



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-36

メタラジの面白さ

～特に高温界面現象の不思議に魅せられて～

Interest in Metallurgy

Especially Fascinated by the Wonders of
High-temperature Interface Phenomena



田中敏宏 大阪大学
統括理事・副学長
Toshihiro Tanaka

1 なぜ、メタラジの世界に魅かれたのか？

私は最近、高校生や大学生等の若い世代の皆さんに研究活動の楽しさを伝える機会が多く、特に高校生の皆さんからは、私が工学の世界に入った背景や、材料工学、特にメタラジの世界で研究活動を40年近くも進めてきた理由を聞かれることがよくあります。そのため、今になって改めて私自身が大学に入学する前の子どもの頃を思い出すことが多々あり、どういう経緯があって本稿で述べる「メタラジの面白さ」に出会うようになったかな？と振り返ってみました。そこで、メタラジに出会う背景についての説明から本稿の話を始めさせていただきます。

私は1957年生まれで、第2次世界大戦が終わって12年後であり、歴史の教科書には、「もはや戦後ではない」と言われた時代に生まれました。まさに子どもの頃、高度経済成長期を過ごし、1964年の小学校1年生の時に東京オリンピックが開催され、それに合わせて、東海道新幹線が開通し、名神高速道路も開通しています。父が日本国有鉄道(国鉄、現JR)に勤め、姉も国鉄に勤めましたので、家の中をはじめ周りには鉄道関係の情報やグッズが溢れていました。また、小学校から高校生の時代に一気に自家用車の数が増えた時代を過ごしています。鉄道、自動車、さらには夢の乗り物にも見えた飛行機も憧れの乗り物でした。中学1年生の1970年には大阪万博が開催され、その前年にアポロ11号が月面に着陸し、月から持ち帰った月の石が、万博に展示されていました。その後も経済発展は続き、1980年代初頭に「ジャパン・アズ・ナンバーワン」と呼ばれた時代を大学生・大学院生として過ごしました。

このような時代を背景にした中で子ども時代を過ごし、小

学校の担任の先生は理科が大好きな先生でしたので、実験室に遊びに行き、工業製品の話聞く機会がたくさんありました。上述の鉄道、自動車、飛行機の車体は金属でできており、その先生によると、金属の素になる鉱石は日本にはなく、遠く海外から輸入され、日本には天然資源がないので、海外から輸入する鉱石から金属を作り出し、それを加工して、工業製品にして輸出し、国を豊かにするという話をよく聞きました。その鉱石は、私にとっては、宝石のように光り輝くようなものであると頭の中で想像していましたが、実際には家の周辺に転がる石ころと比べても、あまりにも美しいものとは言えずに愕然とし、このこげ茶色の物体がどのように「変身」したら、自動車や新幹線に変わるのか？という疑問が子ども心にあったように思え、この思いが、工学部に入ることに繋がっていると思います。結局は工学部でメタラジの世界に入り、40年近くもメタラジの世界にどっぷりと浸かりました。

2 高温界面現象の不思議に魅せられて

特に、メタラジに夢中になった要素の一つとして、鉱石から金属が現れた際、金属結合の溶鉄とイオン結合あるいは共有結合の溶融スラグの間に「界面」が形成されますが、この結合様式の異なる2つの物質間の「界面」では、どのような現象が生じて、両者が引っ付いているのか？という点が私にとっては謎に満ちた世界でした。それを知りたい、理解を深めたい、という想いをこの40年近く追いかけてきたように思います。特に、熱力学を学び始めた頃、平衡状態というのは、巨視的な視点では静止しているように見えるが、高温の液体状態では、非常に高速で、原子が振動し、動き回っていることを知り、原子やイオンが超高速で界面を挟んで両側の

相の間を行き来しているが、その様子を頭の中であれこれ想像すること自体にワクワクしました。さらに、平衡状態ではなく、界面で化学反応が生じている際には、界面張力は化学反応が生じている間だけ低下し、化学反応が収まると再度、界面張力が上昇し、反応後の平衡状態に対応する界面張力の大きさに戻るといった現象があります。時代的には、私が小学生のころから世界ではこの研究が始まっており、その機構はよくわかっていないことが指摘され続け、最近の10年近くはその機構を明らかにしたいという研究も行ってきました^{1,2)}。図1は、溶鋼-溶融スラグにおいて、溶鋼中のAlが溶融スラグ中のSiO₂を還元する反応が進行中に一時的に界面張力が低下し、その際、SiO₂が分解し、Siと酸素が溶鉄中に溶解する際、酸素だけは一時的に溶鉄側の界面に過剰に吸着するために界面張力が低下するというモデルを提案した際の界面の模式図です¹⁾。見えない界面の様子をあたかも見たかのようにワクワクしながら描きました。学問とはいかに楽しいものかと思った思い出の一つです。

とはいえ、やはり、溶鋼も溶融スラグも高温では液体状態であるので、界面を直視することは難しく、界面を直視した状態で、その物性を計測することは不可能であろうと思っていました。ところが、2014年頃に学習院大学の渡邊匡人先生にお声がけをいただき、渡邊先生が代表を務めておられる国際宇宙ステーションでの実験に関係させていただきしました。この実験は、JAXAの石川毅彦先生が開発された静電浮遊炉を活用する研究プロジェクトであり、そのテーマの一つとして、溶鋼を液滴の核にして、その周りを溶融スラグが覆った2重液滴を作製し、微小重力空間に浮いた2重液滴の溶融スラグを通じて、界面を直視したまま、液滴振動によって表面張力や界面張力を計測するというプロジェクトです^{3,4)}。まさか、国際宇宙ステーションにおいて溶融スラグと溶鋼の実験をすることになるとは思ってもみませんでした。

表面張力に関しては、液体合金の表面張力はButlerの式⁵⁾を用いて推算できることが知られており、1980年代後半には熱力学データベースを利用した溶融合金の表面張力の推算も

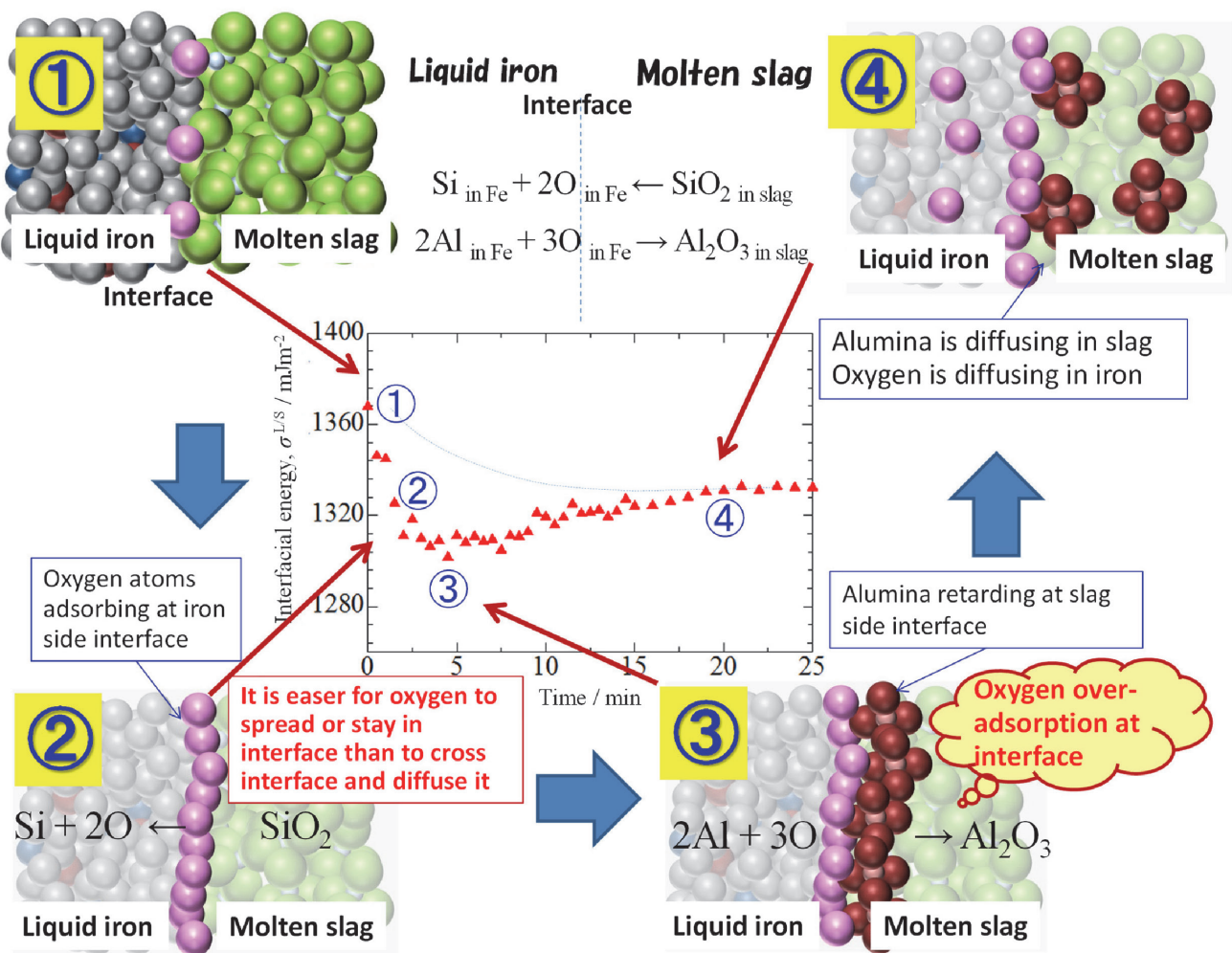


図1 化学反応による溶鋼 - 溶融スラグ間の界面張力の動的変化の機構 (Online version in color.)

Yeumら⁶⁾によって進められていました。2000年頃、ナノサイエンスが大きな話題となり、熱力学データベースを利用したら、平衡状態図と表面張力が同時に計算できるので、ナノ粒子合金の平衡状態図の計算を試みました^{7,8)}。純金属の融点がナノ粒子系では低下する現象は古くから知られていましたが、2成分系合金の状態図はナノ粒子系ではどのように変化するかを知りたくて計算を試みました。その結果、液相線温度が粒子径の減少に伴って大きく変化することがわかり、また得られたナノ粒子系の計算結果を実証する実験も実施し⁹⁾、ワクワクするような面白い結果が得られて夢中になりました。

3 様々な叡智に触れてメタラジーを満喫

前述の液滴振動によって、色々な物性が計測できますが、上記の実験で得られる表面張力や界面張力以外に、液滴振動の減衰率から粘度の計測も可能です。溶融スラグの粘度の推算については、これまでに数多くの推算モデルが提案されています。著者も独自の考えで粘度モデルを導出しようと試みましたが、多成分系物質であるため、解析が難しい面が多々あります。そこで、2006年頃にニューラルネットワーク計算を利用した溶融スラグの粘度の推算を行うことにしました¹⁰⁾。当時はAIという言葉は今ほど一般に浸透していなかったと思います。市販のソフトウェアでは、得られた回帰式の係数が読み取れないので、自前のソフトウェアを作成することにしました。計算結果による実験値の再現性は非常に高く、その後は、溶融スラグの粘度の推算のみならず、表面張力、電気伝導度、固体酸化物と溶融金属の接触角の推算など¹¹⁻¹⁷⁾、メタラジーに関係する様々な分野へニューラルネットワーク計算の活用範囲を広げてきました。

さらに溶融スラグの研究を進めるうちに、地球物理学の先生方と知り合いになり、マグマの研究にも触れることができました。さらに、スラグとマグマと月面の鉱石は同様な組成であることを知ってその共通性に感激してワクワクし、これまでに蓄積されてきたメタラジーの成果は、地球科学の知見も加味すれば、将来の月面でのメタラジーの発展にも活用できる可能性を見出し、地球上でのメタラジーに関する情報を月面でのメタラジーに適用するためのデータベース化を試みしています。特に、溶融スラグ中の溶鉄との界面物性に着目した金属液滴の凝集作用の活用による月資源からの金属の回収などを試みています¹⁸⁾。

メタラジーにおける界面科学を深めてみたいという想いから上記のように、地球科学から宇宙科学、ナノ科学、さらにはニューラルネットワーク計算のような情報科学等の様々な叡智に触れることができました。というよりも、振り返って

みますと、物事を深めようすると、様々な叡智に触れることが不可欠なのではないかと思っています。

4 まだまだ未知の世界が広がる 未来のメタラジーに向かって

前述の結合様式の異なる2つの物質が形成する溶鉄 - 溶融スラグの界面が一体どのようなになっているかという謎は、いまだ誰も精確には解明できていないと思います。また、溶液の表面張力の推算については、溶融合金は前述のButlerの式を基本とするモデルが存在しますが、実はアルカリハライド系の単純な溶液系にはこのButlerの式は適用が難しいことがわかっています。私自身は、陽イオン共通系または陰イオン共通系に対して、実験値を再現できる表面張力の推算式を導出しましたが¹⁹⁾、陽イオンと陰イオンが交互に共存するいわゆるReciprocal系に対しては未だに実験値を再現できる推算モデルは存在しないと思います。メタラジーに関係する表面・界面科学の世界にはまだまだ未解決の課題が残っている一つの事例です。

メタラジーの世界は、青銅器時代にまでその歴史を遡ることができ、その後、国や地域の発展には不可欠の工学として非常に長い年月にわたって発展し続けている分野です。国の発展とともにその中心となる地域も時代と共に移り変わってきていますが、地球上においても、未来に向かってさらに発展する工学分野であり、上述のように、地球を離れて近くの衛星や惑星に目を向ければ、そこにはさらに新たなメタラジーの発展が求められると思います。

メタラジーは古くからある古典的な分野と言えども、未知の課題は今なお沢山あります。私自身は上述のように、その時々最新の科学の導入を試み、課題の解明に向かってあれこれ考える研究生生活を過ごしましたが、終始ワクワク感に溢れて、実に楽しく、有意義でした。特に、未来のメタラジーをデザインし、またメタラジーを活用して、未来社会をデザインしたいという想いをこれまで持ち続けてきました。私が主宰した研究室は2023年3月末をもって20年間の幕を閉じましたが、「研究室」とは呼ばずに、研究室のWEBサイトでは「未来社会デザイン工房」と称して研究活動を紹介していました。

鉄鋼関係の若い研究者、技術者の皆様には、「なぜだろう？ どうして？」という気持ちを子どもの世界だけのものとかと考えずに、いい年の大人が？！と言われようが、ワクワク、ドキドキする気持ちを是非持ち続けてほしいと思っています。特に前述のように、なにかを深めようとするには、様々な叡智に触れることが大切であり、周囲の新たな世界に触れることによって、ワクワク感が余計に醸成されるような気が

します。「何でも見てやろう」の精神で、世界を舞台に未来のメタラジの世界を開拓し続けてほしいと願っています。

参考文献

- 1) T.Tanaka, H.Goto, M.Nakamoto, M.Suzuki, M.Hanao, M.Zeze, H.Yamamura and T.Yoshikawa : ISIJ Int., 56 (2016), 943.
- 2) M.Suzuki, M.Nakamoto, T.Tanaka, Y.Tsukaguchi, K.Mishima and M.Hanao : ISIJ Int., 60 (2020), 2332.
- 3) 渡邊匡人, 田中敏宏, 塚田隆夫, 石川毅彦, 田丸晴香, 水野章敏 : Int. J. Microgravity Sci. Appl., 32 (2015), 320102-1.
- 4) 中本将嗣, 後藤弘樹, 鈴木賢紀, 田中敏宏 : Int. J. Microgravity Sci. Appl., 32 (2015), 320103.
- 5) J.A.V.Butler : Proc. Roy. Soc. A, 135 (1938), 348.
- 6) K.S.Yeum, R.Speiser and D.R.Poirier : Metall. Trans. B, 20 (1989), 693
- 7) T.Tanaka and S.Hara : Z. Metallkde., 92 (2001), 467.
- 8) T.Tanaka and S.Hara : Z. Metallkde., 92 (2001), 1236.
- 9) J.Lee, J.Lee, T.Tanaka, H.Mori and K.Penttila : JOM, (2005), 56.
- 10) M.Hanao, M.Kawamoto, T.Tanaka and M.Nakamoto : ISIJ Int., 46 (2006), 346.
- 11) M.Nakamoto, M.Hanao, T.Tanaka, M.Kawamoto, L.Holappa and M.Hamalainen : ISIJ Int., 47 (2007), 1075.
- 12) B.Derin, M.Suzuki and T.Tanaka : ISIJ Int., 50 (2010), 1059.
- 13) J.Yeon, P.Ni, M.Nakamoto and T.Tanaka : Calphad, 64 (2019), 267.
- 14) M.Nakamoto and T.Tanaka : ISIJ Int., 60 (2020), 2134.
- 15) P.Ni, H.Goto, M.Nakamoto and T.Tanaka : ISIJ Int., 60 (2020), 1586.
- 16) 長谷川格, 小泉琢哉, 喜多和彦, 鈴木賢紀, 田中敏宏 : 日本金属学会誌, 85 (2021), 247.
- 17) 佐伯直哉, 中本将嗣, 田中敏宏 : 日本金属学会誌, 87 (2023), 24.
- 18) S.Lim, M.Nakamoto, K.Fuji-ta and T.Tanaka : Mater. Trans., 64 (2023), 672.
- 19) T.Tanaka, T.Kitamura and I.Back : ISIJ Int., 46 (2006), 400.

(2023年5月12日受付)