

令和元年6月11日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13574

研究課題名(和文)低・高エネルギー粒子、及びX線の同時分析機能実現に向けたハイブリッド検出系の試作

研究課題名(英文) Fundamental development of hybrid detector system for simultaneous measurements of low/high-energy space plasma particles and X rays

研究代表者

平原 聖文 (Hirahara, Masafumi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：50242102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙探査、特に宇宙プラズマ粒子の検出において宇宙実績のあるマイクロチャンネルプレートアセンブリと、ASIC(特定用途向け集積回路)が組み込まれた片面ストリップ型シリコン検出器ユニットを結合させハイブリッド検出器を試作した。これにより、MCPが有効な数百keV以下のエネルギー帯と、SSDが多用される数十keV以上でのエネルギー帯に渡ってハイブリッド系検出が可能になり、広いエネルギー帯域を有感帯域とする検出システムの基礎開発が原理的に可能となった。このハイブリッド検出系を真空槽内に設置しイオンビーム照射する事で、真空中でのハイブリッド検出器の機能を世界で初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球・惑星を取り巻く宇宙空間に広く分布・飛来し、宇宙変動現象、及び宇宙インフラ技術に大きな影響を及ぼす宇宙プラズマ粒子・超高層大気粒子・極端紫外線・X線・ガンマ線の計測は、宇宙惑星空間物理学における極めて重要な観測対象である。本研究では、これらの観測に従来から活用されてきた2種類の検出器であるマイクロチャンネルプレート(MCP)と半導体検出器(SSD)を構造的・電気的に結合させることで、それらの長所を生かし、欠点を補いあう新規の一体型ハイブリッド検出器を設計・製作し、性能評価・較正実験を行うという技術的・挑戦的な課題に関する実験的研究を遂行し、世界初のハイブリッド検出器の試作品を開発した。

研究成果の概要(英文)：We made an innovative design for combining a micro-channel assembly and a silicon strip detector system with ASIC for control and position-sensitive signal read-out, both of which have the space-qualified heritages based on the previous and on-going space exploration missions(INDEX and ERG missions by ISAS/JAXA), in order to fabricate a hybrid detector system to cover a wide energy ranges in the detection of low/high-energy space plasma particles and X/gamma rays over several eV to several MeV. Through the vacuum calibration experiments using our charged particle beamline facility and radio-active source, we have actually confirmed the world's first achievements of the particle detection with the hybrid detector system in vacuum.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：宇宙プラズマ粒子 ハイブリッド検出器 マイクロチャンネルプレート 半導体検出器 探査衛星搭載用機器開発 宇宙探査 宇宙科学 宇宙計測技術

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間物理学の計測技術としての地球・惑星の電離圏・磁気圏でのプラズマ粒子の直接観測は、他研究分野では不可能な3次元のプラズマ速度分布関数の取得が可能な、極めて優位性・独自性の高いものである。また、超高層大気・固体表面からの EUV や X・線などの光子、及び高速中性粒子の検出により、リモートセンシング技術として大局的な観測をも可能としている。これらの粒子・光子の検出には MCP が広く用いられており、世界最高品質を誇る国産の MCP も数々の国内外の飛翔体計画に用いられ、研究分野の発展に極めて大きな貢献をしてきた。特に数 10keV 以下のプラズマ粒子分析器には必須であり、EUV に対しても検出効率率は低下するものの、仕事関数が低い光電物質を入射面に塗布することで、広く用いられている。その反面、MCP 固有の増幅原理の制約により、出力信号だけでは、入射粒子・光子の特性を取得することは不可能である。例えばエネルギー情報は元より、測定対象の種別さえもできない。また、電子に関しては、数 100eV を超えるエネルギー帯域では、MCP の増幅能力は急速に減退し、感度が低くなるという問題があり、多くの直接観測のデータに不確定性をもたらしている。

一方、MCP とは異なる増幅原理を持つ SSD は 10keV を超える高エネルギー粒子の検出に広く用いられている。特にイオン注入技術による PN 接合型 SSD は、国産の高品質な素子が多くの飛翔体計画に用いられてきた。SSD の場合、出力信号に対する波形・波高分析がエネルギー情報をもたらすので、検出 + エネルギー分析という複合機能素子として重宝される一方、地球・惑星周辺の宇宙空間を支配するプラズマが、より低エネルギー帯に分布するため、計測の適用範囲が制限されているのが実情である。

この様な状況に鑑み、これら 2 種類の検出器を実際に飛翔体観測に利用してきた経験がある本研究代表者は、それぞれの利点・欠点を良く理解しており、MCP と SSD を構造的・電氣的に結合させ一体型とした全く新規のハイブリッド検出系の研究開発を構想するに至った。MCP と SSD を組み合わせた検出器は世界的に見ても例がなく、極めて独自性が高いのみならず、一体型とすることで計測対象のエネルギー帯域が広がるため、宇宙空間物理学の直接観測においては今後の幅広い活用が期待できる。以上の様な背景を基盤として、試作品を設計・製作した後、動作確認・性能評価を行い、将来の直接観測の基盤技術として技術的な開拓的研究・開発を行う研究計画を提案した。

2. 研究の目的

人工衛星・観測ロケットを用いた宇宙空間でのプラズマ・中性粒子、極端紫外線 (EUV)、それに昨今盛んになりつつある X・線の計測は、太陽地球系物理学における極めて重要な観測である。本研究では、これらの観測に従来から活用されてきた 2 種類の検出器であるマイクロチャンネルプレート (MCP) と半導体検出器 (SSD) を構造的・電氣的に結合させることで、それらの長所を生かし、欠点を補いあう新規の一体型ハイブリッド検出器を設計・製作し、性能評価・較正実験を行うという技術的・挑戦的課題に取り組む。

MCP は比較的低いエネルギーの粒子・光子の検出に対して極めて有効な素子であるが、出力信号を処理する段階で入射エネルギーの情報が失われてしまう。SSD は高エネルギー粒子、あるいは透過性の高い X・線に対しては、出力信号の波高分析によりエネルギー情報を取得可能である一方、低エネルギー粒子に対しては感度がない。これら、いわば相反する特性を相補的に取り入れ、一体型ハイブリッド検出器として機能させることを目指す。これらの 2 種類の検出器を入射粒子経路に対して直列に配置し、それぞれの出力信号の波形・波高分析と同期計測を精密に行うことで、入射粒子・光子の分別とエネルギー分析の可能性が高まると期待されているため、このハイブリッド検出器の試作を通して、その可能性を確認する事が本研究の目的である。

この開発研究では、一体型ハイブリッド検出器の性能・問題点・改良項目を確かめるべく、試作品を設計・製作し、その後、室内ビームラインと各種簡易放射線源を活用することで動作試験、性能評価・較正実験を実施し、将来の飛翔体による探査・観測計画への技術的基盤開拓を行う。特に、本研究グループが構築・運用している様々な試験・実験設備を活用し、入射粒子の種別 (様々なイオン種、電子) あるいは光子を真空内で照射し、それらのエネルギー・波長を連続的・離散的に変化させながら、ハイブリッド検出器からの出力信号を高精度・高速に増幅し、その波形・波高に対して多チャンネル分析を行う。これにより、入射粒子・光子の種別・特性エネルギーにより変化する出力信号の特長を、統計的な信頼性・確度を確認・保証しながら多面的に調査・検討することが可能となる。これらの結果から、MCP 単体では取得できなかった入射種別の弁別が可能になり、また、分析器構造を突き抜けて検出部で雑音を生成してしまう高エネルギー粒子・光子の除去にも有効性を発揮することを確認する。

そもそも、本研究分野である宇宙空間物理学は観測に基づく実証的研究であり、光・磁場・波動・電波などの地上観測に加えて、特に宇宙プラズマ粒子の直接観測を可能とする観測ロケット・人工衛星による探査計画が、研究活動・発展の原動力となっている。宇宙プラズマの計測では、速度分布関数の取得が可能な地球・惑星の磁気圏・電離圏、及び惑星間空間において、エネルギー分析・質量 (プラズマ種別) 弁別のため、様々な原理・構造の分析器が考案・開発され、飛翔体に搭載されてきた。MCP (マイクロチャンネルプレ

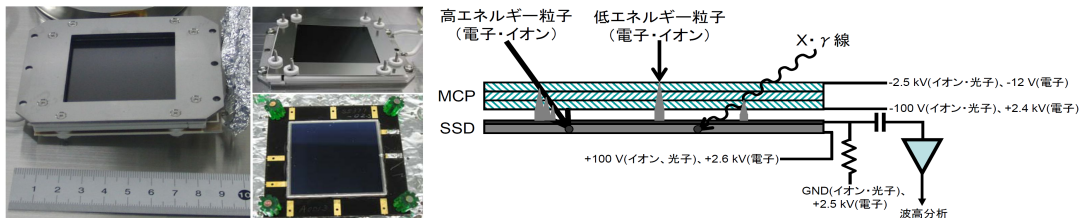
ート)や SSD(半導体検出器)は、それらの分析器に検出部として組み込まれ、多用されてきたし、今後も主流となると思われるため、本研究開発により複数の原理・機構を組み合わせた新機軸の検出系を実現するにより、次世代の宇宙空間物理学における観測手法の革新を始動・推進するが大きな意義・目標である。

3. 研究の方法

以下の左写真は MCP の一例で、50mm × 50mm の入射面積を持つ 3 段重ねのものであり、1 段はほぼ 1mm の厚さで約 1kV という高電圧が必要とされる。一般的な MCP の場合、直径が 20 ミクロン程度で、数度ほど傾斜した縦穴(ポア)が数 10 ミクロン間隔で無数に空けられている。このポア内で加速・衝突・二次電子生成という過程が繰り返され、10⁶~7 の利得で増幅された電子雲が金属電極に到達する。そのパルス状信号を増幅させることにより、入射粒子・光子一つ一つの計数、及び 1 ナノ秒程度の精度の時計測が可能となる。

一方で SSD の内部では、エネルギー準位(Si 型の場合は 3.6eV)を基準として、入射粒子・電子のエネルギーに比例した数の正孔・電子対が生成されるため、その微小な出力パルス信号を金属電極で収集し、処理することでエネルギー情報が得られるのが特徴である。その為には、極めて小さいパルス波高をアナログ処理する必要がある。また、入射面を保護する目的で、不感層である酸化膜が施されていることもあり、数 keV 以下のイオン・電子や光子に対する検出効率は極めて低い。この SSD の欠点を、一体型ハイブリッド検出器で補完でき得ると考えている。また、例えば低エネルギー粒子を計測する分析器内に高エネルギー粒子が侵入しても MCP で出力パルス信号を生成し得るので雑音源となる。本研究では、この MCP の雑音に対する対策として、SSD を用いるという世界的に初めての技術的試みに挑戦し、入念な試験・実験により効果を確認するという計画である。

MCP・SSD 両者に共通しているのは、内部利得で増幅した後、金属電極で収集された電荷パルスを出力信号として波高解析を行うことであり、特に SSD には、半導体素材に対して金属電極が蒸着・固着されている状態となっている。この SSD の金属電極は適度な処理・配置により、MCP からの電子雲の収集としても利用出来る可能性が高いことが、これまでの実験・製作の経験で確認されている。以下の写真で、上下に並んだ 2 枚はそれぞれ、金属電極部を取り外した状態の MCP(上)と、SSD の全体(下)であり、本研究では、これらを構造的・電氣的に結合させ、一体型ハイブリッド検出器として機能させた。この様な独創的な原理による検出器は世界的にも報告がなく、MCP・SSD のそれぞれの特性を活かし、出力パルス信号の波形・波高解析を行うことで、入射粒子・光子の弁別やエネルギー分析の可能性を探るといった挑戦的な機器開発を行った。



まずは、現有の MCP と SSD を調査し初期設計を経て、SSD に構造上付帯している金属電極を挟む様に SSD と MCP を、特注による絶縁材・金属製部品で配置・結合し、出力パルス信号の収集を行った。本研究で実施される研究開発により、この一体型ハイブリッド検出器の動作・性能が確認された事で、今後の探査計画に一般的に適用される可能性が大きく広がり、エネルギー帯域拡張・雑音除去に代表される計測技術上の革新的進歩へとつながったと考えている。

具体的な研究手法・計画として、まず SSD と MCP との一体化に向けた検討とハイブリッド検出器の機構部の詳細設計を行った。これには現有の MCP と SSD を用いた。ここでの経験・実績が、その後導入する新しい大型の SSD でも有益な情報をもたらす事となった。また、ほぼこれと並行しつつ、現有の電子・イオンビームライン・放射線源による真空内試験施設の整備を実施した。その後、上述の詳細設計に基づき、機構部品・信号読み出し電極等の製作を行い、超音波洗浄による脱脂・清浄化の後、組み上げ用の様々な特殊工具・治具を用いて、一体型ハイブリッド検出器を組み上げた。

これらを通して、SSD と MCP とが一体化されたハイブリッド検出器の真空内試験を行った。まずは、高電圧の印加試験、その後の背景雑音の評価と低減措置を施した。また、SSD を MCP に対するいわば反同時計数法(アンチコインシデンス)の検出器としても利用するため、MCP と SSD からの出力電荷パルスと同じ信号分析回路により処理を行った。これには主に電子・各種イオン種・X 線を照射し、入射位置を変化させながら実施した。また、MCP・SSD からの出力パルス形状がそれぞれで異なるという特性を利用して、出力パルス信号の発生源としての検出素子の同定が可能かどうかを詳細に調査した。様々なエネルギー・波長の入射粒子・光子を様々な入射位置・角度で照射し、それらの入射信号源の特性に依存する出力パルス信号を取得した。MCP と SSD の出力電荷パルスと同じア

ナログ増幅器で処理する試みは全く新規の開発項目であった。

4. 研究成果

初年度には宇宙探査、特に宇宙プラズマ粒子の検出に最も広く用いられてきたマイクロチャンネルプレート(MCP)と半導体検出器(SSD)を結合させてハイブリッド検出システムを試作した。これにより、MCPが有効な数百keV以下のエネルギー帯と、SSDが多用される数十keV以上でのエネルギー帯に渡ってハイブリッド系検出が可能になり、広いエネルギー帯域を有感帯域とする検出システムの基礎開発が原理的に可能となった。また、プラズマ粒子とX・ガンマ線の検出においては、お互いが雑音源となるため、ハイブリッド検出系による雑音除去手法開発の端緒となった。

実験を基盤とする研究開発の成果としては、放射線源による大気中でのアルファ粒子の検出を、現有のSSDを用いて再現した後、このSSDを現有の大型円形MCPアセンブリーに結合させる機構治具を製作し、ハイブリッド検出系を試作する事が出来た。このハイブリッド検出系を真空槽内に設置し、イオンビーム照射する事で、真空中でのハイブリッドシステムによる検出に、世界で初めて成功した。なお、この過程に至るまでに、放射線源を用いて大気中にてSSDからの信号をチャージアンプにより増幅する事で、現有の信号増幅系・波高分析系・データ解析系の適用が可能であることを確認している。この後、大型円形MCPアセンブリーを改修し、特注金属電極治具の設計・製作を経て、上記の半導体検出器(SSD)を取り付けた後、イオンビームラインに設置し、真空中にてプロトン、ヘリウムイオン、窒素イオンを20keVにて照射し、信号応答を調査した。その後、検出器(SSD、MCP)と粒子種の違いによる出力信号波形の差異を比較し、SSDに比べMCPからの出力信号波高が優位に高い事、このエネルギー帯、及び、今回のMCPの印加電圧状態では粒子種による波形・波高に有意な差異が認められない事、等が判明した。

次に、最先端の宇宙探査衛星計画である「あらせ(ERG)」衛星に実際に適用された高エネルギー電子用半導体検出器である片面ストリップ型シリコン検出器(SSSD)の予備品を、昨年度の試作に用いたマイクロチャンネルプレート(MCP)に結合させてハイブリッド検出器を構成するための基礎設計を行った。本開発研究で用いたMCPアセンブリーは、2005年8月に打ち上げられたINDEX(れいめい)衛星に搭載され順調に観測を実施したプラズマ粒子計測用静電型エネルギー分析器に用いられているものと同型機であるため、宇宙実績を有している事が特徴である。また、SSSDは数百マイクロ幅で32チャンネル独立のストリップ電極により粒子の入射・通過位置を検出可能であり、MCPからの電子雲の検出にも対応可能である。更には、Application specific integrated circuit(ASIC)技術により、超小型・軽量、省電力でSSSDからの32チャンネルの信号を処理可能であるため、MCPと組み合わせる事で、低エネルギー粒子入射時にはMCPで生成された電子雲の検出を、高エネルギー粒子入射時にはSSSD内部で生成された信号の読み出しが可能となる。このSSSDに関しても、実際にジオスペース探査衛星「あらせ」に搭載されて宇宙空間での高エネルギー電子の検出を実現しており、ここではこれらMCP・SSSDの同等品・予備品を活用して、MCPとSSSDのハイブリッド検出器を世界で初めて製作し、それらの機械的結合に向けた基礎設計を行った。具体的には、MCPで生成された電子雲を電氣的に引き込んで、SSSDの金属電極に入射させるための電位配位の検討、及び、MCPアセンブリーへのSSSDの機械的取り付け構造の検討を行った。このSSSD基盤上にはASICやチップ素子が多数実装されており、それらへの機械的・電氣的干渉を避ける為の措置を考案した。また、ハイブリッド検出器開発における較正実験を円滑に行う上で必要となる高エネルギー粒子ビームラインのビームプロファイル取得システムの開発も並行して実施した。

最終年度では、世界的にも第一線・最先端技術として確立しつつある日本製マイクロチャンネルプレート(MCP)・ストリップ式シリコン半導体検出器(SSSD)の最新の宇宙実証実績を誇るタイプを用いて、それらを独自設計・特注による特殊治具で機械的に結合する事によりハイブリッド検出系を構成した後、日本国内の宇宙空間物理学の実験グループでは我々のみが保有する高エネルギー粒子ビームラインを用いて実証実験を行った。このビームラインへのハイブリッド検出系のセッティングでも特殊治具を新規設計・製作し、更に電気信号ラインを様々に工夫・調達する事で、効率的な較正実験を実施した。

このSSSDは、上述の通り、2016年12月に打ち上がった後、順調に地球磁気圏にて宇宙観測を行っているERG(あらせ)衛星の高エネルギー電子分析器に用いられたタイプの予備品であり、制御・信号読み出し回路としてASIC(application specific integrated circuit、特定用途向け集積回路)が用いられているのが特徴である。同等品がJAXA・ESA国際共同水星探査衛星計画「BepiColombo」のMMO(Mercury Magnetospheric Orbiter)の高エネルギーイオン・電子分析器群にも適用されている実績がある。このASICと数百マイクロピッチの64チャンネル電極が実装されたSSSDを用いる事で、MCPからの出力信号を高精度の位置検出機能により、SSSDの出力と同様にASICで読み出す事が可能となった。

実際のイオンビームラインを用いたMCP・SSSDハイブリッド検出系の較正実験では、1mmに絞ったイオンビームの1mmピッチのマルチスポットをMCPに照射し、MCPにて増幅された電子雲を、SSSDの複数のストリップ電極にて集電荷し、ASICにより読み出す事に世界で初めて成功した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

Masafumi Hirahara, Mission Plans, Strategy, and Organization for Space-Terrestrial Physics on the Basis of Trinity Research System by In-Situ Measurement, Ground-based Observation, and Data Analysis/Modeling, Korean Space Science Society, Gangwon-do, Korea, April 29-30, 2015.

Masafumi Hirahara, Japanese Space-Earth Coupling Exploration Mission by Multiple Polar-orbiting Compact Satellites and its Collaborations in Instrumentations and Ground-based Observations, The 45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, Kiruna, Sweden, August 28-31, 2018.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~hirahara/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(該当無し)

(2)研究協力者

研究協力者氏名：笠原 慧

ローマ字氏名：KASAHARA, SATOSHI

研究協力者氏名：三谷 烈史

ローマ字氏名：MITANI, TAKEFUMI

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。