

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02079

研究課題名(和文)ハイパー核ガンマ線分光で解明する N相互作用の荷電対称性

研究課題名(英文) Charge symmetry breaking in Lambda-N interaction investigated via hypernuclear gamma-ray spectroscopy

研究代表者

田村 裕和 (Tamura, Hirokazu)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：10192642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、J-PARCハドロン施設で ^4He 、 ^4H ハイパー核の γ 線を精密測定して両者の構造の違いを調べ、昔の実験で示唆されていた ハイパー核の荷電対称性の大きな破れが存在を実験的に決着させること目指した。まず ^4He の実験を実施し、励起状態 1^+ と基底状態 0^+ の間隔を1.406 MeVと決定した。これは過去に報告された ^4H での間隔1.09MeVと大きく離れていることから、大きな荷電対称性の破れの存在が明確になった。引き続き ^4H の γ 線測定によりその 1^+ 、 0^+ 間隔を高精度で再測定する実験をJ-PARCの新たなビームラインで行うため、ファイバー飛跡検出器等の検出器群を開発し、実験準備を整えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

荷電対称性とは、原子核の陽子と中性子の間の対称性で、その破れは極めて小さい。今回の実験により、これがハイパー核では非常に大きくなることが初めて確定した。これは原子核物理学の基本的概念を揺さぶる重要な発見である。この大きな破れの起源は、さまざまな努力にもかかわらずまだ理論的に説明できないが、この発見を機に理論研究が大きく進展すると期待される。荷電対称性の破れは、uクォークとdクォークの小さな質量差を起源としているため、それがどのようにバリオン間相互作用に反映されるのかが明らかになれば、核力を含むバリオン間相互作用のより本質的な理解につながるであろう。

研究成果の概要(英文)：This subject aims at precisely measuring γ -rays in ^4He and ^4H hypernuclei and comparing their level structure to clarify a possible large charge symmetry breaking (CSB) effect in light hypernuclei suggested by old experiments. We carried out a ^4He experiment and observed a γ -ray at 1.406 MeV. It is much larger than the corresponding energy for ^4H , 1.09 MeV. Thus we clearly confirmed the existence of a very large CSB effect. In order to measure the ^4H γ -ray again but much precisely with a new beam line at J-PARC, we have developed all the detectors including a new fiber tracking detector and made the experiment ready to run.

研究分野：実験核物理

キーワード：原子核物理学 ハイパー核 ガンマ線分光 ストレンジネス 荷電対称性 ゲルマニウム検出器 バリオン間相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

荷電対称性は、原子核における陽子と中性子の間の対称性で、強い相互作用に対する陽子と中性子の性質がほぼ同じであることからくる。陽子数と中性子数を入れ替えた原子核(鏡像核)では、束縛エネルギーや準位構造が殆ど同じである。通常の原子核では荷電対称性の破れは極めて小さいことがわかっている(例えば、鏡像核である ${}^3\text{H}$ と ${}^3\text{He}$ 束縛エネルギーの差は、電磁相互作用の効果を除くと70 keV程度である)。ところが、粒子を1個含むハイパー核では、鏡像核である ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の基底状態のエネルギー差が350 keV程度と大きく、荷電対称性が大きく破れていることが1970年代の原子核乾板を用いた実験で示唆されていた。しかし、この理由を理論的に説明できないことと、昔の原子核乾板のデータでは系統誤差が不明であったことから、他の方法による再実験が強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は、J-PARCハドロン施設で ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ 、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ハイパー核の線を精密測定し、両者の構造の違いから、昔から示唆されていたハイパー核の荷電対称性の破れ(CSB)の問題を実験的に決着させることである。まず ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ を生成し、励起状態(1^+)から基底状態(0^+)への線のエネルギーを精密測定する。次に ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ を生成し、同じガンマ線のエネルギーを精密測定する。両者を比較して $A=4$ ハイパー核におけるCSBの存在を確定するとともに、大きなCSBが観測された場合には、理論家が精密計算を通してその原因を探ることができるような、十分に高精度のデータを供給する。

3. 研究の方法

(1) ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ハイパー核の研究

${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ハイパー核の線分光実験を、J-PARCハドロン施設 K1.8 ビームラインにおいて行う。図1は実験のセットアップである。K1.8ラインからの1.8 GeV/cの大強度・高純度のK-中間子ビームを用い、液体ヘリウム標的で ${}^4\text{He}(K^-, \pi^-){}^4_{\Lambda}\text{He}$ 反応を起こさせることで ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の励起状態を生成し、そこから放出される線を我々がハイパー核線分光実験用に開発した特殊なゲルマニウム検出器群 Hyperball-J(図2)によって測定する。K1.8 ビームライン下流の磁気スペクトロメータでK-ビームの運動量を分析し、標的の下流に設置された大型超伝導磁石 SKS を用いたスペクトロメータ(SksMinus)で π^- を同定して運動量分析する。両者の運動量からハイパー核の生成事象を選び、同時に放出されていた線のスペクトルを求める。

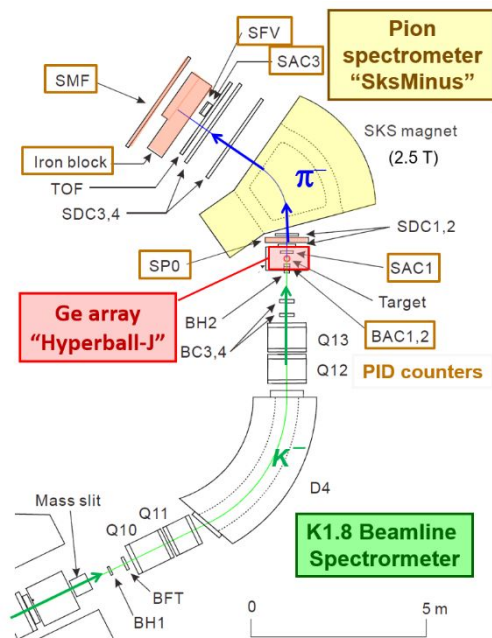


図1: ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の線分光実験(J-PARC E13)の実験セットアップ。K1.8 ビームライン、SKSスペクトロメータ(SksMinus)、Ge検出器群 Hyperball-Jを用いる。

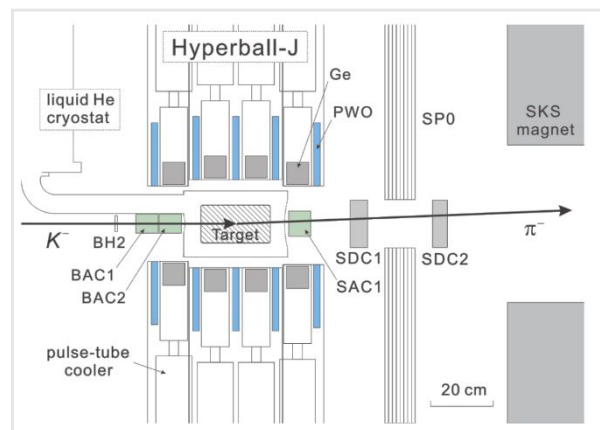


図2:図1のセットアップの実験標的周辺の側面図。液体ヘリウム標的をハイパー核線分光用 Ge 検出器群 Hyperball-J が囲んでいる。

(2) ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ハイパー核の研究

${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ハイパー核については、1.1 GeV/c の K-中間子ビームを用い、リチウム標的で ${}^7\text{Li}(K^-, \pi^-){}^7_{\Lambda}\text{Li}^*$ 反応によって ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の高い励起状態を作り、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}^* \rightarrow {}^4_{\Lambda}\text{H} + {}^3\text{He}$ によって ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の励起状態を生成してその線を測定する。それ以外ある。ただし、ビーム強度や周辺状況を考慮して K1.1 ビームラインで実験を行うこととする。実験に使用する SKS 超伝導電磁石は J-PARC K1.1 ビームラインのエリアにすでに移動されている。ビームラインが変わることに合わせて上流のビーム飛跡検出器を新たに製作することと、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の生成を弱崩壊で放出される π^- を用いて同定するための検出器を開発・製作する必要がある。

4. 研究成果

(1) ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ハイパー核の研究

${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ハイパー核については、J-PARC E13 実験としてデータ収集を予定通り実施し、データ解析を行って、最終結果を得た。(K⁻, π⁻) 反応の missing mass スペクトル (図 3) から、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ハイパー核生成のピークの事象を選び、同時に出ていた線のエネルギースペクトル (Doppler 効果の補正後) を求めたところ、図 4 のようになり、1.4 MeV に明確なピークを観測した。これにより、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}(1^+, 0^+)$ の間隔を $1.406 \pm 0.002 \pm 0.002$ MeV と高精度で決定できた。

図 5 に示すように、このエネルギー間隔は、過去に報告された線で測られた ${}^4_{\Lambda}\text{H}(1^+, 0^+)$ の間隔 1.09 MeV と比べて大きく離れていることから、質量数 4 のハイパー核に大きな荷電対称性の破れが存在することを明確に示すことができた。さらに、過去の原子核乾板による両者の基底状態 ${}^4_{\Lambda}\text{He}(0^+)$, ${}^4_{\Lambda}\text{H}(0^+)$ の束縛エネルギーを認めると、励起状態 ${}^4_{\Lambda}\text{He}(1^+)$, ${}^4_{\Lambda}\text{H}(1^+)$ の束縛エネルギーは誤差の範囲で一致するという面白い結果が得られた。スピンによって CSB の効果が劇的に変わることは、大きな CSB を理解するための手掛かりになるものと期待される。なお、この実験と同時期に、Mainz 大学で ${}^4_{\Lambda}\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^-$ 崩壊の π^- 運動量を精密に測ることで ${}^4_{\Lambda}\text{H}(0^+)$ の束縛エネルギーが再測定されたが、図 5 に緑で示すように昔の原子核乾板の値をほぼ再現しており、スピンによる CSB の効果が大きく変わるという上記の議論は信頼性が高いことがわかった。

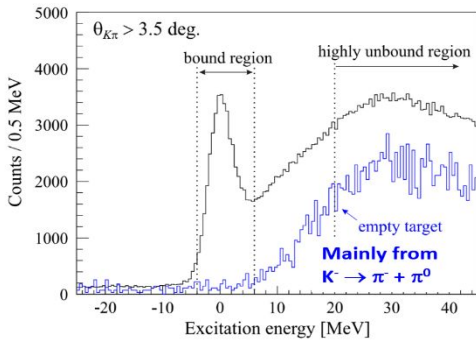


図 3: ${}^4\text{He}(K^-, \pi^-)$ 反応の missing mass スペクトル。ピークは、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の基底状態 (0^+) と励起状態 (1^+) の生成事象である。

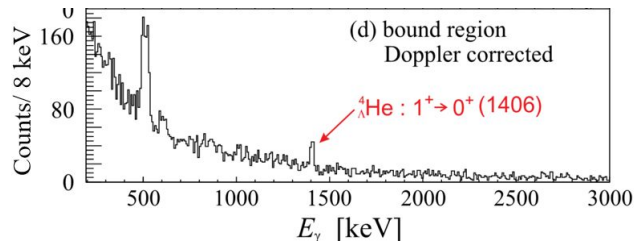


図 4: ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の生成事象 (図 3 の "bound region") を選択したときの γ 線エネルギースペクトル (Doppler 効果の補正後)。1.4 MeV のピークが ${}^4_{\Lambda}\text{He}(1^+ \rightarrow 0^+)$ 遷移である。

この実験により、原子核の荷電対称性がハイパー核では非常に大きくなるのが初めて確定した。これは原子核物理学の基本的概念を揺さぶる重要な発見である。この大きな破れの起源は、さまざまな理論的努力にもかかわらずまだ説明できていない。この発見が、今後バリオン間相互作用のより進んだ理解につながることは明らかである。この成果を発表した Physical Review Letters 誌の論文は、Editors Suggestion に選定された。また、東北大と KEK, J-PARC, JAEA の共同でプレスリリースを行った。

ただし、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ のデータとの比較に使った過去の ${}^4_{\Lambda}\text{H}(1^+, 0^+)$ のデータ 1.09 MeV は、3 つのばらついた実験データの平均であり、それぞれの統計が非常に少なく、NaI 検出器を用いているため分解能も悪い。そこで ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ と同様にゲルマニウム検出器を

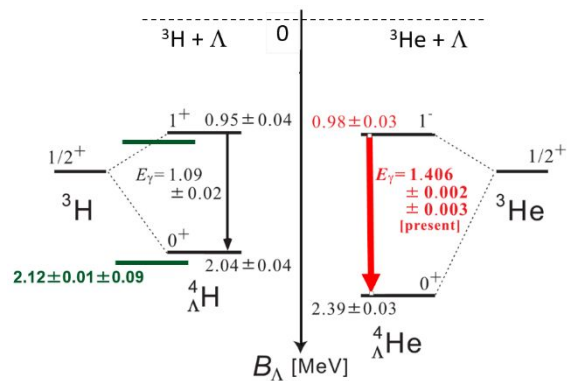


図 5: ${}^4_{\Lambda}\text{He}$, ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ のレベル構造を B_{Λ} の関数として示したもの。赤字が今回の成果。基底状態の黒字のエネルギーは過去の原子核乾板のデータ。緑は Mainz 大学で ${}^4_{\Lambda}\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^-$ 崩壊の π^- 運動量を精密に測って求めたもので、原子核乾板のデータとは誤差の範囲で合致している。

用いて高精度で ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の 線 を再測定することは重要であり、さらに精密な理論計算によって CSB の起源を調べる際にも、高精度の実験データがあることが望ましい。そこで以下の(2)の実験も行う必要がある。

我々の ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の成果発表後、理論家による研究が活発になっており、最近発展したカイラル有効場理論による N 相互作用モデルを用いて第一原理計算を行うといった方法で研究が進められている。

なお、 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の実験の際には、関連実験として四フッ化炭素を標的として ${}^{19}\text{F}$ ハイパー核の線測定も行い、4 つの遷移を観測して ${}^{19}\text{F}$ の構造を決定した。荷電対称性とは別の観点から、核内での N 相互作用の情報を与える貴重なデータとなった。

(2) ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ハイパー核の研究

${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ハイパー核の 線測定実験は、E63 実験として改めて実験審査委員会で審査を受け、採択された。この実験は、新たに建設される K1.1 ビームラインを用いる。SKS 超伝導電磁石は K1.1 実験エリアに移動済みであり、付随する検出器もほぼすべて K1.8 ラインで行った ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の分光実験(E13)と共通であるが、K1.1 の最下流偏向磁石の上流に K1.1 のビームサイズに合わせた飛跡検出器を新たに製作して設置する必要がある。そこで、ファイバー飛跡検出器を製作しテストを行い、十分な性能を持つことを確かめた。また、 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ は、 ${}^4\text{He}$ を用いた(K, π)のような荷電粒子の直接反応で作れないため、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ の高励起状態から ${}^7_{\Lambda}\text{Li}^* \rightarrow {}^4_{\Lambda}\text{H} + {}^3\text{He}$ によってフラグメントとして生成することとした。しかし、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ から別のハイパー核がフラグメントとして生成する可能性もあるため、弱崩壊 ${}^4_{\Lambda}\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \pi$ で放出される π のエネルギーを測定して ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の生成を同定することとした。この π は、多層の薄いプラスチックシンチレータによって飛程を測定する range counter とし、効率的で十分なエネルギー分解能をもつ読み出し方式として、波長変換ファイバーを複数埋め込んで MPPC でファイバーの光を読み出すこととし、その開発を行った。厚みやファイバー数を最適化し、十分な性能が出ることを確かめた。他にも、回路系や周辺機器を整備した。J-PARC K1.1 ビームラインは施設側の都合により建設が遅れているが、完成すればすぐ実験が実施できるように実験準備を整えることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件/うち国際共著 12件/うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 T. Koike, T. Takahashi, H. Tamura, K. Tanida, M. Ukai, T.O. Yamamoto et al.	4. 巻 2130
2. 論文標題 Gamma-ray spectroscopy of single -hypernuclei at J-PARC: Results and perspective	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 20011
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5118379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Tamura	4. 巻 26
2. 論文標題 Strangeness Nuclear Physics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.26.011003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S.B. Yang, T. Koike, T. Takahashi, H. Tamura, K. Tanida, M. Ukai, T.O. Yamamoto et al.	4. 巻 120
2. 論文標題 First Determination of the Level Structure of an sd-Shell Hypernucleus, 19 F	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 132505-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.120.132505	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
1. 著者名 H. Tamura, T. Koike, T. Takahashi, K. Tanida, M. Ukai, T.O. Yamamoto et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 Gamma-ray Spectroscopy of Hypernuclei -Recent Results and Prospect at J-PARC-	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011004 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.17.011004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 T.O. Yamamoto, T. Koike, T. Takahashi, H. Tamura, K. Tanida, M. Ukai et al.	4. 巻 115
2. 論文標題 Observation of Spin-Dependent Charge Symmetry Breaking in N Interaction: Gamma-Ray Spectroscopy of 4 He	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 222501 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.115.222501	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

1. 著者名 T.O. Yamamoto, T. Koike, T. Takahashi, H. Tamura, K. Tanida, M. Ukai et al.	4. 巻 8
2. 論文標題 Study of N Interaction via the -ray Spectroscopy of 4 He and 19 F (E13-1st)	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 021017 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.8.022017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 25件 / うち国際学会 28件)

1. 発表者名 H. Tamura
2. 発表標題 Hypernuclear Physics --Recent Results and Future Prospects
3. 学会等名 Symposium on Rare Isotope Sciences, Institute for Basic Science, Daejeon, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tamura
2. 発表標題 Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei
3. 学会等名 International Conference on Physics, Mandalay 2018 (ICPM21018), Mandalay, Myanmar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tamura
2. 発表標題 Strangeness Nuclear Physics
3. 学会等名 The 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, Tsukuba (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tamura
2. 発表標題 Hadrons in medium
3. 学会等名 The 21st Particle and Nuclei International Conference (PANIC2017), Beijing, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Tamura
2. 発表標題 Recent Progress in Hypernuclear Physics
3. 学会等名 25th International Nuclear Physics Conference (INPC2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Tamura
2. 発表標題 Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei - recent results and prospects at J-PARC
3. 学会等名 The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 T. Koike
2. 発表標題 Study of N interaction via the A=4 mirror hypernuclei: ^4H and ^4He
3. 学会等名 Future directions for nuclear structure and reaction theories: Ab initio approaches for 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Ukai
2. 発表標題 Prospect of gamma-ray spectroscopy of ^4H at J-PARC
3. 学会等名 The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 T.O. Yamamoto
2. 発表標題 Gamma-ray spectroscopy of ^4He hypernuclei with Hyperball-J
3. 学会等名 International symposium on the "Frontier of γ -ray spectroscopy" (Gamma15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>【プレスリリース】J-PARC/ハドロン実験施設で"奇妙な粒子"が原子核の荷電対称性を破る現象を発見 http://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20151125-3744.html 原子核物理学の基本法則「荷電対称性」を大きく破る「奇妙な粒子」 (東北大理物理 トピックス) http://www.phys.tohoku.ac.jp/topics/topics-2010/</p> <p>【プレスリリース】重いハイパー核(フッ素19ラムダ核)の構造解明に成功 - 中性子星の内部構造を理解する手がかりに - https://www2.kek.jp/ipns/ja/release/hyper/</p>

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
研究協力者	山本 剛史 (Yamamoto Takeshi)		
研究協力者	鵜養 美冬 (Ukai Mifuyu)		
研究協力者	小池 武志 (Koike Takeshi)		
研究協力者	高橋 俊行 (Takahashi Toshiyuki)		
研究協力者	谷田 聖 (Tanida Kiyoshi)		