

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

A Frequency-Division Multiplexing Readout System  
for Large-Format TES X-Ray Microcalorimeter Arrays  
towards Future Space Missions

(将来の宇宙ミッションをめざしたTES型X線マイクロカロリメータ  
大規模アレイの周波数分割型信号多重化システム)

氏名 酒井 和広

## 1. 研究の背景と目的

金属の超伝導遷移端を温度計として用いた超伝導遷移端(TES)型X線マイクロカロリメータは、優れた分光性能と高い空間分解能を両立できるという点で、次世代のX線天文衛星において最も有望な検出器である。理論的なエネルギー分解能は、5.9 keVのX線に対し半値全幅(FWHM)で2 eVを切り、「すざく」衛星などでも搭載されたX線CCD検出器のそれを二桁も上回る。2015年に打ち上げ予定のAstro-H衛星では、半導体温度計を用いたマイクロカロリメータが搭載されるが、そのエネルギー分解能は $\Delta E \leq 7$  eV FWHMと高いものの、半導体素子の入力容量と高い入力インピーダンスにより信号多重化に向かず、高い空間分解能の達成は難しい。100 mK といった極低温で用いられる検出器では、熱流入を抑えるため配線本数の削減が必須であり、信号多重化は不可欠である。一方、TESを用いたマイクロカロリメータはその低い入力インピーダンスにより多重化に向き、分光性能と空間分解能の両立が実現可能である。

TES信号の多重化はこれまで時分割(TDM)、符号分割(CDM)、周波数分割(FDM)と先行研究がなされてきたが、宇宙利用においてはFDMが採用される。FDMによるTES信号の多重化は、TESボロメータにおいては実用化されつつあり、アタカマサブミリ波望遠鏡実験の多色TESボロメータカメラなどでは既に結果が出ている。しかし、ボロメータと比較するとX線検出器は信号帯域が二桁以上大きく、そのためFDMによる信号多重化技術は未だ過渡的であり、実用までには至っていない。これまでに我々の研究グループと、SRONの研究グループのみがそれぞれ独立な技術を用いX線信号の多重化に成功している。

本論文では、2020年代のX線天文衛星に搭載される予定である数百から数千という規模のTESアレイの実現を目指し、大規模アレイのためのFDM多重化システムを、低発熱型超伝導量子干渉計(SQUID)、低ノイズ室温アンプ、またデジタル回路によるSQUID駆動装置と、TESを除くすべての要素について新たに開発を行った。他機関が採用するマルチステージの極低温構成とは異なり、我々はシングルステージ構成を採用しており、TESとコールドフロントエンドが同一のステージ上に配置される。この構成はマルチステージ構成と比較し、非常にシンプルな構成であるがゆえに、極低温ステージの構築に必要なリソースやリードタイム、またコストが削減され、さらには人為的過誤の確率も下げ歩留まりの向上も期待される。数千という規模のアレイの実現には最も可能性の高い構成である。しかし、シングルステージ構成では冷却能力が最も低い極低温ステージに発熱の大きいSQUIDを配置するため、一般的な高ゲインのSQUIDは使用できない。発熱の小さなSQUIDを用い、かつひとつのSQUIDで多くの信号を多重化しなければこの構成は実現できない。そこで我々は、低発熱型SQUIDの開発と、高密度信号多重化が可能なデジタル回路によるSQUID駆動装置の開発を行った。

## 2. 低発熱型SQUIDの開発

人工衛星に搭載される冷凍機は断熱消磁冷凍機が一般的で、50 mK 極低温ステージの冷却能力は通常  $1 \mu\text{W}$  程度である。我々が先行研究で用いてきたSQUIDは発熱が最小のものでも100 nW 程度と大きく、多重化数を大幅に上げない限り宇宙機での使用は難しい。本論文では、SQUIDに要求されるゲインやノイズといった性能値を満たしつつ、発熱を20 nW まで抑えた低発熱型SQUIDの開発に成功した。一般的に発熱を抑えるとゲインまで小さくなるが、開発したSQUIDは単位発熱あたりのゲインが最大となる最適化を行い、低発熱ながらも十分なゲイン( $> 100 \text{ V/A}$ )を備えている。入力換算電流ノイズも4 Kにおいて $< 10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  と十分低く、TESの信号を劣化なく読み出すことが可能である。

また、同SQUIDを用い、FDM用の多入力SQUID基板の開発も行った(図1)。2.5 mm 角の基板の上に低発熱型SQUIDとTES 4素子分のLCバンドパスフィルタを備えている。さらに同基板に拡張基板を接続すれば多重化数を増やせ、極低温ステージの限られたスペースで効率良く多重化が行える設計となっている。

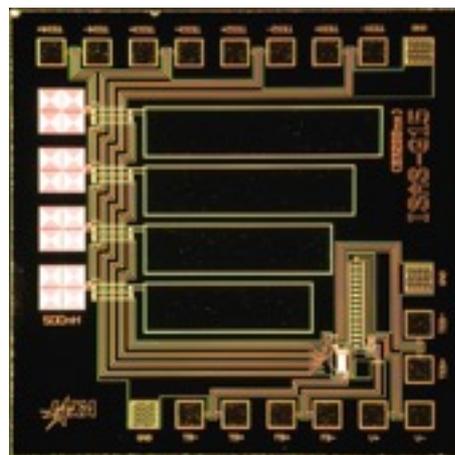


図1: 新たに開発した2.5 mm角FDM用4入力低発熱型SQUID基板。低発熱型SQUIDの他に4素子分のバンドパスフィルタを備える。

## 3. デジタル回路によるFDM信号多重化装置の開発

X線入射によるTES信号の帯域は $\sim 100 \text{ kHz}$ と大きく、十数、数十といった数の多重化を行うとなれば、必要な帯域は数MHzから十数MHzとなり、通常のSQUID駆動装置は使用できない。また、冷凍機から室温への配線による位相遅れのため、駆動装置の帯域を広げただけではSQUIDの駆動は不可能である。そこで、FDMでの信号多重化では、数MHzのTESの信号を一旦室温回路で復調し、SQUIDで

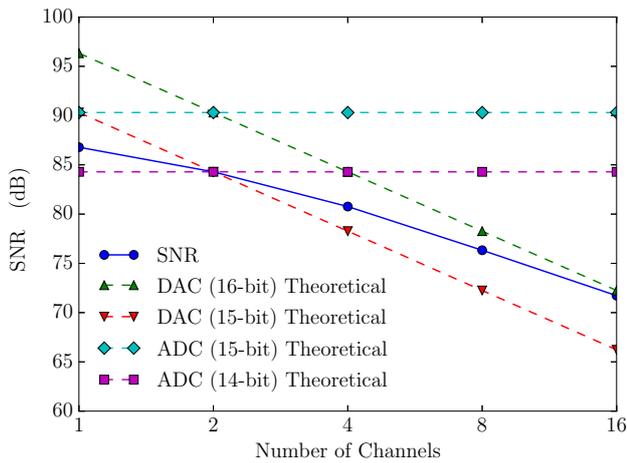


図2: デジタル信号多重化装置の単体試験におけるS/N比

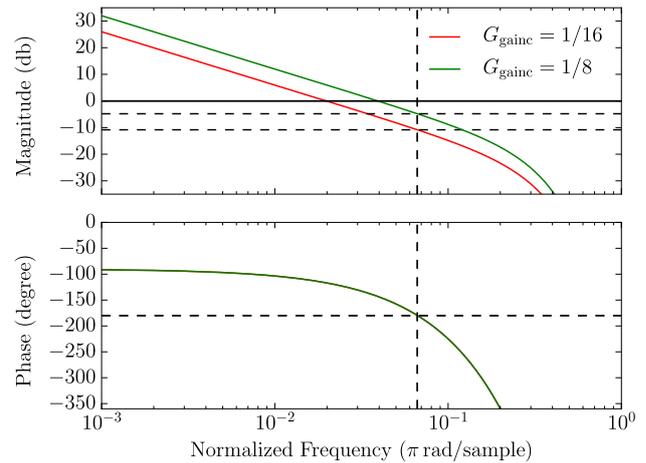


図3: デジタル信号多重化装置の単体試験における閉回路時の周波数特性

の加算点においてちょうど逆位相となるよう位相調整を行った搬送波で再変調を行い負帰還をかける、ベースバンドフィードバック(BBFB)という手法が用いられる。

多重化数を制限する要因として、周波数帯域、負帰還の安定性、入出力信号のダイナミックレンジがある。これまで我々はアナログ回路によるFDM信号多重化装置を開発し実験を行ってきたが、対応周波数が 2 MHz までと低く、高密度な多重化は不可能であった。また、復調に位相検波方式を用いており、位相調整が困難な上に位相の揺らぎやドリフトに追従できず、強く安定した負帰還を得ることができなかった。本論文では、市販されている高速FPGAと高速ADC/DACモジュールボードを組み合わせ、デジタル回路によるFDM-BBFB信号多重化装置の開発を行った。帯域は 10 MHz 以上と十分大きく、要求されるS/N比 (60 dB) を保ったまま少なくとも16素子までの多重化が可能である(図2)。復調にはI/Q復調を用い、位相の揺らぎやドリフトにも追従し安定した復調が可能である。閉回路時でのユニティ・ゲイン帯域幅は単体動作時で最大 76.8 kHz と非常に高い一方、位相余裕は60°と、広い帯域で安定した負帰還をかけることが可能である(図3)。入力信号は負帰還により抑制されるため多重化数が増加してもダイナミックレンジは問題にならない。一方出力信号は多重化数の増加とともに一素子あたりのダイナミックレンジが失われ、多重化を制限する要因となっている。

多重化数の増加と共に、システムのデータ転送率も高くなる。衛星上の限られたリソースで数百から数千の信号を処理・蓄積するためには、いかにデータ量を削減するかが鍵となる。本論文では、高い周波数 (~4 MHz) でトリガをかけ、波形を抽出した後にデータレートを大幅に下げること (240 kbps)、エネルギー分解能を犠牲にすることなくシステムのデータ転送レートを下げることに成功した。2 ms のX線パルス一波形あたりのデータ量は 1 kB 以下であり、仮に連続的にパルスが入射し続けたとしても必要なデータレートは 500 kB/s と低く、限られたリソースにおいても高密度多重化が十分可能な設計となっている。

本論文で採用したDACは最大出力が 1 Vpp と小さく、数十素子の信号多重化に必要な電流を供給することができない。そこで、V/I変換器とローノイズアンプからなるアナログフロントエンド回路の開発も行った。V/I変換器はDCから 20 MHz 以上の帯域を持ち、200 Ω 程度の配線抵抗があったとしても、DAC出力 1 Vpp において最大で 30 mApp まで出力可能で、数十素子の信号多重化を十分可

能としている。ローノイズアンプはDCから 20 MHz の帯域において 46 dB のゲインを持ち、入力換算電圧ノイズは  $< 2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 10 kHz と十分低く、SQUIDからの小信号をS/N比の悪化なく読み出し可能である。

#### 4. TES多重読み出し試験

開発した低発熱型SQUIDとFDM信号多重化装置、またアナログフロントエンド回路を用い、TESの多重化読み出しを行った。この実験で用いたTESは、Ti/Au二層薄膜の $8 \times 8$ アレイで、TESサイズは  $180 \mu\text{m}$  角、吸収体は厚み  $600 \text{ nm}$ 、サイズ  $120 \mu\text{m}$  角のAuである。SQUIDは4入力低発熱型SQUID基板を用いたが、ただしLCフィルタ付き基板ではなく、LCフィルタ用のインダクタ ( $500 \text{ nH}$ ) 付き基板を用い、キャパシタは表面実装型の積層セラミックコンデンサを用いた ( $4.7\text{-}8.2 \text{ nF}$ )。X線源には $^{55}\text{Fe}$ 線源を用いた。また冷凍機は無冷媒希釈冷凍機を用いた。

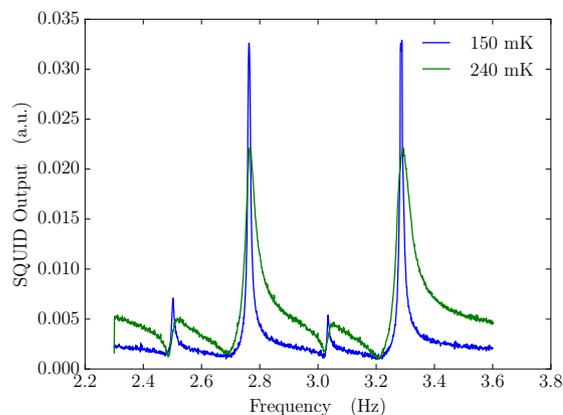


図4: TES超伝導/常伝導状態におけるバンドパスフィルタの特性

図4にTESが超伝導時 (150 mK) と常伝導時 (240 mK) におけるバンドパスフィルタの周波数特性を示す。これはTES-バンドパスフィルタ-SQUID-TESシャント抵抗のループに外部より振幅一定の電流を印加の上、SQUIDに現れる電圧を測定しており、超伝導時にはそれぞれCh.1から4として2.5, 2.8, 3.0, 3.3 MHz に共振周波数が現れている。但し、Ch. 1 と Ch. 3 の特性が非常に悪く、常伝導時にはほぼ見えなくなっている。一方、TESのR-T測定、I-V測定においては、透過特性は悪いものの、TES信号の読み出しには成功し、ループ内のインピーダンスは特に問題のないことが確認された。Ch. 1 と Ch. 3 の透過特性悪化の原因は現在特定中である。

X線照射試験では、透過特性の良い Ch. 2 と Ch. 4 については熱浴温度 150 mK で単体読み出し、また175 mK で同時読み出しに成功した。さらに、Ch. 1 と Ch. 3 については 190 mK で単体読み出しに成功した。また、TESの遷移温度直前である 205 mK では4素子多重読み出しに初めて成功した。一方、TESの吸収体が薄いため時定数が  $< 100 \mu\text{s}$  と極めて短く、パルス高が大きくなる状況では強い発振が発生してしまい、残念ながらエネルギー分解能は最良で  $5.9 \text{ keV}$  で  $\sim 50 \text{ eV}$  FWHM であった。

本論文では将来の宇宙計画に向け、大規模なTESアレイを周波数分割方式にて読み出すシステムの開発を根本から行った。各要素開発においては高密度多重化を支える結果を得ることに成功し、また実際に開発した装置を用いTESの4素子同時駆動に初めて成功した。今後は、時定数の大きなTESを用いたエネルギー分解能の改善と、多重化数増加が目下の急務である。