

## GRAINE 2011 年度気球実験：コンバーターの解析現状

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, 六條 宏紀
愛知教育大学	児玉 康一
ISAS/JAXA	斉藤 芳隆, 田村 啓輔, 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, 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, 濱田 要, 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. エマルションガンマ線望遠鏡 GRAINE

我々はエマルションからなるガンマ線望遠鏡の開発を進めている。エマルションで電子対の始まりを捉えることで、優れた角度分解能、及び直線偏光に対して感度を持つことが期待できる。この望遠鏡を GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)と呼ぶ。GRAINE 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。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 をおこなうことを目指す。これは Fermi-LAT の 1 年間のガンマ線の収量( $1\text{m}^2 \times 365$  日)と同等である。そのために、まず、口径  $1/10\text{m}$  で 3 時間程度のフライトをおこない、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定する一連の流れの確立、及び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、実際に既知の明るいガンマ線天体の観測により、オーバーオールでの性能実証をおこなう。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。今回は、その第一ステップとなる口径  $1/10\text{m}$  で 3 時間程度の気球フライトをおこなった。

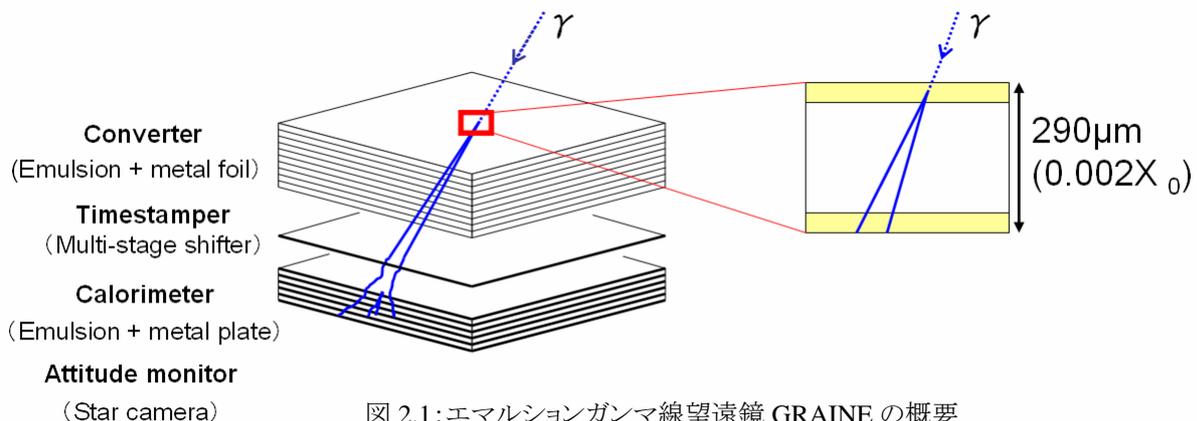


図 2.1: エマルションガンマ線望遠鏡 GRAINE の概要

### 3. 2011 年度気球実験

2011 年度に大樹航空宇宙実験場(TARF)にて気球実験をおこなった。エマルションチェンバー、スターカメラ、気圧計、GPS、そして電池を搭載し、4.3 時間(水平浮遊 1.6 時間)の気球フライトをおこなった。

### 4. エマルションチェンバー

図 4.1 に本実験に搭載したエマルションチェンバーの構造を示す。エマルションチェンバーの口径面積は  $12.5\text{cm} \times 10\text{cm}$  であり、コンバーター、タイムスタンプ、カロリメーターで構成される。コンバーターはエマルションフィルム(102 枚)と  $50\mu\text{m}$  厚の銅箔との積層構造になっている。コンバーターは最下部のフ

フィルムのエッジ数 mm 幅を天板に押し付け固定している。フィルムには下から通し番号を付けており、最下部フィルム番号が 1、最上部フィルム番号が 102 となっている。下から 98 枚目(フィルム番号 1~98)までは OPERA 型エマルジョンフィルム(205micron 厚の支持体の両面に 44micron 厚の乳剤層)、最上部 4 枚(フィルム番号 99~102)は、S/N 比と efficiency の改善が図られた新型原子核乳剤フィルムを導入した。

### 5. スキャン及び飛跡の再構成

名古屋大学で現在稼動している自動飛跡読取装置 SUTS を使い、エマルジョンフィルムのほぼ全面の領域 12.3cm×9.7cm、角度範囲は各プロジェクション角度 $|\theta_{proj}| < 45^\circ$  について、飛跡の読み出しをおこなった。一枚の片側乳剤層で読み出される飛跡の総数は約 10 億本である。スキャンは順調に進んでおり、現在全 OPERA 型エマルジョンフィルム 98 枚のスキャンが完了している。今回は、その内の下側 16 枚のフィルムについて飛跡の再構成をおこない、つなぎの精度、及び efficiency を評価し、ガンマ線事象の拾い出しをおこなった。

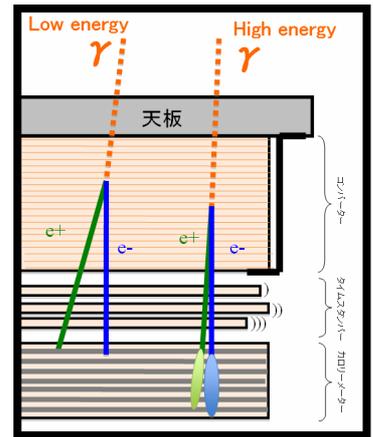


図 4.1: エマルジョンチェンバーの構造。

#### 5.1. つなぎの精度

フィルム間での飛跡のつなぎの精度(位置ズレ、角度ズレ)を評価した(図 5.1.1)。図 5.1.2 に飛跡の位置ズレ、角度ズレの分布を示す(フィルム番号 12 と 13 の間における入射角 $(\theta) 0^\circ$  の領域( $\tan \theta < 0.1$ )の飛跡について)。ガウス関数によるフィッティングにより得られた $\sigma$ は、位置ズレの X( $\sigma_{dx}$ )で 0.75micron、Y( $\sigma_{dy}$ )で 0.76micron、角度ズレの X( $\sigma_{d\theta x}$ )で 4.2mrad、Y( $\sigma_{d\theta y}$ )で 4.6mrad の精度が得られている。図 5.1.3 に入射角ごとの位置ズレの $\sigma_{dx}$ 、 $\sigma_{dy}$ 、及び角度ズレの $\sigma_{d\theta x}$ 、 $\sigma_{d\theta y}$ を示す。それぞれの $\sigma$ は入射角依存性があるものの、入射角 $45^\circ$ の領域( $0.9 < \tan \theta < 1.0$ )においても、位置ズレの $\sigma_{dx}$ で 2.2micron、 $\sigma_{dy}$ で 2.3micron、角度ズレの $\sigma_{d\theta x}$ で 7.1mrad、 $\sigma_{d\theta y}$ で 7.2mrad と、飛跡の再構成に問題のない精度が得られている。図 5.1.4、5.1.5 に今回処理した全フィルム間について、入射角 $0^\circ$  領域、及び入射角 $45^\circ$  領域のそれぞれにおける位置ズレの $\sigma_{dx}$ 、 $\sigma_{dy}$ 、及び角度ズレの $\sigma_{d\theta x}$ 、 $\sigma_{d\theta y}$ の分布を示す。入射角 $0^\circ$  領域では、位置ズレの $\sigma_{dx}$ の平均値( $\langle \sigma_{dx} \rangle$ )で 1.4micron、 $\langle \sigma_{dy} \rangle$ で 1.2micron、角度ズレの $\langle \sigma_{d\theta x} \rangle$ で 4.4mrad、 $\langle \sigma_{d\theta y} \rangle$ で 4.8mrad が得られている。また、入射角 $45^\circ$  領域では、位置ズレの $\langle \sigma_{dx} \rangle$ で 2.9micron、 $\langle \sigma_{dy} \rangle$ で 2.8micron、角度ズレの $\langle \sigma_{d\theta x} \rangle$ で 7.6mrad、 $\langle \sigma_{d\theta y} \rangle$ で 7.7mrad が得られている。まだ改善の余地はあるものの、今回処理した全フィルム間において、ほぼ一様な精度が得られている。局所的な領域(数 mm 角)における更なる fine tuning や、蓄積時間ごとに飛跡集団をわけて tuning をすることにより、更なる精度の改善が期待できる。

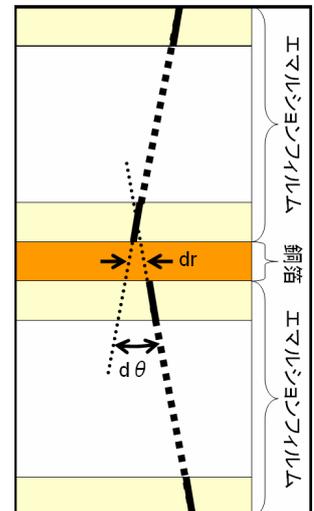


図 5.1.1: 飛跡のつなぎの精度(位置ズレ、角度ズレ)。

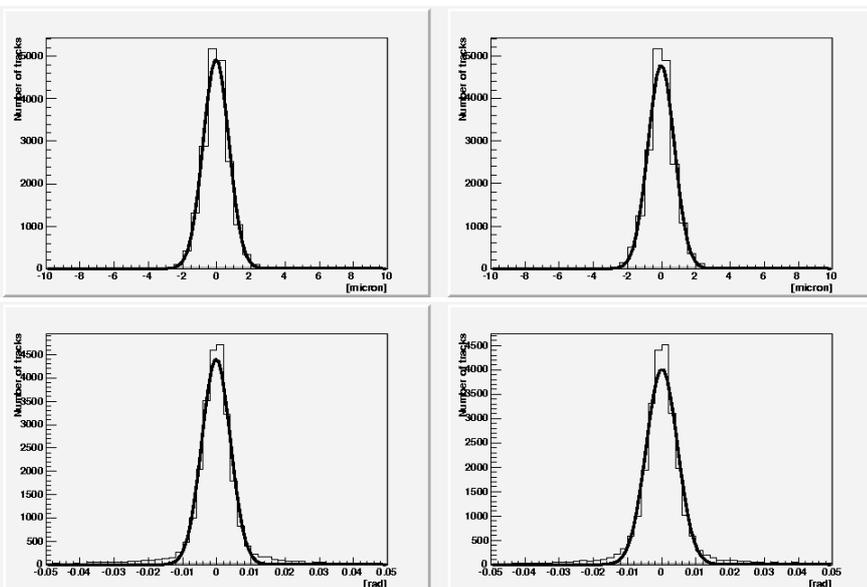


図 5.1.2: 飛跡の位置ズレ(上段)X(左)、Y(右)、及び角度ズレ(下段)X(左)、Y(右)の分布を表す(フィルム番号 12 と 13 の間の入射角 $0^\circ$  領域の飛跡について)。

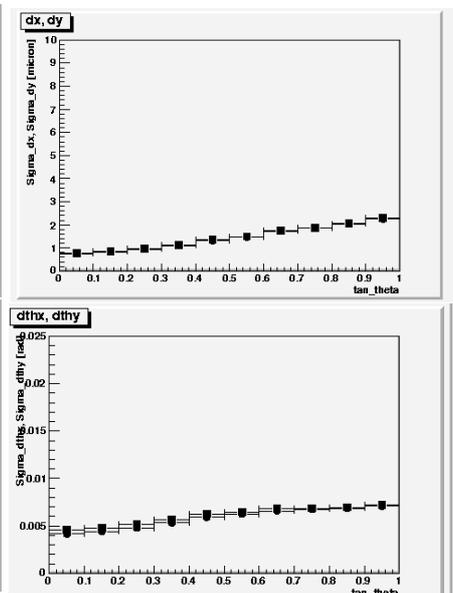


図 5.1.3: 入射角( $\tan \theta$ )ごとの位置ズレ(上)  $\sigma_{dx}$ (●)、 $\sigma_{dy}$ (■)、及び角度ズレ(下)  $\sigma_{d\theta x}$ (●)、 $\sigma_{d\theta y}$ (■)を表す(フィルム番号 12 と 13 の間について)。

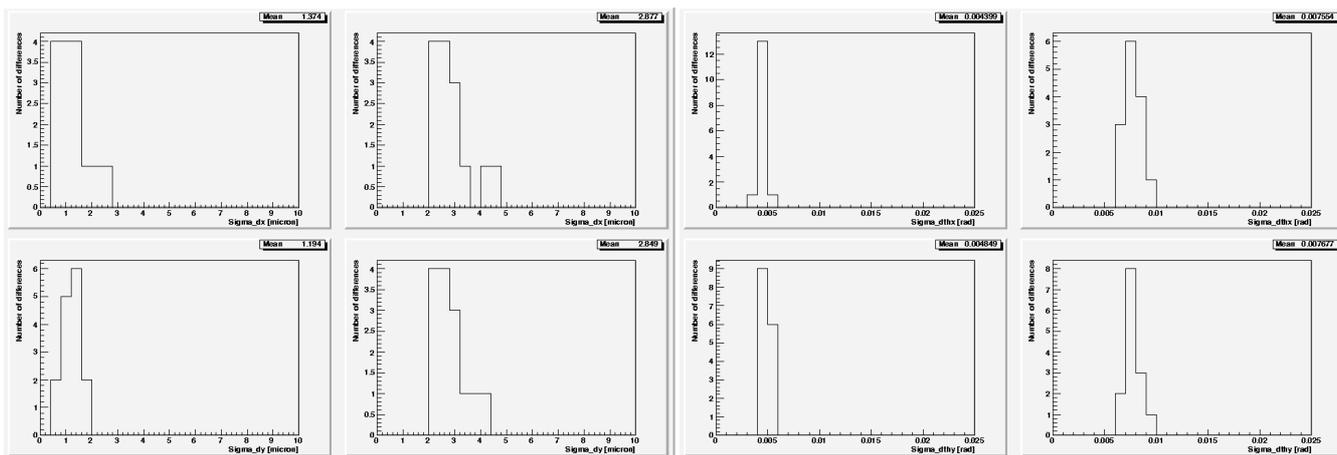


図 5.1.4:今回処理した全フィルム間について、入射角  $0^\circ$  領域(左列)、及び  $45^\circ$  領域(右列)における位置ズレ  $\sigma_{dx}$ (上段)、 $\sigma_{dy}$ (下段)の分布を表す。  
 図 5.1.5:今回処理した全フィルム間について、入射角  $0^\circ$  領域(左列)、及び  $45^\circ$  領域(右列)における角度ズレ  $\sigma_{d\theta_x}$ (上段)、 $\sigma_{d\theta_y}$ (下段)の分布を表す。

## 5.2. Efficiency

フィルム 1 枚飛ばしで飛跡をつなぎ、その間のフィルムに対応する飛跡があるかを確認することで efficiency を評価した(図 5.2.1)。図 5.2.2 にフィルムの位置 X、Y に対する efficiency をそれぞれ示す(フィルム番号 4 について)。フィルムの全面にわたり、一様な efficiency が得られている。図 5.2.3 に入射角ごとの efficiency を示す。efficiency は緩やかな入射角依存性があるものの、入射角  $0^\circ$  の領域( $\tan \theta < 0.1$ )で 80%、入射角  $45^\circ$  の領域( $0.9 < \tan \theta < 1.0$ )で 67%の efficiency が得られている。図 5.2.4 に、今回処理した全フィルムについて、入射角  $0^\circ$  領域、及び入射角  $45^\circ$  領域における efficiency の分布をそれぞれ示す。今回処理した全フィルムにおいて、入射角  $0^\circ$  で平均 80%、入射角  $45^\circ$  で平均 65%の efficiency が得られている。今回処理した全フィルムにわたり、一様な efficiency が得られている。1 枚あたりの inefficiency は 2 枚飛ばしや 3 枚飛ばしでも飛跡をつなぐことでリカバーできる。また、今後においては新型原子核乳剤フィルムを使うことにより、一枚あたりの efficiency をさらに上げることは可能である。

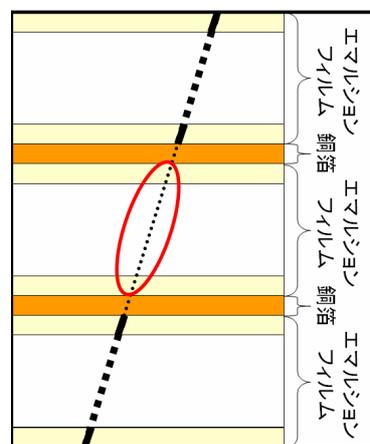


図 5.2.1:飛跡の efficiency

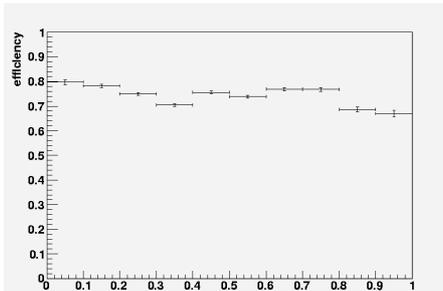
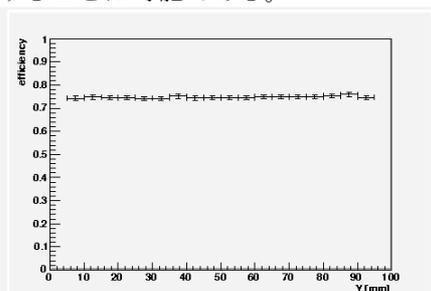
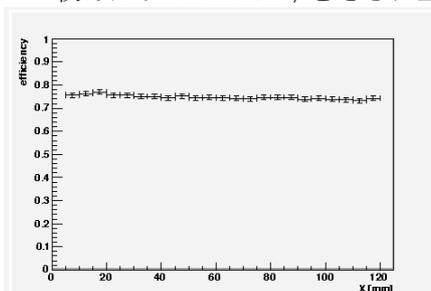


図 5.2.2:フィルムの位置 X(左)、Y(右)に対する efficiency を表す(フィルム番号 4 について)。

図 5.2.3 : 入射角 ( $\tan \theta$ ) ごとの efficiency を表す(フィルム番号 4 について)。

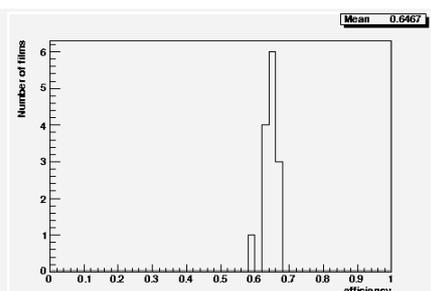
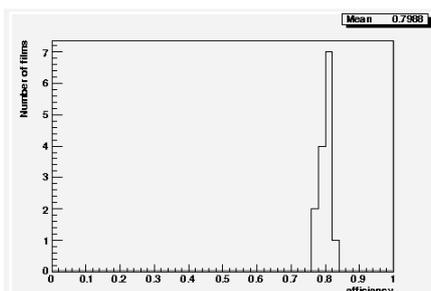


図 5.2.4:今回処理した全フィルムにおける入射角  $0^\circ$  領域(左)、入射角  $45^\circ$  領域(右)の efficiency の分布を表す。

### 5.3. ガンマ線事象の拾い出し

3D のイベントディスプレイによるディスプレイチェックにより、データセットの途中のフィルムから始まる飛跡、及びその飛跡に近接する飛跡を持つ事象をガンマ線事象候補として拾い出した。拾い出したガンマ線事象候補に対して、顕微鏡観察により、途中のフィルムから発生し、2本に分岐していることを確認することにより、ガンマ線事象であることの確認をおこなった。図 5.3.1 にその一例を示す。この事象は、フィルム番号 11 から電子対の飛跡が始まっている。入射角は約  $27^\circ$  であった。電子対の開き角は  $5.9\text{mrad}$  であり、その開き角から推定されるガンマ線のエネルギーは  $340\text{MeV}$  である。また、この事象に対して、タイムスタンプにて、サブ秒精度でのタイムスタンプが押されている。その時刻における高度は  $34.6\text{km}$  であった。また、その時刻における姿勢モニターの情報と併せることにより、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定した。この一連の流れを確立し、エマルジョンガンマ線望遠鏡 GRAINE におけるファーストライトに成功した。また、その他にも  $60\text{MeV}$  程度のガンマ線事象やハドロンシャワー事象なども捉えられている。

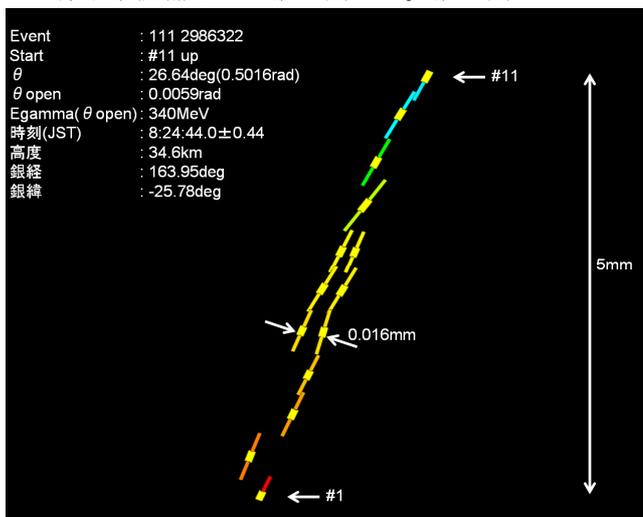


図 5.3.1:ガンマ線事象の1例

## 6. まとめ

我々は、高い角度分解能、及び直線偏光に対して感度を持つことが期待できるエマルジョンガンマ線望遠鏡 GRAINE による宇宙ガンマ線観測を目指す。2011 年度の TARP での気球実験にて、4.3 時間(水平浮遊 1.6 時間)のフライトに成功した。現在、フライトデータ解析を進めている。コンバーターについては、面積  $12.3\text{cm} \times 9.7\text{cm}$ 、角度範囲  $|\theta_{\text{proj}}| < 45^\circ$  について飛跡の読み出しをおこない、全 OPERA 型エマルジョンフィルム 98 枚についてスキャンが完了している。今回は下側 16 枚のフィルムについて飛跡の再構成をおこない、十分で一般的な精度、及び efficiency が得られていることを確認した。また、ガンマ線事象の拾い出しをおこない、入射角約  $27^\circ$  の事象やエネルギー  $60\text{MeV}$  程度の事象が捉えられていることを確認した。そして、タイムスタンプや姿勢モニターも大きな問題なく機能しており、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定する一連の流れを確立し、GRAINE におけるファーストライトに成功した。今後は、これまでの解析を基に、系統的なガンマ線事象の検出、解析領域の拡大を進めていく。そして、大気ガンマ線フラックス(エネルギーごと、高度ごと、天頂角ごと)の導出を目指す。そして、次に口径面積 20 倍の 2 号機による 1 日程度の気球フライトにより、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目指す。

### 参考文献

- 青木茂樹 他, 2004~2011 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 年度大気球シンポジウム報告
- 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, 日本物理学会 2011 年秋季大会
- 尾崎圭太 他, 2011 年度大気球シンポジウム報告