Spot Light

若手の特集記事

インタビュー —私の溶接履歴—*

前田 将 克**

How I came into and what I do in the world of welding*

by MAEDA Masakatsu**

キーワード

電子照射誘起異種原子強制注入，超音波接合，半導体コンタクト界面組織制御，固相界面プロセス，よい絵本，尊敬する偉人

この分野の研究者になったきっかけは？

私は大阪大学工学部材料物性工学科と同大学院工学研究科材料物性工学専攻博士前期課程をそれぞれ卒業，修了しました。両課程で配属された超高圧電子顕微鏡センターにて森博太郎先生に高エネルギー電子照射によるセラミックス中への異種原子強制注入に関する興味深いテーマを与えていただき，ご指導の下で卒業論文と修士論文をまとめることができました。酸化ケイ素，炭化ケイ素，窒化ケイ素，炭化ホウ素，ダイヤモンドなど，現在でもホットなセラミックス材料を対象にして研究の基本を教えてくださいました。初めから研究対象に挙げられていたのは酸化ケイ素と炭化ケイ素だけでしたが，ひとつまたひとつと追加される形で増えていきました。学生時代は，これらの材料選定の先見性が全く理解できておらず，「また，得体の知れない材料を…」と思ったりしました。ダイヤモンドなどは，透過電子顕微鏡試料を作製する研磨工程を考えるだけで暗い気分になりました。しかし，それほど先見性をもったテーマ設定は，現在の自分でもできる自信がありません。贅沢な環境で研究教育を受けることができたことは疑う余地がありません。

この学生時代の研究テーマでは，セラミックス材料の透過電子顕微鏡試料の片方の面にハフニウム，タングステン，金といった原子番号の大きな遷移金属を蒸着します。そして金属膜側から超高電圧透過電子顕微鏡内で2 MVの高電圧で加速された電子ビームを集光して局所的に照射します。すると，これらの重金属は弾き出しのための原子散乱断面積がセラミックスの構成元素よりもはるかに大きいので，遷移金属を優先的に弾き出してセラ

ミックス中に強制注入することができます。この現象を照射電子ビームで直接透過電子顕微鏡観察し，その結果を基に高速電子による照射損傷過程と点欠陥挙動について考察しました。学生時代に取り扱った材料はこれだけではありません。森先生は，自分の研究テーマと直接関係のない種々の材料の透過電子顕微鏡試料作製も私に任せて下さいました。そしてそれを通じて非常に多くの試料作製技術に接する機会を与えて下さいました。時には，特殊で少量しかないサンプルで失敗が許されない緊張も与えて下さいました。一見すると自分の研究テーマから脱線した作業でも，将来別の研究テーマに従事するようになったときや自分の研究が壁に阻まれたときに解決の糸口につながる着想を与えてくれるかもしれません。自分の研究テーマとの直接的な関連性にとらわれずに種々の作業を学生に任せるのは教育上無駄ではないこと，すなわち「急がば回れ」を無言のうちに伝えようとして下さったのかもしれません。しかし，当時の私はそのような意図には全く気付かず，純粋に色々な作業ができることを楽しんでいました。

さて，大阪大学溶接工学研究所（名称は当時，現大阪大学接合科学研究所）で教授に昇任したばかりの奈賀正明先生が助手を募集していることを親交のあった森先生に伝え，私が候補に上がりました。時期は正確に覚えていないのですが，森先生の強い薦めもあって応募し，着任することができました。溶接・接合の分野に足を踏み入れたのはこのときが最初です。溶接に関する専門教育は全く受けたことがなく，経験もない初心者状態でのスタートでした。しかし，スタートから待ち受けていた環境は苛酷でした。奈賀研に着任した私に先ず与えられたテーマは金属箔を中間材に用いた窒化ケイ素の固相拡散接合でした。ど素人の私は，奈賀先生の研究手法をできるだけ早く吸収しようと，機会あれば質問していました。そして5月の連休に入る直前，質問した私に突然，奈賀

*原稿受付 平成20年7月22日

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

先生が激昂して「いちいち上げ足を取るんじゃない！助手は教授の命令にハイハイと従っていればいいんだ！」と叫びました。そのときの奈賀先生の表情は今も鮮明に記憶しています。自分の意思で研究を進めることを否定され、私はたちまち研究意欲が失せました。そして苦痛の日々が過ぎ行く中、阪神淡路大震災が起きました。西宮市で被災した家族が気がかりでしたが、学生にも被災して通学さえ困難な者もありましたので、弱音を吐く余裕もなく、気を張って研究室の復旧を急いでおりました。一方で奈賀先生との間に数多の問題が発生累積していきましました。奈賀先生に対する信頼が完全に消失し、当時の所長に辞表を提出しました。しかしその直後から、多くの溶接工学研究所教職員が激励、叱咤、様々な形で冷静になって考え直す機会を与えて下さいました。おかげで私は自分の役割について認識を改めることができ、所長に辞表取り下げを願い出しました。

私は多くの溶接工学研究所の方々を支えていただくことができたからこそ、今の立場で研究を続けることができております。その方々のお名前は本稿には出しませんが、心から感謝しております。

今、どのような研究をされているのですか？

現在は接合科学研究所から大阪大学先端科学イノベーションセンターに活動の場を移し、高橋康夫先生の下で先進材料の固相界面プロセスに関する研究に従事しています。この研究を通じて目指す夢は、高出力低損失パワーエレクトロニクスシステムの実現による省エネルギー環境調和社会の構築です。具体的には以下の3つの研究テーマを掲げて、一歩ずつ研究を進めています。

◆**広禁制帯幅次世代半導体デバイスへの低抵抗オーム性コンタクト形成**：シリコン半導体よりもはるかに高エネルギー効率動作を実現する次世代半導体材料として、炭化ケイ素や窒化ガリウムに代表される広禁制帯幅化合物半導体の研究開発が世界中で競われています。その中で大きな問題となるのが、半導体と金属電極の界面でのコンタクト抵抗です。これらの半導体材料は広い禁制帯を有するため、仕事関数の異なる金属材料との界面で大きな Schottky 障壁を生じます。この障壁は界面を横断する電荷移動を阻害し、界面での局所的な Joule 発熱による電力損失と接合強度低下を招きます。このため、障壁を低く薄くする努力が続けられています。障壁を低くするためには、半導体と仕事関数がほぼ等しくなるように電極材料を選択する必要があります。しかし、特に p 型半導体は仕事関数が大きく、いかなる純金属を用いても等しい仕事関数は得られません。このため、半導体と仕事関数がほぼ等しい化合物相を界面反応により形成する方法が試みられています。この界面反応を適切に制御しなければ、目標とする界面組織状態は得られません。一方、障壁を薄くするには、電極近傍の半導体にドーピング処理して電荷担体密度を極限まで上げる方法が採られます。しかし、この高電荷担体密度層も半導体と電極材料の界面反応に消費されてしまえば、せっかくのドーピング処理も徒労となってしまいます。このときも界面反応制御

は重要となります。

私が接合科学研究所在籍時に取り組んだメインテーマのひとつが、セラミックスと金属の界面組織制御でした。本テーマとは、対象材料が多結晶セラミックスであるか異方性の強い単結晶化合物半導体であるかの相違しかありません。ひとたび目標とする界面組織状態を決定できれば界面反応制御の指針は立てられると考えています。この経験を生かして優れた技術を開発できないかと、野望を持って研究に臨んでいます。

◆**超音波接合**：超音波接合は、わずかな接合圧力をもって接合面で正対した被接合部材の一方に超音波振動を印加して接合を達成する低温固相接合技術です。加熱を嫌う電子部品の配線接続に広く利用されています。特に、高出力パワー電子デバイスの配線接続では、継手の耐熱性と電気伝導特性が優れるため、超音波接合が好適かつ代替困難な接合技術として応用されています。パワー電子デバイスは機器の動力を制御する装置であるため、その配線接合部には極めて高い信頼性が求められますが、他方では高出力化のために一層の配線太径化が志向されています。しかし、配線材が太くなるほど凝着形成は難しくなるのです。高い信頼性を保ちながら太径配線を達成するには、精緻な超音波接合プロセス制御が不可欠となります。さらに、超音波接合はわずか1 s 足らずの短時間でプロセスが完了し、配線材変形による密着面積増加などの状況はミリ秒単位で刻々と変化します。的確に接合プロセスを制御するには界面現象に対する正しい理解と理論に立脚した予測が必要となります。

この課題に対して、当研究室では接合ツールの振幅変化や沈降挙動の実測、凝着面積拡大挙動のその場観察、さらに接合界面の微細組織解析により超音波接合における界面現象を詳しく調べ、その現象を精度よく予測できる理論構築に取り組んでいます。また、最近では電子部品と同様に加熱を嫌う材料である金属ガラスの接合にも取り組んでいます。

◆**固相界面プロセスのモデル化と数値演算シミュレーション**：このテーマは高橋先生が長年実績を積んでこられた分野です。塑性変形、クリープ変形、拡散、伝熱に関する理論を組み合わせた数理モデルを用いて、同種材や異種材固相界面での凝着現象の進行を予測し、最適なプロセス設計を実現することを目的としています。

実験を軸に研究を進めてきた私には全く新しい研究スタイルで、現在はまだ学生を巻き込みながら右往左往しています。この手法は実験研究においても先回りして実験結果を迎えに行くことを可能とします。データを得た時点で予測と実測を定量的に比較検討できることは、研究を効率よく進めるためには非常に重要な要素となります。まだ高橋先生の足元にも及びませんが、身に付けて行きたいですし、今がその好機だとも思っております。

どのようなことが、あなたの研究分野でのブレークスルーとなると考えていますか？

対象とする自然現象の本質を的確に見抜き、これを正確に記述して、その上で現象を人が意図する状態に誘

導・制御する技術にまで発展させる、この3段階の過程を着実に積み重ねることに尽きると考えています。しかし、これは口で言うほど容易ではありません。自然現象は嘘こそつきませんが幾重ものバールで本質を隠すことは得意です。油断している人を惑わすのは簡単なことなのです。私も本質を突き止められなかったために恥ずかしい思いをしたことが何度もあります。ちょっとした前提条件の思い違いでデータの解釈を誤る場合がほとんどですが、このちょっとしたことで導かれる結論が本質と全く異なることになり得ます。研究に携わる者は現象を表面的に捉えて満足してはいけません。注意深く複数の視点から検証を重ね、本質に迫る努力が求められます。検証を疎かにして、得られたデータを鵜呑みにすることは本質を見誤る第一歩です。

一例として、次世代半導体へのコンタクト形成について見てみます。このテーマは世界中で研究開発が競われ、多くの研究者、技術者、資金が集中しています。論文も多く発表されていますが、その大半はチャンピオンデータを追求した試行レポートで、材料や熱処理プロセスの選択や設計に関する理論的背景が明示されていません。入口（材料の初期状態と熱処理条件）と出口（コンタクト特性）の相関ばかりが論じられ、材料界面での現象がブラックボックス化されています。このような論文で特に気がかりなのが界面組織写真の扱われ方です。その多くが「ついでに撮ってみた記念写真」になってしまっています。もったいない使われ方をしている写真が氾濫しているのです。写真は界面現象の本質を解き明かす上で決定的な証拠を提示できる重要な情報です。しかし、写真を強力なデータとするには、単に撮影するだけでは不十分で、これを丁寧に読み解いて行く作業が必要不可欠です。この作業が十分に行われていない写真は、撮影行為そのものが目的である記念写真と同じように感じるのです。私はこのスピード偏重の研究分野において、「急がば回れ」の精神でブラックボックスをこじ開けて材料界面現象への理解を深め、優れた界面制御技術へと発展させる、地に足が着いた研究を推進したいと考えています。

今までの仕事の中で最も記憶に残っている瞬間は？

研究において鮮明に思い出される内容は、鳥肌が立つような失敗がほとんどです。しかし、わずかですが新しい発見に歓喜した経験もあります。私の場合、このような発見はこれまで実験データの解析作業をしているときにしか得られていません。界面組織写真から取り出せるデータをできるだけ余すことなく取り出して数値化し、様々な条件値と対比してグラフ上に点を乗せていきます。界面反応層の厚さを熱処理時間に対してプロットする作業は一般的によく行われるのですが、私の場合は界面反応層の厚さを隣接する金属層中の特定成分の濃度や、平衡状態図で示唆されるその温度での反応相の組成許容幅（溶解度幅）、あるいは熱処理後の経過時間など、様々な横軸に対してプロットします。そのとき、横軸として選んだパラメータがある一定値に達したときに現象の切り

替わりを示す変曲点がそろったり、ばらつきの大きなデータ集合がきれいに一直線上に乗ったりすることがあるのです。グラフを描画してこのような相関が見つかる、夢中になってその背景にある理論をたぐり寄せようとしてしまいます。机の上には開いたままの書籍や論文ファイルが累々と積み重ねられ、周囲からはカオスとしか見えなくなります。しかしこの時間が、私にとって研究していて一番楽しい時間なのです。

今、どのような本を読まれていますか？

私には子どもが二人いるのですが、二人とも絵本が大好きで、週末はよく近所の市立図書館へ行って絵本を借りられるだけ借りてきています。そして出張のときや深夜の実験で不在のとき以外は毎晩就寝前に絵本を読み聞かせる時間を設けています。同じ絵本を何度も借りることもあります。これまで数多くの絵本と接してきました。その中で、1冊の絵本に強く心を打たれてしまいました。いせ ひでこ作、「ルリユールおじさん」理論社、東京、2007。ルリユール（relieur）とはフランスの製本装幀職人です。この絵本はルリユールと植物が大好きな女の子のふれあいを描いた物語ですが、物語終盤のルリユールの回想シーンと作者あとがきが、何度読んでも私の心の琴線に触れてしまうのです。他方で、どれほど情緒をこめて読んであげても子どもたちはそれほど感動しているようには見えません。このギャップが滑稽で、また、良い絵本とは何かを考えさせられます。

良い絵本のリストは、ちょっと探せば全国学校図書館協議会選定のものから、各出版社の名作選、読者個人が選んだリストなどが直ぐに見つかります。これらのリストに従って絵本を選べば、誰かが良い絵本だと薦める絵本を選び続けることができます。しかし、私は表面的な良い絵本のリストでは飽き足らず、なぜそれが良い絵本とされるのか、その判定要素と基準はどのように設定され、さらに聞き手である子どもたちの成長に伴ってその設定はどのように変化するのか、本質のところが知りたくなってしまいました。一種の職業病かもしれません。しかし、絵本が大好きなわが子らにより適切な時期により良い絵本により多く接することができるように手伝ってやりたいのです。その手始めに読み始めているのが、永田桂子著「よい「絵本」とはどんなもの？」チャイルド本社、東京、2007。自然現象以外の対象について深く考えるのは不慣れですが、自分なりの考え方を確立したいと思っています。その考え方を適切な場で公表し、これによって未来の絵本作家らが一冊でも多く良い絵本を出版することにつながれば、一人の学者として、また、一人の父親として、本懐とするところです。

もし、過去、現在を含めて3人の方と夕食を共にできるとすると誰と同席したいですか？

人としての格の違いを度外視して、夕食に招待できるのであれば、私が第一に招待したい人物は Galileo Galilei です。彼は振り子の等時性を見出しただけでなく、ピサ

の斜塔で落下運動の公開実験を実施し、さらに自ら作り出した望遠鏡を使って多くの発見をし、地動説を唱えた近代科学の開祖ともいえる人物です。それだけに、個々の発見に対して多くの批判や迫害を受け続けました。最たるものは、自分の信仰する宗教の教皇庁から地動説提唱を禁止されたことです。現代と異なり、当時の宗教は生命の拠所でしたから、強烈な精神的ストレスに耐えながら研究していたと思います。それら多くの批判や迫害に屈することなく、自分の導き出した結論が真理であることを信じ、教皇庁も含めた多くの人々にそれを分かってもらおうと努力されていました。その強靱な精神力と自分の導き出した結論に対する揺るがない信頼は彼の中でどのようにして育まれたのか、実践できるか否かは別にして話を聞いてみたい人物です。

第二に招待したいのが Alfred B. Nobel です。彼は功罪両面に大きな足跡を残しています。まず功の面を見ますと、鋭敏なニトログリセリンを安全に取り扱えるダイナマイトを開発し、多くの鉱夫の生命を守ることに成功しました。しかし、罪の面では、各国の軍隊に兵器として爆薬を販売したのです。人の命を守る技術が人を殺める技術にも転用され得ることを自らの手で証明してしまいました。この問題は現在も生きています。先端科学技術は常に軍事転用される可能性を内包しています。爆薬製造販売事業で巨富を手にした彼は、後にノーベル賞を設

立しました。罪滅ぼしだったのでしょう。賞設立に至るまでに考えていたこと、さらにその先に見ていた未来の描像について話を聞きたい人物です。

最後に招待したい人は前ローマ教皇 John Paul II です。彼は人の命のあるべき姿を求め続け、戦争・妊娠中絶・安楽死に対して反対の姿勢を貫きながら世界中を訪問して回り、空飛ぶ聖座とまで呼ばれました。その訪問先はキリスト教社会に限定されることなく、宗教、民族、文化の壁を越えて対話と相互理解をすすめ、世界平和の実現に努められました。それだけにとどまらず、教皇庁内部のものの考え方を一新し、地動説を認めて Galileo Galilei の名誉を回復したほか、イスラム教国に対して十字軍が犯した罪を公式に反省しています。これらの活動は一部の人々に受け入れられず、暗殺未遂事件も起きています。しかしそれに臆することなく、活動が続けているところに強固な意志が感じられます。彼は、聖職最高位の座に着くことがゴールではありませんでした。座に着いてから、指導者として一本筋を貫き通しながら多くの活動を実践しました。学ぶべきことが多すぎる偉大な人物ですが、彼が聖座に着くずっと前に思い描いていた「夢」としての自分の姿と行動、そして、指導者の立場に立ったときに自分の考え方の何を切り替え、何を固持したか、話を聞きたいです。