

(様式7)

採用年度	平成24年度
種別	国際戦略型

先端研究拠点事業
平成25年度 事業実績報告書 (平成24、25年度採用課題用)

平成26年4月21日

採用番号	22001
領域	数物系科学
分科	プラズマ科学
細目	プラズマ科学
分科細目コード	4501
研究交流課題名 (和文)	実験室と宇宙のプラズマの自己組織化に関する国際連携
研究交流課題名 (英文)	Center for Magnetic Self-Organization in Laboratory and Astrophysical Plasmas
採用期間	平成22年4月1日 ~ 平成27年3月31日 (60ヶ月)

《実施組織体制》

日本側

拠点機関名	東京大学 大学院新領域創成科学研究科
実施組織代表者 (所属・職・氏名)	研究科長 武田 展雄
コーディネーター (所属・職・氏名)	先端エネルギー工学専攻・教授・小野靖
協力機関数	5
参加者数	136

相手国1

国名	米国
拠点機関名	プリンストン大学プラズマ物理研究所
コーディネーター (所属・職・氏名)	プラズマ物理研究所・主任研究員・JI Hantao
協力機関数	9
参加者数	26

相手国2

国名	イタリア
拠点機関名	パドバ大学
コーディネーター (所属・職・氏名)	物理学科 (コンソーシアム RFX)・教授・MARTIN Piero

(様式7)

協力機関数	0
参加者数	8

相手国3

国名	英国
拠点機関名	カラム科学研究所
コーディネーター（所属・職・氏名）	英国核融合研究部門・主任研究員・GRYAZNEVICH Mikhail
協力機関数	1
参加者数	16

相手国4

国名	ドイツ連邦共和国
拠点機関名	マックスプランク太陽圏研究所
コーディネーター（所属・職・氏名）	太陽および太陽圏研究科・研究科長・SOLANKI Sami K.
協力機関数	0
参加者数	10

相手国5

国名	スペイン
拠点機関名	カナリー諸島天文研究所
コーディネーター（所属・職・氏名）	カナリー諸島天文研究所・教授・BUENO Javier Trujillo
協力機関数	0
参加者数	13

1. 交流目標の達成（見込）状況

目標の達成（見込）状況を、A～Eのそれぞれの観点から、ポイントを絞って記載すること。

A 学術的な成果 B 持続的な協力関係の基盤構築 C 若手研究者育成における成果
D 国際的学術情報の収集整備 E 事業の波及効果

① 平成25年度事業計画における達成目標

A 学術的な成果：1) 要素として「磁気リコネクション」、2) 総体として「自己組織化」、3) 実験・観測の「現場の自己組織化問題の解明」を位置づけ、A) 実験・観測・理論の3分野の「異分野融合」、B) 日米欧の「国際連携」によって解き明かす。1) では、①イオンの異常加熱機構、②電子加熱機構③非熱的な粒子加速に重点を置いて、リコネクションのエネルギー変換機構を解明する。2) ではビームによる運動量の注入による磁場構造の自己組織化の変化と能動制御を試み、平衡分岐などの新現象の解明や最後は自己組織化の工学応用を試みる。3) では、観測・実験現場の自己組織化の謎、①ライトブリッジなど彩層リコネクション、②プラズモイド現象、③非熱的粒子加速の解明を進める。

B 持続的な協力関係の基盤構築： IPELS 会議、ひので7会議を日本で主催し、それぞれ、プラズマ自己組織化の最先端研究、太陽観測現場の自己組織化研究を集め、実験・観測・理論の異分野融合、日米欧の国際連携を定常状態に高める。実験、衛星、理論の研究者が他分野に直接参加する形で異分野連携を定常化し、「自由な留学」も定常化をはかる。

C 若手研究者育成における成果： 「自由な留学」計画の定常化を通じて若手を国際共同研究の担い手に定着させる。IPELS 国際会議に伴って博士向き、修士・学部向けのプラズマスクールを2週にわたって開設し、若手育成の活性化を図る。異分野連携した若手が企画するひので実験室会議も年3回開催し、異分野連携、国際連携を完成させる。

D 国際的学術情報の収集整備： IPELS 国際会議に自己組織化の最先端研究、ひので7国際会議に太陽観測現場の最先端研究を集めて、本プログラムの国際連携・異分野融合研究の成果を公表する。フランス、オランダ、ベルギー等からある関連プラズマ分野からの招待講演依頼に応じて国際協力と分野間連携をさらに拡大する。

E 事業の波及効果： IPELS、ひので7を通じて分野間・国際間共同研究の成果を公表し、異分野連携、国際連携が自己組織化問題の解決に有効であることを広い分野に発信したい。また、上記2会議、特に企画するスクールを通じて、日米欧による本国際・分野間連携を主としてアジアへ裾野の拡大をはかる。

平成25年度事業計画の達成状況 ※成果の公表状況は、別紙1「論文リスト」にて作成のこと。

A 学術的な成果： 長期7名を含む30名の派遣と150名を越える来訪により交流は一層活発になり、計画を上回る成果を上げた。リコネクション研究では、1) 東大開発の2次元ドップラー温度計測を導入して英国 MAST の共同リコネクション実験を行い、X点電子加熱と下流のイオン加熱が影響しあうため3重になった高イオン温度領域を明らかにし、2) 日米共同の TS/MRX 実験では下流の負ポテンシャル形成とイオン加速機構について実験と計算機で一致が得られ、3) X点に局在化した非熱的粒子加速、異常加熱も新たに判明した。自己組織化研究では、4) MST (米)、RFX 実験 (伊) を中心にビームによる自己組織化制御法が確立され、5) 緩和分岐現象の実験・理論解析が進んだ。現場の自己組織化も5) ライトブリッジやプラズモイド、さらに分光観測の活用とアウトフローやイオン加熱の観測等の太陽観測の問題が次々と異分野融合チームも貢献しつつ、解明され、これらの成果は2013AGU 会議招待講演、FEC2014 日本代表論文をはじめ、60以上の論文となり、予定される MR2014 会議論文も MR2010、MR2012 に続き、Physics of Plasmas 誌特集号に推薦され、プラズマ核融合学会の招待によりリコネクション研究を本組織が11、12月に特集するなどの成果をあげている。

B 持続的な協力関係の基盤構築： 理論・実験・観測が一体となった日米英伊との多数の派遣・受入：「自由な留学」は軌道に乗り、主催する MR、IPELS 国際会議は分野 No.1 の会議として持続的な協力の核になった。Physics of Plasmas 誌から MR2014 会議論文も3回目にあたる特集号とする依頼がある。日米 COE は新たに、東京大学・プリンストン大学共同研究・教育プロジェクト予算を獲得し、25年度も研究科予算でプリンストン大学教授の招聘・教育参加が実現するなど財政基盤も整備され、持続的な協力が進展している。今年度から宇宙観測現場を取り込んで実験・観測・理論の融合が進み、室内実験と観測の融合は天文月報に掲載され、今年は更に理論が加わった3分野融合の持続的連携に進んでいる。

C 若手研究者育成における成果： 若手研究者派遣が最適な研究場所を探せる「自由な留学」も日米伊英の COE 協力により定着し、学生の電気学会学術奨励賞、学科長特別賞、修論論文賞などを生んだ。観測、実験の若手研究者が相手の分野で共同論文投稿を行う新潮流は天文月報記事、プラズマ核融合学会誌特集となるなど高く評価されている。

D 国際的学術情報の収集整備： 本組織が育てた MR 会議、IPELS 会議、ひので会議はそれぞれリコネクション、自己組織化、太陽物理分野の No.1 の会議として定着し、国際的学術情報の収集と発信の中心として機能した。他分野の招待講演の依頼も多く、分野を拡大して情報交換を行ない、天文分野や工学応用などの分野拡大を行なうことができた。

E 事業の波及効果： 実験・太陽・理論が連携したプラズマスクールはアジアの学生の参加が多く、本組織の連携はアジアに拡大している。本組織も加わり、3分野融合した会議をアジアで創設した。分野融合は太陽物理から磁気圏、降着円盤へ広がり、来年主催の MR2014 の主要課題の1つになる予定である。本連携は東京大学・プリンストン大学共同研究・教育プロジェクトの開始や産業技術研究所と伊 Italian National Research Council との包括研究協定につながった。

2. 実施状況

① 研究交流計画実施にあたる実施体制

国内外の拠点機関及び協力機関の間の、協力連携の状況

今年度は実験と観測に加え、実験分野の学生がシミュレーションも行う新たな若手相互派遣が成功し、成果は Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文に選定された。観測・実験・理論の分野融合研究は多くの学会招待講演を生み、最終的にプラズマ核融合学会の 11, 12 月号に渡る大きな特集記事となった。日米欧連携は MR2012 会議論文を中心に Physics of Plasma 誌の特集号にまとめられた。日米欧が共同で研究者相互派遣や学生の「自由な留学」を企画し、各 COE がスクーリングを行って受入をサポートする体制が定着した。その結果、日米 COE の緊密な連携が評価されて、東京大学・プリンストン大学共同研究・教育プロジェクトという新規予算が両大学でみとめられた。1) 国際会議を共同主催し、2) 学生派遣、スクーリングを共同企画する形で若手研究者の相互派遣が定常化されたといえよう。

日本側拠点機関における研究交流課題への取り組み（事務支援体制等の観点より）

学融合を理念とする新領域創成科学研究科は本組織のような異分野連携・国際連携の支援に積極的である。25 年度には米国側 COE 組織との共同研究とスクーリング充実のため、1 年間にわたり研究科予算でプリンストン大学側の教員招聘のサポートが行われた。全学的にも本連携活動は注目され、小野も東京大学本部で総長補佐、教育企画室員となり、東京大学の教育改革の特に教育の国際化の一翼を担うことになった。本計画の海外留学の促進は東京大学の方針に合致し、連携した活動を行っている（創成 Vol.22, 2013 等）。25 年度スクールも東京大学サマースクールの試行としての位置づけと財政支援を獲得し、本連携活動の定常化にも見通しがつきつつある。また、本活動の核である東京大学・プリンストン大学間の協力は、新たに東京大学・プリンストン大学共同研究・教育プロジェクトとして採択され、学生を中心とした交流が拡充されることになった。本協力が契機となって産業技術総合研究所と The Italian National Research Council が環境・エネルギー分野を中心とした包括研究協定 (MOU) 締結を目指した協議を開始した。

② 共同研究

年度当初の交流計画をふまえ、共同研究を実施するにあたっての枠組み、活動内容、得られた成果等（国内外の拠点機関・協力機関との連携状況も、考慮すること）

長期 7 名を含む 15 名の派遣とそれを上回る来訪によって協力は急進展した。キーとなる要素：リコネクション研究では 1) 英国 MAST 実験に東大開発の 2 次元ドップラー温度計測を導入し、東大 TS-4 実験、粒子シミュレーションが協力してリコネクション加熱が X 点のオーム損による電子加熱とアウトフローが下流で熱化するイオン加熱であり、相互作用して 3 重の高温領域を形成する物理を明らかにした。2) 日米共同の TS-4/MRX 実験では下流の負ポテンシャル形成とそれによるイオン加速機構を計測し、さらに計算機シミュレート連携させて、一致した結論を得た。3) X 点の非熱的粒子加速、異常加熱も実験、観測、計算を連携して見出した。総体となる自己組織化研究では、MST (米)、RFX 実験 (伊) を中心に 500 kA 級の磁気再結合プラズマへの中性粒子ビームと固体水素の同時入射実験を初めて行って、運動量入射と密度制御で自己組織化の速度制御がほぼ確立され、リコネクションと自己組織化をつなぐ緩和現象の物理が明らかになりつつある。運動量導入によって緩和が分岐する現象やプラズマ流のある動的緩和といった新現象の解析も進展した。観測や実験の現場の問題解析も、ひので衛星を核とした欧米との研究連携、米国 IRIS 衛星との協調観測が始まり、太陽プラズマの自己組織化現象の多角的診断が整備された。フレアループ上空に存在する高温プラズマのリコネクションアウトフローの検出はその成果であり、輻射輸送の理論的研究を先導するスペイン、ドイツとの連携を加速し、輻射輸送や MHD 数値解析等の連携研究によって IRIS 衛星の紫外線分光データを用いた物理診断が可能になってきた。実験・理論・観測融合チームの研究対象は太陽のライトブリッジの解析から、プラズモイドによるリコネクション高速化、弱電リコネクションなどへ研究領域はひろがり、天文学会からも注目されて天文月報の記事につながった。以上の成果は招待講演、FEC2014 の日本代表論文をはじめ、60 以上の論文となり、MR2012 会議論文も MR2010 に続き、Physics of Plasmas 誌特集号となり、内外より評価されている。さらにプラズマ核融合学会の招待により、リコネクション研究の最新動向について本組織メンバーが分担執筆し、同学会誌 11, 12 月の 2 ヶ月にわたって大きな特集記事となるなどの成果をあげている。

③セミナー

- ・研究交流計画におけるセミナーの位置づけを、他の交流形態と関連させつつ述べること
 - ・交流目標達成に向け、セミナーが果たした貢献を、具体的に述べること
- ※具体的な実施状況及び成果については、別紙2にて作成のこと

本研究課題の異分野・国際連携に焦点をあてた Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS) 2013 国際会議を日本で主催し、海外 50 名弱を含む 100 名以上の参加があり、室内実験や太陽・宇宙・地球磁気圏観測に理論・計算機解析を加えた異分野が協力して、盛況のうちに磁気リコネクションとその先にある自己組織化の物理、応用開拓について成果発表と討論を行った。異分野が連携したリコネクションのエネルギー変換の解明や過去最大・最低損失リコネクション実験の巨大でクリアカットな加熱物理検証、核融合プラズマ加熱への応用開拓、自己組織化への拡張などが注目された。アジアからの参加者が増加し、実験・観測・理論の異分野連携会議はアジアにも創設される見込みで、本会議の影響力が拡大している。

ひので7 国際会議は、太陽プラズマ観測現場の自己組織化現象に焦点を当て、海外から 16 カ国述べ 142 人、日本人を加えて 242 人が参加し、口頭発表とポスター発表の数はそれぞれ 60 件と 170 件に上った。恒星など宇宙物理学や長い時間スケールでの活動サイクル性を取り扱う宇宙気候など学際的広がった分野からの出席者も多く、周辺分野への研究の広がりや波及に寄与した。Solar Dynamic Observatory、IRIS 衛星、SUNRISE 気球望遠鏡、ビッグベア太陽観測所の 1.6m 望遠鏡と「ひので」の広範な観測の国際連携や室内実験・太陽観測が連携した模擬実験などが注目された。

ひので実験室会議は異分野連携研究の核として定着し、若手が全てを企画することから、プラズモイド構造導入時のリコネクションの非定常性やリコネクションの波動、リコネクションの電子スケールマイクロ領域など頂点を絞った異分野連携会議を行い、それらが速やかに次の異分野連携研究のスタートにつながっている。若手教育の場になっている。

実験室と宇宙のプラズマの自己組織化に関するスクール・ワークショップは、博士向きを IPELS 会議に併設して開催し、修士・学部向けは代々木の宿泊施設において本組織に加え、広くアジアの学生を加えて行った。アンケートでは 90% を越える学生から高評価を得ており、今後、アジアでスクールを常設する動きも有り、新タイプの分野連携、国際連携型のプラズマ教育に成長しつつある。

④研究者交流

- ・研究交流計画における研究者交流の位置づけを、他の交流形態と関連させつつ述べること
- ・交流目標達成に向け、研究者交流が果たした貢献を、具体的に述べること

研究者交流では、さらなる異分野についても招待講演に積極的に応じる中で、本異分野・国際連携研究の成果を分野内外を問わず広く発信し、本国際 COE 活動を広げる目標を推進中している。太陽プラズマの自己組織化現象に関する研究成果が注目され、メキシコ、欧州(5カ国)、オーストラリアで開催された国際会議に招待講演を依頼された。これらの国際会議は、地球惑星分野、恒星フレア、宇宙天気(太陽地球間システムの応答)、宇宙気候といった、太陽プラズマと周辺学問領域をつなぐ学際的研究領域に焦点を当てた会議が多く、研究者交流により学際的な方向へ研究が広がる可能性が広がった。

また、プラズマ閉じ込め研究のための球状トカマク国際会議からの招待を受け、リコネクション急速加熱の有用性について講演を行い、物理研究から応用研究への分野拡大を開始した。来年度からリコネクション・自己組織化の応用を目指したが交流、国際会議開催が計画されている。若手、特に学生教育としては、各拠点でスクールを施して共同研究の一環としての派遣につとめており、成果をあげているが、若手研究者への招待講演の依頼もあり、機動的に活動できる若手研究者の連携拡大のチャンスととらえて、積極的に応援している。

(様式 7)

3. 経費の執行状況

事業実施状況との関連(研究者の交流数や、セミナー等会合の開催状況などと、経費の関連を、具体的に示すこと)

今年度は大きな国際会議・スクールを主催したことから、事業経費は国内派遣の比率が高まる年度で、710万円の国内旅費で IPELS2013 とひので 7 会議中心に 84 名の旅費をサポートした。海外外国旅費 1130 万円は、腰をすえた共同研究のための長期派遣の比率が高まり、長期 7 人を含む 30 人を派遣した。他経費の獲得につとめ、自助努力で経済的な運用をはかったため、国内派遣、海外派遣共に費用対効果の大きな派遣を行うことができた。また、研究科経費のサポートも得て、プリンストン大学教員が 1 年間滞在し、共同研究・若手教育を充実させると共に、経費をはかった。若手の研究教育活動をサポートするひので・実験室会議は外部研究機関経費、関連分野からの助成金を活用して費用低減を図ったため、実際の派遣人数は本報告記載の人数を大幅に上回っている

【参考】

相手国側との経費分担の状況(※様式 3(四半期交流状況報告書)に記載の相手国側マッチングファンドにより来日した人数についても触れること)

国際会議・スクールの日本主催、共同研究のため、相手国側マッチングファンドだけでも 150 人を越える来訪をいただき、日本が研究・情報交換の中心的役割を果たした。内訳は、米国 96 人、英国 22 人、ドイツ 22 人、イタリア 6 人、スペイン 5 人であり、米国科学財団 (NSF) の COE プロジェクトと本計画との連携を中核とした交流だが、連携がヨーロッパに急拡大していることがわかる。各国は自国分の派遣旅費を負担し、派遣先ホスト国は自国で行う共同実験経費を負担したが、各国とも計測器を海外に持ち込み、研究の効率化と経費節減を図った。日本側主催が多かった国際会議は会場費、自国分国内旅費などはホスト国側が負担したが、他経費の獲得による経費節減に努め、派遣旅費は相手国が負担した。

4. 今年度の問題点・反省点

(事業全体の実施体制上において、課題、問題となったものや、反省点等があれば示すこと)

飛行機搭乗券など証拠書類の収集から大学事務当局の旅費・消費税の計算が 4 月中旬には間に合わず、現在のところ有効な対策は見当たらない。また、英国の MAST 実験の実験室壁でアスベストが見つかり、除去に半年以上を費やした遅れが、引き続き 25 年度の同大型リコネクション実験の遅れにつながったが、限られた時間で効率的に実験を進めることで概ね計画を実施することができた。

5. 次年度以降の展望

計画目標の達成に向けた課題等

共同研究の中心課題は、要素：リコネクションと総体：自己組織化現象の運動論的解釈を順に確立していくことであり、キーとなる流れや粒子運動によってリコネクションやそれを積み上げた自己組織化のより深い理解に結びつけた。リコネクションや自己組織化中のイオン流、電子流の計測や中性粒子ビームやペレット入射、外部誘導電場によるこれらの現象の能動制御がキーとなる。流れを持つ動的平衡や緩和分岐現象も重要と言える。

セミナーは、リコネクション研究の総まとめとして日本が再びホストする R2014 会議でリコネクションの運動論的解釈に目処をつけ、ひので 8 会議で異分野連携チームによる観測される自己組織化問題解明の定常化をはかる。

ひので・実験室会議は異分野融合で現れる若手の自由が発想を生かしながら、若手育成を進め、連携研究の計画作りと実行のいくつかを若手に担ってもらう予定である。有能な若手は「自由な留学」制度を用いて国際的にトレーニングし、有能な人材に育てて、海外ポストを含めた国内外の広い分野における新しいキャリアパスに結びつけていきたい。

研究者交流は異分野、未連携国での招待講演を中心に積極的に応じて、分野の拡大につとめ、若手派遣は十分なスーリングによって共同研究枠で派遣するよう工夫を行う予定である。