

科学技術と日本の将来 「温故知新の材料サイエンス」

金沢大学
理工学域自然システム学類 3年
加賀谷 健太

1. はじめに —材料創成と地球環境は両立できるか?—

人類は長い年月をかけてセラミックス、金属、プラスチック、半導体などの材料を開発し、それらを利用して社会を発展させてきた。特に第二次世界大戦以後の材料の進歩は目覚ましく、生活を豊かにする多種多様な材料が発明され文明は進化した。しかし、材料の開発には負の側面もある。

例えば、毒性が懸念される圧電材料が一例である。センサーとして利用される圧電素子は、機械エネルギーと電気エネルギーを変換する性質（圧電効果）があり、スマートフォンから最先端の走査型プローブ顕微鏡まで幅広く使用されている。こうして圧電素子は欠かせない部品であるが環境汚染の原因となる鉛が含まれる PZT が多く使用されており、鉛フリー圧電材料の開発が進められている。しかし、PZT に遜色ない鉛フリー圧電材料の開発は困難を極め、電子機器による環境負荷軽減を目的とする EU での RoHS 指令では PZT は適用除外にされている。

このように、環境に配慮した高機能材料を開発する試みはあるものの、なかなか実用化には達していない。また、世界規模で資源の枯渇と環境破壊が進み、やみくもに材料開発競争を繰広げる姿勢は転換を迫られている。そして、地球環境に配慮した持続可能な社会の実現のためには、依然として新しい材料の開発が重要なのは変わりなく、これからの材料創成には多くの困難が立ちほだかっている。

2. 自然界から見つかる問題解決のヒント —物質に着目する—

これらの困難を解決するヒントは、自然や先人の知恵を学ぶことにあると思う。自然界には、機能性材料の創成のヒントになる物質や生物が見うけられ、ヒントをもとに研究開発が進められている。

例えば、鍾乳石の形成プロセスを手本とした人工的な結晶成長は世界的に盛んな研究の一つである。鍾乳石は自然に普遍的に存在する炭酸カルシウムで構成された天然の結晶（鉱物）であるが、研究が実用化されれば省資源かつ低環境負荷を満たす電子デバイスの生産への応用が期待されている。その中でも結晶核生成過程の制御は大きな課題であり、任意の場所だけに結晶成長を緻密に制御することが重要である。

そこで、天然の鍾乳石の結晶成長の原理に従いプロセスを模倣する研究が進められ、他の無機物質でも自然界の結晶核成長を模倣して狙った場所で結晶を成長させる研究も盛んである。これらの方法で作成された結晶は、高価なレアメタルや有害な化学物質を利用しない上に、高温の電気炉での焼結や真空中での合成を必要としない。

つまり、こうした鉱物といった自然界の物質が作られるプロセスは低環境負荷かつ省資源を両立しており、まさしく理想的な環境調和型の材料創成である。こうして自然界の物質は、現代の最先端の科学技術を遥かに超える環境調和型の材料創成へのヒントを教えてくれる。

3. バイオミネラゼーション —生物から学ぶ材料創成—

こうした材料創成へのヒントは生き物からも見つかる。例えば、現代の ICT 技術の根底を支える光ファイバーの製造には原材料に毒性のある気体を用い、大量のエネルギーが消費されている。この光ファイバーは、二十世紀に発明されるより遥か前から自然界に存在していた。南極海に生息するカイロウドウケツという海綿は、人が発明した光ファイバーを超える高性能のファイバーを持つ。高強度で壊れにくく複数の波長の光を利用可能なこのファイバーは自然界で常温常圧で形成されている。

こうした生物による無機鉱物形成反応はバイオミネラゼーションと呼ばれ、身近な生物にも見つけられる。美しい構造色を示す真珠、鋭い磁鉄鉱の歯をもつカサガイ、シリコンの代替材料となる黄鉄鉱のウロコを持つ巻貝など、自然界にはいくつもの例がある。生物は、こうした様々な機能性材料を温和な条件下で作り出すが、合成の鍵は少量のタンパク質である。

例えば、非常に硬い一方で耐衝撃性に優れるウニの刺。刺は主成分の炭酸カルシウムで構成されるが、僅かに含まれるタンパク質が結晶の成長を制御する。硬くて脆い方解石結晶に、タンパク質が複合化されることで、刺に柔軟性が付与され欠点が克服される。こうして、ウニの刺は高い強度と折れにくさを両立させている。

ウニの刺を初め、緻密に有機物と無機物を組み合わせて高機能材料が作られるケースがよく自然界では見当たる。バイオミネラゼーションでは、有機物の官能基を作用させたりテンプレートとして働かせたりすることで、温和な条件下でも材料の機能が発現するように無機物の核形成を調整し結晶成長を制御している。こうしたバイオミネラゼーションを真似て、有機物で結晶成長の制御を試みる研究が盛んになってきた。

有機物と無機物との絶妙な複合化は、自然界が教えてくれる材料創成へのヒントであり、大きなイノベーションをもたらす可能性が期待されている。そして、有機-無機ハイブリットプロセスによって、低環境負荷かつ省資源を両立した機能性材料の創成を実用化する取り組みが進められている。何気ない生き物でさえも、私たちの困難を救ってくれるヒントを多く教えてくれる。

4. 環境調和型材料の社会実装に向けて ―古代文明からの再発見―

自然界を手本とした環境調和型の材料創成の研究は進んでいるが、自然界から学んだ環境調和型の材料を人はこれまで利用してきたのだろうか？驚くべきことに、古代ローマ文明で使われていた火山灰等を原料としたローマンコンクリートはその一つと考えられ、使用されたイタリアのコロッセオは建造から 2000 年を越えた現在にも残る程の高い耐久性が特徴である。最近、ローマンコンクリートを模倣したジオポリマーの研究が進められ、いくつかの優れた特徴がある。

まず、資源を有効活用できる上に耐久性に優れていることである。ジオポリマーは、石炭火力発電で発生するフライアッシュも原料として利用することが可能である。こうして産業副産物を廃棄物ではなく有用に利用することが可能であるだけでなく、従来のポルトランドセメントの弱点であるアルカリシリカ反応が起こりにくく、耐久性に優れており施工に利用され始めている。

そして、最大の特徴は、ジオポリマーの製造で発生する二酸化炭素はポルトランドセメントよりも大幅に少ないことだ。ポルトランドセメントは原材料の石灰岩を高温で加熱するプロセスで大量の二酸化炭素の排出されており地球温暖化の一つの原因であるとの指摘がある。つまり、ポルトランドセメントからジオポリマーへの転換は、セメント業での二酸化炭素排出を抑制する可能性が期待される。

近年、高度経済成長期に建造された橋脚や道路といった社会インフラの崩壊が危惧されている。そして、パリ協定批准を受けてセメント製造における二酸化炭素の排出は問題となっていて、セメント製造での更なる二酸化炭素排出抑制が求められている。その両方を解決する技術こそがローマンコンクリートから学ぶジオポリマーだと私は思う。

5. 最後に ―環境調和型の材料創成を目指して―

これまで、数々の自然に倣った材料創成のヒントを見てきた。これら自然界が材料創成に与えてくれるヒントを以下 3 つのポイントにまとめ、将来の材料創成の方向性の概観を図に示した。

1. 自然にある物質を巧みに利用して、高機能性材料をつくる
2. 低環境負荷と省資源を両立して、常温常圧のもとで目的の物質をつくる
3. 絶妙に有機物と無機物を複合化することで、結晶成長を緻密に制御する

現代の科学技術では、材料の機能性を追求すればするほど、材料創成に大量の資源を消費し環境に負荷を押し付けてきた。それに対して、自然は自然現象の本質を底とした根本的な原理・法則に立脚する洗練された材料創成を成し遂げている。今こそ、地球温暖化や環境汚染に立ち向かうために、自然の叡智と人の科学技術が融合した材料創成が必要である。

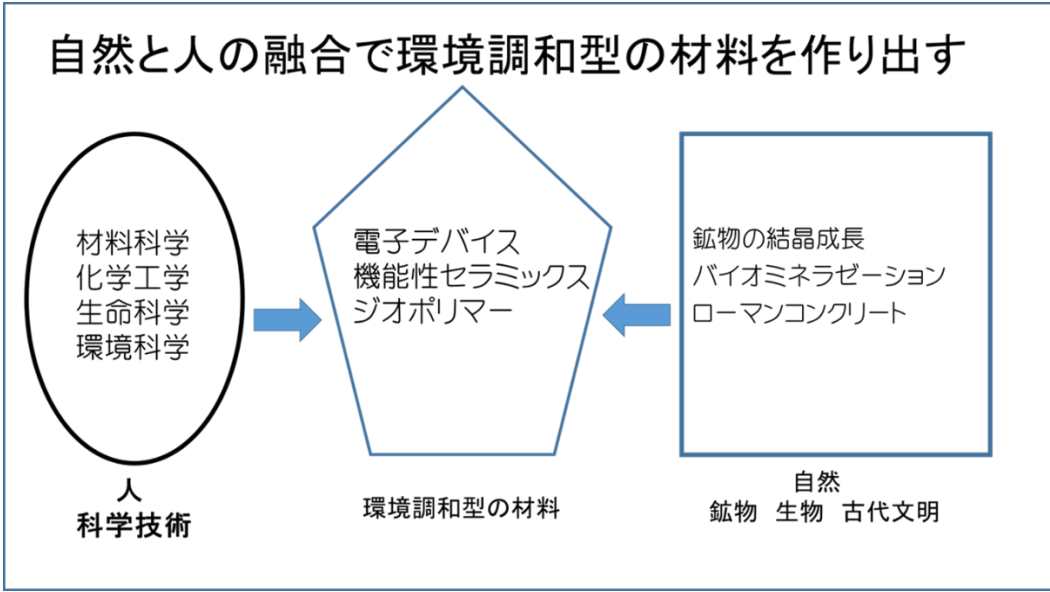


図. 自然と人の融合で環境調和型の材料を作り出す

【参考文献】

<書籍>

1. 「自然に学ぶ材料プロセッシング」、名古屋大学 21 世紀 COE「自然に学ぶ材料プロセッシングの創成」教科書編集委員会編、2007 年 3 月 30 日、三共出版、pp. 21~34、pp. 91~111
2. 「新・社会環境マテリアル—セメント系材料の使命と持続可能な社会—」、坂井悦郎・大門正機編、2017 年 3 月 1 日、セメント新聞社、pp. 322~331
3. 古代世界の超技術、志村史夫著、2013 年 12 月 20 日、講談社、pp. 126~182
4. V.C.Sundar, et al., Nature, p. 424, pp. 899-900 (2003)、2003 年 8 月 21 日、Nature Publishing Group
5. C.A.Orme, A.Noy, A.Wierzbicki, M.T.McBride, M.Gratham, H.H.Teng, P.M.Dove and J.j.deyoreo, Nature, p. 411, pp. 775-779 (2001)、2001 年 7 月 14 日、Nature Publishing Group

<WEB>

1. 産業総合技術研究所「高性能な鉛フリー圧電セラミックスを開発」(2014 年 1 月 22 日記事)
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140122/pr20140122.html
(閲覧日：2018 年 1 月 20 日)
2. 積水化学工業株式会社「自然に学ぶ研究事例 ローマンコンクリートに学ぶ建設材料」
https://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/nextgen/bio_mimetics/1184221_27856.html
(閲覧日：2018 年 1 月 20 日)
3. 積水化学工業株式会社「自然に学ぶ研究事例 バイオミネラルに学ぶ有機／無機複合体の開発」
https://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/nextgen/bio_mimetics/1241138_27856.html
(閲覧日：2018 年 1 月 20 日)