

**平成29年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)
中間評価資料(進捗状況報告書)**

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	数理論理学とその応用の国際研究拠点形成		
日本側拠点機関名	北陸先端科学技術大学院大学		
コーディネーター 所属部局・職名・氏名	先端科学技術研究科・教授・石原 哉		
相手国側	国名	拠点機関名	コーディネーター所属部局・職名・氏名
	英国	University of Leeds	School of Mathematics・Professor・Michael RATHJEN
	スウェーデン	Stockholm University	Department of Mathematics・Professor・Erik PALMGREN
	ドイツ	Ludwig-Maximilians-University Munich	Department of Mathematics・Professor・Helmut SCHWICHTENBERG
	イタリア	University of Padova	Department of Mathematics・Academic Researcher・Maria Emilia MAIETTI

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

○申請時の研究交流目標

本研究交流課題では、広い意味での数理論理学（証明論と構成的数学・計算可能性と再帰理論・代数的論理・非古典論理・公理的集合論・モデル理論など）とその応用分野にまたがる問題解決・先端研究の創出のための国際研究交流拠点の形成と人材育成を目指す。数理論理学は数学・計算機科学を原理的に解明しその深淵に光を当てる一方、実社会における様々なシステムの正しさを理論的に保証し電子社会の急速な発展の基盤を担ってきた。北陸先端科学技術大学院大学は構成的数学、ソフトウェア検証、知識・信念の論理等の分野の世界的拠点をなし、EU 第7次研究枠組み計画(FP7)People プログラム国際スタッフ交流事業（IRSES）プロジェクト CONSTRUMATH(2009-2011)、COMPUTAL(2012-2015)、CORCON(2014-2017)の一翼を担う中で、構成的数学からの証明解析手法の提唱、項書換え系における新手法の導入、実数値充足問題の新アルゴリズムの開発、様相論理を用いた人工知能へのアプローチといった革新的成果を残してきた。その背景には、2012年発足の領域横断型学内研究ユニット「数理論理学とその応用」による各分野の深い相互理解、また、計算可能性理論と証明論の融合や連続構造の計算可能性で重要拠点をなす東北大学・国立情報学研究所・京都大学との緊密な連携がある。

この中で、北陸先端科学技術大学院大学には各分野の国内外若手研究者が集い、新たな先端研究を発信する場ともなっている。本研究交流課題ではこの基盤をさらに発展させ、EU プロジェクトと両輪をなして世界を牽引する研究の発信拠点を目指す。また、既存のプロジェクトの枠を広げ、証明からプログラムを抽出するより包括的な枠組みの構築や様々な計算概念の連続構造への拡張等を目指していく。さらに、集う優秀な若手研究者が多様なシニア研究者との議論を経て研究をリードしていける環境を整え、複数分野を股にかけ研究を国際的に牽引する次世代の拠点リーダーへの成長を促す。

○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について、

- 十分に達成された
- 概ね達成された
- ある程度達成された
- ほとんど達成されなかった

【理由】

北陸先端科学技術大学院大学は、EU 第7次研究枠組み計画(FP7)People プログラム国際スタッフ交流事業（IRSES）プロジェクト CONSTRUMATH(2009-2011)、COMPUTAL(2012-2015)、CORCON(2014-2017)の拠点機関であり、これらのプロジェクトにより構築された国際研究ネットワークを活かし、その維持・強化・拡大を目指した。本事業によるさらなる研究交流により、シニア研究者による共同研究の展開・深化は順調に進展しており、また若手研究者による共同研究の創出は計画以上に進展している。数学分野の論文は出版までに2年近くかかる場合が多々あり目に見える形では現れていないが、本事業終了後には十分な優れた研究成果が期待できる。また、日本側若手研究者が、Marie Curie actions-イタリア国立高等数学研究所のポスドクとして採用されるなど、若手研究者の育成も順調に進展している。さらに、COMPUTALの後継プロジェクトのEU Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie actions (RISE) プロジェクト CID (2017-2020)の申請に参加し採択された。同プロジェクトは平成29年度以降の相手国側マッチングファンドとなる。CID参加機関のロレーヌ大学を拠点機関としフランスを本事業の相手国として追加する方針が確認され、本事業による欧州主要各国の研究機関との緊密な連携によって、日本側拠点機関を中心として参加機関・参加研究者により研究交流拠点の構築は着実に進展し

ている。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1)これまで(平成29年3月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

平成27年度は、4名の研究者をそれぞれリーズ大学、スワンジー大学およびケンブリッジ大学に派遣し共同研究および共同研究の立上げを行った。リーズ大学の研究者と若手研究者2名がそれぞれ時制論理とその数理形態学への応用に関する共同研究、構成的集合論の実現可能性解釈に関する共同研究を立ち上げた。スワンジー大学の研究者とはグレイ・コードに対応する論理に関する共同研究で成果が得られた。また、1名の研究者をチャルマース工科大学に派遣し依存型型理論の内包性に関する共同研究を行い成果を得た。日本側から(若手研究者のべ3名を含む)のべ7名の研究者をそれぞれルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンおよびダルムシュタット工科大学に派遣し共同研究および共同研究の立上げを行った。若手研究者とダルムシュタット工科大学の研究者が二重否定移動の公理に関する共同研究で成果を得た。若手研究者を含む2名とミュンヘン大学の研究者が中間値の定理などの構成的逆数学に関する共同研究で成果を得た。さらに、日本側から(若手研究者2名を含む)のべ6名をそれぞれパドヴァ大学およびヴェローナ大学に派遣し共同研究および共同研究の立上げを行った。若手研究者とパドヴァ大学の研究者が構成的数学とBar帰納法に関する共同研究を立ち上げた。若手研究者とパドヴァ大学の研究者が2進列の選列に関する共同研究で成果を得た。リーズ大学から1名、スワンジー大学から2名、ケンブリッジ大学から1名の研究者を2週間~2ヶ月間受入れ、グレイ・コード等の共同研究を行った。ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンの研究者1名および学生1名を2ヶ月間~6ヶ月間受入れ、構成的逆数学に関する共同研究を行った。ダルムシュタット工科大学、ジーゲン大学およびトリア大学から6名の研究者を1週間~2ヶ月受入れた。

平成28年度は、(若手研究者4名を含む)5名の研究者をリーズ大学およびスワンジー大学に派遣し共同研究および共同研究の立上げを行った。リーズ大学との共同研究では、構成的集合論における independence of premiss rule に関する研究の深化、古典的逆数学における完備可分距離空間における Caristi の不動点定理に関する研究成果が得られた。スワンジー大学との共同研究では、並列計算プログラムの証明からの抽出に関する研究の深化などの研究成果が得られた。また、1名の研究者をチャルマース工科大学に派遣し共同研究を行った。PCF の Full Abstraction における非線形項書き換え系のアイデアの応用可能性が明らかになった。日本側から(若手研究者のべ8名を含む)のべ14名の研究者をルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンに派遣し共同研究および共同研究の立上げを行った。構成的逆数学における Weak Koenig's lemma のバリエーションの非構成的原理と従属選択公理による特徴づけに関する研究成果、クラス理論に基づく証明検証支援システムの開発についての有益な示唆、型付きラムダ計算における簡約列の長さの上限の高階ラムダ計算への拡張などで、研究成果を得た。さらに、日本側から(若手研究者2名を含む)4名をパドヴァ大学およびヴェローナ大学に派遣し共同研究および共同研究の立上げを行った。パドヴァ大学との共同研究では、証明論におけるバー帰納法公理・バー帰納法規則などで、研究成果を得た。ヴェローナ大学との共同研究では、非決定性帰納的定義と含意関係に関する研究の端緒を得た。リーズ大学から学生1名、スワンジー大学から3名(内学生1名)を10日間~6ヶ月受入れた。ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンからのべ5名の研究者を2週間~1ヶ月半受入れ、構成的逆数学などに関する共同研究を行った。ジーゲン大学から研究者1名を1か月間受入れた。ジェノバ大学およびインスブリア大学から研究者2名を1か月間受入れた。

○セミナー

	平成27年度	平成28年度
国内開催	0回	1回
海外開催	2回	1回
合計	2回	2回

【概要】

平成 27 年度の S-1 では、直観主義数学、構成的型理論および構成的ポイント・フリー・トポロジーで国際的に著名なそれぞれ A. S. Troelstra, P. Martin-Loef および G. Sambin をはじめとして、関係する分野の欧州で一流の研究者が講演を行った。また、日本側から 3 名の若手研究者が参加し講演を行った。参加者は招へいを原則に厳選されており、優れた講演ばかりであった。そのような環境で若手研究者が講演・討論を行ったことは、若手研究者育成の観点から有意義であった。S-2 は本事業と緊密に連携する EU プロジェクト COMPUTAL のプロジェクト・ワークショップであり、日本側から 11 名の研究者・大学院生が参加し、共同研究およびその立上げに関して貴重な討論・意見交換の場となった。日本側研究者による 5 講演を含む、当該分野に関する優れた講演が目立った。日本側の新たな参加者にとっては、EU プロジェクト COMPUTAL と本研究課題での課題と関心を共有することができる、貴重な機会であった。平成 28 年度の S-1 は本事業が連携する EU プロジェクト CORCON のプロジェクト・ワークショップである。EU を中心として一流の著名な研究者による 12 件の招待講演、および、プログラム委員会で選ばれた 19 件の一般講演が行われた。日本側からは(若手研究者 5 名を含む)9 名を派遣し、(若手研究者 3 名を含む)4 名が講演を行った。S-2 では、20 件の研究発表が行われた。内、日本側の参加研究者によるもの 16 件、英国側・ドイツ側の参加研究者によるもの 4 件である。また、若手研究者による研究発表は 11 件であった。セミナーにより本研究課題の日本側の研究者や若手研究者との交流により既存の国内共同研究体制が強化し、講演・意見交換などを通して、新たな国内連携体制の構築ができた。本研究課題に参加する若手研究者を中心とした、新たな研究ネットワークの構築につながった。

○研究者交流

【概要】

研究者 1 名がドイツ・ベルリン・ベルリン工科大学で H27. 9. 7~H27. 9. 13 に開催された国際会議 CSL2015 にて研究討論を行った。

(2)(1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、「学術的側面」、「若手研究者の育成」、及び「研究交流拠点の構築」の観点から記入してください。

○学術的側面

本研究交流課題は EU プロジェクトのワークパッケージと連携し、(1) 証明論と構成的数学、(2) 自動定理証明とソフトウェア検証、(3) 連続構造の計算可能性、(4) 知識と信念の論理に焦点を絞って研究を推進した。それぞれの分野での核心的な問題点を明らかにするとともに、その解決を目指した。また、これらの分野は多元的また有機的に結びついており分野境界的な国際共同研究の創出、およびこれらの分野の実社会や他分野への応用の可能性を探り分野横断的な国際共同研究の創出につなげた。平成 27 年度には、(1) では二重否定移動の公理、中間値の定理などの構成的逆数学、依存型理論の内包性、(2) ではトリア大学で開発された iRRAM パッケージを用いた SAT ソルバの実装、(3) ではグレイ・コードに対応する論理、表現付き空間と

記述集合論、べき空間とポイント・フリー・トポロジー、(4)ではエージェント・コミュニケーションと直観主義論理の知見に関する共同研究で成果を得ている。また、2進列の選列、時制論理とその数理形態学への応用、構成的集合論の実現可能性解釈、Bar 帰納法などで新たな研究が端緒についた。平成 28 年度には、(1)では構成的集合論における independence of premiss rule、構成的逆数学における Weak Koenig's lemma の非構成的原理と従属選択公理による特徴づけ、古典的逆数学における不動点定理（完備可分距離空間での Caristi の不動点定理）、ナッシュ均衡存在の分析、証明論におけるパー帰納法公理・パー帰納法規則、型付きラムダ計算における簡約列の長さの上限の高階ラムダ計算への拡張などで、研究成果を得た。また(2)では、並列計算プログラムの証明からの抽出、クラス理論に基づく証明検証支援システムの開発、配列をもつ分離論理の決定可能性などで、研究成果を得た。さらに(3)では、距離空間上の計算量理論、プログラム合成・検証による情報セキュリティ（サイドチャネル攻撃に対する理論的耐タンパー性の自動合成）、 ω 言語の包含関係判定、WQOにおける有限基底性の正規表現に基づく構成的証明、Indutive type を用いた一般の WQO への拡張可能性、PCFにおける非線形項書き換え系などで、研究成果を得た。

以上、シニア研究者による共同研究の展開・深化は順調に進展しており、また若手研究者による共同研究の創出は計画以上に進展している。

○若手研究者の育成

若手研究者の国際共同研究の深化と創出、セミナーへの参加に重点を置いている。ストックホルムのセミナー（平成 27 年度 S-1）では、日本側から 3 名の若手研究者が参加し講演を行った。参加者が招へいを原則に厳選された伝統のあるワークショップの環境で若手研究者が講演・討論を行ったことは、若手研究者育成の観点から有意義であった。また、若手研究者をダルムシュタット工科大学、ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンおよびパドヴァ大学に派遣し、参加機関の研究者とのそれぞれの共同研究で成果を得た。さらに、若手研究者をリーズ大学およびパドヴァ大学に派遣し、参加機関の研究者とのそれぞれの共同研究が立ち上がった。そのうちの若手研究者 1 名は、10 か月程度の長期派遣であり、他の若手研究者もそれぞれ 2 週間以上の派遣で共同研究および共同研究の立上げに十分な期間となった。ドイツのニーデルラティヒでのセミナー（平成 28 年度 S-1）では日本側から 3 名の若手研究者が講演を行った。著名な研究者が参加する環境で若手研究者が講演・討論を行ったことは、研究者育成の観点から有意義であった。若手研究者をリーズ大学、ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンおよびパドヴァ大学に派遣し、参加機関の研究者との共同研究の深化および共同研究の立上げを行った。そのうちの若手研究者 1 名は、4 ヶ月以上の長期派遣であり、他の若手研究者も 2 週間～1 ヶ月間の派遣である。

また、機会を捉え本研究交流課題および EU プロジェクトで来日した研究者による若手研究者向けのセミナー・特別集中講義を JAIST Logic Seminar Series として平成 27 年度 2 回、平成 28 年度 9 回（内 3 回は集中講義形式）開催し、平成 27 年 7 月には受入研究者 7 名の講演を含むミニ・ワークショップを開催し、研究交流課題への導入を行った。本研究交流課題において平成 27 年度 10 ヶ月、平成 28 年度 4 ヶ月イタリアへ派遣していた日本側若手研究者が、Marie Curie actions-イタリア国立高等数学研究所のポスドクとして採用された。

以上、若手研究者の育成も順調に進展している。

○研究交流拠点の構築

北陸先端科学技術大学院大学は、EU 第 7 次研究枠組み計画 (FP7) People プログラム国際スタッフ交流事業 (IRSES) プロジェクト CONSTRUMATH (2009-2011)、COMPUTAL (2012-2015)、CORCON (2014-2017) の拠点機関であり、これらのプロジェクトにより構築された国際研究ネットワークを活かし、その維持・強化・拡大を目指した。特に、本事業で新たに参加した日本側研究者や若手研究者と EU 側研究者の交流により既存の国際共同研究を拡大し研究協力体制を強化した。セミナーやワークショップなどでの意見交換を通して、できるだけ多くの参加研究者が領域横断的な国際共同研究を立ち上げ研究協力体制を拡大した。具体的には、ドイツのコッヘルおよびニーデルラティヒで開催されたそれぞれ COMPUTAL および CORCON のプロジェクト・ワークショップを本事業のセミナーと位置づけ、講演・意見交換などを通して多くの参加研究者が新たな領域横断的な国際共同研究を立ち上げることを支援した。特に、コッヘルでの COMPUTAL プロジェクト・ワークショップでは日本側から 11 名の研究者・大学院生が参加し、共同研究およびその立上げに関して貴重な討論・意見交換の場となった。日本側の新たな参加者にとっては、EU プロジェクトと本研究課題での課題と関心を共有することができ、日本側研究者と欧州側研究者の共同研究の深化と新たな共同研究の立上げに資するところが大きい。ニーデルラティヒで開催された CORCON のプロジェクト・ワークショップには日本側から (若手研究者 5 名を含む) 9 名が参加し、講演・意見交換などを通して多くの参加研究者が新たな領域横断的な国際共同研究を立ち上げる端緒となった。また、京都でワークショップを開催し、(若手研究者 10 名を含む) 13 名を派遣し、国際的研究協力体制のみでなく国内での研究協力体制の強化・拡大につながった。これらのセミナーでは、次年度以降の共同研究とセミナーの運営・企画について意見交換を行った。

英国のリーズ大学、スワンジー大学、スウェーデンのチャルマース工科大学、ドイツのルートヴィヒ・マクスミリアン大学ミュンヘン、ダルムシュタット工科大学、イタリアのパドヴァ大学、ヴェローナ大学と研究連携を深化させ、研究協力体制の構築を進めた。また、欧州側の研究者と若手研究者とのいくつかの共同研究が立ち上がり、今後の共同研究を推進するための端緒を得た。

COMPUTAL の後継プロジェクトの EU Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie actions (RISE) プロジェクト CID (2017-2020) の申請に参加した。申請は採択され、同プロジェクトは平成 29 年度以降の相手国側マッチングファンドとなる。平成 29 年 6 月にフランスで開催された CID プロジェクト・キックオフ・ワークショップ (平成 29 年度 S-1) には学生 2 名を含む 5 名を派遣した。そこで、CID 参加機関のロレーヌ大学を拠点機関としフランスを本事業の相手国として追加する方針が確認された。これにより数理論理学の応用分野での研究交流の活性化が期待できる。以上、本事業による欧州主要各国の研究機関との緊密な連携によって、日本側拠点機関を中心として参加機関・参加研究者により研究交流拠点の構築は着実に進展している。

4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での、「日本側拠点機関の実施体制」、「相手国拠点機関との協力体制」、及び「日本側拠点機関の事務支援体制」について記入してください。

○日本側拠点機関の実施体制 (拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等)

日本側の拠点機関では、石原 (数理論理学)、東条 (人工知能)、小川 (ソフトウェア科学) は理論計算機科学センターを兼務し、中心となって基礎研究および領域横断研究を行っている。石原はコーディネーターとして、拠点機関のみでなく協力機関・協力研究者の学生や若手研究者にも十分に配慮し、国内外の共同研究の創出・若手研究者育成を支援している。日本開催のワークショップ (平成 28 年度 S-2) では協力機関の京都大学の研究者と十分な事前打合せ

を行い、役割分担を明確にして協働して、京都で開催した。EU Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie actions (RISE) プロジェクト CID (2017-2020) の申請に際しては、日本側拠点機関が CID 参加機関となり欧州側との連絡・調整を担い採択に結びつけた。今後も EU プロジェクトの日本側参加機関として、欧州側との連絡・調整および日本側参加研究者と欧州側研究者との共同研究の進展・深化・創出をきめ細かく支援して行く。特に、日本側拠点機関では東条・小川を中心として領域横断研究が活発であり、新たな相手国フランスの応用研究との相乗効果が最大限発揮されるよう支援を行う。

○相手国拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

英国側拠点機関リーズ大学は、証明論、構成的集合論、計算可能性理論、人工知能を中心に研究を担っている。日本側若手研究者 3 名がすでに、それぞれ構成的集合論、計算可能性理論、人工知能分野で共同研究を立ち上げている。英国側協力機関スワンジー大学は、証明論等を中心に研究を担い、日本側シニア研究者 2 名が共同研究を展開・深化させている。スウェーデン側拠点機関ストックホルム大学は、構成的型理論、構成的数学を中心に研究を担い、本事業セミナー（平成 27 年度 S-1）を主催した。共同研究実績が少ないことが課題であり、今後若手研究者を含めた共同研究の創出が期待される。ドイツ側拠点機関ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンは、証明論、構成的逆数学、ラムダ計算を中心に研究を担っている。日本側シニア研究者 2 名がそれぞれ構成的逆数学、ラムダ計算分野で共同研究を展開・深化させ、若手研究者 3 名が証明論、構成的逆数学分野で共同研究を立ち上げている。イタリア側拠点機関パドヴァ大学は、構成的数学の基礎付け、構成的位相空間論を中心に研究を担っている。英国側バーミンガム大学の協力研究者とともに日本側若手研究者 2 名と共同研究を立ち上げている。また、Marie Curie actions-イタリア国立高等数学研究所のポスドクとして採用された日本側若手研究者の受入機関である。

CID 参加機関のローレーヌ大学を拠点機関としフランスを本事業の相手国として追加する方針が確認され、ネットワークの拡大・構築を予定している。

○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

契約等を含め様々な手続きは研究資金戦略課において事務支援を丁寧に行っている。また、日常の秘書業務は共通事務管理課がきめ細かく行っている。EU Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie actions (RISE) プロジェクト CID (2017-2020) の申請および採択後のパートナーシップ・アグリーメントの締結等は国際交流課により事務支援が積極的に行われた。様々な局面での諸手続きに対して円滑に事務支援が行われており、拠点機関が組織として本事業に対応している。