

## 結晶工学が拓く次世代材料－若手研究者への期待－

東京農工大学工学府／科学技術振興機構 佐藤勝昭

**Abstract**－シリコンテクノロジーは、微細化の限界を迎えつつあり、この限界を突破するためには、革新的なコンセプトによるデバイス、およびそれを実現するための材料が必要とされている。また、環境や省エネルギー、省資源に配慮したデバイスや材料へのニーズも高まっている。この小文では、私が個人的に興味をもっているスピントロニクスを中心に次世代材料につながる話題をとりあげ、現代的ニーズをもった材料開発のために結晶工学の役割がいかにかに重要であるかについて述べ、従来のコンセプトにとらわれない斬新な発想をもった若手研究者への期待を述べたい。

### 1. はじめに

2005年12月発行のCrystal Letters No.30「結晶工学分科会50周年記念特別号」において、藤崎幹事長（当時）は、「20世紀後半、エレクトロニクス産業が飛躍的に成長し、私たちの生活をも大きく変革させる発展をとげました。日本の結晶工学が今日のエレクトロニクス隆盛に世界的な貢献を果たしたことはまぎれもない事実です。この発展を支えた仕組みは、ひたすら微細化を追求し製品の製造単価を下げることで市場を拡大し、その結果、エレクトロニクス産業は大きな利益を享受し、その利益をまた投資するというビジネスモデルでした。その微細化技術も2020-2030年頃には物理的な限界を迎え、いままでのビジネスモデルが崩壊するのではないかと危惧されています。」と書き、「いままでエレクトロニクスを支えることで飛躍的に発展してきた結晶工学もそろそろ別の土俵を探索する時期に近づいているといえるでしょう。・・・ちょうどADP研究会が設立されたころの初心に立ち戻り、逆境をバネに換え再発展の基礎を気づくべき時期かもしれません。」と結んでおられます。また、筆者は、同じCrystal Letters No.30の「結晶工学の未来」と題した小文の中で、「結晶に対するこだわりを捨て、結晶工学が培ってきた技術を、結晶を含む広範な材料科学において活かしていくことが、発展の鍵であると信じている。」と書きました。結晶工学のノウハウは、今後の材料・デバイス開発・評価に大きな役割を果たすはずです。以下では、私がこのところ興味を持っているトピックスを紹介しながら、結晶工学が果たすべき役割についてのべて行きたいと思います。

### 2. いまスピントロニクスが熱い

物質科学研究の中で、いま最も熱い分野がスピントロニクスではないでしょうか。

電子のもつ2つの性質である電荷とスピンは、しばらく前までは別々に取り扱われ、独立に発展してきました。電気と磁気の相互変換には電気→磁気はアンペールの法則、磁気→電気はファラデーの電磁誘導の法則と、いずれの変換にも電磁気学、したがって、コイルが使われておりました。もちろん、金属や磁性半導体において、キュリー温度付近でスピン依存散乱が起き電気抵抗率が高くなること、強磁性体において異方性磁気抵抗効果や異常ホール効果など電気輸送現象が磁化に依存することなど、電気伝導現象にスピンが関与することは1960年代までに多くの研究があり<sup>1</sup>、理論的にもかなり解明されていきました<sup>2</sup>が、当時の技術では、磁気的な相互作用は物質固有のいわば作りつけの性質であって、人工的に制御するなんてことは夢物語に過ぎませんでした。

状況が大きく変わったのは、半導体分野においてEsakiら<sup>3</sup>によって創成され、その後の結晶工学の発展によって確立したナノサイエンス、ナノテクノロジーが磁性の世界にまで波及した1980年代後半からでした。1986年になって、Grüenbergは強磁性金属／非磁性金属／強磁性金属からなる人工的な超

構造において、磁性体層間に反強磁性的な結合が生じることを見出したのです<sup>4</sup>。これを受けて、1988年、Grünbergのグループは磁性体/非磁性体/磁性体の3層構造で<sup>5</sup>、Fertのグループは磁性体/非磁性体の人工超格子において<sup>6</sup>、独立に巨大磁気抵抗効果(GMR)を発見し、スピントロニクスという新しい分野の幕が切って落とされました。人類はコイルを使わずに磁気から電気への変換をするすべを手にしたのです。GrünbergとFertには2007年日本国際賞<sup>7</sup>が、ついでNobel賞<sup>8</sup>が授与されたことはご存じの通りです。

GMRの発見から時を置かずして、IBMのParkinらはGMRを利用した磁界検出素子Spin Valveを開発し<sup>9</sup>、ハードディスクドライブ(HDD)に実装しました。Spin Valveの導入によって、微細な磁区から生じるわずかな磁束の検出が可能になり、HDDの高密度化がそれまでの10年10倍のペースから10年100倍のペースに急展開したことは記憶に新しいことです。

同じ時期に、磁性/非磁性の人工格子において、磁性層間に働く交換相互作用が非磁性層の層厚に対して数ナノメートルの周期で、強磁性→反強磁性→強磁性→・・・と振動的に変化することが発見されました<sup>10</sup>。ナノテクノロジーの確立によって、人類は、ついに交換相互作用さえも人工的に制御する手段を手にしたのです。

磁性と伝導の関係にさらなるブレークスルーをもたらしたのは、Miyazakiによる1995年の磁気トンネル接合(MTJ)における室温での大きなトンネル磁気抵抗効果(TMR)の発見で、TMR比\*は18%におよびました<sup>11</sup>。MTJとは2枚の強磁性体層で極めて薄い絶縁物を挟んだトンネル接合で、磁化が平行と反平行とで電気抵抗が大きく異なる現象です。スピン偏極トンネリング自体は、1980年代から知られていたおり<sup>12</sup>、磁性層間のトンネルについて先駆的な研究<sup>13</sup>も行われていたのですが、トンネル障壁層の制御が難しく、再現性のよいデータが得られていなかった

のです。Miyazakiらは成膜技術を改良して、平坦でピンホールの少ない良質のAl-O絶縁層の作製に成功したことがブレークスルーとなりました。この発見を機にTMRは、世界の注目するところとなり、直ちに固体磁気メモリ(MRAM)および高感度磁気ヘッドの実用化をめざす研究開発が進められました。

そして2004年、TMRは革命的なブレークスルーを迎えます。Yuasaらはそれまで用いられてきたアモルファスAl-Oに代えてMgO単結晶層をトンネル障壁に用いることで、200%におよぶ大きなTMR比を実現しました<sup>14</sup>。その後もTMRは図1のように伸び続け、最近では500%に達しています<sup>15</sup>。これにより、TMRが実用に供せられることになったのです。TMRヘッドは2004年に、MRAMは2006年に市場に投入されました。障壁層にMgO単結晶を使うと高いTMRが得られるということは、Butlerらによって理論的に予言されていたのですが<sup>16</sup>、結晶性のよいMgOの成膜技術の確立があつて初めてブレークスルーが得られたのです。まさに結晶工学の成果と言えるでしょう。

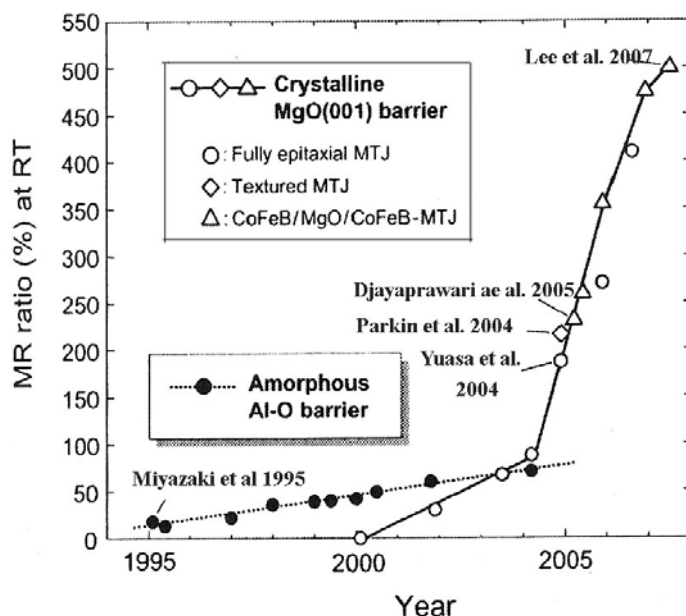


図1. トンネル磁気抵抗効果の進展のグラフ  
[S. Yuasa: 第45回茅コンファレンス予稿集(2007.8.19) p.19]

\* TMR比は、向かい合う2つの磁性層の磁化の向きが磁化の向きが平行のときの抵抗  $R_{\uparrow\uparrow}$  と反平行のときの抵抗  $R_{\uparrow\downarrow}$  との差を平行の抵抗で割った百分比で表されます。  $TMR(\%) = (R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow}) / R_{\uparrow\uparrow} \times 100$

1999年、新たなスピントロニクス分野としてスピン注入磁化反転のアイデアがSlonczewski<sup>17</sup>およびBergerら<sup>18</sup>によって提案され、実験的に検証されました<sup>19</sup>。強磁性電極からスピン偏極した電流を反平行なスピンをもつ対極強磁性電極に注入すると、スピン角運動量のトルクが対極電極の磁化にトランスファーされて磁化反転をもたらすというのです。当初はGMR素子によって  $10^7\text{-}10^8\text{A/cm}^2$  という大電流密度を必要としたので実用は無理であろうと言われていましたが、現在ではMgO-TMR素子を用いて  $10^6\text{A/cm}^2$  台の実用可能な電流密度にまで低減することができるようになりました<sup>20</sup>。これまではMRAMの記録のためには電流を流してそれが作る磁界で磁化反転をして記録していたので電力消費が集積化のネックでしたが、スピントルクを使うとMTJ素子に電流を流すことによって磁化反転できるので、高集積化が可能になります。かくして、ついに人類は、コイルによらずに、電気を磁気に変換することに成功したのです。

スピントロニクスにおける最近の最も大きなトピックは「スピン流」の制御という概念です<sup>21</sup>。電荷の流れとしての電流は、平均自由行程（数 10nm）で表される散乱を受けるのですが、スピンの流れは電子の不純物やフォノンとの衝突の際にあまり散乱を受けないためスピン拡散長は平均自由行程よりかなり長くmmに達することさえあるのです。スピン流の舞台は、かならずしも磁性体である必要はなく、非磁性の金属でも半導体でもよいのです。最近ではなんとグラファイトの1層（グラフェン）においてもスピン流を注入できることが明らかになってきました<sup>22</sup>。スピン流をうまく使えば、散逸の影響を受けずに情報を伝えることができるはずです。

スピン流の性質を端的に表しているのがスピンホール効果です。普通のホール効果は磁界下に置かれたキャリアがローレンツ力で電流に垂直な方向に曲げられる効果ですが、スピンホール効果では、電流が流れるだけで、スピン軌道相互作用の効果で上向きと下向きのスピンの左右に分離され、電流と垂直方向にスピン流を生じるのです<sup>23</sup>。この現象によってスピンの蓄積がおきるのですが、これはKatoによってn型半導体において磁気光学的に観測されました<sup>24</sup>。ナノテクノロジーを使うことによって、スピン流が電流に変換される逆スピンホール効果も直接観測されるようになりました<sup>25</sup>。

スピントロニクスのもう1つの流れは、磁性半導体です。1991年、Munekata, Ohnoらは低温MBE成長によってInAsに大量のMnを添加することによってキャリア誘起強磁性を発現することに成功しました<sup>26</sup>。Ohnoは1996年にGaAs:Mnにおいてキュリー温度( $T_c$ )が120Kの強磁性を発見しました<sup>27</sup>。 $T_c$ は、結晶成長技術の進展によってどんどん高くなり、 $\delta$ -ドーピングによって250Kにまで高くなっています<sup>28</sup>。特筆すべきは、磁性半導体をLED構造へのスピン注入電極として用い、発光の円偏光性が制御できることがOhnoグループとAwschalomのグループの共同研究によって明らかにされたり<sup>29</sup>、InMnAsの磁性がキャリア誘起であるために、FET構造を作ることによって、キャリア密度を制御し、そのキュリー温度、ひいては磁化をゲート電圧で制御できたりすることです<sup>30</sup>。ここでもコイルを使わずに電氣的に磁性を制御できることが実証されています。金属系と同様のトンネル接合が磁性半導体でもできています。Tanakaらは磁性半導体を用いてTMR素子を作ることに成功しております<sup>31</sup>。そして、磁性半導体の場合、 $10^5\text{A/cm}^2$  台の低い電流密度で磁壁を動かせることが確認されています<sup>32</sup>。

このように、スピン注入、スピン蓄積、スピン緩和などスピン流の制御は、CMOSに代表されるSiのデバイスが限界を迎えつつあるいま、それに代わる新しい革新的次世代デバイス技術の芽として熱い視線を浴びているのです。スピン科学は、ナノという舞台を得て、大きく育ちつつあります。Nagaosaは、強磁性体における異常ホール効果をベリー位相という量子論の深淵のコンセプトで説明し、彼は固体の中に宇宙論が成立すると言っています<sup>33</sup>。この分野は進歩が速すぎて一時も目が離せないほどです。理論と実験がかみ合って、新しい世界が開かれる予感を感じます。

### 3. いまふたたび化合物半導体

半導体の最近の動向については、結晶工学分科会のメンバーは私より遙かにお詳しいと思いますので、ここでは、簡単に流れだけをお話ししたいと存じます。(この項では、あえて引用文献を挙げません。)

いま、シリコンの限界が近づいたと言われているのですが、1980年代にもシリコンの限界が叫ばれ、ポスト・シリコン材料として III-V 族化合物半導体が救世主になるとしてもはやされた時期がありました。多くの新進気鋭の研究者が参入し、III-V 族の電子デバイスは大きな進展を見せました。特に、エピタキシャル成長技術の確立によって半導体超構造の作製が可能となり、それとともに界面における電子状態の解明が進み、それを利用した電子デバイスとして HEMT が実用化されました。現在のよう、GHz を超える超高周波が私たちの身近な生活に当たり前のように使われる状況は、III-V 族半導体電子デバイスなくしてはあり得なかったでしょう。また、III-V 族は直接遷移型バンドギャップをもつということから、光エレクトロニクス、特に、半導体レーザの分野において不動の地位を築きました。このことは、まさに、結晶工学の果実といっても過言ではないでしょう。

これまで、シリコンテクノロジーは、実にしぶとく、限界を超えてきました。これに対し、化合物半導体は、MOS 構造が作れないという根本的な問題を克服できず、電子デバイスにおいてシリコンに代わるというパラダイムシフトは起きませんでした。その結果バルク単結晶への市場のニーズは伸びず、参入した多くの会社が手を引いてしまいました。電子デバイスに使えないとなると、バルク GaAs 結晶への熱もさめ、GaAs 基板単結晶の欠陥密度はいまだにシリコンのレベルには遠く及ばない状態のままです。

一方のシリコンテクノロジーも、メタルゲート・高誘電率絶縁膜スタック技術、浅い接合技術などさまざまな工夫により、ポスト・スケーリング技術を開発して、限界を突破しようとしています。化合物の再登場を本気で求めるのであれば、バルク成長の基礎に帰って徹底的に結晶性の改善と、シリコン MOS に代わり得る革新技术の開発を図ることが必要でしょう。

光エレクトロニクスにおいて確固たる地位を築きつつある GaN をはじめとするワイドギャップの化合物半導体は、高い電子飽和速度をもち、温度耐性も高く、次世代高速電子デバイス・大電力デバイスとして大いに期待されています。ワイドギャップ半導体を電子デバイスに使うための基礎研究も進んできました。しかし、GaN や ZnO をシリコンに代わる電子デバイスとして用いるには、結晶性の大幅な改善が必要でしょう。これらの結晶性は、上に述べた GaAs に比べてさえ大きな遅れがあります。半導体デバイスのブレークスルーは、常に結晶工学の進展によってもたらされたことは、歴史の教えるところです。若手の結晶工学研究者のチャレンジを期待します。

### 4. カーボンナノチューブ<sup>34</sup>

カーボンナノチューブ(CNT)は、Iijimaによって炭素繊維の高分解能電子顕微鏡観察の際に発見されました<sup>35</sup>。CNTは、グラファイトの1枚の層であるグラフェンを短冊状に切って丸めて作った継ぎ目のない円筒です。(グラフェン内では炭素原子は蜂の巣状の六方晶格子を作って配列しています。)これを単層ナノチューブ(SWNT)といいます。多数の円筒がぴったりと重なって入れ子になっている多層ナノチューブ(MWNT)もあります。直径は1-10nm、長さは長いものでは10 $\mu$ mに達するものもあります。丸めるときに斜めに巻いてつなぐこともできます。これをカイラルナノチューブと呼びます。六方晶格子の単位ベクトルを $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  とすると、カイラルベクトル $\mathbf{Ch}$ は $\mathbf{Ch} = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$  ( $n, m$ は整数)で定義されます。角度をつけずに( $n=0, m=0$ )つないだときには炭素原子はジグザグに並びますが、 $n=m \neq 0$  のとき

30° の角度となり原子は2つずつペアになって凹凸になるアームチェア構造をとります。アームチェア構造のCNTは金属的なバンド構造を示します。バンド構造は $n$ と $m$ の差が3の整数倍の時金属的に、その他の $(n, m)$ の組み合わせでは半導体的になります。

CNT の物性の研究が進むにつれ、その特異な電子輸送特性が明らかになってきました。金属的な特性をもつ CNT では、フェルミ面付近のバンドの分散関係( $E$  と  $k$  の関係)が直線になります。このとき理想的には弾道的な輸送が期待されます。また、電圧・電流特性は、200mV 以下では直線ですが、数 V の高電界になると飽和するように曲がってきます。電気抵抗  $R$  を電圧  $V$  に対してプロットすると  $V$  に対して直線になります。また、この特性は温度に依存しないのです。この特性は、光学フォノンによる散乱によって説明でき、平均自由行程は数  $\mu\text{m}$  になると考えられます。また、CNT の表面にはほとんど真性の欠陥がありませんから欠陥による散乱が無視できますから、数  $\mu\text{m}$  にわたって弾道的に電子が輸送されるのです。通常のリソグラフィで金属配線の配線幅を 10nm 以下にすると、断面積が減ることと、表面や粒界による散乱のため電気抵抗が高くなりますが、CNT で配線することができれば、金属より高い電流密度を期待できるのです。銅配線では  $10^7\text{A}/\text{cm}^2$  の電流密度でエレクトロマイグレーションを起こして断線するのですが、CNT では配線長が散乱長より短ければ  $10^{10}\text{A}/\text{cm}^2$  もの電流密度の電流を流すことができると言われています。また、このことを使って高い電流密度が必要なビア（半導体や絶縁層にあけた小さな孔を通して2つの金属層間をつなぐ配線）に CNT を使うことができれば、ビアの径を小さくできるという期待もされています。

さらに、半導体微細化の限界が叫ばれる根拠の一つである発熱の問題にもCNTが大きな力を発揮することがわかってきました<sup>36</sup>。CNTは高い熱伝導性と優れた耐熱性とを備えているのです。Berberらの理論研究によれば、室温におけるSWNTの熱伝導率は  $6600\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  と見積もられています。これはダイヤモンドの熱伝導率  $2000\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  を遙かにしのいでいます。今のところ、実験的には、 $1000\text{--}2000\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  という値が報告されていますが、いずれにせよ熱伝導性が優れていることは確かなようです。

CNT を電界効果トランジスタ(FET)に用いることも試みられ、シリコンの MOSFET に匹敵するか、それを上回る特性を示すことも報告されています。CNT だけで回路を作ることも可能であるという楽観的な見方を示す人もいます。

しかし、現実問題として、CNT を基板上にきちんと配列して配線に使うのは、至難の業です。CNT を制御性よく作製する技術の確立が望まれています。ここにも結晶工学の出番があります。若手の方、是非がんばってください。

## 5. 「さきがけ研究」佐藤領域について

筆者は、今年度発足の新しい戦略的創造研究事業（さきがけタイプ）「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」の研究総括として、研究テーマを公募しました。この研究領域は、文部科学省の戦略目標「新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発」に沿って設置されたものです。文末に戦略目標を付録としてつけてあります。

公募要領には、次のように書きました。

『CMOS に代表される既存のシリコンデバイスには微細化の限界が目前に迫っており、従来とは異なる革新的な原理に基づいた新規デバイスの開発が求められています。そこで、この研究領域では、CMOS の延長ではない次世代エレクトロニクス・デバイスの実現に結びつく新しい材料の開拓、デバイス構造やプロセスの開発に向けた独創的かつ挑戦的な研究提案を募集します。上記の「エレクトロニクス・デバイス」とは、電荷を制御・輸送する従来型のデバイスにとらわれず、スピン、軌道状態、準粒子、ボ

ルテクス、光位相などさまざまな物理量、あるいは、それらの複合体の制御・輸送・蓄積を行うデバイスを含めます。対象となる材料は特に限定せず、半導体、金属、セラミクス、有機材料まで幅広く捉えています。選考にあたっては、将来の産業化を見据えた提案であるかどうかを重視しますが、現行の技術水準をもってしては実用化が困難なデバイスを目指していても、将来のイノベーションを見越して産業化が可能な提案であれば対象となります。』

本年度は、3月に公募を開始し、108件の応募がありました。11名のアドバイザーの先生方、6名の外部評価者の先生方のご協力を得て、書類選考によって25課題がヒヤリングの対象となり、11課題を採択しました。応募された提案は優れたものが多く、選考会議では熱心な議論が交わされました。ここでは、研究が基礎研究として優れているという視点だけでなく、その研究が戦略目標にどのように結びついているのかについてもしっかりと検討しました。基礎にしっかりと立脚しながら、目的を持った研究推進を行うというJSTの事業の位置づけを明確に意識しました。研究総括の専門性を意識して応募があったためでしょうか、応募の研究分野の分布にやや偏りがあり、結果的に、7名がスピントロニクス関連、2名が分子エレクトロニクス、2名が半導体デバイスの分野でした。マテリアル的には、半導体、誘電体、金属、ハーフメタル、有機物、ナノカーボン、メタマテリアルと多岐にわたりました。研究手法としては、実験9名、理論2名。研究機関としては、大学9名（国立大学6名、私立大学3名）、独法研究所2名でした。男女別では、男性10名、女性1名でした。

あと2回（平成20年、21年）公募があります。次回にはぜひ、今回応募の少なかった分野（ワイドギャップ半導体、有機・分子エレクトロニクス等）からの応募をお待ちしています。今年、惜しくも採択されるにいたらなかった応募者も、ぜひ、研究計画を練り直して、再チャレンジしてください。また、男女共同参画推進のため、女性研究者の応募を歓迎します。さらに、beyond-CMOSをめざす企業研究者の応募も歓迎します。なお、あくまで個人型研究であることをご理解の上応募ください。

10月から研究がスタートしています。私は、北海道から九州におよぶ採択された全研究者の研究室に、サイトビジットと称して訪問させていただき、上司・研究機関のご理解とご支援をお願いするとともに、研究者と研究方針についてディスカッションを行ってきました。いずれの方々も、若手ながら目標をしっかりと持って、自信をもって新しい研究に挑戦しておられる様子を拝見して、大変感銘を受けました。今後、領域会議やシンポジウムを通じて、徐々に、佐藤領域のチームカラーを打ち立てていきたいと考えています。このプロジェクトが、採択された研究の推進に、そして次世代デバイスの礎作りに力になればと願っています。

## 6. おわりに

この小文では、シリコンCMOSを超える次世代の材料開発に向けて、私が関心を持っている分野を中心に私の視点で概説し、新しい分野の展開やブレークスルーがいかに結晶工学に依存しているかについて述べ、これからの若手研究者へのメッセージを込めました紙数の都合で、スピントロニクスと化合物半導体、および、ナノカーボンに話題を限らせていただきましたが、私自身は、有機エレクトロニクス、強相関電子系、超伝導エレクトロニクスにも強い関心をもっています。機会を改めてご紹介できればと思っています。

最後に、私が研究総括として本年度からスタートしたさきがけのプロジェクト「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」のねらいと、選考経過・選考結果の一端に触れ、次回からの応募への期待を述べました。

## 付録一 文部科学省 19 年度戦略目標

「新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発」（概略）

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/001/07021516/007.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/001/07021516/007.htm)

文部科学省は、19 年度戦略目標の 1 つに「新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発」を掲げ、施策を進めている。以下では、この戦略目標について、あらましを紹介しておく。

上記の戦略目標は既存のシリコンデバイスの特性を超越する新概念・新構造に基づく次世代デバイスの創製を目指すものであり、「ナノ・材料」分野の戦略重点科学技術のうち、次の 3 つに密接に関係する。

- ①イノベーションを生む中核となる革新的材料・プロセス技術
- ⑤デバイスの性能の限界を突破する先端的エレクトロニクス
- ⑨ナノ領域最先端計測・加工技術

CMOS に代表される半導体集積回路(LSD)で使うシリコンは、電子情報社会の今日の発展に欠かせない材料であり、国民の生活を支える基盤材料とも言える。半導体製造技術は日々高度化され、CMOS の微細加工精度がナノ領域に及ぶなど、ナノテクノロジー技術と不可分な関係にある。ところが、このシリコン CMOS の生産ラインにおける微細化が極めて困難になる hp(ハーフピッチ)32nm が目前に迫っており、従来のシリコン CMOS とは異なる新概念・新原理に基づいたデバイスの開発が求められている。我が国では、1980 年代以降、ポスト・シリコン材料の探索とデバイス開発のために積極的な研究投資がなされ、世界的に見ても優れた数多くの萌芽的研究成果を持つこととなった。

JST 戦略的創造研究推進事業においても、ナノテクノロジー分野別バーチャルラボとして、平成 14 年度より「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」の戦略目標の下、「非シリコン系半導体材料を用いた次世代デバイス用材料の開拓」、「新概念の論理回路・情報ストレージ等の構築のための強相関材料の開拓」、「分子エレクトロニクスに関連する材料の開拓」等のプロジェクトにおいて、優れた研究シーズを創出してきた。

一方、諸外国、特に米国は、NSF(National Science Foundation)が中心となって、複数の産学連携組織\*)による「ハイリスク・ハイリターン」な研究開発を進めている。なぜ基礎サイエンスを担当する NSF がイニシアチブを取っているかと言えば、シリコン CMOS の延長では対応できない「次世代エレクトロニクス(Beyond CMOS)への壁」を突破できた国こそが、10~15 年後のエレクトロニクスの覇権を握ると認識しているからに他ならない。

シリコン CMOS での微細化に限界が見えた今こそ、我が国が持つこれらの優れた研究資産を活用し、イノベーションとして生かす重要な時期であり、本戦略目標は喫緊に取り組むべき最重要課題である。

今後迎えるユビキタス・情報ネットワーク社会では、ネットワークの高速化、コンテンツの大容量化に伴って、高度に集積化された CPU やメモリーデバイスの実現が必須となる。以下、本戦略によって将来実現しうる代表的な成果のイメージを列挙する。

Ga-As, In-Sb などの化合物半導体、GaN, AlN, ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体の開拓：  
→高い移動度・高い飽和速度を利用した超高速・低消費電力デバイスにより、次世代のモバイル機器の実現が可能

強相関材料(含む超伝導材料)の開拓：→電子のスピン・軌道制御により、新原理に基づいた超高速の論理回路素子や高密度の不揮発性メモリーへの展開が可能

カーボンナノチューブや量子ドット等の新材料・新構造デバイスの開拓：→ナノレベル・分子レベルでの加工性に基づいた単一電子デバイス、自己組織化を利用したナノ構造転写技術の確立が可能

有機分子材料(高分子/低分子)の開拓：→軽量で衝撃に強く携帯性に優れたフレキシブルデバイスの創製が可能。

このように本戦略は、数多くのイノベーションを創出する革新的なもので、社会・経済的要請にも十分応えるものである。

---

参考文献

- 1 たとえば、G.K. White and R.J. Tainsh: Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 165.
- 2 A. Fert and I.A. Campbell: Phys. Rev. Lett. 21 (1968) 1190.
- 3 L. Esaki and R.Tsu, IBM J. Res. Develop. 14 (1970) 61.
- 4 P. Grünberg, R. Schreiber and Y. Pang: Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442.
- 5 G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbad, W. Zinn: Phys. Rev. B 39 (1989) 4828.
- 6 M.N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friedrich, J. Chazelas: Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2472.
- 7 [http://www.japanprize.jp/prize/2007/j1\\_fert\\_grunberg.htm](http://www.japanprize.jp/prize/2007/j1_fert_grunberg.htm)
- 8 [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2007/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/)
- 9 S. S. P. Parkin, Z. G. Li and David J. Smith: Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 2710.
- 10 S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche: Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2304.
- 11 T. Miyazaki, N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139 (1995) L231.
- 12 R. Meservey, P.M. Tedrow, P. Flulde: Phys. Rev. Lett. 25 (1980) 1270.
- 13 S. Maekawa, U. Gäfvert: IEEE Trans. Magn. MAG-18 (1982) 707.
- 14 S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando, Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) L588.
- 15 Y. M. Lee, J. Hayakawa, S. Ikeda, F. Matsukura, H. Ohno : Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 212507.
- 16 W. H. Butler, X.-G. Zhang, T. C. Schulthess, J. M. MacLaren: Phys Rev. B63 (2001) 054416.
- 17 J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159 (1996) L1.
- 18 L. Berger: Phys. Rev. B 54 (1996) 9353.
- 19 E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, R. A. Buhrman: Science 285 (2000) 865.
- 20 久保田均, 福島章雄, 大谷祐一, 湯浅新治, 安藤功児, 前原大樹, 恒川孝二, D. Djayaprawira, 渡辺直樹, 鈴木義茂: 日本応用磁気学会第 145 回研究会資料「スピン流駆動デバイスの最前線」(2006.1)p.43
- 21 大谷義近: 第 31 回 MSJ サマースクールテキスト(2007.7.11-13)p.109.
- 22 M. Ohishi, M. Shiraishi, R. Nouchi, T. Nozaki, T. Shinjo, and Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. (Express Letter) 46 (2006) L605.
- 23 S. Murakami, N. Nagaosa, S.C. Zhang: Science 301 (2003) 1348.
- 24 Y.K. Kato, R.C. Myers, A.C.Gossard, D.D. Awschalom: Science 306 (2004) 1910.
- 25 安藤和也, 齊藤英治: 固体物理 42 (2007) 495.
- 26 H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmüller, L.L. Chang, L. Esaki: Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 1849.
- 27 H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye: Appl. Phys. Lett. 69 (1999) 363.
- 28 A. M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka: Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 17201.
- 29 Y. Ohno, D.K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno and D.D. Awschalom, Nature 402 (1999) 790.
- 30 H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani: Nature 408 (2000) 944.
- 31 M. Tanaka and Y. Higo: Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 026602.
- 32 千葉大地, 北智洋, 山ノ内路彦, 松倉文礼, 大野英男: 日本応用磁気学会第 145 回研究会資料「スピン流駆動デバイスの最前線」(2006.1)p.7.
- 33 永長直人: 固体物理 41 (2006) 877, 同 42 (2007) 1, 同 42 (2007) 487.
- 34 CNT の項全般については、Rainer Waser 編、木村達也訳「ナノエレクトロニクス(上)」(Wiley-VCH, オーム社, 2006) セクション 19, p.797 の記述を参考にさせていただきました。
- 35 S. Iijima: Nature 354 (1991) 56.
- 36 山本貴博, 渡辺一之, 渡邊聡: 固体物理 42 (2007) 365.