

## 掲載内容 (サマリー):

### トピックス

高温超電導発現機構 - 「フォノン再燃」

### 特集: 超電導デジタルデバイスの技術動向

超電導デジタルデバイス技術の動向

ニオブ系集積回路プロセス技術の進展

SFQ スイッチを旨とした回路設計技術、実装技術の進展

SFQ プロセッサ技術の進展

高温 SFQ 回路用プロセス及び設計技術の進展

高温 SFQ サンプラー及び A/D コンバータ技術の進展

超電導関連 10-11月の催し物案内

新聞ヘッドライン (8/19-9/20)

平成18年 電気学会 基礎・材料・共通(A)部門大会から

低温工学協会 東北・北海道支部主催 第11回超電導・低温若手セミナー報告

隔月連載記事 - 超電導心磁計が市場にでるまで (その5)

読者の広場(Q&A) - 「超電導エレクトロニクス分野」についてお教えてください。

[超電導 Web21 トップページ](#)

### 超電導 Web21

発行者

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒105-0004 東京都港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel (03) 3431-4002 Fax(03) 3431-4044

超電導 Web21 トップページ: <http://www.istec.or.jp/Web21/index-J.html>



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://keirin.jp>



トピックス：高温超電導発現機構 - 「フォノン再燃」

東京大学大学院理学系研究科  
教授 内田慎一

高温超電導体に於いても超電導は電子対（クーパー対）形成により起こる。低温超電導体では、電子対形成の引力をフォノンが媒介していることが BCS 理論の出発点であるが、その実験的根拠が同位体置換による  $T_c$  の変化であったことはよく知られている。その後、実験も理論も精密化され、超電導トンネル接合を流れる電流の電圧  $V$  に対する特性 ( $dI/dV, d^2I/dV^2$ ) から電子とフォノンとの結合強度が測られ、そのデータから  $T_c$  が予測できるようになったのである。

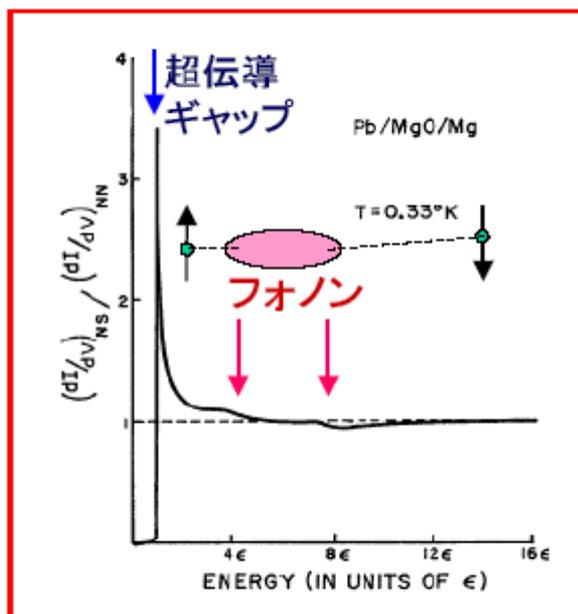
高温超電導体に対しても同様な手法が適用されたが、同位体効果が小さいこと、トンネル分光からは意味のあるデータが得られなかったこともあり、高温超電導にはフォノンは関与していないとの見方が大勢であった。一方、高温超電導研究が牽引して、様々な分光測定技術が飛躍的に発展し、これまで得られなかった詳細な電子やフォノンの情報を得ることができるようになってきた。光電子分光と走査型顕微トンネル分光 (STM) が代表的なものである。今世紀になり、これらの2つの手法の進展の結果、高温超電導体においてもフォノンが見えてきたのである。<sup>1,2)</sup>

最近行われた STM 実験は、トンネル電流特性を原子スケールで調べたものである。<sup>2)</sup> 原子スケールの分解能を必要とするのは、超電導ギャップの大きさ ( ) がナノメートルスケールで変化しており、通常のトンネル接合法では、重要な情報が空間的に平均化されて隠れてしまうからである。Bi 系高温超電導体に対して測定された特性は

と同様、ナノメートルスケールで変動しているが、各場所のスペクトルには明確な構造が観測された。この構造は低温超電導体の場合には電子間の引力を媒介するフォノンに対応するものである。このピークの起源を明らかにするために酸素原子の同位体置換を行ったところ、そのエネルギー位置が移動した。原子の質量が変化して、フォノン周波数 ( ) が変化したのである。紛れもなく、フォノンが「見えた」のである。

この結果から、高温超電導体のクーパー対形成にフォノンが接着剤の役目を果たしているとは断定できない。例えば、同位体置換では は変化しても

Tunneling on Pb



McMillan and Rowell

図1 低温超電導体ではトンネル接合の特性からクーパー対形成に関与しているフォノンが見える。

は殆ど変わらない ( $T_c$  も変化しない) からである。しかし、フォノンが高温超電導発現に役割の一端を担っていることは確かであり、電子のスピンの電荷と併せて、フォノンをどう考えるのが高温超電導研究のホットな話題になっている。

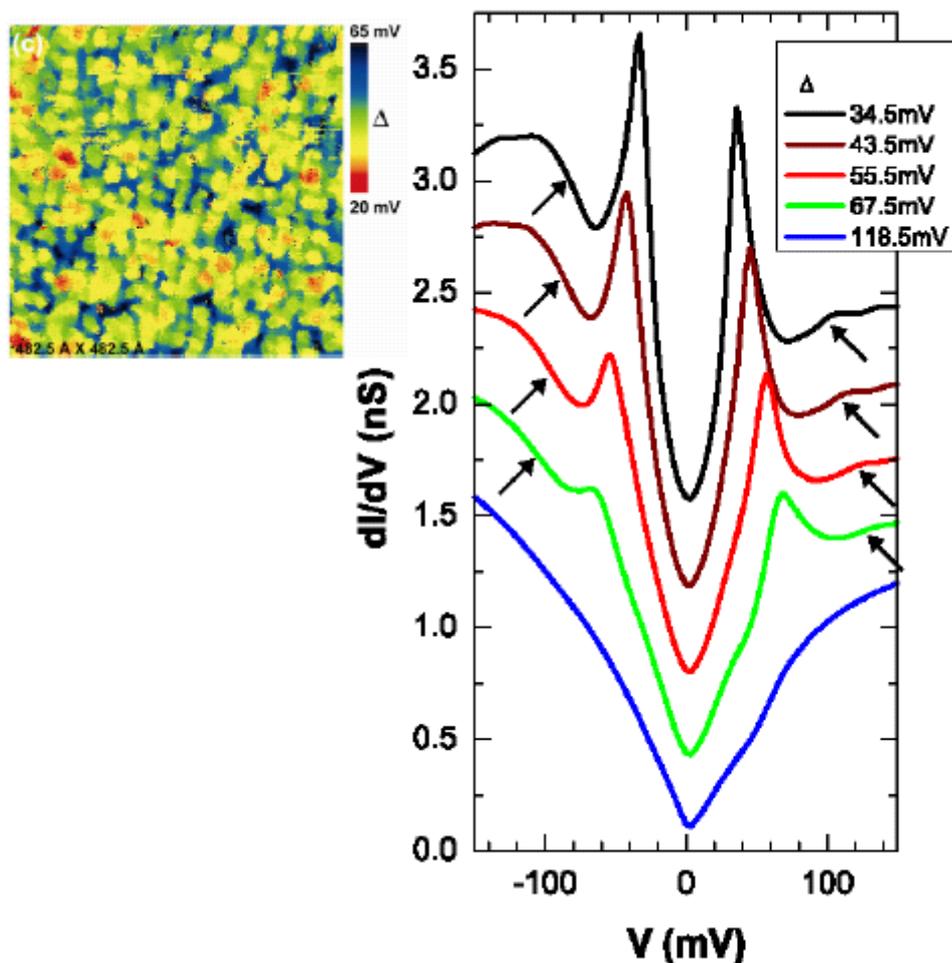


図2 高温超電導体では超電導ギャップがナノメートルスケールで空間変化しているため、「フォノン」(矢印)をみるためにはSTMプローブが必要であった。

参考文献

- 1) A. Lanzara *et al.*, Nature **412** (2001) 510-514.
- 2) J. Lee *et al.*, Nature **442** (2006) 546-550.

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 特集：超電導デジタルデバイスの技術動向 「超電導デジタルデバイス技術の動向」

超電導デジタルデバイス開発の歴史は古く、1970年代から80年代のいわゆる“ジョセフソンコンピュータ”の開発に遡るが、90年代後半からは単一磁束量子（SFQ）型のデバイスが開発の主流になっている。SFQデバイスの最大の特長は、最先端のシリコン CMOS デバイスに比べ、1-2桁高い数 10 GHz から 100 GHz 超の高速クロック動作が可能で、かつ論理ゲート当たりの消費電力が約 3桁小さいことである。これらは、半導体デバイスと異なり、パルスを使った論理回路であり、かつ論理振幅が mV 以下と小さいこと、また損失のない超電導配線を利用できることなどに起因する。SFQ デバイスは、これらの特長から、発熱や配線遅延などの問題によりその高速性能向上に限界が見えつつある CMOS デバイスの一部を将来置き換えるポテンシャルをもつものとして期待されている。

SFQ デバイスを用いたデジタルシステムの開発は、90年代後半の米国におけるペタフロップスコンピュータを目指したマイクロプロセッサの開発が先行した。Nb 系ジョセフソン接合を約 7 万个含むプロセッサチップが試作されたが、動作には至らなかった。一方、日本では、97年にスタートした旧科学技術庁の振興調整費研究やその後の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の2つのプロジェクトにおいて、Nb 系のみならず Y 系高温超電導材料を用いたデバイスプロセス、SFQ 回路設計技術、低温高速実装技術などの基盤技術の開発が精力的に行われ、デバイス基盤技術においては世界を大きくリードするに至っている。現在の NEDO “超電導ネットワークデバイス開発”プロジェクトにおいては、Nb 系デバイスはハイエンドルータやサーバなどの大規模デジタルシステム、Y 系デバイスは AD コンバータやサンプラーなどのアナログ/デジタル混在の小規模システムをターゲットとし、部品レベルで半導体を超える性能が実証されようとしている。米国では、IBM からスピンアウトし古い歴史をもつベンチャー企業である HYPRES 社が現状では開発の中心を担い、軍のサポートを受け無線用のデジタル通信機システムの開発を精力的に進めている。また、日本の技術開発に刺激を受け、米国では超電導コンピュータに関する大規模な開発計画、欧州では大学、国研を中心とする SFQ デバイス技術開発計画が政府に働きかけられている。さらに、SFQ デバイスは、量子コンピュータ用の入出力回路や電磁波センサアレイ用の信号処理回路としても注目され、国内外で研究開発が進められている。

（SRL/ISTEC デバイス研究開発部長 田辺圭一）

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイスの技術動向 「ニオブ系集積回路プロセス技術の進展」

現在、臨界電流密度が  $2.5\text{kA/cm}^2$  で最小接合サイズ  $2\mu\text{m}$  角の Nb/AIOx/Nb 接合と 4 層のニオブ (Nb) 層で構成された Nb 標準プロセスにより数千接合規模の多くの単一磁束量子 (SFQ) 回路が試作され、40GHz 程度の高速度動作も確認されている。今後さらに超高速で大規模な SFQ 回路を開発するためには、より高い臨界電流密度のジョセフソン接合と多層の Nb 層を有するプロセス技術が求められており、臨界電流密度  $10\text{kA/cm}^2$  のジョセフソン接合と平坦化により Nb 層の多層化を可能にしたアドバンスプロセスの開発が進んでいる。<sup>1)</sup>

図 1 に、アドバンスプロセスにより試作したニオブ 9 層平坦化構造の SEM 断面写真を示す。最上部の Nb 層以外の全ての Nb 層で平坦化 (カルデラ平坦化技術<sup>2)</sup>) を行うことで、このような多層構造にもかかわらず、非常に良好な平坦性が得られている。この多層構造により、バイアス電流に起因した磁場のシールドや、接合を含む回路の直上へのストリップライン構造の PTL (Passive Transmission Line) 配線の自由な配置も可能になり、高集積化が可能になる。

図 2 に、アドバンスプロセスで試作した 8 ビットシフトレジスタの顕微鏡写真を示す。このシフトレジスタは、図 1 の M<sub>2</sub> から M<sub>4</sub> までの 3 つの Nb 層で構成されたアドバンスプロセスのデバイス構造を有している。オンチップテストにより、この 8 ビットシフトレジスタが 120 GHz までのクロック周波数で正常に動作することが確認された。<sup>3)</sup> 標準プロセスで試作されたシフトレジスタの最大クロック周波数が 50 GHz 程度であることから、2 倍以上の高速度動作が実現されたことになる。これは、高速度性の観点からアドバンスプロセスの性能を実証したものである。

さらに、アドバンスプロセスの信頼性の評価及び有効性を実証するために、記憶容量が 256 ビット、1K ビット、4K ビット、16K ビットの 4 種類の超電導 RAM が試作された。デコーダ、ドライバ、センス及び記憶セル等の RAM の要素回路は、ラッチング素子で構成された以前に開発したもの<sup>4)</sup> を使用したが、回路定数やレイアウト設計は、上記アドバンスプロセスの仕様に

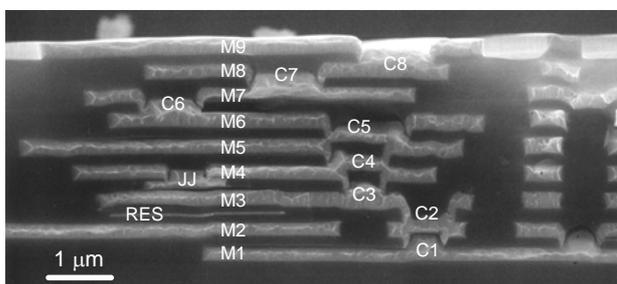


図 1 ニオブ 9 層平坦化構造の SEM 断面写真 Nb/AIOx/Nb 接合 (JJ)、Mo 抵抗 (RES)、コンタクト (C<sub>1</sub>-C<sub>8</sub>) を含む。Nb 膜厚：300nm、SiO<sub>2</sub> 層間絶縁層：200nm - 300nm、Mo 膜厚：35nm

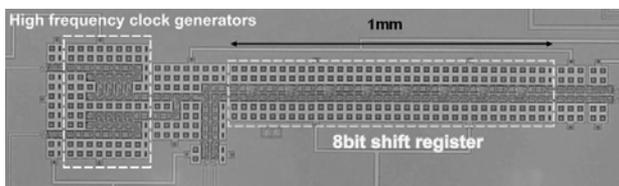


図 2 アドバンスプロセスで試作された 8 ビットシフトレジスタ (クロック発生器を含む) の顕微鏡写真、120GHz 動作を確認

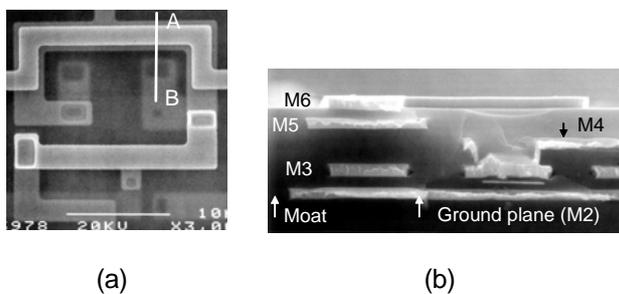


図 3 6 層のアドバンスプロセスで試作した RAM の記憶セル ( $22\mu\text{m} \times 22\mu\text{m}$ ) とその断面 SEM 写真 (図(a)の AB 断面)

合わせて変更されている。図3に、図1のM<sub>1</sub>からM<sub>6</sub>までの6つのNb層のアドバンスプロセスで試作したRAMの記憶セルとその断面SEM写真を示す。記憶セルの大きさは、22 $\mu$ m角である。図4に、一例として4KビットRAMと16KビットRAMの顕微鏡写真を示す。現在のところ、256ビットRAM(約2,544接合)で100%、1KビットRAM(約7,392接合)で99.8%、4KビットRAM(23,488接合)で96.7%のビットエラーでの正常動作を確認することができた。これにより、初めて1万接合を越える実回路によりNb6層のアドバンスプロセスの有効性を実証することができた。今後は、このRAMを用いてプロセスの欠陥評価を行い、アドバンスプロセスの信頼性を向上させていきたいと考えている。

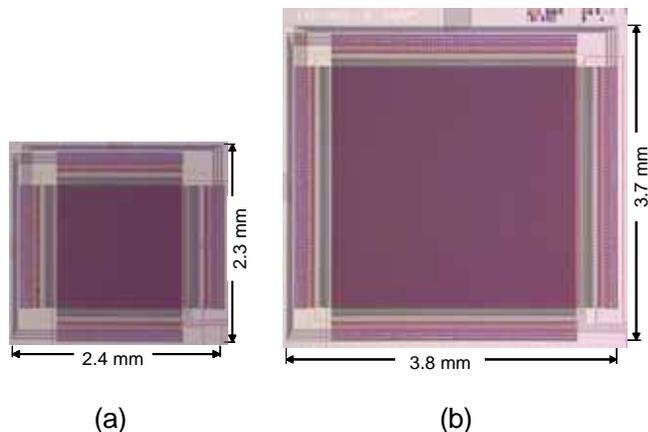


図4 4Kbit RAM(接合数:23,488個)と16Kbit RAM(接合数:80,768個)の顕微鏡写真

**謝辞** 本研究は、低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

#### 参考文献

- 1) S. Nagasawa, K. Hinode, M. Sugita, T. Satoh, H. Akaike, Y. Kitagawa and M. Hidaka: *Physica C* **412-414** (2004) 1429-1436.
- 2) K. Hinode, S. Nagasawa, M. Sugita, T. Satoh, H. Akaike, Y. Kitagawa and M. Hidaka: *IEICE Trans. Electron.* **E86-C** (2003) 2511-2513.
- 3) H. Akaike, T. Yamada, A. Fujimaki, S. Nagasawa, K. Hinode, T. Satoh, Y. Kitagawa and M. Hidaka: *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) S320-S324.
- 4) S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata, and S. Tahara, *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* **5** (1995) 2447-2452.

(SRL/ISTEC 低温デバイス開発室 永沢秀一)

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 特集：超電導デジタルデバイスの技術動向

### 「SFQ スイッチを目指した回路設計技術、実装技術の進展」

フォトニック技術によるネットワーク機器の大容量化が実現される時代においても、制御などの複雑な処理は電気で行う必要がある。将来の大容量ネットワークに用いられる伝送速度 40Gbps 以上のデータ処理を考えると、クロックがそれより遅い CMOS 回路ではパラレル処理に起因する膨大なハードウェア量が必要となり機器全体の消費電力が限界を越えることが懸念される。これらの問題を解決するために、超高速と低消費電力が両立できる SFQ (単一磁束量子) スイッチの実現が待たれている。超電導工学研究所では、SFQ スイッチを実現するための回路設計技術や実装技術の開発を行っている。

回路設計技術では、SFQ 回路用トップダウン自動設計ツールを開発した。これは論理記述言語で書かれた回路の仕様から SFQ 回路の特性に合わせた論理回路図を作成し、この論理回路図に合わせて各ゲートを配置し、その間を PTL と呼ばれる超電導配線で結線することにより SFQ 回路の物理的なレイアウトを自動的に生成するツールである。また、作成された SFQ 回路はシミュレータによる動作検証が行われ、パフォーマンスが予測される。論理記述言語は CMOS 回路の設計に用いられるものと同じであるため、基本的には超電導に不慣れな半導体設計者でも大規模 SFQ 回路を設計することができる。図 1 はこのツールを用いて CMOS 用論理記述から設計した 8 ビット RISC (縮小命令セット) プロセッサのレイアウト図である。約 40 万個のジョセフソン接合を用いた SFQ 回路のレイアウトを動作検証も含めて約 12 時間で作成できた。シミュレーションにより見積もられたクロックは 27.6GHz であり、半導体を大きく越える性能が示された。

実装技術では、液体ヘリウム温度 (~4K) で動作する SFQ 回路と室温環境にある半導体機器との間で、多数 (32 本) の高速信号 (10Gbps) をやり取りできる装置を開発し、その動作実験に成功した。今回開発した装置「広帯域低温サブシステム」の外観を図 2 に示す。別置きのコンプレッサが必要ではあるが、冷凍機込みで 36x36x90 cm のコンパクトなサイズに収まっている。こ

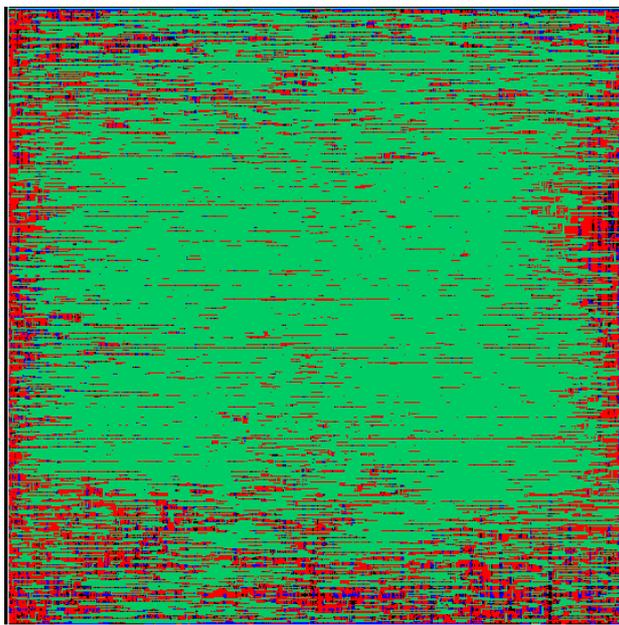


図 1 自動設計ツールでレイアウトした 8 ビット RISC プロセッサ

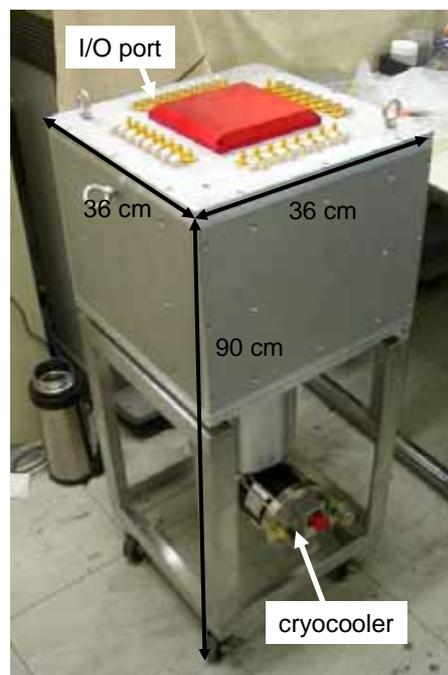


図 2 広帯域低温サブシステムの外観

の装置の上部にあるコネクタに接続することで SFQ 回路に入出力を行うことができる。この装置を用いた動作実験により、10Gbps 電気信号が SFQ 回路で処理された後、正しく出力されていることが確認できた。また、ビット・エラー・レート (BER) を測定したところ、通信応用に十分な  $10^{-13}$  台の値を得られることが確認できた。

これらの設計、実装技術により、SFQ スイッチに向けた開発が今後加速されるものと思われる。この成果は、「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。

(SRL/ISTEC 低温デバイス開発室 室長 日高睦夫)

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 特集：超電導デジタルデバイスの技術動向 「SFQ プロセッサ技術の進展」

名古屋大学大学院  
工学研究科 量子工学専攻  
教授 藤巻 朗

マイクロプロセッサはデジタル回路の中でもっとも複雑な構造をしており、デバイスからアーキテクチャ、OS、コンパイラに至る高度な技術の集結体となっている。このマイクロプロセッサは、低電力で高集積可能な CMOS 技術によって支えられてきた。一見、順風満帆に見える CMOS 技術であるが、電力密度が空冷限界の  $100 \text{ W/cm}^2$  に迫りつつあるほか、論理ゲートではなく長い配線の遅延時間がマイクロプロセッサの動作周波数を決めるようになり高速化に翳りが見えてきた。こういった CMOS 集積回路の問題点が顕在化するに伴い、本質的に高速で低電力な SFQ 回路が改めて見直された。ただ、SFQ 回路は半導体回路とは異なり信号がインパルス状であるため、ほぼすべての論理ゲートに信号の到来を記憶するラッチ機能が必要とされる。このラッチ機能が、マイクロプロセッサのような帰還部がある回路では高速化の障害となった。また、基本的に配線が 1 出力ポートから 1 入力ポートへのいわゆる通信であることから、マイクロアーキテクチャに代表される回路構成法も SFQ に適したものを見出す必要があった。

これまで NEDO による「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」プロジェクトにおいて、名古屋大学と横浜国立大学が中心となって上述の課題をひとつひとつ解決してきた。最近のもっとも大きなトピックスは、1 出力ポートから最大 4 入力ポートにまで同時にデータ伝送可能な 50 Gbps マルチキャスト受動配線技術の開発であろう。これにより、小面積化と高速化が一段と進んだ。また、SFQ 回路に適した回路アーキテクチャの採用も進み、コントローラには高速化に不可欠なパイプライン処理に適したワンホットエンコーディング技術を、命令デコーダ部にはストリーム処理に適した二分決定グラフ技術を、さらに算術演算回路 (ALU) には帰還部を持たせずに演算を実現する状態遷移設計法を考案した。

図 1 は、これまで動作実証に成功した最大規模の SFQ マイクロプロセッサである。SRL、NICT とともに開発した CONNECT セルライブラリを利用して設計、SRL 標準プロセスによって作製されており、約 11000 個のジョセフソン接合から成っている。2 個の ALU をカスケード接続し処理効率を上げるフォワードリングアーキテクチャに加え 4 段のパイプライン処理も導入している。ALU でのビット処理は 20GHz で行われ、ピーク値では 1 秒間に 1.5 ギガ回の処理をこなすことができる。命令数、データ長は小さいものの、通常のマイクロプロセッサとほぼ同等の処理回数となっている。プロセッサの消費電力は 3.3 mW であった。この値は冷凍機の投入電力を考えると、半導体に比べ優位性を保っており、SFQ マイクロプロセッサの潜在能力を示している。詳細は別に譲るが、最近になってスーパーコンピュータを構成する上でボトルネックとなっていたメモリと

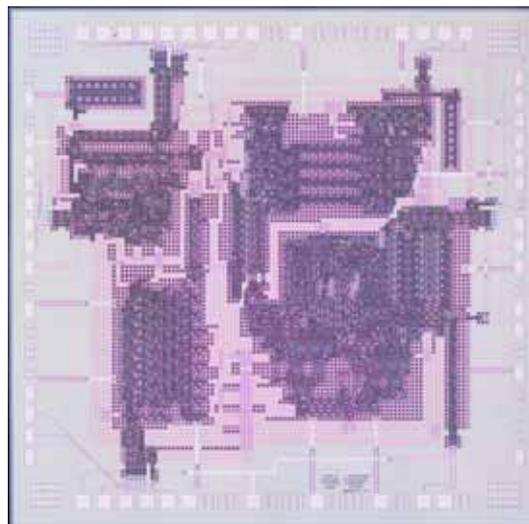


図 1 動作実証に成功した SFQ マイクロプロセッサ CORE1β

プロセッサ間のデータ転送能力の低さを克服する新しいアーキテクチャが考案され、SFQ回路応用に新しい風を吹き込んでいる。このようにSFQ回路のマイクロプロセッサはさまざまな面から着実に進展を続けており、集積技術の向上とともに大きな飛躍が期待される。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイスの技術動向

「高温 SFQ 回路用プロセス及び設計技術の進展」

フリップフロップ要素回路の高速性能実証と機能回路への展開

高温超電導材料を用いた SFQ(単一磁束量子)回路の特徴は 30 ~ 40 K の高温動作と、数十 ~ 百 GHz の高速動作を期待できることである。ランブエッジ接合という、電極膜の端部を用いた接合構造を採用しているため、接合幅をサブミクロンまで縮小することなく、1  $\mu\text{m}^2$  以下の微細な接合面積と高臨界電流密度( $J_c$ )を実現でき、高速動作が可能になる。

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 等の酸化物薄膜で動作可能な SFQ 回路を実現するには、回路内で配置された接合の臨界電流を一定の値に揃える必要がある。このためには電極膜の平坦性が必須条件である。超電導工学研究所では磁気遮蔽膜、2 枚の接合電極膜を含む超電導膜 3 層、および絶縁膜 2 層の酸化物積層膜はスパッタリング法等で形成した。成膜パラメータを詳細に調べ、細かく制御した結果、全膜厚 1  $\mu\text{m}$  以上の積層膜で表面凹凸度 1 nm まで平坦性を向上した。一方、回路内の接合では、下部電極の寸法等、接合幅以外の様々な回路パターン形状によって、臨界電流が変動することを見出した。接合毎に下部電極膜を分離して寸法形状を揃えるデザインを採用したことにより、接合幅のみによって臨界電流を調節できることがわかった。回路内超電導接合の臨界電流( $J_c$ )分布を個別に測定したところ、従来構造のトグル・フリップフロップでは  $J_c$  分散が 27% であったものが、このような回路デザインの工夫により、 $J_c$  分散を 8% まで低減できた。

これらのプロセス技術および設計技術を用いて様々な SFQ 回路を作製した。セットリセット・フリップフロップ、コンフルエンス・バッファ、トグル・フリップフロップ、インバータ等、20 ~ 30 接合で構成される様々な SFQ 要素回路で、60 K までの高温動作を確認した。とくにトグル・フリップフロップでは 8 K で分周動作周波数 360 GHz を、41 K で 210 GHz を得た(図 1)。さらに要素回路の次段階の基本回路として、1 個の入力信号線、2 個のクロック信号線および 2 個の出力信号線を備えた 1:2 スイッチ回路を作製し、温度 50 ~ 60 K で論理動作を確認できた(図 2)。今後はトグル・フリップフロップとスイッチ回路を組み合わせた 1:2 デマルチプレクサ等、より機能的な SFQ 回路を開発する予定である。

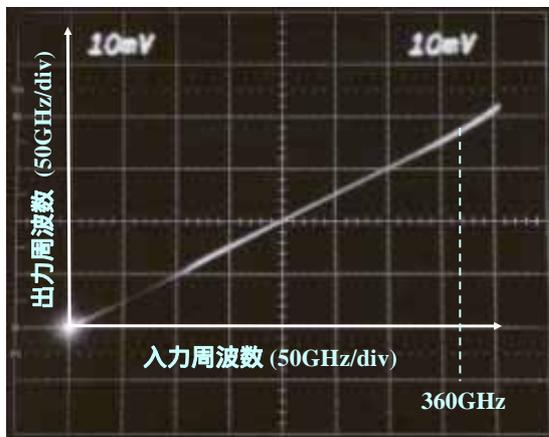


図 1 トグル・フリップフロップの分周特性 (入力周波数と出力周波数の比が 2:1 の範囲が動作周波数領域)

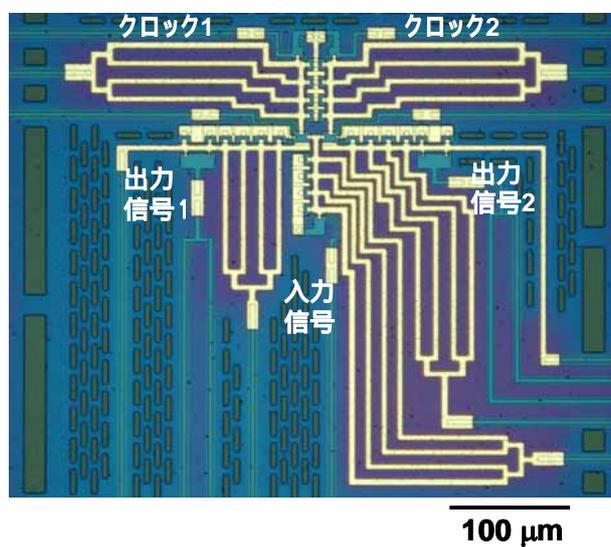


図2. 論理動作を確認した 1:2 スイッチ回路

(SRL/ISTEC デバイス研究開発部 樽谷良信)

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイスの技術動向

「高温 SFQ サンプラー及び A/D コンバータ技術の進展」

高温超電導デバイスは小型冷凍機での冷却が可能でシステム全体を小型化できる。その応用としてパッシブなデバイスとしては HTS フィルタが米国ではすでに実用化され国内でも実用化に向けた研究開発が進められている。一方アクティブな複数の接合(バイクリスタル接合)を用いた SQUID システムや THz 波のデテクターへの研究が行われており、その一部は実用化もはかられつつある。超電導工学研究所とアドバンテスト研究所では、低消費電力型超電導ネットワークデバイス開発プロジェクトの一環として数十接合規模(ランブエッジ接合)で実現可能な超高速なサンプラーシステムの研究開発を行っている。電気的な信号伝達による方法と並行して、<sup>1)</sup>より高周波の信号をサンプラーチップに伝えるためにほぼ無損失で熱流入が小さな光ファイバおよび周波数帯域として 300GHz 以上が可能なフォトダイオード(UTC-PD: Uni-Traveling-Carrier Photo Diode)を介して信号入力する HTS サンプラーも開発している。プロジェクト開始当初に UTC-PD が低温で動作可能であることを確かめ、これを高周波信号入力に用いる研究開発を進めている。磁性材料を使用している市販の PD モジュールではサンプラー動作が困難であることから、NEL 殿のご協力により UTC-PD とサンプラーチップからなる非磁性の光一体型サンプラーモジュールを開発した(図1)。現在のところ、この光一体型のモジュールで 20GHz までの波形観測に成功している(図2)。サンプラーチップの再現性や光モジュールの冷却に対応したチューニングにより 100GHz を越える帯域が期待できる。また、小型冷凍機を用いたサンプラー用の冷却システムや計測システムの開発も進めており、現在実用化レベルに近いシステム開発を目指している。

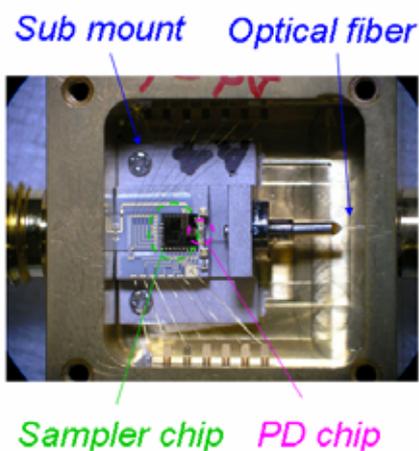


図1 光一体型モジュールの写真

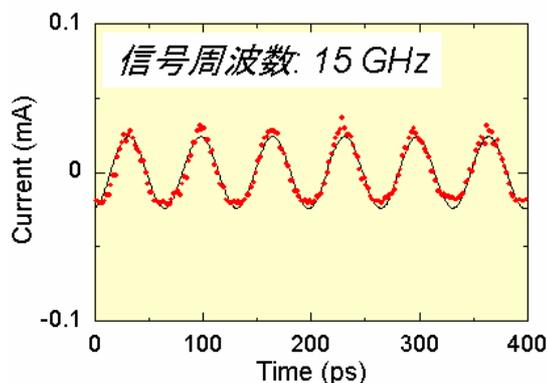


図2 測定された信号波形

また、同プロジェクトにおいて超電導工学研究所、日立基礎研、横浜国大が協力してオーバーサンプリング方式のアナログ - デジタル変換器(ADC)の研究開発を進めている。この方式では、基本的には一つの量子化器でサンプリング周波数の高周波化により高ビット精度が得られることから、将来のソフトウェア無線通信などへの応用へ向けての研究開発が盛んに行われている。超電導 SFQ 回路では本来有する量子化機能に加えて低消費電力で半導体を越えるサンプリング周波数の

高速化が可能である。また、比較的小規模な回路で実現可能なことから SFQ 回路の有望な応用分野であると考えられている。現在は LTS(Nb/AIOx/Nb 接合) 技術を用いて研究開発が行われているが将来は高温超電導での実現が可能と考えられる。我々は 型のモジュレータと呼ばれる積分機能を有した量子化器を用いたローパス型フロントエンド回路部を超電導、デシメーション(間引き)フィルタを主としたバックエンド回路を半導体で実現するハイブリッド形式で開発を行っている(図3)。このフロントエンド部に関してはサンプリング周波数:  $f_s=16\text{GHz}$ 、帯域:  $BW=10\text{MHz}$  でほぼ理想的なパワースペクトラム特性(6dB/octのノイズシェーピング)と性能、 $\text{SINAD}=77\text{dB}$

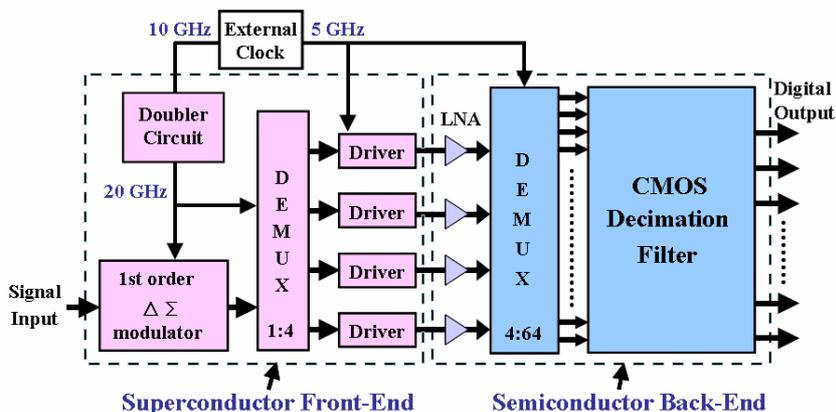


図3 ハイブリッド型 ADC の構成

( $\text{ENOB}=12.5\text{b}$ )が得られている(図4)。現在バックエンド回路を含めたシステム全体で  $f_s=20\text{GHz}$  の動作を目指している。一方、バックエンド回路を含めて SFQ 回路で構成する好例として、1K 以下に冷却された Superconducting Tunnel Junction (STJ) と呼ばれる X 線/THz のデテクターアレーからの膨大な検出信号を低温下の超電導 ADC でデジタル化するシステムの研究開発が進められている。また、米国 Hypres 社において、ラック一台に 4K クライオクーラー等を収めたローパス型 ADC のプロトタイプシステムが開発され、 $f_s=11.52\text{GHz}$  で動作(チップ単体性能は、 $BW=10\text{MHz}$ 、 $\text{SINAD}=83\text{dB}$ 、@  $f_s=20\text{GHz}$ )している。さらに、高周波化と広帯域化が要求される将来の軍用・民生用にダイレクトコンバージョン方式に向けて複数のローパス型やバンドパス型モジュレータやバックエンド回路を搭載した ADC チップおよびシステムの研究開発などが進められている。

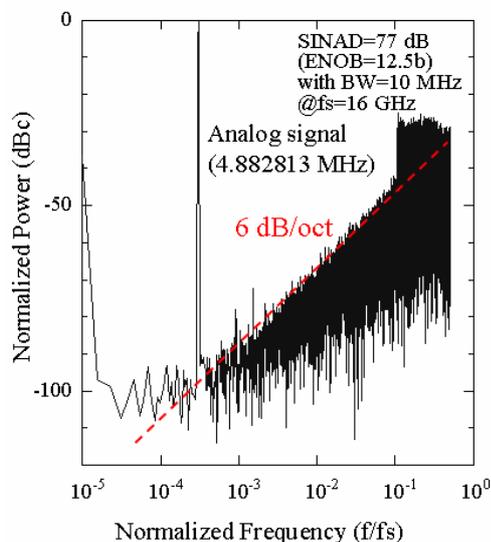


図4 得られたスペクトラム

1) 鈴木秀雄、「超電導 Web21」2005年10月号 3頁

(SRL/ISTEC デバイス研究開発部 鈴木秀雄)

## 超電導関連 10-11月の催し物案内

### 10/6-7

第4回冷凍部会例会 - 低温工学・超電導工学における国際情勢と動向について -

場所：ルネサンス赤沢 伊東市

主催：低温工学協会 冷凍部会

問合せ：(独)物質・材料研究機構 強磁場共用ステーション 佐藤明男

Tel:029-863-5453、Fax:029-863-5470、e-mail:inquire@akahoshi.nims.go.jp

### 10/12

第64回超伝導科学技術研究会ワークショップ

場所：化学会館会議室 東京都千代田区

主催：(社)未踏化学技術協会 超伝導科学技術研究会、(独)物質・材料研究機構 超伝導材料センター

問合せ：Tel:03-3503-4681、Fax:03-3597-0535 担当：為田

HPからオンライン登録可 <http://www.sntt.or.jp/fsst/ws64.html>

### 10/30-11/1

第19回国際超電導シンポジウム(ISS2006)

場所：名古屋国際会議場、名古屋市熱田区

主催：(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)

問合せ：ISS2006事務局

Tel:03-3431-4002、e-mail:iss@istec.or.jp、<http://www.istec.or.jp/ISS/>

### 10/31

超電導標準化第3回パネルディスカッション

場所：名古屋国際会議場、名古屋市熱田区

主催：(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)//IEC/TC90

問合せ：IEC/TC90事務局、田中靖三、檜山由紀子

Tel:03-3459-9872、Fax:03-3459-9873、e-mail:tc90tanaka@istec.or.jp

### 11/21

低温工学パネルディスカッション - 既存技術の見直しと更なる技術の高度化(仮) -

場所：熊本大学 工学部 熊本市

主催：低温工学協会

問合せ：九州電力㈱総合研究所 電力貯蔵技術グループ長 林 秀美

Tel:092-541-3034、Fax:092-551-1583、e-mail:Hidemi\_Hayashi@kyuden.co.jp

### 11/27-12/1

MRS Fall Meeting

場所：Hynes Convention Center & Sheraton Boston Hotel, Boston, Massachusetts

主催：Materials Research Society

問合せ：

Tel:724-779-3003、Fax:724-779-8313、e-mail:info@mrs.org.

<http://www.mrs.org/>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 新聞ヘッドライン (8/19-9/20)

船イノベーション 電気で動くエコシップ 8/19 日本経済新聞(夕)  
船イノベーション 超電導でプロペラ回す 8/21 日本経済新聞(夕)  
原子力機構が実証 核融合実験 遠隔地から可能に ITER 計画で技術活用へ 8/21 電気新聞  
超電導線材 ビスマス系 イットリウム系 研究開発組織を統合「両にらみ」で加速図る 住友  
電工 8/21 電気新聞  
欧州物理拠点を歩く 素粒子から放射光へ 「究極の光」求めて競争 8/21 日経産業新聞  
文科省概算要求 ITER に77億円 計画推進へ大幅な増額 8/22 電気新聞  
IHI など産学8者 船舶向け超電導モーター 400キロワット級、年内商品化へ 2010年売上300  
億円めざす 大型機も順次開発 8/24 電気新聞  
イットリウム系超電導モーター 水中での動作確認 超電導工学研など 動力源軽量化に道  
8/25 日刊工業新聞、日経産業新聞、日本経済新聞、電気新聞  
ふしぎ科学館 熱い! 太陽のヒミツ IH同じ仕組み 8/26 読売新聞(夕)  
超伝導モーターの水中実験 イットリウム系で成功 9/1 朝日新聞(夕)  
これが未来の鉄道? 実用化へ、コストが壁 リニア 9/3 朝日新聞  
「非エックス線検査」続々 阪大 MRI 応用した装置 九大 感度 犬嗅覚の1000倍 9/4 日  
本経済新聞  
極低温冷凍機 世界最高出力を達成 中部電力 アイシン精機 耐久性も向上 9/7 電気新聞、  
日刊工業新聞  
固体酸素の構造解明 産総研 超電導の解明足がかり 9/7 日経産業新聞  
MRI への影響抑制 磁場コントロールシステム きんでん 9/12 日刊工業新聞、電気新聞  
再生エネルギーの現場から 新ビジネスモデル構築を 太陽光発電、普及拡大への方策 9/14  
日刊工業新聞  
“磁気浴”で高血圧改善 細胞が活性化 名大・京大が解明 9/14 日刊工業新聞  
水素貯蔵技術の共同研究 米ロスアラモス研と合意 経産省 9/14 日刊工業新聞  
きょうのテーマ【超電導】マイナス230度Cで抵抗ゼロ規格外の技術が「夢」実現 大量の電気、  
ロスなく流す 米国で家庭向け送電試験 9/14 日刊工業新聞  
超電導限流器 磁気遮へい型 電力中央研究所 開発を加速 系統トラブル時の事故電流抑制へ  
実証実験では70%を抑制 08年度以降6.6万V完成へ 9/19 電気新聞  
自家発電システム 亀山工場に導入 シャープ CO<sub>2</sub>排出40%削減 亀山第2の2期ライン稼働  
前倒しも示唆 9/20 日刊工業新聞  
超電導性アルミ複合材料 直径3mmの線材作製 富山大など、医療機器向けに 9/20 日刊工  
業新聞



[超電導 Web21 トップページ](#)

## 平成 18 年 電気学会 基礎・材料・共通 (A) 部門大会から

電気学会は、平成 18 年 8 月 21 日から 8 月 22 日まで熊本大学工学部 2 号館において、平成 18 年 電気学会 基礎・材料・共通 (A) 部門大会を開催した。同大会は、特別講演 4 件、日韓合同セッション 31 件、テーマ付きセッション 42 件、一般セッション 174 件及びポスターセッション 23 件の合計 274 件の講演で構成され、約 350 人が参加した盛大なものであった。また、これらの講演に合わせて、企業の展示会、A 部門優秀論文発表賞受賞式、各技術委員会、PR するためのカラー B1 版ボード展示、懇親会、現地物産品即売店などの企画がなされた。

超電導関連の講演は、IX.セッションの半導体・機能・超伝導材料・金属・セラミックスのプログラムに組込まれていた。超電導関連の講演は 2 件に留まった。また、このセッションにおける受講者は、40 人程度の規模であった。

九州大学木須隆暢氏らによる「RE 系高温超電導線材の電流輸送特性」では、200m 級 (212.6m) の Y 系テープ線材を用いた広い温度、磁界領域における電流輸送特性に関する実測データとパーコレーションモデルによる定式解析結果が報告された。外部磁界は自己磁界から 26T までのデータが報告され、4-20K の低温域では 30T 近傍での高磁界で  $1\text{MA}/\text{cm}^2$  を超える臨界電流密度が維持されることを明らかにした。

また、熊本大学末吉哲郎氏らによる「人工ピンを導入した高温超伝導薄膜における磁束ピンニング特性」では、Er 系薄膜の高温、高磁界における有効なピンニングセンターの検討結果が報告された。PLD 法におけるターゲットに  $\text{BaZrO}_3$  ナノ粒子を添加し、Er 系薄膜の製膜過程で自己組織化によって生成する  $\text{BaZrO}_3$  ナノロッドを 1 次元人工ピンとして導入するものである。ターゲットに  $\text{BaZrO}_3$  を 1.5wt% 添加したものでは、3T 以上の高磁界における著しい  $J_c$  の向上と 0.5T 近傍における異方性の緩和が確認された。また、パーコレーション遷移モデルによる解析によっても  $\text{BaZrO}_3$  ナノロッドが高温、高磁界で有効であることを明らかにした。



ポスターセッション風景

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 低温工学協会 東北・北海道支部主催 第 11 回超電導・低温若手セミナー報告

北海道工業大学  
電気電子工学科  
槌本昌則

低温工学協会東北・北海道支部主催の第 11 回超電導・低温若手セミナーが、北海道洞爺湖畔で 2006 年 9 月 5 日から 7 日まで開催されました。本セミナーは、学生や大学・企業の若手研究者を対象にして毎年開催されています。今回は「超電導のエレクトロニクス応用、線材・材料、大型応用」をテーマに、3 名の先生に講義をしていただきました。

セミナー初日は、開会式後に 14 名の学生が自身の研究発表を行いました。様々な分野の熱心な発表があり、緊張感もあってよかったと思います。

2 日目の午前中は「超電導エレクトロニクス応用の最前線」と題して、(財)国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所の田辺圭一先生に講義をしていただきました。まずエレクトロニクス応用の立場からジョセフソン接合の解説を詳しくしていただいた後、センサー応用として各種 SQUID センサーを利用した検査装置や受信機の話、高周波応用として超電導フィルターの話を中心に、デジタル応用として超高速・低消費電力の単一磁束量子(SFQ)デバイスのお話をいただきました。さらに低温超電導 SFQ デバイス開発の現状の紹介と、高温超電導 SFQ デバイスの問題点や開発現状まで解説していただきました。

午後はまず東北大学金属材料研究所、強磁場超伝導材料研究センターの淡路智先生に「超伝導材料の基礎、現状、将来展望」と題して講義をしていただきました。超電導マグネットをクエンチさせた時の影像に始まり、基礎的な話を交えながら超電導体が超電導材料として実用になるまでの課題・不安定性の克服方法を詳しく解説していただきました。そして実用線材の構造や設計・作成プロセス、高温超電導線材開発の現状、次世代超電導線材・マグネットの展望まで幅広く話していただきました。

最後の講義は「先端技術が統合した大型超電導装置の開発に学ぶ」と題して、新潟大学大学院自然科学研究科の山口貢先生より、超電導マグネットの大型応用について講義していただきました。企業に長くおられた経験を踏まえて、実際にモノを作る時の苦労や開発秘話を聞かせていただきました。超電導発電機・磁気浮上列車・MRI等の超電導マグネットの話に加えて、超電導機器の開発・研究がいかに面白いかを特に学生さんに向けて熱く語っていただきました。

合宿形式で学生同士や講師の先生・他大学の先生と交流し、親睦も深めることができました。昼間の密な発表会・講義と懇親会や連日の夜中までの談話を通して、セミナーの目的を十分に達成することができたと思います。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### 超電導心磁計が市場にできるまで（その5）

岡山大学大学院自然科学科  
教授 塚田啓二

#### 6. 高温超電導心磁計の開発

##### 6.1 高温超電導心磁計の開発着手

低温系の SQUID を用いた 64 チャンネルの心磁計は、開発の段階が終わり、薬事承認を受けるための臨床評価段階にあった。この臨床評価により、多くの新しい知見が得られるとともに、新しい解析方法が次々と開発されていった。

研究所ではこの臨床評価を進めている間に、解析ツールの開発を強化するとともに、次のハードウェアの開発が目標にあった。このまま、64ch 心磁計を改良していくことをおこなうか、かなり先のものを狙うかを判断する必要があった。当時すでに高温超電導の実用化への取り組みが多くの研究機関で積極的におこなわれていた。超伝導センサ研究所のことはすでに述べたが、ここでは低温系 SQUID だけでなく、高温系 SQUID も生体磁気計測システムへの応用もおこなわれた。その時は、住友電工が中心的な役割をして高温超電導心磁計が開発された。当時高温系 SQUID の一般的な問題として、感度が低く、立体構造のピックアップコイルが作れない大きな課題があった。

超電導分野全体を見るとその実用化の共通問題としては、冷媒のコストや冷却機構が複雑化する問題がある。すでに医療機器として超電導が使われている MRI は、冷媒として液体ヘリウムを用いているものの、冷凍機との併用により液体ヘリウムの補給サイクルが長いので、コストの面では大きな問題とはなっていない。ところが、生体磁気計測装置では、冷媒の蒸発が早く、もし冷凍機を使った場合は冷凍機から発生する磁気ノイズを取り除く必要がでてくる。しかし、高温超電導を使った SQUID であれば、液体ヘリウムより格段に安い液体窒素を使うことができるので、コストの問題が解決できるとともに冷媒の保温装置でセンサを内蔵しているデュワの構造を簡単にすることができる。つまり、低温系から高温系に置き換えることができれば、装置をより低コストで小型化することが可能であると考えられる。

高温超電導を用いることにより、小型な心磁計の実現が期待されるが、先にあげた高温系 SQUID の感度を向上させる必要がある。特に心臓疾患を診断できる臨床用機器を実現するためには、計測した時間波形データを加算処理しなくても信号が見える感度が要求される。また、別の課題として、心磁計を小さくしても、環境磁気雑音を除去するための磁気シールドの構造も同時に小型化する必要がある。しかし、磁気シールドは小型化すると、被験者に閉所感を与えるので、臨床機器としては大きな問題となる。このため、小型化しつつ解放型にする必要があった。かなり技術的に難しい課題を設定した開発であったが、幸いなことに 2001 年に NEDO からの産業技術実用化開発の助成を受けることができたので、着手することができた。

##### 6.2 高温超電導 16 チャンネル心磁計

低温系 SQUID を用いた心磁計の感度として 10fT/ Hz 以下を達成しているが、これは胎児心磁計測や脳磁計測もできる高い感度である。しかし、高温系 SQUID の感度目標をそこまで設定することは無謀である。高温超電導心磁計の臨床用途としては、特に健康診断や集団検診を考えていた。つまり、このような一次スクリーニングに使えるようにするためには、検査のスループットがよいことと、装置を移動できる必要がある。この検査で異常が検知されると、さらに大きな病院で精密検査を受けることになるのだが、この精密検査には低温系 SQUID の適応を考えた。このため、

開発初期段階では、一次検査できるように、計測する時間波形の中で一番小さいp波が認識できる感度を目指した。また、磁気シールドを含め可搬型の装置を目標とした。

開放性が高く、しかもコンパクトな心磁計として図1に示す縦型の磁気シールドを用いた心磁計を開発した。この装置の特徴としては、従来にない磁気シールドの構造と座位計測があげられる。磁気シールドは上下が開放されていて、スライド式のドアによって人の出入りが可能となっている。この構造は狭いが、中に入った人には閉所感を与えない。例えば公衆電話ボックスに入ったような感じである。被験者はいすに座り、センサが垂直面に配置されたデュワ面に胸を当てて検査を受ける。この検査スタイルは、健康診断の時に受ける胸部X線検査に似ている。磁気シールドはスライド式のドアがあり、密閉された筒にはなっていないので、遮蔽率はそれほど高くない37dB (at 1Hz)の遮蔽率であった。しかし、磁気シールドの内部では均一な磁場分布が得られている。SQUIDとしては、SrTiO<sub>3</sub> バイクリスタル基板の上にエピタキシャル成長したYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (YBCO) 超電導薄膜を成膜したものを使った。ジョセフソン接合は、バイクリスタル基板の結晶面の方位が異なる基板を機械的に貼り合わせた部分の上にてきた粒界接合を用いている。磁気センサとしてピックアップコイルと SQUID の直接結合したマグネトメータの構成をとっている。隣り合った SQUID 間で差分をとる信号処理により、環境雑音を除去している。心磁の磁場成分は胸部に垂直な方向をとったので、円筒磁気シールドでは半径方向となる。つまり、開放されている円筒軸方向とは垂直な遮蔽率が高い方向で、しかも円筒内部では均一な磁場分布なので、隣り合った SQUID 間で差分をとると環境雑音を大幅に減少させることができた。SQUID は40mm 間隔で4×4のセンサレイ状に配置されている。これらの構成により、当初目的としたp波をリアルタイムで計測することができた。



図1 高温超電導 16 チャンネル心磁計

### 6.3 高温超電導 51 チャンネル心磁計

開発の最終年度の目標は、臨床評価ができる高温超電導心磁計を実現し実証することであった。いままで積み上げてきた高温系 SQUID の製作技術や、磁気雑音除去技術などを統合し、新しい装置の開発が行われた。図2は2003年に開発した高温超電導 51 チャンネル心磁計である。51 チャンネルともなるとセンサ間のばらつきや信頼性が問題となる。高温系 SQUID の製造方法で低温系 SQUID と異なるのは、集積化の点にある。低温系 SQUID は、外部とのピックアップコイルと超電導接続できるので、SQUID 部分だけでつくることができる。つまり、小さな面積の SQUID 単体を作ればよいので、量産が可能である。また、SQUID は半導体のプ



図2 高温超電導 51 チャンネル心磁計

ロセスと同様に Si のウェハ上に薄膜を形成していくことができるので、大きな Si ウェハを使うことにより数 100 個や数 1000 個と大量に製造することが可能である。ところが、高温系 SQUID の SrTiO<sub>3</sub> 基板の大きさは低温系 SQUID で使用する Si のウェハに比べて非常に小さい。また外部のピックアップコイルと SQUID は超電導接続できないため、同じ基板に両者を製造する必要がある。このため、1 個の SQUID の面積が大きくなるため、1 枚の基板に 1 個あるいは数個の SQUID しかできない。この高温系 SQUID の生産性が低いことは、現在でも問題であり、生体磁気計測装置の多チャンネルを開発する上で、大きな問題となる。このため、このプロジェクトでは、基板を多数個並べて連続成膜できる PLD(Pulsed Laser Deposition)法を用いた成膜装置(連続成膜 PLD 装置)を開発して、51 チャンネルの開発に対応した。病院にて臨床評価をおこなうために、16 チャンネルの構成と異なり被験者はベッドに横たわる構成にした。磁気シールドはドーム型になっており、閉所感を与えないように身長より短くなっている。ベッド上部にセンサアレイを配置したデュワがガントリによって支えられている。計測点は 36 点あり心臓全体を一回で測定できる広さをもっている。磁気シールドは約 30dB で、環境雑音をさらに取り除くため 5 つのベクトルセンサが追加されている。従ってシステムとしては、51 チャンネルの心磁計となった。この装置は臨床評価の結果、病院環境下でも心磁図の時間波形とともにマッピングができることが実証された。

このように次世代機器としての高温超電導心磁計の開発を行い、臨床用として使える可能性を示せ、今後の研究開発の方向付けができたことは有意義であった。次回はまた低温系の心磁計にもどり、その心磁図がどのように展開し現在に至っているかをお話したい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

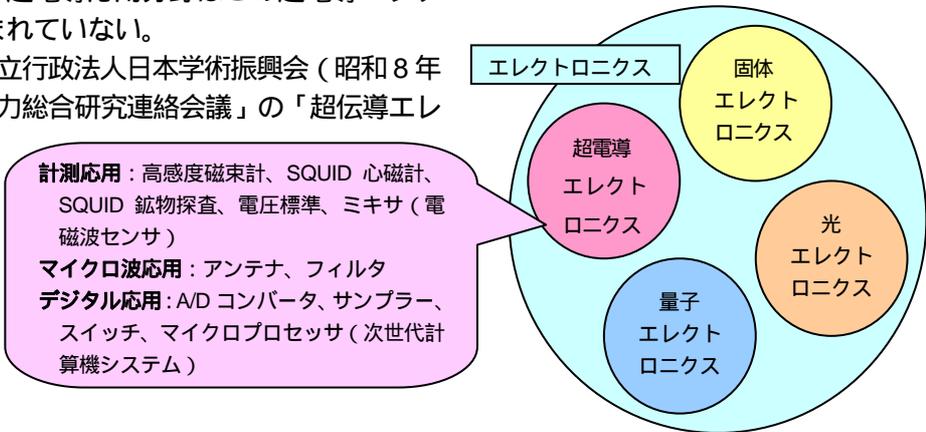
Q: 「超電導エレクトロニクス分野」について教えてください。

A: 超電導エレクトロニクス分野とは、ジョセフソン効果<sup>注1</sup>、準粒子トンネル効果<sup>注2</sup>、超電導閉ループに関する磁束量子化<sup>注3</sup>、低表面インピーダンス<sup>注4</sup>などの超電導現象を応用した電子技術分野をいう。

広義には半導体などの固体エレクトロニクス、光エレクトロニクス、量子エレクトロニクスなどと同様にエレクトロニクスの一分野に属する。

狭義には、超電導体の通信工学や弱電工学に関連する分野と理解されており、交流電力機器などの電気工学や高磁界への超電導応用分野はこの超電導エレクトロニクス分野には含まれていない。

わが国においては、独立行政法人日本学術振興会（昭和8年発足）における「産学協力総合研究連絡会議」の「超伝導エレクトロニクス第146委員会（昭和57年設置、平成16年改名）を機軸として、超電導エレクトロニクス分野の研究開発活動が継続的に行われている。



（注1）ジョセフソン効果は、超電導体 S - 絶縁体 I - 超電導体 S 接合（SIS 接合）におけるクーパー対のトンネル電流に係わるもので、半導体では生じない現象である。一般的には、絶縁体だけではなく常電導体などを介して2つの超電導体を弱く結合した接合で起こり、これをジョセフソン接合と呼ぶ。ジョセフソン効果には、直流ジョセフソン効果と交流ジョセフソン効果がある。高感度の SQUID センサは、直流ジョセフソン効果と超電導閉ループに関する磁束量子化（後述）を利用し、微弱磁場を電圧に変換し観測可能としたものである。また、直流電圧標準は、交流ジョセフソン効果を利用し、ジョセフソン接合列に照射する電磁波の周波数で電圧の大きさを規定するものである。

（注2）準粒子トンネル効果は、SIS 接合において、一方の超電導体のクーパー対が、対のままではなく不對電子（自由電子とはエネルギー状態が異なるため準粒子と呼ばれる）となってもう一つの超電導体にトンネルする電流に係わるものである。この SIS 接合は高い感度が必要とされるミリ波、サブミリ波領域の検波器や混合器（ミキサ）として有用である。

（注3）超電導閉ループに関する磁束量子化は、SQUID のみならず、論理回路、記憶回路などのデジタルデバイスに不可欠な超電導体における基本的現象である。超電導ループに1個ないし2個のジョセフソン接合を組込み、ループ内の磁束量を磁束量子条件に基づき検出するデバイスが SQUID である。さらに、このループにおけるジョセフソン接合のスッチング動作に伴う磁束量子の出入りを利用して論理回路や記憶回路が構成される。

（注4）低表面インピーダンス（常電導金属に比べ2,3桁小さい）は、マイクロ波領域での超電導体の代表的な特徴であり、フィルタ、アンテナ、遅延線路などの受動型デバイス応用に有用である。

（編集局）

[超電導 Web21 トップページ](#)