実験でわかる
電気をとおす
プラスチックのひみつ

工学博士　白川　英樹
博士（工学）　廣木　一亮　共著

コロナ社

コロナ社

000-00v_実験でわかる_前付_nen.indd 1　2017/11/09 11:26

ま　え　が　き

── 導電性プラスチックと私たち ──

レジ袋やペットボトル，電気コードなど私たちの身の回りにはたくさんの種類のプラスチックが使われている。加熱すると柔らかくなる性質があるので，ペットボトルのように複雑な形の瓶を簡単につくれるという利点がある。一般的にプラスチックは柔らかく熱に弱い素材だが，研究・開発が進んで金属のように熱に強いプラスチックや鉄鋼にも負けない強さのプラスチックもできるようになった。変化に富んだ性質をもつプラスチックはすべて電気をとおさない絶縁体である点は共通している。1977 年に金属のように電気をとおすプラスチック，つまり導電性プラスチックが生まれるまでは，プラスチックが電気の絶縁体であることは常識だった。どのようにして常識外れのプラスチックが生まれたかについては導電性プラスチックとセレンディピティーの章で詳しく述べる。

金属は電気をよくとおすといっても，電気のとおしやすさ（電気伝導性）は温度が一定ならば金属の種類によって決まっていて調節はできない。これに反して，導電性プラスチックはドーピング（doping）という処理（または化学反応）によって，絶縁体から半導体，金属の広い範囲にわたって電気のとおりやすさを調節することが可能である。このことについても 2 章で詳しく述べるが，ドーピングの方法や程度によって p 型，n 型の半導体や金属のように電気をとおしやすくできる。しかも，ドーピング反応は導電性プラスチックの分子内に正の電荷や負の電荷を貯めこむばかりでなく，逆に貯めこんだ電荷を外に出す逆反応（脱ドーピング）も可能なので，二次電池の電気を貯めこむ充電過程，そして貯めこんだ電気を使う放電過程そのものでもある。ポリピロールを使った二次電池への応用実験は 5 章で述べる。

今日，導電性プラスチックはテレビや携帯電話，パソコンなど，私たちの身

コロナ社

の回りのあらゆる電子機器に使われている。どのような使われ方をしているかを知ろうとしてこれらの電気製品や電子機器を分解しても，特殊な容器に入っていたり，あまりにも小さかったりして簡単には理解に至らないだろう。本を読んだり，先生や専門家から教わったりすれば，ある程度のことは理解できるだろうが，一番良い方法は実験で試してみることである。先生が教壇に立って生徒に実験の様子を見せる演示実験ではなく，自らの手を使って行う実験が最善である。

導電性プラスチックは特殊なプラスチックだから，つくるのは難しいと思われるかもしれないが，意外と簡単な方法でつくれる導電性プラスチックもあり，3章のブレイク導電チェッカーのつくり方で述べる「トオル君」で簡単に電気がとおることを調べることもできる。

「百聞は一見にしかず」ということわざがある。人から同じことを何度も聞くより，1回でも自分の目で見るほうが確かであり，よく理解できるということである。各地で開いている実験教室ではこのことわざをいい換えて，「百見は一実験にしかず」といっている。実験は理解を深めるだけでなく，自ら手を使って実験をする楽しさを味わうこともできる。

なお，本書に掲載している写真（カラー写真）の一部や実験操作をわかりやすく説明した動画は，ホームページ†からダウンロードできるので，必要に応じてご活用いただきたい。

2017年9月

白川　英樹

† カラー写真や動画のダウンロードについて
http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339066449/
（本書の書籍ページ。コロナ社のトップページから書名検索でもアクセスできる）

目　　次

Ⅰ．導入編

1章　導電性プラスチックについて知ろう

1.1　プラスチック？　高分子？　ポリマー？……2
1.2「プラスチックは絶縁体」は常識か？……2
1.3　常識では考えつかなかった電気をとおすプラスチックの誕生……3

2章　ドーピング

2.1　ドーピングとは……5
2.2　化学ドーピング……7
2.3　電気化学ドーピング……7
2.4　ドーピングによる荷電担体の生成……8

導電性プラスチックとセレンディピティー……13

Ⅱ．実践編

実験をする前に……19

コロナ社

3章 もっとも簡単な実験
── 触媒酸化重合によるポリピロールの合成 ──

3.1 ポリピロール……22
3.2 ピロールの重合反応と触媒のはたらき……23
3.3 実 験……26

4章 電気でつくる電気をとおすプラスチック
── 電気化学重合によるポリアニリンとポリチオフェンの合成 ──

4.1 ポリアニリン……40
4.2 ポリチオフェン……45
4.3 電気化学重合……47
4.4 エレクトロクロミズムとドーピング……50
4.5 実 験……52

5章 電気を貯めるプラスチック
── ポリピロールの二次電池への応用 ──

5.1 一次電池と二次電池……63
5.2 固体電解コンデンサー……66
5.3 ピロールの電気化学重合……67
5.4 実 験……69

6章 これがスピーカー？
── PEDOT の透明フィルムスピーカーへの応用 ──

6.1 ポリエチレンジオキシチオフェン……80
6.2 フィルムスピーカー……85
6.3 実験①：EDOT をフィルム上で触媒酸化重合する方法……91
6.4 実験②：市販の PEDOT/PSS を塗布成膜する方法……100

7章 手づくりの有機 EL 素子
── PEDOT と MEH-PPV を使った高分子有機 EL 素子 ──

7.1 有機 EL 素子……110
7.2 ポリフェニレンビニレン（PPV）……111
7.3 実 験……113

8章 手づくりの太陽電池
── PEDOT を使ったペロブスカイト型太陽電池 ──

8.1 太陽電池……129
8.2 ペロブスカイト型太陽電池……133
8.3 実 験……135

9章 ポリアセチレン
── 電気をとおすプラスチックの原点 ──

9.1 ポリアセチレンとは……149
9.2 ポリアセチレンフィルムの合成……150
化学実験教室の企画・開発・実施のコツ……152

引用・参考文献……156
あとがき……161
索 引……164

執 筆 分 担
白川英樹：まえがき，1章，2章，導電性プラスチックとセレンディピティー，9章
廣木一亮：あとがき，実験をする前に，3～8章，化学実験教室の企画・開発・実施のコツ

コロナ社

I. 導入編

コロナ社

001-004_実験でわかる_01章_nen.indd 1 2017/11/07 13:56

1 導電性プラスチックについて知ろう

1.1 プラスチック？　高分子？　ポリマー？

本書ではプラスチック（plastics）という言葉を使っているが，そもそもプラスチックとは熱か圧力，あるいは両者を同時に加えることによって簡単に形が変わり，圧力や温度を下げても変わった形をそのまま保つ性質（塑性変形）をもつ物質のことを指しており，（粘土のような無機物質ではなく）分子量が非常に大きい有機高分子化合物のことである。一方，圧力を加えると変形するが圧力を取り除くと元の形に戻る性質（弾性変形）をもつゴムも，分子量が非常に大きい有機高分子化合物である。

したがって，プラスチックやゴムのことを単に高分子ということもあるが，その英語のポリマー（polymer）を使うこともある。いささか紛らわしくて混乱するかもしれないが，実験を繰り返すことでこれらの言葉に慣れ親しんでほしい。

1.2 「プラスチックは絶縁体」は常識か？

私たちの身の回りにはたくさんの電気製品が使われている。居間には電気スタンドやラジオ，テレビ，オーディオ装置など，台所には冷蔵庫や電気炊飯器，電子レンジなど，多くの家庭用電化製品がある。電池で動かすものを除いて，すべて電気コードでコンセントにつなげ電気をとおして機能する。その電気コードの銅線を覆っているのが，電気絶縁体のプラスチックだ。前節で述べたようにプラスチック（やゴム）は炭素原子がたがいに結び合って長い鎖の骨

格をつくっている。金属原子と違って炭素原子は自由電子をもたない。炭素と炭素が結合した長い鎖状のプラスチックは炭素同士の電子が対になった共有結合，とりわけ強く結びついた σ（シグマ）結合でできているので，これらの電子はまったく動けない。したがって，電気をとおさない。ポリエチレンやポリプロピレン，ポリ塩化ビニル，ポリエチレンテレフタレート（PET）など，1976 年に導電性プラスチックが誕生する以前に知られていたすべてのプラスチックは電気をとおさない優れた絶縁体だったので，プラスチックが絶縁体であることは常識であった。

1.3 常識では考えつかなかった電気をとおすプラスチックの誕生

常識外れの電気をとおすプラスチックが誕生した経緯については，導電性プラスチックとセレンディピティーの章で詳しく述べるが，意外なことに電気を通す元となるプラスチックは古くから知られていた。3 章で述べるピロールブラックやアニリンブラックがそうであるが，不思議なことにプラスチックは電気を通さない絶縁体であるという常識を乗り越えて，**電気を通すという見方**でこれらの物質を研究した化学者や物理学者はだれもいなかった。今となっては，ピロールブラックはポリピロール，アニリンブラックはポリアニリンであることがわかったが，その名のとおり黒い粉末で正体不明な物質として見捨てられていた。

ポリアセチレンも当初合成されたものは黒い粉末で，研究には不向きな物質として化学者からは敬遠されたが，2 章のドーピングと導電性プラスチックとセレンディピティーの章で詳しく述べるように，薄膜状に合成されてから構造や性質の研究が進み，さらに臭素やヨウ素をドープすると金属のように電気をよくとおすようになることが明らかになった。電気をとおすプラスチックの誕生である。

ポリピロールやポリアニリン，ポリアセチレンの共通点はいずれも 2.1 節で

コロナ社

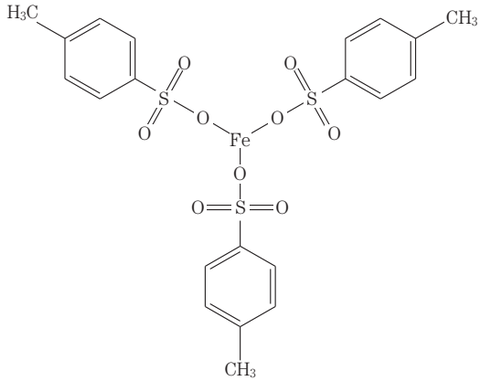


図 3.4　*p*–トルエンスルホン酸鉄（Ⅲ）

た用途も開発されている[6),7),12)]。

さぁ，ここまで読んだ方は，実際にポリピロールがどんな物質なのか，合成して触れてみたくなったことだろう。早速，実験してみよう。

3.3　実　　験

【レベル】小学 4 年生以上

【実験場所】理科室・実験室・科学館（通気を良くして行うこと）

【実験時間】1 ～ 2 時間（準備・後片付けを除く）

電極上での反応である電気化学重合も，溶液中で粉末状のポリピロールが生成する触媒酸化重合も，大面積のポリピロールを得るのは困難である。しかし，触媒を塗布したシートをピロールの蒸気に触れさせると，重合反応が起こり，ポリピロール薄膜が簡単に得られる。黄褐色の鉄触媒に対して，ポリピロールは黒色であるため，反応が起こったことは一目瞭然である。

実験としての面白さと，導電性プラスチックが実際に電気をとおすことを確認するという重要な操作に必要であることから，「トオル君」（**図 3.5**，3 章のブレイク導電チェッカー「トオル君」のつくり方を参照）の工作を同時に行う

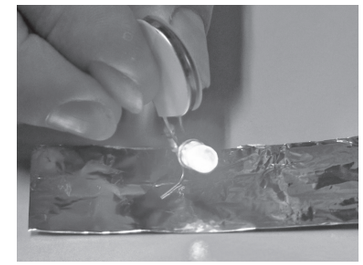


図 3.5　導電チェッカー「トオル君」

ことが望ましい。

触媒には入手しやすさから塩化鉄 $FeCl_3$ を使用し，あとはピロールさえ購入できれば，小中学校の理科室でも十分に実験可能である。のちに洗濯のりを加えるので，結果的に水が入ることを考えると，塩化鉄は無水物である必要はなく，六水和物 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ を使用しても良い。

【器具】

□ビーカー（50 mL 用）……1
□電子天秤（感量 0.1 g）……1
□メスシリンダー（50 mL 用）……1
□薬さじ……1
□ガラス棒……1
□ヘアドライヤー……1
□シャーレ（90 mmϕ）……1
□OHP シート（100 mm × 100 mm × 0.1 mm，市販品を加工）……各 1†
□ろ紙（No.1，240 mmϕ）……各 1
□マスキングテープ……各 1
□ポリスポイト（**図 3.6**）……各 1
□試験管（30 mmϕ × 200 mm，**リムなし**）……各 1

† 実験者一人ひとりに必要な数量は「各 1」のように記す。

コロナ社

図 3.6　ポリスポイト（0.3 ～ 0.5 mL に印をつけておく）

□キムワイプ†

【試薬】（20 ～ 30 人分，**図 3.7**（a））

□塩化鉄 $FeCl_3$　5.0 g（または塩化鉄 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$　8.3 g）

□ピロール　10 g 程度

□エタノール　5.0 mL

【その他の材料】（20 ～ 30 人分，図 3.7（b））

□洗濯のり（PVA を主成分とする市販品☞ **Point 1**）約 20 mL

（a）　試薬：塩化鉄，ピロール，エタノール（左から順）

（b）　洗濯のり

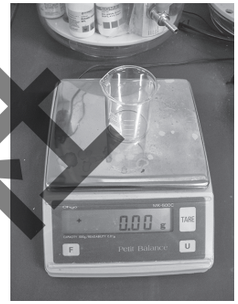
図 3.7　今回の実験で用いる試薬と洗濯のり（左から順）

† 本書で使用している会社名，製品名は，一般に各社の商標または登録商標である。本書では®と™，©は明記していない。

【実験操作】

Step 0　（事前準備）触媒溶液をつくる（**図 3.8**）

1. 電子天秤にビーカーをのせて塩化鉄 $FeCl_3$　2.0 g を量り取り，エタノール 5.0 mL を入れて溶かす。
2. 洗濯のりを約 20 mL 加え，均一になるまでかくはんする（可能ならマグネチックスターラーを使用したほうが楽である）。



（a）　塩化鉄の秤量

（b）　マグネチックスターラーによるかくはん

図 3.8　触媒溶液をつくる

Step 1　触媒溶液を塗る（**図 3.9**）

1. ろ紙をマスキングテープで実験台に固定する（図（a））。
2. OHP シートを**ろ紙の中心よりも少し下側に置いて**，マスキングテープで実験台に固定する（図（b））。
3. ポリスポイトで触媒溶液を OHP シートの**手前側に一直線に**のせる（図（c））。
4. 試験管に軽く手を添え，**回転させないように注意しながら**，手前から奥にスライドさせ，OHP シートに触媒溶液を塗りつける（図（d））。
5. この際，試験管は OHP シートの**向こう側までスライド**させて，あまった触媒溶液を上部のろ紙に吸収させる（図（e））。
6. ヘアドライヤー（OHP シートから **20 cm 程度離し**，**温風「弱」**）**で**触媒溶液を乾かす（図（f））。

コロナ社

あ と が き

化学は物質の性質を知り，巧みな合成法を考え，応用を実現する学問である。新薬や新素材を生み出し，日々社会に貢献しているが，テレビや自動車といった製品の華やかさに目を奪われ，それを支える素材や技術に注目する人は少ない。

導電性プラスチックという画期的な発明は，有機エレクトロニクスという新しい研究分野を生み出し，いまや身近な家電製品にも多用され，世の中を大きく変えたといって良いだろう。それにも関わらず，もし2000年のノーベル化学賞がなかったら，導電性プラスチックが，ここまで知られることもなかっただろうし，さらにいえば導電性プラスチックがどこにどうやって応用されているのか，知る人は多くないだろう。

しかし導電性プラスチックは，科学全般の素晴らしさを伝えるには格好の素材である。実験教室のテーマとしてじつに魅力的で，やりがいのある実験教室になる。そんな導電性プラスチックに大学で出会い，化学を正しくわかりやすく伝えるのは化学者にしかできない仕事だと，勝手な使命感を感じた私（廣木）は，科学の素晴らしさを伝える活動に力を注ぐ師に触発されたこともあり，化学を含めて科学全般の研究だけでなく，教育や普及に尽力して，今日に至る。師には及ばないながらも，数えきれないほどの実験教室を国内はもとより国外でも行ってきたが，いつもどこでも大盛況。実験教室が終わったとき，化学の未来は明るいと，参加者の笑顔に何度も勇気づけられた。この先も導電性プラスチックは研究開発が続けられ，便利で豊かで健康的な社会をつくるために貢献していくことだろう。

このたび，導電性プラスチックに関する実験書が完成したことは，師の念願かなってのことであり，私にとってもこの上のない喜びである。この書が，科

コロナ社

学を愛するすべての人に，実験の良い手引きとして役立つことを心から祈りつつ，筆を置くこととしたい。

最後に，本書で取り上げた実験プログラムは，2003年10月から実施が始まった東京・お台場にある日本科学未来館（未来館）での特別実験教室「ノーベル賞化学者からのメッセージ ～白川英樹博士×実験工房～ 導電性プラスチックを作ろう！」や，ソニー教育財団が実施している子供たちの自然教室「科学の泉―子ども夢教室」の実験教室などで行っており，それぞれの機関や施設と共同で企画・開発されたものが多く含まれている。

未来館での企画・開発に当たり宮島章子（科学技術スペシャリスト，のちの科学コミュニケーターに相当，以下敬称略），科学コミュニケーターの渡部晃子，Blech Vincent, 小岩井理美香，山口珠美，中川映理，大堀菜摘子，佐尾賢太郎，田村真理子，CHEN Du（陳 芷），田中 健，石田茉利奈，梶井宏樹，鈴木 毅らをはじめとする多くのスタッフの尽力によって実験プログラムが組まれ，その後も実験方法や内容の改良を重ねて現在に到（いた）っている。この間，特別実験教室の運営を支える実験工房ボランティアの諸氏，導電チェッカー「トオル君」を考案した佐伯 聡，ノーベル賞実演チーム「ノーベル隊」ボランティアの皆さんのたゆまぬ貢献で特別実験教室を続けることができており，未来館の皆さんに感謝する。また，「科学の泉―子ども夢教室」で行っている実験プログラムの開発や改良で献身的な努力を惜しまなかったソニー教育財団の担当者に感謝する。

多くの科学者や研究者，企業の協力なしでは，これらの実験プログラムの実現は不可能であった。3章で取り上げたピロールの気相重合は宮田清蔵（当時東京農工大学教授）の発案に基づいている。4章・5章で述べた電気化学重合は筑波大学の木島正志，後藤博正，川島英久の諸氏の協力を得て開発・改良された。6章の透明フィルムスピーカーで使うKFピエゾフィルムは株式会社クレハの森山信宏らにより提供していただき，透明フィルムスピーカー専用の超小型高性能アンプの設計・製作は東京大学生産技術研究所の小林 大，このアンプと使い勝手のよいPEDOT/PSS溶液は金井文彦（株式会社理学）により

それぞれ提供された。PEDOTおよびモノマーのEDOTについては橋本丞嗣（現松尾産業株式会社，当時スタルク株式会社）の協力が欠かせなかった。7章の手づくり高分子有機EL素子は住友化学株式会社の大西敏博（当時）と加藤岳仁（現 小山工業高等専門学校）らによるガリウム–インジウム合金の教示がなかったら実現できなかった。また，山崎舜平ら株式会社半導体エネルギー研究所による実験機器や材料の提供，財団法人材料科学技術振興財団による材料の提供とEL素子の解析，シグマ アルドリッチ ジャパン合同会社・メルク株式会社と旭化成株式会社および旭化成ファインケム株式会社による試薬の提供など，それぞれ全面的に協力をいただいた。8章の手作りペロブスカイト型太陽電池では桐蔭横浜大学の宮坂力，池上和志らによる献身的な協力で実験プログラムが完成した。これら多くの皆さんに敬意と感謝を表する。

最後に本書に記載した画像の撮影や動画の作成に全面的な協力をしてくれた津山工業高等専門学校 機械工学科 竹内嗣人，電気電子工学科 松原 巧，西山政隆，浜田将聖，佐藤 良，情報工学科 出口翔斗，総合理工学科 土居 諒，山中裕葵，イラストを作成した助教の守友博紀に感謝する。また，廣木のゼミ生諸君は昼も夜も平日・休日の別もなく献身的に尽力してくれた。皆さんの労を多として感謝申し上げる。

2017年9月

廣木 一亮

コロナ社

―― 著 者 略 歴 ――

白川　英樹（しらかわ　ひでき）
1961 年　東京工業大学理工学部化学工学科卒業
1963 年　東京工業大学大学院理工学研究科
　　修士課程修了（化学工学専攻）
1966 年　東京工学大学大学院理工学研究科博士
　　課程修了（化学工学専攻）
　　工学博士
1966 年　東京工業大学資源化学研究所助手
1976 年　ペンシルベニア大学博士研究員
1979 年　筑波大学助教授
1982 年　筑波大学教授
2000 年　筑波大学名誉教授

廣木　一亮（ひろき　かずあき）
2000 年　筑波大学第三学群基礎工学類卒業
2006 年　筑波大学大学院一貫制博士課程
　　数理物質科学研究科修了
　　博士（工学）
2006 年　独立行政法人産業技術総合研究所
　　環境化学技術研究部門特別研究員
2008 年　独立行政法人科学技術振興機構
　　日本科学未来館
　　科学コミュニケーター
2008 年　独立行政法人理化学研究所
　　基幹研究所客員研究員（兼任）
2011 年　津山工業高等専門学校講師
2013 年　津山工業高等専門学校准教授
　　現在に至る

実験でわかる 電気をとおすプラスチックのひみつ
Exploring Conductive Polymers Through Experiments

© Hideki Shirakawa, Kazuaki Hiroki 2017

2017 年 12 月 28 日　初版第 1 刷発行 ★

検印省略

著　　者　白　川　英　樹
　　廣　木　一　亮
発 行 者　株式会社　コ ロ ナ 社
　　代 表 者　牛 来 真 也
印 刷 所　新 日 本 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 http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-06644-9　C3043　Printed in Japan　（中原）

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 03-3513-6969，FAX 03-3513-6979，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。

コロナ社