

【隔月連載記事】

やさしい超電導エレクトロニクスのおはなし(その1)

SRL/ISTEC

特別研究員 蓮尾信也

その1: 超電導エレクトロニクス概論

1. はじめに

超電導現象を応用したエレクトロニクスを総称して超電導エレクトロニクスという。その応用分野は半導体エレクトロニクスにも匹敵するほど多くの種類がある。しかし、その多くが現在開発中あるいは研究中のものが多く、日常生活の中でお目にかかることはまだ少ない。

半導体エレクトロニクスが使われるようになってから、人々の生活様式は大きく変わった。これと同じように、超電導エレクトロニクスが日常生活で使われるようになれば、情報通信技術、医療技術、環境技術、そして宇宙技術などの分野が、これまでと大きく変わるものと期待される。この解説記事では、超電導エレクトロニクスの現状を紹介するとともに、将来どのように発展するかを述べる。

2. 超電導現象のエレクトロニクスへの応用

超電導現象をエレクトロニクスへ応用しようという試みは、1950年代中期のクライオトロンに端を発する。¹⁾ 超電導材料で薄膜を作り、その膜が超電導状態にある時は電圧を発生しないが、常電導状態に移った後は電圧が発生する性質を利用してスイッチとして使うというものである。当時としてはリレーや真空管に比べるとその切り替え速度が格段に速いものであった。世界で初めての真空管式コンピュータ ENIAC が 1946 年に登場してから 10 年もしない時期に、クライオトロンを使ってコンピュータを作る試みがなされていることは驚くべきことである。ENIAC ができた当初から、人類はもっと速いコンピュータを作ろうと考えていたことの証だからである。

しかし、クライオトロンはトランジスタの進歩に押されて滅び去り、その後には超電導電子のトンネル効果を利用したジョセフソン素子が現れる。1963年のことである。ジョセフソン素子はこれから述べる超電導エレクトロニクスになくしてはならない主役である。また、超電導材料としては、1980年代末まではほとんどニオブ(Nb)が用いられていた。このため動作温度は液体ヘリウム温度(4.2K)程度の低温に限定されていた。しかし、1986年に高温超電導体が発見されたことにより、素子の動作温度が液体窒素温度(77K)で実現できる可能性が生まれた。超電導エレクトロニクスへの期待がいつそう高まっていった。

ジョセフソン素子とは何かについては後ほど述べるとして、超電導エレクトロニクスで何ができるのかを述べておこう。

それをまとめたのが図1である。基本となる素子は大きく二種類に分けることができる。受動素子と能動素子である。

受動素子

受動素子というのは、外部からエネルギーを与えなくても必要な役割を果たすことのできる素子をいう。抵抗器やコンデンサーなどはその典型である。超電導受動素子は超電導体そのものが素子としての役割を果たす。形状は超電導体のバルク、厚膜(厚さ数 μm ~数 mm 程度)あるいは薄膜(厚さ0.1~1 μm 程度)などがある。超電導体の表面抵抗が小さいことから、銅や金を用いたマイクロ波部品よりも優れた性能を発揮する周波数領域(数GHz~100GHz程度)で用いられること

が多い。超電導アンテナやマイクロ波共振器などへの応用が研究されているが、現在すでに実用化されているのは超電導フィルタである。携帯電話基地局でほかの電波帯域との区切りを明確にする目的で超電導フィルタが使われる。米国では実際に数千箇所の基地局に超電導フィルタが導入されている。

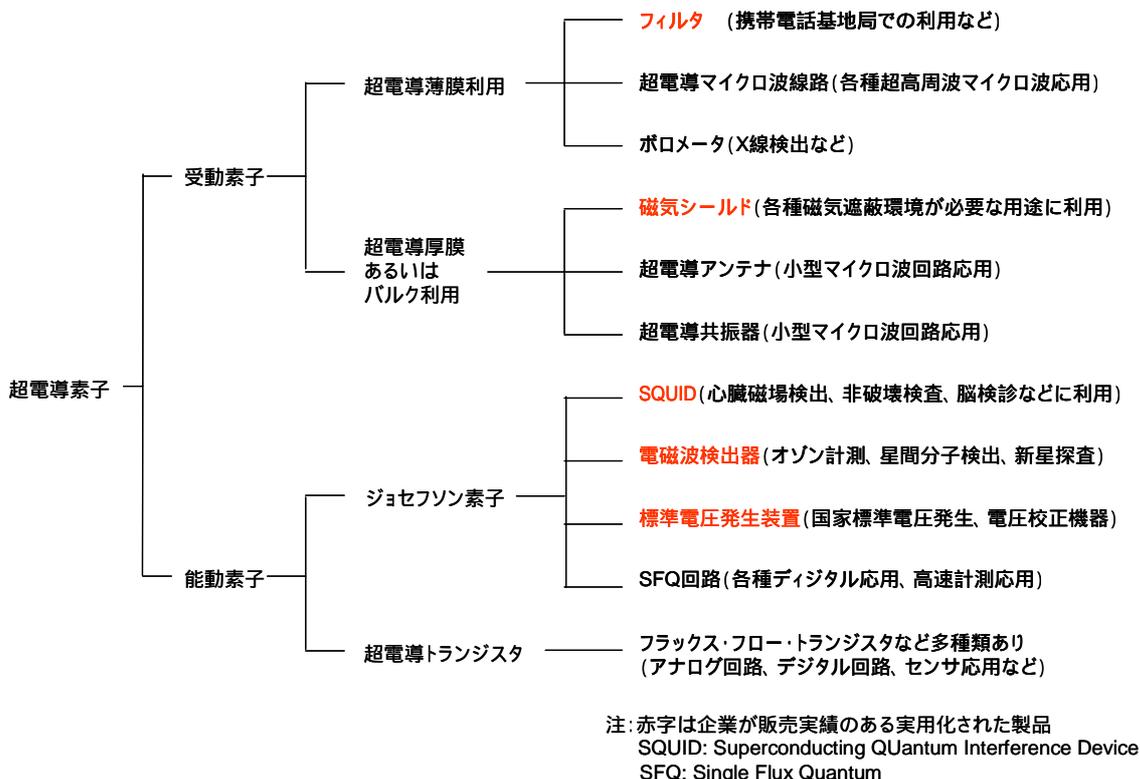


図1 超電導素子のエレクトロニクスへの応用

能動素子

能動素子というのは、外部からエネルギーを供給することにより信号を増幅したり、新しい信号を作り出したりするもので、トランジスタがその典型である。超電導体の場合はジョセフソン素子が能動素子の典型といえる。

ジョセフソン素子は今後もこの解説の中でよく登場するので、少し詳しく述べておこう。

図2(a)に示すように二つの超電導体の間に数 nm (1nm は 10 億分の 1m) の絶縁層を挟んだ構造の素子である。このような構造をジョセフソン接合という。この接合の間を超電導電子 (二つの電子が対を作っており、クーパー対と呼ばれる) が壊れる (普通の電子にもどる) ことなく流れることができるというのがジョセフソン効果である。これは超電導電子のトンネル効果とよばれ、1962年にケンブリッジ大学の B.D. Josephson によって理論的に予測された現象である。²⁾ 翌 1963年にベル研究所の P.W. Anderson と J.M. Rowell によって実験で確かめられた。³⁾

図2(b)にジョセフソン素子の電流 - 電圧特性を示す。(b)で縦にまっすぐな青線は超電導電子が流れることによる電流である。この超電導電流はいくらでも流れるというわけには行かない。最大流し得る電流値を臨界電流という。臨界電流は超電導体の間に挟む絶縁膜の厚みに依存する。厚いほど流られる電流値は小さくなる。それ以上の電流を流すと超電導電子は普通の電子に変わってしまうので、接合の両端には電圧が発生する。その結果(b)に示すような電流 - 電圧特性になる。

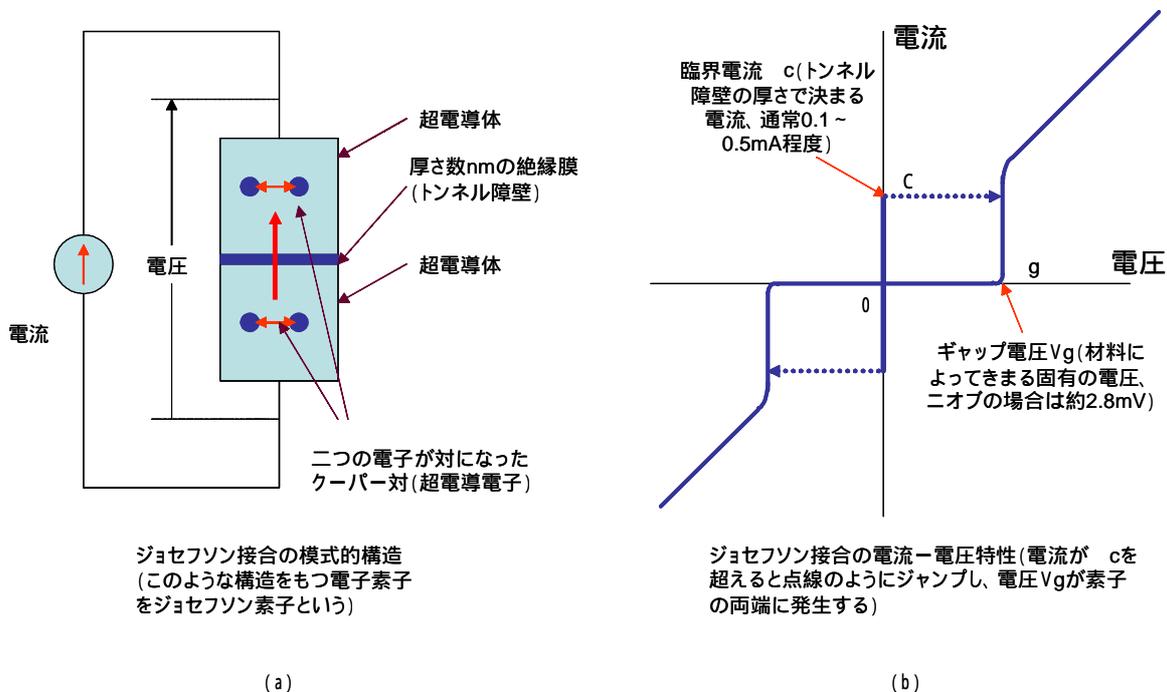


図2 ジョセフソン素子の構造とその電流 - 電圧特性

ジョセフソン素子の臨界電流が外部の磁界に敏感に反応する性質を用いれば、人体に触れないで心臓の鼓動が作る磁界を計測したり、脳に電流が流れることによって発生する磁界を検出したりすることができる。心臓疾患の検査や脳機能の研究などに用いられる。電磁波のセンサーとしても非常に高感度であり、大気中の中層圏に存在するオゾンからのわずかな電磁波も捕らえることができる。また、正確な電圧を発生することも可能であり、日本など先進諸国では電圧の国家標準にジョセフソン素子を用いたシステムを採用しているところが多い。各種デジタル回路への応用も可能である。半導体に比べ数十倍の高速で動作し、電力も一桁以上少なくすむからである。

そのほかに超電導体を用いてトランジスタを作る試みもある。まだ複数個の超電導トランジスタを組み合わせて動作させた例はないが、センサーなどへの応用が考えられている。

ここで述べたフィルタ、磁界検出、電磁波検出、電圧標準、デジタル応用などの詳細については次回以降述べることにする。

参考文献

最近の解説記事として、応用物理学会誌 2004年1月号の超電導特集号が参考になる。

- 1) D.A.Buck: Proc. IRE 44, 482 (1956)
- 2) B.D.Josephson: Phys. Lett., 1, 251 (1962)
- 3) P.W.Anderson and J.M.Rowell: Phys. Rev. Lett., 10, 230 (1963)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導エレクトロニクスのおはなし(その2)

SRL/ISTEC

特別研究員 蓮尾信也

その2: 超電導エレクトロニクスの具体例(その1)

3. 超電導エレクトロニクスの具体例

前回、超電導エレクトロニクスの分野にはいろいろな応用があることを示した。そのすべてを詳細に述べることは紙面の都合上できないが、その中のいくつかを取り上げて具体的に示そう。

超電導フィルタ

超電導 Web21 の 2004 年 3 月号に「超電導マイクロ波デバイス」の特集が組まれており、その中で超電導フィルタについても解説されているのでここでは簡単に紹介しておく。一言でいえば、超電導薄膜を用いてフィルタを設計すれば理想的な特性のものが得られることである。ここでいう理想的とは、通過させたい周波数の電波は完全に通り、遮断したい周波数は完全にさえぎることができるという意味である。高温超電導薄膜を用いて実際に作られているフィルタでは、通過域での挿入損失が 0.3db (約 7%) 以下であり、遮断域では 80db 以上減衰する(1億分の 1 以下になる)⁴⁾超電導フィルタをたとえば携帯電話の基地局の電波の送受信に用いると、電波の混信を防ぐために非常に有効である。

超電導フィルタを用いた小型受信増幅装置の例を図 3 に示す。⁵⁾ 第三世代通信システムである IMT2000 用に設計されており、冷凍機まで含めて容積 15 リットルの中に組み込まれている。日本ではまだ実際の基地局に採用された例はないが、米国では数千箇所の基地局の受信システムにすでに導入されている。



図 3 超電導フィルタを用いた小型受信増幅装置の試作例⁵⁾

磁界センサー

ジョセフソン素子は磁界に非常に敏感な素子である。その敏感な素子を組み合わせるとさらに敏感なセンサーができる。前回述べたジョセフソン素子を 2 個使って、図 4(a)に示すように超電導線で作ったループに挿入する。その結果、このループに流すことのできる電流の最大値(臨界電流)は図 4(b)に示すように、周期的に小さくなったり大きくなったりする。これは(a)の超電導ループの中に単一磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)と呼ばれる磁束の最小単位が 1 個入る毎に周期が 1 つずつずれるためである。磁束量子の値 Φ_0 は物理定数 $h/2e$ (h : プランク定数、 e : 電子電荷) で表すことができ、この値は 2×10^{-15} Weber という小さな値である。しかも、計測のための周辺回路を工夫することにより、 Φ_0 の百万分の 1 程度まで識別することができる。このため非常に高感度に磁界計測ができるのである。

このように超電導ループの中にジョセフソン素子を組み込んだ回路を SQUID(スクイッド)という。辞書を引くと“すみいか”と書いてあるが、これとは全く関係ない。Superconducting QUantum

Interference Device (超電導量子干渉素子) という長い名前を縮めたものである。超電導 Web21 の 2003 年 7 月号に SQUID の特集が組まれており、いろいろな応用例が示されているので参考にして頂きたい。

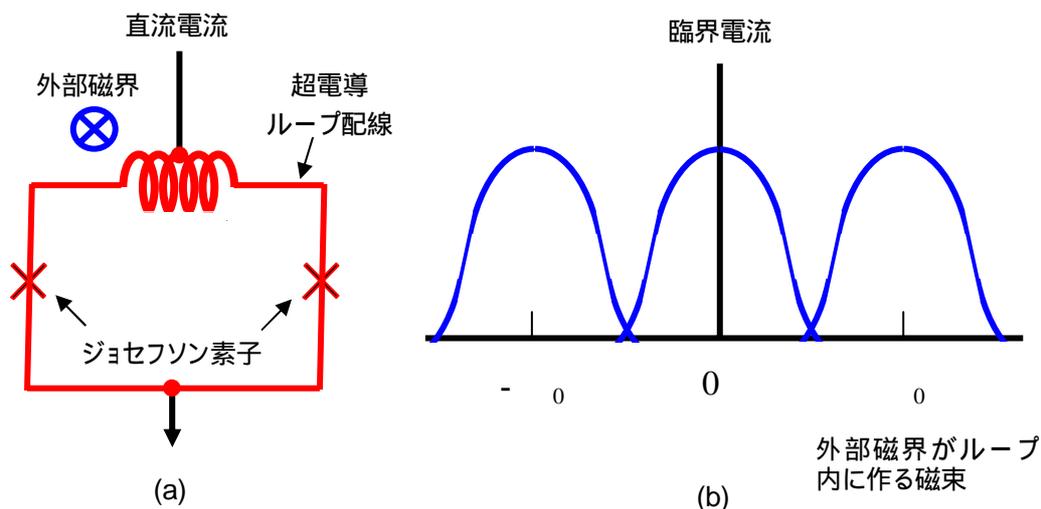


図 4 SQUID の等価回路(a) とその臨界電流の外部磁界依存性(b)

この SQUID は非常に高感度である。地磁気(約 50 μ T)の 1 億分の 1 以下の磁界まで検出できる。非常に高感度に磁界が検出されるようになると、これまでのセンサーでは不可能であったさまざまな微小磁界を検出できる。顕微鏡の下で蝶の鱗粉の構造を生まれて初めて見た時の感激は多くの人が経験していると思う。これまで肉眼では 1 ミリ程度の大きさのものしか識別できなかったものが、0.1 ミリあるいは 0.01 ミリという小さな世界が見えた時の感動である。それと同じように、磁界の世界においてもこれまで見えなかったもの(認識できなかったもの)を見ることによって、世界が変わる可能性がある。磁界計測の分野でそのような手段を提供してくれるのが SQUID である。

たとえば、人体から発生する磁界(生体磁気という)を検出することができる。人体に触れないで心臓の電気活動によって作られる磁界を検出し、心電図と似た信号である心磁図を計測することが出来る。とくに多数個の SQUID を並べることにより心臓周辺の磁界の空間的な分布を測定することが出来る。このマルチチャンネル SQUID システムで計測された磁界分布から、計算によって心臓内部の電流分布を知ることができる。これまでの医療機器では発見の難しい虚血性心疾患などの診断に有効であると期待されている。また、人体に非接触で計測できるので胎児の心臓疾患の診断にも有効である。すでに 64 チャンネルの SQUID システムが医療機器として認可されており、⁶⁾ 今後病院での検査に広く使われるようになるであろう。

心臓の磁界だけでなく、さらに高感度検出を行うと脳内電流の作る磁界を検出することも出来る。将来は脳疾患診断用の医療機器として SQUID が使われるようになるだろう。高感度な SQUID を用いた脳機能解明の研究も行われている。SF 小説の世界のことが現実になる日がくるかも知れない。

航空機や高速道路の橋脚などの構造物の劣化(内部亀裂など)を非破壊で検査することもできる。ドイツでは実用テストが行われている。5 μ m 程度の空間分解能を有する SQUID 顕微鏡も開発され実用されている。磁性インクで印刷されたお札の像を観察したり、⁷⁾ 超電導回路の中に捕捉された磁束を観察することが出来る。⁸⁾ 作製途中の半導体 LSI 回路や完成した回路に細いレーザー光を当て

ることによって、発生した電子・正孔対の作る電流を SQUID で検出し、LSI の欠陥や故障診断に用いるシステムも作られている。⁹⁾ 牛や豚の育成段階で予防注射やホルモン注射を行った際に、誤って注射針が折れて体内に残留することがある。このような食肉が消費者に購入される以前に、食肉の形に加工された段階で検出するシステムも作られている。¹⁰⁾ 免疫診断にも SQUID が使われる。磁性微粒子を抗体に付着させたマーカーを作り、抗原と結合した抗体の磁気モーメントを計測することによって抗原の量を計測するシステムである。¹¹⁾

大規模な応用としては地下埋蔵物の磁気探査がある。電線で地表面を数キロメートル四方にわたって取り囲み、そこにパルス電流を流した時の応答磁界を SQUID で検出し、地下に埋蔵されている金属鉱床などを発見する方法である。¹²⁾

以上のように様々な分野で SQUID を利用することができ、その特徴は非破壊・非接触で超高感度に磁界を検出できることであるといえる。新たなアイデアの創出により、今後さらに SQUID の応用範囲は拡大されていくであろう。

また、ここで述べた SQUID を構成するためのジョセフソン素子は、ニオブなどの低温超電導材料で作ることもできるが、構造が簡単なので YBCO などの高温超電導材料を用いて作ることもできる。一般に低温超電導材料で作った SQUID のほうが感度がよく、より微弱な磁界を検出できる。一方、高温超電導材料で作った SQUID は冷却が簡便であることから、簡易測定や戸外での測定に用いられることが多い。

今回はフィルタ応用と SQUID について述べたが、次回は引き続いてその他のエレクトロニクス応用について紹介する。

参考文献

- 4) 榊原伸義：応用物理学会誌 2003 年 1 月号 p.21
- 5) 富士通プレスリリース、<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2002/09/20.html>、2002.9.20.
- 6) 塚田啓二：超電導 Web21、2003 年 7 月号、p8
- 7) 糸崎秀夫：NIMS NOW <http://www.nims.go.jp/jpn/news/nimsnow/2003-07/08.html>
- 8) 鈴木宏治ほか：2004 年春季応用物理学会関係連合講演会 29a-YF-11
- 9) 二川清ほか：LSI テスティングシンポジウム 2002 講演番号 39
- 10) 工藤正義ほか：2004 年春季応用物理学会関係連合講演会 29a-YD-9
- 11) 円福敬二：応用物理学会誌 2004 年 1 月号 p.28
- 12) 太田肇ほか：2004 年春季応用物理学会関係連合講演会 29a-YD-3

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導エレクトロニクスのおはなし(その3)

SRL/ISTEC

特別研究員 蓮尾信也

その3: 超電導エレクトロニクスの具体例(その2)

前回到引き続き超電導エレクトロニクスの具体例を紹介する。

電磁波検出

ジョセフソン素子は微弱な電磁波にも敏感に応答する。とくにミリ波・サブミリ波とよばれる周波数領域(数10~数100GHz)で威力を発揮する。このような周波数領域を日常生活で利用することはまだまだ多くないが、人々の生活に非常に重要な貢献をする場合がある。たとえば、大気中の中層圏に存在するオゾン層には、オゾン分子 O_3 のほかにもオゾン破壊物質である ClO や HCl などの分子が漂っており、これらの分子が100GHzから1THz程度の微弱な電磁波を放出している。実際に4Kに冷却されたジョセフソン素子を用いてオゾン分子の発する電磁波



図5 ジョセフソン素子を用いたオゾン観測装置¹³⁾

(110GHz)を測定し、そのデータから大気中のオゾン濃度を求める装置が実現されている(図5)。¹³⁾ つくばの環境省国立環境研究所と北海道「りくべつ宇宙地球科学館」内の陸別成層圏総合観測室に設置され、24時間連続観測が行われている。高度20km~80km上空のオゾン分布が観測できる。

また、天文科学の分野でもジョセフソン素子を用いた電磁波観測技術は大きな威力を発揮する。¹⁴⁾ 星雲を望遠鏡で見ると、多くの星がいろいろな形を形成しているのが分かる。しかし、これを可視光線ではなく異なる波長で捉えてみると違った形に見える。X線や赤外線などでの観測も行われているが、それらに比べて波長の長いミリ波やサブミリ波で星雲を捉えると、星の誕生の初期段階を観測することができる。パラボラアンテナを多数個並べて宇宙からの電波を捉えることにより宇宙の多くの謎が解明されようとしている。

電圧標準

ジョセフソン素子に周波数の分かっている電磁波を照射すると、その周波数に比例した電圧がジョセフソン素子両端に発生する。周波数 f と電圧 V との間には、 $f = (2e/h) \cdot V$ という関係が成り立つ。その比例係数は物理定数(プランク定数 h と電子の電荷 e)だけで決まっている。周波数は10桁以上の高精度で決めることができるので、これらの物理定数さえ精度よく与えてやれば、物理定数と同じ精度で正確な電圧を作り出すことができる。現在、 $2e/h$ の値は483597.98 GHz/Vと定義

されている。¹⁵⁾ ジョセフソン素子を多数個直列接続してマイクロ波を照射すると、全ての素子の電圧が足し合わさって大きな電圧を得ることができる。たとえば、48.359798 GHz のマイクロ波を照射すると、前述の式の関係に従って、ジョセフソン素子一個に 100 μ V の電圧が発生する。これを 10,000 個直列接続して 1V の標準電圧が発生できる。産業技術総合研究所で維持運用している電圧標準装置では、10V を 1 億分の 1V の精度で校正することができる。¹⁶⁾ 現在、日本をはじめ世界の先進国のほとんどはこの方式による国家標準を採用している。超電導材料として Nb もしくは NbN を用いたジョセフソン素子が使われることが多い。また、米国の HYPRES 社からは 1V および 10V の標準電圧を発生する標準電圧発生装置が販売されている。¹⁷⁾

デジタル応用

これまで述べてきた数々の応用から読者はお気づきと思うが、超電導素子の応用分野はいずれも他の手段では実現できない究極の性能を追求していることが特徴である。超電導素子を用いたもう一つの重要な応用、それがデジタル応用である。人々の生活の中でデジタル回路がいかに重要な役割を果たしているかはいまさら述べるまでもないが、超電導素子の目指すものは究極の高速性能を実現するデジタル回路である。

コンピュータ用の演算素子は、リレー、真空管、トランジスタと進歩してきた。その演算速度はこの 50 年間で約 10 億倍になった。乗り物の速度が速くなったとはいえ、200 年前の駕籠（かご）と現代の新幹線を比較してもわずか 50 倍しか違わない。ジェット機ですらやっと 200 倍である。コンピュータの進歩がいかに大幅であるかが分かる。最高速のトランジスタを用いて世界最高速のスーパーコンピュータが作られている。地球シミュレータである。¹⁸⁾ 一秒間に 40 兆回もの浮動小数点演算が出来る(40Tflops)。それでも満足できないユーザはさらに高速のコンピュータの実現を待ち望んでいる。

1960 年代から現在に至るまで、Si トランジスタが高速演算素子の主役であった。その主役の座を取って代わろうと狙う高速素子の候補はこれまでに数多く出現した。しかし、Si トランジスタの進歩は目覚しく、Si 以外の素子は出番を迎えないまま消え去って行った。いま、Si に立ち向かう挑戦者として最先端を走っているのがジョセフソン素子である。ジョセフソン素子を超高速演算素子として使う試みは 1970 年代前半から始まった。いわゆるジョセフソンコンピュータを作る試みが行われた。これはジョセフソン素子の両端に電圧が発生していない超電導状態を二進数の“0”に対応させ、電圧が発生している状態を“1”に対応させるものである。この方式を用いて 4 ビットマイクロプロセッサ(MPU)や 8 ビットデジタルシグナルプロセッサ(DSP)が実現された。^{19), 20)} 図 6 に 4 ビット MPU を示す。これはクロック周波数 1GHz で動作した。1980 年代末の当時としては Si や GaAs のトランジスタを用いたプロセッサに比べて十倍以上高速であった。しかし、この方式ではクロック周波数を上げることに限界があり、5GHz 以上は困難であることが分かってきた。

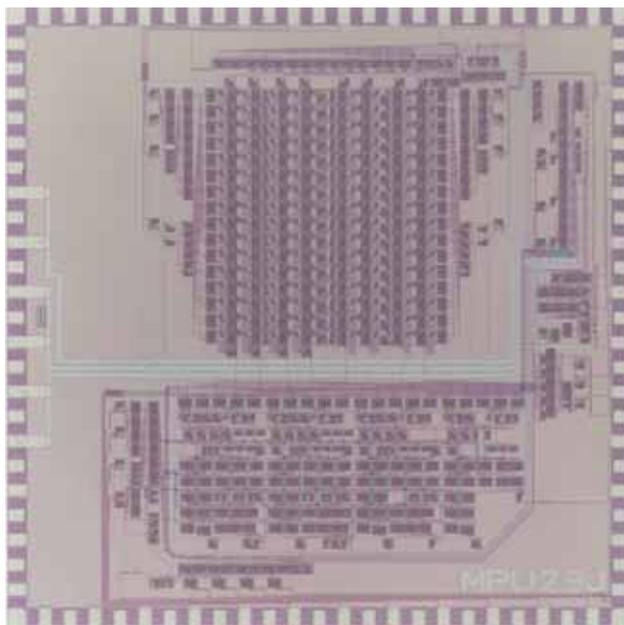


図 6 世界初のジョセフソン 4 ビット MPU¹⁹⁾

ジョセフソン素子を用いて論理演算を行わせる方式には、大きく分けて二通りの方法がある。一つは、先に述べた電圧状態と超電導状態を切り替える方式である。もう一つは、前回の SQUID のところで述べた単一磁束量子 (Single Flux Quantum: SFQ) の有無を二進数の“1”と“0”に対応させるものである。前者の回路は一度電圧状態になると入力信号が切れても状態が保たれることから、鍵を掛けるという意味でラッチ型論理回路と呼ばれている。後者は SFQ 論理回路という。SFQ 論理回路の研究も 1970 年代から行われていたが、本格的に研究が始まったのはラッチ型論理回路の方式に限界が見えてきた 1990 年代の半ばからのことである。SFQ を用いたデジタル回路は、Si トランジスタでは実現不可能と思われる高速動作を実現することができる。クロック周波数が 100GHz 程度の次世代高速デジタル回路の主役となることが期待されている。

今回は、章を改めてこの SFQ 論理回路について述べる。

参考文献

- 13) http://edevice.fujitsu.com/fvd/eco/viso_100.html
- 14) http://www.nro.nao.ac.jp/Misc/radio_obs.html
- 15) <http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0001369/0/0306denatsu.pdf>
- 16) http://www.aist.go.jp/aist_j/museum/keisoku/jyosefu/jyosefu.html
- 17) <http://www.hypres.com/>
- 18) <http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/>
- 19) S. Kotani et al.:Digest of ISSCC p.150 (1988)
- 20) S. Kotani et al.:Digest of ISSCC p.148 (1990)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導エレクトロニクスのおはなし(その4)

SRL/ISTEC

特別研究員 蓮尾信也

その4: SFQ 論理回路

4. SFQ 論理回路

今回は、磁束量子 1 個の有無を 2 進数の“1”と“0”に対応させて論理演算を行う SFQ 論理回路について述べる。ちなみに、SFQ とは Single Flux Quantum の略で単一磁束量子を意味する。

なぜ SFQ 論理回路か？

半導体である Si を用いた論理回路は微細加工プロセスの導入により高速化を図ってきた。いまではゲート長^{注1)}が 0.09 μm という微細なトランジスタを集積した LSI が作製可能になり、動作クロック周波数は 3~4GHz と高速になった。しかし、これ以上高速化するためにゲート長をさらに短くすると、本来の電流以外にトンネル効果によるリーク電流が急増する。このため、制御できない電流によって致命的に電力消費が増加してしまう。パソコン用のプロセッサは 100W 程度の電力を消費している。わずか 1cm 角程度の LSI に 100W の電力を与えたらどうなるか、容易に想像がつく。表面温度はホットプレートのように熱くなる。これ以上電力を増加すれば、熱でトランジスタが破壊されてしまう。いま高速 Si の前には消費電力の問題の壁が大きく聳え立っている。

Si トランジスタの高速化に限界が見えてきたことが、SFQ 論理回路の実現に向けた努力を強く後押ししている。SFQ を論理回路に用いる動機は大きく二つある。一つは超高速の応答速度であり、もうひとつは極低消費電力である。状態“1”から“0”へ、あるいは“0”から“1”へ切り替える時間(スイッチング時間という)が数 ps (1ps は 10^{-12} 秒)と短い。また、AND や OR などの論理回路の最小単位(ゲートという)当たりの消費電力が $1\mu\text{W}$ 以下である。超高速あるいは極低消費電力のいずれかを実現できる素子は数多く存在する。しかしその両方を同時に実現できるものは SFQ 回路をおいてほかにない。このため、クロック周波数が 20~100GHz 程度の超高速 LSI が実現できると期待されている。

SFQ 論理回路の動作原理

図 7 に SFQ 論理回路の基本構成を示す。基本的な構成要素は、その 2 (「超電導 Web21」2004 年 5 月号)で述べた SQUID と同じである。すなわち、ジョセフソン素子 2 個を含む超電導ループが基本単位である。超電導ループの中に磁束量子が出入りする瞬間だけジョセフソン素子の両端に電圧が現れる。これが SFQ パルスである。SFQ パルスの幅は数 ps で電圧振幅は 1mV 程度である。このような超電導ループを図 7 のように並べて、たとえば入力信号 A と B が二つとも入ってきたら出力信号 C が得られるようにすれば AND ゲートとして動作する。A、B どちらか一方が入ったら C に出力パルスが得られるように設計すれば OR ゲートとなる。ある瞬間に時間を止めてみれば、超電導ループの中に磁束量子が一個入っている場合と何も無い状態が存在する。これが SFQ (単一磁束量子) 回路と呼ばれる所以である。

SFQ 論理回路の中では、このように数 ps という非常に短いパルスを用いて論理動作を行わせるので、20~100GHz 程度の高速クロック周波数で動作させることが可能である。論理回路におけるクロックというのは、音楽におけるメトロノームのような役割と考えればよい。すなわち、回路動作のリズムを決めるものである。100GHz のクロック周波数で動いている回路では、クロックが一

周期する時間は 10ps であり、その間にまとまった論理演算を行うことになる。

SFQ 論理回路も半導体回路と同様に AND や OR ゲートなどの基本要素回路を組み合わせることで複雑な回路を構成する。このため、基本要素回路が前もって準備されていれば回路設計が容易になることは誰も想像できる。SFQ 論理回路ではそのような準備がすでに整っている。CONNECT セルライブラリという注2)。²¹⁾ これは AND や OR だけでなく、配線や電極など、LSI を構成するのに必要な要素部品（セル）がすべて同じ寸法（たとえば $40 \times 40 \mu\text{m}$ ）で作られている。このようなセルの集合体のことをセルライブラリと呼んでいる。現在すでに約 250 種類のセルを登録したライブラリが作られている。タイルを貼り付ける感覚でこれらのセルを並べて行けばどんな複雑な LSI も作ることができる。

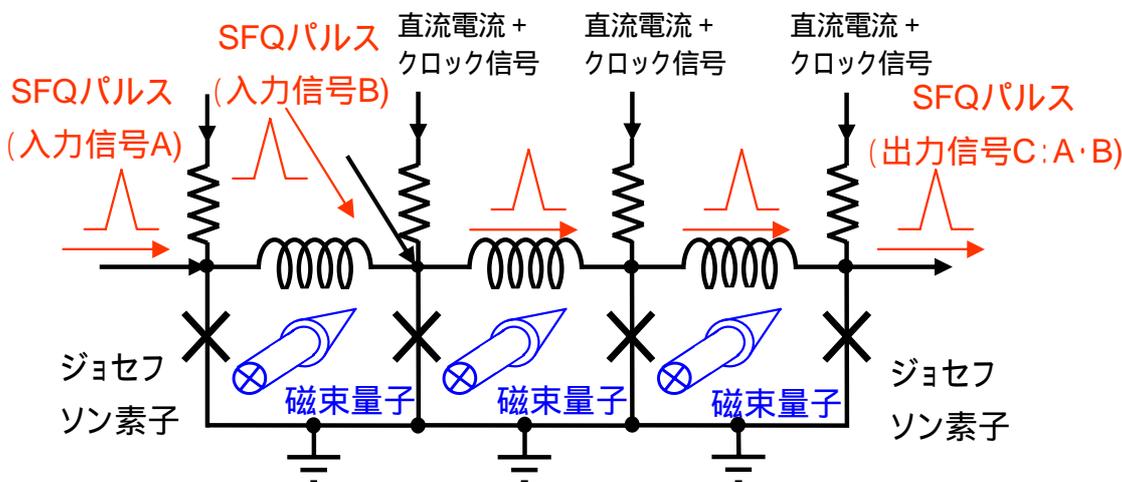


図7 SFQ 論理回路の基本構成

SFQ 論理回路の具体例

SFQ 論理回路を用いることにより、通常のトランジスタで作られているものと同じ機能を有する回路を構成することができる。したがって、半導体で作られた論理回路は原理的にすべて SFQ 回路で実現することができる。ただし、半導体論理 LSI ではトランジスタが 1 億個以上集積できるのに対して、SFQ 論理回路ではまだジョセフソン素子の数で 1 万個程度である。このため実現できる回路規模には制限がある。しかし、将来 SFQ 論理回路の集積規模が向上すれば、半導体 LSI と全く同じ機能を持った回路を数十倍高速に動作させることができるようになる。

ここで SFQ 回路を実現する材料について述べておこう。詳細な構造は次回に述べるが、4K 程度の低温で動作させるニオブを用いた集積回路と、30 ~ 50K 程度の比較的高い温度で動作させる YBCO 系材料を用いた集積回路とがある。前者はジョセフソン素子の数が 1 万個程度のもので作られているが、後者は 100 個程度である。いずれも半導体では実現できないような高速システムを目指すという点では同じだが、それぞれ目標とする回路が異なっている。前者はルータやサーバなどのような比較的大規模システムを目指しているのに対し、後者は掌に乗るような小型冷凍機の中に組み込んだシステムを目指している。後者の例として超高速波形を観測するための信号処理回路などへの応用が考えられている。

CONNECT セルを用いて構成した 4×4 スイッチのチップ写真を図 8 に示す。これは入力信号 4 個の行き先を 4 種類に振り分ける回路である。インターネットで接続先を決めるのに重要な役割を果たすルータの心臓部となる回路である。ジョセフソン素子 4,200 個で構成されており、クロック

40GHzでの動作が確認されている。²²⁾ 一秒間に処理できる能力(スループットという)は160Gbpsになる。これは現在市販されている最大容量のルータに用いられているスイッチと同じ性能である。半導体ではプリント板を数枚必要とする回路がわずかに5mm角のチップで実現できている。また、SFQ回路を用いたプロセッサも作られており、クロック18GHzでの動作が確認されている。²³⁾

これらの回路はいずれも超電導材料としてニオブが用いられており、そのほかにもいろいろなテスト回路が試作されている段階である。また、高温超電導材料であるYBCOを用いたジョセフソン素子を数十個集積した回路も各種作られている。

今回は、低温超電導材料であるニオブおよび高温超電導材料のYBCOを用いたそれぞれの集積回路プロセス技術について述べるとともに、超電導エレクトロニクスの将来について展望する。

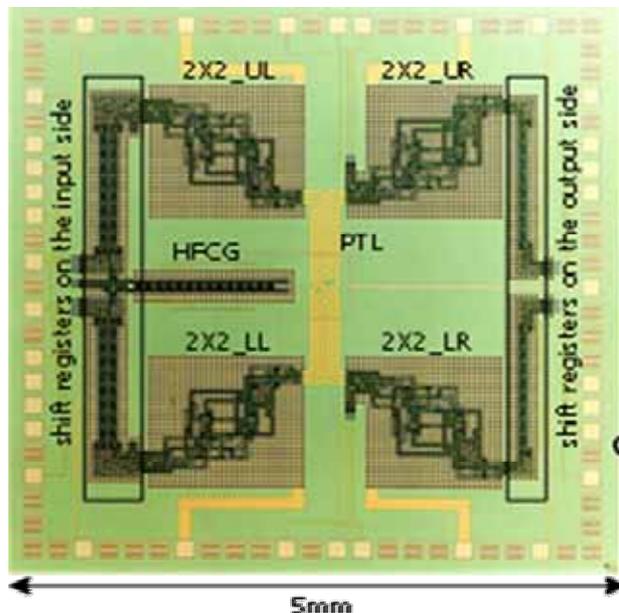


図8 4×4スイッチのチップ写真²²⁾

注1) ゲート長：トランジスタには、電流の大きさをコントロールするためのゲート電極がある。この長さを短くすればするほど高速で動作する。このため“ゲート長”を用いてトランジスタの性能を象徴的に表現することが多い。

注2) CONNECT セルライブラリ：CONNECTとはCooperation with Nagoya Univ., NEC, and CRL teamsの略字で初期の構成メンバーを示している。現在の構成メンバー組織は、超電導工学研究所、名古屋大学、横浜国立大学、情報通信研究機構である。このCONNECTグループが共同で5年以上の歳月をかけて作ったSFQ論理回路セルの集合体をCONNECTセルライブラリという。現在も作製プロセスの進捗に応じてライブラリを更新している。

参考文献

- 21) S. Yorozu et al.: Physica C, vol.378-381, p.1471 (2002)
- 22) S. Yorozu et al.: IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, p.20 (2004)
- 23) M. Tanaka et al.: Digest of ISSCC, 講演番号 16.7 (2004)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導エレクトロニクスのおはなし (その5 最終回)

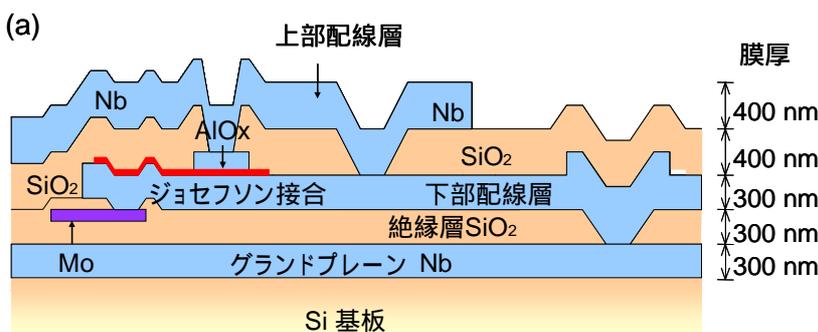
SRL/ISTEC
特別研究員 蓮尾信也

その5：超電導エレクトロニクスの発展

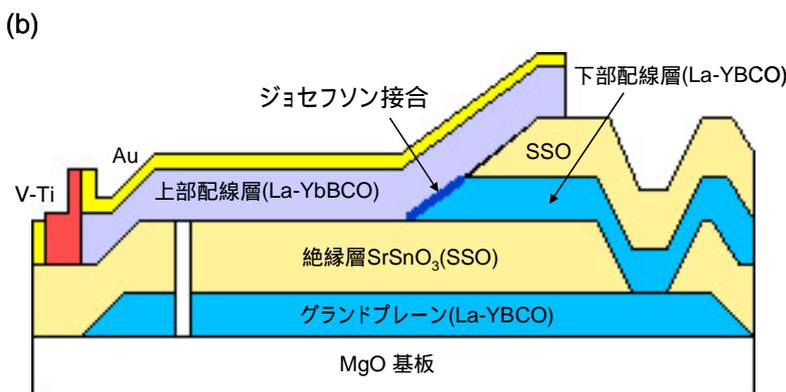
これまで述べてきたことから、超電導エレクトロニクスによって何ができるかが概略お分かりいただけたと思う。今回は、これらの素子の作り方について述べるとともに、超電導エレクトロニクスが今後どう発展していくのかについて述べよう。

5. 素子作製技術

磁界検出用の SQUID や電磁波検出用の素子などは比較的構造が簡単であるが、SFQ 回路に用いる素子は半導体プロセスで用いられるのと同様の作製方法が用いられ、構造も複雑である。ここでは紙面の関係で SFQ 集積回路について述べる。SFQ 集積回路には 4K 程度の低温で動作させるニオブを用いた集積回路と、30~50K 程度の比較的高い温度で動作させる YBCO 系材料を用いた集積回路とがある。半導体集積回路と同様に、基板材料の上にフォトリソグラフィーの技術を用いて回路パターンを形成する。ニオブの場合は基板材料として Si を用い、YBCO の場合は MgO などを用いる。図 9 (a)²⁴⁾ および (b)²⁵⁾ に示すように、いずれも基本的な構造は同じである。上部配線層、下部配線層、およびグランドプレーンが超電導材料で作られる。上部配線と下部配線の間数 nm の絶縁膜を



Nb:ニオブ超電導層、SiO₂:絶縁層、
Mo:抵抗層、AlO_x:接合の酸化膜バリア層



La-YBCO、La-YbBCO:高温超電導層、
SSO:絶縁層、V-Ti:抵抗層、Au:コンタクト層

図9 ジョセフソン集積回路の断面構造

- (a) 低温超電導材料 (ニオブ) を用いた集積回路
- (b) 酸化物高温超電導材料 (YBCO 系) を用いた集積回路

挟んだ箇所を設ける。この部分がジョセフソン接合となる。上部配線層および下部配線層は信号を伝播させるための信号線としても使われる。グランドプレーンとの間でストリップ線路構造を形成し、数 ps 程度の超高速パルス信号の伝播を可能にする。

最も重要な技術は、二つの超電導体の間に挟む非常に薄い絶縁膜の制御である。この絶縁膜の厚さがジョセフソン接合を流れる超電導電流の大きさを決定するからである。ニオブ集積回路の場合は数 nm の厚みのアルミニウム (Al) を下部配線層のニオブ表面に付着させてその表面を酸化することにより絶縁膜を形成する。酸素ガスの圧力を変えて酸化膜の厚さを制御する。YBCO の場合は下部配線層の表面をアルゴンイオンの照射により超電導性を弱めて絶縁物に改質する手法が用いられる。照射の強さを制御することにより絶縁膜の厚さを決める。

このようなプロセスを用いて集積回路を作成し、現在ではニオブで 1 万接合規模、YBCO で 100 接合規模の回路が動作できる段階にある。それぞれに回路技術と連携しながらさらに集積度を上げる努力が続けられている。ニオブ集積回路では集積度を高めるため、半導体プロセスで用いられるのと同様の平坦化技術を導入している。²⁶⁾ 図 10 に示すように、平坦化技術の導入により、ニオブ配線層の数を従来の 3 層から 6 層に増やすことができた。この結果、より高度な配線が可能となり、プロセッサなどの複雑な論理回路をよりコンパクトに集積化できるようになってきている。

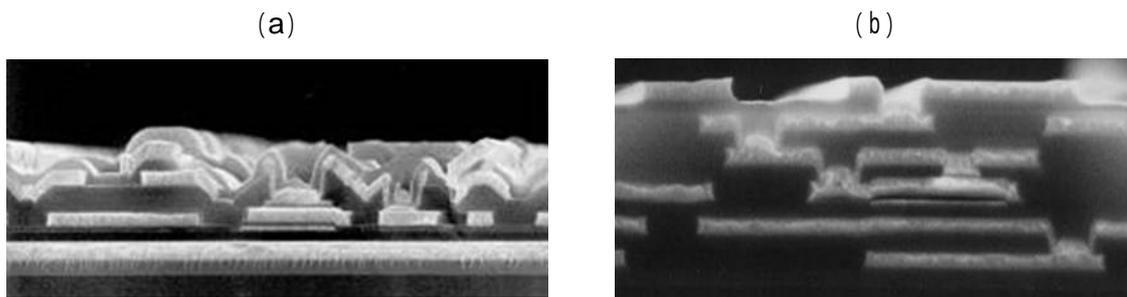


図 10 実際のジョセフソン集積回路の断面構造 (電子顕微鏡写真)
(a) 従来のニオブ集積回路、(b) 平坦化技術を導入して配線層を 6 層に増やしたニオブ集積回路。画面の横幅の実寸は(a)が約 10 μ m、(b)が約 8 μ m。

6. 今後の展開

これまで述べてきたように、いろいろなエレクトロニクス分野で超電導デバイスの開発が進められている。しかし、まだ一般の人々に知られる程度に普及しているとは言いがたい。超電導デバイスの応用は、多くの場合これまでになかった新たな市場分野への展開である。このため、その有用性が十分に認知されていないことがまだ普及していない理由である。たとえば、SQUID を用いて超高感度に磁界検出することにより何ができるのかということは、将来 SQUID を使うことになりそうな潜在的ユーザにもあまり知られていない。超電導フィルタの効果についても同様である。今後超電導デバイスの有用性が認知され、その必要性が増してくれば急速に市場が開けていくことになる。たとえば、ユーザ数が増えていくだけでなく動画など情報量の多い通信が増加すると、ほかの電波との干渉を防ぐために超電導フィルタの導入が不可欠になってくる。実際に米国では数千台規模の超電導フィルタが携帯電話基地局に導入されている。また、米国のように人の死亡原因の第一位が心筋梗塞であるような国においては、SQUID による心臓診断は非常に有効な手段となる。

超電導デバイスはいろいろな分野において、人々のニーズを満足させる技術を提供してくれる。超電導フィルタ、SQUID、および標準電圧発生装置などは、すでにシステムが作られてその有用性が実証されており、今後その市場をいかに大きく開拓していくかが課題である。その意味では、これらのデバイスはいわゆる「ダーウィンの海」^{注3)}を越えなければならない状態にある。

一方、SFQ 素子を用いた各種デジタル集積回路はいろいろな回路動作が実証され、その高速性能も示されているが、システムとしての性能実証はこれからである。その意味では、いわゆる「死の谷」^{注4)}を越える準備段階であるといえる。しかし外部の状況からみれば、「死の谷」をすぐにでも飛び越える必要が迫ってきている。CMOS にも成長の翳りが見えてきたからである。超高速デジタルデバイスについては、これまで 50 年以上に亘って高速化が図られてきた。用いられる素子はリレー、真空管、トランジスタと受け継がれてきた。トランジスタもバイポーラトランジスタから CMOS トランジスタへと主役が交代した。しかし、最も活躍した CMOS も微細化に伴ってリーク電流が増加し、無駄に消費する電力が大きくなっており、その発熱のためにこれ以上集積度を上げることが困難になってきている。²⁷⁾ しかし、一方ではインターネット人口の急速な膨張と扱われる情報の高度化に伴い、情報量は指数関数的に増加し続けている。このため、超高速のルータやサーバに対する要求は日ごとに高まってきている。この結果、SFQ 素子のような超高速素子を用いてルータやサーバを実際に作ってその性能を実証することが強く求められている。

7. あとがき

本稿で述べたように超電導エレクトロニクスには多彩な応用がある。今後いろいろな分野に使用されて行くことになる。あと何十年か後に振り返ってみれば、21 世紀の前半が超電導デバイスの黎明期になっていたことに気がつくかもしれない。

注 3) ダーウィンの海：商品プロトタイプが作られてから、実際に市場を切り開いて大量生産にいたるまでの困難さを象徴的に表現した言葉。

注 4) 死の谷：あるアイデアをもとに研究開発を行い、それが実際の商品プロトタイプとして実現されるまでの困難さを象徴的に表現した言葉。

参考文献

- 24) S. Nagasawa et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 5, no. 2, p. 2447 (1995).
- 25) H.Wakana et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, p. 595 (2003).
- 26) S. Nagasawa et al., Physica C, vol.412-414, p.1429 (2004).
- 27) たとえば、日経エレクトロニクス 2004 年 4 月 26 日号

[超電導 Web21 トップページ](#)