

ETL NEWS



電総研ニュース

仮想作業教示による実環境適応型ロボットプログラミング手法を開発

電総研における超電導エレクトロニクス研究戦略

電総研オープンサイトアンテナ測定設備

平成11年度の研究課題一覧

受章・その他

1999.6 vol.593

仮想作業教示による実環境適応型ロボットプログラミング手法を開発

- さまざまな環境で組立作業を行う知能ロボットシステムを構築 -

Real Environment Adaptation Type Robot Programming Technique using Virtual Teaching

- Intelligent Robot System which does Assembly Task with Various Environments -

知能システム部実環境作業構成ラボ

音田 弘*、小笠原司*¹、比留川博久、北垣高成、中村 晃、築根秀男*²

*¹ 現奈良先端大、*² 現大分県産業科学技術センター

e-mail: onda@etl.go.jp*

Intelligent Systems Division, Skill Integration for Real Environment Lab.

Hiromu Onda, Tsukasa Ogasawara*¹, Hirohisa Hirukawa, Kousei Kitagaki, Akira Nakamura, Hideo Tsukune*²

(NAIST)*¹, (OIRI)*²

We have implemented a novel method for automatic programming of robots. In our system, a robot can achieve various assembly tasks by monitoring the performance of human operator in virtual reality. We teach assembly task by using the sequence of contact state transitions which should occur in this task. Since automatic planning of this transition sequence of contact states is difficult except for a simple case, such a teaching system is significant from the practical viewpoint. An operator globally plans the motion in virtual reality and locally the system plans the motion and controls a manipulator in the real world.

1. はじめに

ロボットというと、普通の人が思い描くのはSFや映画に出てくるようなロボットでしょうか。SFに出てくるロボットはといえば、人間より力持ちだったり、頭が良かったり、すばらしい技能をもっていたりと、超人的な要素を何かしら持っています。映画等では、そういうロボットたちが当然のごとく動き回っています。あれは絵空事だ、とばかりもいっていただけません。人間に近い格好をしたロボットや、歩行を行うロボットが現実には現われはじめています。

超人的なロボットを作るのは難しくても、人間の行える程度の作業をこなすロボットならば、いつそれが現われてもおかしくないと思う方もいるのではないのでしょうか。では、人間なみのことができるロボットはすぐ誕生するのでしょうか。そういうロボットを作るには、どういう基本技能を持たせて、それをどう組み合わせ、ひとつひとつの動きを実現したらよいのでしょうか。そして、それらの基本技能はどういうふうプログラムとして書かれ、ロボットに「教え」ればよいのでしょうか。我々の研究グループでは、こういう問いに答えていこうと研究を

進めています。

2. ロボットを器用にするには

夢のないことをいえば、人間が容易にできるようなことでも、今のロボットにはまだまだ難しいことばかりです。ここでは、手作業に関して、人間の技能をロボットに移植するためにどんな問題があるのかを簡単に見てみましょう。

まず、人間の技能そのものについて、より良く知ることが重要です。心理学の分野等、作業を解析することは従来から行われていて、各種作業での人の挙動、作業の特徴等が明らかにされつつあります。しかし、これらは技能をどう構成するかという立場で行われたものではないことが多く、ロボット研究のように人間の技能をどう再構成するかという観点でのさらなる研究が必要です。そのツールとして、仮想空間内で作業を仮想的に行い、そのデータを記録することが有効だと筆者は考えています。さらに、器用な手作業の一例である組立のような作業では、把持物体同士の様々な接触の仕方を検出することが重要です。この接触状態の遷移は、現実世界では検出困難で

すが、仮想空間内では簡単に検出できるなど、仮想空間を用いることで得られるメリットが多々あります。

次に、ロボットに不可欠な単位作業機能を充実させることが必要となります。この単位作業機能は、作業を実行するために必要な基本動作で、様々な作業でそれを部品として用いることのできる汎用性のある動作です。筆者らのグループでは、この具体例として、力制御等の研究を基礎として組立作業に必要な単位作業機能(スキル)を開発してきました。このスキルは、作業環境が想定していたものと少々異なってもセンサや知能を駆使してその単位作業を実世界の環境に適応させてやり遂げることのできるプログラムです。部品の面同士の押しあて等の基本的なスキルがライブラリ化されています。このようなスキルを組み合わせれば、一連の組立作業を行わせることができるのです。

最後に、これらの単位作業機能をどう組合せて用いるかが問題となります。作業手順を自動的に求める問題は、行動計画と呼ばれる問題です。組立作業では、物体と物体の接触状態を制御して作業を行います。筆者らのグループでは、接触状態の解析手法や、くぼんだ部分のない凸多面体同士であれば接触状態を制御しつつ組立手順を自動的に求める手法を開発してきました。しかし、くぼみのある凹物体の場合はいわゆる組み合わせの爆発が起こり計算量的に困難

な問題となって、一般的には解をもとめることはできません。ただし普通の手作業に関していえば、計算機には難しい問題でも、人間は知識と経験を駆使して簡単に解いてしまいます。そこで、この計算量的に困難な部分を人間が担当し、大局的な計画を人間が行いロボットに教示し、局所的な計画を計算機が行うことにすれば、この問題を回避できます。この人間の教示を利用して、人間の知識と経験を蓄積していければ、ロボットをより器用にしていくことも可能となるでしょう。

3. 仮想教示によるロボットプログラミング

前節のような問題がある程度クリアした、単位作業機能を持つロボットができたとして、それを利用するにはどうしたらよいでしょうか。この問題に対しては、いろいろなアプローチがありえます。完全に自律的に動く知能ロボットの実現にはまだ多くの課題があるので、上記のような単位機能をプログラムとして持つロボットをどう人間が動かすか、という観点で話を進めます。筆者らのグループは、仮想教示によるプログラミングというアプローチを取っています。2節で述べたコンセプトに従いながら単位作業機能を有する器用なロボットを作成し、そのロボットに仮想空間で人間の試行した作業を行わせる新しいプログラミング手法とそれを用いた仮想教示

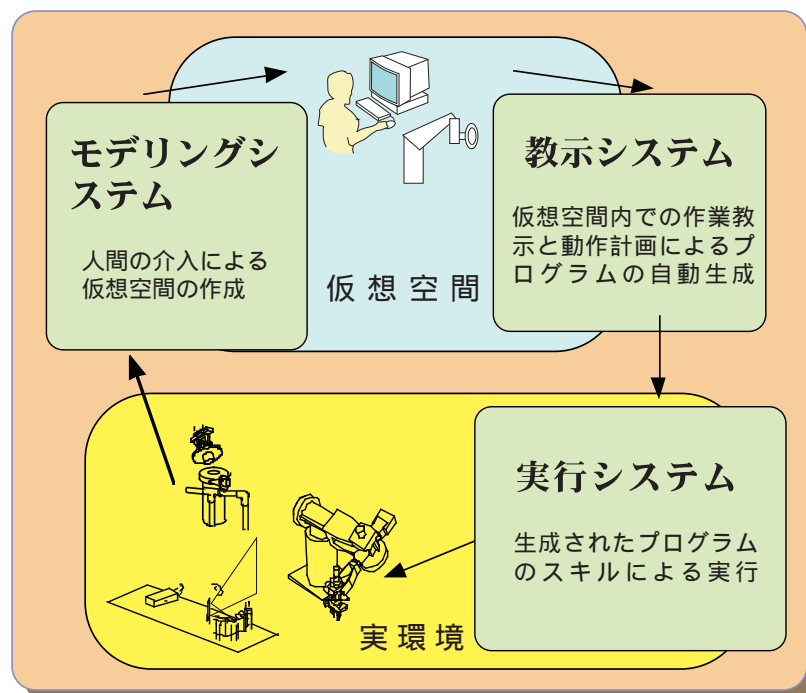


図1 システム構成

システムを開発しました。人間が仮想空間の中で作業を行うだけで、実環境に適応可能なマニピュレータ(ロボットの手と腕)の作業プログラムを自動的に生成し、接触を伴う作業を自動的に行えるシステムが開発されたのは、これが初めてです。これについて簡単に解説しましょう。

システムのコンポーネントは、以下の3つに大きく分けられます。(1)仮想教示システム(仮想空間内の作業から作業プログラムを生成するシステム)、(2)実行システム(仮想空間の作業プログラムを実環境で実行する技術)、(3)環境モデリングシステム(作業のための仮想空間をつくるための技術)の3つに大きく分けられます(図1)。これらにより、仮想空間を作製して、その中で人間の作業から作業プログラムを自動生成し、それを用いて接触を伴う作業を自動的の実環境で実行します。各システムの実現のために次のようなキーテクノロジーが用いられています。

(1)スキルで達成できる状態を基にした仮想空間内での作業教示

人間が仮想空間の中で作業を行うことによって実環境に適応可能な組立作業プログラムを自動的に生成する手法です。この手法では、仮想空間での作業に現われる接触を解析、記録し、現われた各接触状態をスキルで実環境において実現しています。接触状態をもとに作業を再構成することにより、仮想空間の接触を伴う作業を実環境の作業プログラムへ変換することが可能となっています。仮想空間の人間の作業から自動的に作業の仕様にあたるもの、すなわち接触状態の遷移の系列を導出することができます。

そして、この作業の中に現われる接触状態を一つ一つスキルで達成するプログラムを生成することにより、実環境に適応できるプログラムの自動生成が行われます。生成されたプログラムを実行すると、教示された接触状態が確実に実現されます。これにより、物と物との接触を伴う組立などの精密な手作業を、実環境に適応させながら確実に実行することが可能となっています。

(2)力情報を用いたマニピュレーションスキル

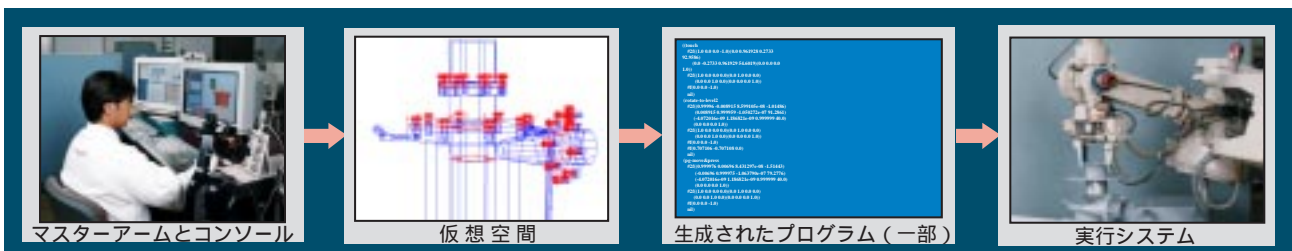
力情報を用いて、接触点の時間変化のパターンを的確にセンシングし制御することにより、高度なマニピュレーションスキルを実現しています。

力センサで計測された力とモーメントのデータから、実際の物体同士の接触点に対応する位置を推定して、その時間変化のパターンのモニタリングを行っています。これを用いて、組立作業に良く現われるような面合わせ、挿入等の接触状態を実現するスキルを開発し、ライブラリ化しています。

(3)教示ツリーを用いた環境モデリング

人間が介入することによって、対象物の限られた部分のデータから位置・姿勢の決定を信頼性よく行う環境モデリング手法です。

プラント内の保守作業を対象にする場合、保守対象の機器に関してはCADデータ等から幾何モデルを作成しておくことができます。レンジファインダという装置によって、実環境の物体の面の情報を測定し取り込み、対応する幾何モデルの位置・姿勢を同定し、仮想空間が作製されます。ただし、プラント内のような未整備環境下では、測定対象となる物体の前



コンソールを見ながらマスターアームを操作して仮想空間内で作業を行う。

仮想空間内で行った作業から接触状態を解析し、動作手順を計画する。

計画された各動作を行うためのスキルプログラムを組合せて全体プログラムを生成する。

生成されたプログラムを実行する。

図2 仮想作業教示を利用した実環境適応型ロボットプログラミング

に他の物体があって測定を妨げたり、鏡面反射で物体の一部分のデータが正しく得られない場合が生じます。このような場合の仮想空間の構成は非常に困難です。本システムでは、物体の面が部分的にしか見えていなくても、測定された面情報と幾何モデルの面とを人間が対応づけることによって、対象物の限られた部分のデータから位置・姿勢の決定を信頼性良く行うことが可能となっています。

これらのコンポーネントを利用して、システムがプログラムを自動生成する過程を説明しましょう。

プログラム生成までの手順は、次のようになっています(図2)。

環境モデリング技術、コンピュータビジョン技術、バーチャルリアリティ技術を用いて、実際の作業環境に対応した仮想空間をコンピュータの中に作製します。

作業を教える人間はこの空間の中で操作対象物を自在に操ることにより、組立作業を仮想的に実行し、仮想作業教示を行います。その時のすべての作業実行データをコンピュータが記録し解析することにより、作業プログラムを自動的に作成します。

この際に、接触状態も解析されます。仮想空間で得られた作業プログラムは、マニピュレーションスキルをライブラリ化したスキルライブラリで実行可能なレベルにあり、現実の作業環境との誤差はスキル内部で補償されます。ここで得られたプログラムを実行システムが実行します。

このシステムで扱っている作業、すなわち物と物との接触を伴う作業は、自由空間でジェスチャーをするような接触を伴わない作業に比べて、一般に困難です。接触を伴う手作業の代表例ともいえる組立作業を、ロボットに行わせたいという要望は、産業用としてばかりでなくプラント内での保守作業等、広汎な分野から寄せられています。プラント等での保守作業は、工場でのように十分な環境整備が許されない未整備環境下の作業であり、短時間で作業の完了が求められます。これは非常に厳しい制約が課せられていることに相当します。ここに述べた仮想教示によるロボットプログラミングという手法は、仮想環境での試行錯誤を許すという安全性、スキルの未整備環境への適応性によってそのような場で力を発揮するものであり、ロボットの活動範囲を工場からプラント内、そして、さらにより広い範囲に拡大していく基盤技術として期待されています。そして、ス

キルを組合せた高次のスキルを構成していることに注意すれば、ある程度器用なロボットを利用しながらそれをさらに器用なロボットにする、という側面もあり、人間からロボットへの技術伝承(スキルトランスファー)の観点からも好ましいアプローチといえます。

4. おわりに

ロボットの技能、それも手の動作に関わる技能に注目して話をしてきましたが、残念ながらそれが人間並みになるのはまだまだ先のことになりそうです。ここでは取り上げませんでしたが、ロボットのハードウェア自体も改良していかなければなりません。考えてみれば、生物は約40億年かけて人間のような形態にまで進化してきたのですし、人間並みのロボットと技能を「短時間で」人工的に作ろうというのは、そもそも無理なことなのかもしれません。とはいえ、人間の祖先と目されるアウストラロピテクスは約400万年前に直立歩行を行っていたようです。その頃から手を使い出して今日の技能まで身につけたとすれば、既にロボットが直立歩行しはじめた今、その日は思ったよりも早く来るのかもしれません。

最後に、今後の研究の方向について簡単に述べます。今回、紹介した研究は、従来の幾何モデルに基づく物体操作方式を、スキルを導入することにより実空間での作業にうまく適用できるものとして利用する枠組みを作ったといえます。しかし、物体間の摩擦、遊び、あいまい性などのため、従来の幾何モデルに基づく物体操作方式だけでは器用な作業の実行はできません。この問題を解決すべく、筆者らのグループでは、不確定性を考慮した接触および仮想的な拘束記述に基づく技能の開発と体系化、視覚・力覚によって拘束を導く手法の研究を開始しています。

研究課題名

原子力ロボットの実環境行動計画技術に関する研究

電総研における超電導エレクトロニクス研究戦略

電子基礎部長 清水 肇
hsimizu@etl.go.jp

1. はじめに

電子技術総合研究所は、超電導のエレクトロニクス分野への出番を長年主張し、低温、高温超電導それぞれに独自の出番があるとの両輪論の立場にたって研究を推進してきた。酸化物高温超電導体が発見されて以降、超電導研究には一時期かなりの追い風が吹いていたが、10年以上の歳月が流れた現在は、むしろ向かい風が変わってきている。必ずしも超電導を専門としない人も含めて、かつてエールを送ってくれた人達からの、技術開発に対する鋭い問題提起や論点にも耳を傾けて、「超電導エレクトロニクスの来し方行く末」を自問しなければならない時期である。今後の超電導エレクトロニクスの戦略を練る上で、研究を担う側が気長な技術開発への可能性を主張しているだけでは、庇護の元での研究開発になりかねず、もはや現実的ではない。成果を受け入れる側をも含めた総合的な議論の中から、技術領域や研究ターゲットの設定、目標達成のためのマンパワーや

資金源の配分、費やせる時間、組織的な研究に向けての研究拠点の在り方などを精査すべき時期に来ている。以下では、これまでの電総研における研究開発の要約をし、その分析並びに周囲状況を踏まえて、今後重点を置くべきテーマに関し戦略を述べる。

2. これまで果たしてきた役割と何を学んだか

電総研は、電気試験所時代にヘリウム液化機の導入を計り、低温物理の先駆的研究の立ち上げと物性科学の発展に貢献した。その後数々の超電導応用について、低温超電導はもとより、後には高温超電導を含めて研究を実施してきた。その流れを図1に示す。代表的な応用分野である、計測技術、エレクトロニクス、エネルギー技術等では、萌芽的研究を育て、その中からジョセフソン電圧標準システムや電力関連の大規模なシステム研究まで多様な展開を行ってきた。また、超電導材料研究の広がりや、長期計画に基づく超電導エネルギーエレクトロニクスへの出番を想定

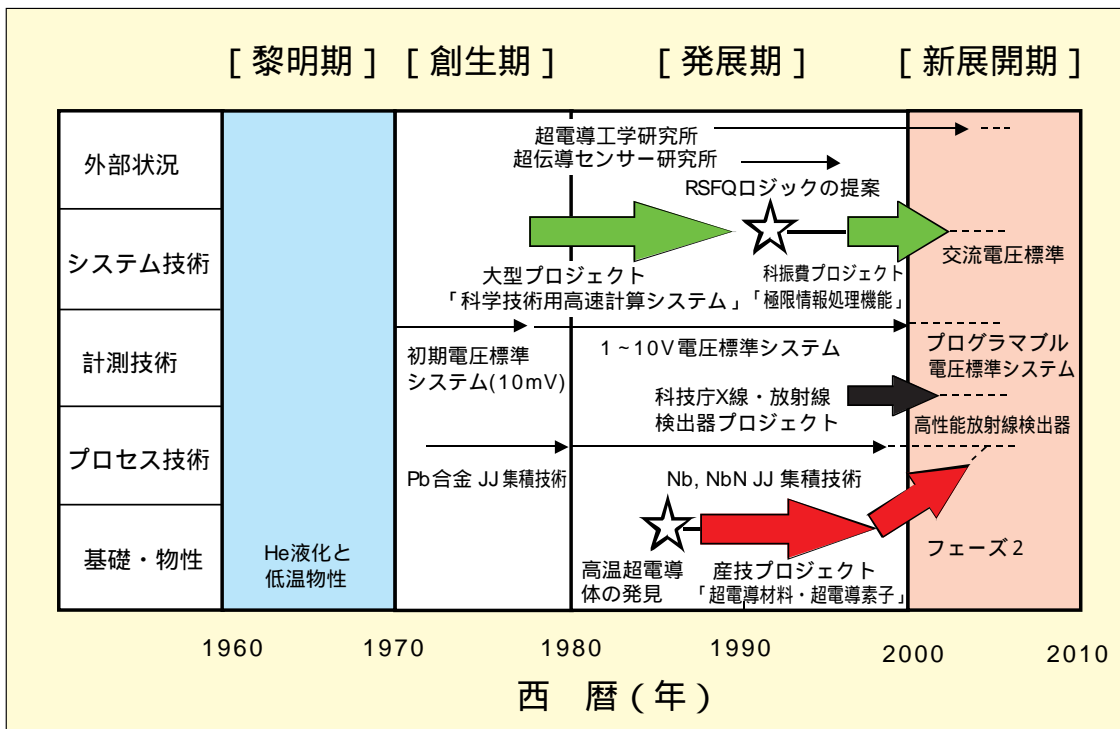


図1 電総研における超電導エレクトロニクス研究の歩み

しているが、ここでは、狭義のエレクトロニクスに限って議論を進める。

(a)低温超電導エレクトロニクス

今日のエレクトロニクスの潮流であるデジタル応用分野の研究では、システム技術として「高速」、「大容量」、「低消費パワー」はクリアすべき最も重要な性能課題である。この中で「高速性」と「低消費パワー」については、「シリコン系エレクトロニクス」が今後発展したとしても、素子の動作原理上は超電導の方に有利な出番があると考え、所の戦略として超電導エレクトロニクスの研究を進めてきた。

1981年電総研でジョセフソンコンピューターに向けての研究を開始し、1982年から始まった工業技術院大型プロジェクト「科学技術用高速計算システム」の中で発展させ、1989年にETL-JC1として実証した。これらの成果は、まだ物性物理学の対象であった超電導研究を、エレクトロニクス技術分野に押し上げて、研究に夢を与える牽引車の役割を果たした。所内においては、それまでの主流であった鉛(Pb)系から信頼性の高いニオブ(Nb)系、さらに転移温度が高い窒化ニオブ(NbN)系を扱う新しい材料プロセスを開拓し、回路技術等の基盤を整えて、超電導研究を波及させる効果をもたらした。

しかし超電導エレクトロニクスを取り巻く状況としては(1)プロジェクト開始前段階で既に予想されていた、シリコン系エレクトロニクス技術の高度化への見通しがあり、(2)開発段階では市販のコンピューターの高速性能の予想を上回る長足の進歩があった。ETL-JC1は、1チップあたりの有効素子数が数千個レベルまで集積化された回路レベルで、コンピュータに必要とされる機能をすべて持つなど、完成度の高い装置で世界的にも規模としては進んだ研究成果であった。残念ながら、追究すべき課題の一つである高速性(ラッチ型、kHzのクロック)に関しては、ライバル陣営を唸らせるレベルには達しなかった。プロジェクト終了時点において実用化への展望はもとより、次の研究戦略を立てることの困難さを痛感した。さらには、1986年には高温超電導体が発見され、マンパワーのシフトが生じたため、Nbを素材とする低温超電導デジタル回路開発は一時停滞した。

その後、磁束量子(Single Flux Quantum:SFQ)を情報の単位として利用する論理回路が提案された。SFQを使う回路にはやはりジョセフソン接合を用いるが、それまでのラッチ型に比べて素子動作速度が桁違い

に速く、高速性に対する展望が開けた。1997年には、科学技術庁の振興調整費総合研究制度で「単一磁束量子を担体とする極限情報処理機能」の研究が取り上げられた。電総研、産学および超電導工学研究所(SRL)が参加し、超電導デジタル回路開発に向けての新たな挑戦をすることになった。

このテーマの運営面における重要な特色は、電総研に独自のプロセス設備整備を継続する一方、産学については民間企業1社への集中投資によりNb系集積回路プロセスの一本化を進め、研究グループの連携の強化と研究資源配分の重点化を図ったことにある。電総研ではこれまでに(1)接合数100個レベルの3ビットカウンタ、シフトレジスタ等基本的な回路部品の動作確認と(2)極めて小規模な回路(1ビットカウンタ:接合数8個)の高速動作(100GHz)の検証をしており、次節で述べる計測分野への応用を目指した研究に踏み出した。

(b)高温超電導エレクトロニクス

高温超電導体は、物性科学や材料科学分野における基礎研究として極めて魅力的なものであった。液体窒素温度下での動作条件は、低温環境に対する心理的負担を軽くし、実用化に対しての距離感を大きく縮めた効果も大きく、所内の様々な分野からも参入した研究者は多かった。1988年からスタートした工業技術院次世代産業基盤研究開発(後に産業技術研究開発)制度「超電導材料・超電導素子」プロジェクトにおいて、物性、材料、接合、素子の4分野で探索的研究が総合的に実施され、足踏みしていた超電導研究に対して追い風を与えたことは確かである。

当所においては、高い転移温度を持つ物質や低異方性銅系超電導体の発見など活気ある研究が進められた。世界の研究趨勢をもってすれば、超電導の機構解明にも早晚手が届くと思わせるものがあつたが、当初の予想に反して、高温超電導の発現機構は依然として謎に包まれている。現在も理論と物性実験との間には厳しいやり取りが続いている。

高温超電導エレクトロニクスに話を戻すと、世界的には物質科学や、材料、プロセスの分野で探索的な研究が進められ、応用に結びつける話は小規模のベンチャー企業が得意な出番を目指す活動が主体であった。ところが、我が国では対照的に応用技術に対する期待が驚くほど大きく、フィーバとも呼ぶべき現象が起き、上記のプロジェクト内では超電導回路を目指した能動素子の開発が進められた。電総研で

は、積層型ジョセフソン接合の集積およびそのパラッキ評価、極低温STS(Scanning Tunneling Spectroscopy)による超電導表面における電子状態の観察、接合特性の制御性を高めるための電極表面の電子状態の解析等基礎的課題を担当して1998年に終了した。

以上の経緯を振り返ってみると、新しい発見によって大きな応用に繋がるストーリーが創られ、市場規模の議論にも発展したが、それにはかなり楽観的な期待が含まれていたことが、エレクトロニクス応用の研究を実施した結果明らかになった。高温超電導フィーバ現象は、すべてのフィーバがそうであるように、やがて終熄の時を迎えた。なぜだろうか？簡単に言えば、焼き固めるだけで誰にでも超電導を確認でき、超電導を身近に感じさせた物質も、薄膜や接合向けのエンジニアリングマテリアルとして扱った途端に自然は行く手を執拗にさえぎってきた。多元系でしかも超電導発現には結晶性を要求する物質のハンドリングが大変なことは、化合物半導体の研究への長い道のりを考えれば想像に難くないことである。欧米における高温超電導研究開発戦略の立て方への論点の差異は、このあたりの見通しにあると見るべきである。低温超電導を高温超電導で置き換えるという企てはそう簡単でない。

これら物質群が持つ高い転移温度や物性に由来する高速応答性などの優位性は、デジタルエレクトロニクスの技術開発からは確かに魅力的である。しかし、今後の戦略を検討する上では、この物質の超電導物性がまだ十分に明らかでないことを、「単に物性研究の世界の話」として見過ごしてはならない。エレクトロニクスのキーテクノロジーであるジョセフソン接合の制御性を高めてゆくためには、ひたすらプロセスや材料についてより高度な技術を駆使して、探索的研究を引き続き進めるだけでは不十分である。ブレークスルーを生むことを目指して、既知の知見を活用してかなり絞り込んだ指針を取るべきである。そのためには、物質、材料、プロセスをつなぐ研究として、表面・界面での超電導特性や素子物理に対する新しい視点や議論が必要である。

なお、高温超電導は固体内電子の多体電子相互作用によって発現し、これら「強相関電子系」と呼ばれる物質群は高温超電導以外に、従来の物性の枠組みを越えた種々の性質を示す。たとえば、巨大磁気抵抗効果などの新しい発見が多々あり、この物性の奥の深さを見せている。酸化物エレクトロニクスなど超電導とは異なる新しい方向性を示した研究分野の芽

が育つ動きも有って、我々は周囲の研究の広がりにも目を向けるべきで、研究者のフレキシブルな発想や感受性をますます研ぎ澄まさなければならない。

3. 我々は中期的目標として何を目指すか

(1) デジタル応用

以上述べた様に、超電導エレクトロニクスの研究環境の変化の中で、ここまで到達した数々の業績は先輩及び関係者のたゆみ無い努力の恩恵によるもので、高く評価されるべき事柄である。これからは、長年の成果を活用し、ギャラリーを説得して我々自身が追い風を起こしながら、もしかしたら名脇役に徹してでも、超電導がキラリと光る出番への道筋を示してゆく役割を担わなければならない。

(a) 低温超電導

超電導エレクトロニクスが克服すべき高速性は、磁束量子(SFQ)を用いた回路技術の研究を基本とし、システムのトータルな評価につながる、高速のパルス信号を伝送する実装技術、低温と室温動作の素子をつなぐインターフェース技術などを融合した技術開発を目指さなければならない。

米国では、現在もベタフロップス級コンピュータ用CPUとしてのSFQ回路の応用を目指し、大規模な回路(数万~数十万接合)技術やそれらを作製するための集積プロセスなどを集約化したRSFQ(Rapid Single Flux Quantum)技術の開発が進められつつある。関連のある技術陣営に対して超電導の出番を語って説得し、支援を取り付けて夢や希望を研究陣営に与えながら、目標達成に向けて牽引する米国の研究グループの姿勢に我々は学ぶべき点は多い。

しかし、現状および今後のシリコン系エレクトロニクスの進歩を考慮すれば、日本のコンピュータ産業界では、省エネルギーや高速性の点に注目して5年以内に超電導ベタフロップスコンピュータや、超電導電子交換機に対するニーズが喚起される可能性は低いと予測する。なおかつ、そのレベルの目標達成には相当の技術的詰めや克服すべき課題が必要とされ、フラグシップマシン開発への適切なスポンサーを探すことも容易でないと考えられる。

電総研は、研究開発の時間展開を考慮して超電導特性を生かした確実な出番のある路線として、「産業計測」分野の育成に向けての戦略を当面採用する。エイジェンシー化に向けた施策を具体化する中で、開発スケジューリング的に可能な超電導デジタル技術の具体的な応用への早急な提示が、研究開発への支援を

取り付けるためには重要と判断している。図2に、電総研における今後の超電導エレクトロニクス技術開発の展望を示す。図3にはそれらの技術要素の難易と技術開発への社会的期待度としてのインパクトをやや主観的に整理した。

「産業計測」分野での当面の具体的ターゲット、「高精度電圧発生用 DA 変換器」や「超高速 AD 変換器」など標準・計測用デバイスの開発に置く。その基礎として3年以内にRSFQ回路をベースとするDA変換器用チップの開発を行い、その後交流電圧標準への応用を具体化する。同時に、AD変換器チップの開発を進め、極限的計測技術への応用を図る。

このために、2001年のエージェンシー化に際して、デバイス開発の基盤を整えたデバイスセンター（仮称）の中で、Nb系デジタル回路の設計、作製、評価を中心とする超電導エレクトロニクス用プロセスラインを充実させ、外部にも開かれた研究を進め、日本における超電導エレクトロニクス研究の拠点となることを目指す。

上記の目標設定は、コンピュータや電子交換機への超電導の出番を否定したものではない。2005年以降、シリコン系エレクトロニクスの発展の中で、消費

電力の問題が次第に顕著になることは明らかである。当然、システム全体の機能の評価、競合技術や相補的な技術の改良や発展への見通しの中で優位性を我々が主張出来れば、10年後、あるいは20年後になるかの議論は別にして超電導に出番が来る可能性が高い。そのためには、現在のシリコンテクノロジーが、半世紀かけて辿った集積化回路技術、アーキテクチャーなどの面で、低温超電導の優位性の具体的実証をシリコン系エレクトロニクスのロードマップの中で示さなければ、念願の目標に超電導が顔を出す機会は永久に生まれない。

その他に、規模はコンピュータより小さくて比較的早い出番が期待されるものとして、ソフトウェア無線通信が名古屋大学より提案されている。SFQ回路を基本部分に採用することにより、大きなダイナミックレンジと広帯域特性を備えた超電導AD変換器の開発が提案の骨格である。チップの作製規模は $10^3 \sim 10^4$ JJ/チップ程度と推測されるので、現在の技術力の進展時間軸を外挿した点に、ターゲットを設定することは十分可能である。実現にあたっては、スペック的な優位性と互換性、開発への時間軸などを明確にすることは勿論として、常に高い信頼性が要

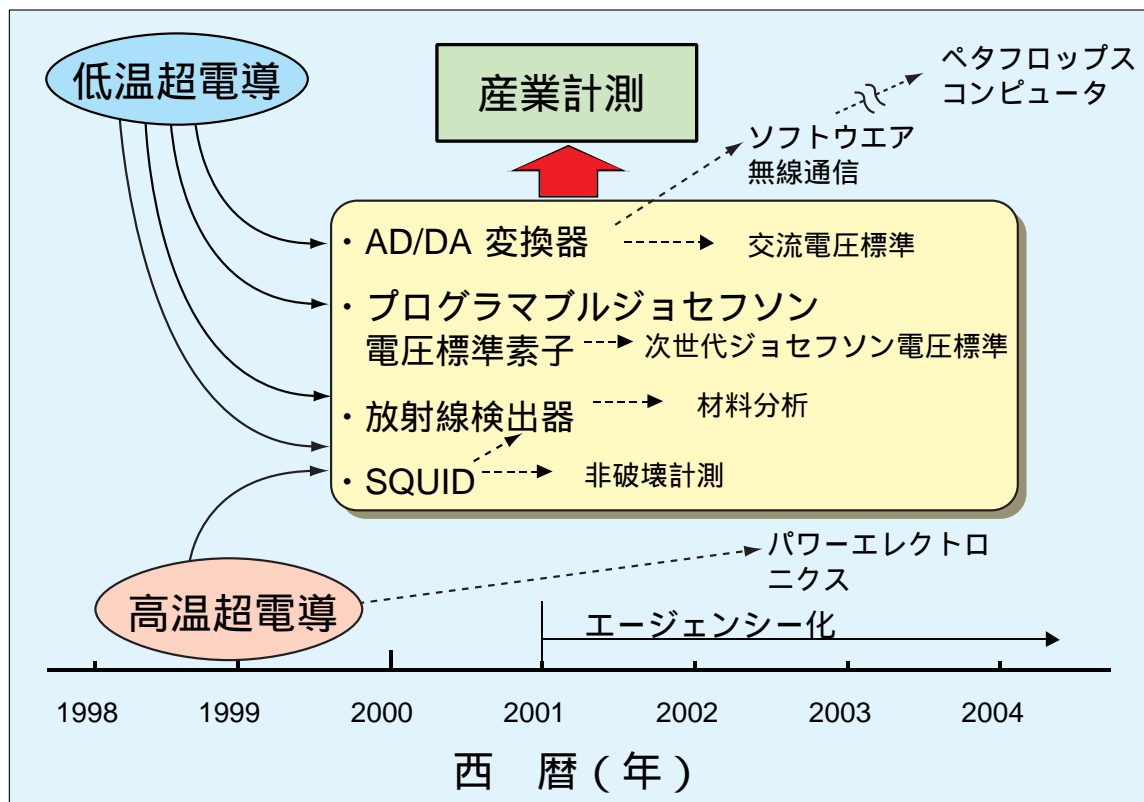


図2 電総研における超電導エレクトロニクス技術開発の展望

求されるシステムに対する代替技術としての保証を、超電導研究者側が実証することが必須である。さらに、低温環境への心理的バリアの払拭といった、超電導研究者が今まで経験したことの無い新たな役割への厳しさが要求される。

電総研における超電導エレクトロニクスのロードマップの中では、先に述べた「産業計測」の目標達成に当面注力し、今後の展開に伴う研究ポテンシャル、マンパワー並びに外部協力体制を踏まえながら、図3に示したソフトウェア無線やコンピュータへの出番を判断すべきと現在考えている。

(b)高温超電導

高温超電導のデジタルエレクトロニクス向け研究戦略を時間軸まで加味して立てることは今のところ極めてむづかしい。これまでに最小限の数のジョセフソン接合を用いて、SFQを応用したフリップフロップ回路動作の確認が民間で行われている。1998年よりISTECと民間企業との参加のもとにニューサンシャイン計画「超電導応用基盤技術研究開発(いわゆるフェーズ2)」がスタートし、高速エレクトロニクスの基礎としてSFQ応用を目指している。低温超電導のNb系集積回路技術に相当するものが、高温超

電導では小規模ですらネックになっている。ボトルネックの解消を目指して、少なくとも1000個の接合をチップ上に集積し、その時の臨界電流(Ic)のばらつきの標準偏差として5%以下にすることを目指している。さらに、その成果に基づいて集積化回路技術を進めることをプロジェクトの研究開発目標として設定している。

接合技術の高度化には、今後現われるブレーススルーの発見にかかっているといっても過言ではなく、2000年度より同プロジェクトに電総研が参加するにあたっては、研究進展の節目々々において、当所において層の厚い物性物理、材料プロセス等の研究者間の議論を通して、「素子物理」という視点からの接合研究の指針をまとめて行く。プロジェクトの目標達成に向けて材料やプロセスの研究が不可欠であるが、主目的でなく、動作する回路技術の実証を目指すプロジェクトの目標達成に民間と共に歩調を合わせる責任がある。

ところで、当所が取っている両輪論の中で、主役が高温超電導か低温超電導かの問題は重要では無くなりつつある。詳細な議論は省くが、高温超電導体の動作温度をどの程度に設定するかは、回路設計に必要なマージンや熱雑音の問題と関連しているため、単

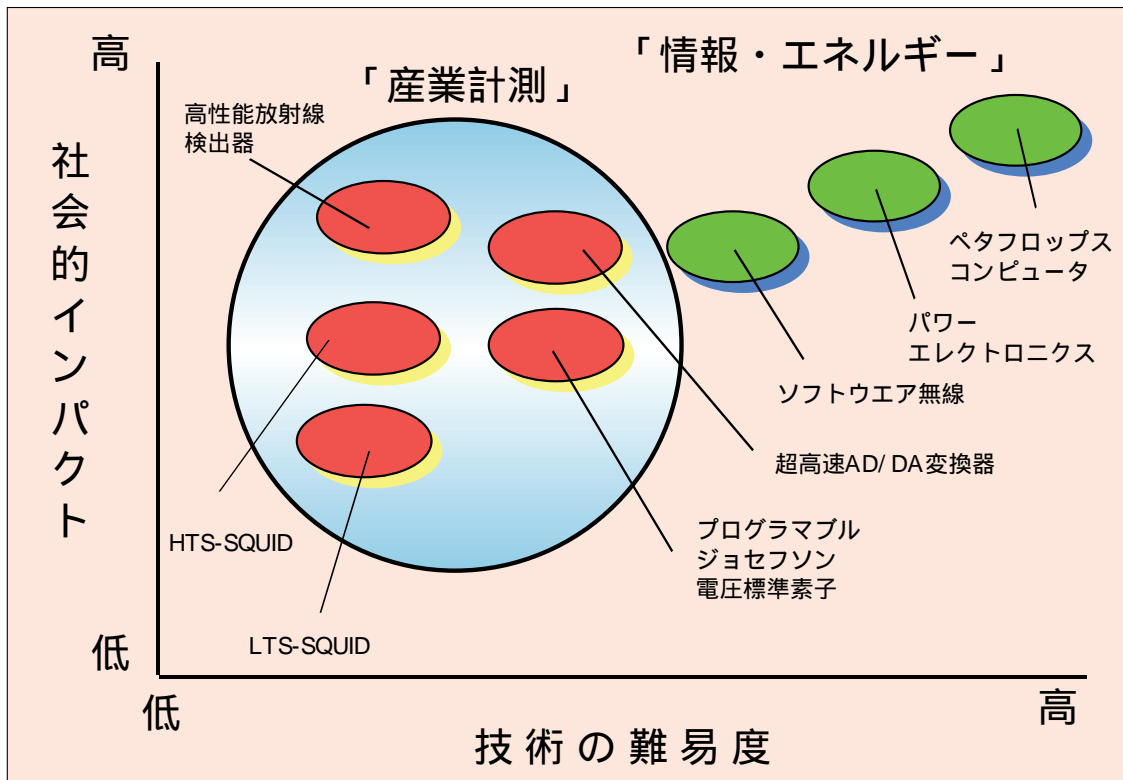


図3 超電導を利用する様々の技術の位置づけ

純には温度のメリットを主張できない。その上、今後ギャラリーが注目する点は動作温度の優位性だけではなく、小規模の回路であれ具体的応用への出番に向けた目標設定と、目指す技術の完成度である。低温超電導エレクトロニクスや、シリコン系エレクトロニクスでは実現困難なことを目指さなければならない。

(2) 超電導カロリメータ

ますます微細化・高密度化が進む半導体産業およびバイオ産業、環境技術などにおける極微量元素材料分析、状態分析へのニーズに応えるものとして、超電導カロリメータ(TES)を利用するX線・放射線検出器の研究が大きな注目を集めている。その理由は、半導体や超電導トンネル接合(STJ)を利用する検出器よりもはるかに高いエネルギー分解能が得られることにある。超電導転移端を利用することにより、従来の極低温超電導カロリメータに比較して応答速度を数桁向上出来、さらに、簡便な冷却システムによって用意が可能な0.1 K近傍において動作させても、高エネルギー分解能を保つことができる。X線領域に話を限れば、従来の結晶分光法の高いエネルギー分解能性と、半導体検出器の迅速性の利点を兼ね備えている。さらに、高温超電導体を利用することでは、様々な温度で高感度のポロメータとしての利用も可能である。このため、超電導カロリメータの開発は、超電導エレクトロニクス分野では、初めて大規模市場の開拓につながる可能性が期待されている。当所では、「産業計測」において重要な材料分析技術になるとの認識から、その実用化に向けて周辺技術まで含めた超電導カロリメータの研究開発を開始した。

一方、これまでの半導体検出器に比較して優れた性能を有することから、超電導トンネル接合を利用したX線・放射線検出器の研究開発を既に行ってきた。「産業計測」の戦略を進める観点から、競合技術である超電導カロリメータの出現に対して、単体素子が持つ性能面と、素子の集積化やシステム化も含めて応用上の出番に対して、それぞれの技術のどこに具体的優位性があるのかの議論を、早急に詰める必要が有る。電総研の置かれている限られた条件下では、多様な可能性を追求することは得策ではなく、当所の研究が産業の世界で使われる競争力を持った技術としての出番を目指すためには、戦略を詰めるべき時期に来ている。図2に要約した論点にもとづき、所内研究体制と、産業界との連携の最適化

が焦点の課題である。

(3) ジョセフソン電圧標準

電総研では、これまでに直流ジョセフソン電圧標準システムの開発を進め、素子集積技術や周辺技術を含め、日本はもとより世界的にも大きな貢献を果たしてきた。今後は交流まで含めた新たなジョセフソン電圧標準の確立を目指す。「産業計測」分野における高精度電気精密測定の新技術の確立(例えば、高精度AD/DA変換器の校正等)を目指す。これらの目標達成のために、先に述べたRSFQ回路をベースとするDA変換器の開発を行うとともに、任意の大きさの電圧を短時間(秒レベルから1/1000秒レベルに改善)で発生が可能なプログラブルジョセフソン電圧標準素子の開発を実施する。後者は、従来のジョセフソン電圧標準素子では、動作電圧の設定に長い時間を要していた問題の解決を目指して、近年米国のNIST(National Institute of Standard and Technology)のグループによって提案されたものである。電総研では独自に開発したオーバーダンプ型ジョセフソン接合を採用し、NISTとの共同研究により、実用的に有用な数Vの電圧発生を目指す。最終的には、3万個以上の接合を集積した標準素子チップを作製する。

(4) SQUID

高温超電導体を利用したSQUID(Superconducting Quantum Interference Device)センサは、高温超電導体の実用的な応用の有力な候補として期待されている。冷却技術が簡単になるばかりでなく、試料とセンサの距離を小さくできる利点も大きい。このため、素材製造工程での欠陥の検出などの小規模なものから、航空機のフィールド試験を対象にした大規模なものまで、高温超電導SQUIDセンサーの様々な応用が欧米を中心に検討されている。また、微小磁気ビーズと組み合わせた抗原抗体反応量計測など、バイオ工学分野における分析技術としての小規模研究開発も進められている。電総研では、金属疲労に伴う余寿命検査など、これまでとは質の異なる材料評価技術としての非破壊検査技術を中心に研究を進める。非破壊計測技術の開発には、素子の研究開発ばかりでなく、システムレベルの研究や利用ソフトウェアの開発が必要であり、その点においては市場ニーズの把握と外部機関との共同研究が重要である。

低温SQUIDについては、電総研はこれまで超電導センサー研究所を通じ、わが国における生体磁気計

測システムの開発に貢献してきた。今後は、「産業計測」のために必要な技術開発を進めると同時にその移転を図る。当面具体的には、(2)項で述べた超電導カロリメータの付属デバイスとして不可欠である高感度SQUID増幅器の開発を民間企業と共同して進める。

4. おわりに

電総研においては、高温超電導と低温超電導の研究を両輪論の立場から進めてきたが、現時点での低温超電導、高温超電導両研究のポテンシャル、将来の技術開発の展開へ寄与の仕方についての分析し次期目標と戦略の議論をした。

超電導エレクトロニクスの研究開発には、今後も引き続き何らかの公的な支援を要請してゆかなければならない。その際、庇護のもとでの研究推進でなく、研究開発の社会的受容性にも踏み込んで、「超電導でしか出来ない」、「超電導ならなお良い」という出番を見据えて、研究戦略を主張すべき時期と、我々は考えている。超電導エレクトロニクスの実用化に向けた当所の戦略は、21世紀の高度に発達した「半導体」、「バイオ」、「材料」、「計測技術」などの主要産業に対し、超高速信号処理技術、高精度・高感度センサー技術、電圧標準技術などのいわゆる「産業計測」向けの競争力のある技術を開発し、提供することにある。

低温超電導研究に関しては、磁束量子(SFQ)を扱う回路技術開発に取り組み、高速デジタルエレクトロニクス分野では、DA変換器などの応用目標を設定しする。センサー技術として放射線検出器の開発の研究を促進する。

高温超電導研究のデジタルエレクトロニクス応用については、基礎的な視野で接合制御の問題にターゲットを集約する。フェーズ1の成果を活用し、素子物理の視点を取り入れて研究すべきと考える。超電導カロリメータ、SQUIDには独自の出番があると期待される。長期的な視点で、基礎物性研究の発展や酸化物を扱う新しいエレクトロニクスの萌芽的研究の育成には引き続き注力するが、所外との連携を一層強めホットな議論の場に出番があるよう心がけなければならない。

ここに述べた超電導エレクトロニクスへの戦略をもとに、周囲の研究の進展を視野に入れて、今後何をすべきかの議論に我々はもっと時間を使い、ささやかでも、追い風を自ら巻き起こして研究の発展を目

指す。

最後に、「近藤効果の発見」で著名な当所の誇る世界的な理論物理学者である近藤淳博士(当所顧問、学士院会員)の言葉を引用して締めくくる。「何を研究のテーマに選ぶかを良く考えることが研究の最も重要な過程で、それが決まれば研究はかなり進んだとも言える。研究には粘りが必要で、自分は研究は好きだがいつも楽しいと思ったことはなく、日々苦しみながら進めてきた。」

用語の説明

(1) SFQ回路とラッチ型回路

超電導デジタル回路方式。SFQ回路では、磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)の有無が二値情報に対応づけられる。磁束量子は、永久電流として超電導ループ中に記憶され、微小電圧パルスとして回路内を伝播する。この回路原形は我が国で研究され、近年米国で「RSFQ(Rapid Single Flux Quantum)回路」として体系化された。低消費エネルギー性と高速性からシリコン系エレクトロニクスに優位性を持ち現在の超電導デジタル回路方式の主流となっている。

ラッチ型回路ではジョセフソントンネル接合素子のゼロ電圧とギャップ電圧状態が二値情報に対応する。ラッチ型回路では、ギャップ電圧状態からゼロ電圧状態へのリセットが必要となるため、SFQ型回路の方が消費電力が小さく、また高速動作可能である。

(2) 米国におけるペタフロップス級コンピュータ開発

複雑系システム、宇宙航空システムの流体力学モデル、長期天気予報、遺伝子データ管理、世界経済ダイナミクスモデル、核物質管理等に関する大規模な計算を短時間で行うことを目的に米国で行われているペタフロップス級コンピュータ開発プロジェクト。HTMT(Hybrid Technology Multi-Thread)プロジェクトと呼ばれる。マシン全体は、RSFQ回路から作られるCPU、超電導キャッシュメモリ、フォログラムメモリ、光ネットワーク等によって構成される。最終モデルでは、10万JJ規模のRSFQ回路チップを作製し、それらを50個マルチチップモジュール上に集積し、さらに、512個のモジュールを直径0.9m、高さ0.8mほどの空間に集積することによってCPUが構成される。CPUと超電導メモリの冷却は液体Heによって行われる。

(3) ソフトウェア無線

通常の無線通信では、ある通信方式にのみ対応した機器を用いて、送信・受信を行なっている。これに対して、ソフトウェア無線では、プログラム可変のデジタル信号処理により、一つの機器でプログラムを書換えるだけで任意の通信方式の取り扱いが可能で柔軟性から将来性が期待されている。

(4) 熱雑音と SFQ

熱ゆらぎによってジョセフソン接合の位相が回転する現象は「位相すべり」とよばれる。これが、超電導回路中のジョセフソン接合で発生すれば、回路の誤動作となって現れる。熱雑音に起因する誤動作確率 p は、

$$p = A \exp[-B I_c / T]$$

と近似的に表わせる (I_c : 接合の臨界電流、 T : 動作温度、 A 、 B : 回路構成に依存する定数)。通常の応用に対しては、 $I_c / T > 25$ 程度 (例えば、 $T = 4.2\text{K}$ において $I_c = 105\mu\text{A}$) にとれば誤動作確率は無視できるとされている。高温超電導体においても SFQ の動作原理は同様であるが、動作温度を高く設定できることの優位性と熱雑音による回路の誤動作の問題はトレードオフになるため、応用を想定するうえで回路規模や回路の仕様への制約となる。

(5) 半導体、超電導を比較した、AD, DA 変換器現状と超電導の優位性

計測・標準用超電導 DA 変換器のねらいは、ジョセフソン効果を利用して任意の波形を高精度に合成することで、これを半導体素子で行なうことは原理的に不可能である。

AD 変換器の民生用としての主たる用途はオーディオ用で、市場規模のある超電導の応用はほとんどない。レーダー技術ではコストを無視しても、より高い性能が求められる特殊分野として期待されている。ソフトウェア無線基地局の AD 変換器は新しい狙い目といえるが、システムにおける冷凍機の評価が重要になる。ただし、化合物や Si/Ge という強力な競争相手が存在する。

(6) 直流ジョセフソン電圧標準システムとプログラマブルジョセフソン電圧標準素子

ジョセフソン素子にマイクロ波を照射すると、素子の電流/電圧特性曲線上に、一定の間隔で定電圧ステップが発生する。この電圧間隔は、照射するマイクロ波の周波数のみに依存し、素子の材質や形状等の

他のパラメータには依存しないため、精密直流電圧測定における基礎標準として広く用いられている。現在、数千個から数万個の素子で構成されるジョセフソンアレイを利用して 1~10 V の直流電圧を発生させている。最近になって、バイナリー方式、パルス駆動方式、RSFQ 方式等の任意の電圧波形を発生させることの可能なプログラマブルジョセフソン電圧標準が提案され、交流電圧標準等への応用を目指して、電総研、米国 NIST、ドイツ PTB 等の国立研究機関で実用化研究が進められている。

(7) 超電導放射線 (X線) 検出器

超電導を利用した X 線検出器には、トンネル接合検出器 (STJ) と熱量計型検出器 (ボロメーター、カロリメーター) がある。前者は、半導体検出器同様に X 線によって超電導ギャップを越えて励起される準粒子の数を数えることにより、吸収された X 線のエネルギーを分光する。後者は、X 線を吸収した吸収体の温度変化を、大きな温度・抵抗変化を有する超電導転移端を利用して測定するものであり、1995 年に新動作原理が発表され注目を浴びることとなった。性能 (6keV - X 線の半値幅と計数効率) としては、トンネル接合素子がおよそ 27 eV、数千 cps、超電導カロリメーターの場合が 7 eV、数百 cps が報告されている。動作温度はいずれも、0.1 K 付近である。

(8) SQUID

光波の干渉を利用することにより高精度距離測定が可能となると同様、電子波の干渉を利用して磁場の高感度・高精度測定を可能とするセンサー。超電導リングの一部に数個のジョセフソン接合素子を含む構造を有する。数 10 フェムトテスラ (地磁気の約 10 億分の 1) の磁場計測可能。微小磁気、電流、電圧、変位計測などに応用されている。非侵襲計測手段として数百チャンネルの SQUID 脳磁システムが市販され、脳機能診断のために使用されている。今後、高温超電導体を利用した SQUID に置き換えられることが期待されており、そのための技術開発が重要である。

電総研オープンサイトアンテナ測定設備

光技術部 電磁界計測ラボ 小見山耕司^{*1}、森岡健浩^{*2}

Optoelectronics Division, Electromagnetic field measurement lab. Koji Komiyama^{*1}, Takehiro Morioka^{*2}

光技術部長 矢嶋弘義^{*3}

Director of Optoelectronics Division. Hiroyoshi Yajima^{*3}

E-mail: komiyama@etl.go.jp^{*1}, tkmoriok@etl.go.jp^{*2}, yajima@etl.go.jp^{*3}



写真 標準アンテナ測定用オープンサイト

1. アンテナ測定用オープンサイト建設の背景

人間社会の経済活動は世界規模に広がり、工業製品の輸出入が盛んに行われる。わが国の経済は天然資源の少なさゆえに技術立国を目指して発展してきたこともあって、工業製品の輸出に重点をおく現状にある。良質の製品を外国に輸出しているが、中小企業も含めて多くの企業が輸出に関与し貿易摩擦を生み出す原因にもなっている。工業製品の中でも電気を利用した製品はわが国の得意とするところであり、過去にはいろいろな形態の貿易摩擦が生じた。

電気エネルギーを利用した工業製品は、内部に電流が流れているため特に直接に電波を放射する機能をもつ携帯電話機や無線機などに限らず、さまざまな雑音性の信号を発生し、それを空間に放射することもある。これらの不要放射電磁波はさまざまな機械の誤動作を引き起こし、以前には工業用ロボット

の誤動作による事故が、最近では医療機器の誤動作が報告されており、このような電磁障害を防止するためEMC規制が実施されるようになった。わが国では電気用品取締法などが整備されつつあり情報関連装置に関してはVCCI^{注1}自主規制が行われ、欧米ではEMC規制による市場管理が行われている。

ヨーロッパにおいてはすでにEMC規制により市場製品調査が実施されており、年間に数千種類の製品が検査され、もっとも割合の大きいAV製品では43%が不合格に、平均すると22%の割合で電気製品が不合格になっている。EMC規制とは、主に機器からの不要放射電磁波の強度を規制するために規定された方法と設備によってその放射雑音を測定し、規定値以下であれば合格となる規制である。VCCI規制もそのひとつであり、具体的な測定法としてはグランドプレーン(導体板)の上に被測定機器を設置し規定の

注1 情報処理装置等電波障害自主規制協議会

工業技術院筑波第2研究センター内

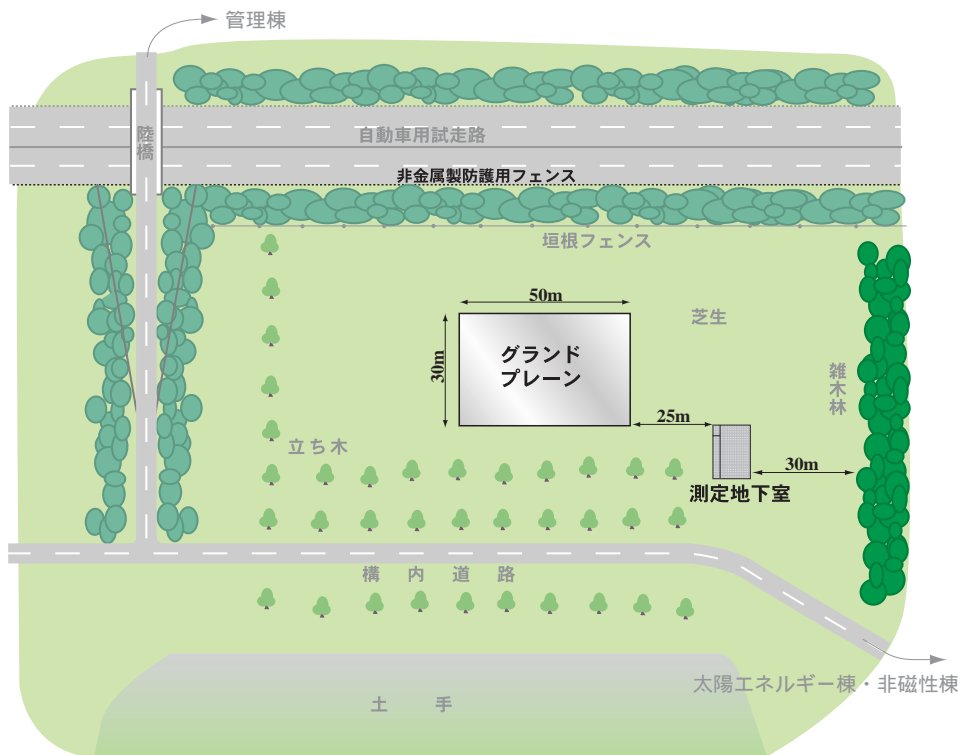


図 標準アンテナ測定用オープンサイト配置図

距離だけ離れた位置に受信アンテナを置いて不要放射電磁波を受信する。このとき導体板は測定場を同一条件にするために用いられる。この測定のために用いられるグランドプレーンを含む測定設備がオープンサイトである。電波測定のためには、屋内において測定できるように上下および周囲からの反射を抑えた電波暗室も用いられるが、長い波長領域では電波吸収材が大型化し、また伝播距離を長くするために大規模な電波暗室が必要になる。現在規制の中心となっている30MHz～1000MHzの周波数帯においては、野外でグランドプレーンを用いたオープンサイトがしばしば用いられる。

一方、空間的な不要電磁界を測定するにはアンテナが必要であり、計測結果が規制の合否判定などに用いられるためアンテナそのものの感度が重要になる。電磁界を高精度に測定するためには同一の基準が必要であり、そのために標準アンテナを校正する測定技術やアンテナ校正用の基準アンテナ測定場が必要となる。当所では、平成10年12月から標準アンテナ測定用オープンサイトの建設を開始し、平成11年3月に完成した。(図,写真) オープンサイトの主体は図に示されるような接地された地上の平面金属

板(グランドプレーン)である。白色塗装を施したグランドプレーンの中央部付近に送受信アンテナを取り付けるアンテナマストを設置しアンテナ測定設備として使用される。地上の電波反射物は測定誤差の原因となるため、アンテナマスト以外は突出するものはなく、測定作業室も地下に設置したため、外見上は空き地のように見える。近接する雑木林の境界を後退させ、アンテナ間の伝播方向に広い空間を開けている。車両試験用の周回路の防護柵を非金属製のフェンスに取りかえるなど、近くにある金属物を可能な限り排除している。

2. オープンサイトの機能とアンテナ測定への使用

完成したオープンサイトは主に30MHz～1000MHzの周波数帯域においてアンテナの計測・校正を行う設備である。この周波数帯域においては放射性妨害波測定に使用することも可能である。アンテナを特徴付ける特性には入力インピーダンスや指向性、利得などが挙げられ、いずれの測定においてもアンテナ以外に電波を反射する物体が存在するとその散乱波が測定値に誤差を与えるので、アンテナ測定は周囲空間に全く反射物の存在しない自由空間で行われるこ

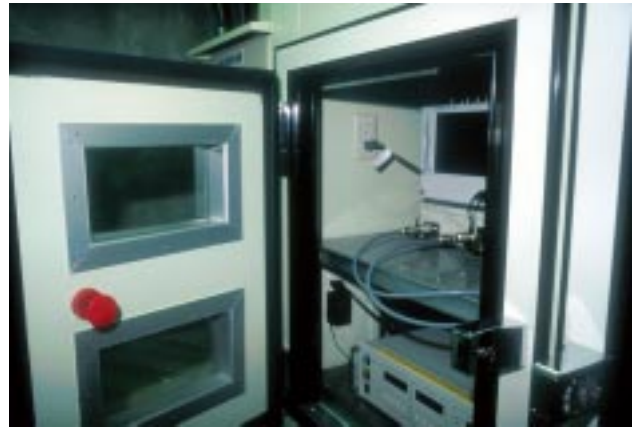
とが理想である。しかし、地上では地面があるため周囲に電波を反射する物体が全くない空間を実現することはきわめて困難である。このため、逆に地面に導体反射板を平面状に敷くことにより理論的に予想できる反射状態を作り出し、理論的な裏付けを得て高精度にアンテナ測定をする設備がオープンサイトである。理想的なグランドプレーンは無限大の広さが必要であるが、物理的な制約から有限な広さのグランドプレーンを用いている。また、理想的な反射状態を実現するためにグランドプレーンの平面性が重要であると同時に、周囲物体からの電波反射・散乱が測定の誤差となるためにグランドプレーンより上にある物体をできる限り取り除く処置を行った。これにより理想的には被測定アンテナ間の電波伝播は直接波とグランドプレーンでの反射波のみとみなすことができるので、理論的にも評価できる。このようにアンテナ間を理想的な伝播経路とみなし、この経路上で誤差の原因となる反射などの電磁波伝播を避けるために、当所のオープンサイトは以下のような条件に沿って設計・建設を行った。

1. グランドプレーン構造として 16mm 厚鉄板を用い、溶接により 50m×30m の大きさの 1 枚鋼板
2. グランドプレーンの平坦度の目標値を ±6mm で設計
3. グランドプレーン全周にステンレスのメッシュを取付け、地中埋設し接地を確保
4. 電磁波を反射しにくい FRP 製アンテナマスト
5. 送信アンテナ用電動マスト駆動部は地下ピットを設けてグランドプレーン下に設置
6. 10m 及び 30m の送受アンテナ間距離を実現するための電動マスト移動機能
7. 地上建造物による反射を回避するため、測定作業室を地下に建設
8. ケーブルの減衰低減のため測定機器をグランドプレーン下のピット内に恒温槽に収納して設置、さらに、地下測定室内から直接測定するためケーブル配線
9. 周囲の雑木を除去

また、アンテナ間伝播の精密計測のため伝播減衰測定にはネットワークアナライザを用い、送受アンテナ間の複素Sパラメータを測定する。オープンサイトでの実際のアンテナ測定手順は次のとおりである。グランドプレーン上のアンテナマストを用いて



アンテナマスト



恒温槽内の測定機器



グランドプレーン地下ピット

一定の高さに送信アンテナを設置し、信号を供給し電波を放射する。放射された電磁波を送信アンテナから一定距離離れて設置された受信アンテナで受信し、その信号の伝播減衰を測定する。送受アンテナに接続する信号ケーブルは、あらかじめ送受アンテナから外して直結し、送受アンテナと伝播空間の入らない減衰量を校正する。送受アンテナの端子に信号ケーブルを接続すると、送受信アンテナの特性と空

間伝播減衰を合わせて測定できる。周囲の電波環境を理想的とみなせばアンテナ間伝播による減衰を理論的に取り除き、残った減衰量が送受信アンテナ特性を統合した情報を含むことになる。

アンテナは空間電磁界と伝送回路とのインターフェイスであり、空間電界と回路内電圧を結びつけるアンテナ単体の特性として、EMCではアンテナを設置した空間の電界強度Eと出力電圧Vの比によって定義されたアンテナ係数 $AF(=E/V)$ が用いられる。上記のような送受アンテナ間の伝播計測からアンテナ単体の特性を抽出する方法として3アンテナ法を用いる。3アンテナ法とはアンテナ係数の不明なアンテナ3本による3通りのアンテナの組合せを用いて伝播減衰測定を行うことにより3元一次連立方程式をたて、未知数としてのアンテナ係数を解く手法である。

EMCの分野ではANSIの規約に記述されている送受アンテナ高が異なる3アンテナ法がよく用いられるが、グラウンドプレーンから数m以内に設置したアンテナはグラウンドプレーンとの相互結合によりアンテナ係数に高さ依存性が生じ、この方法ではアンテナ標準となる正確なアンテナ係数が求まらないことが今まで行ってきたNEDOとの共同研究^{注2}による予備実験によって確認されている。このため、今後アンテナ標準測定のために当所においてオープンサイトをを用いて行う電磁界精密計測手法としては送受信アンテナ高を同一に設定した固定高3アンテナ法が採用される。

また、理論計算や数値計算によって解析評価が可能なアンテナが標準アンテナとして望ましく、30MHzから1000MHzの周波数領域では半波長(共振、または非共振)ダイポールアンテナを用いる。数値解析的に求めたアンテナ係数と測定によって得られた

アンテナ係数との比較を行うことによって測定上の誤差要因を排除し測定精度を向上させる。

理想的なアンテナ間の伝播経路は、送信アンテナから受信アンテナに到達する直接波とグラウンドプレーンによって反射されて受信アンテナに到達する反射波が存在し、受信アンテナで観測される電磁界はこれらの合成界である。しかし、グラウンドプレーンの周囲による回折波、周囲構造物による散乱波、グラウンドプレーンの平面度の不足による理想的ではない反射波や熱膨張によるグラウンドプレーンの変形、風によるアンテナの揺れ、アンテナマストによる電磁波の反射、さらには放送波や通信用電波など外来電波等が混入するため、現実にはアンテナ間の伝播経路は理想状態からずれ、アンテナ測定には誤差が生じる。これらの誤差要因に対処して得られる高精度測定技術によるアンテナ測定値と、アンテナ理論から得られる理想的なアンテナ特性が一致することが望ましく、今後のアンテナ標準の研究はこれを目標に行われる。

アンテナ測定用オープンサイト建設工事の設計・施工

1) アンテナ測定場建設工事(オープンサイトグラウンドプレーン側)

設計外注：株式会社日本設計

施工：TDK株式会社

監理：株式会社日本設計

2) アンテナ測定棟建設工事(地下測定室側)

設計：建設大臣官房官庁営繕部営繕計画課

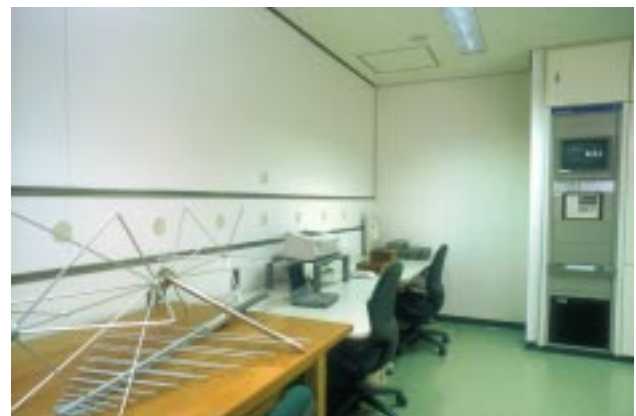
筑波研究学園都市施設管理センター

施工：フジックス建設株式会社

監理：株式会社日本設計



地下測定作業室入口



地下測定作業室

注2 平成10年度NEDO即効型提案公募プロジェクト「電磁環境両立性保証のための標準測定オープンサイト評価の基盤技術開発」

平成11年度の研究課題一覧

特別研究

計測・標準計測

量子効果を利用した計測・標準に関する研究
計測標準の高度化及び利用技術に関する研究

バイオニクス

生体における情報統合プロセスに関する研究
神経細胞の情報制御機構に関する研究
生体関連複雑系の動特性に関する研究
生体における刺激・受容分子の識別機構に関する研究

電子技術

光と電子の量子的相互作用制御技術に関する研究
極限プロセス技術を活用した半導体材料制御に関する研究
極端紫外レーザーの高効率励起技術に関する研究
スーパー・ヘテロ機能材料に関する研究
電子数制御デバイスに関する研究
サブピコ秒デバイス技術に関する研究
表面エレクトロニクスに関する研究
酸化物光エレクトロニクスに関する研究
プラズマを利用した新システムの基盤に関する研究
多点計測技術及び発生源同定技術に関する研究
新奇な超伝導体に関する研究
強相関電子物性に関する研究
近接場の機能と制御に関する研究
計算物質科学基礎技術に関する研究

宇宙開発関連技術

次世代宇宙インストラクチャに関する研究

情報技術

情報ダイナミクスに関する研究
帰納的情報処理の実証的研究
相互作用による知的行動制御に関する研究
認知的インターフェースの研究
知的メディア処理に関する研究
ネットワーク情報場に関する研究
実世界知能に関する研究

境際研究

行動下サル神経活動の光計測技術に関する研究

原子力平和利用技術

核融合用高磁界超伝導マグネットの応力緩和技術に関する研究
KrF レーザーによる核融合に関する研究
核融合反応に関する研究
先端領域放射線標準の確立とその高度化に関する研究
小型高輝度放射線源の開発とその利用に関する研究
エネルギー可変線発生技術の高度化と利用に関する研究
原子力エレクトロニクスのための素子化プロセス技術に関する研究

原子力ロボットの実環境作業構成技術に関する研究
放射線・レーザー複合場における結晶成長ダイナミクスとその応用に関する研究
単一サイクルパルスの発生に関する研究
放射線励起による量子作用の高効率検出技術に関する研究
ロボット群と保全知識ベースの協調によるプラント点検・提示システムの研究開発
自由電子レーザー先端技術に関する研究
超低速短パルス陽電子ビームによる表面物性評価法の研究
高密度マルチスケール計算技術の研究

公害防止技術

窒素原子注入法による排煙脱硝に関する研究

標準基盤研究

新素材等先端技術関連標準基盤の整備

知的基盤研究

電気標準のトレーサビリティ技術の研究
マイクロ波・ミリ波電力トレーサビリティ範囲の拡大
電磁界強度分布の精密測定技術に関する研究
分光反射率測定技術とその複合材料の評価技術確立に関する研究

国際特定共同研究事業

神経回路網の可塑性の研究
機能分子ならびに分子固体に関する研究
撮影の物理を考慮した頑健な医療画像診断手法の確立に関する研究
ネットワーク計算用行列工房
半導体量子ナノ構造の顕微分光評価

国際産業技術研究事業（ITIT）

レーザー容射法を用いたパワー素子用材料作製技術の研究
高効率結晶化合物太陽電池の研究

先導調査研究

スーパーコンパイラ・テクノロジー
スピントロニクス素子基盤技術に関する先導調査研究
産業科学技術研究開発

ヒューマンメディア

フェムト秒テクノロジーの研究開発

フェムト秒共通要素基礎技術の研究

ゲノムインフォマティクス技術研究開発

遺伝子配列情報のモデル化技術

医療及び福祉機器技術の研究開発

ヒューマンフレンドリー介護支援知能機器の研究開発
高速コーンビーム三次元X線CTの研究
医学・工学連携型の研究事業

産業科学技術研究開発（特別会計）

細胞機能応用計測技術開発の評価

石油及びエネルギー需給構造高度化技術開発評価

細胞機能発現制御技術開発の評価

産業科学技術研究開発（特別会計）**発電施設用高機能メンテナンス技術開発評価**

- システム化技術の評価
- 3次元微細加工技術の評価
- 極微小高機能電子回路の研究開発評価
- 高輝度X線パルスの利用発電施設モニタリングシステム開発評価

超短パルス光エレクトロニクス技術開発評価**産業科学技術研究開発（応用研究開発）****人間協調・共存型ロボットシステム研究開発**

- 人間協調・共存型仮想ロボットプラットフォームの研究開発
- 人間協調・共存型ロボットシステム・シミュレータの評価（特別会計）
- ロボットプラットフォームの構成法の評価（特別会計）

超高密度電子SI技術**エネルギー・環境領域総合技術開発推進計画（ニューサンシャイン）****省エネルギー技術研究開発****省エネルギー技術の確立調査**

- 省エネルギー技術の総合的効果把握手法の確立調査
- 省エネルギー技術評価に関する研究

先導的・基盤的省エネルギー技術研究開発

- 省エネルギー材料に関する研究
- 超低損失電力素子の研究
- 交流超電導電力機器基盤の研究

超電導電力応用技術研究開発

- 超電導線材の研究
- 先進的超電導線材の研究
- 超電導発電機の研究開発
- 回転子要素技術の研究
- トータルシステムの研究
- ケーブル・マグネット要素技術の研究

燃料電池発電技術

- 固体電解質型燃料電池発電技術
- 乾式技術の研究

電源多様化技術開発評価（特別会計）**太陽光発電システム実用化のための解析・評価**

- 薄膜太陽電池実用化のための開発・評価
- 薄膜シリコン系太陽電池の解析・評価
- 化合物太陽電池用材料及び制作技術の解析・評価
- 太陽電池構成・解析評価の研究
- 太陽電池用新材料の解析評価（クラスター粒子の太陽電池用材料の解析・評価）
- 太陽電池用新材料の解析評価（太陽電池材料ベータ鉄シリサイドの評価）
- 超高効率太陽電池の技術開発のための解析・評価
- 高効率太陽電池技術開発のための解析・評価
- 周辺技術研究開発のための解析・評価
- 太陽光発電システムの解析・評価

超電導電力応用技術研究開発

- 超電導線材の研究
- 超電導材料特性評価
- 超電導発電機の研究開発
- 回転子マグネットの安定性評価
- トータルシステムの研究
- 冷凍システム能力評価

超電導フライホイール電力貯蔵の研究開発に伴う評価

- システム設計技術開発
- 超電導バルク材料特性評価
- 超電導軸受の性能評価

二酸化炭素回収対応タービンの開発に伴う解析・評価

- 二酸化炭素回収対応タービンの開発に伴う解析・評価
- 産業連関をベースとするエネルギー・環境分析モデルの構築と評価

燃料電池発電技術

- 固体電解質型燃料電池発電技術
- 発電性能評価

分散型電池電力貯蔵技術開発

- 高能率未来型電池評価
- 安全性・信頼性評価

エネルギー需給構造高度化技術開発評価（特別会計）**環境調和型高効率エネルギー利用システムの解析・評価**

- 廃熱回収システムの解析・評価
- 燃焼加熱型熱電子発電技術の解析・評価

エネルギー需給構造高度化技術開発評価（特別会計）**超低損失電力素子技術開発評価**

- 基板結晶・プロセス・素子評価基盤技術に関する研究
- 石油及びエネルギー需給構造高度化技術開発評価（特別会計）

水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術

- 高温水蒸気電解に関する解析・評価
- 高温水蒸気電解に関する解析・評価

重要技術の競争的研究開発

- 実時間生体機能情報処理のためのビジュアルコンピューティング技術の研究
- 次世代インプリサイズ実時間システムに関する研究
- 宇宙情報通信システムの軌道上保全技術の研究
- 極限酸化技術を用いた微細構造限界デバイスの研究
- 多言語情報処理アーキテクチャの研究
- 高度難聴者のための超音波補聴器開発に関する研究

重要地域技術の研究開発**高品質結晶材料の製造法の研究開発**

- 溶融材料の熱物性値に与える不純物の影響に関する研究
- 低損失材料創製技術（特別会計）

地域コンソーシアム研究開発

- 工程適応型フレキシブルロボット技術に関する研究開発
- 高性能フラットパネルディスプレイ技術の総合開発研究

新情報（特別会計）

- 能動知能システムの評価

進化システムアーキテクチャの評価

超並列システムの評価

高並列大容量演算システムの評価

科学技術振興調整費

総合研究

物質と材料の自己組織化機構の解析と制御に関する研究

高密度パルス光の発生と先端的物質制御基盤技術に関する研究

機能調和酸化新機能材料創製の開発に関する研究

単一磁束量子回路とのインターフェイスの研究

海底ケーブルを用いた地震等多目的地球環境モニター

ネットワークの開発に関する研究

広域高速ネットワークを利用した生活工学アプリケーションの調査研究

高度医療ネットワークに関する研究開発

中核的研究拠点(COE)

大域情報処理技術

二国間型国際共同研究

導波路型磁気光学デバイスの設計と作製

多層超伝導体中の磁束量子と電磁波に関する研究

超伝導高速信号波形の実時間観測技術に関する研究

タンパク質誘導薄膜構造変換機構の研究

電圧感受性チャンネルの構造と機能の解明

有機薄膜光スイッチング素子および光メモリーの共同開発

コヒーレント光電子制御による超高速半導体素子に関する共同研究

イオンビームによる巨大磁気抵抗材料の創製

計算代数に基づくロボットの動作計画ソフトウェアの研究

重点基礎研究

半導体基板上に集積可能な磁気光学電子デバイスの作成

光パルス三次元形状制御技術の研究

陽電子オージュ電子分光法による酸化層形成過程の研究

揮発性物質の超高感度計測法の研究

分散電源の能動的利用技術に関する研究

色素の会合体を利用した高感度なNO₂ガスセンサーの開発

仮想空間における設計支援及び評価の研究

目標達成型脳科学研究推進制度

ヒトを含む霊長類のコミュニケーションの研究

網膜神経回路網・視神経の再生における制御因子に関する研究

文脈主流型、認識・判断・行動機能のための動的記憶システムの研究

流動促進研究制度

多元系酸化物薄膜の原子層制御 MBE 成長とデバイス化技術の研究

問題解決履歴からの重要パターン知識の自動抽出の研究

項書換系における数学的構造の研究

環境感覚を用いた人間の生理情報の蓄積とその応用に関する研究

知的基盤整備推進制度

国際的先導材料の実用化を促進するための基盤構築に関する研究

X線極限解析装置の研究開発

物理現象の高度化に関する研究

量子標準体系の高度化に関する研究

重点研究支援協力員

高性能電子材料・デバイスの製作・評価に関する研究

地球科学技術特定調査研究

雲の構造及び放射過程に関する研究

地球環境遠隔探査技術

長波長マイクロ波超合成ラジオメータの観測パラメータの研究

新規産業創造型提案公募事業

炭化ケイ素高温半導体新結晶成長法の開発

ポスト0.1ミクロン時代に対応するディープサブナノ多次元位置測定装置の開発

高効率廃熱利用を目指した熱電材料エコプロセス

小型コジユネ・電気自動車用低温動作固体電解質燃料電池の研究開発

プロトン伝導性無機高分子固体電解質を用いた電気自動車中温作動燃料電池の開発

超先端電子技術開発促進事業

空間パターン光重合プロセスに基づく三次元配向制御技術の開発とその応用に関する研究

戦略的基礎研究

運動指令構築の脳内メカニズム

サンゴ礁によるCO₂固定バイオリクター構築技術の開発

原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果

自己組織化量子閉じ込め構造に関する研究

異方的超伝導体の量子効果と新電磁波機能発現の研究

最高性能高温超電導材料

量子相関機能のダイナミクス

表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス

表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス

量子スケールデバイスのシステムインテグレーション

共同研究促進事業

脳活動に伴う2次信号の計測とその発生機序に関する研究

国際 HFSP グラント

Functional Organization of the Neuronal Networks of the Parahippocampal Region

宇宙フォーラム公募地上研究

宇宙用太陽熱熱電変換の研究

研究情報公開データベース(RIO-DB)

新超伝導体文献データベース

エネルギー情報技術データベース
 物体色の基準分光反射率分布データベース
 工業技術院研究カタログ
 逆磁場ピンチプラズマデータベース
 脳画像データベース
 ETLにおけるプログラムの意味論研究成果データベース

検定庁費

特定標準器による校正など
 騒音計
 高周波電力・レーザパワー校正
 光標準の維持及び分光応答度の新たな供給
 照射線量計

経常研究

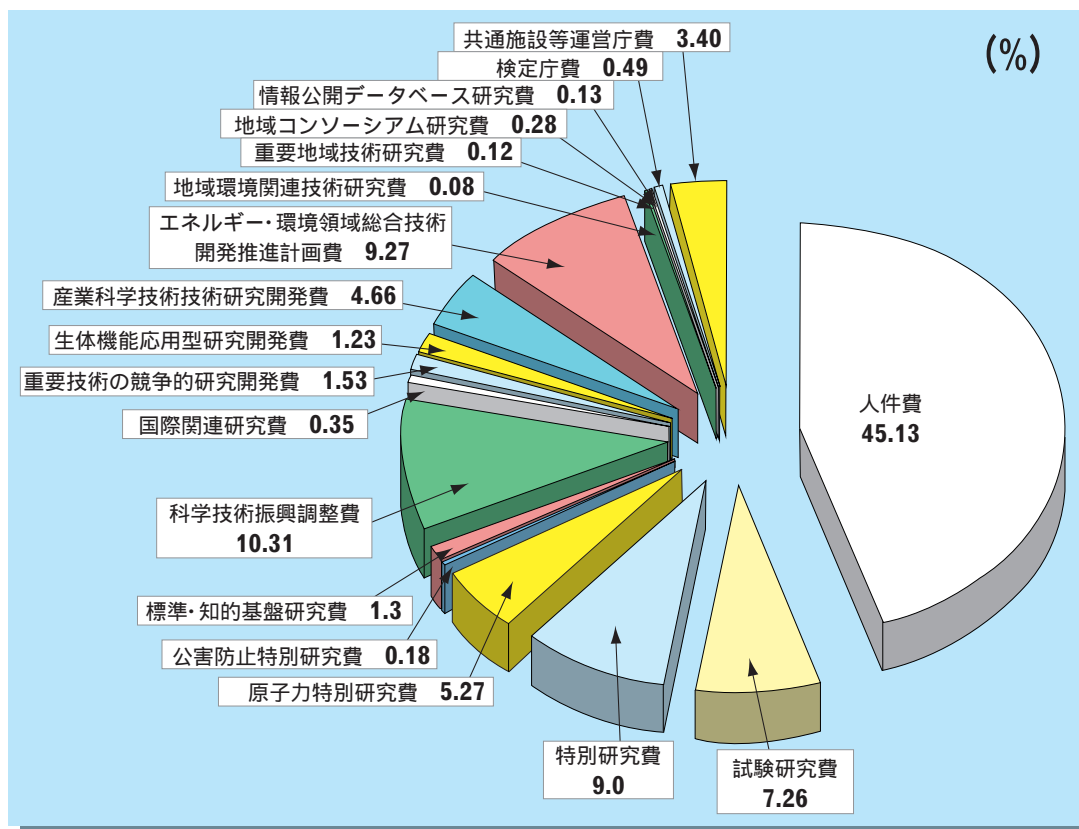
脳による情報処理の基礎研究 他 43 課題

平成11 年度予算

単位:千円

5月18日現在

人件費	5,800,982
試験研究費	933,328
特別研究費	1,156,788
原子力特別研究費	677,667
公害防止特別研究費	23,466
標準・知的基盤研究費	166,955
科学技術振興調整費	1,325,820
国際関連研究費	44,995
重要技術の競争的研究開発費	196,468
生体機能応用型研究開発費 (新情報)	158,000
産業科学技術研究開発費	599,150
エネルギー・環境領域総合技術 開発推進計画費	1,192,009
地球環境関連技術研究費	10,438
重要地域技術研究費	14,973
地域コンソーシアム研究費	35,511
情報公開データベース研究費	16,600
検定庁費	62,982
共用施設等運営庁費	437,359
合計	12,853,491



受賞

片岡照榮氏が勲四等旭日小綬章を受章

(元電子デバイス部長)

(平成11年5月11日)



(電総研での功績)

片岡氏は、昭和28年3月電気試験所(現電子技術総合研究所)に入所し、半導体応用技術の研究を開始した。昭和32年からは我が国に於いて初めて半導体のホール効果を応用する研究で、インジウム・アンチモナイド半導体ホール素子の入力抵抗が磁界により増加する現象を見出し、その抵抗増加は半導体素子の形状や電極条件によって著しく変化することを発見した。その結果、半導体磁気抵抗効果の理論を展開し、実用的な磁気抵抗素子の設計理論を確立した。また、半導体磁気抵抗素子を用いた電力測定方式を発明し、直流電力、商用交流電力からマイクロ波電力の測定に応用した。この業績に対し、稲田賞(昭和38年)、ケルピン賞(1964年度)を授与された。

昭和40年7月電気試験所電子部品部固体部品研究室長に就任し、新しい回路部品としての半導体磁気抵抗素子の応用技術を開発し、従来の計測技術を飛躍的に高める技術を実証した。さらに半導体集積回路技術を磁気抵抗素子の製造に応用、高性能化と量

産化の新製造技術を確立し、それを応用しての無接触ポテンシオメーターを発明した。この技術は、国際技術誌に掲載されるなど高く評価された。また、この新技術の企業化を希望する企業からの技術者を受け入れ技術指導し、新産業の創成、育成に努めた。その結果、わが国の半導体磁気センサ産業は急速な発展を遂げ、その製品は家電から産業機器に及び、あらゆるエレクトロニクス機器に応用され、性能を高めた。

氏は電子の速度が速いために本質的に高速素子への応用が期待されるガリウム砒素半導体の研究に早くから取り組み、その結果、高電界で負性導電特性を示すガリウム砒素半導体の表面に誘導体を装荷するという独特の素子構造の発明により、電流-電圧間に負性抵抗を観察することに世界で初めて成功し、優れたマイクロ波固体電子素子発展の基礎を築いた。また、この素子内での高電界ドメインの有無を情報の1,0に対応させて、高速のAND,OR及び桁上げ演算回路を提案・実証し、「機能デバイス」という新しいエレクトロニクス分野を開拓した。また、イオン注入技術に早くから注目し、ガリウム砒素半導体や磁性ガーネット単結晶中にイオン注入することによって新しい素子製造技術を開発した。

昭和45年7月に電子デバイス部固体デバイス研究室長を経て、昭和55年8月電子デバイス部長となり、多くの国際会議に出席したり、数冊の専門書を著すなどして、上記の技術の普及に努めた。これらの化合物半導体素子の研究開発が世界のエレクトロニクス技術界に果たした役割は絶大なものがあり、その研究業績に対して、1978年10月ロンドン大学より世界で最高の学位である、ドクター・オブ・サイエンスの学位の授与、1979年1月米国電気電子学会よりフェロー及び1998年同学会よりライフフェローの称号が与えられた。昭和59年7月井上春成賞、昭和61年4月紫綬褒章、さらに平成4年5月に電気学会業績賞が授与された。

昭和60年4月にシャープ株式会社に移られ、わが国での液晶ディスプレイにTFT(薄膜トランジスタ)を応用する新技術の開発などに貢献され、平成10年10月に同社を退職された。

現在、IEC^{*}のTC-100の国際議長として、国際標準に貢献されている。

*IEC (International Electrotechnical Commission 国際電気標準会議)

富增多喜夫氏が紫綬褒章を受章

(元量子放射部長)
(平成 11 年 5 月 14 日)



(研究業績名)
高性能電子加速器及びそれを用いた小型高輝度放射装置の開発

(業績内容)

1970年代世界的に放射光を用いた高輝度科学が注目されていたが、当時のシンクロトロン放射(SR)装置は容積が大きく電子加速器の加速電流が小さい等多数の問題点があった。

富増氏は、定勾配型加速管及びそれを用いた高性能電子線形加速器を開発するとともに照射野の拡大を可能とする電子波動リングを開発し、小型で高性能なシンクロトロン放射用蓄積リングを実現した。さらに、高密度で集束性の高い電子加速器の開発を行い、安定した高輝度放射光を長時間発生することが可能な世界最高性能の自由電子レーザー(FEL)専用線形加速器を開発し、実用FEL施設の実現に成功した。

本開発成果は、半導体産業、生体・医療、材料科学等の広汎な分野の研究において広く活用され新たな科学技術分野を拓くとともに、産業界における技術の進展を促し、広く社会・経済の発展に大きく貢献している。

(経歴)

昭和 31 年 4 月通商産業省工業技術院電気試験所(現電子技術総合研究所)入所
昭和 55 年 6 月量子技術部放射能研究室長
昭和 58 年 8 月量子技術部長
平成 3 年 7 月退官
平成 3 年 8 月(株)自由電子レーザー研究所理事・研究所長に就任
平成 9 年同顧問となり現在に至る。

科学技術庁第 58 回注目発明(平成 11 年 4 月 12 日)

レーザードップラー速度計測装置:特開平 9-257915 号
伊藤日出男、向井誠二、渡辺正信、ディーターブランドル、ウィルヘルムストーク(光技術部)
結晶基盤の表面平坦化方法:特開平 9-87100 号
坂本邦博、安藤 淳(電子デバイス部)
Ⅲ族原子層の形成方法:特開平 10-64825 号
王 学論、小倉睦郎(電子デバイス部)

人事異動

氏名 (新)

(旧)

平成11年4月30日付

築根 秀男	退職(大分県産業科学技術センター長)	知能システム部長
諏訪 基	知能システム部長に併任	次長兼産学官連携推進センター長

平成11年5月1日付

杉崎 弓	電子技術総合研究所主任研究官	エネルギー基礎部長
山根 茂	超分子部長	大阪ライフエレクトロニクス研究センター長
上野 和夫	エネルギー基礎部長	大阪工業技術研究所エネルギー変換材料部 無機機能材料研究室長
守谷 哲郎	大阪ライフエレクトロニクス研究センター長 大阪工業技術研究所に併任	超分子部長
諏訪 基	産学官連携推進センター長の併任解除	次長兼知能システム部長兼産学官連携推進 センター長
太田 公廣	採用(産学官連携推進センター長) 産学官連携推進センター指導係長に併任	大分県産業科学技術センター長兼大分県・ 工業技術院研究交流センター所長
土井 卓也	企画室開発班の併任解除 工業技術院総務部研究開発官(再生可能エ ネルギー・システム担当)付の併任解除 工業技術院総務部技術評価課の併任解除	エネルギー部主任研究官兼企画室開発班兼 工業技術院総務部研究開発官(再生可能エ ネルギー・システム担当)付兼工業技術院総 務部技術評価課
豊島 安健	企画室開発班に併任 工業技術院総務部研究開発官(再生可能エ ネルギー・システム担当及びエネルギー変 換・輸送・貯蔵担当)付に併任 工業技術院総務部技術評価課に併任	材料科学部主任研究官
中井 敏晴	大阪ライフエレクトロニクス研究センタ - 超分子部に併任	超分子部主任研究官
平賀 隆	大阪ライフエレクトロニクス研究センタ - に併任	超分子部主任研究官
佐藤 主税	大阪ライフエレクトロニクス研究センタ - に併任	超分子部主任研究官
阿刀田富美枝	総務部業務課長補佐	筑波研究支援総合事務所

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

表紙説明: 仮想教示実験【実行システム、教示システム(左
上)】URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail: info@etl.go.jp

印刷・製本 株式会社イセブ