



大阪市立大学の研究者の世界

第5回

ACADEMIC CAFE

2021 10.15 Fri
13:00~15:00

Zoom開催

申込不要

参加方法: Zoomウェビナーにて開催(URLより参加)

※URL・パスコードはポータルサイトに掲載します。

～日本学術振興会賞 受賞記念～

※日本学術振興会賞は、我が国の学術研究の水準を世界のトップレベルにおいて発展させるために創造性に富み優れた研究能力を有する若手研究者を早い段階から顕彰し、その研究意欲を高め、研究の発展を支援する目的で設置された賞です。

Episode1. 生物多様性に学ぶ巧みな光の使い方



小柳 光正
理学研究科 教授

光は生物にとって重要な環境情報であり、多くの動物は光を視覚や体内時計の調節などのさまざまな生命活動に利用している。それら動物の光利用のしくみは目的や動物によって多種多様であるが、光をキャッチする分子、すなわち光受容タンパク質が単一起源であることから、光受容タンパク質の進化を起点とすることで、動物の光利用のしくみを動物界横断的に調べることができる。この点に着目し、さまざまな動物の多様な光受容タンパク質の機能解析を行った結果、動物の巧みな光の使い方が見えてきた。

Episode2. マルクスの抜粋ノートと人新世の危機

現代資本主義の矛盾が格差や気候危機として現れる中で、カール・マルクスへの再評価が進んでいる。新しい『マルクス・エンゲルス全集』(MEGA)の刊行によって、これまで見過ごされてきた環境問題へのマルクスの視点が浮き彫りになっているのだ。マルクスのエコロジーを基礎として、「人新世」の未来を考えたい。



齋藤 幸平
経済学研究科 准教授

第5回アカデミックカフェは、日本学術振興会賞を平成29年度に受賞された小柳先生と令和2年度に受賞された齋藤先生による競演です。本学から社会科学系、自然科学系の2人の先生方が、この賞を受賞されたことは誇らしく、若手の後輩たちも後に続いて欲しいですね。当日はゼミ生になったつもりでアカデミックカフェを一緒に楽しみませんか？



荒川 哲男
学長

NEXT▶ 次回のアカデミックカフェ
テーマ: その行動は遺伝?(仮)

講演者: 文学研究科 川邊 光一 教授、理学研究科 測例 太郎 准教授

日時: 2021年12月23日(木) 15:15~17:15

■プログラム	
13:00~	開会の挨拶 櫻木 弘之 副学長
13:10~	講演 小柳 光正 教授
13:50~	講演 齋藤 幸平 准教授
14:35~	座談会 荒川 哲男 学長 小柳 光正 教授 齋藤 幸平 准教授

※後日Webclassにて
動画配信予定

All religions, arts and sciences are branches of the same tree. Albert Einstein

われわれは、すべてのものを包括する統一
的な知識を求めようとする熱望を、先祖代々
承継してきました。学問の最高の殿堂に
与えられた総合大学 (university)の名
は、古代から幾世紀もの時代を通じて、総
合的な姿こそ、十全の信頼を与えられるべき
唯一のものであったことを、われわれの心
に銘記させます。しかし、過ぎる100余年の
間に、学問の多種多様な分枝は、その広さ
においても、またその深さにおいてもまた
す拡がり、われわれは奇妙な矛盾に直面す
るに至りました。われわれは、今までに知ら
れてきたことの総和を結び合わせて一つの
全一的なものにするに足りる信頼できる素
材が、今ようやく獲得されはじめたばかりで
あることを、はっきりと感じます。ところが一
方では、ただ一人の人間の頭脳が、学問全
体の中の一つの小さな専門領域以上のもの
を十分に支配することは、ほとんど不可能
に近くなってしまったのです。

この矛盾を切り抜けるには(われわれの真
の目的が永久に失われてしまわないように
するためには)、われわれの中の誰かが、
諸々の事実や理論を総合する事に思い
きって手を着けるより他には道がないと思
います。

シュレーディンガー: 岡小天; 鎮目恭夫 訳
「生命とは何か-物理的にみた生細胞」

まえがきより抜粋

知の
SEEDS
大阪市立大学

2021.10.15 開催
第5回アカデミックカフェ
「日本学術振興会賞受賞記念」

生物多様性に学ぶ巧みな光の使い方

理学研究科 教授 小柳 光正

概要 光は生物にとって重要な環境情報であり、多くの動物は光を視覚や体内時計の調節などのさまざまな生命活動に利用している。それら動物の光利用のしくみは目的や動物によって多種多様であるが、光をキャッチする分子、すなわち光受容タンパク質が単一起源であることから、光受容タンパク質の進化を起点とすることで、動物の光利用のしくみを動物界横断的に調べることができる。この点に着目し、さまざまな動物の多様な光受容タンパク質の機能解析を行った結果、動物の巧みな光の使い方が見えてきた。

キーワード 光受容タンパク質、眼、視覚、奥行き知覚、ピンぼけ、進化、DFD



会場の様子

1. はじめに

光は生物にとって重要な環境情報であり、ヒトを含む多くの動物は光情報をさまざまな生理機能に利用している。中でも、ものの形、色、位置の情報を得ることが出来る視覚は動物にとって極めて重要な感覚である。この動物の視覚の入り口に位置し光をキャッチする分子が光受容タンパク質で、その性質が、吸収する光の波長域（色）や駆動する情報変換系など、光受容の性質の大部分を決定する。そのため光受容タンパク質は、動物の光利用のしくみを理解する上で最も重要な分子と言える[1]。さらに、さまざまな動物の光受容タンパク質は単一起源であることから、光受容タンパク質の分子進化を起点とすることで、動物の光利用のしくみを動物界横断的に調べることができる。

このような点に着目して、私たちはさまざまな動物の光利用について研究してきた。その結果、動物の視覚システムの進化の全体像や[2, 3]、眼以外での光利用のしくみ[4, 5, 6]など、興味深い発見に至った。特にハエトリグモというクモの研究からは、これまでに知られていなかった意外なしくみによる奥行き知覚を見出したので紹介したい。

2. 動物の奥行き知覚メカニズム

対象までの距離を測る、すなわち奥行きの知覚は、視覚の重要な機能の一つである。動物は様々な視覚の手がかりから奥行き知覚を行うが、相対的な位置情報を知るだけでなく絶対的な距離を測ることができるメカニズムとしては次の3種類がよく知られている。1つ目は、左右の目の見え方の違いなどを利用した両眼立体視であり、ヒトを含む多くの動物がこのメカニズムによって奥行きを知覚している。2つ目は、カメレオンなどの脊椎動物で知られている accommodation と呼ばれるメカニズムである[7]。脊椎動物は一般に眼のレンズの厚みを変えたり動かしたりしてピントを調節するが、対象にピントを合わせるためにどれだけレンズを調節したか、という情報から奥行き情報を得ることができるのである。3つ目は、カマキリなどの昆虫で知られている運動視差と呼ばれるメカニズムで、これらの昆虫は頭部を左右に振った際にどれだけ対象が速く（あるいは大きく）動くかによって距離を判断している[8]。このメカニズムは、走行中の列車から外を眺めたときに近くのものほど速く通り過ぎていくことを思い浮かべるとわかりやすいだろう。

3. ハエトリグモの視覚系

眼は動物によって、大きさ、数、構造など実に多様である[9]。動物界を見渡すと、眼点と呼ばれる単純な構造の眼や、われわれ脊椎動物やイカ、タコなどの軟体動物の眼のようにレンズと網膜を備えたカメラ眼と呼ばれる発達した眼が視覚を支えている。昆虫や甲殻類の眼は、たくさんの個眼が集まった複眼と呼ばれる眼で、カメラ眼とは外見も光学系も大きく異なる。ところが興味深いことに、昆虫や甲殻類と同じ節足動物に属するクモ類は、複眼ではなくカメラ眼でものを見ている。すなわちクモ類の視覚系は、他の節足動物とは独自に進化したものと考えられる。クモ類は一般に4対（合計8つ）のカメラ眼をもつ。クモといえは、網を張って昆虫などの獲物を待ち伏せするクモがよく知られているが、徘徊性で網を張らずに自ら獲物を捕獲するクモも多い。徘徊性のクモの多くは発達した視覚をもつが、その中で最も優れた視覚をもつクモがハエトリグモである（図1）。



図1 ハエトリグモの主眼

ハエトリグモは、英語では *jumping spider* と呼ばれ、その名が示す通り、小バエなどの獲物を飛び掛かって捕獲する。ハエトリグモの正面についている、ものを見る時に用いる主眼と呼ばれる一対の眼（図1の矢じり）は特に優れていて、その空間分解能、いわゆる視力は、われわれのそれに匹敵するといわれている[9]。その一方で、ハエトリグモは、左右の主眼の視野が重なっていないために、先に述べた両眼立体視を使って奥行き情報を得ることができない。また、レンズがクチクラの固い外骨格に固定されているためにピントの調節にもとづくメカニズムも持っていない[10]。さらに、ジャンプの前に運動視差を生じさせるような動きも報告されていない。にもかかわらず、ハエトリグモは獲物に向かって正確な距離のジャンプをする。すなわち、ハエトリグモはこれらとは異なるメカニズムで奥行き距離測定を行っていると考えられた。

4. ハエトリグモの特殊な網膜構造

ハエトリグモの奥行き距離測定メカニズムを解明するためのヒントは、主眼の特殊な網膜構造にあった。眼のレンズを通った光は網膜に存在する光受容細胞（視細胞）でキャッチされる。一般的に動物の網膜は視細胞層が1層であるのに対して、ハエトリグモの主眼の網膜は視細胞層が4層にも積み重なった特殊な構造をしている[11]（図2）。

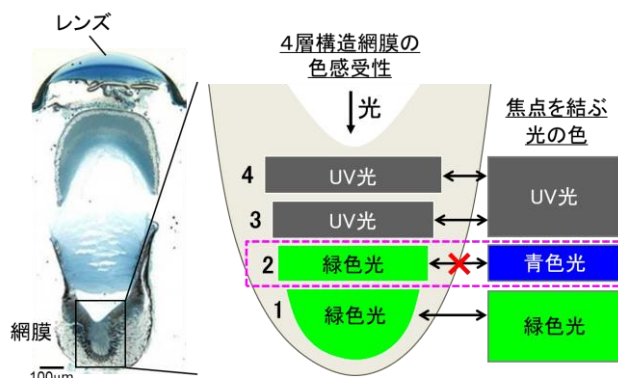


図2 ハエトリグモの4層構造網膜の特徴

また、ハエトリグモの主眼の光学系の解析から、レンズの色収差（レンズの屈折率は光の波長によって異なるため、焦点距離も光の波長によって異なること）のために、レンズから最も遠い視細胞層に緑色光、2番目に遠い視細胞層に青色光、3番目と4番目の視細胞層に紫外光（UV）がそれぞれ焦点を結ぶことがわかってきた[12]（図2）。私たちはまず4層の視細胞層で機能する光受容タンパク質を同定し[13]、各層がどのような色の光に感度を持つのかを調べた。その結果、レンズから遠い第1層と第2層は緑色光を効率よくとらえる緑色光受容層、よりレンズに近い第3層と第4層はUV光を効率よくとらえるUV光受容層であることがわかった[14]（図2）。これをそれぞれの視細胞層に焦点を結ぶ色と比べると、第1層、第3層および第4層では、「焦点を結ぶ光の色」と「受けとる光の色」が一致しているので、これらの視細胞層は、レンズの色収差によって分けられたUV光、緑色光それぞれについてピントの合った像を受け取る役割を果たしていると考えられた。一方、第2層は緑色光受容層であるにも関わらず、焦点を結ぶのは青色光で、緑色光は焦点を結ばない。すなわちハエトリグモ主眼網膜の第2層は、つねに“ピンぼけ”像を受け取っていると考えられた。

5. ピンぼけ像にもとづく距離測定

ハエトリグモ主眼網膜の第2層に生じるピンぼけ像のぼけ量は、例えば、近くにある対象からの光は、遠くにある対象に比べてより遠くに焦点を結ぶため大きくなる（図3上）。そこで私たちは、

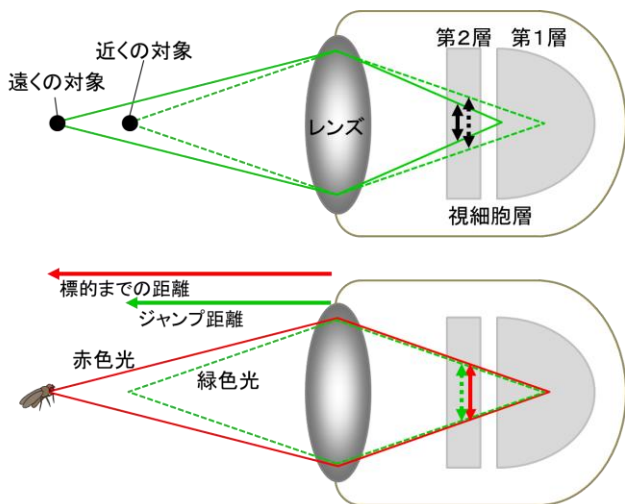


図3 ピンぼけ像のぼけ量にもとづく距離測定

「ハエトリグモは第2層のピンぼけ像のぼけ量をもとに距離を測定している」という仮説を立てた。この仮説を証明するために、私たちは光の波長を変えるとレンズの色収差の効果により第2層におけるピンぼけの量が変わることに着目した実験を行った。すなわち、ハエトリグモにとって通常光である緑色光よりも長波長の赤色光は、緑色光に比べて像が遠くに結ばれるために、同じ距離からの光でも第2層でのピンぼけ度合いが大きくなる（図3下）。一方、大きなピンぼけは対象物が近いことを意味することから、私たちの仮説が正しければ、ハエトリグモは、波長の変化によって第2層のピンぼけ度合いが大きくなると、それを対象物が実際より手前にあると錯覚すると予想された（図3下）。この作業仮説にもとづいて、赤色光の下でハエトリグモの対象物（餌）に対するジャンプ行動を観察した結果、予想通り、ハエトリグモは餌に届かない短いジャンプをした[14]。さらに、光の波長を変えることによって短くなったジャンプ距離は、ハエトリグモのレンズの色収差の実測値から理論的に導かれる距離の誤認量とよく一致した。これらの結果から、ハエトリグモがピンぼけ像のぼけ量にもとづいて距離測定を行っていることが証明された。

6. マシンビジョンへの応用

「ピンぼけ像から奥行き距離情報を含む3D画像を得る原理」は、Depth From Defocus (DFD) と呼ばれ、産業的にも注目されている。DFDは、カメ

ラが1つでよい点、リアルタイムで3D情報が得られる点が優れている。また原理的には、画像と距離情報が重なった状態で取得できるため、情報の位置合わせの処理が不要である。これは、2つの画像の比較から3D画像を構築する手法に比べて計算量が少なく済むという実用上の大きな強みである。ハエトリグモの眼は、DFDの初めての生物モデルであり、DFDによる優れた距離測定システム開発のための参考になると期待される。すでに、私たちの発見を受けて、ハエトリグモのしくみを模倣したDFDの試みもなされており[15]、今後の発展が楽しみである。

7. おわりに

視覚の第一の役割は、ものの形を正確に見ることである。その意味では“ピンぼけ”は望ましくない、避けるべき特性である。しかしハエトリグモは、その一見役に立たない情報を巧みに使って奥行きを知覚していることがわかった。ではなぜ、ハエトリグモでは、このようなユニークな奥行き知覚メカニズムが採用されたのか？上述したように、ハエトリグモの眼の空間分解能は非常に高い。ハエトリグモのような小さな眼（少ない視細胞数）で分解能を上げるには、単純には視野を狭くすればよい。実際、ハエトリグモの主眼の視野は、左右の重なりがないほど狭く、それによって直径約500マイクロメートルという小さい眼でも高い空間分解能を実現している。しかしその代償として、ハエトリグモの眼は両眼立体視ができない。つまり、ハエトリグモのピンぼけ像にもとづく奥行き知覚は、このような制約の中でこそ進化し得たしくみといえるのかもしれない。

謝辞

本研究の共同研究者である、永田崇博士、塚本寿夫博士、佐伯真二郎博士、磯野邦夫博士、徳永史生博士、七田芳則博士、木下充代博士、蟻川謙太郎博士、寺北明久博士に、この場をかりて深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Koyanagi M & Terakita A (2014) Diversity of animal opsin-based pigments and their optogenetic potential. *Biochim Biophys Acta.* 1837(5):710-6.
- [2] Koyanagi M, Kubokawa K, Tsukamoto H, Shichida Y, Terakita A (2005) Cephalochordate melanopsin: evolutionary linkage between invertebrate visual cells and vertebrate photosensitive retinal ganglion cells. *Curr Biol.* 15(11):1065-9.
- [3] Koyanagi M, Takano K, Tsukamoto H, Ohtsu K, Tokunaga F, Terakita A (2008) Jellyfish vision starts with cAMP signaling mediated by opsin-G(s) cascade. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 105(40):15576-80.
- [4] Koyanagi M, Kawano E, Kinugawa Y, Oishi T, Shichida Y, Tamotsu S, Terakita A (2004) Bistable UV pigment in the lamprey pineal. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 101(17):6687-91.
- [5] Koyanagi M, Takada E, Nagata T, Tsukamoto H, Terakita A (2013) Homologs of vertebrate Opn3 potentially serve as a light sensor in nonphotoreceptive tissue. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 110(13):4998-

- 5003.
- [6] Wada S, Shen B, Kawano-Yamashita E, Nagata T, Hibi M, Tamotsu S, Koyanagi M, Terakita A (2018) Color opponency with a single kind of bistable opsin in the zebrafish pineal organ. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 115(44):11310-11315.
 - [7] Harkness L (1977) Chameleons use accommodation cues to judge distance. *Nature.* 267(5609):346-9.
 - [8] Kral K (2003) Behavioural-analytical studies of the role of head movements in depth perception in insects, birds and mammals. *Behav Processes.* 64(1):1-12.
 - [9] Land M F & Nilsson DE (2002) *Animal eyes.* (Oxford University Press).
 - [10] Land M F (1969) Movements of retinae of jumping spiders (*Salticidae - Dendryphantinae*) in response to visual stimuli. *J Exp Biol.* 51(2):471-93.
 - [11] Land M F (1969) Structure of retinae of principal eyes of jumping spiders (*Salticidae - Dendryphantinae*) in relation to visual optics. *J Exp Biol.* 51(2):443-70.
 - [12] Blest, A. D., Hardie, R. C., McIntyre, P. & Williams, D. S. The spectral sensitivities of identified receptors and the function of retinal tiering in the principal eyes of a jumping spider. *J Comp Physiol A.* 145, 227-239 (1981).
 - [13] Koyanagi, M, Nagata, T, Katoh, K, Yamashita, S & Tokunaga, F (2008) Molecular evolution of arthropod color vision deduced from multiple opsin genes of jumping spiders. *J Mol Evol.* 66(2):130-7.
 - [14] Nagata T, Koyanagi M, Tsukamoto H, Saeki S, Isono K, Shichida Y, Tokunaga F, Kinoshita M, Arikawa K, Terakita A (2012) Depth perception from image defocus in a jumping spider. *Science.* 335(6067):469-71.
 - [15] Guo Q, Shi Z, Huang YW, Alexander E, Qiu CW, Capasso F, Zickler T (2019) Compact single-shot metalens depth sensors inspired by eyes of jumping spiders. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 116(46):22959-22965.

発表者紹介

小柳光正 福岡県出身。1995年京都大学理学部卒業。2001年京都大学大学院理学研究科生物科学専攻博士課程修了。分子進化学分野で学位を取得。2001年より同専攻でポスドク、2004年より大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻助手を経て、2006年に現所属に着任。2019年より現職。専門は光生物学・分子進化学で、動物界を俯瞰的にとらえた研究により、動物の光利用の多様性や進化の解明を進めている。また近年は、自身が発見した光受容タンパク質を光スイッチとして用いた“生命現象の光操作”にも取り組んでいる（これも巧みな光の使い方といえるだろう）。

2021.10.15 開催
第5回アカデミックカフェ
「日本学術振興会賞受賞記念」

マルクスの抜粋ノートと人新世の危機

経済学研究科 准教授 齋藤 幸平

概要 現代資本主義の矛盾が格差や気候危機として現れる中で、カール・マルクスへの再評価が進んでいる。新しい『マルクス・エンゲルス全集』（MEGA）の刊行によって、これまで見過ごされてきた環境問題へのマルクスの視点が浮き彫りになっているのだ。マルクスのエコロジーを基礎として、「人新世」の未来を考えたい。

キーワード マルクス, 社会主義, 資本主義, 自然, 環境問題, 格差問題



会場の様子

マルクスを専門に研究されている齋藤先生より、どういう経緯でマルクスを研究するに至ったか、マルクスの抜粋ノートからマルクスがどういうことを考えていたのか、地球の環境危機・気候変動問題を考える際に、マルクスの思想が役立つこと等をお話いただきました。

気候変動の問題が注目される昨今、地球環境は非常に劣化していて、生物多様性の喪失や窒素循環の攪乱など、非常に大きな問題を抱えています。その状況を表すために「人新世」という言葉が使われています。「人新世」とは要するに、人類の経済活動の痕跡、例えば、ビル、道路、農地、ダム、ゴミ捨て場などが地球の表面全体を覆ってしまっている時代のことを指します。その結果、気候変動やパンデミックのような世界規模の危機こそが「人新世」のニュー・ノーマルになっています。私達はこの危機に立ち向かうにはどうしたらいいのでしょうか。

そもそも、資本主義で絶えず経済成長を続けながら、砂漠化や気候変動等を解決し、環境負荷を減らしていくことには困難があります。だとすれば、どこかで経済成長にブレーキをかける必要があります。そうしたことから、今、若い世代を中心として、「システム・チェンジ」を求める声が上がっています。

「資本主義じゃないシステムって何だろう？」

私達は資本主義が当たり前で、身近になり過ぎていて、資本主義じゃない、皆が幸せに暮らしている持続可能な社会が想像できません。環境問題を前にして資本主義が行き詰まったり、格差が拡大しつつある中で、社会主義のイメージが強いマルクスという人物を使って、ソ連とは違う社会主義的なものをもう一度考え直すべきではないでしょうか。

学生時代からマルクスに興味があった先生は、リーマン・ショックや派遣村の活動から、労働者の貧困や格差問題を考えるには、資本主義についてもっと理解を深める必要があるとして、マルクスを研究するためドイツへ留学されました。その後、福島第一原発の事故があり、環境問題への関心と経済成長を優先する思考を反省し、エコロジーに対する関心が強まっていったそうです。

ドイツ留学中に、MEGA というマルクスとエンゲルスの新しい全集を編集する日本人研究者チームに参加され、編集作業に携わった先生は、マルクスの抜粋ノートを読み解いていくと、マルクスは晩年、『資本論』を完成させるために、自然科学を熱心に研究していたことがわかり、衝撃を受けたそうです。『資本論』を完成させるために自然科学を勉強していたとすると、自然科学と資本論の関係を再構成しないといけないのではないかとマルクスは、資本主義のもとで、人間が自然をどんどん変えることによって、しっぺ返しを受けた

り、技術を発展させることで別の危機を引き起こしたりする、そういうたちごっこを丹念に研究していました。そこにマルクスの環境思想があったのです。

「こうして大土地所有は、社会的な物質代謝と自然的な、土地の自然諸法則に規定された物質代謝の連関のなかに修復不可能な亀裂を生じさせる諸条件を生み出すのであり、その結果、地力が浪費され、この浪費は商業を通じて自国の国境を越えて遠くまで広められる（リービッチ）。」

(MEGA II/4.2: 752 f.)

マルクスは晩年、土壌疲弊に始まり、森林伐採、畜産、石炭など、自然からの収奪を研究しており、問題意識が拡張していく過程をノートに記録し、持続可能な未来の在り方を模索していました。

マルクスが最晩年に思索を続けて書き残したノート。先生はこのノートを調べることで、ソ連創設者の一人であるマルクスのイメージとは違う、持続可能で経済成長に依拠しない社会こそが目指すべき社会だという考えを持つ、21世紀の新しいマルクス像を再構築されました。

マルクスの問題意識の発展形として、「物質代謝の亀裂」を別の問題にも応用できるだろうと考え、マルクスが当時知らなかった気候変動や地質循環、現代のテクノロジー等にマルクスの方法を使って応用していく研究が進んでいます。マルクスの研究があることで、現代においてもマルクスならこの問題をどう分析しただろうと考えることができます。先生は最後に、「マルクス経済学は時代遅れと思われるがちですが、むしろこういう時代にこそ、経済学の多様なアプローチが必要であり、そうした発想が新しい社会を作っていくきっかけになると考えます。」と述べられました。

発表者紹介

齋藤幸平 大阪市立大学大学院経済学研究科准教授 博士（哲学） 専門は経済学説、経済思想。現代社会における諸問題を解決すべく、マルクス経済学をテーマに、自然科学と経済学の融合を試みて研究を行う。研究成果は、『大洪水の前に』（堀之内出版、2019年）、『未来への大分岐』（集英社新書、2019年）、『人新世の「資本論」』（集英社新書、2020年）など。2018年にはマルクス経済学において最高峰賞である「ドイッチャー記念賞」を日本人初、史上最年少（当時31歳）で受賞。