Graphene gets ready for the big time

グラフェンが表舞台に躍り出る

Geoff Brumfiel Nature Vol.458(390-391)/26 March 2009

物理学者たちは、これまで基礎研究の対象であったグラフェンを実用化する方法について話し合うようになっている。

物理学者たちは今、グラフェンに夢中である。2009年3月16日から20日にかけて米国ペンシルベニア州ピッツバーグで開催された米国物理学会の会合では、炭素原子がハチの巣のような網目状に並んでできた、原子1個分の厚さしかない薄いシートについての話を聞くために、多くの物理学者が会議室に詰めかけた。多くのセッションには産業界（特にIBM）からの参加者がいて、グラフェンのトランジスタ、化学センサ、電極、スケールおよび周波数発生器についての講演を聴くことができた。

英国マンチェスター大学の物理学者 Andre Geim は、超薄の炭素シートが、ふだんはおとなしい物理学者たちを「サイの群れ」に変えたと話す。「今年は特に、応用への強い意識がこの分野を牽引しているように感じました」。

グラフェンの商業化の可能性については、だれもが楽天的であるわけではない。グラフェンにはいくつかの問題がある。特に大きな問題となっているのは、はっきりした「バンドギャップ」がないことである。コロンビア大学（米国ニューヨーク市）の電気工学者である Kenneth Shepard は、「バンドギャップとは、電子のエネルギー準位の間の隔たりのことであり、材料をト

ランジスタとして利用することを容易にするものです」と説明する。彼は、グラフェンが多くの問題を抱えていることを指摘し、この最新の材料にのぼせあがっている研究者たちが誇大宣伝に走る可能性を危惧している。

しかし、グラフェンは以前のカーボンナノチューブよりはるかに有望であると主張する人々もいる。マサチューセッツ工科大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の電気工学者である Tomas Palacios は、「ナノチューブは、基本的にはグラフェンを巻いたものであり、これを制御して既存の電子機器に組み込むのは困難です」という。均一で平坦なグラフェンは既存のシリコン技術と組み合わせやすいため、かつてナノチューブに取り組んでいた多くの研究者が、グラフェンに目を向けるようになっている。今年の米国物理学会の会合では、この変化がはっきりと現れていた。ナノチューブに関するセッションの数が16であったのに対して、グラフェンに関するセッションは28もあったのである。

グラフェンは、5年ほど前に Geim らによって発見された（K. S. Novoselov *et al. Science* **306**,666-669;2004）。その後、この材料の2次元性から異常な

シート状になる：グラフェンには太陽電池や柔軟なディスプレイへの応用が考えられる。

量子的挙動が生じることが示されると、グラフェンの研究は急速にヒートアップしていった（*Nature* **438**,201-204; 2005 参照）。グラフェンは、ある種の応用にとって魅力的な性質ももっている。電荷がグラフェンのシートの中を移動する速度は、シリコンの中を移動する速度の約4倍も大きいのだ。グラフェンの薄くて大きなシートは、柔軟で透明なものとなる。バルクのグラフェンがトランジスタとして動作しなくても、グラフェンのリボンなら動作する

かもしれない。また、グラフェンは非常に薄いので、隣接する原子がかすただけでも、その機械的・電気的性質を変えることができる。「グラフェンは魅力的な材料なのです」と、IBMのT. J. Watson研究所（ニューヨーク州ヨークタウンハイツ）のMarcus Freitagは語る。

シリコンに取って代われるか？

グラフェンの応用を現実のものにするためにはまず、材料を大量に合成しなければ

ならない。グラフェンはこれまで炭化ケイ素の基板上で形成されることが多かったが、炭化ケイ素の供給量は限られており、高価である。3月の米国物理学会の会合では、いくつかの新しい技術が紹介された。その1つは、エレクトロニクス産業で広く用いられている化学気相成長法によりグラフェンを形成させる方法である。韓国の成均館大学のByung Hee Hongは、この技術を使って直径10センチの薄膜を成長させることができたことを報告し、このサイズはすぐに2倍になるだろうと自信をみせた。「大規模なグラフェン膜を合成する技術は、長足の進歩を遂げました」とFreitagはいう。

このようにグラフェンの大量合成に取り組む研究者がいる一方で、グラフェンの利用法を模索する研究者もいる。グラフェンの最も直接的な応用法は、単純な電極として使うことである。コロンビア大学の物理学者Philip Kimは、酸化インジウムスズ（ITO）などの材料を使用した透明な電極はすでに商業的に入手できるようになっているが、柔軟性のあるグラフェンは、太陽電池やディスプレイへの応用において有利になるだろうと指摘する。

電荷がグラフェン中を非常に高速に移動できることなどから、グラフェンにはブロードバンドへの応用も期待されている。Palaciosによると、グラフェンを用いた送信器と受信器は、シリコンの数ギガヘルツに比べて格段に高い、数百ギガヘルツ（1ギガヘルツは 10^9 Hz）から数テラヘルツ（1テラヘルツは 10^{12} Hz）の周波数で動作できるはずであるという。動作する周波数が高ければ、より広い帯域を利用することが可能になるため、グラフェンはブロードバンド衛星通信への道を切り開くことになる。Palaciosの研究室の大学院生であるHan Wangが3月の米国物理学会の会合で展示した初期の実験では、データは1メガヘルツ（ 10^6 Hz）までしか得られていなかったが、Palaciosは強気である。「私たちは数か月後には

競争力のある装置を完成させているはずです」と彼はいう。

グラフェンがエレクトロニクス産業の基礎としてシリコンに取って代わることができるかどうかは、また別の問題である。グラフェンにバンドギャップがないことは非常に大きな問題である。最も明白な解決法は、グラフェンを離散的なエネルギー準位をもつリボン状に切断することである。しかし、複数のグループがピッツバーグで示したように、グラフェンのシートを切断すると、材料の端部にダングリングボンドという未結合手ができてしまい、これが望ましくない不純物を拾ってしまう可能性がある。米国カリフォルニア州のスタンフォード大学のXinran Wangは、アンモニアやその他の化合物を用いてグラフェン・リボンの端部を処理し、電荷の移動を多少容易にすることができたと報告した。それでも、リボンのぎざぎざの端から電子が散乱されるため、その性能は大幅に低下する。Shepardは、これらの知見を根拠に、グラフェンを使った素子を機能させることは極めてむずかしいと考えている。「私が生きている間に、シリコンに取って代わりそうな材料はありません」と彼は語る。

結局のところ、グラフェンに何ができ、何ができないかを断定するには時期尚早であるのかもしれない。さまざまな研究チームがモデルを提案し、その初期のグラフェン素子から得た生データを示したことで、彼らの多くが炭素材料の神殿の増築に取り組んでいる最中であることが明らかになった。あるトークの後に、英国ケンブリッジ大学のAndrea Carlo Ferrariが、スクリーン上に数枚のスライドを映写した。Ferrariは聴衆に、グラフェンを酸化させると赤外線レーザー光の下で輝くようになるらしいと告げた。データは新しく、その意味はまだはっきりしない。「この知見は何をもたらすのでしょうか？」Ferrariは肩をすくめていった。「わかりません」。