



# バイオミメティクス から学ぶ 有機エレクトロニクス

*Organic Electronics Learning from Biomimetics*

白鳥世明 【著】

*Shiratori Seimei*

コロナ社

## まえがき

白川教授の導電性高分子のノーベル賞受賞，液晶ディスプレイの普及，進む EL 素子の実用化，携帯情報端末機の普及，有機太陽電池への期待からもうなずけるように有機エレクトロニクスは，物理的にも化学的にも実社会に必要な不可欠な学問分野となっている。また，山中教授の iPS 細胞ノーベル賞受賞から，バイオテクノロジーの医療応用に関する期待がますます高まってきており，生物学的なアプローチの重要性が認識されている。こうした産業界および学問分野の急激な進展を予測するかのようには，すでに応用物理学会では「有機分子・バイオエレクトロニクス」分野が設立され 25 年以上が経過している。この間の急速な変化は大学や学界に留まらず，企業・産業界でもさまざまな製品開発にこの分野の基礎知識や考え方が必要不可欠となっている。

ここで，学界や産業界における新規なアプローチといっても，意外にも生物の優れた機能を模範，模倣することから発案されたものが多い。また，生物の機能にヒントを得て開発されたものも多い。何万年，何億年と絶滅の危機を回避して生き延び，進化の一途を経て来た生物の機能にはわれわれ人間が学ぶべきことがあまりに多い。それがバイオミメティクス（生物模倣）であり，特に生体機能こそわれわれの学ぶべき老師であるともいえる。

著者らも，ハスの葉がコロコロと雨水を弾く様子に魅了され，その機能を自動車用の汚れ防止としての撥水コーティングやヨーグルトが付着しない容器の蓋材などの開発，製品化を進めてきた。ハスの葉そのものはヨーグルトを弾くが，生クリームは付着してしまう。それでも原理を追求し続けると，生クリームの付着しない表面も製品化でき，実際にクリスマスケーキのフィルムに用いられている。これらのことから生物の優れた機能からの発想がとても有効であることを実感している。

近年著しい進展を遂げているエレクトロニクスには，有機物が積極的に活用されている。コガネムシの美しさやホタルの発光は昔から人々を魅了してきた。スマホやパソコンの表面では，液晶や有機 EL が次々に開発され，近年目覚ま

しい進展を遂げている。しかしながら、ヘルスケア用や香料、製品の管理用においてセンサとなるとまだまだであり、現状では犬や多くの動物の嗅覚にまさる製品がないため、今後の研究開発が期待されている。太陽電池もだいぶ普及してきたが、植物の光合成に見習うべきところがまだまだありそうである。

こうした有機薄膜表面の機能の発現、制御には顕微鏡による直接観察がきわめて有用であった。これからも、 $\mu\text{m}$  レベル、 $\text{nm}$  レベルの観察や制御に顕微鏡がますます活躍するであろう。そのため、本書では電子顕微鏡やプローブ顕微鏡をはじめとする薄膜のおもな評価方法をまとめた。

本書は有機エレクトロニクスの中で、特に、バイオミメティクスに重点を置き、材料科学、界面物理・界面化学に関する基礎理解、電気・電子デバイス、光学デバイスに関する基礎理解や新しい発想の習得を目標として、大学生・大学院生の教科書・参考図書とすることをめざした。実践的な薄膜の製造方法や評価方法についても紙面の許す範囲で記述したため、民間・産業界での研究・開発の一助にもなれば幸いである。

2019年9月

白鳥世明

# 目 次

## 第 1 章 バイオミメティクスとは

---

## 第 2 章 生物模倣と表面

2.1 植 物	5
2.2 動 物	9
章 末 問 題	13

---

## 第 3 章 固体表面構造と濡れの関係

3.1 接 触 角	16
3.2 撥水性と超撥水性の分類	17
3.3 超撥水性発現のためには	17
3.3.1 化学的要因	17
3.3.2 幾何学的要因	20
3.4 撥水性が要求される用途および現状と課題	21
3.5 平ら面上での濡れ現象	22
3.6 凹凸面上での濡れ現象	24
3.7 複合表面上での濡れ現象	25
章 末 問 題	27

---

## 第 4 章 導電性高分子とデバイス

4.1 電気ウナギの発電メカニズム	28
4.2 電気を使う神経線維	29
4.3 電線を流れる電気	31
4.4 導電性高分子の発明	31
章 末 問 題	37

---

## 第 5 章 水晶振動子マイクロバランス

5.1 人の五感とセンシング	38
5.2 水晶振動子	40
5.3 水晶の圧電効果	41
5.4 質量付加効果	42
5.5 液中での質量付加効果	44
5.6 水晶振動子の等価回路および発振回路	47
5.7 水晶振動子式センサの感度	50
章末問題	53

---

## 第 6 章 顕微鏡の原理と利用法

6.1 光学顕微鏡	55
6.2 電子顕微鏡	56
6.2.1 走査型電子顕微鏡	57
6.2.2 透過型電子顕微鏡	57
6.3 走査型プローブ顕微鏡 (SPM)	58
6.3.1 走査型プローブ顕微鏡の原理	58
6.3.2 走査型トンネル顕微鏡 (STM)	61
6.3.3 原子間力顕微鏡 (AFM)	63
6.3.4 SPM による観察・評価	65
6.4 X線回折法	67
6.5 赤外分光分析法	68
6.6 紫外可視吸光度測定法	69
6.7 エリプソメトリー法	69
章末問題	72

---

## 第 7 章 動画表示素子, ディスプレイ

7.1 液晶	73
7.2 生物発光	78
7.3 有機 EL	79
章末問題	81

---

## 第 8 章 光学多層膜の原理と応用

8.1	フレネルの透過と反射	82
8.2	多層膜の透過と反射	87
8.3	有機高分子の屈折率	91
	章末問題	93

---

## 第 9 章 コーティング技術

9.1	コーティング技術の利用	95
9.2	ドライコーティング技術	98
9.2.1	真空蒸着法	98
9.2.2	スパッタリング法	98
9.2.3	イオンプレーティング法	100
9.2.4	化学気相反応法	101
9.2.5	分子線エピタキシー法	101
9.2.6	静電塗装	102
9.3	ウェットコーティング技術	102
9.3.1	ディップコート	103
9.3.2	スピコート	104
9.3.3	グラビアコート	105
9.3.4	スロットオリフィスコート	106
9.3.5	スプレーコート	107
9.3.6	ビードコート	108
9.3.7	メッキ技術	109
9.3.8	LB法	110
9.4	次世代コーティング技術	111
9.5	交互吸着法	112
9.5.1	交互吸着法の原理	112
9.5.2	交互吸着法の報告例	115
9.5.3	光学薄膜作製技術としての交互吸着法	116
	章末問題	118

---

## 第10章 有機薄膜太陽電池

10.1	有機薄膜太陽電池の原理	119
10.2	有機薄膜太陽電池の構造	120
10.3	有機半導体活性層	121
10.3.1	半導体	121
10.3.2	有機半導体と活性層	123
10.3.3	太陽電池特性	126
10.4	最近の研究動向	129
10.4.1	低バンドギャップポリマーへの取組み	129
10.4.2	光吸収領域の長波長化への取組み	130
10.4.3	界面構造に関する取組み	130
10.4.4	半透明太陽電池の開発	131
10.4.5	ウェットプロセスでの有機薄膜太陽電池	131
	章末問題	133

---

## 第11章 電磁気学と有機エレクトロニクス

11.1	非接触 IC	134
11.2	フレキシブルエレクトロニクス	135
11.3	ウェアラブルエレクトロニクス	135
11.4	IoT センサデバイスシステム	137
	章末問題	138

引用・参考文献	139
---------	-----

章末問題略解	152
--------	-----

索引	158
----	-----

# バイオミメティクスとは

人は馬を見て馬のように速く走りたいと思い（図 1.1），自動車を発明した。最初は馬が車を引いていたので，馬車と呼ばれ，馬の力を崇拜するところから Horse Power，すなわち馬力という言葉が生まれた。



図 1.1 走る馬

5 馬力というのは馬の 5 倍のパワーを出す動力のことであった（図 1.2）。おおよそ，人は 0.1 ~ 0.2 馬力，自動車は 100 馬力，トラックは 360 馬力，新幹線は 2 万馬力，ジェット旅客機は 50 万馬力程度になると考えてよいであろう。今日では，あまり馬と比較することなく，馬よりも速く，しかもスムーズに静かに走るのが普通となっている。普通自動車のメカニズムも馬とは大きく異なってきた。しかしながら，自動車は完全に馬よりも優れているかというところではない。自動車が走れないような険しい山道でも，馬は荷物を背負って移動することが可能であり，いまでも重宝されている地域がある。近年ではそうした険しい山道を人とともに重い荷物を持って移動するために，馬型ロボットも開発されてきている<sup>1)†</sup>。

† 肩付き数字は，巻末の引用・参考文献の番号を表す。



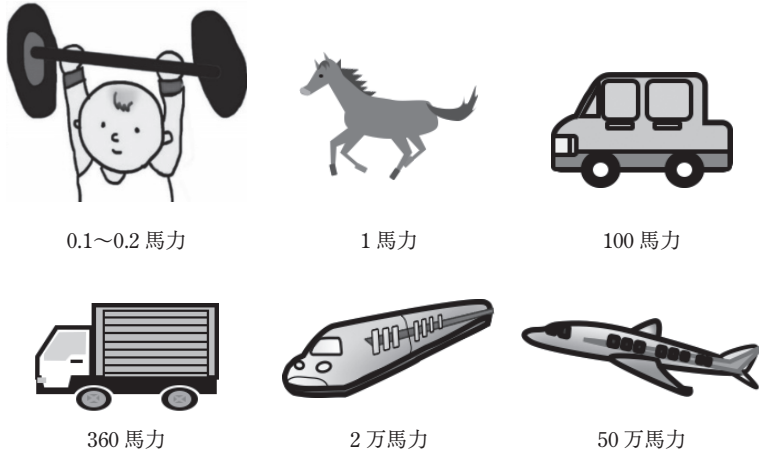


図 1.2 馬力の概念 1馬力は約 745.7ワット

昔、人は鳥を見て鳥のように空を高く飛びたいと思い、長い年月をかけた試行錯誤と努力の結果、飛行機の発明に至った（図 1.3）。そして、人はジェット機やロケットによって鳥よりも高く、鳥よりも速く飛ぶことができるようになった。当初の試行錯誤は鳥の羽に類似した翼を人間の手につけ、鳥を模倣することから始まったが、現在では、ジェット機やロケットのメカニズムは鳥の模倣のレベルを打ち破り、鳥と大きく異なっている<sup>2)</sup>。



図 1.3 空飛ぶ鳥と飛行機

しかしながら、近年でも鳥型ロボットの開発は続いている。その目的は、ジェット旅客機のように人を運搬することではない。猛禽類の姿をした鳥型ロ

ロボットが鳥害をなくすために飛ばされている。また、多くの鳥の誘導をするための、羊飼いならぬ鳥飼いのような用途も期待されている。実際、鳥のように飛ぶロボットを飛行させたところ、多くのカモメが後をつけ始めることが動画などでも報告され始めている。

このように生物を模倣して、われわれの実社会に役立てようとする学問を**バイオミメティクス**、**生物模倣工学**という<sup>3)</sup>。学問は「学び」「問い」続けて極めるものであるが、「学ぶ」の語源は「まねぶ」すなわち「まねる」であり、つまり模倣することからスタートする。赤ん坊が母親の言葉をまねして発音しようとする、それが「学ぶ」ことのスタートであり、だれもが最初はよくまねることはできない。しかし、「学ぶ練習」つまり「学習」を重ねることで、うまく学ぶことができるようになる。そのうち赤ん坊は、子供に成長し、さまざまなことを「問い」続ける。「蝶はどうして飛べるの?」「アメンボはどうして水の上を歩けるの?」「イルカはどうして速く泳げるの?」こうした素朴な疑問を持ち続け、仕組みを調べて、不思議なメカニズムを解明するところからバイオミメティクスは始まる。そして、メカニズムの本質がわかると、求める機能をさらに発展させることが可能になる場合がある。ジェット機やロケットの飛行速度、飛行高度は鳥をいつの間にか大きく超えている。

本書では、植物、動物のバイオミメティクスからはじめ、特に生物の表面に着目する。また、生物表面の特徴的な構造を形成する生体分子の自己組織化について述べる。そして、この自己組織化から発現するさまざまな機能を調べ、こうした機能性を発現する特徴的な構造を模倣したさまざまな薄膜形成技術を学習し、それをを用いた電子デバイスへの展開を紹介する。

近年、電子デバイスには半導体、金属に代表される無機材料だけでなく、有機材料も多く用いられるようになってきている。パソコンや携帯端末機器のディスプレイには有機材料である液晶が用いられ、タッチパネルはすでに実用化されており、近年では有機薄膜太陽電池に対する期待も高い。レンズやディスプレイの表面には、光の透過率の調整のため、光学機能性薄膜が多用されている。この新機能構築の際に、バイオミメティクスの考え方が有効な場合が多

い。例えば、蛾の目玉は夜間でも飛行が可能になる程度の、高度な光透過率を持つ。逆に、可視光反射率が非常に低い。この機能を活用して、太陽電池表面の反射防止機能に活用されたり、ディスプレイの表面の反射防止に使用されたりしている。このように各方面でバイオミメティクスが活用されている。

さらに、近年では、デバイス材料の高精度化と微細化に伴って、その評価方法も大切になってきた。そこで本書では、有機薄膜、無機薄膜の評価方法を解説する。一方、分子の配向、配列も、分子サイズレベル、原子サイズレベルになってきており、原子や分子の観察もデバイスには重要な評価項目であるため、電子顕微鏡やトンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡について解説する。そして、電磁気学を活用して全国に普及したICカードなどのプラスチックカードなどにも触れ、有機エレクトロニクスの今後の展望について述べる。

# 生物模倣と表面

固体表面上に水滴を滴下すると、その水滴は半球状に弾かれる場合（撥水性）や濡れ広がる場合（親水性）がある。一般的に撥水性とは固体表面上における水の濡れ性を表す言葉であり、撥水現象は学問的に「濡れ」現象として扱われる。また毛細管現象などほかの界面現象とともに界面張力という概念で統一的に記述されている<sup>1)~3)</sup>。撥水性を表す指標としてよく接触角が用いられる。最近では、接触角を決めているメカニズムをはじめ、フラクタルという数学上の概念の界面科学への応用理論なども明らかになってきている<sup>1), 4), 5)</sup>。

近年、表面改質による機能性付与の1つとして超撥水性が注目されている。超撥水性とはその名のとおり水にまったく濡れない性質であり、水による汚れ・腐食防止などの観点から必要とされている。

## 2.1 植物

超撥水性を示す代表的な例としてハスやサトイモの葉などが挙げられる。ハスの葉、およびその表面上での水滴写真を図 2.1 に示す。この図より水滴がほ

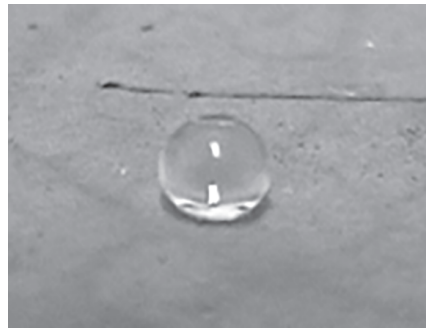
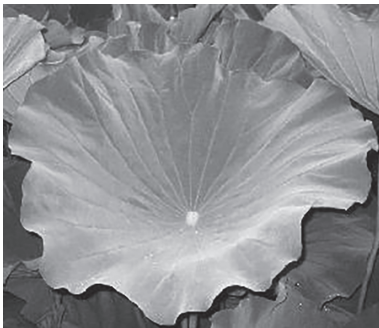


図 2.1 ハスの葉の表面が水滴を弾く様子

# 索引

## 【あ行】

アクセプター	33, 125
アクチュエータ	36
アセチレン	31
圧電効果	41
圧電素子	62
厚みずれ振動	41
イオンチャネル	29
イオンビームスパッタ方式	99
イオンプレーティング法	100
イージーピール	96
色収差	91
インダセノジチオフェン	130
ウェットコーティング技術	102
ウェットプロセス	131
ウェンツェルの関係式	24
液 晶	74
液相中	45
液体クロマトグラフィー	39
エリプソメトリー法	69
エレクトロケミルミネッセンス	78
オフセットグラビア	106
オプトエレクトロニクス	73
親電子付加反応	35

## 【か行】

回折格子	69
開放電圧	127
界面エネルギー	22
界面科学	5
界面現象	5
界面張力	21

化学気相反応法	101	銀ナノワイヤ	131, 132
化学的要因	16	空気中での安定性	33
化学ドーピング	32	クラスター	19
架橋反応	96	グラビアコート	105, 132
ガスクロマトグラフィー	39	グロー放電	100
ガスレーザー	55	蛍 光	78
活動電位	30	蛍光面	57
カーテンコート	106	結合性軌道	123
価電子帯	122	結晶格子	67
カナザワの式	47	原子間力顕微鏡	63
カラーディスプレイ	75	コア粒子	97
カリウムイオン	28	光学厚さ	89
カンチレバー	63	光学異性体	77
官能基	20	光学インピーダンス	89
気液平衡反応	50	光学顕微鏡	55
幾何学的要因	16	光学フィルタ	69
気相中	44	交互吸着法	112
ギブスエネルギー	51	構造発色	12
基本味	39	高分子液晶	74
逆圧電効果	41	高分子主鎖	75
キャシー効果	26	固体電解コンデンサ	35
キャシー - バクスターの 関係式	25	コーティング技術	95
キャスト法	44	ゴードン - カナザワの式	45
キャリア	124	コルピッツ式発振回路	50
求電子性	32	コレステリック液晶	74, 76
共焦点レーザー顕微鏡	55	コンビナトリアル ケミストリー	115
共役 $\pi$ 電子	123		
共役数	31		
共役ポリエン	31		
極性分子	18		
曲線因子	129		
近接場顕微鏡	63		

## 【さ行】

最密充填構造	6
サーモトロピック液晶	74
酸化物半導体	39
3極, 4極スパッタ方式	99





ポリスチレンスルホン酸 36  
 ポリテトラフルオロ  
 エチレン 92  
 ポリピロール 35  
 ポリプロピレン 31  
 ポルフィリン 130

## 【ま行】

マイクログラビア 106  
 マクスウェルの式 82  
 マグネトロンスパッタ法 99  
 マトリックス法 89  
 無機材料 3  
 無機薄膜 4  
 無極性分子 18  
 メイソンの等価回路 47  
 メソゲン基 75  
 メッキ技術 109  
 毛細管現象 5  
 モスアイ構造 11, 91  
 モノクロメーター 69

## 【や行】

ヤング - デュプレの式 23  
 ヤングの関係式 23  
 有機 EL 36, 79  
 誘起効果 19  
 有機材料 3  
 有機薄膜 4  
 有機薄膜太陽電池 3, 119  
 有機半導体 121  
 有効フレネル係数 89  
 4分割フォトダイオード 65

## 【ら行】

螺旋構造 77  
 ラミネーション 132  
 ラングミュア吸着 51  
 リアクタンス特性 48

リオトロピック液晶 74  
 離型性 95  
 リップル吸収 35  
 リバースキスグラビア 106  
 リバースグラビア 106  
 臨界表面張力 20  
 ルシフェリン - ルシフェラー  
 ゼ反応 78  
 励起子プロッキング層 131  
 レーザー顕微鏡 55  
 レーザー走査方式 55  
 レナード - ジョーンズ・  
 ポテンシャル 63  
 連続ロール法 131  
 六方細密構造 10  
 ローバンドギャップ 130  
 ローレンツ - ローレンツの式 91

## 【英字】

AC スパッタ方式 99  
 AFM 63  
 AT カット 41  
 CVD 101  
 DC2 極スパッタ方式 99  
 DC バイアス特性 36  
 DLC 102  
 FF 129  
 FTIR 68  
 HOMO 123  
 IC 134  
 Iot 137  
 IR スペクトル 68  
 ITO 36  
 LBL 法 112  
 LB 法 44, 110  
 LED 79  
 LSI ウエハ 66  
 LUMO 123  
 n 型半導体 119  
 OLED 79  
 OM 55  
 p/n 界面 130  
 P3HT 129  
 PDMS 132  
 PE 92  
 PEDOT 36  
 PEDOT : PSS 36, 120, 131  
 PET フィルム 135  
 PMMA 93  
 pn 接合 119  
 PSPD 65  
 PSS 36  
 PTFE 92  
 PVC 93  
 PVD 100  
 p 型半導体 119  
 p 軌道 33  
 QCM 法 42  
 RF2 極スパッタ方式 99  
 RFID 134  
 SEM 6, 57  
 SNOM 63  
 SPM 59  
 STM 60, 62  
 TEM 57  
 TFT 形 75  
 X 線回析法 67  
 X 線結晶構造解析 67  
 X 線小角散乱法 67

## 【ギリシャ文字】

$\pi$  結合 123  
 $\pi$  電子 33  
 $\sigma$  結合 123



— 著 者 略 歴 —

1987年 早稲田大学理工学部電子通信学科卒業  
1989年 東京工業大学大学院修士課程修了（電気電子工学専攻）  
1992年 東京工業大学大学院博士課程修了（電気電子工学専攻），博士（工学）  
1992年 千葉大学助手  
1994年 慶應義塾大学助手  
1997年 慶應義塾大学専任講師  
1997年 米国マサチューセッツ工科大学客員研究員  
～98年  
2000年 慶應義塾大学助教授  
2014年 慶應義塾大学教授  
現在に至る

## バイオミメティクスから学ぶ有機エレクトロニクス

Organic Electronics Learning from Biomimetics

© Shiratori Seimei 2019

2019年11月22日 初版第1刷発行



検印省略

著 者	しら どり せい めい 白 鳥 世 明
発 行 者	株式会社 コロナ社 代表者 牛来真也
印刷所	萩原印刷株式会社
製本所	有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00928-6 C3055 Printed in Japan

(新宅) N



**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。