

平成 31 年 4 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26104004

研究課題名(和文)大型実験装置による暗黒物質の直接探索

研究課題名(英文)A large-scale darkmatter direct-detection experiment

研究代表者

岸本 康宏(KISHIMOTO, Yasuhiro)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：30374911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 226,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、この宇宙最大の謎の1つ、暗黒物質の謎に迫るべく、大型実験装置による暗黒物質探索と、次世代暗黒物質探索装置の開発・研究という2つの課題に取り組んだ。前者に対しては、先行研究(DAMA/LIBRA)が主張する暗黒物質による季節変動事象を追試し、その結果を否定した。その他、Bosonic-Super WIMPsと呼ばれる暗黒物質候補の探索を行い、「ベクトル型のは暗黒物質の主要成分とはなり得ない」という結論を、世界で初めて公表した。後者の課題については、超低バックグラウンド技術を開発・改良した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々は、宇宙の物質の約20%しか知らない。残り約80%は未知の暗黒物質で占められている。この正体を解明すること無しに、宇宙を知ったとは言えない。本研究は、この暗黒物質の正体を解明すべく、大型実験装置XMASSを用いて探索を行った。先行研究(DAMA/LIBRA実験)では、標準的な暗黒物質が引き起こす季節変動事象が観測されていたが、本実験はその結果を大統計で追試し、「そのような季節変動はない」と結論づけた。暗黒物質が何か？この謎にたいする答えは、将来の実験に委ねられることとなったが、そこでは、本研究で開発した超低バックグラウンドの成果が応用されると期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to address to one of the biggest mysteries in the universe, the dark matter, this research project has challenged two tasks: dark matter search with a large-scale experimental apparatus, and development and research of a next-generation dark matter search apparatus.

As for the first subject, in this study, we searched for the seasonal modulation signal by dark matter, which the previous research (DAMA / LIBRA) claims, and denied the result. In addition, we searched for dark matter candidates called Bosonic-Super WIMPs, and for the first time published the conclusion that "the vector type cannot be the main component of dark matter". For the second issue, we developed and improved ultra-low background technology.

研究分野：天体素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 超低放射能技術

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究の開始当時、現代の素粒子物理学・宇宙物理学にあって非常に重要なテーマであるにも拘らず、暗黒物質をめぐる状況は混んとしていた。

先行実験 (DAMA/LIBRA 実験) が暗黒物質に起因する季節変動事象を主張する、一方、他の幾つかの実験は、そのような季節変動を生じさせる暗黒物質の存在を否定していた。

このような状況下、季節変動事象を先行実験と同程度以上の大統計で追試・検証すること、そして、暗黒物質をより詳細に、高感度で暗黒物質を探索/測定するために、大型で極低バックグラウンドの装置の開発・研究することが必要とされていた。

### 2. 研究の目的

本研究は、1) 大型実験装置 XMASS を用いて暗黒物質を探索すること、特に DAMA/LIBRA を追試すること、2) 将来の大型暗黒物質実験装置の開発・研究を推進することを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では、大型液体キセノンシンチレータ XMASS を用いて、暗黒物質の探索を行う。季節変動事象の追試が大きな目標の1つであるため、安定的なデータ取得が非常に重要となる。また、次世代暗黒物質探索では、極低バックグラウンド化が必須である。極低バックグラウンド化した、新型の電子増倍管の開発、極低バックグラウンドの測定装置の開発などを推進する。

### 4. 研究成果

#### 1) WIMP による季節変動事象の探索

本研究では、先行研究 (DAMA/LIBRA 実験) の主張する、WIMP と呼ばれる暗黒物質による季節変動事象を 3 で否定した。これは、本研究の当初目標の1つを達成した成果であり、「季節変動事象は標準的な暗黒物質によるものではない」と結論づけられる、大きな成果であった。

更に、本研究では、観測エネルギー閾値を下げ、暗黒物質との相互作用による原子核の制動放射光を捉えることが可能とし、その結果、0.3 GeV までの暗黒物質の探索に成功した。結果は、0.5 GeV の暗黒物質に対し、散乱断面積は  $1.6 \times 10^{-33} \text{ cm}^2$  以下 (信頼度 90%) との成果を得た。この結果は低質量暗黒物質に特化した検出器の成果には及ばないものの、これまで考慮されていなかった物理過程を考慮することで、より広く暗黒物質の探索が可能であることを示した。

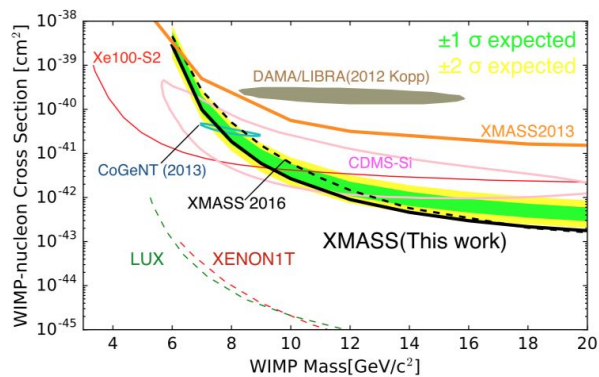


図 1: 暗黒物質のパラメータ領域 (2018 年)

横軸が暗黒物質質量、縦軸が核子で規格化した相互作用断面積。中央金色の領域は、先行研究が発見を主張する領域。本研究は、黒太線より上を 90% 信頼度で排除した。

#### 2) バックグラウンドを考慮した暗黒物質 WIMPs 事象の探索

本研究では、季節変動を用いない暗黒物質解析も行った。その結果、暗黒物質信号は発見することが出来ず、質量 60 GeV の暗黒物質に対し、散乱断面積は  $2.2 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$  以下 (信頼度 90%) であるという制限を課した。LUX 実験、XENON 実験などの超高感度探索実験では、暗黒物質と原子核の弾性散乱の事象に限定して探索しているのに対し、XMASS は電子散乱の事象にも感度を有しているため、相補的な実験結果となっている。

#### 3) 他の暗黒物質の探索

暗黒物質の有力候補は WIMPs と呼ばれる粒子であるが、本研究では、更に幅広い暗黒物質候補を探索した。

その1つが、Bosonic Super-WIMPs と呼ばれる未知の素粒子である。XMASS は、2014 年、これらの暗黒物質探索を実施し、「熱的生成メカニズムではベクトル型の Bosonic-super WIMPs は暗黒物質の主要成分ではない」との成果を、世界で初めて公表した。更に 2018 年、更に高感度化した探索を実施し、世界で最も厳しい制限を課している。

また、暗黒物質がキセノン原子核を励起する素過程を用いた暗黒物質探索も行った。この素過程では、暗黒物質が原子核スピンに依存した相互作用をする場合に高い感度を有する。この解析では感度が従来約 8 倍と高感度であったが、暗黒物質発見には至らず、200 GeV の暗黒物質に対し、散乱断面積は  $4.1 \times 10^{-39} \text{ cm}^2$  以下という、世界で最も厳しい制限を課した。

#### 4) 暗黒物質以外の物理学

本研究では、当初の計画を超え、暗黒物質以外の物理学でもいくつかの成果を達成した。

1 つは、キセノンの電子二重捕獲事象の探索である。電子二重捕獲は、未だ発見されておらず、発見されれば、世界初となる。しかし、二重電子捕獲事象を発見することは出来ず、半減期の下限値として  $T_{1/2} (^{124}\text{Xe}) > 2.1 \times 10^{22}$  年、 $T_{1/2} (^{126}\text{Xe}) > 1.9 \times 10^{22}$  年という世界で最も厳

しい制限を課しことに成功した。この成果は、原子核行列要素の計算におけるいくつかの理論モデルを排除しており、従って、この分野の発展を促すと考えられる。

さらに、XMASSでは天体素粒子物理学でも成果を残した。1つは、超新星ニュートリノ天文台としての機能である。我々は、2017年にXMASSで近傍超新星からのニュートリノの観測が可能であることを示し、その後、データ収集系を改良し、超新星ニュートリノの観測に備え、24時間365日の観測体制を構築した。更に、2015年9月の重力波観測を受け、重力波天体と関連のある事象の探索を行った。現在までのところ、重力波天体と関連のある事象は見つかっていないが、XMASSがマルチメッセンジャー天文学の1つとして機能した。

#### 5) 極低バックグラウンド技術

現在までのところ、素粒子暗黒物質は未発見のままである。そのため、次世代の暗黒物質探索装置は、今まで以上に高感度であることが必要であり、従って、バックグラウンド源である放射性元素を排除して装置を構築する必要がある。このためには、超高感度の測定装置が必須である。本研究では、表面アルファ線検出器、Ge半導体検出器などを低バックグラウンド化することに成功し、これらを用いて、放射性元素の少ない物質を高い感度で選択することが可能となった。これらの低バックグラウンド測定装置を用いて、極低放射能光電子増倍管の開発に成功した。この光電子増倍管は、これまでの製品に比べ約10分の1の低放射能化に成功した。更に、一層式キセノンTPC、石英内包型の二層式キセノンTPCなど、大質量化、低バックグラウンド化という次世代の暗黒物質検出器に必須の要素の基礎研究を行った。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13件)

1. T. Suzuki, K. Ichimura (4番目), Y. Kishimoto (5番目), K. Kobayashi (6番目), H. Ogawa (10番目), et al (XMASS collaboration, 計36名), Search for WIMP-129Xe inelastic scattering with particle identification in XMASS-I, *Astroparticle Physics* (査読有), 110 (2019) 1-7, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2019.02.007
2. K. Abe, K. Ichimura (3番目), Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (10番目), et al (XMASS collaboration, 計41名), Development of low radioactivity photomultiplier tubes for the XMASS-I detector, *Nuclear Inst. And Methods in Physics Research A* (査読有), A922 (2019) 171-176, DOI: 10.1016/j.nima.2018.12.083
3. K. Abe, K. Ichimura (3番目), Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (9番目), et al (XMASS collaboration, 計37名), Search for dark matter in the form of hidden photons and axion-like particles in the XMASS detector, *Physics Letters B* (査読有), B787 (2018) 153-158, DOI: 10.1016/j.physletb.2018.10.050
4. K. Abe, K. Ichimura (3番目), Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (9番目), et al (XMASS collaboration, 計37名), A measurement of the scintillation decay time constant of nuclear recoils in liquid xenon with the XMASS-I detector, *Journal of Instrumentation* (査読有), (2018) 13 P12032, DOI: 10.1088/1748-0221/13/12/P12032
5. K. Abe, K. Ichimura (3番目), Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (10番目), et al (XMASS collaboration, 計41名), A direct dark matter search in XMASS-I, *Physics Letters B* (査読有), B789 (2019) 45-53, DOI: 10.1016/j.physletb.2018.10.070
6. K. Abe, K. Ichimura (3番目), Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (10番目), et al (XMASS collaboration, 計41名), Direct dark matter search by annual modulation with 2.7 years of XMASS-I data, *Physical Review D* (査読有), D97 102006 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevD.97.102006
7. K. Abe, K. Ichimura (3番目), Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (10番目), et al (XMASS collaboration, 計41名), Improved search for two-neutrino double electron capture on 124Xe and 126Xe using particle identification in XMASS-I, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (査読有), 2018 053D03, DOI: 10.1093/ptep/pty053
8. K. Abe, Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (10番目), B.S. Yang (17番目) et al (XMASS collaboration, 計41名), Identification of 210Pb and 210Po in the bulk of copper samples with a low-background alpha particle counter, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, (査読有). A884 (2018) 157-161, DOI:10.1016/j.nima.2017.12.015
9. N. Oka, Y. Kishimoto (5番目), K. Kobayashi (6番目), H. Ogawa (11番目), B. S. Yang (18番目) et al (XMASS collaboration, 計41名), Search for solar Kaluza-Klein axions by annual modulation with the XMASS-I detector, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (査読有) 2017, 103C01, DOI:10.1093/ptep/ptx137
10. K. Abe (1番目), K. Ichimura (3番目), Y. Kishimoto (4番目), K. Kobayashi (5番目), H. Ogawa (11番目), B. S. Yang (16番目) et al (XMASS collaboration, 計43名),

- Detectability of galactic supernova neutrinos coherently scattered on xenon nuclei in XMASS, *Astropart. Phys.*, (査読有). 89 (2017) 51-56, DOI:10.1016/j.astropartphys.2017.01.006
11. H. Takiya (1 番目), K. Ichimura (4 番目), Y. Kishimoto(5 番目), K. Kobayashi(6 番目), H. Ogawa (11 番目), B.S. Yang(17 番目) et al (XMASS collaboration, 計 39 名), A measurement of the time profile of scintillation induced by low energy gamma-rays in liquid xenon with the XMASS-I detector, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, (査読有). A834 (2016) 192-196, DOI:10.1016/j.nima.2016.08.014
  12. K. Abe (1 番目), K. Ichimura (3 番目), Y. Kishimoto(4 番目), K. Kobayashi(5 番目), H. Ogawa (10 番目), B.S. Yang(15 番目) et al (XMASS collaboration, 計 41 名), Direct dark matter search by annual modulation in XMASS-I, *Phys. Lett. B*759 (査読あり)(2016) 272-276 , DOI:10.1016/j.physletb.2016.05.081
  13. K. Abe (1 番目), K. Ichimura (3 番目), Y. Kishimoto(4 番目), K. Kobayashi(5 番目), H. Ogawa(11 番目), B.S. Yang(16 番目) et al (XMASS collaboration, 計 43 名), Search for two-neutrino double electron capture on  $^{124}\text{Xe}$  with the XMASS-I detector, *Phys. Lett. B*759 (査読あり)(2016) 64-68 , DOI:10.1016/j.physletb.2016.05.039

[学会発表](計 151 件)

**国内発表**(101 件)

1. 石井瞭, XMASS 実験: 暗黒物質直接検出に向けた 1 相式液体キセノン TPC による低エネルギー比例蛍光の観測, 日本物理学会第 74 回年次大会, (2019)
2. 佐藤和史, XMASS 実験: 石英容器を用いた 2 相型キセノン TPC の開発, 日本物理学会第 74 回年次大会, (2019)
3. 市村晃一, XMASS 実験: ニュートリノの出ない 4 重ベータ崩壊の探索, 日本物理学会第 74 回年次大会, (2019)
4. 小川洋, XMASS 実験: XMASS-I 検出器におけるエキゾチックなニュートリノ相互作用の探索, 日本物理学会第 74 回年次大会, (2019)
5. 小林兼好, 液体キセノンを用いた暗黒物質探索, 平成 30 年度東京大学宇宙線研共同利用研究成果発表会, (2018)
6. 市村晃一, XMASS 実験: 中性子線源を用いた液体キセノンの原子核散乱の発光時定数測定, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018)
7. 市村晃一, XMASS の報告, 新学術「地下素核研究」, 「極低放射能技術」研究会 (2018)
8. 平出克樹, XMASS, 新学術「地下素核研究」第 4 回超新星ニュートリノ研究会 (2018)
9. 佐藤和史, XMASS 実験-液体 Xe シンチレーター-, *Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies* (2017)
10. 小林兼好, XMASS 実験: アルファカウンタによる銅バルク中の微量 Pb210, Po210 の測定, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017)
11. 小川洋, XMASS 実験: 有効体積解析による暗黒物質探索の為にバックグラウンドの評価, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017)
12. 森山茂栄, 暗黒物質実験の展開, 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」領域研究会 (2017)
13. 岸本康宏, 地下素核研究 B01「大型検出装置による暗黒物質直接探索」, 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」領域研究会 (2017)
14. 小川洋, XMASS 実験: 有効体積解析による暗黒物質探索の為に系統誤差の評価, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017)
15. 市村晃一, XMASS 実験: 低エネルギー中性子線源の開発研究, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017)
16. 梁炳守, XMASS 実験: XMASS 検出器の電子散乱事象に対するエネルギー応答の研究, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017)
17. 小林兼好, XMASS 実験: 表面バックグラウンドの除去研究 2, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017)
18. 市村晃一, XMASS 実験: 中性子による原子核散乱を用いた XMASS 検出器の較正, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016)
19. 小林兼好, XMASS 実験: 表面バックグラウンドの除去研究, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016)
20. 小川洋, XMASS 実験: 暗黒物質探索における有効体積内バックグラウンドと、その系統誤差の評価, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016)
21. 小川洋, XMASS 実験: 有効体積領域での暗黒物質探索におけるバックグラウンドの評価, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016)
22. 市村晃一, XMASS 実験: 中性子による原子核散乱を用いた XMASS 検出器の較正, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016)
23. 毛笠莉沙子. 比例蛍光読み出しによる XMASS 実験テストベンチの開発~GEM による液相

- 増幅, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016)
24. 小林兼好, XMASS 実験: 低バックグラウンドアルファ線検出器による表面バックグラウンド研究 2, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016)
  25. 市村晃一, XMASS 実験: 中性子による原子核散乱を用いた XMASS 検出器の較正, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015)
  26. 梁炳守, XMASS 実験: 内部較正と検出器シミュレーションを用いた検出器の安定性評価, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015)
  27. 小林兼好, XMASS 実験: 低バックグラウンドアルファ線検出器による表面バックグラウンド研究, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015)
  28. 小川洋, XMASS 実験: XMASS 検出器におけるバックグラウンドの理解, 日本物理学会第 70 回年次大会 (2015)
  29. 梁炳守, XMASS 実験: 検出器シミュレーションのパラメータチューニング, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014)
  30. 小川洋, XMASS 実験: XMASS 検出器改造後の暗黒物質探索におけるバックグラウンドの理解について, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014)
  31. 市村晃一, XMASS 実験: 中性子による原子核散乱を用いた XMASS 検出器の較正, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014)
- 他 67 件

#### 国際発表 (50 件)

1. Y. Kishimoto, The XMASS experiment, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019, (2019)
2. K. Ichimura, Recent results from the XMASS experiment, The 4th International Conference on Science, Application and Technology of Xenon Radiation Detector, (2018)
3. K. Kobayashi, Dark matter searches in XMASS, XXXIX International Conference on High Energy Physics, (2018)
4. K. Sato, Search for dark matter in the form of axion-like particles and hidden photons in the XMASS detector, 14th AxionWIMP conference, (2018)
5. B. Yang, XMASS Experiment, 日本物理学会第 73 回年次大会・日韓シンポジウム(2018)
- 6.
7. K. Ichimura, Solar axion search by annual modulation with XMASS-I detector, XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (2017)
8. K. Kobayashi, Recent results with XMASS, Exploring the Dark Universe (2017)
9. H. Ogawa, WIMPs search with background evaluation into fiducial volume by XMASS detector, 35<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference (2017)
10. B. Yang, The recent results from the annual modulation analysis of the XMASS-I dark matter data, 35th International Cosmic Ray Conference (2017)
11. K. Kobayashi, Identification of <sup>210</sup>Pb and <sup>210</sup>Po in the bulk of copper with low background alpha counter, Low Radioactivity Techniques 2017 (2017)
12. K. Sato, Dark matter search in XMASS, International Workshop in Double Beta Decay and Underground Science “DBD2016” (2016)
13. K. Hiraide, Recent results of direct dark matter search with XMASS, ICHEP2016 (2016)
14. K. Abe, Future XMASS project, ICHEP2016 (2016)
15. B. Yang, Recent results and future plans of XMASS, 12<sup>th</sup> Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (2016)
16. K. Kobayashi, Dark matter search with XMASS, Warsaw Workshop in Non-Standard Dark Matter
17. K. Ichimura, Recent results from XMASS, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2016 (2016)
18. 平出克樹, Search for double electron capture on <sup>124</sup>Xe with the XMASS-I detector, XIV Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2015) (2015)
19. 平出克樹, Results from the annual modulation analysis of the XMASS-I dark matter data, 34<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference (ICRC2015) (2015)
20. 竹田敦, Results from the fiducial volume analysis of the XMASS-RFB dark matter data, 34<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference (ICRC2015) (2015)
21. 市村晃一, XMASS1.5, the next step of the XMASS experiment, 34<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference (ICRC2015) (2015)
22. 小林兼好, Surface purity control during XMASS detector refurbishment, Low Radioactivity Techniques (LRT2015) (2015)
23. 梁炳守, The XMASS experiment, International Workshop in Double Beta Decay and Underground Science “DBD2014” (2014)
24. 小川洋, XMASS experiment, VHEPU2014 (2014)

25. 小林兼好, Direct Dark Matter Search with XMASS, ICHEP2014 (2014)  
26. 市村晃一, The XMASS experiment, 10<sup>th</sup> Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (2014)  
他 2 4 件

〔その他〕

ホームページ等 <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/index.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：梁 炳守 (H26 から H29 年度まで)

ローマ字氏名：(YANG, Byeongsu)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：特任助教

研究者番号 (8 桁): 10626055

研究分担者氏名：小川 洋

ローマ字氏名：(OGAWA, Hiroshi)

所属研究機関名：日本大学

部局名：理工学部

職名：助手

研究者番号 (8 桁): 20374910

研究分担者氏名：小林 兼好

ローマ字氏名：(KOBAYASHI, Kazuyoshi)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：特任助教

研究者番号 (8 桁): 20374910

研究分担者氏名：市村 晃一

ローマ字氏名：(ICHIMURA, Kouichi)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：特任助教

研究者番号 (8 桁): 80600064

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：安部 航

ローマ字氏名：(ABE, Ko)

研究協力者氏名：鈴木 洋一郎

ローマ字氏名：(SUZUKI, Yoichiro)

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。