

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H06208

研究課題名（和文）モバイル・ミュオン検出器による三次元ミュオグラフィの実現研究

研究課題名（英文）Feasibility study on 3D-muography with mobile muon detector

研究代表者

尾崎 正伸（Ozaki, Masanobu）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：90300699

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,600,000円

研究成果の概要（和文）：火山などの大規模な地質構造に対するミュオンを使ったCTの実現には量産された可搬型ミュオンイメージャが極めて有効だと考えられる。この中枢部となるミュオン到来方向検出半導体センサの量産研究開発を行った。検出器として安価に製造可能なCMOSイメージセンサパッケージを実現するための要素技術である精密なチップ配置と校正の自動化適用可能手法を開発し、それを使って概念検証モデルを製作した。またセンサ量産に必要な製品検査装置を開発し、これを使って概念検証モデルを評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人体に対するCTと同様に火山や遺跡、原子炉などの大規模構造の内部を把握できる技術があれば、防災や発掘調査、事故調査などに大きく寄与すると期待できる。この大規模構造を透過観察する方法として、レントゲンで用いるX線の代わりに大気ミュオンを使う手法が確立されているが、これで得られる像はレントゲン写真と同様に2次元の絵に留まっている。しかしその理由は巨大な観察対象をミュオンが貫く様子を全方位から捉える現実的な手段が開発されていないからに過ぎない。本研究は、この手段となる「量産技術による、多数の可搬型ミュオン検出器の製造」の実現を目指す。

研究成果の概要（英文）：To realize the muon CT for large geological structures such as volcanoes, mass-produced portable muon imagers can be key components. We studied a semiconductor muon sensor package that determines the arrival direction, which can be the central component of the imager. In order to realize the mass production of such device, we developed the precise sensor chip placement and alignment-calibration technologies, and manufactured a proof-of-concept sensor package. We also developed an electrical tester as a part of the product inspection system and evaluated the electrical performance of the package.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ミュオグラフィ 半導体検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本構想は、宇宙科学研究所で計画されている火星衛星探査 (MMX) ミッションに対して宮本がミュオグラフィを提案し、尾崎他がその技術評価を行ったことに端を発する。宮本は地上で使われているシンチレータ式のミュオグラフィを提案したが、これは提案されたシステムが宇宙用に必要な堅牢性について未検討だったことと検出器を火星衛星上の適切な位置に配置する事が難しいという理由で実現しなかった。一方尾崎は、今まで携わってきた宇宙用 CCD 技術を用いることでミュオグラフィの装置そのものを小型軽量堅牢化できる可能性に気づいた。その尾崎のアイデアを聞いた宮本が、宇宙用途に留まらない意義可能性に気づき本構想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、ミュオン CT 実現の鍵となる「多数のミュオン検出器の配置」を実現させるモジュール・ミュオン検出器の糸口をつける。具体的には、重ねる形で近接配置した二枚の半導体イメージャを貫くミュオンを検出しその到来方向を決定する超小型装置の概念実証モデル (BreadBoard Model: BBM) を開発する。これには、特にシステム量産に欠かす事のできない検出素子および構造部材のアラインメント調整技術を含む。

3. 研究の方法

開発する装置の核は、「配置が正確に較正された、二枚の重なった位置検出半導体」である。この「正確な較正」を簡便に実現することが、複数の装置で得られたデータを組み合わせることで CT を行うことの鍵となる。配置較正すなわちアラインメント決定は、以下の二つの要素からなる：

(1) 二つの検出器間の相対的アラインメント：

この配置には、平成 24～26 年度萌芽的研究で開発済みの「アンチコインシデンス CCD」の実装技術を使う。これは一枚のセラミック (厚み 200 μm) の両面に放射線検出用 CCD を貼って同時に動かし、両 CCD 中の相対的位置情報を正確に保持したまま読み出す物である。この開発では両素子間のアラインメントは特に調整せず別途放射線を当てて較正したが、製造段階でアラインメントを制御しての組立 (素子貼付け) 法を確立する。

(2) 外部座標系を基準とした絶対的アラインメント：

検出器システムが外部座標とのアラインメントが確立された定盤ないしは雲台に取り付けられるという前提で、それらに対し一定の誤差以下で二枚組センサを配置する構造を開発する。

粒子を検出する時に問題となるのは、目的外粒子 (バックグラウンド) の存在である。地上望遠鏡で使われる撮像素子でしばしば見られるのは今回の主検出目的であるミュオンであるから、問題となる可能性は低い。しかし、それらは定量評価がされておらず、また本構想の発端となった (そして究極の目標でもある) 惑星科学でのミュオグラフィに至っては確実に大量のバックグラウンドが予想される。従来のシンチレータでは、極めて高い時間分解能を用いて極めて近い時間 (原理的には 1 ns の見分けが付く) に生じた痕跡のみを拾い上げることでバックグラウンドを除外している。対して遅い半導体撮像素子では、時間ではなく空間分解能を用いて極めて近い距離に生じた痕跡のみを拾い上げることになる。これの実用度の評価は、既存の放射線源やビームラインでの放射線を用いることで行う方針とした。

4. 研究成果

(1) CMOS イメージセンサへの使用素子転換

本研究は、当初案では実績のある CCD 素子を使い実現する予定であった。しかし、製造メーカーと実現性に関して詳細に協議し、CMOS イメージセンサで実装する方が昨今の技術開発動向などを踏まえると全体として目的の物を実現し易いことが見出された。これにより、使用素子として CMOS センサを使うことに方針転換をした。このセンサを使用するメリットは、既に別案件で素子実装位置を制御・計測した実績があること、空乏層が薄いことにより冷却の必要がなくなること、複雑な駆動回路と出力の AD 変換回路の両方が素子に内蔵されていることによる小型軽量化である。

一方で素子のピン数は CCD に比べはるかに多いので、既存のパッケージが使えず全く新しいパッケージを準備する必要が生じた。これには当初見込んでいなかった期間と費用がかかるため、研究の当初計画を変更し検出器パッケージの BBM 製造に目的を絞り、全素子を駆動することによるミュオン飛来方向検出実証は研究終了後の課題とした。

(2) セラミックバルク両面へのアラインメントを制御した素子貼付けの確立

過去に製作した CCD を使わない決断をしたことで、センサチップを実装する量産対応可能なパッケージを新たに設計する必要が生じた。ここでの量産とは、パッケージそのものとパッケージを実装した装置全体の両方を指す。これに要求される性能は、センサチップを距離を保ちながら重ねる形で自動実装し、その重なり方を自動校正できることである。

- ・ センサを正確に重ねて配置するために、厚みを精密に作ったセラミック板の両面にベアチップを実装する方法を開発した。
- ・ セラミックの両面に配置されたチップの相対的なずれ(アラインメント)を $1\ \mu\text{m}$ の精度で自動計測できることを実証し、その出力をパッケージおよび装置それぞれに付与した ID と紐づけたデータベースを作ることで、実使用で得られるデータに必要な補正を行える目処を付けた。

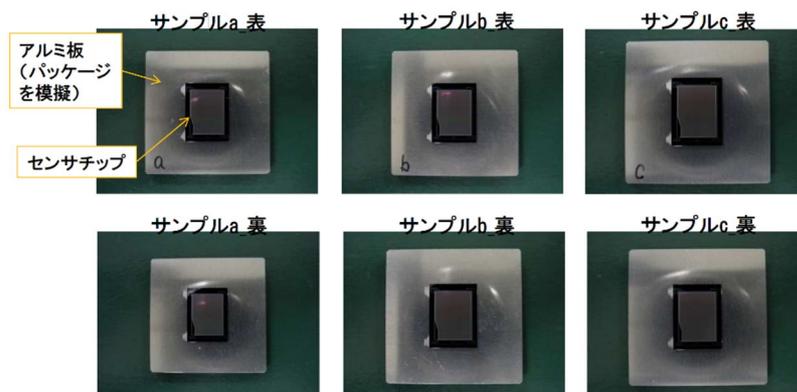


図.1：センサパッケージを模したアルミ板とセンサチップの実装写真

表.1 アラインメント測定結果

		測定結果		
		X [μm]	Y [μm]	θ [°]
サンプルa	①アルミ板表-表チップ	44	-5	-0.124
	②アルミ板裏-裏チップ	20	18	-0.067
	③裏チップ-表チップ	64	-23	-0.191
サンプルb	①アルミ板表-表チップ	20	25	-0.053
	②アルミ板裏-裏チップ	20	40	-0.113
	③裏チップ-表チップ	40	-15	-0.166
サンプルc	①アルミ板表-表チップ	13	3	-0.079
	②アルミ板裏-裏チップ	20	10	0.002
	③裏チップ-表チップ	33	-7	-0.077

※①アルミ板表-表チップ…アルミ板表の中心を基準としアルミ板表に実装したチップの中心までの距離

※②アルミ板裏-裏チップ…アルミ板裏の中心を基準としアルミ板裏に実装したチップの中心までの距離

※③裏チップ-表チップ…裏に実装されたチップ中心を基準として表に実装されたチップ中心までの距離

(3) 実素子を動作させる BBM パッケージの製作と素子試験環境の確立

量産パッケージはハンドリングおよび精度保持の都合から全セラミックが望ましいが、これを一度で作るのは電氣的デザインの見落とし可能性と費用面でリスクが高い。そこで、チップアラインメントをセラミック塊で確保し電氣的配線は専用設計のプリント基板で引き出す、概念実証モデル (BBM) を製作した。これは主に組立可能性および高速信号配線が正常に取り出せることを検証するための「メカニカルモデル」という位置付けである。

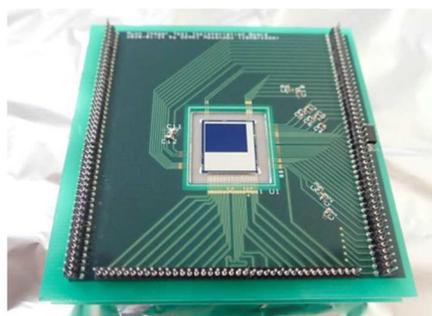


図.2：メカニカルモデル写真

メカニカルモデルは電氣的配線も有するので、これをサンプルとして性能検証を行うための治具を製作し、期待した通りに両面のセンサ性能の測定を行えることを確認した。これにより素子製造工程における出荷検査環境までの目処がついたことになる。また治具調整の一環としてメカニカルモデルの特性を測定し、製品として出荷されている単一素子パッケージと遜色ない電氣的性能を得られていることを確認できた。

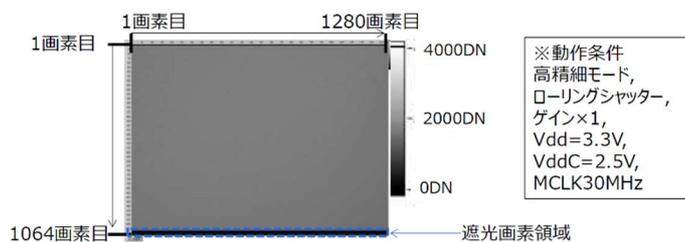


図.3：性能検証治具により得られたメカニカルモデルの出力画像。雑音も乗っていない。

表.2：メカニカルモデルで得られた性能。既存製品と遜色ない。

項目	S14501実力			サンプル 検査結果	単位
	Min	Typ	Max		
オフセット出力	0	200	400	203.4	DN
オフセットばらつき	-	3	10	2.4	DNrms
暗出力	-	30	60	20.3	DN/s
飽和出力	3000	3500	-	3529	DN
ランダムノイズ	-	1.7	3.4	1.0	DNrms
PRNU	-	-	4	1.6	%

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮本 英昭 (Miyamoto Hideaki) (00312992)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	