

生物多様性を規範とする革新的材料技術

Innovative Materials Engineering Based on Biological Diversity



トピックス PEN より

自己組織化の工業化を目指し、 バイオミメティクスの適用へ

三菱レイヨン株式会社 横浜先端技術研究所 魚津吉弘

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災をきっかけに、今まで日本人がおさなりにしてきた非常に大きな課題がクローズアップされた。その課題こそが、エネルギー問題である。

地震が引き起こした津波による福島第一原発での事故が起因となった電力不足から計画停電などを経験し、我々の生活が如何に電気に依存しているかを痛感させられた。現在、原発の安全性への不安から、各地の原発は定期検査後の再稼働を見合せている。地震以前には原発増設により原発を中心としたエネルギー政策がたてられていた。原発の安全神話が崩壊し、原発増進の道が閉ざされたことによって、エネルギーの大転換への道を突き進む必然に直面することとなった。今回の地震は、我々日本人の生活の大きなターニングポイントとなる可能性が高い。実際にはエネルギーの転換が完了するまでには、エネルギーの需給バランスが崩れ深刻なエネルギー不足になる可能性やエネルギーの質の低下により現在まで人間が築いてきた安定な電力供給を前提とした工業プロセスからの転換の必然性も再認識されている。

これまで人間が築いてきた工業化プロセスでは、化石燃料をエネルギー源とし、鉄、アルミ、シリコン、そして希少元素を原料として、リソグラフィー等を駆使したトップダウンの加工技術によりモノを作り、情報や価値を生み出してきた。これに対し、低エネルギーで典型元素を中心として自己集合や自己組織化というボトムアップの加工技術が

昨今注目を浴びている。ボトムアップの加工技術は、このような省エネという一面とともに、トップダウンの加工技術では困難な大面積加工や超微細加工の可能性を有していることから期待されている。

生物は太陽光や化学エネルギーを用いて、炭素を中心とする有機化合物を主だった原料として、分子集合や自己組織化によってモノを作る、「生物の技術体系」とも言うべき仕組みを持っている。上述のような技術のトレンドのなかで、今世紀に入り欧米を中心に、「自然に学ぶモノづくり」のひとつである「バイオミメティクス」が改めて注目され始めている。

2. ボトムアップとしての自己組織化の利用

規則的な構造を有する機能性材料の作製に関しては、現在大部分は半導体用レジストや成形材料の金型など、まずは構造を形成するための規則性を機械加工やリソグラフィー等により形成している。人の意思によって、その時点で手に入れた加工手法によって規則的構造を形成する、いわゆるトップダウンの加工方式である。トップダウンの加工方式では、規則構造の微細化とともに加工設備が非常に大きくなってきて、研究開発設備でさえ単独の企業ではもてないようなレベルになってきた。また、トップダウンの加工方式では、将来的な目標である規則性のサイズの実現も不可能となってきた。そこで最近注目を集めているのが、ボトムアップの加工方式である自己組織化の手法を利用した

新たな材料設計である。自己組織化の手法による材料設計では、用いる加工設備は比較的簡易でかなり安価のもので済ませられること、ならびに一般的に大面積での構造形成が可能だという大きなメリットを有している。ただし、この自己組織化現象は、作製される組織化構造が完璧には制御できず、欠陥が必ず存在するという欠点を有している。自己組織化現象を工業化プロセスに適用するには、このような規則性の不完全性を許容するようなアプリケーションを見出すことか、トップダウンの手法との組み合わせで高度な規則性を付与することが重要なポイントである。

3. 自己組織化現象を利用した研究開発

自己組織化現象の代表例としては、高分子の世界ではブロックコポリマーのナノ相分離構造形成があげられる。材料設計や加工条件を整えることにより、自己組織的にナノオーダーの様々な構造形成が実現されている [1]。また、高分子の溶液キャストを加湿下で行うことにより、マイクロオーダーではあるが規則的なハニカム状の構造が形成できることもよく知られている現象である。これらの手法では大面積での加工が可能であり、工業化へ向けた開発が進められている [2]。自己組織化はこれらの現象だけではなく、非常に多くのバリエーションが知られている。その中で、三菱レイヨンにおいても自己組織化現象を利用した研究開発を進めている。これらの研究は屈折率分布型プラスチックロッドレンズの研究を通じて、色々な検討を行ってきた結果たどり着いたものである。一つは、レンズ材料の特性をさらに向上させるために、材料探索研究を進めてきた中で偶然見出した現象（セレンディピティ）に関するものである。もう一つは、蛾の目の表面を模倣し微細凹凸を形成した無反射構造を、工業化を目指し大面積に形成することを目的とした研究である。ロッドレンズの研究者として屈折率分布をいかに効率良く形成するかを考えるなかで、蛾の目の表面の微細凹凸構造に関心を寄せるようになっていた。この研究は、現在バイオミメティクスの代表的な研究となりつつある。本稿では一連の研究の起点となったロッドレンズの紹介から、これら自己組織化現象を用いた工業プロセスの開発に向けた取り組みの現状、ならびにその開発におけるバイオミメティクス適用の意義に関して解説していきたい。

4. 拡散と反応の制御によるプラスチックロッドレンズの製造技術

ロッドレンズとは図1に示すように直径1 mm程度の円柱状の物体であり、中心から円周にかけて連続的に屈折率が減少していることを特徴としている。このような屈折率分布を有していることで、特定の長さで切断すると、1対1の正立実像を形成することから、ファクシミリ、スキャナや、多機能プリンタ等の原稿読み取り用のレンズとして用いられている。プラスチックロッドレンズは、複数の屈折率の異なるモノマーとポリマーとの溶解混合物（原液）を図2に示すように、複合ノズルより押し出し糸状とした後に層間でモノマーを拡散させ、モノマーの分布を形成した（屈折率分布を形成した）後に、紫外線を照射することでモノマーを重合するという工程により作製される。各層のロッドレンズの原液は拡散光を用いて重合硬化すると、透明なレンズ材料として使用できる。[3]

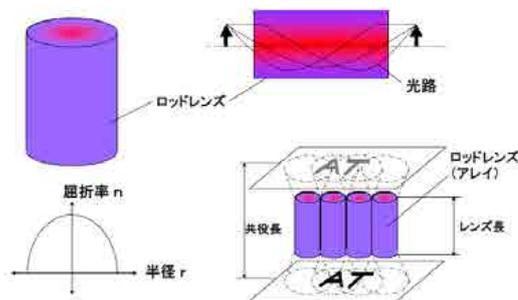


図1 ロッドレンズの構造と機能

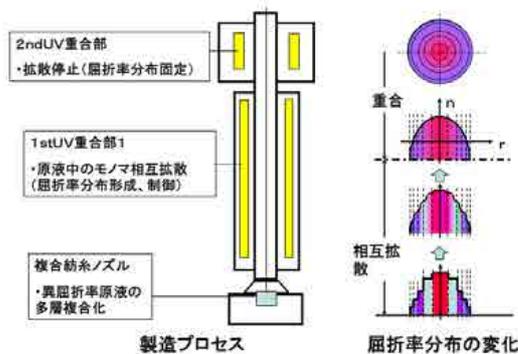


図2 相互拡散法の製造プロセス概要

5. 平行光線照射によるマルチシリンダー構造の形成技術

プラスチックロッドレンズに用いる原液のポリマーとモノマーとの均一溶解物を平行光線により重合硬化すると、図3に模式的に示すように光線の方向に自己組織的にマルチシリンダー状の構造が形成される [4]。この現象はレンズ材料の開発を進める中で20年近く前に偶然に見出した現象である。図4に照射面から観察した代表的な相分離構造の光学顕微鏡写真を示す。この図から確認できるように直径が約 $5 \mu\text{m}$ で間隔が約 $10 \mu\text{m}$ のドメインが一面に形成されていることがわかる。また、アスペクト比100を超えるシリンダー構造が形成可能である。これらマルチシリンダー構造の形成は、光重合速度(光開始剤量、光強度)や、光重合の進行とともに形成されるネットワーク構造(オリゴマー分子構造)に依存することを実験的に確認している。この構造の形成起源は、反応拡散系における Turing 不安定性 [5] との関わりを理解することが重要と考え検討を進めているが、いまだにその形成メカニズムの解明には至っていない。

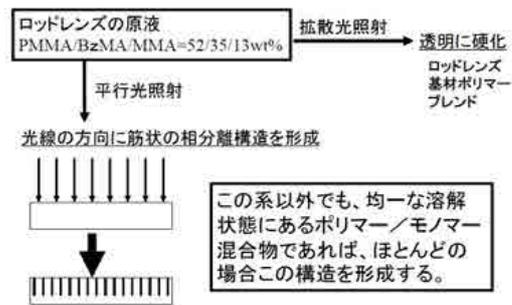


図3 平行光によるマルチシリンダー構造の形成

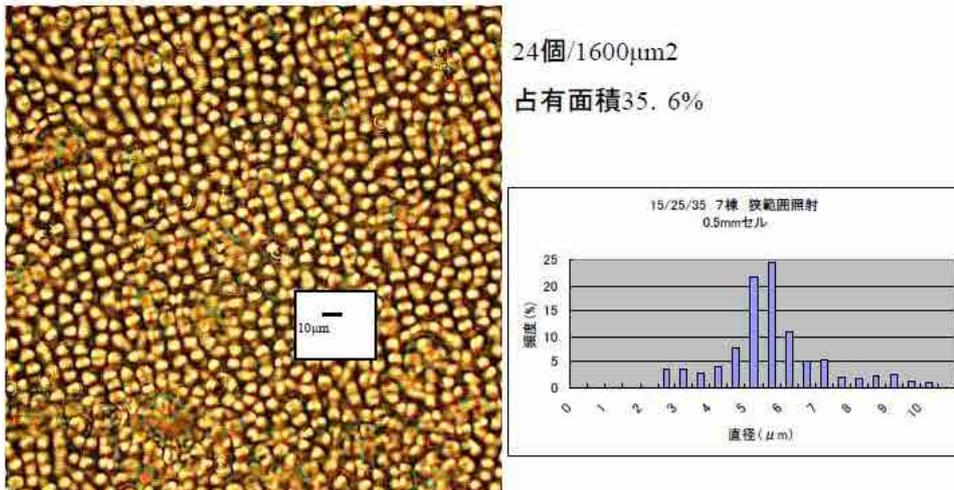


図4 自己組織化構造の光学顕微鏡による観察

**6. トップダウンの手法との組み合わせ
テクスチャリングの手法を用いた規則性の向上**

光硬化性樹脂フィルム中に、自発的に形成される規則的な構造には、自己組織化では避けがたい不完全性が見られる。このマルチシリンダー構造は回折格子としての利用が考えられるが、回折格子への適用には規則性の向上が必須である。より高い規則性を付与するためには、フォトマスクによる前段硬化を用いたテクスチャリング法が効果的であることが確認されてきた。ゲル化点近傍における構造の誘起をテクスチャリング法によりアシストし、引き続いて行われる平行光束の紫外線照射により、構造を成長させ固定化することにより、高度な規則性を有するマルチシリンダー構造の形成が実現される [6] (図5)。図6にレーザー光をこれらのフィルムを通して得られた回折パターンを示す。自発形成のみで作製したフィルムを通したパターンでは、ビームスポットの滲みや散乱成分が確認される。一方、テクスチャリングを施したフィルムを通したパターンでは、それらは認められなかった。

自己組織化現象の工業化のためには、このようにトップダウンの手法と組み合わせて、従来の手法では形成することが困難な超規則構造の形成に結びつけることが一つの方向性であると考えられる。

7. 構造制御への考え (図7)

平行光線照射により形成されるマルチシリンダー構造 (a) に関して検討を積み重ねてきたが、ドメインサイズがマイクロサイズの範囲でしか実現できないこと、並びにドメイン間にはわずかな組成の差しかなく屈折率差が小さく、回折や拡散にしか利用ができないという制約がある。様々な光学素子の可能性のあるサブマイクロオーダーでの構造形成を思考し研究企察を進めた結果、同じ画で表現できる陽極酸化法によるアルミナナノホールアレイの活用へと行き着いた。アルミナナノホールアレイを金型として用い、ナノインプリントによりポリマーに構造を転写することで、可視光の波長オーダーの表面構造 (b) を形成可能である。また、空気とポリマーとからなることから、屈折率差も大きくなる。さらにはその空気の部分に機能性材料を埋め込む (c) ことにより、更なる機能性の付与も期待して研究に取り組んでいる。その研究のマイルストーンとして、モスタイプ無反射フィルムの開発に取り組んでいる。

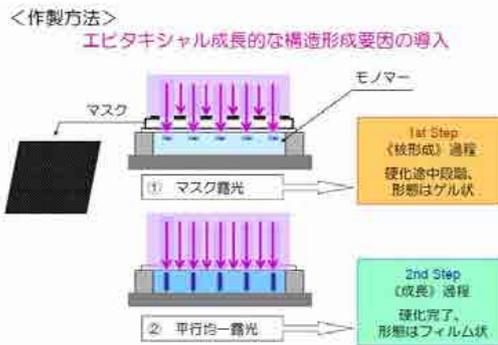


図5 テクスチャリング法による配列精度の改良

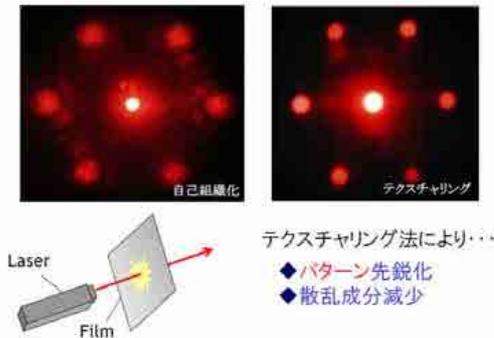


図6 フィルムを通した回折パターン

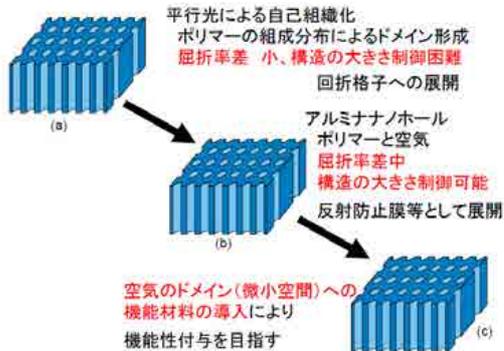


図7 表面機能化研究の展開

8. アルミナナノホールアレイを用いたモスアイ型反射防止フィルムの製造技術開発

自己組織化現象を利用した工業化プロセス研究の二つ目は、神奈川科学技術アカデミー（KAST）の益田秀樹教授と共同で研究を進めているモスアイ型反射防止フィルムの開発である。

1) モスアイ型反射防止フィルムとは

ディスプレイにとっては外光から生じる反射光の影響で、画像が見えにくくなるという現象が生じ、その反射光の影響を低減化することがディスプレイの特性を改善するための大きなポイントとなっている。反射光の影響を防ぐフィルムとしては、反射光をばよかす Anti-Glare (AG) フィルムと反射光自体を低減化する Anti-Reflection (AR) フィルムとがある。現在、AG フィルムは、液晶ディスプレイに多く用いられており、AG フィルムはプラズマディスプレイに用いられてきた。AG フィルムは反射光をばよかすために、ディスプレイの解像度を落とすという欠点を有している。一方、現在各社より上市されている AR フィルムは多層膜タイプのものであり、各層の屈折率及び膜厚制御を行うことで反射光同士が干渉して打ち消しあうように設計されている。この多層タイプのもは多くの層を積み重ねることで、かなり広い波長範囲の光の反射を抑えることが可能である。ただ、コスト面からの要請から、一般的にディスプレイ用途で用いられている AR フィルムは 2 層フィルムであり、視感度の最も大きな 570nm 付近の光の反射を強く防止するような設計となっている。

一方、これとは異なる原理でナノオーダーの微細な凹凸構造を表面に形成することで、空気と基材の界面で屈折率を連続的に変化させて反射を防止できることは、学術的には以前から知られていた。この構造は図 8 に示す蛾の目の表面構造を模倣したものであり、一般にモスアイ構造と呼ば

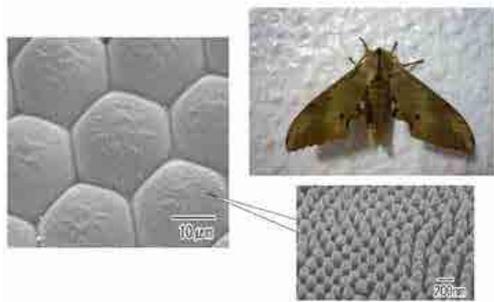


図 8 蛾の目の表面構造

れ、バイオミメティクスの代表的な例である [7]。しかしながら、このようなナノオーダーの微細な凹凸構造を大面積で作製することは難しく、工業的には実用化されていない。

2) モスアイ型アルミニウム金型の作製とインプリント技術

アルミニウムを陽極酸化した時に自己組織的に形成されるアルミナナノホールが、大面積に、しかも、曲面に形成できる [8] という特性を利用すれば、シームレスな大型のロール金型の形成が可能であるとの確信のもと検討を開始した。

アルミナナノホールアレイの構造は、セルと呼ばれる一定サイズの円柱状の構造体が細密充填した構造となっている (図 9)。各セルの中心にはセル径の約 $1/3$ の径を有する均一な径の細孔が配置しており、各細孔が膜面に垂直に配向して配列している。それぞれのセルのサイズ (細孔の間隔) は、陽極酸化の際の電圧に比例する。陽極酸化時の電圧を変化させることによって、細孔間隔を 10nm から 500nm 程度の範囲で制御することが可能である [9]。テーパ形状を有するアルミナナノホールアレイからなるモスアイフィルム形成用金型の形成方法を、図 10 を用いて説明する。まず、シュウ酸水溶液を電解液として用い定電圧下で、アルミニウムの陽極酸化を行う。次に形成した細孔をエッチングにより拡大する処理を行った。エッチングにより孔径拡大処理を行ったものを、シュウ酸水溶液を電解液として用い定電圧下で、アルミニウムの陽極酸化を行う。すると、ナノホール底面よりセル径の $1/3$ の径を有する細孔が形成される。底部にはセル径の $1/3$ の径を有する細孔その上部にエッチング処理により拡大した径の部分が形成された複合形状のナノホールアレイが形成される。この一連の処理を複数回繰り返すことにより擬似的なテーパ形状を有するモスアイ金型が形成される [10]。

モスアイフィルムは図 11 のような光ナノインプリントの工程により作製した [11]。まず、アルミナナノホールアレイ金型に光硬化性樹脂を充填し、PET 等の透明な基盤フィルムをかぶせる。この基盤フィルムは酸素による重合阻害を防止するという目的も持っている。次に、基盤フィルム側から UV 光を照射し、光硬化性樹脂を硬化させる。最後に保護フィルムと一体化した形状を付与した樹脂を金型から剥離する。この一連の工程を経由して、モスアイ型反射防止フィルムが作製される。基盤となるフィルム上に、モスアイ型反射防止コーティングを行うことにより、モスアイ型反射防止フィルムが形成される。基盤となるフィルム

としてはアクリル系フィルム、ポリエステルフィルム、ポリカーボネートフィルム等が用いられる。図 11 の下側の写真は、左は作製したテーパ形状を有するアルミナナノホールアレイを有するモスアイ金型の断面の SEM 写真であり、中央がモスアイ金型の表面の SEM 写真である。直径約 100nm のテーパ状の細孔がきれいに配列した形状となっている。また、右の図は UV ナノインプリントにより形成したモスアイフィルムの TEM 写真である。モスアイ金型の形状がきれいに転写されていることが確認できる。

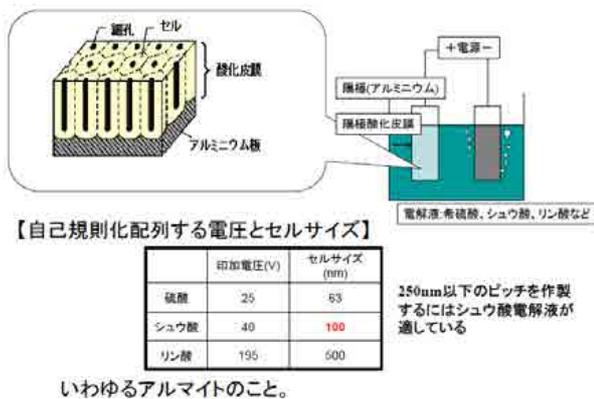


図9 アルミナナノホールとその作製方法

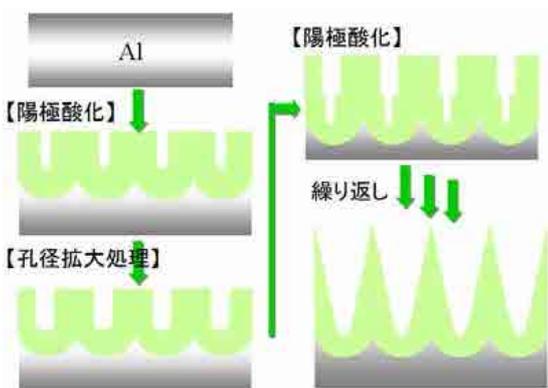


図10 テーパー状アルミナ金型作製の模式図

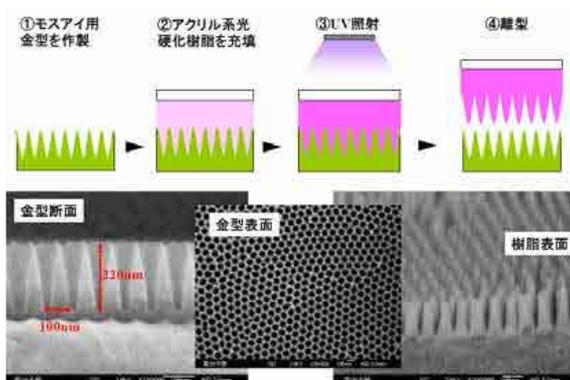


図 11 モスアイフィルム作製プロセスの模式図

3) モスアイフィルムの光学特性

標準的なモスアイフィルムの反射率の測定データを図 12 に示す。従来品の AR フィルムは視感度の最も高い 570nm 付近の反射を選択的に防止するような特性を有しているのに対し、モスアイフィルムは可視光域全域において反射率を下げる事が可能であることが分かる。また、反射率の入射角度依存性も良好であり、入射角度 50 度付近まではほぼ無反射で、60 度になってはじめて反射率は 1% を超える。アクリルシートの両面に反射防止フィルムを貼り付け、映り込みの比較を行ったのが図 13 である。右側の市販の反射防止フィルムを用いた場合、強い映り込みが確認できる。一方、モスアイフィルムを貼ったのが左側であるが、映り込みはほぼ確認できなかった。

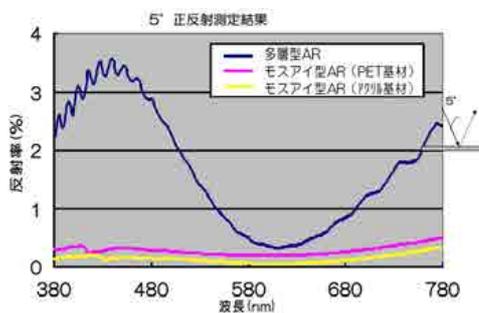


図 12 反射防止フィルムの反射率

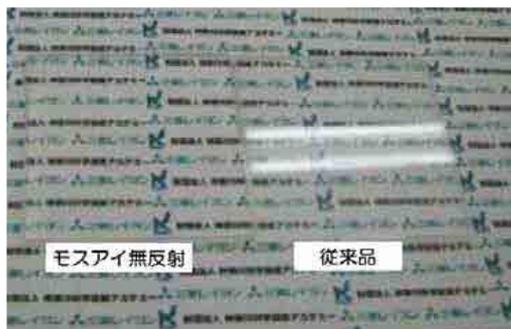


図 13 反射防止フィルムの映り込み評価結果

4) ロール to ロールによるモosaic型フィルムの連続的製造技術

数10cm単位の大きさのロール形状で鏡面加工したアルミニウムをシュウ酸水溶液を電解液として用い定電圧下で陽極酸化を行い、次に細孔径を拡大する処理を行った。これを複数回繰り返して表面にテーパー形状のアルミナナノホールを有するロール金型を得た。

得られたロール金型を用いて光硬化性樹脂を用いてロール to ロールで連続的に樹脂フィルム上にモosaic構造を転写した。樹脂表面及び断面を電子顕微鏡により観察したところ、パッチで検討していた時と同様に、100nm周期の均一なサイズのモosaic構造がナノインプリントされていることを確認した。得られたフィルムの反射率測定を行ったところ、可視光波長域において反射率及び反射率の波長依存性が低いことがわかった。このように、ロール金型を用いた連続光ナノインプリントの可能性を確認した。

9. バイオミメティクスと自己組織化現象の工業化

微細構造の大量での加工技術の実現のためには、自己組織化現象の適用が最も可能性が高いと考えられる。しかし自己組織化現象で形成される規則構造には、規則構造の乱れ“いいかげんさ”が必ず存在する。自己組織化を工業化するためには、テクスチャリングによりマルチシリンダー構造の超規則性を実現したように、トップダウンの加工技術との組み合わせにより規則構造の乱れを解消する方向性がある。ただ、トップダウンの加工技術がベースにあるので、大量の加工にはつながらない。自己組織化現象の特性を十分に活かし大量加工技術を実現するためには、構造の“いいかげんさ”を許容するようなアプリケーションを見出すことが必須である。

ここで生物に目を移してみる。生体に帰属する表面構造は特性としては、完全な機能の発現が必須である。また、生体を構成する構造は、基本的には自己組織的に形成される。ただ、自己組織化による構造形成は、規則性に不完全さが必ず存在する。生体の表面構造では、規則性に不完全さが存在するにもかかわらず、完全な機能が実現されている。生体は自己組織的な構造形成の最良のお手本であり、自己組織化を工業的に利用する際の非常に良い指針となると考えられる。

モosaicの場合を例にして考えてみる。モosaic構造はアスペクト比などの満たすべき条件はあるが、式1の関係を満たす限り無反射の特性を実現するものと計算されている。最もピッチが小さくなる条件、波長400nmで屈折率

が1.5で計算すると、ピッチは267nm以下であれば無反射特性となる。モosaic構造はピッチが267nm以下であれば無反射の特性となるということであり、ピッチがそれ以下の中でフレても無反射構造であるということの意味する。すなわち、モosaic構造は多少の構造の欠陥は特性に影響しない、規則性の不完全さを許容するアプリケーションである。このようにモosaic無反射フィルムは、自己組織化の工業化のための最適なアプリケーションと考えられる。

$$\Lambda \leq \frac{\lambda}{n} \dots (1)$$

Λ ピッチ(nm)
 λ 波長(nm)
 n 屈折率

式1

10. まとめ

自己組織化の手法による材料設計では、基本的にエネルギー消費が少なく省エネであるということ、用いる加工設備は比較的簡易でかなり安価なもので済ませられること、ならびに一般的に大量での構造形成が可能だということ大きなメリットを有している。多くの解説では省エネの面並びに安価な加工設備の面が強調されたものとなっているが、本稿では工業化に結びつく最も大きなポイントと考えられる大量加工の可能性にポイントを絞って解説を行った。

自己組織化現象を工業的に適用した事例は、現在までのところ非常に数少ない。自己組織化現象を工業的なプロセスへと結びつけた成功例として挙げられるように、これらの技術の工業化を目指し多くの研究開発が進められている。そのための強力なツールとしてバイオミメティクスは期待されている。

References:

- [1] 鎌田香織、化学と工業、58(3)、231-232 (2005)
- [2] 下村政嗣、高分子、55(1)、28(2006)
- [3] 魚津吉弘、廣田憲史、高分子論文集、61(1)、51-66 (2004)
- [4] 魚津吉弘、服部俊明、川原田泰、藤井泰行、高分子学会予稿集、55(2)、3413(2006)
- [5] Castets, V., Dulos, E., Boissonade, J., and De Kepper, P., Phys. Rev. Lett., 64, 2953-2965 (1990).
- [6] 茶谷俊介、實藤康一郎、服部俊明、刀襦誠司、2006

年第 15 回ポリマー材料フォーラム、2PB12

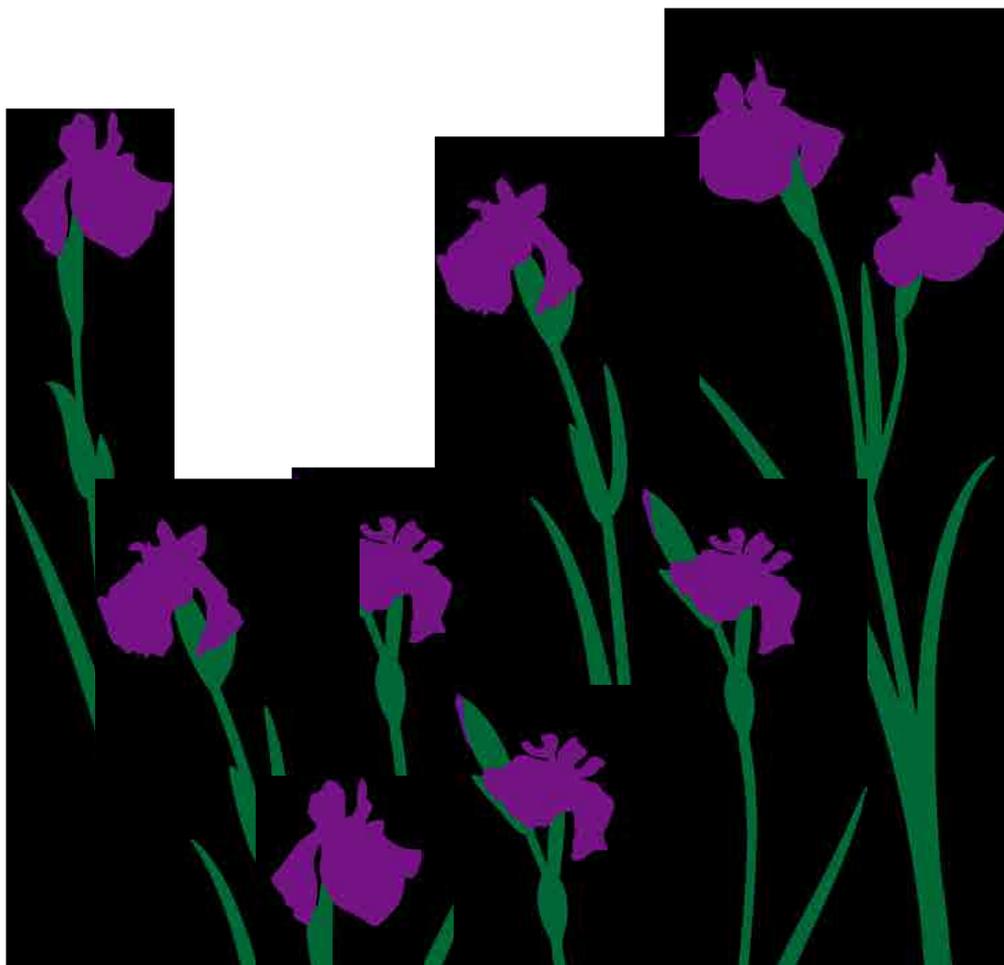
[7] P. B. Clapham & M. C. Hultley, *Nature* 244, 281 (1973)

[8] H. Masuda and K. Fukuda, *Science*, 268, 1466 (1995).

[9] T. Yanagishita, K. Nishio, and H. Masuda, *J. Vac. Sci. B*, 25, L35 (2007).

[10] T. Yanagishita, K. Yasui, T. Kondo, K. Kawamoto K. Nishio, and H. Masuda, *Chem. Lett.*, 36, 530 (2007)

[11] 魚津吉弘：日本接着学会誌“モスアイ型反射防止コーティング”、46(5)、173 (2010)



自然に学ぶ表面処理技術 ～汎用元素によるはつ油性に優れた表面の創製～

産総研 サステナブルマテリアル研究部門 高耐久性材料研究グループ
浦田千尋、Dalton F. Cheng、*穂積篤

1. はじめに

初夏になると、緑色の大きな葉で一面が覆い尽くされた蓮田を見かける。蓮の原産地はインド半島とその周辺と言われており、7～8月にかけて白やピンク色の美しい花を咲かせる。その葉は円形で、中心に特徴的な葉柄がついており、「蓮は泥より出でて泥に染まらず」といわれるように、蓮の葉の表面は驚異的なはつ水性により汚れがつきにくい。蓮の葉表面には、図1 (a) に示すように、5～15 μm の突起物がそれぞれ20～30 μm の間隔を持って空間配置されており、突起物表面は分泌された植物ワックスの微結晶で覆われている(図1 (b))。植物ワックスは低表面エネルギー物質で、高級不飽和脂肪酸、その重合物および高級アルコールと高級不飽和脂肪酸のエステル等からなる蝟、トリテルペン、ステロイドなどのことである [1]。この物理的・化学的效果により、蓮の葉は「水をはじき、汚れない」という優れた機能を発現している。この超はつ水性によるセルフクリーニングは蓮の葉効果 (Lotus-Effet[®] は Bonn 大学の商標) と呼ばれている [2]。しかしながら、この効果は油性系の汚れに対しては無効である。なぜなら、植物ワックスは油と相性が良いため、例えば、蓮の葉に *n*-

ヘキサデカン (油) を一滴たらずと一瞬にしてぬれ広がり、水のようにはじかれて表面から転がり落ちることはない。

優れたはつ油性を実現するためには、超はつ水性表面と同様に微細構造の導入と、油よりも表面エネルギーの低い有機フッ素化合物が有効であることが知られている。しかし、油の表面エネルギーは低いことから、蓮の葉上の水滴のように油滴がころころと滑落していく表面の創製はチャレンジングなテーマであり、実際にその報告例は少ない [3,4]。はつ油性表面には、有機フッ素化合物の使用は必要不可欠であるが、近年、有機フッ素化合物の製造に必要な原料である蛍石の価格高騰や、有機フッ素化合物 (特にパーフルオロオクタン酸) の人体や環境への影響が懸念されており、本物質群に対する規制も年々厳しくなっている [5,6]。そのような背景から、省エネルギー・省資源・低環境負荷の観点からも、有機フッ素化合物に依存しないはつ油処理技術の開発が望まれている。実際に自然界では、例えば、カタツムリや魚の殻や鱗は、汎用元素を利用し、微細構造化した表面を水やタンパク質で被覆し、親水化という水と油の相分離現象を利用することで、優れたはつ油性、防汚機能を発現させている [7,8]。

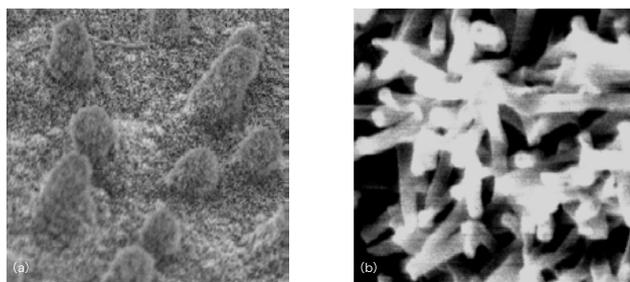


図1 蓮の葉表面のSEM写真：(a) 表面の突起物 (1000倍)、(b) 突起物表面の拡大像 (30000倍)

2. ぬれ性とは？

では、固体表面の水や油のはじきやすさ、あるいは水や油のぬれやすさは、どのように判断されているのであろうか？ 通常、液滴の接線と固体表面とのなす角度である接触角という値を用いて判断する。水をプローブに使用した場合は水滴接触角という。接触角は固体表面の1 nm程度の最外層のみの物性を反映しており、この値が大きい表面は一般的に、はっ水 / はっ油性表面、小さい表面は、親水 / 親油性表面と認識されている。それでは、図2 (a) と (b) の表面ではどちらが油滴をはじく性能があるだろう。前述の定義から判断すると、(a) の表面の方が (b) よりも接触角が大きいため、はっ油性表面であるといえる。

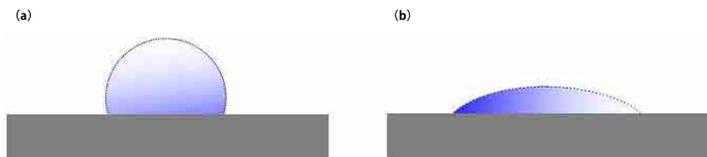


図2 油滴の静的な状態

しかし、図3 (a) の表面のように、基板を180°傾けても落ちない場合もあれば、(b) の表面のように、わずかな傾斜角で転がり落ちて行く場合もある [9]。

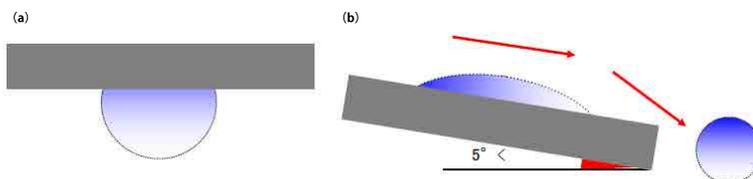


図3 油滴の異なった動的挙動：(a) ヒステリシスの大きな表面、(b) ヒステリシスの小さな表面

このことから固体表面のぬれ性は、液滴の「静的」な状態ではなく「動的」な挙動で評価することが重要であることが容易に想像できる。しかしながら、これまでに報告されている超はっ水 / はっ油処理に関する研究では、一つの接触角、多くは静的接触角 (θ_s) の値しか記載されていない場合が多い。動的接触角とは、固体表面上を液滴が動く状態を想定した、液滴の前進 (θ_A)・後退 (θ_R) 接触角によって決定される値であり、固体表面からの液滴除去性能の指標として、最近注目されている。 θ_A と θ_R の差 ($\Delta\theta = \theta_A - \theta_R$) あるいは θ_A と θ_R の余弦の差 ($\Delta\theta_{\cos} = \cos\theta_R - \cos\theta_A$) は接触角ヒステリシスとして定義され、この値が小さい程、液滴と固体表面との相互作用は小さい。事実、蓮の葉の θ_A/θ_R 値は156°/151°であり、ヒステリシスはわずか5°である。ヒステリシスの起源は、表面粗さ、化学的不均一

性、固液界面での分子再配列等の影響によるものと考えられている [10]。

Wei らは固体表面で液滴を駆動させるのに必要な力を式 (1) のように表した [11]。この式から明らかなように、ヒステリシスを小さくすれば液滴を小さな力で駆動させることが可能になる。

$$F_s = kw\gamma_{lv}(\cos\theta_R - \cos\theta_A) \quad (1)$$

k : 定数、 w : 液滴の幅、 γ_{lv} : 液滴の表面張力

ヒステリシスが大きな表面では、例えば θ_s の値が大きくても液滴は「ピン止め効果」により傾けても動かないのに対し、ヒステリシスが小さい表面では、例えば θ_s の値が小さくても、基板をわずかに傾けた (重力) だけで液滴を容易

に動かすことができる [9]。図 4 の植物の葉の表面は、一見、水滴をよくはじいているように見えるが実はなかなか水滴は落ちてこない。「ピン止め効果」の一例である。



図 4 ピン止めされた水滴 (名古屋工業研究所八木橋信博士提供)

接触角ヒステリシスを小さくできれば、液滴 (水、油) をわずかな力で自由に動かすことが可能となるが、残念ながらその手法は未だ確立されているとは言えない。これまでに、1) 特殊な分子構造を持った単分子膜 [11-14]、2) 低分子量ポリジメチルシロキサン (PDMS) 薄膜 [9, 15]、3) 充填密度の低い単分子膜 [16] の表面 (主としてシリコン基板上) が接触角ヒステリシスが小さいという報告がある程度である。いずれの表面にも共通していることは、分子が十分に駆動できる「Liquid-like な状態」にあるということである。そのような表面では、官能基や高分子鎖の回転 / 駆動により液滴の三相接触線も動きやすくなり液滴が動く際のエネルギーバリアが小さくなるため、ヒステリシスが小さくなると考えられている [11, 17]。

3. 汎用元素によるはつ油処理

これまで、超はつ水 / はつ油性に関する研究分野は主に θ_s 値を大きくすることのみに焦点が絞られてきたといっても過言ではない。 θ_s の値だけから判断すると、これらの処理で一般的に使用されるアルキル鎖を持った有機分子で被覆された表面は、水に対しては表面エネルギーが十分に低い (高い) はつ水性を示すものの、油に対しては親油性を示す。従って、特にはつ油処理に関しては有機フッ素化合物の使用は必要不可欠である。我々のコンセプトは、 θ_s の値

をやみくもに大きくするのではなく「液滴と表面との相互作用を抑制し、いかにヒステリシスを小さくするか」である。それが実現できれば、超はつ水 / はつ油表面と同様に液滴をスムーズに動かすことができる。このような低ヒステリシス表面を実現するため、著者らはこれまでに、単分子膜、ポリマー薄膜、有機 - 無機ハイブリッド薄膜を利用して Liquid-like な表面を構築する手法を探索し続けてきた。本稿では、その中でもヒステリシス制御に基づいた汎用元素によるはつ油処理について最近の研究事例を紹介する。

3.1. ポリマー薄膜

我々は最近、高分子鎖の動力学特性を利用して優れたはつ油性を示す表面を作製した [9]。環状構造をもったヒドロシラン (1,3,5,7-テトラメチルシクロテトラシロキサン、 $C_4H_{16}O_4Si_4$ 、以下、 D_4^H と示す。) を気相から $80^\circ C$ で、72 時間化学吸着させると、 D_4^H 由来の厚さ ~ 0.5 nm の分子膜が形成される。この D_4^H 分子膜を被覆したシリコン表面に残存した水素基を利用してビニル基終端の PDMS (Gelest 製、DMS-V21、分子量 6000) をヒドロシリル化反応 (図 5) により固定した。

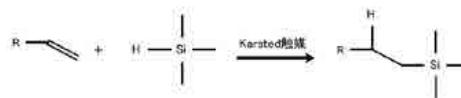


図 5 ヒドロシリル化反応

PDMS をヘキサンに希釈し、Gelest 製の Karstedt 触媒 10 ppm を添加して 20 wt% の反応溶液を調製した後、先ほどの D_4^H 分子膜を被覆したシリコン基板をこの溶液に $50^\circ C$ で 72 時間浸漬させた。この処理により PDMS が基板表面に固定されていることが赤外高感度反射法 (IRRAS: Infrared Reflection Absorption Spectroscopy) により確認された。PDMS 表面上での各種液滴の動的接触角を表 1 に示す。いずれの液滴に対しても接触角ヒステリシスは 5° 以下と小さく、特に油に対してヒステリシスの小さい表面であることがわかる。また、微小油滴 $3 \mu L$ に対しても転落角 5° 以下の優れた滑油性を示した。PDMS はガラス転移温度が $-127^\circ C$ と極めて低いため室温では液体である。また、*n*-ヘキサデカン、*n*-ドデカンはいずれも PDMS に対して良溶媒であるため、PDMS 鎖とこれらの液体間で、いわゆる「Blended liquid/liquid interface」を形成する。これらの油が可塑性のような役割を果たし、PDMS 鎖が膨潤することで高分子鎖の動きが活発になったことがヒステリシスが小さくなった原因であると考えている [9]。また、この PDMS 表面の動的ぬれ性は温度により著しく変化し

た。70℃に基板を加熱すると高分子鎖の動きがさらに活発化するため、ヒステリシス、転落角いずれも著しく小さくなることが確認された [9]。

表1 PDMS 表面での各種液体 (25 °C) の動的接触角と接触角ヒステリシス

プローブ液体 (表面張力)	θ_A / θ_R	$\Delta\theta^*$
水 (72.8 dyn/cm)	109° / 104°	5°
ヨウ化メチレン (50.8 dyn/cm)	73° / 68°	5°
<i>n</i> -ヘキサデカン (27.5 dyn/cm)	35° / 33°	2°
<i>n</i> -ドデカン (25.4 dyn/cm)	21° / 20°	1°

$$*\Delta\theta = \theta_A - \theta_R$$

3.2. 有機/無機ハイブリッド薄膜

有機シラン (R_nSiX_{4-n} , $n = 1, 2, 3$, 一般的に $X = Cl, OR, H$ 基, R は各種官能基) を、液/気相から自然酸化膜 (SiO_2) のシリコン表面に吸着させると、充填密度が比較的高く、機械的強度や化学的安定性に優れた単分子膜が形成する [18]。通常、メチル基終端の単分子膜で被覆された表面は水に対しては十分に表面エネルギーが低いいため、静的接触角の値から判断すると高いはっ水性を示すが、油に対しては親油性を示す。前述のとおり、接触角ヒステリシスを小さくするには、表面分子が回転/駆動するのに十分なスペースを確保する必要がある。そこで我々は、この有機シランであるデシルトリエトキシシラン (DTES) にアルコキシシランであるテトラメトキシシラン (TMOS) を所定量添加したゾル液を調製し、各種基材に塗布することで表面に露出する DTES 分子の密度を制御した [19]。図 6 にガラス管内部を各種処理した試料に、赤色に着色した *n*-ヘキサデカンを滴下した後の状態を示す。DTES 単分子膜を被覆したガラス管 (図 6 (b)) では、*n*-ヘキサデカンはぬれ広がり赤く染まっていることが確認できる。また、従来のフッ素系有機シラン単分子膜で被覆したガラス管 (図 6 (c)) は一見、*n*-ヘキサデカンをよくはじいているように見えるが、液滴がピン止めされていることがわかる。これに対し、TMOS を添加して作製したハイブリッド薄膜を被覆したガラス管 (図 6 (a)) は、*n*-ヘキサデカンに対して染まることなく優れた滑油性を示した。同じ原料を用いたにも関わらず、表面の分子密度を制御するだけで油滴が特異な動的挙動を示すことが明らかとなった。このハイブリッド薄膜は常温で硬化し、基材の制限もなく、特に前処理なしでも比較的良好な密着性が得られるという特長がある。

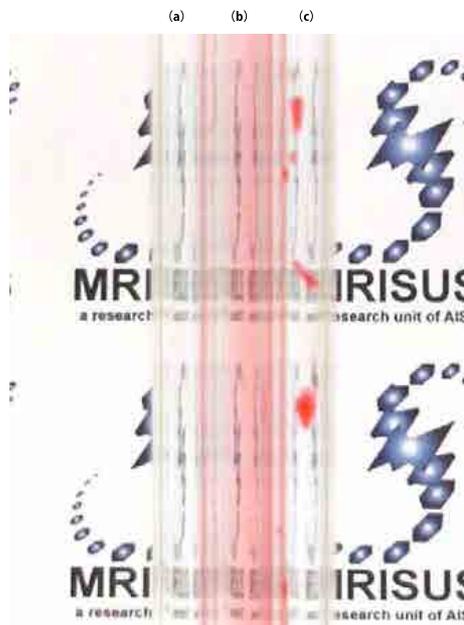


図 6 着色した *n*-ヘキサデカン滴下後のガラス管の状態：(a) 有機/無機ハイブリッド薄膜、(b) DTES 単分子膜、(c) フッ素系有機シラン単分子膜被覆ガラス管

4. まとめ

生物は長い年月をかけて汎用元素を用い、微細構造を最適化することで、人類が未だ実現できていない驚異的な機能を獲得してきた。環境や資源に配慮した材料/材料プロセス開発のトレンドから、「汎用元素の利用」は今後、重要なキーワードとなることは間違いない。従来からのぬれ性の評価基準である静的接触角の値だけで判断すると、我々が創りだした表面はまぎれもなく親油性表面であり、実際に著者自身も最近まで炭化水素系材料は親油性だと信じていた。しかしながら、視点を変え、その動的挙動の滑油性から判断すると、はっ油性表面であると言わざるを得ない。これまでのぬれ性に関する既存概念からの脱却と新たなブレークスルーが必要である。カタツムリや魚は、微細構造化した表面を水やタンパク質で被覆し親水化することで、はっ油性・防汚性を実現しているが、自然界にはこれ以外にも、同様の微細構造とぬれ性制御というシンプルな原理に基づいて様々な機能を常温/常圧下で発現させている例がある。今回紹介した表面は極めて平滑なため、微細構造の効果はぬれ性に反映されていない。著者らは今後、生物の持つ特異な微細構造を賢く利用していきたいと考えてい

る。そのためには、何よりも、生物学・博物学が持つ豊富な生物資源情報（生物が有する表面構造とそれがもたらす機能発現）を活用することが重要である。異分野の融合・連携のもと、生物学・博物学に基づいた表面デザインと新しい技術（ナノテクノロジー）の融合により、蓮の葉効果を凌駕する次世代バイオメテリック表面の開発が期待できる。この分野はまだ無限の可能性を秘めている。

References :

- [1] 日本植物生理学会 <http://www.jspp.org/>
- [2] <http://www.lotus-effekt.de/en/index.php>
- [3] A. Tuteja, W. Choi, M. L. Ma, J. M. Mabry, S. A. Mazzella, G. C. Rutledge, G. H. McKinley and R. E. Cohen, *Science*, 318, 1618 (2007).
- [4] J. P. Zhang and S. Seeger, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 50, 6652 (2011).
- [5] Y. Zushi, J. N. Hogarth and S. Masunaga, *Clean Technol. Environ. Policy*, 14, 9 (2011).
- [6] A. B. Lindstrom, M. J. Strynar and E. L. Libelo, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 7954 (2011).
- [7] <http://inax.lxil.co.jp/inax/story/technology/nano.html>
- [8] M. Liu, S. Wang, Z. Wei, Y. Song and L. Jiang, *Adv. Mater.*, 21, 665, (2009).
- [9] D. F. Cheng, C. Urata, M. Yagihashi and A. Hozumi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51, 2956 (2012).
- [10] J. N. Israelachvili : 分子間力と表面力 第2版, 近藤保／大島広行訳, p.312, 浅倉書店 (1996).
- [11] W. Chen, A. Y. Fadeev, M. C. Hsieh, D. Oner, J. Youngblood and T. J. McCarthy, *Langmuir*, 15, 3395 (1999).
- [12] A. Y. Fadeev and T. J. McCarthy, *Langmuir*, 15, 7238 (1999).
- [13] A. Hozumi and T. J. McCarthy, *Langmuir*, 26, 2567 (2010).
- [14] A. Hozumi, D. F. Cheng, M. Yagihashi and J. Colloid Interface Sci., 353, 582 (2011).
- [15] J. W. Krumpfer and T. J. McCarthy, *Faraday Discussions*, 146, 103 (2010).
- [16] A. Y. Fadeev and T. J. McCarthy, *Langmuir*, 15, 3759 (1999).
- [17] L. Gao and T. J. McCarthy, *Langmuir*, 22, 6234 (2006).
- [18] H. Sugimura, K. Ushiyama, A. Hozumi and O. Takai, *Langmuir*, 16, 885 (2000).
- [19] C. Urata, D. F. Cheng and A. Hozumi, submitted.

昆虫の形態研究は バイオミメティクスに寄与するか？

国立科学博物館動物研究部 野村周平

1. はじめに自己紹介

もともと筆者は、アリヅカムシという微小甲虫の分類研究が本業であり、博物館では甲虫全般のコレクションの管理運営、細かくは展示物の準備製作や研究用標本の貸出業務なども行っている。そのような仕事を本務とするものがないためバイオミメティクスに関わるようになったのか、その経緯をまず説明したい。2010年に国立科学博物館の上野本館で「次世代バイオミメティック材料の研究動向と異分野連携に関するジョイントシンポジウム」(バイオミメティクス研究会主催)が開催された。そのシンポジウムを契機にバイオミメティクス研究会の先生方とお知り合いになることができ、最近ではそれに関連する研究費もいただけるようになった。もしこのシンポジウムのような好機がなければ、筆者はまったくこの分野とかかわることなく、博物館を一步も出ることなく、昆虫分類学に埋没していただろう。

私が専門としているアリヅカムシは体長約0.5～4ミリほどの微小甲虫で、日本からはすでに300種ほどが知られている。20年以上前は「アリヅカムシ科」という独立の科とされていたが、その後の研究により、最近ではハネカクシ科の1亜科として扱われることが多くなった。日本から300種ほどが知られると書いたが、実はまだ名前のついていない種がたくさんある。昆虫の名前には、ラテン語で表記される学名と日本語で表記される和名とがあって、学名がついたものは、動物界の「種」として認識された、ということになる。さらに和名がつけられると、どのグルー

プのなにがしであるか、ちょっとでも虫を見知った一般の人々にも認識可能、ということになる。

まだ学名がついていない種は「未記載種(みきさいしゅ)」と呼ばれ、sp. 1, sp. 2, …のような仮の番号で呼ばれることが多い。アリヅカムシはまだあまり研究されていないグループなので、未記載種の割合が非常に多く、日本だけでも500～700種くらいあると推定される。世界中ともなると想像するだに恐ろしいほどである。未記載種に新たな名前が付けられて発表されると「新種」ということになる。「新種の昆虫」というと大変ありがたいもののように思えるかもしれないが、アリヅカムシの場合にはこれから新種になる種の方が、すでに知られている種よりも多い。東京近郊、つくば界隈でもこれから新種になろうというアリヅカムシはたくさん見つかる。

そのようなアリヅカムシを自然の野山から採ってきて、既知の種と区別し、特徴を記述して新種名をつけ、「これが新種のアリヅカムシ、何の何兵衛でございます」と発表するのが、私が専門とする昆虫分類学の作業である。ちなみに私はこれまで、日本のみならず、韓国、台湾、中国、ベトナム、タイなどアジア諸国から260種ほどのアリヅカムシを新種として発表した。アリヅカムシは大変小さい昆虫なので、種の区別を確実に行うためには、顕微鏡による詳細な観察が欠かせない。大雑把な観察比較は実体顕微鏡でも可能だが、詳細な比較を行い、なおかつ精細な写真として観察結果を記録するために私は走査型電子顕微鏡(SEM)を20年以上前の学生時代から用いてきた(図1)。

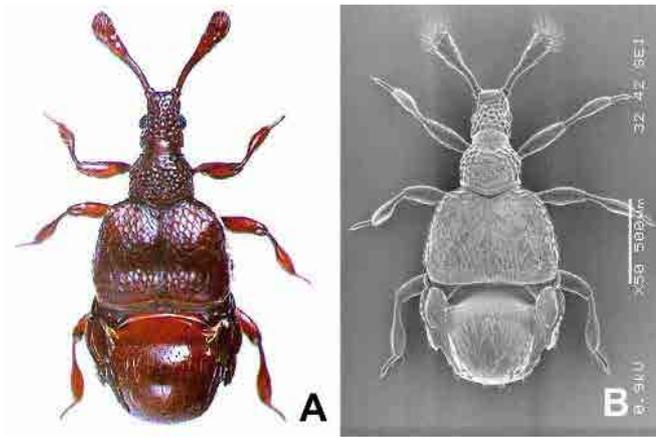


図1 ベトナム産のアリヅカムシ（ハネカクシ科）の一種 *Cerylambus reticulatus*。
A：CCDカメラによる画像；B：SEM写真

2. SEMによる昆虫の形態研究

SEMはこのように昆虫分類学の様々な研究の中で利用されるようになってきたが、現在においてもなお、それほど普及して一般的な研究手法となるには至っていない。昆虫分類学を担っている人々の中で、SEMがある程度自由に使える環境にいる人は極めて限られているからだ。また、SEMによる観察では、実体顕微鏡による観察にはない長所と短所があって、分類研究者が構築しようとするイメージと必ずしも合致しない、という点も大きいと思われる。長所はもちろん、昆虫体表面の微細構造をきわめて正確に、しかも高倍率で観察記録できるということにある（図2）。

一方SEM観察の最大の短所は、観察部分の色が判断できない、ということにあるのではないだろうか。このため、同一部分を観察しても、実体顕微鏡による観察結果とは非常に異なり、白黒写真でしか記録することができない。つまり形に関する情報は極めて精細であるが、色に関する情報がそっくり抜け落ちた形でしか我々は受け取ることができない。色が決め手になるような昆虫グループの観察には不向き、ということになるのではなかろうか。

アリヅカムシの場合、色はあまり問題ではなかった。アリヅカムシほど小さい虫では、毛のような細かい構造ばかりでなく、体を覆う外皮でさえも色がついていないことが多

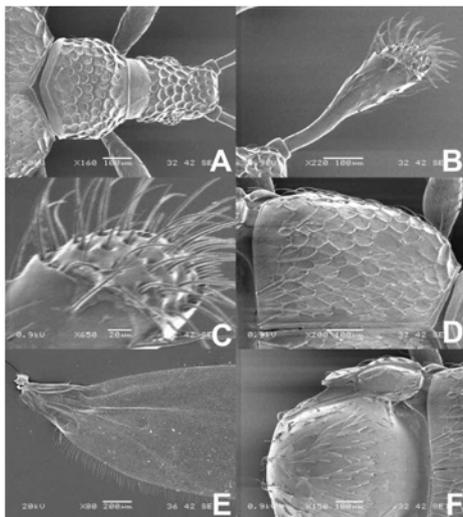


図2 ベトナム産アリヅカムシの一種 *Cerylambus reticulatus* の各部SEM写真（A～F）。Eのみ金蒸着、加速電圧20kvで撮影、他は非蒸着、加速電圧0.9kv。

い。そのため、性能のいい実体顕微鏡で倍率を上げても、透明な構造が折り重なって見えるばかりで、正確な形態が把握できない。この点、SEM 観察は透明な部分も正確に観察できるため、非常に都合がよかった。

SEM によって昆虫体表面を観察すると、これまでの実体顕微鏡下の観察では見えていなかったもの、認識できなかった構造ですら、精密に観察できるようになる。するとこれまで気が付かなかった昆虫体表面の機能が分かってくるようになる。ただ、上に述べたように、SEM 観察には大きな欠点もあるので、実体顕微鏡や光学顕微鏡（透過式）などによる観察を併用することによって、欠点を補っていかねばならない。

私が専門としているアリヅカムシなどの甲虫類は、一般に外皮が硬く、非常に安定した形態を保持している。それで特別に処理をしなくても、乾燥しただけで低倍率の観察はできる。たまたまではあったが、これも大変都合がよかった。一般に生物資料を SEM 観察する場合には、金や白金などの金属をスパッタリング等により被検体に薄くコーティングし、20kV くらいの高い加速電圧で観察することが主流である。しかしそうすると観察後の資料はのちの標本資料として役立つことが難しくなる。そのため私がアリヅカムシ標本の観察をする場合には、資料をよく乾燥し、非蒸着で、低い加速電圧（0.9kV）で観察することにした。しかし低い加速電圧では、2 万倍、5 万倍といった高倍率

の観察は極めて不安定になって難しいため、どうしても高倍率の観察を必要とするときには十分な資料を準備したうえで、金属を蒸着した資料で観察するようにしている。私が使用している SEM の機体で昆虫資料を観察する場合、非蒸着では最大 2000 倍程度、蒸着した資料では最大 10 万倍ほどが限界のようである。もちろん世の中にはこれよりも機能の優れたマシンはいくらか存在するだろうが、今は手元の機械でできることをやっている段階だ。

アリヅカムシの分類研究に SEM を利用する一方で、その他の昆虫についても同様な方法で観察すると、これまで実体顕微鏡や光学顕微鏡による観察だけでは知られていなかった昆虫形態の奥深さに触れることができ、ますます興味膨らんだ。母校の九州大学で助手をやっていたころにはクワガタムシ幼虫の発音器を観察、記録した（野村・漆山、1992）。またクワガタムシに似たツノクロツヤムシ（図 3）の幼虫発音器についても報告した（野村、1994）。これらの昆虫は朽ちた倒木の中にトンネルを掘ってすんでおり、互いの、あるいは成虫とのコミュニケーションのため、発音すると考えられている。これらの幼虫には他の甲虫と同じく、前・中・後脚の 3 対の脚があるが、後脚が特殊な形に発達し、中脚の基部外側を摩擦することによって発音する。こすり合わせる部分には硬く丈夫な顆粒ややすりのような構造が発達し、その形状は種ごとに異なっている（図 4）。

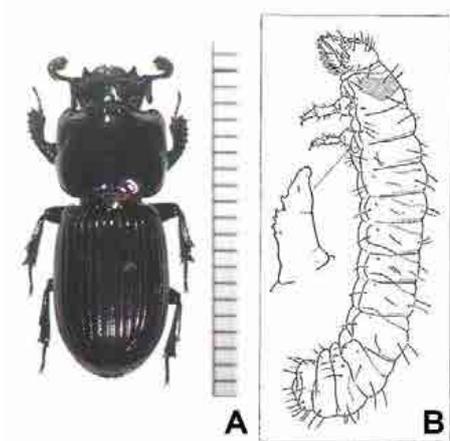


図 3 ツノクロツヤムシ（クロツヤムシ科）。A：大分県産成虫；B：幼虫のイラスト（宮武，1959 から転載）。

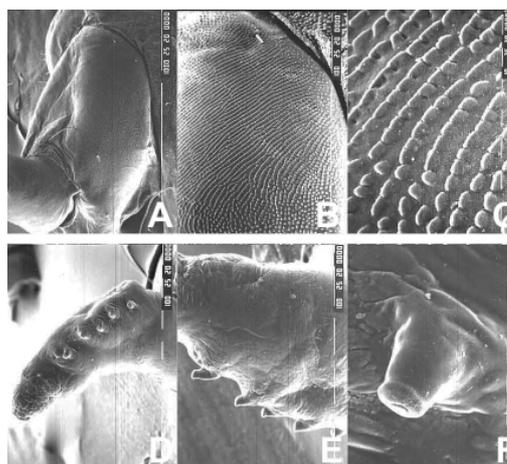


図 4 ツノクロツヤムシ幼虫発音器の SEM 写真（すべて野村，1994 原図から作成）。A～C：中脚外側；D～F：後脚内側。

3. バイオミメティクスへの展開

私がそれまでに行ったSEM観察はそれだけだったら、昆虫分類学の域を一步も出るものではなかった。しかし2010年のシンポジウムに出席し、その時にお話し下さった北海道大学名誉教授、下澤橋夫先生とやり取りするうちに違った景色が見えてきた。

下澤先生はある日、北大構内で手に入れたエゾハルゼミ(図5A)の翅をSEM観察し、透明な翅膜の表面に、微細な突起が多数、しかもきわめて整然と配列されていることを発見し、写真を撮影された(図5B)。

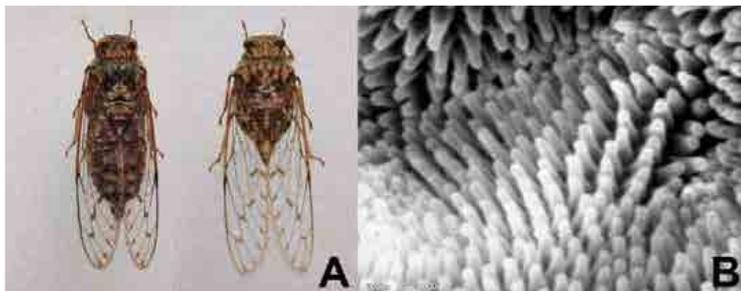


図5 エゾハルゼミとその翅膜上ナノパイル。A:成虫(佐賀県産)左♂右♀;翅膜上ナノパイルのSEM写真(下澤橋夫撮影)。

筆者がエゾハルゼミの翅を独自に観察したところ、一個の突起は、高さ約200ナノメートル(nm)、直径50~100nmであり、いわゆる「ナノパイル」という構造である。しかしこの構造は相当に微細な構造であるので、相当にSEMの倍率を上げないと、そこに突起があることさえ認識できない。このような構造は実はすでに知られているものであった、といっても、もともとは蛾の複眼表面で見つかったために「モスアイ」と呼ばれている。個々の突起は「ナノパイル」あるいは「ナノニップル」と呼ばれている。「ナノ~」は言うまでもなく長さの単位であるが、「パイル」は杭(くい)状の構造、「ニップル」は乳頭状の構造を意味する。

モスアイの機能はすでに知られており、自動車のフロントガラスのように雨滴をはじいて見る機能を補助する「撥水」の役割と、光の反射を抑えてコウモリなどの外敵に見つかりにくくする「無反射」の役割があると考えられている。下澤先生が見出されたエゾハルゼミ翅のモスアイもやはり、撥水と無反射の機能を兼ね備えていると考えられた。この構造はどうか、さらに別の機能も備えているようであり、下澤先生と浜松医科大学の針山孝彦教授が研究を進めている。

セミの翅にモスアイ構造があるなど、私はこれまで一切知らなかったし、その精緻な構造とセミの生態との精妙な関係に興味をひかれたので、自分でも見てみることにした。博物館の標本資料を少し拝借して6種ほどのセミをSEM観察してみた。見たい昆虫の標本がすぐ出てくるところが博物館の偉いところで、翅の透明なミンミンゼミ、ツクツクボウシ、エゾハルゼミとフェアブル展の準備で手に入れた南仏産のトネリコゼミ(*Cicada orni*)、そして翅が不透明なアブラゼミとニイニイゼミが準備できた。

SEM観察の結果、どの種にもやはりナノパイルが見出された。しかもその形や配列の状況はセミの種ごとに違っていた(図6)。そして透明な翅膜と不透明なそれとではかなり構造が違うことが分かった。つまりナノパイルのサイズや形がかなり異なるのである。透明な翅をもつ種ではナノパイルは非常に規則的な棒状で、おおよそ100~300nmの間隔で分布している。それに比べ、不透明な翅ではナノパイルは不規則な形をしており、おおよそ500~1000nmの間隔で生じている。すなわち透明な翅ではサイズが小さく整然としており、不透明な翅ではサイズが大きく、不規則である。

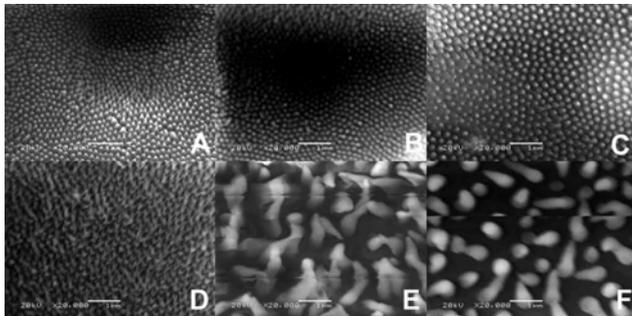


図6 セミ6種の翅膜上ナノパイルSEM写真 (倍率はすべて2万倍)。A:エソハルゼミ (山梨県産); B:トネリコゼミ (南フランス産); C:ツクツクボウシ (屋久島産); D:ミンミンゼミ (東京都産); E:アブラゼミ (東京都産); F:ニイニイゼミ (東京都産)。スケール (1 μ m = 1,000 nm) は各写真中央下。

このような観察結果が果たしてバイオメティクスの分野へ何らかの作用を与えられるのかどうかは現段階ではわからない。しかし昆虫学サイドにあるものとしては、必要な情報を求められたときに出すことができないとなると大変恥ずかしい。近い将来必ずやってくるであろうバイオメティクスの急展開に備えて、その基礎となる知識や情報を整備しておくことこそ、昆虫学のみならず広く生物多様性に携わる者の務めであるように思う。いつまでも昆虫学の中だけで通じる言葉、昆虫学の中だけで流れる情報の中でだけやっていたのでは将来的な展望はない。

4. 未来の科学にいかにか寄与するか？

昆虫の歴史は人類などよりもはるかに長く、約3.5億年前の古生代デボン紀末までさかのぼる。どのような形態を身につければ、その後の気候変動や地球的規模の危機を乗り越えて生き残れるかという知恵が詰まっているといっても過言ではない。昆虫たちは生き残る知恵を事前知っていたわけではなく、遺伝的な変異の中から、適したものがたまたま生き残った、その他のものは死滅した、という試行錯誤を絶え間なく、数限りなく繰り返した結果が現在わたしたちの眼前にあるということだ。私たち昆虫研究者は、そのきわめて多様な昆虫形態の中から、ある形態を抽出し、それがいかに昆虫の生存に役立ってきたかを解明し、わたしたちが今手にしている科学に寄与できるように、次の段階に手渡さなければならない。

現在、バイオメティクス研究会あるいはそれ以外のさまざまな研究者団体あるいは個々の研究者が、昆虫の形態や機能を、テクノロジーに活かすことができないか、多くの試みを行っている。具体的には、構造色、吸着(粘着)機構、撥水、無反射等々であるが、何が成功し、何が失敗するのはあらかじめわかるものではない。それはまさに昆虫自

身が営々と続けてきたような試行錯誤の積み重ねによってしか、結果にたどり着かないのではないだろうか。

そのような局面に、正確で、十分な、そして新しい発想が可能となるような昆虫形態に関するデータを供給するのが昆虫研究者の役割ではないかと私は考える。私たちの取り組みでは、具体的には、SEMのようなより現代的な手段を用いて昆虫形態に関するデータ、特に画像データを集積してデータベースを構築する。それによって昆虫形態にヒントを求める、特に工学関係の人々に必要十分なデータを提供できるようにすることを企図している。それだけではなく、近年発展著しい情報科学のノウハウを生かして、これまで誰にもできなかった発想を可能にするようなデータベースの構築を目指している。このような取り組みによって、これまで昆虫学界の中だけで流通しがちであった情報を外へ向け、昆虫の形態研究がものづくりに寄与するチャンスが生まれるのではないだろうか。

末筆ながら、バイオメティクス研究会で日頃より多大なご指導をいただいている、東北大学の山村政嗣先生、札幌の下澤橋夫先生、浜松医大の針山孝彦先生に厚く感謝の意を表したい。

References :

- [1] 宮武睦夫, 1959. ツノクロツヤムシの生活. 講談社刊「日本昆虫記IV甲虫の生活」, pp. 183-234.
- [2] 野村周平・漆山誠一, 1992. クワガタムシ幼虫発音器の走査型電子顕微鏡による観察. 新築紫の昆虫, 筑紫昆虫同好会, 福岡, (1):13-28.
- [3] 野村周平, 1994. ツノクロツヤムシ幼虫発音器の走査型電子顕微鏡による観察. PULEX, 日本昆虫学会九州支部, 福岡, (83): 441.

フラクタル日除け —生物から学ぶもの—

京都大学大学院 人間・環境学研究科 酒井敏

1. すべては「物まね」から始まる

世の中の職業の中で、最も創造性、独創性を要求される芸術家も、多くの場合、先ずは先人のコピーをすることから修行を始める。他人の影響を受けずに独力で素晴らしい作品を作るのは、よほどの才能と幸運に恵まれなければできないであろう。そういう意味で、やはりビートルズは天才である。

一方、科学の世界では、まず基本的な論理を学び、それを応用する形で世界を広げてゆく。とは言うものの、基本的論理に関しては、先人の知識を「まね」するわけで、「物まね」から始めるという意味では、同じようなものかもしれない。ただし、同じ物まねでも、まねの仕方はずいぶん違って、芸術家の場合は表現された「結果」をまねすることから始めるのに対して、科学の場合には根本的な考え方をまねするところから始めるのが基本である。

こう書くともっともらしいが、実は、そう単純ではない。特に自然科学の場合、相手は地球や生物などで、彼らは高度な芸術家である。人間の論理だけで、彼らの真似はそう簡単にはできない。科学である以上、根本的論理を捨てるわけにはいかないが、時には芸術家的センスで、彼らの物まねをしてみても、あとから理屈をつけることもしばしばである。こういう場合でも、論文にするときには、あたかも最初から理屈がわかっていたような書きぶりを書くから、一般には上記のような演繹的アプローチが正攻法であるかのような印象を与えてしまう。しかし、自然にとって、そんなことはどうでもよいのだ。自然界はもともと「結果オー

ライ」であって、最初から理屈があるわけではないのだから。

2. ヒートアイランドの大きな誤解

2000年頃から、ヒートアイランドが社会問題化し、「ヒートアイランド」という言葉は、夏の季語になってしまった。ここでの論調は決まって「人間活動により自然が失われて環境が悪化した」というものである。しかし、この「人間活動＝悪」という単純な論調には正直なところ強い違和感を感じる。そもそも、生物は周囲の環境を変えながら生きていくもので、生物の生き方に「正解」や「正しい道」があるわけではない。自らの影響で環境が変わってしまうことが不都合なら、そうならないように対処するか、そうなくてもよいように適応するかのどちらかである。どちらでも構わないが、最もうまく対処したものが生き残るだけである。これは、人類も例外ではない。人類が他の生物と違うのは、試行錯誤だけに頼って最適解を探るのではなく、多少の論理的予測や、他の生物や自然のしくみの真似をすることで、少し「賢く」対処できるという点である。そのためには、当然ながら、現在の状態を正しく認識する必要がある。

この点で、ヒートアイランド問題に関しては、大きな誤解がある。実は、昼間の気温は、都市部も郊外もほとんど差がないのである。都市部の気温が郊外よりも高くなる現象そのものは、昔からよく知られている現象であるが、それは昼間ではなく夜の現象である（図1）。そして、それが

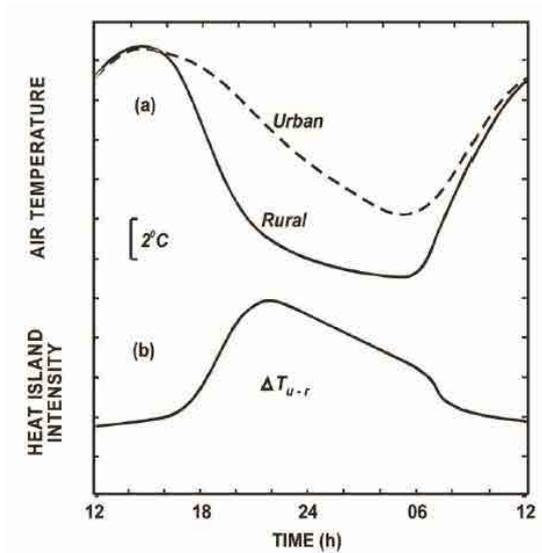


図1 都市部と郊外の気温の日変化。都市部と郊外の気温の差がヒートアイランド強度 (Heat Island Intensity) で、夜間に大きな値を持つが、昼間はほとんど0である。[1]

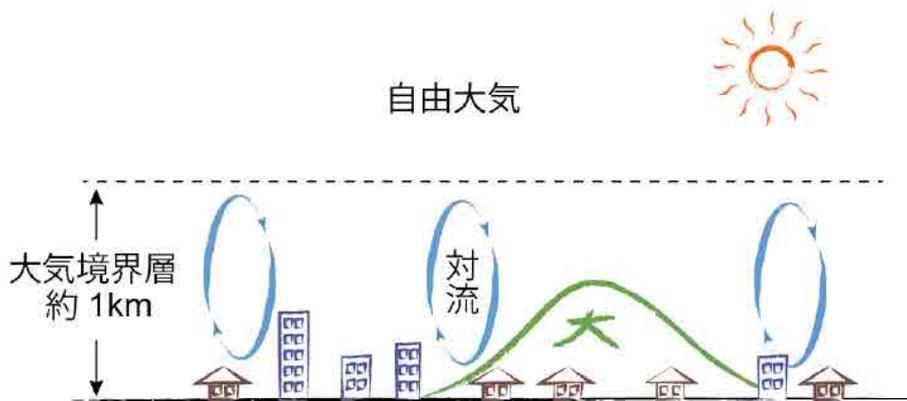


図2 昼間の大気の状態の模式図。地表面から約1kmの高さまでの大気境界層は、太陽によって温められた空気が、強い対流を起こしており、よくかきまぜられている。

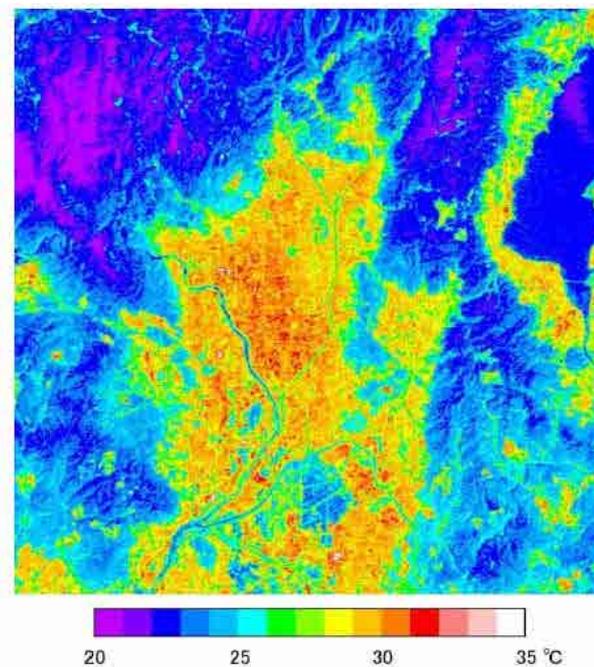
顕著に現れるのは、夏ではなく空気が澄んで放射冷却が効く冬の夜である。これは今も基本的には変わらない。

昼間に都市部の気温が郊外とほぼ同じになるのは、気象学的な理由がある。昼間は都市部であろうと郊外であろうと、強い日射によって地表面が熱せられ、強い対流が起こる。この対流の高さは約1kmで、この部分を大気境界層と呼ぶ(図2)。これより上は、自由大気と呼ばれ、地表面の影響をあまり受けない(1日の温度変化がない)領域である。昼間の大気境界層の中は、この対流によってよくかきまぜられ、温度差(正確には温位差)はほぼ1℃以内とな

る。したがって、地表付近の気温が変わるためには1kmの厚さのある大気境界層全体の温度が変わらなければならない。そして、大気境界層内にはそれなりに風が吹いているので、都市部から郊外までほとんど温度が変わらない状態になるのである。

これに対して夜間は、この対流が起こらず、大気が地表面付近で安定成層をするため、地表面の局所的な特性が大きく影響することになる。都市部ではアスファルトやコンクリート等、熱容量の大きな素材で地表面がおおわれているため、夜間にもそれらの温度が下がりにくく、その上の大

図3 京都市周辺のLANDSATの熱赤
外画像。撮影日時：2000年8月25
日午前10時25分。



気もその影響を受けて温度が下がりにくい。これが、昔から言われていた「ヒートアイランド現象」である。

では、昼間の都市部が暑いというのは間違いなのか、というと、それも違う。図3はLANDSATで測定した都市部(京都)の地表面温度である。周囲の郊外と比べて明らかに温度が高いことがわかる。ここで、注意していただきたいのは、これは「地表面温度」であって、「気温」ではないことである。地表面の温度が高ければ、その上の大気温度だって高くなるだろう、と想像してしまいがちである。しかし、昼間に関しては、前述のとおり強い対流のため、地表付近の気温も上空1kmの気温(温位)も同じになってしまい、地表面のごく近くだけが大きく温度が異なる。その境目は、地表面から1cm程度のところにある。つまり、地表面の温度の影響を受ける大気は、地上1cm程度の範囲に限られているのである。

地表面温度が高くなると、何が起るのかというと、地表面から強い輻射熱が発せられることになる。路面の温度が気温より30℃程度高くなったとすると、路面温度が気温

に等しい時に比べて、その上に立っている人は100W程度余分に熱を受け取る計算になる。100Wと言ってもピンとこないかもしれないが、これは使い捨てカイロ100枚分に相当する。これで、暑くないわけではない。つまり、昼間のヒートアイランドは気温が問題なのではなくて、地表面温度が問題なのだ。

ただ、困ったことに輻射熱の正体である赤外線が目に見えないために、気温は同じでも、輻射熱が強いため暑いのだと説明しても、なかなかわかってもらえない。さんざん説明した挙句に「で結局、気温はどのくらい変わるんですか?」という質問を最後に受けることになる。

さらに困ったことに、昼間の地表面温度が郊外のそれより非常に高い、という事実は、素直に考えて、昔から言われている夜のヒートアイランドの説明と矛盾する。都市部にはアスファルトやコンクリートなどの熱容量の大きなものがある、夜、温度が下がりにくいので、都市部が郊外に比べて暑くなる、というのが夜間のヒートアイランドの説明である。だとすれば、昼間の都市部は大きな熱容量のた

めに、温度が上がりやすく、逆にクールアイランドになるはずだ。ところが、昼間の地表温度は郊外に比べて明らかに熱い。そして、その地表とは熱容量が大きいはずのアスファルトやコンクリートそのものである。

このような事実が明らかになったのは、人工衛星から地表温度が測定できるようになった1980年ころからである。そのころから、ヒートアイランドの説明は歯切れが悪くなり「ヒートアイランド現象は、様々な要因が複雑に絡み合って起こる」などという説明がなされるようになってしまった。これは、ほとんど「何もわからない」と言っているに等しい。こんな状態では、都市部で昼間に気温が高いわけではない、と言ってみたとこで、説得力に乏しい。

3. 都市部の地表温度はなぜ高いのか？

矛盾があるということは、何かがおかしい。いろいろ調べてみても、昔の夜のヒートアイランドの説明は、間違っているようには見えない。夜に関しては、この説明が観測事実とよく合う。一方、昼間の地表温度が高い、というのも疑いようのない事実である。しかし、だからと言って「都市部の熱容量が小さい」というのは、ちょっと飛躍がある。少なくとも、アスファルトやコンクリートが素材として熱容量が大きいことも間違いない。ということは、熱容量が大きくても、温度が高くなってしまふ理由があるに違いない。

一見、もっともらしく、よくある説明としては、都市部で人間が熱を出すからだ、というものがある。しかし、人間が出している熱量（人口排熱）は太陽熱に比べると通常一桁以上小さい。また、エアコンの室外機より、人間が熱を出しているわけではない道路のアスファルトのほうがはるかに高温である。

もう一つの説明として、都市部には植物が少なく、水を蒸発させていないからだ、というものもある。これも多くの人が信じている説明だが、太陽からやってくる熱量は半端じゃない。夏の晴れた日なら1日30MJ/m²くらいの熱量がやってくる。この熱量で水を蒸発させると、1日15mmの水が蒸発することになる。年間降水量を1500mmとすれば、1日平均の降水量は5mmである。これを全部蒸発させてしまったら、川が干上がってしまうので、半分程度しか使えないと考えると、水の蒸発熱が地表温度に決定的に効いているとは考えにくい。

さらに、もし、そんなに水を蒸発させているのであれば、晴れた日には朝よりも夕方のほうがかなり大気中の水蒸気量が高くなっているはずだが、そんな傾向が顕著にみられるわけでもない。

そんなことを考えていたある日、ある事実気が付いた。直射日光下に置かれた車は、触れないくらいに熱くなるのに、ミニカーは熱くならないのだ（図4）。実は、これは私が発見したものではない。伝熱工学の教科書にちゃんと書いてある。伝熱工学を勉強しなくても、ランダウ・リフ

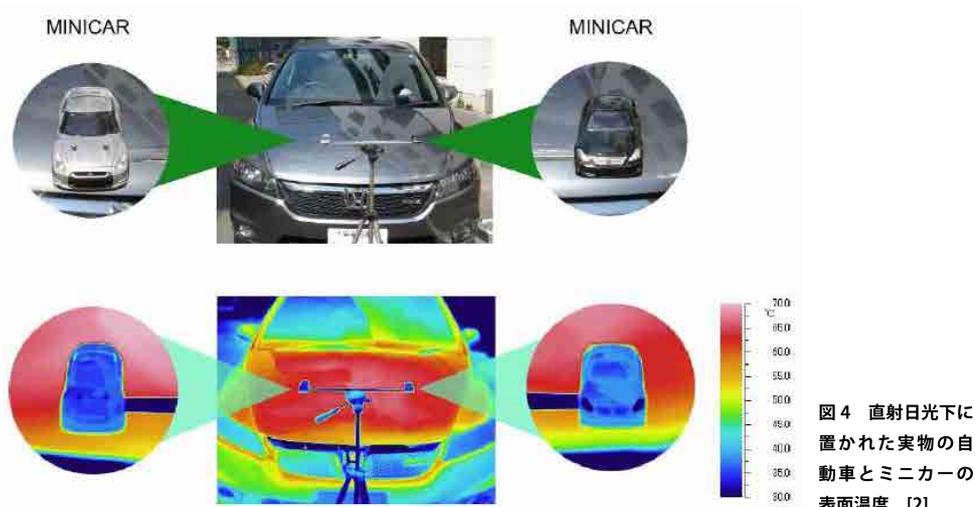
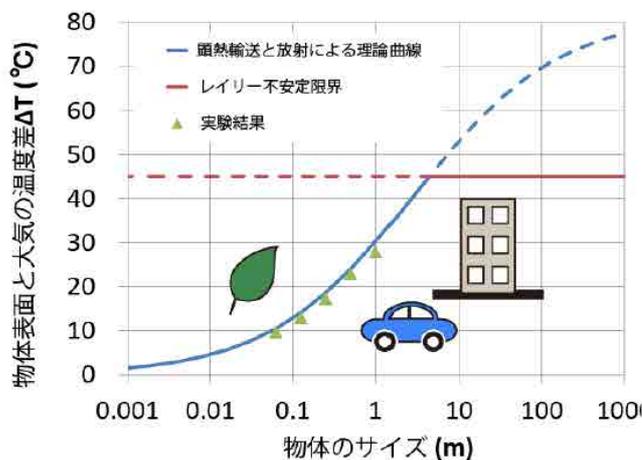


図4 直射日光下に置かれた実物の自動車とミニカーの表面温度。[2]

図5 物体のサイズと表面温度の関係。物体のサイズが大きくなるにしたがって、表面と気温との温度差も大きくなるが、ある程度の温度差(数十°C)を超えると、熱境界層が不安定になって、それ以上温度差はつかなくなる。1cm から1m 位のところで、急激に温度差が大きくなる。



シツクの流体力学をかじったことがある人ならば、次元解析から即座にこの法則を導き出すことができる。しかし、である。精密にコントロールされた風洞実験ならばともかく、「さまざまな要因が複雑に絡み合った」屋外で、こんな単純な話が成り立つとは、全く想像だにしていなかった。さらに驚いたのは、この実験結果が極めてロバストであるということである。少々雲が出ようが、風が吹こうが、定性的にはほぼ間違いなくこのような結果になる。これは、極めて重要なことである。精密に条件をコントロールしなければ実現しないような法則は、自然界の中ではほとんど意味をなさないからである。いいかげんな実験でも、常に成り立つ法則が重要なのだ。

ミニカーの大きさは、多くの植物の葉っぱのサイズに近い。一方、都会の屋外にある人工物は小抵車よりも大きい。理論的に計算すると、このサイズの違いが、表面温度を大きく左右する(図5)。そして、この大気との温度差は、物体の表面から数mmの厚さの熱境界層内で起こる。

また、図3のLANDSATの画像から、表面温度のヒストグラムをとってみると、きれいな二山構造が見える(図6)。つまり、郊外と都市部では、典型的な表面温度がだいたい決まっていて、その中間的な温度を持つ地表面はほとんどない。これは、自然の葉っぱが数cmの大きさを持つのに対して、屋外人工物の表面は多くの場合、1mよりも大きく数十cm程度の大きさを持つものがほとんどないということを見ると、自然に理解できる。

つまり、都会の地表面温度が高いのは、人工排熱のためでも水の蒸発が少ないためでもなく、表面の「大きさ」が問題だったのだ。

4. シェルピンスキー四面体

都会が暑いのは、その表面が大きな面で覆われていることが問題であることがわかった。それならば、その表面を小さくちぎってしまえばよい。しかし、それをタイルのようにきれいに並べてしまったら、元の木阿弥である。小さなものが熱くならないのは、空気に熱を逃がすからで、そのすぐ下流に入ってしまうと、小さくした御利益ないだろう。では、どのように、小さくちぎった小片を配置すればよいのだろうか？

そんなことを考えていたある日、数学の先生からフラクタル図形の一つであるシェルピンスキー四面体(図7)のフラクタル次元が2であることを聞いた。その時、私は非整数の実数次元を持つ図形がフラクタルだと思っていたので、「そんなフラクタルじゃないじゃん」と言ってしまった。しかし、目の前のシェルピンスキー四面体は、どう見ても典型的なフラクタル図形である。30年前、数学者は非整数の次元を定義して、世の中の人々をビックリさせたと思ったら、今度は整数次元のフラクタル図形を持ってきた。「まあ、数学者は暇なこと考えるねえ。」というのが、正直な感想であった。(注:シェルピンスキー四面体自体は、100年位前の数学者シェルピンスキーが考えたもので、フ

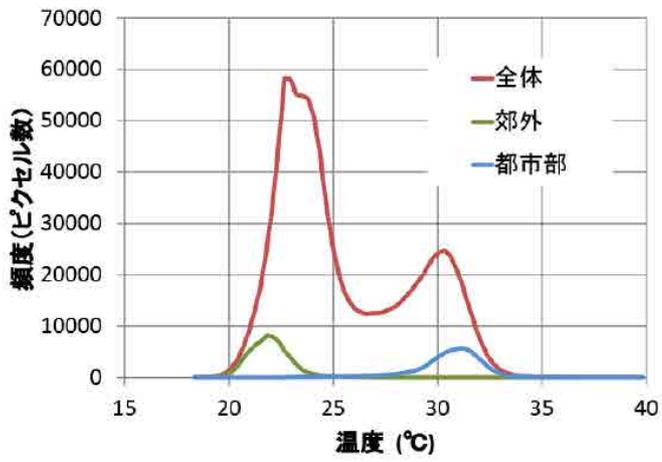


図6 衛星画像(図3)のヒストグラム。全体で見ると、明瞭な二山構造がある。都市部と郊外を部分的にヒストグラムをとると、それぞれ、一つずつの山に対応していることがわかる。

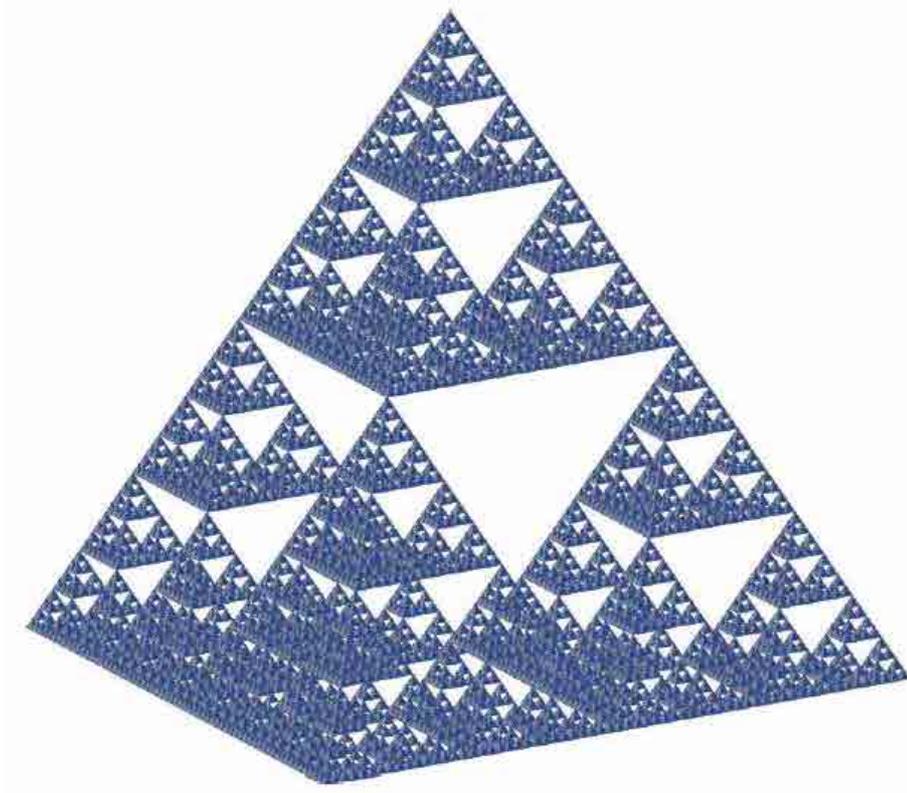


図7 シェルピンスキー四面体

ラクタルという概念ができる前から知られている。)

その晩、昼間の話は忘れて、布団の中で都市の表面を小さくちぎってばら蒔く方法を考えていた。「要するに、2次元の平面を小さくちぎって、3次元空間にどうやってばら蒔くか、という問題だよ」とつぶやいた瞬間、昼間の話がよみがえった。シェルピンスキー四面体は3次元空間を占めているのにもかかわらず、2次元である。まさに、これが求めていたものではないのか？

次の朝、大学に向かう途中で画材屋に寄り、黒い紙を買ってきてシェルピンスキー四面体を作ってみた。それと同じ大きさの通常の四面体を並べて直射日光下に置き、サーモカメラで温度を測ってみた。するとなんと、シェルピンスキー四面体は温度がかなり低いではないか。

これをもっと大がかりに実験してみたものが、図8である。シェルピンスキー四面体を並べた「フラクタル日除け」と、通常のトタン屋根を4畳半くらいの大きさに作ってみて、その下で昼寝ができるか、という実験である。シェルピンスキー四面体は特定の方向から見ると、穴が塞がって、100%光を遮ることができる。その方向を正午の太陽の方向に向けて四面体を並べてある。図8の写真は夏の正午の写真で、フラクタル日除けの下もほぼ100%影になっていることがわかる。この時、太陽の光を吸収している屋根の部分の温度がまるで違う。トタン屋根はとても熱いので、そこから輻射熱を出し、その下で昼寝をしても陰にはなっていないでもジリジリ暑い。それに対して、フラクタル日除けは、それ自体の温度が上がらないので、そのような輻射熱を感じることはなく、風通しもよくて気持ちが良い。

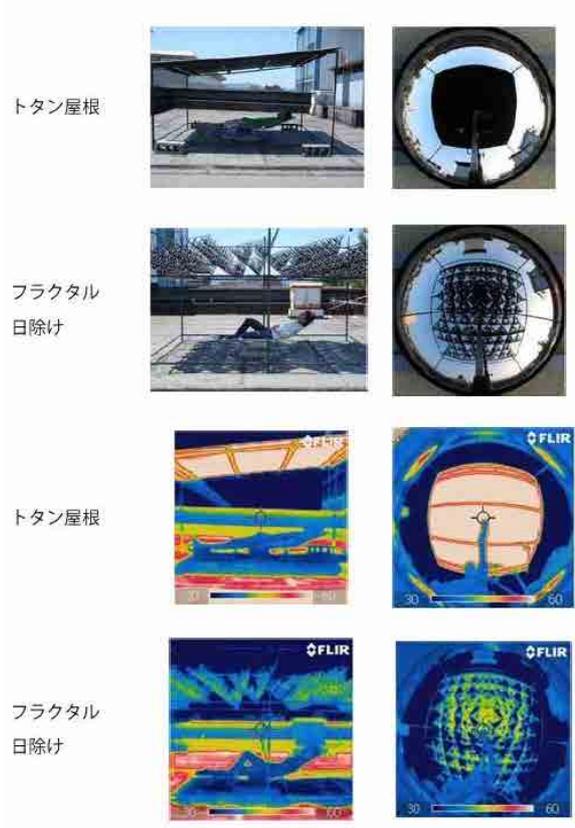
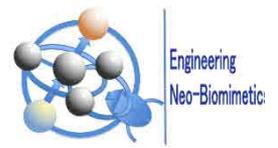


図8 直射日光下におけるトタン屋根とフラクタル日除けの温度比較



国内外研究動向紹介

産学連携グループ：（株）LIXIL 井須 紀文
B01-3 班：産業技術総合研究所 穂積 篤

「日本化学会第 93 回春季年会」を終えて

3月23~25日に立命館大学びわこ・くさつキャンパスで開催された日本化学会第93回春季年会に参加した。アドバンス・テクノロジー・プログラム（ATP）の中の「自己組織化技術、融合マテリアルが支えるバイオミメティクス研究の最前線」を中心に聴講した。下村新学術領域に関係するセッションは、23日の「生物から何を学ぶか」と25日の「持続可能性に向けて」の2つで、前者は10件（基調講演1件、招待講演1件、依頼講演8件）、後者は4件（招待講演4件）、計14件の講演があり活発な質疑、討論が行われた。

3月23日

- ・「生物に学ばざれば工学は科学に非ず」下澤楯夫氏（北大名誉教授）

イカの巨大神経軸索の研究をベースにオットーシュミットにより開発されたシュミットリガー回路（陰極結合三極管回路）は、三極真空管の開発（1906年）から32年後、アメンボの表面構造を模倣したゴアテックス（防水透湿性素材）は、YoungやLaplaceの研究から200年も後に開発されたという。「工学は生物の技術（生きる仕組み）を全く別の回り道をして再発見したに過ぎない」、「工学に合成理論はない、生物は1億年前にその技術を確立していた」というコメントに、改めて生物学を工学に取り入れること（生物規範工学）の重要性を痛感した。

- ・「自己組織化ナノ電子機能とフレキシブル医療デバイスへの応用」関谷毅氏（東大院）

自己組織化単分子膜をゲート酸化膜に利用した多チャンネルな生体用フレキシブル電子デバイスの開発とその有効性についての講演が行われた。フレキシブル電子デバイス（温度センサー、圧力センサー、酸素濃度センサー）の柔軟性を利用して、医療用カテーテルや人体内外に装着することで様々な生体信号（例えば、血管中の酸素濃度、心筋シグナル、腫瘍や血管の圧力等）の測定が可能になった。

- ・「やわらかいロボット」山口智彦氏（産総研）

産総研で進められているやわらかいロボット開発のコンセプトについての講演が行われた。やわらかいロボットの開発には、群（群れ）機能、記憶演算、通信、アクチュエーター、センシング、エネルギー変換、材料のしなやかさ等、様々な要素が必要である。コアテクノロジーとなるソフトアクチュエーターは、化学エネルギー駆動なので静音、サイズに比例した

力が出るので軽量化が可能、壊れても環境に優しいというメリットがあるという。

- ・「ウイルスの自己集合に学んだペプチド材料の構築」松浦和則氏（鳥取大院）

合成化学によって、ウイルスの球殻構造をいかに構築するかについて講演が行われた。球殻構造構築には自己集合と対称性が鍵となる。ウイルス由来の短鎖合成ペプチド（ β -Annulus）によるナノカプセルの作成事例や、そのナノ空間への DNA やタンパク質の導入技術、着せ替え（外側の高機能化）技術の紹介があった。

- ・「自己組織化ペプチドを用いるナノファイバーの構築」三原久和氏（東工大院）

β シートペプチドを用いたナノファイバーの合成手法とその応用について講演が行われた。 β シートペプチドのデザインにより、捩じれたファイバー、テープ状ファイバー、ナノチューブができるという。ナノファイバー表面の機能化（金ナノ粒子やタンパク質の選択析出）、細胞の足場材料への応用技術が紹介された。

- ・「昆虫の脚の付着機能：発生生物学的アプローチ」木村賢一氏（北教大札幌）

昆虫の脚には Hair 状パット、Smooth 状パットの 2 種類あり、研究対象の黄色ショウジョウバエの脚は、毛管現象や分泌液の粘性により接着するウエットタイプのフットパットを持つ。そのフットパットの形成過程におけるアクチンの役割を発生生物学的アプローチにより解析し、その形成メカニズムを明らかにした。

- ・「自励振動高分子ゲルの創製とバイオメテックス材料への展開」吉田亮氏（東大院）

自励振動高分子ゲルを用いた、アクチュエーター、輸送媒体、機能性流体への応用についての講演があった。チューブ状の自励振動高分子ゲル内で CO₂ ガスやラテックスビーズの輸送事例、ポリマーブラシによるゲル表面の改質技術等が紹介された。

3月25日

- ・「光で駆動される界面膜の配向作用と形態発現」関 隆広氏（名大院工）

光による液晶組織状態や配向のスイッチング、構造組織化に関して、グラウトを用いた高度な高分子配向制御など最新の研究成果をはじめ、光によって誘起されるフォトメカニカル効果、光配向、相転移、相分離、移動などの現象とその工学的な応用に関するトピックスが紹介された。

- ・「ソフト界面の濡れ、摩擦特性の精密制御」高原 淳氏（JST ERATO、九大先導研）

材料表面に固定化した重合開始材を起点に、高分子鎖を成長させたポリマーブラシは、従来の手法に比べて表面のポリマー密度が高く、強固に結合されているため耐久性が高いという特徴を持つ。ポリマーの分子設計による超親水、トライポロジー、機能性ナノ粒子など高機能化に関する研究成果や産業応用についての最新トピックスの紹介が行われた。

- ・「可逆的犠牲結合による多機能ゲルの設計と創製－高靱性・自己修復・形状記憶－」龔 剣

萍氏（北大院）

ハイドロゲルは生体親和性、極低摩擦性など固体材料にはないユニークな機能を持つが、脆くて壊れやすい欠点もつ。その欠点を克服するために犠牲結合を導入したダブルネットワークゲルの創製についての紹介が行われた。様々な犠牲結合構造をデザインすることで高靱性に加え高機能化を実現しており、物理結合を可逆的な犠牲結合として導入した形状記憶性を示すゲルなどの最新研究成果の紹介も行われた。

産学連携を目指したオープンセッションであるA T Pの締めくくりに相応しい最後のトピックス「持続可能性に向けて」では、仁連孝昭氏（アスクネイチャー・ジャパン）、馬奈木俊介氏（東北大院環境）、井須紀文氏（LIXIL）、佐野健三氏（積水インテグレートリサーチ）の4件の講演が行われ、自然科学・工学がどのように社会に還元されているかの現状と将来の社会像についての議論が繰り広げられた。ただ、学会最終日の午後のセッションであったためか、これから生物規範工学の概念を担って欲しい学生の姿がやや少なくなった事が残念であった。

産学連携グループ：（株）日立製作所 日立研究所
宮内 昭浩

13-1 バイオミメティクス研究会レポート

2013年6月20日に13-1バイオミメティクス研究会は「バイオミメティクスの国際標準化」をテーマに産業技術総合研究所（産総研）の臨海副都心センターで講演会を開催した。今回はISO/TC266 バイオミメティクス国内審議委員会との共催であった。

プログラムは、第一部はISO Biomimetics TC266 国際委員会の報告、第二部は「知識基盤の構築と産学連携にむけて」をテーマに、産官からの講演頂く二部構成であった。

バイオミメティクス研究会代表の東北大、下村正嗣教授からのご挨拶の後、2013年5月22、23日にフランスのパリ郊外にあるサンドニ市で開催された第2回 ISO Biomimetics TC266 国際委員会の状況が報告された。ISO Biomimetics TC266 国際委員会には四つのワーキンググループ（WG）が設けられており、WG1 に関しては、産総研ナノテクノロジー戦略室の関谷瑞木氏が状況を報告した。

WG1 は、“Terminology and methodology”を対象としている。即ち、「何を標準化するか？」が対象であり、バイオミメティクスとは何か、の議論が重要となっている。幹事国はドイツで、キーワードは sustainability になっている。実務ベースでは、例えば韓国が接触角の測定に関する標準化を提案準備中であり、正式に取り上げられれば韓国政府の支援が開始されるであろう、とのことであった。

WG2 は“Biomimetic materials, structures and components”を対象としており、物質・材料研究機構の細田奈麻絵氏から状況が報告された。議長にベルギーのホルナート氏、プロジェクトリーダーに細田氏が選出された段階で、本格的な議論は次回以降という状況である。ただし、既に、バイオミメティクス製品としてのガイドラインを示そうとしており、ポイントは、製品の開発過程において生物的なアナロジーとその抽象化の工程が含まれているか、である。単純に「生物からヒントを得た」ではなく、製品化に至った開発過程において、所定の思考ルートを経たか否かが、バイオミメティクス製品としての認定基準になる可能性があり、企業としては重要視すべき議論がこれから開始されるであろう。

WG3 は“Biomimetic structure optimization”が対象で、産総研ナノテクノロジー戦略室の阿多誠文氏が状況を報告した。このWG では、既にドイツ技術者協会（VDI）が作成したガイドラインがたたき台となり、2011年3月の「ISO BIONIK」で最適化アルゴリズムの標準化が検討され、現在は、学術的な視点からワーキングドラフトの校正作業が進められて

いる。

WG4 は日本が新たに提案した WG で、日本が幹事国となった。対象は”Knowledge infrastructure for biomimetics”で、北海道大学情報科学研究科の長谷山美紀教授が報告した。バイオミメティクスでは、生物学、工学の各分野の融合が前提となるため、異なる専門分野で関連する用語の共通化（シソーラス）と相関マップ（オントロジー）の規格化を進めることになる。

第二部では、始めに「ビッグデータ時代の新たな価値創造」と題し、JST シニアフェローの奥和田久美氏のご講演があった。ビッグデータは最近、良く耳にする言葉であるが、科学や大学教育を大きく変貌させるであろう、その見えざる革新的動きに言及され、大変、示唆に富んだご講演であった。特に、これまでの科学が、「観察」から「解明」へと進み、「シミュレーション」の段階に来ているが、桁違いの知識を迅速に得られる現代は「第4のパラダイム」と呼べる次元に移行しており、科学の世界に変革を起こしつつある点は、参加者一同、大変、刺激を受けた。また、膨大な知識を誰もが迅速に検索できる現在においては、アカデミアの立ち位置が変革を余儀なくされ、洞察できる能力が次のアカデミアにとって重要になる点なども興味深い内容であった。既に米 NSF での研究評価基準が本年1月に改定され、「知的メリット」と「より幅広いインパクト」が等しく評価されることとなった点も、時代の変革点を予感させる。

次いで、JST 情報企画部の恒松直幸氏が「異分野融合を支える知識情報基盤」と題し、異分野融合に適した検索とは何か、シソーラスの構成、JST が運用している J-GLOBE の使い方などが紹介された。特にオントロジーの構成の難しさが述べられた。

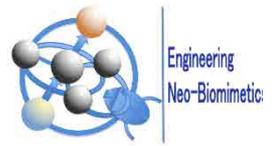
また、(株)積水インテグレートドリサーチの佐野健三氏から「産業界との連携」が講演され、今年で12回目を迎える「自然に学ぶものづくり研究助成プログラム」の紹介や産と学の使命の違いから生じる連携の難しさが述べられた。

最後に帝人(株)の平坂雅男氏が「バイオミメティクスの産業利用促進—政界動向と日本の課題—」と題し、欧州企業のバイオミメティクス製品、特許の状況や人材育成プログラムが紹介された。欧州や中国、韓国はバイオミメティクス分野で産学連携が進み始めており、日本もコンソーシアムの構築が必須な状況であることが述べられた。

((株)日立製作所日立研究所 宮内昭浩)

生物多様性を規範とする革新的材料技術

Innovative Materials Engineering Based on Biological Diversity

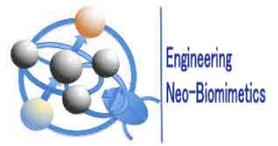


新聞・報道

【新聞・報道】

- 1) 2013年02月27日 日経新聞
2013年2月27日付の日経産業新聞で生物模倣技術関連記事が掲載されました。北大名誉教授の下澤楯夫先生が撮影した写真が紹介されました。
- 2) 2013年03月06日 月刊事業構想4月号
月刊事業構想4月号 巻頭特集「バイオミミクリーは世界を救う。」に石田秀輝先生(C01班)のインタビュー、赤池学先生(総括班評価グループ)の対談と、細田奈麻絵先生(B01-3班)、石井大佑先生(B01-2班)の研究成果、などが紹介されています。
- 3) 2013年03月08日「ライブ北海道」
2013年3月6日(水)18:40放送の「ライブ北海道」(NHK 総合札幌)にて、北大総合博物館の特別展示(ネイチャーテクノロジーとライフスタイル展)が紹介されました。北大総合博物館の大原昌宏先生が生放送で、ネイチャーテクノロジー、バイオミメティクスの紹介をしました。
- 4) 2013年03月18日 化学工業日報
2013年3月18日付の化学工業日報で下村政嗣先生の記事が掲載されました。「自己組織化技術、融合材料が支えるバイオミメティクス研究の最前線 生物・化学融合の新学術領域確立へ」
- 5) 2013年04月17日 サイエンスポータル
科学技術振興機構のサイエンスポータルにおいて、SciencePortal 特派員成田優美さんによる、北海道大学総合博物館「バイオミメティクス市民セミナー」の紹介が掲載されています。
- 6) 2013年04月19日 日刊工業新聞
2013年04月19日付の日刊工業新聞で長谷山美紀教授(北海道大学)の記事が掲載されました。「類似画像の検索が”気付き”を与える」
- 7) 2013年04月23日 サイエンスポータル
溝口理一郎先生(A01-1班)の「バイオミメティクス市民セミナー」での公演がサイエンスポータルで紹介されています。「異分野情報を融合する『オントロジー工学』」
- 8) 2013年04月24日 Nikon Today vol.79
2013年04月24日付のNikon Today vol.79(インターネット記事)で下村政嗣先生の記事が掲載されました。「生き物に学ぼう。Lesson 2 生物の構造に学ぶ」

- 9) 2013年05月07日 Newton
2013年5月7日付のNewtonで細田奈麻絵先生の記事が掲載されました。「空気の泡を利用して水中を歩く」
- 10) 2013年05月21日 日刊工業新聞
2013年5月21日付の日刊工業新聞で下村政嗣先生、長谷山美紀先生の記事が掲載されました。「2013年5月22, 23日にパリで開かれる国際標準化機構のバイオメティクス(ISO/TC266)の会合で、バイオメティクスのデータベース(DB)に関する規格づくりの作業部会(WG)設置を、東北大学教授 下村政嗣氏と北海道大学教授 長谷山美紀氏が正式提案する。」
- 11) 2013年05月23日 日科技連ニュース
2013年5月23日付の日科技連ニュースで石田秀輝先生の記事が掲載されました。「地球環境を考えたものづくりのかたち」
- 12) 2013年05月31日 サイエンスポータル
北海道総合博物館で開催された「バイオメティクス市民セミナー」がサイエンスポータルで紹介されています。
- 13) 2013年06月5日 研究開発の俯瞰報告書(2013年)
科学技術振興機構の研究開発戦略センターが発行した「研究開発の俯瞰報告書(2013年)」にバイオメティクスに関する調査が掲載されています。
- 14) 2013年06月17日 日刊工業新聞
2013年6月17日付の日刊工業新聞で下村政嗣先生、長谷山美紀先生の記事が掲載されました。「生物模倣技術、国際標準化へ 日本主導でDB規格作り」
5月22～23日にパリで開催された国際標準化バイオメティクスTC266国際委員会において、日本から提案した「バイオメティクス知的基盤」が採択された。これに伴いデータベースに関する規格作りを行う作業部会が設置された。」



アウトリーチ活動

【アウトリーチ活動報告】

1) バイオミメティクス国際標準化ニュースレター

高分子学会バイオミメティクス研究会は、ISO Biomimetics TC266 の国内審議委員会の機能も持っています。また、「生物規範工学」のミッションの一つに、バイオミメティクス国際標準化を通じて我が国の国際競争力を高める（C01 班、総括班）ことがあり、高分子学会とも連携して国際標準化に関わっています。

2) 「エコで粋!? 自然に学ぶネイチャー・テクノロジーとライフスタイル展」

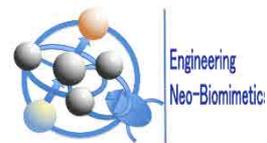
1月22日から北海道大学総合博物館で開催されておりました「エコで粋!? 自然に学ぶネイチャー・テクノロジーとライフスタイル展」と、展示会併設の「光るどろだんごワークショップ」が3月17日に終了しました。4月6日に総合博物館で行われた「バイオミメティクス市民セミナー」の会場において、「光る泥団子」の優秀作品に対し、LIXIL賞、博物館賞ならびに市民セミナー賞の表彰をいたしました。

3) 「役に立つ生き物展」

穂積篤先生（B01-3班）が開発した超はっ水金属が、山梨県にある北杜市オオムラサキセンターにて開催された「役に立つ生き物展」（2013年3月上旬～30日、4月1日～4月21日）に展示されました。試料は当該センターに常設展示されています。

4) 「生物多様性の本箱」～みんながいきものつつながる 100 冊～

石田秀輝先生（C01班）が監修した『すごい自然図鑑』が国連生物多様性の10年日本委員会でおこなわれた「生物多様性の本箱」～みんながいきものつつながる 100冊～に選定されました。



各種案内

BIO Mimetics

バイオミメティクス・市民セミナー

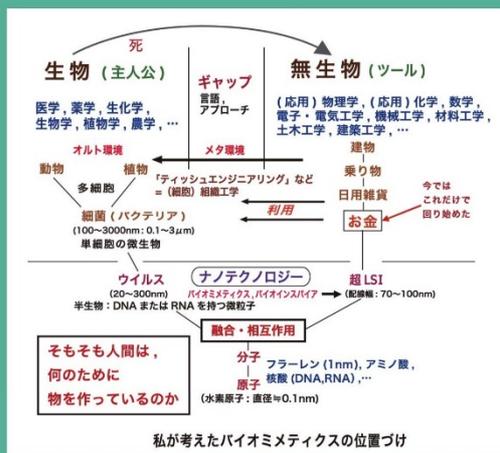
黒川 卓 (北海道大学電子科学研究所 客員教授)

社会に伝えたい バイオミメティクス 2013年 4月 6日 (土)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー
時 間：午後1時30分から午後3時30分



我々はこれまで科学技術の恩恵を受けてきた。しかし生まれた時から社会に備わっている技術は、成り立ちを知らず、何の疑問も持たないで使っている。近くで事故が起こった時、初めてその危険性に気づく。地球環境は人が作る科学技術で破壊が進んでいる。一方、人間以外の生物は自然に適合するように進化してきた。我々は今後、自然を壊すのではなく自然に溶け込む技術を開発しなければならない。ヒントは生物のナノ構造にも隠れている。しかしそれらの価値を理解し、広く伝え、応用することは極めて難しい。バイオミメティクスを含め、持続可能な社会を実現する科学技術を皆様と一緒に考えたい。



主催：北海道大学総合博物館 問合せ先：北海道大学総合博物館
共催：高分子学会バイオミメティクス研究会 TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp
高分子学会北海道支部 060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

BIO Mimetics

バイオミメティクス・市民セミナー



居城 邦治 (北海道大学電子科学研究所 教授)

ナノテクノロジーが拓く バイオミメティクス

2013年5月4日 (土)

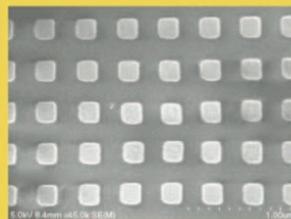
会場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時間：午後1時30分から午後3時30分

ナノテクノロジー (ナノテク) は、ナノメートル (nm、10億分の1メートル) の領域すなわち原子や分子のスケールにおいて、物質を自在に組み立てたり、動かしたりする技術のことです。2001年から世界各国で研究がスタートし、現在最も活発な科学技術研究分野のひとつとなっています。半導体や高性能電池、情報家電や先進医療デバイスなどに使われているだけでなく、白物家電、スポーツ用品、化粧品などにも、ナノテクを活用した製品が多数存在します。ナノテクを駆使することで、生物のナノ構造をまねることができるようになってきました。また、逆にバイオミメティクスの考え方を導入することで、環境にやさしいナノテクが生まれようとしています。ナノテクとバイオミメティクスのこれからについて考えていきます。



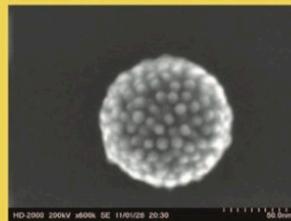
ゲル表面の動的構造色



ナノテクで作製した金ナノパターン



ネオンテトラの動的構造色



ナノ粒子の自己集合

主催：北海道大学総合博物館
協賛：高分子学会バイオミメティクス研究会
高分子学会北海道支部
問合せ先：北海道大学総合博物館
TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

BIO MIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

宮内 昭浩 (株)日立製作所 日立研究所 主管研究員

ナノインプリント技術による 表面構造の模倣とバイオミメティクス

2013年6月1日(土)

会場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時間：午後1時30分から午後3時30分

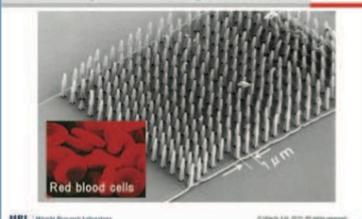


生物の表面形状は、進化の過程において周辺環境に適合した形状を得ていきました。そしてその構造は、タンパク質の自己組織化などによって常温で自然に形成されています。

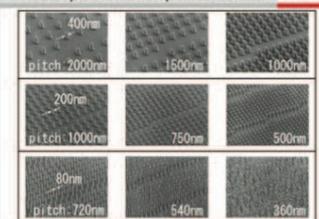
一方、人類は微細な構造を形成するために、半導体の微細加工に代表されるような、特殊なガスや真空雰囲気、さらにはプラズマ状態など、特殊な環境を制御することで所定の微細構造を形成しています。同じような微細構造を形成することに対し、アプローチの仕方が大きく異なっています。今後、生物の形態を人工的に模倣することで、我々が日々、購入している製品の付加価値を上げようとする場合、簡便に生物の表面構造を形成できる新しい製造技術の登場が望まれています。

本セミナーでは、ナノインプリントと呼ばれる、新しい微細加工技術を紹介し、バイオミメティクスと人工的なナノ加工技術との接点を探ります。

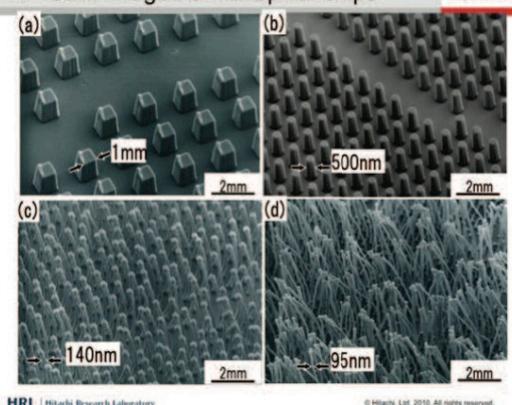
0. Examples of nanoimprinted feature



1. Examples of nanoimprinted feature



2. SEM images of nanopillar chips



主催：北海道大学総合博物館 問合せ先：北海道大学総合博物館
共催：高分子学会バイオミメティクス研究会 TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029
E-mail: museum-jmu@museum.hokudai.ac.jp
高分子学会北海道支部 060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

BIO Mimetics

バイオミメティクス・市民セミナー

鎌田 香織 (東京工業大学フロンティア研究機構, ERATO
鎌田超集積材料プロジェクト バイオテンプレートグループ グループリーダー)

バイオテンプレートと 構造機能材料

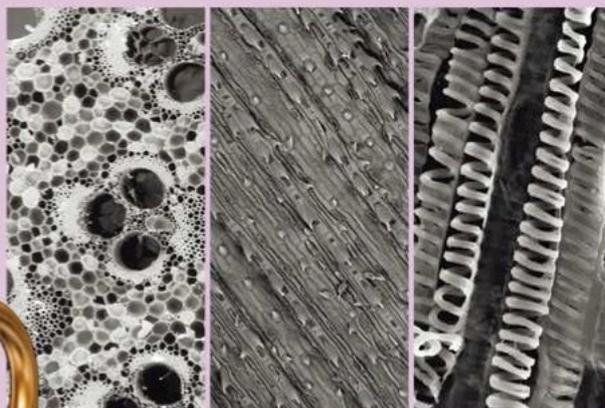
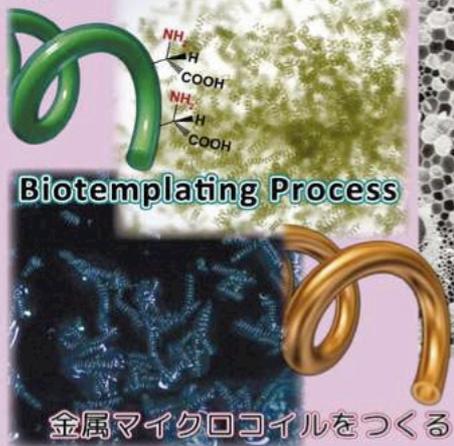
2013年 7月 6日 (土)

会場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時間：午後1時30分から午後3時30分

植物の葉や茎にみられる組織や微生物の構造は、大変魅力的です。自然によって「自己組織的」に作り上げられた規則的な高次構造であり、人工的に作製した構造材料よりも、はるかに機能的にみえます。また、種類や部位によって、実に多様な構造がみられるのにも感心してしまいます。普段、材料化学の研究は、ある特定の機能の発現を目的として、最適な分子・高分子やその組織化構造を設計します。ですから、自然界のナノ・マイクロ構造をみると、いつもとは逆に、様々な使い道が思い浮かび、わくわくするのです。今回のセミナーでは、そんな自然界の興味深くもまた機能的な構造を鋳型（バイオテンプレート）としたあたらしい材料づくりと工学的な応用展開について紹介します。

藻から



主催：北海道大学総合博物館
共催：高分子学会バイオミメティクス研究会
高分子学会北海道支部

問合せ先：北海道大学総合博物館
TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029
E-mail: museum-jmu@museum.hokudai.ac.jp
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

13-1バイオミメティクス研究会

バイオミメティクスの国際標準化

—統合化知識インフラを基盤とするオープンイノベーション・
プラットフォームの構築に向けて—

日 時：平成25年6月20日(木)

13:00-17:50

会 場：産業技術総合研究所
臨海副都心センター
別館11階会議室

(東京都江東区青海二丁目4番7号4-2-2)

電 話：03-3599-8001

交 通：新交通ゆりかもめ「船の科学館駅」

「テレコムセンター駅」下車徒歩約4分
東京臨海高速鉄道りんかい線

「東京テレポート駅」下車徒歩約15分
(<http://unit.aist.go.jp/waterfront/>)

趣旨

バイオミメティクスは、生物の多様性を原資にすることで、エンジニアリングのパラダイムシフトと、ひいては持続可能性に向けたイノベーションをもたらす切り札であり、多量な生物学データベースの有効利用がその成否を握っています。

昨年10月には国際標準化機構においてISO Biomimetics TC266が設置され、本年5月の第二回国際委員会において3つの課題について議論がはじまりました。また、今般、日本から、生物や材料のデータベースを統合化した知識プラットフォームの標準化を提案いたしました。生物学のデータベースは、画像もテキストもある、いわば“ビッグデータ”であり、多量の画像データを含む情報処理と、エンジニアリングへのリエゾンによってもたらされる発想支援がキーポイントになります。

今回は、パリで開催されたISO TC266国際委員会の報告と、生物や材料、機械などの統合化データベースを知識プラットフォームとし、異分野連携、産学連携、垂直連携のためのオープンイノベーションのプラットフォーム構築に向けた取り組みを紹介いたします。

プログラム

第一部：ISO Biomimetic TC266国際委員会報告

13:00~13:30

1. Conception and strategy - Differences between bionic and conventional methods/products (WG1)

(産総研) 関谷 瑞木

13:30~14:00

2. Biomimetic materials, structures and components (WG2)

(物材機構) 細田奈麻絵

14:00~14:30

3. Biomimetic optimization (WG3)

(産総研) 阿多 誠文

14:30~15:00

4. Knowledge Infrastructure for Biomimetics (WG4)

(北大情報) 長谷山美紀

第二部：知識基盤の構築と産学官連携にむけて

15:20~16:20

5. [招待講演] ビッグデータ時代の新たな価値創造

(JSTシニアフェロー) 奥和田久美

16:20~16:50

6. 異分野融合を支える知識情報基盤

～シソーラスを用いた分野横断検索について～

(JST) 恒松 直幸

16:50~17:20

7. 産業界との連携

(積水インテグレートドリサーチ) 佐野 健三

17:20~17:50

8. バイオミメティクスの産業利用促進

—世界動向と日本の課題—

(帝人) 平坂 雅男

主 催 高分子学会 バイオミメティクス研究会 ISO/TC266バイオミメティクス国内審議委員会

共 催 科学研究費新学術領域「生物規範工学」

協 賛 アスクネイチャー・ジャパン ネイチャーテクノロジー研究会

参加お申込みはこちら：<http://www.spsj.or.jp/entry//annaidetail.asp?kaisaino=853>

問合先：高分子学会 バイオミメティクス研究会係

〒104-0042 東京都中央区入船3-10-9 新富町ビル6F

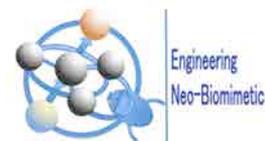
電話 03-5540-3771 F A X 03-5540-3737

※Webでのお申し込みは6月19日(水)午前までとさせていただきます。以降は上記宛お問い合わせください。



生物多様性を規範とする革新的材料技術

Innovative Materials Engineering Based on Biological Diversity



「生物多様性を規範とする革新的材料技術」ニュースレター Vol. 2 No. 1
発行日 2013年7月1日
発行責任者 下村政嗣 (東北大学)
編集責任者 穂積 篤 (独立行政法人 産業技術総合研究所)
制作 「生物規範工学」領域事務局
北海道大学電子科学研究所内
〒001-0021 札幌市北区北21条西10丁目
電話 011-706-9360 FAX 011-706-9361
URL <http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/index.html>