

特集「自然界から学ぶ粉体技術」を企画して

岐阜大学、東北大学 高井 千加
国立研究開発法人 物質・材料研究機構 不動寺 浩
中部大学 黒川 卓
株式会社ノリタケカンパニーリミテド 伊藤 雅章

枝葉を広く携えた大木は、小さな生き物たちに外敵から身を守る隠れ家を提供する代わりに、栄養補給の手助けを受ける。自然界を操り何代も続く生き物は「輝かしいデザインの宝庫」だ。すでに絶滅した種も含め、生物はすべて、何百万年もの自然選択（自然淘汰）を経て、最適化されてきたデザインの成功例である。栄養源や保温・保湿効果をもたらす土壌を操り積層・成形する自然界の住人はまさに粉体技術の達人とも言える。進化が生み出したその見事なデザインから、私たちは多くを学ぶことができる。本特集では、粉体を操る生き物の紹介と粉体製品へ発展させた例を紹介する。

「生態系から学ぶ、人新世を生き残る科学技術 — バイオミメティクスからエコミメティクスへのパラダイムシフト —」として、**公立千歳科学技術大学**の**下村政嗣氏**より総論をいただいた。人間の経済活動に伴うさまざまな営為によって指数関数的に増大した痕跡が、新たな地質時代“人新世”を迎えることになってしまった。これは不可逆的かつ地球環境収容の限界値“プラネタリーバウンダリー”をすでに超えたとも言われ、炭素中立（Carbon Neutral）、循環経済（Circular Economy）、そして自然再興（Nature Positive）の観点から、科学技術がもたらした功罪についてさまざまな分野で議論されている。ヒトから人への進化は、確かに進歩だったはずだ。生態系の攪乱においても生物がしたたかに生き延びていることを考えれば、メビウスの輪のように淘汰と適応が無限大に繋がっているとも言える。ここに人と生物の大きな違いがあるのだろう。つまり、人は自然から資源を搾取することで進歩してきた。そしてさらに右肩上がりの成長を追い求め、プラネタリーバウンダリーを脅かすことになった。“生物に学ぶ”という意識は古くからあり、機械工学、生体工学、建築などさまざまな領域でバイオミメティクス（生物模倣）が用いられている。しかし、CN、CE、NPが問われる今、バイオミメティクスの功罪にも言及していかなければならない。生態系の淘汰と適応を人類が模倣するにはまだ認知不足だ。人間中心ではなく生物中心として世界を俯瞰し、SDGs wash（実態が伴っていない状況）ではなく、真に自然との共存と完全なる循環システムの構築が必要であることを述べられた。

「甲殻類陸生最大種「ヤシガニ」のハサミの硬さは鋼鉄並み：究極の強靱材料を目指して」とし、**国研物質・材料研究機構**の**井上忠信氏**より、ライオンの噛む力に匹敵するヤシガニのハサミの強さの秘密が紹介された。ハサミの外骨格の断面を観察すると、主要組織は硬質層/中間層/軟質層から成り、表層の硬質層の強度は高強度鋼並みの硬さに対し、軟質層の強度はその1/5程度であった。また硬さ試験で材料に押し込む圧子の圧痕が見られず靱性もある興味深い材料であることが確認された。さらに三次元組織を観察すると、硬質層は薄い単板が数百枚積層した合板構造であり、単板はキチン-タンパク質からなる直径数百ナノの束が水平に並び、厚さ方向にらせん状に回転しながら積み重なったらせん積層構造となっていることが分かった。つまり、巨視的には異なる層からなる不均質構造をとり、微視的には各層が規則性・異方性のある複雑な構造を持ち、剛と柔が複合した軽さと強靱さを兼ね備えている。生物が持つ複雑な組織は人工物では作れないとも言われるが、多様で複雑な自然物を具現化し特性限界を突破する材料創出の可能性を活かすのは人の知恵である。ヤシガニは定期的に脱皮し、脱ぎ捨てた外骨格は体内に取り込み数日で強靱なハサミを再生する。一匹で循環型社会を実現している姿勢も学びたい。

「自然から学ぶ可逆的接合技術」と題し、**国研物質・材料研究機構構造材料研究センターの細田奈麻氏**より、リサイクルを基調としたものづくりへの要求に答える、接合部を簡単に分離できる接着技術が紹介された。接着と剥離は相反する力であるが、自然界の中には可逆的な接着の仕組みを取り入れている生物がいる。ヤモリの指裏には多くの毛が生え、被着面とファンデルワールス力で接着する。天井を難なく歩行できることから瞬時に剥離もできるわけである。毛の先端表面にある脂質層が剥離に寄与するようだ。昆虫が凹凸のある表面も歩行できるのは、脚表面の剛毛を覆う分泌液の働きによる。食虫植物のウツボカズラは、捕虫器官であるピッチャー表面をワックスで覆い、昆虫の脚の接着力を阻害するという工夫を施す一方、カメムシの一種は自身を捕えようとする植物の粘液との接触を妨げる分泌液を脚の表皮に持ち身を守る。生物が生きていくための作戦は緻密で興味深い。バイオミメティクスは、単に生物の形を模倣するのではなく、生物自身の作り方も模倣した「発生生物学的バイオミメティクス」へと進化し、ショウジョウバエのヘラ状接着性剛毛が骨組み形成後固化する単純なプロセスで発生することにヒントを得て作られたナイロン繊維が、強い接着力を示しながら脱着効果も持つという新しい材料が生まれた。生物が持つ、室温で最低限のエネルギー消費で複雑な微小構造を形成する環境低負荷技術の普及が期待される。

「生物の自己修復機能に学んだ次世代バイオミメティック材料の開発」と題し、**国研産業技術総合研究所極限機能材料研究部門の穂積篤氏**にマスクメロンの網目構造に着想を得た長期にわたり撥水機能が持続する皮膜が紹介された。生物が過酷な生存競争を生き抜くために生み出してきた特異な機能のなかで、“ぬれ”は、ハスの葉が有する超撥水・自己洗浄機能のように、我々の日常生活でも馴染みの深い物理現象のひとつであるが、これまでの表面に関するバイオミメティック材料は依然として使い捨て用途が多い。これは、ある特定の機能発現のために微細構造を模倣することに注力した結果であり、外部ダメージを受けた際の構造や機能回復、つまり自己修復機能が考慮されていないためである。高級フルーツであるマスクメロンの美しい網目模様は、果肉の成長に伴い生じた果皮のひび割れに油脂が分泌され補修された傷跡である。ここに着想を得て、ナノ空間を有する皮膜内部に補修成分を充填し、補修成分の徐放により機能が自発的に発現するだけでなく、外部からのダメージを受けた際、補修成分の移行により機能が回復、長期にわたり機能（防錆性、撥水性）が持続する分泌系バイオミメティック材料が生まれた。生物が進化と環境適応の過程で確立してきた究極のサステナブルなものづくりプロセスに倣い、そこに人類の叡智を加えることで、コストのみならず現代社会が抱える資源、エネルギー環境問題を解決する糸口を見出せるであろうと述べられた。

「コンニャク石の微細構造に学ぶ免振基礎の開発」と題し、**名古屋工業大学大学院の吉田亮氏、橋本忍氏、森河由紀弘氏、ウエスタンデジタル同の岩屋遼氏**より、曲がる岩石として知られるコンニャク石が持つ亀裂や微細構造を幾何モデルとした免振基礎への展開可能性を紹介された。コンニャク石の主成分は二酸化ケイ素であり、その起源は17億年前と古い。石英粒子の成長時に、粒子同士の接触部が互いに溶解する風化現象が起こり粒子界面に遊間が生み出され、いびつな形状の粒子が相互にかみあったインターロッキング構造が生まれた。この興味深い構造をジグソーパズルモデルとして表し、いかなる方向にも外れず単一形状のブロック要素が遊間を持ちながら連結したブロック集合体として設計した。荷重負荷時、遊間が開閉しブロックが回転するため応力分散することが3次元モデルの解析により確認され、実際に作製したブロック集合体に球体を落下させても跳ね上がらず球体を持つ位置エネルギーがブロック間の遊間に吸収され、幾何モデルがコンニャク石の特徴を表現できたと考える。構造物の直接基礎として用いた場合の振動試験では、一体型のブロックと比べて加速度を1/3程度まで低減することができ、ブロック集合体には揺れ難く・止まり難い振動吸収効果があることが述べられた。

「カイコを使った持続可能なものづくり」と題し、KAICO (株)の佐々木友樹氏、九州大学大学院工学研究院応用化学部門、九州大学未来化学創造センターの神谷典穂氏より、カイコ個体を反応器としたバイオ医薬品（組み換えタンパク質）の生産を目指した取り組みが紹介された。カイコは桑の葉を餌として体内で多様なタンパク質を生産できる。目的タンパク質の遺伝子情報をウイルスをキャリアとしてカイコ個体に直接導入すれば、生体内に目的タンパク質を蓄積することができるようである。2018年設立の九州大学発ベンチャーである KAICO (株)では、カイコバキュロウイルス発現系をコア技術とし、ラボスケールの組み換えタンパク質受託発現サービスから製品化に対応したスケールアップ生産体制を持つ。成果の一つとして新型コロナウイルスのスパイクタンパク質の発現と精製に成功したことを基盤とし、自宅で採血しポストに投函するだけで可能な抗体測定サービスを完成させ、感染拡大で混乱した社会に貢献された。カイコ発現系の強みは、培養技術未確立のウイルスに対するワクチン抗原など多様なタンパク質が生産できることやカイコの頭数の調整で製造スケールを調節できることである。種々動物用ワクチン向けに複数のパイプライン開発が進んでいるとのことである。

「バイオミメティクスに基づく生活アシスト手袋の摩擦向上」と題し、国産浜松医科大学の針山孝彦氏より、指紋を失った患者の QOL 向上を実現する指紋機能に代用できる補助具が紹介された。天井を這うことができるヤモリを支えるのは剛毛が引き起こすファンデルワールス力である。一方、何気なく使っている我々の指先は、指紋に凹凸があることで摩擦が発生し紙をめくったり物を掴んだりと複雑な動きができるとも言われる。抗がん剤の副作用で指紋を消失した患者にとって指紋代用の構造物の開発が急務であった。剛毛先端構造に類似した表面構造を持つ人工の布に高い接着性があると予測されたため、これを基盤とした生活アシスト手袋“ナノぴた”の販売に至った。抗がん剤の副作用は痺れや痛みを生じることが多く、手の保護や生活のアシストのために手袋を装着する時間が長い。通気性が悪ければいくら高性能であっても使用を敬遠される。また、アピアランスケアの観点から、デザインにも工夫が凝らされている。単に機能を持たせるだけでなく、長く使用できるという観点から指サックの開発も進んでいるとのことである。

「住宅分野のカーボンニュートラルを支える粉体技術」と題し、(株) LIXIL の井須紀文氏より、土の呼吸メカニズムを利用した自律型調湿タイル、多孔質セラミックス粒子を用いた真空断熱材が紹介された。世界共通の長期目標として脱炭素社会に向けた活動が活発化している。家庭でのエネルギー消費のうち、給湯と暖房の熱源が半分以上を占め、住宅の断熱性能向上がますます重要となった。天然原料であるアロフェンは湿度70%以上で水蒸気を吸着し、40%以下で放出するナノサイズの細孔を持ち、人間が快適と感じる湿度環境を提供できる。これを利用したタイルを作る際、焼成温度が重要となる。つまり焼成温度が高いと細孔径が減少し、低いと材料強度が低下する。アロフェンの特徴を活かす焼結助剤を加えることで低温焼成が可能となり、内装建材への展開が実現した。また、古来より日本では、蓄熱性、調湿性、防火性を兼ね備えた保管庫として、土を何層にも塗り重ねた土蔵が発展してきた。現在の日本では土蔵のような壁厚の確保は難しく、蓄熱の代替として高い断熱性を持つ真空断熱材が必要であった。高断熱性は対流空間を気体分子の平均自由行程以下にすることが効果的であり、ナノサイズの多孔質構造を有するセラミックス粒子を開発するに至った。北海道における実証試験では開発粒子を施工することで空調の消費電力削減が確認できている。

「人の役に立つものを作りたい」と願う研究者や技術者たちのお陰で我々の生活は豊かになった。今度は、ものが壊れたときにどう廃棄するかが問題となった。自然界の循環・適応能力は未知の部分が多いが、それでも、人の叡智を使い、チームとなってこの課題に立ち向かえば、自然との共存、循環システムの構築が可能になるはずだ。本特集がその一助になることを願う。