

# GRAINE 2011 年度気球実験：エマルションデータ解析

神戸大学 ○高橋 覚, 青木 茂樹, 尾崎 圭太, 釜田 啓樹, 鈴木 州, 原 俊雄,  
中川 諒, 水谷 早紀, 水谷 深志, 六條 宏紀  
愛知教育大学 児玉 康一  
ISAS/JAXA 齊藤 芳隆, 田村 啓輔, 濱田 要, 吉田 哲也  
宇都宮大学 佐藤 禎宏, 手塚 郁夫  
岡山理科大学 伊代野 淳  
名古屋大学 石黒 勝己, 河原宏晃, 北川 暢子, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, さこ 隆志,  
佐藤 修, 鈴木 和也, 中 竜大, 中塚 祐司, 長縄 直崇, 中野 敏行,  
中村 光廣, 丹羽 公雄, 宮西 基明, 森島 邦博, 吉田 純也

## 1. はじめに

近年の宇宙観測では、電波から超高エネルギーガンマ線にいたるまで、多波長にわたる観測が進展している。その中で高エネルギーガンマ線の観測は、宇宙における高エネルギー現象に対して直接的な知見をもたらす。最近のフェルミ望遠鏡の観測により、この高エネルギー帯域におけるガンマ線の観測は大きく進展している。その一方で、未同定天体の解明や、更なる高解像度での観測、及び偏光観測など新たな課題も浮かび上がりつつある。

## 2. GRAINE 計画

エマルションは少ない物質質量( $\sim 10^{-3}X_0$ )で高い空間分解能( $< 1\mu\text{m}$ )をもつ強力な飛跡検出器である。エマルションでガンマ線による電子対生成の始まりを捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能、及び直線偏光に対する感度を持つことが期待できる。我々はエマルションから成るガンマ線望遠鏡を開発し、気球フライトによる宇宙ガンマ線の観測を目指す。この計画を GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画と呼ぶ。エマルションガンマ線望遠鏡は、コンバーター、タイムスタンプ、カロリメーター、そして姿勢モニターからなる。エマルションフィルムを積層したコンバーターで電子対の始まりを捉え、捉えた事象に対して、タイムスタンプでタイムスタンプを押し、その時刻情報を基に姿勢モニターの情報と併せることで、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定する。この望遠鏡を気球に搭載し、口径面積  $10\text{m}^2 \times 7$  日間  $\times 5$  フライト程度の exposure をおこなうことで、Fermi-LAT の 1 年間のガンマ線の収量( $1\text{m}^2 \times 365$  日)と同程度を目指す。はじめに、口径  $1/10\text{m}$  で 3 時間程度のフライトをおこない、各構成要素の動作試験およびそれらの連動試験、またバックグラウンドとなる大気ガンマ線の実測をおこなう。次に、口径  $1/2\text{m}$  で 1 日程度のフライトをおこない、既知の明るいガンマ線天体の観測をおこない、オーバーオールでの性能実証をおこなうと共に、 $100\text{MeV}$  領域における最高精度でのイメージングを目指す。そして、観測面積、フライト時間の拡大を図り、科学観測の開始を目指す。

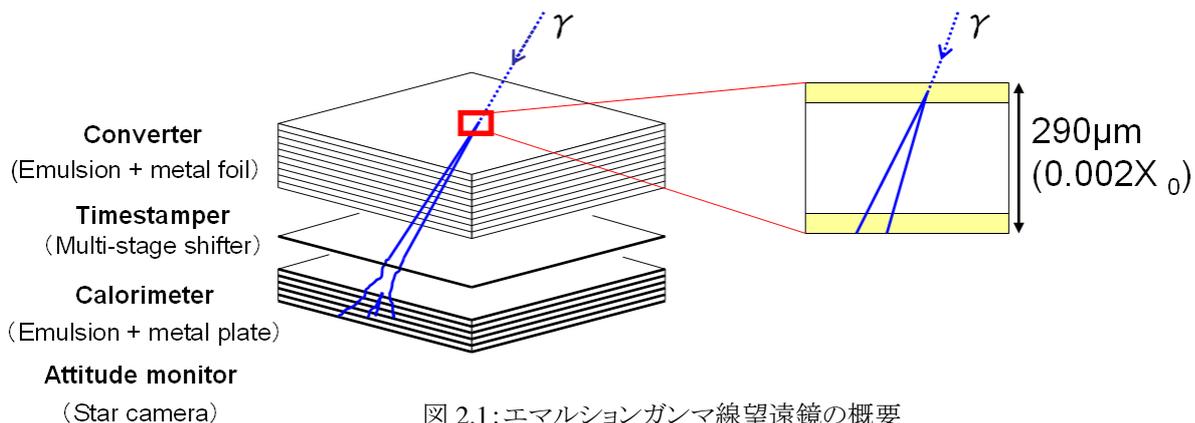


図 2.1: エマルションガンマ線望遠鏡の概要

## 3. 2011 年度大気球実験

2011 年 6 月 8 日に、北海道の大樹航空宇宙実験場(TARF)にて、はじめのステップとなる気球実験をおこなった。気球ゴンドラには、エマルションチェンバー、スターカメラ、残留大気圧計、GPS、そして電池を搭載した。気球フライト 4.3 時間(そのうち高度  $35\text{km}$  の水平浮遊  $1.6$  時間)のフライトに成功した。これまでに、姿勢モニターであるスターカメラの動作を確認し、十分な精度がでることを確認した。また、タイムスタンプである多段シフターが気球フライト環境下で動作することを確認し、エマルションの飛跡にサブ秒のタイムスタンプを押しした。また、コンバーターにおいては、投影角で  $\pm 45$  度までの飛跡の系統的な読み出しおよび再構成をおこない、運動量で低いほうで  $25\text{MeV}/c$  までの飛跡の再構成をおこなった。そして、実際にコンバーターでガンマ線事象の拾い出し、タイムスタンプでタイムスタンプを押し、姿勢モニターの情報と併せ、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定すると共に、GRAINE におけるファーストフライトに成功した。現在は、宇宙ガンマ線のバックグラウンドとなる大気ガンマ線を実測すべく、系統的なエマルションデータ解析を進めている。

#### 4. エマルションデータ解析

##### 4.1. 飛跡の読み出しおよび再構成

エマルションフィルムの飛跡の読み出しは、名古屋大学で稼動している自動飛跡読取装置 SUTS を使用した。図 4.1.1 に読み出された飛跡の数密度分布を示す。読み出されてくる飛跡の数は  $10^9$  レベルにのぼる。この中から  $\sim 10^2$  レベルで記録されている電子対の始まりの飛跡を探し出す。読み出された飛跡をエマルションフィルムの上面と下面、そしてフィルム間で位置と角度の一致をとり、飛跡の再構成をおこなった。図 4.1.2 に各乳剤層で読み出された飛跡数、および各フィルム、各フィルム間で再構成された飛跡数の分布を示す。今回、フィルム番号 1~16 のデータボリュームにおいて再構成された飛跡の数は  $8.7 \times 10^7$  となる。

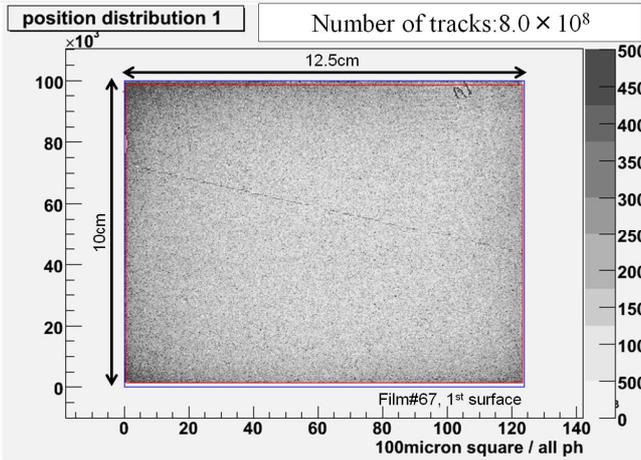


図 4.1.1: 読み出された飛跡の数密度分布

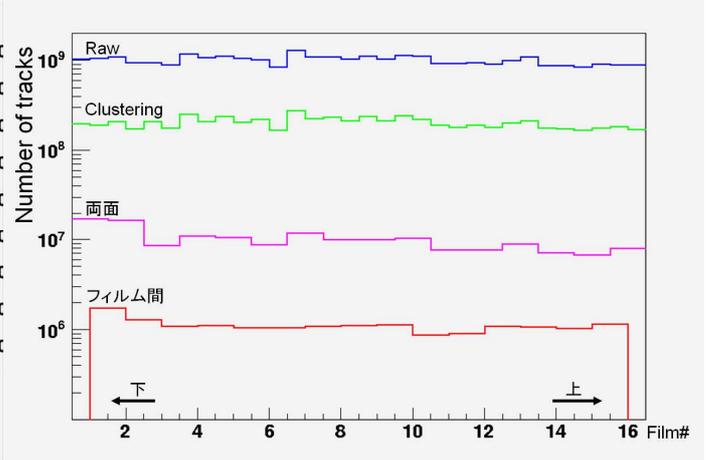


図 4.1.2: 各乳剤層で読み出された飛跡数、および各フィルム、各フィルム間で再構成された飛跡数分布

##### 4.2. ガンマ線事象の再構成

再構成された飛跡の中から、電子対のトポロジーを要求することで、ガンマ線事象の選び出しをおこなった。図 4.2.1 に、切り出した  $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 10$  枚のデータボリュームについて、選び出しの過程を示す。途中のフィルム(今回はフィルム番号 7 のエマルションフィルムのほぼ全面( $101.3\text{cm}^2$ )の領域)から始まり、下側に貫通している飛跡数は  $2.1 \times 10^5$  となる。それらの飛跡に対して位置・角度が近いパートナーの飛跡を持つ事象数が  $1.1 \times 10^3$  となる。最後にディスプレイチェックをおこない、電子対のトポロジーを示す 153 事象をガンマ線事象として選び出した。電子対のトポロジーを示さない事象の主な成分は、見かけ上途中のフィルムから始まっている飛跡に対して、近傍を貫通飛跡がかすめることで誤った飛跡の再構成をしていることに基づく。このような事象はディスプレイチェックにより明確に区別でき、今後このような事象を効率的に除くことで、ガンマ線事象の選び出しの更なる効率化が図れる。また、次回以降のフライトにおいて、本フライトで一部に導入している新型原子核乳剤フィルムのような高い飛跡検出効率および高い S/N 比を持つようなエマルションフィルムを用いることで更なる効率化が見込める。

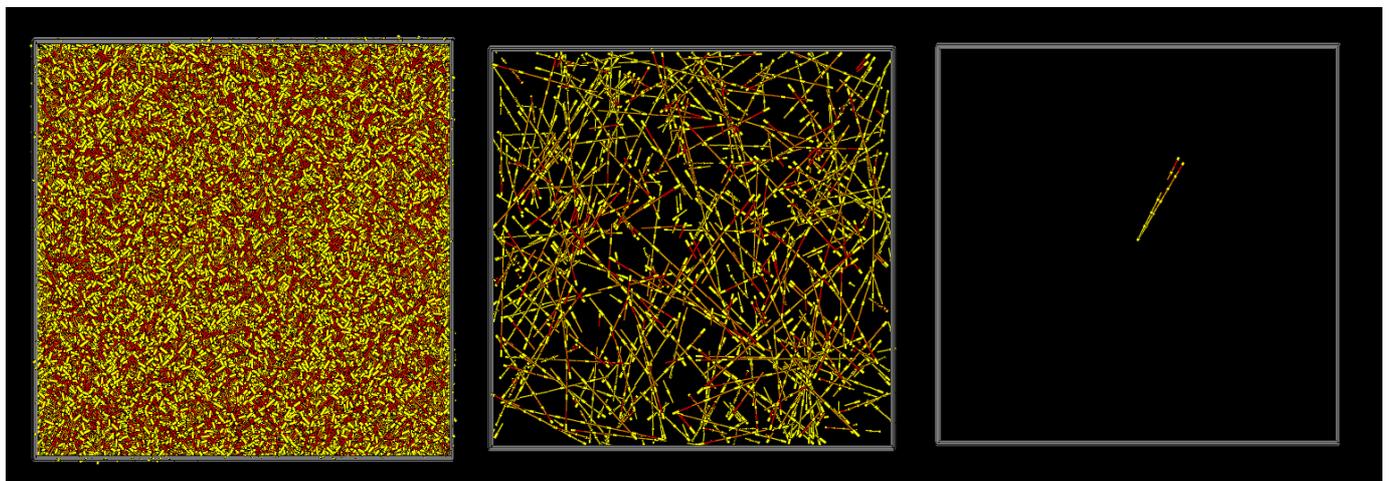


図 4.2.1:  $5\text{mm}$ (横)  $\times$   $5\text{mm}$ (縦)  $\times$  10 枚(奥行き)のデータボリュームについて、ガンマ線事象の選び出しの過程を表す。測定フィルムごとに色分けしている(赤が最下側フィルム(#1))。左: データボリュームで再構成された全飛跡。中: 途中のフィルムから始まり下側へ貫通する飛跡。右: パートナーの飛跡を持つ事象。

ガンマ線事象の検出効率をモンテカルロシミュレーション(MC)により評価した。Geant4.9.5 の G4BetheHeitlerModel で生成した電子対に対して、飛跡の読み出しレスポンスをかけて、一から再構成プログラムを通し、生き残り率を調べることで検出効率を評価した。図 4.2.2 に評価したガンマ線事象の検出効率を示す。今回の選出条件による検出効率を実線で示す。また、電子対の開き角が大きい領域まで探索した場合の検出効率を破線で示す。一点収束精度が高いエマルジョンで vertex を組むことで、開き角の大きい領域までの探索は可能である。そして、次回以降のフライトにおいて、本フライトで一部に導入している新型原子核乳剤フィルムのような、高い飛跡検出効率をもつエマルジョンフィルムを用いることで、100MeV で 70%、200MeV で 90% の検出効率が期待できる。

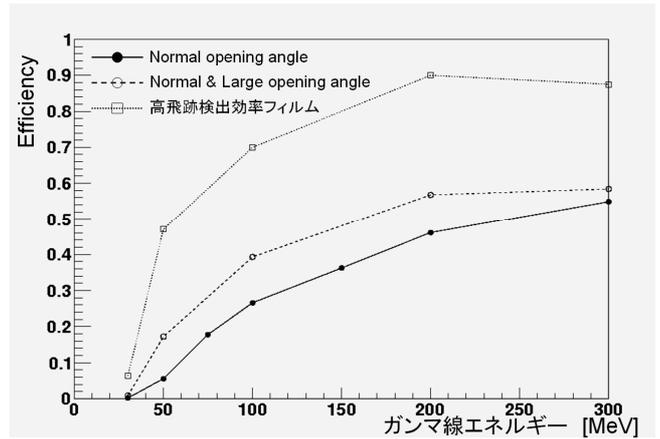


図 4.2.2: ガンマ線(垂直入射)事象の検出効率を表す。実線が今回の選出条件における検出効率、破線が電子対の開き角が大きい領域まで探索した場合の検出効率、点線が飛跡検出効率の高いエマルジョンフィルムを用いた場合の検出効率を表す。

#### 4.3. ガンマ線のエネルギー測定

検出したガンマ線事象に対して、系統的なエネルギー測定をおこなった。電子対各々の運動量を測定することで、ガンマ線のエネルギーが再構成できる。電子対各々の運動量は多重電磁散乱から測定できる。図 4.3.1 に測定事例例を示す。左側の飛跡が 60MeV/c、右側の飛跡が 32MeV/c、各々25%と 22%の精度(運動量の逆数の相対誤差)で運動量を決定した。それらからガンマ線のエネルギーを 92MeV、プラス側に 24%、マイナス側に 14%の精度で決定した。測定精度については、測定フィルム枚数を増やすことで改善可能である。今回 153 事象、306 本について系統的な運動量測定を試行し、飛跡ベースで、86%にあたる 263 本について運動量を決定した。残りの 14%にあたる 43 本については運動量の下限値を設けた。事象ベースでは、73%にあたる 112 事象についてエネルギーを決定し、残りの 27%にあたる 41 事象についてはエネルギー下限値を設けた。下側にあるカロリメーターを用いることで、測定精度は改善可能であり、下限値を設けているイベントについて測定することは可能である。測定したガンマ線のエネルギー分布を図 4.3.2 に示す。今回は低いほうで 50MeV 程度までのガンマ線事象を捉えることができています。

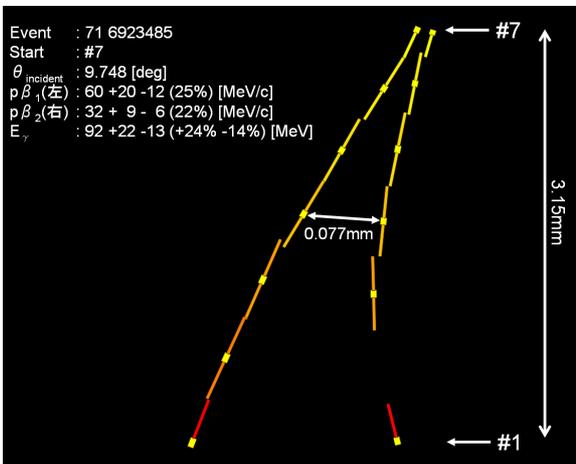


図 4.3.1: ガンマ線事象のエネルギー測定例

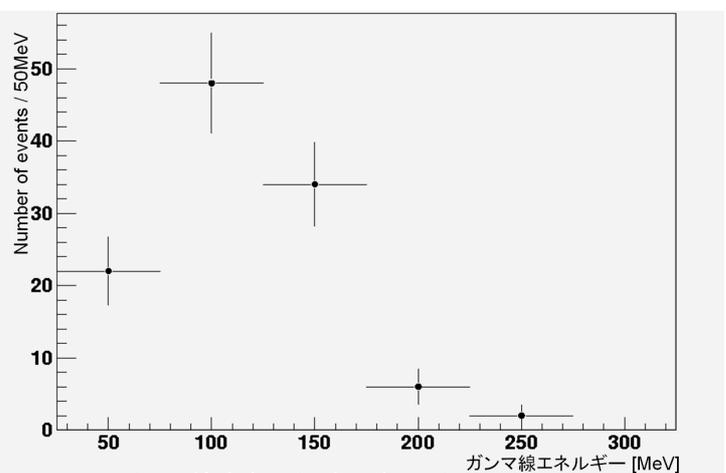


図 4.3.2: ガンマ線事象の測定エネルギー分布

#### 4.4. MC との比較

エネルギーを決定したガンマ線事象について、電子対の kinematics について、MC との比較を進めている。MC は truth を使い、エネルギー分布を測定エネルギー分布にあわせた。ガンマ線事象の検出バイアスは考慮しているが、運動量測定バイアスに基づくバイアスは未考慮である。図 4.4.1 に各分布におけるデータと MC との比較を示す。MC に未考慮の部分があるものの、現状でおおむね一致が得られつつある。

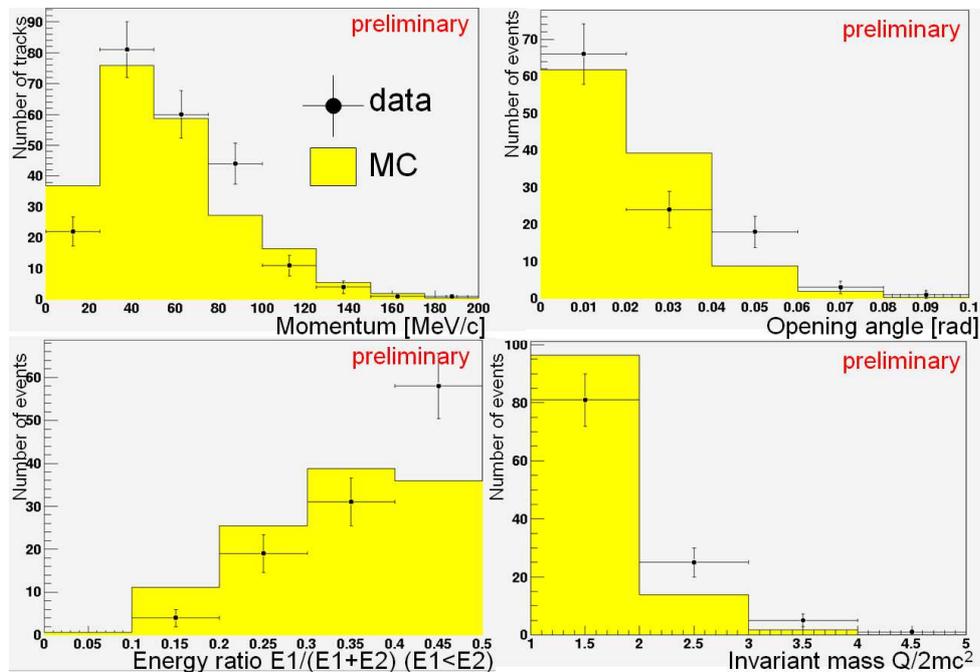


図 4.4.1: 電子対の kinematics についてデータと MC の比較を表す。MC は truth を使い、エネルギー分布を測定エネルギー分布にあわせた。ガンマ線事象の検出バイアスは考慮しているが、運動量測定バイアスに基づくバイアスは未考慮である。左上: 電子対各々の運動量分布。右上: 開き角分布。左下: エネルギー分配比。右下: 不変質量分布(2電子質量単位)。

#### 4.5. 大気ガンマ線フラックスの導出

タイムスタンプ情報を併せることで、ガンマ線事象を高度ごとに識別できる。高度 35km(残留大気 6.6g/cm<sup>2</sup>)の水平浮遊時における大気ガンマ線フラックスの導出をおこなった。図 4.5.1 に導出した大気ガンマ線の積分フラックスを示す。導出した大気ガンマ線の積分フラックスは、過去の測定結果との一致が得られた。また、微分フラックス、高度依存性、天頂角依存性の導出も進めており、これらについても現状で過去の測定結果との一致が得られている。また、今回、残留大気が 6.6g/cm<sup>2</sup> に対して、検出器の厚みが 8.5g/cm<sup>2</sup> あり、検出したガンマ線事象には、検出器内で発生したガンマ線も含まれている。大気ガンマ線フラックスの導出の際は、検出器の厚みの補正もおこなっている。検出器内で発生するガンマ線については、ガンマ線事象と荷電粒子の飛跡との時刻同期や一点収束を要求することで識別可能である。検出器内で発生したガンマ線を識別することで、宇宙ガンマ線に対するバックグラウンドが抑えられるだけでなく、ガンマ線のポインティング精度、エネルギー、および検出効率を、フライトデータを使い校正できる可能性を拓く。実際に、コンバーターで検出したガンマ線事象に対して、タイムスタンプで他の飛跡との時刻一致を要求することで、一点収束を示すハドロン反応候補が捉えられることが確認できている。

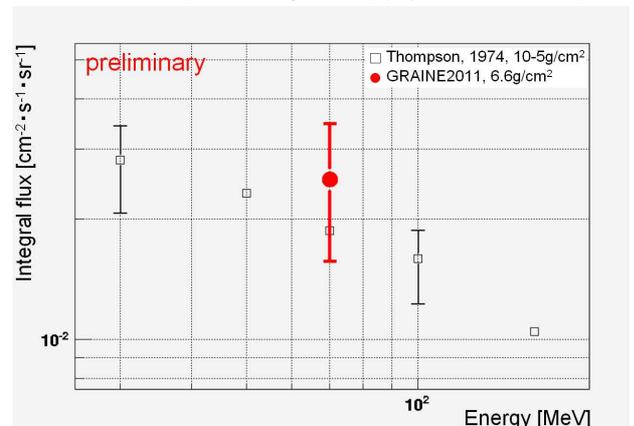


図 4.5.1: 大気ガンマ線の積分フラックスを表す。四角が Thompson 1974 (10-5g/cm<sup>2</sup>)、赤丸が GRAINE 2011 (6.6g/cm<sup>2</sup>)を表す。

#### 5. まとめ

本フライトにおいて、各構成要素の動作実証およびそれらの連動実証をおこなった。また、宇宙ガンマ線観測においてバックグラウンドとなる大気ガンマ線フラックスの実測をおこない、過去の測定結果との一致が得られた。また、MSC2004 では、電磁シャワーを捉えることにより、10GeV 以上の電磁成分の系統的な検出に成功した。GRAINE2011 では、電子対を捉えることにより、50MeV 以上のガンマ線事象の系統的な検出に成功した。超新星残骸などのガンマ線放射起源の解明において、200MeV 以下のスペクトル測定が重要となる。GRAINE における観測実現のための展望が得られた。

#### 参考文献

- 青木茂樹 他, 2004~2012 年度大気球シンポジウム報告
- S. Aoki et al., Advances in Space Research Vol.37(COSPAR 2004 Proceedings) pp.2120-2124
- 高橋寛 他, 2007~2009, 2011 年度大気球シンポジウム報告
- T. Nakano and K. Morishima, J. SPSTJ. 72 (2008) 229; K. Morishima and T. Nakano, JINST 5 P04011 (2010)
- S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A, 620 (2010) 192-195
- 六條宏紀 他, 2010, 2011 年度大気球シンポジウム報告
- 長縄直崇 他, 2010, 2011 年度日本写真学会、年次大会および秋季研究発表会
- 尾崎圭太 他, 2011, 2012 年度大気球シンポジウム報告
- 釜田啓樹 他, 2011 年度日本写真学会、秋季研究発表会