

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号： 22604

研究種目： 基盤研究 (A)

研究期間： 2009~2012

課題番号： 21246017

研究課題名 (和文) 超高分解能 X 線検出器による X 線分光分析の革新

研究課題名 (英文) Revolution of X-ray Spectroscopy with High-resolution X-ray Spectrometer

研究代表者

石崎 欣尚 (ISHISAKI YOSHITAKA)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号： 10285091

研究成果の概要 (和文)：

本研究は、従来の半導体検出器と比較して飛躍的に優れたエネルギー分解能 ΔE を持つ TES 型 X 線マイクロカロリメータを生かした応用物理研究を行ない、新たな X 線分光分析の手段とすることをめざした。特に、惑星間空間における太陽風を模擬した重イオン衝突装置からの電離した炭素や酸素と中性ガス (H_2 , He など) との間の電荷交換過程による X 線放射スペクトルの Si 検出器による測定と、超伝導積層配線を利用した大面積センサ素子/2 段式断熱消磁冷凍機および熱スイッチ/信号処理回路も含めた極低温で動作する X 線検出器開発を行った。

研究成果の概要 (英文)：

This research aimed to conduct physics experiments utilizing TES microcalorimeter, which has much superior energy resolution than traditional semi-conductor based detectors, and to establish it as new tool for X-ray spectroscopy. We performed measurements of charge exchange X-ray emission from the ionized carbon / oxygen in collision with neutral gas (H_2 , He) using a Si detector, considering the solar wind in the interplanetary space. Regarding to the detector development, superconducting multi-layer wiring for large-format array of TES microcalorimeters, 2-stage adiabatic demagnetization refrigerator with lab-made heat-switch, and signal processing system have been made and tested.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2010年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2011年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2012年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
総計	34,000,000	10,200,000	44,200,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎

キーワード： 物理計測・制御、X 線分光、超伝導材料・素子、超精密計測

1. 研究開始当初の背景

マイクロカロリメータは入射 X 線のエネルギーを温度上昇として検出する検出器で、100 mK 以下の極低温で動作させることで優れたエネルギー分解能を発揮する。カロリ

メータは究極的には極低温に保った X 線吸収体のフォノン数の揺らぎで分解能が決定され、センサの熱容量 C 、温度 T 、無次元の抵抗温度計の感度 $\alpha \equiv d \log R / d \log T$ 、ボルツマン係数 k を用いて $\Delta E \sim \sqrt{(kCT^2/\alpha)}$ と表される。世界的には、アメリカの

NASA ゴダード研究所において、1.8 eV @ 6 keV、NIST 研究所において 27 eV @ 100 keV のエネルギー分解能が達成されており、1-2 桁の分解能向上が可能である。カロリメータの利点は、吸収体をうまく選択することで 100%近い量子効率を持つこと、よりエネルギーの高い軟γ線領域(~100 keV)でも対応可能なことである。TES (Transition-Edge Sensor; 超伝導遷移端温度計)とは、温度計として超伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用したもので、従来型温度計の 100 倍近い感度 α をもつことから、SQUID (超伝導量子干渉計)を低インピーダンス低ノイズ電流計として組み合わせて用いることで、急激な進歩を遂げてきた。上記の世界記録は、どちらも TES カロリメータを用いたものである。

首都大、宇宙研を中心としたグループでは、アメリカの NASA ゴダード研究所やオランダの SRON 研究所とも協力しつつ、これまで X 線天文衛星搭載へ向けた X 線マイクロカロリメータ検出器、極低温冷凍機、信号読み出しシステムの開発を行ってきた。特に、日本で 5 代目になる X 線天文衛星「すざく」は 2005 年 7 月に打ち上げられ、その主力検出器の 1 つであったマイクロカロリメータ XRS は衛星軌道上においては世界初となる断熱消磁冷凍機(Adiabatic Demagnetization Refrigerator; ADR)を稼働させ 60 mK の極低温を実現し、約 24 時間の冷却中に取得した ^{55}Fe 較正線源の Mn-K α (5.9 keV) X 線に対して、 $\Delta E = 7 \text{ eV}$ ($E/\Delta E = 840$) の優れたエネルギー分解能を達成した。さらに 2013 年の打ち上げを目指し、XRS をグレードアップした検出器を Astro-H 衛星に向け設計・製作中である。

我々はこのような背景のもと、特に TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発および、それを自作の小型可搬型 ADR に組み込んだの地上応用実験に取り組んできた。TES カロリメータ素子自体の性能としては、我々はインハウスプロセスを 4 年前より立ち上げ、単素子で 4.8 eV @ 6 keV のエネルギー分解能をもつセンサを自作した。これは、フォトマスク製作から、薄膜(Ti/Au) のスパッタ、エッチングによるパターンニングやシリコン加工までほぼすべてを首都大、宇宙研、産総研にある装置を利用して手作りで進めたものである。軟γ線領域でも、スズ吸収体を手で貼りつけることで、2005 年に 38 eV @ 60 keV という当時としては世界一の分解能をもつ素子の製作に成功した。

近年、宇宙の軟 X 線領域(0.3-1 keV)での観測において、彗星、地球や外惑星の磁気圏、惑星間空間での電荷交換相互作用による X 線放射が注目を集めている。電荷交換過程とは、例えば太陽風に含まれる重イオン(C^{N+} , O^{N+} , Fe^{N+}) と中性水素が衝突して電子が重

イオンに移動して励起イオンとなり、それが基底状態に落ちる時に X 線放射が起きる現象である。しかし、電荷交換過程と熱的プラズマからの X 線放射を区別することは容易ではなく、その最も良い方法が高分解能 X 線分光観測である。電荷交換過程では、熱的放射に比べて高次の主量子数からの遷移の放射が強くなり、禁制線が強いなど輝線の微細構造も異なる。本研究では、首都大の重イオンビームと中性物質の衝突実験装置(TMU ECRIS)を用いて、惑星間空間での電荷交換過程に近い状態を作りだし、これを TES カロリメータを用いて X 線スペクトルを高分解能で取得することを目的とする。さらにそれを「すざく」衛星の観測データや理論研究と比較することで、宇宙からの電荷交換による X 線放射スペクトルを推定することを目指す。

2. 研究の目的

本研究は、従来の半導体検出器と比較して飛躍的に優れたエネルギー分解能 ΔE を持つ TES 型 X 線マイクロカロリメータを生かした応用物理研究を行ない、新たな X 線分光分析の手段として確立することにある。具体的な応用としては、

- (1) 重イオン衝突装置からの電荷交換過程による X 線放射スペクトルの測定
 - (2) 超高压下の物質の相解析をめざしたエネルギー分散 X 線回折スペクトルの取得を取り上げる。応用研究を実施する過程で、
 - (3) センサ性能および、極低温冷凍機や信号処理回路も含めたシステム全体の安定性・操作性の向上
- も、本研究の大きな目的の一つである。

3. 研究の方法

(1) 電荷交換過程による X 線放射の研究: 首都大学の電子サイクロトロン共鳴イオン源を用いた重イオン衝突装置に、2 keV 以下で半値幅 5 eV 以下のエネルギー分解能を持つ TES 型 X 線マイクロカロリメータ、断熱消磁冷凍機(ADR)、信号処理システムを接続し、電荷交換過程で放射される X 線輝線の詳細な X 線スペクトルを測定する。地球近傍や惑星間空間、さらに銀河間空間で実際におきていると考えられる衝突に近い条件で実験を行えるように、実験装置の整備を行う。並行して、「すざく」衛星の X 線 CCD カメラや地球近傍のや惑星空間の荷電粒子流量の測定データを組み合わせることで、全天で見られる軟 X 線放射に対する電荷交換過程の寄与の定量的な制限を与える。実験データと比較することで、宇宙からの電荷交換による X 線放射スペクトルの精度の高いモデルを作り出す。

(2) 超高压下の物質の相解析をめざしたエネルギー分散 X 線回折実験: 筑波の高エネルギー研究所(KEK)フォトンファクトリーのビームライン BL14-C2 に設置されている Max III マルチアンビル超高压装置に 2–60 keV の範囲で半値幅 40 eV 以下のエネルギー分解能を持つスズ吸収体つき TES カロリメータ、ADR、信号処理システムを接続し、実際の放射光を用いて回折データを取得する。将来的には SPring-8 の超高压実験にも本システム導入をめざす。

(3) TES マイクロカロリメータは面積小さく、予想カウントレートは 0.1 c/s である。分岐比の低い輝線の微細構造まで議論するためには、~100 photon 以上溜める必要あり、1 日以上の上長時間実験が必要になる。これには冷凍機の液体ヘリウムの持ち時間、検出器の安定性などの問題がある。そこで 10 画素のアレキ素子とそのリアルタイムデータ処理システムを開発し、実験に要する時間を 1/10 にする。マイクロカロリメータの設計を酸素輝線のエネルギー帯域に最適化することでエネルギー分解能を向上するために、アレキ素子は、新たに設計・製作する。信号処理システムは、信号デジタイザとリアルタイム波形処理(X 線イベントの検出、波形切り出し、最適デジタルフィルター処理を行う)を開発する。

4. 研究成果

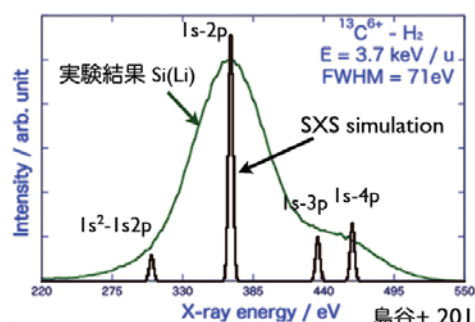
(1) 電荷交換過程による X 線放射の研究

衝突エネルギー 30–140 keV において O^{7+} および N^{6+} と He 標的气体との電荷交換反応による軟 X 線発光を Si 検出器を用いて観測した。高い励起状態から最低励起状態である 2p 状態にカスケード遷移し、最終的に起きた 1s-2p の発光が最も強く観測され、発光強度から TES を用いた場合の信号強度を見積り、測定可能であることを実証した (図 1)。

電子サイクロトロン共鳴型イオン源で生成した水素様多価イオン (C^{5+} , N^{6+} , O^{7+}) を太陽風と同等の速度 (300–800 km/s) にまで減速して希薄な気体標的 (H_2 , He, CH_4) と衝突させ、一電子捕獲断面積および軟 X 線発光断面積の絶対値を系統的に測定した。一電子捕獲断面積については、全ての衝突系において従来の報告値と矛盾のない値が得られた。発光スペクトルについては、解析によって 1s²-1snp (n = 2–5) 遷移の発光断面積を求めた。その結果、高励起状態からのカスケードによって最終的に 1s2p 状態の占有数が多くなり、何れの場合においても 1s-2p 遷移が主要となることが判った。また、電子捕獲断面積と発光断面積の値を比較することで、一電子捕獲によって生成する一重項と三重項の生成断面積の比が統計重率の 1:3 に近

い値を取るという結果を得た。

図 1. Si 検出器で取得した $C^{6+} \cdot H_2$ からの



電荷交換反応の X 線スペクトルと、カロリメータを利用した場合のシミュレーション。

(2) SEM-EDS 分析の応用研究

我々はこれまでに、中井を中心として TES カロリメータを SEM に搭載した SEM-EDS 分析システムを SII-ナノテクノロジー(株)との共同研究で、NEDO の支援を受けて開発した。本科研費では、応用研究を展開した。様々な系への応用を試み、環境化学の分野では大気粉塵の 1 粒子分析、法科学の分野では微細塗膜片や発砲残渣の特性化を行った。特に、法科学への応用で射撃残さを分析し S-K 線と Pb-M 線および Sb-L 線と Ca-K 線などが鮮明に分離して検出され、EPMA を用いないでもより詳細な組成情報を得ることができた。これを平成 7 年に発生した警察庁長官狙撃事件の法鑑定に適用、有力な鑑定試料を提供し、実際の法科学分析における SEM-EDS 分析の有用性を世界で初めて実証した。

(3) TES カロリメータの開発

TES 素子の製作にはマイクロマシーニング技術が必須であるが、首都大、宇宙研の設備を利用して in-house で素子製作が行なえる環境を構築した。エネルギー分解能 2.8 eV @ 5.9 keV を達成した TMU-146 素子と同じデザインの 4x4 ピクセル素子をいくつか製作し、製作プロセスの再現性を確認した。特に、TES 温度計となるチタン、金の成膜を行なうためのスパッタ装置(首都大)の条件出しをやり直し、Ti=40 nm, Au=80 nm で 100–150 mK の転移温度の TES を再現性良く製作することに成功し、新しく製作した TMU-193 素子で 5.0 eV の分解能を達成した。これにより、TES カロリメータ素子を安定して供給するめどがたった。

in-house 製作した 4x4 素子の TES カロリメータ TMU-146 でエネルギー分解能 4.2 eV (for Mn-Kα; 5.9 keV) を達成し、さらに測定系を改善することにより 3 eV 程度までの向上を見込んでいた。性能評価に使用している首都大の希釈冷凍機の温度安定度を改善、輻射シールドを強化して、ノイズスペク

トルの低周波側に見られていた超過ノイズを減少させることに成功した。また、データ取得に用いていた A/D コンバータを 13-bit のものから 16-bit のものに変更することで、デジタル化による量子化ノイズの寄与も小さくできた。これらの改善により、最終的にエネルギー分解能 2.8 ± 0.3 eV を達成することができた(Akamatsu et al. 2009)。

また、大フォーマットのピクセルアレイとなると、配線の物理的スペースやインダクタンス、ピクセル間の電気的クロストークも問題となってくる。そこで、SII ナノテクノロジーに製作を依頼して、最大で 20×20 ピクセルになるカロリメータ用の超伝導配線 (Al/Al or Al/Nb) の試作を行なった (図 2)。この配線には、積層配線と呼んでいる方式を採用し、行きの配線と帰りの配線が絶縁層をはさんで完全に重なるように設計した。要所には上下の配線のコンタクト部分を作り、ピクセル部分は折り返し構造、パッド部分は分岐構造を実現している。これにより、配線の自己インダクタンスを非常に小さくし、クロストークが起きにくくなるメリットがある。

多ピクセル素子の性能評価については、 4×4 ピクセルと 20×20 ピクセルの折り返し型積層配線を用いた素子を希釈冷凍機により ~ 100 mK の極低温まで冷却し、R-T 曲線の取得や臨界電流の測定、X 線応答の評価などを実施した。 4×4 ピクセルの素子については、X 線信号の取得にまで成功したが、エネルギー分解能は ~ 100 eV と性能要求を満たすものではなかった。 20×20 ピクセルの素子については、2 層薄膜の Ti を厚くせざるを得ないため転移温度が高いうえ、臨界電流が小さくバイアス電圧を十分にかけられず TES カロリメータとして駆動ができなかった。この原因をさぐるため、アルミ配線との接合部を電子顕微鏡で観察、元素分析をおこなったところ、TES とアルミの上部配線の段差で剥離がみられた。これをもとに、製作プロセスの再検討が必要である

衛星の軌道上環境を想定した TES の放射線耐性の試験を実施した。厚さ Ti: 30 nm, Au: 50 nm の 2 層薄膜の TES に $1.5 \mu\text{m}$ の X 線吸収体をつけた TES カロリメータに対し、放射線医学総合研究所において 150 MeV の陽子を約 10 krad (軌道上で 10 年分に相当) 照射して、前後での超伝導転移特性 (R-T 曲線)、および X 線に対するエネルギー分解能を比較した。結果としては、転移温度、転移前抵抗、温度感度 $\alpha = d\log R/d\log T$ とともに大きな変化はなく、エネルギー分解能も 5.9 keV での半値全幅で 5.1 eV から 5.6 eV へのわずかな劣化が示唆される程度であり、TES の性能に宇宙放射線の影響は無視できそうであることがわかった。

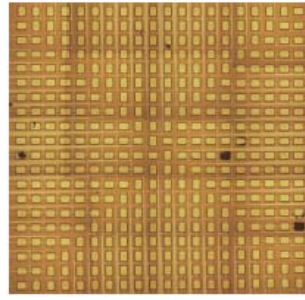


図 2. 試作した 400 素子の TES カロリメータ。大きさは 1 cm 四角。Si 基板上に積層配線を形成し、その上に TES カロリメータを作り込んでいる。

(4) 極低温冷凍機および測定系の開発

国立天文台とも協力してガスギャップ式ヒートスイッチの製作を行なった (図 3)。ON 時の熱伝導度と OFF 時の熱伝導度を独立に決定でき、ギャップ幅のアライメント調整も行ないやすい新構造ヒートスイッチの設計/製作/性能試験を行ない、活性炭に取り付けたヒータの電流を制御することで、液体ヘリウム温度でヒートスイッチの上下間を熱的に ON/OFF できることを確認した。4.2 K における ON 時の熱伝導度は ~ 10 mW/K, OFF 時は ~ 10 μ W/K と測定され ON/OFF 比 ~ 1000 を実現している。



図 3. 国立天文台と協力して製作した新構造のガスギャップ式ヒートスイッチの写真と断面図。

また、宇宙研で篠崎を中心に開発されてきた 2 段式 ADR は、ASTRO-H 衛星でも採用された、小型軽量の冷却系に必須の技術である。ソルトピルとして GGG (Gadolinium Gallium Garnet) を 1 段目に、CPA を 2 段目としたシステムが稼働している。最低到達温度としては 50 mK を実現しているが、熱流入が予想よりも大きく、100 mK での保持時間が 1 時間程度と短いという問題があることがわかった。調査の結果、熱流入の原因としては、使用している Passive 式のガスギャップヒートスイッチの OFF 時の熱伝導度が予想よりも大きいこと、また、OFF になる温度が 2 K 付近とやや温度が高いことが挙げられる。我々は、このヒートスイッチを独自に開発した上記の Active 式のヒートスイッチと交換して、保持時間を向上させた。

冷却能力の確認試験を行ったところ、液体ヘリウムの保持時間は 48 h、最低到達温度は 45 mK、100 mK 以下の保持時間は 2.6 h であり、温度環境の実現にめどがたった。続いて、TES を流れる電流の微小変化を測定する

SQUID を Cryo-Perm と Nb で磁気遮蔽を行い、4 K ステージ上に設置して正常動作することを確認した。一方、検出器ステージに設置した TES が超伝導遷移しないという問題が明らかとなり、残留磁場の影響が疑われる。

(5) 「すざく」による地球外圏の観測

日本の「すざく」衛星は広がった X 線に対して世界で最高レベルの感度を持ち、地球の超高層大気である外圏からの X 線放射の研究を進めた。地球半径の 10 倍にも広がる希薄な外圏大気は太陽風に含まれる高階電離したイオンと電荷交換反応を生じる。電子はイオンへと移動し、カスケードにより X 線輝線を放出する (図 4)。こうした X 線は銀河団などのあらゆる X 線観測の前景放射となるため、太陽風フラックスとの強度関係や視線方向の依存性を押さえることが重要となる。「すざく」の全観測データを対象とし、太陽風の強度と相関した X 線増光を示すデータ 38 例を取り出した。それらの方向分布はかなり一様に近く、カusp などへの集中が見られなかった。一方 OVII 輝線強度から、地球の中性大気密度 N_H を算出したところ、太陽フレアと同期した例についてはフレア強度と N_H がよく相関した。一方、得られた N_H の値は地球大気モデルより 5 倍ほど大きく、大気が地球半径の数 10 倍まで 10 cm^{-3} ほどの高い密度で広がっていることが示唆された。X 線観測が惑星科学や磁気圏物理に新たな情報をもたらすことを示した結果である。本研究結果は石川の博士論文としてまとめられた。

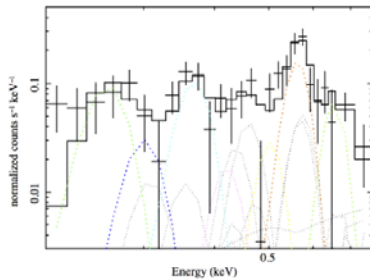


図 4. X 線増光のエネルギースペクトルの例で、0.57 keV の酸素輝線が強く見える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 37 件)

- (1) Kumi Ishikawa, Yuichiro Ezoe, Yoshizumi Miyoshi, Naoki Terada, Kazuhisa Mitsuda, and Takaya Ohashi: Suzaku Observation of Strong Solar Wind Charge Exchange Emission from the Terrestrial Exosphere during a Geomagnetic Storm, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, in press
- (2) Y. Ezoe, R. Fujimoto, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Ohashi, K. Ishikawa, S. Oishi,

Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Futaana, F. S. Porter, G. V. Brown: Suzaku observations of charge exchange emission from solar system objects, *Astronomische Nachrichten*, **333**, Issue 4, p.319 (2012)

(3) Yuichiro Ezoe, Satoshi Kasahara, Yoshizumi Miyoshi, Atsushi Yamazaki, Kazuhisa Mitsuda, Tomoki Kimura, Takaya Ohashi, Kumi Ishikawa, Masaki Fujimoto: Juxta: A Probe of X-ray Emission from Jupiter's Magnetosphere, *39th COSPAR Scientific Assembly. Held 14-22 July 2012, in Mysore, India. Abstract*, E1.15-39-12, p.524

(4) T. Enoki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H. Tanuma, H. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda: Development of Laboratory Experimental System to Clarify Solar Wind Charge Exchange Mechanism with TES Microcalorimeter, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, Issue 5-6, pp. 771-776 (2012)

(5) S. Oishi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Abe, Y. Enokijima, R. Hosoya, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Morooka, K. Tanaka: Development of Superconducting Multilayer Wiring for Large Arrays of TES X-Ray Microcalorimeters, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, issue 3-4, pp. 220-225 (2012)

(6) Y. Ishisaki, K. Henmi, H. Akamatsu, T. Enoki, T. Ohashi, A. Hoshino, K. Shinozaki, H. Matsuo, N. Okada, T. Oshima: Development of Active Gas-Gap Heat Switch for Double-Stage Adiabatic Demagnetization Refrigerators, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, Issue 5-6, pp. 777-782 (2012)

(7) T. Ishida, T. Kanda, H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, H. Ohashi, L. Liu, J. Wang, H. Tanuma: Soft X-ray emissions related to the solar wind charge exchange observed by the X-ray satellite observatories, *Journal of Physics: Conference Series*, **388**, Issue 8, article id. 082021 (2012).

(8) S. Kasahara, Y. Ezoe, T. Kimura, Y. Miyoshi: Radiation background and dose estimates for future X-ray observations in the Jovian magnetosphere, *Planetary and Space Science*, 75, p. 129-135. (2013)

(9) 石崎欣尚 and The ASTRO-H SXS Team: 宇宙用 X 線マイクロカロリメータ検出器, 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」**37**, 217-226 (2011)

(10) 江副祐一郎, 木村智樹, 笠原慧, 山崎敦, 三好由純: 将来木星探査と X 線観測, 日本惑星科学会誌, **20**, 300-308 (2011)

(11) C. Tao, M. Fujimoto, Y. Kasaba, T. Kimura, Y. Ezoe, M. Kagitani, H. Tadokoro, Y. Miyoshi, S. Kasahara, T. Takashima, and

- the JMO working group: Magnetospheric Science Targets of JMO, *Proc. EPSC-DPS*, 767-768, (2011)
- (12) Y. Ishisaki, K. Henmi, H. Akamatsu, T. Enoki, T. Ohashi, A. Hoshino, K. Shinozaki, H. Matsuo, N. Okada, T. Oshima: Development of Active Gas-Gap Heat Switch for Double-Stage Adiabatic Demagnetization Refrigerators, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 777-782 (2012)
- (13) S. Oishi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Abe, Y. Enokijima, R. Hosoya, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Morooka, K. Tanaka: Development of Superconducting Multilayer Wiring for Large Arrays of TES X-ray Microcalorimeters, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 220-225 (2012)
- (14) T. Enoki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H. Tanuma, K. Shinozaki, K. Mitsuda: Development of Laboratory Experimental System to Clarify Solar Wind Charge Exchange Mechanism with TES Microcalorimeter, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 771-776 (2012)
- (15) T. Kanda, H. Ohashi, S. Maeno, T. Ishida, H. Tanuma, H. Akamatsu, Y. Abe, W. Yokota, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda: Laboratory experiments on soft x-ray emissions from the solar wind, *Physica Scripta*, **144**, 014025 (2011)
- (16) Y. Ezoe, Y. Ishisaki, S. Oishi, Y. Abe, T. Ohashi, H. Yoshitake, N. Sekiya, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Morooka, K. Tanaka: Development of Multilayer Readout Wiring for Large-format TES X-ray Microcalorimeter Arrays, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, **21**, 246-249 (2011)
- (17) Y. Ezoe, R. Fujimoto, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Ohashi, K. Ishikawa, S. Oishi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Futaana, S.F. Porter, G. Brown: Suzaku Observations of Charge Exchange Emission from Solar System Objects, *Astron. Nachr.*, **333**, 319-323 (2012)
- (18) Y. Ezoe, Y. Miyoshi, H. Yoshitake, K. Mitsuda, N. Terada, S. Oishi, T. Ohashi: Enhancement of Terrestrial Diffuse X-Ray Emission Associated with Coronal Mass Ejection and Geomagnetic Storm, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, S691-S704 (2011)
- (19) K. Ishikawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, N. Terada, Y. Futaana: X-Ray Observation of Mars at Solar Minimum with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, S705-S712 (2011)
- (20) Y. Ezoe, K. Ishikawa, T. Ohashi, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, Y. Futaana: Solar system planets observed with Suzaku, *Advances in Space Research*, **47**, 411-418 (2011)
- (21) 中井泉:低加速SEM-TES-EDSシステムによる大気粉塵及びナノ物質の分析, クリーントクノロジー, **20**, p26-31 (2010)
- (22) 中井泉: Transition Edge Sensor-Energy Dispersive Spectrometer (TES-EDS) and Its Applications, *IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS*, **3**, p334-340 (2009)
- (23) 中井泉: High-resolution microanalysis of suspended particulate matter using a transition edge sensor microcalorimeter x-ray spectrometer, *X-Ray Spectrometry*, **38**, p369-375 (2009)
- (24) 中井泉: 環境計測を支える応用物理 都市環境計測 3 —環境試料の先端的X線分析技術—, 応用物理, **78**, p459-464 (2009)
- (25) 中井泉: Morphology and chemical composition analysis of inorganic nanosheets by the field-emission scanning electron microscope system, *J. Electron Microscopy*, **58**, p1-6 (2009)
- (26) 江副祐一郎, 篠崎慶亮, 竹井洋: 進化するX線マイクロカロリメータ-精密X線分光で解き明かす宇宙の大規模構造-, 日本物理学会誌 **64** (2009) pp. 611-618
- (27) Y. Ezoe, K. Ishikawa, T. Ohashi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, H. Negoro: Discovery of Diffuse Hard X-Ray Emission Around Jupiter with Suzaku, *The Astrophysical Journal Letters*, **709**, pp. L178-L182 (2010)
- (28) Y. Ezoe, H. Yoshitake, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, T. Ohashi, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Takano, R. Maeda: Large Arrays of TES X-ray Microcalorimeters for Dark Baryon Search, *LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp. 60-63 (2009)
- (29) H. Akamatsu, Y. Ishisaki, A. Hoshino, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Oshima, K. Tanaka: Impedance Measurement of a Gamma-Ray TES Calorimeter with a Bulk Sn Absorber, *LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp. 191-194 (2009)
- (30) H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Maeda: Impedance measurement and excess-noise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter, *LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp. 195-198 (2009)
- (31) H. Seta, M. S. Tashiro, Y. Terada, Y. Shimoda, K. Onda, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, T. Hagihara, Y. Takei, K. Mitsuda, K. Boyce, A. Szymkowiak: Development of a Digital Signal Processing System for the X-ray Microcalorimeter onboard ASTRO-H, *LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp. 278-281 (2009)
- (32) Y. Ishisaki, H. Akamatsu, A. Hoshino,

T. Numazawa, K. Kamiya, R. Fujimoto, Y. Kojima, K. Shinozaki, K. Mitsuda, P. Shirron: Performance test of Ti/Au bilayer TES microcalorimeter in combination with continuous ADR, *LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, 442 (2009)

(33) H. Yoshitake, Y. Ezoe, T. Yoshino, K. Mukai, K. Ishikawa, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, R. Maeda, R.; T. Takano: Optimization of Structure of Large Format TES Arrays, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **19**, p456-459 (2009)

(34) L. Liu, Y. Q. Zhao, J. G. Wang, R. K. Janev, and H. Tanuma: Polarization degree differences for the $3p^2P_{3/2} \rightarrow 3s^2S_{1/2}$ transition of $N^{4+}(3p^2P_{3/2})$ produced in N^{5+} -He and N^{5+} - H_2 collisions, *Phys. Rev. A*, **81**, 014702 (8pp) (2010)

(35) K. Shinozaki, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, K. Masui, K. Asano, T. Ohashi, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, R. Fujimoto, K. Sato, K. Kanao, S. Yoshida: Development of double-stage ADR for future space mission, *Cryogenics*, **3**, 6pp (2010)

(36) T. Hara, K. Tanaka, K. Maehata, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, M. Ohsaki, K. Watanabe, X.Z. Yu, T. Ito, Y. Yamanaka: Microcalorimeter-type energy dispersive X-ray spectrometer for a transmission electron microscope, *JOURNAL OF ELECTRON MICROSCOPY*, **59**, p17-26 (2010)

(37) Y. Takei, N. Y. Yamasaki, W. Hirakoso, S. Kimura, K. Mitsuda: SQUID multiplexing using baseband feedback for space application of transition-edge sensor microcalorimeters, *Superconductor Science & Technology*, **22**, p114008-114016 (2009)

[学会発表] (計 73 件)

(1) Y. Ezoe: Planetary magnetospheres and their solar wind interaction observed in X-rays: Past, present and future (Invited), Geotail 20th workshop, Ookayama, JAPAN, Nov 12 - 14, 2012

(2) K. Ishikawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Miyoshi, N. Terada: Systematic Search for Solar Wind Charge Exchange X-ray Emission from the Earth's Exosphere with Suzaku, 第 14 回惑星圏研究会 2013 年 2 月 20~22 日(東北大)

(3) 島谷紘史, 石川彰一郎, 石田卓也, 須田慎太郎, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応III, 日本物理学会 2012 年秋季大会

(4) 石崎欣尚: 宇宙用X線マイクロカロリメータ検出器, 日本物理学会 2013 年春季大会 (ほか 69 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 情報記録再生装置および記録再生方法
発明者: 河上聡子, 檜原弘樹, 水島和代, 高橋忠幸, 国分紀秀, 能町正治, 尾崎正伸, 河合誠之, 石崎欣尚, 寺田幸功

権利者: 同上 種類: 特許出願 番号: 2012-284142

出願年月日: 2012 年 12 月 27 日 国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.astro.isas.ac.jp/~tes/index.php?%BA%C7%BF%B7%C0%AE%B2%CC>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石崎 欣尚 (ISHISAKI YOSHITAKA)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号: 10285091

(2) 研究分担者

田沼 肇 (TANUMA HAJIME)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 30244411

満田 和久 (MITSUDA KAZUHISA)
JAXA・宇宙科学研究所・教授
研究者番号: 80183961

中井 泉 (NAKAI IZUMI)
東京理科大学・理学部・教授
研究者番号: 90155648

亀卦川 卓美 (KIKEGAWA TAKUMI)
KEK・物質構造科学研究所・講師
研究者番号: 70195220

篠崎 慶亮 (SHINOZAKI KEISUKE)
JAXA・研究開発本部・研究員
研究者番号: 10435802

(3) 連携研究者

大橋 隆哉 (OHASHI TAKAYA)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 70183027

江副 祐一郎 (EZOE YUICHIRO)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号: 90462663