

平成22年10月29日現在

研究種目：基盤研究（B）（一般）
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19340145
 研究課題名（和文） 中高エネルギー電子計測用2次元イメージャ検出器の開発
 研究課題名（英文） Development of 2-dimensional imagers for middle and high energy particles
 研究代表者
 高島 健（TAKASHIMA TAKESHI）
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部宇宙プラズマ研究系・准教授
 研究者番号：10298193

研究成果の概要（和文）：

非熱的粒子加速現象を解明するための直接観測は、低エネルギーから高エネルギーまで粒子のエネルギーを切れ間なく計測する技術、粒子の到来方向を測るための角度分解能向上技術、さらには高エネルギー粒子がバックグラウンドになってしまうために、効率よくバックグラウンドを除去する技術が必要となる。本研究により、APDを電子計測センサーとして用い、かつ不感層の薄いSi検出器を開発したことにより、エネルギーを切れ間無く計測できるようになった。また、ピクセルタイプの検出器により高効率の放射線帯の中でも粒子計測が可能となるセンサー技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

Developments of new techniques for particle detectors with wide energy range and with high angular resolution are needed in the future plasma universe exploration mission in order to resolve mechanism of particle acceleration in suite observation. In this study, we developed new APD for middle energy electron (5 – 35 keV) and new Si strip detector with very thin dead layer to detect lower than 10keV electrons. The sensor technologies under high radiation environment are established using pixel and strip detectors developed by this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2008年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：高エネルギー粒子、粒子検出器、放射線帯、APD

1. 研究開始当初の背景

宇宙プラズマ観測において非熱的物理現象（粒子加速）は、宇宙の遙か彼方でおこる天文学的な現象から、太陽フレアやオーロラ粒子といった地球・惑星環境という我々の手が届く身近な領域まで、多くの研究者達に注目されている。また、近年における人類の宇宙空間における活動を支えて行くためには、放射線粒子（数eV～数GeVまでの幅広いエネルギー帯の粒子）の人体・機器への影響を知るとともに、放射線粒子の発生過程を理解し、かつその変動を予測していく宇宙天気が実用面として機能することが期待されており、確実に実用化されなければならない。上記に示したように、宇宙天気という実用面でも、自然物理現象の謎を解くサイエンス的な面でも、「非熱的な粒子加速」現象の解明、つまり、「いつ」、「どこで」、「どのように」粒子加速がおきるのか？がキーワードとなっている。この大きな物理テーマの解明は、近年求められている科学的成果の実用への貢献という意味でも、大きな役割を果たすと考える。天文学分野における非熱的加速現象の解明は、粒子加速に伴う「副産物（X線、 γ 線、電波、赤外線などの光子系）」を観測することによって、加速の領域（「どこで」）を知ることによる。加速領域がどんな状態（密度、磁場）であるかの情報を得ることができる。一方でSTP分野においては、地球周辺・惑星周辺において、加速領域内部の状態を“直接観測”できる唯一の分野である。直接観測によって、上記にあげたキーワードのうち、「いつ」、「どのように」を解明することができる。唯一の欠点は限られた加速領域の“どこで”についてであるが、イメージング衛星との共同観測などによって、行きたい場所に行ける複数衛星観測や長時間観測によって今後十分補われていくものと考えられる。

2. 研究の目的

その場観測における重要な観測量は、磁場、電場、波動計測とともに広いエネルギー粒子の観測データ取得が鍵を握っている。しかし、以下の点において現在の粒子観測器は問題点を抱えている。

1) 数keV～100keV程度のエネルギー領域において、電子・イオンのエネルギー測定連続性がなく、観測的に抜け落ちた状態となっている。加速現象を解明するためには必須のエネルギー領域であるた

めこのギャップを埋める必要がある。

2) 太陽フレアに伴う高エネルギー粒子増加時、あるいは放射線帯周辺での観測において、高エネルギー粒子のコンタミが除去できず、加速領域における観測を阻害してしまう。また、コンタミの影響は正しいFluxやエネルギーを得ることを阻害し、間違った解釈をもたらしてしまうことがある。高放射線環境下での正しい計測とPhase-Space-Density (PSD) 測定は、必ず実行されなければならない、本研究の最大の目標である。

上記の問題を引き起こしている原因は、センサーとして使用されている既存の半導体検出器の性能限界によるものである。すなわち、

A) 不感層（粒子のエネルギーを測定できない領域）が厚く、大きいために100keV以下の粒子測定が極めて困難であった。

本研究において超低不感層半導体検出器開発を行なう動機

B) 有感領域の大きいものを利用しているため、計測時間中に複数の粒子が入射し、見かけ上エネルギーが高い粒子が入ったように見える現象（エネルギーパイルアップ）により、正しいPSDを求めることができなかった。→本研究においてピクセル型検出器を開発する動機

C) 検出器の読み出し回路の開発が、計画的に行われてこなかったため、Geotail以降同じ重量の検出器では世界の性能において行かれる結果となってしまった。検出原理などアイデアでは世界と肩を並べる状態であるにもかかわらず、衛星搭載品では、回路規模が世界的レベルからみて非常に大きく重量があり、歴然とした差をつけられてしまっている。

本研究において専用LSIチップの積極的利用をする動機

上記(A)から(C)までの問題点を、本研究で行なう次世代のセンサー素子開発とチップ化された読み出し回路の利用によって、世界をリードする粒子検出器の製作が可能となると考える。本研究で開発する新しい粒子検出器によって、連続したエネルギースペクトルの時間変化を、どのような環境下でも抑えることができるようになり、非熱的粒子加速の解明を目指すとともに、宇宙天気という実

用面からも宇宙時代を迎える社会に貢献ができる。

3. 研究の方法

本研究計画のメインをなす非常に薄い不感層を持ったピクセル型半導体検出器の開発と性能評価を中心に行い、次年度以降の検出器設計の準備をあわせて行う。本研究の代表である高島は、水星探査用に使用するSiストリップ検出器において、薄い不感層を持つSi検出器の開発を浜松ホトニクスと共に行い、80keV程度のionが測定できるSi検出器の開発に成功している。よって、この技術をさらに応用することによって、以下の開発を行うものである。

1) 背面照射型、薄い不感層を持ったアバランシアフォトダイオード (APD) の開発とそのピクセル化

現在のAPDの欠点は、検出器内部のアバランシア領域 (信号を増幅する領域) が狭いため、測定エネルギーのダイナミックレンジが数倍程度しかないため、広いエネルギー測定を行なうことが難しく、プラズマ計測と高エネルギー計測の欠落を埋めることができない。そこで、APDの構造を図に示すように変更することによって、検出器内部の有感領域を増やすことができる。特に粒子の入射面に対しては、浜松との開発を進めている薄い不感層生成技術を応用することによって、60keV以下のイオンに対して測定が可能となる。この結果、コリメータとの組み合わせによって、非常に高い角度分解能を得ることができる。APDについては、以下の試験により性能を評価する。

a) 放射線原を用いた、エネルギー分解能と位置分解能の性能評価試験を実施する。また、素子の出力ばらつきが無いかを確認するために、素子全体に放射線照射を行い、一様性確認試験を実施する。いずれの試験も放射線源を用いたものであり、研究室チェンバーでの実験で可能である。

b) APDは温度に対して素子性能が敏感であることが知られている。本研究で開発した素子に対しても出力の温度依存を測定する必要がある。温度と出力の関係を測定し、検出器設計の基礎データとする。

2) 電子センサーの設計

現在、衛星に搭載されている電子センサーは、そのデータを見る限り高エネルギー粒子の影響を受けたものが多々ある。これは、センサー設計の際に強放射線環境下でのシミュレーションが十分に行われてきていない現状

がある。近年では、この問題を意識しつつ、NASA、ESAともにGeant4という加速器物理で使用されているコードを用いたシミュレーション環境を整えつつある。本研究での開発も、高放射線環境下での計測が重要であることは明らかであり、次年度以降に製作する電子センサーに対する高エネルギー粒子の影響をシミュレーションする環境を整え、その結果を電子センサー設計に反映する。

4. 研究成果

- ① 不感層の非常に薄いシリコン検出器を開発し、高エネルギー電子センサーの測定下限エネルギーを20keV以下に下げることが成功した。この成功により、これまで開発してきた中エネルギー電子計測器の計測下限界である80keVに対して、宇宙空間でクロスキャリブレーションを実施することが可能となった。さらに、半導体検出器の実装方法を検討し、宇宙機に搭載可能なサイズで目標の性能を実現できることを確認した。
- ② 対象観測領域での強度変動である $10^7/\text{cm}^2\text{sec}$ を超えるような広い強度変化に対応するために、ピクセル型APD検出器の開発を実施した。浜松ホトニクスと2x2mm/ピクセルで3x3ピクセルのAPD素子と、さらに強強度でも測定可能なように0.3x0.3mm/ピクセルで3x3ピクセルのAPD素子の開発を行った (図1)。いずれの素子も400V程度のブレイク電圧で、数nA以下のリーク電流を達成することができた。
- ③ 3次元分布関数計測に向けた大型有感領域をもつアバランシアフォトダイオード (APD) を開発し (図2)、5-35keVの中エネルギー電子に対する応答を調べた。入射電子エネルギーに対するAPD出力の計測結果を図3に示す。計測対象とする電子に対して、十分な検出効率とエネルギー分解能が得られることを確認した。また、入射電子のエネルギー毎の増幅率を計測した結果を図4に示す。10keV以上の電子に対してはほぼ一様な増倍率が得られているが、10keV以下の電子に対しては、急激に増倍率が低下している。これは、10keV以下の電子がアバランシア領域に対して十分なレンジを持っていないために起こっている現象と考えられる。図5に大面積APD有感領域に対する一様性確認試験結果を示す。試験は、

X-Ray を用いて行っているが、構造もしくは製造上の特性からか図中では左下に向かって特徴的な変化がみられる。ただし、これらの変化量は、ほぼ±1%程度の検出効率誤差しか生じていないことより、現在の想定するエネルギー測定では、問題にならないことを確認している。強放射線環境下でのAPDの劣化特性を確認するため、宇宙放射線帯を模擬した高エネルギーの陽子（70-120MeV）を照射して、リーク電流と分解能変化を測定した。その結果、リーク電流は照射量とともに、ほぼリニアに増加していくのに比べて、エネルギー分解能の変化はほとんどないことが確認できた。ただし、ブレイクダウン電圧は照射量とともに下がる傾向を示しており、放射線帯での観測への応用時には、注意が必要であることがわかった。大面積のAPDは静電容量がこれまでの小さなAPDにくらべて約10倍程度大きくなっている。そのため、従来の電子回路による読み出しでは、静電容量によるパルスの立ち上がり特性が悪いため、十分なエネルギー分解能をえることができなかった。静電容量の大きなAPDに対応するために、電荷有感型前置増幅器の再設計を実施した。その結果、数100pF以上の静電容量を持つAPDに対しても2keV程度（Si換算）のエネルギー分解能を達成することができた。

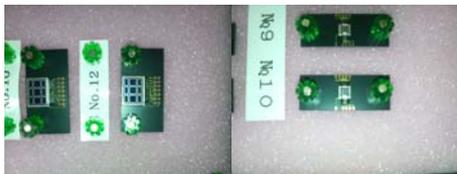


図1：新規開発したピクセル型APD。左が2x2mm/ピクセルを3x3に配置したもの。右側が高係数環境での計測を可能にするために有感領域を0.3x0.3mm/ピクセルとして3x3に配置したもの。いずれも、400V程度のブレイク電圧と数nA以下のリーク電流を達成できた。

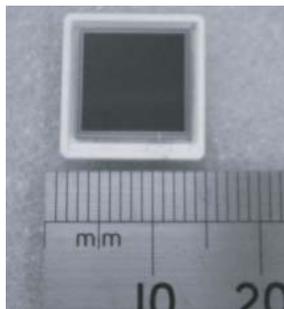


図2：今回新規に制作した浜松ホトニクス製の

10x10mm 低不感層型 APD 検出器

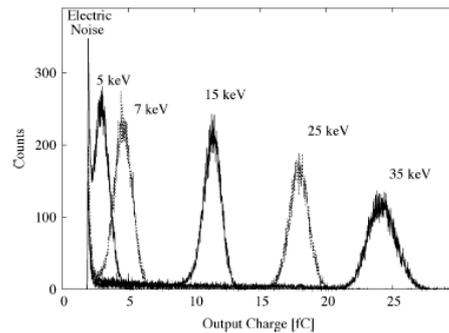


Fig. 4. Pulse height distribution for electron injections (5-35 keV) measured at 22°C.

図3：5-35keVの電子線に対するAPDの出力分布。想定したエネルギー範囲で十分な検出効率とエネルギー分解能が得られている。

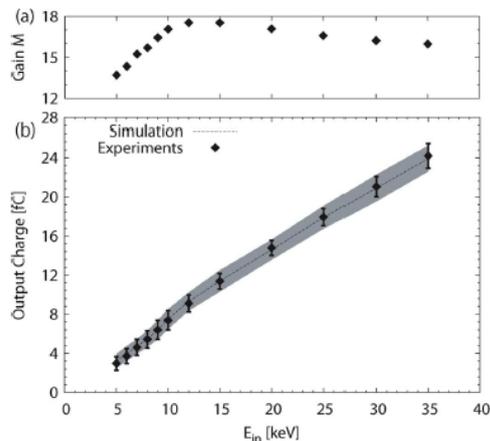


Fig. 5. (a) Effective gain and (b) peak output charges versus the incident energy of electrons. Vertical bars for the experimental data indicate the FWHMs of the pulse height distributions. The dashed line and shaded region illustrate the peak output charge and FWHMs, respectively, obtained by a simulation.

図4：入射電子エネルギーに対するAPD出力より求めた増倍率。10keV付近をピークに低エネルギー側では増幅率が急激に落ちていることがわかった。

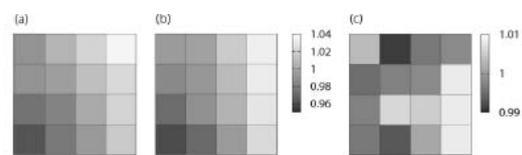


Fig. 7. The non-uniformity of the detected pulse height for (a) the 5.9 keV X-ray emitted from ^{55}Fe (corresponding to the internal gain) and (b) the 10 keV electrons and (c) the deduced influence of the dead layer thickness (upper limit).

図5：5.9keV(X-ray)を用いた大面積APDの一様性の測定結果。結晶もしくは製造工程の影響と思われるが図の左下に向かって検出効率の濃淡がわかる。ただし、この差は±1%程度に収まっており、必要とするエネルギー測定範囲としては十分な性能を得ている。

- ④ 高エネルギー電子計測においては、検出器中での電子散乱も考慮し、Geant4を用

いたシミュレーションによって片面ストリップ型検出器の大きさを 30mm 程度に決定した。一方で、放射線帯でのバックグラウンド粒子（主に陽子）の除去のためにストリップ幅は 50-70 μ m にしなければいけないことも判明した。今回の検討結果より高放射線環境下での粒子計測にむけたイメージャ検出器の基本性能の検証ができた。

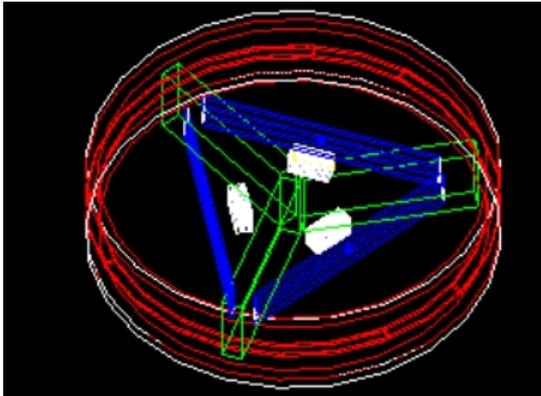


図6：Geant4を用いた高エネルギー粒子検出器設計結果。図中の白い部分がSi半導体センサーのスタック部。青がコリメータ。周囲の赤い部分は鉛を用いて放射線帯でのバックグラウンド粒子の進入を防いでいる。

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3件)

- ① S. Kasahara, K. Asamura, K. Ogasawara, Y. Kazama, T. Takashima, M. Hirahara, Y. Saito, “A noise attenuation method for medium-energy electron measurements in the radiation belt”, *Advances in Space Research*, 査読有, vol. 43 (5), p792-801, 2008
- ② S. Kasahara, K. Asamura, K. Ogasawara, T. Mitani, M. Hirahara, T. Takashima, Y. Saito, T. Mukai, “Medium energy ion mass spectrometer capable of measurements of three-dimensional distribution functions in space”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 査読有, vol. 36 (3), 841-847, 2008
- ③ S. Kasahara, T. Takashima et al., “Development of an APD with large area and thick depletion layer for energetic electron measurement in

space”, *IEEE Trans. On Nucl. Sci.*, 査読有, 2010

[学会発表] (計7件)

- ① 高島健, 中高エネルギー粒子観測イメージャの開発 (招待講演), 日本天文学会, 2007/9/27, 岐阜大学
- ② 笠原慧、高島健 他5名, 中間エネルギーイオン計測に向けた半導体素子の性能評価, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2007/9/30, 名古屋大学
- ③ 風間洋一, 高島健, 平原聖文, Design of a high energy electron instrument (XEP) for the ERG Mission, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), 2008年10月11日, 戦災復興会館 (仙台市)
- ④ 小林光吉, 高島健, 平原聖文, 渡邊健太, ジオスペース探査用放射線モニターの開発, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), 2008年10月10日, 戦災復興会館 (仙台市)
- ⑤ 浅井佳子, 高島健, 長井嗣信, 放射線帯粒子計測器が被るデータ混入, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), 2008年10月10日, 戦災復興会館 (仙台市)
- ⑥ 小林光吉, 高島健, 平原聖文 他, ERG搭載用高エネルギー電子観測器設計とモンテカルロシミュレーションによる性能評価, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2009年9月29日, 金沢大学
- ⑦ 笠原慧, 浅村和史, 高島健 他, 中間エネルギー電子計測器の設計と大面積APDの開発: ERGミッションに向けて, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2009年9月30日, 金沢大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高島 健 (TAKASHIMA TAKESHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部宇宙プラズマ研究系・准教授
研究者番号: 10298193

(2) 研究分担者

浅村 和史 (ASAMURA KAZUSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部宇宙プラズマ研究系・助教
研究者番号: 50321568