

修士論文

TES型マイクロカロリメータの電熱フィードバックを
考慮した熱的・電氣的応答の研究

(A Study of Current and Temperature Sensitivity of TES
Microcalorimeters under the Electro-Thermal Feedback.)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
宇宙物理学研究系 山崎研究室

田中 圭太

指導教官：山崎典子

2022年 1月

概要

X線マイクロカロリメータは、入射した光子1つ1つのエネルギーを素子の温度上昇により測定するエネルギー分光器である。熱雑音の低い極低温下 (0.1 K程度) で動作させることで高いエネルギー分解能を達成でき、なかでも TES (Transition Edge Sensor) 型マイクロカロリメータは、超伝導-常伝導転移端の急激な抵抗変化を利用することで数 eV 程度の高いエネルギー分解能を誇る。

次世代の X線天文衛星で必要とされる撮像性能を有する hydra 型の TES マイクロカロリメータは、光子の入射位置に対して感度を持っており、光子の入射位置は TES の信号波形によって決定することができる。入射位置を精密に決定するには、信号波形がカロリメータの構造にどのように依存するか理解する必要がある。また、我々が開発を行なっている太陽アクシオンの探査に特化した TES 型マイクロカロリメータは、太陽アクシオンの変換物質である ^{57}Fe を吸収体として用いる必要がある。 ^{57}Fe は強磁性体であり、TES は磁場の影響によってエネルギー分解能が劣化することがわかっている。したがって磁場によるエネルギー分解能の劣化を抑えるために、吸収体と TES を横置きにして、Au の熱パスで繋ぐ新しい構造が開発された。単一素子での動作試験までは完了しているが、Au の熱パスの最適な構造は明らかではない。

Au の熱パス構造の最適化には、電熱シミュレーションによって、熱入力時の TES の信号波形を再現する必要がある。TES の熱入力に対する信号波形は、電熱フィードバックに強く依存する。したがって信号波形の再現には、TES の電熱フィードバックを含めたシミュレーション体系の構築が必要となる。本修士論文では、我々の製作した TES 型マイクロカロリメータの熱入力時の波形をシミュレーション上で再現することを目指した。シミュレーションにフィードバック量を決定するパラメータである、温度感度 α 、電流感度 β 、熱容量 C を TES の複素インピーダンス測定から求める。また、IV 測定から TES と熱浴間の熱伝導度 G と、TES の抵抗の温度依存性を求めて、シミュレーションに組み込んだ。本研究では、我々が製作した TES 型マイクロカロリメータに対して複素インピーダンスを測定し、吸収体厚 $5\mu\text{m}$ の素子の温度感度 α_I 、電流感度 β_I 、熱容量 C の TES の動作領域に対する依存性を確認した。その結果、Au 吸収体と TES の熱容量が想定している値程度であることが判明した。TES 型マイクロカロリメータの信号応答を理解を目指して、電熱シミュレーションを行った。まずはシミュレーション環境の構築を行い、電熱フィードバックを再現するために、実験的に求めた TES の抵抗値の温度依存性をシミュレーション上に組み込み、信号波形の再現を試みた。その結果、吸収体の熱容量を想定値の 1.8 倍程度にすることで、測定した波形を再現できることがわかった。また、複素インピーダンス測定の結果から、信号の立ち上がり時定数に対する電流依存性 β_I の効果を見積もったところ、吸収体は想定値程度で説明できることがわかった。