

独創的研究を目指して

岩谷産業株式会社中央研究所；技術顧問，大阪大学名誉教授 中嶋 英雄*

私は過去50年間，金属合金中の拡散を中心とする物性研究とポーラス金属のもの作り研究を行ってきた．この過程でいつも考えてきたことは独創的研究を行うにはどのようにすべきか，ということであった．本稿では私の経験から独創的研究を遂行するための試みをまとめた．若い研究者や大学院生が研究を進めるにあたり参考にしていただければ幸いである．

1. 人との出会いを大切に ―私が先人から学んだこと―

大学4年生の時に与えられた卒論テーマは電界下での原子輸送現象―エレクトロマイグレーション―であった．当時，我が国でこの種の研究をやっている人がいなかった．大学院修士課程1年になってこの分野の大家である米国レンスレー工科大学 (Rensselaer Polytechnic Institute[†], RPI) 教授の H. B. Huntington 先生にいくつかの質問を書いた手紙を送った．世界的に極めて優れた大教授が日本の一学生に返事を下さることは期待できなかったが，決断して手紙を書いた．驚いたことに Huntington 先生から明快な丁寧な回答をいただいた．それ以降博士課程修了まで6年間の長きにわたって文通をすることになり先生からのアドバイスに勇気づけられながら研究を行ってきた．博士課程修了後，ポストドクとして来ないかという誘いを受けて RPI 物理学科 Huntington 研究室の博士研究員として赴任した．初対面だったが，6年間も多数の手紙での交信していたので，初対面という気がしなかった．しかしながら，①語学のハンディは一切考慮しない，②米国人と同等に扱う，③出来が悪ければ2か月前に解雇通知すると言われ，わが身に緊張が走った．初対面にもかかわらず，すぐ研究打ち合わせとなり10件以上の宿題事項が与えられた．私は「はい判りました．2週間以内に回答します」と返答すると，怪訝な顔つきをなされた．そして明日の朝，8時半から講義があるので，その1時間前に回答内容を聞きたいと言われ，驚いてしまった．米国勤務第一日は徹夜であった．先生の恩師(指導教授)E. P. Wigner 博士は1963年に原子核と素粒子理論でノーベル物理学賞を受賞，(物性分野では Wigner-Seitz 法^{††}で有名)，Huntington 研究室の出身者(教え子)I. Giaever 博士もその10年後の1973年に超伝導のトンネル効果発見でノーベル物理学賞を受賞し

ている．ノーベル賞受賞者を輩出した研究室はノーベル賞受賞者が出やすいと言われているが，研究室で研究活動をしているとわかるような気がする．Huntington 先生は毎日朝夕の2回研究室に来て大学院生，研究員の全員と研究，実験の議論をする．大学院生がテーマが難しすぎると悲鳴を挙げても徹底して決して安直なテーマに変えることはなかった．そのために落伍者が出て，またチャレンジングな大学院生が入れ替わり入ってくる．その結果，優れた研究者に淘汰されてくるという言わば厳しい道場のような研究室であった．このように先生の指導は徹底してきめ細かく厳格であった．私も研究に対する意識の変革が求められ，3年間，厳しい研究訓練を受け研究者として強靱さを身に付けることができた⁽¹⁾(図1)．

ところで，E. O. Kirkendall は銅と黄銅との相互拡散実験により Kirkendall 効果を発見し，金属結晶における金属原子の拡散がそれまで考えられていたような直接交換機構ではなく，空孔機構によることを解き明かした．第2次世界大戦前後の時期に Kirkendall の主張は多くの研究者から非難されその解釈が認められるまでには苦悩が続いた．Kirkendall



図1 Huntington 先生と中嶋(1988年ハンガリーバートン湖畔にて，拡散国際会議)．(オンラインカラー)

* Challenge to Originative Research; Hideo Nakajima
† 1824年に創立された米国における最古の理工系大学．
†† 結晶内の電子のバンド構造を計算する方法．



図2 Kirkendall 先生(1995年米国メリーランド州, ご自宅を中嶋が訪問して)。(オンラインカラー)

が如何に当時の常識を破る発見に至ったか, 私は米国のメリーランド州のご自宅を訪問し, 拝聴する機会を得た⁽²⁾⁽³⁾(図2). 黄銅に銅メッキして拡散対を作製し接合界面に Mo マーカーを挿入してそのマーカー間の距離を測定することによって格子面が移動したことを実証し空孔機構によることを突きとめた⁽⁴⁾. 拡散対のアニールに伴う体積変化を分離して説得力あるデータを得るために非常な苦勞をなされた. 当時, 拡散は隣接する原子が直接位置を交換する機構で起こると信じられており, 金属中に空孔が存在することも知られていなかった. この発見した結果を正当に認める研究者が少なく博士学位審査には指導教授の意向で格子面の移動は空孔機構ではなく拡散による体積変化であると妥協せざるを得なかったこと, それを空孔機構に覆した論文を投稿してもなかなか受理されず査読に長時間を要したこと, この混乱によって準教授への昇格審査に困難が生じたことなど, Kirkendall には苦難が続いたが, それを見事に克服したことに私は強い感銘を覚えた. 私は Kirkendall 先生から 8 時間にも及んだ話を伺い, 研究者は自らの手で正確な実験結果を取得し既存の学問や知識に惑わされることなく新学問領域を構築する勇氣を持たなければならないということを学んだ.

この二人の先生に共通することは, 当時, 金属中に空孔が存在することが知られていなかった時代に, 空孔が存在し, それが拡散を起こすことを明確に解明したことである. Huntington は, 量子力学電子論を用いて銅中の自己拡散の活性化エネルギーを計算し, 直接交換機構を否定し空孔機構で拡散が起こることを理論的に明らかにした⁽⁵⁾. 一方, Kirkendall はほぼ同時期に格子面移動実験から直接交換機構を否定し空孔機構で拡散が起こることを実験的に明らかにした⁽⁴⁾.

私はたまたま出会うことのできた偉大な研究者・教育者から研究に対する厳格な姿勢や研究哲学を直接学ぶことができ, その後の自分の研究活動の精神的基盤を築くことができたように思える. このように, 若い時に勇氣をもって貪欲に優れた研究者から多くを学び取る必要がある. 特に欧米には, 想像を絶するような素晴らしい研究者がいる. そのような研究者から研究哲学を学び取る姿勢が必要ではないか.

2. 物性研究からもの作り研究に転じるきっかけ

RPI 在職中, 東北大学金属材料研究所の増本健先生が Troy に立ち寄られた. 隣の Schenectady の General Electric 社の研究所で講演をなされるというので同行させていただいた. そこで先生が開拓されたアモルファス合金の研究の経緯を聞き, もの作りの研究の面白さを知ることができた. その後, 私のアパートの居間で, これまでやってきた鉄鋼の研究からアモルファス合金の研究にドラスティックに研究テーマを変えた決断の経緯と苦勞話を伺い感動した. 当時, 伝統を重んじる金研で, しかも基礎鉄鋼学部門担当者がアモルファス合金を手掛けるには勇氣と成功への読みがなければできないものではない. その後, D. Shechtman 博士は準結晶を発見し, 2011年にノーベル化学賞を受賞している. このアモルファス合金と準結晶金属は20世紀の金属構造体の最大の発明発見と位置付けることができる. また, この二人の先生に共通することは新しい構造を有する金属の発明と発見であり過去の経緯にとらわれない自由な発想の下での独自の信念に基づいた研究を行ったことである.

私は研究経歴の前半25年間は物性研究をしてきたが, 増本先生の鉄鋼→アモルファス合金の研究の大転換に啓発され, 後半25年間はポーラス金属の「もの作り研究」に転向した. 私の場合は物質を変えたのではなく物性→もの作り研究と手法での大きな転換の舵をきることになった. この転換でスタッフと大学院生を擁する研究室のアクティビティが低迷するリスクを回避するために数年間は私だけが先行研究と称してポーラス金属の研究を行ない, 「これならば行ける」と判断してから研究室のテーマに昇格させた⁽⁶⁾. もの作り研究をしていると想定したものができなかったり, 予期しない珍現象に出くわしたりすることが多々ある. この種の失敗実験に落胆するのではなく, その究明こそがこの失敗を成功に導くことができる. 私は拡散や状態図に関する知識と経験があったので失敗の原因を多くの場合, 究明することができた. これまでの25年間の物性研究がその後のもの作り研究に役立つことになるとは予想もしなかったことである. 研究者として1つの研究分野一筋に研究を行うのも大切だが, 新分野開拓に果敢に挑戦していく姿勢も大きな価値がある.

3. 手作り実験の勧め

私は大学在職中に, 先行研究と称して研究室のスタッフや大学院生が行っている研究とは別に自分自身で実験をしてい

たが、その際は工場の技術職員に頻繁に工作を依頼することができた。しかし、最近は大学や研究所の工作センターは縮小されたり廃止されたりで実験に必要な部品や装置を外注しなければならないことが多くなってきた。ちょっとした工作も外注となると大学の工場と比較して1桁、あるいは数十倍も費用がかかってしまい、研究に大きな負担となってしまう。私の場合、大学定年後に在籍した(公財)若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)には一般工作を依頼できる技術部がなかったが、幸い旋盤、ボール盤、フライス盤、切断機などの一連の工作機械が揃っていたので、自分で操作して実験に必要な部品、簡単な装置を作製することができた。初めは不格好な工作物しかできず、実験に支障をきたすこともあったが、次第に工作が上手になって大学の技術職員レベル程度の技能を身に付けることができた。

実験に必要な工作物を外注すると、出来上がるのに時間がかかること、多大の費用を要することなどのデメリットがある。一方、自らの手作りで工作できると、安価で短時間で工作物を得ることができるというメリットがある。現在は企業の研究所において毎日、実験に専念しているが、エネ研での工作物作製の経験がものを言っている。例えば、発想に至ったアイデアを実験で試したいと思ったときに、簡単な工作物であれば翌日には自分で作ることができ、アイデアが正当であるかどうか、実験で判断することができる。もしこれをせずに外注となれば、多大の対価を支払って何か月も待たなければ試し実験を行うことができなくなる。そのうち着想したアイデアも陳腐になってしまうかもしれない、気が抜けてしまうかもしれない。アイデアがでた直後に実験で実証できるメリットは実に大きい。プロ野球の選手ならば打率3割が合格ラインとすれば私のアイデア着想の成功率はそれよりも低い。だからこそ長期に待つのではなく、即刻決着が付けられると、失敗実験の対策、アイデアの不備の軌道修正を短時間で実践することができる。その結果、修正が加えられたアイデアの成功率を大幅に引き上げることができた。

いまの大学院生や若手研究者は手を汚さない実験に走る傾向があり工作など面倒だと思ってしまうかもしれないが、モノづくりや工作技術を習得して簡単な実験に必要な部品や装置を自分で作製することをお勧めしたい。そうすることによって、試行錯誤する研究や実験を迅速に実施でき研究の進捗度を飛躍的に加速することができる。気軽に試し実験ができれば、アイデアがどんどん出てくる。この繰り返しによって研究のレベルは向上する。

4. 技術要素の集合としての実験方法

実験方法は多くの場合、複数の実験技術要素から成り立っている。図3に示したように、実験プロセスを技術要素に細分化する。細分化された実験技術要素は既知の、既に確立された実験技術要素 K と未知の実験技術要素 M が混在して構成されている。実験技術要素 K は採用して無難に実施できるが、未知の実験技術要素 M は未知であるが故に採用して

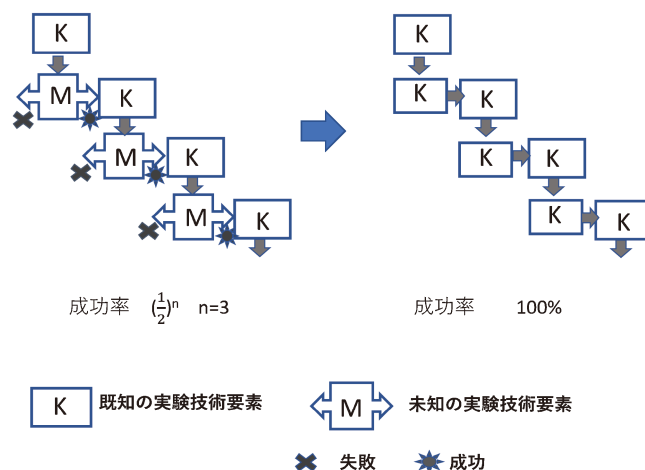


図3 実験方法の実験技術要素への細分化：(左図)KとMの混在した実験方法、(右図)Mを既知化した(M→K)場合の実験方法。(オンラインカラー)

成功するかもしれないし、失敗するかもしれない。その確率が半々であるとする1つのMを実施する成功率は50%、その後、2つ目のMを実施する成功率は $1/2 \times 1/2 = 1/4$ (25%)に減ってしまう。3つ目のMを実施しようとする、成功率は $(1/2)^3 = 1/8$ (12.5%)になってしまう。すなわち、多数の未知の実験手法を導入しようとする、成功率が急激に落ち込んでしまう。

そこで、手作り実験によって個々の未知の実験技術要素を予め成功に導いておけば、多数の実験技術要素から構成される実験を高い成功率で成功に導くことができる。細分化された未知の実験技術要素Mを手作り試し実験で短期間に迅速に解決しておけば、全工程の実験を長期を費やさずに成功に導くことができる。もしこのような技術要素の細分化を行わずに個々の実験技術要素Mを未達成のまま、実験を行うと、実験に失敗した場合、どのプロセスで失敗したのか特定が難しく、失敗実験を繰り返すうちに泥沼化し迷路に迷い込んでしまう。このような意味からも手作りの試し実験の効用は大きい。

5. おわりに

独創的研究に協同研究は必要か？

以前、NHKでプロジェクトXという番組があった。企業の研究者が自社の製品化のために集団体制を編成して、研究者、技術者がそれぞれの強みを出し合い、「補完して」目的の製品化を達成した成功シナリオである。この種の開発研究には集団体制が功を奏する場合が多い。しかしながら、基礎研究では、あるいは学術研究では個人的能力が発揮されるべきで、集団での協同研究は不向きであろう。独創的研究には「補完する」という概念はない。未解決課題に悩み続け、自己を律して困難との挑戦によって初めて血路が開けてくる。一匹狼の心構えで独創性を発揮すべきではないか。

我が国では生き抜くために多くの人と協調した精神を持つことが大切とされ、それが研究にも反映されている。我が国の研究者は流行の研究に迎合しやすい。皆がやっているから危なくない、石橋をたたいて失敗しないように橋を渡ろうとする傾向が強い。しかしながらチャレンジングな研究を行うには失敗と言うリスクが伴う覚悟が必要であり、そのような気構えで研究を進めないと独創的な研究はできない。むしろ非流行の研究を堂々とやる気構えが必要ではないか。独創的研究をやりたいと思うなら、非流行の分野を選び他の追随を許さないくらい独走することが大切だと思う。

文 献

- 日本金属学会会報, **34**(1995), 461-467.

- (2023年3月22日受理) [doi:10.2320/materia.62.537]



中嶋英雄

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

1977年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了

1977年 米国レンスレア工科大学・博士研究員

1980年 東北大学金属材料研究所助手，助教授，岩手大学教授を経て

1996年 大阪大学産業科学研究所・教授

2011-2017年 日本學術會議會員

2012年 大阪大学名誉教授，(公財)若狭湾エネルギー研究センター・所長

2019年 岩谷産業株式会社中央研究所・技術顧問、
現在に至る

専門分野：ポラス材料学，拡散

◎ロータス型ポーラス金属，オープンチャンネルアルミニウムの作製・応用開発.

★ ★