

1.登録年月日 2018/6/26

2.会議体名

フロンティア連携委員会 先端化学・ 材料技術部会 新素材分科会

3.件名

外部委託調査最終報告書 「新素材コンセプト創出のためのバイオミメティ クス技術の開発動向調査」 株式会社 積水インテグレーテッドリサーチ

4.発信者

JACI 福井祥文

5.発信先

J-Shares 外部委託調査フォルダー

6.公開範囲、期間

正会員・関係者及び上司・同僚・部下まで (関係者外秘) 登録後5年以内



2018年5月31日

公益社団法人 新化学技術推進協会 先端化学·材料技術部会新素材分科会御中

(Confidential 新化学技術推進協限り)

「新素材コンセプト創出のためのバイオミメティクス技術の開発動向調査」調査報告書



株式会社 積水インテグレーテッドリサーチ

(本件に関するご連絡先)

㈱積水インテグレーテッドリサーチ

部長 飛鳥政宏 asuka@sekisui.com

〒601-8105 京都市南区上鳥羽上調子町 2-2 電話 075-662-8604



目次

1. はじめに

- 1-1. 調査の背景
- 1-2. 調査の目的
- 1-3. 調査の項目
- 1-4. 調査の方法

2. 調査結果

- 2-1. 分子系バイオミメティクス動向
 - 2-1-1. これまでの分子系バイオミメティクスの技術動向と化学産業への貢献 2-1-2. これから商業化が期待される分子系バイオミメティクス技術の動向
- 2-2. 材料系バイオミメティクス動向
 - 2-2-1. これまでの材料系バイオミメティクスの技術動向と化学産業への貢献 2-2-2. これから商業化が期待される材料系バイオミメティクス技術の動向
- 2-3. 日本の官庁・企業の動向
- 2-4. ドイツ及び周辺国のバイオミメティクスの動向
- 2-5. ISO TC266 の動向
- 2-6. 中国と米国の動向

3. まとめ

- 3-1. バイオミメティクスへの新しい視点
- 3-2. 新しい視点から見た分子系、材料系からの新素材への可能性
- 3-3. ドイツ及び周辺国の動向が日本の素材の研究開発や産業界へ与える影響
- 3-4. ISO TC266 が日本の素材·商品の研究開発·産業化へ与える影響

4. 本報告書のまとめ



1. はじめに

本調査報告書は、公益社団法人新化学技術推進協会(略称: JACI)先端化学・材料技術部会新素材分科会が公募した「新素材コンセプト創出のためのバイオミメティクス技術の開発動向調査」を、株式会社積水インテグレーテッドリサーチ(略称: SIR)が受託し、2018 年 1 月より 5 月に調査した結果をまとめたものである。本調査報告書は、5 年間公益社団法人新化学技術推進協会の会員限定で開示され、5 年経過後一般公開されるものである。

1-1.調査の背景

生物の優れた構造や機能などを解析して、そこに潜む原理を解明し、新たな工 学技術を生み出す取り組みであるバイオミメティクスへの注目が高まっている。

この分野で先行しているのは独・仏を中心とする欧州であり ISO/TC266 を立ち上げ、産業展開策を図っている。一方の米国は当該 ISO にオブザーバー参加はしているものの、欧州とは距離を置き、米国国立科学財団 (NSF) や米国国防高等研究計画局 (DARPA) を中心に"バイオミミクリー"と定義した独自の研究開発を進めている。それらに比べ日本では、NPO 法人バイオミメティクス推進協議会が 2017年 8 月に発足したばかりであり、標準化を含めた開発状況は後塵を拝しているのが現状である。

(新化学技術推進協会による公募要項より抜粋引用)

1-2.調査の目的

本調査では、上述した日本の状況を挽回すべく、①国内外のバイオミメティクス技術を初めて統合整理した上、新素材コンセプトの創出につなげると共に、②素材・商品の研究開発・産業化の障壁とならないかという観点から、国際標準化や各国の政策動向の状況を把握し、化学業界として新素材開発に活かせる形で整理することを意図している。

(新化学技術推進協会による公募要項より抜粋引用)



図表.調査の目的と項目

目的	項目
新素材コンセプトの創出 そのために、素材·構造·機能の相関関係 等を新たに見出す	国内外のバイオミメティクス技術を初 めて統合整理する
素材・商品の研究開発・産業化の障壁とな	国際標準化や各国の政策動向の状況を
るリスクがあるかを明らかにする	把握

公募要項を下記に示す。

公募要項

公益社団法人 新化学技術推進協会 先端化学·材料技術部会 新素材分科会

1. 件名

『新素材コンセプト創出のためのバイオミメティクス技術の開発動向調査』についての調査

2. 背景と目的

生物の優れた構造や機能などを解析して、そこに潜む原理を解明し、新たな工学技術を生み出す取り組みであるバイオミメティクスへの注目が高まっている。バイオミメティクスは、分子系、機械系、材料系の3つに大別されるが、新潮流として、分子系と機械系の研究を統合した総合的なバイオミメティクス研究が進展している。

バイオミメティクス技術は、分子系(nm レベル)、材料系(数十 nm~数 μ m)、機械系(mm 以上)、の 3 つが独立して進展してきた。本調査では、材料系を中核に分子系と機械系を融合した新素材コンセプトを創出するために、バイオミメティクス技術の開発動向を初めて統合整理することで、素材・構造・機能の相関関係等を新たに見出したい。

この分野で先行しているのは独・仏を中心とする欧州であり ISO/TC266 を立ち上げ、産業展開策を図っている。一方の米国は当該 ISO にオブザーバー参加はしているものの、欧州とは距離を置き、米国国立科学財団 (NSF) や米国国防高等研究計画局 (DARPA) を中心に"バイオミミクリー"と定義した独自の研究開発を進めている。それらに比べ日本では、NPO 法人バイオミメティクス推進協議会が 2017年8月に発足したばかりであり、標準化を含めた開発状況は後塵を拝しているの



が現状である。

本調査では、上述した日本の状況を挽回すべく、①国内外のバイオミメティクス技術を初めて統合整理した上、新素材コンセプトの創出につなげると共に、②素材・商品の研究開発・産業化の障壁とならないかという観点から、国際標準化や各国の政策動向の状況を把握し、化学業界として新素材開発に活かせる形で整理することを意図している。

3. 調査内容

3-1. 調査整理の視点

本調査では、単なる技術・商品の羅列ではなく、バイオミメティクス技術を化学業界として新素材開発に活かせる形で整理したい。一案として、生物が有するサブセルラー(数十 nm~数 μ m)構造が特異な機能を発現することが多いため、バイオミメティクス技術を構造(サイズ)別に分類し、素材・構造・機能の相関関係を新たに見出すことが挙げられるが、これに限らず、新素材開発に有用な分類方法を入手したい。

3-2. 海外での開発状況

- ・ 1 の視点をもとに他国に大きく先行している独・仏や、さらには素材から建造物までの応用を目指した独自路線を行く米を中心に、最新の技術動向の調査を行い、技術的な内容は国内調査と合わせて分類する。
- ・ また、国際標準としての ISO/TC266 の現状とその狙い、当該分野の素材開発 にどの程度まで影響を与えるかに着目して調査を行い、今後の動向について 考察する。

3-3. 国内の開発状況

過去の(非統合的な)調査報告書の内容を活用し、最新技術を補完するとと もに、1の視点で分類する。

注:本調査は上記 2017 年 12 月の募集要項をベースに、2018 年 2 月のキックオフミーティング、4 月の中間報告会での、新化学技術推進協会殿からの追加ご要望、一部修正に基づいて進めた。



1-3. 調査の項目

図表. 調査項目と手法の一覧

具体的な調査項目	調査手法
材料系(数十 nm~数 μ m)を中核に	1) 積水イングレーテッドリサーチが 2002 年以来
1) 国内外の過去の成功例	蓄積した過去の知見の精査活用(公
2) 国内の最新の技術開発状況	開可能なもの限定)
3) 海外の最新の技術開発状況	2) 国内外の報告書、文献、特許調査
4) サイズと機能の整理統合	3) 国内有識者訪問取材調査
	4) 欧州有識者訪問取材調査
材料系(数十 nm~数 μ m)を対象に、化	
学・素材メーカーの観点で	1) 国内外の報告書、文献、特許調査
1) ISO/TC266 の動向	2) 国内有識者訪問取材調査
2) ドイツの産学官連携(BIOKON)動向	3) 欧州有識者訪問取材調査

【新化学技術推進協会殿からのご要望】

受注後、新化学技術推進教会とは3回の打ち合わせを実施し、進捗状況を報告、調査の進め方につき指導、指示を受けた。

図表.調査の進め方に関する新化学技術推進協会との打ち合わせ

会議日	会議名
2018/2/15	キックオフミーティング
2018/4/12	中間報告会
2018/5/21	最終報告会

上記の会議にて、次の要望、指示を受け、調査及び本報告書に反映させた。 化学技術推進協会からの要望・指示は、

- 1)「生物が」勝ち取った優れた機能のメカニズム」に着目せよ
- 2)「機能を発現するために何が必要か」の観点で見よ。「構造」か「材質」なのか
 - ① 「構造」の場合 □「サイズ」を明記
 - ② 「材質」の場合 □「材質」を具体的に明記し、特徴(物性)等を明記



3) (分子系よりも)材料系に注力せよ。機械系は不要

図表. バイオミメティクスのサイズ別分類

分子系	nmレベル
材料系	数十nm~数μm
機械系	mm以上

4)「原理はわかったが商業化が未のもの」に注力し、その n 数を増やせ。 「原理がわかっていて商業化済のもの」も成功例として紹介すること。

【バイオミメティクスの定義】

本報告書では、バイオミメティクスの定義を ISO TC266 (バイオミメティクス) のバイオミメティクス 3 原則とする。

図表. バイオミメティクス3原 則 1)

- 1.「生物」の分析に基づく
- 2. 生物から「原理抽出」しモデル化
- 3. 生物を(そのまま)利用するのではなく「(ヒトの)技術に転換」
 - 1) バイオミメティクス国際標準化ニューズレター,4,2015 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL4.pdf

【新しい視点】

従来のバイオミメティクスの産業界への展開は、「分子系」、「材料系」、「機械系」が独立して進展しており、これらが統合・整理されていなかった。そのため、素材・構造・機能の相関関係がまだ十分に解明されていない。例えば、フクロウの風切羽のセレーションから着想した騒音防止策は「機械系」におけるバイオミメティクスの大きな成果であるが、残念ながら応用は 500 系新幹線のパンタグラフにとどまっていて、「分子系」、「材料系」への協創に至っていない。関係者全員に、相関という視点がまだ不十分であるその結果、これらを「分子系」、「材料系」、「機械系」を融合した新素材コンセプトが未踏領域として残されている現状である。(逆に言うと、新素材開発のチャンスが眠ったままである)これまでのバイオミメティクス技術を分子系(nm レベル)、材料系(数十 nm から数 μ m)、機械系(mm 以上)に分類した上で、最新の技術動向を追加し、整理、統合することによって、「分子系、材料系、機械系を融合した新素材コンセプト」を浮かび上がらせることを試みる。



図表、バイオミメティクス分類

前提: 1)メーカーでの事業・製品開発の立場で (=アカデミアの立場ではない)

2) 化学メーカーの立場で (=材料にポイントを当てて)

分子系	nmレベル	生物の産生物→解析→化学合成
材料系	数十nm~数μm	生物の表面機能→解析→精密賦形
機械系	mm以上	表面により流体(主に気体)を制御
ロボット系		生物にヒントを得たロボット等
プロセス系		植物にヒントを得た光合成等
システム系		生物にヒントを得た交通システム等
アルゴリズム		生物の進化にヒントを得た計算等

図表. 大きさの例示(参考)

		0.1nm	水素原子の直径	1)
ハマズ	Inm 1nm	1nm	カーボンナノチューブの直径	2)
分子系	nm	5.4nm	分子量 6 万の球状たんぱく質の直径	3)
		8nm	たんぱく質アルブミンの長径	2)
		30nm	ノロウイルス	4)
	数十 nm	100nm	インフルエンザウイルス	5)
材料系	から数	460nm	可視光(青)の波長	
竹 杆 汞		2μ m	コレラ菌の長径	
	μ m	4μm	赤外線 (中赤外線) 波長	
		10 μ m	清酒酵母	6)
機械系	mm			

- 1) http://home.hiroshima-u.ac.jp/masters/TSS-gakumon-sanpo/23-10-shiotani.pdf
- 2) https://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%95%B7%E3%81%95%E3%81%AE%E6%AF%94%E8%BC%83
- 3) http://www.fbs.osaka-u.ac.jp/labs/ishijima/Molecule-01.html
- 4) http://www.tokyoeiken.go.jp/assets/issue/health/webversion/web25images/norovirusandfoodpoisoning.pdf
- 5) http://www.pref.tottori.lg.jp/39478.html
- 6) http://www.jozo.or.jp/i.topicsPart1200201.html



1-4. 調査の方法

1) 文献調査

過去に作成されたバイオミメティクスに関する調査報告書を収集、精査し、バイオミメティクス技術を構造(サイズ)別に、分子系(nm レベル)、材料系(数十 nm~数 μ m)、機械系(mm 以上)に分類する。

図表、主な、バイオミメティクスに関する過去の調査報告書

調査者	調査報告書
環境省	自然模倣技術システムによる環境技術開発推進検討成果 報告書
㈱富士通総研	(2015/3/30)
㈱東レ経営研究所	バイオミメティクスの新展開
(株) 果 レ 柱 呂 切 乳 川	(2015/11/6)
(性) 切 リ サ _ エ ナ ン ク _	今後の発展が期待されるバイオミメティクス
(株) 旭 リ サ ー チ セ ン タ ー	(2016/6/8)
経済産業省特許庁	平成 26 年度特許出願技術動向調査報告書 バイオミメティクス
在对性未有付計厂	(2017/3/31)
7. ボルは 起 処 エロ /カサ\	わが国企業における生物規範工学に関する調査・研究・考察
みずほ情報総研㈱	(2017)

日本学術振興会未開拓学術研究推進事業 (平成 11 年度~15 年度) 「バイオミメティック材料プロセシングの開発」 プロジェクトリーダー 高井治

https://www.jsps.go.jp/j-rftf/saishu/h15/k01_j.html

文部科学省科学研究費新学術領域研究(平成 24 年度~28 年度) 「生物多様性を規範とする革新的材料技術」 領域代表者 下村正嗣

http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/chukan-jigohyouka/1352870.html

京都工芸繊維大学・生物の優れた機能から着想を得た新しいものづくり研究会 https://www.bioinspiredm.org/



2) 最新情報の補完と国内ヒアリング調査

さらに、最新の文献調査及び有識者ヒアリングにより、最新技術を補完する。 通常得られる文献、報告書に加え、㈱積水インテグレーテッドリサーチが 2002 年度より蓄積してきた最新のバイオミメティクス関連情報も活用する(ただし、 公開可能な情報に限定する)。

図表、㈱積水インテグレーテッドリサーチオリジナルな蓄積情報

最新の文献調査	内容
積水化学 自然に学ぶものづくり	111 例の
研究助成プログラムの歩み(2013年)	「自然に学ぶものづくり」テーマ紹介集
自然に学ぶものづくり研究助成	2002年から。但し、公開されている情報に限る

図表、主な国内バイオミメティクスに関連する研究者(材料・化学系)

研究者	研究例
千歳科学技術大学	バイオミメティクス推進協議会理事長
下村正嗣教授	高分子学会バイオミメティクス研究会運営委員長
バイオミメティクス推進協議会理事長	
北海道大学	構造色
電子科学研究所	https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/64/1/64_9/_pdf
三友(みとも)秀之准教授	
北海道教育大学	イカ墨を使った太陽電池
松浦俊彦教授	https://www.museum.hokudai.ac.jp/lifelongeducation/pu
	blicevents/12993/
東北大学	バイオミメティクス特許
香坂玲教授	https://ci.nii.ac.jp/naid/40021033192/
東北大学	生物に学ぶ、生物と融合し生物を超える材料開発
材料科学高等研究所	https://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/yabu_labo/index/Welc
藪浩教授	ome.html
東京大学工学部	(公益) 高分子学会 会長
化学生命工学科	バイオミネラリゼーションにならう有機無機ハイ
加藤隆史教授	ブリッド材料
高分子学会会長	http://kato.t.u-tokyo.ac.jp/rframe.html



	(負/ハインナグ レーナット リリー・
東京大学	
生物生産工学研究センター	
岡田憲典准教授	
東京大学	
新領域創成科学研究科	
伊藤耕三教授	
東京大学農学部	イネの葉のロータス効果
伊藤純一准教授	http://bsj.or.jp/jpn/general/BSJ_Review6B_102-111.pdf
東京大学 生産技術研究所	
吉江尚子教授	
東京工業大学	構造色
渡辺順次名誉教授	自然に学ぶものづくり研究助成審査委員長
東京工業大学 理工学研究科	
大塚英幸教授	
お茶の水女子大学 物理学科	
奥村剛教授	
東京農工大学 農学研究院	アレロパシー
藤井義晴教授	
千葉大学工学部	孔雀の羽の構造色
桑折道済准教授	https://www.museum.hokudai.ac.jp/lifelongeducation/pu
	blicevents/12993/
名古屋工業大学	生物表面の多機能性を応用した液体制御法の開発
石井大佑准教授	https://www.jaci.or.jp/event/event_apply.php?event_id=7
	38
	https://newswitch.jp/p/9206
新潟大学工学部	バイオ TRIZ
山内健教授	ビンセント研究室へ留学
富山県立大学工学部	生物に学ぶ微細リンクル加工技術と超撥水化
遠藤洋史講師	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/81/5/81_401/_
	<u>pdf</u>
金沢大学	バイオミネラリゼーション
理工研究域	http://jglobal.jst.go.jp/detail/?from=API&JGLOBAL_ID=2
西村達也准教授	$\underline{01402258342227758}$



	積水インテク・レーテット・リサー
慶応大学理工学研究科	
今井宏明教授	
京都大学理学部	水と油を効率的に分離できる柔軟多孔性物質(マ
金森主祥助教	シュマロゲル)
	http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/new
	<u>s6/2012/130111_2.html</u>
京都大学	海洋生物の機能と海洋生態系に学ぶ
農学研究科	http://www.appbio.kais.kyoto-u.ac.jp/laboratory/kaiyous
豊原治彦准教授	eibutsukinougaku.html
龍谷大学理工学部	ハスの葉のダブルラフネス構造を模倣した光応答
内田欣吾教授	性超撥水性表面
	OSTEC 受賞
	http://www.ryukoku.ac.jp/news/detail.php?id=8403
大阪大学生命機能研究科	生物の模様や形ができる仕組みを理解する
近藤滋教授	https://www.fbs-osaka-kondolabo.net/
大阪大学工学部	生体の表面ナノ構造にもとづく「構造色」の制御
斎藤彰准教授	と応用
	http://www-ss.prec.eng.osaka-u.ac.jp/html/member/stuf
	f/saito2.html
大阪大学基礎工学部	バイオ TRIZ
小林秀敏教授	ヴィンセント研究室へ留学
大阪大学理学部	
原田明特任教授	
大阪府立大学	微生物の付着現象の解明とその利用技術の開発
小西康裕教授	http://www.chemeng.osakafu-u.ac.jp/group1/japanese/st
	udy/study_theme.html
大阪市立大学理学部	海洋天然有機化合物を模倣した環境にやさしい新
西川慶祐助教	規防汚剤
	OSTEC 受賞
	https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-268
	10061/
関西大学システム理工学部	医療への応用



	「3次元ナノ・マイクロ構造の創成とバイオミメ
	ティクス・医療への応用」研究代表者
	https://www.kansai-u.ac.jp/ordist/research/project/proj
	ect27_1.html
関西大学システム理工学部	生物がもつナノ・マイクロ構造の模倣と機能評価
伊藤健教授	http://www.kansai-u.ac.jp/ordist/staff/data/id016434.ht
	<u>ml</u>
近畿大学生物理工学部	生物の硬組織形成機構の解明と炭酸カルシウムを
高木良介講師	主成分として複合材料への応用
	OSTEC 受賞
	http://www.ostec-tec.info/01-2/uploads/photos/88.pdf
岡山大学自然科学研究科	新しいトライボロジーメカニズムを秘めたサンド
木之下博准教授	フィッシュの鱗のバイオミメティクス
	https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-256
	30037/
山口大学 生物機能科学科	
松井健二教授	
九州大学農学研究院	
T. Control of the Con	
園元謙二教授	
園元謙二教授 元(公益)日本生物工学会長	
	アレロパシー
元(公益)日本生物工学会長	アレロパシー
元 (公益) 日本生物工学会長九州大学	アレロパシー
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所	アレロパシー 貝類の接着機構を利用した医療用接着剤
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所 新藤充教授	
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所 新藤充教授 九州工業大学	貝類の接着機構を利用した医療用接着剤
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所 新藤充教授 九州工業大学	貝類の接着機構を利用した医療用接着剤
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所 新藤充教授 九州工業大学	貝類の接着機構を利用した医療用接着剤 OSTEC 受賞
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所 新藤充教授 九州工業大学	貝類の接着機構を利用した医療用接着剤 OSTEC 受賞 https://www.japanfs.org/ja/news/archives/news_id03266
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所 新藤充教授 九州工業大学 金子大作准教授	貝類の接着機構を利用した医療用接着剤 OSTEC 受賞 https://www.japanfs.org/ja/news/archives/news_id03266 0.html
元(公益)日本生物工学会長 九州大学 先導物質化学研究所 新藤充教授 九州工業大学 金子大作准教授	貝類の接着機構を利用した医療用接着剤 OSTEC 受賞 https://www.japanfs.org/ja/news/archives/news_id03266 O.html https://www.nbci.jp/activity/technology-biomimetics.htm



	積水インエクレーエットリサー		
構造材料研究部門	開発		
佐藤知哉研究員	OSTEC 受賞		
	http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr201		
	61007/pr20161007.html		
(国研)物質・材料研究機構	無機、金属材料分野におけるバイオミメティクス		
経営企画部門	の最新技術動向		
(国研)農業•食品産業技術総	植物活用分野におけるバイオミメティクスの最新		
合研究機構	技術動向		
浦上敦子ユニット長	特に分子系防衛物質		
(公益) 高分子学会	国内のバイオミメティクスの最新技術動向		
平坂事務局長			
(財) 大阪科学技術センター	ネイチャー・インダストリー・アワード受賞テー		
	マから見るバイオミメティクスの最新技術動向		
(財) 未踏科学技術協会	ナノ構造領域分野におけるバイオミメティクスの		
	最新技術動向		
(株) LIXIL	自然に学ぶ省エネ建材		
井須紀文室長			
三菱レイヨン(株)横浜研究所	モスアイフィルム		
魚津吉弘フェロー			
(株)日立製作所	サメの遊泳に学ぶ省エネ設計		
宮崎真理子	https://www.museum.hokudai.ac.jp/lifelongeducation/pu		
	blicevents/12906/		
(株) Spiber	クモ糸繊維		
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			

図表. ドイツのバイオミメティクスに関する文献調査方法の例

文献調査の方法例	解析例
バイオミメティクス文献調査	筆頭著者の国別解析
バイオミメティクス特許調査	出願国の国別解析
ISO文献調査	過去に ISO 制定が事業化の障害となった事例
バイオミメティクス国際標準化ニューズレター	ISO TC266 の進捗状況
J. of Biomimetics in Engineering	欧州のバイオミメティクス研究機関

1) ドイツ出張による面談ヒアリング調査



図表、ドイツ出張によるバイオミメティクスに関するヒアリング調査候補例

訪問先の候補	ヒアリング内容案
BIOKON(Das Bionik-Kompetenznetz)	ベルリン市
(Bionics Competence Network)	
Fraunhofer Institute IZI	ポツダム市
Biomimetic Functional Materials Unit	
Fraunhofer Institute IPA	シュトゥットガルト市
Manufacturing Engineering and Automation	
Fraunhofer Institute IFAM	ブレーメン市
Bio-inspired Materials	
Max Planck Institute of Colloids and Interface	ポツダム市
Max Planck Institute for Eisenforschung GmbH	デュッセルドルフ市
Max Planck Institute for Biochemictry	ミュンヘン市
Rhine-Waal University of Applied Sciences	ニーダーライン市
ライン・ヴァール専門大学	
Biomimetics-Innovation-Centre Hochschule Bremen	ブレーメン市
City University of Applied Sciences	
ブレーメン経済工科大学	
University of Bonn, Institute of Zoology	ボン市
ライン・フリードリヒ・ヴィルヘルム大学ボン	
South Westphalian University of Applied Sciences	ゲルゼンキルヒェン市
サウス・ウエストファリア応用科学大学	
University of Freiburg	フライブルク市
アルベルト・ルートヴィヒ大学 フライブルク	
Technische Universität Bergakademie Freiberg	フライブルク市
フライベルクエ科大学	
Carinthia University of Applied Sciences	オーストリア
École polytechnique fédérale de Lausanne	スイス
スイス連邦工科大学 ローザンヌ校	ローザンヌ市

なお、下記のようにバイオミメティクスにおいてドイツが進んでいると指摘されている。

図表、バイオミメティクスに関する報告および報道



英国貿易産業省	2007 年 1 月に当時の英国貿易産業省は報告書を作成し	
	た。(中略)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	1)
	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。	
日本経済新聞	「生物模倣」が国際規格にドイツ先行、日本は遅れ	2)

1) 下村正嗣,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,科学技術動向,2010年5月号,9-28(2010).

http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/2140/1/NISTEP-STT110-9.pdf

2) 日本経済新聞,2016年1月13日

https://www.nikkei.com/article/DGXMZO94941690Z01C15A2000000/

16



2. 調査結果

2-1. 分子系バイオミメティクス動向

【分子系】数 nm

- 2-1-1. これまでの分子系バイオミメティクスの技術動向と化学産業への貢献分子系の過去の成功例を紹介する。
- 1. アオカビに学んだ合成ペニシリン

最も有名なものの一つは合成ペニシリン(合成抗菌薬)だと思われる。

【従来課題】

アオカビの産生するペニシリンには、①酸に弱く胃酸で分解するので経口投与が不可能、②耐性菌(β -5/9 γ -t 産生菌=黄色ブドウ球菌他)の出現、③抗菌スペクトルが狭く、ブドウ球菌を代表とするグラム陽性菌、グラム陰性球菌に対しては強い抗菌作用を示すが、大腸菌を代表とするグラム陰性桿菌に対しては抗菌作用が弱く、特にグラム陰性桿菌の中でも薬剤に対する自然抵抗性が高い緑膿菌には無効、という課題があった。

【分析・原理抽出・技術転換】

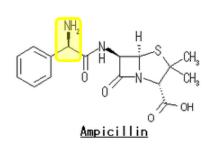
技術者達はアオカビが産出する天然ペニシリンを分析し、天然ペニシリンの活性中心が β -ラクタム環を含んだペナム骨格であることを明らかにした。1957年、ジョン・シーハンがフェノキシ酢酸を活用しフェノキシメチルペニシリン(ペニシリン V)の全合成に成功、化学合成法が確立され、化学合成ペニシリンが開発された。①フェノキシ酢酸を活用することにより耐酸性を高め経口投与が可能になった半合成ペニシリンにフェノキシメチルペニシリン(ペニシリン V)があるが、抗菌スペクトルは天然ペニシリンと同じであり、天然ペニシリンと併せて第一世代ペニシリンと呼ぶ。②天然ペニシリン(ペニシリン G)にアミノ基(NH2)導入することによりグラム陰性菌の外膜を透過させ、抗菌スペクトルを広げた広域ペニシリンがアンメシリンである。グラム陽性菌およびグラム陰性菌の一部に有効である。③ペニシリン耐性菌は、ペニシリンの β -ラクタム環を加水分解し開環する酵素ペニシリナーゼ(β -ラクタマーゼ(EC 3.5.2.6)を産生する。バルキーな置換基を付け、これらの



分解酵素による分解を受けないペニシリン系抗生物質であるメチシリンが開発された。

天然ペニシリン(ベンジルペニシリン)
赤枠部分がペナム骨格

フェノキシメチルへ゜ニシリン(抗菌スペクトルは同じ) 耐酸性 (ペナム骨格は維持)



アンピリジン アミノ基導入で抗菌スペクトル拡大



メチシリン バルキー置換基導入で耐性菌対策

【効果】

人類の最大の脅威であった細菌感染を克服し、平均寿命を大幅に伸ばすこととなった。

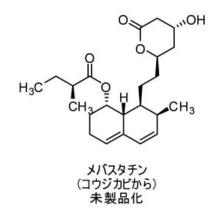


2. コウジカビに学んだ合成血中コレステロール低下剤

最も商業的に成功したものだと思われる。

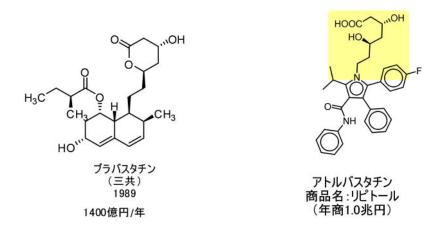
【従来課題】

高コレステロール血症には良い治療薬が無かった。市販された最初のコレステロール低下剤「トリパラノール」も2年後の1962年には早々と発売中止になった1)。1973年、第一三共の遠藤章博士がアオカビの一種からメバスタチンを発見、動物実験で劇的に血中コレステロール値を下げたが、動物実験で副作用が認められたため製品化できなかった。



【分析・原理抽出・技術転換】

米メルク社(MSD)がロバスタチン、中谷矩章(東海大)らがプラバスタチン、米ファイザー社がアトルバスタチンを半合成、合成により開発した。



【効果】

2006 年時点でスタチンは世界中で約 3,000 万人の患者に毎日投与され、スタチンの年間売り上げは、邦貨換算で約 2 兆 8,000 億円に達した¹⁾。

【出所】

1) 遠藤章,動脈硬化のペニシリン"スタチン"の発見と開発,月刊心臓,37(8),681-698(2005) http://www.jhf.or.jp/shinzo/mth/images/History-37-8.pdf



3. 放線菌に学んだ抗寄生虫薬

日本人がノーベル賞を受賞したことで有名。

【従来課題】

1973年北里研の大村智は静岡県伊東市川奈の土壌の放線菌「ストレプトマイセス・アベルメクチニウス」(Streptomyces avermitilis)からアベルメクチンを発見した(2015年 ノーベル生理学・医学賞受賞)。アベルメクチンは家畜の線形動物や節足動物感染症に 300μg/kg 以下で広範囲な有効性を示したが、ヒトの寄生虫には効果を示さないという課題があった。

HO, Avermectin
$$B_{1a}$$
 $R = CH_2CH_3$
Avermectin B_{1b}
 $R = CH_3$
 $R = CH_3$
 $R = CH_3$

【分析・原理抽出・技術転換】

米メルク社 (MSD) はアベルメクチンの作用機序を解析、アベルメクチンを もとにイベルメクチンを創製した。



$$B_{1b}$$

イベルメクチン

【効果】

オンコセルカ症(河川盲目症)と呼ばれる病気は熱帯地域の失明の主要な要因になっている。世界で推定 2500 万人の感染者がおり約 30 万人が失明に至っているとされる。イベルメクチンはこの感染症の特効薬で、年 1 回程度、経口投与するだけでオンコセルカ症を予防できる。世界保健機関(WHO)はイベルメクチンを用い、オンコセルカ症の撲滅作戦を進めており、2020 年代の制圧を目指している。¹⁾イベルメクチンは売上高 1,000 億円/年。北里研特許収入累計は 250 億円に及ぶ²⁾。

【出所】

- 1) 日経サイエンス 2015 年 12 月号 http://www.nikkei-science.com/201512_024.html
- 2) 産学官連携ジャーナル

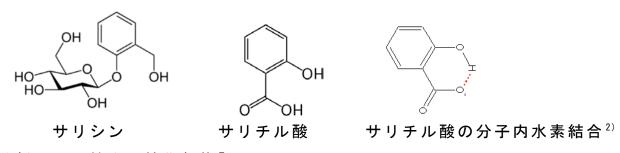
https://sangakukan.jst.go.jp/journal/journal_contents/2016/03/articles/1603-07/160 3-07_article.html



4. ヤナギに学んだアスピリン

【従来課題】

セイヨウシロヤナギの葉に鎮痛効果があることは紀元前 4~5 世紀、古代ギリシア時代の医師、ヒポクラテスの時代から知られていた。19 世紀初めには、その鎮痛成分が配糖体サリシンとして単離された。サリシンは容易に分解、非糖部が酸化を受けたサリチル酸が鎮痛消炎作用の活性本体であることがわかり、リウマチなどの耐え難い痛みと腫脹の緩和を目的に処方されていた。しかし、サリチル酸はpKa=2.97 の強い酸であり嘔吐、胃痛を起こし、胃穿孔から腹膜炎になる恐れもあるという課題を有していた1)。



【分析・原理抽出・技術転換】

1897 年、独バイエル社のフェリックス・ホフマンはサリチル酸をアセチル化し副作用の少ないアセチルサリチル酸(商標:アスピリン)を合成した。³⁾アセチルサリチル酸は世界で初めて人工合成された医薬品である。⁴⁾

アセチルサリチル酸

【効果】

現在の生産量は約 1,000 億錠/年(=約5万 t/年)

サリチル酸のエステル化はサリチル酸メチルとしてサロンパスやサロメチールなどの外科用湿布薬に、さらに、サリチル酸誘導体のパラアミノサリチル酸はパス(PAS)と呼ばれる結核薬として用いられている。5)

【出所】

- 1) (公益) 日本薬学会ホームページ http://www.pharm.or.jp/souyaku/asupirin.shtml
- 2) http://chemieaula.blog.shinobi.jp/Entry/214/
- 3) (公益) 日本心臟財団 http://www.jhf.or.jp/bunko/mimiyori/08.html
- 4) バイエル薬品(株) ホームページ
- 5) https://www.aspirin-japan.com/html/contents_2_3.html



5. 除虫菊に学んだ合成殺虫剤

【従来課題】

除虫菊の殺虫成分である天然ピレスロイドのピレトリンは、熱、光、酸素、アルカリに不安定で、環境中に揮発した後は速やかに分解・失活する。熱により分解することは蚊取り線香に用いるには欠点であり、光、空気酸化により分解することは農薬として欠点である。また、除虫菊を原料とするので大量生産は困難であるという課題があった。

【分析・原理抽出・技術転換】

米国のMilton S. Schechter が 1949 年、アレスリンを初めて合成した。アレスリン類は初めて合成されたピレスロイドである。日本では住友化学が、1949 年、除虫菊に含まれる殺虫成分の類縁化合物ピレスロイドを工業的に合成する技術を確立、旧酉島工場(大阪府)にアレスレン(商標:ピナミン)の製造設備を建設した^{1),2)}。

アレスリン I (R = -CH3), アレスリン II (R = -C00CH3)

【効果】

アレスリンは熱に強いので蚊取り線香等に用いられる。また、フェノトリンは光、酸素に強いので農薬にも用いられる。

【出所】

- 1) 住友化学(株) ホームページ
 - http://www.sumitomo-chem.co.jp/products/agricultural_chemicals/facilities.html
- 2) 日本防疫殺虫剤協会ホームページ http://hiiaj.org/insecticide/knowledge.html



2-1-2. これから商業化が期待される分子系バイオミメティクス技術の動向分子系であって研究中でまだ商業化が進んでいない例を紹介する。

1. 植物のアレロパシーに学ぶ合成除草剤

【従来課題】

従来の合成除草剤は、環境に優しいとは言いにくい。1)

従来と異なるメカニズムとして、植物が他の植物の生育を抑制するために忌避物質を産生すること(アレロパシー)が注目されている。例えば、キンポウジュ (別名:ブラシノキ)の産生するアレロパシー物質(他の植物の生育を抑制する物質)の研究からメソトリオンが発見された。

メソトリオン

メソトリオンは、水稲用除草剤として販売されている。

【出所】1)シンジェンタジャパン(株)ホームページ

http://www.syngenta.co.jp/cp/items/apirogrowmx_jumbo/view/

【分析·原理抽出·技術転換】

九州大学の新藤充教授、平舘俊太郎教授、東京農工大学の藤井義晴教授らは、ユキヤナギから単離構造決定されたシス桂皮酸配糖体が強い生長阻害活性を示すことを見出した。20この単純な構造に着眼、シス桂皮酸配糖体を合成し、その構造と活性を証明したうえで、この構造活性相関研究とより強い植物生長阻害剤の開発を進めている。その結果、天然を超える活性の類縁体も見出した。既にシス桂皮酸の誘導体を300種類以上合成、この中から強力な植物成長調整剤を見つける試みを進めている。

シス桂皮酸

【出所】

1)農薬評価書 (厚生省ホームページ)

http://www.mhlw.go.jp/shingi/2009/07/dl/s0724-10j_0001.pdf

2)九州大学新藤充教授ホームページ

https://shindo-kano-lab.weebly.com/12450125241252512497124711254012398212702339



8.html

2. 南極の魚類に学ぶ合成不凍たんぱく質

【従来課題】

従来の不凍たんぱく質は魚類等の天然物由来であり、安定供給性やコストに課題があった。具体的には、海水の氷点は-1.8℃程度であり、通常の海水魚の血液の氷点は-0.8~0.9℃程度である。このため、海面が氷結する海域においては、通常の海水魚は身体が凍結してしまうはずである。しかしながら、このような海域においても生存し活動する魚が存在しており、それを支えている要素のひとつが、魚血液中の不凍タンパク質である。北極海や南極海に生息する魚類の分析から、2.6-3.3 kD 程度の不凍糖タンパク質が発見されている。

不凍たんぱく質の研究は活発に進められ、株式会社カネカと関西大学河原秀 久准教授の共同研究成果¹⁾ や、株式会社ニチレイと国立研究開発法人 産業技 術総合研究所の共同開発成果は市場に出現している。

しかし、いずれも天然資源由来であり、安定供給性やコストに課題を残している。例えば、1キログラムの不凍タンパク質を得るためには、100トン程度の魚が必要だと言われている³⁾。

【分析 • 原理抽出 • 技術転換】

名古屋工業大学の柴田哲男教授はフッ素化合物技術を活用して、「不凍活性物質を目指した含フッ素糖ペプチドの設計と合成」を発表している³⁾⁴⁾。

【出所】

- (株) カネカ ニュースリリース
 http://www.kaneka.co.jp/service/news/n20091116/
- 2) (株) ニチレイ ニュースリリース http://www.nichirei.co.jp/news/2016/283.html
- 3) 積水化学工業 (株) ホームページ
 http://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/nextgen/bio_mimetics/1302927_27856.html
- 4) 住井裕司ら,日本化学会第 98 春季年会 (2018) http://www.ach.nitech.ac.jp/~organic/shibata/conferences-2017.html



3. コモドドラゴンに学ぶ新しい合成抗生物質

【従来課題】

従来、抗生物質をはじめとする医薬品、農薬等は微生物から発見され、それが分析、原理が解明され、課題がある場合は化学修飾、化学合成技術により課題が解決されてきた。

ところが、長年の研究開発の結果、新規の有用物質が発見される確率が低下 してきた。微生物だけに限らず、新規のソースを開拓する必要がある。

【分析・原理抽出・技術転換】

米国ジョージ・メイソン大学の研究者達は、インドネシアに生息するコモドドラゴンからVK25 と呼ばれるペプチドを発見、これにヒントを得て合成ペプチドを設計、DRGN-1 と名付けた。既に、皮膚が細菌に感染したマウスでの試験において、DRGN-1 が細菌を破壊し皮膚の治癒を促進していることを確認済で(2017 年 4 月現在)企業からのオファーを待っている^{1),2)}。

【出所】

- 1) The Sydney Morning Herald 18 April 2017

 https://www.smh.com.au/environment/conservation/in-a-dragons-blood-scientists-d
 - iscover-a-potential-antibiotic-20170418-gvnbqk.html
- 2) Ezra M.C. Chung, Scott N. Dean, Crystal N. Propst, Barney M. Bishop & Monique L. van Hoek, Komodo dragon-inspired synthetic peptide DRGN-1 promotes wound-healing of a mixed-biofilm infected wound, Biofilms and Microbiomes 3, (2017).

https://www.nature.com/articles/s41522-017-0017-2



4. ナメクジに学ぶ新しい合成接着剤

【従来課題】

従来表面が濡れていて、動く被着体、例えば、皮膚・軟骨・心臓・動脈・肝臓といった組織用には良い医療用接着剤が無かった。

【分析・原理抽出・技術転換】

ョーロッパ全土やアメリカ北東部に分布するダスキー・アリオンというナメクジの仲間は、捕食者に脅かされると、のりのようにネバネバとした粘液を分泌する。こうすることで自らをその場所にはりつけ、相手に剥がされて食われないようにする。従来の研究で粘液に強い粘着性を与える化合物は既に判明していた。ハーバード大学ウィス研究所のジャンユ・リ(Jianyu Li)氏らはこれを参考に、表面が濡れているといった条件のために接着が難しい生体組織であっても接着が可能な物質の合成を行った。1)

【効果】

従来の医療用接着剤と比べ 3 倍の接着力を得た。実験では濡れた状態でも 乾いた状態でも豚の組織を接着でき、ラットの体内で 2 週間安定した状態を 維持。豚の心臓の穴を塞いで心臓を膨らませたり縮ませたりしても剝がれな かった。さらにマウスの肝臓の止血にも使え、組織の損傷は起きなかった²⁾。

【出所】

- 1) J. Li, A. D. Celiz, J. Yang, Q. Yang, I. Wamala, W. Whyte, B. R. Seo, N. V. Vasilyev, J. J. Vlassak, Tough adhesives for diverse wet surfaces, Science, 357, 378-381, (2017). http://science.sciencemag.org/content/357/6349/378.full
- 2) ニューズウィーク 2017 年 9 月 6 日 https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2017/09/post-8382.php



5. クモの糸に学ぶ新しいたんぱく繊維

【従来課題】

クモの糸は、重量当たりのタフネス(靭性)が鋼鉄の約 340 倍¹⁾、鋼鉄の 4 倍の強度がありつつも、ナイロンを上回る伸縮性を兼ね備えていて、300℃ま で耐える耐熱性を持ち合わせているものもある²⁾と言われている。

しかし、クモは肉食性かつ共食いをする生物であるため、カイコのように飼育 することが極めて難しく、天然のクモ糸を大量に生産することはできなかった。

そのため、遺伝子組み換え技術を応用して微生物に生産される技術が開発されたが、発酵の世界では微生物による遺伝子組換えタンパク質の製造コストは1キログラムあたり100ドルを下回ることは困難であるという「常識」 "\$100 Barrier" があり¹⁾、微生物を利用したバイオプロセスにより合成する方法は生産効率の低さや高コストであることから大量生産には不向きであると考えられていた。

【分析・原理抽出・技術転換】

理化学研究所では、2段階の化学合成的手法を用いて、クモ糸タンパク質のアミノ酸配列に類似した一次構造を持つ人工ポリペプチドを合成する技術を開発した。³⁾ 具体的には、まず、アミノ酸エステルを材料にし、化学酵素重合によってクモ糸タンパク質によくみられる配列である 2 種類の短いポリペプチドブロック(ポリアラニン配列およびグリシンを多く含む配列)を合成、次に、これらのポリペプチドブロックを重縮合によりさらにつなげることで、クモ糸タンパク質が持つ繰り返し配列に似た構造を持つマルチブロックポリペプチドを合成する技術を開発した。

【効果】

この技術を用いると、微生物合成法よりも低コストで、大量のポリペプチド材料を得ることができると期待される。得られた材料は既存の石油由来の高強度材料の代替品として、持続可能社会の実現に大きく貢献すると期待できる。また、この合成手法ではポリペプチド材料に任意の一次構造を作ることができるため、材料物性をコントロールすることが可能である。



【備考】

この分野は世界中で技術競争になっており、進歩が早いので常に最新の情報に注意する必要がある。下記に、各種技術をまとめた。

図表 クモ糸の研究開発状況

R&D 機関	ターケ゛ット	技術	ステップ	課題	出所
Spiber(株) (慶大発ベンチャー) ImPACT	繊維	遺伝子組み換え 微生物培養	1t/月 ジャケット発売	コスト	1)
(国研)理化学研究所 ImPACT	繊維	化学合成 (安価)	研究@2017 年	スケールアッ フ゜	3)
Bolt Threads Inc (米) カリフォルニア大バークレイ発	繊維	遺伝子組み換え 酵母菌培養	t 単位生産 @2015 年 ネクタイ発売 @2017 年	詳細不明	4) 5)
Kraig Biocraft Laboratories Inc. (米)	繊維	カイコ活用	米陸軍と契約 @2018 年	詳細不明	
Araknitek (米)	繊維	大腸菌,カイコ	詳細不明	詳細不明	
AMSilk GmbH (独)	繊維 化粧品	遺伝子組み換え バクテリア発酵	0.5 t レベル	詳細不明	6)
韓国科学技術院 (KAIST)	繊維	大腸菌培養	研究	詳細不明	

【出所】

- 1) スパイバー社ホームページ https://www.spiber.jp/endeavor
- 2) 環境省ホームページ

https://www.env.go.jp/policy/keizai_portal/B_industry/bb2014/report/h26engine_18Spiber.pdf

- 3) (国研) 理化学研究所ホームページ http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170119_1/
- 4) https://wired.jp/2015/06/22/bolt-threads-spider-silk/
- 5) https://wired.jp/2018/01/03/spider-silk-hat/
- 6) http://www.aremachi.com/2014/08/24/20140824184817/



6. アリに学ぶ新しい抗生物質

【従来課題】

抗生物質に対する耐性菌が次々と出現しており、新規抗生物質と耐性菌との "いたちごっこ"になっている現状で有効な耐性菌対策が無いという課題があ った。

【分析・原理抽出・技術転換】

アリのような昆虫の大規模で緊密な社会集団は病気の温床として理想的な環境である。ところが、アリの伝染病は見つからない。研究者たちはアリが何か強力な抗菌物質を保持しているのなら、新たな抗生物質の有望な供給源となると考えアリに注目したところ、アリが体にある特殊な分泌腺で抗菌性化合物を生成することがわかった。この分泌腺は、アリの「化学工場」とも呼ばれている。アリはこの腺の分泌物で体の表面を覆っており、中には人が部屋の中で殺菌洗浄剤を利用するのと同じように抗菌性物質を巣の周囲にまくアリもいる。これまでに記録されているアリの種数は1万5000種以上に上り、それぞれが抗菌作用を持つ多種多様な化合物を生成する可能性が高い。

【発展性】

人が開発した薬剤の多くはほんの数十年で効力を失うが、アリを攻撃する病原菌には、おそらく何百万年も前からアリが使用し続けてきたと考えられる抗菌性物質への耐性が生じていないのはなぜかという疑問がわく。1)

米アリゾナ州立大学のペニック氏は、抗菌性物質を作らないアリ8種を見つけた。この8種は、少なくとも今回試験した細菌に対して有効性を示す物質を何も生成しない。抗菌性物質を作らないアリ種が存在するなら、それはこれらのアリが病気から自らの身を守るための別の方法を見つけた可能性があることを意味するとみている。²⁾

【出所】

 Clint A. Penick et. al., External immunity in ant societies: sociality and colony size do not predict investment in antimicrobials, Royal Society Open Science, 7 February 2018.DOI: 10.1098/rsos.171332

http://rsos.royalsocietypublishing.org/content/5/2/171332.article-info

2) AFP BB News 2018 年 2 月 13 日 http://www.afpbb.com/articles/-/3162208?page=2



7. ミミズに学ぶ新しい落ち葉の腐食剤

【従来課題】

植物が分解して腐葉土になり、環境で炭素循環が回るまで相当の時間がかかる。これは、多くの植物が「ポリフェノール」と呼ばれる物質を持っているからである。ポリフェノールは植物の色の元となり、抗酸化物質として作用する。そして何より、動物の体内での消化を妨げる作用を有する。ポリフェノールは腸内の酵素と結合する事で消化効率を低下させている。この事は動物に対して消化の悪い植物であると学習させる事でそれ以上の食害を防ぐ意味合いがある。しかし、その結果として植物が分解して土に戻るのに多くの時間を必要とする。

【分析・原理抽出・技術転換】

研究者は、土壌中の分解者で非常に優秀な生物であるミミズに注目した。 ミミズはポリフェノールに対して耐性を持っており、落ち葉を効率的に分解 するからである。

インペリアル・カレッジ・ロンドンの Manuel Liebeke らの研究チームは、ミミズの消化管液を分子顕微鏡と質量分析法によって調べ、体内にポリフェノールの作用から消化管を保護する代謝物が発見した。「ドリロデフェンシン」と名付けられたこの物質は、洗剤のように界面活性剤としての役目を持ち、化合物間の表面張力を低下させ、ポリフェノールが酵素に結合する事を抑制する。ドリロデフェンシンはミミズ 14 種類の体内から発見されたが、近縁種のイトミミズやヒルからは発見されなかった。また、ポリフェノールが豊富に含まれる餌をミミズに与えた所、ドリロデフェンシンの濃度が増大した。これはミミズがポリフェノールを消化できるように環境適応した結果であると考えられる。

	R ¹	R^2	R^3	Sum formula
(1)	CH ₃	CH ₃	Н	C ₁₂ H ₂₀ O ₄ S
(2)	Н	CH ₃	Н	C ₁₁ H ₁₈ O ₄ S
(3)	CH ₃	CH ₃	ОН	$C_{12}H_{20}O_5S$
(4)	CH ₃	CH ₃	=O	$C_{12}H_{18}O_5S$
(5)	CH ₃	CH ₂ OH	ОН	$C_{12}H_{20}O_6S$
(6)	CH ₃	CHO	=O	C ₁₂ H ₁₈ O ₆ S

ドリロデフェンシン¹⁾

【発展性】



ミミズ以外の生物でも、木を含む植物をすみやかに分解できるようになるか もしれない。

【出所】

1) Manuel Liebeke et. al., Unique metabolites protect earthworms against plant polyphenols, Nature Communications volume 6, Article number: 7869 (2015) doi:10.1038/ncomms8869 https://www.nature.com/articles/ncomms8869

8. 抗生物質を食べる細菌に学ぶ環境中の抗生物質処理方法

【従来課題】

人のし尿を通じて下水道から環境へ放出される未代謝の抗生物質、畜産や水産によって環境へ放出される未代謝の抗生物質によって、環境中の細菌が抗生物質耐性を獲得する。これが、将来の抗生物質が効かない疾病への大きな脅威になる。この脅威を防ぐために河川や湖、土壌に混入した抗生物質を一掃する手法が課題として残っている。

【分析・原理抽出・技術転換】

細菌を死滅させる抗生物質に対して耐性を持つだけでなく、それを餌として摂取する一部細菌が存在することが分かっていたが、今回、米ミズーリ州にあるワシントン大学医学部ゴータム・ダンタス(Gautam Dantas)准教授が、細菌が抗生物質を食べるメカニズムを明らかにした。

【発展性】

まだ研究の初期の段階ではあるが、将来環境中に残存し、潜在的脅威になっている抗生物質を一掃する技術に発展する可能性がある。

【出所】

1) Terence S. Crofts et.al., Shared strategies for β-lactam catabolism in the soil microbiome, Nature Chemical Biology (2018) doi:10.1038/s41589-018-0052-1 https://www.nature.com/articles/s41589-018-0052-1



2-2. 材料系バイオミメティクス動向

【材料系】数十 $nm \sim$ 数 μ m

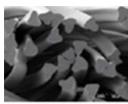
1. 絹に学んだシルク・ライクなポリエステル繊維

【従来課題】

絹には、水に弱い、しわになりやすい、高価であるという課題があった。

【分析・原理抽出・技術転換】

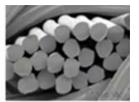
東レの技術者は絹の繊維構造を分析、絹のしなやかさと美しさのカギを握るのは絹繊維の多角形の構造だと原理抽出、ポリエステルの異型押出技術でポリエステルの多角形断面構造を実現、昭和39年(1964年)に「シルック」を開発した。



シルック®の断面



絹の断面



ポリエステルの断面

【写真出所】

1) 東レホームページ http://www.sillookkimono.com/sillook/sil a001.html

【効果】

親のようなしなやかでしっとりとした風合い、優雅な光沢と美しい色合いを実現したのに加え、色あせ、黄変の心配が少ない、シワになりにくく旅行にも最適、虫くい・カビの心配が少ないので保存も簡単、水や汗に強く、雨に濡れても収縮したり、型くずれの心配がいらず、家庭の洗濯機で丸洗い可能という絹に無かった利点を得た。その結果、シルックは、発売開始から継続的に成長を続け、1984年ごろには850トン/月も生産されるようになった。このころのシルックの生産量はポリエステル長繊維事業全体のおよそ15%であったが、その利益は同事業の総利益の半分を占めていた。東レばかりでなく、他社においてもシルク・ライクを追求したポリエステル繊維の開発に大きな関心が寄せられ、帝人では「シルパール」、東洋紡績では「シルファイン」と名付けられた新製品が生み出された。



【出所】

東レ (株) シルックきもの http://www.sillookkimono.com/sillook/sil_a001.html

(公財)発明協会 戦後日本のイノベーション100選

http://koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation_detail.php?eid=00081&age=stable-growth&page=keii

2. 羊毛に学んだバルキーアクリル繊維

【従来課題】

羊毛には、乾きにくい(吸湿性大)、虫に食われる、鮮やかな染色が困難であるという課 題があった。一方、従来のアクリル繊維には保温性、風合いに劣るという課題があった。

【分析・原理抽出・技術転換】

技術者達は羊毛の繊維構造を分析、羊毛のふっくら柔らかい風合いと暖かい保温性という特徴を実現するには、嵩高く空気をたくさん含むことが条件となることを発見した。 そこで、収縮繊維と収縮しない繊維を混紡した後、熱処理で収縮繊維を収縮させることで糸の中に多くの空気を含むように加工したバルキー糸を開発した。





糸(収縮前)

糸(収縮後)

図表. バルキーアクリル繊維

【写真出所】

東京都クリーニング生活衛生同業組合

https://www.tokyo929.or.jp/column/fiber/post_84.php

【効果】

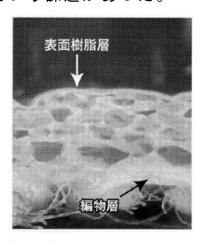
フェイクファーなどはほとんどがアクリルと言われている。 保温性があり、 強度も強く、耐久性がある。また、虫食いなどの影響を受ない。更に、吸水吸 湿性が小さいので乾きが早い。そして鮮やかな染色加工が可能。



3. 皮革の断面構造に学んだ人工皮革

【従来課題】

従来の塩ビレザーでは外観を似せただけで、布地をベースにし、その上に合成樹脂を塗った表面層だけを天然の革に似せた人工的な素材であり、強度不足、耐久性不足という課題があった。



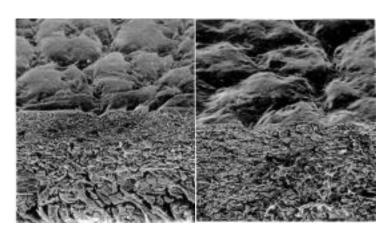
図表. 塩ビレザー断面図(縮尺明記無し)

【写真出所】東京都クリーニング生活衛生同業組合

https://www.tokyo929.or.jp/column/fiber/post_84.php

【分析・原理抽出・技術転換】

技術者達は、マイクロファイバーを3次元に統合させた「不織布」に、ポリウレタン樹脂を浸潤させたベースを使い、構造も機能も天然皮革を再現した。密度が高く、左の天然皮革の構造ととても似ている。



図表. (左)天然皮革、(右)人工皮革(いずれも縮尺明記無し)

【写真出所】(公益) 発明協会

http://koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation_detail.php?eid=00014&age=high-growth&page=kaihatsu



【効果】

特徴として

- ①(織ってないので)断面がほつれず、自由な裁断が可能。
- ②不織布ならではのしなやかさと高密度さがある。
- ③スエード加工ができる。
- 4 色々な厚みで作れる。
- ⑤耐久性がある。
- ⑥発色性が非常に高い

といった特徴がある。

下表に、主な材料系のサイズと機能の関係をまとめた。

図表. 作用を及ぼす対象と微細構造のサイズ

対象	対象のサイズ	具体例	具体例のサイズと材質
可視光	460nm (青色波長)	構造色(発色) ・光の多層膜干渉	モルフォ蝶で200nm間隔 ¹⁾ (青色光の波長の1/2)
可視光	460nm (青色波長)	モスアイ(吸光) ²⁾ ・屈折率の緩やかな変化	150~300nm (可視光の波長の1/2以下)
細菌	2um (緑膿菌長辺)	セミの羽根 ³⁾ ・ナノピラーが細菌を突き刺し抗 菌	直径約50nm TiO ₂ ³⁾
水滴	数mm	ロータス効果(蓮の葉) 水滴をはじく	直径 数 um ポリオレフィン
細胞	20um (培養細胞)	ロータス効果(蓮の葉) 細胞を剥離する	直径約1um ポリスチレン ⁴⁾

【出所】

- 1) http://school.gifu-net.ed.jp/ena-hs/ssh/H23ssh/sc2/21146.pdf
- 2) http://www.keins.city.kawasaki.jp/content/ksw/4/5_film.pdf
- 3) https://www.nature.com/articles/ncomms3838
- 4) http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2005/02/0224.html



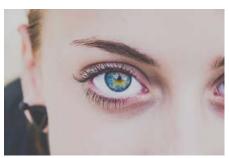
4. 構造色

【生物の構造色の例】

















【写真出所】

上列左から、

モルフォ蝶 (石崎貴裕,構造色によるカラーリング,表面技術,61(11),747-750 (2010). 孔雀 (photoAC)、玉虫 (photoAC)

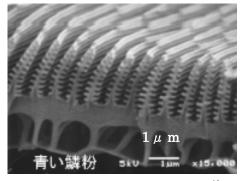
中列左から、ヒトの目 (パブリックドメイン Q)、カモ (photoAC)、カワセミ (photoAC) 下列左から、カメレオン (photoAC)、タチウオ (photoAC) 以上 7点 photoAC

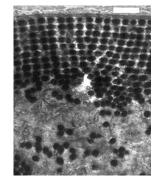
【分析】

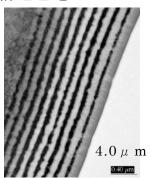
モルフォ蝶の鱗片の断面を見てみるとシダ状の微少な規則正しい突起が観察される。これに光が入ると、この突起部分で反射、屈折、干渉を繰り返し、ブルーの波長が増幅されるので、結果的に鮮明な深みのある青色を示すと思われる¹⁾。鳥の羽根は、一般に二度枝分かれする構造を持っている。そして、二度分かれた先の一番細い枝は、小羽枝と呼ばれている。下図は孔雀の小羽枝断面の透過型電子顕微鏡写真である。規則的に並んだ粒の構造が見て取れ



る。この粒は人間の髪毛の中にもあるメラニン色素の顆粒であり、粒の間隔は光の波長の数分の一となっている²⁾ ヤマトタマムシの鞘翅の縦断面の電子顕微鏡像でも白と黒に見える最外層の 18 の層が構造色をつくっている³⁾。







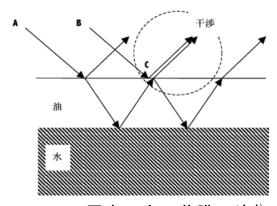
モルフォ蝶の鱗片の断面1)

孔雀の小羽枝2)

ヤマトタマムシの 鞘 翅 の 縦 断 面 3)

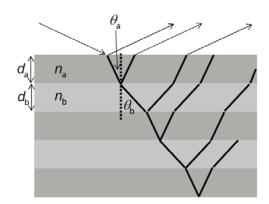
【原理抽出】

材質ではなく構造であることが明らかになっている。光の波長の 1/2 (=数百nm) で、急激な屈折率変化²⁾

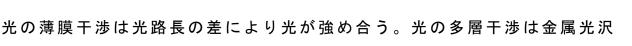


図表、光の薄膜干渉4)

感のある色彩に富んだ構造色である。



図表、光の多層干渉4)



【過去の成功例】

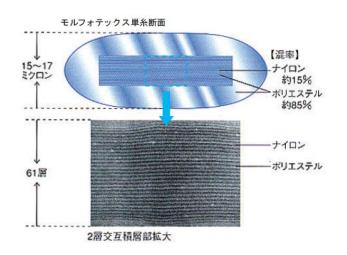
① 「モルフォテックス」(帝人, 1995年)

2003 年、帝人は、モルフォ蝶のように光の干渉で構造発色する新光学繊維「モルフォテックス」の量産を開始した。この繊維は、モルフォ蝶の羽が、空気層とたんぱく質の層(ラメラ界面)との光干渉により美しく発色することをヒントに日産自動車、田中貴金属工業および帝人の共同開発で開発された。繊維の構造は、屈折率の違うポリエステルとナイロンを数十ナノオーダー単位で 61 層積み重ねた多層積層構造となっており、染料を全



く使用することなく、あくまで光の屈折を利用して発色させる繊維である。 そのため、染料・顔料を使用する必要がないという、地球環境に優しい繊維となっている。

光の屈折の違いで発色させるので、見る角度や光の強度によっても微妙に色も違ってくる。だから、ファッション用途としても使い方が広がる。また、テキスタイル用途以外にも、「モルフォテックス」の糸を細かく切断し、粉状(パウダー状)にしたものを透明な塗料に混ぜて使用するということも考えられる50。





図表. 帝人「モルフォテックス」繊維断面 6)

図表. テキスタイル例 6)

技術面では、1)繊維を押し出す金型の設計、2)糸の収縮率による断面の変化の抑制、3)コストに見合った生産効率の実現がポイントだった。特に、生産効率の向上では、時速 50km だった速度を直接延伸法に切り替えることにより時速 200km を実現し、2003 年 7 月に量産体制がスタートした。

【出所】

- 1) 吉岡伸也(東京理科大学) http://www.yoshioka-lab.com/kaisetsu/cypris.html
- 2) (一社) 色材協会 http://www.shikizai.org/shikizai_column/vol10/index.html
- 3) (国立) 浜松医大

http://www2.hama-med.ac.jp/w1d/biology/hariyama/research/color/color.htm

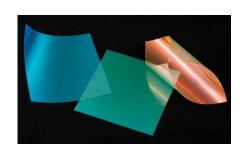
- 4) 石崎貴裕,表面技術,61(11),747-750,2010.
 - https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/61/11/61_11_747/_pdf/-char/ja
- 5) 日本化学繊維協会ホームページ
 - http://www.jcfa.gr.jp/fiber/topics/no19/topics19.html
- 6) 帝人ホームページ https://www.teijin.co.jp/recruit/career/rd/pdf/teijin_labo_03.pdf



②「モルフォシート」(凸版印刷)

凸版印刷(株)は、光の反射と散乱を制御するナノ構造設計技術と多層薄膜形成技術の融合によって、顔料や染料などの色素を使わずに、色を示す構造発色シート「モルフォシート」を開発した。偽造防止やブランドプロテクションなどのセキュリティ商品や屋内外でのプロモーションツール向けの製品として実用化を目指す。

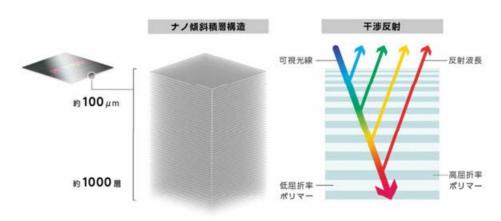
ナノインプリント技術によりフィルム上にナノ構造体を大面積で形成する 量産技術を確立。ナノ構造の形状とサイズ、およびランダムパターン配置の 設計によって、表現する色と視野範囲を自由にコントロール。フォトマスク 製造で培った薄膜形成技術によって、ナノ構造上に多層薄膜を精密形成する ことができるため、反射吸収する波長域を狭めることができる。これにより 発色の均一性を高めることができるという。



③ 金属光沢易成形フィルム「PICASUS」(東レ)

PICASUS(ピカサス)は種類の異なるポリマーを数百から一千層、数ナノメートルの薄さで多層積層した金属光沢調のフィルムである。

塗装やメッキを使わずに金属のような光沢を持った外観を表現できることから、重金属フリーの環境低負荷型フィルムとして、2008年に上市して以来、環境配慮型社会における新たなニーズに対応してきた¹⁾。

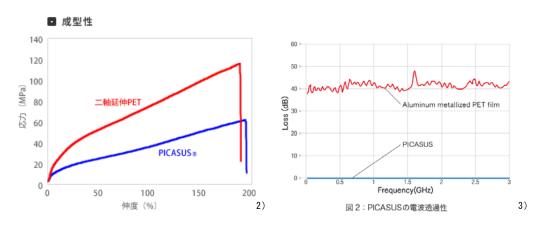




特長として金属フリーなのに金属光沢を持つことから、

- あ)メッキ、塗装からの代替が可能となり環境低負荷に貢献する。
- い)無線通信の電磁波を透過するためユビキタス社会の加飾方式として優れる。
- う) 金属の錆が問題となる用途で、金属調の加飾が可能になる。
- え)成形性に優れ、樹脂との一体成形もできることから、工程の簡略化が可能。
- お)耐熱性、耐薬品性、印刷性に優れる。

といった効果が期待できる¹⁾。東レの発表¹⁾によると、売上高は 2013 年度は 2009 年度比で 10 倍の規模に達する見通しで、2016 年度には 2013 年度比で 5 倍の規模へと拡大を目指すとされている。特に、成形性が良いところから、インサート成形が可能であり電磁波透過性と併せて I T機器に採用される例が多いようである。



図表. 東レ・名阪真空工業・東芝3社共同開発によりノートパソコンに応用した例4)



図表、スマートフォンの筐体に採用した例3),5)







【出所】

- 1) 東レプレスリリース
 - http://cs2.toray.co.jp/news/toray/newsrrs01.nsf/0/C8D6BA9B7042191B49257D0F002 D3BA7
- 2) 東レホームページ http://www.toray.jp/films/printing/product/picasus.html
- 3) 荒川孝保,Harima Quarterly,98,1-3(2009)

 https://www.harima.co.jp/randd/technology_report/pdf/techrepo0901_1.pdf
- 4) 東芝ホームページ https://dynabook.com/pc/benefit/ocean/index_j.htm
- 5) (株) アトモスホームページ https://www.atmos-n.co.jp/technical/ukeoi.html

④ 装飾フィルム(日栄化工)

シール、ラベル印刷市場をターゲットに日栄化工からイリュージョンフィルムという名称で構造色フィルムが販売されている。¹⁾



1) 日栄化エホームページ

http://www.netak.co.jp/product/index.php/item?sheet004_cell002=%E3%82%B7%E3%83%BC%E3%83%AB%E3%83%BB%E3%83%A9%E3%83%899%E3%83%AB%E7%B4%A0%E6%9D%90&cell004
=%E7%89%B9%E6%AE%8A%E5%A4%9A%E5%B1%A4%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%AB%E3%83%A
0%EF%BC%88%E6%A7%8B%E9%80%A0%E8%89%B2%E3%83%BB%E8%89%B2%E5%BD%A9%E5%A4%8
9%E5%8C%96%EF%BC%89&name=%E3%82%A4%E3%83%AA%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%B8%E
3%83%A7%E3%83%B3%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%AB%E3%83%A0&id=131



⑤レクサス (トヨタ自動車)

トヨタ自動車は 2018 年 4 月 5 日、高級車ブランド「レクサス」の国内累計販売台数が 3 月末で 50 万台を達成したことを記念し、フラッグシップクーペ「LC」の特別仕様車「Structural Blue」を発売した。「Structural Blue」は、「ストラクチュラルブルー」と名付けた独自の鮮やかな青のボディーカラーをまとう。この色は、南米に生息するモルフォチョウの羽から着想を得た「構造発色」という原理を応用したものだという。モルフォチョウの羽は無色だが、光を受けると特定の波長だけが反射・強調される構造になっており、人間の目には青く輝いて見える。銀色のCDが角度によって虹色に輝くのと同じだ。特別仕様車には、15 年かけて再現したという自動車用の構造発色性顔料を採用した1)。

この技術は、ミシガン州アナーバー市のレクサスリサーチ (Lexus Research in Ann Arbor, Michigan) でMinjuan Zhang博士が 2005 年から開発を始めた。 Debasish Banerjee博士らの協力を得て、カリフォルニア州の特殊顔料メーカー VIAVI Solutions社と共同開発した²⁾。

原料をフィルム上に塗工、乾燥後、塗膜を引きはがすことによって塗料を 製造している^{3),4)}。

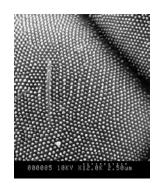
【出所】

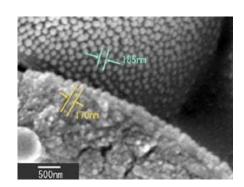
- 1) https://www.sankei.com/economy/news/180406/ecn1804060032-n1.html
- 2) https://www.pcimag.com/articles/104339-lexus-and-viavi-solutions-crack-the-code-o
 n-bioinspired-color
- 3) https://lexus.jp/models/lc/features/sesb/
- 4) https://www.viavisolutions.com/ja-jp/taxonomy/term/4721

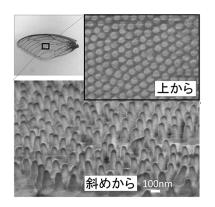


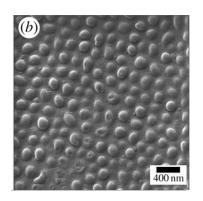
5. 表面構造

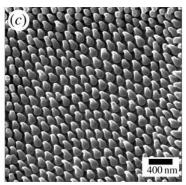
【生物のモスアイ及び微細構造の例】

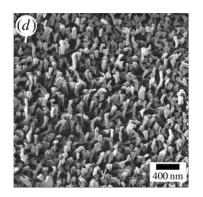












図表. 上段左: モスアイ (蛾の目)

写真出所: D.G Stavenga et.al., Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies, Proc Biol Sci. 273, 661-667(2005). doi: 10.1098/rspb.2005.3369

https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1560070/

以下、生物の微細構造

図表.上段中:(蚊の目)直径 150~200nm の乳頭状突起

図表. 上段道:(クマゼミの翅) 直径約 100nm の乳頭状突起

図表. 下段左:(17年周期ゼミ,北米) 平均直径 167nm

図表. 下段中:セミ(北米)平均直径 57nm、平均長 183nm

図表. 下段右:トンボ(北米)平均直径 50nm、平均長 241nm

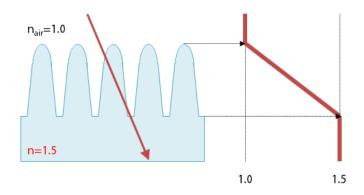
写真出所 上記いずれも Kyle Nowlin et. Al., J.Royal Soc. Interface, 12, 2014099 (2014)

http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/12/102/20140999

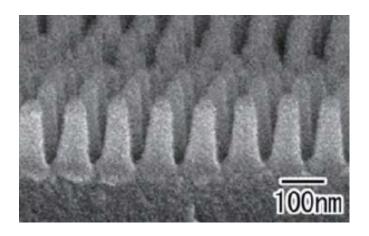


【原理】

材質ではなく構造が性質を決める。光の波長の 1/2 (=数百 nm) 以下で緩やかな 屈折率変化。



https://www.molecularscience.jp/lecture/Nanobio2016.pdf



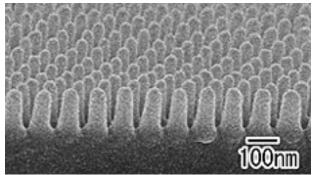
図表. モスアイシート

写真出所:(公益)神奈川科学技術アカデミー

www.keins.city.kawasaki.jp/content/ksw/4/5_film.pdf





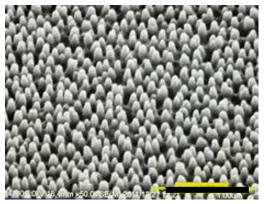


図表. モスアイフィルム (アクリル) (2008年)

写真出所 三菱レイヨン/神奈川科学アカデミー

https://www.m-chemical.co.jp/news/mrc/p08/080116.html





 $1~\mu$ m

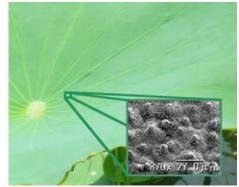
図表. モスアイパネル シャープ/大日本印刷 (2012 年)



6. ロータス効果

【生物のロータス効果の例】





図表. 左図:ハスの葉のロータス効果

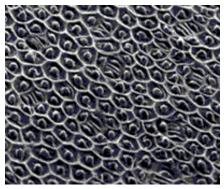
写真出所: photoAC

図表. 右図:ハスの葉の表面(直径約10μmの乳頭状突起)

写真出所:高エネルキー加速器研究機構

https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20120731170000/







図表. 左図:サトイモの葉のロータス効果

写真出所: photoAC

図表. 中図及び右図:サトイモの葉の表面(直径約8μmの乳頭状突起)

写真出所:松本壮平,水をはじく微細構造,流れ,10(2001)

https://www.jsme.or.jp/fed/Old/newsletters/2001_10/2102.html





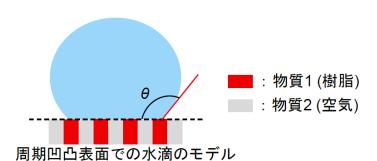
図表. 左図:バラの花の水滴

写真出所: photoAC

図表. 右図:イネの葉の表面(直径約3μmの乳頭状突起)

写真出所:相賀彩織他,植物科学最前線,6,102-11(2015)

【原理】



凹凸が多く粗い面において、液体が入り込めない多数の空隙によって点接触をしている場合、接触角はCassie —Baxter の式で表される

 $\cos\theta = A_1 \cos\theta_1 + A_2 \cos\theta_2$

樹脂

ここに、 A_1 , A_2 :物質1と2が表面を占める割合

物質2が空気の場合は θ_2 =180°、つまり真の接触角 θ_1 がある程度大きければ、見かけの接触角 θ が150°を越える

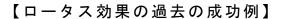
—

理論的には、親水性材料(真の接触角 $\theta_1 < 90$ °)でも、表面に占める割合 A_1 を極端に小さくすれば超撥水性表面になる

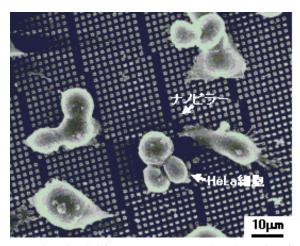
➡ 表面の微細構造の制御だけで超撥水性材料を作り出せる可能性

出所: JST 成果発表会

https://shingi.jst.go.jp/past_abst/abst/p/10/1053/iwate1.pdf







図表. ポリスチレン細胞培養シート (剥離時の細胞活性低下が少)

日立製作所 2005 年

写真出所:日立製作所ニュースリリース

http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2005/02/0224.html



図表. ヨーグルトの蓋 (ポリオレフィン) 森永乳業/東洋アルミ 2010 年

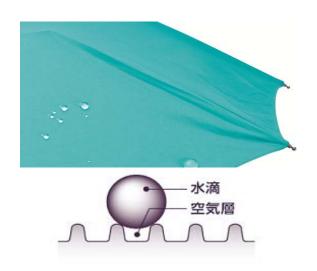




図表. コンクリート型枠(樹脂コート)清水建設(2015年) (良脱泡性で表面美麗)

写真出所:清水建設

http://www.fbi-award.jp/sentan/jusyou/2017/07.pdf



濡れない傘

帝人/シュース コレクション 2015年

図表. ミノテック (撥水ファブリック) 帝人 2016年



2-2-2. これから商業化が期待される材料系バイオミメティクスの技術の動向 材料系であって過去の成功例を基に現在開発が進みつつある例を紹介する。

1. 構造色

① 安全性の高いカラーコンタクトレンズ

中国江蘇省南京市の東南大学は、顔料が漏出する危険がなく安全性が高いことを狙いとし、構造色によるコンタクトレンズの研究を行っている。

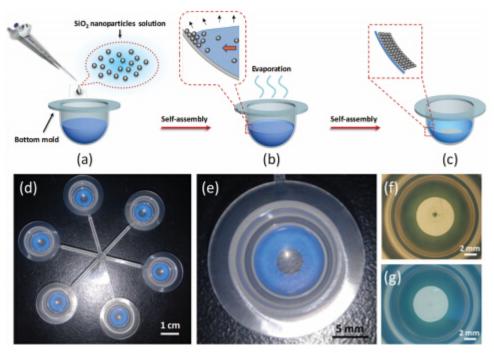


Figure 1. (a-c) Schematic illustration of the fabrication of circle colloidal crystal templates. (d, e) Photographs of circle colloidal photonic crystal templates assembled in molds. (f) Colloidal photonic crystal template without HF cleaning. (g) Colloidal photonic crystal template after HF cleaning.

図表. 構造色によるカラーコンタクトレンズ 1)

1) Xie, Z., Li, L., Liu, P., Zheng, F., Guo, L., Zhao, Y., Jin, L., Li, T. and Gu, Z. (2014), Self-Assembled Coffee-Ring Colloidal Crystals for Structurally Colored Contact Lenses. Small. doi: 10.1002/smll.201402071

http://bme.seu.edu.cn/englishweb/a1/02/c7894a106754/page.psp



② ステラーカケスに学ぶ角度依存性のない構造色を占める光学デバイス

構造色には角度によって色が変わるものと、角度依存性のないものの2種類がある。角度依存性のない青色を示すには、微細構造に加え、その背後に黒色構造が必要なことが分かっている。具体的には、青い羽根を持つステラーカケスとそのアルビノ種は共に羽根にサブミクロンサイズの特定の大きさの細孔が短距離秩序を持って等方的に分散している。しかし、ステラーカケスは青いが、アルビノ種は白い。このような構造があるだけでは構造色は発現しない。非干渉性の多重散乱が可視光の全域に生じるため、その影響が強いと羽根は白っぽくなってしまうからである。 青いステラーカケスの羽根は、①可視光の波長の長さで屈折率の変化に短距離秩序を有する微細構造に加え、②その背後に存在する黒色のメラニン顆粒の利用により、鮮やかな角度依存性のない構造色を示す。1)





図表、カケスとアルビノ種のカケス

1) 名古屋大学プレスリリース (2017年)

http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_image s/20170427_engg_1.pdf

③ 次世代インク用フォトニック材料

見る角度により色が可変な「虹色構造色」と、色が変化しない「単色構造色」を容易に作り分けることを可能とした。構造色は色褪せせず、従来のインクにはない独特の光沢を有することから、構造色を用いる次世代インク開発の基盤となる重要な研究成果を得た。



具体的には、山階鳥類研究所との共同研究で、孔雀の羽の発色機構のもとになる微細構造とそれらを構築しているメラニンを、構造・素材ともに模倣し、メラニンの模倣体としてポリドーパミンを含む新たなコア-シェル型粒子を作製し利用することで、単一材料で視認性の高い構造発色を実現した¹⁾。

 Ayaka Kawamura et. al., Full-Color Biomimetic Photonic Materials with Iridescent and Non-Iridescent Structural Colors, Scientific Reports volume 6, Article number: 33984 (2016) doi:10.1038/srep33984

https://www.nature.com/articles/srep33984

④ フレキシブルオパール

ケンブリッジ大学の研究チーム¹⁾は、微粒子を規則正しく積層する新しい方法を考案した。これにより、捩じったり延ばしたりすると色が変わる新素材を実現した。



図表. フレキシブルオパール

- 1) Qibin Zhao et.al., Large-scale ordering of nanoparticles using viscoelastic shear processing, Nature Communications volume 7, Article number: 11661 (2016) doi:10.1038/ncomms11661 https://www.nature.com/articles/ncomms11661
- 2) 写真出所:ケンブリッジ大学ホームページ http://www.cam.ac.uk/research/news/flexible-opals



【モスアイに関し、研究中でまだ商業化が進んでいない例】

① スーパーブラックバード

パプアニューギニアに生息するフウチョウ科の極楽鳥の中には、最大で99.95%という驚きの光吸収率を持ち、その輪郭すら見えなくなる、ブラックホールにも似た真っ黒な鳥が存在する。この真っ黒な鳥は当たった光の99.95%を吸収する。その吸収率は、カラスやクロウタドリといった他の黒い鳥の10~100倍。1)

人間が作り出した最も黒い物質は「ベンタブラック」であるが、その吸収率 99.965%にも匹敵する黒さである。ベンタブラックの場合、垂直のカーボンナノチューブの"森"を育てるために約 400 度が必要になるが、極楽鳥は同じような森を体温で生体物質のみを利用して育てる。



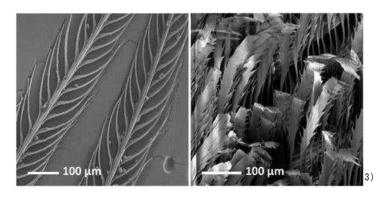
図表. スーパーブラックバード1)





aとbは普通の黒色、他はスーパーブラック²⁾

この黒さは羽の極小レベルの構造に由来する。典型的な鳥の羽には羽軸という軸が中央を通っている。そこから羽枝が生え、羽枝からはさらにもっと細かい小羽枝が生える。これらはどれも同じ平面に沿って平らに生えている。だがスーパーブラックバードの漆黒の羽は小羽枝が平面ではなく上向きにカーブし、微細なトゲのようになっている。このため光は反射してそこから離れず、小羽枝とそのトゲの間を繰り返し跳ね回り、その都度光は吸収されていく。こうして羽の中で光は消えてしまう。



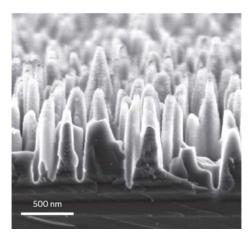
図表. 通常の黒い鳥の羽根 スーパーブラックバードの羽根

- 1) https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/01/super-black-is-the-new-black/549869/
- 2) Dakota E. McCoy et. al., Structural absorption by barbule microstructures of super black bird of paradise feathers Nature Communications volume 9, Article number: 1 (2018) doi:10.1038/s41467-017-02088-w
 - https://www.nature.com/articles/s41467-017-02088-w#Fig1
- 3) https://phys.org/news/2018-01-evolved-illusionblackest-black-bird-paradise.html



② ブラックシリコン

ハーバード大学をスピンアウトした企業が開発したシリコン上へのモスアイ構造であるブラックシリコンは光の吸収率の良さに注目され、太陽電池に展開されている¹⁾。日本では関西大学で研究が進んでいる²⁾。



図表. 太陽電池用ブラックシリコン4)

赤外線は物を温めるのには役立つけれど、太陽光発電においては役に立たなかった。しかし、フィンランドのアールト大学の研究チームが、スペインのカタルーニャ工科大学と共同で行った研究で、ブラックシリコン⁴⁾を使ったソーラーセルで、22.1%という過去最高の変換効率を達成したという。同大学がウェブサイトで発表している。³⁾



ブラックシリコンはその赤外線も含めた太陽光のほぼすべてを電気に変換することができる。

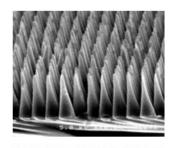
- 1) https://www.greentechmedia.com/articles/read/black-silicon-from-sionyx-raises-pv-e
 fficiency#gs.vYE5q9o
- 2) http://www2.kansai-u.ac.jp/nano/researchtheme.html
- 3) https://nge.jp/2015/05/23/post-105716
- 4) Hele Savin et.al., Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency, Nature Nanotechnology 10, 624-628 (2015) doi:10.1038/nnano.2015.89

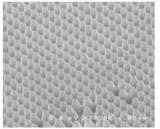


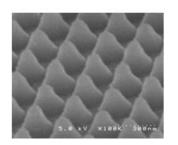
③ LED への展開

独自の高演色、高効率白色 LED 技術の製品化を目指して創立された名城大学(愛知県名古屋市)発のスタートアップ企業であるエルシード(株)は、LED への展開を進めている。名城大学の上山教授(現エルシード取締役)は、LED 内で発生した光が外部に放出される前に内部反射を繰り返すことで発生する吸収損失の問題をモスアイ構造表面を用いて解決する技術を初めて提案した。

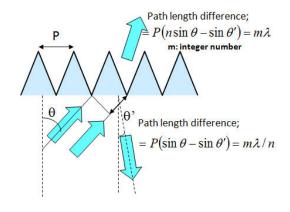
モスアイ構造表面に入射した光は、回折効果によってより垂直に近い方向に反射または透過する性質がある。その結果、モスアイ構造を導入したLEDにおいては光がより垂直方向に強く放射される特徴がある¹⁾。







図表. エルシード



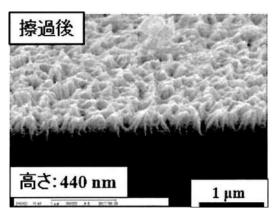
1) エルシード (株) ホームページ

http://elseed.com/jproducts/jmpss/



④ 壊れず拭き取り可能なモスアイ構造フィルム

反射防止効果を持つモスアイ構造を使ったフィルムはこれまでも、大型ディスプレーの表面などに使われてきたが、触ると壊れ、指紋が付くという問題点があった。しかし、東京理科大学基礎工学部電子応用工学科の谷口淳教授とオーテックス(東京都新宿区)の日和佐伸研究員らは、高硬度で防汚性を持つ紫外線硬化性樹脂を開発した。新開発の樹脂を用いて作製したモスアイ構造は、擦過試験に耐え、指紋の拭き取りも容易にできた。触っても壊れない、スマートフォンなどのタッチパネル用反射防止フィルムとして使える。この新素材は、開発した高硬度で防汚性を持つ紫外線硬化性樹脂にナノオーダーの針状構造「モスアイ構造」を転写することによって作成した。さらに、モスアイ構造表面の水の接触角は150度以上と超撥水(はっすい)性を示すことから、この性質を利用した製品展開も見込めるという。1)



図表、モスアイ構造フィルム

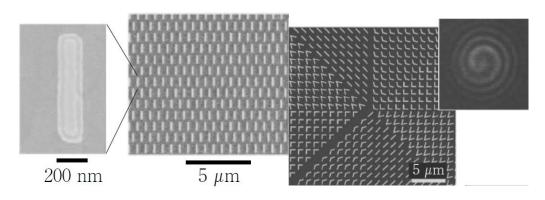
1) 日刊工業新聞 2017/8/9

https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00438767



(関連する参考情報/バイオミメティクスではありません)

(1) メタマテリアル (自然界には無いもの)



加藤純一,精密工学会誌,78(9),768-772(2012)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/78/9/78_767/_pdf

(2) ヴァンタブラック (カーボンナノチューブ)

世界で最も黒い材料とされているのがヴァンタブロック。英国立物理研究所 (National Physical Laboratory) al Laboratory) による測定では光の 0.036% しか反射しない (700nm)。

ヴァンタブラックは直径約 20 ナノメートル、約 $14\sim50\,\mu$ m長のカーボンナノチューブから構成される。 $1\,cm^2$ 中に約 10 億個のナノチューブを含む。



上図の左右の像は同じものである。右側がヴァンタブラックを塗ったもの で、高い光吸収率で低反射のために凹凸が全くわからなくなっている。

http://twistedsifter.com/2017/03/guide-to-vantablack-darkest-substance-ever/

2. 熱戦遮断材料



① サハラ砂漠のアリに学ぶ放熱材料 (反射とモスアイのコンビネーション)

【従来課題】

夏季の居住空間(車内、住宅等)や園芸用ハウス等において、外部からの 熱 (赤外線)を遮断し、内部からの熱を放出したいというニーズがあるが実 現困難であった。

【分析·原理抽出·技術転換】

サハラ砂漠は最高気温 70℃に達する。一方、ここに棲むサハラン・シルヴァー・アントの限界温度 53.6℃である。



1.

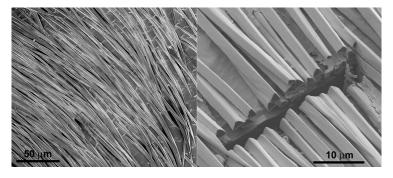
図表、サハラン・シルヴァー・アント

コロンビア大学らの研究によると、このアリの背中と体側は横断面が三角 形をした体毛に覆われており、この毛が赤外線を制御であることがわかった。 この体毛は体表面での太陽光 (可視光線および近赤外線の波長領域) の反射 率を高める。そして、中赤外線領域において、過剰な熱を熱放射により体外 へ排出する能力を高める。



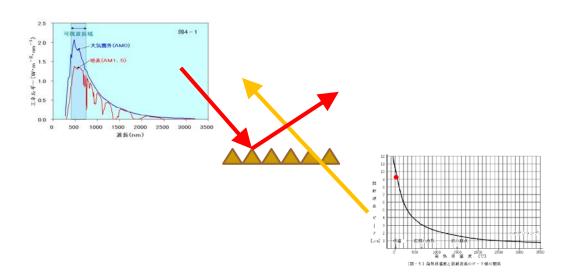
図表. サハラン・シルヴァー・アント表皮





図表. サハラン・シルヴァー・アントの体毛

具体的には、太陽光中の赤外線の波長は $0.7\sim2\,\mu\,m$ であり、アリの体表の毛の太さは $2\,\mu\,m$ なので太陽光中の赤外線は体表で反射されアリの体内には侵入しない。



図表、サハラン・シルヴァー・アントの体毛の光学特性

【効果】

この冷却効果により体毛を持たない場合と比べて体温を約 5~10 度低下させる。

【出所】

- 1) http://www.sciencemag.org/news/2015/06/silver-hairs-keep-desert-ants-cool
- 2) Norman Nan Shi et al., Science, Keeping cool: Enhanced optical reflection and heat dissipation in silver ants, 349, 298-301(2015).

http://science.sciencemag.org/content/early/2015/06/22/science.aab3564



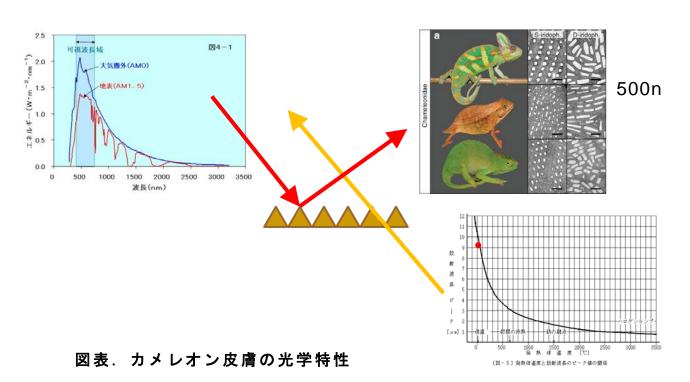
② カメレオンの表皮(反射とモスアイのコンビネーション)

【従来課題】

夏季の居住空間(車内、住宅等)や園芸用ハウス等において、外部からの 熱 (赤外線)を遮断し、内部からの熱を放出したいというニーズがあるが実 現困難であった。(サハラン・シルヴァー・アントと同じ)

【分析 · 原理抽出 · 技術転換】

スイス、ジュネーブ大学の研究チームパンサーカメレオン(学名: Furcifer pardalis)の皮膚構造を調べた。カメレオンの皮膚には、微小結晶入りの細胞でできた2つの層があるという。1層目はこのカメレオンに特有のものだが、下層にあたる2層目は、どのカメレオンにもある。1層目と同じく虹色素胞でできているが、反射する光のスペクトルは1層目よりも広く、特に近赤外線を反射する。目には見えないが、熱として感じる波長に近い光だ。この2層目の働きが変温動物であるカメレオンの体温調節に役立っているのではないかと推測する。



【出所】

1) Jérémie Teyssier, et. al. Photonic crystals cause active colour change in chameleons, Nature Communications volume, 6 (2015).

https://www.nature.com/articles/ncomms7368



3. 食虫植物に学ぶ超機水・機油材料

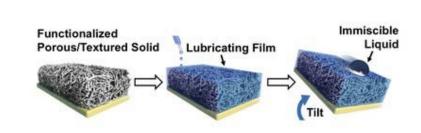
【従来課題】

撥水材料は多くあるが、撥水でかつ撥油のものが無い。また、従来の撥水材料は表面が傷つくと機能が失われる

【分析・原理抽出・技術転換】

食虫植物であるウツボカズラの壷型の葉の内側は水で満たされたスポンジのようになっており、これが壷に落ちた虫の足の油分をはじくため虫は中から上ってくることができないという。SLIPS(Slippery Liquid Infused Porous Surface)と名付けられたこの表面加工はテフロン(フッ素樹脂)の細孔に潤滑性の膜を固定することで極めて摩擦係数の低い表面を作ることに成功したとのこと。また、水と油両方をはじくことのできるオムニフォビシティ(omniphobicity)という珍しい性質も備えている。1)









図表. SLIPS 原理

【発展性】

将来は、送油パイプ等。

【出所】

1) Tak-Sing Wong et.al., Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity, Nature, 477, 443-447, (2011).

https://wyss.harvard.edu/slippery-slope-researchers-take-advice-from-carnivorous-plant/



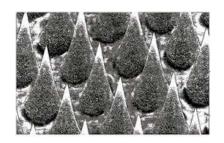
4. あらゆる天然材料よりも撥水性の材料

【従来課題】

撥水材料は多くあるが、撥水でかつ撥油のものが無い。また、従来の撥水材料は耐久性に乏しかった。

【分析 • 原理抽出 • 技術転換】

米オークリッジ国立研究所は、ロータス効果の研究から発展して、超撥水かつ 撥油性の新素材の開発に成功した。ポイントは、撥水性の耐久性が乏しいのは、 つまり、撥水性能が低下するのは撥水材料が不純物やゴミを吸着するからである という考え方と、乳頭状突起の先端を鋭くすることにより撥水、撥油性能を向上 させたことと考えられる。^{1),2),3)}





図表. 開発した新素材(縮尺明記無し) 新素材上の水滴

写真出所:米オークリッジ国立研究所

https://www.ornl.gov/news/samsung-licences-ornl-transparent-superhydrophobic-glass-coatings-electronic-devices

【発展性】

2016 年 9 月韓国サムスンが電子機器に関してオークリッジ国立研究所からこの技術の独占ライセンスを受けた。サムスンはスマートフォンの撥水・防塵・防指紋・防反射を 3 年間維持することを狙いとしている。なお、このライセンスは電子機器に関するものであり、例えばソーラーパネルや窓は範囲外とされている。

【出所】

- オークリッジ国立研究所プレスリリース
 https://www.ornl.gov/news/ornl-super-water-repellent-could-cause-big-wave-market
- 2) https://www.wired.com/2007/11/moses-effect-ge/
- 3) オークリッジ国立研究所プレスリリース
 https://www.ornl.gov/news/samsung-licences-ornl-transparent-superhydrophobic-glass-coatings-electronic-devices

5. 撥水撥油防汚材料



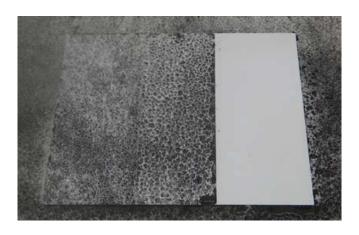
① ロータス効果による防汚材料

【従来課題】

撥水材料は多くあるが、撥水でかつ撥油のものが無い。また、従来の撥水材料耐久性に乏しかった。

【分析・原理抽出・技術転換】

三菱電機は、ロータス効果の研究から発展して、超撥水かつ撥油性かつ防汚性の新素材「スマートエアコーティング」の開発に成功した。ナノ微粒子を疎水性樹脂へ分散させる技術を高度化、マイクロメートルサイズの凹凸構造を形成できるコーティング技術を開発することにより、超撥水表面をもつ凹凸構造が空気の膜を形成し、粉じんや水滴・氷雪の付着を抑制するものと説明されている。1),2),3)



図表. 左:一般的な防汚コーティング (フッ素コート) 図表. 中:コート無し、右:スマートエアコーティング

粗大粒子 超撥水表面 疎水性樹脂 ナノ微粒子 空気の膜 基材

凹凸構造(約10µm)

2)

【出所】

三菱電機プレスリリース 2014/2/13
 http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2014/pdf/0213-b.pdf

強化層

- 2) 日本経済新聞 2014/2/19
 https://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1802J_Y4A210C1000000/
- 3) 再表 2014/106922 他 (三菱電機)
- ② 自己組織化微細防汚材料



【従来課題】

撥水材料は多くあるが、撥水でかつ撥油のものが無い。また、従来の撥水材料耐久性に乏しかった。

【分析・原理抽出・技術転換】

米ウルトラテック・インターナショナル社は、ロータス効果の研究から発展して、超撥水かつ撥油性かつ防汚性の新素材「ウルトラーエバードライ」の開発に成功した。基材の上に2層のコーティングをほどこすときに自己組織化により表面に微細構造を形成すると説明されているが、詳細は未発表である。

(原文) The bottom coat bonds to most materials and acts as a primer. It provides a consistent material for the top coat to bond to while interacting with the top coat to self-assemble the surface, creating finely textured geometry. This surface is comprised of patterns of geometric shapes and billions of interstitial spaces. There are "high points" in the surface that help to create a low surface energy, which causes droplets of water to touch a very small percentage of the coating. The water in the droplet that does not touch these "high points" is held together by intermolecular cohesive forces of the water molecules. It is the combination of these elements that allow Ultra-Ever Dry to be superhydrophobic and oleophobic for some, but not all, oil-based liquids.



図表、ウルトラーエバードライ

【発展性】

既に米国では販売されている。

【出所】

1) ウルトラテック・インターナショナル社ホームページ http://www.spillcontainment.com/products/ever-dry



6. 赤外線遮断材料

【従来課題】

兵士が暗視スコープで発見される



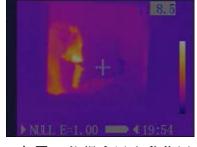
写真出所:photoAC

図表. 暗視監視カメラ

【分析・原理抽出・技術転換】

ホッキョクグマは暗視スコープで見えにくい。多くの哺乳類の体毛がたとえ白色であっても光を透過しないのに対し、ホッキョクグマの体毛は光を透過し、内部が空洞になった特殊な構造のために、散乱光によって白く輝いて見える。ホッキョクグマの透明の体毛は陽光の通過を妨げず奥にある皮膚にまで届き熱をもたらす。もたらされた熱はぶ厚い脂肪層と体毛に保護され、容易に失われることはない。それに加え体毛内の空洞も蓄熱の役割を果たすという巧みな保温機構を成立させている。体温が殆ど外に逃げないため、体から 輻射 される 赤外線 の量が非常に少ない。この特性から、赤外線カメラによる空中撮影の際は雪の反射光に遮られる為、ほぼその姿を捉えられない。





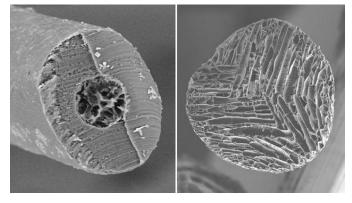
写真出所: 左図 photoAC

右図 札幌市円山動物園

図表、シロクマと暗視スコープ図

http://www.city.sapporo.jp/zoo/topics/topics2-661.html





ホッキョクグマの毛

多孔繊維試作品

1)

図表. シロクマの毛の断面と多孔繊維の断面

【出所】

1) Ying Cui et.al., A Thermally Insulating Textile Inspired by Polar Bear Hair, Advanced Materials, 14 February (2018), doi.org/10.1002/adma.201706807

7. トンボの羽根に学ぶ物理的抗菌新素材

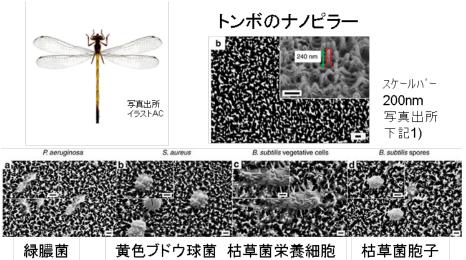
【従来課題】

生体材料(人工関節等)に使用できる良い抗菌材料がない

【分析·原理抽出·技術転換】

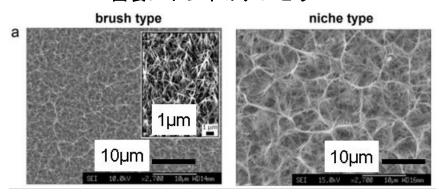
豪スウィンバーン工科大学のエレーナ・イワノワ氏率いる研究チームは、昆虫のトンボからヒントを得て、細菌を物理的に殺すナノテクノロジー表面構造の発見に至った。詳細な調査の結果、答えは羽の生化学的な性質ではなく、羽の表面に等間隔に並ぶ 250 ナノメートルの「ナノピラー」と呼ばれる先が鋭くとがった突起が林立する構造になっている。この構造に細菌が触れると、細菌の細胞膜が破れることを研究チームは発見した。撥水性を持つ表面はどれも、このような殺菌剤としての物理的性質を持つことが明らかになった。細菌は、この表面に付着すると粉々に切り裂かれてしまう。





スケールバー(各写真右下)は**5μm**、写真出所は下記¹⁾

図表. トンボのナノピラー



TiO2ナノワイヤー構造

写真出所下記2)

図表. TiO2ナノワイヤー

【出所】

- 1) Ivanova, E. P. et al. Bactericidal activity of black silicon. Nature Commun., 4, (2013). https://www.nature.com/articles/ncomms3838
- 2) Diu T et al., Cicada-inspired cell-instructive nanopatterned arrays. Sci Rep. ,4,(2014). https://www.nature.com/articles/srep07122



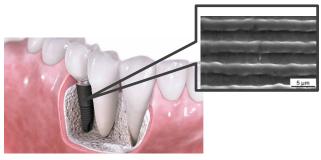
8. 乳児の歯に学ぶ物理的生体親和素材

【従来課題】

人工歯のチタン合金製インプラントの生体親和性が低い

【分析・原理抽出・技術転換】

乳児の生えたての歯にはミクロンレベルの溝があることからヒントを得て、 チタン合金製インプラントにミクロンレベルの溝を形成したところ親和性の向上を得た。

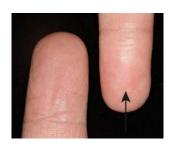


図表. 歯科溝を施したインプラント

9. 物理的接着

【従来課題】

治療で指紋が消えた患者に良い手袋が無い

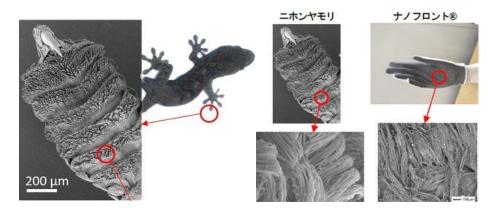


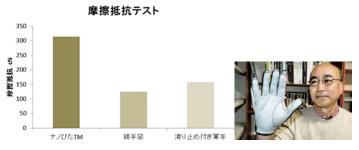
図表. 指紋の消えた指

【分析・原理抽出・技術転換】

ヤモリの手先には細かい繊毛があることがわかっており、ファンデルワール スカのためと言われているが、詳細のメカニズムはまだよくわかっていない。







図表. ヤモリの手を応用した接着

真空だろうが超低温だろうが高温だろうがこの構造体による接着性が比較的維持されること、またVOCが極めて少ないことに注目し、高精度の分析機器内への適用が考えれている。^{1),2)}

【出所】

1) 静岡新聞 2018/2/4

http://www.at-s.com/news/article/health/shizuoka/453764.html

2) 帝人フロンティアプレスリリース

http://www2.teijin-frontier.com/news/180201.html



10. 水収集材料

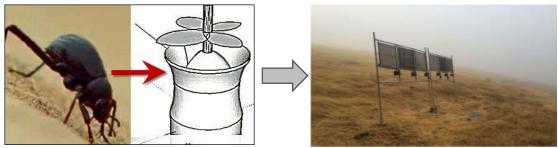
【従来課題】

砂漠の乾燥地帯では水不足に悩んでいた。

【分析・原理抽出・技術転換】

アフリカの砂漠に棲む小さな甲虫は、年間降水量がわずか 1.3cmというナミブ砂漠だけに生息しており、硬い羽の表面で、海風から水を集めて生き延びている。鞘翅の表面は微小な凹凸で覆われていて、その頂点部分が水を引きつけ(親水性)、横の部分が水をはじく(疎水性)。海風が吹いてくる方向に向かって羽を広げて湿った空気を受けることにより、最終的には直径 15~20 ミクロンの小さな水滴が背中に溜まり、口に向かって流れ込む仕組みになっている。





図表、ナミブカメムシと原理を応用した収水システム

この原理に着目して米国の新興企業が、大気から水分を取り出して液化し、 自動的に水を収集する水筒の開発を進めている。¹⁾

その他この原理に着目して日本でも水採集システムの研究が進みつつある。

金属製パンチングメッシュを用いた高効率液滴捕集システムの開発平井悠司(千歳科学技術大学)2016年度助成砂漠の生物に学ぶ結露水生成システムの構築 鴇田(ときた)泰弘(早稲田大学)2005年度助成 【出所】

1) 米 NBD Nanotechnologies, Inc. home page http://nbdnano.com/#



11. 非凍結材料

【従来課題】

悪天候や吹雪が何千ものフライトの遅延や欠航を引き起こしている。その理由の一つが翼についた氷のためである。 このような凍結した翼の表面を、氷のない状態に維持するには多くの時間とエネルギーが必要となる。





写真出所 左: SIR 撮影、右: photoAC

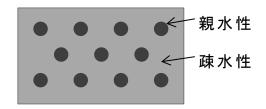
図表.飛行機の翼の着氷

【分析・原理抽出・技術転換】

アフリカの砂漠に棲む小さな甲虫の甲殻表面は、小さな隆起の集合で、空気中の水分がそこに濃縮されてしずくとなり、極小の漏斗を備えた嫌水性の表面に蓄積され、漏斗は昆虫の口へと水を向かわせる。



この原理をヴァージニア工科大学の科学者たちは、反対の現象つまり氷の形成を制御下に置くために、下図のような、親水性と疎水性をもつ異なる材料の組み合わせで再現した。¹⁾ 親水性部分に結露した水がブリッジする前に蒸発するように表面構造を制御した。



【出所】

1)J. B. Boreyko et al., Controlling condensation and frost growth with chemical micropatterns, Scientific Reports 6, Article number: 19131 (2016)

https://www.nature.com/articles/srep19131



12. 自己鋭利化材料

【従来課題】

従来の工具等の刃は、使用につれ鋭利さを失うという課題があった。

【分析・原理抽出・技術転換】

ウニは波や天敵から身を守る隠れ家を作るために岩をえぐって穴をあける。 なぜウニの歯は鋭利さを失わないのかを研究していた研究者たちは、ウニの歯 が特殊な構造であることを見出した。

ウニの歯の結晶構造同士の間には、方解石よりもろい有機質の層があった。 そして、先端にダイヤモンドが付いた超微細な探針でウニの歯をたたくと、こ の有機質層に沿って歯が折れることがわかった。

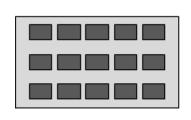
つまり、ウニはあらかじめ歯の"弱点"を設けていて、ミシン目に沿って紙を切り取るように、所定 の個所だけ簡単に分離するようになっている。歯は絶え間なく成長しており、切れ味の鈍くなった部分は定期的に捨てられ、先端は常に鋭利な状態が保たれる。

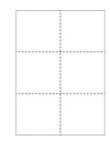






図表、ウニの巣穴と鋭利な歯







写真出所 photoAC

今回の発見を基に、非常に丈夫で破壊に対する耐性に優れたナノセメントや、先端が多層式でほとんど交換が不要なナノ研磨用ツールなどが開発できるかもしれないと研究者は期待するが、まだ解明されていない部分も多い。¹⁾

【出所】

1) Christopher E. Killian et al., Self-Sharpening Mechanism of the Sea Urchin Tooth, Advanced Functional Materials, 21,682-690,(2010).

https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.201001546



13. 軽量高強度新素材

【従来課題】

兵士のアーマーや装甲車を代表とする武器類は、身体を敵からの攻撃や、爆風から身を防ぐために重要である。しかし、その素材は強度が強い素材は重いため、アーマーやヘルメットや車載シールド武器に使用した場合には、機動性に欠けるという欠点があった。

【分析·原理抽出·技術転換】

シャコ類は、肉食性の強い獰猛なハンターとしても知られる。獲物を仕留めるに当たって最大の武器となるのが、体の前の方に備わった捕脚と呼ばれる脚。ヒトの肘打ちに似た強烈なパンチを繰り出すことができる。この捕脚の秘密のカギを握るのが、V字形や長方形を縦横とし連続して組合せたユニークな「ヘリンボーン構造(herringbone structure)」にある。 1),2),3),4)



図表. シャコ捕脚のヘリンボーン構造

軽量で硬いシャコ類の捕脚に目を付け、2012 年 6 月に米空軍の研究部門である AFSOR (Air Force Office of Scientific Research) が、カリフォルニア大学の研究チームに対して 60 万ドル(約 4,740 万円)の研究開発費用を計上した。 1)

【発展性】

活躍する兵士が、敵からの攻撃や、爆風から身を防ぐ際の素材として開発を進めたい考えを示している。研究成果は、ヘルメットやハンヴィー、ヘリコプター、ドローン、車載ターレットのシールドなど様々に活用できることが見込まれている。 既にヘルメットの試作品まで進んでいると言われている。

米空軍からの研究開発費用支援は800万ドルまで拡大しているようである。





図表. シャコの足の構造を模倣したヘルメット

【出所】

- カリフォルニア大学リバーサイド校ホームページ https://ucrtoday.ucr.edu/37532
- 2) カリフォルニア大学リバーサイド校ホームページ https://ucrtoday.ucr.edu/37532/prototype-helmet
- 3) ワシントンポスト 2014/4/26
 https://www.washingtonpost.com/national/health-science/peacock-mantis-shrimps-swif
 t-deadly-punch-inspires-superstrong-composite-materials/2014/04/26/ef5aa6a6-cc7f-1
 https://www.washingtonpost.com/national/health-science/peacock-mantis-shrimps-swif
 t-deadly-punch-inspires-superstrong-composite-materials/2014/04/26/ef5aa6a6-cc7f-1
 t-t-deadly-punch-inspires-superstrong-composite-materials/2014/04/26/ef5aa6a6-cc7f-1
- 4) Nicolás Guarín-Zapata, Shear Wave Filtering in Naturally-Occurring Bouligand Structures, Materials Science, DOI:10.1016/j.actbio.2015.04.039



14. 無農薬防虫素材

【従来課題】

環境にやさしい防虫素材がない

【分析・原理抽出・技術転換】

家畜のナガナ病の病原体となる原生生物トリパノソーマの媒介種として知られるツェツェバエの生息地域(ツェツェベルト地帯)と、シマウマの生息地域が一致すること。そして、ここには野生のウマがいないことに注目した研究者たちは、シマウマの縞を詳細に研究した。1)

その結果、黒ウマと茶ウマからは偏光が、白ウマからは非偏光が反射光として出ること、及びシマウマの縞の黒部分からは偏光が、白部分からは非偏光が出る実験結果を得た。²⁾

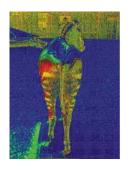
そして、シマウマの縞からの非偏光と偏光がツェツェバエを混乱させてシマウマに近寄ることができないことを明らかにした。³⁾







図表、シマウマの生息分布とツェツェバエの生息地域



写真出所 上左 周南市徳山動物

https://shunan.mypl.net/mp/tokuyamazoo_shunan/?sid=33759

上右 photoAC

► http://www.bbc.co.uk/nature/16944753



【出所】

1) ナショナルシ オケ ラフィック 2012/2/10

http://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/5610/

- 2) Ádám Egri et.al., Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes, Journal of Experimental Biology 2012 215: 736-745; doi: 10.1242/jeb.065540
- 3) Tim Caro et al., The function of zebra stripes, Nature Communications, 5, (2014).

15. 柔軟断熱材料

【従来課題】

低温の水中に潜水する時に使用するクロロプレンゴム製ウェットスーツには、柔軟性不十分で動きにくく着脱もしにくいという課題があった。

【分析・原理抽出・技術転換】

北極海に住むセイウチが防寒のために厚い脂肪層を必要とし、そのため緩慢な動きしかできないのに対し、同じ北極海に住むラッコは脂肪層が薄く機敏な動作が可能なことに注目したマサチューセッツ工科大学の研究者たちはラッコの毛を研究した。¹⁾

そして、ラッコが海中に入水する時の速度において、ラッコの毛皮が効率的に空気を取り込み、かつ水中においても毛が倒れない(=空気の断熱層を維持する)毛の長さと密度になっていることを明らかにし、計算式を確立し、新しいウェットスーツ素材を開発した。

【出所】

1) Allice Nasto et.al., Air entrainment in hairy surfaces, Phys. Rev. Fluids, 1, (2016). https://journals.aps.org/prfluids/abstract/10.1103/PhysRevFluids.1.033905



16. 自己修復高強度材料

【従来課題】

通常の防弾チョッキは一度被弾すると、その部分を修復することができないため廃棄処分になる。

【分析・原理抽出・技術転換】

瀋陽材料科学国家連合実験室では、自己修復型の防弾チョッキの研究が進められている。センザンコウのうろこは傷やへこみが生じても、水に濡らせば元通りになり、何度でも使用可能だという。同実験室の主席研究員・劉増乾は「センザンコウ製防弾チョッキならば、洗濯機に放り込むだけで傷やへこみ、ゆがみはすべて修復され、新品同様の姿になる」と話しているが軍事技術のため詳細は明らかにされていない。1)



図表. センザンコウ

写真出所 (公益) 東京動物園協会

https://www.tokyo-zoo.net/encyclopedia/species_detail?move=-1&species_code=360

【出所】

1) South China Morning Post July 7, 2015 Pangolin scales could be key to self-healing bulletproof vests: scientists

http://www.scmp.com/tech/science-research/article/1833335/pangolin-scales-could-be-key-self-healing-bulletproof-vests



17. ナマコに学ぶ光応答性高分子新素材

ナマコに手を触れると、皮は硬くなり身を守る。 ところが、ナマコを手にとって強く揉み続けると、 皮は軟らかくなり、 どろどろの粘稠な液にまで「融けて」しまう。この融けてドロドロになったナマコは、 数週間のうちに元の体に回復する。

本川達雄 (1996). 自在に硬さを変える「適応材料」としてのナマコの皮 Japanese Society for Medical and Biological Engineering 10, 58-64.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmbe1987/10/11/10_11_58/_article/-char/ja/

【従来課題】

光により硬さを可逆的に変化させる高分子材料が無いという課題があった。

【分析・原理抽出・技術展開】

ナマコには海から取り出して力を加えると柔らかくなるが、海中に戻すと元に戻る種類がいることに注目した東京大学の豊田太郎准教授らはコラーゲンネットワークの一部が可逆的に変化しているのではないかと考えた。

そして、このナマコのメカニズムをシリコーン結合に応用し、紫外光で分子 同士の結合の一部が切れドロドロ化。光を消すとすぐに元の硬さに戻る高分子 を開発した。

【発展性】

応用として、例えば簡単に剥がせる接着剤等が期待される。

【出所】

1) 日本経済新聞 2017/9/18

https://www.nikkei.com/article/DGKKZO2123420017092017TJM000/

2) 本川達雄,自在に硬さを変える「適応材料」としてのナマコの皮, Japanese Society for Medical and Biological Engineering,10(11),58-64 (1996).

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmbe1987/10/11/10_11_58/_pdf/-char/ja



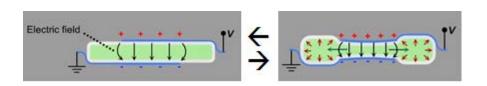
18. 人間の筋肉に学ぶ人工筋肉 HASEL

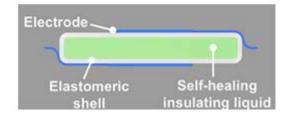
【従来の課題】

ロボットアームにはきめ細かな動きが要求されるが、多くのモーターを有しているため、重量が重くなって制御がたいへんという課題があった。

【分析・原理抽出・技術展開】

米コロラド大学ボルダー校の研究者らは、人間の筋肉にヒントを得て、液体 誘電体が弾力のある素材に中に入った構造の人工筋肉を開発した。電圧が加わる ことで内部の液体が動くことによりヒトの筋肉のように収縮、伸張するという仕 組みになっている。そのため、ラズベリーのように潰れやすいものをつかんで扱 うことができる他、俊敏で簡単に制御応答できるという特長を持つ。1),2),3)







図表. 人工筋肉

【出所】

- E. Acome et al., Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance, Science 05 Jan 2018:
 Vol. 359, Issue 6371, pp. 61-65, DOI: 10.1126/science.aao6139
- 2) Nicholas Kellaris et al., Peano-HASEL actuators: Muscle-mimetic, electrohydraulic transducers that linearly contract on activation, Science Robotics 05 Jan 2018:Vol. 3, Issue 14, eaar3276,DOI: 10.1126/scirobotics.aar3276
- 3) https://wired.jp/2018/01/23/new-robotic-muscle-hasel/
- 4) https://www.youtube.com/watch?v=M4qcvTeN8k0

19. 人間の皮膚に学ぶ人工皮膚新素材 X P L



【従来の課題】

耐水性と耐久性に優れた化粧品(シワ・たるみ隠し、紫外線防止)が無いという課題があった。

【分析・原理抽出・技術展開】

米マサチューセッツ工科大学の研究者らは人間の皮膚の構造に学び人工皮膚 新素材 X P L (0livo film) を開発した。シリコーンのポリマーを塗布した後、 触媒を塗布、架橋させる技術である。

【発展性】

マサチューセッツ工科大学からスピンアウトしたオリボラボラトリー社のセカンドスキン事業を、2018年1月11日資生堂が買収、2020年までに製品発売し、数年で数百億円の事業に育成することを発表した。¹⁾

【出所】

1) 事業構想 2018年3月号



2-3. 最近の日本の官庁・企業の動き

(環境省)

環境省が第5次環境基本計画を策定、2018/4/17 閣議決定した。この環境基本計画の中で、2箇所でバイオミメティクスに関して言及している。

具体的には、

- ①微生物と植物の共生関係を利用した減農薬農業など生物の共生関係を利用した低環境負荷技術や、化合物を使わない防汚材料など生物の持つ優れた機能や形状を模倣する技術(バイオミメティクス)を活用した低環境負荷技術、化石資源によらない微生物・植物による有用物質生産が可能な低環境負荷技術の開発が近年急速に進んでいる。
- ②バイオミメティクスや共生関係についての研究をベースにした技術は、自然 (生態系)のメカニズムに倣い、生態系への負荷を最大限軽減する技術とし て人間の技術体系にパラダイムシフトをもたらし、持続可能性に資する技術 革新をもたらすと期待されている。

(菱電商事)

菱電商事は 2018 年 2 月 6 日信州大学山口昌樹教授と技術供与などの契約を締結した。将来はバイオミメティクス関連事業で売上高 100 億円を目指す。



2-4. ドイツ及び周辺国のバイオミメティクスの動向

バイオミメティクスの研究開発で先行するのはドイツであり、ISO TC266(バイオミメティクス)の立ち上げ準備を主導したのもドイツ政府が資金を提供するBIOKONであるという指摘がある。例えば、文献 1)では、バイオミメティクスの ISO立ち上げの準備を BIOKON が主導したことが次のように書かれている。

「第1回総会までの流れとして ISOに新しい技術委員会(TC)が設けられた背景には、バイオミメティクスの研究開発で他国に先行するドイツの奮闘があった。TC立ち上げの準備を主導したのはドイツ政府が資金を提供するプロジェクトBionics Competence Network(BIOKON)である。BIOKONは、様々なバイオミメティクス関連のプログラムを実施してきた実績がある。2011 年3月に、BIOKONとドイツ技術者協会(VDI)は共同で、バイオミメティクスの国際標準化に向けた事前のイベント「ISOBIONIK」を開催した。」¹⁾。

また、文献 2)では、BIOKONがドイツ政府の助成を受けて、ドイツの産学官連携とISOに重要な役割を果たしていることが報告されている。具体的には、「ドイツにおけるバイオミメティクスの産学官ネットワークであるBIOKONは、ドイツ連邦教育研究省の助成を受け、2001 年に設立された。最近の動きとして、BIOKONがドイツ技術者協会と共同で作成したドイツ国内のガイドラインをもとに、2011 年にドイツ規格協会がISOに対して、バイオミメティクスについての技術委員会の設立の提案を行い、TC266 が設立された。」²⁾

文献 3) では、BIOKON がドイツ政府から巨額の資金援助を受けていることが次のように記載されている。

「2001 年にドイツ政府の資金援助により、28 の研究組織の産学官からなるネットワーク BIOKONが設立された。 2011 年には世界で初めての International Industrial Convention on Biomimeticsを開催する等、市場開拓、組織化および知識移転で大きな実績を持っている。ドイツ政府は 2001 年から 2004 年の間に 2.4億ユーロ、2004 年から 2007 年の間に 6億ユーロの資金を供与した。2009 年に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が設立された。」 3)



また、BIOKONには、12のワーキンググループがあり以下に示す通り。



WG1 Architecture & Design WG7 Molecular, biochemical

WG2 Bio-inspired materials WG8 Robotics

WG3 Complex biological systems WG9 Sensors & signal processing

WG4 Energy Systems WG10 Lightweight structures

WG5 Fluid dynamics WG11 Organization & Management

WG6 Functional surfaces WG12 Education & training

このように、ドイツが「国をあげての支援」と言える多額の政府資金援助によりバイオミメティクスの ISO 規格化を進めている背景には、ドイツがバイオミメティクス関連産業での国際間の競争力の強化を狙って ISO 制定の主導権を握ろうとしている可能性がある。

- 1) バイオミメティクス国際標準化ニューズレター,1,2012 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL1.pdf
- 2) 特許庁, 平成 2 6 年度特許出願技術動向調査報告書(概要)バイオミメティクス https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/26_15.pdf
- 3) 富士通総研,自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討成果報告書 https://www.env.go.jp/policy/report/h27-01/report_H25.pdf

ドイツおよび周辺国の動向について、国内および海外出張による直接ヒアリングの手段で、BIOKONの活動状況を ISO 活動と関連付けて調査した。



【海外出張調査の設計】

(課題)

ドイツで BIOKON や ISO の当事者だけにインタビューしても客観的な調査になるとは限らない。ドイツ政府が巨額の資金を提供しているのなら、その提供元の公共機関も、受け入れ先の公共機関も、成功例としての話しかしにくいからである。そこで、客観的で正しい情報取得を行うために、バランスの取れた取材とするよう工夫が必要となる。

(施策)

ドイツの当事者の主張を聞くのは当然として、反対の立場をとるものの主張と、中立の立場のものの意見を聞く。また、併せて、日本との比較では、この分野で日本とドイツの比較ができる者の意見を聞くように取材先を選択することとした。

立場	BIOKON, ISOについて	ドイツのバイオミメティクスが進んでいるか?
当事者	BIOKON 推進者、ドイツ	じょっちのままのぶてまこす
中立	オランダ	ドイツと日本の両方のバイオミメ ティクスに詳しい研究者
ライバル	イギリス	アイグスに許しい研究者

図表. 取材先の設計

ドイツのライバルとしての取材先としてイギリスを選択した。あらゆる分野で昔からドイツとイギリスはライバルの関係であるが、バイオミメティクスも例外ではない。中立国としてはオランダを選択した。オランダは人種的にも言語的にも地理的にもドイツに近いが、過去の歴史的経過から仲が良いとは言えない。一方、イギリスとはビジネス上で競合になることもあるが、ロイヤル・ダッチ・シェルやユニリーバのように両国にまたがるビジネスもしている。このようにオランダは単に地理的にドイツとイギリスの中間にあるだけでなく、両国に常に注目している国であり、かつバイオミメティクスも盛んであることから選択した。

図表. 取材項目

BIOKON の助成資金は増えているか?ドイツのバイオミメティクス	
'	に貢献しているか?
2	ISO TC266 バイオミメティクス制定活動は進捗しているか?
3	バイオミメティクスに関し、他の国と比較してドイツは進んでいるか?

調査結果については、以下の ISOTC266 の調査結果と合わせて報告する。

2-5. ISO TC266 の動向



【規格の重要性について】

国際標準規格の目的は互換性の確保等が第一ではあるが、グローバル化の中で産業の国際競争力の強化という側面も重視されてきている。文献にも、例えば、「標準化の目的として、互換性・インターフェースの整合性の確保、生産効率の向上等があげられた時期もあるが、近年は、技術の普及、安全・安心の確保、省エネ等環境、産業競争力の強化、競争環境の整備、貿易促進にその目的が変化してきている。」との指摘1)がある。

国際標準が政府調達に対して影響を与えた例として、(当時完全民営化前だった) JR東日本がSuicaにソニーのFeliCa方式を採用しようとしたところ、海外企業が「待った」をかけてきた例²⁾が有名である。

具体的には、WTO(世界貿易機構)加盟国全部に適用される国際標準化に関わる規定は、マラケシュ協定・附属書1-Aに含まれる"貿易の技術的障害に関する協定(TBT協定)"と、附属書4に含まれる"政府調達に関する協定(政府調達協定)"の2つである③が、この政府調達協定の第6条2項には「機関は技術仕様については、適当な場合には、(a)デザイン又は記述的に示された特性よりも性能に着目して、また、国際規格が存在するときは当該国際規格、国際規格が存在しないときは国内強制規格、認められた国内任意規格又は建築規準に基づいて定める。」と規定されている④。当時完全民営化前で政府に準ずる機関と見られたJR東日本は、ISO規格ではなかったソニーのFelicaではなくISO規格に則った海外品を使わないといけないとクレームを付けられた例である。

化学関係で国際標準が調達に影響を与える例としては、日本で水道配水管に使われるポリエチレンは、ISO 9080 の外挿方法及びISO 12162 の分類表でPE 100 に分類される高密度ポリエチレンであることと規定されていることが例示される。 50 このように、国際標準規格ISOが国際間の競争力強化の手段として使われる例がある。

- 1)藤田昌三(参議院経済産業委員会調査室)国際規格の制定プロセスと国際標準化への取組 http://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2011pdf/20110114114.pdf
- 2) 松本隆(日本規格協会),標準化教育プログラム第 5 章日本の標準化政策 https://www.jsa.or.jp/datas/media/10000/md_740.pdf



- 3) (一財) 道路新産業開発機構,ITSの国際標準化
 https://www.hido.or.jp/08its/hyou/TS/TSF/4_wtotbt.html
- 4) http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/wto/pdfs/kyoutei1307.pdf
- 5) http://politec.gr.jp/ad/wordpress/wp-content/uploads/2016/12/web100tei.pdf

【ISO 及び BIOKON に関する課題】

国際標準規格 ISO には、他にも VHS/ベータ戦争の例でみるように、品質に大きな差が無くても国際間の仲間の囲い込みで市場を席捲した例や、エコマーク、グッドデザイン賞の例でみるように顧客に対して「お墨付き」を与えうるメリットもある。 いずれにせよ技術革新が著しく、化学産業にとっても重要なバイオミメティクス分野で、ドイツが主導するという国際標準規格 ISO TC266 の現状を把握することは重要である。

そのポイントは、

- 1) ISO TC266 の作業はどこまで進んでいるのか?
- 2) ISO TC266 でバイオミメティクスの定義はどう決められ、ドイツにとって有利になっているのか?
- 3) ISO TC266 は化学産業にとって実効性があるのか、日本の化学産業に影響があるのか?

であると考え、調査を行った。

【事前文献調査】

ISO TC266 (バイオミメティクス)の進捗に関しては、(公益)高分子学会から ニューズレターが毎年発行されている。また、日本知財学会誌をはじめとする 各文献にも詳細に発表されている。

これらをまとめると、

- 1)制定作業は、当初の予定をほぼ完了した段階。具体的には、4つのターゲットのうちドイツ提案の3つは既に国際規格として発行済。残る日本提案の1つは国際規格としてではなく技術報告書とする方向で推進中。
- 2) 制定作業はドイツと日本が中心に進められた。 具体的には、主導権を持って進めようとするドイツに対して、日本が議論を挑み数々の修正を受け入れ させた。
- 3) 定義はバイオミメティクスとバイオテクノロジーを分けるとことがポイント であることが読み取れる。

しかし、



- 4) 上記は機械、ロボット、システム等を含むバイオミメティクス全体のことであり、我々化学企業が関心を持つ、材料・化学製品分野で産業にとってどういう意味を持つかは公開文献だけからは必ずしも明確でない。
- 5) また、制定された国際規格がドイツの化学産業界にとって有利であり日本の 化学産業界にとって不利なのか
- 6)制定された国際規格がどの程度実効性を持つのかも必ずしも明確ではない。

下記図表に、ISO TC266 (バイオミメティクス) の 4 つのWG (ワーキンググループ) のポイントをまとめた。

図表. ISO TC266 のワーキンググループ

全体	「ドイツ提案の WG1~3 の原案は全て IS として発行された」	6)
	Terminology and methodology	
WG1	何がバイオミメティクスであって、何がそうでないのかといった基本的な定義	1)
	やバイオミメティクスの手法に関する規格策定→IS018458	
	Materials, structures and components	
WG2	「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ックな開発	4)
WGZ	に関しての国際標準化」	
	「WG の原案は ISO/DIS18457 として承認された」 🗌 ISO18457	5)
	Biomimetic Structural Optimization	
	「生物の動きの模倣」や「生物の形の模倣」を「工業製品の最適化に	
	応用するアルゴリズムの標準化」	
	① 「これが国際標準になった場合に日本にとって利点は何もないの	
	ではないか、逆にドイツだけが国際競争力で得をするのではないか」	
	② 「日本の民間企業からは『そのような最適化アルゴリズムは使ってい	4)
WG3	ないから、それが国際標準になっても関係ない』という意見が多かっ	
	た」	
	③ 「近々国際規格として発行されることになった」→IS018459	
	④ 「今回(2014/10)の総会をもって WG の活動はしばらく休止とな	
	る」	
	「標準化しようとしたアルゴリズムは(中略)1980 年代のもので、ドイツ	6)
	以外ではほとんど使われていない」	0)
WG4	現在 WG4 では国際規格 (IS) ではなく、TR (Technical Report,技術	7)
114	報告書)を発行する議論が進展している。	1)



1) ハ'イオミメティクス国際標準化ニュース'レター,1,2012 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL1.pdf

2) ハイオミメティクス国際標準化ニュースンター,2,2013 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL2.pdf

3) ハ'イオミメティクス国際標準化ニュース'レター,3,2014 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL3.pdf

4) ハ'イオミメティクス国際標準化ニュース'レター,4,2015 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL4.pdf

5) ハ'イオミメティクス国際標準化ニュース'レター,5,2016 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL5.pdf

6) ハ'イオミメティクス国際標準化ニュース'レター,6,2017 http://main.spsj.or.jp/pdf/TC266NL6.pdf

7) 香坂玲, Biomimetica, 創刊号, 24-25 (2018)

http://www.biomimetics.or.jp/BNJ/Biomimetica201801_compressed.pdf

8) 平坂雅男,バイオミメティクスを取り巻く課題,日本知財学会誌,13(2),11-17 (2016)

【国内取材詳細】

事前文献調査だけでは不明な点もあるのでキーマンへの国内取材を実施した。 ISO TC266 (バイオミメティクス) の国内審議は、国内審議委員会において進められている。しかし、国内審議委員が誰かであるかの公開リストは発見できなかった。 ただし、公的な立場にある方は、その所属機関から国内審議委員であることが開示されている。下記図表に示す。

図表 ISO TC266の国内審議委員(公開済み)

所属・氏名	ISO TC266 との関係	出所
千歳科学技術大学	国内審議委員会 委員長	1)
下村正嗣教授		1)
(国研) 産業技術総合研究所	副委員長	
山口智彦副部門長	H28 年 3 月 時 点	2)
(国研) 産業技術総合研究所	WG2 委員	2)
穂積篤グループ長	H28 年 3 月 時 点	
	BIOKON と共同研究協力覚書調印	2)
(国研)物質・材料研究機構	2007年3月27日	3)

- 1) 千歳科学技術大学HP https://www.chitose.ac.jp/info/pdf_report/2015/14.pdf
- 2) 産業技術総合研究所HP https://unit.aist.go.jp/ipsta/ja/is/27convenor_all_reference.pdf
- 3) 物質材料研究機構HP http://www.nims.go.jp/news/archive/2007/03/vk3rak000000ezw.html



また、ISO TC266(バイオミメティクス)に関する公開文献は多くの場合、(公益) 高分子学会の平坂雅男常務理事によって執筆されている。そこで、国内審議委員長 である下村正嗣教授と、平坂雅男常務理事および次期高分子学会会長就任予定の加 藤隆史教授に取材を行った。さらに産業界から、ISO 制定における焦点となったクモ 糸繊維に関して、株式会社スパイバーへの取材も行なった。

1. 千歳科学技術大学 下村正嗣教授

2018年4月13日(金)12:00~13:10、千歳科学技術大学(千歳市)にて

【お肩書】

千歳科学技術大学 教授

ISO TC266 国内審議委員会 委員長

公益社団法人 高分子学会 理事

公益社団法人 高分子学会バイオミメティクス研究会 運営委員長 NPO 法人 バイオミメティクス推進協議会 理事長 他

【ドイツと ISO】

- 1) I S O に関し、定義と構造はドイツの提案がそのまま通った。しかし、日本の産業界に影響はない。実害はないと思って良い。
- 2) 我々がスタートした時、確かにドイツに後れをとっていた。当時、ドイツは (化学者が)生物学者と連携をとると言っていた。だから、日本でも生物学と化学 が連携をとろうと言った。
- 3) BIOKON は I S O と連携してサステナビリティを訴求している。 B I O K O N はコンソーシアムであり、立ち上げて、 I S O まで持っていった。
- この業績は大きい。
- 4) 今 BIOKON の活動はよく見えず、使命は終わっている。あとは個別の企業、研究者の働きであるが、大成功と言って良い。日本は周回遅れではあるが、早くやろうとしている。まだ追いかけている最中だが追い付かない。
- 5) BIOKONの中心はVDIであり、VDIがドイツ国内標準を作ってそのままISOまで持っていく。
- 6) バイオミメティクスの定義は、ISOのバイオミメティクス3大原則で良い。 バイオテクノロジーは入れない。
- 7) ドイツの考え方は、当時ドイツの誰もバイオミメティクスを知らなかった。だから有名にしたいというのはあった。しかし、なんでもかんでもとまでは言っていない。ドイツが心配していたのは偽物がでてくること。バイオというとイメージ



が良いから。

- 8) 具体例:スパイダーシルクはバイオミメティクスに入れて良い。 ISOでは最初ボーダーラインだと言っていた。そうしたら、ドイツが白黒つけようと言って、結局バイオミメティクスに入れて良いことになった。日本ではスパイバーのクモ糸繊維はバイオミメティクスと言わない。遺伝子操作はバイオミメティクスと呼ばないから。
- 9) 具体例: ミュンヘン・オリンピアシュタディオン。フライ・オットー (Frei Paul Otto) 設計の膜構造はバイオミメティクスと言わないことに決定した。膜構造は表面張力をうまく使っているが。
- 10) 具体例:バイオミックカーのコンセプトは一番もめたが、結局ドイツの提案が通った。
- 11) 原理原則は生物学者がやるのであり、それとシーズ/ニーズマッチングをすることが今問われている。生物学の知見を工学者に移転するのが大事。ISOで日本がこれを提案した。そうしないと新しいものは出てこない。
- 12)前回ベルリンの I S O 会議で P メンバーが 3 カ国しか参加しなかった理由: フランスは金が無い (標準化から抜けた)。韓国はデファクトを提案してリジェクトされたので。米中は様子見。

【ドイツとの比較】

- 1) ドイツと日本のどちらが進んでいるかとの質問: 化学とか機械とかで考えてはいけない。こういう考え方ではだめ。ドイツの自動車産業は垂直統合。メルセデスが右と言えば右で決まる。ドイツのやり方は自動車メーカーが機械だけでなく、川上から川下まで全て含めて考えてデザインする。作り方で素材まで決まってしまう。
- 2) 基礎か応用(製品化)かでは、ドイツはどちらも進んでいる。ドイツは産学連携にいくまでバリアフリー。なぜドイツがこうかでいうと歴史的背景。もともとサイエンスでは英仏が進んでいてドイツは後進国だった。ドイツは産業革命に遅れた。そこで追い付け、追い越せでサイエンスよりもテクノロジーを重視した。日本もそうで、一極集中で進めた。ドイツは基礎も応用も産学連携もやるぞとプロモートした。ドイツは政府(連邦政府)が異分野連携を進めた。異分野連携をやらないと金を出さない。日本もそう言っているが(ドイツと比べたら)まだまだ。
 - 3) ロータス効果はドイツにおける成功例であり、どこでも取り上げている。
- 4) 下村教授が、バイオミメティクスのISOはインダストリー4.0と密接な関係にあるとみて、結果的にこれが大当たりだった。ハノーバーメッセの結果を見



ればわかる。

5) ドイツは川上から川下まで、サステナビリティを考えてやる。 この戦力と組織力が、ドイツが強いところである。

【バイオミメティクス全体】

- 1) バイオミメティクスを始めるのは今からでも遅くはない。しかし、ロータス効果ではない。ロータス効果は、今、論文数は多い。
- 2) 五大話(ごだいばなし)は、構造色、ヤモリ、超撥水、モスアイ、シャークスキン。他にバイオミネラリゼーション。これらは原理原則がわかっている。ただし、これらの中でも昔はリソグラフィーでやっていたのが今は自己組織化でやるというようにプロセスの進捗はあり。
- 3) イギリスのバイオミメティクスの大家はヴィンセント。生物学者だがバイオトリッツを考えた。
- 4) 中国は撥水を中心に論文がすごい。国が力を入れているが、生物学者が入っていない。
 - 5) 帝人はモルフォテックスをやめたが、今レクタスをやっている。
- 6) 原理原則がわかって産業化がまだのものとして、下村教授がやっている着氷雪がある。撥水性で進めている。
- 2. 公益社団法人 高分子学会 平坂雅男様

2018 年 4 月 24 日 (火) 16:30~18:00、高分子学会 (東京都中央区) にて 【お肩書】

公益社団法人 高分子学会 常務理事 事務局長

[ISO]

- 1) ISO TC266 には WG (ワーキングループ) が4つある。
- 2) WG1 は言葉の定義。既に ISO18458 として発行された。
- 3) WG2 は材料、構造、表面、コンポーネント、生産技術の開発に関する具体的な例示。日本がかなり修正し、ISO18457 として発行された。
- 4) WG3 は生物の動きや形の模倣を工業製品の最適化のアルゴリズムに関する標準化で、日本がかなり修正し、ISO18459 として発行された。なお、車の部品においても材質指定は一切ない。
- 5) WG4 は日本が主導する生物学と工学の言葉の「辞書」であり、IS(国際規格)ではなく TR(技術報告書)を発行する方向で議論が進展している。
- 6) このように IS の作業はかなり進展したので、TC266 全体の活動としては以前に比べトーンダウンしている。



7) 最近の動きとして、経済産業省が「省エネルギー等に関する国際標準の獲得・普及促進事業委託費(省エネルギー等国際標準開発)」の公募を行ったが、これを高分子学会が獲得できれば WG4 を IS にするロビー活動に活用できるかもしれない。3 年間で 1000 万円弱の経費が使え、3 年以内に IS の提案をしたい。

http://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/k180201002.html

- 8) 最近の動きとして、上記 4 つの WG 以外に CAG(チェーン・アドバイザリー・グループ)がある。これは昨年(2017 年)秋にカナダが言い出し、現在、カナダ、ドイツ、日本で検討していることで、サステナビリティ(持続性)のインデックスに関する議論。まだ具体性はない。IS(国際標準)につながるような文章もできていない。ただし、サステナビリティに関係がないとバイオミメティクスではないとなると、バイオミメティクスの定義そのものが狂ってくる可能性があるので注意が必要。とは言え、この問題は WG1 で過去 7 年間議論してきたが結局まとまらなかったことで、議論が進展するかはわからない。日本が主体的にWG5を立ち上げて検討する可能性もあるが現時点ではっきりしたことは言えない。
- 9) 海外の動向であるが、ドイツの ISO 関係者から聞いたところでは、ドイツも ISO を作ったはいいが本音としてはまだ産業界で使えるものに至っていないと思っていて、TC266 の将来性に疑問を持っているとのこと。ドイツと日本が対立した WG3 も、ドイツのリーダーの一人が言うにはドイツの産業界との連携に苦戦しているとのこと。例えば、ドイツのフェスト社も毎年バイオミメティクスを活用した機械を発表しているが、ISO とは全くくっついていない。旗を振ったはいいが、先がなかなか見えないとこぼしており、日本に今後も継続的に ISO に出てくれることを期待している。
- 10)課題として、WG1のバイオミメティクスの定義がはっきりしていないことがある。バイオテクノロジーと区別するために生物は使わないと指針では決めたが、(遺伝子組み換え大腸菌を使う)スパイダーシルクをドイツが通してしまった。現在、スパイダーシルクはバイオミメティクスである。ドイツの主張は、確かに生物(大腸菌)を使っているが、糸を作るところ、紡糸が人工的であると。では真珠はどうなるか?等、バイオテクノロジーとの区別にはっきりしていないところがあるのが課題である。
- 11) このように定義はとても大事。カナダが言い出したサステナビリティでも、例えばサステナビリティがあるバイオミメティクスだと言っても、その加工に多くのエネルギーを消費するバイオミメティクスであれば環境貢献とは言えない。本末転倒であり、そこを今議論している。
 - 12) ISO の実効性はドイツでも見えていないという。車や建築等においても、ド



イツでは ISO の実効性は見えないと聞いている。

13) 将来はバイオミメティクスがエコマークのような「お墨つき」にできれば良い。定義でもめるだろうから、日本だけでも先導して、例えば NPO 法人で先頭を切ってということも考えられなくはない。

化学業界として繊維産業応用に関する取材を行った

3. Spiber 株式会社 菅原取締役兼執行役

2018 年 5 月 9 日 (水) 13:00~14:00、Spiber 株式会社(山形県鶴岡市)にて 【お肩書】

Spiber 株式会社 菅原取締役兼執行役 先行技術部門

[ISO]

- 1) ISO TC266 (バイオミメティクス) については全く知らなかった。
- 2) クモ糸を ISO 標準して何かメリットあるのでしょうか。
- 3) バイオミメティクスの標準化には一切興味ない。

[BIOKON]

- 1) 全く知らない。
- 2) 当然ドイツアムシルクは技術的に注目している。 しかし、今一番注目しているのは米国だ。
- 3) アムシルクは医療分野に注力しているではないかとみている。 (後述のアムシルクヒアリングの内容とも一致)



4. 加藤隆史 東京大学工学部教授 2018年5月28日(月)11:30~13:00、東京大学にて

[ISO]

【お肩書】高分子学会会長

- 1) ISO TC266 (バイオミメティクス) については全く知らなかった。
- 2) ISO TC266 の推進については平坂理事に任せている。 アカデミア主導するのではなく、産業界がもっと関与すべき。
- 3)日本のバイオミメティクスについてはまだまだ狭い範囲の活動だ。 産業界を巻き込んだ動きには遠い気がする。
- 4)化学業界だけでなく、顧客である機械メーカーなどの川下メーカーも 巻き込んで産学が一団となってバイオミメティクスを推進するべき 5)できれば、JACIが旗振りして産学連携をうまく進められないか?

[BIOKON]

独の動向はつかんでない。



調査・取材に基づいて、現時点での ISO TC266 の動向についてまとめる。

1) ISO TC266 への参加国

ベルギー、カナダ、中国、チェコ、ドイツ、イスラエル、日本、スイス、イギリスの9か国からなる。

- 2) ドイツの ISO メンバー企業について
- ISO TC266 に関する参加企業は、ドイツのベルリンにある ISO 事務局への取材から 2 社だけであることが判明した。建築資材メーカーの STO社 1) と、電気機器・機械メーカーのシーメンス社 2)。 化学・素材メーカーの関与はなかった。
 - 1) https://www.sto.com/
 - 2) https://www.siemens.com/global/en/home.html

発行済みの ISO TC266

- 3 つの ISO がすでに発行済みである。ISO18457、ISO18458、ISO18459
 - ① ISO18458: Teminology and methodology

何がバイオミメティクスであって、何がそうでないのかといった基本的な定義やバイオミメティクスの手法に関する規格策定。

以下に、クモ糸の場合を例に例示す。

図表. ISO 18458 の例示

		基準① 生物 機能分析	基準② 原理抽出 モデル化	基準③ 生物を使わず 技術転換	判定
①分子設計	Molecular Design	0	0	0	yes
②タンパク質 再結合(微生物)		×	×	×	no
③材料成形		Ο	Ο	Ο	yes

生物(クモ)をまねてクモ糸の分子設計した場合は、生物の機能を分析して、その原理を抽出し、生物そのものを使わずに設計しているのでバイオミメティクスである。

しかし、クモ糸そのものを、微生物培養によりタンパク質を再結合したものは、バイオテクノロジーであった、バイオミメティクスではない。

ただし、このバイオテクノロジーで製造したクモ糸タンパク質を紡糸等の 工業手段で糸を作った場合は、バイオミメティクスになる。



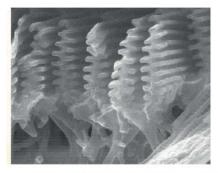
② ISO18457: Materials, structures and components 材料、構造、表面、コンポーネント、生産技術に関するバイオミメティクスな開発に関するもので、生物機能をどのように活用するのかを、材料・構造・表面・部品・製造技術の開発のためのフレームワークとして複数の具体的例示がなされいる。しかし、材料・素材指定等は一切ない。一例を示すと、

モルフォ蝶の青い色の翅に注目



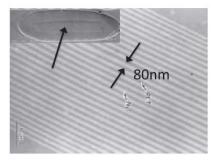
a) Morpho butterfly

翅の構造を分析し、その構造を人間が使える形でモデル化



b) Lamellate structure of the wing scales

工業的な製造技術(例示の場合は積層構造)に技術転換



Cross section of technical structural colour



③ IS018459 : Biomimetic Structural Optimization

生物の動きの模倣や生物の形の模倣を工業製品の最適化に応用するアルゴリズムの標準化である。自動車や建築物のような構造物の設計と評価に利用する際の構造最適化の手法である。例えば、ハコフグの形から、コンピュータによる解析により、空力解析をおこなって、車の形を最適化する方法が例示されている。







図表. IS018459 での最適化の例示

Computer Aided Optimization (CAO)

Soft Kill Option

Computer Aided Internal Optimization などが挙げられている。

しかし、これらの最適化手法は日本では使用されていないし、材質指定等は一切ないので、日本の材料メーカーには影響はないと推測される。

3) まとめ

ISOTC266は、ISO18457、ISO18458、ISO18459として発行した。

クモ糸繊維は、バイオミメティクスと認定する。

学術的な定義であって、化学産業界への影響は軽微である。



【要約•海外出張調査結果】

- 1) ドイツの BIOKON 推進者は「資金は既に使い切り、役目は完了した」と述べた。 ドイツのバイオミメティクスの研究者の多くは BIOKON を知らなかった。
- 2) ISO TC266 について、多くの研究者はコメントを避けたがった。コメントをしてくれた研究者はバイオミメティクスに ISO はなじまないと答えた。
- 3) 英国ビンセント名誉教授は、「BIOKON も ISO も、ドイツが政府から研究資金を 獲得するためにしかけているものだ」との意見だった。
- 4) バイオミメティクス分野で特にドイツが進んでいるという意見は聞かれなかった。バイオミメティクス分野で、ドイツは政府資金により基礎研究を進めているという構造が明らかになり、これは日本と同じだとの指摘を受けた。

1. ドイツヒアリング個別内容まとめ

1) BIOKON 推進者

狙い	BIOKON 推進当事者。BIOKON 機関にコンタクトしたところ、BIOKON
	についてはこの人が最も詳しいと紹介された
機関	マックス・プランク研究所コロイド・表面研究所
取材先	フレッツエル・バイオマテリアル部門長
日本との関係	無し
	BIOKONの予算は使い切った。残っていない。今後、政府から新し
BIOKON	い方針が出たら助成金が復活するのではないかと期待している。ネ
BIOKON	ーミングが大事だ。環境に貢献するバイオミメティクスと言ったら
	誰も反対できない。
ISO TC266	わからない。うまくいっていないし、どうしようとしているのかわ
	からない。私は関与していないし、ISO 化する意味がわからない。
日本とドイツ	ドイツも進んでいるが、中国も成長している。



	1
狙い	BIOKON 推進当事者。WG 7 分子化学の責任者 (電話取材)
機関	バイロイト大学、アムシルクの共同設立者
取材先	トーマス・シーベル教授
日本との関係	研究上のライバル
	BIOKON の分子化学ワーキンググループの責任者をしていた。タン
	パク質関連の高機能バイオポリマーの研究資金をドイツ国内に配
	分した。
	BIOKONは、これまで疎遠だった生物学者と工学者とのコラボレー
BIOKON	ション促進には一定の成果があったと考えている。
BIOKON	ドイツの制度上、政府が直接企業をサポートすることはない。よっ
	て、このような組織を作ったうえで、大学と企業の連携を図るとい
	う名目で、いろいろ企業へ助成をする。
	クモ糸のアムシルクは、バイオミメティクスの成功例であるが、
	BIOKONの資金を活用して起業したわけではない。
	コメントできない。何をもって生物模倣とするのかは意味不明なと
	ころがある。定義をしっかり決めたことはいいことだと思うが、し
ISO TC266	かし、バイオミメティクスとしてのグレーの領域が存在している。
	我々のクモ糸では、クモ糸を作るところはバイオメクノロジーであ
	るが、紡糸する場合はバイオミメティクスとなる。
	日本のスパイバーは有名。アムシルクは大きなシューズメーカー
	(アディダス)と組んでおり、一番有名ではないかと考えているが、
日本とドイツ	両社ともバイオミメティクスではなく、純粋なバイオテクノロジー
	である。それに、工業的なブレークスルーまでには至っていない。
	幅広い工業用途への採用はまだまだ見えていない。今アムシルクが
	力を入れている分野は化粧品分野と医療分野。
	最近ドイツは、中国科学アカデミーとの大きなプロジェクトが進行
	している。



2) ドイツの一線級のバイオミメティクス研究者

狙い	ドイツの第一線のバイオミメティクス研究者
機関	ベルリン自由大学
取材先	レイシッグ教授
	2000年から2016年まで名古屋大学(ポスドクから准教授まで)2016
日本との関係	年にドイツに戻り現職
BIOKON	知らない。我々はバイオミメティクスに対する助成金情報はずいぶ
BIOKON	ん集めているが BIOKON ははじめて聞いた。
ISO TC266	知らない。関心が無い。
	基礎研究では日本よりドイツが少し進んでいるかもしれない。た
日本とドイツ	だ、私がドイツに戻ってきたのは家族的理由であり、日本でバイオ
	ミメティクスの研究を続けたかった。

狙い	ドイツ最大の産学連携プロジェクト Unicat の責任者の一人。
	Unicatの研究分野には、貝の接着の研究もある。
機関	フンボルト大学ベルリン校
取材先	クリスチャン・リンバーク教授
日本との関係	研究上のライバル
	BIOKON の存在は知らない。BIOKON から助成を受ける気はない。な
BIOKON	ぜなら、Unicat からの助成で十分だから。(その場で BIOKON のド
DIUKUN	イツ語のホームページをチェックして、この助成金は特定の研究者
	または特定の研究分野を対象にしたもののようだとコメント)
ISO TC266	知らないのでコメントできない。しかし、個人的意見としてバイオ
	ミメティックスの ISO 化は良いアイデアではない。
日本とドイツ	我々の研究分野では名古屋大学の伊藤教授が進んでいる。また、東
	大の柴崎教授も有名。



	1見小コンファ ファック
狙い	EU 最大の応用研究機関フラウンホッファーからの意見を聞く(電
	話取材)
機関	フラウンホッファー IWS
取材先	ティム・クンゼ博士
日本との関係	設備・技術について、日本含め世界中に提供可能
	BIOKON の存在はよく知らない。BIOKON は生物学者が基礎研究振興
BIOKON	のために作った。我々は微細加工の設備を研究開発しており、彼ら
	がIWSの顧客になりえる。
	ISOTC266 には参加はしていないが関心はある。
ISO TC266	我々の研究開発は設備であるので規格化には基本賛成する。
130 10200	バイオミメティックスで表面加工での設備の規格化は難しい。我々
	の設備自体が生物に学んでいるわけではないから。
	我々の研究分野は、レーザーを使った表面微細加工であり、このレ
日本とドイツ	ーザー設備については、ドイツだけでなく、日本も含めて世界中に
	販売したい。
	設備の製造については、研究機構からスピンアウトしてドレスデン
	市近郊の中小企業が担当する。

狙い	ドイツの応用研究機関 ライプニッツ研究機構からの意見を聴く
機関	ライプニッツ研究機構 新材料研究所元所長
取材先	ヘルムット・シュミット博士
日本との関係	ゾルゲル技術のノウハウについて、日本含め世界中に提供
BIOKON	BIOKONは、基礎研究者達がバイオミメティクス振興のために設立
BIOKON	されたが、現在は目立った活動はない。
ISO TC266	ISOTC266 アカデミア関係者主体で進められた。
130 10200	内容は、学術的な定義に終わっており、産業界への影響はない。
	ドイツでは、ロータス効果を防汚利用することなどを、相当昔から
日本とドイツ	取り組んでいた。どう表面構造を制御するのかが大事。
	生物模倣をすることが大事なのでなく、いかに経済的に工業生産す
	るかがポイントである。



2. オランダヒアリング個別内容まとめ

	オランダのバイオミメティクス研究者
狙い	大学院でバイオミメティクスコースを設置。
	半数はドイツ含めた欧州からの国際留学生
機関	ユトレヒト大学
取材先	ジャコ・アッペルマン博士、ヤン・ウォステン教授
日本との関係	現在日本との関係はないが、是非コラボしたい。
	BIOKON は知っているが強化されているという印象もないし、頑張
BIOKON	っているという印象も無い。ドイツは政府が資金を持っているが、
	オランダは民間の資金を活用している。
	必要であり、有効ではないか。なぜなら、ISOが制定されると民間
ISO TC266	での産業化が進むから。「ドイツが ISO 制定で主導権を握って囲い
130 10200	込みをしようとしている」だと?そんなことは考えたこともなかっ
	た。
	我々は EU の一員として応用を目指した研究をしている。ドイツは
日本とドイツ	ある意味アカデミックで組織的に活動している。当然、我々はドイ
	ツとも EU という枠組みで連携する

	ナニンドのブノナンフェットラ研究者 フトロラ山 白い はじノッマ
狙い	オランダのバイオミメティクス研究者。イタリア出身だがドイツで
	の研究歴あり。
機関	アムステルダム大学
取材先	フランチェスコ准教授、ターニャクラウス博士
日本との関係	無し
BIOKON	BIOKON は知らない。我々は EU の資金で研究をしている。
ISO TC266	バイオミメティクスで ISO 制定の動きがあるとは知らない。
日本とドイツ	ドイツとかイギリスとかそういう見方ではない。我々は EU から資
	金をもらってバイオミメティクスの研究をしている。私はオースト
	リアから来ているし、同僚(フランチェスコ准教授)はイタリアか
	ら来ている。EUとして研究をしている。ドイツが優れているのは
	メンタリティ(やる気)である。大陸の科学者は連携していて国よ
	りも EU という考え方が大事。ただし、イギリスは別。



3. イギリスヒアリング個別内容まとめ

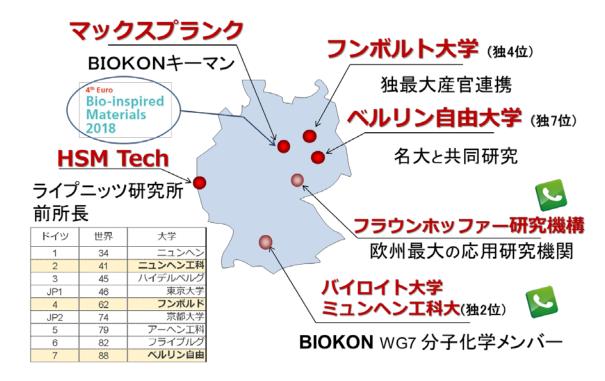
狙い	ヴィンセント名誉教授はバイオミメティクス分野でイギリストッ
	プ。欧州でも五本の指に入る著名な研究者。 ISO TC266 の欧州審査
	委員
機関	バース大学
取材先	ヴィンセント名誉教授
日本との関係	日本通。JACIで講演したこともある。また、日本人でヴィンセン
	ト研究室に留学した研究者も多く、大阪大学や新潟大学等で教授職
	に就いている。日本及びドイツを含めた欧州のバイオミメティクス
	に詳しい。
BIOKON	BIOKON も ISO もドイツがバイオミメティスを盛り上げようとして
ISO TC266	やっていること。バイオミメティクスは環境に優しいとなれば誰も
	文句を言えない。そんなドイツの作戦になぜ日本が乗ろうとしてい
	るのか不思議。
日本とドイツ	ドイツは日本と同じで基礎研究。ただし、ドイツはエンジニアリン
	グ。イギリスは実用化までする。

狙い	ドイツのライバルであるイギリスのバイオミメティクス研究者。
	マルコス教授はドイツとポルトガルのハーフでドイツの事情に詳
	しい。
機関	ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン
取材先	コバン教授、マルコス教授
日本との関係	まだ、バイオミメティクスで日本とコラボした例はないが、是非日
	本とは、実用化に向けてコラボしたいと考えている。
BIOKON	BAIOKONは知らない。
ISO TC266	ISO TC266 はうまくいっていない。バイオミメティクスを ISO にす
	るのは奇妙な話だがドイツ人が考えそうなことである。彼らはまず
	ルールを作ってから製品を作る。定義が大事で、彼らは新しい「お
	墨付き」を作ろうとしている。
日本とドイツ	学術はともかく、日本企業として実用化すすめるならイギリスが一
	番だ。

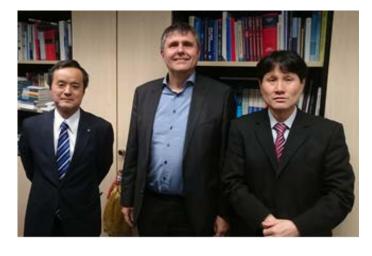


1. ドイツのヒアリング内容詳細

今回ヒアリング実施した調査機関を以下に示す。



- ① マックスプランク コロイド界面研究所 バイオマテリアル部門 2018 年 3 月 22 日 (木) 15:00~18:00、ドイツ ポツダムにて
- 1) フレッツェル博士は、ドイツのバイオミメティクス分野で最も権威ある研究者のひとり。
- 2) 過去 4 年間ポツダムで開催された Bio Inspired Materials Conference の主催者。
- 3) International Bionic Award の審査委員として、政府資金レビューパネルに就任。





主なポイント

- 1) BIOKON ネットワークはアカデミア主体である。
- 2) 産業界への影響力としては、VDI(German Engineers Association)よりも影響力が薄いとのこと。 VDI は、バイオミメティクスのエンジニアリングへの応用について過去 10 年間にいくつかの報告を発表している。最新の報告書は昨年中旬に出版済み。

https://www.google.co.uk/search?q=vdi+international+bionic+award+germany&oq= vd&aqs=chrome.1.69i57j69i59j0l4.5508j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8

- 3) BIOKON は、ドイツで生物学や生物学の応用をする人々を結集させるための政府の助けを借りて設立されたもの。 バイオミメティクスの問題の1 つは、生物学者が細胞レベルで働き、化学者が物質レベルで働いていたこと。 つまり生物学者が、工学者と共同でワークするように説得することが難しかった。 BIOKON によって、その資金の魅力で、これまで馴染みのなかった異分野の人材が知り合うようになって交流が深まった。よって、横縦の繋がりが形成された現在では、その役割を終えつつある。また、設立当時、政府は大学と産業界との連携を促進することも熱望していたため、その資金提供にあたっては、大学と産業界で既に共同で研究を進めていたグループに研究資金を優先させた経緯がある。
- 4) バイオミメティクスは(資金獲得のための) マジックワードである。 環境貢献、地球に優しいと言えば誰も反対できない。 そういう意味で政府方針にも合致している。 他国よりも、資金獲得という意味では宣伝効果あった。そういう意味で BIOKON は大成功。
- 5) 今ドイツ政府が進めているのは「エクセレンス・イニシアチブ」。 基礎 研究者たちは、現在、研究の指針となる製品設計や実現コンセプトに向 けて、新しい種類の文化を築くため、アーティストと交流することが奨 励されているとのこと。
- 6) ISO 活動については直接関与していないとのこと。ただし、「バイオミメ ティクス」と名付けられ得るものの定義は重要であるとの考え、しかし、 ドイツの ISO の委員の多くはアカデミア出身のため実効性に疑問がある との見解。



② ミュンヘンエ科大学、ベイロイト大学

トーマス・シーベル教授に2月25日に電話取材

- 1) バイロイト大学のバイオマテリアルズ教授。
- 2) トーマス・シーベル教授は、クモ絹タンパク質の合成の発明者。
- 3) クモ糸繊維の生産で有名なアムシルクの共同設立者である。
- 4) アムシルクはミュンヘンエ科大学のスピンオフ企業で、遺伝子組換えに よるバクテリアを使って、スパイダーシルクを世界で初めて生産した。
- 5) クモ糸繊維の引っ張り強度は、天然のクモ絹のそれに匹敵、Biosteel®と 命名。
- 6) ドイツの制度上、政府が直接企業をサポートすることはない。よって、このような組織を作ったうえで、大学と企業の連携を図るという名目で、企業へ助成をするとのこと。BIOKONもその一つ。

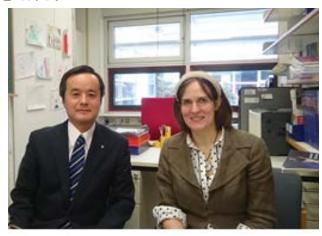
- 1) Biosteel®繊維は、バイオテクノロジーと紡糸プロセスによって製造。
- 2) 滑らかで、肌にやさしく、シルクのように輝くだけでなく、繊維産業で使用される一般的な技術で染めることができる。
- 3) Biosteelの用途としては、現在、アディダスと組んでシューズのアッパー素材としてプロトタイプを世の中に出した。高性能の繊維として、スポーツ用品のみならず、医療用テキスタイルや創傷被覆材などの外科用製品に応用が期待されている。
- 4) 現在、繊維の紡糸ではなく、原材料の生産を強化している。そのために、 同社は TUM の生化学工学教授であるボッツ教授と協力し、低コストでス パイダーシルクタンパク質を生産するための効率的な新しいプロセスに 取り組んでいるが まだ、工業的にブレークスルーまで至っていない
- 5) ドイツの ISO への取り組みに関して、ドイツのアカデミアの働きでクモ 糸繊維が ISO 標準に入ったことは知っているが、あまり興味はない。我々 の今のメインターゲットは医療用テキスタイルや創傷被覆材など医療分 野である。
- 6) 化学合成も試しているが、アミノ酸が百個程度しかつながらない。
- 7) アディダスでの限定採用の話があるが、工業用途での幅広い採用はまだ見えていない。
- 8) 最近のドイツのトピックは、マックス・プランクと中国科学アカデミー との大きなプロジェクトができたこと。



③ ベルリン自由大学、レイシック教授

2018年3月22日(木)10:00~12:00、ドイツ ベルリンにて

- 1) 2000 年から 2016 年まで名古屋大学でポスドクから准教授までを経験。
- 2) 2016 年にドイツに戻り現職。
- 3) バイオセンサーを研究。



- 1) BIOKONについては今回が初耳。Webページをその場でチェック。 彼女はアプリケーションと企業との共同に焦点を当てているという 印象を受けたとのこと。
- 2) BIOKONに属する大学は既に企業と協力しているか、または既存 の企業との関係を持っていると思われる。
- 3) 教授自身は、タンパク質光検出器に関する研究をスピンアウト する予定。彼女は、BIOKONがアドバイス、ビジネスマッチング、ま たは資金調達への助けを借りて彼女を助けることができるかどうか を調べるとのこと。
- 4) ただし、教授は、ドイツの学者は伝統的に会社や政府の仕事を 好きではないと説明。多分野の研究協力が政府によって推進されて いるが、政府は研究協力の中でより小さな企業参加を望んでいる。 しかし、政府の資金調達の場合は30%しかでないため、大学は企業 との協力を望んでいないとのこと。
- 5) スピンアウトについては、研究者のために、伝統的な産学連携のフラウンホーファーのルートを通過するより、自分でスピンアウトのルートに従うことで技術を開発する方が簡単。 1 つの理由は、フラウンホーファーが仕事の分野で非常に特異的である傾向があること。また、バイオミメティックスが、フラウンホッファーがもつ主要な専門分野に適合しないこと。

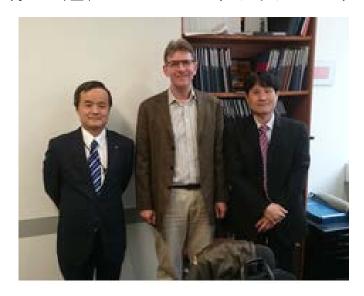


- 6) スピンアウトは、より柔軟でより迅速に動くことができる。しかし、問題は、学問にはビジネススキルと訓練がなく、専門的な管理者を見つけなければならないということ。さらに、知的財産を管理しなければならない。
- 7) ドイツはおそらく、バイオミメティクスに関する基礎研究では 比較的進んでいると思われる。フランスもかなり強い。イタリアは モデリングと計算研究で非常に強い。英国は実用研究が強い。
- 8) 産業界の協力: BMW や VW のようなドイツの大企業は、特定の大学と緊密な関係を持つ傾向がある。
- 9) ISO 標準化団体との接触はないのでわからないが、独としての狙いはわかる。原理を明確にコード化するのが好き。 この嗜好は ISO の考え方(文書化・コード化・明確化)と一致している。



④ フンボルト大学ベルリン校 化学科 リンバーク教授

2018年3月23(金)10:00~12:00、ドイツ ベルリンにて



- 1) バイオ触媒分野のエクセレンス・プログラムである Uni-Cat プログラムのコーディネーター
- 2) ドイツ最大の産学連携プログラムである。

- 1) Uni-CAT の研究プログラムは、DFG(ドイツ地方政府の資金提供機関)によって資金提供され、最大の研究プログラムである。
- 2) Uni-CAT は、バイオ触媒の優れたプログラムである。研究は依然と して基礎レベル。応用には 15-25 年かかるだろう。この触媒はメ タンからメタノールへの転換する。
- 3) ドイツはヨーロッパでバイオ触媒のリーダーであると考えているが、米国でも多くの研究が行われている。
- 4) ムール貝の接着研究も、Uni-CAT プログラムに含まれている。
- 5) 生物由来の化学は重要であり、特に酸化触媒の研究が重要と考える。ただし、バイオテクノロジーによる触媒が、既存の技術に取って変わるにはブレークスルーが必要。
- 6) BIOKONは知らなかったため、その場でウェブサイトにて確認。
- 7) バイオミメティクスではドイツは進んでいる。バイオミネラリゼーションにおけるフレッツェル教授の研究と、クモの巣の分野が特に有名。
- 8) ISO については全く分からない。



⑤ フラウンホッファー研究機構 IWS

電話取材:2018年2月6日,面談相手トム・クンゼ博士 フラウンホッファー及び関連の研究開発機関は、欧州最大の応用研究機関 である。

- 1)70%が民間企業からの委託契約である。
- 2) IWSのチーム (物質表面の機能化が専門) は、バイオインスパイアード機能 (例えば、濡れ性、潤滑、生体適合性、自己組織化など) と関連した表面構造を実現するための開発を実施。



図表、表面微細加工する設備の応用例

- 3) ドイツでは、表面のストラクチャリングと表面の機能化の研究開発が 活発とのこと
- 4) BIOKONはよく知らなかったが、アカデミック主体であるようだ。生物 学者が基礎研究の振興のために作ったようだ。フラウンホッファーは それとは一線を画しており産学連携で実用化を目指している。
- 5) このような研究者が我々の顧客となるのだろう。
- 6) 国際標準化への動きとして、IWSは将来的にはISO/TC266標準を考えているとのこと。

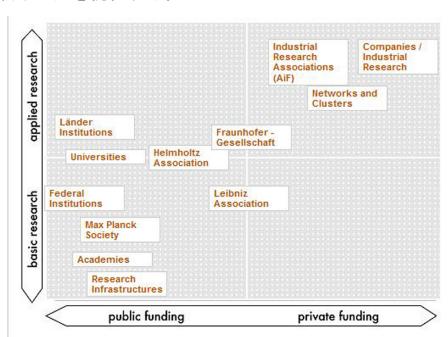


⑥ライプニッツ研究機構新材料研究所

2018 年 5 月 1 8 日. 面談相手ヘルムット・シュミット博士



ライプニッツ研究機構は、社会の重要な研究テーマを総合的に研究する 87の研究所が所属する機関である。ライプニッツ研究所は科学と研究のためのインフラストラクチャーを提供しており、一般社会、政治、科学、経済の分野において研究に基づいたサービス(紹介、コンサルティング、技術移転など)を提供する。

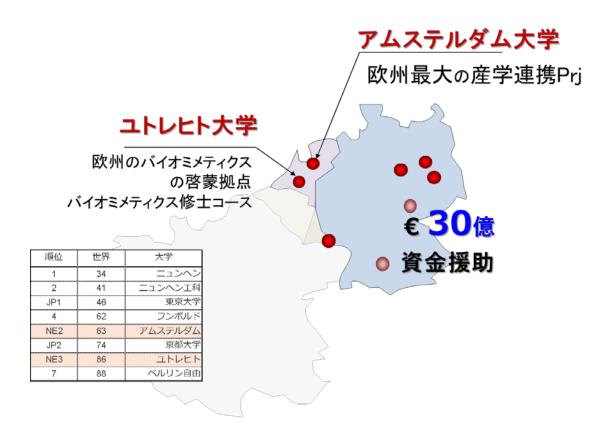


- 1)50%が民間企業からの委託契約である。
- 2) 基礎研究主体であるが、応用研究よりの研究を実施。
- 3) ドイツでは、政府から直接に企業への支援をしない。
- 4) BIOKONのような組織をつくって資金提供して産学連携を図る
- 5) ドイツでは、ロータス効果の表面のストラクチャリングと表面 の機能化の研究開発が昔から活発である。
- 6) 大事なことは、経済的に表面構造をどうやって制御するかであって生物を模倣することではない。

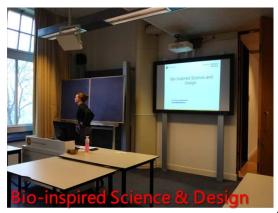


2. オランダのヒアリング内容詳細

今回調査したオランダの研究機関を以下に示す。



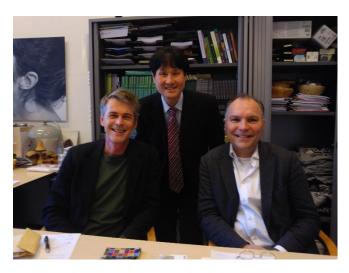
- ① ユトレヒト大学 ジャコ·アッペルマン博士、ヤン·ウォステン教授 2018 年 3 月 26 日 (月) 10:00~14:00
 - 1) バイオミメティクス修士コースを設置



バイオミメティクス授業風景

- 2) 本コースは半数が外国からの国際留学生でドイツからも留学。
- 3) オランダの大学であるが、EUの教育機関としても位置付け。
- 4) ウォステン教授研究室では真菌の酵素を利用したサステナブルセラミックスを開発







アペルマン博士とウォステン教授

- 1) BIOKON ネットワークはアカデミア主体。
- 2) 学問振興という一定の成果はあった しかし拡大傾向にはない。
- 3) ドイツではバイオミメティクスと言えば資金を得られやすかった。
- 4) ドイツのアカデミアはその点で宣伝戦略に長けている。
- 5) バイオミメティクスについてドイツが特に進んでいる訳ではない。
- 6) 我々は EU の一員として応用を目指した研究をしている。ドイツはある意味アカデミックで組織的に活動している。当然、我々はドイツとも EU という枠組みで連携する。
- 7) 環境意識の高い欧州諸国(オランダ,イギリス,フランス,ノルェー等)も注目している。
- 8) ドイツは官資金活用し、オランダは民間資金活用しているところが大きな違い。
- 9) ISO/TC266 はバイオミメティックスの定義づけとして必要だと思っている。ある程度有効ではないか。なぜなら、ISO が制定されると民間での産業化が進むから。
- 10) ドイツが囲い込みをしようとしているとの考えは全く想定外だ。
- 11) ドイツの囲い込みには要注意だ。指摘ありがとう。



② アムステルダム大学 フランチェスコ准教授、クラウス博士

2018年3月27日(火)10:00~14:00

- 1) 欧州最大級の EU 資金での産学連携。
- 2) 国際大学で欧州のバイオミメティクスの拠点、フランチェスコ准教授はイタリア人、クラウス博士はオーストリア人。
- 3) 生物無機化学分野の研究を行い、2015 年 7 月以来、Van't Hoff Institute for Molecular Sciences (HIMS)、アムステルダム大学 (UvA) で生物触媒学を研究。
- 4) 欧州研究評議会の資金を得て、産業パートナーである BASF と共同で、アルコールの非対称酵素水素借用アミノ化に関する研究を続けている。



ターニャ・クラウス博士

- 1) BIOKON については知らなかったが、ドイツのアカデミアが、官からうまく資金を得たのだろう。
- 2) オランダでは民間資金活用する。
- 3) 資金を得るのにはキーワードが大事1. Nature-inspired ②Energy ③AIである。
- 4) ドイツに学ぶべきは組織力とメンタリティ!だ。
- 5) ドイツとかフランスとかでなくEUという考え方をすべき 国際 的に考えて研究している。
- 6) 欧州は環境への意識が高く、その意識にバイオミメティクスはミートしている。
- 7) ISO/TC266 には関心がないが、もし囲い込みの意図があるならば要注意を要する。



3. イギリスのヒアリング内容詳細

今回調査したイギリスの研究機関を以下に示す。



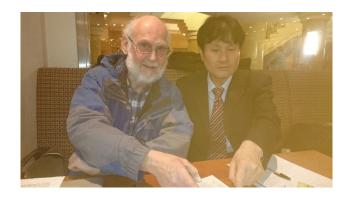
ISO/TC266欧州委員 世界的権威

順位	世界	大学
UK4	8	Uカレッジロンドン
JP1	46	東京大学
JP2	74	京都大学
UK10	100-150	バース

① バース大学 ジュリアン・ヴィンセント教授

2018年3月28日(水)10:00~12:00

- 1) バイオミメティクスの世界的権威
- 2) ISO/TC266 欧州委員



ヴィンセント教授

主なポイント

1) BIOKON ネットワークはアカデミア主体である。



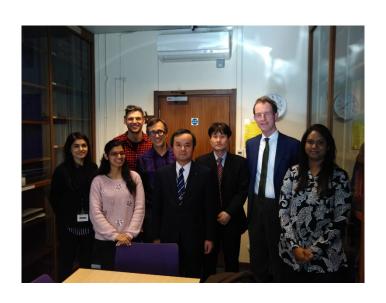
- 2) BIOKONのメンバーであるフライブルグ大学のトーマス・スペック教授は有名な学術研究者でもあり、偉大な自己プロモーターでもある。彼は1年間で最大130の会議をこなしている。
- 3) フライブルク大学、シュツットガルト、および他の地域の大学がバイオミメティック研究活動を増やしている。
- 4) 生物学者が中心となって、BIOKONを作って工学者との融合を果たした意義は大きい。
- 5) ドイツがバイオミメティクスに関する研究で、ヨーロッパで最も活動的な 国であることは間違いない。ドイツだけでも 50 万ユーロの助成金を政府 より得たのだから。
- 6) フレッツェル博士は、ドイツのバイオミメティクスの非常に優れた宣伝大 使だ。国際的に非常に影響力がある。
- 7) ヨーロッパの研究機関ではドイツ以外では、彼はパリ近くの CEEBIOS が頑張っている。
- 8) バイオミメティック分野において、ドイツや EU の研究者が、政府から強い支持を得ていることは事実だ。しかし、資金は「持続可能性」研究のためであり、バイオミメティックスはこれのサブセットとしての位置づけである。
- 9) ISO / TC 266 についてヴィンセント教授自身は、委員会に対して非常に批 判的。4年前に、標準委員会を組織するのが早すぎるように思えたが、日 本の下村教授から説得されて参加することに決めたという。
- 10) 下村教授が、ドイツ人は委員会に力を入れすぎるのではないかと心配 していることを彼に説明したという。しかし、日本人もあまり積極的に貢献していないという印象を受けているとのこと。
- 1 1) ヴィンセント教授の懸念は、ISO委員会、特にドイツ人はあまりにも理論的であるということ。もう一つの問題は、ISO委員会に学者が多すぎるということ。実効性に欠ける。
- 12) ヴィンセント教授の見解では、理論は実践に従うべきであり、その逆ではない。彼は、委員会は、基準を構築するための原理原則ではなく、成果とアプリケーションについてもっと考えなければならないと考えている。
- 13) カナダの研究者たちはドイツの考え方に反対する提案をしている。



③ ユニバーシティカレッジロンドン大学 マーカス教授

2018年3月29日(木)10:00~12:00

- 1) 英4位、世界8位の国際大学。
- 2) 英最大のバイオミメティクス産学連携を推進。
- 3) プログラムディレクター、Bio-Integrated Design、Bartlett School of Architecture。
- 4) バイオテクノロジーと建築を組み合わせた Bartlett School of Architecture を設立。



マーカス教授(左から4人目)

- 1) Nature Inspired Research の目的は、自然をコピーするのではなく、時には自然界に引き寄せられる解決策を見つけること。
- 2) センターには3つの主なテーマがある。①自然からのフラクタルパター ニング②分子の極性対物理的な閉じ込め③自己組織化。
- 3) 地球は生き物でいっぱいで、建築物に生き物を導入したいと考えている とのこと。
- 4) 関心のある領域は「クリスタルグラム」(藻類、苔、苔など)。彼らはど のような表面でも「バイオコロニー化」することができる。
- 5) 過去 20 年間の英国の大学(UCL に在籍して以来) は、学術機関から社外、 特に業界と協力する組織に変化。これを推進してきたことの 1 つは、大 企業が内部 R&D 支出を削減し、代わりに大学への委託と起業を行ったこ と。ここがドイツとの大きな違い。



2-6. 中国と米国の動向

欧州出張調査の結果、必ずしもドイツが進んでいるとは限らないという結果になったので、バイオミメティクスの世界動向を定量的に把握することを試みた。

技術文献のデータベースとしては、クラリベイト・アナリティクス社(旧トムソン・ロイター社)のものが定評ある。このデータベースは、ネイチャーやサイエンスをはじめとしてクラリベイト・アナリティクス社が一流と判断した世界中の技術雑誌の文献、数百万件からなるものである。このデータベースは、会費を払えば誰でも使用が可能である。

このデータベースからバイオミメティクス関連の文献を抽出した。検索条件は下 記の通りである。

検索条件

Biomimetic* OR biomimic* OR bio near/2 inspired OR nature near/2 inspired

ここで*はワイルドカードを表し、near/2 は前後 2 単語以内を対象とすることを意味する。

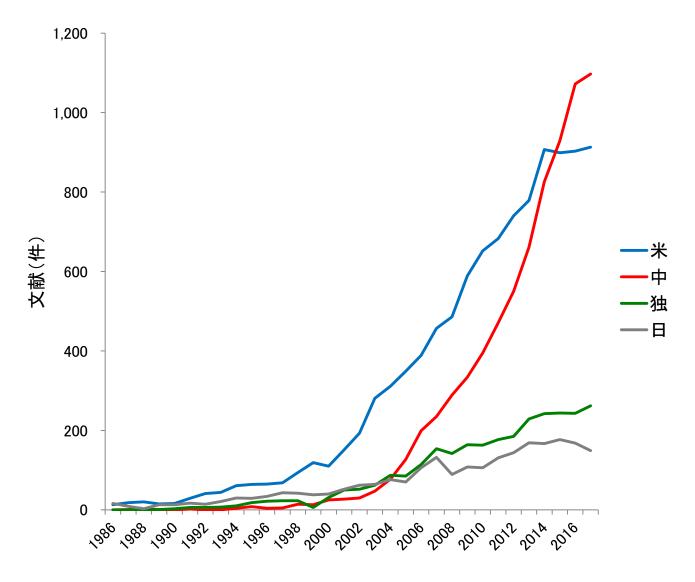
上記の検索条件で検索した結果、バイオミメティクスに関連する技術文献 39,624件が抽出された。なお、最も古いものは 1972 年のものであった。文献の言語は英語が 98.33%であった。

このようにして得たバイオミメティクス関連の技術文献 39,624 件の著者の所属機関の国籍を調べ、その国籍を年別にプロットした。

なお、ここでいう所属機関は文献を執筆した当時のものである。例えば、東京大学の日本人研究者A氏が米国の大学に留学し、そこで文献を執筆した場合は米国にカウントされ、同じA氏が留学から帰国し東京大学に就職して文献を執筆した場合は日本にカウントされる。



結果を次の図に示す。



図表、バイオミメティクス関連文献数の推移

上図に示すように、①米国が常に上位であることと、②米国と中国の伸びが著しいことが明らかになった。

次にバイオミメティクスに関する特許の調査を行った。EPO(欧州特許庁)が提供するデータベース Global Patent Index を用いて分析を行った。

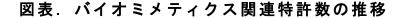
検索条件は下記の通りである。

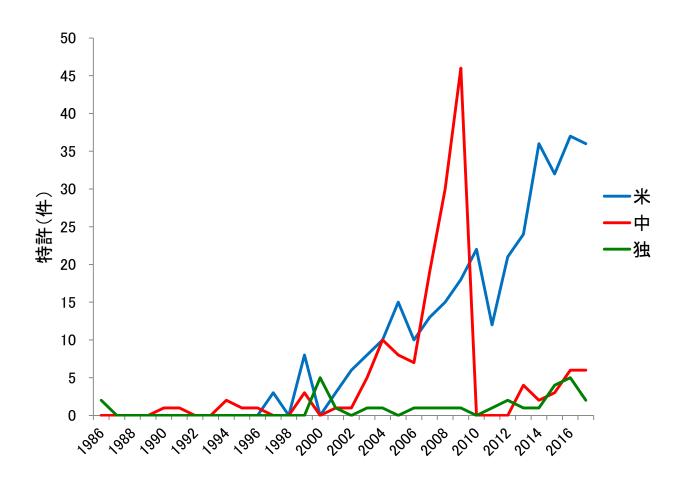
検索条件

WORD=biomimetic* or biomimic* or bio/2w inspired or nature/2w inspired



結果を次の図に示す。





上図に示すように、特許においても米国と中国の伸びが著しいことが明らかになった。なお、「特に、2008年から2012年にかけて、中国籍の出願人による出願件数の増加が著しい」ことは、平成27年3月発行の特許庁のレポートでも指摘されている1)。

1) 平成 26 年度特許出願技術動向調査報告書 (概要) バイオミメティクス, 特許庁 https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/26 15.pdf

技術文献も特許もどちらも重要な情報源であるが、①査読付き文献に比べると公開特許(=出願特許)は新規性が担保されないこと、②特許公報(=成立特許)は情報として古い場合があること、より、以降は技術文献をベースに解析を進めた。



中国の技術文献が多いことがわかったので、中国内のどの機関からの文献発表が 多いのかを解析した。

図表、中国のバイオミメティクス関連技術文献の著者所属機関累計件数

研究機関名	件数
中国科学院 CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	1,366
浙江大学 ZHEJIANG UNIV	348
清華大学 TSINGHUA UNIV	335
吉林大学 JILIN UNIV	334
中国科学院大学 UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES CAS	276
北京航空航天大学 BEIHANG UNIVERSITY	265
上海交通大学 SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY	258
四川大学 SICHUAN UNIVERSITY	248
中国科学院化学研究所 INSTITUTE OF CHEMISTRY CAS	236
天津大学 TIANJIN UNIVERSITY	230

出所:クラリベイトアナリティクス(旧トムソンロイター)より SIR 作成

上図からわかるように中国科学院が 1,366 件とトップであった。

なお、次表に示すように中国科学院は Nature Index による化学、地球と環境科学、生命科学、物理科学領域ランキングで 2017 年トップであり、トップは 5 年連続である。



図表. 自然科学分野の研究機関ランキング(指数)

1	中国科学院	中	1,298
2	ハーハ゛ート゛大	米	746
3	マックス・プランク研究所	独	673
4	フランス国立科学研究センター	仏	666
5	スタンフォート゛大	米	506
6	マサチューセッツエ 科 大	*	481
7	オクスフォート・大	英	415
8	ヘルムホルツ協 会	独	402
9	ケンプ・リッシ・大	英	391
10	東京大	日	380
11	カリフォルニア大 バークレイ	米	315
12	チューリッヒエ 科 大	スイス	303
13	北京大	中	295
14	イェール大	米	293
15	カリフォルニア大 サンテ゛ィエコ゛	米	279
16	米国立衛生研究所	米	279
17	南京大学	中	263
18	ミシカ゛ン大	米	260
19	コロンヒ・ア大	米	256
20	カリフォルニアエ科大	*	253

Nature Index(2017)より SIR 作成

https://www.natureindex.com/annual-tables/2017/institution/all/all

次に、中国のバイオミメティクスの質をチェックした。技術文献の質を評価する 尺度の一つに「被引用数」がある。一般に、被引用数が多いほどオリジナル性、独 創性が高いとみなされている。



次表は、既出のクラリベイト・アナリティクス社のデータベースを用いて、2017年に発表されたバイオミメティクス関連技術文献の、被引用数ランキングを示す。トップ 10 のうち中国人が筆頭著者のものが 6 件、うち 4 件が中国の研究機関のものである。バイオミメティクス分野において、中国及び中国人の発表する技術文献の質が高いことがわかる。

図表. 2017年発表のバイオミメティクス文献の被引用数上位10傑

No	被引用数	第一著者	所属	タイトル
1	50	Pelaz, Beatriz	マールブルク大(独)	Diverse Applications of Nanomedicine
2	39	Liao, Jinfeng	四川大学 Sichuan Univ	The fabrication of biomimetic biphasic CAN-PAC hydrogel with a seamless interfacial layer applied in osteochondral defect repair
3	33	Hu, Jue	东华大学 Donghua Univ	Electrospinning of poly(glycerol sebacate)-based nanofibers for nerve tissue engineering
4	33	Liu, Jun	华南理工大学 South China Univ Technol	New Nanoconfined Galvanic Replacement Synthesis of Hollow Sb@C Yolk-Shell Spheres Constituting a Stable Anode for High-Rate Li/Na-Ion Batteries
5	25	Bella, Federico	トリノエ科大(伊)	Paper-based quasi-solid dye-sensitized solar cells
6	25	Xu, Yan Chao	<mark>哈尔滨工业大学</mark> ハルビン工科大学 Harbin Inst Technol	Nanocomposite organic solvent nanofiltration membranes by a highly-efficient mussel-inspired co-deposition strategy
7	23	Singh, Nishant	ジャウマ 1 世大学(西) Univ Jaume 1	Peptide-Based Molecular Hydrogels as Supramolecular Protein Mimics
8	21	Liu, Ji 余子夷	ケンブッジ大学(英)	Cucurbit n uril-Based Microcapsules Self-Assembled within Microfluidic Droplets: A Versatile Approach for Supramolecular Architectures and Materials
9	21	Romero, Elisabet	アムステルダム自由大学(蘭) Vrije Univ Amsterdam	Quantum design of photosynthesis for bio-inspired solar- energy conversion
10	21	ZYu Shrike Zhang	ハーバード大学医学大学院(米) Harvard Med Sch	3D Bioprinting for Tissue and Organ Fabrication

クラリベイト・アナリティクス社のデータベースより SIR 作成次表は、中国人による中国外での研究例である。具体的には、最近(1年間)のネイチャー、サイエンスからバイオミメティクス関連の記事を抽出した。次表に示すように抽出できた 9 件のうち 4 件に中国人と思われる著者名が見つけられた。



図表. 最近のネイチャー、サイエンス等のバイオミメティクス関連文献

2018/1	筋肉に学んだ自己修復する人工筋肉 (米ミシガン大、コロラド大)	
2017/12	デンキウナギに着想を得た柔軟な電源 (米ミシガン大、スイス・フリブール大)	
2017/10	皮膚をまねた日焼け止め (カリフォルニア大サンディエコ・)	
2017/10	ガの目に学んだ表示画面 (セントラルフロリダ大)	
2017/9	ヒトの脳を模倣した人工シナプス (英ェクスター大、オックスフォート・大、ミュンスタ大)	Zengguang Cheng (オックスフォート・大)
2017/8	生物から着想を得た自己修復ロボット (ブリュッセル自由大学)	
2017/7	ナメクジに学んだ内臓止血用接着剤 (米ハーバート・大) 心臓、動脈、肝臓等	J. Li (ハーバート・大), J. Yang (ハーバート・大), Q. Yang (ハーバート・大), Bo Ri Seo(ハーバート・大), Zhigang Suo (锁志刚) (ハーバート・大)
2017/5	ハエトリソウを模倣した把持装置 (フィンランド・タンペレエ科大)	Hao Zeng (曾浩)(タンペレエ科大)
2017/3	骨から学んだ鋼鉄 (九州大、マックスプ [°] ランク研、マサチューセッツ工大)	Zhao Zhang (九州大) Meimei Wang (マックスプ [°] ランク研)

以上より、中国のバイオミメティクス技術が質量ともに優れていることが明らかになった。次に、中国のバイオミメティクス技術の分野別の特徴を明らかにする。 つまり、我々化学メーカーの関心がある材料分野において中国が注力しているかを 解析する。

図表. 世界のバイオミメティクスの分野別分類

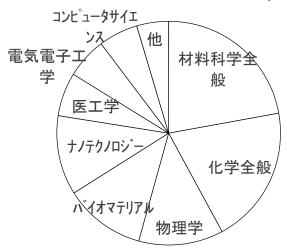


上表に示すように、バイオミメティクス分野全体の中で化学及び材料科学で約30%を占め、これにバイオマテリアルを加えると 1/3 を超える。



図表. 中国のバイオミメティクスの分野別分類

中国バイオミメティクス全体(7,578)



中国のバイオミメティクス研究は、材料科学、化学全般の割合が多い。また、比較的ナノテクノロジーが多く医工学が少ないという特徴を持つ。

図表. 米国のバイオミメティクスの分野別分類



米国のバイオミメティクス研究は、医工学、物理学が比較的多く、コンピュータ サイエンスが少ないという特徴を持つ。

中国、米国ともに化学全般、材料科学、バイオマテリアルの比率が多く、この 2 国のバイオミメティクス技術の伸びが日本よりはるかに大きいということは、我々、 日本の化学、材料メーカーにとって注目すべきである。



次に、中国のバイオミメティクスの直近の具体例を紹介する。

今回の欧州出張調査の際に、ちょうどドイツ、ベルリン郊外のポツダムにて第4回欧州バイオ・インスパイアード・マテリアルシンポジウム 2018 が 3 月 19 日から22 日まで開催されていた。日程の関係でポスターセッションしか参加できなかったが、口頭発表のプログラムを入手した。

この中から、中国の発表の具体例を紹介する。

図表. 第 4 回欧州パイオ・インスパイアードマテリアルシンポジウム 2018 での中国発表例

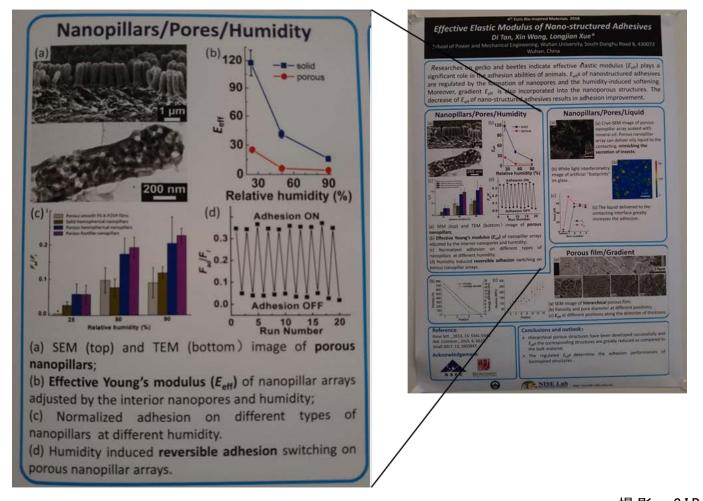
学会発表	Bio-inspired hierarchical composite based on carbon nanotube fibers and study on the interphases	中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生 研究所 (Suzhou institute of Nano-tech and Nano-Bionics) ワイツマン科学研究所(イスラエル)と共同発表
	Total Morphosynthesis of Biomimetics Prismatic-Type CaCO3 Thin Films	厦门大学(国立アモイ大学) (Xiamen University)
ポスター	Design of Biomimetics Thin Coatings Compound of Cellulose Beta- Nanocrystals for Epitaxial Crystallization and Coassembly of 1D Nanoparticles	厦门大学(国立アモイ大学) (Xiamen University)
	Effective Elastic Modulus of Nano- structured Adhesives	武汉大学(国立武漢大学) (Wuhan University)

やはり、材料関係の発表がなされている。



次図はポスター発表例である。

図表. 第4回欧州バイオ・インスパイアードマテリアルシンポジウム2018でのポスター発表例



撮影:SIR

従来ヤモリの足の接着はファンデアワールスカで、離脱は傾斜梁構造の毛で説明 されていた。

例えば、^ムタビー他,溶接学会誌,78,195-200 (2009)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjws/78/3/78_195/_pdf

この研究では、ヤモリは足の着脱を湿度で制御していると説明している。

なお、日本ではヤモリテープが有名であるが、海外では軍需技術(垂直歩行のロボットの足等)としても開発されている。



次に米国のバイオミメティクス技術を解析した。中国と同様にクラリベイト・アナリティクス社のデータベースを用いた。

図表、米国のバイオミメティクス関連技術文献の著者所属機関累計件数

研究機関名	件数
カリフォルニア大	1,153
エネルギー省	476
マサチューセッツ工科大	450
ハーバード大	444
カリフォルニア大バークレイ	325
ペンシルハ゛ニア州高等教育システム	319
ジョージア大学システム	305
スタンフォード大	296
国防総省	274
イリノイ大学システム	268

出所:クラリベイトアナリティクス(旧トムソンロイター)より SIR 作成

米国ではカリフォルニア大学がバイオミメティックスの研究発表が多い。また、 国防総省、エネルギー省がランキングに入っているのも大きな特徴である。



なお、カリフォルニア大学も次表に示すように研究のレベルが高いことで有名である。

図表. 自然科学分野研究ランキング(指数)

1	中国科学院	中	1,298
2	ハーバード大	米	746
3	マックス・プランク研究所	独	673
4	フランス国立科学研究センター	仏	666
5	スタンフォート・大	米	506
6	マサチューセッツ工科大	米	481
7	オクスフォート・大	英	415
8	ヘルムホルツ協会	独	402
9	ケンブリッジ大	英	391
10	東京大	日	380
11	カリフォルニア大バークレイ	米	315
12	チューリッヒ工科大	スイス	303
13	北京大	中	295
14	イェール大	米	293
15	カリフォルニア大サンディエコ゛	米	279
16	米国立衛生研究所	米	279
17	南京大学	中	263
18	ミシガン大	米	260
19	コロンピア大	米	256
20	カリフォルニア工科大	米	253

Nature Index(2017)より SIR 作成

https://www.natureindex.com/annual-tables/2017/institution/all/all

(参考情報) カリフォルニア州の大学

カリフォルニア州では、カリフォルニア州高等教育制度のもとに、カリフォルニア大学システムとカリフォルニア州立大学システムの2つの4年生大学制度がある。前者は10校からなり研究重視であり、後者は23校からなり教育・職業訓練重視である。このレポートで出てくるカリフォルニア大学は前者を指す。



図表. カリフォルニア州の大学システム

	カリフォルニア大学システム UCシステム (カリフォルニア大学 という単一大学は無い) 研究重視	10大学 バークレー校、デイビス校、サンディエゴ校、サンフ ランシスコ校、サンタ・クルーズ校、サンタ・バーバラ 校、ロサンゼルス校、アーバイン校、リバーサイド校、 マーセド校
カリフォルニア州 高等教育制度	カリフォルニア州立大学システム CSUシステム (カリフォルニア州立大学 という単一大学は無い) 教育・職業訓練重視	23校 サンノゼ州立大学,カリフォルニア州立大学チコ校,サンディエゴ州立大学,サンフランシスコ州立大学,カリフォルニア理工州立大学,カリフォルニア州立大学カリフォルニア州大学ポモナカリフォルニア州立大学ロサンゼルス校,カリフォルニア州立大学サクラメント校,カリフォルニア州立大学ロングビーチ校,カリフォルニア州立大学イーストベイ校,カリフォルニア州立大学フラトン校カリフォルニア州立大学ノースリッジ校,カリフォルニア州立大学スタニスラウス校,カリフォルニア州立大学ドミンゲスヒルズ校,ンノマ州立大学,カリフォルニア州立大学サンバーナーディーノ校,カリフォルニア州立大学、カリフォルニア州立大学サンバーナーディーノ校,カリフォルニア理工州立大学カリフォルニア州立大学ボーカーズフィールド校,カリフォルニア理工州立大学カリフォルニア州立大学モントレーベイ校,カリフォルニア州立大学チンネルアイランズ校
	カリフォルニア二年制大学 California Community Colleges CCCシステム	
私立大学		スタンフォート、大,カリフォルニア工科大,南カリフォルニア大等

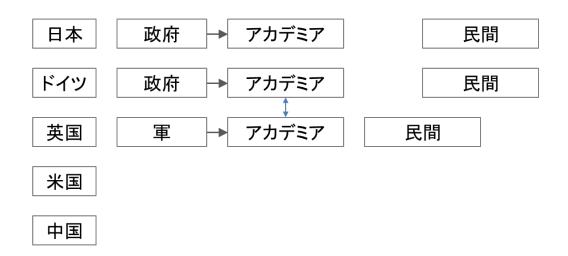
今回の調査の結果、バイオミメティクスの研究に関しドイツは比較的日本と似ていることがわかった。つまり、大学等のアカデミアの研究予算は政府から拠出されている。したがって、アカデミアは政府から研究予算を獲得する努力を怠らない。産学官連携が勧められているものの、他の国と比較して比較的アカデミアと民間との距離がまだあることが課題である。また、ドイツのアカデミアと日本のアカデミアは交流が多く、研究テーマも近い。どちらも、軍からの研究依頼テーマは少ない。

このレポートでは触れなかったが、弊社では 2015 年 3 月と 11 月に 2 回にわたりバイオミメティクスに関するイギリス出張調査を実施済である。その結果によると、イギリスはバイオミメティクスに関するアカデミアの研究が民間に近く、また比較的アカデミアに対する政府からの予算は少ない。その代わり、軍からの依頼テーマがある。(なお、現時点では軍からイギリスのアカデミアへの依頼テーマはAIがトップとなっているもようである)

今後、バイオミメティクスの世界の技術動向を見るためには、米国と中国の動向 を調べることが必要と考えられる。



図表. 各国のバイオミメティクスの産官学連携



3. まとめ

3-1. バイオミメティクスへの新しい視点

サイズで分けるという新しい視点は非常に有効であった。

その結果、

- 1) 材料系(数十 nm~数 μ m) では材質よりも表面形状による、光・超撥水・撥油・防汚等の機能化がポイントであることがわかった。
- 2) 具体的には、技術革新により高耐久化の見通しが立ち、環境貢献という訴求点を得られる可能性が見えてきた。

図表. バイオミメティクス分類

前提; 1)メーカーでの事業・製品開発の立場で (=アカデミアの立場ではない)

> 2) 化学メーカーの立場で (=材料にポイントを当てて)

分子系	nmレベル	生物の産生物→解析→化学合成
材料系	数十nm~数μm	生物の表面機能→解析→精密賦形
機械系	mm以上	表面により流体(主に気体)を制御
ロボット系		生物にヒントを得たロボット等
プロセス系		植物にヒントを得た光合成等
システム系		生物にヒントを得た交通システム等
アルゴリズム		生物の進化にヒントを得た計算等

3-2. 新しい視点から見た分子系、材料系からの新素材への可能性



JACIへの中間報告会への中間報告会での打合せより、機械系は割愛、そのぶん材料系にフォーカスを当てて進めた。以下に、分子系、材料系をまとめると、

1)分子系では古くから微生物を分析して原理を解明し、化学合成により課題を解決することが医薬品を中心に行われ実績をあげてきた。今後は微生物にとどまらず、植物、海洋生物等に範囲を拡大、医薬品はもとより接着剤、粘着剤、農薬、化粧品等に対象を拡大していくことが期待される。

特に注目されるのはスパイダーシルクであり、今後大きなイノベーションを生み出す可能性がある。

- 2) 材料系は、現在最も研究の進展が急である。
 - ① 構造色、モスアイ、ロータス効果はいずれも表面形状による機能発現であり、素材によらず、表面の形状を数十 nm サイズから数 μ m サイズまで表面構造制御することによって、素材単独では達成できない機能や性質を素材に付与することができるため、今世界的も注目集めており、積極的に研究開発が進む分野である。
 - ② 極限状態(酷暑、極寒、乾燥)での生物の生存原理を応用した熱制御材料の水制御技術もまだ数は少ないものの研究は進む。 今後、こういった生存原理を応用した製品の研究開発が進み実用化が図られるものと思われる。
 - ③ 生物のもつ優れた特性(ヤモリ、ウニ、シャコ等)はまだ研究段階であるものの軍需中心に素材としての応用が米国・中国で進展しつつあるため、今後注目を集める分野である。

今回、分子系、材料系、機械系を融合した新素材には至らなかったが、フォーカスした材料系において「原理はわかったが未商品化」のシーズを多数見いだすことができた。

図表、サイズ別に分けた材料系バイオミメティクスのまとめ



	サイズ	形状	主な「実用 化済」例	技術開発(=主な「原理はわかったが未商品化」例)	
構造色	数百nm (<mark>光の波長</mark> レヘブル)	層状	繊維フィルム	耐久性个	ストラクチャルフ [*] ルー (自動車・限定発売)
		乳頭状突起		耐久性个	拭取可能モスアイ
	数百nm		ディスプレイ用	111111111111111111111111111111111111111	ブラックシリコン(太陽電池)
モスアイ	(光の波長 レベル)		反射防止	吸収率个	スーハ゜ーフ゛ラックハ゛ート゛
	V (V)		フィルム	赤外線	サハラ砂漠アリ
ロータス 効果	数~ 数十μm (水滴 表面張力)	乳頭状突起	ョーゲルト蓋型枠材	耐久性个 超撥水 撥油 防汚	Ultra-Ever Dry スマートエアコーティング モーセ [*] 効果(3年効果持続)

材料系では、生物が機能を発現しているのは表面の微細構造であることが多い。 微細構造のサイズは機能を発現する対象に最適なサイズに制御されており、可視光 線を対象とする場合は可視光線の波長に対応したサイズに、水滴、油滴を対象とす る場合はその表面張力に対応したサイズに表面の微細構造を制御されている。

しかし、生物の場合は材質に制限があるため耐久性や機能の最適化に課題がある。 ここに、これからの新素材開発のヒントがあり、一部では研究が着手されている。

例えば、構造色は可視光線を対象に機能を発現するので、タマムシの表面は可視 光線の波長の 1/2 レベルの数百 nm の層状に微細構造が制御されている。この微細構 造を解析し、合成物の繊維やフィルムが実用化されてきたが、これまでは屋内使用 で使い捨てまたは数年の商品寿命のものにとどまっていた。しかし、今年 4 月 トヨ タ自動車が発表したレクサスは屋外で自動車レベルの耐久性をもつものを実現して いる。

また、モスアイも可視光線を対象に機能を発現するので、蛾の目は可視光線の波長の 1/2 レベルの数百 nm の釣鐘状乳頭突起に微細構造が制御されている。この微細構造を解析し、合成物のディスプレイ用反射防止フィルムが実用化されてきたが、これまでは機械強度に課題があるため保護フィルムを必要とする用途が主だった。しかし、内外の大学では太陽電池に適用できる耐久性をもつものが研究室レベルで実現できている。

さらに、ロータス効果では水滴を対象に機能を発現するので、ハスの葉は数十μm の乳頭状突起に微細構造が制御されている。この微細構造を解析し、合成物のヨー



グルト蓋やコンクリート型枠等が実用化されてきたが、これまでは耐久性と機械強度に課題があったため、使い捨ての用途に限定されていた。しかし、内外の大学等ではロータス効果を越えるモーゼ効果(超撥水及び撥油)をもち、数年の使用に耐えるものが開発されている。

従来の構造色、モスアイ、ロータス効果の性能を向上させ、かつ耐久性を大幅に アップできる新素材が開発されれば大きな潜在市場を開拓できるものと期待される。 それをリーズナブルなコストで実現しうるキー技術の候補としては、近年めざまし い性能向上を実現したレーザー加工技術や自己組織化技術等がありうる。



3-3. ドイツ及び周辺国の動向が日本の素材の研究開発や産業界へ与える影響

BIOKON (Bionics Competence Network) について

- ① BIOKON は、ドイツの生物学者が、工学者との繋がりをつくる目的で政府から 資金を獲得するための仕掛けであった。
- ② BIOKON は、資金を既に使い切り、ドイツにて生物学者と工学者を結びつける 目的は達成された。
- ③ 環境に優しいバイオミメティクスというスローガンは、EU での資金集めには 有効だった。
- ④ バイオミメティクス分野で特にドイツが進んでいるという意見は聞かれなかった。

3-4. ISO TC266 が日本の素材·商品の研究開発·産業化へ与える影響

② ISO TC266 は ISO18457. ISO18458. ISO18459 が発行されている。

図表. ISO TC266 の発行済規格

IS018457	Materials, structures and components 「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ス な開発」に関する
IS018458	Terminology and methodology 何がバイオミメティクスであって、何がそうでないのかといった基本的な定義 やその手法
IS018459	Biomimetic Structural Optimization 「動きの模倣」や「形の模倣」を「工業製品の最適化に応用するアルゴリズム」 に関する

- ② IS018458 は言葉の定義。既に IS018458 として発行。しかし、定義がはっきりしていない。バイオテクノロジーと区別するために生物は使わないと指針では決めたが、(遺伝子組み換え大腸菌を使う) スパイダーシルクをドイツは強引にバイオミメティクスとした。
- ③ IS018457 は材料、構造、表面、コンポーネント、生産技術の開発に関する具体的な例示。例えば、車の部品においても材質指定等は一切ない。
- ④ IS018459 は生物の動きや形の模倣を工業製品最適化のアルゴリズムに関する もの。1980 年代の古いアルゴリズムでドイツ以外ではほとんど使われていな い。日本企業からは『そのような最適化アルゴリズムは使っていないからそれ が国際標準になっても関係ない』という意見。



専門家の見解は「ISOを作ったはいいが本音としてはまだ産業界で使えるものに至っていない。」実際、ドイツにおいてさえ、バイオミメティクス分野での ISO の認知度は低く実効性は見えない。当初のドイツの狙いとはほど遠く、日本の化学産業界に与える影響はほとんどないと言っても過言ではないだろう。

一方で、進め方によっては ISO の現状は日本の化学産業界のチャンスに転換しうる可能性が生まれている。それは、バイオミメティクスのサステナブルな世界への貢献の観点である。現状の ISO にはこの環境貢献への観点が十分とは言えないとカナダからの指摘がある。一部の国から環境貢献をうたう偽物のバイオミメティクス製品が出現することも懸念されており、これを防ぐ目的で、エコマークのような「お墨つき」、「認証」を与えるアイデアもあたためられている。日本の立場で産学官連携や NPO 法人との連携を活用し、バイオミメティクスのサステナブルな面での貢献を進めていくことが、これから期待されるであろう。



4. 本報告書のまとめ

化学メーカーによる新素材コンセプトの創出という立場で、材料系(サイズ数十nm~数μm)に焦点を当ててバイオミメティクス技術を調査した結果、

- 1. 材料系(サイズ数十 nm~数 μm)では(材質よりも)表面形状による光・超撥 水・撥油・防汚等の機能化がポイントであることがわかった。
- 2. 具体的には、技術革新により構造色、モスアイ、ロータス効果を中心に高耐久 化の見通しが立ち、環境貢献という訴求点を得られる可能性が見えてきた。
- 3. 今後は、ドイツをはじめとする欧州勢もさることながら、米国、中国の技術開発動向に注意が必要と思われる。
- 4. ドイツが主導した ISO TC266 は日本の化学産業にとって大きな障害になる とは思われない。

むしろ、産学官連携により、環境貢献で日本が主導できるチャンスがある。

技術開発(=主な「原理はわかった 主な「実用 サイズ 形状 化済」例 が未商品化」例) 層状 数百nm 繊維 ストラクチャルフ゛ルー 構造色 耐久性个 (光の波長 (自動車・限定発売) フィルム レベル) |拭取可能モスアイ 乳頭状突起 耐久性个 ディスプレイ用 ブラックシリコン(太陽電池) 数百nm モスアイ 反射防止 (光の波長 吸収率个 スーハ゜ーフ゛ラックハ゛ート゛ レベル) フィルム 赤外線 サハラ砂漠アリ

図表. 材料系 (数十 nm~数 μ m) の主な技術開発

最後に、本調査のヒアリングに快く応じてくださった国内外の研究者の方々、企業の方々、関係者の方々、また調査にご指導いただきました公益社団法人新化学技術推進協会の方々にお礼申し上げます。

ヨーグルト蓋

型枠材

耐久性个

超撥水

撥油

防汚

Ultra-Ever Dry

スマートエアコーティンク゛

モーセ 効果(3年効果持続)

乳頭状突起

数~

数十μm

(水滴

表面張力)

以上

ロータス

効果

調査主題:2/15キックオフミーティングでの決定事項にもとづき、材料と化学製品中心に「OOはなぜ△△なのか?」という表現で公開情報を集めた。

カテゴリー:防(防衛),修(修復),自己組織化(組),接(接着)

					研究(解明)		応用				
学んだ対象	研究段階	\ n=	研究機関	発表年	内容	出所	online	検討者	内容	出所	online
1 微	商防	アオカビはなぜ他の微生物を殺せるのか	フレミング	1928	他の微生物の細胞壁合成阻害剤ペニシリンを含む				メチシリン等合成抗菌剤(耐性菌が出てきたペニシリンの化学構造を改良して合成)		
2 微	商防	アオカビはなぜ他の微生物を殺せるのか		1970 年代	他の微生物のコレステロール合成阻害剤コンパクチンを含む (遠藤章2006年日本国際賞受賞)	国際科学技術 財団	http://www.japan prize.jp/prize_pas t_2006_prize02.ht ml	ファイザー社	アトルバスタチン(副作用のある未発売のコンパクチンの化学構造を改良し合成)	協会	http://koueki.jiii.or. jp/innovation100/i nnovation_detail.ph p?eid=00084&age=
3 微	商防	伊東市の放線菌はなぜ他の微生物を殺せるのか	北里研究所	1978	エバーメクチンを含む(大村智2015年ノーベル生理学・医学賞 受賞)	NHK	http://www.nhk.o r.jp/gendai/articl es/3713/1.html	メルク社	イベルメクチン(動物用駆虫薬のアベルメクチン の化学構造を改良し合成)	日本農芸化 学会	https://katosei.jsb ba.or,jp/view.html. php?aid=502
4 微	商防	コウジカビはなぜ他の微生物を殺せるのか	メルク社	1973	三共メバスタチンを抽出(未製品化)	日本心臓財団		メルク社	血中コレステロール低下剤スタチン(1400億円)	日本心臓財団	
5 虫	研防	セミの羽根はいつも輝いているのはなぜか	ブリストル大学	2017	羽根の表面がナノピラ一構造になっており、細菌が棲息しずらい	Advances in Colloid and Intrface Science	https://reader.e lsevier.com/rea der/sd/962877 05BA55C77AC8				
6 虫	研防		豪スウィンバー ンエ科大学	2013	羽根の表面にナノピラーが立っていて細菌を突き刺す	Nature Communicatio ns誌	https://www.natu				
7 虫	研防	サハラ砂漠のアリはなぜ最高気温70°Cに耐えられるのか	コロンビア大	2015	断面が三角の毛が可視光線〜近赤外線を反射し、中赤外線領域を体外へ放出、体温を約5〜10℃低下させる	Science誌	http://science.sc iencemag.org/con tent/349/6245/2 98?explicitversion				
8 虫	研防	ナミブ砂漠に棲む甲虫はどうやって水を得ているのか	バージニアエ科 大学	2016	親水性と疎水性がパターン化された皮膚表面に結露させている	Scientific Reports誌			給水する水筒	NBD Nanotechnolo gies社ホーム ページ	http://nbdnano.co m/#
9 虫	研防	マダニはなぜ振り落とされないで一週間も吸血できるのか	ウィーン医科大	2017	強力なセメント様物質で接着している	Biological Reviews誌	http://onlinelibrar y.wiley.com/doi/1 0.1111/brv.12384 /full	ウィーン医科 大	医療用接着剤	Biological Reviews誌	http://onlinelibrary .wiley.com/doi/10. 1111/brv.12384/fu II
10 虫	研防	巣の中のアブラムシは、なぜ自分が出す蜜によって溺死しないのか			分泌する蜜が固体ワックス粒子で覆われた団子状だから			大阪工業大 学	粉末状の粘着剤を開発	Materials Horizons誌	http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2016/MH/C5MH00203F
11 虫	研防	クマムシはなぜ水のない状態で100年も生存できるのか			クリプトビオシス(乾眠)する。つまり、体内のグルコースをトレハノースに変換し、体組織を構成する炭水化物が構造を破壊されることなく休眠状態に入れる			バイオマトリア	糖衣ワクチン		
12 虫	研接	サンドキャッスルワームは、水中に巣を作るに際して、なぜ 水中で石や砂を接着できるのか	ユタ大学	2012	分離された接着剤成分が海中に放出された時に混合されpH変化で硬化する	ユタ大学ホー ムページ	http://www.bioen .utah.edu/faculty /RJS/LabSite12 /sandcastle%20gl	中国科学院	新規水溶性接着剤	Macromol Chem Phys誌	http://onlinelibrary .wiley.com/doi/10. 1002/macp.20140 0513/epdf?r3 refer
13 虫	研防	蛾の目はなぜ光を反射しないのか			モスアイ構造(複眼の表面が300ナノメートルの細かい突起がたくさん並んでいる凹凸構造なので光の屈折率を変化させ、取り込んだ光を反射させない)			東京理科大学	拭ける反射防止フィルム	学プレスリ	http://www.tus.ac. jp/today/2017080 8012.pdf

14 虫 研 防	クモの巣はなぜ、あちこち破けても、ハリケーンが来ても壊れないのか	MIT	2012	2種類の性質が異なる糸が、蜘蛛の巣の外からの衝撃を吸収して巣の一部を切り離し、巣の穴が広がることや、巣が壊れることを防ぐ	MITニュース	us_Buehler-	NortEastern Univ	高い負荷がかかった場合、その部分だけが落ちる仕組みにして巣の一部を犠牲にすることで、この問題を解決 建築土木への応用	NortEastern Univ HP	International Journal of Applied Mechanics 1 (01), 85-112
15 虫 研 防	クモはなぜ自分の糸にぶら下がることができるのか			重さ当たりのタフネス(靭性)が鋼鉄の約340倍だから	MIT Technology Review	chnologyreview. com/s/420070/ making-spider-	(国研)理化 学研究所	(スパイバー社はバイオテクノロジーで作るので 高価なのに対して)化学合成でクモ糸タンパク質 を生産する技術を開発	理化学研究 所プレスリ リース	http://www.riken.j p/pr/press/2017/ 20170119_1/
16 虫 開防	クモはなぜ自分の糸にぶら下がることができるのか			重さ当たりのタフネス(靭性)が鋼鉄の約340倍だから	MIT Technology Review	making-spider-	スパイバー(株)	Moon Parka(世界で初めて実際の工業ラインで制作された人工タンパク質素材を使った衣服)	スパイバー社 ホームページ	https://www.spibe r.jp/endeavor
17 虫 開防	クモはなぜ自分の糸でぶら下がることができるのか	Chinese Academy of Science	2018	特殊なタンパク質の構造による		http://english.cas .cn/newsroom/re search_news/201 802/t20180205 1	Academy of	バイオメディカル	ChineseAcad emy HP	http://english.cas. cn/newsroom/res earch_news/20180 2/t20180205_1898
18 虫 開 防	クモはなぜ自分の糸でぶら下がることができるのか			重さ当たりのタフネス(靭性)が鋼鉄の約340倍だから	MIT Technology Review	making-spider-	Kraig Biocraft	Dragon Silk製のボディアーマーの開発で米陸軍と10万ドル(約1050万円)の契約 ケブラー繊維に比べて、圧倒的に高い伸縮性	Kraig社HP	http://www.kraig labs.com/
19 虫 開 防	クモはなぜ自分の糸でぶら下がることができるのか			重さ当たりのタフネス(靭性)が鋼鉄の約340倍だから	MIT Technology Review	com/s/420070/ making=spider=	バイオテク企 業Bolt Threads	微生物を利用して人工蜘蛛の糸を作る \$106Mの巨額を調達	Techcrunch	ch.com/2017/11 /09/bolt- threads-is-
20 虫 開防	クモはなぜ自分の糸にぶら下がることができるのか	Chinese Academy of Science	2018	特殊なタンパク質の構造による		http://english.cas .cn/newsroom/re search_news/201 802/t20180205 1	バイオテク会 社AMSilk	クモ糸繊維、Biosteel®Fiberの合成(ドイツ)	Amsilkホー ムページ	https://www.ams ilk.com/industrie s/biosteel- fibers/
21 虫 開 防	クモの糸のタンパクには微生物が生息しないのか		2015		Advances in Silk Science and Technology		バイオテク会 社AMSilk	合成クモネダンハク賞を配合したAmSilkのコスメーティック Ocean Pharma社と共同で「呼吸するマニキューア」、OXYPERMを商品化。酸素を通し、爪が傷ん	Amsilkホー ムページ	https://www.ams ilk.com/industrie s/biosteel- fibers/
22 虫 開	トンボはなぜ効率よく飛べるのか			波状翅(翅の断面に見えるデコボコ)のデコボコした部分に小さな空気の渦が発生、この小さな渦が、その外側の空気を翅の後方へスムーズに流し、微風でもトンボの翅には揚力が生じる	ク研究会ホー	http://nature- sr.com/index.php ?Page=11&Item= 147	日本文理大学	マイクロ・エコ風車	日本文理大学ホームページ	http://www.nbu.ac .jp/fac_sub/engine ering/aerospace/p roject/
23 虫 商	トンボはなぜ効率よく飛べるのか			波状翅(翅の断面に見えるデコボコ)のデコボコした部分に小さな空気の渦が発生、この小さな渦が、その外側の空気を翅の後方へスムーズに流し、微風でもトンボの翅には揚力が生じる	ク研究会ホー	http://nature- sr.com/index.php ?Page=11&Item= 147	シャープ	エアコン室内機クロスフローファン(送風効率3 0%アップ)	シャープホームページ	http://www.sharp. co.jp/nature/tec/ aircon/shitsunaiki. html
24 虫 商 防	アフリカのシロアリは、昼は40度、夜は2度という寒暖の差が激しい環境において、なぜ蟻塚内の温度をほぼ一定に保てるのか			煙突のように空気が上下に流れる構造で、下部の通気孔から 高密度の(重い)冷たい空気を取り込み、低密度の(軽い)熱い 空気は煙突を通って上昇し、建物外部へと放出する	フォー・サステ	https://www.japa nfs.org/ja/news/ archives/news id 031722.html		冷却装置コストが従来の10%、エネルギー消費 も35%減少(イーストゲートショッピングセンター /ジンバブエ・ハラレ市)		http://natgeo.nikk eibp.co.jp/nng/arti cle/news/14/5970
25 虫 商	モルフォ蝶はなぜ青いのか		1940 年代	構造色			クラレ	デフォール (構造発色繊維)		
26 虫 商	モルフォ蝶はなぜ青いのか		1940 年代	構造色			帝人	モルフォテックス (構造発色繊維)	日本化学繊維協会	http://www.jcfa.gr. jp/fiber/topics/no 19/topics19.html
27 虫 商	モルフォ蝶はなぜ青いのか		1940 年代	構造色			凸版印刷	モルフォシート (構造発色シート)	凸版印刷 ニュースリ リース	http://www.toppan .co.jp/news/2016/ 08/newsrelease08 09.html
28 虫 商	モルフォ蝶はなぜ青いのか		1940 年代	構造色				触っても壊れない、ふき取り可能な、モスアイ構 造フィルムをナノインプリント技術で開発	日刊工業新聞	https://www.nikka n.co.jp/articles/vie w/00438767

29	虫商	モルフォ蝶はなぜ青いのか		1940 年代	構造色			トヨタ	レクサスストラクチャルブルー	Paint&coating s	mag.com/articles /104339-lexus- and-viavi-
30	虫商	アサギマダラ蝶は、なぜ本州と台湾の間、2000km余りを旅できるのか			あまり羽ばたかず、滑空しながら飛行する羽根の構造になって いる	日本経済新聞	https://www.nikk ei.com/article/D GXNASFK1203E S2A610C100000	シャープ	扇風機のブレード(送風効率を低下させることなく圧力変動は65%減少、半径方向の風速分布のムラが従来の1/40)	日本経済新聞	https://www.nikkei .com/article/DGX NASFK1203E S2A 610C1000000/
31	虫商	トンボは羽化する時になぜきれいに羽根を伸ばせるのか	金沢大学		ミウラ折りだから	積水化学工業 ホームページ	http://www.sekis ui.co.jp/csr/contr ibution/nextgen/ bio_mimetics/118	JAXA	国際宇宙ステーションの日本の実験棟「きぼう」	積水化学工 業ホームペー ジ	http://www.sekisui .co.jp/csr/contribu tion/nextgen/bio mimetics/1189079
32	虫商防	5 蚊はなぜ人に痛みを感じさせずに刺せるのか			痛点を避けるようにノコギリ状の刃で皮膚を切り裂く			 株 ライトニック ス	ランセット針	特許庁/富 士通総研	
33	虫商防		Kansai University	2013	針が3本あり、その外側の針にギザがり、ザギザの先しか皮膚に触れないので、その分、抵抗が小さくなり刺さりやすい。さらに、この3本が連動し動くことで、痛みをやわらげる	New Scientists	https://www.new scientist.com/arti cle/mg20928044 -900-mosquito-	Kansai University	無痛針	New Scientists	http://s- park.wao.ne.jp/arc hives/854
34	虫商	絹はなぜ独特の風合いがでるのか	東レ		繊維が細いことと、断面が多角形であるので、上品で美しい光沢、シャリ感のある感触、優雅なドレープ性、しなやかでさらりとした風合いを生み出す	東レホーム ページ	http://www.silloo kkimono.com/sillo ok/sil_a001.html	東レ	ポリエステル繊維の糸を細く、かつ断面を多角形にした	東レホーム ページ	http://www.sillook kimono.com/sillook /sil_a001.html
35	虫商防	5 蛾の目はなぜ光を反射しないのか			モスアイ構造(複眼の表面が300ナノメートルの細かい突起がたくさん並んでいる凹凸構造なので光の屈折率を変化させ、取り込んだ光を反射させない)			三菱ケミカル	モスマイト (反射防止フィルム)	三菱ケミカル ホームページ	https://www.m- chemical.co.jp/pro ducts/department s/mcc/hp-films-
36	虫商防	5 蛾の目はなぜ光を反射しないのか			モスアイ構造(複眼の表面が300ナノメートルの細かい突起がたくさん並んでいる凹凸構造なので光の屈折率を変化させ、取り込んだ光を反射させない)			シャーノ	モスアイパネル (液晶テレビ)	ムページ	http://www.sharp. co.jp/qr/lc001/
37	虫商防	対は、超多湿状態でどうやって視覚情報を得るのか?	National Nature Science Foundation of China	2007	17~2 ~ 4 . 30 ~ 2 . 7 . 1 . 1 . 1 . 1 . 1 . 1 . 1 . 2 . 2 . 2	Advanced Materials Volume 19, Issue 17	http://onlinelibrar y.wiley.com/wol1 /doi/10.1002/ad ma.200601946/ci	Nature Science	コーティング	Advanced Materials Volume 19, Issue 17	
38	虫研防		Ohio State University	2012	表面突起構造のため	Soft Matter	nr/c3nr01/10a#!	University	抗バクテリア	Soft Matter	
39	虫研接	虫が壁に容易にくっついたり、離れたりしても 接着力が落ちないのはなぜか	University of Hull	2012		Journal of Experimental Biology	http://jeb.biologis ts.org/content/2 15/2/279	UK Biotechnology and Biological Sciences Research	接着	Journal of Experimental Biology	
40	虫研防	コガネムシはいつもなぜ輝いているのか	Royal Melbourne Institute of Technology	2016	表面プラズモンで有機物を分解している	Advanced Materials Interfaces	Mater. Interfaces 2016, 3, 1500632		自己洗浄性の布	Advanced Materials Interfaces	
41	虫研接	ま 蜘蛛はなぜ自分のネットにくっつかずに巣を張れるのか	インディアナ大 学	2012	足に毛がはえていて、くっつかない構造をしている	Applied Microb		インディアナ 大学	はがせる接着	Applied Microbiology	
42	虫商防	j あめんぼは、水面でも油の上でも動き回れるのはなぜか	U of Florida	2012	足に毛がはえていて、水も油もはじく	Langmuir	Langmuir, 2010, 26 (3), pp 1504– 1506	ボーイング	不凍コーティング	Langmuir	
43	虫商防	「ナメクジはどうして敵から身を守るのか?	Harvard University	2017	捕食者に脅かされると粘液を分泌して貼りついて取れない	Science , 357, 378-381, (2017).	http://science.s ciencemag.org/ content/357/63 49/378 full		医療用接着剤	News Week	https://www.new sweekiapan.ip/st ories/world/2017 /09/post-

44 虫 商 防 アリは集団生活しているのになぜ集団感染しないのか?	Arizona State U	2018	アリは特殊な抗菌性の分泌液を出している	Royal Society Open Science, Published 7 February Royal Society Isocietypublishi ng.org/content, 5/2/171332 art	Arizona State	抗生物質、殺虫剤	Royal Society Open Science	http://rsos.royal societypublishing .org/content/5/2 /171332 article-
45 植 研 防 ユキヤナギのそばには、なぜ他の雑草が生えないのか	東京農工大	2005	他の植物の生育阻害物質を発散している	雑草研究誌 age.jst.go.jp/art cle/weed1962/ 50/Supplement		より効果の高いものを化学合成	九州大新藤 充教授ホーム ページ	http://www.cm.ky ushu- u.ac.jp/dv01/cont ents/research1_ci
46 植 研 防 動けない植物は、他種の植物とどのようにして生存競争しているのか	South China Agricultural University	2006	他の植物の生育阻害物質を発散している	Plant and Soil October 2006, Volume 288, Issue 1–2, pp 47–56		無農薬の防虫剤	October	sweekjapan.jp/st ories/world/2017 /09/post-
47 植 研 防 ウツボカズラはなぜ足の先端に油分がある虫も滑らせられるのか	ハーバード大	2012	スポンジ状表面に水膜が構成され虫の足の先端にある油分も滑る	ハーバード大 ヴィース研究 所プレスリリー ス biofilmsーfor—	イ ハーバード大 ヴィース研究 所	新規スリップ材		https://wyss.harva rd.edu/new- coating-evicts- biofilms-for-good/
48 植 商 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		帝人	マイクロフト・レクタス (撥水布地)		
49 植 商 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		(株)福井洋 傘	ヌレンザ (濡れない傘)	事業構想誌	https://www.proje ctdesign.jp/20130 4/mimi-bio- cree/000455.php
50 植 商 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		シチズンセイ ミツ(株)	超撥水性表面を有する成形物	特許庁/富 士通総研	
51 植 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		株)LIXIL		特許庁/富 士通総研	
52 植 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		日産自動車 (株)	撥水ウインドウUltr-Ever Dry	特許庁/富 士通総研	
53 植 商 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		東洋アルミニ ウム	TOYAL LOTUS(撥水性包材)	みずほ情報 総研	https://www.jstag e.jst.go.jp/article/s fj/67/9/67_482/_p df
54 植 商 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		清水建設	アート型枠(超撥水コンクリート型枠)	みずほ情報総研	https://www.shimz .co.jp/solution/tec h306/index.html
55 植			ロータス効果		三菱電機	持続性のある撥水材料	三菱電機プレスリリース	http://www.mits ubishielectric.co.j p/news/2014/pd f/0213-b.pdf
56 植 商 防 蓮の葉はなぜ水をはじくのか			ロータス効果		サムスン	スマホの撥水防汚を3年間維持するコーティング	米オークリッ ジ研 サムスン	gov/news/sams ung-licences- ornl-
57 植 防 蓮の花			ロータス効果		Monarch Power社	Lotus Mobile(従来の平面型のパネルより30%も 効率よく発電できるソーラーパネル)		https://www.youtu be.com/watch?v= ToWM8mlj1zg
	ジョルジュ・デ・ メストラル氏	1948	実が無数の鉤でできている	東レ経営研究 所	クラレ	マジックテープとして販売	クラレファスニ ングシステム	https://www.magic _ tape.com/about/hi story.html

59 植 商 防 松ぼっくりはなぜ種子を遠くに飛ばせるのか			まつぼっくりは湿度に敏感で、種子を遠くにとばせる湿度の低 い時だけ開くように、鱗片を湿度依存性にしている	東レ経営研究所		帝人/ナイキ	マクロリアクト (発汗・保温調整ウェア)		
60 植 商 防 多数の葉で構成される樹木構造はなぜ涼しいのか	京都大学	2011	フラクタル効果	京都大学ホームページ	http://www.gaia.h .kyoto- u.ac.jp/~fractal/	積水化学工 業	エアリーシェード(フラクタル日よけ)	積水化学工 業プレスリ リース	https://www.sekis ui.co.jp/news/201 1/_icsFiles/afieldfi le/2011/06/14/11
61 植 商 防 除虫菊にはなぜ虫が近づかないのか	チューリッヒエ 科大学	1910	殺虫成分の天然ピレスロイド(主にピレトリン)を含む			住友化学	アレスリン(熱に弱いという天然ピレスロイドの欠 点を改良した合成ピレスロイド)→蚊取り線香	日本化学会ホームページ	http://www.chemi calmuseum.jp/prof essional/report/11 /index.html
62 植 商 防 除虫菊にはなぜ虫が近づかないのか	チューリッヒエ 科大学	1910	殺虫成分の天然ピレスロイド(主にピレトリン)を含む			住友化学	フェンバレレート(光により分解されやすいという 天然ピレスロイドの欠点を改良した合成ピレスロイド)→農薬	住友化学ホームページ	nouryoku.com/pro d/newprod/gopyre throid/pdf/technic
63 植 商 防 ヤナギの樹皮をせんじて飲むとなぜ熱や痛みを軽減するのか		紀元前	有効成分のサリチル酸を含む	バイエル薬品	https://www.aspi rin- japan.com/html/ history_02.html	バイエル	アスピリン=アセチルサルチル酸(苦く、嘔吐や 胃痛を起こすサリチル酸の化学構造を改良して 合成)	バイエル薬品	https://www.aspiri n- japan.com/html/hi story_02.html
64 植 商 防 植物のタバコにはなぜ虫がつきにくいか			殺虫成分のニコチンを含む			日本特殊農 薬	ネオニコチノイド(人体に対する毒性が強いニコチンの化学構造を改良、合成した世界で最も使われている殺虫剤としての農薬)	日本曹達	http://www.nippon soda.co.jp/nougyo /pdf/no197/197_0 23 pdf
65 植 商 防 キナの木はどうやって身を守っているのか			キニーネを含むから			ロシュ	メフロキン(耐性菌が出てきたキニーネの化学構造を改良して合成)		
66 植 研 防 筋肉も神経もないはえとり草は、なぜ獲物をすばやく捕まえることができるのか	ハーバード大学	2005	張力を機械的に蓄える構造をもつ	Nature		ハーバード大 学		Nature	
67 植 研 修 ひ弱な植物がどうしてダメージから回復するのか	ЕМРА	2011	複層構造で、傷ついた後下の層がダメージを補修する	EMPA HP	https://www.emp a.ch/web/s604/n ature-shows- the-way			ЕМРА НР	
68 植 研 防 どうして乾燥した灼熱で育つ植物があるのか	南アフリカ大	2009	気孔で水分放出をコントロールする	South African Journal of Botany	https://www.scie ncedirect.com/sc ience/article/pii/ S0254629913002			South African Journal of Botany	
69 植 商 防 花はどうして汚れずいつも美しいのか	Universität Bonn	2011	花弁の毛で自己洗浄している	Journal of Nanotechnolo gy	https://www.beils tein- journals.org/bjnan o/articles/2/27	University of Bonn	防汚コーティング	Journal of Nanotechnolo gy	
70 植 研 修 蓮の葉はなぜ水をはじくのか	Universität Bonn	1997	ロータス効果	Planta,202,1	https://link.spri nger.com/articl e/10.1007/s004 250050096	産総研	汎用元素を利用したバイオミメティクス自己修復機能表面 SLUG	Langmuir, 33(2017)9972	
71 海 研 防 シャコのパンチはなぜ貝殻を割れるのか	カリフォルニア 大	2016	ヘリンボーン構造をとっている	University of California- Riversideホー ムページ	https://ucrtoday. ucr.edu/50629	米空軍	研究助成	University of California- Riverside, home page	https://ucrtoday.u cr.edu/50629
72 海 研 防 ウニの歯はなぜ岩石に穴をあけられるか	カリフォルニア 大	2010	自己研磨式で常にフレッシュな刃面が先端にある	Advanced Functional Materials誌	http://onlinelibrar y.wiley.com/doi/1 0.1002/adfm.201 001546/abstract				
73 海 研 防 デンキウナギはどのようにして発電するのか	ミシガン大	2017	発電細胞と呼ばれる数千の細胞が体に沿って配列し、それぞれの細胞が小さなイオン勾配を生成することで細胞の配列全体にわたり電位差を生じさせる	Nature誌	https://www.nature.com/articles/nature24670	ミシガン大	柔軟な電源		https://www.natur e.com/articles/nat ure24670

			11			•					
74	海研「	防 南極海の魚はなぜ凍らないのか	カリフォルニア 大	1969	血液中に不凍タンパク質が存在する	Science誌	http://science.sc iencemag.org/con tent/163/3871/1 073	名古屋大学	フッ素を用いて化学合成	積水化学工 業ホームペー ジ	https://www.sekis ui.co.jp/csr/contri bution/nextgen/bi o_mimetics/13029 27 27856 html
75	海 研 [防 海生甲殻類クラゲノミはなぜ(透明で)目に見えないのか	デューク大学	2016		ナショナルジ オグラフィック	http://natgeo.nik keibp.co.jp/atcl/n ews/16/1214004 82/				
76	海研「	が 外洋魚シロガネアジやメアジは捕食者からどうやって身を 守っているのか	テキサス大学 オースティン校	2015	体表に持つ「小板」という微小な構造で、偏光の方向を変え、自身の姿をほとんど見えなくしているから。特に捕食者が狙ってくる角度である、魚の頭または尾から45度の角度に対して効果的な構造	ナショナルジ オグラフィック	http://natgeo.nik keibp.co.jp/atcl/n ews/15/1126003 39/				
77	海研	が ラッコは脂肪層が無いのになぜアリューシャン列島の低温 水に耐えられるのか	マサチューセッ ツエ科大	2016	毛が入水時でも空気を含んだままの特殊な構造をしている	MITニュース	http://news.mit.e du/2016/beaver- inspired- wetsuits-surfers-				
78	海 研 [防 小動物はどうして水中で体温低下を防ぐのか	NIKWAX社		二層構造で水分を調整する内層と、水蒸気、水を防ぐ毛をもつ 外層	NIKWAX社HP	gb/materials/anal ogy.php	Nikwax® and Páramo®	防水着Nikwax Analogy®	NIKWAX社HP	
79	海研	妾 ムール貝はなぜ水中で強力に接着できるのか	九州工業大学		カテコール基を特長とする接着剤を分泌する	九州工業大学	http://www.phys. che.kyutech.ac.jp /content/files/2 0130831- 071942 pdf	九州工業大 学	歯科用接着剤の研究(植物由来のカテコール基を特長とする接着剤を開発)	九州工業大 学	http://www.phys.c he.kyutech.ac.jp/c ontent/files/2013 0831-071942.pdf
80	海研	接 ムール貝はなぜ水中で強力に接着できるのか	Chemical and Materials Engineering, University of	2012	カテコール基をもつタンパク質からなる足毛でくっつく	J Royal of Society,Interfa	od/22172105	University of California, Santa Barbara,	バイオメディカル	University of California, Santa Barbara, HP	
81	海研「		Chemical and Materials Engineering, University of	2012	カテコール基をもつタンパク質からなる足毛でくっつく	J Royal of Society,Interfa	https://www.ncbi. a nlm.nih.gov/pubm ed/23173195	ベルリンエ科 大学	自然の医療用接着剤	ChemBioChe m誌	http://onlinelibra ry.wiley.com/doi /10.1002/cbic.20 1700327/full
82	海商	防 イルカはなぜ高速遊泳できるのか			イルカの皮膚はツルツルして、ゴムのように弾力があるが、イルカの推進によって頭から尾に移動する水圧に対して、イルカの皮膚がしわをつくり水圧を吸収するクッションの役目をし、また、イルカの皮膚のしわの突起の部分には発生した渦を抑える効果がある	構ホームペー	http://j- net21.smrj.go.jp/develop/nature/entry/2012011601.html		スキー用のスーツ(2010年バンクーバー五輪アルペン回転日本代表の皆川賢太郎選手のスーツ)	読売新聞	http://www.yomiur i.co.jp/olympic/20 10/feature/kagaku /ka20100228_01.ht m
83	海商	防 イルカはなぜ高速遊泳できるのか			イルカの皮膚はツルツルして、ゴムのように弾力があるが、イルカの推進によって頭から尾に移動する水圧に対して、イルカの皮膚がしわをつくり水圧を吸収するクッションの役目をし、また、イルカの皮膚のしわの突起の部分には発生した渦を抑える効果がある	構ホームペー		シャープ	ドルフィンパル(洗濯機のパルセパレータ。タテ方向の水流を起こし、もみ洗い効果をプラスし、落ちにくい汚れもしっかり落とす)	特許庁/富 士通総研	http://www.sharp. co.jp/sentaku/pro ducts/esge60p_fea ture.html
84	海商	対 牡蠣は寄生虫や砂などの異物が体内に入ってもなぜ大丈 大変 大なのか			外套膜の働きで異物との界面に真珠層を形成し身を守る			御木本幸吉	養殖真珠		
85	海商	防 サメはなぜ速く泳げるのか			循鱗(一つ一つの鱗が細い突起とV字型の溝がついた鋭い歯のようになっていて、それが全て尾ビレの方向に向かって整然と並んでいる)の鱗のV字型の溝の部分に小さな渦ができるが、この渦が鱗の表面で水流が乱れることを防ぎ、水をスムーズに流すので泳ぐ時の抵抗を抑える	ク研究会ホー		SPEEDO	ファーストスキン(2000年シドニー五輪競泳水着)		
86	海商	防 サメはなぜ速く泳げるのか			循鱗(一つ一つの鱗が細い突起とV字型の溝がついた鋭い歯のようになっていて、それが全て尾ビレの方向に向かって整然と並んでいる)の鱗のV字型の溝の部分に小さな渦ができるが、この渦が鱗の表面で水流が乱れることを防ぎ、水をスムーズに流すので泳ぐ時の抵抗を抑える	ク研究会ホー		NASA	船の抵抗低減コーティング(1987年ヨットレース のアメリカズカップでの星条旗号)		

87 海 商 防 サメはなぜ速く泳げるのか	Harvard University	2018	表面の小歯状突起形状は薄型の乱流翼(Vortex Generator)としても作用し、揚力を大きく増加させる	The Harvard Gazzete		Onice or Naval Research and the	風力タービン ドローン	The Harvard Gazzete	vard.edu/gazette /story/2018/02/ in-aerodynamic-
88 海 商 防 カジキはなぜ時速100キロ以上で泳げるのか			自ら表面に親水性の物質を出すことで、泳ぐ際に水から受ける 抵抗を軽減している	特許庁/富士 通総研	http://www.nino miyasports.com/a rchives/11102	ミズノ	アクセルスーツ WATERGENE(競泳用水着)	特許庁/富 士通総研	http://www.ninomi yasports.com/arch ives/11102
89 海 商 防 マグロはなぜ時速100キロ以上で泳げるのか	国工父週省協 賛、日本ペイン ト、日本ペイント マリン、商船三			特許庁/富士 通総研	http://www.nippe _ marine.co.jp/prod ucts/a lf sea/ind	日本ペイント マリン(株)	A-LF-Sea(超低燃費型船底防汚塗料)	特許庁/富 士通総研	http://www.nippe- marine.co.jp/produ cts/a_lf_sea/index. html
90 海 商 接 タコはなぜ吸い付けるのか			足の吸盤を活用している			アシックス	急停止が可能なバスケットシューズ	みずほ情報 総研	http://openers.jp/ article/7095
91 海開防 魚群はなぜぶつからずに泳げるのか			「側線感覚」と「視覚」をセンサーとして、周囲の状態を認識し、 最寄りの仲間の位置に応じて、衝突回避、並走、接近という3つ のルールに従って、動きを変化させている	, A , J	https://www.niss an- global.com/JP/T ECHNOLOGY/O VERVIEW/eporo		エポロ	日産自動車ホームページ	https://www.nissa n- global.com/JP/TE CHNOLOGY/OVE
	ウエストチェス ター大学		尾びれの前にあるコブの列が小さな渦を作って水中での抵抗 を減らし、水中で尾びれをすばやく動かせる		http://natgeo.nik keibp.co.jp/nng/a	ホエールパ ワー・コーポ レーション	風力発電のタービン		http://natgeo.nikk eibp.co.jp/nng/arti cle/news/14/5940
93 海 商 防 ハコフグはなぜ頑丈な構造と機敏な動きを両立できるのか			他の魚のように体全体をくねらせて速く泳ぐ代わりに、防御と流 体抵抗を両立する骨格としている	すごい自然の ショールーム	http://nature- sr.com/index.php ?Page=11&Item= 2		バイオニックカー		benz.co.jp/passen gercars/brand/cor
94 海 研 組 どうして生物は常温常圧で、強固なセラミックスを作れるのか	State University of New York	2000	タンパク質の働きにより微小な無機結晶が形成され,複雑な微 細構造が組み立てられる しかしまだ詳細は不明	Journal of Crystal Growth	encedirect.com /science/article /pii/S00220248	Keio University	人工的に自己組織化プロセスを用いて新しい無 機/有機ハイブリッド材料をつくる	J-stage	ncrpts/†www.lsra ge.jst.go.jp/articl e/oleoscience/1 4/10/14 425/ ar
95 海 研 修 エビの外殻は丈夫であるが補修もできる	ハーバード大学	2011	キトサンを原料としたバイオプラスチックスである	Advanced Materials	http://onlinelibrar	ハーバード大 学	バイオプラスチックス	Advanced Materials	
96 海 研 防 スポンジは水の流れから栄養分を得ているが、海流で自己が壊れたりしないのは	Brown University	2015	多層の特殊の構造によって驚異的な強度を有す	National Academy of Science	http://www.pnas. org/content/earl y/2015/04/01/1 415502112		海中での接着	National Academy of Science	
97 海 研 防 ホッキョクグマは暗視スコープに移り難いのはなぜか	札幌市円山動 物園		ホッキョクグマの毛は防寒のため毛の中が中空になっており、 体温を外に逃がさない仕組みになっている	Advanced Materials 14 February (2018),doi.org/	http://www.city .sapporo.ip/zoo /topics/topics2 _661.html	軍	暗視スコープに映り難い衣服		
98 陸 研 組 シマウマはなぜ吸血アブに刺されないか	カリフォルニア 大	2014	縞模様が偏光を生じ吸血アブが着地できない	Nature Communicatio ns誌	https://www.natu re.com/articles/n comms4535?mes sage-				
99 陸 研 防 コモドドラゴンはなぜロ中細菌で敗血症にならないのか	米ジョージ・メイ スン大	2017	特殊な抗生物質を産生している	Nature誌	https://www.natu re.com/articles/s 41522-017- 0017-2		新規合成ペプチド DRGN-1		
100 陸 研 防 ダスキー・アリオン(欧米のナメクジの一種)はなぜ捕食されないのか	ハーバード大	2017	驚異的な粘着力を持つ粘液で木の枝等に粘着し剥がれない	Science誌	http://science.sc iencemag.org/con tent/357/6349/3 78	ハーバード大	医療用止血剤	Science誌	http://science.sci encemag.org/cont ent/357/6349/37 8
101 陸 研 防 手はなぜつぶれやすいものをつかめるのか	ミシガン大	2018	(骨は固いが)筋肉が柔らかい	Science誌	http://science.sc iencemag.org/con tent/359/6371/6 1	ミシガン大	自己修復する人工筋肉	Science誌	http://science.sci encemag.org/cont ent/359/6371/61

			11			T	1	1		•	
102 B	研		ブリュッセル自 由大学	2017	タンパク質が、体内で再生産される	Science Robotics誌	http://robotics.s ciencemag.org/co ntent/2/9/eaan4 268	ブリュッセル 自由大学	自己修復性素材	Science Robotics誌	http://robotics.sci encemag.org/cont ent/2/9/eaan4268
103	研	組 骨はなぜ疲労破壊に強いのか	九州大	2017	ナノラミネート構造だから	Science誌	http://science.sc iencemag.org/con tent/355/6329/1 055		新しい鋼鉄	Science誌	http://science.sci encemag.org/cont ent/355/6329/10 55
104	研:	接ヤモリはなぜ壁にくっつけるのか	オレゴン州立大 学	2012	ファンデアワールス力による	ナショナルジ オグラフィック	keibp.co.jp/nng/a	マサチュー セッツ大学ア マースト校	ポリウレタンパッドと炭素繊維布と組み合わせて、100平方センチメートルの接着面で垂直のガラス面に貼りつき約300kgの荷重に耐える新材料を開発	Advanced Materials誌	http://onlinelibrary .wiley.com/doi/10. 1002/adma.20110 4191/abstract
105	研:	接 ヤモリはどこにでもくっつくのは	オレゴン州立大 学	2000	手に細かいナノサイズ毛が生えている	Nature	https://people.ee cs.berkeley.edu/~ ronf/PAPERS/00	University of Akron		Journal of Biologist	
106	研:	接 ヤモリはどこにでもくっつくのは	University of Massachusetts	2012	手に細かいナノサイズ毛が生えている	Umass Amherst HP	Autos://www.uni ass.edu/newsof fice/article/insp ired-gecko-	アメリカ軍	壁を登る手袋を開発中GecksKin	Umass HP	https://www.dar pa.mil/news- events/2014- 06-05
107	研:	接 ヤモリはどこにでもくっつくのは	University of Massachusetts	2012	手に細かいナノサイズ毛が生えている	Nature	https://people.ee cs.berkeley.edu/~ ronf/PAPERS/00		ヤモリテープ CNTでやもりの手のひらを再現 分子間力で接着	日東電工技 報90号	o.com/jp/ja/othe rs/press/2010/fi le/2009 90 11.pd
108 B	研:	接 ヤモリはどこにでもくっつくのは	University of Massachusetts	2012	手に細かいナノサイズ毛が生えている	Nature	https://people.ee cs.berkeley.edu/~ ronf/PAPERS/00	加サイモンフ	アビゲイル(登攀ロボット)の開発→欧州宇 宙技術研究センターが評価中		
109	研:	接 樹上に棲むカエルは、なぜ濡れて滑りやすい木の上を自 在に動き回れるのか	マックスプランク高分子研究所	2012	カエルの指先の微細構造が、分泌液を出したときのように濡れた状態では、表面に沿って働くせん断応力(摩擦力)を大きく高める	Adv. Funct. Mater誌	http://onlinelibrar y.wiley.com/doi/1 0.1002/adfm.201 202024/abstract				
110	研	修 骨はどうやって骨折から治癒するのか			炎症・修復・改変期という3つの過程で治癒する			(国研)物質・ 材料研究機 構 横浜国立大		材料研究機	https://www.jst.go. jp/pr/announce/2 0171221/index.ht ml
111 B	研	防 皮膚はなぜ日焼けするのか			紫外線UVA(長波長紫外線)がメラノサイトに働きかけ、メラニン 色素の生成を促す			カリフォルニ ア大学サン ディエゴ校	合成ナノ粒子を自然のメラニンと同じように働か せることに成功	ACS Central Science誌	https://pubs.acs.o rg/doi/full/10.102 1/acscentsci.6b00 230
112	研	変温動物であるカメレオンはどうやって体温を維持している のか	ジュネーブ大学	2015	皮膚に結晶を含む細胞の層が2層存在するが、下層にあたる2 層目が特に近赤外線(=熱線)を反射する。色を変えるようにこ の反射率を調整して体温を制御している	ナショナルジ オグラフィック	http://natgeo.nik keibp.co.jp/nng/a rticle/20150312/ 438952/				
113 B	研	防 センザンコウはどうやって身を守るか			固く、鋭いうろこを利用し、装甲と攻撃に用いる			瀋陽材料科 学国家連合 実験室	軍用防弾チョッキを開発中	South China Morning Post	http://www.scmp. com/tech/science - research/article/1
114	商	防 カタツムリの殻はなぜいつもきれいなのか			表面が親水性で、空気中の水分を吸って水膜を作っている			Lixil社	汚れにくい外壁材	Lixil社ホーム ページ	http://ebook.lixil.c o.jp/inax/catalogli b/pdf/TATG02_35 /TATG02_35_1412
115	商	防 皮革はなぜ強靭なのか	クラレ		コラーゲンが絡まりあった構造だから			クラレ	銀面タイプ人工皮革:クラリーノ(マイクロファイ バーを絡み合わせてコラーゲンの構造を模倣)	日本化学繊 維協会ホーム ページ	http://www.jcfa.gr. jp/fiber/topics/vol 16.html
116	商	防 皮革はなぜ強靭なのか	東レ		コラーゲンが絡まりあった構造だから			東レ	スエードタイプ人工皮革:エクセーヌ(マイクロファ イバーを絡み合わせてコラーゲンの構造を模倣)	日本化学繊維協会ホームページ	http://www.jcfa.gr. jp/fiber/topics/vol 16.html

117	陸商瓜	方皮革はなぜ強靭なのか	帝人		コラーゲンが絡まりあった構造だから			帝人	微多孔質繊維ウェルキー(繊維を中空にしておいて、繊維の外側から中空の部分に達する微細な孔を構成)		
118	陸商瓜	方羊毛はなぜ暖かいのか			他の繊維には見られない非常に細かい縮れ(クリンプ)が隣接する繊維との距離を広げ、糸・織編物の内部に空間を作ること、さらに繊維の表面にスケールと呼ばれる鱗片状の表皮を持っていて互いの繊維同士が絡み合う現象(フェルト化)する	(一財)ボーケ ン品質評価機 構(旧日本紡 績検査協会)	https://www.bok en.or.jp/knowledg e/fiber/post_11/		バルキー加工アクリル繊維(収縮繊維と収縮しない繊維を混紡した後、熱処理で収縮繊維を収縮させることで糸の中に多くの空気を含むように加工)	東京都クリー ニング生活衛 生同業組合	https://www.tokyo 929.or.jp/column/f iber/post_84.php
119	陸商瓜	方 ネコはなぜ毛づくろいしては、まとめて毛を吐き出せるのか			糸状乳頭という突起が舌全体に約300個あり、全てお腹の方 へ向かっているので毛をひっかけやすい		http://mormor- c.com/why-the- tongue-of-a- cat-feels-rough	シャープ	サイクロン掃除機(ゴムを圧縮する)	特許庁/富 士通総研	http://www.sharp. co.jp/nature/tec/ soujiki/
120	陸研修	方 毒カエルは自身が毒に侵されないのか	アリゾナ州立大 学	2015	二層構造で分泌内層と撥水外層をもっている	Advanced Materials Interfaces	http://onlinelibrar y.wiley.com/doi/1 0.1002/admi.2014 00479/full	大学	アンチフリージング、防霜	Advanced Materials Interfaces	
121	陸研修	砂漠に住むトカゲは、まぶしい中や暗い暗闇でどうやって 獲物を探したり、敵から身を守るのか	UC Davis Department of Ophthalmology	2000	異常に大きな瞳と瞳孔の絞りがすごく狭くなる	British Journal of Ophthalmology	http://dx.doi.org/ 10.1136/bjo.84.11	UC Davis Department of Ophthalmolog	光学装置	BRITISH JOURNAL OF OPHTHALMO LOGY	
122	鳥研糸	且スーパーブラックバードはなぜあれほど黒いのか	Harvard University Yale University		羽根の表面にナノビラー構造があって構造的に光を吸収する	Nature Communicatio ns	<u>s/s4146/-01/-</u> <u>02088-w#Fig1</u>	UNPL	光集光		https://www.surreynanosystems.com/
123	鳥研糸	且カケスはなぜ角度依存性のない構造色を示すか		2018	干渉性散乱を生じる構造体の膜厚の制御と黒色背景の両方の しくみを持っている	名古屋大学プ レスリリース	relations/researc	名古屋大学	退色性の少ない構造発色性顔料及び色相が変 化する光学デバイス	名古屋大学プレスリリース	http://www.nagoy a-u.ac.jp/about- nu/public- relations/researchi
124	鳥研糸	且クジャクの羽はなぜ美しいのか			柱状型のメラニン顆粒が微細構造を形成している	千葉大学プレス リリース	http://www.chiba _ u.ac.jp/others/to pics/publicity/pr	千葉大学	構造色を基盤とするフォトニック材料の開発	千葉大学プレ スリリース	http://www.chiba- u.ac.jp/others/topi cs/publicity/press /pdf/20160926_2.p
125	鳥研糸	且クジャクの羽は色あせない	University of Michigan	2017	微細構造で発色している	Advances Materials	http://onlinelibr ary.wiley.com/d oi/10.1002/adm a.201605177/	University of Michigan	カラーディスプレイ	Advances Materials	
126	鳥 <mark>商</mark>	アホウドリはなぜ一度も羽ばたかずに数千キロを滑空できるのか	ミュンヘンエ科 大学		あまり羽ばたかず、滑空しながら飛行する羽根の構造になって いる		http://natgeo.nik keibp.co.jp/nng/a rticle/news/14/6 711/	シャープ	エアコン室外機用のプロペラファン(エアコンの送風効率は最大で1.4倍に向上し、騒音は最大で10db低減)	日本経済新聞	https://www.nikkei .com/article/DGX NASFK1203E_S2A 610C1000000/
127	鳥商	カモメはなぜ効率よく飛べるのか			あまり羽ばたかず、滑空しながら飛行する羽根の構造になって いる			(株)ドウシシャ	扇風機(カモメファンの到達距離は最大約17m)		http://www.d- designing.com/kam omefan/
128	鳥商	カワセミは時速100キロで水中に飛び込むのに、なぜ水しぶきが少なく水中に突入できるのか			くちばしが水や空気の抵抗を減らす鋭い四角錘の形状をしてい る		http://j- net21.smrj.go.jp/d evelop/nature/en try/2010111517.		500系新幹線(トンネルドンの軽減)	(独法)中小機構ホームページ	http://j- net21.smrj.go.jp/d evelop/nature/ent ry/2010111517.ht
129	鳥商	フクロウはなぜ音もなく飛べるのか			翼の前のふちに生えている風切り羽根に、普通の鳥には無い 小さなギザギザがたくさんついていて、このギザギザが空気抵 抗を減らすので空中で音がしない		http://j- net21.smrj.go.jp/d evelop/nature/en try/2010111517.	JR西日本	500系新幹線(パンタグラフの風切り音の軽減)	(独法)中小 機構ホーム ページ	http://j- net21.smrj.go.jp/d evelop/nature/ent ry/2010111517.ht
130	鳥商	ツバメの尾羽はなぜ二つに分かれているのか			虫を捕食するために旋回機能を高めるため			アメリカ軍	F22ラプター(米空軍戦闘機)	(公益)日本 野鳥の会	https://www.bird fan.net/fun/etc/ shinkansen/inde x.html
131	鳥 <mark>商</mark>	姉羽鶴はどうして8000m級の山脈を超えてとべるのか			中空の骨に空気を溜めているため	仲津英治氏講 演		JR	700系新幹線(台車の台枠)	仲津英治氏 講演	

132	鳥商	ムクドリは飛翔中になぜ三角形になるのか		加速性と高速域での運動性に優れるため				ユーロファイター・タイフーン(欧州戦闘機)	(公益)日本 野鳥の会	https://www.bird fan.net/fun/etc/ shinkansen/inde x.html
133	鳥商	丹頂鶴にはなぜ風切羽があるのか		初列風切の外縁部には上方に向けて反り返りができるが、これは翼の端部における渦の発生を防ぎ、あるいは渦の発生方向を上方に移動させることで空気抵抗を減らし、結果飛翔抵抗を減らすため	(公益)日本野 鳥の会	https://www.bir dfan.net/fun/et c/shinkansen/i ndex.html	ボーイング	ボーイング717-800(米旅客機)等のウィングレット	(公益)日本 野鳥の会	https://www.bird fan.net/fun/etc/ shinkansen/inde x.html
134	鳥 <mark>商</mark>	チョウヒ(タカ科)はなぜ長時間の飛行ができるのか		翼をおだやかにたわませた飛翔形をとれるため	(公益)日本野 鳥の会	https://www.bir dfan.net/fun/et c/shinkansen/i ndex.html	ボーイング	ボーイング787(米旅客機)	(公益)日本 野鳥の会	https://www.bird fan.net/fun/etc/ shinkansen/inde x.html
135	鳥研	組 クジャクの羽は色あせない	University of Michigan	2017 微細構造で発色している	Advances Materials	http://onlinelibr ary.wiley.com/d oi/10.1002/adm a.201605177/	富士化学	人工オパール	NIMSホーム ページ	http://www.nims. go.jp/lfn.cluster/ fudouzi.html
136	人研	組 骨は無機物なのに、なぜ異物として認識されないのか		1997 バイドロキシアパタイトCa10(PO4)6(OH)2で表されるイオン結晶 が生体親和性を示す	J. Bioengineering		産総研	アパタイトコーティング	New Glass	http://www.newg lass.jp/mag/TITL /maghtml/94- pdf/+94- p035.pdf
137	人研	組 骨は無機物なのに、なぜ異物として認識されないのか		1997 ハイドロキシアパタイトCa10(PO4)6(OH)2で表されるイオン結晶 が生体親和性を示す	J. Bioengineering		(株)ジーシー 研究所 九州大学	世界初、骨の無機成分と同組成の人工骨の開発 発 炭酸アパタイト製人工骨	九大ホーム ページ	https://www.jst. go.jp/pr/announc e/20180215- 2/index.html
138	人商	組 骨は無機物なのに、なぜ異物として認識されないのか		1997 バ生体親和性を示す	J. Bioengineering		НОҮА	アパタイト/コラーゲン人工骨	東工大ホームページ	https://www.tite ch.ac.ip/researc h/stories/creatin g artificial bones. html
139	人研	組 腎臓は血液をどのように濾しているのか	ハーバード大学医学部	2004 メソポーラスフィルター構造である	Nature	https://pdfs.sem anticscholar.org/ bc78/116a82237 cf14eaa502635fb 204636d22110.pd f	ハーバード大学医学部	大流量にも対応できるフィルター	Nature	
140	人研	防 皮膚は、しわやたるみをどうして補修しているのか	米ベンチャー Olivo Laboratories	XPLTM(Cross-linking Polymer Layer 架橋ポリマーフィルム)で 皮膚を再現			資生堂	シワやたるみを瞬時に隠すポリマーベースのク リーム	資生堂ニュー スリリース	https://www.shis eidogroup.jp/new s/detail.html?n=0 0000000002349
141	人研	手はなぜ機械にできないきめ細かい作業ができるのか	Science Robotics	2018 人間は筋肉が体を正確に操作している			コロラド大学	油と電気で作動する人工筋肉	Science Robotics	https://wired.jp/ 2018/01/23/new -robotic- muscle-hasel/
142	人研	修 歯は歯茎にどうして長い年月なじむのか		乳児の歯にはミクロンレベルの溝が存在している			ドイツ Fraunhofer	インプラントのチタン合金表面上にミクロン単位 の溝をつける	Fraunhofer IWS HP	fraunhofer.de/en/business fields/microtechnology/surface functio