



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

溶融めっき鋼板に関する研究開発を通じて

Through the Research and Development of
Hot Dipping Steel Sheet

浦中将明

Masaaki Uranaka

日新製鋼(株)
グループ開発本部
表面処理研究所

表面処理第一研究チーム 主任研究員

1 はじめに

筆者が所属する表面処理研究部では、日新製鋼(株)が経営理念に掲げている「お客様中心主義」に基づいて、お客様にうれしさを提供できる製品を開発すべく、溶融めっき、特殊めっき、後処理といった表面処理に関する研究開発に日々取り組んでいる。筆者は2008年に入社して以来、溶融めっき関連の研究開発に従事しており、研究内容としては自動車分野に関連した研究テーマを主に担当してきた。今回、本稿を執筆する機会を与えていただいたことに感謝を申し上げ、これまでに取り組んできた研究開発事例として、自動車部品への溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板の適用検討、高強度溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板の開発を取り上げて紹介させていただく。

2 自動車部品への溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板の適用検討

エンジンルームやアンダーボディで使用される自動車部品には高防錆性能が求められる。これらの自動車部品では鋼板を部品形状に成形後、電気Znめっきを行いクロメート処理(以下、Znめっきクロメート)を施す防錆方法が主に施されてきた。この防錆方法は、切断端面や加工部全面に防錆処理が施されることが利点となっているが、煩雑な処理工程やクロメート処理時に排出される廃液の環境問題から、Znめっきクロメートに替わる防錆方法が求められていた。そこで、Znめっきクロメートの代替として、当社で新たに開発した溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき(以下、Zn-6Al-3Mgめっき)鋼板^{1,2)}が優れた耐食性を示すことに着目し、自動車部品への適用を試みた。

2.1 促進腐食試験による耐食性評価

Zn-6Al-3Mgめっき鋼板を自動車部品として用いた場合、切断端面部やめっき層にクラックが生じる加工部では鋼素地が露出するため、加工後に処理を施すZnめっきクロメート製の自動車部品と比べ耐食性の低下が懸念される。このため、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板を適用する場合、切断端面部や加工部の腐食挙動を検討する必要がある。これまでにZn-6Al-3Mgめっき鋼板の平坦部ではMgやAlを含む微細で緻密なZn腐食生成物がめっき層上を覆うことで優れた耐食性を示すことが報告されている^{1,2)}ように、めっき鋼板の耐食性とその表面に生成する腐食生成物との間には密接な関係があることが知られており、表面に生成する腐食生成物の形態・組成等の把握が重要と考えた。

促進腐食試験(複合サイクル腐食試験JIS H8502 Cyclic Corrosion Test以下、CCT) 180サイクル後の試験片の切断端面部の外観をFig.1に示す³⁾。供試材として、板厚2.3mm、片面めっき付着量としてZnめっきクロメート材は100g/m²、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板は80g/m²に調整したものを用いた。Znめっきクロメート材の切断端面部では切断端面全体が赤錆で覆われている。Zn-6Al-3Mgめっき鋼板の切断端面部でも赤錆が発生しているが、一部で白錆も観察される。Fig.2はCCT180サイクル後のZnめっきクロメート材およびZn-6Al-3Mgめっき鋼板の切断端面部の断面組織を観察した結果である³⁾。切断端面部の鋼素地の腐食状態に明らかな違いがみられ、Znめっきクロメート材では約0.4mmの鋼素地の腐食

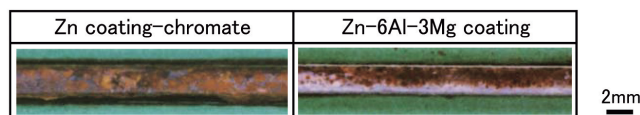


Fig.1 Appearance of the cut edges after CCT 180 cycles³⁾

が発生しているのに対し、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板では鋼素地の腐食がほとんど認められないことから、優れた耐食性を有することがわかる。Fig.3にCCT40サイクル後のZnめっきクロメート材およびZn-6Al-3Mgめっき鋼板の切断端面部に生成した腐食生成物の表面外観を示す³⁾。Znめっきクロメート材の切断端面部には粗い粒状でポーラスな腐食生成物が生成しているのに対し、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板の切断端面上には微細で緻密な腐食生成物の生成が認められる。微小部X線回折による分析結果から、Znめっきクロメート材で生成する腐食生成物はZnO、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板で生成する腐食生成物はZn₅(OH)₈Cl₂・H₂OおよびZnOであることを確認している³⁾。

以上のことから、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板の切断端面部は、平坦部と同様、腐食の進行とともにめっき層から溶出したZn、Al、Mgにより微細で緻密なZn腐食生成物に覆われ、その腐食生成物の保護効果が高いために優れた耐食性を示すと考えられる³⁾。加工部の耐食性を評価した結果をFig.4に示し

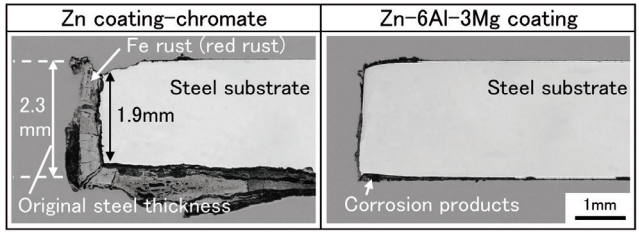


Fig.2 Cross-sectional structures of the cut edges after CCT 180 cycles³⁾

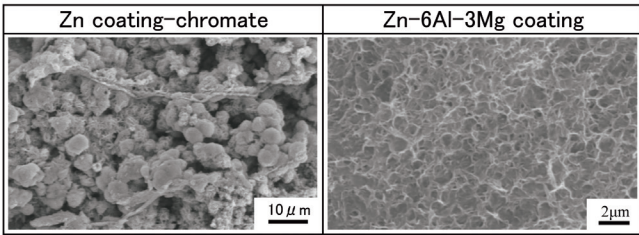


Fig.3 Surface appearance of the corrosion products on the cut edges after CCT 40 cycles³⁾

ているが、赤錆の発生程度からZn-6Al-3Mgめっき鋼板の方が優れた耐食性を示すことが確認でき、加工部でも切断端面部と同様の防食機構が働いていると考える³⁾。これらの評価結果に基づき、実際にZn-6Al-3Mgめっき鋼板が自動車部品に採用されるようになり、現在では適用部品も拡大している。

2.2 実車環境における耐食性評価

促進腐食試験では塩水噴霧に加え、乾燥、湿潤等の条件を組み合わせることで、より実環境に近い腐食環境を模擬しているが、完全には再現できていないのが現状である。そのため、実車環境における腐食状態を把握することも重要であると考え。そこで、腐食環境の厳しい地域であるケベックシティ、モントリオールを走行した車両から自動車部品を回収して耐食性を評価した。

Fig.5に回収したそれぞれの部品の表面外観を示す³⁾。回収した自動車部品は、(a) ケベックシティを約3年走行した車両のエンジンルーム内にあるZn-6Al-3Mgめっき鋼板製のラジエーターファンモーターカバー（板厚1.0mm、片面めっき付着量100g/m²）、(b) モントリオールを約5年走行した車両よりアンダーボディ部品であるZn-6Al-3Mgめっき鋼板製のリアバンパーブラケット（板厚0.6mm、片面めっき付着量60g/m²）および (c) エンジンルーム内のZnめっきクロメート製のラジエーターファンモーターカバー（板厚1.2mm、片面めっき付着量100g/m²）である。表面外観に大きな差は認められず、いずれの部品についても表面に白錆が発生しているだけで、赤錆の発生は認められない。Fig.6にZnめっきクロメート製部品およびZn-6Al-3Mgめっき鋼板製部品の平坦部の断面組織を示す³⁾。Znめっきクロメート製部品では、

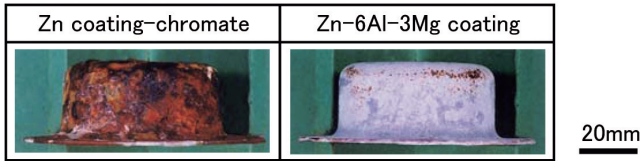


Fig.4 Appearance of cup-shaped after CCT 180 cycles³⁾

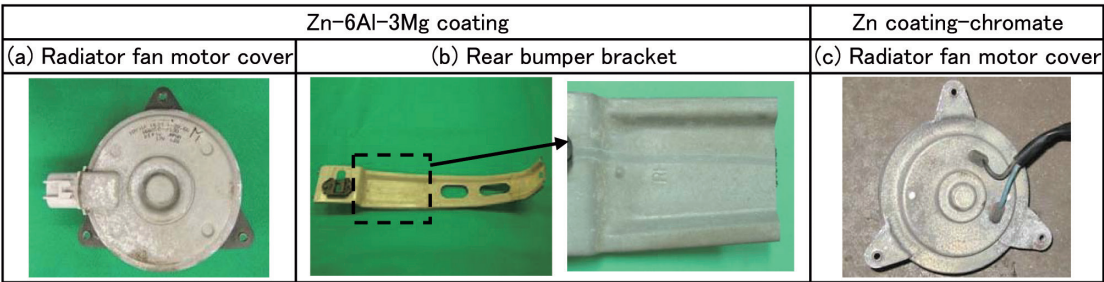
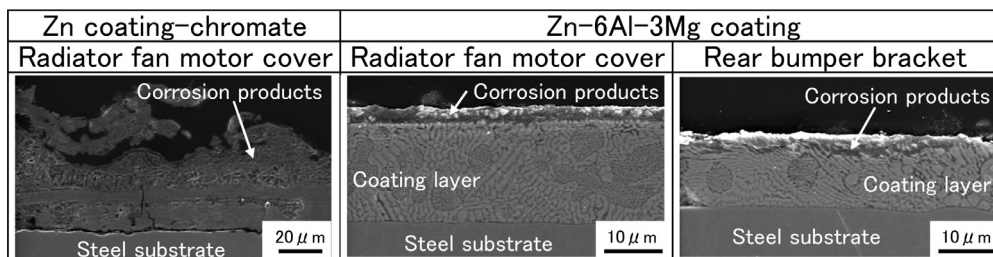


Fig.5 Appearance of the collected automotive parts³⁾

Fig.6 Cross-sectional structures of coating layers on the automotive parts³⁾

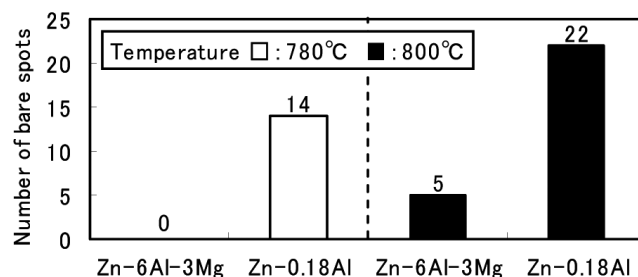
めっき層の全面腐食が観察されるが、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板製部品では、めっき層の残存が確認される。これらの部品は、走行年数、搭載位置が異なるため、完全な比較とはならないが、そういった点を考慮してもZn-6Al-3Mgめっき鋼板製部品の方が大幅にめっき層の腐食が抑制されていると推定される。海岸環境（沖縄県宜野湾市）での大気暴露試験において、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板では $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ で構成される緻密で平滑性のある腐食生成物が生成することで優れた耐食性を示すことを確認している⁴⁾。この大気暴露試験と今回の実車環境におけるめっき層断面組織を比較すると類似した腐食状態となっていることから、実車環境でもこのような腐食生成物の保護効果により、めっき層の腐食が抑制されたと考える。

以上のように、実車環境においても促進腐食試験と同様、Zn-6Al-3Mgめっき鋼板製部品はZnめっきクロメート製部品に比べて優れた耐食性を示すことを明らかとした³⁾。このような実車環境での評価と促進腐食試験評価の比較データを蓄積させていくことで、適正なめっき付着量のスペックと新規用途の提案が行えるようになると思われる。

3 高強度溶融 Zn-6%Al-3%Mg 合金めっき鋼板の開発

近年、環境対策としてCO₂ガス排出量削減に向けた自動車車体の軽量化と、衝突安全性の基準の厳格化に対応した車体強度の向上を目的に、自動車構造部材への高強度鋼板の適用が拡大している。また、車体寿命の延長も重要な課題であり、耐食性向上を目的に表面処理鋼板が多用されている。こうした動きがある中、当社においても耐食性向上を目的として高強度Zn-6Al-3Mgめっき鋼板の開発に着手することとなり、筆者はこの開発のめっき性に関する検討に主に携わっている。

高強度鋼板は、一般的にC、Si、Mn、Pなどの固溶強化元素、Ti、Nbなどの析出強化元素が必要に応じて鋼中に添加される。これら添加元素の中でも、Si、Mnは機械的性質の劣化を抑制しながら高強度化を達成することが可能であるため、頻繁に活用されている。しかしながら、これらの元素は溶融

Fig.7 Relationship between reduction heating temperature and number of bare spots of Zn-6Al-3Mg coating and Zn-0.18Al coating⁶⁾ [Holding time : 35s]

めっき工程の還元加熱時に鋼板表面に濃化して酸化物を形成し、溶融めっき性を低下させることが知られている⁵⁾。そのため、Si、Mnを強化元素として鋼中に添加する場合には、めっき性の把握が重要となる。これまでにSi、Mn添加鋼における溶融Znめっき性に関しては報告されているが、溶融Zn-Al-Mg系合金めっき浴を用いてめっき性を調査した結果はほとんど報告されていないため、Zn-6Al-3Mgめっき性の調査に取り組んだ。

めっき原板として0.12%C-0.4%Si-2.0%Mn鋼を用いて、DP-50℃、30%H₂-N₂の雰囲気にて還元加熱を行い、浴温400℃のZn-6Al-3Mgめっき浴、浴温450℃のZn-0.18Alめっき浴に2s浸せきしてめっきを行った。還元加熱温度780℃、800℃で35s間保持した際のめっきサンプルに発生した不めっき数をFig.7に示す⁶⁾。なお、評価面積は40mm×90mmとし、不めっき有無はめっき後の表面外観を目視で観察し評価している。Zn-0.18Alめっきでは還元加熱温度780℃で不めっきが発生し、800℃になると不めっき数が増加した。これに対し、Zn-6Al-3Mgめっきでは、還元加熱温度780℃で不めっきの発生がなく良好なめっき性を示した。還元加熱温度800℃では不めっきが発生したが、不めっき数はZn-0.18Alめっきに比べて少なかった。めっき浴の組成により高強度鋼板とのめっき性が変化する現象がみられたが、詳細なメカニズムは明らかに出来ていない。鋼板とめっき浴との濡れ性は溶融めっき技術の根幹を成す部分であり、この現象を理解しておくことは将来の溶融めっき鋼板の開発において有益な知見と成り得ることも

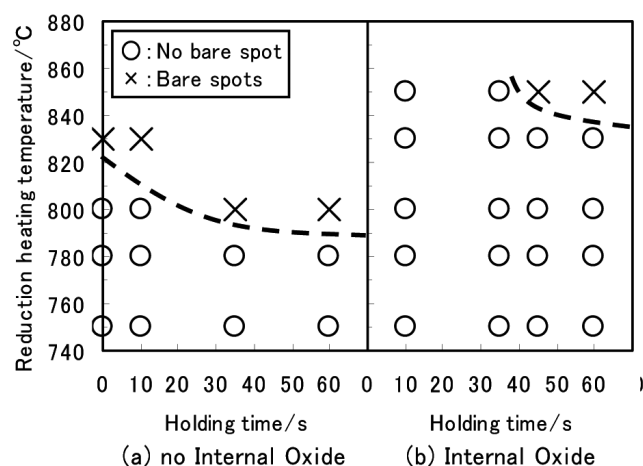


Fig.8 Effect of Internal Oxide on Wettability with molten Zn-6Al-3Mg alloy⁶⁾

考えられるため、今後はメカニズム解明に尽力していきたい。

今回調査に用いた高強度鋼板にZn-6Al-3Mgめっきを施した場合、還元加熱温度が800℃を超えると不めっきが発生することが明らかとなった。しかしながら、高強度鋼板においては800℃近くもしくはそれ以上の温度での還元加熱が必要となることから、実機設備での製造を想定すると安定した製造性の確保が困難になることが予想される。そこで、熱延時の巻取り温度を通常より高くすることによって内部酸化物を形成した場合のめっき性改善効果について検討を行った。Fig.8にZn-6Al-3Mgめっき性におよぼす内部酸化物の影響を調査した結果を示す⁶⁾。内部酸化物を形成した場合、還元加熱温度850℃、保持時間35sまで良好なめっき性が得られることがわかる。これは内部酸化物が形成されることで、鋼板表面へのSi、Mnの濃化が抑制されたためと考える。この結果から、熱延時の巻取り温度を通常より高くすることで、高強度Zn-6Al-3Mgめっき鋼板を製造可能であることが確認できた⁶⁾。

4 おわりに

入社してから溶融めっきに関する研究開発に8年間携わり、この間、様々な研究テーマを担当してきた。その中でも、今回紹介させていただいた自動車部品へのZn-6Al-3Mgめっき鋼板の適用検討において、ラボでの促進腐食試験から実車環境での腐食試験という一連の流れの中で腐食挙動を調査し、腐食生成物の効果を把握することが出来たのは良い経験

になったと思う。また、高強度Zn-6Al-3Mgめっき鋼板の開発においても、主な担当はめっき性に関する検討であったが、母材設計の段階から検討に加わり機械的性質におよぼす各添加元素の影響や強化機構等に触れ、鉄鋼材料の基礎的な部分についての知識を深めることができたのは有益であったと感じる。このように一人の研究者が自分の専門分野を超えて、一連の流れの中で全てのプロセスを経験出来るということが当社の研究開発の強みであると考えている。今後も、そういった研究開発に携わることで多くの経験と知識を積み重ねていき、溶融めっきだけでなく、その他の分野の現象・プロセスを理解した鉄鋼のスペシャリストを目指していきたい。そして、幅広い視野を持って研究開発を行い、世の中のニーズにあったお客様に喜ばれる新製品・新技術の開発に携わっていききたい。

筆者は3年前から「次世代溶融亜鉛めっき鋼板の高機能皮膜構造の創成とナノレベル解析」フォーラム（主査：東北大貝沼教授）に参加させていただいている。大学の先生方や鉄鋼他社の研究者の方々と議論する中で、自分とは異なる視点での意見を聴くことができるため大いに刺激を受けるとともに、同年代の研究者の方々と比較して自分の未熟さを痛感する場面も多々ある。自分の未熟さから、このような貴重な機会を無駄にしないためにも、積極的に議論に参加していき、日本の溶融めっき分野の技術レベルの向上に少しでも寄与できるよう日々努力していきたい。

参考文献

- 1) T.Tsujimura, A.Komatsu and A.Andoh : Proc.5th Int.Conf.on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH'01), CRM, Brussels, (2001), 145.
- 2) S.Tanaka, K.Honda and A.Takahashi : Proc.5th Int. Conf.on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH'01), CRM, Brussels, (2001), 153.
- 3) M.Uranaka and T.Shimizu : Proc.8th Int.Conf.on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH'11), AIM, Genoa, (2011), 111.
- 4) 清水剛, 吉崎布貴男, 三吉泰史, 安藤敦司 : 日新製鋼技法, 85 (2004), 11.
- 5) 小松厚志, 安藤敦司, 橘高敏晴 : 日新製鋼技法, 77 (1998), 1.
- 6) 浦中将明, 服部保徳 : 材料とプロセス, 29 (2016), 335.

(2016年2月15日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京大学 大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 教授

山口 周

溶融亜鉛めっき鋼板は、優れた特性を持ちながら「錆びる」鋼を様々な環境で用いるための重要な技術です。日本が世界をリードする溶融亜鉛めっき鋼板に関する最近の話題は、高張力鋼に対する溶融亜鉛めっき処理の開発に加えて、過酷な腐食環境に耐える高AlめっきやMg添加めっきが最先端の表面処理として注目を浴びていますが、浦中さんはこのなかでMg添加めっきの開発に従事し、紹介されているような応用を目指す開発研究において大きな成果を上げている新進気鋭の研究者です。

溶融めっき技術は最終製品と直結するためか、他社の研究者とともに切磋琢磨する機会が減少しており、めっき研究の活性化を目指して、鉄鋼協会のフォーラム¹⁾、研究会²⁾、産発プロジェクト³⁾が企画・実施されてきました。浦中さんとはこのGA研究会活動の中ではじめてお会いしたのですが、この研究会は、様々な分野の専門家が参集して各分野の専門家としての視点からめっき反応やめっき層の諸物性について徹底的な議論を行うことを意図したものであり、これまでの常識にとらわれずにめっき研究の「ルネッサンス」を目指すというものでした。新しい発見に皆興奮し、各社から参加した若手研究者達が熱心に夜更けまで議論をしていたことが印象的でした。浦中さんは静かにしかし着実に、他社からの若手幹事とともにフォーラム活動の舞台回しの中心的役割を果たし、来年度から新しい研究会⁴⁾へと発展するうえでの実働部隊として貢献されてきました。

今回の原稿を拝見して、Mg添加めっきの腐食性能に関する基礎研究から自動車応用に関する応用研究、全く内容の異なる

高張力鋼へのMg添加めっきのプロセス開発まで、実に広汎な分野にわたって活躍されているのを知り、温和しい印象だった浦中さんがじつは非常にアクティブに厚みのある研究・開発でブレークしているのを知りました。めっき組織だけからは想像もできない複雑な腐食現象に関する腐食生成物に注目した腐食反応の解析や、ハイトンへの内部酸化を利用したMg添加めっきの応用など、入社から短期間でこれだけの優れた成果を上げられたのは、優れた着眼点によるものです。自信を持ってこれからもますます大活躍してください。一つ注文をつけるとすると、厳しさを増す国際的な競争のなかで、優れた成果を明解に示すために必要な厳しい議論に負けない強い発信力の獲得でしょう。日本は技術力、研究・開発力はトップクラスなのに、国際会議等での発信力が今ひとつという状態が続いているのが現状です。Mg添加めっきのようなオリジナルの技術も図々しく自分達が開発したなどと主張するものもいます。これからは強い日本の鉄鋼人として、世界のめっき技術を背負って立つ意気込みで頑張ってください。

- 1) 「次世代溶融亜鉛めっき鋼板の高機能皮膜構造の創成とナノレベル解析」フォーラム (H25-27年度)：略称GAフォーラム
- 2) 「合金化溶融亜鉛めっき鋼板の被膜特性に及ぼす鋼中Si添加の影響」研究会 (H21-24年度)：略称GA研究会
- 3) 産発プロジェクト展開鉄鋼研究「GA皮膜加工特性の飛躍的向上に関する研究」(H25-27年度)：略称産発プロジェクト
- 4) 「高機能溶融亜鉛めっき皮膜創成とナノ解析」研究会 (H28-30, 予定)

新日鐵住金(株) 君津技術研究部 部長

松村 賢一郎

今 回縁あって、表面処理分野でご活躍中の浦中さんの「躍動」記事へのエールをお引き受けすることになりました。浦中さんは、日新製鋼の溶融めっき研究開発者としてご活躍されている若手のホープ。彼との出会いは、この数年活発に活動が行われている鉄鋼協会主催のフォーラムにおいてでした。見た目はおとなしい感じですが、しっかりと自分の意見を持った若手研究者という第一印象を持ちました。

さて、私たちの携わる表面処理は家電、建材、容器など多くの用途がありますが、最も多く使用されている用途に自動車向けがあります。表面処理鋼板は特に自動車用材料との結びつきが強く、薄板母材の開発を始めとし、防錆性を含む自動車の諸特性向上へのユーザーニーズに応える形で、表面処理はその発展を遂げてきました。昨今、中国、韓国、東南アジアの諸国が躍進を見せ、日本製の素材はその一部の量を明け渡すことになりはしたものの、こと表面処理鋼板に関して申し上げるならば、最先端の研究開発、そして上市される鋼板の多くが、日本から生まれていると言っても過言ではありません。

日本がグローバルに戦い始めた、まさにこの時代に彼は入社し、常に一步先を歩むことを義務づけられた自動車表面処

理鋼板の研究開発というポジションでご活躍されています。今回、ご紹介の あった、Zn-Al-Mg合金めっきは、これまで建材を主流に開発と展開が進められたものです。最近JIS化もなされ、高防錆鋼板として、大きな成果と結果をあげてきました。そして自動車材料への展開という新たな一歩としての検討結果が報告されました。その中で彼は、自分の専門分野を超え、プロセスも含めて経験していきたいとその強い意志を伝えてくれています。このような研究者が育っている限り、ものづくり日本が失われることは無いでしょう。大変心強く思います。

表面処理の材料開発には防錆性といった一面だけでなく、ユーザーニーズに応じた多岐にわたる性能の両立が求められます。多くの知識の獲得やそれをサポートする体制も必要です。折しもこの数年、フォーラムをはじめとする鉄鋼協会の各種研究会では、自動車用防錆鋼板として主流のGAにそのスポットをあて、構造とその性能向上の可能性を産学一体となつてとことん議論追及し、日本発で大きな成果をあげてきました。これらの結果をも活かし、さらなる飛躍とご活躍を祈念するとともに、日本を代表する研究者として成長されることを期待しています。