

研究種目：特定領域研究

研究期間：2003 ～ 2008

課題番号：15077204

研究課題名（和文） 地表検出器の開発と AGASA 検出器による較正

研究課題名（英文） Development of the surface detector for the Telescope Array experiment and calibration with the AGASA surface detectors

研究代表者

萩尾 彰一 (OGIO SHOICHI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20242258

研究成果の概要：山梨県で 2004 年まで稼働した明野広域空気シャワー観測装置 (AGASA) は理論的予測を超える量の極高エネルギー宇宙線フラックスを観測したが、その源は既知の天体とは同定されなかった。この結果を受けて、本計画研究では、より軽量・大型・高精度のシンチレーション地表検出器を開発・製造し、計 507 台をユタ州に展開して、大面積・高精度のテレスコープアレイ地表検出器観測装置を完成させた。本観測装置は AGASA の約 9 倍の感度を持ち、2008 年 3 月に定常観測を開始した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2003 年度	27,900,000	0	27,900,000
2004 年度	101,200,000	0	101,200,000
2005 年度	146,300,000	0	146,300,000
2006 年度	14,900,000	0	14,900,000
2007 年度	1,400,000	0	1,400,000
2008 年度	1,500,000	0	1,500,000
総計	293,200,000	0	293,200,000

研究分野：宇宙線物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線・極高エネルギー宇宙線・宇宙物理・素粒子物理・高エネルギー天文学・粒子線天文学

1. 研究開始当初の背景

東京大学宇宙線研究所明野観測所で 2004 年まで 11 年間稼働した明野広域空気シャワー観測装置 (AGASA) による観測は、極高エネルギー宇宙線について、2 つの大きな問題を提起した。

(1) 理論的なエネルギー限界よりもはるかに高エネルギーの宇宙線が観測された。
10²⁰eV 以上の宇宙線は宇宙背景放射光子と

の相互作用でエネルギー損失するため (GZK 機構)、地球で観測されるスペクトルには鋭いカットオフ (GZK 限界) が存在すると予想されていたが、AGASA の観測にはそのようなカットオフが見られなかった。

(2) これらの極高エネルギー宇宙線は全天からほぼ一様に到来していた。しかし、2 つ以上の宇宙線が同一の点から到来するように見える doublet、triplet 事象を 6 点検出した。これらの点は、既知の天体・大規模構造

と相関がなかった。

極高エネルギー宇宙線の起源候補は、電波銀河ローブ、活動銀河中心核、衝突銀河、ガンマ線バーストなど大きな広がりを持ち巨大なエネルギーを放出しているような『宇宙でもっとも活動的な天体』であると予想されているが、AGASAの検出した極高エネルギー事象の方向には、GZK機構の影響の少ない近傍3億光年以内に対応する天体はなく、極高エネルギー宇宙線の起源は謎である。

このような観測結果は多くの理論家の興味を呼び起こし、標準的な素粒子理論、宇宙論の枠組みを超えた新しい物理に基づく極高エネルギー宇宙線起源モデルも数多く提唱された。すなわち、初期宇宙に作られた宇宙紐・準安定超重粒子の崩壊・対消滅によるモデルなどである。

2. 研究の目的

本計画研究では望遠鏡アレイ実験のための地表粒子検出器アレイを建設する。すなわち、AGASA実験の用いた検出器と同一の原理に基づくシンチレーター検出器576台からなる空気シャワー地上検出器アレイを建設する。この装置感度は、その展開範囲面積と観測可能視野の広さからAGASAの約9倍となる。さらに、他の計画研究で建設される「大気蛍光望遠鏡」との同時観測により、エネルギー測定系の系統誤差を減じ、GZK限界を超える極高エネルギー宇宙線の存在について決定的な結論を導く。

地表検出器の信号読み出しに高速フラッシュADCを利用することによって、時間分解能、すなわち到来方向分解能をAGASAより向上させ、この高空間分解能と高装置感度によって極高エネルギーの点源の存在についての決着をつけ、点源天体の同定を通じて粒子線天文学の開拓を目指す。

3. 研究の方法

本計画研究は以下の3段階で進められた。

(1) 望遠鏡アレイ実験用3m²シンチレーター地表検出器の開発。すなわち、シンチレーター・波長変換ファイバーの形状および配置方法を検討し、信号読み出し・電源制御・無線通信のためのエレクトロニクスを新たに開発した。

(2) 検出器の設置作業と無線通信塔の建設。

(3) データ収集システムの構築、データ解析、定常観測の実施。

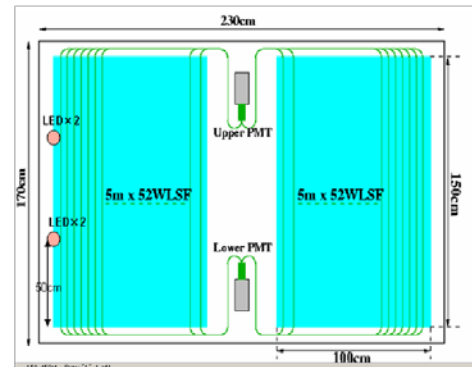


図1：地表検出器の内部構造図

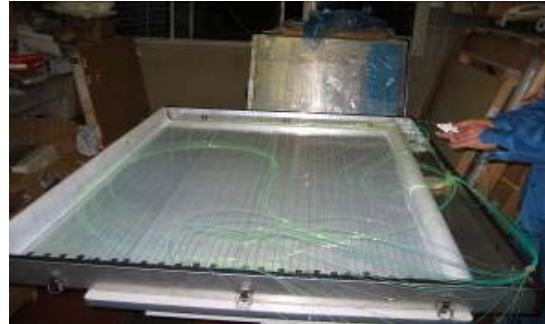


図2：地表検出器内部



図3：地表検出器読み出し電子回路。50MHz 12bit ADCで波形を記録し、無線LANモデムで通信塔まで送り出す。時間記録はGPSのタイムスタンプで行う。

4. 研究成果

(1) 地表検出器の開発

開発した地表検出器は、1.5m x 1m x 1.2cmのプラスチックシンチレーター4枚からなり、有効検出面積3m²、上下2層となっている(図1、図2)。シンチレーター上面に張られた波長変換ファイバー(208本)を通じて、光は光電子増倍管(ETL 9124SA、上下層各1本)に送られ、電気信号に変換される。このファイバー読み出しによって、有効検出面積内での応答一様性10%以下を実現した。

信号読み出し電子回路には50MHz、12ビットのFADCを採用した。粒子到着時刻記録はGPSのタイムスタンプで行われ、検出器間の絶対時刻のずれは20ns以下であることを確認した(図3)。

AGASA が 2004 年にシャットダウンされたため、当初計画していた AGASA 検出器との十分な較正は達成できなかった。しかし、GEANT4 検出器シミュレーションライブラリを利用したシミュレーション計算を精力的に行い、両者の特性を研究した。また、シミュレーションと実際の検出器を比較し、シミュレーションの十分な妥当性も確認した (図 4)。

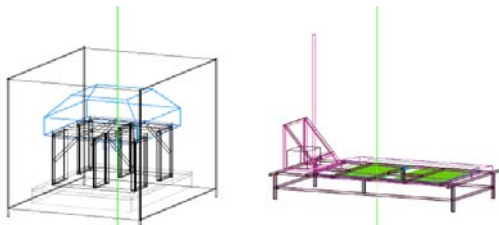


図 4 : GEANT4 を用いてモデリングされた AGASA、テレスコープアレイの地表検出器。



図 5 : 設置された地表検出器。発電のための太陽電池パネル、通信のための無線 LAN アンテナが見える。自然環境への配慮から、ヘリコプターによって設置点まで運搬され、設置された。

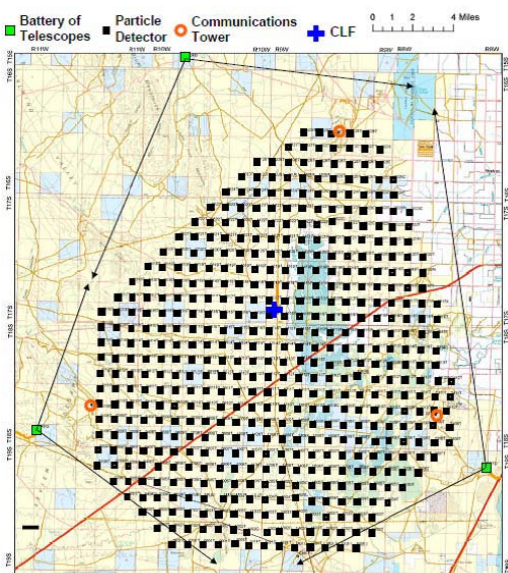


図 6 : 地表検出器の配置図。黒■が地表検出器の設置点をあらわす。橙○は地表検出器のための通信中継塔で、制御はデルタ市内のミラード郡宇宙線センターから行われている。

(2) 地表検出器アレイの建設

製作された地表検出器は 507 台で、これらは米国ユタ州デルタ市近郊の砂漠地帯に設置された。設置間隔は約 1.2km、総面積は 680km² (AGASA の約 7 倍) で、北半球最大の極高エネルギー宇宙線観測装置である。設置は平成 17 年(2005 年)末に開始され、平成 20 年(2008 年)初めに完了した (図 5、図 6)。

(3) 地表検出器アレイによる観測

平成 17 年 (2005 年) 末から試験観測が始まり、平成 20 年 (2008 年) 3 月から全 507 台での定常観測が開始され、現在も継続中である。データ収集のためのトリガー条件は、隣接する 3 台以上の検出器へ 3 粒子以上の同時入射で、現在約 40 イベント/日でデータ収集が行われている。検出された事象例を図 7 に示す。検出器の感度・温度などの情報は 10 分ごとに中央に送られ、モニターされている。そのモニター例を図 8 に示す。

本実験による最初の 1 年間の定常観測による学術的成果は、2009 年の第 31 回宇宙線国際会議で報告される予定である。

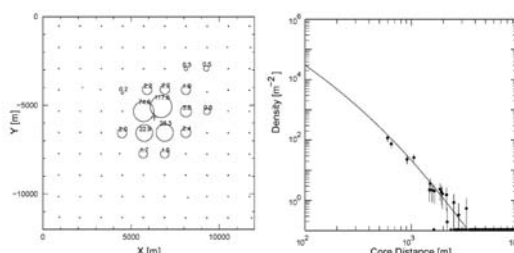


図 7 : 地表検出器で検出された極高エネルギー事象の例。16 台の検出器によって粒子が記録された。右は同じ事象の粒子数密度横方向分布である。

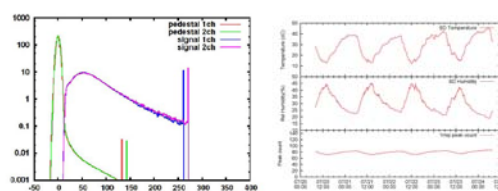


図 8 : (左) 増幅率の較正は、突き抜ける宇宙線 μ 粒子の信号強度を記録して行う。約 700Hz の信号を全ての検出器で蓄積し、10 分間に 1 度通信塔に向けて送り出す。この図には、上下 2 層のシンチレーターの信号強度分布と、ペダスタル分布がプロットされている。(右) オンラインで記録された、(上から) SD の温度、湿度と μ ピークの 4 日間の変動を示す。

テレスコープアレイ実験は平成 21 年度 (2009 年度) から 5 年間の特別推進研究に採択された。これによって定常運転をさらに 5 年間継続する。この間に $4 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上の宇宙線事象を 500 例、大気蛍光望遠鏡とのハイブリッド検出事象を 800 例蓄積すると見込

んでいる。この北半球最大の統計量に基づき、
①極高エネルギー宇宙線の起源天体の同定、
②GZK 限界の存否の決定、③極高エネルギー
宇宙線粒子種の特定、の3つの目標の達成を
目指す。

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 19 件)

①H.Tokuno, S.Ogio(8/19), et al., “On site
calibration for new fluorescence detectors
of the Telescope Array experiment”, Nucl.
Inst. and Meth., 査読有, **A601**(2009)364-371

②H.Tokuno, Y.Hayashi(24/111),
K.Honda(29/111), S.Kawakami(43/111),
T.Nakamura(58/111), S.Ogio(61/111), et al.,
“The Telescope Array experiment: Status
and Prospect”, J. of Phys.: Conf. Ser., 査読
無, **120**(2008)062027:1-3

③H.Kawai, T.Nakamura(35/92),
Y.Hayashi(40/92), S.Kawakami(41/92),
S.Ogio(44/92), K.Honda(88/92), et al.,
“Telescope Array Experiment”, Nuc.
Phys.(Proc. Suppl.), 査読無,
175-176(2008)221-226

④Y.Tameda, S.Ogio(5/14), et al., “Trigger
system for the TA fluorescence detector”,
Physica E, 査読無, **40/2**(2007)430-433

⑤K.Kasahara, T.Nakamura(46/111),
Y.Hayashi(53/111), S.Kawakami(54/111),
S.Ogio(57/111), K.Honda(105/111), et al.,
“Status and Prospect of Telescope Array
(TA) Experiment”, Proc of 30th
International Cosmic Ray Conference, 査
読無, (2007)0955

⑥S.Ogio(1/6), et al., ”The First
Observation with the Fluorescence
Detectors of the Telescope Array
Experiment”, Proc of 30th International
Cosmic Ray Conference, 査読無,
(2007)0847

⑦Y.Tameda, S.Ogio(7/12), et
al., ”Characteristics and Performance of
the Electronics for the Fluorescence
Detectors of Telescope Array”, Proc of 30th
International Cosmic Ray Conference, 査
読無, (2007)0790

⑧H.Tokuno, S.Ogio(7/15), et al., “Data

Acquisition System of the Air Fluorescence
Detectors for the Telescope Array
Experiment”, Proc of 30th International
Cosmic Ray Conference, 査読無,
(2007)0795

⑨H.Tokuno, S.Ogio(10/19), et al.,
“Calibration and Monitoring of the Air
fluorescence Detectors for the Telescope
Array Experiment”, Proc of 30th
International Cosmic Ray Conference, 査
読無, (2007)0792

⑩S.Ozawa, S.Kawakami(3/12), et al.,
“Data Acquisition System of Surface
Detector Array of the Telescope Array
experiment”, Proc of 30th International
Cosmic Ray Conference, 査読無,
(2007)1028

⑪H.Kawai, T.Nakamura(29/71),
Y.Hayashi(33/72), S.Kawakami(34/72),
S.Ogio(38/72), K.Honda(70/72), et al.,
“Telescope Array: Status and Prospect”,
Proc. of 29th International Cosmic Ray
Conference, 査読無, **8**(2005)141-144

⑫S.Ogio(1/4), et al. “Telescope Array:
Progress of Fluorescence Detector”, Proc. of
29th International Cosmic Ray Conference,
査読無, **8**(2005)173-176

⑬S.Machida, S.Ogio, and F.Kakimoto,
“Atmospheric Monitoring Using
Radiosonde Data for TA”, Proc. of 29th
International Cosmic Ray Conference, 査
読無, **8**(2005)169-172

⑭Y.Hayashi(1/10), S.Kawakami(2/10), et
al., “Performance of the Surface
Scintillation Detector for the Telescope
Array”, Proc. of 29th International Cosmic
Ray Conference, 査読無, **8**(2005)161-164

⑮H.Kawai, T.Nakamura(29/71),
Y.Hayashi(33/72), S.Kawakami(34/72),
S.Ogio(38/72), K.Honda(70/72), et al.,
“Telescope Array: Progress of Surface
Array”, Proc. of 29th International Cosmic
Ray Conference, 査読無, **8**(2005)181-184

⑯Y.Arai, K.Hashimoto(6/40),
Y.Hayashi(7/40), K.Honda(10/40),
S.Kawakami(17/40), T.Nakamura(20/40),
S.Ogio(21/40), T.Yoshikoshi(40/40), et al.,
“The Telescope Array: An Overview and
Physics Aim”, Proc. of 28th International

Cosmic Ray Conference, 査読無,
2(2003)1025-1028

⑬F.Kakimoto, S.Ogio(2/14), et al., “The Telescope Array Experiment: Hybrid Measurement of Ultra High Energy Cosmic Rays in Northern Hemisphere”, Proc. of 28th International Cosmic Ray Conference, 査読無, 2(2003)1029-1032

⑭M.Chikawa, K.Hashimoto(3/18), Y.Hayashi(4/18), K.Honda(7/18), S.Kawakami(9/18), T.Yoshikoshi(18/18), “The Telescope Array Experiment: The Search for the Clusters in the Northern Sky with A Large Scintillator Array”, Proc. of 28th International Cosmic Ray Conference, 査読無, 2(2003)1033-1036

⑮M.Takeda, K.Honda(3/32), S.Kawakami(3/32), et al., “Energy determination in the Akeno Giant Air Shower Array experiment”, Astropart. Phys., 査読有, 19(2003)447-462

[学会発表] (計 9 件)

①荻尾彰一、招待講演「北半球における観測—Telescope Array 実験の現状」、日本物理学会、宇宙線・宇宙物理領域他合同シンポジウム、2007年9月23日、北海道大学

②荻尾彰一、「The First Observation with the Fluorescence Detectors of the Telescope Array experiment」、30th International Cosmic Ray Conference, 2007年7月7日、Merida(Mexico)

③本田建、「テレスコープアレイ実験 116 : 地表粒子検出器用ソーラーシステム」、日本物理学会、2006年9月21日、奈良女子大学

④荻尾彰一、招待講演「Telescope Array Project」、14th International Symposium for Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 2006年8月18日、威海(中国)

⑤荻尾彰一、「テレスコープアレイ実験 90 : 全体状況報告」、日本物理学会、2005年9月14日、大阪市立大学

⑥荻尾彰一、「Telescope Array: Progress of Fluorescence Detector」、29th International Cosmic Ray Conference, 2005年8月6日、Pune(India)

⑦川上三郎、「Telescope Array: Progress of Surface Array」、29th International Cosmic

Ray Conference, 2005年8月6日、Pune(India)

⑧本田建、「テレスコープアレイ実験 82 : ソーラーパネルによる地表検出器の電力供給システム」、日本物理学会、2004年9月27日、高知大学朝倉キャンパス

⑨川上三郎、「The Telescope Array Experiment: The search for the clusters in the northern hemisphere sky with a large scintillator array」、28th International Cosmic Ray Conference, 2003年8月4日、つくば 国際会議場(つくば市、日本)

[その他]

[報道関連情報] (計 10 件)

①日刊工業新聞記事、2008年8月26日、高エネルギー宇宙線観測」

②朝日新聞記事、2008年8月25日、「『スーパー宇宙線』観測へ」

③ニュートンムック 『未解決の天文学』第8章：超高エネルギー宇宙線、2008年4月15日

④Science, “Little” Cosmic Ray Observatory Aims to Make a Big Mark”, pp. 400, vol. 319, 25 Jan. 2008

⑤日本経済新聞社「かがく Café」記事、2007年1月28日、「スーパー宇宙線が見つければ、物理学の定説が大きく揺らぎます」

⑥ニュートン記事、2007年1月号、「相対性理論をゆるがす“スーパー宇宙線”の謎」

⑦日経サイエンス記事、2006年9月号、「超高エネルギー宇宙線の謎を解く」

⑧朝日新聞記事、2006年2月15日、「探せスーパー宇宙線」

⑨山梨日日新聞、2005年4月22日、「最強宇宙線への挑戦を「投影」」

⑩Millard County Chronicle Progress, “Proposed detectors for Telescope Array being staked”, June 17, 2004.

[アウトリーチ情報] (計 4 件)

①Millard County Cosmic Ray Center (ユタ州デルタ市)。データ収集・観測制御拠点兼ビジターセンター(運営: ユタ大学)。

②テレスコープアレイ完成記念講演会・祝賀

会、記者発表。東京大学。2008年8月25日。

③Millard County Cosmic Ray Center 開所式。
デルタ市長、ユタ大学副学長他出席。2006年3月20日。

④山梨科学館プラネタリウム番組「最強宇宙線の謎ー明野からの挑戦」。山梨科学館。2005年4-9月。

[ホームページ情報] (計3件)

①<http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp/kakenhi/>

② http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp/index_jp.html

③ <http://www.telescopearray.org/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

(平成19,20年度)

荻尾 彰一 (OGIO SHOICHI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：20242258

(平成15-18年度)

川上 三郎 (KAWAKAMI SABURO)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：40047337

(2)研究分担者

(平成15-20年度)

林 嘉夫 (HAYASHI YOSHIO)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：00176337

(平成15-19年度)

本田 建 (HONDA KEN)

山梨大学・
大学院医学工学総合研究部・教授
研究者番号：10115321

(平成15-19年度)

中村 亨 (NAKAMURA TORU)

高知大学・理学部・准教授
研究者番号：90243815

(平成17,18年度)

荻尾 彰一 (OGIO SHOICHI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：20242258

(平成15,16年度)

吉越貴紀 (YOSHIKOSHI TAKANORI)

東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号：30322366

(平成15,16年度)

橋本勝巳 (HASHIMOTO KATSUMI)

山梨大学・教育人間科学部・助手
研究者番号：80242626

(3)連携研究者

(平成20年度)

本田 建 (HONDA KEN)

山梨大学・
大学院医学工学総合研究部・教授
研究者番号：10115321

(平成20年度)

中村 亨 (NAKAMURA TORU)

高知大学・理学部・准教授
研究者番号：90243815