

**先端研究拠点事業
平成24年度 事業実績報告書**

採用年度	平成24年度
種別	国際戦略型

平成25年4月12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24年4月1日 ~ 平成27年3月31日 (36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 上田 卓也
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	112

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6)

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）	物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

※交流相手国が複数の場合、適宜、枠を追加して記入すること。

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24年度事業計画における達成目標

A 学術的な成果： 1) 自己組織化の要素：磁気リコネクション研究では、加熱手段が揃った日英の実験が、イオン・電子加熱機構、非熱的な粒子加速の解明とリコネクションの工学応用の開拓、ビームによる制御を担当し、低温でも制御性の良い米国と日本のリコネクション実験が高速化機構、プラズモイドの効果、波動の影響を担当する。2) 総体：自己組織化研究では、時間スケールや構造形成、安定状態の変化や安定平衡の分岐現象の解明や機構解明を行い、3) 観測・実験の現場の自己組織化問題として、特に太陽衛星観測「ひので」関連で太陽フレアやコロナの構造変化、ショックによるイオン・電子加熱、非熱的粒子加速を分野融合で進化した計測と日米独西の国際連携組織を駆使して解明を進める。

B 持続的な協力関係の基盤構築： MR2012 会議にリコネクションの最先端研究、ひので6 会議に太陽観測現場の自己組織化問題を集め、実験・観測・理論の異分野融合、日米欧の国際連携を前進させる。MR2012 会議で物理成果をレビューしつつ、今後の日米 COE 組織による若手育成について打ち合わせを行う。ひので6 国際会議では、太陽観測現場の問題を解くことで異分野間連携を大きく発展させ、日米欧の国際連携を進める。実験的に衛星観測者が直接実験を行なう形で実験・観測・シミュレーションが直接タイアップしながら問題を解決する新体制をとる。

C 若手研究者育成における成果： 若手派遣は国際共同研究推進の主力と位置づけ、協力が進む太陽観測と実験、理論・シミュレーションの連携のための若手育成セミナーを年3 回開催し、各機関で共同研究を進める際にも若手向きスクールを必ず行い、分野融合と若手の研究の活性化を図る。最終的に、若手を異分野連携研究の担い手に育てる。

D 国際的学術情報の収集整備： MR2012 国際会議に要素であるリコネクションの最先端研究、ひので6 国際会議に、太陽観測現場の自己組織化最先端研究を集めて、分野融合された本プログラムの研究成果を公表する。ヨーロッパ物理学会の Plenary Talk をはじめとする米国、インド等から既に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： MR2012 で分野間・国際間共同研究の成果を公表するとともに、ひので6 国際会議等を通じて異分野連携が太陽観測の自己組織化問題の解決に有効であることを実証したい。問題解決能力の実証によって次の飛躍を期する。宇宙分野からプラズマ応用分野の招待講演に応じて、国際 COE の国際連携、分野間連携の裾野を拡大する。

② 平成24年度事業計画の達成状況

A 学術的な成果： 長期3 名を含む23 名の派遣と35 名の来訪により計画以上の成果を上げ、リコネクション研究では1) 1keV 以上のイオン加熱を実証した日英共同 MAST 実験が、東大開発の2 次元ドップラー温度計測を採用した新実験に発展し、2) 日米共同の TS/MRX 実験はアウトフローがイオン加熱につながる機構をショックと粘性を介する MHD 解釈、下流の負ポテンシャル形成による二流体解釈を生み、3) プラズモイド放出はリコネクションの高速化と4) 非熱的粒子加速、異常加熱の双方を結論した。自己組織化研究では、5) MST (米) に加え RFX 実験 (伊) のビームによる自己組織化制御が確立し、さらに6) 太陽観測現場の問題：ライトブリッジを異分野融合チームで室内実験として再現・解明したことが、宇宙研・東大の記者発表、全国紙掲載につながった。これらの成果はヨーロッパ物理学会基調講演や招待講演、40 以上の論文となり、MR2012 も MR2010 に続き、Physics of Plasmas 誌特集号に招待され、高評価が継続している。

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米英伊との多数の派遣・受入は日米 COE がリードする形で軌道に乗り、主催する MR2010、IPELS 国際会議は分野 NO.1 の会議として、Physics of Plasmas 誌から2 回連続での論文特集号を依頼されるなど高評価が定着してきた。日米 COE は互いに協力しつつ、両国予算を獲得するなど財政基盤も整備され、COE 連合は持続的に発展している。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、ライトブリッジ解明が新聞発表される具体的な成果もあげたことから異分野融合も持続的な協力へ向かっている。

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」も日米英の COE 協力により徐々に定着し、学生のプラズマ核融合学会奨励賞、電気学会学術奨励賞、工学部長賞、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新聞発表でも注目された。

D 国際的学術情報の収集整備： Physics of Plasmas 特集号に2 回連続で招待された MR 会議をはじめ、本 COE が主催するひので会議、IPELS 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 の会議といえ、国際的学術情報収集の中核である。他の招待講演にも積極的に応じ、裾野は広がっている。IPELS 国際会議、ひので7 会議は来年度、日本主催が決まり、情報交換の核となる予定である。

E 事業の波及効果： 実験・太陽観測の融合研究の新聞発表を契機に第2、第3 の融合研究が始まり、注目を集めている。国立天文台、宇宙科学研究所が協力機関に加わったことから本 COE 組織は、太陽物理のみならず、磁気圏物理から降着円盤物理へ広がり続けており、宇宙観測との連携が更に強化され、そうした融合型若手スクールも計画されている。

実施状況

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

※研究参加者リストを、別表 2 にて作成のこと。

今年度から異分野連携を新段階に入り、観測分野の若手が実験に、実験分野の若手が観測分野に加わる形で異分野融合研究が進んだ。このため、観測・実験・理論の分野融合は大きく進み、太陽観測現場の自己組織化の謎を異分野連携で解いた初の学術論文が話題となって、宇宙科学研究所と東京大学で共同記者発表を行ない、新聞に掲載された他、欧州物理学会の基調講演にも選ばれ、国際 COE 連携の影響力は拡大している。また、日米 COE の緊密な連携のため、本 COE と米国側 COE とではプリンストン大学、ウィスコンシン州立大学、東京大学が相互にリエゾン室に入って、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実現されている。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。

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）

東京大学大学院新領域創成科学研究科は学融合を理念とするため、本 COE が目指す分野間連携・国際連携を積極的に支援しており、事務における会計・旅費の処理に加え、新領域創成科学研究科が学融合研究調査費を別途支給して異分野連携活動をサポートする体制を整えている。24 年度は学融合研究調査費、25 年度には米国側 COE 組織とのスクーリング充実のため、2 回目の客員教授招聘が認められており、研究科予算で客員教授招聘、若手セミナー開催経費を負担するなどのサポートが行われている。

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)

共同研究は、長期 3 名を含む 23 名の派遣と相手国による 20 名の来訪により計画以上の成果を上げた。自己組織化の基本要素である磁気リコネクション共同研究は、東大・カラム研・プリンストン大の人員相互派遣により加熱研究が進み、1) MAST 装置 (英) を用いた最大のリコネクション加熱実験はイオンも電子も 1keV を超える加熱が明らかになり、東京大学開発の 2 次元ドップラートモグラフィ計測を大規模に移設・拡張してより詳細な機構解明に入った。2) 一方、TS-3、MRX 装置では 2 次元画像計測により、アウトフローがイオン粘性とショックにより熱化されたとする MHD 解釈、軽い電子が先に下流に動いて負の静電ポテンシャルを形成してイオンを加速・熱化するという二流体・運動論的解釈を見出し、その成果はヨーロッパ物理学会年会 plenary talk をはじめとする複数の招待講演となった。3) 磁場の 2 乗に比例するリコネクション加熱則の発見はリコネクション応用研究につながり、合体加熱型の大型核融合炉の提案はプラズマ核融合学会優秀論文発表賞を受賞した。その他、1) プラズモイドの放出、2) 同異常加熱・加速、2) 3 次元高速リコネクション等に関する論文発表、招待講演も続き、プラズマ核融合学会誌よりリコネクション特集の依頼を受けるに至っている。

総体に当たる自己組織化研究は、流れによるプラズマの自己組織化制御に集中し、ウィスコンシン大 MST 装置において、ビームによる運動量 (フロー) 注入に関する実験を実施した。単一ヘリカル磁場モードのプラズマにビームを注入する実験を行った際、中性粒子分析器による計測結果から高速の水素イオンと重水素イオンの振る舞いに大きな違いが見出された。更に、ビーム入射実験時に高速磁場プローブを用いた計測を行った所、RFP プラズマでは初めてアルペン不安定性が観測された。これらは、米国物理学会招待講演として選定された。イタリア RFX 装置でも小電流のビームを入射する実験を実施し、ビーム入射に起因した発光分光計測・解析を進めた。以上により、自己組織化プラズマを運動量注入により外部制御の解明が進むことから、プラズマ・磁気再結合・フローの関係に対する新たな理解が大きく進むことが期待される。

現場の自己組織化研究では、理論・実験・太陽観測が一体となったチームにより、太陽彩層のライトブリッジの模擬実験を行い、理論予測通りのジェットの発生を見出した。論文が注目を浴びて、東大・宇宙研共同の記者発表、さらに全国紙掲載につながった。ひので 6 会議でも新たな研究手法として注目を浴びた。太陽の自己組織化診断として、「ひので」極端紫外線撮像分光装置がとらえた観測データに基づき、太陽フレアの磁気リコネクション領域や浮上磁気活動で発生するマイクロフレア (磁気リコネクション) の物理診断を海外 (英国、米国、ドイツ) の分光専門家と共同で進めた。さらに、紫外線分光による新しい太陽観測の方向性についても検討し定めた。また、磁気要素の運動学的振る舞いに関する共同研究によって太陽磁場の自己組織化の物理過程を探った。「ひので」の成果に基づき、来年度米国 NASA が IRIS 衛星を打ち上げ、彩層ダイナミクスの分光診断を行う。「ひので」との共同観測が米国との共同研究を大きく発展させる上で極めて重要であり、そのための基礎検討を行った。

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、別表3にて作成のこと

セミナーも MR2010 会議論文に続き、MR2012 会議論文も米国 AIP の学術雑誌 Physics of Plasmas の論文特集号に採用されるなど、外部から高く評価され、計画以上の成果が上がったといえる。

1) 5月に行った MR2012 国際会議では、日米の COE 組織 (US-CMSO, J-CMSO) 関係者を中心に磁気リコネクション物理を明らかにするため、70 名が出席し、最新の研究成果をレビューした。同分野 NO.1 といえる国際会議に成長し、磁気リコネクションの 1) イオン・電子加熱効果、2) 非熱的粒子加熱、3) 高速リコネクション機構、4) プラズモイド効果、5) 3次元リコネクション、6) 波動効果の 5 つの観点で最新研究をレビューした。特に日英共同実験の 1keV に達するリコネクション加熱物理、日米共同のリコネクション加熱の MHD 領域、二流体領域の 2 つの解釈、日米のプラズモイドによる高速リコネクションや粒子加速が注目された。今後の共同研究活動、セミナー活動、若手育成の方針と計画を議論し、次回は 2014 年東京大学がホストすることになった。

2) 8月には太陽観測現場との緊密な連携を進めるため、ひので 6 国際会議を共同主催し、140 名の参加者があった。高精細な衛星観測を中心に理論、実験が加わり、ひのでデータと他衛星観測や地上観測データを併用した総合的解析や、観測結果を解釈するための数値シミュレーションの成果が多数発表され、一步観測現場に踏み込んだ討議がなされた。特に太陽コロナ、彩層での爆発現象等自己組織化現象に関して大きな進展があり、現場の自己組織化現象の解明に向けた研究の方向性および見通しが得られた。来年度、Hinode7 会議の日本主催が決まり、研究の集大成を行う予定である。

3) ひので・実験室会議は若手が 3 回自主的に企画し、室内実験と太陽観測と理論の分野融合を進め、融合組織で太陽物理のキーとなる自己組織化・リコネクションの解明を試みた。1 回目、2 回目はひので観測の現場の宇宙科学研究所と国立天文台、3 回目は実験室側の東京大学で行った。観測、実験、理論の研究者が一体となって模擬実験や模擬計算を行なう新スタイルを定着し、分野融合は勿論、磁気融合研究計画を若手が作成する体制が整っている。米国側 COE もこの活動に適宜参加し、学生を対象としたスクーリングも 2 回、米国側で行なった。日米 COE で相談し、来年度日本主催の IPELS 会議の一部も利用してプラズマサマースクールを行って学生教育を拡充する計画を立案した。

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
- ※具体的な交流状況については、別表4-1、4-2にて作成のこと

研究者交流では、本プログラムの成果を広い分野に公表し、あわせて関連分野に本国際COE組織の活動を広げる目標を推進中であり、観測も太陽分野に加えて磁気圏分野の参加も増加している。24年度はヨーロッパ物理学会の基調講演を任された他、COSPER会議、米国物理学会などに選ばれ、10名を派遣して最新研究を紹介し、幅広い分野の研究者と討論を行った。結果的に実験・観測・理論による分野融合が大きく波及し、3分野のプラズマ研究の連携が対象となったアジアプラズマ物理会議やアジアプラズマスクールが企画され、後者は本COEの天文台・東大が校長・副校長を担当して2013年に東京で開催されることとなった。分野連携がアジアに広がったといえる。また、韓国ソウル大学では東京大学のUTST合体・磁気リコネクション実験装置の類似装置が稼働をはじめ、ソウル大学と東京大学のリコネクション加熱協力も始まった。24年度はリコネクション加熱の核融合プラズマ応用に興味を持っていただいた招待講演依頼も多くあり、リコネクション加熱応用が広く認知され、リコネクション応用分野を軌道に乗せたという意味で大きな進展があった。