

1998.8

ISSN 0011-846X

電総研ニュース

<http://www.etl.go.jp/publication-j/news-j.html>

1998年8月号 583号



電子ビーム露光装置

- 絶縁膜上での世界最小のゲート長40nmMOSFETの試作に成功
- 拡張性の高い分子構造表示ソフトウェア MOSBY
- 超伝導と磁性の物性入門
- 統一公開・その他

絶縁膜上での世界最小のゲート長 40nmMOSFET の試作に成功

- 次々世代のシリコン集積回路に先鞭 -

Fabrication of 40nm gate length SOI MOSFET's

電子デバイス部ナノシリコンデバイスラボ

石井賢一、鈴木英一、金丸正剛、前田辰郎、永井清子、関川敏弘

Electron Devices Division, Nanostructure Silicon Devices Laboratory

Kenichi Ishii, Eiichi Suzuki, Seigo Kanemaru, Tatsuro Maeda, Kiyoko Nagai, and Toshihiro Sekigawa

We have successfully fabricated 40 nm gate length ultrathin SOI MOSFET's for the first time. The 40 nm gate length device on a 11 nm SOI layer with a backside conducting substrate operates quite normally. The threshold voltage is only 0.2V lower than that of the longer gate length (150 nm) device. The excellent threshold voltage roll-off characteristics of the 40-150 nm gate length devices indicate the effectiveness of an ultrathin SOI channel. These experimental results point the direction of future Si devices.

1. シリコン集積回路の進展

今日の情報化社会を支えているのは、高度に発展してきたシリコン集積回路である。トランジスタの発明からちょうど50年、ICの発明から40年であるが、その間にシリコン集積回路の集積度は、過去約30年来、3年で4倍（1世代と称される）の驚異的な発展を遂げ、この傾向は、少なくとも21世紀早期まで続くと考えられている。それを成し遂げていくためには、次世代のシリコン集積回路の実現に向けてシリコン技術の開発を進めるとともに、どこまで微細なシリコン素子が集積回路として実現できるのかを実際に示していく極限シリコン素子の探求も同時に要求されている。

シリコン集積回路の飛躍的な高集積化、高性能化は、主にそれを構成するシリコンMOSFET（金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ）のサイズの全体的な比例縮小化（スケールアップと称される）によって実現されてきた。ところが、素子の基本的な寸法が1 μ m以下の領域に入ったところからすでに比例縮小の手法が容易に成り立たなくなり、様々な素子構造の工夫がなされてきた。MOSFETの微細化に伴って集積回路動作で最も問題となるものは、チャンネル長の減少によって、ソースとドレインが短絡してしまうパンチスルーやそのしきい値電圧（チャンネルがOFFからONになる境目のゲート電圧）が急激にシフト（ロールオフ特性と呼ばれる）してしまう、いわゆる短チャ

ネル効果が顕著になってくることである。この短チャンネル効果があると、膨大な素子を含む集積回路ではその動作が保証できなくなる。

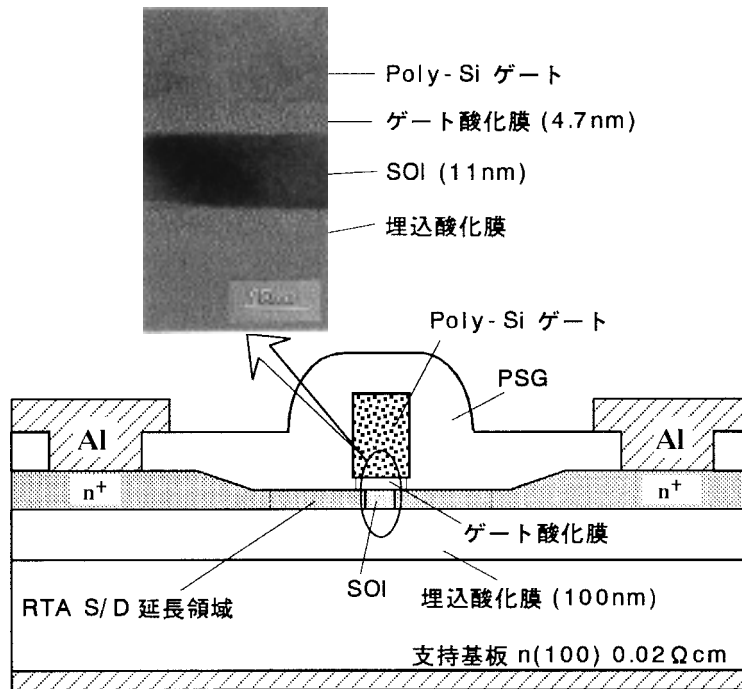
この問題のブレークスルーとして、電総研では1984年に短チャンネル効果を大幅に軽減する基本的なMOS素子構造として、上下にゲートをもち、それらできわめて薄いチャンネル領域を挟んだダブルゲートMOS（XMOS）素子構造を提案し、2重のゲートと極薄チャンネル層が短チャンネル効果防止に極めて有効であることを示した。このXMOS素子は、21世紀のシリコン集積回路の超高集積化を可能とする最も優れたMOS素子構造として広く学会で認められている。しかし現状の最先端のシリコン技術をもってしても理想的なXMOS構造作製はきわめて困難である。一方、絶縁膜上に単結晶シリコン層を持つSOI（Silicon on Insulator）ウエハが既に市販されるようになり、この上に集積回路を構成すれば素子の分離や配線が容易になることから次世代の集積回路用ウエハとして期待されている。そこで、導電性のシリコン支持基板の上に薄い埋込酸化膜および単結晶シリコン層を持つSOIウエハを用い、チャンネル領域の厚さをきわめて薄くした素子にすればXMOS素子に近い構造となり、短チャンネル効果防止に著しく有効であることが予想される。

以上のような基本的な考えの元に、本研究では可能な限り薄い埋込酸化膜上の極薄のSOI層を用いて

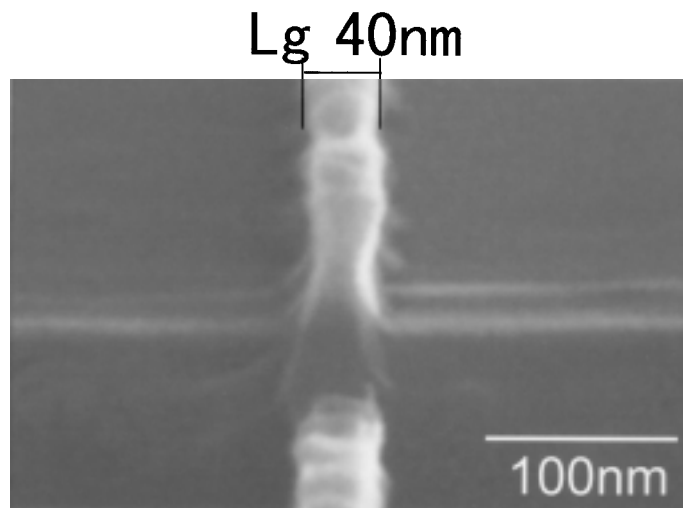
どこまで微細なMOS素子を実現できるかを実際に素子を作製し確認することを試みた。数々の極微細プロセス開発を踏まえて、ゲート長40nm、チャネル領域厚さ11nmの、絶縁膜上での世界最小のゲート長MOSFETの試作に成功し、きわめて正常な動作を確認した。また、同時に作製したゲート長が40nm～150nmの試作素子において優れたしきい値電圧の

ロールオフ特性を確認し、0.1μmをはるかに切る次々世代のシリコン集積回路素子が十分可能であることを、チャネル領域の極薄膜化の有効性ととも実験的に実証した。

2. 絶縁膜上での世界最小のゲート長40nmMOSFETの作製



(a)



(b)

図1 試作に成功したゲート長40nmのSOI nチャネルMOSFET
 (a) 素子の断面模式図とゲート部分の断面TEM写真
 (b) 素子のSEM写真 (PSG膜除去後)

ゲート長が40nmおよび150nmまでの極短チャネルMOSFETを、導電性支持基板/埋込酸化膜(100nm)上の厚さ11nmおよび18nmのごく薄いSOI領域に作製した。図1は、試作したデバイスの模式断面図、ゲート部分の断面TEM(透過型電子顕微鏡)写真、およびSEM(走査型電子顕微鏡)写真である。素子の各部の寸法がナノメートル(100万分の1ミリメートル)オーダーと従来素子よりはるかに小さくなっている。

まず最初に、SOIウエハのデバイスとなる領域のみをシリコン酸化膜で分離するために、LOCOS(シリコン局所酸化法)プロセスによって素子となる領域以外を完全に酸化した。素子となる領域のうち、最終的にチャネル領域になる中心部分のみをさらに薄膜化するために、電子ビーム(EB)リソグラフィによってその領域を形成し、酸化エッチングを繰り返すことによって所定のチャネル厚にした。ゲート酸化膜の厚さは4.7nmである。ポリシリコンゲートの形成には、EBリソグラフィとECR(電子サイクロトロン共鳴)プラズマエッチングを用いて形成した。その後、ソース/ドレイン延長領域を濃いn型層にするためにリンガラス(PSG)からのリン拡散を瞬間熱アニー

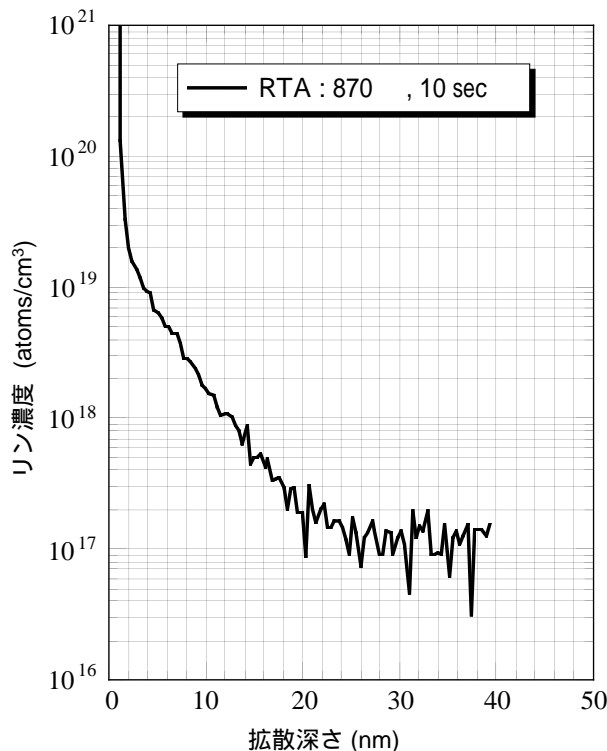


図2 スピン塗布したPSG膜からRTAにより固相拡散したリンの深さ方向のSIMSプロファイル。約10nmの極く浅いリン拡散が実現されていることを示す。

ル(RTA: Rapid Thermal Anneal)により行った。きわめて薄いSOI層へのリン拡散であるため通常の炉アニールは使えず、極短時間で行うRTAが必要であった。

図2は、拡散したリンの深さ方向のSIMS(二次イオン質量分光法)分析によるプロファイルを示している。リン濃度 10^{18} /cm³の表面からの深さが約10nmと従来にないきわめて浅いリン拡散が実現できていることが分かる。水素アニール後、最後にアルミニウム電極でコンタクトを形成し試作デバイスを完成させた。

3. 優れた特性を示す試作素子

ここで示すゲート寸法はすべてポリシリコンゲートの長さ(ゲート長と言う)であり、実際のチャネルの長さ(実効チャネル長と言う)はもっと短い。試作した最も短い140nmゲート長素子の実効チャネル長は、横方向リン拡散を考慮すると約20nmと予想される。このゲート長と予想される実効チャネル長は、絶縁膜上のMOS素子としては世界最小である。

試作素子の電氣的評価は、全て室温で導電性支持基板を0Vにしっかり固定して行った(従来のSOI素子では基板が高抵抗であるため電位を固定することが困難であった)。図3は、試作したゲート長40nm素子のドレイン電流-ドレイン電圧(I_d - V_d)特性を示しておりきわめて正常な動作をしている。

図4は、この素子のドレイン電圧1.5Vにおける、

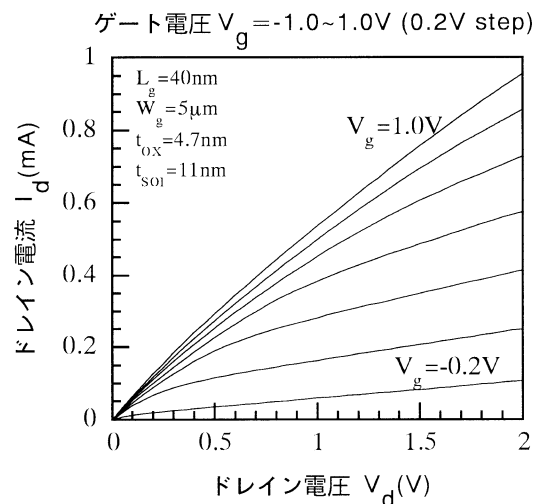


図3 ゲート長40nmSOI nチャネルMOSFETのドレイン電流-ドレイン電圧(I_d - V_d)特性(ゲート酸化膜厚: 4.7nm、ゲート幅: 5μm、チャネル層厚: 11nm)。

ゲート電圧による素子電流の制御の様子、すなわち、ドレイン電流-ゲート電圧(I_d-V_g)特性と、ゲート電圧による素子電流の駆動力の様子、すなわち、トランスコンダクタンス-ゲート電圧(g_m-V_g)特性を示している。図から明らかなように、ゲート長40nmにおいても典型的なしきい値電圧 V_{th} は-0.45Vと小さな値で収まっている。ドレイン電流のサブスレッショルド特性(素子電流がONからOFFになるまでの様子)から、ゲート長40nmにおいてもSファクタ(どれだけすばやくチャンネルをOFFできるかを示す量で、素子電流が1桁(ディケイド)変化するのに必要なゲート電圧)が110mV/ディケイドと十分小さな値を示していることが分かる。50nmゲート長デバイスでは86mV/ディケイドとさらに小さな値を示し、理論値(60mV/ディケイド)に近づいている。また、素子の駆動能力を示す g_m は、図4の40nmゲート長の素子で $150 \mu S / \mu m$ である。試作素子のソース/ドレイン抵抗はまだ高いため g_m をロスをしているが、これを下げる技術を開発することにより、より高い g_m が十分可能である。

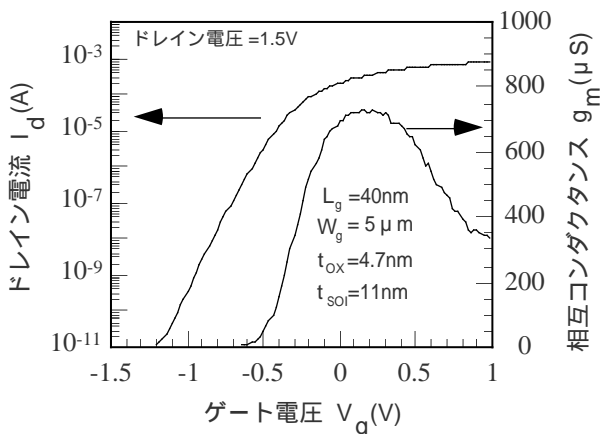


図4 ゲート長40nmSOI nチャンネルMOSFETのドレイン電流-ゲート電圧(I_d-V_g)特性と相互コンダクタンス-ゲート電圧(g_m-V_g)特性(ゲート酸化膜厚:4.7nm、ゲート幅:5 μm 、チャンネル層厚:11nm)、ドレイン電圧は1.5Vである。

図5は、今回試作した素子のしきい値電圧のゲート長依存性を示したもので、これらの素子の優位性を示す最も重要な実験結果である。すなわち、SOI厚さ11nmの試作素子は、ゲート長40nmにおいても長いゲート長(150nm)に比べてしきい値電圧のシフトはわずか0.2Vに収まっている。SOI厚さ18nmの試作素子との比較からも極薄膜SOI素子が短チャンネル効果防止にきわめて有効であることを示している。MOS

素子の極微細化競争は、しきい値電圧ロールオフ特性をいかに短いゲート長まで延ばすかに第1の眼目があり、SOI厚さ11nmの試作素子の特性は世界で最も優れたものを系統的に示している。今回試作したチャンネル領域SOI厚さを更に薄膜化することによって、更なるしきい値電圧ロールオフ特性の向上が期待できることになる。

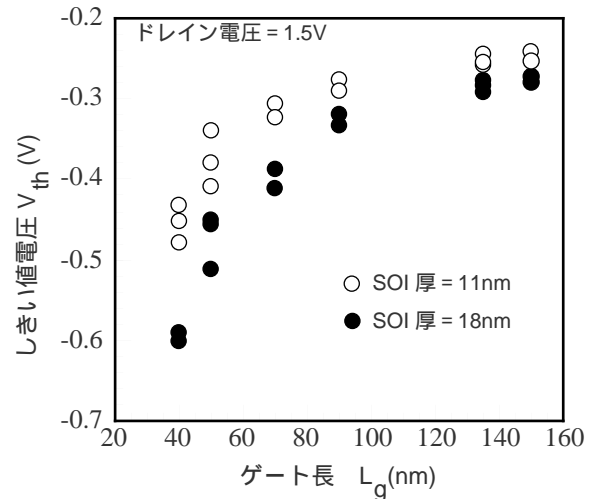


図5 試作したSOI nチャンネルMOSFETのしきい値電圧のゲート長依存性(40nm~150nm)、チャンネル層の極薄膜化によりしきい値電圧のロールオフ特性(短チャンネル効果)が大幅に抑止されていることを明瞭に示す。

4. 今後の研究方針

以上のように、今回、数世代先のMOS素子に相当する、絶縁膜上での世界最小のゲート長40nm SOIMOSFETの試作に成功し、問題なく動作することを実証したにとどまらず、従来報告されたことのない優れた短チャンネル効果防止特性を示した。ソース/ドレインの低抵抗化、チャンネル領域SOI層の薄膜化、ゲート絶縁膜の薄膜化などを更に進めれば、素子特性はまだ大幅に向上するとともに、更なる短チャンネル化も夢ではない。今後、今回の成果をふまえて、より理想的なXMOS素子の実現に向けて開発を進めていきたい。

e-mail

ishii@etl.go.jp(石井賢一), esuzuki@etl.go.jp(鈴木英一)
kanemaru@etl.go.jp(金丸正剛), tmaeda@etl.go.jp(前田辰郎)
knagai@etl.go.jp(永井清子), sekigawa@etl.go.jp(関川敏弘)

拡張性の高い分子構造表示ソフトウェア MOSBY

MOSBY: An Extendible Molecular Structure Viewer

知能情報部 遺伝子情報ラボ 上野 豊*、浅井 潔**

Yutaka Ueno*, Kiyoshi Asai**

e-mail: ueno@etl.go.jp*, asai@etl.go.jp**

A molecular structure viewer program, MOSBY has been developed with flexible extension capability for enhanced display, analysis and calculations using atomic coordinates of molecules. A new software component architecture and high-throughput graphics library are devised to provide desired extensibility and portability.

はじめに

MOSBYは分子構造を表示するプログラムであり、また立体構造に基づいた様々な計算や処理の機能を拡張モジュールによって実現するソフトウェアツールである。近年多くのタンパク質の立体構造が決定され、構造に立脚した機能の理解が進んでいる。特に新薬の開発や酵素の工業利用において大きな技術革新の期待がある。

通常タンパク質は数千の原子で構成されるため分子モデルを扱うにはコンピュータグラフィックスの利用は欠かせない。これまでに開発されてきた分子構造表示プログラムには、2つの種類がある。一つは、X線結晶構造解析や、立体化学的な理論計算を行う専門家のためのツールで、高速なグラフィックスおよび計算機資源をもつワークステーションで利用されてきた。商用化されたソフトウェアも普及している。もう一つは、一般的な研究者や学生が分子構造を理解するために利用するもので、機能は限定されているが、操作が容易でパーソナルコンピュータで動作する。

しかし、研究のために新しいアルゴリズムを組みこむとなると、商品化されたソフトウェアでは改造ができない。また、今日のパーソナルコンピュータの性能が向上し、数年前のワークステーションの処理能力をしのいでいるが、ソフトウェアは充分でない。生命科学の多くの研究者が、膨大な遺伝子データベースやタンパク質の立体構造データを扱うようになっており、今日の計算機環境に適応したソフトウェアツールが望まれている。我々は研究を支援する

そのようなプログラムの開発を進めている。特に拡張性と移植性に重点をおいて設計し、新しいソフトウェア技術を開発することによって、タンパク質の立体構造の研究のためのMOSBYプログラムを実現させた。

MOSBYの概要

MOSBY(Molecular Structure Browsing and analysis)はプロテインデータバンク(PDBと呼んでいる)に登録されているタンパク質の原子座標のデータファイルを読んで画面上に表示するプログラムである。図1に示したようなウインドウの上部にあるメニューバーからコマンドを選択する。分子構造は、ボール&スティックや、Van der Waals半径の球で原子を表示した空間充填モデルなどのほか、タンパク質におけるアミノ酸配列の主鎖をリボン表示することもできる。ウインドウの左側のツールバーによってマウスのモードを選し、回転、移動、拡大などを自由に行うことができる。数千原子程度の分子であれば、汎用のワークステーションや新型のパーソナルコンピュータでレスポンス良く扱うことができる。

基本的な表示機能だけでなく、拡張モジュールを結合することによって機能とメニューを増やしていくことができるのがMOSBYの大きな特徴である。これまでに開発した拡張モジュールとして次のようなものがある。

・電子密度マップ表示: X線解析などによって得られた電子密度マップのデータを原子座標のモデルと重ね合わせて表示する機能。

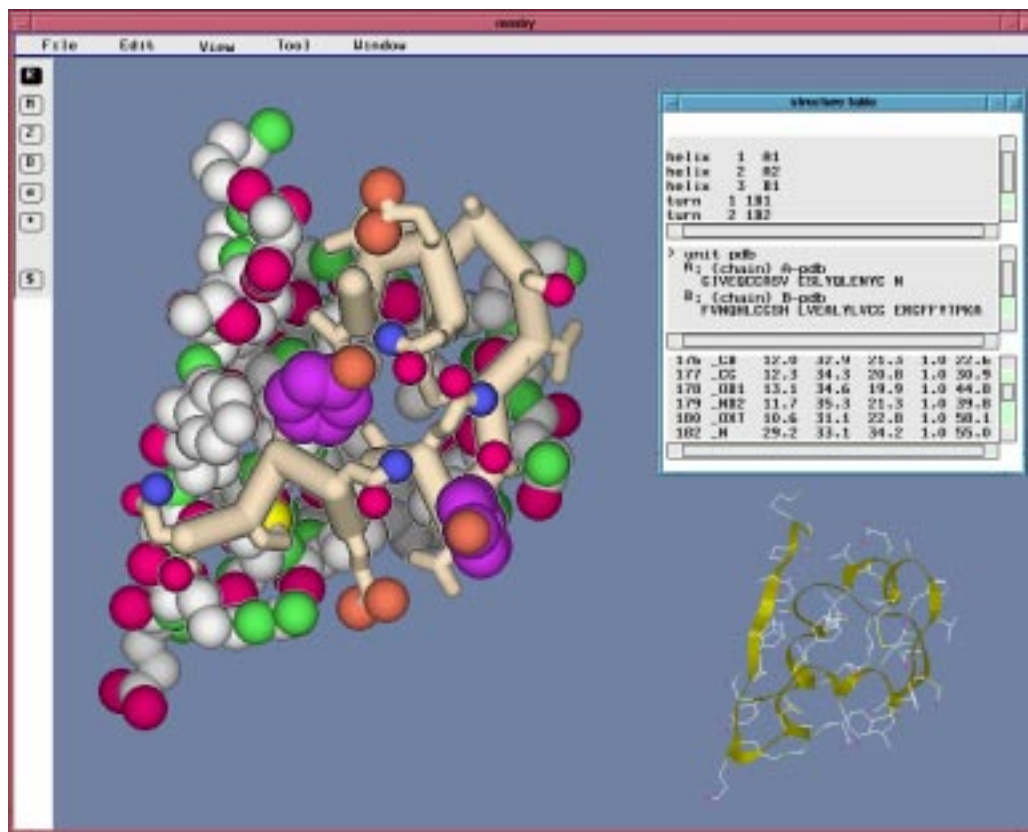


図1 MOSBYプログラムの表示画面の例(インシュリン)

分子構造が表示されているウインドウにおいて、注目する原子を選択だけでなく、structure table ウインドウに表示されている、タンパク質のアミノ酸配列単位での選択や、ヘリックス領域などの選択が可能である。

・分子動力学シミュレーションの結果表示: 分子動力学によって計算した原子の動きデータを読み込み、分子モデルをアニメーションで表示させる機能。

・MDL ファイルフィルタ: MDL 社の分子データファイルを読み込む機能で、類似の拡張モジュールによって様々なファイルフォーマットに対応できる。

このように、MOSBYは初心者でも使えるプログラムでありながら、専門的な解析用に拡張することができる。MOSBYはC言語で書かれており、現在X-Windowシステムを持つunixワークステーションで稼働している。

新しいソフトウェア技術

目的の機能を持ったMOSBYを実現するためには、拡張モジュールによるソフトウェア構築手法と高速なグラフィックスについて新しくソフトウェア技術を開発する必要があった。

拡張モジュール

MOSBYに新しい機能を組み込む時には、簡単な手続きで作成したモジュールをプラグイン形式で追加するだけで実現できることが望ましい。我々はパーソナルコンピュータを含め多くのプラットフォームで利用できるダイナミックリンクに着目し、これまでにないシンプルな手法を開発した。従来は煩雑であった関数のシンボル名(ソースコードにおける名前)を使わずに、関数に新しい名前を付けて登録し、メニューや他のモジュールからその登録名で呼んで動作させるという方法である。拡張モジュールはプログラム本体の一部として動作するため、処理のオーバーヘッドが少なく、モジュール間のデータの交換も容易である。これまでにC言語やFortranで書かれたソフトウェア資産を活用できるのも大きなメリットである。さらに、MOSBYを起動させた状態で拡張モジュールを切り離してデバッグすることも可能である。

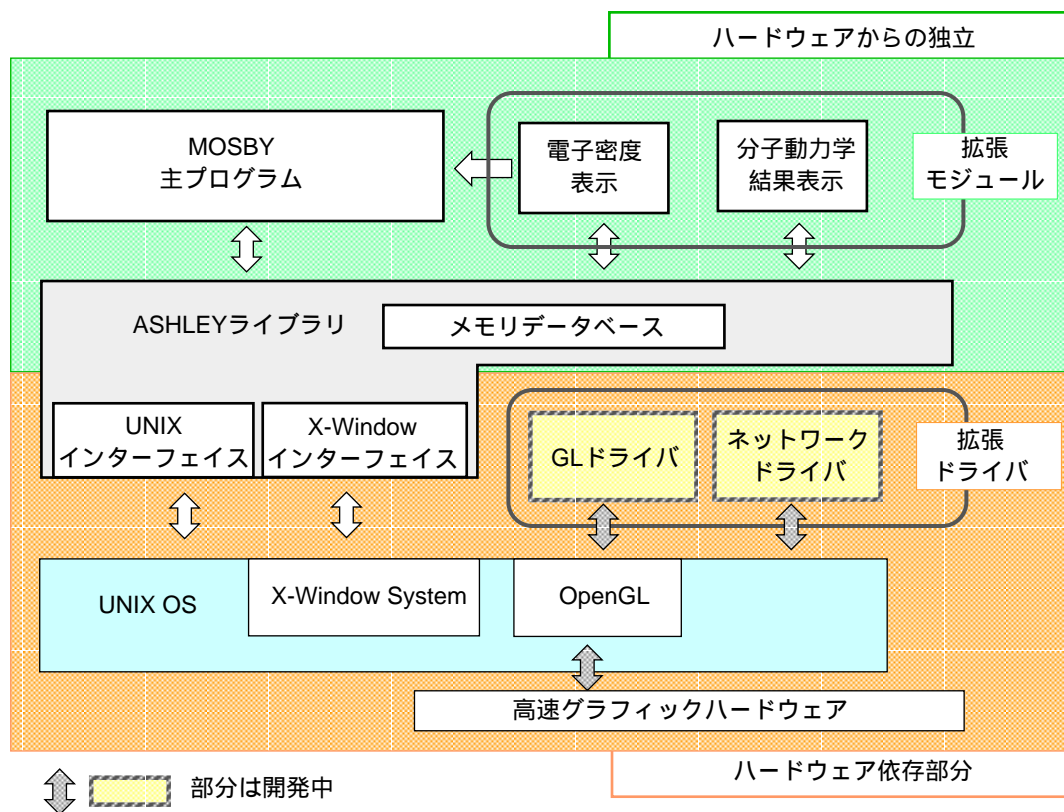


図2 ソフトウェア構築

MOSBYのようなウインドウシステムにおけるアプリケーションの構築を支援するためのプログラミングライブラリがASHLEYである。unix版はSiliconGraphics, Sun, HP, DEC, IBM-PC(Linux)で動作する。Macintosh版のプロトタイプを開発し、Windows版も開発中である。拡張モジュールには、MOSBYの機能を拡張するモジュールの他に、ASHLEYの機能を補強するドライバモジュールがライブラリ機能を強化する。我々の拡張モジュールの手法では、結合時に自分の関数のアドレスを新しい名前でASHLEY内(メモリデータベース)に登録する。その新しい名前をメニューなどに割り当てれば、メニューから処理を開始できる。登録した名前に対応する関数を状況に応じて変更したり、拡張モジュールから別の拡張モジュールの関数を呼ぶことも可能である。

グラフィックスライブラリ

グラフィックスのための特殊なハードウェアがなくても、低画質でレスポンス良く分子構造を表示できることが必要である。現在はグラフィックスライブラリとしてOpenGLが標準的であるが、分子構造の表示において多用される球の表示が遅いのが欠点がある。特にパーソナルコンピュータにおいては目的の高速性を実現できない。そこで我々は、近年の高速なマイクロプロセッサを積極的に利用し、最適化されたソフトウェアによる高速描画を実現するグラフィックスライブラリを開発した。特に整数演算だけで実現した球の表示アルゴリズムは、OpenGLを

利用した場合より効果的であった(図3)。

このほかに、ユーザーインターフェイス構築ライブラリは移植性を維持する重要な技術であり、特に拡張モジュールからの利用を考慮して新たに開発した。これらは、汎用のアプリケーションプログラムの構築ライブラリASHLEY(Application Support Hybrid Library for easY programming)としてまとめられている。図2に示すようにアプリケーションプログラムであるMOSBYはASHLEYの関数を利用して構築されているため、移植する場合はASHLEYだけを移植すればよい。

今後の計画

多機能のソフトウェアは複雑になる傾向にあるが、MOSBYで提供している基本機能はシンプルで保守もしやすく、機能の強化は拡張モジュールで対応できる理想的な研究の基盤ツールに近づいたと考えている。MOSBYを普及させることで、情報工学的な研究によって新しく開発されたアルゴリズムを拡張モジュールとして作成し、迅速に機種異なるパーソナルコンピュータに移植し、いち早く多くの研究者に提供できるようなソフトウェアシステムの実現を目指している。さらに、有機化学や無機材料設計などに便利な拡張機能も望まれる。また、商用の解析計算プログラムがMOSBYの拡張モジュールとして提供されることは最終ゴールであろう。動作マシンのチェックやネットワーク接続処理なども拡張モジュールに埋め込むことができるので、様々なライセンス形態が可能である。ユーザが必要な機能追加が拡張モジュールの範囲で対応できるように上げることが課題であり、フィードバックを得るためにWebでの公開を準備している (<http://www.etl.go.jp/~ueno/bioinfo>)。

現在、MOSBYの動作をWebブラウザと連携動作させる機能、あるWebページから自動的に拡張モジュールをダウンロードする機能、グラフィックスハードウェアがある場合にそれを動作させる拡張モジュール、などを開発中である。また分子構造だけでなく、遺伝子データを扱う上で必要な遺伝子配列情報表示ツールGUPPY (Genetic seqUence Preview and comPutational analYsys)の開発も進めており、ゲノムデータベース等を効率的に可視化、解析できるツールに育てたいと考えている。

参考文献

Y.Ueno and K.Asai (1997). A New Plug-in Software Architecture Applied for a Portable Molecular Structure Browser. Proceedings, International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology (Gaasterland et al., eds. AAAI Press) 329-332.

研究課題名 遺伝子関連データからの情報獲得技術 7235

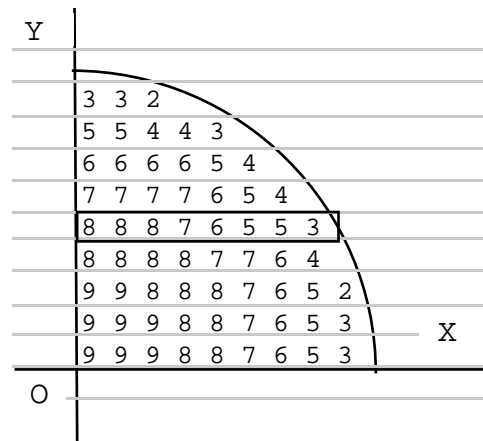


図3 球の高速表示方法の概念図

従来の対話型コンピュータグラフィックスでは、球をポリゴンで近似した多角形で表示していた。我々は球面を直接画面上の走査線に沿ったデータに変換する方法で表示している。図の数字は球面の濃淡を表しているが、整数演算だけでこれらの値を計算するアルゴリズムの開発によって、非常に高速で正確な表示が可能となった。

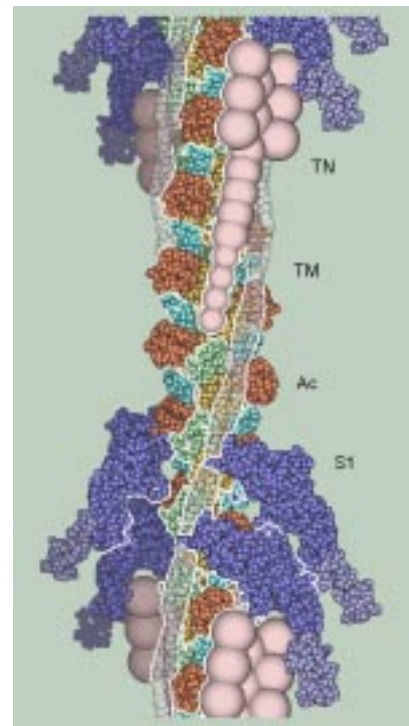


図4 筋肉繊維を構成するタンパク質複合体のモデルを表示した例。アクチン(Ac)とミオシン(S1)、トロポミオシン(TM)はアミノ酸の炭素を球で表しており、らせん状に複合体を構成している。トロポニン(TN)は構造が未知なので大きな球で表したモデルである。

超伝導と磁性の物性入門

サイエンスキャンプ「超伝導の観測」～現在の錬金術師になってみよう～
「解説3」のテキストより

電子基礎部 井上 公
e-mail: inoue@etl.go.jp

● 電子ってなんだろう ～とってもちいさなパチンコ玉みたいなものかな?～

電子というのはとってとって小さいものです。小さすぎて顕微鏡を使っても見えません。ここでこの「見る」という行為を少しばかり科学的に表現するならば『電子にあたって跳ね返ってきた「光」を「目」で検出する』ということになります。光を使って電子の位置を「観測する」と言ってもよいでしょう。

1つの電子にあたって跳ね返ってきた光はとても弱すぎて人間の目ではとても検出できないのですが、巧妙な実験装置を使えば観測できないことはありません。そこで、光を当てて、ある電子が、今この一瞬に、どこにいたかを観測したとします。

ところが、電子はとってとって小さくて軽いので、光があたると(つまり観測されると)たちまちその反動で吹っ飛ばされていってしまいます。ですから、位置を



観測したその瞬間にこの電子が「どんな速度」だったのかを知ろうと思っても、もはや手遅れなのです。(正確には「どんな運動量」だったのかを知ろうと思ってもわからないということになります。運動量というのは簡単に言うと「質量」×「速度」であらわされる量です。)

逆に、非常に精密で小さなスピードガンみたいな実験装置を使って、巧妙に電子の速度(つまり「運動量」)だけを測定できたとしましょう。でも、この場合も電子は小さくて軽すぎるので、いくらここで使用するスピードガンが巧妙にできていても、測定をする[とあつという間に電子の位置が変わってしまいます](#)。つまり、「運動量」を測定したのと同じ時刻に、[いったい電子がどの位置にいたのかを正確に知ることはできないのです](#)。

なんだかわけわかんなくて、じれったい話ですが、このように、

電子のような軽くて小さいものの「位置」と「運動量」の両方を、同時に正確に測定することは出来ないのです。

これは決して、実験のやり方が悪いからではありません。装置を適当に調節するといったことで解決する問題ではないのです。野球のボールのようなものは電子に比べるととてつもなく大きく重くて、光があたっただぐらいではびくともしませんから、位置と運動量を同時に極めて正確に測定することは可能です。もちろん、この場合もやはり上で述べたような『どうしてもさけられない誤差』があるのですが、その誤差は野球のボールの大きさや重さ(運動量)に比べれば無視できる量なので問題になることはありません。電子のように小さな物質になって初めて、上のような「観測の問題」が生じてくるのです。

このことは「不確定性原理」とよばれていて、次のようにあらわされます。

$$\text{【位置の誤差】} \times \text{【運動量の誤差】} = h$$

h はプランク定数とよばれる定数で、とんでもなく小さな数です。

さて、不確定性原理を考えると、実に奇妙なことが起こります。例えば、上の式から

$$\text{【位置の誤差】} = h \div \text{【運動量の誤差】}$$

ですね。そこで、これまた何か巧妙な実験装置(ここでは電子銃とよばれる装置を使うことにしましょう)を使って運動量を出来るだけ正確に決めたいので、電子を空間に発射してやることにします。すると【運動量の誤差】を h に比べて十分に小さくすることができれば(野球のボールではこんなことは無理です)【位置の誤差】がとんでも大きくなってしまいます。

つまり、電子がパチンコ玉のようなものだと予想される軌道を大きくはずれたような場所でも、電子が観測される確率はゼロにならないわけです。

今まで皆さんは気付かなかっただけなのですが、実は世の中はそんな風に出ているのです。いま手のひらの中にあると思って見つめている野球のボールも正確にはそこにあるわけではなくて、ぼや~っと広がっているのです。ただし、野球のボールのような大きいものに対しては、その大きさに比べてぼやけかたがあまりにも小さすぎるので、誰もそんなことには気付かないのです。ところが電子のように極端に小さいものになると話は別です。多くのおみなさんは「電子」というとひじょうに小さなパチンコ玉のようなものをイメージすると思いますが、このようにとんでもなく小さくて軽いものに対しては、もはやこうしたイメージは不十分です。むしろ、空間にぼや~っと広がった雲、あるいは空間全体に広がって伝わって行く波のようなものを考えなければならないこともあります。

極端な話、【運動量の誤差】が0になると【位置の誤差】は無限大になります。これは、もはや電子はどこにいるのかわからないということを意味します。つまり電子は空間のいたるところに等しい確率で存在することになってしまいます。巧妙な電子銃

を使って、電子の運動量を非常に正確に決めて発射したのに、そのせいで結局どこを飛んでるのかわからない状態にしてしまったのですね。

この時の電子の状態を量子力学では

「波長が $h \div \text{【電子の運動量】}$ の波(電子波)」

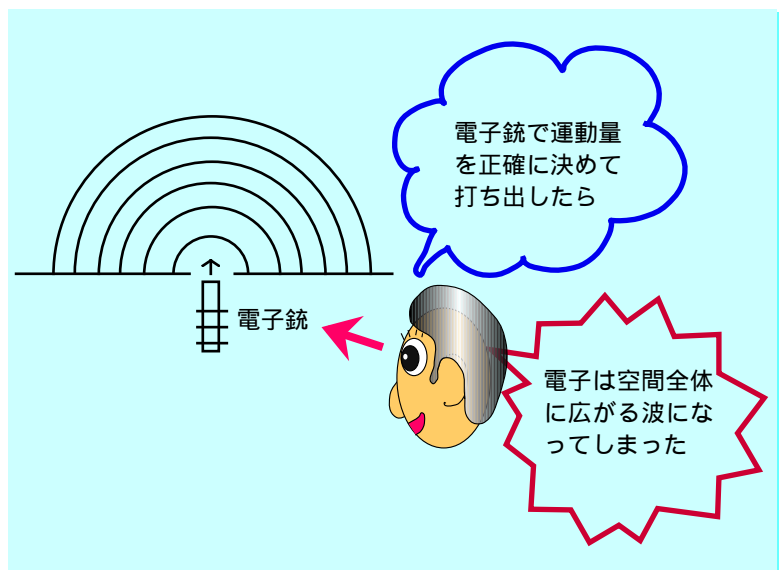
として表します。すなわち、電子はもはやパチンコ玉のようなものが飛んでいるというようなイメージでは表せなくて、まるで空間全体に電子波が広がるように進んで行くものなのだと考えなければいけません。

このように電子のような小さくて軽い物質になると、野球のボールのような大きくて重たいものでは完全に無視できた「不確定性原理」の影響が大きくなってきます。そのため、私達が電子を扱う方法に合わせて、波のように振る舞ったり、粒子のように振る舞ったりすることになります。

● 電子がいっぱい集まるとどうなる~位相と個数~

ある面から見ると、電子はマイナスの電荷を持っていて、1個2個・・・と数えられる玉のようなものなのですが、一方で電子はあたかも空間のある領域に広がった波のように振る舞います。こんな電子がたくさん集まるといったいどうなるのでしょうか。先程は、電子1個のときの振る舞いを「不確定性原理」という奇妙な法則から考えましたが、電子がたくさんいるときは、この「不確定性原理」から次のような関係が導き出されます。

それぞれの電子の波の「位相」のずれの乱雑さと、



電子の「個数」の不正確さの間には

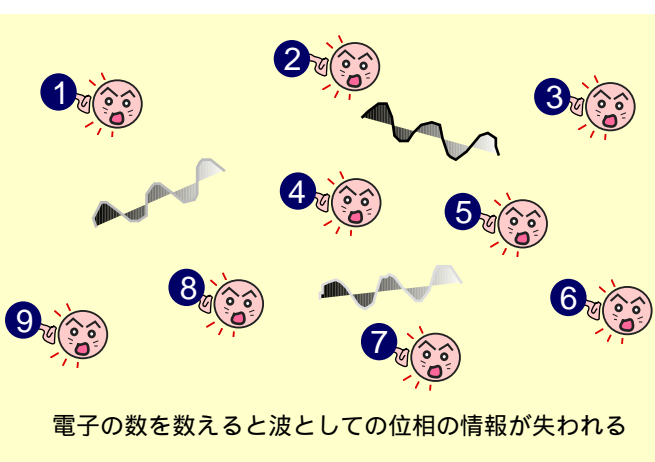
$$\text{【電子波の位相のずれの乱雑さ】} \times \text{【電子の個数の不正確さ】} = 1$$

という関係が成り立つのです。これはつまり、電子の集団の「位相」と「個数」の両方を同時に正確に測定することは出来ないということです。

「位相」というのは聞きなれない言葉ですが、つまりところ波の1周期の始まりの時刻の違いのことで、例えば、輪唱で「か～え～る～の～う～た～が～」と誰かが歌ったらすかさず次の人が「か～え～る～の～う～た～が～」と続けますが、この場合は「位相が2小節遅れている」ということになります。みんながでたらめに位相をずらせばずらすほど、ガーガー言ってるだけの雑音みたいになって、「歌」つまりもとの「波」としての特徴がわからなくなります。

上で述べたところによれば、波でなくなってくるということは電子があたかもパチンコ玉のようになったということなので、これはすなわち電子の数を1個2個・・・と出来るだけ正確に数えることが出来るようになったということになります。

要するに、電子の数を1個2個・・・と正確に数えるということは、それぞれの電子の「位置」を観測していくということですから、さきほど述べたように、観測された電子は、その瞬間に、いちど「波」としての性質を失います。観測が終わってまたもとの波に戻った時には、その波の位相は観測される前の位相とは当然異なっているでしょう。したがって、このようにすべての電子について位置の測定を行って電子の個



数を正確に数えてしまうと、それぞれの電子の波の位相はぐちゃぐちゃに狂ってしまうわけです。

それでは逆に電子の位相をみんなきれいにそろえてみたしましょう。

$$\text{【電子の個数の不正確さ】} = 1 \div \text{【電子波の位相のずれの乱雑さ】}$$

ですから、【電子波の位相のずれの乱雑さ】=0ならば、【電子の個数の不正確さ】は無限大になります。つまり電子の数を数えることができません。全ての電子が波として空間に広がっていて、しかも波の位相も全部そろっているわけですから、もはや電子がここにいったい何個いるのかなんてまったくわからなくなってしまいます！「電子が何個いるかわからない」なんて奇妙なことが起こってもいいのでしょうか？

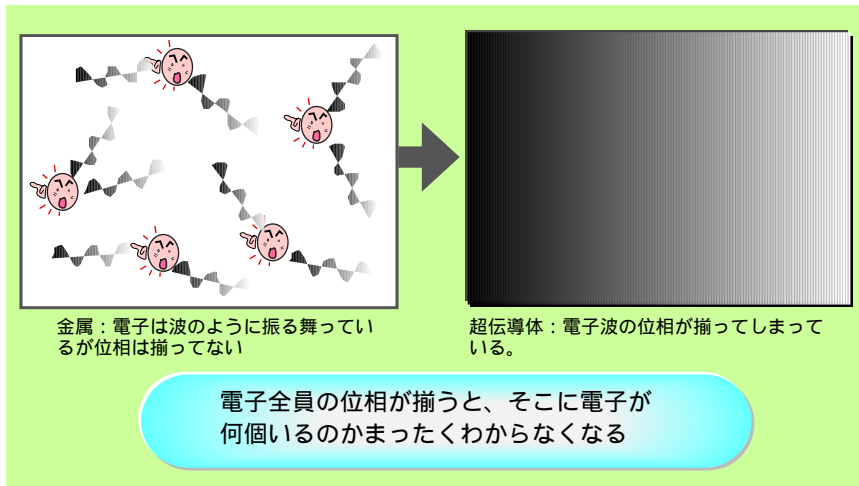
● 究極のマスゲーム・・・超伝導

皆さんは「金属」というと、自由に動きまわられる電子がたくさんいる物質を想像するでしょう。例えばアルミニウム9gの中には、自由に動きまわられる電子が 6×10^{23} 個もいます。高校の教室で、たかだか40人の生徒全員を同じ姿勢でじっとさせておくのですら難しいのに 6×10^{23} 個なんて途方もない数の電子の集団がみんな同じように振る舞うことがおこりうるものなのでしょうか？

実はこのたくさんの電子の「位相」がすべてそろってしまっただ状態が「超伝導」という状態なのです。これから少し説明してみましょう。

ちょっと難しい話ですが、電気抵抗というのは、実は位相のずれの足しあわせのようなものなのです。これはつまりこういうことです。みんながてんでばらばらに位相をずらしてがやがや歌っている場合を考えましょう。全体ではガーガーゴゴゴ言ってるだけの雑音になっているのですが、そこでピアノの人が「私に従え」と言ってメロディーを奏でたとしても（電圧をかけたということ）なかなかみんな従ってくれない（あまり電流が流れてくれない）でしょう。つまりこれは抵抗が大きいということです。

ところが、電子の位相がすべてそろってしまうと、要するにみんなが斉唱しているようなものなので、例えばそれに合わせてピアノを弾けばまったく抵抗はありません。これが「電気抵抗ゼロ（完全導電性）」という状態です。



もっと不思議なのは、先ほど述べたように、位相がそろってしまうと電子が何個いるのかわからなくなるということです。最初は9 gの中に 6×10^{23} 個いたはずなのに、超伝導状態になると、そこから外に（電気的には中性を保ったまま）電子が出ていたり、あるいは入り込んだりできます。これは「ジョセフソン効果」と呼ばれています。ジョセフソンがこのような説を発表した時、最初誰もがそんなとんでもない話は信じられないと思ったそうです。

さて、アルミニウムは温度を冷やして行くと約1 K（-272）で超伝導になります。このように物質の状態がある温度（圧力、磁場とかでもいい）を境に劇的に変化してしまう現象を「相転移」といいます。

相転移が起こると何かが「固く」となるということがわかっています。水が氷になるのも相転移ですが、このときは構造が固くなりますね。超伝導の場合は「位相」が固くなります。つまり超伝導に相転移して、すべての電子の位相があるひとつの値に揃ってしまうと、これをあとで別の値に変えるのは非常に困難になるのです。

ここから先はちょっと難しい話になります。じつはあとで出てくる電子のスピンというものに関係しているのですが、電子を1個だけ超伝導体中で別の場所（正確に言うと「別の状態」）に動かそうとすると、全体の位相の和が「半周期」だけずれてしまいます。そういうものなのだと思います。すると、超伝導状態は位相が変化することを嫌いますから、なんとかしてそういうことはさせないようにします。つまり超伝導体中で電子を1個だけ動かすのはとても大変な仕事になってしまうのです。物理の言葉で言うと「これを実現するには大きなエネルギーが必要だ」と

いいます。（もっとわけのわからない言葉を使えば、「超伝導ギャップが生じた」といいます）。

ただし、『運動量が互いに反対（全体の運動量の和を変化させないするため）になっていて、後で述べるスピンというものも反対（全体のスピンの和を一定にするため）になっているような2個の電子』を「いっしょに」動かしてやると、位相のずれは

$$\text{半周期} + \text{半周期} = 1 \text{ 周期}$$

となります。これは位相がずれな

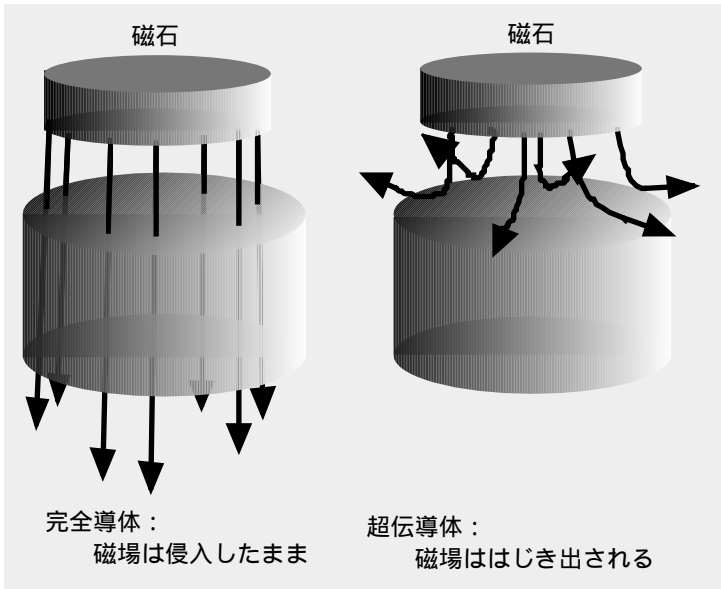
かったのと同じことなので、外から余分なエネルギーを加える必要がありません。つまり2個いっぺんに動かすのは簡単なのです。このように外から余分な仕事を加えなくても一緒に動きまわられる2個の電子の組のことを「クーパーペア」といいます。超伝導体中では電子が2個ずつ組になって運動しているということなのです。

位相が固くなるともうひとつ面白い現象が起こります。「マイスナー効果」です。実は最初に述べた「電気抵抗ゼロ（完全導電性）」だけでは超伝導とはいえません。頭の中で想像するだけで実際にはそんなもの作れないのですが、例えば、不純物のまったくいない理想的な金属は絶対0度で電気抵抗ゼロの完全導体になります。しかし、完全導体ではこれから述べる「マイスナー効果」は起こりません。

「マイスナー効果」というのは電位差がゼロのところをあたかも永久に電流が流れ続けているかのように見える現象です。超伝導の教科書には「マイスナー効果によって超伝導体の中には磁場が侵入できない」と書いてあります。（厳密に言うと第2種超伝導体とよばれるものには磁場が入って行きます。YBa₂Cu₃O₇ もその仲間です。この現象は非常に面白いのですが、ここでは省略します。）

超伝導でない、普通の金属に磁石を近づけると、金属の中に磁場が侵入します。そこで磁石を図のように金属の近くにじっとさせておいて、この金属をどんどん冷やしていくことにしましょう。そして、温度を下げたときに、この金属の電気抵抗があるとき突然ゼロになったとします。

さて、この電気抵抗ゼロの物質が「超伝導」ではなくて、ただの「完全導体」だったとしたら、どうなる



と思いますか？ 実はなんの変化も起こりません。磁場は侵入したままだし、磁石が引き付けられたり、あるいは逆に反発力を受けるということも起こりません。

ところが、この電気抵抗ゼロの物質が「超伝導体」の場合は驚くべきことが起こります。今まで物質の内部に入っていた磁場が全部物質の外にはじき出されてしまいます。磁場がはじき出されるので、磁石は超伝導体のそばにはいられなくなり、反発力を受けて、図のような配置の場合は宙に浮かぼうとします。皆さんが実験して体験したのはこの現象です。正確に言うと、 $YBa_2Cu_3O_7$ のような超伝導体の場合は磁場がほんの少し超伝導体の中に残るので、磁石はある安定な位置に固定されます。(これを難しい言葉では磁束のピン止めといいます。)

この「磁場の排除」という現象は、あたかも超伝導体の中に、磁石の磁場を完全に打ち消すような反対向きの磁場が生じているかのようです。しかもこの磁場はずっと同じ値のままで存在していて、時間がたつて

も、外からの磁石の磁場が超伝導体の中に入っていきというようなことは絶対に起こりません。高校の物理でも教わるのですが、磁場を作るのは電流です。(電磁誘導の法則) したがって、あたかも超伝導体の中に永久に電流が流れ続けているかのように思われます。しかもこの電流は電位差が全く無いにもかかわらず流れ続けるのです。まるで平らなテーブルの上に水を張った洗面器を置いたら何もしてないのにその水がいつまでもぐるぐるまわり続けているようなものです。これを「マイスナー効果」といいます。

これは「超伝導」に特有の現象です。単に電気抵抗がゼロの完全導体では起こらないことなのだということを覚えておいてください。つま

り超伝導体というのは単に電気抵抗がゼロの物質というわけではないのです。

実際には、これまで述べたように、超伝導体中では電子を数えられない状態になっているので、普通の意味での「電子の流れ=電流」は存在していません。どうして磁場が侵入しないかというのは電子の位相が固まってしまったからなのです。磁場が侵入すると電子の位相は変化しなくてはなりません。超伝導体はそれを嫌がるので、磁場が入っていかないのです。

超伝導転移という「相転移」によって電子の「位相」が固まったせいで、このような不思議な現象が生じるのだと理解しておいてください。

● 一触即発のにらみ合い・・・モット転移

超伝導とまったく正反対なのがモット転移という現象なので、せっかくだからちょっとだけ勉強してみましょう。

電子の位相が全部揃って、個数がわからなくなったのが「超伝導」ですが、逆に電子の個数が「正確に」わかってしまったらどうなるのでしょうか？ このとき電子の波としての性質はほとんど失われてしまって、位相の情報もむちゃくちゃになります。

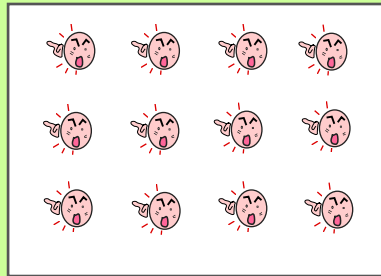
普通の金属の中では電子は波として振る舞っています。しかし、超伝導にならない限り、位相が完全に揃っているわけではありませんから、電子の個数もある程度正確に数えることができます。ところが、ある条件のもとでは、電子どうしが、お互いに近寄るのを嫌がるようになることがあります。お互いに近寄りたくないのだから、電子は固体の中に波としていっぱい広がるよりも、どこか狭いところにじっとしていた

超伝導クラブ 入会条件

1. 電気抵抗がゼロであること
2. マイスナー効果が見られること

電子がたくさん集まると、一個の時には考えられない不思議な現象が起きる。その両極端が「超伝導」と「モット転移」である。

$$\text{【電子波の位相のずれの乱雑さ】} \times \text{【電子の個数の不正確さ】} = 1$$



$$\text{【電子の個数の不正確さ】} = 0$$

モット絶縁体



$$\text{【電子波の位相のずれの乱雑さ】} = 0$$

超伝導体

くなります。しまいには、すべての電子がお互いに避けあって、それぞれ、自分の居心地のいい場所をみつけて局在するようになります。居心地のいい場所というのは、固体の骨格を作っているイオン芯のそばです。

固体の中にイオン芯がいくつあるかはわかっていまずから、電子が何個いるかはこの場合すぐにわかってしまいます。

このように電子どうしが近づくの嫌ってそれぞれがイオン芯の周りに局在してしまう現象を「モット転移」といいます。一見すると、自由電子がたくさんいて、金属であってもいいはずの物質でも、モット転移してしまうと電子どうしがお互いににらみ合って動けなくなり、電気の流れない絶縁体になります。

モット転移も相転移です。相転移が起こると何かが固くなります。この場合、電子の個数が固くなります。電気が流れないというのはそういうことです。

● スピンをそろえる・・・強磁性と反強磁性

先程から何度も出てきましたが電子は「スピン」というものをもっています。電子はひとつひとつが小さな磁石になっていて、その磁石のことをスピンというもので表現します。電子は負の電荷を持っていて、電荷をもったものが回転すると磁石になりますから、電子の持つ磁石のことを電子の自転(スピン)とよぶのです。しかし、これはあくまでも直感的なイメージで

あって、実際に電子がぐるぐると回転しているわけではありません。

先程も述べたように固体の中にはおびただしい数の自由電子がいます。超伝導のようにその電子みんなの位相をひとつの値に揃えるのも大変なことですが、それらの自由な電子全員の磁石の向き、つまりスピンを揃えるのも並み大抵のことではないように思えます。

実際にアルミニウムに強力な磁石を近づけても、全ての自由電子のスピンを同じ向きにすることはできません。ところが、幾つかの特殊な物質では、ある温度以下で全ての電子のスピンの向きが揃ってしまいます。超伝導と同じでこれも非常に不思議な「相転移」です。このようにスピンの揃ってしまった物質を「強磁性体」といいます。では、この相転移では何が「固く」なるのかわかりますか？この相転移で固くなるのは隣同士の電子のスピンの向き(つまり小さい磁石)の成す「角度」です。この角度が0°に揃って固まってしまふ相転移のことを強磁性転移といいます。

ちょっと難しい話なのでここから先はわからなくても構わないのですが、実は隣同士のスピンの成す角度が180°に揃って固まってしまふ相転移もあります。つまり隣同士のスピンの向きが交互に上向きと下向きを繰り返すのです。このような転移を反強磁性転移といいます。強磁性の場合はとにかく全ての電子のスピンの向きが全部同じ方向になればいいのですが、反強磁性というのは「隣同士の電子のスピンの向きが反対向きでない」と

いけません。したがってこれが実現するには自分の「隣の電子」というのがどいつなのかわかっていないといけません。

ひとつの方法は上向きのスピンを持った電子の位相と下向きのスピンを持った電子の位相をそれぞれまるで超伝導みたいに揃えといて、その位相のずれを半周期にすることです。スピン密度波とよばれる状態です。この状態は超伝導とほんのちょっと違うだけなので、実際に温度や圧力を変えるだけで超伝導の状態からスピン密度波の状態へ、あるいはその逆にと変化することができるのだといわれています。

もうひとつはモット絶縁体から出発する方法です。この場合電子は局在しているのでお隣さんがどこかかすぐにわかります。実際、多くの反強磁性転移はこのようなモット絶縁体で実現しています。反強磁性転移を起こしたモット絶縁体に、自由に動きまわられる電子を入れてやると、モット絶縁体と全く正反対の超伝導状態になるものがあります。実はこれが高温超伝導体と呼ばれているものです。どうしてそんなことが起こるのかについては未だによくわかっておらず、世界中で一先懸命に研究されているところです。



超伝導浮上と超伝導磁石

紀元前200年に錬金術師達がデモクリトスの名を不正に語ってPHYSICAという本を著しました。もちろん現在ではどのような方法を使っても金を含まないものから金を作り出すような錬金術を行うことはできないことがわかっています。しかしながら、物質の、すなわち電子の集団の性質を理解することで、近い将来、私達が現在まるで「金」のように、あるいはそれ以上に価値を見いだし必要としている様々な性質を持った物質を、自由に作り出すことができるようになる日が来るかもしれません。1986年以降世界を騒がせている高温超伝導体の発見というのは、まさにその一里塚のようなものではなかったのでしょうか。

● 錬金術? ~ 電子の集団の性質をコントロールするには~

以上、できるだけ数式を使わないで、超伝導とその周辺の話について説明してきましたが、まあ、何だか不思議なことがあるもんだということぐらいは感じていただけたのではないかと思います。物質の中には、電子が1個とか2個とかではなくて、たくさんいるからこそ、こんな不思議な現象(=相転移)が起きるのです。

温度や圧力や磁場といった外からの攻撃を加えないで、物質の性質そのもの、つまり電子の集団の性質をコントロールするには大まかに言って次の3つの方法が考えられます。まさに現代の錬金術の3つの秘伝です。

一、電子の運動できる方向を制御する。

つまり、直線内ではしか動けない(1次元)平面内ではしか運動できない(2次元)、どこでも動ける(3次元)というのを制御してやることです。この制御が他の2つに比べると最も難しいとされていますが、それだけに最も劇的な変化が見られます。

二、電子の運動エネルギーを制御する。

エネルギーが大きくて電子が動きまわりやすいのか、エネルギーが小さくて電子が動きにくくなっているのかを制御してやることです。錬金術師はこれを「バンド幅を制御する」という呪文で呼んでいます。

三、電子の密度を制御する。

単位体積あたりの電子の数を制御してやることです。同じ体積の中でも電子が何個いるのかで性質が変わってきます。ほんの少し変えてやるだけで劇的に性質が変わるものもあります。錬金術師はこれを「キャリア数を制御する」という呪文で呼んでいます。

'98工業技術院統一公開開催 1,502名の方が見学

去る7月31日(金)工業技術院統一公開が開催され、電子技術総合研究所でも小・中・高校生・一般を対象に、「見てみよういろんな世界」をテーマに13の展示を行いました。

今年は、昨年度を大幅に上回る見学者があり、説明者や受付などは対応に追われました。

電総研での見学者

1,502名(昨年度は1,005名)

工業技術院筑波センター全体

9,693名(昨年度は7,500名)

電総研での展示内容

酸化物単結晶の育成(電子基礎部) 天然ダイヤモンドを超えるダイヤモンド薄膜が気体から作れる!(材料科学部) LSI技術を用いた次世代フラットパネルディスプレイ(電子デバイス部) 音の世界の不思議な体験-無響室と残響室-(基礎計測部) 光コンピューター(光技術部) 陽電子(電子の反粒子)で見るミクロの世界(量子放射部)

宇宙で活躍するロボット(極限技術部) ピン止め力による超伝導浮上と超伝導磁石(エネルギー部) -地上に太陽を-核融合研究-大型逆磁場ピンチ実験装置(エネルギー基礎部) 進化するハードウェア筋電制御義手(情報アーキテクト部・知能情報部) 見て聞いて笑顔で話しかけるコンピューター-マルチモーダル対話システム-(知能情報部) オフィスロボットJijo-2(知能システム部) 感性で対話するコンピューター-電子美術館-(知能システム部)



電総研内でのスナップ



電総研内でのスナップ



来 訪

7月28日

堀内前通産大臣が真空マイクロラボのLSI技術による次世代フラットディスプレイの研究、進化システムラボの進化するハードウェアチップを用いた筋電制御義手を視察された。



編集 〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-4 工業技術院 電子技術総合研究所 0298(54)5059

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail: info@etl.go.jp

印刷・製本 株式会社イセブ