

**超電導SFQを用いた、超高速(40GHz)スイッチスケジューラを開発**  
——半導体スケジューラより100倍速いクロックで動作、大容量ルータ実現へ——

平成17年8月16日

(財)国際超電導産業技術研究センター  
超電導工学研究所

(財)国際超電導産業技術研究センター(理事長:荒木浩)超電導工学研究所はこのたび、40GHzで動作する低温超電導(注1)SFQ(単一磁束量子)(注2)スイッチスケジューラを開発しました。この動作(クロック)速度は、半導体回路で構成したスケジューラの現在の最高速度が400MHz程度と云われているのに対し、約100倍の速度に相当します。

この技術は将来の超大容量ルータ(現状の半導体ルータ(最大1Tbps:1秒間に1兆ビット)の10倍から1000倍の処理量を持つルータ)へつながるものです。

今回の成果は「低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発」事業として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により行われたものです。

技術的な詳細は、米国カリフォルニア州スタンフォード大学で、現地時間の8月14日から16日までの間に開催される第17回HOT CHIPS (A Symposium on High Performance Chips)の中の15日午後のセッションにおいて発表致します。

スイッチスケジューラ(以下スケジューラ)とは、ネットワークルータ(以下ルータ)の主要パーツで、ルータ内部で同じ行き先のパケット同士が衝突しないように、処理する順番をコントロールする回路のことです。スケジューラの動作速度は、現在のルータにおけるボトルネックの原因の一つとなっており、この部分の高速化を行うことでルータの処理能力を大幅に向上することが期待できます。

今回開発した超電導SFQスケジューラは4入力・4出力対応という小規模のものですが、スケジューラのような複雑な論理回路で、40GHzもの超高速動作の実証は世界でも初めてのことであり、現状ではSFQ回路だけが実現できる性能です。また、このスケジューラはクロック速度の低下を伴わずに規模の拡張を行うことも可能です。

ネットワークルータの能力を向上させるためには、スケジューラの指示に従ってデータの行き先を切り替えるデータパス(スイッチ)も重要です。超電導工学研究所では、既に40GHz対応のデータパス(スイッチ)を開発済みであり、両者を組み合わせることにより、今後、大容量ルータへ展開していく計画です。

HOT CHIPSのような半導体業界の主要会議で今回取り上げられたことは、SFQ技術が半導体業界からも注目されていることを示していると考えられます。

日本のインターネット利用者は増加の一途をたどっており(注3)、ネットワークのトラフィックも年々混雑度を増しています。

インターネットに代表される現在の大容量通信網を支える社会基盤として、光ファイバーなどの通信経路とそれらを結ぶルータがあります。インターネットの中でも多くのデータが集中する基幹系ルータはハイエンドルータと呼ばれ、特に大きな容量が要求されます。ハイエンドルータの中は、パケットの前処理を行うラインカードと呼ぶ部分と、パケットの行き先を振り分けるスイッチカードと呼ぶ部分で構成されており、スイッチカードは、スケジューラとパケット

データ経路を切り替えるデータパスとで構成されています。[\(注4\)](#)。

スケジューラは、データの行き先を見比べる逐次処理を行い、データパス上での衝突を防止する手法が一般的ですが[\(図1\)](#)、全てのデータの行き先を見比べる必要があるために並列化による速度向上が困難な部分です。入出力数増加と信号伝送速度の高速化に伴い、スケジューラが半導体ルータの大容量化[\(注5\)](#)を妨げる一つの律速要因となってきています。

半導体ハイエンドルータは、処理の並列化により高速化を実現してきましたが、並列化による回路量増加とチップ発熱量増加がさらなる高速化の足かせとなってきています。一方、SFQ回路で構成すると、低消費電力特性と素子の高速性から、高い性能がコンパクトに実現できます。

今回開発したスケジューラ[\(図2\)](#)は、SFQ回路の高速性を活かすために独自に開発した設計技術[\(注6\)](#)を利用しています。これにより、従来のスケジューラで用いてきたスケジューリングアルゴリズムを変えることなく、従来のスケジューラより約100倍速い40GHzクロックで動作することが可能です。また、今回実現した40GHzというクロックはSFQ技術の限界ではなく、素子の微細化を進めることにより100GHz以上のクロックも可能です。

超電導工学研究所では既に4入力・4出力SFQデータパスの40GHzクロック動作に成功しており、今回のSFQスケジューラ高速実験の成功により、大容量超電導SFQハイエンドルータの実現を目指した研究開発を加速していきたいと考えております。また、SFQスイッチはハイエンドルータだけでなく、スーパーコンピュータのプロセッサ間通信への展開も有望です。さらに、SFQスケジューラはその高速性から光スイッチの制御にも適用が期待されています。

今回の成果は、8月14日から16日まで米国カリフォルニア州スタンフォード大学で開催されるHOT CHIPS (A Symposium on High Performance Chips)において、15日午後の”Advanced Technology Session”で発表する予定です。HOT CHIPSは高性能マイクロプロセッサや集積回路に関する半導体業界の主要会議で、Intel, IBM, Ciscoなどの半導体業界を牽引する企業が参加し、毎年8月にシリコンバレーで開かれています。今年は2日間で29件の発表が行われることになっており、日本からはこのうち本件を含めた4件が発表されます。また、今回は、IBMと東芝から発表される予定のCELLプロセッサも話題となっています。このような会議で超電導SFQスケジューラが取り上げられることは、半導体回路の諸問題を解決する手段としてSFQ回路技術が注目されていることを示していると考えられます。

<本件に関するお問い合わせ先>

超電導工学研究所 デバイス研究開発部低温デバイス開発室 室長

日高 睦夫 E-mail: hidaka@istec.or.jp

電話 029-849-0707

超電導工学研究所 デバイス研究開発部 部長

田辺 圭一 E-mail: tanabe@istec.or.jp

電話 03-3536-5709

### (注1) 低温超電導

超電導デジタル応用に使われる超電導体には、マイナス269°C(絶対温度4° K)付近で動作する低温超電導体とマイナス243°C(絶対温度30° K)以上で動作する酸化物系の高温超電導体とがあります。低温超電導材料には一般にニオブ(Nb)という金属が用いられます。ニオブは安定で取り扱いやすい材料であるため、ニオブ系の回路は集積度が高いことが特徴です。

最近では、ニオブ系超電導回路が動作する絶対温度4° Kまで簡単に冷却できる冷凍機も市販されています。

#### (注2)SFQ(単一磁束量子)回路

-15

超電導体で作られたリングを用いることで、磁束を $2.07 \times 10^{-15}$  Wbを一つの単位として閉じ込めることが可能となります。このことを磁束の量子化と言います。量子化された磁束の最小単位を単一磁束量子または英語表記でSFQ(Single Flux Quantum)と呼びます。

SFQ回路とは、超電導リング中のSFQの有無を情報の”1”, ”0”に対応させて演算を行う回路のことをいいます。

超電導リングにSFQを出し入れするには、ジョセフソン接合と呼ばれる能動素子を使います。ジョセフソン接合は超電導体同士が”弱く”結合した構造をしています。このジョセフソン接合にある一定電流(臨界電流)以上の電流が流れると超電導状態から電圧状態(非超電導状態)に転移します。超電導リングに含まれるジョセフソン接合の電圧状態への転移により、超電導リングが壊れた部分を通してSFQの出入りを制御し、演算を行います。動作速度は半導体素子の100倍、消費電力は1/1000です。また、SFQは超電導配線中を光速に近いスピードで減衰なしに伝わるすることができます。

#### (注3)日本のインターネット利用者

インターネット白書2005によると、日本のインターネット人口は2005年2月調査時点で7000万人を超え、自宅でインターネット利用する世帯は55.4%に達しています。

#### (注4)通信経路とルータ

車の交通にたとえると、通信経路は道路にあたり、ルータは交差点にあたります。また、スケジューラは交差点中の信号機にあたります。

交差点で信号機がタイミングよく切り替わらないと、衝突事故や道路渋滞が発生し車の流れが悪くなるのと同じように、ルータが(スケジューラとデータパスにより)効率良く経路を切り替えられないと、光ファイバーのように高速な経路を用いたとしてもデータの流れに滞りが発生します。

#### (注5)半導体スケジューラ的高速化手法

最近では、スケジューラの機能を分散させて高速化を狙う分散処理型の半導体スケジューラも提案されています。この方法は、スケジューリングアルゴリズムの大きな変更を伴い、今までと全く違った回路アーキテクチャを設計し直す必要があります。一般に、新規アーキテクチャを実現する回路設計・検証には多くの時間がかかります。

#### (注6) SFQ回路設計技術

半導体回路と動作原理の異なるSFQ回路設計のために、超電導工学研究所は名古屋大学、横浜国立大学、情報通信研究機構と共同で、共通基盤として約250のSFQセル(基本構成単位)を有する標準セルライブラリ(CONNECTセルライブラリ)を構築する等、SFQ回路設計技術を開発しています。最小寸法をより小さくすること

により、更なる高速化が可能で、そのためのプロセス研究も進めています。

また、超電導工学研究所では、SFQ回路独自の高速回路設計手法を組み込んだ回路設計ツールを並行して開発しており、今回の超電導SFQスケジューラ設計にも応用しています。

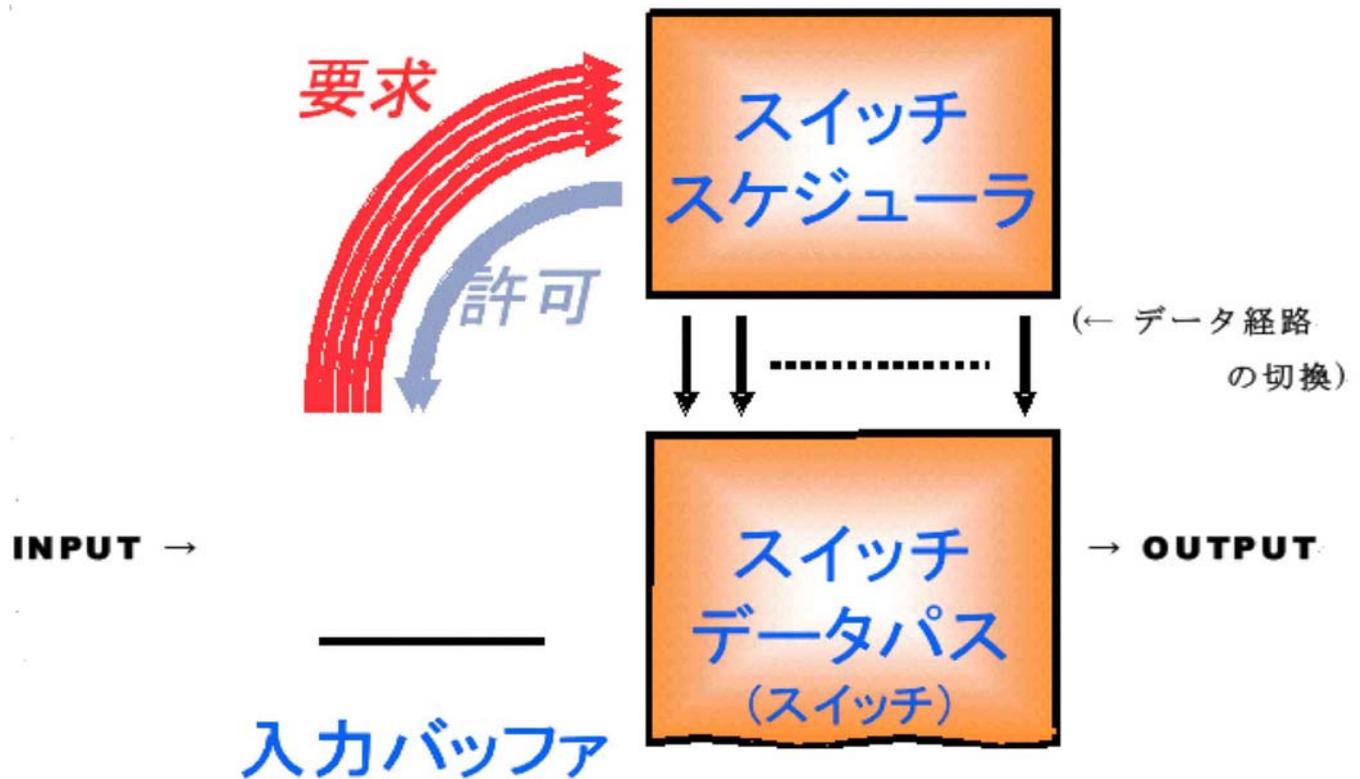


図1 スケジューラの役割

スケジューラの処理が遅いと、データパス経由でデータを送り出す処理が間に合わず、新しく入ってきたデータが入力バッファからあふれ出してしまう。

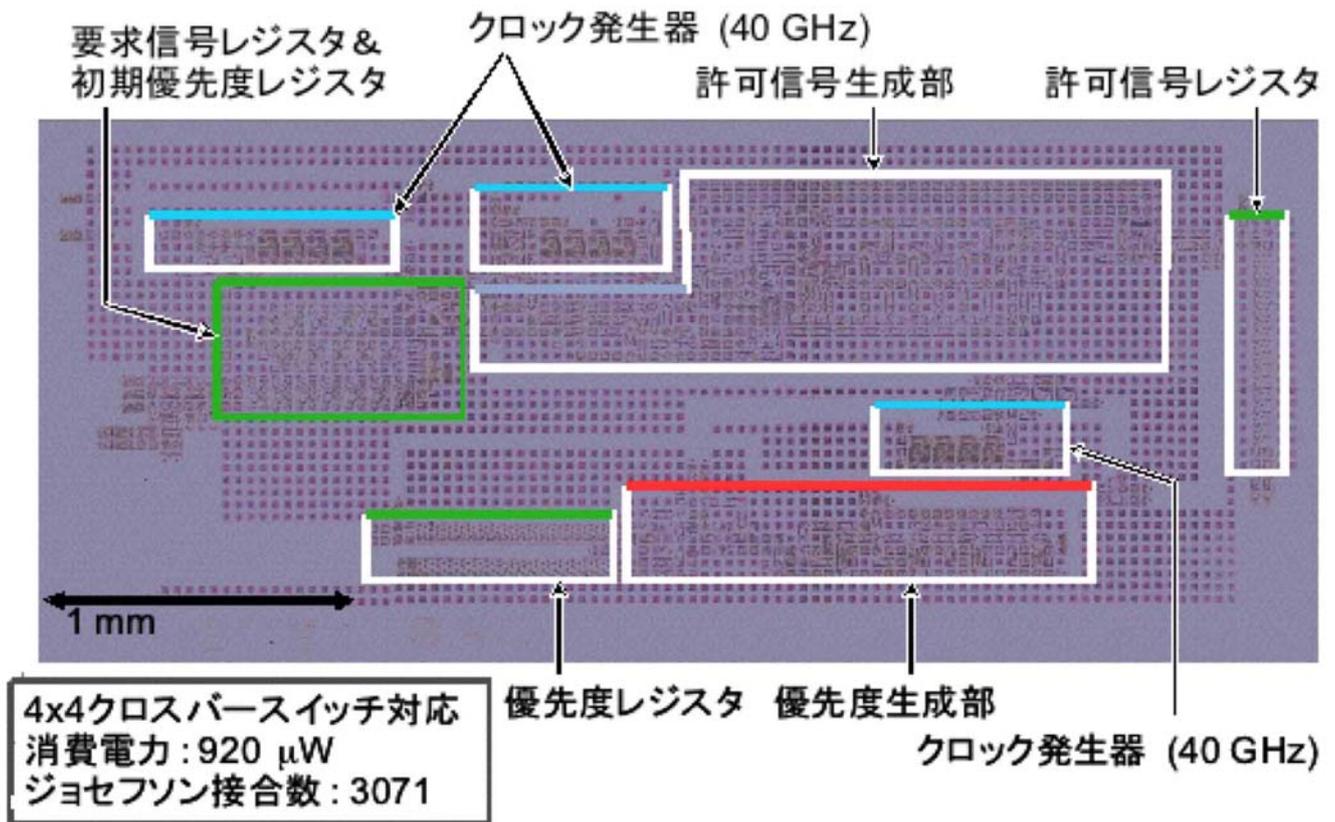


図2 SFQスイッチスケジューラテストチップ

