

# 超伝導単一磁束量子回路による極低温信号処理技術

寺井弘高 三木茂人 山下太郎 牧瀬圭正 梶野顕明 王 鎮

超伝導単一磁束量子 (SFQ) 論理回路は、究極のエネルギー効率でデジタル演算を実現する技術である。SFQ回路を超伝導技術が得意とする各種検出器の信号処理に応用することで、超伝導検出器にさらなる機能性・高性能化をもたらすことも可能である。本稿では、超伝導単一光子検出器 (SSPD) と組み合わせた極低温信号処理回路としての応用に焦点を当て、我々の最近の研究活動について紹介する。

## 1 まえがき

原発事故や石油価格の高騰によりエネルギー問題への関心がこれまでになく高まっている。我々の身の回りは様々な電子・電気機器であふれているが、とりわけパソコンや携帯電話、スマートフォンといった ICT 機器は人々の生活に深く浸透しており、ICT 機器なしにはや社会生活は成り立たなくなっている。ICT 機器の中には、情報が集中する基幹ネットワークのルータや、データセンターなど大規模設備も含まれるが、例えば日本国内のデータセンターが消費する電力は原発2基分の発電量に相当する年間100億kWhに達する勢いである。パソコンやスマートフォンといった端末機器を含めると、2020年にはICT機器が消費する電力使用量だけで日本の全電力使用量の20%に達するという予測もある。自然エネルギーへの転換と同様、ICT機器が消費する電力の削減も重要課題となっている。

ICT機器の頭脳となっているのはCMOSに代表される半導体集積回路であり、このCMOS集積回路技術のたゆまない進歩がICT社会を作り上げたといっても過言ではない。しかしながら、CMOS回路の性能改善にも限界が見え始めており、今後の大幅な性能向上が難しくなっている。我々は、「超伝導」をキーワードに情報通信分野における技術革新を目指して研究に取り組んでいる。本稿では、単一磁束量子 (SFQ: Single Flux Quantum) を情報担体とした究極の低エネルギー論理演算回路について、その動作原理、特長、研究開発の現状を紹介する。また、より実用に近い応用事例として、我々が開発している超伝導単一光子検出器 (SSPD: Superconducting single-photon detector) アレイと組み合わせた信号処理回路としての応用について紹介する。

## 2 単一磁束量子 (SFQ) 論理回路

### 2.1 動作原理

現在、情報のほとんどはデジタル情報として処理されている。デジタル情報処理の省エネとは、「0」と「1」の識別をできるだけ小さなエネルギーで行うことである。最先端のCMOS回路においてトランジスタ1個が1回のスイッチングで消費するエネルギー ( $E_{sw}$ ) は、約0.1~1fJ (フェムトジュール:  $10^{-15}$  ジュール) 程度である。超伝導を利用したSFQ論理回路は、CMOS回路の  $E_{sw}$  よりはるかに小さい0.01~0.1aJ (アトジュール:  $10^{-18}$  ジュール) という  $E_{sw}$  で動作する。これは、動作温度である4Kにおける熱雑音の200~2,000倍に相当し、究極の低エネルギー情報処理技術として極めて魅力的であることを示している。

SFQ回路では、その名が示すとおり、超伝導ループの中で量子化された磁束(磁束量子:  $2.07 \times 10^{-15}$  T)を情報担体として使用する<sup>[1]</sup>。SFQ回路の動作原理を図1に示す。複数の超伝導ループとループ内の磁束量子を出し入れするためのスイッチとして機能するジョセフソン接合を組み合わせることで、あらゆる論理演算を実現できる。一方、ゲートレベルで見た動作は、図1に示すように、論理ゲート間でボールをやりとりするようなイメージである。磁束量子のエネルギーは極めて小さいため、論理ゲートにおける消費電力、動作遅延(消費電力と動作遅延の積が消費エネルギーに相当)は上述のように極めて小さく、かつ磁束量子はゲート間を光速に匹敵する速さで動くため、ゲート間信号伝送においては光インターコネクトのような高速性を備えている。実際、100GHz(計算回数が1,000億回/秒)を上回る動作がすでに実証されており<sup>[2]</sup>、ゲート当たりの消費電力も100nW程度と極めて小さい。半導体トランジスタでも100GHz以上で動作するものは存在するが、消費電力が大きいため、MUX/DEMUX

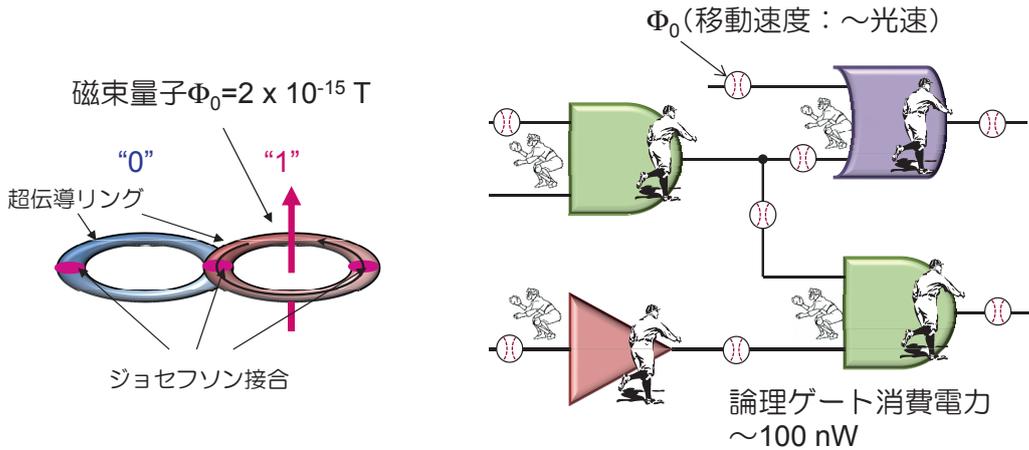


図1 SFQ回路の動作原理

等の小規模回路で使用されるに留まっており、大規模集積回路へ適用したという事例はない。SFQ回路が他の集積回路技術と決定的に異なる点は、高速性と同時に低消費電力性も兼ね備えている点であり、100 GHzを上回る高速動作と大規模集積化、高密度実装を同時に実現できる点が、SFQ回路の大きな魅力である。

一方、超伝導現象は極低温でしか発現しないため、冷却装置が必要となる。低温技術に馴染みのない人の中には、「超伝導＝巨大冷凍機」というネガティブなイメージを持つ人も多い。しかし、最近の小型冷凍機の進展はめざましく、後述する我々が開発したSSPDシステムは19インチラックに冷凍機を含めたすべてが収納されており、冷媒である液体ヘリウムは不要、家庭用100V交流電源で動作する。スイッチを入れるだけで、どこでも連続運転が可能である。データセンターや基幹ネットワークルータといった大規模設備では、発熱を取り除くための空調にシステム全体の50%近い電力を費やしている。もちろん、SFQ回路の冷却に伴うエネルギー効率の低下は小さくはない。冷凍機まで含めると、おそらく3桁程度はエネルギー効率が下がるだろう。しかし、データセンターや基幹ネットワークルータといった大規模設備にSFQ回路を適用すれば、冷却によるエネルギー効率の損失を含めても1桁以上の省電力効果が見込まれる。

また、SFQ回路が極低温でしか動作しないことを逆手にとり、同じく極低温で動作する超伝導検出器の信号処理回路として積極的に利用していくことも可能である。超伝導技術が本来得意とする各種検出器の信号処理に応用することで、超伝導検出器にさらなる機能性・高性能化をもたらすことができる。本稿では、このような事例として、我々が最近取り組んでいるSSPDアレイの信号処理回路としての応用について、3で詳しく触れることにする。

## 2.2 研究開発の現状

SFQ回路は、日本、米国、欧州で活発な研究が行われており、現状ではジョセフソン接合数1万個を超えるSFQ回路が動作可能という技術レベルに到達している。米国では無線基地局用のRF受信機などの実用化研究も進んでいるが<sup>[3]</sup>、さらなる回路大規模化が依然として課題となっている。日本では、超伝導工学研究所のNbファンダリープロセスを利用して、大規模SFQ回路の設計・評価技術が開発されている<sup>[4][5]</sup>。大規模回路設計支援ツールや集積度向上を目指した多層配線プロセスの研究開発が進んでおり<sup>[6]</sup>、世界でもトップレベルの大規模回路作製技術および設計・評価技術が確立されている。しかし、現状の1,000倍以上の回路規模を実現するためには、さらなる作製プロセスの進展、作製歩留まりの改善が不可欠である。また、回路大規模化を阻む大きな問題として、極低温での回路デバッグの難しさもある。回路のどの部分で、どのようなエラーが発生しているのか突き止めることができれば、設計および作製プロセスに有効なフィードバックがかけられ、動作可能な回路規模は飛躍的に向上すると思われる。

現状のSFQ回路研究は、日本、米国、欧州のいずれにおいても、超伝導材料として超伝導転移温度( $T_c$ )が9.5 KのNbが使われているが、我々の研究室では $T_c$ が16 KのNbNを用いたSFQ回路の研究開発に取り組んでいる<sup>[7]</sup>。図2に我々が開発しているNbN集積回路の顕微鏡写真を示す。NbNを用いることで最低到達温度が10 Kの冷凍機で冷却することが可能となる。そのため、冷却効率(投入パワーに対する冷却パワーの割合)は、Nb素子の冷却で使用する4 K冷凍機よりも大きく改善する。ルータやサーバといった大規模システムでは、最終的に冷凍機込みでのエネルギー効率が重要となるため、冷凍機の冷却効率の改善が、実用化への成否の鍵を握る可能性があるため、より高い

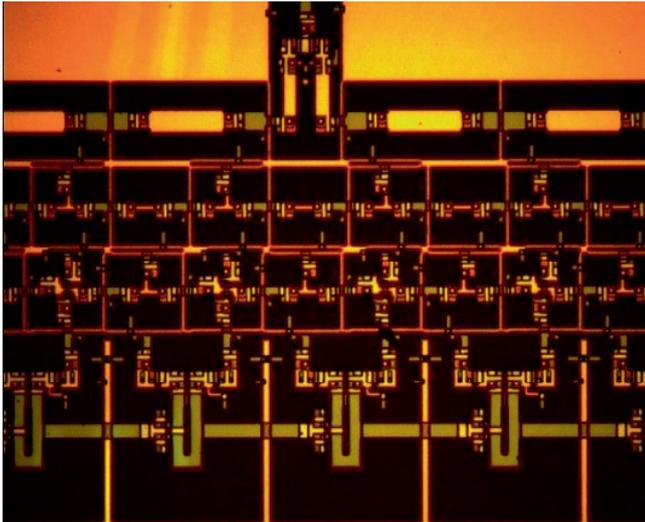


図2 NbN 集積回路の顕微鏡写真

温度での動作は重要である。NbN は薄膜およびジョセフソン接合の特性制御性、安定性、再現性が、Nb よりも高い  $T_c$  を持つ材料ではもっとも優れており、ポスト Nb 超伝導材料の最有力候補と言える。

### 3 SFQ 信号読み出しによる超伝導単一光子検出器の高性能化

#### 3.1 超伝導単一光子検出器 (SSPD)

我々の研究室では、超伝導ナノワイアを用いた SSPD の開発に取り組んでいる。SSPD は、深紫外から中赤外という広い波長帯域に感度を持ち、特に通信波長帯の 1,550 nm においては、半導体材料として InGaAs を用いたアバランシェフォトダイオード (APD) よりも、検出効率、計数率、暗計数、ジッタなど、多くの点で優れている。このため、量子鍵配送 (QKD: Quantum Key Distribution) システムのフィールドテストや量子光学実験等で、すでに広く使用されている<sup>[8][9]</sup>。我々の研究室では、SSPD の素子作製技術<sup>[9]</sup>、光ファイバと SSPD の安定した結合を可能とするパッケージ技術<sup>[10]</sup>、6 チャンネルの SSPD を 0.1 W GM (Gifford McMahon) 冷凍機に実装したマルチチャンネル SSPD システムを開発した<sup>[11]</sup>。我々の開発したシステムでは、6 チャンネルすべての SSPD が暗計数百カウントで 20% 以上の検出効率を有している。また、冷凍機を含めたシステム全体が 19 インチラックに収納されており、水冷不要、100 V 電源で駆動できるため、どこでも手軽に使用できる。我々の開発した SSPD システムは、東京 QKD ネットワークでも使用され、QKD ネットワークのシステム性能実証に大きく貢献した<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 SSPD のアレイ化による性能向上

SSPD の計数率は、現状では 100 MHz 程度であるが、それは SSPD の細く、薄く、長い超伝導ナノワイアのカイネティックインダクタンス ( $L_K$ ) で決まっている<sup>[13]</sup>。電子-フォノンの相互作用で決まる SSPD 本来の応答速度は 1 GHz を大きく超えるため、ナノワイアをできるだけ短くし、 $L_K$  を低減することができれば、さらなる高速化が可能である。 $L_K$  を低減する最も簡単な方法は、受光面積を縮小することであるが、受光面積の縮小はファイバとの結合効率を低下させるため、最低でも  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  の受光面積は必要である。現状の 100 MHz という計数率はこの最小受光面積により制限されている。

ファイバとの結合効率を確保しつつ、受光面積をさらに縮小する手法として、多ピクセル化が考えられる<sup>[14]</sup>。1 つひとつのピクセルの小型化により高速化しつつ、それらをアレイ状に並べて一定の受光面積を確保することで、ファイバとの高い結合効率を達成できる。このアレイ化に際して問題となるのが、小型冷凍機への実装である。ピクセル数の増加分だけ、読み出し用の同軸ケーブル本数も増加する。一般に、高帯域信号伝送が可能な同軸ケーブルは、熱の良導体でもあるため、ケーブル数の増大は冷凍機の到達温度に深刻な影響を及ぼす。SSPD の性能は、動作温度に極めて敏感で、検出効率は温度上昇とともに急激に悪化するため、ケーブル本数の増大による冷凍機の温度上昇は受け入れられない。

#### 3.3 SFQ 回路による SSPD 出力信号処理

そこで、我々の研究室では、SFQ 回路による極低温信号処理を提案している<sup>[15]</sup>。そのイメージを図 3 に示す。多数のピクセルを有する SSPD アレイからの出力信号を SFQ 回路により極低温環境で信号処理することで、出力ケーブル数を大幅に削減でき、同軸ケーブルからの熱流入の影響を減らすことが可能である。SFQ 回路自体の発熱は極めて小さいため、SFQ 信号処理による冷凍機の温度上昇はほとんど無視できる。

どのような信号処理回路が必要かは、SSPD アレイの使用目的により決まる。図 4 に SFQ 信号処理回路として 2 つの事例を示す。図 4 (a) に示す回路は QKD システム等、より高い計数率が求められる応用を想定した信号処理回路である。機能としては各々のピクセルからの  $n$  チャンネルの信号を 1 チャンネルにマージするという至ってシンプルな回路である。この回路では、光子がどの位置に入射したかという位置情報については、信号処理の過程で失われる。SSPD を  $n$  ピクセルに分割した場合、SSPD の  $L_K$  はピクセル数  $n$  に比例して小さくなる。従って、 $n$  に比例して応答速度は高

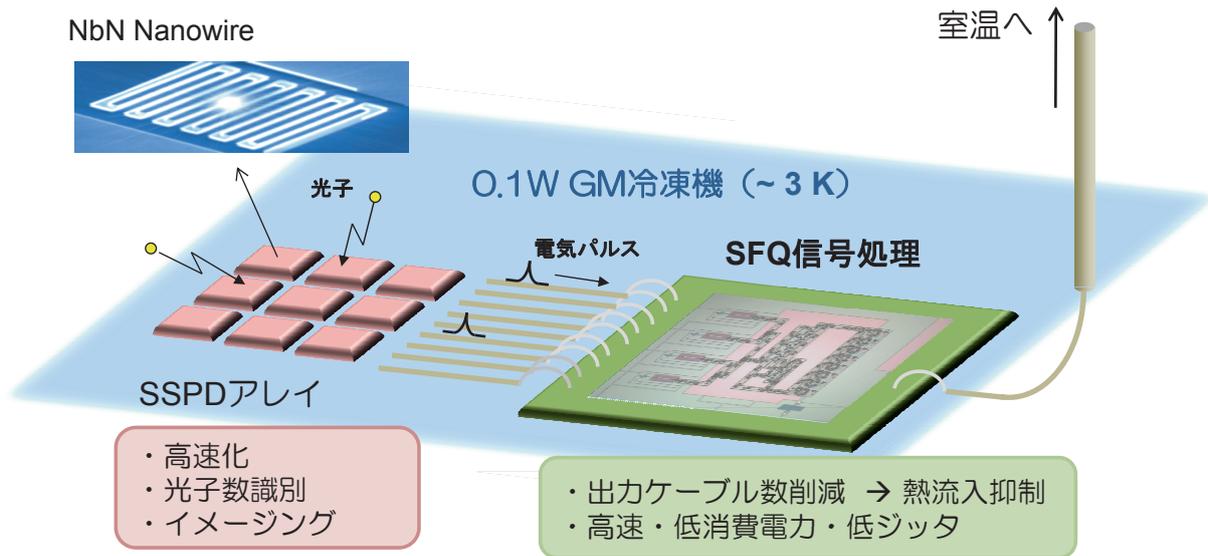


図3 SSPDアレイ化とSFQ信号処理

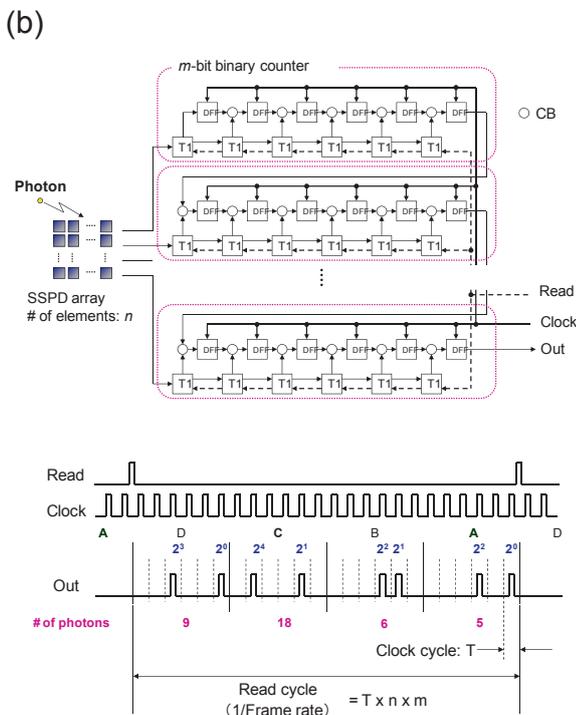
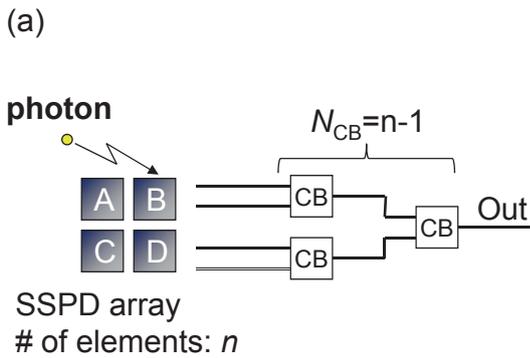


図4 SSPDアレイ用SFQ信号処理回路の例  
(a) 高速通信用マージ回路、(b) イメージセンサ用回路

速化する。一方、それぞれのピクセルに光子が当たる確率は  $n$  に比例して減少し、この確率の減少分で  $n$  倍の高速化が可能である。結果的に、SSPD の計数率は  $n$  の 2 乗に比例して改善することになる。例えば、 $n$  の値として 16 を仮定すると、計数率は原理的には現状の 100 MHz の実に 256 倍にも達することになる。信号処理に用いる SFQ 回路の規模は、 $n=16$  を仮定しても、ジョセフソン接合数で 500 接合以下であり、消費電力も 1 mW に満たないため、冷凍機の温度上昇に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。

一方、図 4 (b) はイメージングセンサへの応用を想定した信号処理回路である。各々のピクセルにバイナリカウンタを接続し、カウンタの内部状態を外部からの Read 信号によりシフトレジスタに転送し、クロック信号によりシフトレジスタからシリアルに信号を外部に読み出す。システム全体では 3 本の高周波同軸ケーブルが必要となるが、この程度の本数であれば、冷却パワーの小さい 0.1 W GM 冷凍機でも大きな温度上昇をもたらすことはない。出力信号のシーケンスにより、光子の当たったピクセル、当たった光子数を同定できるため、SSPD アレイをイメージングセンサとして用いることが可能となる。256 ピクセルの SSPD アレイを仮定した場合に必要な回路規模は、ジョセフソン接合数で 14,000 個程度と見積もられ、現状の技術レベルでも十分実現可能な規模である。また、SFQ 回路は高速動作が可能のため、10 GHz 以上の信号読み出しが可能である。仮に、10,000 ピクセルの SSPD アレイから 10 GHz で信号を読み出したとして、1 MHz のフレームレートが実現可能である。このような、フォトンカウントレベルの高感度性と高速性を兼ね備えたイメージングセンサが実現すれば、バイオ・

医療分野、計測分野、量子光学分野等、様々な分野で大きな威力を発揮し、新現象の発見、革新的技術の創出に大きく貢献するだろう。

### 3.4 SFQ 信号処理による 4 ピクセル SSPD アレイの動作実証

我々は、世界にさきがけて SSPD の多ピクセル化のための SFQ 信号処理を提案し、これまでの研究で、SSPD の  $20 \mu\text{A}$  以下 (  $50 \Omega$  終端で  $1 \text{mW}$  以下に相当) の微弱な出力信号から SFQ パルスへの変換動作、2つの SSPD からの出力信号を同一冷凍機に実装した SFQ 信号処理回路でマージする動作、4ピクセル SSPD アレイの SFQ 信号処理によるクロストークフリー動作の実証に成功している<sup>[16]-[18]</sup>。図 5 に SFQ 信号処理による 4 ピクセル SSPD アレイの実証実験結果を示す。図 5 (a) は 4 ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理回路を  $0.1 \text{W}$  GM 冷凍機に実装した冷凍機内部の写真である。4 ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理回路は 4 本の高周波同軸ケーブルで接続している。図 5 (b) の実験セットアップに示すように、SSPD の各ピクセルには、SFQ 回路上に作製した  $5 \text{k}\Omega$  のバイアスフィード抵抗を介して供給される。図 5 (b) において、SSPD と SFQ 回路はバイアステーを介すことなく直接接続されているが、バイアステーと低ノイズアンプを介して SSPD から信号を読み出す従来手法と同じ動作を確認している<sup>[17]</sup>。正常動作では、SSPD アレイの 4 チャンネルすべての出力信号が SFQ パルスに変換され、SFQ 信号処理回路で 1 チャンネルの出力信号にマージされた後、電圧ドライバで室温の低ノイズアンプで増幅可能な方形波形 (SFQ パルスそのものはパルス幅数 ps、電圧レベル  $0.5 \text{mV}$  以下の極小信号であるため、外部機器で読み出せるようパルス形状の変換が必要) に変換され出力される。SSPD アレイの個々のピクセルに、あらかじめ所定のカウンタ数を得られるようにバイアス電流値を調整した上で、各ピクセルへのバイアス電流を次々にオンしていった場合の、出力カウンタ数の変化を観測した結果を図 5 (c) に示す。得られた出力カウンタ数は、個々のピクセルに対して設定したカウンタ数の和になっており、4 ピクセル SSPD アレイと SFQ 読み出し回路のすべてが正常に動作していることが確認された。

図 5 (b) では、SSPD から SFQ 回路までの配線長に意図的に差を設けることで、時間相関光子数カウンタモジュールを使って、光子が当たったピクセルの位置情報を時間情報として識別できるようになっている。我々は、図 5 (b) に示すセットアップで、時間情報から光子が入射したピクセルを同定できることを確認している<sup>[18]</sup>。この方法は、光子の位置情報と時間情報

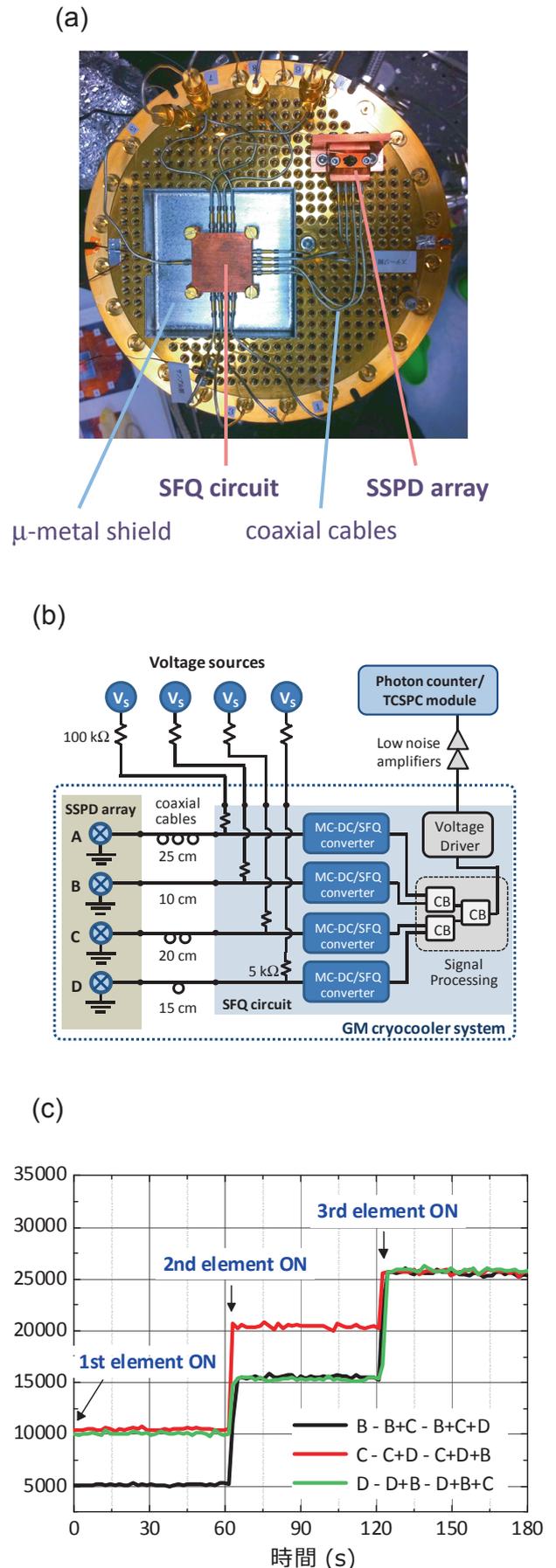


図 5 4 ピクセル SSPD アレイの SFQ 信号読み出しによる動作実証 (a) 冷凍機内部写真、(b) 実験セットアップ、(c) 実証実験結果

### 3 超伝導デバイス

の両方を知りたいという応用では極めて有効である。しかし、位置情報を確定するために、外部トリガを時間基準信号として用いるため、時間基準信号のない単純なイメージングに使うことはできない。位置情報のみのイメージングでは、前述した図4 (b) に示す信号処理回路が必要となる。

今回の実証実験では、SSPD アレイと SFQ 信号処理回路を同軸ケーブルを用いて接続しているが、さらに多ピクセル化した場合は、実装が困難になることが予想される。今後、SSPD アレイと SFQ 回路を同一基板上に集積化する方向で、現在研究を進めている。

#### 3.5 SFQ 回路による低ジッタ信号読み出しの実証

SFQ 回路を SSPD からの信号読み出し回路として利用するもう 1 つの利点として、低ジッタでの信号読み出しがある。通常の低ノイズアンプを使用した信号読み出しでは、SSPD へのバイアス電流の低下に伴って、出力信号の S/N 比が悪化し、ジッタが増大する。S/N 比が悪化するとジッタが増大する傾向は、SFQ 回路を信号読み出しに利用する場合でも同じだが、SFQ 読み出し回路は入力電流感度が高いため、SSPD からの出力電流が  $20 \mu\text{A}$  以下でも、低ジッタでの信号読み出しが可能である<sup>[19]</sup>。また、SFQ 回路自体のジッタは数 ps オーダーと極めて小さいため、信号処理回路内でのジッタの増大も無視できる。図6にSFQ回路と通常の低ノイズアンプを用いた信号読み出しにおけるジッタを比較した結果を示す。

通常の読み出し方法では、バイアスティーを介してバイアス電流が SSPD に供給される。この場合、光子入射により抵抗状態から復帰せず熱暴走状態に陥るラッチと呼ばれる現象が高バイアス領域でしばしば発生する。このラッチ現象を抑制するために、SSPD と並列に  $50 \Omega$  の抵抗を接続する方法が有効である。一度熱暴走状態に陥った SSPD は、バイアスティーのキャパシタに直流バイアスが遮られて SSPD 以外に行き場がないために、熱暴走状態から回復しないが、 $50 \Omega$  の並列抵抗が接続されていると、それが直流バイアスの逃げ道となり熱暴走状態から回復することができる。この並列抵抗の効果は図6からも見て取ることができる。 $50 \Omega$  並列抵抗を接続しない場合、 $14.5 \mu\text{A}$  以上のバイアス電流で SSPD がラッチ状態となっているが、 $50 \Omega$  並列抵抗を接続することで、ナノワイアの臨界電流とほぼ同じ  $18 \mu\text{A}$  のバイアス電流まで動作している。以上の理由から、通常は SSPD と並列に  $50 \Omega$  の抵抗を接続して使用するが、その場合のジッタと比較して、バイアス電流が  $13 \mu\text{A}$  以上では SFQ 信号読み出しによりジッタが大きく改善していることがわか

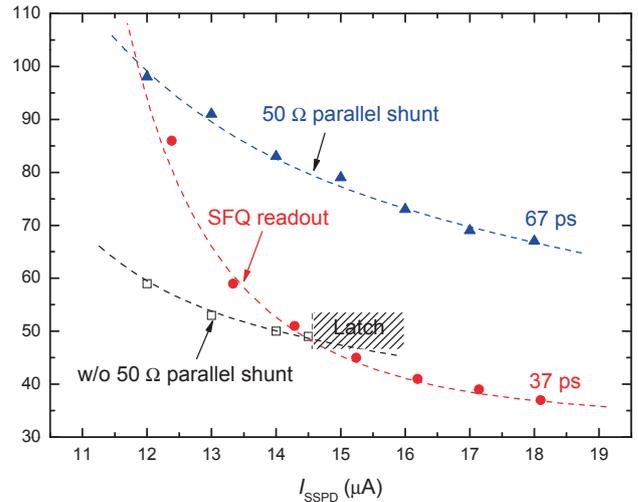


図6 SFQ 読み出しと通常読み出しにおける SSPD のジッタ比較

る。また、 $50 \Omega$  の並列抵抗を接続しない状態で、仮に SSPD がラッチしなかったとしても、 $15 \mu\text{A}$  以上の入力電流レベルでは、SFQ 信号読み出しのほうが低ジッタであることもわかる。以上の結果は、SFQ 回路が SSPD から低ジッタで信号読み出す上で極めて有効であることを示している。

## 4 今後の展望

SFQ 回路研究の究極のゴールは何かと言われれば、やはり基幹ネットワークのルータやサーバといった大規模システムということになる。しかしながら、そういった大規模システムでは数千万、数億のジョセフソン接合を集積化し、それらを MCM (Multi-Chip Module) として冷凍機に実装し、さらに高速な信号入出力を実現する必要がある。実用化までの道程はまだまだ長いと言わざるを得ない。企業が短期の収益性を重視する中、情報通信研究機構 (NICT) のような公的研究機関がこのような研究開発を牽引していく必要があるが、それでも実製品を伴わない研究開発には限界がある。本稿で紹介した SSPD と組み合わせた研究事例は、このような問題意識から生まれたものである。SSPD と SFQ 回路の両方の技術を併せ持っている研究機関は、世界的にも NICT だけであり、信号処理まで含めた独自の研究開発により、世界最高性能の SSPD システムが実現できると考えている。このような超伝導センサと一体化した実製品としての研究開発を通して、数千万素子規模の SFQ 回路が動作可能な技術レベルにまで成熟すれば、ルータやサーバといった大型 ICT 機器を目指した大規模 SFQ 回路システムの研究に移行していくことも十分にあると考えている。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、有益なご議論をいただいた量子 ICT 研究室の佐々木雅英氏、藤原幹生氏に深く感謝する。

## 【参考文献】

- 1 K. K. Likharev and V. K. Semenov, "RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-tera-hertz-clock-frequency digital systems," IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1, 3-28, 1991.
- 2 H Akaike, T Yamada, A Fujimaki, S Nagasawa, K Hinode, T Satoh, Y Kitagawa, and M Hidaka, "Demonstration of a 120 GHz single-flux-quantum shift register circuit based on a 10 kA cm<sup>2</sup> Nb process," Supercond. Sci. Technol. 19, 320-324, 2006.
- 3 D. Gupta et al., "Modular, Multi-Function Digital-RF Receiver Systems," IEEE Trans. on Appl. Supercond. 21, 883-890, 2011.
- 4 S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata, and S. Tahara, "A 380 ps, 9.5 mW Josephson 4-Kbit RAM operated at a high bit yield," IEEE Trans. on Appl. Supercond. 5, 2447-2450, 1995.
- 5 S. Yorozu, Y. Kameda, S. Tahara, H. Terai, A. Fujimaki, and T. Yamada, "A single flux quantum standard logic cell library," Physica C, 378-381, 20115-20123, 2002.
- 6 T. Satoh, et al., "Planarization Process for Fabricating Multi-Layer Nb Integrated Circuits Incorporating Top Active Layer," IEEE Trans. on Appl. Supercond. 19, 167-170, 2009.
- 7 K. Makise, H. Terai, and Z. Wang, "Resistively Shunted NbN/AlN/NbN Tunnel Junctions for Single Flux Quantum Circuits," Physics Procedia, 36, 116-120, 2012.
- 8 H. Takesue, S. W. Num, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, and Y. Yamamoto, "Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors," Nature Photonics 1, 343-348, 2007.
- 9 R. Ikuta, H. Kato, Y. Kusaka, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto, "High-fidelity conversion of photonic quantum information to telecommunication wavelength with superconducting single-photon detectors," Phys. Rev. A87, 010301, 2013.
- 10 S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, B. Baek, A. J. Miller, R. H. Hadfield, S. S. Nam, and Z. Wang, "Large sensitive-area NbN nanowire superconducting single-photon detectors fabricated on single-crystal MgO substrates," Appl. Phys. Lett. 92, 061116, 2008.
- 11 S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Multichannel SNSPD system with high detection efficiency at telecommunication wavelength," Opt. Lett. 35, 2133-2135, 2010.
- 12 M. Sasaki, et al., "Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network," Opt. Express 19, 10387, 2011.
- 13 A. J. Kerman, et al., "Kinetic-inductance-limited reset time of superconducting nanowire photon counters," Appl. Phys. Lett. 88, 111116, 2006.
- 14 E. A. Dauler, et al., "Multi-Element Superconducting Nanowire Single-Photon Detector," IEEE Trans. on Appl. Supercond. 17, 279-284, 2007.
- 15 H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, "Readout electronics using single-flux-quantum circuit technology for superconducting single-photon detector array," IEEE Trans. on Appl. Supercond. 19, 350-353, 2009.
- 16 H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, and Z. Wang, "Demonstration of single-flux-quantum readout operation for superconducting single-photon detectors," Appl. Phys. Lett. 97, 112510, 2010.
- 17 S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Superconducting single-photon detectors integrated with single flux quantum readout circuits in a cryocooler," Appl. Phys. Lett. 99, 111108, 2011.
- 18 T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, "Crosstalk-free

operation of multi-element SSPD array integrated with SFQ circuit in a 0.1 Watt GM cryocooler," Opt. Lett. 37, 2982-2984, 2012.

- 19 H. Terai, T. Yamashita, S. Miki, K. Makise, and Z. Wang, "Low-jitter single flux quantum signal readout from superconducting single photon detector," Opt. Express 20, 20115-20123, 2012.



**寺井弘高** (てらい ひろたか)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室研究マネージャー  
博士 (工学)  
超伝導エレクトロニクス、ナノエレクトロニクス



**三木茂人** (みき しげひと)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員  
博士 (工学)  
超伝導デバイス、光子検出器



**山下太郎** (やました たろう)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員  
博士 (理学)  
超伝導工学、物性理論



**牧瀬圭正** (まきせ かずまさ)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室研究員  
博士 (工学)  
超伝導エレクトロニクス、ナノエレクトロニクス



**梶野顕明** (かじの けんめい)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室研究員  
博士 (工学)  
超伝導エレクトロニクス、ナノエレクトロニクス



**王 鎮** (おう ちん)

未来 ICT 研究所主管研究員  
工学博士  
超伝導エレクトロニクス、ナノエレクトロニクス

7月1日から、未来 ICT 研究所招へい専門員 / 中国科学院上海微系統与信息技術研究所教授