

原子一層でできた、究極に薄い物質の科学 —原子層科学の紹介—

東北大学大学院理学研究科

齋藤 理一郎

(2015.5.10)

第1回 究極に薄い物質を作ると何が出来る？

近年の情報社会を支える、高度なコンピュータを中心とする産業では、製品に軽薄短小（けいはくたんしょう）を求める傾向が強い。より軽く、より薄く、より高速で、より小さいものができれば、使う電力や、原材料も廃棄物も少なく済むためエコであるし、高速でデータが通信できれば便利である。また、薄型のテレビやパソコン、タブレット、スマートフォンは何より格好がいい。近年、新しく便利なものが出来る度に古いものが、どんどん置き換わっている。

このコラムでお話したいのは、軽薄短小の中の「薄いもの」を作る、という科学である。皆さんの身の回りにあるもので、薄くなった電化製品と言えば何だろうか。最も代表的なのは、テレビだろう。もはや若い世代では箱型のテレビを知らない人もいる。これは、箱形のテレビは画面を表示する部品がブラウン管だったのが、薄い液晶画面の開発によって置き換わったからである。2015年春発売のS社のテレビは厚さなんと0.5cmというから驚きである。他にも、ノートパソコンの初期のものは、厚さが5cm以上あったが、最近では2cmを切るものもある。しかし、実はノートパソコンの液晶で表示する部分は、数枚のフィルムからできていて、その厚さの合計が1mm程度に過ぎない（ノートパソコンを分解したことがある）。したがって原理的には、ノートパソコンをもっと薄くできるはずであるが、液晶が壊れないためにフレームに入れる必要があり、フレームの厚さ以下に薄くすることは困難だった。そこで登場するのが、紙のように折り曲げ自由な製品を作ろうという考え方である。折れ曲げ自由なことをフレキシブルという。すなわち、曲がらないようにするのではなく、多少折降り曲がっても壊れないようなフレキシブルなものにしよう、ということである。新聞のように、多少折り曲げても壊れなければ、折りたんでポケットにいれられるし、落としても壊れにくいタブレットをつくることできる。自由な曲面上にディスプレイができると、いろいろな用途が考えられる（写真1）。では、紙のように自由に折れ曲げても問題ない製品を作るにはどうすればよいだろうか？答えは、使われる部品を薄くても強い物質で作ればよいのである。



写真1：今にも話し始めそうな、インドネシアのお面に薄いディスプレイをつけることができれば、お面がまるで話しているようなインターフォンを作ることができる。「どなたじゃ」と話しかけられたら、少し怖い。（写真は想像図であり、実現したものではない。）

第2回 折り曲げるとはどういうことか？

薄い折りたたみ可能なタブレットを作るには、折り曲げ自由なフレキシブルな部品で製品を作ればよく、そのためにはタブレットの部品を折り曲げ可能な薄い物で作ればよい。では、折り曲げるとはどういうことであろうか？例えば、金の延べ棒は人間の力で曲げることにはできないが、金箔なら簡単に折れ曲がる。普通、曲がるとは部分的に、ある半径の円筒（球殻）の形に変形することである。この半径を曲率半径という。物の厚さが曲率半径に比べて十分に小さければ、物は簡単に曲げることができる（写真2）。逆に厚い物質であれば、曲がる部分の外側と内側で大きな変形を伴うので、曲がったとしても外側から裂けるように壊れてしまう。チョコレートを折り曲げて2つに割る様子を想像すればわかりや



写真2：アルミ箔（左）は簡単に折れ曲がるが、同じアルミニウムでできている1円硬貨は普通の手では折れ曲がらない。1円硬貨を包んでいるラップは、しわができていくつついているが、注意深く伸び広げるとラップは折れ曲がっていないことがわかる。アルミ箔とラップの厚さは、髪の毛の太さもしくは紙幣の厚さの10分の1程度（10マイクロメートル=1mmの100分の1）である。同じ厚さでもラップが折れ曲がらないのは、ラップが分子の集まりでできていて、分子と分子の間は大きな変形をおこすことができるからである。一方アルミ箔は分子でなく原子でできていて、大きい変形に対して原子の配列がずれ塑性変形が起きる。ちなみに市販されている金箔の厚さは、アルミ箔の厚さのさらに100分の1であり、しわはできるが折れ曲がってはいない。

すい。チョコレートの山と山の間で薄くなっている場所で大きな変形が起こり、割れやすくなっている。また均質に薄いプラスチックの板や紙は、ある程度の曲げに対してはもとに戻る（弾性変形）が、曲率半径を板の厚さぐらいにしてしまうともとに戻らない変形（塑性変形）が起きる。折り紙を折る感じである。

フレキシブルな製品を作るためには、塑性変形しない、ラップのように自由な折り曲げが可能な電気回路が必要である。自由な折り曲げが可能な、「へなへなの」電気製品ができると、例えば、足の裏に張り付けて歩行発電したり、体に張り付けて体温や心拍数を測定したりできるようになる。他にも、電気回路の応用可能性が一気に増えることになる。

現在の電気製品の中の回路は、厚さ 1 mm ぐらいの板状のもの（プリント基板）に作られる（写真 3）。基板には薄い銅の配線がなされ、トランジスタのような部品が組立てられる。したがって基板が多少曲がっても回路が壊れることはないが、基板自身が大きな変形をすると薄い銅の配線が切れてしまう。代表的な部品である集積回路（IC チップ）も、固いシリコンの基板上に回路が作られる。シリコンの基板は変形しないようにパッケージでおおわれるので、IC チップの大きさが 1 ミリ程度にも関わらず、パッケージ全体の変形ができないようになっている。このような IC チップや、部品を支える基板を同時に薄くしたら何ができるであろうか？



写真 3：上：プリント基板。基板上に集積回路などの部品がついている。基盤は多少の変形は可能である。下左：ノートパソコンの部品と基板をつなぐ折り曲げ可能な配線。変形しても折り曲げても問題ない。下右：透明な電卓。文字盤、液晶部と太陽電池からなる。よく見ると文字盤のところに薄い回路が配線されている（写真では見えない）。

第3回 折り曲げ可能な電気回路

電気回路は固いプリント基板上に組み立てられるが、もし薄く柔軟な基板上に組み立てられれば、基板は自由に変形できる。さらにプリント基板上の配線も非常に薄く作ればその配線も基板と一緒に変形できる。このようにしてできた電気配線はフレキシブル・プリント配線と呼ばれ、ノートパソコンの折れ曲がる部分であるヒンジ（蝶番、ちょうつがい）の中を通す配線などに使われている（写真4）。フレキシブル・プリント配線上にカーボンナノチューブでできた非常に薄いトランジスタを載せればそのままフレキシブル・プリント回路として使われる（写真5）。フレキシブル・プリント回路は単に折り曲げられるだけでなく、重さが軽く、平らでない空間にも設置できる利点がある。

フレキシブル・プリント回路は様々なところで用いられていて、これからの発展が期待されている。例えば、第1回で紹介したノートパソコンの液晶の部分の1mm程度の厚さのフィルムは、薄い基板上に映像を表示するための回路が取り付けられたものである。薄い基板をもっと薄く、そして自由に折り曲げられるほど強くすれば、液晶テレビをシール状にして、車のフロントガラスに貼り付けてカーナビとして使用できるほか、新幹線の座席のテーブルに貼り付けて映像を流すことができる。一方、この薄くて小さな電気回路は太陽電池（写真3）にも使われている。電卓のように太陽電池で十分駆動できる小さな電力でよければ、フレキシブル・プリント回路に必要な電力を太陽電池でまかなうことができる。



写真4：右：非常に薄いノートパソコンのヒンジ（蝶番）。ヒンジによってキーボードのある本体部分と液晶部分をつないでノートの開閉ができ、また一定の角度で開いた状態を保つことができる。左：このヒンジの隙間の中を、パソコンの心臓部と液晶表示部に信号をやり取りするフレキシブルなプリント配線（黒いリボン状のもの）が通っている。乱暴に扱うと、この配線が切れてしまう。著者は、このフレキシブルな配線を手入れし、壊れたノートパソコンを直した。部品の入手先を探すのと、ヒンジの隙間の中に配線がどう通っているかを理解するのにかなりの時間を要した。

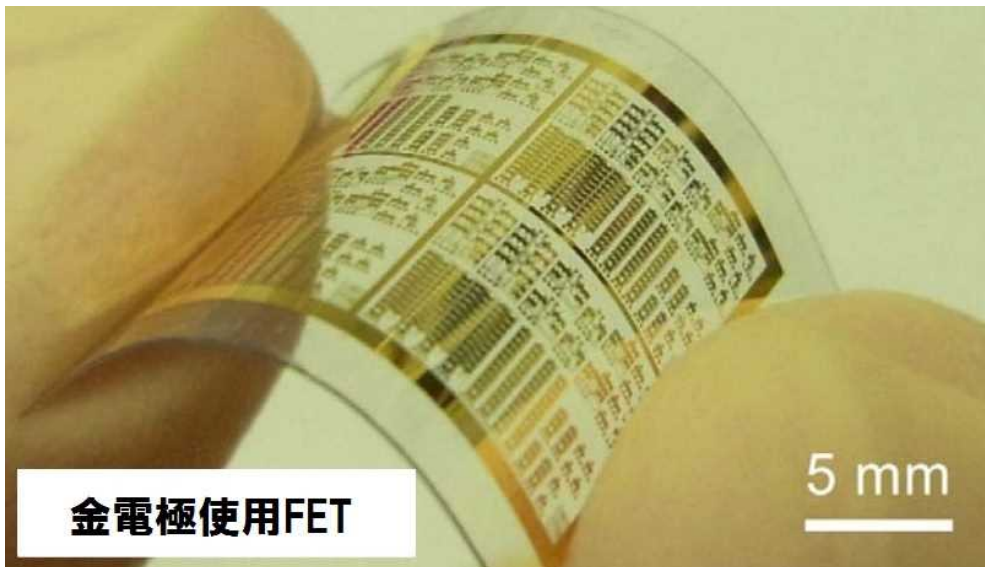


写真5：透明な基板の上にカーボンナノチューブの電界効果トランジスタ（FET）を多数設置（透明で見えない）し、FET間を薄い金箔で電極と配線を施した論理回路（名古屋大学大野雄高先生のご厚意による）。

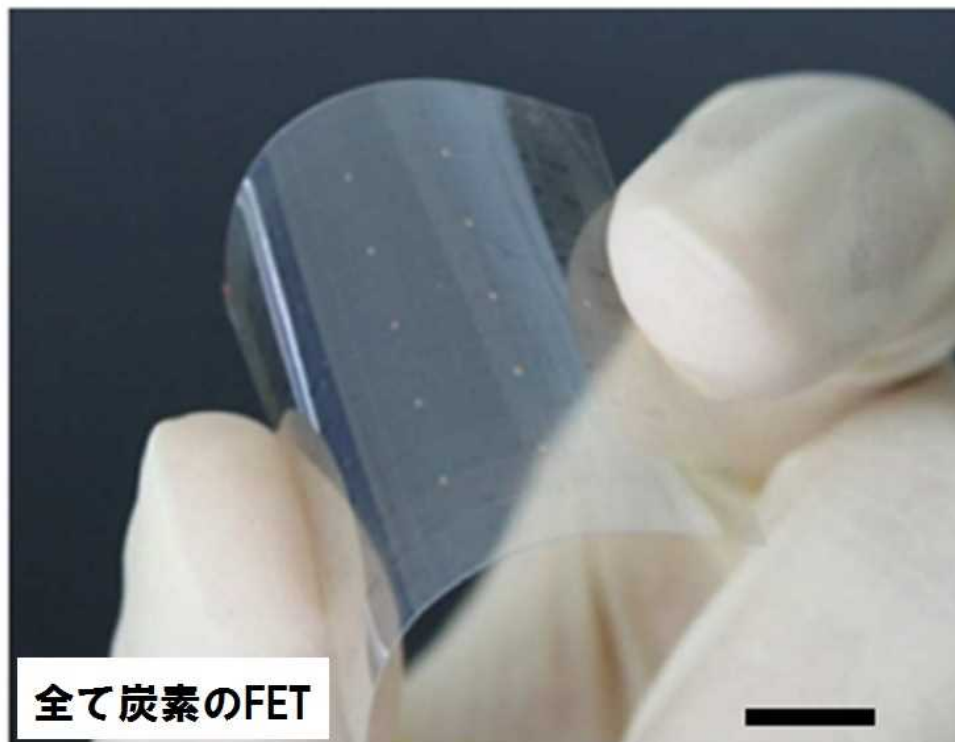


写真6：カーボンナノチューブの電界効果トランジスタをさらに、透明なナノカーボンで電極配線したもの、わずかに回路が見えるが透明である。このすべて炭素でできた回路は印刷技術で基板上に配線することができる（名古屋大学大野雄高先生のご厚意による）。

光が無くて太陽電池が使えない状況でも、熱電（または圧電）素子といって熱（圧力）から電気を取り出すことができる部品があるので、手にフレキシブル・プリント回路を張り付け体温で発電（足に取り付け歩行で発電）することも可能である。さらに、もっと薄い究極の物質で回路を作ると、もともとは透明でない物質であっても光を通すことができる。全く透明な電気回路ができるのである（写真6）。全く透明な電気回路であれば、メガネのレンズに張り付けても前が見えづらくなるなどの支障がない。これは、カーボンナノチューブやグラフェンという炭素という元素でできた物質（ナノカーボン）を使って実現できている。今回は、この究極に薄い物質の登場のお話をする。

第4回 究極に薄い物質の登場、グラフェン、ナノカーボン、原子層物質

薄くて折り曲げ自由なフレキシブル・プリント回路で、くねくね曲げられる電気製品ができる、という話を進めてきた。究極に薄い物質でフレキシブル・プリント回路を作ったらどうなるだろうか、という問題提起をしたが、それについて述べる前に、究極に薄い物質の正体を明かそう。それは、グラフェンである。グラフェンは2004年に発見された。なぜグラフェンが究極に薄い物質であるかという、グラフェンが炭素原子でできた原子層1層の物質だからである。すべての物質は原子という、物質の最小単位の一つづつでできている。究極に薄い物質があるとすれば、原子の層一層で作られる物質ということになる。例えば、原子を小豆のような丸い豆と考えると、原子の層一層とは杓付きのお盆の上に豆の層が一層だけになるように隙間なく並べ、そのまま糊で豆同士をくっつけて作ったようなものである。こういう物質を原子層物質と呼ぶ。炭素でできた原子層1層（グラフェン）を実際に取り出して、その性質を調べるという研究が約10年前に報告され、2010年ノーベル物理学賞が授与されている。

グラフェンを用いたフレキシブル・プリント回路はまだ開発中である。しかし、ペットボトルに使われるペット薄膜の上にグラフェンを張り付けたシートはすでに市販されている（写真7）。炭素と言えば、鉛筆の芯（黒鉛）など黒い物質であるが、究極に薄いグラフェンになると、透明になる。また、グラフェンは驚くことに究極に薄いだけではなく電気を流す物質（金属）である。しかもその電氣的な性質は原子の塊より原子層1層のほうが格段に優れていることがわかっており応用上の期待が高まっている。

グラフェンの発見後、半導体や絶縁体といった電気回路に必要な電氣的性質をもったグラフェン以外の原子層物質も次々に発見された。この究極に薄い物質を組み合わせると、まったく透明で柔軟な電気回路が理論的にできることがわかった。すでに原子層数層でできた発光ダイオードが作られている。現在は近未来の技術の進歩に伴い、より複雑な集積回路を原子層物質で作る研究が世界中で行われている。日本でも、いろいろな分野の科学者が集まってプロジェクト研究「原子層科学」が始まっている。Facebook や Web で「原子層科学」が検索可能である。究極に薄い物質を作り組み合わせる科学は、今後実用的な技術を生み出し、巨大な市場に発展する無限の可能性を秘めている。



写真7：透明なフィルム上に、グラフェンを1原子層つけたもの（市販されている）。1原子層かどうかは光の透過率が1層あたり2.3%であるので、濃淡から判断できる。写真でフィルムの上部にグラフェンがついているところとついていないところの濃淡の差がかすかに見える。この市販されているシートを何に使えるかは、わかっていない。

第5回 原子層科学が作る 21 世紀の技術

このように 21 世紀の科学は、グラフェンの発見とともに「原子層科学」として大きな展開をしている。原子層物質を使った薄い物質は、電気回路だけでなく、強く軽い素材としてもいろいろな用途がある。例えば宇宙空間で太陽風を受けて動く宇宙ヨットの帆としても、この原子層物質が使える。また、熱伝導度も非常に高いので、熱を逃がす面素材や熱を伝える素材として使える。また、グラフェン（グラファイト）は、磁石に反発するという性質があり、写真のように N 極と S 極を交互に並べてくっつけた強力磁石の上で浮上することが可能である。（写真 8）



写真 8：結晶性の高いグラファイトは、磁石に反発し（反磁性）浮上する。これは常温で測定された写真であり、超伝導体の完全反磁性（マイスナー効果）とは全く異なる現象である。良質なシャープペンの芯も結晶性の高いグラファイトが使われていて、磁石の上で浮上する。1 原子層のグラフェンはこの反磁性の効果がより顕著であり、グラフェンを適当な間隔があくように別の物質を挟み、間隔をあけたグラフェンを 10 万枚ぐらい積み重ねると室温で完全反磁性の物質ができることが期待されている。設計上では 10 万枚積み重ねても厚さが 1 mm もない。

さらに炭素でできた物質として、グラフェンのような 2 次元の面のような物質の他に、1 次元の線（円筒系）の物質であるカーボンナノチューブ、0 次元の点（球殻）の物質であるフラーレン、などを使っても非常に薄い物質を組み立てることができる。例えばカーボンナノチューブを海苔のように繊維をお互いに絡み合わせ薄い電界効果トランジスターをつくることできる（写真 5, 6）。またフラーレン分子をお互にくっつけて高分子を作

ることも知られている。このフラーレン・ナノチューブ・グラフェンは、炭素できたナノメートル（10億分の1m）の大きさの人工的に合成された物質であり、まとめてナノカーボンと呼ぶ（図9）。ナノカーボンを組み合わせた、炭素だけで作ったオールカーボンの集積回路も2013年に作られているし（写真6）、原子層の薄さの発光ダイオードも2015年に作られている。多くの若い研究者がこの研究分野に興味をもってチャレンジしてくれることを期待するとともに、究極に薄い物質を使ってもっと何ができるか広くアイデアを聞きたい。

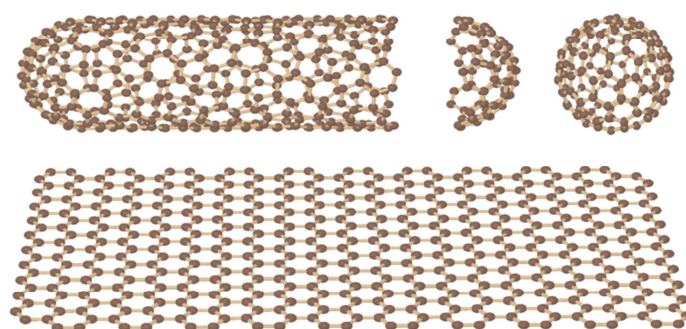


図9：左上：1次元の物質である、半導体カーボンナノチューブ。終端は半球状のキャップ（中上）と呼ばれるもので閉じている。右上：0次元の物質であるフラーレン分子、閉曲面の形をした分子。いろいろな形の分子がつくられている。下：2次元の物質であるグラフェン、グラファイト（黒鉛）の1原子層。電気を流し、1THzの高周波の信号でも電子が追従可能であるなど、従来の概念を打ち破る顕著な結果が報告されている。フラーレン・ナノチューブ・グラフェンは、炭素できたナノメートル（10億分の1m）の大きさの人工的に合成された物質であり、まとめてナノカーボンと呼ぶ。

さらに興味のある方は参考文献をどうぞ。

参考文献：「フラーレン・ナノチューブ・グラフェンの科学」 齋藤理一郎著、共立出版（2015）2,160円（税込）ナノカーボン研究の歴史と研究の最先端、高校生から研究者向けに書かれた最新の本。（右図）

齋藤 理一郎

東北大学大学院理学研究科教授

カーボンナノチューブ・グラフェンの研究

を行い、科学研究費・新学術領域研究「原子層科学」の領域代表者として日本のプロジェクトを推進中。

趣味は、家庭菜園、ウクレレ、卓球

研究室: <http://flex.phys.tohoku.ac.jp/japanese/>

Facebook 原子層科学

Web: <http://flex.phys.tohoku.ac.jp/gensisou/>

