

戦略的創造研究推進事業  
－CREST(チーム型研究)－

研究領域「Society5.0を支える革新的コン  
ピューティング技術」

研究領域中間評価用資料

研究総括：坂井 修一

2023年2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.....	3
3. 研究課題の選考について.....	4
4. 領域アドバイザーについて.....	6
5. 研究領域のマネジメントについて.....	8
6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について.....	19
7. 総合所見 .....	27

## 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

「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」(2018年度発足)

### (3) 研究総括

氏名 坂井 修一 (東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授・副学長)

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」

<https://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](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	研究代表者	所属・役職 (採択時 <sup>2</sup> )	研究課題	研究費 <sup>1</sup>
2018年度	近藤 正章	慶應義塾大学 理工学部・教授 (東京大学 大学院 情報理工学系研究 科・准教授)	エッジでの高効率なデータ解析 を実現するグラフ計算基盤	276
	鈴木 秀幸	大阪大学 大学院情報科学 研究科・教授	光ニューラルネットワークの時 空間ダイナミクスに基づく計算 基盤技術	267
	本村 真人	東京工業大学 科学技術創成研 究院・教授	学習/数理モデルに基づく時空 間展開型アーキテクチャの創出 と応用	304
2019年度	天野 英晴	慶應義塾大学 理工学部・教授	MEC 用マルチノード統合システ ムの開発	304
	井上 公	産業技術総合研 究所 電子光基 礎技術研究部門・ 上級主任研究員	スパイキングネットによるエッ ジでのリアルタイム学習基盤	320
	佐藤 茂雄	東北大学 電気 通信研究所・教授	スピンエッジコンピューティン グハードウェア基盤	337
	戸川 望	早稲田大学 理工学術院・教授	地理空間情報を自在に操るイジ ング計算機の新展開	310
	本間 尚文	東北大学 電気 通信研究所・教授	耐量子計算機性秘匿計算に基づ くセキュア情報処理基盤	334
				総研究費

<sup>1</sup>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(2022年11月30日現在)<sup>2</sup>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) 研究領域の位置づけ

我々の社会は、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した Society5.0（超スマート社会）へと向かっている。Society5.0 では、高度に情報化された遠隔医療システムやエネルギーネットワーク、自動化された産業システムなどが新しい社会インフラとなると考えられている。

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」では、こうした新しい社会を支えるため、高速処理、低消費電力化、低コスト化等による情報システム全体の高効率化に向けて、従来性能を圧倒的に凌駕する新たなコンピューティングの基盤技術の研究開発を推進することとし、以下の達成を目指した。

#### 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

##### 1.1) 新しい計算原理とその実現

##### 1.2) 安全・安心のための新原理とその実現

##### 1.3) センサからの多様かつ大量のデータを実時間処理するための基盤技術

#### 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

##### 2.1) 超スマート社会の基盤となる情報システム

##### 2.2) セキュリティ、ディペンダビリティとプライバシーを担保する情報システム

##### 2.3) IoT と人間社会を高度に結びつけるための実時間処理を行う情報システム

### (2) 本研究領域の位置づけに対するねらい

コンピューティングの領域は、最終的には、社会システムとしての結実が必須である。上記のそれぞれの分野でのイノベーションを果たすとともに、それがいかに Society5.0 の情報システムの中に組み込まれるかを研究者（特に研究代表者）が示すことが重要となる。

計算原理、デバイス、回路、アーキテクチャ、ソフトウェアの諸分野で最先端の研究者が参加することは当然として、それぞれの専門だけでなく、原理やデバイスの研究ではシステム実装を、システムの研究では近未来で基盤となる原理やデバイスを検討することを課すこととした。また、それぞれの研究のロードマップを、中間評価時点、CREST 終了時点、10年後、20年後と描くことによって、社会実装までの過程を示し、各課題の産業的・実社会的なインパクトを示すことを必須とした。

### 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

2で述べたねらいをさらに具体化して、研究課題の提案者に条件として課した。以下の通りである。

##### 1.1) 新しい計算原理とその実現

超スマート社会で有用となる新しい計算原理として、深層学習を含む人工知能、量子計算、光計算、ブレインモルフィック、ニューロモルフィックなどがあげられる。これらの分野で新しい有用な知見を示すことが条件となるが、さらに、コンピューティングとして実現するための回路・アーキテクチャ・ソフトウェアなど実装に向けた研究を含めることを課す。

##### 1.2) 安全・安心のための新原理とその実現

近未来のスーパーコンピュータや量子コンピュータによっても危殆化することのない暗号方式、ゼロデー攻撃や標的型攻撃を防止するアルゴリズム、著作権やプライバシーを守るためのアルゴリズム、高信頼化のための新しい冗長化や再構成方式などが課題として考えられる。これらにおいて、数理的な研究を中心にする場合でも、回路やアーキテクチャの研究を含み、実現可能性を示すことを課す。

##### 1.3) センサからの多様かつ大量のデータを実時間処理するための基盤技術

実時間性を保証する操作手順、センサ配置などの計画法などが課題として考えられる。これらにおいて、数理的な研究を中心にする場合でも、超小型コンピュータのアーキテクチャやOSのジョブスケジューラなどの研究を含み、スマート社会での実現性・有用性を示すことを課す。

##### 2.1) 超スマート社会の基盤となる情報システム

エッジまたはクラウドにおけるコンピュータアーキテクチャ、ソフトウェア、アルゴリズム、アプリケーションの研究開発が課題となる。特に、以下を高速・低消費電力・安全・安心に行うことが中心と考えられる。

- センサからの大量情報の実時間的な処理
- 深層学習を含む人工知能アプリケーション
- ロボットや自動車などの知的な実時間制御動作原理

アプローチとして、量子計算など新しい原理に基づくコンピュータアーキテクチャやソフトウェアによるものと、フォンノイマン型など計数型デジタルコンピュータの改良によるものが考えられる。後者による場合、ベンチマーク性能が単体で飛躍的な効率改善を行うか、実時間性や安全性や可用性の担保において従来達成できなかったことを可能にする

などの質的な飛躍をもたらすことを示すか、どちらかを必須として課す。

## 2.2) セキュリティ、ディペンダビリティとプライバシーを担保する情報システム

ゼロデー攻撃や標的型攻撃から情報インフラとユーザを守るアーキテクチャ、ソフトウェア、アルゴリズムの研究などが想定される。さらに具体的には、スマートセンサなど IoT デバイスからのビッグデータの信頼性の担保、メディアコンテンツなどの著作権保護、末端ユーザの個人情報とプライバシーの保護、発電所・工場・上下水道・交通システム・病院などの高信頼かつ安定した運用などがある。

## 2.3) IoT と人間社会を高度に結びつけるための実時間処理を行う情報システム

無数の IoT が人間社会に活用されるために、ビッグデータを実時間処理するコンピュータアーキテクチャとソフトウェアの研究である。スマートシティーなどの構成法や生産ラインの設計法などの研究を含めても良い。その場合でも、情報システムとしての新規性・有用性を必要条件として課す。

### 想定する研究の進め方

上記の 6 つのテーマ設定に沿った研究をすることになるが、ひとつのテーマに対してチームを作る場合と、複数のテーマに跨がる目標を立ててチームを作る場合が考えられる。どちらの場合であっても、情報システム（アーキテクチャや OS）の専門家をメンバーに加えることを必須とする。また、総括のアドバイスにしたがって、チーム間での意見交換や共同研究などをそれぞれの進捗に応じて行うこととする。

以上を踏まえて、選考した結果は、1. (4) の通りである。これを分野別に記すと、次の図のようになる。



図 3.1 研究課題のポートフォリオ

(2) 研究課題採択を通じ、戦略目標を達成する上で必要な研究課題、研究者の参加が適切に得られたか

採択された研究課題の代表および主たる共同研究者は、いずれも本邦トップの研究者であり、国際的評価も高い。2 で述べた位置づけにも合致し、視野も広く、本研究領域に適した選考結果と考えられる。戦略目標を達成する上で必要な研究課題、研究者の参加は、ほぼ適切に得られたと言ってよい。

少し残念だったのは、予算的な制約から、採択が望ましい課題が 1、2 件落選している点である。特にセキュリティ・ディペンダビリティ分野について、耐量子暗号だけでなく、人間系も含む安全・安心情報社会の研究が採択されていないのが悔やまれる。

(3) その他選考について

1 年目で特定課題調査課題になった 2 課題は、翌年に採用となった。両件ともに良好な進捗を示しており、この制度が有効活用された例になると考えられる。

#### 4. 領域アドバイザーについて

本研究領域は、研究対象が計算原理からソフトウェアまで広範囲に及ぶため、領域アドバイザーも、各分野トップの研究者・技術者を選ぶとともに、自分の専門ではない分野を積極

的に理解し応援できる心の広い人格者を選ぶことを心がけた。また、アカデミアと産業界、男性・女性（ジェンダー）のバランスにも配慮した人選となっている。具体的には以下の通り。

計算原理の研究者として、堀尾喜彦（東北大学、ブレインモルフィック）、谷誠一郎（NTT、量子コンピュータ、量子計算）。

デバイス・回路の専門家として、井上美智子（奈良先端科学技術大学院大学、ディペンダブル・テスト設計）、清水徹（東洋大学、LSI）。

アーキテクチャの専門家として、中川八穂子（日立製作所、計算機アーキテクチャ）、西直樹（理化学研究所、システムLSI）。

ソフトウェアの専門家として、千葉滋（東京大学、プログラミング言語）、住元真司（富士通(現 東京大学)、ソフトウェア、HPC システム）。

アプリケーションの専門家として、伏見信也（三菱電機、データベース・スマート社会）、山名早人（早稲田大学、ビッグデータ）。

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 <sup>1</sup> (現在の所属)	役職 (現在の役職)	任期
井上 美智子 (デバイス・回路)	奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科	教授	2018年6月 ～2025年3月
清水 徹 (デバイス・回路)	東洋大学 情報連携学部	教授	2018年6月 ～2025年3月
住元 真司 (ソフトウェア)	富士通株式会社 次世代 TC 開発本部 (東京大学 情報基盤センター)	シニアアーキテクト (特任教授)	2018年6月 ～2025年3月
谷 誠一郎 (計算原理)	日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所	特別研究員	2018年6月 ～2025年3月

千葉 滋 (ソフトウェア)	東京大学 大学院情報 理工学系研究科	教授	2018年6月 ～2025年3月
中川 八 穂子 (アーキテ クチャ)	株式会社日立製作所 研究開発グループデ ジタルテクノロジー イノベーションセン タ	シニアプロジェクトマ ネージャ	2018年6月 ～2025年3月
西 直樹 (アーキテ クチャ)	理化学研究所 イノ ベーション事業本部 企業共創部 (株式会社理研鼎業企業 共創部)	連携促進コーディネー ター (上級コーディネーター)	2018年6月 ～2025年3月
伏見 信 也 (アプリケ ーション)	三菱電機株式会社	顧問 (シニアアドバイザー)	2018年6月 ～2025年3月
堀尾 喜 彦 (計算原 理)	東北大学 電気通信研 究所	教授	2018年6月 ～2025年3月
山名 早 人 (アプリケ ーション)	早稲田大学 理工学術 院	教授	2018年6月 ～2025年3月

<sup>1</sup>着任後変更/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、それに基づく研究課題の指導

#### 1.1) 各課題のダイバーシティと運営管理

本研究領域は、研究対象のレイヤー（計算原理、デバイスからアプリまで）、実装場所（エッジからクラウドまで）、実用化時期（2030年から2050年）の3点に関して、大きなダイバーシティをもつ。各課題について、このことを整理し、本研究領域全体がどのような広が

りをもっているのかを具体的に示すところからマネジメントについての報告を始めたい。  
表 5.1 に、各課題の位置取りを示す。

表 5.1 研究領域「Society5.0 を支える革新的コンピューティング技術」の広がり

課題名	代表者	レイヤー	実装場所	実用化 時期
エッジでの高効率なデータ解析を実現するグラフ計算基盤	近藤 正章	アルゴリズム アーキテクチャ システムソフト アプリ	エッジ フォグ	現在 ～2030
光ニューラルネットワークの時空間ダイナミクスに基づく計算基盤技術	鈴木 秀幸	原理 デバイス	フォグ クラウド	2050
学習/数理モデルに基づく時空間展開型アーキテクチャの創出と応用	本村 真人	原理 デバイス アーキテクチャ アプリ	フォグ クラウド	2040
MEC 用マルチノード統合システムの開発	天野 英晴	アーキテクチャ システムソフト アプリ	エッジ フォグ	2030
スパイキングネットによるエッジでのリアルタイム学習基盤	井上 公	原理 デバイス アプリ	エッジ	2050
スピンエッジコンピューティングハードウェア基盤	佐藤 茂雄	原理 デバイス	エッジ	2040
地理空間情報を自在に操るイジング計算機の新展開	戸川 望	原理 アプリ	クラウド	2030
耐量子計算機性秘匿計算に基づくセキュア情報処理	本間 尚文	原理 アプリ	エッジ フォグ クラウド	2040

このようにダイバーシティの大きな領域に対して、統一された物差しで個々の課題を評価し、アドバイスすることは意味をなさない。総括と領域アドバイザーは、各課題がどのような貢献をするのか、個々の特性に合わせた評価を行い、それが「Society5.0 の情報処理基盤」という大テーマにいかに関与するかを図りながら、本研究領域を推進してきた。

## 1.2) ロードマップ

研究代表者には、実施期間中の研究計画だけでなく、各課題についてのロードマップ作成を課している。ロードマップは、課題の進捗とともに、将来の実社会展開までを描くように指示した。各チームには、このロードマップの中でマイルストーンとなる要素技術・システム技術を設定し、毎年その達成度をサイトビジットや領域会議のときに報告することで、総括・アドバイザーの評価を受け、研究の加速や改善、場合により統廃合を行ってもらおうこととしている（図 5.1～図 5.8）。

・近藤チーム

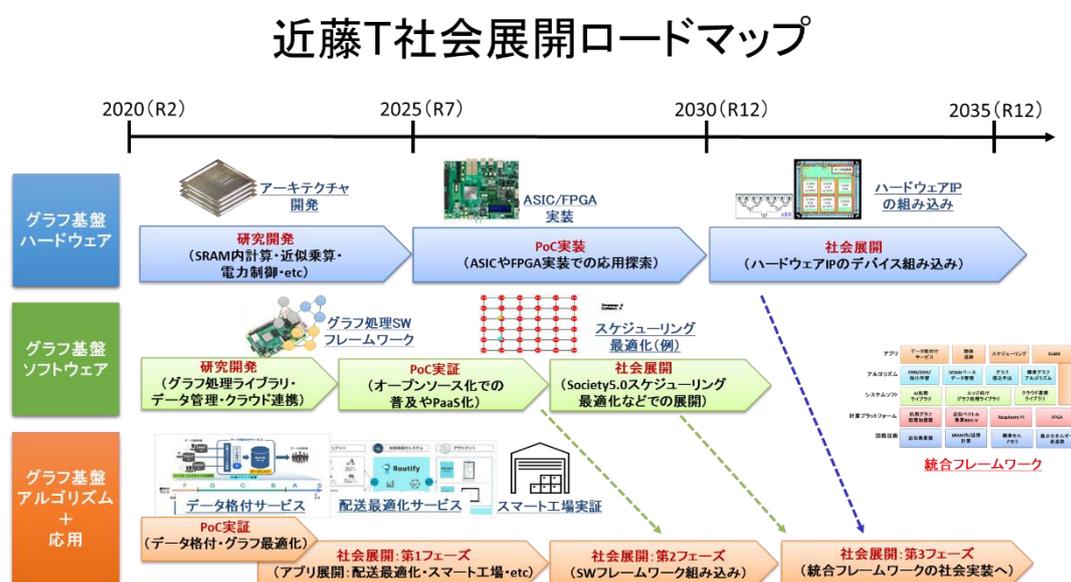


図 5.1 近藤チームのロードマップ

・鈴木チーム

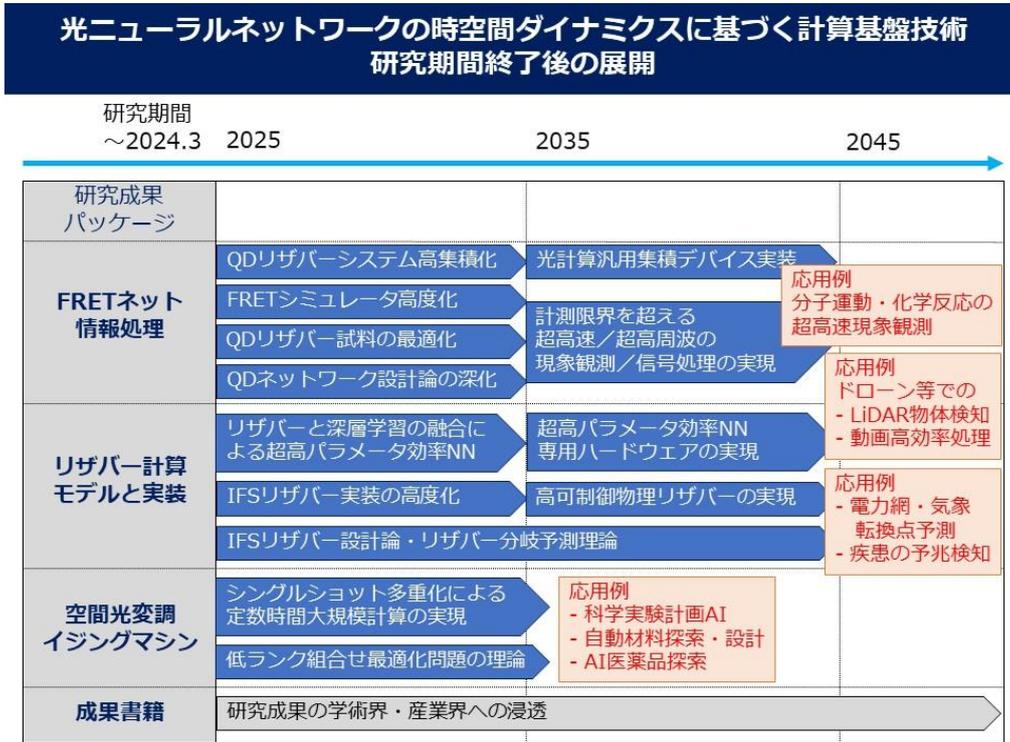


図 5.2 鈴木チームのロードマップ

・本村チーム

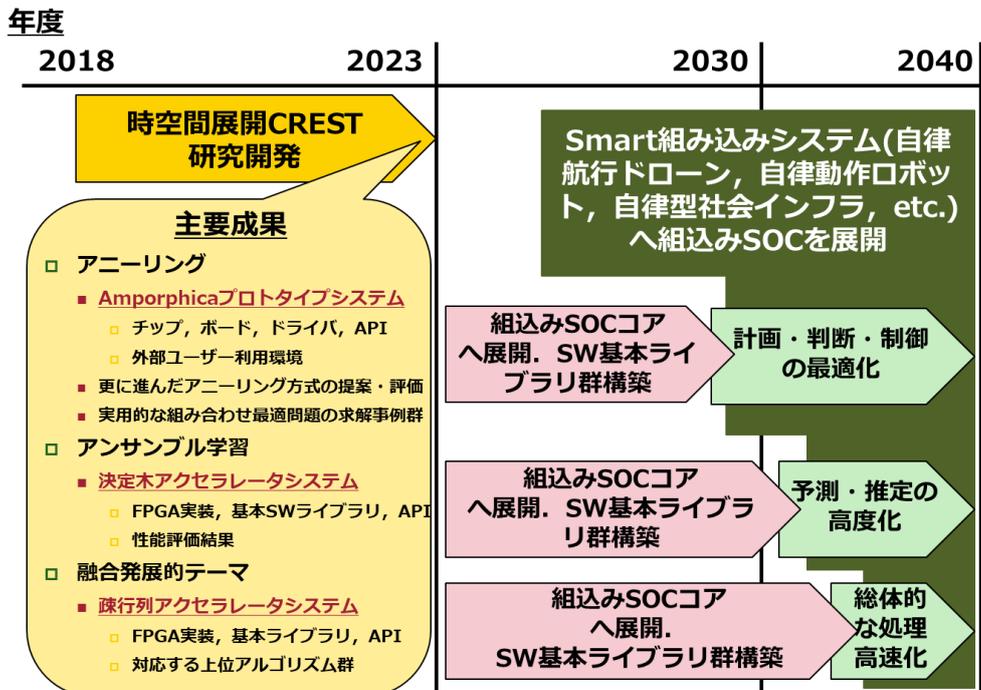


図 5.3 本村チームのロードマップ

・天野チーム

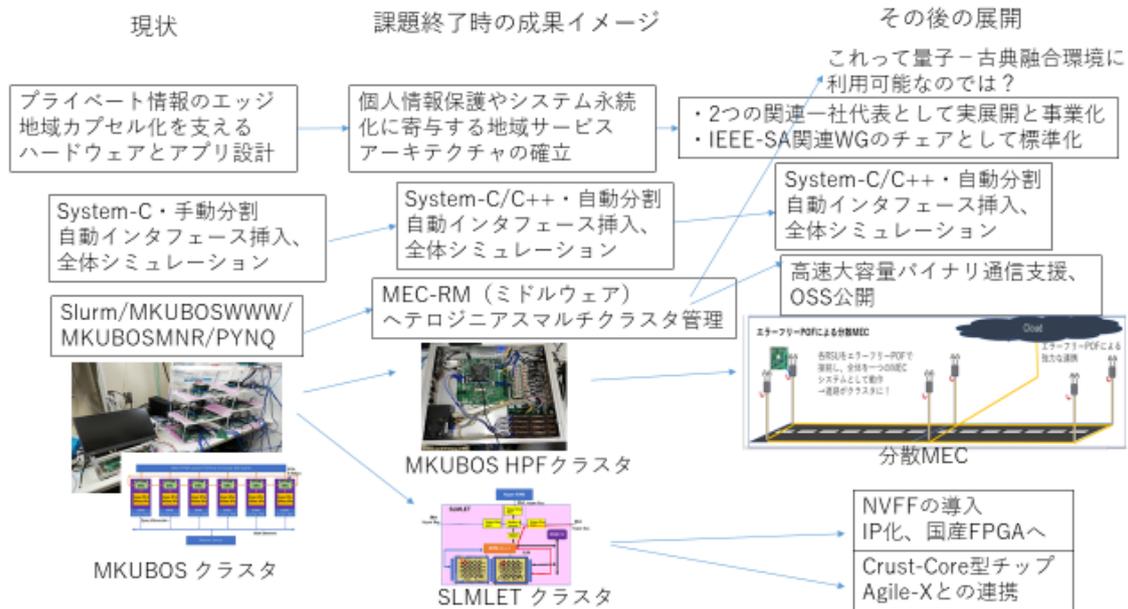


図 5.4 天野チームのロードマップ

・井上チーム

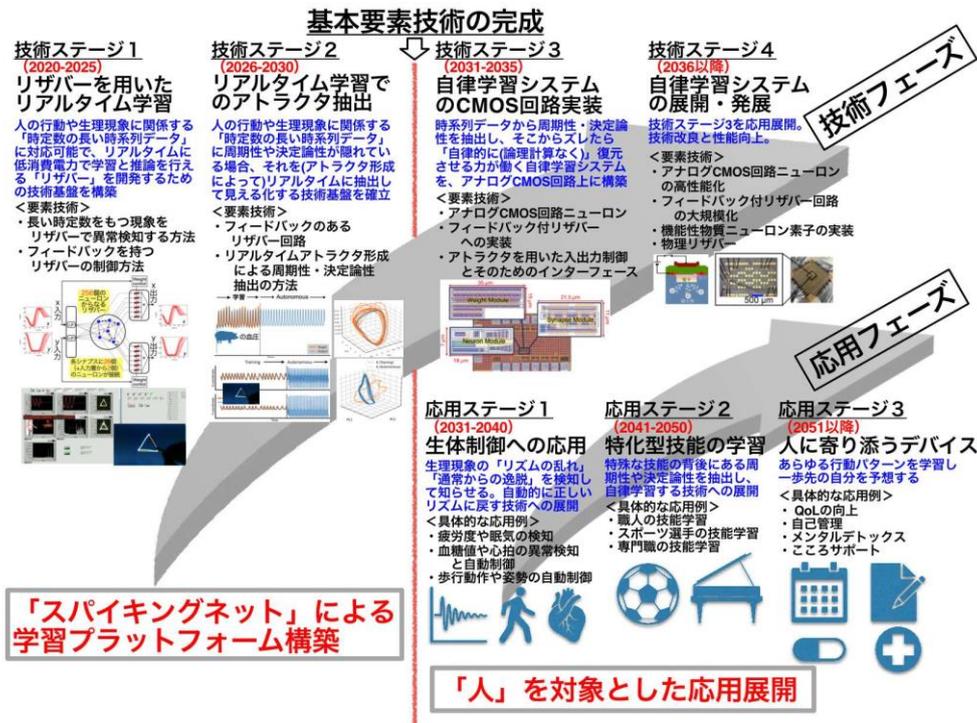


図 5.5 井上チームのロードマップ

・佐藤チーム

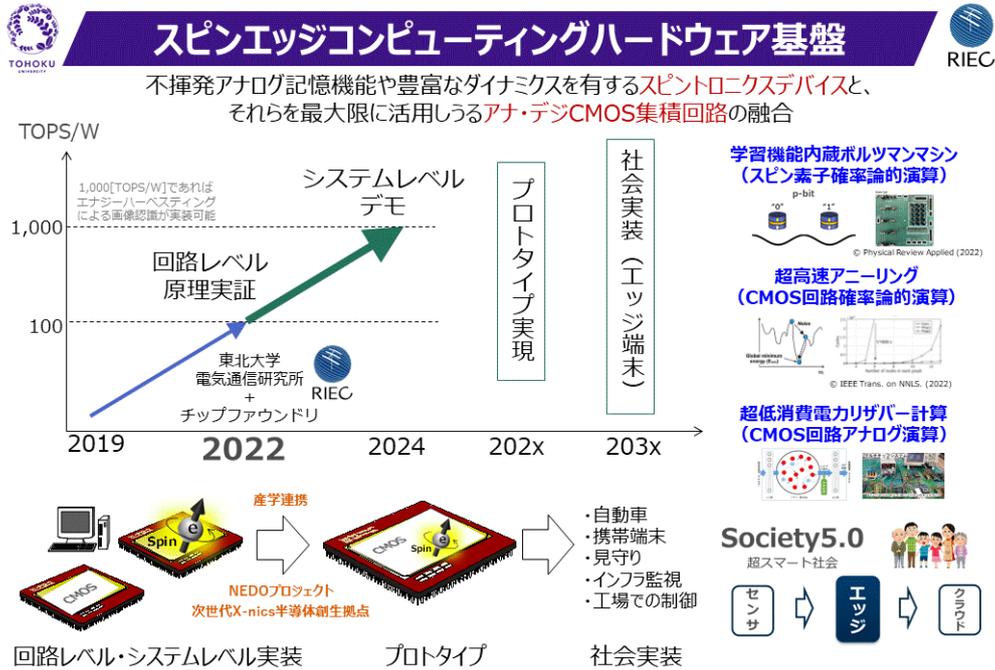
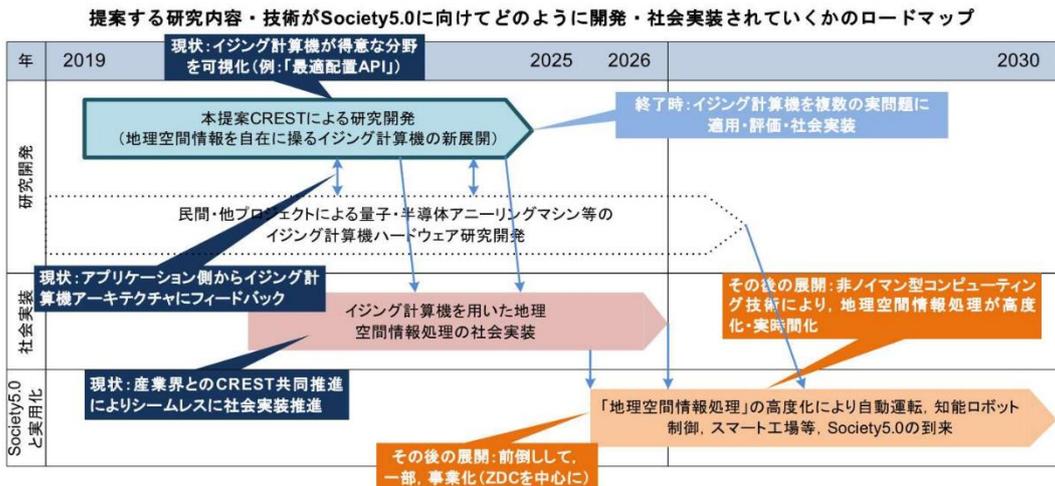


図 5.6 佐藤チームのロードマップ

・戸川チーム

現状，課題終了時の成果イメージ，その後の展開



本提案の強み

- 提案当初から，学（早稲田大学）と産（ゼンリンデータコム）が共同提案
- 社会実装実験のプラットフォームを持つ → シームレスに社会実装へ

図 5.7 戸川チームのロードマップ

・本間チーム

## 社会実装・実用化に向けたロードマップ

技術的な見通し

- 耐量子計算機暗号(PQC)システム: 2030年ころエッジ搭載拡大
- 秘匿コンピューティング: 研究開発段階, 203X年標準化

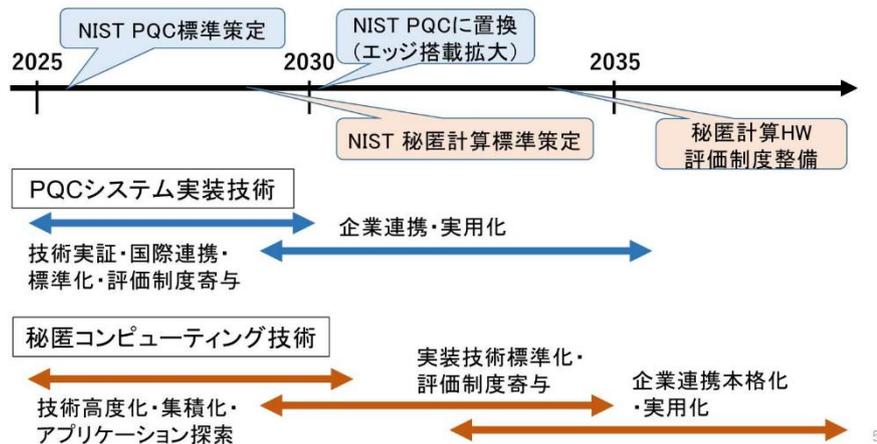


図 5.8 本間チームのロードマップ

### 1.3) サイトビジット

各チームについて、研究開始後 1 年目と 3 年目にサイトビジットを行っている。2019 年度はオンサイトで、2020 年度・2021 年度はコロナ禍のためにオンラインで、2022 年度はハイブリッドで行った。ハイブリッドのケースでも、総括は必ず数名の領域アドバイザーとともに現地に赴いている。これまでに合計 16 回のサイトビジットを行った。

サイトビジットでは、研究発表とともに、試作した LSI チップ、評価用ボードやテストベッドシステム、実験環境などを見るとともに、アプリケーションの稼働やロボットの動作などのデモンストレーションを見ることになる (図 5.9、図 5.10)。

オンラインでは、実験装置、試作品、ハードウェアのデモシステムなどを直に見ることはできない。そこで、チームによっては当該チームの研究課題に関わるラボの見学ツアーを動画で撮影してもらうなどして、研究環境から成果物までを決められた時間内に観察できるようにしてもらった。これは、主に半導体やロボットが関わる研究課題について行われた。

第 1 期の採択課題は 2019 年に、第 2 期の採択課題は 2022 年に、ともにオンサイト (ハイブリッド) でサイトビジットを実施しており、総括はじめ分野的に関係の深い領域アドバイザーは現場を検分している。第 1 期の成果を精査するためのサイトビジットは 2023 年度に行われる予定である。

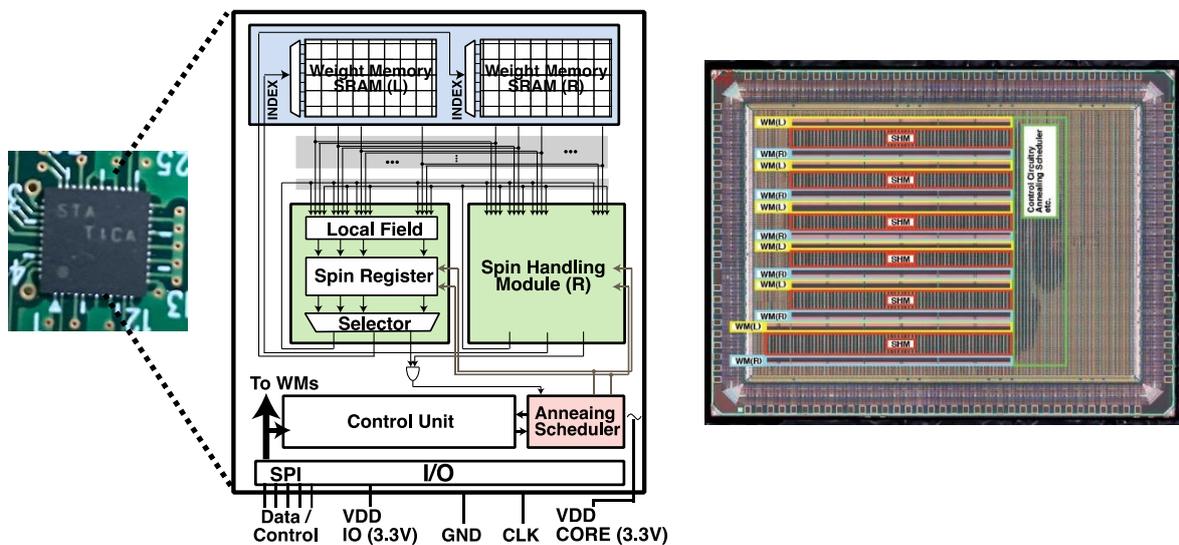


図 5.9 本村チームのサイトビジット (2020) : STATICA チップの展示



図 5.10 天野チームのサイトビジット (2022) : MKUBOS クラスターの展示

## (2) チーム型のネットワーク研究所としてのマネジメント

### 2.1) 領域会議

初年度である 2018 年度より毎年 10 月に領域会議を開催し、意見交換とアドバイスを行っている。2018 年、2019 年、2022 年は JST 本部にて対面で行い、2020 年、2021 年はコロナ禍のためオンラインで行った。

領域会議は、個々の課題について、研究代表が現状報告と展望を行い、これに対する質疑応答をし、コメントを述べ、アドバイスをする、という形である。研究計画の見直しによる重点化や新規サブテーマの提案、チーム間の連携などもこの場で提案され、いくつかが実現

している。

## 2.2) シンポジウム

2022年9月11日、「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」と題するシンポジウムをJST本部に登壇者が集まり、そこから配信するオンライン形式で開催した。

シンポジウムは、徳田英幸 国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)理事長の「Beyond 5GとCPSが拓く未来社会のかたち～安全安心なSociety 5.0をめざして～」と題する招待講演に始まり、8人の研究代表による発表、この8人と井上弘二九州大学教授・加藤真平東京大学准教授による「Society5.0を支えるコンピューティング技術とは何か？」と題するパネルディスカッションが行われた。シンポジウムはハイブリッド形式でオンライン配信し、並行してオンラインのポスターセッションを開催した。

本シンポジウムは、招待講演、パネルとすべての発表が動画として以下に公開されている。  
<https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/comp-revol/index.html>

図5.11はこのときのパネルディスカッションのスナップショットである。



図 5.11 「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」シンポジウム  
パネルディスカッション（※ コロナ対策のため、参加者の席を離すなどしている）

## 2.3) 学会などのイベント

本研究領域が企画して開催した学会イベントとして、FIT2021における「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」(2021年8月27日)とCEATEC2021におけるJST CREST「コンピューティング基盤」(2021年10月19日～22日)がある。前者は、さきがけ「革新的コンピューティング技術の開拓」(井上弘二総括)との共催であり、本研究領域からは、研究代表である本村真人、天野英晴、本間尚文が講演者として登壇したほか、坂井修一が最初の挨拶で領域全体の説明を行い、近藤正章が全体の司会を務めた。後者は、CEATEC 2021 ONLINE /JST ブースの中に、天野英晴が「MEC(Multi-access Edge Computing)用マルチ FPGA

システム」を、本村真人が「学習/数理モデルに基づく時空間展開型アーキテクチャの創出と応用」を出展した。

本研究領域企画・主催によるもの以外にも、多くの学会・国際会議で本研究領域に関する講演やパネルディスカッションが行われている。コンピュータアーキテクチャのトップ国際会議である MICRO51 でのブース出展 (2018 年 10 月 22 日～24 日)、FIT2018 でのイベント企画「革新的コンピューティング」における本研究領域の紹介 (坂井修一)、情報処理学会第 5 回連続セミナー「人工知能時代のコンピューティング基盤」(2018 年 11 月)、情報処理学会全国大会ブース設置 (2019 年 3 月 14 日～16 日)、電子情報処理学会ソサイエティ大会における特別講演 (坂井修一、2019 年 9 月 11 日)、佐藤チームによる国際会議特別セッション (NOLTA2020, JNNS2020, ISCAS2021) と NOLTA ジャーナル特集号 (2021 年 4 月号) などが主なものである。

## 2.4) チーム間連携

領域の活動開始より、総括によってチーム間の連携が強く奨励され、提案されており、以下のものが実現している。

### ① 本村チームと戸川チームの連携

本村チームと戸川チームとは、多面的なアニーリング最適化処理の連携を行っている。戸川チームの社会応用に向けた最適化問題ベンチマーク処理例をシェアしてもらい本村チームで評価する活動を進めている他、アニーリング最適化アルゴリズムの面でも、意見交換を進め、新しい知見を得ている。

### ② 近藤チームと天野チームの連携

近藤チームで開発している SLAM 向けアクセラレータ・エンジンを天野チームで開発した FiC システムである M-KUBOS に実装中である。これにより大規模な地図環境へも対応できることが期待される。

### ② 鈴木チームと井上チームの合同会議

2021 年 4 月に、両チームが合同会議を開き、新しい計算モデルに基づく情報デバイスについて意見交換などを行った。

## 2.5) 他の研究プロジェクトとの連携

鈴木チームでは、実験系の構築に関して、2020 年度より開始した「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」領域「自己組織化トポロジカル有機マイクロ共振器の開発」への参画に伴い同研究開発に関する知見・設備が活用されている。

本村チームの提案した SCA 技術を、国内の主要なアニーリング技術の関係チーム (企業及び大学) 5 者以上に既に紹介し、今後の協業の道筋をつけている。また、同チームの高前田准教授 (東大) の提案が「信頼される AI システムを支える基盤技術」領域に採択された (テーマ名「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」)。また、同チーム湊

教授(京大)の科研費・学術変革(A)「アルゴリズム基盤」がスタートし、一部のメンバーが双方に参加している。さらに、同チームの劉准教授は、鈴木チームのメンバーでもあり、2021年スタートした上記 D3-AI\_CREST のメンバーである。前者においては、劉准教授のニューラルネットワークリザバー融合型計算モデルが大きな成果となっており、劉准教授を介して相互創発的な研究を進めている。

佐藤チームでは、本研究の成果をプロトタイプにする際に、NEDO プロジェクト「CMOS/スピントロニクス融合技術による AI 処理半導体の設計効率化と実証、及び、その応用技術に関する研究開発」と連携している。本村チームでは、本 CREST の成果が、一部 NEDO プロジェクト「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発」に用いられる予定である。また、本間チームで開発した汎用プロセッシングの基盤技術について、CREST 数理的情報活用基盤「AI 集約的サイバーフィジカルシステムの形式的解析設計手法」(研究代表者 末永幸平)にて利用されている。

## 2.6) 国際研究協力

天野チーム菅谷グループでは、Georgia Tech の Neuro Design 研究者と連携を推進する運びとなっている。

本間チームでは、Worcester Polytechnic Institute (米国)、Nanyang Technological University (シンガポール)、KU Leuven (ベルギー)、Telecom ParisTech (フランス)、Yonsei University (韓国) と、開発した耐量子計算機性暗号技術の安全性設計・評価プラットフォームを用いた研究開発で連携している。

井上チームでは、従来からソウルの漢陽大学、パリのサクレ大学と CNRS-Thales 研究所、およびハイファのイスラエル工科大学(Technion)とニューロモルフィック素子/回路の共同研究を行っており、コロナ禍を越えて本研究課題に関連した協力を実施していく。

佐藤チームでは、集積回路に関してカタルーニャ工科大学 (スペイン)、アーキテクチャに関してマギール大学(カナダ)、材料デバイスに関してヨーテボリ大学(スウェーデン)、材料デバイスに関して UCSB (米国) と共同研究を行っている。

## (3) 研究費配分上の工夫

当初より、総括・領域アドバイザーが計画書を精査して、予算申請の妥当性を検討してきた。研究者・補助員の雇用や実験装置の購入・改良などにおいて採択テーマはどれも妥当な要求をしてきている。その上で、中間評価の結果などを受けて、課題ごとに濃淡をもった配分としている(特に初年度採択課題)。コロナ禍のための半導体ラインの確保難により、LSI 試作の遅れなどがあり、予算を後ろ倒しにした場合があるが、こうしたことがあっても、今のところ研究の遂行全体に支障をきたすほどではない。2021 年度にあった震災からの復旧なども、同様である。課題によっては、進捗が予定以上となって、開発費を前倒しにしたものがあり、400 万円から 3000 万円程度増額となったものもある。

事業の後半には、2年度採択課題の中間評価なども考慮に入れ、最終成果として期待できるものを精査しながら、より大きな選択と集中を行う予定である。

## 6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について

### (1) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

最初に論文発表から見ると、表 6.1 の通りである。国際論文誌を中心に盛んに発表していることが見てとれる。

表 6.1 研究発表

		論文		特許出願		口頭発表	
採択年度	研究代表者	国内	国際	国内	海外	国内	国際
2018 年度	近藤 正章	6	26	1	0	28(18)	14(8)
	鈴木 秀幸	0	20	1	1	15(2)	10(1)
	本村 真人	1	40	3	0	68(23)	37(26)
2019 年度	天野 英晴	3	74	0	0	60(24)	37(9)
	井上 公	1	11	1	0	24(14)	10(4)
	佐藤 茂雄	2	44	2	0	61(30)	53(37)
	戸川 望	0	12	1	0	21(4)	5(0)
	本間 尚文	0	25	1	1	36(7)	3(3)
研究領域全体		13	252	10	2	313(122)	169(88)

- ・研究課題中間評価時点
- ・論文数の研究領域合計は、研究課題間の共著論文があるために各年度の単純合計とは一致しない
- ・特許出願数は研究者からの報告によるもので、公開前の出願も含まれる
- ・招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記載

これらの発表により、各課題と本 CREST 事業に国際的な注目度が高まることになった。

中でも、本間チームは、耐量子計算機性暗号 SW/HW 安全性設計・評価プラットフォームの国内外機関への提供による国際連携ネットワークの形成に務めてきた。特に、2022 IEEE Int'l Symp. on EMC (2022 年 8 月) にて特別セッションを企画・運営している。

研究評価の高い傍証として、課題従事者のキャリアアップが多いことが挙げられる。表 6.2 の通りである。

表 6.2 研究参加者のキャリアアップの状況

キャリアアップ内容	該当数
教授/教授クラス職への昇任/学部長・ユニット長	14
准教授・講師への昇任	12
助教・講師への採用	7
その他（任期無し職位獲得、他大学兼任等）	6
計	39

(2022年11月30日現在、予定を含む)

## (2) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

本研究領域のプレスリリースを以下に記す。プレス発表は、アウトリーチが見えやすいものから基礎研究まで、幅広い分野に亘っている。

表 6.3 プレス発表

(JST との共同発表に限らず、研究機関単独での発表も含む)

日付・機関	チーム	グループ	タイトル
2020年2月18日 東京工業大学	本村	本村	組合せ最適化問題を高速に解く新しいアニーリングマシンを開発 世界初の全結合型アニーリングプロセッサ LSI で高いエネルギー効率を実現
2021年3月29日 ゼンリンデータコム	戸川	高山	ゼンリンデータコムの「いつも NAVI ラボサイト」で、東芝のシミュレーテッド分岐マシンを活用して最適なルートを提案する“旅程最適化サイト”を無償公開
2021年3月18日 東北大学/JST	佐藤	深見	スピントロニクス疑似量子ビットを 従来比 100 倍超に高速化 ～エントロピーを用いた磁化のブラウン運動の 新しい理解に基づき演算速度の向上に道筋～
2021年11月30日 東北大学/JST	佐藤	深見	スピントロニクスで脳型コンピュータ向け新素子を開発 ～ニューロンとシナプスの機能を一体化～

日付・機関	チーム	グループ	タイトル
2022年2月2日 東北大学	本間	本間	量子コンピュータにも耐性を持つ次世代暗号 を安全に実現する技術を開発・実証
2022年4月1日 東北大学/JST	佐藤	羽生	大規模な組み合わせ最適化問題を解く確率的計算技 術を開発 ～解収束時間を3桁以上低減し実時間で社会還元で きる道を開く～
2022年5月30日 早稲田大学/JST	戸川	戸川	イジング計算機で組み合わせ最適化問題の「真の最 適解」を高精度に探索～局所最適解から効率よく脱 出する技術を開発～
2022年12月7日 東北大学	佐藤	深見	確率動作スピン素子と半導体回路を用いた高性能・ 省電力「P」コンピュータを実証 ～機械学習や組み合わせ最適化に適した高い演算性能と 電力効率が明らかに～
2023年1月26日 早稲田大学/JST	戸川	戸川	制約を持つ組み合わせ最適化問題をイジング計算機 で効率的かつ高精度に解くための新たな手法を開発 ～変数の個数を削減し性能向上、ソフトウェアへの 応用に期待～
2023年2月18日 東京工業大学/JST	本村	本村	問題に応じて計算手法を選択・最適化するアニーリ ングマシンを開発 対GPU比3万倍の電力効率を達成

これらのうち、最初の本村チームと最後の佐藤チームの記事・報道を図 6.1、図 6.2 に示す。

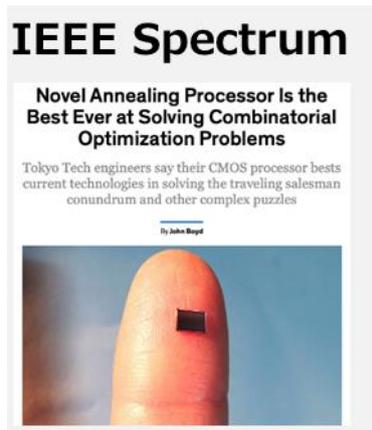
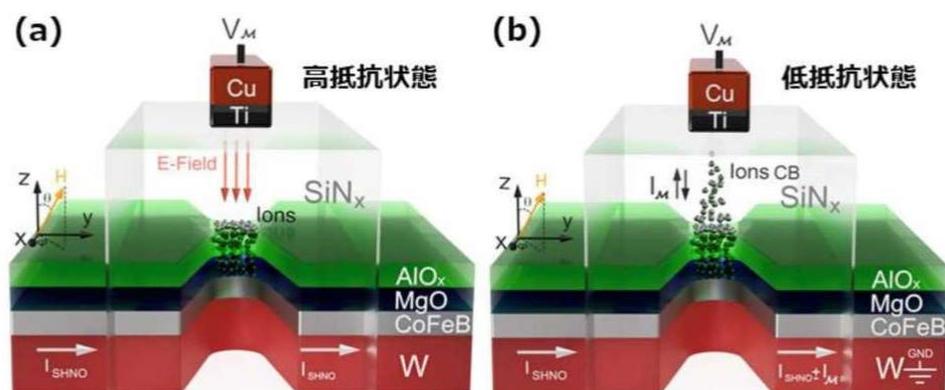


図 6.1 本村チーム STATICA に関する記事

出展 ; IEEE Spectrum 14 APR 2020

<https://spectrum.ieee.org/japanese-researchers-develop-a-novel-annealing-processor-thats-the-fastest-technology-yet-at-solving-combinatorial-optimization-problems>

その他、日経新聞、毎日新聞にも記事が掲載された。



東北大など、ニューロンとシナプスの機能が一体化したスピントロニクス技術を開発

掲載日 2021/12/02 06:35

著者：波留久泉

東北大学と科学技術振興機構は11月25日、スピントロニクス技術に基づくニューロンとシナプスが統合された人工構造を作製し、脳における「同期の制御」の機能を果たしたと発表した。

図 6.2 佐藤チーム (深見グループ) スピントロニクスに関する報道

出展 : マイナビニュース 2021 年 12 月 2 日

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20211202-2210474/>

次に、表 6.4 に製品化や企業への導入、国際社会へのアウトプットのあった成果を示す。

表 6.4 成果の社会実装へむけての取り組み

チーム	技術移転・連携先など	内容
近藤	富士通株式会社	グラフ処理・疎行列処理向けアクセラレータ機構
	ヤフー株式会社 (Yahoo! Japan)	Web アクセス履歴によるユーザの潜在的興味度判定
	パナソニック株式会社 & ロート製薬株式会社	工場の CPS 化
	NTT コンピュータ&データサイエンス研究所	コヒーレントイジングマシンの性能評価
	ソフトバンク株式会社	LP ガス容器の配送最適化
	理化学研究所 & 株式会社フィックスターズ	Graph500 ベンチマーキング最適化
	OpenStreet 株式会社	バイクシェアリングにおける再配置最適化
	ソフトバンク株式会社 & 株式会社豆蔵	データ格付サービス
	ドイツ国立研究所 ZIB	格子暗号の安全性を検証する最短ベクトル問題に対する解読
鈴木	ドレスト光子研究起点	量子ドットネットワーク内部におけるエネルギー伝搬の様相に関する量子ウォークモデルの適用
本村	株式会社日立製作所	プログラミングコンテスト 社会応用
天野	株式会社 PALTEK	M-Kubos ボード販売
戸川	株式会社ゼンリンデータコム	地理空間情報アプリ
本間	NTT 社会情報研究所	耐量子計算機性暗号の耐タンパー化手法の研究開発で連携

これら以外に、企業等との非公開の連携案件がある。

上記表のうち、近藤チームの LP ガス容器の配送最適化と本間チームのセキュリティ試験のテストベッドを、図 6.3、図 6.4 に示す。

## LP ガス配送サービス：現在のアルゴリズムとサービス

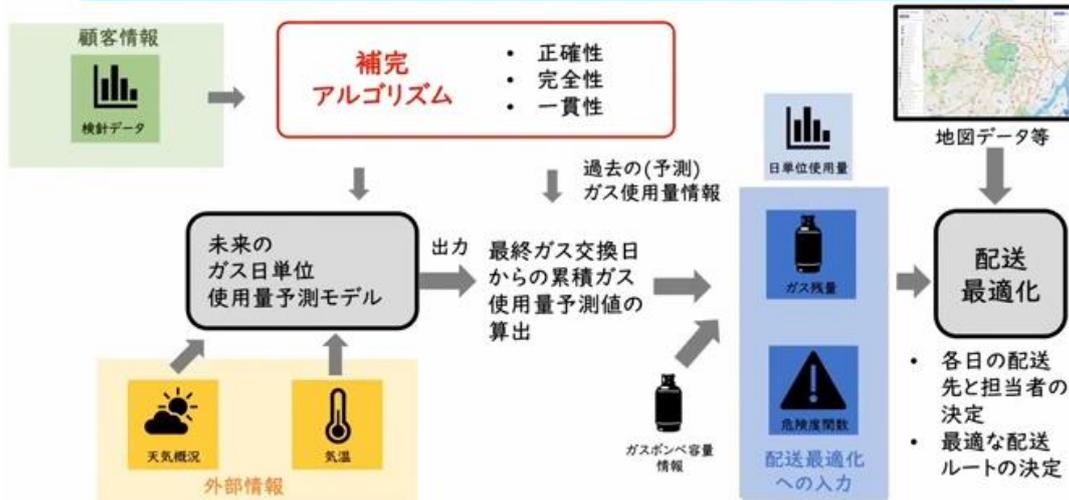


図 6.3 近藤チーム（藤沢グループ）の企業連携： ソフトバンク LP ガス

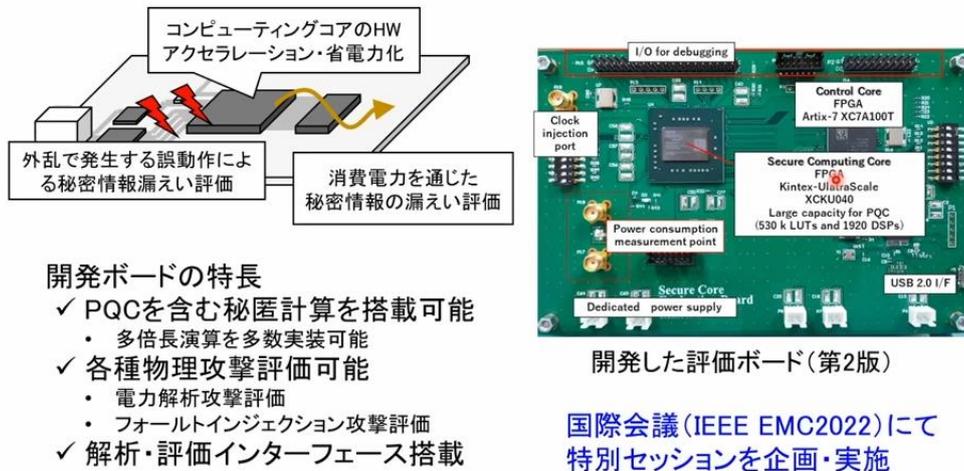


図 6.4 本間チームのセキュリティ評価ボード

### (3) 特筆すべき研究成果

各チームとも、水準以上の成果をあげているが、これまでで特に目立った成果を以下に記す。

#### 3.1) 近藤チーム

グラフ埋め込み問題における包括的な枠組みと安定解法を提案した。また、グラフ構造を利用した SOINN をベースに、データの密度分布を考慮した重要データ選択とそれをエッジ

デバイス上で高効率に実行する技術を開発した。デプロイ的には、データの品質を数理的に判定して明示する「データ格付け」について、高い精度を実現している。さらに、ゲート型量子コンピュータにおける量子ビットのエラー耐性向上に向けた技術の開発を行った。

### 3.2) 鈴木チーム

FRET ネットワークを用いた深層リザーバーコンピューティング (DRC) を実現するための第一歩として、重みを初期乱数状態に固定したまま選択利用のみで機能する再帰型深層ニューラルネットワーク (DNN) の HFN を提案した。また、マルチモーダル感覚情報を統合する予測符号化の階層的リザーバーネットワークモデルを提案した。

### 3.3) 本村チーム

整数計画法を用いた説明可能機械学習のための反実仮想説明の生成手法と因果推定を用いたその拡張手法を開発した。また、拘束項を導入することで逐次性の呪縛を破り並列スピン更新を可能とした確率的セルラーオートマトン (SCA) の数理モデルを提案し、その基本的な挙動や収束性の数学的な解明を進めた。さらに、既存技術と比べてメモリアクセス回数を約 1/20 に減らすことが可能な機械学習アーキテクチャ ExtraFerns を提案し、評価した。また、512 スピンの全結合イジングモデルの全並列スピン更新ができる全結合・全並列型アニーリング最適化チップ STATIC を開発した。

### 3.4) 天野チーム

多次元情報に対応した情報匿名化手法を構築した。また、オープンソース embedded FPGA の開発と、Crust - Core 型アーキテクチャの提案、MEC 用 FPGA クラスタの製品化、マルチチップ FPGA 用の高位合成ツールの作成などを行った。

### 3.5) 井上チーム

省電力のリザーバー計算デバイスにおける効率的な逐次学習を実現するため Transfer-RLS 法という学習法を提案し、収束速度を犠牲にすることなく演算を簡易化した。また、異なる時間スケールの変動を含む時系列データの予測に有用なりザーバー計算モデルを提案、有効性を実証した。スパイキングニューラルネットワーク (SNN) の実現に向けて、小面積でミリ秒単位の時定数を実現し、その時定数を調整可能な Leaky Integrate-and-Fire (LIF) ニューロン回路を提案し実際に ASIC で作製した。

### 3.6) 佐藤チーム

確率的に動作する磁気トンネル接合素子の物理機構を解明し、性能の飛躍的向上を達成した。また、磁気トンネル接合素子を用いた確率論的コンピュータによる機械学習の原理実証を行った。さらに、CMOS を用いた確率論的コンピュータの組合せ最適化問題への応用を

検討し、超低消費電力アナログスパイクニューロン回路の研究開発を行った。

### 3.7) 戸川チーム

イジング模型ならびにこれと等価な QUBO 模型の複数のスピンを「縮退」させることによって、同時スピントリップを実現した。また、複数日にまたがる旅行計画問題を対象に、これを論理イジング模型にマッピングし、物理イジング模型にエンベッドした上で実イジング計算機によって解法した。これらは現実の地理情報に適用し、自治体（静岡県熱海市）の協力のもと「実イジング計算機の旅程最適化サイト」が試験公開されている。

### 3.8) 本間チーム

耐量子計算機性暗号による高効率秘匿演算とその耐タンパー化理論の構築を行った。また、同じく暗号に関する汎用プロセッシング技術の提唱と基盤ソフトウェアの開発を行った。また、これらを現実の問題に適用するために、耐量子計算機性暗号技術の安全性設計・評価プラットフォームプロトタイプの開発を行った。さらに、データとモデル保護を両立する秘匿推論プロトコルの開発を行い、その有効性を検証した。

## 7. 総合所見

### (1) 研究領域のマネジメント

#### 1.1) 課題選定まで

領域を定めて、具体的なテーマを設定したところで、本研究領域のスペクトルの広さから、各分野をとりまとめているシニアな方々（学会会長など）に相談し、現役として活躍中の最も信頼できる方々を領域アドバイザーとして選定した。コンピュータシステムは総括自らが、ニューロや量子はそれぞれ専門のアドバイザーが中心となって、選定を行った。狭い意味で専門家でないアドバイザーも皆、これまで多数の研究プロジェクトの指導を経験しており、信頼が置けるものであった。これによって、課題選定は、2018年度、2019年度ともに順調に行われた。

ひとつ残念だったのは、セキュリティ・ディペンダビリティ分野で、今の現実社会に直接に接する課題（文理融合型など）を選ぶことができなかったことである。これは、端的に予算不足から課題数に限りがあったためである。

#### 1.2) 各チームへのアドバイス

採択から1年目、3年目でサイトビジットをして、課題ごとに集中的な討論・アドバイスをやるほか、毎年の領域会議での意見交換、2022年の公開シンポジウムでの外部からの意見聴取など、複眼的で徹底した批判・批評を行いながら、各チームの研究を指導してきた。2020年、2021年はコロナ禍で領域会議、サイトビジットなどがオンライン化するなどした。特に（東京から見て）遠隔地の場合は、オンラインによって領域アドバイザーが参加しやすくなったものの、実際の研究環境や研究プロダクトを見て評価するなどがやりにくい面があった。2022年になってオンサイトの訪問やJST本部に集まったの領域会議が開催できるようになり、この点は改善された。全体として、概ね問題なく各チームの指導や評価ができている。

#### 1.3) 全体フォーメーションに関するアドバイス

CRESTは、各チームが仮想研究所を作ってプロジェクトを進める形態をとる。したがって、研究代表者がチーム内の課題を最適に設定し、各チームが個別の成果をあげるとともに、これらをまとめあげて全体テーマに対してパフォーマンスを高めるための統率力が課題となる。すなわち、CRESTの成否が研究代表者のパーソナリティに依存するところ大である。領域総括はこの点を重視し、チーム内の各グループの研究を意識したアドバイスとは別に、全体フォーメーションとロードマップ達成に関する研究代表者へのアドバイスを心がけた。すなわち、総括はサイトビジットや領域会議などでの、チームの発表の中でのチーム全体/各グループへのアドバイス（研究内容に関するコメント、アイデア、方向性の意見など）を

言うだけでなく、研究代表者がチームのかじ取りができるように、方向性を示したり、チーム運営の相談に乗ったりすることを、CREST 公式行事の中だけでなく、メールや学会の場などの交流の場で行ってきた

課題によって、グループ間のテーマ的・地理的・組織的分散が大きなものと小さなものがある。特にテーマの分散が大きな課題について、複数のアドバイザーがそれぞれのテーマについて相談に乗るとともに、チーム全体のまとめかたについての議論が多く行われた。

#### 1.4) チーム間連携など

2年度目の採択が決定したところで、本村チームと戸川チーム、近藤チームと天野チームの連携が提案された。これらは、すぐに実行に移されている。また、鈴木チームと井上チームの間でテーマ討論をするようにアドバイスがされており、これも実現されている。こうしたトップ研究者どうしの共同作業は、本 CREST の研究領域によって初めて実現したものであり、そのシナジー効果は、今後とも大きなものと考えられる。

これに対して、国際協力は今のところそれぞれのチームの自発性に任されている。今のままでも十分な成果が期待されるが、CREST 後半では、領域アドバイザーが関与するなどして、より大きな協力と国際的パブリシティーの獲得が望まれている。

#### (2) 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況

これまで述べた通り、本研究領域は、原理・デバイスからシステムまでをカバーする、ダイバーシティの大きなものである。そこでキーワードとなるのが、実時間性、最適化、安全性、省電力などであり、これらはすべての課題で共通する。各チームでロードマップを描いて、毎年の達成度をチェックするとともに、デプロイのタイミングと産物を示すことを課しており、これらは総括と領域アドバイザーによって厳しくチェックされている。

現実には、初期ロードマップ以上の達成度を示しているもの、副産物が大きなテーマとなってロードマップを修正したもの、チーム内グループの進捗が異なるために重点化が起こったものなど、いくつかの種類が生じている。これらを総合して、領域全体として、本資料の2と3で述べた領域全体の戦略目標に着実に近づいていると考えている。

#### (3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性(研究開始以前と現時点との比較を念頭に置いて)

Society5.0 において中心となるコンピューティング基盤を作ることは、情報社会の最重要の課題であり、実時間性・省電力・安全性などを高度に満足する計算原理・デバイス・アーキテクチャ・ソフトウェアの研究を推進することによって、新産業の育成と社会の発展とともに達成できると考えられる。

本研究領域は、そのための、最も先進的で有用な技術開発を目指すものであり、成功裏の社会的効果はとても大きなものとする。そのために選定され、遂行中の8つの課題は、本

資料の 6 に見られる通り、期待に応え得るものになっている、あるいはなり得ると考えている。

#### (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

5. (1) で述べた通り、本研究領域の場合、課題によって、社会展開の時期ややりかたが大きく異なる。以下に各チームについて、イノベーションへの期待、展望、課題を記す。

##### 4.1) 近藤チーム、天野チーム

計算モデルとしてはチューリングマシンが基礎となるが、省電力性・実時間性・軽量性などの点において新技術分野を開拓しており、社会応用において即効性がある。実際、スマート工場、データ格付けなどにおいて産業化がスタートしている。中期的には、エッジやフォグにおける実時間情報処理によって、社会生活の質を飛躍的に向上させるインフラ作りが可能となろう。

##### 4.2) 戸川チーム

地理情報の利活用において、すでに実用化レベルの技術開発が始まっている。運輸・観光などの産業に資するところ大であるが、さらに広い社会領域に応用することが期待される。

##### 4.3) 本村チーム

計算原理・デバイスとともに、広いレンジの応用が見込まれる。社会基盤としての利活用が最も広範に期待される。課題終了時には、キラーアプリを複数立てて有効性を示すことが望まれる。

##### 4.4) 佐藤チーム

10 年後、20 年後に、電子産業、半導体産業、自動車産業などを刷新する可能性が大きい。産業的ヘゲモニーとともに、SDG s など社会のありかた改革にも貢献することが期待される。

##### 4.5) 鈴木チーム 井上チーム

情報処理を原理的などころから変えていく可能性を示している。省電力、実時間などだけでなく、従来なかった新しい情報処理分野を開拓する可能性が示されつつある。

##### 4.6) 本間チーム

量子コンピュータが実用化されて後に訪れるセキュリティの危機を回避できる仕組みが提供される。社会の安全安心にとって必須の技術となる可能性がある。

全体を通して、デプロイ時期や方法に差はあるが、どれか一つだけが主流になるというこ

とではなく、8 課題がそれぞれに、そしてお互いに協力して、さらに他の技術とも連携して、情報処理社会を飛躍的に発展させると考えられる。

#### (5) 所感

研究領域のスペクトルが大きいことから、当初の目標設定、領域アドバイザーの選定などに、時間と労力を使った。結果としてできあがった運営体制と選定された 8 課題は、優れたものとなったと考える。

課題に対して中間評価を行ったところ、うまくいっている課題がほとんどだが、細かく見ると、各チーム内のグループによって進度に差があるなど濃淡がある。これには、コロナ禍による半導体サプライチェーンの停滞など、予期できなかった事柄も作用している。

課題によって原理に重いものと、応用に重いものがあるが、前者は必ずシステム系の研究を入れるように、後者は、今のやりかたの延長では達成できない目標を立てるように（電力性能比 100 倍など）と、厳しい条件を課している。採択した課題のほとんどで、これらが数字の上でも達成できそうなことは、特筆に価すると思われる。

最後に、本研究領域は、新しい社会のコンピューティング基盤作りにおいてイノベーションを目指すものであるが、そこには社会学的知見が必要と思われる。その意味で、本研究領域を超える話になるかもしれないが、人間社会としての Society5.0 のありかたについての文科系研究者の参加協力を得るような研究領域が立つことも必要に思われる。そのような文理融合型の研究領域を進めることによって、従来にはなかった性質の社会イノベーションを果たすことが望まれるのではないかと。

以上