

研究種目：特定領域研究

研究期間：2003～2008

課題番号：15077203

研究課題名（和文）Super-GZK 問題の解決と最高エネルギー宇宙線の化学組成測定

研究課題名（英文） Study both on the super-GZK problem and on the chemical composition of high energy cosmic rays

研究代表者

垣本 史雄 (KAKIMOTO FUMIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00092544

研究成果の概要：本特定領域研究により米国ユタ州砂漠地帯の約700km<sup>2</sup>の敷地に地表検出器約500台と大気蛍光望遠鏡ステーション3ヶ所を設置し、宇宙線空気シャワーをこれら2種類の検出器によるハイブリッド観測を約1年間行った。本計画研究では、このうち大気蛍光望遠鏡の撮像カメラ（データ収集系を含む）の設計、製作と設置を担当し、当初の性能を達成した。すなわち、一次宇宙線のエネルギー、到来方向と空気シャワー縦方向発達曲線の決定精度は、それぞれ10%以下、1度以下と30g/cm<sup>2</sup>以下であることが確かめられた。今後5年間観測を継続し、超高エネルギー宇宙線の起源を解明する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2003年度	11,600,000	0	11,600,000
2004年度	76,800,000	0	76,800,000
2005年度	76,800,000	0	76,800,000
2006年度	41,700,000	0	41,700,000
2007年度	1,600,000	0	1,600,000
2008年度	1,600,000	0	1,600,000
総計	210,100,000	0	210,100,000

研究分野：宇宙線物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、空気シャワー、エネルギースペクトラム、GZK カットオフ、質量組成、縦方向発達、空気シンチレーション光、活動的天体

## 1. 研究開始当初の背景

10<sup>20</sup> eV（～デカジュール）以上の宇宙線起源は、宇宙における最も激しい現象や特異な天体と関連があることは疑う余地がない。このような現象や天体を特定する上で、一次宇宙線の化学組成とエネルギースペクトラムの情報は極めて重要である。とくに、本研究の最終解明目標である起源天体までの距離に応じてエネルギースペクトラム上に表れることが期待されている Greisen、Zatsepin、

Kuzmin(GZK) cutoff の存否は、早急に決着をつけねばならない重要課題である。

この問題に関しては、我々が参加した AGASA 観測実験によって GZK を超える、すなわち、Super GZK 宇宙線の存在を報告している。一方、米国 HiRes グループにより GZK cutoff の存在を示唆する結果が報告されており、この GZK 問題に対する早急なる決着が世界的に求められている。両者の結果の違いの根本原因は、それぞれが採用している観測

手法の違いによるところが大きい。すなわち、AGASA では地表に展開したシンチレーション検出器を用いて空気シャワー荷電粒子の横方向分布を測定しているのに対して、HiRes では、大気蛍光望遠鏡を用いて空気シンチレーション光(大気蛍光)を観測し、空気シャワー荷電粒子数の縦方向発達(宇宙線が大気中を進むにつれて生成粒子数が増減する様子)を測定している。これらの測定結果を用いた一次宇宙線エネルギーの算出は、AGASA では、シミュレーション計算で採用する化学組成や高エネルギー相互作用に大きく依存する。一方、HiRes では、半直接的にカロリメトリックに測定してはいるものの、測定した空気シンチレーション光イメージから縦方向発達を導出するには、大気中でのシンチレーション光発生効率や大気中での散乱吸収の補正などに不確定な要因が多く介在している。

## 2. 研究の目的

上記の背景をふまえ、本研究では、 $10^{18.5}$  eV以上の一次宇宙線が生成する空気シャワーを大気蛍光望遠鏡装置と地表シンチレーション検出器で同時測定を行い、ガンマ線、ニュートリノを含めた一次宇宙線の核種を高精度で決定するとともに、大気中での縦方向発達、すなわち、エネルギー損失を正確に算出した精度の高いエネルギースペクトラムを確立する。これにより、GZK 問題に決着をつけるとともに、超高エネルギー宇宙線起源を解明することを目的とする。

ただし、本領域研究期間中は、主に観測装置の製作設置および調整を行い、設置後約5年間の観測の後、最終結果を得る。

## 3. 研究の方法

本領域研究全体の大部分の予算を用いて、米国ユタ州デルタ近郊の砂漠地帯の約700 km<sup>2</sup>(山手線が取り囲む面積の約7倍)の敷地に地表検出器を約500台、また、これ取り囲むように大気蛍光望遠鏡ステーションを3ヶ所に設置する。このステーションのうち2ヶ所は、本領域研究予算にて設置する。他は、HiRes で使用されていた装置を移設する。

大気蛍光望遠鏡は、反射鏡、撮像カメラ部、高圧電源、測定回路、記録装置から構成される。とくに、本研究予算では、撮像カメラとデータ収集系の設計製作を行う。製作台数は2ステーション分24台である。

本望遠鏡による測定データから個々の空気シャワー縦方向発達を大気の厚さにして30 g/cm<sup>2</sup>の精度で決定する。さらに、観測データの解析を行うためのプログラム開発を行う必要がある。また、大気中でのシンチレーション光の散乱吸収の影響を較正するために必要なデータ(ラジオゾンデデータなど)の検討と較正方法の確立も行う必要があ

る。最後に、個々の宇宙線空気シャワーに対して得られた縦方向発達の様相から、一次宇宙線の化学組成(一次ガンマ線や宇宙ニュートリノも含めた)を決定する。これには、膨大なシミュレーション計算を行い、化学組成を決定するのに最も良いパラメータ(複数)を選定し、化学組成決定の精度ならびに一次宇宙線エネルギー決定精度を確定する。もちろん、これらの解析には地表検出器からの情報を取り入れ、より不確定性が少ない解析方法を開発する。さらに、決定した化学組成を考慮して、一次宇宙線のエネルギーを精度良く決定し、エネルギースペクトルを得て、GZK問題を決着させる。

なお、本望遠鏡を用いた観測は、月のない晴天夜の期間のみ行うため、有効観測時間は約6%であり、最終結果を得るには装置完成後約5年間の観測が必要である。

## 4. 研究成果

### (1) 大気蛍光望遠鏡カメラとデータ収集系の設計・製作

大気蛍光望遠鏡カメラの受光素子には、必要とされる測定精度を考慮し、2インチの



写真1 大気望遠鏡カメラ

PMT(浜松フォトニクス社特製R9508)を選定した。このPMT前面には、夜光のノイズを軽減するためにショット

社製BG3フィルターを装着した。このPMT256本を16×16のマトリクス状に配置し、これを筐体に収め、カメラ受光面を形成した(写真1)。この筐体

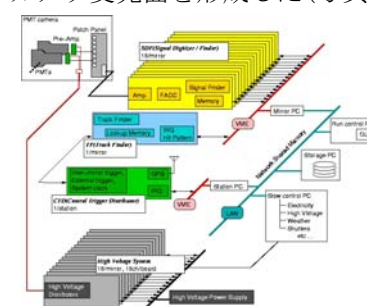


図1 データ収集システム

前面窓には、紫外光透過特性に優れたパラグラスを用いた。図1は、データ収集系のブロック図である。本システム

により、データ収集のためのトリガー判定、大気蛍光シグナルの波形記録および読み出しを行う。

### (2) 大気蛍光望遠鏡ステーション建設と望遠鏡設置

大気蛍光望遠鏡ステーション(写真2)2ヶ所建設と望遠鏡設置は、2007年6月に完了し、本観測を開始した。写真3はステーション内部に設置した反射鏡とカメラ部分を撮影したものである。このように望遠鏡は2段に組



写真2 大気蛍光望遠鏡ステーション



写真3 反射鏡とカメラ

まれ、この1組で仰角3から33度、方位角幅17度を視野としている。1つのステーション内には望遠鏡12台が設置されている。

本施設完成後、調整を行いながら計画終了時まで、約2年間の観測を行うことができた。一方、地表検出器とのハイブリッド観測は約1年間行った。

### (3) 大気蛍光望遠鏡測定性能

本研究計画時に予定していた大気蛍光望遠鏡の測定精度は、宇宙線到来方向決定精度1度以内、一次宇宙線エネルギー決定精度10%以内、縦方向発達の最大発達深さ( $X_{max}$ )は30 g/cm<sup>2</sup>以内である。これに対して、完成した望遠鏡の性能は、各素子の計測精度、回路特性や望遠鏡設置精度を考慮したシミュレーション計算により決定する。図2にはその一例として一次宇宙線エネルギー決定精度に関するシミュレーション計算結果を示

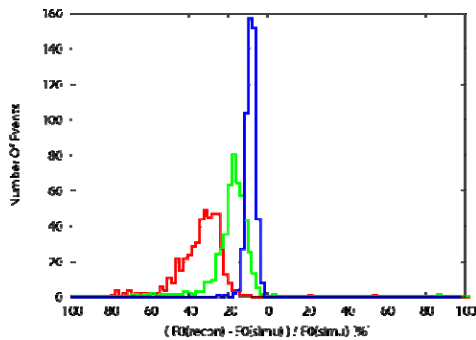


図2 一次宇宙線エネルギー決定精度。シミュレートした一次宇宙線のエネルギーは  $10^{19.5}$  eV、入射天頂角は10(赤)、30(緑)、60度(青)である。

す。系統誤差はまだ存在しており、これを解決する必要があるが、決定精度を示す分布の幅は、それぞれ6.7(赤)、6.7(緑)、2.7%(青)であり、当初の精度が達成されていることが分かる。また、到来方向決定精度は、 $10^{19.5}$  eVの宇宙線に対して1度以下であり、 $X_{max}$ については、30 g/cm<sup>2</sup>以下であることが確かめられた。

なお、データ収集系も予定通りの動作特性を達成できたが、設置場所固有のノイズ（特に飛行機が発するパルス光）の軽減措置など、予想外事態への対応が必要であった。結局、DAQソフトの改善とデータの事前処理により、ほぼノイズ事象を除去することができた。

### (4) 観測結果

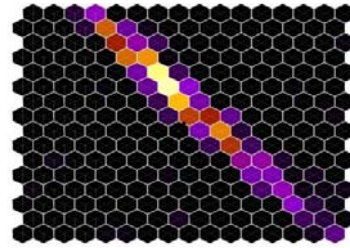


図3 撮像カメラで観測された空気シャワー事象

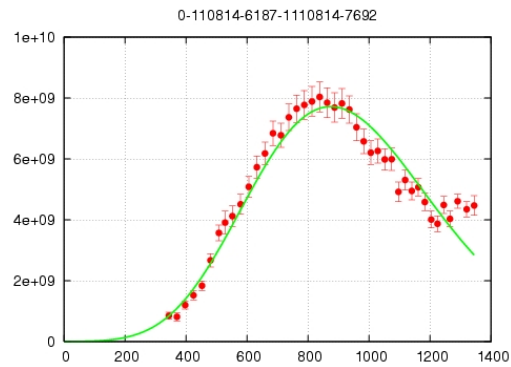


図4 撮像カメラで観測されたデータを用いて得られた空気シャワー縦方向発達曲線。縦軸は空気シャワー中の荷電粒子数で横軸は  $g/cm^2$  で表した大気の深さ。緑実線は関数フィットの結果である。

図3には、大気蛍光望遠鏡カメラで観測された空気シャワー事象の1例を示す。図中の六角形1つが1PMTに対応しており、色の違いにより計数された空気シンチレーション光子数の多寡を示している。また、図4は、測定された測定データから再構成された空気シャワー縦方向発達曲線である。この結果、この空気シャワー事象に対する宇宙線のエネルギーが  $1.4 \times 10^{19}$  eVと決まる。また、 $X_{max}$ は874 g/cm<sup>2</sup>である。ただ、大気の深いところに空気チェレンコフ光の影響と考えられる増光が見られることから、その補正を施す必要がある。

### (5) $X_{max}$ と一次宇宙線化学組成

一次宇宙線化学組成の決定には、測定パラ

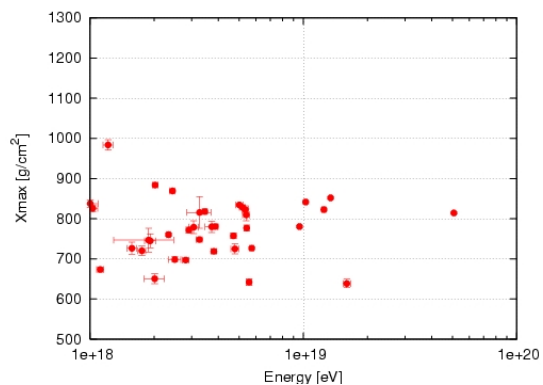


図5 観測された  $X_{max}$  分布。横軸は一次宇宙線のエネルギー。

メータとして  $X_{\max}$  ばかりでなく、大気の深さ  $300\text{g/cm}^2$  や  $900\text{g/cm}^2$  での空気シャワー荷電粒子数を用いた多次元解析を行うことにより、より精度が高い結果が得られる可能性があり、現在、検討中である。

図5には、観測された  $X_{\max}$  の分布を示す。本結果は、更に系統誤差を補正する必要があり、preliminaryな結果である。また、図6には、これと比較すべきシミュレーション計算結果を示す。まだ、観測事象の例数が少なく、また、系統誤差の問題もあり、最終結論を出す状況ではないが、観測結果は一次宇宙線が陽子を仮定したときのシミュレーション計算結果に近い分布をしているようである。

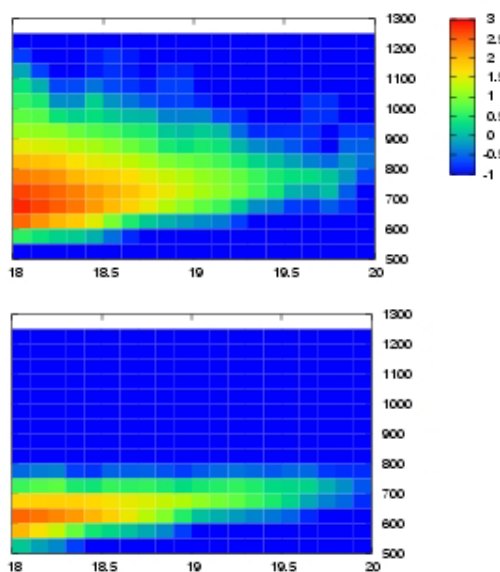


図6 シミュレーション計算による  $X_{\max}$  分布。横軸は一次宇宙線エネルギーの対数値。縦軸の単位は  $\text{g/cm}^2$ 。上図は陽子、下図は鉄核が入射粒子である場合の結果。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① H. Tokuno, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., On site calibration for new fluorescence detectors of the telescope array experiment, Nuclear Instruments and Method in Physics Research A, A601, 364-371, 2009, 査読有
- ② Y. Tameda, F. Kakimoto, Y. Tsunesada et al., Trigger system for the TA fluorescence detector, Physica E, 40, 430-433, 2007, 査読有
- ③ H. Tokuno, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al.,

Data acquisition system of air fluorescence detectors for the Telescope Array experiment, Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conference, CD-ROM, 2007, 査読無

- ④ Y. Tsunesada, F. Kakimoto, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., Telescope Array Aperture: Mono, Stereo and Hybrid, Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conference, CD-ROM, 2007, 査読無

⑤ S. Ogio, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, K. Kadota, H. Yoshii et al., The First Observation with the Fluorescence Detectors of the Telescope Array Experiment, Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conference, CD-ROM, 2007, 査読無

⑥ Y. Hayashi, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., Performance of the Surface Scintillation Detector for The Telescope Array, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, 8, 161-164, 2005, 査読無

⑦ S. Machida, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., Atmospheric Monitoring Using Radiosonde Data for TA, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, 8, 169-172, 2005, 査読無

⑧ S. Ozawa, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., The System of DAQ for TA Surface Array, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, 8, 177-180, 2005, 査読無

⑨ N. Sakurai, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., Telescope Array; Simulation and Data Analysis, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, 8, 193-196, 2005, 査読無

⑩ S. Ogio, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, K. Kadota, H. Yoshii et al., Measurement of Chemical Composition Using Telescope Array, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, 8, 229-232, 2005, 査読無

⑪ S. Yoshida, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., Characterization of the PMTs for the Telescope Array Experiment, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, 8, 241-244, 2005, 査読無

- ⑫ H. Tokuno, F. Kakimoto, Y. Tsunesada, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., Calibration of The Telescope Array Air Fluorescence, Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference, 8, 221-224, 2005, 査読無
- ⑬ F. Kakimoto, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., The Telescope Array Experiment: Hybrid Measurement of Ultra High Energy Cosmic Rays in Northern Hemisphere, Proceedings of 28th International Cosmic Ray Conference, 2, 1029-1032, 2003, 査読無
- ⑭ Y. Arai, F. Kakimoto, S. Ogio, K. Kadota, H. Yoshii et al., The Telescope Array Experiment: An Overview and Physics Aims, Proceedings of 28th International Cosmic Ray Conference, 2, 1025-1028, 2003, 査読無

[学会発表] (計 26 件)

- ① 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 156: 大気蛍光望遠鏡観測・校正の現状, 日本物理学会第 64 回年会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学
- ② 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 157: FD ステレオイベント解析と質量組成解析, 日本物理学会第 64 回年会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学
- ③ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 146: 大気蛍光望遠鏡観測・解析の現状, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学
- ④ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 147: 大気蛍光望遠鏡・校正の現状, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学
- ⑤ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 141: 大気蛍光望遠鏡観測報告, 日本物理学会第 63 回年会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学
- ⑥ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 127: 大気蛍光望遠鏡観測状況報告, 日本物理学会第 62 回年会, 2007 年 9 月 24 日, 北海道大学
- ⑦ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 128: 大気蛍光望遠鏡エレクトロニクスと DAQ の現状, 日本物理学会第 62 回年会, 2007 年 9 月 24 日, 北海道大学
- ⑧ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 136: テレスコープアレイ検出器による極高エネ

- ルギー宇宙線のハイブリッド観測報告その 1, 日本物理学会第 62 回年会, 2007 年 9 月 24 日, 北海道大学
- ⑨ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 119: 全体報告, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 25 日, 首都大学東京
- ⑩ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 123: 大気蛍光望遠鏡全体報告, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 25 日, 首都大学東京
- ⑪ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 108: 全体報告, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 21 日, 奈良女子大学
- ⑫ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 109: 大気蛍光望遠鏡観測状況報告, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 21 日, 奈良女子大学
- ⑬ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 110: 米国ユタ州における大気蛍光望遠鏡電子回路の性能評価, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 21 日, 奈良女子大学
- ⑭ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, TA 実験 99: 大気蛍光望遠鏡全体報告, 日本物理学会第 61 回年会, 2006 年 3 月 27 日, 愛媛大学
- ⑮ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ実験 90: 全体状況, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 2005 年 9 月 14 日, 大阪市立大学
- ⑯ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ実験 95: 大気蛍光望遠鏡試験観測報告, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 2005 年 9 月 14 日, 大阪市立大学
- ⑰ 垣本史雄, 常定芳基, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ実験 96: 大気蛍光望遠鏡エレクトロニクスと DAQ の開発, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 2005 年 9 月 14 日, 大阪市立大学
- ⑱ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ実験 84: 全体計画, 日本物理学会第 60 回年会, 2005 年 3 月 24 日, 東京理科大学
- ⑲ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ実験 85: 大気蛍光望遠鏡開発状況, 日本物理学会第 60 回年会, 2005 年 3 月 24 日, 東京理科大学
- ⑳ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ計画 69: TA 全体計画, 日本物理学会 2004 年秋季大

会, 2004年9月27日, 高知大学

⑲ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ計画 71: 大気蛍光望遠鏡のPMTカメラの性能評価, 日本物理学会 2004年秋季大会, 2004年9月27日, 高知大学

⑳ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ計画 59: 全体計画について, 日本物理学会第59回年会, 2004年3月24日, 九州大学

㉑ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 多米田裕一郎 他, テレスコープアレイ計画 60: 大気蛍光望遠鏡の性能テスト, 日本物理学会第59回年会, 2004年3月24日, 九州大学

㉒ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 他, テレスコープアレイ計画 61: 大気蛍光観測用PMTカメラとエレクトロニクス, 日本物理学会第59回年会, 2004年3月24日, 九州大学

㉓ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 他, テレスコープアレイ計画 56: 全体計画について, 日本物理学会 2003年秋季大会, 2003年9月10日, 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット

㉔ 垣本史雄, 門多顕司, 吉井尚, 荻尾彰一, 他, テレスコープアレイ計画 58: 地表検出器およびFADCの性能評価, 日本物理学会 2003年秋季大会, 2003年9月10日, 宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット

[図書] (計 1件)

① 垣本史雄 他, 日本評論社, シリーズ現代の天文学第17巻「宇宙の観測Ⅲ」, 2008, 151 - 178

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

垣本 史雄 (KAKIMOTO FUMIO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 00092544

### (2) 研究分担者

荻尾 彰一 (OGIO SHOICHI)  
大阪市立大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 20242258

吉井 尚 (YOSHII HISASHI)  
愛媛大学・名誉教授  
研究者番号: 00036360

門多 顕司 (KADOTA KENICHI)  
東京都市大学・工学部・講師  
研究者番号: 00339532

常定 芳基 (TSUNESADA YOSHIKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 50401526

(3) 連携研究者  
なし