。



下地処理とイオンプレーティングの組み合わせによる多彩な質感

文化財へのチタン適用の可能性

チタン建材の黎明から現在までをたどっていく中で、やはり特筆すべきは、その技術的な進化においても、マーケットの展開においても、神社仏閣、中でもとりわけ寺院建築が欠くべからざる存在だったということである。

一見奇異に感じられるかもしれないが、わが国の建築史を概観するに、古くは6世紀、寺院建築技術の渡来により、建物の躯体が掘立て式から礎石式へ、屋根が板葺・草葺から瓦葺へと進化する道が開かれて以来、寺院建築はつねに時代の先端素材、先端技術を取り入れることで進化を遂げ、またその技術や素材が一般の建築のモデルとなって、日本の建築全般の質を高めてきたという伝統がある。従って、その現代版がチタン

であるという解釈も十分に成り立ち得る。

神社仏閣においてチタン建材が使用される契機となった1つの要因としては、檜皮、コケラといった伝統的屋根材の入手難や耐用年数の短期化があるが、それは同時に維持管理コストの高騰も意味し、これらの問題は全国各地の文化財指定物件にも及んでいるという現状がある。

すなわち文化財指定物件の屋根改修においても、檜皮、コケラ等の入手に難渋し、なおかつ改修周期も短期化し費用もかさむということから、この先、建物自体の維持管理に見通しが立たないという問題が立ちだかっているのである。

仮にもし、こういった文化財指定物件にチタンの適用が可能であるなら、材料の入手難から解放されるのみならず、改修の頻度も大幅に低減できる。また、毎年指定により文化財件数は増加をたどり、その補修には税金が投入されていることを考えると、財政支出の抑制という意味でも益をもたらす。

ところが現在のところ、文化財へのチタンの適用にはまだまだ高いハードルがある。修復にあたっては建築当初の素材の使用が原則とされるためであるが、「伝統」というもののありようを考えるに、既存の技術や工法、素材の上に新しく開発された技術や工法、素材を採り入れながら継承発展してきた道程もまた、一つの伝統であると言えよう。

数々のすぐれた特性を有するチタンは、価値あるものを末長く継承するため、時代の最先端の技術・素材を使用するという、日本建築のまた新たな伝統を築くに足る素材であると確信している。

安全・安心な社会への貢献

本稿を締めるに当たって、今後のチタン建材の可能性について言及すると、チタン建材はこれからの社会の新しい価値観に適合し得る建材であるという点を力説したい。

その比類なき耐久性から、既存の建材からの代替を進めることで資源の消費やメンテナンスに要するエネルギーを抑制できる。また、有害物質を排出しないため通常の使用時においても環境負荷を食い止められる。前項で述べた文化財への適用が可能となった暁には、文化の継承や財政にも貢献できる。

とくに屋根材として、従来素材よりも軽量のチタンを使用することで建物の重心を下げるができるため、万一揺れを受けた際にも建物の安定性に寄与する可能性が高いということが期待できる。

現在のわが国は、東日本大震災という未曾有の大災害の渦中にあり、被災された方々には心よりお見舞いを申し上げますとともに、被災地の1日でも早い復旧を祈念しておりますが、防災面でもチタン建材が多少なりとも貢献できることを、関係者の1人として願ってやまない。

