

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03673

研究課題名(和文)次世代大型検出器のための液体キセノンシンチレータ内の光散乱過程の研究

研究課題名(英文)A study on the scattering processes in liquid xenon scintillator for next-generation large detectors

研究代表者

中村 正吾 (NAKAMURA, Shogo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50212098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：液体キセノン大型検出器で用いる際に重要なパラメータの1つである散乱強度を実測する目的で、液体キセノン中の光の減衰を測定する新しい手法の実験に取り組んだ。実験では、波長可変で強度が安定した光ビームを発生する外部光源を新規に開発し、散乱光を吸収するバッフルを備えた容器中の液体キセノンに出射光を通して減衰を測定した。そして、減衰の光の波長依存性の結果を、レイリー散乱と呼ばれる基本的な光散乱過程の特徴と比較することが出来ることを世界で初めて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体キセノンは、宇宙暗黒物質の正体の解明を目指す将来計画の実験で核心部に使われる発光物質であるが、大規模化を進める上で、光が液体キセノン中を進む際に散乱して発生方向の情報を失う現象が顕著になる。この現象の理解は不十分で、先行研究では、実験結果と理論の予想とが有意に異なることが未解決問題になっていた。

本研究では、この問題の解決の手掛かりを得ることを目的として、世界初の手法を用いた実験を考案しチャレンジした。そして、初期のデータからは、今後課題は残しつつも、先行研究では得られなかった散乱強度の波長依存性という詳細情報を得られることを世界で初めて示せたことは学術的に大きな成果である。

研究成果の概要(英文)： In order to measure the scattering intensity of liquid xenon, which is one of the important parameters when using liquid xenon in a large detector, we have been experimenting with a new method to measure the attenuation of light in liquid xenon. In the experiment, we developed a new external light source that emits a stable light beam with variable wavelength and intensity, and measured the attenuation by passing the emitted light through liquid xenon in a container equipped with a baffle that absorbs the scattered light. We showed for the first time in the world that the wavelength dependence of attenuation can be compared with the characteristics of a fundamental light scattering process called Rayleigh scattering.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：液体キセノン シンチレータ 光散乱

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 神岡の XMASS 実験では、宇宙物理学の最重要課題の 1 つである宇宙暗黒物質の正体の解明などを目指し、液体キセノンをシンチレータとして 1 トン近い大規模に用いた探索を進めていた。一方、国外でも同様に、XENON1T, LUX, ZEPLIN, PandaX 実験など世界各地で同規模の液体キセノンをを用いた宇宙暗黒物質探索が行われ、暗黒物質の信号検出の一番乗りを目指す競争が激化していた。

(2) シンチレータを用いた検出器では、シンチレーション光に対する吸収長（自己吸収されるまでの距離の平均）や散乱長（散乱を受けるまでの距離の平均）は重要なパラメータである。液体キセノンをを用いた宇宙暗黒物質探索においては、高感度化に必要な超低放射能バックグラウンドが最も実現しやすいのは一般的に検出器の中心付近であることから、周辺部の光センサに光が届くまでに光が被る素過程の理解は重要である。特に、検出器の大型化が進んで光路長が散乱長に比して長くなればなるほど、散乱過程のより正確な理解が必要となる。

(3) 液体キセノンの吸収長は、発光機構が常時は存在しないエキシマ起源であることから十分に長く、実測でも 1m を超える下限値しか与えられていないが、散乱長については、理論的にはレイリー散乱過程を前提とした計算が行なわれ、有限値の 30cm が予想された（文献①）。

一方で、散乱長の実測は、以前から複数の実験グループにより試みられてきたものの精度は低く、理論計算で求められた値と比較は難しかった。しかし近年になって、XMASS 実験や MEG 実験で大型の液体キセノン装置が実用化されると、その応答の研究から、およそ $52 \pm 1\text{cm}$ （文献②）という散乱長が示されたが、結果として文献①の理論値との差異が顕著になった。

(4) 液体キセノンの散乱長の実験値と理論値との明らかな差異を説明することは容易ではない。実験値は、いずれも、液体キセノン中で発生した真空紫外 (VUV) 領域のシンチレーション光の振る舞いを計算シミュレーションと比較して求めている。VUV 光を測定する実験では一般に、種々の不純物による光吸収や蛍光が起きやすいことを考えれば、この実験値は下限値と見ることも出来る。

一方、液体キセノンの散乱長の理論値については、計算に必要な液体キセノンの屈折率と等温圧縮率を自ら高い精度で再評価して計算値を更新したが、液体キセノンのシンチレーションの発光波長の中心値である 174.8nm（文献③）において、散乱長は $39 \pm 2\text{cm}$ （文献④）とやや長くはなったものの、実測値には及ばなかった。なお、散乱長の理論計算では高次の散乱過程を無視することが普通であることから、上記の計算値は上限値と見るべきである。

(5) 以上のように、液体キセノンの散乱長は、実験値と理論値で、およそ 20%にも及ぶ差異があつて、統計的に 5 シグマ以上で有意であり、考慮されていない何らかの効果を新たに取り込んだとしても解消することは難しい状況に陥っている。そこで、この手詰まりな状況を打開するには、何らかの新たな次の一手が求められていた。

2. 研究の目的

(1) 宇宙暗黒物質探索実験は、現在までに、XENONnT, LZ, PandaX-4T など、数トン規模に液体キセノンをを用いた第 2 世代の実験に移行しており、将来的には、DARWIN/XLZD 計画で 100 トン規模の液体キセノンをを用いることも検討され始めている。このように、今後実験の規模をさらに拡大し高精度化する上で、液体キセノンの様々な基本特性を従来以上に正確に把握することがますます重要になっている。

本研究では、液体キセノンの散乱長について、実験値と理論値とに有意な差異がある状況の打開を試みた。散乱長の理論的な計算については、計算に用いる液体キセノンの屈折率と発光波長について我々は高い精度のデータを有しており、また、等温圧縮率についても先行研究の結果を精査して必要なデータを得て用いていることから、当面は修正の余地が見つからない。そこで、本研究では、散乱長の実験値の方に問題解決の新たな手掛かりを求めて、新しい実験手法を開発して新たな実験データを得ることを目指した。これにより、将来の次世代の大型検出器を用いた宇宙暗黒物質実験に貢献することを最終目的とした。

3. 研究の方法

(1) 具体的な方法としては、液体キセノンの散乱長を入射光の波長を変化させながら求める実験を行なった。波長をコントロールする理由は、主たる散乱過程と考えられているレイリー散乱を仮定した散乱長の式に、波長の 4 乗に比例する係数と、VUV-UV 領域で大きく変化する液体キセノンの屈折率の 2 乗を含む複雑な項が含まれているからである。

本研究の結果、求められた散乱長の値が波長の関数としてレイリー散乱の理論式に一致すれば、従来の散乱長の実測値に問題を解く鍵があることを示すことが出来る。反対に、レイリー散

乱の理論式に合わない結果が得られれば、当該の理論式に問題があるか、もしくは未考慮だった他の過程が寄与していることの傍証となる。

なお、液体キセノンのシンチレーション光の波長スペクトルには、もともと固有の広がりがあるからあり、波長の中心値は VUV 領域の 174.8nm で、広がりはおよそ±15nm と 20%近くに及ぶ（文献③）。したがって、本研究で波長の関数として散乱長を求めることが出来れば、検出器内のシンチレーション光のあらゆる散乱過程について、光の波長による違いを考慮して理解することが出来るようになると期待される。

(2) 実験では、これまでに液体キセノンの屈折率や発光波長の測定を通じて得た技術と経験を活かし、既存の実験装置を改造して、液体キセノン中に波長を制御した光源の光を細いビーム状にして通して、通過後の光の強度の測定を行なった。

開発した実験装置の構成を図 1 に、実験装置全体の外観を図 2 に示す。実験装置の大まかな構成と測定の原理は次の通りである：我々が以前に開発した液体キセノンの発光スペクトルの測定装置を再利用し、真空断熱槽の蓋の内側に下げられている小型の液体キセノン容器に波長の決まった細い光ビームを通す。容器には両端に光学窓があり、光を高い効率で通すことが出来るが、液体キセノンが貯められていて散乱を受けると通る光量が減少する。そこで、容器内に液体キセノンが存在する時と存在しない時とで容器を通った後の光ビームの強度を測定すれば、その比から散乱長を求めることが出来る。

(3) この実験手法の最大の特長は、方向が揃った細い光ビームを用いて通過する光を測光することで、散乱光を元の光ビームから分離して測定出来ることである。また、加えて波長が制御されていることで、散乱強度の波長依存性を求めることが出来ることも優れた点である。

先行研究の実験では、液体キセノン自身が発する様々な波長の光が混ざった等方的なシンチレーション光について液体キセノン中での振る舞いを測定していたことから、無散乱光と散乱光とを弁別することは出来ず、精度が高い結果が得られなかった。本研究の実験手法は、これらの点を根本から解決するものである。

なお、この測定原理を最大限に活かすためには、光源の強度が時間的に十分に安定であることと、光の波長が広く可変であること、そして、キセノン容器の内部の反射率が十分に小さいことが重要である。

(4) 波長可変な細いビーム光を生成する光源としては、VUV-UV 領域で透過率が高いフッ化マグネシウム窓を有する高安定な 2Wキセノンフラッシュランプ (HAMAMATSU, L13651-04-3) を用い、既存の VUV 分光器 (Acton, VM-502-S) と組み合わせ、さらに分光器の出射スリットの後段にフッ化マグネシウム製平凸レンズ (Pier Optics, MLPX12.7F14.5) と絞り (THORLABS, SM05D5D) を用いて開発した。フラッシュランプはシングルボードコンピュータの Raspberry Pi 400 を用いて点灯の繰り返し周波数を制御し、分光器は、Raspberry Pi 3 によって設定波長を制御した。

(5) 液体キセノン容器には、以前に発光波長の測定に用いた容積約 11ml の既存の円筒型ステンレス容器を用いた。容器の内径は約 $\phi 16\text{mm}$ 、内部の長さは 70mm であり、両端に ICF34 規格のフッ化マグネシウム窓のビューポートを取り付けた。また、容器内には、散乱光の吸収のため、無機被膜の黒色メッキ (EBINAX, スゴクロ®) を内面に施した内直径 $\phi 11\text{mm}$ のステンレス管を中心軸上に同軸に固定した。

キセノン容器の上部の配管にはパルス管冷凍機 (IWATANI, PDC-08Y) のコールドヘッドがあり、容器内部を約 $2 \times 10^{-4}\text{Pa}$ まで真空にした後に、バッファ容器中のキセノンガスを純化装置 (NuPure, Omni600-VR4-Xe-PF-AC100-H-HS-IVS2) を通して不純物を除去した後、 -108°C に冷却して液化して容器内に貯めた。

(6) 液体キセノン容器を通過させた光ビームは、容器の後段に置いた反射高速電子線回折法 (RHEED) 用途で実績のある蛍光板 (アリオス, $\phi 25\text{mm}$ 4t BK-7 片面 P1-G2 蛍光体膜 片面 AR コート) により可視光に変換した。この可視光は、真空断熱槽の正面の ICF152 規格のガラス窓越

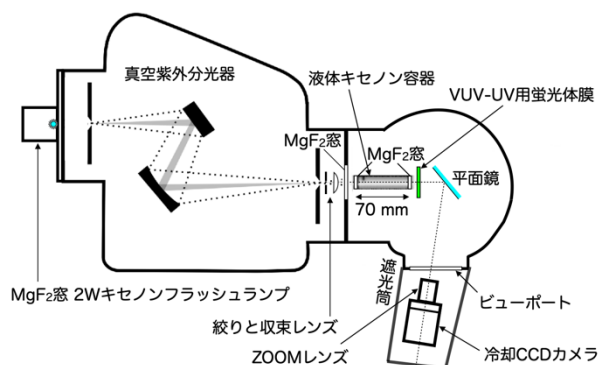


図 1 開発した実験装置の構成

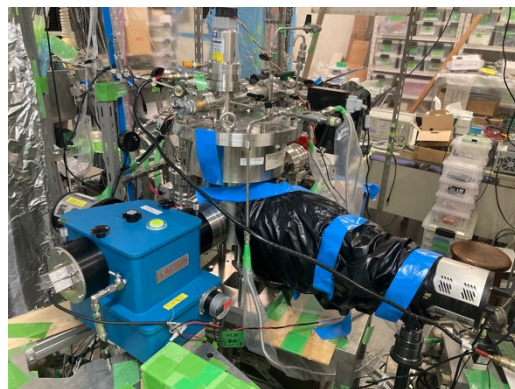


図 2 開発した実験装置の外観

しに、約 40cm の距離に置かれた超高感度冷却 CCD カメラ (Princeton Instruments, PIXIS256E, 1024x256 画素) と民生品のズームレンズ (TAMRON SP 24-135mm 1:3.5-5.6 MACRO) を自作のアダプタで組み合わせた系で測光した。なお、レンズは F5.6 の絞りで望遠端に設定した。カメラは、制御ソフトウェアの LightField6 (Teledyne Japan) を搭載したノート PC によって制御した。

4. 研究成果

(1) 実験装置の開発要素として、波長可変な細い光ビームを生成する光源の開発に成功した。発光波長の範囲は、その短波長端はキセノンフラッシュランプの発光スペクトルで決定され、約 130nm である。また長波長端は分光器の特性で制限され、約 550nm である。なお、キセノンフラッシュランプ内の中性キセノン気体が強く吸収する $147 \pm 4\text{nm}$ だけは殆ど発光は得られなかった。

得られた光ビームについて、平行度の正確な評価は行っていないが、分光器の射出スリットの幅を 1mm (波長幅で約 4nm)、スリット高を 1mm、後段の絞りを直径約 $\phi 1\text{mm}$ にした場合、射出スリットから約 140mm の位置にある蛍光板においてビームを測定したところ、そのサイズがいずれの波長でも縦 4mm 以内×横 1mm 以内と必要十分なレベルに細いことを確認した。縦横のサイズが等しくないのは、分光器内のスリット幅とスリット高を設定する各機構の位置が、光路上で 3mm 程度前後していることが原因であると考えられる。

(2) -76°C に冷却した分光用の超低ノイズの冷却 CCD カメラを活用し、市販のカメラレンズと組み合わせることで、科学計測用の撮像系 (図 3) が構築出来ることを示した。

この撮像系により、真空ゲージに用いられているヒーターが発する近赤外光を環境光に利用して真空断熱槽内の蛍光板を写した像を、図 4 に示す。この画像の解析から、1 画素サイズである約 0.15mm の分解能が確認された。



図 3 開発した撮像系

(3) 入射した光ビームの散乱光が液体キセノン容器の内面で反射して再び透過光に混入することを出来るだけ抑制するため、無機被膜の黒色メッキを内部に施したバツフルを容器内の光路の周囲に導入する手法を開発した。また、用いた無機被膜は液体キセノンに浸しても使用に問題が生じないことを、実際の測定を通じて確認した。

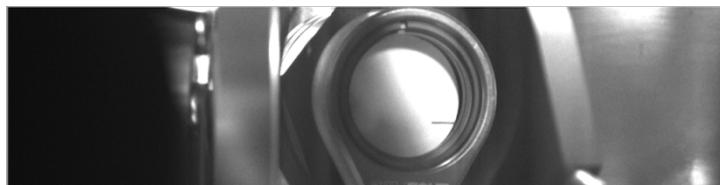


図 4 開発した系で撮像した真空断熱槽内の蛍光板。中央の蛍光板の右下に見える水平線は蛍光板上の傷で、撮像系の焦点を合わせるために利用した。

(4) 本研究で開発した外部光源の細い光ビームをキセノン容器に通して測光しながら、液体キセノンを容器に貯める作業を行なって、観測された光ビームの像が液体キセノンの液面上昇によって変化することを確認することが出来た (図 5)。この結果は、液体キセノンの新しいタイプの液面計を構築する可能性を拓くものである。



図 5 液体キセノンの液面により変形した光の像

(5) 液体キセノン容器に、波長を制御した外部光源の細い光ビームを通し、液体キセノンがある時と無い時のそれぞれの場合について、蛍光板上に観察された光ビームのプロファイルの画像を取得した。

光源のキセノンフラッシュランプは、安定した出力になるよう、主放電電圧は内部設定で low とし、500Hz で連続点灯した。測光系の冷却 CCD カメラの設定は、センサ温度を -76°C 、ゲインは High、露光時間は 60 秒とし、各波長毎に連続して 4 フレーム取得した。なお、この露光条件では、前方の散乱光は微弱で検出されなかった。典型的な画像として、図 6 に、液体キセノンが貯まっている状態で波長を 174nm に

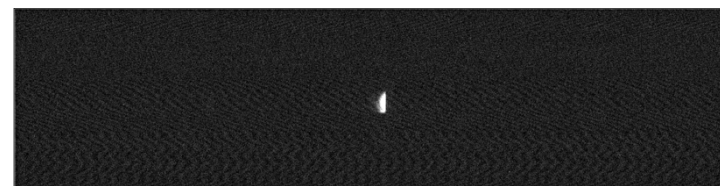


図 6 光ビームが当たった蛍光板の典型的な発光

液体キセノンが貯まっている状態で波長を 174nm に

設定して光ビームを通した時の蛍光板の画像を示す。

(6) 図6に示したような信号の画像を、VUV-UV領域の134-275nmの波長において、VUV領域では2-4nm間隔、UV領域では5-25nm間隔で4フレームずつ取得した。取得した各画像は、パブリックドメインの画像解析ソフトウェアのImageJを用いて、蛍光体が光っている領域を対象領域(ROI)に設定して、周辺部分から求めた基準レベルを差し引いて積算された蛍光量を算出した。なお、画像に環境放射線により生じたノイズの発光が重なった場合には、当該の画像を棄却した。

なお、液体キセノンの有無により、液体キセノン容器の両端の窓の内側表面で入射光の反射量が異なることから、この影響を液体キセノンの屈折率とフッ化マグネシウムの屈折率を波長の関数として用いて計算した反射率により評価し、光量を補正した。

このようにして求めた、キセノン容器の液体キセノンの有無による光量比の初期の結果を、波長の関数として、図7に赤丸で示す。なお、黒丸はレイリー散乱で予想される光量比である。ここで、波長によって光量比の誤差の大きさが異なるのは、主に、測定される光量が、光源の発光スペクトルと蛍光体の励起スペクトルを反映して波長毎に異なることによる。また、加えて、光学系の組み立て精度からキセノン容器内に導入したバツフルの影響が部分的に懸念されることから、波長の長いUV領域では光量比が1と無矛盾になるはずであると考えて、暫定的に誤差を大きめに付した。

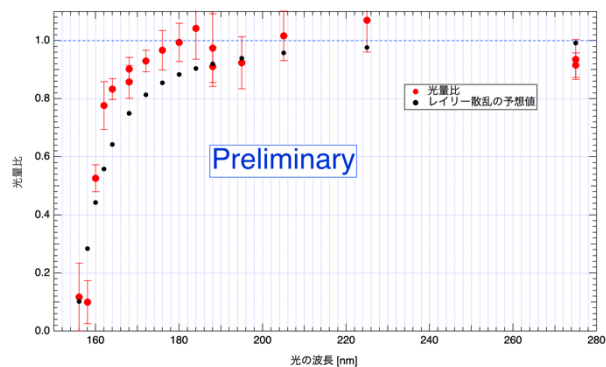


図7 液体キセノンの有無による透過光量の比

結果として、図7に示す様に、UV領域に比してVUV領域では波長が短くなるほど光量比が1から有意に小さくなり、レイリー散乱を仮定した場合と類似の減少傾向を示す結果が得られた。ただし、減少の程度についてはレイリー散乱で期待されるレベルよりもやや小さく、ずれを示している。このずれが有意かどうかを判断するのは時期尚早ではあるものの、このように液体キセノン中での光の散乱強度の波長依存性を直接的に示すデータは、従来に報告されたことがない新しい知見である。

(7) 以上のように、本研究によって新たに開発した実験手法の基本的な優位性が明らかに示されたことから、例えば光源の強度を上げ光学系の組み立て精度をさらに上げるなどの様々な地道な改良を実験装置に施せば、今後散乱強度の測定精度を確実に高められる見通しが立ったと言える。そして、将来に高精度のデータが得られるようになれば、次世代の大型検出器を用いた宇宙暗黒物質実験に直接大きく貢献出来ると考えられる。

<引用文献>

- ① G.M.Seidel et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 489 (2002) 189-194.
- ② H.Takiya et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 834 (2016) 192-196 ; 大谷航氏 私信.
- ③ K.Fujii et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 795 (2015) 293-297.
- ④ 武田紘樹 他, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016) 24aSG-5.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷山天晴, 中村正吾, 小林和哉, 吉本圭佑, 出石汐里, 笠見勝祐, 斎藤究, 佐々木慎一, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノンの赤外発光の測定-9
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷山天晴, 中村正吾, 小林和哉, 吉本圭佑, 出石汐里, 笠見勝祐, 斎藤究, 佐々木慎一, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノンの赤外発光の測定-10
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村正吾, 谷山天晴, 笠見勝祐, 斎藤究, 佐々木慎一, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノン中の散乱長測定のための装置開発-6
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村正吾, 谷山天晴, 吉田裕哉, 笠見勝祐, 斎藤究, 佐々木慎一, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノン中の散乱長測定のための装置開発-5
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村正吾, 谷山天晴, 笠見勝祐, 齋藤究, 佐々木慎一, 俵裕子, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノン中の散乱長測定のための装置開発-3
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村正吾, 谷山天晴, 笠見勝祐, 齋藤究, 佐々木慎一, 俵裕子, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノン中の散乱長測定のための装置開発-4
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村正吾, 狩野芳樹, 笠見勝祐, 齋藤究, 佐々木慎一, 俵裕子, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノン中の散乱長測定のための装置開発
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 狩野芳樹, 中村正吾, 笠見勝祐, 齋藤究, 佐々木慎一, 俵裕子, 春山富義, 三原智, 森山茂栄
2. 発表標題 液体キセノン中の散乱長測定のための光学系のシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村正吾, 狩野芳樹, 田岡和樹, 笠見勝祐, 齋藤究, 佐々木慎一, 依裕子, 春山富義, 三原智
2. 発表標題 液体キセノン中の散乱長測定のための装置開発-2
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019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
研究協力者	笠見 勝祐 (KASAMI Katsuyu)		
研究協力者	齋藤 究 (SAITO Kiwamu)		
研究協力者	佐々木 慎一 (SASAKI Shinichi)		
研究協力者	春山 富義 (HARUYAMA Tomiyoshi)		
研究協力者	三原 智 (MIHARA Satoshi)		

6. 研究組織（つづき）

	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	森山 茂栄 (MORIYAMA Shigetaka)		
研究協力者	俵 裕子 (TAWARA Hiroko)		
研究協力者	狩野 芳樹 (KANOU Yoshiki)		
研究協力者	田岡 和樹 (TAOKA Kazuki)		
研究協力者	武田 紘樹 (TAKEDA Hiroki)		
研究協力者	谷山 天晴 (TANIYAMA Tensei)		
研究協力者	吉田 裕哉 (YOSHIDA Yuya)		

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
---------	---------