領域略称名 ：極限光システム
領 域 番 号：２２Ａ４０１

令和７ 年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」
に係る中間評価報告書

「光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成」

領域設定期間

令和４ 年度 ～ 令和８ 年度

令和７ 年 ６ 月

領域代表者　　川西　哲也（早稲田大学・理工学術院・教授）

目　　次

研究組織

1　総括班・総括班以外の計画研究
2　総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者
3　公募研究

研究領域全体に係る事項

4　研究領域の目的及び概要
5　研究組織の連携体制
6　研究の進展状況及び主な成果
7　研究発表の状況
8　審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況
9　今後の研究領域の推進方策
10　若手研究者の育成に係る取組状況
11　アウトリーチ活動に係る取組状況
12　研究費の使用状況・計画
13　総括班評価者による評価

研究組織　（　令和７年　３　月現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。）

1　総括班及び総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]	課題状況
X00 総	22H05192 総括班	川西　哲也	早稲田大学・理工学術院・教授	8	
A01 計	22H05193 極限光技術を生かすフォトニック近似コンピューティング	鯉渕　道紘	国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授	4	
A02 計	22H05194 光基盤と応用の最適結合を実現するシステム構造研究	川上　哲志	九州大学・システム情報科学研究院・准教授	3	
B01 計	22H05195 複雑系フォトニクスによるフォトニックコンピューティングの変革	内田　淳史	埼玉大学・理工学研究科・教授	2	
B02 計	22H05196 極限光変調によるフォトニックコンピューティングの変革	川西　哲也	早稲田大学・理工学術院・教授	5	
B03 計	22H05197 光の極限性能による強化学習の変革と応用開拓	長谷川　幹雄	東京理科大学・工学部電気工学科・教授	3	
C01 計	22H05198 光多重化によるフォトニックコンピューティングデバイスの変革	砂田　哲	金沢大学・機械工学系・教授	4	
総括班及び総括班以外の計画研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2]　研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究組織　（　令和７年　３　月現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。）

1　総括班及び総括班以外の計画研究（つづき）

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]	課題状況
C02 計	22H05199 超高速シリコンアナログ回路と超高速光回路の融合	笠松　章史	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所小金井フロンティア研究センター・研究センター長	3	
総括班及び総括班以外の計画研究　合計　8　件（廃止を含む）					

[1]　総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2]　研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　X00

研究課題名： 総括班

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	川西　哲也	早稲田大学・理工学術院・教授	領域全体及び総括班の統括
分担	砂田　哲	金沢大学・機械工学系・教授	総括班における運営業務及び企画関連（教育関連等）業務
分担	堀崎　遼一	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授	総括班における運営業務及び企画関連（領域連携等）業務
分担	川上　哲志	九州大学・システム情報科学研究院・准教授	総括班における運営業務及び企画関連（領域連携等）業務
分担	笠松　章史	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所小金井フロンティア研究センター・研究センター長	総括班における運営業務及び企画関連（領域連携等）業務
分担	鯉渕　道紘	国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授	総括班における運営業務及び広報関連（WEBサイト関連等）業務
分担	内田　淳史	埼玉大学・理工学研究科・教授	総括班における運営業務及び企画関連（領域連携等）業務
	合計	名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者（つづき）

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
分担	長谷川　幹雄	東京理科大学・工学部電気工学科・教授	総括班における運営業務及び企画関連（領域連携等）業務
	合計	8 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　A01

研究課題名： 極限光技術を生かすフォトニック近似コンピューティング

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	鯉渕　道紘	国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授	総括および近似コンピューティング処理系
分担	安戸　僚汰	京都大学・情報学研究科・助教	情報学基礎理論・耐故障並列計算アルゴリズム
分担	八巻　隼人	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授	コンピュータアーキテクチャ・チップ内/チップ外統合近似アーキテクチャ
分担	中野　浩嗣	広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授	情報学基礎理論・近似並列計算アルゴリズム
	合計	4 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　A02

研究課題名： 光基盤と応用の最適結合を実現するシステム構造研究

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	川上　哲志	九州大学・システム情報科学研究院・准教授	光電融合回路設計・評価評価環境構築
分担	ＶＡＲＧＡＳ　ＤＡＮＩＬＯ	九州大学・システム情報科学研究院・准教授	光計算機向けアルゴリズム開発
分担	小野　貴継	九州大学・システムＬＳＩ研究センター・准教授	アーキテクチャ探索・最適化
	合計	3 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　B01

研究課題名： 複雑系フォトニクスによるフォトニックコンピューティングの変革

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	内田　淳史	埼玉大学・理工学研究科・教授	研究総括。複雑系フォトニクスによる光コンピューティングの実験を担当する。
分担	菅野　円隆	埼玉大学・理工学研究科・准教授	複雑系フォトニクスによる光コンピューティングの数値計算を担当する。
	合計	2 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　B02

研究課題名： 極限光変調によるフォトニックコンピューティングの変革

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	川西　哲也	早稲田大学・理工学術院・教授	研究代表者　研究の統括光変復調デバイスに関する研究
分担	イ　ヨウフウ	早稲田大学・理工学術院・助手	高速光変調器に関する研究
分担	黄　晴川	早稲田大学・理工学術院・助手	高精度光変調に関する研究研究統括の補佐
分担	森田　逸郎	早稲田大学・理工学術院・教授	高度変調方式の近似コンピューティングへの適用に関する研究
分担	鄭　辰	早稲田大学・理工学術院・助手	レーザ光の光変動に関する研究及びノイズ源に関する研究
分担			
分担			
	合計	5 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　B03

研究課題名： 光の極限性能による強化学習の変革と応用開拓

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	長谷川　幹雄	東京理科大学・工学部電気工学科・教授	研究の統括、極限光システムの通信応用
分担	堀崎　遼一	東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授	極限光システムデザイン・実証
分担	内山　和治	山梨大学・大学院総合研究部・准教授	極限光システムにおける近接場光学の探求
	合計	3 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　C01

研究課題名： 光多重化によるフォトニックコンピューティングデバイスの変革

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	砂田　哲	金沢大学・機械工学系・教授	研究プロジェクトとりまとめ・光ニューラルネット回路の設計・試作、学習アルゴリズム開発・センシング実験の評価
分担	犬伏　正信	東京理科大学・理学部第一部応用数学科・准教授	リザバー計算および物理コンピューティングに関する理論的考察・数値計算
分担	丸山　武男	金沢大学・電子情報通信学系・准教授	光ニューラルネット回路の評価およびセンシングデバイス評価
分担	原山　卓久	早稲田大学・理工学術院・教授	微小共振器を用いた光コンピューティングに関する基盤技術の理論構築および数値計算
	合計	4 名	

2　総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：　C02

研究課題名： 超高速シリコンアナログ回路と超高速光回路の融合

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	笠松　章史	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所 小金井フロンティア研究センター・研究センター長	研究統括
分担	原　紳介	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所 小金井フロンティア研究センター・主任研究員	システム設計
分担	関根　かをり	明治大学・理工学部・専任教授	集積回路開発
	合計	3 名	

3　公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名 研究期間	研究代表者氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]	課題状況
公	25H01880 Koopman作用素を用いたニューラルネットワークの光回路への埋め込み技術の開発 令和７年度～令和８年度	大久保　潤	埼玉大学・理工学研究科・教授	1	
公	25H01881 光磁気変換型スパイキング光ニューロンを用いたオンチップ学習光回路 令和７年度～令和８年度	庄司　雄哉	東京科学大学・総合研究院・准教授	1	
公	25H01883 新奇極性液晶により高速化した光回折ディープニューラルネットワークとオンライン学習 令和７年度～令和８年度	木村　宗弘	長岡技術科学大学・工学研究科・教授	1	
公	25H01884 フーリエ変換作用に基づく大規模並列演算可能な空間フォトニックイジングマシン 令和７年度～令和８年度	下村　優	大阪大学・大学院情報科学研究科・助教	1	
公	25H01886 環境照明の遮光による光線場変調を用いた知覚的なBRDFの置き換え 令和７年度～令和８年度	天野　敏之	和歌山大学・システム工学部・教授	1	
公	25H01887 超低損失光導波路による時間次元光極限学習機械の高度化 令和７年度～令和８年度	久世　直也	徳島大学・ポストLEDフォトニクス研究所・教授	1	
公	25H01889 設計可能な相互作用媒質を有する空間光変調型ニューラルネットワーク 令和７年度～令和８年度	高林　正典	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授	1	
公募研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

3　公募研究（つづき）

研究項目[1]	課題番号 研究課題名 研究期間	研究代表者氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]	課題状況
公	25H01891 モード多重空間光変調による低損失光行列演算 令和７年度～令和８年度	榎原　晃	兵庫県立大学・工学研究科・特任教授	1	
公	25H01893 光コンピューティング用プログラマブル活性化関数生成光回路の研究 令和７年度～令和８年度	瀧口　浩一	立命館大学・理工学部・教授	1	
A03 公	23H04804 光エッジコンピューティングのための光電融合システムの研究 令和５年度～令和６年度	塩見　準	大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授	1	
A03 公	23H04808 光複素振幅分布を入出力とする光電子融合型AIハードウェア 令和５年度～令和６年度	高林　正典	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授	1	
B04 公	23H04800 Koopman作用素を用いたレーザダイナミクスの確率的挙動のモデル化 令和５年度～令和６年度	大久保　潤	埼玉大学・理工学研究科・教授	1	
B04 公	23H04805 空間光多重化を用いた並列探索型空間フォトニックイジングマシン 令和５年度～令和６年度	下村　優	大阪大学・大学院情報科学研究科・助教	1	
B04 公	23H04806 マイクロコムによる周波数分割方式の集積光リザバーコンピューティングの創出 令和５年度～令和６年度	久世　直也	徳島大学・ポストLEDフォトニクス研究所・教授	1	
公募研究　合計　　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

3　公募研究（つづき）

研究項目[1]	課題番号 研究課題名 研究期間	研究代表者氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]	課題状況
C03 公	23H04802 光磁気変換を利用した導波路型スパイキング光ニューロン 令和５年度～令和６年度	庄司　雄哉	東京科学大学・総合研究院・准教授	1	
C03 公	23H04803 磁気光学効果を利用した光回折型ニューラルネットワークの開発 令和５年度～令和６年度	石橋　隆幸	長岡技術科学大学・工学研究科・教授	1	
C03 公	23H04810 環境と一体化した光計算によって代謝・行動を最適化する液滴ロボット 令和５年度～令和６年度	斎木　敏治	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授	1	
C03 公	23H04811 光スラブ導波路型フーリエ変換回路を用いた高機能光情報信号処理回路の実現 令和５年度～令和６年度	瀧口　浩一	立命館大学・理工学部・教授	1	
公募研究　合計　18　件（廃止を含む）					

[1]　公：公募研究

[2]　公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

4　研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に記述すること（2頁以内）。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」もの（例えば、「新しい原理や学理の発見・追究をするもの」、「学術の概念や体系の見直しを迫るもの」、「大きな発想の転換や斬新な方法論によりブレークスルーをもたらすもの」。）であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

■学術的背景と目的

ムーアの法則の終焉と人工知能（Artificial Intelligence: AI）を始めとするコンピューティング需要の増大に伴い、電子移動に基づく従来の集積回路技術だけでなく、新たな物理過程を活用する情報処理技術の必要性が高まっている。特に、光を用いたコンピューティングに関する研究は 2010 年代以降、世界的に活発化し、本領域のメンバーも大いに貢献してきた。光コンピューティングは、1980 年代に一度注目を集めたが、その後の電子技術の発展により停滞した経緯がある。しかし、現在では目的機能や技術環境が大きく変化し、光の持つ可能性を最大限に引き出すことが可能となっている。また、AI を含めた先端電子技術と光との最適な合成系（光電融合システム）を生み出す可能性も追求できる。2000 年前後から長距離大容量光ファイバー通信向けに発展を遂げた光デバイス技術や、それを支える高度な信号処理技術をベースとして、近年、光を用いたコンピューティングは再び注目を集め、各国で盛んに研究が進められている。代表的な研究例として、光導波路と光スイッチによる深層学習の実現（MIT）、光電融合行列演算器の実現（NTT）、光ファイバーでの神経回路網構築による脳型計算（Princeton 大学）、半導体レーザの高速ダイナミクスを活用した光リザーバーコンピューティング（仏 FEMTO-ST、埼玉大学）等が挙げられる。

上記のような背景を踏まえ、本研究領域では、「光の極限性能を生かす」を基本概念とし、従来の電子技術に依存する情報処理から脱却し、光科学技術と情報科学技術を高度に融合したフォトニックコンピューティングの創成を目指す。具体的には、光の様々な性質－伝搬高速性・低損失性・広帯域性・多重性・実世界接触能等－を極限まで追求し、それをコンピューティングに生かす新たなシステム構造やアーキテクチャを探求する。さらに、意思決定や論理演算等、従来の行列演算を超えた光による高次機能の創成を目指す。また、これらを実現するための超高速アナログ・光回路や集積光デバイスの実現を目指す。以上により、極限フォトニックコンピューティングと呼べる学術変革を達成する。

■全体構想

上述の通り、2010 年代以降、光とコンピューティングの融合研究は世界的に進展しているが、現状では光の多値表現可能性、波長多重、時空間多重、及びこれらの基礎にある広帯域性といった基本特性が十分に活用されていない。本領域では、光伝搬・広帯域性・多重性といった「光の極限性能」を活用することで、従来のデジタル行列演算に留まらない革新的なフォトックコンピューティングを確立する。**これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させブレークスルーをもたらす、以下の3項目を研究の柱とする。**

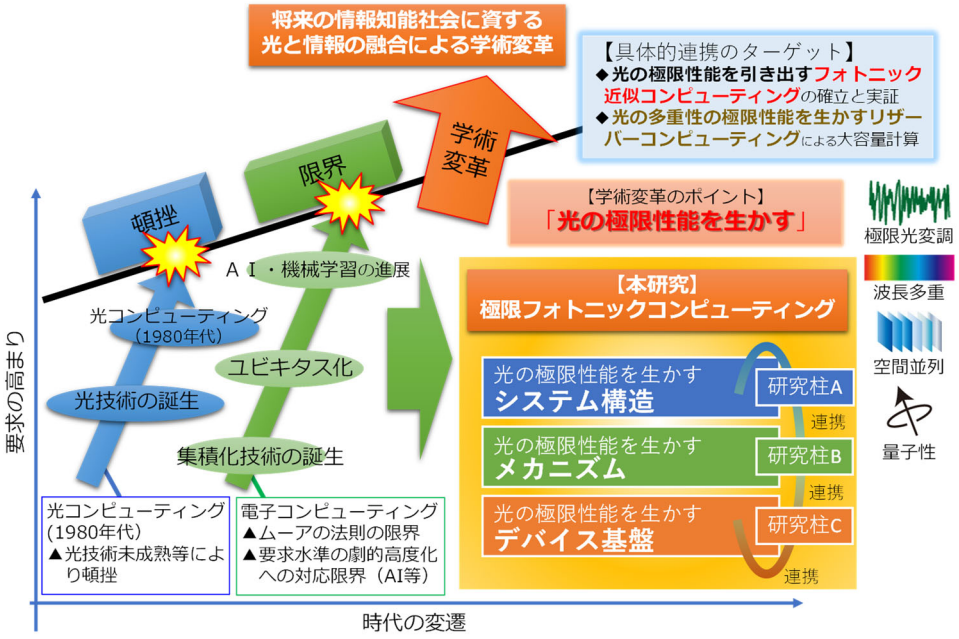


図 4-1　本研究領域の位置づけと全体構想。

【研究柱 A：光の極限性能を引き出すシステム構造】

光の極限性能を生かしたフォトニックコンピューティングの性能を最大限に発揮するためには、光デバイスの技術向上のみならず、目的機能に応じた最適なアーキテクチャの設計が不可欠である。本研究では、近似コンピューティング（Approximate Computing: AC）の概念をフォトニックコンピューティングに適用し、光の極限性能のうち多値表現能力を最大限に生かすシステム構造を構築するとともに、システムレベルでの最適化を実現する。AC と

は、目的機能が達成される範囲でデバイス等の不具合や不完全性を積極的に許容すると同時に、集積性や省エネルギー性を始めとした性能の革新を目指す概念であり、先端メモリ等で近年多大な効果を上げている。計画研究 A01 班代表者の鯉渕（NII）は、世界に先駆け光インターコネクトに AC の概念を応用し、光の高速性を最優先に活用するシステムを実現し、注目を集めている。また、超高速領域では信号変換の非線形性は不可避であり、光の極限性能を引き出すための AC は極めて有効と期待される。一方、計画研究 A02 班代表者の川上（九大）は、AI における認識や学習における演算構造の全体系を分析し、その上で、全体性能を最大化させる電気系と光系の割り当てを示した。すなわち、光の極限性能を発現させるタスク分解という極めて重要な研究領域を切り拓いている。本領域では**「フォトニック AC コンピューティング」**とも言える先導的アプローチを、研究柱 B 及び C と連携し世界に先駆けて実現し、**光の極限性能を生かすシステムアーキテクチャを明らかにする**。同時に、**電気系と光系の最適なタスク分解**に基づいて**光電融合システムとしてのシステムレベルでの最適化を実現する**。

【研究柱 B：光の極限性能に基づくコンピューティングメカニズム】

従来のフォトニックコンピューティングは主に行列ベクトル演算に焦点を当ててきたが、光の基本特性が十分に活用されているとは言い難い。本研究では、光の極限性能を生かした新たなコンピューティングメカニズムの開発に取り組む。前領域代表者／前計画研究 B03 班代表者の故成瀬（東大）と計画研究 B01 班代表者の内田（埼玉大）らは、近接場光や単一光子、レーザカオス、エンタングルドフォトン等の特徴を生かした機能構築に注力し、その一例としてバンディット問題（意思決定問題）を光で解決する手法を実証してきた。この成果は国際的に高く評価され、類似研究が急速に増加している。これらの研究は、光に固有の物理や極限性能、並びに先端的フォトニクスをストレートに生かすという根本的発想に根ざすと同時に、高度な認識機能や意思決定という具体的機能創成を明確に捉え、新たな可能性を次々と示している。本領域では、これらの成果をさらに昇華させ、レーザカオス等の**複雑系フォトニクスを駆使した光リザーバーコンピューティングの最適設計と、光意思決定及び物理深層学習のハードウェア実装**、さらに**光カオス及び量子性に基づく多腕バンディット問題解決手法の原理実証と通信システムへの応用展開**を行う。また、**光の回折現象を利用した大規模並列論理演算**にも取り組み、フォトニックコンピューティングの可能性を拡張していく。さらに、**高精度・多値光変調技術によるセンシング・演算手法の原理検証**と、**フォトニックコンピューティング用信号処理コアエンジンとしての応用**を目指す。

【研究柱 C：光の極限性能を引き出す新たなデバイス基盤】

光の極限性能を生かすためには、革新的なデバイスの開発が不可欠である。特に、電子と光を併用する光電融合システムでは、超高速な光信号と低速な電子系との変換部が今後解決されるべき重要なボトルネックである。計画研究 C02 班代表者の笠松（NICT）らは、独自のシリコン回路技術を発展させ、300 GHz 動作可能な超高速アナログ回路を開発した。光回路と電子回路の融合は 1990 年代頃から光電子融合として課題意識はあったが、従来研究は光の極限性能よりも圧倒的に低速での検討に留まっていた。本領域では、**光の極限性能を生かすための本来の意味での光電子融合に挑戦する**。ただし、このような超高速領域では回路の非線形性は不可避となる。これに対しては研究柱 A の AC の活用が有効であり、研究柱間の連携により領域全体として解決を図る。これらにより、**光信号処理の高速化と省エネルギー化を両立する**。また、AI の中核を成すニューラルネットワークに関して、**空間多重化と波長多重化を組み合わせることで、並列分散的に大規模ニューラルネットワーク計算が実行可能な新奇光デバイスを開発する**。その並列分散処理性と最適制御を用いて、**微小領域でこれまでにない超大規模かつ高度なリザーバーコンピューティング（再帰型ニューラルネットワーク計算の一種）が可能となることを示す**。さらに、この光デバイスを用いて、従来技術では達成困難な**サブナノ秒の超高速イメージング技術への応用展開を図る**。以上により、フォトニックコンピューティングの実用化に向けたデバイス基盤技術を確立する。

■領域設定期間終了後に期待される成果

本領域は、ポストムーア、超大容量コンピューティング需要、Society5.0、及びポストコロナ時代に応えるため、光科学技術と情報科学技術を高度に融合し、光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成を目指す。具体的な社会実装につながる成果も期待される。例えば、①光による大容量計算を基盤とする「大容量クラウド」や「大規模データセンター」の確立、②光による計算加速に基づく「AI・機械学習の高速化と低消費電力化」や「様々な最適化問題・意思決定問題の解決」等が挙げられる。さらに、③光による瞬時処理を生かした「Beyond 5G/6G 最適ネットワーク割り当て」、④光の低遅延性を生かした「Beyond 5G/6G ネットワークで必要となる信号処理やテレオペレーション」、⑤光の複雑性・量子性を生かした「乱数生成」「セキュリティシステム」への貢献が挙げられる。また、⑥光の物理界面能力（計測・通信・信号処理間の高い親和性）を生かした「サイバーフィジカルシステム」「知的計測システム」への応用や、⑦光リザーバーコンピューティングの高速化や低消費電力化を生かした「情報端末機器におけるエッジコンピューティング」や大量のデータを効率的に処理する「インセンサーコンピューティグ」への応用も強く期待される。さらに、⑧光リザーバーコンピューティングを用いて長時間の時系列予測が実現できれば、「天気予報や地震予測の精度向上」による社会的波及効果は多大である。

5　研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に記述すること（1頁以内）。

本研究領域では、総括班専門委員会を中心に計画研究、公募研究を組み合わせた強固な連携体制を構築し、研究の推進と発展を図ってきた。**運営委員会**は領域全体の研究方針の策定、各計画研究の統括及び連携促進を担ってきた。**企画委員会**はシンポジウムや領域会議等の企画・運営を、**広報委員会**はウェブサイトでの情報発信や報道発表等を、**国際活動支援委員会**は国際研究協力の促進や人材招聘・派遣の支援を行ってきた。

計画研究は、本領域の核となる基礎的研究を推進し、光と情報を統合する新たな学術の創成を目指している。公募研究は、幅広い視点から新たな研究課題を取り入れ、計画研究との連携により研究の多様性と拡張性を確保している。本領域の7つの計画研究は、情報科学、数理科学、光科学、物理学、光電子デバイス、通信工学等の多様な専門分野の研究者で構成されるため、分野間の垣根が生じがちである。これを一掃するため、毎月、**「ARC（Architecture）×光」研究会**を開催し（計 23 回）、分野横断的な議論を行い、異分野間のより深い相互理解を図ってきた。また、年2回、**領域会議**を開催し、計画研究及び公募研究の全ての研究者が一堂に会して、進捗確認、成果発表、議論及び意見交換を行い、領域メンバー全員で意思疎通を図ってきた。さらに、**領域代表者は各研究拠点を定期的に訪問**し、現場での密な議論を通じて研究の方向性を確認し、効果的な連携を推進してきた。これらの取り組みが功を奏し、領域全体としての一体感が醸成されるとともに、多角的な視点に基づく新たなアイディアの創出や、異なる計画研究間及び計画研究・公募研究間での様々な共同研究の創成に繋がった。

本領域では、国内及び海外の研究機関との共同研究や研究者の相互交流を積極的に推進している。国際シンポジウムやワークショップを開催し、産業界も含めて最新の研究動向を共有し、国内外の研究者とのネットワーキングも進展している。この中で、若手研究者の育成にも重点を置き、大学院生や博士研究員等が積極的に参加できる環境を整備してきた。例えば、前述の領域会議や国際シンポジウムでは、毎回ポスターセッションを設ける等、成果発表の場を数多く提供してきた。特に、ポスターセッションは、他の計画研究や公募研究の研究グループとの議論の場、及び共同研究契機の機会として極めて有効であった。さらに、これらのイベントの準備や運営にも積極的に参画してもらうことで、本領域を構成する中軸メンバーとしての意識付けを行ってきた。

右の図は、以上述べた連携体制の成果の一部として、異なる計画研究間あるいは計画研究・公募研究間の共同研究を、論文・学会発表の数で定量的に示したものである。まだ、論文になっていない、あるいは未発表の共同研究の成果はこの表に現れていない、さらに分野によっては、論文を書く頻度、査読にかかる時間等にも大きな差があることに注意を要する。B01、B03、C01 班は多くの研究者が参画しているため、必然的に共同研究の数が多くなっている。一方、少人数の A01、A02 班は、共同研究の数が少なくなりがちである。しかし、A01 班は B02 及び B03 班と密接な連携関係にあり、近似コンピューティングで決定的な成果を挙げた（Ishimaru et al., IEEE Access 2023）。また、A02 班も B01 班及び公募研究 A03 班とで、近似リザーバーコンピューティング（Ito et al., NOLTA 2024）及びセキュリティ関連（西田他, 第 207 回 SLDM 研究発表会 2024）で各々優れた成果を挙げている。また、採択時に領域全体との関連性を指摘された C02 班に関しては、B01、B03、C01 班と密接に連携しており、B01 及び B03 班との共著論文が AIP Advances 誌に Editor's Pick として採択された（Wada et al., AIP Advances 2022）ことは特筆に値する。

今後も、これらの連携体制の維持・拡張を継続し、光の極限性能を活かしたフォトニックコンピューティングの創成とその発展を目指していく。

班	A02	B01	B02	B03	C01	C02	公募
A01 近似コンピューティング	– –	– –	1 1	1 2	– –	– –	– –
A02 光電融合・システム構造	a02	– 7	– –	– –	– –	– –	1 1
B01 複雑系フォトニクス		b01	– –	8 23	5 14	1 –	2 5
B02 極限光変調			b02	1 1	– –	– –	– –
B03 強化学習・応用				b03	3 6	1 8	– –
C01 光多重化・デバイス					c01	– 5	– –
C02 超高速アナログ・光回路						c02	– –
公募							– –

図 5-1 異なる計画研究間あるいは計画研究・公募研究間の共同研究による論文・学会発表数。上段赤字が論文数、下段黒字が発表数。例えば、B01 が関わる共同研究は、該当する縦軸と横軸の交差点 b01 から右方向及び上方向を眺めることで、共同研究の相手と論文・発表数が確認できる。注：一つの論文に複数の計画研究、公募研究の研究者が関わっている場合は、重複してカウント。

6　研究の進展状況及び主な成果

本研究領域の研究の進展状況及び主な成果について、以下のとおり記述すること。
1．研究領域全体の進展状況及び成果の概要
以下の点について具体的かつ簡潔に記述すること（2頁以内）。
(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか
(2) 研究を推進するに当たって特に留意した点や、生じた問題又は課題への対応状況等
※研究推進の過程において当初に想定・予見していなかった新たな展開（計画、研究手法、アプローチ方法の見直し又はセレンディピティ等）によって得られた研究成果がある場合には、その成果の内容とともに、当該成果が得られた経緯を当初計画との関係性を含めて説明すること

2．計画研究及び公募研究の進展状況及び成果
研究項目（計画研究及びそれと連携している公募研究）ごとに、以下の点について具体的かつ簡潔に記述すること（一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内）。記述に当たっては、「7　研究発表の状況」に記載の研究成果との対応関係がわかるように記載すること。
(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているか
(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果（計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。）
※研究推進の過程において当初に想定・予見していなかった新たな展開（計画、研究手法、アプローチ方法の見直し又はセレンディピティ等）によって得られた研究成果がある場合には、その成果の内容とともに、当該成果が得られた経緯を当初計画との関係性を含めて説明すること

1．研究領域全体の進展状況及び成果の概要

（1）領域全体の進展状況と成果の概要

本研究領域は、「光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成」を目的とし、光の持つ広帯域性・多重性・超高速性を最大限に活用することで、従来の電子計算技術を超える新たな情報処理基盤を確立することを目指している。研究開始からこれまでの3年間において、研究柱 A（システム構造）、研究柱 B（コンピューティングメカニズム）、及び研究柱 C（デバイス基盤）の各分野で着実な進展がみられ、**当初の計画に沿った成果と一部ではそれ以上の成果が得られつつある。**

■研究の進展状況と成果

【研究柱 A：光の極限性能を引き出すシステム構造】

最終目標「**近似コンピューティング（Approximate Computing: AC）により、光の高速性や多重性を最大に引き出すアーキテクチャ設計及び目的機能を踏まえたタスク分解を世界に先駆けて開拓**」に向けて、AC をベースに、ポストムーア時代のフォトニックコンピューティングに最適なアーキテクチャ設計を進めた。まず、ムーア則を維持することを目指す（1）More Moore 技術と、異なる方法で付加価値を提供する機能をデバイスに統合することを目指す（2）More Than Moore 技術に分類し、体系的に研究を進めた。（1）については、A01 班代表者 鯉渕が中心となり**光インターコネクト技術の高度化を実現し、データの比較操作無しに移動によってデータの並びかえ（ソーティング）を世界最高速水準で並列処理する技術を開発**した。これは光の高速性を最大限に活用する点で従来の並びかえ技術と本質的に異なり、今後の応用展開が期待される。A02 班代表者 川上は光演算器と電気演算器を完全に分ける従来のアプローチから脱却し、電気回路のクリティカルパスを積極的に光化することが光電融合の本質と考えた。その結果、**大幅な改善が難しい電気回路においてレイテンシー88%、消費エネルギー42%という性能向上を達成**した。さらに、集積光学系と空間光学系を融合した**超並列光行列演算器を提案し、188 TOPS という高スループットを実証**した。これらをベースに、セキュリティ面への展開も進めている。（2）については、A01 班分担者 安戸が B03 班代表者 長谷川らと、**バンディット問題の光計算で量子アニーラ、デジタルアニーラの性能を向上させられる**場合があることを示した。これは、**光技術と情報科学、特に AC との融合成果**である。このように、光の極限性能を引き出すシステム構造について、具体的なシステム設計の方向性が明確になった。

【研究柱 B：光の極限性能に基づくコンピューティングメカニズム】

最終目標「**光リザーバーコンピューティング、光変調のコンピューティングへの展開、光意思決定等の高次光機能を世界に先駆けて切り拓く**」に向けて、光の特性を生かした新たな計算手法の研究を進めた。B01 班では、公募研究 B04 班と連携して、大規模言語モデルで使用される**注意機構を搭載したリザーバーコンピューティングの開発に成功**した（Physical Review Applied 誌に掲載）。また A02 班との連携により、近似コンピューティングの概念を導入することで、**従来法よりも 91%の低消費電力のリザーバーコンピューティング**が実現可能であることを示した（NOLTA 2024）。さらに B03 班と連携して、マルチモード半導体レーザを用いて、多腕バンディット問題における意思決定の光実装実験に成功した。**100 台以上のスロットマシン（選択肢）でソフトウェア方式よりも性能が向上**することを示した（Science Advances; IF 13.7; 論文採択率 10.4 %）。また、空間光変調器を用いた光実装を行い、512 台のスロットマシンに対する意思決定に成功した（Optica; IF 10.4）。B02 班では、B03 班や A01 班と連携して、近似計算のために倍精度浮動小数点数を近似データとして転送する実験を行った。倍精度浮動小数点数

自体のオーダで変調変化するビット位置を変えることで、**任意の浮動小数点数に対して一定オーダの値変動に抑えながら高速化を達成**した（IEEE Access）。B03 班では、**レーザネットワークを用いた意思決定の高次機能化**や、**レーザカオスによる探索の有効性理論の確立**、フォトクロミック結晶における**ナノ光経路のバンディット応用**による基盤強化を行った。さらに、Beyond 5G を見据えた無線通信における非直交多元接続（Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA）や MIMO（Massive Multi Input Multi Output）への応用可能性を示した。加えて、光回折を活用した新たな全光コンピューティング手法、**Diffraction Casting を提案し、従来困難とされていた 16 種の 256 ビット並列論理演算に成功**し（Advanced Photonics; IF 20.6）、当初の期待を上回る成果を得た。

【研究柱 C：光の極限性能を引き出す新たなデバイス基盤】

最終目標「**多重性を最大に活用する集積光デバイスの変革、及び電子系との接続のボトルネック解消に向けた超高周波エレクトロニクスとフォトニクスの融合**」に向けて、（1）光多重化を活用したシリコンフォトニック・リザーバー計算回路と深層学習への展開、（2）光と電子の融合におけるボトルネックを打破する超高速アナログ集積回路、（3）以上の光電融合技術に基づく超高速イメージ処理技術、を確立し、次世代フォトニックコンピューティングの基盤構築及び応用展開を進展させた。（1）については、C01 班及び B01 班が有する技術を結集して、ランダム行列演算に特化するも、**既存の電子コンピューティング性能を遥かに超える 22.3TOPS/W のエネルギー効率と 6,750TOPS/mm²の計算速度**を有する光リザーバー計算回路を開発した。さらに誤差逆伝播に頼らない新たな学習手法を見出し、学習コストの劇的な低減が達成可能であることを示した。本成果は物理学分野で最も権威ある学術誌の一つである Physical Review Letters 誌に掲載され、Editors' Suggestions に選定された。（2）については、**300GHz 動作可能な超高速アナログ集積回路技術をベース**に、B03 班の超高速意思決定の根幹である計数処理・閾値処理技術、B01 班の高速乱数生成を支える超高速 XOR 及びサンプリング回路、C01 班の光リザーバー計算回路の後処理への貢献等、各計画研究の光技術を最大限に生かしつつ、それらを根底から支える技術基盤を構築してきた。（3）については、以上の光電融合技術に基づき、**サブナノ秒現象を認識・検知・可視化可能な超高速イメージ処理技術を開発した。これは既存のエレクトロニクスでは達成不可能な技術であり、光の極限性能（多重性に基づく並列分散性）を生かす本学術変革領域研究により初めて達成できた技術**である。このように、光による高効率・高速情報処理の新たな地平を切り開く基盤確立に向けて順調に進展している。

■領域全体としての取り組みと成果

上記3つの研究柱（7つの計画研究）における研究成果以外にも、研究領域全体として以下の3項目を重点課題と位置づけ、様々な取り組みを行って多くの成果を挙げてきた。その一例を以下に記載する。

【連携体制の構築】

7つの計画研究は多様な専門分野の研究者で構成されるため、毎月「**ARC×光」研究会**を開催し、分野横断的な議論と相互理解を図ってきた。また年2回、**領域会議**を開催し、全ての研究者が一堂に会して、進捗確認や成果発表、意見交換等を行ってきた。さらに、領域代表者は各研究拠点を定期的に訪問して研究の方向性を確認し、効果的な連携を推進してきた。その結果、領域全体としての一体感が醸成されるとともに、異なる計画研究間及び計画研究・公募研究間での共同研究の創成に繋がった。

【若手研究者の育成】

大学院生や博士研究員等の若手研究者が主体的に研究に参加し、リードできる環境を整備してきた。海外の国際会議に積極的に参加させ、自身の立ち位置を再認識させることにも注力した。**査読論文と学会発表の筆頭著者の 9 割以上が、49 件の受賞のうち 41 件が、いずれも若手研究者であった**。海外渡航を支援し、2023 年度、2024 年度と**計3名の大学院生が共同研究を行った**。これら若手研究者の活躍と高い評価は大きな成果である。

【アウトリーチ活動】

領域ウェブサイトで領域の概要や活動等を国内外に発信し、毎月「**光×コンピューティング」オープンセミナー**を、また年一回「**光と情報」サマースクール**を開催してきた。**計8件の国内・国際シンポジウム**を主催した。積極的にプレスリリースを行い、**11 件の新聞報道、26 件の国内外専門誌への記事掲載**に至った。イベント情報を小中高生向けのメールマガジン及びウェブサイトに掲載し、一定数の参加を得た。招待講演やワークショップ等を通じて、企業との緩やかなコミュニティを形成してきた。**フォトニックコンピューティングに関する書籍2冊を発刊**した。

以上述べたように、本領域の研究及び様々な取り組みの成果は当初の予想を超えて、大きく進展している。今後のさらなる発展が期待できる。

（2）留意した点や問題又は課題への対応状況等

最大の困難の一つは、研究開始2年目にして領域代表者の東京大学の成瀬誠が死去したことである。この出来事はプロジェクト遂行において大きな痛手となったが、2023 年 10 月、早稲田大学の川西哲也が後任の代表者として領域を引き継ぎ、総括班を中心とした領域メンバーの協力の下で計画を継続することができた。領域内の緊密な連携と迅速な対応により、研究計画の遅延を挽回し、当初の目標を上回る進展を遂げることができた。

2. 計画研究及び公募研究の進展状況及び成果

計画研究 A01「極限光技術を生かすフォトニック近似コンピューティング」鯉渕 道紘（国立情報学研究所）

（1）研究の進展状況

計画研究 A01 班では、近似コンピューティング（Approximate Computing: AC）とフォトニックコンピューティングの融合を世界に先駆け実現し、光の極限性能を生かすアーキテクチャを明らかにすることを目指している。フォトニックコンピューティングを遂行する上で、一部の処理を既存のコンピューティングにおいて補助的に実行することが現実的である。具体的には、以下の3項目を実施することでポストムーア時代の近似フォトニックコンピューティング基盤を確立する。なお、研究柱 A の方針に従い、今後 10～15 年にわたりムーア則を維持することを目指す More Moore 技術（Ⅰ及びⅡ）と、異なる方法で付加価値を提供する機能をデバイスに統合することを目指す More Than Moore 技術（Ⅲ）に分類し、体系的にまとめるべく研究を発展させている。

Ⅰ．フォトニックコンピューティングのためのチップ内・チップ間統合近似アーキテクチャ

どのように、誤差等の要求指標に応じてシステムを構成するか？という問いに対して、複数の FPGA（Field Programmable Gate Array）を用いた並列計算システム等の具体的なターゲットデバイスにおいて、誤差等の要求指標に応じて許容ビット誤り率を満たすように制御を行うフレームワークを開発する。

Ⅱ．フォトニックコンピューティングのための近似コンピューティング処理系

どのように、計算アルゴリズムを表現するか？という問いに対して、具体的な問題を通して検討を行う。

Ⅲ．フォトニックコンピューティングのための耐故障・近似並列計算アルゴリズム

どのような、計算アルゴリズムが完動するか？という問いに対して、具体的な問題を通して検討を行う。ここでは、計画研究 B02 班が保有する多値変調技術、及び B03 班が保有するレーザカオスの振舞いを利用する計算技術等と強く連携する。

中間評価実施までに、項目Ⅰについては、高速 I/O を有する 8 台の FPGA を用いた PC クラスターにて方式提案から基礎評価まで実施し、項目Ⅱについては、組み合わせ最適化問題のソルバにおける非ノイマン型計算に関する最大問題サイズや高速性等について検討を行い、項目Ⅲについては、バンディット問題の光計算で、量子アニーラ、デジタルアニーラの性能を向上させられる場合があることを示した。このように予定通り順調に進捗している。

（2）計画研究で得られた成果、計画研究間及び計画研究・公募研究間の共同研究で得られた成果

Ⅰ．フォトニックコンピューティングのためのチップ内・チップ間統合近似アーキテクチャ

A01 班代表者 鯉渕が中心となって**FPGA 間光インターコネクト技術の高度化を実現し、データの比較操作無しに、データの移動によってデータの並びかえ（ソーティング）を世界最高速水準で並列処理する技術を開発**した（Mizutani et al., J. Opt. Commun. 2025）。これは光の高速性を最大限に活用する点で従来の並びかえ技術と本質的に異なる。評価に用いた計算システムの全体像を図 6-1 に示す。この高いデータ処理性能は、1 対多、多対多の集合通信と計算処理を帯域の理論上限に漸近するまで高速化できたことによるものである。さらに、この集合通信に低遅延非可逆圧縮回路を導入することで、さらなる広帯域通信を達成することができた。その結果を図 6-2 に示す。図 6-2 において、alltoall、scatter、allgater は評価を行った集合通信の種類を示している。図 6-2 より、対象とする浮動小数点数（FP32）配列の誤差の許容範囲が大きくなるにつれて、総スループットがさらに向上していることが分かる。**この集合通信は汎用性を有し、様々な計算処理に適用できることから、さらなる応用展開を進めている**（Nguyen et al., J. Parallel Distrib. Comput. 2023）。

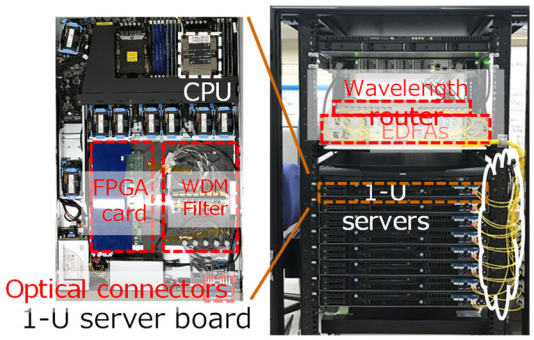


図 6-1 FPGA 計算システム（計8台）。

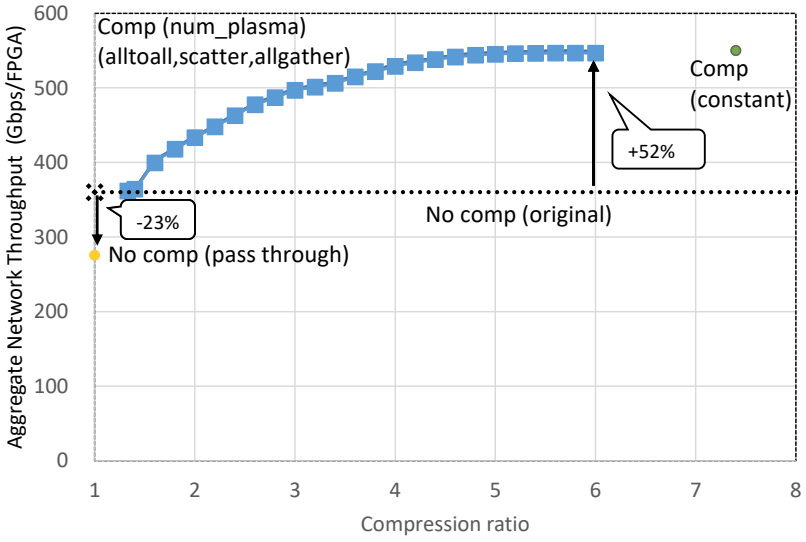


図 6-2 非可逆圧縮を用いた集合通信の評価結果。

この計算システムでは遠隔 FPGA 内メモリへ最大約 800Gbps で通信できるが、本並びかえではその帯域を活用することができる。ただし、この処理技術において計算精度についての検討が不十分であることが判明した。そこで、平澤が中心となって、計算と通信による誤差の伝搬をモニタリングし、その結果に基づき計算手法のチューニングを実施する枠組みを開発した。これは Linux 用計算ソフトウェアとして利用可能である。

Ⅱ．フォトニックコンピューティングのための近似コンピューティング処理系

どのように、計算アルゴリズムを表現するか？という問いに対して、A01 班分担者　中野は、非ノイマン型計算技術の一つであるアニーリング近似計算の高速化を探求した。最新の GPU のハードウェアを効率良く利用することで**世界最高速水準のスループットを達成し、アニーリング近似計算アルゴリズムの内部表現について一定の指針を得る**に至った。鯉渕は**前領域代表者　成瀬、現領域代表者／B02 班代表者　川西、及び B03 班　巳鼻らとの共同研究**で、この**近似コンピューティングの概念が光ファイバー無線通信（Radio-Over-Fiber System）において有効である**ことを実証した（Ishimaru et al., IEEE Access 2023）。A01 班分担者　八巻は光ネットワークにおける効率的な経路利用を可能とするトラフィック分散法、チップ内ネットワークへのセキュリティ技術の展開（Shikama et al., Best Paper Award, PDCAT 2022）等、様々な応用問題に取り組んだ。特にセキュリティ技術について、光ネットワークオンチップのネットワークインタフェースに仕組まれたハードウェアトロイによる挙動を検知し、プロセッサのキャッシュデータのコヒーレント維持に必要なトラフィック量を抑えるように近似処理を導入する処理系を開発する等、光とコンピューティングに関する新しい技術を幅広く開発した（Koibuchi,, CANDAR 2023 and ISPEC 2023）。

Ⅲ．フォトニックコンピューティングのための耐故障・近似並列計算アルゴリズム

どのような、計算アルゴリズムが（高速に）完動するか？という問いに対して、2つのアプリケーションについて一定の解を得ることができた。

一つ目のアプリケーションはバンディット問題の光計算である。A01 班分担者　安戸は、レーザカオスによる意思決定で多腕バンディット問題を解く手法をイジングマシンに適用する研究を行った。組合せ爆発により、従来の多腕バンディットの定式化では腕の数が足りず、解を求めることが困難であった。そこで、**並列バンディットアーキテクチャを導入することで、複数のバンディット問題の組み合わせで膨大な解を表現する、バンディット変数固定法と並列バンディット変数固定法を考案**した。GPU を用いたシミュレータを設計し評価した結果、**最大カット問題のベンチマークにおいて 95%程度の精度で解を求められる**ことを示した。図 6-3 に評価結果の詳細を示す（Yasudo, PDP 2023）。2つの最大カット問題（Max-cut）、1つの循環セールスマン問題（TSP: Traveling Salesman Problem）において、安戸が開発した手法が優れた解を発見できている様子が確認できる。これらの結果を基に、安戸は**B03 班代表者　長谷川らとの共同研究**で、**新たなフォトニックコンピューティングへ展開する技術を提案し、既存のアニーラ計算機と比べて潜在的に高い性能を有している**ことを示した。

二つ目のアプリケーションは光ニューラルネットワークである。河野は、光の極限性能の一つである「光子の量子性」に着目し、画像分類のためのニューラルネットワークを構築するシステムアーキテクチャを探求した。具体的には、光量子ネットワークの接続構造をランダムグラフに基づいて構築することにより、必要な光量子ゲート数（干渉計等の光デバイス数）と推論精度のトレードオフの向上を図った。評価の結果、MNIST データセットにおける画像分類タスクにおいて、従来の光量子ネットワークの接続構造と比較して、**本研究で提案したランダムな接続構造により、Top-1 分類精度が最大で約 6%向上**した。

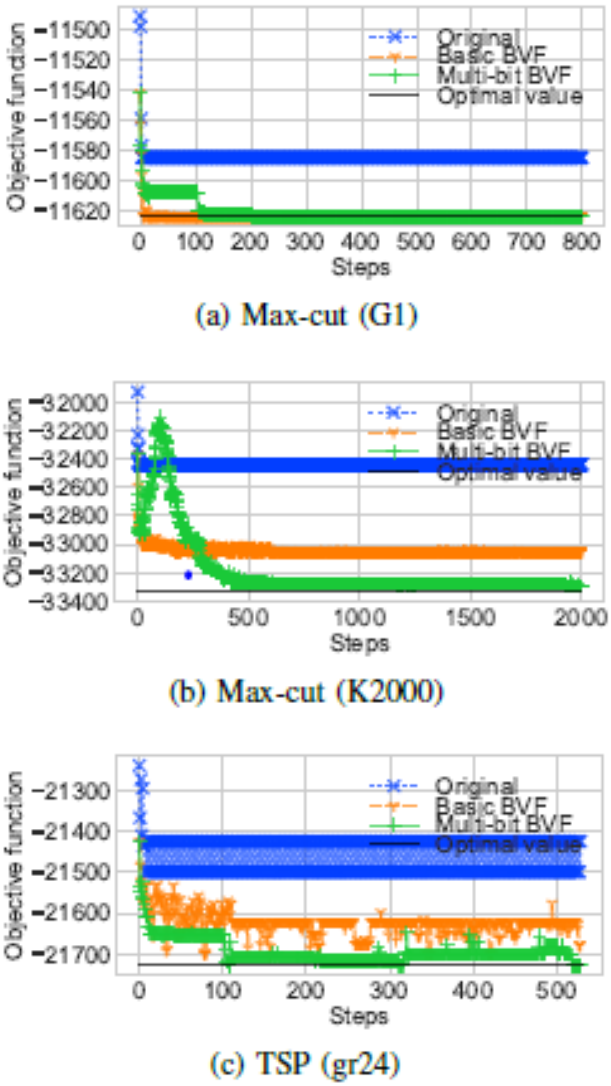


図 6-3　3つの最適化問題における解の質の評価結果。青：メタヒューリスティクス、橙：バンディット変数固定法、緑：並列バンディット変数固定法。(a)最大カット問題（G1 インスタンス）、(b)最大カット問題（K2000 インスタンス）、(c)循環セールスマン問題（gr24 インスタンス）。

計画研究 A02「光基盤と応用の最適結合を実現するシステム構造研究」川上 哲志（九州大学）

（1）研究の進展状況

計画研究 A02 班では、多様な光演算回路をコアとした光電融合計算機基盤を対象とし、タスク分解に基づいて、デバイス/回路/アーキテクチャ/アルゴリズムを包含したシステムレベルの評価環境の構築と設計空間探索・最適化を行うことで、光電融合計算機システムのあるべき姿を探求する。具体的には、下記の3項目について光電融合計算機システムでの性能・電力的優位性を明確化し、光演算器がスケールした場合のメリットと精度に関する実現可能性を実証した上で、光物理現象を活用する新たな計算アルゴリズムを創成する。

Ⅰ．光演算回路の設計と計算機システムレベルでの性能評価

1）アナログ光演算回路を活用した浮動小数点演算
2）集積光回路と空間変調器を活用した超並列光行列演算器
3）光電融合計算機のシステムレベルでの理論ピーク性能・電力と実効性能・電力の見積手法

Ⅱ．光電融合計算機システムのスケーラビリティを考慮した精度評価

1）小−大規模モデル向けのノイズを考慮した精度シミュレータ
2）各種光 VMM（Vector-Matrix Multiplication）の計測ノイズを考慮した演算エミュレーション
3）量子化・ノイズ耐性向上のための学習アルゴリズム

Ⅲ．光物理現象に基づいた計算機構を活用するアルゴリズムの創出

1）光物理リザーバーと自己組織化力学方程式を組み合わせた最適化フリーな分類モデル
2）各種ノイズ環境下におけるモデルのロバスト性の検証と性能比較
3）教師なし学習に基づく適応性と頑健性の向上手法

中間評価実施までに、項目Ⅰに関して1）、2）の光回路提案と性能比較、3）の理論ピーク性能見積手法の確立、項目Ⅱに関して1）の精度シミュレータの開発、2）、3）の初期検討、及び項目Ⅲに関して1）の分類モデルの構築と 2）の性能評価が、予定通り順調に進捗し、当初の期待を上回る成果を得ている。今後2年で、光電融合計算機システムの実効性能・電力の見積手法の確立と、光リザーバーをケーススタディとした実システムへの適用（**計画研究 B01 班との共同研究**）、大規模演算器への適用拡大のための量子化・ノイズ耐性向上のための学習アルゴリズムの開発（**公募研究 A03 班、NTT との共同研究**）、光物理リザーバーを用いた適応性と頑健性を向上させる計算原理の開拓（**計画研究 B01 班、C01 班との共同研究**）を実施する予定である。

（2）計画研究で得られた成果、計画研究間及び計画研究・公募研究間の共同研究で得られた成果

Ⅰ．光演算回路の設計と計算機システムレベルでの性能評価

本研究項目では、光電融合計算機基盤の「コアエンジン」となる光演算器を複数提案し、これらに関して、システムレベルでの性能・電力見積もりが可能となる評価環境を構築した。主要な光演算器はアナログ処理に依存しているため、浮動小数点演算への適応が困難であるという問題を抱えている。この課題を解決すべく、1）光電融合浮動小数点乗算器を提案した（図 6-4）。従来の浮動小数点演算器のボトルネック解析に基づいて、光演算器の設計区間探索を行うことで、精度/電力/遅延志向の演算器を複数提案した。その結果、**大幅な改善が難しい電気回路においてレイテンシー最大 88%、消費エネルギー最大 42%という性能向上を達成**した（Inaba et al., IEICE Trans. Inf. Syst. 2025, ACM CF 2023, and IEEE MCSoC 2022）。

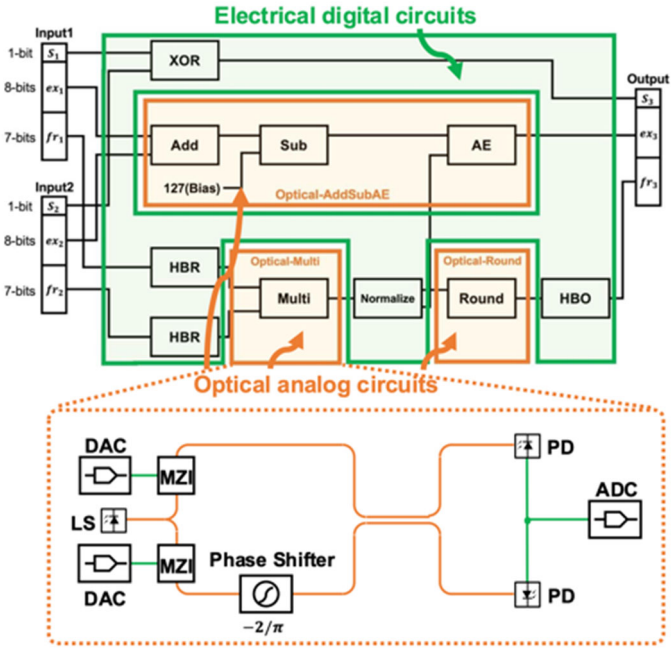


図 6-4 光電融合浮動小数点乗算器。

また、光コンピューティングの主な利点、例えば低いレイテンシーや高いエネルギー効率等が回路規模の拡大に伴って向上することから、光演算器のスケーラビリティを確保することが極めて重要であると考え、2）**集積光学系と空間光学系を融合した超並列光行列演算器を提案**した（図 6-5）。空間と波長分割の両方における高密度並列処理により、**スループットを 188 TOPS まで向上可能**であることを実証した。これは、従来回路では到達できない領域であり、大規模言語モデルの実行といった応用が期待できる（Nakajima et al., AI and Optical Data Sciences V, SPIE Photonics West 2024）。

さらに、3）これらの光演算器を含む ADC/DAC/OE/EO/メモリアクセス/電気デジタル回路を考慮した、システムレベルでの性能・電力評価環境を構築した。光演算器単体での利点のみでは計算機システムとしての優位性を議論することが困難なうえ、システムの設計探索・最適化はできない。この問題の解決策として、まず理論ピーク性能・電力の汎用的な評価環境を構築した。本手法は、特定の光演算器のみならず、他の回路へも応用可能である。例えば、計画研究 B01 班代表者 内田の提案する**光リザーバーコンピューティングにおいて ADC のエネルギーが極めて重要であることを明確化し、bit 幅を変化した場合の設計空間探索を実施し、システムレベルでの消費エネルギー最適化を実施**した（Ito et al., IS-PALD 2024; NOLTA 2024; 他国内学会 3 件）。

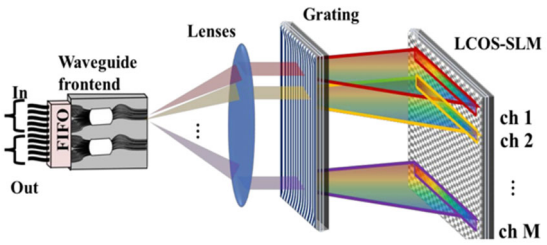


図 6-5 超並列光行列演算器。

Ⅱ. 光電融合計算機システムのスケーラビリティを考慮した精度評価

本研究項目では、項目Ⅰで示した高性能・低電力な光演算回路の大規模化に向けて、精度評価を基に実現可能性を検証した。光電融合計算機システムの実応用では、様々な既存の事前学習済み DNN（Deep Neural Network）のデジタルパラメータをダウンロードして微調整し、それを光アクセラレータに転送することで推論処理を実行する。しかし、光アクセラレータでは、ADC/DAC における入出力量子化エラー及びクロストークや製造/制御エラーによる、理想的な行列重みと実装された行列重みの間のアナログエラーが推論精度を劣化させる。一方、アナログ光演算器の物理エラーを考慮した演算シミュレーションは、極めて莫大な実行時間を要する。そこで、1）光演算器のエラーを抽象化して、**軽量実行可能な大規模モデル対応のシミュレータを開発**した（図 6-6）。GPU クラスターを用いて、**8.7×10^7までのパラメータサイズの DNN モデルを評価することが可能**となった。本シミュレータにより、項目Ⅰの**超並列光行列演算器や公募研究 A03 班のセキュリティ研究で対象にしている MZI（Mach-Zehnder interferometer）-VMM について精度評価を実施**した（Nakajima et al., IEEE SUM/PSC 2024; **西田, 第 207 回 SLDM 研究発表会セッション特別賞**）。また、2）シミュレータのノイズの忠実度を上げるべく、**各種光行列演算器の演算誤差の実機測定を NTT との共同研究により実施**した（図 6-7）。現在、実測ノイズをガウシアンフィッティングすることにより、光演算実行を再現している（中島他, 2024 年応物学会春季講演会）。今後は任意のヒストグラムに対応したノイズ印加により、シミュレーションの忠実度をさらに向上させる予定である。また、さらなる大規模化のため、3）量子化・ノイズ耐性向上のための学習アルゴリズムの開発にも着手している。

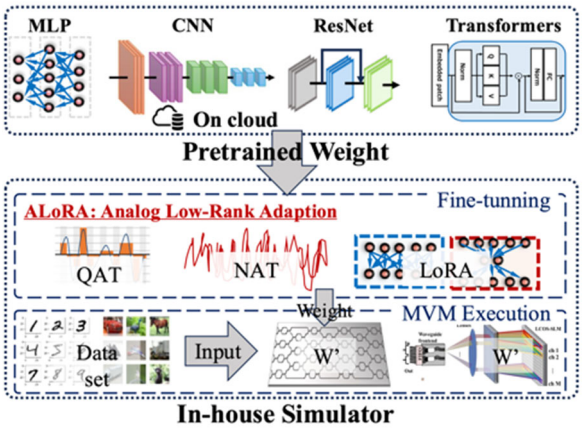


図 6-6 大規模モデル向け精度評価環境。

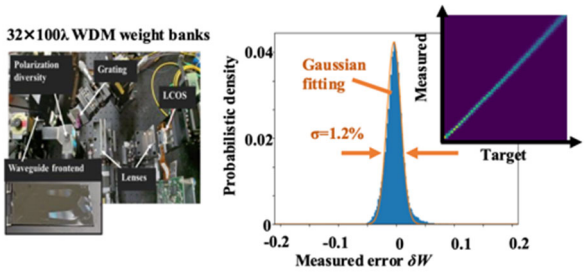


図 6-7 実機誤差測定（LCOS-VMM）。

Ⅲ. 光物理現象に基づいた計算機構を活用するアルゴリズムの創出

本研究項目では、光物理現象に基づく新しい計算アルゴリズムの開発を目指している。特に、リザーバーコンピューティング等のランダムネットワークと、自己組織化動的方程式（Self-Organizing Dynamic Equation: SODE）による意思決定機構の融合により、最適化に依存しない新しい分類パラダイムの創出を試みている。このアプローチは、自然界における情報処理機構に着想を得ており、本質的な適応性と高い頑健性の両立を目指している。中間評価時点までに、標準的な IRIS データセットを用いて、実際の光物理リザーバーの計測データに基づく評価実験を実施した（**計画研究 B01 班及び C01 班との共同研究**）。多層パーセプトロン（Multilayer Perceptron: MLP）やエコーステートネットワーク（Echo State Network: ESN）と比較して、1）**提案モデル（RFA-SODE/ESN-RFA-SODE）の頑健性の高さが確認**された。特に、2）**強いガウスノイズ（SNR=4）を入力に付加した条件下でも、RFA-SODE は0.81 ± 0.02の精度を維持し、ESN（0.69 ± 0.03）や MLP（0.79 ± 0.03）を上回る性能を示した**。また、入力特徴量のランダム置換やドロップアウトといった多様な汚染シナリオにおいても、RFA-SODE は常に安定した性能を維持しており、高い頑健性を有していることが明らかとなった。さらに、**リザーバーコンピューティングの頑健性について、特徴と潜在空間を調査する新しい方法論を開拓**した（Foong and Vargas,, J. Inf. Process. 2025; Tran et al. ACCV 2024; Zhang and Vargas, Physica D 2023; Zhang and Vargas, IEEE Access 2023）。

計画研究 B01「複雑系フォトニクスによるフォトニックコンピューティングの変革」内田　淳史（埼玉大学）

（1）研究の進展状況

本研究領域では、光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成を目標としている。**計画研究 B01 班は、研究柱 B「光の極限性能に基づくコンピューティングメカニズム」における、「時空間多重フォトニックコンピューティング」を担っている**（右図参照）。B01 班の役割は、フォトニックコンピューティングの新規メカニズムの創成であり、理論と実装の中間に位置している。特に、B01 班の大きな武器である複雑系フォトニクスの解析手法を用いて、光リザーバーコンピューティングを基盤として強化学習や深層学習と融合させることで、**光と複雑系の長所を利用した質的に異なるフォトニックコンピューティング技術を創発する**。これにより、研究領域の推進に貢献する。

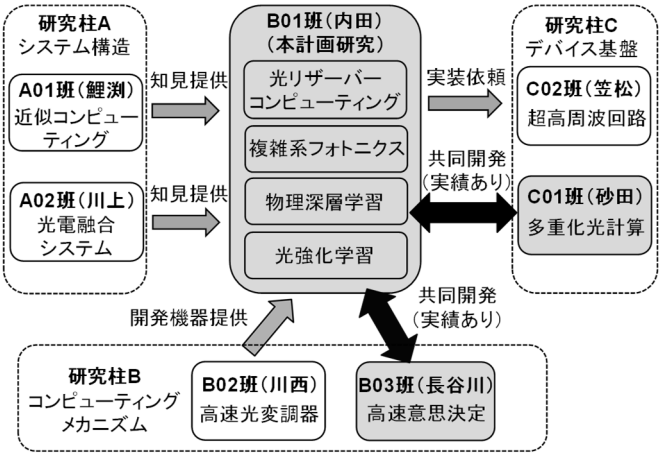


図 6-8　計画研究 B01 班と他班との連携。

B01 班が担当する3つの研究テーマは、以下の通りである。いずれのテーマも順調に進展している。

Ⅰ．光リザーバーコンピューティングのハードウェア実装と最適デバイス設計

戻り光を有する半導体レーザや電気光変調器を有する電気光遅延システムを用いて、**リザーバーコンピューティングを実験的に実装し、その最適化を行う**ことを目的とする。近似コンピューティングの概念を導入し、量子化ビット数や消費電力の観点から、リザーバーの最適化の設計指針について調査する。

Ⅱ．光強化学習と光意思決定の高機能化とハードウェア実装

多腕バンディット問題とは、未知の当たり確率を有する複数のスロットマシン（選択肢）を繰り返し選択することで報酬を最大化する問題であり、強化学習の重要な問題である。本研究では、マルチモード半導体レーザを用いて、**多腕バンディット問題における意思決定の光ハードウェア実装を行う**。さらに、空間光変調器と CMOS カメラを用いた電気-光フィードバックシステムのハードウェア実装を行い、空間並列処理による大規模意思決定システムの実現を目指す。

Ⅲ．最適制御理論に基づく物理深層学習

非線形システムの過渡応答時間波形を用いた新たな物理深層学習をハードウェア実装する。本手法は最適制御理論に基づき、**深層学習を物理デバイスで実現するという非常に画期的なアイディア**であり、フォトニックコンピューティングの高機能化を促進する上で極めて重要な技術である。電気光遅延システムを用いて物理深層学習のハードウェア実装を行い、時系列予測や音声認識等の大幅な高性能化を達成する。

（2）計画研究で得られた成果、計画研究間及び計画研究・公募研究間の共同研究で得られた成果

Ⅰ．光リザーバーコンピューティングのハードウェア実装と最適デバイス設計

（A）半導体レーザを用いたハードウェア実装と最適設計（担当：代表者　内田、分担者　菅野）

戻り光を有する半導体レーザを用いたリザーバーコンピューティングにおいて、出力信号の量子化を導入した場合の時系列予測タスクの性能評価を行った。さらに光システム全体の消費電力の低減を行った。その結果、リザーバーコンピューティングの性能を維持しながら、**従来法に比べて 91 %の消費電力の削減に成功**した（Ito et al., NOLTA 2024）。本成果に関して Student Paper Award を受賞した。本研究成果は、**計画研究 A02 班代表者川上らとの連携により得られた**。

また、従来のリザーバーコンピューティングは学習が容易であるという利点を有しているが、一方で深層学習の性能には及ばないという欠点があった。そこで、大規模言語モデルに搭載されている注意機構（Attention mechanism）を出力部に用いたリザーバーコンピューティングの提案と実証を行った。注意機構の導入により、リザーバーのノード状態に依存して重みが時間的に変化することが可能となり、**時系列予測において性能向上を達成**した（Köster et al., Phys. Rev. Appl. 2024）。本研究成果は、**国際共同連携及び公募研究 B04 班　大久保らとの連携により得られた**。

機械学習は事前の学習が重要であり、データの性質が変化すると再学習が必要となり、計算コストが増大する。そこで転移学習を用いることで、データの性質が変化した場合でもリザーバーコンピューティングが正常に動作することを示した（Uchida et al., ICAIIC 2024）。本成果により、リザーバーコンピューティングの適用範囲を大幅に拡大できることを示した。

Ⅱ. 光強化学習と光意思決定の高機能化とハードウェア実装

(A)マルチモード半導体レーザを用いた光強化学習と光意思決定（担当：代表者 内田）

戻り光を有するマルチモード半導体レーザを用いて、多腕バンディット問題における意思決定の実証実験を行った（図 6-9）。半導体レーザの縦モード間のカオス的モード競合を利用して、各モードをスロットマシンに割り当てて、自発的な意思決定を行う光ハードウェアの構築に成功した。特に**スロットマシンの台数（選択肢の数）が 100 台以上に増加した場合に、ソフトウェア方式よりも性能が向上**することを示した。本成果は国際論文誌 Science Advances 誌に掲載され、国内外から多くの反響を得ている（Iwami et al., Science Advances 2022; インパクトファクター（IF）13.7; 論文採択率 10.4 %）。さらに、国際会議 KJCCS 2024 での口頭発表において Best Student Paper Award を受賞し、また国内のレーザー学会学術講演会にて論文発表奨励賞を受賞した。加えてプレスリリースも行った。本研究成果は、**B03 班代表者 長谷川及び C01 班 代表者 砂田らとの連携により得られた。**

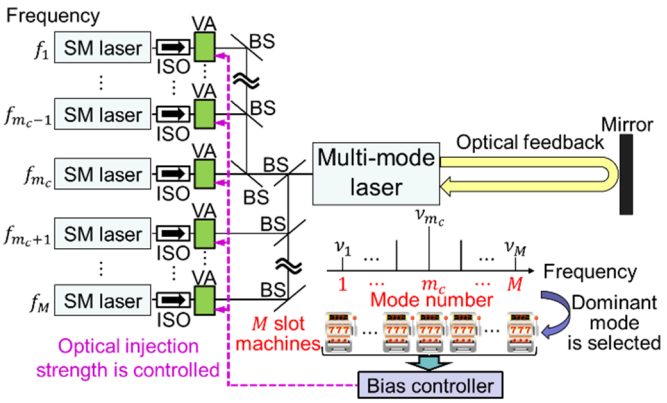


図 6-9 マルチモード半導体レーザを用いた意思決定の実験装置。

(B)空間光変調器の時空間ダイナミクスを用いた並列意思決定（担当：代表者 内田）

空間光変調器の非線形性を用いて電気-光フィードバックシステムを構築し、多腕バンディット問題における意思決定の光ハードウェア実装を行った（図 6-10）。空間並列化により、**最大で 512 台のスロットマシンに対する多腕バンディット問題を解くための実証実験に成功**した（Morijiri et al., Optica 2023; IF 10.4）。本成果は、**B03 班代表者 長谷川らとの連携により得られた。**

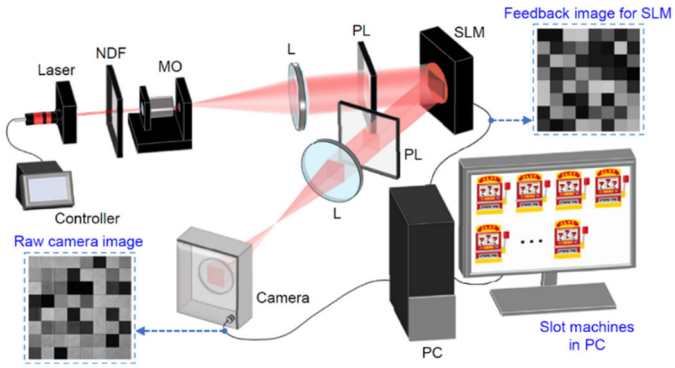


図 6-10 空間光変調器を用いた意思決定の実験装置。

(C)光周波数コムを用いた周波数多重化による並列意思決定（担当：代表者 内田）

光周波数マイクロコムを用いて周波数領域で並列化を行い、多腕バンディット問題における意思決定を実現した。異なる波長の時間波形をスロットマシンに割り当て、時間波形の大小により意思決定を行い、効率的な意思決定を達成した（Cuevas et al., APL Photonics 2024）。本成果は、**国際共同連携及び公募研究 B04 班代表者 久世らとの連携により得られた。**

Ⅲ. 最適制御理論に基づく物理深層学習

(A)物理深層学習のハードウェア実装（担当：代表者 内田、分担者 菅野）

最適制御理論に基づき、深層学習を物理デバイスで実現するための新たな学習方法を提案し、電気-光フィードバックシステムでの実証実験に成功した。一方で、初期状態に入力信号を加えることから、本手法は**任意の物理デバイスにおいて機械学習用ハードウェアを実現できるため、汎用性や波及効果が非常に高い**。本成果は国際論文誌 Physical Review Letters 誌に掲載され、Editors' Suggestions に選ばれた（Sunada et al., Phys. Rev. Lett. 2025; IF 8.1）。本成果は、**B03 班 A. Röhm 及び C01 班代表者 砂田らとの連携により得られた。**

最後に特筆すべきこととして、B01 班では、**光リザーバーコンピューティング技術を網羅した書籍を出版**した（菅野, 内田, "光リザーバーコンピューティング －原理と実装－", 共立出版 (2024)）。**新たな学問分野を創造するという本学術変革領域研究の研究目標に合致した大きな成果**であり、本分野の教科書として学術領域の発展に大きく貢献している。また、**12 件の招待講演**（国際学会 4 件、国内学会 8 件）を行った。さらに、**国際会議 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2024（IS-PALD 2024, 埼玉）を主催し、本研究分野の国際的認知度の向上**に尽力した。

図 6-11 出版した書籍。

計画研究 B02「極限光変調によるフォトニックコンピューティングの変革」川西 哲也（早稲田大学）

（1）研究の進展状況

計画研究 B02 班では、**光変調技術の極限的高精度化**と、それを基盤とした革新的なフォトニックコンピューティングシステムの構築を目指して研究を推進してきた。光の物理特性である**線形性、非線形性、加法性**を活かした高精度光波制御と、これに基づく**新たな演算・通信機能**の開発に注力している。これまでの主な進展は、高精度光変調の**広帯域特性評価**への適用と、それを基盤とした**能動的レーザ線幅制御技術の開発**、IQ 変調器を用いた**光アナログ乗算器**の実証、及び近似通信技術による光伝送スループット向上効果の検証である。具体的には、下記の3項目の課題を設定して研究を進めてきた。

Ⅰ．高精度変調技術の追求と計測用光源の開発

レーザ線幅制御に関する研究を実施した。高速信号伝送、光情報処理等において、線幅への要求性能を明らかにすることが費用対効果の高いシステム構築に不可欠であることから、この技術の社会的・学術的意義は極めて高い。

Ⅱ．光変調を用いた新機能の探索

入手性の高い IQ 変調器を用いた光アナログ乗算技術を新規提案し、電子回路では達成困難な超広帯域・リアルタイム演算の可能性を示した。大規模演算の高速化への大きな寄与が期待される。計画研究 A01 班と連携し、システム応用の検討を開始した。

Ⅲ．費用対効果を最大化するための近似通信技術の開発

複数の変調方式の最適な組み合わせを検討し、エネルギー効率とスループットの両立という大きな課題に対して、システム設計上の基盤となるデータを取得することができている。

中間評価実施までに総ての項目について順調に研究が進捗しており、一部では当初の期待を上回る成果を得ている。各項目の代表的な成果を以下に記載する。

（2）計画研究で得られた成果、計画研究間及び計画研究・公募研究間の共同研究で得られた成果

Ⅰ．高精度変調技術の追求と計測用光源の開発

高精度光変調を用いた**広帯域計測技術に関する研究を実施**した。狭帯域システムでは2次歪みと3次歪みは異なる周波数帯域に発生し、それぞれ別個に扱うことが可能であったのに対して、広帯域システムではこれらがオーバラップする。また、非線形性と周波数依存性の影響を同時に受けるため、これらを分離して取り扱うことが必要となる。非線形性発生のメカニズムについて幾つかのモデルを立て、これらに基づいたデータの処理を行うことで、**デバイス構造の推定を可能**とするスキームを提案した。これらの成果は、光の非線形性、広帯域性を活用したシステムの実用化に資するものである（Matsunaga, Orihara, and Kawanishi, IEICE ELEX 2025）。

高精度光変調の応用として、**位相変調を用いた能動的レーザ線幅制御の開発**を行った。線幅の狭いレーザと高精度光位相変調を組み合わせて、レーザ内部で起きるゆらぎを人為的に模擬するものである。変調精度の高さと、広帯域信号の発生が重要な要素となる。従来の線幅可変技術では、低周波から高周波までのゆらぎを含むランダムウォーク過程を位相変調で表現すると、その値が発散するという問題があった。これに対して、位相変調器への入力電圧振幅を一定の範囲内に収めるためのミラーメソッドが提案されている（Mochizuki et al., IEICE ELEX 2020; Zhou et al. IEICE ELEX 2023）。ランダムウォーク過程の平均値からのずれが一定値を超えると、それ以降の過程をその一定値を示す直線を軸に鏡像変換するというものである。このような変換を受けた過程もランダムウォーク過程のサンプルの一つであり、レーザのゆらぎを模擬しているとはいえるが、アンサンブル全体を見ると低周波成分が欠落するという課題があった。これに対して、図 6－12 に示すような構成で、**FPGA やアナログノイズ源を活用することで、低周波成分の補償を実現**した（Chen et al., CLEO-PR

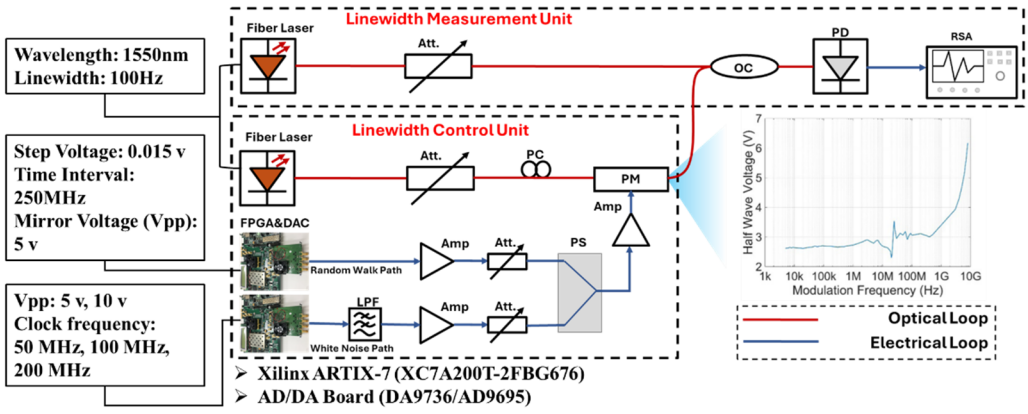


図 6-12 レーザ線幅制御の実験装置。

2024)。また、新たな位相ラッピング法を提案し、サンプリングレートが十分であれば不要な高周波帯域ノイズの発生を抑えつつ、低域の損失を補償できることを実証した。このように、**レーザのダイナミクスを非常に広い周波数帯域で模擬**するシステムの構築を継続中である。

Ⅱ．光変調を用いた新機能の探索

光変調器を用いたサブシステムによる**新機能の実現を目指して、光電気発振器の特性評価**を行った。光電気発振器は光変調器出力を光検出器で電気信号に変換し、その信号を光変調器の電気入力に帰還させることで発振状態を得るものである。光ファイバーの低損失性を生かして発振器の Q 値を高くすることが容易であることと、電気入力、光入力の両方があるため、各種の信号からクロック抽出ができる等の特徴がある。**変調器のバイアス条件、消光比（精度の高さ）等と発振条件の関係を解析**した。

次に、**偏波多重 IQ 変調器を用いた光アナログ乗算器の開発**により、二つの独立した**変調信号の積成分をリアルタイムに分離・抽出できるシステムを提案・実証**した（図 6-13 参照）。偏波多重 IQ 変調器は 4 つの光干渉計が集積され、複雑な構成ではあるが、光ファイバー通信システムで標準的に用いられているものであり、大量生産の結果、安価に入手できる。これを光演算に活用するという発想に基づくものである。最新の光変調器は 100GHz を超える帯域を有しており、超高速演算実現の可能性がある。演算精度確認のために、異なる周波数の正弦波同士の乗算結果を評価し、その結果がシミュレーションと良好に一致し、**5%以下の誤差で高精度に動作**することを確認した。現在、この成果を著名国際会議 OECC/PSC 2025 に投稿中である。また、この成果は大規模演算の高速化への適用が期待され、**A01 班と連携して具体的なシステム応用の検討を開始**した。

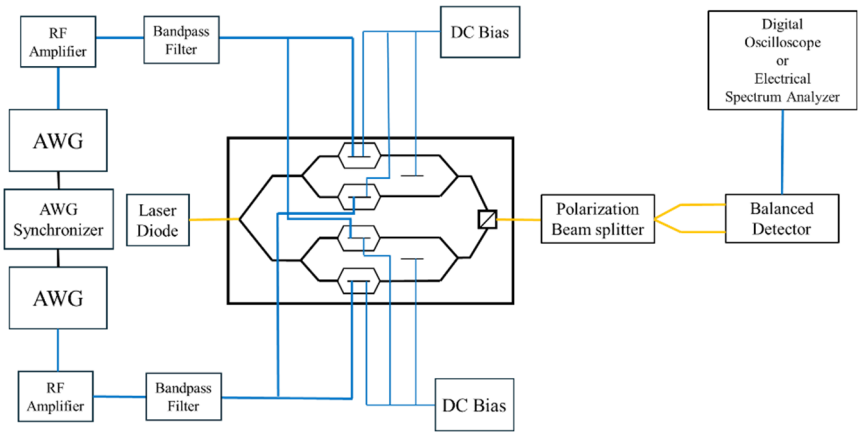


図 6-13 偏波多重 IQ 変調器を用いたリアルタイム乗算実験装置。

Ⅲ．費用対効果を最大化するための近似通信技術の開発

適度な浮動小数点演算精度を必要最小限のリソースで実現するための近似通信技術の開発を行った。図 6-14 にビットの振り分けのコンセプトを示した。指数部でのビット誤りは非常に大きな数値誤差につながるので、エラーフリーとする必要がある。他方、仮数部の下位ビットではある程度のエラーがあったとしても、機械学習等で必要となる統計的演算には大きな影響を及ぼさない。適切なエラーレートを設定することで、効率的な数値の伝送が可能となる。図示した例では**上位ビットと下位ビットの中間的な範囲にあるビットに対してある程度のエラーを許容**し、下位ビットでは送信しないという選択をしている。倍精度浮動小数点数に対する近似通信において、ビットごとの重要度に応じた変調方式の適用と廃棄ビットの導入によって、**単レーン伝送で最大 2.23 倍、並列伝送で最大 1.52 倍のスループット向上**効果を実証した（図 6-15 参照）。

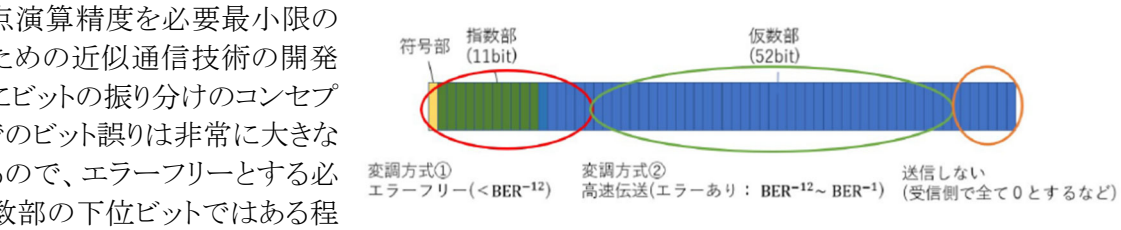


図 6-14 近似通信におけるビットの振り分け。

この技術は、単なる伝送容量の増大に留まらず、リソース効率の最適化、エネルギー消費の低減にも直結するものであり、フォトニックコンピューティングシステムの実現において極めて有用である。**B03 班と連携し、ファイバー無線システムへの近似通信を検討**し、その成果を原著論文としてまとめた（Ishimaru et al., IEEE Access 2023）。フォトニックコンピューティングにおける近似計算の本格導入の可能性を示すものである（詳細は B03 班の項目に記載）。

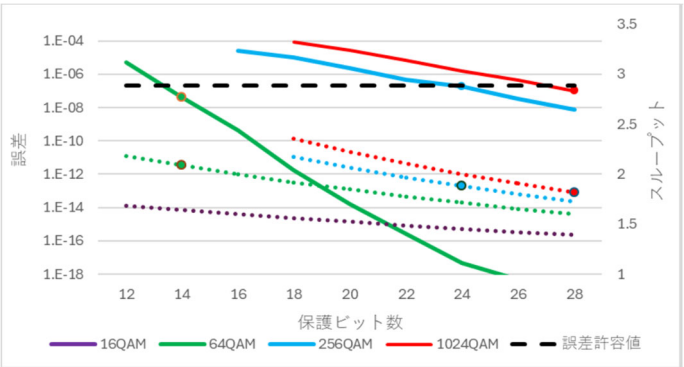


図 6-15 保護ビット数と誤差、スループットとの関係。

計画研究 B03「光の極限性能による強化学習の変革と応用開拓」交代前：成瀬 誠（東京大学）（～2023.9）
交替後：長谷川幹雄（東京理科大学）（2023.10～）

（1）研究の進展状況

計画研究 B03 班では、光の高速性や量子性を活用したフォトニックコンピューティングを確立するとともに、動的不確実環境が不可避な Beyond 5G 等への応用展開を具体的に実証することを目指す。この目標達成のため、下記の3項目の課題を設定して研究を進めてきた。

Ⅰ．光バンディット問題を超える高次機能化と基盤強化
Ⅱ．光強化学習に向けた光の量子性の活用
Ⅲ．応用展開

中間評価実施までに、項目Ⅰについては、レーザネットワークバンディットソルバの高次機能化、レーザカオスによる探索の有効性理論の確立、フォトクロミック結晶におけるナノ光経路のバンディット応用による基盤強化、項目Ⅱについては、競合バンディットへの光の量子性の活用、及び量子ウォークの応用、項目Ⅲについては、Beyond 5G を見据えた非直交多元接続（Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA）や Massive Multi Input Multi Output (MIMO)への応用に加え、新たな全光コンピューティング手法となる **Diffraction Casting** を提案し、当初の期待を上回る成果を得ている。

（2）計画研究で得られた成果、計画研究間及び計画研究・公募研究間の共同研究で得られた成果

Ⅰ．光バンディット問題を超える高次機能化と基盤強化

前 B03 班代表者 成瀬による先行研究（Naruse et al., Sci. Rep. 2017）により、レーザカオスがもつ負の自己相関が学習の加速に有効であることが数値実験で示されていたが、その理論は明確化されていなかった。そこで本計画研究では、当時大学院生であった岡田が、レーザカオス時系列をマルコフ連鎖で構成される相関ランダムウォークによりモデル化し、相関時系列により**意思決定が加速される仕組みを理論的に解明**した（Okada et al., Complexity 2022）。シミュレーションと理論解析の 2 つの結果は非常に高い一致を示し、理論的に負の自己相関が学習の加速に寄与していることを示した。

巳鼻らが考案したレーザネットワークの同期現象に基づくバンディットソルバ（Mihana et al., Opt. Exp. 2019）は、相互結合されたレーザの遅延カオス同期における、先行振動する自発的スイッチングを活用した手法である。この手法を高次機能化するため、当時学部生であった伊藤が主導した研究では、レーザネットワークにおいて生じるゼロ遅延同期を利用し、**複数ユーザの選択が競合することのない新たな高次機能化法を提案し、実験実証した**（Ito et al., Sci. Rep. 2024）。完全な同期を達成できなかったが、数%の競合発生に抑える（ランダムな場合には50%程度発生）ことに成功した。さらに、大学院生の神徳は、**ネットワーク理論とカオス理論を融合したレーザネットワークの設計手法を提案**した（Kotoku et al., Opt. Exp. 2024）。Balanced Coloring により、所望の同期を達成するネットワーク構成を提案し、条件付きリアプノフ指数を算出することで、実験実装可能なネットワークを提案した。

内山らは、フォトクロミック結晶に形成されるナノ光経路に基づいた光バンディットの基盤研究を進めた。ナノ光経路の入出力相関を順序行列に変換する手法を提案し、限られた情報から**高速に選択肢全体の順序構造を認識する物理計算を提案**した（Uchiyama et al., Sci. Rep. 2022; 特許取得）。他の擬似的相関を用いる場合と比較し、高い性能を持つことを示した。大学院生の堀江は、フォトクロミック結晶内のナノ光異性化が、ナノスケールの電子特性変化を伴うことを、走査型トンネル顕微鏡法により明らかにした（Horie et al., Sci. Rep. 2025）。これは、ナノ光計算で学習した結果を保存したまま、電子特性変調として電子系へ接続する技術であり、**光計算と電子計算を融合する応用展開の基礎**となる。さらに、複雑な光反応（光演算）の結果を光トラップ中のフォトクロミック微結晶の運動として捉える実験（Uchiyama et al., Appl. Phys. Lett. 2022）、表面弾性のナノスケールでの変化として捉える実験（Suzui et al., J. Appl. Phys. 2023）等、**ナノ光記憶に基づく計算に関する基盤技術を探索**している。

Ⅱ．光強化学習に向けた光の量子性の活用

大学院生の白鳥は、複数ユーザ間で初期報酬値が異なる場合において、意思決定を経たうえで**報酬の均一化を目指すシステムを考案**した（Shiratori et al., Sci. Rep. 2023）。先行研究のシステムに偏光ビームスプリッタを追加し、空間光変調器を調整することで競合回避が達成されることを示した。また、当時大学院生であった新川は、**プレーヤごとに選択肢の選好性をもたせたバンディットソルバを提案**した（Shinkawa et al., Complexity 2023）。この手法では、すべての選択肢の人気度が一定以下であれば、全員の選好性を満たし、かつ選択競合が発生しない選択が可能であることを数理的に示し、人気度が高い場合にはアルゴリズム的に解決可能であることを示した。さらに、5×5の盤面において2つの報酬マスがそれぞれ 50%の確率で報酬を生成し、ユーザ2人は総報酬最大化を目指すグリッドワールド問題に**強化学習の枠組みを加え応用**した（Shinkawa et al., Intelligent Computing 2023）。バンディット問題の基盤に Q-learning を追加することで、**複数ユーザが衝突することなく、特定**

の行動による報酬最大化を達成することができ、ランダム行動を行うよりも高報酬を達成できる原理を示した。

山上は、**量子ウォークによるバンディットソルバを新たに提案**した（Yamagami et al., Entropy 2023）。ランダムウォークの確率分布が正規分布になるのに対し、量子ウォークの確率分布はそれとは異なり、初期状態における局在化と分布の線形的拡がりを持つ。バンディット問題では、良いスロットマシンを探し出す探索と良いスロットマシンを選択し続ける活用が必要となる。そこで、量子ウォークにおける線形的拡がりを探索に、局在化を活用に結びつけることで効率を向上させたバンディットソルバを提案した。実験により、**ランダムウォークより高性能なソルバとなる**ことを示した。

大学院生の荒川は、フォトクロミック結晶におけるナノ光経路の量子的排他性を活用する競合バンディットソルバの研究を主導した。2つのナノ光経路を作製し、互いに排他的な入出力相関を有することを、2つの近接場プローブを試料表裏に有する独自計測システムにて実証した（Arakawa et al., Commun. Mater. 2024）。光の波長以下の領域に多数存在するナノ光経路の出力は量子的重ね合わせを成し、その経路間の反相関を、報酬と罰からなる**最適化問題の解決に応用することに成功**した。

Ⅲ. 応用展開

無線通信システムでは、動的不確実で瞬時の決定を要する無線資源割当て問題がしばしば生ずる。当時大学院生であった杉山は、Beyond 5G/6G で重要な要素技術となる NOMA を対象とし、**レーザカオスによるユーザペアリング手法を提案し、従来手法よりビット誤り率を減少できることを示した**（Sugiyama et al., Electronics 2022）。さらに、レーザカオスの並列化によって大規模な NOMA に適用可能な手法を提案した（Sugiyama et al., IEEE Access 2024）。Massive MIMO は、多数のアンテナを用いて指向性を絞り、受信電力を高めることで通信容量を拡大する技術であるが、最適なビーム制御を行うことが重要となる。大学院生の浅野は、レーザカオスを応用し、ユーザの移動に追従したビーム制御手法を提案した（Asano et al., NOLTA IEICE 2025）。また、新井は量子ウォークを利用したビーム選択手法を提案し、**他の意思決定アルゴリズムと比較して少ない探索で最適ビームを発見できる**ことを示した（Arai et al., IEEE Trans. Quantum Engineering 2025）。

さらに、大学院生益子が主導した研究による注目すべき成果は、図 6-16 に示す**新たな全光コンピューティング手法、Diffraction Casting の提案**である（Mashiko et al., Advanced Photonics 2024）。光の回折現象と DNN（Deep Neural Network）を組み合わせた全光型 SIMD（Single Instruction/Multiple Data）論理演算器であり、入力層を上層 4 層、下層 5 層の空間光変調器で挟み込む構成となっている。空間光変調器のパターンは変化させず、実行する論理演算ごとに照明パターンを切り替えることで、演算される。この構成により、**16 種の論理演算を 256 ビットの空間で実行できることを実証**した。**本研究は Advanced Photonics 誌（IF 20.6））に採択され、プレスリリースを行ったところ、多くの注目を集め、海外 13 の主要専門誌に掲載**された。

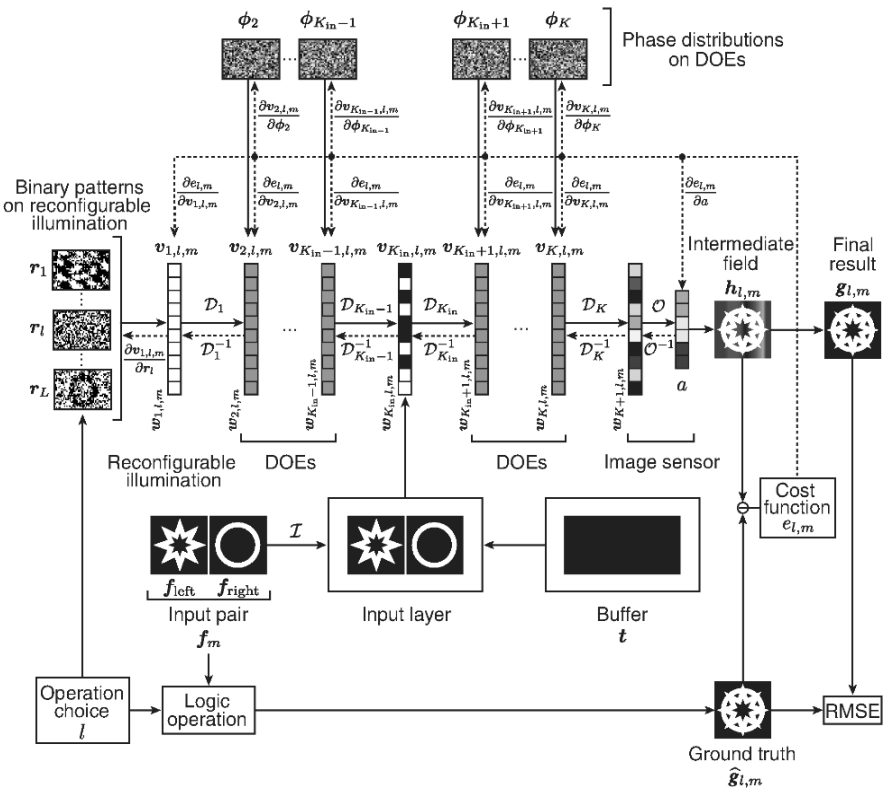


図 6-16　全光コンピューティング手法：Diffraction Casting。

Ⅳ. 計画研究 A01・B02・B03 間の共同研究で得られた成果

計画研究 A01 班及び B02 班との共同研究で、近似計算における倍精度浮動小数点数の、近似データとしての転送を実験的に行った（Ishimaru et al., IEEE Access 2023）。現在のデータ通信では、送信速度と誤り耐性の間にトレードオフが存在する。また、倍精度浮動小数点数では、上位ビットが指数部及び仮数部上位に対応しており、これらのビットに誤りが生じた場合、演算処理に重大な影響を与える可能性が高い。この課題に対し、倍精度浮動小数点数のビット列を上下に二分割し、上位ビットを低速かつ高信頼な四位相偏移変調で、下位ビットを 16 位相偏移変調で各々変調する方式を提案した。浮動小数点数のオーダに応じてビット位置を変えることにより、**任意の浮動小数点数に対して一定オーダの値変動に抑えながら高速なデータ転送を実現できることを実証**した。

計画研究 C01「光多重化によるフォトニックコンピューティングデバイスの変革」砂田　哲（金沢大学）

（1）研究の進展状況

計画研究 C01 班の主要な目的は、マイクロ・ナノフォトニクス技術による光制御と光多重化技術を組み合わせ、スケーラブルかつ並列分散的にニューラルネット型情報処理を実行する新奇光デバイスの開発とその応用分野の開拓である。この目的の下、下記の3項目の課題を設定して研究を進めてきた。

Ⅰ．光回路：光多重化による大規模リザーバー計算を可能にする光回路の作製と機能実証

リザーバー計算と呼ばれる新規のコンピューティング手法とその光ハードウェア化をアイディアの起点として、スケーラブルなニューラルネット型情報処理を実行する光デバイスを開発した。具体的には、C01 班の砂田と B01 班の内田が提案した、光ニューラルフィールドという無限の自由度を有する波動状態（Sunada and Uchida, Optica 2021）を計算資源とする光リザーバー計算回路を、シリコンフォトニクス光微小共振器を用いて実装し、高密度な光ニューロンの実装に基づく高次非線形演算が可能であることを示した。また、光波長多重化を用いた並列処理化も検討して、演算のさらなる大規模化の可能性を検討した。

Ⅱ．学習理論：光ハードウェアの高効率学習に向けた学習理論の構築とその実証

上述のリザーバー計算は、リザーバー層と呼ばれる複雑ネットワーク層を固定してリードアウト層のみ学習する計算パラダイムであるため、深層学習のような高度な処理には適用困難である。一方、パラメータ制御を可能とするような機構を光回路上に高密度に集積化することは、現代の光集積回路技術では困難である。これらの課題を克服するために、最適制御理論に基づく外部制御によりパラメータの学習を可能にする手法を開拓した。また、アナログ的な光ハードウェアではノイズ耐性が弱いという課題も、併せて克服する学習手法に発展させた。

Ⅲ．応用：光ニューラルネット回路に基づく超高速イメージ処理技術の開拓

光ニューラルネットの直接的な応用分野の一つは、膨大な視覚情報を取り扱うイメージ処理である。本研究では、視覚情報を光のまま圧縮的に時系列データに変換することで、小規模な光ニューラルネット（光リザーバー計算回路）でも超高速なイメージ処理（認識、検知、イメージ再構成）が実行可能となる技術を開発した。

以上述べたように、中間評価実施までに総ての項目について順調に研究が進捗しており、一部では当初の期待を上回る成果を得ている。

（2）計画研究で得られた成果、計画研究間及び計画研究・公募研究間の共同研究で得られた成果

Ⅰ．大規模リザーバー計算を可能にする光回路の作製と機能実証

課題 I における主要成果の一つは、C01 班分担者 原山らとともに**波動カオスや非エルミート光学効果を有する光微小共振器構造を明らかにし**（Matogawa et al., Appl. Phys. Lett. 2023; Mengyo et al., Entropy 2022）、**この光微小共振器構造に基づく光リザーバー計算回路を作製**したことである（図 6-17(a, b)）。この光微小共振器は、0.01 mm^2 の微小領域に高密度な光ニューロンの実装が可能であり、ある特定のランダム行列演算に特化するも、**22.3 TOPS/W のエネルギー効率と 6,750 TOPS/mm^2 の Computing Density に対応する演算が可能であり、電子型演算の限界を超え、既存の光ニューラルネットよりも優れた性能を有する**ことを明らかにした（図 6-17(c)）。さらに、本光リザーバー計算回路は、波長多重化を併用することができ、波長数に比例してエネルギー効率及び演算速度を向上させることができる。本成果は共同研究者の Y. Mengyo が IS-PALD 2024 で発表し、Best Student Paper Award を受賞した。また、本成果をまとめた論文は現在査読中である。

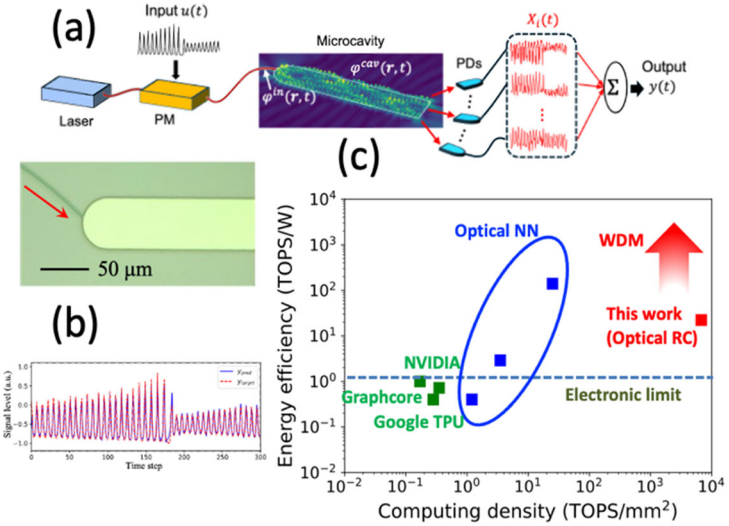


図 6-17 光微小共振器構造に基づく光リザーバー計算回路。(a)本研究の光リザーバー計算。(b)カオス波形の予測結果。(c)従来の光ニューラルネットとの比較見積もり。

さらに、リードアウト層も実装した光リザーバー計算回路も作製した。これにより、入力から演算結果の出力までを全て光で実行できる。本成果は 2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会で発表し、現在、論文執筆中である。また、**C02 班代表者 笠松及び同分担者 関根らと共同で、高速アナログ回路を用いた非線形リードアウト層を有する光電融合リザーバー計算回路を現在作製中であり、成果の一部を IEEE ICECS 2024 で発表**した（Ohtsuka et al., IEEE ICECS 2024）。

以上の成果をさらに発展させて、**スケーラブルかつ非線形な光ニューラルネットを実現するシステムをフランスの Femto-ST 研究所のグループと共同で開発**し、論文を投稿中である（Skalli et al., arXiv:2503.16943）。また、**ベルギーの Ghent Univ.グループと共同で、超次元ベクトル演算をベースとする低遅延光演算のフローサイトメトリーへの応用**を検討した結果を、CREO Europe 2025 に投稿中である。

Ⅱ．ハードウェアの高効率学習に向けた学習理論の構築とその実証

B01 班代表者 内田及び B03 班 A. Röhm らとともに、光を含む物理ニューラルネットを効率的に（デジタル演算の使用を最小限にして）学習させる手法を開拓した。本手法は、外部駆動制御とランダム行列に基づく Direct Feedback Alignment（DFA; 直接フィードバック）をベースとする学習手法であり、計算コストの大きい誤差逆伝播を用いることなく学習を可能とする。これにより、学習性能を維持したまま**学習コスト（時間）が 1/5 以下に抑えられる**ことを明らかにした。また、外部駆動によりノイズ耐性を格段に向上できることも示した。**本成果は、Physical Review Letters 誌に掲載され、Editors' Suggestions に選ばれた**（Sunada et al., Phys. Rev. Lett. 2025）。さらに、本成果は**新しい Energy-saving 学習方法として Physics Magazine 誌にて特集**された。また、本研究の最適制御に基づく学習手法は、世界中のニューロモルフィック研究者が集まって執筆したロードマップ論文でも紹介された（Finocchio et al., Nano Futures 2024）。

Ⅲ．光ニューラルネット回路に基づく超高速イメージ処理技術の開拓

シングルピクセルイメージング呼ばれる計算イメージング技術にヒントを得て、視覚的な空間情報を光のまま高速に時系列信号に変換するシステムを考案し（Hanawa et al., Opt. Express 2022）、そのシステムと再帰型の光ニューラルネット（光リザーバー計算）回路を組み合わせたイメージ処理系を構築した（図 6-18(a)）。本システムでは、**25 Gframes/sec という従来の 10,000 倍以上の高速レートで視覚情報を時系列信号に変換可能**であり、光リザーバー計算回路を用いることで、光のまま有効な特徴抽出が可能となる。実証実験として、簡単な 28×28 ピクセルの手描き文字が1%以下のデータ量まで圧縮され、**0.5 ns 程度の低遅延でイメージ認識できる**こと（図 6-18(b)）、さらに課題Ⅰで開発したリードアウト層も集積した光リザーバー計算回路を用いて、全光型でリアルタイム異常検知が可能であることを示した。また、本システムでは記録した時系列データから元のイメージの復元が可能であり（図 6-18 (c)）、波長多重化と併せて **1 ns の時間分解能を有する高速イメージングが可能**となることも示した。**本研究は、B01 班との共同研究成果**である（Yamaguchi et al., Commun. Phys. 2023）。本成果をプレスリリースを通じて公表したところ多くの反響があり、国内外から多くの講演の依頼及び企業からの問い合わせがあり、幾つかは**社会実装を想定した共同研究に発展**している。また、本成果に関連して**大学院生2名が電子情報通信学会 2023 年度学術奨励賞、OPJ/SPIE 2023 Student Award、IS-PALD 2024 Student Paper Award 等を受賞**した。さらに、本研究のアイディアの根幹である光情報の変換を一般化した、新たな光ドメイン変換のコンセプトを、光ニューロモルフィック研究のロードマップ論文にまとめ（Brunner et al., arXiv.2501.07917）、現在、査読中である。

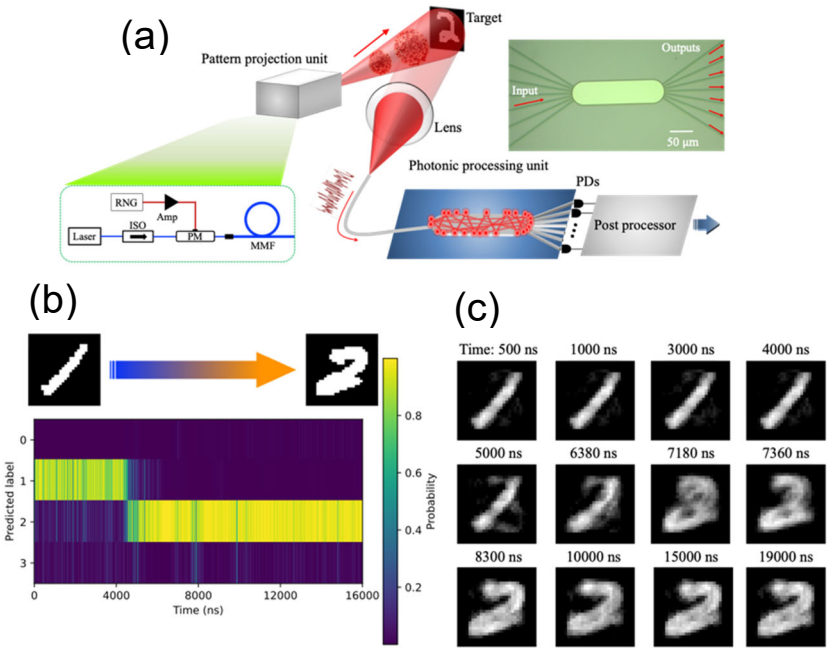


図 6-18 光ニューラルネット回路に基づく超高速イメージ処理システム。(a)システムの全体構成。(b)マイクロ秒現象のイメージ認識。(c)イメージ再構成結果の例。

計画研究 C02「超高速シリコンアナログ回路と超高速光回路の融合」笠松　章史（情報通信研究機構）

（1）研究の進展状況

フォトニックコンピューティングにおいて、全ての処理を光化することは困難である。制御回路や後処理回路はエレクトロニクスに依存しており、光と電気の融合は最重要課題の一つである。しかし、従来のデジタル回路やマイクロプロセッサのみをベースとした技術では、規模が非常に大きくなり、消費電力の増大や処理速度・効率の問題が顕在化する恐れがある。計画研究 C02 班では、高速アナログ信号処理及び超高周波通信のために開発してきた 300GHz 動作可能な超高速アナログ回路技術を応用展開するとともに、アナログ回路の不確定性、非線形性を積極活用して、上記問題の解決を目指す。具体的には、以下の3項目について研究開発を進めている。

Ⅰ．光カオスを用いた高速意思決定システムへの超高速電子回路の適用

光コンピューティングにおける代表的な複雑系として、光カオス信号を用いた高速意思決定システムを適用対象とする。半導体レーザから生成されるカオス信号を入力して多本腕バンディット問題を処理するこのシステムの信号処理系を、高速集積回路で実現し、レーザ系と融合することを目指している。本研究は、計画研究 B01 班及び B03 班の協力を得ながら実施している。現在までに、**各要素ブロックを集積回路で試作して性能測定を実施し、アナログ回路の不確定性や非線形性等の特性がシステム動作に与える影響を評価**した。系全体のアナログ的なロバスト性が確認される等の成果を得ている。

Ⅱ．光リザーバーと積和演算集積回路の融合

光コンピューティングにおける複雑系アーキテクチャの一つとして注目され、研究が進んでいる光リザーバーに関して、後処理にあたる積和演算をアナログ集積回路によって高速処理し、シリコンフォトニクスによって作製された光リザーバーチップと組み合わせて、全体でリアルタイム処理を実現することを目指している。本研究は、計画研究 C01 班との連携によって実施している。現在までに、**積和演算回路を集積回路で試作し、単体での演算特性を測定するとともに、その結果からシステム全体の動作予測を実施**した。さらに、光リザーバーチップとこの積和演算集積回路を接続して、リアルタイム処理の検証実験を開始している。

Ⅲ．光カオスを用いた高速乱数生成への集積回路の適用

光カオス信号を利用した乱数生成システムが、従来から精力的に研究されている。これまで、計算機や FPGA（Field Programmable Gate Array）等で処理されていたアナログ・デジタル変換や XOR 演算を、**アナログ特性を考慮して最適設計された集積回路を用いることで、性能を改善**することを目指して研究を進めている。本研究は、計画研究 B03 班との連携によって実施している。

以上述べたように、中間評価実施までに総ての項目について順調に研究が進捗している。

（2）計画研究で得られた成果、計画研究間及び計画研究・公募研究間の共同研究で得られた成果

Ⅰ．光カオスを用いた高速意思決定システムへの超高速電子回路の適用

図 6-19 に、2つのスロットマシンからの収益最大化を図る2本腕バンディット問題に対する意思決定システムのブロック図を示す。レーザカオス信号 V_{CS} としきい値電圧 V_{TH} の大小を比較する回路（CMP）と、過去の当たりはずれの結果を記憶する履歴積算回路は、これまでの研究において集積回路の設計と製作を行い、基本的な性能を検証してきた。本研究開発では、さらに、選択回路と短パルス発生回路を組み合わせた処理系全体を1つの集積回路とすることを目指している。まず、**システム全体をブレッドボード上で個別の電子回路によって組み上げ、電子回路全体の機能検証を実施し、アーキテクチャの妥当性を確認**した。その後、システム全体の集積回路設計を完了し、現在、試作を進めている。今後は、集積回路の試作が完了次第、性能等を検証する予定である。

これと並行して、個別の回路ブロックの詳細な機能評価や性能の検証を進めている。一例として、比較回路において、入力カオス信号がしきい値電圧とほぼ同じ値の付近の場合に出力が不定にな

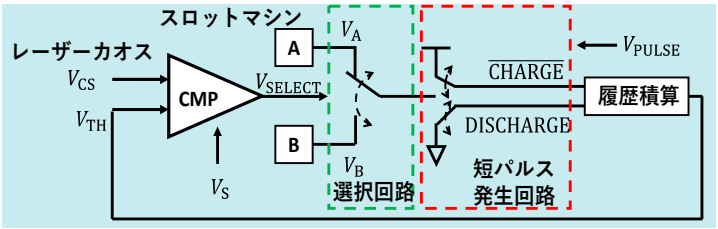


図 6-19　光カオスを用いた意思決定システムのブロック。

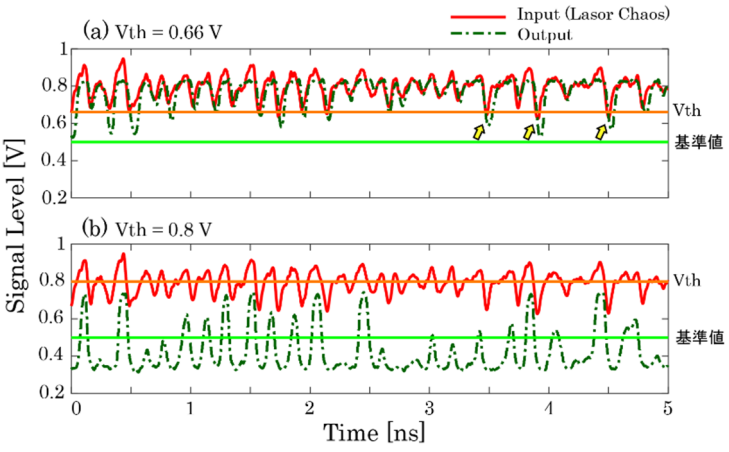


図 6-20　集積回路で作製した比較回路の測定結果例。

る現象や、実際の回路に寄生的なキャパシタやインダクタによって動作遅延の影響が生じることが分かっており、それらがシステム全体に及ぼす影響を検証した（Wada et al., AIP Advances 2022; Editor's Pick）。図 6-20 に示すように、しきい値付近で比較する場合や、遅延が生じた場合には、比較結果に誤りが生じることが示されている。しかし、**システム全体の動作性能を表す正答率（Correct Decision Ratio: CDR）には、これらの誤りや遅延が大きな影響を及ぼさない**ことが多いことが分かった。これは、**系全体のアナログ的なロバスト性による**ものであると考えられる。これらは、**B01 班及び B03 班との共同研究による成果であり、AIP Advances.誌に掲載され、Editor's Pick に選ばれた**。この他にも、**履歴回路に入力する短パルス波形の形状や、履歴回路の非線形性がシステムに与える影響等についても、回路シミュレータ（SPICE）とシステムシミュレータ（MATLAB）を組み合わせたシミュレーション環境を構築して検証し、いずれもアナログシステムのロバスト性が示されている**（Unno et al., AVIC 2022）。こちらは、**B03 班との共同研究による成果**である。

Ⅱ. 光リザーバーと積和演算集積回路の融合

現状の光リザーバーを用いた情報処理系では、図 6-21 の上段に示すように、光リザーバーチップからの出力を計算機に取り込んで積和演算をオフライン処理で実行しており、リアルタイムでの処理は実現できていない。それに対し、本研究では、同図下段に示すように、集積化した積和演算回路を光リザーバーチップと接続して、リアルタイム処理することを目指して研究を進めている。

最初の段階として、ギルバートセル型のアナログ積和演算回路を 65nm ルール集積回路で設計して、TSMC 社の集積回路製造技術で試作した。図 6-22 の上段に示すように、**光リザーバーチップからの出力を 40GHz でサンプリングして積和演算集積回路に入力し、波形再生実験を行った**。理想的なシステム動作との差異を検証した結果を、同図下段に示す（Ohtsuka et al., IEEE ICECS 2024）。理想的な動作や、計算機による処理の場合との差異は確認されたが、それらが画像認識等への応用においてどのような影響を及ぼすかを今後検証する予定である。

現在、図 6-21 の下段に示す、**光リザーバーチップの光出力を外付けの光検出器で電気信号に変換後、積和演算集積回路に直接入力する構成にて、最終目標であるリアルタイム処理の検証実験を開始**している。

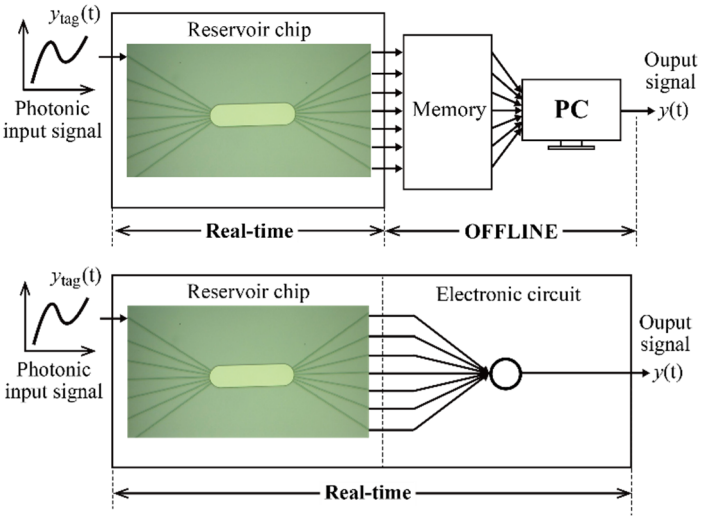
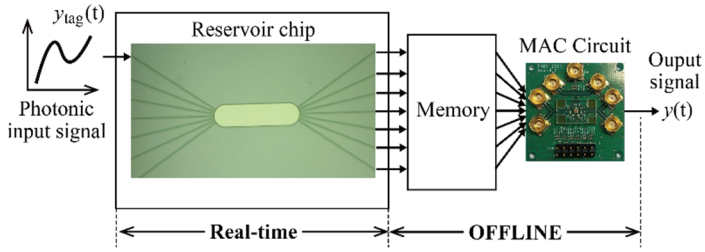


図 6-21 光リザーバー出力の積和演算処理。上段：従来の計算機によるオフライン処理、下段：目標の積和演算集積回路によるリアルタイム処理。



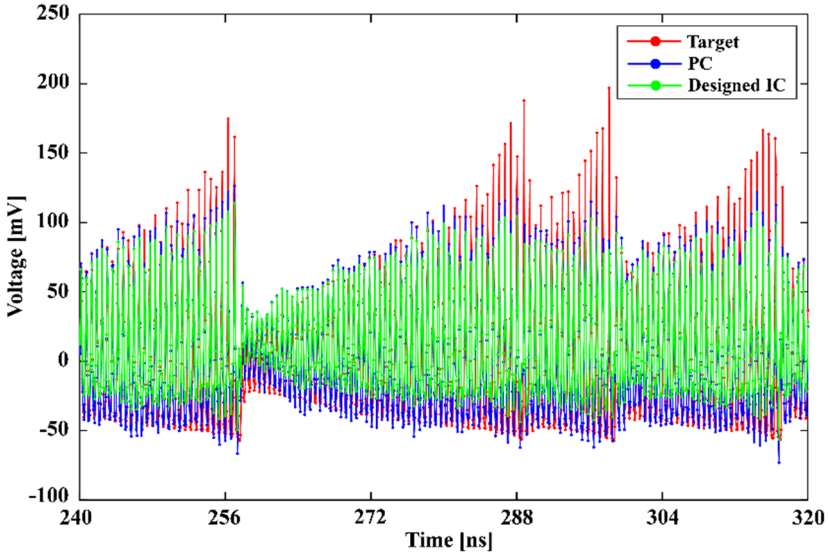


図 6-22 カオス波形予測実験結果。上段：実験装置の構成、下段：実験結果。

Ⅲ. 光カオスを用いた高速乱数生成への集積回路の適用

光コンピューティング研究の一つとして、光カオス信号を利用した乱数生成の研究が行われている。従来は、乱数生成のためのアナログ・デジタル変換や XOR 演算をプログラム可能な FPGA を用いて実行しており、ノイズや動作速度制限等の本質的な課題があった。本研究では、**XOR 回路やサンプリング回路を集積回路のアナログ特性を考慮して最適設計**することで、性能改善を図ることを目指している。現在までに、各回路を 65nm ルールで設計して TSMC 社で試作し、各機能ブロックの動作検証を行いつつ、性能確認を実施している。

7　研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和７年５月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、以下の留意点を踏まえ、具体的かつ簡潔に記述すること（５頁以内）。

・雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、計画研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、計画研究分担者には一重下線、公募研究代表者には波線、corresponding author には左に＊印を付すこと。

・領域設定期間より前の研究成果など、本研究に直接関連のない成果発表については、記入しないこと。

総括班

■企画委員会

【主催シンポジウム】**8 件**の公開（国内・国際）シンポジウムを主催、主要な 3 件を記載。いずれも 200 名を超える参加者を集め、大変盛況であった。国際シンポジウムでは本領域の国際的発信力と研究ネットワークの強化を狙いとして、著名な海外研究者 5 名を招聘するとともに、サイトビジット等個別議論の機会を設けた。

1. **第2回公開シンポジウム “Photonics for Computing & Computing for Photonics”**, 情報通信研究機構, 小金井, 日本, 2024/12/17, 参加者 125 名（オンサイト）／166 名（オンライン）.
2. **第1回国際シンポジウム “The First International Symposium on Photonic Computing”**, 東京大学 伊藤国際学術研究センター, 東京, 日本, 2024//3/11-12, 参加者 114 名（オンサイト）／153 名（オンライン）.
3. **第1回公開シンポジウム “光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成”** 東京大学 伊藤国際学術研究センター, 東京, 日本, 2023/3/27, 参加者 80 名（オンサイト）／150 名（オンライン）.

■広報委員会

【報道発表】**42 件**中、共同研究を中心とした主要な 8 件を記載

1. “AI のブラックボックス解決へ計算過程を可視化 九州大”, 日本経済新聞, 2025/1/3, **A02**.
2. “光の散乱現象で AI 演算、ほぼ電力ゼロで超高速処理”, 日経 XTECH, 2024/12/19, **B01/C01 共同研究**.
3. “全光コンピューティングの新手法、Diffraction Casting で大規模並列論理演算が可能に”, プレスリリース, 2024/10/3, **B03**.
4. “生成 AI 時代のデータ爆発、光が救う？ 消費電力抑える「光電融合」”, 朝日新聞デジタル, 2024/7/26, **領域代表者**.
5. “金沢大学など、光 AI で画像処理 サブナノ秒現象を認識”, 日経テックフォーサイト, 2023/10/4, **B01/C01 共同研究**.
6. “レーザーカオスで強化学習 多腕バンディット問題解く”, 日刊工業新聞, 2022/12/14, **B01/B03/C01 共同研究**.
7. “レーザ光のカオス的遍歴の自発性を用いた高効率な強化学習を実現 ～脳を模倣した意思決定できる AI ハードウェア～”, プレスリリース, 2022/12/8, **B01/B03/C01 共同研究**.
8. “東京理科大、AI強化学習で「流体混合」最適化 新手法開発”, 日刊工業新聞, 2022/9/9, **C01**.

研究柱 A. 光の極限性能を引き出すシステム構造

■計画研究 A01・A02

【査読論文】**17 件**中、主要な 5 件を記載

1. *K. Mizutani, Y. Urino, T. Shimizu, H. Yamaguchi, S. Nakamura, T. Usuki, K. Ishii, R. Matsumoto, T. Inoue, S. Namiki, and M. Koibuchi, “In-network stable radix sorter using many FPGAs with high-bandwidth photonics”, ***Journal of Optical Commun.*** **17**, A34–A45 (2025).
2. T. Inaba, T. Ono, K. Inoue, and *S. Kawakami, “Design and implementation of opto-electrical hybrid floating-point multipliers”, ***IEICE Transactions on Information and Systems*** **108-D**, 2–11 (2025).
3. H. Zhang and *D. V. Vargas, “Symmetrical SyncMap for imbalanced general chunking problems”, ***Physica D: Nonlinear Phenomena*** **456**, 133923 (2023).
4. *T. T. Nguyen, K. T. Pham, H. Yamaguchi, Y. Urino, and M. Koibuchi, “Effective switchless inter-FPGA memory networks”, ***Journal of Parallel and Distributed Computing*** **179**, 104713 (2023).
5. H. Zhang and D. V. Vargas, “A survey on reservoir computing and its interdisciplinary applications beyond traditional machine learning”, ***IEEE Access*** **11**, 81033–81070 (2023).

【学会発表】**59 件**（国際学会 29 件（招待講演 8 件）、国内学会 30 件（招待講演 12 件））中、主要 5 件を記載

1. S. Kawakami, “Towards Ultra-Efficient Photonic Computer System ~from a computer architecture perspective~”, AI and Optical Data Sciences VI, SPIE Photonics West 2025, San Francisco, California, USA, 2025/1/29, **招待講演**.

2. S. Kawakami, “Next-Generation Computer System Architecture with Emerging Devices: Challenges and Opportunities”, YONSEI CS BK21 Seminar, Yonsei University, Korea, 2023/12/12, **招待講演**.
3. M. Koibuchi, “Photonic Approximate Communication Highlighting Ultimate Nature of Light”, 11th International Workshop on Computer Systems and Architectures (CANDAR 2023), Matsue, Japan, 2023/12/1, **招待講演**.
4. M. Koibuchi, “Approximate Interconnection Networks for Parallel Processing”, 13th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2023), Tokyo, Japan, 2023/11/2, **招待講演.**
5. R. Yasudo, “Bandit-based Variable Fixing for Binary Optimization on GPU Parallel Computing”, 31st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP 2023), Naples, Italy, 2023/3/3.

【受賞】1 件（若手の受賞）

1. Y. Shikama, M. Koibuchi, and H. Amano, “Best Paper Award”, The 23rd International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT 2022), 2022/12/8.

■公募研究 A03

【査読論文】1 件

1. K. Chijiwa and *M. Takabayashi, "Deep learning-based design of additional patterns in self-referential holographic data storage," ***Optical Review*** **31**, 28–40 (2024).

【学会発表】15 件（国際学会 10 件（招待講演 2 件）、国内学会 5 件（招待講演 2 件））中、主要な 3 件を記載

1. 西田 孔太, 御堂 義博, 三浦 典之, 川上 哲志, 塩見 準, “光ニューラルネットワークに対する熱故障注入攻撃の実行時検知”, 第207回システムとLSIの設計技術（SLDM）研究発表会, 大分, 日本, 2024/11/14, **A02/A03 共同研究**.
2. 髙林 正典, “空間光変調に基づく深層ニューラルネットワークハードウェアの実装方法と応用”, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟, 日本, 2024/9/18, **招待講演**.
3. M. Takabayashi, “Self-referential holography meets AI technologies”, The 14th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF’24), Tucson, Arizona, USA, 2024/7/12, **招待講演**.

【受賞】1 件（若手の受賞）

1. 西田孔太, “第 207 回 SLDM 研究発表会セッション特別賞”, 情報処理学会, 2024/12/16.

研究柱 B. 光の極限性能に基づくコンピューティングメカニズム

■計画研究 B01・B02・B03

【査読論文】81 件中、主要な 9 件を記載

1. R. Mashiko, M. Naruse, and *R. Horisaki, “Diffraction casting”, ***Advanced Photonics*** **6**, 056005–1–14 (2024), **プレスリリース**.
2. F. Köster, K. Kanno, J. Ohkubo, and *A. Uchida, “Attention-enhanced reservoir computing”, ***Physical Review Applied*** **22**, 014039–1–12 (2024), **国際共著**, **B01/B04 共同研究**.
3. M. Sugiyama, T. Mihana, *A. Li, M. Naruse, and M. Hasegawa, “Ultrafast Resource Allocation by Parallel Bandit Architecture Using Chaotic Lasers for Downlink NOMA Systems”, ***IEEE Access*** **12**, 18073–18086 (2024).
4. *T. Ishimaru, T. Mihana, M. Koibuchi, T. Kawanishi, and M. Naruse, “Experimental Demonstration of Approximate Communication Based on Radio-Over-Fiber System”, ***IEEE Access*** **11**, 65590–65598 (2023), **A01/B02/B3 共同研究**.
5. K. Morijiri, K. Takehana, T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and *A. Uchida, “Parallel photonic accelerator for decision making using optical spatiotemporal chaos”, ***Optica*** **10**, 339–348 (2023), **B01/B03 共同研究**.
6. *N. Asuke, N. Chauvet, A. Röhm, K. Kanno, A. Uchida, T. Niiyama, S. Sunada, R. Horisaki, and M. Naruse, “Analysis of temporal structure of laser chaos by Allan variance”, ***Physical Review E*** **107**, 014211 (2023), **B01/B03/C01 共同研究**.
7. *R. Iwami, T. Mihana, K. Kanno, S. Sunada, M. Naruse, and *A. Uchida, “Controlling chaotic itinerancy in laser dynamics for reinforcement learning”, ***Science Advances*** **8**, eabn8325 (2022), **プレスリリース**, **B01/B03/C01 共同研究**.
8. *T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and *A. Uchida, “Photonic decision making for solving competitive multi-armed bandit problem using semiconductor laser networks”, ***Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*** **13**, 582–597 (2022), **B01/B03 共同研究**.

9. N. Okada, T. Yamagami, N. Chauvet, Y. Ito, M. Hasegawa, and M. Naruse, “Theory of Acceleration of Decision-Making by Correlated Time Sequences,” ***Complexity***, **2022**, 5205580 (2022).

【学会発表】321 件（国際学会 165 件（基調講演・招待講演 15 件）、国内学会 156 件（招待講演 26 件））中、主要な 7 件を記載

1. T. Ito, K. Kanno, S. Kawakami, and A. Uchida, “Evaluation of photonic approximate reservoir computing through quantization”, 2024 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2024), Ha long Bay, Vietnam, 2024/12/3, **A02/B01 共同研究**.
2. A. Röhm, F. Stelzer, S. Yanchuk, R. Vicente, I. Fischer, M. Naruse, T. Niiyama, and S. Sunada, “Folded-In-Time Deep Neural Networks: Multi-Delay Systems and Their Equivalence to Multi-Layer Perceptrons by Gradient Descent or Optimal Control”, 18th International Federation of Automatic Control Workshop on Time Delay Systems 2024, Udine, Italy, 2024.9.26, **国際共著**, **招待講演**, **B03/C01 共同研究**.
3. A. Uchida, “Photonic artificial intelligence: Reservoir computing and decision making based on complex photonics”, The 6th International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIC 2024), Osaka, Japan, 2024/2/19, **招待講演**.
4. Y. Yi, S. Duan, T. Umezawa, K. Akahane, and T. Kawanishi, “Avalanche UTC Photodetector Using InAlAs Collection Layer at High Frequency Range”, 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2023), San Jose, California, USA, 2023/5/7.
5. A. Uchida, “Artificial intelligence using complex photonics: Decision making and reservoir computing”, Optical Fiber Communication Conference 2023 (OFC 2023), San Diego, California, USA, 2023/3/6, **招待講演**.
6. M. Naruse, "Decision Making by Photonics: Toward Photonic Computing Highlighting Ultimate Nature of Light", 10th International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2022), Himeji, Japan, 2022/11/21, **基調講演**.
7. M. Naruse, A. Uchida, K. Uchiyama, and K. Akahane, “Photonic Approach to Reinforcement Learning”, 27th Opto-Electronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching and Computing 2022 (OECC/PSC 2022), Toyama, Japan, 2022/7/4, **招待講演**, **B01/B03 共同研究**.

【書籍】2 件

1. 成瀬 誠, “現代光コンピューティング入門”, コロナ社, 2024/5/7.
2. 菅野 円隆, 内田 淳史, “光リザーバーコンピューティング –原理と実装–”, 共立出版, 2024/2/29.

【産業財産権】2 件

1. 西村 涼, 内田 欣吾, “超撥水性表面構造体、および鋳型の製造方法”, 特許第 7595980 号, 2024/11/29.
2. 堀 裕和, 内山 和治, 成瀬 誠, “対象要素の順位付けシステム及び方法、プログラム”, 特許第 7573267 号, 2024/10/17.

【主催シンポジウム】4 件中、主要な 2 件を記載

1. A. Uchida (General Chair), “International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2024 (IS-PALD 2024)”, Omiya Sonic City, Saitama, Japan, 2024/11/5-7, 参加者 90 名.
2. 内田 淳史（世話人）, 砂田 哲（世話人）, “2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム「フォトニックコンピューティングと AI のクロスオーバー ～新潮流から応用まで～」”, 朱鷺メッセ他 2 会場, 新潟, 日本, 2024/9/18, 参加者 100 名.

【受賞】31 件（若手の受賞 26 件）中、主要な 8 件を記載

1. T. Ito, “Student Paper Award”, International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2024), NOLTA Society, IEICE, 2024/12/6, **A02/B01 共同研究**.
2. A. Haruto, “Best Student Paper Award, International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2024), NOLTA Society, IEICE, 2024/12/6.
3. 平 英駿, “第 56 回（2024 年春季）応用物理学会講演奨励賞”, 応用物理学会, 2024/5/23.
4. 益子 遼祐, “2023 年度 AI Optics 優秀発表賞”, 日本光学会 Al Optics 研究グループ, 2024/4/2.
5. R. Iwami, “Best Student Paper Award”, The 10th Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences (KJCCS2024), 2024/1/30
6. 益子 遼祐, “第 9 回 OPJ 優秀講演賞”, Optics & Photonics Japan 2023（日本光学会年次学術講演会）, 日本光学会, 2023/11/29.
7. M. Sugiyama, “Best Student Paper Award”, 2023 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2023), NOLTA Society, IEICE, 2023/9/30.

8. 岡 明澄, “若葉賞”, 日本液晶学会, 2023/9/13.

■公募研究 B04

【査読論文】5 件中、主要な 3 件を記載

1. Y. Tahara, K. Fukushi, S. Takahashi, K. Kinjo, and *J. Ohkubo, “Improvement of system identification of stochastic systems via Koopman generator and locally weighted expectation”, ***J. Phys. Soc. Jpn*****. 93**, 1–9 (2024).
2. J. Cuevas, R. Iwami, A. Uchida, K. Minoshima, and *N. Kuse, “Solving multi-armed bandit problems using a chaotic microresonator comb”, ***APL Photonics* 9**, 036112–1–10 (2024), **国際共著, B01/B04 共同研究**.
3. *T. Sakabe, S. Shimomura, Y. Ogura, K. Okubo, H. Yamashita, H. Suzuki, and J. Tanida, “Spatial-photonic Ising machine by space-division multiplexing with physically tunable coefficients of a multi-component model”, ***Optics Express* 31**, 44127–44138 (2023).

【学会発表】32 件（国際学会 15 件（招待講演 1 件）、国内学会 17 件（招待講演 4 件））中、主要な 3 件を記載

1. J. Cuevas, R. Iwami, A. Uchida, K. Minoshima, and N. Kuse, “Decision making using a chaotic microresonator frequency comb”, The 13th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS2024), 2024/4/25, Yokohama, Japan, **国際共著, B01/B04 共同研究**.
2. J. Ohkubo, K. Fukushi, Y. Tahara, and K. Kinjo, “Probabilistic interpretation for leader-laggard relationship in mutually coupled synchronized semiconductor lasers”, The First International Symposium on Photonic Computing, Ito International Research Center, Tokyo, Japan, 2024/3/11.
3. S. Shimomura, “Function enhancement of spatial photonic Ising machine using optical multiplexing”, The 13th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2023), Beppu, Japan, 2023/12/18, **招待講演**.

【受賞】1 件（若手の受賞）

1. J. Cuevas, “OSJ/Optica Student Award”, Optics & Photonics Japan 2024（日本光学会年次学術講演会）, 日本光学会 & Optica, 2024/12/1.

研究柱 C. 光の極限性能を引き出す新たなデバイス基盤

■計画研究 C01・C02

【査読論文】15 件中、主要な 6 件を記載

1. *S. Sunada, T. Niiyama, K. Kanno, R. Nogami, A. Röhm, T. Awano, and *A. Uchida, “Blending Optimal Control and Biologically Plausible Learning for Noise-Robust Physical Neural Networks”, ***Physical Review Letters* 134**, 017301 (2025), **Editors’ Suggestions, Featured in Physics Magazine, B01/B03/C01 共同研究**.
2. *G. Finocchio, S. Sunada, et al, “Roadmap for Unconventional Computing with Nanotechnology”, ***Nano Futures* 8**, 012001 (2024), **国際共著**.
3. T. Yamaguchi, K. Arai, T. Niiyama, A. Uchida, and *S. Sunada, “Time-domain photonic image processing based on speckle projection and reservoir computing”, ***Communications Physics* 6**, 250 (2023), **B01/C01 共同研究, プレスリリース**.
4. M. Matogawa, Y. Kuribayashi, Y. Suzuki, M. You, S. Shinohara, S. Sunada, and *T. Harayama, “Nonlinear laser dynamics of a non-orthogonal chiral pair,” ***Applied Physics Letters* 123**, 1104 (2023).
5. K. Wada, S. Hara, S. Tanoi, *A. Kasamatsu, Y. Otsuka, K. Sekine, A. Uchida, and *M. Naruse, “Ultrafast silicon threshold circuitry for chaotic laser time series”, ***AIP Advances* 12**, 125225 (2022), **Editor’s Pick, B01/B03/C02 共同研究**.
6. M. You, D. Sakakibara, K. Makino, Y. Morishita, K. Matsumura, Y. Kawashima, M. Yoshikawa, M. Tonosaki, K. Kanno, A. Uchida, S. Sunada, S. Shinohara, and *T. Harayama, “Universal Single-Mode Lasing in Fully Chaotic Billiard Lasers”, ***Entropy* 24**, 1648 (2022), **B01/C01 共同研究**.

【学会発表】128 件（国際学会 50 件（招待講演 9 件）、国内学会 78 件（招待講演 25 件））中、主要 6 件を記載

1. S. Sunada, T. Yamaguchi, A. Skalli, and D. Brunner, “Spatiotemporal image encoder for capturing sub-nanosecond dynamic events”, AI and Optical Data Sciences VI, SPIE Photonics West 2025, San Francisco, California, USA, 2025/1/29, **国際共著, 招待講演**.
2. Y. Ohtsuka, K. Sekine, K. Wada, S. Sunada, A. Kasamatsu, S. Hara, and S. Tanoi, “Output Estimation of Photonic Reservoir Systems Considering Characteristics of Analog MAC Circuits”, 2024 IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS), Nancy, France, 2024/11/18, **C01/C02 共同研究**.
3. S. Sunada, K. Kitagawa, and T. Yamaguchi, “Photonic neuro-inspired sensor processing”, International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2024 (IS-PALD 2024), Saitama, Japan, 2024/11/5,

招待講演.

4. S. Sunada, K. Kitagawa, and T. Niiyama, “Multimodal soft sensor processing based on optical hyper-dimensionality”, SPIE Optics & Photonics 2024, San Diego, California, USA, 2024/8/24, **招待講演**.
5. S. Sunada, **“**Neural delay differential equations and their physical implementations,” International Conference: Differential Equations for Data Science 2023, Online, 2023/2/22, **招待講演**.
6. H. Unno, K. Sekine, K. Wada, S. Hara, A. Kasamatsu, S. Tanoi, and M. Naruse, “Tolerance in Reinforcement Learning Systems for Analogue History Storage Circuits Implemented in 180nm CMOS Process”, 2022 International Conference on Analog VLSI Circuits (AVIC 2022), Hiroshima, Japan, 2022/11/1, **B03/C02 共同研究**.

【書籍】1 件

1. 砂田 哲, 他計 64 名, “次世代高速通信に対応する光回路実装、デバイスの開発”, 2022/11/30, 技術情報協会.

【産業財産権】2 件

1. 砂田 哲, 伊藤 結人, 浅井 哲也, 田中 剛平, 内田 淳史, ”広帯域信号測定器”, 特願 2025-30184, 2025/2/27.
2. 砂田 哲, 新山 友暁, 花輪 仁成, “分析方法、及び分析システム”, 特願 2022-163205, 2022/10/11.

【受賞】9 件（若手の受賞 7 件）中、主要な 3 件を記載

1. M. You, “Student Paper Award”, International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2024 (IS-PALD 2024), 2024/11/7.
2. 山口 智也, “電子情報通信学会 2023 年度学術奨励賞”, 2023 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 電子情報通信学会, 2024/3/5.
3. 砂田 哲, “北陸情報通信協議会会長賞”, 総務省北陸総合通信局, 2023/6/1.

■公募研究 C03

【査読論文】12 件中、主要な 4 件を記載

1. H. Sakaguchi, T. Honma, J. Zhang, S. Sumi, H. Awano, H. Nonaka, F. Z. Chafi, and *T. Ishibashi, “Thermomagnetic recording of highly Bi-substituted iron garnet film using scanning laser for spatial light modulation”, ***Jpn. J. Appl. Phys.*** **63**, 10SP02–1–6 (2024).
2. K. Sato, M. Okano, and *Y. Shoji, “Ultra-compact microring optical isolator using an aluminum-substituted cobalt ferrite thin film”, ***Optica*** **11**, 889–895 (2024).
3. Y. Takimoto and *K. Takiguchi, “Mode group division multiplexing communication with the use of graded-index plastic optical fiber”, ***Electronics Express*** **21**, 20230472 (2024).
4. Y. Takamatsu, C. Yamato, M. Kuwahara, Y. Saito, and *T. Saiki, “All-Optical Rapid Formation, Transport, and Sustenance of a Sessile Droplet in a Two-Dimensional Slit with Few-Micrometer Separation”, ***Micromachines*** **14**, 1460 (2023).

【学会発表】88 件（国際学会 28 件（招待講演 9 件）、国内学会 60 件（招待講演 16 件））中、主要 4 件を記載

1. T. Saiki, “Colloidal robotics using phase-change memory in individuals and the environment”, The 7th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems, Seoul, Korea, 2024/11/12, **招待講演**.
2. K. Takiguch, “Recent advances in integrated-optic signal processing devices based on optical Fourier transform”, International Conference on Electronics, Communications and Networks (CECNet2024), Matsue, Japan, 2024/11/7, **招待講演**.
3. T. Ishibashi, H. Sakaguchi, T. Honma, R. Akagawa, J. Ikeda, J. Zhang, F. Z. Chafi, S. Sumi, H. Awano, and H. Nonaka, “Development of Magneto-optical Deep Neural Network Device”, International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2024 (ISOM 2024), Himeji, Japan, 2024/10/23, **招待講演**.
4. Y. Shoji, “Magneto-optical devices for photonic computing”, SPIE. Photonics West 2024, San Francisco, California, USA, 2024/1/29, **招待講演**.

【産業財産権】2 件

1. 瀧口 浩一, “光演算装置”, 特願 2024-139964, 出願日 2024/8/21.
2. 瀧口 浩一, “光演算装置”, 特願 2023-202977, 出願日 2023/11/30.

【受賞】6 件（若手の受賞 5 件）中、主要な 2 件を記載

1. 下津 裕生, “電子情報通信学会 2023 年度学術奨励賞”, 2023 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 電子情報通信学会, 2024/3/4.
2. 中山 牧水, “第 54 回（2023 年春季）応用物理学会講演奨励賞”, 応用物理学会, 2023/5/15.

8　審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に記述すること（2頁以内）。

■審査結果の所見において指摘を受けた事項

領域全体が目指す「極限性能を生かすコンピューティング」についての学理と、デバイス化の方策については、目標設定をさらに明確にすることが望まれる。研究の実施にあたっては、領域代表者の強力な研究マネジメントが必要であり、計画研究の有機的な結合、光に関わる基礎的な学理を含めた公募研究の適切な設定等、革新的かつ達成可能な学術的な問いと目標の設定をより明確にして領域を推進していただきたい。

【対応状況】

計画研究間の有機的な結合、学術的な問いと目標の設定のために、計5回の**領域会議**（2022 年 8 月、2023 年 3 月、2023 年 8 月、2024 年 8 月、2024 年 12 月）を開催し、領域内の相互理解・相互連携・具体的協働の促進を目指すとともに、各計画研究の目標を再確認した。また、**「ARC×光」研究会**を計 23 回（原則毎月末）実施し、分野横断的な議論を活発に行い、異分野間のより深い相互理解と新たな課題設定を目指した。これらにより、光の極限性能を活用するコンピューティングに関する理解が領域全体で深まり、また多角的な視点から新たな発想や研究の方向性を見出すことができ、異なる計画研究間の有機的な連携と多くの共同研究の創成に繋がった。

公募研究に関しては、基礎的な学理を含めた課題設定を目指して、第1期及び第2期共に「光の極限性能を引き出すシステム構造」、「光の極限性能に基づくコンピューティングメカニズム」、「光の極限性能を引き出す新たなデバイス基盤」の3項目について公募を行った。その結果、第1期では「Koopman 作用素を用いたレーザダイナミクスの確率的挙動のモデル化」「光磁気変換を利用した導波路型スパイキング光ニューロン」等、第2期では「設計可能な相互作用媒質を有する空間光変調型ニューラルネットワーク」「超低損失光導波路による時間次元光極限学習機械の高度化」等、といった挑戦的な課題や光科学に基づく課題に関する研究テーマを、各期共に9件立ち上げることができた。また、上記領域会議や「ARC×光」研究会では、計画研究・公募研究間においても活発な議論や意見交換が行われ、計画研究・公募研究間の様々な共同研究の創生に繋がっている。詳細は**「5 研究組織の連携体制」**に記載されている。

本領域では、上記の領域会議や「ARC×光」研究会に加えて、アウトリーチ活動として、**「光×コンピューティング」オープンセミナー**（原則毎月末、計 16 回開催）、**「光と情報」サマースクール**（毎年夏2日間、計2回開催）、**第1回公開シンポジウム**（2023 年 3 月 27 日）、**第1回国際シンポジウム**（2024 年 3 月 11–12 日）、**第2回公開シンポジウム**（2024 年 12 月 17 日）を開催し、さらに 2022 年及び 2024 年の Optics & Photonics Japan（日本光学会年次学術講演会）にて領域シンポジウムを、2023 年の電子情報通信学会総合大会にて企画セッションを開催し、「フォトニックコンピューティング」研究の最新成果をアピールするとともに、多様な分野の研究者と熱心な意見交換を行った。詳細は、**「7 研究発表の状況」**及び**「11 アウトリーチ活動に係る取組状況」**に記載の通りである。

以上述べた様々な活動は、前領域代表者の故成瀬はもちろんのこと、その後を引き継いだ現領域代表者 川西の強力なリーダーシップの下、総括班運営委員会及び企画委員会が中心となって運営・企画してきたものである。このように、現領域代表者の研究マネジメント能力には疑いの余地がなく、余人をもって代えがたい。

■留意事項

計画研究 B01、B02、C02 班の研究代表者のエフォート率に関する懸念と、計画研究 C02 班と領域全体との親和性について、また計画研究 A02 班の研究体制についての懸念をご指摘頂いた。

【対応状況】

計画研究 B01、B02、C02 班の研究代表者のエフォート率の上方修正（5%→15%、5%→7%、3%→15%）、計画研究 C02 班の研究計画の見直し、及び計画研究 A02 班の研究体制の再検討を行った。

計画研究 C02 班の課題設定について議論を深め、計画研究間の連携を強化した。具体的には、光リザーバーの信号処理効率を向上させる信号処理電子回路の研究（C01 班と連携）、光カオスからのランダム信号生成における信号処理系の研究（B01、B03 班と連携）を実施している。その成果として、C02 班において、B01、B03 班と共著の原著論文が AIP Advances 誌に Editor's Pick として採択された（Wada et al., AIP Advances 2022）。

計画研究 A02 班に関しては、ソフトウェア基盤部分の体制を強化するためにメンバーを追加した。また、B01 及び B02 班との連携を具体化し、光物理リザーバーを活用したロバストで効率的な機械学習アルゴリズムの開発を実施し（Ito et al., NOLTA 2024）、さらに公募研究 A03 班とセキュリティ関連（熱故障注入攻撃検知）で優れた成果をあげている（西田他, 第 207 回システムと LSI の設計技術（SLDM）研究発表会 2024）。

以上の詳細は、**「5 研究組織の連携体制」**に記載されている。

９　今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に記述すること（２頁以内）。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

本研究領域では、これまでの研究活動を通じて、光の極限性能を活用したフォトニックコンピューティングに関する多くの学術的かつ応用的成果を挙げてきた。今後は、これらの成果を基盤として、研究柱 A（システム構造）、研究柱 B（コンピューティングメカニズム）、研究柱 C（デバイス基盤）の各研究をさらに深化させるとともに、それらを有機的に統合・連携させることで、より実用的かつ高機能な次世代の情報処理基盤の確立を目指す。

まず重要なのは、研究柱間の連携のさらなる強化である。各研究柱の知見や技術は相補的であり、各々が独立して進むだけでなく、全体としての整合性と統一感が研究成果の最大化に不可欠である。例えば、研究柱Ｃで開発された新奇デバイスを研究柱 A のアーキテクチャに実装し、研究柱 B で得られた光の特性を生かした新しい計算モデルを統合することで、より現実的かつ革新的なフォトニックコンピューティングシステムの設計が可能となる。今後は、研究柱横断的な議論を促進する仕組みをさらに強化し、統合的な研究推進体制を構築していく。

なお、本領域の中で、計画研究はこれまで同様、領域の核となる基礎的研究を推進し、光と情報を統合する新たな学術の創成を目指す。一方、公募研究は幅広い視点から新たな研究課題を取り入れ、計画研究との連携により研究の多様性と拡張性を確保する。この観点で第2期の公募を行い、挑戦的な課題や光科学に基づく課題に関する研究テーマを9件立ち上げることができた。

統合的な研究推進体制構築のために、これまでの定期的な領域会議や公開シンポジウムに加え、テーマ別の研究会や集中討論の開催を検討する。特に、領域内で継続的に開催してきた「ARC×光」研究会は、これまでに 23 回の実施実績があり、領域内外の研究者との意見交換とともに分野横断的な連携のきっかけを生み出してきた。今後もこのような枠組みを活用し、領域内の融合だけでなく、他の学術変革領域研究とのコラボレーションを積極的に推進する。実際に、2024 年 12 月に開催した第2回公開シンポジウムでは、「散乱・揺らぎ場の包括的理解と透視の科学」から4名の研究者にご参加頂き、招待講演やパネルディスカッション等異なる領域間の学術的接点を探る場を提供し、具体的な共同研究構想へと発展している。

国際的な研究展開も本領域の重要な柱である。これまでに、海外の研究機関との共同研究や研究者の相互派遣を進め、国際シンポジウムの開催や著名な海外研究者の招聘も実施してきた。今後は、これらの取り組みをさらに発展させ、国際的な研究ネットワークの構築とグローバルな研究プレゼンスの強化を図る。特に、若手研究者の国際展開支援に重点を置き、短期～中長期の海外渡航支援プログラムの拡充や、国際会議での発表支援、海外研究機関とのジョイントプロジェクトの立ち上げ等を通じて、次世代のグローバル研究人材の育成と活躍の場の提供を積極的に行う。

若手研究者の育成は、本領域において今後も中核的な戦略と位置づける。これまでも、海外渡航支援プログラムや若手主体のポスターセッション開催等、若手研究者が主体的に研究に参加・リードできる環境を整備し、一定の成果を挙げてきた。今後は、これらの施策に加え、若手自身が研究テーマの立案・運営に関与できるような仕組みを創出し、自律的な研究推進力とネットワーク形成能力の涵養を図る。さらに、領域活動において若手が中心となって運営する企画セッションやパネルディスカッション等の機会を積極的に設けることで、研究者としての成長機会と責任感を育む。

産業界との連携の強化も今後の重点課題の一つである。フォトニックコンピューティングの応用可能性は、AI、センシング、通信、医療、ロボティクス等多岐にわたる。これまでも、産業界に積極的に情報発信し、企業の研究者に招待講演を依頼したり、ワークショップを開催したりして、緩やかなコミュニティを形成してきた。今後は、これらの取り組みを拡大し、企業との定期的な意見交換会や産学連携セミナーを開催し、研究成果の社会実装に向けた技術シーズの提供とフィードバックの受け入れを両輪とした協力体制を築く。加えて、プロトタイプ開発や実証実験のフェーズにおいて企業と連携することにより、研究成果の実用性と社会的意義を高めていく。

さらに、総括班広報委員会を中心にアウトリーチ活動の強化にも取り組む。フォトニックコンピューティングの持つ革新性や社会的価値を、一般市民、政策立案者、産業界に広く伝えるため、一般公開イベントや広報記事、教育コンテンツの制作・発信を進める。科学技術に対する社会的理解と支持を得ることは、研究の継続性と発展性を保証するうえでも極めて重要である。なお、アウトリーチ活動に関しては、研究者の労力が過剰となって本来の研究の進捗を妨げてはならない。広報委員会は研究者にかかるオーバーヘッドを最小としつつ、効果的な活動の推進を心がける。

今後も、本研究領域が目指す「光の極限性能を生かすコンピューティング」の学術的・社会的価値を最大化するため、柔軟かつ戦略的な研究推進方策を講じ、学術的革新と社会実装の両輪を目指す持続的な発展を実現していく。

10　若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に記述すること（１頁以内）。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を冒頭に示すこと。

本領域では、取り組むべき重要課題の一つとして、若手研究者の育成に注力してきた。ここで若手研究者とは、40 歳以下の計画研究及び公募研究に従事する者であり、その中心は大学院生及び博士研究員である。以下に、これまでの取り組み状況とその成果の一部を記載する。

■取り組み状況

「フォトニックコンピューティングの創成」は、今後の情報社会に大きなインパクトを与え、かつ世界中の研究者を相手にしのぎを削る魅力あふれる研究テーマである。本領域では、対面にてその意義や魅力を若手研究者に伝え、理解してもらうとともに、主体的に研究をリードできる環境を構築してきた。また、学会発表や論文投稿を積極的に勧め、さらに、領域主催のシンポジウムや領域会議ではポスターセッションを設け、大学院生及び博士研究員を中心とした多くの若手研究者に研究成果の発表の機会を提供してきた。海外の国際会議にも積極的に参加させ、英語での発表やこの分野の著名な研究者との議論を通して、研究分野における自身の立ち位置を再認識させることにも注力してきた。また、若手研究者の研究能力の養成及び国際研究協力の促進を目的に、総括班国際活動支援委員会を中心に、若手研究者の海外研究機関への派遣支援も行ってきた。

■成果

上記の取り組みの結果、多くの若手研究者が存分にその実力を発揮し、多くの成果が生まれた。

【論文投稿・学会発表】

「7 研究発表の状況」に記載した査読論文と学会発表の筆頭著者の 9 割以上が、大学院生及び博士研究員を中心とした多くの若手研究者であった。文字通り、若手研究者が各計画研究及び公募研究をリードしてきたと言っても過言ではない。さらに、特筆すべきなのは、計画研究 B01、B03 及び C01 班の共同研究「レーザカオスによる高効率な強化学習」において主導的立場にあった B01 班の博士課程大学院生 岩見がまとめた論文、及び B03 班の修士課程大学院生 益子が主筆の Diffraction Casting に関する論文が、各々ハイインパクトジャーナル（Iwami et al., Science Advances 2022, IF 13.7; Mashiko et al., Advanced Photonics 2024, IF 20.6）に掲載され、プレスリリースを行ったことである。この結果、業界から高い評価を得て、新聞報道を始めとして多くのメディアに取り上げられた。このように、積極的な論文投稿や学会発表を通して研鑽を積むプロセスが確立できている。

【受賞】

本領域の研究成果に対して、計 49 件の受賞があった。これらのうち、第 54 回及び第 56 回応用物理学会講演奨励賞、電子情報通信学会 2023 年度学術奨励賞2件、第 9 回 OPJ 優秀講演賞（日本光学会）を始め、実に 41 件が若手研究者の受賞であった。さらに、そのうちの 18 件は Best Student Paper Award (NOLTA Society, IEICE)を始めとする国際会議での受賞であった。本領域の若手研究者が主要学会及び海外において高い評価を得ている証左である。また、計画研究 B03 班の新川（2023 年 3 月修士課程修了）、同山上（2024 年 3 月博士課程修了）、及び同神徳（2025 年 3 月修士課程修了）が、各々東京大学情報理工学系研究科研究科長賞を、C01 班の山口（2024 年 3 月修士課程修了）と同高林（2025 年 3 月修士課程修了）が、各々金沢大学自然科学研究科長賞を受賞した。このように、本領域の若手研究者は、学会だけでなく、所属機関・組織においても存分に活躍し、高い評価を得ている。

【海外渡航】

国際活動支援委員会の海外渡航支援プログラムにより、若手研究者3名が海外研究機関で共同研究を実施した。計画研究 B03 班の修士課程大学院生 土山は、2023 年 10 月上旬から約2か月間、ソルボンヌ大学にて B01 班及び B03 班が関わる「光リザーバーコンピューティング」の研究を行った。公募研究 A03 班の修士課程大学院生 西田は、2025 年 1 月末から約1か月間、カリフォルニア大学サンディエゴ校にて「光ニューラルネットワークに対する熱故障注入攻撃の検知」に関する研究を行った。C01 班の博士課程大学院生 的川は、2025 年 2 月から韓国基礎科学研究院に滞在中である。光リザーバー計算に応用可能な「非対称リマソン型微小共振器」の研究を行い、韓国物理学会で成果発表の予定である。3名とも初の海外派遣であったものの、先方との事前の議論や準備を充実させた結果、短期集中型の大変有意義な研究活動が遂行できた。

■今後

以上述べたように、学術変革領域研究という貴重な研究環境と機会の下、多くの優秀でかつ国際的な若手研究者を育成できている。また、研究者として早い段階から受賞等の成功体験を積むことは、その後の成長に大きな影響を与え、非常に重要である。今後もこの取り組みを継続していきたい。

11　アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に記述すること（1頁以内）。

本領域の研究成果を広く周知し、社会に還元するために、広報委員会を中心に、領域ウェブサイトでの情報発信やオープンセミナー、サマースクール、公開シンポジウムの開催、報道発表、若い世代への情報発信、産業界とのコミュニティ形成、書籍発刊等、幅広く積極的にアウトリーチ活動を行っている。以下に、その一部を記載する。

■領域ウェブサイトでの情報発信

領域代表者の挨拶、領域の概要、領域の活動、研究成果（論文、発表、受賞等）、公募情報、及びメンバー紹介等、領域の総てを網羅する内容を、和文・英文両方で国内外に向けて発信している。特に、トップページでは、オープンセミナーやサマースクール、シンポジウム等の開催案内を始めとして、最新の情報を常時公開している。

https://www.photoniccomputing.jp/

■オープンセミナー及びサマースクールの開催

フォトニックコンピューティングの概念を広く周知するとともに研究者の裾野拡大を図ることを目的として、2023年 4 月より毎月末の木曜日に 70 分間の**「光×コンピューティング」オープンセミナー**をオンライン開催している。講師は領域内だけでなく、領域外の第一線で活躍される研究者に依頼し、「光リザーバーコンピューティングと光意思決定」や「フォトニック近似コンピューティング」といった領域研究テーマを始め、「光電融合技術の最新動向」「光回折型ニューラルネットワークデバイス」といったこの分野の最新のトピックを紹介している。2025 年 5 月末時点で計 18 回を数える。毎回 60 名を超える多くの参加者を集め、活発な議論が交わされている。

https://www.photoniccomputing.jp/activities/2023_0421_0526_seminar.php

2023 年夏より年一回、2日間にわたる**「光と情報」サマースクール**を開催し、「光ニューラルネットワークの基礎」といった入門的内容と、「光の量子性と意思決定」等の先端的研究のオンラインレクチャーを実施している。これだけ体系的に「光と情報」を学べる集中ゼミは他に類を見ない。毎回 60 名を超える参加者を集め、盛況である。

https://www.photoniccomputing.jp/activities/2023_light_and_information_school.php?actList=2024

■公開（国内・国際）シンポジウムの開催

「7　研究発表の状況」に記載の通り、8件の国内・国際シンポジウムを主催した。第1回及び第2回公開シンポジウム、並びに第1回国際シンポジウムは、いずれも国内外から 200 名を超える参加者を集め、非常に活発な議論が行われ、盛況であった。2022 年及び 2024 年の Optics & Photonics Japan（日本光学会年次学術講演会）にて領域シンポジウムを、2023 年の電子情報通信学会総合大会にて企画セッションを開催し、「フォトニックコンピューティング」研究の最新成果をアピールするとともに、多様な分野の研究者と熱心な意見交換を行った。

■報道発表

顕著な研究成果が得られた際には積極的にプレスリリースを行い（5 件）、11 件の新聞報道、26 件の国内外専門誌への記事掲載に至った。計画研究 B03 班の成果の一つである Diffraction Casting（Mashiko et al. Advanced Photonics 2024; IF 20.6）は多くの注目を集め、EurekAlert!（AAAS）を始め、海外 13 の主要専門誌に掲載された。領域代表者 川西の朝日新聞によるインタビュー記事「生成 AI 時代のデータ爆発、光が救う？」（朝日新聞デジタル, 2024/7/26）は、今後の光コンピューティング研究の動向を占うものとして高い関心を集めた。

■若い世代への情報発信

シンポジウムやオープンセミナー等の各種イベント情報を、小中高生を対象として科学技術振興機構発行のメールマガジン**「JST 理数大好き NEWS」**及びウェブサイト**「サイエンスポータル」**に定期的に掲載してきた。その結果、オープンセミナー5名、サマースクール3名、第1回及び第2回公開シンポジウム、各4名及び2名、第1回国際シンポジウム1名の高校生・高専生の参加をみており、本研究領域への関心の高さを実感している。

■産業界とのコミュニティ形成

社会実装を視野に入れ、また研究領域の裾野拡大を狙いとして、産業界に積極的に情報発信している。例えば、公開シンポジウム等のイベント時には、毎回、主要企業・大学・国研等約 100 機関に開催案内を送付し、平均 60 名以上の企業の方にご参加頂いている。また、シンポジウムやオープンセミナー等では企業の研究者に招待講演や講師を依頼し、さらに定期的にワークショップを開催する等して、緩やかなコミュニティを形成してきた。

■書籍発刊

現代のフォトニックコンピューティング分野には、基礎から応用までを体系的に学べる教科書的な書籍が残念ながら見当たらない。そこで、前領域代表者の成瀬と計画研究 B01 班代表者の内田及び同分担者の菅野は下記の書籍を発刊した。いずれも新機軸でフォトニックコンピューティングを捉えた好著である。

1. 成瀬 誠, “現代光コンピューティング入門”, コロナ社, 2024/5/7.
2. 菅野 円隆, 内田 淳史, “光リザーバーコンピューティング –原理と実装–”, 共立出版, 2024/2/29.

12　研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に記述すること（1頁以内）。

以下に、総括班及び各計画研究班における研究費の使用状況や今後の使用計画等について記載する。

■総括班

本研究領域では、(1)連携体制の構築、(2)若手研究者の育成、(3)アウトリーチ活動を重点課題と位置づけている。このための、(1)「ARC×光」研究会や領域会議・総括班会議の開催、領域代表者の研究拠点訪問、(2)若手研究者の海外渡航支援や国内・国際会議参加支援、(3)ウェブサイト維持・管理や「光×コンピューティング」オープンセミナー、「光と情報」サマースクール、国内・国際シンポジウム等の開催、国内・海外研究者の招聘等に、研究費を使用してきた。研究会やセミナー、スクールはオンライン開催として、研究費の効果的使用に努めた。今後も、これらの活動の継続と強化に研究費を活用していく。

図 12-1 第1回国際シンポジウム、東京大学 伊藤国際学術研究センター。

■計画研究班

計画研究 A01 班では、近似コンピューティング処理系とアプリケーション評価の柱となる計算基盤として、2025年 9 月に、A01 班分担者 中野が所属する広島大学に 1,000 万円を投じて共用の GPU サーバーを導入する。A01 班分担者 安戸と B03 班代表者 長谷川らが開発中の組み合わせ最適化問題のための並列ソルバアプリケーション等が収容される見込みである。この計算機環境をベースに、A01 班と B03 班の研究環境の効率化と統合を進めていく。

A02 班も、主に計算機環境の整備に研究費を使用してきた。特に、GPU クラスター（Nvidia A30×2/node）の導入により、約9千万までのパラメータサイズの大規模光演算器のノイズシミュレーションが高速に実行可能となり、超並列光行列演算器の性能実証に大きく貢献した。今後は、数 100 億までのパラメータ数を有する大規模モデルに対応すべく、当該計算機環境のさらなる性能向上を図っていく。

図 12-2 ノイズシミュレーション用 GPU クラスター（Nvidia A30×2/node）。

B01 班では、2023 年に高速信号計測処理装置（Tektronix, DPO77002SX R3, 70 GHz 帯域）、及び広周波帯信号測定機器（Rohde & Schwarz, FSW85/FSW-B90G, 90 GHz 帯域）を購入し、光リザーバーコンピューティングにおける高速過渡応答信号の検出に成功している。今後は高速波形生成装置を購入し、より高速な入力信号の生成に利用する。また、実験結果を再現するための数値計算用に、コンピュータを購入している。さらに、国際会議での研究成果発表のための旅費としても研究費を使用しており、国内外での研究成果の普及に努めている。

B02 班では、偏波多重 IQ 変調器を用いた乗算機能実証のための偏波弁別差動光電変換システムを構築した。今後、精度向上のための光増幅器等の導入を計画しており、A01 班との連携で応用検討のためのデータ取得に活用する予定である。

B03 班では、2023 年から特任准教授 André Röhm 博士の雇用に研究費を使用している。レーザネットワークや量子ウォークの意思決定システムについて、議論及び論文化を行っている。今後は、Röhm 博士が得意としているリザーバーコンピューティングに関して、B01 班及び C01 班との連携を積極的に進める。光意思決定の高速化実験実証に向けて、ディレイライン及び光変調器の購入を行った。今後、複数入力のリザーバーコンピューティングへの展開を進めていく予定であり、そのための実験環境の整備に研究費を使用する予定である.

C01 班では、主に光デバイス評価実験装置の購入と、成果発表及び共同研究のための出張に研究費を使用してきた。2022 年度は、高速オシロスコープ（Tektronix, MSO72304DX, 100GS/s）と高速波形生成器（Tektronix, AWG70002, 25GS/s）を購入し、数 GHz 帯域での光回路の情報処理性能の評価が可能となった。2023 年度は、光ニューラルネット応用に関する研究を加速するため、この分野で著名な Femto-ST（仏）の D. Brunner 博士のもとに滞在し、わずか 1 年弱で大きな成果を挙げ、現在論文投稿中である。今後は、効率的な光デバイス評価実験を遂行するためのさらなる実験環境の整備と技術員の雇用等に、研究費を使用する予定である。

C02 班では、光システムから出力される高速の情報信号を処理する電子回路を評価するため、オシロスコープの測定可能周波数の 30GHz への拡大や、集積回路測定用のポジショナやプローブの購入、測定環境温度調整機能等の整備に、主として研究費を使用してきた。また、フォトレシーバ・ディテクタ、光トランスミッターモジュール等の購入により、電子デバイスと光デバイスを融合したシステムの測定評価が初めて可能となった。

13　総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に記述すること（２頁以内）。評価コメントは、次の点について記述すること。
(1) 研究領域の設定目的に照らして、着実に研究が進展しているか。
(2) これまでの研究成果に照らして、今後の研究計画は適切なものとなっているか。
(3) その他、特筆すべきポイントや改善すべきポイント

以下4名の総括班評価者から評価コメントを頂いた。

■石川 正俊（東京理科大学 学長）

光並びに電子技術によるコンピューティングの限界を見据え、また、光の原理的な並列性や高速性の活用を基本として、光の極限性を生かした新たなコンピューティング原理の創成というチャレンジングなテーマに対して、システム構造、コンピューティングメカニズム、デバイス基盤の3項目を柱として、従来のコンピューティング構造にない新たな構造を生み出すことを目指したものである.

計画研究では、3項目それぞれで新たな提案と実証を行っている. 計画研究 A01・A02 班では、「フォトニック近似コンピューティング」という考え方を提案・実装している. また光電融合計算機基盤の性能評価や精度評価を行い、最適な演算構造とアルゴリズムを提案している. これらは、アーキテクチャの視点から、新たな構造の提案や評価方法を提起している点において、極めて重要であり、稀有な研究課題にチャレンジしていると言える.

計画研究 B01・B02・B03 班では、「光リザーバーコンピューティング、光変調の活用、意思決定のための光演算」といった観点から新たな演算手法を提案・実装している. このテーマの特徴は、従来の演算機構と比較して遜色ない性能が実現できることを実証している点にあり、研究の実現可能性の面でも大きな進歩が認められる.

計画班 C01・C02 班では、光電融合技術に対して、デバイスから次世代フォトニックコンピューティングに対して、大きな進歩が認められる. 従来から指摘されている電子回路の限界に対して、エネルギー効率と計算速度の点で凌駕する結果を出しており、光の並列性、高速性、低消費電力性能を実証した点に大きな成果が認められる.

領域の運営に関しては、領域内の共同研究を積極的に推進して、大きな効果を生み出している点は、評価に値する. また、若手研究者の育成やアウトリーチ活動も十分である.

デバイスや要素研究に陥りがちな関連研究分野において、アーキテクチャレベルからデバイスに至るまで、体系的な研究を遂行できたことは、関連分野に大きな影響をもたらすと期待できる. 日本の研究開発が弱かった部分、光の演算構造の研究で弱かった部分を積極的に推進した点において、先駆的な研究であると言える.

■武田 光夫（宇都宮大学オプティクス教育研究センター 名誉フェロー、電気通信大学 名誉教授）

1980年代の光コンピューティング研究に参加していた一研究者の視点で，自由な感想を交えてコメントします. 本領域研究では，1980年代の研究頓挫の要因をよく分析し，現在の技術における光の「強み」と「弱み」を再検討した上で，異なる角度から「強み」を生かすように，3テーマを柱に全体計画が綿密に策定されています. このことが功を奏して，研究は計画にしたがって順調に進展しており，一部には目標を上回る成果もでています. これは高く評価できます.「光計算の強みは並列アナログ計算で弱みは計算精度である」ということは80年代に我々も認識していました. が，計算精度の弱点に対応した近似コンピューティング（AC）や近似高速通信技術のような発想や，光カオス等の物理現象で生成した確率過程を計算原理に内包した意思決定やリザバーコンピューティングなどの発想は，当時我々が思いもしなかった斬新な構想です. 実証実験も開始しており，今後の発展が期待されます. このように，物理学と情報科学を包摂する研究領域を一つの学理で統合するのは大変難しいと思われますが，それに向けた努力として2冊の成書が上梓されたのは評価できます.

組織運営については，公募研究の採用により，研究領域全体のバランスがとれて，計画研究の骨組みを補強・補完する研究体制を整えることができているように思います. また各研究グループ間の共同研究も多くの成果が得られており，組織相互の有機的な協力体制の確立がうかがわれます. 特に印象的なのは，若手育成の成果です. 重要な研究発表の多くが大学院生などの若手研究者を筆頭著者としています. また，若手に国外での研究の機会を与え，国外の研究者を共同研究に招き若手との交流をさせるなど国際協力の面でも努力がみられます.

以上を纏めますと，全体として研究は順調に進んでおり，目標を超えるものもあり，今後の発展が期待されます.

■谷田 純（大阪大学大学院情報科学研究科 招聘教授）

(1) 研究領域の設定目的に照らして、着実に研究が進展しているか。

本研究領域は、コンピューティング性能の向上という情報科学の基盤を支える重要課題に対して、光伝搬・広帯域性・多重性など光の極限性能の活用という根本的かつ合理的なアプローチにより、その解決をめざしている。三つの研究柱では多数の論文や学会発表で示されるなど個々の研究課題ごとに成果があげられており、「ARC×光」研究会等による有機的に連携した共同研究や若手研究者の育成が積極的に行われている。明確な設定目標の下、オープンセミナーやサマースクール、国際・公開シンポジウムなどのアウトリーチ活動にも意欲的に取

り組まれており、研究が着実に進展していると判断される。

(2) これまでの研究成果に照らして、今後の研究計画は適切なものとなっているか。

近似コンピューティングは光の物理的性質に適合した演算形態であり、本研究領域の進展によって有意義な成果が得られるものと期待される。三つの研究柱による研究遂行は合理的なものであり、それぞれが取り組む研究計画は研究費の使用計画を含め適切なものと考える。一点、研究開始当初の予想を超える勢いで生成 AI が発展しており、既に多くの分野での利活用が進んでいる。この状況を鑑みると、本研究領域においても、生成 AI 系への直接的応用を想定した視点が重要になると考えられる。

(3) その他、特筆すべきポイントや改善すべきポイント

本研究領域は、当初の領域代表者の死去という非常事態にもかかわらず、それに起因した研究計画の遅延を挽回し、当初目標を上回る進展を遂げている。これは、後任領域代表者による強力な研究マネージメントの下、総括班を中心とした領域メンバーが一致協力した結果であり、優れた研究内容とは別の次元として特筆に値する。今後、領域内の研究協力にとどまることなく、学会や既存研究グループとの連携や体制づくりを積極的に進めていただきたい。

■Daniel Brunner（CNRS Group leader; Associate Professor, FEMTO-ST）

The project “Photonic Computing Highlighting Ultimate Nature of Light,” led by Prof. Tetsuya Kawanishi, tackles critical research questions by advancing beyond traditional binary electronic integrated circuits. It focuses on leveraging light's unique properties to enhance computing infrastructure, addressing key challenges created and driven and vast pace by the AI revolution. Light offers significant advantages, including high-speed communication, low loss, wide bandwidth, multiplexing, and optical data interfacing.

Structured around three research pillars, the project aims to:

A. Develop System Architectures utilizing the Ultimate Nature of Light.

B. Create Computing Mechanisms that exploit the Ultimate Nature of Light.

C. Establish Device Fundamentals benefiting from the Ultimate Nature of Light.

At the halfway point, each pillar has surpassed initial expectations, leading to transformative advancements in computing frameworks. The project's design promotes collaboration, demonstrated by numerous joint publications and presentations. Notable achievements include ultra-high-performance photonic computing chips and advanced IC technology. The project also emphasizes nurturing future talent, with over 90% of first authors being early-stage researchers and 41 awards received by young scientists involved.

Given these mid-project successes, the potential for continued high-impact results during and beyond the project timeline is excellent, with significant real-world relevance as AI technology advances. Combined with the outstanding collection of international leaders in their respective fields of research, I am of the highest confidence that the project will continue along this outstanding trajectory. For any potential questions I rest gladly at your disposal.