


ポストムーア時代を見据えた超伝導コンピューティング技術の創成と展開

	研究代表者	九州大学・システム情報科学研究院・教授 井上 弘士 (いのうえ こうじ) 研究者番号:80341410
	研究課題情報	課題番号：22H05000 研究期間：2022年度～2026年度 キーワード：計算機アーキテクチャ、超伝導コンピューティング、ポストムーア

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

今から約30年前、超伝導コンピュータの実現に向け世界でデバイス研究が活発化し、その後、冬の時代に突入した。しかしながら、この局面が大きく変わりつつある。これは、材料や回路技術の進歩に加え、ここ数年で計算機工学分野での研究が飛躍的に進み、革新的アーキテクチャが次々と誕生したことに起因する。現在、コンピュータの性能向上を支え続けた半導体微細化の終焉が予想されている。このような状況において、次世代計算基盤の最有力候補として超伝導コンピューティングが再び注目され、今まさに、冬の時代の終わりを迎えているのである。本研究では、超伝導コンピュータ技術の中でも特に「単一磁束量子（SFQ: Single Flux Quantum）回路」に着目する。これまでに我々は、SFQコンピュータアーキテクチャ技術に関して世界をリードし、32GHzビットパラレル型SFQプロセッサや34GHzのAIアクセラレータのプロトタイプ実証に世界ではじめて成功した。本研究では、これら最先端基礎研究をシステムレベルへと昇華させ、極低温超伝導汎用コンピューティング技術を世界に先駆けて確立する。そのために、デバイスからアーキテクチャまでを包括したシステム階層縦横断型研究を遂行し、極低温新奇デバイス活用コンピュータアーキテクチャを創成する（図1）。

超伝導コンピュータシステムアーキテクチャ

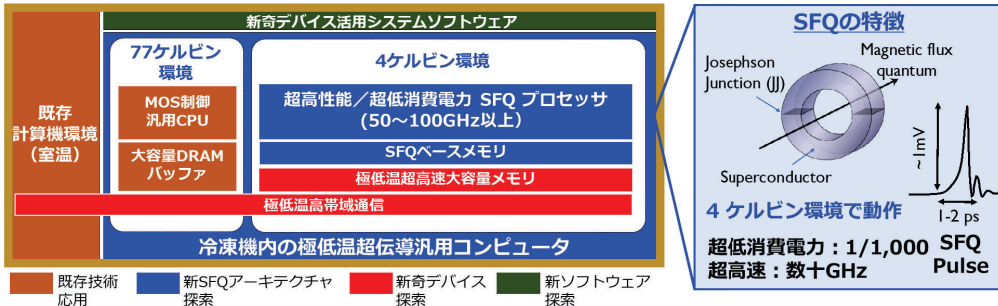


図1 研究の全体像（単一磁束量子回路と超伝導コンピュータシステムアーキテクチャ）

●研究内容（1/3）：極低温超伝導デバイス技術の創出

これまでの成果に基づきSFQプロセッサの欠点を明確化し、その解決のために以下に示すデバイスレベルまたは回路レベルでの新原理や新機能を創成する。

- ❖ 記憶：これまでに磁性体を用いたSFQ向けメモリが提案されたものの、その大容量化は実現できていない。この問題を抜本から解決すべく、SFQプロセッサの特徴である超高速性を維持しつつ、大容量化（高集積化）を実現する電界制御型の新メモリ素子を探索し、その原理を検証する。
- ❖ 通信：現状、SFQ回路の情報担体である超微弱パルス信号の情報を冷凍機外へ伝達するには、これを安定した定常的な電圧レベルへと変換する必要がある、極めて大きなオーバヘッドが生じる。この問題を抜本から解決する新しい光トランジスタ素子を探索し、その原理を検証する。
- ❖ 演算：現状のSFQ回路は確実かつ安定した動作を実現するために多くのマージンを確保した回路構成となっており、これが高性能化や低消費電力化の限界をもたらしている。これを打破すべく、設計マージンを極限まで小さくした新しいSFQ回路構成方式を探索する。

●研究内容（2/3）：極低温超伝導コンピュータアーキテクチャ技術の創出

これまでに培ったSFQ技術、ならびに、本研究で探索する新奇デバイスの利活用を前提とし、従来とは大きく異なる革新的SFQコンピュータアーキテクチャを考案する。特に、「新奇デバイスの利点を最大化し、かつ、欠点を隠蔽する」といった新しいコンセプトに基づき、デバイスとアーキテクチャの分野縦横断型連携（図2）を遂行し、以下に示すアーキテクチャ技術を探索する。

- ❖ 時空間情報表現法の理論構築：空間情報表現法と時間情報表現法を融合した「SFQ向け時空間情報表現法」の新原理に基づき、その数理的理論の構築と演算/記憶回路構成法を探索する。
- ❖ 極低温SFQプロセッサアーキテクチャ：MOS-FETを利用する極低温低速厳密処理部と、SFQを用いる極低温高速厳密処理部/非厳密処理部から成る新アーキテクチャを創成する。そして、図1のSFQシステムアーキテクチャへと発展させる。
- ❖ 冷凍機内メモリアーキテクチャ：極低温環境での既存デバイス（SRAMやDRAMなど）の利活用も視野に入れ、本研究で探索する新メモリデバイスの利活用を前提とした新階層メモリ構造を導出する。

分野縦横断型研究により世界を圧倒的にリード!



図2 デバイスとアーキテクチャの分野縦横断型研究

●研究内容（3/3）：極低温新奇デバイス活用システムソフトウェア(OS)技術の創出

極低温環境に必須となる冷凍機も含め、様々なハードウェア資源を有効に利活用するオペレーティングシステム技術を探求する。特に、SFQ回路特性や冷凍機特性に着目した従来とは一線を画す以下の新技術を確認する。

- ❖ ランタイムバイアス電圧/動作周波数制御技術：電源電圧と動作周波数を最適化するSFQ向けDbVFS (Dynamic bias-Voltage and Frequency Scaling) 技術を探求する。SFQ回路に駆動エネルギーを与えるバイアス電源の電圧に関して、CMOSでのDVFS制御とは異なる新たなトレードオフ最適化が可能となる。
- ❖ ランタイム冷却温度制御技術：温度上昇に起因するエラー発生頻度と冷却コストのトレードオフを最適化するSFQ向けサーマル制御技術を探求する。より高い温度環境下でSFQ回路を動作させることでエラー発生確率が高まる一方、冷却コストを大幅に削減できる。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●新奇デバイス原理検証

SFQコンピューティングを飛躍させるための極低温新奇デバイスに関して、動作原理を検証するとともに学理を構築し、さらなる極低温デバイスの創成に貢献する。

●極低温新アーキテクチャ創成

超伝導古典コンピューティングのためのアーキテクチャ（図1）を確立し、飛躍的な電力効率の向上を実現する。チップ試作による原理検証とシミュレーションによるシステムレベル評価により、実現可能性と有効性を示す。また、ポストムーア時代を支える新奇デバイス活用型コンピュータの設計法を確立する（図3）。

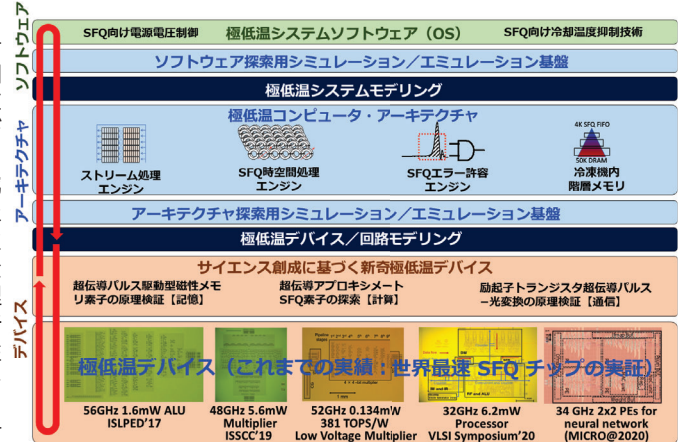


図3 ポストムーア時代を支える新奇デバイス活用型コンピュータ設計法