



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-21

私の発想法

Way of My Thinking

永田和宏

Kazuhiro Nagata

東京工業大学
東京芸術大学

名誉教授
元教授



1 はじめに

大学と研究所での教員生活を3月末に終え、38年間の教育と研究生活を振り返った。学生時代、研究室で交わした諸先輩方や同僚との討論、徹夜で行った実験、助教授の後藤和弘先生に提出した論文が手直しされ自分の文言が全て赤線で消されていた悔しさ、そして自分の最初の科学論文が米国の科学雑誌に掲載された時の高揚感私の研究者としての基礎を築いてくれた。博士号取得後、ベネズエラ国立科学研究所主任研究員として赴任し、外国人研究者との交流を通じて欧米の科学者の考え方に触れた。東京工業大学金属工学科鉄冶金学講座の助手時代に英国、ドイツ、フランス、スイスの大学や研究所を1ヶ月近くかけて訪問し、講演をさせて頂いた。その後、彼ら研究者との共同研究や討論を通じて私の研究に大きな影響を与えた。米国マサチューセッツ工科大学1年間の留学では、John F. Elliott先生の研究者と教育者としての情熱に大いに感化された。東京工業大学では多くの学生と講究(ゼミ)で緊張感のある討論を行い、研究室では学生一人一人と研究の本質、何が新しい知見かを追求した。一方で、研究室の懇親会では、学生と大いに酒を酌み交わして親交を深め、個々の学生の抱えている思いや心の問題の相談に真摯に向き合った。考古学分野である「たたら製鉄」に鉄冶金学の立場から関わって行ったとき、多くの学生達や一般市民の方々の関心と協力が得られ、日本鉄鋼協会の現在「鉄の技術と歴史フォーラム」の設立に参加し、また「NPOものづくり教育たたら」を設立した。さらに日本鉄鋼協会では「失敗プロセス研究会」(現歴史を変える転換技術研究フォーラム)を立ち上げ、技術の変遷の本質を研究してきた。たたら製鉄の特徴を生かした粉鉄鉱石製錬法の「マイクロ波製鉄」は、現在、インドの会社とコンソーシアム設立に向けて準備が進められている。

この4年半は、東京芸術大学文化財保存学専攻で伝統技術

の保存と復元の研究を行った。多くの芸術家との交流の中で、成果を作品という形で表す魅力に憑かれた。研究を論文という方法で表すのとは違った面白さと分かり易さがある。ファラデーが1846年に行った講演「ロウソクの科学」は、子供たちや一般の人達を前に実験を行いながら燃焼の原理からロウソクを構成する成分元素の解析を行った珠玉の講演である。3月に行った退任展「和鉄 たたらと鍛冶」は、私の長年の鉄冶金の研究成果、たたら製鉄と現代製鉄で造った銑鉄や鋼の違いを、パネルやたたら炉、鋤塊、日本刀など実物の陳列で表したもので幸いにも好評を得ることができた。

私は、研究を行う上で常に「何が新しいか」を考えながら行ってきた。そして、常にこの発想を継続するための訓練を行ってきた。その結果得られたのは「継続は力」である。私の経験が少しでも若い方々に役に立てれば幸いである。

2 新しい場所で面白いものを見つける

東京工業大学から工学博士を授与された後、国内に就職口が見つからず、たった一つ返事が来たベネズエラ国立科学研究所(Instituto Venezolano de Investigaciones Cientificas)の主任研究員として昭和51年6月妻子を連れて赴任した。この国がスペイン語圏であり、学卒の助手は英語が話せないため、語学学校に通い3ヶ月で会話ができる程度になった。工学部長はPedro Bolsaitis先生で、米国メリーランド大学の教授から来られていた。研究所は海拔800mにあるカラカスからさらに1000m程高地のアンデス山中の国立公園内にあり、軍隊が警備していた。ここでは多くの研究者が欧米から来ており、有利な採用条件で常に働き場所を変えていた。骨を埋める覚悟で来た私は、生き方をもっと気軽に考えることができるようになり、世界どこでも研究が出来るようになるようになった。ここで出会った燃焼工学が専門のCharles A. Garris博士(現ジョージワシントン大学名誉教授)とは現在でも家

族ぐるみの付き合いをさせて頂いている。

赴任して与えられた仕事はラテライト鉱石の製錬方法の研究であった。学位論文の研究は溶融スラグ中のイオンの拡散に関する実験とそれを非平衡熱力学で解析するという内容である。高炉と転炉法による製鉄技術は教科書で勉強した程度で実物を見たこともなかった。オリノコ川南側のアマゾン地区に車で入り、現地の人たちの協力を得てラテライト鉱石を採取した。成分を調べてみるとヘマタイトとアルミナが半々で酸化チタンが多い地層では15~20%あることが分かった。酸化鉄を除くとポーキサイトとほぼ同じ原料として使える。アルコア社は全ての元素を炭材と塩素ガスで塩化物にして塩化チタンと塩化シリコンなどを分溜し、分離できない塩化鉄と塩化アルミニウムを高温高压で溶融塩電解してアルミニウム製錬する方法の特許化していた。アルコア法は炉体の耐火物に耐久性がなく実用化しなかった。

私は、酸素分圧を制御することにより金属酸化物や硫化物を選択的に塩化物にできることを熱力学的に確認した。そこで、最初に酸化鉄をCO-SO₂混合ガスで700℃で硫化鉄に変換し、それに塩素ガスを400℃で反応させると、硫化鉄だけが塩化鉄としてガス化して分離できる。反応容器は流動層を用いた。ガラス管を研究所内で調達し、街に出てアングル用鋼材を購入した。パーナーでガラス管を溶接し装置を全て私が作ると、ベネズエラ人の助手や大学院学生が、不思議そうに私の作業を見て、技術をどこで覚えたのかと聞いた。欧米では博士がガラス細工を行うなど考えられないことである。この研究は、未利用のラテライト鉱石を使えるようにする技術開発であり、博士課程で行ってきた基礎物性に関する研究とは異質であった。しかし、熱力学を駆使するところは同じである。

ラテライト鉱石という未利用の原料と硫化・塩化精錬法という非鉄分野の新しい領域の特許申請と投稿論文¹⁾にして帰国し、昭和53年10月に東京工業大学技官に採用された。帰国してエネルギー関連材料の研究として溶融スラグの熱伝導を非等温非平衡熱力学の観点から研究した²⁾。一方で、後藤先生のライフワークであった酸素濃淡電池の冶金学的応用の一環で、川鉄(現JFE)千葉製鉄所でQ-BOP底吹転炉中の溶鋼とスラグ中の酸素ポテンシャルを測定する研究を命じられた。この研究は、博士課程修了後研究生をしていた時、川上正博先生(現豊橋技術科学大学名誉教授)とNKKの川崎工場LD転炉を用いて研究を行っていた。転炉建屋の上の階で、会社の方の協力を得てガスマスクをつけて測定を行った。この研究で、スラグ中の酸素ポテンシャルがメタルより1桁高く、攪拌が大きくなるとこの差が小さくなるばかりでなく全体の酸素ポテンシャルが下がるということが分かった³⁾。この研究の後、高炉の出鉄口前で実験する機会があり、通算3年近く

製鉄現場で研究を行った。高炉の研究では、炉下部における不純物の反応の大きさを化学親和力を用いて解析した⁴⁾。製鉄会社の装置を用いた研究では、博士課程修了後、川上先生とNKKの研究所でESR装置を用いてスラグプール内の温度と電位分布を測定した⁵⁾。この研究で、俵論文賞を頂いた。

製鉄会社での研究は、製鉄と製鋼の中間製品を造る工程の中で、高温と亜硫酸ガスの匂いや時折起る出鉄口からの溶鉄の飛散などから身を守るための方法を、危険予知運動で現場の人と一緒に学んだ。これにより、どのようにして鉄や鋼を作るかを製鉄現場で学ぶことができた。また、複雑な現象から興味深い現象を数多く観察し、その後の研究に活かすことができた。

未経験の分野に入り込むことは苦勞も多く、すぐには投稿論文など結果は出ない。しかし、新しい分野を自分の領域にすることができる。私は、21名の博士課程の学生と4名の論文博士を教育し学位を出してきたが、彼らを送る言葉は、「博士課程と同じ研究をするな、全く別の研究をせよ」である。その結果、その後彼らとは分野が違うことが多く、学会で同席することは稀である。複数の分野を経験し自家菜籠中の物にすることは新しい研究を遂行する上で強力な武器となる。

3 学会発表と質問

新しい研究課題をどのように作るか。後藤先生は、学会の講演大会で自分で話されることも多く質問も良くされていた。その影響で、弟子の雀部実先生(現千葉工業大学名誉教授)と川上先生の後に私もついて周り、講演大会で良く質問をした。講演大会で初めて聞く研究に質問をするためには、10分程度の限られた時間内に発表者の研究内容を理解する必要がある。そして、自分の論理と突き合わせて発表者の論理の矛盾や問題点を指摘し、さらに研究を発展させる提案をする。これは、思考の整理の訓練である。特に自分の持っている学問の基盤を常に意識し、明確にすることができる。また、的を得た質問であれば他の質問者がそれを引き継ぎ討論が盛り上がり、司会者もやり易くなる。

国際会議では欧米の若手研究者らは頻りに質問をする。質問をすることが研究者の存在証明のようである。残念ではあるが、我が国の学会の討論は低調と言わざるを得ない。外国の研究者は、日本人は恥ずかしがり屋だと言うが、そうではなく、小学校から大学に至るまで互いに意見を交わし討論する慣習がなく、質問や討論に慣れていないためである。最近ではメールで意見交換をすることが多く、顔を突き合わせて相手の微妙な表情の変化を含め、燃えるような議論は行われなくなっている。そこで、私は、修士課程や博士課程の学生に講演大会参加の経済的援助する見返りに、聴講した発表

には必ず質問をして、その内容を後日報告するよう義務付けた。質問をすることは気後れがする。学生には、最前列で司会の前に座り、発表が終わったら真っ先に挙手し、指名されたら名前と所属をはっきりと言いなさい、質問は何でも良い、と教えている。質問に慣れてくれば内容も良くなる。名前を覚えてもらうことも学生の将来にとって重要なことである。

私は東京芸術大学を退職するまで、春と秋にある日本金属学会と日本鉄鋼協会あるいは日本学術振興会第19と54委員会、国際会議で必ず少なくとも年に2件のオリジナルの研究を自分で発表することを義務付けていた。これは非常に厳しい作業である。講演大会が終わると次の大会で話すネタを考えねばならない。今までの研究結果を整理して考察し、従来の結果との違いを見つけ、この現象はなぜ起こるのかを考える習慣を作ってきた。このために、熱力学、非平衡熱力学、流体力学、電磁気学、量子力学などの教科書は手放せなかった。そして、研究論文に仕上げた。

研究論文は、研究計画の段階で既にその論文内容の範囲を想定しておくことが重要である。研究を進めると次から次へと新しい課題が見えてくる。その課題に次々と手をつけるとデータは溜まる一方で、論文は書けない。研究は範囲を限定することが重要である。仮説(序文)、実験結果、論証(考察)、結論という科学論文の構成で、何が新しく分かったかを明確にする必要がある。そのためには、科学論文はやはり英語で書く方が良い。日本語は「と考えられる。」などと言う曖昧な表現が多いが、英語は厳密な論理展開する言葉として優れている。もちろん日本語も「である。」という表現で厳密な論理を展開することはできる。結果と考察を一緒にしている論文を見かけるが、結果の羅列の場合が多く、論証になっていない。

4 体験と観察

助手の頃までは学生と一緒に実験を行うことが多かった。しかし助教授になってからは学生の実験に手を出すことを止めた。もちろん時間があるときは実験室を見て回り学生に研究の進捗状況を尋ねた。学生には研究の問題点を指摘し、その原因と解決方法を一緒に考えた。講究や研究室での討論は厳しく行った。しかし、実験を自分で行ない、研究を体験しないと新しいアイデアはなかなか生まれない。講究は私にとってバーチャルではあるが学生の実験を再現できる場であった。そして、実験室を見て回り装置を前に学生と話し合った。だが、この方法ではやはり実験の感覚が鈍る。幸いなことに、小型たたら炉を開発し製鉄を子供たちに教えることで実験の感覚を維持することができた。

昭和54年に学生と岐阜県関市の刀匠孫六氏を訪問し、簡

単な鍛冶炉で砂鉄から鉤塊が出来るのを目の当たりにし非常に驚いた。直ぐに大学で学生と実験を行なったが4年たっても失敗続きであった。再度、関市を訪問し、刀匠大野兼正氏の実験たたらを見学させていただいた。ノロ(スラグ)を造ることが重要であることを知り、それ以来小型たたら炉での操業に失敗したことは無い。砂鉄から最も簡単な鋼や銑鉄の作り方をテーマに工夫を加え、「永田式たたら炉」を考案した。これは20kgの砂鉄から6~7時間で5kg程度の鉤を作ることができるので、小中高校での実施を多く依頼された。平成19年には「特定非営利活動法人ものづくり教育たたら」を設立し、指導者を養成している。そして、学校で子供達とたたら操業を行い、なぜ砂鉄から鋼ができるのか、炉の中はどのような状態になっているのか、子供たちに体験させ、五感を働かせる理科教育を行っている。この時重要なことは観察である。羽口に設置した覗き窓から炉内で鉄が炭素を吸収して丸くなる様子や、炉下部から流出するノロの流れ方や色、割った時の断面の変化などの状態変化、ノロの中に時折含まれる粒鉄、炉から立ち上る炎の色の変化など観察で製鉄工程を学ぶことができる。

実験の記録は重要である。学生にはA4版の実験ノートを支給し、日にち、天気、気温から始まり、実験の経過を時系列で書くように指導した。電気炉のスイッチを入れた時間、一定間隔で温度を記録する、測定系の電圧、実験装置や実験前後の試料のスケッチ等を書き込む。グラフ用紙を常に用意し、その場でプロットすると実験の状況が直ぐに把握できる。これは私が学生から今まで行っている記録の仕方である。しかし、現在はパーソナル・コンピューターなど便利な機器が溢れており、学生はデータを電子媒体で保存している。講究での研究発表では電子媒体から直接きれいな図面を作ってくる。図面には全ての実験点が入っているだけで線が無い。私が線を入れるように言うと、最小自乗法でその場に入れる。しかし、データ点一つずつを吟味してないので、飛び離れた点も全て含めて計算するので実験点とずれてしまう。図面に線を引くことは、縦軸と横軸の相関をあらかじめ理論的に予測しておかねばならない。その理論的予測と実験値のズレを考えることにより新しい現象と理論を発見することができる。この時、実験を行っている時の観察とその記録が重要な意味を持つ。特に起電力の安定性は測定回路の抵抗が大きくなると感度が下がりバラつきが大きくなる。SEMやEPMAで試料の組織写真を撮り組成分析する時、全体の写真がない場合が多く、たまたまあった微小領域の写真を持ってくる。「樹を見て森を見ず」である。スケッチを行う学生は稀である。このような写真をとって電子ファイルにいれ、あまりにたくさんの写真を収集するのでそれからどのような結論を出すのか混乱している。このような中ではデータの改竄

や写真の切り貼りも起こりかねない。

このように実験データの記録の採り方や保存方法は、私が学生の頃とすっかり変わっている。これを嘆いても仕方がないが、やはりノートに克明に記録し、他人が見ても分かるようにしておくことは重要である。ノートを取りながら理論的な予測と時々刻々画面に現れるデータを見て実験の進捗状況を考える必要がある。特にスケッチは重要である。実験者が重要と思われる部分を強調して記録するからである。

5 新しい知見と論文

観察は重要である。例えば、鍛冶工程で重要なのは鋼同士の鍛接である。たたら製鉄で造った鋼である和鉄は、鍛冶炉で加熱するだけで簡単に溶接出来る。私は鍛冶場の横座に座り、鋼を2枚重ね藁灰と泥を塗って鍛冶炉にいれ木炭で覆って加熱を行なった。最初は木炭の燃焼から生じる一酸化炭素の燃焼による紫色の炎であるが、30分ほど経つと炎が黄色みを帯び、ジュワジュワという音が聞こえる。さらに加熱を続けると40分頃には橙色になり、炎の中に細かい白い火花が出始める。差し吹鞆を強く押し風を強めると火花は強く大きくなり全体から出ようになる。この火花を「沸き花」を呼ぶ。この段階で取り出すと、鋼塊の表面から火花が盛んに飛び出しており、金床の上で軽く鍛造すると2枚の鋼は溶着する。同時にFeOの溶融酸化物が激しく飛散し、鋼塊は減量する。鍛造しなくとも炉から出した時すでに溶着している場合もある。2枚の鋼近傍の温度を測定すると刀匠によらず1300℃近傍にあることがわかる。酸素センサーで酸素分圧を測定すると高く、炭素が析出する状態では無いので炭素飽和で鋼の表面が溶けるわけではない。界面近傍の鋼中の炭素濃度は0.2mass%に下がっており、最初の炭素濃度0.9mass%から激しく脱炭している。この観察と分析から、界面の鉄が燃焼しその時発生する熱で温度が上昇し、表面が溶解して濡れると同時にCOガス気泡が発生し、その発生時の力で鋼の微粒子が気泡中に補足され、その微粒子が空気中に出て燃焼し発熱して白く光る沸き花となる。沸き花は鋼界面が溶けたシグナルである。

この研究は、5年ほど前に刀匠の協力を得て測定を終えていたが、投稿論文にできていなかった。しかし、その後、実際に鍛冶の横座に座り、炎を観察しながら鋼の接合の状態を考える中で結論に到達し論文にした⁶⁾。観察がいかに有益な結果をもたらすかを体験した。

6 独創的研究

私は、学生に「人のやらないことをやるように」と言い、自

分もそれを心がけている。しかし、誰も考えたことのない自分が初めての研究と思って始めると、世界の誰かがやはり似た研究をやっている場合がある。しかし、各人それぞれ発想と視点が異なっているので臆することはない。私が行なった研究は大きく分けて6つある。

一つは先に述べたラテライト鉱石の硫化塩化処理の研究である。

二つ目は、イオン性融体中のイオンの拡散係数と電気伝導度の関係を非平衡線形熱力学を使って厳密に導いた事、溶鋼の脱炭速度を非平衡非線形熱力学を使って解析した事⁷⁾、及び高炉や転炉実機内の状態を化学親和力で解析した事である。

三つ目は、スラグや熔融金属中の熱伝達機構を研究し⁸⁾、連続铸造機中のモールドフラックススラグを通した抜熱の機構を明らかにしたことである⁹⁾。

四つ目は、たたら製鉄の冶金学的研究である¹⁰⁾。粉体の難還元性磁鉄鉱石である砂鉄を用いた製鉄法で、世界の製鉄4000年の歴史の中で非常にユニークな方法であることを明らかにした。

五つ目は、マイクロ波加熱による金属製錬法の開発である¹¹⁾。これはたたら製鉄の粉体鉱石製錬の原理から発展したもので、エクセルギー損失分を電磁波であるマイクロ波で置き換える研究である。この研究で、製鉄およびシリコンの製造及びイルメナイトからアナターゼの生成に成功した。現在、これらの研究を工業化する研究を行っている。特にマイクロ波製鉄法はスラグを生成しないので貧鉄の利用に、またシリコン製造は無電極加熱という利点から太陽光発電用シリコンの製造に注目されている。

六つ目は、たたら製鉄と大鍛冶及び古釘や日本刀の研究から、脱酸工程を行わないで製造された鋼中の酸素が過飽和に存在することを発見してその原因を解明すると共に、これがマグネタイトである黒錆の薄膜の形成を誘発し錆び難い現象を発現することを明らかにした¹²⁾。

この他にも、スラグの熱力学と構造、薄膜中の拡散と熱伝導、熔融金属の放射率、スラグのプラズマ溶融機構の研究を行った。

これらの研究が、独創的であるかどうかは歴史の評価を待つしかないが、学問の上でも社会でも役に立つよう生涯努力する責任があると考えている。

7 若い研究者・技術者への期待

「どこにでも面白い事を見つける能力」を身につけることが重要である。「面白い事」は現実に見えている事象に隠れていることが多い、それを感じ取ること。このためには感動する心を涵養する必要がある。美術や音楽の鑑賞は重要な方法

である。また、様々な考えや経験を持った人達と交流することである。そして面白い事を見つけたら実際にやってみることである。失敗は諦めることにある。諦めずしつこく継続して行えば必ず道は開ける。もちろん同じことを繰り返すわけではない。どのようにしたら解決に到達できるかを常に考え続けることである。そして研究や仕事に区切りを付け、成果をまとめて1段ずつ階段を上ることである。

禪に次の言葉がある。大道無門千差路有り 此の関を透得せば 乾坤に独歩せん。私流に読めば、面白い事を見つける心が身に付けば何事にも煩わされることはない、となろうか。

参考文献

- 1) P.Bolsaitis and K.Nagata : Metall.Trans. B,11B (1980) June, 185.
- 2) K.Nagata and K.S.Goto : J.Electrochem.Soc., 123 (1976) 12, 1814.
- 3) 永田和宏, 中西恭二, 数土文夫, 後藤和弘 : 鉄と鋼, 68 (1982) 2, 277.
- 4) 永田和宏, 槌谷暢男, 角戸三男, 後藤和弘 : 鉄と鋼, 68 (1982) 15, 2271.
- 5) 川上正博, 永田和宏, 山村稔, 坂田直起, 宮下芳雄, 後藤和弘 : 鉄と鋼, 63 (1977) 13, 2162.
- 6) 永田和宏, 渡邊玄, 釘屋奈都子 : 鉄と鋼, 97 (2011) 12, 637.
- 7) M.Susa and K.Nagata : Metall.Mater.Trans.B, 26B (1995) , 997.
- 8) 永田和宏, 須佐匡裕, 後藤和弘 : 鉄と鋼, 69 (1983) 11, 1417.
- 9) H.Nakada, M.Susa, Y.Seko, M.Hayashi and K.Nagata : ISIJ Int., 48 (2008) 4, 446.
- 10) 永田和宏 : 金属, 75 (2005) 7, 711~81 (2011) 5, 435まで41編.
- 11) K.Ishizaki and K.Nagata : ISIJ Int., 48 (2008) 9, 1159.
- 12) Y.Furunushi and K.Nagata : ISIJ Int., 54 (2014) 5, 1074.

(2014年5月19日)