

材料における プロセッシング デザインと 異分野融合の重要性

Importance of a Processing Design and Different Field Fusion in Materials

Key-words : Innovation, Failure, Connection, Creation

林 大和

Yamato HAYASHI (Tohoku University)

1. はじめに

昨今、さまざまな研究分野において異分野横断および分野融合が求められている。これは従来の縦型の単分野研究では、拡大する社会要請に対応できないだけでなく、研究の新しい展開のために重要であるからである。しかしながら、分野間で横断や連携するケースは多いが、異分野と融合しているケースは極めて少ない。革新的な発想や材料の実現のためには、異分野との横断連携でなく融合が重要である。本稿では、プロセッシングデザインにおける異分野融合の重要性を解説する。

2. 材料合成におけるプロセッシングデザインの重要性

材料合成において、マテリアルデザインは非常に重要であるが、プロセッシングデザインもそれ以上に重要である。なぜなら、素晴らしいマテリアルデザインがあっても、適切なプロセッシングデザインがなければ、実現できないためである。しかしながら、プロセッシングは、あくまでも手段であり、それ以上でもそれ以下でもない。料理で例えれば、美味しい料理がマテリアルデザインであり、その調理レシピがプロセッシングデザインであるといえる。本特集号の反応場は、そのプロセッシングデザインにおける調理手法である。材料合成の論文においては、実験手法に合成手順が記述されている。他の研究者の論文を参考にその合成をトレースされたことはないだろうか？その際に再現性がある場合とない場合があることは、実験をしている多くの研究者は経験している。これはなぜだろうか？答えは明確である。論文における合成手順は、料理に

マテリアルデザインはプロセッシングデザインがなければ実現できない

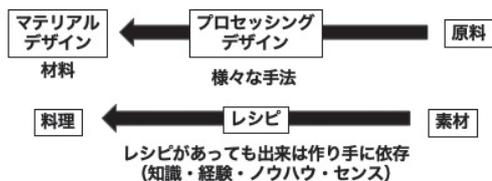


図1 マテリアルデザインとプロセッシングデザインの関係

における調理レシピであり、できる材料（料理）は、研究者（料理人）に依存するためである。材料合成は、料理と同じであり、原料と合成手順だけでなく、作製者の知識・経験・ノウハウによる機転や創意工夫に依存することが多い。本質的には、プロセッシングデザインは研究者の第六感が特に重要であると考えられる（図1）。

3. 分野横断・連携とイノベーションのための分野融合の違い

研究者は、自分の専門分野については多くを熟知している専門家であるが、その分野から離れると、多くの場合が別分野ではほぼ素人である。分野横断や連携は、その研究者自身の不足している分野を強化するために行う場合が多い。分野横断や連携は、あくまでも小分野が異なる研究者同士が、小分野を横断・連携して、中分野や大分野を構築する想定内の場合が多い。ある材料において計算と実験と評価の研究者が連携したり、またある目的材料において、セラミックスと金属と有機材料の研究者で横断したりする場合もある。これらは極めて自然な流れである。これまでは独立した分野の研究者が想定内の分野間で横断や連携を行っており、融合していない場合が多い。

研究には革新的なイノベーションが重要である。材料研究者が遭遇するセレンディピティもその一つである。革新的イノベーションの実現には、従来研究や研究ロードマップ上にない奇想天外なアイデアと発想が必要である。そのためには、想定内の分野横断・連携ではなく、想定外の分野横断が重要である。例えば、電気的特性のセラミックス研究者とバイオの研究者、機械的特性のセラミックス研究者と電気的機能性ポリマーの研究者と横断連携することは、ほぼないと言っても過言ではない。つまり全く接点のない分野では、横断連携がない場合が多く、融合も然りである。想定外の横断連携は、分野間で接点がないため、実現するためのボーダーが高く、そのためミッシング領域を生じる（図2）。

革新的なイノベーションの実現には、学術分野では想定されていない結果が重要であり、そのためには想定外のコネクションが必要である。

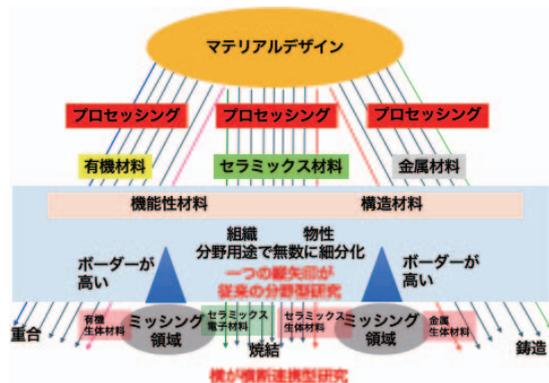


図2 典型的な従来型の研究スタイル

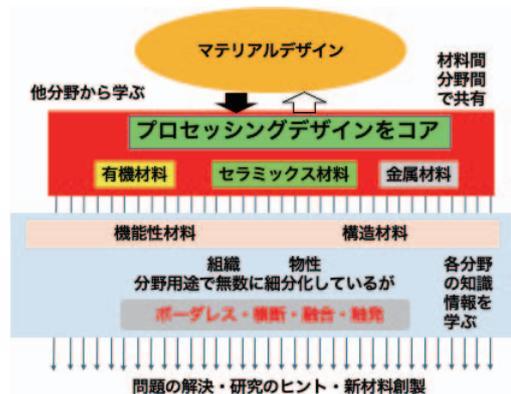


図3 プロセッシングデザインをコアとする異分野融合スタイル

4. プロセッシングデザインにおける分野間コーディネート的重要性

分野間の融合は、非常に困難である。なぜなら、前述している通り、自分の専門分野以外の不足している分野を強化するため、分野横断し連携するのであるが、研究者同士の領域の侵犯や模倣などの問題で、近い領域では横断連携を超えることは実際には難しい状況にある。仮に融合した場合でも、連携研究者同士が似たような研究になる場合がある。イノベーション創出のための他分野との横断連携を超えた融合を進めるための一つの考え方として、プロセッシングデザインにおける考え方を提案したい。

プロセッシングデザインは、機能性材料、構造材料、無機材料、金属材料、有機材料などのさまざまな分野やジャンルを問わず、材料を創るためには必要で必然な要素である。つまり材料研究者に共通する事項である。従来の学会や研究会は、材料の機能性において縦型に特化して強化しようとする趣旨であり、分野やジャンルを横断し難く、研究者が多分野に特化した研究会に参加する機会は非常に稀である。機能性に特化した場合、その機能性と関係ない研究者は参加しない場合が多い。しかし、どの材料領域でも材料プロセッシングは行われている。セラミックス分野で例えるならば、機能性材料でも構造材料でも、パウダープロセッシングやバルク焼結技術は、共通するプロセッシングデザインであり、共有すべき事項である。無機材料、金属材料、有機材料においても、それぞれにおいて共有すべき技術やノウハウが多く存在する。

料理で例えるならば、日本料理と中華料理、フランス料理は、それぞれ特徴のある料理（マテリアルデザイン）であり、料理技法（プロセッシングデザイン）もそれぞれ歴史と特徴があり独自に進化している。しかしながら、料理人は、他分野の料理をリスペクトして、自分自身の分野に取り込んで新しい料理を作り出

している。材料分野における横断・連携は、コース料理に例えれば、中華料理がオードブル、日本料理がメインディッシュ、フレンチでデザートを作製といったような状況が多いのではないだろうか。材料分野における分野融合は、さまざまな分野の寄せ集めではなく、他分野に学んだ材料のトータルコーディネートが重要である。同分野のリスペクトは想定内であるが、異分野からのリスペクトは想定外で可能性は無限である。研究者のコーディネートする能力は、重要であり第六感につながるものである。第六感とは、五感以外での感覚で、理屈で説明しにくい事象の本質をつかむ感知能力のことである。研究におけるセンスはこの第六感である。この第六感とは、持って生まれた才能の先天的なものもあるが、学習や体験によって後天的に向上することが可能である。学習は重要であり、これは研究における基礎力である。より知れば基礎学力の向上につながる。体験は、研究における応用力である。体験をすることによって、経験値が向上する。料理人や技術者の才能は、経験による応用展開力とコーディネート力に依存している場合が多い。多くの料理レシピを熟知していても、多くの料理を食べていても、創る経験がなければ技術は上達しない。材料も多くの学術書や論文を読んでも、手を動かさなければ良い材料ができないことと同じである。料理も材料も理論と実践が重要である。想定内のコーディネートは、その分野であれば誰にでも想定内である。異分野間の連携融合が想定外のコーディネートであり、プロセッシングデザインは誰にでも、新しい分野間融合とそれによる新しい材料と学問領域を構築できる可能性がある。料理に例えるなら、和食が、中華とフレンチの良い部分を取り入れ融合し、新しい美味しい料理を創作することである。レンジでチンよりも、創意工夫で愛情のこもった美味しい料理が、材料には重要であると思われたいだろうか。

5. 研究における知識・雑学と異分野融合の関係

研究において、知識は重要である。研究者はその専門分野においては、知識は豊富であるが、その分野を離れるとどうであろうか？研究において自分の専門分野を離れると、知識に疎くなりやすく対応できないため、分野連携する機会が多いのではないだろうか。研究者は、自分自身の分野では、学術知識を精力的に吸収しようとするが、分野をいったん離れ、興味があまりない分野だとあまり積極的ではない場合が多い。異分野融合のためには研究者は単分野のプロフェッショナルは当然であるとともに他分野・多分野に精通したジェネラリストたるべきである。

そのためには、専門分野以外の知識、雑学が重要である。専門分野以外の知識は、革新的な研究をするためには非常に重要である。これは従来の単分野では対応できない問題の対応だけでなく、その分野では常識でも、他分野では非常識の場合（その逆の場合も）があり、井の中の蛙、大海を知らずとならないことが重要である。研究内容は単分野における各論的でなく、多分野で総論的に把握することが良い研究につながる。

ノーベル物理学賞の小柴昌敏東大名誉教授は、「研究者は、物事をたくさん知っているのではなく、何が未知なのかを理解している」と言われている。極めて深い言葉である。論文や学術書を読めば、知識は増える。しかしながら、論文や学術書には、既知の事実や理論は記述されていても、何が未知なのかは示されていない。またノーベル医学生理学賞の本庶佑京大名誉教授は「論文とか書いてあることを信じない。自分の目で確信ができるまでです」と言われている。何が事実で未知なのかの判断は、研究者の見識の深さと広さと経験を合わせた第六感によるものが大きいと考える。何にでも積極的に興味を持ち、他分野、異分野も学ぶことが研究者には重要である。

6. プロセッシングと失敗学

材料研究者は材料合成における失敗は、何に起因していると考えているだろうか？材料デザインにおいては、計算によって構造や物性はプルーフされている場合が多く、それを実現できないプロセッシングデザインが問題と考えているのではないだろうか。もちろんそもそも物理的に、その材料デザインが成立しない場合もある。

一つの材料実験や論文が成立するためには、その材料を合成するための無数の失敗で成り立っている。ビギナーズラックな場合もあるが、ほとんどの場合はより良い材料合成のためにプロセッシングデザインの試

行錯誤を繰り返している。料理で言えば、美味しい料理のためには無数の試作と失敗が必要である。この失敗が材料合成には重要である。

失敗は成功の素、失敗学という言葉があるように、材料合成だけではなくすべての分野において失敗は重要な要素でありながらも、ほとんどの失敗は材料合成においては学術的に体系化されていない。論文では、成功したプロセスのみを記述している場合がほとんどである。つまり、失敗は研究者のプロセッシング体験であり、ノウハウのみで存在する機会が多い。材料プロセッシングにおける体験や失敗は、材料合成において重要である。例えば、AI（人工知能）における例を示したい。近年、材料分野も含めあらゆる分野でAI化が進んでいる。マテリアルデザインにおいては、既往の理論やそれらに基づいた理論の構築によって、AI化が進んでおり、コンピュータでの高効率な材料合成を推進している。しかしながらこのマテリアルデザインを実現するためには、このマテリアルデザインを実現するためのプロセッシングデザインが必要である。プロセッシングデザインもAI化が進められているものの、AIによる材料合成の高度なレシピへの導入は難しい状況である。理由としては、プロセッシングデザインのAI化のためには、合成のビッグデータが必要であるが、これまでのAIのビッグデータには、成功のデータはあっても、失敗のデータは極めて少ない状況であるからである。論文は成功データのオンパレードであるが、失敗は論文にならない。確実性の高いプロセッシングデザインのAI化のためには、無数の失敗のビッグデータが必要である。また失敗以外にも経験のビッグデータも必要である。例えば、ほぼ同じプロセスでも、添加物の投入タイミングが微妙に異なるだけで、生成物やその物性が大きく変化した体験は、多くの研究者が経験している。

プロセッシングは、経験が重要であり、ノーベル化学賞の吉野彰旭化成名誉フェローも言われているように「失敗しないと絶対に成功はない」。失敗の経験と、その失敗した経験をどう生かすかが、料理と同じで材料合成には重要である。

プロセッシングにおける経験と失敗は、材料合成において重要であり、それぞれの分野で研究者個人によって蓄積されている。プロセッシングは材料合成を行う研究者の万人に共通する事項であり、プロセッシングデザインをコアにして、他分野から学び、材料間や分野間で共有することが融合のために重要である。さまざまな材料において、機能性材料や構造材料をはじめ、分野用途で無数に細分化している。例えばプロセッシングデザインをコアにすれば、分野間のボーダレス化に

より横断連携から、異分野における触発・融合により、単分野では解決できなかった問題や、研究のヒント、新材料の創生につながると考えられる。古典的な単分野の学問体系でなく、多分野の融合による新たな学問体系の構築が、革新的なイノベーションを実現する (図3)。

7. セラミックス材料と他の分野とのコラボレーション

筆者の研究のバックグラウンドは、セラミックスであるが、現在金属ナノ材料を中心に研究を行なっている。現在の筆者の推進している金属ナノ材料の研究は、セラミックス材料と有機材料と環境問題が関係するSGDs (持続可能な開発目標) に直結した研究である。従来の金属ナノ粒子は化学的手法では原料として、硝酸塩等を用いる。硝酸塩を原料とした場合、合成後に硝酸の除去と処理が必要である。しかし、セラミックスナノ粒子合成や金属ナノ粒子合成において、硝酸等の発生した廃棄物やその処理について記述している論文はほぼ存在しない状況である^{1)~3)}。これは当然で、廃棄物処理は環境分野における問題であるためである。しかし洗浄は材料研究者にとって手間暇がかかる作業である。そこで金属ナノ材料の金属源として、金属酸化物に注目した。金属酸化物は、金属イオンと酸素イオンで構成されている無害で安全な典型的なセラミックス材料である。原料に酸化物セラミックスを利用することで、洗浄と廃棄物処理工程が不要になった^{4),5)}。銀ナノワイヤー合成の場合、これまでは特定の結晶面にPVP (ポリビニルピロリドン) などの高分子保護剤を付着させて、異方成長させるのである。そのため、合成後に導電性を担保するために、高分子保護剤の除去が必要である。新しい銀ナノワイヤー合成手法においては、針状有機銀前駆体を用いモルフォロジーを保った状態で還元する手法で、保護剤除去の工程を不要にした (図4)^{6),7)}。

このように他分野の材料やプロセッシングを知ることにより、問題解決のヒントや新しい材料や分野領域を開拓できることは多分に存在する。

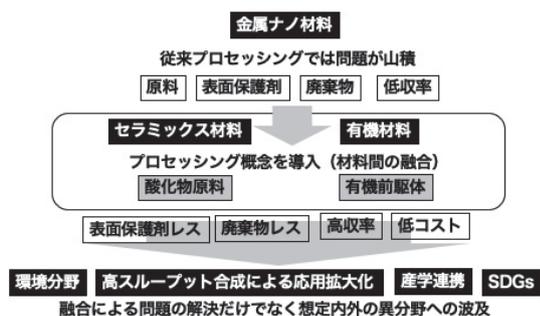


図4 プロセッシングデザインの融合による領域拡大の例

8. まとめ

近年、学術において、物性や構造が主眼となり、プロセッシングがなおざりにされている傾向がある。しかしながら、ものづくりの本質はプロセッシングである。本号の特集はマテリアル・ファブリケーション・デザインであり、セラミックスを始め、金属材料や有機材料に関連したプロセッシングを取り上げている。雑学を深め自身の研究の問題解決や研究範囲を広げるためにも、新たな異分野融合の実現のためにも是非とも読んでいただきたい。自分と全く関係のない分野や研究に、自身の研究のヒントは隠されているかもしれない。情報過多な現代社会では、すべて掌握するのが不可能であるが、情報収集するアンテナ能力と得られた情報を的確に取捨選択する能力と異なる事象をコネクションする能力が重要である。異分野融合で期待されるのは、最先端技術でも“Advanced”は当然で、“Cutting-edge”である必要がある。つまり、斬新な切り口、エッジの効いた研究が求められている。材料プロセッシングや調理の本質は、創意・工夫である。いかに従来にはないイノベーション材料、美味しい料理を作るかである。

イノベーション材料を実現する手段の一つとして、異分野融合におけるプロセッシングのイノベーションがあり、これはハードルが低いながらも、どの分野の研究者でも今からはじめることができる、極めて有効な手段である。多分野・他分野にも学び、コネクションし融合する能力が、創造性のある革新的なイノベーション材料の実現に重要である。

文 献

- 1) 林 大和, 粉体工学会, 56, 409-416 (2019).
- 2) 林 大和, 滝澤博胤, 粉体および粉末冶金, 63, 926-939 (2016).
- 3) 林 大和, 粉体工学会, 51, 578-585 (2014).
- 4) D.Ishikawa, Y. Hayashi and H. Takizawa, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 8, 4482-4487 (2008).
- 5) Y. Sekiguchi, Y. Hayashi and H. Takizawa, *Mater. Trans.*, 52, 1048-1052 (2011).
- 6) K. Sugawara, Y. Hayashi, J. Fukushima and H. Takizawa, *Cryst. Res. Technol.*, 50, 319-330 (2015).
- 7) 藤田恭輔, 林 大和, 福島 潤, 滝澤博胤, *J. Ceram. Soc. Japan*, 127, 655-662 (2019).

筆者紹介



林 大和 (はやし やまと)
 東北大学大学院工学研究科准教授。大阪大学大学院工学研究科博士後期課程終了。日本学術振興会特別研究員 (DC, PD), NEDO フェローを経て現職。専門分野は、ナノ材料の高スループット材料プロセッシングと産学・産学官連携の推進・実用化。
 [連絡先] 〒980-8597 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-07 東北大学大学院工学研究科
 E-mail: hayashi@aim.che.tohoku.ac.jp