

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用
を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」
研究課題「ナノ光学と光カオスを用いた超高速意思
決定メカニズムの創成」

研究終了報告書

研究期間 2017年10月～2023年3月

研究代表者：成瀬 誠
(東京大学大学院情報理工学系研究科、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

動的に変化する環境での適切な判断—意思決定課題—は、強化学習に見られる人工知能を始めた多くの重要な応用の根拠を成す。意思決定問題の根幹に、報酬確率の未知なスロットマシンからの獲得報酬を最大化する問題—多本腕バンディット問題—がある。計算機上のアルゴリズムとして従来取り組まれていた意思決定を、光を用いて直接に解決できれば、フォンノイマンボトルネックと呼ばれる従来システムの限界を打破でき、新たな価値の提供が可能となる。

そこで本研究プロジェクトでは、本チームが世界をリードする光カオス技術及びナノ光学に基づき、光を用いた超高速意思決定メカニズムを創成することを目的として、**課題1**光カオスによる超高速意思決定メカニズムの創成、**課題2**ナノ光学による超高集積意思決定メカニズムの創成、**課題3**基盤理論の構築、を柱として研究を推進した。

ここで、課題1はレーザーカオスに見られる光の広帯域性という物理的基盤に基づく超高速性を基礎とし、課題2は光の回折限界より小さな微細スケールでの光物質相互作用を基盤とした超高集積性を特長とした。課題1、課題2は、各々超高速性と超高集積性において補完的關係にあり、課題3が理論的基礎及び応用システムの観点から全体を統合する役割を担った。

課題1では、成瀬グループのシステム構成技術、内田グループの複雑系フォトニクス技術、赤羽グループの集積光デバイス技術を融合させることで、光を用いた意思決定メカニズムの研究が大きく発展した。特に、光カオス時系列を用いたスケラブルな意思決定、リングレーザーによる集積化などの世界初の原理構築を中間評価までに成功させ、その後、リーダーラガード同期現象、空間並列化、モード競合など多様なアーキテクチャの実証に成功した。さらに、フランスとの共同研究により、エンタングルメントや Hong-Ou-Mandel 量子干渉を用いた協調的意思決定が大きく進展した。また、赤羽グループにおける超高周波電子デバイス技術に基づいて、レーザーカオス時系列を閾値処理するアナログ集積回路を TSMC 社の 180 nm プロセスを用いて試作し、基本動作を確認するなど、超高周波電子デバイスとフォトニックコンピューティングの融合に向けた挑戦的研究についても一定の成果を得た。

課題2では、成瀬グループのシステム構成技術、内山グループの近接場光学技術を融合させ、光の回折限界以下のナノスケールにおける意思決定メカニズムの研究を発展させた。特に、近接場光による局所光励起と局所光計測の同時実行を可能とした独自の多プローブ近接場光装置を用いて、フォトリソグラフィ結晶の局所光励起により、光の回折限界より微細なスケールにおける複雑構造の自律的形成に世界で初めて成功した。さらに、近接場光分布に基づき、組み合わせ幾何学の基礎にあるシューベルト多項式を生成し、ひいては、これを用いてバンディット問題の高次化に相当する確率の順位認識問題を解決する原理を提唱し、その実証に成功した。

課題3では、圏論を用いた光意思決定システムの基本構造の解明に成功した。本理論研究は研究全体の統合を担い、要素研究の方向性を与えると同時に、レーザーカオスを用いた 64 本バンディット問題の解決や、近接場光分布を用いた順序認識など、全班の研究者の結集による成果に繋がった。また、個々の研究課題の理論基盤の構築に関しても成果を挙げた。具体的には、課題1のレーザーカオス時系列を用いた意思決定において、負の相関が機能の加速に關与するメカニズムを、相関付きランダムウォークに基づく独自の数理モデルにより明らかにした。また、課題2の近接場光分布が一様乱数よりも高速な順序認識を可能とさせるメカニズムに関して解析を行い、シューベルト多項式の特異性との対応關係を示した。

また、課題3は応用展開の観点からも重要な役割を担った。特に、通信システムにおいて瞬時調停が求められる諸問題を動的環境におけるバンディット問題と見なし、レーザーカオス時系列を用いた意思決定原理の応用展開を実現した。具体的には、無線 LAN におけるチャンネル選択、Beyond 5G を念頭においたチャンネルボンディング、非直交多元接続などへの応用展開を進めた。

以上のように、相互補完的なコンピタンスを有する研究者の結集により、光を用いた意思決定・バンディット問題解決の実践的研究及び理論に関する先駆的研究を推進し、フォトニックコンピューティング分野における先端的研究として世界的に認知される状況に到達できた。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 原著論文 N. Okada, T. Yamagami, N. Chauvet, Y. Ito, M. Hasegawa, and M. Naruse, Theory of Acceleration of Decision-Making by Correlated Times Sequences, Complexity, Vol. 2022, Article ID 5205580, 2022.

概要: 負の時間相関を有するレーザーカオス時系列を用いることで、バンディット問題と呼ばれる強化学習の基本課題の高速解決が実験的に本研究プロジェクトの初期に見出されていたが、加速のメカニズムは未解明であった。本研究は、相関付きランダムウォークを援用した独自の数理モデルにより、時系列の相関がバンディット問題解決に寄与する構造を明らかにした。レーザーカオスに見られる物理系の相関構造と意思決定機能を繋ぐ重要な理論基盤を与えた。

2. 原著論文 K. Uchiyama, S. Nakajima, H. Suzui, N. Chauvet, H. Saigo, R. Horisaki, K. Uchida, M. Naruse, and H. Hori, Order recognition by Schubert polynomials generated by optical near-field statistics via nanometre-scale photochromism, Scientific Reports, Vol. 12, Article No. 19008, 2022.

概要: 近接場光による局所光励起と局所光計測の同時実行を可能とした独自の多プローブ近接場光装置を用いて、フォトクロミック結晶の局所光励起により、結晶中に光の回折限界より微細なスケールにおける複雑構造の自律的形成に成功した。さらに、近接場光分布に基づき、組み合わせ幾何学の基礎にあるシューベルト多項式を生成し、これを用いてバンディット問題の高度化に相当する確率の順位認識問題を解決する原理を提唱し、その実証に成功した。

3. 原著論文 M. Naruse, S.-J. Kim, M. Aono, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, H. Hori, Category Theoretic Analysis of Photon-based Decision Making, International Journal of Information Technology & Decision Making, Vol. 17, No. 5, pp. 1305-1333, 2018.

概要: 物理系を援用した機能システムでは、不確実に変化する環境(報酬の確率的な有無や報酬確率の変化など)と、単一光子の確率性やレーザーカオスのカオス性に見られる物理信号の不規則性などが絡み合って動作する。本研究は、光を用いた意思決定システムの動作様式を圏論を規範として特徴づけ、構成要素の相互依存関係を明確にした。物理系に知的機能の一部をアウトソースするデザインに関する基盤的理論を提供した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 原著論文 R. Homma, S. Kochi, T. Niiyama, T. Mihana, Y. Mitsui, K. Kanno, A. Uchida, M. Naruse, and S. Sunada, On-chip photonic decision maker using spontaneous mode switching in a ring laser, Scientific Reports, Vol. 9, Article No. 9429, 2019.

概要: 光を用いた意思決定において、システム・デバイスの集積化は、実用化や新産業創出を見据えたときに重要な論点のひとつである。本研究は、チップ上に集積したリングレーザーにおける自発的なモードスイッチング現象を活用し、光チップ上での意思決定を世界に先駆け実証した。シリコンフォトニクスなどの集積フォトニクスと意思決定機能を結びつける、科学技術イノベーションに寄与する内容と位置づけられる。

2. 原著論文 K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida, Adaptive model selection in photonic reservoir computing by reinforcement learning, Scientific Reports, Vol. 13, Article No. 10062, 2020.

概要: 光リザーバコンピューティングは、光の広帯域性を活用した新たな計算原理として発展し、時系列予測などで顕著な性能を発揮する。しかし、事前学習が必須のため、問題によっては性能が十分に発揮されないという課題があった。本研究では、光を用いた意思決定システムを、光リザーバコンピューティングにおけるモデル選択に応用し、動的に信号源の性質が切り替わる時系列に対しても高い予測性能を実現することを実証した。光意思決定とコンピューティングの関わりを明確に示す、科学技術イノベーションに寄与する内容と位置づけられる。

3. 原著論文 S. Takeuchi, M. Hasegawa, K. Kanno, A. Uchida, N. Chauvet, and M. Naruse: Dynamic

channel selection in wireless communications via a multi-armed bandit algorithm using laser chaos time series, *Scientific Reports*, Vol. 10, Article No. 1574, 2020.

概要：光を用いた意思決定は、動的に不安定な環境下において効果を発揮し、通信システムにおける資源割当てが重要な応用のひとつである。本研究は、無線通信におけるチャンネル選択をバンディット問題と見なし、レーザーカオス時系列を用いた意思決定に基づくチャンネル選択原理を提唱するとともに、実際に無線 LAN にメカニズムを実装し、動的に変化する電波環境下において良好な通信速度を維持することを実証した。

< 代表的な論文 >

1. M. Naruse, N. Chauvet, A. Uchida, A. Drezet, G. Bachelier, S. Huant, and H. Hori, *Decision-Making Photonics: Solving Bandit Problems Using Photons*, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 26, No. 1, Article No. 7700210, 2020. (Invited paper)

概要：本論文は、本研究プロジェクトの予備段階での成果である量子ドット間のエネルギー移動を用いた意思決定や単一光子を用いた意思決定を踏まえつつ、本プロジェクトの主要な成果であるレーザーカオスを用いた高速意思決定、さらにはエンタングルドフォトンを用いた協調的意思決定や圏論的システムモデルなどに関する研究を、系統立て総合的に論じた内容である。本プロジェクトの代表論文のひとつと位置づけられる。

2. T. Amakasu, N. Chauvet, G. Bachelier, S. Huant, R. Horisaki, and M. Naruse: *Conflict-free collective stochastic decision making by orbital angular momentum of photons through quantum interference*, *Scientific Reports*, Vol. 11, Article No. 21117, 2021.

概要：本研究は、単一光子における軌道角運動量を意思決定における選択肢と対応づける新たな意思決定原理を提唱し、偏光を用いた従来方式における選択肢のスケラビリティ問題の抜本的解決策を示した。さらに、軌道角運動量を有する光子の Hong-Ou-Mandel 量子干渉によって 2 プレイヤーの意思決定の競合を回避できることを示した。その上で、多数選択肢・2 プレイヤーのシステムにおいて競合のない意思決定がシステム全体の報酬を最大化することを実証した。光の軌道角運動量の新たな応用、競合のない意思決定の基盤、光の量子性の新たな活用などの観点から、本プロジェクトの代表論文のひとつと位置づけられる。

3. R. Iwami, T. Mihana, K. Kanno, S. Sunada, M. Naruse, and A. Uchida: *Controlling chaotic itinerancy in laser dynamics for reinforcement learning*, *Science Advances*, Vol. 8, Issue 49, eabn83, 2022.

概要：レーザーの有するモードダイナミクスを用いることで、バンディット問題における探索の効率化が期待できる。本研究では、マルチモード半導体レーザーのカオス的モードダイナミクスを利用してバンディット問題の解決を試みた。選択肢数の増加に伴い、意思決定性能は選択肢数の 0.7 乗のオーダーで変化することが分かった。特に選択肢数が 100 よりも大きい場合には、従来のソフトウェア手法よりも高効率にバンディット問題を解ける事が明らかとなった。このようにマルチモードレーザーのダイナミクスを用いた意思決定性能の加速手法の発明は、本プロジェクトの代表論文のひとつと位置づけられる。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 成瀬グループ

研究代表者：成瀬 誠(東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)

研究項目

- ・光カオスによる超高速意思決定メカニズムの創成(理論・システム・性能評価)
- ・ナノ光学による超高集積意思決定メカニズムの創成(データ分析・性能評価)
- ・基盤理論の構築(モデル構築・応用検討)

② 内田グループ

主たる共同研究者：内田 淳史(埼玉大学大学院理工学研究科 教授)

研究項目

- ・光カオスによる超高速意思決定メカニズムの創成(理論・新原理構築・光システム・性能評価)
- ・基盤理論の構築(応用検討)

③ 内山グループ

主たる共同研究者：内山 和治(山梨大学大学院総合研究部 准教授)

研究項目

- ・光カオスによる超高速意思決定メカニズムの創成(理論)
- ・ナノ光学による超高集積意思決定メカニズムの創成(実験)
- ・基盤理論の構築(数学基盤構築)

④ 赤羽グループ

主たる共同研究者：赤羽 浩一(情報通信研究機構ネットワークシステム研究所 研究マネージャ)

研究項目

- ・光カオスによる超高速意思決定メカニズムの創成(光デバイス・電子デバイス)

(2) 国内外の研究者や産業界などとの連携によるネットワーク形成の状況について

① 国際研究協力(フランス)

- ・フランス・グルノーブルのグルノーブルアルプス大学及び CNRS ニール研究所の Guillaume Bachelier 博士を中心とした研究グループと、量子光学の理論並びに実験に関して連携し、これまでに 14 報の原著論文、2 報の総説を発表するなど充実している。JST の国際強化費の支援を頂き、フランスより 2018 年度に 1 名、2019 年度に 2 名の招聘、2019 年度に日本側研究者(山梨大学・内山和治准教授)のフランスへの派遣を実施した。なお滞在時の共同実験は 2022 年に Applied Physics Letters 誌に原著論文として掲載された。
- ・研究代表者の成瀬は 2017 年にグルノーブルアルプス大学の招聘教授を務め、2017 年 11 月から 12 月に 1ヶ月現地に滞在した。
- ・2019 年 3 月にグルノーブルアルプス大学で Ph.D.を取得した Nicolas Chauvet 博士が 2019 年 4 月より本 CREST の研究員として東京大学に着任し、2020 年 4 月から 2022 年 3 月まで東京大学助教を務めた。なお Chauvet 博士は 2022 年度からはフランスにおける光関連の先端企業である Cailabs 社に勤務している。
- ・2022 年 11 月にグルノーブルアルプス大学及び CNRS ニール研究所の Guillaume Bachelier 博士及び博士課程学生の Jonathan Laurent 氏が東大に約 10 日間滞在し、共同研究を実施した。
- ・2023 年 2 月末にグルノーブルにてワークショップ Quantum Optics and Decision Making Workshop を開催した。

②国際的な研究者ネットワークの構築

- 主たる共同研究者の内田淳史(埼玉大学 教授)を中心に、光科学と情報科学の学際融合領域におけるワークショップを、国際会議 Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA)において毎年主催している。関連分野の先端研究者に対して本 CREST の研究成果の発信を行っているほか、研究者の人的ネットワークを定常的に世界展開している。
- 2018年に国際会議 Unconventional Computing and Natural Computing においてワークショップ “Decision Making in Nature” を研究代表者により主催し、計算科学分野の研究者との議論や人的ネットワークの強化を行った。
- 2021年に国際会議 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (IS-PALD 2021)を、主たる共同研究者の内田淳史(埼玉大学)を中心としたメンバーにより主催(オンライン開催)し、レーザーダイナミクス基礎と応用に関する議論を深めた。外国の著名研究者が数多く招待講演を行い、研究者ネットワークの構築にも重要な役割を果たした。