

「液体を塗る」だけで太陽電池ができる

液体の隠されたポテンシャルを引き出せ!

半導体や太陽電池などに欠かせないシリコン薄膜は、気体からつくるのが常識だった。そんな常識にとらわれず、「液体」から、しかもインクジェットを利用してつくり出そうと考えた、ある研究者のユニークな発想が、液体の隠れていた多様な可能性を開こうとしている。

インクジェット印刷でトランジスタを描く!?

磁力にこだわらず加工性を優先した磁石を開発

国の戦略目標実現に向けて課題解決型基礎研究を推進するJSTの戦略的創造研究推進事業のなかでも、ERATOは時限的な研究拠点を新たに編成することで運用される大規模なプロジェクトだ。トップとなる研究総括は、大学の研究室で長年の経験を積み上げた研究者がほとんど。そのなかで異色の存在といえるのが、「下田ナノ液体プロセスプロジェクト」で研究総括を務める、北陸先端科学技術大学院大学教授の下田達也さんだ。大学教授となったのは数年前のこと。それ以前の30年間は企業人として過ごしてきた。

「東京大学の金属工学科で学びましたが、卒業するときも、大学院に残って研究者になりたいという気持ちはあまりなかったですね。周りもほとんどが企業に就職していましたし、私も、何かモノづくりにかかわる仕事が見たいなと漠然と思っていました」

穏やかに微笑みながら、30年以上前のことをそう振り返る。勤務先に選んだのは長

野県の諏訪精工舎（現セイコーエプソン）。SEIKOブランドの腕時計の製造・開発を担う会社で、下田さんが入社した数年前には世界初のクォーツ腕時計を開発するなど、社内は活気がみなぎっていた。そんな環境のもと、下田さんは専門の金属の知識を生かして時計のステップモーター用小型磁石の開発に取り組み、当時主流だったサマリウムコバルト磁石のなかでも「2-17系」とよばれる新しい磁石の開発に成功。当時、最も強い磁力を持った「史上最強の磁石」として注目を集めた。画期的だったのは磁力の強さだけではない。磁石の製造過程で、下田さんは当時の常識を覆すユニークな手法を取り入れた。

「粉末の磁石に樹脂を混ぜて固める“ボンド法”を採用しました。焼き固める“焼結法”に比べると磁力は低下しますが、この手法ならいろいろな形の磁石が、安く、簡単にできるんですよ」

時計に使われる磁石は、直径が1mm以下という極めて小さなサイズのものだ。形状の制約も大きい。磁力を優先するなら焼結法が勝るが、磁石にしてから削って加工しなければならぬ欠点がある。工業製品として考えれば、加工性に優れたボンド法にするべきだと考えたのだ。そんな発想の転換によって開発した磁石は、時計だけでなく携帯音楽プレーヤーや電気自動車のモーターなど、さまざまな用途で使われるようになった。

下田さんはこの経験を通じて、「多軸的」に物事を眺めることの大切さを痛感したという。

「人間だって、みんなが同じように勉強して同じような道を進むのではなく、それぞれの個性や才能を生かす方向を見極めたほうがいい。磁石の開発といえば磁力ばかりが目立りますが、さまざまな観点で見ると、生かす道や方向性が見えてくると知ったのです」

半導体製造プロセスのエネルギー効率の悪さに着目

こうして大きな成果を収め、経験を重ねていた下田さんに、94年、大きな転機が訪れる。15年間以上、慣れ親しんだ磁石から、半導体や表示体の開発というまったく違う世界への異動を命じられたのだ。

「ショックでした。磁石の研究をしたい気持ちを捨てられず、会社を辞めようとも考えましたが、結局は思いとどまりました」

磁石への未練を胸に秘めながら、半導体を用いた薄膜トランジスタの開発などに取り組みうちに、あることが心に引っかかった。製造過程に大きなムダがあることに気づいたので。

「薄膜トランジスタは、半導体材料をいったん気体にしてから基板全面に堆積させて薄膜をつくり、そこから必要な部分だけをカットするというプロセスで製造されます。ところが

多軸的に眺めると可能性が見えてきます。



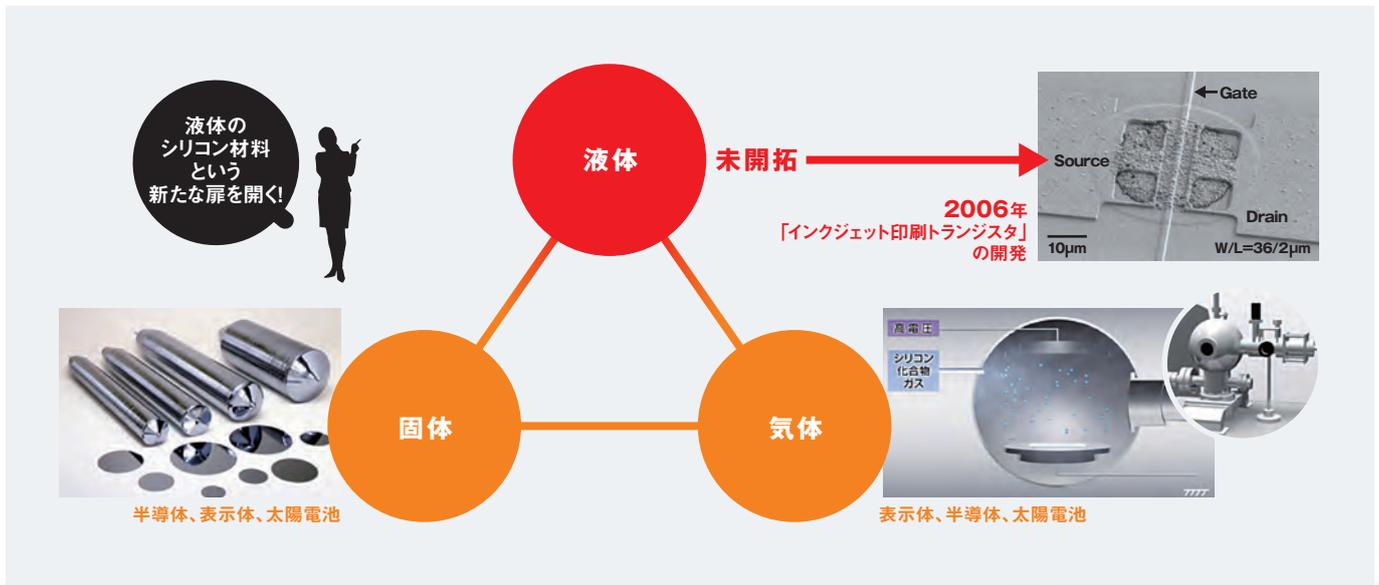
研究総括

下田達也 しもだ・たつや

1977年東京大学工学部金属工学科卒業（後に工学博士号取得）。株式会社諏訪精工舎（現セイコーエプソン株式会社）で研究開発本部基盤技術研究所所長、同部副開発本部長などを歴任。99年より北陸先端科学技術大学院大学客員教授を務め、2006年より同大学ナノマテリアルテクノロジーセンター教授を経て、08年より同大学マテリアルサイエンス研究科教授。06年よりERATO「下田ナノ液体プロセスプロジェクト」研究総括。

シリコン材料の利用

シリコン材料は半導体として優れた特性を持つことから、液晶表示パネルや太陽電池などに広く用いられている。製作方法を形態別に分類すると、利用する際の形態と同じ固体材料を加工する方法のほか、薄膜を形成する際の製作プロセスに必要な形態として気体材料も開発されているが、液体材料は利用法が見出されず、未開拓のままだった。下田教授らは液体材料を用いることで製作効率を飛躍的に上昇させられると考え、液体シリコン材料の開発に取り組み、実現させた。



この方法だと、最終的に製品として使われるのは元の材料のうちわずか1%で、エネルギー効率が非常に悪かったです」

エネルギー効率に着目した背景には、磁石開発での経験があった。磁石の応用製品の開発に取り組み、家電製品のモーターについて「多軸的に」眺めていたとき、モーターの効率が気になった。調べてみたところ、エアコンで使われる電力のうちかなりの部分がムダになっていることが判明。電力損失の少ないモーターの開発に取り組んだことがあった。半導体も同じ観点から眺めてみたところ、改善すべき大きな問題点として、効率という課題が浮かび上がってきたのだ。

4色のインクの代わりに 4種類の材料を吹き付ければ……

解決策を練るうちに、インクジェット印刷(*)の技術が使えるのではないかとひらめいた。

*インクジェット印刷

インクを微小な液滴にして、印刷したい媒体に対し直接吹き付ける印刷方式。シアン(青)、マゼンタ(赤)、イエロー(黄)、ブラック(黒)の4色のインクを用いる。

セイコーエプソンでは、セイコーが東京オ

リンピックの公式計時を担当した際に記録の印刷を担うためにプリンター事業を始め、すでに高いインクジェット技術を誇っていた。下田さんもその技術を熟知しており、トランジスタにも応用できると考えたのだ。

「インクジェットなら微小な液滴を狙ったところだけに吹き付けますから、ムダがありません。4色のインクの代わりに、半導体材料、絶縁体材料、金属材料、透明導電膜材料をセットすれば、描画ソフトで描いた絵をプリントする要領で、基板上に求めるパターンを描き、トランジスタができるのではないかと考えました」

しかし、あまりにも突飛な発想だけに、ほとんど誰からもまともに相手にされなかった。予算をつけようと会社にかけても断られ、100人ほどいた部下からも白い目で見られる。「半導体はそんなに甘くないですよ」とすら言われた。それでも下田さんはあきらめない。数人の有志が集い、通常の業務をこなしながらのチャレンジがささやかに始まった。

ポイントの1つは、トランジスタに求められるマイクロレベルの細かい解像度で図面を描けるかどうかだった。既存のソフトで試してみたところ、そのハードルはクリアできそうだという手ごたえをつかむ。しかし、最も大きな障害となったのが、半導体材料であるシリコンを「液体」にすることだった。

インクジェット印刷のポイントは、インクとして液体を使っていることにある。形があって拡散しないという固体の利点と、自由に形を変えられるという気体の利点を併せもっている液体だからこそ、狙ったところにムダなくプリントできるのだ。

「これまでのシリコン薄膜製造法では気体を使っていましたから、シリコンを気体にする技術はできていました。しかし、液体にする必要はなかったから、世の中に液体のシリコン材料は存在していなかったのです」

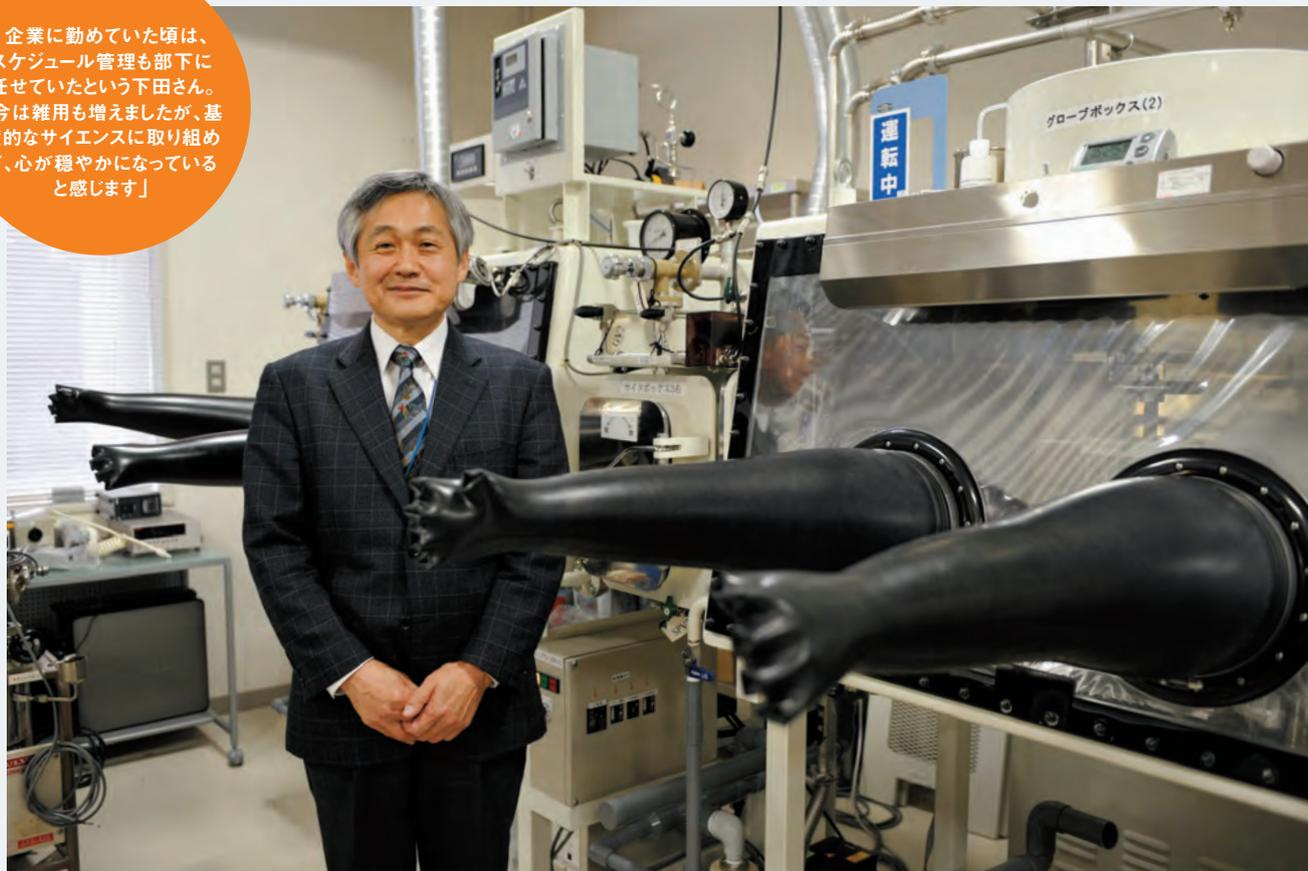
アメリカやヨーロッパにも答えを求めた結果、数年して、有機材料なら液体にして使えそうだという感触を得る。そして99年頃、ついにインクジェット印刷で製作したトランジスタを動かすことに成功。科学誌『サイエンス』にも掲載されて世界中の注目を集める。03年頃には、開発した液体シリコンが半導体特性を示すようになり、06年には『ネイチャー』に掲載された。インクジェット印刷による電子デバイスの製造は「プリンタブル・エレクトロニクス」と呼ばれる新しい潮流となった。

図らずも踏み入れた未知の分野で、多軸的に物事を眺めるという自らのポリシーを貫いた下田さんの姿勢が、これまでの常識を打ち破り、半導体製造の世界に大きな革命を起こしたのだ。

「液体を塗る」だけで太陽電池ができる

液体の隠されたポテンシャルを引き出せ!

企業に勤めていた頃は、スケジュール管理も部下に任せていたという下田さん。「今は雑用も増えましたが、基礎的なサイエンスに取り組めて、心が穏やかになっていると感じます」



液体シリコンを極める!

このまま小型化が進めば インクジェットでは対応できない

インクジェットを利用したトランジスタ製造に成功した下田さんのもとをJSTの担当者が訪れたのは、06年初夏のこと。研究総括としてERATOに応募してみないかとの誘いだった。「ERATOの総括なんて雲の上の人ばかりで、自分なんかとてもなれないと思っていましたから、驚きましたよ」

研究総括は、さまざまな大学や企業のトップクラスの研究者を束ね、導いていかなければならない。研究予算も大きく、責任も重い。当初はさすがに尻込みをしたが、担当者の熱意にも押されて応募を決意する。その裏には、これまでの成果を超える新しい研究開発を試みたいという思いがあった。

「ERATOの誘いを受けたのはインクジェットを利用した成果が目にとまったからだと思いますが、じつはその頃には、今後、トランジスタがどんどん小型化していけば、インクジェット

では対応できないことが明らかになっていたんですよ」

そのレベルはマイクロメートルを割り、100ナノメートルを切るところにまで突入していた。しかし、インクジェットの液滴の直径は15マイクロメートル。これではとてもトランジスタをつくることなどできない。この壁を越えるには、まったく新しい技術の開発が必要だと下田さんは考えていた。

「インクジェットのときの社内プロジェクト名は『マイクロ液体プロセス』でしたが、今度は新たに社内で『ナノ液体プロセス』という名の技術の検討をしていたのです」

ほんとうにこの試みを成功させたいと思うなら、ERATOというより大きなプロジェクトはよい機会ではないか—そう考えて応募を決め、見事に採択されたのだ。30年間近く勤めた会社を辞め、北陸先端科学技術大学院大学教授に転身することも決断。大きな挑戦が始まった。

分子構造や溶ける理由など 「なぜ」を1つひとつ解明

プロジェクトの当初のテーマの1つは、「液体シリコンを極める」ことだった。

「インクジェットで使える液体シリコンはできたとはいえ、それはたまたまできただけで、どうしてできるのか、詳しい分子構造や特性などはわかっていませんでした。そこを極めることで、秘めた可能性が見えてくると考えたのです」

特に解明が必要なのは、シリコンを「溶かす」技術の確立だった。液体シリコンとはいっても、固体のシリコンを高温で溶かして液体にしているわけではない。有機溶媒に溶かしてシリコンの溶液にして初めて、常温でも液体として扱える。しかし、半導体材料に使うような高分子のシリコンでは、沈殿してしまってなかなか溶けてくれない。インクジェットを利用した電子デバイス製造法の開発でも、苦勞した末にようやく溶かすことに成功したのだが、なぜ溶けたのかはわかっていなかっ

ただ、下田さん自身、その点が引っかけたはいたが、深めることはできていなかった。

「企業で求められるのは、使える材料を開発することで、『なぜか』は必要とされません。しかし、研究の世界ではそうしたサイエンスの部分が求められます。それに、インクジェットのとくのように既存の手法を使うのではなく、まったく新しい手法を開発しなければならない今回のプロジェクトでは、サイエンスとして液体シリコンを極めることが欠かせないと、私自身、考えていました」

そんな覚悟を共有した研究員と、分析装置を駆使して研究を続けた結果、どんな分子構造をしていてどのように溶けているのかが1つひとつ明らかにになっていく。それをもとに、インクとしての品質が保証できる「シリコンインク」を製造する手法が確立された。

研究の次のステップは、シリコン薄膜を作製するために「液体を塗る」手法の確立だった。基板にむらなくシリコンインクを塗っても、乾いたときには水玉模様のような点々とした状態になってしまうのだ。ファンデルワールス力(**)の仕業だ。

**ファンデルワールス力

オランダの物理学者ファン・デル・ワールスが提唱した、分子や原子同士が互いに引き合う力。氷の上で滑るのも、ハスの葉の上で水滴が転がるのもこの力による。

「インクジェットのとくにも同じ現象は起き、気にはなっていたのですが、当時はトランジスタとして使うためには問題がないため、やり過ぎていました。そこをきちんと解明しようと考えました」

真空から生まれるというこの不思議な力に下田さんは次第に魅せられ、「ファンデルワールスおたく」と自称するほど研究に没頭。その結果、光の屈折率の違いによってファンデルワールス力が左右されることを見出した。そして、それをヒントに溶媒の種類などを変えることでシリコンインクを均質に塗る手法も開発する。

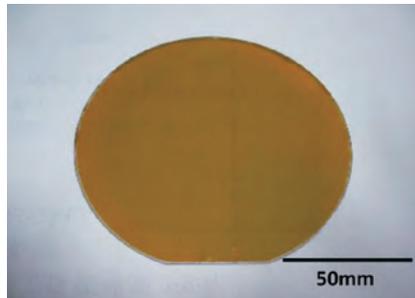
次の課題は、半導体としての特性の向上だ。液体シリコンを材料として利用するには熱を加えて構造を変えなければならない。しかしそのとき、半導体としての特性が失われてしまうのだ。だが、この課題もクリアした。熱を加えてシリコンの化合物の構造が変わるとき、分子の結合が1度切れてから再び結合するのだが、そこで切れたままものが存在することで、半導体としての特性が失われ

液体からの アモルファス・シリコン太陽電池の 製造

STEP01 シリコンインクの開発



STEP02 塗布膜技術の開発



STEP03 優れた半導体特性を持つ アモルファス・シリコン薄膜の開発

STEP04 塗布プロセスで高効率の 薄膜太陽電池を開発



「世界初」の
液体シリコンによる
太陽電池

る。研究の結果、分子の結合が「切れる」ときに「つながる」ときのわずかな温度の違いが見出され、「つながる」ときの温度をできるだけ保つことで、半導体としての特性を保つことに成功したのだ。

サイエンスを追求したことが 液体の可能性を引き出した

こうして1つひとつ課題をクリアするうちに、下田さんの頭には、「液体シリコンを用いた太陽電池もできるのではないか」という考えが広がっていった。

「太陽電池をつくるには、均一で広い面積の膜をつくる必要があります。液体シリコンは、ファンデルワールス力の問題もあり、そんな膜をつくるのは難しいと考えていたのです。しかし、均一の膜をつくることが可能になったことで、もしやと思い始めました。そして、シリコン薄膜の半導体特性が、太陽電池に求められる基準を超えたことで、これはできると確信しました」

太陽電池にするには、種類の違う半導体材料を層状に重ねなければならない。液体シリコンでは、これらが互いに交じり合ってしまうという課題があったが、それも、条件となる温度をコントロールすることでクリア。世界で初めて、液体シリコンを用いた太陽電池の作製に成功した。今後は、JSTの先端的低炭素化技術開発(ALCA)を通じた実用化への道も視野に入れている。

太陽電池ばかりではない。液体シリコンによるトランジスタの製造のほか、酸化物系の液体を用いたデバイス製造の研究も進んでいる。その過程で下田さんは、サイエンスを極めることの面白さと力を改めて感じているという。

「正直に言って、ERATOのプロジェクトが立ち上がったときには不安でいっぱいでした。『インクジェットの代わりに何を使うんですか』と問われて『頭を使います』と答えるしかなかったくらいです。しかし、『なぜか』を追い求めてサイエンスを極めるうちに答えが見えてきました。意外な物性も見出されて、当初は考えていなかった新しい可能性も見えてきています」

こうして下田さんは、液体の持つ隠されたポテンシャルを鮮やかに引き出した。しかし、もし液体シリコンと出会わなかったら、一企業人として人生を送っていたことだろう。もしかすると、下田さん自身が、液体シリコンによって研究者としてのポテンシャルを引き出されたといえるのかもしれない。■