

# ETL NEWS



電総研ニュース

年頭のご挨拶

SiC パワー素子プロセスでブレークスルー

シンポジウム報告「材料研究・開発の新たな展開に向けて」

**2001.1** vol.612

# 年頭のご挨拶

所長 児玉 皓雄

皆さん、あけましておめでとうございます。

21世紀の幕開けにあたり、「電総研」の所長として21世紀の科学技術（産業技術）を先導していく皆さんに、年頭のご挨拶をする機会に恵まれましたことを非常に幸運なことと感じております。

21世紀はどのような社会になるのか、そこではどのような技術が必要とされ、また、どのような技術革新が社会を変えていくのか。事実、情報技術や生命科学の進歩はここ数年の間においてさえ、予測を越えて社会を大きく変化させつつあります。10年後、50年後、更には100年後の姿を思い描くことは、常に現実が予測を越えるという事実を知っている我々にとって、不可能に近いことです。むしろ我々が個々の技術に対して夢を持っていますか？次にはそれを実現するための長期的ビジョンを持っていますか？更にはこのビジョンを達成するための努力をしていますか？21世紀を迎えた今、皆さんに問いかけたいと思います。

本当に社会を変革する技術は、数年単位でなし得るようなものではないことを、我々は歴史の上からも十分認識しております。古きは、当所の歴史とも関わりの深い通信技術にしましても、1895年にマルコーニが1.7kmの距離での無線通信を成功してから、大西洋横断の無線通信が可能になるまでには僅か6年ですが、これが社会に普及し、社会を動かすようになったのは、1912年に北大西洋において豪華客船タイタニック号が氷山に衝突して沈没した事故を契機としております。しかも、研究の初期にあって、マルコーニはイタリア政府からの援助の拒否等の困難に直面しております。政府からの拒否をうけ、イギリスへ渡り郵政庁の技師長の援助を得て、ようやく実用化事業にこぎ着けたということでもあります。

最近では、既に7兆円産業に達したと言われる光産業に関しましても、我が国においては、当所、桜井健二郎氏の二十数年来に及ぶ、一方ならぬ努力の末であることを、皆様にもご承知おき頂きたい。桜井氏の

名は、桜井賞として残されておりますが、研究の初期においては、非常な困難があったと伺っております。また、私が深く関わって参りました、リチウム電池開発についてもやはり同様であります。現在では、1兆円産業にまで成長しておりますが、10年前は、産業界でのパートナー探しに非常な苦勞をいたしました。幸いなことに、それまでの技術の積み上げによって、揺るぎない自信と、長期的なビジョンとを持っておりましておかげで、現在のような状況を作り出すことが出来たと、自負しております。

皆さんも現在社会を動かしている技術について、個々にお考えいただければ、こういった事例が、かなり普遍的なことであることにお気づきになることと思います。独創的であり、社会的インパクトの大きな研究ほど、その初期においては過酷な環境に曝されるケースが多いものであります。所謂「出る杭は打たれる」であります。長い時間、困難な環境にも屈せず、それを跳ね返すためには、日々の研究の積み重ねと、その技術に対する長期的なビジョンが、更にはそれに基づく揺るぎない信念が必要になってきます。しかし、ここで皆さんに申し上げたいことは、「研究者は出る杭になれ」ということであります。当所の重大な使命の一つに、こういった研究の芽を育てて行くことがあります。「電子技術総合研究所」が「産業技術総合研究所（産総研）」に変わっても、この使命は変わりません。先ほど述べた事例でもわかるように、社会を動かすような技術の開発は、個人の力だけではなし得ない点多々あります。長期的ビジョンのもとに、研究の積み重ねを経た技術を有する個人が、組織と有機的に結びつき、組織そのものになった時に、初めてその技術が社会で認められる事になります。このようなプロセスにもまた、少なからざる時間が必要になりますが、このプロセスを怠ったために社会的に孤立してしまった技術は、例えそれがどんなにすばらしい技術でも、社会的に認知されないということ、我々は色々な例で知っております。また更に、社会がその存在を認めたにしても、その技

術を、社会が受け入れるか否かが、今後重要になることは明らかであります。

これまでの20世紀の社会は、大量生産・大量消費を基本にしたものでしたが、環境等の諸問題が明らかになってきた近年、社会の嗜好も多少の犠牲を払っても、「地球に優しい」物を選ぶ方向へ変化しつつあります。この変化を物語る博報堂生活総合研究所が出した興味深いアンケート調査のデータがあります。これによりますと、「地球環境保護を考え、そのための行動をしている」という人が、回答者の4割を越えているということです。更に「社会全体のためには不便も我慢する」という人は5割を越えたということです。このような傾向からは、21世紀の社会ではもはや、大量生産・大量消費の在り方は、根底から覆されるのではないかと考えられます。エゴ、つまり個別化という言葉はかつての日本では、あまり良い意味には用いられてきませんでした。しかし今後は、小児化問題や教育問題とも相まって、最も重要なキーワードの一つかもしれません。個人に適合したハードウェアとソフトウェア。これらを支える次世代の半導体技術や生命科学、更には超高速通信技術。遺伝子情報を利用した個人専用の医薬品や医療技術。場所や需要形態に適合したエネルギーソース。適材適所に用いられる様々な種類の材料等、21世紀の多様化・個別化した社会が必要とする技術が、既に垣間見られています。そしてその種は、既に我々の手の中にあると言えます。

21世紀が始まり、当所も産総研に移行致します。この移行は、従来型の研究所の組織をラボ制の導入により、柔軟性のあるフラットな構造に変革して参り



英国 NPL(National Physics Laboratory)にて副所長の Andrew Wallard 博士とともに。

ました当所を、更に大きな組織に成長させるものと考えております。個人や小規模のグループでは、社会に対する影響のサイズが自ずと決まってしまう。個々の研究グループの声も、社会に響き出すような大きさの組織、それが産総研であります。

新しいものへの移行に関しては、技術にしる、組織にしる、常に過去との比較がなされるものです。しかし、社会も着実に変化していることを忘れてはなりません。

このような変革に対して、組織の内側からのみ見てみると、我々だけがこのような事を行っていると思いがちですが、私が最近(12月10日~18日)訪問しました英国のNPLやドイツのGMD、またフランスのINRIA-Lorraine、LORIAにいたしましても、社会からの要請に応じて、研究内容はもとより、その組織自体までもダイナミックに変革させており、国立研究所が社会との関わりにおいて、問い直されているのは、なにも我々だけではないとの感をますます深くして帰国した次第です。

21世紀の科学技術に求められることは、社会の中にあつて、社会のために、社会と共に発展していくことでもあります。つまり政治・経済や、教育・文化との密接な関わりによって、科学技術は成長していくものであり、組織もまた同様であります。産総研はこのような要求に、柔軟に対処できるように設計をされておりますが、実際に変革を行って行くのは、他でもない、この電総研を発展させてきた皆さんひとりひとりであります。皆さんには十二分に産総研を変革させ、更には社会を動かしていく力をお持ちであります。まずは「電総研から産総研へ」、大いなる飛躍を期待して、新年のご挨拶といたします。



フランス INRIA-Lorraine、LORIA にて所長の Michel Cosnard 博士、研究部門長の Helene Kirchner 博士とともに。

# SiC パワー素子プロセスでブレークスルー コンタクト抵抗無視できるまで低減

## Breakthrough Technology in SiC Power Device Fabrication Contact Resistance Reduced to Negligible Level

先進パワーデバイス研究室  
材料科学部 ハードエレクトロニクス・ラボ  
Advanced Power Devices Lab.  
Materials Science Division, Hard Electronics Lab.

A suitable process for fabricating low resistivity n-type and p-type (0001) 4H-SiC contacts applicable to electron devices, such as MOSFETs and Schottky barrier rectifiers, is proposed. This process, including field oxide growth, opening of contact windows, contact material deposition and post-deposition annealing, has been successfully carried out. One notable feature of the process is that a self-aligning technique makes it possible to define just the contact metals in the contact windows, which can overcome problems resulting from interactions between the contact metals and the field oxide. Very low specific contact resistance in the range of  $10^{-7}\Omega\text{cm}^2$  is achieved for both n-type and p-type contacts.

### 1 .はじめに

熱損失、動作速度、降伏電圧、耐熱性で Si 半導体を凌ぐ性能をもつ SiC デバイスは、近年の環境保護志向の高まりと高品質の結晶が供給されるようになったことを契機に開発に拍車がかかり、日米欧の3極にわかれてさまざまな開発プロジェクトが立ち上げられ、実用化に向けた激しい先陣争いがくりひろげられている。日本では、当所と(財)新機能素子研究開発協会が、通産省ニューサンシャイン計画のもと、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受け、「超低損失電力素子の技術開発」として、平成10年度から5ヶ年計画でSiCのプロジェクト研究を展開している。具体的には、当所と新機能素子研究開発協会の会員である企業の研究者が、当所に集中研という形で結集して材料研究からデバイス化プロセスに関する基盤技術開発を行い、これと連携してデバイスメーカー3社が分散研という形で基本電力素子(パワー・デバイス)の開発を行っている。この中で、基盤技術開発の主要課題のひとつである「オーミック・コンタクトの形成技術」について成果が出てきたが(ETL NEWS 604号)今回プロジェクトの最終目標値をクリアする成果が得られたので、開発の背景も含めて紹介する。

一般に、半導体によるデバイスを構成するには、電気を流すために電極(金属)を形成する必要がある。このとき半導体材料の電気的特性を最大に生かすた

めには、この金属と半導体界面における接触抵抗が少ないオーミック・コンタクトが必要である。本プロジェクトの対象材料であるSiCの場合、実用レベルとしてこのオーミックの接触比抵抗値は $\rho_c=10^{-6}\Omega\text{cm}^2$ 以下のものが要求されており、本プロジェクトの最終目標も実用レベルでこの数値をクリアすることであった。今回、高性能が期待される4H(六方晶)SiC単結晶基板で、コンタクト抵抗値がn型領域で $10^{-7}\Omega\text{cm}^2$ 前半、p型領域で $10^{-7}\Omega\text{cm}^2$ 後半(ともに世界最小値)という値を得ることに成功し、パワー・デバイスの内部抵抗に占めるコンタクト抵抗の割合は0.01%以下(MOSFET)と無視できるレベルになり、実用的なオーミック・コンタクトを実現した。

### 2 .低抵抗が必要な理由

電力素子の電流経路に大きなコンタクト抵抗が寄生すると、抵抗の二乗と電流の積に比例する電力が熱として浪費される。つまり熱損失が発生する。この発熱は電力素子を加熱するので縮小化・集積化を阻む一因になっている。さらにコンタクト抵抗はスイッチング速度(電流をON/OFFするときの速さ)を落とすので、とくに高周波用途では悩みの種である。このようなわけで、SiC素子ではn型で $10^{-6}\Omega\text{cm}^2$ 以下、p型で $10^{-5}\Omega\text{cm}^2$ 以下のコンタクト抵抗が必要とされてきたが、これまでは適わなかった。

### 3 .なぜ難しいか？ (図1)

半導体Si基板にオーミック・コンタクトを形成するのに広く用いられている方法は、蒸着した金属膜を高温で熱処理(PDA)して基板と合金化させ、こうしてできたシリサイド電極とn型、p型領域を接触させる方法である。エネルギー・バンドギャップが狭いSi半導体( $E_g=1.1\text{eV}$ )では適当なシリサイド材料を選び、n型、p型領域のキャリア濃度を極端に高くすることで、非常に低抵抗のコンタクトができた。コンタクト抵抗の原因となるショットキー障壁を小さく、薄くできたからである。ところが、バンドギャップが $E_g=3.2\text{eV}$ (4H基板)とかなり広いSiCでは、金属膜が簡単に合金化しない、グラファイトCが電極内部に析出しやすいという現象があり、Siデバイスでのシリサイド電極的なものができにくい。またバンドギャップが大きい故に、欠陥や不純物原子があるとそれがそこにエネルギー準位としてしSiと較べてかなり深い準位を形成してしまう。そのためキャリアが捕えられてしまい自由に動けるキャリア濃度が上げられないことから、コンタクト抵抗の原因となるショットキー障壁を小さく、薄くできにくくなっている。とくにp型に対するコンタクトはn型の場合よりショットキー障壁が大きくなる傾向にあるので難関とされ、この解を求めて世界中で地道な研究が行われてきた。

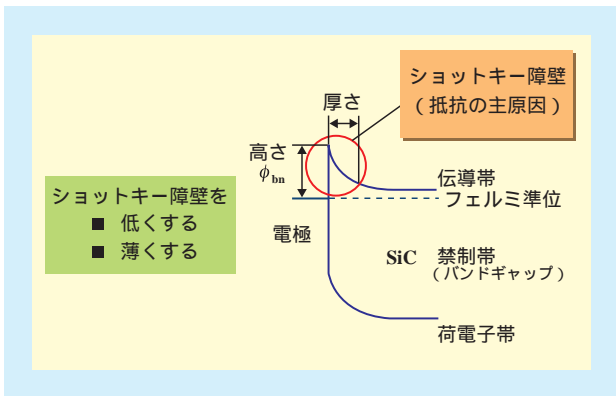


図1 コンタクト低抵抗化の方法

### 4 .世界最小のコンタクト抵抗

今回、入手可能な結晶多系のなかで電子移動度及び絶縁破壊電界が最も高く、高性能デバイスが期待される4H-SiC単結晶基板にn型、p型両方に対して低抵抗コンタクトを実現した。図2、図3はn型、p型伝導でわれわれが達成したコンタクト抵抗と従来の抵

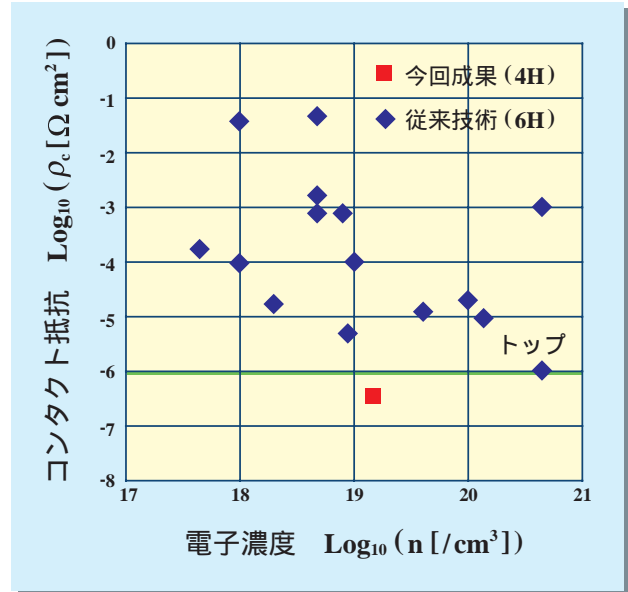


図2 従来技術との比較：n型コンタクト  
(注) 従来技術は下論文から引用  
"Crofton et al., Phys. Stat. Sol., 202, 581 (1997)"

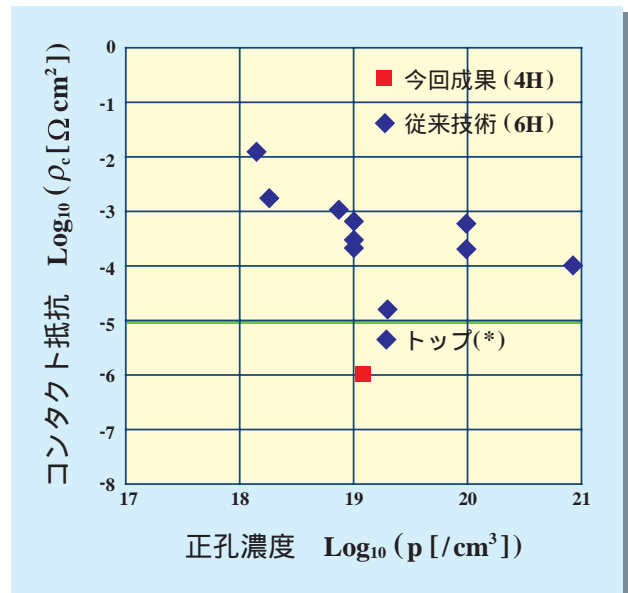


図3 従来技術との比較：p型コンタクト  
(注) 従来技術は下論文から引用  
"Crofton et al., Phys. Stat. Sol., 202, 581 (1997)"

抗値を比較したものである。横軸は接触領域のSiCの電子濃度、正孔濃度を表す。n型領域で $3.3 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ 、p型領域で $9.5 \times 10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ のコンタクト抵抗(specific contact resistance,  $\rho_c$ )を得た。この値は4H基板よりバンドギャップが狭い6H基板で報告されている従来のトップデータを下回り、ともに世界最小の値である。これら値が相対的に低いキャリア濃度で実現されてい

る点にも注目されたい。前述の実用化の要求値もn型、p型ともクリアした。

図4は低濃度のp型基板に形成した非常に薄いn型領域に、距離を変えて作った隣接する2つのn型コンタクトの間の電流と電圧の関係である。IV特性が直線になっているのはコンタクトがオーミック特性であること示している。このコンタクトは一平方センチメートルあたり10万アンペア以上の電流(有効電流密度)を流すことができる。電流 - 電圧特性の傾きから

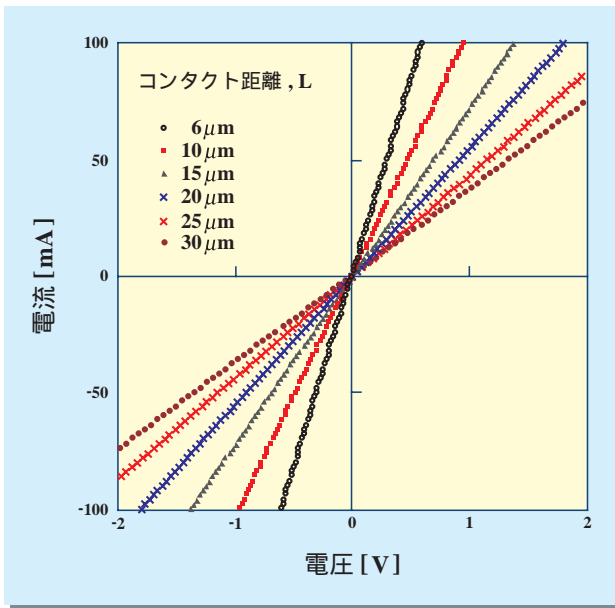


図4 コンタクト間のI-V特性

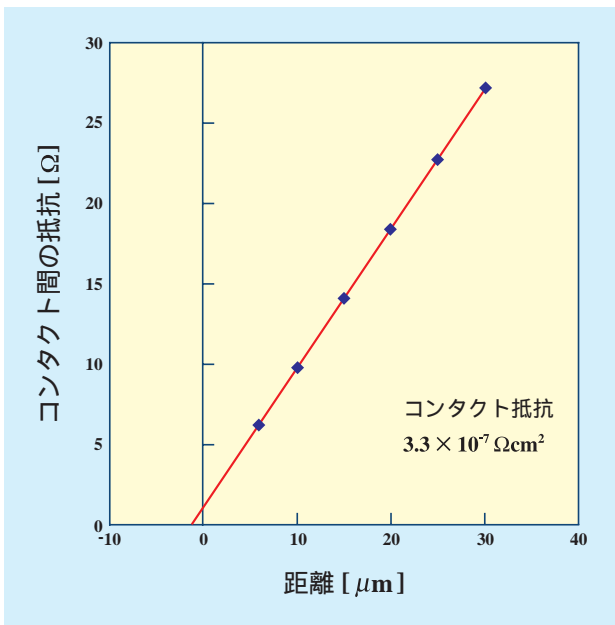


図5 TLM特性

算出される抵抗値は2つのコンタクトの抵抗とn型領域の抵抗の和に相当する。図5のように、コンタクト間の抵抗とコンタクト距離の関係(TLM特性)を回帰した直線のy切片は、コンタクトの抵抗(2個分)に等しい。前述のコンタクト抵抗 $\rho_c$ はこのようにして求めたコンタクトの実抵抗を、線形伝送線モデルに基づいて面積に依存しない普遍的な抵抗率に変換した値である。本稿では割愛するが、p型コンタクトでも図4、図5と類似した特性を示す。

### 5.改良のポイント

イオン注入またはエピ成長で形成した高濃度キャリア領域に、n型にはNi電極、p型にはTi/Al積層電極を真空蒸着して、高温で急速熱処理(PDA)をした。これら電極構成はSiCの世界では決して目新しいものではなく、急速熱処理もいくつかの研究機関から報告がある。しかし、従来のコンタクト抵抗低減の研究は電極材料選びと熱処理条件の最適化に集中していた。ほぼ同じ構造、方法でコンタクトを形成しているにもかかわらず、研究機関によって報告される抵抗値はまちまち、と言うよりも、何桁も違っている。

この事実に着目したわれわれグループでは、コンタクト抵抗を決定するのは電極材料と熱処理だけではないと考え、開発の初期からコンタクト構造(図6)とトータル・プロセス(図7)の最適化を進めた。SiC基板の熱酸化とCVDで形成した厚い酸化膜に開口したコンタクト窓にコンタクト・メタルを自己整合的に埋め込み、これにAlなどの配線を結線する構成にした(図6)。コンタクト・メタル下はPDAで形成された薄い反応層である。n型のコンタクト・メタルNiはPDAの時、酸化膜と強く反応し種々の問題を引き起こすため、コンタクト窓側壁との間に僅少な空隙を設けるようにした。プロセス上、最適化を図ったのは、基板の仕様、高濃度p型・n型領域の形成法、基板の洗浄法、電極蒸着前の表面処理、真空蒸着条件、加熱(アロイ)処理、配線の前処理などの各素工程とプロセス・フローである。素工程間のハンドリング(放置時間や環境など)もコンタクト抵抗に影響を与えることがわかったので厳密に管理し、細心の注意を払った。

### 6.Siプロセスとの高い親和性

学会レベルでの研究では構造や製作プロセスを単純化して、ややもすると、実際のデバイスの構造や製造プロセスをかえりみない手法になりがちである。

構造：

- ・高濃度層プロファイルの設計
- ・熱酸化+CVD酸化フィールド膜
- ・メタル選択（n型：Ni，p型：Ti/Al）
- ・薄い反応層
- ・開口部にメタル埋設
- ・異種コンタクト一括配線

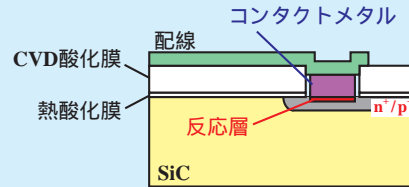


図6 改良のポイント

プロセス：

- ・徹底した前処理
- ・フィールド膜で清浄表面凍結
- ・多目的な「薄い」熱酸化
- ・清浄表面を汚さず露出 メタル成膜
- ・< CNT >，< MTL > は一回露光
- ・Self-Alignでメタル埋込み
- ・希薄酸素RTA

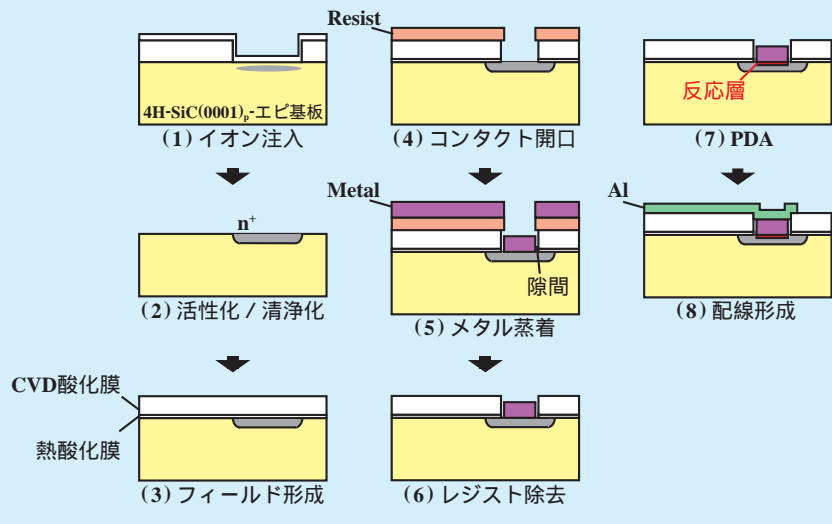


図7 コンタクト形成プロセス

たとえばp型コンタクトの最小抵抗値を記録した従来の方法（図3の\*印）は6H基板にCoとシリコンを積層した後、延べ7時間の熱処理を施すというものである。メタルの上にCVDでシリコンを積層する工程、長時間の熱処理工程は製造の現場ではなかなか採用できない。電極蒸着直前の表面処理法として多用されている酸処理洗浄や犠牲酸化/除去手法も、それ以前の工程でポリシリコン電極や別のコンタクト・メタルが形成されるデバイス・プロセスには、単純には適用できない。

これに対して、今回開発したオーミック・コンタクトはSiプロセスとの相性がよく、実デバイスの製造に組み込みやすい構造とプロセスが特徴である。図7

のフィールド形成工程(3)の後にゲート構造形成工程を付加したらMOSFETあるいはMESFETの製造工程に早変わりする。JFETのように基板の素子形成面にp型、n型両コンタクトが必要な場合にはコンタクト窓開口(4)～レジスト除去(6)をそれぞれのコンタクトについて行い、その後の熱処理はp型コンタクトもn型コンタクトも同時にできるようにした。n型ではこれまで難しいとされた薄い反応層、平坦な電極表面も実現した。

7.まとめ

通産省のプロジェクト「超低損失電力素子開発」で進められているSiCパワー・デバイス基盤技術開発に

において、オーミック・コンタクトの低減にかかる最新の成果を紹介した。

高性能が期待される 4H (六方晶) SiC 単結晶基板にコンタクト抵抗が n 型領域で  $10^{-7} \Omega \text{cm}^2$  前半、p 型領域で  $10^{-7} \Omega \text{cm}^2$  後半と極めて低い実用的なオーミック・コンタクトを実現することに成功した。これによりパワーデバイス (1kV 級の MOSFET) の内部抵抗に占めるコンタクト抵抗の割合は 0.01% 以下と無視できるレベルになった。

既存の Si プロセスと整合性が高いのも今回開発したコンタクトの特徴である。このコンタクトが電界効果トランジスタ - MESFET、MOSFET、JFET に適用できるかどうかを見極める共同研究が同プロジェクトに参加する国内半導体メーカー 3 社と始まっている。耐熱性の評価や実装の検討も平成 13 年度から開始する。

#### 用語説明

##### 炭化珪素 (SiC)

シリコンと炭素が 1:1 の割合で結合した高耐電圧、高熱伝導、高融点の半導体材料。存在する多数の結晶系の中で六方晶系の 4H、6H 単結晶基板、立方晶系の 3C 単結晶基板が、ごく最近産業用として製造されるようになった。半導体の性能指標として用いられるジョンソン指数とオン抵抗は、Si の、それぞれ、約 7 倍、3 百分の 1 (4H 基板) と、SiC が圧倒的に勝っている。

##### 電力素子

大電流 (あるいは大電力) を制御するトランジスタやダイオードなどの固体素子の総称。パワー・デバイスとも呼ばれる。エアコンなどでお馴染みの各種インバータ回路 (交電力直変換機) で多用される。

##### 抵抗の発生源

MOSFET (別項説明参照) の例で説明すると、ソース・ドレイン抵抗、ソース = ドレイン間のチャンネル抵抗、素子間または素子 = 外部回路端子間を結ぶ配線の抵抗 (配線抵抗)、配線 = ソース・ドレイン電極間のコンタクト抵抗

がある。今回の成果でコンタクト抵抗は実用上無視できるレベルまで低減できるようになった。

##### MESFET

金属 - 半導体構造電界効果トランジスタ

##### MOSFET

金属 - 酸化物 - 半導体構造電界効果トランジスタ

##### JFET

接合型電界効果トランジスタ

#### 「超低損失電力素子技術開発」計画

電力利用に伴う変換損失低減による資源の有効利用と環境負荷低減を目指し、平成 10 年度から平成 14 年度までの 5 年間、「ニューサンシャイン計画」の一環として行う通産省のプロジェクト。SiC 等のワイドバンドギャップ半導体を用いた超低損失・高速パワー素子の開発を基盤、応用両面から促進するために計画され、NEDO を介して素子協に委託された。当所と民間企業 10 社のほか 8 大学が参加している。参加企業は沖電気、関西電力、三洋電機、昭和電工、デンソー、東芝、日産自動車、日立製作所 (あいうえお順) である。

#### 米欧の SiC 関連国家プロジェクト

**SiCEP (スウェーデン)**: 98 年 ~ 01 年。材料、デバイス、システムの開発。リンチョピン大、ABB 社、Okumetrik 社など 9 団体が参加。

**SCEPTRE (英国)**: 98 年 ~ 00 年。高温、高出力パワー・デバイスの開発。ニューキャッスル大、ミッテル・セミンダクター社など 8 団体が参加。

**CPES (北米)**: 98 年 ~ 08 年。モジュール化まで視野に入れたパワー・エレクトロニクス素子の開発。レンセラー大など 4 大学と企業が参加。

\* このほか、企業の合従連合による民間提携がそれぞれシーメンス社 (ドイツ)、インフィニオン社 (ドイツ)、クリー社 (北米) を中心に進められている。

#### ラボメンバー (Lab. Members)

谷本 智 (Satoshi Tanimoto)

e-mail: s-tani@etl.go.jp

早見 泰明 (Yasuaki Hayami)

星 正勝 (Masakatsu Hoshi)

大串 秀世 (Hideyo Okushi)

荒井 和雄 (Kazuo Arai)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Devices Lab.)

材料科学部 (Materials Science Division)

材料科学部 (Materials Science Division)

## シンポジウム報告

# 「材料研究・開発の新たな展開に向けて」

材料科学部は、本年4月1日からの独立行政法人への移行・組織再編を踏まえ、今後の材料研究・開発の展開の在り方を展望するため、「材料研究・開発の新たな展開に向けて」と題するシンポジウムを、2000年12月26日当所視聴覚室において以下のプログラムにより開催した。ここにその概要を報告する。

### プログラム

#### 第一部 特別講演会

ナノテクノロジー：連携と融合の例題

田中 一宜 (JRCAT、プロジェクトリーダー)

Disruptive 技術の時代 (革新的な技術が生まれる時)

伊東 宇一 ((株)モリテックス、専務理事)

炭素電極を求めて 25年

金子 浩子 (筑波物質情報研究所、主任研究員)

#### 第二部 パネルディスカッション

パネラー：寺倉 清之 (産業技術融合領域研究所)、古賀 義紀 (物質工学工業技術研究所)

小林 直人 (量子放射部)、伊藤 順司 (電子デバイス部)

### シンポジウム開催にあたって

荒井 和雄 (材料科学部長)

材料科学部四十数人は、このたびの独立行政法人化の機構改革により、平成13年4月1日には9ユニット、1ラボに発展的解消をする。新世紀の始まりを前に、シンポジウムを開き、材料研究・開発の今後のあり方を展望する。

現在それぞれ異なる形で活躍されている3先輩に特別講演をお願いし、専門分野での動向をもとに材料研究と社会ニーズとのかかわりに関する示唆に富んだお話をうかがい、材料研究の新たな潮流、世界のIT革命の激流、ベンチャーの一つのあり方について学ぶ。また、新法人となっても材料研究と深い係わりをもつパネラーの方と、部の若手との意見交流のためのパネルディスカッションも行う。

前川元部長の下で行われた1988年の組織再編により材料部から材料科学部になって以来、「頑張って成果を出している人を応援する」という田中前部長の明快な方針のもとに、挑戦する雰囲気が助長された。それに加え「使われてこそ材料。遠くであれ、ニーズを描いた研究を。必要とあればどんな基礎も。」を

モットーとして部の運営にあたった。部の発展的解消は今回の再編がニーズ別に行われた故ではあるが、ニーズの実現に向けてステップアップした研究を展開するチャンスといえる。材料研究は、原理的優位性の発見・着想から材料合成・機能発現、広義のデバイス化へと進展する。実用化までには何段階もラセン的発展を経る。現行の技術の壁は厚く、開発には時間がかかる。重要な技術については、組織として、実用化への見通しを立てられるところまでシームレスに行える体制が必要となる。

実用化に最も近い研究開発である薄膜シリコン太陽電池は、ラボとしてさらなる発展に備える。ワイドバンドギャップ半導体による過酷な仕様にたえる「ハードエレクトロニクス」は、SiC、GaNは超低損失電力素子技術を実現するパワーエレクトロニクス研究センターとなり、ダイヤモンドは新炭素系材料研究開発センターで光機能の発現を狙う。当所オリジナルの低異方性銅系高温超伝導材料はエレクトロニクス研究部門で実用化への見通しをつける。磁性材料の研究は、スピントロニクスとしてMRAMや光磁気半導体機能の新たな研究を展開し、エレクトロニクス研究部門の一翼を担う。光材料は、超高速ス

イッチング材料・機能の研究を光技術研究部門で発展させる。極微小光回路や有機分子・結晶材料の研究は、ナノテクノロジー研究部門で萌芽的研究の発展を期す。計算材料科学の研究者たちは、次世代半導体研究センター、計算科学研究部門へと活躍の場を選択した。

材料科学部はこれまで「プロセス診断によるプロセス制御」など独自のコンセプトと文化を醸成してきた。新組織の中でこうした役割をどこが果たせるかがかりなところではあるが、部の諸氏が新たな活躍の場で、新たな文化の担い手になることを願う。材料研究は深い専門性ととも、適時の技術の合従連衡を必要とする。発展的解消をしたことにより、さらにネットワークを広げ、組織の壁にこだわらず研究が展開されることを願う。

### 特 別 講 演

#### ナノテクノロジー：連携と融合の例題

田中一宜

ナノテクノロジーは、数ナノメートルから数10ナノメートルの長さの世界でモノを作り、量子効果や表面効果などそのサイズ特有の物理的・化学的・機械的性質を利用しようとする技術の総称である。大事なことは、ナノテクノロジーが、21世紀において、エレクトロニクスやバイオテクノロジーを含む総ての産業に不可欠の学際的・業際的な共通基盤技術であること、そして何よりも、基本的には「ものづくり」の技術である、ということだ。ITやバイオテクノロジーについては日本は米国の後塵を拝した。しかし、「ものづくり」日本が、ナノテクノロジーで後れを取るとは許されないだろう。これが基本認識である。ITやバイオテクノロジーも、ナノテクノロジーの下支えなしでは発展を期待することは難しい。

昨年1月、米国が発表した「国家ナノテクノロジー戦略(NNI)」は、21世紀の最も重要な技術領域としてナノテクノロジーを位置づけ、長期的な基礎研究プロジェクトとして2001年会計年度に500億円余を要求したものであった。これの特徴は、高額の研究費要求にあるのではない。6省庁の異分野の専門家がワーキンググループを組み、民間も巻き込んで調査を行い、3年以上かけて国全体の長期的なプランを練り上げたプロセスにある。その結果、半導体からバイオ、

医療応用など広範な領域を融合した素案に仕上がっている。

日本はどうか。残念ながら、省庁間で連携して戦略を作成することなど、縦割り行政の現在の日本では困難である。一部の例外を除いて、各省庁のナノテクノロジー関連プロジェクトはお互いローカルに林立しているだけで、戦略の糸で結ばれてはいない。国全体のプランに責任を負う総合科学技術会議の成熟には、まだ時間がかかるだろう。一方、組織だけでなく、研究者側の閉鎖的なマインドも問題である。横の連携と異分野融合をどう伸ばしていけば良いだろうか。

実は、類似の問題が、筆者が部長になった前後の材料科学部でも盛んに議論されたことがある。各研究室は半導体、磁性体、ガラスなど材料で縦割りにされている。それらを横につなぐ材料研究はなにか、部としての戦略テーマはないのか。そのような中で生まれたのが、材料部の横断的テーマとしての特別研究「反応過程制御による新材料合成技術に関する研究」(1987-1991)であったと記憶する。国と部を同じ俎上で論じる訳にはいかないが、縦割りの壁をこわして横系をつないでいく作業は本質的に同じ、つまりフラクタル構造をなしている。組織であれ、研究者個人であれ、周囲に対する興味を失い異文化との積極的な関わりを避けると、大局観や機動力が減じて柔軟な戦略を生み出すことができなくなるだろう。

材料部特研の精神を敷衍したナノテクノロジープロジェクトがJRCATのアトムプロジェクトであると筆者は考えている。米国のNNIとは規模が違うものの、バイオを含む学際・業際領域としてのとらえ方や産学の直接参加を実現した集中共同研究体制は、NNIと軌を一にし、NNIに先駆けること8年、1992年にスタートしている。100名の研究者のうち7割くらいが3-4年で入れ替わるという流動性、バイオとナノの融合、理論と実験の融合など、従来よりはるかに柔軟な運営が実現されている。

グローバル化が進行する中、連携と融合は国の戦略作成上のキーワードであり、ナノテクノロジーはそれがもっとも先鋭に反映される分野である。人事交流など縦割り構造を打破する制度的な工夫もさることながら、材料科学部ががって実施してきた様な研究者の主体的な横への動きに期待するところ大である。結局は人なのだから。

## Disruptive 技術の時代 (革新的な技術が生まれる時) 伊東 宇一

### 1 .パソコン通信から始まった

おかしな音を立てていたHDDがクラッシュした。バックアップをさぼっているところという事がおきる。3ヶ月のデータが消えた。HDDクラッシュは、はじめての経験だった。これに懲りて、バックアップ用のHDDも積めるノート・パソコンを買った。パソコンは7代目だ。早いものだ。最初のアップルを買ったのは92年だった。高かった。50万円した。車を買うような気分。7代目のノート・パソコンも同じくらい。性能は格段にアップした。CPUは700MHz、HDDは12GB、DVD装備、技術の進歩を実感する。それでも遅いと思う自分がいるのも驚きだ。

パソコン通信を始めたのは、93年だった。随分と苦労した。メーラ、モデム、プロバイダーとの接続。どれもトラブル。メーカーと連絡をとりながら解決するのに半年もかかった。こんなにも苦労しながら始めたのは、ボストンに生まれたスタートアップ段階のベンチャーを日本から応援するためだった。ビジネスプランをメールで交わしながらブラッシュアップするには、e-mailは便利な道具だ。インターネットに切り替えたのは、95年。パソコンも4代目になった。インターネットを通じて、ビジネスに関する問題を議論、勉強する新しい人間関係が生まれた。

米国ではインターネットを活用することにより生産性が向上したといわれている。1985年頃、設立間もない研究所を米国シンシナチに訪問したことがあった。各人の机にはアップルのパソコンが置かれ、全員がネットワークでつながれていた。景気が落ち込んでいた米国で、15年前に次の時代を狙う準備をしていた。米国にベンチャーが数多く生まれた一つの理由かもしれない。誰でもが仲間とビジネスを話し合うことができる世界がある。インターネットを利用したビジネスが生まれたばかりではなく、インターネットのおかげで将来のビジネスを語り合う機会が増えた。光ネットワークが必要になったのも、インターネットの爆発的な増加に起因している。

### 2 .光がこんなになるとは

1999年にサンディエゴのOFC(光ファイバー会議)では1万人の参加者に驚いた。2000年ポルティモアでのOFCでは1万8千人にまで増えた。驚きではなく

これが常態になった業界がそこにあった。ファイバーオプティクス(光エレクトロニクスと呼んでいた分野も含まれる)は、北米を中心にフィーバーしている。インターネットの基幹インフラを作る光ネットワーク産業が生まれた。

従来技術で構築してきたビジネスモデルは、Disruptive(既存の技術あるいはビジネスを完全に崩壊させてしまうような)技術が出現すると、突然のように変わる。生まれたばかりのDisruptive技術は荒削りなために、従来技術ではカバーできない、ニッチな市場から参入し始める。例えば、パソコンは少数のオタクによって熱狂的に支持された。メインフレームから見るとビジネス規模も小さく、収益も低いために無視された。ところが、Disruptive技術とビジネスが成長すると、既存の従来技術(ビジネス)の領域にも侵入し始める。気がつく、従来技術(ビジネス)は、突然のように小さな存在に変わっている<sup>1)</sup>。

インターネットと光ネットワークの両分野で、これが起きている。Disruptive技術を市場に出すには過去に実績を持たず、小さな収益でも熱狂できるベンチャー組織が向いている。従来技術で収益をあげている巨大企業は、収益性の良い従来型ビジネスと比べて、収益が貧弱なDisruptive技術(ビジネス)には入れない、という矛盾を抱えている。

### 3 .ベンチャー達との出会い

出歩くことが好きな落ち着かない性分から、生まれたばかりのベンチャー会社とのビジネスを求めて、ベンチャーを各国に訪ねてきた。街の発明家が生み出すベンチャーもあるし、大学あるいは研究所がベンチャーの中心にいるケースも多かった。

いろいろと思い出す。サンタバーバラに、赤外の放射光出力測定装置で、R&Dの雑誌で今年の発明賞を受賞した会社を訪問したとき、社員達は机に段ボールを置き、会社を辞めていく準備をしていた。米国政府の軍事予算削減の影響を受けて、会社はほとんど倒産寸前だった。

シカゴでは、電力用銅コネクターから携帯電話用の電磁波シールドに事業展開をはかって、地元のモトローラと共同開発、急成長している会社を訪問した。この会社を探り当てるには苦労した。雑誌の紹介記事で見つけ、記事を書いた記者に電話、紹介してもらった。親爺さんは、弁護士をやめて、趣味のモータサイクル好きから、金属プレス工場経営を始めただけに、独特のパーソナリティを持った人だった。

米国の大手企業からスピンオフした台湾の起業家、大学の先生が始めたロシアの起業家、シリコンバレーに飛び出したロシアの起業家、大学の研究室中心に生まれたドイツの会社、リスクをとってハイテクベンチャーに乗り出す人達との出会いを思い出す。

英国ケンブリッジに、インクジェットのベンチャーを訪問したことがあった。ここには研究所で研究開発された技術を持ってスピンオフした、インクジェットプリンターの会社が5社集まっている。競争相手がすぐそばにいる環境は、技術を切磋琢磨するのに向いているとも言えるが、競合会社に技術者が引き抜かれるのは困るとぼやいていた。

#### 4 .ベンチャー（新産業）を生み出す大学、研究所

大学あるいは研究所は、自分たちの持つ独自の技術をベンチャーに技術移転して積極的に支援する方式、あるいは中からスピンオフしていく仲間を支援することで、新たに産業を生み出す努力をしている。

当所からも何人が留学しているカナダのCRC（通信研究所）は、ケン・ヒルが発明したファイバースラッググレーティング（FBG）を周囲のベンチャーに技術移転をしてきた。FBGは、光ネットワークでは、波長固定、波長平坦化デバイスとなるキーデバイスの一つ。彼らの技術移転のおかげで、オタワからモントリオール近郊に多くのFBGベンチャーを生み出した。ケン・ヒルは気さくな人で、当所からきた人達のことを高く評価していた。彼もついにスピンオフして会社を作ったと最近聞いた。

MITは、2000以上のベンチャーを生み出したと誇る。自分で会社を作りたい人達が入学してくるから生まれ易いといえるかもしれない。学生達が自主運営で開催するビジネスコンテストには毎年多数のベンチャーの卵たちがビジネスプランを提出して競う。MBAの教授、ベンチャーキャピタリスト、成功した起業家等が審査委員として加わり、厳しいコメントをだす。これもまた卵達にとっては勉強の材料になる。

SBIR(Small Business Innovation Research)、ハイリスクな研究開発型ベンチャーに米国政府各省から出されるファンドだ。申請書には技術的な独自性だけではなく、マーケティングに基づくビジネスプランが要求される。研究者の思いこみだけで市場から求められている製品でなければ、開発してもビジネスにならない。と判断される。ファンドの提供の仕方も、会社内での開発に似ている。認められれば資金は各フェーズの最初に振り込まれる。借金をして研究開

発を行い期間が終了してから資金を振り込まれる方式ではないから、ベンチャーにとっては助かる。第1フェーズでは、独自の技術の可能性を予備的に確認する。目標とした成果を達成したベンチャーは第2フェーズに進む。この段階でプロトを作る。第3フェーズは量産試作になる。

スタートアップのベンチャーには、ボランティアでボードメンバーを勤める風土がある。成功した企業家や大手会社の部長クラスが休みをとり、ボードメンバーとして参加、会社のビジョン、方針、運営について経験からきた手厳しいコメントをだす。次の世代を鍛え育てていこうとしている。そうそう、最近ではCEO&Founderというタイトルの名刺が増えた。リスクをとって挑戦するFounderを尊敬する風土がある。

#### 5 .地道に

ベンチャーを応援してきた経験から思うのは、市場からの要求を見つけだし、独創的なアイデアを地道に着実にものにする事の重要性。技術は、独自のアイデアを地道にこつこつと研究開発を積み重ねることで本物になっていくと思う。他と違うアイデアを見つけだし、可能な限り早く実現化する。ビジネスも似ている。他と同じモノを製造販売しても勝てない。先行した会社の後追いにしかならない。他が持たない、あるいは気がついていないモノもしくはビジネスモデルを見つけ、誰よりも早く、世に提供する。ベンチャーのように小回りの利く組織は、Disruptive技術(ビジネス)が現れる時代にふさわしい。光ネットワークの分野では、北米を中心に次から次へとベンチャーが生まれている。木の香りも新しいオフィスで、生き生きと将来のビジョンを語る元気のよい彼ら、彼女らと会うと元気な魔法の国にきたように嬉しくなる。技術者の時代が来たのかもしれない。

1987年ころ米国のある研究機関で、日本の光共研の活動を詳細に報告した資料をみたことがある。当時、米国は景気が落ち込んでおり、政府からの研究開発資金も少なくなり、一方で日本は積極的に光エレクトロニクスを振興しているという警戒感から、研究者達は米国政府に必死に働きかけていた。この資料もその一環だった。超LSI研究所に始まり、競合する各社が共同して基礎的な研究をするスタイルは、日本で生み出した、新しい研究開発手法だと思う。米国でも、日本を見習ってコンソーシアムと呼ぶ類似の研究スタイルが生まれた。

83年に米国が落ち込んだとき、おもだった企業人

は「日本を見習え」と激をとばし、MITからは「Made in USA」という調査報告書が出版された。日本の組織の優れた点と欠点を徹底的に調査研究し、学問の分野では「組織行動学」が見直され、より深化した時代でもあると思う。落ち込んだ時代にこそ、じっくりと基本に戻って問題を研究し、次の時代に備えていくことがいかに大切かを教えてくれる。

#### 参考資料

- 1) The Innovator's Dilemma, when new technology cause great firm to fail: Harvard Business School, 1977 by Clayton M. Christensen  
邦訳 イノベーションのジレンマ(技術革新が巨大企業を滅ぼすとき) 翔泳社

## 炭素電極を求めて25年

金子 浩子

### 1 .はじめに

電総研35年間の在職中、電気分析化学と大型電池開発研究の狭間で、私は「電極が研究や仕事の成否を分ける」ことを常に実感してきた。この間、扱う電極材料はマクロからマイクロへと変わってきたが、この考えは、定年退職後6年近くなった今でも変わらず、電気化学に関わる多くの人達の思いでもあると考えている。この思いが電総研退職を機に、私達が良い電極だと思っている炭素微小電極を世の中に出そうと思う motive force になったのである。

### 2 .炭素電極とのなれそめ

1975年、つくば移転5年前、電力貯蔵用レドックス・フロ-型(RF)電池の研究開発がスタートした。まず、その電池電極として、非腐食の炭素布を使用することになり、その電気化学的特性の評価を始めたのが、炭素電極とのつきあいの始まりであった。炭素繊維は日本で育ち、世界一の量産を誇る材料であり、軽くて強靱な特性から、構造材、スポーツ用具など広範囲に使用される優れた素材である。大型電池の電極には、電流を多く流すため大面積が要求され、この観点から、炭素布や、今では、炭素繊維フェルトが使用されている。

### 3 .マクロからマイクロへ

炭素布電極を電池の電極として評価し、その特性

が明らかになるにつれ、電極として開発されたのではないため、その炭化まえの素材や製法により電極特性が大変異なることがわかってきた。その電極の良否が炭素表面の(構造か、組成か、表面残基か)何に依存するのかを明らかにしたかった私達(野崎、根岸、金子)は、まず、布の構成糸を極限のCarbon Fiber(CF)にまでほぐして、微小電極として評価する方法を開発したいと考えた。

丁度その頃、生物電気化学の分野で、ラットの脳内を刺激したり、脳内外の神経伝達物質を検出する手法として、CFを電極とする電気化学計測が米国で行われ始めた。CFサイズの炭素微小電極の簡易理論解析法を開発すれば、我々のCF電極の定量的評価も可能になり、マイクロ電極の分野にも寄与できると考え、早速大学の先生と共に、電極反応の解析法を開発した<sup>1)</sup>。その後、計測用電極開発の時点まで、その先生とは変わらず研究上のつきあいを続け、現在も親しくしている。

### 4 .シャ-プペンシル芯から計測用電極へ

布状やフェルト状の炭素電極の特性評価が一段落したあと、次は「濃厚イオン含有、強酸性電解液のレドックス反応の解析をどうしよう」という課題に突き当たった。液を薄めるとイオン種の状態が変化してしまうため、濃厚なまま計測したかったが、市販のポテンシオスタットで、3mmφのGC(Glassy Carbon)電極では、電流が流れすぎてオ-バ-してしまうのである。水銀電極では正極反応が見られない、白金電極では負極反応が無理、電極の評価に使った炭素布やフェルトをほぐして作ったCFマイクロ電極で計測したいところだったが、その頃のCF電極の特性は、炭素系の抜き取り場所ごとに異なっており、とても計測用電極としての役には立たなかった。思いあぐねていた1987年頃、シャ-プペンシル芯(シャ-プ芯)がオ-ル炭素から成ると仲間から薦められたのが、私のその後の計測用炭素電極を探すライフワークの端緒となったのである。

### 5 .「ライフワーク」のスタート

「いつでもどこでも手に入り、電極特性が変わらず、電位窓が広くて、特性のよい計測用炭素電極があればどんなにか便利なのに!」という思いを、シャ-プ芯素材が満たしてくれそうであった。ところが、それを実現するには、素材や製造方法(その生まれと育ち)による炭素の特性の差を理解しながら、電極活性

な表面を維持してゆく努力が続けられる協力者が必要であり、その協力者は材質と技術の継続という(地味だが大切な)仕事を背負うことになる。もしこのような炭素電極の標準となれそうな細い電極が、いろいろなサイズで、いつでも入手できれば、電気分析化学や実分析、さらに濃厚電解液の研究やバイオ系の研究などにも役立つのではないかと考えた。また、この炭素の表面には活性な残基が豊富なので、修飾電極のよい基盤にもなれると考えてきた<sup>2)</sup>。

## 6 . 協力者を得て

シャ - プ芯素材で特性の良い微小炭素電極を創りたいとの願望に、上記の考えを理解した三菱鉛筆社の協力が得られて、10年以上、今も変わらぬ協力の下、品質管理されたシャ - プ芯素材から、いろいろなサイズ(0.05~0.5mm $\phi$ )のGRC(Graphite Reinforced by Carbon)や(0.5~3.0mm $\phi$ )のPFC(Plastic Formed Carbon)電極が生まれた。

## 7 . 小さなベンチャ - 起業

これまでに見出した良好なCF素材の電極や、電解電極として使える布状やフェルト状の炭素、シャ - プ芯素材から生まれたGRCやPFC電極などを、自分では多目的に使える良い電極だと思ってきた。もし、これらの電極を、電極探しをしている人達に、これまで蓄積してきた情報を添えて提供できれば、電気化学の分野の発展の一助になるかもしれない、との思いが高じて、電総研退職を機に、この計画を始めてしまったのである。

## 8 . (有) 筑波物質情報研究所

その計画の根拠地は(有)筑波物質情報研究所<sup>3)</sup>にある。ここはいま、「国の研究所などを定年で退職したが研究を終了したわけではない。在職中に得た技術を社会に還元したい。」と考える、同じ思いの仲間が、各自のライフワークを追いかけるときのStatusであり、Positionとなっている。

いまここで、私は「カタログは? 広告はどうしよう? home page もほしい。営業、税金対策、特許対応は?

商標もほしい、応用実験もしたい。研究ボランティアも・・・。」と電総研在職中より忙しい(?)と云いつつ(少々遅い社会勉強をしているつもりで)毎日を過ごしている。

## 9 . 夢に向かってスタート

電極のマイクロ化は電気化学の分野での今後の課題であり、これまで開発してきた、先端部がCF電極並に細く基幹部はシャ - プ芯並の太さの電気抵抗の小さい先細型の電極や、反応物質を炭素内部に内蔵したGRCセンサ - 電極、GRC電極の表面の感応残基が多いのを利用するセンサ - 基盤など、多面的な機能性センサ - の母体として期待し、開発を進めて行きたいと考えている。

そして、退職4年後の昨年春、ようやく、電気化学会での展示会に参加出来たのを端緒に、営業を始め(<http://www1.ocn.ne.jp/~tmil>)、これらの電極類が本当にその真価を示す場所を得てくれるようにと期待し、夢をふくらませているところである。

### 参考資料

- 1) 青木、金子、根岸、野崎、J.Electroanal.Chem., 247(1988) 17-27,29-36
- 2) 金子、ぶんせき、311-315(1995)
- 3) 金子、Boundary、12-13[8](1997)



突然のコールだったが材料科学部のメンバーが集まった。  
(全体の約半数)