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

ニュースレター　Vol. 4　No. 3

生物規範工学

Engineering Neo-Biomimetics

文部科学省　科学研究費　新学術領域
「生物多様性を規範とする革新的材料技術」

CONTENTS

文部科学省　科学研究費　新学術領域
「生物多様性を規範とする革新的材料技術」

****

1)　巻頭言
・　不易流行
亀井　信一（株式会社三菱総合研究所政策・経済研究センター長）……8

2)　評価委員からのメッセージ：
・　生物規範工学の持続的発展に期待をこめて
藤崎　憲治（京都大学名誉教授，日本学術会議連携会員）…… 11

3)　研究紹介
【2015 年 11 月 17 日(火)】
15-2 バイオミメティクス研究会　環境とバイオミメティクス
・　プログラム…… 16

要旨集
・　ISO/TC266 Biomimetics 京都会議（第 5 回）WG1 報告
齋藤　彰（大阪大学）…… 18

・　ISO/TC266 WG2 国際委員会 京都会議の報告
細田　奈麻絵（物質・材料研究機構）…… 20

・　バイオミメティクスの国際標準化～生きた国際標準を目指して～
関谷　瑞木（産業技術総合研究所）…… 22

・　ISO/TC266 Biomimetics WG4 京都会議報告
溝口　理一郎（北陸先端科学技術大学院大学）…… 24

・　環境・CSR 経営からみたバイオミメティクス
白鳥　和彦（積水インテグレーテッドリサーチ）…… 27

・　欧米の環境・技術戦略からみたバイオミメティックス
亀井　信一（三菱総合研究所）…… 29

・ 生物多様性と自然環境評価
平井　規央（大阪府立大学）…… 31

・ フジツボ構造の形成によるプラズモン現象の効率的発生とバイオセンシングへの応用
福田　隆史（産業技術総合研究所）…… 33

【2016 年 3 月 3 日(木)-5 日(土)】
科学研究費「生物規範工学」全体会議／JAMSTEC 合同講演会
公開ジョイントシンポ“海洋資源メッカ沖縄で考えるバイオミメティクス”
・ プログラム…… 37

要旨集
科学研究費「生物規範工学」全体会議／JAMSTEC 合同講演会
< Oral >
・ バイオミメティクス・データベース構築―2015 年度後半の取り組み
A01 班　野村 周平 (国立科学博物館)…… 41

・ オントロジーの拡充と高機能化
A01 班　溝口 理一郎 (北陸先端科学技術大学院大学) …… 43

・ シワ構造のトライボロジー
B01-1 班　大園 拓哉 (産業技術総合研究所) …… 45

・ 流水条件下における生物付着評価方法の開発への取り組み
B01-1 班　野方 靖行 (電力中央研究所)…… 47

・ サブセルラーサイズの生物表面研究の重要性－多機能な生存戦略を学んで，ものづくりに
B01-2 班　針山 孝彦 (浜松医科大学) …… 49

・ 班間連携による魚類の吸盤に関する研究
B01-3 班　細田 奈麻絵 (物質・材料研究機構) …… 51

・ 新しい実装技術に向けたバイオミメティクス表面の開発
B01-3 班　松尾 保孝 (北海道大学)…… 53

・ 生物規範環境応答・制御システム
B01-4 班班長　森 直樹 (京都大学)…… 55

・ 生物羽ばたき飛行の受動的な制御
B01-5 班　劉 浩 (千葉大学)…… 57

・ がん細胞の運動表現型診断のための弾性率可変マイクロファイバーゲルマトリックス
B01-5 班　木戸秋 悟 (九州大学)…… 59

・ 光り輝く未来を創るために
C01 班　石田 秀輝 (東北大学・地球村研究室) …… 61

・ 心豊かなライフスタイルとテクノロジーを繋ぐデータベースの構築
C01 班　小林 秀敏（大阪大学） …… 63

・ 超撥水現象の温故知新-私の研究と生物の超撥水-
特別講演 1　辻井 薫 (元北海道大学教授) …… 65

・ 海洋生物に学ぶセンシングとコミュニケーション
特別講演 2　赤松 友成 (水産総合研究センター) …… 68

< Poster >

・ 魚類に関するバイオミメティクス・データベース構築
A01 班　篠原 現人（国立科学博物館） …… 72

・ 生物微細構造を規範とした材料表面改質とその特性
B01-1 班　小林 元康（工学院大学） …… 73

・ 低環境負荷の構造色塗工プロセス
B01-2 班　不動寺 浩（物質・材料研究機構） …… 74

・ イオン液体を用いた SLUG の開発
B01-3 班　佐藤 知哉，浦田 千尋，穂積 篤（産業技術総合研究所）…. 75

・ ガ類の受容体によるフェロモンブレンド検出機構の解明
B01-4 班　光野 秀文（東京大学） …… 76

・ 昆虫の羽ばたき飛行における胸部構造の変形とその制御
B01-5 班　安藤 規泰（東京大学） …… 77

・ 心豊かな暮らし方のか・た・ち を創るテクノロジー
C01 班　古川 柳蔵（東北大学）…… 78

・ インコ類の混色による非虹色構造色
公募 01　森本 元（山階鳥類研究所）…… 79

・ メラニン顆粒から着想した粒子を用いる構造色材料
公募 03　桑折 道済，河村 彩香（千葉大学）…… 80

・ 珪藻細胞壁の微細構造が生み出
栄養取り込み機能の解明と物質拡散制御材料への応用
公募 04　前田 義昌（東京農工大学）…… 81

・ 環状両親媒性高分子の自己組織化によるベシクル構築とゲスト包摂
公募 05　山本 拓矢（北海道大学）…… 82

・ NanoSuit®法によるリアルな生物表面観察のバイオミメティクスへの展開
公募 06　高久 康春（浜松医科大学）…… 83

・ セミの翅の物理的防御機構を模倣した機能性ナノデバイスの創製
公募 07　安井 隆雄（名古屋大学）…… 84

・ 磁性粒子分散ゴムを用いた人工繊毛の開発
公募 08　津守 不二夫（九州大学）…… 85

・ 好中球（白血球）に学ぶ微粒子の濃度勾配駆動水中推進
公募 09　玉川 雅章（九州工業大学）…… 86

・ 粉体状粘着剤
公募 10　藤井 秀司（大阪工業大学）…… 87

・ カイメン－二枚貝集合体の立体構造解析
公募 11　椿　玲未（海洋研究開発機構）…… 88

・ バイオミメティクスの社会実装に向けた特許と論文発表件数の関係性の考察
公募 12　香坂 玲（金沢大学）…… 89

・ 3D コンフォーカル顕微鏡による生物表面の観察
津留 美紀子（海洋研究開発機構）…… 90

・ 成長に伴うヨワカイメンの濾過機能の変化
保坂 美沙子（海洋研究開発機構）…… 91

・ 海洋生物の持つ切削器官は最適か
山本 美希（海洋研究開発機構）…… 92

公開ジョイントシンポ“海洋資源メッカ沖縄で考えるバイオミメティクス”
テーマその１　海洋資源とバイオミメティクス
・ 海洋生物資源を活用した事業展開
招待講演１　金本 昭彦 先生 (オーピーバイオファクトリー株式会社)… 93

・ 海洋生物の自然史学に学ぶバイオミメティクス
招待講演２　白山 義久 先生 (海洋研究開発機構)…… 96

・ 新種のフグが作るミステリーサークル：魚の「建築」技術を探る
招待講演３　松浦 啓一 先生 (国立科学博物館)…… 100

・ 国立自然史博物館はバイオミメティクスのメッカ！？
招待講演４　西田　睦 先生（琉球大学)，馬渡 駿介（北海道大学）… 103

・ 沖縄美ら海水族館が創り出す多様な資源とその活用
招待講演５　佐藤 圭一 先生 (沖縄美ら島財団　総合研究センター)…. 106

テーマその２　自己組織化とバイオミメティクス　「良い加減さの起源」
・ 生体模倣技術を用いた味と匂いを測るセンサ開発
招待講演６　都甲 潔 先生 (九州大学) …… 110

・ 匂いで良い加減を知る？アリの巣仲間センシング
講演１　尾崎 まみこ 先生 (神戸大学) …… 114

・ フジツボの抗付着に適した「良い加減」な表面微細構造
講演２　室崎 喬之 先生 (旭川医科大学)…… 116

・ 昆虫の表面構造における「良い加減さ」
講演３　吉岡 伸也 先生 (東京理科大学)…… 118

・ 眼の構造における「良い加減さ」　水棲生物の場合
講演４　山濱 由美 先生 (浜松医科大学)…… 120

4)　トピックス (PEN より)
・ バイオミメティクスに対する最初の意識調査
産業技術総合研究所　安順花，関谷 瑞木，阿多 誠文 …… 123

・ カラスの行動にまつわる工学的なエトセトラ
東京大学総合研究博物館　松原 始…… 127

・ カブトムシを極めよう
国立科学博物館　野村 周平…… 131

5)　国内外研究動向紹介
・ 平成 27 年 10 月 19 日(月)-21 日(水)
ISO/TC266 Biomimetics WG4 京都会議報告
香坂　玲（金沢大学）…… 141

・ 平成 27 年 10 月 22 日(木)
Engineering Neo-Biomimetics VI and Satellite Workshop at Lake Biwa
（1 日目 10/22）に参加して
鈴木　航祐（産業技術総合研究所）…… 142
「バイオミメティクス国際会議」レポート
星野　敬子（NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン）…… 145

・ 平成 27 年 10 月 23 日(金)
島津新素材セミナー2015　新素材のヒントはここに！「バイオミメティクス」
（京都 10 月 23 日）に参加して
片山　英里（国立科学博物館）…… 146

・ 平成 27 年 10 月 30 日(金)
Conference Report: 4th Nagoya Biomimetics International Symposium (NaBIS)
Raju　Gupta，穂積　篤（産業技術総合研究所)）…… 147

・ 平成 27 年 11 月 17 日(火)
２０１５年度第２回高分子学会バイオミメティクス研究会報告
溝口　理一郎（北陸先端科学技術大学院大学）…… 149

・ 平成 27 年 11 月 20 日(金)
島津新素材セミナー2015　新素材のヒントはここに！「バイオミメティクス」
（2015 年 10 月 23 日および 11 月 20 日）セミナーに参加して
森　直樹（京都大学）…… 151

6) 新聞・報道…… 152

7) アウトリーチ活動…… 157

8) 各種案内…… 159

（1）巻頭言

不易流行

株式会社三菱総合研究所
政策・経済研究センター長
亀 井 信 一

この研究プロジェクトもラストスパートの時期を迎えようとしている。研究成果を総括することはもちろんのこと，次のプロジェクトにスムーズに繋げるような検討も重要な時期である。本研究プロジェクトのように，知的基盤の構築を目指すものは継続してこそ意味がある。正念場である。

私事で誠に恐縮であるが，この一年間，「人間の生き方・働き方の未来」に関して研究を進めてきた。しばしお付き合いいただきたい。本来，人間は多様で多元的な価値観を持っている。それはどのように生き，どのように働くかについても同様である。過去の高度経済成長を支えた工業社会は規格大量生産を前提としたものであり，一ケ所に集まり階層をもつ組織で同時に働くことが最も効率的であった。しかし，多様化や情報化が進み知識産業の比率が高まった現代では，これまでの働き方が時代に合わなくなりつつある。では，未来の働き方はどうなるのであろうか。その解を追い求めてきたのである。

未来の働き方を考えるアプローチとして，働き方に影響を与える外的要因を設定し，その要因の未来予測から，働きから像を導き出した。ここでは，①日本の社会の特性を反映した視点である「家族像と人のつながりの変化」，②世界で最初に迎えることになる「高齢化と人口構成の変化」，③働き方に直接影響を与える「経済環境の変化」，④世界最先端の展開と高いロボット受容性などを特徴とする「テクノロジーの進化とその享受」，⑤弱点から逆転の発想になりえる「グローバル化のインパクト」を据えた。散々検討したが，未来の生き方や働き方に大きな影響を与えるのは，実は，テクノロジーの進化であった。

この研究の過程で，「人は，科学や技術が進歩すると何歳まで健康でいられるものか？」という問いにもぶち当たった。これは，「老化がどのようなメカニズムでなぜ始まるの

か」という本質的問題に通じる。現在，老化のメカニズムは約 100 通りの学説があるといわれている。その中で，2000 年に存在が注目された長寿遺伝子（サーチュイン）をサーベイした。最初にその働きが解明されたのは酵母であったが，長寿遺伝子はほとんどすべての生物が持っている。霊長類も含めて，この長寿遺伝子はカロリー制限（すなわち飢餓）によってスイッチが入り，多様なメカニズムを経て長寿を実現しているといわれる。ある種の飢餓がスイッチということは極めて興味深い。ここに，太古からの生物の生き残り戦略が内在していそうである。

なお，話を元に戻すと，「未来の生き方・働き方は，個人の主体性・自律性のもとで，場所や時間さらには組織に縛られず価値観の多様化にあわせた多元的なものが加速度的に台頭する」と結論付けた。すなわち「フリー・フラット・プルーラル」が，未来の生き方・働き方である。固定的な考えに縛られ，多様性を失うと途端に人間は立ち行かなくなる。

また，研究の中で出会った「危機・飢餓が生き残りのためのスイッチになる」ことも示唆深く受け止めた。これは単細胞生物から霊長類まで続く戦略である。

本プロジェクトも，非常に厳しかった中間報告を転機（スイッチ）として，転換した。今後，次の飛翔に向かって，決して国内に縛られることないグローバルな展開や生物や人類の生き残り戦略なども含めた巨視的な目で捉え多様性のある取り組みの中でさらなる発展を望みたい。

（2）評価委員からのメッセージ

生物規範工学の持続的発展に期待をこめて

藤崎憲治（京都大学名誉教授，日本学術会議連携会員）

新たな年が明け，本新学術領域も4月からいよいよ最終年度を迎えることになった。2014年に実施された中間評価ではきわめて厳しい指摘を受けたことは，記憶に新しい。しかし，それを受けて翌年の7月16日に執り行われた外部評価委員によるサイトビジットでは，下村リーダーをはじめとする領域メンバーの懸命の対応の結果，「指摘事項へ適切に対応されている」との確認結果を受けた。これに甘んじることなく，事後評価では高い評価が得られるよう，より一層の努力を期待したい。

繰り返し言われてきたように，本領域が目指すものは，工学と生物学という全く異質な学問分野の融合的学問領域である「生物規範工学」という，きわめてチャレンジブルな新規学問分野の創生である。下村先生によれば，それは単なる生物模倣ではなく，生物が自らの形態を作っていくやり方である「自己組織化」の機構を解明し，模倣することによって，技術革新を図ることである。生物の在り方の本質に迫る，そのような学問領域が一朝一夕に達成できるほど甘くはなく，中間評価の厳しい結果は何よりもそのことを物語っているだろう。しかしそれは，本新規学問分野が，新たな知の地平を切り拓き，人類の持続的発展に寄与して欲しいという大きな期待の裏返しでもある。わずか数年の間に目標とした成果が得られるような新規学問領域なら，所詮その程度のものであるに過ぎない。生物規範工学はプロジェクト終了後も長期にわたる持続的発展が必要とされ，そして期待される学問領域である。

我が国のバイオミメティクスは周回遅れとも言われたりするが，必ずしもそうとは言えない。2014年に翻訳発行された，ジェイ・ハーマンの『自然をまねる，世界が変わるーバイオミミクリーが起こすイノベーション』（化学同人）の中には，日本におけるバイオミメティクスの成果がいくつも紹介されている。それらは，カワセミの嘴を模倣した新幹線のノーズ，フクロウの羽根の形状を模倣した新幹線のパンタグラフ，ミツバチの湾曲した複眼のデザインを取り入れた自動車のレーザー距離計（日産自動車），モルフォチョウの構造色の発現機構を模した繊維であるモルフォテックス（帝人），菌類の自然のネットワークを模倣した人工知能（北海道大学）などである。これらとは別に，シャープ株式会社は，電化製品に積極的にバイオミメティクスを取り入れている。例えば，アサギマダラという長距離移動を行うチョウの翅にあるくびれや飛翔時の「うねり」を模倣した扇風機が製品化されている。そのほか，トンボの翅，アホウドリやイヌワシの羽根，イルカの高速遊泳機構，ネコの舌などを模倣した数々の電化製品が考案されて

いる。これらの事実からすれば，我が国におけるバイオミメティクスは時代の先端を走っているものも多く，急速に普及しつつあると言えよう。ＮＰＯ法人「バイオミメティクス推進協議会」も立ち上げられ，そこには大手の化学企業や自動車メーカーも加わる予定だというのは，大きな前進である

バイミメティクスあるいはバイオミミクリーという思想や技術は確かに西欧由来であり，我が国では西欧諸国に比べてスタートが遅れたことは事実である。何と最初のバイオミミックスの一人が，自然のらせん構造の模倣であるアルキメディアン・スクリューを発明した，古代ギリシャのアルキメデスというのだから，それは仕方のないことである。しかし，かつて明治維新とともに西欧から導入された科学技術がそうであったように，ひとたび有用であるとの認識がなされれば，それを改良し急速に発展させていく高い潜在能力を我が国は持っている。バイオミメティクスは今後我が国で大きく花開く可能性があるのだ。昆虫生態学を専門とする私は，手前味噌かもしれないが，その中でも昆虫をモデルにしたバイオミメティクス，すなわち昆虫ミメティクスが大きな役割を果たしていくものと思っている。昆虫は地球上でもっとも種多様性に富む，きわめて進化的に成功した生物であることで，バイオミメティクスの宝庫であること，ナノテクノロジーの発展により小さな生物の複雑な仕組みと機能を解明し，再現できる技術的力量がついてきたことが，その背景にある。さらに，私が昆虫ミメティクスに期待するのは，昆虫が繁栄する進化的基盤になったと思われる，小型化（体サイズや付属器官の小型化），分散化（分散脳システムや高い移動分散性），多様化（高い種多様性と生活様式や形態の多様性）が，ひたすら効率を追求してきた人類文明の必然的方向であった大型化，集中化，一様化とは真逆の戦略であるからだ。まず，ダウンサイジング技術(古くは扇子や小田原提灯など，新しくは折り畳み傘，電卓，ウォークマンなど)の伝統に見られるように，小さきものを愛し志向する日本文明は，さらに昆虫のような小さくて高精度な生物を規範にした技術開発を行うことで，エネルギーを最小にする持続可能な社会を実現することが期待される。次に，人類社会に不可欠な電気を作り出す発電所の分散化も，漏電や電気抵抗によるロスを防ぎ，大災害によるリスクを軽減する合理的な手立てになる。例えば個々の家などで電気を生産するのが理想的であるが，その際にトンボの翅の形状を模倣したプロペラで回転する小型発電機が有効であるだろう。さらに，昆虫たちは4億年という長大な進化的歴史を通して，生活様式を多様化させ，あるいは多様な生物間相互作用（競争や共生）を進化させることで，ニッチを多様化させ（ニッチ分割），生態系のダイナミックな安定性に貢献してきた。このことは人類の採るべき資源配分戦略のヒントになるに違いない。このように，昆虫ミメティクスは人類の持続的発展に貢献する大きなポテンシャルを秘めていると言えよう。

下村先生は，ある講演での冒頭，「動物園や博物館に行きましょう」と述べたようであるが，私はさらに「子供たちを自然のフィールドに連れ出しましょう」と言いたい。詩人で劇作家の寺山修司の言葉「書を捨てよ，町へでよう」をもじれば，「書を捨てよ，自然へ出よう」ということである。バイオミミックスになるための原体験は，子供時代

に育まれた自然に対する素朴な好奇心や畏敬の念にあるのであって，そのようなエモーションはありのままの自然の中でしか醸成されないだろう。自然の中には生物の不思議が溢れている。森や川や海といった自然の中での子供たちを対象にした「バイオミミックス育成教育」が何よりも必要とされる。しかし，エモーションだけでは事は進まない。大学においては生物学と工学を日常的に学ぶバイオミメティクス学部が創設される必要があるだろう。そこでは生物学を工学に結び付ける論理と技術が畳み込まれる。さらには，国立バイオミメティクス研究所のようなものが設立されたらどんなに良いだろうと思っている。

最近，バイオミメティクスの将来にも大きく影響するかもしれない動きがある。それは，国立自然史博物館設立へ向けての動きである。現在，日本学術会議では「国立自然史博物館設立の必要性」という提言を行うべく準備が進められつつある。もし国立自然史博物館が創設されることになれば，保有する莫大な生物標本の微細表面構造を走査型電子顕微鏡で調べ，その機能と関連させることを通して，バイオミメティクスに貢献することが期待される。バイオミメティクス推進協議会としても，最大限のバックアップが必要であろう。偉大な昆虫学者で社会生物学の創始者でもあるハーバード大学のエドワード・O・ウィルソン博士は，バイオミミクリーの提唱者であるジャニン・ベニュス女史が敬愛するバイオミミックスでもあるが，大学において分類学をはじめとする基礎的な生物学に関する教育が，分子生物学などの“先端的生物学”の台頭とともに困難になりつつあることを憂慮している。そのことは我が国においても全く同様である。いや状況はもっと深刻かも知れない。だからこそ，日本学術会議農学委員会応用昆虫学分科会では，「昆虫科学が果たすべき役割とその推進の必要性」という報告（2011年）と「昆虫分類・多様性研究の飛躍的な拡充と基盤整備の必要性」という提言（2014年）を上申し，そのことを訴えた。ぜひご覧になっていただきたい。国立自然史博物館の創設がこのような危機的状況を打開する契機になることを願っている。本新領域は「生物多様性を規範とする革新的材料技術」というタイトルであるが，この領域の発展の鍵を握っているのも，生物多様性研究の基礎となる分類学や博物学の維持・発展であることを，私たちは強く認識するべきである。ともあれ，生物規範工学の一層の持続的発展を期待して，内部評価委員としてのメッセージとしたい。

（３）研究紹介

15-2 バイオミメティクス研究会　環境とバイオミメティクス

趣旨：生物多様性は，長い進化の過程において環境に適応した結果であり，「生物の技術体系」とも言うべき"高炭素世界の完全リサイクル型技術"によって獲得されたものです。バイオミメティクスは，「生物の技術体系」における"生産プロセス"や"作動原理"，"システム制御"を規範とすることで，「人間の技術体系」にパラダイムシフトをもたらし環境調和と持続可能性に資する技術革新を目指す，古くて新しい科学技術の体系です。バイオミメティクスの体系化には，環境と生物多様性に関する生態学的な知見は不可欠であり，また一方で，環境と産業活動に関する経済学的な視点を持つ事が重要になります。京都で開催される国際標準化 ISO TC266Biomimetics 国際委員会における持続可能性の議論や，12 月にパリで開催される国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議と京都議定書第 11 回締約国会合を鑑み，今回は，"環境とバイオミメティクス"を主題にいたしました。

　また，『生物模倣技術と新材料・新製品開発への応用』（技術情報協会刊）からは，センシングの話題を提供して頂きます。

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：国立研究開発法人産業総合研究所，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，モノづくり日本会議ネイチャーテクノロジー研究会，
　　ナノテクノロジービジネス推進協議会バイオミメティクス分科会
開催日：2015 年 11 月 17 日　13:00～18:00
開催場所：産業技術総合研究所　つくばセンター　共用講堂　2 階　大会議室
　　（つくば市東 1-1-1 中央第 1）

■プログラム■

13:00～13:05　開　会
　　（高分子学会バイオミメティクス研究会運営委員長）下村　政嗣

＜第一部：ISO TC266　京都国際会議の報告＞

13:05～13:25　ISO/TC266 Biomimetics 京都会議（第 5 回）WG1 報告
　　（大阪大学）齋藤　彰

13:25～13:45　ISO/TC266 WG2 国際委員会 京都会議の報告
　　（物質・材料研究機構）細田　奈麻絵

13:45～14:15　バイオミメティクスの国際標準化～生きた国際標準を目指して～
　　（産業技術総合研究所）関谷　瑞木

14:15～14:45　ISO/TC266 Biomimetics WG4 京都会議報告
　　（北陸先端科学技術大学院大学）溝口　理一郎

14:45～15:00　休　憩

＜第二部：環境とバイオミメティクス＞
15:00～15:40　環境・CSR 経営からみたバイオミメティクス
（積水インテグレーテッドリサーチ）白鳥　和彦

15:40～16:20　欧米の環境・技術戦略からみたバイオミメティックス
（三菱総合研究所）亀井　信一

16:20～17:00　生物多様性と自然環境評価
（大阪府立大学）平井　規央

17:00～17:10　休憩

＜第三部：『生物模倣技術と新材料･新製品開発への応用』（技術情報協会刊）から＞
17:10～17:50　フジツボ構造の形成によるプラズモン現象の効率的発生とバイオセンシングへの応用
（産業技術総合研究所）福田　隆史

17:50～18:00　閉会

ISO/TC266 Biomimetics 京都会議（第５回）WG1 報告

（大阪大学大学院 工学研究科 精密科学・応用物理学専攻）齋藤 彰
電話 06-6879-7298　FAX 06-6879-7299
E-mail　saito@prec.eng.osaka-u.ac.jp
http://www-ss.prec.eng.osaka-u.ac.jp/html/member/stuff/saito.html

１．WG1: Terminology, concepts and methodology

開催日時：2015 年 10 月 20 日（会議二日目）13:30～16:00,
21 日（会議三日目）　9:10～11:30（WG1 を含む全体総論）
参加者：TC266 関係者全員

２．これまでの流れ

WG1 の規格（ISO 18458）は，Liège 会議（前回 2014.10 月）を受けた修正後，2015.5 月に出版済みで（つまり規格として確定済み），その時点で WG1 は本来，解散の筈である。しかし英国とカナダの２提案（後述）が未決なのと，文書の修正ステージが控えており，それらの議論用に WG 自体は継続していた。これは「出版済み（確定）」の事実と矛盾するようで紛らわしいが，「出版は修正の可能性含み」と考えればよい（或いは，そうまでして出版・確定を急いだ，という見方もできる）。そこで今回の仕事は英国提案，カナダ提案，修正項目，の処理である。前２者は各国の提案次第で対策も限界があるため，国内で事前に準備したのは最後の修正項目である。

なお WG1 の主題は冒頭のとおり「定義，概念と方法論」だが，主な使命は「何を以て Biomimetics となすか」という判断基準の明文化である。これが曖昧だと「正規」と「似非」の境界が揺らいでしまい，「標準」自体が成立しない。しかし，もとより生物・物理・化学・情報などから工学に至る広範かつ膨大な境界領域を必然的に含む Biomimetics は，宿命的に多くの曖昧さを内包する。そこに WG1 の困難がある。

３．議事と当日の様子

予定された上記２議題のうち，英国提案（Sustainability の Work item（WI）立上げ）は，責任者欠席のため当座，延期された。議論の必要性自体は全体の合意があるため，将来の提案を待つ（時期は不明）ことになった。

最も時間を割いたカナダ提案は「成功事例のアセスメント」である。前回の提案時は「Biomimetics の成功例として怪しいものがあるので検証を（特に図１の項目 3.）」の話で，前項の「似非を排除」という「お墨付き」の話に見えた。しかし方向はそうでも，じつは驚くほど大規模な制度提案であった。網羅した説明は紙幅のためかなわぬが，ポイントは，新たな評価プロセスの導入である。

要点は，各 Biomimetics 事例について成否を「採点」「数値化」すること，判定には図１の６原則を使うこと，評価システムは産業界に広く分散し，結果は産業にフィードバックし「使える」ようにすること，である。

判定基準６原則はその半数（図１の 2., 3., 4.）が従来の３原則と同等でマイナーチェンジだが，斬新なのは全体構想である。採点はユーザ（企業）を含む市場自身が行い，各社へフィードバックし，生きたシステムを目指す。そして「神棚上のルー

図１　カナダ提案（の一部である６項）。
Biomimetics　３原則は2.3.4.に相当する。

1. ニーズあっての開発である事。※
2. 「生物機能」からの新たな案に依る事。
3. 生物機能を「モデル化」する事。
4. 元の生物機能の拝借でなく「応用」する事。
5. 全体に建設的成果がある事。※
6. その成果はBiomimetic な部分で得られる事（他の部分で出た成果は×）。

※ 事例のための事例，はNG。

ルブック」でなく，例えば開発の意思決定プロセスやマーケット評価など生産現場での「使えるマニュアル」にする。かつ Triple-Bottom-Line 方式（環境用語。企業評価に収益だけでなく環境・社会貢献も考慮）も導入し，最終的に「Biomimetics 評価システム」を一般化し，各組織で枠組み作りに役立てる。結果として技術実施面での（ゴールに向けた）良否判断が容易になる，その過程で定義や意義の理解・確認もはかどる，等の利点がある。

私見だが，学術における Impact Factor（IF）を Biomimetics 産業に導入するような構想と思えばわかり易い。思い切った提案で，現 18458 文書の不備（後述：肝心の辞書部が貧弱で，成否診断の事例表が幹事国の我田引水など牽強付会）に対し，それを凌駕する「規格」を策定する提案である。たしかに経緯からして，前回第 4 回会議になって突然 P メンバー国（投票権所有）に新規参入した上，従来の経緯をひっくり返す主張を続けたカナダは，最後の投票（2014.7 月）でも唯一，日本と同じ反対票を投じ，WG1 規格へ強い不満を持つ数少ない参加国である。その意味で，カナダ提案は現行 WG1 文書の不備を，実地の応用例（と有効性）と査定で補完する試みともとれ，我田引水でない正確な判定を求める日本としては，尊重したい。ただ，何でも数値化に頼る昨今の（メディアの視聴率，学術の IF 偏重など）思考停止に気色悪さを覚えるのは筆者だけだろうか。なお上記はあくまでアイデア段階で，審査方法やデータ収集，合意形成など問題も山積である。カナダは 2016 年半ばを目途に新 WI を作る予定で，WG1 でもその必要性は合意し，カナダの動きを待つことになった。それが WG1 の枠組で続くのか，WG5 となるか，は今後次第である。

最後に修正項目の処理では，日本は 2 点提案をした。1 つは「Biomimetics 成否診断例」表で，Fin Ray の代表例として独・FESTO 社製品の写真が新たに加わった点である。最終校正の段で，かつ 1 社の利益供与たり得る改変はいかがなものか，の疑義である。しかし Convener（独）は「Liège で合意した」と拒み，日本代表で筆者は「聞いた覚えがない」と述べた。しかし「図があると便利。ISO 本部も宣伝でなければ社名 OK の由」と突っぱねられた。これにも「聞いた覚えがない」旨を言ったが，筆者に同調する声も無く（よほどその場で一人一人に確認するか迷ったがそれは止めた），単身，鉾を収める羽目になった。2 点目は辞書部（第 2 章）の不備である。前回の日本提案（修正）は反映されたが，まだ混乱した類義語で曖昧な境界が不鮮明のままなど，明らかな瑕疵も残ったままである。これも Convener は「既に合意済み」と言うが，筆者の明確な記憶では議論がフェードアウトしただけであり，この主張に対しては「修正用に覚えておく」との話であった。

４．総括

今回は 18458 出版後であり，前回のような 7 時間超の議論にならず冒頭の通りである。筆者は第 3 回プラハ会議の数か月前（2013.6 月）に前任者の代打で，しかし任を完全に引き継いだ。以後 2 年半の限られた間ではあるが，主な成果は，上記にもある「Biomimetics 成否診断」の全項目にわたる大幅修正（Matrix 導入により，牽強付会の阻止）と，辞書部の修正であろう（居城・溝口各委員をはじめご協力に感謝したい）。一方で残念なのは，性急・強引な 18458 出版に，歯止めが効かなかった点である。ただ全力は尽くし，筆者ができる攻防としては，ここが限界である。あとは筆者の本職（科学研究者）の視線で，18458 の影響を今後の予測に基づいて観測してゆきたい。

なお余談ながら重要な話として，ドイツによる性急な ISO 策定と Industry4.0 の関係はこの機会にぜひ確認したく，翌 10/22 の講演会で WG1 Convener の講演時，質疑をした。さらに制限時間で聞けなかった点も個別に話ができた。印象は「直接のお上の指令は無いが，意識は深い」という所である。詳細は省くが，世界情勢の中，我が国の置かれた深刻な状況に思いを深めた次第である。最後に，ホスト側として大変な苦労・工夫をされた平坂・三原両委員を始めとする高分子学会事務局，何より下村委員長に，運営に対する海外参加者各位の絶賛をお伝えするとともに深く感謝を表したい。

ISO/TC266 WG2 国際委員会 京都会議の報告

Biomimetic Materials, Structures and Components

（国立研究開発法人　物質・材料研究機構）細田　奈麻絵
電話 029-860-4529　FAX 029-860-4697
E-mail　HOSODA.Naoe@nims.go.jp

ISO 規格の策定手順は６段階あり（①新作業項目（NP）の提案、②作業原案（WD）の作成、③委員会原案（CD）の作成、④国際規格原案（DIS）の照会及び策定、⑤最終国際規格案（FDIS）の策定、⑥国際規格の発行)、WG2 は現在では④の国際規格原案の照会及び策定の段階まで進んでいる。昨年 WG2 が作成した原案は ISO/DIS 18457 として登録され、全てのメンバー国に回付された後 DIS 承認に対する投票が２０１５年７月２０日から１０月２０日の３ヶ月間行われた。投票結果は、コンビナーを務めるベルギーとフランスとイスラエルが棄権、P メンバーであるカナダ、中国、チェコ、ドイツ、日本、スイス、イギリスが賛成票（カナダとドイツはコメント付き賛成)、O メンバーであるフィンランドが賛成票を投じ、P メンバーによる投票の２／３以上が賛成、反対が投票総数の１／４以下（非承認国ゼロ）であることから WG2 の原案は ISO/DIS 18457 として承認された。京都会議では、国代表団体により DIS から最終国際規格案（FDIS）の作成作業が行われた。

図１　ISO/TC266 京都会議の様子
（１０月２１日）

【京都会議】

２０１５年１０月２０日午前、京都の三井ガーデンホテル京都四条において、ISO/TC266 作業グループ２(WG2)は、材料、構造、表面、コンポーネント、生産技術に関するバイオミメティクな開発に関する最終国際規格案（FDIS）の作成作業を行った。会議の参加者は、ベルギー１名、フランス２名、カナダ１名、チェコ１名、ドイツ３名、日本１２名、スイス１名、イギリス１名、合計２２名である。

FDIS の作成作業は、まず DIS の投票時に送られたドイツとカナダの５６項目に関するコメント（主にエディトリアルなコメント）及び修正案に対し賛否を取りながら修正作業を行った。続いて図・表の詳細を再チェックし、印刷ミスのある原図（図３）の Ashby の図の書き換え、図４と図５の書き換え、生物及びバイオミメティック製品の分析手法をまと

めた表３及び分析手法について記載された 5.1.1 と 5.1.2 を付録 B へ移動となった。また、今回の会議から参加したオックスフォード大学の Julian Vincent 教授ら新メンバーにより”reverse biomimetics”の概念の否定などの意見も出され予定していた時間を４０分延長するなど活発な議論となった。

【原案で紹介されている日本の技術】

WG2 の ISO/DIS 18457 には付録にバイオミメティクス技術開発と分析技術の紹介が書かれている。１つめは、表面観察に関連した日本発の技術である。表面観察に良く利用される電子顕微鏡は真空を使うため生きた状態で生物表面を観察するにはあまり適していなかった。近年開発された電子顕微鏡の前処理技術である“ナノスーツ法”が生きた状態での生物表面の観察手法として紹介されている。２つめは、生物の機能を簡略的に理解するツールとして既存技術を生物の機能に照らし合わせて理解する手法の例として“三浦折”の理論を葉の展開の理解に役立てた研究の例として日本の研究が紹介されている。

【今後の予定】

WG2 では京都会議での話し合いを基に原案を修正し、１２月７日２２時（日本時間）よりウェブ会議を行う予定である。この会議が原案修正の最終となる。２０１６年１月中に原案は提出され、最終国際規格案（FDIS）として登録される。

バイオミメティクスの国際標準化
～生きた国際標準を目指して～

（国立研究開発法人産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センター）
関谷瑞木
電話 029-860-5108
E-mail　mizuki-sekiya@aist.go.jp
URL　http://www.pengin.ne.jp/

バイオミメティクスの国際標準化を議論するために国際標準化機構（ISO）に設置された 266 番目の専門委員会 ISO/TC266 Biomimetics はベルリンのドイツ規格協会での第 1 回会合から 4 年目を迎え，10 月に京都で第 5 回目の全体会合が開催された。現在 TC266 Biomimetics に 4 つ設けられているワーキンググループ（WG）のうち，2 つの WG は京都会議で国際標準の発行の一つの節目を迎えることとなった。昨年ベルギーのリエージュで開催された第 4 回の全体会合で生物に学んだ構造の最適化のアルゴリズムを国際標準とする WG3 Biomimetics Structural Optimization は，ISO が迅速な国際標準化のために設けた手続きを経ることに合意されており，国際標準の発行がすでに決められたアイテムとして京都会議では議論は行われなかった。

Fig. 1 自然に学ぶ構造最適化アルゴリズムのひらめきの源となった生物の順応的な成長の例

バイオミメティクスの国際標準化は研究開発と並行して，研究開発の成果を社会へ還元するところまでを見据えて取り組みが進められている。とはいえ，具体的な製品やマーケットへの展開が乏しい，あるいはよく見えてこないなかで議論を進めなくてはならないことに対する懸念はこれまでの国内審議委員会で議論の俎上に載せられてきた。今回，WG やタスクグループの議論の際に，海外の複数の代表からも同様の懸念や不満の声が聞かれた。

京都会議では，国際標準を発行した後について，様々な形で繰り返し議論された。前回リエージュの会合の最後に日本からの提案で設置して活動を行うことが決まったタスクグループ Transparency and Stakeholder Communication の会合においても同様であった。タスクグループは，第 4 回までの会合とその間に開催されるウェブミーテ

ィングの議論の進められ方などから，各参加国内匂いて潜在的なステークホルダーがきちんと掘り起こされておらず，社会からのニーズが適切に発行される国際標準に反映されていないのではないかとの懸念に取り組むために日本から提案したものである。これは，国際標準化のプロセスの透明性の確保やステークホルダーのニーズの把握によって，長く活用される国際標準が作成されるようにとの ISO の期待に応えるものでもある。タスクグループでは，各国が自国のステークホルダーとコミュニケーションのきっかけとできるよう，また，各国が自国でステークホルダーとどのように議論を進めているのかについて京都会議の際に他の参加国と参考になるような情報を共有できるようにとの趣旨で質問票への回答を呼びかけた。

1 年前のリエージュ会議の際に，カナダおよびイギリスから新たに持続可能性の視点を盛り込んだワーキングアイテムを提案したいとの希望が出されていた。京都会議でカナダは発行済みの国際標準を評価する手法を開発し，国際標準化したいとの提案であった。カナダのこの提案に多くの参加国が賛同した背景には，多くの時間や労力をかけて発行まで至った国際標準には，その後活用されないままとなっている国際標準があるとの批判が ISO の内外にあったといえよう。

国際標準は発行することが目的ではない。数年の議論を経て発行される国際標準がきちんと製品の開発や産業の育成・振興に活かされてこそ，ISO の場での議論が実ったといえるであろう。TC266 Biomimetics 設置の提案をし，幹事を務めるドイツでは，そのような「国際標準発行のその後」の戦略がしっかりと練られているようである。前回の会合では WG3 Biomimetics Structural Optimization で議論されてきた Soft Kill Option（SKO）や Computer Aided Optimization(CAO)といった生物の成長をモデルとして構造の最適化を図るアルゴリズムが国際標準として発行することが決められた。ドイツでは事業者に向けて，ISO から新しくバイオミメティクスの国際標準として発行される構造最適化アルゴリズムを用いて製品のデザイン・製造を行うためのセミナーがすでに複数回開催されている。

京都会議では，これまで予備的な審議段階であった日本提案の WG 4 Biomimetic knowledge platform が，新規提案（NP）の投票に掛けられることが合意された。最初の提案は日本が行なっており，多くの事務作業を日本が担っているのではあるが，第 2 回のパリでの会合以降，各国の代表との議論を重ねて参加国が協力し合って形作ってきた原案である。多くの労力をかけて構築されるデータベースであっても，収載されたデータごと活用されないまま死蔵されてしまうとことが多々あると指摘されている。WG4 の成果は TC266 Biomimetics に留まらない貢献が可能なツールになると期待される。

ISO/TC266 Biomimetics WG4 京都会議報告

（北陸先端科学技術大学院大学）溝口　理一郎
電話 0761-51-1787　FAX 0761-51-1767
E-mail　mizo@jaist.ac.jp
URL　http://www.jaist.ac.jp/profiles/info_e.php?profile_id=614[1]

１．WG4: Knowledge infrastructure of biomimetics

本 WG は以下の要領で意見交換を行った．

開催日：2015 年 10 月 19 日(月）（会議初日）
時間：9:30～16:00
参加者：TC/266 関係者全員（今回は Single session）

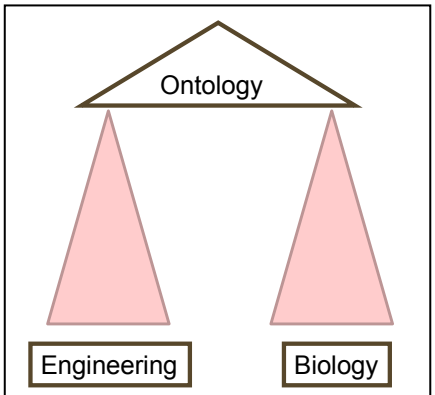


Fig. 1 Ontology-enhanced thesaurus.

２．議事内容

Convener（恒松直幸（JST））による手際の良い司会の下，非常に活発な意見交換が行われた．前回（昨年 10 月）の Liege 会議で WG4 の活動内容に関する合意を得たあと，メンバー委員からのコメントを得て，Preliminary stage であった本 WG を，Proposal stage に進めることを正式に決定することが今回の会議の主目的である．

前回の Liege 会議では，WG4 が扱う問題が，工学者と生物学者の双方が必要とする適切な情報を生物 DB から検索する操作を支援するための Ontology-Enhanced Thesaurus（OET）（Fig.1 参照）を構築する過程の標準化であることが合意された．それは本質的には DB 検索支援という問題であり，従って，DB 検索支援の定番であるシソーラス[1]を強化することで対応可能となる．そこで我々はオントロジーを導入して thesaurus を強化する考えを提案した．オントロジー[2]という抽象的な概念をしっかり整備して，工学と生物科学の間にあるギャップを埋めることによって，両者の間の行き来がスムースになると期待される[3]．このことは WG4 のタイトルである，Biomimetics の(概念的）基底構造を組織化するという考えに繋がる．WG4 では，オントロジーの中でも特に「機能オントロジー」[4]に注目する．機能は工学者が実現したいものであり，生物が既に実現している機能を参考にして新しい発想が生まれることが期待されるからである．

Liege 会議で本 WG の Scope と活動の概要の理解を得た後，将来の公式文書のたたき台となるべきドキュメントを執筆し，ISO/TC266 委員会のサーバーにアップし，メーリングリストを通して意見交換を行って来た．その過程において，Liege 会議後に加入した，Liege での筆者の説明を聞いていない少数のメーンバーから批判的な意見が集中していた．そして，京都会議の直前には Web 会議を開催して京都会議で議論すべき話題を整理した．実際京都会議では彼等からの批判に対応することが主な意見交換となった．以下に論点の概要を示す．

(1) Biomimetics の分野でシソーラスが効果的であったという話は聞いていない．シソーラスを開発する必要性の根拠はどこにあるのか？
(2) 提案している OET が効果的であるという事例はあるのか？

[1] Keyword explorer is available at: http://biomimetics.hozo.jp/ontology_db.html

(3) Knowledge Infrastructure の確立はテーマが大き過ぎるし，実際にやっているのはシソーラスであり，小さ過ぎる．
(4) まだ成熟していない Biomimetics の分野において，信頼性の高い，シソーラスを作るソースとするに値するドキュメントは十分にあるのか？
(5) 生物学者が書く論文は工学者が期待する内容になっていることはほとんどない．それほど両者の文化は異なる．従って，生物学の論文をいくら分析してシソーラスを作っても工学者が用いる用語とは一致しないので，シソーラスとして意味をなすものは得られないのではないか？
(6) ゴミを入力にしてシソーラスを作っても，ゴミが出力されるだけではないのか？
(7) WG4 の成果物としてのオントロジー開発プロセスの仕様は Biomimetics に固有の開発過程になるのか？そうだとすると，どういう所が固有なものになるのか？
(8) 固有になるとすると，何がその要因なのか？Diversity か？
(9) OET の利用として誰がどういうときに使うことを想定しているのか？
(10) オントロジーがシソーラスを強化するということは実際にはどういうことなのか？

このように, 原則論に基づく批判から次第に具体性を求める批判へと変わってきた結果，ドキュメントにも記述されている Motivating example を再度説明して，そこに現れる例題に対して，提案しているアプリである Keyword explorer が OET の上でどのように動作するかのデモを行うこととなった. その結果状況は一変し, 批判は影を潜め, 賞賛と OET を支持する方向の議論へと方向転換された．更に，Keyword explorer の試用の許可を求める声が相次いだ．我々の提案を支持するコメントの後，ドキュメントの書き方の議論に移行した. 現在のドキュメントは Keyword explorer を単なる応用プログラムの一例として位置づけて，OET の内容と必要性を一般論として展開していることが分かりにくい原因であるので，Keyword explorer を前面に押し出して，それを実現するために OET を設計するという具体例主導の記述に変更することとなった.

OET の基本思想は，情報の検索において用いられる Keyword 探索を独立したタスクとして設定し，以下の二段階の支援を行うことにある.

Step 1：シソーラスを用いた通常の Keyword 探索を支援.
Step 2：選択した Keyword が生物側の DB でその概念を用いてインデックス付けされていないが，利用者にとって有用な情報が存在する場合(missing link と概念化)に対処するために，機能オントロジー以外のオントロジーも準備して，その Missing link を補償する[3][7].

そして，Step 2 に関して，モデルケースとして小規模のオントロジーを実装し，その上で動くアプリが Keyword explorer である．WG4 が標準化すべきものはそのようなオントロジーの開発プロセスなのであるが，開発プロセスの標準化を行う前に，そもそもそのようなオントロジーの開発の意義自体を WG メーンバーで共有することが不可欠であるので，その意義を具体的に示すためにアプリを作成した．実際，その意図通りデモは非常に効果的であった. 批判的な発言者を含む全員がデモプログラムの意義を理解しただけではなく，その斬新さと有用性を深く理解することに大きく貢献した. Keyword explorer は, 実現したい機能が入力されると, オントロジーを探索して[5][6], それを実現している可能性のある生物種の候補を表示する. 既に知られている生物種の表示は当然であるが, まだ知られていないが, 可能性が期待できる生物種（Missing link）を表示する能力を持つことが特徴である．Keyword explorer は，適切なキーワードを見つけるための種々の操作をサポートする一種の Workbench として位置づけられ, 表

示された生物種ノードを右クリックするだけで DBpedia や Google，CiNii 等から瞬時に情報を取って来ることができる．それらを総合して，相談すべき研究者名を含む，適切な Keyword を選定して本格的な情報検索を実行することが可能になる．

３．結論

上述の様に，率直かつ緊密な意見交換を通して，WG4 を Proposal stage に移行するための作業を開始することが承認された．Keyword explorer のデモはかなり良い印象を与えたが，重要なことはそれ自体は標準化対象では無いことである．標準化の対象としては，そのような有用なアプリを構築する可能性を持つ，Knowledge infrastructure of biomimetics としての Ontology-enhanced thesaurus の開発プロセスの標準化を行うのが WG4 の活動である．今後は，日本側が主導権を持って，2016 年春を目処に New Work Item Proposal (NWIP)を作成し，その承認を得て，正式に Proposal stage に進むことを目指して活動する．

＜参考文献＞

[1] 國岡，他：JST シソーラス map，情報管理，Vol.55, No.9, pp.662-669, 2012.
[2] 溝口理一郎：オントロジー工学，オーム社，２００５．
[3] 溝口理一郎：オントロジー強化型シソーラス―工学者のための発想支援型情報検索を目指して，情報管理，Vol.58, No.5, pp.361-371, 2015.
[4] Yoshinobu Kitamura, Sho Segawa, Munehiko Sasajima, Shinya Tarumi and Riichiro Mizoguchi: Deep Semantic Mapping between Functional Taxonomies for Interoperable Semantic Search, Proc. of the 3rd Asian Semantic Web Conference (ASWC 2008), Springer, LNCS 5367, pp. 137-151, February 2-5, Bangkok, Thailand, 2008
[5] Takeru Hirota, et al.: Divergent Exploration of an Ontology: Poster & Demo Notes of the 7th International Semantic Web Conference (ISWC 2008), Karlsruhe, Germany, 2008
[6] Terukazu Kumazawa, et. al.: Toward Knowledge Structuring of Sustainability Science Based on Ontology Engineering, Sustainability Science, Vol.4, No.1, pp.99-116, 2009.
[7] Kozaki, K. et al.: A Keyword Exploration for Retrieval from Biomimetics Databases, Proc. of Joint International conference on Semantic Technology, LNCS8943, Springer, pp.361-377, 2014.

環境・ＣＳＲ経営からみたバイオミメティクス

（株）積水インテグレーテッドリサーチ　白鳥和彦
電話 075-662-8604　FAX 075-662-8605
E-mail k-shiratori@sekisui.com

自然界は基本的に，太陽のエネルギーを受けて植物が光合成を行い，食物連鎖によってさまざまな生物が生まれては死んで次の栄養源となるといった具合に，循環システムが効率的，相互作用的に働いている。植物も動物も，限られた資源，エネルギーで生命の営みを続けられる機能を備えている。

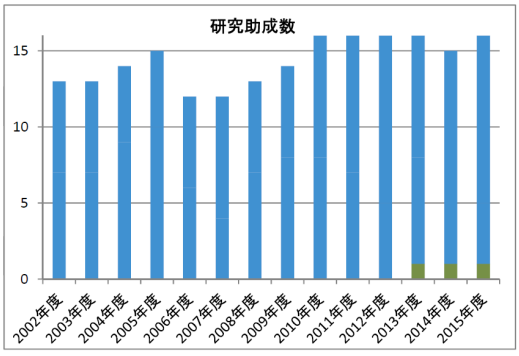
これからのテクノロジー開発では，あらためて「生物」が生きるために身につけた知恵や，省エネルギーで環境負荷のない生産技術に学ぶことがさらに重要になっている。こうした地球上の生物は，誕生以来 38 億年という長い時間を生きてきて，その進化の結果，人の叡智やハイテクも及ばない驚くべき「智恵」の体系を持っている。このような生物の構造や機能，生産プロセスなどから着想を得て，新しい技術の開発やものづくりに活かそうとする科学技術は持続可能な社会実現への技術革新をもたらすものとして重要である。この認識から「積水化学 自然に学ぶものづくり」研究助成プログラムはスタートした。

このプログラムは下記３点から構成される。また，研究費助成に関わる運営は，積水化学工業の子会社である積水インテグレーテッドリサーチが事務局を担当している

(1)積水化学 自然に学ぶものづくり研究助成：自然に学んだ基礎サイエンスの知見を活かし，自然の機能をものづくりに活用する研究に対し，研究費を助成する

(2)自然に学ぶものづくりフォーラム（年 1 回開催）：同分野の研究者のネットワークを作り，技術の融合，産学の融合を通じて総合科学の発展に貢献することを図る

(3)コミュニケーション・啓発活動：21 世紀型の環境ビジネス領域である生物模倣学の最新情報を発信し，その重要性を広く社会に訴える



研究助成については，本年度 292 件の応募

から 16 件の助成を行った。これまで 14 年間の累計で４千件近い応募があり，そのなかから 201 テーマに助成を行った。助成総額は３億円を超える。応募される研究分野は大きく(1)生物機能に学ぶ，(2)天然資源を生かす，(3)生体（生命の営み）に分けている。研究内容は，エコマテリアル，環境修復技術，ナノテクノロジー，バイオテクノロジー，メカトロニクスなど多岐に渡る。研究者の専門分野も，工学・理学だけでなく，農学や薬学，医学など幅広い研究者が集まっている。この多様性が本プログラムの大きな特徴である。

大学や研究所の研究はどうしても論文優先になり，世界で誰もやっていない研究や試験管レベルでの検証など地道な研究を，最新の設備がない環境のなかで，あるいは限定され，かつ制約の大きい予算でこつこつ行っている。したがって，どうしても具体的な成果が出るまで時間がかかるうえ，自分の専門分野に閉じこもりがちになる。

一方，企業は利益を出さなければいけないため，短期間に成果の出る研究を求める傾向が強くなり，(1)テクノロジーが（コストを含めて）本当に卓越しているか，(2)対象となるマーケットサイズが十分に大きいか，(3)実用化されるタイミングが市場にマッチしているかといったことを考えながら事業を進めているため，大学や研究所の学術的研究とは大きな乖離がある。

本分野の研究者への助成支援，環境や生物模倣学の重要性を社会に発信することについては，これまでの活動である程度達成されたと認識しているが，本分野の研究や技術開発が進み事業を生み出すことまで出来て社会に貢献することであると考えている。それに向けて今後は産学の連携・共同で成し遂げられるような助成支援や連携のスタイル・仕組みを図りつつ研究助成を継続していきたい。

欧米の環境・技術戦略からみたバイオミメティックス

（三菱総合研究所）亀井　信一
電話 03-6705-6087　FAX 03-5157-2126
E-mail　skamei@mri.co.jp

１．我が国が置かれている状況分析－歴史科学的な視点から－

日本のモノづくり産業に元気がない。わが国を代表する企業が赤字に陥り，世界ブランド価値評価の上位 100 位以内には 7 つのブランドしか入っておらず，しかも，そのいずれもがランキングを年々落としている。さらには，近年，「モノづくり終焉」という言葉も出てきた。モノづくり不要論は，本当であろうか。

言うまでもなく，わが国は極端に資源の乏しい国である。すなわち，エネルギーや資源を海外から輸入しなければ直ちに立ち行かなくなるきわめて不安定な先進国である。東日本大震災は，改めてその厳然たる事実を突きつけた。燃料，食料，鉱物資源の輸入だけで約39兆円にのぼる。必需品といえるこれらの輸入を賄うためには，相当分を海外に売り外貨を獲得しなければならない。現在，日本の輸出製品の90％は工業製品である。したがって，モノづくりの競争力の確保は，わが国の存在を左右しかねない極めて重要なテーマなのである。

しかしながら，1990年代以降，国内の製造業の付加価値は頭打ちになっており，国際的なシェアや存在感が薄れつつあることも事実である。このままで進めば，製造業の付加価値ランキングは，現在の世界3位から，2030年までには5位まで低下すると予測している。これを打ち砕くためには，これまでとは全く異なる発想の転換が求められる。

これまでのモノづくりには，外から熱を加えて鎔かし固めたり，削ってのばしたりする工程を経るものが多かった。特に半導体製造プロセスの多くは，大規模な真空装置を用いた製造法がとられてきた。これらのプロセスでは，多大なエネルギーと資源の投入が必要であり，省資源や省エネルギーとは掛け離れた世界が展開されてきた。21世紀型のモノづくりは，サステイナブルで環境調和型のものが求められる。その期待が，自己組織化ナノテクノロジーに向けられている。究極のモノづくりとは，モノの持っている本質的な性質を最小のエネルギーで取出すことであろう。近年，出口志向が声高に叫ばれ，ともすると基礎研究が軽視されそうになるが，自然を愛でるという哲学に基づくモノづくりの実現は，産業的な期待のみならず，新しいサイエンスの世界をも切り拓くことが期待されている。

２．第三の産業革命（インダストリー4.0）とは何か？

モノづくり（製造業）の使命はイノベーションである。今，モノづくりの世界で大きな革命が始まっている。インダストリー4.0とは，ドイツの産業政策であるが，メイカーズ・ムーブメントを捉えた次世代の産業革新である。

昨年末に，私どもは，「第3の産業革命（メイカーズ・ムーブメントが資本主義を変える。ものづくりを変える。あなたの働き方を変える。）」の概念を提唱した（PHRONRSIS,Vol.6, No.1，ダイヤモンド社(2014)）。第一の産業革命は，1760年代の英国に始まった機械生産，製鉄技術の発展，工業と分業の拡大，水力と蒸気機関という動力源の獲得などの一連の技術

イノベーション連鎖による生産性の飛躍的向上である。第二, 第三次の産業革命に関しては, 諸説ある。一つは電気や石油による重化学工業への移行後を第二次，原子力エネルギーを利用する現在を第三次ととらえる見方がある。また，20世紀初頭のフォード生産方式を始まりとする大量生産の時代を第二次，20世紀後半のITおよびインターネットとそれに続くメイカー革命をひとくくりにして第三次と捉える一派もいる。われわれは，IT革命やインターネット革命と呼ばれるものまでを第二次産業革命とする立場をとっている。これと第一の産業革命の決定的な違いは, 巨大な生産資本を持っていなくてもIT武装すれば事業的な成功を収めることができる点である。個人へのパワーシフトをもたらしたとみることもできる。

いま起こりつつある第三の変革は，デジタル・ファブリケーションの急速な進歩と普及によって，個人でも高度なモノ作りを可能とするメイカーズ・ムーブメントが拡がっていることである。第三の産業革命は，第2の産業革命の延長線上で語られることが多いが，ビットの世界で起こったIT革命が，実態のあるアトムの世界に広がった点が決定的に異なる。MITメディアラボのニール・ガーシェンフェルド教授の言によれば「アトム（現実）とビット（デジタル・情報）の融合（モノをデータ化し，データをモノにする)」ということになる。

ところで，わが国のモノづくり産業の衰退の原因を，的確な設計情報を創出できないことに帰着させる見方が定着してきた。市場を拓き利益を創出するモノを見出せないのである。わが国の工業製品と言えば，メイドイン・ジャパンの高品質を思い浮かべるが，品質管理や生産性の向上は，実は第一次産業革命時代の考え方である。大量生産の時代の付加価値の考え方はとうの昔に終わっていたことに早く気付くべきであった。

第三の産業革命（インダストリー4.0）の時代は，まさに設計情報のみがモノづくりの付加価値を生み出すことになる。さらに，アトム（現実）とビット（デジタル・情報）が融合する時代では, 設計情報の生み出し方もこれまでのそれとは全く異なるであろうことは容易に想像できる。それでは，その具体的な未来像はどのように描かれるのであろうか。メイカーズ・ムーブメントは，ICT とデジタル・ファブリケーションによって武装された個々のメイカーたちが，デザイン，設計，製造，果てはリサイクルや電力源までのバリューチェーンを担うことになる。究極の自律分散型社会であり，多様性を前提とした社会でもある。

３．欧米のモノづくり革命の真の意味

国家として総力を挙げて，モノづくり革命に取り組んでいるのは，ドイツである。基本コンセプトとして「つながる工場」を掲げ，通信ネットワークを介して工場内外のモノやサービスと連携させることにより, 今までにはない新しい価値やビジネスモデルを創るとともに種々の社会問題を解決しようとしている。一般的には，ドイツの強みは，古くから州や都市での産業クラスター単位での産業構造を有するとか, 世界的な研究所が地域に点在し各研究拠点が州立大学と連携し地域ごとに強い R&D 分野が推進されているとか，人を通じた産学一体での取り組みがなされている点などが指摘されてきた。それだけであろうか。実は，ドイツは，博物館や美術館の数が我が国やほかの欧州諸国と比べて桁違いに多い。小さい時から自然やアートを愛でる文化が根付いていそうである。第三の産業革命（インダストリー4.0）時代の見えざる競争力である。

生物多様性と自然環境評価

大阪府立大学大学院生命環境科学研究科　平井　規央
電話 072-254-9413　FAX 072-254-9694
E-mail　n_hirai@envi.osakafu-u.ac.jp
URL　http://www.envi.osakafu-u.ac.jp/entomol/index.html

46 億年の地球の歴史の中で，生命は約 38 億年前に誕生したといわれている。現在地球上には数千万種もの生物がいると考えられているが，これらは時間とともに常に増加してきたわけではなく，何度かの大絶滅と呼ばれる時期を経験してきた。近年は，人間活動の影響を受けて，6 度目の大絶滅と呼ばれる時期を迎えている。ここでは，生物多様性の概要を述べるとともに，自然環境評価の視点からその保全について考察する。

生物多様性 biodiversity という言葉は，生物学的 biological と多様性 diversity を組み合わせた造語で，1985 年頃から使われ始めたといわれている。1992 年にリオデジャネイロで開催された「地球サミット」（国連環境開発会議）で採択された「生物多様性条約」以降は特に関心を集めるようになった。生物多様性には「生態系の多様性」，「種の多様性」「種内の多様性（遺伝子の多様性）」3 つのレベルがあると捉えられている。この中で，生物多様性と聞いて素直にイメージできるのが種の多様性で，それぞれの地域にどれだけ多くの生物種が生息しているかということである。生態系の多様性は，森林，草原，砂漠，河川，湖沼，海洋などさまざまな生態系が存在することで，それぞれに生息する生物の構成種も異なり，多様となる。種内の多様性は，遺伝子の多様性または遺伝的多様性といった方がわかりやすい。例としてはテントウムシの模様が有名であるが，外見には表れなくても高い遺伝的多様性を維持している集団は病気の流行や環境の変化を乗り切る個体が含まれる可能性が高いことになる。

このような生物多様性を基とする生態系から私たちはさまざまな恩恵を受けており，これらは次の 4 つに大別される。「供給サービス」は，衣・食・住にかかわる材料や医薬品など，生態系からもたらされる生物資源とその利用を指す。「基盤サービス」は，植物による二酸化炭素の吸収や酸素の放出，分解者による分解などすべての生命が存立する基盤を支えるものである。「調整サービス」は，森林による土壌の流出防止，気候の緩和など地域の環境や暮らしの安全性に関わるものである。最後に「文化的サービス」

は，野生生物や生態系が文学，芸術，教育，研究などの対象となり，豊かな文化の根源となっていることを指す。これらのことから，生物多様性の損失は私たちの豊かで快適な生活を脅かすことにつながってしまう。

日本において生物多様性の低下をもたらす要因として，「4 つの危機」が挙げられている。①開発など人間活動による危機（開発や乱獲など），②自然に対する働きかけの縮小による危機（里地里山問題など），③人間により持ち込まれたものによる危機（外来生物や化学物質の影響など），④地球環境の変化による危機（地球温暖化や海洋の酸性化による影響など）である。このような背景から，生物多様性保全を目的とした生物調査では，特に絶滅危惧種と外来種の把握が不可欠となっている。

絶滅のおそれのある種をリストアップし（＝レッドデータリスト RDL），その生息状況などをまとめたレッドデータブック（RDB）は，環境省が 1991 年（当時は環境庁）から発行し，5〜10 年に一度見直しが行われている。2012〜2013 年に公表された第 4 次リストでは，動物 1,388 種，植物 2,337 種，計 3,725 種が掲載され，ニホンオオカミやカワウソなど 828 種が絶滅種とされている。都道府県，市町村でも同様の資料が順次発行されている。最近では，RDB 掲載種（レッド種ともいう）が特に多く生息する地域を「生物多様性ホットスポット」と呼んで（もともとの言葉の定義は異なる），特に保全上重要な場所として指定する取り組みも各地で行われている。

本講演では，生物多様性について概観し，絶滅危惧種や外来種問題，生物調査の実際について実例を挙げながら紹介する。生物がもたらす資源の多様性や，その循環，また，生物多様性保全の重要性などでバイオミメティクスの参考となる事例があれば幸いである。

出典：福田隆史 「第 11 節　フジツボ構造の形成によるプラズモン現象の効率的発生とバイオセンシングへの応用」，
監修 文部科学省科学研究費新学術領域「生物規範工学」・高分子学会バイオミメティクス研究会・エアロアクア
バイオメカニズム学会，『生物模倣技術と新材料･新製品開発への応用』，(株)技術情報協会，2014，第 7 章 pp. 469-472

第 11 節　フジツボ構造の形成によるプラズモン現象の効率的発生とバイオセンシングへの応用

はじめに

筆者らは感染症や各種疾病の早期・迅速診断を簡便に行うためのバイオセンサーとして局在プラズモン現象を利用することを検討している。プラズモン現象とは金属表面の自由電子が特定の波長の光によって励振されることを指すが，特に，金属の微細構造に生じるプラズモンを局在プラズモンと呼ぶ。

特定の波長の光のエネルギーによって金属表面の自由電子が励振されると言うことは，すなわち，当該波長の光が金属によって吸収されることであり，金属本来の吸収スペクトルには見られない新たな吸収ピークが生じることを意味する。したがって，この新しい吸収ピーク（プラズモン共鳴ピーク）は金属表面の化学的・物理的状況に強く依存して変化する。この変化が鋭敏であるものほど高感度なセンシングに好適であり，これまでに様々な微細構造について報告がなされている[1-3]。

このような中，筆者らは，独自の製造方法によって特徴的なサブ波長構造が安価・簡便に形成できることを見出し，そのバイオセンサー応用（局在プラズモンチップの開発）を進めている。以下にその概要を紹介させて頂く。

1.　光応答性高分子材料における自発的構造形成（フジツボ構造の形成）

筆者らは光応答性材料を対象として，光一括処理可能・安価な微細構造の形成技術の開発について従来より取り組んできた[4-6]。そして，それらの知見を土台としつつ，種々の検討を（株）カネカと共同して進めた結果，新しい自発的構造形成現象を発見した。当該現象は図 1（A）～（C）に示すように，光応答性高分子材料の薄膜上に水層を介在させた状態で青色 LED 光を照射することで発現する。形成された微細構造の電子顕微鏡観察像を図 2 に示す。

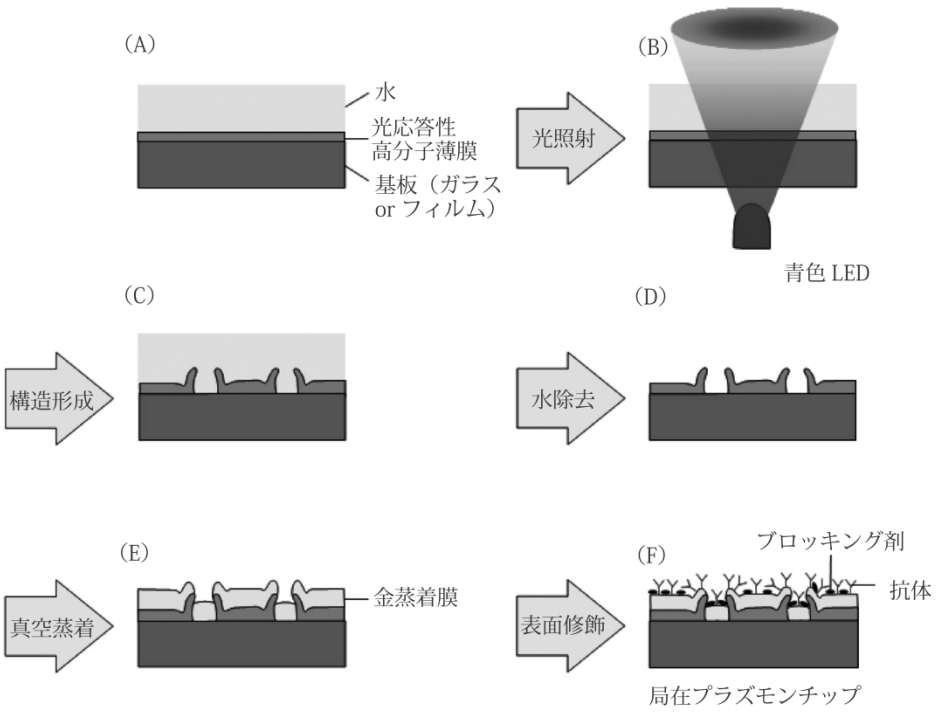


図 1　光応答性材料における自発的構造形成現象と局在プラズモンチップ

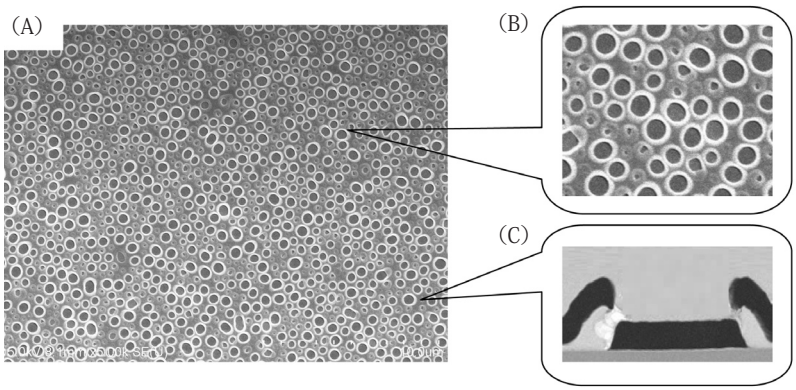


図２　形成された微細構造（フジツボ構造）の上面，及び，断面観察図

図２（A）は膜を上面から観察したものであり，サブミクロンサイズの輪状の構造が光応答性材料薄膜の全域にわたってランダムに生成されていることが分かる。図２（B）は一部分の拡大像である。さらに，図２（C）に一つの構造の断面を観察した結果を示す。基板から斜めに立ち上がっている白い部分が光応答性材料薄膜であり，黒い部分はその上に真空蒸着によって堆積された金薄膜である。図２より形成された微細構造が円形開口を持った凸部からなることが理解されると思うが，この形状から海洋生物の“フジツボ”が連想されたため，筆者らは当該構造を『フジツボ構造』と命名した。

フジツボ構造をバイオセンシングチップにするためには図１（D）～（F）に示すように，金の蒸着を施した上で，その表面に検出対象となるバイオマーカーを捕捉する能力を有する抗体を修飾する。したがって，抗体の種類を適切に選ぶことによって，同一のプロセスで製造されるバイオチップを多様なターゲット（特定ウィルス，タンパク，ホルモンなど）にカスタマイズすることができる。なお，チップの基板は青色光に対して透明なものであれば特に種類を問わない。現在の研究段階ではスライドガラスなどを基板として用いているが，製造・廃棄コストの低減，ならびに，チップの取り扱い上の安全性への寄与を期待して，透明な樹脂フィルムの適用も検討中である。

2.　フジツボ構造を有する局在プラズモンチップのバイオセンシング性能

さて，図１に示すプロセスによって作製される局在プラズモンチップであるが，これまでに，インフルエンザウィルスを含む数種類の代表的なバイオマーカーに対して（精製試薬を用いた実験レベルではあるものの）性能評価を実施してきた。表１に示す通り，筆者らのチップの検出可能範囲（検出下限濃度）は，現在臨床現場で行われている一般的な検査法の検査濃度に比べていずれも３桁（1000 倍）以上に相当することが明らかとなっており，ターゲットをラベル化するなどの前処理を必要としない方法にもかかわらず，高感度な検出が期待できることが分かる。

このような高感度なセンシングが達成されている要因として，フジツボ構造による特有の電場増幅効果が考えられる。図３は，フジツボ構造に垂直に光が入射する場合を仮定した場合の数値シミュレーション（時間領域差分法（FDTD 法））

表１　現在普及している一般的な検査法による検査濃度とフジツボチップの検出下限濃度の代表的な検査対象における比較

マーカー （関連のある疾患など）	一般的な検出法による検査濃度	フジツボ構造チップ による検出下限濃度
Fibrinogen （血液凝固因子）	1.5-4mg/mL （トロンビン時間法）	10pg/mL
CRP （各種炎症（肝疾患，癌，感染症など））	3 μg/mL 以下 （ラテックス免疫比濁法）	1ng/mL
Leptin （肥満，高血圧，動脈硬化，糖尿病など）	規程なし （RIA2 抗体法） （化学発光法では 100pg/mL の報告有り）	100pg/mL
不活性化 H1N1 ウィルス （インフルエンザ）	50ng/mL 程度 （イムノクロマト法）	100pg/mL 以下

を行った結果である。図は特定の波長における電場強度分布を示しているが，フジツボ構造の開口付近に入射光のエネルギーが集中し，局所的な光密度が最大 70 倍まで増幅されることが予想されている。このため，強い光吸収が起こるが，局在プラズモンの共鳴条件は金属膜表面の状態に非常に敏感に影響を受けるため，センサーチップの抗体がバイオマーカーをわずかでも捕捉すれば吸収スペクトルのシフトとしてその結果ははっきりと捉えることが出来る（図 4）。

スペクトルシフトの値は概ねバイオマーカー濃度の常用対数に対して線形に変化する傾向が認められる。不活性化された H1N1 インフルエンザウィルス精製試薬溶液を対象として行ったセンシング実験の結果を図 5 に示す。

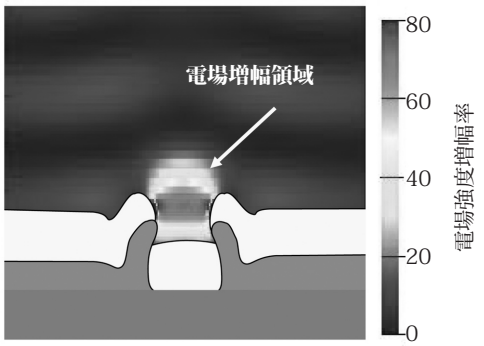


図 3　時間領域差分法（FDTD 法）による電場増幅効果のシミュレーション結果

※カラーの図は巻頭ページ参照

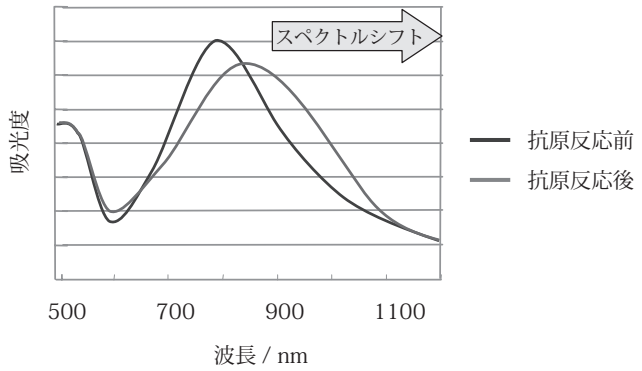


図 4　バイオマーカーに反応させる前後におけるスペクトルシフトの例

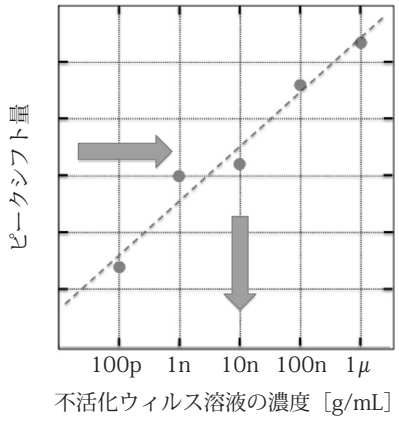


図 5　サンプル中のインフルエンザウィルス濃度とスペクトルピークシフト値の測定例

3.　局在プラズモンを利用するもう一つのメリット

局在プラズモンは高効率な電場増幅を実現するため，簡便に非標識の高感度センシングが達成できることは既に述べたが，それ以外にも局在プラズモンをセンサーの検出原理として利用する大きなメリットがもう一つある。それは，局在プラズモン効果が，光の入射角に対して比較的小さな依存性しか示さない点である。通常の表面プラズモンの場合，プラズモンが励振される（共鳴する）入射角を角度スキャン測定によって計測し，その変化をセンサーの検出原理とする。一方，局在プラズモンの場合，光の入射角を一定とした（例えば垂直入射の光学配置に固定するなどの）測定によってスペクトルシフトを検出する方式であるため，光計測系から機械的稼働部分を排除し，検出機構を大幅に小型化できるメリットがある（図 6）（なお，図にはスペクトルを測定するための分光器が 2 台描かれているが，実際には反射配置，または，透過配置のいずれかに光路を選択すれば良く，設置するのは 1 台で良い）。この点は，ポイントオブケア検査（Point of Care Testing : POCT）分野への適用を考える上で極めて重要な点である。図 7 は筆者らが開発したポータブル計測システム[7] の外観である。計測器の重量はわずか 600g 程のパームトップサイズであり，スマートデバイスが無線操作端末となっている。

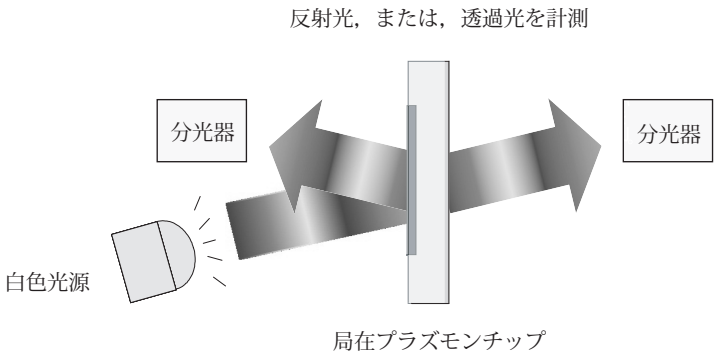


図 6　小型化を容易に行うことが出来る単純なスペクトル測定系

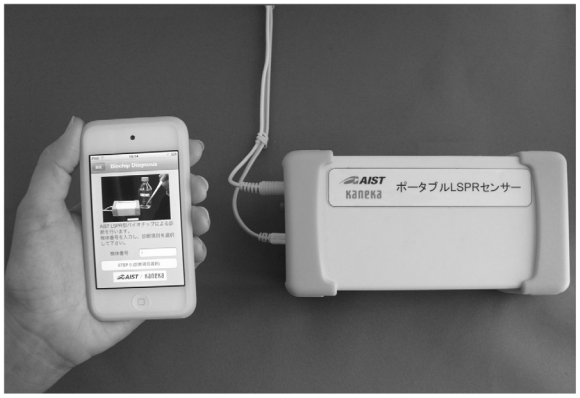


図 7　試作した手のひらサイズのポータブル計測器（右）と無線操作端末（スマートデバイス）（左）からなる小型バイオセンシングシステム

おわりに

筆者らは光応答性材料のユニークな特性を利用して，独自のフジツボ構造を簡便に，かつ，安価に製造する方法を見出し，その構造が生み出す局在プラズモン効果を利用したバイオセンサーの試作に成功した。チップのコストは現在市販されているイムノクロマトキットと比較しても遜色のないレベルに抑えることが出来ると期待しており，今後の更なる研究開発を通じて『非標識（特殊な前処理なし）で・どこでも・誰でも簡単に高感度なバイオチップ，及び，センシングシステム』の実用化に結びつけたい。

謝辞

本研究開発の一部は，科研費 基盤（B）（平成 23 ～ 25 年度）による支援の成果として得られたものであり，ここに感謝致します。

文　　献

1）P. N. Prasad : *Nanophotonics*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA (2004)
2）*プラズモニクス－光・電子デバイス開発最前線－*，（株）エヌ・ティー・エス（2011）
3）岡本隆之，梶川浩太郎：*プラズモニクス－基礎と応用－*，講談社（2010）
4）福田隆史：「光による表面レリーフ形成」，O plus E，第 24 巻 第 3 号（2002）pp. 287
5）福田隆史：「光誘起による表面レリーフ形成現象」，高分子論文集，第 60 巻 第 8 号（2003）pp. 428
6）福田隆史:「第 13 章 アモルファス高分子の光誘起物質移動」, 新規クロミック材料の設計・機能・応用, シーエムシー出版（2005）
7）http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130117/pr20130117.html