

NE

1-2
2006



NIKKEI ELECTRONICS
日経エレクトロニクス

研究開発 物理に還る

Leading Trends
ISSCC 2006の見どころ

Leading Trends
電子ペーパー, 相次ぎ市場に

Buyers' Guide/選わない材料選び
家電向け吸音材

Guest Paper
マルチコア時代のデバッグ技術

Interview
米Microsoft, 強さの秘密は研究開発にあり

Keyword
燃料電池

物理学の中に宝が成長

物性物理学をはじめとする物理学そのものの発展が、こうしたメーカーの期待を後押しする。

例えば、強相関系材料の分野で最近になって常識を覆す新材料が次々に生まれたのは「金属酸化物の成膜技術や材料探索の技術が飛躍的に向上したことが大きい」と、東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻教授の十倉好紀氏は語る。1986年に金属酸化物系で高温超電導体が発見されたのをきっかけに、この現象の解明に膨大な研究費が投じられた。その結果、従来は金属酸化物では難しかった原子層1層単位での薄膜形成が可能になるなど、多くの副次的な成果もたらされた⁴⁾。

理論と実践を橋渡しする計算機シミュレーションの実力が実用水準にまで高まりつつある点も見逃せない。「計算機シミュレーションをはじめとする解析の技術にはいくらでも投資しろ」。キヤノン 代表取締役社長の御手洗富士夫氏が発した号令の下、同社は、研究開発の現場に大規模なクラスタ構成のコンピュータ・システムを導入した。同社は、第一原理計算¹⁾をはじめとする計算機シミュレーションが、新たな材

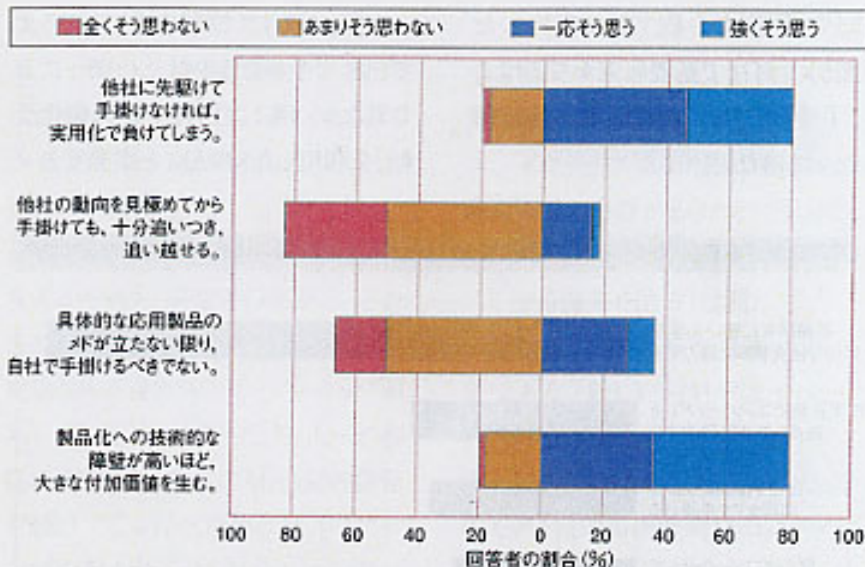


図4 他社より遅いと負ける

本誌が2005年12月に実施したアンケートの結果から、基礎研究に関するそれぞれの文章に対し、「強くそう思う」「一応そう思う」「あまりそう思わない」「全くそう思わない」の4段階のどれに当てはまるかを、回答者を選んでもらった。「他社に先駆けて手掛ければ、実用化で負けてしまう」は約8割の回答者が「そう思う」と答え、逆に「他社の動向を見極めてから手掛けても、十分追い付き、追い越せる」は8割強が「そう思わない」だった。「具体的な応用製品のMDが立たない限り、自社で手掛けるべきでない」は、6割強が「そう思わない」を選んだ。「製品化への技術的な障壁が高いほど、大きな付加価値を生む」は、8割の回答者の支持を集めた。グラフは、無効な回答を除いて集計した結果。アンケート調査の概要はp.73を参照。

料や素子の発見につながると期待を寄せる(p.74の「計算手法が材料開発の武器に、試行錯誤の時代は終わる」参照)。

基礎研究の成果を最短で実用化

こうした動きは、日本のエレクトロニクス・メーカーの研究開発が基礎寄りになりつつあることを意味するのかもしれない。ただし、バブル崩壊以前にあった基礎研究シフトと現状の動きとは大幅に様相が異なる⁵⁾。現在の

主眼は、あくまで基礎研究の成果を最短の時間で実用化に結び付けることにある。このため、各社は必ずしも自社で基礎から応用まで手掛けることにはこだわらない。

本誌が実施したアンケート調査でも、これを裏付ける結果が出た。「基礎研究の成果を、なるべく早く実用化するにはどのような研究開発体制がよいとお考えですか」との問いに対し、最も支持を集めたのは「基礎研究に強い大学や公的な研究機関と協力す

注4) この恩恵を受けて今まさに興光を浴びている物質の1つに、酸化物半導体のZnOがある。白色LED向けの紫外線レーザーや、液晶パネル向けの透明電極の材料に応用が期待されている。「ZnOにp型不純物を導入するなどの成膜技術は、高温超電導体の研究で培った技術の地下がここぞ」(東北大学 金属材料研究所 教授の川崎隆司氏)。

1) 第一原理計算=シミュレーションの対象となる系の各元素やその構造のみを入力パラメータとして、物質の特性を計算する手法のこと。原則として、実

験結果などから得られた経験的なパラメータは計算に組み入れない。

注5) 1980年代に、日本のエレクトロニクス産業では基礎研究を重視する機運が高まった。特に1980年代後半に入ると、企業はこぞって基礎研究所を設立した。背景には、投機熱が変えたバブル景気と、日米貿易摩擦に伴って吹き荒れた「基礎研究タダ乗り論」の圧力があってとされる。だが1990年代初頭にバブルが崩壊して以降、より製品に直結した研究開発を重視するようになり、逆に基礎研究の比重

は低下した。



強相関係材料

超高密度メモリを求めて
カギは材料と原理の追究

素子の抵抗値を変化させて情報を記録する不揮発性メモリ「ReRAM (resistive RAM)」の開発が、にわかに注目を集めている。2005年12月に開催した半導体関連の国際会議「2005 IEDM」では、韓国Samsung Electronics Co., Ltd. や米Spansion LLCが最新の試作例を報告。このほかにも、水面下では国内外の多くの企業が

ReRAMの開発に着手しているもようだ。例えば米Intel Corp.は、2005年7月にReRAMに詳しい技術者を集めてシンポジウムを開くなど、情報の収集に余念がない¹⁾。「ReRAMのセル構造や周辺回路は、相変化膜を用いた不揮発性メモリ(PRAM)とほぼ同じ。少なくともPRAMを開発している企業は、ReRAMも「味見」をしている

とみていい」(ReRAM関連の研究者)。

ReRAMが脚光を浴びるのは、フラッシュ・メモリをしのごく超高密度の不揮発性メモリになる可能性があるからだ。記憶素子を電極で挟むだけの単純なセル構造を採るため、セル面積が $4F^2 \sim 6F^2$ と小さい(F は設計ルール)。多値化や積層も容易とされる。このReRAMの記憶素子としてメモ

強相関係材料の研究

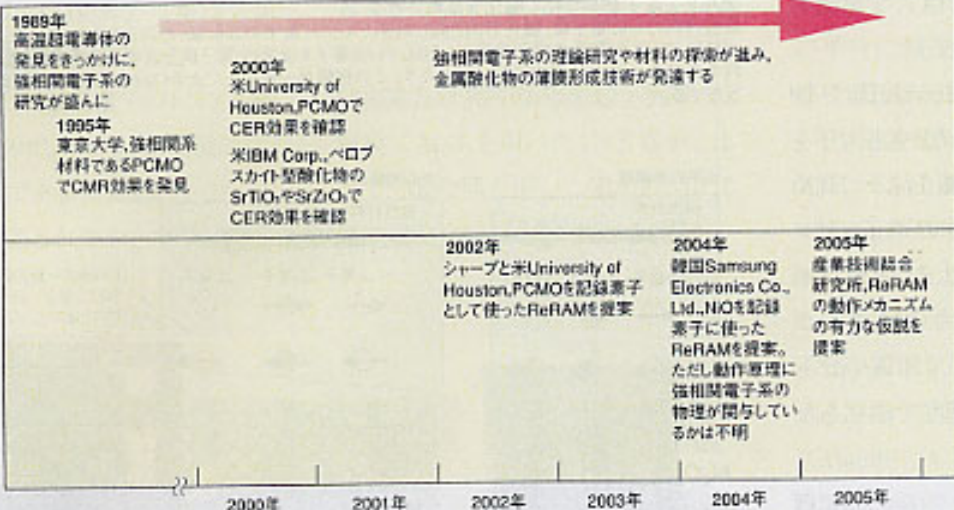


図1 強相関係材料の開発がReRAMに結実
強相関係電子系の研究は、1989年に発見された高温超電導体をきっかけに始まった。この分野で2000年に、米University of Houstonや米IBM Corp.が見つけた超巨大電界誘起抵抗変化(CER: colossal electroresistance)が、シャープの新型不揮発性メモリ「RRAM」の開発につながった。

ReRAMの研究

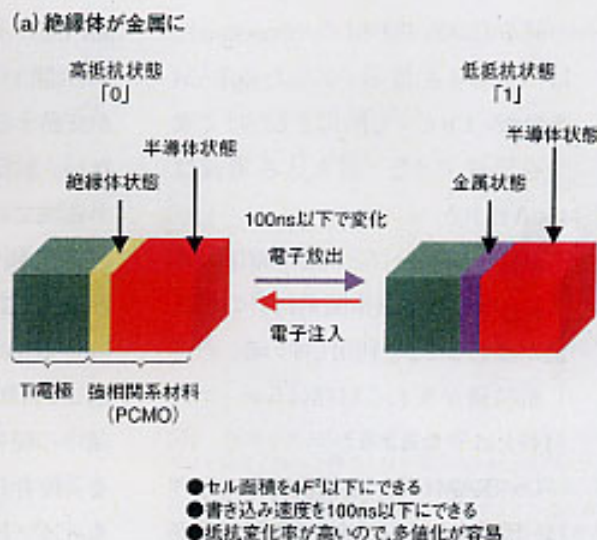
注1) シンポジウムに参加した東北大学 金属材料研究所 教授の川崎雅司氏によれば、Intel社はReRAMでSRAMやDRAMを代替させることも視野に入れていたという。

¹⁾強相関係材料—クーロン反発力に代表される電子間の相互作用(電子相関)の影響が、電子の振る舞いに支配的な影響を与える「強相関係電子系」の材料のことを指す。遷移金属や希土類金属とその化合物などが含まれる。このような電子系が注目されるに至ったきっかけは、強相関係材料である銅酸化物で高温超電導現象が発見されたことである。これ以来、少しでも高い温度で高温超電導を実現するために、強相関係電子系の理論や材料の研究が急速に進んだ。

¹⁾ペロブスカイト構造=BaTiO₃などの3元系遷移金属酸化物が採る結晶構造の1つ。強相関係材料の一種である酸化物高温超電導体は、すべてこの構造を持つとされる。

図2 巨大な抵抗変化を利用して情報記録

ReRAMの一例である、PCMO膜を使用した記憶素子の動作原理は以下の通りとされる。PCMOのような強相関系材料とTi電極との間に電圧パルスを加えると、電極との界面にあるトラップ単位に電子が注入され、電圧の印加をやめても電子は界面にとどまる。正負逆の電圧パルスをかけると電子が放出される。この電子の注入・放出に伴って界面が絶縁体状態と金属状態とを行き来(金属-絶縁体転移)する(a)。抵抗値が極端に変化するの、このためとみられる(b)。(b)は、東京大学の十倉好紀教授のグループが、温度が20Kの状態で大結晶を対象に測定した結果。なお、実際の素子に用いる多結晶の強相関系材料では、電極との界面だけでなく結晶粒の界面でも電子の注入・放出が生じているもようだ。



リ・メーカーが開発を進めるのが、強相関系材料[†]である。一部の材料で見られる、電圧パルスを加えると抵抗値が劇的に変化する超巨大電界誘起抵抗変化(CER: colossal electro-resistance)現象を利用する。

この現象がなぜ起こるのか、現状でははっきり分かっていない。「記憶素子に使う材料によって、動作原理は大きく異なるとみられる」(東北大学金属材料研究所 教授の川崎雅司氏)。そもそも抵抗値の変化は、強相関系材料のあまたある特徴の1つにすぎない。「強相関系材料は面白い。半導体とは全く世界が違う、とんでもない挙動を示すことがある」(Spansion Japan 専務取締役の田口真男氏)。

きっかけはシャープの研究

ReRAMの開発に火を付けたのが、シャープが2002年に発表した不揮発性メモリ「RRAM」である(図1)。NAND型フラッシュ・メモリ並みに小さいセル寸法とSRAM並みの高速性を両立したことが、半導体メーカーを驚かせた。これをきっかけに、メモリ技術者は相次いで強相関系材料の探索に乗り出した。

シャープが用いた材料は、もともと米University of Houstonの Alex Ignatiev氏が開発したものである。同氏は、2000年にペロブスカイト構造[†]を持つ強相関系材料であるPCMO($\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$)の薄膜を使い、室温

でCER効果が起こるのを発見した。それまでPCMOでは、低温下でしかCER効果を確認できなかった⁽²²⁻²³⁾。

この材料がなぜ室温でCER効果を示すのか、まだ明確にはなっていない。今のところ、強相関系材料に特徴的な挙動である「金属-絶縁体転移」が生じているとみる説が有力だ(図2)。金属-絶縁体転移とは、温度や磁界などの印加で、物質の電気伝導特性が絶縁体状態から金属状態へ変わる現象である(pp.88-89の「絶縁体が一瞬にして金属に、電子の相互作用が原因」参照)。

各社が次々にReRAMに食指

シャープの発表を契機として、その

注2) Ignatiev氏はこの時、CER効果が不揮発性を持つことから「メモリに使えるのでは」と示唆した。ただし、複雑な組成を持つPCMOの薄膜を形成するために、同大学は量産には適さないPLD(pulsed laser deposition)を用いていた。この話に敏感に反応したのがシャープである。University of Houstonの学生が米Sharp Laboratories of Americaに入社したのと前後して、同大学と共同研究を開始。そして、わずか2年後の2002年には、量産に適したスパッタリング法で素子をSiウエハー上に形成し、不揮発性メモリとして動作させた。シャープ

は「現在もRRAMの開発は継続している」としながら、その開発動向については一切明らかにしていない。

注3) RRAM向けの素子が発明されたきっかけは、1995年にさかのぼる。この年、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授の十倉好紀氏が、PCMOで超巨大磁気抵抗(CMR: colossal magnetoresistance)効果を発見した。1996年には同氏が、同じ物質でCER効果も観測した。ただし双方とも極低温下での実験であり、産業応用は

難しいとされていた。

注4) CBRAMは、酸化・還元反応を応用して固体電解質膜の中に銀(Ag)の導電路を形成することで、抵抗値を変化させる。オン時とオフ時の抵抗値の比は 10^2 と大きいため、多値化も可能という。書き込み時間や消去時間はそれぞれ100nsより短くできる見込みとする。