

戦略的創造研究推進事業
－さきがけ(個人型研究)－

研究領域「革新的コンピューティング
技術の開拓」

研究領域事後評価用資料

研究総括: 井上弘士

2024年1月

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 1. 研究領域の概要 | 1 |
| (1) 戦略目標 | 1 |
| (2) 研究領域 | 1 |
| (3) 研究総括 | 1 |
| (4) 採択研究課題・研究費..... | 2 |
| 2. 研究総括のねらい | 4 |
| 3. 研究課題の選考について | 6 |
| 4. 領域アドバイザーについて | 9 |
| 5. 研究領域のマネジメントについて..... | 10 |
| 6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について..... | 27 |
| 7. 総合所見 | 35 |

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術の創出」

(2) 研究領域

「革新的コンピューティング技術の開拓」(2018年度発足)

超スマート社会を実現しその持続可能性を維持するためには、情報処理基盤の要であるコンピュータシステムの飛躍的かつ継続的な発展が必要不可欠となる。しかしながら、近い将来、半導体の微細化がついに限界に達すると予想されており、コンピュータシステムを進化させ続けるための新しい概念や技術の創出が求められている。

そこで本研究領域では、半導体微細化に頼らない革新的コンピューティング技術の開拓を目指す。大きなダイナミズムを有する超スマート社会を支える情報処理基盤を構築するには、社会的変化と技術的進歩を敏感に察知し、将来を予測し、様々なトレードオフを考慮した上で、柔軟かつ斬新な発想に基づく次世代コンピュータシステムを実現しなければない。そこで、高性能化、低コスト化、低消費電力、安全性向上、高信頼化、運用容易性向上、など、様々な観点から次世代コンピュータシステムのあるべき姿を探求する。

研究内容としては、1)回路、アーキテクチャ、システムソフトウェア、プログラミング、アルゴリズム、アプリケーションなどを対象としたクロスレイヤ、コデザインに基づく新しい高効率コンピューティング技術の確立、2)現在主流であるデジタルCMOS処理とは異なる新コンピューティング技術の創成、3)従来の計算モデルとは一線を画す新計算原理／新概念の創出、などを対象とする。そして最終的には、世界をリードする若手研究者を輩出するとともに、持続可能な超スマート社会の実現を可能にするための情報処理基盤の構築に貢献していく。

(3) 研究総括

氏名 井上 弘士 (所属 九州大学 大学院システム情報科学研究所 役職 教授)

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

<http://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

平成 30 年度新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h30.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

| 採択 年度 | 研究者 | 所属・役職 採択時 ² | 研究課題 | 研究費 ¹ |
|------------|--------|---|--|------------------|
| 2018 年度 | 栗野 皓光 | 京都大学・准教授 (東京大学・助教) | 深層学習の「見える化」で切り 拓く安全な人間・機械協調社会 | 51 |
| | 伊藤 創祐 | 東京大学・講師 (北海道大学・助教) | 情報幾何と熱力学による生体 コンピューティング理論 | 30 |
| | 上野 嶺 | 東北大学・助教 | バッテリーレス無線センサネッ トワークのためのポスト量子 暗号計算技術 | 40 |
| | 大久保 潤 | 埼玉大学・准教授 | 双対過程に基づくコンピュー ティングの展開 | 40 |
| | 鬼沢 直哉 | 東北大学・准教授 (東北大学・助教) | エッジ型学習用ハードウェア 実現に向けたインバーティブ ルロジックの創成 | 36 |
| | 佐藤 幸紀 | 豊橋技術科学大学・准教 授 | データフロー主導によるカス タム計算機システム開発基盤 の体系化 | 30 |
| | 張 任遠 | 奈良先端科学技術大学 院大学・准教授 (奈良先端科学技術大学 院大学・助教) | 単線駆動型高効率近似計算基 盤 | 35 |
| | 高瀬 英希 | 東京大学・准教授 (京都大学・助教) | データ中心開発パラダイムを 実現する包括的なIoTシステム 開発環境 | 40 |
| | 高前田 伸也 | 東京大学・准教授 (北海道大学・准教授) | アーキテクチャとアルゴリズ ムの協調による高効率深層学 習システムの創出 | 40 |
| | 三浦 典之 | 大阪大学・教授 (神戸大学・准教授) | Triturated Computing System (粉末コンピューティングシス テム) | 65 |
| | 山本 英明 | 東北大学・准教授 (東北大学・助教) | バイオニック情報処理システ ムの人工再構成 | 46 |

| | | | | |
|------------|--------|-----------------------------------|--|----|
| 2019 年度 | 鯉渕 道紘 | 国立情報学研究所・教授 (国立情報学研究所・准教授) | 耐故障並列計算と高速ロシー 結合網の協調 | 40 |
| | 坂田 綾香 | 統計数理研究所・准教授 (統計数理研究所・助教) | 求解軌道のマクロ表現による アルゴリズム制御理論の創出 | 32 |
| | 坂本 龍一 | 東京工業大学・准教授 (東京大学・助教) | 新世代デバイスを用いた密結 合型マイクロサービス実行基 盤 | 49 |
| | 砂田 哲 | 金沢大学・教授 (金沢大学・准教授) | 光波動コンピューティングの 展開 | 42 |
| | 孫 鶴鳴 | 早稲田大学・次席研究員 | リアルタイム低電力深層学習 適用による革新的な動画像圧 縮システム | 45 |
| | 高橋 綱己 | さきがけ研究者(東京大 学) (九州大学・特任准教授) | メモリスタセンサネットワー クによるエッジ化学情報処理 | 52 |
| | 陳 オリビア | 東京都市大学・准教授 (横浜国立大学・特任助 教) | アルゴリズム・ソフトウェア・ ハードウェアの融合による超 低電力ニューラルネットワー クの構築 | 49 |
| | 西原 禎文 | 広島大学・教授 (広島大学・准教授) | ペタビット時代を支える革新的 分子ストレージング技術の確立 | 53 |
| | 松井 鉄平 | 岡山大学・准教授 (東京大学・講師) | 生物模倣によるロバストで効 率的な深層学習の開発 | 50 |
| 2020 年度 | 入江 英嗣 | 東京大学・教授 (東京大学・准教授) | ユーザに寄り添うオンデマン ド近似計算基盤の開拓 | 40 |
| | 金澤 輝代士 | 京都大学・准教授 (筑波大学・助教) | 確率過程の縮約理論を用いた 社会シミュレータの高速化 | 46 |
| | 塩見 準 | 大阪大学・准教授 (京都大学・助教) | 光集積回路で切り拓く次世代 セキュアコンピューティング 基盤 | 47 |
| | 鹿野 豊 | 筑波大学・教授 (慶応大学・特任准教授) | セキュア量子乱数に基づくハ イブリッド量子秘密計算基盤 の創出 | 53 |
| | 常木 澄人 | 産業技術総合研究所・主 任研究員 | ナノオシレータニューラルネ ットワークの開発 | 40 |

| | | | | |
|---------------|---|---|--------------------------------|------|
| Tran Thi·Hong | 大阪公立大学・講師 (奈良先端科学技術大学院大学・助教) | Society5.0 向け超低消費電力 ブロックチェーンアクセラ レータの開発 | 52 | |
| Bian Song | 京都大学・助教 | 安全な遠隔診療支援に向けた 高速秘密計算プラットフォームの構築 | 5 (海外機 関移籍 により 中止) | |
| 深谷 猛 | 北海道大学・准教授 (北海道大学・助教) | 低精度・低信頼性演算を活用し た数値計算アルゴリズムの創 出 | 20 | |
| 増田 豊 | 名古屋大学・准教授 (名古屋大学・助教) | ファジングを用いた近似コン ピューティング回路のテスト 技術 | 35 | |
| Mohamed Wahib | 理化学研究所・チームリ ーダー (産業総合研究所・主任 研究員) | ムーアの法則を超えた並列プ ログラミング | 48 | |
| | | | 総研究費 | 1251 |

¹各研究課題とも研究期間の総額、進行中の課題は予定を含む(2023年12月1日現在)

²変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

2. 研究総括のねらい

(1) 戦略目標に対する本研究領域のねらい

超スマート社会の到来を目前に控えた今、その情報処理基盤となるコンピュータシステムは大転換期を迎えつつある。社会環境におけるビッグデータ処理/AI 処理の爆発的普及や IoT デバイスの急速な浸透に伴い、コンピュータシステムが満たすべき要件（高性能性、低コスト性、低消費電力/低消費エネルギー性、安全性、信頼性、など）は多様化・複雑化している。その一方、1970 年代初頭に世界で初めて 1 チップ・プロセッサが開発されて以来、コンピュータの高性能化と低消費電力化を支え続けてきたトランジスタの微細化（半導体の集積度が 3 年で 4 倍となるムーアの法則）はついに終焉を迎える。いわゆる、ポストムーア時代の到来である。これは、着実に発展を遂げてきたコンピュータの性能向上が停滞する可能性を示唆する。Society5.0 の実現にはエッジからクラウドまでを含む情報処理基盤の継続的発展が必要不可欠であり、今こそ、現代のコンピュータシステム構成法を抜本から見直す時である。すなわち、半導体の微細化に頼らない新しいコンピュータシステムはどの

ような姿であるべきか、また、どのように利活用すべきか、という、極めて本質的かつ抜本的な課題に対し、正面から挑戦する必要がある。そこで、新たなコンピュータシステム構成法を探求するという基本方針のもと、本研究領域を「革新的コンピューティング技術の開拓」と定めた。ポストムーア時代では、半導体の微細化によるトランジスタ数の増加を拠り所とする「量的アプローチ」から、多様な特徴を有する新奇デバイスや新計算原理の創成・活用を拠り所とする「質的アプローチ」へのパラダイムシフトが必要である。これを実現するには、異なる分野間での議論・連携・融合を加速し、従来とは一線を画す「新しい知の交差の場」が求められる。そこで、「革新的コンピューティングを開拓する」という共通の目標のもと、様々な研究領域や分野から研究者が集まり、切磋琢磨するとともに、新たな連携により相乗効果が次々と生まれる領域を設計した。

(2) 本研究領域で実現をねらったこと、研究成果として目指したこと

本研究領域を設計するにあたり、①様々な分野の新進気鋭な若手研究者集団を構成し、その中で切磋琢磨するとともに、将来に向けた異分野間連携の種を育てること、②これまでの常識にとらわれない様々な次世代コンピューティング技術を創出すること、③世界トップクラスの国際会議やジャーナル等への採択により日本発コンピューティング技術を世界に発信すること（そしてその分野の第一人者になること）、を目指した。①に関しては、自身の研究コミュニティ（学会などが運営する研究会など）に閉じた世界では出会うことすらなかったであろう他分野の優れた研究者と意見をぶつけ、さらには、新たなチームを構成して従来とは一線を画する新しい取組みへと繋げることを重視した。これは、ポストムーア時代を支える「コンピューティング技術の質的変化」というブレークスルーを生み出すために極めて重要となる。また、②に関しては失敗をよしとする雰囲気作りに努め、研究者が従来の延長や改善ではなく抜本から新しいアプローチや原理を探求する（つまり、1を10に改善するのではなく、ゼロから1を生み出す）挑戦性に優れた領域となるよう意識した。そして③に関しては、コンピュータアーキテクチャなどコンピューティング技術の中心的分野において、世界トップレベルの国際会議における日本からのプレゼンス拡大を目指した。

(3) 科学技術の進歩への貢献やイノベーション創出に向け目指したこと

革新的コンピューティング技術の開拓には、ある意味で一つの課題に対する真理や解の探求のみならず、コンピュータシステムに内在する様々なトレードオフ探索をはじめ、コンピュータシステムを構成する多種多様なデバイス、ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク、さらには、物理学や数学を土台とした上での計算原理や理論構築など、まさに総合的観点からの技術探求が必要となる。当然ながら、分野が異なれば専門用語も異なり、会話そのものが成立するまでもにそれなりの時間と労力を有する。しかしながら、それでも将来を見据えて異分野の研究者同士が意見をぶつけ合う環境こそが、異分野連携に基づく新しい科学技術の発展とイノベーション創出への鍵であると考え、「研究者自らが、自らの研究コ

コミュニティを飛び出し、自らが新たなコミュニティを作り上げる」という流れを加速する領域の実現を目指した。

3. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針、および選考結果

① 選考方針

本研究領域では次世代を支えるコンピューティング技術の開拓を目指し、新しいコンピュータシステムの創成とその応用に繋がる先駆的かつ挑戦的な研究提案を募集した。本研究領域でのさきがけ研究を起点とし、新しい分野やトピックを開拓して世界的な流れ形成するとともに、その第一人者となり世界をリードする強い志を持った若手研究者の参画を期待した。主な研究内容としては、回路、アーキテクチャ、システムソフトウェア、プログラミング、アルゴリズム、アプリケーションといったシステム階層を視野に入れた超高効率コンピューティング技術の確立、脱デジタルCMOS処理を念頭においた新コンピューティング技術の創出、従来とは一線を画す新計算原理や新概念の提案、などを想定したが、これらにとらわれない新しい方向性、概念、分野に基づくコンピューティング技術の提案も対象とした。また、計算機工学／計算科学のみならず、他の分野を専門とする若手研究者（例えば、数学や物理学、生物学など）の参画も歓迎した。

応募に際しては、今後の超スマート社会を支えるべく次世代の情報処理基盤に求められる様々な要件に基づき研究提案のターゲットを定め（例えば、高性能化、低コスト化、低消費電力／低消費エネルギー化、安全性向上、高信頼化、運用容易性向上、など）、関連する国内外の技術動向を整理し、挑戦する課題を明確にした上で、その解決に向けたオリジナリティのある提案を求めた。加えて、コンピューティングプラットフォームとしての発展性を念頭に、提案技術の一般化・汎用化もできるだけ考慮するよう依頼した。なお、上記に加え、新デバイス技術の提案も認めたが、その場合には、当該デバイスの利用を基盤としたコンピュータシステム像を示し、新しいコンピューティング技術として展開できるシナリオを求めた。以下、想定される研究分野に関する代表的なキーワードを示す。

【**コンピューティング（「**」に当てはまる部分）】

並列、分散、クラウド、エッジ、ヘテロジニアス、ドメイン特化、イン・メモリ、ニア・メモリ、リコンフィギャラブル、デジタルアナログ混載、近似（Approximate）、確率的（Stochastic/Probabilistic）、間欠（Intermittent）、ディペンダブル、セキュア、ニューラルネットワーク、ニューロモフィック、ブレイン、ウェアラブル、ナノフォトニック、超伝導、量子、バイオロジカル、など。

【研究対象となるシステムレイヤ】

回路、アーキテクチャ、コンパイラ、OS、仮想マシン、アルゴリズム、システム制御、など。

【コンピューティング対象となる処理】

汎用処理、リアルタイム処理、ビッグデータ処理、データベース処理、AI 処理、最適化処理、イジング処理、グラフ処理、メディア処理、科学技術計算、大規模シミュレーション、など。

② 選考方法

選考は、10名の領域アドバイザーの協力を得て研究総括が行った。査読に関してはその年に対応可能なアドバイザーの数と提案数を鑑み、応募研究課題に対して少しでも査読者数が増えるように考慮して以下のように決定した。

- 2018年度 課題1件にアドバイザー3人
- 2019年度 課題1件にアドバイザー4人
- 2020年度 課題1件にアドバイザー5人

② 選考結果

2018年度から3年間募集を行い、応募総数108件に対して面接対象56件、最終的に採択は30件となった。女性研究者は3名、外国籍研究者は6名である。年度別の詳細は以下の表3-1の通りである。

表 3-1 応募・採択状況一覧

| 募集年度 | 応募・採択研究課題数 (件) | | | | |
|--------|----------------|-----|-----|----|-----|
| | 応募数 | 面接数 | 採択数 | 女性 | 外国籍 |
| 2018年度 | 46 | 22 | 11 | 0 | 1 |
| 2019年度 | 38 | 16 | 9 | 2 | 2 |
| 2020年度 | 24 | 14 | 10 | 1 | 3 |
| 合計 | 108 | 52 | 30 | 3 | 6 |

③ 選考概況

採択研究課題を整理し、方式・デバイス・理論と階層で配置したポートフォリオとしてまとめた。図3-1は、研究者が専門とするシステムレイヤと本研究でのコンピューティング

| | 一期生 | 二期生 | 三期生 |
|------------|----------------------|-----|--------------------------|
| | 機械学習系 | | 基礎系 (エッジ) (クラウド/スパコン) |
| 計算原理理論 | Zhang@奈良先端 | | |
| アルゴリズム | 鬼沢@東北大 | | |
| プログラミングモデル | 高前田@東大 | | |
| 通信/ネットワーク | 高効率深層学習 高信頼深層学習 | | |
| システムSW/EDA | 深層学習画像認識 | | |
| アーキテクチャ | 近似アナログ | | |
| 回路 | 確率的計算基盤 | | |
| デバイス | 超伝導計算 Chen@横国 | | |
| | 光波動計算 砂田@金沢大 | | |
| | 粉末情報処理 三浦@神戸大 | | |
| | 専用計算機開発基盤 佐藤@豊橋 | | |
| | ポスト量子暗号 上野@東北大 | | |
| | 光セキユア処理 塩見@阪大 | | |
| | IoTシステム設計 高瀬@京大 | | |
| | プロックチェーン Hong@奈良先端 | | |
| | 新仮想化技術 坂本@東大 | | |
| | 数値計算 深谷@北大 | | |
| | エラー許容通信 難波@NII | | |
| | 秘匿計算 Song@京大 | | |
| | プログラミン グ Mohaned@産総研 | | |
| | 数値計算 深谷@北大 | | |
| | エラー許容通信 難波@NII | | |
| | 秘匿計算 Song@京大 | | |
| | プログラミン グ Mohaned@産総研 | | |
| | 分子ス トレーシ 西原@広大 | | |
| | 双対過程と事前計算 大久保@埼玉 | | |
| | 神経細胞計算 山本@東北大 | | |
| | 量子乱数 鹿野@群馬大 | | |
| | 熱情報力学 伊藤@東大 | | |
| | アルゴリズム制御理論 坂田@筑波研 | | |
| | 回路シミュレーション 金澤@筑波 | | |
| | 社会シミュレーション 金澤@筑波 | | |
| | 回路シミュレーション 増田@名大 | | |
| | 化学情報処理 高橋@九大 | | |
| | ナノオシレータ 常木@産総研 | | |
| | 分子ス トレーシ 西原@広大 | | |
| | 双対過程と事前計算 大久保@埼玉 | | |
| | 神経細胞計算 山本@東北大 | | |
| | 量子乱数 鹿野@群馬大 | | |
| | 熱情報力学 伊藤@東大 | | |
| | アルゴリズム制御理論 坂田@筑波研 | | |
| | 回路シミュレーション 金澤@筑波 | | |
| | 社会シミュレーション 金澤@筑波 | | |

図 3-1 領域ポートフォリオ (システムレイヤとコンピューティング対象)

| | 一期生 | 二期生 | 三期生 |
|------------|----------------------|-----|-------------------------|
| | エレクトロニクス | | 光 超伝導 スピン 分子化学 バイオ生態 理論 |
| 計算原理理論 | Zhang@奈良先端 | | |
| アルゴリズム | 鬼沢@東北大 | | |
| プログラミングモデル | 高前田@東大 | | |
| 通信/ネットワーク | 高効率深層学習 高信頼深層学習 | | |
| システムSW/EDA | 深層学習画像認識 | | |
| アーキテクチャ | 近似アナログ | | |
| 回路 | 確率的計算基盤 | | |
| デバイス | 超伝導計算 Chen@横国 | | |
| | 光波動計算 砂田@金沢大 | | |
| | 粉末情報処理 三浦@神戸大 | | |
| | 専用計算機開発基盤 佐藤@豊橋 | | |
| | ポスト量子暗号 上野@東北大 | | |
| | 光セキユア処理 塩見@阪大 | | |
| | IoTシステム設計 高瀬@京大 | | |
| | プロックチェーン Hong@奈良先端 | | |
| | 新仮想化技術 坂本@東大 | | |
| | 数値計算 深谷@北大 | | |
| | エラー許容通信 難波@NII | | |
| | 秘匿計算 Song@京大 | | |
| | プログラミン グ Mohaned@産総研 | | |
| | 分子ス トレーシ 西原@広大 | | |
| | 双対過程と事前計算 大久保@埼玉 | | |
| | 神経細胞計算 山本@東北大 | | |
| | 量子乱数 鹿野@群馬大 | | |
| | 熱情報力学 伊藤@東大 | | |
| | アルゴリズム制御理論 坂田@筑波研 | | |
| | 回路シミュレーション 金澤@筑波 | | |
| | 社会シミュレーション 金澤@筑波 | | |
| | 回路シミュレーション 増田@名大 | | |
| | 化学情報処理 高橋@九大 | | |
| | ナノオシレータ 常木@産総研 | | |
| | 分子ス トレーシ 西原@広大 | | |
| | 双対過程と事前計算 大久保@埼玉 | | |
| | 神経細胞計算 山本@東北大 | | |
| | 量子乱数 鹿野@群馬大 | | |
| | 熱情報力学 伊藤@東大 | | |
| | アルゴリズム制御理論 坂田@筑波研 | | |
| | 回路シミュレーション 金澤@筑波 | | |
| | 社会シミュレーション 金澤@筑波 | | |

図 3-2 領域ポートフォリオ (システムレイヤと技術分野)

対象である。また、図 3-2 は、システムレイヤ (図 3-1 と同じ) と研究分野の対応を整理している。これらの図において、中抜き (水色の背景が見えている) 部分は、これに対応するシステムレイヤは主には含んでいないことを意味する。これらの図より、①基本的にはコンピュータシステムを構成する全てのレイヤをカバー (デバイス、回路、アーキテクチャ、システムソフトウェア/設計技術、通信/ネットワーク、プログラミングモデル、アルゴリズム、計算原理と理論) することができた、②質的变化によるブレークスルーを探求するための様々な分野 (エレクトロニクス、光、超伝導、スピン、分子、化学、バイオ生態、理論) から新進気鋭な若手研究者が集う結果となった、③様々なコンピューティング応用形態 (機械学習系、エッジ/クラウド/スパコンなどの計算基盤系、計算/デバイス原理系、センサ

系、設計技術、社会／人とのインタラクション系)を対象とすることができた、という特徴が見られた。戦略目標では「(1)情報処理を質的に大転換させる新たなコンピューティング技術の創出、(2)アルゴリズム、アーキテクチャ等の技術レイヤーを連携・協調させた高効率コンピューティング技術の開発」が定められているが、この目標の達成に資する研究課題を採択できた。

4. 領域アドバイザーについて

本研究領域の領域アドバイザーには、コンピュータ技術への卓越した知見だけでなく、コンピューティング技術の将来像への見識も求められる。そこで、関連する分野に精通しているアカデミアの専門家をバランス良く委嘱するのみならず、これまでのコンピューティング技術以外の専門家にも参画を依頼した。これにより、各採択研究課題への、多彩な視点からのアドバイスに加えて、新しいコンピューティング技術の基盤創出に向けた議論や、研究者への意識付けが可能になった。また、学术界のみならず、産業界からも、半導体集積回路、組込みシステム、ハイパフォーマンスコンピューティング、などに関する製品開発の経験と企業経営／チームマネジメントに優れた専門家に参画して頂き、産学が連携した強固かつ実効的な領域支援体制を構築することができた。

特にさきがけ研究を進めるにあたり、将来的には世界レベルの研究リーダーの輩出を目指した。そのためには研究に対する多角的な視点や、活用できる人的ネットワークが不可欠である。研究者のみではアプローチが難しい諸分野との交流・連携を進めることも考慮して、様々な分野で世界的に活躍されている専門家に依頼した。

| 領域アドバイザー名 (専門分野) | 着任時の所属 ¹ | 役職 | 任期 |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 河野 崇 (数理工学、ブレイン モルフィック) | 東京大学 | 教授 | 2018年4月～2024年3月 |
| 権藤 正樹 (OS、自動運転、組込み ソフト) | イーソル株式会 社 | 取締役 CTO 兼 技術本部長 | 2018年4月～2024年3月 |
| 竹房 あつ子 (分散処理、データセ ンター、HPC) | 国立情報学研究 所 | 准教授 (教授) | 2018年4月～2024年3月 |
| 田中 良夫 (セキュリティ、シス テムアーキ、IoT) | 産業技術総合研 究所 | 研究部門長 (執行役員) | 2018年4月～2024年3月 |

| | | | |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|
| 谷口 忠大 (ロボティクス、プラットフォームフォーム) | 立命館大学 | 教授 | 2018年4月～2024年3月 |
| 中条 薫 (モバイル、センサー、カメラ、ネットワーク) | 富士通株式会社 | エグゼクティブ ディレクター | 2018年4月～2024年3月 |
| | (株式会社 SoW Insight) | (代表取締役社長) | |
| 中島 康彦 (アーキテクチャ) | 奈良先端科学技術大学院大学 | 教授 | 2018年4月～2024年3月 |
| 成瀬 誠 (ナノフォトニクス、光コンピュータ) | 情報通信研究機構 | 総括研究員 | 2018年4月～2023年9月 |
| | (東京大学) | (教授) | |
| 前澤 正明 (量子コンピュータ、超伝導デバイス) | 産業技術総合研究所 | 主任研究員 | 2018年4月～2024年3月 |
| | (中国科学院) | (研究員) | |
| 宮森 高 (プロセッサ、システムLSI、アプリ) | 東芝デバイス&ストレージ株式会社 | センター長 | 2018年4月～2024年3月 |

¹変更/移動のあった場合、下段に括弧つき記載

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 研究課題の進捗状況の把握と評価、研究課題の指導

本研究領域では、何よりも研究者個人が世界トップレベルの独創的な研究を自由闊達に推進できる（挑戦できる）場の提供を最大の使命と考え、これを実現するための運営を行った。また、本研究領域最大の特徴はまさに様々な分野の新進気鋭な研究者が集まっている点にあり、将来へと続く新たなネットワーク構築も念頭において各研究者へのアドバイス等を行った。領域発足当初は研究室等を実際に訪問し、課題について研究者と対話する形のサイトビジットを実施した。特に、研究の進捗や成果もさることながら、直面している課題の共有と、その解決に向けた方策を議論するスタイルを採った。2年目に入った段階でコロナ禍となり、基本的にはリモート会議を用いた運営へと切り替わり、本研究領域の最終年度にしてようやく対面形式に復帰することができた。本研究領域では、以下「3つの心構え」を設定し、研究者には常に意識するよう施した（事前説明会においても「3つの心構え」を示した上で応募を呼びかけた）。

- さきがけは個人研究→自由闊達な研究をやるべし！

- さきがけは切磋琢磨できる場→大いに刺激を受けるべし!
- さきがけは世界への登竜門→大いに成長すべし!

また、基本的な指導方針として、

- 自分自身の野望は何か?
- その実現に向け、さきがけ研究でどのような山（成果、分野としての流れ、コミュニティ、など）をつくりたいのか?
- 研究成果として最後にどんな山をつくれたのか?

を問い続け、研究の加速を後押しするとともに、常に将来ビジョンを描きながら研究を進めるよう意識付けを行った。そして、「1を10に改善するのではなく、ゼロから1を生み出す研究をやるう!」というビジョンをアドバイザーや研究者と共有し、領域運営を遂行した。

各研究者の進捗を把握するため、研究総括、領域アドバイザー、研究者が一堂に会して、年2回、一泊二日を基本として領域会議を開催した。第1回の領域会議においては、本研究領域総括として「本研究領域の狙い、基本方針、心構え」を説明した。また、世界最先端コンピュータアーキテクチャ研究の動向と世界トップを走るために必要なことを共有した。第4回～第8回においてはコロナ禍の影響によりオンラインを主体とした運営に切り替えた。当初はオンライン会議に不慣れであったこともあったが、種々のコミュニケーションツールの整備や普及も進み、対面でのライブ感ある議論の展開にまでは至らないものの、できる範囲での領域運営を進めた。第9回からは対面での領域会議（実際にはハイブリッド方式）へと戻り、さきがけ研究の醍醐味である「他研究者との議論と交流の場の提供」を再開できたことは何よりも嬉しい状況であった（特に、3期生にとっては、それまでのイベントの全てがオンラインであったため）。各運営会議においては、スケジュールの都合によるが、可能な範囲でアドバイザーによる講演、コンピューティングプラットフォームや研究施設の見学、などを実施した。また、本研究領域総括をモデレータ、本研究領域卒業生（1期生）をパネリストとし、「さきがけ研究の光と影 ～今だからこそ言えること、2期生3期生へのアドバイス～」を領域会議内にて実施した。様々な観点からテーマを設定し、さきがけ研究の良い点、改善すべき点、など多面的な議論を行うことができた。領域会議の実施回数と時期は以下の通りである。

- 第1～3回（2018～2019年）：リアル開催
- 第4～8回（2020～2022年）：オンライン開催
- 第9～11回（2023～2024年）：リアル開催（ハイブリッド）

(2) 研究課題間や他の研究領域、国内外の研究機関、異分野との融合・連携・協力の推進

基本的には、1) 本研究領域の特徴である幅広い対象分野を最大限活用すべく、異分野研究者間での実効的な連携の促進をサポートする、2) 世界トップクラスのコミュニティとのネットワークを拡大し、さきがけ研究者の国際的プレゼンスと意識を高める、3) 本研究領域に限らず、より広範でハイレベルな異分野連携の機会を提供する、の3点に主眼を置き、研究領域運営を進めた。主な活動は以下の通りである。

- **第20回情報科学技術フォーラム FIT2021 特別企画「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」(さきがけ/CREST 連携)** : CREST 研究領域「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」と連携し、電子情報通信学会/情報処理学会の協賛による FIT2021 (情報科学技術フォーラム) にてイベント企画を提案し開催した。本さきがけ研究領域からは1期生4名(高前田研究者、大久保研究者、三浦研究者、上野研究者)、2期生1名(鯉渕研究者)、3期生1名(塩見研究者)が講演を行った。同じ戦略目標の達成に向け CREST/さきがけ研究者が議論を展開し、新技術の導入や将来のコンピューティングプラットフォーム像などについて活発な議論を交わした。本さきがけ研究領域の研究者にとっては、自らが将来 CREST などの大型プロジェクトの立案と推進する姿を想像する貴重な経験となった。次の世代においては、本企画で発表した本さきがけ研究領域の研究者が CREST 実施者の立場で日本のコンピューティング分野をリードしていることを願う。
- **「革コン」×「量子」さきがけ合同セミナー(領域間連携)** : さきがけ研究領域である「革新的な量子情報処理技術基盤の創出(量子情報処理)」と連携し、合同でのセミナーを開催した。量子情報処理の研究領域総括(北海道大学 富田章久教授)と議論を重ね、「コンピューティング」という共通キーワードのもと、異分野連携に向け領域の垣根を越えて交流し、領域間の融合・新たな研究アイデアの探索・共同研究立案をはかる一つの仕掛けとして実施した。発表は全て福岡会場での対面形式(オンラインでの参加も可能)とし、量子情報処理領域からは3名(谷本研究者、御手洗研究者、山崎研究者)が、革新的コンピューティング技術の開拓領域からは1期生5名(高前田研究者、伊藤研究者、大久保研究者、山本研究者、三浦研究者)が登壇した。異分野であるにもかかわらず、コンピュータアーキテクチャ、機械学習、物理/数理アプローチ、など、様々な観点から活発な議論が交わされ、質の高い、かつ、異分野融合による新領域の創成を期待させる極めて有意義なイベントであった。分野の垣根を容易に跳び越えて(もしくは、殆ど垣根を意識することなく)知的好奇心や技術探究心に基づき議論する両研究領域の研究者を目の当たりにして大きな感銘を受けると同時に、日本の若手研究者のポテンシャルの高さを確信した。
- **物理とコンピューティングの勉強会(領域内異分野連携)** : 本研究領域は、その設計思想に基づき幅広い分野から新進気鋭な若手研究者を採用した。すなわち、極めて

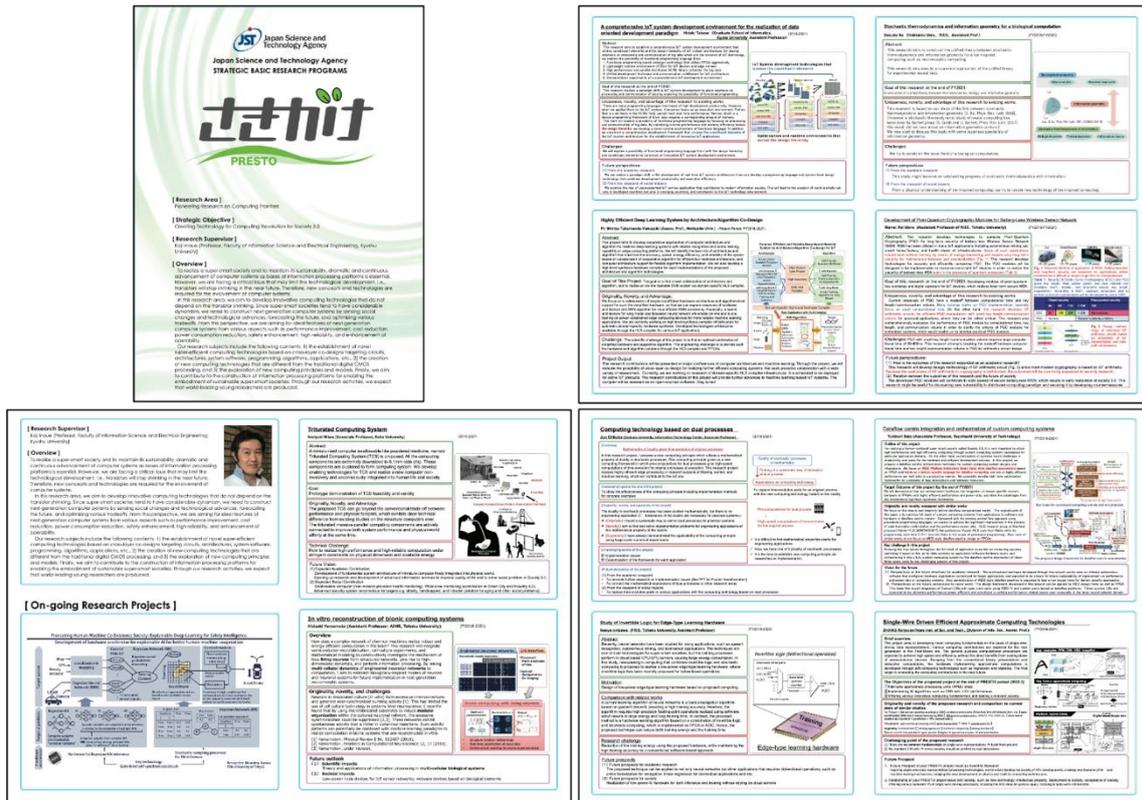


図 5-1 MICRO で配布した研究領域／内容紹介パンフレット

多様性のある研究分野で構成された領域であることが一つの大きな特徴である。このような環境をさらに研究者が利活用すべく、分野を超えたコミュニティ造りを推奨し続けた。その結果、本研究領域の研究者（伊藤研究者）が中心となり「物理学とコンピュータサイエンスのインタラクション」を目的としたグループが設立された。これには、本研究領域の研究者のみならず、他大学の教員や学生なども参加している。米国では、数年前から物理学者と計算機科学者が新しい物理に基づく次世代コンピューティングに関する記事を共同で執筆するなどの動きが出ている。本活動はまさにこれに匹敵する（かつ、若手研究者という観点からは世界をリードしているといっても過言ではない）ものである。

- IEEE/ACM MICRO 2018 でのさきがけ研究ブース展示（国際連携）：コンピュータアーキテクチャ分野において最も古い歴史を有する IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO) が 2018 年に福岡にて開催された。これは、本会議における半世紀の歴史において初めての日本開催であり、コンピューティング技術に関する世界トップレベルの研究者が一堂に会するものである（2018 年は本研究領域総括が組織委員長）。そこで、図 5-1 に示すように本研究領域の研究者（1 期生）の研究内容を紹介する英語版パンフレットを作成し、さらには、ブース展示により世界に発信した。世界的研究者と交流を深める絶好の機会であり、さきがけ研究者が世界へと大きく羽ばたく一助になったことを願う。

(3) 研究費配分上の工夫

各研究者の研究計画書にもとづき毎年度初めに予算承認を行うことを基本として、研究進捗や研究環境変化に伴う研究費見直しを定期的に行った。特に研究費増額に関わる支援を下記に示す。なお、JSTによる増額としては「国際強化支援」「スタートアップ支援(所属機関異動支援)」などがある。

- **総括裁量経費**：研究の進捗やインパクトなどを勘案し、各研究者に希望を募り、最終的には以下のように執行した。

表 5-1 総括裁量経費執行一覧

| 年度 | 対象者 |
|--------|--|
| 2020 年 | 1 期生 (栗野研究者 (665 万円)、三浦研究者 (1400 万円))、2 期生 (高橋研究者 (500 万円)) |
| 2021 年 | 2 期生 (砂田研究者 (102 万円)、高橋研究者 (400 万円)、西原研究者 (150 万円))、 3 期生 (金澤研究者 (160 万円)、鹿野研究者 (150 万円)) |
| 2023 年 | 3 期生 (Wahib 研究者 (350 万円)、鹿野研究者 (300 万円)) |
| 合計 | 4,177 万円 |

- **国際強化支援**：国際強化支援は、海外の研究機関や研究者等のポテンシャルを活用して研究を加速・推進すること、研究成果を広く世界に発信し戦略的創造研究推進事業の国際的認知度を高めること、また若手研究者の人材育成を行うことなどを目的に実施されている。各研究者が行う海外研究者の招聘や研究者の海外派遣等に係る費用を支援した。本研究領域においては、その対象となった研究者が年に 2 名程度いたものの、特にコロナ禍の影響により実施不可能となった場合が多くあった。最終的には、領域最終年度 (2023 年度) の 3 期生のみ海外研究者の招聘 1 件 (鹿野研究者)、研究者派遣 1 件 (Hong 研究者) が実施された。
- **スタートアップ支援**：研究者の独立を促し、能力をより一層伸ばすことを目的に、研究者の異動に伴う研究室の立ち上げ等に必要環境整備費用の追加支援 (スタートアップ支援) を実施した。本研究領域では延べ 13 名の研究者が対象となった。

表 5-2 スタートアップ支援対象者一覧

| 年度 | 対象者 |
|--------|---|
| 2020 年 | 1 期生 (栗野研究者、三浦研究者、山本研究者)、2 期生 (坂田研究者、西原研究者) |

| | |
|-------|--|
| 2021年 | 2期生（坂本研究者、陳研究者、松井研究者）、3期生（塩見研究者、鹿野研究者、Hong研究者） |
| 2022年 | 3期生（Wahib研究者） |
| 2023年 | 3期生（鹿野研究者） |
| 合計 | 延べ13名 |

(4) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況（キャリアアップ、国内外の顕彰・受賞や、国際会議での招待講演の状況）

本研究領域での活動を通して、多くの研究者がキャリアアップを実現した。ここでは2023年12月現在での状況のみ報告するが、実際にはすでに新組織への（昇任となる）着任が決まっているケースもある。本さきがけ研究で得た財産を糧にして、海外も見据えたさらなるキャリアアップを期待する。

- **研究者の昇任・異動状況**：昇任・異動した研究者は研究期間終了直後も含めると26名と総数（29名）のほぼ9割となっており、本研究領域の研究者に対する評価は極めて高いことがうかがえる。

表 5-3 採択時から現在までのキャリアアップ・異動状況（所属・役職）

| | 研究者名 | 採択時 | 終了時 | 2023年12月現在 |
|-----|--------|--------------|-------------|------------|
| 1期生 | 粟野 皓光 | 東京大学・助教 | 京都大学・准教授 | |
| | 伊藤 創祐 | 北海道大学・助教 | 東京大学・講師 | 東京大学・准教授 |
| | 大久保 潤 | 埼玉大学・准教授 | 同左 | 埼玉大学・教授 |
| | 鬼沢 直哉 | 東北大学・助教 | 東北大学・准教授 | |
| | 張 任遠 | 奈良先端大・助教 | 奈良先端大・准教授 | |
| | 高瀬 英希 | 京都大学・助教 | 東京大学・准教授 | |
| | 三浦 典之 | 神戸大学・准教授 | 大阪大学・教授 | |
| | 山本 英明 | 東北大学・助教 | 東北大学・准教授 | |
| | 高前田 伸也 | 北海道大学・准教授 | 東京大学・准教授 | |
| 2期生 | 鯉渕 道紘 | 国立情報学研究所・准教授 | 国立情報学研究所・教授 | |
| | 坂田 綾香 | 統計数理研究所・助教 | 統計数理研究所・准教授 | |
| | 坂本 龍一 | 東京大学・助教 | 東京工業大学・准教授 | |
| | 砂田 哲 | 金沢大学・准教授 | 金沢大学・教授 | |
| | 孫 鶴鳴 | 早稲田大学・次席研究員 | 同左 | 横浜国大・准教授 |

| | | | | |
|-------------|---------------|------------|-----------------------|----------|
| | 高橋 綱己 | 九州大学・特任准教授 | さきがけ研究者 東京大学・特任准教授 | 東京大学・准教授 |
| | 陳 オリビア | 横浜国大・特任助教 | 東京都市大学・准教授 | |
| | 西原 禎文 | 広島大学・准教授 | 広島大学・教授 | |
| | 松井 鉄平 | 東京大学・講師 | 岡山大学・准教授 | 同志社大学・教授 |
| 3 期 生 | 入江 英嗣 | 東京大学・准教授 | 東京大学・教授 | |
| | 金澤 輝代士 | 筑波大学・助教 | 京都大学・准教授 | |
| | 塩見 準 | 京都大学・助教 | 大阪大学・准教授 | |
| | 鹿野 豊 | 慶応大学・特任准教授 | 筑波大学・教授 | |
| | Tran Thi・Hong | 奈良先端大学・助教 | 大阪公立大学・講師 | |
| | 深谷 猛 | 北海道大学・助教 | 北海道大学・准教授 | |
| | 増田 豊 | 名古屋大学・助教 | 名古屋大学・准教授 | |
| | Mohamed Wahib | 産総研・主任研究員 | 理研・チームリーダー | |

- **顕彰状況**：主な受賞だけでも 30 件を超えており、科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞（鬼沢研究者、高前田研究者）や日本学士院学術奨励賞（鯉淵研究者）の受賞など、本研究領域の研究者が第三者からも高く評価されていることが分かる。

表 5-4 研究者の主な受賞履歴(筆頭著者でないものは除く)

：1 期生/2 期生は研究終了時まで、3 期生は 2023 年 12 月時点まで

| | 研究者名 | 賞の名称 | 授与者名 | 受賞時期 |
|--|-------|--|------------------------------------|------------|
| 1 期 生 | 伊藤 創祐 | 東京大学卓越研究員 | 東京大学 | 2020/11/19 |
| | 鬼沢 直哉 | 科学技術分野の文部 科学大臣表彰・若手 科学者賞 | 文部科学省 | 2020/04/07 |
| | 張 任遠 | Best paper award run-up, IEEE SOCC2020 | IEEE Int. System-on- Chip Conf. | 2020/09/08 |
| | 高瀬 英希 | 1st place of FPT' 18 FPGA Design Competition | FPT' 18 | 2018/12/12 |
| 1st place of HEART2019 FPGA Design Competition | | HEART2019 | 2019/06/06 | |

| | | | | |
|-------------|--------|---|--------------------------------------|------------|
| | | ベストプロジェクト賞 シルバー | 第 21 回組込みシステム技術に関するワークショップ (SWEST21) | 2019/09/06 |
| | | Outstanding Paper Award | APRIS2019 | 2019/11/04 |
| | | 3rd place of FPT' 19 FPGA Design Competition | FPT' 19 | 2019/12/11 |
| | | ベストポスター賞 シルバー | 第 22 回組込みシステム技術に関するワークショップ (SWEST22) | 2020/08/20 |
| | 高前田 伸也 | 科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞 | 文部科学省 | 2023/4/7 |
| | 三浦 典之 | 平成 30 年度 丸文研究奨励賞 | 丸文財団 | 2019/03/06 |
| | | 神戸大学優秀若手研究者賞・学長賞 | 神戸大学 | 2020/01/16 |
| | | IEEE Solid-State Circuits Society Distinguished Lecturer | IEEE Solid-State Circuits Society | 2023/01/01 |
| | 山本 英明 | 日本表面真空学会学術講演会 講演奨励賞 | 日本表面真空学会 | 2020/02/12 |
| 2 期 生 | 鯉渕 道紘 | 日本学術振興会賞 | 日本学術振興会 | |
| | | 日本学士院学術奨励賞 | 日本学士院 | |
| | 孫 鶴鳴 | Picture Coding Symposium Grand Challenge on Short Video Coding Silver Award, Dual Learning-based Video Coding with Inception Dense Blocks | Picture Coding Symposium | |
| 高柳健次郎財団研究奨励 | | 高柳健次郎財団 | | 2020/01/20 |

| | | | | |
|-----|-----------|--|---|------------|
| | | IEEE VCIP Best Paper Award | IEEE VCIP | 2020/12/04 |
| | | PCS Top 10 Best Paper Award | IEEE PCS | 2021/07/02 |
| | | 安藤博記念学術奨励賞 | 安藤研究所 | 2022/06/25 |
| | | IEEE CAS Society Japan Joint Chapter Best Presentation Award | IEEE CAS Society Japan Joint Chapter | 2022/11/28 |
| | | 優秀発表賞 | SLDM 研究会 | 2022/11/30 |
| | | Best Demo Award | IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing | 2022/12/15 |
| | 西原 禎文 | ひろしまベンチャー育成賞（個人）金賞 | 公益財団法人ひろしまベンチャー育成基金 | 2019/12/11 |
| | | 学長表彰 | 広島大学 | 2021/11/06 |
| | | 村川・難波技術奨励賞 | 社団法人山陽技術振興会 | 2022/05/01 |
| | | 衛藤細矢記念賞 | 公益財団法人双葉電子記念財団 | 2022/07/01 |
| 3期生 | 金澤 輝代士 | Best Presentation Award | 7th workshop on Complexity in Economics and Finance | 2022/10/19 |
| | Bian Song | IEEE Services Hackathon Top Winning Award | IEEE Services | 2020/12/24 |
| | 深谷 猛 | PDCAT2022 Best Paper Award | PDCAT2022 | 2022/12/08 |

- 国際会議での招待講演：国際会議での招待講演（66件）の実績について以下に示す。
1期生／2期生は研究終了時まで、3期生は2023年12月時点まで。各研究者それぞれの分野において国際的に活躍していることが見て取れる。また、半導体関係国際会議にてバイオコンピューティングの講演を行う（山本研究者）など、分野を横断した形での招待講演も見られ、本研究領域が狙った「分野を超えた革新的コンピューティング技術の探索」という観点でも高く評価できる。

i) 1 期生

伊藤創祐研究者

- 「Information geometry, several variants of thermodynamic uncertainty relations, and speed limits」 CSH Online Workshop “Stochastic thermodynamics of complex systems”、2020 年 5 月
- 「The projection theorem in information geometry and the entropy production」 RIGOROUS STATISTICAL MECHANICS AND RELATED TOPICS II、2020 年 11 月
- 「Information geometry, thermodynamics, and biochemical information processing」 MINDS-MoNET-ISE Workshop Information, Network & Topological Data Analysis、2021 年 12 月

鬼沢直哉研究者

- 「Stochastic Computing for Brainware LSI」 The 2019 RIKEN International Workshop on Neuromorphic Computing、2019 年 3 月
- 「Stochastic Computing for Brainware LSI」 26th IEEE International Symposium on Asynchronous Circuits and Systems, Special Session、2019 年 5 月
- 「Stochastic-Computing Based Brainware LSI Towards an Intelligence Edge」 Proc. 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits & Systems (ICECS) 2019、2019 年 11 月
- 「Stochastic Computing for Brainware LSI」 2019 International Workshop on Emerging Technologies for Brainware LSI and Its Applications、2019 年 12 月

佐藤幸紀研究者

- 「Computer Systems Performance Engineering from Dynamic Binary Optimization to MISD-style Dataflow Hardware」 CANDAR'18 (The Sixth International Symposium on Computing and Networking)、2018 年 11 月

張 任遠研究者

- 「Elastic neural network on-chip」 International Symposium on Brain Functions and Brain Computer、2020 年 2 月

高瀬英希研究者

- 「ROS and mROS: How to accelerate the development of robot systems and integrate embedded devices」 24th Asia and South Pacific Design Automation Conference、2019 年 1 月
- 「mROS: How to Integrate ROS Components into Embedded Devices」 the

19th International Forum on Embedded MPSoC and Multicore (MPSoC' 19)、
2019年7月

- 「Cockatrice: A Hardware Design Environment with Elixir」 ElixirConf
US 2019、2019年8月
- 「An Evaluation of Real-Time Performance for Nerves」 Nerves in Action
Web Series、2020年10月
- 「Towards a hardware synthesis environment from the functional
language Elixir」 26th Asia and South Pacific Design Automation
Conference、2021年1月

高前田伸也研究者

- 「Architecture/Algorithm Co-design for Highly-Efficient Machine
Learning Processing」 Embedded Machine Learning Workshop (EML 2018)
(collocated with FPT' 18)、2018年12月
- 「Model/Architecture Co-design for Accurate Binary Neural Network」
19th International Forum on MPSoC for Software-defined Hardware
(MPSoC 2019)、2019年7月

三浦典之研究者

- 「Emerging Computing Systems Utilizing Electro-Magnetic Near-Field
Connectivity」 2022 IEEE International Symposium on Radio-Frequency
Integration Technology (RFIT)、2022年8月

山本英明研究者

- 「Surface micropatterning techniques for reconstituting functional
neuronal networks in culture」 Pacific Rim Symposium on Surfaces,
Coatings & Interfaces (PacSurf 2018)、2018年12月
- 「Engineering neuronal network functions in culture using
microfabricated surfaces」 KTH Royal Institute of Technology: CST
Seminar、2019年3月
- 「Engineering the structure and function of neuronal networks in vitro」
7th China-Japan Symposium on Nanomedicine、2019年5月
- 「Ultrasoft silicone gel as a biomimetic culture scaffold for cortical
neurons」 13th International Symposium on Nanomedicine (ISNM 2019)、
2019年12月
- 「Designing functional neuronal networks with living cells」 Asia South
Pacific Design Automation Conference (ASPDAC 2021)、2021年1月
- 「Ultrasoft silicone elastomer as a biomimetic scaffold for neuronal
cultures」 European Materials Research Society (E-MRS) 2021 Spring

Meeting、2021年6月

- 「Ultrasoft polydimethylsiloxane as a biomimetic scaffold for neuronal cultures」 8th Japan-China Nanomedicine Meeting、2021年6月
- 「 Tuning synchrony in living neuronal networks through neuroengineering」 DynamicsDays 2021、2021年8月
- 「Polydimethylsiloxane microfluidic films for in vitro engineering of mesoscale neuronal networks」 14th International Symposium on Nanomedicine (ISNM 2021)、2021年11月
- 「Artificial reconstitution of neuronal network functions with living cells」 The 3rd International Symposium on Neuromorphic AI Hardware、2022年3月

ii) 2期生

鯉渕道紘研究者

- 「Graph Golf Competition Seeking for Small-Diameter Graphs」 23th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (APDCM)、2021年5月

坂田綾香研究者

- 「Active pooling design in group testing based on Bayesian posterior prediction」 ISM-Bristol Joint Seminar、2020年9月
- 「Decision Theoretic Cutoff and ROC Analysis for Bayesian Optimal Group Testing」 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence、2023年3月
- 「Exploring the Intersection of Physics, Information Science, Statistics, and Biophysics: My Research Journey」 Bristol Women's day、2023年3月

砂田哲研究者

- 「Physical deep learning based on dynamical systems」 IEEE Nanotechnology council, TC-16 Quantum Neuromorphic and Unconventional Computing、2021年6月
- 「Neuro-inspired photonic computing based on multimode waveguides」 The 12th International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2021)、2021年7月
- 「Progress in neuro-inspired photonic computing」 JSAP-OSA Joint Symposia 2021、2021年9月
- 「Photonic neural field dynamics and deep learning」 International

Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (ISPALD 2021)、2021年11月

- 「Scalable neuro-inspired photonic computing on a silicon chip」 The 6th International Workshop on Optical Microcavities and their Applications 2022 (WOMA 2022)、2022年2月

孫 鶴鳴研究者

- 「Deep Pedestrian Density Estimation for Smart City Monitoring」 IEEE International Conference on Image Processing、2021年9月

西原禎文研究者

- 「Development and application of Single-Molecule Electret (SME) based on polyoxometalate」 70th Conference of Japan Society of Coordination Chemistry、2020年9月
- 「Molecular Electronics Device Based on Supramolecular Chemistry」 BITS Pilani-Hiroshima University Joint Workshop 2022、2022年11月

iii) 3期生

金澤輝代士研究者

- 「Kinetic theory for financial Brownian motion: a microscopic model based on forex data analysis and its mean-field theory」 APS March Meeting 2021、2021年3月
- 「Lévy flight in active matter from its microscopic dynamics」 2021 NCTS Physics in Complex Systems Workshop、2021年10月
- 「Quantitative verification of the order splitting hypothesis & the LMF model for persistent order flow」 CFM informal workshop、2023年4月
- 「Asymptotic solutions to non-Markovian stochastic processes: nonlinear Hawkes processes and beyond」 East Asia Joint Seminars On Statistical Physics 2023、2023年10月
- 「Microscopic data analysis for financial market microstructure: a quantitative test of a microscopic econophysics model for the long memory in market-order flows」 Challenges in Data Science: a Complex Systems Perspective International Workshop & School DASC 2023、2023年11月
- 「Statistical-physics theory of the long memory in market-order flows and its empirical validation in the Tokyo Stock Exchange」 DPG Spring Meetings 2024、2024年3月

鹿野豊研究者

- 「Real-time in-vivo thermometry on worms by nitrogen-vacancy center in nanodiamond」 OIST Mini-symposium QSense、2021年2月
- 「Quantum Nanodiamond Thermometry for Biological System」 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT 21) 20 July、2021年7月
- 「Quantum Computer Health Check via Quantum Random Number Generation」 Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT 22)、2022年8月
- 「Weak-value imaging via quantum-classical correspondence」 40th Samahang Pisika ng Pilipinas (Physics Society of the Philippines) Physics Conference、2022年10月
- 「Three-particles Aharonov-Bohm Effect」 Yakir Aharonov 90th Anniversary Conference at Chapman University、2023年8月
- 「Quantum computer health check via quantum random number generation」 10th Jagna Workshop “Uncovering Patterns in the Time Series and Sequence data of Natural and Social Phenomena”、2024年1月
- 「Quantum computer health check via quantum random number generation」 4th International Conference “Quantum Foundations to Quantum Technologies 2024” (QFQT 24)、2024年3月

Tran Thi·Hong 研究者

- 「High Performance Blockchain Accelerator (BCA) for Society 5.0」 MOBI Innovation Lecture series、2021年3月
- 「Blockchain consensus: Proof of Work (PoW) and Proof of Stake (PoS)」 Vietnam Blockchain Innovation Webinar、2021年6月
- 「Substrate and Polkadot's Consensus」 Vietnam Blockchain Innovation Webinar、2021年12月

深谷猛研究者

- 「Exploring the Potential of Low Precision Computing in the GMRES(m) Method」 International Workshop on the Integration of (Simulation + Data + Learning): Towards Society 5.0 by h3-Open-BDEC、2021年11月

Mohamed Wahib 研究者

- 「Challenges for Scaling Deep Learning」 ML-HPC 21 Workshop、2020年11月
- 「Challenges of Scaling Deep Learning on HPC Systems」 ETH Zurich SPCL BCast、2022年5月
- 「The First Exascale Supercomputer Accelerating AI-for-Science and

Beyond] HPCI Consortium' 22, 5th consortium symposium, 2022 年 10 月

- 「How Could High-Performance Computing Help in High-Performance Imaging Applications」 Electronic Imaging' 23, 2023 年 2 月
 - 「An Exascale Supercomputer Accelerating AI for Science and Beyond」 Virginia Tech' 23, Invited Talk at CS department, 2023 年 3 月
 - 「Scaling AI-for-Science on Exascale Supercomputers」 Cloud Week' 23, 2023 年 8 月
 - 「High Performance Imaging Applications: At the Intersection of HPC and AI」 Electronic Imaging' 24, 2024 年 2 月
 - 「AI for Science: An Update on Research Activities from RIKEN-CCS」 ADAC' 24 Workshop, 2024 年 2 月
 - 「Challenges of Scaling Deep Learning on HPC Systems」 SIAM Conference on Parallel Processing (SIAM PP' 24), 2024 年 3 月
 - 「Scaling Large Scale ML Workloads」 SOS-26 2024, 2024 年 3 月
- **競争的資金獲得状況**：さきがけ研究実施中、または、期間終了後に、これまでの研究成果を発展させ、領域研究者と連携するなどして新たな資金を獲得した主なものを以下に示す（2023 年 12 月時点）。特に、高前田研究者が代表を務める CREST「信頼される AI」領域でのプロジェクトはさきがけ最終年度での採択である。これは、本さきがけ研究領域の同世代研究者との連携により新たな方向性を見いだしたものであり、高く評価できる。また、前述した「物理とコンピューティングの勉強会（領域内異分野連携）」を起点とし、高前田研究者が代表となり新たなコンピューティング技術の探索に関する提案が科学研究費補助金・基盤研究 A に採択された点は特筆すべき成果である。加えて、JST 創発的研究支援事業に 2 件（大久保研究者、陳研究者）採択されるなど、確実にステップアップしていることが見て取れる。なお、以下のリストにおいて研究分担者に関しては本研究領域からの参加者のみを記している。
 - JST 関連
 - CREST「D3-AI：多様性と環境変化に寄り添う分散機械学習基盤の創出」、信頼される AI 領域、代表：高前田研究者、主たる分担：高瀬研究者、坂田研究者
 - 創発的研究支援事業「方程式と双対性でつなぐ革新的データ処理技術の創出」、代表：大久保研究者
 - 創発的研究支援事業「高性能非ノイマン型超伝導 SoC の開発」、代表：陳研究者

- 先端国際共同研究推進事業 (ASPIRE) 「ダイヤモンド量子情報技術の基盤構築」、代表：鹿野研究者
- さきがけ「極低温 CMOS コンピューティング技術の開拓」、情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム領域、代表：栗野研究者
- さきがけ「単分子誘電体ストレージクラスメモリの開発」、情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム領域、代表：西原研究者
- さきがけ「確率的推論によるデータ取得とデータ解析の包括的最適化」、計測・解析プロセス革新のための基盤の構築領域、坂田研究者
- 科学研究費補助金
 - 基盤研究 A：「ゆらぎの熱力学に基づく確率的コンピューティング基盤の創出」、代表：高前田研究者、分担：伊藤研究者、金澤研究者
 - 学術変革領域研究 (A) 「フォトニックコンピューティング」、分担：砂田研究者、鯉渕研究者、公募研究参加者：大久保研究者、塩見研究者
 - 学術変革領域研究 (B) 「脳神経マルチセルラバイオコンピューティング」、代表：山本研究者、分担：松井研究者
- **書籍・総説等の執筆、出版**：以下に示すように、本研究領域の研究者により種々の書籍や総説、学会誌、解説記事などの出版物の成果があり、それぞれの分野に対して積極的に情報発信を行った。特に、大久保研究者による書籍の執筆 (単著) は学術的観点からも高く評価できる。

i) 1 期生

大久保研究者

- 「確率的シミュレーション」、森北出版、発行：2023. 12

伊藤研究者

- 「物理学と情報幾何学 - ゆらぐ系の熱力学の視点から」、数理科学 2020 年 11 月号
- 「化学反応ネットワーク上の化学熱力学と情報幾何学」、生体の科学 Vol. 72 No. 3-2021

鬼沢研究者

- 「Stochastic Computing: Techniques and Applications」、Chap. 9、発行：2019. 2

高瀬研究者

- 「2050 年の情報処理：1. 組込みシステムはどこへ向かうか?」、情報処理学会情報処理 2020 年 5 月号
- 「IoT 向きモダン言語 Elixir の研究」(連載)、Interface、2020 年 6~12 月号、

2021年1月号

山本研究者

- 「百科瞭覧 VOL. 2 若手研究者が挑む学際フロンティア」、ナノテクで神経細胞の回路を作る（第6章）

ii) 2期生

砂田研究者

- 「次世代高速通信に対応する光回路実装」、デバイス開発（技術情報協会）
- 「光の複雑系に情報処理を担わせる—リザバーコンピューティングとその実装を中心に—」、レーザー学会誌 48巻5号
- 「光の並列計算とニューラルネットワークプロセッサ」、光技術コンタクト Vol. 59, No. 11
- 「光リザバー計算回路の新展開」、フォトニクスニュース 第8巻第1号
- 「新奇の光ニューロチップでAI加速：大規模・超高速の光ニューラルネット型計算回路」、光学 51巻6号
- 「光リザバー計算チップ：新奇の光ニューラルネット回路でAI処理を加速」、光アライアンス Vol. 33(7)

iii) 3期生

金澤研究者

- 「物理における非マルコフ過程——場の理論を用いたホークス過程の解法」、日本物理学会誌 76巻（2021）6号
- 「生命現象における拡散現象 レヴィ・フライトのマイクロ理論」、生体の科学 72巻3号

(5) その他マネジメントに関する特記事項

その他のマネジメントに関しては、ライフイベントへの対応や JST 知的財産マネジメント推進部（知財部）からの支援を実施した。

- **ライフイベントへの対応（研究期間中断）**：一名の研究者がライフイベントによる研究期間の中断・延長制度を利用した。当該研究者は異動昇進直後であったために学内業務の中断は困難な状況にあり、育児にかかる時間を確保するためさきがけ研究を一時中断することとなった。
- **JST 知財部からの支援活動**：JST 知財部と連携し知財サポートを実施した。具体的には領域会議等には知財担当者が参加、すべての研究課題を把握してもらい、特許出願の可能性のある課題に関しては研究者との個別相談の機会を設けた。1件に関しては、当初 JST からの出願について相談を始めたが、大学から出願が可能であると

わかったために、知財調査のみのサポートを受けることとなった。

6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

本研究領域では、戦略目標の達成に向けて多様な研究課題を採択し、研究者それぞれが取り組んだ。特に、「自らの野望に向けて山をつくる」というスローガンのもと、それぞれが独創的かつ挑戦的な研究課題に対して果敢に挑戦し、極めてレベルの高い研究成果を挙げ、世界への発信へと繋がった。本事後評価時点（1期生/2期生は研究終了時まで、3期生は2023年12月時点まで）において、本研究領域全体では、査読付き国際論文191件、査読付き国内論文25件、国際招待講演66件、国内招待講演77件、国際特許出願3件、国内特許申請12件、メディア掲載やプレスリリース23件であった。特徴的な点としては以下が挙げられる。

- **多様な分野における研究成果の創出と発信**：本研究領域の最大の特徴は、革新的コンピューティング技術を開拓するという旗のもと、様々な分野から若手研究者を募った点にある。その結果、広域にわたる分野において高いレベルでの研究成果が創出された。例えば、エレクトロニクス系ではIEEE Transaction on Circuits and Systems / Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems / Information Security and Forensics / Information Theory / Computers / Applied Superconductivity / Circuits and Systems for Video Technology / Image Processing / Multimedia / Parallel Distributed Systems や ACM Transactions on Architecture and Code Optimization / Embedded Computing Systems など、物理数学系ではPhysical Review Letters / X / Research / Applied や Journal of Statistical Mechanics / Physics など、サイエンス系ではNature や Science Advances など、光系ではOptica / Optics Express など、化学系ではACS Sensors / Applied Electronic Materials など、バイオ系ではAdvanced Biosystems など、である。
- **コンピューティング分野トップレベル国際会議でのプレゼンス向上**：本研究領域立ち上げ時において、特に、コンピューティング系や半導体系のトップレベル国際会議でのプレゼンス向上を意識した。これは、これらの分野において、ここ20年来、日本からの発表件数の減少が極めて深刻な問題になっていることに起因する。特に、コンピュータアーキテクチャの分野では数年に1件発表があるか無いか、という状況が長年続いており、これを打破する必要があった。結果として、本研究領域での研究者により、半導体分野におけるISSCC(2件)、アーキテクチャ分野におけるMICRO(2件：1件はベストペーパー候補に選出、1件は研究期間終了後)、高性能計算分

野における SC (3 件)、設計技術分野における DAC (2 件) や ICCAD (2 件 : 1 件は研究期間終了後)、セキュリティ分野における USENIX Security Symposium (1 件 : 研究期間終了後) といったトップレベル国際会議で多数の成果を発表するに至り、我が国のコンピューティング分野にとって極めて大きな前進となった。

上記に加え、現在は研究途上ではあるものの、将来大きな成果に繋がる見込みがあるものも多数あがっており、戦略目標の達成および科学技術イノベーション創出に対して以下のように大きく貢献した。

- **達成目標 1 情報処理を質的に大転換させる新たなコンピューティング技術の創出** : 伊藤研究者、大久保研究者、鬼沢研究者、張研究者、三浦研究者、山本研究者、砂田研究者、高橋研究者、西原研究者、松井研究者、塩見研究者、鹿野研究者、常木研究者らによる新原理コンピューティングの探索により、ポストムーア時代を支える様々な新しい方向性が見いだされており、今後のさらなる展開が期待される。
- **達成目標 2 アルゴリズム、アーキテクチャ等の技術レイヤーを連携・協調させた高効率コンピューティング技術の開発** : 栗野研究者、上野研究者、佐藤研究者、高瀬研究者、高前田研究者、鯉渕研究者、坂田研究者、坂本研究者、孫研究者、陳研究者、入江研究者、金澤研究者、Hong 研究者、深谷研究者、増田研究者、Wahib 研究者らによるシステム階層縦横断型研究を通して、より実用レベルに近い領域での革新的コンピューティング技術が創成された。企業での製品化に繋がった事例も出ており、今後はさらに大きな流れとして拡大することを望む。

実際には、各研究者の成果は上記の双方に関係する場合が殆どであり、新原理探索といった基礎研究から実応用を見据えたシステム研究の両面に対して大きなインパクトを与えている。これらの中でも、特に優れた研究成果を挙げた研究課題について具体的な内容と今後の見通しを記載する。

達成目標 1 : 情報処理を質的に大転換させる新たなコンピューティング技術の創出

- 三浦研究者「Triturated Computing System (粉末コンピューティングシステム)」

物理環境との親和性を極限まで高めた 0.1mm 角級の極小チップ群で情報処理を実現する「粉末コンピューティングシステム (Triturated Computing System: TCS)」の概念を提唱し、新技術の開発とチップ試作に基づく実現可能性の実証に挑戦した極めて独創的な研究である。現代のコンピュータシステムの在り方を抜本から変える革新的アプローチであり、現状ではコンピュータシステムを設置できない様々な環境へのコ

ンピューティング展開を可能にする極めて重要な成果である。また、極小の半導体チップを無線通信により相互接続し、様々なコンピュータシステムを構成する発想は、半導体／集積回路分野においても新展開をもたらすものであり、学術的・産業的インパクトは極めて大きい。本研究で展開された、回路技術、アーキテクチャ技術、アルゴリズム技術の融合的アプローチは、まさに本研究領域が目指す分野横断型研究の具現化そのものであり、研究成果のみならず、確立した研究プロセスそのものも特筆すべき成果である。加えて、さきがけ期間中に「胎動回路」という TCS の拡張概念を新たに創出し、コンピューティングシステムの新しい可能性を見せてくれた。本研究では半導体製造時のプラズマをエネルギー源とする新コンピューティング技術を開発したが、その本質は環境中に別目的として存在するエネルギーをコンピューティングに利活用する点にあり、様々な応用展開が期待できる。これらの成果は、半導体集積回路分野における世界最高峰カンファレンスに採択されており、未来のイノベーションが期待される技術として世界的インパクトをもたらした。このように、さきがけ研究を通して目覚ましい飛躍を成し遂げたことは明らかであり、高く評価できる。今後は TCS の第一人者として、また、日本の半導体／コンピューティング分野をリードする研究者として、更なる世界的活躍を期待する。

- 大久保研究者「双対過程に基づくコンピューティングの展開」

確率過程の双対性の数理に基づく新しいコンピューティング技術（特に、事前計算に基づく高効率コンピューティング）を開拓する独創的かつ挑戦的な研究である。双対過程の初等的方法による系統的導出方法の発見と、それにより可能となった双対過程の自動導出コード開発は、提案する新原理計算法を普及させるための礎であり、新しい数理の工学的利用という観点からも極めて重要な成果である。また、組合せ論とレゾルベントを利用した数値計算アルゴリズムの提案により、事前計算コストの大幅削減と適用範囲の拡大に成功しており、これは学術的・産業的に大きなインパクトを持つ。加えて、数理的基盤を構築するのみならず、フィルタリング、制御、機械学習といった応用への適用可能性も示しており、今後の更なる応用展開が期待される。本さきがけ領域内でも活発に意見交換や交流を進め、数学的・物理的知識を基本とし、その上でアーキテクチャやハードウェア分野へも視点を向けたコンピューティング技術の俯瞰的議論は新原理コンピューティングを開拓する上で必要不可欠であり、本研究はまさにこれを実践した価値あるものである。加えて、さきがけ交流会を通じて知り合った他領域研究者との連携を進め、学会発表にまで発展させたことも特筆すべき点である。本さきがけ研究開始直後に大きな技術的課題に直面した際にも、持ち前の数学的センスにより克服し、その結果としてさらに新しい方向性を見いだした。これは、技術的側面のみならず、研究者自身にとっても大きな飛躍となったものとする。これらの成果を起点と

し、JST 創発的研究支援事業に採択されており、引き続き、双対性に基づく新コンピューティング技術の第一人者として世界をリードすることを期待する。

- 伊藤研究者「情報幾何と熱力学による生体コンピューティング理論」

生体コンピューティング／熱力学的コンピューティングの理論構築を目標とした、極めて独創的かつ野心的な研究である。情報熱力学法則の情報幾何学的な取り扱い、生化学的なコンピューティングにおける熱力学的不確定性関係の解明、生化学的な実験データの情報熱力学的な解析の実現、といった研究を着実に遂行し、多くのトップジャーナルでの掲載や2つの書籍など高い学術的成果をあげた。また、国際イベントにおいて多数の招待講演を行うなど、世界レベルで研究者の知名度が高まっており、本さきがけ研究を通して大きく飛躍したことが見て取れる。また、理論物理的アプローチにより、情報処理における消費エネルギー、性能、精度のトレードオフの解明に挑戦し多くの成果を得ている。これらは、将来の生体／熱力学的コンピューティングの礎となるのみならず、電気電子を基本とした現代コンピュータシステムの更なる最適設計への貢献も期待できる。例えば、最適輸送理論に基づく必要最小エネルギーの理論的解明などは、今後の省エネルギー指向コンピュータシステムの設計に極めて有用である。また、自身は理論物理を専門としつつ、コンピュータサイエンスを専門とするさきがけ領域の研究者、他領域の研究者、博士後期課程の学生などを巻き込み、新しい省エネルギーコンピューティングを探索する活動をはじめた点を高く評価したい。分野を横断した若手研究者による連携は次のブレークスルーの源泉であり、このような流れをさらに拡大させてほしい。生体コンピューティング／熱力学的コンピューティングは世界的にも注目を集めつつある方向性の一つであり、引き続き、本分野を世界にさきがけてリードすることを期待する。

- 山本研究者「バイオニック情報処理システムの人工再構成」

神経回路網の機能をボトムアップ的に解析・解明し、人工神経細胞を用いたバイオニック情報処理の実現を目指す独創的かつ挑戦的な研究である。まず、モジュール構造型培養神経回路を作製する独自技術を開発し、細胞間の同期特性を制御するにはモジュール構造設計が鍵となることを発見した点は高く評価できる。また、神経細胞の活動パターンをコンピューティングへと応用すべく、人工神経細胞回路に対する摂動解析を行うための実験系を構築し、これをマイクロ加工基板上で培養した培養神経回路のパターン分類特性を解析する実験系へと発展させた。そして、実際の培養細胞を用いた音声認識情報処理の概念実証に成功するとともに、人工神経細胞のモジュール性や細胞間の同期性が分類性能に与える影響を見いだしている。これらの結果は、バイオニッ

ク情報処理の実現にむけた基礎研究を大きく前進させたものであり、非常に価値ある研究成果である。加えて、学術論文の発表のみならず、多くの国際会議での招待講演など、当該分野における世界レベルでの貢献は大きい。人工神経細胞を用いたバイオニック情報処理の大きな可能性を見せてくれた研究であった。今後、自然環境負荷の低減を目的とした情報処理など、バイオニック情報処理への期待は大きくなると予想される。その一方、解決すべき課題はまだ多く、基礎研究を着実に進めるとともに、将来的な実応用に向けた取組みも必要となるであろう。本さきがけ研究の成果を起点とし、当さきがけ領域の他研究者との連携により学術変革領域研究(B)に代表として採択されるなど、すでに次のステップへと前進しており、今後の更なる飛躍を期待する。

- 砂田研究者「光波動コンピューティングの展開」

光波動を用いた新コンピューティング原理を探求するものであり、極めて挑戦的かつ独創的な取組みである。まず、本研究では光ニューラルフィールドという概念を提唱し、光デバイスを用いた新コンピューティング原理の検証に成功している。その上で、シリコンチップ・デバイスの試作を行い、高速・省電力光リザバー計算回路として具現化した。これは、光の仮想ニューロンを微小領域に高密度かつ大規模に実装できるものであり、最先端光回路や電子回路と比較して圧倒的な高速性と省エネルギー性を達成できるものである。本成果は、光学系ハイインパクトジャーナルにも掲載されており、日本光学会より「2021年度 日本の工学研究」として選出されている。また、多数のメディアなどでも紹介され、極めて大きなインパクトをもたらした研究成果であると高く評価できる。加えて、光リザバー計算をコアとしつつ、光コンピューティングの究極系とも言える「光情報入力に対する光直接情報処理」を目指し、高速イメージ認識システムへと研究のスコープを発展させた。このような新しい取組みにおいて、アイデア創出から技術開発、実証までを完了しており、本さきがけ研究スタート時の想定を大きく上回るすばらしい成果である。光デバイス分野を専門とする当研究者が、本さきがけ研究を通してシステムレベルへとスコープを拡大できた点は、自身の大きな飛躍に繋がっている。論文発表、プレスリリース、特許出願などの外部発信も積極的に行っており、光コンピューティングの新たな可能性を見せてくれた研究であった。他さきがけ研究者とも連携した学術変革領域研究(A)の計画研究班の研究代表者として活動を広げるなど、すでに次のステップへと前進しており、今後の更なる飛躍を期待する。

達成目標 2：アルゴリズム、アーキテクチャ等の技術レイヤーを連携・協調させた高効率コンピューティング技術の開発

- 高前田研究者「アーキテクチャとアルゴリズムの協調による高効率深層学習システ

ムの創出」

エネルギー制約のあるエッジコンピューティングで高速かつ安心・安全な認識・判断処理を行う深層学習システムの実現に向け、ハードウェアアーキテクチャとアルゴリズムの協調により高精度化、高速化、高電力効率化、高信頼化のための技術開発を目的とした研究である。特に、二値ニューラルネットワークは低消費電力化に有効であるが、推論精度が低くなる点が課題となっている。本研究において、アーキテクチャ視点とアルゴリズム視点の双方からのアプローチにより新しいアイデアを創出し、精度改善を実現した点は高く評価でき、本コミュニティに対するインパクトは極めて大きい。また、信頼性を考慮するためのベイジアンニューラルネットワークを対象とした研究においても従来とは一線を画す方式を提案しており、今後のさらなる展開が期待できる。加えて、学習済みモデルからハードウェアアクセラレータのハードウェア記述を自動生成するドメイン特化高位合成コンパイラは、企業との共同研究へと発展し実製品開発で利用されており、これは社会実装の観点からも特筆すべき成果である。2件の特許、著名国際会議でのベストペーパー選出、国内外での招待講演、JST CREST 研究代表者としての採択（当さがけ領域の同期生も主たる分担として参加）など、学術面・産業応用面の双方で確実な成果を挙げるとともに、世界的研究者へと確実に飛躍している。コンピュータアーキテクチャの分野においてアルゴリズム領域との連携は重要であり、これらの協調設計・協調最適化の効果と有効性を実践的に見せてくれた研究であった。次世代 AI コンピューティングのリーダー的存在として今後の更なる活躍に期待したい。

- 陳研究者「アルゴリズム・ソフトウェア・ハードウェアの融合による超低電力ニューラルネットワークの構築」

超伝導断熱磁束量子パラメトロン (Adiabatic Quantum Flux Parametron: AQFP) を対象とし、ハードウェア、ソフトウェア、アルゴリズム、といったシステム階層を横断しつつ、設計自動化技術にも踏み込んだ独創的かつ挑戦的な研究である。従来の超伝導回路技術においては、その殆どが演算器レベルでの実証に留まっていたが、本研究はAI処理をターゲットとしてシステムレベルへと昇華させ、新しい超伝導コンピューティングの方向性を示した。特に、超伝導素子の確率的な動作特性に着眼し、それに適したコンピューティングモデルを定め、回路、アーキテクチャ、アルゴリズムに至るまでを最適化した点は、世界的にもユニークなアプローチであり、高く評価できる。回路と設計技術を専門としていた当研究者が、アーキテクチャやシステムにまでスコープを拡大できたのは本研究を通して大きく飛躍した証である。また、シミュレーションに留まらずチップ試作により実現可能性を示しており、将来の高性能コンピュータシステム

開発における一つの選択肢を示した価値ある内容である。超伝導回路はタイミング設計や種々の最適化をほぼ人出に頼っているのが実状であるため、本さきがけ研究で構築した設計自動化技術と各種のツールは、本分野に対する極めて大きな貢献となるであろう。現在、超伝導量子コンピュータの研究開発が世界中で進められているが、それにともない、極低温環境下における超低消費電力古典情報処理（例えば、誤り訂正など）の実現はより重要となる。本さきがけ研究が創出した成果は、このような応用にも展開可能であり、今後の更なる飛躍を期待したい。

- 入江研究者「ユーザに寄り添うオンデマンド近似計算基盤の開拓」

常に正しい計算を行うという従来型コンピューティングモデルとは異なり、ユーザが要求する計算結果の質に基づき、あえて計算精度の低下を許容することで飛躍的なコンピューティング性能の向上や低消費電力化を目指す近似計算技術の創成を目的とした研究である。特に、近似計算の実現を支援する新しいプロセッサ命令を導入し、その実行を効率化するマイクロアーキテクチャを考案した。ソフトウェアの繰り返し実行という特性に着目し、実行時（動的）に近似度をコンピュータ自らが判断・最適化可能な処理基盤の構築を目指した研究は世界的にも珍しく、極めて独創的な挑戦であった。また、コンピュータ構成法の基礎となる命令セットアーキテクチャ（ハードウェア／ソフトウェア・インタフェース）を近似計算向けに再設計し、効率的な実行のために新しいマイクロアーキテクチャを考案するとともに、実 LSI チップとして実装しデモンストレーションまで完成させた点は、本研究が目指すユーザ主体型の新コンピューティング法の実用化に大きく前進した点として高く評価できる。さらに、スケーラビリティを向上させる命令セットアーキテクチャ研究へと発展させ、その成果がコンピュータアーキテクチャ分野におけるトップレベル国際会議 MICRO に採択され、ベストペーパー候補として選出（日本からの論文が候補として選出されるは本学会の 50 年以上の歴史において初だと思われる）された点は極めて大きなインパクトを与えた。命令セットというコンピュータ構成法の基礎に立ち返った上で、動的近似計算という新しい実行法を探求し、LSI チップとして実証した、まさにコンピュータアーキテクチャ研究の魅力と醍醐味を再認識させてくれた研究であった。今後、次世代アーキテクチャ研究を牽引する世界的リーダーとしてさらに大きく飛躍することを期待している。

- Wahib 研究者「ムーアの法則を超えた並列プログラミング」

高性能計算機システムを対象とし、システムの様々な構成要素（アクセラレータ、メモリ、ネットワーク、ストレージ、など）での分散実行を可能にする「Autonomous (distributed) Execution 法」を提案し、プログラミングモデル、コンパイラ、ランタ

システム、コストモデルなどを構築し、実アプリケーションを対象にその有効性を示した極めて有効かつ実践的な研究である。現代の大規模コンピュータシステムの性能や消費電力はデータ移動（例えば、CPU から GPU へのデータ移動など）が極めて深刻なボトルネックとなっている。この抜本的かつ本質的な問題に対し、システム構成要素のそれぞれにおいて、できるだけローカルに計算を実施し、かつ、それを可能な限りプログラマから隠蔽する、新しい実行フレームワークを構築した。そして、ハイパフォーマンスコンピューティング分野で対象となる科学技術計算に加え、近年注目を集めている大規模言語モデルも対象としたアプリケーションへの適用評価を実施し、提案方式の有効性を明らかにしている。まさに本研究領域の目標の一つであった「システム階層の縦横断により新たなコンピューティング技術を開拓する」という挑戦に対して、直接的かつ実用的な解を導き出した完成度の高い研究であった。ハイパフォーマンスコンピューティングのみならず、機械学習など複数分野におけるトップカンファレンスでの成果発表を多数行っており、高く評価できる。現時点でも適用アプリケーションを拡大し続けており、日本発のヘテロジニアス大規模コンピュータシステム向け実行基盤として広く普及することが期待される。ハイパフォーマンスコンピューティングは日本が世界に誇れる重要技術分野の一つであることは間違いなく、ハードウェアからアプリケーションまでを俯瞰した次世代のリーダー的存在としてさらに成長することを期待したい。

- 金澤研究者「確率過程の縮約理論を用いた社会シミュレータの高速化」

デジタルツイン時代の到来を鑑みた場合、大量のマイクロデータに基づき、社会現象のモデル化と大規模シミュレーションにより様々な意思決定を行うという流れは今後爆発的に増えてくるであろう。このような状況において「社会現象の高速シミュレーションを如何に実現するか？」は極めて本質的かつ重要な技術課題である。本研究は、この課題に対する直接的な解を導き出す理論基盤を構築した。特に、確率過程の縮約理論を発展させ、エージェントベースモデルを高速シミュレーションすることを念頭に、①履歴依存性を有する非マルコフ過程を対象にした数理基盤の構築、②エージェントベースモデルにしばしば組み込まれる条件分岐を取り扱うための数理的枠組みの開発、③モデルケースとして金融市場・経済物理学分野での（ここ 18 年来未解決であった）重要な問題の解決、④高次元非マルコフ過程への縮約理論の拡張、に成功している。物理学や統計物理学の分野における世界的トップ誌にて多数発表しており、優れた研究成果を導きだした。また、③の内容に関してはアメリカ物理学会にて最上位クラスとしての扱いで特集記事が組まれており、世界的インパクトを与えた点は特筆すべき成果である。今後のデータ駆動型社会において、社会シミュレーションは極めて重要な技術トピックとして位置づけられることは間違いない。このような背景において、従来の

数学的枠組みだけでは対処できなかった状況の打破という極めて野心的な課題に取り組む、履歴依存性を有する非マルコフ過程を対象とした数学的基盤と解析手法を見事に導き出すという、極めて優れた成果を挙げている。革新的コンピューティング技術の開拓という研究領域の目標に対し、数理の観点から、社会課題の解決に直結する社会シミュレーションの高速化へと繋がる新技術の探求を見せてくれた研究であった。今後は、社会課題解決の観点から、数理・物理分野と計算機工学分野の融合をリードする研究者へと飛躍することを期待している。

7. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

本研究領域では、何よりも研究者個人が世界トップレベルの独創的な研究を自由闊達に推進できる（挑戦できる）場の提供を最大の使命と考え、これを実現するためのマネジメントを行った。特に、ポストムーア時代において必須となる（しかしながら、世界的にも未開拓領域である）システム階層縦横断型研究アプローチを念頭に、異分野間連携が加速する（そして、それが将来の新技術創成の種となる）ことを重視した。研究者に対しては、本研究領域が掲げる3つの心構え「さきがけは個人研究→自由闊達な研究をやるべし!」「さきがけは切磋琢磨できる場→大いに刺激を受けるべし!」「さきがけは世界への登竜門→大いに成長すべし!」を合い言葉とし、「目先の論文執筆にとらわれず、自分自身の野望を持ち、どのような山（成果、分野としての流れ、コミュニティ、など）をつくりたいのか?」を常に意識するようアドバイスした。実際、領域会議などにおいて、研究者はそれぞれが抱く野望を宣言し、最終的にはその実現に向け何を成し遂げたのか、どのような山をつくりあげたのか、を報告するに至った。本研究領域からは、様々な分野における世界トップレベルの国際会議／論文誌／雑誌にて多くの成果を発表するに至ったが、なによりも、革新的コンピューティング技術の開拓を目指した「29の山を築き上げたこと」が最大の成果である。今後、この29の山がさらに大きくなり、新たな山をつくりだす、ポストムーア時代を支えるコンピューティング技術の礎になると信じている。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

戦略目標である「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術の創出」では以下の2つの達成目標が設定されており、それぞれに対し十分に達成していると判断する。

- **達成目標1 情報処理を質的に大転換させる新たなコンピューティング技術の創出：**伊藤研究者、大久保研究者、鬼沢研究者、張研究者、三浦研究者、山本研究者、砂田研究者、高橋研究者、西原研究者、松井研究者、塩見研究者、鹿野研究者、常木研究者らによる新原理コンピューティングの探索により、ポストムーア時代を支え

る様々な新しい方向性が見いだされた。具体的には、新原理コンピューティング技術（伊藤研究者、大久保研究者、鬼沢研究者）、新シリコン集積回路技術（三浦研究者、張研究者）、バイオ／生体コンピューティング技術（山本研究者、松井研究者）、光コンピューティング技術（砂田研究者、塩見研究者）、分子／化学コンピューティング技術（高橋研究者、西原研究者）、量子情報処理技術（鹿野研究者）、スピンドバイス技術（常木研究者）など、ポストムーア時代を支える上で必須となるデバイス多様性を様々な観点から探索し、それぞれのポテンシャルを示すことで、今後のコンピューティング技術の開拓に十分値する成果を生み出すことができた。スタートアップの設立（西原研究者）や、研究期間終了後ではあるがBSテレビの科学番組で紹介（山本研究者）された成果もあり、今後の展開が大いに期待される。

- **達成目標 2 アルゴリズム、アーキテクチャ等の技術レイヤーを連携・協調させた高効率コンピューティング技術の開発**：栗野研究者、上野研究者、佐藤研究者、高瀬研究者、高前田研究者、鯉渕研究者、坂田研究者、坂本研究者、孫研究者、陳研究者、入江研究者、金澤研究者、Hong 研究者、深谷研究者、増田研究者、Wahib 研究者らによるシステム階層縦横断型研究を通して、より実用レベルに近い領域での革新的コンピューティング技術が創成された。具体的には、数理とアルゴリズム（坂田研究者）、アプリケーションと回路（栗野研究者、孫研究者、Hong 研究者）、アルゴリズムとアーキテクチャ（上野研究者、高前田研究者、鯉渕研究者、入江研究者）、システムソフトウェアとハードウェア（佐藤研究者、高瀬研究者、坂本研究者、深谷研究者、Wahib 研究者）、統計物理とシミュレーション（金澤研究者）、新コンピューティング原理を念頭においた設計技術（陳研究者、増田研究者）など、ポストムーア時代を支える次世代のコンピュータシステム構成法を様々な観点から探索し、それぞれのポテンシャルを示すことで、コンピューティング技術の開拓に十分値する成果を生み出すことができた。今後はさらに大きな流れとして拡大することを望む。

(3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性

本研究領域の立ち上げ以前と比較して、以下、2つの観点から本研究領域設定の意義を説明する。

- **コンピューティング技術分野における世界的プレゼンスの大幅な向上**：ここ 20 年来、コンピュータアーキテクチャや集積回路の分野における日本からの研究成果発表が減少しており、特に、コンピュータアーキテクチャ分野に至っては、世界トップレベルの国際会議（例えば、ISCA や MICRO など）において数年に 1 件発表があるか無いか、という状況であった。これに対し、本事後評価時点にて、本さきがけ研究領域の研究者から、MICRO' 23 で 2 件の発表（陳研究者、入江研究者）があり、う

ち1件はベストペーパー候補としてノミネートされている。また、集積回路分野でのトップ国際会議である ISSCC' 23 で2件（三浦研究者）、高性能コンピューティングに関するトップレベル国際会議である SC にてこの3年間で3件（Wahib 研究者）採択された。加えて、技術の普及やプラットフォーム化という観点から、成果物のソフトウェア一式を積極的に公開する活動も多くあり、世界的にも注目される実用レベルの高い完成度となっている（高瀬研究者、高前田研究者、Wahib 研究者）。本研究領域の設定により、コンピューティング分野が活性化し、日本の世界的プレゼンスが急速に高まってきていることは間違いない。

- **世界にさきがけた分野連携型新コンピューティング技術の開拓**：これまで、数学／物理／コンピュータサイエンス／生物／化学／バイオ／光学など、それぞれの分野に閉じたコミュニティ形成とそれに基づく研究活動がスタンダードであった。異分野連携の重要性がかねてから指摘されていたものの、いざ、それを実行することは容易ではない。分野の壁を越え、コミュニケーションをとることからスタートし、互いの本質を理解した上で、新たな方向性を探索する必要がある。本研究領域の設定により、まさに異分野連携型のコンピューティング技術の開拓を実践できたことは極めて大きな意義である。そして、コンピュータアーキテクチャ分野と物理分野における本研究領域の研究者により、新プロジェクトが立ち上がった（科学研究費補助金・基盤研究 A を獲得した）点は特筆すべき成果である。本事後評価資料作成時において、未だに分野間の壁は大きく、異分野連携はまだまだ発展途上にあるが、本研究領域での活動が一つのロールモデルとなり、今後加速することを期待する。

(4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題

ポストムーア時代では、半導体の微細化によるトランジスタ数の増加を拠り所とする「量的アプローチ」から、多様な特徴を有する新奇デバイスの創成・活用を拠り所とする「質的アプローチ」へのパラダイムシフトが必要である。そのためには、デバイスの新機能や新現象の発見、ならびに、その利点を最大化し欠点を顕在化させない革新的アーキテクチャやシステムの創成を同時に実現しなければならない。求められるのは、様々な新奇デバイスを生み出す「コンピューティングのためのデバイスサイエンス (Device Science: DS)」と「デバイス多様性を活用するコンピュータサイエンス (Computer Science: CS)」が密に連携した新しい潮流の形成である（ここでは CS に物理や数理に関する分野も含む）。この「次世代コンピューティング=DS×CS」に基づくコンピュータ構成法を探求することが、ポストムーア時代における有望な方向性であると考えられる。従来の「システム階層間インタフェース（や仕様）を固定し、その上で、双方が個別独立に最適化を図る垂直分業型アプローチ」は、トランジスタ集積度が堅実に向上するムーア時代において、インタフェースにて量的な変化しかないと有効であった。しかしながら、デバイス多様性の利活用が必須であるポストムーア時代では、この分業体制の限界は明らかであり、新たな学際的アプローチが必要となる。

そして、従来の垂直分業型アプローチでは克服できない制約を排除し、コンピュータ構成法の新たな局面を見いださなければならない。本研究領域は、まさに様々な分野における新進気鋭な若手研究者が集い、互いが切磋琢磨しつつ、「DS×CS」を実践してきたものである。当然ながら、異分野間連携は言葉で言うほど簡単なものではない。分野間に存在する用語・文化（物事を考える抽象度など）の違いや技術ギャップなどを理解し、本質的な議論をスタートできるまでにそれなりの時間を要する。しかしながら、この困難に挑んでこそ新たな科学技術イノベーションを生み出すことができるのである。今後、革新的コンピューティング技術を生み出し続けるためには、システム階層縦横断型研究の加速が極めて重要となる。多様なDS×CSサイクルが次々と生まれる場として、新融合領域コミュニティの形成とそのドライブが必要であり、本研究領域はその口火を切った活動である。今後、自然科学、環境学、社会科学へとコンピューティングが連携すべき分野はさらに広がるであろう。継続的なコンピューティング技術の開拓に向け、異分野融合のさらなる加速と積極的な投資が必要である。

(5) 所感

現代ならびに今後の情報社会において、「コンピューティング力」はまさに「国力そのもの」に匹敵する。新たなデジタル革命を引き起こすためには、それを可能にするコンピューティング能力が必須であり、持続可能な情報社会のインフラとなる。一方、コンピューティング分野はエンジニア色が強くとらわれがちであり、科学技術の探求という観点から真の価値を理解されにくい場面が多々ある。しかしながら、今やコンピューティング技術は、計算機科学のみならず、様々な分野における新原理の発見や新たなブレークスルーを支えていることは疑う余地がない。実際、近年各分野に浸透しつつある（かつ、社会においても爆発的な普及を見せている）種々のAIアプリケーションは、それらを高性能かつ低消費電力に実行できるコンピューティング基盤があってこそ利用できるものである。今後の持続可能な情報社会の発展を鑑みた場合、「コンピューティング力の継続的な強化と、それを可能にする不断の高度人材育成の必要性」は明らかである。残念ながら、この20年近く、日本におけるコンピューティング分野に対する研究投資は十分であったとは言いがたい。このような中、本研究領域が立ち上がり、様々な分野から新進気鋭な若手研究者が集い、極めて優れた研究成果を世界へ発信し、そして何よりも将来有望な若手研究者が育ったことは、日本の「コンピューティング力」を維持・拡大し続ける上で極めて重要であったと認識している。繰り返しになるが、コンピューティング技術の開拓は継続が必要である。社会が求めるアプリケーションが変われば、必要となるコンピューティング力が変わる。新たな材料・デバイス技術が発見されれば、適切なコンピューティング方式が変わる。求められる制約が変われば、コンピュータシステムのあるべき姿が変わる。このような変化を世界にさきがけて察知・予測し、最先端コンピューティング技術を開拓し続けなければならない。今後、本研究領域を卒業した研究者が世界の先頭を走り、未来を描く「野望」を持ち、新たな異分野融合

領域を立ち上げ、次世代の研究者達とさらに大きく新しい「山」を次々と作り続けることを期待する。

以上