



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# ドイツ・マックスプランク鉄鋼研究所への 留学体験

One Year Stay in Max-Planck Institut für Eisenforschung, Germany

桂 翔生 (株) 神戸製鋼所  
材料研究所 表面制御研究室  
主任研究員  
Sho Katsura

## 1 はじめに

筆者は、株式会社神戸製鋼所 材料研究所 表面制御研究室に勤務し、2008年の入社以来、主に薄鋼板の表面処理プロセスの生産技術の開発に従事しています。2017年10月より1年間、派遣留学の形でドイツ・デュッセルドルフにあるマックスプランク鉄鋼研究所に滞在し、慣れ親しんだ日本を離れて、最先端の技術と、異国の文化を経験する機会を得ました。終わってみればたいへん短い期間でしたが、これまで当たり前だと思っていたことを改めて問い直す機会となる、非常に濃密な経験の連続でした。

本稿では、筆者の留学活動の概要をお伝えするとともに、現地で筆者が感じたことなどをお伝えしたいと思います。

## 2 マックスプランク鉄鋼研究所

マックスプランク研究所は、1911年設立のカイザーヴィルヘルム協会を前身とする調査研究機関で、基礎研究に主眼を置き、鉄鋼に限らず幅広い分野をカバーする数多くの研究所からなっており、ドイツ全土に研究拠点が存在しています。応用研究を目的としたフラウンホーファー研究所や各地の大学とも相互に補完・協力しあいながら、ドイツのみならず欧州の科学技術研究を先導する存在となっています。

マックスプランク研究所を構成する研究所の一つである鉄鋼研究所 (Max-Planck Institut für Eisenforschung GmbH) は、1917年設立のカイザーヴィルヘルム鉄鋼研究所を前身とし、筆者の滞在開始時にちょうど創立100周年を迎えた歴史ある研究所です (図1)。同研究所は国と民間企業からの50%ずつの出資に基づき『株式会社』の形で運営されています。

研究所の所在地であるデュッセルドルフ (Düsseldorf) 市

は、ドイツ西部・ノルトラインウエストファーレン州の州都であり、市内を流れるライン川の両岸に広がった人口60万人、ドイツ第8位の都市です。同市は、いわゆる『ルール工業地帯』の一部であり、古くからドイツの石炭・鉄鋼業の中心地であったことに由来して、この地に鉄鋼研究所が設立されました。また、デュッセルドルフ市は、多くの日系企業が多数の現地事務所を設置しており、多くの日本人駐在員が居住する、欧州最大級の日本人街が存在する街でもあります。

マックスプランク鉄鋼研究所の組織としては、

- (1) 計算材料学
- (2) 材料設計学
- (3) ナノ組織の機械特性
- (4) 界面科学および表面処理

の4つの研究部門が存在しており、筆者の滞在時には合計で約250名の研究者が積極的に研究を行っていました。研究者の大半は、博士号の取得を目指すPh.D studentと、筆者のよ



図1 マックスプランク鉄鋼研究所 外観

うな企業・大学からの Visiting Researcher からなっており、数週間から数年の単位で、世界各国からそれぞれの目的に応じて滞在して研究活動を行っていました。

筆者は、このうちの (4) 界面科学および表面処理部門の腐食解析グループに所属し、グループリーダーである Michael Rohwerder 博士の指導を受けながら研究活動を行いました。

### 3 留学先での研究内容

鉄鋼製品、特に薄鋼板は、建材や自動車分野で広く使用される重要な材料です。特に、耐食性が求められる分野においては鋼板表面に種々のめっき層が形成された表面処理鋼板が用いられています。表面処理鋼板の大部分を占めるのが、溶融Znめっき鋼板です。これは、鋼板を連続的に焼鈍するとともに溶融Zn中に浸漬させて引き上げ凝固させることで、鋼板表面に一定厚のZn層を形成させたもので、鋼材よりも卑な性質を持つZnが犠牲防食効果を発揮することで、裸材に比べて高い耐食性を示します。溶融Znめっき鋼板としては、長らく、純Znをベースとしためっき層が広く用いられてきましたが、近年、より高い耐食性が求められる環境において、ZnにAlおよびMgが添加された高耐食Zn-Al-Mgめっき製品が商品化され<sup>1,2)</sup>、継続的に市場が拡大しつつあります。

Zn-Al-Mg合金めっき層は、従来の純Zn系のめっき層よりも多量のAl, Mgを含有するため、非常に複雑な凝固組織を示しており、その耐食性に及ぼす微細組織の影響は詳細には明らかになっておりません。先行研究において、凝固組織が微細であるほど耐食性に優れる傾向が確認されているものの<sup>3-7)</sup>、

ミクロン単位の微細組織が、腐食挙動にどのように影響するかを評価することは難しく、そのメカニズムについては明らかになっておりませんでした。筆者は、留学期間を通じ、この課題を解明するため、Zn-Al-Mg合金めっきの腐食挙動に及ぼす微細組織の影響を評価しました。

このために、SKPFM (Scanning Kelvin Probe Force Microscopy、走査型ケルビンフォース顕微鏡) を活用しました。同手法は、微細なプローブを振動させながら試料表面に近接させ、サンプル表面と探針との間の原子間力および静電気力の相互作用を感知し、試料表面の一定範囲を走査することによって、表面の微細組織における凹凸および腐食電位像分布をその場観察できる手法です。サブ $\mu\text{m}$ オーダーの高い空間解像度が比較的容易に得られるため、微細な凝固組織を持つZn-Mg-Al合金めっきの凝固組織の各部位が、雰囲気環境の変化に対してどのように相互作用を及ぼし腐食するかを観察する目的に活用することができます<sup>8,9)</sup>。

この手法を用いて、凝固速度の制御により緻密度を変化させたZn-6%Al-3%Mg合金の表面電位分布を測定すると、凝固組織に存在するMgリッチ相が最も卑な電位を示す一方で、Znリッチ相が貴な電位を示すことから、腐食初期においてはMgリッチ相がZnリッチ相に対して犠牲防食作用を示すことが明確に確認できました。また、雰囲気への酸素の添加や、水蒸気分圧の上昇によって腐食反応が促進される傾向も確認できました (図2)。さらに、凝固組織が粗大化することで、異相界面における電位変動がよりダイナミックになること、腐食生成物の堆積が顕著に増加することも確認できました。

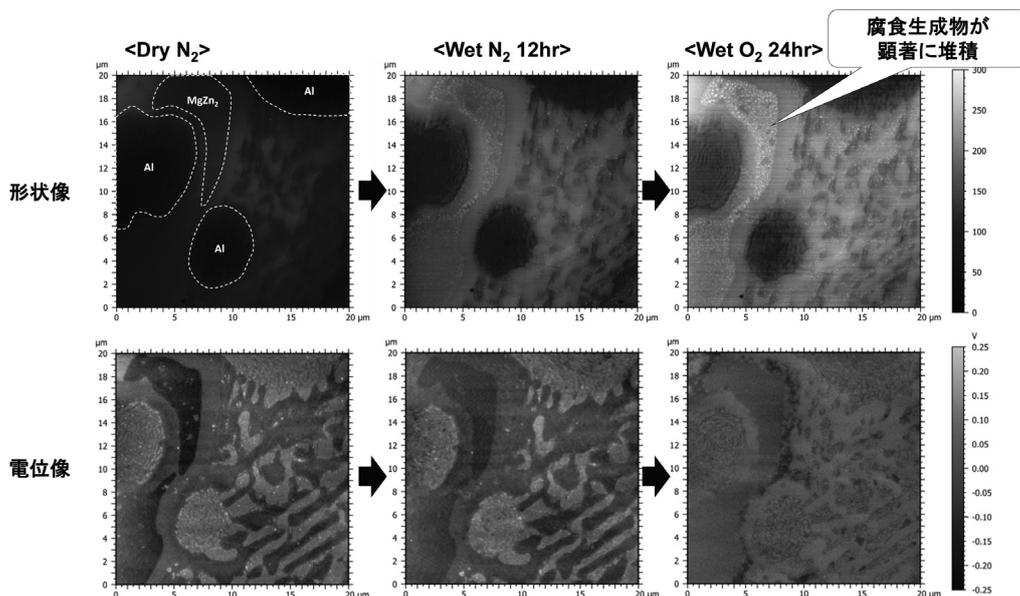


図2 Zn-6%Al-3%Mg合金めっき層の湿潤環境における腐食電位分布その場観察結果

凝固組織の緻密度が腐食挙動に大きく影響するメカニズムとして、サンプル表面に形成された水膜中における腐食生成イオンの拡散に起因するものと考えました。前述の通り、微細な凝固組織のうち、部分的なアノード部とカソード部が分離することにより、アノード部においてはイオンの溶出、カソード部においては水の分解に伴う $\text{OH}^-$ イオンの発生が起きます。この際、相対的に微細な組織を持つめっき層においては、隣接する異相間の距離が近接しているため、生成したイオンの拡散が容易となり均一化が生じやすく、表面全体をほぼ均一な腐食生成物が覆うことが可能となり、早期に腐食反応が沈静化されるものと考えられます。一方で、粗大組織においては異相間の距離が相対的に離れており、初期の腐食反応で発生するイオンの拡散距離が長いために、微細組織に比べて表面水膜中のイオンの均一化が起り難いと考えられます。特に、 $\text{OH}^-$ の堆積による局所的なpH上昇が起りやすく、表面に不均一な皮膜が形成されることで長期間腐食が継続され、微細組織の場合とは異なる腐食挙動が確認できるものと考えられます。

水膜中に溶存して平衡作用を示す $\text{CO}_2$ 添加環境においては、上記のような局所pHの上昇を抑制可能となりますが、この環境において同様の試験を行うと、微細組織と粗大組織の腐食挙動の違いは確認できなくなりました。このことから、表面水膜中におけるイオンの拡散が腐食挙動を支配し、組織サイズの変化に腐食挙動が変化するものと考えられます。

## 4 おわりに

企業に所属する研究者の活動としては、やはり応用を目的とした研究開発に偏りがちとなりますが、今回の留学期間では、自らの興味に基づいた基礎的な研究に没頭することが可能であり、研究者としての自分の在り方を再確認する大変良い機会となったと考えています。また、世界中から集まった材料工学を学ぶ同世代の若い研究者と知り合い、交流を深めることができました。マックスプランク鉄鋼研究所で博士課程に所属している研究者の約半分が、ドイツ以外の国を母国としていましたが、博士号取得後のキャリアパスについて流動的に考えている点がとても印象的でした。『勤め先に骨を埋める』ような感覚が無いのはもちろんですが、国境を越えることに躊躇せず、求められればどの国でも自分の力を発揮していける、という気概のようなものを感じました。

また、異なる文化・生活習慣を持つ人が世界中から集まる環境に触れたことで、近年議論が活発なダイバーシティ<多様性>の在り方を体感することもできました。『郷に入っては郷に従え』という諺とは対照的に、現地ではむしろ各自が自分の文化・習慣を大事にするとともに、異なる文化を持つ人を許容し、共存できる状況が実現されていたと感じています。今後日本でも活発化していく多様化の流れの中で、他者の文化を尊重し、ありのままを受け入れることの重要性を体感することができたと考えています。

最後になりましたが、今回の留学におきまして、快く送り出してくれた上司や同僚に感謝したいと思います。本稿の内容が、海外への留学を考えておられる方々にとって少しでもご参考になればと考えております。

## 参考文献

- 1) 辻村太佳夫：日新製鋼技報, 92 (2011), 1.
- 2) 森本康秀, 本田和彦, 西村一美, 田中暁, 高橋彰, 新頭英俊, 黒崎将夫：新日鉄技報, 377 (2002), 22.
- 3) H.-K.Sohn, J.-W.Lee, Y.Yoo, J.Min, M.-S.Oh, S.-H.Kim, Y.-S.Jin and K.Y.Kim : Proc. 8th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet, GALVATECH, (2011)
- 4) R.Krieg, A.Vimalanandan and M.Rohwerder : J. Electrochemical Soci., 161 (2014), C156.
- 5) Z.Xi, Q.-F.Zhang, S.Jiang, Q.Liu, C.Hu and D.Guo : Proc. 9th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet, GALVATECH, (2013), 530.
- 6) Q.-Y.LIU, S.-M.Jiang, Z.-G.XI, Q.-F.Zhang, X.LIU and C.-F.YUE : Proc. 10th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet, GALVATECH, (2015), 834.
- 7) T.Prosek, J.Hangström, D.Persson, N.Fuertes, F.Lindberg, O.Chocholatý, C.Taxén, J.Šerák and D.Thierry : Corros. Sci., 110 (2016), 71.
- 8) M.Rohwerder and F.Turcu : Electrochimica Acta, 53 (2007), 290.
- 9) D.B.Blücher, J.-E.Svensson, L.-G.Johansson, M.Rohwerder and M.Stratmann : J. Electrochemical Soc., 151 (2004), B621.

(2019年6月3日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

Head Corrosion, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Germany

PD Dr. Michael Rohwerder

**I**t is my pleasure to share here my experience with Sho Katsura. The first contact was by email in early June 2017. He introduced himself and told me that he was interested in my research on Zn-Mg-Al alloy coatings and asked whether he could come for a visit at the end of the same month. During that visit we had a long discussion about that topic and he told me that Kobe Steel has a program encouraging company members to study abroad as a guest researcher, which he would like to use. I immediately agreed. At the Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH (MPIE) I had already gained very good experience with visiting scientists from Japanese steel industry and I was sure that a stay of Sho Katsura as a visiting scientist would be certainly very fruitful.

MPIE is quite special within the Max Planck Society as we receive a large part of our basic funding from steel industry. The expectation from the side of the steel industry is of course applied research of more or less direct relevance for the industry. On the other hand, being a Max Planck institute the research at MPIE should focus mainly on very fundamental scientific questions. Hence, MPIE has developed a unique expertise in combining both, applied and fundamental research. Such an approach was also planned for the research stay of Sho Katsura. The research stay started in October of the same year.

As described in the article the main focus of his research was on the question whether we see an effect

of microstructure on the performance of the Zn-Mg-Al coatings and how these can be understood. At MPIE we have developed a leading expertise in using Kelvin probe based techniques for investigating atmospheric corrosion, coating delamination and hydrogen embrittlement. The idea for his research was to investigate the local potential distribution on samples of different microstructure and how these evolve under corrosive atmospheres. For this he employed an AFM based Kelvin probe technique, SKPFM. His studies also involved the effect of short term immersions in salt solution and looking at the effect of the potentials. The big problem there is then to find again the area that was monitored prior to the immersion. This is an extremely difficult task, which he mastered with perfection. I will never forget when he showed me the first results. He had not only managed to perform that task once, but several times with different parameters. I was really impressed by his experimental skills and really impressive endurance. So, really interesting results were obtained in this project. Apart from that I think it was also an experience for the members of my research team to interact with Sho Katsura. His kindness and expertise were highly appreciated. I think it was a great experience for both sides. And hence I am very happy that the collaboration with him was continued even when he went back and is still ongoing.

日本製鉄(株) 技術開発本部 表面処理研究部 主幹研究員

竹林 浩史

**桂**さんとは鉄鋼協会が主催しているめっき関連の研究学会などで以前からご一緒させていただいており、研究会の運営にもご協力いただいていたご縁もあり、僭越ながらコメントを寄稿させていただきます。ただ、少し前からしばらく研究会に顔を出されないな、と思っておりましたら、マックスプランク研究所に留学されていたとのことで、少々驚きましたが。

昨今、めっき鋼板の分野では、従来一般的だったZn系やZn-Al系だけでなく、それらにMgを添加したZn-Al-Mgめっきが開発され、その高い耐食性から様々な用途に採用が進んでいます。その耐食性発現メカニズムについても種々の研究が進められていますが、比較的マクロな報告例が多く、特にZn-Al-Mg系めっき特有の複雑なめっき皮膜構造が具体的にどのように作用して耐食性を発現しているかについては、あまり報告例がありませんでした。今回、桂さんが取り組まれた手法は、走査型ケルビンフォース顕微鏡を用い、局所的な表面形状と表面電位を同時にin-situで観察できる手法として脚光を浴びている方法です。その最新の手法を用いて、Zn-Al-Mgめっきの組織や環境の違いによって腐食がどのように進行していくかを研究されました。驚いたのは得られた

画像の分解能が非常に高く鮮明で、各微細組織ごとの電位や、溶解、腐食生成物の形成等の形状変化も手に取るようにわかるため、局所的な腐食挙動の解析に非常に強力なツールになると思えました。今後もこの手法を他の様々なめっきにも応用していただき、更にイオンを含む腐食環境でも測定していただければ、実環境で起きている腐食現象を論理的に考察することが可能になると考えられます。そして、めっき皮膜組織と耐食性の関係を体系的に解明していただきたいと思えます。

今回、桂さんが行かれた留学先は、金属や鉄鋼材料の研究機関として世界でも屈指の頭脳が集まっているマックスプランク鉄鋼研究所とのことで、研究設備はもちろん、著名な先生方や新進気鋭の若手研究者も多く、非常にレベルの高い環境で研究されたことと思います。また、留学に際しては本文にもあるようにグローバルな環境から考え方の多様性の必要性も感じてこられたようで、今回得られた人脈を生かし、ややもすると閉鎖的になりがちな我が国の鉄鋼研究に新風を吹き込みつつ、世界と戦える日本の鉄鋼業や表面処理分野を切り開いてもらえることを期待しています。今後もこの分野を牽引する研究を進めて行ってください。