

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340076

研究課題名(和文) CERN LHCf 実験の解析深化と最高エネルギーへの新展開

研究課題名(英文) Deeping the analysis of the LHCf experiment and exploring the highest energy

研究代表者

笠原 克昌 (kasahara, katsuaki)

早稲田大学・理工学術院・その他招聘研究員

研究者番号：00013425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円

研究成果の概要(和文)： 10^{14} eVから 10^{20} eVに達する宇宙線の組成，起源の解明に必須のハドロン相互作用(粒子多重発生)のモンテカルロコードの検証のため，CERN LHC加速器を用い， 4×10^{14} ～ 9×10^{16} eVの領域に相当するエネルギーでの粒子発生スペクトルを宇宙線の起こす空気シャワーの発達に効く超前方領域で観測した．装置を放射線耐性の高いものに改良して対処した，ガンマ線，パイゼロ中間子，中性子について発生スペクトルを求め，結果を数種のコードと比較した．どのモデルも完璧ではないが，まったく的外なものもない．そのうちEPOSモデルが比較的良好な結果を与えることを明らかにした．

研究成果の概要(英文)：To check validity of Monte-Carlo codes of hadronic interaction (multi-particle production) models which are indispensable for clarifying the composition and origin of cosmic rays extending from 10^{14} to 10^{20} eV, we performed an experiment at CERN LHC accelerator; its laboratory equivalent energy is 4×10^{14} to 9×10^{16} eV and comparable to those of high energy cosmic rays. We upgraded the detector to be more radiation hard. We got photon, pi0 and neutron energy spectra at very forward region which is effective to the cosmic ray air shower development, and compared with several hadronic interaction models. It's found that none of them is perfect but all of them are not very far from our data. Among them, EPOS model shows relatively good agreement with the data.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：LHC 超高エネルギー宇宙線 ハドロン相互作用モデル 空気シャワー モンテカルロ

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線が発見されてから 100 年以上経過した。この間、その正体が水素原子核の陽子を主成分とする高エネルギー原子核であること、中にはエネルギーが 10^{20} eV(電子ボルト) 以上にも及ぶものがあることが判明してきた。X 線の

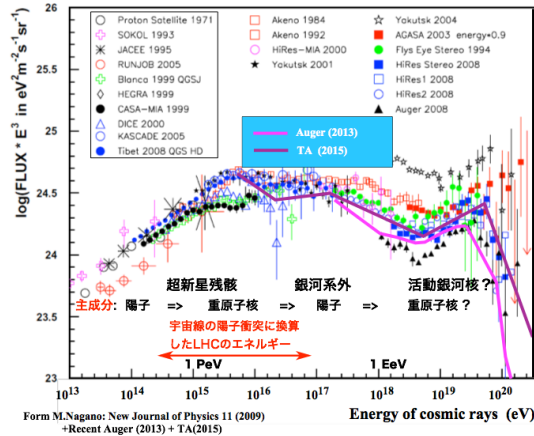


図 1: 宇宙線のエネルギースペクトル。縦軸は到来頻度に相当するが、エネルギー E の増大とともに急激に少なくなるので、 E^3 を掛けてグラフがほぼ平らになるように調節してある。LHC のエネルギー範囲を宇宙線衝突のエネルギーに換算して示してある。

エネルギーはおおよそ 10^3 eV, 原子炉中の粒子はさらにその千倍の 10^6 eV, であるから、そのさらに 1 兆倍以上の高エネルギー粒子が宇宙から飛来してきている (図 1)。その起源はどこか? 太陽は時折 10^9 eV を超えるくらいの陽子を作り出すが、それ以上の加速はできない。その千倍 (10^{12} eV) とか百万倍 ($1 \text{ PeV} = 10^{15}$ eV) の粒子はもっと特異な天体で加速されていて、超新星残骸であるという説が実証されつつある。しかしそれ以上の粒子の加速は不可能で他の特異天体や環境を考えないといけない。10PeV を超える宇宙線は銀河系外起源を考える必要があるが、1EeV (10^{18} eV) 以上になると、はるかに遠方の活動銀河核などの可能性や、さらに特異な事象を検討する必要がある。その加速機構がどうなっているのか、どのように地球まで伝播するか、粒子の主成分は何か、大きな謎である。

(2) そうした極高エネルギーの宇宙線観測をする大実験が世界で 2 つ行われている。1 つは南米で行われている米国、ヨーロッパを中心とした Auger 実験。もう 1 つは我が国主導の米国 Utah 州での TA 実験である。飛来する粒子の頻度は極めて少なく、10EeV の粒子は 1 km^2 に年

間 1 程度になる。先発の Auger 実験はかなりの統計を貯め、1 次宇宙線の主成分がエネルギーが高くなるにつれかなり重い成分に変化するという結果を出していた。また、30~50 EeV あたりからの強度の低下が観測されていた。低下は、成分が陽子だとして宇宙を満たす 2.7K 背景放射と陽子の相互作用で陽子のエネルギーが下がるために起こる (GZK カットオフ) とすると、矛盾のない結果に見える。しかし、Auger のもう一方の主張である、そのあたりでの主成分は陽子よりかなり重い原子核、というのとは矛盾することになる。そのため、GZK カットオフによる強度低下とは結論できない状態であった。一方 TA 実験は徐々に統計を貯め、その結果は Auger とは異なり、重原子核が主成分とは異なることを示唆し出していた。

(3) 低エネルギーから数 PeV までの 1 次宇宙線スペクトルは陽子主成分から鉄のような重い原子核に変化するという観測解釈が有力になりつつある。これは超新星残骸でのショック加速や銀河磁場での閉じ込めからの漏れだして説明できる。しかし、確定はしていない。10PeV を超える領域では銀河系外の陽子が再び主成分になるのか、10EeV の極高エネルギー領域にどのように接続して行くのか、など最高エネルギー領域以外でも解くべき謎は多い。TA 実験はそうした接続領域での観測もめざす TALE 実験も開始していた。

こうした宇宙線の謎を解明する手段として、我々はヨーロッパの CERN 研究所の世界最高エネルギーを生み出す LHC 加速器で、第 1 段階の実験結果を得ていた。

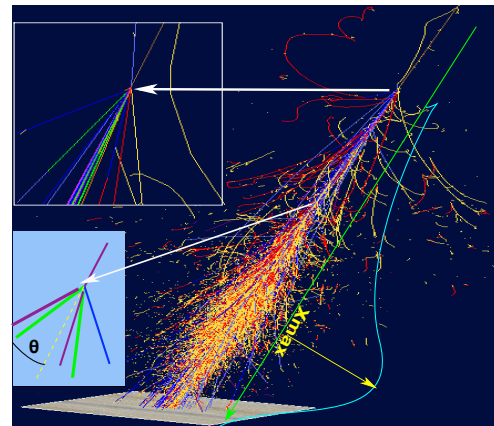


図 2: 空気シャワー。ハドロン多重発生 (拡大部分) が繰り返され、シャワーの種となる。最大発達深さ X_{max} は 1 次宇宙線の核種を反映する。

2. 研究の目的

(1) 10^{14} eV を超える宇宙線のエネルギー、組成などを調べるには空気シャワーを観測するのが現状では唯一の手段である。空気シャワーは1次宇宙線が大気に突入し、大気原子核と衝突し、多くの2次粒子を発生(多重発生)させ、それらのうちエネルギーの高いものがさらに衝突を繰り返し、鼠算的に粒子が増えていく現象(カスケードシャワー)である(図2)。観測データの処理やエネルギー、組成の推定にはこの空気シャワー発達を模擬計算するモンテカルロ・シミュレーション(M.C)が不可欠である。

シミュレーション過程には陽子、原子核、パイ中間子などのハドロンと大気原子核との衝突(ハドロン相互作用)を扱うモデルが必要であるが、高エネルギーでのハドロン相互作用ははっきり分かっていない。空気シャワーの発達に重要なのは陽子などが衝突したときに発生する粒子のうち、衝突した粒子の進行方向に近い前方領域のエネルギーの高いものであるが、そうした前方領域の粒子発生の様相は、現状ではハドロン相互作用の基本理論であるQCDでは取り扱えないからである。

このため、多重発生を取り扱う色々な理論的モデルが提案され、それらに基づくM.Cコードが開発されてきている。現状ではそれらのモデル間の差異は無視できるレベルではなく、どのモデルを用いるかで、観測データの解釈が変わる。そのためモデルの妥当性を実験的に検証することが急務である。数年前にCERN LHCの稼働により、初めて空気シャワーのエネルギー領域での実験的検証が可能になった。LHCで加速できる陽子のエネルギーは 10^{13} eVに届かないが、そうした粒子を正面衝突させることで宇宙線の衝突に対応する実効エネルギーは 4.3×10^{14} eV から 9×10^{16} eV に達する(図1)。そこで、前身の科研費(複数)で測定装置構築と最初の観測を行った(LHCf実験; 当時のエネルギー上限は 2.6×10^{16} eV)。

空気シャワー発達に重要なのはエネルギーの高い前方への発生粒子であるが、その度合いを測る変数としては入射粒子のエネルギー(E_0)と2次粒子のエネルギー(E_s)の比 $X_F = E_s/E_0$ や粒子の発生角度 θ (図2)から導かれる擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ である。LHCfでは加速器の構造から観測可能なのは $\eta > 8.8$ ($\theta < 0.017^\circ$) である。これに対してLHCの大型実験グループは $|\eta| < 2.5$ の中心領域を観測する。これらの両者のデータに対して、これまで宇宙線および高エネルギー分野で使われていたすべてのモデルは破綻を示した。

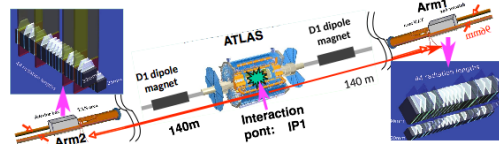
検討したモデルは DPMJET3(①)、QGSJET2(②)、EPOS(③)、SIBYLL(④)、PYTHIA(⑤)で、破綻の様相はモデルにより異なる。DPMJET3は低エネルギーで前方まで含めて極めて優れたモデルで、 4.3×10^{14} eVでの中心領域の η 分布も極めてよい再現性がある。しかし、 2×10^{15} eVを超えると突然中心領域での再現性が崩れ、前方領域でもLHCfから大きく外れる。その他のモデルも傾向はいろいろであるが、 10^{15} eV以上では満足できるものはなかった。

こうした傾向を見ると、2013年に実現すると予想されたLHCの最高エネルギー 10^{17} eVでのモデル検証が極めて重要と考えられた。LHCf測定器での観測可能領域はエネルギーとは無関係に $\eta > 8.8$ である。一方空気シャワー発達には $X_F = 0.05 \sim 0.5$ が重要であるが、小さい X_F ほど、また、入射エネルギーが小さいほど観測は困難になる。これまでの最高エネルギー 2.6×10^{16} eVでは $X_F = 0.1$ のガンマ線の $\sim 15\%$ しか観測できなかったのが、 10^{17} eVでは $\sim 40\%$ まで可能になり、より確度の高いモデルの検証が行える。

また前身科研費での実験結果解析も本研究と合わせて深化させる。

3. 研究の方法

(1) これまでのLHCf実験と同様2つの測定器 arm1, arm2 を ATLAS 実験のビーム衝突点から140m離れた2点に設置した。



ただし、最高エネルギーでの測定では、装置の放射線耐性が懸念材料で、それを高めるため、プラスチック・シンチレータ EJ260 に替え GSO シンチレータ・プレート(arm1, arm2)を使い、耐性を10000倍にした。位置敏感型検出器の1mm×1mm断面のシンチレーティング・ファイバー(SciFi)に替え1mm角のGSOバーを arm1)用いることにした。この装置較正をCERN SPS 加速器によりあらかじめ行った。

4. 研究成果

(1) まずこれまでのLHCf実験のビームエネルギーなどを表1にまとめておく。本研究より前に実施したものも含むが、結果についてはその後深化させたものである。

表 1: LHCf 実験のまとめ. 表中の①などは後述の「雑誌論文」中の番号で, 各項についての詳細が記述された論文を示す.

ビーム \sqrt{s} (TeV) 検出器 年	宇宙線換算 エネルギー (eV)	測定粒子		
		γ	n	π^0
pp 0.9 Arm1,2 2009	4.3×10^{14}	④		
pp 7 Arm1,2 2010	2.6×10^{16}	⑤	①	③
pp 2.76 Arm2 2012	4.1×10^{14}			②
pPb 5.02 Arm2 2012	1.3×10^{16}			②
pp 13 Arm1,2 2015	9.0×10^{16}	本稿		

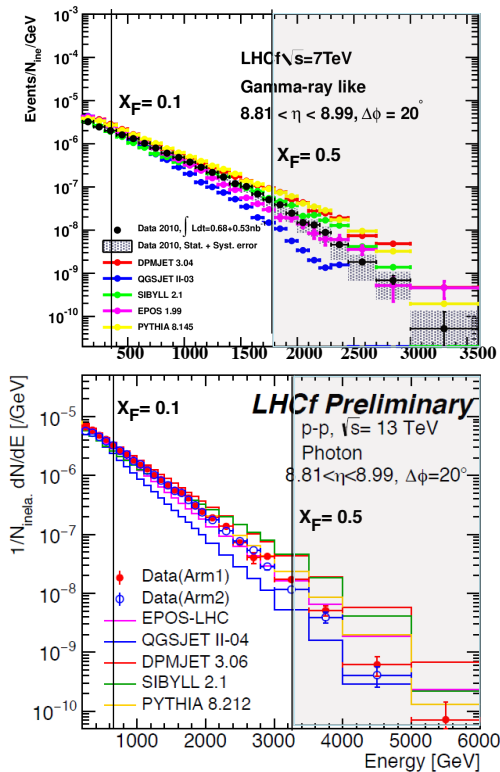


図 3: $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ (上), 13TeV (下) の pp 衝突での γ 線のエネルギー (E) 分布の例

(2) γ 線と π^0 のエネルギースペクトル
 図 3 には $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ と LHC 最高エネルギー 13TeV での γ 線のエネルギー・スペクトルを $8.81 < \eta < 8.99$ の領域で示す. \sqrt{s} は重心系での全エネルギーで宇宙線換算のエネルギーは表 1 を参照. 粒子のエネルギーを E とすると, $X_F \approx 2E/\sqrt{s}$ である. 従って, $X_F = 0.1, 0.5$ の位置は図 3 に示したようになり, グラフの表示範囲は X_F で見ると上下図ともほぼ同じである. $X_F = 0.1$ での γ 線の観測効率はそれぞれ, 15%, 40%程度で, 勾配が下図の方が急なのはこのためである.

モデルとの比較では, DPMJET3(赤), PYTHIA(黄) が大きな X_F 領域で実験データ(丸印) よりハードになる. EPOS(マゼンタ) は data より下にくるが, 概ねデータとの一致は良い, QGSJET2(青) は data 点よりソフトで, 13TeV では顕著になる. これらは他の η 領域でも概ね共通している. SIBYLL(緑) はこの η 領域では DPMJET3 と似た振る舞いをするが, η がこの領域をまたぐに従って急激にソフトからハードに変わる.

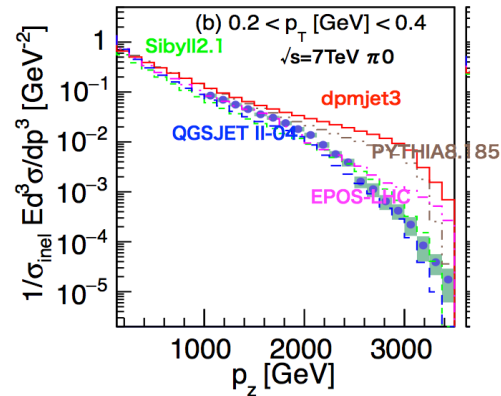


図 4: $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ の pp 衝突での π^0 の p_z ($\approx E$) 分布の例

図 4 は $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ での π^0 の p_z ($\approx E$) スペクトルである. ただし, データは横運動量が $0.2 < p_T < 0.4\text{GeV}$, $p_z > 1\text{TeV}$ のカットが入れている. この位相空間は検出器で観測可能な幾何学的領域にあり, 検出効率の補正を行い, 縦軸の絶対値を導出, モデルと比較している.

図 5 は $\sqrt{7}\text{TeV}$ での pp 衝突の中性子のエネルギー分布を示す. ハドロンに対するエネルギー分解能は $30\sim 40\%$ と悪いので, モデルの真の分布と比較するため, unfolding の手法を用いて実験データから真の分布を推定し, 比較した. 特徴的なことは最前方 $\eta > 10.76$ では

QGSJET2 以外は高エネルギー中性子の出現が全く合わないこと、 $\eta < 9.22$ では図には示していない領域も含め、DPMJET3 が良い一致を示すことである。理論的な面から見ると、データとの一致を示すモデルの構築は重要なテーマであるが、空気シャワーへの影響という観点からは、データとの一致が悪いモデル即悪いモデルとは言えない。こうしたリーディング・ハドロンについては p と n の和で議論しないといけないからである。

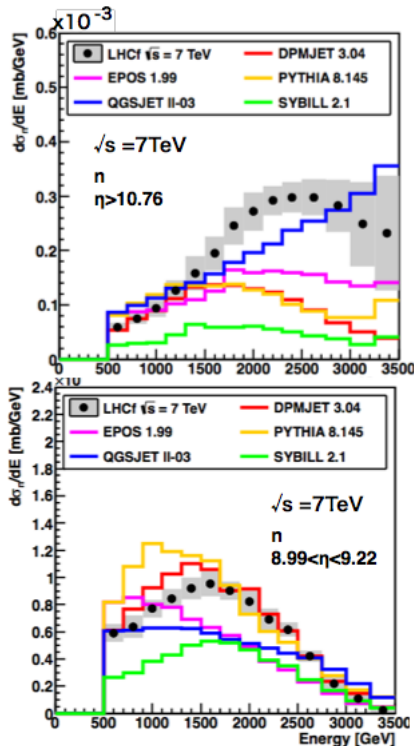


図 5: $\sqrt{s} = 7$ TeV の pp 衝突での中性子のエネルギー分布の例。

(3) 予期せぬ副産物 (UPC の検証)

大気原子核は窒素、酸素であり、陽子でも鉛でもないが、原子核の効果を調べるために、実効 $\sqrt{s} = 5.02$ TeV での陽子鉛衝突 (pPb) を陽子進行方向について観測した。その結果は陽子が鉛に核衝突せずに遠方をすれ違う場合も陽子と鉛の周りの強電場 (\approx 光子場) との相互作用 (UPC=Ultra Peripheral Collision) で光子-ハドロン生成反応が起こり、 $p\gamma \rightarrow n+\pi^+$ による超前方中性子が観測されていることが判明した。

中性子の散乱角度分布を調べると、図 6 のようになり、データ点 (●) は UPC+QCD の M.C

でよく再現され、ATLAS との共通トリガーからの情報からも UPC の寄与が圧倒的であることが支持される。 $\sqrt{s} = 13$ TeV での同様トリガーが回折散乱の解析にも有効なことを示す証拠である。

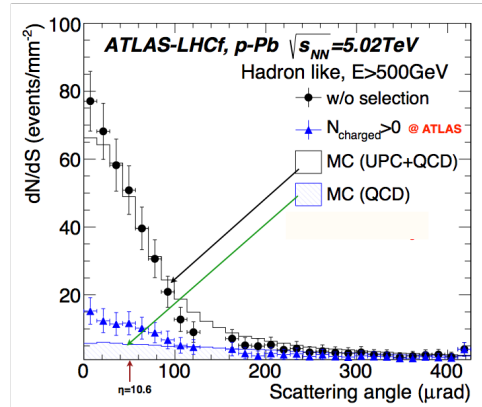


図 6: $\sqrt{s} = 5.02$ TeV pPb 衝突での UPC 効果。中性子の散乱角分布。黒丸:実験。ATLAS ($|\eta| < 2.5$) で電荷のある粒子が観測された場合は UPC は起こってないと考えられ、実際そうした条件を課すと、データ点は青色の点になる。これはハドロン衝突で期待される中性子の分布に近い。

UPC の効果を差し引いて QCD 部分からの π^0 スペクトルを求めると、概ね 7 TeV pp の場合と似た傾向になるが、ハードだった DPMJET3 のスペクトルは原子核の効果のため、かなりソフトになる。

また、ラピディティ $y = \ln((E + p_z)/(E - p_z))/2$ の関数として求めた π^0 の横運動量の平均値は DPMJET3 が良い一致を示し、他のモデルは値が実験より 10~30% 低くなるという結果になり、原子核効果の扱いに示唆を与えるであろう。

<引用文献>

- ① F.W.Bopp J.Ranft R.Engel and S.Roesler Phys. Rev. C 77, 014904 (2008)
- ② S.Ostapchenko, Nucl.Phys.B, Proc. Suppl. 151, 143 (2006).
- ③ K. Werner, F.-M. Liu, and T. Pierog, Phys. Rev. C 74, 044902 (2006)
- ④ E.-J.Ahn R.Engel T.K.Gaisser P.Lipari and T.Stanev Phys. Rev. D 80, 094003 (2009)
- ⑤ T.Sjöstrand, S.Mrenna, and P.Skands, Comp. Phys. Comm. 178, 852, (2008)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① LHCf collaboration: O. Adriani, et al., Measurement of very forward neutron energy spectra for 7 TeV proton-proton collisions at the Large Hadron Collider, Physics Letters B, 査読有, Vol.750, (2015), pp.360-366, DOI: 10.1016/j.physletb.2015.09.041
- ② LHCf collaboration: O. Adriani, et al., Transverse-momentum distribution and nuclear modification factor for neutral pions in the forward-rapidity region in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, Physical Review C, 査読有, Vol.89, 065209 (2014), pp.1-12, DOI: 10.1103/PhysRevC.89.065209.
- ③ LHCf collaboration: O. Adriani, et al., Measurement of forward neutral pion transverse momentum spectra for $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions at LHC., Phys. Rev. D, 査読有, Vol.86, 092001 (2012), pp.1-18 DOI: 10.1103/PhysRevD.86.092001
- ④ LHCf collaboration: O. Adriani, et al., Measurement of zero degree inclusive photon energy spectra for $\sqrt{s} = 900$ GeV proton-proton collisions at LHC. Physics Letters B, 査読有, Vol.715 (2012) pp.298-303, DOI: 10.1016/j.physletb.2012.07.065
- ⑤ LHCf collaboration: O. Adriani, et al., Measurement of zero degree single photon energy spectra for $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton collisions at LHC. Physics Letters B 査読有, Vol.703 (2011) pp.128-134, DOI:10.1016/j.physletb.2011.07.077

[学会発表] (計 5 件)

- ① K.Kasahara for the LHCf collaboration, Results of the LHCf experiment so far and future prospects, 7th International Workshop on Multiple Partonic Interactions at the LHC, Nov.23-27, 2015, The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy
- ② T. Sao for the LHCf collaboration, LHCf experiment; astrophysics connection of high-energy nucleus collisions, 25th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM2015), 27 Sep.-3 Oct. 2015, Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan
- ③ T. Sao for the LHCf collaboration, LHCf: Results and plan for Run II, The LHC Working Group on Forward Physics and Diffraction, Apr. 21-25, 2015, Madrid, Spain
- ④ K.Kasahara for the LHCf collaboration, Upgrade of the LHCf detector and future plans, 33rd International Cosmic Ray Conference, 2-9 July, 2013, Rio De Janeiro, Brazil
- ⑤ T. Sako for the LHCf collaboration, Forward particle production measured by LHCf; testing hadronic interaction models for Cosmic Ray physics, 4th Workshop on Air Shower Detection at High Altitude, 31 Jan.-1 Feb. 2013, Naples, Italy.

[そのほか]

LHCfとしての共通 H.P:

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf/>
<http://home.cern/about/experiments/lhcf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠原 克昌 (Kasahara, Katsuaki)
早稲田大学・理工学術院・招聘研究員
研究者番号: 00013425

(2) 連携研究者

鳥居 祥二 (Torii, Shoji)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 90167536

小澤 俊介 (Ozawa, Shunsuke)
早稲田大学・理工学術院・次席研究員
研究者番号: 60506715

増田 公明 (Masuda, Kimiaki)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授
研究者番号: 40173744

さこ 隆志 (Sako, Takashi)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師
研究者番号: 90324368

田村 忠久 (Tamura, Tadahisa)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 0271361

清水 雄輝 (Shmizu, Yuuki)
神奈川大学・工学部・准教授
研究者番号: 60434320

板倉 数記 (Itakura, Kazunori)
KEK・素核研・講師
研究者番号: 30415046