

【隔月連載記事】

やさしい超電導デジタル応用のおはなし(その1)

SRL/ISTEC

デバイス研究開発部 低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

その1: ネットワークルータ1

超電導工学研究所に勤める健くんには文香さんという婚約者がいる。文香さんは将来夫となる人の仕事を理解しようと色々勉強しているが、どうもわからないことが多い。特に健くんが研究しているSFQ(単一磁束量子)回路というものが何の役に立つのかさっぱりわからない。そこで健くんはSFQ回路が何の役に立つのか聞いてみることにした。

文香: ねえ健くん、あなたが研究しているSFQ回路のこと超電導 Web21に出ていた蓮尾さんの話(2004年9月号“やさしい超電導エレクトロニクスのおはなし(その4)”)を読んで少し分かったけど、これって何の役に立つの?

健: 何だい、いきなり。ニオブ系のSFQ回路は、ネットワークルータやスーパーコンピュータ高性能計測器の信号処理回路に期待されているんだ。酸化物系のSFQ回路は、無線通信基地局用のアナログ/デジタル変換器、高時間分解能の波形観測ができるサンプラーに向けた開発を超電導工学研究所でやってるよ。

文香: いきなり頭に霞がかかってきた。分からない言葉が多すぎる。だいたい、ニオブ系、酸化物系ってなあに。

健: 蓮尾さんの話をちゃんと読んでないな。デジタル応用に使う超電導体には、大きく分けて金属系と酸化物系の二種類があるんだ。金属系はニオブという金属を使うんだけど、材料として扱いやすいんで、規模の大きなLSIを作れるんだ。けれど、マイナス269度くらいまで冷やさないと使えないんで大きな冷凍機がいるんだ。そこで、大きな冷凍機でも持ち込めるような大規模システムが応用のターゲットになるんだよ。酸化物系は、例えばイットリウム、バリウム、銅と酸素が混じった物質なんだけど、でたらめに混ぜればいいわけじゃなくて、決まった位置に決まった原子がきちんと来るように結晶成長してあげないと超電導にならないんだ。だから、酸化物系の回路は作るのが難しく、あまり大きな回路はまだできないんだ。でも、酸化物系は金属系に比べるともっと高い温度、例えばマイナス230度くらいで使えるんだ。

文香: ちょっと待ってよ。マイナス230度だって相当低い温度よ。冷蔵庫じゃ無理ね。

健: 確かにそうだけど。マイナス230度くらいだと冷凍機がとっても簡単になるんだ。マイナス269度だと脇机くらいの冷凍機本体とエアコンの室外機くらいのコンプレッサがいるんだけど、マイナス230度だとコンプレッサを含めてランチボックスくらいの大きさに収まるんだ。だから、酸化物系のSFQ回路は、持ち運びできるものやコンパクトなサイズが必要な応用に向いているんだ。

文香: ふうん適材適所ってわけね。

健: これからSFQ回路を何に使うのか説明していくね。まずは、超電導工学研究所で力を入れて開発しているニオブ系のネットワークルータから始めよう。

大スループットネットワークルータは何故必要か

文香：今更なんだけど、ネットワークルータって何？

健：いきなり来たね。いつもはみんな分かったような顔をしているから、省いちゃうんだけど。文香も電子メールやインターネットは使っているだろう。あれはデータを IP パケットというものに小分けして、パケット単位で相手とやり取りしているんだ。パケットには送り先のアドレスが書いてあって、そのアドレスを読みとってパケットを行き先別に振り分けていくのがネットワークルータの役目だよ。

文香：オフィスの隅にあってインターネットのケーブルがつないであるあれのこと？あれもルータって言うでしょう。あれを SFQ で作ろうっていうの。

健：まあそうだけど、ちょっと違う。アドレスは膨大な数あるから 1 個のルータで全て処理することはできないね。そこで、普通は階層構造を取るんだ。処理する量が多い方からハイエンドルータ、ミッドレンジルータ、ローエンドルータと呼ぶんだけど、SFQ が狙っているのはハイエンドルータだよ。オフィスにあるのは一番処理量が少ないローエンドルータだから、特に SFQ を使うまでもないよ。

文香：でも、今だってハイエンドルータってあるんでしょ。どうして SFQ なんか使わないといけないの。

健：この図（図1）を見てごらん。この図は JPIX といって BIGLOBE や NIFTY なんかのインターネットプロバイダー同士がデータを交換する所のデータ取扱量の推移を示したものだんだけど、2001 年ころから取扱量が急激に増えているのがわかるだろう。2001 年の 7 月に比べて 2003 年の 7 月には取扱量が 5.5 倍に増えている。これは年率 2 倍以上のすさまじい勢いで、この傾向が続けば 2009 年には 2001 年の 900 倍以上に取扱量が増えることになるんだ。2004 年 7 月は少し伸びが鈍ったけど、それでもすごい勢いで増え続けているのは同じだよ。

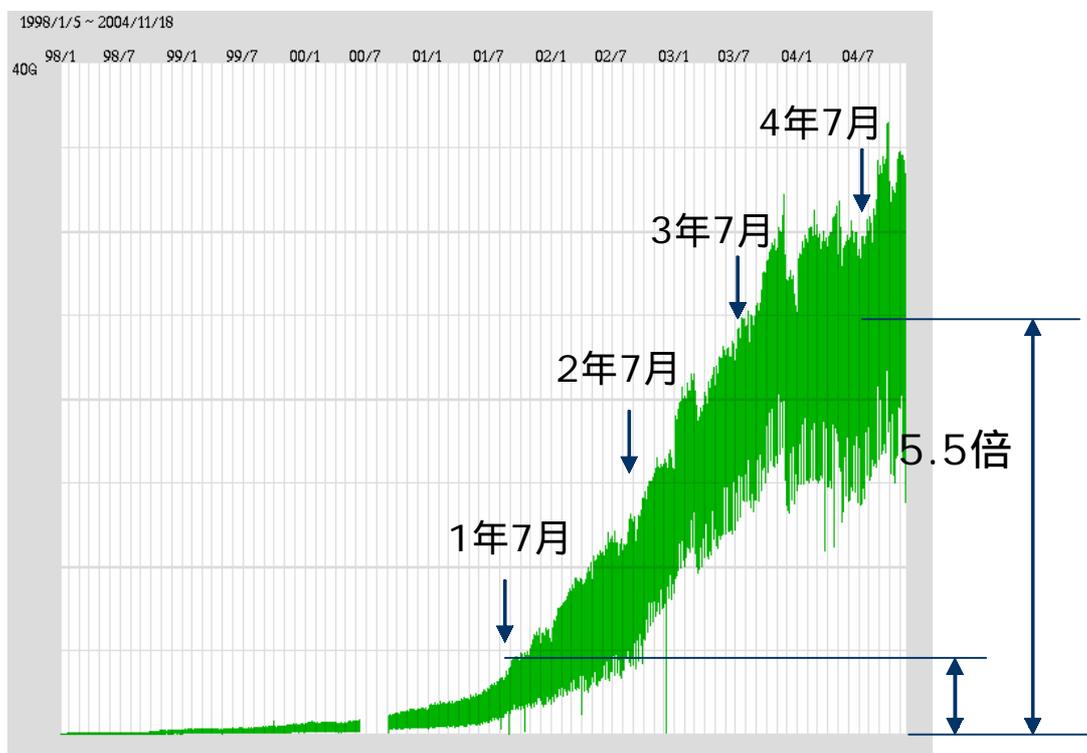


図1 JPIX におけるネットワークトラフィックの伸び (<http://www.jpix.jp/jp/index.html> 参照)

文香：でも、半導体 LSI を使ったルータだってこの 5 年間に性能が 10 倍になったって何かに書いてあったわよ。

健：よく知ってるね。ハイエンドルータにはその時々々の最高性能の半導体 LSI を使っているんだ。だからこれは半導体 LSI の性能がこの 5 年間に 10 倍伸びたということだよ。でも、問題はハイエンドルータに要求される性能の伸びがもっと大きいということなんだ。それに半導体 LSI の性能も今までのようには伸びないと言われているし。ルータの処理できるデータ量のことをスループットというのだけれど、半導体ルータのスループットが 10Tbps まで行くのは難しいんじゃないかな。ととも 2010 年のハイエンドルータに必要とされている数 10Tbps は実現できないよ。

文香：Tbps ってなあに。

健：bps というのは bit per second の略で 1 秒間あたりのデータ処理量を表す単位なんだ。T はテラで 1 兆、だからスループット 1Tbps は 1 秒間に 1 兆ビットのデータを処理する能力があるということだよ。ちなみに P はペタで 1000 兆、G はギガで 10 億だよ。

文香：ふうん。で、SFQ 回路だったらルータで処理できるスループットはどのくらいになるの？

健：100Tbps は可能だね。作り方によっては 1Pbps も夢じゃないよ。これができれば、ネットワーク社会がどんなに発展しようが安泰だよ。

文香：でも、どうして SFQ を使ったらそんな大きなスループットのルータができるの。

SFQ で高スループットルータができる理由

健：そのことに答える前にハイエンドルータの構成から説明しよう。この絵（図 2）はハイエンドルータの構成をおおまかに描いたものだけど、一般にハイエンドルータはラインカードとスイッチカードという部分に分けられるんだ。ラインカードというのは、IP パケットの前処理を行うプロセッサで、この部分でセキュリティを始め様々な処理が行われるんだ。だからいろんなソフトウェアが装備されていて、ルータの使い勝手はこの部分で決まるんだ。メモリをいっぱい搭載しているのもラインカードの特徴だよ。処理を行う間に IP パケットを一時保管しておかないといけないからね。

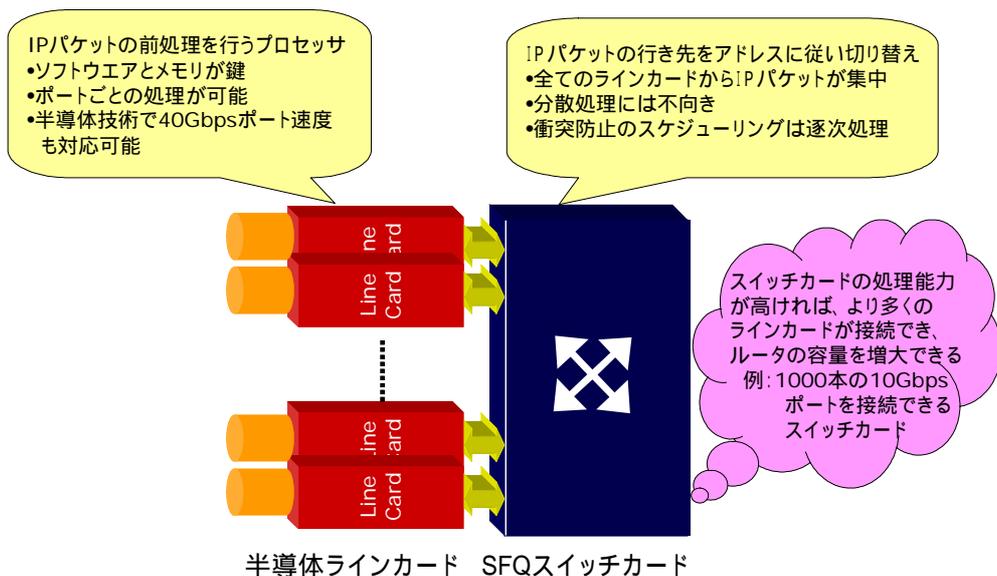


図 2 SFQ ネットワークルータの構成

文香：わかった。ラインカードの処理は大変だから、高性能の SFQ 回路を使うということね。

健：そうじゃないんだな。確かにラインカードでの処理は大変だけど、1ポートあたり1個のラインカードで処理することができるんで、ポートが増えてもラインカード数を増やすことで対応できるんだ。ポートというのは、ルータの入り口や出口のことで、それぞれのポートは光ファイバーにつながっていて、この光ファイバーを通して次の目的地に IP パケットは送られるんだ。ルータのスループットが増えると言うことは、各ポートに出入りする通信速度が上がるか、ポートの数が増えることを意味しているんだ。とにかく、一つのポートに入ってくるパケットだけを何とかすればいいんで、半導体でも 40Gbps の通信速度くらいまでなら処理できるんだ。

文香：そうなんだ。で、スイッチカードというのは何？

健：スイッチカードというのは、IP パケットの行き先をアドレスに従い切り替える部分だよ。だから全てのラインカードからのパケットが集まってくるんだ。

文香：何となくわかってきた。ルータで処理するスループットが増えるということは、スイッチカードが大変になるということね。

健：そのとおり。しかも、ルータではパケットを衝突させないということが重要なんだ。

文香：衝突って？

健：同じ出口に同時に二つのパケットがやってきたら困るだろう。これを衝突というんだ。そこでスイッチカードでは、衝突が起きないようにスケジューラという回路を使って入ってくるパケットの順番を決めているんだ。このスケジューラが、つながっているラインカードの数が増えると大変になるんだ。

文香：また、目の前に霧が出てきた。

健：いいかい、スケジューラというのはラインカードから入ってくるパケットのアドレスを一個ずつ調べて全てのラインカードからの情報がわからないと、入れる順番を決められないんだ。しかも、この処理をパケットの長さ以下の時間でやらなくちゃならないんだ。

文香：どうして？

健：だって、この処理がパケットの長さ以上かかったら、処理できないパケットがどんどんたまっていってしまうじゃないか。だから、スイッチカードはつながるラインカードの数が増えるほど高性能のものが要求されるんだ。

文香：何か少し晴れてきた。SFQ 回路で高性能のスイッチカードを作って、たくさんのラインカードをつなげてルータのスループットを増やそうという作戦ね。

健：そのとおり。冴えてるね。それに、この作戦にはユーザとのインターフェイスになるラインカードは、半導体のものがそのまま使えるという利点もあるんだ。

文香：健くんソフトウェアなんて作れないしね。

健：知的資源の有効活用だよ。それに、ユーザだって慣れ親しんだソフトウェアを変えるのはいやだろ。

文香：でも、ちょっと待って。最近では画像データなんかが多いんだから、一つのパケットをうんと長くしたらスケジューラはゆっくり処理してもかまわないんじゃない。

健：冴えすぎ。でも、大丈夫。画像データを送る場合でもお互いの接続を確認するような小さなデータも結構行き交っているんだ。こんなデータにとっては、長いパケットは無駄だろ。とにかく、スケジューラによって最短のパケットが決まるわけだから、スケジューラが高性能なほどネットワークのフレキシビリティは上がるわけさ。

文香：納得。でも、SFQ 回路を使うと、どうしてスケジューラやスイッチカードの性能が上がるか全然わかんないんだけど。

健：それは話すと長くなるんで、また今度ね。

【隔月連載記事】

やさしい超電導デジタル応用のおはなし (その 2)

SRL/ISTEC

デバイス研究開発部 低温デバイス開発室

室長 日高睦夫

その 2: ネットワークルータ 2

超電導工学研究所に勤める健くんには文香さんという婚約者がいる。文香さんは将来夫となる人の仕事を理解しようと色々勉強しているが、どうもわからないことが多い。特に健くんが研究している SFQ (単一磁束量子) 回路というものが何の役に立つのかさっぱりわからない。そこで健くんは SFQ 回路が何の役に立つのか聞いてみることにした。

スループットとレイテンシ

文香: 今日、この前の続きね。確か SFQ 回路を使うとどうしてスイッチカードの性能が上がるのかということからだったよね。

健: そうだね。簡単に言ってしまうと、SFQ 回路は半導体回路よりパケットを高速に処理できる、ということなんだけど。

文香: ニヶ月待って、たったそれだけ。何かもうちょっと、今日は勉強したなって気になるように教えてくれない。

健: それじゃ今日は SFQ 回路の本質にせまる話をしてあげるね。まず、回路の処理スピードを表す時にスループットとレイテンシという言葉を使うんだけど、知ってる。

文香: スループットというのは、「ルータの処理できるデータ量」ってこの前聞いたけど、そのこと。

健: まあ、そうだね。この前の話はルータのシステムとしての処理量のことだったけど、一定時間に回路が処理できるデータ量もスループットと言うんだよ。

文香: でもレイテンシというのは、私の人生の中では一度も聞いたことのない単語ね。

健: そうだろうね。普段使わない言葉だからね。レイテンシというのは、ある回路にデータが入ってから出てくるまでの時間のことだよ。

文香: でも、データが入ってから出てくるまでの時間が短かったら処理できるデータ量も当然大きくなるんだから、同じことじゃないの。

健: それが同じじゃないんだな。10 人の人が一列に並んでバケツリレーをする場合を考えてみよう。ある人がバケツをもらってから隣の人にバケツを渡すのに 1 秒かかるとすると、最初の人バケツを取ってから最後の人バケツを出すまで 10 秒かかるね。これがレイテンシなんだ。この時スループットは 10 秒に 1 個だね。一度に運ぶバケツが 1 個だけだったら、スループットとレイテンシは確かに同じことを見方を変えて言っているだけだけど、バケツの数を増やして、1 個目のバケツが真ん中に来たときにもう 1 個を運び始めたらどうなる。

文香: 10 秒間にバケツ 2 個ってということ。

健: そうそう。スループットは 2 倍になるだろ。こんな風にバケツの数を増やしていけば、スループットは最大 10 秒に 10 個まで増やせるわけだ。

文香: そうか。でもレイテンシが同じでもスループットが高いと、休みなしに働かなければならぬいからバケツを運ぶ人は大変ね。

健：そうだね。半導体回路ではバケツを増やすにはレジスタというメモリを回路の中に入れ込む必要があるんだけど、半導体のレジスタは普通の論理ゲートと比べると、大きくて、スピードが遅いという欠点があるんだ。だから、半導体回路ではスループットをむやみに上げようとしても、思ったほど上がらないし、レイテンシが許せないほど大きくなるという問題があるんで、普通は論理ゲート 10 個に 1 個くらいの割合でレジスタを使っているんだよ。これに対して、論理ゲート自身がメモリの機能を持っていることが SFQ 回路の大きな特徴の一つなんだ。だから、レジスタなんか使わなくてもいいから、レイテンシを変えずに思いっきりスループットを高くできるんだよ。

文香：そうか。SFQ 回路は働き者なんだ。

健：変な納得してるね。ここで大事なことは、スループットが高いということは、次々に結果が出てくるわけで、データの処理量が大きいということだよ。スイッチカードのデータ処理量が大きいと、より大容量のルータが構成できるということはこの前説明したよね。

文香：うん。覚えてる。それでルータではスループットっていうことが大事なのね。

SFQ スイッチと半導体スイッチのクロックレート

健：半導体回路も SFQ 回路もクロックという周期的に発生されるタイミングパルスに合わせてすべての処理を行っているんだけど、クロックごとに処理は進んでいくので、このクロックが速いとスループットは大きくなるんだよ。パソコンの商業でペンティアム* 3.4GHz (ギガヘルツ) とか言うだろ、あれがクロックの速さ、クロックレートだよ。ヘルツは周波数の単位で 1 秒間に何回クロックが発生するかを表していて 3.4GHz は 1 秒間に 34 億回クロックが発生するという意味だよ。スイッチみたいな回路だと、1Hz で 1 ビットのデータが処理されていくと考えるとわかりやすいね。

文香：意味は知らなかったけど、クロックなら聞いたことがあるわ。

健：超電導工学研究所でクロックレート 40GHz の SFQ スイッチ動作実験に成功しているんだ。将来的には 160GHz のクロックレートも十分可能だよ。ところが、半導体スイッチのクロックレートは数百 MHz、それも低い方の 400MHz くらいが今のところ最高なんだ。ちなみに、GHz は MHz の 1000 倍だからね。

文香：ちょっと待ってよ。今ペンティアム 3.4GHz って言ったばかりじゃない。ペンティアムは半導体でしょう。

健：確かにね。でも、ペンティアムはプロセッサだろ。スイッチはちょっと事情が違うんだ。

文香：どう違うのよ。

健：ペンティアムの 3.4GHz というのは、プロセッサの一部が 3.4GHz のローカルクロックで動いているだけで全体がこのクロックレートで動いているわけではないんだ。全体を動かしているグローバルクロックは数百 MHz とされているよ。それにプロセッサは稼働率が 0.2 くらいの回路なので、クロックレートを上げても、それによる消費電力増加の影響が比較的小さくてすむんだ。これに対して、スイッチは一部だけを速く動かしても意味がなくて、速くするならグローバルクロックを上げる必要が有るんだよ。もう一つ、スイッチは稼働率がほぼ 1 の回路なので、クロックレートを上げると消費電力増加が深刻になるという問題もあるよ。

文香：それで半導体スイッチのクロックレートはそんなに大きくないのね。SFQ スイッチは半導体スイッチより 100 倍くらいクロックレートが大きいんだ。

*ペンティアム：Intel 社のマイクロプロセッサ

並列展開とその問題点

健：ルータに入ってくるパケットのデータレートは通信側で決まっています、大容量のものは現在 10Gbps が使われているよ。10Gbps というのは、1 秒間に 10G ビットのデータがルータに入ってくるということだけど、半導体スイッチのクロックレートが 400MHz だとすると、1 秒間に 400M ビットつまり 0.4G ビットしかデータを処理できないということになるね。これじゃ処理量が足りないからどう思うと思う。

文香：困ったわね。ゴメンナサイって言って、許してもらおう。

健：誰も許してくれないから。こういう時には、入ってきたデータを並列展開するんだ。

文香：並列展開って？

健：10Gbps のデータを 25 本の 400Mbps データに分けてしまうんだよ。こうすれば、400MHz のスイッチでも処理できるだろう。

文香：かしこいわね。これで問題解決じゃない。

健：ところが、そうでもないんだな。データを 25 本に分けるということは、それを処理する回路が単純に考えて 25 倍必要になるということだろ。それに、25 本に分ける回路や処理された結果をまた 1 本にまとめるための回路も必要になるだろ。しかも、一つのスイッチカードにつながったポートは何十本とあるんだ。半導体スイッチではこういう処理をしているために、回路量が増えすぎて回路が出す熱の影響で回路がうまく動作しなくなってしまうことが大きな問題なんだ。

文香：発熱が問題だったら、回路を少し離して置けばいいんじゃないの。

健：いい所突いてくるね。実は半導体スイッチでもそういうことやっていて、大きなボードの上にたくさんの LSI を置いてスイッチカードを作っているんだ。でも、一つのチップ内では回路と回路をつなぐ配線は比較的自由にできるけど、チップとボードを高速につなぐピンの数はそんなにたくさん取れないんだ。おまけに、並列化で回路が複雑になってしまっているから、必要な配線をつなぐことが段々難しくなっているんだ。これをピンネックというんだけどね。それにチップとチップの間の距離が開いてくると、400MHz といってもその速さでデータを隣のチップに伝えるのは大変なんだ。半導体の配線は長距離の伝送に弱いからね。

文香：なんだか大変ね。

健：そうなんだ。並列展開は集積度が高い半導体ならではの方法なんだけど、発熱の問題とピンネックの問題から増大するネットワークからの要求に応えることが難しくなっているんだ。通信速度はこれから 40Gbps の時代に移っていくと言われているけど、そうなったらますます困ったことになるね。

SFQ スイッチが高性能な理由

文香：それで、SFQ 使ったらどうなるの。

健：さっきも言ったように、SFQ 技術を使ったスイッチは今でも 40GHz で動作することが確認されているんだ。これを使えば、10Gbps ポート 4 本からのデータをまとめて SFQ スイッチの一つの入力に入れることができるから、回路量は逆に減らすことができるんだ。半導体の場合とえらい違いだろ。SFQ 回路はもともと低消費電力だけど、回路量が少ないから、ますます低消費電力だし、回路も簡単になるからピンネックにも強いんだ。それに将来通信速度が 40Gbps、160Gbps とかになっても、クロックがそれについて行くことができるからね。

文香：SFQ のスループットが大きいという特徴、つまり一定時間の間にたくさんのデータを処理することができるという特徴が、流れ込んでくる大量のデータを次々に処理しなくてはならないネットワークルータにとっても向いているというわけね。だから SFQ にはまだまだ余力があるので、将来の通信量増大にも対応できるってわけね。

健：素晴らしい。それが分かってくれたら、言うことなしだね。

文香：ほめてくれて、ありがとう。

健：これは 40GHz クロックでの動作が確認された 4 入力、4 出力 (4x4) SFQ スイッチの写真なんだけど (図 1)、5mm 角のチップに乗っている小さな回路だろ。しかも、5mm 角をめいっぱい使っているわけじゃなくて結構スカスカだろ。このスカスカの回路でもスループットは 160Gbps あるんだ。今一番大きな半導体ルータシステムでもスイッチのスループットは 640Gbps だよ。これは、一辺が数十センチあるような大きなボード数枚で構成されているんだ。もちろん半導体のスイッチカードには制御回路なんかも含まれているんで単純に比較はできないけど、SFQ スイッチも半導体スイッチ並みの大きさにすれば、とんでもない性能のものができるとわかるだろ。

文香：へえ～、SFQ スイッチってこんなにちっちゃいのにすごいんだ。

健：すごい性能がびっくりするほど簡単な回路で実現できるってことが、SFQ 回路の魅力であり、その魅力の秘密が高いスループットにあるってことをわかってくれれば、一生懸命説明してきた甲斐があったよ。スイッチに関してはもうちょっと話があるんだけど、大分長くなっちゃったから続きはまた今度ね。

文香：健君もそれまでスループットを上げてしっかり働いてね。

健：.....

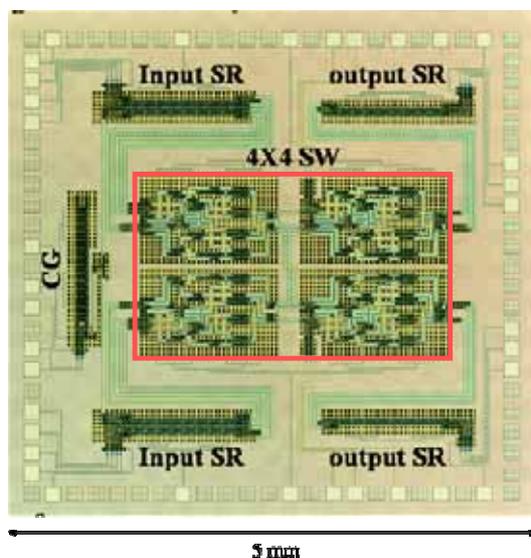


図 1 SRL で開発した SFQ4x4 スイッチのチップ写真
赤い囲みの中がスイッチ回路、それ以外はテスト用回路

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導デジタル応用のおはなし(その3)

SRL/ISTEC

デバイス研究開発部 低温デバイス開発室

室長 日高睦夫

その3: ネットワークルータ3

超電導工学研究所に勤める健くんには文香さんという婚約者がいる。文香さんは将来夫となる人の仕事を理解しようと色々勉強しているが、どうもわからないことが多い。特に健くんが研究しているSFQ(単一磁束量子)回路というものが何の役に立つのかさっぱりわからない。そこで健くんはSFQ回路が何の役に立つのか聞いてみることにした。

光ルータとSFQ技術

文香: この前の話でSFQを使うと半導体では実現できないような大容量ルータができるってことは分かったんだけど、新聞見てたら大容量の光ルータを開発中って記事が出てたわよ。光ルータってSFQルータのライバルなの?

健: そこがよく誤解されるんだけど、僕たちはそうは思っていないよ。むしろ、お互いに助け合う関係にあるという方が当たっているんじゃないかな。

文香: でも半導体では難しい大容量のルータを実現するってことじゃ目標がもろにバッティングしているんじゃないの。

健: 目標は同じだよ。でも、光技術でその目標を達成するためにSFQ技術が大きな力になるんだよ。

文香: どういうこと?

健: 実は光ルータには二種類あるんだ。一つが光波長ルータで、波長単位で光の行き先を切り替えていくものなんだ。もう一つが光IPルータで、IPパケット単位で行き先を切り替えるものなんだ。

文香: それがどうSFQと関係するの?

健: 光波長ルータから説明するね。大容量の通信には光ファイバーが使われているんだけど、その中を伝わる光の波長は種類じゃなくて、たくさんの波長を束ねて情報を送る波長多重技術(WDM)という方式が使われているんだ。

文香: たくさんの波長の光を使うと何かいいことがあるの?

健: 波長の違う光はお互いに混じり合わないから、それぞれの波長に別々の情報を乗せて送ることができるんだ。例えば、100波長使えば、一本のファイバーで100倍の情報が送れるんだよ。

文香: ファイバーが効率よく使えるってわけね。

健: そういうことだね。例えば、Aの波長を大阪行き、Bの波長を福岡行き、Cの波長を広島行きと決めてやって、波長ごとに行き先を切り替えてやれば、ルーティングができるだろ。このとき、波長によって行き先を固定してしまうと、ネットワークの柔軟性が損なわれるので、行き先を可変にして状況に応じて切り替えられるようにするんだ。これが光波長ルータなんだ。一つの波長で送られる情報量はものすごく大きいので、行き先を切り替える時間がそんなに早くなくても、1秒あたりにルーティングできる情報量、つまりスループットは大きくで

きるんだよ。

文香：そうか。そうすれば、大きな情報がうまく捌けるわね。

健：でも、波長ルータはIPパケットの固まりをルーティングしているだけで、個々のIPパケットをルーティングしているわけではないんだ。例えていうと、波長ルータは、手紙のいっぱい入ったコンテナを積んだ列車をポイント切り替えて別の線路に通しているだけで、その先では必ず手紙ごとにそれぞれの宛先に振り分ける作業が必要になるんだ。

文香：それはそうね。

健：そこで、光波長ルータが発達して大容量の情報を捌くようになればなるほど、その後に来るIPルータに高いスループットが要求されるようになるんだ。

文香：そこでスループットの大きいSFQルータの出番ってわけね。

健：そのとおり。ネットワークは一続きのものなので、一部だけ性能が上がっても別の場所がボトルネックになってトータルの性能は上がらないんだ。だから、大容量の光波長ルータを使うのなら、それに匹敵するような大容量のIPルータを導入する必要があるんだよ。SFQルータはその有力な候補ってわけさ。

文香：でも、さっき光IPルータというのがあるって言ったじゃない。光でIPルータができれば、SFQなんていらんんじゃないの。

健：そうでもないんだな。確かに、光IPルータは光信号を光のまま処理できるんで、ものすごく魅力的なんだ。しかも、例えば160Gbpsくらいの高いポート速度に対応したスイッチもできるからね。でも、光技術だけでは光IPルータの実現は難しいと言われているんだ。

文香：どうして？

健：スイッチを実現するには、経路の切り替え機能だけじゃダメでスケジューラと呼ばれる制御回路が必要になるんだ。

文香：スケジューラって何？

健：IPパケットの行き先を切り替える時に、二つのパケットが同時に一つの出口に行こうとすると、必ずどちらかがはねとばされてエラーになるだろ。これを衝突というんだけど、スイッチでは衝突を回避することが必要なんだ。このために、あらかじめ全てのパケットの行き先を見て、衝突が起こらないようにスイッチに入るパケットの順番を決める回路がスケジューラだよ。スケジューラはパケットの行き先を順番に見ていく必要があるんで並列処理に不向きな回路である上、一つのパケットの長さ以内の時間で処理を終わる必要があり、高速性が要求される回路でもあるんだ。しかも、パケットをスイッチに入れる優先順位をある規則に従って逐次更新していく必要があるんで、結構複雑な論理回路なんだ。

文香：複雑な論理回路で高速性が要求されるんだったら、SFQにピッタリの回路じゃないの。

健：そのとおり。高速のスケジューラが作れるってことがSFQの大きな強みの一つなんだ。でも、光回路は複雑な論理機能を持たせることが難しいので、現在の技術ではスケジューラは作れないんだ。しかも、光の高速スイッチに対応できるような高速スケジューラは、半導体では難しくSFQでないと実現できないと言われているよ。そこで、光スイッチの切り替えをSFQスケジューラで制御するSFQ/光ハイブリッドIPルータを超電導工学研究所では提案していて、光IPルータを研究している人達にもずいぶん興味を持ってもらっているよ。

文香：それじゃライバルってわけじゃないわね。

健：そうなんだ。光ルータが高度なものになればなるほどSFQ技術が必要になるし、SFQルータが使われるためには、光ネットワーク環境がもっと進化する必要があるんだ。だから、僕たちはSFQ技術と光技術はお互いに助け合う関係にあると思っているんだよ。

スーパーコンピュータとSFQスイッチ

文香：この前から教えてもらってSFQスイッチを使ったネットワークルータがすごいのは分かったけど、SFQスイッチって他のことには使えないの？

健：いい質問だね。SFQスイッチはコンピュータ間のデータ交換に使ってもすごい性能を発揮すると思うよ。文香は地球シミュレータって知ってる？

文香：すごく大きくて、すごい性能のコンピュータでしょう。

健：名前だけは聞いたことがあるってことね。地球シミュレータは

日本の海洋研究開発機構にある世界最大の汎用スーパーコンピュータで、半年前までコンピュータ計算性能世界一の座に2年半に渡って君臨していたんだ。進歩の早いコンピュータの分野で世界一の座に2年半もいたというのはたいしたことだと思うよ。これが地球シミュレータの鳥瞰図(図1)だけど50m x 65mの体育館みたいな建物いっぱいを占めるすごく大きなコンピュータだよ。

文香：これが一つのコンピュータというのは驚きね。それで地球シミュレータがどうしたの？

健：地球シミュレータが世界一の座を譲ったのは、ある特殊なプログラムを使ったベンチマークテストの結果で、今でも別の種類の計算ではダントツに世界一の性能なんだ。地球シミュレータには5,120個のプロセッサが使われているんだけど、それらのプロセッサ間でデータが頻繁にやり取りされるような計算では他の追随を許さないんだ。その秘密がプロセッサ間のネットワークに単段クロスバー接続を使っていることにあるんだ。

文香：単段クロスバー接続って何？

健：この図(図2)にあるように、例えば、BとDを接続したい場合は、その交点となる接点をオンにして結合する、というような接続方法だよ。この方法は全ての構成要素が平等に接続できるというメリットがある反面、構成要素数が増えたとハードウェア量が膨大になるという欠点があるんだ。この図では構成要素数が5個だからたいしたことないけど、構成要素数が1,000個あれば、接点数は百万になるからね。だから、構成要素数が大きくなってくると、普通は結合の仕方を別のものに変えてハードウェア量を減らすんだけど、そうすると例えば隣り合う構成要素間のデータ転送は速くできるけど、離れた構成要素間のデータ転送にはすごく時間がかかるということになるんだ。

文香：単段クロスバー接続というのは、まじめで実直、頼りになる人ってイメージね。

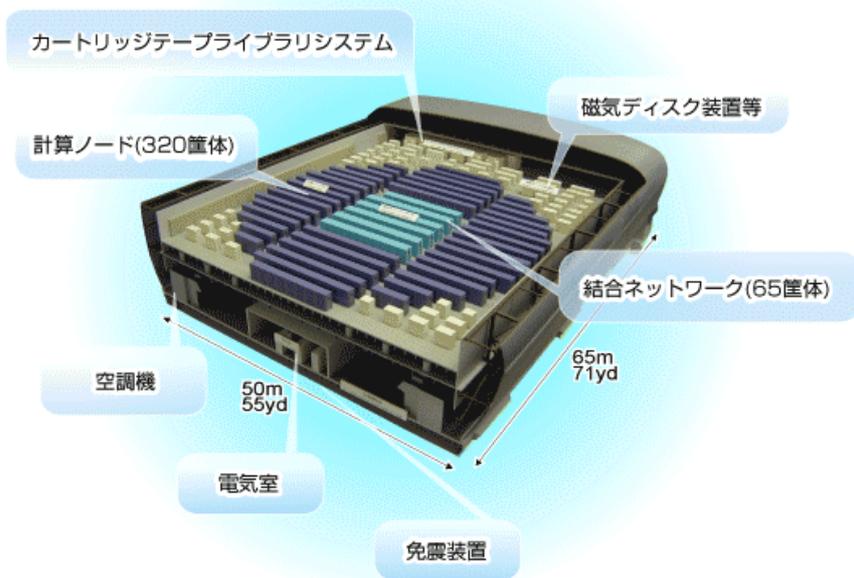


図1 地球シミュレータの鳥瞰図

(<http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/ES/facilities.html> 参照)

健：まあそうだね。地球シミュレータは 5,120 個のプロセッサを 640 のノードにまとめて、その間を単段クロスバー接続でつないだから、すごい性能が出せるんだけど、この図（図 1）の中央にある水色の 65 個のラックが結合ネットワークの部分なんだ。半導体技術で作ったおそらく世界最大のスイッチだと思うよ。でも、ノード数がこれ以上増えたら、とても作る気にはならないと思うな。

文香：確かにね。そこで SFQ スイッチの出番ってわけね。

健：そう。SFQ スイッチで接続ネットワークを作れば、遙かに小さく作れるしね。ノード数が増えなくても対応可能だよ。

文香：そうね。面白そうね。でも地球シミュレータって世界に 1 台しかないコンピュータじゃない。そういうコンピュータの性能を上げるのは確かに面白いけど、もっと色々な所に使えないの？

健：使えるよ。最近 PC クラスタといってパソコンをたくさんつなげて、大きな計算をすることが盛んに行われているんだけど、ここに SFQ スイッチを使うと、ネットワークの性能が上がって、今までのものと比べて高性能で応用範囲が広い PC クラスタが作れると思うんだ。そうすれば、もっと多くの人に SFQ スイッチが使ってもらえるんじゃないかな。

文香：それって面白そう。

健：3 回に分けて話してきたけど、ネットワークルータに関する話は今回で終わりにして、次は SFQ をプロセッサに使ったスーパーコンピュータの話をするから、楽しみにしていてね。

文香：SFQ が他にも役に立ってという話楽しみにしてるわ。健君も単段クロスバースイッチ目指して頑張ってるね。

健：なんか変なところだけ記憶に残ってない。

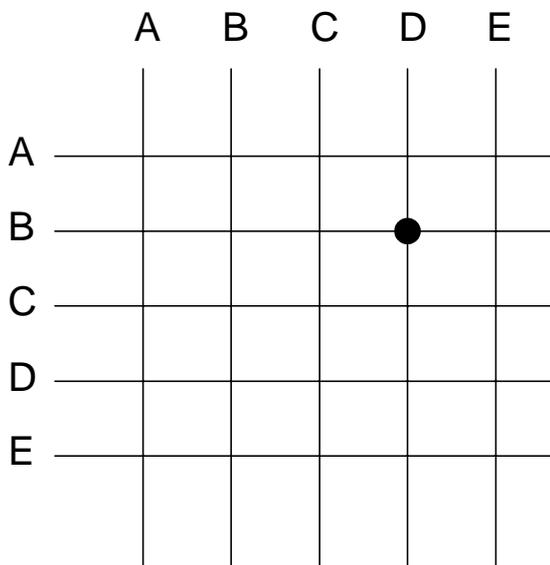


図2 クロスバースイッチの概念図

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導デジタル応用のおはなし(その4)

SRL/ISTEC

デバイス研究開発部 低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

その4: スーパーコンピュータ

超電導工学研究所に勤める健くんには文香さんという婚約者がいる。文香さんは将来夫となる人の仕事を理解しようと色々勉強しているが、どうもわからないことが多い。特に健くんが研究しているSFQ(単一磁束量子)回路というものが何の役に立つのかさっぱりわからない。そこで健くんはSFQ回路が何の役に立つのか聞いてみることにした。

地球シミュレータは今でもダントツのトップ

文香: 今日はSFQを使ったスーパーコンピュータの話だったよね。

健: そうだよ。でもその前に半導体を使ったスーパーコンピュータの話から始めよう。この前話した地球シミュレータって覚えている。

文香: 体育館のような建物にぎっしり詰まったすごいコンピュータだったわよね。それで、ついこの前まで2年半も世界トップだったっていうアレね。

健: そうだよ。今はアメリカのコンピュータに抜かれて、4位になってしまったけどね。

文香: なんだ4位か。

健: おいおい、4位だってすごいんだよ。それに、実際の研究に使う複雑なシミュレーションでは今でもダントツのトップなんだよ。

文香: 今4位って言ったばかりじゃない。4位がどうしてトップなのよ?

健: もっともな疑問だね。世間では公表された順位だけが取り上げられて、勝った、負けたと騒いでいるようだけど、どうやって順位が決められているかは、皆あまり知らないよね。

文香: そういえばそうね。

健: スーパーコンピュータのランキングは、半年に一度公表される「TOP500リスト」で決まるのだけれど、これにはLINPACKと呼ばれるベンチマークテストが使われているんだ。

文香: ベンチマークって何?

健: ハードウェアやソフトウェアの性能を評価するためのプログラムのことだよ。LINPACKは主に浮動小数点演算のための連立一次方程式の解法プログラムなんだ。異なったスーパーコンピュータの計算能力を比べるために、同じプログラムつまりLINPACKを実行させるんだよ。

文香: 同じプログラムを実行させて競わせるんだったら、公平なんじゃない。

健: ところがそうでもないんだ。地球シミュレータと今1位から3位にいるアメリカのコンピュータとでは、コンピュータの構造(アーキテクチャ)が違っているんだ。この前も少し説明したけど、地球シミュレータはベクトル型といって比較的大きなプロセッサが、ネットワークを使って密につながっているんだ。だから、プロセッサ同士で頻りにデータをやり取りするような計算に向いているんだ。これに対して、1位から3位のコンピュータはスカラー型といって比較的小さなプロセッサをたくさんつないでいるんだ。

文香: それだと、どうなるの?

健：お互いに無関係な計算をたくさんのプロセッサに割り振って、最後に計算結果をまとめるという場合はスカラー型でも性能が出せるんだ。計算はお互いに無関係だからプロセッサの数を増やすことで計算能力を増やすことができるからね。それに、この前説明した地球シミュレータで使われている単段クロスバー接続を使っているわけではないので、接続するプロセッサの数を増やすことがそれほど大変ではないんだ。でも、プロセッサ間のデータのやり取りが多くなってくると、こういうコンピュータは性能がガクンと落ちてくるんだ。その点ベクトル型では、プロセッサ間のデータのやり取りが増えても性能があまり落ちないというのが強みなんだ。

文香：実行させる計算の種類によってスカラー型に有利になったり、ベクトル型に有利になったりする訳ね。じゃあ、LINPACK はどちらのタイプの計算なの？

健：元々はプロセッサ間のデータのやり取りが必要なプログラムだったんだけど、ある計算手法が開発されてスカラー型でも性能が出るようになってしまったんだ。でも、気象変動を調べるといった実際のシミュレーションでは、スカラー型でも性能が出るようなものは少なく、こんなシミュレーションではベクトル型とスカラー型の差は LINPACK でのテスト以上に大きいんだ。

文香：そうか。「TOP500 リスト」はあくまでも LINPACK での順位ってということね。

健：そういうこと。でもそのことを分かっている人はあんまりいないと思うよ。この図(図1)は、アメリカのエネルギー省傘下の研究所が、実際に研究に使う複雑なシミュレーションプログラムを実行させて、アメリカ製のスーパーコンピュータと地球シミュレータの効率比較を行った結果なんだけど、地球シミュレータの効率が実際のシミュレーションでは勝っていることがわかる。しかも、アメリカの CRAY X1 が 64 プロセッサしかないため、比較は 64 プロセッサで行われているんだ。地球シミュレータは 5,120 プロセッサ構成で、プロセッサ数を増やしても効率はほとんど落ちないから、実際の性能差はこの図以上に大きいと思うよ。

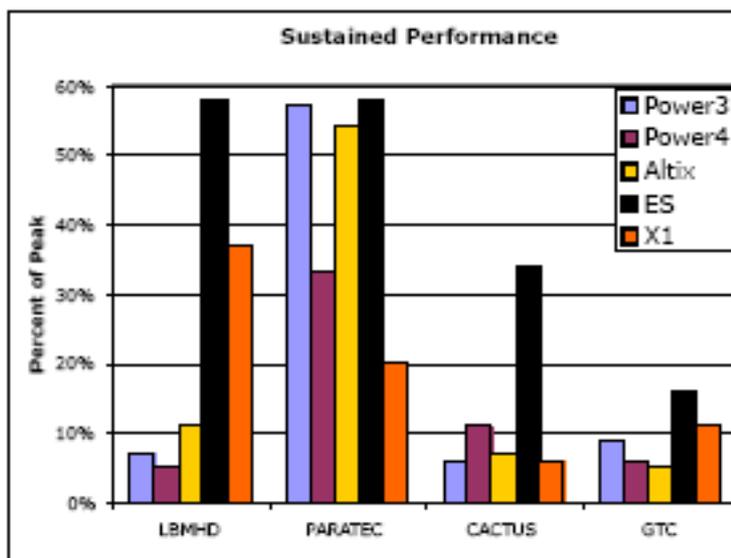


図1 地球シミュレータ(ES)と米国製コンピュータの実効性能比較
各コンピュータとも 64 プロセッサを使用。
LBMHD (プラズマ物理)、PARATEC (材料科学)、CACTUS (天体物理)、GTC (核融合)
L. Oliker, A. Canning, J. Carter, J. Shalf and S. Ethier,
"Scientific Computations on Modern Parallel Vector Systems",
<http://crd.lbl.gov/~oliker/papers/SC04.pdf>

文香：地球シミュレータってすごいね。

SFQ スーパーコンピュータ

健：前置きが大部長くなってしまったけど、ここから本題に入ろう。

文香：いよいよ SFQ を使ったスーパーコンピュータの話ね。

健：地球シミュレータの話で分かったと思うけど、スーパーコンピュータで重要なのは個々のプロセッサ性能と台数のかけ算であるピーク性能だけではなくて、プロセッサ間のデータ交換能力やメモリとプロセッサ間のデータ交換能力も重要で、これらの性能のバランスが取れている必要があるんだ。しかもプロセッサの性能が上がれば上がるほど全てのコンポーネントを近くに置く必要があるんだ。つまり小さなコンピュータにする必要があるんだ。

文香：どうして。すごい性能のコンピュータは大きくてもいいんじゃないの？

健：どんな信号でも真空中の光の速さ以上の速さで伝わることはできないって、知ってるよね。真空中の光は1秒間に30万km進むんだけど、光ファイバーや電気ケーブルを使うとそれより確実に遅くなるんだ。仮にプロセッサのクロックが上がって地球シミュレータの10倍の10GHzになったとしよう、10GHzだと100ピコ秒（ピコ秒は1兆分の1秒）ごとにデータが出てくるんだけど、100ピコ秒の間に信号の進める距離は真空中の光でもたった3cmなんだ。ところがコンピュータの大きさが地球シミュレータより大きくなって、例えばプロセッサ間の距離が300mあったとしたら、データは10,000クロック以上かかってやっと別のプロセッサに到着できることになるね。実際にはこれにネットワークの処理時間も加算されるから、プロセッサはその間ずっと待つことになるね。だから、プロセッサ間の距離が大きくなると性能が落ちてくるんだ。

文香：何とか工夫ができないの？

健：ある程度までは処理方法の工夫で回避できるけど、本質的に信号到達に時間がかかってしまうのは、物理法則だからどうしようもないよ。唯一の解はプロセッサ間の距離を小さくすることだよ。つまり、小さなコンピュータを作るってことだよ。

文香：性能を上げて、小さくするんでしょ。これって矛盾していない。どうすればいいの？

健：方法は二つあって、一つは個々のプロセッサの能力を上げること。こうすると、ある性能を達成するために必要なプロセッサ数を減らすことができる。もう一つは、プロセッサなどのコンポーネントをできるだけ近づけて置くこと。こうすれば、全体を小さくできるだろ。

文香：何となく話が見えてきたわ。この前スイッチの話で聞いたように、半導体プロセッサの性能を上げると発熱が大きくなるんで、近づけることができなくなるのね。そこで、高性能でも発熱が小さいSFQの出番って訳ね。

健：教育の成果が出てきたね。するどいじゃない。

文香：ありがと。

健：SFQ技術を使うと、半導体より数十倍大きなクロックが使えるので、単体のプロセッサ性能を大幅にアップすることができるんだよ。この写真（図2）は、名古屋大学、横浜国立大学と超電導工学研究所が共同で開発したSFQマイクロプロセッサだよ。7つの命令を実行するだけの簡単なものだけど、半導体より5倍以上速い21GHzクロック動作が実証されているんだ。この技術を発展させると、地球シミュレータの約25倍の計算能力にあたる1PFLOPS（ペタフロップス）を実現するために、半導体プロセッサ100,000個が必要なところを、SFQプロセッサを使うと4,000個で

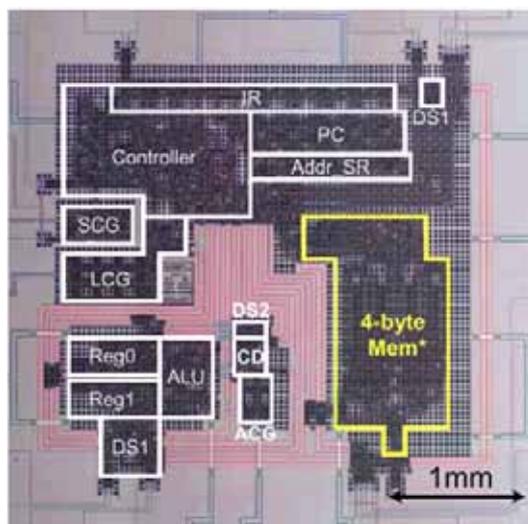


図2 21GHzクロック動作が確認されたSFQマイクロプロセッサ回路
(設計・評価：名大、横国大 試作：超電導工学研究所)

すむという試算もあるよ。

文香：すごく少なくてすむのね。

健：おまけに SFQ 回路は発熱が小さいから思い切りコンパクトに詰め込むことができるしね。プロセッサとプロセッサ、プロセッサとメモリを縦に積み重ねる三次元実装も発熱を心配せずにできるしね。

文香：SFQ でスーパーコンピュータを作るとどんなものができるの？

健：この図（図 3）は、横浜国立大学の吉川教授の試算を基にした SFQ スーパーコンピュータのイメージだけど、地球シミュレータの約 40 倍の計算能力を持つ 1.6 PFLOPS システムが僅か 4m 四方に収まるんだ。半導体技術で同じものを作るとすると 300m 四方程度必要になるんだよ。おまけに、この規模で SFQ スーパーコンピュータの消費電力はたった 4kW なんだ。冷却用の冷凍機の消費電力を加えても 1.4 MW だよ。これに対して、半導体システムでは 240 MW というとてつもない電力が必要になると予想されているよ。

文香：SFQ の方が環境にもやさしいって訳ね。

健：地球温暖化をシミュレーションしているコンピュータが、バカみたいに電力を消費しているんじゃカッコ悪いからね。ここまで説明したように、SFQ 技術を使えば本当の意味で計算能力が高いスーパーコンピュータが実現できるんだよ。それに、場所や電力も少なくてすむからコストもずいぶん低く抑えることができると思うよ。

文香：SFQ スーパーコンピュータって、ちっちゃくって、ご飯も少ししか食べないのにとっても賢い。まるで私みたい。

健：どこが！

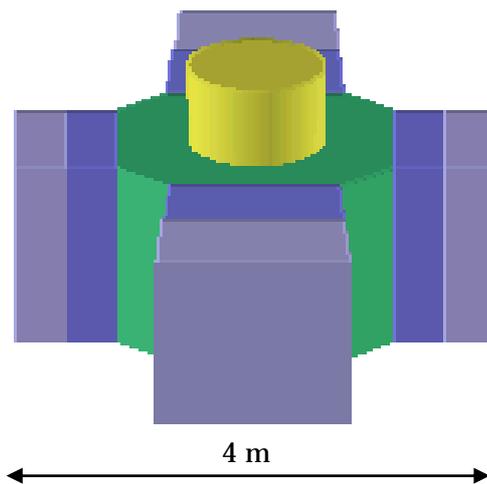


図 3 1.6 PFLOPS SFQ スーパーコンピュータのイメージ
(横浜国大吉川教授作成)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導デジタル応用のおはなし(その5)

SRL/ISTEC

デバイス研究開発部 低温デバイス開発室

室長 日高睦夫

その5: 高温超電導サンプラー

超電導工学研究所に勤める健くんには文香さんという婚約者がいる。文香さんは将来夫となる人の仕事を理解しようと色々勉強しているが、どうもわからないことが多い。特に健くんが研究しているSFQ(単一磁束量子)回路というものが何の役に立つのかさっぱりわからない。そこで健くんはSFQ回路が何の役に立つのか聞いてみることにした。

“見えない”冷凍機

健:今日は酸化物系の高温超電導体を使ったサンプラーの話をしてしよう。

文香:高温超電導体って、マイナス230度くらいまで冷やさなくてはならないけど、高温って言うてるのよね。

健:ちょっと変かもしれないけど、この前まで説明してきたニオブに比べたら高い温度で動作できるって意味だよ。でもね、前にも説明したけど、このくらいの温度だと冷やすのがとても簡単になるんだ。ランチボックスくらいの大きさの冷凍機で十分冷やせるから、使っている人に分からないように装置の中に組み込むことも簡単にできるんだ。

文香:冷凍機が見えなかったら、使っている人は超電導を使っているって分からないかもしれないね。

健:そう。それが大事なんだ。ユーザーにとっては超電導を使っているのが重要なのではなくて、装置の性能が高いことが重要だ。だから、超電導体を冷やすための冷凍機は、できるだけ見えない方がいいんだ。

文香:じゃ、装置を大きくして隠してしまえばいいじゃない。

健:ダメダメ、そんなことしたら装置の大きさが邪魔になるだけだよ。ここで言う“見えない”というのは、冷凍機を使うことが負担にならないということなんだ。だから、実際に見えないだけじゃなくて値段にも、ノイズにも、振動にも影響が出ないことが大事なんだ。

文香:実際に使っているのに、それはムリね。

健:完全に見えなくするのはムリなんだけど、できるだけそこに近づけることが超電導を使った製品を世の中に広めるための一つのキーポイントになるんだよ。

文香:それで、冷凍機が小さくできる高温超電導体の方が有利なのね。じゃ、ニオブなんて止めちゃって、ルータもスーパーコンピュータも高温超電導体で作ればいいんじゃない。

健:それは前に(その1)説明しただろう。高温超電導体は材料が複雑なので、今のところあまり大きい規模の回路が作れないんだ。だから、高温超電導体を使っても作れるくらいの大きさの回路で、役に立つものを作ることが大事なんだ。

文香:その役に立つものがサンプラーってわけ。

健:そういうこと。もちろん他にもあるけどね。

サンプラーって何？

文香：ところで、サンプラーって何。一度も聞いたことがないんだけど。

健：そうだろうね。サンプリングオシロスコープとも言うんだけど。聞いたことある。

文香：何それ。いきなり文系人間をシャットアウトしてしまいそうな名前ね。

健：困ったな・・・。ドラマか何かで死にそうな人の横で小さなテレビ画面みたいなものに、いろんな線が映っているの見たことない。心臓なんかから来る電気信号の形、つまり波形を見ているんだけど。こういうふうに電気信号の波形を観測するものをオシロスコープと言うんだよ。

文香：それなら見たことある。じゃ、サンプリングって？

健：心臓から来る電気信号は十分遅いから問題ないんだけど、最先端の物理や電子工学の世界では、100ピコ秒(1ピコ秒は1兆分の1秒)以下の時間スケールで変化するような電気現象を観察する必要があるんだ。こういう速い時間変化を直接見れるようなオシロスコープを作ることにはできないから、サンプリングという方法を使うんだ。一つの電気信号波形があって、ある時間間隔で繰り返し現れるとする。例えば、最初に出発点から10ピコ秒経過した時刻の電気信号の大きさを何らかの方法で測るんだ。

文香：そんなに速い電気信号波形は計れないんじゃないか。

健：高速に変化する電気信号波形全体を一度に観測することはできないけど、どこか一点だけなら何とかできるんだ。これを1回の測定だけで計ってもいいし、しつこく何回も計って値を出してもいい。時刻10ピコ秒での信号の大きさがわかったら、次は観測する時刻を10ピコ秒ずらして時刻20ピコ秒での信号の大きさを測る。この操作を次々と例えば100回繰り返すと、1,000ピコ秒までの10ピコ秒おきの電気信号の値がわかるよね。横軸に観測した時刻を取って、縦軸にそれぞれの時刻で得られた電気信号の値をプロットしていけば、観測したかった高速波形が現れるんだよ。

文香：へえー。頭いいのね。でもこの方法って繰り返す波形じゃないとダメなんじゃない。

健：そのとおり。でも、ほとんどの電気信号波形は周期的に繰り返す性質を持っているから、サンプリングオシロスコープの適用範囲は広いんだよ。

文香：サンプリングオシロスコープは分かったけど。これとサンプラーは同じなの？

健：同じ意味で使うこともあるけど、特にサンプリングオシロスコープのセンサーにあたる短い時間間隔で電気信号波形の値を観測していくデバイスのことをサンプラーって言うこともあるよ。

高温超電導サンプラーの原理

文香：どうやって高温超電導体でサンプラーを作るの？

健：高温超電導体を使ってサンプラーを作ろうという試みは、最初 NEC の基礎研究所で行われて、現在は超電導工学研究所に受け継がれているんだ。今はもう少し複雑な回路になっているけど、最初の高温超電導サンプラーはジョセフソン接合をたった5個しか使わないものだったんだ。

文香：それで、小さな回路ならできる高温超電導体に向いていたわけね。

健：そうだね。詳しい話は止めとくけど、この5個のジョセフソン接合で、信号電流を観測するためのSFQパルスを作って、このSFQパルスとジョセフソン接合のスイッチを使って信号電流の値を観測して、読み出すということが出来るんだ。SFQパルスを使っているんで、このサンプラーのことをSFQサンプラーとも言うんだよ。

文香：ちょっと端折りすぎじゃない。もうちょっとだけ教えてよ。

健：この図（図1）を使って高温超電導サンプラーでどうやって特定の時刻の信号電流の大きさを測定するのかを説明するね。図の中の I_s が計りたい電流波形だとするね。ある時刻に SFQ パルス電流 I_p を加えるんだ。そうすると I_p を加えた時刻だけ I_s が持ち上げられて他の部分より値が大きくなるだろ。

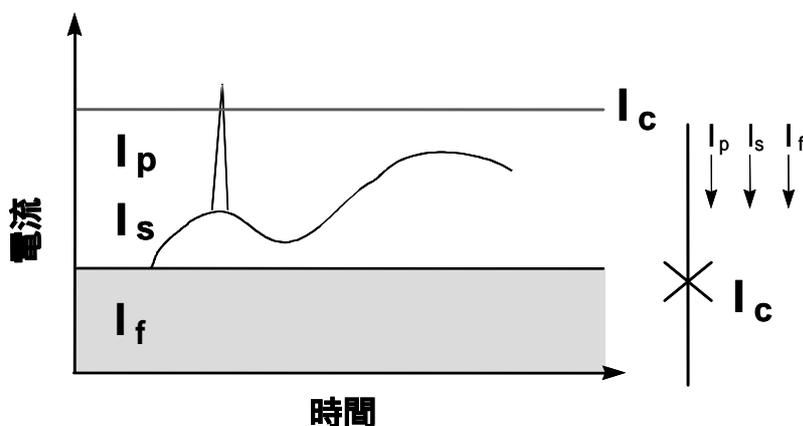


図1 高温超電導サンプラーによる信号電流波形の測定方法。
×印はジョセフソン接合。

文香：それは分かるけど、加えるとか持ち上げるとか具体的にはどうするの？

健：具体的には、あるジョセフソン接合に両方の電流を流すんだよ。ジョセフソン接合は超電導体同士を弱く結合した素子で、ある一定以上の電流（臨界電流 I_c ）が流れると電圧が発生して SFQ が通り抜ける、ということは前に話したよね。

文香：うん。覚えている。

健： I_s に I_p を加えて持ち上げて他の部分より大きくすると言うのは、 I_p を加えた瞬間には I_s と I_p が足し合わされるので、ジョセフソン接合を流れる電流を他の時刻より大きくする、ということだよ。

文香：観測したい時刻だけ I_p を加えて目印を付けるのは分かったけど、 I_s の大きさはどうやって調べるの？

健：フィードバック電流 I_f と呼ばれる 1 回の観測中は値を変えない電流を 1 回の観測ごとに値を変えてジョセフソン接合に流すんだ。そうすると、 I_f がある値になったときにジョセフソン接合はスイッチして SFQ が通り過ぎて、用意していた SFQ ループに入るんだ。SFQ ループに SFQ が入ると読み出し回路に電圧が発生するから、ジョセフソン接合がスイッチしたかどうか分かるんだ。さっき言ったように I_s は I_p で目印されているから、ジョセフソン接合がスイッチするのは必ず I_p が加えられた時刻になるよね。でも SFQ ループに入った SFQ はリセット動作を行うまでそこにいるから、読み出しはゆっくりでもいいんだ。この操作を行うことで、ジョセフソン接合がスイッチする最低の I_f の値がわかるよね。同じ事を I_s をゼロにして行くと、さっき求めた I_s があるときにジョセフソン接合がスイッチする最低の I_f の値と違うよね。この差が I_p を与えた時刻での I_s の値になるんだよ。この操作を I_p を流す時刻を少しずつ変えながら繰り返していくと I_s の波形全体がわかるんだよ。

文香：ふうー。頭がぐちゃぐちゃになりそう。このやり方で正しいのね。

健：大丈夫だよ。NEC ではこの写真（図2）のような高温超電導サンプラーで波形観測をするための測定システムを作って、いろんな波形を観測しているんだ。その結果、数十ピコ秒周期で変化する電流波形が正しく観測できることが確かめられているよ。超電導工学研究所では、50GHz のサイン波形が正しい周期（20 ピコ秒）で観測されることを確かめているしね。

文香：それはすごいわね。

高温超電導サンプラーの強み

文香：高温超電導サンプラーで実際に波形が観測できることはわかったけど、今までのものに比べて何がいいの？

健：まず、時間分解能が高いことだね。さっき説明したように信号電流のどの時刻を観測するかは、SFQ パルス電流で目印をつけるのだ。時間分解能の高い測定をしたいなら、この目印はできるだけ細かく付けられた方がいいよね。目印が大きいと、どこを計っているか曖昧になってしまうからね。SFQ パルスは条件によっては幅 1 ピコ秒くらいまで細くできるから、すごく時間分解能が高い観測ができるんだよ。

文香：そうか。他には？

健：電流に対する感度が高いことも特徴だよ。ジョセフソン接合は I_0 を境にゼロ電圧状態から有限電圧状態に急激に状態をかえるからね。これをつかうことで感度の高い測定ができるんだよ。

文香：時間分解能も電流感度も高いってことね。

健：そうだよ。その他にも、高温超電導サンプラーは電流が直接測定できるっていう強みもあるんだよ。電圧で動作を制御する半導体素子は電流を測定することが苦手なんだ。

文香：でも、電流で計っても電圧で計っても同じなんじゃないの？

健：同じじゃないよ。オームの法則って知っているだろ。計っている場所の抵抗、この場合はもっと一般化してインピーダンスというんだけど、それがわかっていれば、電圧の値からオームの法則を使って流れている電流を知ることはできるよ。でもインピーダンスがわからないということは結構よくあるんだ。そういう場合の測定では、電圧を測っても電流は分からないんだよ。

文香：高温超電導サンプラーって、性能も高くておまけに電流まで計れてすごいじゃない。でも、このシステムの写真を見ると、冷凍機ちゃんと見えているじゃない。

健：……。これは超電導を使っていることを宣伝するためにわざと見せているの。



図2 高温超電導サンプラー観測システム

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導デジタル応用のおはなし(その6 最終回)

SRL/ISTEC

デバイス研究開発部 低温デバイス開発室

室長 日高睦夫

その6: AD変換器とまとめ

超電導工学研究所に勤める健くんには文香さんという婚約者がいる。文香さんは将来夫となる人の仕事を理解しようと色々勉強しているが、どうもわからないことが多い。特に健くんが研究しているSFQ(単一磁束量子)回路というものが何の役に立つのかさっぱりわからない。そこで健くんはSFQ回路が何の役に立つのか聞いてみることにした。

他に使えるものはないの？

健: SFQについて大事なことは大体説明してきたから、この辺でまとめにしよう。

文香: ちょっと待って。今までネットワークルータ用のスイッチ、スーパーコンピュータのプロセッサ、高温超電導サンプラーについて教えてもらったのよね。他にSFQが使えるものはないの？

健: ISTECが出している「超電導 Web21」の2005年10月号に「超電導デジタルデバイスの進展」という特集が組んであるんだけど、その中にスイッチやサンプラーと並んでアナログ/デジタル(A/D)変換器のことが載っているよ。AD変換器もSFQの有望な応用の一つなんだ。

文香: どうして？

健: AD変換の中にオーバーサンプリングという方法があって、詳しい説明は省くけどSFQを使うと半導体に比べて回路がものすごく簡単になる上に、SFQ回路の数十GHzの高速動作が精度向上の役に立つんだ。

文香: なんかよくわかんないけど、SFQの特徴をうまく使った回路というわけね。でもAD変換器って何に使うの？

健: 電気信号には大きく分けてアナログ信号とデジタル信号があるの知ってる？

文香: アナログ人間とかデジタル人間とかいうあれね。

健: いやちょっと違うけど・・・。デジタル信号というのはコンピュータで処理できるような形に情報を“1”と“0”の列で表したものだよ。アナログ信号というのは波のように連続して続く信号だよ。例えば、無線の信号なんかはアナログ信号だよ。

文香: どうしてアナログ信号をデジタル信号に変換する必要があるの？

健: デジタル回路で処理するためだよ。例えば、携帯電話は無線だから飛んでくる信号はアナログなんだ。でも携帯電話の中には複雑なデジタル回路が入っていて、色んな処理をしてくれるんで便利に使えるんだ。

文香: そうか。デジタル回路で処理するために、アナログ信号をデジタル信号に変える必要があるってことね。

健: その通り。このアナログ信号をデジタル信号に変える回路がAD変換器だよ。

文香: でも携帯電話に超電導なんか使ったら耳が霜焼けにならない？

健: ならない。何か大きな誤解をしていない？

文香: ジョーク、ジョーク。続けて。

健: それぞれの携帯電話で行うAD変換はそれほどたいした処理ではないんで、超電導を使うまでもないんだ。でも、さらに高速で精度の高いAD変換が必要となる第4世代の携帯電話基地局では、超電導AD変換器が期待されているよ。

文香：そうなの。

健：他にも超電導放射線検出器の出力処理に使っても面白いんだ。

文香：それ、もうちょっと教えて。

健：超電導放射線検出器は他ではまねのできないくらい高い感度で放射線を検出できるデバイスなんだけど、検出できる面積が小さいのが欠点なんだ。それで、たくさん並べて検出面積を稼ごうとしているんだけど、検出器の数の分だけ極低温と室温との間の配線や室温におく測定器の数が増えて大変なことになるんだ。もし、たくさん検出器からの出力を一本の配線に乗せて室温まで送れて、一つの装置で処理できたら楽だろう。このためには、検出器からのアナログ信号をAD変換器でデジタル信号に変換することが必要なんだ。一旦デジタル信号に変換できたら、たくさん検出器からの信号を一行に並べて一本の線で室温まで送ることは簡単だからね。

文香：そのくらいだったら半導体のAD変換器でもできるんじゃないの。

健：性能的にはそうだけど。超電導放射線検出器が動作するような極低温では、半導体のAD変換器は動作できないんだ。逆に始めから冷えているんだから、超電導AD変換器を動作させるにはもってこいだろ。

文香：超電導AD変換器を冷やすために特別な装置が必要ないってところがいいわね。

SFQはポスト半導体の切り札

健：文香もいろいろ勉強してきたからSFQのことについて詳しくなっただろう。

文香：そうね。SFQってたくさん面白い応用があるのね。私は、SFQは超高速で動いても、とっても消費電力が小さいってところが気に入ったわ。何か経済的でお得って感じがするでしょう。

健：そうだよ。SFQはとってもお得なんだ。この図(図1)は高速半導体ゲートと最高速のSFQゲートの消費電力を示したものだけど、スピードだけだとSFQが無茶苦茶速いというわけでもないんだ。でも、消費電力は6桁もSFQの方が小さいよ。6桁といえば百万分の一だからね。百万分の一の電力で同じ仕事をするんだからすごいよね。逆に言うと、半導体高速ゲートはとてつもなく電力を消費するんで、絶対に集積回路にできないってわかるだろう。

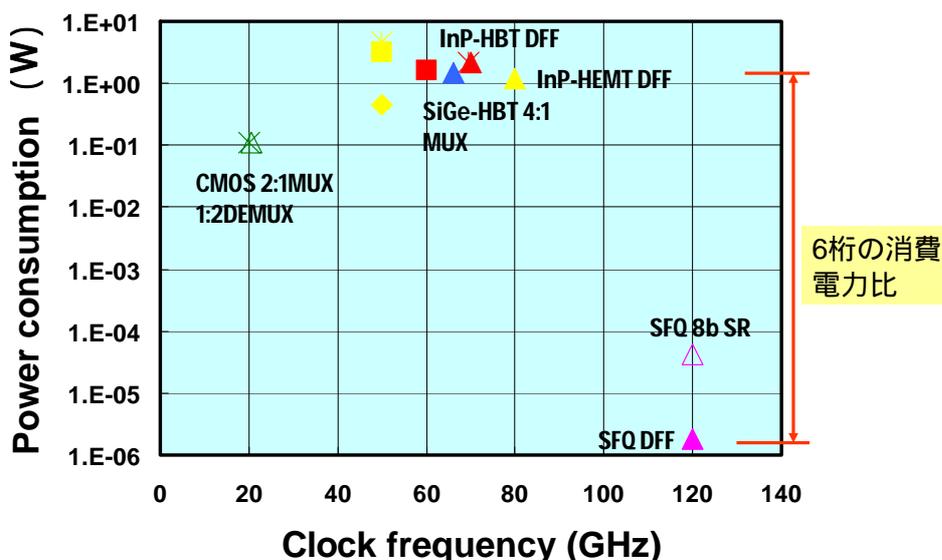


図1 半導体高速ゲートとSFQゲートの消費電力
(名大藤巻教授提供)

文香：超高速の集積回路でパラレル展開なしに高速データが処理できるのが、SFQ 回路の最大の強みなのよね。

健：その通り、将来半導体回路が行き詰まった時の切り札が SFQ 回路なんだ。

文香：でも、他にも新しい原理で動くデバイスはあるんでしょう。SFQ 回路だけが切り札じゃないんじゃない。

健：SFQ だけが唯一の解だと言うつもりはないよ。でもね、この表（表 1）は「超電導 Web21」の 2005 年 10 月号にある色々な新規論理デバイスの比較で、ITRS という半導体のロードマップから持ってきたものだけど、SFQ が一番魅力的だろ。しかも、SFQ と共鳴トンネルデバイス以外は論理回路レベルでの高速動作の実証はなされていないんだ。1 万接合規模の集積回路の動作実証がなされているのは SFQ だけだよ。SFQ が最も有力と僕が言っている理由がわかるだろう。

文香：うん。わかる。わかる。

表 1 ITRS ロードマップより引用した新規論理デバイス技術とその性能
（横浜国大吉川教授提供）

| | 寸法 | 回路スピード | 動作エネルギー |
|---------------|--------|---------------|-------------------------|
| SFQ デバイス | 300 nm | 250 ~ 800 GHz | 2×10^{-19} J |
| 1 次元 FET デバイス | 100 nm | 30 GHz | 2×10^{-18} J |
| 共鳴トンネルデバイス | 100 nm | 30 GHz | $> 2 \times 10^{-18}$ J |
| 単一電子デバイス | 40 nm | 1 GHz | 1×10^{-18} J |
| 分子デバイス | 不明 | 1 MHz | 1×10^{-16} J |
| 量子セルオートマトン | 60 nm | 1 MHz | 1×10^{-18} J |
| スピンドevice | 100 nm | 30 GHz | 2×10^{-18} J |

三つのブレークスルー

文香：SFQ って、どこまで進んだら使われるようになるの？

健：応用によって違うから一概に言えないけど、僕は SFQ 技術が広く使われるようになるには三つのブレークスルーが必要だと思っているんだ。

文香：三つのブレークスルーって？

健：SFQ を使ったシステムの性能は、SFQ 回路技術、入出力技術、冷却技術のかけ算だと僕は思っているんだ。だから、それぞれの技術を高めていって、現状技術と比較してブレークスルーだと思えるようなレベルに達した時、SFQ は当たり前に使われている技術になると思うよ。

文香：どこまで行ったらブレークスルーだと言えるの？

健：回路技術は 100GHz で動作する 100 万接合の SFQ 回路が量産できるようになることかな。そこに行くにはやることいっぱいあるけど、道筋は見えているんだ。

文香：入出力技術は？

健：光/SFQ、SFQ/光変換を使った 40Gbps 光入出力だろうね。これができれば冷凍機の負荷が軽くなるし、あらゆるハイエンド半導体機器と簡単に接続できるようになるよ。特に出口の SFQ/光変換の方が難しいけど、最近有望な実験結果も出始めているよ。

文香：冷却技術は？

健：冷却の効率が今の 10 倍上がることかな。

文香：冷却の効率って？

健：今ニオブの SFQ 回路を冷却するのに一番使いやすい GM 冷凍機は、1W の冷却能力を得るために数 kW の電力を消費しているんだ。カルノー効率と呼ばれる物理的限界は 80 位だから、現状はこれに比べるとものすごく効率が悪いんだ。冷却の問題は僕たち超電導デバイス研究者の専門外だから、これまで人まかせにしてきたところがあるけど、一番必要だと思っている人達が手がけるべきだと思うんだ。もちろん専門の人達と連携しながらだけだね。

文香：三つのブレークスルーが起こせたら、世の中が変わるほどすごいってことね。

健：もちろん、今言ったブレークスルーが起きなくても使える応用はあるよ。でも、やるからには三つのブレークスルーを起こしたいな。

文香：ふうん面白そうね。私も一緒に夢が見られそうね。

健：夢見るだけじゃないよ。僕は現実を戦う男だよ。

文香：何かこっつけてるの。結婚したら SFQ だけじゃなくて私のこともちゃんと見てくれないとダメだからね。

健：ハイ、ハイ。

[超電導 Web21 トップページ](#)