

領域略称名：アルゴリズム基盤  
領域番号：20A402

令和5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

「社会変革の源泉となる革新的アルゴリズム基盤の  
創出と体系化」

領域設定期間

令和2年度～令和6年度

令和5年6月

領域代表者 京都大学・大学院情報学研究科・教授・湊 真一

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
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
3	公募研究	7

## **研究領域全体に係る事項**

4	研究領域の目的及び概要	9
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	11
6	研究の進展状況及び主な成果	13
7	研究発表の状況	24
8	研究組織の連携体制	29
9	若手研究者の育成に係る取組状況	30
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	31
11	研究費の使用状況・計画	32
12	今後の研究領域の推進方策	33
13	総括班評価者による評価	35

**研究組織**

(令和5年6月末現在。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]
X00 総	20H05961 研究領域「革新的アルゴリズム基盤」の 組織運営と研究推進	湊 真一	京都大学・情報学研究科・ 教授	10
A01 計	20H05962 新しい概念に基づいたアルゴリズム・ 最適化の問題創出とその効率的求解方 法の研究	宇野 毅明	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・教授	7
A02 計	20H05963 社会を志向した革新的アルゴリズムの 実装	安田 宜仁	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・協創情報研究部・ 主幹研究員	6
B01 計	20H05964 大規模離散構造の理解と革新的アルゴ リズム基盤の創出	堀山 貴史	北海道大学・情報科学研究 院・教授	7
B02 計	20H05965 新計算モデルにおけるアルゴリズム・ 最適化	河原林 健一	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・教授	6
B03 計	20H05966 量子アルゴリズムの理論と実装を接続 する革新的基盤の創出	山下 茂	立命館大学・情報理工学部・ 教授	6
B04 計	20H05967 アルゴリズム基礎理論の追究・発展	牧野 和久	京都大学・数理解析研究所・ 教授	7
<b>総括班及び総括班以外の計画研究 計 7 件</b>				

[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：研究領域「革新的アルゴリズム基盤」の組織運営と研究推進

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	湊 真一	京都大学・情報学研究科・教授	研究領域全体の総括マネジメント
分担	宇野 毅明	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・教授	領域運営委員，A01 班マネジメント
分担	安田 宜仁	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・協創情報研究 部・主幹研究員	領域運営委員，A02 班マネジメント
分担	堀山 貴史	北海道大学・情報科学研究 院・教授	領域運営委員，B01 班マネジメント
分担	河原林 健一	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・教授	領域運営委員，B02 班マネジメント
分担	山下 茂	立命館大学・情報理工学 部・教授	領域運営委員，B03 班マネジメント
分担	牧野 和久	京都大学・数理解析研究 所・教授	領域運営委員，B04 班マネジメント
分担	上原 隆平	北陸先端大学・先端科学技 術研究科・教授	領域運営委員，B01 班マネジメント補佐
分担	瀧本 英二	九州大学・システム情報科 学研究院・教授	領域運営委員，B04 班マネジメント補佐
分担	玉置 卓	兵庫県立大学・情報科学研 究科・准教授	領域運営委員，総括班マネジメント補佐
合計 10 名			

研究項目：A01

研究課題名：新しい概念に基づいたアルゴリズム・最適化の問題創出とその効率的求解方法の研究

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	宇野 毅明	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・教授	全体の統括アルゴリズム定式化
分担	中小路 久美代	公立はこだて未来大学・シ ステム情報科学部・教授	問題カタログにおける問題構築技術に関する研究

分担	瀧川 一学	京都大学・国際高等教育院 附属データ科学イノベーション 教育研究センター・特 任教授	学習理論とモデル開発
分担	山本 章博	京都大学・情報学研究科・ 教授	意味構造とモデル開発
分担	久保山 哲二	学習院大学・付置研究所・ 教授	実データに基づくモデル開発
分担	石島 正和	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・協創情報 研究部・主任研究員	モデル・最適化とアルゴリズムの開発
分担	松田 智裕	立命館大学・衣笠総合研究 機構・研究員	問題カタログにおける，人間・社会の論理構造の整理
合計 7名			

## 研究項目：A02

### 研究課題名：社会を志向した革新的アルゴリズムの実装

代表/ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	安田 宜仁	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・協創情報 研究部・主幹研究員	全体の統括とグラフ列挙型ソルバの実装
分担	有村 博紀	北海道大学・情報科学研究 院・教授	離散数学の実装に関する研究
分担	鍋島 英知	山梨大学・大学院総合研究 部・准教授	充足判定器の高速化の研究
分担	井上 武	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・協創情報 研究部・特別研究員	グラフ列挙型ソルバの設計
分担	西野 正彬	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・協創情報 研究部・特別研究員	論理推論とデータ構造の研究
分担	美添 一樹	九州大学・情報基盤開発セ ンター・教授	二分決定図演算の並列化に関する検討
合計 6名			

**研究項目：B01**

**研究課題名：大規模離散構造の理解と革新的アルゴリズム基盤の創出**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	堀山 貴史	北海道大学・情報科学研究 院・教授	研究の総括
分担	湊 真一	京都大学・情報学研究科・ 教授	BDD/ZDD アルゴリズムに関する研究
分担	上原 隆平	北陸先端科学技術大学院大 学・先端科学技術研究科・ 教授	ゲーム・パズルと計算量に関する研究
分担	宇野 裕之	大阪公立大学・大学院情報 学研究科・教授	グラフアルゴリズムに関する研究
分担	稲永 俊介	九州大学・システム情報科 学研究院・教授	文字列アルゴリズムに関する研究
分担	番原 睦則	名古屋大学・情報学研究科 ・教授	SAT アルゴリズムに関する研究
分担	松井 泰子	東海大学・理学部・教授	離散構造に関する研究
合計 7名			

**研究項目：B02**

**研究課題名：新計算モデルにおけるアルゴリズム・最適化**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	河原林 健一	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・教授	研究総括
分担	岩田 覚	東京大学・大学院情報理工 学系研究科・教授	最適化研究
分担	吉田 悠一	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・教授	アルゴリズム研究
分担	福永 拓郎	中央大学・理工学部・教授	最適化研究
分担	平原 秀一	国立情報学研究所・情報学 プリンシプル研究系・准教 授	計算量研究
分担	Avis David	京都大学・情報学研究科・ 研究員（非常勤）	組合せ最適化研究
合計 6名			

**研究項目：B03**

**研究課題名：量子アルゴリズムの理論と実装を接続する革新的基盤の創出**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	山下 茂	立命館大学・情報理工学部・教授	全体の統括と量子回路モデルに関する研究
分担	山本 直樹	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授	実践的な量子計算の利用に関する研究
分担	ルガル フランソワ	名古屋大学・多元数理科学研究科・教授	分散量子計算モデルに関する研究
分担	森 立平	名古屋大学・多元数理科学研究科・准教授	測定ベース量子計算モデルに関する研究
分担	谷 誠一郎	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・メディア情報研究部・特別研究員	能力が限定された量子計算モデルに関する研究
分担	西村 治道	名古屋大学・情報学研究科・教授	万能量子計算モデルに関する研究
合計 6名			

**研究項目：B04**

**研究課題名：アルゴリズム基礎理論の追究・発展**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	牧野 和久	京都大学・数理解析研究所・教授	研究の総括
分担	小野 廣隆	名古屋大学・情報学研究科・教授	最適化アルゴリズム設計
分担	定兼 邦彦	東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授	圧縮アルゴリズム設計
分担	河村 彰星	京都大学・数理解析研究所・准教授	計算論的アルゴリズム解析
分担	玉置 卓	兵庫県立大学・社会情報科学部・准教授	論理的アルゴリズム設計
分担	瀧本 英二	九州大学・システム情報科学研究院・教授	学習論的アルゴリズム設計
分担	渋谷 哲朗	東京大学・医科学研究所・教授	計算生物学におけるアルゴリズム設計
合計 7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]
1 公	23H04391 決定グラフで扱える世界の拡張	令和5年度 ～ 令和6年度	伝住 周平	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・研究員	1
2 公	23H04390 ゲートとアニーリングの複合方式 による中規模量子コンピュータ向 けアルゴリズムの開発	令和5年度 ～ 令和6年度	松崎 雄一郎	中央大学・理工学部・准教 授	1
3 公	23H04388 効用関数付きグラフ最適化問題に 対する計算量解析のさらなる発展	令和5年度 ～ 令和6年度	土中 哲秀	九州大学・システム情報 科学研究所・准教授	1
4 公	23H04386 辞書式順序依存問題の複雑さの解 明	令和5年度 ～ 令和6年度	中島 祐人	九州大学・システム情報 科学研究所・助教	1
5 公	23H04385 分散アルゴリズムと動的アルゴリ ズムにおける設計手法の相互展開 と発展	令和5年度 ～ 令和6年度	泉 泰介	大阪大学・情報科学研究 科・准教授	1
6 公	23H04384 経路列挙とクラスタリングによる 化学反応経路カタログの作成	令和5年度 ～ 令和6年度	杉山 佳奈美	京都大学・工学研究科・ 助教	1
7 公	23H04383 組合せ遷移ソルバーの活用事例の 研究	令和5年度 ～ 令和6年度	川原 純	京都大学・情報学研究 科・准教授	1
8 公	23H04381 文字列処理における NP 困難問題 の高速解法の追求	令和5年度 ～ 令和6年度	三重野 琢也	電気通信大学・情報理工 学(系)研究科・助教	1
9 公	23H04377 Scalable and Precise Social Network Algorithms under Local Differential Privacy	令和5年度 ～ 令和6年度	スッパキットパイ サン ウォラボン	東京大学・情報理工学(系) 研究科・准教授	1
10 公	21H05861 部分グラフ列挙問題で用いる多項 式遅延列挙アルゴリズム設計技法 の拡張に関する研究	令和3年度 ～ 令和4年度	栗田 和宏	名古屋大学・大学院情報学 研究科・助教	1
11 公	21H05857 フロンティア法によるグラフ同型 性における標準形列挙アルゴリ ズムの開発	令和3年度 ～ 令和4年度	齋藤 寿樹	九州工業大学・大学院情報 工学研究所・准教授	1
12 公	21H05854 分散計算における細粒度設計抽象 化技法の創出とその応用	令和3年度 ～ 令和4年度	泉 泰介	大阪大学・情報科学研究 科・准教授	1

13 公	21H05852 効用関数付きグラフ最適化問題に対するアルゴリズムに関する研究	令和3年度 ～ 令和4年度	土中 哲秀	九州大学・システム情報 科学研究所・准教授	1
14 公	21H05850 New frontiers in distributed property testing	令和3年度 ～ 令和4年度	シュワルツマン グレゴリー	北陸先端科学技術大学院大 学・先端科学技術研究 科・准教授	1
15 公	21H05848 プロダクトミックスオークション 実装のためのアルゴリズムの構築	令和3年度 ～ 令和4年度	塩浦 昭義	東京工業大学・工学院・ 教授	1
16 公	21H05847 Resource-Constraint Privacy- Aware Data Structures Tackling Problems in Bioinformatics	令和3年度 ～ 令和4年度	Koepl Dominik	東京医科歯科大学・M&D データ科学センター・助 教	1
17 公	21H05846 工学システム解析に現れるシンボ リック行列に対する離散構造論の 展開	令和3年度 ～ 令和4年度	谷川 眞一	東京大学・大学院情報理 工学系研究科・准教授	1
18 公	21H05845 Precision Analysis of Frameworks for Publishing Graph Information under Differential Privacy	令和3年度 ～ 令和4年度	スツパキットパイ サン ウォラボン	東京大学・大学院情報理 工学系研究科・特任准教 授	1
19 公	21H05844 より高階の離散構造を扱うための 近似を用いたデータ構造の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	伝住 周平	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・協創情報研究 部・リサーチアソシエイ ト	1
20 公	21H05843 双対過程に基づくサンプリング不 要な統計量計算手法のアルゴリズ ム論的解析と効率化	令和3年度 ～ 令和4年度	大久保 潤	埼玉大学・理工学研究 科・教授	1
21 公	21H05839 強指数時間仮説に基づく計算限界 の理解と探究 公募研究	令和3年度 ～ 令和4年度	脊戸 和寿	北海道大学・情報科学研 究院・准教授	1
公募研究 計 21 件 (完了を含む)					

[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2頁以内で記述すること。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。

#### 【本研究領域の社会的・学術的背景】

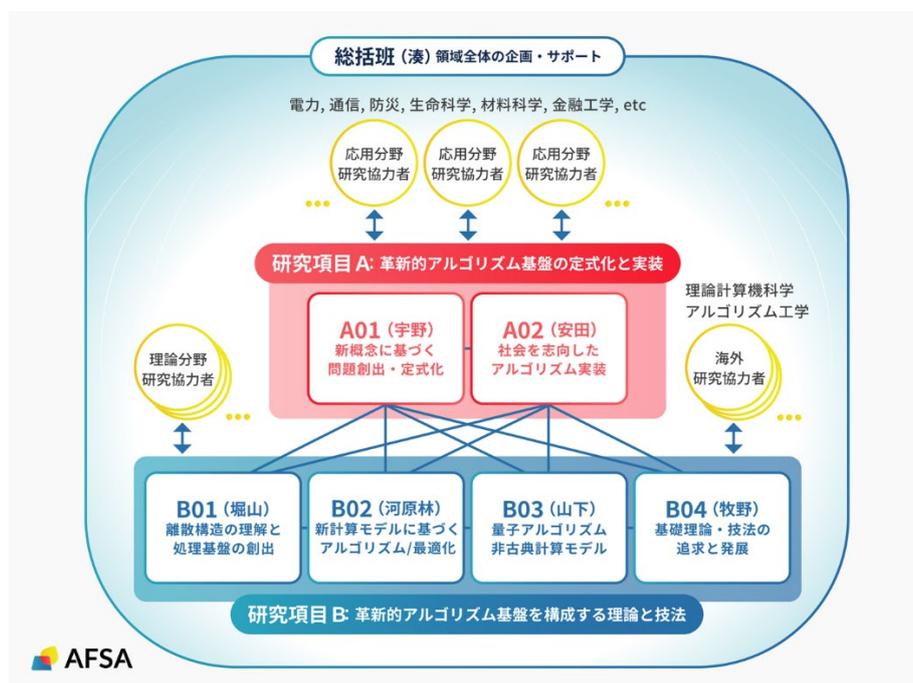
集積回路技術、光通信技術、ストレージ技術の急速な進歩に伴い、人々が手にする PC や情報通信端末は、1980年頃から2010年頃までの約30年間で実に10万倍～100万倍もの圧倒的な価格性能比の向上を遂げている。例えば近年の深層学習・AIブームも、計算能力の圧倒的向上とビッグデータの取得・流通が容易になったことにより初めて開花したものである。このような計算能力の圧倒的向上の恩恵を活かしたアルゴリズム技術の進展が、今後10年～20年にわたって高度情報化社会の競争力の源泉となり社会変革を先導する波及効果を持つと予想されている。アルゴリズム分野で世界を先導し、次世代の科学技術や社会構築における変革の源泉となりうる概念や手法を開拓していくことが、我が国が次の世代においても世界のトップレベルの先進国であり続けるためには必須である。さらに、量子計算デバイスのような未来の革新的デバイスを想定して、その恩恵を活用可能とするアルゴリズムの理論研究を進めることも求められている。そのためにもアルゴリズム分野の第一線の研究者コミュニティを強化し、世界トップレベルの若手・中堅研究者の育成を継続的に図っていく必要がある。

#### 【本研究領域の研究目的】

現代の高度情報化社会を動かしているアルゴリズム、すなわち論理的な手続き処理の理論と技法における近年の急速な進展を、様々な分野の科学者・技術者が理解可能な形で広く自由に利用できる学術として体系化し、社会変革の源泉となる基盤研究領域として発展させることを目的とする。近年の圧倒的な計算性能の進歩や未来の革新的デバイス、及び新しい社会的概念や価値観に基づいて、理論と応用を分かりやすく接続する汎用的かつ実用的な定式化モデルを再構築・体系化する。それらを構成する離散構造処理、制約充足、列挙、離散最適化、量子計算理論など、日本が強みを持つ分野を中心としたアルゴリズムの理論と技法の研究を推進し、革新的アルゴリズム基盤として発展させる。

#### 【本研究領域の全体構想】

本研究領域は、下図に示す通り、理論と応用を有機的に結合するインタフェースを追究する研究項目 A01, A02 と、それらを下支えする理論と技法を追究する研究項目 B01, B02, B03, B04 の合計6つの計画班、及び全体の企画を行う総括班からなり、さらに公募研究を含めて構成する。



各計画班の主な研究内容は以下の通りである。

**A01: 新しい概念に基づいたアルゴリズム・最適化の問題創出とその効率的求解方法の研究**

応用分野の研究者の協力を得て、情報学の未来を切り開く新しい問題群を議論し、解くべき課題を定式化する。新しいアプローチによるアルゴリズムを設計する。

**A02: 社会を志向した革新的アルゴリズムの実装**

領域内で得られた理論的な成果を「社会変革アルゴリズム基盤」として広く社会に利用可能な形として実装し、理論研究者と応用研究者のインタフェースを構築する。

**B01: 大規模離散構造の理解と革新的アルゴリズム基盤の創出**

理論及び実装の研究者が互いのマインドを理解しながら、指数関数的に大規模な離散構造に立ち向かい、その構造を利用した列挙、数え上げ、グラフ、文字列処理、SAT などのアルゴリズムの設計技法を研究する。

**B02: 新計算モデルにおけるアルゴリズム・最適化**

現在の社会課題に適合する新しい計算モデルにおける離散数学・アルゴリズム・最適化分野の基礎研究、及び機械学習分野（主にオンライン最適化、深層学習）の解析、巨大グラフや巨大データを扱う超高速アルゴリズム開発に関する研究を行う。

**B03: 量子アルゴリズムの理論と実装を接続する革新的基盤の創出**

計算理論の研究知見と量子計算機を実際に利用する研究知見を融合して、古典計算機も活用しながら効果的な量子計算を行うための理論的基盤を創出することを目指す。

**B04: アルゴリズム基礎理論の追究・発展**

アルゴリズムの性能保証や精度保証、公平性、安定性、均衡性の解析、離散と連続の融合、新しい価値観に基づく計算モデルや計算量解析方法など、計算機科学の基礎理論や技法を追究し、新たな突破口の開拓を目指す。

**【どのような点でこれまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させるものであるか】**

計算機の黎明期には理論と応用は一体だったが、技術が高度に発達した現代では理論研究者と応用研究者の距離が離れており、両方を同時に深く究めることは難しくなっている。アルゴリズム技術の研究成果として実応用へ貢献するツールを提供することは重要であるが、本当に使われるためには個々の応用問題に特化する必要があり、しかし特化し過ぎると汎用性が失われてその場限りで完結してしまい、学術としての長期的な蓄積となりにくい。このような現状の課題を考えると、理論と応用をつなぐ何らかの良い「つなぎ方」を工夫する必要がある、それが学術として変革しなければいけない重要なポイントの1つであると考えられる。本研究領域で変革を目指すポイントは以下の3点にまとめられる。

**1. 研究テーマの変革：**

圧倒的に進歩した計算機性能や未来の革新的デバイスを前提として、理論研究の成果を社会変革につなげるための汎用的なモデルを再構築・体系化する。巨大グラフ、離散最適化、BDD, SAT, 列挙、量子計算理論など、特に日本が世界での存在感を持つアルゴリズムの分野をさらに伸ばし発展させる。

**2. 研究スタイルの変革：**

アルゴリズム研究のように高価な実験装置を用いない研究分野における大規模研究プロジェクトの効果的な運営方法を実践する。「理論と応用が出会う場となる研究コミュニティを作り、競争力の源泉となるアイデアを醸成し続ける」という取り組みを理論計算機科学の分野全体に水平展開する。

**3. 研究アウトプットの変革：**

難関国際会議や論文誌における論文業績はもちろん重要であるが、それだけに留まらず社会への波及効果も合わせて内部評価を行う。応用研究者との連携による実問題への適用、他のあらゆる科学技術分野への間接的貢献、実社会応用による経済的波及効果、および一般市民向けアウトリーチによる社会的インパクト等も積極的に評価する。

**【領域設定期間終了後に期待される成果】**

計算機性能の急速な進展や未来の革新的デバイスを見通して、理論と応用を有機的に接続する汎用的なモデルを再構築・体系化する。日本が世界で強みを持つ分野をさらに伸ばし、「革新的アルゴリズム基盤」として発展させる。理論と応用が出会う「場」となる研究コミュニティを組織し、競争力の源泉となるアイデアを醸成し続ける。難関国際会議や論文誌等の学術業績はもちろん重要であるが、それだけに留まらず、応用研究者との連携による実問題への適用、様々な学問への間接的貢献、実社会応用による経済的波及効果、及び一般市民への社会的インパクト等を考慮して研究活動を推進する。

## 5 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2頁以内で記述すること。

### 【審査結果の所見の概要】

「審査結果の所見」では留意事項の指摘はなく、以下のような中長期的な期待が述べられていた。

- ・ 新たな日本流アルゴリズム設計手法を体系化することが望まれる。
- ・ 学術・産業界を牽引する研究者・技術者の育成に期待したい。
- ・ 基礎理論が社会実装へ結びついた成果やその手法を具体的に示す工夫が望まれる。

なお「参考意見」として以下の事項が挙げられていた。

- ・ 研究項目 A で提案している「定式化プラットフォーム」や「実装技法の体系化」が具体的に示され、その活用事例が数多く得られるような成果を期待している。
- ・ 研究項目 B02 や B04 の理論的な研究と本研究領域の他の研究項目との連携の成果、特に理論研究の成果の実際的な活用事例の創出を期待している。
- ・ COVID-19 流行の中で、研究推進方法についても新たな手法を開拓し、同様の分野の研究者の模範となっていきたい。

### 【審査結果の所見（参考意見）への対応状況】

- ・ 研究項目 A でのプラットフォーム定式化や実装技法の体系化に向けた取り組み  
以下に示すような取り組みを進めている。

#### (1) 離散構造処理系「Graphillion」の拡張・発展形の検討と開発

これまでの湊 ERATO/基盤(S)で開発してきた離散構造処理系「Graphillion」をさらに拡張し発展させることを検討しており、「Graphillion Family」として体系化していく方向で議論を深めている。本研究領域の研究期間内に開発を進め「Graphillion 2.0」として一区切りさせることを目指している。

#### (2) 「グラフ数え上げ国際競技会」を開催

プロジェクト外部からも広くアイデアを受け入れることと、本研究領域の活動を国内外にアウトリーチさせることを目的として、国際アルゴリズム競技会を開催中である。今回は「グラフ数え上げ問題」を取り上げ、2か月程度の応募期間を設定する「マラソン型」のコンテストとした。2023年度前半に開催し、9月の情処学会/通信学会の共催大会 FIT2023 の企画セッションで表彰を行う予定である。提案アイデアは、可能であれば本プロジェクトの「Graphillion Family」に取り込み体系化を図る。

#### (3) 他の大型研究プロジェクトとの連携

日本の研究コミュニティは適度にコンパクトであり、大型研究プロジェクト同士の連携が取りやすいことが日本の強みであると考えられる。本研究領域では他の大型研究プロジェクトと積極的に連携しながら研究を進めている。主なものとしては、学術変革(B)「組合せ遷移」(代表:伊藤健洋(東北大教授))、CREST「学習/数理モデルに基づく時空間展開アーキテクチャ」(代表:本村真人(東工大教授))、WPI-ICReDD「化学反応創成研究拠点」(代表:前田理(北大教授))、理研 AIP センター(代表:杉山将(東大教授))とは、領域代表および関係者が直接/間接的に関与しながら研究活動を進めている。

#### (4) 人文・社会科学との連携

情報科学の研究者だけでなく、哲学・技術史学・文学等の文系研究者を A01 班でポスドク研究員として複数名雇用し、アルゴリズムを活用する側の人間や社会から見た有用性や研究の方法論に関する討論会を集中的に開催し、討論の結果を蓄積する取り組みを実行中である。情報学の進むべき方向

性として中長期的には重要であると考えている。

・ **研究項目 B02・B04 班の領域横断的な連携に向けた取り組み**

各計画班主催の「AFSA セミナー」をコロナによる活動制約下でも毎月定期的にオンライン開催してきており、これに副所属班として登録している他の計画班のメンバーにも参加を促すことによって、理論研究と応用研究をつなぐ取り組みを続けている。コロナの影響が落ち着いてきた 2022 年度以降は「短期集中セミナーシリーズ (SSSS-2022/3.xx)」と名付けたイベント（会議施設に 10～20 人程度が 1～3 日程度集まって集中的に議論するセミナー）を、これまでに 6 回開催している。このイベントは主に A02・B01・B04 班が中心となり、領域横断的な研究の場が形成されている。このような深い連携の呼び水となるための、やや広く浅いレベルの情報交換の場として「AFSA コロキウム」と呼ぶ半日程度の領域横断的な講演会+意見交換会も 2022 年度より新たに開始している。各計画班の持ち回りで講演者を担当し 1～2 か月に 1 度の頻度で 8 回開催している。

・ **COVID-19 流行の中での研究推進の工夫について**

対面とオンラインを組み合わせるハイブリッド型の研究スタイルを種々工夫している。これはコロナ対応だけでなく、空間的に離れた研究者の交流とソサイエティ作りに大きく関わる重要な取り組みである。春秋開催の領域会議では、オンライン化を逆手に取り、会議場の物理的制約がないことで研究協力者にも門戸を開く「領域集会」としてオープン化し、国内外の多数の研究者と連携するための機会として利用している。さらに 2022 年春に NII 会議室で開催した領域集会では、ハイブリッド形式のポスターセッションという、これまでにない新しい会議スタイルに挑戦し、十分に機能することを実証した。この結果は NII 主催の教育研究シンポジウムでも報告を行った。さらに 2022 年秋に京都市内の会議場で開催した領域集会では、ハイブリッド形式のポスターセッションを特殊な機材を使うことなく低コストで実現できることを実証し、以降の領域集会では、コロナ対応が不要となってもハイブリッドポスターセッションを無理なく継続させている。

一方で、多対多の同時会話が難しいオンライン会議の制約を逆手に取り、1 人の研究者の人物像に焦点を当てて対話形式のラジオ番組のような談話会を流す「AFSA 研究ラジオ」という領域横断イベントを開始した。今まで会議の休憩時間や懇談会などで行われていた、研究者の価値観や目標と言った、表に現れにくい個に関わる概念を広く伝えることにより、個別研究者に対する視点や考え方の拡大と言った研究能力の向上とともに、研究者間の相互理解と関係性の構築を以前より迅速に行うことを可能とした。これを研究領域全体向けに毎月 1 回、昼休みに実施して価値観の共有を図っている。2022 年度より開始してすでに 16 回を数えている。本研究領域内のこれまでの平均視聴率は 50%を超えており好評を博している。

以上の取り組みでは、東京神田と京都寺町の 2 つのサテライト拠点の存在が鍵となっており、対面とオンラインをつなぐ重要なハブ拠点としての役割を担っている。オンラインとオフラインを合わせ、適切な心理的安全性と、新しい人とのつながりとのバランスを調整することで、活発かつ有益な議論ができるようデザインしている。研研究コミュニティ（場）を形成するための拠点として有効に活用されている。

## 6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び(2)について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、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)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには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はどこまで研究が進展しているのか

(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について、(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。)

### 【A01 班】新しい概念に基づいたアルゴリズム・最適化の問題創出とその効率的求解方法の研究

A01 班の研究目標は、情報学、特にアルゴリズム理論に関わりのある、新しい問い立てを行うことである。情報学、アルゴリズム理論で扱われている問題は、それがモデル化され、定式化されてから大きな変化を持たず、同じ価値観の元研究されていることが多い。一方で社会のほうは大きな変化を続けており、新しい価値観や新しい現象が出現し、データや問題の解決方法も刷新されている。そのような時代の流れに追随し、未来に解くべき問題を考えるべく、広く多分野の研究者を集めて、ものごとの概念から議論して問い立てを行い、それをカタログの形で体系化するのが、A01 の目標である。

A01 の具体的な研究計画は以下の3つの項目からなる。1つ目は、新しい問題の群を作り、カタログとして体系化することである。同時に、新しい問題群を構築、あるいはデザインするために用いる概念のカタログを作ることである。例えば、地図のナビゲーションに使われる最短経路問題を考える。最短距離の経路を見つける問題として最初に定式化された後、時間やコストや渋滞などの要因や制約、様々なものが考えられてきたが、もっとも評価値の高い経路を見つける、という枠組みからは脱していない。一方で人がだれかに目的地までの行き方を説明するときには、「大別して3つの行き方がある」「高速道路を使う」「まずA市に行き、その後B市に行く」などの説明の仕方をするし、こちらのほうが、経路を選び、決める観点ではありがたい。このような観点は評価値の最大化でアプローチすることは難しく、新しい問題設定と解法の構築が必要となる。

具体的な研究方法は、人文学をはじめとする情報学以外の分野から多くの研究者を集め、1つ1つのトピックについて深い議論を行うことである。分野横断の議論で何かを構築していくことは通常非自明で時間のかかることであるので、議論の粒度を調整し、抽象的な概念を議論し、また具体的な問題の議論をすることを、議論の参加者を変更しながら行う。各議論は詳細な記録を残し、次回粒度や視点の異なる議論を行うときに容易にキャッチアップができるようにまとめておくことで、多様な結果を得られるような議論を効果的に行う。

2つ目は、議論プラットフォームの構築である。分野横断の議論を行う場合、価値観、概念、言葉などの違いから様々な障壁があり、実りのある議論をすることが難しいことが多い。このような障壁をスムーズに乗り越え、効果の高い議論を行うためには何らかの方法論が必要であるが、現状でこのような方法論を、特に情報学と他の様々な分野との連携において構築したものは見当たらない。そこで、本研究では、効果的な議論を行う方法論を体系化し、それを議論プラットフォームとして体系化する。

具体的な研究方法であるが、宇野が2011年よりオーガナイズしている、産業界、学術界、行政の分野横断議論会、未来研究トークで得られた、議論を効果的に進めるためのノウハウを用いて、上記問題カタログ構築のための議論会をデザインし、そこで何が起こるか、それぞれの参加者がどのようなことを考え、どのようなふるまいをするかを観察し分析する。その分析から得られた知見を用いて新たな、相互理解、信頼関係構築、自然と良い議論ができる雰囲気や場作り、題目の設定やファシリテーションなどの議論自体の手法などを開発する。開発した議論手法は、それを用いることで、同じ問いに興味を持つコミュニティの形成や、議論手法を用いた分野横断的な交流の場作りなどに応用していく。

3つ目は、創造した新しい問いを実際に研究することである。具体的には、A01の中の個人、あるいはAFSAの他班のメンバーや外部の研究者と共同で行うことを想定している。つまり、自分たちで作った問いを広く多くの人と共有し、具体的な研究活動へとつなげていく。

中間評価までの達成目標であるが、まず問題カタログについては、議論を進め、40%程度の量の完成を目指していた。議論プラットフォームに関しても同様であり、40%くらいの部分について体系化と記述を終わらせる予定であった。新しい問い立てからの研究については、3、4個の研究が同時並行的に進むこ

とを目標としていた。また、複数のコミュニティ形成、議論プラットフォームの成果物を用いた社会還元応用を行う。

次に現在までに得られている成果について記す。

**【問題カタログ】** 当初予定よりも遅れている。研究開始から議論を盛んに行っていたが、当初の想定よりも分野横断の相互理解と分野の壁を越えた意見、発想が困難であったため、まずは分野融合の難しさや分野ごとの特性や価値観などの異なり、議論プラットフォームの構築を急ぎ、効果的な議論の実現の技術を高めることに軸足を置いた。その結果として、60回以上の議論会の開催により問題カタログの材料となる概念収集は予定通り進んでいるが、それをさらに深く議論して情報学の問いに落とし込むところが進んでいない。

**【議論プラットフォーム】** 問題カタログからこちらに軸足を移したおかげで、当初の想定よりも大きな成果が得られている。具体的な、融合のための着目点、現在の分野融合の様相の整理、分野融合における難しさの整理、分野の異なりの整理、議論手法などの方法論を構築していった。これにより、相手の考えや内面、研究構想などをインタビュー形式で聞き出す「遡る問いによるインタビュー手法」、自身の研究を紹介するのではなく、研究に対する動機、面白さ、熱意、経緯、できていないことや考え方などの内面を話すことで迅速に相互理解を進める「内面自己紹介」、参加者の興味や熱意の度合いに応じて余計なコストをかけずに参加できる「興味の温度差に対応した議論形式」、など、具体的に体系化ができた手法を得ることができた。また、これらの手法を再構築して応用し、後述するさまざまなアウトリーチ活動を行っている。

**【新しい問い立てによる研究】** 現在までにいくつかの研究が行われている。A01 分担者の瀧川は、A01 班活動の中で機械学習における訓練データにないデータを探索する問題を、第2世代 AI の時代に研究されていた「機械発見」の現代的な新しい問題として考えることを考案し、その手法の開発を他プロジェクトで行っている。分担者の中小路は、地域に関わる明治初期からの多数の統計表をデジタル化し、そのビジュアルインタラクティブ性を創出することで出現する価値や意義を対象として、求解の観点からその問題を規定し、デジタル化過程に市民参加型プロセスを組み込むことによりアプローチする手法を構築している。代表の宇野と分担者瀧川は、ルービックキューブに代表される置換型パズルに対する人間の認知に沿った理解しやすい解法の構築方法に関する研究を行っている。また、代表者宇野と A01 班 PD Punzi は、文字列に対する一様な類似性という新しい概念を導入することによる非常に高速な比較アルゴリズムの理論を構築している。代表者宇野と A01 班 PD 橋本は、局所最適解を多数発生させてクラスタリングするという新しい手法により、既存手法に比べてはるかに高度な多様解を求め解の良質部品化を達成する最適化アルゴリズムを構築している。

**【コミュニティ形成】** 現在、新しい問いを作るコミュニティを2つ形成中である。一つはアーキテクチャとアルゴリズムを中心に、デバイスや計算機言語の研究者が集まったものである。コンピュータアーキテクチャの分野では、新しいデバイスを用いた新奇アーキテクチャの開発がときとして行われるが、アーキテクチャのより下流であるアプリケーション層の制約から現在のコンピュータアーキテクチャと同じ仕様での設計を求められ、そのため長所を活かしきれずにその有用性を発揮できないケースが存在する。しかし、このような短所はアルゴリズムや計算言語の対応により解決できる可能性が高く、つまりはこれらの分野で共同で新しいアーキテクチャとアルゴリズムを同時設計すれば、デバイスの長所を活かし短所を隠蔽する方法が開発可能となる。このコンセプトのもとに分野横断の議論を行い、問い立てと研究プラン、アーキテクチャの基礎設計を行うものである。ここに、議論プラットフォームで開発された、内面自己紹介や研究構想構築法などの手法を適用し、効果的な議論を行い相互理解と関係性の構築を極めて迅速に行うことに成功している。

もう一つは、信頼できる AI 領域のさきがけ研究者と、哲学や教育学、文学などの人文学研究者と、AFSA メンバーによる議論コミュニティである。信頼できる AI のさきがけ研究者は、信頼や解釈性、理解など人文学的な取り扱いを要する研究テーマを抱えており、一方人文学研究者の中には情報学の発展に伴う人文学的な研究対象の新しい発展や変化を得るべく情報学研究者との議論を求める人々がいる。それと、問い立てを求める AFSA 研究者が集まり、議論のコミュニティを構築している。ここでも議論プラットフォームの成果である議題の作り方や場の作り方、ファシリテーションの仕方などを用いて効果的な議論を行っている。AFSA としては研究の問いを立てること、および議論プラットフォームの応用事例として確立することが大きな目的となっている。

**【アウトリーチ】** A01 班で開発された交流手法、議論手法を応用して、さまざまなアウトリーチ活動を

行っている。一つは、インタビューによる研究構想の明確化手法を用いたファンドセミナーである。広島大学と理科大学で行ったが、通常とは異なる本質的なものが得られたと大変好評であった。また、内面自己紹介を婚活セミナーに応用し、スピーディーに興味を持ち合う方法を伝えたところ、2年間一度もカップリングすることのなかった参加者が翌日にカップリングに成功する、といった効果をあげている。

【若手育成】 A01で行っている異分野融合の議論自体が、若手研究者にとって非常に効果的な、研究力を高める場になっている。神田ラボで議論を行ってきた PD 達は自身が非常に多彩な視点を持ち、深く構造的にものを考えることができるようになったと異口同音に述べている。具体的には、後述するように、非常に多くの研究ファンドに採択されており、本人達の感覚だけでなく、実際にしっかりとした研究が行えるようになってきていることを示している。また、PD として雇用した若手研究者がすでに3人職を得ている、京大助教、名大助教、立命館 PD であり、高いレベルの職を得ることができている。

【研究費採択】 A01 班神田ラボで議論されてきた研究内容が発展し、様々なプロジェクトとして研究費に採択されている。A01 班の分担者、PD が代表者となっているものが、科研費若手研究×3、基盤 C×2、基盤 B×2、情報・システム研究機構戦略的研究プロジェクト FS×2、学術変革 A 公募研究×2、ACT-X×1 となり、さらに領域集会での招待講演をお願いした理研大武先生が、神田での議論をもとにして、ムーンショット研究に採択されている (A01 代表の宇野が課題推進者をしている)。

### 【A02 班】 社会を志向した革新的アルゴリズムの実装

#### (1) 中間評価実施時まで何を明らかにしようとし、どこまで進展しているか？

本計画班は、アルゴリズム研究と応用研究の間を接続すべく、アルゴリズム基盤という共通の場の実装することにより、応用研究者が個別のアルゴリズムを探索・検討せずとも最先端の革新的アルゴリズム群を利用できる仕組みを構築することである。アルゴリズムが持つ数学的な構造は維持しつつ、かつ、応用研究者は問題を容易に記述できるようなアルゴリズムと応用の「良いつなぎ方」を確立し、実応用問題を通してアルゴリズム研究の成果を社会に還元していく環境を構築することにある。この目標に対して3つの項目を軸に研究を進めている。

1. 他研究班が検討する最先端のアルゴリズム理論と応用研究とを結ぶ良いつなぎ方の確立
2. 計算機アーキテクチャの進展を踏まえた高効率な実装
3. 実装の応用問題への適用

これらの項目をより具体的に進めるため、計画においては中間報告時点までの実施項目として下記3つの目標項目を定めていた。

(項目1: つなぎ方) 問題の抽象表現形式の検討。特に、本研究分野で広く利用されている処理系である Graphillion で課題となっている無向グラフの「辺」のみを用いた問題抽象化形式の改善  
(項目2: 高効率) 計算機アーキテクチャを考慮した SAT ソルバー、ZSDD 線形ソルバーの実装  
(項目3: 応用適用) 実装改善サイクルの実証としての、通信網・電力網を対象とした解析・最適化  
以下これらについて中間報告時点での進捗状況を報告する。

項目1のつなぎ方については、当初予定していた単純な Graphillion の拡張、すなわち Graphillion が辺だけでなく頂点を取り扱えるようにする、という枠を超えて広く検討を行った。この結果、問題入力形式としてのグラフの補完する役割として単項二階論理(MSO)を用いたインタフェースと、問題入力形式をグラフではなく厳密被覆問題として取り扱うアプローチが有望であるとの考えに立ち、前者については Graphillion との結合モジュール、後者については実装の検討に加え、入力の処理が場合によっては指数的に改善できる技法の提案も行いトップ会議に採択された。

項目2の高効率な実装については、並列 SAT ソルバーについての研究を進めた。特に、同じ問題について複数回実行したとしても挙動が同様となるような並列ソルバーについて新しいフレームワークを提案した。

項目3の応用適用については主に通信インフラと高信頼機械学習の2方面から取り組んだ。

(項目3-1) 題目に掲げている「社会を志向」という観点をより強く意識し、単に応用問題というだけでなく、社会で広く意義のある対象として社会インフラの信頼性についての研究を題材に研究を進めた。従来独立故障のみを考慮していた設定を相関故障も取り扱えるよう拡張するなど複数の問題提案を行った上で、二分決定グラフに近い構造を用いた厳密解法を提案し、通信分野最難関会議を含む5件の会議に採択された。

(項目3-2) アルゴリズム技術の応用として、信頼性の高い機械学習にも取り組んだ。高信頼性機械学習に

おける反実仮想説明の生成について因果構造を反映した生成手法を考案した。また、誤りが許されない状況下での機械学習において、入出力の検証器を設けた場合の学習可能性についての限界を明らかにした。

以下では上記項目についてのより具体的な成果内容と、その他の進展について述べる。

## (2) 中間評価実施時までの研究成果

(項目 1) 厳密被覆問題すなわち集合とそのいくつかの部分集合が与えられた場合に、和集合が重複なく入力集合を構成するような組合せを見つける問題の全解列挙に関して、従来知られていた方法は入力サイズ(部分集合の総数)に比例した処理時間が必要であった。この制約はたとえば 2 次元盤面にポリオミノを敷き詰めるような設定であれば大きな制約とはならない。しかし実用的な問題の抽象表現として厳密被覆問題を考えた場合には、入力サイズは指数的に大きいものも含めて取り扱えることが望ましい。分担者の西野らが提案した「DanceDD」というデータ構造を用いる厳密被覆問題解法手法は、圧縮された入力を圧縮したまま厳密被覆問題求解に用いることに成功した。この手法は難関国際会議 IJCAI に採択された。

(項目 2) 従来の多くの並列 SAT ソルバーは、各々のスレッドの間での情報交換において同期を取らないため、実行結果に再現性がない非決定的動作となっていた。決定的ソルバーも存在したが、実装に専門的知識が求められ、開発が容易ではなかった。分担者の鍋島らは、並列 SAT ソルバーであっても再現性のある挙動を効率的に行うための新しいフレームワーク「DPS」を提案した。加えて、このフレームワークを活かして参加した SAT ソルバーの競技会 SAT Competition 2022 において、並列部門 Main Track において 2 位、Anniversary Track において 3 位を獲得し、その有効性を示すことができた。また、現時点での成果ではないが、研究計画に掲げていた計算機アーキテクチャを考慮した高速化を加速するために、並列化に関して実績のある美添が新規に分担者に加わった。本計画班ではハッシュ駆動並列探索に取り組む予定である。

(項目 3-1) 従来のネットワーク信頼性問題の設定では、リンク故障は独立、特定ノード間の相互接続のみが計算対象、得られる指標は確率値のみ、といった強い前提条件があった。これは、このような条件の下でなければ計算が困難であったことに起因していると考えられる。この 2 年間で、代表者の安田らは研究協力者の NTT 中村健吾と共同で、(1)リンク故障が独立ではなく依存関係がある場合の考慮、(2)ノードにクライアント・サーバの概念を導入しすべてのサーバと接続できる確率の計算、(3)確率のみではなく確率の分散や期待接続ノード数の計算を可能とする、という 3 つの方向で、従来の前提条件の緩和・拡張を行った。いずれについても厳密解を実用的な計算時間で計算可能なアルゴリズムを考案した。効率的な二分決定グラフの構築とその上での動的計画法により、従来手法を準用した場合に比べ、理論計算量、実計算時間の双方において大幅な高速化を達成した。これらの成果は通信分野最難関会議 IEEE INFOCOM, IEEE 旗艦会議 ICC および GLOBECOM の 3 つの会議に 5 本採択された。

(項目 3-2) 機械学習においては、解釈しやすい離散的ルールのために、モデル出力の予測の改善入力方法を提示する「反事実説明」に取り組んだ。因果構造を反映した反実仮想説明の整数計画法を用いた生成手法を開発し、人工知能分野のトップ会議 AAAI, 難関会議 AISTATS に採択された。本結果は報道面でも日本経済新聞や各種ウェブメディア等で報道されるなど社会的関心を集めた。誤りが許されない状況における機械学習を想定し、入出力内容の検証器を設けた場合の学習可能性について理論的な検討を行った。推論時のみ検証器を使う場合には仮説クラスが PAC-学習可能なら予測誤差保証つきで仮説獲得可能であること、学習時にも検証器を使う場合には Rademacher 複雑度による予測誤差は検証機を使っても悪化しないことを証明し、機械学習分野の最難関会議 NeurIPS に採択された。

以下、その他の進展について述べる。

- ・ 高速非同期ストリーム索引について、分担者の有村を含むグループは、一本の成長する系列の索引である接尾辞木のオンライン線形時間構築法を、非同期に成長する複数本の系列の索引である「全オンライン接尾辞木」に自然に拡張することに世界で初めて成功し、その線形時間アルゴリズムを与えた。
- ・ 小さく高精度な予測モデルの列挙、非構造・構造データの検索・最適化について、それぞれ 国際会議 MDLM, CPM に採択された。
- ・ 本領域が関わる手法で、ソルバーとしても用いることができる技法は複数存在する。具体的には決定グラフ、厳密被覆、SAT ソルバー、MIP ソルバーなどである。これらが共通して性能比較できる題材として、B01 班上原を中心に、Rep-tile パズルの解の発見について取り組み、当計画班からはパズルの厳密被覆問題への変換および DanceDD を用いた解法を提示した。この取り組みのように、同じ

土俵で分野の異なる技法を比較できる場を提供することは重要であるとの観点から、「国際グラフ数え上げコンペ」を計画した。初回は 2023 年 4 月から開始し、長さ制約下での指定端点間のパスの数を求める問題である。

## 【B01 班】大規模離散構造の理解と革新的アルゴリズム基盤の創出

### (1) 中間評価実施時まで何を明らかにしようとし、どこまで進展しているか？

B01 班では、入力サイズに対して指数関数的に大きな解空間を持つ組合せ問題に対し、以下の 2 つの観点から大規模離散構造を理解し、その構造を利用したアルゴリズムの設計技法の体系化を目指している。一つは「風潰しで（つまり総当たりで）解空間を探索するよりも本質的に速く解を得る理論的性能保証のあるアルゴリズム」であり、もう一つは「入力として与えられる多くの典型的な問題例に対して、最悪時の計算時間の理論的性能保証よりも速いオーダーの実行時間で動作するアルゴリズム」である。

これまで、指数関数的な壁に立ち向かうアルゴリズムは、理論や実用の個別の分野において、個別のアイデアに基づいて設計されてきた。本研究課題ではこうした成功事例をケースワークとして理論計算機科学の観点から改めて観察し、大規模離散構造をどのように利用しているかを整理する。この大規模離散構造に関する理解に基づき、理論と実装の研究者が一体となって、理論的に良好なだけでなく実用に供せることを念頭に、大規模離散構造処理のための革新的アルゴリズム基盤技術の構築を目指している。

このために、二分決定グラフ (BDD; Binary Decision Diagram) やその亜種のゼロサプレス型二分決定グラフ (ZDD; Zero-suppressed BDD) のアルゴリズム、逆探索による列挙アルゴリズム、グラフ探索アルゴリズム、文字列処理アルゴリズム、論理式の充足可能性判定問題 (SAT; satisfiability problem) の充足解探索アルゴリズムなどの観点から、大規模離散構造に関する問題において、場合分けや数え上げ、列挙、索引化、組合せ遷移などを念頭にケースワークを通して、各観点で個別に進められてきたアルゴリズム設計の技法の融合を行っている。

これまでに、本研究課題の目的を共有し、理論と実装の両方の観点から個別の研究テーマを越えた技法の連携を促進するために、本学術変革領域の領域集会で周知に加えて、オンライン、ハイブリッド、対面での B01 班の研究集会、チュートリアル、短期滞在セミナーシリーズ (SSSS; Short-Stay Seminar Series) を計 14 回開催した。これには、B01 班の研究者だけでなく、本領域の他班や領域外の研究協力者も積極的に参加し、アルゴリズム設計技法の融合に向けた取り組みが進んでいる。本研究課題の進展は、以下の通りである。

BDD/ZDD アルゴリズムに関する研究については、グラフを扱う BDD/ZDD アルゴリズムの開発・実装と、そのアルゴリズムを応用分野の研究者が自身の研究に利用することの間には、大きなギャップがある。このギャップを埋めるツールの 1 つが BDD/ZDD によるグラフ操作ライブラリ Graphillion であるが、定型的な利用の枠を外れて新たなアルゴリズムを試すことは困難であった。これに対し、Graphillion に新たなアルゴリズム記述をより柔軟に組み込むことができるよう、その仕組みの検討を行った。

また、BDD/ZDD アルゴリズムは、解空間の中で制約条件を満たす解を圧縮した状態ですべて得る列挙・索引化に主に用いられてきた。一方、最適化アルゴリズムは、制約条件と併せて目的関数が与えられ、制約条件を満たす解の中で目的関数値が最大/最小のものを求めるのに用いられてきた。解の多様性の観点から、目的関数値が閾値以上/以下の解をすべて得るアルゴリズムを開発し、BDD/ZDD による列挙と組合せ最適化を融合的に発展させた。

制約を充足する解を得るとの観点では、制約充足ソルバーには BDD/ZDD によるアプローチのみならず、混合整数計画法 (MIP) や SAT ソルバー など、さまざまなアプローチがある。それらのアプローチを同じ土俵で性能比較し、利害得失を議論するために、Rep-tile と呼ばれるパズルを取り上げた。パズル業界で 50 年以上にわたり未解決だった問題例に解決を与えただけでなく、誰もが平易に理解できる問題記述にもとづいて同じ土俵で分野の異なる技法について性能比較を行ったことが特徴である。

列挙技術と文字列処理アルゴリズムの融合の観点から、文字列をそれより小さなサイズの文法により導出する文法圧縮表現の理解に取り組んだ。文法圧縮は、圧縮された文字列を陽に展開することなく文字列処理を行う圧縮文字列処理との相性がよく、他の多くの文字列圧縮表現からの変換が容易に可能なため、注目を浴びている文字列表現手法である。1 つの文字列に対し、その最小サイズの文法は複数あり

えるため、最小文法の列挙を行い、その特徴づけを行った。

## (2) 中間評価実施時までの研究成果

BDD/ZDD によるグラフ操作ライブラリ Graphillion では、定型的な利用は可能であるが、新たな BDD/ZDD アルゴリズムを必要とする場合には、BDD/ZDD の理解に基づくアルゴリズム設計と、C++ での詳細設計が必要である。このギャップを埋め、アルゴリズム研究と応用研究をシームレスに接続するために、これまでの Graphillion の利用形態に加えて、予約語レベルでの API を組合せての利用、新たな予約語を C++ レベルで実装し既存の予約語と組み合わせ利用、といった段階的モデルの提案を行った。

BDD/ZDD による列挙と組合せ最適化の融合においては、BDD/ZDD の区間メモ化探索によるコスト制約組合せ問題の解列挙技法を開発・実装した。この問題は、たとえば近似率 20% の近似解の中でランダムサンプリングを行いたい場合や、統計検定の p 値計算など、観測された解より上位にある解の個数を正確に求めたい場合などに有効である。計算機実験においても、分枝限定法や SAT/ASP ソルバーを利用した手法よりも良好な結果を得た。

Rep-tile は、うまく分割すると自分自身と相似な複数の合同図形に分割できる図形のことをいう。単位正方形を組み合わせた図形であるポリオミノの rep-tile は、単純で定式化も容易であり、多くのソルバーで自然な形で定式化して解かせることができる。このため、異なるソルバーを比較するための共通の基盤としての役割を果たすことができる。3 種類のポリオミノに焦点をあて、A02 班および酒井、橋本(名大)の協力のもと、Knuth の dancing links、整数計画法、厳密被覆問題を利用する手法、danceDD による手法、解集合プログラミング (ASP; Answer Set Programming) による手法などの比較を行った。また、解の個数の数え上げに特化して、重み付き投射モデル計数ソルバーによる手法も同じ土俵にあげ、その高速性を確認した。

列挙技術と文字列処理アルゴリズムの融合においては、規則的な文字列の 1 つであるフィボナッチ文字列を導出する最小サイズの文法の列挙を行った。この列挙により、文字列を導出する文法に関する理解が深まり、フィボナッチ文字列の最小文法は、有名な文法圧縮アルゴリズムの 1 つである RePair によって完全に特徴づけられることが分った。

公募研究で採択された伝住は、ZDD の拡張に取り組んだ。ZDD は有向非巡回グラフによる集合族の表現法であるが、これを拡張して集合族の族等の高階の離散構造を扱うための表現法、および当該データ構造上での演算アルゴリズムの検討を行った。

公募研究で採択された Köppl は、文字列処理アルゴリズムの開発に取り組んだ。特に、文字列の圧縮法非依存な反復性指標として知られる string attractor を対象に、ASP の観点から最小 attractor の求解法を開発し、文字列処理アルゴリズムと ASP 技術の融合を図った。

公募研究で採択された斎藤は、ZDD 列挙において、グラフ同型性を考慮して標準形となるグラフのみを列挙する手法の開発に取り組んだ。二部置換グラフ、鎖グラフ、補鎖グラフ、しきい値グラフが長さ  $O(n)$  の二値文字列で表現できることに着目し、ZDD による列挙アルゴリズムを開発した。また、最大クリークサイズや辺の本数などの制約を加えたグラフ列挙への拡張に取り組んだ。

また、PD の三重野は、上記の列挙技術と文字列処理アルゴリズムの融合に大きく貢献し、電通大に助教として採用され、その後、第 2 期の公募研究に採択された。同じく PD の Hoang は、B02 班の Avis と連携して組合せ遷移問題に取り組み、ベトナム国立大 (VNU) に講師として採用された。両名とも、順調にキャリアパスを描いている。

## 【B02 班】新計算モデルにおけるアルゴリズム・最適化

### (1) 中間評価実施時まで何を明らかにしようとし、どこまで進展しているか？

本計画班の研究者グループは、過去 10 年の間、理論計算機科学のトップ国際会議である STOC, FOCS, SODA で数多くの論文を発表し、SODA2013, STOC2017 にて最優秀論文賞受賞するなど、世界の当該分野をけん引するような研究成果をあげてきた。本計画班では、理論計算機科学分野のさらなる強化、特にグラフアルゴリズム、計算量理論、組合せ最適化のそれぞれの分野での世界的な研究成果発信を目指し、かつアルゴリズム研究における世界的拠点の構築も目指す。

本計画班は、現在の理論分野 (STOC, FOCS, SODA 等) で活発に研究されている以下の分野に取り組

む予定であった。

1. 離散アルゴリズム，計算理論において現れる構造の解析  
(特にグラフ構造理論と「学習」における計算可能性と不可能性の解析)
2. 組合せ最適化分野における高速アルゴリズム開発，精度保証改善と機械学習への応用  
(特に多面体論的アプローチの深化と「想定外設定」での組合せ最適化問題)
3. 巨大データ (ハイパーグラフ，高次元データなど) 解析のための「疎化 (sparsification)」

これらの分野は，それぞれが理論計算機科学分野のみならず，人工知能分野の中核をなす機械学習やデータマイニングにも大きな影響を与えている。以下，項目 1~3 に対しての進展を説明する。

項目 1 に関しては，以下の 2 つの問題に取り組み多くの進展を得た。

(1-1) 「無向グラフに関するグラフマイナー理論を有向グラフへ拡張することは可能か？」というテーマが離散数学・グラフアルゴリズム分野の中で現在，非常に大きな研究課題となっている。現在までに，グラフマイナー理論の 10 本目の論文まで拡張ができるようになった。

(1-2) 計算理論において「どのような関数であれば効率的に学習できるか？」という問いは非常に基礎的な問題であるが，いまだに解明されていない課題が多い。ここでいう「学習」とは，未知のブール値関数が与えられたときに，その関数を近似的に表現するような最小の論理回路を求める，という問題である。本計画班では現在までに，学習の計算困難性について長年の未解決問題を解決した。

項目 2 に関しては，現代の組合せ最適化研究は，Edmonds による最大重みマッチング問題の解決で導入された多面体論的アプローチを基盤としている。実際に多面体論的アプローチの深化による理論構築は，組合せ最適化における中心的研究課題である。本計画班では，現在までに組合せ最適化問題の中でも中心的改題と知られている最大本数の辺素なパス問題に対して，具体的に構成する効率的なアルゴリズムを与えた。

項目 3 に関しては，無向グラフの情報を保ったまま圧縮する手法として cut sparsification と spectral sparsification と呼ばれるものがある。前者はカットの情報を保持し，後者はカットの情報を含むスペクトルな情報 (ラプラシアンと呼ばれるグラフに付随する行列の二次形式) を保持する。sparsification (疎化) はグラフを効率よく処理するための基盤技術として，現在まで盛んに研究されてきた。本研究では，現在までにグラフの拡張である「ハイパーグラフ」に対して本質的貢献を行った。

以下で具体的な成果を述べる。

## (2) 中間評価実施時までの研究成果

上記の項目(1-1)に対しては，代表者の河原林が 2022 年にグラフマイナーの 10 本目の論文の結果を有向グラフに拡張，そして 2023 年には，グラフマイナーの 13 本目の論文の結果を有向グラフに拡張することに成功した。これらの研究成果では，有向グラフ特有の「困難」な状況を打破し，独自の道具を發展させた。また平面無向グラフの分割定理を有向グラフに拡張した 2021 年の結果は，アルゴリズム分野で長年未解決であった問題の解決となり，その後の分野の發展に寄与することが期待されている。

項目(1-2)に関しては，分担者の平原が 1991 年の Ker-I Ko による未解決問題の完全解決に成功した。背景として，与えられた正例・負例を正しく分類する最小の仮説を計算する問題はオッカム学習と呼ばれており，計算量的学習理論において中心的な研究の対象である。仮説クラスを制限した場合には NP 完全であるということは知られていたが，一般のプログラムの場合については 1991 年から未解決であった。平原はこの未解決問題を解決し，与えられた正例・負例を正しく分類するプログラムのうち，最小の大きさのものを効率的に計算する問題が NP 完全であるということを証明した。また，同様の証明技法を使い，NP 完全性の概念が導入された 1970 年代に遡る未解決問題であった部分関数版の回路最小化問題の NP 完全性を証明した。これらの研究成果は国際的に高く評価されており，Complexity result of the year 2022 に選出された。

項目 2 に関しては，分担者の岩田が，組合せ最適化において，多面体論的アプローチによって本質的な進展を与えている。背景として，最大本数の辺素なパスを具体的に構成する効率的なアルゴリズムは，マトロイド・マッチング問題と呼ばれる一般的な問題に帰着する以外には知られていなかった。岩田は，研究協力者の横井 (当時 NII，現在東工大) と共同で，この問題を直接的に解く組合せ的な多項式時間アルゴリズムを開発した。グラフの辺の本数を  $m$  とするとき，このアルゴリズムの計算量は  $O(m^2)$  となっている。

また項目 3 に関しては，分担者の吉田が，ハイパーグラフのカットや二次形式の情報を保ったままハイパーグラフから枝を取り除く sparsification について研究を行なった。一般に，ハイパーグラフは頂点

数を  $n$  として  $O(2^n)$ 個の枝を持ちうるが、枝数  $O(n \log^3 n)$  で sparsification ができることを 2021 年に示した。またハイパーグラフよりさらに一般的な劣モジュラ関数の和に対しても sparsification が可能であることを 2022 年に示した。さらに吉田は、入力を全て読み込まずに問題を近似的に解く劣線形時間アルゴリズムにも取り組んでおり、与えられた実関数  $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$  が低次の多項式かどうかを  $n$  に依存しない時間で (近似的に) 判定するアルゴリズムや、最大カット問題に対する近似をおおよそ  $O(m^{1/2})$  時間で行うアルゴリズムなどの成果を 2023 年に得た。

以下では、公募研究に関する研究成果を記す。

公募研究者の谷川は、シンボリック行列の離散構造論の工学システム解析への応用として、ユークリッド空間内の点配置同定問題を考察した。この問題は、ユークリッド空間内の点集合の配置(つまり各点の座標)を、観測可能な点部分集合間の代数的依存関係から同定する問題である。谷川は、特に点配置の同定可能性と観測の離散構造の関係を解析した。背景として、まず配置の有限性の解析は、対応する代数多様体の一般の点における接空間の解析に帰着可能である。この接空間はある種のシンボリック行列で表現可能であり、谷川は、そのシンボリック行列から定まる代数的マトロイドと、観測の組合せ構造から定まる疎性マトロイドとの関連性を明らかにした。さらにこれを利用して、点配置の有限性を保証するために必要な観測集合の組合せ的な必要条件・十分条件を導出した。また谷川は、一意性解析においては、代数幾何におけるセカント点同定性条件とグラフ剛性理論における組合せ的解析手法の融合を行い、ある種のシンボリック行列の階数が点配置の一意性を保証することも解明した。

公募研究者の泉は、(分散)グラフアルゴリズムの研究領域を対象とする適切な粒度での抽象化に基づき、利用容易性と高効率性の両立を目指した分散アルゴリズム設計基盤の創出を目指し研究を行った。背景として、多数の計算機を相互接続した分散システムにおけるアプリケーション開発のための基盤となる、高度に抽象化された分散アルゴリズムの充実が求められている。泉は主たる成果として以下の 2 点を得た。なお (1) に関しては、同じく公募研究者の Schwartzman との共同研究である。

- (1) 何らかの与えられた制約を満たすような経路のうち最短であるようなものを発見する問題 (制約付き最短経路発見問題) について、分散システム上で効率的に求解可能であるような制約のクラスを定式化するとともに、それに対応するアルゴリズムを設計した。
- (2) 与えられた故障リンク集合の下での任意の 2 点間の連結性を判定するための、省スペースな分散型データ構造(耐故障連結性ラベリング)に対する、新たな決定性アルゴリズムを提案した。

### **【B03 班】量子アルゴリズムの理論と実装を接続する革新的基盤の創出**

#### **(1) 中間評価実施時まで何を明らかにしようとし、どこまで進展しているか？**

B03 班は、将来、大規模でエラー訂正可能な実用的な量子計算機が実現した時には、量子計算機と現在の計算機 (以下、古典計算機) を協調して利用するために、「計算理論からの古典計算と量子計算の能力の比較に基づいた量子・古典の協調設計の枠組み」の構築を目指している。そのために、中間評価までに、以下の 5 つの量子計算のモデルの計算能力に関して新たな知見を積み重ね、古典計算に比べて量子計算が得意・不得意とする問題領域を理論的に明らかにすることを計画とした。また、現状利用で可能な量子計算機を利用する手法についての実践的な研究の知見も集積することを計画としている。以下ではこれらの 6 つの研究項目について現在までの成果について述べる。

#### **① 万能量子計算モデルに関する研究**

まず、通信を含む万能量子計算モデルの代表的計算モデルである量子通信計算量モデルについて、秘密同時通信 (PSM) モデルという計算モデルの量子版を新しく導入して、その計算モデルにおける量子優位性を明らかにした。具体的には、量子もつれの PSM モデルにおける有用性を解析するため、入力データをもつ参加者が量子もつれ状態を共有する場合とそうでない場合の量子通信計算量の差異について研究した。その結果、両者に指数的な通信量の差が生じるような問題を発見した。また、データの等価性判定問題に関連する自然な問題についても両者に通信量の差が生じることを示した。次に、量子対話型証明および対話を一方向通信に制限した量子非対話型証明について、検証者が複数であるという状況を新しく導入して、その状況における量子優位性や量子計算特有の性質を証明した。量子非対話証明においては、検証者がネットワーク上に配置された状況において、各検証者が持つデータが同一であるか否かを問うというデータの等価性判定問題に対して、証明者からのメッセージが量子の場合、指数的に短くすることができることを明らかにした。量子対話型証明においては、通信ラウンド数が任意の定数か

ら 5 回まで削減できるようなユニバーサルな変換方法が存在することを証明した。

## ② 能力が限定された量子計算モデルに関する研究

限定された量子計算モデルに関し、主に以下に述べる(a), (b)の 2 つの成果を得た。

(a) 機能やサイズが制限された量子回路において、ある種の計算量的仮定のもとで、その出力分布が古典計算では効率的に模倣することができない(=量子超越性を持つ)具体例が知られている。しかし、これらの結果は、物理実装時のノイズが全くない理想的な条件を仮定している。本研究は、(理想的な条件のもとでは)量子超越性を持つ量子回路を含む量子回路クラスに対して、出力時に典型的なノイズが発生する条件下では、古典模倣可能である場合があることを示した。本成果により、量子超越性を得るためには、量子回路実行時に発生しうるノイズを十分考慮すべきことが明らかになった。

(b) 近い将来までに開発が見込まれている量子計算機(いわゆる NISQ 計算機)は、誤り訂正機能を持たないため、計算結果(=出力量子状態)の正しさを検証する必要がある。このためには、正しい量子状態を別に生成して、出力された量子状態と比較することが有効であるが、これでは検証対象の量子計算機と同等以上の能力を持つ量子計算機が必要になる。本成果では、検証対象の NISQ 計算機よりも小さいサイズの信頼できる量子計算機が使用可能であるという仮定のもとで、効率的に検証する手法を与えた。

## ③ 測定ベース量子計算モデルに関する研究

測定ベース量子計算には欠かせないグラフ状態の効率的な生成について研究した。グラフ状態は 1-qubit のクリフォードゲートと 2-qubit のクリフォードゲートを用いて生成できる。このときに 2-qubit のクリフォードゲートの個数を最小化する問題を考える。本研究ではグラフの持つパラメータであるランク幅を使って必要な 2-qubit クリフォードゲートの個数の上下界を導出した。具体的にはランク幅  $r$  のグラフ  $G$  についてグラフ状態  $|G\rangle$  を生成するのに  $O(rn \log n)$  個の 2-qubit クリフォードゲートがあれば十分であることを証明した。また一方で  $n + r - 2$  以上の 2-qubit クリフォードゲートが必要であることを証明した。この結果は 2-qubit クリフォードゲートの個数の上下界として初めて得られたものである。また、非適応的測定型量子計算のモデルで効率的に計算できる論理関数が定数段の古典回路計算モデルである ACC0 に深い関係があることを示唆する結果も得られた。こちらは引き続き研究を続けて、具体的な結果を得る予定である。

## ④ 量子分散計算モデルに関する研究

まず、量子分散計算に関して、 $k$ -clique 問題(与えられたグラフがサイズ  $k$  の完全グラフを部分グラフとして持つか判定する問題)を解く高速な古典分散アルゴリズムの開発を行い、量子通信による更なる高速化を達成する手法を提案した。その手法を用いて、様々な重要なグラフ問題に対して、古典分散アルゴリズムより高速な量子分散アルゴリズムの構築に成功した。次に、分散検証という枠組みでは、古典の証拠より指数的に短い量子証拠を用いて、データの整合性を検証する量子プロトコルを構築し、分散検証における量子優位性を初めて証明できた。最後に、通信計算量理論の枠組みにおいて、与えられた二つの確率分布の距離を求める問題をはじめ、いくつかの重要な問題に対して、優位性のある量子プロトコルを開発した。また、量子プロトコルの通信計算量の限界を明らかにするため、新しい手法を開発した。その手法を用いて、様々な関数(対称関数など)に対して、タイトな下限を示すことに成功した。

## ⑤ 量子回路モデルに関する研究

量子ブール回路において、T ゲートの数を減らすことが非常に重要である。Toffoli ゲートの論理機能をより少ない T ゲート数で近似する、Relative-Phase Toffoli (RTOF) ゲートが提案されている。量子ブール回路を構成する Toffoli ゲートを RTOF ゲートで置き換えることで量子ブール回路の T ゲートの数を減らすことができる。しかし量子状態の位相を考慮すると、全ての Toffoli ゲートを RTOF ゲートに置き換えることはできない。そこで、量子ブール回路を構成する全ての Toffoli ゲートを RTOF ゲートで置き換え、変化した位相をコストの小さな S ゲートで修正する手法を考案した。考案した手法では、位相を修正するための関数を作成する必要があるが、RTOF ゲートと S ゲートを組み合わせた回路や量子ブール回路内の関数を利用することにより、追加で必要となる T ゲートの数を削減する。考案した手法を用いることで、既存手法より T ゲートの数をベンチマーク回路に対して平均で 6.0%、最大で 15.0%削減することに成功した。

## ⑥ 実践的な量子計算の利用に関する研究

本研究項目では、不完全な量子計算機でも動作する実践的なアルゴリズムを構築し、その性能評価を

行うための数理基盤を構築することを目標としている。実践的アルゴリズムとして、まず[Y. Sato, et al., arXiv: 2302.12602]では、一般化固有値問題を近似的に解くための量子アルゴリズムを開発し、手法を有限要素法による材料選定問題に応用した。また、[Q. Gao, et al., Intelligent Computing, 0037, 2023]では組合せ最適化問題を解くための量子アルゴリズムを開発し、発光効率が最大となる分子置換最適化問題に応用した。さらに、[K. Kishi, et al., IEEE J. ESTCS, 12-3, 602/613, 2022]では、グラフ分類問題を解く量子機械学習アルゴリズムを開発し、分子構造から決まる性質(ガン化しやすい/しにくいなどの性質)を分類する問題に応用した。これらの量子アルゴリズムを動作させるための量子回路は調整パラメータを含んでおり、何らかのコスト関数を下げることで適切な量子回路を決定するという学習過程を必要としている。そこで、[K. Nakaji, et al., arXiv:2109.03786], [Y. Suzuki, et al., arXiv:2106.10981]では、学習過程が効率よく進むための構造を提案した。

## (2) 当初の計画にはなかったが、本課題に関連する研究成果

特筆すべき結果として以下のものがある。

データの等価性判定問題に対する量子優位性の成果は量子情報科学のトップカンファレンスであるQIPで発表することができた。また、上記の量子優位性を保証するための古典の下界証明には、ASFAコロキウム等で得た他班の研究者の意見を参考にするなど当該プロジェクトに参加したからこそ得られたものも多い。

上で述べた k-clique 問題に対して、高速な量子アルゴリズムを提案するだけでなく、NISQ デバイス (IBM-Q 量子コンピュータ) 上での実装も行った。IBM-Q の量子ボリューム指数成長予測とエラー解析の結果に基づき、提案された手法が実際のデバイス上で効果的に実行できると推定される時期も見積もった。

## **【B04 班】アルゴリズム基礎理論の追究・発展**

### (1) 中間評価実施時まで何を明らかにしようとし、どこまで進展しているか？

B04 班では、現在の高度情報化社会を駆動する「アルゴリズム」の基礎理論をさらに追及し展開させること目的とする。P vs NP 問題に代表されるように、アルゴリズム分野において未解決に残された部分は数多く存在する。一方、情報学、工学、農学、医学など多様な応用分野では、それぞれに特化したアルゴリズムが開発されているが、それらアルゴリズムを飛躍的に進化させるためには、基礎理論の革新が必要不可欠な現状にある。そのため B04 班ではアルゴリズムとデータ構造という 2 つの専門分野を統合させ、アルゴリズム品質保証技術ならびに応用分野との連携に力点を置き研究を遂行した。

具体的には、アルゴリズムグループは、最適化、論理的、学習論的、計算論的というキーワードをもとに、それぞれの分野で用いられているアルゴリズム設計や解析技法をさらに深化、汎用化することを目的とした。中間評価実施時までには、多主体系に関するアルゴリズム技法の開発、計算困難な問題に対するパラメータ容易性に関するアルゴリズム開発などを目標とした。一方、データ構造グループは、データを圧縮したままで効率的に用いることができる圧縮技法やそれを用いたアルゴリズム技法の開発、およびデータ構造に着目した計算生物学におけるアルゴリズム技法の開発を目標とした。中間評価実施時までには、グラフクラスの構造を利用した圧縮技法開発を目指した。また、応用分野との連携に関しては、実用化を考慮して産業界との連携を模索した。中間評価実施時までの成果としては、80本程度の学術論文の出版、並びに国内外の学術賞の受賞などからも分かるように大きな成果を収めている（具体的な成果は(2)で述べる）。さらに産業界との関係としては、トヨタ自動車と連携し、自動車産業界における問題を「アルゴリズム」という視点で取り組み、すでに研究成果を出している。それ以外に国内外の学生論文賞を9件も受賞するなど若手が大きな研究成果を収めている点も特筆すべきである。

### (2) 中間評価実施時までの研究成果

1. 計画研究 (アルゴリズムグループ)
2. 計画研究 (データ構造グループ)
3. 公募研究

の順で代表的な成果のみを記す。計画研究 (アルゴリズムグループ) に関しては4つの成果に絞る。

(1-1) 無線基地局への周波数割り当てという実応用をもつグラフ最適化問題を扱った。この問題は、NP 困難と呼ばれる問題群に属し、高速に最適解を求めることが困難とされている問題である。そればかり

か近年の研究により自然なパラメータ1つを用いたパラメータ計算量の観点からも難しい問題であることが知られている。この問題に対して複数のパラメータに着目することでそれらに対しては、高速なアルゴリズムが設計可能であることなどを示した。これらの成果は、分散計算モデルに関する国際ワークショップ (APDCM2023) で **Outstanding Paper Award** を受けるなど国際的に高く評価されている。なお、この研究は B04 班に所属する公募研究者との共同研究である。

(1-2) 物流やサプライチェーンに応用をもつ再配置問題について考察した。より正確には、すべての品が個別で並列作業ができ、その再配置にかかるコストが他の移動に関係せず独立であるという現実的な一つの設定について扱った。この設定において、移動時間や各倉庫の入出の制限という条件毎に計算量解析を行い、効率的なアルゴリズムの開発、あるいは線形計画問題を利用した逐次緩和アルゴリズム手法の拡張を行い、近似アルゴリズムの開発に成功している。このことは、国際会議 COCOON 2022 で **Best Paper Candidate** を受賞している。

(1-3) 推薦システム等、e コマースの分野で幅広い応用をもつオンライン行列補完問題に取り組んだ。この問題をオンライン半正定値 (OSDP) 問題に帰着する手法が知られているが、真値行列に関する補助情報が与えられるという仮定のもとでは、改善の余地があった。本計画班では、帰着の際に用いる正則化項を、補助情報を用いて補正することで、誤り回数のタイトな上界を導出することに成功した。この知見は、オンライン最適化アルゴリズムの設計に際し、正則化項の選択に対する知見を与えるものとして意義がある。

(1-4) タクシーなど多くの乗客から順次もたらされる要求に応じて効率よく運行する戦略について、顧客の乗車時間、乗降場所などの情報が時々刻々と与えられるオンライン問題として研究を行い、複数台の機械 (タクシー) が与えられた場合の競合比に関して、理論的に最適性の保証されたアルゴリズムの開発に成功した。これはトヨタ自動車との共同研究であり、実用のシステム開発を見据えたアルゴリズムの理論的な成果である。

それ以外にも充足可能性問題の計算困難性に基づく量子超越性に関する成果、代表的なグラフ最適化問題である巡回セールスマン問題 (TSP) や、ノーベル経済学賞などでも有名な安定マッチングに対する成果などがある。

計画研究 (データ構造グループ) に関しては、2 件に絞りに言及する。

(2-1) 医学研究や個別化医療などの領域では、次世代シーケンサー等の発達により、ゲノムなど様々な高度かつ大規模な情報が増々扱われるようになってきている。ゲノム情報は究極の個人情報であり、その扱いには最大限のプライバシーの保護が求められる。一方で、Dwork が 2006 年に提唱した差分プライバシーという概念が、セキュリティ・プライバシー保護技術研究分野だけでなく機械学習やデータベース技術分野など情報学の様々な領域で大きな注目を浴びている。(提唱者の Dwork は 2017 年にゲーデル賞を受賞。) しかしこれまで、ゲノム等の医療情報の複雑さや求められる正確性などの理由から、差分プライバシーの観点での医療情報のプライバシー保護へ向けた研究は困難だった。山本、渋谷はデータ構造とアルゴリズム理論を活用し、大規模ゲノムワイド関連解析における差分プライバシーを考慮した高速かつ正確な重要遺伝子の公開技術の開発に成功し、プライバシー保護分野のトップ国際会議 IEEE TrustCom2022 において **IEEE Outstanding Award** を受賞するなど世界的に注目されている。

(2-2) 理論・応用の両方の意味で重要なグラフ圧縮を扱った。例えば、インターネットの構造を表現するグラフは巨大であり、そのまま扱うことは困難である。本研究では、グラフの性質に着目しその性質を利用することで、いくつかのグラフのクラスに対し、最適なサイズのグラフの圧縮表現と、圧縮された表現上でグラフの頂点の巡回等を効率的に行うアルゴリズムの開発に成功した。

公募研究に関しては、すでに言及しているように計画班との共同でも成果を出している。上記以外では、例えば、代表的な離散構造である文字列に関する問題の計算量に関する研究を A01 班、B01 班とともにを行い、成果を出している。それ以外にも、オークションに関するアルゴリズム、具体的には、イングランド銀行で使用されている **product-mix** オークションに関連する成果、列挙アルゴリズム技法に関する成果、確率微分方程式の統計量計算に関する成果、ゲーム理論に関する成果等が挙げられる。

## 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5年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、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、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### 【A01】 新しい概念に基づいたアルゴリズム・最適化の問題創出とその効率的求解方法の研究

#### 【雑誌・国際会議論文】

1. Tesshu Hanaka, Yasuaki Kobayashi, Kazuhiro Kurita, See Woo Lee, Yota Otachi, "Computing Diverse Shortest Paths Efficiently: A Theoretical and Experimental Study. ", AAI, 3758-3766, 2022.
2. Tesshu Hanaka, Masashi Kiyomi, Yasuaki Kobayashi, Yusuke Kobayashi Kazuhiro Kurita, Yota Otachi, "A Framework to Design Approximation Algorithms for Finding Diverse Solutions in Combinatorial Problems. ", CoRR, abs/2201. 08940, 2022.
3. Sheng Hu, Ichigaku Takigawa, Chuan Xiao, "Edit-Aware Generative Molecular Graph Autocompletion for Scaffold Input", The AAI'22 Workshop on Deep Learning on Graphs: Methods and Applications (DLG-AAI'22), Vancouver, BC, Canada, Feb. 2022.
4. Shinya Mine, Yuan Jing, Takumi Mukaiyama, Motoshi Takao, Zen Maeno, Kenichi Shimizu, Ichigaku Takigawa, Takashi Toyao, "Machine Learning Analysis of Literature Data on the Water Gas Shift Reaction toward Extrapolative Prediction of Novel Catalysts", Chemistry Letters, 51, 3, 269-273, Mar. 2022.
5. Koki Suetsugu, "Emperor nim and emperor sum: a new sum of impartial games", International Journal of Game Theory, May 2021.
6. 宇野毅明, 武富有香, 小林亮太, 橋本隆子, 久保山哲二, 申吉浩, "多様性の解析を用いたニュース記事に対するコメント集合の分析", じんもんこん 2022 論文集, 2022, 207-212, Dec. 2022.
7. 武富有香, 松田智裕, 須田永遠, 宇野毅明, "#metoo に対する”誹謗中傷”的語りの類型化とアノテーション", じんもんこん 2022 論文集, 2022, 213-220, Dec. 2022.
8. 須田永遠, 前山和喜, 武富有香, 杉山佳奈美, 栗田和宏, 宇野毅明, "Wikipedia の影響関係データを用いた 20 世紀フランス思想家ネットワークの分析", じんもんこん 2022 論文集, 2022, 193-198, Dec. 2022.
9. Uno Takeaki, Kobayashi Ryota, Takedomi Yuka, Hashimoto Takako, "Using Temporal Information on Topic Mining", Digital Humanity 2022, Jul. 2022
10. Yasuaki Kobayashi, Shin-ichi Nakano, Kei Uchizawa, Takeaki Uno, Yutaro Yamaguchi, Katsuhisa Yamanaka, "Max-Min dispersion on a Convex Polygon", Proceedings of the European Workshop on Computational Geometry (EuroCG), 37, Mar. 2021.

#### 【学会発表】

1. Takeaki Uno, "Utility of Clustering algorithms in Social Media Analysis", IEEE Big Data 2022, Dec. 2022.
2. 宇野 毅明, "研究ファンド獲得力強化セミナー 研究課題発想力, 構築力, 記述力を鍛える その1,2", 東京理科大学 オンラインセミナー, 2022/10/3.
3. 宇野 毅明, "研究ファンド獲得力強化セミナー プレゼンを想定した申請書構成力と研究課題構築力を鍛える その1, 2", 広島大学 URA 主催 オンラインセミナー, 2022/3/9.
4. 宇野 毅明, "AI 婚活と結婚支援", 長崎県結婚支援センター, 2022/1/11.

### 【A02】 社会を志向した革新的アルゴリズムの実装

#### 【雑誌・国際会議論文】

1. Kengo Nakamura, Takeru Inoue, Masaaki Nishino, Norihito Yasuda, Shin-ichi Minato, "A Fast and Exact Evaluation Algorithm for the Expected Number of Connected Nodes: an Enhanced

- Network Reliability Measure", IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) , 2023.
2. Takeru Inoue, Toru Mano, Takeaki Uno, "Cost-Effective Live Expansion of Three-Stage Switching Networks without Blocking or Connection Rearrangement", IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2023.
  3. Masaaki Nishino, Kengo Nakamura, Norihito Yasuda, "Generalization Analysis on Learning with a Concurrent Verifier", Thirty-sixth Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2022.
  4. Hidetomo Nabeshima, Tsubasa Fukiage, Yuto Obitsu, Xiao-Nan Lu, Katsumi Inoue, "DPS: A Framework for Deterministic Parallel SAT Solvers", 13th Pragmatics of SAT international workshop, 2022.
  5. Kota Mata, Kentaro Kanamori, \*Hiroki Arimura, "Computing the Collection of Good Models for Rule Lists", Proc. the 18th International Conference on Machine Learning and Data Mining (MLDM 2022), 2022.
  6. Tsubasa Oizumi, Takeshi Kai, Takuya Mieno, Shunsuke Inenaga, \*Hiroki Arimura, "Cartesian Tree Subsequence Matching", Proc. the 33rd Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching (CPM 2022), Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), 1401-1418, 2022.
  7. Kengo Nakamura, Takeru Inoue, Masaaki Nishino, Norihito Yasuda, "Efficient Network Reliability Evaluation for Client-Server Model", 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 1-6, 2021.
  8. Kazuhiro Kurita, Kunihiro Wasa, Hiroki Arimura, Takeaki Uno, "Efficient enumeration of dominating sets for sparse graphs", Discrete Applied Mathematics,303,283-295,2021
  9. Masaaki Nishino, Norihito Yasuda, Kengo Nakamura, "Compressing Exact Cover Problems with Zero-suppressed Binary Decision Diagrams", Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 1996-2004, 2021.
  10. Takehide Soh, Hidetomo Nabeshima, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, Katsumi Inoue, "Towards CEGAR-based Parallel SAT Solving", 12th Pragmatics of SAT international workshop, 2021.
  11. Kentaro Kanamori, Takuya Takagi, Ken Kobayashi, Yuichi Ike, Kento Uemura, Hiroki Arimura, "Ordered Counterfactual Explanation by Mixed-Integer Linear Optimization", Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence,35,13, 11564-11574, 2021.
  12. Kentaro Kanamori, Takuya Takagi, Ken Kobayashi, Hiroki Arimura, "DACE: Distribution-Aware Counterfactual Explanation by Mixed-Integer Linear Optimization", Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-20), 2855-2862, 2021.

## **【B01】大規模離散構造の理解と革新的アルゴリズム基盤の創出**

### **【雑誌・国際会議論文】**

1. M. Milanic, \*Y. Uno, Upper clique transversals in graphs, 49th International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science, 2023.
2. \*Y. Matsui, S. Nakano, Enumerate all routes on a doughnut, 54th Southeastern International Conference on Combinatorics, Graph Theory and Computing, 2023.
3. S. Minato, M. Banbara, T. Horiyama, J. Kawahara, I. Takigawa, Y. Yamaguchi, A ZDD-based method for exactly enumerating all lower-cost solutions of combinatorial problems, 5th Workshop on Enumeration Problems and Applications, 2022.
4. T. Horiyama, F. Klute, M. Korman, I. Parada, \*R. Uehara, K. Yamanaka, Efficient segment folding is hard, Computational Geometry, 104, 101860, 2022.
5. T. Mieno (B01 PD), S. Inenaga, T. Horiyama, RePair grammars are the smallest grammars for Fibonacci words, 33rd Sympo. on Combinatorial Pattern Matching, LIPIcs, 223, 26:1-17, 2022.
6. A. Baes, E. Demaine, M. Demaine, E. Hartung, S. Langerman, J. O'Rourke, \*R. Uehara, Y. Uno,

- A. Williams, Rolling polyhedra on tessellations, 11th International Conference on Fun with Algorithms, LIPIcs, 226, 6:1-6:16, 2022.
7. M. Banbara, K. Hashimoto, T. Horiyama, S. Minato, K. Nakamura, M. Nishino (A02), M. Sakai, \*R. Uehara, Y. Uno, N. Yasuda (A02), Solving rep-tile by computers, 14th Gathering 4 Gardner Conference, 2022.
  8. \*K. Yamanaka, D. Avis (B02 PD), T. Horiyama, Y. Okamoto, R. Uehara, T. Yamauchi, Algorithmic enumeration of surrounding polygons, Discrete Applied Mathematics, 303, 305-313, 2021.
  9. \*T. Mieno (B01 PD), Y. Fujishige, Y. Nakashima, S. Inenaga, H. Bannai, M. Takeda, Computing minimal unique substrings for a sliding window, Algorithmica, 84, 670-693, 2021.
  10. \*S. Minato, (基調講演) Decision diagrams and reversible computation, 13th International Conference on Reversible Computation, 2021.
  11. E. Demaine, M. Demaine, R. Uehara, \*Y. Uno, A. Winslow, Packing cube nets into rectangles with  $O(1)$  holes, Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games, 152-164, 2021.
  12. T. Ito, J. Kawahara, S. Minato, Y. Otachi, T. Saitoh, A. Suzuki, \*R. Uehara, T. Uno (A01), K. Yamanaka, R. Yoshinaka, Sorting balls and water: Equivalence and computational complexity, 11th International Conf. on Fun with Algorithms, LIPIcs, 226, 16:1-17, 2022. (公募研究)
  13. T. Akagi, \*D. Köppl, Y. Nakashima, S. Inenaga, H. Bannai, M. Takeda, Grammar index by induced suffix sorting, 28th International Symposium on String Processing and Information Retrieval, LNCS 12944, 85-99, 2021. (公募研究)

#### 【学会発表】

1. S. Denzumi, T. Horiyama, K. Kurita, A. Nagao, K. Seto, K. Wasa, Enumeration of non-isomorphic unordered trees with degree sequence constraints, IPSJ SIGAL, 2023-AL-192(11), 1-6, 2023. (公募研究)

#### 【書籍】

1. \*上原隆平, 4.7 数理パズルにおける計算理論, 徳山豪, 小林直樹 (編), 理論計算機科学事典, 朝倉書店, 2022.
2. \*Louridas Panos (著), 鳥飼まこと (訳), 湊真一 (監訳), 基礎からわかるアルゴリズム, ニュートンプレス, 全 383p, 2022.

### 【B02】新計算モデルにおけるアルゴリズム・最適化

#### 【雑誌・国際会議論文】

1. Vipul Arora, Arnab Bhattacharyya, Noah Fleming, Esty Kelman, \*Yuichi Yoshida, "Low Degree Testing over the Reals", ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA23), 2023.
2. Pan Peng, \*Yuichi Yoshida, "Sublinear-Time Algorithms for Max Cut, Max E2Lin(q), and Unique Label Cover on Expanders", ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA23), 2023.
3. Michael Kapralov, Robert Krauthgamer, Jakab Tardos, \*Yuichi Yoshida, "Spectral Hypergraph Sparsifiers of Nearly Linear Size", Proceedings of the 62th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), 2022.
4. \*Shuichi Hirahara, Nobutaka Shimizu, "Hardness Self-Amplification from Feasible Hard-Core Sets", Proceedings of the Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 2022), 2022
5. \*Shuichi Hirahara, "NP-Hardness of Learning Programs and Partial MCSP", Proceedings of the Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 2022), 2022.
6. Lijie Chen, \*Shuichi Hirahara, Igor Carboni Oliveira, Ján Pich, Ninad Rajgopal, Rahul Santhanam, "Beyond Natural Proofs: Hardness Magnification and Locality", Journal of the ACM, 69, 4, 25-49, 2022.
7. Archontia C. Giannopoulou, \*Ken-ichi Kawarabayashi, Stephan Kreutzer, O-joung Kwon, "Directed Tangle Tree-Decompositions and Applications", Proceedings of the 2022 ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA), 377-405, 2022.
8. Keyulu Xu, Mozhi Zhang, Jingling Li, Simon Shaolei Du, Ken-ichi Kawarabayashi, Stefanie Jegelka, "How Neural Networks Extrapolate: From Feedforward to Graph Neural Networks", 9th

- International Conference on Learning Representations (ICLR), 2021.
9. Ken-ichi Kawarabayashi, Anastasios Sidiropoulos, "Embeddings of Planar Quasimetrics into Directed  $\ell_1$  and Polylogarithmic Approximation for Directed Sparsest-Cut", FOCS,480-491, 2021.
  10. Danushka Bollegala, Huda Hakami, Yuichi Yoshida, \*Ken-ichi Kawarabayashi, "RelWalk - A Latent Variable Model Approach to Knowledge Graph Embedding", Proceedings of the 16th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Main Volume (EACL), 1551-1565, 2021
  11. \*Ken-ichi Kawarabayashi, Bingkai Lin, "A nearly  $5/3$ -approximation FPT Algorithm for Min-k-Cut", Proceedings of the 2020 ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA), 990-999, 2020.
  12. Archontia C. Giannopoulou, \*Ken-ichi Kawarabayashi, Stephan Kreutzer, O-joung Kwon, "The Directed Flat Wall Theorem", Proceedings of the 2020 ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA), 239-258, 2020.

**【書籍】**

1. Arnab Bhattacharyya, Yuichi Yoshida, Property Testing: Problems and Techniques, Springer Singapore, 978-981-16-8622-1, 2022.

**【B03】量子アルゴリズムの理論と実装を接続する革新的基盤の創出**

**【雑誌・国際会議論文】**

1. \*François Le Gall, \*Masayuki Miyamoto, Harumichi Nishimura, "Distributed Quantum Interactive Proofs", 40th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS), 4201-4221, 2023.
2. Sevag Gharibian, \*François Le Gal, "Dequantizing the Quantum singular value transformation: hardness and applications to Quantum chemistry and the Quantum PCP conjecture", Proceedings of the 54th ACM Symposium on Theory of Computing (STOC 2022), 19-32, 2022.
3. \*Seiichiro Tani, "Space-Bounded Unitary Quantum Computation with Postselection", Proceedings of the 47th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS 2022),241, 8110-8115, 2022.
4. \*Yuki Takeuchi, Yasuhiro Takahashi, Tomoyuki Morimae, Seiichiro Tani, "Divide-and-conquer verification method for noisy intermediate-scale quantum computation", Quantum, 6,758, 2022.
5. \*François Le Gall, Harumichi Nishimura, \*Abuzer Yakaryilmaz, "Quantum Logarithmic Space and Post-Selection", Proceedings of the 16th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC 2021), 10-17, 2021.
6. \*Shuichi Hirahara, \*François Le Gall, "Test of Quantumness with Small-Depth Quantum Circuits", Proceedings of the 46th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS 2021), 15-59, 2021.
7. \*Keren Censor-Hillel, Yi-Jun Chang, François Le Gall, \*Dean Leitersdorf, "Tight Distributed Listing of Cliques", Proceedings of the 32nd ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 2021), 2878-2891, 2021.
8. \*Yasuhiro Takahashi, Yuki Takeuchi, Seiichiro Tani, "Classically simulating quantum circuits with local depolarizing noise", THEORETICAL COMPUTER SCIENCE, 893, 117-132, 2021.
9. Sara Ayman Metwalli, \*Francois Le Gall, Rodney Van Meter, "Finding Small and Large  $k$ -Clique Instances on a Quantum Computer", IEEE Transactions on Quantum Engineering,1,1-11, 2020.

**【学会発表】**

1. \*Seiichiro Tani, "Quantum Algorithm for Finding the Optimal Variable Ordering for Binary Decision Diagrams",16th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication, and Cryptography (TQC 2021), 2021.
2. Pierre Fraigniaud, \*Francois Le Gall, Harumichi Nishimura, Ami Paz, "Distributed Quantum Proofs for Replicated Data", QIP2021, 2021.

## 【書籍】

1. \*西村治道, "基礎から学ぶ量子計算 : アルゴリズムと計算量理論", オーム社, 978-4-274-22969-5, 2022.

## 【B04】アルゴリズム基礎理論の追究・発展

### 【雑誌・国際会議論文】

1. Tsuyoshi Hirayama, Yuhao Liu, Kazuhisa Makino, Ke Shi, \*Chao Xu, "A Polynomial Time Algorithm for Finding a Minimum 4-Partition of a Submodular Function", 34th SODA, 1680-1691, 2023.
2. \*Akito Yamamoto, Tetsuo Shibuya, "Privacy-Preserving Statistical Analysis of Genomic Data using Compressive Mechanism with Haar Wavelet Transform", J. Comput. Biol. 30(2): 176-188 , 2023.
3. \*Akito Yamamoto, Tetsuo Shibuya, "Efficient and Highly Accurate Differentially Private Statistical Genomic Analysis using Discrete Fourier Transform", 21st IEEE TrustCom, 53-525, 2022.
4. Satoru Fujishige, Tamás Király, Kazuhisa Makino, Kenjiro Takazawa, Shin-ichi Tanigawa, "Minimizing submodular functions on diamonds via generalized fractional matroid matchings", J. Comb. Theory, Ser. B 157: 294-345, 2022.
5. Kristóf Bérczi, Endre Boros, Ondrej Cepek, Petr Kucera, Kazuhisa Makino, "Approximating Minimum Representations of Key Horn Functions", SIAM J. Comput. 51(1): 116-138, 2022.
6. Hiromichi Goko, Ayumi Igarashi, Yasushi Kawase, Kazuhisa Makino, Hanna Sumita, Akihisa Tamura, Yu Yokoi, Makoto Yokoo, "Fair and Truthful Mechanism with Limited Subsidy", 21st AAMAS, 534-542, 2022.
7. Hiromichi Goko, Akitoshi Kawamura, \*Yasushi Kawase, Kazuhisa Makino, Hanna Sumita, "Online scheduling on identical machines with a metric state space", 39th STACS, 31:1-31:20, 2022.
8. \*Toshimasa Ishii, Jun Kawahara, Kazuhisa Makino, Hiroataka Ono, "Reallocation Problems with Minimum Completion Time", 28th COCOON, 292-304, 2022.
9. \*Daiki Suehiro, Eiji Takimoto, "Simplified and unified analysis of various learning problems by reduction to Multiple-Instance Learning", 38th UAI, 1896-1906, 2022.
10. Yaxiong Liu, Xuanke Jiang, \*Kohei Hatano, Eiji Takimoto, "Expert advice problem with noisy low rank loss", 13th ACML, 1097-1112, 2021.
11. \*Tomoyuki Morimae, Suguru Tamaki, "Additive-error fine-grained quantum supremacy", Quantum, 4, 329, 1-12, 2020.
12. Tesshu Hanaka, Hironori Kiya, Hiroataka Ono, Kanae Yoshiwatari, "Winner Determination Algorithms for Graph Games with Matching Structures", Algorithmica, to appear (公募研究)
13. Tesshu Hanaka, Hiroataka Ono, Kosuke Sugiyama, "Solving Distance-constrained Labeling Problems for Small Diameter Graphs via TSP", 25th APDCM, 308-313, 2023. (公募研究)
14. Tesshu Hanaka, Yasuaki Kobayashi, Kazuhiro Kurita, See Woo Lee, Yota Otachi, "Computing Diverse Shortest Paths Efficiently: A Theoretical and Experimental Study", 36th AAI, 3758-3766, 2022. (公募研究)
15. Yasuaki Kobayashi, Kazuhiro Kurita, Kunihiro Wasa, "Linear-Delay Enumeration for Minimal Steiner Problems", 41st PODS, 301-313, 2022. (公募研究)

## 8 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1頁以内で記述すること。

### 人的な組織整備

- ・ 2020年11月の採択内定通知を受けて、直ちに総括班会議を発足させた。毎月1回の運営会議を定期的で開催し、研究領域の活性化のために必要な事項についての方策を議論し決定している。
- ・ 外部評価委員の就任交渉を行い6名の強力な先生方にお引き受けいただいた。2名の学術調査官とともに「アドバイザリー会議」を組織し、春秋の領域集會に合わせて意見を伺う体制を整えた。
- ・ 各計画班のポストドク研究員の配置計画を行い、適任者の紹介や公募により採用を行った。コロナの制約の下で可能な限り優秀な人材を探して雇用した。事務スタッフの雇用も並行して進めた。その後、2022年度末までに5名が領域外でポジションを獲得しており、人材育成としての成果も順調といえる。研究員が栄転するのは望ましいことであるが、適任の研究者をすぐに補充するのはなかなか難しく、人件費の執行が計画通りに進まないという問題も生じている。
- ・ 第1回の公募研究では25件の応募があり12件が採択された。直後の秋の領域集會で採択者全員の研究発表を行い、計画班メンバーとの交流・融合を図った。倍率の制限により最大17件の公募枠をフル活用できなかったのは残念だったが、応募者のレベルは十分に高く、期間中に新しいポジションを獲得して昇任した事例も見られた。第2回公募では、応募者が増えるように広報活動に力を入れたが、結果的には20件の応募で10件の採択（うち1件は海外転出のため辞退）に留まった。これは本研究領域に近い分野の学変(B)が終了し、その後継として別の学変(A)を申請していた（不採択）という特殊事情があった。とはいえ、今回採択された公募研究はいずれもレベルが高く、他分野との連携という意味でも重要な研究課題が選ばれており、今後の進展が大いに期待できる布陣となっている。

### 研究環境の構築・整備

- ・ 採択直後に英語の類似名称を調査した上で「AFSA」という短い4文字の略称を制定し「afsa.jp」ドメインの権利を確保した。以後、略称AFSAを積極的に利用し、ML（メール同報）アドレスや、公式ホームページを構築・整備した。分かりやすい名前を付けることで組織内連携の活発化を図った。
- ・ 東京と京都の東西2か所に連携拠点となるサテライトラボを設置した。東京では、AFSAの前身の基盤(S)プロジェクトで賃貸利用していた神田ラボを引き継いで使用。京都では、市内中心部の寺町三条にラボを新設し、契約交渉、設備工事などを経て、2021年度より本格始動した。コロナの影響はあるが、オンラインとオフラインのベストミックス拠点として効果的に活用されている。

### 領域内のイベントの企画・実施

- ・ 領域発足直後に各計画班の全ての分担者向け「キックオフ説明会」をオンライン開催し、研究領域の理念の共有を図った。さらに関連分野研究者向けに「スタートアップ集會」を開催し、公募研究への参加や、応用系プロジェクトとの連携を呼びかけた。
- ・ 領域内の関係者全員が参加する「領域集會」を2021年度から年2回、春と秋に1泊2日（または2泊3日）で開催している。コロナの制約から2021年度は完全オンラインで開催し、その後は対面中心にハイブリッドで開催している。オンライン化により会議場の物理的制約がないことから、研究協力者にも参加対象者を広げ、海外からの招待講演も交えて毎回80～100名の研究者が参加している。
- ・ 定常的な研究活動として「AFSAセミナー」「AFSAコロキウム」「AFSA研究ラジオ」と呼ぶ3つのイベントを領域横断的に開催している。「セミナー」は先端的な研究についてシャープに議論し合う場であるのに対し、「コロキウム」はより一般的な話題について専門が異なる研究者同士が気楽に討論し合うことでコミュニティ醸成を図るものであり、名称を分けて目的を明確にしている。また、「ラジオ」は毎回1人の研究者に焦点を当てインタビューを流すことで、研究者間の相互理解を促す取り組みである。これらの領域内イベントの開催実績を以下の表に示す。年度を追うごとに領域全体のイベント開催回数が大きく増えており、領域内連携が活性化されていることを示している。

	2021 前期	2021 後期	2022 前期	2022 後期	2023/4-6 月	合計
AFSA セミナー	8	9	23	27	14	81
AFSA コロキウム	—	—	4	2	2	8
AFSA 研究ラジオ	2	5	6	5	3	21

## 9 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1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

### 「若手研究者」の定義

本研究領域では「若手研究者」として、下記のいずれかのフェーズにある者を想定し、それぞれのフェーズに応じて育成・支援を行っている。

- ・ 助教～講師（多くは任期付き）の教員ポジションで次の昇任を目指す研究者
- ・ これから研究ポジション獲得を目指すポスドク研究員
- ・ アcademiaまたは企業の研究者を目指す大学院学生

### 本研究領域での若手研究者育成に係る取組状況

- ・ 京大数理解析研究所との共催で、「組合せ最適化」をテーマとするサマースクールを7月下旬～8月上旬の3日間の日程で開催し、毎年、第一線で活躍している中堅研究者を講師に招いて、主に大学院学生やポスドク研究員を対象にチュートリアル講演会を実施している。2021年度はオンラインで、2022年度はハイブリッドでそれぞれ約50名が参加した。2023年度も開催予定である。
  - ・ 年4回発行しているAFSAニュースレターで、各計画班のメンバー紹介を順番に行っており、その中でポスドク研究員やRA学生についても紹介し、領域内での知名度の向上を図っている。また若手研究者のコラム記事も掲載している。さらに研究者のポジション獲得や受賞などの情報共有も行い、研究者コミュニティの醸成を図っている。
  - ・ 公募研究者は公式に所属する計画班の他に、副所属班を1つ以上選んで、領域横断的に活動することで、新しい研究の種を見つけてもらうことを期待している。ポスドク雇用の研究者も同様に副所属班を設定し、研究の幅を広げることで次のポジション獲得のチャンス拡大を図っている。
  - ・ 若手研究者は、領域会議でのポスターセッションや計画班横断の短期集中セミナーなどで、優先的に発表の機会を与えている。
  - ・ 東京神田サテライトラボを拠点として、10人程度の若手研究者が常連で集まる「神田チーム」を形成し、AFSAの公式イベントとしての討論会を定期的に企画するなど、コミュニティの核としての役割を果たしつつ、一流の中堅研究者と交流する機会を増やすことで成長を促進させている。
  - ・ 本研究領域に参加する岩田教授・河原林教授・定兼教授らは、東大理系のトップレベルの学生が集まる研究室を主宰しているが、連携して合同セミナーを月例開催し、アルゴリズム分野の難関国際会議で採択・発表をした有力若手研究者の講演を、トップレベルの大学院学生に聴講させる取組を開始している。
  - ・ 京都寺町サテライトラボを拠点として、京大情報系の複数研究室合同で、研究志向の優秀な大学院生を推薦で出してもらってRAとして雇用し、毎週定例で集まって、アルゴリズム分野の注目される研究論文をサーベイして報告し議論する「AFSA 寺町ラボRAセミナー」を開催している。これにより孤立しがちな博士学生同士でチームを形成し、共鳴しあって切磋琢磨する環境の醸成を図っている。
- 上記の取組により、若手研究者の昇進や、受賞などの成果が得られている。以下にその一部を示す。

#### （昇進）

A01-PD/B04 公募 栗田和宏（NII-PD→名大助教）、 A01-PD 杉山佳奈美（NII-PD→京大助教）、  
B01-PD 三重野琢也（北大PD→電通大助教）、 B02 分担 平原秀一（NII助教→准教授）、  
B04 公募 土中哲秀（名大助教→九大准教授）、 B01-PD D. Hoang（京大PD→ベトナム国立大講師）、  
B03 分担 森立平（東工大助教→名大准教授）、 B03-PD 川口英明（慶応大PD→特任准教授）

#### （受賞）

B02 分担 平原秀一（2022/12 Complexity result of the year 2022）  
B04-PD 湯山孝雄（2023/06 国際会議 DLT2023 Best Paper）、  
B04 公募 土中哲秀（2023/03 国際会議 IEEE IPDPSW2023 APDCM Outstanding Paper）、  
A01-RA 前川和喜（2022/03 情処学会全国大会 学生奨励賞）、  
B01-RA 江本洗海（2022/12 情処学会/通信学会 FIT2022 ヤングリサーチャー賞）

## 10 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1頁以内で記述すること。

本研究領域のアウトリーチ活動に関する主な取組を以下に記す。

### ・ AFSA ドメインの取得および公式ロゴのデザイン

採択直後に英語の類似名称を調査した上で「AFSA」という短い4文字の略称を制定し「afsa.jp」ドメインの権利を確保した。さらに、研究領域の理念（理論と応用の融合）を図案化した視認性の高い公式ロゴマークを制定した。公式ホームページでもロゴマークをモチーフとした統一したデザインを使用している他、講演スライドのテンプレートでもロゴマークを積極的に使用し、本研究領域の活動をアピールすることを心掛けている。独自ドメインの取得により、本研究領域の公式ホームページは「afsa.jp」という非常に短い文字列で到達可能となっており、本研究領域の活動内容の一般向けの広報を行うとともに、研究者同士の情報交換のためのハブとしても活用している。



### ・ ニュースレターの発行

一般市民向けの記事執筆の経験を持つサイエンスライターと契約し、2021年12月より年4回のニュースレターの制作・配布を行っている。領域代表や計画班代表、および若手研究者のインタビュー記事やイベント案内等を掲載し、研究活動のアウトリーチを図っている。2023年7月までに第7号まで継続的に出版している。



### ・ 一般向け科学雑誌での記事の執筆

本研究領域の源流の1つであるERATO 湊プロジェクトで制作された日本科学未来館の展示動画「フカシギの教え方」が公開10周年を迎え、再生回数が300万回に達していることを記念する紹介記事を一般向け科学雑誌『Newton』2022年10月号に掲載した。記事の中で本研究領域の活動についても紹介を行っている。

さらにA01班代表の宇野毅明教授も同誌でアルゴリズム技術の解説記事の連載を行っている。



### ・ 情報科学の達人プログラムとの連携

高校生、高専生の情報学分野におけるトップ才能に対して、我が国の情報学分野研究力の向上と底上げにつなげるために、国立情報学研究所が中心となり情報処理学会と情報オリンピック日本委員会と共同で実施している「情報科学の達人プログラム」の活動に協力している。これまでに、本研究領域の湊領域代表の研究室への学生訪問および模擬講義を実施するとともに、本領域メンバーの研究者の何人かがメンターとして対象学生の研究指導に協力し共著論文を発表している。若い世代のトップ学生が、第一線で活躍する研究者と触れ合い刺激を受ける機会を提供している。

### ・ 国際アルゴリズム競技会の実施

2023年4月から7月にかけて、広く一般から研究のアイデアを募ることを目的とする国際アルゴリズム競技会を開催している。国内外の関連分野の研究者に案内を送り参加を呼び掛けている。本競技会に自作アルゴリズムを応募する参加者はもちろんのこと、例題セットを閲覧して出題内容を知ってもらうだけでも、本研究領域のアウトリーチの機会となることが期待される。

### ・ 関連学会との共催企画セッションの実施・その他

2022年3月の情報処理学会全国大会において、本研究領域の活動概要を紹介するとともに、最新の研究内容についてポスターセッションにより討論を行う企画セッションを情報処理学会アルゴリズム研究会との合同企画で開催した。さらに2023年9月開催予定の情報処理学会・電子情報通信学会共催大会FIT2023において、企画セッションとして本研究領域が主催する国際アルゴリズム競技会の表彰式を開催する予定である。その他の活動として、可逆計算の理論と応用に関する国際会議Reversible Computation (RC2021)において本領域代表の湊が基調講演を務め、本研究領域についての概要紹介を行っている。また、電子情報通信学会コンピューテーション研究会(2021年5月)でも本領域の取り組みを紹介する招待講演を行っている。

## 11 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1頁以内で記述すること。

### ・ 研究費の使用状況

初年度(2020年度)は科研費の制度変更の影響で採択時期が年末にずれ込んだことから必要最小限の予算計画となっていて、実質的な研究予算は2021年度から執行開始する予定であった。2021年度中には新型コロナの影響は沈静化すると期待していたが、残念ながら東京五輪も無観客となる状況で、大規模集会や出張の制限が続く、研究費執行の大幅変更と翌年度繰越を行う事態となった。そのような中でも、東京神田と京都寺町三条にサテライトラボを設置し、コロナ感染状況に配慮しながら、オンラインと対面を組合せたハイブリッドな集会を継続的に開催し、研究の停滞をできるだけ回避する努力を続けた。2022年度は元の状態に戻ることが期待されたが、オミクロン変異株による感染再燃により集会や移動の制限が続いたため、前年度に引き続き繰越が発生した。2023年度は集会や移動の制限はほぼなくなったことから、前年度繰越分も含めて予定通り執行できるものと想定している。

総括班では、研究領域で共通に使用するサテライトラボの賃料、光熱通信費、環境整備費用、および各研究拠点を結ぶオンライン環境（大型ディスプレイ、高性能マイクスピーカー、ノートPC端末等）の整備、事務補助スタッフ人件費、公式ロゴのデザインやホームページ制作デザイナーへの業務発注、ニュースレター記事を執筆するサイエンスライターへの業務発注、領域横断的に活動する研究員/技術員の人件費サポート等が主要な支出先となっている。

### ・ 今後の使用計画

2023年度以降の残り2年間は、新型コロナによる制限がほぼ無くなると思われることから、研究者の国際会議での現地発表が大幅に増えると思われている。円安や欧米のインフレ、ウクライナ状況により、海外旅費が大幅に高騰しているため、当初想定した程度の活動であっても必要経費は想定を上回る可能性がある。一方、コロナ収束後に日本で国際会議の開催を希望する海外研究者が多いことから、2023～2024年度にかけて、多くの国際会議(ISAAC2023, WALCOM2024, CPM2024, AAAC2024)の日本開催が内定しており、本研究領域の共催イベントとして実行委員長や基調講演等を引き受け、会議費や旅費をサポートすることで、将来にわたり国際的な研究コミュニティを強化できるものと期待している。その他にも、これまでオンライン開催のためほとんど不要だった若手研究者や学生への旅費サポートや、領域会議の実開催のための会議室借料等の復活が見込まれる。その他、国際アルゴリズム競技会の順位判定のための評価用サーバ購入などへの研究費の機動的な投入を予定している。

### ・ 研究費の効果的使用の工夫

京都寺町サテライトラボは交通至便な京都中心部に位置する民間賃貸オフィスであるが、コロナ前には良い条件の物件はほとんど埋まっている状態で、現実的な坪単価の物件を見つけることは困難な状況であった。しかし本研究領域が採択されてから物件を探したところ、元は英会話教室だった物件がコロナのために大声での対面練習ができなくなってオンライン化したことで、都心の一等地よりも割安な郊外に移転することになり、タイミングよく好条件の空き物件が見つかったという事情があった。コロナのために活動が制限されて苦しい時期であったが、それを逆手にとって好立地で良い環境の研究拠点を比較的安価に整備することができた。

### ・ 設備等の活用状況

大きな実験設備を必要としないアルゴリズムの研究では、人が集まる「場」を醸成することが成功の鍵となる。東京・京都の2か所のサテライトラボは、本領域メンバー共通の連携拠点として有効活用されている。コロナの影響下で、人数制限を設け換気に十分気を付けながら、オンラインと対面を組合せて使用していたが、制限が解除された現在は、当初の期待通りの活用状況となっている。ポスドク研究員や学生RAの勤務場所でもあり、計算サーバの設置場所としても活用されている。

## 12 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2頁以内で記述すること。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。

### 【今後の本研究領域の推進方策】

本研究領域では、「研究テーマの変革」「研究スタイルの変革」「研究アウトプットの変革」の3つの変革を掲げて研究活動を推進している。以下、それぞれの項目について推進方策を述べる。

#### (1) 研究テーマの変革に向けて：

本研究領域では、アルゴリズムの理論研究の成果を社会変革につなげるための汎用的なモデルを再構築・体系化していくことを目指し、応用分野と理論をつなぐA項目の計画班と、日本が強みを持つ理論分野をさらに発展させるB項目の計画班が互いに連携して課題に取り組む体制を組んでいる。これまでに、新型コロナの影響下で何とか工夫しながら、それぞれの計画班で一定の研究成果を挙げており、総括班評価者からも、研究成果の厚みという点では期待されるレベルにあると評価を受けている。しかし理論研究の成果が社会変革の源泉となっているか、どのような社会変革につながる見込みがあるか、ということが外部からは分かりにくいとの指摘があり、目に見えるような特徴的な事例をいくつか示していくことが望まれている。そのような方向性を重視しながら今後の研究活動を推進していく。具体的項目としては、

- ・ 社会的に重要と思われる問題カタログや例題セットの作成とその作成方法の体系化
  - ・ これまでに開発してきた Graphillion（超高速グラフ列挙ソフトウェア）の拡張と体系化
  - ・ アルゴリズム国際競技会の実施と表彰イベント開催、および応募アイデアの活用
  - ・ 公募研究者や若手研究者を中心とする特徴的な研究活動の支援と活性化
  - ・ 新規デバイス・アーキテクチャとアルゴリズム技術の融合研究に向けた討論会の定期的開催
  - ・ 人文・社会科学とアルゴリズム技術の連携に向けた意見交換会の定期的開始
  - ・ 本研究領域から派生した新規プロジェクトの提案、外部資金プロジェクトの申請・獲得
  - ・ これまでに強みを持っている分野での研究成果の継続的な積み上げ
- などを実施していく。

#### (2) 研究スタイルの変革に向けて：

アルゴリズム研究のように高価な実験装置を用いない研究分野では、優秀な研究者が集まる「場」が重要であり、他の多くの実験系の大型研究プロジェクトとは事情が異なる。本研究領域では「理論と応用が出会う場となる研究コミュニティを作り、競争力の源泉となるアイデアを醸成する」という取り組みを継続的に推進している。新型コロナの影響によりオンラインでの活動を余儀なくされる時期が長く続いたが、その時期も無駄にせず、オンラインと対面のベストミックスとなる研究スタイルを確立すべく活動を続けてきた。今後、コロナによる行動制限がほぼ解除された後も、これまでの取り組みを継続し、研究コミュニティの維持・発展を図っていく。具体的には、

- ・ 効率的、効果的な分野融合による議論と、問い立てに関する手法論の構築
- ・ 東京神田ラボ、京都寺町ラボを連携のハブ拠点とする研究コミュニティの維持・発展
- ・ 若手研究者の育成の取り組み（神田討論会、東大合同セミナー、京大寺町セミナーなど）
- ・ 領域全体の交流イベント（領域集会、短期集中セミナー、AFSA コロキウム、AFSA ラジオなど）
- ・ 関連分野の国際会議の誘致共催（ISAAC, AAAC, CPM 他）、関連学会（COMP, AL 他）との連携による国内外の研究コミュニティの維持・発展

などを継続的に実施していく。

#### (3) 研究アウトプットの変革に向けて：

社会変革の源泉となるような研究成果を目指す観点からは、難関国際会議や論文誌における論文業績はもちろん重要であるが、それだけに留まらず、社会への波及効果も重視して研究を推進していく。応用研究者との連携による実問題への適用、他のあらゆる科学技術分野への間接的貢献、実社会応用による経済的波及効果、および一般市民向けアウトリーチによる社会的インパクト等も、本研究領域のアウト

トブットとして奨励・支援していく。具体的項目としては、

- ・ ソフトウェアツール（例えば Graphillion 拡張の成果物や例題セット等）の公開（GitHub 等）
- ・ オープンアクセス論文とツール類の相互リンク，afsa.jp 公式ページとの関係
- ・ 共催の国際会議，国内学会イベント等でのプロジェクト成果の発信・広報
- ・ プロジェクトの成果をまとめ国内外から参照されるような専門書の執筆・出版
- ・ 社会的に注目度が高まっている領域（機械学習や生成系 AI 等）への貢献や分野連携を視野に入れた研究コミュニティの立ち上げ支援

などが挙げられる。

以上の取り組みは、総括班が中心となって各計画班の連携を取りながら推進していく。ただし、単なるトップダウンで研究の方向性を強制して、個々の研究者のパフォーマンスを低下させ、世界で強みを持つ分野の競争力を削いでしまうことになっては逆効果なので、適材適所でバランスを取りながら無理のない範囲で推進していくことを旨とする。

### 【今後実施する公募研究の役割】

第 2 期の公募研究では以下の研究課題が採択された。

- ・ (A02) 経路列挙とクラスタリングによる化学反応経路カタログの作成（杉山佳奈美・京都大学）
- ・ (A02) 組合せ遷移ソルバーの活用事例の研究（川原純・京都大学）
- ・ (B01) 決定グラフで扱える世界の拡張（伝住周平・NTT CS 基礎研）
- ・ (B01) 文字列処理における NP 困難問題の高速解法の追求（三重野琢也・電気通信大学）
- ・ (B01) 辞書式順序依存問題の複雑さの解明（中島祐人・九州大学）
- ・ (B02) Scalable and Precise Social Network Algorithms under Local Differential Privacy（スッパキットパイサンウォラポン・東京大学）
- ・ (B02) 分散アルゴリズムと動的アルゴリズムにおける設計手法の相互展開と発展（泉泰介・大阪大学）
- ・ (B03) ゲートとアニーリングの複合方式による中規模量子コンピュータ向けアルゴリズムの開発（松崎雄一郎・中央大学）
- ・ (B04) 効用関数付きグラフ最適化問題に対する計算量解析のさらなる発展（土中哲秀・九州大学）

公募研究の審査システムは、本研究領域の運営からは独立にボトムアップに行われるため、領域全体を見渡した時に戦略的に重点化したい応募課題が必ずしも選ばれるわけでないが、結果的には、今後の領域全体の研究推進に向けて重要な研究課題、および今後の活躍が期待される有力な若手研究者の研究課題が採択されている。例えば A02 班では化学反応経路探索という化学分野へのアルゴリズム技術の応用研究が採択されており、異分野連携による今後の発展が期待される。また組合せ遷移ソルバーの研究は、学術変革(B)「組合せ遷移」で得られた研究成果を本研究領域において発展させるもので、大型プロジェクト同士の連携という点でも意義がある。B01 班の三重野は、本研究領域の初年度に北大でポストドク雇用された後に、その業績が認められて電通大で助教の職を獲得し、今後の活躍が期待される若手研究者である。他にも「決定グラフ」「文字列」という B01 班で取り組んでいる最も重要な 2 つの離散構造に関する課題が採択され、計画研究への貢献が期待される。B03 班では量子計算の理論と物理デバイスをつなぐ研究提案が採択されており、古典と量子のモデルを協調させる現実的な量子コンピュータの実現に向けた基盤技術への貢献が期待される。B02 班と B04 班の採択者は第 1 期の公募研究でも国際的に高く評価される成果を挙げている若手研究者であり、例えば B04 班の土中はこれまでの公募研究期間に中央大助教から名大助教を経て九大准教授に昇進している。

以上の通り、粒揃いの公募研究が採択されており、研究分野の変革と若手育成という学術変革の制度理念に沿った公募研究体制となっている。

### 【研究推進上の問題点】

第 1 期公募研究で優れた成果を挙げ、第 2 期公募でも採択内定していた若手研究者が、内定までに海外の大学への栄転が決まったため辞退することとなり、貴重な公募枠を活用できなかった。将来の制度改善要望として、海外研究者との連携支援策、および辞退者が出た場合の補欠制度を検討していただきたい。

## 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2頁以内で記述すること。

### 今井 浩（東京大学）

研究領域全体でアルゴリズム基盤の研究者の力を糾合し、公募班も含め若手研究者の研究を奨励することによって、中間評価時点で革新性の出口も固まりつつある。アルゴリズム分野は国際的な場での研究が必須であり、新型コロナウイルスによる影響は多大であったが、ポストコロナの時期に複数国際会議主催を早速実現予定になっており、成果の発信も加速されると思われる。革新的アルゴリズムの理論基盤については、平均計算量そして公開鍵暗号などセキュリティ諸問題において高く評価される成果が出ており、それを Graphillion による数え上げや SAT/ZDD 等の有用なアルゴリズムと連携して、セキュリティ問題での既存技術の限界を超える社会にインパクトある成果創出につながる可能性がある。最終年度までに他の諸問題も含め社会基盤への応用展開に取り組みが期待される。量子計算分野ではプロジェクト前半でオンライン環境での国際研究活動を牽引する貢献も行われており、量子分散計算モデルを本研究グループが理論を確立して、量子コンピュータ実機での研究とも連携して量子分散計算での応用展開につながる成果である。文字列アルゴリズムの成果も多数出されており、社会変革に最も近い成果としてゲノム情報に差分プライバシーへの展開を通して重要遺伝子公開技術を確立したことがあげられる。国際会議最優秀論文や文部科学大臣表彰など社会的にも多数顕彰されており、プロジェクト終了時に向け、社会変革へとつながる体系的なアルゴリズム基盤の創出が期待できる。

### 岡部 寿男（京都大学）

各計画班と公募班の研究者たちがそれぞれの専門分野において国際的に注目される顕著な成果を挙げていることは議論を待たないが、それに加えて、アルゴリズムにおける近年の急速な発展を、様々な分野の科学者・技術者が理解可能な形で広く自由に利用できる学術として体系化し社会変革の基盤とするという本学術変革領域の目的においても、細分化された各分野の最先端の動向や理論研究の成果が応用適用される事例を領域横断で俯瞰的に共有できている点は高く評価できる。

若手研究者の育成に関しては、取組状況として述べられている諸活動に加え、アウトリーチ活動として挙げられている「情報科学の達人」プログラムとの連携を特筆しておきたい。同プログラムは、10年後に情報学のトップエリートとして研究を担う人材を、国際情報オリンピックなどで活躍するトップ高校生たちに最先端の研究と出会う機会を与え高校生段階から研究活動を開始させることで早期から育成するもので、B02 班代表の河原林教授がコーディネータとして統括し、オンライン講習やメンターには領域代表者をはじめ本領域の研究者が多数参画している。同プログラムは、本領域が直接的な育成の対象としている若手研究者の前段階の育成を分担していると考えることができシナジー効果が大きい。また同プログラムのカリキュラムには、本領域で行っている、アルゴリズムの理論と応用を分かりやすく接続する汎用的かつ実用的なモデルの体系化が色濃く反映されており、かつそのようなカリキュラムに基づく初学者向けのオンライン教材の作成を通じて、本領域が目指す様々な分野の科学者・技術者が理解可能な形で広く自由に利用できる学術として体系化にフィードバックされているところも少なくないように見受けられる。

### 土井 美和子（情報通信研究機構）

個別には顕著な研究成果がでており、その点は大いに評価できる。一方、様々な分野の科学者・技術者が理解可能な形で広く自由に利用できる学術として体系化を実現し変革を起こすためには不足である。

①研究テーマの変革、②研究スタイルの変革、③研究アウトプットの変革の3点から迫るとしている点についてコメントする。

① 研究テーマの変革：Graphillion は Python と C++ を組み合わせて作られた高速にグラフ問題を解くためのライブラリ であるが、これを Family 化することで、生成系 AI などではできない、説明可能な AI (XAI) としての役割をどこまで拡張できるのか、その目標を具体的にすることが必要がある。また、グラフ数え上げ国際競技会開催によりどこまで異なる技法が比較可能であり、それが研究テーマの変革に寄与するのかについても分野外にも理解されるようにすることが必要がある。

② 研究スタイルの変革：神田ラボ、寺町ラボをハブ拠点とする研究コミュニティの活性化されていることは認めるが、いまだ理論と応用が出会う場となっていない、サロン化しない仕組み作りが必須であろう。

- ③ 研究アウトプットの変革：人文・社会科学との連携や量子と古典の融合技術の研究など、アルゴリズムが活躍できるデータのあるテーマなどより具体化が必須である。例えばサイバーセキュリティではサイバー攻撃データをリアルタイムで収集・分析・知識化し、CYDERなどの演習として、防御や人材育成へとエコシステムを構築している。できればそのようなアウトプット変革を希望する。

### 徳山 豪（関西学院大学）

研究計画全体は、COVIDによる影響にも関わらず順調に遂行されている。STOC-FOCS-SODAなどの計算理論におけるトップ国際会議で多数の採録のみならず最優秀論文賞などを受け、また2022年のComplexity result of yearを受けている（B02班）など、計算理論分野で世界屈指の研究グループとして活動するとともに、INFOCOM, GLOBCOMなどの通信系のトップ国際会議や、AAAIなどの人工知能系の一流国際会議でも論文が採択されており、さらに量子計算においても世界的にインパクトのある研究がおこなわれている。これらを支える領域の活動として、ワークショップやサテライトオフィスでの勉強会等が活発に実施され、若手研究者の育成、特に彼らが自主性を持った研究者として育つための取り組みが行われている。評価者が参加した領域会議においても、若手研究者や学生たちが生き生きと発表や議論をしているのが印象に強い。社会実装に関しても、A01班において、人文科学、社会科学の研究者を主体にした議論を行い、社会にとってのアルゴリズムの役割についての検討とカタログ作りが行われ、また、A02班を中心に、本研究領域で開発された中心的な汎用手法の社会活用が現実に行われた。更に、世界的なアルゴリズムコンテストの開催など、国際的な啓蒙においても労を惜しまず、具体的な成果をあげている。総じて、中間段階では評価者の期待以上の成果をあげている。

今後に向けての期待としては、A01班のテーマである「新しい概念」は、議論の最中であり、まだ、概念としてまとまったものにはなっていないように思える。この「新しい概念」が具体化し、今後のアルゴリズム理論の世界的な潮流となる事を期待する。また、提案した手法が多くプログラマや学生に使われるような教育や平易な教科書の作成も期待される。更に、この3年間の間でも、AIの革新による社会への影響が目覚ましく、テーマである「社会変革の源泉」への影響も避け難いと思える。本学術変革研究の成果の一部も上述のようにAIと関連しているので、より強い波及効果や社会へのPRの検討が行われると良いと考える。

### 丸山 宏（Preferred Networks）

基盤的アルゴリズムの研究で、それぞれの研究者が優れた成果を挙げていることを高く評価する。加えて、領域代表のリーダーシップによって、非常に活動的な研究コミュニティが育っていると感じる。基礎研究は計画して成果が出るものではなく、むしろ研究環境を整えることによって自発的に成果が出てくるものであり、その意味で非常にうまくいっている国プロであるといえる。さらに、共通ツールとしてのGraphillionは、深層学習におけるフレームワークなどと同様に、社会への大きなインパクトの可能性を秘めていて、期待できる。

深層学習や生成モデルの急速な進展によって、プログラミングの世界も大きく変化しつつある。入出力の例示を与え、既存のアルゴリズムを組み合わせることによって自動的にプログラミングができる時代がすぐそこに来ている。このことはただちにアルゴリズムの重要性を減じるものではないが、この新しい現実の中で基盤的アルゴリズムがどのような役割を果たすのかを再検討する必要がある。アルゴリズム研究を深く究めるとともに、社会の大きな流れを見ながら位置づけを考えていくことも同時に考えていただきたい。

### 渡辺 治（東京工業大学）

各研究課題において突出した成果を含む多くの成果を挙げていることは、他の情報系分野の研究者の間でも高く評価されている。この点、本領域の研究力の強さと研究マネジメントの高さを評価したい。また、本領域の研究者間の連携策であり、より広くはアルゴリズムの設計と解析に関わる研究者のコミュニティ作りのための新たな試み（神田サテライトラボ、京都サテライトラボ、AFSA研究ラジオ）に果敢に取り組み、コロナ禍をうまく乗り切る・コロナ禍で生まれたコミュニケーション術を上手に活用している点も大変良い。一方で、この領域から、さらにある分野を深めるための、あるいは、より大きな社会実装の流れを作るための、大型の研究プロジェクトの提案が出てきていない、もしくは、大型研究資金獲得などで見える化されていない点が残念である。今後の領域の戦略の中に是非、組み入れ、皆で議論して頂きたい。たとえば、A02班が目指している、高度アルゴリズムの成果を社会実装に活用するための研究は、対話型AIの台頭により、新たな局面を迎えると思われる。こうした点を新たに新たなプロジェクトとして起こしていく、などの戦略を領域全体で議論して頂きたい。