



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-30

研究は体育会系のノリで 始めてみてはどうか

Enthusiasm for Experiments will Help You
in Research

江坂久雄 元防衛大学校

Hisao Esaka



1 はじめに

会報の編集委員会が私に期待したであろうことは、企業の研究所と防衛大学校という中立機関の両方を経験することによって得たことを若い研究者・技術者に伝えてほしい、ということかも知れない。しかし、それは非常に大きくかつ重く、自分自身として、まだ十分には整理ができていないため、次の機会まで先送りさせてもらいたい。

とはいえ、せっかくいただいたチャンスであるので、本稿では私が主として担当してきた製鋼技術や鋳造技術の研究開発の進め方、特に実験装置や実験方法について、防衛大学校にいた時に考えていたことを回顧的に書いてみたい。

2 敢えて何も調べずに 研究を始めてはどうか

製鋼の鋳造工程の役割りは、精錬工程で所定の組成になった溶鋼をきちんとした形に成型し、圧延や鍛造の次工程に回すことであると個人的には理解している。多くの鋼種はインゴットキャスティング (IC) から連続鋳造 (CC) へと置き換えられ、そのプロセスは大きく変化したが、この役割りは変わっていない。うまく事が運べば素晴らしい中間製品ができるが、時々うまく行かないと欠陥品ができてしまう。主な欠陥は「割れ」「偏析」「介在物」の3つである。相互に関連することも多いが、この3つの欠陥は大昔から変わっていない。多くの鋳造技術者の努力により、欠陥のひどさや発生頻度は徐々に改善され、現在ではほとんど問題にならないレベルにまで到達している。しかし、これらの欠陥が皆無になったわけではなく、品質の厳格化や新商品、新鋼種の開発などのために、現在でもこれらの欠陥防止あるいは抑制の研究開発が

進められている。

欠陥抑制技術あるいは軽減技術の研究開発はおおよそ次のようなステップで進められるであろう。(1) 実態調査を行う。(2) 生成メカニズムの仮説を立てる。(3) 検証のための実験を行う。(4) 対策方案を立て、検証する。この流れが最もオーソドックスなもので、100年前と同じスタイルであろう。欠陥の種類が変わらない。研究開発の基本的なスタイルは変わらない。しかも、100年前の近代鉄鋼業の黎明期と現在の我々とで、研究開発に携わる人のレベルがそれほど変わるとは思えない。そうであれば、我々が思いつく仮説や実証方法などのアプローチは昔の誰かが考え付いていたとしてもおかしくない。

それらの研究成果は口頭発表や論文、あるいは特許などの知的財産として残っているだろう。ここで問題になることは、過去の先人の知見をしっかりと調べてから自身の課題に着手するのがよいかどうかであろう。ここで私は、敢えて何も調べずに着手することを薦めてみたい。その理由は5点ある。

- 1) 洋の東西の100年超の蓄積である。関連情報は相当多い。古さと言語の問題から電子化されていないものも多い。調べるだけで時間がかかる。
- 2) 調べてみると、思いついた内容はすでに検討されていたと気づくことが多い。違いは多々あるにもかかわらず、気付いただけでモチベーションが著しく下がってしまう。
- 3) 追体験するだけでも意味がある。 $n=1$ だった先人の結果が $n=2$ になり、信頼性が上がる。また、本人にとっても、書類上の体験・理解よりも一段深い体験ができ、検討方法に自信を持てるようになる。
- 4) 仮に全く同じアプローチ方法であっても、目的が全く同じ、ということはないと思われる。目的が異なれば、得られた結果の解釈や利用法は当然異なり、新たな視点の研

究開発につながる。

- 5) 同じ実験をして解析をするにしても、解析方法や分析方法が昔とは格段に向上していることが多い。したがって、当時は得られなかった詳細なデータが得られ、新たな発展につながる。

私が実際に推進していたマクロ偏析対策の研究を例に挙げながら、もう少し具体的に述べたい。日本鉄鋼協会内の高温プロセス部会のバックアップもあり、2009年度から「ミクロ・マクロ偏析制御研究会」という研究会を担当した。そこでは図1に示すように、①現場材を含む铸件の実態調査、②ミクロ偏析モデル、③マクロ偏析モデル、④可視化実験による物理モデル、という4つの柱を有機的に結び付けながら、連铸材、IC材そして遠心铸造で作る圧延ロールに見られる偏析問題を4年間（実働3年+まとめ1年）で解決の糸口を探ろうと活動を開始した。

当時、マクロ偏析モデルについてはICなどに見られる逆V偏析に適用できるモデルは構築されつつあったが、連続铸造の中心偏析に関するモデルはほとんど手付かずの状態であった。また、連铸铸件の古い実態調査結果はあるものの、モデルの検証に使えるようなラボでの制御された条件での実験結果はないと思われた。したがって、研究会の中でマクロ偏析モデルの検証実験をする、という位置づけでマクロ偏析の生成を明らかにする小型実験が必要となった。

その時の状況がまさに前記した状態であった。マクロ偏析抑制のための研究開発は実は古くから行われており、非常に多くの成果・報告例があるはずである。さらに、ラボスケールでの再現の試みも多く実施されているはずである。もちろんいくつかは知ってはいたが、それらをいちいち調べていたら果たしてどうなっていたであろう。

追体験でもよい、条件をできるだけシンプルにする、形状をできるだけシンプルにする、測定をできるだけシンプルに

する、などの条件を満足させること、また中立機関では溶鋼を使った実験や大量の溶融合金を用いた铸造実験は極めて難しいという制限の下で実験方法をトライアンドエラー方式で探索した。時間はかかったが最終的にはAl合金を用いて再現性良く、マクロ的な偏析を生成させることのできる鋳型設計ならびに铸造実験方法が確立できた^{1,2)}。この鋳型製作そして実証実験をしてくれた学生の名前を冠して、現在この鋳型は「佐藤鋳型」と呼ばれている。鋳型のマクロ偏析再現のポイントは凝固過程を模式的に描いた図2に示すように、故意にブリッジングを生起させることにある。ブリッジングのために溶湯補給が不十分になるために凝固収縮による負圧が過大となり、溶質を濃縮した凝固末期の樹間液相が負圧部に移動してマクロ偏析が生成するというシナリオである。いくつかあるマクロ偏析生成メカニズムのうちの一つを取り上げたもので、この点では決して新しいものではないが、200cm³程度の小容量の溶融合金を用いてマクロ偏析が再現できる点、再現性が良い点が特徴として挙げられる。Al合金ではTiB₂系の接種剤を铸造直前に添加することにより等軸晶化が可能であり、さらに添加量によって等軸晶径を変化させることができるという特徴がある。この性質を利用して、等軸晶を微細にするほどマクロ偏析は軽微になることが明らかにでき、凝固組織制御によるマクロ偏析低減の可能性を示せたと考えている。もちろん、マクロ偏析モデルの検証実験としての役割りも活動期間内に果たすことができ、研究会の成果に寄与できたものと考えている。

この佐藤鋳型は2014年度－2016年度の「固液共存体の挙動制御によるマクロ偏析低減研究会」（主査：北海道大学 大野宗一先生）でさらに発展し³⁾、2018年度－2020年度の「凝固過程の偏析・欠陥の3D/4D解析研究会」（主査：九州大学 宮原広郁先生）のもとでは鋳型デザインに改良を加えうえて、鋼に適用されるだけでなく、ベンチマークテストとして採用してもらえることになり、生みの親の一員として大変光栄に思っている。これも、必要性に迫られ、先人の成果を詳しく調べずに見切り発車をして、モチベーションの高い間に着手したことが結果的に幸いしたと考えている。

もちろん言うまでもないことであるが、レポートにする時には、きちんと先人の業績を調べ、リスペクトしながらも先人の不備だった点を指摘し、私が問題点を解決して新しいデータを出した、という風にストーリーを再構築する必要がある。

3 はじめから完全・完璧は狙わない、また狙えない

「配慮の行き届いた、きめ細かい研究者であれば、あらかじめ起こりうることを想定し、最初から100点満点の研究をす

研究項目の位置づけ

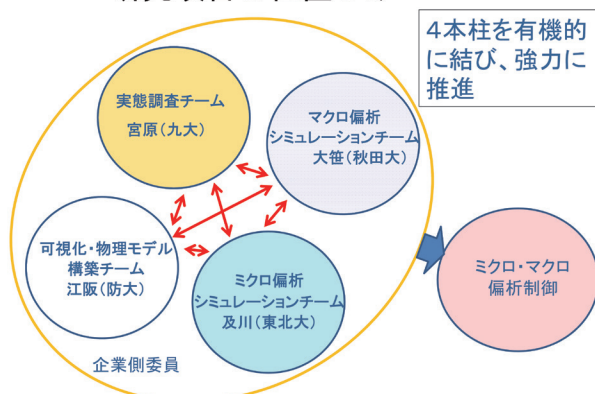


図1 ミクロ・マクロ偏析制御研究会の構成

るべきである」。理想である。きっとこの考え方に基づいて研究遂行している研究者の方もおられるだろう。しかし、それは極めてまれなケースであると個人的には思っている。大多数は数多くのトライアルアンドエラーの末に確立された手法で遂行されていると思う。だから私は、なんでもいいとは言わないが、それらしいことをまずやってみよう、と言ってみたい。やはり私の担当したことであるが、遠心鋳造についての実験研究を例に述べてみる。

鉄鋼協会の創形・創質部会の鋳鍛品工学フォーラムの活動で、「見学会+講演会」という企画があった。その一環として、「遠心鋳造による鉄管製造」という催しがあり、遠心鋳造によって大量に鉄管を生産している現場を見せてもらった。バケツに水を入れて、ぐるぐる回すと、バケツの水は遠心力のためにこぼれない、この原理で、高速回転するパイプ形状の鋳型の中に熔融金属を流し込むと、自然にパイプができる。ネットシェイプキャスティングの典型例であり、原理は非常に簡単である。しかし、遠心力を受けながら凝固するとはどういうことだろう？と非常に興味を持った。当時、透明有機物を用いた凝固現象の可視化実験の経験が少しはあったので、同様の手法でやってみたら面白いことが分かるかもしれないと、比較的軽い気持ちで着手した。

正直に言うと、ここでも前節と同じで、全く先行研究例を

調べなかった。しかし、始めてしばらくしてから、姜さん、大中先生の先駆的な研究⁴⁶⁾があることを知った。幸いにも直接観察の方法や視点が異なっており、事なきを得たが、たつぷりと冷や汗をかいたことを覚えている。実は透明有機物を使って遠心鋳造の可視化実験などを思いつく人は誰もいないと思込んでおり、当時は全くの「慢心状態」だった。前節の「敢えて調べずに着手する」ということは「謙虚さ」とセットでないといけないということだ。話を戻す。

やろうとした可視化実験は、図3に模式的に示すように、遠心鋳造の断面を切り出すように要素を取り出したものである。円板状のガラスセルに透明有機物を封入し、それを回転させながら周りから冷やす。冷えて固まる様子を回転体に取り付けたカメラで撮影する、という方式である。言葉や模式図では簡単に書けるが、具体的な方法が決まらない。何から決めるか、が重要だった。

重要なパーツは透明有機物を封入するガラスセルであるため、これから決めた。小さすぎず、逆に大きすぎず、手際よく取り扱えることが必須であると思われたため、片手で持てるサイズとして、直径100mmとした。これは遠心鋳造で作られる製品サイズとは関係なく、実験のしやすさ、という観点だけから決めたことになる。構造上、回転軸を通せない

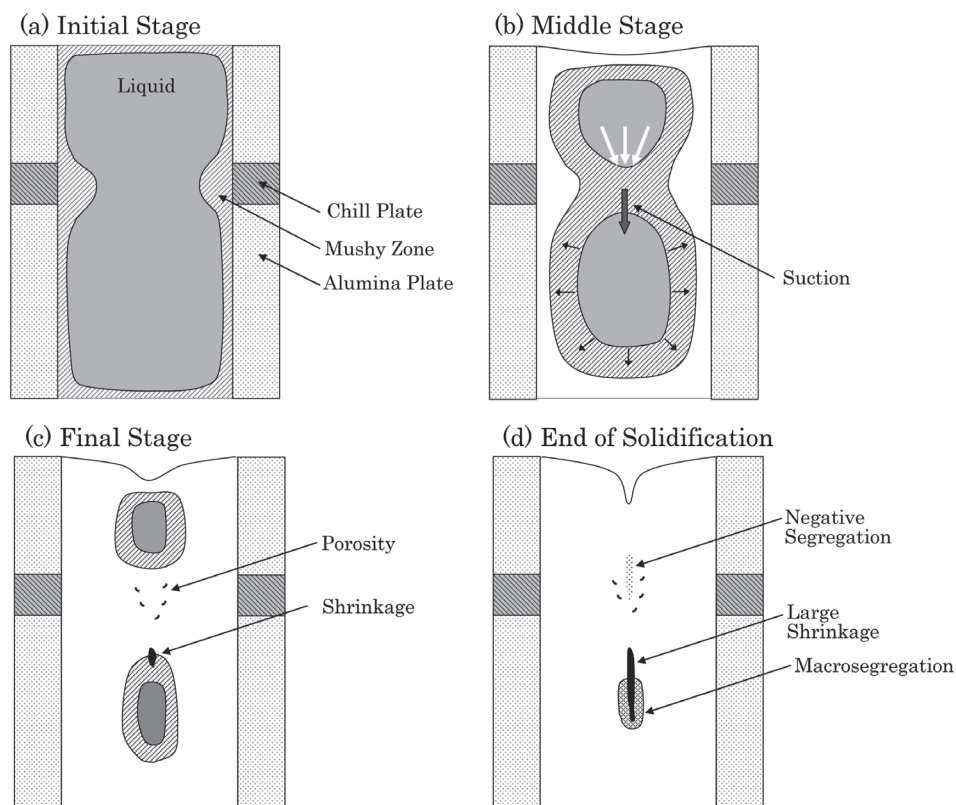


図2 佐藤鋳型での凝固の進行と偏析の形成機構（模式図）

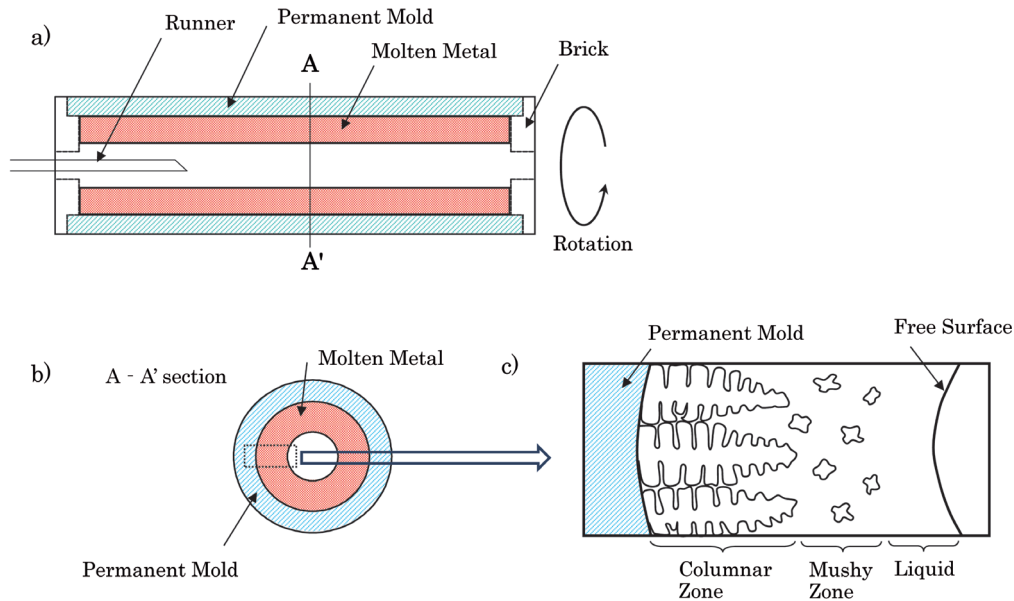


図3 横型遠心鑄造の可視化実験装置の考え方

間は経験から1分程度と想定できたので、ここでも手際よくガラスセルを固定できる方法を模索した。また、ガラスセルのギャップ（2枚のガラス板の隙間）は実験上重要な因子だと予想できた。ギャップが広いとガラス板の影響が小さくなり流動は正しくとらえられる。しかし、固相はセルの中で重なり合うため、凝固の様子を正確に撮影できなくなる。逆にギャップが狭いと固相形態は正しくとらえられるが、流動が制限されたものになってしまう。何水準かの予備実験で、広すぎず、狭すぎない中位のギャップの1.3mmに決定した。それは手近にあったプレパラート用のガラスの厚みであった。ガラスセルのサイズとギャップは比較的初期の段階で決められた。

直接観察がどのように見えるかわからない、面白いと思って始めたが、本当に面白いかどうかはわからない、研究として成立するかどうかはわからない、もちろんお金も潤沢にあるものでもない。そのような状況であったので、アングルで一辺が250mm程度の箱を自作し、その中心部に円状のガラスセルを固定した。そしてガラスセルの中心が回転軸になるように自作の軸受けを取り付け、自転車用の歯車とチェーンを用いた「手回し方式」とした。8mmビデオカメラを箱の一部に固定し、ガラスセルと一緒に回せるようにした。

ガラスセルの外側から内側への指向性凝固のためにはガラスセルの外側を冷やすことが必要であり、ガラスセルホルダーは冷却水を流せる構造とした。しかし、これだけで予備的に実験すると、透明有機物が一気に凝固する「過冷凝固」と思われる現象がしばしば見られた。この原因は回転中に風があたり、ガラスセルの表面全体が冷えるためと推定され

た。そのため、ガラスセルホルダーに透明で観察の妨げにならない風防板を取り付けた。さらに、内部を加熱しないとバランスよく指向性凝固が起こらないことが分かったため、ガラスセルホルダーの中央部に自作のヒーターを取り付け、温度勾配が付けられるようにした。以上のように加熱・冷却機構と風防板を取り付けることにより、ガラスセルホルダーとしての機能が良くなり、遠心鑄造時の巨視的な凝固現象がそれらしくなった。

照明と撮影用カメラが不十分であったため、現状での観察結果⁷⁾とは比べ物にならない。しかしまさに手作りの1号機で、大変不鮮明であるが、生成した等軸晶が図4に示すように何とか見えるようになった。また、手回し式のため回転にはムラがあったが、生成した等軸晶が回転と対応するように振動して見えた時には大変感動した。装置作りを始めて1年で、遠心鑄造の可視化実験は大変面白く、研究として十分成立するという感触が得られた。

2年目以降は防衛大学校の研究費のほかに、日本鉄鋼協会の鉄鋼研究振興助成や研究会の研究費のおかげで、モーター回転方式への改善、照明方法の改善、カメラ等の映像記録方法の改善、等軸晶挙動の定量的解析などを進めることができた。確かにお金をかけることによって進化した部分は多いが、基本設計の重要な部分—例えば1) ガラスセルのサイズおよびギャップ、2) 防風板の必要性、3) 加熱/冷却の機構など—は1号機の手動式の実験装置の時に基本仕様を決定したものであった。まず始めて、やりたい実験ができるように徐々に積み上げてゆく方式をとったことが幸いしたと考えている。

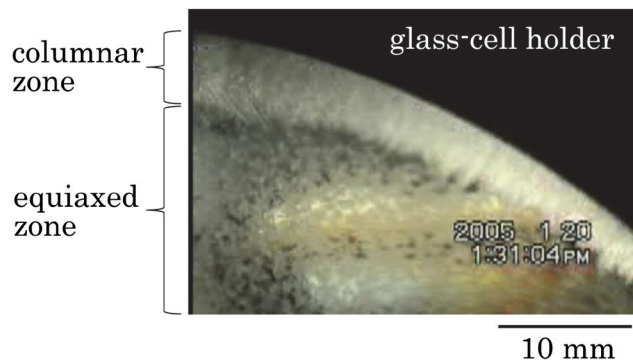


図4 横型遠心鑄造中の凝固中の様子(1号機での観察結果)

実験装置に関して裏話を一つ。シミュレーターの電動化については自作はとても無理なので、ある会社に設計・製作をお願いに行った。「約15kgのものを約1000rpmで回転させたい」と希望を伝えたが、「回転するものの重心はどこか」と質問され絶句。ガラスセルホルダー、カメラ、照明器具などを観察に適した場所に取り付ける予定であったので、重量はおろか重心の位置など設計段階で判る訳がない。正直にそう答えると、相談に入る前に門前払いを食らってしまった。シミュレーターのバランス合わせは学生さんに苦勞をかけたけれど、1000rpmで回転させるとなると小さなねじ1本の1回転分の距離でもバランスが変わるので、大変神経を使う作業だった。

4 研究の段階によっては体育会系で進めるべき

現場操業では色々な因子が関係し、どの因子がどのように寄与するかわかりにくいことが多い。さらに、各因子が関連することによって、現象解明をより複雑にしている事象が多い。さらに、現場で起こることは確率的に生起することが多いと言われる。例えば鑄造工程の欠陥発生は決定論的に起こることももちろん多いが、対策技術が発達してきた今日では発生頻度が低く、確率論的に起こることも多いようだ。これらに関して、最近ではAIを活用して解析を進めようとする動きがあると聞く。操業的にはうまく対応できるのかもしれないが、学問的には解明が進むのだろうか。個人的にはよく判らない。

欠陥発生について言えば、たとえ確率的事象であっても、当然原因があるはずであり、欠陥抑制を課題としている現場技術者は原因をはっきりさせ、対策を講じて最終的には欠陥発生を抑制しなければならない。成熟すればするほど、技術レベルが上がれば上がるほど、より大変なミッションになる。このような時、現場から少し離れた研究所や中立機関に

欠陥発生メカニズムやその対策技術についての検討依頼が舞い込むことがあるだろう。日本鉄鋼協会の前記した研究会活動なども多分にその性格を帯びているかも知れない。

しかし私は、欠陥発生メカニズムの直接的な解明はラボでは不可能であると言ってみたい。特に確率的に発生する欠陥の場合のメカニズム解明は無理であると言いたい。なぜなら、通常の実験操作をしていれば、ラボでは欠陥は発生しないからである。再び鑄造工程での例を出すなら、50kg程度の溶鋼を鑄型に鑄造しても、現場材に見られるような割れ、偏析、介在物の欠陥はどれも発生せず、均一なインゴットができあがる。だからこそ材料研究に携わる研究者が新成分系の材料開発や、新しい加工熱処理などのプロセスメタラジの開発などが推進できるとも言える。これは、量が原因かもしれないし、あるいは量に基づく温度変化が原因かもしれないし、また外乱があまりにも少ないからかもしれない。いずれにしても、ラボで実施する小型の実験では現場で起こることはまず生じしない。まして、確率論的に起こる現象に出会うことはない。そもそもラボ実験では現場操業ほどn数を稼げないことも理由の一つであるが。

したがって、通常の実験では無欠陥品しかできないので、欠陥品をわざわざ作るために『特殊な』操作をする必要がある。例えば第2節の「佐藤鑄型」のところで述べたように、考えられるメカニズムの少なくとも1つを故意に起こるような工夫をして、欠陥が発生する現象を得ておくことが前提となる。そうすれば、その欠陥発生がどの程度抑制できるかを指標として、対策技術の探索評価が可能となる。佐藤鑄型の例では、等軸晶の微細化および形態複雑化がマクロ偏析抑制の対策となりうることを示せた³⁾。ここで、欠陥の発生頻度は必ずしも100%である必要はないが、高くないと実験回数が限られたラボ実験では対策技術の評価が難しくなる。このように、プロセス研究—特に欠陥生成や欠陥抑制—にかかわるラボ実験の場合には、実験に対する考え方を根本から変える必要があるように思う。

繰り返しになるが、佐藤鑄型の場合のようにラボ実験で欠陥を発生させるには、いくつかあるメカニズムの少なくとも一つを考慮した、特殊な操作をする必要がある。逆に言うなら、そこで考慮しなかったメカニズムは一切入り込まない。考慮しなかったメカニズムは仮説としての検証は全くなされてないことに注意が必要である。

では、いくつかある仮説のうち、考慮する仮説を選ぶのはどうするか。私の場合を思い出してみると、仮説の検証方法を考え、その仮説の補強あるいは棄却のための「官能試験」を頭の中でやっていたと思う。偏析や割れなどの特性値に作用する、例えば温度のようなパラメーターを変化させると、特性値にどれくらい影響するかを過去の知見や知識に照らし

て推測していたと思う。その官能試験で絞り込めたらその仮説を第一位とし、検証するための実験装置/方法を考える。

しかし、そう簡単には絞り込めないことの方が多だろう。ラボ実験の良いところは実験条件を限定することが容易である点である。しかも一般には小型であるので、あまり大がかりにはならず実現できる可能性があることである。そうであれば、条件にもよるが、仮説1のみを検証する実験装置/方法、仮説2のみを検証する実験装置/方法、などなど、時間と予算の制約はあるものの、思いつくことを実行してみればよい。官能試験という事前検討は必要だろうが、仮にうまく機能しないのであれば、無駄な時間を消費することなく、思いつくことをどんどん試してみるべきだろう。まずやってみるという、まさに体育会系のスタイルが適している。もちろん、いつでも、どのような研究テーマでも通用するものではないが、こんなスタイルで進めた方が良いステージがありうることを知っておくと何かの役に立つだろう。

5 さいごに

「研究に使用する実験装置が完成したら、その実験研究は90%完成したも同然である。」社会人1年目の私の上司だった中村泰氏の教えである。実験主体の研究なら比較的わかりやすいが、モデル主体の研究についても同じことであろう。アルゴリズムや収束条件等を含めたモデルの大筋ができれば90%できたも同然と読み替えられる。これは実験方法という言葉に変えても同じだろう。時間的には残りが10%で済むということはないが、方法を確立するまでが大切だということだ。しかし、ここまでをしっかりとっておけば、あとはデータの蓄積が主体になり、それほど気を使うことはない。だからこそ、やりたい実験ができるかどうか、やりたい計算ができるかどうか、ある程度高い成功率が得られる実験装置/方法になっているかをよく吟味するべきである。前述した

佐藤鋳型も遠心鋳造シミュレーターもそれなりのレベルまできたので、装置としては完成したものと思っている。佐藤鋳型はさらに発展しそうな状況なので楽しみだ。

実験をしていると、「この実験はAさんどうまくいくが、Bさんがやるといつもうまくいかない。」などと、『都市伝説』的に言われることがある。「人による」、「人を見る」、ともよく言われるが、それは本当だろうか。

ある実験が人には全く依存しない、ということはおそらく無理であろう。しかし、誰がやっても再現性のあるデータが取れないと、やはりどこかおかしいと考えたい。実験に対する習熟は必要だろうが、その人にしかデータが取れない、その人でないと実験が成立しない、というのでは装置/方法が完成していない、ということの意味していると思う。だれがやっても、いつやっても同じように動作する実験装置や実験手順を確立することが必要で、ここまで来たら研究は90%完成と宣言してよいのだろう。

実験装置を作ること、実験方法を工夫することは大変面白いことなので、臆することなく、まず着手してほしい。体育会系のノリで。

参考文献

- 1) 佐藤文人, 江阪久雄, 篠塚計: 鉄と鋼, 99 (2013), 101.
- 2) 佐藤文人, 江阪久雄, 篠塚計: 鉄と鋼, 99 (2013), 108.
- 3) 有高暎一, 江阪久雄, 篠塚計: 鉄と鋼, 104 (2018), 293.
- 4) 姜一求, 大中逸雄: 製造工学, 69 (1997), 119.
- 5) 姜一求, 大中逸雄: 製造工学, 69 (1997), 240.
- 6) 姜一求, 大中逸雄: 製造工学, 69 (1997), 815.
- 7) 江阪久雄, 坪根誠一郎, 宮田寛之, 渡辺大起, 金子紘士, 河合康輔, 篠塚計: 鉄と鋼, 103 (2017), 763.

(2019年2月28日受付)