

## GRAINE 2018：姿勢モニターおよびそれを併せたフライトデータ解析

○中村崇文、青木茂樹、高橋覚、GRAINE collaboration

神戸大、愛知教育大、ISAS/JAXA、岡山理科大、名古屋大

### 1. はじめに

GRAINE 計画では、原子核乾板を用いたエマルジョン望遠鏡を大気球に搭載し、宇宙ガンマ線の精密観測を目指している。2018 年に Vela パルサーの撮像による望遠鏡の総合性能実証を目的とした 3 回目の気球実験を実施し、現在はフライトデータの解析を進めている。本実験では 100MeV で 1deg の結像性能を目標としている。

### 2. 姿勢モニター:スターカメラ

天球に対するガンマ線の到来方向を決定するためには望遠鏡の上空における姿勢情報を得る必要がある。私たちは姿勢モニターとしてスターカメラを採用している。スターカメラは CCD カメラを用いて星画像を昼夜問わず撮影することで、上空の望遠鏡の姿勢情報を得るシステムである。

前回の 2015 年気球実験では、2011 年に比べてカメラの限界等級を大幅に改善し、搭載するスターカメラを 1 台から 3 台にするなど、大きな実績を得た一方、システムのトラブルによる撮影の中断や、迷光による輝度値の飽和時間の増大によって、Vela 時間帯における解析可能時間が 60%に制限されてしまった。この結果を受けて課題を明確化し、改善を行った。

### 3. 2018 年豪州気球実験

2018 年気球実験において、撮影の中断に関しては、システムとストレージの分離及びストレージを冗長化するなど、システムの堅牢化を施した。また、輝度値の飽和時間の増大に関しては、カメラの視線の先の散乱体が原因だと考え、フードを軽量化し視線の先に散乱体がないような搭載方法に変更を行った。これらの課題を克服するような開発を行ったシステムにおいて、JAXA の恒温恒圧槽を用いた環境試験など国内で様々な準備実験を行った。また、現地においてもステップバイステップに計 25 回にわたる動作試験やゴンドラ実装による試験観測などを経て、最終セットアップを固め、フライトに臨んだ。その結果、全時間帯に渡って画像の取得に成功した。さらにレベルフライト中は常時少なくとも 2 台は有効なフレームの取得に成功し、Vela 観測時間においては昼夜問わず全カメラで有効フレームの取得に成功した。このように、レベルフライト全時間帯に渡り解析可能な画像の取得に成功した。

### 4. スターカメラフライトデータ解析

現在、スターカメラについて Vela パルサーが観測できる時間帯の解析が一通り完了している。図 1 に 3 台搭載しているスターカメラの視線方向の地平座標方位角の時間変化を示す。このように 90deg ずつずらして 3 台のスターカメラを搭載していることが確認でき、ある 1 台が太陽の方向を向いていても残りの 2 台で補い合うように視線方向が決定できていることを確認した。さらに取得画像間が 10 秒以内なら視線方向を線形補完しても、精度が最大 0.1deg までしか悪化しないことをデータで確認し、それを線形補完可能時間とした。それを行うことにより、カメラ 1 台あたりの視線決定不能率は 1/3 に改善した。さらに、カメラ 3 台用

いることで少なくとも 1 台以上で視線方向を決定できている割合は 99.1%を達成することができた。

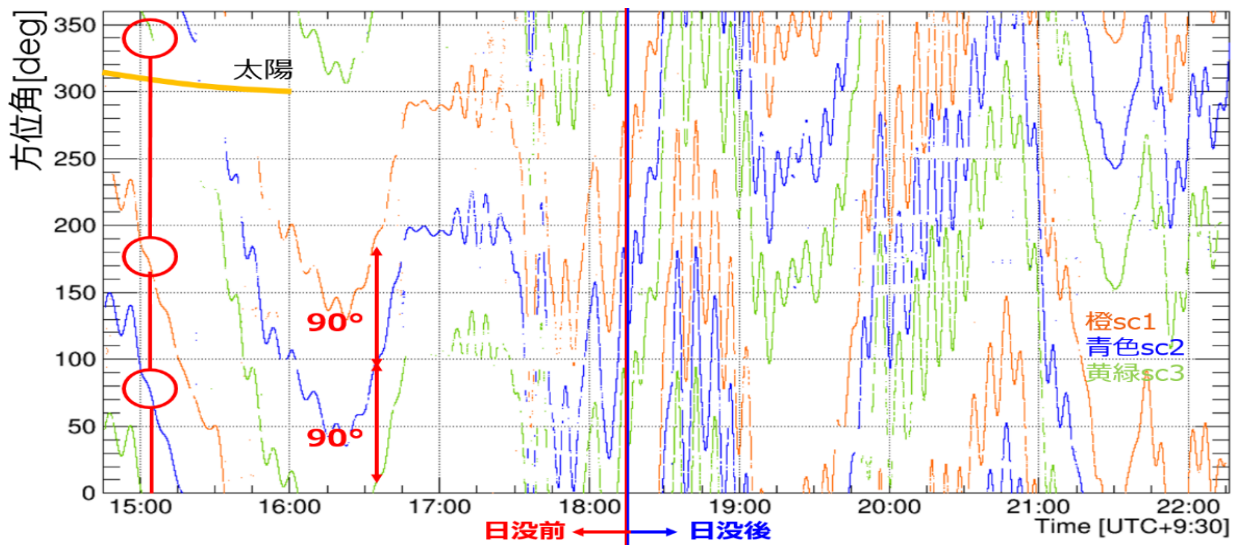


図 1 3 台のスターカメラの視線方向の地平座標方位角の時間変化

次に決定した視線方向をもとに、望遠鏡の姿勢情報への変換を行った。図2に地平座標北方向の検出器座標方位角の時間変化について、3台のカメラからそれぞれ独立に得られた方位角の時間変化、および各カメラの平均からの差を示す。

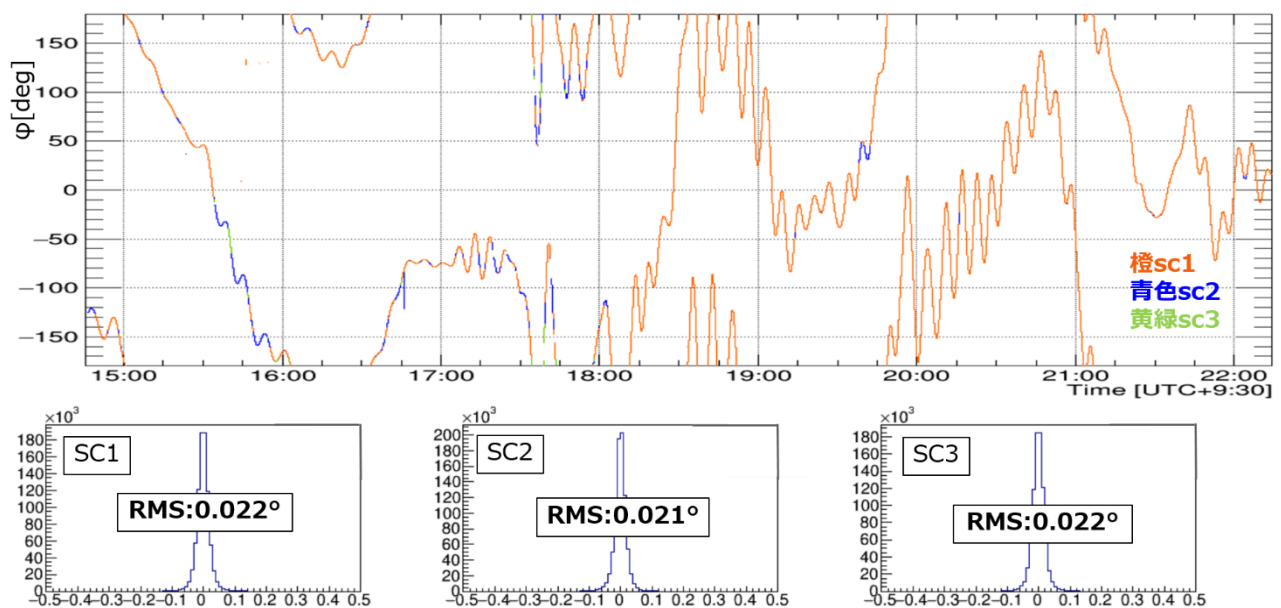


図 2 3 台のカメラの地平座標北方向の検出器座標方位角時間変化および、各カメラの平均からの差

このように、3 台のスターカメラにおいて、姿勢は全時間帯にわたりそれぞれよく一致しており、またその広がり  $0.022\text{deg}$  と目標の精度に対して十分な精度で姿勢を決定することができた。

決定した姿勢をもとに作成した望遠鏡の天球上のサーベイマップを図 3 に示す。

このように GPS で決めた天頂方向と、スターカメラで決めた検出器の法線方向が一致していることから、スターカメラによる姿勢決定が正しくできていることを確認した。

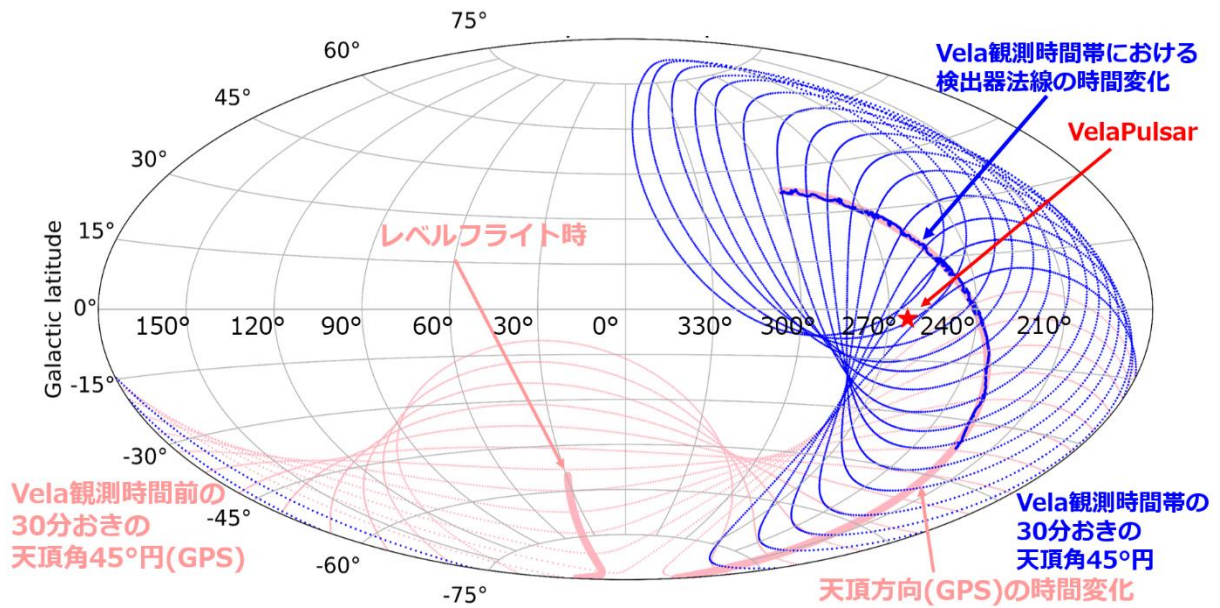


図 3 望遠鏡の天球上のサーベイマップ

#### 5. 姿勢情報を用いたフライトデータ解析

スターカメラに関して、Vela パルサー観測時間における解析が一通り完了したため、時刻情報やガンマ線情報などを用いたエマルジョン望遠鏡の統合解析を進めている。まずはスターカメラと多段シフターの時刻同期を行った。多段シフター駆動のタイミングで LED ライトを点灯させており、それをスターカメラが撮影することで時刻同期を行う。両者で決めた時刻の差を時刻同期精度として評価したところ 0.06 秒と、多段シフターの時間分解能に比べて十分よい精度で時刻同期を行うことができた。

次に多段シフターで記録している荷電粒子飛跡に到来方向の付与を行った。その到来方向付与率は 99.1% と高い決定率で行うことができています。その付与した到来方向の方位角分布を図 4 に示す。

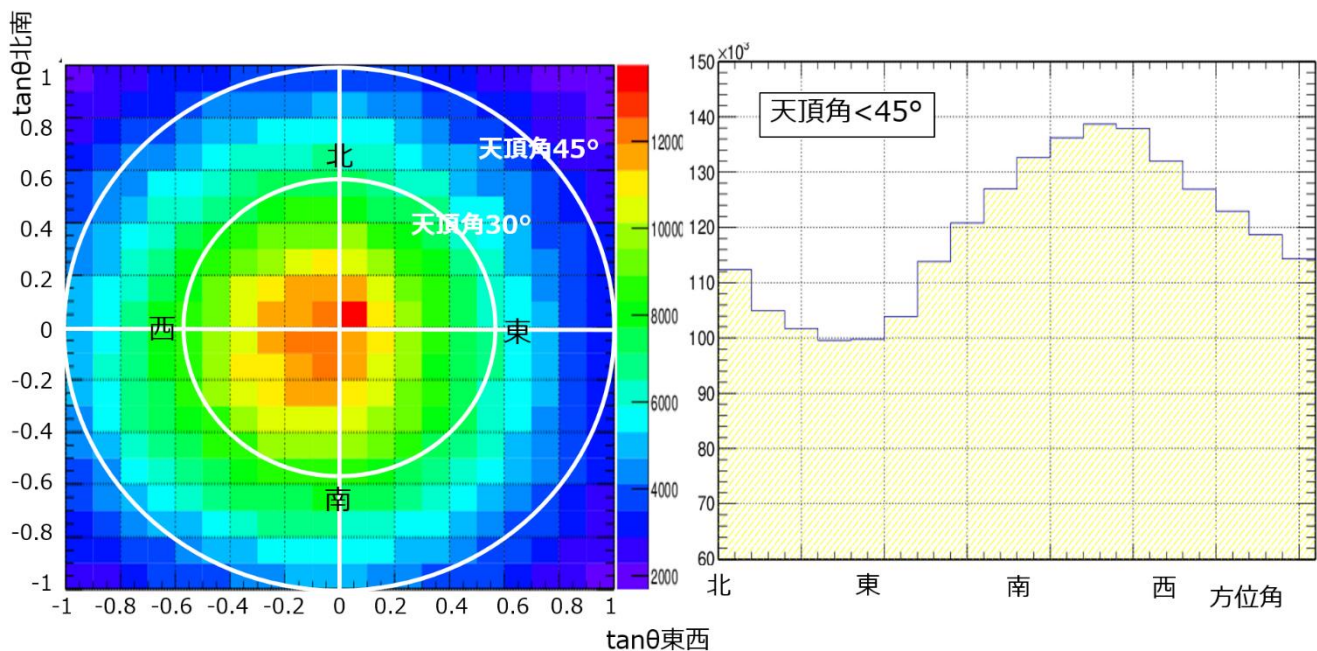


図 4 荷電粒子の方位角分布

このように西高東低の東西効果が顕著に見えている。飛跡 1 本ずつに到来方向を付与して東西効果が観測できたのは GRAINE 計画では初のことである。またこのような東西効果は多段シフターの全解析エリアにおいて見えており、均質に解析できていることを確認した。

また東西効果の分布から、非対称度を最大にする振幅及び位相を定義し、望遠鏡の性能評価を行った。多段シフターの解析エリアごとに位相のばらつきを評価したところ、 $0.85\text{deg}$  以下で位相を決定できていることを確認した。また振幅が角度精度と相関を持つことを利用し、評価を行ったところ、解析エリアごとのばらつきが  $2\text{deg}$  以下であることを確認した。

さらに、2015 年気球実験の際に宇宙線研究所の本田守弘氏の協力を仰いで提供を得た、HKKM モデルの陽子のシミュレーションとの比較も進めている。現状、西高東低の傾向はおおよそ一致している一方で、振幅や位相に関しては少しずれている。この理由として、多段シフターは全荷電粒子飛跡を記録していることや、通過物質量の違い、エネルギーの閾値など、条件の違いがあるためと考えており、今後詳細な理解を行っていく必要がある。

また、ガンマ線に関しても、到来方向を付与し、その到来方向の分析を進めている。ガンマ線に関しても、方位角分布を作成したところ、東西効果が確認できた。これは観測で得られているガンマ線の大半が 1 次宇宙線によって発生する大気ガンマ線であるためと考えられる。またガンマ線に関してもシミュレーションとの比較を進めている。こちらは位相振幅に関しても同等の傾向が得られつつある一方、詳細な構造は異なっている。その理由としては緯度や経度、通過物質量の違いなど、条件が異なるためであると考えており、今後さらに詳細な理解を進めていく。

## 6. まとめと展望

GRAINE 計画 2018 年豪州気球実験では、2015 年における課題を克服し、全時間帯に渡って解析可能な画像の取得に成功した。そして現在はフライトデータ解析を進めている。スターカメラについては Vela 観測時間帯の解析を一通り完了させ、姿勢決定率が 99%と高い決定率を達成し、姿勢決定精度が  $0.022\text{deg}$  と望遠鏡の角度分解能よりも十分良い精度で姿勢を決定することができた。また、サーベイマップを作成し姿勢決定の妥当性も確認している。現在は時刻情報やガンマ線情報などを用いたエマルジョン望遠鏡の統合解析を進めている。スターカメラと多段シフターの時刻同期を行い、到来方向の付与を行ったところ、99%という高い姿勢付与率を達成した、そしてその方位角分布から東西効果を観測できた。多段シフターによる荷電粒子 1 本ずつに到来方向を付与し、東西効果を観測したのは GRAINE 計画では初のことである。また振幅や位相を抽出し精度を評価することで、シフターの解析エリアごとの一様性を確認することができた。またガンマ線についても到来方向付与を行っている。ガンマ線に関しても GRAINE 計画では初の東西効果を観測することができた。さらに荷電粒子、ガンマ線についてシミュレーションとの比較も行っており、今後詳細な分析を行うことで、データに関する理解を深めていく。

## 7. 参考文献

GRAINE collaboration( エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ )2004-2018 年度大気球シンポジウム報告