



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ 34

研究半生の回想と それに基づくいくつかの提案

Some Suggestions Based on Recollections of
My Research Half-life



須佐 匡裕 東京工業大学
アントレプレナーシップ教育機構
副機構長、特命教授
Masahiro Susa

1 はじめに

私は2023年の3月に東京工業大学を定年退職した。1986年4月の奉職以来、37年間お世話になった。この間に、学士課程学生のためのグローバル教育プログラムである「グローバル理工人育成コース」を設置して実施できたこと、多くの留学プログラムを整備できたこと、また2020年～2022年には物質理工学院長を務められたことなどをとても嬉しく思っている。このような活動を一緒にしてくださった学内関係者の方々に感謝している。また、研究活動においては、研究室のメンバーだけでなく、日本鉄鋼協会に関係した多くの先生がた、および協会事務局の皆様がたにも、たいへんお世話になった。まずはこの場をお借りし、心より深く感謝申し上げたい。

本年1月に会報委員会より「若手研究者・技術者へのメッセージ」というトピックで寄稿するように依頼された。これまで私は、主に「ISIJ International」や「鉄と鋼」に原著論文を掲載してきたが、私が執筆した論文数や獲得した外部資金額は、広い意味の材料系分野の先生方の1/10程度でないかと思う。そういう意味で、私は若手に役に立つようなアドバイスをできるほど立派な研究者ではない。そのあたりは考慮しながら、本稿を読んでいただければと思うが、以下では自分が経験したことの中で、研究者としての人生を送るために私自身が「経験しておいてよかった」と思ったことをいくつか紹介させていただこうと思う。それらの中に読者の参考になることが少しでもあれば本望である。

また私は、原著論文以外に会報にも記事を掲載したことがある^{1,8)}。内容的には、硬いものから軟らかいものまである。それらを書いていたころには、「若手研究者・技術者へのメッ

セージ」のような依頼がくるとは露程も思っていなかったため、本トピックと同趣旨のことを書き込んだものもある。内容的に重複する部分があることはご容赦いただきたい。

2 会社に勤めたこと

私は1982年の春に東京工業大学大学院の金属工学専攻修士課程を修了した。後に大学教員になったが、修士修了直後は電器会社の研究所に勤務した。当時の大学教員へのルートは、修士修了後は直ちに博士課程に進学し、博士号取得後は助手あるいはポスドクとなるのが一般的であった。「博士はすごい」という畏敬の念はあったが、自分に博士号を取るような能力があるとは思わなかったし、博士号の必要性を肌で感じてはいなかった。「何となく進学する」にはリスクが大きいと思い、その当時、鉄に代わる「産業のコメ」と言われ始めた半導体産業に興味を掻き立てられ、その業界に飛び込んだ。

当時の半導体業界は、64 kbitのDRAMが世界最高の技術レベルの製品という状況だったと思う。私が関わったデバイスは固体撮像素子で、日本のテレビを映すには、最低20万画素(200 kbit相当)を有するカメラが必要で、それを生産できるように開発するというのが目標であった。最近では、固体撮像素子は、デジタルカメラをはじめ、我々の生活のいたるところで使われている。スマートフォンでも5000万画素のカメラが搭載されているものもあるが、この40年間の技術的進歩の大きさを改めて感じる。なお、40年前は、金属配線の最小線幅は約3 μm であったが、それが今は3 nmとなっていて、2 nmについては現在研究開発中ときいている。

私のバックグラウンドは金属工学であるため、半導体の物

理やIC回路などについてはほとんど知らなかったが、日々ダイナミックに発展をつづける業界に身をおいて、研究することに楽しさを感じていた。私が実際担当したのは、固体撮像素子の製造プロセスであった。その部署には、「一人でシリコン基板の前処理からデバイスまで作製できるようになる」という方針があった。いまのような全工程を自動で行うような工場はなく、全工程マニュアルの操作であった。全工程を終えるには約2か月を要したが、その間に、基板を割ったり、傷つけたり、ホコリが付いたり、装置がトラブルを起こしたりと、いろいろな出来事に見舞われた。見た目完成したように思えるチップをつかってモニターに映してみたら、真っ黒な画面しか映らないということも多々あった。ところどころに白い線や黒い線、白い点や黒い点が映るのはマシなほうであった。入社3年目くらいに、歩留まりは良くはなかったが、ようやく無欠陥のチップが取れるようになった。このときモニターに映ったイメージには、本当に感激した。

このように実際にプロセスを流しながら、私には「BPSG (borophosphosilicate glass) のフロー技術」という要素技術についての研究ミッションが与えられた⁹⁾。MOSトランジスタ間を配線するために、MOSの上にシリケート薄膜を絶縁膜として形成し、必要な部分に穴をあけて配線するのであるが、そのシリケート膜の表面が平坦であるほうが、配線は容易になる。そのために、それまで使われていたPSG (phosphosilicate glass) より低温でガラス軟化を起こす可能性があるBPSGを絶縁膜として採用し、形成後適切にアニールして表面を平坦化させようという目論見である。修士論文では、スラグの熱伝導率の測定を行っていたので、シリケートには馴染みがあったし、興味もあった。会社では研究といっても、開発に近いものであり、実際に行ったのは、BPSGをCVDで形成するときの B_2H_6 、 PH_3 、 SiH_4 、 O_2 ガスの流量を調整して、BPSGの組成を変え、その流動温度やエッチング速度などの観点から、膜組成や成膜プロセスの最適化を図るということである。上司命令で結果を論文にして発表はしたが、学術論文というよりは報告書といった感じである。もちろん、会社の研究は生産を目指して行っているものであり、その研究はそれでよいと思う一方で、自分にもっと深堀する能力と知識があれば、書き方はずいぶん変わっていて、もっと含蓄のある論文になったかなと思う。このとき「会社で研究するにしても、もっと学問があれば」と思い、部署内を見渡してみたら、多くの社員が博士号を持っていた。あるいは取ろうとしていた。「会社で研究するにしても、やはり博士を取る必要はある」と実感した次第である。

一方で会社において、半導体の製造プロセス全体に関わったのは大きな経験である。要素技術の研究といっても、前

後のプロセスとのつながりもだいじである。この経験を通して、「部分」を「全体」から俯瞰するといった考えをもてたように思う。論文を書くときに、学生のときは、やったことを単に羅列しただけであったが、全体のストーリー性を意識できるようになった。

さらに「書く」ということにおいて役立ったのは特許明細書の作成である。特許の明細書には、発明が関係する技術分野、それについての従来の技術とその問題点、それを解決するための手段、発明の効果、特許請求の範囲などが記載されるが、この記載の方法は学術論文の緒言のつくりとそっくりである。私自身は大したアイデアは出せなかったが、明細書を書くという経験を積めたことは、その後の学術論文の執筆において、とくにその構成を考える上では大いに役立ったと思う。

また会社では、理系・文系というだけではなく、様々なバックグラウンドの人が混在して働いている。学生のときは、割と価値観や通念の似た人間の間で関係を作ればよいのであるが、会社ではそうわけにはいかない。組織の中でどう他者と協調して、かつ自分らしさを出していくのか、そういうことを考える上でも、会社での経験は役に立った。そしていま強く思うのは、組織の中の一員ではあっても、「主体的に考えて行動する」姿勢が重要であるということである。

3 博士の学位を取得したこと

前節で述べたように、博士号取得の必要性を実感していたころ、大学の恩師から「助手をやりながら博士号を取らないか」というオファーが舞い込んだ。今ではあり得ない話である。私はそのころすでに家庭をもっていたので、「失敗したら将来一家が路頭に迷うかもしれない」が、「これがラストチャンス」と思い、リスクを取ることにし、背水の陣で臨んだ。

1986年3月に会社を退職し、4月に助手として大学に着任した。先生方の研究・教育のお手伝いをするとともに、学生に実験の指導なども行い、自分の研究にも打ち込んだ。会社の研究でも扱っていたシリカ薄膜を材料として取り上げ、その作製方法による薄膜の構造のちがいを拡散および熱伝導の観点から考えたという内容である¹⁰⁾。拡散と熱伝導はいずれも移動現象に含まれるが、一つの研究になぜ2つの観点を取り上げたのか。それは、当時ボスが2人いたからである。最後のまとめには苦労はしたが、1990年秋に何とか博士の学位をいただけた。博士課程の標準学修期間は3年であるが、論文博士である私の場合には4年半を要した。本来の業務がある中で、時間を捻出して自分の研究をし、論文をまとめる必要があったため、通常より多くの時間を要した。が、「段取りよく仕事を進める」術は身についたように思う。

ところで、博士論文は複数の章で構成されている。第1章は緒論、たとえば第7章が総括であるとする。その場合、第2～6章の各章はそれぞれ投稿論文1報分に相当する内容が入ってくる。この全体を構想するのは非常に難しく、単に投稿論文が5報あればよいという話ではない。先に述べた「部分」と「全体」の話に通じるが、全体のストーリーがあり、その中で各章がそれ相応の役割を果たすように構成しなければならない。博士論文の作成は論理構築の非常に良い訓練になるので、研究者になる人はぜひこのプロセスを一度は経験してほしい。博士号は、「研究のライセンス」である。

修士から博士課程へ直接進学すると、効率的に博士号が取れる。もちろん、会社に入った後、社会人として博士課程に在籍するのも良いし、論文博士を目指すのも良い。いずれにしても、博士号を取るためには「主体的に考えて行動する」姿勢は必須の姿勢である。

4 留学したこと

1990年、今から思うとバブル経済はもう終わっていたが、まだその余韻は残っていた。「博士号をとったら、またどこか会社を探さねば」とは思っていたが、ボスから「一度外国に行け」という指令が下った。条件は、「行先と経費は自分で工面せよ」ということであつた。

大学からときどき回ってくる資料を見てみたら、ちょうど文部省在外研究員と日本学術振興会特定国派遣研究者の募集が行われている最中であつた。いずれも競争倍率は高いとのことだったので、両方に申請することとした。過去にも触れたが^{1,7,8)}、留学先はいずれもイギリスのNPL (National Physical Laboratory) のK.C.Mills先生とした。私は修士での研究の一部を鉄鋼協会の講演大会で発表し、その概要を英文でも発表していたのだが、Mills先生はそれに目を通してくださっていて、留学の受入可能性を問い合わせたとき、すぐに「君のことは気に入っていた。旅費と滞在費は出せないが、その都合が付くのであれば受け入れる」旨の返信をいただけた。研究内容を相談しながら、申請書を書き、応募したところ、幸運なことに両方で採択された。さらに幸運なことに、派遣の年度が1年ずれていたために、10か月+10か月の滞在が可能となった。このような長期の滞在を許可してくれた当時のボスや学科の先生方への寛容には感謝しかない。ただ、6か月を超える長期の滞在となるため、イギリスには観光ビザでは入国できず、労働許可書や家族のための入国同意書をイギリス政府から取得することとなった。こういう苦労も一度はしたほうが良いように思う。

留学中には、スラグやモールドフラックスの熱物性に関する論文を3報¹¹⁻¹³⁾、NPLレポートを2報^{14,15)}書くとともに、

Mills先生の計らいでSLAG ATLAS 2nd ed¹⁶⁾の執筆に参加させていただいた。研究成果はそれなりに上げたと思う。留学には研究以外にもいろいろな効果がある。やはり英語運用能力は向上する。留学前は、論文を読むことくらいしか英語に触れる機会がなかったが、書く、聞く、話す機会は圧倒的に増えるからである。

私の場合、留学といっても学生としての留学ではないため、クラスに出るなどの決まったイベントはない。イギリスはよく「大人の社会」と言われるが、自分が動かなければ何も始まらない。何ごとにも「主体的に考えて行動する」という姿勢が求められる。自分は何がしたいのか、そのために何が必要なのかを考えて相談に行くと、先生を含めて同僚は皆、親身に相談に乗ってくれた。いろいろな提案をしてくれた後で出てくる言葉は、「It's up to you.」である。「君次第だよ」という意味であるが、「決めるのは君。そして結果として何が起こっても、最終責任は君にある」というニュアンスもあるようだ。それを含めての言語の勉強である。

海外という異文化の中で感じる、思うこと、考えることはいろいろとあつたが、本稿に関係しそうなエピソードをもう一つだけ紹介しておく。それは、titleの重要性である。論文のタイトルのつけ方も重要であるが、ここでいうtitleは肩書のことである。「肩書で人を判断するな」と日本ではよく言われるが、イギリスでは重要視されているように思えた。たとえば、アパートを借りて電気やガスを開通させたときに、日本と同様に、その旨をハガキで会社に通知した。そのときに、氏名などの個人情報を記載するのであるが、該当するtitleにチェックするようになっていて、Mr、Mrsなどに先行して、Prof、Drという項目があつた。私あての料金の請求書には、Dr M SUSANと記載されていた。社会全体でProfやDrの価値が共有されているのだと思う。日本にはそういう文化はないが、グローバルに働こうと思う若者には、博士号を取ることを強く勧めたい。

なお、NPLは大学ではなく、研究機関であるが、NPLと性格が似た研究機関は他の国にもあり、たとえばフランスならLNE (フランス国家計量標準研究所)、ドイツならDLR (ドイツ航空宇宙センター)、イタリアならCNR (イタリア学術会議) などがそれに当たる。NPLに滞在したことをきっかけに、そのような他国の研究機関にもネットワークが築け、後年、学生のインターン先としても機能してくれた。「はじめに」に記したように、私はグローバル理工人育成コースや留学プログラムに携わってきたが、このような学内業務においても自分の留学経験が生きたと思う。

留学中には、もちろんその国の人々と仲良くなれるチャンスがある。それとともに、日本人とのネットワークも広がる。なぜならば、海外で会った日本人は、強く印象に残るからで

ある。

5 研究テーマを継続したこと

NPLに滞在中、日本からも大学の先生、国研や企業の研究者らがMills先生を訪ねてお見えになり、その都度、私も同席させていただいた。その中の一人、ある鉄鋼会社の研究者から「モールドフラックスの熱物性、やったらええよ」と言っていた。私は留学前までは、溶融スラグなどの均一系についての研究を行っていた。スラグフィルムといった非常に不均一な系についてNPLで研究を始めたばかりであったが、複数の相が関与し、かつ急峻な温度勾配に晒される複雑怪奇な系の伝熱現象をできるだけ単純に理解したいと思い、以来ずっと取り組んできた。その研究だけしかやらなかったということではなく、ずっとやり続けてきたことがあるということである。

テーマ的には、鉄鋼プロセス関係で、かつかなり実用に近いものであったため、科研費などには採択されにくい中、「やったらええよ」と言ってくれた人から後に共同研究のオファーがあった。その会社はそれ以来、私の定年前まで毎年共同研究を継続してくれ、感謝の念に堪えない。また、研究を継続する中、複数の海外企業とも共同研究を実施できた。「継続は力なり」というが、あるテーマを続けていると、それを見てくれている人がどこかにいるということかと思う。ただし、「研究を続けた」というのは、カネのためではない。自分が知りたいことがあり続けたからであり、やはり「主体的に考えて行動する」という姿勢に基づくものであると思う。結果として、モールドフラックスの伝熱に関する研究では、日本鉄鋼協会から2回澤村論文賞をいただくこととなった^{17,18)}。

また、「熱物性」に注目してくれて、「スケールの熱物性」についての研究会を鉄鋼協会内で組織させていただいたこともある。スケールというものの自体を勉強するところから始める必要があったため、研究の進捗ははじめ芳しくなく、周りをヒヤヒヤさせたかもしれないが、最終的には所期の成果が出せたと思う¹⁹⁾、研究会終了後ではあるが、それ以上の学術的価値を創出できたと思う²⁰⁾。圧延の本質的な難しい部分は全く分からないが、それまでは無縁であった圧延理論部会の方々とも関わりが持てたことは一つの大きな財産である。そして、私が継続してきた鉄鋼プロセスと熱物性の研究に関して、2021年に日本鉄鋼協会より学術功績賞をいただけた。これは望外の喜びである⁸⁾。

6 おわりに

2023年3月に私は東京工業大学を定年退職したが、この原稿を提出する今、私はまだ東京工業大学にいる。大学が4月に設置したアントレプレナーシップ教育機構の副機構長を務めている。これまでグローバル教育には携わったことがあるが、アントレプレナーシップ教育は初めてである。ために、事前に本を読み、また学内の担当教員からも、アントレプレナーシップとは何かについてお話をうかがった。

「アントレプレナー」という言葉は、日本語には「起業家」と訳されることが多いが、本来は「新しいビジネスを創る」ということを意味し、それは必ずしも新しく会社をつくること（スタートアップ）とは直結しないとのことである。社内起業のような取り組みをする会社もあると聞いている。「アントレプレナーシップ」は、新しコト（価値）を創ろうとする精神であり、その基本は「主体的に考えて行動する」という姿勢であるという。確かに多くの人が、そういう精神を持たず、先人がつくったコトを継承するだけに留まってしまうと、社会は発展しない。とくに人口減少の一途をたどっている日本においては、拡大再生産という概念はもはや通用しない。グローバリゼーションやイノベーションが叫ばれる所以である。

「主体的に考えて行動する」姿勢は、企業、研究機関を問わず、新しい価値を創出して具体化しなければならない研究者・技術者には必須であり、またそのタマゴである大学生にとっても重要な姿勢である。そのために本稿では、その点を強調させていただいた。そして、自分のこれまでの経験に基づいて、その姿勢を体得するための機会などを、いくつかの提案をさせていただいた。が、最終的には「It's up to you.」である。

参考文献

- 1) 須佐匡裕：鉄と鋼，80（1994），N438.
- 2) 須佐匡裕：ふえらむ，3（1998），595.
- 3) 須佐匡裕，小嶋理恵：ふえらむ，9（2004），566.
- 4) 須佐匡裕，小嶋理恵：ふえらむ，9（2004），619.
- 5) 林幸，須佐匡裕，永田和宏：ふえらむ，15（2010），189.
- 6) 李沐，須佐匡裕：ふえらむ，24（2019），104.
- 7) 須佐匡裕：ふえらむ，26（2021），139.
- 8) 須佐匡裕：ふえらむ，26（2021），512.
- 9) M.Susa, Y.Hiroshima, K.Senda, T.Kuriyama, S.Matsumoto, S.Terakawa and T.Takamura：J. App. Phys., 58（1985），3880.
- 10) 須佐匡裕：酸素拡散と熱伝導による非晶質シリカ薄膜の構造の研究，東京工業大学，（1990）.

- 11) M.Susa, F.Li and K.Nagata : Ironmaking Steelmaking, 20 (1993), 201.
- 12) M.Susa, K.Nagata and K.C.Mills : Ironmaking Steelmaking, 20 (1993), 372.
- 13) M. Susa, K. C. Mills, M. J. Richardson, R. Taylor and D. Stewart : Ironmaking Steelmaking, 21 (1994), 279.
- 14) K. C. Mills and M. Susa: Thermal Conductivities of Slags, NPL Report, DMM (A) 68, National Physical Laboratory, (1992).
- 15) M. Susa and K. C. Mills: Optical Properties of Slags, NPL Report, DMM (A) 73, National Physical Laboratory, (1992).
- 16) Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) : SLAG ATLAS 2nd Edition, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, Germany, (1995).
- 17) M. Susa, A. Kushimoto, H. Toyota, M. Hayashi, R. Endo and Y. Kobayashi : ISIJ Int., 49 (2009), 1722.
- 18) S. Takahashi, R. Endo, T. Watanabe, M. Hayashi and M. Susa : ISIJ Int., 58 (2018), 905.
- 19) M. Li, R. Endo, M. Akoshima, H. Tanei, H. Okada and M. Susa : ISIJ Int., 59 (2019), 398.
- 20) Y. Yang, H. Watanabe, M. Akoshima, M. Hayashi, M. Susa, H. Tanei, H. Okada and R. Endo : ISIJ Int., 61 (2021), 26.

(2023年4月5日受付)