



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

「私」のレビュー

My Review

新井宏忠

Hirotsada Arai

八戸工業高等専門学校
産業システム工学科

マテリアル・バイオ工学コース 准教授

1 はじめに

筆者は、八戸工業高等専門学校産業システム工学科マテリアル・バイオ工学コースに所属し、主として鉄鋼プロセスにみられる移動現象論的な課題に取り組んでいる。また、本校では金属材料関連の科目を中心に授業を行っている。今回、このような記事を執筆する機会を頂いたが、初めてこのお話を頂いた際、ここ数年あまり学会活動等に取り組めていなかったため、「躍動」しているかと躊躇する気持ちを持ったのが正直なところである。しかし、折角の機会を頂いたので、ここで研究紹介を兼ねて自身の研究内容と当時の思いを振り返ってみた。

本稿では、まず筆者の学生時代から現在までの研究を紹介したい。所々、出来事などを交えたため、研究内容以外に気持ちが混じった文章になっている点をご容赦頂きたい。最後には、研究を通じた教育活動についても思いを述べたい。

2 研究紹介

冒頭にて移動現象論的な課題に取り組んでいると述べたが、移動現象論が扱う学問は広範で、流体力学・反応工学・伝熱工学・分離工学などが挙げられる。金属工学が抱える分野で言うと製錬工学になる。鉄鋼製造プロセスや他の製品・素材の製造において、有限の時間で何か製品や素材をつくらうとしたとき、熱力学的に定まるゴールのみならず、そこに到達するまでの時間や速度の概念も重要となる。その点、移動現象論は速度論的に流体・物質・熱の移動を考えるため、時間や速度が関係する問題に対して非常に相性がよい。

筆者が移動現象論を知ったのは、大学3年時の移動現象論の講義で、当時、谷口尚司教授（現東北大学名誉教授）が担当されていた。その魅力に惹かれ、4年時の研究室配属では谷口研究室を希望し、無事配属された。以来、博士課程卒業ま

での6年間を谷口研究室で過ごした。谷口研究室では移動現象論や化学工学の視点で、鉄鋼やアルミニウムなどのプロセス課題に取り組んでいた。選んだテーマは溶鋼中介在物の動力学的挙動であり、この研究はいま現在も取り組んでいる。

2.1 介在物の気泡付着除去挙動

学部4年生で選択した研究テーマは「溶鋼中介在物の気泡付着除去挙動」であった。このテーマは修士課程でも継続して取り組んだ。図1に代表的な介在物挙動をまとめて示すが、気泡付着除去挙動も数ある溶鋼中介在物挙動の1つである。気泡付着除去は、ガス攪拌をすれば必然的に生じる現象であり、浮上速度の小さい微細な介在物でも気泡に付着すれば気泡の浮上とともに溶鋼中から除去される。実際、ガス攪拌によって介在物が除去されることは古くから多くの研究で明らかになっている。ではなぜ、気泡付着除去挙動に着目したかということ、乱流や粒子の濡れ性の影響がわからなかったためである。

気泡付着除去挙動には浮遊選鉱に基づいた基盤理論がある。しかしながら、既往の理論では気泡が垂直に浮上し、粒子は特定の流線に沿って気泡に衝突付着すると仮定していた。これが鉄鋼プロセスのような乱流状態でも同様に適用できるか不確かであった。そこで、機械式攪拌槽を用いて乱流条件下における気泡付着除去の水モデル実験を行い、乱流や粒子径、粒子の接触角、気泡の影響等を調査した²⁾。特に、接触角は除去速度に顕著な影響を与えることがわかったが、一方でわからないことも新たに生じた。一つは粒子と気泡間の衝突頻度が乱流の強さ（乱流エネルギー消散速度）の増加とともに減少したことである²⁾。既往の理論では説明できないことで、仮説を立てただけで現在も謎のまま放置している。

結局、これが物理現象として正しいのか、あるいは装置系に依存するのか解明できず、一旦区切りをつけて半理論式としてまとめた²⁾。ただし、この半理論式は、当時使用した実

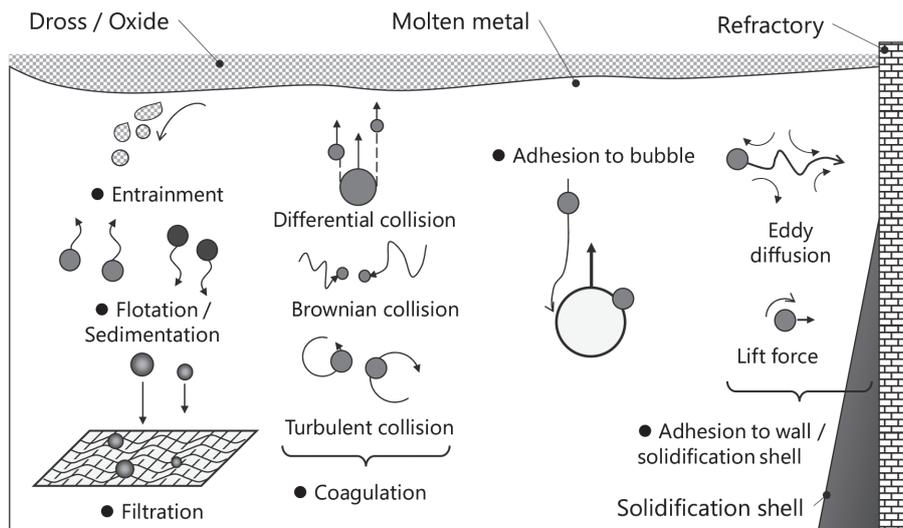


図1 溶融金属中介在物の代表的動力学の挙動

験装置での水モデル実験データに基づいており、多くのパラメータを含むものとなってしまった。そのため溶鋼系に適用できるか確証はなく、実際に「水モデルにしか使えないよね」と言われもした。その通りで何も言えず、やはり系によらない理論式もしくは無次元相関式などにまとめて、他者が使いやすい形にすることが広く工学的に使ってもらえるためには非常に重要だと痛感した。

2.2 介在物の凝集挙動

博士課程では、それまで取り組んできた気泡付着除去と凝集挙動の同時進行現象に焦点を当てた。実プロセスにおいて溶鋼中では複数の介在物挙動が関与しており、これらを組み合わせ精度のよいシミュレーション等が行われる。その中で、介在物凝集は溶鋼中では不可避で進行するため、この挙動を考慮しないわけにはいかない。

凝集挙動は標準理論ともいえる Smoluchowski のポピュレーションバランス式³⁾があり、同研究室ではこの理論を修正し、さらにコロイド凝集理論から粒子間の粘性抗力と London-van der Waals 力の影響を考慮した補正係数を取り入れ、実験的にもその妥当性を確認していた⁴⁾。そのため、ただそのまま凝集理論と組み合わせるだけだと思っていたが、ポピュレーションバランス式と組み合わせる粒子間の衝突頻度の方にも修正が必要であることに気づいた。その翌日、助教の先生と一緒に谷口先生の部屋に行き説明した。これは、谷口先生と前任者の理論修正を否定することであり、かなり緊張した。議論の結果、谷口先生は「なんだ、そうか。ちくしょう。」と笑いながら納得してくださった。その後の鉄鋼協会の講演大会で、この誤りを谷口先生ご自身が発表され、冒頭で「学生が理論の誤りに気づきました。このような内容は学

生ではなく指導教員が発表すべきことであり、以前報告した内容の修正を報告します」と述べられた。ほんの少し学んだだけの学生の指摘を受け止め、かつ、既報の研究の訂正を報告された姿はいまでも忘れられない。研究歴や実績に関係なく、正しいことを率直に認められる度量と誠実さを持ちたいと強く思った出来事であった。

その後は順調に進み、前述の気泡付着除去の半理論式の提案、凝集理論の修正、気泡付着除去と凝集のモデル連成と検証実験を1つの論文²⁾に詰め込んだ。内容的に濃いもので、数少ない論文の中でも特に思い入れが強いものとなった。

博士課程後半に差し掛かり、次に何をするかとなったときに、共同研究先の研究員の方に二種凝集を扱った論文⁵⁾を紹介頂いた。非常に精緻に介在物モデルを考慮しており、このような考えをどういう発想で生み出せるのかと思ったことをよく覚えている。何か踏み込む余地はないかと論文を読み込むと、Smoluchowski のポピュレーションバランス式を二種凝集に拡張できると考えた。この拡張自体は難しくなく、すぐに式は導出できた。ただし、計算負荷が非常に高く、考慮できる凝集体の大きさに制限があった。そこで計算負荷を減らすために、前任者が考案した PSG 法⁴⁾を拡張した。しかし、計算プログラムを実行してみると体積保存がされず、何かしらの間違いがあることは明白であった。ここからが大変で、コードと計算手法の見直しの繰り返しであった。本当に1か月間これしかせずにいたところ、ベッドの中で足りない部分が頭に浮かんだ。現在に至るまでこのような体験はこの一度きりであったが、考え続けると閃くことが本当にあるのだと身をもって体験した。残念ながら、モデルの検証実験では擬似的な異種凝集実験での検証に留まったが、異種凝集モデルがでたらめではないことまでは確認できた^{6,7)}。やり残したこ

とはあるが、ここで時間切れとなり、鉄鋼メーカーに就職した。

その後、2015年9月に八戸高専に着任し、やり残したことを進めることにした。まず1つ目は液滴凝集であり、溶鋼中の液相介在物や巻込みスラグ滴を想定したものである。オレイン酸液滴を用いた水モデル実験から既往の理論が成り立つことを確認した⁸⁾。次いで、完全な異種凝集実験による検証を行った。溶鋼中の固体介在物とスラグ系介在物(液体)の異種凝集を想定して、固体粒子(プラスチック粒子)と液滴粒子(オレイン酸液滴)で異種凝集実験を行ったが、検証に耐える値を得ることが難しく残念ながらペンディングしている。

最後は多分散粒子の凝集挙動である。液中の凝集では、粒子間の粘性抗力と van der Waals 力を考慮した凝集係数と呼ばれる補正係数を導入する必要がある。既往の研究¹⁰⁾で衝突粒子間のサイズ比によって値が大きく変わることは示されていたが、これまで一定値で扱われてきた。粒度分布をもつ多分散粒子の場合、一定値で扱うことは不適當であり、図2に示すように変数として扱うことでモデルの精度を向上させることができた¹¹⁾。

凝集理論は過去膨大な研究がなされてきており、強固な理論基盤がある。しかし、原論文にまで遡ってみると、新たな改善点が見えてくる。凝集係数のようにたった1つのパラメータであっても全体に影響する。細かなところも深く考え

ることの重要性を実感した。

2.3 介在物の界面捕捉挙動

現在取組中であるのが、溶鋼-スラグ界面や溶鋼-耐火物などの異相界面における介在物捕捉挙動である。この研究の動機は、境界条件をどのように設定するかという疑問から生まれた。これはプロセス解析において問題になり、境界条件をどう設定すればよいのか迷うことになる。

種々の異相界面において、いま注力しているのは溶鋼-スラグ界面における介在物捕捉速度の調査とモデル式の構築である。介在物は浮上して、スラグ層界面に到達して溶解すると考えられる。これを最も単純化したモデルは、終端速度で介在物が抜けていくと考えるものである。しかし、実プロセスでは溶鋼が乱流状態にあるので、乱流拡散によって移動することも考え得る。そこで乱流拡散も考慮した界面捕捉モデルをたて、水モデル実験で検証している¹²⁾。まだまだ検証は足りないが、乱流拡散も無視できない可能性がある。

本研究の界面捕捉モデルもまた既往の研究に依っているが、エアロゾル工学や粉体工学の知見を活用した。鉄鋼分野では不明な現象であっても、他の分野ではすでに理論が確立されていることもある。先に述べた凝集現象においても、乱流中の粒子間衝突頻度に Saffman-Turner の式¹³⁾がよく用いられるが、これは雲中における雨滴の成長を対象としたもので、溶鋼中介在物とは無関係である。界面捕捉モデルもエア

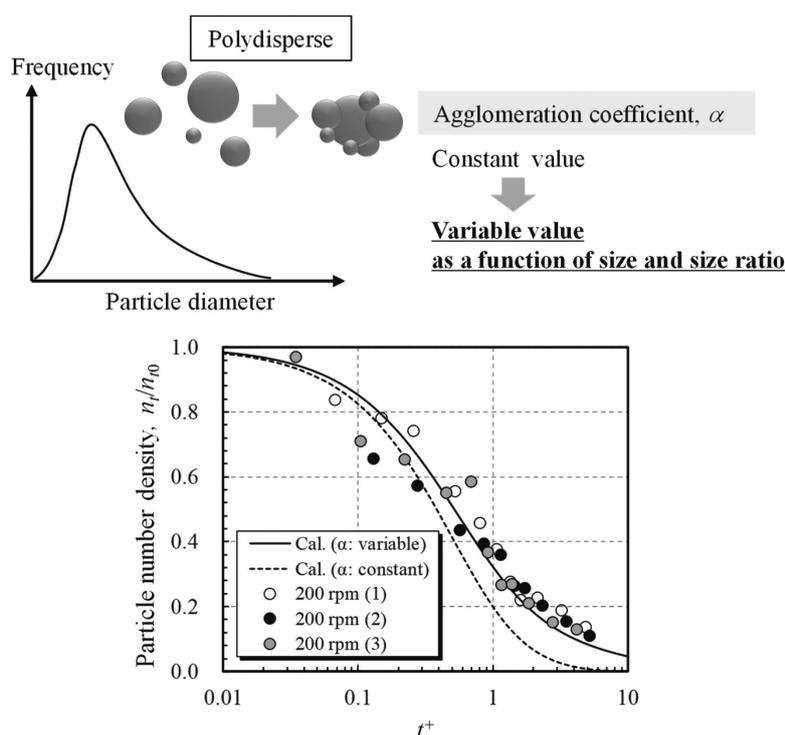


図2 凝集による粒子個数濃度の時間変化¹¹⁾

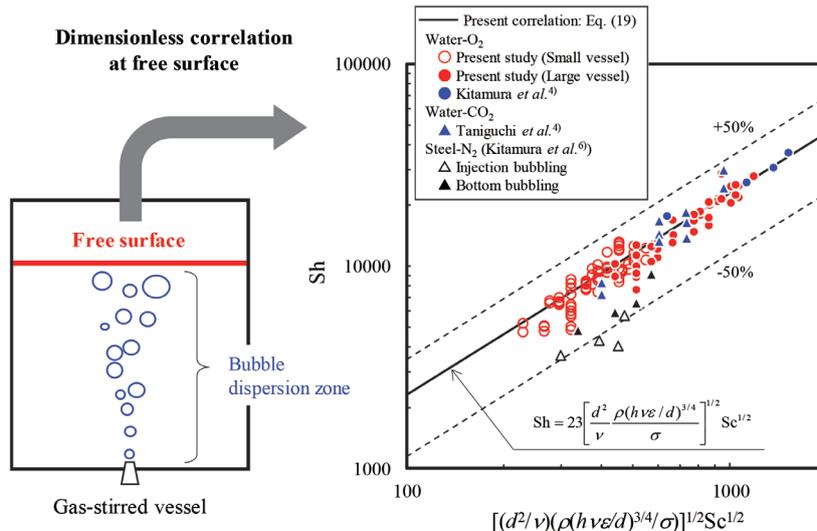


図3 気液界面における液側物質移動係数の無次元相関式¹⁵⁾ (Online version in color.)

ロゾル工学の壁面沈着理論を参考にした。このように、他分野にも目を向けてみると大いに勉強になることが多々ある。エアロゾルは気体中であるが、流体という意味では溶鋼も同じである。より一般的に現象をとらえ、他の分野の力を借りることも大事と感じている。

2.4 異相界面の物質移動解析

この研究は、八戸高専に赴任直後に始めたテーマである。動機は、谷口先生が講義でご自身の論文について解説されたときの一言にある。その論文¹⁴⁾では、ガス攪拌槽における気液界面および液液界面における物質移動速度を測定し、相関式で整理していた。それに対し、「この相関式は左辺と右辺の次元が合っていないので、不十分である」とコメントされた。これがずっと頭の片隅にあり、機会があれば取り組んでみたいと思っていたが、八戸高専に赴任したことをきっかけに研究を開始した。

まずはガス攪拌槽における気液界面に着目し、既往の研究のデータを参照しつつ自分たちでデータを集めていくとともに、気液界面の物質移動に関する無次元相関式を新たに導出した¹⁵⁾。図3に示すように概ね無次元相関式でデータを整理できたことから、次に液液界面でも同相関式で整理できるか実験してみた。まだデータを取り切れていないが、概ね同相関式で整理できる見込みが得られた¹⁶⁾。既往の研究¹⁴⁾で気液および液液界面の物質移動は同一の相関式で整理できることは指摘されているが、無次元相関式として整理できれば、気液界面や液液界面と分けずに、「異相」界面として統一して、より普遍的な関係として用いることができる。

本研究は無次元相関式にこだわっている。移動現象論的な

観点で研究されている方の中には、最終的に無次元相関式にまとめたいという欲求を持たれる方も少なくないと思われる。無次元相関式のよいところは、純理論的に展開できずとも、無次元数同士でまとめることで、物性や系(大きさ、形)に依らない式を立てられることにある。多少大雑把であっても、普遍的な関係にたどり着けるといふ点に魅力を感じている。

3 教育への思い

ここで少し高専について紹介させて頂きたい。高専は、工業発展を支える実践的な技術者の養成のため、「深く専門の学芸を教授し、職業に必要な能力を育成することを目的」とすると学校教育法第115条第1項に記載されている。図4に高専の教育課程を示すが、中学校卒業段階から5年間の一貫した専門教育を行う高等教育機関という位置づけである。この5年間の課程を修了すると、卒業後には進路として専攻科への進学、大学への編入学、あるいは就職といった選択肢がある。進路の自由度が高いことも高専の特徴である。専攻科に進学した場合、そこから大学院に進学するか就職となる。カリキュラムは高等学校の授業科目に大学の専門科目が加わったもので、高校と大学を組み合わせたようなイメージである。

実践的な技術者を養成するため、高専では実験や実習が重要視されている。そのためか、実験作業等でも非常によく手が動く。さらには実験実習を授業時間内に終えるために、作業効率もよい。その一方で、物事を深く考え抜き、考察を加えるという面が苦手と感じている。AIや自動化が急速に発展

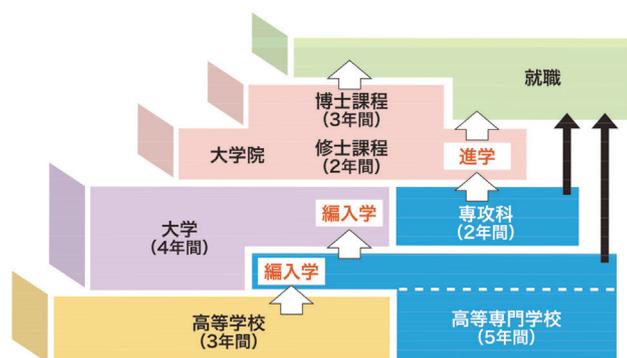


図4 高専の教育課程と高等学校・大学の教育課程との比較 (Online version in color.)

している社会において、「自ら考え、行動する」能力を伸ばしたいと思っている。このような能力は答えのある座学や実験実習では身につかず、研究活動が1つの手段だと思う。高専にも卒業研究があるが、卒研を通じて研究者として務めながら教育者としていかに学生を伸ばしていくのか、毎年配属されてくる学生を見ていつも悩まされる。

本稿を執筆中の出来事であるが、今回紹介できなかったテーマで、ある相関式を検討していたとき、学生が測定データを綺麗にまとめてみせた。それは私では背景知識や経験が邪魔をして決して思いもつかないものであった。確かに知識は重要であるが、新しいことを思いつくのは、むしろまっさらな状態の学生の方がよいのではと強く印象付けられた。思い返してみると、谷口先生からは特にこうした方がいい、ああした方がいいと言われたことはほとんどなく、在籍中好きに研究させて頂いた。教える側の立場になってみると、これがいかに難しいかを実感する。谷口尚司先生の姿勢を参考にしながら、これはこうなると経験から安易に方針を出さずに、私自身は基礎知識やノウハウ等を伝え、学生が思う存分研究に打ち込める環境づくりや指導をしていきたい。

4 おわりに

本稿では、筆者の研究活動や教育活動について紹介させて頂いた。こうして自身の研究をレビューして見ると、いかに諸先輩方の研究に依拠しているかを改めて痛感する。同時に、論文等をよくよく読み込んでみると、納得できない点も見えてくる。私自身の研究成果は決して多いわけでもなく、内容も重箱の隅をつつくようなマニアックな現象を対象にしていると感じられたと思う。私自身も細かなところに入り込み過ぎていると感じることもある。しかしながら、例え小さな事柄であっても、納得のいかないこと、足りないと思うことがあれば丁寧に調べ上げ、諸先輩方の研究をしっかりとレ

ビューした上で、その上に少しでも新しい知見を積み上げていきたいと思う。また、それに誤りがあれば積み上げたものをどかして厳しく指摘していただきたい。

「愚直一徹」は、卒業時に谷口先生から贈られた言葉で、それ以来、私の座右の銘となっている。この信念を胸に、真摯に研究に取り組むとともに優れた人材(学生)を送り出し、微力ながらも鉄鋼業の発展に貢献したいと考えております。この場を借りてこれまでお世話になった皆様に深く感謝申し上げますとともに、今後ともご指導とご鞭撻を賜りたくよろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 新井宏忠, 中村修也, 岡山敦, 松本克才, 谷口尚司: 鉄と鋼, 92 (2006), 584.
- 2) H. Arai, K. Matsumoto, S. Shimasaki and S. Taniguchi : ISIJ Int., 49 (2009), 965.
- 3) M. Smoluchowski : Z. Phys. Chem., 92 (1917), 129.
- 4) T. Nakaoka, S. Taniguchi, K. Matsumoto and S. T. Johansen : ISIJ Int., 41 (2001), 1103.
- 5) 淵上勝弘, 若生昌光, 今村尚近, 遠藤公一, 清瀬明人, 沢田郁夫: 鉄と鋼, 85 (1999), 368.
- 6) 新井宏忠, 中村悠季, 嶋崎真一, 谷口尚司: 鉄と鋼, 101 (2015), 129.
- 7) 新井宏忠, 中村悠季, 嶋崎真一, 谷口尚司: 鉄と鋼, 101 (2015), 139.
- 8) 新井宏忠, 松本克才, 杉谷崇, 太田裕己: CAMP-ISIJ, 33 (2020), 116, CD-ROM.
- 9) H. Arai, K. Matsumoto, S. Shimasaki and S. Taniguchi : ISIJ Int., 49 (2009), 965.
- 10) K. Higashitani, R. Ogawa, G. Hosokawa and Y. Matsuno : J. Chem. Eng. Jpn., 15 (1982), 299.
- 11) H. Arai, T. Sugitani, H. Ota and S. Kimura : ISIJ Int., 64 (2024), 550.
- 12) 新井宏忠, 佐々木風樺, 松本克才: CAMP-ISIJ, 36 (2023), 481, CD-ROM.
- 13) P.G. Saffman and J.S. Turner : J. Fluid Mech., 1 (1956), 16.
- 14) S. Taniguchi, Y. Okada, A. Sakai and A. Kikuchi : Proc. 6th Int. Iron & Steel Congress, ISIJ, Tokyo, (1990), 394.
- 15) 新井宏忠, 松本克才: 鉄と鋼, 106 (2020), 727.
- 16) 佐藤春陽, 新井宏忠, 松本克才: CAMP-ISIJ, 36 (2023), 480, CD-ROM.

(2024年3月4日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

北海道大学 大学院工学研究院 材料科学部門 教授

岩井 一彦

介 在物は永遠の課題と言われています。この大きな課題に主として介在物の動的挙動の観点から研究に取り組んでみえる先生へのエールコメントを述べさせていただきます。

鉄鋼関連の研究者が減少傾向にある昨今、介在物挙動の解明に関する研究を推進している先生は、今後の鉄鋼が発展していくために必要な人材です。先生は民間会社での研究経歴があることが強みであり、ただ単に自分の興味のあることを研究するのではなく、産業界で解決すべき問題点、将来問題となりうることを理解したうえで研究テーマ設定できる方だと理解しています。液相中に固相が分散している混相における現象に関する深い洞察力と、移動現象論を基盤とした理論的知識、固液混相の実験技術、解析技術をお持ちなので、現在取り組んでおられる研究を今まで以上に深化させていただくことで、将来の成果である「物理現象の無次元相関式での整理」が学術、産業の両者に大きく寄与するものと期待しています。

研究の幅を広げることもよいかと思います。私的なことで恐縮ですが、小職は日本磁気科学会の会員です。金属分野に限らず、化学、生物系等で磁場を利用している

研究者が集っており、そこでは刺激的な議論がよくなされます。例えば、金属とは異なり、高分子材料はその状態によって融点が変わることをこの学会で初めて知って驚いた記憶があります。新たな刺激が斬新なアイデアを惹起して研究の間口を広げるばかりではなく、今まで見えてこなかったものが見えてくるはずで、それが将来のご活躍に繋がるものと思います。

先生の「教育への思い」を読ませていただき、自発的に行動、思考することを重視する姿勢に共感しました。日本を支える基幹産業である鉄鋼業は、このような人材を必要としています。講義や研究を通して、学生に鉄鋼への興味を抱かせていただき、産官学のいずれかで鉄鋼を支える人材を育成していただきたいと思います。先生の薫陶を受けた学生が鉄鋼分野で活躍されることは、将来の先生にとっても大きな財産になるはずです。

最後になりましたが、守破離という言葉があります。基本に忠実であることはもちろん重要ですが、恩師であり先生が尊敬されている谷口先生とは異なった切り口で研究を進めることで、移動現象論の新たな分野を切り開いていただけることを期待しています。

日本製鉄(株) 技術開発本部 プロセス研究所 製鋼研究部 上席主幹研究員

塚口 友一

新 井先生と初めてお会いしたのは、共同研究のお願いに東北大を訪ねた20年近くも前のことです。当時研究開発に取り組んでいた介在物除去プロセスの効率を定量的に見積もろうとした際に、当時の私の専門知識では手に余る課題だと悟り、谷口研究室の門を叩いた次第です。新井先生は当時、後期博士課程の学生さんで、博士論文の準備に忙しい時期であったにも関わらず、助教の先生と一緒に、時にとんでもなく根気のいる作業をこなしながら、実験や解析に取り組んで下さいました。

私もこの機会に勉強させて頂こうと、時には泊りがけで何度も実験に立ち合い、谷口先生との議論に同席しました。その時に感じたのは、新井先生の腰の据わった研究態度です。谷口先生のご指摘は、時に厳しくかつ本質的なものでした。それに正面から向き合い、わからないことは基本に立ち帰って調べ、論理の破綻がないよう慎重に検討を進める姿勢には、普通の学生さんには見られない芯の太さがありました。また普段の新井先生は柔和で、お茶目な一面もあり、研究に向き合う真剣さとの落差が魅力です。

高専に移られてからの新井先生は、教師として時に厳

しさを示しながらも、多くの学生さんに慕われている様子が伺えます。人としてぶれない安定感と人当たりの良さが、信頼を呼ぶのだと思います。鉄鋼協会講演大会のポスターセッションなどで接する学生さんは皆さん生き生きとされています。日々悩みながらも、きっと丁度良いバランスで指導されているのでしょう。

このような新井先生からは、企業の先輩という立場ではあるのですが、逆に学ぶことが多くあります。技術的に細かなところへ入り込み過ぎることを気にすることはありません。それは、分野の第一人者として、しっかりとした基盤の上に理論を積み上げる上で、とても重要なことです。

新井先生の真摯な研究姿勢は、地味ではあっても重要な基盤的研究成果へと結び付き、当該分野に関わる研究者・技術者に貴重な指針を与え続けるものと信じます。また、新井先生の指導を受けた学生さんは、それぞれの就職先や進学先で存在感を発揮することでしょう。これからもそのご活躍を見守っていきたいと思います。愚直一徹に幸あれ！