

令和元年6月14日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25246039

研究課題名(和文) 増倍率2万倍の自発的共鳴型・レーザー光発振蓄積空洞による高強度ガンマ線源の実現

研究課題名(英文) Study of gamma-ray generation by using self-resonating enhancement optical cavity

研究代表者

大森 恒彦 (OMORI, Tsunehiko)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：80185389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,690,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー増幅器とレーザー光蓄積空洞を光学的に一体とし、共鳴状態を実現する波長を系が自発的に選択する全く新しい着想の「自発的共鳴型・レーザー発振蓄積空洞」を開発した。CW発振にて約19万倍という非常に高い増倍率をもつ光共鳴蓄積空洞の動作に成功し、自発的な共鳴・発振を確認した。約19万倍という非常に高増倍率にもかかわらず、自発共鳴・発振のための一切のフィードバック制御は不要で、自発共鳴・発振というコンセプトの正しさを実証できた。またモードロックパルス化の研究も行い、まだ増倍率の低い状態ではあるが自発的な共鳴・発振の確認に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー・電子衝突により逆コンプトン散乱で生成されるX線/γ線は準単色性、偏光制御、エネルギー可変など優れた特徴を持つ。この方法により実用上の意味を持つような強度のX線/γ線を生成するためには、レーザー光の強度が重要な意味を持つ。レーザー光を光共振器空洞中に蓄積し、元の強度を何桁も上回る高強度のレーザー光を作る事ができる。本研究では光共振器空洞中のレーザー光蓄積の限界を決めていた要因の一つである、ミラー間隔のフィードバック制御の問題を、自発発振によるフィードバック不要化により取り除く目処をつける事ができた。

研究成果の概要(英文)：A power enhancement optical cavity is a compelling means of realizing high laser power. However, a precise feedback system is necessary for maintaining the narrow resonance condition of the optical cavity; this has become a major technical issue in developing such cavities. We have developed a new approach that does not require any active feedback system, by placing the cavity in the outer loop of a laser amplifier. We demonstrated the CW operation of the new system. The effective finesse of the cavity was measured to be 394,000, and the laser power stored in the cavity was approximately 187,000 times greater than the incident power to the cavity. The stored power was stabilized with a fluctuation of 1.7%, and we confirmed continuous cavity operation. This result has the potential to trigger an innovative evolution for applications that use optical resonant cavities. We also performed the first demonstration of a mode-locked pulse oscillation using the new system.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：レーザー光蓄積 光空洞 自発的共鳴 ガンマ線源 偏極粒子源 偏極陽電子源 X線源 国際リニアコライダー

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

高強度の偏極ガンマ線/X線ビームは物理の多くの分野で有力な実験手段となる。

素粒子物理分野で計画中の国際リニアコライダー ILC では、偏極ガンマ線から生成した偏極陽電子ビームを使用する事でカップリングを制御し、生成する粒子を選択しバックグラウンド事象を大幅に抑制出来る。一般に生成された新粒子は弱い相互作用の固有状態の混合であるが、偏極ビームを使えばその混合割合を解く事が出来る。

物性物理の分野では、偏極 X 線により物質中の電子のスピン磁気能率と軌道磁気能率の分布の観測が可能になり、巨大磁気抵抗効果のより深い理解などが期待できる。

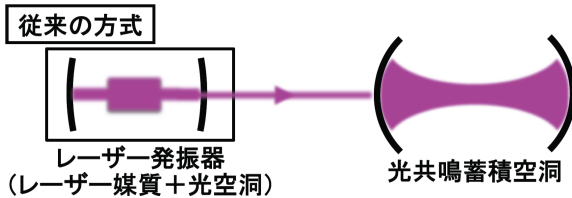
我々は ILC の偏極陽電子源として、円偏光レーザーと電子ビームを衝突させ高強度の偏極ガンマ線を作るコンプトン方式を提案している。最近それを光蓄積型へと発展させ研究を続けている。この中で光蓄積増倍率を 10 倍以上向上させる事の出来る本研究の着想を得た。

## 2. 研究の目的

レーザー増幅器とレーザー光蓄積空洞を光学的に一体とし、共鳴状態を実現する波長を系が自発的に選択する全く新しい着想の「自発的共鳴型・レーザー発振蓄積空洞」を開発する。これを高エネルギー加速器研究機構の電子蓄積リングに挿入し、高強度円偏光レーザー光と電子ビームを衝突させ、コンプトン散乱による高強度・偏極ガンマ線生成を実証する。この光蓄積空洞は、低エネルギーの電子ビームと組み合わせれば X 線生成にも適用でき、極めて広い応用範囲を持つ。

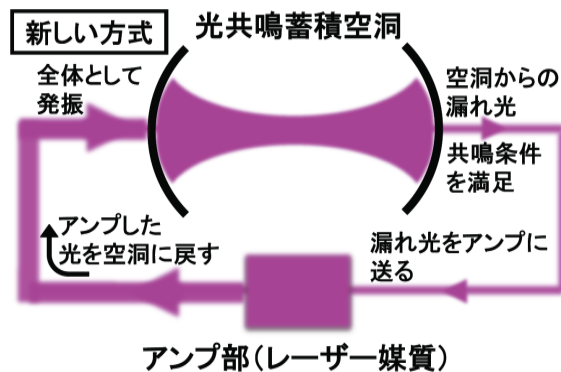
## 3. 研究の方法

レーザー光を光共鳴空洞中に蓄積する事により、元の強度を何桁も上回る高強度の光を作る事ができる。現在すでに蓄積増倍率 1000 倍以上の空洞が実現している。本申請の方式ではこれを 10 倍以上向上させ 1 万～2 万倍の蓄積増倍率を実現することが期待出来る。



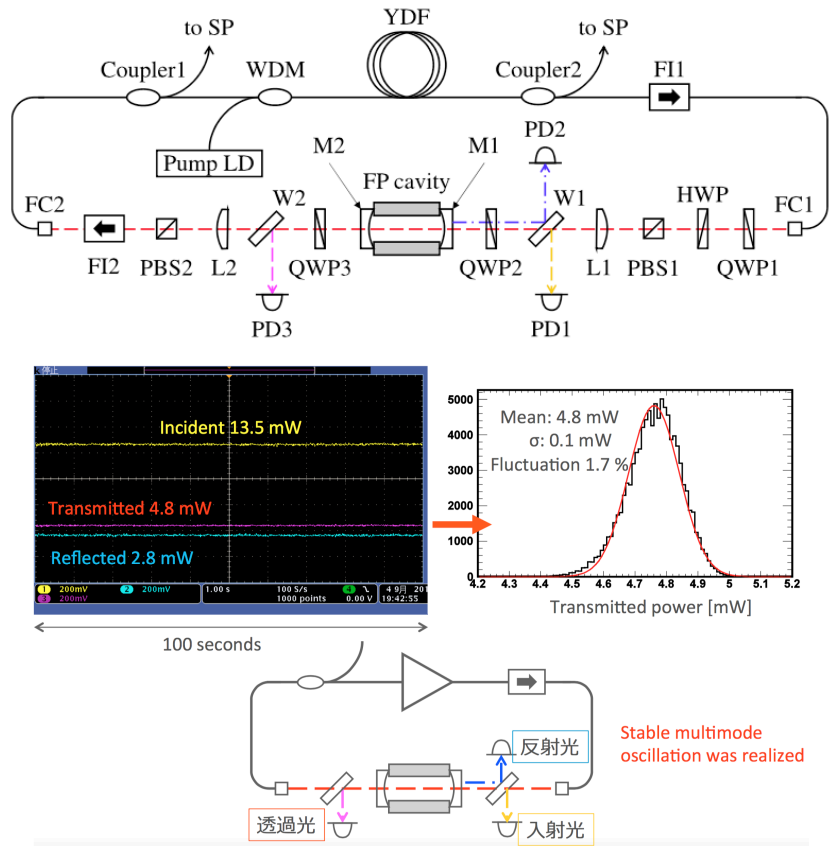
最も簡単な 2 枚ミラー型レーザー光蓄積空洞はファブリ-ペロ型光共振器であり、レーザー光を入射すればミラー間で反射を繰り返し光は閉じ込められる(左図)。ミラー間隔を精度良く制御し、全ての波の位相を揃えれば閉じ込めた光の振幅は何倍にも”増倍”される。ミラー間隔の制御は、蓄積光をモニターし共鳴を維持するようにミラーの位置をピエゾ素子によるフィードバックにより行なってきた。ミラー間隔は「半波長÷増倍率」よりも十分に小さい値で制御される必要があり。波長 1 ミクロン、増倍率 1000 倍では 0.2 nm よりも十分小さい精度が要求され、これが増倍率の上限を決めて来た。

本研究ではこの制限を完全に取り除く事が出来るレーザー増幅器と光共鳴空洞を光学的に一体にしたシステムを提案する(右図)。光共振器を共鳴通過した漏れ光が種光となって、レーザー増幅器で増幅され再び共振器に入射される。増幅のゲインが周回ロスを上回れば発振状態になる。発振は自然発生光ノイズから始まり、空洞の共鳴条件を満足する成分だけが成長する。人為的制御は不要で、共鳴状態を実現する波長を系が自発的に選択する。

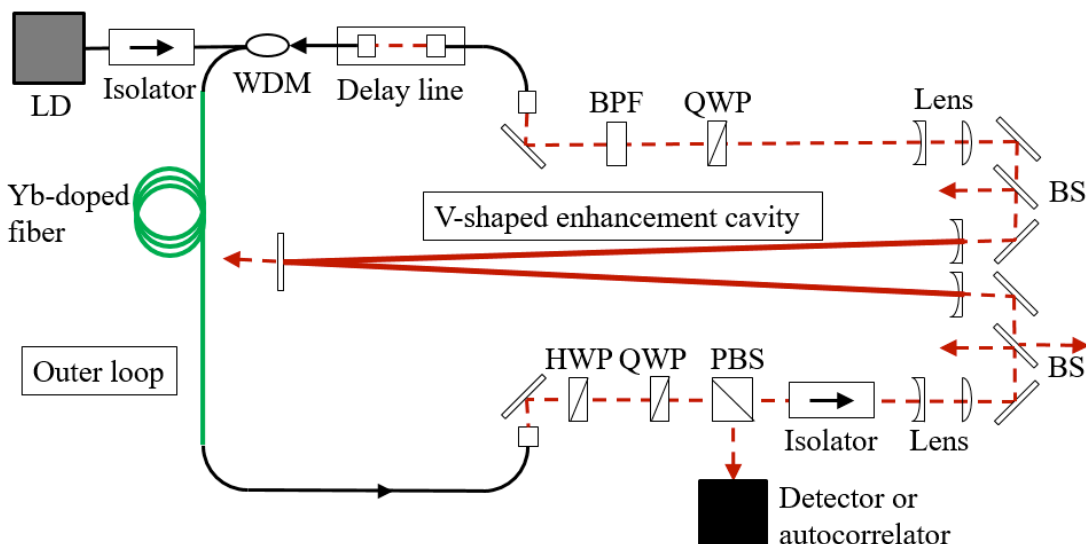
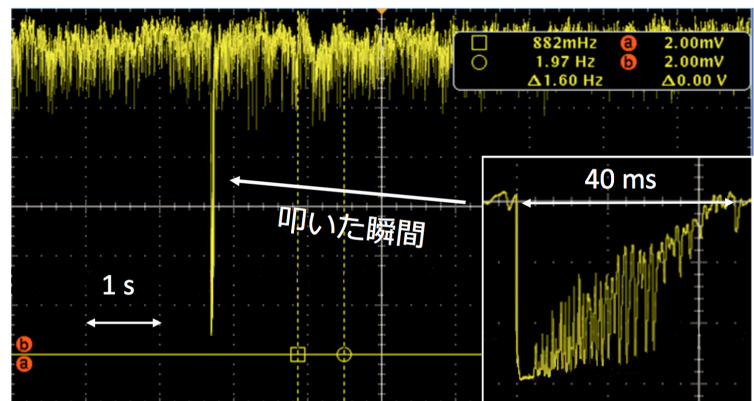


#### 4. 研究成果

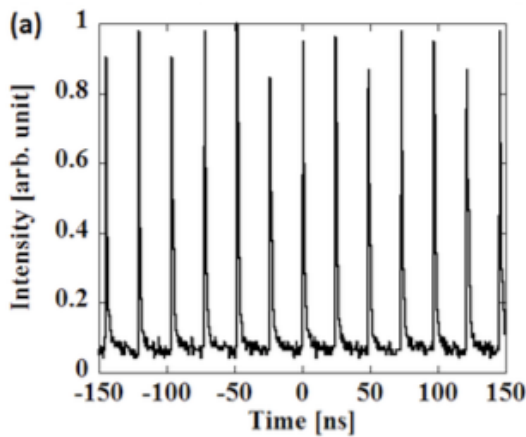
CWにて非常に増倍率の高い空洞を開発した。約19万倍という非常に高い増倍率をもつ光共鳴蓄積空洞(右図)の動作に成功し、自発的な共鳴・発振を確認した。これはCWではあるが、目標を1桁上回る値である。約19万倍という非常に高増倍率にもかかわらず、自発共鳴・発振のための一切のフィードバック制御は不要であった。発振強度のふらつきは1.7%と小さく十分な安定性を示した(右図)。外乱にも大変強く、小さなハンマーで空洞を叩いた場合、その瞬間は発振が止まるが、すぐに数十ミリ病程度後に、一切の操作なく、またアクティブな制御にも依らずに、自発的に発振が回復した(右下図)。これらの確認により自発共鳴・発振というコンセプトの正しさを実証できた。



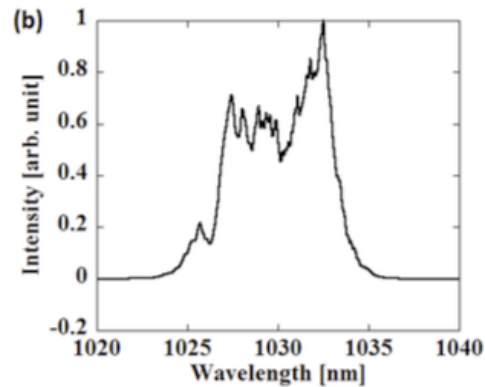
つぎにモードロックパルス化の研究に進んだ。まず実用機よりも空洞を10倍程度長くしたシステムを用いてパルス化の研究を進めた(下図)。実用機よりも一桁長い空洞を開発したのは、光路一周とその中に入る空洞の長さの比が小さな方がパルス化が容易になる事が予想されたからである。



このシステムにおいて、まだ増倍率が約 50 と小さい状態ではあるが、モードロックパルス化された自発的な共鳴・発振の確認に成功した(下図2つ)。



パルス発振波形



パルス発振波長スペクトル

以上の進捗を元に、空洞長を実用機と同じ長さまで短くしたシステムでのモードロックパルス化の研究を進めた。この短い空洞でも自発共鳴・発振のモードロックパルス化を観測できた。ただしこの短い空洞長のシステムではモードロック発振が不安定で、すぐに止まったりQスイッチ的発振に変化したりする現象が観測された。このため最終年度は自発共鳴・発振空洞のモードロック発振を安定化するための研究を重点的に行った。まだ十分に安定とは言えないが、安定化のためにモードロックのアクティブ化の研究や、レーザー発振を解析するためのシミュレーションコードの開発などを進めた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

① “Mode-locked pulse oscillation of a self-resonating enhancement optical cavity”  
Y. Hosaka, Y. Honda, T. Omori, J. Urakawa, A. Kosuge, K. Sakaue, T. Takahashi, Y. Uesugi and M. Washio, Journal of Physics: Conference Series, 掲載予定、発行年 2019 年、Vol 未定、論文番号：未定、査読あり

② “Stabilization of burst laser pulse storage in an optical enhancement cavity using a counter propagation mode”, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yosuke Honda, Nobuhiro Terunuma, and Junji Urakawa, Review of Scientific Instrument, 発行年 2018 年、巻 89、最初と最後の頁 -、査読あり

③ “Development of optical resonant cavities for laser-Compton scattering”  
T. Akagi, S. Araki, Y. Honda, A. Kosuge, T. Omori, H. Shimizu, N. Terunuma, J. Urakawa, T. Takahashi, R. Tanaka, Y. Uesugi, H. Yoshitama, Y. Hosaka, K. Sakaue, M. Washio  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B  
発行年 2017 年、巻 402(1)、最初と最後の頁 370-372、査読あり

④ “Feedback-free optical cavity with self-resonating mechanism”,  
Y. Uesugi, Y. Hosaka, Y. Honda, A. Kosuge, K. Sakaue, T. Omori, T. Takahashi, J. Urakawa, and M. Washio, APL PHOTONICS 1, 026103 (2016) 査読あり

⑤ 「レーザーコンプトン光源のためのパルス型自発共鳴型光蓄積共振器の開発」  
“Development of the pulsed self-start build-up cavity for laser-Compton based photon sources” 保坂 勇志, 赤木 智哉, 浦川 順治, 大森 恒彦, 小菅 淳, 本田 洋介, 上杉 祐貴, 高橋 徹, 坂上 和之, 鷲尾 方一,  
第 12 回 日本加速器学会年会プロシーディングス、2015、THP111、査読なし

[学会発表] (計 13 件)

- ① 2019年5月21日、10th International Particle Accelerator Conference (IPAC2019), Melbourne, Australia,  
“Mode-locked pulse oscillation of a self-resonating enhancement optical cavity (TUPGW032)”, Y. Hosaka, Y. Honda, T. Omori, J. Urakawa, A. Kosuge, K. Sakaue, T. Takahashi, Y. Uesugi and M. Washio
- ② 2018年3月19日、応用物理学会 春季学術講演会、早稲田大学、  
「自発共鳴型レーザーパルス蓄積共振器の開発」、  
上杉 祐貴, 浦川 順治, 大森 恒彦, 小菅 淳, 坂上 和之, 高橋 徹, 保坂 勇志, 本田 洋介, 鷺尾 方一
- ③ 2018年1月24日、レーザー学会 学術講演会第38回年次大会(招待講演)、京都市勧業館みやこめッセ(京都府京都市)、  
「レーザーコンプトン散乱光源のための自発共鳴型光蓄積共振器」  
上杉 祐貴, 浦川 順治, 大森 恒彦, 小菅 淳, 坂上 和之, 高橋 徹, 保坂 勇志, 本田 洋介, 鷺尾 方一
- ④ 2017年8月22日、The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (国際学会), Keio Plaza Hotel (Tokyo),  
“Development of feedback-free optical resonant cavities for laser-Compton scattering”, Yosuke Honda, Yuji Hosaka, Atsushi Kosuge, Tsunehiko Omori, Kazuyuki Sakaue, Tohru Takahashi, Yuuki Uesugi, Junji Urakawa, Masakazu Washio
- ⑤ 2017 年 3 月 19 日、日本物理学会 第72回年次大会、大阪大学、  
「レーザーコンプトン光源応用を目指した自発共鳴型光蓄積共振器の開発研究」、  
保坂勇志, 上杉祐貴, 浦川順治, 大森恒彦, 小菅淳, 坂上和之, 高橋徹, 本田洋介, 鷺尾方一
- ⑥ 2016 年 8 月 8 日、第13回 日本加速器学会年会、幕張メッセ(千葉県千葉市)  
「レーザーコンプトン光源のための自発共鳴型光共振器のモードロックパルス発振」  
“Mode-locked pulse oscillation of self-resonating optical cavity for laser-Compton photon sources”, 保坂 勇志, 上杉 祐貴, 本田 洋介, 小菅 淳, 大森 恒彦, 浦川 順治, 高橋 徹, 坂上 和之, 鷺尾 方一
- ⑦ 2015年9月28日、日本物理学会 秋季大会、大阪市立大学、  
「レーザーコンプトン光源のための高フィネス自発共鳴型光蓄積共振器の開発」、  
上杉祐貴, 赤木智哉, 浦川順治, 大森恒彦, 小菅淳, 坂上和之, 高橋徹, 保坂勇志, 本田洋介, 鷺尾方一
- ⑧ 2015年9月28日、日本物理学会 秋季大会、大阪市立大学、  
「レーザーコンプトン光源のためのパルス型自発共鳴型光蓄積共振器の開発」  
保坂勇志, 赤木智哉, 上杉祐貴, 浦川順治, 大森恒彦, 小菅淳, 坂上和之, 高橋徹, 本田洋介, 鷺尾方一
- ⑨ 2015年8月5日、第12回 日本加速器学会年会、プラザ萬象(福井県敦賀市)、  
「レーザーコンプトン光源のためのパルス型自発共鳴型光蓄積共振器の開発」 THP111  
“Development of the pulsed self-start build-up cavity for laser-Compton based photon sources”, 保坂 勇志, 赤木 智哉, 浦川 順治, 大森 恒彦, 小菅 淳, 本田 洋介, 上杉 祐貴, 高橋 徹, 坂上 和之, 鷺尾 方一
- ⑩ 2014年9月18日、日本物理学会 秋季大会、佐賀大学、  
「偏極陽電子源の為にレーザー蓄積共振器の高Finesse化への取り組み」、  
田中龍太, 赤木智也, 荒木栄, 上杉祐貴, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 坂上和之, 清水洋孝, 高橋徹, 照沼
- ⑪ 2014年3月24日、日本物理学会 第70回年次大会、早稲田大学、  
「レーザーコンプトン光源のための自発共鳴型光蓄積空洞の開発」  
上杉祐貴, 赤木智哉, 荒木栄, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 小菅淳, 坂上和之, 高橋徹, 田中龍太, 照沼信浩, 保坂勇志, 本田洋介, 鷺尾方一

⑫ 2013年9月22日、日本物理学会 秋季大会、高知大学、  
「偏極陽電子源の為のレーザー蓄積共振器の改良」  
田中龍太、赤木智哉、荒木栄A、浦川順治、太森恒彦、奥木敏行、栗木雅夫、坂上和之、清水洋孝、高橋徹、照沼信浩、舟橋義聖、本田洋介、鷺尾方一

⑬ 2013年3月27日、日本物理学会 第69回年次大会、東海大学  
「レーザーコンプトン散乱による小型高輝度光子ビーム源の開発」  
上杉祐貴、赤木智哉、荒木栄、浦川順治、太森恒彦、奥木敏行、栗木雅夫、坂上和之、清水洋孝、高橋徹、田中龍太、照沼信浩、舟橋義聖、本田洋介、鷺尾方一

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

① 研究分担者氏名: 本田 洋介  
ローマ字氏名: HONDA, Yosuke  
所属研究機関名: 高エネルギー加速器研究機構  
部局名: 加速器研究施設  
職名: 助教  
研究者番号: 40509783

② 研究分担者氏名: 高橋 徹  
ローマ字氏名: TAKAHASSHI, Tohru  
所属研究機関名: 広島大学  
部局名: 先端物質科学研究科  
職名: 准教授  
研究者番号: 50253050

③ 研究分担者氏名: 鷺尾 方一  
ローマ字氏名: WASHIO, Masakazu  
所属研究機関名: 早稲田大学  
部局名: 理工学術院  
職名: 教授  
研究者番号: 70158608

④ 研究分担者氏名: 保坂 勇志 (注: 平成 30 年 6 月 27 日に追加)  
ローマ字氏名: HOSAKA, Yosuke  
所属研究機関名: 量子科学技術研究開発機構  
部局名: 高崎量子応用研究所・先端機能材料研究部・  
職名: 博士研究員(任常)  
研究者番号: 90645558

### (2) 研究協力者

① 研究協力者氏名: 上杉祐貴  
ローマ字氏名: UESUGI, Yuuki

② 研究協力者氏名: 浦川順治  
ローマ字氏名: URAKAWA, Junji

③ 研究協力者氏名: 坂上和之  
ローマ字氏名: SAKAUE, Kazuyuki

③ 研究協力者氏名: 田中龍太  
ローマ字氏名: TANAKA, Ryota

※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。