

令和元年6月11日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04381

研究課題名(和文) ロボット義足による歩行運動への介入から解き明かす昆虫の脚間協調メカニズム

研究課題名(英文) Understanding Interlimb Coordination Mechanism Based on Walking Intervention with Prosthetic Legs

研究代表者

大脇 大(Owaki, Dai)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：40551908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、義足による歩行運動への介入を通して、昆虫が示す適応的移動能力の基盤となる脚間協調機序を解明することを目的とした。

初年度は、ハイスピードカメラと筋電位アンプを用い、昆虫の歩行中の脚の運動と筋活動を同時計測するシステムを構築した。初年度に構築した計測システムにより、コオロギの脚切断前後の歩行パターンを解析した。計測したN=5の個体のデータを解析した結果、両脚の中脚切断後の筋電位パターンが左右で同相同期に変化していくことが示された。最終年度には、義足実験を行い、両中脚切断後に脚の切断部分に義足を取り付けることによって、脚切断前の歩行パターンが再生成されることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果から、潜在的な神経回路には左右の脚を同相同期で制御するパターン生成器と、脚の機械刺激受容器からの入力によってそのパターンを上書きするメカニズムが、昆虫の脚間協調において重要な役割を果たすことが示唆され、脚間協調モデルの精緻化に有用な学術的知見が得られた。工学的意義のみならず、生物学的知見としても有用な成果である。

社会的意義としては、本研究で得られた昆虫の適応メカニズムに基づく脚間協調制御則をロボットに実装することにより、昆虫に比肩する適応能力を有し、脚の切断などの故障に対してレジリエントな歩行ロボットシステムの構築につながることである。

研究成果の概要(英文)： This study aims to elucidate the interlimb coordination mechanism in adaptive insect locomotion with the intervention method into walking by using prosthetic legs.

To this end, at the first fiscal year, we developed a simultaneous recording system of leg motions and leg muscle electromyography (EMG) by using high-speed camera and EMG amplifier. Then, using the developed system, we simultaneously measured leg motions and muscle activities in cricket walking before and after leg amputation. By analyzing the obtained data in 5 female crickets, we found that muscle activation timings of the both middle legs tend to be in-phase synchronization pattern from anti-phase synchronization pattern according to the "amount" of remaining leg parts. In the final fiscal year, we conducted a preliminary prosthetic experiments, suggesting that gait patterns were "reproduced" with the prosthetic legs even after leg amputation.

研究分野：システム工学，ロボティクス

キーワード：昆虫 運動への介入 脚間協調 筋電位 機械刺激受容器 義足

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

昆虫は、脚切断など、自身の身体構造の劇的な変化に対しても、柔軟かつ適応的にロコモーション（移動運動）を生成する能力を有している。一般的に昆虫は、同側の前後足と対側の中足が同期して交互に接地する tripod 歩容（R1-L2-R3/L1-R2-L3 が同期）を示すが、中足 2 本を切断した場合、歩容は対角の前後足がほぼ同期して交互に接地するパターン（4 足動物の trot 歩容に類似、R1-L3/L1-R3 が同期）へと即時的かつ自発的に変化する。通常歩行時は同側の前後足が同期し接地するのに対して、脚切断時では同側前後の同期関係が崩れており、この協調パターンが固定された神経回路で実現されているわけではないことを示唆している。このような昆虫の適応能力の背後に潜むメカニズムを解明することができれば、いまだ実現されていない、しぶとくレジリエントなシステムの工学的実現に資するため、その研究意義は大きい。

このような昆虫のロコモーション生成を司る脚間協調制御は、胸部神経節（thoracic ganglions）に存在するといわれる神経回路網（central pattern generators: CPGs）や感覚フィードバックに基づく反射の連鎖（reflex chains）によって、自律分散的かつ自己組織的に実現されていると考えられている[1]。神経生理学の分野では、昆虫の身体から神経節を取り出した *in vitro* の実験や身体を拘束した条件下での神経活動計測実験によって、胸部神経節のさまざまな発火パターン[2],[3],[4],[5]や感覚フィードバックが神経節の神経活動へ与える影響[6],[7]などについて検証されている。また、動物行動学的研究では、振る舞いを観察し解析するアプローチに基づき、ゴキブリ[8]やナナフシ[9],[10]の脚切断後の歩行パターンの時空間的な変容が報告されている。

2. 研究の目的

本研究では、義足による歩行運動への介入を通して、昆虫が示す適応的移動能力の基盤となる脚間協調機序を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、脚切断後の昆虫の脚間協調制御メカニズムを紐解く糸口を捉えるため、昆虫の生体信号の一つである「筋電位（Electromyography: EMG）パターン」に着目する。筋電位パターンは、ロコモーション生成のための胸部神経節などの神経活動を間接的に表象し、神経活動と、それに基づく身体の運動、そして環境との相互作用から結果的に発現するロコモーションとを媒介する生体信号といえる。昆虫ができるだけ自然な環境条件でロコモーションを行う際の脚運動と筋電位パターンを同時に計測することで、脚切断後の歩行パターンの変容過程を解析する。昆虫自身の感覚運動機能を残存させた状態でのロコモーションの適応過程を解析することで、その背後に隠れた脚間制御メカニズムに迫る。さらに、切断部位に自身の脚とほぼ同等の義足を接続することで、自身の脚が存在するかのような状況にすることで、その後の昆虫の適応メカニズムを観察する。

並行して、昆虫の脚間協調メカニズムに着想を得た制御則をロボットに実装し、脚の切断にも適応可能な昆虫型ロボットを実現する。

(1) モデル生物

本研究では、モデル生物としてコオロギ（*Gryllus bimaculatus*, 成虫雌 5 個体 N=5）を用いた。他の多くの昆虫と同様に、コオロギにおいても、脚切断後の適応的な歩行パターンの変容を確認できる。脚切断後の筋電位パターンの変化を解析するため、脚切断後も計測可能な脚の根元、腹部内の筋を選定し、左右中脚（Left middle (LM) and right middle (RM) legs）、右後脚（Right hind (RH) leg）の該当する筋の筋電位を計測した。中脚においては遊脚期（swing phase）に脚を前方に振り出す protractor、後脚においては支持脚期中に脚を後方に蹴り出す retractor の筋活動を計測した。該当する部位のクチクラ（cuticle）に極微小な穴を 1mm 間隔程度で 2 つ開け、2 本の銅線（50 μ m）を電極として挿入し、ゼリー状の接着剤を塗布することで電極の固定および閉塞を行った（図 1 右下）。

(2) 計測システム

コオロギができるだけ自然な状態で発現するロコモーション中の筋電位活動を計測するため、球状トレッドミル（Spherical treadmill）上で計測を行った（図 1）。球状の発泡スチロール（Styrofoam ball）を土台にのせ、エアポンプにより加圧することで浮かせた状態にし、コオロギの身体を上下方向と回転方向の運動は拘束せず適切な高さに固定する（tethered）ことで、トレッドミル上での自然なロコモーションを可能とした。ハイスピードカメラ HAS-L1（DITECT, 640 \times 480 pixels, 500fps）を用い、側部から鏡面画像を撮影することで、上部からの各脚の運動を録画した（図 1）。コオロギに挿入した電極からの微小な筋電位信号を生体電位アンプ DAM80

(World Precision Instruments) を用いて解析可能な電気信号に増幅し、データロガーGL900 (GRAPHTEC) へとアナログ入力することで筋電位データを記録した (5000Hz). 同期計測ソフトウェア DIPP-ADII (DITECT) を用い、ハイスピードカメラの動画データとデータロガーの筋電位データを同期させパソコンに記録した.

(3) 実験条件

前節にて説明した計測システムを用い、次の4つの条件(関節で脚を切断)でのロコモーション-筋電位計測実験を行った.

(A) 通常歩行 (Intact),

(B) 右中脚を femur-tibia 間の関節 (femur-tibia joint: FTi joint) にて切断,

(C) 右中脚を coxatrochanteral 関節 (coxatrochanteral joint: CTr joint) にて切断,

(D) 左右両脚を CTr 関節 (CTr joint) にて切断,

5 個体 (N=5) のコオロギに対して、各条件で計測を行った. 各試行には、5 周期以上の定常的なロコモーションが含まれるデータを記録した.

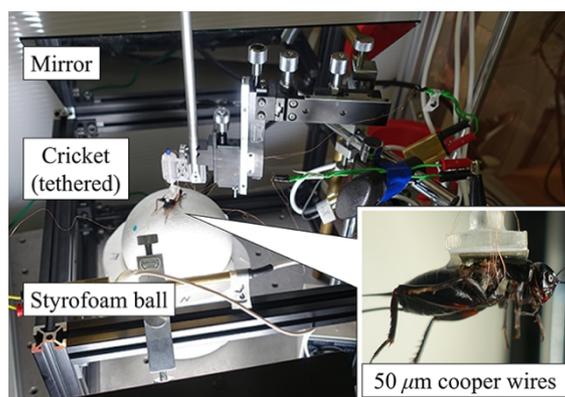


図 1 : 生物実験環境



図 2 : 開発した昆虫型ロボット

(4) 昆虫型ロボット

生物実験の結果に着想を得ることで、昆虫の脚内協調を再現する制御則 [成果 19], 脚切断前後の歩容変化を再現する脚負荷分配制御則 [成果 3, 18] を考案し、ロボットを用いてそれを再現することを試みた. 開発した昆虫型ロボットを図 2 に示す. ロボットは、全長 280mm, 幅 120mm, 重量 1.4kg である. 昆虫の脚構造を模擬するため、各脚 3 つのサーボモータ(双葉電子工業株式会社 RS303MR)を実装する構造とした. さらに、脚先には、昆虫の脚に存在する機械刺激受容器である *Campaniform sensilla* を模擬した 3 軸の力センサ (Optoforce: OMD-20-SE-40N) を実装した. マイクロコンピュータ (STMicroelectronics: NUCLEO-L432KC) を用い、各サーボモータの制御と力センサ情報の取得を行い、構築した制御則から昆虫の歩行の再現を試みた.

[参考文献]

- [1] 下澤楯夫, 針山孝彦: 昆虫ミメティクス - 昆虫の設計に学ぶ -, 50/57, NTS (2008).
- [2] Pearson, K. G., and Iles, J. F.: Nervous mechanisms underlying intersegmental co-ordination of leg movements during walking in the cockroach, *J. Exp. Biol.*, **58**, 725/744 (1973)
- [3] Bässler, U., and Wegner, U.: Motor output of the denervated thoracic ventral nerve cord in the stick insect *carausius morsus*, *J. Exp. Biol.*, **105**, 127/145 (1983)
- [4] Dean, J.: Leg coordination in the stick insect *carausius morsus*: effect of cutting thoracic connectives, *J. Exp. Biol.*, **145**, 103/131 (1989)
- [5] Knebel, D. Ayali, A. Pfuger, H-J, and Rilich, J.: Rigidity and flexibility: the central basis of inter-leg coordination in the locust, *Front. Neural Circuits*, **10**:112, doi: 10.3389/fncir.2016.00112 (2017)
- [6] Borgmann, A., Hooper, S. L., and Büschges, A.: Sensory feedback induced by front-leg stepping entrains the activity of central pattern generators in caudal segments of the stick insect walking system, *J. Neurosci.*, **29**, 2972/2983. doi: 10.1523/JNEUROSCI.3155-08.2009 (2009)
- [7] Berg, E. M., Hooper, S. L., Schmidt, J., and Büschges, A.: A Leg-Local Neural Mechanism Mediates the Decision to Search in Stick Insects, *Current Biology*, **25**, 2012/2017 (2015)
- [8] Hughes, G. M.: The co-ordination of insect movements II. The effect of limb amputation and the cutting of commissures in the cockroach (*Blatta orientalis*), *J. Exp. Biol.*, **34**, 306/333 (1957)
- [9] Graham, D.: The effect of amputation and leg restraint on the free walking coordination of the stick

- insect *Carausisus morosus*, *J. Comp. Physiol.*, **116**, 91/116, doi: 10.1007/BF00605519 (1977)
- [10] Grabowska, M., Godlewska, E., Schmidt, J., and Daun-Gruhn, S: Quadrupedal gaits in hexapod animals-inter-leg coordination in free-walking adult stick insects, *J. Exp. Biol.*, **215**, 4255/4266, doi: 10.1242/jeb.073643 (2012)

4. 研究成果

計測した N=5 のすべての個体のデータを解析した結果、両脚の中脚切断後の筋電位パターン、左右で同相同期に変化していくことが示された。さらに、最終年度には、義足介入予備実験を行い、両中脚切断後に、脚の切断部分に義足を取り付けることによって脚切断前の歩行パターンが再生成されることが確認できた [成果 1, 16, 17].

これらの結果から、潜在的な神経回路には左右の脚を同相同期で制御するパターン生成器と、脚の機械刺激受容器からの入力によってそのパターンを上書きするメカニズムが、昆虫の脚間協調において重要な役割を果たすことが示唆され、脚間協調モデルの精緻化に有用な知見が得られた。

さらに、ロボット実験においては、「手応え」制御に基づく脚間協調制御則 [成果 7], 18 個の自由度を制御可能な脚内協調制御則 [成果 19], 脚が切断されても歩き続けることができる昆虫型ロボット [成果 3, 18] など、本研究成果に基づき精緻化したロボットの脚間協調制御則を報告した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

1. D. Owaki, Y. Sugimoto, A. Ishiguro, and H. Aonuma, Leg amputation changes coordinated pattern of the leg muscle movements in the cricket, *BioRxiv.*, 2019, *in prep.*
2. 大脇 大, 動物の歩容を再現する四脚ロボット, *日本ロボット学会誌*, vol.37, pp. 14-19, doi:10.7210/jrsj.37.126 (2019) 査読無
3. 大脇 大, 脚を切られても歩きつづける昆虫とロボット, *昆虫と自然*, vol. 54, pp. 31-34, <http://hokuryukan-ns.co.jp/cms/books/昆虫と自然-2019年-2月号/>, (2019) 査読無
4. K. Naniwa, Y. Sugimoto, K. Osuka, and H. Aonuma, Defecation initiates walking in the cricket *Gryllus bimaculatus*, *J. Insect Physiol.* vol. 112 pp. 117-122, doi: 10.1016/j.jinsphys.2018.11.004 (2018.11.4 on line) (2019) 査読有
5. A. Fukuhara, Dai Owaki, T. Kano, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, Spontaneous gait transition to high-speed galloping by reconciliation between body support and propulsion, *Advanced Robotics*, vol. 32, pp. 794-808, doi: 10.1080/01691864.2018.1501277 (2018) 査読有
6. 大脇 大, “脚式ロコモーションに内在する制御メカニズムの解明を目指して”, *日本神経回路学会誌*, vol. 24, pp. 162-171, doi: 10.3902/jnns.24.162 (2017) 査読無
7. D. Owaki, M. Goda, S. Miyazawa, and A. Ishiguro, “A Minimal Model Describing Hexapedal Interlimb Coordination: the Tegotae-based Approach,” *Front. Neurobot.*, vol.11:29, doi: 10.3389/fnbot.2017.00029 (2017) 査読有
8. T. Kano, K. Sakai, K. Yasui, D. Owaki, and A. Ishiguro, “Decentralized control mechanism underlying interlimb coordination of millipedes,” *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 12, doi: 10.1088/1748-3190/aa64a5 (2017) 査読有
9. D. Owaki and A. Ishiguro, “A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping,” *Sci. Rep.*, vol. 7, 277, doi: 10.1038/s41598-017-00348-9, (2017) 査読有
10. K. Matsuda, H. Gotoh, Y. Tajika, T. Sushida, H. Aonuma, T. Niimi, M. Akiyama, Y. Inoue, and S. Kondo, Complex furrows in a 2D epithelial sheet code the 3D structure of a beetle horn. *Sci. Rep.* vol. 7, 13939, doi: 10.1038/s41598-017-14170-w (2017) 査読有
11. T. Kinugasa and Y. Sugimoto, Dynamically and Biologically Inspired Legged Locomotion: A Review, *J. Robotics and Mechatronics*, vol. 29, pp. 456-470, doi: 10.20965/jrm.2017.p0456 (2017) 査読無

[学会発表] (計 32 件)

12. H. Aonuma, Modeling of group size dependent aggression in the cricket, 9th Federation of the Asian and Oceanian Physiological Society Congress (FAOPS 2019),

- Kobe, Japan. (2019 Mar.24) 招待講演
13. 青沼 仁志, 昆虫で見られる集団サイズに応じた攻撃性のモデル化, 電子情報通信学会 NC&NLP 研究会, 北海道大学 (札幌) (2019 年 1 月 23 日) 招待講演
 14. Y. Sugimoto, Nonlinear Control by Coupled Oscillator: from Nonholonomic Systems to Quasi-Passive Dynamic Walker, 2018 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, 2018 年 6 月 招待講演
 15. H. Aonuma, Oscillator model to understand group size dependent behavior in the cricket, The 3rd A3 International Workshop for Mathematical and Life Sciences, Hiroshima University, Japan (2018 May 18) 招待講演
 16. D. Owaki, Y. Sugimoto, A. Ishiguro, and H. Aonuma, "Change in Electromyographic Patterns After Leg Amputation in the Cricket", ICN2018 (2018).
 17. 大脇 大, 杉本 靖博, 石黒 章夫, 青沼 仁志, "コオロギの脚切断後の筋電位パターンの変容", 第 30 回自律分散システム・シンポジウム資料, 2A2-4 (2018).
 18. 宮澤 咲紀子, 大脇 大ほか, 脚の切断状況に応じた歩行運動を生成可能な 6 脚ロボットの自律分散制御則, 第 30 回自律分散システム・シンポジウム, 127-131 (2018)
 19. 宮澤 咲紀子, 大脇 大, 石黒 章夫, 脚の役割分担を自発的に生成可能な 6 脚歩行の脚内協調制御則, 第 18 回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), 3D4-05 (2017).
 20. D. Owaki, Y. Sugimoto, A. Ishiguro, and H. Aonuma, "Change in coordinated motor patterns after leg amputation in the cricket", JSCPB2017, Fukuoka (2017)
 21. 大脇 大, 昆虫を創りたい! ? -ロボット工学の限界と可能性-, 日本比較生理生化学会 第 39 回福岡大会 若手の会「秋の合宿」, 福岡 (2017.11.24) 招待講演
 22. D. Owaki, Inter and intralimb coordination for adaptive bipedal walking: Tegotae-based approach, SWARM2017 Workshop on Bio-inspired control for interlimb coordination and adaptation in legged robots, Kyoto, Japan (2017.10.29) 招待講演
 23. H. Aonuma, Synthetic approach to understand neuronal mechanism of social adaptability in animals Symposium on Challenges in Neuroscience National Center for Theoretical Sciences (NCTS), Taiwan (2017/1/14) 招待講演
 24. 青沼 仁志, 昆虫の高速運動をつくる不思議な仕組み, 技術講演会 協賛: 精密工学会北海道支部, 日本ロボット学会北海道ロボット技術研究専門委員会, 計測自動制御学会北海道支部北海道大学(2017/5/17) 招待講演
 25. S. Suzuki, A. Fukuhara, D. Owaki, T. Kano, A. J. Ijspeert and A. Ishiguro, "A Simple Body-limb Coordination Model that Mimics Primitive Tetrapod Walking", SICE Annual Conference 2017, pp. 12-14 (2017).
 26. T. Kinugasa, N. Miyamoto, K. Osuka, R. Hayashi, K. Yoshida, D. Owaki, and A. Ishiguro, "Myriapod Robot i-CentiPot via Passive Dynamics -Emergence of Various Locomotion for Foot Movement-" SICE Annual Conference 2017, pp. 7-9 (2017).
 27. S. Suzuki, A. Fukuhara, D. Owaki, T. Kano, A. Ijspeert, and A. Ishiguro, "A Minimal Model for Body-limb Coordination in Quadruped locomotion," The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017), pp.106-107 (2017).
 28. A. Fukuhara, D. Owaki, T. Kano, and A. Ishiguro, "Gait Transition to Gallop via an Interlimb Coordination Mechanism Based on Tegotae from Body Support and Propulsion," The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017), pp.81-82 (2017).
 29. T. Kano, K. Yasui, D. Owaki, and A. Ishiguro, "Decentralized Control Scheme for Myriapod Locomotion That Exploits Local Force Feedback", Living Machines 2016, pp. 449-453 (2016).
 30. M. Goda, S. Miyazawa, S. Itayama, D. Owaki, T. Kano, and A. Ishiguro, "Understanding Interlimb Coordination Mechanism of Hexapod Locomotion via "TEGOTAE"-based Control", Living Machines 2016, pp. 441-448 (2016).
 31. K. Yasui, T. Kano, D. Owaki, A. Ishiguro, "Decentralized Control Scheme for Centipede Locomotion Based on Local Reflexes", Living Machines 2016, pp. 545-547 (2016).
 32. D. Owaki, S. Horikiri, J. Nishii, A. Ishiguro, "TEGOTAE-based Control of Bipedal Walking, Living Machines 2016, pp. 472-479 (2016).
 33. S. Suzuki, D. Owaki, A. Fukuhara, A. Ishiguro, "Quadruped Gait Transition from Walk to Pace to Rotary Gallop by Exploiting Head Movements", Living Machines 2016, pp. 532-539 (2016).
 34. A. Fukuhara, D. Owaki, T. Kano, A. Ishiguro, "Leg Stiffness Control Based on "TEGOTAE" for Quadruped Locomotion", Living Machines 2016, pp. 95-100 (2016).

ほか, 9 件

[図書] (計 2 件)

1. 四津 有人, 大脇 大, 船戸 徹郎, “身体性システムとリハビリテーションの科学1 運動制御”, 第5章, pp. 153-178, 東京大学出版会 (2018年11月19日).
2. 大脇 大, 石黒 章夫, “17章 二足歩行ロボット 3.4 受動走行”, ロボット制御学ハンドブック, pp.590-593, 近代科学社 (2017年12月13日).

[その他]

[ホームページ等]

個人ページ: www.oscillex.org

researchmap: <https://researchmap.jp/read0149942>

[報道]

2019年6月3日掲載, 朝日新聞, 「(科学の扉) 鳥・虫ヒント、次世代ロボ 環境変化へっちら/宅配や災害現場で応用」, https://www.asahi.com/articles/DA3S14041039.html?iref=pc_ss_date

[受賞 4件]

1. 第22回青葉工学研究奨励賞 (2016.12.2)
2. 第18回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会 (SI2017) 優秀講演賞 (2017.12.23) (連名)
3. 計測自動制御学会関西支部技術賞 (2018.1.31) (連名)
4. 第6回木村賞 (横断型基幹科学技術研究団体連合) (2018.4.27) (連名)

[関連する科研費]

科研費・国際共同研究加速化基金 (国際共同研究強化) 「Motion Hacking: 昆虫の歩行を司る脚間協調機序を紐解く介入法の開拓」代表: 大脇 大, 2018 年年度~2020 年度.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 青沼 仁志

ローマ字氏名: Hitoshi Aonuma

所属研究機関名: 北海道大学

部局名: 電子科学研究所

職名: 准教授

研究者番号 (8桁): 20333643

研究分担者氏名: 杉本 靖博

ローマ字氏名: Yasuhiro Sugimoto

所属研究機関名: 大阪大学

部局名: 工学研究科

職名: 准教授

研究者番号 (8桁): 70402972

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 宮澤 咲紀子

ローマ字氏名: Sakiko Miyazawa

研究協力者氏名: 郷田 将

ローマ字氏名: Masashi Goda

研究協力者氏名: 石黒 章夫

ローマ字氏名: Akio Ishiguro

※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。