

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20403005

研究課題名(和文) チベットにおける高エネルギー天体現象の系統的研究

研究課題名(英文) Systematic study of high-energy celestial phenomena in Tibet

研究代表者

湯田 利典 (YUDA TOSHINORI)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：60092368

研究成果の概要(和文)：2004年秋に完成したヤンパーチン(チベット、標高4300m)の空気シャワー装置(Tibet-III AS array)を用いて、高エネルギー宇宙線の研究を行なっている。この装置は面積0.5 m²のシンチレーション検出器約800台を7.5m間隔の基盤目状に配置したもので、有効面積は約37,000 m²である。この実験により、かに星雲など活動天体からのガンマ線照射、 $2 \times 10^{14} - 10^{17}$ eVの広いエネルギー領域に亘る一次宇宙線のエネルギースペクトル、10TeV領域宇宙線強度の恒星時異方性、銀河宇宙線が作る太陽の影の年変化について新たな結果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：A study of high-energy cosmic rays has been continued using the air shower array at Yangbajing (4300 m above sea level) in Tibet. The present array (Tibet-III AS array), completed in the late fall of 2004, consists of about 800 scintillation counters of each 0.5 m² which are placed on a lattice with 7.5m spacing, covering about 37,000m². From this experiment, we obtained new results on the gamma-ray emission from the Crab Nebula and other sources, all-particle energy spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range of $2 \times 10^{14} - 10^{17}$ eV, sidereal anisotropy of 10-TeV cosmic-ray intensity and yearly variation of the Sun's shadow by Galactic cosmic rays.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：宇宙線物理学

科研費の分科・細目：数物系科学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ヤンパーチン、空気シャワー観測装置、knee領域、宇宙ガンマ線、太陽の影、宇宙線異方性、水チェレンコフ・ミュオン検出器、一次宇宙線

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線は1912年ヘスにより発見されたが、その起源及び加速機構については未だ謎に包まれている。現在、TeV(10^{12} eV)ガンマ線観測の主流は解像型空気チェレンコフ望遠鏡(IACT)である。とくに、

2003年から南アフリカのナムビアで稼働を始めたH.E.S.S.グループはTeVガンマ線天体を数多く発見した。ガンマ線を放射する天体は銀河面に集中する超新星残骸がかなりの割合を占めるが、その種類はさまざまでありガンマ線発生

機構の多様性を示唆している。また、「チャンドラ」と「すざく」などX線観測衛星は超新星残骸での磁場の大きさと電子の加速時間について興味ある結果を与え、高エネルギー宇宙線の加速場所が超新星残骸であることを強く示唆しているが、まだその確定に至っていない。エネルギーの低いガンマ線領域では電子による逆コンプトンガンマ線成分が卓越するため、ハドロン起源のガンマ線の抽出は難しいことが分かった。この解明には、100TeV 領域のガンマ線天体の観測が重要であると認識されるようになり、いくつかの大型計画が提案された。加えて、2008年頃に打ち上げ予定のGLASTはガンマ線天文学に新たな展開をもたらすと期待されていた（この衛星は2008年6月に打ち上げられ、Fermi/LAT衛星と命名された。現在までに、数多くのGeVガンマ線天体を発見している）。

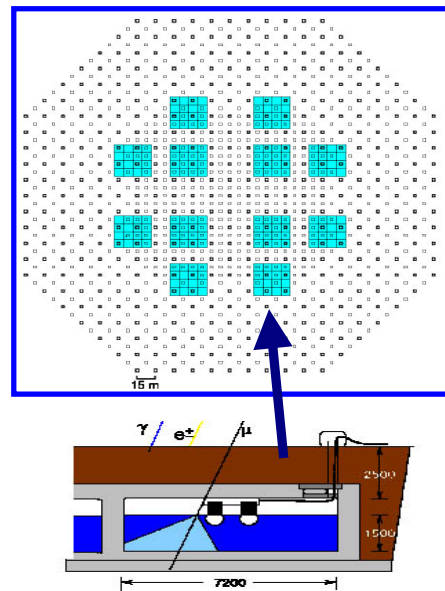
- (2) 宇宙線の加速に関連して、観測されている宇宙線のエネルギースペクトルの 10^{15} - 10^{16} eV領域に現れる折れ曲がり(kneeと呼ばれている)の起源については依然として解決を見ていない。最近、南極周回気球などによる直接観測の結果も報告されているが、そのエネルギー上限はせいぜい 10^{14} eVでありknee領域を超えない。チベットの宇宙線実験は世界で初めてknee領域での一次陽子及びヘリウム成分のエネルギースペクトルを観測し、これら軽粒子はこの領域の宇宙線の主成分ではないことを示した。さらに、鉄など重原子核の観測を行なうことにより、宇宙線の起源及び超新星残骸での加速エネルギーの限界を明確にできる。重粒子による空気シャワーの観測は4000mを超える高山でのみ可能である。
- (3) 太陽による銀河宇宙線の遮蔽効果、「太陽の影」の時間変動による太陽の近傍磁場の研究は本実験が切開いた分野であり、他の方法では得られない太陽活動と太陽近傍磁場変動について新たな知見を得ることができる。これまでの太陽の影の変動は太陽磁場のポテンシャルモデルで概ね説明できるが、データの統一的な説明は難しい。今後のデータの収集と詳細なモンテカルロ計算が必要とされていた。
- (4) 宇宙線の恒星時異方性については、チベット実験はこれまでにない高精度のデータを提供し、世界を完全にリードしている。とくに、恒星時4-7時方向にテイルイン(tail-in)異方性がTeV以下で観測されているが、この異方性はチベット実験によって100TeV領域まで続くことが確かめられ、長島らのモデルの再検討が迫

られている。加えて、この実験により白鳥座領域にも異方性が発見され、これは宇宙線の生成によるものと示唆された。最近Milagro実験はこの領域にいくつかのガンマ線点源を検出したが、これらはチベットの結果とほぼ一致している。

2. 研究の目的

中国と共同で、ヤンパーチン（チベット、標高4,300m）に有効面積約37000m²の空気シャワー観測装置（Tibet-III AS array）を2004年秋に完成させ（図1）、高エネルギー宇宙線の研究を行なっている。本研究の主な目的は、(1) TeV以上の高エネルギーガンマ線を放射する活動的天体の探索と観測、(2) Kneeを含む“ 10^{14} — 10^{17} eV”エネルギー領域の一次宇宙線の研究、(3) “太陽の影”の時間変化と太陽近傍及び太陽風磁場構造の変動の研究、及び、(4) 太陽系及び銀河系空間における宇宙線変動とその異方性の解明など、高エネルギー宇宙線に起因する天体現象を系統的に研究する。本研究では、これらの研究をさらに発展させると同時に、数10TeV領域の宇宙ガンマ線の検出感度を飛躍的に上げるため、このアレイの中に空気シャワー中のミューオン数を計測するための総面積10000m²規模の水チェレンコフ・ミューオン検出器（MD）の設置計画を推進する。このために、本研究期間内にまず100m²規模の水

Tibet-III AS Array 図1



水チェレンコフ検出器

チェレンコフ装置を完成させ、その性能テストとデータの評価を行なう。これからMD装置のデザイン及びアレイ内の配置を最適化し、まず3分の1規模（約3000m²）のMD装置の建設を目指す。

3. 研究の方法

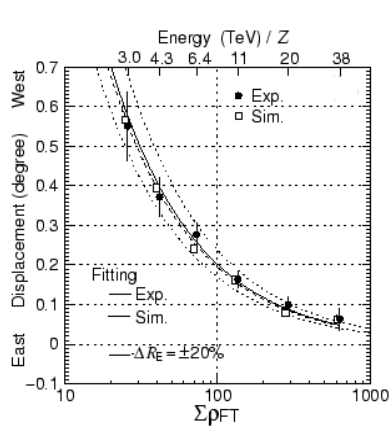
本研究で行う高エネルギー宇宙線の観測は各断面積が 0.5 m^2 のシンチレーション検出器 800 台を 7.5m 間隔の基盤目状に配置した空気シャワー観測装置 (図 1) を用いて行なう。検出器がカバーする領域は約 37000 m^2 であり、約 3 TeV 以上の宇宙線シャワーの到来方向、エネルギーを精度良く観測できる。また、ヤンパーチンは 4300m の高度にあるため、knee 領域の一次宇宙線をバイアス無しに観測できるのが特徴である。

観測データはテープにより、定期的に日本に郵送され、東大宇宙線研究所の計算機システムに保管される。各大学の共同研究者はネットワークを通じて自由にデータの解析などができるようになってきている。これらのデータを解析することにより、目的とする研究テーマについて物理的な結果を得ることができる。

近い将来、空気シャワー装置の中にシャワー中のミューオン数を計数するために、12 台の MD アレイを設置する予定である (図 1)。このミューオン検出装置は 2.5m の地下に設置され、1 GeV 以上のミューオンを検出できる。各 MD は断面積約 800 m^2 、水深 1.5m のプールであり、20 インチの光電子増倍管 2 本を下向きに取り付け壁での反射チェレンコフ光を検出するように設計されている。MD アレイの総面積は約 10000 m^2 になる。これが完成すると、100TeV ガンマ線を殆どバックグラウンドフリーで検出できるようになる。本研究期間の間に 4 台の MD を設置する。

4. 研究成果

本研究は、これまでに、宇宙ガンマ線のアレイによる世界最初の検出、knee 領域の一次宇宙線スペクトルの観測、太陽の影に対する



銀河宇宙線がつくる月の影の西側への移動角度と入射宇宙線のエネルギーとの相関。これから数 TeV の宇宙線のエネルギーの絶対値が 20% の精度で決まることが明らかとなった。

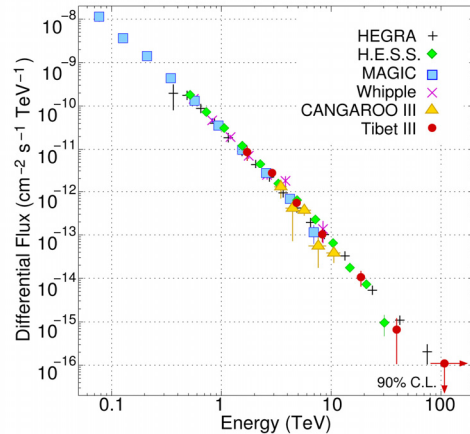
太陽磁場効果の世界最初の観測、宇宙線の強度異方性の精密観測とそのエネルギー依存性、月の影の地磁気効果を用いた入射宇宙線のエネルギー値の絶対較正 (図 2) など、数多くの成果をあげている。

このように、本装置はその規模と精度において他の同種実験の追随を許さない。また、高山の利点が最大限に発揮された多目的宇宙線実験として極めてユニークであり、その国際的評価は高い。

本実験の主要な研究成果は以下の通りである。

- (1) 月の影によるシャワーエネルギー値の絶対較正を行なったデータに基づいて、かに星雲からのガンマ線のエネルギースペクトルを求めた (図 3)。空気シャワー装置によるかに星雲からのガンマ線観測は

図 3

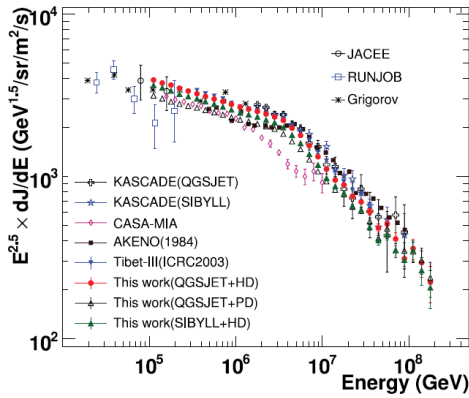


かに星雲からのガンマ線スペクトル

本実験が世界で最初である。この結果は観測方法が異なるチェレンコフ望遠鏡の結果と良く一致し、両者の絶対値の比較が可能となった。他に、宇宙線の異方性の研究から、白鳥座領域にいくつかの広がったガンマ線源候補を発見した。さらに、Fermi/LAT 衛星で発見された北天の 27 個の天体について TeV ガンマ線の探索を行ない、いくつかの天体について有意さを示唆する結果を得た。これは MD アレイとの連動によって確認できる。

- (2) Knee 領域を含む $2 \times 10^{14} - 10^{17} \text{ eV}$ の広いエネルギー範囲に亘る一次宇宙線の全粒子スペクトルを求め、 $4 \times 10^{15} \text{ eV}$ 近辺に鋭いスペクトルの折れ曲がりが存在することを明らかにした (図 4)。この折れ曲がりの起源に関していくつかのモデルが議論されている。

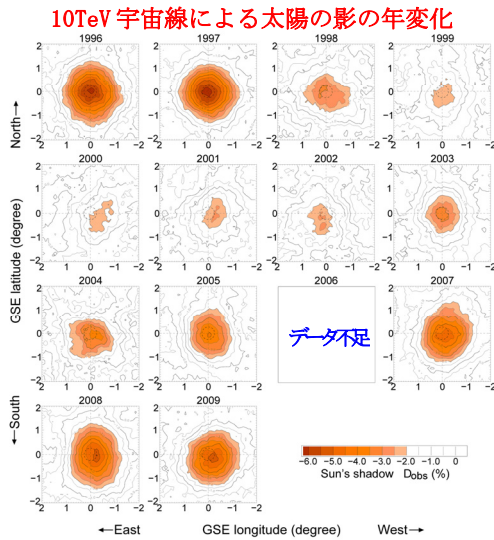
図 4



Knee 近辺の一次宇宙線のエネルギースペクトル。チベットの結果のモデルの依存性は他に較べて極めて小さい。

- (3) 太陽活動の第 23 期サイクルに亘る太陽の影の位置と深さの年変動のデータを得ることができた。図 5 は太陽を中心にした 4 度×4 度領域の宇宙線数減少の度合いを示している。太陽の大きさは直径約 0.5 度の円である。太陽活動は 1996-1997、2007-2009 年は静穏期、2000-2003 年は活動期に対応している。太陽活動が活発になると、太陽近傍の磁場強度が増すため、太陽の影は浅くなることが容易に理解できる。

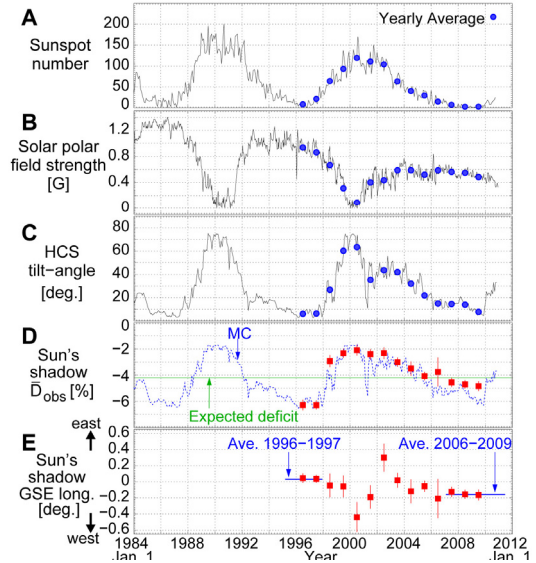
図 5



観測された太陽表面の黒点磁場及び惑星間空間磁場（太陽風磁場）の中での銀河宇宙線の軌道計算を行ない、観測された太陽の影の深さとその時間変動の傾向は概ね再現できるが、その絶対値に少し差があることが判明した（図 6）。とくに、太陽の影の深さと磁気中性面の傾き（tilt angle）が良い相関を持っていることが分かった。また、影の中心の南北方向へのずれが極域磁場の構造を

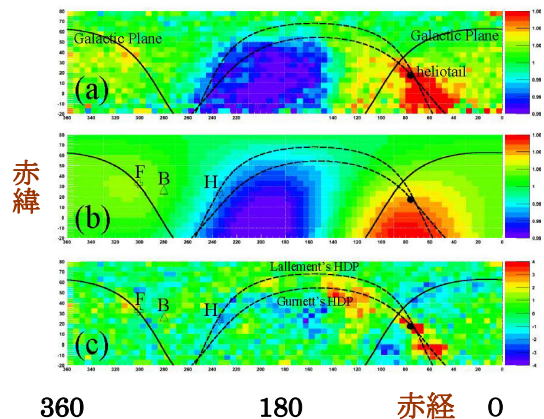
決める双極子磁場の変動に関係している。これらの結果は、太陽の影の精密観測により、観測が難しい太陽近傍の大局的磁場構造について新たな情報が得られることを示唆している。

図 6



- (4) チベットの高頻度空気シャワー装置は宇宙線の異方性の研究に最適である。図 7 (a) はチベットで観測された 7 TeV 宇宙線強度の異方性の 2 次元分布である。右横の色のスケールは赤の方向が過剰、青の方向が欠損の度合いを示す。黒の実線は銀河面を表す。赤経が 150° ~ 200° と 40° ~ 90° の広い領域に亘って見られる二つの異方性はそれぞれ loss cone, tail-in と呼ばれており、その振幅の大きさの最大値は 0.1% 程度である。

● Heliotail 方向 (75.9°, 17.4°) 図 7

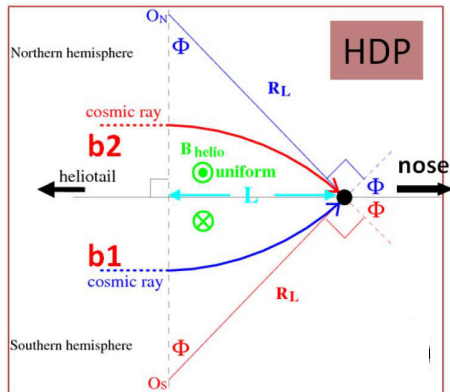


360 180 赤経 0

これら広域の異方性は銀河内の宇宙線のローカルな流れの方向を表し、とくに、太陽圏を取り囲む数パーセク (pc) スケールの星間空間の磁場構造が効いていると考えられている。そこで、図 7 (b) のようなグローバルな異方性分布を仮

定し、この分をデータから引くと図7(c)に示すような局所的な異方性成分が残る。この成分が太陽磁気圏の heliotail に起因する異方性である。

図 8



すなわち、このモデルでは、heliotail 方向からの宇宙線の流れは図8のようになる(太陽から $L=100\sim 300$ AU の距離にあるヘリオポーズ内の磁場構造が効く。宇宙線のエネルギーは数~数 10 TeV)。

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 11 件)

- ① M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino (17), N.Hotta(18), M.Ohnishi(43), A.Shiomi (54), M.Takita (57), N.Tateyama (59), T.Yuda(77) et al.(85), Cosmic ray energy spectrum around the knee obtained by the Tibet experiment and future prospects, *Advances in Space Research*, **47**, 629-639 (2011), 査読有
- ② M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(18), N.Hotta(19), M.Ohnishi(45), A.Shiomi (53), M.Takita (56), N.Tateyama (58), T.Yuda(75) et al.(84), Cosmic ray energy spectrum around the knee observed with the Tibet air shower experiment, *Astrophys. Space Sci. Trans.*, **7**, 15-20 (2011) 査読有,
- ③ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(18), N.Hotta(19), M.Ohnishi(45), A.Shiomi (53), M.Takita(56), N.Tateyama(58), T.Yuda(75) et al.(84), Heliospheric signatures seen in the sidereal anisotropy of high energy galactic cosmic ray intensity, *AIP Conf. Proc.*, **1302**, 285-290 (2010), 査読有
- ④ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(18), N.Hotta(19), M.Ohnishi(45), A.Shiomi (53), M.Takita (56), N.Tateyama(58), T.Yuda(75) et al.(84), Observation of TeV
- ⑤ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(18), N.Hotta(19), M.Ohnishi(46), A.Shiomi (54), M.Takita (58), N.Tateyama(60), T.Yuda(77) et al.(86), On Temporal Variations of the Multi-TeV Cosmic Ray Anisotropy Using the Tibet III Air Shower Array, *ApJ*, **711**, 119-124 (2010), 査読有.
- ⑥ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(17), N.Hotta(18), M.Ohnishi(43), A.Shiomi (53), M.Takita(56), N.Tateyama(58), T.Yuda(76) et al.(84), Recent results on gamma-ray observation by the Tibet AS array and related topics, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **78**, 88-91 (2009), 査読有.
- ⑦ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(17), N.Hotta(18), M.Ohnishi(43), A.Shiomi (53), M.Takita(56), N.Tateyama(58), T.Yuda(76) et al.(84), Chemical Composition of Cosmic Rays around the Knee Observed by the Tibet Air-Shower-Core Detector, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **78**, 206-209 (2009), 査読有.
- ⑧ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(17), N.Hotta(18), M.Ohnishi(43), A.Shiomi(54), M.Takita(57), N.Tateyama(59), T.Yuda (77) et al.(85), Multi-TeV Gamma-Ray Observation from the Crab Nebula Using the Tibet-III Air Shower Array Finely Tuned by the Cosmic-Ray Moon's Shadow, *ApJ*, **692**, 61-72 (2009), 査読有.
- ⑨ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(17), N.Hotta(18), M.Ohnishi (43), A.Shiomi (54), M.Takita(57), N.Tateyama(59), T.Yuda(77) et al.(85), The energy spectrum of all-particle cosmic rays around the knee region observed with the Tibet-III air shower array, *Advances in Space Research*, **42**, 467-472 (2008), 査読有.
- ⑩ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino(17), N.Hotta(18), M.Ohnishi(43), A.Shiomi (54), M.Takita(57), N.Tateyama(59), T.Yuda(77) et al. (85), The all-particle spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range from 10^{14} eV to 10^{17} eV observed with the Tibet-III air shower array, *ApJ*, **678**, 1165-1179 (2008), 査読有.
- ⑪ M.Amenomori, X.I.Bi, K.Hibino (17), N.Hotta(18), M.Ohnishi(43), A.Shiomi (54), M.Takita(57), N.Tateyama(59),

Gamma Rays from the Fermi Bright Galactic Sources with the Tibet Air Shower Array, *ApJ*, **709**, L6-L10 (2010), 査読有.

T.Yuda(77) et al. (85), New Estimation of the Spectral Index of High Energy Cosmic Rays as Determined by the Compton-Getting Anisotropy, *ApJ*, **672**, L53-L56 (2008), 査読有.

[学会発表] (計 12 件)

- ① 宗田天志、チベット空気シャワー観測装置による TeV 領域での Fermi/LAT ガンマ線放射天体の探索、日本物理学会 2010 年秋大会、9 月 14 日、九工大 (九州)
- ② K.Hibino, Cosmic ray energy spectrum around the knee observed with the Tibet air shower experiment, 22nd European Cosmic Ray Symposium, Aug. 7, 2010, Turku (Finland)
- ③ 瀧田正人、チベット水チェレンコフミューオン観測装置：プロトタイプ検出器を用いた原子核宇宙線除去能力の検証、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大 (岡山)
- ④ M.Ohnishi, A northern sky survey for PeV gamma rays using the Tibet air shower array with water Cherenkov type underground muon detectors, 31st ICRC, July 10, 2009, Lodz (Poland)
- ⑤ M.Takita, Demonstration of hadronic cosmic-ray rejection power by a water Cherenkov underground muon detector with the Tibet air shower array, 31st ICRC, July 14, 2009, Lodz (Poland)
- ⑥ M.Nishizawa, Sun's Shadow in Changing Phase from the Solar Cycle 23 to 24 Observed with the Tibet Air Shower Array, 31st ICRC, July 14, 2009, Lodz (Poland)
- ⑦ 廣光佑亮、チベット水チェレンコフミューオン観測装置による宇宙線核種弁別、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 28 日、立教大 (東京)
- ⑧ 井上大輔、チベット水チェレンコフミューオン観測装置：ミューオン観測装置のために用いる水温・水圧測定システムの開発、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大 (東京)
- ⑨ 宗像一起、Large-scale and localized structures of the sidereal anisotropy observed with the Tibet III air shower array、日本物理学会 2008 年秋大会、9 月 21 日、山形大 (山形)
- ⑩ 佐古崇志、チベット水チェレンコフミューオン観測装置：計画概要とシミュレーション、日本物理学会 2008 年秋大会、9 月 21 日、山形大 (山形)
- ⑪ 大西宗博、チベット水チェレンコフミュー

オン観測装置：プロトタイプを用いた空気シャワー解析、日本物理学会 2008 年秋大会、9 月 21 日、山形大 (山形)

- ⑫ 川田和正、チベット水チェレンコフミューオン観測装置：プロトタイプを用いたガンマ線の探索、日本物理学会 2008 年秋大会、9 月 21 日、山形大 (山形)

[図書] (計 1 件)

- ① 湯田利典 (単著)、チベットにおける高エネルギー天体现象の観測—四半世紀を超える日中共同研究—、中国科学技術月報 27 号、全 5 頁、2009 年 (独法: 科学技術振興機構)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯田 利典 (YUDA TOSHINORI)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号：60092368

(2) 研究分担者

立山 暢人 (TATEYAMA NOBUHITO)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号：30102239

日比野 欣也 (HIBINO KINYA)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号：80260991

(3) 連携研究者

瀧田 正人 (TAKITA MASATO)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号：20202161

大西 宗博 (OHNISHI MUNEHIRO)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：10260514

堀田 直己 (HOTTA NAOKI)
宇都宮大学・教育学部・教授
研究者番号：60157039

塩見 昌司 (SHIOMI ATSUSHI)
日本大学・生産工学部・助教
研究者番号：60401288