

博士論文

単一磁束量子回路と超伝導検出器を用いた高精度質量分析システムの研究

Study on highly accurate time-of-flight mass spectrometry systems using single flux quantum circuits and superconducting detectors

横浜国立大学大学院 工学府

物理情報工学専攻 電気電子ネットワークコース

Specialization in Electrical and Computer Engineering,
Department of Physics, Electrical and Computer Engineering,
Graduate School of Engineering,
Yokohama National University

佐野 京佑

Kyosuke Sano

2017年3月

要約

アルツハイマー病に代表される未解明の特定疾患の解明のため、タンパク質などの高分子の高感度かつ高精度な質量分析が求められている。現在、分析対象に一定のエネルギーを加え加速・飛行させた際の飛行時間を利用した行時間型質量分析 (TOF MS, time-of-flight mass spectrometry) 法が一手法として広く用いられている。本研究では、分子量依存のない高感度検出の可能な超伝導検出器と高時間分解能で検出器からの信号を連続測定可能な単一磁束量子時間測定回路 (SFQ TDC, single-flux-quantum time-to-digital converter) を組み合わせた超伝導分析システムの実現に取り組んだ。

これまでに、SFQ TDC の単体の動作実証には既に成功している。本研究では、この SFQ TDC と超伝導検出器とを実際に組み合わせた世界初の超伝導質量分析システムの構築に取り組んだ。まず、両超伝導回路が各々単独で動作実証の成功している冷凍機システムを室温を介して接続し二冷凍機システムを構築した。複数種類の生体分子に対して、本システムを用いた TOF MS 測定を行い、超伝導検出器と SFQ TDC を組み合わせた初の質量分析実験に成功した。その後、両超伝導回路を同一の冷凍機に組み込んだ単一冷凍機システムにおいても生体分子の TOF MS 測定に成功した。一方で、SFQ 回路へのバイアス電流供給による冷凍機内温度上昇や SFQ 回路のバッファ容量の不足による検出器信号の読み飛ばしなどの課題も明らかになった。SFQ 回路の動作には回路規模に応じた直流電流の供給が必要であり、単純にバッファを大容量化させることはできない。

本課題を解決するため、SFQ 回路の低電流化技術「カレントリサイクル」に着目した。これは、SFQ 回路を同一規模の複数のブロックに分割し、ブロック間で供給電流をリサイクルする手法である。本手法を用いることで、室温から冷凍機内の SFQ 回路に供給する必要のある電流量を大幅に低減することができる。本研究では、SFQ TDC の上記の問題の解決に加え、これまで実現されていない大規模回路における大電流のリサイクルの実現も大きな目標とした。

カレントリサイクルにて大電流のリサイクル及び大規模回路への適用を妨げているのは、SFQ ブロック間に挿入される非接触信号伝送回路の動作余裕度である。本伝送回路は原理的に磁場の影響に敏感であり、SFQ チップ上のグラウンド電流でさえ動作不安定化の原因となりうる。本研究では、磁場耐性の強い伝送回路を検討し、バッファ容量を増大させた SFQ TDC へのカレントリサイクルの適用を図った。その結果、SFQ TDC のバッファ容量を従来の実証回路の 4 倍に増大させつつ、カレントリサイクル未適用時と比較し約 7 割の供給電流量の低減に成功した。

以上から、超伝導分析システムの実証とカレントリサイクルの適用によるより実用的な SFQ TDC の実現可能性を示すことができ、超伝導質量分析システムの基礎を築けたと言える。なお、今回のカレントリサイクル適用回路の動作実証は液体ヘリウム中におけるものであり、今後は冷凍機中の動作実証にも取り組む必要がある。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 背景.....	1
1.1.1 巨大分子の質量分析.....	1
1.1.2 超伝導検出器の開発.....	2
1.1.3 単一磁束量子回路の背景.....	4
1.2 研究目的.....	5
1.3 本論文の構成.....	6
第 2 章 理論	7
2.1 本章の概要.....	7
2.2 飛行時間型質量分析法.....	7
2.3 超伝導ストリップ粒子検出器.....	9
2.3.1 検出原理.....	9
2.3.2 応答時間.....	10
2.3.3 価数弁別.....	11
2.4 単一磁束量子回路.....	12
2.4.1 Josephson 接合[60][61].....	12
2.4.2 SFQ 回路の動作原理.....	14
2.4.3 SFQ 回路の特徴.....	17
第 3 章 SFQ 回路の設計法と測定環境	19
3.1 本章の概要.....	19
3.2 SFQ 回路の作製プロセス.....	19
3.3 設計法.....	20
3.3.1 セルベース設計法.....	20
3.3.2 CONNECT セル.....	22
3.4 SFQ 回路の測定環境.....	24
3.4.1 測定系.....	24
3.4.2 測定環境.....	25
第 4 章 分析用システム用 SFQ 回路	28
4.1 本章の概要.....	28
4.2 超伝導検出器用 SFQ 読出し回路.....	28

4.2.1	SFQ 読出し回路	28
4.2.2	SFQ 電流検知器の実装	30
4.2.3	ダークカウントレートの測定	32
4.2.4	TOF MS 測定	33
4.3	質量分析用 SFQ TDC	34
4.3.1	SFQ TDC の性能	34
4.3.2	質量分析用 SFQ TDC の構成	34
4.3.3	24-bit カウンタの構成	36
4.3.4	$n \times 24$ -bit asynchronous First-In-First-Out (FIFO) buffer の構成	38
4.3.5	24-bit shift register (SR) の構成	40
4.3.6	SFQ TDC のシミュレーション一例	41
4.3.7	SFQ TDC の液体ヘリウム内動作	41

第 5 章 超伝導質量分析システムの構築44

5.1	本章の概要	44
5.2	冷凍機システムの立ち上げ	44
5.2.1	冷凍機内へ導入すべきケーブル	44
5.2.2	SFQ チップの冷凍機内実装	46
5.2.2.1	単体動作試験用測定系の構成	48
5.2.2.2	SFQ TDC の冷凍機内動作一例	49
5.2.2.3	SFQ TDC の測定精度	50
5.2.2.4	動作余裕度	52
5.3	超伝導分析システムの構築	54
5.3.1	二冷凍機を用いた分子分析	54
5.3.1.1	分析装置	54
5.3.1.2	SFQ TDC の測定条件	55
5.3.1.3	SFQ TDC を用いた高分子の分析実験	55
(i)	リゾチームの分析	55
(ii)	免疫グロブリン G (IgG) の分析	60
5.3.2	単一冷凍機を用いた分子分析	61
5.3.2.1	分析装置	61
5.3.2.2	SFQ TDC の測定条件	63
5.3.2.3	SFQ TDC を用いた高分子 (リゾチーム) の分析実験	63
5.3.2.4	半値幅による測定精度の評価	65
5.3.3	ノイズピークの原因と対策	67
5.4	まとめ	68

第6章 カレントリサイクル SFQ TDC.....69

6.1 本章の概要.....	69
6.2 SFQ TDC のバッファ容量増大のための課題.....	69
6.3 カレントリサイクル.....	70
6.3.1 バイアス供給方法.....	70
6.3.2 非接触信号伝送回路 (driver/receiver 回路).....	71
6.3.2.1 driver/receiver 回路の動作.....	71
6.3.2.2 磁気結合部の構造.....	72
6.3.2.3 垂直構造のグラウンド電流に対する耐性の評価.....	73
6.3.2.4 寄生インダクタンスの低減.....	75
6.4 カレントリサイクル技術の SFQ TDC への適用.....	76
6.4.1 冷凍機内動作のため低減すべき電流量.....	76
6.4.2 SFQ TDC の低電流化.....	76
6.4.3 3×24-bit のカレントリサイクル SFQ TDC の測定結果.....	79
6.5 バッファの大容量化.....	81
6.5.1 12×24-bit のカレントリサイクル SFQ TDC の設計.....	81
6.5.2 12×24-bit のカレントリサイクル SFQ TDC の測定結果.....	83
6.5.2.1 D/R 回路の評価結果.....	83
6.5.2.2 カウンタの評価結果.....	84
6.5.2.3 TDC の全体の動作結果.....	85
6.6 まとめ.....	89

第7章 結論.....90

7.1 本研究のまとめ.....	90
7.2 今後の課題.....	92

謝辞

参考文献

研究業績

第 1 章 序論

1.1 背景

1.1.1 巨大分子の質量分析

アルツハイマー病に代表される特定疾患の解明・治療法の開発のため、高精度な質量分析によるタンパク質などの生体高分子の凝集体形成メカニズムの解明が求められている。現在、構成の単純さ、高分解能性、高感度性から飛行時間型質量分析 (TOF MS, time-of-flight mass spectrometry) 法が高分子の質量分析に広く用いられている[1]-[3]。TOF MS 法とは、試料に一定のエネルギーを加え加速・飛行させ、検出器までの飛行時間から質量電荷比 (m/z) を算出する手法である。タンパク質の質量分析のためには、タンパク質を気化させイオン化させる必要がある。以前は、電子やキセノン原子の衝突による大きなイオン化エネルギーを与えており大型の生体分子は破壊され分析が困難であった。しかし、1987 年以降では、Karas 氏や田中氏らにより小エネルギーでイオン化可能なマトリックス支援レーザー脱離イオン化 (MALDI, matrix assisted laser desorption/ionization) 法[4], [5]が開発され、分子量が数万から十万を超す分子の質量分析が可能となっている。本手法の実用化には田中氏の研究成果に依るところが大きく、同氏は 2002 年にノーベル化学賞を受賞している。

上述の通り、現在では MALDI 法の開発により分子量十万を超す巨大分子の分析が可能となったが、理想的な TOF MS を実現するためにはイオンの検出効率の均一性と分子量に依存しない応答を実現可能なイオン検出器が必要となる[6]。現在、イオンにも感度を持つ電子倍增素子 (MCP, micro channel plate) [7]が質量分析に広く使われている。しかし、MCP 検出器には、検出効率が分子量に大きく依存し、分子量が数十万を超える検出対象に対する検出効率は極めて低い[8], [9]。Oberheide らの MCP 検出器[10]を用いた検出効率 Q_i の分子量依存性に関する解析結果の一例を図 1.1[9]に示す。図中の曲線はイオンへの印可電圧 [keV] ごとの検出効率を示している。また、同図中の四角のプロット、三角のプロットは、それぞれ Twerenbold らによる実験結果[11]及び Frank らの実験結果[12] (30 keV 印可時) を示す。図 1.1 より、検出効率の分子量依存は極めて大きく、分子量十万に対する感度は 20%を切り、実験値に至っては 5%に満たない。このこ

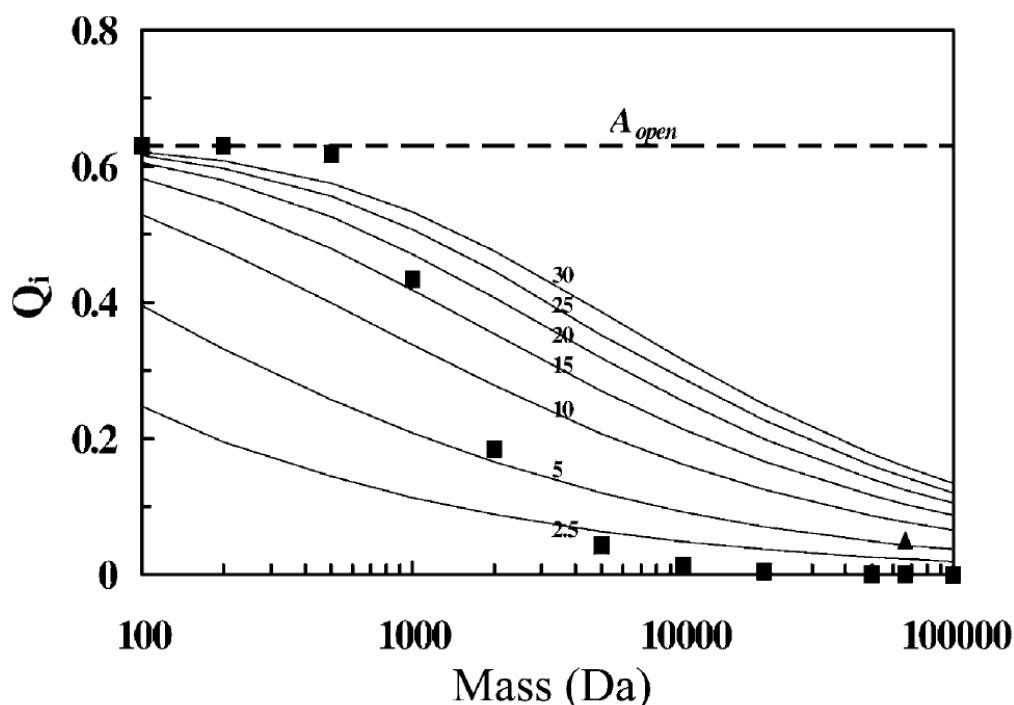


図 1.1 分子量 (Mass) に対する MCP 検出器の検出効率 Q_i の解析結果一例[9].

とから、現在分析可能な分子量は検出器の分子量依存性により大きく制限されていることが分かる。今後の巨大分子の分析のため、分子量依存のない高検出効率の検出器の存在が求められる。

1.1.2 超伝導検出器の開発

先述の通り、従来より広く用いられてきた MCP 検出器には、分子量に依存し検出効率が大きく低下するという課題が存在した。また、同検出器には同じ質量電荷比 (m/z) を持つイオンを判別できない等の課題も存在する。これらの問題を解決するため、超伝導体を用いた検出器が提案されている[13]-[15]。近年、超伝導ストリップ粒子検出器 (SSPD, superconducting strip particle detector) [16]-[19]や超伝導トンネル接合検出器 (STJ, superconducting tunnel junction) [20]-[22]などの超伝導検出器の研究がされている。超伝導検出器は、イオン衝突時に生じるフォノンにより超伝導状態が破壊されることを利用しており、分子量に依存しない高感度検出が可能である。STJ 検出器と MCP 検出器の分析結果の比較結果の一例を図 1.2[15]に示す。この論文[15]における実験では、多量体を

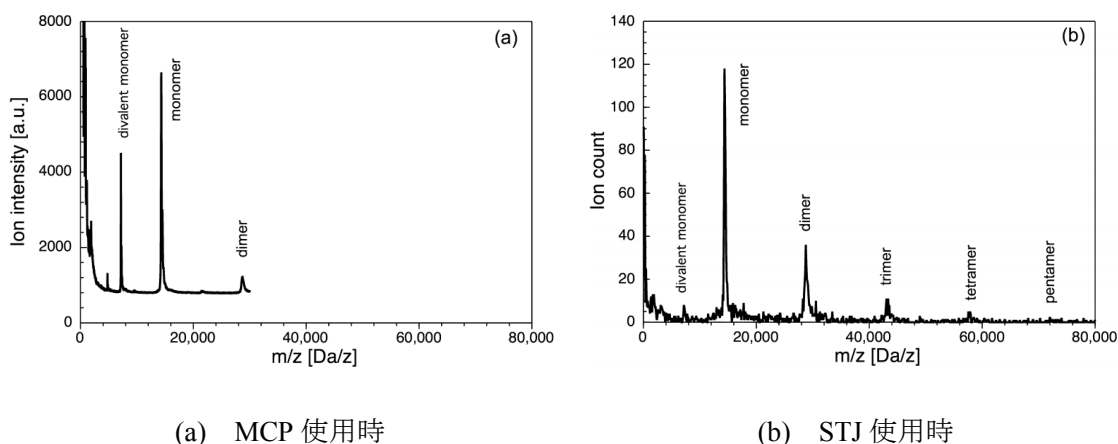


図 1.2 リゾチームのマスペクトルの取得例[15]

多く作る分子量 14,350 のリゾチームを対象としている。同図より、MCP 検出器においては分子量 10,000 を超えた辺りで検出効率が急速に低下し、三量体以上のリゾチームを観測できていないことが分かる。一方、STJ を用いた場合、五量体のスペクトルも観測でき STJ 検出器の検出効率の高さが確認できる。また、STJ 検出器においては、検出器表面に付与された運動エネルギーも測定可能であり質量電荷比の判別も可能である [23]。SSPD は、分子量に依存しない検出効率に加えてサブ ns の高速応答性も備えている [16]-[19]。検出器の高速応答性は、TOF 測定における高時間分解能性に繋がり高分子分解能を実現する。これらの超伝導検出器を用いた巨大分子の高検出効率かつ高精度な質量分析の実現が期待されている。

上述の通り、SSPD は原理的には高速応答性に優れているが、実際の応答速度は検出器のインダクタンス値に制限されてしまう [16], [17]。この制限により応答速度と検出器の有感面積はトレードオフの関係にある。有感面積を向上させるため、SSPD を構成するナノストリップを平行に配置した構造も提案されているが、応答速度を落とさずに実現されているのはせいぜい $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 程度である [19]。従来の検出器の有感面積が数 cm^2 以上であることを考えると、この有感面積は決して十分とは言えない。検出器をアレイ状に並べることで実質的な有感面積の向上を図ることができ、同時に検出器の多チャンネル化により検出信号の高速化も望める。しかし、単純に SSPD をアレイ化するだけでは室温への読み出し配線数の増大により冷凍機内への熱流入及び超伝導検出器積

載チップの温度上昇による動作不良が懸念される。また、アレイ化した多チャンネル検出器を用いる場合、SSPDの各チャンネルから平行に同時出力される信号の検出時間を高速かつ連続的に測定可能な時間デジタル変換器 (TDC, time-to-digital converter) が必要となる。本研究では、超伝導検出器と同一温度ステージで動作可能であり、また、将来的に超伝導検出器と同一チップ上に集積可能な超伝導論理回路である単一磁束量子回路に注目した。

1.1.3 単一磁束量子回路の背景

1962年にJosephsonにより予想されたJosephson効果(超伝導体間のトンネル効果)[24]を端として単一磁束量子(SFQ, single-flux-quantum)回路の歴史は始まった。翌年には、AndersonらによりJosephson効果を利用した素子が実現され[25]、その翌年からはIBMにてこのJosephson接合の高速デジタル回路への応用研究が始まった[26]。1967年には、MatisooによりJosephson接合のサブnsの高速のスイッチとJosephsonデバイスのフリップフロップが実証された[27]。IBMに触発され、日本国内でも電子技術総合研究所(産業技術総合研究所の前身の機関の一つ)、電電公社(現在のNTT)、富士通、日立製作所、日本電気、三菱電機など様々な研究所・企業においてもJosephson接合を用いたコンピュータの研究が開始された。その一方で、1983年に突如IBMがJosephsonコンピュータプロジェクトを中止した[28]。この時点でのJosephson接合に用いられていた材料は鉛合金であり、その歩留まりや耐温度サイクル性が大きな課題であった。本問題は、NbやNbNなどの機械的に硬い材料を用いることで解決可能となったが、当時のラッチング論理方式と呼ばれるJosephson接合の使用法では動作周波数はせいぜい数GHz程度であり、また、1ゲートあたりの消費電力は $\sim 10 \mu\text{W}$ 程度となり半導体素子への優位性も失われつつあった。しかし、1980年代後半から1990年代にかけ、中島らにより提案されていたSFQ論理方式[29]がMukhanovらによりRSFQ(rapid SFQ)論理[30]として体系化され、サブTHzの高速動作と数nWの低消費電力の実現性が示された。ラッチング論理方式では、パンチスルー現象により動作周波数が制限され、また、接合が一度スイッチすると電源を切るまで接合は電圧を生じ続け電力が無駄に消費される。一方で、RSFQ方式は、構成する超伝導ループ内の磁束の有無で論理状態を決定し、接合のスイッチング時間はわずか数psである。このため、電圧が生じるのはSFQが接合を通過する数psの間のみであり、これによりラッチング方式と比較し3桁もの低消費

電力化が可能となった。その後、RSFQ回路の高速動作性は770 GHzでのフリップフロップの動作報告など実験的に実証され[31]、また回路作製プロセスの進歩により現在では既に一万接合を超える大規模回路の動作実証にも至っている[32]-[34]。

以上のようにNbの使用やRSFQ論理による性能向上、また、作製プロセスの向上による大規模回路の実証などRSFQ回路は着実に実用化に近づいていると言える。そこで、次のステップは、より実用性を示すための大規模回路の冷凍機内動作実証であると考えられる。RSFQ回路のスイッチ時の消費電力は上記の通り極めて低いが、回路の動作には一定のバイアス電流の供給が必要でありこの電流供給部の抵抗における静的消費電力がボトルネックとなっている。実際、現在冷凍機内での動作実証に成功しているRSFQ回路は数百接合程度のものであり[35]、数千接合規模の回路に至っては完全動作に至っていない[36]。このため、現在では冷凍機内動作も考慮し、更なる低消費電力性を有するLR-RSFQ[37]、[38]、低電力RSFQ[39]、ERSFQ/eSFQ[40]-[42]、RQL (reciprocal quantum logic) 回路[43]、QFP (quantum flux parametron) 回路[44]-[47]などの研究も盛んに取り組みられている。近年では、超伝導デジタル回路の低消費電力性・高速動作性が再注目され、米国では多額の予算が投資されたCryogenic Computing Complexity (C3) プログラム[48]が進められている。

1.2 研究目的

本研究では、超伝導検出器 (SSPD) の読み出し・時間デジタル変換器としてRSFQ回路に着目した。RSFQ回路は幅数 ps、ピーク電圧値数百 mV のSFQパルス情報を情報担体とし、半導体集積回路と比較して3桁近く低い消費電力で数百 GHz の高速動作が実現可能である[49]。SSPDと同じく超伝導技術を用いたRSFQ回路をTDCとして用いることで、SSPDと同一の冷凍機内で無理なく両回路を接続することができる。本研究の目的は、高感度性に優れるSSPDと高速動作性に優れるRSFQ回路を組み合わせ、分子量に依存しない高分解能超伝導質量分析システムを構築することである。目標の超伝導分析システム概念図を図1.3に示す。本システムの実現を目指し、本研究では両超伝導回路を組み合わせた分析システムを構築し実際に生体分子の分析実験に取り組む。本分析実験を基に今回構築したシステムの課題を洗い出す。

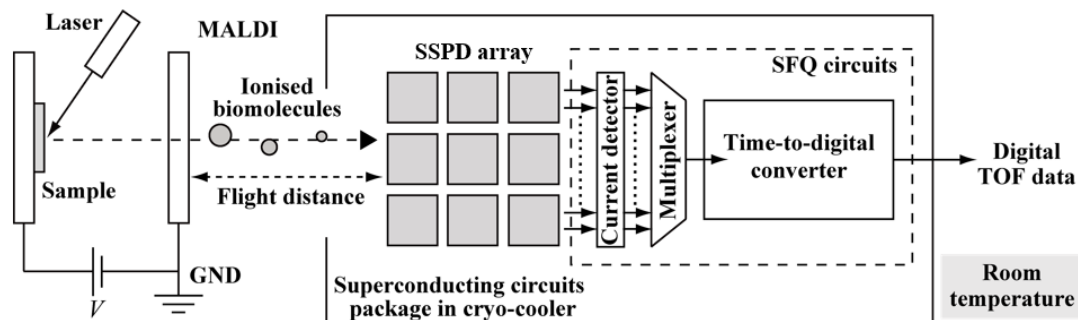


図 1.3 目標の生体分子用超伝導質量分析システム

また、SFQ TDC の拡張とそれに伴う回路規模の増大を考慮し、SFQ 回路用の低電流化技術である「カレントリサイクル技術[50]-[53]」についても検討する。カレントリサイクル技術の研究は数多くされているが、未だ大規模回路への適用成功例は報告されていない。そのため、大規模 SFQ 回路への大電流カレントリサイクルの適用とその実証も本研究のテーマの一つである。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のようになる。

第 1 章では研究背景，研究目的について述べた。

第 2 章では分析手法，超伝導検出器の検出原理及び SFQ 回路の原理・特徴について述べる。

第 3 章では SFQ 回路の作製プロセス，設計方法について述べる。また，本研究で用いた SFQ 回路の測定環境について述べる。

第 4 章では分析システムに用いる SFQ 回路について述べる。

第 5 章では，超伝導回路の冷凍機内実装及び超伝導質量分析システムの構築と生体分子の分析実験について述べる。

第 6 章では，SFQ 回路用の低電流化技術であるカレントリサイクル及び SFQ TDC への適用について述べる。

第 7 章では本研究のまとめとして結論を述べる。

第2章 理論

2.1 本章の概要

本章では、本研究で用いる生体分子用の分析手法、超伝導検出器および単一磁束量子回路の動作原理とその特徴について述べる。

2.2 飛行時間型質量分析法

飛行時間型質量分析 (TOF MS, time-of-flight mass spectrometry) 法は、その構成の単純さ、高分解能性、高感度性から高分子の分析に広く用いられている[1]-[3]。本研究では、特にマトリックス支援レーザー脱離イオン化法 (MALDI : matrix assisted laser desorption/ionization) を用いた MALDI-TOF MS[4][5]を用いる。図 2.1 に本手法の概念図を示す。まず、分析対象の試料にレーザーを照射しイオン化する。イオン化後は、一定の加速電圧 (20~25 kV 程度) を加え検出器まで飛行させ、その飛行時間から質量電荷比 (m/z) を算出する。MALDI 法では、対象分子のイオン化を補助するマトリックスと呼ばれる物質がサンプルに混合されている。与えるエネルギーはどのイオンに対しても一定であるため、質量電荷比 (m/z) の小さいイオンほど速く、大きいイオンほど遅く検出器に到達する。加速電圧を V で飛行距離 l を時間 t で飛行するイオンの質量電荷比 (m/z) は式(4.1)のように表される。また、ここでの e は素電荷量である。

$$\frac{m}{z} = 2eV \left(\frac{t}{l} \right)^2 \quad (2.1)$$

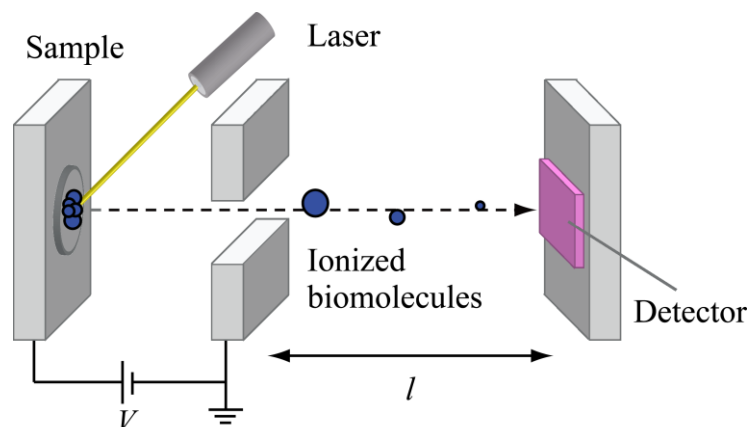


図 2.1 MALDI TOF-MS の原理

リニアモード [54]

先述のような単純にイオン源から検出器までイオンを直線的に飛行させるモードをリニアモードと呼ぶ。リニアモードには、測定できる質量範囲が広い点や高感度性という利点があるが、高い質量分解能を望むことができない。分解能の低下の原因の一つは、MALDI 法におけるイオン化時に与えられる初期エネルギーのバラつきである。このバラつきが生じると同じ質量電荷比 (m/z) を持つイオンであってもその飛行速度がバラつき、飛行時間に広がりが生じ質量分解能が低下してしまう。

リフレクトロンモード [54]

質量分解能の向上のため用いられるのがリフレクトロンモードである。図 2.2 を用いてリフレクトロンモードの原理について述べる。図中の(i)は、●のイオンが初速度を持って、○のイオンが静止した状態で生じた初期状態とする。いずれのイオンにも同じ加速電圧 V_0 を加えてドリフトスペース内を飛行させるが、(ii)に示すように途中まではリニアモードと同様に初期エネルギーを持っているイオンが先行する。しかし、ドリフトスペースを完走しリフレクトロンにイオンが入射すると、リフレクトロン部では電位差に勾配があり●のイオンは初期エネルギーの分だけ余分に坂を登る。その分、●のイオンは○のイオンよりも飛行時間が余計にかかり、両イオンの速度が異なっても最終的に検出器には同時に到達する。このような仕組みをとることでリフレクトロンモードでは高分解能な TOF MS 測定が可能となる。

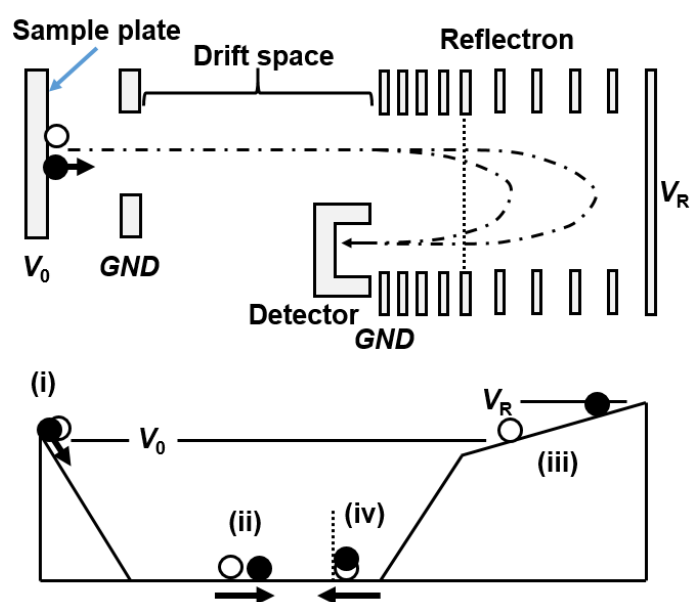


図 2.2 リフレクトロンモードの原理

2.3 超伝導ストリップ粒子検出器

2.3.1 検出原理

超伝導ストリップ粒子検出器 (SSPD, superconducting strip particle detector) は, 図 2.3 の (a)に示すような超伝導体を用いたミアンダ状のナノストリップライン構造をとっている. 材料としては NbN が一般的に用いられ, 膜厚は数 nm から数十 nm, 線幅数百 nm から数 μm である [17]. 動作原理は超伝導ストリップ光子検出器 (SSPD, superconducting strip photon detector) [55]と同様だが, 検出対象が異なるため名称は使い分けている. 以下に, その検出メカニズムについて述べる.

イオンの検出器表面衝突時, フォノンが励起されクーバー対が破壊される. デバイエエネルギー程度のフォノンが励起されるとすると, この時に必要となるエネルギーは数十 meV 程度であり [20], [56], このため SSPD は極めて高感度なイオン検出が可能である. クーパー対の破壊により, ストリップ線上にホットスポットと呼ばれる局所的準粒子励起状態が現れる. この模式図を図 2.3 の (b)に示す. SSPD には予め SSPD の臨界電流値以下のバイアス電流を流しておくが, ホットスポット形成部は局所的に超伝導状態が破壊されており, バイアス電流はホットスポットを避けるように流れる. 臨界電流密度を超える領域 (ホットスポット) は拡大し, ストリップ幅方向全体に渡り常伝導バンドが形成される. これにより, バイアス電流は順方向には流れなくなるが, ナノ秒程度で発生した熱はストリップ線の長さ方向もしくは基板へ拡散しストリップ線は超伝導状態へと戻る [57]. この際に, 半値幅がナノ秒程度の高速度な電流パルスが出力される [17].

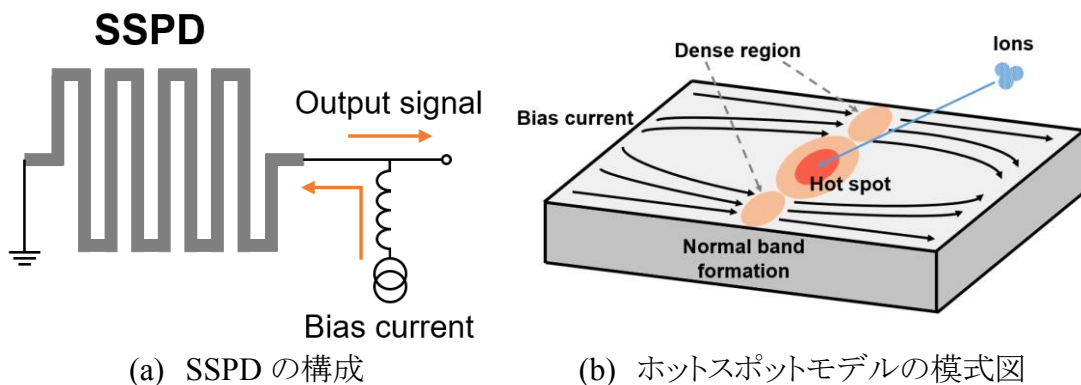


図 2.3 超伝導ストリップ粒子検出器 (SSPD)

2.3.2 応答時間

先述の通り, SSPD は高感度検出に加えて高速応答が期待できる. SSPD の信号の立ち上がり時間 (τ_{rise}) と緩和時間 (τ_{relax}) はそれぞれ次式のように表される[17].

$$\tau_{\text{rise}} = L / (R + R_s) \quad (2.2)$$

$$\tau_{\text{relax}} = L / R_s \quad (2.3)$$

ただし, L はストリップ線のインダクタンス, R はイオン衝突時のストリップ線の抵抗値, R_s は SSPD の出力部に接続される増幅器の入力抵抗である.

式(2.2), (2.3)から, SSPD の応答時間はインダクタンス L により制限されることが分かる. L の低減は応答時間の向上を狙えるが, 同時に有感面積を犠牲にしてしまう. $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ の検出器サイズを持つミランダ SSPD でさえ緩和時間は 7.0 ns に及ぶと報告されており[58], 高速性を保ったままこれ以上の大面積化は困難である. 本問題を解決するため, SSPD を構成するストリップ線を図 2.4 に示すような平行に配置する構造が検討されている[59], [60]. 平行に並べる個々のストリップ線はインダクタンス L_w , とスイッチ時の検出器の抵抗 R で表される. また, 不安定なスイッチを防ぐためにインダクタンス $L_s (\geq L_w)$ を直列に挿入している. このような構成をとることで, 検出器インダクタンス L は式(2.4)に示すように並列に並べる検出器数 N を増やすほど低減することができる.

$$L = (1 + 1/N) L_w \quad (2.4)$$

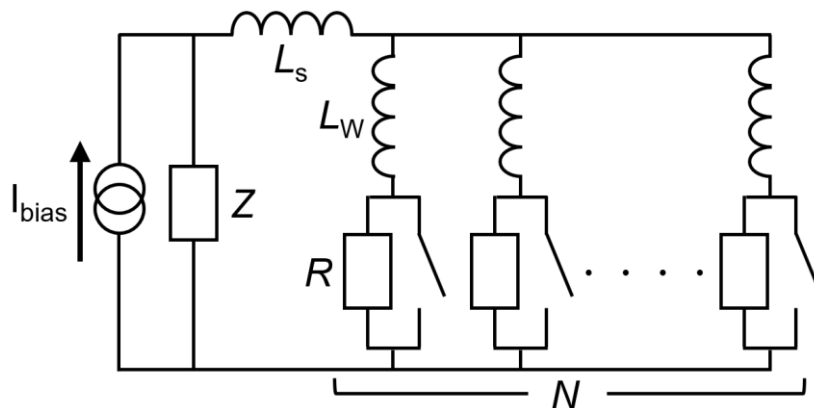


図 2.4 平行型 SSPD

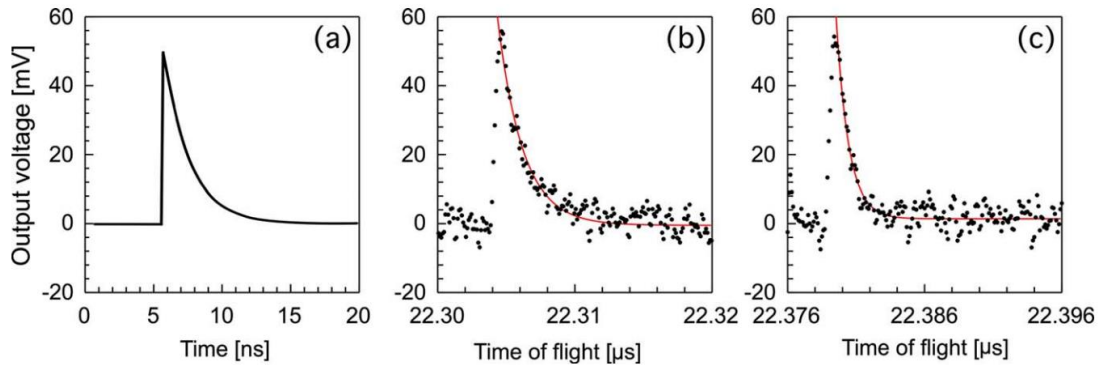


図 2.5 パラレル型 SSPD 信号の一例[18]

実際にパラレル構造を用いた長さ 1 mm の検出器 (検出器サイズは $1 \times 1 \text{ mm}^2$) の実証例が全氏によって既に報告されている[18]. そのパラレル型 SSPD 信号の一例を図 2.5[18]に示す. (a), (b)は, 5 本のストリップ線をパラレルに並べたものを 1 ブロックとして, 51 ブロックを直列接続した際のシミュレーション波形及び実験値である. この結果から, 立ち上がり時間 600 ps, 緩和時間 1.8 ns が得られている. (c)は, 並列させるストリップ線を 10 本に増加させた際の読み出し波形であり, パラレルに並べるストリップ線を増加させることで立ち上がり時間, 緩和時間ともに 1 ns 以下 (立ち上がり時間 520 ps, 緩和時間 920 ps) の高速応答が実現されている. また, 現在では, 同氏によって最大で $2 \times 2 \text{ mm}^2$ の検出器サイズの SSPD の動作実証が報告されている[19]. 一方で, パラレル型構造を用いた検出器サイズの拡大にも限界が訪れており, イオン化レーザーの照射面積に対応した 1 cm 角のサイズを実現させるためには検出器のアレイ化は必要不可欠である.

2.3.3 価数弁別

SSPD は STJ とは異なり個々の粒子の運動エネルギーを測定することはできない. しかし, SSPD は流すバイアス電流を調整することで検出可能な粒子の運動エネルギーの下限を変化させることができる. 粒子の運動エネルギーはイオンの価数に比例するため, SSPD のバイアス電流を低下させながら順次 TOF を測定することで, 1 価以上の全ての, 2 価以上の全てのイオン, 3 価以上の全てのイオンというように条件ごとに n 価以上の全ての TOF のセットを得ることができる. 条件ごとに得られたセットの差分をとることで価数弁別は可能となる[57].

2.4 単一磁束量子回路

まず, 単一磁束量子 (SFQ, single-flux-quantum) 回路におけるスイッチング素子である Josephson 接合について述べ, SFQ 回路の動作原理及び特徴について述べる.

2.4.1 Josephson 接合[61][62]

一般的に, Josephson 接合は二つの超伝導体が弱く結合した構造であり, 図 2.6 に示すように厚さ $l = 1\sim 5$ nm 程度の絶縁層(酸化物バリア)を挟んだ超伝導層-絶縁層-超伝導層 (SIS, superconductor-insulator-superconductor) 構造をとるトンネル接合である. 基礎的な性質として, 電流密度が二つの超伝導層間の各々の巨視的波動関数の位相差 ϕ に依存すること, その位相差は接合の瞬時電圧により時間的に変化することが挙げられる. 各々の特徴は式(2.5), (2.6)のように表される.

$$J = J_c \sin \phi \quad (2.5)$$

$$(I = I_c \sin \phi)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} &= \frac{2e}{\hbar} V \\ &= \left(\frac{2\pi}{\Phi_0} \right) V \end{aligned} \quad (2.6)$$

ただし, J はトンネル電流 I の電流密度であり, J_c は接合の臨界電流密度 (I_c は臨界電流値), V は超伝導体間の電位差である. また, Φ_0 は磁束の最小単位である磁束量子の磁束量 (2.07×10^{-15} Wb) である.

Josephson 接合に I_c 以下の定電流を加えると接合にゼロ電圧で電流が流れ, また, 印加電流値が I_c を超えると電圧が生じ電圧値に比例した周波数 ($f = (1/2\pi) \cdot (2e/\hbar)V$) の交流電流が流れる. このような振る舞いを Josephson 効果と呼ぶ.

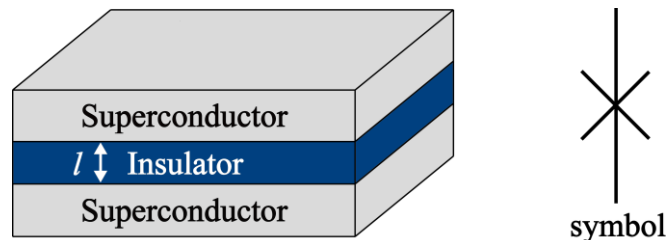


図 2.6 Josephson 接合の構造

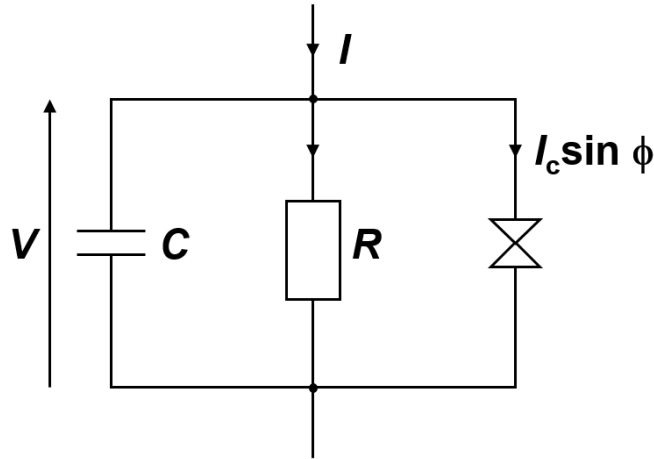


図 2.7 ジョセフソン接合の等価回路図

Josephson 接合の等価回路は図 2.7 のように表され, これを RSJ (resistively shunted junction) モデルと呼ぶ. 接合を流れる全電流 I は次式のように表される.

$$I = I_c \sin \phi + \frac{V}{R} + C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.7)$$

これは, 接合を流れる電流を静的状態で得られた Josephson 電流と常伝導トンネル電流, 変位電流の和で表したモデルである. 式(2.7)に対し, $\theta \equiv \frac{2\pi I_c R}{\Phi_0} t$ という変数変換を行い, 式(2.6)を代入すると次式を得ることができる.

$$\frac{I}{I_c} = \sin \phi + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \beta_c \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \quad (2.8)$$

ただし,

$$\beta_c = \frac{2\pi I_c R^2 C}{\Phi_0} \quad (2.9)$$

β_c は McCumber パラメータと呼ばれ, Josephson 接合の I - V 特性を決める重要な値である. I - V 特性は, β_c の大小により次の二種に分けられる.

β_c が 1 以下の場合(図 2.8(a))には, 臨界電流値 I_c 以上の電流に対して電圧が発生し I - V 特性は抵抗体の特性に漸近する. このような I - V 特性を持つ接合をオーバードンプ型と呼ぶ. 一方, β_c が 1 よりも十分に大きい時(図 2.8(b))には I - V 特性にはヒステリシスが現れ, このような接合をアンダーダンプ型と呼ぶ. アンダーダンプ型では, 一定範囲の電流値に対してはゼ

ロ電圧状態と有電圧状態の 2 状態が存在し, β_C が大きくなるとこのヒステリシスは大きくなる. スイッチング素子として用いる場合は, ヒステリシスを持たないアンダーダンプ型が望ましい. そのため, 一般的に接合にシャント抵抗と呼ばれる並列抵抗を接続し, 接合間の実効的な抵抗値を調整する手法が取られている.

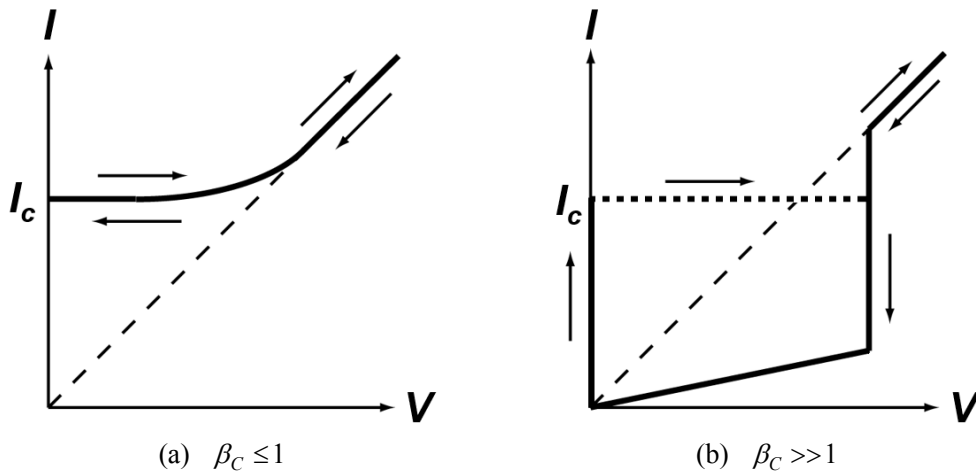


図 2.8 Josephson 接合の I - V 特性

ただし, 有電圧状態では Josephson 交流効果により交流電流となり振動するが, 図中では平均をとり曲線は滑らかにしてある.

2.4.2 SFQ 回路の動作原理

SFQ 回路は図 2.9 に示すような Josephson 接合を挟んだ複数の超伝導リングによって構成される. 超伝導体はマイスナー効果により内部に磁束は侵入しないがリング内を通過することは

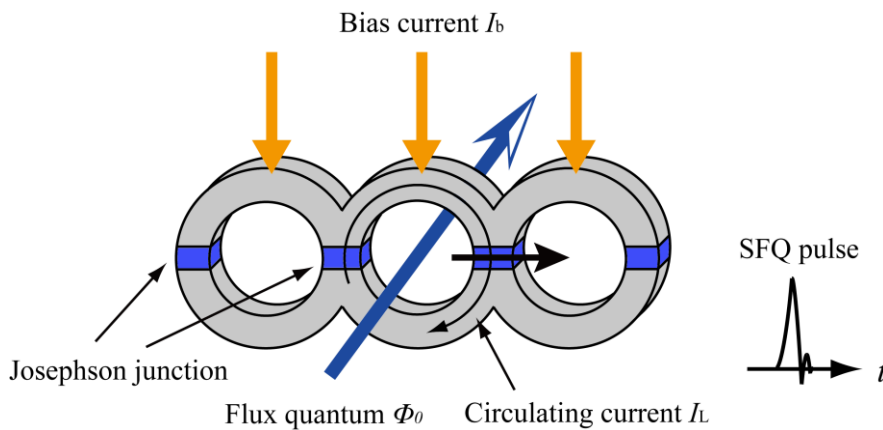


図 2.9 SFQ 回路を構成する超伝導リング

できる。このとき、超伝導リングを貫く磁束の値は磁束量子 1 個の磁束量 Φ_0 の整数倍となる。これを磁束の量子化という。SFQ 回路は、この磁束量子一つ (SFQ) を情報担体とし超伝導リング内の磁束量子の有無で“1”と“0”を表現する。図 2.9 を用いて SFQ 回路の動作原理について述べる。超伝導リングには予めバイアス電流が供給しておく。この状態で、インダクタンス L の超伝導リングに SFQ が入力されると、リングに式(2.10)で表される循環電流 I_L が流れる。

$$I_L = \frac{\Phi_0}{L} \quad (2.10)$$

SFQ 回路の動作において、超伝導リングのインダクタンス L とリングに含まれる Josephson 接合の I_c の値の組み合わせが極めて重要である。この L と I_c の積と SFQ の磁束量 Φ_0 の関係により以下のように SFQ 回路の動作は変わる。

i) $LI_c < \Phi_0$ の時

I_L が臨界電流値 I_c を超え循環電流の流れ込んだ接合がスイッチし、入力された SFQ はローレンツ力により隣接する超伝導リングへと移る。SFQ の出力されたリング内には循環電流がなくなり、接合はゼロ電圧状態に戻る。この際にパルス状の電圧が生じ、この SFQ パルスが回路内を伝搬していく。このような回路は JTL (Josephson transmission line) と呼ばれ SFQ 回路における信号伝搬線路として用いられる。等価回路とその入出力特性の一例を図 2.10 に示す。図の 2.10 の(b)に示す通り、SFQ パルスは幅数 ps、振幅数百 μV 程度の急峻かつ微小なものとなる。 LI_c の最適値は回路によるが、基本的には $0.7I_c$ 程度の I_b が予め供給されるものとし LI_c は $0.5\Phi_0$ 程度を目安としている。

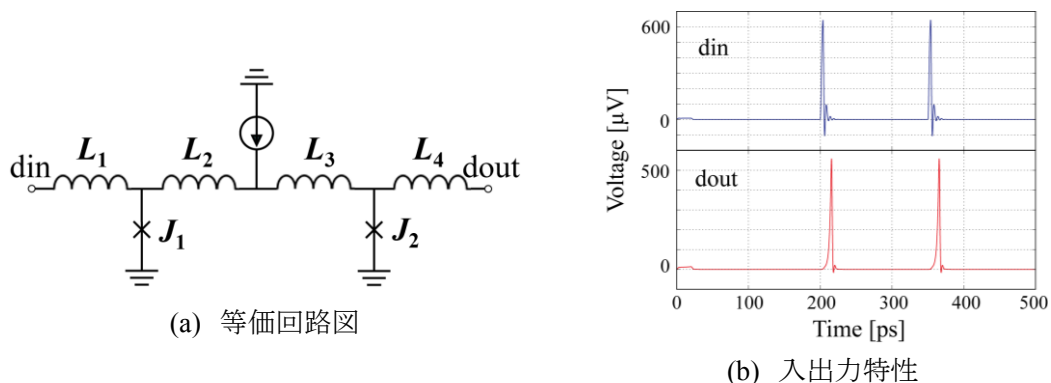


図 2.10 Josephson transmission line (JTL)

ii) $LI_c > \Phi_0$ の時

I_L が臨界電流値 I_c 未満であり接合はスイッチしないので SFQ はリング内に留まり続ける. この性質を利用することで delay flip flop (DFF) などのラッチ回路や様々な論理ゲートが実現可能となる.

一例として DFF 回路の等価回路図, 状態遷移図, 入出力特性を図 2.11 に示す.

図 2.11 の(a)における接合 J_2 , インダクタンス L_4, L_5, L_6 , 接合 J_3 からなる超伝導リングを先述の保持用のループとして設計することで DFF を構成することができる. 保持された SFQ は読み出し用信号 (clk 信号) の入力により出力させることができる. 伝搬用のループの LI_c を $0.5\Phi_0$ 程度としたのに対し, 保持用のループの LI_c は $1.5\Phi_0$ 程度として設計する. また, DFF には, J_6 のようなグランドに落ちずに超伝導リング内に含まれる接合があるが, これは, 保持用のループに SFQ が保持されていない時に clk 信号が入力された場合に J_6 をスイッチさせ DFF の内部状態を維持させるためのものである. このような接合をエスケープ接合と呼ぶ.

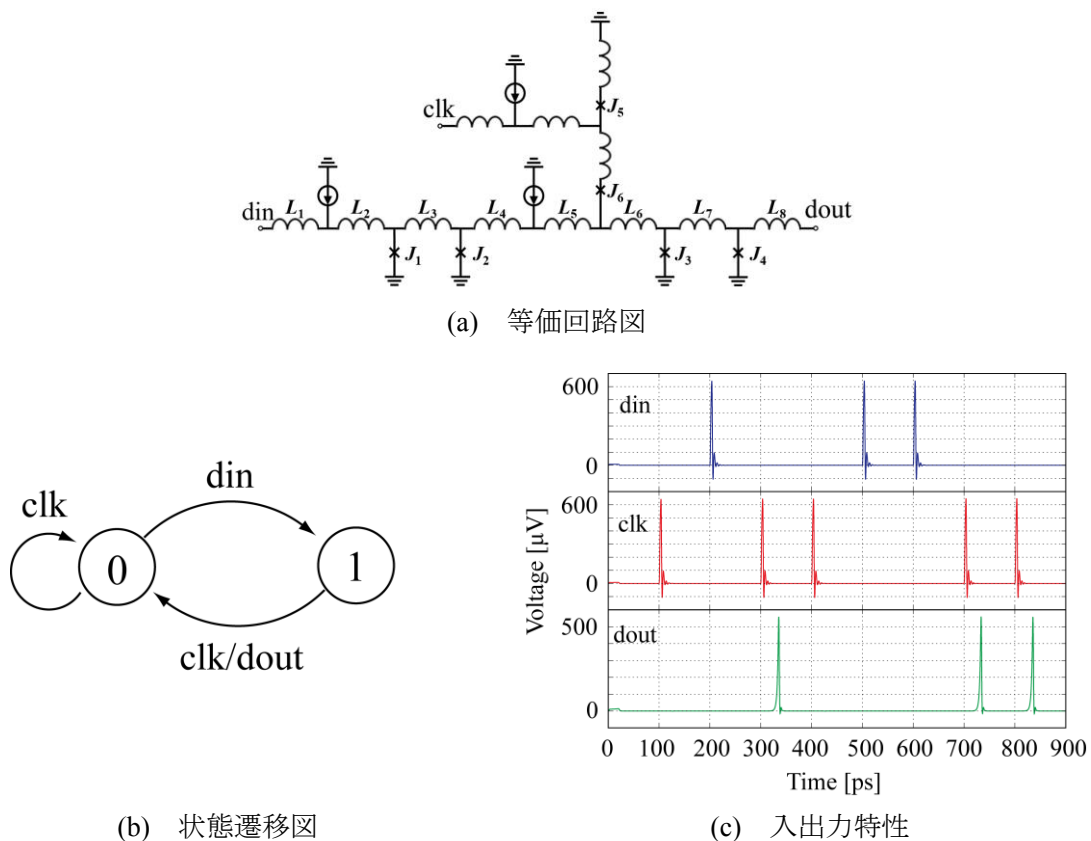


図 2.11 delay flip flop (DFF)

2.4.3 SFQ 回路の特徴

SFQ 回路の大きな特徴は、その低消費電力性と高速動作性である。以下にそれぞれについての詳細を述べる。

低消費電力性

SFQ 回路の電力消費は次の二つに分けられる。一つは Josephson 接合のスイッチング時に生じる動的消費電力である。もう一つは SFQ 論理回路へのバイアス供給部の抵抗で生じる静的消費電力である。

SFQ 論理回路の本質的な電力消費は接合のスイッチング時の動的消費電力である。接合のスイッチングの周波数を f とすると、臨界電流値 I_c の接合で消費される電力は式(2.11)のようになる。

$$\int I_c V(t) dt \cdot f = I_c \Phi_0 f \quad (2.11)$$

式(2.11)から SFQ 回路の動作時に消費される 1 接合あたりの電力はせいぜい数十 nW 程度と見積もられる。この半導体デバイスの 3 桁以下の低消費電力性が SFQ 回路の特徴の一つである。

しかし、SFQ 回路は超伝導体を用いたデバイスであり、その冷却コストが問題となる。また、静的消費電力については、一般的に SFQ 回路の回路規模、つまり動作に必要なバイアス電流量の増大に伴い増加する。現在の SFQ 回路の電力消費を制限しているのは主にこの静的消費電力である。1 章で述べたように、本課題を解決するため LR-RSFQ[37], [38], 低電力 SFQ[39], ERSFQ/eSFQ[40]-[42], RQL (reciprocal quantum logic) 回路[43], QFP (quantum flux parametron) 回路[44]-[47]など様々な低消費電力超伝導回路の研究が進められている。

高速動作性

SFQ 論理回路は磁束量子の有無で“1”と“0”を表すパルス論理回路であり、伝搬パルスのパルス幅は数 ps、電圧値は数百 μV 程度である。このため、半導体回路のように配線の電圧を閾値まで充電し等電位にする必要がなく配線遅延が生じずに配線上に次々と SFQ パルスを送り込むことができる。その結果、高いスループットが実現可能となる。どれほど高速に SFQ パルスを送り込めるかは SFQ パルスの幅で決まる。パルス幅 τ は、Josephson 接合の常伝導抵抗 R 、

臨界電流値 I_c , 磁束量子 Φ_0 により次式のように与えられる.

$$\tau \equiv \frac{\Phi_0}{I_c R} \quad (2.12)$$

式(2.12)より, Josephson 接合のスウィッチング時間は $I_c R$ 値により決定される.

また, 接合の臨界電流密度を J_c , 単位体積あたりの接合容量を C_0 とし, β_c により $I_c R$ を表すと式(2.13)のように書き換えられる.

$$I_c R = \sqrt{\frac{I_c \beta_c \Phi_0}{2\pi C}} = \sqrt{\frac{J_c \beta_c \Phi_0}{2\pi C_0}} \propto \sqrt{J_c \beta_c} \quad (2.13)$$

式(2.13)より, J_c や β_c が大きいほどスウィッチング速度が上がる. 一方で, β_c の大きい接合はヒステリシスを持つため, プロセス開発によるより高い J_c の実現が望まれる.

現在, 日本国内で主に用いている回路作成プロセスは AIST 2.5 kA/cm² Nb standard process (STP2)[63]と AIST 10 kA/cm² Nb advanced process (ADP2) [64]の二種である. 現在の回路作製プロセスでも SFQ 回路は半導体回路に比べて数十倍高速に動作するが, 今後より高い $I_c R$ を持つ接合が開発され微細化技術が進化すれば更なる高速化が見込まれる.

第3章 SFQ回路の設計法と測定環境

3.1 本章の概要

この章では、まず、SFQ回路の作製プロセスについて触れ、続いてSFQ回路の設計手順について述べる。最後にSFQ回路単体の動作評価に用いる測定環境について触れる。ただし、本研究における超伝導分析システムにて用いる極低温冷凍機については第5章にて述べる。

3.2 SFQ回路の作製プロセス

本研究では、CAD (computer-aided design) システム上で作成したマスクレイアウトデータを基に産業技術総合研究所 (AIST, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) に依頼し作製されたチップにて測定・評価を行なっている。

本研究では、AIST 2.5 kA/cm² Nb standard process (STP2)を用いて回路を設計している。これは、NECにて開発された図3.1示す回路作製プロセス[63]を基にAISTにより発展させられたプロセスである。図に示すように、マスクレイアウトのレイヤーは、ground plane (GP)、モリブデン (Mo) を用いた抵抗層、下部配線層である base (BAS), Josephson 接合用の JJ 層、AlO_xを用いた Josephson protection (JP) 層、上部配線層である COU 層及び各層のコンタクトから構成される。Josephson 接合は、JJ 層で上部電極が、BAS 層で下部電極が形成される。現在用いている STP2 プロセスでは、更に CTL 層 (同時に追加される SiO₂ 層同様厚さは 500 nm) と呼ばれる Nb 配線層が最上層に追加されている。

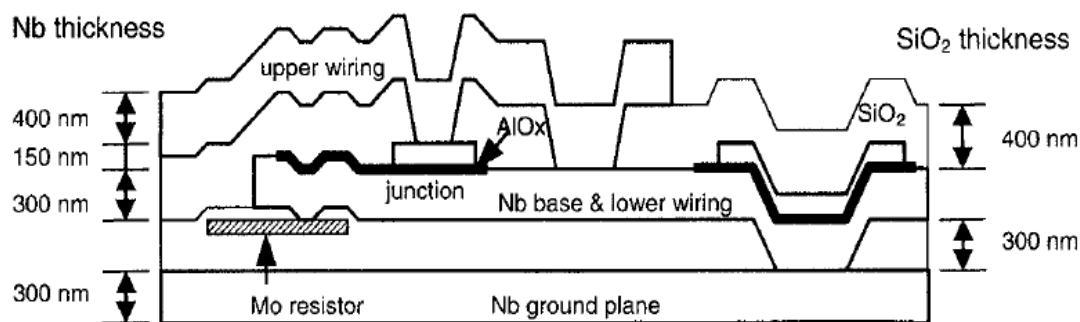


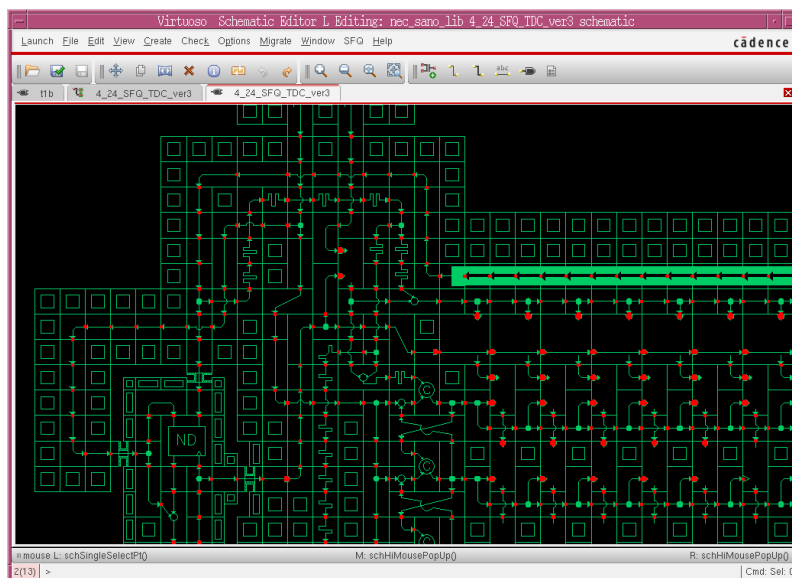
図 3.1 NEC 2.5 kA/cm² Nb standard process (STP) のチップ断面図[63]

3.3 設計法

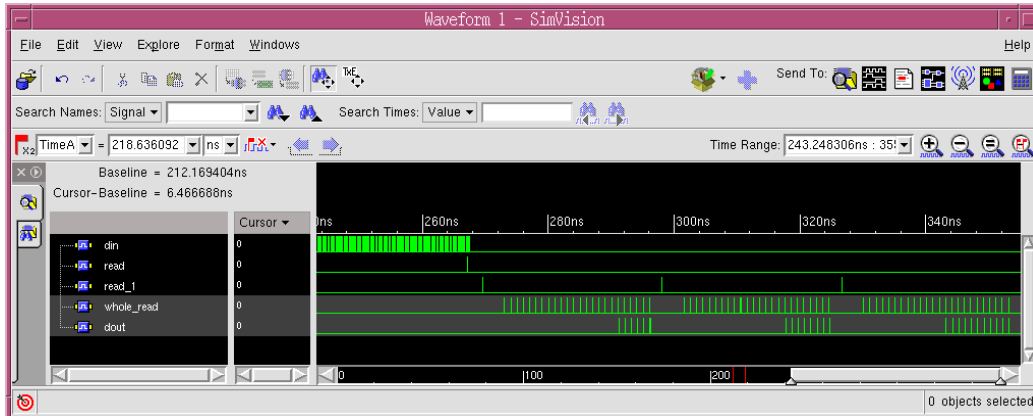
3.3.1 セルベース設計法

小規模の SFQ 回路については SPICE 系シミュレータである JSIM[65]を用いて設計される。JSIM は Josephson 接合を含む回路のアナログシミュレータとして U.C. Berkley で開発された。一方で、大規模 SFQ 回路の設計については、計算時間の点から JSIM による効率的な設計が難しく、セルベース設計法[66]が用いられる。これは、予め必要となる SFQ ゲートを一つのセルとして作成しデータベース化（セルライブラリ化）しておき、設計時に必要なセルをライブラリを参照し利用する手法である。また、ライブラリに登録するセルの素子パラメータは、名古屋大により開発された最適化ツール SCOPE[67]により最適化する。

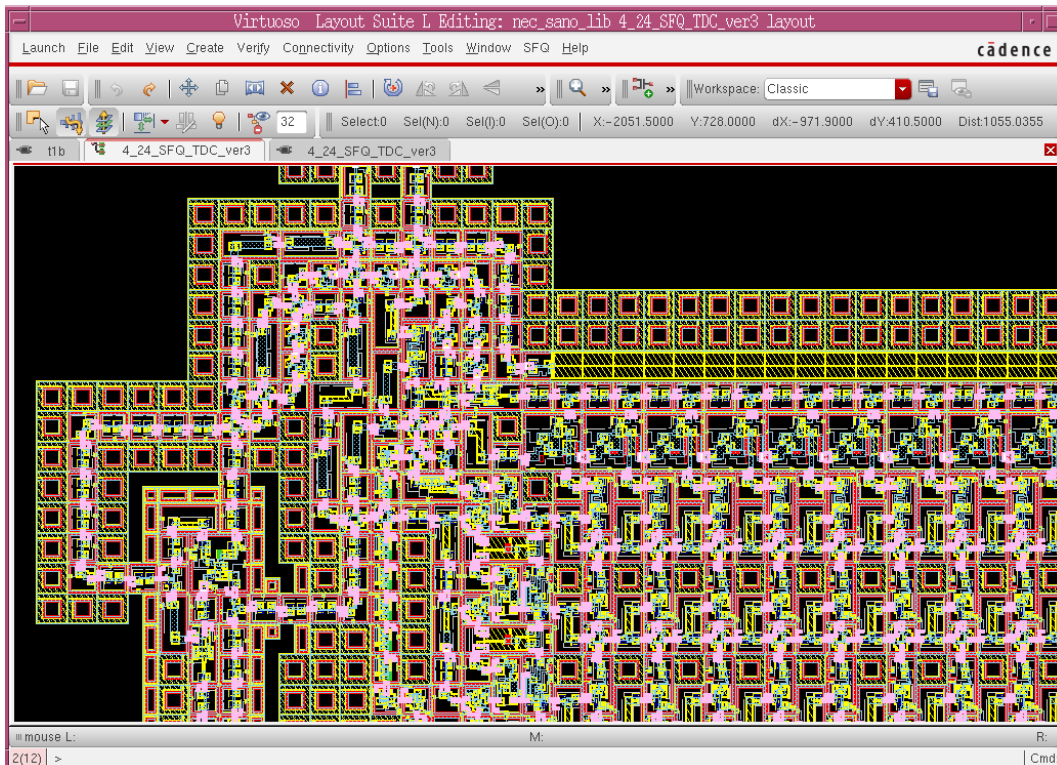
本研究では、小規模回路にて JSIM 及び scope を、大規模回路にて各セルのタイミングパラメータを用いたデジタルシミュレーションとして Verilog-XL[68]を用いて回路設計を行った。図 3.2 に Verilog-XL を用いたセルベース設計例を示す。まず、図 3.2 の(a)のようにライブラリに登録されたセルをタイル状に並べ回路を設計し、(b)のように回路内を伝搬するパルス信号の遅延をシミュレーションする。目標の回路動作を満たした後は、(a)の schematic view から(c)に示すようなレイアウトを作成する。以上のように作成したレイアウトデータを AIST へ送りデバイス作製を依頼する。



(a) schematic view



(b) circuit timing simulation



(c) layout view

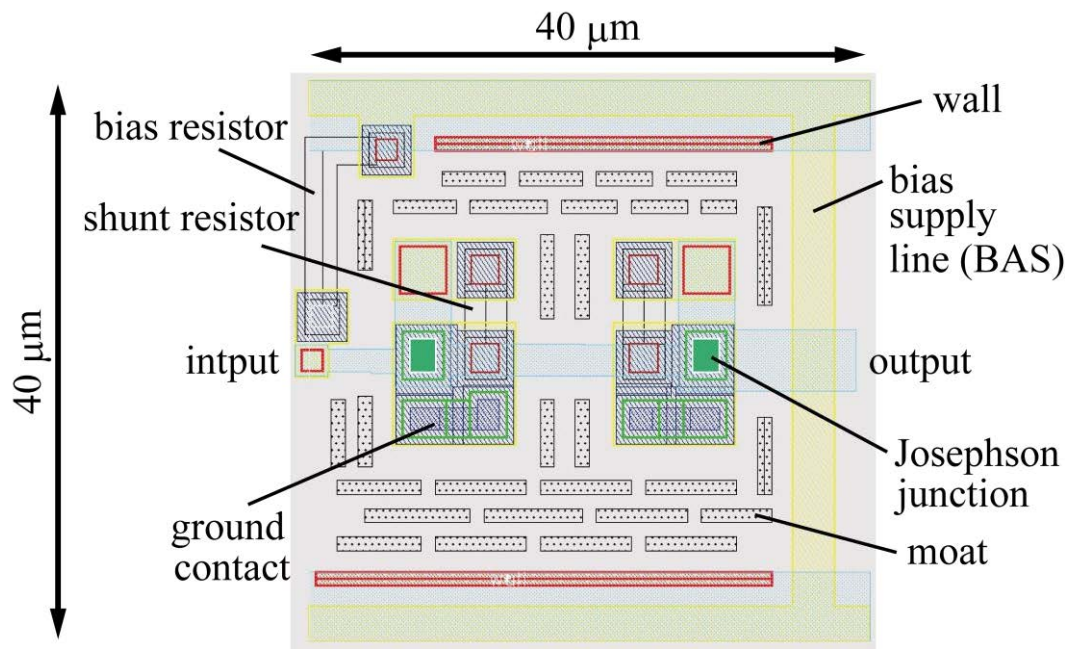
図 3.2 セルベース設計法の設計手順例

3.3.2 CONNECT セル

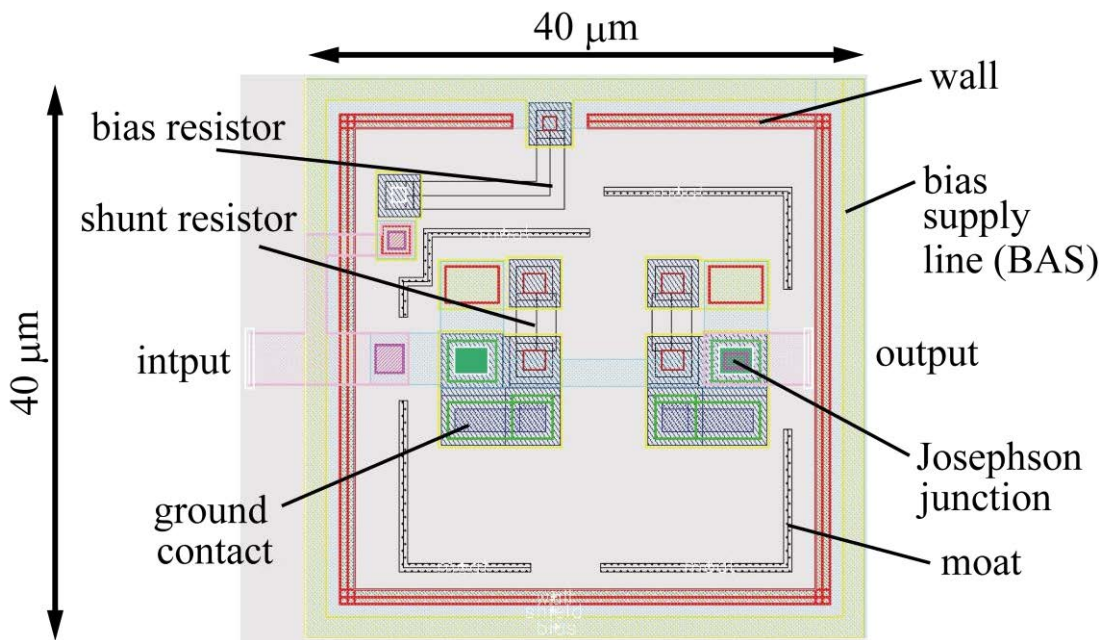
CONNECT セルライブラリは, 超電導工学研究所, 情報通信研究機構, 横浜国立大学, 名古屋大学によって共同開発された[69]. CONNECT セルライブラリは, $NEC\ 2.5\ kA/cm^2$ Nb standard process (STP) 用に構築されたライブラリであり, 基本素子や論理セルが 350 個以上登録されている. 各セルには, それぞれ等価回路図, CAD 上のレイアウト, 入出力情報, シンボルなどの情報が登録されている.

現在使用している STP2 には OPEN 構造と SUSHI 構造という二種類の構造が用いられており, 両構造共にセルライブラリに登録されている. 一例として, 図 3.3 の(a), (b) のそれぞれに JTL (Josephson transmission line) セルの OPEN 構造のレイアウトと SUSHI 構造のレイアウトを示した.

バイアス電流は BAS 層 (図中の黄色の層) からバイアス抵抗を通して Josephson 接合へ供給される. バイアス電流はセルの周囲を縦横無尽に流れ, その際に生じる磁場が SFQ 回路の動作に影響を与えうる. この影響を抑えるため, wall 周辺のバイアス供給配線部には超伝導磁気シールドとして COU 層 (図中の青色の層) を被せている. wall とは COU 層と GP 層を接続している積層コンタクトである. ただし, OPEN 構造においてはセルの入出力の配線に COU 層を用いているため, セルの信号入出力部にはこのシールド構造は使用できない. OPEN 構造に対し, セルの外周全体にシールド構造を持たせた構造を SUSHI (SUPERconducting SHield) 構造という[70]. 本構造においては信号入出力線には CTL 層 (図中のピンク色の層) を用いる. 本構造を用いることで動作余裕度が改善されるが, 積層構造 (wall 等) を信号線が横切る構造はプロセス上困難である. このため, 本来絶縁されるべき配線同士の短絡 (層間リーク) のリスクが高まり歩留まりは悪化する. また, 両構造共に冷却時の磁束トラップのリスクを軽減するため moat 構造[71]と呼ばれるグランド層を抜いた構造を持つ.



(a) OPEN 構造 (JTL)



(b) SUSHI 構造 (JTL)

図 3.3 JTL セルのレイアウト

3.4 SFQ 回路の測定環境

3.4.1 測定系

本項では, SFQ 回路単体の液体ヘリウム中での評価を目的とした測定系について述べる. SFQ 回路の極低温冷凍機内実装やその評価については第 5 章にて述べる.

図 3.4 に測定系の概略図を, 図 3.5 に測定系の外観を示す. Nb の超伝導転移温度が 9.2K であるため, SFQ 回路を測定する際には 4.2K の液体ヘリウム中 (図 3.6) にチップを浸して測定を行う. また, SFQ チップはボンダー (図 3.7) によってチップキャリアにアルミワイヤでボンディングされている (図 3.8). チップキャリアは, 測定プローブ (図 3.9) に取り付けられており, プローブの先端は外部磁場を遮断するために高透磁率の μ -metal 磁気シールド (図 3.10) が二重に取り付けられている. 我々は, この状態でプローブを液体ヘリウムデュアに挿入・冷却をして測定を行なっている.

配線は回路へのバイアス供給電源部以外は同軸ケーブルを用いている. バイアス供給電源部では電圧源に直列に接続した抵抗 R にかかる電圧をモニタし, その値から逆算して供給しているバイアス電流値を求める. バイアス電流を加えた状態でチップに室温の信号発生器から減衰器を介して入力信号を加えその出力波形をオシロスコープで観測する. 測定時には被測定回路, DC/SFQ converter, SFQ/DC converter はそれぞれ異なる電圧源からバイアス電流供給を行う.

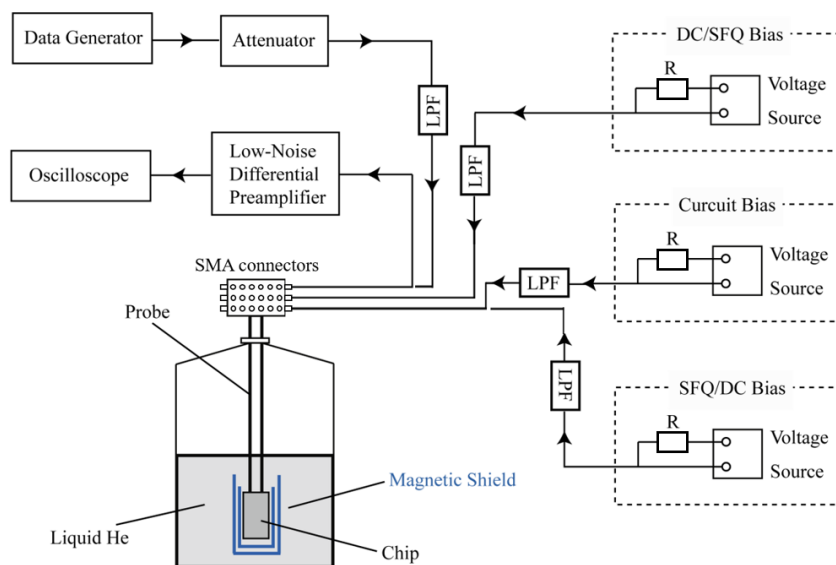


図 3.4 測定系の概略図

3.4.2 測定環境

本研究で用いた測定機器を以下に示す。また、測定系の外観を図 3.8 に示す。

• Data Generator	Sony Tektronix	DG2020A
• CW Generator	Anritsu	MG3694A
• Oscilloscope	Agilent Technologies	DSO5014A
• Low-noise voltage preamplifier	Stanford Research Systems	SR560
• Attenuator	TAMAGAWA ELE.	VBA461A
• 直流電圧源	KIKUSUI	PMR24-1QU
	Agilent Technologies	E3646A
• Output Pod	Sony Tektronix	DG2020A
• Digital Multimeter	CUSTOM	CDM-2000D
	HIOKI	3200
• He デュアー (図 3.6)	CRYOFAB	
• チップキャリア (図 3.8)	日本特殊陶業株式会社	
• 測定用プローブ (図 3.9)	タイヨー電子株式会社	
• 磁気シールド (図 3.10)	大同プラント工業株式会社	



図 3.5 測定系の外観



図 3.6 He デュアー



図 3.7 ボンダー

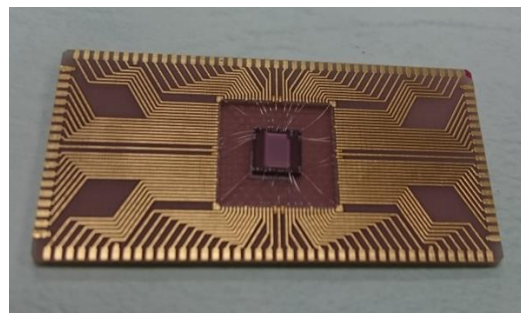


図 3.8 SFQ チップ及びキャリア

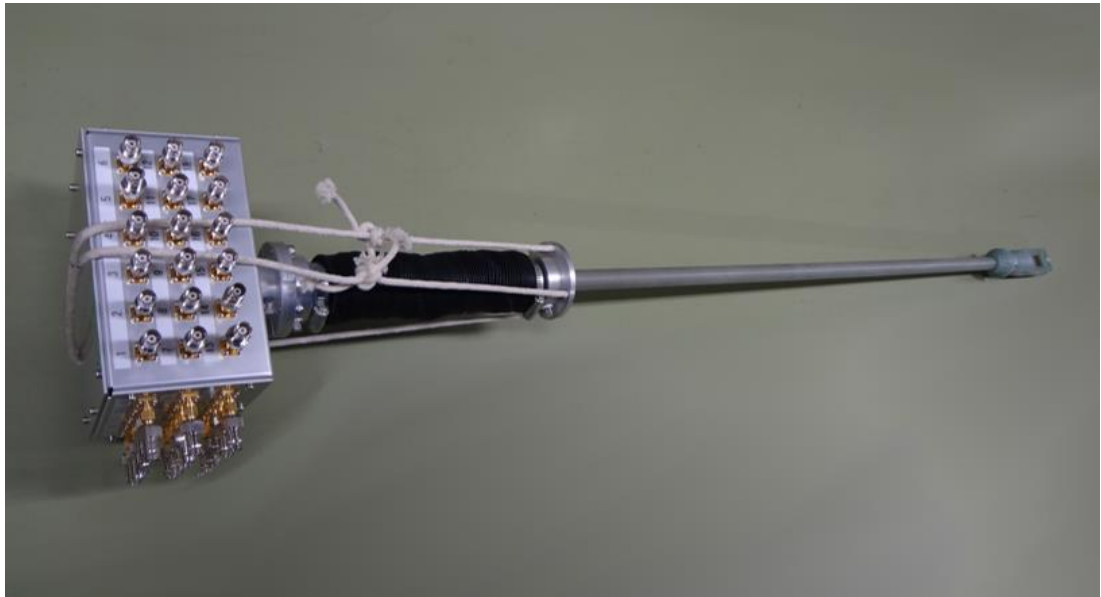


図 3.9 測定用プローブ

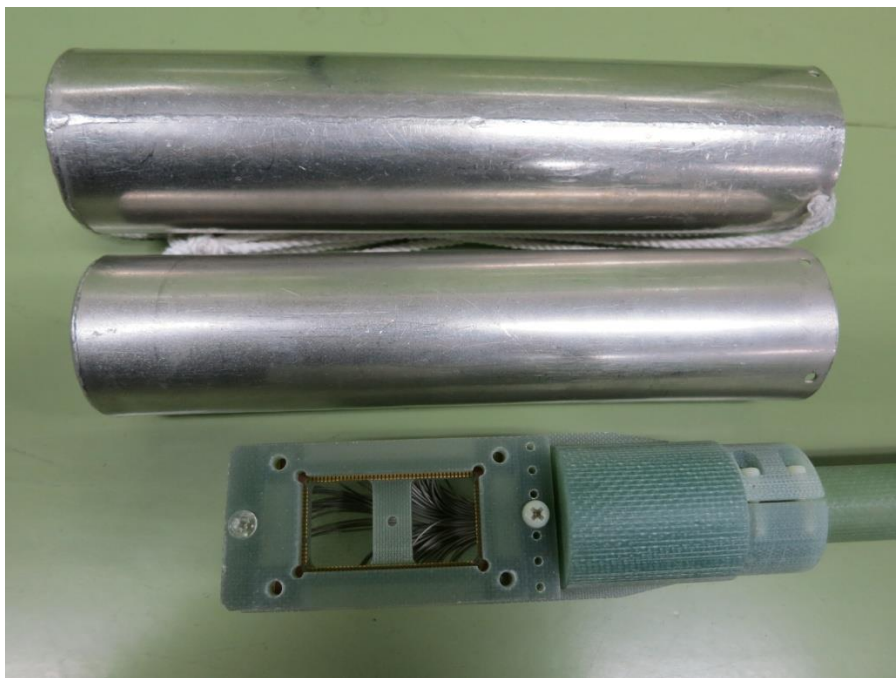


図 3.10 磁気シールドと測定用プローブ先端部

第4章 分析用システム用 SFQ 回路

4.1 本章の概要

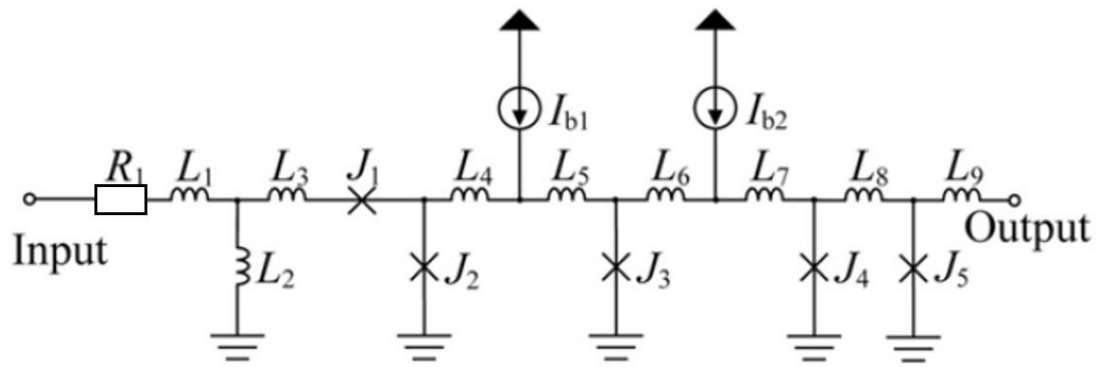
本章では、質量分析システムを構築するための前段階として、超伝導検出器用 SFQ 電流検知器と SFQ 時間測定回路 (TDC, time-to-digital converter) について述べる。

4.2 超伝導検出器用 SFQ 読出し回路

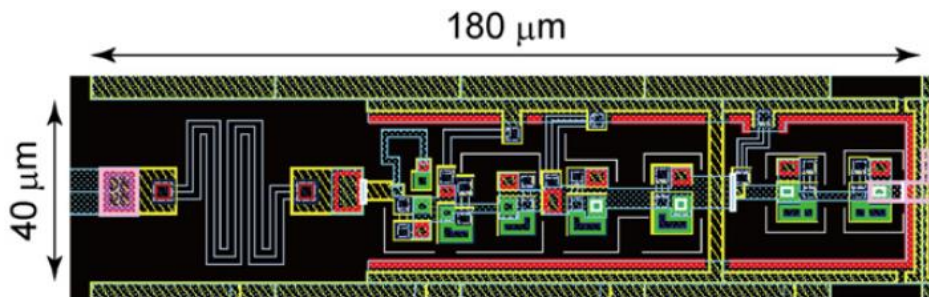
4.2.1 SFQ 読出し回路

SSPD と SFQ 回路からなる超伝導 TOF MS システムにおいて、 $200\ \mu\text{A}$ 以下の SSPD 信号を低エラーレートで SFQ パルスへと変換する SFQ 読出し回路が必要不可欠である。近年、TOF MS 応用に限らず超伝導検出器用の SFQ 読出し回路の多くの研究がされている[72]-[74]。これらの研究では、数十 μA 以下の微小電流を対象としており SFQ 読出し回路の入力部には超伝導変成器が用いられている。一方で、巨大分子の検出時に得られる SSPD 信号の電流値は比較的大きいため（最大で数百 μA 程度）、本研究では変成器を用いない直接接続型の SFQ 電流検知器を用いることができる。本回路は、CONNECT セルライブラリ[69]を利用でき、また、その動作周波数も極めて高い。

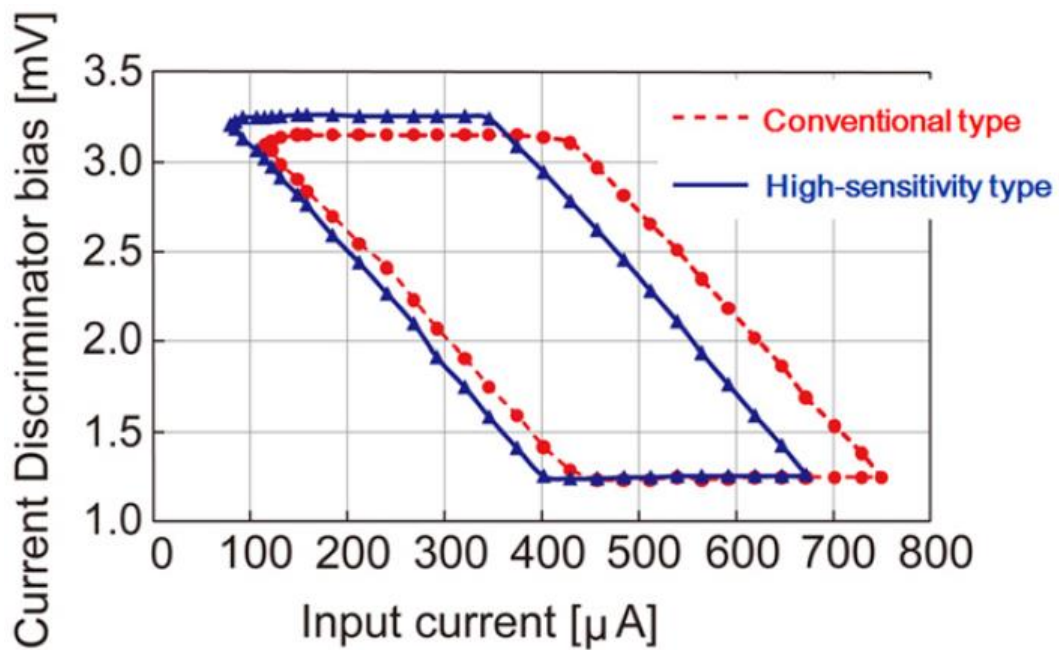
本研究で用いた SFQ 電流検知器の等価回路図及びレイアウトを図 4.1 の(a), (b)に示す。本回路は DC/SFQ コンバータとしてよく知られており[30][72]-[76]、入力信号の立ち上がりに反応し SFQ パルスを生成する。SSPD と SFQ 電流検知器を接続する同軸ケーブルに対しインピーダンスマッチングをとるため、SFQ 電流検知器の入力部には $50\ \Omega$ の抵抗が接続されている。図 4.1 の(c)にシミュレーション (JSIM) により得た検出電流に対するバイアスマージンを示す。本研究では、 $100\ \mu\text{A}$ 以下の電流にも感度を持たせるため、CONNECT ライブラリに登録された DC/SFQ コンバータのインダクタンス L_2 を $7.85\ \text{pH}$ から $9.23\ \text{pH}$ へ変更した。図 4.1 の(c)から、本電流検知器が従来のものに比べ高感度化され、 $80\ \mu\text{A}$ 程度まで検出可能となったことが分かる。



(a) 等価回路図



(b) レイアウト



(c) 動作余裕度

図 4.1 SFQ 電流検知器

4.2.2 SFQ 電流検知器の実装

高感度化した SFQ 電流検知器と SSPD とを組み合わせ、図 4.2 に示すような超伝導 TOF MS システムのプロトタイプを立ち上げた。SFQ 回路側は、電流検知部、JTL、SFQ/DC コンバータからなる極めて簡単な構成をとっている。本システムでは、SFQ 電流検知器により SSPD の信号は直接検出され SFQ パルスへと変換され、SFQ/DC コンバータにより出力電圧レベルの遷移として出力され室温の増幅器で増幅し観測される。また、SSPD への電流供給は bias-tee を通じて行った。

本実験では、膜厚、線幅、実効面積はそれぞれ 10 nm, 800 nm, $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ のミアンダ状の SSPD を用いた。また、SSPD の臨界電流値 I_c は $345 \mu\text{A}$ であった。

実際に 4.2K 冷凍機に実装した SSPD と SFQ 電流検知器を図 4.3 に示す。それぞれは異なるモジュールに実装され同軸ケーブルを用いて冷凍機内で接続されている。SFQ チップは真鍮製のモジュールにマウントされ、高透磁率のシールドで覆った。また、SFQ モジュールは冷却し易いように銅製のブロック上に固定した。

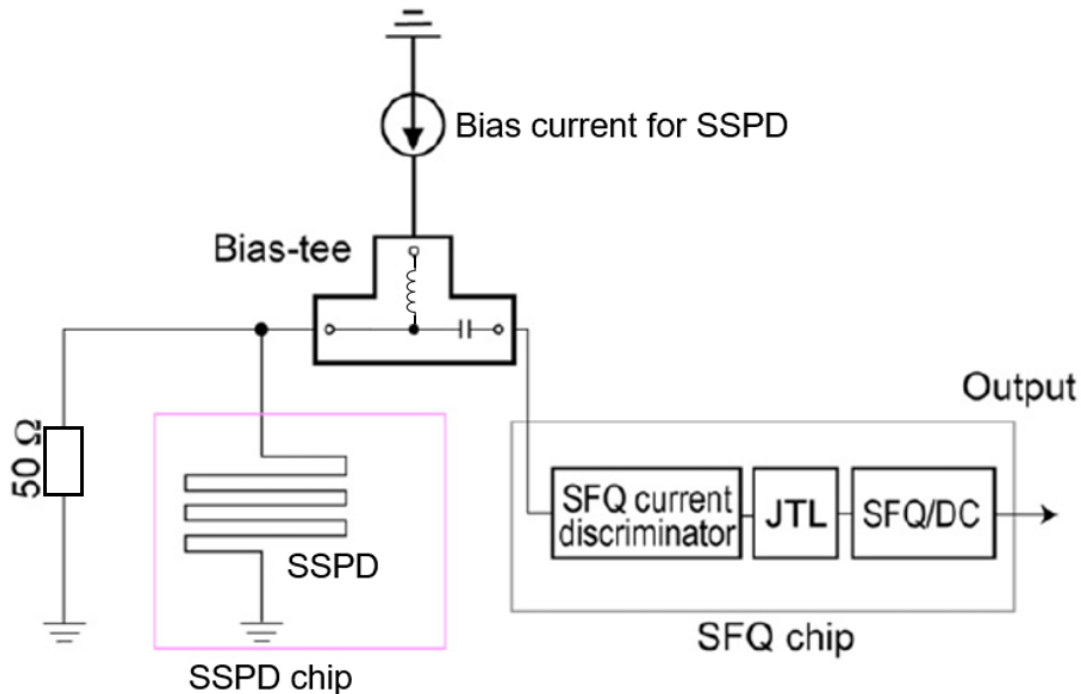
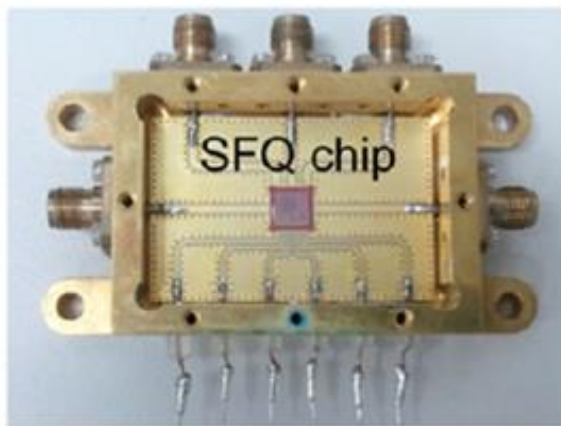
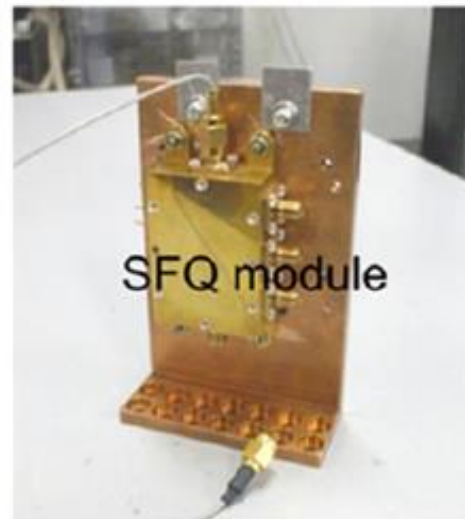


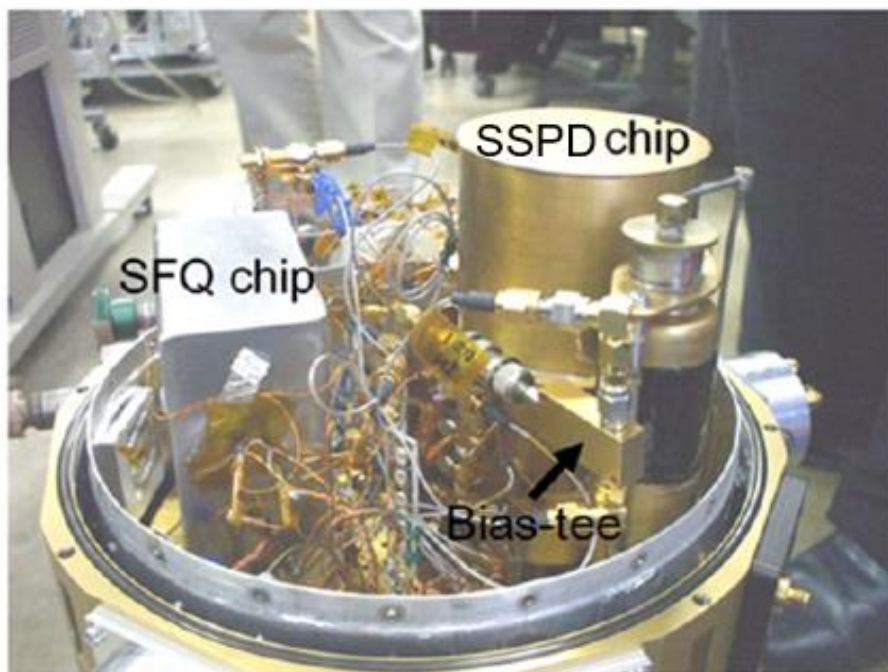
図 4.2 SSPD-SFQ 電流検知器の構成図



(a)



(b)



(c)

図 4.3 SFQ 読み出し回路の 4.2K 冷凍機への実装.

4.2.3 ダークカウントレートの測定

SSPD は臨界電流値直下までバイアス電流を印加すると、熱励起のみでランダムな信号を生成する。この計数確率をダークカウントレートと呼ぶ。このダークカウントレートを測定することで、SSPD-SFQ 読み出し回路の安定性とエラーレートを評価することができる。

SSPD の 98%までバイアスし、実際にダークカウントを計測した。図 4.4 に本実験にて得られた SFQ 電流検知器のバイアス条件ごとのダークカウントレートの SSPD バイアス電流依存性を示した。ただし、SSPD のバイアス電流値は臨界電流値で規格化した。

実験結果から、ダークカウントレートと SSPD へのバイアス電流量の間に指数関数的な関係が確認できた。これにより、SFQ 読み出し回路による SSPD の特性への影響がないことと SFQ 読み出し回路が SSPD のバイアスに依存せず正常に動作していることが確認できた。ダークカウントレートと SSPD バイアス間の関係は以前に報告されており、これは vortex のストリップ線上の通過[77]や vortex-antivortex 対の対生成消滅過程[78]に関係あるなど諸説あり未だ決着はついていない。また、図中にて二つの異なる指数関数的な依存性が観測されたことに関しては現在検討中である。

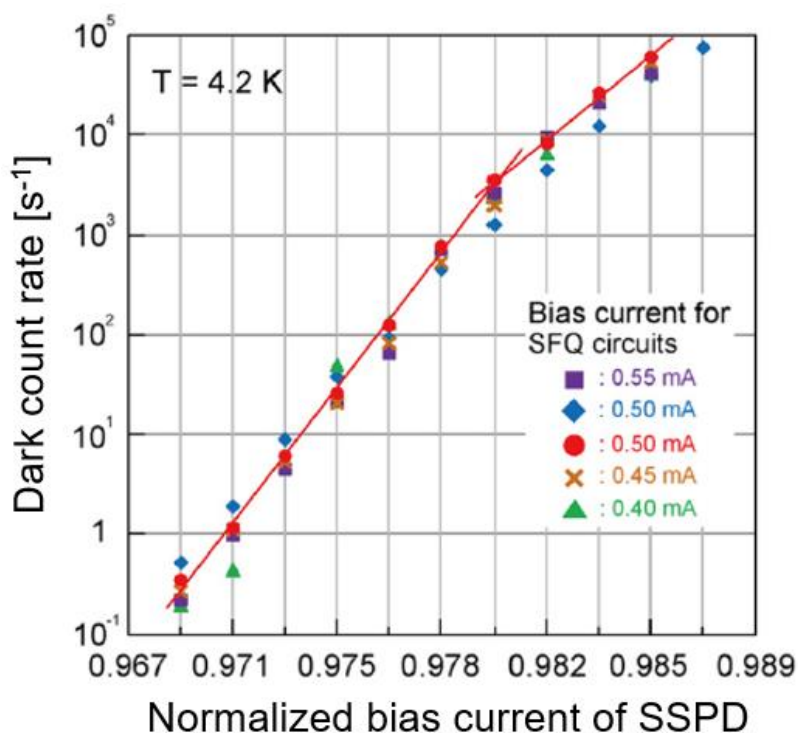


図 4.4 ダークカウントレートの測定.

4.2.4 TOF MS 測定

SSPD-SFQ 電流検知器システムを用いて、実際にタンパク質の一種である分子量 1,296 のアンギオテンシンを試料として MALDI TOF MS 測定を行った。図 4.5 の(a)には、SFQ 読み出し回路の出力信号波形を示す。レーザー照射時のトリガー信号入力後に、出力波形にて複数の電圧遷移が確認され、高分子のイオン検出が正常に行われたことが分かる。

室温の TDC を用いてマススペクトルを測定した結果を図 4.5 の(b)に示す。ただし、検出閾値を図 4.5 の(a)の Discrimination level に設定した。(b)中の $0 \mu\text{s}$ 付近の大きなピークは加速電圧の印加に同期したものであり、 $10 \mu\text{s}$ 付近のピークはアンギオテンシンをイオン化するために添加したマトリクスの TOF を意味する。 $23 \mu\text{s}$ 付近のピークがアンギオテンシンの TOF に相当し、妥当なスペクトルの取得に成功した。一方で、そのスペクトル幅は過去に半導体増幅器を用いて読み出されたもの[79]と比較し広いものとなった。本実験で用いた SFQ 読み出し信号用の室温の差動増幅器の帯域が 1 MHz であり、これが TOF 測定の正確性を制限したものと考えられる。本問題は SFQ TDC を SFQ 読み出し回路に直接接続することで解決可能である。

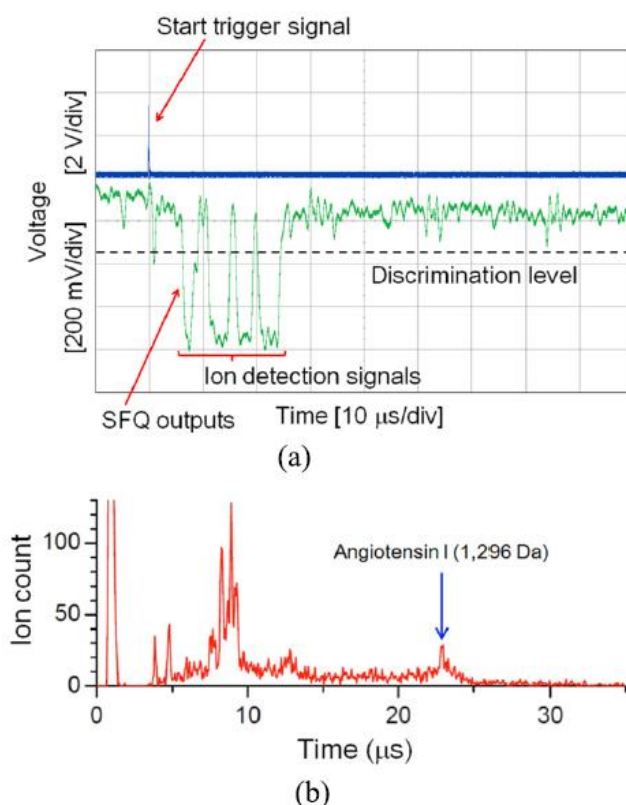


図 4.5 Angiotensin I の TOF MS 測定結果.

4.3 質量分析用 SFQ TDC

4.3.1 SFQ TDC の性能

SSPD は 2 章で述べた通り，高感度性，高速応答性に優れておりアレイ状に並べて多チャンネル化することで更に検出信号の高速化が望める．しかし，そのためには SSPD の各チャンネルからパラレルに同時出力される信号の検出時間を高速かつ連続的に測定可能な時間測定回路が必要である．SFQ 回路を用いた TDC は，イオンの検出時間を ps オーダーの高分解能で直接デジタルデータに変換可能であり [75], [80]，SSPD と SFQ TDC を組み合わせることで生体高分子用の新たな高精度分析システムが実現可能である．

まず，現在，検出器単体で実現されている検出面積は $2 \times 2 \text{ mm}^2$ [19] 程度であるが，イオン化レーザーの口径が 1 cm 角以上であることから，検出器アレイを構成する検出器数は 25 以上となり，これと同数の入力数が SFQ TDC には必要となる．ただし，今回の研究においては，単一の検出器を用いた原理実証に取り組んだ．

SSPD の応答時間はサブ ns 程度であり，SFQ 回路側にはシステム全体の分解能を制限しない高時間分解能が必要とされる．また，最大で 600,000 Da 以上の巨大分子を測定するため，十分に高いダイナミックレンジが必要とされる．加えて，MALDI を用いた TOF MS の測定においては一度のレーザー照射時に数十個ものイオンが検出されるため，検出信号を高速かつ連続的に処理できる機構が必要となる．以上から，SFQ TDC の時間分解能，ダイナミックレンジはそれぞれ 100 ps，1.6 ms と設定した．さらに，連続的に検出される信号を非同期的に読み出すことが可能なマルチストップ機能を付与した．現在，これらを満たす SFQ TDC を開発している [76], [81]．

4.3.2 質量分析用 SFQ TDC の構成

図 4.6 に質量分析用 SFQ TDC のブロック図を示す．本 TDC は 100 ps の時間分解能，1.6 ms のダイナミックレンジを有し，マルチストップ機能が付与されている．時間分解能は，供給されるクロック信号の周波数により制御することができる．過去の設計では，オンチップの SFQ リング発振器 [82] をクロックの生成に用いていたが [76]，リング発振器を構成するジョセフソン接合における熱雑音による jitter を考慮し本設計では室温のマイクロ波発振器を用いた供給方式を採用している [81]．

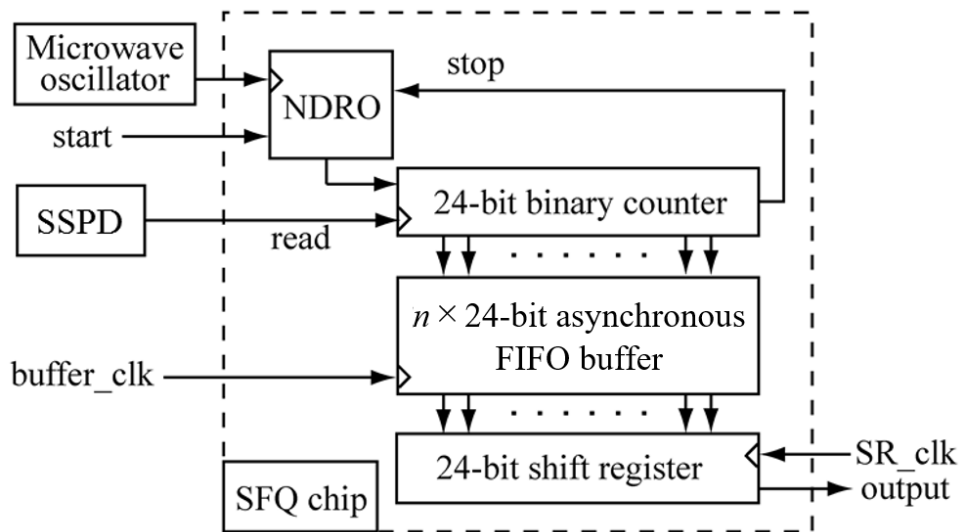


図 4.6 質量分析用 SFQ TDC のブロック図

SFQ TDC は、外部供給のクロック信号のオン・オフの切り替え用スイッチ (NDRO セル) , 時間測定用 24-bit 二進カウンタ, データ保持用 $n \times 24$ -bit 非同期式 First-In First-Out (FIFO) バッファ [30], [83], [84], 測定データ読み出し用の 24-bit シフトレジスタ (SR) から構成されている. なお, 本研究で用いた回路は AIST 2.5 kA/cm² Nb 標準プロセス (STP2) [63]及び CONNECT セルライブラリ [69]を用いて設計した.

<動作原理>

予め室温の発振器から SFQ チップへクロック信号を供給しておく. この時, クロック供給のオン・オフを担う NDRO セルの内部状態は '0' であり, クロック信号はカウンタへ到達しない. レーザー照射をトリガーとし, NDRO セルには測定開始の合図として start 信号が入力され NDRO セルはオン状態となる. 以降のクロック信号はカウンタへと供給されカウンタが時間測定を開始する. この時, 発振器の周波数を 10 GHz とすることで 100 ps 間隔で SFQ パルスが出力され, 24-bit の二進カウンタにてそのパルス数を計測する. イオンが検出される度にカウンタへ read 信号が入力され, その時点でのカウントは非同期式の FIFO buffer へ順次送られる. buffer へと送られたカウントはデータの衝突無く非同期的に buffer 内に格納されていく. buffer 内に格納されたカウントデータは 1 発の buffer_clk 信号により読み出し用の 24-bit SR へと送られ, 24 発の SR_clk 信号により室温へと読み出される. また, カウンタのオーバーフロー時, カウンタから stop 信号が出力され NDRO セルの内部状態を '0' に戻し測定を終了する.

4.3.3 24-bit カウンタの構成

本研究で用いる非破壊型二進カウンタは非破壊型のリセット機能付き Toggle flip-flop (NRTFF, nondestructive resettable toggle flip-flop) をシリアルに繋ぐことで構成することができる。NRTFF は CONNECT セルライブラリには登録されておらず、本カウンタを構成するために新たに設計したセルである[76]。NRTFF セルの等価回路図, symbol, 状態遷移図, 入出力特性をそれぞれ図 4.7 の(a), (b), (c), (d)に示す。また, NRTFF セルを用いて構成した 24-bit カウンタを図 4.8 に示す。本カウンタは, 時間分解能を 100 ps とした場合, 約 1.67 ms ($= 2^{24} - 1 \times 100 \text{ ps}$) まで測定可能となる。カウンタの測定可能時間を超えた際には, その合図として overflow 信号を出力する。

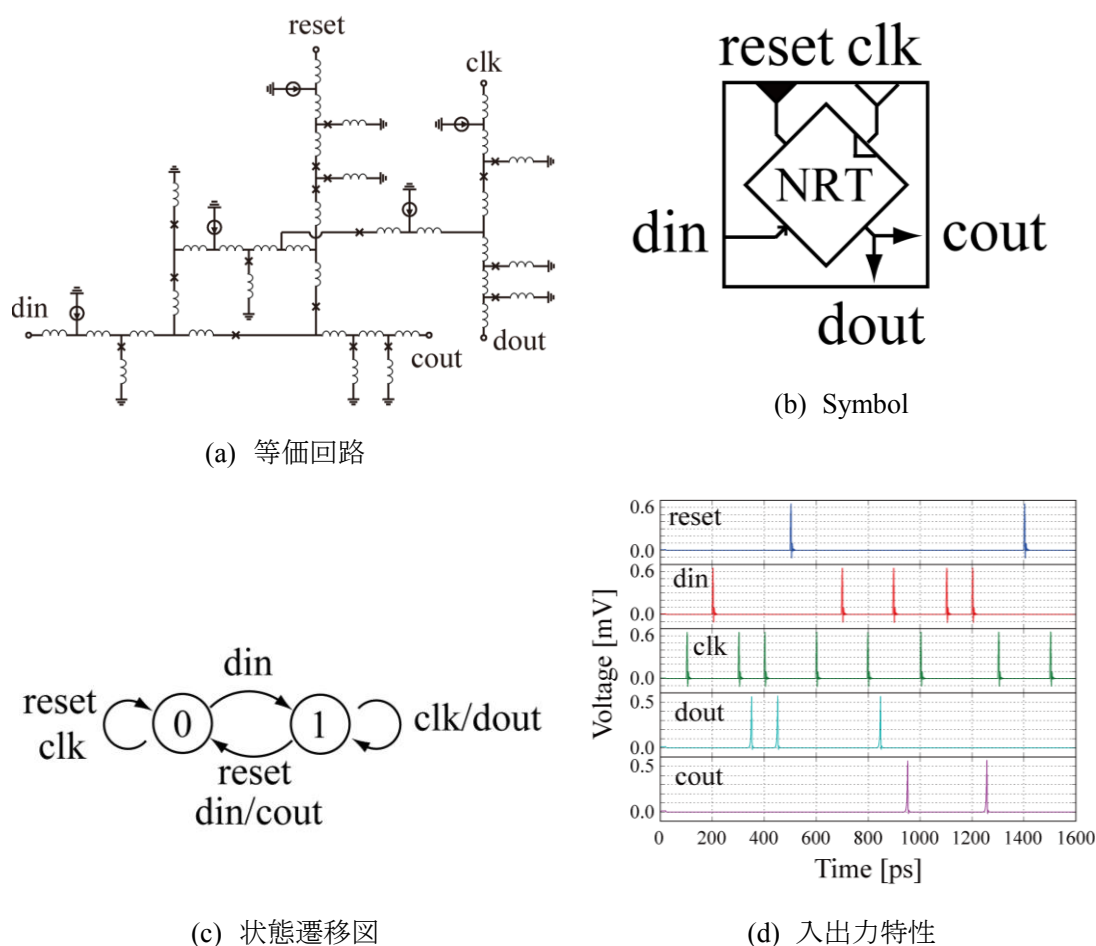


図 4.7 NRTFF セル

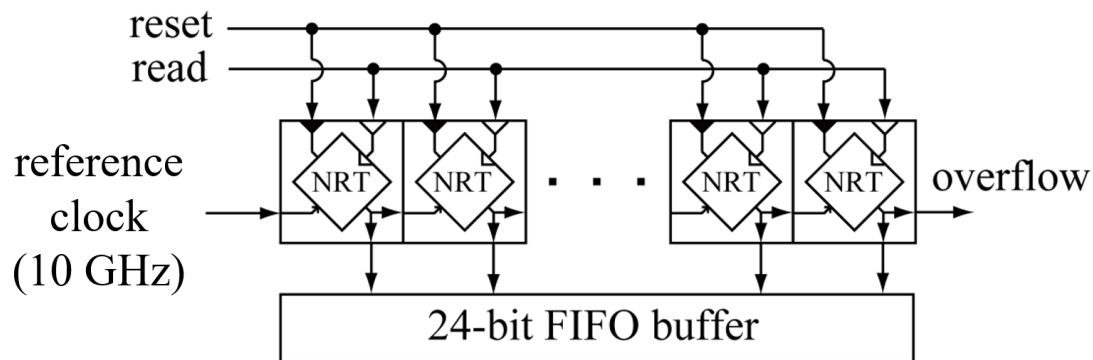


図 4.8 24-bit カウンタの構成

<カウンタの動作原理>

一例としてカウンタに SFQ パルスが 2 発入力された場合について考える。

まず，1 発目の SFQ パルス (reference clock) が 1-bit 目の NRTFF の din に入力され 1-bit 目の NRTFF の内部状態“1”となる．引き続き 2 発目の SFQ パルスが入力されると 1-bit 目の NRTFF は状態が“0”に遷移しつつ 1-bit 目の NRTFF セルの cout より SFQ パルスが出力され，2-bit 目の NRTFF の内部状態を“1”へと遷移させる．この時，24 個の直列に繋がれた NRTFF の内部状態は 2-bit 目のみが状態 “1”となっている．この状態で read 信号により各 bit の NRTFF に clk 入力がされると 2-bit 目の NRTFF のみ dout から SFQ パルスを出力する．各 bit の dout 出力を 24-bit 目から順に読み上げると “0000 0000 0000 0000 0000 0010”となる．これは 10 進数の“2 ($= 2^1 \times 1 + 2^0 \times 0$)”に対応しており，2 発のパルスをカウントしたことになる．また， 2^{24} 発以上の SFQ パルスがカウンタに入力された場合，カウンタがオーバーフローし 24-bit 目の NRTFF の cout より overflow 信号が出力され時間測定を終了する．

4.3.4 $n \times 24$ -bit asynchronous First-In-First-Out (FIFO) buffer の構成

非同期制御用の Muller-C とそれぞれ 24 個の dff から構成される n 段のレジスタから構成される。本回路を用いることで、24-bit の TOF データを同時に n 個まで格納することができる。FIFO buffer の非同期動作を実現する Muller-C の symbol 及び状態遷移図を図 4.9(a), (b)に、一例として 3×24 -bit の FIFO buffer の構成を図 4.9(c)に示す。

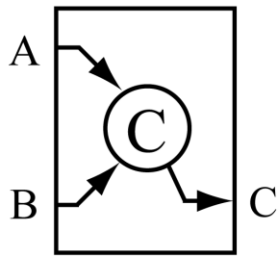
本 FIFO buffer は書き込みと読み出しを非同期で行え、読み出し信号によりデータの衝突なく古いデータから順に読み出される。

<動作原理>

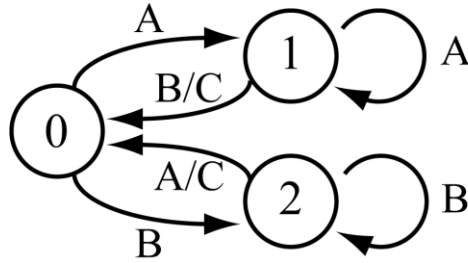
まず start 信号が各 Muller-C の B に入力され Muller-C の内部状態は“2”となる。これを初期状態とする。この状態で read 信号が得られると、カウンタに格納されているデータが buffer 1 に送り出される。直後に、分岐した read 信号が 1 段目の Muller-C の A に入力され、この Muller-C は内部状態を“0”にしつつ SFQ パルスを出力する。この SFQ パルスにより buffer 1 に格納されたデータは buffer 2 へ送られ、同時にハンドシェイクにより 2 段目の Muller-C の A にも入力される。この時、同時に Muller-C 出力部のハンドシェイクにより 2 段目の Muller-C にも SFQ パルスが入力され、この Muller-C の内部状態も先の動作と同様に“0”となり SFQ パルスを出力する。この出力パルスは 3 分岐し、一つはハンドシェイクにより 1 段目の Muller-C の内部状態を再び“2”とし、一つは buffer 2 に格納されたデータを buffer 3 へ送り、残りの一つが buffer_clk 入力用 dff に入力される。読み出し用の dff の内部状態は“1”となる。

この時点で 1 段目の Muller-C の内部状態は初期状態 (“2”) に戻っており、2 度目以降の read 信号検出時にも同様にデータは格納され、最大 3 回分 (FIFO buffer 内レジスタの数まで) のデータを格納することができる。1 発の buffer_clk 信号を入力することで読み出し用の dff から SFQ パルスが出力され buffer 3 に格納されたカウントデータは読み出し用の SR へと送られる。

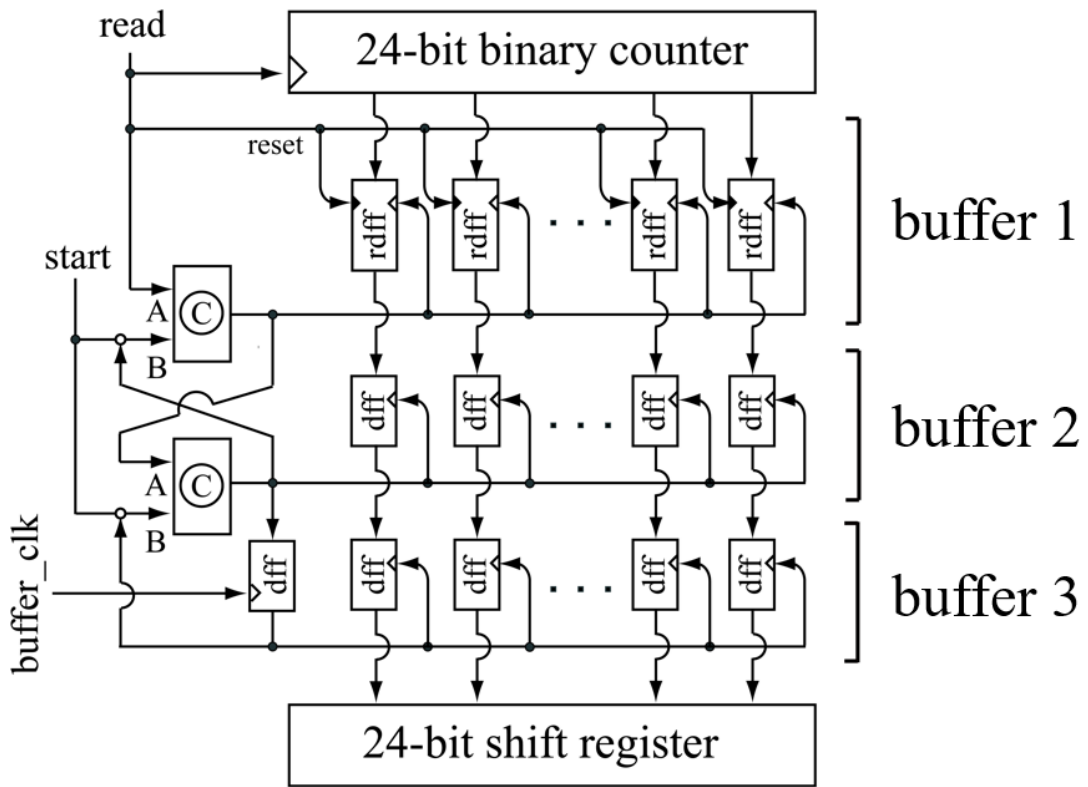
buffer_clk による読み出し速度以上の速度で read 信号が検出されると、FIFO buffer はオーバーフローし 4 度目以降のデータが buffer 1 にて衝突し得る。これを避けるため、buffer 1 には rdff (resettable dff) を用いている。この機構により 3 段の buffer が全て満たされている場合には、buffer 1 に格納されていた古いデータはリセットされ常に最新のデータに上書きされる。



(a) Muller-C の symbol



(b) Muller-C の状態遷移図



(c) FIFO buffer の構成

図 4.9 3 × 24-bit FIFO buffer

4.3.5 24-bit shift register (SR) の構成

読み出し用 SR の構成を図 4.10 に示す。SR はデジタル回路においてデータを保持する基本的な回路であり、24 個の dff と読み出し用のクロックラインから構成されている。

SR の構成としては主に、カウンタフロー型とコンカレントフロー型に分けられる。カウンタフロー型では、データラインとクロックラインの向きが逆で出力側の論理ゲートから先にクロックが入力される。このため、クロック間隔が十分に広ければ回路内のタイミングエラーが生じにくい。本研究では、FIFO buffer に格納された TOF データを室温の読み出し系によって低速で読み出すため、この型を採用している。

ちなみに、コンカレントフロー型においては、データラインとクロックラインの向きが同じであり、一般には高スループットの求められる構成において用いられる。一方で、データとクロックが同方向に伝搬するためクロックラインがデータラインよりも遅れる等の誤動作も起きやすくタイミング設計に精密さが求められる。

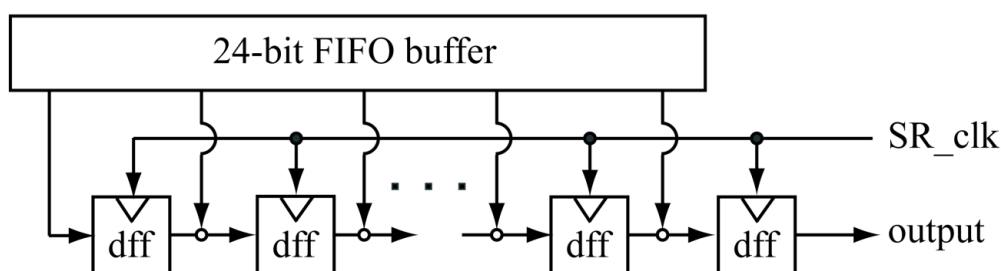


図 4.10 24-bit Shift register の構成

<動作原理>

まず、FIFO buffer に格納されたカウントデータが 1 発の buffer_clk 信号により読み出され、SR 内の 24 個の dff へと格納される。この後に SR_clk 信号を 24 回入力することで出力側の dff から順に格納されたデータは読み出される。このようにして、24-bit の TOF データを室温に読み出すことができる。

4.3.6 SFQ TDC のシミュレーション一例

上述の構成にて設計した SFQ TDC のデジタルシミュレーションを行った。図 4.11 に、start 信号と read 信号の入力時間差 $t_1 = 0.5 \text{ ns}$, $t_2 = 1.0 \text{ ns}$, $t_3 = 1.5 \text{ ns}$, $t_4 = 2.0 \text{ ns}$ の時のシミュレーション結果を示す。読出結果は二進数で表されており、それぞれ $\text{Dout1} = (0000\ 0000\ 0000\ 0000\ 0000\ 0101)_2$, $\text{Dout2} = (0000\ 0000\ 0000\ 0000\ 0001\ 1000)_2$, $\text{Dout3} = (0000\ 0000\ 0000\ 0000\ 0010\ 1000)_2$ と読み替えられる。これは t_1 , t_2 , t_4 の入力時間差に対応しており、FIFO buffer のリセット機構が機能し t_3 のカウントデータが t_4 のカウントデータにより上書きされ SFQ TDC が正常に動作していることを示している。

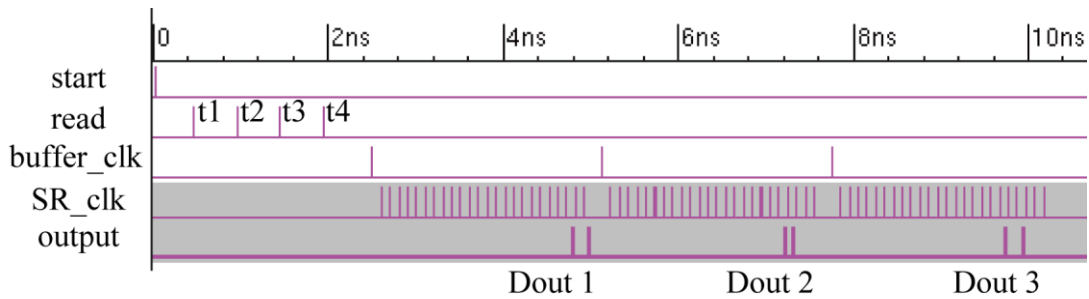


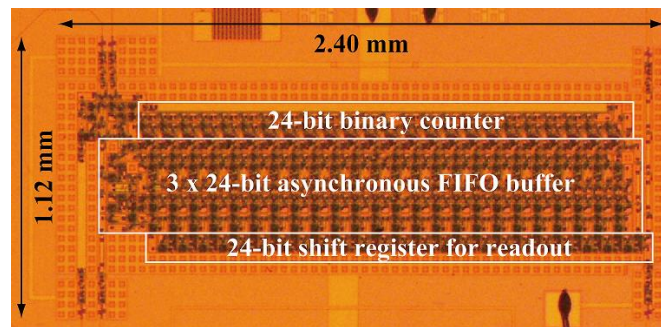
図 4.11 SFQ TDC のデジタルシミュレーション結果

4.3.7 SFQ TDC の液体ヘリウム内動作

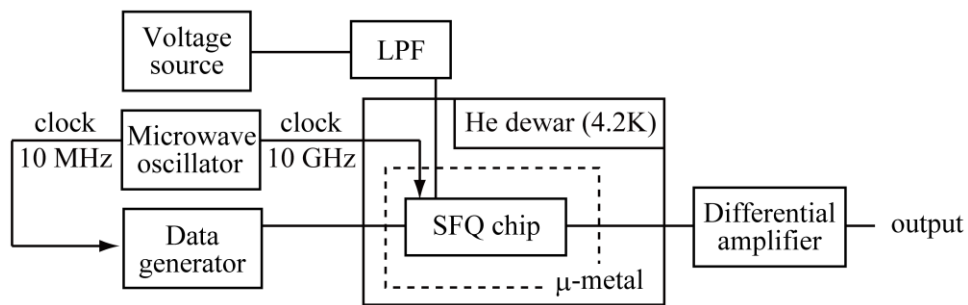
実際に設計した $3 \times 24\text{-bit}$ の SFQ TDC の液体ヘリウム中の動作について述べる。本測定において用いた回路の顕微鏡写真及び本実験のセットアップを図 4.12 に示す。本回路の回路面積、総接合数、総供給電流量は、それぞれ $2.40 \times 1.12 \text{ mm}^2$, 2,684 接合, 303 mA である。用いたマイクロ波発振器は約 4 ps の十分に jitter の小さなものを選定した。また、start 信号及び read 信号の疑似信号を発生させる室温のデータジェネレータは最大で 10 ns の jitter を有している。本 jitter を低減させるため、データジェネレータはマイクロ波発振器による 10 MHz の同期信号を用いて同期させた。

本セットアップにて SFQ TDC を測定した波形の一例を図 4.13 に示す。本実験では、一例として入力信号時間差 10 μs , 50 μs , 100 μs を与え測定を行った。シミュレーションとは異なり実験では SFQ TDC の出力部には SFQ/DC コンバータが接続されている。そのため、出力信号は SR_clk 信号の入力に同期した電圧レベルの遷移で判断する。これに従うと、読出結果(1), (2), (3)は、それぞれ $(0000\ 0001\ 1000\ 0110\ 1011\ 0010)_2$, $(0000$

0111 1010 0001 0011 0010)₂, (0000 1111 0100 0010 0100 1011)₂と読み替える事ができ, それぞれ時間差 10.0018 μs, 50.0018 μs, 100.0018 μs に対応する. この結果から, SFQ TDC の液体ヘリウム中での正常動作が確認でき, また, 同時に三つの読出結果の端数が最下位ビットまで一致していることが分かる.



(a) 3 × 24-bit SFQ TDC のチップ写真



(b) 測定装置の構成

図 4.12 3 × 24-bit SFQ TDC の液体ヘリウム内測定

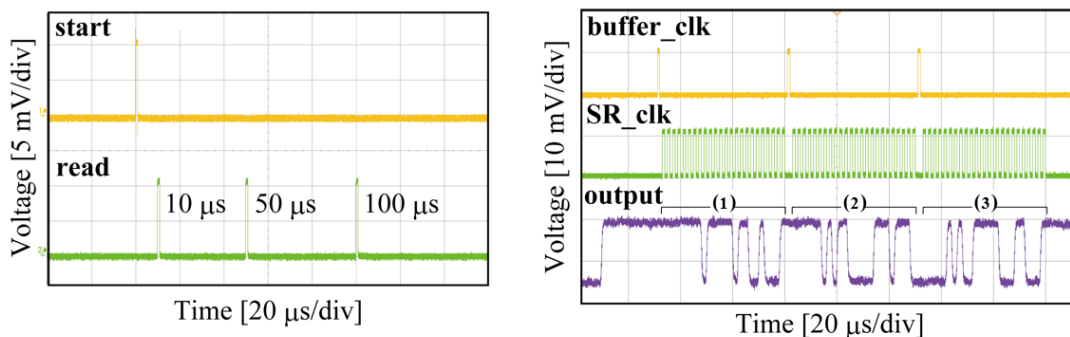


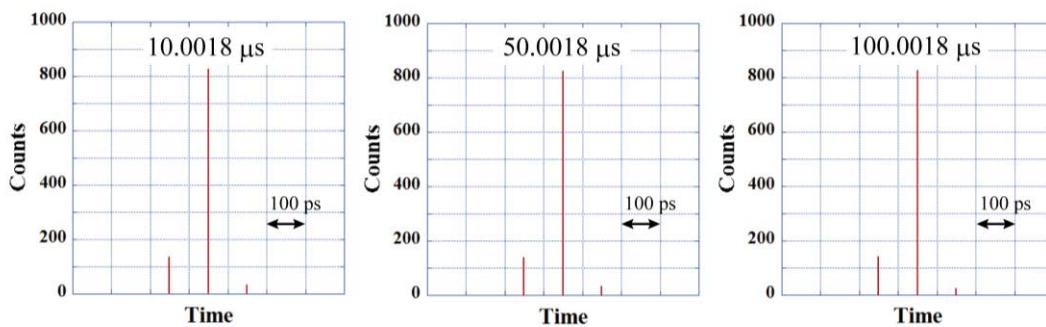
図 4.13 SFQ TDC の読出結果一例

同じ測定を 1,000 回繰り返して図 4.14 の(a)に示すようなヒストグラムを得た。図 4.14 の(a)において、入力時間差に対応した大きなピークが得られておりそのバラツキは前後 100 ps 以内に収まっていることが確認できる。SFQ TDC 単体の測定精度を評価するため、ガウス分布を表す式(4.1)を用いて図 4.14 の(b)のようにフィッティングさせ、それぞれのヒストグラムの半値幅も算出した。

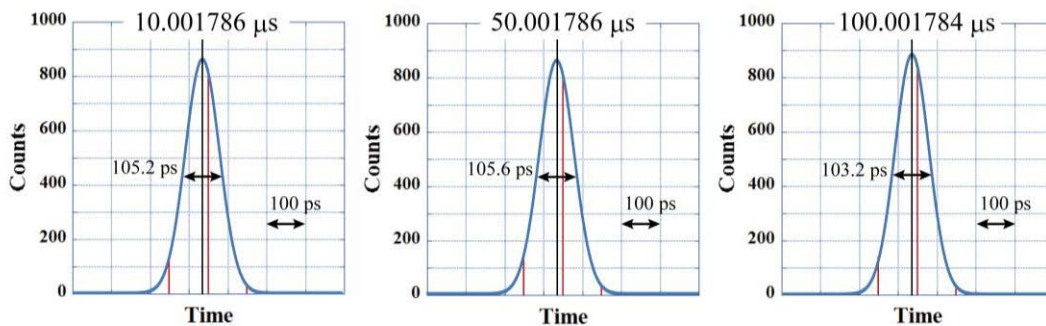
$$count = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \times \exp\left[-\frac{(T-T')^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.1)$$

ただし、 T 、 T' 、 σ は、測定時間差、中央値、標準偏差である。

図 4.14 の(b)から、入力時間差 10 μs 、50 μs 、100 μs に対応するヒストグラムのピーク
の中心値及び半値幅は、それぞれ 10.001786 μs 、50.001786 μs 、100.001784 μs 及び 105.2
ps、105.6 ps、103.2 ps と見積もられる。本結果から、読出結果は数 ps のオーダーで一
致しており、SFQ TDC 単体の潜在的な分解能はより高いものであると考えられる。



(a) ヒストグラム (プロット間隔 100 ps)



(b) 分布特性

図 4.14 SFQ TDC の読出結果のヒストグラム

第 5 章 超伝導質量分析システムの構築

5.1 本章の概要

本章では、まず、冷凍機システムの立ち上げ及び SFQ TDC 回路単体の冷凍機内動作について述べ、その後に超伝導検出器と SFQ 回路とを組み合わせた超伝導質量分析システムを用いた生体分子の分析実験について述べる。

5.2 冷凍機システムの立ち上げ

5.2.1 冷凍機内へ導入すべきケーブル

本研究では、0.5-W/4-K パルスチューブ極低温冷凍機を用いる。本研究で用いた冷凍機を図 5.1 に示す。本冷凍機には、50K、4K の二つのステージがあり、各々の実際の冷却能力は、30 W 供給時に 61.4K、0.5 W 供給時に 3.91K であると実験的に確認されている。本冷凍機にて、超伝導検出器及び SFQ 回路を実装する上で最適なケーブルの種類及び長さを決定する。

今回の冷凍機システムに導入すべきケーブルは下記の通りとなった。

- (1) SFQ TDC への start 信号入力用 1 本：真鍮 \square 0.86 セミリジッド
- (2) SFQ TDC のその他の入出力用 4 本：SUS \square \square 0.33 セミリジッド
- (3) 検出器用バイアス線 4 本：各 0.3 A
- (4) SFQ TDC 用大電流供給線 4 本：各 0.2 A
- (5) SFQ TDC 用小電流 (DC/SFQ, SFQ/DC など) 供給線 4 本：各 0.5 mA 以下
- (6) その他 6 本：各 7 mA 以下

各種ケーブルについて、ある電流を流すとき、式(5.1)を解くことにより最小のパワー入力 [W] となるケーブル長を表 5.1 に示すように決定した。

$$\frac{\text{熱伝導積分値 [W/m]} \times \text{断面積 [m}^2\text{]}}{\text{ケーブル長 [m]}} = \text{電流}^2 [\text{A}^2] \times \text{抵抗率} [\Omega/\text{m}] \times \text{ケーブル長 [m]} \quad (5.1)$$



(a) 内観



(b) 外観

図 5.1 0.5 W/4-K パルスチューブ極低温冷凍機

表 5.1 冷凍機に導入する各ケーブルの種類及び長さ

ケーブル ステージ		(1) 真鍮	(2) SUS	(3) 銅線	(4) 銅線	(5) マンガン	(6) リン青銅	計
300K-40K	長さ	5 cm	5 cm	45 cm	30 cm	50 cm	50 cm	0.173 W
	消費	0.054 W	0.004 W	0.043 W	0.065 W	0.0007 mW	0.0062 W	
40K-3K	長さ	20 cm	5 cm	116 cm	77 cm	67 cm	36 cm	30 mW
	消費	1.1 mW	0.2 mW	11.1 mW	16.7 mW	0.05 mW	0.8 mW	

5.2.2 SFQ チップの冷凍機内実装

超伝導質量分析システムの構築のため、SFQ チップを冷凍機の 4K ステージ上に実装した。実装した SFQ 回路は液体ヘリウム中での動作実証に成功している 3×24 -bit の SFQ TDC (4 章) である。本 SFQ TDC は AIST 2.5 kA/cm² Nb standard process (STP2) [63] にて作製された回路であり、総接合数及び総供給電流量は各々 2,687, 303 mA となっている。数千接合規模の回路であるため安定したバイアスマージンを確保するため SUSHI 構造が用いられている。本回路の顕微鏡写真を図 5.2 に示す。

SFQ チップは図 5.3 に示すように銅製のキャリア及びモジュールにマウントされている。SFQ チップ-キャリア間及びキャリア-モジュール間の接触には熱伝導率を高めるためドータイトペーストを用いた。SFQ モジュールには、6 個の信号の入出力用の SMA ポートと 10 個のバイアス電流供給用ポート（銅線）がある。

5.2.1 のケーブルの選定を元に、SFQ モジュールを図 5.4 に示すように冷凍機内に実装した。（なお、SFQ モジュールは外部磁場の遮断のため図 5.4 (b) に示すように高透磁率の磁気シールドを被せている。）配線の対応の詳細は図 5.5 及び表 5.2 に示す。

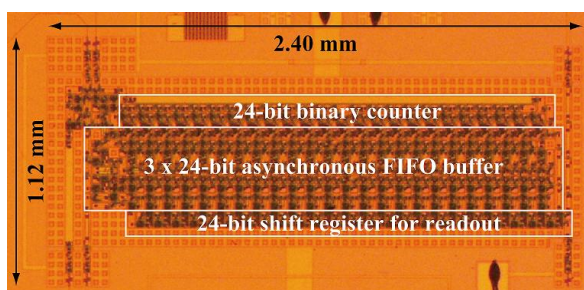


図 5.2 3×24 -bit SFQ TDC のチップ写真

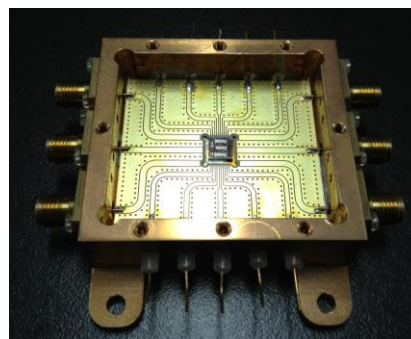


図 5.3 SFQ モジュール（銅製）

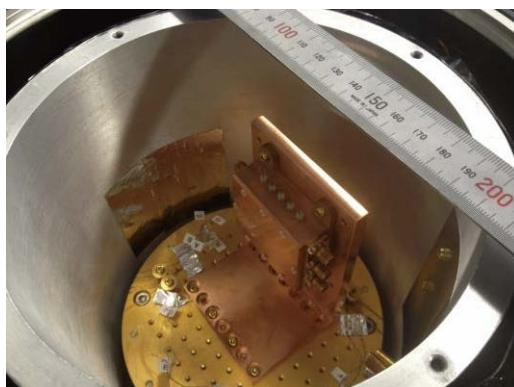


図 5.2 3×24 -bit SFQ TDC のチップ写真

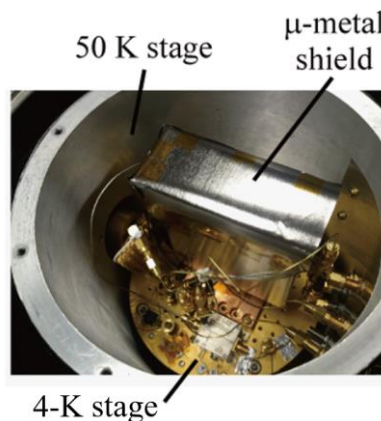


図 5.3 SFQ モジュール（銅製）

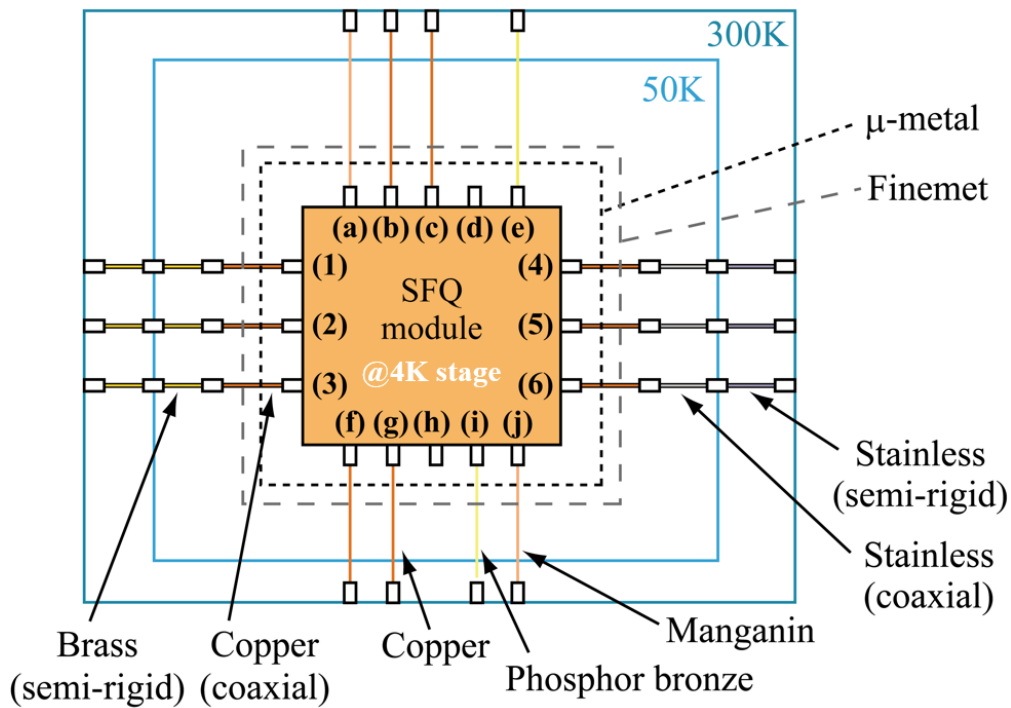


図 5.5 冷凍機内の SFQ モジュール配線概略図

表 5.2 SFQ モジュール配線対応表

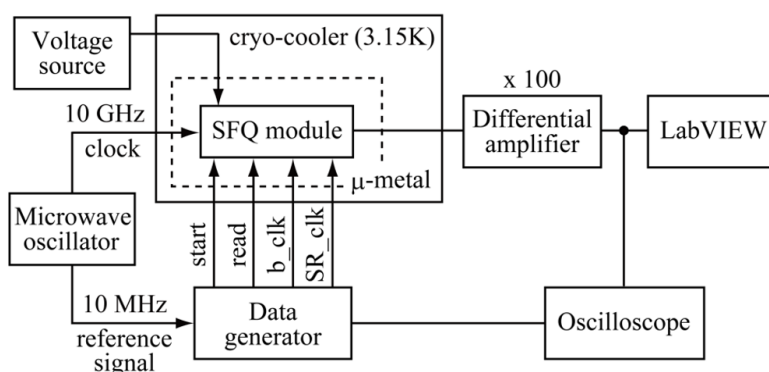
		3K-----50K-----300K
高速信号	(1) read	銅 真鍮 真鍮
	(2) start	同軸 セミリジット セミリジット
	(3) 10 GHz clock	
低速信号	(4) SR_clk	銅 ステンレス ステンレス
	(5) buffer_clk	同軸 同軸 セミリジット
	(6) output	
大電流	(b) 引き抜き (150 mA)	銅線
	(c) TDC bias (150 mA)	
	(f) 引き抜き (150 mA)	
	(g) TDC bias (150 mA)	
小電流	(a) DC/SFQ bias (3.53 mA)	マンガン線
	(j) SFQ/DC bias (1.78 mA)	
中電流	(e) GND	リン青銅
	(i) GND	
	(d) 未接続	
	(h) 未接続	

5.2.2 SFQ TDC 単体の冷凍機内動作

5.2.2.1 単体動作試験用測定系の構成

図 5.6 に冷凍機内動作試験に用いた測定環境を示す。SFQ モジュールと同じ 4K ステージには温度モニタが設置されており、測定前のステージ温度は約 3.15K であった。

室温のデータジェネレータから start 信号と複数の read 信号を入力し、その時間差を SFQ TDC を用いて測定した。時間分解能を 100 ps に設定するため、室温のマイクロ波発振器から供給する reference clock の周波数は 10 GHz とした。また、start, read の両信号の生成時間精度を上げるため、データジェネレータはマイクロ波発振器の 10 MHz クロック信号により同期されている。SFQ TDC からの出力は、室温の差動増幅器（帯域は 1 MHz）を用いて 100 倍に増幅しオシロスコープ及び LabVIEW にて観測・記録した。



(a) 測定系の構成

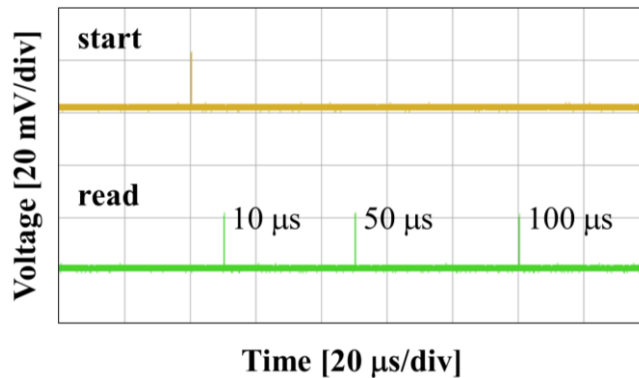


(b) 外観

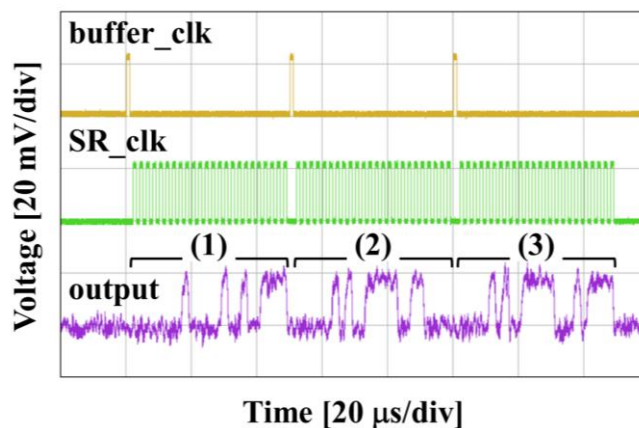
図 5.6 SFQ TDC の冷凍機内動作試験用測定環境

5.2.2.2 SFQ TDC の冷凍機内動作一例

図 5.6 の測定系を用いて SFQ TDC 単体の動作を評価した. 測定結果の一例を図 5.7 に示す. 図 5.7 における例では, 10, 50, 100 μs の信号時間差を時間分解能 100 ps で測定し, 読み出し結果(1), (2), (3)を得た. SFQ TDC の出力部には SFQ/DC コンバータが接続されているため, 読み出し用 SR への読み出し信号 (SR_clk) の立ち上がり反応して得られる output の電圧レベルの遷移の有無で “1” と “0” を判断する. よって, 読出結果(1), (2), (3)はそれぞれ (0000 0001 1000 0110 1101 0001)₂, (0000 0111 1010 0001 0101 0000)₂, (0000 1111 0100 0010 0111 0001)₂ と読み替える事ができ, これは SFQ TDC により読み出された時間データがそれぞれ 10.0049 μs , 50.0048 μs , 100.0049 μs であることを意味する. 本結果から, 冷凍機内にて SFQ TDC が正常に動作しており, また, 同時に三つの読出結果の端数が最下位ビットまで良く一致していることが分かる. 端数の約 4.9 ns の遅延は, start・read 信号を伝搬する室温のケーブル長の差により生じている.



(a) 入力波形



(b) 読出し結果

図 5.7 測定波形一例

5.2.2.3 SFQ TDC の測定精度

5.2.2.2 で示した冷凍機内における SFQ TDC 単体の測定を 1,000 回繰り返して、その際に得た読み出し結果の分布を図 5.8 に示す。図 5.8 より、入力時間差に対応した大きなピークが得られておりそのバラツキは前後 100 ps 以内に収まっていることが分かる。また、SFQ TDC の潜在的な時間分解能を調査するため、4 章と同様にしてガウス分布を表す式(4.1)を用いて、得られたヒストグラムをフィッティングした。

$$count = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \times \exp\left[-\frac{(T-T')^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.1)$$

ただし、 σ は標準偏差である。

同図中の黒い実線の曲線はそのフィッティングカーブを示している。その結果、(1)、(2)、(3)の各々の読み出し結果のヒストグラムの中央値 T' は、10.004884、50.004885、100.004884 μs であると見積もられた。同様にして、SFQ TDC のダイナミックレンジ (~ 約 1.68 ms) の範囲で得られた複数の測定結果から中央値 T' を求め、入力時間差 T (= 10, 50, 100, 500, 750, 1,250, 1,500, 1,677.7 μs) に対する依存性を図 5.9 に示した。図 5.9 より、得られた ΔT (= $T' - T$) は入力時間差 T によらず、そのバラつきは平均値を中心に数 ps 以内に収まっていることが分かる。以上から、冷凍機内においても液体ヘリウム中同様に SFQ TDC の正常かつ高精度な時間測定に成功したと言える。

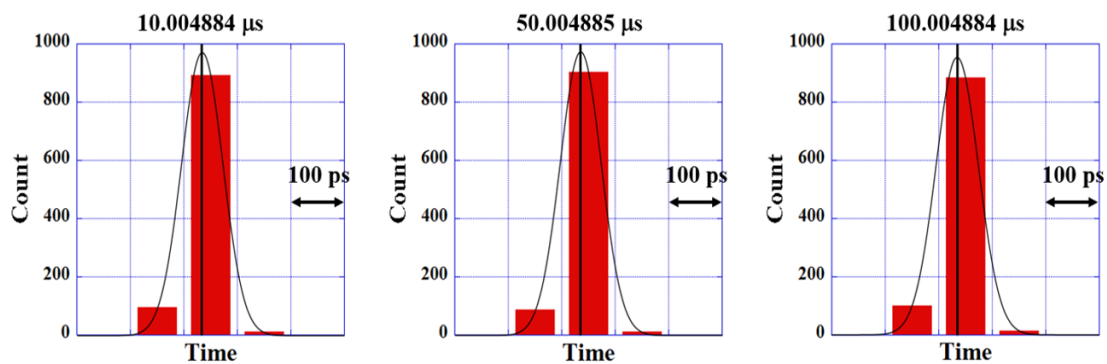


図 5.8 読み出し結果の時間分布 (10, 50, 100 μs の信号時間差を 1,000 回試行)

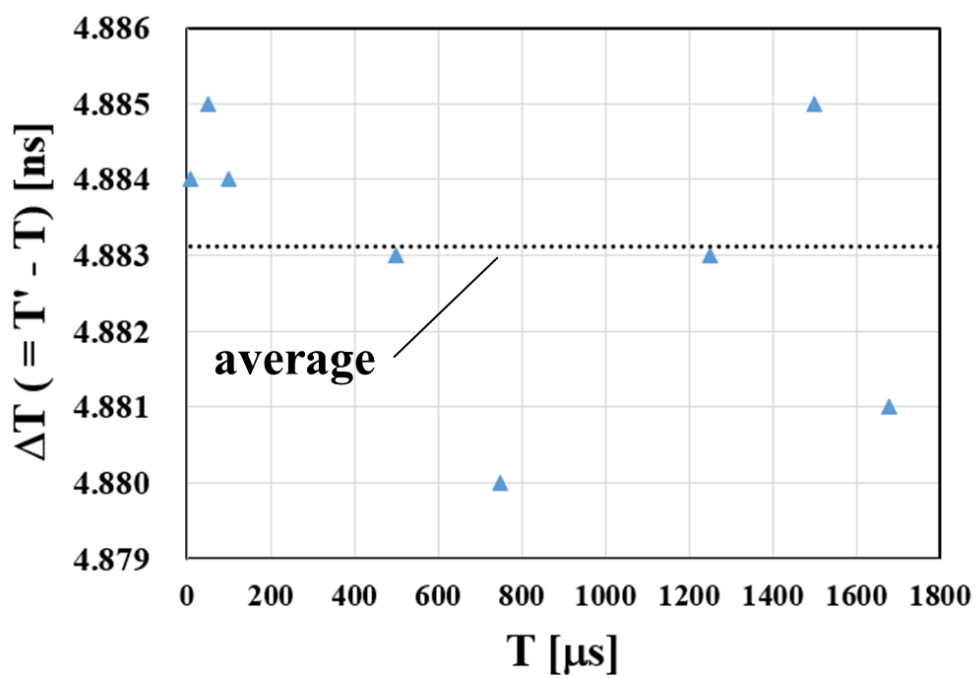


図 5.9 見積もり上のヒストグラム中心値 (ΔT) の入力信号時間差 (T) 依存性

5.2.2.4 動作余裕度

SFQ回路は、回路規模に応じた一定のバイアス電流量が必要である。SFQ回路の動作余裕度は標準バイアスを 2.5 mV とし、その際に供給される電流量を基準 ($\pm 0\%$) として扱う。尚、本実験で用いた SFQ TDC の標準バイアス電流量は約 300 mA である。

図 5.10 に冷凍機内動作試験にて得られた SFQ TDC の動作余裕度を示す。液体ヘリウム中 (4.2K) と比較し、そのバイアスマージンは低バイアス側へとシフトしつつ縮小していることが分かる。この原因は SFQ チップの冷却不足であると考えられる。冷凍機内の温度は常にモニタしているが、図 5.11 に示すように SFQ TDC の動作時には初期温度と比較し 10 mK 以上温度が上昇している。これは、冷凍機による冷却が追いついていないことが意味する。

温度モニタは 4 K ステージ上にマウントされているが、温度モニタと SFQ チップの間は、SFQ チップ-チップキャリア間のボンディングワイヤ、SFQ モジュール、L 字の銅ブロックなどにより隔たれている。このため、SFQ チップの実際の温度はモニタ上の表示温度より高いと考えられる。少なくとも、液体ヘリウム中における動作余裕度が実験的に確認されていることから、冷凍機内における SFQ チップの実際の温度は 4.2 K 以上に上昇していることは間違いない。本結果から、より多くの供給電流量を必要とする大規模 SFQ 回路を現状のセットアップにおいて動作させることは困難であると分かる。

現在の SFQ TDC のバッファ回路にはレジスタが 3 段積まれているが、これはつまり、同時に格納できるカウントデータが最大で 3 個までであることを意味する。しかし、MALDI TOF MS を用いた質量分析においては、一度のレーザー照射時に数十ものイオンが検出される。このため、SFQ TDC のバッファ回路にはレジスタが 10 段程度は必要となり、その際の供給バイアス電流量は 1 A 程度となる。現在使用している冷凍機の冷却能力では 1 A のバイアス電流を要する SFQ TDC を動作させることはできない。本問題を解決するためには、低電流化技術の適用が必要不可欠である。

本研究では、直列バイアス技術を用いた SFQ TDC を開発しているが、その詳細は第 6 章に記述した。

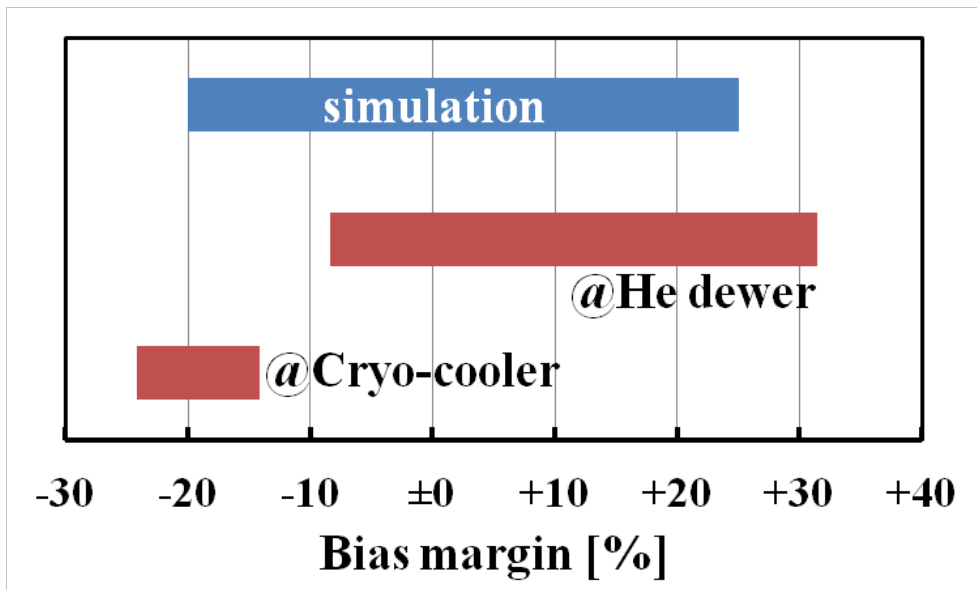


図 5.10 SFQ TDC の動作余裕度

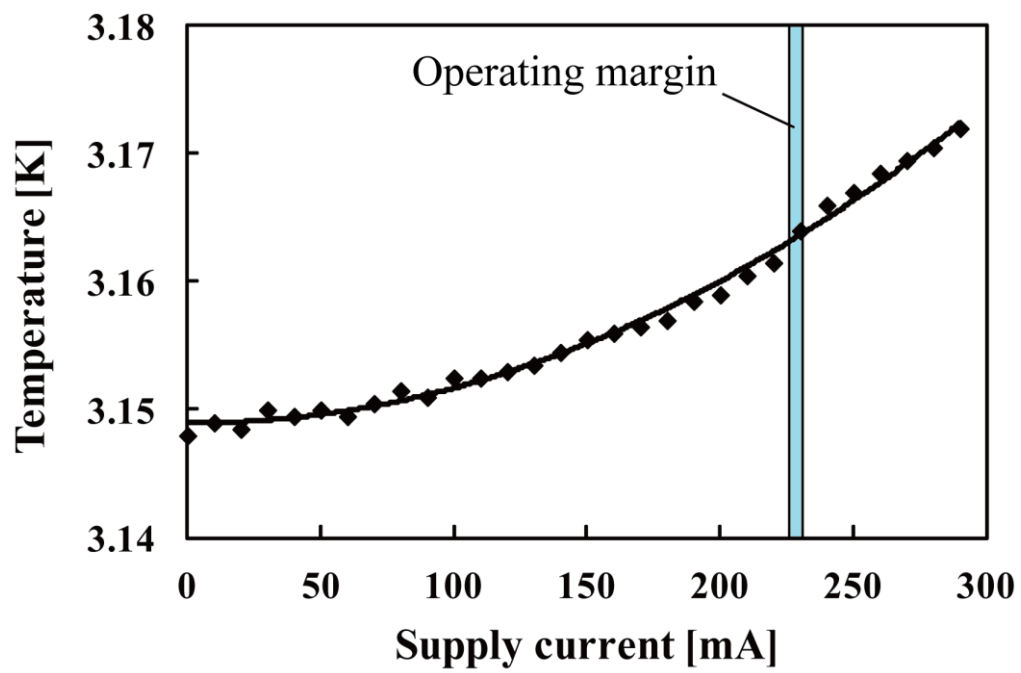


図 5.11 SFQ TDC への供給電流量に対するモニタの平均表示温度

5.3 超伝導分析システムの構築

5.3.1 二冷凍機を用いた分子分析

5.3.1.1 分析装置

5.2 節で述べたように，SFQ TDC 単体の冷凍機内動作実証には成功している．このため，今回，実際に超伝導検出器 (SSPD) と SFQ TDC を組み合わせた分析システムを構築し，生体高分子の飛行時間測定を行った．

まず，超伝導検出器単体，SFQ TDC 単体のそれぞれの動作確認の取れている二つの冷凍機システムを同軸ケーブルで室温を介して接続した．図 5.12 に測定装置の構成を示す．本実験で使用した SSPD は膜厚 40 nm の Nb 薄膜を使用しており，線幅 1 μm のミアンダ状のラインで形成されている．10 本のミアンダを平行に接続し，検出面積は $2 \times 2 \text{ mm}^2$ となっている[19], [85]．また，本研究では，マトリックス支援レーザー脱離イオン化法 (matrix assisted laser desorption / ionization, MALDI) [4][5] を用いているが，本実験では MALDI TOF MS 装置をリニアモードで使用している．リニアモードの測定では，イオンは検出器まで単純に直線的に飛行する．リニアモードを用いて測定した場合，高分解能での分子分析は望めないが短時間でのイオン検出が期待できる．

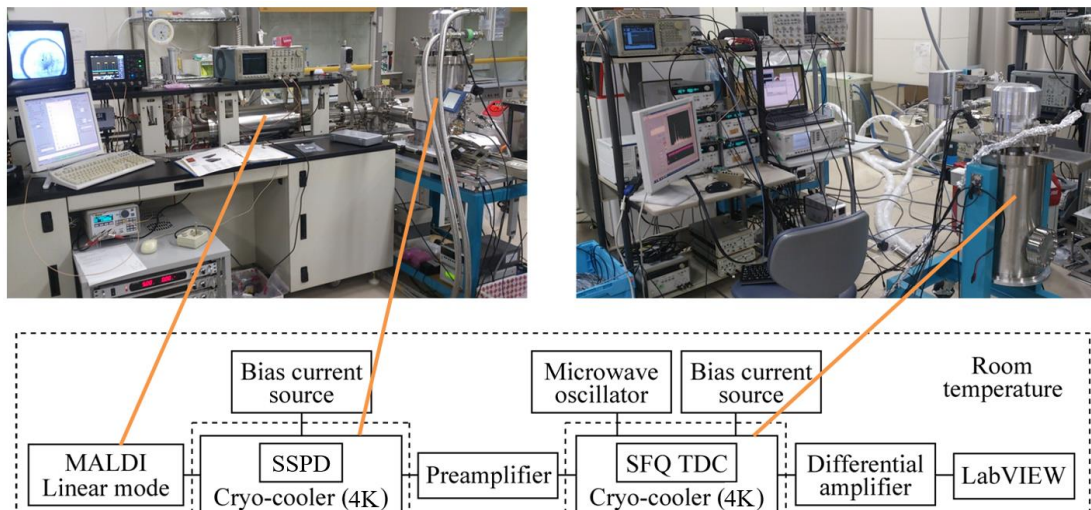


図 5.12 SSPD と SFQ TDC を組み合わせた分析装置の構成

5.3.1.2 SFQ TDC の測定条件

冷凍機内にて SFQ TDC を安定動作させるため、先述の 5.2.2.4 にて得られたバイアスマージンを元に SFQ TDC へのバイアス電流量は 240 mA に固定した。ただし、冷凍機内配線における電力消費を抑えるため、電流供給部は二手に分け 120 mA ずつ供給した。また、超伝導回路への電流供給時にグランドプレーン上に生じる鏡像電流は SFQ 回路の動作を不安定にする。この影響は、電流供給部の直近から供給量と等量の電流を引き抜くことで大幅に抑制できることが知られている[86]。この引き抜き用の電流も含めると、冷凍機内の配線を計 480 mA の電流が流れることとなる。

上記のバイアス条件にて SFQ TDC を動作させたところ、冷凍機の 4 K ステージの温度モニタは約 3.2 K を示していた。

5.3.1.3 SFQ TDC を用いた高分子の分析実験

(i) リゾチームの分析

図 5.12 に示した二冷凍機超伝導分析システムを用いて、分子量約 14,000 Da の生体高分子であるリゾチームの飛行時間を測定した。リゾチームは、ヒトの涙や鼻水などに含まれる酵素の一種である。リゾチームは複数の多量体を形成する高分子であるため複数のマススペクトルが同時に取得可能であり、TOF MS 測定のベンチマークテストに適している。

SFQ TDC を用いてリゾチームの飛行時間を測定した結果の一例を図 5.13 に示す。出力結果は二進数で表されており、SR_clk 信号の入力に対応した output の電位レベルの反転の有無で“1”と“0”を表現している。図 5.13 中の読出結果(1), (2), (3)は、(0001 0100 0100 1111 0100 1100)₂, (0001 0100 1101 0100 0110 0010)₂, (0010 1010 0101 1101 1001 1111)₂ と読み替えることができ、それぞれイオンの飛行時間 133.1020 μ s, 136.5090 μ s, 277.6479 μ s を測定したことを意味する。133.1020 μ s 及び 136.5090 μ s の飛行時間がリゾチームの一価の単量体 (Lys⁺) もしくは二価の二量体 (2Lys⁺⁺) の飛行時間に、277.6479 μ s は一価の四量体 (4Lys⁺) もしくは二価の八量体 (8Lys⁺⁺) に相当する。以上の通り、SSPD と SFQ TDC から構成される超伝導質量分析システムを用いたリゾチームの飛行時間測定に成功した。

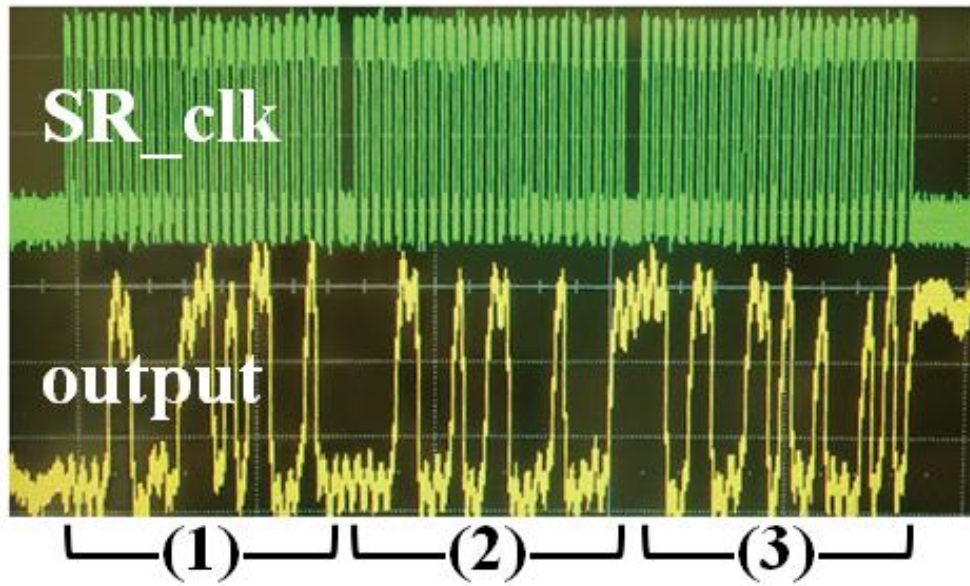


図 5.13 リゾチームの飛行時間の読み出し結果の一例

同様の測定を繰り返し、図 5.14 のようにヒストグラムを作成した。ただし、図 5.14 におけるヒストグラムのビンの幅は 64 ns とした。図 5.14 の(a)は SSPD から出力された信号を従来の室温の半導体 TDC を用いて分析した結果である。これに対し、図 5.14 の(b),(c)の結果は SFQ TDC を用いて読み出した結果である。図 5.14 の結果から、SFQ TDC を用いてリゾチームの飛行時間に対応したマススペクトルが得られていることが分かる。しかし、(a)と比較し(b)のマススペクトルにおいて、飛行時間の短いイオンに対し飛行時間の長いイオンのスペクトルが小さいことが確認できる。これは検出信号の読み飛ばしに依るものである。(b)の測定では、レーザーにより飛行したイオン全てが検出器に到達した後に、TDC に格納された時間データを室温に読み出している。本実験に用いている SFQ TDC は 5.2.2 で述べた通り、同時に格納できる時間データは 3 つまでである。また、バッファのオーバーフロー時には常に最新の TOF データが上書きされる。つまり、測定時にリアルタイムで格納データを読み出さない場合、飛行時間の長いイオンの検出時間はバッファ内レジスタに格納されず読み飛ばしが生じる。本問題は、SFQ TDC の FIFO buffer の非同期読み出し機能を用いることで軽減される。本機能を用いて、飛行時間測定時にリアルタイムで時間データを室温へ読み出した結果が(c)である。本実験では、 $50 \mu\text{s}$ 間隔で SFQ TDC に読み出し信号を入力し、FIFO buffer に格納されたデ

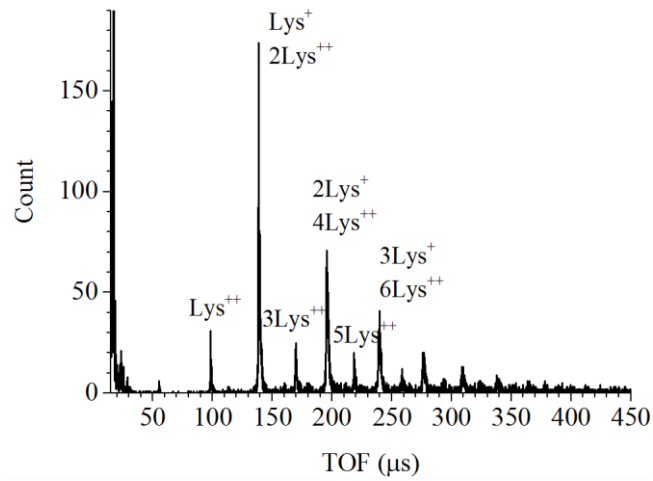
一タの読み出しを TDC 測定と同時に行った。(c)の結果から、(b)と比較し飛行時間のより長いイオンのスペクトルが大きくなったことが確認できる。これは SFQ TDC の FIFO buffer が正常に動作し読み飛ばしを軽減させたことを意味する。

一方で、図 5.15 の(a)に示す通り、(a)と(c)の結果を直接比較したところ、リアルタイム読み出しを行った場合であっても未だに SFQ TDC には読み飛ばしの問題が残っている。本問題を解決するためには、SFQ TDC のバッファ容量の増大が必要であるが本件については第 6 章にて改めて詳しく述べる。

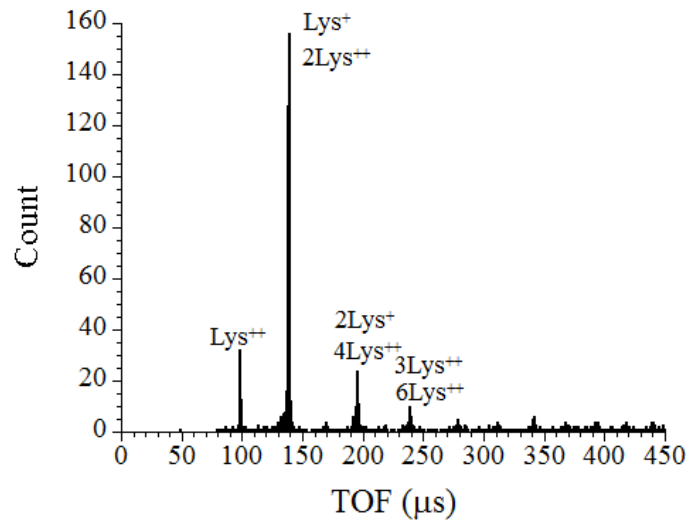
次に、得られたマススペクトルの質量分解能を評価するため、Lys⁺及び 2Lys⁺⁺スペクトルの半値幅の比較について述べる。図 5.15 の(a)の該当部のスペクトル拡大図を図 5.15 の(b)に示す。ただし、縦軸は Lys⁺及び 2Lys⁺⁺のカウント数で規格化した。図 5.15 から、半導体 TDC を用いた場合と SFQ TDC を用いた場合共に半値幅は 596 ns と厳密に一致していることが確認できる。また、この値は質量分解能で表すと $m/\Delta m = 116$ に相当する。

以上より、SSPD と SFQ TDC を組合せた分析システムによりリゾチームのマススペクトルを取得することに成功した。

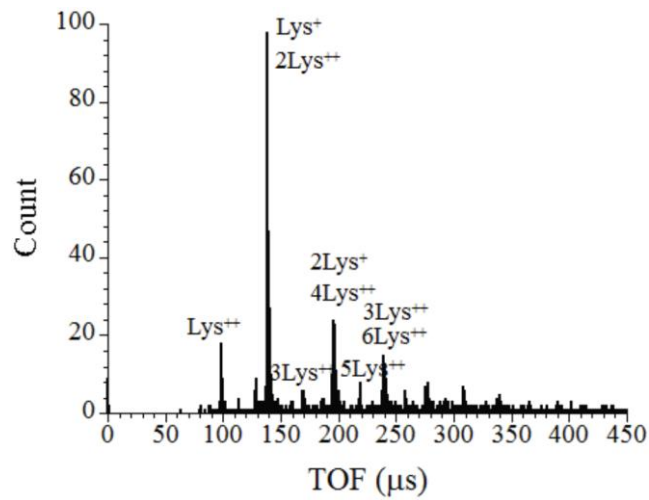
現在、本システムで得られるスペクトルの半値幅はイオン加速部の設定（リニアモード）及び SSPD-SFQ TDC 間の室温を介した接続のバンド幅により制限されている。MALDI 装置の条件の最適化及び SSPD と SFQ の同一冷凍機内への実装により、この半値幅は小さくなることが期待される。



(a) SSPD-Senucibd. TDC

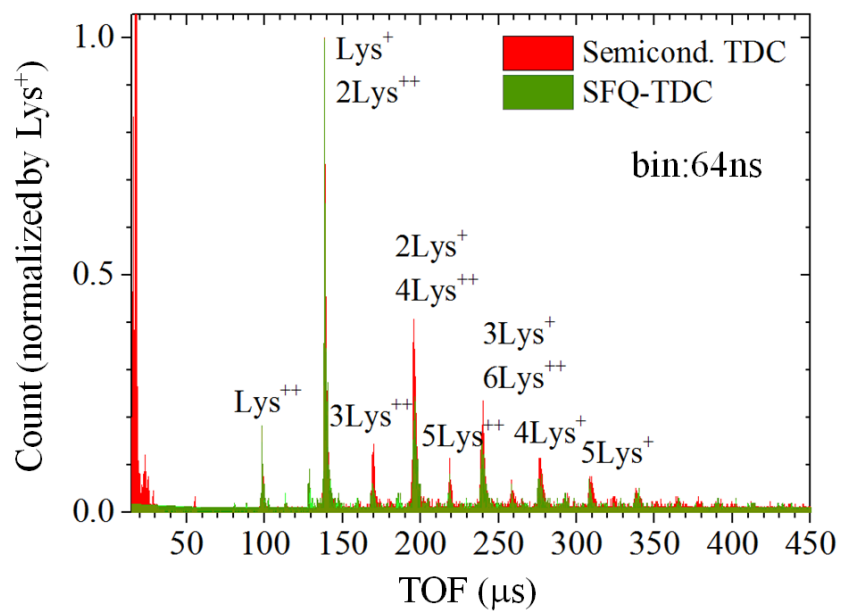


(b) SSSPD-SFQ TDC (測定時非リアルタイム読み出し)

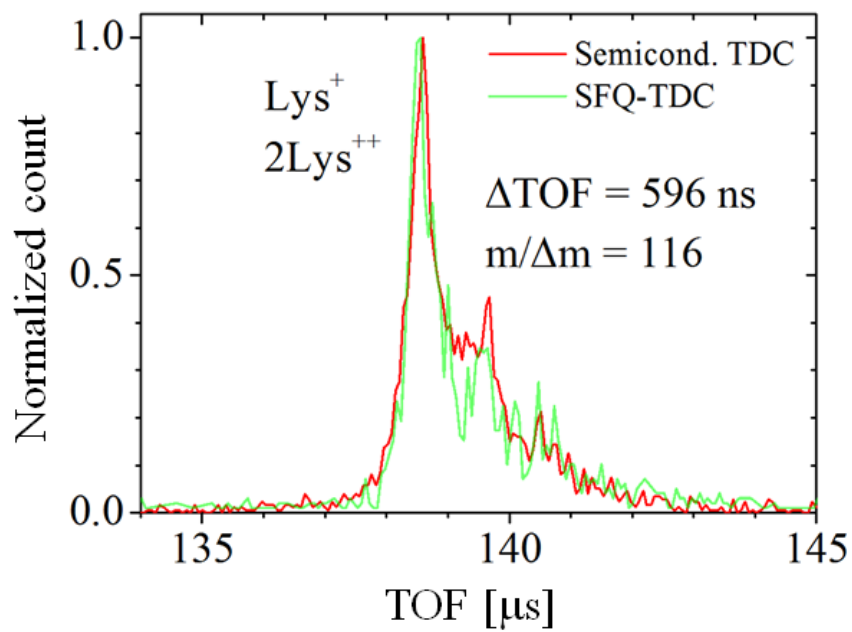


(c) SSPD-SFQ TDC (測定時リアルタイム読み出し)

図 5.14 リゾチーム (分子量: 約 14,000 Da) のマススペクトル. (ビン幅: 64 ns)



(a) Lys^+ で規格化したマススペクトル

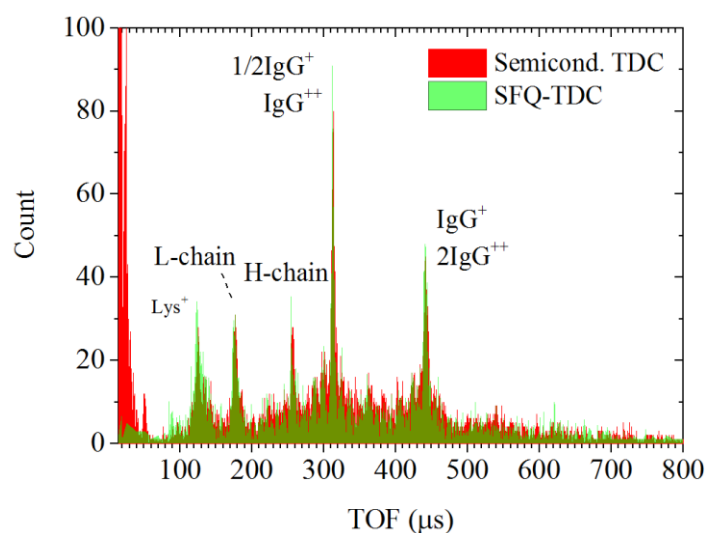


(b) Lys^+ 及び 2Lys^{++} のスペクトルの半値幅

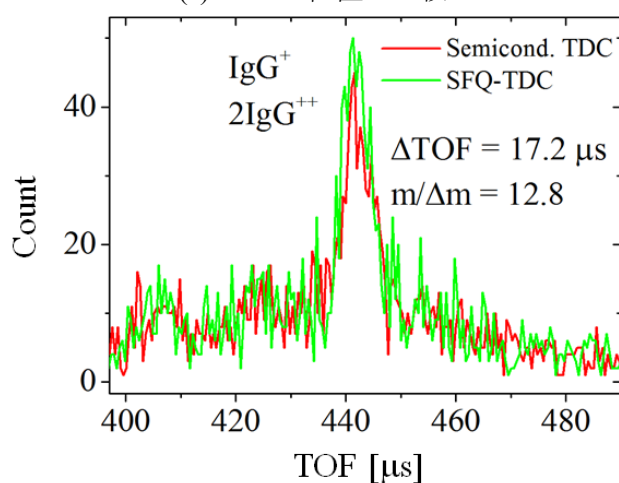
図 5.15 半導体 TDC と SFQ TDC で取得したマススペクトルの比較

(ii) 免疫グロブリン G (IgG) の分析

より分子量の大きな IgG (分子量 : 約 150 kDa) においてもリゾチーム同様に分析を行った。得られたマススペクトルを図 5.16 に示す。ただし、図 5.16 におけるヒストグラムのビン幅は 512 ns とした。IgG はリゾチームと比べ検出頻度が低く、FIFO buffer 容量不足による読み飛ばしの影響が大きく出ない。このため、図 5.16 の(a)に示すように半導体 TDC 及び SFQ TDC を用いた両測定より得られた結果は、スペクトルの位置だけでなく高さにおいても良好に一致している。また、(b)は取得した IgG のスペクトルの拡大図を示しており、半導体 TDC と SFQ TDC の両 TDC から得られたスペクトルの半値幅が一致していることが確認できた。また、半値幅は 17.2 μs であった。



(a) ピーク位置の比較



(b) 半値幅の比較

図 5.16 IgG (分子量 : 約 150 kDa) のマススペクトル (ビン幅 : 512 ns)

5.3.2 単一冷凍機を用いた分子分析

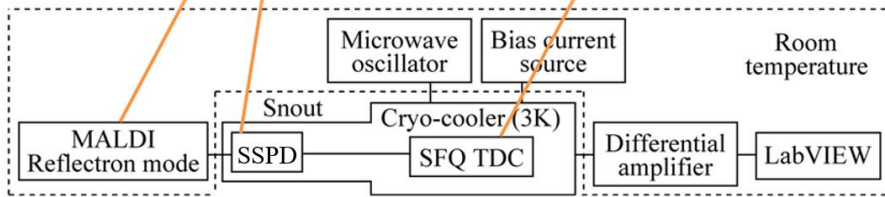
5.3.2.1 分析装置

5.3.1の結果から、SFQ TDCを用いた高分子の分析実験の成功が確認された。そのため、目標の分析システムの実現に向け単チャンネルのSSPDとSFQ回路を同一の冷凍機に実装し、図5.17のように新たにフル超伝導質量分析システムを構築した。本システムの構成を図5.18に示す。SSPDはSFQ回路の実装された冷凍機のスナウトの先端に図5.18の(b)のように取り付けられ、MALDI装置のフライトチューブ内に配置されている。また、(c)に示すように、実装時にはスナウトの先端は50 Kのシュラウドで覆われており、イオンの通過部は熱の流入を抑制するためシールドされている。

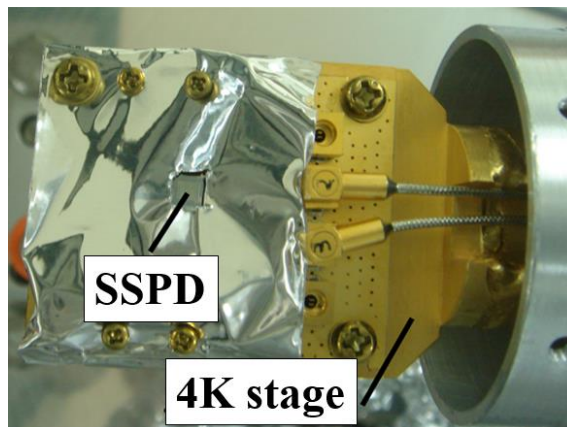
温度モニタはSFQモジュールのマウントされた4 KステージとSSPD実装部の二か所に設置されており、それぞれ、3.2 K, 3.4 Kを示していた。また、本実験ではSFQ TDCの高分解能性を活用するため、MALDI TOF MS装置をリフレクトロンモードで使用している。リフレクトロンモードでの測定では、飛行させたイオンを静電界ミラーにより反射させ飛行時間分布を集束される仕組みが取られており、分解能を向上させることができる。その一方で、カウントレートは低減されるためカウントの蓄積に時間がかかってしまう。



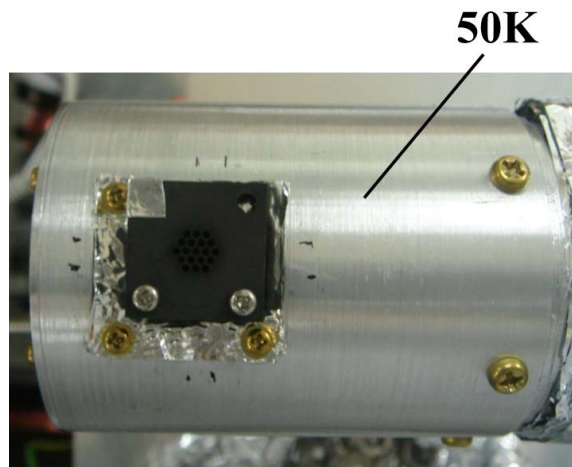
図 5.18 単一冷凍機分析システム全体の外観



(a) 構成



(b) 冷凍機のスナウト先端に取り付けられた SSPD



(c) MALDI 実装時のスナウト先端

図 5.17 単一冷凍機分析システム

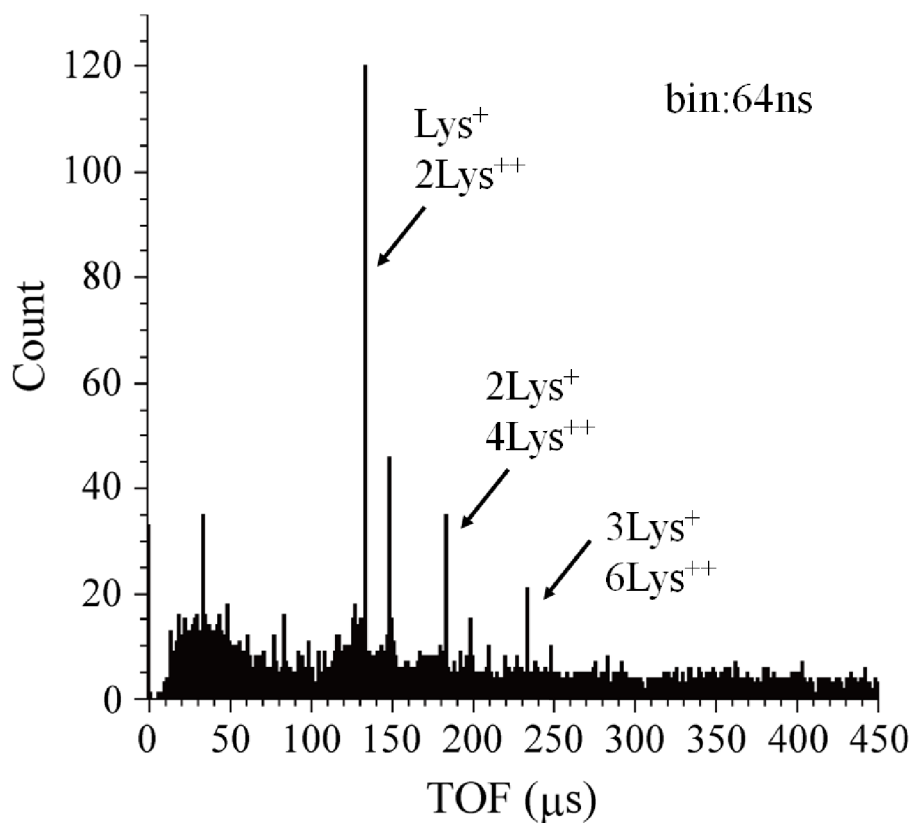
5.3.2.2 SFQ TDC の測定条件

測定条件は 5.3.1.2 の二冷凍機使用時と同様にし、SFQ 回路へのバイアス電流量は 240 mA に固定し等量の電流を引き抜き動作させた。冷凍機の 4 K ステージの温度も 6.2.2 の時と同様に約 3.2 K を示していた。

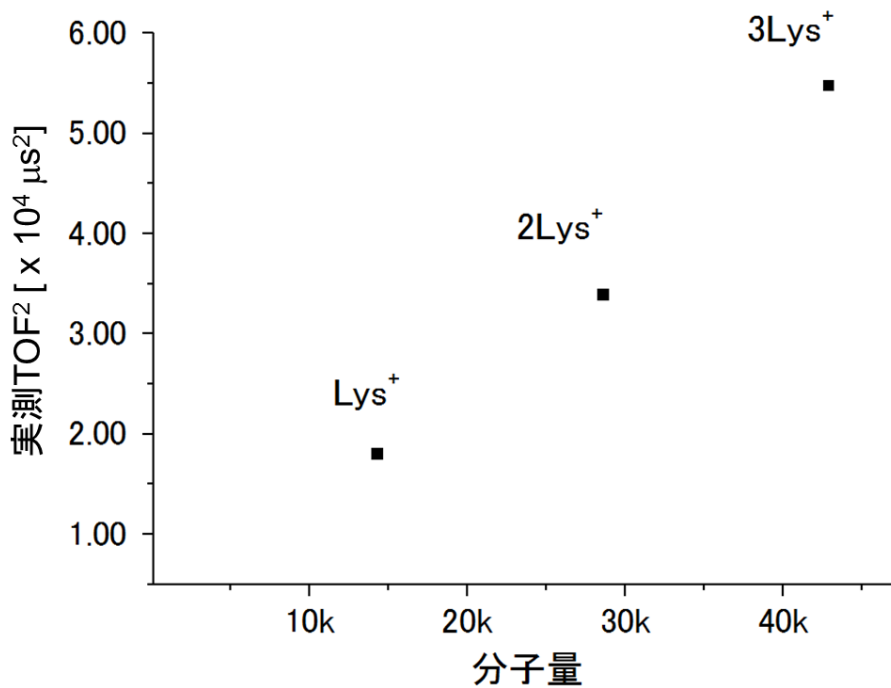
5.3.2.3 SFQ TDC を用いた高分子（リゾチーム）の分析実験

本実験においては、SSPD の出力部は冷凍機内で直接 SFQ 回路の入力部に接続されている。そのため、リゾチームのマススペクトルは SFQ TDC のみを用いて取得した。本実験にて得られたスペクトルを図 5.19 の(a)に示す。上記の通り、今回は SFQ TDC のみを用いて測定をしたため、図 5.19 の(b)に示すように、得られたスペクトルのピーク位置（実測の TOF の二乗）とリゾチームの推定分子量からスペクトル位置の妥当性を評価した。ただし、Lys⁺の推定分子量は 14,300 Da とした。図 5.19 の(b)から良好な線形性が確認でき、本測定で得られたスペクトルはそれぞれリゾチームとその多量体を示していると考えられる。これらの結果から、単一冷凍機を用いた場合においてもリゾチームの分析実験に成功したと言える。

また、上記の通り、リゾチームの妥当なスペクトルの取得には成功したが、図 5.19 の(a)にて確認できるようにリゾチームの飛行時間に対応した各スペクトルの約 16 μ s 後に予期せぬゴーストピークも観測された。各ゴーストピークの位置に規則性があることから、これは SFQ TDC のカウンタにてデジタルエラーが起きていると考えられる。本件に関しては次節にて詳細を述べる。また、同図にて、ゴーストピーク以外にも多くのノイズピークが観測されている。本実験では、MALDI TOF MS 装置側の分解能を向上させるため、リフレクトロンモードを使用しておりイオンの検出レートが低下している。このため、ノイズピークが相対的に大きく観測された。



(a) マススペクトル

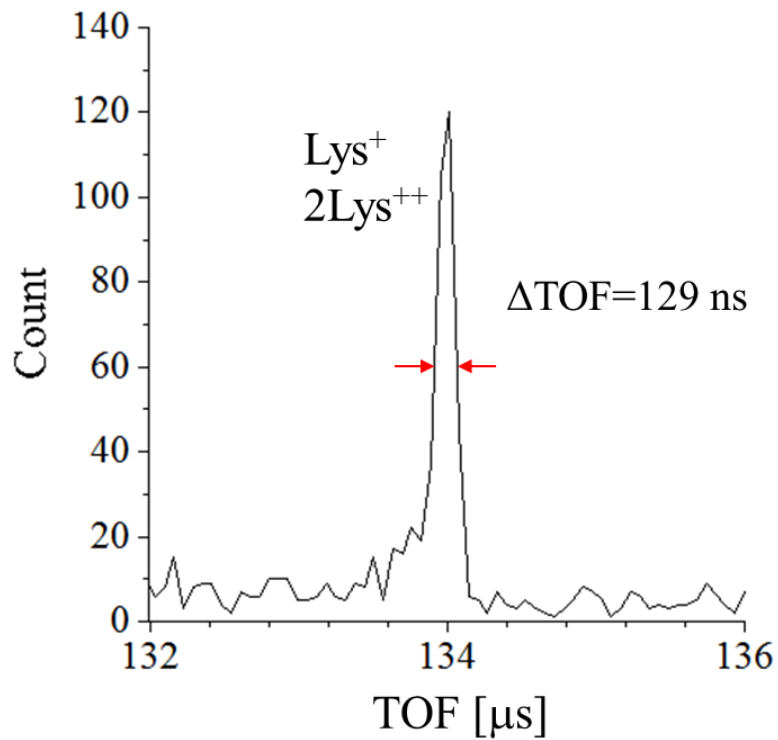


(b) ピーク位置 vs 推定分子量

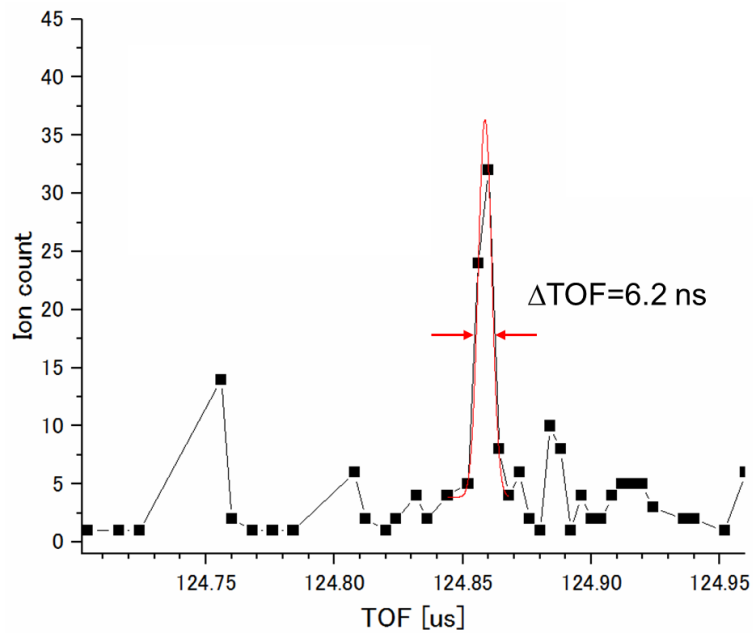
図 5.19 単一冷凍機分析システムを用いて取得したリゾチームのマススペクトル

5.3.2.4 半値幅による測定精度の評価

5.3.2.3 にてリゾチームの妥当なスペクトルが得られたため、次にその半値幅について評価する。5.3.2.1 にて述べた通り、本実験では MALDI のリフレクトロンモードを使用しており、得られる半値幅はリニアモード使用時と比較し狭くなると期待される。本実験で得られた一価の単量体 (Lys^+) 及び二価の二量体 (2Lys^{++}) のリゾチームのスペクトルの拡大図を図 5.20 の(a)に示す。リニアモードで測定した際に得られた半値幅が 5.3.1.3 にて示したように約 600 ns であったのに対し、本測定系で得たスペクトルの半値幅は 129 ns となり、より狭い半値幅を得ることができた。しかし、過去に同様にリフレクトロンモードを用いて SSPD 単体でリゾチームを測定し得られたスペクトルの半値幅は、図 5.20 の(b) (AIST より提供) に示すように 6 ns 程度あった。高分解能性に優れた SFQ TDC を用いて読み出したにも関わらず、今回得られたスペクトルの半値幅には SSPD で得たものに及ばない。使用した測定環境が全くの同一ではないことに加え TOF のバラつきは試料の鮮度にも依存するため、両結果を直接比較することは難しい。しかし、その差は 20 倍以上あり無視できる数値ではない。これは、本測定で設定した MALDI におけるイオン化レーザーの強度によるものと考えられる。まず、今回使用した SSPD の出力電流が 200~300 μA 程度であったのに対し、SFQ TDC の入力部の DC/SFQ コンバータの入力感度は 300~540 μA 程度 (実験値) であり、検出器信号の読み落としが頻発した。(二冷凍機システムにおいては、室温にアンプを挟み検出器信号を増幅していた。) そのため、イオンの発生率を高めるため MALDI のレーザー強度を高め設定していた。しかし、レーザー強度はスペクトルの質を決定するための重要なパラメータであり、強度を上げるほど生じるイオンの初期運動エネルギーにバラつきが生じ飛行時間の精度は低下してしまう。これが今回良質なスペクトルを得られなかった要因である。今回使用した DC/SFQ コンバータは設計上 100 μA 程度の電流であれば十分検出が可能である (4 章)。DC/SFQ コンバータの感度の低下も SFQ チップの温度上昇によると考えられ、SFQ 回路の冷凍機内安定動作を可能とする技術が求められる。



(a) 単一冷凍機システムにて得たスペクトル. bin 幅 : 64 ns



(b) 過去に測定された SSPD 単体の読み出し結果. bin 幅 : 4 ns (AIST より提供)

図 5.20 リゾチームのマススペクトル拡大図

5.3.3 ノイズピークの原因と対策

ノイズピークの原因は、MALDI 装置における遅延引き出し法 (PE : pulsed extraction) [87]にて印加される加速電圧であることが実験的に分かった。PE 法とは、イオンの加速電圧をイオンの発生時間から少し遅らせて印加する方法である。PE 法の概念図を図 5.21 に示す。試料のイオン化は、レーザー照射後もしばらく続くためイオンの発生時間に差が生じる。そのため、イオンを常時加速した場合、発生時間に依存して飛行時間に差が生じてしまう。また、生じたイオンの初期エネルギーの差も飛行時間をばらつかせる。そこで、図 5.20 の(a)に示すように一定時間は MALDI 装置の flight tube 内の引き出し電極を一定に保ち、その後 (数 10 ns) , (b)に示すような勾配を持たせた電圧印加により、対象のイオンの発生後に各イオンの初期エネルギーに応じた加速電圧を加えることができる。これにより質量分解能は向上するが、瞬時に 2.5 kV もの電位変化が測定系内で起きることで SFQ 回路は誤動作しうる。

図 5.17, 5.18 の実験系を用いた測定から、PE の電位変化を 0.8 kV 以下に下げることによって SFQ 回路が正常動作することが確認された。一方で、この条件ではイオンが正常に検出されないことが分かった。以上より、本問題は MALDI デバイス-冷凍機システム間の電氣的絶縁により解決可能であると思われる。

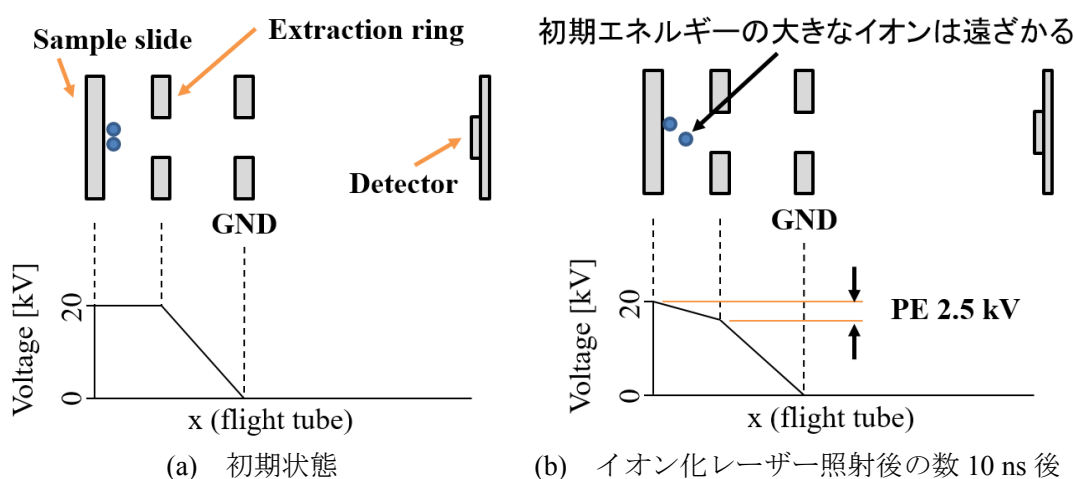


図 5.21 遅延引き出し法の概念図

5.4 まとめ

二冷凍機システムを用いて SSPD と SFQ TDC を用いた世界初の超伝導分析システムによる TOF 測定に成功した。得られたマススペクトルは半導体 TDC を用いた際と厳密に一致し、SFQ TDC の検出器への応用可能性を示した。その後、単一冷凍機システムにおいても妥当なスペクトルの取得に成功した。一方で、SFQ TDC の冷却問題とバッファ容量の不足が課題であると明らかになった。両問題の解決については 6 章にて詳細を述べる。

第6章 カレントリサイクル SFQ TDC

6.1 本章の概要

本章では、カレントリサイクル技術について述べた後、必要となる要素回路と本技術を適用した SFQ TDC について述べる。

6.2 SFQ TDC のバッファ容量増大のための課題

一般的に SFQ 回路の動作にはその回路規模に応じた一定のバイアス電流の供給が必要であるが、回路規模の増大に伴うバイアス電流量の増大がより大規模な SFQ 回路の実現の大きな妨げとなる。

まず、2章で述べた通り、SFQ 回路は磁束の最小単位である磁束量子を情報担体とした回路であり極めて磁場の影響に敏感である。そのため、供給バイアス電流の増大はその自己場ですら回路の動作余裕度を狭めうる[88]。また、現在の SFQ 回路の動作評価は液体ヘリウム中で行われることが一般的だが、実用化にあたり極低温冷凍機における動作は必要不可欠である。しかし、供給電流量の増大は、上記の問題に加え冷凍機内の配線抵抗の発熱による冷凍機内温度の上昇という問題も引き起こす。両問題の解決が SFQ TDC のバッファ容量の増大のための大きな課題である。本研究では、上記の問題を解決可能なカレントリサイクル技術[50]-[53]に着目した。

冷凍機内の温度上昇の要因としては、先述の冷凍機内配線における発熱と SFQ チップ自体の発熱が挙げられる。SFQ チップの発熱を抑える場合、LR-RSFQ[37], [38], 低電力 RSFQ[39], ERSFQ/eSFQ[40]-[42]などの SFQ 回路自体の消費電力を低減する技術が必要となる。一方で、本研究で用いるカレントリサイクルの場合、供給する電流量が低減されるだけで回路の静的消費電力自体は変化しない。本研究で用いる SFQ 回路の静的消費電力は、数百 μ W から数 mW 程度あり、0.5-W/4-K 冷凍機の冷却能力に対し十分に消費電力は小さい。このため、本研究において最も問題であるのは、冷凍機内の配線抵抗における発熱であり、カレントリサイクル技術の適用が最も有効であると考えられる。

6.3 カレントリサイクル

6.3.1 バイアス供給方法

従来の SFQ 回路の場合、バイアス電流は図 6.1 の(a)に示すように回路全体に並列に供給される。このような並列バイアス供給の場合、 N 個の SFQ 回路ブロックに対して NI [A] のバイアス電流が必要となり、回路規模に比例して総バイアス電流量は増大する。これに対し、カレントリサイクル技術を用いた場合、図 6.1 の(b)のように複数の SFQ 回路ブロックを異なるグランドプレーンに配置し、それらを直列に接続することでバイアス電流を再利用する。本技術を用いることで、 N 個の SFQ 回路ブロックに対しても必要となる総バイアス電流量は I [A] となる。カレントリサイクル技術の研究やその実証報告は数多くされているが、未だ実証回路の回路規模及びリサイクル電流量は大きくても 1,500 接合及び 10 mA 程度である[89]。本研究では、より大規模な回路にてより大電流のリサイクルを実現するという目標も掲げている。

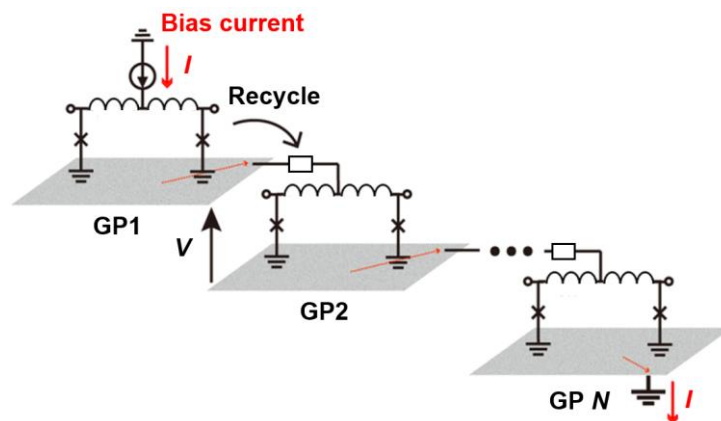
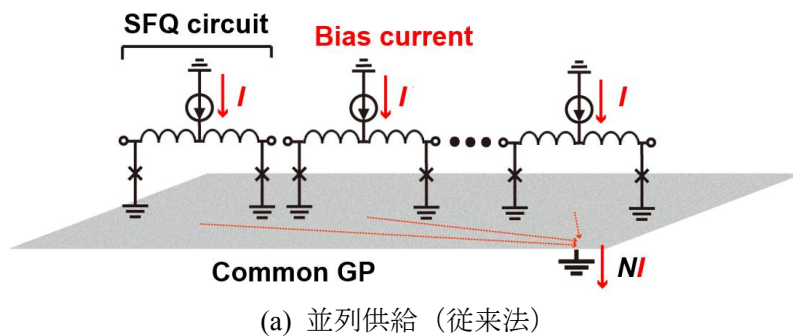


図 6.1 電流供給方式

6.3.2 非接触信号伝送回路 (driver/receiver 回路)

6.3.2.1 driver/receiver 回路の動作

カレントリサイクルを用いた場合、図 6.1 の(b)のように各回路ブロックの配置されたグランドプレーン間に電位差が生じ、各グランド上の SFQ 回路の信号伝達ラインを直接結線することはできない。このため、各グランドプレーン上の SFQ 回路間を非接触で通信可能な信号伝送回路 (driver/receiver 回路) が必要となる。本回路は driver 回路と receiver 回路から構成されるが、本研究では両回路間の結合部にはインダクタンスを用いた磁気結合を採用している。driver/receiver (D/R) 回路の等価回路図を図 6.2 に示す。input へ SFQ パルスが入力されると、 J_1, J_2 の Josephson 接合がスイッチし、 J_2, L_1, R_0 で構成されるループに電流が流れる。この時、磁気結合構造により receiver 回路の J_3, L_2, J_4 で構成される超伝導量子干渉計 (SQUID, superconducting quantum interference device) が磁場を検知しスイッチすることで SFQ パルスが生成され output へ伝搬される。

D/R 回路の設計においては、磁気結合部におけるインダクタンス L_1, L_2 及び結合係数 k の値が極めて重要である。SFQ 回路のレイアウト設計において、これまでは Lmeter [90] と呼ばれるインダクタンス抽出ツールが広く用いられてきた。しかし、D/R 回路の磁気結合部のような複雑な三次元構造をとるレイアウトには上記のツールは不十分である。そのため、本研究では、ステルンボッシュ大学にて開発されているインダクタンス抽出ツール InductEx [91] を用いて磁気結合部の最適化を図った。

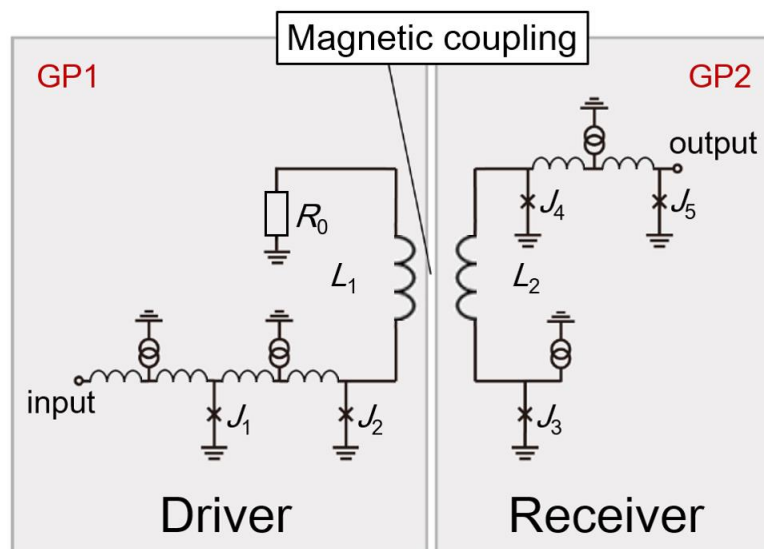


図 6.2 driver/receiver 回路の等価回路図

6.3.2.2 磁気結合部の構造

磁気結合部の構造を図 6.3 に示す. D/R 回路の磁気結合部は driver 回路側と receiver 回路側のグランド境界の直近に位置している. 図 6.3 の(a)に示す通り, receiver 回路は磁束の高感度検出の可能な SQUID 構造が用いられているが, グランド境界に集中するグランド電流のつくる磁場の影響まで受けてしまう可能性が懸念される. これまで用いられていた D/R 回路の磁気結合部は, 図 6.3 の(b)に示すようにグランド境界と平行に配置されており, 上述の影響を直接的に受けてしまう. これが大規模回路にてカレントリサイクルの動作実証がされていない原因であると考えた. 本問題を解決するため, 図 6.3 の(c)に示すような磁気結合部をグランド境界と垂直に配置した構造が提案された [92].

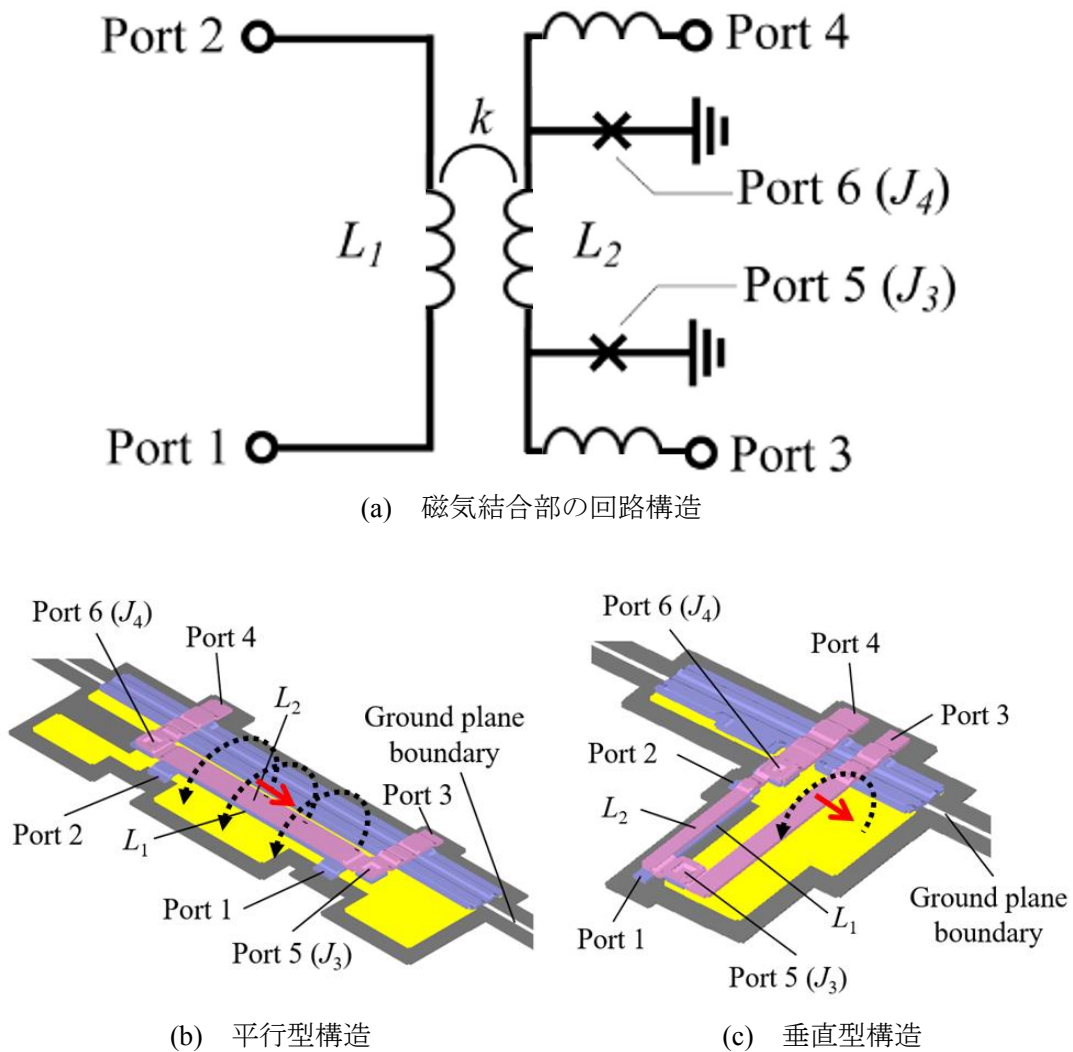
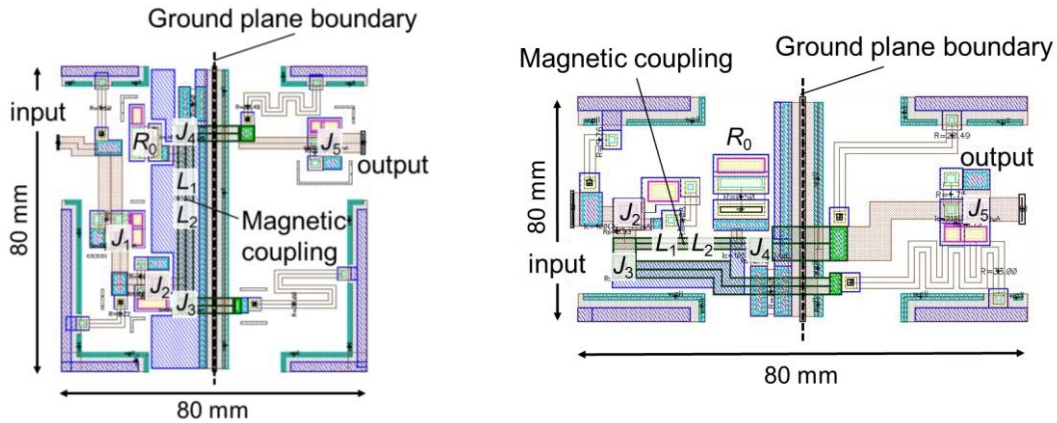


図 6.3 D/R 回路の磁気結合部

6.3.2.3 垂直構造のグラウンド電流に対する耐性の評価

図 6.4 の(a), (b)のように平行型と垂直型の D/R 回路を各々設計し、磁場耐性を実験的に評価した。図 6.4 の(c)の D/S, JTL, D/R, S/D のみで構成される単純な回路にて動作余裕度を調査した。driver 回路と receiver 回路のバイアスは独立して行い、グラウンド境界と平行に外部からグラウンド電流 (0 mA, 10 mA, 20 mA) を供給してその依存性を調べた。測定結果を図 6.5 に示す。図より、平行型 receiver 回路のバイアスマージンがグラウンド電流の供給量に応じて大きくシフトするのに対し、垂直型構造ではシフト量が大きく軽減されている。本結果から、垂直構造によりグラウンド境界に集中する電流により生じる磁場の影響を抑制可能であると確認された。一方、垂直型構造を採ることで J_3 の寄生インダクタンスが増大し、receiver 回路のマージンは制限されてしまう。



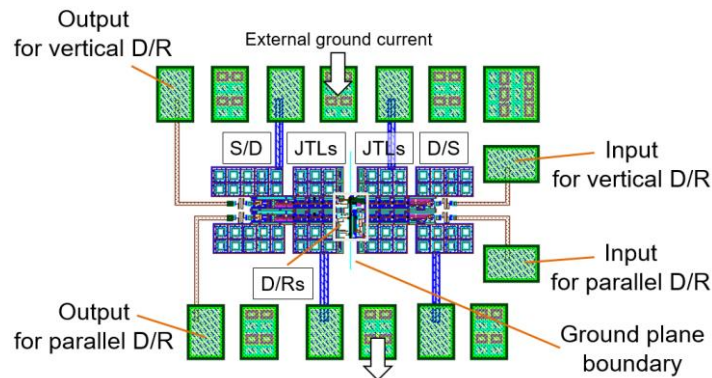
(a) 平行型構造の D/R 回路

$$L_1 = 6.59 \text{ pH}, L_2 = 9.95 \text{ pH}.$$

(b) 垂直型構造の D/R 回路

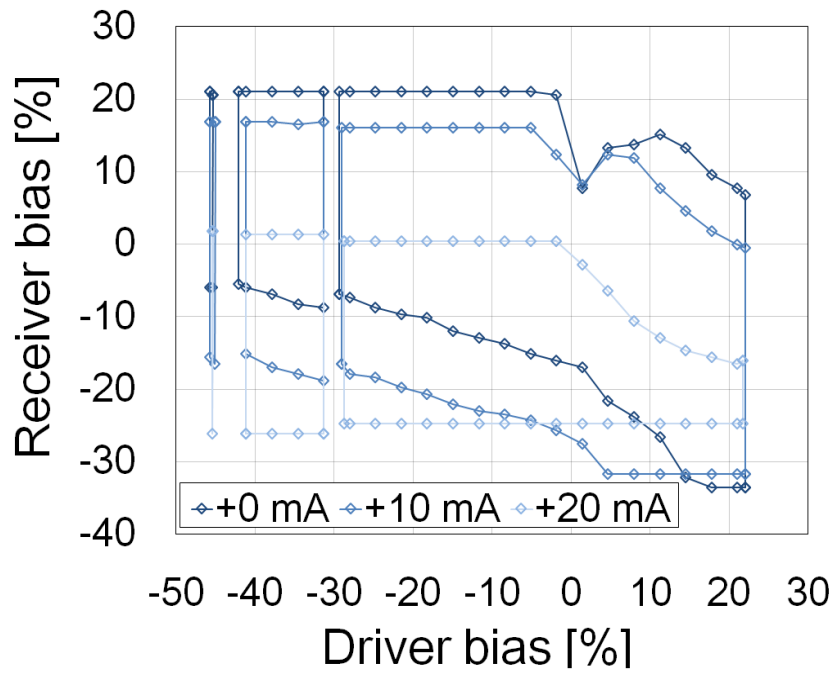
$$L_1 = 6.07 \text{ pH}, L_2 = 9.80 \text{ pH}.$$

ただし、 $I_c(J_1) = 280 \mu\text{A}$, $I_c(J_2) = 400 \mu\text{A}$ ($\beta_c = 15$), $I_c(J_3) = 95 \mu\text{A}$ (unshunted), $I_c(J_4) = 100 \mu\text{A}$ ($\beta_c = 0.03$), $I_c(J_5) = 216 \mu\text{A}$, $k = 0.40$, $R_0 = 0.5 \Omega$ は、共通のパラメータである。

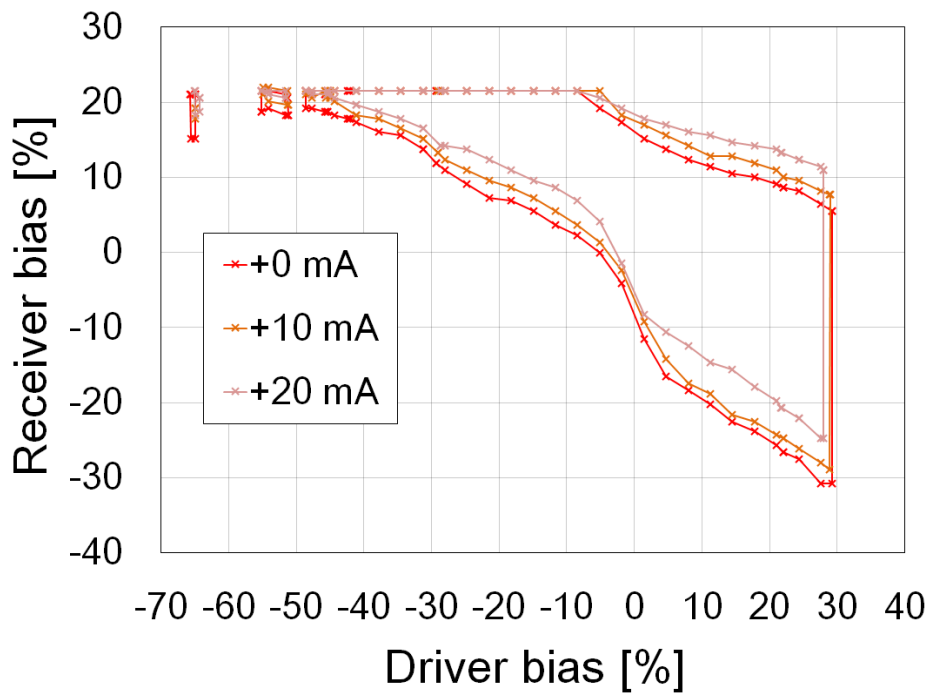


(c) 評価用回路

図 6.4 バイアスマージン評価用 D/R 回路のレイアウト



(a) 平行型構造

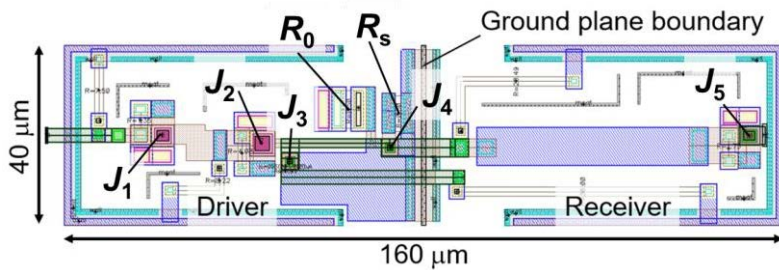


(b) 垂直型構造

図 6.5 D/R 回路のグラウンド電流に対するバイアスマージンの依存性

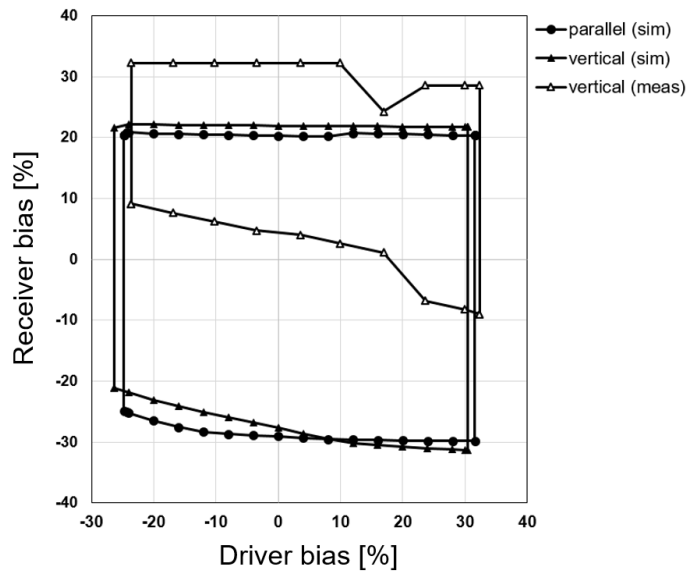
6.3.2.4 寄生インダクタンスの低減

receiver 回路の動作余裕度を向上させるため、接合 J_3 の寄生成分の低減に取り組んだ。再設計した D/R 回路のレイアウトを図 6.6 の(a)に示す。 J_4 のシャント抵抗 R_s の配置を変更しつつ receiver 回路側から伸びている疑似的なグランド層 (BAS 層) の面積を可能な限り広くとれるようにレイアウトを変更した。以上のようにし、 J_3 の寄生インダクタンスを 1.81 pH から 1.12 pH に低減した。平行型構造採用時 (0.67 pH) には及ばないが、図 6.6 の(b)のようにシミュレーションにて平行型構造に近いバイアスマージンを得た。また、本 D/R 回路単体の動作を測定し、同図に示すバイアスマージンにて正常動作を確認した。実験では、receiver 回路の動作余裕度は高バイアス方向にシフトしつつ縮小したが、SFQ TDC に適用可能な十分に広いマージンを確保することはできた。



(a) レイアウト

各素子パラメータは、 $I_c(J_1) = 280 \mu\text{A}$, $I_c(J_2) = 400 \mu\text{A}$ ($\beta_c = 15$), $I_c(J_3) = 95 \mu\text{A}$ (unshunted), $I_c(J_4) = 100 \mu\text{A}$ ($\beta_c = 0.03$), $I_c(J_5) = 216 \mu\text{A}$, $R_0 = 0.5 \Omega$, $L_1 = 6.26 \text{ pH}$, $L_2 = 9.04 \text{ pH}$, $k = 0.409$ となった。



(b) バイアスマージン

図 6.6 寄生インダクタンスを低減した垂直型 D/R 回路

6.4 カレントリサイクル技術の SFQ TDC への適用

6.4.1 冷凍機内動作のため低減すべき電流量

本研究で用いる冷凍機は 5 章で述べたように 0.5-W/4-K パルスチューブ冷凍機である。このため、室温系-SFQ チップ間の配線抵抗を仮に $1\ \Omega$ と見積もっても供給可能な電流量の上限は、700 mA 程度となる。引き抜きの電流量も考慮するとその値は更に半分となる。また、実験的に SFQ TDC の動作の確認できているバイアス電流量が 240 mA であることも踏まえ、カレントリサイクル技術を用いた SFQ TDC の供給電流量は 240 mA 未満を目標とした。

6.4.2 SFQ TDC の低電流化

動作の確認された driver/receive 回路を用いて、動作実証済みの 3×24 -bit の SFQ TDC にカレントリサイクル技術を適用し低電流化を図った。今回設計したカレントリサイクルを用いた SFQ TDC の構成を図 6.7 に示す。

本 TDC は、4 章に示した TDC 同様、24-bit の二進カウンタ、Muller-C 回路を用いた非同期式の FIFO (first-in first-out) 制御部と 3 段の 24-bit レジスタからなるバッファ、読み出し用の 24-bit シフトレジスタ (SR) で構成される。今回、カレントリサイクルを適用するため、バッファ内のレジスタおよび読み出し用のレジスタを全て異なるグラウンドプレーン上に配置し、1 段目のレジスタ (buffer 1) に供給した電流を buffer 2, buffer 3, 読み出し用レジスタと順次再利用できるようにした。D/R 回路はカウンタ-レジスタ間および各レジスタ間、また、FIFO 制御部に挿入した。本回路には全部で 132 個の D/R 回路が使用されている。

図 6.7 に基づいて本回路の動作を簡単に述べる。

まず、外部から入力する “start” 信号によりカウンタは時間測定を開始し、同時に FIFO 制御部に set 信号を送り FIFO 制御部の機能をオン状態とする。その後に検出信号である read 信号が入力されるとその時点での測定時間データが非同期的にバッファに格納される。バッファに格納された時間データは 1 発の “buffer_clk” 信号と 24 発の “SR_clk” 信号を入力することで buffer 3 から読み出し用レジスタに移り室温へと読み

出すことができる。また、カウンタがオーバーフローすると測定を終了しつつ測定を終了した合図として **overflow** 信号を出力する。

上記のようにして設計した SFQ TDC のレイアウトを図 6.8 に示す。カレントリサイクル適用前後の接合数及び供給電流量を表 6.1 に示す。カレントリサイクル技術を用いることでバッファ及び読み出し用レジスタ部の供給電流量を低減した。カウンタ部を含めた総供給電流量としては 26%低減することに成功し、総供給電流量は 224.4 mA となった。一方で、D/R 回路に含まれる接合及び電流をリサイクルする各ブロック間の電流量を等しくするための余剰接合により接合数は従来の TDC と比較し 44%増大している。接合数の増大は後者による影響が大きく、これは主にリセット機構を有する buffer 1 に制限されている。

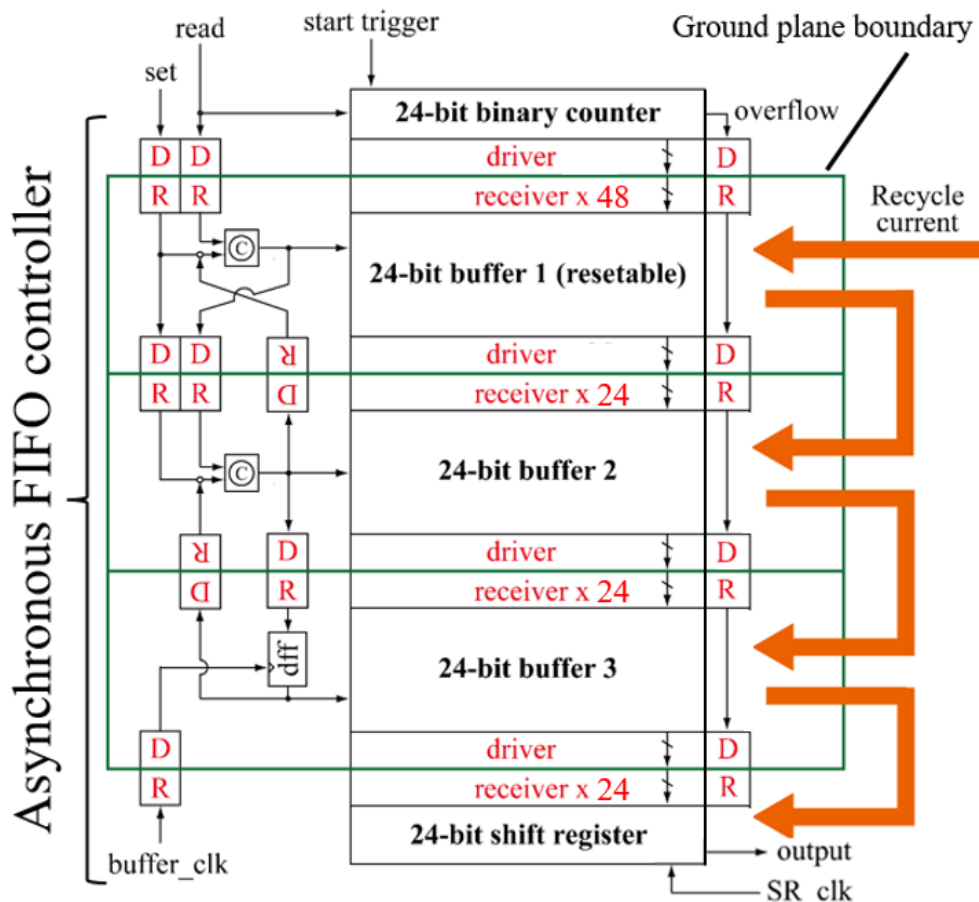


図 6.7 カレントリサイクルを適用した 3 × 24-bit の SFQ TDC の構成

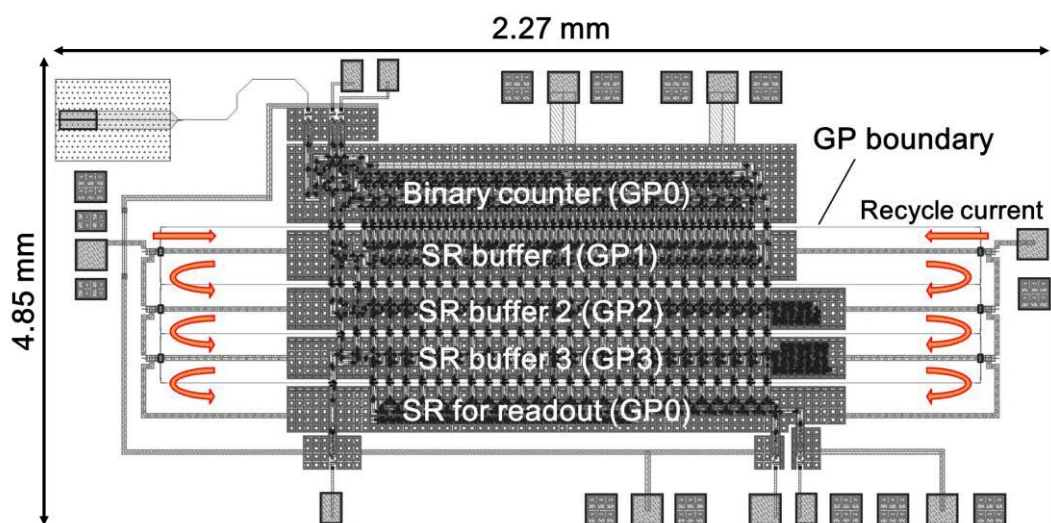


図 6.8 カレントリサイクルを適用した 3 × 24-bit の SFQ TDC のレイアウト

表 6.1 3 × 24-bit SFQ TDC の接合数及び供給電流量

	カレントリサイクル 未適用時	カレントリサイクル 適用時
接合数	2,684 JJ	3,851 JJ
総供給電流量	303.4 mA	224.4 mA
カウンタ用電流	-	136.2 mA
リサイクル電流	-	88.2 mA

6.4.3 3 × 24-bit のカレントリサイクル SFQ TDC の測定結果

今回, SFQ TDC 単体の動作を評価するため, 室温のデータジェネレータを用いて “start” 信号と “read” 信号を入力した. なお, 本実験で用いた SFQ TDC の時間分解能は 100 ps である. 測定波形の一例として, 図 6.9 に両信号の入力時間差が 10 μs , 50 μs , 100 μs の時の入出力波形を示す. 出力結果は二進数で表されており, SR_clk 信号の入力に対応した output の電位レベルの反転の有無で “1” と “0” を表現している. 読み出し結果(1), (2), (3)は, (0000 0001 1000 0110 1010 0010)₂, (0000 0111 1010 0001 0010 0001)₂, (0000 1111 0100 0100 0100 0010)₂ と読み替えることができ, それぞれ時間差 10.0002 μs , 50.0001 μs , 100.0002 μs に対応する.

本測定を 1,000 回繰り返し, 図 6.10 に示すようなヒストグラムを作成した. 図 6.10 から, 測定時間に対応した大きなピークがはっきりと確認でき, D/R 回路を組み込んだ SFQ TDC が正常に動作していることが確認できる. また, いずれのヒストグラムの分布もメインのピークを中心に前後 100 ps 以内に収まっており SFQ TDC が安定して高精度に測定できていることが分かる. この結果から約 90 mA の大電流をリサイクルした回路を低エラーレートで動作させることに成功したと言える. ただし, バイアスマージンはピンポイントであり, D/R 回路の動作余裕度の改善が必要である.

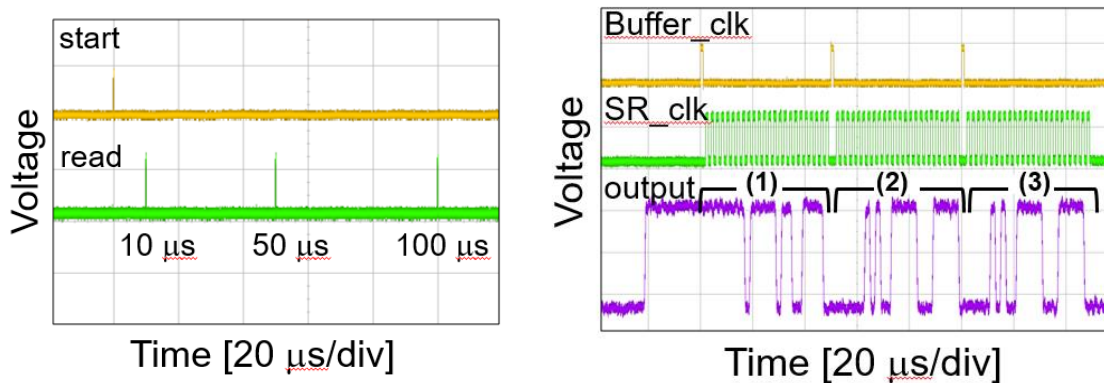


図 6.9 測定波形の一例 (入力時間差は 10 μs , 50 μs , 100 μs)

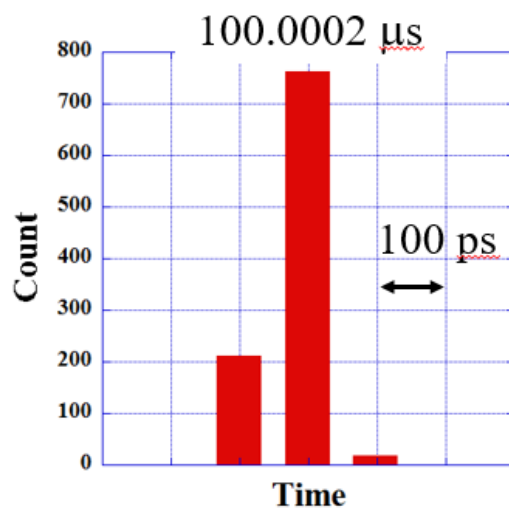
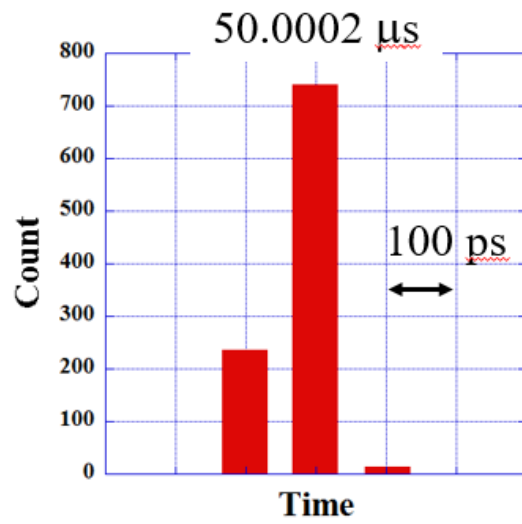
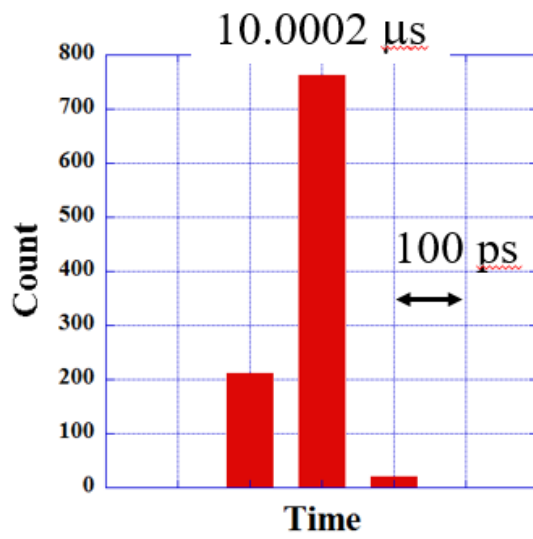


図 6.10 ヒストグラム. (入力時間差 10 μs , 50 μs , 100 μs を 1,000 回測定)

6.5 バッファの大容量化

6.5.1 12 × 24-bit のカレントリサイクル SFQ TDC の設計

6.4 節に示した通り，3 × 24-bit SFQ TDC にカレントリサイクル技術を適用し，その動作実証に成功した．このため，同様にしてバッファ内レジスタを 12 段に増大させた図 6.11，6.12 に示すような SFQ TDC を設計した．その結果，総供給量を一定に保ったまま，カレントリサイクル未適用時に対し総供給電流量を 71% 低減することに成功した．カレントリサイクル適用前後の接合数及び供給電流量を表 6.2 に示す．

また，本回路は一万近い接合にて構成され，これまで実証した SFQ TDC の回路規模を大きく上回る．そのため，回路全体の動作を確認する前に，部分動作を確認可能なパスを設けた．具体的には，JTL と D/R 回路のみからなるパスを用意し，全てのグランドプレーン間の非接触通信が正常に行われているかを set 信号にて確認できるようにした．

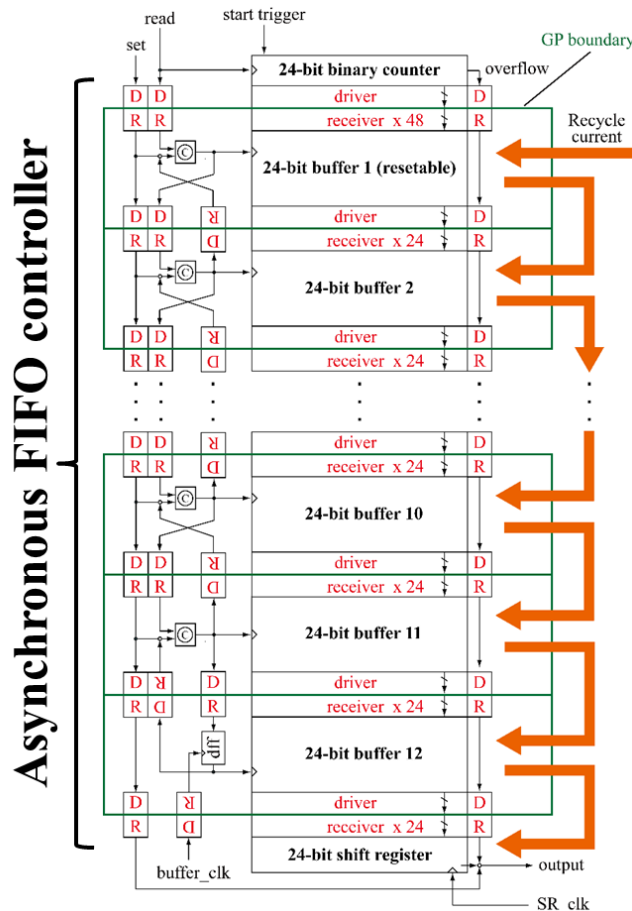


図 6.11 カレントリサイクルを適用した 12 × 24-bit の SFQ TDC の構成

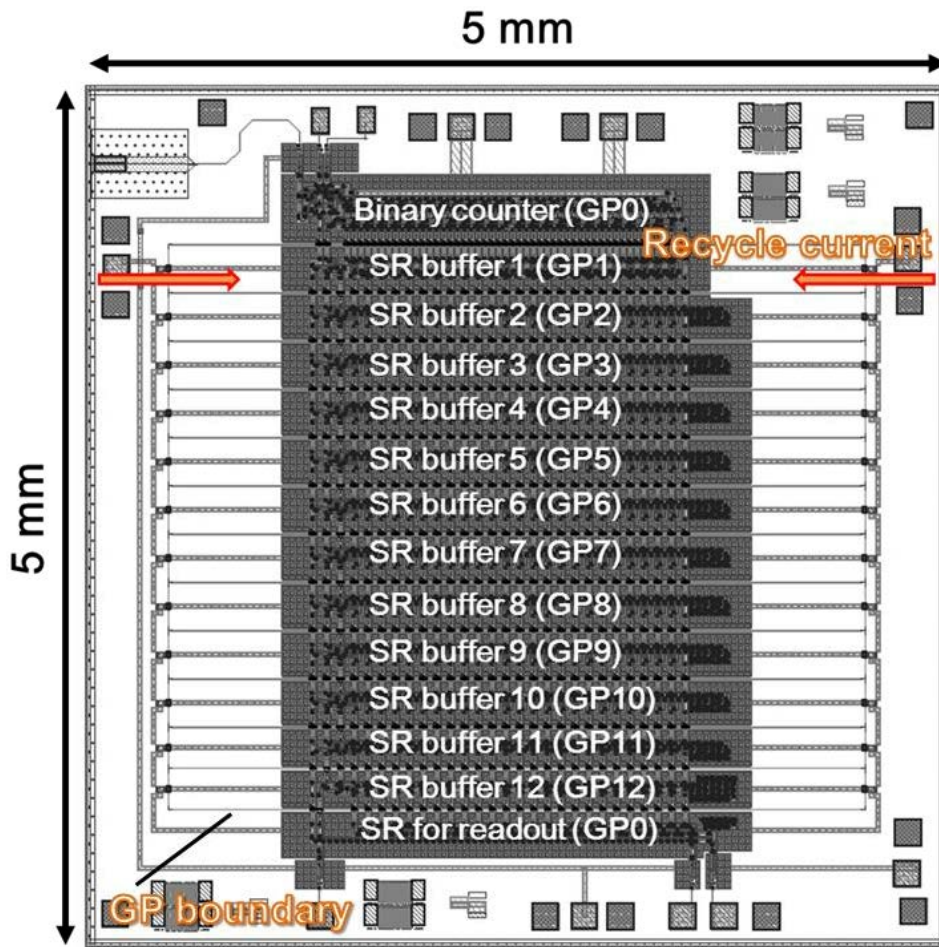


図 6.12 カレントリサイクルを適用した 12 × 24-bit の SFQ TDC のレイアウト

表 6.2 3 × 24-bit SFQ TDC の接合数及び供給電流量

	カレントリサイクル 未適用時	カレントリサイクル 適用時
接合数	6,377 JJ	9,570 JJ
総供給電流量	775.7 mA	224.7 mA
カウンタ用電流	-	136.2 mA
リサイクル電流	-	88.5 mA

6.5.2 12 × 24-bit のカレントリサイクル SFQ TDC の測定結果

6.5.2.1 D/R 回路の評価結果

まず、TDC 全体の動作を評価する前に、JTL (Josephson transmission line) と D/R 回路のみで構成される経路の動作を確認した。本測定では、図 6.11 中の set 信号入力部に信号を入力し、13 個の D/R 回路を経て得られる output 信号を観測し、その動作を評価した。図 6.13 に測定波形の一例を示す。図に示す通り、室温のデータジェネレータから入力した四つの信号に対応した四度の出力電圧の遷移が確認された。本結果より、12 回の電流のリサイクルに成功し 13 個の D/R 回路が正常に動作したことが分かる。この動作は、+6.2% ~ +25.4% (標準電圧 2.5 mV) のバイアス電圧印加時に観測された。このバイアスマージンは、同一ウェハ上の D/R 回路単体の測定結果 (6.3 節を参照) とよく一致している。

また、本測定では、図 6.12 に示すように TDC の左右からバイアス電流を供給しており、上記のバイアスマージンは両側から供給する電流の総和で算出している。

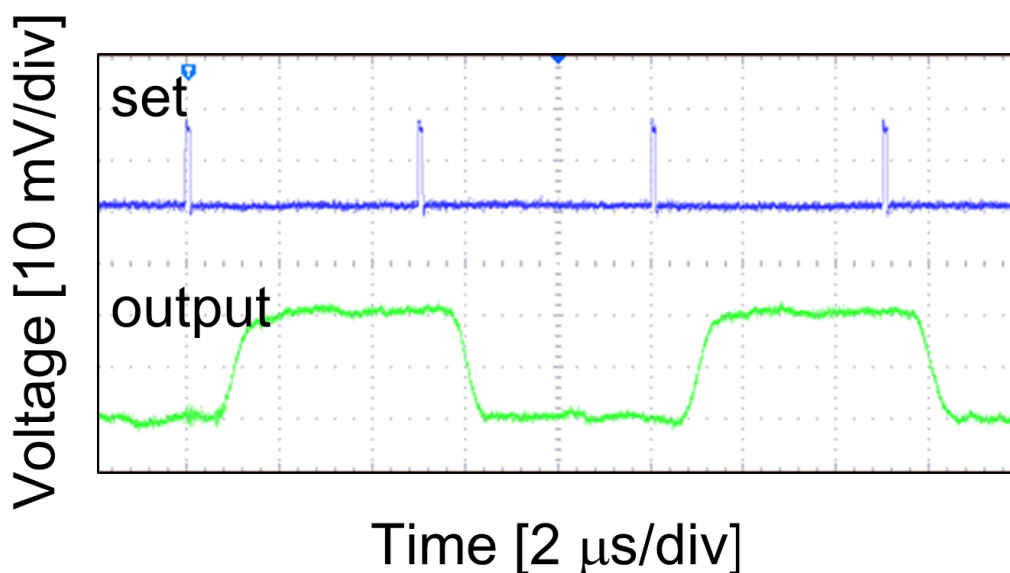


図 6.13 D/R 回路 (13 段) の測定波形

6.5.2.2 カウンタの評価結果

カウンタ部にはカレントリサイクル技術は適用されておらず、独立してバイアス電流が供給されている。リサイクル電流の供給量を先述の 6.5.2.1 にて得られた範囲の中心に固定し、カウンタのバイアスマージンを評価した。本 TDC のカウンタは、4 章で述べた通り非破壊型の TFF セル (NRTFF セル) を 24 個シリアルに繋いで構成されており、start 信号 (図 6.11) が入力された約 1.67 ms ($100 \text{ ps} \times 2^{24}$) 後にオーバーフローする。この時に得られる overflow 信号を観測し、カウンタ (桁上げ) の動作余裕度を評価した。測定波形の一例を図 6.14 に示す。本測定により、-10.4~+11.7%の動作余裕度が得られた。また、設計上、start 信号に同期して set 信号が入力されるため、6.5.2.1 で述べた start 信号に同期した出力も観測されている。

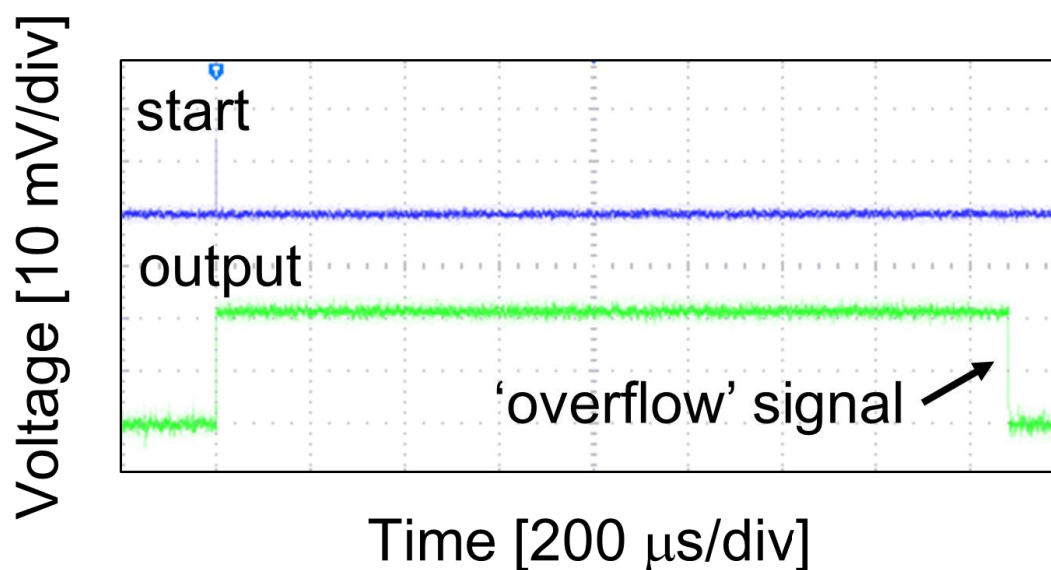


図 6.14 カウンタの桁上げ動作の測定波形

6.5.2.3 TDC の全体の動作結果

6.5.2.1 及び 6.5.2.2 より，D/R 回路及びカウンタの動作領域を調査し正常動作を確認した．引き続き，SFQ TDC 全体の動作を評価するため，室温のデータジェネレータを用いて start trigger 信号と read 信号を入力した．本実験では，バッファ内のレジスタ全てに時間データが格納されるように室温のデータジェネレータから 12 発の read 信号を入力し，測定開始時間との各時間差 (5, 10, 50, 100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1600, 1677.7 μs) をダイナミックレンジの範囲 (約 1.68 ms) で測定した．SFQ TDC を用いて読み出した波形の一例を図 6.15 に示す．読み出し結果(1)~(12)は，それぞれの測定時間差の読み出し結果に対応する．一例として，(1)~(3) は， $(0000\ 0000\ 1100\ 0011\ 0101\ 0001)_2$ ， $(0000\ 0001\ 1000\ 0110\ 1010\ 0010)_2$ ， $(0000\ 0111\ 1010\ 0001\ 0010\ 0010)_2$ と読み替えることができ，それぞれ，時間差 5.0001 μs ，10.0002 μs ，50.0002 μs に対応している．(1)~(12) の読み出し結果を入力時間差と対応させた結果を図 6.16 の(a)に示す．本結果より，SFQ TDC を用いて測定可能な時間の範囲で正常に時間が測定できているが確認できた．(ただし，入力時間差が 5 μs ，10 μs のプロット位置は極めて近く図中では重なって見えている．) 本測定を 10,000 回繰り返し図 6.15 の(b)のようなヒストグラムを作成した．図 6.16 の(b)より，測定時間に対応した大きなピークがはっきりと確認でき，D/R 回路を組み込んだ SFQ TDC が正常に動作していることが確認できる．また，得られたヒストグラムのスペクトルの拡大図の一例を図 6.17 に示す．図 6.17 より，各スペクトルの分布はいずれも 200 ps 未満であり (本質的には 100 ps 以下)，入力信号時間差が高精度に測定されていることが確認できる．以上の結果より，カレントリサイクルを用いた 12×24 -bit の SFQ TDC の動作実証に成功したと言える．ただし，上記の安定動作は 99 mA (標準バイアスの + 11.9%) のリサイクル電流を供給したときにのみ確認された．これは，6.4.3 で得られた 3×24 -bit の SFQ TDC と同様，回路中の D/R 回路の動作余裕度のバラつきにより回路全体の動作余裕度が制限されていると考えられる．このため，D/R 回路の動作余裕度の更なる改善が必要である．

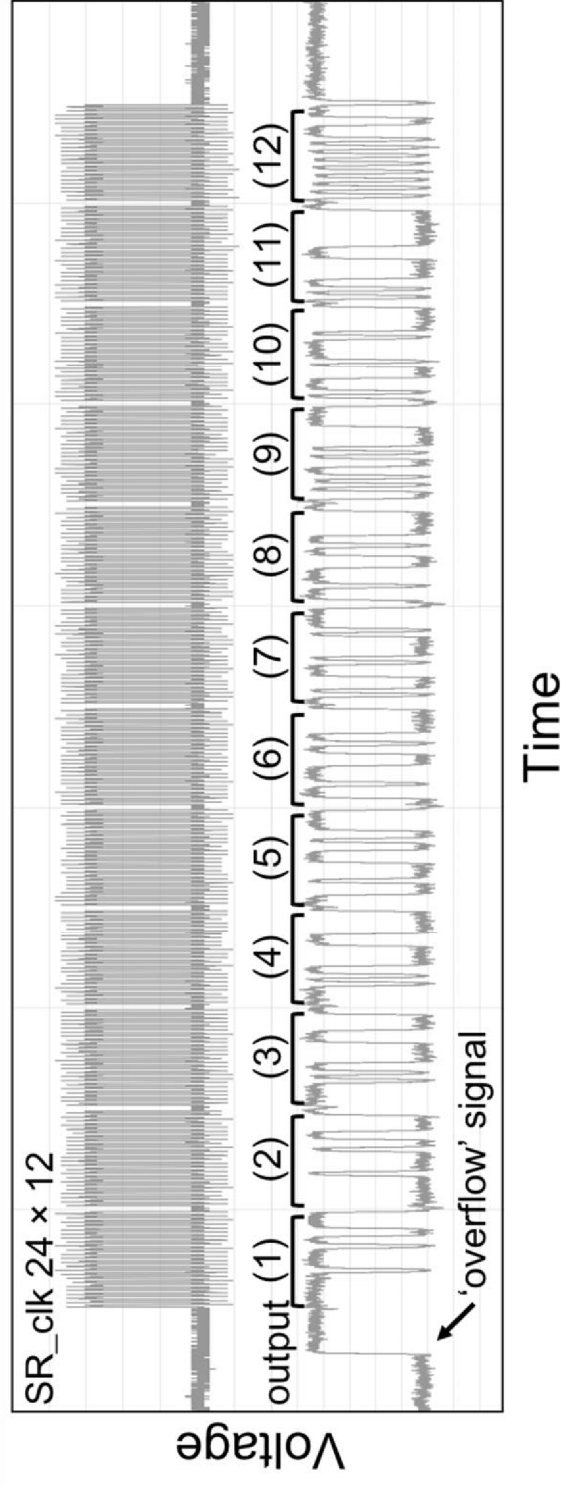
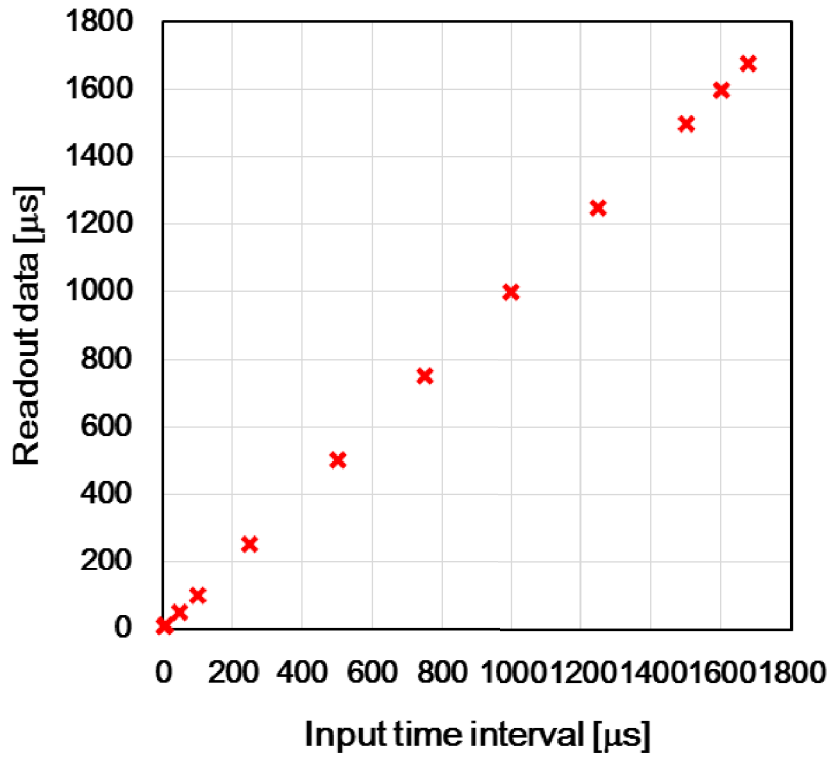
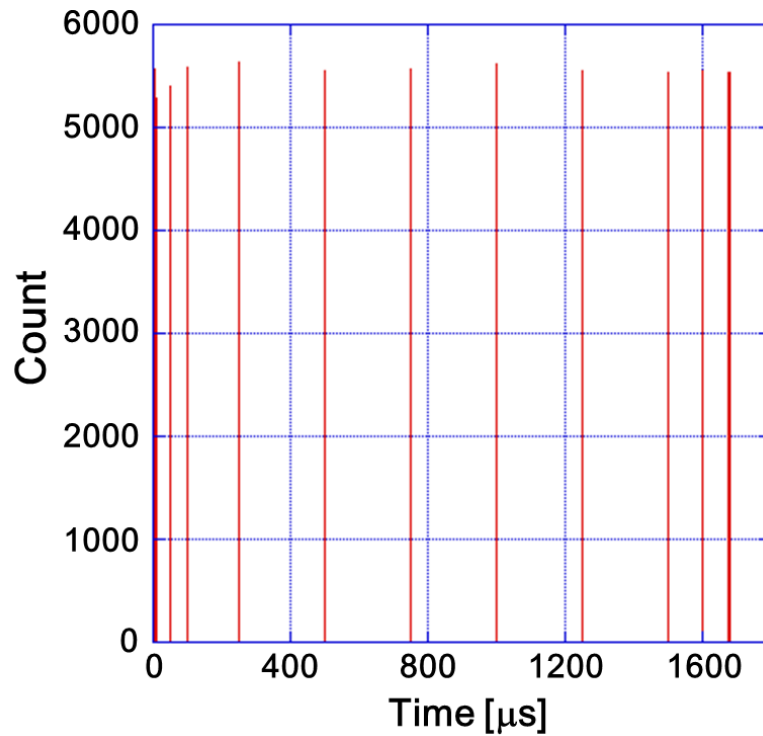


図 6.15 12 × 24-bit CR SFQ TDC の読み出し結果一例
 (入力時間差 $\Delta t = 5, 10, 50, 100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1600, 1677.7 \mu\text{s}$)



(a) 入力時間差と読み出し結果の関係



(b) ヒストグラム

図 6.16 12 × 24-bit CR SFQ TDC の測定結果

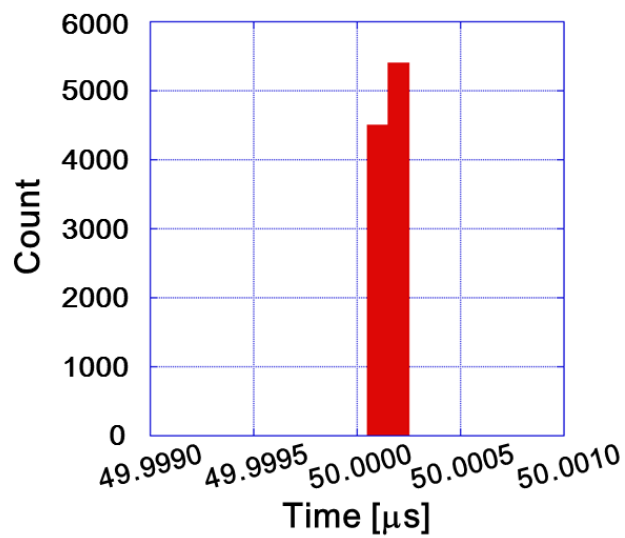
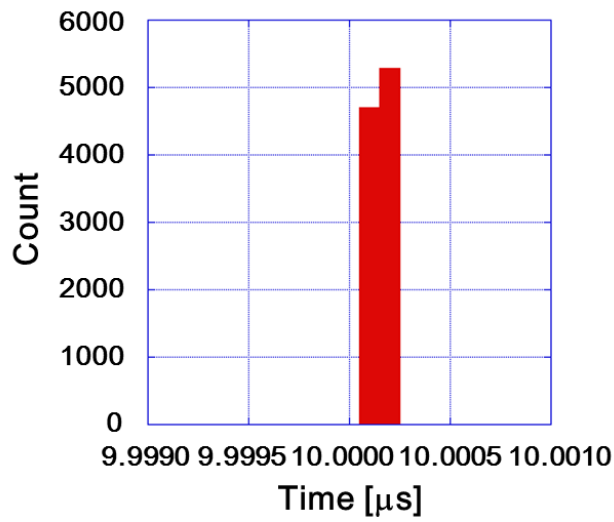
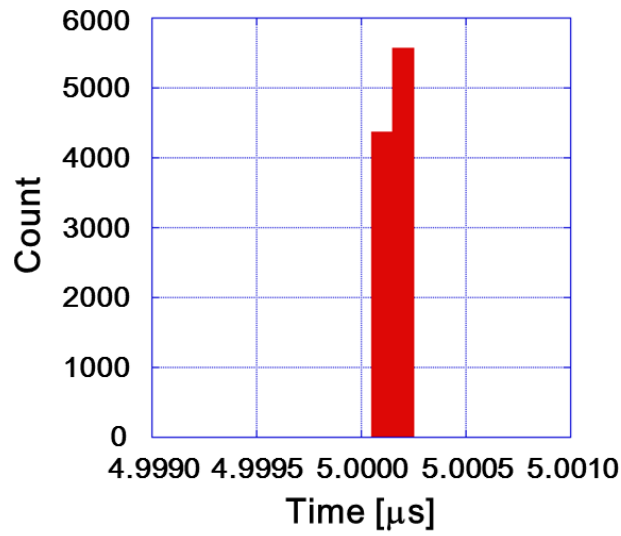


図 6.17 ヒストグラムの拡大図一例 (入力時間差 5 μs, 10 μs, 50 μs)

6.6 まとめ

SFQ TDC の冷凍機内安定動作及びバッファ容量の増大を目的として、カレントリサイクル技術の適用を図った。まず、カレントリサイクル用の非接触通信回路(D/R回路)の垂直型構造の磁場耐性を実験的に確認し、D/R回路の receiver 回路のバイアスマージンを改善した。正常動作を確認できた D/R 回路を用いてカレントリサイクル技術を適用した結果、SFQ TDC の供給電流量を低減しつつバッファ内レジスタ数を 3 段から 12 段に増加させることに成功した。また、本回路の動作実証により、一万接合近い SFQ 回路にて約 100 mA の大電流のリサイクルに成功したと言える。今回の実験は液体ヘリウム中で行われたものであるため、冷凍機内動作実証が今後の課題である。しかし、回路全体のバイアスマージンは未だ狭いため、D/R 回路の更なる改善が必要である。

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

本研究では、超伝導回路を用いた生体高分子用飛行時間型質量分析システムの実現に向けて、超伝導検出器と SFQ 時間測定回路を組み合わせた冷凍機システムの実証と本システムへのカレントリサイクル技術の適用に取り組んだ。

第1章では、未解明の特定疾患の治療法開発に用いられる生体高分子の分析法や超伝導検出器と SFQ 回路の背景について述べた。超伝導検出器は生体高分子などの分子量の大きな分子の高感度検出に優れ、SFQ 回路はその高速動作性を利用して生体分子の高分解能分析を可能とする。両超伝導回路を組み合わせることで新たな高精度質量分析システムの実現が期待される。

第2章では、本研究で用いる分析手法について説明した後に超伝導検出器や SFQ 回路の動作原理及び特徴について述べた。SFQ 回路においては、本研究では特にその高速動作性に着目し、生体分子の飛行時間を高精度に測定可能な高時間分解能時間測定回路 (TDC, time-to-digital converter) の実現に利用した。

第3章では、本研究で用いたデバイスの作製プロセス、SFQ 回路の設計手法、SFQ 回路単体の測定環境について述べた。本研究では、CONNECT セルライブラリに登録されたセルを主として使用し SFQ 回路を設計し、産業技術総合研究所の AIST 2.5 kA/cm² Nb standard process 2 (STP2) を用いてデバイスを作製し、回路動作を評価した。

第4章では、分析システムに用いる SFQ 回路について述べた。まず、SSPD の出力電流を検出する SFQ 読み出し回路について述べ、その後、SFQ TDC の性能・構成・動作について説明した。本研究では、分子量に依存しない高感度検出に加えて高速応答性に優れる超伝導ストリップ粒子検出器 (SSPD, superconducting strip particle detector) と高時間分解能 (~100 ps) かつ高ダイナミックレンジ (最大測定可能分子量 600,000) で複数のイオンの飛行時間を連続測定可能なマルチストップ SFQ TDC を組み合わせた分析システムを開発している。

第 5 章では、実際に SSPD と SFQ TDC とを組み合わせた超伝導分析システムの構築と本分析システムを用いた生体分子の分析実験について述べた。まず、SSPD 単体と SFQ TDC 単体各々の正常動作の確認がされている冷凍機システムを室温を介して接続し、生体分子の分析実験を行った。二冷凍機を用いた超伝導分析システムにてリゾチームと免疫グロブリン G を対象にマスペクトルを取得した結果、半導体 TDC を用いて得たスペクトルと比較し厳密に一致したスペクトルを得ることに成功した。本結果は、超伝導検出器と SFQ TDC とを組み合わせた世界初の測定例である。また、両超伝導回路を単一の冷凍機に実装した分析システムにおいても生体分子の分析に成功した。一方で、SFQ TDC の冷却問題とバッファ容量の不足が課題であると判明した。

第 6 章では、第 5 章にて問題となった SFQ 回路の冷却問題とバッファ容量の不足を解決するため、カレントリサイクル技術と呼ばれる SFQ 回路用低電流化技術について検討した。本研究では、超伝導分析システムの実現に加えて、より大規模な回路でのより大電流のリサイクルの実現という目標も同時に掲げた。本目標の実現に向け、カレントリサイクルにおいて用いられるグランド間非接触通信回路 (D/R) の動作余裕度改善とリサイクルする大電流の引き回し手法について検討した。D/R 回路を最適化した上でカレントリサイクル技術を SFQ TDC に適用し、バイアス電流量を低減しつつバッファ内レジスタ数を 3 段から 12 段に増加させることに成功した。これまで報告されていたカレントリサイクル適用回路は、最大でも接合数 1,500、リサイクル電流量 10 mA 程度であったが、本研究により、一万接合近い SFQ 回路にて約 100 mA の大電流のリサイクルが実現された。一方で、動作実証にこそ成功したが未だバイアスマージンは極めて狭いため、D/R 回路及びバイアス電流の引き回しの更なる改善が求められる。

以上より、SSPD と SFQ TDC を組み合わせた生体高分子用分析システムの実証に成功した。また、分析システムの実証実験にて問題となった冷却問題とバッファ容量の不足については、大電流をリサイクルした大規模 SFQ 回路の動作実証により、その解決が可能であることを示せた。これらの結果より、超伝導質量分析システムの基礎構築に成功したと言える。

7.2 今後の課題

今回、構築・実証した超伝導分析システムでは、単チャンネルの検出器を用いており目標の高速・大有感面積の検出器システムの実現には至っていない。そのため、まず、既存システムに対する優位性を実験的に示すため、多チャンネル化（アレイ化）検出器を用いた実証に取り組む必要がある。検出器の多チャンネル化は先述の利点に加え、質量分析結果のイメージングも可能とする。各 SSPD の信号を個別に処理できるように SFQ 回路を拡張することで SSPD アレイを X, Y 座標に切り分け分子の検出位置の判別が可能となる。この位置情報を含めた検出結果を基に分子に対しフィルタリングを行い色分けすることで分析結果が可視化される。

カレントリサイクル技術においては、大規模回路における大電流のリサイクルに成功したが、その動作余裕度は未だ実用レベルに達していない。7.1 に記した通り、D/R 回路の動作余裕度の改善だけでなく、リサイクル電流の引き回し方についても検討事項が多く残されている。SFQ 回路の実用性を示す上で、大規模 SFQ 回路の冷凍機内動作は他機関においても壁となっており、本技術の研究は今後も必要不可欠であると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 15J00206 の助成を受けたものです。また、本研究に使用されたデバイスは、産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム CRAVITY において作製して頂きました。

学部時代から博士課程に至るまで基礎知識から専門知識まで幅広くご指導下さった吉川信行教授に深く感謝致します。また、研究に留まらずその姿勢も含め数多くを教えてくださいました山梨裕希准教授、竹内尚輝准教授、Christopher Ayala 助教に深く感謝いたします。研究に関する助言に加え測定機器の扱いについても多大なお力添えを頂いた鈴木秀雄氏と金田久善助手に深く感謝致します。

共同研究グループの一員として有益なご意見やご指導を頂いた名古屋大学の藤巻朗教授、田中雅光先生、SFQ 回路の作製等でお世話になりました産業技術総合研究所の日高睦夫氏、永沢秀一氏に深く感謝致します。また、共同研究を通じて大変お世話になりました産業技術総合研究所の大久保雅隆氏、全伸幸氏、志岐成友氏、藤井剛氏に深く感謝いたします。

非同期グループの先輩として直接多くのご指導、アドバイスをして下さい下さった卒業生の高橋佳弘先輩に深く感謝致します。また、研究においてお世話になった同グループの村松祐希氏、下田知毅氏、阿部裕氏、冨塚裕真氏に深く感謝致します。

研究のみならず日々の生活においてもお世話になった卒業生の陳賢珠先輩、彭析竹先輩、川越隆紀先輩、島村泰浩先輩、三浦翔吾先輩、信夫史弘先輩、今泉智也先輩、梅田麗雅先輩、江原康平先輩、桑原啓太先輩、日名子和也先輩、向山隆志先輩、石垣敬之先輩、青木一希先輩、津賀優斗先輩、高橋章友氏、井上健太氏、加藤泰一氏、室健太郎氏、司徳永氏、大坪樹生氏、蜂谷駿介氏、井上孔佑氏、坂下洋介氏、佐々木悠太氏、沼口涼氏、佐藤紘史氏、西本昇平氏、服部創氏、奈良間達也氏、古市真也氏、宮西駿氏、朝倉剣太氏、木原涼輔氏、菅田裕道氏、堤隆太氏、松本紗弥氏に深く感謝致します。同輩の徐秋韵氏に深く感謝します。また、後輩の知名史博氏、安藤拓生氏、五十嵐丈氏、小野智裕氏、小箱紗希氏、今野元氏、辻直樹氏、方コン氏、村井勇貴氏、今井響氏、村松将気氏、若松十夢氏、佐藤僚亮氏、高山広氏、松島孝氏、安井雄紀氏、刑育閣氏、荒木美佳氏、大熊幸寛氏、齋藤露生氏、野副舞氏に深く感謝します。

最後に、大学及び大学院を含めた 9 年間を過ごすに辺り共に励まし合った友人達、そして、精神的、経済的に支えてくれた家族に深く感謝致します。

2017 年 3 月
佐野 京佑

参考文献

- [1] A. Pandey and M. Mann, "Proteomics to study genes and genomes," *Nature*, vol.405, pp.837-846, Jun. 2000.
- [2] R. Aebersold and M. Mann, "Mass spectrometry-based proteomics," *Nature*, vol.422, pp.198-207, Mar. 2003.
- [3] M. W. Senko and F. W. McLafferty, "Mass spectrometry of Macromolecules: Has Its Time Now Come?," *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.*, vol.23, pp.763-785, Jun. 1994.
- [4] M. Karas, D. Bachmann, U. Bahr, F. Hillenkamp, "Matrix-assisted ultraviolet laser desorption of non-volatile compounds," *Int J Mass Spectrom Ion Proc.*, vol.78, pp.53-68, Sep. 1987.
- [5] K. Tanaka, H. Waki, Y. Ido, S. Akita, Y. Yoshida and T. Yoshida, "Protein and polymer analyses up to m/z 100000 by laser ionization time-of flight mass spectrometry," *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, vol.2, pp.151-153, Aug.1988.
- [6] D. W. Koppenaal, C. J. Barinaga, M. B. Denton, R. P. Sperline, G. M. Hieftje, G. D. Schilling, F. J. Andrade, and J. H. Barnes, IV, "MS Detectors," *Anal. Chem.*, vol.77, pp.418A-427A, Nov. 2005.
- [7] 浜松ホトニクス (株), "MCP (マイクロチャンネルプレート) & MCP アッセンブリ, " 技術資料, no.TMCP, Jan. 2016.
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/MCP_TMCP0002J.pdf
(2016/12/02 アクセス)
- [8] I. S. Gilmore and M. P. Seah, "Ion detection efficiency in SIMS:: Dependencies on energy, mass and composition for microchannel plates used in mass spectrometry," *Int. J. Mass. Spectrom.*, vol.202, pp.217-229, Oct. 2000.
- [9] G. W. Fraser, "The ion detection efficiency of microchannel plates (MCPs)," *Int. J. Mass. Spectrom.*, vol.215, pp.13-30, Apr. 2002.
- [10] J. Oberheide, P. Wilhelm, and M. Zimmer, "New results on the absolute ion detection efficiencies of a microchannel plate," *Meas. Sci. Tech.*, vol.8, p.351, Feb. 1997.
- [11] D. Twerenbold, D. Gerber, D. Gritti, Y. Gonin, A. Netuschill, F. Rossel, D. Schenker, and J. L. Vuilleumier, "Single molecule detector for mass spectrometry with mass independent detection efficiency," *Proteomics*, vol.1, pp.66-69, Jan. 2001.
- [12] M. Frank, "Mass spectrometry with cryogenic detectors," *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol.444, pp.375-384, Apr. 2000.
- [13] G. C. Hilton, J. M. Martinis, D. A. Wollman, K. D. Irwin, L. L. Dulcie, D. Gerber, P. M. Gillevet, and D. Twerenbold, "Impact energy measurement in time-of-flight mass spectrometry with cryogenic microcalorimeters," *Nature*, vol.391, pp.672-675, Feb. 1998.
- [14] D. Twerenbold, D. Gerber, D. Gritti, Y. Gonin, A. Netuschill, F. Rossel, D. Schenker, and J. Vuilleumier, "Single molecule detector for mass spectrometry with mass independent detection efficiency," *Proteomics*, vol.1, pp.66-69, Jan. 2001.
- [15] M. Ohkubo, "Superconductivity for Mass Spectroscopy," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E90-C, pp.550-555, Mar. 2007.
- [16] A. J. Kerman, E. A. Dauler, W. E. Keicher, J. K. W. Yang, Yang, K. K. Berggren, G. Gol'tsman,

- and B. Voronov, "Kinetic-inductance-limited reset time of superconducting nanowire photon counters," *Appl. Phys. Lett.*, vol.88, p.111116, Jan. 2006.
- [17] K. Suzuki, S. Miki, S. Shiki, Z. Wang, and M. Ohkubo, "Time Resolution Improvement of Superconducting NbN Stripline Detectors for Time-of-Flight Mass Spectrometry," *Appl. Phys. Express*, vol.1, p.031702, Mar. 2008.
- [18] N. Zen, A. Casaburi, S. Shiki, K. Suzuki, M. Ejmaes, R. Cristiano, and M. Ohkubo, "1 mm ultrafast superconducting stripline molecule detector," *Appl. Phys. Lett.*, vol.95, p.172508, Oct. 2009.
- [19] N. Zen, S. Shiki, M. Ukibe, M. Koike, and M. Ohkubo, "Ion-induced dynamical change of supercurrent flow in superconducting strip ion detectors with parallel configuration," *Appl. Phys. Lett.*, vol.104, p.012601, Jan. 2014.
- [20] M. Ohkubo, "Superconducting detectors for particles from atoms to proteins," *physica C*, vol.468, pp.1987-1991, Sep. 2008.
- [21] Y. Kobayashi, M. Ukibe, K. Chiba-Kamoshida, H. Nakanishi, S. Shiki, K. Suzuki, and M. Ohkubo, "STJ detectors for protein detection," *physica C*, vol.468, pp.2009-2013, Sep. 2008.
- [22] 千葉かおり, 浮辺雅宏, 陳銀児, 志岐成友, 大久保雅隆, "超伝導マトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析装置を用いた電荷数識別質量分析-抗体中の残留フラグメント解析-", *J. Vac. Soc. Jpn.*, vol.57, pp.309-316, 2009.
- [23] M. Frank, S. E. Labov, G. Westmacott, W. H. Benner, "Energy-sensitive cryogenic detectors for high-mass biomolecule mass spectrometry," *Mass Spectrom. Rev.*, vol.18, pp.155-186, May. 1999.
- [24] B. D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling," *Phys. Lett.*, vol.1, pp.251-253, Jul. 1962.
- [25] P. W. Anderson and J. M. Rowell, "Probable Observation of the Josephson Superconducting Tunneling Effect," *Phys. Rev. Lett.*, vol.10, pp.230-232, Mar. 1963.
- [26] W. Anacker, "Josephson Computer Technology: An IBM Research Project," *IBM Journal of Research and Development*, vol.24, pp.107-112, Mar. 1980.
- [27] J. Matisoo, "The tunneling cryotron-A superconductive logic element based on electron tunneling," *Proc.IEEE*, vol.55, pp.172-180, Feb. 1967.
- [28] A. L. Robinson, "IBM Drops Superconducting Computer Project," *Science*, vol.222, pp.492-494, Nov. 1983.
- [29] K. Nakajima, Y. Onodera, and Y. Ogawa, "Logic design of Josephson network," *J. Appl Phys.*, vol.47, pp.1620-1627, Apr. 1976.
- [30] K. K. Likharev and V. K. Semenov, "RSFQ Logic/Memory Family: A New Josephson-Junction technology for Sub-Terahertz-Clock-Frequency Digital Systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.1, pp.3-28, Mar. 1991.
- [31] W. Chen, A. V. Rylyakov, V. Patel, J. E. Lukens, and K. K. Likharev, "Rapid single flux T-flip flop operating up to 770 GHz," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.9, pp.3212-3215, Jun. 1999.
- [32] Y. Yamanashi, M. Tanaka, A. Akimoto, H. Park, Y. Kamiya, N. Irie, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai, and Y. Hashimoto, "Design and Implementation of a Pipelined Bit-Serial SFQ Microprocessor, CORE1 β ," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, pp.474-477, Jul. 2007.
- [33] S. Iwasaki, M. Tanaka, Y. Yamanashi, H. Park, H. Akaike, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, N. Takagi,

- K. Murakami, and H. Honda, "Design of a reconfigurable data-path prototype in the single-flux-quantum circuit," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, p.S328, Oct. 2007.
- [34] X. Peng, Q. Xu, T. Kato, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, N. Takagi, K. Takagi, and M Hidaka, "High-Speed Demonstration of Bit-Serial Floating-Point Adders and Multipliers Using Single-Flux-Quantum Circuits," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.25, p.1301106, Jun. 2015.
- [35] 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," *Phys. Opt.*, vol.37, pp.2982-2985, Jul. 2012.
- [36] S. Miyajima, T. Kusumoto, K. Ito, Y. Akita, I. Yagi, N. Yoshioka, T. Ishida, S. Miki, Z. Wang, and A. Fujimaki, "High-Throughput RSFQ Signal Processor for a Neutron Diffraction System with Multiple MgB₂ Detectors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.23, p.1800505, Jun. 2013.
- [37] Y. Yamanashi, T. Nishigai, and N. Yoshikawa, "Study of LR-loading technique for low-power single flux quantum circuits," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, pp.150-153, Jun. 2007.
- [38] T. Ortlepp, O. Wetzstein, S. Engert, J. Kunert, and H. Toepfer, "Reduced Power Consumption in Superconducting electronics," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.21, pp.770-775, Jun. 2011.
- [39] M. Tanaka, M. Ito, A. Kitayama, T. Kouketsu, and A. Fujimaki, "18-GHz, 4.0-aJ/bit Operation of Ultra-Low-Energy Rapid Single-Flux-Quantum Shift Registers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.51, p.053102, May. 2012.
- [40] O. A. Mukhanov, "Energy-Efficient Single Flux Quantum Technology," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.21, pp.760-769, Jun. 2011.
- [41] D. E. Kirichenko, S. Sarwana, and A. F. Kirichenko, "Zero Static Power Dissipation Biasing of RSFQ Circuits," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.21, pp.776-779, Jun. 2011.
- [42] M. H. Volkman, A. Sahu, C. J. Fourie, and O. A. Mukhanov, "Implementation of energy efficient single flux quantum (eSFQ) digital circuits with sub-aJ/bit operation," *Supercond. Sci. Technol.*, vol.26, p.015002, Nov. 2012.
- [43] Q. P. Herr, A. Y. Herr, O. T. Oberg, and A. G. Ioannidis, "Ultra-low-power superconductor logic," *J. Appl. Phys.*, vol.109, pp.103903-103910, May. 2011.
- [44] Y. Harada, H. Nakane, N. Miyamoto, U. Kawabe, E. Goto, and T. Soma, "Basic operations of the quantum flux parametron," *IEEE Trans. Magn.*, vol.23, pp.3801-3807, Sep. 1987.
- [45] M. Hosoya, W. Hioe, J. Casas, R. Kamikawai, Y. Harada, Y. Wada, H. Nakane, R. Suda, and E. Goto, "Quantum Flux Parametron: A Single Quantum Flux Device for Josephson Supercomputer," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.1, pp.77-89, Jun. 1991.
- [46] R. Ruby, G. Lee, H. Ko, and A. Barfknecht, "Switching Probability of QFP Comparators as A Function of Exciter Slew-Rate," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.3, pp. 2694-2697, Mar. 1993.
- [47] N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device," *Supercond. Sci. Technol.*, vol.26, p.035010, Jan. 2013.
- [48] <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/c3>
- [49] 吉川伸行, "単一磁束量子回路を用いた超高速マイクロプロセッサの開発とその展望," 電子情報通信学会論文誌, vol.J91-C, pp.183-193, Mar. 2008.
- [50] V. K. Semenov and M. A. Voronova, "DC voltage multipliers: A novel application of

- synchronization in Josephson junction arrays,” *IEEE Trans. Magn.*, vol.MAG-25, pp. 1432-1435, Mar. 1989.
- [51] J. H. Kang and S. B. Kaplan, “Current recycling and SFQ signal transfer in large scale RSFQ circuits,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.13, pp.547-550, Jun. 2003.
- [52] M. W. Johnson, Q. P. Herr, D. J. Durand, and L. A. Abelson, “Differential SFQ transmission using either inductive or capacitive coupling,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 507-510, Jun. 2003.
- [53] T. V. Filippov, A. Sahu, S. Sarwana, D. Gupta, and V. K. Semenov, “Serially Biased Components for Digital-RF Receiver,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, pp. 580-584, Jun. 2009.
- [54] 田中耕一, 吉野健一, 内藤康秀, 豊田岐聡, “なぜリフレクトロンモードやマルチターンによって質量分解能が向上されるのか,” *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, vol.56, pp.49-54, Apr. 2008.
- [55] G. N. Gol’tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and Roman Sobolewski, “Picosecond superconducting single-photon optical detector,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.79, p.705, Aug. 2001.
- [56] 大久保雅隆, “現代質量分析学,” 高山光男, 早川滋雄, 瀧浪 欣彦, 和田 芳直 (編), pp.95-106, (株) 化学同人, 京都, 2013.
- [57] K. Suzuki, S. Shiki, M. Ukibe, M. Koike, S. Miki, Z. Wang, and M. Ohkubo, “Hot-Spot Detection Model in Superconducting Nano-Stripline Detector for keV Ions,” *Appl. Phys. Express.*, vol.4, p.083101, Jul. 2011.
- [58] N. Zen, K. Suzuki, S. Shiki, and M. Ohkubo, “Niobium superconducting strip line detectors (SSLD) for time-of-flight mass spectrometry (TOF-MS),” *Physica C*, vol.469, pp.1684-1687, Oct. 2009.
- [59] M. Tarkhov, J. Claudon, J. Ph. Poizat, A. Korneev, A. Divochiy, O. Minaeva, V. Seleznev, N. Kaurova, B. Voronov, A. V. Semenov, and G. Gol’tsman, “Ultrafast reset time of superconducting single photon detectors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.92, p.241112, Jun. 2008.
- [60] E. Ejrnaes, R. Cristiano, O. Quaranta, S. Pagano, A. Gaggero, F. Mattioli, R. Leoni, B. Voronov, and G. Gol’tsman, “A cascade switching superconducting single photon detector,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.91, p.262509, Dec. 2007.
- [61] T. Van Duzer, C. W. Turner (著), 原宏, 菅原昌敬 (翻訳), “超伝導デバイスおよび回路の原理,” コロナ社, 1983 年.
- [62] 早川尚夫 (編), 菅野卓雄 (監修), “超高速ジョセフソン・デバイス,” 培風館, 1986 年.
- [63] H. Numata, S. Tahara, “Fabrication technology for Nb integrated circuits,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E84-C, pp.2-8, Jan. 2001.
- [64] S. Nagasawa, K. Hinode, T. Satoh, H. Akaike, Y. Kitagawa, M. Hidaka, “Development of advanced Nb process for SFQ circuits,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 412-414, pp. 2447-2452, Jun. 2004.
- [65] E. S. Fang and T. Van Duzer, “A Josephson integrated circuit simulator (JSIM) for superconductive electronics application,” *Extend Abstracts of ISEC’89*, Tokyo, Japan, 1989.
- [66] 越山潤一, 吉川信行, “RSFQ 論理回路のセルベース設計手法の検討,” 電子情報通信学

会論文誌 C, vol. J83-C, pp.636-642, Jul. 2000.

- [67] N. Mori, A. Akahori, T. Sato, N. Takeuchi, A. Fujimaki, and H. Hayakawa, "A new optimization procedure for single flux quantum circuits," *Physica C*, vol.357-360, pp.1557-1560, Aug. 2001.
- [68] 吉川信行, 森静香, 越山潤一, "Verilog HDL による RSFQ 論理回路のタイミング設計手法の検討," 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J83-C, pp.643-650, Jul. 2000.
- [69] S. Yorozu, Y. Kameda, H. Terai, A. Fujimaki, T. Yamada, S. Tahara, "A single flux quantum standard logic cell library," *physica C*, vol. 378-381, pp. 1471-1474, Oct. 2002.
- [70] H. Terai, M. Tanaka, Y. Yamanashi, Y. Hashimoto, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, and Z. Wang, "Diagnostic Test of Large-Scale SFQ Shift Register," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 422-425, Jun. 2007.
- [71] Y. Polyakov, S. Narayana, and V. K. Semenov, "Flux Trapping in Superconducting Circuits," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, pp.520-525, Jun. 2007.
- [72] A. Bozbey, S. Miyajima, H. Akaike, and A. Fujimaki, "Single-Flux-Quantum Circuit Based Readout System for Detector Arrays by Using Time to Digital Conversion," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.19, pp.509-513, Jun. 2009.
- [73] H. Terai, S. Miki, and W. Wang, "Readout Electronics Using Single-Flux-Quantum Circuit Technology for Superconducting Single-Photon Detector Array," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.19, pp.350-353, Jun. 2009.
- [74] T. Ortlepp, M. Hofherr, L. Fritzsche, S. Engert, K. Ilin, D. Rall, H. Toepfer, H. -G. Meyer, and M. Siegel, "Demonstration of digital readout circuit for superconducting nanowire single photon detector," *Opt. Express.*, vol.19, pp.18593-18601, Sep. 2011.
- [75] K. Nakamiya, T. Nishigai, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai, and S. Yorozu, "Improvement of time resolution of the double-oscillator time-to-digital converter using SFQ circuits," *Physica C*, vol.463-465, pp.1088-1091, Oct. 2007.
- [76] K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Design and Demonstration of a Single-Flux-Quantum Multi-Stop Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry," *IEICE Trans Electron.*, vol. E97-C, pp.182-187, Mar. 2014.
- [77] L. N. Bulaevskii, M. J. Graf, C. C. Batista, and V. G. Kogan, "Vortex-induced dissipation in narrow current-biased thin-film superconducting strips," *Phys. Rev. B*, vol.83, p.144526, Apr. 2011.
- [78] T. Yamashita, S. Miki, K. Makise, W. Qiu, H. Terai, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Origin of intrinsic dark count in superconducting nanowire single-photon," *Appl. Phys. Lett.*, vol.99, p161105, Oct. 2011.
- [79] K. Suzuki, S. Miki, S. Shiki, Y. Kobayashi, K. Chiba, Z. Wang, and M. Ohkubo, "Ultrafast ion detection by superconducting NbN thin-film nanowire detectors for time-of-flight mass spectrometry," *Physica C*, vol.468, pp.2001-2003, Sep. 2008.
- [80] A. Kirichenko, S. Sarwana, D. Gupta, I. Rochwarger, and O. Mukhanov, "Multi-channel time digitizing systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.13, pp.454-458, Jun. 2003.
- [81] K. Sano, Y. Muramatsu, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, and M. Ohkubo, "Reduction of the jitter of single-flux-quantum time-to-digital converters for time-of-flight mass spectrometry," *Physica C*, vol. 504, pp.97-101, Sep. 2014.
- [82] M. Ito, N. Nakajima, K. Fujiwara, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai, and S. Yorozu, "Design and implementation of SFQ programmable clock generators," *Physica C*, vol.412-414, pp.1550-

1554, Oct. 2004.

- [83] Q. P. Herr and P. Bunyk, "Implementation and application of first-in first-out buffers," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.13, pp.563-566, Jun. 2003.
- [84] 井上尚子, "RSFQ 論理回路を用いた Muller C 及び First-in First-out Buffer の設計," 横浜国立大学 工学部 電子情報工学科 卒業論文, 2003.
- [85] N. Zen, G. Fujii, S. Shiki, M. Ukibe, M. Koike, and M. Ohkubo, "Improvement in bias current redistribution in superconducting strip ion detectors with parallel configuration," *Chin. Phys. B.*, vol.24, p.098501, Aug. 2015.
- [86] H. Terai, Y. Kameda, S. Yoroazu, A. Fujimaki, and Z. Wang, "The effects of Dc Bias Current in Large-Scale SFQ Circuits," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.13, pp.502-506, Jun. 2003.
- [87] 田中耕一, 佐藤貴弥, 吉野健一, "遅延引き出し法の基礎," *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, vol.57, pp.31-36, Feb. 2009.
- [88] M. Suzuki, M. Maezawa, and F. Hirayama, "Effects of magnetic fields induced by bias currents on operation of RSFQ circuits," *Physica C*, vol.412-414, pp.1576-1579, Oct. 2004.
- [89] S. B. Kaplan, "Serial Biasing of 16 Modular Circuits at 50 Gb/s," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, p.1300103, Aug. 2012.
- [90] P. Bunyk, K. Likharev, and D. Zinoviev, "RSFQ technology: Physics and devices," *Int. J. Hi. Spe. Ele. Syst.*, vol.11, pp.257-305, Mar. 2001.
- [91] C. J. Fourie, O. Wetzstein, T. Ortlepp, and J. Kunert, "Three-dimensional multi-terminal superconductive integrated circuit inductance extraction," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 24, p.125015, Nov. 2011.
- [92] 高橋章友, "大規模単一磁束量子回路の実現に向けた省バイアス電流化技術に関する研究," 横浜国立大学 工学部 物理情報工学専攻 電気電子ネットワークコース 修士論文, 2014.

研究業績

研究論文：全 4 報

- [1] K. Sano, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, “Design and Demonstration of a Single-Flux-Quantum Multi-Stop Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” *IEICE TRANS ELECTRON.*, vol.E97-C, pp.182-187, Mar. 2014.
- [2] K. Sano, Y. Muramatsu, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, and M. Ohkubo, “Reduction of the Jitter of Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converters for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” *Physica C*, vol.504, pp.97-101, Sep. 2014.
- [3] K. Sano, Y. Takahashi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, and M. Ohkubo, “Demonstration of Single-Flux-Quantum Readout Circuits for Time-of-Flight Mass Spectrometry Systems using Superconducting Strip Ion Detectors,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol.28, p.074003, Jun. 2015.
- [4] K. Sano, T. Shimoda, Y. Abe, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo, “Reduction of the supply current of single-flux-quantum time-to-digital converters by current recycling techniques for the operation in cryo-cooler,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.27, p.1300305, Jun. 2017.

Proceeding：全 1 報

- [1] K. Sano, A. Takahashi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, K. Suzuki, and M. Ohkubo, “Design and High-Speed Tests of a Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” *2013 IEEE 14th International Superconductive Electronics Conference (ISEC)*, Sep. 2013.

国際会議：全 27 件（筆頭 15 件，連名 12 件）

- [1] ○N. Yoshikawa, Y. Takahashi, K. Sano, Y. Yamanashi, M. Okubo, K. Suzuki, N. Zen, M. Koike, S. Miki, Z. Wang, “(Invited) Demonstration of single-flux-quantum readout circuits for time-of-flight mass spectrometry of biomolecules using superconducting nano-stripline detectors,” *Applied Superconductivity Conference (ASC) 2012, Portland, US*, Oct. 2012.
- [2] ○K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Measurement of a Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” *Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2012, Nagoya, Japan*, Dec. 2012.
- [3] ○K. Sano, A. Takahashi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Design and High-Speed Tests of a Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” *International*

- Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2013, Cambridge, US, Jul. 2013.
- [4] ○K. Sano, Y. Muramatsu, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Evaluation of Timing Jitter of an SFQ Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” 7th East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE) 2013, Taipei, Taiwan, Oct. 2013.
- [5] ○K. Sano, Y. Muramatsu, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Study on the Reduction of the Jitter of a Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” International Superconductivity Symposium (ISS) 2013, Tokyo, Japan, Nov. 2013.
- [6] ○K. Sano, Y. Muramatsu, T. Shimoda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo, “Measurement of an SFQ Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry in a Cryo-cooler,” Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2013, Tsukuba, Japan, Nov. 2013.
- [7] ○Y. Muramatsu, K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Development of Single-Flux-Quantum Multi-Threshold Current Discriminators for m/z-Sensitive Time-of-Flight Mass Spectrometry,” Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2013, Tsukuba, Japan, Nov. 2013.
- [8] ○K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo, “Evaluation of a Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry in Cryo-cooler,” Superconducting SFQ VLSI Workshop for Young Scientists (SSV 2014-YS), Nagoya, Japan, Mar. 2014.
- [9] ○Y. Muramatsu, K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Design of m/z-Sensitive Time-of-Flight Mass Spectrometry Systems using Single-Flux-Quantum Multi-Threshold Current Discriminators,” Superconducting SFQ VLSI Workshop for Young Scientists (SSV 2014-YS), Nagoya, Japan, Mar. 2014.
- [10] ○K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo “Demonstration of Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry,” Applied Superconductivity Conference (ASC) 2014, Charlotte, US, Aug. 2014.
- [11] N. Zen, ○M. Ohkubo, S. Shiki, M. Ukibe, M. Koike, K. Sano, N. Yoshikawa, “Dynamics of parallel superconducting strip ion detectors,” Applied Superconductivity Conference (ASC) 2014, Charlotte, US, Aug. 2014.
- [12] ○K. Sano, “Optimization of inductance for current recycling with InductEX,” Stellenbosch Workshop on Superconductive Circuit Modelling and Layout Extraction, Stellenbosch, South Africa, Sep. 2014.
- [13] ○K. Sano, Y. Muramatsu, T. Shimoda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo, “Time-of-Flight Mass Spectrometry using a Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter and a

Superconducting Strip Ion Detector in a Cryo-Cooler,” International Superconductivity Symposium (ISS) 2014, Tokyo, Japan, Nov. 2014.

- [14] ○M. Ohkubo, M. Ukibe, S. Shiki, N. Zen, G. Fujii, M. Hidaka, K. Sano, N. Yoshikawa, “Superconducting analog and digital applications to analytical sciences: mass spectrometry to synchrotron radiation,” International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD) 2014, Shanghai, China, Nov. 2014.
- [15] ○N. Zen, K. Sano, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, M. Koike, N. Yoshikawa, M. Ohkubo, “Recent Progress in Superconducting Strip Ion Detectors (SSIDs),” International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD) 2014, Shanghai, China, Nov. 2014.
- [16] ○K. Sano, Y. Muramatsu, T. Shimoda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo, “Demonstration of a Single-Flux-Quantum Time-to-Digital Converter with 3 x 24-bit First-In First-Out Buffers for Time-of-Flight Mass Spectrometry of Biomolecules,” Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2014, Kobe, Japan, Dec. 2014.
- [17] ○Y. Muramatsu, K. Sano, T. Shimoda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Measurement of a Cray Zone Width of SFQ Multi-Threshold Current Discriminators for m/z-Sensitive Time-of-Flight Mass Spectrometry,” Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2014, Kobe, Japan, Dec. 2014.
- [18] ○T. Shimoda, Y. Muramatsu, K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Comparison of Jitter in Three Types of SFQ Ring Oscillators,” Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2014, Kobe, Japan, Dec. 2014.
- [19] ○K. Sano, Y. Muramatsu, T. Shimoda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo, “Demonstration of a Superconducting Time-of-Flight Mass Spectrometry System Operated in a Cryo-Cooler,” International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2015, Nagoya, Japan, Jul. 2015.
- [20] ○N. Zen, K. Sano, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, N. Yoshikawa, and M. Ohkubo, “Superconducting strip ion detector (SSIDs) with single flux quantum based time-to-digital converters (SFQ TDCs) for time-of-flight mass spectrometry (TOF MS),” 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, Grenoble, France, Jul. 2015.
- [21] ○K. Sano, T. Shimoda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, M. Ohkubo, “Demonstration and Improvement of Superconducting Time-of-Flight Mass Spectrometry Systems Operated in a Cryo-Cooler,” European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS) 2015, Lyon, France, Sep. 2015.

- [22] ○N. Yoshikawa, K. Sano, Y. Yamanashi, M. Okubo, N. Zen, “SFQ readout circuits for TOF MS systems: Present status and future directions,” Workshop on Readout Electronics for Radiation and Particle Detectors, Erfurt, Germany, Dec. 2015.
- [23] ○K. Sano, Y. Abe, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Reduction of supply current and capacity enlargement of first-in first-out buffers in single-flux-quantum time-to-digital converters,” Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2016, Yokohama, Japan, Aug. 2016.
- [24] ○Y. Abe, K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Experimental evaluation of Josephson comparators for small current detection,” Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2016, Yokohama, Japan, Aug. 2016.
- [25] ○K. Sano, T. Shimoda, Y. Abe, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Reduction of the supply current of single-flux-quantum time-to-digital converters by current recycling techniques for the operation in cryo-cooler,” Applied Superconductivity Conference (ASC) 2016, Denver, US, Sep. 2016.
- [26] ○K. Sano, Y. Abe, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, N. Zen, and M. Ohkubo, “Recent progress in superconducting time-of-flight mass spectrometry systems,” International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD) 2016, Tsukuba, Japan, Nov. 2016.
- [27] ○Y. Abe, K. Sano, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Study on Josephson comparators for readout of superconducting detectors,” International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD) 2016, Tsukuba, Japan, Nov. 2016.

国内会議：全 36 件（筆頭 20 件，連名 16 件）

- [1] 高橋佳弘, ○佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, 鈴木宏治, 全伸幸, 大久保雅隆, “高分子質量分析用超伝導ナノストリップライン検出器のための単一磁束量子読み出し回路の開発,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 2012 年 3 月.
- [2] 大久保雅隆, ○鈴木宏治, 全伸幸, 高橋佳弘, 佐野京佑, 三木茂人, 王鎮, 吉川信行, “超伝導ナノストリップライン粒子検出器と SFQ 回路を用いた生体分子の飛行時間質量分析,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 2012 年 3 月.
- [3] ○佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “飛行時間型質量分析用単一磁束量子時間測定回路の測定,” 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 愛媛・松山大学, 2012 年 9 月.
- [4] ○佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “飛行時間型質量分析用単一磁束量子時間測定回路の改良と測定,” 第 60 回応用物理学学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013 年 3 月.
- [5] ○村松祐希, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “飛行時間型質量分析装置用 SFQ 電流検出器の高感度化,” 第 60 回応用物理学学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013 年 3

月.

- [6] ○高橋章友, 江原康平, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “カレントリサイクルを用いた非同期式 FIFO Buffer の検討,” 電子情報通信学会総合大会, 岐阜大学, 2013 年 3 月.
- [7] ○佐野京佑, 村松祐希, 高橋章友, 山梨裕希, 吉川信行, “飛行時間型質量分析用単一磁束量子時間測定回路の測定と評価,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学, 2013 年 9 月.
- [8] ○村松祐希, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “飛行時間型質量分析用 SFQ 電流検出器を用いたイオン価数弁別の検討,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学, 2013 年 9 月.
- [9] ○吉川信行, 佐野京佑, 山梨裕希, 全伸幸, 大久保雅隆, “[招待講演]超伝導ストリップ線イオン検出器を用いた飛行時間分析装置のための単一磁束量子読みだし回路の研究,” 超伝導エレクトロニクス研究会, 東北大学・電気通信研究所, 2013 年 10 月.
- [10] ○佐野京佑, 村松祐希, 下田知毅, 山梨裕希, 吉川信行, “単一磁束量子回路を用いた飛行時間型質量分析用時間測定回路の冷凍機内における動作実証,” 第 88 回低温工学・超電導学会研究発表会, ウィンクあいち, 2013 年 12 月.
- [11] ○佐野京佑, 村松祐希, 山梨裕希, 吉川信行, 全伸幸, 大久保雅隆, “飛行時間型質量分析用マルチストップ機能付き SFQ 時間測定回路の時間分解能の評価,” 超伝導エレクトロニクス研究会, 機械振興会館, 2014 年 1 月.
- [12] ○佐野京佑, 村松祐希, 下田知毅, 山梨裕希, 吉川信行, 全伸幸, 大久保雅隆, “外部クロックを用いた SFQ 時間測定回路の冷凍機内における動作実証,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 2014 年 3 月.
- [13] ○村松祐希, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “イオン価数弁別飛行時間型質量分析用 SFQ システムの検討,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 2014 年 3 月.
- [14] ○下田知毅, 佐野京佑, 竹内尚輝, 村松祐希, 山梨裕希, 吉川信行, “SFQ リングオシレータにおけるタイミングジッタの測定,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, 2014 年 3 月.
- [15] ○佐野京佑, 村松祐希, 山梨裕希, 吉川信行, 全伸幸, 大久保雅隆, “単一磁束量子時間測定回路と超伝導ストリップイオン検出器を用いた飛行時間型質量分析,” 第 89 回低温工学・超電導学会研究発表会, タワーホール船堀, 2014 年 5 月.
- [16] ○佐野京佑, 村松祐希, 山梨裕希, 吉川信行, 全伸幸, 大久保雅隆, “単一磁束量子時間

測定回路と超伝導ストリップイオン検出器を用いた高分子の飛行時間型質量分析，”超伝導エレクトロニクス研究会，機械振興会館，2014年7月。

- [17] ○佐野京佑，高橋章友，山梨裕希，吉川信行，「講演奨励賞受賞記念講演」“直列バイアス技術用ドライバレーバ回路の磁気結合部のインダクタンスと構造の最適化，”第75回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学，2014年9月。
- [18] ○村松祐希，佐野京佑，下田知毅，山梨裕希，吉川信行，“飛行時間型質量分析用 SFQ 電流検出器におけるグレーゾーンの測定，”第75回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学，2014年9月。
- [19] ○下田知毅，佐野京佑，村松祐希，山梨裕希，吉川信行，“パルス間斥力を利用した SFQ リングオシレータにおけるジッターの低減，”第75回応用物理学会秋季学術講演会，北海道大学，2014年9月。
- [20] 佐野京佑，山梨裕希，○吉川信行，全伸幸，大久保雅隆，“飛行時間型超伝導質量分析システムの最近の研究，”超伝導エレクトロニクス研究会，東北大学・電気通信研究所，2014年10月。
- [21] ○全伸幸，佐野京佑，志岐成友，藤井剛，浮辺雅宏，小池正記，吉川信行，大久保雅隆，“質量分析用超伝導ストリップイオン検出器の開発，”超伝導エレクトロニクス研究会，東北大学・電気通信研究所，2014年10月。
- [22] ○佐野京佑，村松祐希，下田知毅，山梨裕希，吉川信行，全伸幸，大久保雅隆，“非同期式バッファを有する単一磁束量子時間測定回路による高分子の飛行時間型質量分析，”第90回低温工学・超電導学会研究発表会，コラッセふくしま，2014年11月。
- [23] ○佐野京佑，村松祐希，下田知毅，山梨裕希，吉川信行，全伸幸，大久保雅隆，“[招待講演]単一磁束量子時間測定回路と超伝導ストリップイオン検出器を用いた超伝導質量分析システムの実装と評価，”超伝導エレクトロニクス研究会，機械振興会館，2015年1月。
- [24] ○佐野京佑，村松祐希，下田知毅，山梨裕希，吉川信行，全伸幸，大久保雅隆，“飛行時間型質量分析に向けた超伝導ストリップイオン検出器と SFQ 時間測定回路の単一冷凍機内への実装，”第62回応用物理学会春季学術講演会，東海大学，2015年3月。
- [25] ○佐野京佑，山梨裕希，吉川信行，“カレントリサイクル用ドライバー/レーバ回路の磁気結合部の評価，”第91回低温工学・超電導学会研究発表会，産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂，2015年5月。
- [26] ○全伸幸，佐野京佑，志岐成友，藤井剛，浮辺雅宏，吉川信行，大久保雅隆，“超伝導ス

トリップ粒子検出器と超伝導デジタル信号処理回路の開発”第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月.

- [27] ○下田知毅, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “高分解能 TDC に向けた DAND ゲートの改良,”第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月.
- [28] ○佐野京佑, 下田知毅, 山梨裕希, 吉川信行, 全伸幸, 大久保雅隆, “飛行時間型超伝導質量分析システムの改善と評価,”第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月.
- [29] ○佐野京佑, 下田知毅, 山梨裕希, 吉川信行, 全伸幸, 大久保雅隆, “超伝導回路を用いた飛行時間型質量分析システムの研究,”平成 27 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 金沢大学, 2015 年 9 月.
- [30] ○佐野京佑, 下田知毅, 阿部裕, 山梨裕希, 吉川信行, “カレントリサイクル技術を用いた単一磁束量子時間測定回路の低電流化,”第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東工大, 2016 年 3 月.
- [31] 下田知毅, 佐野京佑, 阿部裕, 山梨裕希, ○吉川信行, “単一磁束量子リング・オシレータのジッタの評価,”第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東工大, 2016 年 3 月.
- [32] ○佐野京佑, 下田知毅, 阿部裕, 山梨裕希, 吉川信行, “カレントリサイクルを用いた単一磁束量子時間測定回路の動作実証,”超伝導エレクトロニクス研究会, 機械振興会館, 2016 年 4 月.
- [33] ○佐野京佑, 阿部裕, 山梨裕希, 吉川信行, “生体高分子用飛行時間型質量分析に向けた単一磁束量子時間測定回路のバッファの大容量化,”超伝導エレクトロニクス研究会, 埼玉大学, 2016 年 8 月.
- [34] ○阿部裕, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行, “微小電流検出用ジョセフソンコンパレータの高感度化,”超伝導エレクトロニクス研究会, 埼玉大学, 2016 年 8 月.
- [35] ○佐野京佑, 阿部裕, 山梨裕希, 吉川信行, “カレントリサイクル技術を用いた単一磁束量子時間測定回路用バッファの大容量化,”第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 2016 年 9 月.
- [36] ○阿部裕, 佐野京佑, 全伸幸, 藤井剛, 馬渡康徳, 山梨裕希, 吉川信行, “超伝導ストリップ光子検出器と SFQ 読み出し回路のモノリシック集積化,”第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 2016 年 9 月.

[受賞歴]

- [1] 第36回（2014年春季）応用物理学会「講演奨励賞」，応用物理学会，2014年9月.
- [2] 第5回（平成26年度）電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会奨励賞，電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会，2015年1月.
- [3] SCE 学生優秀発表賞，電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会，2016年8月.
- [4] SNF Contest for Best Contributed Papers Submitted to ASC 2016 入賞（as a “Winner”），Superconductivity News Forum (SNF) Grobal Edition, 2016年.