

Science & Technology Trends

科学技術動向

5
2010
No.110



レポート

p2.9 生物の多様性に学ぶ
新世代バイオミメティック材料技術の新潮流

p3.29 グラフェンの高速トランジスタ応用への
注目と課題

トピックス

ライフサイエンス分野

p4 サリドマイド製剤の催奇形性に関与する生体内分子の同定

情報通信分野

p6 日本発のプログラミング言語の初めての国際標準化

ものづくり分野

p8 充電電池・太陽電池を内蔵する小型省電力センサユニット

情報通信分野

p5 電力センサのグローバル・ネットワークへの接続

エネルギー分野

p7 石炭火力発電での木質バイオマス混焼を加速展開

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産学官から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々に読んでいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター センター長
奥和田 久美

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「科学技術動向・月報一覧」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

【連絡先】〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】03-3581-0605 【FAX】03-3503-3996

【URL】<http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】stfc@nistep.go.jp

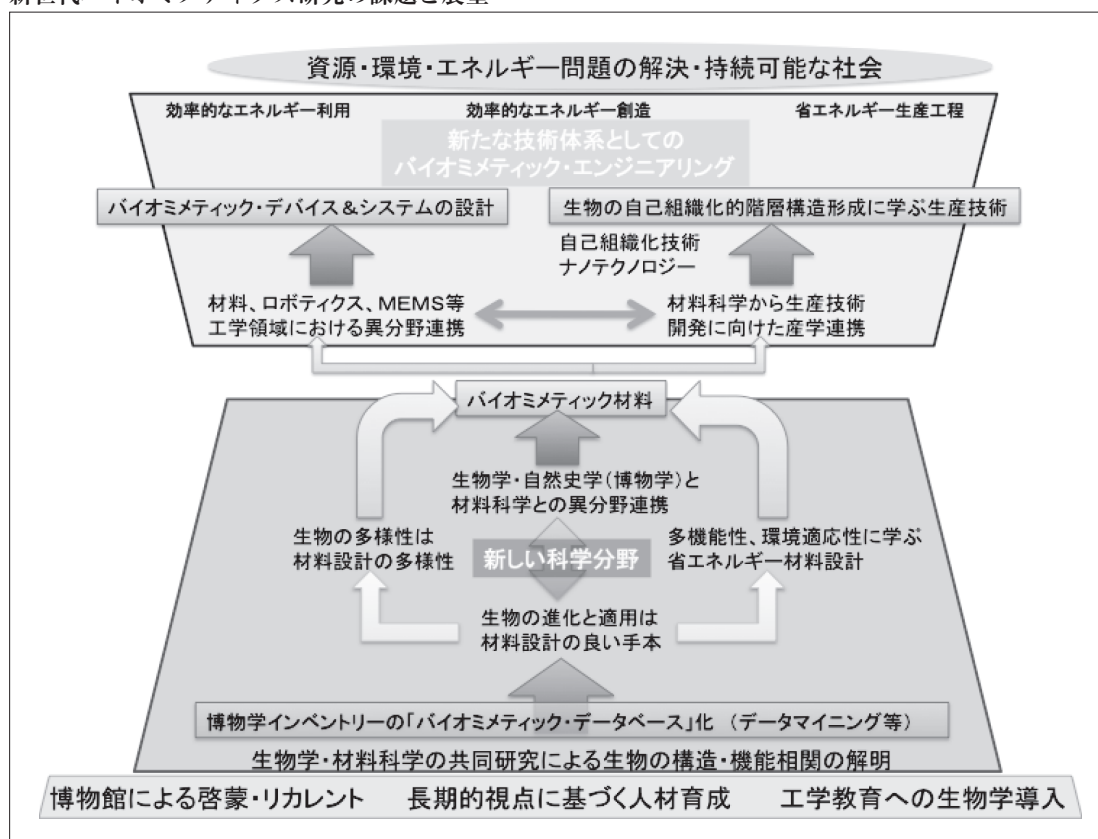
生物の多様性に学ぶ 新世代バイオミメティック材料技術の新潮流

欧米では今世紀に入り、バイオミメティクス (biomimetics) と呼ばれる「自然に学ぶものづくり」に関する研究開発がクローズアップされ始めている。蓮の葉の超撥水性を真似たセルフクリーニング・コーティング用塗料、蛾の目を模倣した無反射フィルムなど、昆虫や植物の表面が持つ特異なナノ・マイクロ構造と、それらが持つ様々な機能を模倣した「新世代バイオミメティック材料」とも呼ばれる新しい機能材料が注目を集めている。現代社会が抱えているエネルギー、環境、資源などの諸問題に対応できる「生産技術の革新」を萌芽する新しい科学技術体系をもたらす潮流として世界的に期待されている。

特に欧州における新世代バイオミメティクス研究開発は、生物学からの問題提起をナノテクノロジーなどとの連携で強く推進されている。人材育成とネットワーク形成を推し進め、博物館や産業界を巻き込んで進んでいる。

一方、我が国のバイオミメティクス研究は「縦割りの」であり、異分野連携が積極的に推進されているとは言えない状況にあり、欧米の研究開発例をキャッチアップしフォローするだけであった。我が国に新世代バイオミメティクス研究の新しい科学技術体系を構築するためには、工学と生物学の強力な異分野連携、包括的な研究連携体の組織化、産学連携のプロジェクトが不可欠である。また異分野連携のバリアを低くするための人材育成・教育の仕組み作りが急務である。

新世代バイオミメティクス研究の課題と展望



科学技術動向研究センターにて作成

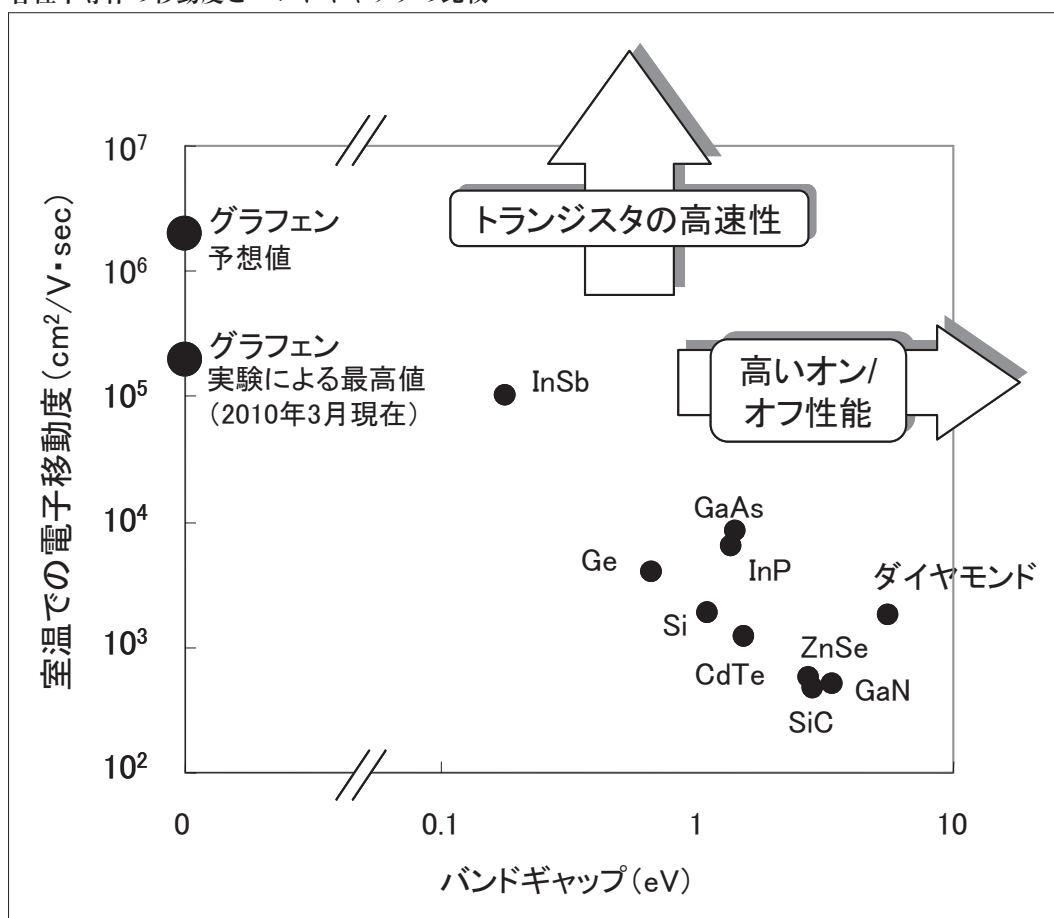
グラフェンの高速トランジスタ応用への 注目と課題

グラフェンは層状化合物であるグラファイトから1原子面を取り出したものである。単離されたのはごく最近であるにもかかわらず、きわめて特徴的な物性を持つことから急速に研究の裾野が広がっている。とくに、電子の移動度がシリコンの100倍にもなる点が大きな注目を集めている。グラフェンを用いることで、従来のシリコンや化合物半導体を用いたトランジスタでは超えることができなかった動作速度の限界を突破する可能性への期待が高まっている。

一方、グラフェンはまだ研究が始まったばかりの素材であるため、実用化へ向けての課題も大きい。もっとも大きな問題と考えられているのは、バンドギャップが0であるためにトランジスタのオン/オフ性が高くできず、デジタル用途への応用が難しい点である。しかし、この点に関しては、グラフェンを原子オーダーで加工できればバンドギャップを大きくできることもわかってきている。ただし、そのためには、原子オーダーの精度で制御する製膜技術、および素子化・加工技術の開発が必要になる。

つまり、グラフェンは新たな電子デバイスの領域を拓く可能性があるが、その実用化のためには、多くの面での製造技術の進展が必要である。

各種半導体の移動度とバンドギャップの比較



科学技術動向研究センターにて作成

東京工業大学と東北大学の研究チームは、多発性骨髄腫などの治療薬として使用されているサリドマイドの催奇形性に関与する分子を世界で初めて同定し、2010年3月12日付けの Science に発表した。同チームはナノ磁性微粒子を用いることにより、サリドマイドが直接作用する標的分子としてセレブロンというタンパク質を同定した。また、セレブロンはユビキチンリガーゼというタンパク質分解にかかわる酵素の構成分子で、サリドマイドがセレブロンに結合するとユビキチンリガーゼ機能が阻害され、奇形を引き起こすことを突き止めた。サリドマイドが誘発する局所的な奇形の原因解明などに課題は残るが、本研究成果は催奇形性に関する基礎研究のメルクマールとなり、副作用のない次世代新薬の開発に道を開くものと期待されている。

トピックス / サリドマイド製剤の催奇形性に関与する生体内分子の同定

サリドマイドは1950年代に睡眠薬として40カ国以上で発売されたが、妊娠初期の服用で胎児に奇形を引き起こしたことで社会問題になった^{注)}。同剤は1960年代に販売停止になったが、その後、ハンセン氏病や多発性骨髄腫などの難病に優れた治療効果があることが明らかにされている。1998年には米国でハンセン氏病の治療薬として承認され、多発性骨髄腫の治療薬としても米国で2006年、我が国で2008年に承認され、厳格な安全管理のもとに処方されている。

サリドマイドの催奇形性に関する研究も世界中で進められてきたが、同剤が直接作用するヒト体内の分子(以下、標的分子と記す)やその分子を介した催奇形性発現のメカニズムは不明であった。東京工業大学と東北大学の研究チームは、その標的分子の同定に世界で初めて成功し、2010年3月12日号の Science にて発表した¹⁾。

研究チームは、東京工業大学の半田らが開発したナノ磁性微粒子(以下、FG粒子と記す)を用いて²⁾、サリドマイドの標的分子を同定した。FG粒子はフェライトを合成高分子のポリGMA(グリシジルメタクリレート)で覆った約200nmの粒子であり、その表面にサリドマイドを固定化し、ヒト子宮頸がん由来のHela細胞抽出液につけた。抽出液中で、サリドマイドと親和性の高い分子が粒子に結合した後、磁石を用いて抽出液から粒子を分離し、粒子から結合分子を溶出した。タンデム質量分析とその後の試験管内での実験により、同剤の標的分子はセレブロン(以下CRBN)というタンパク質であることが明らかになった。過去の研究により、CRBNは軽度知的障害に関係するタンパク質と示唆されていたが³⁾、本研究によりCRBNはユビキチンリガーゼという酵素の構成分子であり、サリドマイドが

CRBNに結合するとユビキチンリガーゼの機能は阻害されることが示された。ユビキチンリガーゼは真核生物の全身に存在し、体内の不要なタンパク質の目印になるユビキチンの結合反応を触媒する。

さらに研究チームは、魚類のゼブラフィッシュとニワトリを用いた動物実験を行った。ゼブラフィッシュによる実験では、人為的にCRBNの働きを抑えると、胸びれや耳胞の未発達など、サリドマイドと同様の奇形が生じた。加えて、ゼブラフィッシュやニワトリで、サリドマイドと結合しないようにCRBNの遺伝子を改変すると、同剤による奇形の誘発は著しく抑えられた。これらの結果から、研究チームは「サリドマイドはCRBNと結合してユビキチンリガーゼの機能を阻害し、奇形を引き起こす」と結論づけている。

しかしながら、同剤のヒトに対する催奇形性のメカニズムは完全に解明されたわけではない。CRBNはヒトの全身に存在するのに対して、サリドマイドが局所的に奇形をもたらす原因は未解明であり、また、CRBN以外の標的分子の探索にも、今後の研究課題が残っている。しかし、本研究成果は催奇形性に関する基礎研究のメルクマールとなり、また、副作用のない次世代新薬の開発に道を開くものと期待されている。なお、FG粒子を用いたバイオ関連物質の分離法について、東京工業大学と多摩川精機株式会社の共同開発により事業化されている。

注：手足が極端に未発達な状態で出産、発育するアザラシ肢症や無肢症のほかに、小耳症や無耳症が報告されている。

参考

- 1) Ito T et al., Science 327, 1345-1350 (2010)
- 2) Sakamoto S et al., Chemical Record 9, 66-85 (2009)
- 3) Higgins JJ et al., Neurology 63 1927-1931 (2004)

米 Microchip Technology 社は、米 Google 社のウェブアプリケーション「Google PowerMeter」の API (Application Programming Interface) を用いた使用電力監視の試作ソフトウェアを発表した。同社のマイクロ・コントローラで動作し、各家庭用にカスタマイズされたインターネットのホームページ「iGoogle」で使用電力を表示できる。このシステムは試行的に稼働しており、米国各家庭の節電に役立つという報告が多数寄せられている。また、関連法案が米国下院に提出され、スマートグリッド構想は大きく前進しつつある。電力機器・各種センサ・家電製品が、米国内だけではなく、国境を越えてグローバルにつながるという意味でも重要な一歩を踏み出したことになる。

トピックス 2 電力センサのグローバル・ネットワークへの接続

米 Microchip Technology 社は、米 Google 社とのパートナーシップのもと、ウェブアプリケーション「Google PowerMeter」の API (Application Programming Interface) を用いた使用電力監視ソフトウェアを初めて試作したと 2010 年 3 月 23 日に発表した¹⁾。この試作ソフトウェアは、同社の 16 ビットまたは 32 ビットのマイクロ・コントローラで動作し、測定結果は「Google PowerMeter」に送られ、ホームページ「iGoogle」を各家庭でカスタマイズして使用電力をグラフ表示できる。

電力測定用のセンサを含むユニットは配電盤の配線途中に挿入したり、家電製品に組み込むことが可能である。このシステムを効果的に機能させるためには、個々の家電製品から直接にデータを収集することが望ましい。したがって、1 家庭に複数のセンサユニットが配置される場合には、無線 (Zigbee) でデータを収集することもできる (図表)。試作ソフトが埋め込まれたマイクロ・コントローラは、有線 LAN または無線 LAN (Wi-Fi) で家庭内のルーターにつながり、そこからウェブ上の「Google PowerMeter」へとつながる。このようにして、家電製品毎の電力使用状況やその履歴について、インターネットを通じて各家庭のパソコンや携帯電話で常時モニタが可能である。

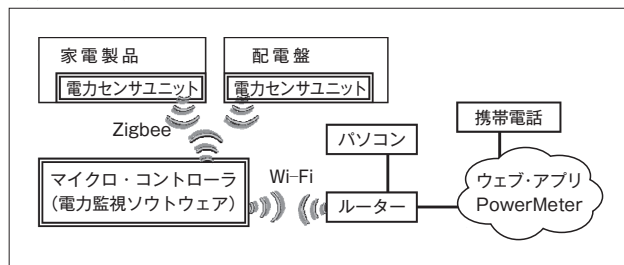
Google 社は、「Google PowerMeter」の API やソースコードを公表しており、世界中のデバイスメーカーはそれを利用して、「Google PowerMeter」と連動する電力センサを作ることができ、さらにはそれを家電製品に組み込むことができる。Microchip Technology 社も試作ソフトのコードを公開しており、それを参考にして各家電製品に適した独自のソフトをつくることも可能である。「Google PowerMeter」は試行的に稼働しており、

それと連動する電力センサがあれば、日本の家庭でも利用することができる。米国内では電気代の節約に役立つという報告がすでに多数寄せられている。特に、電力機器を個別にモニターすることが可能なため、節電対応が容易という報告が多い。このように、Google 互換システムが、スマートグリッド構想のデファクト・スタンダードとなる可能性が大きい。

米国では、このような状況のもと、電力使用量を消費者にリアルタイムで提供し、同時にその情報のプライバシーを守ることを義務化する法案“Electric Consumer Right to Know Act”(通称“e-KNOW Act”)が、2008 年 3 月 16 日に米国下院に提出された²⁾。電力会社は、無料で各家庭の電力使用量をリアルタイムで提供する義務を負い、各家庭はその情報の収集を第三者に委託することができるという内容である。

今回の試作ソフトウェアに加え、法律が制定されれば、米国のスマートグリッド構想は大きく前進することになる。また、米国内だけでなく、電力機器・各種センサ・家電製品が国境を越えてグローバルにつながるという意味でも重要な一歩を踏み出したことになる。

図表 消費電力監視ソフトウェアの利用イメージ図



参考文献¹⁾ を基に科学技術動向研究センターにて作成

参 考

1) Microchip Technology 社ホームページ :

http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2018&mcparam=en547570

2) e-KNOW Act : <http://globalwarming.house.gov/files/SHARE/eKNOWAct.pdf>

2010年4月8日、日本人が開発したプログラミング言語 Ruby の国際標準化へ向けての会議が米国ニューヨークで開催され、2011年4月頃に国際標準として採用される可能性が高まってきた。国際標準化を支援する(独)情報処理推進機構 (IPA) は、2010年内に日本工業標準 (JIS) として規格制定したのち、ISO/IEC JTC 1 に対して国際標準提案を行なう予定を明らかにし、この会議で歓迎された。オープンソースのプログラミング言語が国際標準になることは、世界的にも初めてのケースであり、その意味でも今後の Ruby の標準化動向が注目される。

トピックス 3 日本発のプログラミング言語の初めての国際標準化

日本で開発されたプログラミング言語 Ruby¹⁾が、プログラミング言語としては初めて国際標準になる可能性が高まってきた。

(独)情報処理推進機構 (IPA) は、プログラミング言語 Ruby に関する基本的な言語仕様の標準化文書が固まったとして、プログラミング言語に関する国際標準化委員会である ISO/IEC JTC 1 SC22 のメンバーと Ruby のオープンソース開発コミュニティのメンバーを招いて、2010年4月8日に(独)日本貿易振興機構 (JETRO) ニューヨークセンターにおいて国際会議を開催した。

IPA は、順調に行けば 2011年4月には、プログラミング言語 Ruby が国際的に認められた標準プログラミング言語の一つになると期待している。オープンソースのプログラミング言語が国際標準になることは、世界的に見ても初めてのケースであり、その意味でも、この標準化の動向は注目されている。

Ruby はウェブ開発で盛んに使われているオブジェクト指向スクリプト系プログラミング言語であり、まつもとゆきひろ氏が 1993年に独力で開発し、現在までオープンソースとして世界中に配布されている。プログラミング言語の人気ランキングとして頻繁に引用される TIOBE の「良く使われているプログラミング言語のランキング」²⁾によれば、Ruby は 2010年4月現在で世界の言語中 12位であり(図表)、特にスクリプト系言語の中では Python・Perl・JavaScript に次いで 4位である。

C・C++・C# などのシステム開発用のプログラミング言語は、いずれも ISO/IEC JTC 1 において国際標準とされている。一方、広く使われているにもかかわらず国際標準になっていないプログラミング言語の例としては Java がある。スクリプト系言語では、JavaScript の国際標準版である ECMAScript を除いて Python も Perl も国際標準化されるような動きは今のところ見られない。

IPA は、2008年から、Ruby の国際標準化を支援

する活動を開始した。今回の会議では、IPA の Ruby 標準化担当者が、まず 2010年内に日本工業標準 (JIS) として Ruby の言語仕様を公布し、これを Fast Track という手続き^{注)}で、ISO/IEC JTC 1 に対して国際標準提案するという予定を明らかにした。これに対し、会議参加者は、Ruby の標準化を歓迎し、異論は出されなかった。ただし、現時点の Ruby の基本的な言語仕様には不十分な点が散見されるため、問題点すべてを解消するには 1年程度かかる可能性がある。さらに、文書の形式・テスト関連の標準化・保守やバージョン管理など、国際標準化に向けた具体的な課題もこの会議で挙げられた。

IPA は、Ruby が JIS だけでなく国際標準となることによって、国内外の政府・公的機関・一般企業において Ruby の採用に弾みがつくものと期待している。

図表 プログラミング言語の人気ランキング

Position Apr 2010	Position Apr 2009	Delta in Position	Programming Language	Ratings Apr 2010	Delta Apr 2009	Status
1	2	↑	C	18.058%	+2.59%	A
2	1	↓	Java	18.051%	-1.29%	A
3	3	=	C++	9.707%	-1.03%	A
4	4	=	PHP	9.662%	-0.23%	A
5	5	=	(Visual) Basic	6.392%	-2.70%	A
6	7	↑	C#	4.435%	+0.38%	A
7	6	↓	Python	4.205%	-1.88%	A
8	9	↑	Perl	3.553%	+0.09%	A
9	11	↑↑	Delphi	2.715%	+0.44%	A
10	8	↓↓	JavaScript	2.469%	-1.21%	A
11	42	↑↑↑↑↑↑	Objective-C	2.288%	+2.15%	A
12	10	↓↓	Ruby	2.221%	-0.35%	A
13	14	↑	SAS	0.717%	-0.07%	A
14	12	↓↓	PL/SQL	0.710%	-0.38%	A
15	-	↑↑↑↑↑↑↑↑	Go	0.710%	+0.71%	A

出典：参考文献²⁾

注：国際標準は、標準制定のための委員会が設置されて、そこで標準の案を煮詰め、標準化するのが通常のプロセスである。しかし、手続きの迅速化のために、国家規格などの既存の標準を国際標準にする Fast Track という手続きも認められている。

参 考

- 1) まつもとゆきひろ・David Flanagan 共著：プログラミング言語 Ruby (オライリー・ジャパン、2009)
- 2) TIOBE Programming Community Index：http://www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html
- 3) Ruby を日本から国際標準に、ITPro インタビュー：http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Interview/20090106/322300/

我が国の石炭火力発電所は、すでに世界最高水準のエネルギー効率を達成しているが、さらなる CO₂ 排出削減が求められている。一方、間伐材や剪定木などの木質バイオマスは、少量かつ分散発生するため、十分な利活用が進展していない。そこで電力業界では、カーボンニュートラルな資源である木質バイオマスの石炭火力発電所での混焼を進めている。木質バイオマス混焼は、バイオマスを粗粉碎、またはペレット状に圧縮加工したものを石炭とともに微粉にし、ボイラに吹き込んで燃焼する。国内全ての石炭火力発電所で木質バイオマス 3%を混焼すれば、年間約 500 万トンの CO₂ 排出を削減できる可能性がある。木質バイオマスと化石燃料との共利用技術を開発し、進展させることが CO₂ 排出量削減とともに未利用資源の利活用のために有効である。

トピックス 4 石炭火力発電での木質バイオマス混焼を加速展開

石炭は、我が国にとって供給安定性、経済性などの観点から重要なエネルギー源である。我が国の石炭火力発電所は全国に 36 発電所 66 基あり、総発電電力量の約 3 割を担っている。すでに世界最高水準のエネルギー効率を達成している¹⁾が、さらなる CO₂ 排出削減が求められている。

一方、間伐材・林地残材・建設廃材・剪定木などの木質バイオマスは、その発生が少量で分散しているため、単独で大規模に集積して利活用することは、経済性、ライフサイクルアセスメントの観点から難しい。そのため、現状では地産地消型の小規模利用に留まっており、利活用が十分には進展していない。

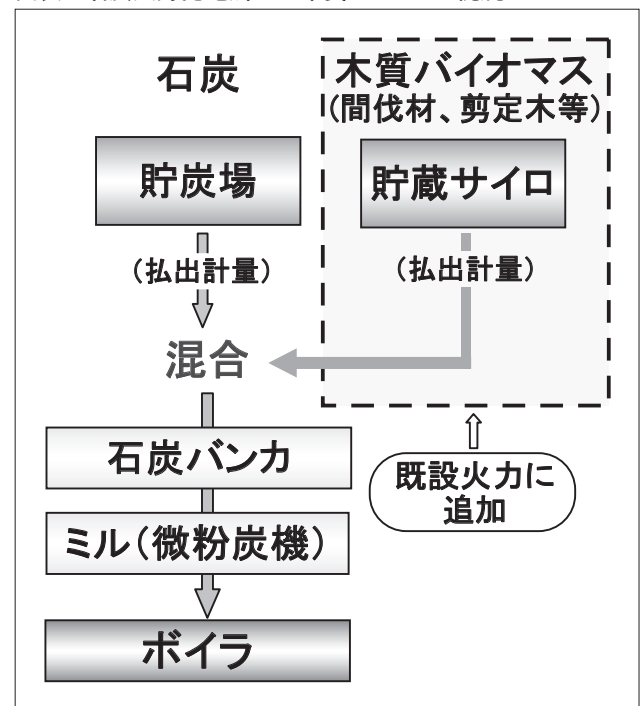
そこで電力業界では、カーボンニュートラルな資源である木質バイオマスの石炭火力発電所での混焼を進めている²⁾。2005 年以降 4 発電所 6 基で木質バイオマスの混焼を実施しているが、2010 年以降の 3 年程度で混焼する石炭火力を 13 発電所 22 基に加速展開する計画が公表されている。

木質バイオマス混焼では、バイオマスを粉碎、またはペレット状に圧縮加工したものを発電所で受け入れ、所定量を石炭とともにミル（微粉炭機）で微粉にし、ボイラに吹き込んで燃焼する。バイオマスの受け入れ・貯蔵・計量などに関わる設備を追加する必要があるが、他の主要設備は変更することなく実施可能である（図表）。また、木質バイオマスは性状・水分量などにより発熱量が一定ではないため、混焼率（重量比）は最大 3%程度としているが、これ以下の混焼率であれば、石炭専焼の場合と同様に運用できる。例えば 100 万 kW の石炭火力 1 基で、木質バイオマス 3%を混焼すれば、

年間約 11 万トンの CO₂ 排出を削減できる³⁾。木質バイオマス供給上の制約などの課題はあるが、国内全ての石炭火力発電所で実施すれば、我が国の総排出量の約 4%に相当する年間約 500 万トンの CO₂ 排出を削減できる可能性がある⁴⁾。

木質バイオマスと化石燃料との共利用技術を開発し、進展させることが CO₂ 排出量削減とともに未利用資源の利活用のために有効である。

図表 石炭火力発電所での木質バイオマス混焼フロー



科学技術動向研究センターにて作成

参 考

- 1) 浦島、戸澗、「温室効果ガス削減に貢献する電力技術」、科学技術動向、No.90、2008年9月号
- 2) 例えば、電気事業連合会プレスリリース：
http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/kaiken/_icsFiles/afieldfile/2010/03/24/kaiken0319.pdf
- 3) 東京電力(株)プレスリリース：<http://www.tepco.co.jp/cc/press/09110901-j.html>
- 4) 金子、「バイオマス燃焼の展望」、第7回 CEE シンポジウム講演要旨集、pp.89-102、2010年4月

ミシガン大学の研究グループは2010年2月の国際固体素子回路会議において、ミリメートルサイズの省電力センサユニットを発表した。太陽電池・薄膜リチウム電池・温度センサ・静電容量センサなどが内蔵されており、大きさは市販の小型センサユニットの約1/1000に相当する。マイクロプロセッサやセンサの制御に省電力技術を導入することで、太陽電池と薄膜リチウム電池も小型にでき、長期間にわたる動作が可能となった。太陽電池からの電力供給がなくても、薄膜リチウム電池が充電されていればスリープモードが49年間は維持され、1時間に1回の計測であれば5年間は動作し続ける。

トピックス 5 充電電池・太陽電池を内蔵する小型省電力センサユニット

ミシガン大学の研究グループは2010年2月に開催のISSCC2010(国際固体素子回路会議)において、小型の充電電池・太陽電池を用いたミリメートルサイズのセンサユニットに関する発表を行った¹⁾。環境モニタリングや医療分野における生体モニタリングなどでは、充電や電池交換を必要としない小型センサが必要とされている。これまでにも、消費電力を抑えて長期間動作するセンサユニットは発表されていた。しかし、小型の電池では電源容量が不足するため、電池の大きさが障害となってセンサユニット全体を小型化することができなかった。今回は、マイクロプロセッサやセンサの制御に省電力技術を導入することで、内蔵する太陽電池と薄膜リチウム電池も小型にでき、結果として、長期間にわたって動作する小型センサユニットが開発された。

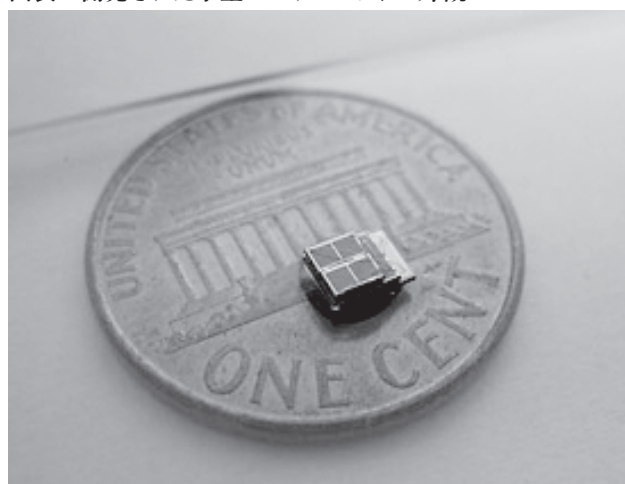
センサユニットの外観(図表)は、3.5mm×2.5mm×1.0mmの大きさで体積は8.75mm³であり、市販小型センサユニットの約1/1000の大きさに相当する。上部には4つの太陽電池セルがあり、これらの合計面積は2mm²である。その下にARM社のCortex-M3 32bitマイクロプロセッサ、およびメモリとCymbet社の薄膜リチウム電池が格納されている。薄膜リチウム電池の体積は2.9mm³と極めて小さい。また、マイクロプロセッサ、データ保存用のメモリ、温度センサ、静電容量センサは1つの基盤に組み込まれている。

太陽電池を用いた装置には、夜間の発電や気象条件の影響による電力供給の不安定性の問題がある。省電力化によって充電電池だけでも長時間の動作が可能になれば、不安定性の問題は回避できる。センサユニットを省電力駆動するために、動作を通常の計測や信号処理を行うアクティブモードと取得データを保持する

スリープモードに分けている。アクティブモードでの消費電力は7.7μWであるが、スリープモードでの消費電力をその1/10000以下の550pWと極めて低く抑えている。薄膜リチウム電池が充電されていれば太陽電池からの電力供給がなくても49年間はスリープモードを維持できる。仮に、1時間に1回の計測を行うように設定した場合、太陽電池からの電力供給がなくても5年間は連続動作させることができる。太陽電池による充電が可能な条件では、計測周期を短く設定しても実用上の問題はない。

このような、太陽電池で駆動する小型の省電力センサユニットは、電源や大きさによる設置場所の制約を受けない。日常生活で、常にセンサユニットを体に装着したまま生体情報の計測とデータを蓄積するといった用途も考えられる。

図表 開発された小型センサユニットの外観



出典：参考文献²⁾

参考

- 1) Chen, G., et al., Millimeter-Scale Nearly Perpetual Sensor System with Stacked Battery and Solar Cells, IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, pp. 288-289, (2010)
- 2) N. C. Moore, http://ur.umich.edu/0910/Feb08_10/742-smallest-commercial-class-solar-powered-sensor-developed

生物の多様性に学ぶ新世代 バイオミメティック材料技術の新潮流

下村 政嗣
客員研究官

1 はじめに

1-1

自然に学ぶものづくり

科学技術の各分野において、「自然に学ぶ」ことの重要性は常識である。欧米では今世紀に入り、バイオミメティクス(biomimetics)と呼ばれる「自然に学ぶものづくり」に関する研究開発がクローズアップされ始めている。例えば、NATIONAL GEOGRAPHIC 誌の2008年4月号は「自然に学ぶデザイン」という特集を組み、「自然の形に学ぶ設計思想 バイオミメティクス」のもとで、流体力学的に燃料効率のよい車のデザインや、雨が降ると汚れが落ちる塗料の開発などが進行していることを紹介している。さらにNATIONAL GEOGRAPHIC 誌に紹介されている内容のいくつかは、2005年に出版されたPeter Forbesの著作“THE GECKO'S FOOT: Bio-inspiration-Engineering new materials from Nature”（「ヤモリの指 生きもののすごい能力から生まれたテクノロジー」吉田三知世訳、早川書房(2007)）に詳細に物語られている。さらに最近では、エネルギーや環境問題の観点からも「自然に学

ぶ」ことの重要性が指摘されている。例えば、“Biomimicry: Innovation Inspired by Nature”（「自然と生体に学ぶバイオミミクリー」山本良一、吉美耶子訳、オーム社(2006)）の著者であるJanine Benyusが主催するNPO法人Biomimicry Instituteは、2008年に“Biomimicry's Climate-Change Solutions: How Would Nature Do It?”という会議を開催した。2008年にドイツのボンで開催された「生物多様性条約第9回締約国会議」(COP9)や2009年の国連環境計画(UNEP)^{注1)}においても、彼らが提唱している“Nature's100Best”と銘打った「生物模倣による技術革新」が紹介され注目を集めている。“Nature's 100Best”の詳細はZERI^{注2)} FOUNDATION（ゼロ・エミッション構想）が運営するホームページで紹介されている。

ちなみに“biomimicry”や“bioinspiration”、“bioinspired”という用語は“biomimetic”からの派生語で

あり、また、後述するように“bioinspired”にはbiomimeticの後継的な意味合いを意識して使用される場合もあるが、本稿ではそもそもの語源でありかつ包括的な用語である“biomimetic”を使うことにする。

1-2

バイオミメティクスへの 関心の高まり

「自然に学ぶものづくり」に対し関心が高まりつつある背景には、前世紀末から今世紀にかけて急速にそして新たに展開を遂げようとしているバイオミメティクス研究の“潮流の変化”がある。ISI Web of Knowledgeによると“Biomimetics”に関する世界の論文の数は今世紀に入り急激に増加している(図表1)。

2006年には専門誌「Bioinspiration & Biomimetics」が発刊され、PNAS^{注3)}やMRS^{注4)}などの主要な

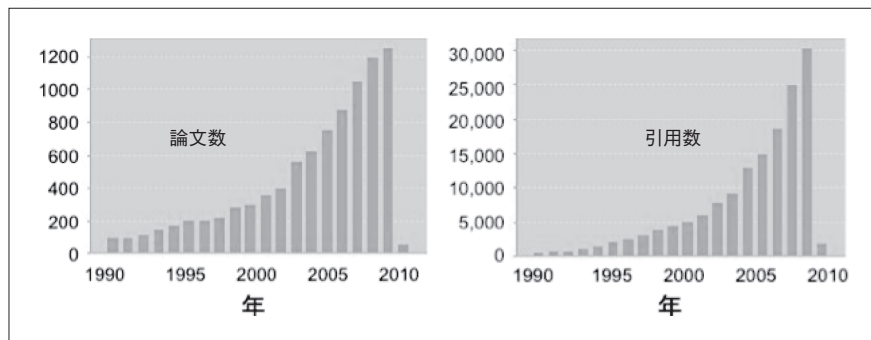
注1: UNEP: United Nations Environment Programme

注2: ZERI: Zero Emission Research and Initiative

注3: PNAS: Proceedings of the National Academy of Sciences

注4: MRS: Materials Research Society

図表1 バイオミメティクス関連論文数の推移



科学技術動向研究センターにて作成

学術誌が「バイオミメティクス」に関する特集を組んでおり、またここ数年、「バイオミメティクス」に関わる国際会議の開催数も増加す

る傾向にある。全米アカデミーズは2008年に“INSPIRED BY BIOLOGY FROM MOLECULES TO MATERIALS TO MACHINES”と

題する科学技術政策の提言書を出版し、そのなかで“Next-Generation Bioinspired Materials”として、蓮の葉を真似た超撥水表面材料やヤマモリの指を模倣した接着材、モルフオ蝶に真似たフォトンクス材料などを紹介し、「バイオミメティクス」を推進すべき課題のひとつとして取り上げている。さらに2011年3月にはドイツ政府の主催のもとで、産学連携および産業化を目指した本格的な国際コンベンション「International Industrial Convention on Biomimetics」の開催がベルリンで予定されている。

2 バイオミメティクス研究の歴史

長い歴史をもつバイオミメティクス研究が、今世紀に入って新しい潮流として再び注目されはじめたのは何故だろうか？ 図表2は、バイオミメティクス研究の歴史を研究対象のサイズと研究分野の観点から俯瞰したものである。

ツアイ)も生物模倣技術であるといわれている。

1970年代になりバイオミメティクス研究は、化学の分野において、酵素や生体膜などを分子レベルで模倣しようとする Biomimetic Chemistry として登場した。このころ、X線構造解析によって生体触媒である酵素の反応部位の化学構造が明らかになったことで、有機化学の手法を用いて生体反応を分子論的に解明することができる

2-2

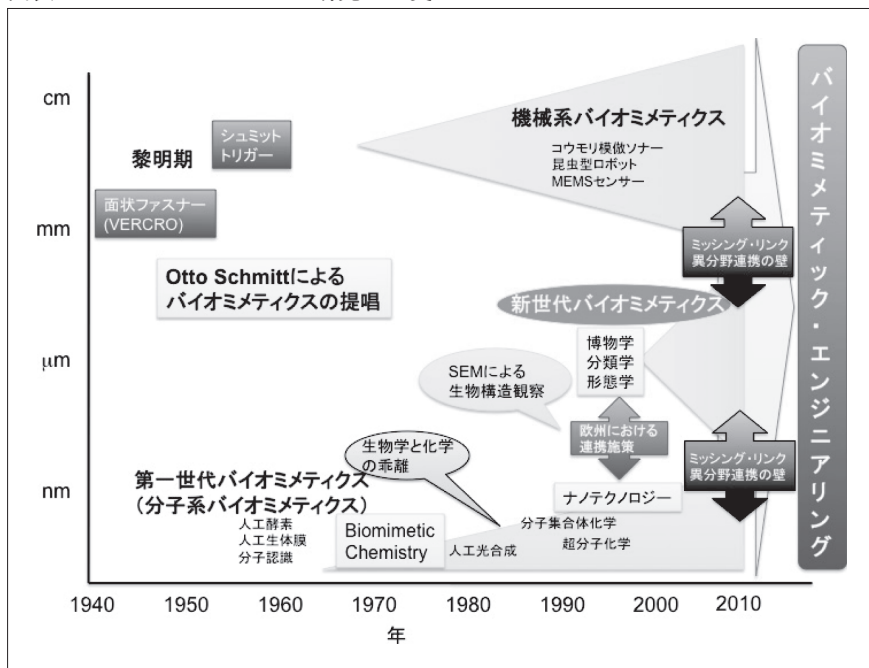
第一世代バイオミメティクス研究としての Biomimetic Chemistry の登場と衰退

2-1

バイオミメティクス研究の黎明

我が国では「生物模倣」と訳されている biomimetics という言葉は、1950年代後半にドイツ系米国人の神経生理学者である Otto Schmitt によって提唱された¹⁾。Schmitt は、神経システムにおける信号処理を模倣して、入力信号からノイズを除去し矩形波に変換する電気回路として知られている「シュミット・トリガー」を発明した。材料としての生物模倣はさらに古く、我が国では“マジックテープ”として知られる面状ファスナー (VELCRO®) が実用化の初期の例と考えられる。また、道路の中央線などに埋め込まれた光の反射板(道路銀: キャッ

図表2 バイオミメティクス研究の歴史



科学技術動向研究センターにて作成

ようになった。生物学的事象を化学的に解明し工学的な応用を図る上で、生物学と化学の連携は不可欠であった。80年代に盛んになった人工光合成の研究は色素増感太陽電池の基礎となり、ゲルを用いたアクチュエーターの研究は人工筋肉などの発明をもたらした。

しかしその後、分子生物学の展開によって、遺伝子を中心として生命現象を解明する研究が生物学の主流になっていった。「分子系バイオミメティクス」とも言うべき Biomimetic Chemistry 研究の主流は、1980年代後半頃からの「分子エレクトロニクス」研究の台頭とも相俟って、生物学とは距離を置くようになり、分子集合体の化学や超分子化学といった方向に向かった。さらに90年代になると、化学や材料の分野において「生物に学ぶ」という考え方はすでに常識化したと思われていたが、実際には生物学との連携の機会はほとんどなくなっていった。そして、分子ナノテクノロジーやナノバイオロジーがクローズアップされることで Biomimetic Chemistry という学術領域名はほとんど用いられなくなった。「生物にヒントを得、生物を超える」バイオインスパイアード (bioinspired) という考え方が主流になり、ここにおいて第一世代バイオミメティクスともいうべき Biomimetic Chemistry は衰退した。

2-3

機械系バイオミメティクスの発展

一方、1970年代には機械工学や

流体力学の分野でもバイオミメティクス研究が発展し、昆虫の飛翔や魚の泳ぎを真似たロボットや、コウモリの反響定位や昆虫の感覚毛を模倣したソナーやレーダーなどが開発された。機械系バイオミメティクスの研究は衰退することなく現在まで継続し、主に軍事産業、鉄道や船舶、航空機産業などの産業分野において展開され、マイクロマシンや MEMS^{注5)}などの先端技術分野にも影響をあたえている。現在、我が国においては、「バイオミメティクス」はロボット研究の代名詞という認識が強いように思われる。

2-4

材料系バイオミメティクスの台頭

前述のように2008年、全米アカデミーズがその提言のなかで“Next-Generation Bioinspired Materials”として紹介したように、今世紀に入り材料研究の分野においてバイオミメティクス研究の新潮流が欧米を中心に注目を集めている。すでにその実用化の動きも始まりつつある。

生物の表面は多くの場合、nm から μm にいたる領域において階層的な構造を有している。この大きさはナノテクノロジーの対象領域である。ナノテクノロジーが旧来の科学技術と際だって異なる特徴のひとつは、その対象物の大きさが電子顕微鏡による観察や解析

が必要不可欠なサイズであり、それゆえに、共通の観察・解析手法を通して生物学と材料科学の新たな連携が生まれる可能性を内包する。電子顕微鏡は、生物が有するナノからマイクロに至る階層構造を明らかにした。ここ十年のナノテクノロジーの進展によって、形態学者や分類学者が明らかにした、生物の持つ表面階層構造をヒントにして、マテリアル研究者が類似の構造を人工的に製造し、その構造に起因した機能を人工的に発現させつつある。このような研究が欧州、とりわけドイツと英国から生み出された。

前述の「第一世代バイオミメティクス」である“Biomimetic Chemistry”が、X線構造解析を契機に分子レベルでの生物模倣を目指した「生物学と有機化学の連携」から生まれたのに対し、「新世代バイオミメティクス」である材料系研究は、電子顕微鏡観察と微細加工技術を基盤とする「博物学・生物学と材料ナノテクノロジーの連携」から生み出されたと言える。また、欧州のナノテクノロジーの特徴は、“Nano meets Bio”というキャッチフレーズに象徴される。すなわち、異分野の融合や連携を目指している。たとえば、ドイツの大学のこの領域の研究においては、異分野連携が研究費獲得の前提になっている²⁾。新世代バイオミメティック材料研究が欧州において胎動したことは、融合を重んじる文化的風土と積極的に融合を図ろうとする欧州の科学技術政策によるものである。

注5：MEMS：Micro Electro Mechanical Systems

3 新世代バイオミメティック材料の研究動向

この章では、バイオミメティック材料研究の成功例である、実用

化を視野に入れた研究課題を、特に、いかにして生物学と材料ナノ

テクノロジーの連携がなされたのかを中心に紹介する。

3-1

蓮の葉に学んだ超撥水材料とその発展である研究

固体表面の液体に対する濡れ性は、物質が持つ固有の親水性や疎水性の強さ(表面自由エネルギー)と表面形状によって決まる。一般に、シリコンやワックス、フッ素化合物などは表面自由エネルギーが低く、水との親和性が小さいので疎水的な性質をしめす。疎水性でなおかつ凸凹形状の粗い表面では、実表面積が増え(Wenzel状態)、凸凹構造によって形成される細かな空隙には水が入り込みにくい(Cassie-Baxter状態)。このため、表面はいつでも水に濡れにくくなる³⁾。

ボン大学附属植物園の植物学者である Wilhelm Barthlott 教授は、蓮の葉の表面がその微細構造と分

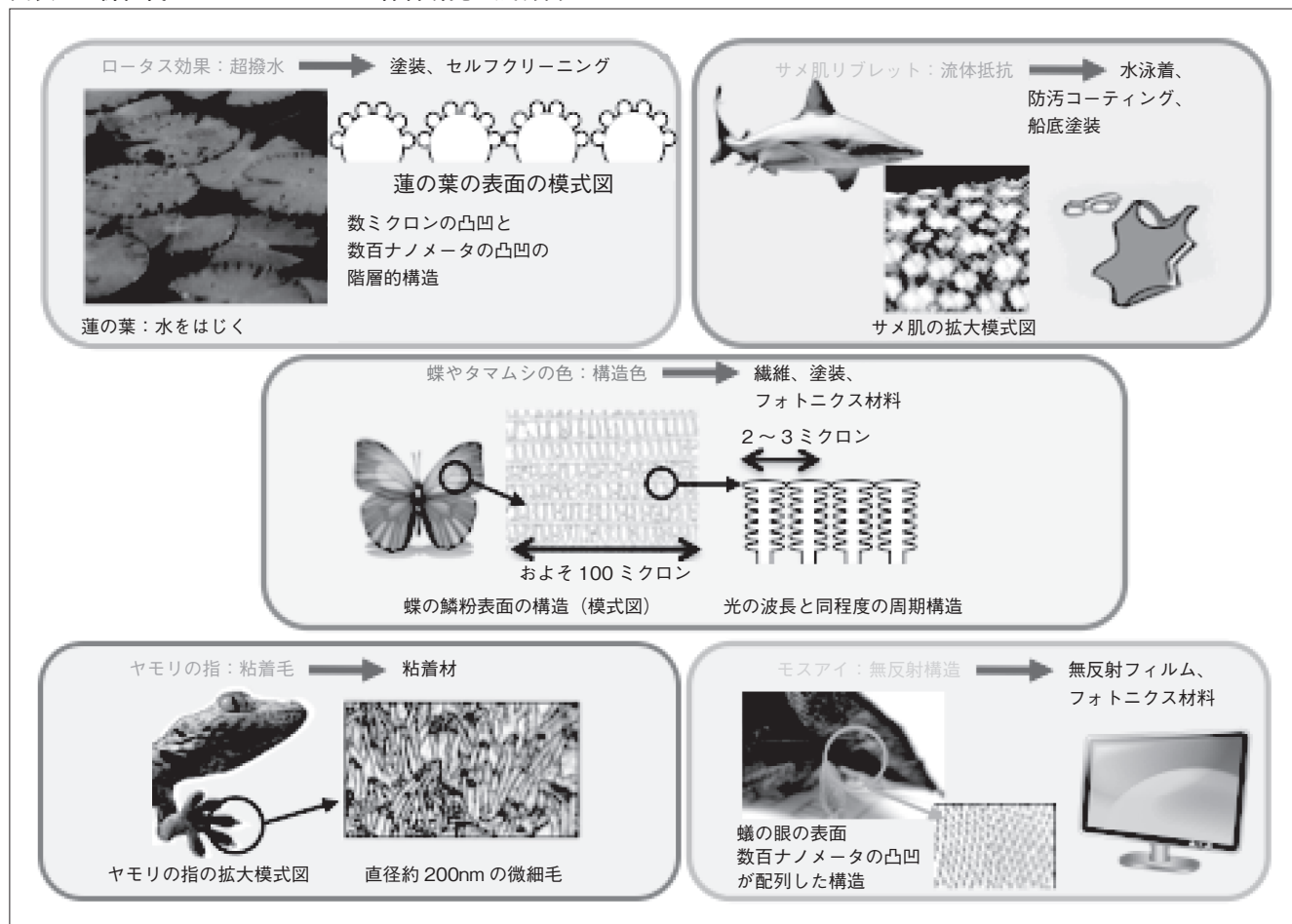
泌されるワックス状化合物の相乗効果によって超撥水性とセルフ・クリーニング効果を示すことを見出した⁴⁾。蓮の葉の表面は数 μm のコブが配列した構造であり、さらに個々のコブには葉から分泌されたワックスの微結晶が突起状に並んでいる。このような階層性を持つフラクタル的な凸凹構造が、蓮の葉表面の超撥水性をもたらしている。

表面の微細構造に起因する撥水性による清浄効果は、ロータス効果(Lotus-Effect[®]はボン大学の商標)と呼ばれている。ボン大学は企業との共同研究によって、疎水性シリカなどのナノ微粒子をバインダーに分散した Lotusan という塗料を開発し、Evonik 社(旧 Degussa 社)など複数の企業が商品化した。ロータス効果の発見は、新世代バイオミメティクス研究における生物学と材料科学、産業界との共同

研究の最も有名な成功例のひとつと言える。これに触発されて、繊維用スプレー(BASF社のMincor[®] TX TT)、コーティング剤(日華化学)、撥水性樹脂(GEのLexan)、プラズマCVD法による凸凹形成(名古屋大学)、高耐水性化粧品(カネボウ)など、ボン大学の技術と類似の効果をもたらす技術開発も行われている。

ロータス効果の発見は、水に関わる生物表面構造に関する研究も誘発した。バラやクンシラン、ヒマワリなどの花卉は、超撥水性であるにもかかわらず花卉を逆さにしても水滴が落ちないほど強い吸着力を持っている。バラ花卉(Rose petal)の表面も蓮の葉と同様に階層的な構造を有しているが、10~20 μm のコブの表面は突起ではなく数百nmの周期をもつ襞で覆われている。この襞が強い吸着性をもたらしていると考えられ⁵⁾、微

図表3 新世代バイオミメティック材料研究の成功例



科学技術動向研究センターにて作成

細構造表面の van der Waals (ファンデアワールス)力が吸着性の起源だとされている。撥水性と吸着性を併せた効果は Rose petal effect と呼ばれ、この効果を示す材料として中空構造を有するポリスチレンナノファイバーが開発されている⁶⁾。

一方、撥水性と親水性の相異なる表面を併せもつ材料も、生物学者と材料研究者の共同研究によって開発された。ロンドン自然史博物館の動物学者 Andrew Parker 教授は、ナミブ砂漠に生息する甲虫(ゴミムシダマシ、*Stenocara gracilipes*)が朝霧に含まれる微小水滴を捕集し飲用する機構を明らかにした。海に近い砂漠に生息するこの甲虫は、朝と夕方に逆立ちのような姿勢で砂丘に佇む。甲虫の体表は、 μm スケールの親水性の微小なコブとその1/10程度のスケールの凹凸構造をもつ疎水面とがパッチワーク状になっている。親水面に吸着した露の水滴は成長すると自重で撥水面をころがり落ち、逆立ちした昆虫の体表を伝わってその口に集められる⁷⁾。マサチューセッツ工科大学の M. Rubner 教授と R. Cohen 教授は、このような甲虫の表皮を模倣した集水材料を開発した。彼らは、Layer by Layer 法と呼ばれる薄膜作製技術によって、高分子をバインダーとして固体基板上に親水性のコブに相当するシリカ微粒子を配列させ、その周囲をフッ素系化合物で撥水性にした。親水性吸着点であるシリカ粒子表面に付着し成長した水滴は、

周囲を囲む撥水性の平滑面を流路として捕集され、1カ所に集めることができた⁸⁾。彼らは、このような表面を大面積化することができれば、乾燥地帯や河川のない地域における霧収集装置など水資源確保の材料への応用が可能であると考えている。

4-6節で後述するが、バイオミメティック材料では作製法も重要な研究課題であり、その中でも自己組織化技術は注目されている。自己組織化現象と簡単な無電解メッキによって、撥水性表面に積極的に吸着点を導入して超撥水かつ強吸着表面の材料を作製する試みもなされている。湿式製膜過程における結露現象を利用して形成したハニカム様多孔質高分子フィルムの細孔に部分メッキを施し、物理的な剥離操作を施して作製した高分子スパイク・金属マイクロドーム複合体が作製された。この材料は、高分子スパイクの超撥水性と強い親水性を併せもつために、大きな接触角をもち、接した水滴が強く吸着される⁹⁾。つまり、この材料は、バイオミメティックな材料設計と自己組織化による新しい作製技術の組み合わせによって創られ、さらに金属を導入することで新たな機能が追加されたハイブリッド材料になっている。

近年のバイオミメティック超撥水材料の研究開発では、中国の成果が目覚ましい。魚の鱗の発油性、蜘蛛の糸を模倣した集水材料、蚊の眼、蝶の翅やアメンボウの脚の撥水性など、様々な生物表面の構

造と機能の相関を見いだそうとしている¹⁰⁾。

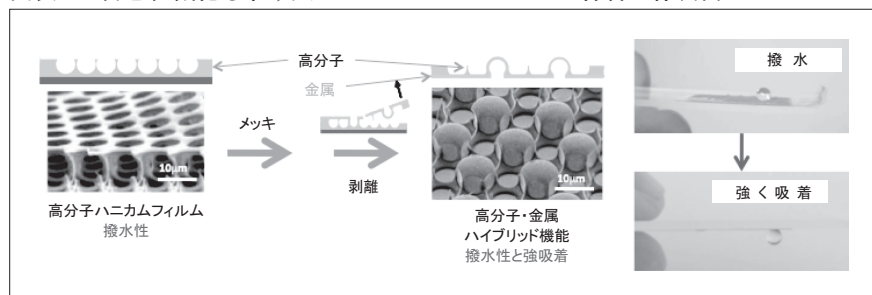
3-2

鮫肌リブレットに学んだ材料の発展

2008年の北京オリンピックを目前にした競泳界の「水着騒動」は一部では High-tech doping という非難もなされたが、材料開発という視点から見れば Speedo 社のバイオミメティクス戦略がすぐれていた。Speedo 社の LZR Racer[®] とそのプロトタイプである FASTSKIN FSII[®] は、中空繊維を用い、さらに超撥水加工による軽量化で高速化を達成している。撥水性表面が層流に対して抵抗軽減効果があることはすでに実証されており、乱流においても効果があることは理論的に予測されていた。しかし、Speedo 社の競泳着が特に注目されたのは、その表面に鮫肌リブレットと呼ばれる構造が付与されていたことにある。リブレット構造とは、数十 μm からサブ mm 間隔の周期的な溝構造であり、リブレット構造を導入することで流体の抵抗摩擦が低減されることは古くより知られていた。3M 社が開発したリブレット・フィルムがアメリカズカップ (America's Cup) などのレース用ヨットの船体やエアバス社の航空機の機体に貼られ、数パーセントの速度向上や燃費節減効果が報告されている。

最近では、防汚効果(anti-fouling effect)の観点からもリブレット構造に注目が集まっている。従来、船底や発電所の冷却水用導管への海洋生物(フジツボや藻類など)の付着を防止するために用いられてきた TBT (トリブチルすず)は、「環境ホルモン」と呼ばれる内分泌攪乱物質であることから、国際海事機構が 2008 年までにその全面使用禁

図表 4 自己組織化も取り入れたバイオミメティック材料の作製例



科学技術動向研究センターにて作成

止を決定した。そこで表面構造を利用したTBTフリーの防汚対策が検討されている。25~30mN/mの表面張力を有する固体の表面が、物理的に生物付着抑制する効果があることが知られている。ブレーメン(Hochschule Bremen)の研究グループは、76 μ m周期のソフトシリコン製リブレット構造を持つ表面(表面張力25mN/m)へのフジツボの付着が、平滑面に対して7割近く抑えられると報告している。

また、欧州では2010年1月から、欧州フレームワークプログラム(FP7)の中でSurface Engineering for Antifouling - Coordinated Advanced Training (SEACOAT)をスタートさせている。この一環として、ナノ・マイクロ構造がもたらす防汚効果を示す材料の開発において、英国、ドイツ、スイスなど17の組織からなる研究チームによる産学連携研究が始まった¹¹⁾。

また最近、リブレット構造は、海洋防汚以外の用途でも注目がされている。フロリダ大学のAnthony Brennan教授らは、リブレット構造がもたらす抗菌特性に着目した。医用フィルムSharklet™を開発し、医療機関の壁材やカテーテルなどの医療デバイス用の材料を目指している。

英国のThe National Museum Directors' Conferenceのホームページには、2008年オリンピックに向けた博物館との共同研究の成果として、鮫肌リブレットが開発され、流体抵抗が3%減少したと述べられている。また、Speedo社の“Biomimetician”でありFASTSKIN®の開発者であるFiona Fairhurstは、European Inventor of the Year Award in 2009に推薦された。彼女は、Oliver Crimmenをはじめとするロンドン自然史博物館のメンバーの協力に対して謝意を表している。これらは、新世代バイオミメティクスの研究開発で「博物学とナノテクの連携」が不可欠であること

を象徴的に表していると思われる。

3-3

蝶やタマムシに学んだ 構造色材料とデータベース化

タマムシやモルフォ蝶の翅が示す金属光沢を持つ色彩を構造色(Structural Color)と呼ぶ。構造色は、光の波長あるいはそれ以下の微細構造による発色現象であり、色素や顔料の光吸収に基づく発色ではないことから退色や劣化の問題がない。構造色発色の機構としては、薄膜干渉、多層膜干渉、微細な溝・突起などによる干渉、微粒子配列などによる散乱や回折、などが知られている。生物の構造色の発現を利用した材料開発は盛んになされており、例えば英国ではExeter大学物理学科のPete Vukusic博士が、また我が国では大阪大学の木下修一教授が主催する構造色研究会が定期的に情報を発信している。構造色は生物表面以外では、オパールなどの鉱物、コロイド結晶などでも発現する。その応用は、塗装、化粧品、宝石、繊維、フォトニック結晶などとして多岐の産業にわたる。とりわけ、日産自動車(株)、帝人ファイバー(株)、田中貴金属工業(株)の3社によって開発された「モルフォテックス」という発色繊維は世界的にも有名である。さらに最近の研究では、高い屈折率を示す有機材料の可能性も指摘されている¹²⁾。

ロンドン自然史博物館のA. Parker教授らは、英国王立協会誌に「John Huxleyの成果も含む、蝶のフォトニック構造の多様性と進化に関する総説」という論文を発表した¹³⁾。彼らは、蝶の翅のフォトニック構造の解剖学的かつ網羅的な記述が、バイオミメティクスの潜在的アプリケーションに大きく寄与すると考え、ロンドン自然史

博物館で故John Huxley博士によって撮影された未発表の電子顕微鏡写真を多様性と進化のデータベースとしてこの総説をまとめた。博物館が収蔵する膨大なインベントリー(ある地域に生息する生物の総種数の目録、あるいは目録を製作するための調査)を解剖学的な知見と機能に関するデータベースとして整理し公表することは、新世代バイオミメティクス研究においてはたいへん有意義である。

3-4

ヤモリの足に学んだ接着材料

ヤモリの指のバイオミメティクスは、ロータス効果とともに生物学と材料の連携におけるもうひとつの成功例である。2003年6月のBBCニュース(on line版)は、“Gecko inspires sticky tape”と題して、Manchester大学のAndre Geim教授のグループがヤモリの指の微細構造を真似た粘着材フリーの接着テープの開発に成功したことを報じた。ヤモリが垂直な壁を登り天井を這うことは、その指先から粘着性の物質を分泌していないことを考えると不思議である。ヤモリの指先にはラメラと呼ばれるひび割れ構造があり、その内部には数十万本の剛毛(seta)が密生している。さらに長さ100 μ m直径5 μ m程度の剛毛の先端は数百の枝毛に分裂し、個々の枝毛の先端はスパチュラ(spatula)と呼ばれる“皿状”の構造になっている。スパチュラの直径は200nm程度である。Kellar Autumnらの生物学的な仮説¹⁴⁾によれば、ヤモリの指の接着力は、その指先に密集した階層構造を持つ微細な剛毛表面と壁に働くファンデアワールス力に起因するとされている。UC BerkeleyのRonald Fearing¹⁵⁾ や Andre Geimら¹⁶⁾のグループは、それぞれ、

AFM (原子間力顕微鏡)チップを用いた微細加工技術や、陽極酸化アルミナのナノ細孔を鋳型として、剛毛が密集した表面を人工的に再現した。彼らはヤモリの指の吸着機構を明らかにするとともに、“Gecko Tape” (ゲッコテープ)と呼ばれる粘着材フリーの吸着材料の開発に成功した。その後、カーボンナノチューブを密集した剛毛とする構造を有する固体表面が、強い吸着力を有することも報告された¹⁷⁾。また、リサイクル可能な建築材料用の吸着剤など、実用化のための研究開発も始まっている。また、ゲッコテープを用いて垂直な壁面を移動することができるヤモリ型ロボットが開発され、軍事や災害救助などの民生面での応用が期待されている¹⁸⁾。現在では、特に米国でその実用化に力が入れている。

3-5

無反射性を持つ モスアイ構造材料

1960年代に Karolinska Institute 生理学科の C. G. Bernhard らは、蛾の複眼の表面に約 100nm の大きさの突起構造が配列していることを報告した¹⁹⁾。さらに 80年代初めには英国 National Physical Laboratory の光学部門の S. J. Wilson と M. C. Hutley らが、周期的に配列した凸凹構造(モスアイ構造)によって表面厚み方向の屈折率を徐々に変化させることで無反射性が発現することを明らかにした²⁰⁾。入射する光に対して明確な反射面(屈折率の変化)が存在しないことになり、反射が起らないのである。このような複眼により、蛾は夜でも空を飛ぶことができ、大きな眼からの反射が抑えられることで鳥などの外敵から発見されにくくなると言われている。

モスアイ構造の反射防止膜は、光学材料の研究開発で早くから注目された。ドイツの Holotools 社は、干渉リソグラフィー (Interference lithography) によって 100nm ~ 100 μ m のパターンを固体基板上に形成する技術を用いて、表面にモスアイ構造を有する透明な高分子フィルムを作製し、ディスプレイ等の大面積の無反射フィルムとして供給している。最近では、三菱レイヨン(株)が 2008年、ナノスケールの細孔が規則的にかつ自己組織化的に形成される陽極酸化アルミナを型として、透明な高分子フィルムの表面にモスアイ構造(開発品の反射率は 0.1%以下、全光線透過率は 99.6%)を作製することに成功した。また王子製紙(株)は 2009年、直径 25 ~ 1000nm の粒子を精度よく単層に配列した状態で物体の表面にコーティングする技術を確認し、ドット型周期微細構造の作製に成功した。

モスアイ構造は太陽電池の高効率化の観点からも注目を集めている²¹⁾。オランダの Institute for Atomic and Molecular Physics (AMOLF) の J.G.Rivas らは、GaP 基板表面上にモスアイ構造のロッドを作製することで可視から近赤外における幅広い波長域で反射を著しく低減できることを見いだしている。我が国でも、三菱電機(株)はレーザーパターンニングと湿式エッチングの技術を用いて、多結晶シリコン太陽電池セル表面に、ハニカム状の凸凹構造を導入して表面反射率を低減することで、18.6%の光電気変換効率を達成し 2010年度の実用化を目指している。

3-6

サンドフィッシュに学んだ 低摩擦材料

北アフリカや南西アジアの砂漠

に生息する有鱗目スキング科のトカゲ(*Scincus scincus*)は、砂の中に潜り泳ぐように移動することからサンドフィッシュ (Sandfish)と呼ばれている。15cmほどの大きさのサンドフィッシュは、“砂の海”を深さ数 cm まで潜り毎秒 10 ~ 30cm の速度で“泳ぐ”ことができる²²⁾。ベルリン工科大学の Ingo Rechenberg 教授は、鱗で覆われたサンドフィッシュの皮膚が、磨かれたスチールや平滑なガラス、テフロンや高密度ナイロンなどの表面よりも低い摩擦係数を示し、砂でこすられてもほとんど摩耗しないことを見いだした。サンドフィッシュの鱗には珪酸塩などの無機物は存在せず、硫黄含量の多いグルコシル化ケラチンから形成されている。ケラチンを主成分とする鱗の表面にはミクロな微細構造があり、この構造が特異なトライボロジーを発現している。W. Baumgartner 教授らは、鱗から抽出したケラチンでコートした高分子フィルムの表面が鱗と同様の性質を示すことを見いだした。また彼らは原子間力顕微鏡計測において、鱗の表面とシリコンチップの間に引力がほとんど生じないことを示した。Rechenberg らは、サンドフィッシュの皮膚に対する砂粒の転落角が、ガラス、ナイロンやテフロン、さらには鋼の表面よりも低いこと、つまり摩擦抵抗が極めて低いことを実証した。一方、サンドフィッシュの皮膚は、鋼やガラス表面よりも高い耐摩耗性を持っている。サンドフィッシュの鱗には、数 μ mの間隔で並んだサブマイクロメートルの高さの長い尾根状の“敷居”(nanothresholds)がある。Rechenberg らは、この“敷居”と砂粒間の摩擦帯電で発生した静電気が、鱗と砂粒の間の斥力を生み出すことによって摩擦が低減される可能性を示唆している。ちなみに、サンドフィッシュの捕食者である蛇の表皮も低摩擦表面であり、バイオ

ミメティクスの研究対象になって
いる²³⁾。

ドイツのBIONIC Graduate²⁴⁾とい
う博士課程の研究・教育プログラ
ムにおける、アーヘン工科大学の
W. Baumgartner 教授が指導する
“Abrasion resistant surface coating
mimicking the sandfish’s epidermis”
というプロジェクトでは、サンド
フィッシュ表皮の化学的および物
理的な分析と、サンドフィッシュ
の表皮成分を用いた金属、ガラス、
およびポリマーの表面コーティ
ングプロセスの研究開発を行って
いる。彼らの最終目的は、サンド
フィッシュの表皮構造が持つトラ
イボロジー特性に学んだ低コスト
耐摩耗性表面コーティング技術を
開発することである。傷のつか
ないフロントガラスや潤滑剤フリー
の低摩擦ボールベアリングなどが
期待される。

最近、流動的な“砂の海”の中
でサンドフィッシュが四肢を使わず
に蛇のように体を波状にくねらせて
“泳ぐ”様子がX線により映像化さ
れた。固体の微粒子からなる“流動
的媒体”の中で泳ぐサンドフィッ
シュの流体力学(Fluid Dynamics)
的挙動に、鱗表面の微細構造によ
って特徴づけられるトライボロジ
ーがどのような影響を及ぼすかが明
らかになりつつある。サンドフィッ
シュの“遊泳”の研究は、材料系バ
イオミメティクスと機械系バイオ
ミメティクスの新たな融合をもた

らすかもしれない。

3-7

昆虫と植物の攻防に学ぶ トライボロジーの研究

Kiel 大学動物学科のStanislav
Gorb 教授らは昆虫や植物の表面ト
ライボロジーについて系統的な研
究を展開している。たとえば、キ
リギリス(*Tettigonia viridissima*)の
足先には4~5 μ mの六角形の
パターンがタイル状に配列している
(図表5)。マイクロ加工技術でシ
リコンゴム表面に類似の微細パ
ターンを作製し摩擦特性を測定し
たところ、表面が乾いた状態にあ
るときにはスティック・スリッ
プ運動を完全に排除したスムーズな
運動ができ、ぬれた状態にあると
きは横滑り(hydroplaning)を防
ぎ、結果として安定な運動性が保
証されていることが示唆された²⁵⁾。
一方、植物も、昆虫とともに進化
適応してきた結果として、興味深
い表面微細構造を有するものがある。
植物学者であるElena Gorb 博
士は、食虫植物であるウツボカズ
ラの外部ならびに内部表面には
様々なマイクロ構造があり²⁶⁾、昆
虫にとってはツルツルとすべりや
すい表面を作っていることを明ら
かにした。とりわけスリッピーズ
ンと呼ばれる昆虫を捕捉する内部

表面には、サイジング剤(紙の表面
改質剤)であるアルキルケテンダイ
マー結晶の表面に形成される超撥
水性のフラクタル構造²⁷⁾に類似し
た構造が観察されており、材料科
学的な視点から見ても興味深い。

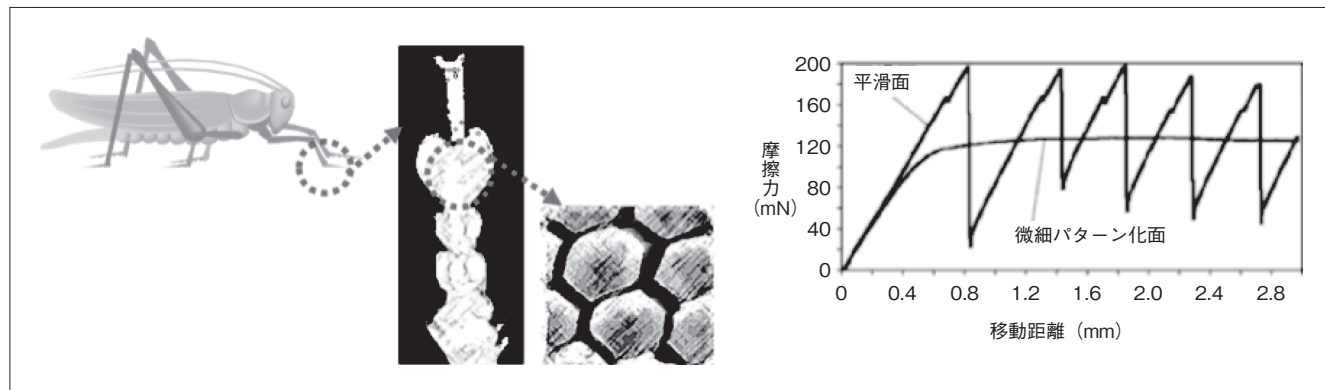
進化の攻防は昆虫の脚に多様な
機能を与えている。*Pameridea ror
idulae* という甲虫は、粘着性の樹
脂を表面に分泌する植物 *Roridula
gorgonias* の表面に捕捉されたミバ
エを、自らは粘着物に捕捉される
ことなく捕食することができる。
甲虫の脚からは、“sloughing-off”
layer として作用する断片的に剥離
するグリース状のクチクラ表皮が
あり、これによって植物が出す粘
着物からののがれることができると
考えられている²⁸⁾。この研究はド
イツ政府のプライオリティー研究
プログラムである“Biomimetic
Materials Research : Functionality
by Hierarchical Structuring of
Materials (SPP 1420 priority pro
gram)”で推進されている。

3-8

昆虫のセンシングに学んだ センサー材料

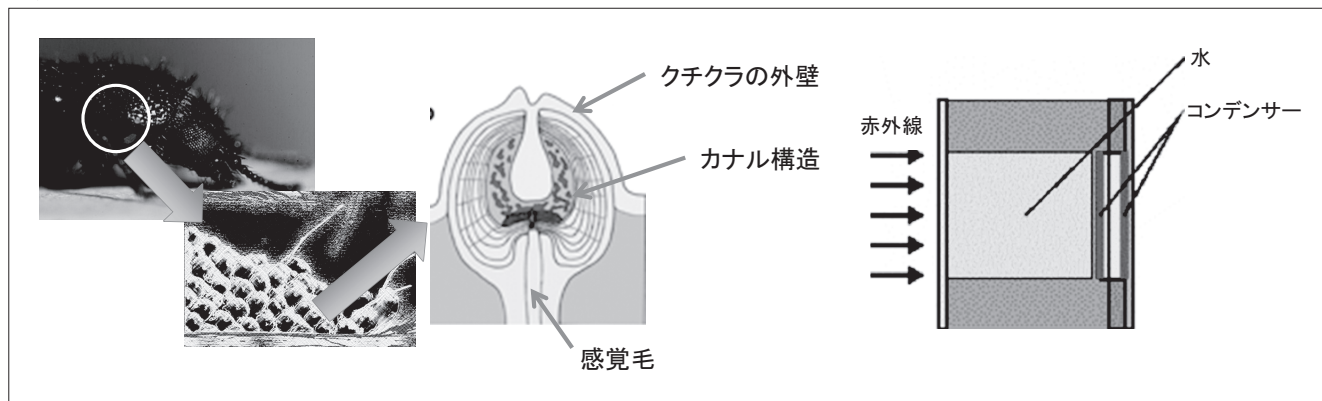
最近、欧州では生物学者を中心
に、新たなバイオミメティック材
料を用いたセンサーの研究が進め
られている。ナガヒラタタマムシ

図表5 昆虫の足に見られるトライボロジー



科学技術動向研究センターにて作成

図表6 ナガヒラタタマムシの赤外受容細胞アレイとそれをまねた赤外線センサーの模式図



科学技術動向研究センターにて作成

(*Melanophila*)は、山火事の跡地に産卵することが知られている。これは、火事の跡地には捕食者がいないためと考えられている。ナガヒラタタマムシは数十キロ先の山火事を感知できる高感度赤外線センサーを有しており、ボン大学動物学科の H. Schmitz 博士らはこれらが一種のメカノセンサーであることを明らかにした²⁹⁾。Sensillum と呼ばれる球状の感覚細胞が複眼の後方に複数配列しており、個々の細胞では神経細胞につながった感覚毛が硬いクチクラの外壁で覆われている(図表6)。細胞の内部は細いカナル構造になっておりカナルは液体で満たされている。波長 $3\mu\text{m}$ の赤外線の照射によりカナル内部の液体は効率よく熱膨張し、その結果、感覚毛が圧迫され力学的な刺激に変換されて神経に伝達する。

この結果をもとに、ボン大学で

は MPI^{注6)} の CAESAR^{注7)} との共同研究によって安価でかつ堅固な冷却不要赤外線センサーのプロトタイプを開発している。センサーの作動原理は簡単で、狭い空間に閉じ込められた液体(水)の熱膨張をコンデンサーで検出する。

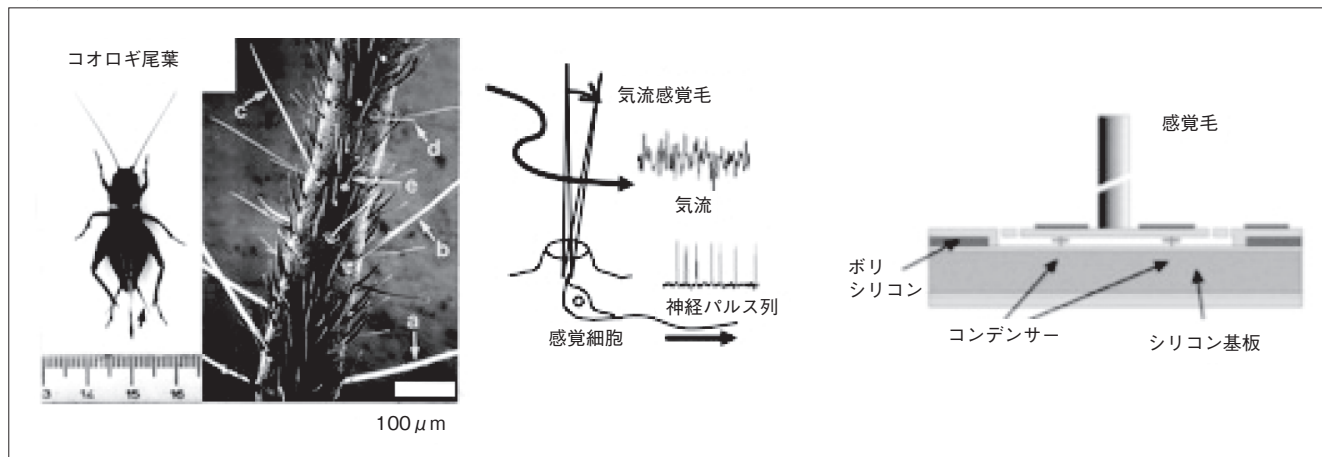
また、コオロギは気流変化によって捕食者の存在を感知することが知られている。尾部にある気流感覚毛は、広い周波数範囲をカバーするため大きさの異なる感覚毛を並べた感覚子アレイを構成しており³⁰⁾、雑音のなかから有効に信号を取り出すことができる(図表7)。コオロギの気流感覚細胞のエネルギー閾値は、ブラウン運動エネルギー

kT 程度であり感覚器としての究極の効率をもつと言われている³¹⁾。コオロギの感覚毛を真似た MEMS センサーが、Tours 大学昆虫学教室の J. Casas 教授グループと Twente 大学の Transducers Science and Technology Group (“MicMec”) の G. Krijnen 教授グループの共同研究によって開発されている³²⁾。

これらの成果は“CILIA”^{注8)}と呼ばれる欧州・コンソーシアムによって2009年にドレスデンで開催された第一回“Natural and Biomimetic Mechanosensing”に関する国際会議で報告された。国際会議では、コオロギの鼓膜に学んだ高分子センサーフィルムなども紹介された³³⁾。

注6：MPI：Max Planck Institute
 注7：CAESAR：Center of Advanced European Studies And Research
 注8：CILIA：Customized Intelligent Life-Inspired Arrays

図表7 コオロギの気流センサーに学んだ MEMS センサー



科学技術動向研究センターにて作成

4 新世代バイオミメティック研究のポイント

この章では欧州などの成功例から、新世代バイオミメティック研究のポイントをまとめる。

4-1

意味その1： 生物の進化と適応は材料設計 の良い手本であり、生物の 多様性は材料設計の多様性を もたらす

「バイオ・トライロジー」³⁴⁾のリーダーの一人であり博物学者である Kiel 大学の S. Gorb 教授は、その著書“Attachment devices of insect cuticle”において、進化的分類にしたがって昆虫の足の接着機構を系統的かつ網羅的に著している。その結果、ヤモリと同様に粘着物質を分泌しないもの(ファンデアワールス型)、粘着物質を分泌するもの、爪のような鉤状の構造体をもつもの、などに分類できること、さらには、昆虫がどの接着機構を採用するかは、進化の系統による分類とは相関が無くむしろ環境適応によって選択されることを明らかにした。これは、長い進化と適応の過程で、昆虫の接着機構に多様性がもたらされたことを意味している。この考え方にしたがって、材料に要求される機能発現機構と構造の相関を系統的に分類することができれば、適材適所的な材料設計が可能になると考えられる。前節でも紹介した植物と昆虫の進化の攻防を学ぶことによって、多様な材料設計が期待される。

4-2

意味その2： 生物資源インベントリーの データベース化が鍵になる

分類学(Taxonomy)的な観点から生物の構造・機能相関のデータベースを作成することによって、様々な応用に対応できるバイオミメティック材料の設計指針が得られる。生物インベントリーの多様性を有効に利用することが、材料研究に多様性をもたらすと言ってもよい。前述のロンドン自然史博物館の A.Parker 教授らによる「フォトニクス材料の設計指針作成におけるデータベース化」の試みに見られるように、博物学における系統的な構造・機能相関の集積とその公表が重要である。S. Gorb 教授もその著作“Attachment devices of insect cuticle”の序論において、「走査型電子顕微鏡 SEM による生物の表面構造観察がポピュラーになったことが、この分野の飛躍的な展開をもたらしている」と述べている。系統的かつ網羅的に生物表面の顕微鏡観察を行う研究機関の存在は、今後のバイオミメティクス研究において、極めて重要なポイントになるに違いない。米国でも“Nature's100Best”や“Biomimicry Taxonomy”などのデータベース化が図られようとしている。

4-3

意味その3： 生物学・自然史学と材料科学 との win-win 連携が不可欠である

生物が有するナノ・マイクロ構

造とそれらがもたらす機能発現との相関に関する知見を収集することは、生物学とくに形態学や発生学における大きな研究課題のひとつである。さらに、生物学の発見を材料学が原理を確認し再現し、さらにそれだけではなく再度生物学にフィードバックすることが重要で、欧州におけるバイオミメティクス研究の成功例に見て取ることができる。基礎科学と応用科学との橋渡しと異分野連携により、自然史(博物学)的な資源である生物標本に工学的な価値をもたらすことができるとともに、生物学的な機能発現の機構解明に工学的な知見をフィードバックすることができる。このような win-win の関係に基づく異分野連携においては、数理科学的手法に抵抗感を持たない生物学者の素養と、生物学に対する材料科学者の旺盛な好奇心が、その成否のキーポイントになると考えられる。

4-4

意味その4： 省エネルギー型材料の設計は、 生物の多機能性や 環境適応性に学べ

新世代バイオミメティック材料の特徴は、nm から μm ケールにおける階層的な構造とそれらが発現する機能を生物に模倣したところにある。例えば、nm から μm に至る階層的な構造は、ある側面では撥水性を示し、ある側面では無反射性を示すことにある。Barthlott 教授らは、このような生物が持つ階層的な表面の多機能性について言及している³⁵⁾。

たとえば、モスアイ構造は蛾だ

けではなく多くの昆虫に見られており、蚊のように小さな昆虫では複眼が示す撥水性によって「雨に濡れて溺れる危険」から身を守っていると考えられている。また、モルフォ蝶の翅の表面(鱗粉)はその特徴的な構造色を生み出す階層構造を有しており、その構造は同時に撥水性も付与している。中国科学院のLei Jiang 教授らは、翅の中心から外側に向かう方向には水滴が撥水されるのに対し、内側に向かう方向には吸着性があることを見出した。翅に付着した水滴が撥水される方向は、“羽ばたき”によって形成される空気の流れる方向と平行であり、付着した水滴が羽ばたきとともに移動して翅の汚れを除去する、セルフ・クリーニング(self-cleaning)機能を持つのかも知れない。

表面ナノ・マイクロ構造がもたらす撥水性は、セミの翅にも見られるが、セミの翅は透明である。透明であることは目立たないことを意味する。また、アサギマダラと呼ばれる長距離飛行をする蝶は部分的には透明な翅を持っている。一方、長距離飛行をしないウスバシロチョウも透明な翅を持っている。両者の翅の微細構造を比較したところ、アサギマダラの透明部分には、低密度ではあるものの鱗粉は整列しており、その結果高い撥水性を示す。それに対し、ウスバシロチョウでは整列した鱗粉はなく撥水性が弱い。このように、撥水性と光学特性の発現に見られ

る多様性は進化と適応の結果であると考えられる³⁶⁾。

最近、バイオミメティック表面構造が有する多機能性(撥水性、セルフ・クリーニング性、無反射性、透明性など)を利用した太陽電池の提案も報告されている。生物表面の多機能性の背景には、1つの構造が2つ以上の機能を果たすという「省エネ設計」とも思える設計思想が隠れているかも知れない。新規材料の設計においては、環境適応や省エネルギーの観点から、生物の構造や機能や行動を見直す必要がある。

4-5

意味その5： 材料系と機械系の連携も 望まれる

材料系バイオミメティクスと機械系バイオミメティクスのコラボレーションも重要である。現状では、これらが分かれてしまっていることに問題がある。鮫肌リブレットの研究は、防汚材料の観点から微生物学者との連携が不可欠であった。また、摩擦低減の観点では流体力学との連携が要求された。

撥水材料を使った水滴のマニピュレーションも、MEMSやコンビナトリアル化学など様々な分野で利用可能な研究課題である。とりわけ、lab-on-a-chip の分野ではデジタル・マイクロ・フルイ

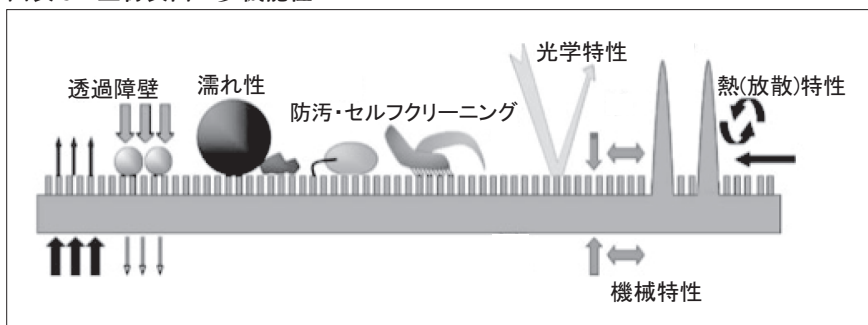
デクスと呼ばれる新興領域において液滴の操作とそれを可能とするデバイスが求められている。液滴の操作は、主として電気湿潤electrowetting-on-dielectric (EWD) と呼ばれる現象を使って行われている。これは、疎水性基板上の水滴の接触角が電場をかけることによって小さくなることを利用している。液滴を安定に操作する方法を蟻と共生するアリマキが心得ていることも、バイオミメティクス・デバイス設計のヒントになりそうである。アリマキは液体分泌物を安定な液滴(liquid marble と呼ばれる)とすることで、巣に満ちた液体で自らが溺れないようにしている³⁷⁾。一方、非 EWD 駆動の液滴操作の研究も始まっている。ヒレアシギが、水の表面張力とくちばしの開閉運動を利用して重力に反して水を口まで登るように移動させることが明らかになり、パイプ内で液体輸送の抗力減少などに応用できる可能性が指摘されている³⁸⁾。新しい作動原理による流路を持つMEMSチップの開発が期待される。また、ナミブ砂漠の甲虫がミスト状の水滴を捕集しているのに対し、砂漠に住むゴキブリの仲間は、飽和蒸気よりも低い湿度条件下からさえもその口の周りに水滴を吸着させることができるといわれており³⁹⁾、エネルギーを使うことなく結露や蒸発などの水滴操作を可能とするデバイス設計のヒントが隠されているかもしれない。

4-6

意味その6： 生物の自己組織化的階層構造 形成は生産技術革新の ヒントになる

新世代バイオミメティクス研究は、生産技術にも革新をもたらす可能性がある。英国におけるバイ

図表8 生物表面の多機能性



科学技術動向研究センターにて作成

オミメティクス研究のリーダーであるバース大学のJ. Vincent 教授(生物学者)は、TRIZ と呼ばれる問題解決策を用いて、生物学的に形成されるものと人間が工業的に作るものが、それぞれどのような要因から成るのかを解析した。彼は、生物はその構造を形成するために「情報」「空間」「構造」を有効に利用しているのに対し、現行の工業技術による構造形成は「エネルギー」「物質」に多くを依存していると結論した⁴⁰⁾。生物はありきたりの元素である炭素、酸素、窒素を使ってDNA やタンパクのように情報を持つ分子を作り、それらは膜やオルガネラなどの構造を形成し、さらに階層的に構造化して細胞、組織、機関を作り上げている。一方、工業製品、たとえば高速電子回路などは、ガリウムやヒ素などの希少な元素をも使って、リソグラフィーなどの手法によって多量のエネルギーを使って原材料を切り刻んで形成している。

生物の構造形成は、その基になる過程は遺伝子によってプログラムされた複雑な化学反応プロセスの組み合わせによるものであり、さらには分子の自己集合や分子集合体の自己組織化などを有効に利用している。生物は、リソグラフィーも石油も使わずに、その特

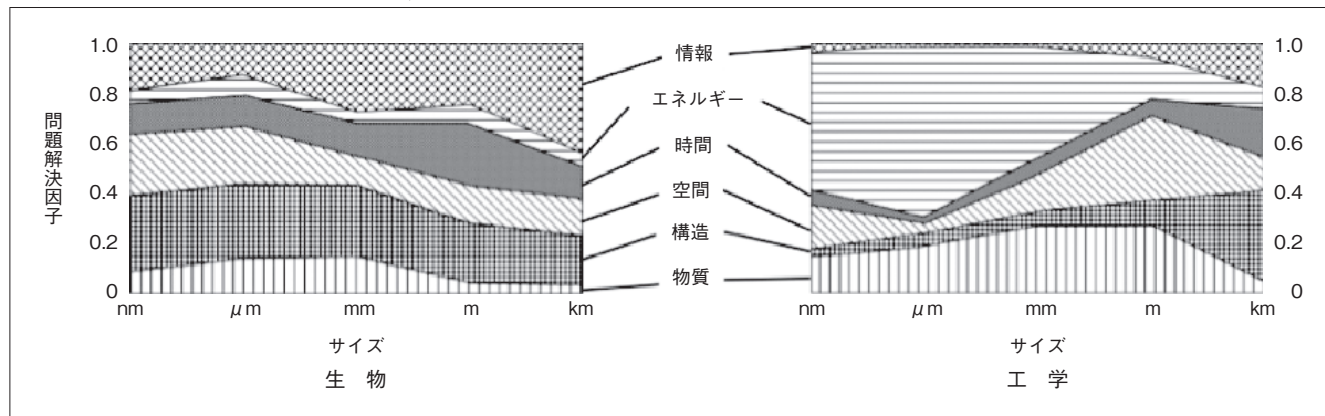
異な構造を生みだし、多様な機能を発現しているのである。Vincent 教授の解析は、エネルギーや物質に多くを依存しない新しい生産技術の可能性を示唆しているのである。

新世代バイオミメティック材料の開発は多くの場合、まず、電子線描画やリソグラフィーなどナノテクノロジーによって作製された“初期モデル”によって原理確認が行われる。次に実用化に向けたステージでは、効率よくかつ安価に製造することが求められることになる。ナノインプリントなどの金型技術、インクジェットなどのパターン化技術、結晶成長技術、ブロックコポリマー・リソグラフィーやマイクロ・コンタクト・プリンティングなどの自己集合現象の利用、散逸構造などの自己組織化現象の利用など、ナノテクノロジーで使用されている様々な製造技術を総合的に検討し、生物型の生産技術を模索する必要がある⁴¹⁾。化学反応プロセスだけで構造化材料を作製することは困難であるが、将来的には自己集合や、自己組織化のような物理プロセスを組み合わせることで、高次に階層化された材料を創ることは可能であろう。

以上をまとめると、バイオミメ

ティクスは産業技術にパラダイムシフトをもたらす可能性を持つものと結論つけることができる。超撥水表面を得るために、工業的にはフッ素コートをすることが多い。一方、蓮の葉は、有機物であるワックス状分泌物と表面のマイクロ・ナノ構造を利用して超撥水表面を実現している。高感度赤外線センサーのために人間は化合物半導体を用いるが、タマムシは液体の体積膨張を利用して遠方の火事を察知する。人間が作ったものとは全く違う機構を用いながら、生物は同じあるいはそれ以上の機能を発現している。また Vincent 教授も示唆するように、リソグラフィーを使わなくても生物はナノ・マイクロ構造を創っている。生物は、産業革命以来人間が培ってきた産業技術とは全く異なる生産技術とシステムデザインの体系を有していることは明確である。バイオミメティクス研究の新潮流は、マテリアルやシステムのデザインと生産技術におけるパラダイムシフトを内包し、そして欧米ではすでに、環境やエネルギー、資源問題を解決し持続可能な社会の実現に向けた政策課題として位置付けられているように思われる。

図表9 「生物」と「工学」のモノ作り比較。BioTRIZ による解析



科学技術動向研究センターにて作成

5 海外の取り組み

5-1

英国の認識と英国内の取り組み

2007年1月に当時の英国貿易産業省(DTI)は“Biomimetics: strategies for product design inspired by nature. A mission to the Netherlands and Germany”と題する報告書を作成した。これは、DTI Global Watch Missionによるものであり、英国の産業界におよぼすバイオミメティクスの潜在的な寄与が述べられている。この報告によれば、バイオミメティクス研究は、英国・ドイツ・オランダおよび米国においてさかんになされており、中でもドイツは基礎研究と産業応用を統合的にとりまとめることで一歩先んじている。一方、オランダはいくつかの先導的な研究機関と企業がバイオミメティクスの概念を製品開発と設計に展開しているものの、個々の研究・開発グループの間には連携がないとされている。

英国では2002年に、英国の企業および大学を中心メンバーとするBIONIS^{注9)}というネットワークが設立された。ニュースレターの発行によって、バイオミメティクスに関するトピックスや会議開催などを国際的に発信している。しかし、英国では基礎研究とプロトタイプ製の製造との間にはよい連携があるにもかかわらず、実用化にむけての展開は必ずしも進んではいないのが現状のようである。ちなみに、2006年にDTIのMaterial Innovation & Growth Teamが行った“Multifunctional Materials”に関する報告においては、英国においては複合材料やコーティング材、ナノ構造材料などとともにバイオミメティクス材料が、将来的に重

要であるとされている。

5-2

ドイツの取り組み

英国からネットワーク形成が充実していると評価されたドイツにおいては、新世代バイオミメティクス研究における生物学の役割が明らかに大きい。ドイツ政府の生物多様性条約戦略(National Strategy on Biological Diversity, 2007)においては、“Biological diversity and its innovation potential”と題した項が設けられ、ロータス効果やゲッコテープ、タマムシの赤外線センサーなどが技術革新をもたらすものとして紹介されている。また、2008年にボンで開催された生物多様性条約第9回締約国会議(COP9)においてドイツ政府は、生物多様性が原材料の調達や生産工程などの企業活動に大きな影響を及ぼすことから、「ビジネスと生物多様性イニシアティブ」を発足し民間企業に生物多様性条約への関与を求めている。

ドイツでは、BIOKON^{注10)}が市場開拓、組織化および知識転移で大きな実績を持っている。BIOKONは、28の研究組織の産官学連携からなる連邦政府によって資金援助されたネットワークであり、2001年に設立された。BIOKONの特徴は、バイオミメティクスの重要な意義である「3つの連携」、すなわち「生物学と工学の連携」、「工学に

おける異分野連携」、「産学連携」を可能とする組織化が意図されている点にある。さらに2009年からはドイツ政府教育研究省から30億ユーロ以上の資金援助を受けてBIOKON Internationalとなり、今後は国際ネットワーク化を図っていく。8人のボードメンバーのうち半数をフランス、スウェーデン、オランダ、英国から迎えている。2012年からは政府から独立した活動を目指しており、本稿の冒頭でも紹介したように2011年には、世界でも初めての「International Industrial Convention on Biomimetics」を主催する。このようにドイツ政府は省庁を超えたバイオミメティクス振興を図っており、ドイツ経済産業省はその白書⁴²⁾においても大きく取り上げている。

5-3

そのほかの欧州諸国の取り組み

欧州連合は、FP7において、防汚効果¹¹⁾のほかにも情報通信、エネルギー、メディカルなど多くの分野でバイオミメティクス関連のプログラムを進めている⁴³⁾。GENNESYS^{注11)} Initiative (Grand European Initiative on Nanoscience and Nanotechnology using Neutron and Synchrotron Radiation Sources)の白書の三章でもBiomimetic nanomaterialsについて大きく採り上げている。

オーストリアのFederal Ministry for Transport, Innovation and

注9: BIONIS: The Biomimetics Network for Industrial Sustainability

注10: BIOKON: Bionics Competence Network

注11: GENNESYS:

Grand European Initiative on Nanoscience and Nanotechnology using Neutron and Synchrotron Radiation Sources

Technology は、機械・材料・生物学など多様な分野における大学・企業のネットワーク形成に力を入れている⁴⁴⁾。また、スウェーデンには Swedish Biomimetics 3000[®] というバイオミメティクスの実用化への橋渡しを目的とした融資会社が設立されている⁴⁵⁾。

5-4

米国の取り組み

冒頭で紹介した全米アカデミーズの白書では、“Next-Generation Bioinspired Materials”に関する提言のひとつとして、「先端材料の新しい設計へのインスピレーションをもたらす生物学的多機能システムを幅広く選択」することが科学的理解への挑戦であると述べられて

いる。Biomimicry の主唱者である J.Benyus は、Biomimicry Institute という NPO 法人と Biomimicry Guild というコンサルティング会社を設立し、フリーアクセスできる AskNature というサイトに Biomimicry Taxonomy というデータベースを開設して生物の多様性を様々な科学技術分野に応用するヒントをリストアップしている。また、“Biomimicry and Design Workshop”を定期的に主催し情報発信をしている。

6 我が国の取り組み—課題と提言

6-1

我が国の取り組み

図表 10 に示すように、今世紀になってから「ネーチャー・テクノロジー」や「バイオミメティクス」に関する著作や論文誌が我が国でも出版され、経済産業省を中心にバイオミメティクスに関する政策的な調査が行われている。また文部科学省は 21 世紀 COE において、生

物模倣型モノづくり(工学分野)や生物資源の新しい利用(農学分野)に関する大学院教育プログラムを採択している。また、我が国の研究者が主催する国際会議も開催されている。また、撥水材料や塗料、構造色繊維、モスアイ構造をもつ光学フィルムなどは、我が国においてもすでに実用化されており、新しい材料デザインや生産技術の革新などの観点からも生物模倣技術への企業の関心はますます高まっている。

6-2

新世代バイオミメティクス研究・開発における日欧比較

バイオミメティクスの新潮流は、現代社会が抱えているエネルギー、環境、資源などの諸問題に対応できる「生産技術の革新」を萌芽する新しい科学技術体系をもたらすものとして世界的にも期待されている。そしてその実現には、工学と

図表 10 我が国におけるバイオミメティクス関係の調査、研究プロジェクト、著作など

調査	平成17年度東北経済産業局調査 「ネーチャーテクノロジーに係わる産業公害防止技術・事業可能性調査」 平成19年度NEDO「生物機能模倣型もの作り技術に関する調査」 平成21年度NEDO「次世代バイオミメティック材料に関わる調査」
研究プロジェクト	平成14年度 名古屋大学21世紀COEプログラム「自然に学ぶ材料プロセッシングの創成」 平成16年度 京都大学21世紀COEプログラム「昆虫科学が拓く未来型食料環境学の創生」
企業の関心	積水化学 「自然に学ぶものづくりフォーラム」「自然に学ぶものづくり研究助成」などの助成事業 日経産業新聞 2010年2月9日、10日「2030年への挑戦 次世代産業技術」生物模倣 (上)(下) 日本経済新聞 2010年1月23日「技術ウオッチ」生物の機能活かし、環境配慮、 日本経済新聞 2010年5月4日、5日、7日「生物多様性 経営に生かす」(上)(中)(下) エコノミスト臨時増刊号「図説 日本経済2010」驚異的なエネルギー効率の生物に学ぶモノづくり
国際会議	2001年～2009年「バイオミメティック材料プロセッシング」に関する国際会議 2009年「エンジニアリング・ネオバイオミメティクスに関する国際シンポジウム」
学術書	2000年「バイオミメティックハンドブック」、2002年「バイオミメティクスの新展開」、2006年「“ファイバー”スーパーバイオミメティクス」、2006年「プラントミメティクス」、2008年「昆虫に学ぶ新世代ナノマテリアル」 2008年「昆虫ミメティクス」、2009年「昆虫科学が拓く未来」
啓蒙書	2004年「カタツムリが、おしえてくれる!—自然のすごさに学ぶ、究極のモノづくり」、2005年「自然に学ぶものづくり」、2006年「昆虫力」、2009年「自然に学ぶ粋なテクノロジー」、2010年「地球が教える奇跡の技術」

科学技術動向研究センターにて作成

生物学の強力な異分野連携が不可欠であることが、本報告で紹介した欧米の成功例からも読み取ることができる。バイオミメティクス研究・開発における欧米の高いアクティビティーとオリジナリティーの背景には、科学技術を縦割りに分割しない文化的な要因があるように思われる。ドイツでは、異分野連携をさらに推進するために、異分野連携研究にしか予算を配分しない行政的な指導を行っている。新世代バイオミメティクス材料研究における我が国の課題を抽出する上でも、欧州との比較を行うことは意味があるだろう。

図表 11 に、異分野連携・産学連携・教育プログラム・予算配分・政策的な調査などにおける日欧比較をまとめた。欧州では、生物学からの問題提起をナノテクノロジーなどとの異分野連携で強く推進してきた結果として、人材育成とネットワーク形成を政策的にも推し進め、さらには博物館や産業界を巻き込んで進んできた様子が見て取れる。一方、欧州とは対照的に、我が国では縦割りの取り組みに限られ、残念ながら異分野

連携が積極的に推進されているとはいえない状況にある。新規な異分野連携・融合領域形成を苦手とする我が国にとっては、バイオミメティクスの成功例である欧米における研究開発例を1つの分野がキャッチアップしフォローするだけでは、科学的にも技術的にも遅れをとることは明白である。

6-3

我が国の問題点とその背景にあるもの

生物学とナノテクノロジーの異分野連携の成果ともいえる新世代バイオミメティクス研究が、何故、我が国では台頭しにくいのであろう。我が国でも、分子系バイオミメティクスとも言うべき Biomimetic Chemistry の伝統と成果があり、その一部はバイオマテリアル研究の潮流を生みだし、そして現在では、医療応用の領域において材料科学と医学の連携を成功裏にもたらしえてきた。我が国における医工連携成功の背景には、バイオマテリア

ル研究者が医学に対する知識と医療現場の課題と問題点を十分に理解していたことがあり、学会組織や教育体制の充実がそれらを可能としたものと考えられる。一方で、分子系バイオミメティクス研究の後継領域でもある超分子科学は、原子や分子、分子集合体を対象とするボトムアップ・ナノテクノロジーの中心的研究領域となるものの、異分野連携の相手は同じ大きさを対象とする研究領域に限られた。nm から μm 、さらには mm にいたるより大きな構造を対象とした研究領域、すなわち、欧州において次世代バイオミメティクス台頭の契機となった分類学や形態学が対象とする大きさは、我が国の超分子科学のテリトリーではなく、結果として昆虫学や動物学、植物学との異分野連携はほとんどなされなかった。その結果、我が国における材料系バイオミメティクス研究は、新規材料のバイオミメティック・デザインを欧州の論文から輸入するところから始まることになる。その段階であれば、生物学者の知識も連携も必要としないのである。材料科学側の問

図表 11 新世代バイオミメティクス研究における日欧比較 (○良好、△改善点あり、×不十分)

	欧州	我が国
材料科学と生物学・自然史学(博物学)との連携	○ 生物学主導の連携が多くみられるナノテクノロジーが重要不可欠 予算配分上、連携は不可欠	× 分子レベルを研究対象とする生物分野と材料科学の連携に限られる
工学領域内での材料系と機械系との連携	○ 異分野連携プロジェクトに予算の集中配分	× 材料系と機械・ロボット系との連携はほぼ皆無
産学連携	△ ドイツでは政府が積極支援ベンチャー化が早道 英国では大手企業はやや様子見	△ 欧米成果のキャッチアップを企業だけで展開する傾向が強い
教育プログラム	○ ドイツでは複数大学の博士課程が連携。分野も多様	△ 21COEなど。ただし、学内分野内で閉じたプログラム
博物館の関与	○ インベントリー(所蔵物)のデータベース化	× 材料科学分野や機械など工学との接点がない
産学連携・異分野連携ネットワークの形成	○ 英国、ドイツを中心に活発化 ドイツでは政府が積極支援 欧州コンソーシアムなど	× 皆無
予算	○ 各国予算ならびにEUのFP6,FP7に重点課題を設定	× 一般的な外部資金
政策的な取り組み	○ 各国で行政が独自の調査様々な学術分野での白書化と積極的な政策提言	△ METI, NEDOが中心に調査産業化に向けた調査に限られる生物学者の寄与がほとんどない

科学技術動向研究センターにて作成

題は、生物の有する構造や機能から新規材料設計のヒントを自らが生物学者との連携の中で探し出すことに価値を見いださなかったことであり、欧米のキャッチアップに甘んじた点にある。これは、我が国の材料科学者が、生物学に対する知識を持たず人材交流をしなかったことに起因する。バイオマテリアル研究者が知識を医学に求め、学会を組織して人材を育成し医工連携に成功したことは対照的である。

一方、生物学側では、極端に縦割りともいえる学問体系と学術組織のありかたを問題点として挙げることができるであろう。まず、学問領域の細分化が工学系に比べて著しく、例えば同じ昆虫を研究対象としていても、分類学、農学(害虫としての研究対象)、生理学、発生生物学など、多くの視点からのアプローチがあり、必ずしも研究者間での交流がなされている訳ではない。バイオメティクスの領域においては、生物が有するナノ・マイクロ構造とそれらが有する生物学的機能を解明することが生物学の主たる役割である。欧州においては分類学者、形態学者が次世代バイオメティクス研究の先導的役割を果たしているのに対し、我が国においては、分類学や形態学、さらには発生学の分野におけるバイオメティクス関連の研究は皆無であった。一方、農業における昆虫学は、蚕と害虫を研究対象とした経緯もあり、応用昆虫学として展開してきた。図表 10 に掲載した京都大学農学部の 21 世紀 COE では、「昆虫から学ぶ科学」としての「エントモメティクス(エントモロジー=昆虫学)」を提唱しており、昆虫型ロボットの開発などでは機械系バイオメティクスとの連携も試みられている。代表者である藤崎憲治教授が、ドイツにおける次世代バイオメティクス研究のリーダーである Kiel 大学

の S.Gorb 教授と交流を始めたことで、応用昆虫学においても材料系バイオメティクスへの関心がもたらされた。

2008 年に出版された「昆虫ミメティクス」は、動物生理学者を中心に編集された我が国では最初の本格的なハンドブックであり、この中では J.Vincent 教授をはじめとする欧州の昆虫学者、動物学者の研究が数多く紹介されている。編集代表の下澤楯夫北大名誉教授は、電子工学のバックグラウンドを持つ生理学者であり、昆虫の感覚毛の研究に工学的な手法を取り入れた研究は欧米でも高く評価されており、その研究成果は 3-8 節で紹介した J.Casas 教授らのプロジェクトのきっかけにもなっている。欧米に遅れはとったものの生物模倣の発想は、工学や農学といった応用の視点を持った生物学者の中では萌芽していると言える。しかし、農学系で提唱されている「エントモメティクス」と生理学系の「昆虫ミメティクス」とは、共通の課題や問題意識を持ち、さらには材料科学や機械工学との接点を持ちながらも、縦割りとも思える我が国の学問体系と学術組織のなかでそれぞれに独立して展開している。その結果、次世代バイオメティクス研究を生物学主導で展開する素地と可能性を孕んではいたものの、欧州にみられる新潮流への展開にはいたらなかったと考えられる。

6-4

課題と提言

「生物機能に学ぶ材料・システムの設計」と「生物プロセスに学ぶ生産技術」を特徴とする「バイオメティック・エンジニアリング」とも言うべき新しい技術体系を我が国に構築するためには、①材料科学・

機械工学などの工学と生物学・自然史学(博物学)の連携、②生物学や工学のそれぞれの領域内部での異分野連携、③産学連携、を早急に行うことにあり、そのためには④異分野連携のバリアを低くするための人材育成・教育の仕組み作りが急務である。早急に異分野連携を推進するためには、例えば「バイオメティック・イニシアティブ」として機能すべき「府省連携型バイオメティック・センター(仮称)」というような機関を設置し、(独)物質・材料研究機構、(独)産業技術総合研究所、(独)農学生物資源研究所、(独)理化学研究所、(独)国立環境研究所、(独)国立科学博物館、地方自治体が運営する自然史系博物館、大学など省庁をまたがる包括的な研究連携体を組織するとともに、産学連携プロジェクトや学術連携融合研究プログラムなどを政策課題として設定することが有効である。さらに、異なる学術領域の複数の学会が連携した人材育成プログラムや、科学博物館と大学、学会の連携による理科教育プログラムや科学技術啓蒙活動、科学技術者のリカレントなどを同時に推進するべきであろう。

6-4-1 博物館の役割

膨大な生物資源情報とも言える生物標本を保存している博物館の役割は特に不可欠である。データマイニングや「知の構造化」などのデータベース化法を利用して、博物館の所蔵物であるインベントリーを整理・集約化することでバイオメティック・データベースを網羅的に作成することが急務である。また、分類学、形態学にとっても、これまでに収集した標本に工学的な価値を見いだされることは学術的にも意味のあることであり、事実、欧州の博物館では、電子顕微鏡写真なども含むデータベースを基に材料やデバイスの研究者との連携、産学連携を積極的

に行っている。生物資源インベントリーを工学的な視点からデータベースにする作業は、工学者と生物学者がお互いを知る場を提供することであり、さらには、「標本」を「宝物」に換えることであり、そしてそこから共同研究の課題を見いだすことでもある。生物多様性は、生物を模倣し着想を得て新たに設計される材料の多様性に反映される。

6-4-2 異分野連携による新学術研究領域の創成

生物は、ナノからマイクロ、そしてマクロにいたる階層的な構造を自発的に形成している。新世代バイオミメティクス研究は、ナノからマイクロにいたる領域で形成される構造とそれらがもつ機能、ならびに機能発現の機構解明を対象とする。これは、分子生物学的手法とは異なるアプローチであり、またナノテクノロジーの発展によっても行われなかった。バイオミメティクス研究は、ナノとマイクロの狭間を埋めることであり、分子ナノテクノロジーと生物のマイクロ構造を結びつけることは、生命科学と工学の融合をもたらす。さらにその成果は、発生生物学や形態学にフィードバックされる。これこそが、新世代バイオミメティクス研究が新しい学術領域たる本質である。

6-4-3 実用研究に向けた産学連携のプロジェクト化

ロータス効果の発見は、ドイツにおけるバイオミメティクス研究開発の象徴的な成功例であり、ドイツ政府は産学連携ネットワーク形成(BIKON)を政策的な課題とし

て援助を行っている。欧州においても、この分野における産学連携の推進には政府の支援が必要であることを意味している。このようなネットワーク形成の形で政策的なサポートがあれば、周回遅れの状況にある我が国においても起死回生の機会は十分にあると考えられる。

生物学と工学分野におけるアカデミアの連携を図るとともに、エネルギーや環境、資源問題に対応できる企業連携体との共同研究コンソーシアムとしての産学連携体を政策的に組織し、産学連携課題の設定とプロジェクト化を行う。例えば、太陽光発電へのモスアイ構造の導入は効率的なエネルギーの創造を可能とし、昆虫の脚に学ぶ低摩擦材料を自動車に導入することで効率的なエネルギーの利用を達成し、自己組織化や自己集合に基づくボトムアップ・ナノテクノロジーの開発と生産技術化は、大量のエネルギーを使わない生産工程を実現する。これらの課題は、持続可能な社会実現にむけたより大きな政策的な課題でもある。

6-4-4 教育・人材育成

生物学に対する興味と理解を持つ工学の研究者を育成することは、バイオミメティクス研究の将来展開にとって不可欠である。3-6節でも紹介したように、ドイツでは昆虫の感覚毛模倣のコンソーシアムと連携したBIONIC Graduateという大学院博士課程のCOEプログラムがあり、複数の大学の専門分野のことになる教員が大学院学生の指導(Cross-Border Training)を行っている。生物の有する構造や機能に工学的な価値を見いだすために

は、工学教育に生物学を取り入れることが不可欠である。また、バイオミメティクス研究を通じて、博物館が持つ啓蒙機能を利用した初等中等教育における理科教育や、企業研究者のリカレント教育なども積極的に考えるべきであろう。

日本が、新世代バイオミメティクスの潮流に乗り遅れたのには、「物理や数学が苦手な生物学者」や「暗記物が嫌いな工学者」、さらには「高校で生物学を履修しないままに医学部に進学する学生」を生み出したこの国の教育と文化的な背景があるように思われる。大学の学部構成には、明治維新から続いている縦割りの教育制度を未だに引きずった感があり、初等中等教育、とりわけ理科教育のありかたにも影響している。さらに、均一性の高い学会などの組織のあり方も異分野連携に消極的な文化の一因かもしれない。我が国が欧米のキャッチアップから脱却し、科学技術先進国として脱近代化するためには、大学・大学院における「課題をつくりだす問題設定能力」を持つ人材の育成が重要になる⁴⁶⁾。特にこれからは、「物理が解る分類学者」、「昆虫に詳しいエンジニア」が求められる。

謝辞

本稿の執筆にあたり、(独)国立科学博物館・友国雅章動物部長、京都大学農学部・藤崎憲治教授、下澤楯夫北海道大学名誉教授、道立北海道開拓記念館・堀繁久課長、浜松医科大学・針山孝彦教授、九州大学先端物質化学研究所・高原淳教授に貴重なご意見を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) <http://www.otto-schmitt.org/>
- 2) ドイツ政府の Clusters of Excellence は異分野連携を前提にした大型プロジェクトの例である。
http://www.dfg.de/en/research_funding/programmes/excellence_initiative/clusters_excellence/index.html
- 3) 例えば、辻井薫「超撥水と超親水 その仕組みと応用」、米田出版 (2009)
- 4) W. Barthlott, "Scanning electron microscopy of the epidermal surface in plants.", Scanning Electron Microscopy in Taxonomy and Functional Morphology (Systematics Association Special Volume No. 41), ed. D. Claugher. Clarendon Press, Oxford, 69-94, Clarendon Press, Oxford, (1990), W. Barthlott, C. Neinhuis, "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces" *Planta*, 202(1), 1-8(1997)
- 5) L. Feng, Y. Zhang, J. Xi, Y. Zhu, N. Wang, F. Xia, L. Jiang, "Petal Effect : A Superhydrophobic State with High Adhesive Force", *Langmuir*, 24(8), 4114-4119(2008)
- 6) M. H. Jin, X. J. Feng, L. Feng, T. L. Sun, J. Zhai, T. J. Li, L. Jiang, "Superhydrophobic Aligned Polystyrene Nanotube Films with High Adhesive Force", *Adv. Mater.* 17(16), 1977-1981(2005)
- 7) A. R. Parker, C. R. Lawrence, "Water capture by a desert beetle", *Nature* 414(6859), 33-34(2001)
- 8) L. Zhai, M.C. Berg, F.C. Cebeci, Y. Kim, J.M. Milwid, M.F. Rubner, R.E. Cohen, "Patterned Superhydrophobic Surfaces : Toward a Synthetic Mimic of the Namib Desert Beetle", *Nano Lett.* 6(6), 1213-1217(2006)
- 9) D. Ishii, H. Yabu, M. Shimomura, "Novel Biomimetic Surface Based on a Self-Organized Metal - Polymer Hybrid Structure", *Chem. Mater.*, 21(9), 1799-1801(2009)
- 10) F. Xia, L. Jiang, "Bio-Inspired, Smart, Multiscale Interfacial Materials", *Adv. Mater.*, 20(15), 2842-2858(2008)
- 11) <http://www.biosciences.bham.ac.uk/SEACOAT/index.htm>
- 12) T. Hariyama, "Structural Colors in Fish", *Structural Colors in Biological Systems -Principles and Applications-*(edited by S. Kinoshita and S. Yoshioka), Chapt.5, Osaka University Press, (2005)
- 13) A. L. Ingram and A. R Parker, "A review of the diversity and evolution of photonic structures in butterflies, incorporating the work of John Huxley (The Natural History Museum, London from 1961 to 1990)", *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, 363(1502), 2465-2480(2008)
- 14) K. Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. Peattie, W. Hansen, S. Sponberg, T. Kenny, R. Fearing, J. Israelachvili, and R. J. Full, "Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae" *PNAS*, 99(19), 12252-12256(2002), W. Kenny, Ronald Fearing and Robert J. Full, "Adhesive force of a single gecko foot-hair", *Nature*, 405(6787), 681-685(2000)
- 15) M Sitti, RS Fearing, "Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives", *J. Adhesion Sci. Technol.*, 17(8), 1055-1073(2003)
- 16) A.K. Geim, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, K.S. Novoselov, A.A. Zhukov, SYU. Shapoval, "Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair", *Nature Materials*, 2(7), 461-463(2003)
- 17) J. Lee, B. Bush, R. Maboudian and R. S. Fearing, "Gecko-Inspired Combined Lamellar and Nanofibrillar Array for Adhesion on Nonplanar Surface", *Langmuir*, 25(21), 12449-12453(2009)
- 18) <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Rise/StickyBot> 英国の軍事産業である BAE Systems においても開発された。
<http://www.bae-systemsmarine.com/fias2006/news/news197.htm>
- 19) C. G. Bernhard, William H. Miller, "A corneal nipple pattern in insect compound eyes", *Acta Physiol Scand.*, 56(3-4), 385-386(1962), W. H. Miller, G. D. Bernard, and J. L. Allen, "The Optics of Insect Compound Eyes", *Science*, 162(3855), 760-767(1968)
- 20) S. J. Wilson, M. C. Hutley, "The Optical Properties of 'Moth Eye' Antireflection Surfaces", *J. Mod. Opt.*, 29(7), 993-1009 (17) (1982)
- 21) J. Zhao, A. Wang, P. Campbell and M. A. Green, "19.8% Efficient Honeycomb Multicrystalline Silicon Solar Cell with Improved Light Trapping", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 46(10), 1978-1983(1999)
- 22) W. Baumgartner, F. Fidler, A. Weth, M. Habbecke, P. Jakob, C. Butenweg, W. Böhme, "Investigating the Locomotion of the Sandfish in Desert Sand Using NMR-Imaging", *PLoS One.*, 3(10), e3309(2008)
- 23) R. A. Berthé, G. Westhoff, H. Bleckmann, S. N. Gorb, "Surface structure and frictional properties of the skin of the

- Amazon tree boa *Corallus hortulanus* (Squamata, Boidae)", *Journal of Comparative Physiology A*, 195(3), 311–318 (2009)
- 24) <http://www.bionikgraduate.uni-bonn.de/index.php>
- 25) M. Varenberg, S. N. Gorb, "Hexagonal Surface Micropattern for Dry and Wet Friction", *Adv. Mater.*, 21(4), 483–486 (2009)
- 26) E. Gorb, and S. Gorb "Functional surfaces in the pitcher of the carnivorous plant *Nepenthes alata* : A cryo-SEM approach.", *Functional Surfaces in Biology : Adhesion Related Phenomena. Volume 2.* (Gorb, S., ed.), Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York., 205–238 (2009)
- 27) T. Onda, S. Shibuichi, N. Satoh and K. Tsujii, "Super-Water-Repellent Fractal Surfaces", *Langmuir*, 12(9), 2125–2127 (1996)
- 28) D. Voigt and S. Gorb, "An insect trap as habitat : cohesion-failure mechanism prevents adhesion of Pameridea roridulae bugs to the sticky surface of the plant *Roridula gorgonias*", *J. Exp. Biol.*, 211(16), 2647–2657 (2008)
- 29) H. Schmitz, M. Mürtz and H. Bleckmann "Infrared detection in a beetle", *Nature*, 386(6627), 773–774 (1997)
- 30) T. Shimozawa and M. Kanou, "Varieties of filiform hairs : range fractionation by sensory afferents and cercal interneurons of a cricket", *J.Comp.Physiol.*, 155(4), 485–493 (1984), T. Shimozawa and M. Kanou, "The aerodynamics and sensory physiology of range fractionation in the cercal filiform sensilla of the cricket *Gryllus bimaculatus*". *J.Comp. Physiol.*, 155(4), 495–505 (1984)
- 31) T. Shimozawa, J. Murakami and T. Kumagai : F. G. Barth, J. A. C. Humphrey and T. W. Secomb (eds.), *Sensors and Sensing in Biology and Engineering*, 145–157, Springer-Verlag (2003)
- 32) G. J. M. Krijnen, T. S. J. Lammerink, R. J. Wiegerink, J. Casas "Cricket inspired flow-sensor arrays", *IEEE Sensors*, 28–31 : 539–546 (2007)
- 33) N. Mhatre, F. Z. Montealegre, R. Balakrishnan, D. Robert "Mechanical response of the tympanal membranes of the tree cricket *Oecanthus henryi* (Orthoptera : Gryllidae : Oecanthinae)", *Journal of Comparative Physiology A*, 195 : 453–462 (2009)
- 34) S. Gorb, "Functional Surfaces in Biology, Vol. 1 Little Structures With Big Effects, Volume 2 Adhesion Related Phenomena", Springer (2009)
- 35) K. Koch, B. Bhushan, W. Barthlott, "Multifunctional Surface Structures of Plants and their Occurrence in Various Environments : An Inspiration for Biomimetics.", *Materials Science*, 54 : 137–178 (2009)
- 36) P. P. Goodwyn, Y. Maezono, N. Hosoda and K. Fujisaki "Waterproof and translucent wings at the same time : Problems and solutions in butterflies." *Naturwissenschaften*, 96(7) : 781–787 (2009)
- 37) N. Pike, D. Richard, W. Foster, L. Mahadevan "How aphids lose their marbles", *Proc. R. Soc. Lond. B*, 269(1497) : 1211–1215 (2002)
- 38) M. Prakash, D. Quéré, J.W.M. Bush, "Surface Tension Transport of Prey by Feeding Shorebirds : The Capillary Ratchet", *Science*, 320 : 931–934 (2008)
- 39) M. J. O'Donnell, "Site of water vapor absorption in the desert cockroach, *Arenivaga investigata*" *PNAS*, 74(4), 1757–1760, (1977)
- 40) J. F.V Vincent, O. A Bogatyreva, N. R Bogatyrev, A. Bowyer, and A. K. Pahl, "Biomimetics : its practice and theory", *J. R. Soc. Interface.*, 3(9) : 471–482 (2006), <http://www.biotriz.com/main.shtml>
TRIZ とは、Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch の頭字語 (英語では Theory of solving inventive problems) である
- 41) S J Abbott, P H Gaskell "Mass production of bio-inspired structured surfaces *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*", Part C : *Journal of Mechanical Engineering Science*, 221(10) : 1181–1191 (2007)
- 42) www.photonicnet.de/download/jahresbericht_kompetenznetze-de.pdf
- 43) http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fet-proactive/bioict_en.html#what,
http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7_PROJ_EN&ACTION=D&RCN=85749, <http://nanoma.zenon.gr/>,
http://cordis.europa.eu/fp7/ict/micro-nanosystems/projects_en.html#Micro-Nano-Bio%20Convergence
- 44) 2008 年のオーストリア政府出版物 "Bionik und Verkehrstechnologie" (http://www.bmvit.gv.at/innovation/aktuell/downloadsaktuell/bionik_handout.pdf) に引き続き 2010 年には "BIONIK Innovation & Qualifikation" も出版された。
- 45) <http://www.swedishbiomimetics.com/index.htm>

46) 松井彰彦：「西洋化」の終わりと日本経済 日経新聞 2010年3月28日 経済論壇から

執筆者プロフィール



下村 政嗣

科学技術動向研究センター 客員研究官
東北大学原子分子材料科学高等研究機構・多元物質科学研究所 教授
<http://poly.tagen.tohoku.ac.jp/Site/Top.html>

九州大学工学部をかわきりに、東京農工大学、北海道大学電子科学研究所、理化学研究所(兼任)、そして東北大学へと転々とし、日本の大学・研究所を体験的に比較し、異分野連携、産学連携のありかたを模索している。専門は、高分子科学、ナノテクノロジー。

グラフェンの高速トランジスタ応用への注目と課題

家近 泰

ナノテクノロジー・材料ユニット

1 はじめに

1-1

グラフェンの発見／半導体の限界を塗り替える可能性

グラフェンは、図表1に化学構造を示すように、炭素が形成する六角形の骨格を無限大にシート状に延ばしたものである。類似の構造を持つ物質としてカーボンナノチューブ(CNT)があるが、グラフェンはカーボンナノチューブを切り開いて無限大に延ばしたものと見ることができる。

グラフェンはグラファイト結晶の1原子面を取り出したものであ

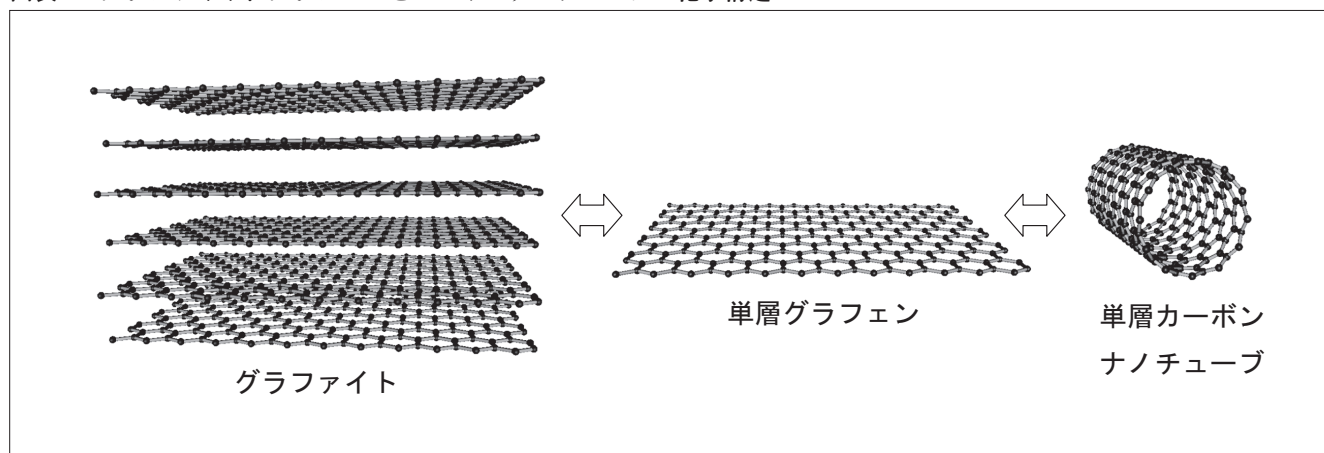
る。また、ベンゼン、ナフタレンと続く芳香族炭化水素化合物をどこまでも押し広げた究極の化合物でもある。そのような意味でグラフェンの構造自体は良く知られていたものであり目新しいものではない。しかし、グラフェンは1原子層分の厚みしかない2次元物質であるため、最近まで単離されていなかった。

2004年、Geimらは、高配向性の無水グラファイト(Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)の表面を粘着テープで剥離し、剥離した薄膜の表面をさらにまた剥離するという単純な方法でグラフェンの薄片を取り出すことに成功し

た¹⁾。この報告以降、グラフェンの電気・電子的、機械的また化学的な性質に驚異的な特徴があることが明らかになり、さまざまな分野で研究が急速に広がっている。その中で特に重要な特徴は、室温の電子移動度^{注)}が驚くほど高かったことである。電子移動度は固体中での電子の速さの目安であり、高い移動度の材料を用いることが高速トランジスタの実現にとって

注：移動度とは固体中での電子などの荷電粒子の動きやすさを表す特性で、移動度が大きいほど荷電粒子の速度を大きくできる。

図表1 グラファイト、グラフェンとカーボンナノチューブの化学構造



科学技術動向研究センターにて作成

重要である。グラフェンが単離された当初、電子移動度は $\sim 10^4$ cm²/V·secと報告され、これは代表的な半導体であるシリコンの1350に比べておおよそ1桁高く、高い電子移動度を持つことで知られているGaAsの8600と比べてほぼ同等である。最近ではサンプルの作製方法の改良によりさらに1桁高い移動度も実現されている。このことから、従来のトランジスタの電子走行層にグラフェンを用いることで、これまでの半導体の限界を超える高速トランジスタが実現できるのではないかと期待が高まっている。

また、このような期待が高まる背景にはシリコンLSIに限界が見え始めていることも大きく影響している。CMOS技術を核とする現状の大規模集積回路(LSI)は長年LSIプロセスの微細化により大幅な性能向上を達成してきた。つまり、LSIに含まれるトランジスタを微細化し、同時にトランジスタの動作電圧を下げることで、消費電力を増大させずに、動作速度と集積規模を向上させることができる(スケールング則)。シリコンLSIは1970年代初めから30年間でトランジスタの数は10万倍、動作周波数は3万倍という驚異的な伸びを示した。この結果、化合物半導体のトランジスタの研究は当初考えられていたようには盛んではなくなった。しかし、最近ではシリコンLSIの微細化はあまりにも進み、その限界が近づいていると考えられている。そこで微細化以外でLSIの性能を向上させる方法として、シリコンより格段に移動度が大きいCNTやグラフェンを用いる方法が大いに期待されている。

このような事実を踏まえて、国際半導体テクノロジーロードマップ(ITRS)委員会では今後のLSIの性能向上に有望となる技術や材料に、CNTやグラフェンを含むカー

ボン系材料も候補として加え実現性を検討している。ただし、2009年の会合では、これらのカーボン系材料に対して、実現の目標となる時期としては、とりあえず2019年以降として検討を進めることが示されている²⁾。これは、グラフェンは高い可能性を秘めているが、研究・開発はまだ基礎的な段階にあり、実用化のためには多くの技術的課題を解決しなければならず、長い開発期間が必要なことを示している。

たとえば、グラフェンの作製方法については、いくつかの新しい方法が試みられてはいるが、トランジスタに関する報告に用いられている作製方法は、いまだにほとんどがHOPGから粘着テープで単離する方法を用いるものである。これは、高い特性のグラフェンを得るための実用的な方法がまだ開発されていないためである。

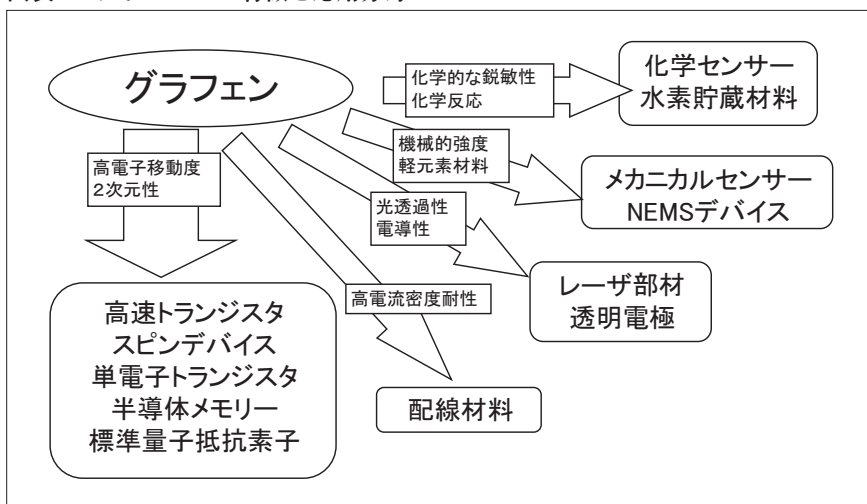
このレポートでは、グラフェンの全般的な特徴を紹介し、グラフェンのこれまでの作製技術、グラフェンを用いたトランジスタの研究、高速トランジスタの実用化に向けての今後の課題について説明する。

グラフェンの応用分野

現在、グラフェンが最も注目されている特徴は移動度の高さであり、そのため高速トランジスタへの応用を念頭に置いた研究が盛んである。もちろん、グラフェンは移動度以外にも特徴的な性質を持っており、それを利用した応用研究も進んでいる。以下にそのいくつかの具体例を挙げる。グラフェンの応用研究分野の広がりについては図表2に模式的に示す。

- (1)グラフェンは熱伝導率とヤング率も大きく、これらの値は現在知られている物質の中で最高である(図表3)。ヤング率が高いことと炭素という軽い元素からできていることも有利であり、グラフェンを用いたNEMS(Nano Electromechanical System: 電氣的に駆動するナノメートルサイズの機械部品)は高い振動応答性を示すことがわかっている。
- (2)グラフェンはバルク部分がない物質であるので、グラフェンの表面への異分子の吸着がグラフェンの性質に与える影響は3次元物質に比べて大きいことが

図表2 グラフェンの特徴と応用分野



参考文献^{3~8)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

予想される。このため、グラフェンをガスセンサーの検知部などに用いることが検討されている。

(3)グラフェンは単一のシートであるが、ヘリウムを含むほとんどのガスを透過させないと考えられている。また、この特徴を利用して、微小な開口にグラフェンでふたをし、その張力を測定する圧力センサーとしての応用などが考えられている。

図表3 グラフェンとその他の半導体との熱伝導度とヤング率の比較

材料	熱伝導度	ヤング率
	W/cm・K	10 ⁹ Pa (GPa)
グラフェン	~50	1500
カーボンナノチューブ	~35	~1000
ダイヤモンド	10~22	1050~1200
Si	1.4	131
Ge	0.6	103
SiC	4.1	450

参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

2 グラフェンの研究の増大傾向

ここではグラフェンの研究が拡大している様子を、論文発表および学会動向によって紹介する。

2-1

グラフェンに関する論文発表件数の動向

図表4にグラフェンに関する論文発表件数の年別推移を示す。データベースとしてISI Web of Knowledgeを用い、キーワード(トピックス)を「graphene」、発表媒体を「article」と指定して検索した。2004年のグラフェンの単離の報告以降、論文数は急激に増加し、2009年は2004年の10倍以上の1800件程度の論文が発表されている。2004年以前にgrapheneの記載がある論文はそのほとんどがCNTに関するものであったが、この中にはグラフェンについての理論的な研究が散見される。

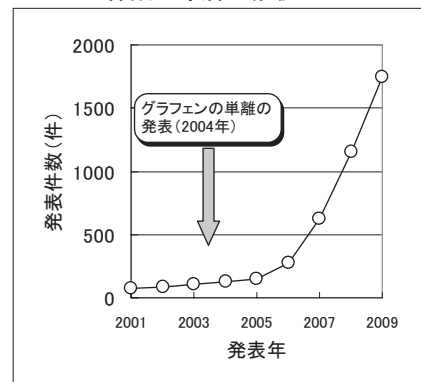
論文の内容は最近ではデバイス性能に関するものも見られるが、まだほとんどが基礎的なものである。グラフェンはまだ研究開発の初期段階にある材料であると言える。

図表5は論文発表件数について、2005年以降の国別の推移を示したものである。2009年での発表件数

の上位8カ国を選んだ。2005年から2009年にかけてこの上位8カ国のうち、ほとんどの国が10倍程度の発表件数の伸びを示している。米国は2位以下に対して2倍以上の発表件数があるが、伸び率も図表4の世界的な伸び率と比較して平均的なものであると言える。2005年~2009年の間で特に伸び率が高い国は、中国と韓国である。中国はこの間に発表件数が約20倍となり、韓国も2005年での件数はほぼ0であったが、2009年には70件程度となっている。日本からの発表件数は2005年には2位であったが2009年は4位となり、2005年からの伸び率は5倍程度である。

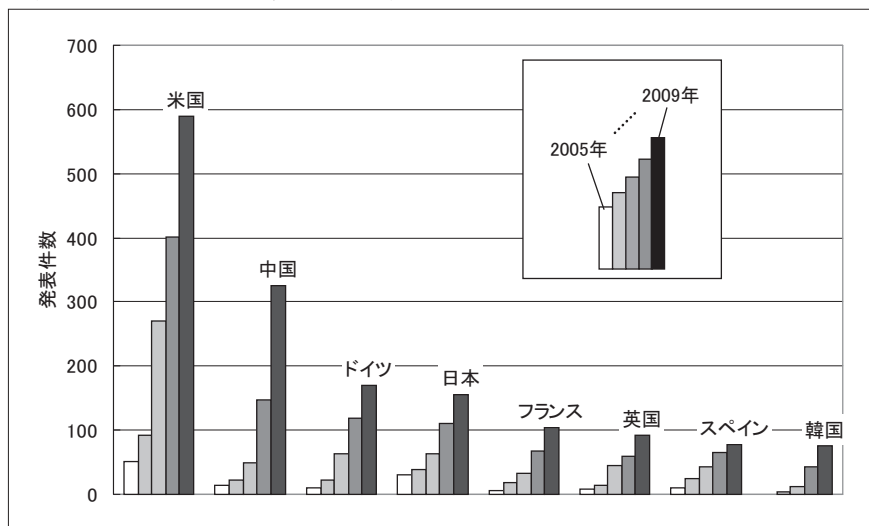
図表6に研究機関別の発表論文件数を、発表年ごとに、2009年での上位8機関についてまとめた。2009年では、とくに中国科学院が

図表4 グラフェンに関する論文発表件数の年別の推移



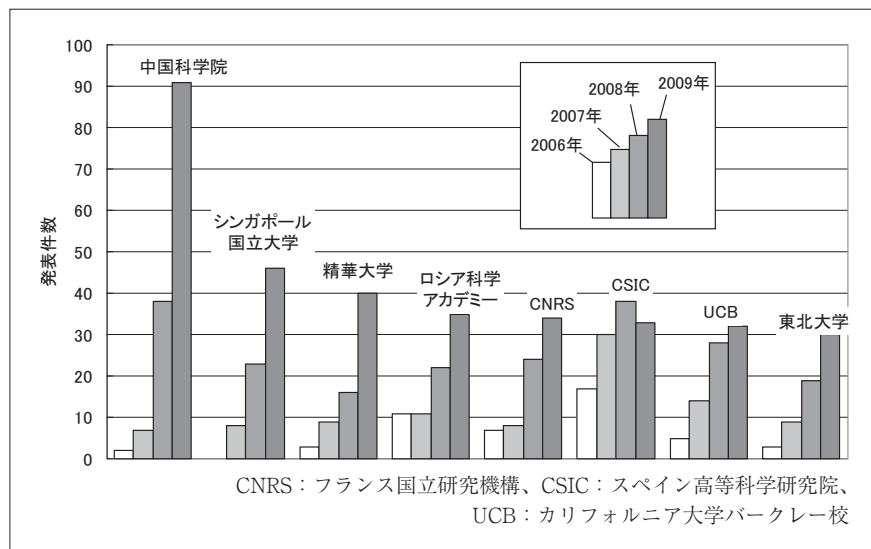
科学技術動向研究センターにて作成

図表5 グラフェンに関する論文発表件数の国別推移



科学技術動向研究センターにて作成

図表6 研究機関別論文発表件数の推移



科学技術動向研究センターにて作成

目立つ。中国の発表件数に対する中国科学院の割合は3割近くにも達し、限られた研究機関から集中して論文発表が行われていると言える。一方、米国は国別では発表件数が多いのに対して、研究機関は分散している。

2-2

グラフェンに関する日米学会発表の比較

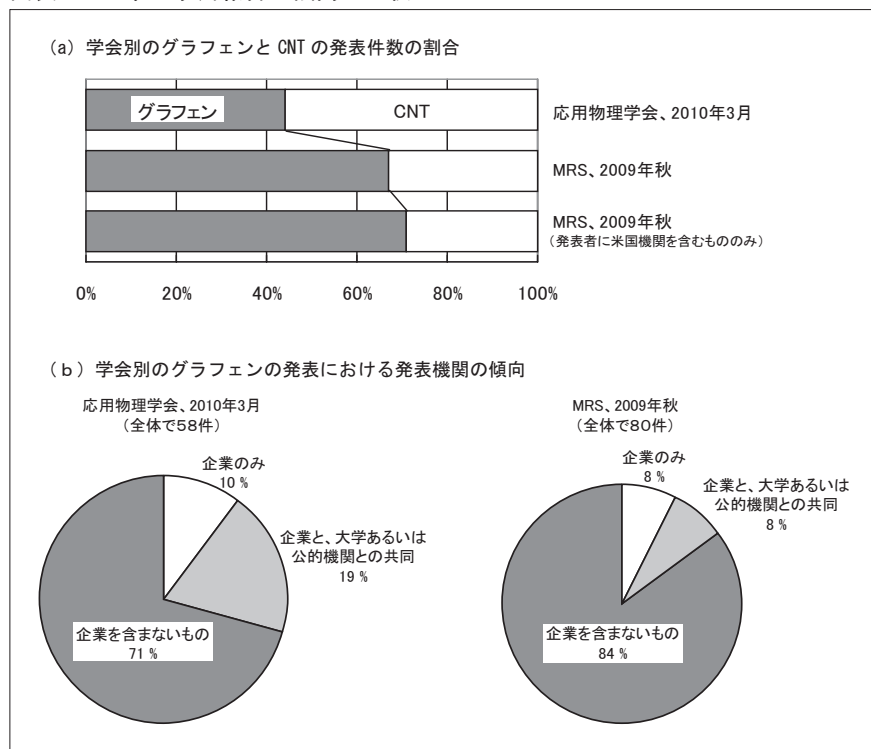
ここでは最近の日米の類似の学会での発表件数について比較する。日本は2010年春季応用物理学関係連合講演会(2010年3月、以下「応用物理学会」)を、米国はMaterials Research Society、2009年秋期ミー

ティング(2009年11月～12月、以下「MRS」)を見る。いずれも、毎年、春と秋の2回の年會が開かれている総合的な学会である。

両学会の発表件数の傾向を図表7に示す。応用物理学会ではナノカーボンの分科会で、CNT、グラフェンなどの材料の発表が行われている。今回、分科会全体で155件の発表があり、各発表の演題から重複無しに対象とする材料を分類すると、CNTが74件、グラフェン58件で、これらを合計すると132件となる。グラフェンの58件は、ほとんどが大学または公的研究機関からの発表で、企業単独の発表はNTT(株)(5件)と(株)富士通研究所(1件)のみである。グラフェンの発表内容は基礎的な物性評価が大部分である。

MRSでもナノカーボン類の大面積エレクトロニクスに関する分科会があり、合計で120件の発表があった。件数では上記の応用物理学会とほぼ同じであるが、内訳で見るとCNT40件、グラフェン80件であり、応用物理学会とは逆にMRSではグラフェンの割合が高い。さらにMRSで米国の研究機関を含む発表は、CNT23件、グラフェン56件であり、若干ではあるがグラフェンの発表件数の比率がさらに高い。ただし、グラフェンのなかで電子デバイスに関するものを演題から選び出すと6件程度で、やはり米国においても基礎的な研究がまだ大部分である。また、企業単独によるものは6件のみで、やはり応用物理学会と同様、大学や公的研究機関が多い。

図表7 日米の学会報告の傾向の比較



科学技術動向研究センターにて作成

このように全体的に言えば、グラフェンの研究はまだ基礎段階であり、大学や公的研究機関が主である。しかしながら、グラフェンの特徴を活かした高速電子デバイスの研究開発という点では、論文や口頭発表件数はそれほど多くないものの注目されるものもあり、その中でもIBM社のレベルが他を

大きく引き離している感がある。

3 グラフェンの電子的性質の特徴

ここでは電子デバイス応用への注目の要因になっているグラフェンの電子的性質を説明する。またグラフェンと同様の分野での応用が期待されているCNTについても比較の意味で簡単に説明する。

3-1

グラフェンの電子的性質

図表8に、典型的な半導体(a)とグラフェン(b)のバンド構造を比較して示す。電子は結晶中で波として伝わる。バンド構造は、結晶中

での電子の波数とエネルギーの関係を表したものである。結晶中の電子はバンドのエネルギーの低い状態(バンド構造の下)から埋めていく。一般の半導体では図表8(a)に示すようにバンドは上側と下側に分かれ、通常上側のバンドは電子がほとんどない状態で、また下側の状態は電子の空き(正孔)がほとんどない状態である。バンドの上側を伝導帯、下側を価電子帯と呼ぶ。伝導帯と価電子帯の間には電子が埋める状態がないエネルギーの範囲があり、この範囲をバンドギャップと呼ぶ。

図表8の(c)には、いくつかの半

導体の室温でのバンドギャップと移動度を示す。

グラフェンが通常の半導体と異なる点は、

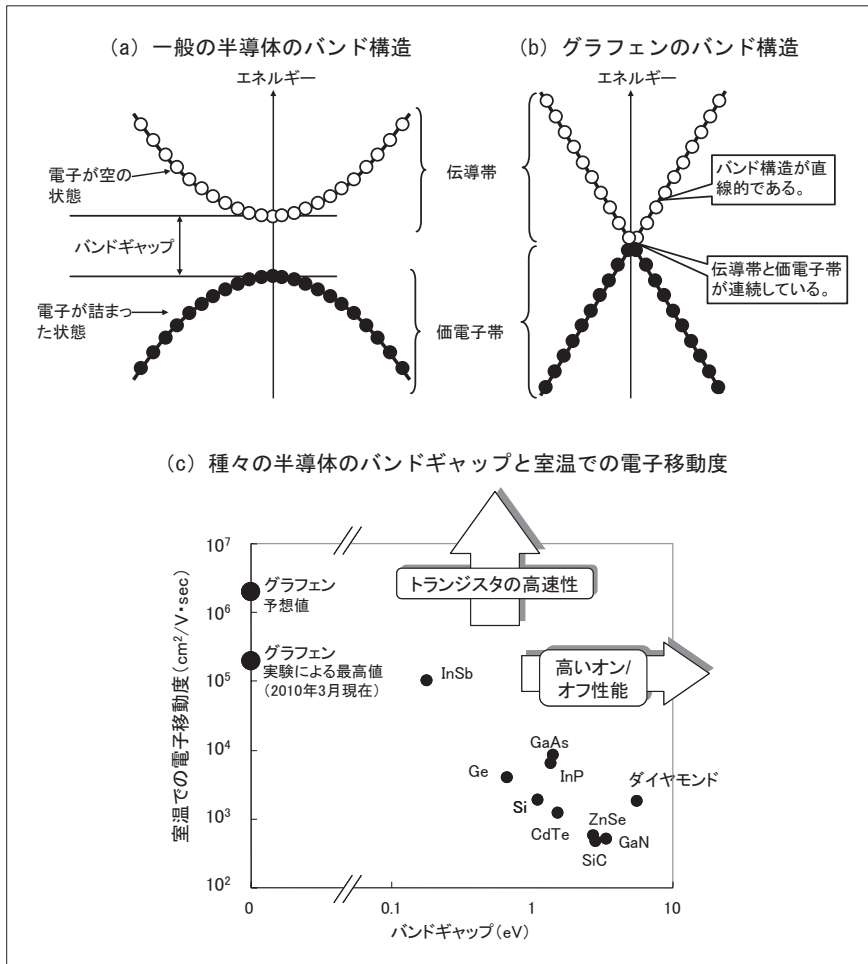
- ① 伝導帯と価電子帯が接する付近でバンド構造が直線に表される、
- ② 伝導帯と価電子帯が連続的につながり、バンドギャップが0である、

ことである。

①のバンド構造の特徴に関しては、通常の半導体は価電子帯の上端あるいは伝導帯の底ではバンドは放物線的に緩やかに変化する。この変化が大きいほど電子の有効質量(物質中での見かけ上の重さ)は小さくなる。しかし、グラフェンの場合はこの変化が直線的であるため、電子のグラフェン中での有効質量は0である。このことからグラフェンは非常に大きな電子移動度を示すことになる。理論的にはシリコンの1000倍もの移動度が予想されていて、実験的にも現時点までにシリコンの100倍となる $2 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ が得られている^{10, 11)}。移動度が大きくなればトランジスタのスイッチングにかかる時間が短くなるため、グラフェンはこれまでのシリコンや化合物半導体の記録を塗り替える高速の半導体デバイスを実現できる材料として期待されている。この点が、グラフェンが高速トランジスタ応用に期待される理由である。なお、グラフェン是有効質量が0であることから、特殊な量子力学的現象を示す物質と言えるため、物理学の対象としても大きな関心ももたれている^{3, 11)}。

一方、②のバンドギャップの大きさが0であるということは、わ

図表8 一般の半導体(a)とグラフェン(b)のバンド構造の比較、および種々の半導体でのバンドギャップと電子移動度の比較(c)



参考文献⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

ずかな熱エネルギーで電子を伝導状態に励起できることを示している。そのため、グラフェンは高い電気抵抗の状態にすることはできない。しかし、デジタル用途への応用では大きな信号のオン/オフ比を得ることが重要であり、信号強度を大きくするために、できるだけ高い電気抵抗にできることが望ましい。つまり、グラフェンのバンドギャップが0ということは、デジタルトランジスタへの応用には極めて大きな障害となる。いくつかの方法でグラフェンのバンドギャップを大きくする方法が提案されており、実験的にもバンドギャップを制御する報告がある。この点については5-1で別途説明する。しかし、バンドギャップを0より大きくすることは、グラフェンのバンド構造を図表8 (b)に示したのから変形させることにな

り、移動度が高いというグラフェンの特長を損なうことにつながりやすい。すなわち、移動度を大きく落とさずにバンドギャップを広げることが、グラフェンの技術開発の大きな課題である。

3-2

カーボンナノチューブ (CNT) との比較

CNTの基本骨格は、チューブ状であることを除いてグラフェンと同じである(図表1)。したがって、高い電子移動度など、グラフェンと共通する特徴が多い。グラフェンとCNTの差異を挙げると、以下のようになる。

① グラフェンは平面的であるため、円筒状のCNTよりも従

来の半導体プロセスとの相性がいい。

② CNTはチューブを構成する炭素原子の並び方によって金属的になったり半導体的になったりするため、実用には半導体的なCNTのみを選び出さなければならない。nmサイズの試料を選別しなければならないことは応用上の大きなネックである。最近、金属型と半導体型の作りわけ、あるいは分離方法が研究され、90%程度の純度のCNTが得られるようになってはいるが、デバイス作製の観点からは、90%という数字は高い精度とはいえない。

③ CNTは1本ずつ取り出すことができ、方向性を持つため、片方向の加工を行わなくてもすむという点が特長である。

4 グラフェンの成長方法と評価手法

4-1

種々の製造方法

ここではグラフェンを作製する主要な方法について説明する。そのなかで、比較的高いトランジスタ特性が報告されているのは、前述のようにHOPGを剥離する方法と、SiCの表面を改質する方法である。ただし、実用的な面積の均一なグラフェンを得る方法はまだ開発されていない。

4-1-1 高配向性無水グラファイト (HOPG)を剥離する方法

一般にHOPGは有機化合物を高温、高圧で処理して製造する。得られるHOPGはグラフェンが積み重なった結晶構造となっている。グラフェンとグラフェンの間には

ファンデアワールス力が働いているのみであるため、グラフェンシート間は簡単に離れる。

この性質を利用して、Geimらは粘着テープでHOPGの剥離を繰り返すことで、グラフェンを単離することに成功した¹⁾。単離されたグラフェンは適当な基板に移し取る。この方法は非常に簡便な方法であり、図表9 (a)に示す。動画サイトで実際の手順を見ることができる。また、この方法で得られるグラフェンの光学顕微鏡写真は同図(b)に示す。

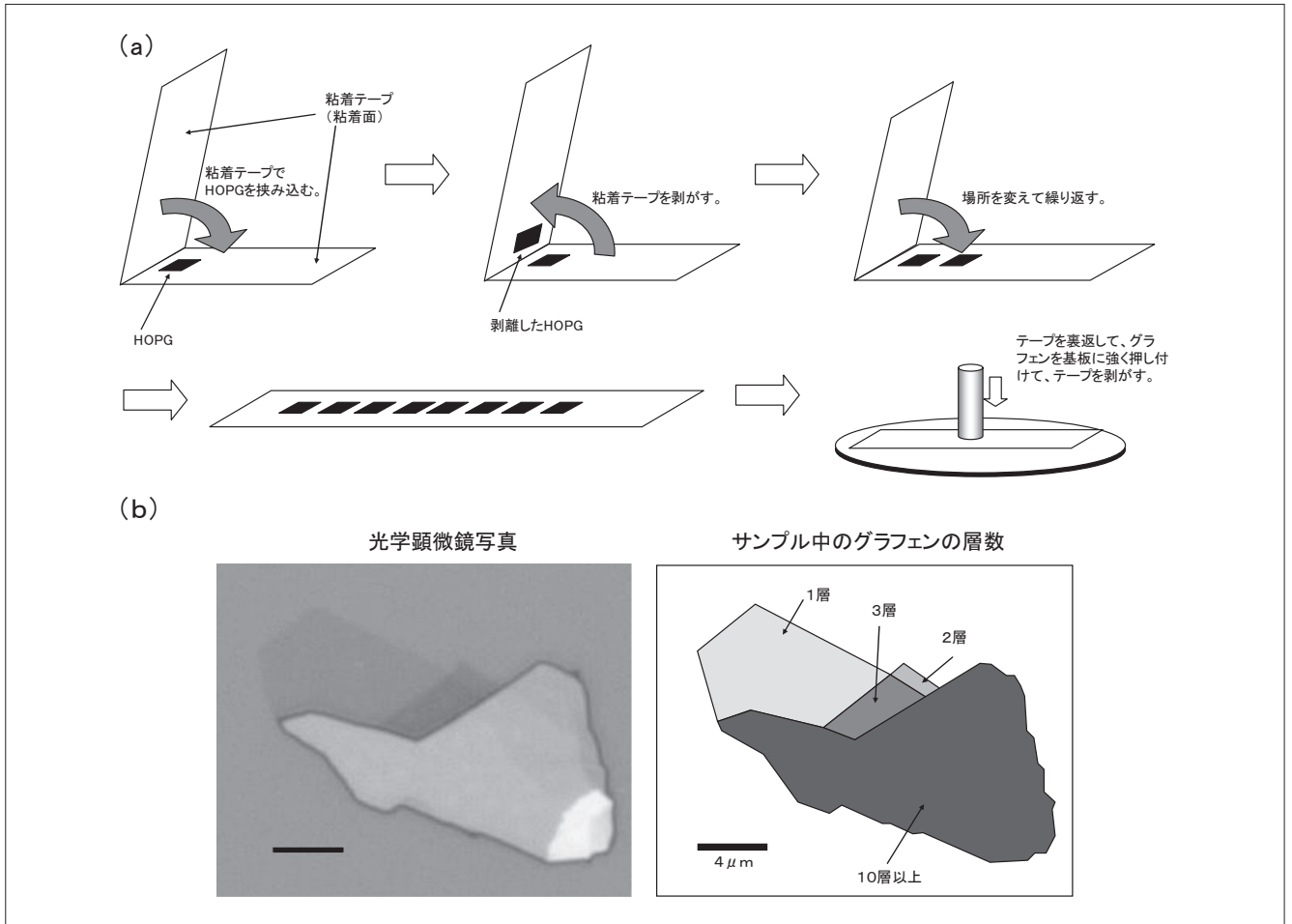
通常のHOPGの結晶性は、X線回折のピークの半値幅(ロッキングカーブ)で0.4度程度である。一般の半導体結晶ではこれより2桁ほど小さく、HOPGの結晶性は半導体結晶の観点からみると非常に低いと言える。HOPGの結晶性が低い主要因は、HOPGが多く的小さ

な結晶(ドメイン)が集まってできていて、小さな結晶の方向が揃っていないためと考えられる。したがってHOPGからグラフェンを剥離する方法では、グラフェンの大きさはドメインの大きさ以上のものは得られない。また、剥離は1分子層の精度で行うことができないため、得られるグラフェンの連続するサンプル中に、層数の異なる部分が存在することになる。図表9 (b)のように顕微鏡観察でもその様子がよくわかる。

この方法は大気中で行われ、また手作業であるため、グラフェン表面の不純物の吸着や汚染、機械的な破損などが悪影響を及ぼすはずである。ところが、これまでのところ、その他の方法による試料よりも良好な移動度が観測できることが多い。

この方法は簡便であり、得られ

図表 9 HOPG を粘着テープで剥離してグラフェンを単離する方法の模式図 (a) と単離されたグラフェン薄膜の顕微鏡写真 (b)



(a) 科学技術動向研究センターにて作成、(b) (独) 物質・材料研究機構 (国際ナノアーキテクトニクス研究拠点) 宮崎久生博士提供

る膜の物性も比較的良いため、現状ではほとんどのデバイスの試作はこの方法によって得られたグラフェンを用いている。この方法で実用的な面積のサンプルを得ることは難しいが、今後も概念実証のための方法としては残るものと考えられる。

HOPG から出発する別の方法としては、HOPG を有機溶媒中で超音波処理する方法も報告されている³⁾。得られるグラフェンは溶媒に分散しているため、溶媒ごと基板に塗布することでグラフェンの膜を得ることができる。しかし、この方法でデバイス検討に用いることができるような品質の高い膜を得ることは難しい。

4-1-2 炭化ケイ素(SiC)の熱処理による表面再構成

SiC を真空中や不活性雰囲気中で加熱することで、表面のシリコンを蒸発させて炭素を偏在させ、グラフェンを形成する方法が報告されている¹³⁾。SiC は高品質の半導体デバイス用の結晶が得られる材料である。また不活性雰囲気中での熱処理は不純物などの影響を受けにくい。したがって、高品質のグラフェンが得られると期待されていたが、最近まであまり良いデバイス特性は得られていなかった。

SiC は極性を持つ結晶であるため、通常利用される SiC 基板にはシリコン面と炭素面の 2 種類の面がある。熱処理により得られるグラフェンの特性はこの SiC 基板の面の種類や熱処理の温度、時間、雰囲気などの条件に依存する。作製条件の検討により膜質は改善さ

れてきているものの、単一層数の膜の範囲はせいぜい数 μm 程度の幅である。広い面積の高品質の半導体結晶から出発しているにもかかわらず、HOPG を剥離する方法で作製するものよりも、微小な領域での膜厚均一性が悪い場合がある。

またこれと似た方法で、シリコン基板上に一旦 SiC の層を気相成長法で製膜し、さらにこの SiC 膜を熱処理してグラフェンを得る方法も報告されている¹⁴⁾。

4-1-3 気相成長法

原料ガスを加熱した基板上に吹き付けて基板上に製膜する気相成長法(CVD: Chemical Vapor Deposition 法)は、一般に、大面積の基板上に均一に製膜するために適した方法であり、半導体薄膜の形成

に広く用いられている。

グラフェンをCVD法で形成する場合には、原料ガスとしてはメタンやアセチレンなどの炭化水素系有機化合物が用いられる。これらの原料は熱分解が起きにくいいため、基板に原料ガスを分解する触媒性が必要である。現在までに報告されている基板としては、銅フォイル¹⁵⁾やSiO₂/Si上に蒸着したNiなどの金属¹⁶⁾、サファイア¹⁷⁾などがある。銅を用いた場合、4000 cm²/V·sec程度の比較的高い移動度のグラフェンが得られている。ただし、この値はシリコンよりは高いものの、HOPGの剥離やSiCから得られているグラフェンに比べると1桁以上小さく、トランジスタを試作したという報告も少ない。

銅を用いた場合には、成長時間を長くしても層数が増えず、成長

の自己停止機構が働くと考えられている。しかし、実際には形成したグラフェンには5%程度の単層以上の領域が含まれている。また、完璧な自己停止機構は、2層以上の形成は難しいことを意味し、2層以上の層数制御をしたい場合にはそれが難しい。

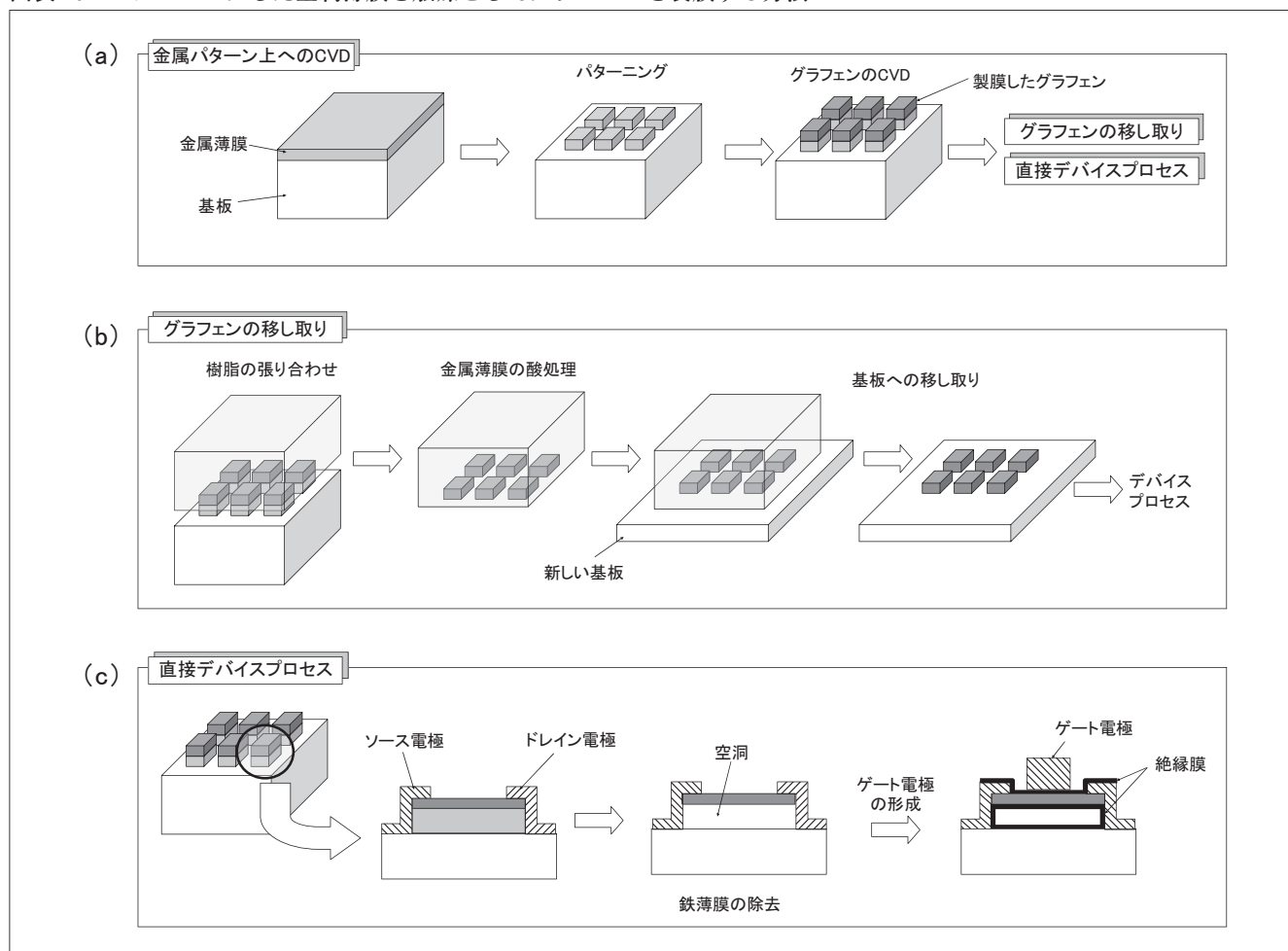
また、金属上にグラフェンを形成した場合、そのままでは電気的評価ができないため、一旦金属を酸の溶液で溶かし去ってグラフェンを基板から剥離させたのち、絶縁性の基板に移しとって電気的評価を行う。たとえば、グラフェンを金属上に成長させた後、グラフェンの表面をアクリル樹脂(PMMA)で保護した上で、金属層を取り除くことで、樹脂の表面にグラフェンを担持し、そのままその他の基板に移し取る方法などが報告されている。一方、サファイ

アなどの絶縁性基板の場合にはそのまま素子化して評価が可能である。

図表10にCVD法によるグラフェンの製膜とデバイスを試作するプロセスの例を示す。(a)はパターンニングした金属上へのグラフェン膜の製膜プロセスである。あらかじめ金属膜をパターンニングしておくことで、任意のパターンのグラフェン膜を得ることが可能である。(b)は(a)で製膜したグラフェンを別の基板に移し取るプロセスである。新しい基板に移したのちにデバイスを試作する。

ごく最近、パターンニングした金属触媒上にCVD法で形成したグラフェンを、基板から剥離せずにそのままトランジスタに作りこむプロセスが報告された¹⁸⁾。そのプロセスを模式的に(c)に示す。(a)の工程で金属にグラフェンを製膜

図表10 パターンニングした金属薄膜を触媒としてグラフェンを製膜する方法



参考文献^{16,18)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

したのち、(c)のプロセスを行う。つまり、まずグラフェンに最初の電極を形成したのち、触媒金属を酸で除去し、最終的にトランジスタとする。グラフェンを別の基板に移し取るというリスクの高い工程を省略することができ、プロセスも短くなる。また、はじめから目的とする基板上にその後のプロセスを連続して行うことができる点で、一旦グラフェンを基板から移し取る方法に比べてさまざまな利点がある。今後のトランジスタを主目的とする研究開発では、この方法が主流になる可能性が高い。

4-1-4 その他の方法

グラフェンを酸化すれば水溶性になり、超音波洗浄で剥離することができる。溶液を遠心分離したのち、酸化グラフェンの溶媒を塗布した後、還元してグラフェンに転化することができる³⁾。また、CNTを化学反応を利用してチューブの構造を切り開き、短冊状のグラフェン(グラフェンナノリボン)を作製する方法も報告されている^{19, 20)}。しかし、これらの方法は基板上への製膜方法ではなく、いずれも半導体プロセスへの応用が難しいと考えられる。

4-2

評価手法

グラフェンについては、従来の半導体で一般的であった結晶性や不純物についての評価手法が適用できないという問題がある。

結晶性や材料中の不純物は、半導体材料のデバイスの特性に重要な影響を及ぼすため、通常、最初に評価の対象となる項目である。従来の3次元の結晶の場合、そのような評価は走査型トンネル顕微鏡(STM)、X線回折、化学エッチング、蛍光分析などで行われてき

た。しかし、グラフェンは2次元的な単層の物質であるため、X線回折の測定や化学エッチングによる評価ができない。また、バンドギャップが0であるため、蛍光分析もできない。STMによる観察については、欠陥についての報告はあるが、汎用的に結晶性を評価できる方法ではない。

現状では、光学顕微鏡による形態の観察と、ラマン分光や電子顕微鏡による層数の確認が評価に用いられている。物性については主として電気的測定からの評価が行われているが、測定条件や測定サンプルの加工方法に強く依存し、グラフェン自身の評価になっているか疑問がある場合も多い。

4-3

今後の研究開発が望まれる製膜手法

一般に半導体の結晶成長では基板の全面にわたり均一に高い品位の製膜ができることが望まれる。グラフェンの場合にはこの条件のほかに、1原子層の膜厚制御ができることが付け加わる。これらの点について参考になると思われる製膜方法の例を以下に3つ挙げるが、いずれも化学的反応や有機合

成の知識が重要になる。

1層ごとの製膜がコントロールできる手法として、液表面の単分子層を移し取るラングミュア-ブロッジェット法や、完全な自己成長停止機能を利用したCVD法であるALD/ALE(Atomic Layer Deposition/Atomic Layer Epitaxy)などが知られている。これらの手法は用いる原料の化学変化をうまく利用しているため、分子の化学反応についての知識が重要になる。

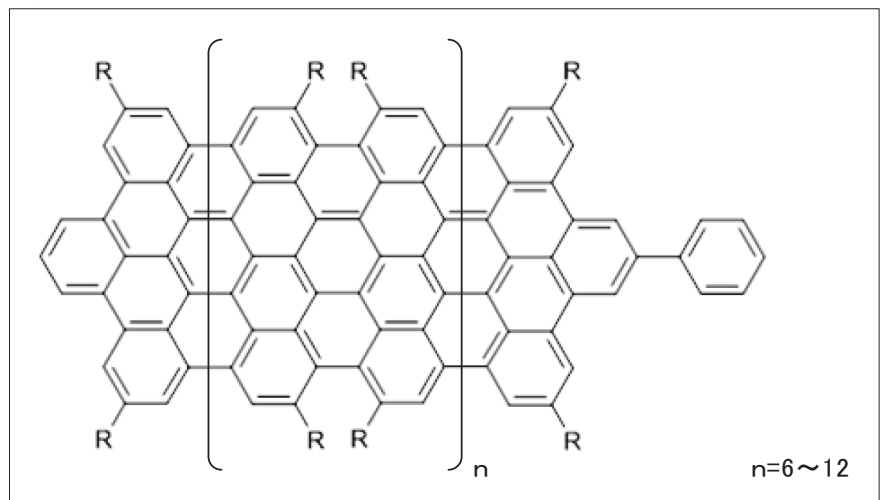
また、グラフェンの類似構造分子の有機合成についていくつかの報告がある²¹⁾。分子の末端を置換基に変えることが容易であり、化学的に規定されたサンプルを得ることができる点に特徴がある。図表11に合成されたグラフェンのリボン状化合物の一例を示す。しかし、物性が評価できるようなサンプルは得られておらず、また希望する基板上への単分子層の製膜という点ではまったく検討は進んでいない。

4-4

界面の形成と管理

グラフェンはバルク部分が無く表面のみであるため、物性が周囲の影響を受けやすい。ガスセンサー

図表11 有機合成で得られたグラフェンのリボン状分子の構造



参考文献²¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

への応用はこの特徴を利用したものである。しかし、電子デバイスへの応用という点では不利で、耐環境性への対策が非常に重要になる。高い移動度を得るためには、加熱処理して吸着分子をグラフェンから脱離させることが重要であると報告されており¹⁰⁾、雰囲気の影響

を取り除くことが重要である。実際上、雰囲気の影響を受けないようにするためには、グラフェンの特性を低下させない保護膜の開発が必要であろう。

また、グラフェンの性質は吸着ガスばかりでなく、基板からも影響を受ける。たとえば、グラフェ

ンを橋のように空中に保持すると、基板と接している場合に比べて1桁程度移動度が向上することが報告されている¹⁰⁾。グラフェンが基板と接触することで移動度が低下するのは、グラフェンが基板の不純物の影響を受けているためと考えられている。

5 グラフェンの電子デバイス試作の現状と動向

この節では、まずグラフェンのバンドギャップを制御する方法について説明し、応用が検討されているいくつかのデバイスについて紹介する。それらは、グラフェンの高い移動度を利用した電界効果型トランジスタ、電子1個の増減によるスイッチングを利用した単一電子トランジスタ、電子のスピンを輸送するスピン輸送デバイスである。

5-1

バンドギャップの形成と制御

2-1で述べたように、単一の層からなるグラフェンのバンドギャップは0であり、高いオン/オフ比が要求されるデジタル信号用トランジスタとしては利用が難しい。そこで、バンドギャップを広げるために、以下の2つの方法

が試みられている。

5-1-1 2層グラフェンを使う方法

グラフェンを2層積み重ねたものもバンドギャップは0であるが、これにシートの上下方向に電場を加えることでバンドギャップを0より大きくすることができる(図表12)。電場を加えること以外にも、シートの表面にカリウムなどの原子を吸着させても同様の効果がある。

電場を加える方法では、バンドギャップの大きさを電場の大きさを制御できる。この方法で、バンドギャップを0.3 eV程度にできることが光学的に確認されている²²⁾。トランジスタを作製して、その電気特性から電場によりバンドギャップが形成されたとの報告もある²³⁾。

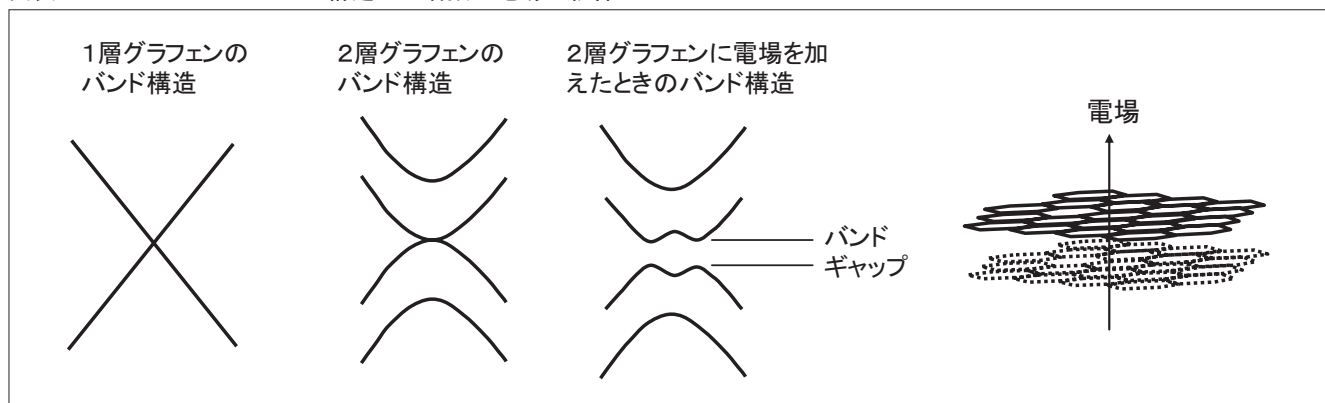
グラフェンを2層重ねると、単層の場合に比べて電子の移動度が

低下することがわかっている。しかし、シミュレーションによればそれでも化合物半導体であるInPのHEMT(High Electron Mobility Transistor:高電子移動度トランジスタ)と同等の高速性が得られるとの見通しが得られている²⁴⁾。

5-1-2 グラフェンナノリボン

グラフェンのバンドギャップを大きくするもうひとつの方法は、グラフェンシートの幅を狭くする方法である。グラフェンの幅がグラフェン骨格の数倍程度である場合、グラフェンナノリボンと呼ばれている。グラフェンナノリボンのバンド構造についての理論計算から、リボンの方向によって、金属的になったり0以上のバンドギャップを持つ半導体的になったりすることが示されている²⁵⁾。具体的には、図表12に示すようにグラフェンナノリボンの構造は、そのエッジ部に注目すると、

図表12 グラフェンのバンド構造への層数と電場の影響



参考文献²²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

炭素の並びがジグザグ状になっている型(ジグザグ型)と、2個ずつの周期になっている型(アームチェア型)がある。このうち、アームチェア型は半導体的になるがジグザグ型はバンドギャップが0である。

図表 13 (c)にアームチェア型ナノリボンのバンドギャップとナノリボンの幅についての理論計算の結果を示す²⁶⁾。アームチェア型のバンドギャップはグラフェンナノリボンの幅に依存して周期的に変化するが、全体として幅が狭くなるとバンドギャップは大きくなる。ただし、ごくわずかな幅の違いでもバンドギャップは大きく変化する。したがって、グラフェンナノリボンのバンドギャップを利用する場合には、幅と方向をナノメートル以下の精度で加工する必要があると予測されている。

しかし、実際に微細加工技術を用いてグラフェンナノリボンを作製し、バンドギャップとリボンの幅の関係を測定した報告²⁷⁾では、バンドギャップの大きさはナノリボンの方向には影響されていない

とされており、理論的な予測と合わない。その原因としては、作製されたグラフェンナノリボンが欠陥を含んでいたり、あるいはそのエッジが、さまざまな形状を含んでいることや化学的に均一な状態でないことなどが考えられる。したがって、加工技術はまだ未熟であると考えられる。

なお、ごく最近報告されたナノリボンと似た手法で、実験的にバンドギャップを広げる方法を二つ紹介する。一つはグラフェンに半径が10 nm前後の微小な穴を高密度で形成し、グラフェンを網目状に加工する方法である²⁸⁾。開発者らがグラフェンナノメッシュと呼ぶこの材料は、穴と穴のあいだ(ネック)のグラフェンを数ナノメートルの幅に調整することでバンドギャップを広げようとしている。またもう一つの方法はグラフェンの表面に水素原子を部分的に吸着させることで、ナノメートルスケールの高抵抗なグラフェンの領域を高密度に発生させる方法である²⁹⁾。これらの方法は、ナノリボン

と異なり、全体としてのグラフェンの幅を狭める必要がないため、大きな電流を流すことができる、取り扱いやすいなどの点で、ナノリボンに対して優位性があるとも考えられ、今後の発展が注目される。

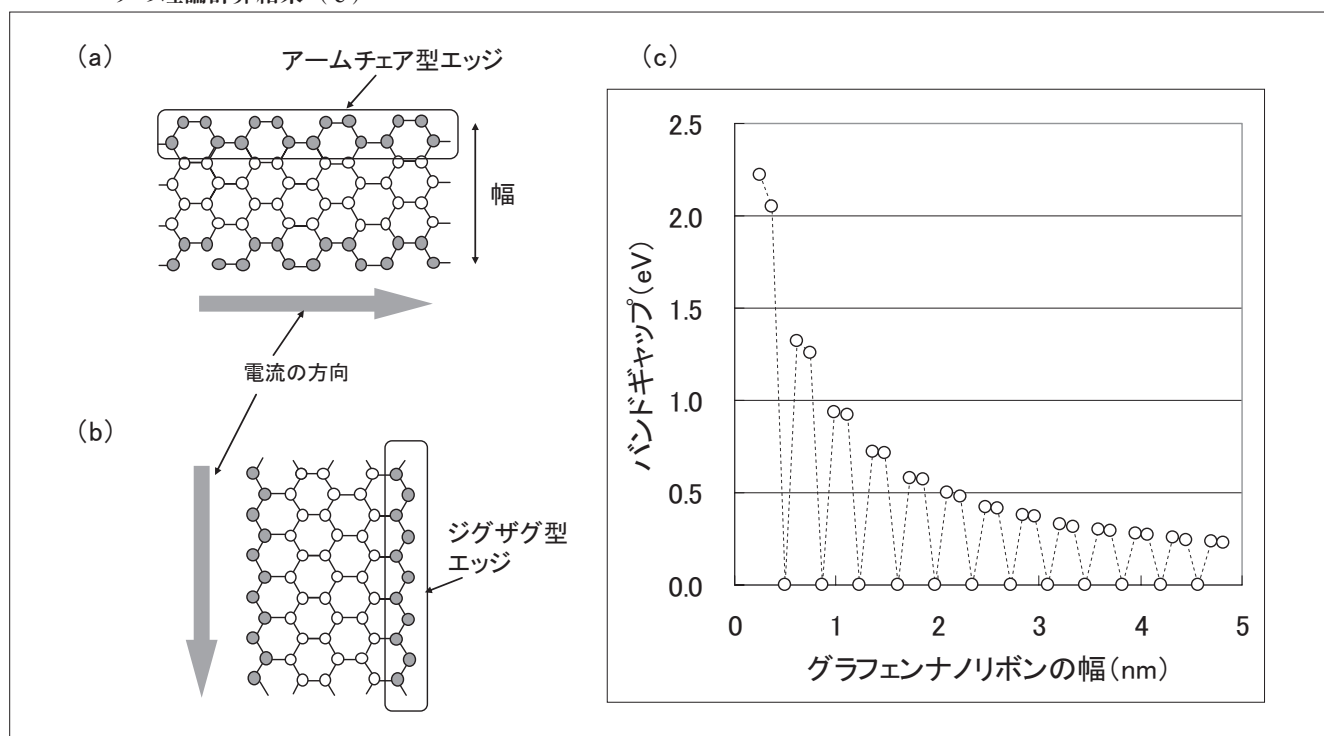
5-2

電界効果型トランジスタ

電界効果型トランジスタ(FET: Field Effect Transistor)は現在のLSIの主要な構成要素である。薄いチャネル層に電流を流し、その大きさをゲート電極で制御する。チャネル層の電子の移動度が大きいほど動作速度が速い。この点がチャネル層にグラフェンを利用することの重要なポイントである。

グラフェンのFET特性については、すでにいくつかの報告が見られる。FETの作製は、HOPGから剥離したグラフェンを利用する方法がよく行われている。一方、最近、

図表 13 グラフェンナノリボン端部の2つの型<アームチェア型(a)とジグザグ型(b)>とアームチェア型のバンドギャップの理論計算結果(c)



参考文献²⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

SiCの熱処理で作製したグラフェンを使って、100 GHzの動作速度が達成され話題となっている⁴⁾。この動作速度は同じゲート長でシリコンをチャンネル層とする場合に比べてすでに2倍以上高速であり、グラフェンのFET応用への高いポテンシャルを示している。

なお、これらの報告に用いられているグラフェンの移動度はグラフェンとしては高いものではなく、FET作製プロセス中に移動度が大幅に低下していることが報告されている³⁰⁾。グラフェン本来の高い移動度を失うことのないプロセスを確立し、FETの構造をグラフェンに合ったものに改良することで、他の材料ではまだ実現されていないTHzレベルでの動作が可能なトランジスタが実現できると期待されている。

5-3

単一電子トランジスタ

半導体や金属などを3次的に数nm以下の大きさにすると、その中に外部から電子を1つ入れただけで電子状態が大きく変わる。このような微細な構造は量子ドットと呼ばれる。量子ドットの電子状態は、外部から電場を加えて制御することができる。このような方法で量子ドット内の電子の数を制御するのが単一電子トランジスタ(SET: Single Electron Transistor)の考え方である。電子1個を情報の単位としているために、消費電力が極めて小さい将来のトランジスタとして研究が進められている。

グラフェンもSETへ応用しようとする報告があり⁶⁾、室温でのスイッチングも報告されている。グラフェンはもともと厚さが原子1層分しかないため、量子ドットを形成するためには、小さな領域をエッチングで切り出すだけでよい。ただし制御性よく数nmの加工ができていくわけではなく、また室温でのスイッチングも再現性のある

結果ではない。

5-4

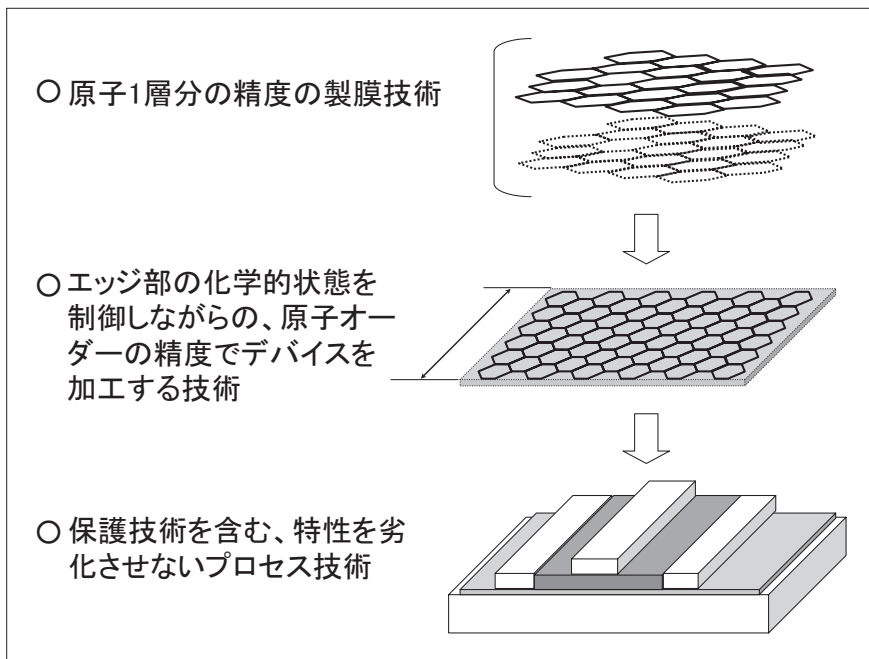
スピン輸送デバイス

スピン輸送デバイスは電子のスピン向きを情報として伝播するデバイスである。通常の電流を利用したデバイスに比べて優位性があるとされ、いくつかの材料で研究が進められている。グラフェンは軽元素である炭素しか含まないことから、グラフェン内の電子はそのスピンの原子核による攪乱を受けにくい。そのためスピンを利用したデバイスへの応用が期待される。すでに実験的に、室温でグラフェンへスピンが注入できることが示されており、またスピンの揃った状態で電子が拡散していることが確認されている⁵⁾。グラフェンはスピン輸送デバイス用材料の候補のひとつであると考えられている。

6 まとめ

グラフェンは高速トランジスタを中心とした電子デバイス応用に大きな期待のかかる材料として注目されはじめ、論文発表が急増している。しかし、現実にはまだ実用化に向けた加工技術がほとんど未開発である。具体的には、原子1層分の精度の製膜技術や、グラフェンのエッジ部の化学的状態を制御しながら、原子オーダーの精度でデバイスを加工し、しかも特性を劣化させないプロセス技術を研究開発していく必要がある。また、グラフェンはバルク部分を持たず、性質が表面の状態に敏感に影響される。このため、このプロセス技術は、特性を高く保ち環境に影響されない保護技術の研究開発を含

図表14 グラフェンの電子デバイス用途に要求される製造技術



科学技術動向研究センターにて作成

む。さらにこれらは電子デバイスを形成しうるだけの均一性がなければ実用化には用いることができない。グラフェンの特性を活かすためには、これらの要求を満たす製造技術の研究開発を進めていく必要がある。

謝辞

本稿の執筆に当たり、東北大学の尾辻泰一教授と齋藤理一郎教授、(株)富士通研究所の佐藤信太郎主任研究員、九州大学の田中悟教授、(独)物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の塚越一

仁主任研究員と宮崎久生博士、福井大学の橋本明弘准教授の皆様に貴重なご意見を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) K. S. Novoselov et al., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Science*, 306(2004)666
- 2) ITRS ホームページ : http://www.itrs.net/Links/2009Winter/Presentations/Conference/ERM_121609.pdf
- 3) A. K. Geim, "Graphene: Status and Prospects", *Science*, 324(2009)1530 およびその引用文献
- 4) Y. -M. Lin et al., "100-GHz Transistors from Wafer-Scale Epitaxial Graphene", *Science*, 327(2010)662
- 5) M. Ohishi et al., "Spin Injection into a Graphene Thin Film at Room Temperature", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46(2007)L605
- 6) L. A. Ponomarenko et al., "Chaotic Dirac Billiard in Graphene Quantum Dots", *Science*, 320(2008)356
- 7) (独)産業総合研究所ホームページ : http://www.nmij.jp/~nmijclub/teishuha/docimsgs/oe_20080730.pdf
- 8) H. Zhang et al., "Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene polymer composite mode locker", *Appl. Phys. Lett.*, 95(2009)141103
- 9) 赤崎勇編著、「Ⅲ-V族化合物半導体」(アドバンストエレクトロニクスシリーズ I-1、培風館、2002年)(GaNについては第13章、それ以外は第7章)
- 10) M. Orlita et al., "Approaching the Dirac Point in High-Mobility Multilayer Epitaxial Graphene", *Phys. Rev. Lett.*, 101(2008)267601
- 11) K. I. Bolotin et al., "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene", *Solid State Commun.*, 146(2008)351
- 12) A.K. ガイム他、「グラフェン 鉛筆から生まれたナノ材料」、*日経サイエンス*、2008年7月号76ページ
- 13) K. V. Emtsev et al., "Toward wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide", *Nature Mater.*, 8(2009)203
- 14) Y. Miyamoto et al., "Raman-Scattering Spectroscopy of Epitaxial Graphene Formed on SiC Film on Si Substrate.", *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 7(2009)107
- 15) X. Li et al., "Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils", *Science*, 324(2009)1312
- 16) K. S. Kim et al., "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes", *Nature*, 457(2009)706
- 17) 岡井誠ほか、「熱CVD法によるサファイア基板上へのグラフェン成長」、第70回応用物理学会学術講演会(2009秋)、11p-ZR-3
- 18) D. Kondo et al., "Low-Temperature Synthesis of Graphene and Fabrication of Top-Gated Field Effect Transistors without Using Transfer Processes", *Appl. Phys. Exp.*, 3(2010)025102
- 19) D. V. Kosynkin et al., "Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons", *Nature*, 458(2009)872
- 20) L. Jiao et al., "Narrow graphene nanoribbons from carbon nanotubes", *Nature*, 458(2009)877
- 21) 佐藤健太郎、「グラフェンからナノチューブまで化学合成で新炭素材料に挑む」。現代化学、2009年8月、pp.16-20 およびその引用文献
- 22) Y. Zhang et al., "Direct observation of a widely tunable bandgap in Bilayer graphene", *Nature*, 459(2009)820
- 23) 宮崎久生ほか、「2層グラフェンにおける電場誘起バンドギャップエンジニアリング」、第56回応用物理学関係連合講演会(2009春)、1a-ZA-3
- 24) N. Harada et al., "Performance Estimation of Graphene Field-Effect Transistors Using Semiclassical Monte Carlo

- Simulation”, Appl. Phys. Exp., 1(2008)024002
- 25) K. Nakada et al., “Edge state in graphene ribbons: Nanometer size effect and edge shape dependence”, Phys. Rev. B., 54 (1996)17954
- 26) Y. -W. Son et al., “Energy Gaps in Graphene Nanoribbons”, Phys. Rev. Lett., 97(2006)216803
- 27) M. Y. Han et al., “Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons”, Phys. Rev. Lett., 98(2007)206805
- 28) J. Bai et al., “Graphene nanomesh”, Nature Nanotech., 5(2010)190
- 29) R. Balog et al., “Bandgap opening in graphene induced by patterned hydrogen adsorption”, Nature Mater., 9(2010)315
- 30) Y. Lin et al., “Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies”, Nano Lett., 9(2009)422

執筆者プロフィール



家近 泰

ナノテクノロジー・材料ユニット
科学技術動向研究センター 特別研究員
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

化学メーカーで青色 LED の技術開発と特許出願に携わったのち、ベンチャー企業で大型 MOCVD 装置の開発に従事した。現在は、分析機器メーカー。ナノテク・材料は、さまざまな領域に応用されるベーシックな技術分野であり、そこが重要で面白いと思う。

Science & Technology Trends

科学技術動向 5/2010



2010年5月号 第10巻第5号/毎月26日発行 通巻110号 ISSN 1349-3663



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター