

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24106001

研究課題名(和文)多面的アプローチの統合による計算限界の解明

研究課題名(英文)A Multifaced Approach Toward Understanding the Limitations of Computation

研究代表者

渡辺 治(Watanabe, Osamu)

東京工業大学・情報理工学院・教授

研究者番号：80158617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 103,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題の目的は、計算限界の解明を目指す新学術領域研究の総括班活動である。本領域では、革新的な計算の活用の鍵となる計算の理解の深化のため、計算限界に関する研究を数理学の多様な観点から行うことを目指した。多様な観点からの研究が力を発揮するには、領域の研究者ならびに世界の研究者との研究連携が必須である。本総括課題では、その研究連携を促進させるため、研究者招聘と活用、研究ワークショップの開催などを実施した。若手育成のために、秋学校や学生勉強会などを実施した。また、国際会議の主催、専門家へのセミナーなど、本領域の成果の公表や波及のための事業を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to manage, as a headquarter, the whole research project for exploring the limits of computation (in short, the ELC project). Deepening the understanding of computation is a key for developing yet stronger and new methods of using computation, and for this purpose, the ELC project investigates the limits of computation from various view points from a wide area of mathematical science. For obtaining significant advancements by such a multi-disciplinary approach, the collaboration of researchers in the world is necessary. The main task of this project is to prepare an appropriate environment for promoting such collaborations. For this, we invited many researchers, organized a good number of research workshops, and organized several international symposiums from small to large. We also organized tutorial seminars, fall schools, and group study sessions for promoting our research and fostering young researchers.

研究分野：計算の理論

キーワード：計算限界解明 研究連携促進 研究拠点形成 若手研究者の育成 成果の総括 成果の波及

1. 研究開始当初の背景

「計算」すなわち、コンピュータ上で実現される処理は、現代の人類にとって欠かせない。一方、計算は未開拓な段階であり、未発掘の革新的な計算活用技術が、多数存在する可能性が高い。こうした技術の発見には、計算の深い理解が必須であり、それには、 $P \neq NP$ 予想に代表される計算限界の解明が鍵となる。古くから、不可能性の研究が、数学各分野の発展の原動力となってきた。計算分野でも同様である。計算活用の、ほとんどすべての場面で登場する NP 問題と呼ばれる問題群に対して、「それらを統一的に効率よく計算する強力な計算法は存在しない」というのが $P \neq NP$ 予想である。この予想の解決へ向けての研究は、計算の理解深化への重要な道筋であり、画期的な計算活用技術を生み出す基礎となる。 $P \neq NP$ 予想が数理学における今世紀の七大未解決問題といわれるのは、その深淵さや数理科学的困難さだけでなく、このような意義が数理科学者の共通認識となっているからである。本領域では、 $P \neq NP$ 予想に代表される計算限界の重要未解決問題の解決へ向けて、その研究の歴史の中で礎となるような限界の発見や研究手法の提案を目指した。世界的にも多くの研究者が最先端の解析技法を開拓している中、我々は、これまでに試みられてこなかった数理学の様々な観点から多面的な計算の分析を行い、その分析の連携により、新たなそして強力な限界解明手法の発見を目指した。

2. 研究の目的

本領域で目指したのは、計算複雑度理論のこれまでの研究の積み重ねの上に、さらに数理学の様々な分野からの多面的な解釈、新たな解析技法を導入して、計算限界の研究をより深めることである。それにより今後の研究の基盤となる (i) 重要な限界の解明、(ii) 革新的な解析技法、(iii) 新たな研究手法を生み出すことが目標である。そのため、本領域では、計算限界に対する次の3つの異なるアプローチに対応して研究項目を立て、各々の研究項目ごとに3つの計画研究班を立てた。

- 研究項目 A : 最先端技法の徹底検討
- 研究項目 B : 計算上界、最適化理論からのアプローチ
- 研究項目 C : 境界領域からのアプローチ

本領域の成功の鍵となるのは、こうした異なるアプローチを進める研究者たちの連携である。本領域の学問分野の特色として研究は個人ベースで行われるのが原則である。もちろん、個々の連携は重要であり、世界的な研究拠点では密に議論を交わすグループ発生の土壌となるコミュニティが形成されている。本領域の成否は、領域の多様な研究者と計算限界に関する世界的な専門家が、こうしたコミュニティを形成できるかにかかっていたと言っても過言ではない。本総括課題

の主な目的は、そうした拠点形成であり、それによる研究者の密な連携の推進である。

さらに、計算の理解を深める研究からの波及のための環境作りも本総括課題の重要な役目である。ICTの発展の歴史の中で、計算への理解の深化が革新的な技術を生み出してきた例は数多くある。本領域でも、その研究の中から得られる計算に関する基礎理論から、計算の活用に関する革新的な理論や基盤技術が生み出されることが十分期待できる。そうした波及を組織的に推進することも本総括課題で目指した。

3. 研究の方法

本総括課題では、領域内の研究連携や研究成果の波及のために、次の5つの事業を行う計画を立てた。(1) 研究連携を構築し、研究を深めるための事業、(2) 計算限界研究において本領域の世界的なプレゼンスを確立するための国際会議の主催、(3) 若手研究者を育成するための教育事業、(4) 波及効果を考えた専門家向けの講習会をはじめとする各種のアウトリーチ活動、そして(5) 本領域での研究の波及、さらには理論計算機科学からの革新的な情報技術を生み出すことを目指した研究組織の形成。

4. 研究成果

上述の5つの事業の成果を述べる。

- (1) 研究連携を構築し、深めるための事業
- ① 研究WSの開催 (一部は計画班と共催)
- H24年度 : GCT WS, WS on Randomness
 - H25年度 : WS on Extension Complexity, WS on Inapproximability, WS on Quantum Info.
 - H26年度 : WS on Pivoting Algo., WS on Boolean Functions, WS on Learning Theory, WS on Extension Complexity 2, WS on Parameterized Complexity
 - H27年度 : WS on Quantum Comp. Complexity, WS on Parameterized Complexity 2
 - H28年度 : WS on Algorithm Design, WS on Quantum Comp. Complexity 2
- ② 研究者の招聘 (次の(2)での招聘も含む、1か月以上の滞在者は氏名、主な共同研究の班を記載した)
- H24年度 : 28名 (S. Kannan : A01, C01)
 - H25年度 : 22名 (M. Vekhperera : C01)
 - H26年度 : 15名 (H. Chen : A02, C01, X. Bei : A01, A02, C01)
 - H27年度 : 45名 (J. Toran : A01, C01)
 - H28年度 : 17名 (H. Chen : A02, J. Saia : A03)
- ③ 計算限界研究センターとその利用
- 領域発足後早くに(2012年11月)、東京工業大学田町キャンパスにて、研究拠点として計算限界研究センターを開設し、総括班事業を担当する事務局を設置した。総括班では、領域内での研究連携の推進のため、(i) 複数の観点からの検討を行う研究レビュー会、

(ii) 戦略的な研究者招聘（上記②）と招聘研究者による講演会，(iii) 研究課題深堀りワークショップ（上記①）を，センターを中心に以下のように実施した。

年度	H24	H25	H26	H27	H28
研究レビュー会	2	2	7	6	3
招聘者講演	1	9	8	11	4
研究WS	3	3	6	3	1
学生勉強会	平均して隔週で1回				

立地条件の良さもあり，この活動は効果的だった。また，センターに設置した各大学を結ぶTV会議システムも非常に有効に活用できた。

以上の事業の結果，計画班間，計画班・公募班間の連携研究が進んだ。その結果，たとえば，班間共著論文数が以下のように大幅に増加した。

H24	H25	H26	H27	H28
37	28	64	42	63

班間（含：公募班）の共著論文数
※査読付き論文のみ。複数の班での共著論文は重複して数えている。H29年度掲載予定のものはH28年度には入れていない。

(2) 本領域主催の国際会議

計算限界の研究ならびに関連の理論計算機科学の研究に関する国際会議を以下のように主催した。こうした活動は，本領域が計算限界の研究の拠点であり，さらには日本が理論計算機科学の重要拠点であるという世界的な認識を確立するのに貢献した。

H24年度：

- ELC Tokyo Complexity Workshop, 品川プリンスホテル, 参加 154 名 (海外 25 名), 3月14日～3月17日
- ELC Tokyo Complexity Workshop, Satellite Workshop, 京都大学 品川オフィス, 参加 62 名 (海外 3 名), 3月14日
- ELC Workshop on Polyhedral Approaches: Extension complexity and pivoting lower bounds, 京都大学, 参加 25 名 (海外 7 名), 6月14日～19日

H25年度：

- ELC International Meeting on Inference, Computation, and Spin Glasses, 北海道大学, 参加 60 名 (海外 20 名), 7月29日～31日
- Japanese-Swiss Workshop on Combinatorics and Computational Geometry, 東京大学, 参加 80 名 (海外 10 名), 6月4日～6日
- AQIS Satellite Workshop, 東京大学, 参加 70 名 (海外 40 名), 8月18日
- Workshop on Learning Theory and Complexity, 京都大学, 参加 24 名 (海外 2

名), 9月16日

H26年度：

- Workshop on Quantum Comput. Complexity, 京都大学, 参加 25 名, 7月4日
- Computability and Complexity in Analysis, 明治大学, 参加 60 名 (海外 40 名), 7月12日～15日

H28年度：

- Computational Complexity Conference, 一橋ホール, 参加 131 名 (海外 62 名), 5月29日～6月2日
- CCC16 Tokyo Satellite Workshop, 学士会館, 参加 95 名 (海外 45 名), 5月28日
- CCC16 Kyoto Satellite Workshop, 京都大学, 参加 25 名 (海外 10 名), 6月3日

(3) 教育事業

学生やPDを含め，本領域の若手育成のために以下のような事業を行った。

- ① 重要会議参加体験プロジェクト（領域内対象）：理論計算機科学の重要会議に若手研究者をリーダーに学生を数名参加させ，最先端の研究の話をして聞く経験をさせた。（H26年度より毎年度数件実施。）
- ② 長期海外研修プロジェクト（領域内対象）：博士課程学生，PD，領域の若手研究者（助教以下）に対して，海外の研究者のもとに1か月～3か月滞在し，共同研究を行わせた。（H26，27年度各1件，H28年度4件。）
- ③ 学生定例勉強会（領域内対象）：PDなど若手研究者がリードし，学生を中心に計算限界の最先端の研究を学ぶ勉強会を，計算限界研究センターでH25年度よりほぼ隔週で実施した。
- ④ PD育成：各班雇用のPDの研究活動を保証するため，雇用班において基盤研究経費50万円／年をPDが独自に使えるようにした。総括班では，PD採用・評価委員会がメンター支援と年度末業績評価を雇用班とは独立に行い，PD研究プロジェクト支援（申請毎30万円以下の研究費支援）を実施した。
- ⑤ 秋学校（領域外も対象）：学生ならびに若手研究者が対象の計算量理論秋学校（毎年度1回，計5回）と暗号学校（最終年度以外毎年度1回，計4回）を開いた。毎回，担当計画研究班がテーマを決めて，班員や招聘研究者による合宿形式で講義&演習&研究討論を行った。
- ⑥ COMP・ELC学生シンポジウム（領域外も対象）：電子情報通信学会の総合大会における企画シンポジウムを毎年度行った。10名程度の学生（主に博士課程学生）が発表を行い，その中から最優秀論文賞を選出した。

(4) アウトリーチ活動

- ① 専門家向け講習会
電子情報通信学会コンピュータ・シミュレーション研究会，特別企画計算限界解明入門講義（招待チュートリアル講演）

- ・脊戸 和寿, 沖縄産業支援センター, 2014年12月20日
- ・玉置 卓, 名古屋工大, 2014年10月18日
- ・上野 賢哉, 奈良女子大, 2013年6月24日
- ・河内 亮周, 岐阜大学, 2013年3月18日
- ・渡辺 治, 九州大学, 2012年12月10日

② 一般対象の啓発活動

[ニュースレター]

- ・ELC NOW Vol. 4: ビッグデータの未来に挑む, 2017年2月9日 1359部発行
- ・ELC NOW Vol. 3: 人工知能に理論保証を, 2016年9月26日 1259部発行
- ・ELC NOW Vol. 2: 「ない」を証明する, 2016年4月6日, 1286部発行
- ・ELC NOW Vol. 1: 計算世界観 2015年11月1日 1200部発行

[サイエンスカフェ]

- ・ELC サイエンスカフェ 「 $P \neq NP$ 予想」, 2016年8月11日, 東工大, 参加約60名
- ・ELC サイエンスカフェ 「 $P \neq NP$ を語る」, 2015年3月12日, 東工大, 参加約60名
- ・ELC サイエンスカフェ, 2012年11月11日, 東工大, 参加約55名 (高校生約30名)

(5) 情報技術産み出すための研究組織形成

応用分野において本格的な波及効果を目指すには、個人の研究では限界があり、応用分野を組織的に開拓するプロジェクトが必要となる。そこで、本領域の研究成果の波及さきの開拓のために、さらには、理論計算機科学の基礎力を活用し、我が国発の革新的な情報技術を産み出すための、本領域の研究者が中心となって実践的な応用を目指したプロジェクトの立ち上げることを、本領域でも支援した。その結果、大規模データ解析での実践応用に関する大型プロジェクトを以下のように複数立ち上げることに成功した。

JST ERATO: 河原林巨大グラフプロジェクト

JST CREST: 大規模複雑システムの

最適モデリング手法の構築

JST CREST: ビッグデータ時代に向けた

革新的アルゴリズム基盤

JST CREST: データ粒子化による高速高精度

な次世代マイニング技術

の創出

これらのプロジェクトとの合同シンポジウムを、5回(含: 国立情報学研究所主催の合同シンポジウム)行い、そこでの議論を経て、本領域で得られた成果の応用に関して複数の共同研究を始めることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件, すべて査読無しの解説論文, 学会誌の論文のため DOI 無し)

- ① 加藤 直樹, e-サイエンスに向けたアルゴリズムの新潮流, 電子情報通信学会誌, 97(5), 370--373, 2014
- ② 徳山 豪, 計算限界の解明?その意義とシナリオ(後編), 情報処理, No. 5, 528--538, 2013
- ③ 徳山 豪, 計算限界の解明?その意義とシナリオ(前編), 情報処理, No. 4, 374-384, 2013
- ④ 徳山 豪, 他, 特集「計算限界の解明への多面的アプローチ - P vs NP に向けた最前線 -」, 電子情報通信学会誌, 96(9), 671--687, 2013

[学会発表] (計16件, すべて招待講演)

- ① T. Horiyama, On the enumeration and counting of developments of polyhedra, Intl Conf. on Math. Modeling and Applications (ICMMA), 11 Nov, 2016, 明治大学(東京・中野区)
- ② 徳山 豪, Theoretical computer Science for data science, FIT 2016, 8 Sept., 2016, 富山大学(富山, 富山市)
- ③ 堀山 貴史, 多面体の展開図の列挙について, 第29回 回路とシステムワークショップ, 12 May, 2016, 北九州国際会議場(福岡・北九州市)
- ④ S. Yamashita, Reduction of computational steps for topological quantum circuits, Quantum Programming and Circuits Workshop, 10 June, 2015, Waterloo (Canada)
- ⑤ T. Tokuyama, Theoretical computer science for big data analysis: recent activities in Japan, The 10th Intl Conf. on Knowledge, Information and Creativity Support Systems, 14 Nov., 2015, Phuket (Thailand)
- ⑥ 徳山 豪, 高性能融合解析技術, 情報処理学会 全国大会, 11 March, 2016, 慶応大学(神奈川・横浜市)
- ⑦ 堀山 貴史, 他5名, 論文必勝法 ~一流論文のための羅針盤~, 情報処理学会 全国大会(パネルセッション), 10 March, 2016, 慶応大学(神奈川・横浜市)
- ⑧ T. Tokuyama, How do you justify existence, The 17th Korea-Japan Joint Workshop on Algorithms and Computation, 13 July, 2014, 沖縄コンベンションセンター(沖縄・宜野湾市)
- ⑨ 瀧本 英二, オンライン凸最適化, 京都大学数理解析研究所「組合せ最適化セミナー」, 1 Aug., 2014, 京都大学(京都・京都市)
- ⑩ 渡辺 治, 計算限界への挑戦: $P=NP$ の世界を目指して, RAMP シンポジウム, 17 Oct., 2014, 法政大学(東京・千代田区)
- ⑪ 徳山 豪, 一流国際会議・論文誌での採択への道, 情報処理学会 全国大会, 17 March, 2015, 京都大学(京都・京都市)

- ⑫ 堀山 貴史, 情報処理と折り紙, 情報処理学会 全国大会, 19 March, 2015, 京都大学 (京都・京都市)
- ⑬ 渡辺 治, 計算限界解明:なぜ限界を?&なぜ今?, FIT 2013, 6 Sept., 2013, 鳥取大学 (鳥取・鳥取市)
- ⑭ 瀧本 英二, オンラインアルゴリズムとストリームアルゴリズム, 計測自動制御学会ニューラルネットワークフォーラム, 29 March, 2013, 名古屋大学 (愛知・名古屋市)
- ⑮ T. Horiyama, Edge unfoldings of platonic solids never overlap, Polyhedral Computation:Theory, Practice and Applications in Engineering and Science, Intl Courses in Communications and Computer Eng., 20 Dec, 2012, 京都大学 (京都・京都市)
- ⑯ 渡辺 治, 計算限界解明チュートリアル, 電子情報通信学会コンピュータ研究会, 10 Dec, 2012, 九州大 (福岡・福岡市)

[図書] (計7件)

- ① 畑埜 晃平, 瀧本 英二, オンライン予測, 講談社サイエンティフィク, 2016, 163
- ② 堀山 貴史, 超高速グラフ列挙アルゴリズム〈フカシギの数え方〉が拓く組合せ問題への新アプローチ, 8章 社会のさまざまな問題への応用, 森北出版, 2015, 84--99
- ③ T. Tokuyama 他編, Reviews and Lectures: Exploring the Limits of Computation 2, IIS GSIS, Tohoku Univ., 2015, 289--399
- ④ 渡辺 治, コンピュータサイエンス, 丸善サイエンスパレット, 2015,
- ⑤ 渡辺 治, 今度こそわかる $P \neq NP$ 予想, 講談社サイエンティフィク, 2014
- ⑥ T. Tokuyama 他編, Reviews and Lectures: Exploring the Limits of Computation 1, IIS, GSIS, Tohoku Univ. 2014, 1--70
- ⑦ 河原林 健一, 田井中 麻都佳, これも数学だった!?:カーナビ, 路線図, SNS 丸善ライブラリー, 丸善出版, 2013, 184

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 治 (WATANABE, Osamu)
東京工業大学・情報理工学院・教授
研究者番号: 80158617

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

浅野 孝夫 (ASANO, Takao)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号: 90124544

茨木 俊秀 (IBARAKI, Toshihide)

京都情報大学院大学・その他・学長
研究者番号: 50026192

今井 浩 (IMAI, Hiroshi)
東京大学・情報理工学系研究科・教授
研究者番号: 80183010

戸田 誠之助 (TODA, Seinosuke)
日本大学・文理学部・教授
研究者番号: 90172163

丸岡 章 (MARUOKA, Akira)
東北大学・その他・名誉教授
研究者番号: 50005427

湊 真一 (MINATO, Shinichi)
北海道大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 10374612

牧野 和久 (MAKINO, Kazuhisa)
京都大学・数理解析研究所・教授
研究者番号: 60294162

河原林 健一 (KAWARABAYASHI Kazuhisa)
国立情報学研究所・情報プリンシプル系・教授
研究者番号: 40361159

浅野 哲夫 (ASANO, Tetsuo)
北陸先端科学技術大学院大学・その他・学長
研究者番号: 90113133

加藤 直樹 (KATOH, Naoki)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 40145826

エイビス デビッド (AVIS, David)
京都大学・情報学研究科・研究員
研究者番号: 90584110

徳山 豪 (TOKUYAMA, Takeshi)
東北大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 40312631

山下 茂 (YAMASHITA, Shigeru)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 30362833

瀧本 英二 (TAKIMOTO, Eiji)
九州大学・システム情報学研究院・教授
研究者番号: 50236395

堀山 貴史 (HORIYAMA, Takashi)
埼玉大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 60314530

森 立平 (MORI, Ryuhei)
東京工業大学・情報理工学院・助教
研究者番号: 60732857