

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02866

研究課題名(和文) GeVガンマ線観測を基軸とした多波長観測による星間ガスの定量

研究課題名(英文) Quantifying the ISM based on GeV gamma-ray and multiwavelength observations

研究代表者

水野 恒史 (Mizuno, Tsunefumi)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号：20403579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円

研究成果の概要(和文)：星間ガスの定量のため、Fermi衛星のGeVガンマ線を中心とした多波長観測による研究を推し進めた。宇宙線加速源候補天体の詳細解析も進めた。後者はVER J2019+368のX線輝度分布を精度よく求め論文化した。前者は、Chamaeleon分子雲領域でダスト放射と星間ガスの非線形性を見出し定量化し、高銀緯原子雲では、スピン温度の仮定によらない星間ガスと宇宙線の定量に成功し、いずれも論文化した。加えてHI 21cm線の輝線幅を用い「光学的に薄い原子ガス」を同定し、星間ガス・宇宙線の精度を大きく改善できることを示した。MBM53-55分子雲及びPegasus loop領域に適用し、論文化中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星間空間を満たす星間ガスの定量は、星間現象(超新星爆発、分子雲形成、星形成など)を理解する根幹であり、現代天文学の主要テーマの一つである。星間ガスの測定は伝統的に21cm線(原子ガス)および2.6mm線(分子ガス)の電波サーベイによってなされてきたが、factor2程度の大きな不定性があった。本研究はGeVガンマ線観測というロバストな星間ガスのトレーサーを基軸とした多波長観測により、星間ガスの定量を目指すもので、ダスト放射と星間ガスの非線形性、スピン温度の仮定によらないガスの定量、HI 21cm線の輝線幅を用いた精密解析の提唱など多くの成果を上げることができた。

研究成果の概要(英文)：We have quantified the interstellar medium (ISM) and cosmic-rays (CRs) based on GeV gamma-ray and multiwavelength observations, as well as studied the CR accelerator data in detail. On the latter we have published a detailed study of the X-ray morphology of VER J2019+368. On the former, we published the analysis of Chamaeleon molecular clouds (in particular the study of non-linearity between the dust emission and ISM density) and high-latitude HI clouds (in particular measurement of ISM density without an assumption of spin temperature). In addition, we have shown that by using HI line profile we can significantly improve the accuracy of ISM/CR measurements. The method has been applied to the MBM 53-55 molecular clouds and Pegasus loop region, and a dedicated paper is in preparation.

研究分野：X線ガンマ線天文学

キーワード：星間ガス 宇宙線 ガンマ線 多波長観測

1. 研究開始当初の背景

星間ガスは伝統的に中性水素原子の 21 cm 線(原子ガス)および CO 分子の 2.6 mm 線(分子ガス)によって測定されてきた。これらは高い S/N 比を持つこと、ドップラーシフトが測れるため距離の情報が得られることなどの利点がある一方で、全星間ガスをトレースしきれていない可能性も指摘されていた(例えば Reach et al. 1994, ApJ 429, 672)。この星間ガスの残差成分は dark gas と呼ばれ、全天スケールでの大まかな分布は Grenier らにより、COBE 衛星および IRAS 衛星による星間赤化(ダスト)モデルと CGRO 衛星 EGRET 検出器によるガンマ線データを組み合わせて最初に得られた。(Grenier et al. 2005, Science 307, 1292)

この dark gas の理解を大きく進めたのが Planck 衛星(ダスト放射モデル)および Fermi 衛星 LAT 検出器(全天ガンマ線データ)である。研究代表者は Fermi 衛星 LAT 検出器のデータ解析を通じ dark gas の重要性をいち早く認識し、天の川銀河の広がったガンマ線放射(星間ガスと宇宙線の反応で生じる)の解析により太陽系近傍の宇宙線強度および銀河面の宇宙線強度分布を求める一方(Ackermann, Mizuno et al. 2011, ApJ 726, 81; Abdo, Mizuno et al. 2009, ApJ 703, 1249)、近傍分子雲領域において dark gas の空間分布・質量を導出してきた(Ackermann, Mizuno et al. 2012, ApJ 755, 22)。一連の研究を通じ、宇宙線強度と dark gas の柱密度の不定性は、主に水素原子ガスの柱密度の不定性によることも分かってきた。Grenier et al. (2015, ARA&A 53, 199)の図 4 にあるように不定性は factor 1.5~2 にも達し無視できない。この現状を打破しつつあるのが、本研究グループ自身による、Planck 衛星および Fermi 衛星のデータを用いた最近の研究である。福井らは感度・角度分解能に優れた Planck 衛星のダスト放射モデルを用い、ダストの温度に着目することで、星間ガスの柱密度を精度よく求める方法を見出した(Fukui et al. 2015, ApJ 798, 6; Fukui et al. 2014, ApJ 796, 59)。一方 Planck Collaboration(2014, A&A 571, 11)の議論にあるように、ダストのどのような物理量を星間ガスのトレーサーとして用いるべきかという問題点が指摘されていたが、我々は GeV ガンマ線を全星間ガスのトレーサーとして用い、ダスト放射モデルに補正をかけることでこの問題を解決し、MBM53-55 分子雲および Pegasus Loop 領域で dark gas を含む星間ガスの定量化を行った(Mizuno et al. 2016, ApJ 833, 278)。

2. 研究の目的

星間空間を満たす星間ガスの定量は、星間現象(超新星爆発、分子雲形成、星形成など)を理解する根幹であり、現代天文学の主要テーマの一つである。星間ガスの測定は伝統的に 21 cm 線(原子ガス)および 2.6 mm 線(分子ガス)の電波サーベイによってなされてきたが、factor 2 程度の大きな不定性があった(例えば Fukui et al. 2015, ApJ 798, 6; Bolatto et al. 2013, ARA&A 51, 207)。本研究は Fermi 衛星による GeV ガンマ線観測を基軸とした多波長観測により、10% 程度の高い精度で、太陽系近傍の星間ガスの分布(形態および密度分布)を明らかにすることを目指した。GeV ガンマ線というロバストな星間ガスのトレーサーを用いることで、かつてない精度(accuracy)で星間ガスの定量を行うのが大きな特徴である。具体的には太陽系近傍の高銀緯領域のガンマ線(および多波長データ)の解析を推し進めた。合わせて銀河宇宙線の総合理解のため、宇宙線加速源天体の解析も行った。

3. 研究の方法

本研究でとる方法を要約すると「Fermi 衛星による全天 GeV ガンマ線データを星間ガスのロバストなトレーサーとして用い、他の衛星(波長)の観測データと有機的に組み合わせることで、星間ガス分布をかつてない正確さで求める」というものである。

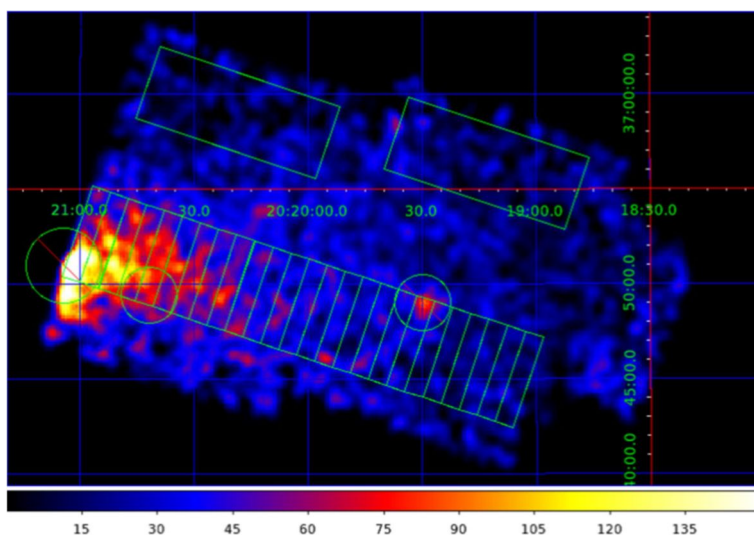
星間ガスの主要なトレーサーは中性水素原子からの 21 cm 線および CO 分子からの 2.6 mm 輝線である。これらは輝線であるがゆえの優れた性質[高い S/N 比や速度(距離)情報]をもつ一方、前者は光学的厚みが不定性の要因となり、後者は水素分子に対する線形性やそもそも CO 分子が解離した分子雲の存在が問題となる。一方 GeV ガンマ線は宇宙線と星間ガスの反応で生じ星間ガスによる吸収は無視できるため、宇宙線強度が一様でありさえすれば[これは太陽系近傍(高銀緯)の、天球上の狭い領域に議論を限れば大変良い近似と考えられる]、ガンマ線強度はガスの柱密度に比例する。つまり GeV ガンマ線は全星間ガスのロバストなトレーサーとなっている。しかし最新の Fermi 衛星 LAT 検出器をもってしても、角度分解能および光子統計は十分でなく、ガンマ線天体の混入もあり、ガンマ線だけでは星間ガスの分布を知ることはできない。そこでやはり全星間ガスのトレーサーと考えられる Planck 衛星のダスト放射モデルマップを用い、ガンマ線分布を最もよく再現するように補正をかけることで、星間ガスの分布を求めることとした。具体的には、光学的に薄いガスと混在すると考えられる高温ダスト放射領域でガス密度の絶対量を決め、それを手掛かりに補正をかけるという手法をとった。解析対象としては、

dark gas の割合が大きいとされる Chamaeleon 分子雲領域, それと対になるものとして高銀緯原子雲領域の解析を行った。合わせて宇宙線の総理解析を目指し, 広がった強い TeV ガンマ線源として有名な VER J2019+368 の X 線フォローアップとその解析を行った。

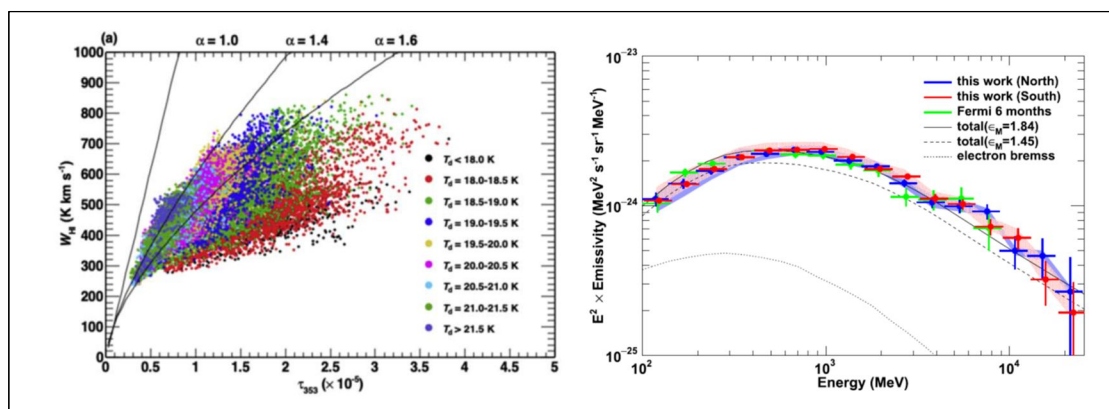
また研究を通じ, なるべく広い領域で光学的に薄いガスを同定することが精度を高くする鍵であることも明らかになった。そこで高温ダスト放射領域に限らず, HI21cm 線の輝線幅情報をもとに, 視線方向に分離して光学的に薄い原子ガスを同定することで精度を高める方法を開発し, MBM53-55 分子雲および Pegasus loop 領域に適用した。

4. 研究成果

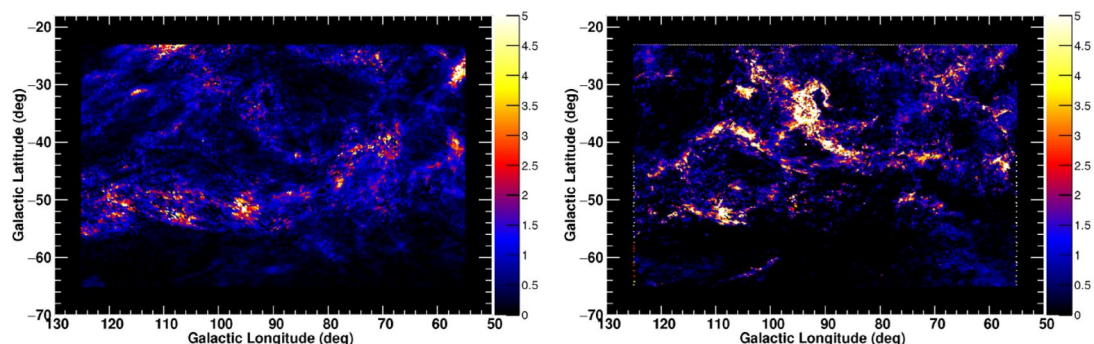
TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の X 線フォローアップ解析では, 「すざく」の高い感度を生かし, パルサーから西側に 15 分角以上にまで X 線放射が伸びていることを見出した (下図)。また「すざく」の感度をもってしてもそれ以上の広がりはなく TeV ガンマ線でのサイズよりも明らかに小さいこと, 場所によりスペクトルの形に大きな変化がみられないことなどの特質を明らかにした。これらの結果をもとに星間空間における宇宙線 (パルサー風で作られた電子) の伝播について議論を行った。(Mizuno et al. 2017, ApJ 841, 104)



近傍分子雲・原子雲の解析では, ガンマ線 (ロバストな星間ガスのトレーサー) を元にダスト放射の空間分布 (高分解能の星間ガスのトレーサー) に補正をかけるという方法で, 星間ガスと宇宙線の定量を行った。Chamaeleon 分子雲の解析 (Hayashi et al. 2019, ApJ 884, 130; 下図左) では星間ガス密度とダスト放射の間の非線形成を見出し, 従来の単純な描像 (線形関係を仮定) では不十分なであることを指摘すると共に, 星間ガスを精度よく求めて議論した。近傍原子雲の解析 (Mizuno et al. 2020, ApJ 890, 120; 下図右) では広い範囲で宇宙線強度が一定であることを実証し, ガンマ線を用いる解析の有用性を確認すると共に, 近傍の宇宙線スペクトルを精度よく議論した。一方これら解析を通じ, 高温ダスト放射領域でガス密度の絶対量を決めるという方法では精度に限界があることも明らかになった。また解析を通じて得られた経験を, 銀河中心からの広がったガンマ線放射の不定性の議論に活用した。(Ackermann, Mizuno et al. 2017, 840, 43)



これらの解析で明らかになった課題(精度の限界)を打破するため、高温ダスト放射領域に限らず、HI 21cm 線の輝線幅情報をもとに、視線方向に分離して光学的に薄い原子ガスを同定することで精度を高める方法を開発した。MBM53-55 分子雲および Pegasus loop 領域に適用した結果を下図に示す。左が光学的に濃い原子ガス、右が CO 輝線の弱い分子ガスのモデルマップで、両者の総質量はほぼ同じだが空間分布が大きく異なることが分かる。広い領域で両者を分離したのはこの研究が初めてである。星間ガス密度・宇宙線強度の精度も大きく改善することができ(5%程度)、論文としてまとめ投稿中である。



以上で述べたように、本課題を通じて「GeV ガンマ線を基軸とした星間ガスの定量」というコンセプトを実証し、星間ガス(ダスト放射との間の非線形性関係など)および宇宙線(近傍の宇宙線強度一定の実証など)の双方において優れた成果をあげることができた。また「HI 21cm 線の輝線幅を用いた光学的に薄いガスの同定」という優れた開発することができ、さらなる研究の進展に向け大きな弾みがついた。改めて本科学研究費のサポートに感謝したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hayashi, Mizuno et al.	4. 巻 884
2. 論文標題 Fermi-LAT γ -Ray Study of the Interstellar Medium and Cosmic Rays in the Chamaeleon Molecular Cloud Complex: A Look at the Dark Gas as Optically Thick H I	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab4351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mizuno et al.	4. 巻 890
2. 論文標題 Study of the Cosmic Rays and Interstellar Medium in Local H I Clouds Using Fermi-LAT Gamma-Ray Observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab6a99	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mizuno T., Tanaka N., Takahashi H., Katsuta J., Hayashi K., Yamazaki R.	4. 巻 841
2. 論文標題 X-Ray Studies of the Extended TeV Gamma-Ray Source VER J2019+368	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 104 ~ 104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aa7201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ackermann M., Mizuno, T., et al.	4. 巻 840
2. 論文標題 The Fermi Galactic Center GeV Excess and Implications for Dark Matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 43 ~ 43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aa6cab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 HI 21cm線プロフィール・ダスト放射・ガンマ線を用いた, MBM 5355分子雲・Pegasus loop領域における星間ガスと宇宙線の研究
3. 学会等名 日本物理学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 Cosmic-Ray and Gas Properties in the MBM 53-55 Clouds and the Pegasus Loop as Revealed by HI Line Profiles, Dust, and Gamma-Ray Data
3. 学会等名 TeVPA 2021 (online)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 Study of the CRs and ISM in Local HI Clouds using Fermi-LAT Gamma-ray Observations
3. 学会等名 9th Fermi Symposium (online)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 宇宙線直接観測とガンマ線観測による近傍宇宙線スペクトルの研究(1)
3. 学会等名 日本物理学会春季年会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 フェルミ衛星による太陽系近傍原子雲の宇宙線・星間ガスの研究(3)
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会(山形大学)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 Study of the CRs and ISM in Local HI Clouds using Fermi-LAT Gamma-ray Observations
3. 学会等名 TeVPA2019, Sydney, Australia(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 Study of the CRs and ISM in Local HI Clouds using Fermi-LAT Gamma-ray Observations
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会(兵庫県立大学, 兵庫)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 Study of the CRs and ISM in Local HI Clouds using Fermi-LAT Gamma-ray Observations(2)
3. 学会等名 日本物理学会秋季年会(信州大学, 長野)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 Study of the Interstellar Medium and Cosmic Rays in Local HI Clouds
3. 学会等名 8th Fermi Symposium (Baltimore, USA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山恭弘, 水野恒史ほか
2. 発表標題 ガンマ線バーストの X 線残光を用いた天の川銀河の星間ガスの評価 (2)
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会 (兵庫県立大学, 兵庫)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koyama, T., Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 Study of the Interstellar Gas Distribution of Milky Way Using Gamma-Ray Burst Afterglow
3. 学会等名 New eyes on X-ray astrophysical objects with Japanese-Chinese observatories (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山恭弘, 水野恒史ほか
2. 発表標題 ガンマ線バーストの X 線残光を用いた天の川銀河の星間ガスの評価
3. 学会等名 応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林克洋, 水野恒史ほか
2. 発表標題 Study of the ISM and CRs in Chamaeleon molecular-cloud complex using the Planck thermal dust optical depth
3. 学会等名 日本天文学会春季年会 (法政大学, 東京)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林克洋, 水野恒史ほか
2. 発表標題 Study of the ISM and CRs in nearby molecular cloud regions using gamma rays
3. 学会等名 宇電懇シンポジウム 2018 (国立天文台三鷹, 東京)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayashi, K., Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 Study of the ISM and CRs in Chamaeleon region using the Planck thermal dust optical depth
3. 学会等名 8th Fermi Symposium (Baltimore, USA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mizuno T. et al.
2. 発表標題 Study of the ISM and CRs in MBM 53-55 Clouds and the Pegasus Loop
3. 学会等名 ICRC 2017 (Busan, South Korea) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mizuno T. et al.
2. 発表標題 Study of the Interstellar Medium and Cosmic-rays in Local HI Clouds
3. 学会等名 7th Fermi Symposium (Garmisch-Partenkirchen, Germany) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 Study of the ISM and CRs in MBM 53-55 Clouds and the Pegasus Loop(2)
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会 (北海道大学, 北海道)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 Study of the Interstellar Medium Gas and Cosmic Rays using GeV gamma rays
3. 学会等名 天の川銀河研究会 (鹿児島大学, 鹿児島)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水野恒史ほか
2. 発表標題 Study of the CRs and ISM in Local HI Clouds using Fermi-LAT Gamma-ray Observations
3. 学会等名 日本物理学会春季年会 (東京理科大学, 千葉)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山恭弘
2. 発表標題 ガンマ線バーストのX線残光を用いた天の川銀河の星間ガスの評価
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会(北海道大学, 北海道)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小山恭弘
2. 発表標題 ガンマ線バーストのX線残光を用いた天の川銀河の星間ガスの評価
3. 学会等名 天の川銀河研究会 (鹿児島大学, 鹿児島)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Abdollahi S., Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 On the origin of gamma-ray emission toward SNR CTB37A with Fermi-LAT
3. 学会等名 ICRC 2017 (Busan, South Korea) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Abdollahi S., Mizuno, T. et al.
2. 発表標題 On the origin of gamma-ray emission toward SNR CTB 37A with Fermi-LAT
3. 学会等名 7th Fermi Symposium (Garmisch-Partenkirchen, Germany) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	福井 康雄 (Fukui Yasuo) (30135298)	名古屋大学・理学研究科・教授 (13901)	
連携研究者	山本 宏昭 (Yamamoto Hiroaki) (70444396)	名古屋大学・理学研究科・助教 (13901)	
連携研究者	田島 宏康 (Tajima Hiroyasu) (80222107)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授 (13901)	
連携研究者	大野 雅功 (Ohno Masanori) (50509875)	広島大学・理学研究科・助教 (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------