

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19104005

研究課題名（和文）世界最高感度でのミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の研究

研究課題名（英文）High sensitivity search for ν_{μ} to ν_e oscillations

研究代表者

梶田 隆章 (KAJITA TAKAAKI)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：40185773

研究成果の概要（和文）：本研究では J-PARC を用いた T2K ニュートリノ振動実験において、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の解析を行った。その結果、予想されるバックグラウンド事象が 1.5 例のところ、電子ニュートリノ事象を 6 例スーパーカミオカンデで観測した。この結果、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の証拠を得、唯一未発見であった第 3 の振動角 (θ_{13}) は比較的大きいということがわかった。

研究成果の概要（英文）：In this research, we searched for electron-neutrino events in Super-Kamiokande in the T2K neutrino oscillation experiment with the J-PARC neutrino beam. We observed 6 such events, while the expected number of background events was 1.5. This is the indication for muon-neutrino to electron neutrino oscillations, suggesting the so-far unknown θ_{13} is rather large.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2008年度	32,600,000	9,780,000	42,380,000
2009年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2010年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2011年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
総計	79,400,000	23,820,000	103,220,000

研究分野：数物系科学

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：素粒子実験、ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

スーパーカミオカンデ、SNO、カムランド、K2Kなどの実験におけるニュートリノ振動、すなわちニュートリノの質量と混合の発見があった。これを受け、ニュートリノ質量と混合に関連した研究が世界中で進行していた。その中でも重要な実験が茨城県東海村の J-PARC 加速器とそこから 295km 離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデ間のニュートリノ振動実験 (T2K 実験) であった。この実験の主目的は、ミューニュートリノの

ビーム中からニュートリノ振動の結果現れる電子ニュートリノ事象を測定して、ニュートリノ間の混合角のうち未発見の θ_{13} 角を世界に先駆けて発見し、ニュートリノ振動の全体像を明らかにすることであった。特に、クォークの場合と違い、3 個の混合角のうち 2 個は大きいことがわかっており、残りの混合角がどの程度の大きさかを知ることは、素粒子の世界のより深い理解に向けた大きな一歩となると考えられた。

2. 研究の目的

T2K 実験においてミューニュートリノのビーム中からニュートリノ振動の結果現れる電子ニュートリノ事象を測定して、世界に先駆けて当時未知であった第3のニュートリノの混合角 θ_{13} に関する知見を得て、ニュートリノ間の混合の全体像を理解することが本研究の目的であった。

3. 研究の方法

(1) スーパーカミオカンデで観測が予想される電子ニュートリノ事象の数が小さいので、バックグラウンドの除去と検出効率の向上に努める。特に中性カレントの π ゼロ生成のバックグラウンド事象などの除去と、残るバックグラウンドの精密な理解が測定の鍵となるため、このような観点で解析ソフトウェアの改良を進める。

(2) 上記に加えて、ミューオンニュートリノの欠損を測定すると質量パラメータ (Δm_{23}^2) と混合角 θ_{23} を精密に求めることができるので、系統誤差を抑える努力を行って、これらのパラメータの精密測定も行う。

(3) それと共に、将来的にはより良くニュートリノビームを理解して、系統誤差を小さくし、精密に電子ニュートリノの出現確率を求めることが必要になる。そのために現行のT2K実験では測定していない、ビーム中心方向での1GeV以下のニュートリノのフラックスを測定する装置を開発し、より良いビームの理解に役立てる。

(4) 上記(1), (2)を進めれば、その成果がスーパーカミオカンデで観測される大気ニュートリノの解析の改良につながるので、大気ニュートリノを用いたニュートリノ振動についても研究を進める。

4. 研究成果

(1) T2K 実験において、J-PARC での最初のニュートリノの生成は 2009 年春に行われた。その後 2009 年秋からニュートリノ生成が引き続いて行われた。それと共にスーパーカミオカンデ側では、ニュートリノビームの生成を始める時期に合わせて、電子回路を入れ替えたスーパーカミオカンデのデータ解析が滞りなくできるように準備をしてきた。これら J-PARC 加速器、T2K ニュートリノビームライン、スーパーカミオカンデの努力によって、2010 年 2 月 24 日には J-PARC で生成されたニュートリノをスーパーカミオカンデで観測し、速やかに解析をして、公表することができた。

上記の発表の後も引き続きニュートリノのデータを取り続け、2011年3月11日の東日本大震災の直前までデータを取得した。スーパーカミオカンデで観測されたデータを解析した。その結果、スーパーカミオカンデで電子ニュートリノ事象が6例観測された。一方、もともとのビーム中に含まれる電子ニュートリノや中性カレントのバックグラウンド事象の合計は1.5事象、またその系統誤差は ± 0.3 と見積もられ、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の証拠を得た。この結果、唯一未発見であった第3の振動角 (θ_{13}) は比較的大きいということがわかった。この結果を論文としてまとめ、公表した。(なお、この結果はその後、原子炉を用いた実験で確認された。)

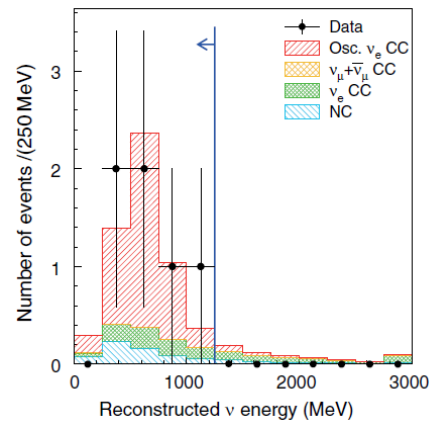


図1. T2Kで観測された電子ニュートリノ事象の再構成されたニュートリノエネルギー分布。図中で黄、緑、青のヒストグラムがバックグラウンドであり、赤のヒストグラムがミューニュートリノから電子ニュートリノへのニュートリノ振動の寄与を示す。

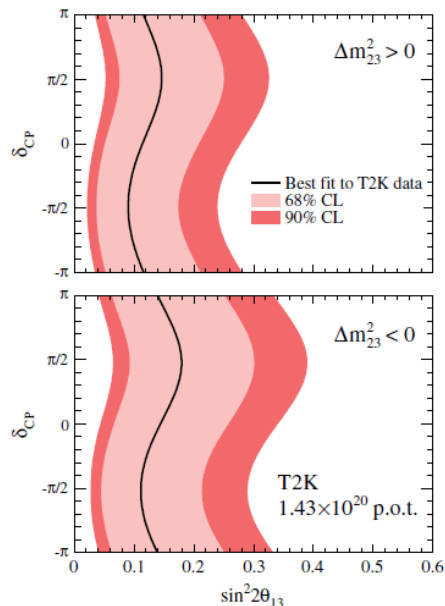


図2. 図1のデータから許される第3の混合角 θ_{13} の大きさを Δm_{23}^2 が正の場合と負の場合について未知のCP位相の関数として示した。

(2) 同じく震災前までに取得したT2K実験のデータを用いて、ミューニュートリノがどれだけニュートリノ振動で消えるかという解析も行い、先行実験と矛盾ない結果を得て、論文として公表した。

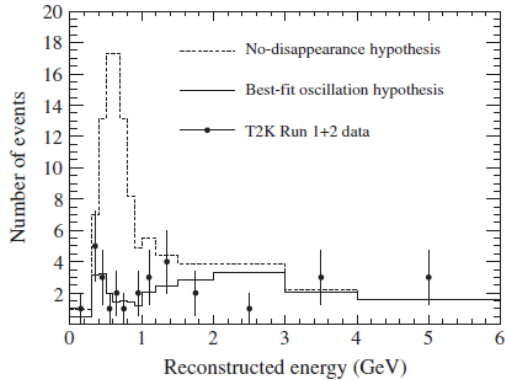


図3. T2K実験で観測されたミューニュートリノ事象の再構成されたニュートリノエネルギー分布。

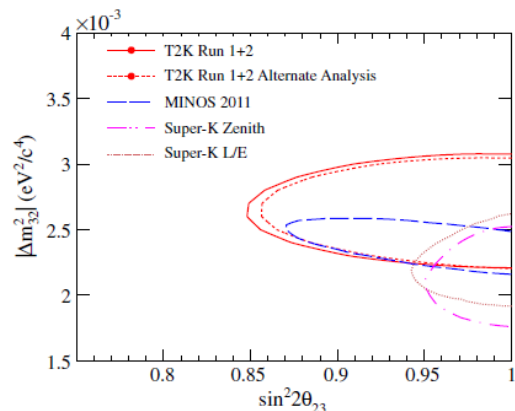


図4. Δm_{23}^2 と $\sin^2 2\theta_{23}$ の90%信頼度での許される領域。赤がT2Kの結果、青はアメリカのMINOS実験の結果、残りの2つの線はスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの解析結果。

(3) ニュートリノビーム軸の中心付近での1GeV以下のニュートリノを測定して、ビームの理解を進める装置については、スイスのベルン大学、フランスのリオン大学と共同で2011年の春にベルン大学で測定器のモジュールを作成し、春から夏にかけて宇宙線研究所で装置を組み上げ様々な試験を行い、秋に予定通りJ-PARCのニュートリノ実験室に搬入した。その後宇宙線を使って総合的な装置の試験を進めニュートリノのビームを待った。そして2012年3月にJ-PARCのニュートリノビームが本格的に地震から復活すると同時に本装置もデータの所得を開始し、解析

も開始した。



図5. T2Kニュートリノビームラインに設置された測定器の写真。2011年9月。

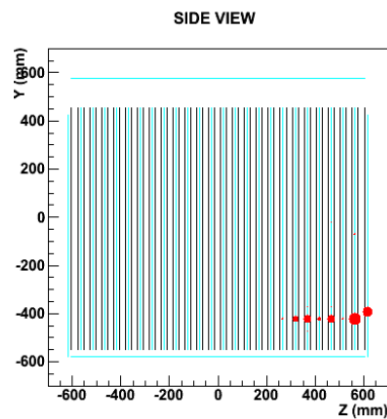
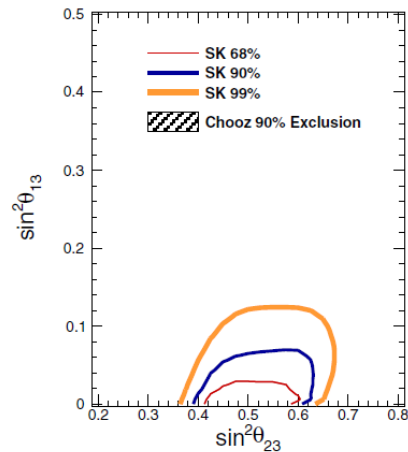


図6. 上記の写真で示した測定器で2012年1月にJ-PARC復帰後のビームコミッショニング中に観測されたニュートリノ事象。右側が下流で、生成されたミューオンが測定器を突き抜けていることがわかる。

(4) T2K実験のためにスーパーカミオカンデの解析ソフトウェアを改良したので、それを用いてスーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノに関する様々な解析を行ってきた。1例を以下に示す。



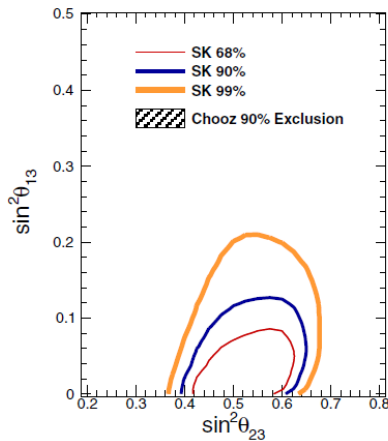


図7. スーパーカミオカンデで大気ニュートリノを用いた解析によって得られた θ_{13} に関する制限。ニュートリノの質量階層性が正の場合が上図、負の場合が下図である。大気ニュートリノでは有限な θ_{13} の証拠は得られなかった。一方で θ_{23} に関しては最も厳しい制限を与えている。

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 12 件)

- 1) "First muon-neutrino disappearance study with an off-axis beam", K. Abe, T. Kajita, J. Kameda, M. Miura, K. Okumura, Y. Obayashi et al. (T2K collaboration), Phys. Rev. D 85, 031103-1 - 8 (2012). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.031103
- 2) "Search for differences in oscillation parameters for atmospheric neutrinos and anti-neutrinos at Super-Kamiokande", K. Abe J. Kameda, M. Miura, Y. Obayashi, T. Kajita, K. Okumura, et al. (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. 107, 241801-1 - 6 (2011). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.241801
- 3) "Indication of electron neutrino appearance from an accelerator produced off-axis muon neutrino beam", K. Abe, T. Kajita, J. Kameda, M. Miura, K. Okumura, Y. Obayashi et al (T2K collaboration), Phys. Rev. Lett. 107, 041801-1 - 8 (2011). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.041801
- 4) "Study of non-standard neutrino interactions with atmospheric neutrino data in Super-Kamiokande I and II", G. Mitsuka, J. Kameda, M. Miura, Y. Obayashi, T. Kajita, K. Okumura, et al., Phys. Rev. D 84, 113008-1 - 12 (2011). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.113008
- 5) "The T2K experiment", K. Abe, T. Kajita, J. Kameda, M. Miura, K. Okumura, Y. Obayashi et al (T2K collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A 659, 106 - 135 (2011). 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2011.06.067
- 6) "Commissioning of the new electronics and online system for the Super-Kamiokande experiment", S. Yamada, K. Kaneyuki, K. Okumura, Y. Obayashi et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 57, 420 - 432 (2010). 査読有
DOI: 10.1109/TNS.2009.2034854
- 7) "Further study of neutrino oscillation with two detectors in Kamioka and Korea", F. Dufour, T. Kajita, E. Kearns, K. Okumura, Phys. Rev. D 81, 093001-1 - 9 (2010). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.093001
- 8) "Atmospheric neutrino oscillation analysis with sub-leading effects in Super-Kamiokande I, II, and III", R. Wendell, J. Kameda, M. Miura, Y. Obayashi, T. Kajita, K. Kaneyuki, K. Okumura et al., Phys. Rev. D 81, 092004-1 - 16 (2010). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.092004
- 9) "High-speed charge-to-time converter ASIC for the Super-Kamiokande detector", H. Nishino, K. Okumura et al., Nucl. Instrum. Meth. A 610, 710-717 (2009). 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2009.09.026
- 10) "Kinematic reconstruction of atmospheric neutrino events in a large water Cherenkov detector with proton identification", M. Fechner, J. Kameda, M. Miura, Y. Obayashi, I. Higuchi, T. Kajita, K. Kaneyuki, K. Okumura et al., Phys. Rev. D 79, 112010-1 - 20 (2009) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.79.112010
- 11) "Search for Matter-Dependent Atmospheric Neutrino Oscillations in Super-Kamiokande", K. Abe, J. Kameda, M. Miura, Y. Obayashi, I. Higuchi, T. Kajita, K. Kaneyuki, K. Okumura et al., Phys. Rev. D 77, 052001-1 - 6 (2008). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.77.052001
- 12) "The development of the new data acquisition system without hardware trigger for the Super-Kamiokande

experiment”, Y. Hayato, Y. Obayashi, M. Shiozawa, Y. Yamada, IEEE Trans.Nucl.Sci. 55, 683-686 (2008). 査読有 DOI: 10.1109/RTC.2007.4382832

[学会発表] (計 38 件)

- 1) 亀田純 他 T2K collaboration, “T2K 実験 ν_{μ} disappearance 研究における Super-Kamiokande 起因系統誤差の評価”, 日本物理学会(2012年3月24日, 関西学院大学).
- 2) 梶裕志 他, “The LEM experiment 運転及び first data の状況報告 “、日本物理学会(2012年3月24日, 関西学院大学).
- 3) Andrew Laing 他, “The LEM experiment: Monte Carlo production and expected efficiency”, 日本物理学会(2012年3月24日, 関西学院大学).
- 4) 奥村公宏 他 T2K collaboration, “T2K RUN1+2 データを用いた $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の解析結果”, 日本物理学会(2011年9月18日, 弘前大学).
- 5) 亀田純 他 T2K collaboration, “T2K 実験における ν_{μ} disappearance 研究の成果”, 日本物理学会(2011年9月18日, 弘前大学).
- 6) 梶裕志 他, “J-PARC ニュートリノビーム on-axis 低エネルギーフラックス測定実験 LEM の準備状況 “、日本物理学会(2011年9月16日, 弘前大学).
- 7) Andrew Laing 他, “Cosmic ray analysis and expected sensitivity of LEM”, 日本物理学会(2011年9月16日, 弘前大学).
- 8) 大林由尚 他 Super-Kamiokande collaboration, “Super-Kamiokande における大気ニュートリノ解析: タウニュートリノの最新観測結果”, 日本物理学会(2011年9月16日, 弘前大学).
- 9) T. McLachlan (for the Super-Kamiokande collaboration), “Sensitivity to Different Oscillation Parameters for ν_{μ} and $\bar{\nu}_{\mu}$ by Investigating the L/E Dependency”, 日本物理学会(2011年9月16日, 弘前大学).
- 10) Y. Obayashi, “Recent Results from Super-Kamiokande”, talk in the 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 2011年8月18-24日, Moscow, Russia
- 11) K. Okumura, “T2K neutrino oscillation results”, The 19th Particles and Nuclei International Conference (PANIC11), 2011年7月25日, MIT, Cambridge, MA, USA
- 12) Y. Obayashi, “Instrumentation and Calibration of a Water Cherenkov Detector Super-Kamiokande”, talk at the Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011) conference, 2011年6月9-14日, Chicago, USA
- 13) 梶裕志, “P35 experiment : J-PARC ニュートリノビームにおける on-axis 方向の低エネルギーフラックス測定”, 日本物理学会 (2010年9月14日, 九州工業大学)
- 14) 李 嘉 碧, 他 Super-Kamiokande Collaboration, “Full three-flavor oscillation analysis of atmospheric neutrino data observed in Super-Kamiokande”, 日本物理学会 (2010年9月11日, 九州工業大学)
- 15) 亀田純 他 T2K collaboration, “T2K 実験における ν_{μ} disappearance 研究の現状”, 日本物理学会 (2010年9月11日, 九州工業大学)
- 16) 奥村公宏 他 T2K collaboration, “T2K 実験における ν_e appearance 事象解析の現状”, 日本物理学会 (2010年9月11日, 九州工業大学)
- 17) 大林由尚 他, “T2K 実験における GPS による東海-神岡間時刻同期について”, 日本物理学会 (2010年9月11日, 九州工業大学)
- 18) 清水雄輝, “スーパーカミオカンデにおける T2K 実験データリダクション”, 日本物理学会 (2010年3月22日, 岡山大学)
- 19) 梶裕志, “Super-Kamiokande-IV 中、高エネルギー領域ニュートリノの事象再構成について” 日本物理学会 (2010年3月22日, 岡山大学)
- 20) 石原千鶴枝, 他 Super-Kamiokande Collaboration, “スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノデータを用いた全ニュートリノ振動パラメータの解析”, 日本物理学会(2010年3月21日, 岡山大学)
- 21) 奥村公宏 他 Super-Kamiokande Collaboration, “スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノデータを用いた CPT 破れの検証 “、日本物理学会 (2010年3月21日, 岡山大学)
- 22) H. Kaji, “A detector to measure neutrino beam asymmetry at the T2K ND280 hall”, Asia Science Seminar on “Frontier Science at High-Intensity Proton Accelerators”, 2009年10月19-25日, Beijing, China.
- 23) 奥村公宏 他 Super-Kamiokande Collaboration, “Super-Kamiokande IV 大気ニュートリノデータの現状 “、日本

- 物理学会 (2009年9月12日、甲南大学)
- 24) 清水雄輝 “T2K実験のためのスーパーカミオカンデにおけるデータリダクションの研究”、日本物理学会 (2009年9月11日、甲南大学)
- 25) 亀田純、“Super-Kamiokande IVに向けた検出器シミュレーションの開発”、日本物理学会 (2009年9月11日、甲南大学)
- 26) Y. Shimizu (presenter), K. Kaneyuki, Y. Obayashi, et al., “Super-Kamiokande data reduction for T2K experiment”, XXIX Physics in Collision, 2009年8月30日-9月2日、神戸。
- 27) Y. Obayashi, “Status of Super-Kamiokande and early atmospheric neutrino data from SK-IV”, 31st International Cosmic Ray Conference, 2009年7月7日-15日, Lotz, Poland.
- 28) T. Kajita, “Status and prospect of atmospheric neutrinos and long baseline studies”, talk at Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2009), 2009年7月3日, ローマ、イタリア。
- 29) 谷本菜穂、“T2K 実験レフトライトモニタープロトタイプ検出器での性能評価” 日本物理学会 (2009年3月27日、立教大学)。
- 30) 清水雄輝 他、“Super-Kamiokande における新フロントエンドボードの特性及び安定性の評価”、日本物理学会 (2009年3月27日、立教大学)。
- 31) 大林由尚、“Super-Kamiokande 新エレクトロニクスにおける時間較正”、日本物理学会 (2009年3月27日、立教大学)。
- 32) 三塚岳 他 Super-Kamiokande Collaboration, “大気ニュートリノデータを用いた Non standard interaction の研究”、日本物理学会、(2008年9月22日、山形大学)。
- 33) 奥村公宏、“Super-Kamiokande における新フロントエンドボード製品版の性能評価について”、日本物理学会、(2008年9月22日、山形大学)。
- 34) 梶裕志、“T2K 実験レフトライトモニターにおける背景事象除去方法の研究”、日本物理学会、(2008年9月20日、山形大学)。
- 35) T. Kajita, “Results from Neutrino Oscillation Experiments”, International School on Astroparticle Physics -Probing the Universe with Neutrinos -, Valencia, Spain, July, 2008.
- 36) 武長由美子 他 Super-Kamiokande Collaboration, “Super-Kamiokande に

おける太陽ニュートリノ振動パラメータを考慮した大気ニュートリノ振動解析”、日本物理学会 (2008年3月24日、近畿大学)

- 37) T. Kajita, “Long baseline Neutrino Experiments”, talk at TRIUMF Workshop on TeV Scale Physics and Neutrino Masses, 2007年10月21日, TRIUMF, バンクーバー、カナダ。
- 38) 奥村公宏 他 “Super-Kamiokande における新 DAQ システムの開発[1]: 新フロントエンドボードの開発”、日本物理学会、(2007年9月23日、北海道大学)。

[図書] (計1件)

- 1) “Landolt-Boernstein Volume 21” M. Koshiba, T. Kajita et al., (Springer, 2009), 64pp.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶田 隆章 (KAJITA TAKAAKI)
 東京大学・宇宙線研究所・教授
 研究者番号: 40185773

(2) 研究分担者

金行 健治 (KANEYUKI KENJI)
 東京大学・宇宙線研究所・准教授 {平成19年度から平成22年度}
 研究者番号: 30224629

奥村 公宏 (OKUMURA KIMIHIRO)
 東京大学・宇宙線研究所・准教授
 研究者番号: 70361657

大林 由尚 (OBAYASHI YOSHIHISA)
 東京大学・国際高等研究所数物連携宇宙研究機構・特任准教授
 研究者番号: 50345055

三浦 真 (MIURA MAKOTO)
 東京大学・宇宙線研究所・助教
 研究者番号: 10272519

亀田 純 (KAMEDA JUN)
 東京大学・宇宙線研究所・助教
 研究者番号: 70376648

樋口 格 (HIGUCHI ITARU)
 東京大学・宇宙線研究所・研究員 {平成19年度}
 研究者番号: 40447446

清水 雄輝 (SHIMIZU YUUKI)
 東京大学・宇宙線研究所・特任研究員 {平成20年度から平成21年度}
 研究者番号: 60434320

(3) 連携研究者

なし。