建 材 用 塗 装 鋼 板

吉 田 啓 二*

* 日本鋼管株式会社 総合材料技術研究所

Precoated Steel Sheets for Construction Materials

Keiji Yoshida*

* Materials and Processing Research Center, NKK

Precoated steel sheets are widely used as construction materials, such as roofing and sidings. In this report, organic coatings on Zn and Zn-Al alloy plated steel sheets are mainly described as precoated steel sheets. Trends, material profiles, properties (weather resistance, corrosion resistance), and evaluation methods for the precoated steel sheets are reviewed. In addition, thin organic coatings on Zn-Al alloy plated steel sheets also are described.

Key words : precoated steel sheets, construction materials, corrosion resistance, thin organic coatings

1. は じ め に

表面処理鋼板は、建材分野において、内外装材料、構造部材として幅広く使用されている。このうち、屋根・外壁などの外装用材料には、主として塗装鋼板が使用される。塗装鋼板は、めっき鋼板上に数十 μm の被覆層を有し、耐食性と美装（意匠性）を基本性能として、さらに潤滑性、撥水性などの機能を付与させた表面処理鋼板である¹⁾。一方最近では、より薄膜の有機複合被覆鋼板が高耐食めっきと組み合わせて用いられるケースも増えてきた。本稿では、建材用塗装鋼板について、動向、材料の構成、耐候性・耐食性などの機能およびこれらの評価方法について解説する。また、合わせて塗装鋼板とは、技術的にも関連の深い有機薄膜被覆鋼板についても述べる。

2. 建材用塗装鋼板の動向

図1に亜鉛系塗装めっき鋼板（溶融亜鉛めっき鋼板、5%アルミ-亜鉛合金めっき鋼板、55%アルミ-亜鉛合金めっき鋼板）の国内向け出荷量推移を示す²⁾。55% Al-Zn合金めっき鋼板はJIS化後98年度からの統計である。こ

図1 塗装めっき鋼板の国内向け出荷量推移

の図より、溶融亜鉛めっき下地の塗装鋼板は、減少傾向が認められ、代わって55% Al-Zn合金めっき塗装鋼板が徐々に増加する傾向が認められる。図2は最近のカラー亜鉛鉄板の用途別出荷実績例である³⁾。カラー亜鉛鉄板の多くは屋根材、外壁材、シャッター、雨戸、パーテーションなどの建材用途に使用されるが、中でも屋根材、外壁材の比率が高い。Zn-5% Al合金めっき鋼板、55% Al-Zn合金めっき鋼板も同様な用途に適用される。

金属屋根は工場、倉庫、公共建築物などの非住宅向けが中心である。表面処理鋼板は、折板、波板、横葺、金属成形瓦などの屋根工法により使用される。最近では工場、倉庫の着工件数の減少など需要低迷により加工数量、施工面積とも減少傾向である。このような中で、工法としては縦葺き工法の一つで意匠性に優れたフラットルーフがここ数年注目されてきている。また、素材では最も使用量の多いカラー亜鉛鉄板に代わって耐食性に優れたアルミ・亜鉛合金めっき鋼板（非塗装、塗装材とも）の比率が増加している⁴⁾。

外壁材として用いられる金属サイディングは、金属板に成形加工を施した後、ウレタン、フェノールなどの裏打ち材を接合させた外壁材である。金属サイディングは、塗装鋼板の特徴である仕上がりの均一性、軽量性を生かせる用途であり、工場などの非住宅分野で多く採用されているが、屋根材と同様、ここ数年、加工数量、施工面積とも減少傾向がみられる。素材では、コストパフォーマンスの点でアルミ系サイディングからスチール系サイディングへの移行が進んでいる⁵⁾。最近では、意匠性

図2 カラー亜鉛鉄板の用途別出荷構成（1999年度）

* 〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1 (1-1, Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, 210-0855 Japan)

図3 建材用塗装鋼板の代表的構成

を高めた深絞りタイプのエンボス材の適用などが進んでおり、これに対応しためっき、塗膜の加工性向上が課題となっている。

今後、塗装鋼板が建材分野で用途を拡大していくためには、塗装鋼板の抱える様々な課題の解決が必要である。特に、屋根材、外壁材は太陽光、風雨、海塩粒子などの過酷な自然環境に長期間さらされるため、耐食性、耐候性などを含む総合的な耐久性が必要である。

3. 建材用塗装鋼板の構成

塗装鋼板は図3に示したように、鋼板を下地処理した上で、付着性の高い下塗り塗膜、腐食性イオンを遮断する上塗り塗膜の順に塗り重ねる構造である。膜厚は下塗り、上塗り塗膜を合わせて約20 μmである。

3.1 下地処理皮膜

下地処理の役割は、鋼板と下塗り塗膜とを密着させることであり、金属の種類、用途に応じて異なる下地処理が適用される。建材用塗装鋼板の場合には、一般に鋼板を脱脂した後、表面調整処理を施して複合酸化膜を形成した上に、塗布型クロメート処理して塗膜密着性と下地金属の耐食性に優れたクロメート皮膜を形成する。処理液はクロム酸を主成分とし、リン酸、シリカゾル、アクリルエマルジョンなどが添加された水溶液である^{5),6)}。

3.2 下塗り塗膜

下塗り塗膜は、下地処理した鋼板と上塗り塗膜との密着性付与、および塗膜中に含まれる防錆剤による防食が主たる役割である。建材用途で使用されている下塗り塗料（プライマーとも呼ばれる）には、樹脂成分として主としてエポキシ系樹脂が用いられる。エポキシ樹脂は金属に対する濡れ性が高く、付着性が良好である。また、耐アルカリ性が高いので、塗膜下で金属が腐食してpHが高くなっても影響を受けにくい性質を有している。厳しい成形加工などを受けるために、塗膜の柔軟性が必要とされる場合、エポキシ樹脂骨格の一部にポリエステルや、ウレタン樹脂などを組み込んだ構造（変性と呼ばれる）の樹脂が用いられる。

塗装鋼板は、塗装後に切断されて使われる材料であり、切断端面部での耐食性が重視される。このため、下塗り塗料中に防錆顔料が添加されている。防錆顔料にはクロム酸塩が多く、主にクロム酸ストロンチウムが使用されている。クロム酸ストロンチウムは、塗膜中から徐々に溶解し、切断端面部からの塗膜剥離を防止する役

割をしている。

現在は下地処理、下塗り塗膜ともに、防食のためのクロメート化合物が使用されているが、耐食性のあまり要求されない用途（電機分野の一部）では、クロメート化合物の代替物質によって耐食性を確保するケースも見られる⁷⁾。

3.3 上塗り塗膜

上塗り塗膜の役割は、主に美装と防食である。美装のために、着色顔料、光沢調整剤、紫外線吸収剤、熱安定剤などが塗料に配合される。上塗り塗膜による防食という観点からは、塗膜による水、酸素、腐食性イオンなどの遮断が重要である。このためには、塗膜を厚くする方法もあるが、主成分の樹脂の選択、硬化剤の添加量の調整、樹脂の分子量の調整、などにより、塗膜の腐食性イオンの透過性を抑制する方法が検討されてきた。

上塗り塗膜に使用される塗料の樹脂成分としては、ポリエステル樹脂、フッ素樹脂、アクリル樹脂、塩ビ樹脂（ポリ）などがある。この中でも代表的なポリエステル樹脂には、ポリエステル-メラミン樹脂系、ポリエステル-イソシアネート樹脂系（ウレタン樹脂とも呼ばれる）、シリコン変性ポリエステル樹脂系の3種に分類でき、ポリエステル-メラミン樹脂系が主流であるが、近年ポリエステル-イソシアネート樹脂系が耐候性、加工性のバランスから伸びており、シリコン変性ポリエステル樹脂系は減少傾向にある。最も耐候性に優れるのはPVdF系フッ素樹脂である。

4. 建材用塗装鋼板の耐候性

ここ数年、メンテナンスフリーという言葉が多用されている。多くのメンテナンスがあるため、この言葉が状況に応じて用いられ、漠然としたものになっている気がするが、補修・改修不要、および、清掃不要の2つが主である。前者は、塗膜の耐候性、塗装鋼板全体の耐食性など、塗装鋼板の本質的な性能にかかわるものであり、後者は、塗装面の汚れにくさ、雨水などによる汚れの除去性など、塗膜の機能にかかわるものである。耐候性は前者に属する。

有機樹脂を主成分とする塗膜は、紫外線により表面からワックス層、主樹脂が徐々に破壊され、光沢の変化・色相の変化が生じる。これがさらに進行すると、塗膜割れが発生し、塗膜厚が損耗して保護膜としての機能が失われる。塗装鋼板の寿命は用途、見方によっても異なるが、外観品質の低下が問題となる場合は耐候劣化、あるいはブリストアなどにより塗膜が劣化するまでである。外観の経時劣化が重要視されない場合、塗膜劣化+下地鋼板劣化により穴あきに至るまでということもできる。

ポリエステル塗膜での大気暴露試験における色調・光沢度変化を図4に示す。大気暴露試験での樹脂の劣化は環境により大きく左右され、また、同じ場所であっても取り付け角度などの条件で大きく異なる。

3.3で触れたように、PVdF系フッ素塗膜が最も耐候性に優れる。PVdF系フッ素は結晶性が高く、加工性が経時で劣化する傾向が見られ、種々の検討が行われている^{8),9),10)}。また、ポリエステル樹脂系塗膜においても、

図4 屋外暴露した塗装鋼板の光沢度変化

耐候性付与成分による向上検討が行われている。木全らは、高分子量化した耐候性付与成分を上塗り塗膜組成に導入することで耐候性向上が得られたことを報告している¹¹⁾。

5. 建材用塗装鋼板の耐食性

5.1 建材用塗装鋼板と酸性雨

建材用塗装鋼板の塗膜、特に上塗り塗膜は様々な環境において耐久性が要求されるが、最近では、影響因子として酸性雨がクローズアップされており、自動車用途を中心として塗膜の耐酸性雨性に関する研究、耐酸性塗膜の開発が行われている^{12)~15)}。酸性化の原因は、工場、発電所、自動車などより排出される SO_x 、 NO_x が大気中で酸化され、硫酸、硝酸が生成するためと言われている¹⁶⁾。

塗装鋼板の場合、酸性雨は、塗膜の劣化と下地の腐食の促進という2通りの影響が考えられる。図5は、1990年に発生したアクリル-メラミン系塗膜の雨染みの代表的形状の3次元粗度計での測定結果である¹⁴⁾。この直径は約3mm、最大深さが1.2μmである。建材用塗装鋼板では、このレベルの欠陥は、初期欠陥としては、問題となるが、通常は、施工、経年後の外観としては、問題にはならないと考えられる。また、侵食深さについて

図5 実車塗膜の雨染みの3次元表面粗度¹⁴⁾

図6 塗装鋼板の切断端面の腐食モデル

も、建材用塗装鋼板の上塗り塗膜厚が10μm以上であることを考えると、腐食促進原因とは考えにくい。むしろ、建材用塗装鋼板では、下地鋼板に対する腐食促進の問題が重要であると考えられる。めっき鋼板自体の耐酸性雨性については、55% Al-Zn 合金めっき鋼板および溶融亜鉛めっき鋼板に関し、酸性雨を模擬した酸性溶液浸漬試験により評価、55% Al-Zn 合金めっき鋼板は溶融亜鉛めっき鋼板に比べて溶出による重量減少が少ないことが報告されている¹⁷⁾。現在のところ、酸性雨を建材用塗装鋼板の腐食の問題として検討した例は少ないが、亜鉛鉄板会が W/G で暴露試験などにより検討を行っており、結果が期待される。亜鉛系建材用塗装鋼板の劣化については、光、熱、湿度、その他各種環境因子の影響があり、侵食による雨染みと違って、これらの要因と酸性雨の影響を明確に区別することは困難である。従って、塗膜・下地の両サイドからの、総合的な耐食・耐久性評価および向上検討が必要と考える。

5.2 下地鋼板・塗膜と耐食性

冒頭にも述べたように、有機被覆鋼板にとって防食は重要な機能である。塗装鋼板の下地としては、亜鉛(または亜鉛系)めっき鋼板が一般的であり、塗膜による防食とめっき皮膜による防食の両方の作用により、耐食性が付与される。このうち塗膜は、バリアー層としての役割と防錆顔料による防食作用が働くと言われている。

塗装鋼板が屋外で使用される場合、大気中の水分、酸素、 SO_2 などの影響により、切断端部、傷部などから腐食が進行する¹⁸⁾。図6に示したように塗装を施した亜鉛めっき鋼板が屋外環境に暴露された場合、亜鉛めっき層が端面から内部に腐食していく。亜鉛のイオン化傾向は、鋼よりも高いため、亜鉛は優先的に腐食して鋼を防食する(犠牲防食作用)。また、亜鉛の腐食生成物は比較的安定であり、腐食抑制の役割を果たす。塗膜が暴露されて紫外線などにより分解劣化し、塗膜厚が薄くなったり、塗膜割れが生じてくると塗膜の保護機能も低下し、塗装面のカソード化、塗膜/めっき界面の塗膜剥離が進行する。

建材用塗装鋼板の下地として、耐食性に優れた Al-Zn 合金めっき系鋼板の適用が進んでいるが、その耐食性についても、1980年代より様々な検討が行われている^{19)~26)}。

図7は屋外暴露試験結果と相関性の高い新たな促進試験方法の開発を目的としたプロジェクト活動(通産省工

図7 大気暴露した無機被覆鋼板の腐食量(暴露期間:3年)

図8 千葉海岸暴露材のエッジクリップ変化

業技術院の委託研究)の中で行われた大気暴露試験結果を示したものである²⁵⁾。3年間の大気暴露試験後の各種無機被覆鋼板の腐食量の比較では、宮古島海岸では、海塩粒子量がきわめて多く、溶融亜鉛めっき鋼板、Zn-5%Al合金めっき鋼板では、暴露2ヵ年で下地鋼に達する腐食が認められたことが報告されている。また、55%Al-Zn合金めっき鋼板は、様々な環境において良好な耐食性を示している。

55%Al-Zn合金めっき鋼板は、米国の Bethlehem Steel 社で開発され、我が国にも1980年代に技術導入された。55%Al-Zn合金めっき鋼板は、優れた耐食性を有するが、塗装鋼板として使用した場合、切断端面から塗膜下で腐食に起因する膨れが進行するいわゆる「エッジクリップ」現象を起こしやすいと言われている。切断端面からの腐食進行については、(a)めっき層中の亜鉛リッチ相が選択的に腐食・溶出し、残存する難溶性のアルミ単相部および亜鉛リッチ相のアルミ部分に腐食生成物がトラップされるメカニズム¹⁸⁾、(b)まずアルミリッチ相が腐食し、この相の表面が腐食生成物に覆われて不動態化された後に亜鉛リッチ相が腐食するメカニズム²⁰⁾などによる説明がなされている。

図8、図9は、筆者らが行った大気暴露試験の例であり、図8は千葉県千葉海岸に7年間暴露した塗装鋼板のエッジクリップ幅を比較したもの、図9は暴露材の外観比較である。塗装55%Al-Zn合金めっき鋼板のエッジクリップは、暴露初期には目立つが、水に溶解しにくいAlの腐食生成物の腐食抑制効果により年々進行速度が

図9 下地鋼板の異なる塗装鋼板の屋外暴露試験後外観

遅くなり、ここでは、5年で塗装溶融亜鉛めっき鋼板と逆転している。また、塗装溶融亜鉛めっき鋼板では、平面部においてもプリスターの発生が見られる。エッジクリップの進行が遅くなる時期は環境によって異なり、8～9年で亜鉛めっき下地の塗装鋼板と逆転した例も報告されている^{19),20)}。

図10、図11は、亜鉛鉄板会と樹脂化粧鋼板会が行った各種塗装鋼板の大気暴露試験結果を整理したものである²⁷⁾。下地鋼板では、溶融亜鉛めっき鋼板に比べ、5%Al-Zn合金めっき鋼板、55%Al-Zn合金めっき鋼板下地の方が良好な外観が得られている。55%Al-Zn合金めっき鋼板で平面部に比較して加工部外観が劣るのは、55%Al-Zn合金めっき鋼板では、めっき皮膜が硬質であるため、めっき、塗膜ともにクラックが生じ、塗膜によるバリアー効果が失われて切断端部と同様に腐食が進行するためと考えられる。塩ビ鋼板は、厚膜でクラックが生じないために、10年間の暴露でも、平面部、加工部とも優れた外観を維持している。

図12は塗膜組成と耐食性の関係を示したものである。下塗り塗膜に配合する防錆顔料の比率を高めていくと、端面の耐食性(耐エッジクリップ性)が向上している。防錆顔料の配合量は耐食性を含めた目標性能(耐薬品性、加工性など)により決定される。

5.3 耐食性評価

有機被覆鋼板の耐食性は、通常、促進耐食性試験により評価する。塩水噴霧試験(JIS Z 2371)は、屋内環境、屋外環境とも実用環境との相関性に乏しいと指摘されながら、有機被覆鋼板の耐食性評価方法として広く使用されている^{28),29)}。

塗装鋼板の耐食性評価としては、大気暴露試験が最も信用性の高い方法であるが、商品開発の期間を考えると、時間がかかり過ぎるのが欠点である。

一方で、実環境と相関のある評価方法の確立のために様々な方法(複合サイクル試験)が検討されている³⁰⁾。図13は、2種類の異なる下地鋼板に塗装した塗装鋼板について大気暴露、複合サイクル試験、および塩水噴霧試験

原板種類	塗装系	(劣) ← 平面部外観 → (優)			
		赤錆	剥れ、白錆	膨れ、割れ	異常なし
熔融亜鉛めっき鋼板 (Z25)	ポリエステル		●	●	○
	フッ素			○	○
	塩ビ			●	○
亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板 (Y25)	ポリエステル		●	●	○
	フッ素			●	○
55%アルミ-亜鉛合金めっき鋼板 (AZ150)	ポリエステル			●	○
	フッ素			●	○

(暴露地) ○:筑波(南向き) ■:沖永良部 ●:筑波(北向き)

図10 各種塗装鋼板(平面部)の大気暴露試験(10年)後の外観

原板種類	塗装系	(劣) ← 平面部外観 → (優)			
		赤錆	剥れ、白錆	膨れ、割れ	異常なし
熔融亜鉛めっき鋼板 (Z25)	ポリエステル	■	■	○	
	フッ素		■	■	○
	塩ビ			○	○
亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板 (Y25)	ポリエステル	■	■	○	
	フッ素		■	■	○
55%アルミ-亜鉛合金めっき鋼板 (AZ150)	ポリエステル			○	○
	フッ素			○	○

(暴露地) ○:筑波(南向き) ■:沖永良部 ●:筑波(北向き)

図11 各種塗装鋼板(加工部)の大気暴露試験(10年)後の外観

を実施した結果である。亜鉛めっき鋼板は、大気暴露では良好であるが、塩水噴霧試験では冷延鋼板よりも劣る結果が得られた。また、複合サイクル試験(ここでは、湿潤率50%のJASO法を使用)では、塩水噴霧よりも、むしろ大気暴露に近い結果が得られている。この理由は、腐食試験環境における湿潤率によって亜鉛めっき鋼板と冷延鋼板の塗膜膨れ(Blister)の発生程度の違いにある。湿潤率が高い場合、亜鉛めっき鋼板は冷延鋼板よりも塗膜膨れが発生しやすく、低くなると亜鉛めっき鋼板の方が塗膜膨れが発生しにくくなり、大気暴露に近い挙動を示すことが明らかになっている。塩水噴霧のような連続的に塩水がかかるような腐食環境では、犠牲防食作用による亜鉛の溶出が顕著となり、一方、湿潤率のより低い環境では、塩基性塩化亜鉛などの安定した緻密な腐食生成物が亜鉛表面を被覆し、その保護作用によって腐食が抑制されるものと考えられる^{1),30)}。

表面処理鋼板の耐食性評価については、屋外暴露試験結果と相関性の高い新たな促進試験方法の開発・規格化

図12 下塗り塗膜厚および下塗り塗膜中の防錆顔料量と端面耐食性の関係

図13 試験方法と塗装鋼板の端面耐食性の関係

を目的としたプロジェクト活動が行われており^{31),32)}、今後、材料・環境に応じたより適切な評価が可能になるものとする。

6. 建材用薄膜有機被覆鋼板

建材分野においても、1~2 μmの有機皮膜を被覆した薄膜被覆鋼板が非住宅の外壁材などの用途に用いられている。55% Al-Zn合金めっき鋼板下地の薄膜被覆鋼板は、わが国で55% Al-Zn合金めっき技術を最初に導入した大同鋼板によって初めて商品化され^{33),34)}、耐食性・外観性に優れることから適用が進んでいる。本鋼板に対する基本的な要求特性は、成形加工時のめっき皮膜のかじりを抑制する機能(加工性)と耐食性であり、最近ではこれに加えて環境調和性の重要度も高まっている。図14~図16は55% Al-Zn合金めっき鋼板下地の薄膜有機被覆鋼板の構造と性能例である^{35)~37)}。有機薄膜被覆の防食効果はめっき表面を被覆する不動態皮膜の防食性と腐食環境下における防食性の維持にかかっている。図14は、従来の無機系(クロム酸が主成分)、および樹脂系(クロム酸と樹脂が主成分)に対して耐食性と加工性を高めた有機薄膜被覆の構造である。めっきと防錆成分(クロム酸、リン酸)を反応させ難溶性の高い不動態皮膜をめっき界面に形成させるとともに、皮膜上層が樹脂リッチとなる塗膜設計を行っており、これによって加工

図14 有機無機複合型高耐食クロメート鋼板(55% Al-Zn 合金めっき下地)の皮膜構造

供試材		クロム固定率(%)				
タイプ	主成分	0	25	50	75	100
無機クロメート	Cr ⁶⁺ /Cr ³⁺					
有機クロメート	樹脂-Cr ⁶⁺					
有機-無機複合型	樹脂-リン酸-Cr ⁶⁺ /Cr ³⁺					

図15 55% Al-Zn 合金めっき鋼板上に形成した各種クロメートのクロム難溶性

供試材		塩水噴霧試験で白錆発生が10%以内に抑制されている期間				
タイプ	主成分	0	120	240	360	480 (hr)
無機クロメート	Cr ⁶⁺ /Cr ³⁺					
有機クロメート	樹脂-Cr ⁶⁺					
有機-無機複合型	樹脂-リン酸-Cr ⁶⁺ /Cr ³⁺					

図16 55% Al-Zn 合金めっき鋼板上に形成した各種クロメートの耐食性

性、耐食性を高めている。図13の構造(有機-無機複合系)の被覆鋼板は、クロム溶出量が低く難溶性の高い構造(図15)であり、可溶性クロム主体の系に比べて、クロムの防食作用が持続しており、より優れた耐食性を示している(図16)。また最近、55% Al-Zn 合金めっき鋼板の課題である加工性に対して、新規防錆技術導入により加工部耐食性を大きく向上させた新表面処理鋼板が開発されており³⁸⁾、本分野での活発な技術開発が期待される。このような薄膜被覆鋼板は、塗装鋼板がオーバースペックな用途におけるコストダウンなどでも使用されており、今後その重要性は増すものと考えられる。

7. ま と め

建材用塗装鋼板に関し、(a) 動向、(b) 材料の構成、(c) 耐候性、(d) 酸性雨、耐食性および評価方法、について述べた。また、関係の深い材料として建材用有機薄膜被覆鋼板について述べた。有機被覆された材料は、商品として最終形態に近く、防食、美装に加えて多種多様な特性が要求される。このような中で、塗装鋼板はユーザーニーズの高度化、多様化、さらには環境負荷低減化という時代の要請に対応して様々な開発が行われてきた。建材用塗装鋼板についても、環境調和型材料としての視点が今まで以上に求められるものと考えられる。

評価方法についても、温湿度、光、酸性雨などの各種劣化因子の影響を十分に考慮した実環境での腐食実態に近いサイクル試験法開発の動きがあり、材料と環境の両面から判断して、最適な評価システムが近い将来確立されるものと期待している。

参 考 文 献

- 山下正明：第167, 168回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編)(1998)。
- 亜鉛鉄板会(1994~1999)統計
- 亜鉛鉄板, 44 [4] 24 (2000)。
- 建材レポート, 6, 6 (2000)。
- 水野賢輔, 川口 純, 萩野陸雄：塗装工学, 30, 472 (1995)。
- 三代沢良明：表面技術, 43, 311 (1992)。
- 金井 洋ほか：新日鉄技報, 371, 43 (1999)。
- 川西勝次：色材, 69 [7] 429 (1996)。
- 川西勝次：表面技術, 48 [8] 61 (1997)。
- NKK 技報, [158] 71 (1997)。
- 木全芳夫, 野村広正, 西岡良二, 吉田雅也, 中崎三男：材料とプロセス, 11, 1217 (1998)。
- 石戸谷昌洋：塗装工学, 31 [2] 57 (1995)。
- 小倉邦義：防錆管理, 6, 216 (1997)。
- 安保敏夫, 伊藤英二：色材, 65 [10] 606 (1992)。
- 奥出芳隆, 佐々木成幸, 石倉慎一：色材, 70 [4] 235 (1997)。
- 竹内浩士：塗装工学, 28 [8] 306 (1993)。
- 竹田正憲, 阿部信浩, 鈴木洋一郎：防錆管理, 12, 441 (1992)。
- 鋼材倶楽部防せい特別委員会編：「表面処理鋼板の端部の防食対策」(1994)。
- 岡 襄二, 高杉政志：鉄と鋼, 77 [7] 272 (1991)。
- 高杉政志, 岡 襄二：新日鉄技報, [353] 31 (1994)。
- 吉田安秀, 吉田啓二, 山下正明：材料とプロセス, 10, 604 (1997)。
- 吉田安秀, 吉田啓二, 山下正明：材料とプロセス, 10, 1234 (1997)。
- 野村広正, 西岡良二, 高杉政志, 中山 久：材料とプロセス, 8, 1413 (1995)。
- 野村広正, 西岡良二, 高杉政志：材料とプロセス, 9, 77 (1996)。
- 松本雅充, 伊藤哲司, 福本博光, 高値由充：第19回防錆防食技術発表大会講演予稿集, p.71 (1999)。
- Oka, J: ECCA 1990 Congress (1990)。
- 「亜鉛めっき及び塗覆鋼板の長期耐久性評価に関する検討 報告書」亜鉛鉄板会, 樹脂化粧鋼板会編(2000)。
- 関根健司, 内川英興：実務表面技術, 6, 292 (1979)。
- 上坂和夫, 光本誠一, 島本幸三：工業塗装, 105, 65 (1990)。
- 黒川重男, 著 典二, 大和康二, 市田敏郎：鉄と鋼, 72, 1111 (1986)。
- 日本建材産業協会：「鉄鋼系社会資本材料の耐候性・耐食性試験評価方法に係る調査研究成果報告書」, 日本建材産業協会 (1999)。
- 平成11年度 新エネルギー・産業総合開発機構研究受託成果報告書「新規産業支援型国際標準開発事業 表面処理鋼板の耐食性試験評価方法の標準化」, 日本規格協会・日本鉄鋼連盟 (1999)。
- 大岸英夫：塗装工学, 33 [2] 83 (1998)。
- 和氣亮介：塗装工学, 34 [9] 304 (1999)。
- 山地隆文, 山下正明, 松崎 晃：材料とプロセス, 12, 364 (1999)。
- 山地隆文, 山下正明, 松崎 晃, 吉田啓二：材料とプロセス, 13, 1322 (2000)。
- 山下正明, 山地隆文, 松崎 晃, 濱田悦男, 新家博幸：NKK 技報, 167, 20 (1999)。
- 山下正明, 吉田啓二, 山地隆文, 松崎 晃, 濱田悦男, 新家博幸：NKK 技報, 173, 49 (2001)。

(2000年11月10日受理)