



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-23

先達はあらまほし

Person with Experience is Helpful

谷口尚司

Shoji Taniguchi

東北大学
名誉教授



1 はじめに

筆者は1968年に東北大学工学部金属系に入学以来、右の足を金属（鉄鋼精錬）分野に置き、左の足は他の分野に置いて、いくつかの研究に取り組んできた。この経験は様々な角度から金属分野を見ることを助け、研究の面白さを増してくれたように思う。2014年3月に37年間の研究生活を終え改めて振り返ると、金属精錬の研究は物理化学を中心に据えながら、その展開とともに化学工学・反応工学・界面科学・流体力学・電磁気学・シミュレーション工学といった基礎工学を次々に取り込んでいく展開型の分野であると気付く。それぞれの基礎工学はとても深く広く、すべての内容を修得することは極めて難しい。そこで必要な部分を選び出して学び摂ることになるが、それすら初学者の身では簡単なことではない。また適用先が高温の精錬条件である特殊性も忘れてはならない。このようなときに進むべき道を示してくれるのが「先達」である。筆者は先達に手を引いてもらいながら、いくつかの基礎工学の門をくぐることができた。本稿ではそのエピソードとともに、私が経験した基礎工学の適用例を紹介したい。若手研究者・技術者である皆さんは、まず自分が学んだ大学に専門の先生を探し、卒業生の特権を駆使して相談に行くといふ。その訪問は一度で終えず、先方の印象に刻み込まれるまで、繰り返し会いに行くこと。現役のときの私の経験では、若手がわざわざ自分を目指して来てくれるのは、とても嬉しいことであった。

2 化学工学

筆者が1971年に卒業研究のために配属されたのは「冶金熱工学講座」という出来立ての研究室だった。当時、原子力製鉄に注目が集まり、実験室レベルで平衡論的データを採取する研究が中心であった金属系学科は、平衡状態とともに物

理的・化学的速度過程の情報に基づいて装置設計を行う化学工学を取り込む必要があった。私の研究室の担当教授は応用化学科・前田四郎先生だった。筆者が与えられた卒論課題は「溶鉄の脱炭速度」であった。当時の脱炭速度測定法は、るつぽ内で高周波溶解した溶鉄の上部から、ノズルを通して酸化性ガスを液面に吹き付けながら、適当な時間間隔で少量の溶鉄を採取し、その炭素濃度変化から脱炭速度を求めるものだった。この研究は過去に多く行われており^{1,2)}、脱炭速度がガス流量に依存し、炭素濃度が高いところでは速度が炭素濃度に依存しない（時間で速度が変わらない）ことまでは分かっていた。しかしながら脱炭速度が測定者毎に異なることを説明できないでいた。筆者は直接の指導者である菊池淳先生の指示で、鑄造したナフタリン円板にノズルから窒素ガスを吹き付けて、その質量変化から昇華速度を求める実験を行った。たまたま研究室に立ち寄られた鉄冶金学の先生からは「1600℃で進む脱炭反応が室温のナフタリン昇華とどう関係するのだ、お前は何をやっているのか」と厳しい指摘を受けて、大いにうろたえた。しかし、修士課程でもこの研究を継続し、最終的にガス側の物質移動係数と、ガスの物性（密度、粘度、拡散係数）、流動条件、装置条件との関係を表す無次元相関式³⁾によって、既往の脱炭速度のデータを表すことができた⁴⁾。要は、物質移動過程への温度の影響は、物性値への温度の影響で記述されるということであった。ここに至って化学工学の手法の奥義を悟り、その素晴らしさに大いに感動したものである。この研究の先達は前田先生と菊池先生であった。Fig.1に筆者らの実験式を図示した。

3 電磁気学と流体力学

溶鉄の脱炭反応などの速度論的研究には、高周波誘導炉がよく使われる。これは高融点の鉄が短時間で加熱・溶解できること、溶鉄が均一に攪拌・混合できることによる。しかし

その攪拌の程度は、用いる炉の条件（周波数、電流、誘導コイルの幾何学系）やつぼ中の溶鉄寸法などで異なり、それがガス・金属間の物質移動速度に影響する。ガス-溶鉄間反応速度を解明するためには、溶鉄の電磁攪拌とそれによる液側物質移動速度の変化を、どうしても知らなければならなかった。既往の論文を調べると、ドイツ語やロシア語の論文に混じって、カナダ・トロント大学のLaversの論文⁵⁾が見つかった。そのコピーを何とか入手したものの、その論文は200頁を優に超えるボリュームで、しかも筆者の苦手とする電磁気学の理論が英語で記載されている。気が遠くなったが、夏休みに郷里にこれを持ち帰り、大汗をかきながら読み終えた。この時の苦しい勉強が、後に材料電磁プロセスの研究に大層役に立った。Laversは解析的な手法に巧みな仮定を施して、誘導炉内の溶鉄に作用する電磁力を求め、それを粘性流れのストークスの式に適用して流動計算を行っていた。計算条件は慣性が無視できる極めて小さなコイル電流の条件に限られていたため、計算結果自体に現実性はなかった。そこで筆者は慣性を含むナビエ・ストークスの式にLaversの電磁力を適用することにした。流体力学は、当時東北大学高速力学研究所の伊藤英覚先生が開講していた大学院の講義で、その雰囲気を経験した。先生はShlichtingのBoundary-Layer Theory⁶⁾を教材にしていたので、その海賊本を購入して懸命に勉強した。お蔭で新しい学問に対する免疫は出来たように思ったが、それだけでは電磁攪拌下の流れの問題を解く力ではつかなかった。それに必要な、微分方程式を差分化して数値的に解く手法は、化学工学科の只木楨力先生に教わった。当時の大型計算機は、プログラムの1行分を機械で1枚のカードに穿孔し、それを束ねて計算機に読み取らせる方式で、計算の順番が自分に回るまで数日を要した。カードの打ち間違い、プログラムのバグ、実行時エラーを全部潰して、ようやく答えが出て、用紙にプリントされ

た数値の羅列から溶鉄のフローパターンを図に仕上げるまでには、長くて単調な作業が必要だった。こうして手にした誘導炉内の攪拌⁷⁾と物質移動⁸⁾の計算結果は、実際に求めた溶鉄の脱炭および窒素吸収速度を定量的に説明できるものだった。この成果は菊池先生、只木先生、前田先生との連名で1982年のIUTAMの国際会議⁸⁾で発表することができた。これが名古屋大学の浅井滋生先生の目に止まり、先生が始めた電磁冶金の研究に筆者も加えていただくことになった。それ以後、浅井先生の導きによって、電磁気学が関係する様々な精錬・ castingプロセスの研究（材料電磁プロセス：EPM）に携わるようになった。電磁気学の先達はトロント大学のJ.D.Lavers先生、また、流体力学の先達は伊藤英覚先生と只木楨力先生であった。Fig.2に溶鉄のフローパターンと窒素吸収における溶質濃度分布の数値計算例⁸⁾を示した。

4 界面科学

誘導炉を使った精錬関係の研究は、様々な冶金現象を対象にして大きな広がりを見せていた。中でも溶鉄の脱酸反応については古くから基礎研究が行われ、その後の介在物の生成・分離機構の研究や超清浄鋼の製造技術の基礎にもつながって行った。「介在物は精錬屋の永遠のテーマだ」と鉄冶金の先生に言われ、せっかく誘導炉の流動解析ができたのだから、その応用として脱酸反応、ひいては流れ場の粒子凝集についても研究してみたいと思い立った。当時、読みあさった脱酸の速度論的研究の中でLindborgとTursellの研究⁹⁾が目止まった。脱酸過程が脱酸生成物の凝集を考慮して解析されており、その中心となる理論としてSaffmanとTurnerの乱流

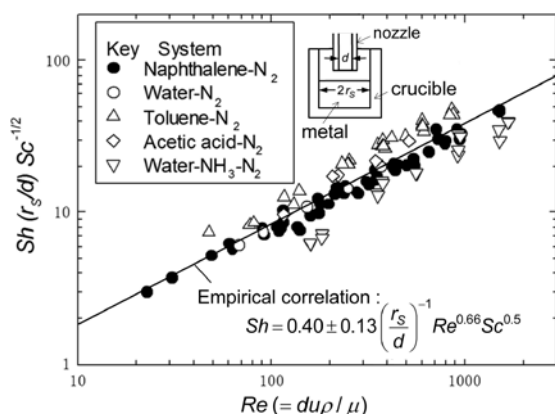


Fig.1 Experimental results of mass transfer coefficients correlated with various factors like nozzle diameter : d , radius of crucible : r_s , gas velocity : u , property values of gas : ρ , μ , D .

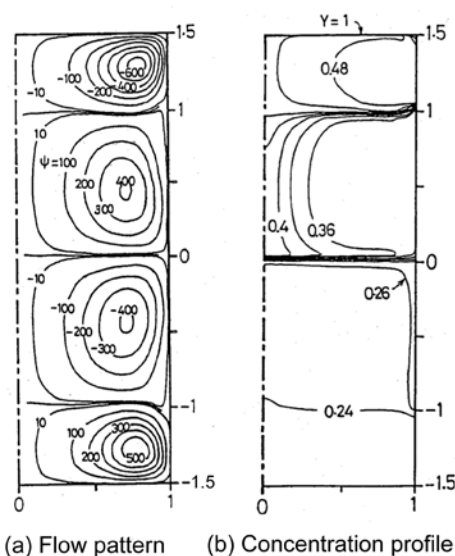


Fig.2 Computed results of fluid flow and mass transfer for induction melting⁸⁾.

衝突理論¹⁰⁾が使われていたのだ。調べてみると、この理論はNakanishiとSzekely¹¹⁾がアルミ脱酸の解析にも適用しており、理論をそのまま適用すると実測よりも脱酸速度が速すぎるので、1より小さな係数を乗じる必要があると記されていた。さて、この補正係数とはなんだろう。Saffmanらの理論は雲の中の微小な水滴が乱流渦内で衝突肥大化する過程を扱っており、1対の液滴が乱流渦（粒子サイズから見れば層流せん断流れ）に乗り、速い流れに乗った液滴が遅い流れに乗った粒子に追い付いて衝突する現象が基本になっている。しかしこれは空気の中の話で、液の中では事情は異なる。粒子同士が近づいて接触する時には、粒子間の液が粒子間隙から押し出されなくてはならず、間隙が小さくなるほど、液を押し出すのに大きな力が必要になる。流れ場の粒子運動に関する研究¹²⁾を調べると、基本的な粒子間引力はLondon-van der Waals力であり、その力を無視すると、粒子同士はどんなに近づいても接触できないと書いてある。この力について勉強しないと先に進めないことを悟った。そこでコロイドの安定性に関する理論の独学を始めたが、未経験の理屈が多くて歯が立たない。ある先生にその話をすると、それならと言って、当時選鉱製錬研究所（現、多元物質科学研究所）の臼井進之助先生に紹介してくれた。先生は浮遊選鉱学の第一人者で、界面科学に精通しておられた。緊張しながら臼井先生の教授室のドアをたたくと、笑顔で迎え入れて下さった。すでに私の望みは伝えられていたらしく、先生はコピー用紙の裏側にメモを書きながらコロイド粒子の凝集に関する理論の成り立ちを、大元から分かりやすく説明して下さい。特に印象に残ったのは、中性粒子間に働くLondon-van der Waals力に関するHamakerの理屈だった。分子を構成する原子核の周りには電子が回っており、2つの分子が遠くにいとそれぞれ勝手に回っているの、分子間に力は働かない。ところが2つが近づくと、電子の運動がシンクロを始めてクーロン力が働くようになる。この力を2つの巨視的物体の間の全ての分

子対について積算して引力を求めるのだ。裏紙に描かれた絵と先生のジェスチャーで、London-van der Waals力の本質が抵抗なく頭に入った。そして、この力は溶鉄中の介在物粒子間にも働くはずであり、また原子核の周りを回る電子運動には、温度の影響は小さいので、常温のデータでも推算に使えるはずであると言われた。先生は筆者との議論によって、ご自分が水溶液の場で研究してきた理論が1600℃の溶鋼にも使えるかもしれない可能性に気付かれ、その日の「にわか弟子」とともに大いに興奮された。これを機に、筆者はコロイド凝集関係の論文を読みこなせるようになり、いくつかの参考論文の中からHigashitaniらの研究¹³⁾に出会った。その研究では水中のポリスチレン粒子の凝集速度を攪拌槽内で測定し、前述の粒子間引力を表すHamaker定数と粘性による反発力とを含む凝集係数（通常は1よりも小さい）をSaffman-Turnerの凝集速度に乘じることで、凝集速度を精確に表すことに成功していた。筆者もこれに倣って、水モデルによる凝集実験から高温の熔融金属中の凝集係数を求める手続きを提案し、熔融Al中SiC粒子の乱流凝集速度の理論的再現に成功した¹⁴⁾。その後、凝集粒子の再分散も考慮したモデル¹⁵⁾や、凝集粒子の顕微鏡下での二次元像から三次元の粒子径や構成粒子数を求める統計的手法¹⁶⁾を開発した。これはAl中の凝集粒子の3次元X線マイクロCTによる観察を通して、二次元像と三次元像の相互関連を導くもので、熔融金属中のクラスター粒子の数とサイズを金属試料の断面観察結果から高精度で解析できるようになった。さて、この研究分野における最初の先達は、間違いなく臼井先生だった。異分野の扉を開けて下さるとともに、その謙虚なお姿で研究者としての私の心も磨いて下さったように思う。Fig.3に機械攪拌された熔融Al中で凝集したSiCクラスター粒子の二次元および三次元X線透過像を示した。

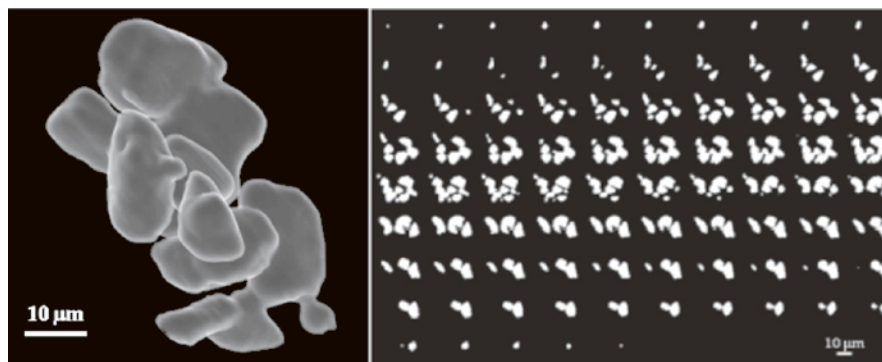


Fig.3 Three-dimensional image of SiC cluster coagulated in agitated molten aluminum compared with its two-dimensional images, both of which are obtained by X-ray micro CT¹⁶⁾.

5 環境科学

最後に環境科学について触れておきたい。2000年頃、工学部の新入生に工学に関わる様々な課題を自主的に考えさせる科目である「工学概論演習」を担当した。この科目は、教員がテーマを掲げて様々な学科の学生を募集するもので、テーマ設定はその教員の趣味で決めることになっていた。筆者は「材料と環境」というテーマで10名程度の学生たちを集めた。まずは、学生たちに環境問題について調べさせ、それをパワーポイントで発表させることにした。その時に大層驚かされたのは、学生たちの環境に対する強い危機意識だった。資源枯渇問題、エネルギー問題、地球温暖化問題、環境と経済のトレードオフ問題等々、筆者も知らないことを短い調査期間に調べ上げ、たどたどしいが一生懸命に発表した。恥ずかしながら筆者自身にはそれほど切迫感はなかったが、これを機に自分でも環境問題について調べ始めた。その結果、様々な異論はあるものの、環境、社会、経済がそろって危ない状況に入っているらしいことを知った。それが2003年に筆者が環境科学研究科へ移籍するきっかけとなった。設置された環境科学研究科には、経済学が専門の佐竹正夫先生が所属していたので、疑問に感じていた市場原理主義やグローバリゼーションについて、先生に会うたびに議論を吹っ掛けた。佐竹先生は、機嫌を損ねることなく筆者との議論に応じてくれ、理解を深めるためのテキストを貸してくれたりした。その甲斐なく、筆者は経済学の方性に対するナイーブな疑いを、ますます深めることになったが、先生のお蔭で経済学の門をくぐらせてもらったことを感謝している。

最後に、私と同時期に東北大学を退職された安田喜憲先生の卒業生へのはなむけの言葉をここに引用したい。「君たちは環境科学研究科で、右手にテクノロジー、左手に哲学を持つ人間に育ったのだ」。これこそ私が環境科学研究科で皆と目指してきた目標を一言で表した言葉だった。

6 おわりに

以上、私の研究歴を振り返りながら、その時々で出会うことができた先達たちについてお話しさせていただいた。定年近い教授の先生から新入生まで、さまざまな人たちが先達になってくれたことが思い出される。

若い研究者・技術者の方と話をすると、異分野の理論に疎

かったり、理論を十分消化せずに使ったりしていることに気付くことがある。専門化が進んだ日本の科学技術界では、自らの専門分野の外に眼を向ける機会を作ることは難しい。今悩んでいる事象は、すぐ隣の分野ではどうの昔に理論化されているかも知れない。多忙な毎日でも、色々な分野に眼を向けて、有望な情報が見つければ、その分野の先達を見つけることが、課題の早期解決と自分の能力の開発に役立つに違いない。また、時には科学技術の世界から抜け出して、科学と技術の社会的な意義についても考えてみようではないか。

参考文献

- 1) 野村宏之, 森一美 : 鉄と鋼, 57 (1971) , 1468.
- 2) J.H.Swisher and E.T.Turkdogan : Trans.Metall.Soc. AIME, 239 (1967) , 602.
- 3) 谷口尚司, 菊池淳, 前田四郎 : 鉄と鋼, 62 (1976) , 191.
- 4) 別所永康, 谷口尚司, 菊池淳 : 日本金属学会誌, 55 (1991) , 860.
- 5) J.D.Laver : Diss.Thesis, Univ-Toronto, (1970)
- 6) H.Shriching : Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, (1979)
- 7) 谷口尚司, 菊池淳 : 鉄と鋼, 70 (1984) , 846.
- 8) A.Kikuchi, S.Taniguchi, T.Tadaki and S.Maeda : Metallurgical Application of Magnetohydrodynamics, IUTAM Symp., Cambridge, UK, (1982) , 79.
- 9) U.Lindborg and K.Turrsell : Trans.Metall.Soc.AIME, 242 (1968) , 94.
- 10) P.G.Saffman and J.S.Turner : J.Fluid Mec., 1 (1956) , 16.
- 11) K.Nakanishi and J.Szekely : Trans.Iron Steel Inst.Jpn., 15 (1975) , 522.
- 12) C.J.Lin, K.J.Lee and N.F.Suther : J.Fluid Mec., 43 (1970) , 35.
- 13) K.Higashitani, R.Ogawa, G.Hosokawa and Y.Matsuno : J.Chem.Eng.Jpn., 15 (1982) , 299.
- 14) 中岡威博 : 東北大学博士論文, (2003)
- 15) T.Nakaoka and S.Taniguchi : Progress in Computational Fluid Dynamics, 8 (2008) , 270.
- 16) T.Li, S.Shimasaki, S.Taniguchi, K.Uesugi and S.Narita : ISIJ Int., 53 (2013) , 1958.

(2014年10月30日受付)