



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

企業研究者の海外留学体験

Studying Abroad –Experience of a Company Researcher–

名古秀徳

Hidenori Nako

(株) 神戸製鋼所
材料研究所 材質制御研究室

1 はじめに

筆者は、株式会社神戸製鋼所の材料研究所に勤務し、主に厚鋼板、溶接金属に関する研究開発に従事しています。2006年の入社以来、基礎研究に近いものから、事業部門と連携しての製品開発まで、幅広い仕事に取り組んできましたが、2013年7月から翌6月の丸一年、コロラド鉱山大学鉄鋼研究センター (ASPPRC: Advanced Steel Processing and Products Research Center) に Visiting Scholar として留学するという得難い機会に恵まれました。国際化が叫ばれて久しい現代、留学といっても珍しいものではないかもしれませんが、本稿では、一人の企業研究者の体験、研究内容をご紹介します。

2 コロラド鉱山大学

留学先となったコロラド鉱山大学は、デンバー空港から車で約1時間、ロッキー山脈の麓、標高約1マイル (1600m) の地に位置します。高地トレーニングで有名な街Boulderに近く、夏は毎日カラッと晴れあがり、冬は時に-20℃まで下がりますが、空気が薄いせいか体感気温はそれほど低くありません。大学のある街、Goldenはゴールドラッシュ時に形成された歴史ある街で、ダウンタウンのメインストリートが300mほどの小さな街ですが、治安も良く非常に住みよいところです。

コロラド鉱山大学 (Colorado School of Mines) は、名前のとおり鉱山学 (Mining) を中核として設立され、鉄鋼研究に関しても全米で有数の規模を誇ります。ASPPRCでは、DirectorのSpeer先生のもと、米国はもちろん、南米、欧州、アジアと様々な国、地域のメンバーが集まり、Bar, Plate, Sheetの3分野で合計40テーマほどの研究が遂行されていました。特徴的なのは、産業界との結びつきが強固な点で、研究計画は

ASPPRCに加盟した企業と協議のうえ決定され、年に2回の成果報告会の場で進捗が共有されるとともに、企業出席者も交えての活発な討論が行われています。

3 外からみた日本の鉄鋼研究

到着した筆者がまず重宝がられたのは、残念ながらディスカッションの相手としてではなく、翻訳者としてでした。当地の学生さんは、研究テーマが決まると最初の半年ほどかけて過去の論文をレビューしますが、ISIJ Internationalはもちろんのこと、「ふえらむ」や「鉄と鋼」の和文記事も時にチェック対象となります。もちろん、大多数の学生さんにとって日本語は未知の言語ですので、通常は、英文概要や図表のキャプションを頼りに内容を推測するのですが、時に、どうしても本文の内容が知りたくなると、筆者に声がかかることとなります。研究テーマの討論会では、プレゼンテーションに日本の研究者の結果が紹介されたり、日本企業の設備が話題になったりと、海外に出てあらためて日本の鉄鋼研究の存在



Fig.1 Building of ASPPRC.

感、レベルの高さを実感することができました。

4 研究テーマ：オキサイドメタラジー

造船や建築分野で用いられる厚鋼板では、構造物の大型化により、高いレベルでの強度と靱性の両立が求められるようになっていきました。特に、溶接時の高温にさらされる溶接熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) では、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 逆変態に伴い形成される粗大組織が、靱性を大幅に低下させることが知られており、HAZ組織を微細化することに多大な努力が払われてきました。代表的な例として、微細なTiN粒子のピンング効果により γ 粒の粗大化を抑制する技術は、実用鋼に幅広く適用されています¹⁾。しかしながら、近年広まりつつある大入熱溶接は、施工効率に優れる反面、HAZでのTiN溶解を助長するという課題があり、新しいHAZ組織微細化技術が求められる場面が増えてきました。オキサイドメタラジーは、TiNに比べ高温で安定な氧化物系介在物を、微細アシキュラーフェライト (AF) 組織の変態核として活用する組織微細化技術であり、大入熱HAZ靱性の向上に有効であると考えられています²⁾。介在物を起点とするAFの生成メカニズムについては、

①介在物/AF界面エネルギー

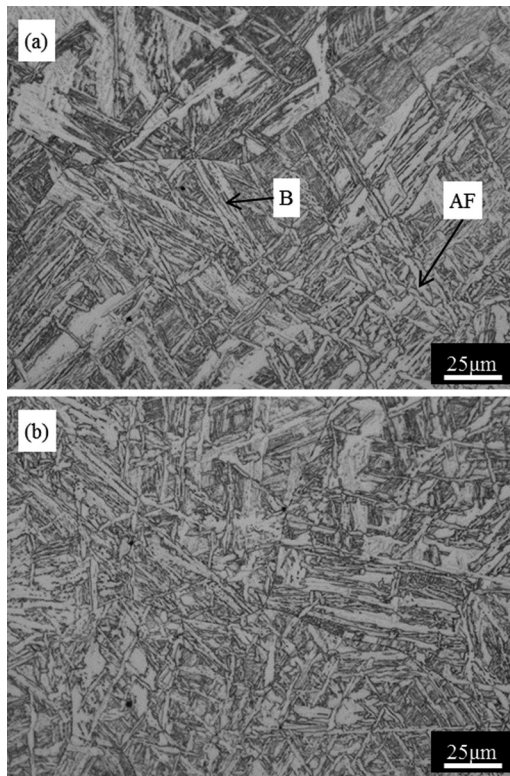


Fig.2 Optical micrograph of the (a) Ti-added and (b) Ti-REM-Zr-added alloys heated at 1723 K for 5 s and cooled at 50 K/s. "B" and "AF" indicate bainite and acicular ferrite microstructure respectively¹⁰⁾.

②介在物周囲の組成変動

③介在物周囲への熱歪、転位導入

等が提唱されてきました³⁾。①は、介在物とAFとの間に低エネルギー界面が形成されることで、AF生成が促進されるというもの^{4,6)}。②の代表例はMn欠乏層で、オーステナイト安定化元素であるMnの濃度が、介在物周囲で低下することで、変態駆動力が局所的に増加することが指摘されています⁷⁾。③は、熱膨張係数の差に起因し、介在物周囲のオーステナイト相に導入される歪、転位がAF生成を促進するとする説です。また、AF生成を促進する介在物としては、Ti系酸化物が古くより見出されています^{4,6,8,9)}。

筆者の留学では、複合酸化物におけるAF生成をテーマに研究に取り組みました。題材としたTi-REM-Zr系酸化物では、HAZを模擬した熱処理条件において、Ti系酸化物を上回るAF生成能が確認されています (Fig.2)¹⁰⁾。Ti-REM-Zr系酸化物と、それを起点とするAFとは、下記の方角関係が成立し、良好な格子整合性が実現されていることが明らかになりました (Fig.3)。

$$(011)_{AF} // (011)_{Oxide}, [100]_{AF} // [011]_{Oxide} \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、前記①のメカニズムが支配的な影響をおよぼしたことを意味します。また、興味深いことに、Ti-REM-Zr系酸化物-AF方位関係に加え、Ti-REM-Zr系酸化物と旧 γ 母相とも特定の方位関係が成立していた可能性が示唆され、こちらも比較的良好な格子整合性が得られることが明らかになりました。一般に、酸化物と旧 γ 相とは特定の方位関係は成立しないとされています¹¹⁾が、Ti-REM-Zr系酸化物は、熱サイクルの高温保持時に一度液体化 (溶融) し、その後の冷却過程において、周囲の γ 相との間に特定の方位関係を満足しつつ再度結晶化するのではないかと考えています。また、良好な格子整合性を有する酸化物/ γ 界面の形成は、それ自身はAF生成に不利に働きますが、Ti-REM-Zr系酸化物- γ 方位関係を満足する酸化物から生成するAFは、Ti-REM-Zr系酸化物-AF方位関係に加え、旧 γ 相との間にKurdjumov-

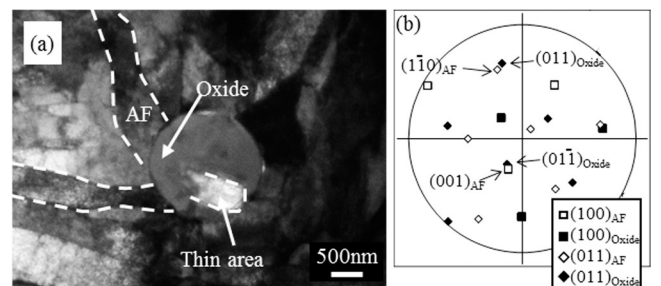


Fig.3 (a) Bright field image and (b) (100) and (110) poles of Ti-REM-Zr oxide and AF crystal¹⁰⁾.

Sachs (K-S) 方位関係を満たすことができるようになるため、総体としてAF生成が容易になると推定されます¹²⁾。すなわち、Ti-REM-Zr系酸化物を起点とするAF生成に対しては、熱サイクル時のTi-REM-Zr系酸化物溶融、再結晶化挙動が重要な役割を果たすことが示唆されています。Ti-REM-Zr系酸化物の溶融が起こり難くなる低温加熱熱サイクルでは、AF生成が低調となることが示されており、本仮説を支持するデータと考えています¹³⁾。

5 おわりに

筆者が留学したのは入社8年目のことで、仕事に慣れてきた反面、思考が硬直化しているのではないかという漠然とした不安を感じ始めていた頃でした。また、日々の実験も殆どが人任せになり、研究をしているという実感が得られないままデータ整理に終始することもしばしばでした。そのようななかでの留学は、日常の仕事を離れて興味のまに研究に没頭し、固まりつつあった頭をほぐすことのできた、実り多い一年間でした。ほぼ10年ぶりの研磨やTEMオペレートなど、久しぶりの実験作業に悪戦苦闘もしたことも良い思い出です。仕事を通じてある程度の研究活動の経験をつんだうえで、自ら手を動かすことで、新たなアイデアにつながることもありました(余談ですが、深夜実験でハイになるのは万国共通らしく、SEM観察中にフラリとやってきた見ず知らずの学生さんと、お互いの研究で大いに盛り上がったことがありました)。先生方や学生さん、ASPPRCの加盟企業の方々と知り合えたことも大きな財産です。自身の研究に限らず、幅広い領域における研究動向に関し、率直に意見交換を行っていくことで、今後の材料開発活動に広がりや深みをもたせていきたいと考えています。

また、異文化のなかで暮らすことで、日本や、日本人である自分を見つめなおす機会も多々ありました。一例を挙げますと、日本流の謙譲の美德は通用せず、「どちらでもかまわない」という態度が最も失望されました。よく言われることではありますが、実際に経験し、その際の相手の残念そうな表情とともに、非常に印象的な出来事として記憶に残っています。

最後に、今回の留学は、企業研究者として経験を積んだからこそ学べることもあった、素晴らしいものでした。快く送り出してくれた上司、同僚にあらためて感謝するとともに、留学を考えておられる方々にとって、この小文が少しでも後押しとなることを願って、締めくくりとしたいと思います。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 笠松裕, 高嶋修嗣, 細谷隆司: 鉄と鋼, 65 (1979), 1232.
- 2) 植森龍治: ふえらむ, 14 (2009), 472.
- 3) 小関敏彦: 鉄と鋼, 90 (2004), 61.
- 4) A.R.Mills, G.Thewlis and J.A.Whiteman: Mater. Sci. Technol., 3 (1987), 1051.
- 5) C.Lee, S.Nambu, J.Inoue and T.Koseki: ISIJ Int., 51 (2011), 2036.
- 6) T.Yamada, H.Terasaki and Y.Komizo: ISIJ Int., 49 (2009), 1059.
- 7) Y.Tomita, N.Saito, T.Tsuzuki, Y.Tokunaga and K.Okamoto: ISIJ Int., 34 (1994), 829.
- 8) J.M.Gregg and H.K.D.H. Bhadeshia: Acta Metall. Mater., 42 (1994), 3321.
- 9) 河西恵一郎, 李昶準, 南部将一, 井上純哉, 小関敏彦: 鉄と鋼, 96 (2010), 123.
- 10) H.Nako, Y.Okazaki and J.G.Speer: ISIJ Int., 55 (2015), 250.
- 11) H.K.D.H.Bhadeshia and L.E.Svensson: Mathematical Modelling of Weld Phenomena, The Institute of Materials, London, (1993), 109.
- 12) H.Nako, H.Hatano, O.Yoshitomi, K.Yamashita and M.Otsu: ISIJ Int., 54 (2014), 1690.
- 13) H.Nako, Y.Okazaki and J.G.Speer: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 336.

(2015年9月8日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

Professor, Director of ASPPRC, George S. Ansell Department of Metallurgical and Materials Engineering, Colorado School of Mines

John G. Speer

It is a delight to be given the opportunity to comment on Hidenori Nako. I first met Hide in May of 2012 when he visited us at Colorado School of Mines to discuss steel research and give a seminar on weld microstructures in high-Ni steels. "Mines" was founded in 1874 in Golden, the territorial capital of Colorado, just on the edge of the Rocky Mountains. The institution has grown to over 5000 students, but retains the character of a small focused university. On first meeting, it was clear that Hide has a sharp mind and a demeanor that is very kind and polite. Later, our program, the Advanced Steel Processing and Products Research Center (ASPPRC) at Colorado School of Mines, was blessed to host Hide as a research scholar for a one year visit during 2013 and 2014. During this year, Hidenori conducted some of the work summarized in the attached article. I have fond memories of some deep discussions on transformation mechanisms and transformation crystallography, and Hide did a wonderful job of applying detailed analyses of his data with rigor and depth. His mentors in Japan should take great pride in his outstanding preparation and continued professional development, which benefited not only his assigned project, but also other projects

where he consulted with post-doctoral researchers and mentored students working in the laboratories beside him. The research led to publications and presentations, and some of the analysis techniques have been shared with others locally and overseas. Hide's kindness and English language skills made it easy for him to collaborate with many of the students who are responsible ASPPRC's research portfolio of about 40 projects. And it has been a special pleasure for me later to have an opportunity to visit with his family in Kobe, Japan, and to discuss the programs of ASPPRC with colleagues at Kobe Steel. For context, the ASPPRC program within which Hide's research was conducted is an "industry/university" cooperative research center where users and producers of steel support pre-competitive research that is shared among all of the 29 member companies. This is a unique center begun in 1984 by Mines' Professors George Krauss and David Matlock that enables manufacturers to work closely with their steel suppliers to help understand the physical and mechanical metallurgy fundamentals of relevance to next-generation developments in steel sheet, plate, long products and forgings, heat treatment, etc.

JFEスチール株式会社 スチール研究所 鋼材研究部長

長谷 和邦

名 古様とは「鉄鋼材料と合金元素」の執筆で同じ元素グループに所属したご縁で今回のコメントをお受けしました。入社8年目というのは一通り研究・開発業務を経験され、企業研究者としての価値観や物の考え方が固まりつつある時期です。このような時期に海外留学を経験されたことは非常に良いタイミングであったと思います。欧米人の論理的かつ合理的な思考に触れることで多くを学び、外から日本を観ることで日本の思考、アプローチ方法の良い点悪い点を再認識されたことと思います。また、大学と企業の連携方法も海外と日本では大きく異なるため、今後の日本の鉄鋼研究のあり方について考える良いきっかけになったのではないのでしょうか。10年以上前の話になりますが、私も海外留学する機会を会社から頂きました。企業研究者として様々な経験を積んだからこそ見えるもの、学べるものもあり今日の自分のキャリアを築く上で非常に重要な経験となりました。それと同時に、発展途上国の若い研究者達が自国の将来のために懸命に努力している姿を目の当たりにすることで日本の将来に対して大きな危機感を抱き、自身の意識が大きく変化したのを感じています。

さて、名古様が開発を担当されている厚鋼板は、主に船舶、海洋構造物、建築分野などで用いられる溶接構造用鋼です。溶接構造用鋼ではTMCPを駆使した母材特性の向上とともに溶接継手性能の向上が重要な開発課題です。最近では母材の高強度化や低温靱性の改善が要求される一方、溶接能率向上の観点から大入熱溶接の適用が進んできており、厚鋼板開発における溶接熱影響部 (HAZ) 組織制御の重要性がより一層増してきております。介在物をアシキュラーフェライト (AF) の変態核として活用する組織微細化技術は、大入熱溶接用鋼の重要な技術の一つです。これまで様々な介在物が検討され HAZ組織の微細化が図られてきました。名古様は留学中の研究成果として溶接熱サイクル中の酸化物溶解、再結晶挙動がAF生成能に重要な役割を示すという新たな仮説を提案されており、その研究成果は現用鋼の適用可能範囲を大きく上回る新しい大入熱溶接用鋼の開発へつながることが期待されます。

貴重な留学経験を生かし今後さらに飛躍され、日本の鉄鋼研究を牽引する企業研究者に成長されることと大いに期待しております。