

グループ A

■受賞者 / Recipient

香取 秀俊 博士 (Dr. Hidetoshi Katori)

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授

国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究センター 時空間エンジニアリング研究チーム
チームディレクター

■業績記 / Citation

光格子時計実現への貢献

Pioneering Contributions to the Realization of the Optical Lattice Clock

■業績説明 / Achievements

精密な時間計測は、情報通信ネットワーク、全球測位衛星システム(GNSS)、電子取引、科学計測など、現代の情報通信技術(ICT)社会を支える基盤技術です。現在の「秒」は、セシウム 133 原子が吸収・放出するマイクロ波の周波数を基準としたセシウム原子時計によって定義されています。一方で、マイクロ波より約 10 万倍高い周波数をもつ原子の光学遷移を利用すれば、時間をより細かく分割できるため、時計の精度を大幅に向上できる可能性があります。こうした背景から光原子時計の研究開発が進められてきました。香取秀俊博士は、光格子時計の概念を提案し、それを実際に実現することで、従来の原子時計を大幅に上回る超高精度な時間標準を確立しました。さらに、その成果を相対論的測地学や時空間センシングへ展開し、次世代情報通信、量子技術、精密測位などへの応用を切り拓きました。

従来の単一イオンを用いた光原子時計では、高精度化と短時間計測の両立が困難でした。統計精度を高めるためには測定を繰り返す必要があり、絶対零度近くまで冷却した荷電原子 1 個を電極間に閉じ込め、多数回にわたって計測を行う必要がありました。香取博士は、この制約を克服するため、2001 年に光格子時計の概念を提案し、2003 年には基礎実験に成功しました。光格子時計では、対向するレーザー光の干渉によって形成される光の定在波が作る周期構造である光格子に、多数のストロンチウム原子を捕獲します。光格子は、原子の熱運動に起因するドップラー効果を抑制するとともに、多数の原子を同時に観測できる特徴を有しています。しかし、光原子時計には、原子を閉じ込めるレーザー光が時計遷移の周波数を変化させるという課題がありました。香取博士は、基底状態と励起状態の電気分極率が等しくなる特定の波長、すなわち「魔法波長」で光格子を形成すれば、この影響を

相殺できることを提案し、実証しました。さらに、この方式により多数の原子を同時に観測することで、量子雑音を低減する手法を確立しました。2015 年には、光格子時計において 10^{-18} レベルの精度を達成した成果を Nature Photonics 誌で発表しました。この精度は、従来のセシウム原子時計の 10^{-15} レベルの精度と比べて約 3 桁高く、100 億年以上にわたって 1 秒程度しか狂わない水準に相当します。これらの成果によって、原子時計における高精度化と短時間計測の両立が実現され、世界各国で光格子時計の研究開発が進展する基盤が築かれました。光格子時計は、原子物理学・量子計測分野における新たな時間標準技術として確立されています。また、2006 年には国際度量衡委員会 (CIPM) がストロンチウム 87 原子の光学遷移を「秒」の二次表現の一つとして採用しており、ストロンチウム光格子時計は 2030 年頃を目途に国際的な検討が進められている「秒」の再定義に向けた有力候補の一つとなっています。

また香取博士は、光格子時計を単なる時間標準としてだけではなく、新しい計測技術へと発展させました。一般相対性理論によれば、重力ポテンシャルが異なる場所では時計の進み方も異なります。 10^{-18} レベルの精度を実現した光格子時計は、この極めて微小な差を検出することができます。香取博士らは、東京スカイツリーの地上階と高さ約 450 メートルの展望台に 2 台の光格子時計を設置し、時計の進み方を比較しました。その結果、展望台の時計が地上の時計よりわずかに速く進むことを実証し、2020 年に発表しました。この成果は、時計の周波数差から高さや重力ポテンシャル差を測定する相対論的測地学の実用化に向けた重要な一歩を示すものでした。また、光格子時計が高さや重力を測る高性能センサーとして利用できることを示し、地殻変動や火山活動などを監視する時空間センシングへの道を切り拓きました。

さらに香取博士は、光格子時計の社会実装に向けた研究開発を推進しました。香取博士の研究グループは、原子の時計遷移を分光する物理パッケージやレーザー制御システムを小型化・堅牢化し、東京スカイツリー実験で用いた約 920 リットルの装置を約 250 リットルへと縮小しました。2025 年には、これらの成果を基に島津製作所が世界初の商用光格子時計を製品化しました。さらに 2026 年には、国際度量衡局 (BIPM)、理化学研究所、島津製作所が可搬型光周波数標準に関する調査・検討に向けた協力覚書を締結しました。これにより、光格子時計は時間標準としての利用だけでなく、情報通信、精密計測、測地学など幅広い分野で活用されるインフラとして、社会実装が進められています。

香取博士の業績は、超高精度な光格子時計の原理提案と実証、光格子時計を用いた相対論的測地学および時空間センシングへの展開、さらに社会実装に向けた実用化にまで及びます。これは、精密な制御・測位・同期を支える情報通信技術に大きく貢献するものであり、高安定レーザー、フォトリソ、電子制御、真空・冷却技術などを高度に融合した C&C 技術の実例と言えます。本業績は、C&C 賞にふさわしい卓越した成果であると高く評価できます。

■経歴と主な受賞 / Biography and Major Awards

【経歴】

1988 年:東京大学工学部 物理工学科卒業

1990 年:東京大学大学院工学系研究科 修士課程修了

1991～1994 年:東京大学教務職員

1994 年:東京大学大学院 論文博士(工学)取得

1994～1997 年:Max Planck 量子光学研究所客員研究員

1999 年:東京大学工学部附属総合試験所 協調工学部門 助教授

2005 年:東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教授

2010 年～:東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授

2010～2016 年:国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 ERATO 香取創造時空間プロジェクト研究総括

2011～2014 年:国立研究開発法人理化学研究所 香取量子計測研究室 招聘主任研究員

2014～2025 年:国立研究開発法人理化学研究所 香取量子計測研究室 招聘主任研究員、国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究センター 時空間エンジニアリング研究チーム チームリーダー

2017～2018 年:東京大学大学院工学系研究科附属 光量子科学研究センター長

2018 年～:国立研究開発法人科学技術振興機構 未来社会創造事業 大規模プロジェクト「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」プログラスマネージャー

2023 年～:日本学士院会員

2025 年～:国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究センター 時空間エンジニアリング研究チーム チームディレクター

【主な受賞】

2005 年:第 1 回日本学術振興会賞

2005 年:Julius Springer Prize for Applied Physics

2005 年:European Time and Frequency Award

2006 年:第 20 回日本 IBM 科学賞

2008 年:RABI AWARD

2010 年:第 42 回市村学術賞・特別賞

2011 年:科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門

2011 年:第 12 回 光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)

2011 年:The Philipp Franz von Siebold Prize

2012 年:2011 年度朝日賞

2013 年:仁科記念賞

2013 年:第 54 回藤原賞

2013 年:第 53 回東レ科学技術賞

2014 年:秋の紫綬褒章

2015 年:日本学士院賞

2017 年:第 14 回江崎玲於奈賞

2020 年:The Micius Quantum Prize 2020

2021 年:2022 Breakthrough Prize in Fundamental Physics

2022 年:本田賞

グループ B

■受賞者 / Recipients

・アンドリュー G. バルト 博士 (Dr. Andrew G. Barto)

マサチューセッツ大学アマースト校 名誉教授

・リチャード S. サットン 博士 (Dr. Richard S. Sutton)

アルバータ大学 教授

Oak Lab Inc. 創業者

・クリストファー J. ワトキンス 博士 (Dr. Christopher J. Watkins)

ロンドン大学ロイヤル・ホロウェイ校 教授

■業績記 / Citation

強化学習の概念およびアルゴリズムの確立

Pioneering Contributions to the Establishment of Reinforcement Learning
Concept and Algorithms

■業績説明 / Achievements

人工知能(AI)は、人間が行ってきた認識、判断、意思決定などの知的活動をコンピュータ上で実現する技術であり、生産性向上や新たなサービスの創出を通じて、社会、産業、人々の生活に大きな変革をもたらすことが期待されています。従来の AI における学習の主流は、正解ラベル付きの学習例を用いる教師あり学習でしたが、事前に正解が与えられない状況においても、外部環境との相互作用を通じて学習し、自律的な意思決定を行えるようにすることが重要な課題でした。アンドリュー G. バルト博士、リチャード S. サットン博士、クリストファー J. ワトキンス博士は、この課題に対し、強化学習の概念的・数学的基礎を確立するとともに、正解ラベル付き学習例に依存しない実用的かつ汎用性の高い強化学習アルゴリズムを創出し、現代の AI の発展に多大な貢献を果たしました。

正解から学ぶのではなく、報酬やペナルティから学ぶという考え方自体は以前から知られていましたが、従来の機械学習の応用では、学習を行う主体であるエージェントが正解ラベル付き学習例を利用できることを前提としており、試行錯誤しながら報酬やペナルティから学習する手法は、AI の分野では十分に活用されていませんでした。バルト博士とサットン博士は、1980 年代初頭に心理学に基づく試行錯誤学習と逐次意思決定の考え方を結び付け、マルコフ決定過程を数学的基礎とする強化学習の基本的枠組みを創始しました。また、1983 年の倒立振り子問題に関する研究において、後に Actor-Critic 法の原型となる手法を提案しました。これにより、エージェントが環境との継続的な相互作用を通じて行動を改善できる、強化学習の一般的枠組みが確立されました。

その後、強化学習で長期的な方策を最適化するためには、行動の直後に得られる報酬だけでなく、将来得られる報酬も考慮する必要があることが明らかになりました。サットン博士は 1988 年に時間差分学習(Temporal Difference Learning)を提案しました。時間差分学習は、モンテカルロ法と動的計画法の利点を併せ持つ学習法であり、現在の予測と次の時間ステップの予測との差である時間差分を利用して、将来得られる累積報酬の見込みを逐次更新します。この手法により、未知環境下で長期的な価値評価を行う基礎が築かれました。さらにバルト博士とサットン博士は、行動を選択する Actor と、その結果を評価する Critic が協調して学習する Actor-Critic 法を発展させました。Actor-Critic 法では、Critic が時間差分学習によって価値を評価し、その結果を利用して Actor が累積報酬を最大化する方策を学習します。これらの成果により、強化学習は長期的な価値評価と方策改善を可能にする体系的な学問分野へと発展しました。また、両氏は 1998 年に標準的教科書である『Reinforcement Learning: An Introduction』を出版し、強化学習研究の普及と発展に大きく貢献しました。

一方、ワトキンス博士は、バルト博士とサットン博士の強化学習の枠組みを動的計画法と結び付け、環境モデルを知らなくても最適方策を学習できる手法の研究を進めました。そして 1989 年の博士論文において Q 学習(Q-Learning)を提案しました。Q 学習では、状態と行動の組ごとに将来得られる累積報酬の見込みを表す Q 値を保持し、行動後に受け取った報酬と次の状態の情報をを用いて Q 値を逐次更新します。この更新プロセスを繰り返すことで、各状態において最も高い Q 値を持つ行動を選択する方策を学習します。Q 学習の最大の特徴は、環境モデルを事前に与えることなく、経験のみに基づいて最適方策を学習し、それによってモデルフリー最適制御を実現した点にあります。Q 学習は比較的単純な構造を持つことから、モデルフリー制御の代表的なアルゴリズムとして広く普及しました。

バルト博士、サットン博士、ワトキンス博士が築いた強化学習は、幅広い課題に適用可能な汎用的な意思決定技術として確立され、深層ニューラルネットワークとの融合によって深層強化学習へと発展しました。その応用範囲は、ゲーム AI、通信ネットワーク制御、半導体設計、物流・エネルギー管理の最適化にまで広がっています。また、人間のフィードバックを利用した強化学習は、生成 AI の応答品質を向上させ、人間の意図に沿った安全性・信頼性の高い応答の改善に貢献する技術となっています。

さらに、フィジカル AI や次世代ロボット制御の行動学習を支える中核技術として、今後の AI 社会の発展において極めて重要な役割を果たすことが期待されています。強化学習の主要な概念と数学的基礎を確立したバルト博士とサットン博士の業績、ならびに Q 学習を考案して強化学習の実用化を大きく前進させたワトキンス博士の業績は、情報処理および知能情報技術の発展に多大な影響を与えてきたものであり、C&C 賞にふさわしい卓越した功績であると言えます。

■経歴と主な受賞 / Biography and Major Awards

【経歴】

・アンドリュー G. バルト 博士

1970 年:B.S., University of Michigan

1975 年:PhD, University of Michigan

1977 年 : Postdoctoral Research Associate, University of Massachusetts Amherst

1982 年:Associate Professor, University of Massachusetts Amherst

1991 年:Professor, University of Massachusetts Amherst

2007～2011 年:Chair of the Department of Computer Science, University of Massachusetts Amherst

2012 年～:Professor Emeritus, University of Massachusetts Amherst

・リチャード S. サットン 博士

1978 年:BA degree in psychology from Stanford University

1980 年:MS in computer science from the University of Massachusetts Amherst

1984 年:Ph.D. in computer science from the University of Massachusetts Amherst

1985～1994 年:Principal Member of Technical Staff in the Computer and Intelligent Systems Laboratory at GTE in Waltham, Massachusetts

1995～1998 年:Senior Research Scientist, the University of Massachusetts Amherst

1998～2002 年:Principal technical staff member, AT&T Shannon Laboratory in Florham Park, New Jersey

2003 年～:Professor, University of Alberta

2017～2023 年:Distinguished Research Scientist, DeepMind and Co-founder of its Edmonton office

2018 年～:Fellow and Chief Scientific Advisor, Amii

2021 年:Canada CIFAR AI Chair

2023～2026 年:Research Scientist, Keen Technologies

2026 年～:Founder, Oak Lab Inc.

・クリストファー J. ワトキンス 博士

1989 年:Ph.D. degree from the University of Cambridge

1985～1990 年:Senior Research Scientist, Philips Research

1990～1992 年:Quantitative Analyst, IFM Trading Ltd.

1992～1994 年:Quantitative Analyst, Springfield International Investments

1995～1996 年:Member of Technical Staff, AT&T Bell Labs

1997 年～:Professor of AI, Royal Holloway, University of London

【主な受賞】

・アンドリュー G. バルト 博士

2004 年:IEEE Neural Network Society Pioneer Award

2017 年:IJCAI Award for Research Excellence

2019 年:University of Massachusetts Neurosciences Lifetime Achievement Award

2024 年:ACM A.M. Turing Award (Dr. Richard S. Sutton と共同)

Fellow, American Association for the Advancement of Science (AAAS)

・リチャード S. サットン 博士

2001 年 : Fellow of the Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI)

2016 年:Fellow of the Royal Society of Canada

2018 年:Lifetime Achievement Award and Fellow of the Canadian Artificial Intelligence Association (CAIAC)

2021 年:Fellow of the Royal Society (FRS) of London

2021 年:IJCAI Award for Research Excellence

2024 年:ACM A.M. Turing Award (Dr. Andrew G. Barto と共同)