

令和元年6月24日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H01700

研究課題名（和文）次世代拡張現実感のためのLight Field IO技術の確立

研究課題名（英文）Development of Light Field IO Technology for Next Generation Augmented Reality

研究代表者

加藤 博一（Kato, Hirokazu）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：70221182

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,000,000円

研究成果の概要（和文）：ヘッドマウントディスプレイは、バーチャルリアリティシステムなどで用いられる頭部装着型のディスプレイである。マイクロレンズアレイを用いた表示方式は、ディスプレイを薄くすることを可能とするが、広視野角化や高画質化の点で問題があった。本研究では、瞳孔の位置と大きさをリアルタイムに計測するセンサをディスプレイパネルの中に埋め込み、その情報に基づいて適応的に画像表示を行うことで、これらの問題点を解決する技術を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Society5.0の進展に伴い、人間が現実世界の情報とコンピュータ内の情報を統合的に取り扱うことが可能となり、より豊かで安全安心な社会を実現できる。このような社会において、拡張現実感やバーチャルリアリティは、情報提示技術として欠かせない技術ではあるが、それを日常生活において利用可能にするにはディスプレイ技術の高度化が必須である。本研究では、ヘッドマウントディスプレイがメガネのように日常生活において手軽に利用できることを目指し、薄型・広視野角・高画質の実現に取り組み、基礎的な技術的問題点を解決した。

研究成果の概要（英文）：Head mounted displays have been used for virtual reality systems. Although the display method using a microlens array can make the display thinner, it has problems in widening the viewing angle and improving the image quality. In this research, we have embedded a sensor that measures the position and size of the pupil in real time in the display panel, and developed a software technology to solve these problems by adaptively displaying images based on the information.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ヘッドマウントディスプレイ バーチャルリアリティ 拡張現実感 ライトフィールド

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

拡張現実感とは、現実世界の中にコンピュータが生成した3次元CG映像や情報を、立体的にあたかもそれが実際に存在するように表示する技術である。拡張現実感には複数の方式が提案されており、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いる方式、スマートフォンなどカメラ付きハンドヘルドディスプレイ（HHD）を用いる方式、据置型ディスプレイを用いる方式に分類できる。スマートフォンの普及は、HHD方式拡張現実感の実用化を後押しし、現在ではさまざまなシステムやサービスが登場している。しかし、この方式では、ユーザはあくまで端末のディスプレイを見る感覚でシステムを使用するため、「実際に存在するように表示する」という機能は必ずしも達成できていない。また、最近になってHMDの開発も盛んになり、Google Glassや、Oculus Riftといったデバイスも登場してきたが、Google Glassは情報表示視野角が極端に狭く、Oculus Riftは日常生活場面で使用できるほどの小型化は達成されていない。

一方、近年、Light Field DisplayやLight Field Cameraといった新しい光学デバイスが注目を集めるようになってきた。Light Fieldの最も単純な考え方の一つとして、1枚の平面板を想定し、その平面上の位置と入射角または射出角をパラメータに情報を記録するデバイスがLight Field Cameraであり、情報を提示するデバイスがLight Field Displayである。現在、Lytro等の実用化されたLight Field Cameraは存在するが、情報記録面のサイズは通常カメラの絞り程度と非常に小さく、画像化されるシーンの被写界深度を撮影後に調整できる機能を提供することを目的としている。また、Stanford Multi Camera Arrayのように低密度だが大面積にする方式の研究もあるが、大面積・高密度のLight Fieldを記録するカメラは存在しない。

Light Field Displayについては、SiggraphやISMAR等の国際会議で多様な形態のディスプレイが発表されている。Light Field Displayは、ディスプレイ面を通過するあらゆる角度の光線を再現するディスプレイであり、究極の三次元ディスプレイや小型軽量広視野角HMDになり得る。しかし、例えば1画素から射出される光線をピッチ角とヨー角のそれぞれで100分割とすると、従来のディスプレイの一万倍の解像度が必要となり、16Kディスプレイでも全く解像度が追いつかない。さらには、その莫大な映像を生成したり、伝送可能なシステムも現状では存在しない。研究開始当初時点で学会で発表されているLight Field Displayは試作品であって、解像度が非常に低かったり、オフラインで映像を生成する方式が取られている。

### 2. 研究の目的

Light field Displayは、あらゆる光線の再生を目指したために上記の問題が生じている。しかし、実際にはユーザの瞳孔を通過する光線のみを再生できれば、ディスプレイとしては成立する。そこで、ユーザの眼球をトラッキングし、瞳孔に向かう光線のみを生成すれば良い。そこで、ディスプレイの各画素にイメージング素子の機能を持たせ、画素毎にどの方向に眼球があるかを判断させることで、効率的に十分な実効解像度を持つLight field Displayができると考えた。これが、Light field DisplayとLight Field Cameraの一体化であるLight field IOへの着想である。この考えに基づいた技術は、次世代ディスプレイの重要な基盤技術になると考えた。そこで、このLight field IOの実現を目指し、本研究においては、まず、要求仕様の割り出し、研究開発すべき技術開発項目の整理、要素技術の開発、プロトタイプによる技術評価を行い、Light field IOの実現に向けて開発した要素技術の有効性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

装着型Light Field Displayの開発に向けて、具体的な方式と新規に研究開発が必要となる要素技術に対する要求仕様を割り出す。Light Field Displayとは、通常のディスプレイがディスプレイ面の各位置に応じて色と明るさを制御するのに対して、位置に加え射出角度もパラメータに色と明るさを制御するディスプレイである。例えば、位置分解能を500x500とし、各画素に対し角度分解能を水平・垂直方向共に100とすると、単純には500x500x100x100の発光素子が必要となり、これは8Kディスプレイの約80倍の解像度が必要になる。同時に、光を角度に応じて振り分ける機構も必要となる。このような発光素子をメガネのレンズサイズで実現することは非常に困難である。そこで、シャッターとなる液晶パネルと発光素子で2層構造とし、液晶シャッターで光の射出方向を時分割で制御したり、ディスプレイをメガネのように装着した際に瞳孔を通過する光線のみを生成することで、発光素子の数を削減することも可能である。また、眼球運動が計測できれば、それらを適応的に制御することも可能になるかもしれない。つまり、装着型ディスプレイの光学系、発光素子及びその発光角度可変機構、さらにその制御機能の間で要求仕様が複雑に絡み合う。

そこで、光学系、Light Field luminous Device、そのコントローラ（眼球運動計測機能を含む）に関して、互いに実現可能な性能限界を確認しながら、協調的に設計を進め、試作に向けた要求仕様を割り出す。次に、割り出した要求仕様に基づき、試作品の開発に着手する。この段階では、完成度の高いものを作製するのではなく、あくまで要求仕様を満足する要素技術の実現可能性を確認したり、要求仕様自体の妥当性の検証を目的とする。その上で、方式の再検討や要素技術の改良を行う。また、ハードウェアに関しては試作が困難な場合も生じうるので、ディスプレイのシミュレーションシステムも同時に開発し、それを用いた評価も併用する。

### 4. 研究成果

### (1) 要求仕様の割り出し

薄型・広視野角の装着型 Light Field Display の実現に向け、どのような方式の光学系が相応しいかを様々な角度から検討を行った。考えられる方式として、マイクロレンズアレイ方式、多層ディスプレイ方式、マルチピンホール方式、マルチピンライト方式、マルチファイバースキャン方式などがあるが、表1にまとめるような特徴から、最終的にマイクロレンズアレイ方式を採用することとした。

表1. 各方式の比較

	解像度	視野角	画質	光学系単純さ	薄さ	アイボックス	ソフトウェア	シースルー
マイクロレンズアレイ方式	△	○	○	○	○	△	△	×
多層ディスプレイ方式	×	○	△	○	○	△	×	△
マルチピンホール方式	×	○	×	○	○	△	△	×
マルチピンライト方式	×	○	×	○	△	△	×	○
マルチファイバースキャン方式	○	○	○	×	△	△	△	○

マイクロレンズアレイ方式においても、解像度、アイボックス（映像が適切に見えるための瞳孔の位置）、ソフトウェアに問題があることが分かる。それらの点における工夫が、実用的なシステムの実現に重要なことが分かった。解像度に関しては、ユーザの視野角1度当たり60画素が理想的な目標値（視力1のユーザの弁別能力の限界。幅1mの4kテレビを75cmの距離から見ることに相当）だが、実用的な目標値としては1度当たり20画素と設定した（幅50cmの従来型テレビを90cmの距離から見ることに相当）。このときに、ディスプレイパネルに求められる画素ピッチは、約2.6 $\mu\text{m}$ となる。これは、9600PPIに相当し、現時点でまだ実現できていない。アイボックスの大きさに関しては、数ミリ程度であり、眼球回転に一切対応できないばかりか、瞳孔が大きく広がっている場合には、瞳孔が最適な位置にあったとしても観測する画像にゴーストが発生してしまう。この問題に対処するためには、眼球トラッキングを行い、瞳孔の位置と大きさをリアルタイムで検出し、それに応じてディスプレイパネルに描画する映像を生成する必要がある。そのためのレンダリングソフトウェアの開発も必要になる。また、眼球トラッキング装置を装着することはデバイス自体の大きさにも影響を与えるため、その実装方法に関しても工夫が必要になることが分かった。なお、マイクロレンズアレイ方式では、シースルーに対応できないため、その問題の解決も大きな問題である。要求仕様を簡潔にまとめると、

- ・ 画素ピッチが約2.6 $\mu\text{m}$ で、サイズが約4cm x 3cmのディスプレイパネル
- ・ 眼球トラッキングデバイスが目立たないようにディスプレイデバイス内に実装できること
- ・ 瞳孔の位置や大きさが変化しても、ユーザが適切な映像を見ることができるようレンダリングアルゴリズム

### (2) 試作システム

本研究の中で5種類の試作システムを作成した。最初の試作システムは、解像度 XGA、ピッチ9.9 $\mu\text{m}$ のディスプレイパネルを用いて、マイクロレンズアレイ方式の光学系を構成し、その方式の基本的な性能を確認した。写真1は、眼球トラッキング機能を外付けで実装した試作2号機である。マイクロレンズアレイディスプレイの下に眼球トラッキング用のカメラデバイスを装着した。このシステムにおいて、ディスプレイデバイスと眼球トラッキング用カメラのキャリブレーション方法を開発した。

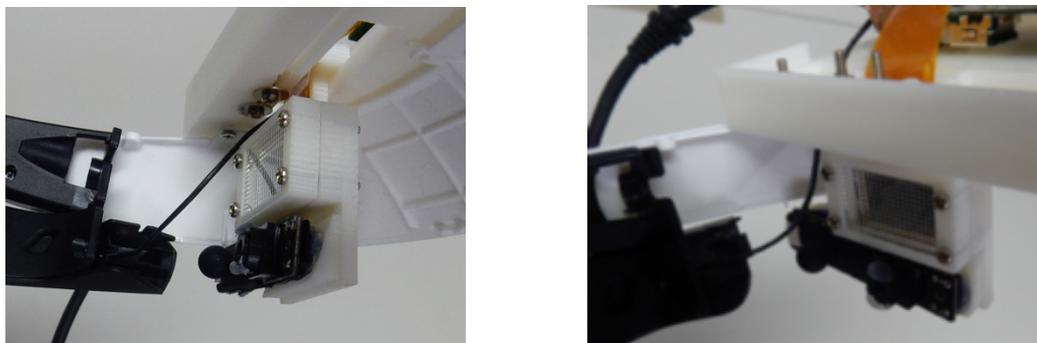


写真1. 試作2号機

次に、眼球移動に応じて提示映像を切り替えることで、ユーザが常に適切な映像を観測できるようなレンダリングアルゴリズムを開発し、試作3号機を用いてその評価を行った。写真2は、試作4号機のマルチレンズヘッドマウントディスプレイ画質評価システムである。眼球トラッキング機能を含んだマイクロレンズアレイ型ディスプレイの画質評価を目的に開発した。写真3は、試作1号機で用いた高ピッチの有機ELディスプレイパネルを3枚並べて試作したディスプレイである。複数ディスプレイを並べることによって生じるディスプレイ間の隙間の問

題を解決し、さらには高画質化に向けた研究に使用した。



写真2. 試作4号機

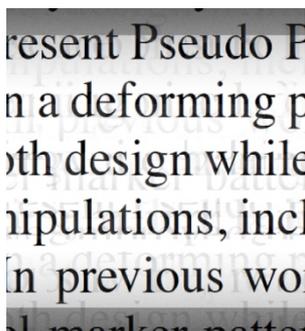


写真3. 試作5号機

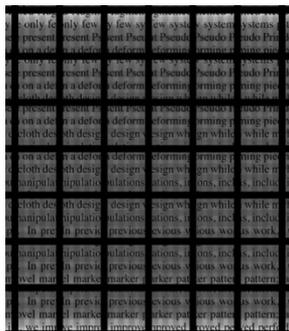
(3) 得られた要素技術

前述の「画素ピッチが約  $2.6 \mu\text{m}$  で、サイズが約  $4\text{cm} \times 3\text{cm}$  のディスプレイパネル」という要求仕様に関して、その実現可能性をさまざまなディスプレイメーカーに対する調査を通じて確認したが、非常に困難であることが分かった。その中で、サイズこそ小さいが、画素ピッチが  $7.8 \mu\text{m}$  のディスプレイの開発に成功したことがわかった。このディスプレイはカラーなので、RGB の3つの発光素子で1画素を構成している。つまり、白黒ディスプレイでよければ、 $1/3$  の  $2.6 \mu\text{m}$  が実現できる（これは、1軸方向であり、もう1軸に関しては未解決である）。よって、問題は、ディスプレイパネルのサイズとカラー化方式になる。

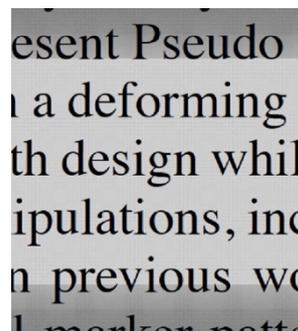
これに対し、本研究では、複数の小さなディスプレイパネルを配置する方法を提案した。この場合、パネル間の隙間が問題となるが、レンダリング方式を工夫することでその問題が解決できることを示した。また、カラー化に関しては、各画素に RGB の色要素を保持するのではなく、マイクロレンズアレイの各レンズを RGB で塗り分け、ソフトウェアで色調整を行う方式を考案した。この2点に関しては、特許を出願した。



(a) 従来手法  
画像にゴーストが発生



(b) 瞳孔位置とサイズに応じ、  
表示画像を調整



(c) ゴーストが消えたのが  
確認できる

写真4. 瞳孔の位置ずれやサイズが大きき場合に発生していたゴーストを、瞳孔位置とサイズに応じてディスプレイパネルに表示する画像を調整することで消すことができた。

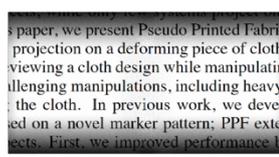
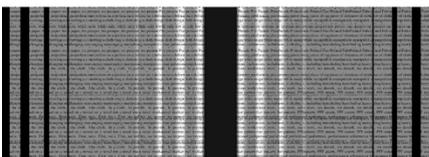
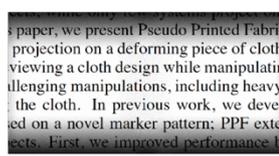
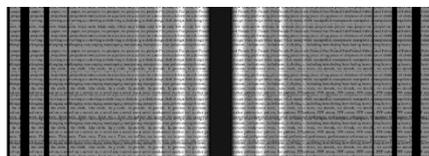


写真5. ディ스플레이パネルに隙間がある場合でも各画素の明度を調節することで、観察する時点では隙間のない画像を生成する技術を開発した。

また、「瞳孔の位置や大きさが変化しても、ユーザが適切な映像を見ることができるようなレンダリングアルゴリズム」に関して、瞳孔の位置と大きさから画像をレンダリングする方法を考案し、上記の技術と統合し、特許の中に記載した。

さらに、試作2号機のような外付けの眼球トラッキングデバイスを用いるのではなく、Light Field IO の考え方に基づき、ディスプレイパネル内に受光素子を配置し、それを用いた眼球

トラッキング技術についても検討した。発光素子と受光素子を1 : 1 の比率で並べることも検討したが、それぞれの製造プロセスの違いから、現時点でその方式の実現は非常に困難であることがわかった。しかし、複数のディスプレイパネルを配置するという考え方から、その隙間が生じるという特徴を肯定的に捉え、そこに受光素子を配置し、眼球トラッキングに利用するという方式を考案した。

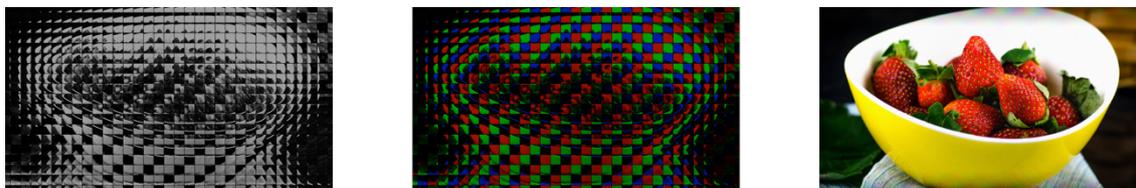


写真6. マイクロレンズアレイの各レンズをRGBで塗り分ける方法によってカラー画像を提示する技術を開発した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① 清川清, AR用ヘッドマウントディスプレイの動向と視覚拡張への応用, 電子情報通信学会和文論文誌C, Vol. J102-C, pp.170-178, 2019. (査読有)
- ② Itoh Yuta, Langlotz Tobias, Iwai Daisuke, Kiyokawa Kiyoshi, Amano Toshiyuki, Light Attenuation Display: Subtractive See-Through Near-Eye Display via Spatial Color Filtering, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.25, pp.1951-1960, 10.1109/TVCG.2019.2899229, 2019. (査読有)
- ③ Bermundo Juan Paolo S., Ishikawa Yasuaki, Fujii Mami N., Ikenoue Hiroshi, Uraoka Yukiharu, Instantaneous Semiconductor-to-Conductor Transformation of a Transparent Oxide Semiconductor a- InGaZnO at 45° C, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 10, pp. 24590-24597, 10.1021/acsami.8b05008, 2018. (査読有)
- ④ Jason Orlosky, Yuta Itoh, M Ranchet, Kiyoshi Kiyokawa, J Morgan, H. Devos, Emulation of Physician Tasks in Eye-tracked Virtual Reality for Remote Diagnosis of Neurodegenerative Disease, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG), Vol.23, pp.1302-1311, 10.1109/TVCG.2017.2657018, 2017. (査読有)
- ⑤ Damien Rompapas, Aitor Rovira, Alexander Plopski, Christian Sandor, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Hirokazu Kato, Sei Ikeda, EyeAR: Refocusable Augmented Reality Content through Eye Measurements, Multimodal Technologies and Interaction, vol.1, no.4, 18pages, 10.3390/mti1040022, 2017. (査読有)
- ⑥ Kiyoshi Kiyokawa, Research Trends in Head Worn Displays for VR and AR, SID Japan Chapter Newsletter, No.62, pp.1-2, 2016. (査読無)
- ⑦ K. Kise, M. Fujii, S. Urakawa, H. Yamazaki, E. Kawashima, S. Tomai, K. Yano, D. Wang, M. Furuta, Y. Ishikawa, Y. Uraoka, Self-heating induced instability of oxide thin film transistors under dynamic stress, Appl. Phys. Lett., 108, 023501, 10.1063/1.4939861, 2016. (査読有)
- ⑧ 太田 淳, センサ技術の最近の動向 CMOS イメージセンサ, 電気評論, Vol.6, pp.56-61, 2016. (査読無)

〔学会発表〕(計10件)

- ① Hirokazu Kato, An Adaptive Rendering for Microlens Array HMD based on Eye-Gaze Tracking, OSA Imaging and Applied Optics Congress, 2018. (招待講演)
- ② Kiyoshi Kiyokawa, Image Processing for Personalized Reality, 4th International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems, 2018. (招待講演)
- ③ Kiyoshi Kiyokawa, To See, Or Not To See That is The Question, ACM ISS' 18 International Workshop on Computational Augmented Reality Displays, 2018. (招待講演)
- ④ Kiyoshi Kiyokawa, From Augmented Reality to Personalized Reality, Cyberworlds, 2018. (招待講演)
- ⑤ Hirokazu Kato, What is the next stage of Augmented Reality, Pacific Graphics, 2017. (招待講演)
- ⑥ Hirokazu Kato, Next Challenge for Augmented Reality as a Smart Display Technology, The 2017 Frontiers in Optics + Laser Science, 2017. (招待講演)
- ⑦ Hirokazu Kato, Next Breakthrough of Augmented Reality for Serious Applications, 2017 International Conference on Regulatory Approaches for Fostering Innovation in Drugs and Medical, 2017. (招待講演)
- ⑧ Juan Paolo Bermundo, Yasuaki Ishikawa, Mami N. Fujii, Hiroshi Ikenoue, Yukiharu Uraoka, Low Temperature Annealing of High Performance Amorphous InGaZnO Thin-film

Transistors, International Symposium for Advanced Materials Research, 2017. (招待講演)

- ⑨ Alexander Plopski, Arno in Wolde Luebke, Wataru Kashima, Takafumi Taketomi, Christian Sandor, Hirokazu Kato, Eye-Gaze Tracking in Near-Eye Head-Mounted Displays, International Workshop on Mixed and Augmented Reality Innovations, 2016.
- ⑩ Damien Constantine Rompapas, Aitor Rovira, Sei Ikeda, Alexander Plopski, Takafumi Taketomi, Christian Sandor, Hirokazu Kato, EyeAR: Refocusable Augmented Reality Content through Eye Measurements, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2016. (Best Demo Award)

〔図書〕(計3件)

- ① 清川清, “AR向けヘッドマウントディスプレイの研究動向, 課題と技術開発の方向性,” VR/AR 技術の開発動向と最新応用事例 (技術情報協会編), 技術情報協会, pp. 223-233, 2018.
- ② 加藤博一, “拡張現実感・複合現実感のためのメディア処理,” 人工知能学大辞典 (人工知能学会編), 共立出版, pp. 758-761, 2017.
- ③ 加藤博一, “拡張現実感・複合現実感,” 人工知能学大辞典 (人工知能学会編), 共立出版, pp. 854-857, 2017.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: ディスプレイ装置

発明者: 加藤 博一, 太田 淳, 浦岡 行治, Alexander Plopski

権利者: 奈良先端科学技術大学院大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-164341

出願年: 平成29年

国内外の別: 国内

〔その他〕

技術展示

- ① イノベーションジャパン 2017 - 大学見本市, 瞳位置検出によるレンズアレイ型 HMD の画質改善, 東京ビッグサイト, 2017.
- ② けいはんな情報通信フェア 2017, 瞳位置検出によるレンズアレイ型ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の画質改善, けいはんなプラザ, 2017.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 太田 淳

ローマ字氏名: (OHTA, jun)

所属研究機関名: 奈良先端科学技術大学院大学

部局名: 先端科学技術研究科

職名: 教授

研究者番号 (8桁): 80304161

研究分担者氏名: 浦岡 行治

ローマ字氏名: (URAOKA, yukiharu)

所属研究機関名: 奈良先端科学技術大学院大学

部局名: 先端科学技術研究科

職名: 教授

研究者番号 (8桁): 20314536

研究分担者氏名: 清川 清

ローマ字氏名: (KIYOKAWA, kiyoshi)

所属研究機関名: 奈良先端科学技術大学院大学

部局名: 先端科学技術研究科

職名: 教授

研究者番号 (8桁): 60358869

※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。