

# TES型マイクロカロリメータ信号読み出し系の開発

○平社航、酒井和広、満田和久、山崎典子、竹井洋、吉武宏、関谷典央(ISAS/JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、赤松弘規、石川久美、阿部祐輝、 辺見香理、大石詩穂子、榎祟利(首都大)、原徹 (物質・材料研究機構)、田中啓一(エスアイアイ・ナノテクノロジー)、師岡利光(セイコーインスツル)

TES型マイクロカロリメータは < 10 keV のX線に対して数eVのエネルギー分解能を達成可能な極低温分光器であり、小型衛星計画DIOS (Diffuse Ionized Oxygen Surveyor)、透過型電子顕微鏡 (TEM) の物質分析用分光器など、宇宙、地上の様々な応用が期待されている検出器である。現在の課題は、~1000 画素の撮像の実現や~300 cps/channelの高カウントレート読み出しであり、共にTES型マイク ロカロリメータの読み出し系の開発が鍵を握る。TESは極低温で動作させ、SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) 磁束計で信号を読み出す。~1000画素の実現には、SQUIDや配線に よる極低温部への熱流入を防ぐ必要があり、極低温部での信号多重化が欠かせない。我々はベースバンドフィードバックによる周波数分割方式という新しい方式でその実現を目指している。また高カウント レート読み出しのためにはTESの信号を高速でリアルタイム処理する必要がある。イベント検出をFPGAロジックで組み、SpWでデータを転送することでそれを実現する。これらの開発状況を紹介する。

## 1. Introduction

マイクロカロリメータはX線の入射を温度上昇として読み出す検出器であり、極低温 (~100) mK) で感度の高い温度計を用いることで、< 10 keV のX線に対して数eVの分光性能を実現でき る。我々は、超伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用した温度計 TES (transition edge sensor) を 用いたマイクロカロリメータを開発しており、5.9 keVのX線に対し 2.8 eVの分光性能を達成して いる (TESの開発の詳細は P7-002 大石他を参照)。TES型マイクロカロリメータの応用にはたと えばDIOS衛星計画 (S3-09, P3-160, 図1)、透過型電子顕微鏡(TEM)の物質分析 (図2) などがあ る。



2.	開発項目

る。

- TES型マイクロカロリメータの今後の課題は、 - 1000 画素程度の撮像の実現
- 300 cps/channel 程度の高力ウント
- レートへの対応

などである。我々は、以下の項目の開発を行ってい



- 図3. 信号多重化の概念
- A) 密集した大規模デザインのTESの実現 (P7-002 大石他 を参照)
- B) 信号多重化のためのSQUIDやコールドヘッドの開発 (Section 3)

信号加算可能なSQUIDの開発を行うことで実現した

C) 信号多重化を実現するアナログエレクトロニクス (Section 4)

信号多重化は、異なるTESを異なる周波数 (~MHz程度) で変調する周波数分割方式で実現し

図1. TESマイクロカロリメータの応用例1: DIOS衛星計画 (P7-002より抜粋)

### 図2. TESマイクロカロリメータの応用例2: TEM の EDS 分光 (NIMSプレスリリース: http://www.nims.go.jp/ news/press/2009/09/p200909250.html)

ようとしている (図3)。しかし、MHzの帯域はこれまで実現されていなかった。SQUIDは線形性 を保ちダイナミックレンジを大きくするためにフィードバック回路 (flux-locked loop; FLL) 内 で用いるが、室温と極低温部の配線や室温回路の位相遅れによりフィードバックループが不安定 になってしまうためである。そこで我々は位相遅れを補償する新しいSQUID駆動方式を開発して いる。

#### D) 高力ウントレートを実現するためのデジタルエレクトロニクス (Section 5)

地上応用では、高カウントレートの信号をエネルギー分解能を保ちつつリアルタイムに処理す る事が要求される。我々は高カウントレート時に頻発するパイルアップイベントも検出できる FPGAロジックを開発してきた (Hagihara et al. 2008) が、データ転送の速度がボトルネックと なっていた。FPGAの改良およびSpW-to-GigabitEtherの採用によりデータ転送速度を100 cps/channel から 600 cps/channel まで改善した。



# 3. 多入力SQUIDと低温部

周波数分割による信号多重化を行うに は、信号加算を行うSQUID、異なるTES 間のクロストークを防ぐLCバンドパス フィルタ、MHz帯でも十分インダクタン スが小さなシャント抵抗などが必要にな る。

我々は、異なるTESの電流を磁場加算 する8入力SQUIDを開発した(Kimura et al., 2008)。

また、NbTi線を巻いた自作の超伝導コ イルとコンデンサでLCフィルタを製作 し、低インダクタンスのシャント抵抗も 成膜した。これらと疑似TESを組み合わ せ信号多重化の実証を行おうとしている (図4)。



図4. 信号多重化実証用の極低温部基板

# 4. ベースバンドフィードバックによる周波数分割信号多重化

TESの読み出しに使う周波数を > 1 MHz に拡 張するには、室温と極低温部の間の位相遅れに 起因するSQUIDフィードバック回路の不安定性 を克服する必要がある。我々は、室温部で一度 信号を復調し、位相を補償して再度変調をかけ てからSQUIDにフィードバックをかける「ベー スバンドフィードバック」という方式を採用 し、開発を行っている (Kiviranta et al. 2002; 図 5)<sub>°</sub> この原理で動作するSQUID駆動回路を開発 し、8入力SQUID + 80 SSA の二段式SQUIDと 組み合わせ、実際に 2 MHz の信号でSQUIDが 動作させられることを世界で初めて実証し (Takei et al., 2009)、またノイズ、ループゲイ ン、出力線形性などに問題がないことも確認し た。次のステップとしてSection 3で述べた基板 で複数周波数を同時に入れた場合の応答の評価 と、TESの駆動を行っていく。



# 5. デジタルエレクトロニクス

地上応用で最も期待されるのは高カウントレートへの対応で ある。例えばTEMで要求されるカウントレートは1チャネル当 り 300 cpsで、全10チャネルで 3,000 cpsとなる。これを図 7の様に3系統に分割し読み出しを行う。

現在開発中のシステムでは、SpaceWireとTCP/IPのプロト コル変換に、これまでのSpaceCubeに替わりシマフジ電機と JAXAが共同開発したSpaceWire-to-GigabitEther (写真1)を 採用した。



写真1. SpaceWire-to-GigabitEther SpaceWireからGigabitEtherへプロトコル変換を行う。





図8に3系統同時読み出し速度試験の結果を示す。1パルス 当りの典型的なデータサイズを4kBとすれば、4kB以上のパ ケットサイズかつ1系統当り2スレッド以上の同時読み込み で、現状1チャネル当り最大 650 cps、10チャネルで最大 6,500 cpsの読み出しが可能である。



Number of Threads **Packet Size:**  $1k \odot 2k \Box 4k \times 8k$ 

地上応用ではデジタル処理系を経てホストへ伝送されたパ ルスデータをリアルタイムで解析できる事が望ましい。我々 はNASA GSFCで開発されたlgorベースの衛星搭載検出器用 解析ソフトウェア(図9)を参考に、リアルタイム解析アプリ ケーションを構築している。

図9. NASA GSFC GSE

図8.3系統同時読み出し速度試験

NASA GSFC開発のGround Support Equipment。

