



特集記事 ● 5 鉄鋼材料への機能性付与
各論 用途別機能性付与(3)土木・建築

鉄鋼系建設材料
Ferrous Materials for Construction

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
材料研究所 研究首席

中山武典 Takenori Nakayama

日新製鋼(株) 技術研究所
塗装・複合材料研究部 部長

福本博光 Hiromitsu Fukumoto

新日本製鐵(株) 建材開発技術部
橋梁開発技術グループ グループリーダー

藤井康盛 Yasumori Fujii

1 はじめに

道路・鉄道・港湾や河川・水道などの社会基盤施設、住居、ビルディングなどに用いられるいわゆる建設材料は、土、石、木材、竹などの天然素材から、鉄鋼、アルミニウム、銅、チタン、セメント、セラミックス、樹脂などにいたる多くの素材に及んでいる。これらは、互いに組み合わせて、複合材料・合成構造として使用されることも少なくない。鉄筋コンクリートや各種の表面処理鋼板などはその代表例である。近年、建設材料に対する要求が多様化・高度化しており、強度・耐久性、経済性だけでなく、製造・使用・廃棄・リサイクルの各段階での環境負荷低減、防・耐火、免震・制震、景観性などが求められている。鉄鋼系建設材料は、用途が広く、こうした要求を実現する構造材料としての重要な役割を担っている。しかしながら、腐食という弱点がある。我が国では、社会基盤施設ストックの老朽・劣化が進む中、初期建設費とライフサイクルコスト(LCC)の低減が要請されており、防錆・防食コストの軽減は重要な課題である。鉄鋼業界としても、建設市場は我が国の国内鉄鋼需要量のおよそ半数を占める巨大マーケットであり、重要な分野である。図1に、建設分野に用いられている鉄鋼系製品の分類例を示す¹⁾。チタンもこの中に含めている。図2に、これら代表材料の耐食性能と防食面積あたりの価格水準との関係について概略図を示す¹⁾。この中で、各種の表面処理製品と裸使用製品に大別されるが、後者の耐候性鋼、ステンレス鋼及びチタンは、近年、ミニマムメンテナンスを実現する金属材料として、ライフサイクルコストの観点からも特に注目を集めている。本稿では、裸使用を特徴とするこれら材料の特性と最近の動向について紹介する。

2 耐候性鋼

耐候性鋼は、普通鋼にCu、Cr、Niなどの元素を少量添加した低合金鋼であり、大気環境において、緻密なさび層を生成し、それが水や酸素などの腐食因子の侵入を防ぎ、以後の



図1 土木・建築分野に用いられる鉄鋼系製品の分類例¹⁾

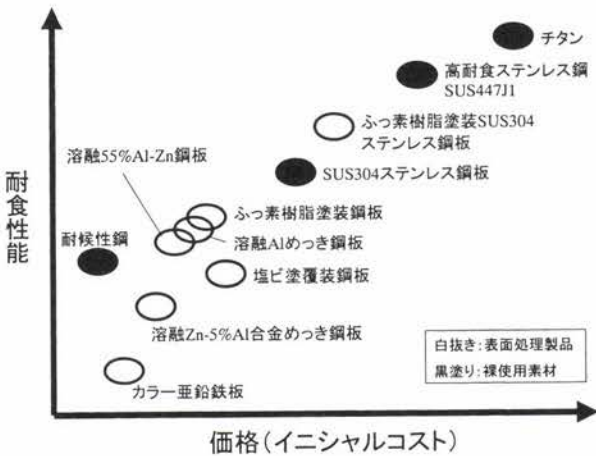


図2 主な鉄鋼系土木・建築材料の耐食性能と価格イメージ概略図¹⁾

さびの進行を抑制する性質を持つ²⁻¹⁰⁾。さびでもってさびを抑制する耐候性鋼は、橋梁に代表される鋼構造物の防食コスト低減の観点では魅力的な材料である。我が国での耐候性鋼需要は近年増加し、平成15年度は22万トン、その内7割が橋梁用途である。これは、建設費縮減やLCC低減に資する耐候性鋼への期待の大きさが反映されたものと思われる。

耐候性鋼のさびの状態は、腐食環境に厳しさに依存して変化し、大気中の塩分量が多い環境や鋼材表面に湿潤状態が継続するような環境に曝された場合には腐食が進行しやすくなるので注意が必要である。緻密なさび層は従来「安定さび」と呼ばれていたが、このさびが形成されればそれ以上腐食しないとの誤解を招くことから、最近では「保護性さび」と呼ばれている。耐候性鋼材の特性を正しく認識してもらうために、異常や要観察を示すさび発生が起きない程度に腐食速度が低減している状態を「さび安定化」と呼ぶことが提言されている。

耐候性鋼は、腐食速度を十分に低減させることにより所定期間の板厚減少量を一定限度内に抑制することにより耐久性を実現する防食法であり、環境が大きく変化しない限り防食性能の劣化はないと考えられる。しかし、材料と設計・施工技術のみで長期耐久性の保証はできず、想定より厳しい環境に曝されたり、予期せぬ箇所から漏水を生じた場合は層状剥離さびが発生してしまうことがあるので、維持管理は必要である。耐候性鋼は、その特性を考慮した適切な使用方法と維持管理により優れた防食性能を発揮する。

JIS耐候性鋼の橋梁への適用は現行規定¹⁰⁾で飛来塩分量が少ない地域に制限されているが、近年はスパイクタイヤ禁止にともない塩分を含む凍結防止剤の多量散布の影響を受けて想定外のさびが発生する問題も生じている。このため、現行適用規定の再評価・改良、点検診断・補修技術の確立に向けた調査研究が進められている。最近、JIS耐候性鋼の適用限界値（飛来塩分量 ≤ 0.05 mdd）を超えた地域でも裸使用を可能とする新しい耐候性鋼が鉄鋼各社より開発実用化された⁷⁻⁹⁾。塩分環境の耐候性向上のために添加されている元素はNi、Mo、Cu、Tiなどであり、Niはどの鋼種にも共通して1 mass %以上添加されていることから、「ニッケル系高耐候性鋼」と呼称されている。一時期、「海浜・海岸耐候性鋼」と呼ばれたが、文字通りの海浜や海岸隣接地など、性能限界を超える飛来塩分量の極めて高い地域での誤用を避けるため、現在ではこの名称は使用されていない。これまでに開発されているニッケル系高耐候性鋼の化学成分例を表1に示す。

現在、ニッケル系高耐候性鋼の統一的な適用基準は確立されていない。従って、本鋼材の使用に際しては飛来塩分量等の適用環境条件を調査し、これを反映した適切な暴露試験等の検討方法により、要求される防食性能が発揮されるのかを

評価することが望ましい。耐候性鋼材の適用環境評価方法については、飛来塩分量のほかに濡れ時間等、他の環境因子も含め腐食環境の程度を評価する指標、およびその指標に応じて板厚減少量を予測する技術⁹⁾が提起されている。また、様々な耐候性鋼に対する統一的な性能評価方法として耐候性合金指標^{8,9)}を用いて検討する方法も提案されている。

耐候性鋼の耐食性能評価として、大気暴露試験が一般に行われているが、実橋の腐食状況調査結果では、部位によってさびの状態が異なり、一般に、降雨による洗浄効果が期待できる部位は、降雨が直接当たらない部位に比べ良好なさびが形成される傾向が見られる。これらは、建設地域の全体的な大気環境に加えて、橋梁構造物が形成する局所的な鋼材表面の腐食環境の影響を受けている証である。後述するステンレス鋼の海浜地帯での暴露試験結果においても、直接降雨のかからない軒下や軒裏部でさび生成が激しいとされている。こうしたことから、最近、鉄鋼系建設材料の耐候性評価法として、雨のかからない条件での暴露試験が実施されている。図3に、田原らが、雨のかかる条件と雨のかからない両条件にて、耐候性鋼の基本合金成分の効果を明確化する目的で実施した、鉄二元系合金を中心とする実験室溶製鋼と市販鋼のつ

表1 ニッケル系高耐候性鋼の化学成分の例 (mass %)

No	メーカー	成分系
1	新日本製鐵	3.0Ni-0.4Cu系
2	JFEスチール	1.5Ni-0.3Mo系
3		2.5Ni-0.3Cu(極低C)系
4	神戸製鋼	1.0Ni-1.0Cu-0.05Ti系
5		2.7Ni-0.5Cu-0.04Ti系
6	住友金属	2.0Ni-0.3Cu-0.3Mo-0.02Ti-0.5Cr系

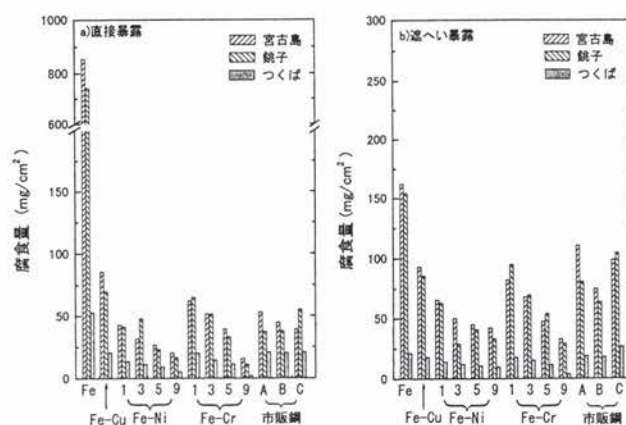


図3 各種鋼材と2年目の腐食量の関係
a) 直接暴露試験、b) 遮へい暴露試験¹¹⁾
A : SM490、B : SMA490、C : SPAH

くば (0.042 mdd)、銑子 (0.286 mdd)、宮古島 (0.381 mdd) における2年間の暴露試験結果を示す¹¹⁾。高塩分環境の銑子及び宮古島では、ほとんどの鋼種において、雨のかからない遮へい暴露試験の腐食量が雨のかかる直接暴露試験よりも大きな値を示し、遮へい暴露試験がより厳しい腐食条件となっていることがわかる。また、高塩分環境の遮へい暴露試験条件における合金元素の作用効果として、Ni添加が耐食性改善に有効であることも明らかである。

耐候性鋼は、さび構成成分やその性状と関連で防食メカニズムが研究されてきた^{3-5, 9, 12-14)}。鋼の大気さびは、 α -FeOOH (ゲーサイト)、 β -FeOOH (アカガネアイト)、 γ -FeOOH (レピトクロサイト)、 Fe_3O_4 (マグネタイト) などの結晶性成分と非晶質成分からなるといわれているが、まず歴史的成果として、岡田らが1969年に報告した非晶質さびモデルがあげられる³⁾。同研究では、偏向顕微鏡やEPMAのさび層の分析結果より、外層にFeOOH層、地鉄面上の内層にCu、Cr、Pなどが濃化した非晶質さび層の2層構造をとることが明らかにされ、この内層の非晶質さび層が環境との遮断機能を発揮し、地鉄の腐食反応を抑制するものと考えられてきた。また、当時、増子らがコロイド化学をベースに人工さび実験を行い、微量のCuやPの存在は Fe_3O_4 結晶の成長を抑制してX線的に Fe_3O_4 を非晶質化するとともに、さびの凝縮性を高める作用があることを示している。これに対して、1990年代初期に三澤らが四半世紀暴露した耐候性鋼のさび層を詳細に調べ、Crが数%含有された α -FeOOHを主体とするさび層が耐候性鋼の最終安定さび層であり、岡田モデルの非晶質さび層はその過渡段階に形成されるものであるとの新たなモデルを提唱した。その後のさび研究においても、新モデルの正当性が実証されつつある。また、山下らは、長期暴露耐候性鋼のX線の非晶質さびの多くは、粒径15 nm以下の超微細 α -FeOOHであることをメスバウア分光解析などで明らかにしている。ここで、これら知見の多くは、田園地帯や工業地帯など、塩化物環境の少ない地域で得られた生成さびの解析結果に基づくものであることに注意を要する。ちなみに、先に述べた全国41橋暴露試験の継続調査にて、塩化物環境下で17、18年間暴露されたサンプルの腐食速度とさび構成成分との対比がなされており、塩化物環境では、 α -FeOOHに加えて、特に β -FeOOHとの相関性が確認され、前者が多く、後者が少ないほど塩化物耐候性に優れることが確かめられている。また、同調査では、石川らが窒素吸着法によりさびの比表面積との関連を調べており、塩化物イオンの多いところではさび粒子が粗大化し、腐食が進行しやすくなるとの知見を得ている¹³⁾。事実、図4に示すように、図3に示した実暴露試験によるNiとCrの添加実験にて、さび比表面積の増大するほど耐食性が向上することが確かめら

れている。さび層はさび粒子の集合体であることから、さび粒子が微細であるほど環境遮断性・保護性が高まり、耐候性向上をもたらすことは考えやすい(図5)。こうした観点から、石川らは各種さび成分の結晶性及び粒子サイズへの各種イオンの添加効果を系統的に調べ、ニッケル系耐候性鋼も含めた耐候性鋼の防食メカニズムを提唱している¹⁴⁾。表2に粒子サイズについてまとめた結果を示す。塩化物フリー環境下で生成する α -FeOOHや γ -FeOOHに対して、Cr、Cu及びNiの添加により、緻密なさびの形成をもたらす一方で、 β -FeOOHが生成する塩化物イオンが存在する環境では、Tiの添加により、 β -FeOOHの成長が抑制されることがわかる。また一方で、ニッケル系高耐候性鋼の基本添加成分であるNiについては、有害さびに分類される Fe_3O_4 や γ -FeOOHを微細化、安定化するだけでなく、内層さびを陽イオン交換

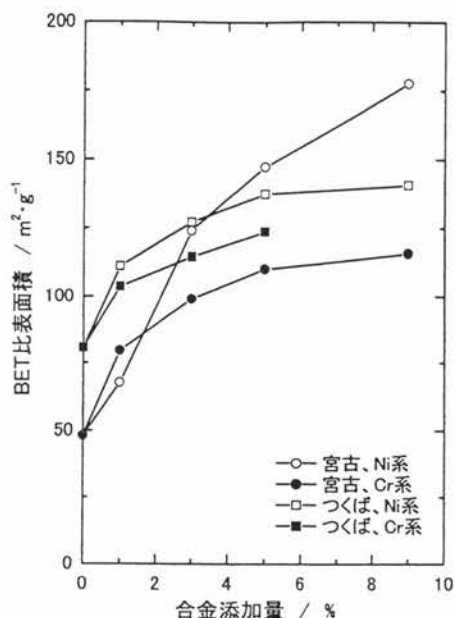


図4 Ni系、Cr系合金暴露材上に形成された鉄さびの比表面積と合金添加量の関係¹¹⁾

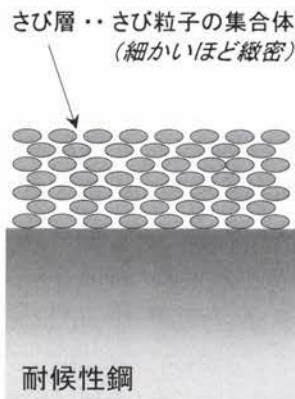


図5 さび層のさび粒子集合体モデル

型に改質する作用があり、その結果、塩分に含まれるNaイオンが内層さびに濃化され、NaOHを形成して、地鉄界面をアルカリ化し、腐食速度を低減することが見出されている。また、Moについては、さびのイオン選択性を発揮し、塩化物イオンの侵入を抑制するものと考えられている^{8,9)}。

耐候性鋼が、我が国で使用され始めてから、すでに30年以上が経過し、実績も着実に増えている。当初は知見が少なく試行錯誤的に適用されてきたのが実情であり、古い時代に建設された構造物には現行適用規定では適用が困難な厳しい環境に設置されたものもある。今後、更新・補修も含めた総合的なアセットマネジメントが重視され、橋梁ではカルテ作成のため既設橋の点検・診断が行われる動向にあるが、不具合対策を充実してユーザーへの信頼性を高めることが必要である。また、性能規定型の技術基準改訂に対応し、より自由で合理的な防食設計のための規定、便覧類の整備が行われ、提案技術の性能照査、信頼性への要求が高まるが、耐候性鋼の適用環境評価技術の向上により適用範囲拡大と新材料採用検討迅速化を図ることが望まれる。耐候性鋼は、その特性を正しく理解した上で、新しい技術を有効に利用して適切に使用すれば期待どおりに機能を発現し、100年を超える耐久性が期待できると考える。“さびをもってさびを抑える”自然環境調和型の耐候性鋼が、ライフサイクルコストを低減する構造物材料の一つとして、今後ますます発展寄与していくことが期待される。

3 建材用ステンレス鋼

我が国におけるステンレス鋼板類の需要の約20%が建材用途であり、その中でも、屋根外装材への適用が積極的に展開されている¹⁵⁾。ステンレス鋼が建材として使用されるのは、耐候性に優れる点にあり、一般にはSUS304、SUS316が使用されている。ステンレス鋼建材は、高塩分環境にて、しばしば小さな孔食を生ずるが、深さ方向への成長が遅いのが通例である(図6¹⁶⁾)。ちなみに、SUS304の広範囲環境での10

表2 鉄の大気さびの粒子サイズに及ぼす添加元素の効果(人工さび実験)

さび	Cu	Cr	Ni	Ti
α -FeOOH	◎	○	○	○
β -FeOOH	●	△	△	◎
γ -FeOOH	○	○	○	△
Fe ₃ O ₄	○	◎	◎	○
X線的不晶質	△	●	△	△

●粗大化、△変化なし、○微細化、◎顕著に微細化

年間の暴露試験結果から推定される40年後の最大孔食深さは0.2 mm以下程度とされている¹⁶⁾。屋根用ステンレス鋼板の板厚は通常0.4 mm以上であることから、「漏水しない」という基本機能は保持できると推察される。ただ、孔食はさび発生をともしない、外観を損なう。さび発生は、海塩粒子の付着、塩分の濃縮、湿潤環境などが原因と考えられ、SUS447J1やSUS445J1、SUS445J2などの高Cr、Mo添加を特徴とする高耐候性ステンレス鋼板が開発された。同鋼板が大型建築物の屋根材に使われた初期の事例としては、幕張メッセ国際展示場(図7¹⁷⁾)がある。その後、大型建築物の屋根材にステンレス鋼板が使用されることが普通になってきた。

ステンレス鋼板にとって、最も厳しい腐食環境は、前述の耐候性鋼と同様に、「海洋性大気環境下で、かつ、雨が直接かからずに、付着した海塩が流されにくい、軒天・軒下」とされる。篠原¹⁷⁾は、幕張メッセ国際展示場の第6、7会場の海側と反海側の軒天部に、ACM型腐食センサーおよび22Cr-0.8 Mo ステンレス鋼の試片を、それぞれ水平下向きに設置し、1994年11月から2年間にわたり、付着海塩量の実

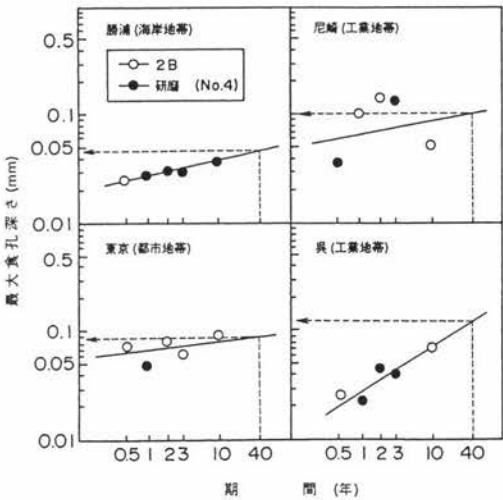


図6 SUS304の10年間大気暴露試験結果および40年後における推定最大食孔深さ¹⁶⁾

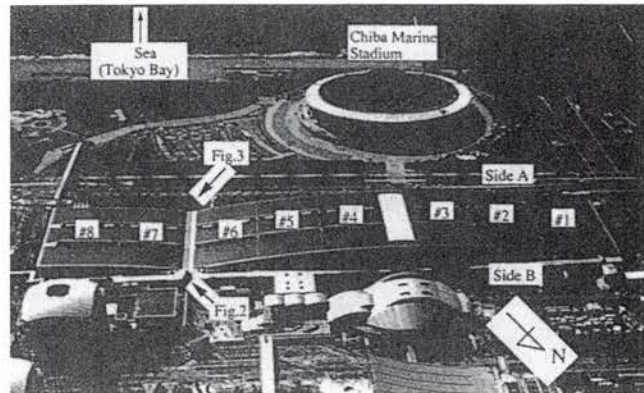


図7 幕張メッセ国際展示場¹⁷⁾

時間測定およびさび発生状況の調査を行っている。図8¹⁷⁾には、各Siteでの付着海塩量 (Ws) の経時変化を示されている。Site1では、'95.4.18.~6.22.の暴露期間でWsが多く、中でも'95年4月23日および4月24日のそれは、それぞれ2.1および2.4 g/m²に達していた。各Siteの各暴露期間におけるWsの最大値を求め、そこでのさび発生の有(×)、無(○)とを併記して表3¹⁷⁾にまとめている。2年間で、22Cr-0.8 Mo 鋼試片にさび発生したのは、Wsが2.4 および2.2 g/m²に達した、Site1およびSite2だけであった。ただし、このさびは拡大することも、新たにさび発生することにはなかった。反海側のSite4では、Wsが0.8 g/m²まで増加したが、さびは発生しなかった。このことから、22Cr-0.8 Mo

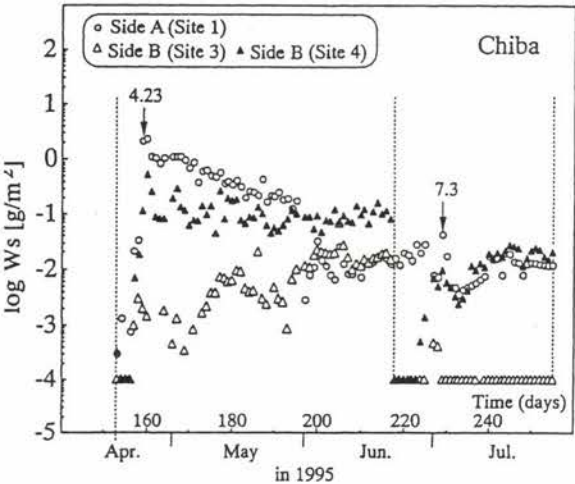


図8 各siteでの付着海塩量 (Ws) の経時変化¹⁷⁾

表3 各siteの各暴露期間におけるWsの最大値およびそこでのさびの有無¹⁷⁾

Exposure period		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5
beginning	end					
'94.11.16	'94.12.26	6.9E-4 ○	5.1E-4 ○	<1.0E-4 ○	<1.0E-4 ○	<1.0E-4 ○
'94.12.26	'95.2.15	5.9E-3 ○	5.1E-3 ○	6.4E-2 ○	2.1E-1 ○	3.9E-2 ○
'95.4.18	'95.6.22	2.4E0 ×	2.2E0 ×	7.2E-2 ○	5.3E-1 ○	6.8E-2 ○
'95.6.22	'95.7.25	4.2E-2 ○	4.3E-2 ○	6.9E-3 ○	2.7E-2 ○	2.0E-1 ○
'95.7.25	'95.8.29	2.2E-2 ○	2.2E-2 ○	9.0E-3 ○	5.5E-2 ○	8.1E-2 ○
'95.8.29	'95.10.17	9.9E-2 ○	9.0E-2 ○	5.0E-2 ○	1.0E-1 ○	6.2E-3 ○
'95.10.17	'95.12.12	1.8E-1 ○	1.8E-1 ○	8.2E-3 ○	2.8E-2 ○	1.0E-2 ○
'95.12.12	'96.2.7	6.1E-2 ○	7.7E-2 ○	6.7E-2 ○	2.3E-2 ○	6.0E-2 ○
'96.2.7	'96.4.10	1.4E-1 ○	1.2E-1 ○	8.8E-2 ○	2.3E-1 ○	1.1E-2 ○
'96.4.10	'96.5.2	7.2E-2 ○	5.2E-2 ○	1.6E-2 ○	7.5E-2 ○	7.2E-3 ○
'96.5.2	'96.6.4	1.5E-2 ○	7.6E-3 ○	2.0E-2 ○	1.3E-2 ○	8.6E-3 ○
'96.6.4	'96.7.30	1.1E-1 ○	1.3E-1 ○	1.4E-1 ○	1.3E-1 ○	6.2E-2 ○
'96.7.30	'96.11.19	1.4E-1 ○	1.6E-1 ○	2.9E-1 ○	8.0E-1 ○	8.0E-2 ○
'94.11.16	'96.11.19	2.4E0 ×	2.2E0 ×	2.9E-1 ○	8.0E-1 ○	2.0E-1 ○
(2 years)		×	×	○	○	○

鋼のさび発生には、およそ1 g/m²以上の海塩の付着が必要と考えられ、環境に応じて、鋼種を選定する必要があることがわかる。

大型の公共物件の屋根などに、22Cr-Mo系のフェライト系ステンレス鋼が注目されている。同鋼は、耐候性に優れているだけでなく、熱膨張係数が小さく、長尺の屋根材に適している。さいたまスーパーアリーナ(図9¹⁸⁾)の場合、165 mに達する長尺屋根をロールフォーミングで成形し、施工されている¹⁹⁾。一般に金属屋根は、ロールフォーミングにより成形されることが多いが、ステンレス鋼や後述のチタンの無垢材をそのままロールフォーミングすると、カジリ現象が発生し、製品および成型ロールに傷を付けてしまう。したがって、これまでは、ステンレス鋼に100 μm前後の保護フィルムを両面に貼り付けて成形する方法が採用されていた。しかし、この保護フィルムは高価であるとともに、貼る・剥がす作業負担が増え、剥がしたフィルムを産業廃棄物として処分するなどのコスト面、環境対応面での問題があった。最近、ステンレス鋼板の表面に特殊なクリア樹脂を両面塗装した材料が開発されている¹⁸⁾。クリア樹脂層は2 μmの厚みであるが、潤滑性に優れ、そのままロールフォーミング成形が可能になった。このクリア樹脂は、紫外線等により1年程度で消失するように設計されていて、剥がす作業を必要としない。また、成形・施工時に発生しやすい取扱い傷が付き難い、汚れ・もらいさびなどが除去しやすい特長も有している。脇役ではあるが、屋根用ステンレス鋼板にとって必要不可欠の機能付与である。「長期間の耐候性という機能」と「成形のための潤滑機能」が揃ったことで、屋根材として活用される材料の1つとなっている。施工例としては、西武ドーム(図10¹⁸⁾)、さいたまスタジアム2002²⁰⁾などがある。

最近、大型建築物や橋梁において、ライフサイクルコスト(LCC)が議論されているが、このLCCの考え方は、プレハブ住宅などにも適用され始めている。「60年以上、大規模補



図9 さいたまスーパーアリーナ¹⁸⁾

修が不要なステンレス素材の屋根」とカタログ²¹⁾で紹介されている。屋根用ステンレス銅板の機能が高くなる程、適用例が増加するものと期待される。

4 建材用チタン

近年、屋根、壁、モニュメントなどの建築分野での新素材として、チタンも注目を集めており、その利用が着実に拡大しつつある²²⁻²⁶⁾。その背景には、最近、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、ビルディングなどの建築物をとりまく腐食環境が厳しくなるとともに、維持管理コストの高騰も見られ、ミニマムメンテナンスの高耐食性材料が求められていることがある。加えて、チタンの有する新規性、高級イメージ、意匠性、ファッション性などが、量から質へというニーズの変化や高級化・差別化指向の高まりなどとうまく合致し、亜鉛めっき鋼材や塗装鋼材、銅、アルミニウムといった在来の金属材料に加わる新たな高級材料として、多くの建築家や施主の関心と呼んでいることもあげられる²²⁻²⁶⁾。屋根や壁などの建材として用いるチタンは、通常、加工性のよいJIS1種あるいは2種の純チタンが用いられている。ボルト・ナットには、高強度のJIS3種、4種あるいはTi-6Al-4V合金が使用されている。

チタン建材としての特性は、まず第一に、海浜・海岸を含む大気自然環境下において卓越した耐食性を有することであり、通常の建材用途環境でさび発生する可能性は皆無と考え

られている。ちなみに、図11にCASS試験により求めたカラーチタン（純チタンについて後述するりん酸水溶液中での陽極酸化により着色）、カラーアルミニウム（純アルミニウムについて浅田式交流二次電解法により着色）、及びカラーステンレス鋼（SUS304鋼についてインコ法により着色）の孔食発生数の経時変化を示す²⁷⁾。カラーアルミニウムでは2時間後に孔食が発生し、それが30時間後にはサンプル全体に広がる。カラーステンレス鋼では、およそ400時間後に孔食が発生している。これに対して、カラーチタンでは2000時間経過後も孔食が全く認められないことがわかる。高耐食性建材として、前節で述べた高Cr、Mo含有の高耐候性ステンレス鋼が実用化されているが、チタンはこれら材料よりもさらに優れた耐食性、耐候性を発揮することが確認されている²⁴⁾。こうしたチタンの優れた耐食性は、チタンの表面に保護性にきわめて優れた酸化皮膜（不働態皮膜）が容易に形成されるためと考えられている²⁹⁾。特筆すべきは、建材の使用環境における腐食性物質の元凶といわれている塩化物（Cl⁻）イオンに対する抵抗性がきわめて強いことであり、高級耐食性材料としての地位を揺るぎないものとしている²⁹⁾。このほか、チタンは、耐食性だけでなく、ステンレス鋼やアルミニウムに比べて、建材特性として重要視されている耐変色性や耐もらいさび性などにも優れることが報告されている²⁸⁾。表4²⁸⁾にチタンと他の金属材料の物理的および機械的性質を示す。チタンの比重は4.51で、銅の約50%、SUS304ステンレス鋼の約60%であり、強度的にも普通鋼とほぼ同

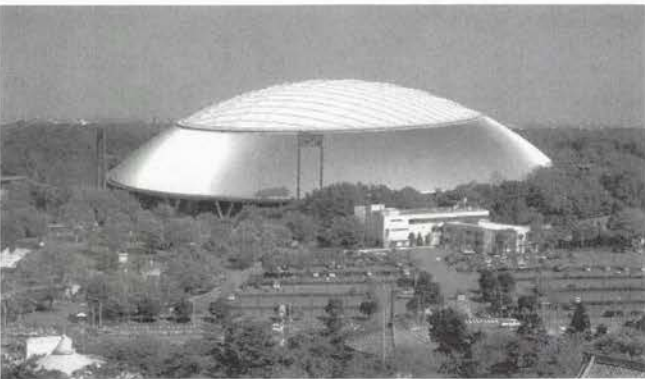


図10 西武ドーム¹⁸⁾

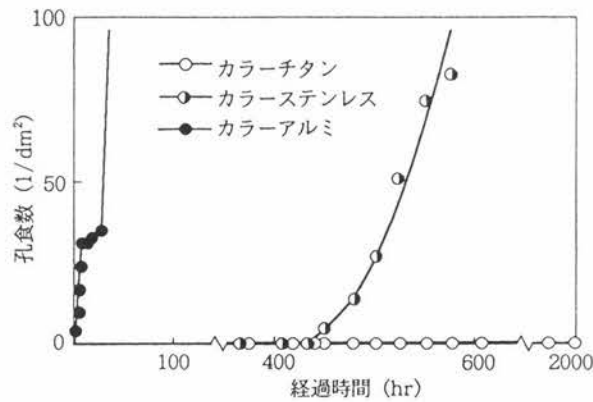


図11 CASS試験による各種着色金属の耐食性比較²⁷⁾

表4 チタンと他の金属材料の物性比較²⁸⁾

	純チタン	鉄	ステンレス鋼 (SUS304)	アルミニウム合金 (5052)	銅
比重	4.5	7.9	7.9	2.7	8.9
溶融点 (℃)	1,668	1,530	1,400~1,420	593~649	1,083
線膨張係数 (cm/cm/℃)	8.4×10 ⁻⁶	12×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶	24×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶
熱伝導率(cal/cm²/sec/℃/cm)	0.041	0.15	0.039	0.33	0.92
電気比抵抗 (μΩ・cm)	55	9.7	72	5.8	1,742
ヤング率 (kg/mm²)	10,850	21,000	20,400	7,030	11,000

等レベルであることから、薄肉化による構造物の軽量化が可能であり、作業性にも寄与する。また、チタンの線膨張係数はSUS304ステンレス鋼の約50%、アルミニウムの約30%と他の金属材料に比較して熱による伸び縮みが小さく、ガラス、レンガ、コンクリートなどとほぼ同じため、これらとの共用に適している。また、熱伝導率が低いことから、保温性にも優れるという特徴もある。一方、チタンのヤング率は表5に示されているように鉄の約50%であり、軟らかくたわみやすいため、チタン建材の成形に際しては、スプリングバッグに対する注意が必要である。その回避には、軟質でスプリングバッグの小さいJIS1種純チタン板の使用が有利である⁴⁾。このほかに、チタン建材を成形する上での注意事項として、ペコと呼ばれるポケットウエーブの発生がある。本現象は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屈服限界応力を越えた場合に生ずる弾性屈服に起因した凹凸であり、美観を損なう²⁴⁾。ポケットウエーブの発生を防止したチタン板が開発されている^{30,31)}。チタンの建材としての優位性は、先に述べたチタンの高耐食性や適度な物理的および機械的性質だけでなく、チタン素地が独特の銀白色を呈すること、ならびに陽極酸化処理に代表される各種の着色法により種々の色に発色できることもあげられる。

表5にチタン建材の主な利用状況を時系列的に示す²⁶⁾。チタン建材の実用例は、1973年の大分県佐賀関町の早吸日女(はやすいひめ)神社の屋根が最初である。その後、ギリシャ・アクロポリスのパルテノン神殿の柱などに使用されたが、本格的に注目されたのは、東京・渋谷の東京電力(株)電力館である。その後、施工法の開発・改良が進み、表5に

示すように、多くの建築物にチタンが適用されている。厳しい腐食環境での採用から恒久的建築物への適用が進み、最近ではチタン独特の意匠性も生かされている。図12に神戸市立須磨水族館、図13に九州国立博物館への適用例を示す。

先に述べたように、チタンは軽い、強い、さびないなど、



図12 神戸市立須磨水族園（屋根に酸洗仕上げチタン素地材が適用）



図13 九州国立博物館

表5 チタン建材の利用状況例²⁶⁾[illegible]

抜群の特性を有しているが、素材単価がステンレス鋼の約10倍と、初期投資の割高感は否めなく、敬遠されるケースが少なくない。しかしながら、腐食しろ、加工費などを加味して建材壁パネル施工のイニシャルコストを比較すると、ふっ素樹脂塗装SUS304 ステンレス鋼の1.8倍、ふっ素樹脂塗装アルミニウムの1.7倍であり、さらに、ライフサイクルコストを比較すると、これら材料よりも長期的には有利であるとの試算もなされている¹⁾。日本で開発が始まったチタン建材が海外への広がりを見せ、さらに最近では、国内の一般住宅への採用の兆しが出てきている。今後、建材としての使用目的、環境、メンテナンスなどとの関連で、チタンの特性の検討・認識がなされ、建材分野において、チタンについてもますます上手に利用されていくことを期待したい。

参考文献

- 1) 鉄鋼系景観材料ガイド，アーバンスチール研究会景観材料小委員会編，(1997)
- 2) 久松敬弘，防蝕技術，20 (1983)，207.
- 3) 岡田秀弥，細井祐三，内藤浩光：鉄と鋼，55 (1970)，355.
- 4) 松島巖：鉄鋼技術の流れ7「低合金耐食鋼」，他人書館，(1995)
- 5) 中山武典：材料，50 (2001)，452.
- 6) 西川和廣：橋梁と基礎，97 (1997)，64.
- 7) 加納勇，渡辺祐一：土木学会誌，87 (2002)，4，5.
- 8) 三木千壽，市川篤司，鶴飼真，竹村誠洋，中山武典，紀平寛：土木学会論文集，738/I-64，(2003.7)
- 9) 三木千壽，市川篤司：現代の橋梁工学「塗装しない鋼と橋の技術最前線」，数理工学社，(2004)
- 10) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX) 一無塗装耐候性鋼の設計・施工要領 (改訂案)，建設省土木研究所，(社) 鋼材倶楽部，(社) 日本橋梁建設協会，(1993)
- 11) 田原晃，片山英樹，小玉俊明：第132回腐食防食シンポジウム資料，(2001)，83.
- 12) 紀平寛，塩谷和彦，幸英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：土木学会論文集，745/I-65，77，(2003.10)
- 13) 中山武典，湯瀬文雄，古川直宏，淵田保司，川野春弥，石川達雄：土木学会平成16年全国大会講演集，V-279，(2004)
- 14) 石川達雄，中山武典：材料と環境，52 (2003)，140.
- 15) たとえば 星野和夫：日本鉄鋼協会 西山記念技術講座 第151回，第152回，(1994)
- 16) 吉井紹泰，西川光昭，林 公爾：日新製鋼技報，59 (1988)，54.
- 17) 篠原 正，元田慎一，鍋島宏司，鈴木揚之助，辻川茂男：材料と環境，48 (1999)，796.
- 18) 森川茂保，武津博文：日新製鋼技報，82 (2001)，65.
- 19) 宇都宮武志：ふえらむ，5 (2000) 3，20.
- 20) 三晃金属ホームページ <http://www.sankometal.co.jp>
- 21) 商品カタログ「エコハイムブック」
- 22) 里 卓郎：R&D神戸製鋼技報，49 (1999) 3，2.
- 23) 諸石大司：材料，49 (2000)，10，1133.
- 24) 屋敷貴司，山本喜孝：金属，67 (1997) 2，152.
- 25) 松里征男：チタン，47 (1999) 4，317.
- 26) 中山武典：材料と環境，50 (2001)，98.
- 27) 山口英俊，三木賢二，佐藤廣士：日本金属学会会報，27 (1988)，296.
- 28) 社団法人チタン協会：チタン建材ご利用の手引き(壁編)，2 (1995)
- 29) 上窪文生：チタン，46 (1998) 2，105.
- 30) Y. Miyamoto and S. Hawa：ISIJ Int.，31 (1991)，863.
- 31) 屋敷貴司，岡本明夫，木田貴之，大山英人：表面技術，50 (1999) 6，69.

(2005年10月7日受付)