

(様式 7)

採用年度	平成 22 年度
種別	国際戦略型

先端研究拠点事業

平成 26 年度 事業実績報告書 (最終年度用)

(※本報告書は、前年度までの事業実績報告書とともに事後評価資料として使用します。

「全期間」について記入する箇所は拠点形成型の期間も含めてご記入ください)

平成 27 年 4 月 10 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	4 5 0 1
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)	東京大学大学院新領域創成科学研究科・研究科長・味埜俊
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	135

相手国 1

国名	アメリカ合衆国
拠点機関名	プリンストン大学
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	46

(様式7)

相手国2

国名	イタリア共和国
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
協力機関数	0
参加者数	9

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	21

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	11

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	16

※交流相手国が多数の場合、適宜、枠を追加して記入すること。

1. 交流目標の達成状況

目標の達成状況を、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

1-1 平成 26 年度研究交流目標の達成状況

① 平成 26 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、リコネクションの粒子運動論解釈の完成を試みる、①リコネクション高速化機構、②運動論的エネルギー変換機構、その際にX点に対応するO点であるプラズモイドに着目し、③O点の形成と排出による高速化効果と④異常加熱・加速効果もまとめを行う。⑤リコネクションの工学応用として核融合プラズマの急速加熱技術に目処をつける。2) では、要素：リコネクションを総体：自己組織化機構をつなぐ研究を行なう。①ビームによる運動量注入によるリコネクション制御を磁場構造の自己組織化の制御研究と融合し、能動的制御手法を駆使しつつ、要素と総体の関係についてまとめる。②複数の磁気リコネクションによる構造の自己組織化や③リコネクションによる安定状態の変化や安定平衡の分岐現象、④波動現象による自己組織化について解明を進め、⑤自己組織化の工学応用開拓も視野に、日米伊の実験・観測・理論が一体的な研究を行う予定である。ビームによるリコネクション・自己組織化制御はビーム装置が揃った日米英の実験が担当する。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： MR2014 会議を日本で、ひので 8 会議を米国で開催し、それぞれ、磁気リコネクションの最先端研究、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として活躍できるように環境整備を進めていく。MR 国際会議では学生向けのチュートリアルを加え、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： MR2014 国際会議に自己組織化の最先端研究、ひので 8 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について議論する。国際機関、アジア、ロシア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： MR2014、ひので 8 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、特に本研究の異分野連携・国際連携に刺激を受けてはじまったアジアの分野間連携スクールもサポートし、本研究の国際・分野間連携についてアジアへ裾野拡大をはかる。

② 平成 26 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：最終年度は、1) 要素である「磁気リコネクション」の解明を2) 総体となる「自己組織化」をつなぎ、3) 「現場の自己組織化問題の解明」に結びつけることができた。特に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」によって最も進んだ運動論的解釈の確立に尽力した他、宇宙・実験室のプラズマの問題を新たなシミュレーション実験で解決した。工学応用も核融合プラズマの急速リコネクション加熱が軌道に乗り、日英の次のプロジェクトに発展する見込みである。

1) では、リコネクションの粒子運動論解釈が急進展した。運動論解釈を中心に、①運動論的エネルギー変換機構、②それに付随したリコネクション高速化機構の解明が進んだ。運動論的メカニズムによる電子・イオン加速機構・加熱機構を検討することにつながり、更にプラズマ加熱の応用開拓へと進んでいる、日本と英米を中心に国際連携、実験・観測・理論の異分野融合によって運動論的なエネルギー変換プロセスを解明することができた。一連の研究は、米国物理学会年会(2014年11月)の招待講演に選ばれ、小野が講演したほか、IAEA Fusion Energy Conference 2014の日本代表論文となり、一般科学雑誌「パリティ」などでも取り上げられ、内外より高く評価されている。2) では、要素：リコネクションを総体：自己組織化機構をつなぐ研究が進展した。①ビームによる運動量(プラズマ流)の注入によるリコネクション制御を磁場構造の自己組織化の制御研究と融合し、能動的制御手法を駆使しつつ、実験・観測・理論の融合ながら、要素と総体の関係がいくつかの学術論文、IAEA Fusion Energy Conference 米国代表論文、Innovative Concept 国際会議の招待講演等となった。

3) では、日本側「ひので」衛星、米国側「IRIS」衛星、「SDO」衛星の特徴ある観測の連携によって「現場」を精密観測し、まずは太陽フレアやコロナの自己組織化や加熱の多角的計測を行なって現象のダイナミックな振る舞いの特徴を把握した後、観測・理論・MHDシミュレーションの融合により、現象の解明を試みた。

B 持続的な協力関係の基盤構築： 43名の派遣と86名の来訪により交流は一層活発になり、交流は持続的なものとなった。

(様式 7)

MR2014 会議を日本で、ひので 8 会議を米国で開催し、それぞれ、磁気リコネクションの最先端研究、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広げていく中心会議となり、歴史も 15 年に延びた。MR2014 会議は実験、衛星、理論の研究者 90 名が一堂に会し、活発な議論を行い、磁気リコネクション分野でナンバーワンの国際会議に成長した。今回は、降着円盤のリコネクションをはじめとする天文分野の参加が増え、リコネクション分野は更に領域を広げつつある。MR2014 会議論文も Physics of Plasmas 誌から 3 回目にあたる特集号とすることが決まり、こちらもほぼ定常化している。現在、キーとなる論文を 10 編程度集め、4 月末を目処に論文集を仕上げている。ひので会議も定着し、観測を核として理論と実験との融合が持続的に行われ、定期的な会議として基盤が形成されている。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が小野らに配分され、25 年度に続き、27 年度も研究科予算でプリンストン大学教授の招聘・教育参加が実現し、本プログラム終了後も持続的なプログラム続行に見通しがついた。本プログラムが契機となり、運動を行った結果、研究科、大学でプログラム続行の機運が生まれたことは幸いであった。実験・観測・理論の融合が進み、室内実験と観測の融合は NHK からの取材があったほか、一般科学雑誌日経エレクトロニクス 2 月号にもリコネクション・合体の工学応用が掲載されるなど話題になっている。5 年間、立ち上げと定常化に尽力してきた「自由な留学」プログラムも、東京大学・プリンストン大学共同研究・教育プロジェクトにつづき、自然科学研究機構とプリンストン大学と東京大学の協力プロジェクトや東京大学・カラム研究所共同研究プロジェクト、東京大学・マックスプランク研究所協力プロジェクトの設立の動きにつながっており、定常化に向けた動きが続いている。「自由な留学」システムに従って、今年度も 2 名の若手研究者が各自の研究テーマに沿って最適な研究機関に最適な時期に留学した。今年は、ひので 8 も 200 名の研究者を集めて、盛況で、太陽観測現場の自己組織化研究を中心に討議が行われた。ひので・実験室会議は若手のための実験・観測・理論の連携会議として定着し、活発な議論が行われ、観測と実験、実験とシミュレーションを融合した論文をいくつも共同執筆している。27 年度も東京大学学融合研究調査費、ネットワーク研究などでサポートされることが決まり、定常化に成功している。

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として活躍できるように環境整備がほぼ整った。若手が必要な時期・研究段階で関連する観測・実験・理論の研究に自由に参画できる「自由な留学」プロジェクトは新たな国際分野連携教育として成功を取っており、大学間の協力協定を進め、資金源の多角化を図るなど定常状態に移行する努力が実り、東京大学・プリンストン大学共同研究・教育プロジェクトにつづき、自然科学研究機構とプリンストン大学と東京大学の協力プロジェクトや東京大学・カラム研究所共同研究プロジェクト、東京大学・マックスプランク研究所協力プロジェクトの設立の動きにつながっている。1) 磁気リコネクションでは、プラズマ加熱機構解明の実験・理論連携のため、またリコネクション急速加熱の応用のため、日本側受け入れと同期しながら、米国へ若手を長期派遣した。2) 自己組織化では、リコネクションと自己組織化の関連の能動解析のため、米国・イタリアへ比較的短期の若手相互派遣を行って、平衡遷移の観点から自己組織化のチームによる人的制御に目処をつけた。3) 現場の自己組織化では、太陽観測の新しい磁場計測の開発と高精細画像を用いた太陽コロナダイナミクスの解明の 2 方向でスペインおよびドイツへの派遣、他地域へは短期派遣を相互で繰り返し、若手も研究最前線を担った。MR 国際会議では博士向き、修士・学部向けのチュートリアルを加え、若手育成の活性化を図った。異分野連携した若手が自ら企画するひので実験室会議も年 3 回開催し、異分野連携、国際連携を定着することができた。また、若手研究者育成の成果として、ひので 8 会議にて「Student Poster Award」、JpGU 大会にて「学生優秀発表賞」を受賞したこと、学生も東京大学優秀博士論文賞、東京大学研究科長賞を受賞し、電気学会学術奨励賞、プラズマカンファレンス 2014 の若手賞など多くの賞を受賞するに至っている。我々が立ち上げて 5 年になる国際選考委員会で適切な研究段階・時期を判断するなど地域間、分野間の垣根を取り払った質の高い教育体制が継続できるはずである。

D 国際的学術情報の収集整備： MR2014 国際会議に磁気リコネクションの最先端研究、ひので 8 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ことができた。米国、ロシア、中国の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ことができた。太陽観測現場の最先端研究を集録した特集号(Special issue: Recent Results from Hinode)を日本天文学会欧文査読誌(PASJ)が 2015 年 12 月に刊行した。日本人主著 8 編および海外研究者主著 10 編の合計 18 編の論文が掲載されている。本プログラムの国際連携による成果として、6 編が集録されている。MR2014 やひので 8 会議を通じて成果を公表し、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。

E 事業の波及効果： MR2014, ひので 8 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。その結果、実験・観測を融合した論文が急増し、分野融合が急速に進んだ。天文月報の他、毎日新聞、NHK などからも取材を受けている、また、本プログラムをアジアに拡張する動きも軌道に乗り、アジアの実験・観測・理論連携スクールが 25 年度東京につづき、26 年度は中国ハルビンであり、定常化しつつある。本プログラムからも招待に応じて 2 名を講師として派遣した。Consorzio RFX の上部機関である The Italian National Research

(様式7)

Council (CNR)は、イタリア国の Ministry of Education, Research, and University に属しており、11 の分野 (Information and Communication Technologies, Earth and Environment, Materials and Devices, Energy and Transportation, Production Systems, Cultural Heritage, Molecular Design, Cultural Identity, Life Sciences, Agrifood, Medicine) を有しており、イタリア国内の各都市に分散して約 100 の Institutes が設置されている (常勤研究者数約 5,000 人)。本派遣制度によって築き上げてきた今までの研究成果を起点として、大規模な産総研と CNR の包括的な研究協定 (MOU) の調停に関して、材料、化学、計測、標準、医療、地質などの分野も含めて展開していくための具体的な内容についてセミナーを開催しテーマ設定について深い議論を行い、できるだけ早期の調印に向けた作業を行うことで同意した。

1-2 移行審査時の研究交流目標の達成状況

① 移行審査時の研究交流目標 (移行審査時に記載した目標を転載のこと)

拠点形成期間は、実験室天文学を中心に観測・理論を連携させたプラズマ自己組織化研究であったが、活動開始により実験・観測・理論の3分野連携が急拡大し、観測・理論の研究者が直接実験に加わり、その逆も発生する好循環を生み出した。観測に有用との評価から観測分野からの参加が急増し、国際連携も英国・イタリアの拠点に加え、観測を中心としたスペイン、ドイツを拠点とする必要性が高まり、米国でも観測の参加者が増えた。同時に観測・理論との連携に期待する実験室の参加者も増え、自己組織性の高さで知られる球状トカマク実験分野：日本、米国の追加が決まった。従って、拠点形成型の成果を基に国際戦略型へ移行にあたり、交流目標は以下のようにアップグレードする。即ち、

- 1) 実験室天文学中心の「連携」研究から、実験・観測・理論の3分野の自己組織化研究の「融合」へ、
- 2) 「実験室側」の問題設定から、宇宙観測・実験室・理論に存在する「現場」の自己組織化問題の解明へ、
- 3) 「自由な留学」の完結：自己組織化に関する日米のCOE 連合の更なる「国際化」と「大学院教育への融合」へ
- 4) 自己組織化の「拡張」から能動法を駆使した要素：磁気リコネクションから総体：自己組織化の「体系化」へ、研究段階を前に進める。

拠点形成期間に進んだ実験・観測・理論の連携は、宇宙観測研究者が実験で物理解明を行い、実験研究者が観測を行う新段階へ移行し、「連携」の先にある3分野の「融合」を達成したい。その上で、COE の若手研究者は、実験室中心の研究課題設定から、解明すべき自己組織化現象が待つ観測・実験の「現場へと課題設定を拡大」する。特に太陽フレア等ではリコネクションを介した自己組織化の解明が急がれ、謎を多く持つため、太陽観測を中心に観測現場の拠点(協力)機関を大幅に拡充する。実験・観測・理論が融合した国際COE が太陽・宇宙観測の謎を解く新スタイルを構築する。拠点形成期に拡充した中性粒子ビーム=「流れ」の制御を駆使し、電磁流体領域から運動論領域に至る自己組織化物理の能動的解明を進める。最終的に微視的要素としてのリコネクション(磁力線のつなぎ代わり)から巨視的総体としての磁場構造の自己組織化を解明し、「体系化」を実現することを最終目標とする。

もう一つの重要目標は、課題遂行を担う若手研究者の人材育成であり、若手が、必要な時期、必要な研究段階で自由に観測・実験・理論の研究に参画できる「自由な留学」プロジェクトの完結といえる。自己組織化COE 活動へのヨーロッパ・アジアへの急拡大は続いており、同時に地域間、分野間の垣根を取り払った質の高い運用体制の構築に努める。プログラム終了後に向けては、自己組織化国際COE と自由な留学の恒久運用に向けて、分野融合と国際連携を進め、確固とした研究分野をまとめ上げたい。大学院教育への融合を進め、大学における外国人客員教員ポストやポスドクなどの今後も持続するポストと研究科のサポートを得よう努める。情報発信としては、今や10年の歴史を持ち、分野No1の評価のあるMR 会議が要素である磁気リコネクションを担当し、2013年日本開催が決まったIPELS 会議が総体として自己組織化を担当し、今後の新展開を整理・記録・発信し続ける予定である。

○目標に対する達成度とその理由

- 研究交流目標は十分に達成された
- 研究交流目標は概ね達成された
- 研究交流目標はある程度達成された
- 研究交流目標はほとんど達成されなかった

(様式 7)

【理由】

実験・観測・理論の3分野の「異分野融合」、日米欧の「国際連携」を同時推進し、要素として「磁気リコネクション」を総体としての「自己組織化」に結び、実験・観測の「現場の自己組織化問題の解明」で磨いた結果、交流目標にかかげた1) 実験・観測・理論の3分野の自己組織化研究の「融合」、2) 宇宙観測・実験室・理論に存在する「現場」の自己組織化問題の解明、3) 「自由な留学」の完結：「国際化」と「大学院教育への融合」、4) 要素：磁気リコネクションから総体：自己組織化の「体系化」を、ほぼ予定以上の成果をあげて完了したといえる。

1) について、実験・観測・理論の異分野間連携は定着し、具体的に観測分野の研究者が実験も行い、実験分野の研究者が計算機シミュレーションや観測現場に行き論文を書くといった具合に分野の垣根が取り払われたことは特筆できる。例えば、太陽観測者が観測現場で疑問を持った彩層リコネクションの黒点ライトブリッジ(黒点の上を渡る磁力管の橋のようなもの)について、実験・観測・理論の3分野の研究者が協力してひので衛星観測から理論的に想定される磁力管構造を実験室で実現し、まさに観測結果に一致するジェットが発生を実証したことは大きな話題となった。宇宙科学研究所と東京大学の共同記者発表から新聞報道、各種の論文、天文月報などの雑誌掲載となり、テレビ取材にも結びついた。研究段階は異分野の「連携」が「融合」に高まったといつてよい。また、異分野融合を突き詰めたことが、2) の「現場」の自己組織化問題の解明につながった。各々分野でトップを走る研究機関同士が異分野で連携し、さらに国際連携することにより、共同研究の成果も多数の招待講演、受賞を生むなど特に集中的に成果を出した5年間であったといえる。国際連携についてもやはり「連携」が「融合」に進んだと言え、物理テーマが共通ならば、国の垣根を越えて相互に研究者が行き来して論文をまとめることが普通に行われるようになった。例えば、分野拡大を行った球状トカマク実験の超大型核融合実験用装置 MAST を用いたリコネクション実験は、磁場の二乗に比例し、1200 万度に達する強力なイオン加熱を実証して大きな話題となった。欧州物理学会の基調講演をはじめ、多くの招待講演を生んだ。一般科学雑誌パリティ 2013 年 1 月号でも「物理科学この1年(2012年)」の成果のトップ3として「プラズマ中の磁力線再結合と巨大加熱」として紹介される等、幅広い注目も浴びた。日英、日米、日独にまたがって博士論文を、修士論文まとめた博士課程学生は期間中、約20名にのぼり、国際的な融合研究が学生レベルまで根付いたことは、3) 「自由な留学」プロジェクトの完結、即ち「国際化」が「大学院教育への融合」を高まった1つの証拠と言えよう。また、自由な留学プロジェクトは、さらに幅広い学生教育に広がり、プリンストン・東京大学の大学予算(寄付金)による継続的なサマースクール開催につながった。そして、大学が用意した客員教授の相互派遣によって直接、大学院や学部教育を行う新たな動きにつながり、本プログラムの国際化が大学院のみならず学部教育も国際的に「融合」が進んだと言える。

学術的な観点から多くの成果をまとめてひとくくりにするならば、旧来の一流体(MHD)的解釈を一新し、運動論へ発展させることにより、「4」要素：リコネクションから総体：自己組織化までを多く整理・体系化」できたといえる。粒子運動論解釈は、本プログラムスタート時から注目し、粒子計測、ビームなど粒子運動論に合った要素に重きを置いたことが成果につながり、当初予想を超えた成果を生んでいる。一連の磁気リコネクションから自己組織化に至る運動論的解釈の確立は多くの招待講演、受賞により、内外より高く評価されている。例えば、本プログラムに関する解説論文は、プラズマ・核融合学会誌が2ヶ月分の特集ページを我々に提供する形で2014年11月号、12月号に「俯瞰と展望：磁気リコネクション研究の最前線」として連続掲載されたことは特筆できる。さらに米国 IOP の学術誌 Physics of Plasmas からは我々の MR 国際会議に対する特集論文を3回：2010年(資料提出済)、2012年(資料提出済)、2014年(現在論文査読が進行中)にわたって掲載したいとの依頼があり、本プログラムセミナーの主要論文がそのまま3回も IOP の雑誌の特集号となったことは、要素：リコネクションから総体：自己組織化に至る本プログラムの成果が期待以上の反響を呼んだ状況を象徴している。成果は交流目標の2) 観測・実験の現場に波及し、本研究組織と006年打上げの日本の「ひので」衛星や米国のSDO衛星(2010年打上げ)やIRIS衛星(2013年打上げ)との連携によって太陽プラズマで起きる多種多様な自己組織化現象の描像が明らかになった。日米の衛星観測連携に加え、自己組織化現象の巨視的な描像を与える太陽観測・数値シミュレーション研究が、ミクロな振る舞いの直接的な診断を可能にする実験室プラズマの研究と異分野融合したためである。国際融合研究により東京大学中型低磁場合体実験 TS-4 を英国の大型高磁場実験 MAST へと

(様式 7)

発展させたことが、リコネクション加熱の初の応用：核融合プラズマの極めて効率の良い高出力加熱の開拓につながったことも特筆できる。前述の招待・基調講演に加え、科学雑誌日経エレクトロニクス2月号では「核融合、再燃する開発競争、第3部常識を越える技術に挑戦」として東京大学大学の合体加熱実験が一般向きに紹介されている。

異分野連携や国際連携を担ったのが若手研究者であったことも、3)「自由な留学」の完結の意味から特筆できる。日米欧双方で入念なスクーリングを行って、若手をプラズマ実験や観測、理論的研究を行う最前線に長期間あるいは頻繁に派遣し、それを日米欧で十分にケアする手法で多くの成果が得るとともに若手の育成につながった。学生の受賞も毎年続いており、学生にとっても異分野連携、国際連携が研究意欲を高め、本プログラムが新たなトレーニング、研究推進・深化の場になっている。英国研究機関に就職する学生も現れて、異分野・国際連携が最終的に若手の新しいキャリアパスの開拓につながったことも期待を上まわる成果と言える。若手向きのスクールは、大きなもの2回企画したが、いずれも好評を博し、特にこれが契機となって我々の実験・観測・理論の異分野・国際連携プログラムが、東アジアプラズマ夏の学校という形で東アジアに拡大したことは特筆に値する。我々も講師を派遣し続けた結果、日中韓の回り持ちという形で定着するに至っている。一方、異分野連携、国際連携を自由にプランする場として「ひので・実験室会議」が、現場や若手を研究の主役にする意味で有効に機能したことも特筆できる。本会議を通じて異分野連携の提案が次々に若手から現れて、異分野連携を異分野融合に高めることに成功した。本会議も強い要望によって、自然科学研究機構のネットワーク研究という形で来年以降も継続が決まっている。

以上、こうした多くの成果から、本プログラムは、プラズマ分野の異分野・国際連携の成功例として広く認識されるようになり、学会誌解説、特集、取材を受ける機会が増えている。全般的に日米が日本学術振興会と全米科学財団を基盤とする自己組織化 COE を同時に立ち上げて、協調運用した効果は絶大であった。本プログラムの活発な活用を受けて、組織的に運動を行った結果、研究科、大学でプログラム続行の機運が生まれたことも特筆できる。東京大学では、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「A Tokyo/Princeton Educational Partnership in Plasma Physics」予算が小野らに配分された。また、25 年度に続き、27 年度も研究科予算でプリンストン大学教授の招聘・教育参加が実現し、さらに学融合研究調査費が配分され、自然科学研究機構からは実験・観測・理論の自己組織化に関する異分野連携についてネットワーク研究という新たな予算が配分されることとなり、本プログラム終了後も持続的なプログラム続行に見通しがついた。自然科学研究機構と東京大学ではマックスプランク研究所・プリンストン大学との連携予算を組む準備が進められ、多方面から活発な活動を大学、関連研究所がサポートする体制が進んでいる。

2. 実施状況

① 研究交流計画実施にあたる実施体制

全期間にわたる「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)」、「相手国側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)」、「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)＞

実施体制としては、東京大学大学院新領域創成科学研究科の TS 実験グループ(小野・井・田辺)が中心となって若手育成を主眼とする国際育成委員会、国際会議のための MR 会議組織委員会、IPELS 会議組織委員会、ひので会議組織委員会、若手の企画する自由な分野融合会議であるひので・実験室会議を組織し、各協力機関：産業技術研究所、宇宙科学研究所、国立天文台、京都大学、千葉大学などと共同で運営する形で運営を行い、多くの決定を個々の委員会が責任を持って行うことによって、運営は効率的に進んだ。

＜相手国側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)＞

日米については、COE 組織が構築されており、国内的には全協力機関メンバーの入った各種委員会を構成し、国際的にはリエゾン室を設けて、互いメンバーを派遣し合って、ネットワークを形成した。COE 組織のない欧州については拠点機関がまとめ役となってそのネットワークに参加する形を取った、具体的には、多くはテレビ会議、テレコンファレンスの形で COE 同士、組織同士の相互連携、意思統一を進めることができた。若手の企画するひので・実験室会議については若手に大幅に権限を委譲する形で、若手が毎回、実験的、冒険的な組織運営を行って多くの連携研究を行う事ができた。

＜日本側拠点機関の事務支援体制＞

日本側拠点機関の事務支援体制は、大学院新領域創成科学研究科研究交流系のメンバー、総務係メンバーに、本プログラム専任の事務補佐員が協力する形で進められ、大変な事務量ではあったものの、滞りなく作業を進めることができた。

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)

(1) 平成 26 年度の状況

1) A) 実験・観測・理論(計算機解析)の異分野連携と、B) 日米欧の国際連携が成熟するに従って、B) 要素である「磁気リコネクション」の解明を 2) 総体となる「自己組織化」をつなぎ、3) 「現場の自己組織化問題の解明」に生かす流れが形成できた。1) では、リコネクションの粒子運動論解釈が急進展した。運動論解釈を中心に、①運動論的エネルギー変換機構、②それに付随したリコネクション高速化機構の解明が進んだ。特に、従来の一流体的な解釈から進んでイオン運動と電子運動に役割分担ができて、軽い電子が先行してアウトフローとして下流に流れ、負電位井戸を下流に形成した後、イオンはアウトフローそのものと電子が作る負電位井戸からエネルギーをもらって加速されることがわかってきた。こうした粒子運動領域の新しいエネルギー変換プロセスは、30 年来の MHD(一流体)近似のリコネクションのエネルギー変換の描像を根本から変えたといえる。誘導電場と静電場による運動論的イオン加熱機構については実験室と計算シミュレーションでほぼ一致し、この連携が中心となって解明を進めた。ガイド磁場がある場合は、リコネクション下流の負電位井戸は、正電位の丘と対になって現れることもわかってきた。電流シート自体もホール効果による四重極磁場とガイド磁場が重なり、回転・変形することになる。これらについては、粒子シミュレーションと実験の結果の一致を見た。X 点や電子層による電子加熱機構については、電子スケールの細長い領域に電子が局在化する粒子シミュレーションに対して、X 点領域に丸く局在化する実験結果が異なっており、注目されている。スラブモデルの粒子シミュレーションでは正確に扱えないトロイダル方向の電子加速の貢献が考えられている。これは、運動論的メカニズムによる電子・イオン加速を検討することにつながり、更に応用開拓へと進んでいる、日本と英米を中心に国際連携、実験・観測・理論の異分野融合によって運動論的エネルギー変換プロセスを解明することができた。一連の研究は、米国物理学会年会(2014 年 11 月)の招

(様式 7)

待講演に選ばれ、小野が講演したほか、IAEA Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文となり、一般科学雑誌「日経エレクトロニクス」などでも取り上げられ、内外より高く評価されている。担当学生も優秀博士論文賞、研究科長賞を受賞し、電気学会学術奨励賞を受賞するに至っている。一方、③リコネクションの X 点に対応する O 点であるプラズモイドの解明も進んだ。その形成によるリコネクション速度の低下とその排出によってリコネクション速度が急増することが、室内実験と流体シミュレーションの一致した結果として得られた。これらの結果は、IAEA Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文に選定され、④それを介した異常加熱・加速効果もまとめも行った。⑤リコネクションの工学応用については、リコネクション加熱を用いた核融合プラズマの急速加熱の提案が評価されて新たに予算化された他、プラズモイド放出についても、これが核融合炉の燃えかすの He を回収するダイバータの熱負荷低減に利用できることがわかり、同様に IAEA Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文に選定された。

2) では、要素：リコネクションを総体：自己組織化機構をつなぐ研究が進展した。①ビームによる運動量（プラズマ流）の注入によるリコネクション制御を磁場構造の自己組織化の制御研究と融合し、能動的制御手法を駆使しつつ、実験・観測・理論の融合ながら、要素と総体の関係がいくつかの学術論文、IAEA Fusion Energy Conference 米国代表論文、Innovative Concept 国際会議の招待講演等となった。特に理論のサポートを得つつ、リコネクション現象が巨視的には小さな揺動の集まりに形を変えて巨視的平衡に反映されていく自己組織化メカニズムが明らかになり、MR2014 国際会議の招待講演となっている。②複数の磁気リコネクションによる構造の自己組織化は太陽フレア現象の成長時間を決めていることがわかり、計算機シミュレーション主導で、いくつかの招待講演となっている。観測・実験との連携も進み、磁力管の巨視的な安定性が、A) 磁力管の弱点部分の局所的リコネクションで磁力管自体の巨視的な安定性、即ち自己組織化が決まるのか、B) 磁力管の磁気エネルギー極小状態からのずれ：磁気エネルギーの余剰が問題なのか 2 つの解に集約されてきたが、前者の立場での議論が充実してきた。③リコネクションによる安定状態の変化や安定平衡の分岐現象については、合体プラズマが磁気ヘリシティー一定の下、磁気エネルギー極小状態に緩和するという従来の常識が通用しない場合が高ベータ状態、即ち磁気エネルギーの保存性が磁気ヘリシティーの保存性を大きく上まわる場合で見つかった。これは高ベータ状態では、これまでの低ベータ近似の緩和理論とは異なった物理が作用することを意味しており、有力な候補として、イオンの運動論効果が想定されている。実際にイオンにイオン質量を大きくしてみると、磁気ヘリシティーが消滅する高ベータ側の緩和の範囲が増えることがわかった。検証が済み次第、論文投稿の予定である。④ビームによるリコネクション・自己組織化制御も、ビーム装置が揃った日米英の実験が中心となって結論を得た。特にウィスコンシン大学 MST では、ビームによる運動量の注入による磁場構造が安定に維持できることがわかった。パドバ大学とのプラズマ流の自己組織化制御研究でも、太陽コロナの高いイオン温度に関連する流れの速度変化（イオンの加速・加熱）が観測され、論文、招待講演、プレス発表などにより成果を公開した。ウィスコンシン大学とのプラズマ流の自己組織化制御研究では、ビーム入射時に磁気リコネクションが生じた際、高エネルギー粒子の急増が認められ、普遍性があるが明らかとなった。

3) では、日本側「ひので」衛星、米国側「IRIS」衛星、「SDO」衛星の特徴ある観測の連携によって「現場」を精密観測し、まずは太陽フレアやコロナの自己組織化や加熱の多角的計測を行なって現象のダイナミックな振る舞いの特徴を把握した後、観測・理論・MHD シミュレーションの融合により、現象の解明を試みた。①「自己組織化問題の解明」：地球環境に影響を与える太陽フレアは、最新の描像によると、ローカルな物理現象である「磁気リコネクション」とグローバルな「MHD 不安定化」の両者が相補的に発展することで、短時間に莫大なエネルギー解放や噴出となる、と考えられている。この描像が最近の数値シミュレーションで模擬されている。最大の問題は、リコネクションや不安定化をトリガーする仕組みである。「ひので」観測によって、小さなトリガー磁場の成長・変化が「磁気リコネクション」を彩層からコロナ底部で起こしてフレアが始まる証拠を得る一方で、コロナ磁場全体が徐々に不安定化にして行く様子も「ひので」で初めてとらえることに成功した。これらの観測的知見によって、理論・シミュレーションとの連携や実験室プラズマでの実験との相互比較検討も始まった。この他には、コロナや彩層磁場に励起された波動の特性や大気の要素的構造を理解する取り組みにおいて、観測的描像を掘り下げる解析的研究と数値シミュレーションを組み合わせる理論的な解明が進んだ。②ライト

(様式 7)

ブリッジなど彩層リコネクション:「ひので」の CaIIH 線の撮像観測によって、太陽彩層で頻発する彩層リコネクションが発見されたが、その物理的解明に向けて、太陽観測と実験室プラズマ関係者との協力が進められてきた。一方、観測視点では、2013 年に米国 IRIS 衛星が観測を開始し、UV 分光というプラズマ診断による定量的情報を加えることができるようになった。「ひので」と IRIS の観測連携は、本事業に参加する日米研究者を中心に推進された。また連携した解析研究によって、例えば、黒点ライトブリッジに現れた磁束管で超音速なプラズマ流が励起され、また少なくとも遷移層温度(8 万度)へ急激な加熱が磁束管周辺で起きることを初めてとらえるなど、進展している。③非熱的粒子加速:太陽フレアで加速された非熱的粒子の観測的研究は長らく硬 X 線分光撮像やマイクロ波の観測を中心に行われてきた。「ひので」は可視光観測の高解像度・高精度化によって、「白色光フレア」と呼ばれる加速電子が太陽表面に侵入する際に発光する連続光を検出できるようになった。今までに 20 例を超える観測例を取得し、粒子加速機構の解明に向けた別視点からの統計研究が進展し、実験室・理論炉の新たな融合研究の芽となっている。

(2) 全期間にわたる状況

まず最初の 2 年で 1) 要素である「磁気リコネクション」の解明を 2) 総体となる「自己組織化」の 2 分野を立ち上げ、軌道に乗ったところで、2 つを現実の観測・実験に適用する 3) 「現場の自己組織化問題の解明」をスタートさせて、後半の 3 年間は、1)2)の成熟を 3) 現場に生かし、同時に 1)2)に現実問題を色濃く反映することができたし、さらに要素と総体の関係を更に深めることができた。一貫して追及した手法は、A) 実験・観測・理論(シミュレーション)の異分野連携、B) 日米の自己組織化 COE を中心とする日米欧の国際連携であり、研究の起爆剤として使うことができた。異分野連携、国際連携は、そのアレンジに工夫を要するものの、研究推進に極めて有用かつ不可欠であることを実証し、幅広い認知を受けることに成功した。又、研究を進める担い手として、学生を含む若手研究者を前面に立てて、入念なスクーリングを各機関にお願いしてなるべく共同研究という形で活用し、若手研究者もそれに十分答えてくれたものと考えている。

まず、要素であるリコネクション研究については、全体を通じて従来の MHD(一流体)的解釈を一新して、運動論的解釈に衣替えすることに成功した。全ての物理について、イオンと電子の役割がはっきりし、イオンと電子では加熱・加速される場所も大きさも全く異なっていることが明らかとなった。具体的には、磁気リコネクションの最大の謎である、①リコネクションの運動論的エネルギー変換機構、特にその大きなプラズマ加熱・加速、さらに、②運動論的あるいは巨視的なリコネクション高速化機構の解明が進んだ。リコネクションのエネルギー変換現象(粒子加速・加熱)も、リコネクションの高速化機構も、複数の機構が領域を分けながら並立している描像が明らかになってきた。

最も影響力が大きかった成果は、リコネクションのエネルギー変換作用効果である。東京大学の TS-3 合体実験のトカマク合体実験の 2011 年の Physical Review において、クリアな 2 次元イオン温度、2 次元電子温度、2 次元磁場分を用いて、1) イオンはリコネクション下流部分で大きく加熱され、2) 電子は電流シートのオーム加熱によりシート内で加熱されること、3) イオン加熱は広範囲のアウトフローエネルギーを反映するため、細い電流シート内に限定される電子加熱に比べて 1 桁大きいこと、4) イオン加熱は密度一定下で再結合磁場の 2 乗に従って増加することを明らかにした。滞在中の米国側 Cheng 教授との理論解析もはじまり、日米共同論文として出版され、内外に大きな反響を呼び、多くの国際共同研究、異分野共同研究が進んだ。イオン加熱のメカニズムはアウトフローが X 点下流でショックライクなパイルアップを形成して、熱化するためであり、さらに X 点下流には電子が先に到達して負電位井戸を形成して、イオンが遅れて負電位井戸に到達してパイルアップしてくることも日米共同研究の中で明らかになり、誘導電場と静電場による運動論的イオン加熱機構については実験室と計算シミュレーションの連携が中心となって解明を進んだ。こうした新しいエネルギー変換プロセスは、30 年来の MHD(一流体)近似のリコネクションのエネルギー変換の描像を根本から変えたといえる。こうした物理が反響を呼び、小野の 2012 年ヨーロッパ物理学会年会の基調講演さらに Physics of Controlled Nuclear Fusion 誌招待論文につながり、関連する研究のいくつかは学生、若手研究者の受賞にもつながった。東京大学 TS-3 合体実

(様式 7)

験装置の最大磁場は電源の都合で 0.05T であり、加熱が再結合磁場の二乗に比例則を実証するならもっと高い磁場で立証の必要があった。そこで、球状トカマク最大の規模の持ち、ポテンシャルのある英国 MAST 実験装置に実験提案のために渡英して、期間限定の高磁場合体によるリコネクション実験を行うこととなった。この協力は何年も年数を要したものの、東京大学開発の 2 次元ドップラー温度計を設置することができ、最終的に 0.15-0.2T の再結合磁場を持つリコネクションを実現し、最大イオン温度 1.2keV をリコネクション下流で達成し、磁場の二乗に比例する比例則の正しさを立証することができた。この成果は 2014 年米国物理学会招待講演に選ばれた他、2013 年科学雑誌「パリティ」1 月号で「物理科学 1 年の成果」に選ばれ、さらにはプラズマ核融合学会誌の磁気リコネクション特集を 2 月号にわたって企画する話が進んだ。一方、実験と粒子シミュレーションの異分野連携では、粒子運動領域のガイド磁場がある場合は、リコネクション下流の負電位井戸は、正電位の丘と対になって現れることも実験とシミュレーションが一致した成果として明らかになり、こちらもプラズマコンファレンス 2011 の優秀論文に選ばれた。観測との異分野連携では、ひのでチームから太陽フレアの対応するドップラー温度計測として、リコネクション下流にイオン温度のピークがある 2 次元計測がなされ、室内実験との 2 次元画像比較が可能となった。電流シート自体もホール効果による四重極磁場とガイド磁場が重なり、回転・変形するためである。これらについても粒子シミュレーションと実験の結果の一致を見た。X 点や電子層による電子加熱機構については、電子スケールの細長い領域に電子が局在化する粒子シミュレーションに対して、X 点領域に丸く局在化する実験結果が異なっており、注目されている。スラブモデルの粒子シミュレーションでは正確に扱えないトロイダル方向の電子加速の貢献が考えられている。これは、②-3 運動論的メカニズムによる電子・イオン加速を検討することにつながり、更に応用開拓へと進んでいる、日と英米を中心に国際連携、実験・観測・理論の異分野融合によって運動論的なエネルギー変換プロセスを解明することができた。一連の研究は、米国物理学会年会（2014 年 11 月）の招待講演に選ばれ、小野が講演したほか、IAEA Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文となり、内外より高く評価されている。担当学生も学内の優秀博士論文賞、研究科長賞、学外で電気学会学術奨励賞、プラズマ核融合学会若論文発表賞を受賞するに至っている。一方、実証されたリコネクションの巨大加熱は、各種の応用研究を可能にし、特に合体・リコネクションの急速加熱は追加加熱に頼らない核融合プラズマ加熱法として評価されている。一般科学雑誌「日経エレクトロニクス」2015 年 2 月号でも東京大学の合体加熱が取り上げられ、部国を中心とする合体型の類似実験、合体型の核融合ベンチャー企業に結びついたことがとりあげられている。

一方、リコネクションの高速化の物理については、電流シート内の密度勾配の LH 不安定が電流シートを薄くし、シート幅がイオンメアンダリング径を下回るとドリフトキンクモードをトリガーされて大きな異常抵抗の発生、即ち高速リコネクションに結びつくシナリオが、第 1 の高速化機構として磁場揺動、静電揺動の 2 次元計測により明らかになってきた。又、一方イオンが X ライン付近でメアンダリング運動をすることが異常抵抗につながるメカニズムも、第 2 の高速化機構として実験と粒子シミュレーションの双方で実証されている。これらの成果は、実験を行いながら粒子シミュレーションも行った若手研究者の貢献が大きく、プラズマコンファレンス 2011 の受賞にもつながった。第 3 の高速化機構は、電流シート内に発生する O 点であるプラズモイドの放出によるものである。その形成によるリコネクション速度の低下とその排出によってリコネクション速度が急増することが、室内実験と流体シミュレーションの一致した結果として得られた。これらの結果は、IAEA Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文に選定されており、それを介した異常加熱・加速効果もまとめも行なった。リコネクションの工学応用については、リコネクション加熱を用いた核融合プラズマの急速加熱の提案が評価されて IAEA Fusion Energy Conference 2014 に選定された他、プラズモイド放出についても、これが核融合炉の燃えかすの He を回収するダイバータの熱負荷低減に利用できることがわかり、同様に IAEA Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文に選定された。

自己組織化研究については、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に関して、国際連携、異分野連携を行い、多くの成果を得た。米国・ウイスコンシン大学においては、自己組織化現象はグローバルな領域・分野において形成される一つの自然形態であり、磁場の再結合過程を経て構造形成されるプラズマの自己組織化はそ

(様式 7)

れを代表する現象として捉えることができ、イオンの加熱を生じることを見出した (R.M. Magee 等“Anisotropic Ion Heating and Tail Generation during Tearing Mode Magnetic Reconnection in a High-Temperature Plasma”, Phys. Rev. Lett 107, 065005 (2011))。ダイナモ駆動の自己組織化プラズマを発生させる装置 (Madison Symmetric Torus; MST) に、高パワーの中性粒子ビーム (運動量) を入射する実験を行い、自己組織化によって形成された単一ヘリカル磁場モードの中性粒子ビーム入射によって、自己組織化現象に基づく磁場揺動において、各磁場揺動モードの位相を制御すること成功した。つまり、磁場構造を能動的に制御することが可能であることを初めて示した成果と言える。更に、ビームによる運動量の注入により、磁場構造の変化に伴う磁場揺動の減少とプラズマ温度の上昇が計測された。つまり、自己組織化プラズマ性能の向上を成功させ、2 編の Physics of Plasmas, Plasma, Phys. Control Fusion 招待論文にまとめられている。プラズマに、ビームを注入する実験を行った結果、中性粒子分析器による計測から、高速の水素イオンと低速の重水素イオンの振る舞いに大きな違いが見出された。そして、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ところ、当該装置においては初めてアルベン不安定性が観測された。これらは、米国物理学会 2014 年年会 (Plasma Physics Division)において招待講演に選定された。以上の成果を受けて、ビーム入射時のプラズマの自己組織化研究に関連して、次の実験が進められることになった。

- PPCD discharges with NBI and ice pellet injection
- The interaction of NBI fast ions with magnetic perturbations
- The behavior of the fast ions as the equilibrium transitions into the 3D SHAx state
- The calculations of stellarator-like quantities for the MST single helicity state

プラズマ電流 500 kA 級の磁気リコネクションのある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行い、プラズマ内部の自己組織化に伴う磁場構造変化、電子温度分布、プラズマフローなどを測定し、ベータ値が向上する実験に成功した。一方、自己組織化現象に関する準静的安定状態の理解のために、stellarator-like quantities for the MST single helicity state についてのモデリング数値計算を行ない、Nuclear Fusion 誌にまとめた。自己組織化プラズマのビームを用いた能動制御研究に関して共同研究を進めてきたが、次の様な新たなデータも出てきており、今後の継続的な研究活動による更なる成果が期待される。ビーム入射に伴い、高周波の energetic particle モードが見出されたことで、新たな理論が検討されている。(L. Lin 等, Physics of Plasmas (2013).) ウィスコンシン大学における研究は、2010 - 2014 年度にかけて毎年米国物理学会プラズマ物理部門年会において招待講演として選定されている。イタリア・Consorzio RFX、パドバ大学においては、次の活動を行ってきた。ダイナモ駆動の自己組織化プラズマを発生させる装置 (RFX) に中性粒子ビームを入射する際、中性化セルで中性化しなかったイオンが、Consorzio RFX の磁場により曲がり周辺に衝突してしまう事が見出されたため、外部磁場コイルを導入することによりイオン軌道を修正可能であることがわかった。

小電流の中性粒子ビームを用いて、プラズマ中にビーム入射した実験時におけるビーム入射に起因した発光分光計測データの解析を行った。中性粒子ビーム装置の活用として、ヘリウム中性粒子ビーム入射を用いたプラズマ内部の磁場構造計測が可能であることを見出した。自己組織化プラズマとしての疑似単一ヘリカル状態の生成と長時間維持を実現する方法を検討し、RFX 装置への応用実験を試み、長時間維持に成功した (Piero Martin, Europhysics News, 2011/06 にプレス発表)。またこれらは、榊田が、Materials Research Society - Spring Meeting 2012 (San Francisco)においてチュートリアル講演となり、先端研究拠点事業 (国際戦略型)「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」に関して、研究組織、研究成果等に関する発表を行い、多くの聴講と注目を集めた。

Consorzio RFX において大規模な実験を計画している負イオン源ビームラインに関連して、産総研から持ち込んでいるビームシステムを活用し、負イオンの生成に関する研究を実施する可能性について議論を行い、活用できることが見出された。プラズマ流の自己組織化制御に関して、ビーム流と希薄プラズマとの相互作用実験時に生じるダイナミックな空間電位構造の自発的な変化現象について、その自己組織化メカニズムに関する理論的な内容について議論を行うと共に、その空間電位構造の能動的な制御方法を見出した。この成果は SPIZZO G らの Nuclear Fusion (2012)にまとめたほか、この自己

(様式 7)

組織化プラズマを能動的に制御することで更なる性能向上が図れるとして、Conorzio RFX, Corriere Della Sera, Italy (2012/03/15)にプレス発表された。以上、Conorzio RFX、パドバ大学における研究は、2010 - 2014 年度にかけて毎年ヨーロッパプラズマ物理学会において招待講演として選定されているとともに、2 年毎に開催される International Atomic Energy Agency Fusion Energy Conference において招待講演とされ、各翌年に Nuclear Fusion に招待論文として公表されている。

現場のリコネクション研究については、宇宙プラズマの自己組織化の解明には、自己組織化の「現場」を精密かつ多角的に観測し、現象のダイナミックな振る舞いの特徴を観測的に把握することが基本となる。宇宙プラズマのなかでも、太陽プラズマは、「ひので」の実現によって約 200km 程度のスケールまで空間的に分解して太陽表面に存在する磁場を直接観測することが可能となり、上空の彩層・コロナ層で起きる磁場の自己組織化過程の物理的な理解のために、現象の全体描像を俯瞰した観測やダイナミックな特徴について新たな知見が得られ、大きく進展してきた。また「ひので」観測が契機となり、2013 年に米国が「IRIS」衛星を飛翔させ、また太陽サイズの磁場変化をとらえる「SDO」がコロナ観測を行っている。これらの衛星群の連携による観測(宇宙科学研究所・国立天文台、スタンフォード大学他)を推進することによって、太陽プラズマの自己組織化を多角的に観測診断することに大きく貢献している。観測解析によって、様々な自己組織化現象がすべてダイナミックで極めて複雑であることが明らかとなった。一方で、自己組織化を物理的に理解する上で重要な発見や知見も得られている。これらの知見は、太陽表面でのベクトル磁場の精密計測の実現、彩層プラズマのダイナミクスや波動をとらえた連続撮像観測、そして、上空コロナで起きる加熱や動的振る舞いとらえる分光・撮像観測から得られている。特に、表面のベクトル磁場の精密計測によって、黒点ライトブリッジ、黒点半暗部や黒点周辺領域における表面層のベクトル磁場が明らかにされ、その直上にある彩層で観測される彩層リコネクション(ジェットや加熱)における 3 次元的な磁場構造が推定することが可能となった。この観測成果は、ミクロスケールに磁気リコネクションを診断する実験室プラズマの実験への応用が討議された。黒点ライトブリッジで推定された磁場構造は、実験室プラズマでも類似の磁場構造が再現され、磁気リコネクションの発生によるジェット加速や加熱の理解に役立つプラズマパラメータのその場計測が行われた。この計測結果は、太陽彩層プラズマでの彩層リコネクションの発生を考える上で貴重な情報となった。このひので観測と実験室プラズマ実験の連携による成果は、世界初となる実験室環境での太陽爆発現象の再現実験として米国天文学会査読誌(ApJ)に掲載された。また、コロナ分光による太陽フレアの初期をとらえた観測は、コロナで発生した磁気リコネクションのアウトフロー流およびインフロー流をドップラー速度としてとらえることに成功した。スローショックの検出についても観測データで検討が行われ、観測データはスローショックの存在とは矛盾しないことを示している。一方で、近年の数値シミュレーション検討などの結果を考慮すると、今後さらに検討を要すると考えられる。また、複雑な観測データの解釈には、放射輸送過程を含む三次元 MHD シミュレーション(京都大学・東京大学・名古屋大学、マックスプランク太陽圏研究所)や放射過程の理論(カナリー諸島天文研究所、ジョージメイソン大学)との連携研究が、観測的研究のさらなる深化を可能にしつつある。太陽フレアは、非常に大きな空間スケールのコロナ磁場に蓄えられた自由エネルギーが、ローカルな磁気リコネクションと系の不安定化の相乗効果によって、短い時間スケールで解放されると想像されている。この考え方を観測的に検証する試みが行われている。特に、人類生活に影響を与えるフレアの発生を予め予測する上では、フレアの発現機構、すなわち磁気リコネクションのトリガーおよび高速化が重要な学術的な課題となってきた。「ひので」観測に基づき、1) フレア発現のトリガーとなりうるトリガー磁場について、フレアの極めて初期の彩層リコネクションの位置を特定するマーカーとして用いることで、限られたフレア例に対して特性、2)音速プラズマ流が太陽表面の磁気中性線近くに励起され、トリガー磁場を形成・発達させる過程を初めて観測的に検出、3) 上空コロナの磁場がゆっくりと不安定化に向けて構造変化する動的な様子を紫外線分光により検出、等の知見が得られた。これらの観測的研究の起点となったのは、非常に単純な数値モデルを用いたフレア噴出の発生についての 3 次元 MHD シミュレーションの実現である。

さらに、より一層の物理的な理解にむけて今後取り組むべき新たな観測研究の方向性を定める研究も日本リードで欧米研究者らと行った(宇宙科学研究所・国立天文台・京都大学、スタンフォード大学、アラバマ大学、カナリー諸島天文研究

(様式7)

所、ロンドン大学、マックスプランク太陽圏研究所)。この研究にもとづき、2020年代前半に最重点に実現すべき飛翔体観測が明らかにされ、各国の宇宙機関に対してその実現に向けた提案などが本プログラムでの国際交流も基盤となって始まっている。この研究は太陽観測に限定されずに、観測・理論・実験室研究を連携させた研究を国際的にどのように発展させ、太陽プラズマをはじめとしたプラズマの自己組織化現象についての研究の新たな展開を模索する絶好の機会となっている。

(様式 7)

③セミナー

(1) 全期間において実施したセミナーの件数

	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
国内開催	3 回	3 回	3 回	7 回	4 回
海外開催	2 回	2 回	2 回	0 回	1 回
合計	5 回	5 回	5 回	7 回	5 回

(2) 平成 26 年度セミナー実施状況

・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

セミナーには、共同研究の成果を社会に向けて発信し、さらに広いコミュニティとの交流を図るトップクオリティのコア会議として、リコネクション分野の MR 会議、自己組織化分野の IPELS 会議、太陽物理を中心に現場の自己組織化問題に特化したひので会議があり、さらに若手が実験的に新分野や方向性をプランし、異分野共同研究にむすびつけるひので・実験室会議を運営した。MR2014 は、日米のプラズマ合体実験を中心に室内実験、太陽・宇宙・地球磁気圏等の観測分野に理論・計算機解析を加えた実験・観測・理論が協力して、磁気リコネクションのメカニズム解明と応用開拓について 4 日間の国際会議を行った。日本側は東京大学・小野、星野、千葉大学・松元、宇宙科学研究所・清水、国立天文台・原、米国側はプリンストン大学プラズマ物理研究所 H. Ji, M. Yamada, C. Forrest, J. Sarff が協力して会議を企画・運営した。会議の焦点は、実験・観測・理論によるリコネクションのエネルギー変換現象の解明やプラズマ加熱の解明、核融合プラズマ加熱への応用、さらにプラズモイド物理を初めとするリコネクションの構造形成と形成した構造からのリコネクション速度へのフィードバック、実験、磁気圏観測の運動論的リコネクション、太陽プラズマと室内実験の連携した模擬実験による新しいスタイルの彩層ジェット物理解明は、3 分野の結果が一致するようになった。リコネクションが粒子加速と粒子加熱を引き起こす物理が次第に明らかになってきている。一方、リコネクション加熱応用は、東大とカラム研究所融合チームが世界最大のトカマク合体実験 MAST において磁気リコネクション実験を行い、イオン温度で 1.2keV、電子温度で 1keV に加え、2 次元のイオン温度分布、電子温度分布からイオンはリコネクションアウトフローによって X 点下流で大きく広く加熱され、電子はオーム加熱によって電流シートの X 点周辺で局所的に加熱され、前者は後者の 10 倍あることがわかった。さらに再結合磁場の二乗に従ってイオン加熱が増加することがわかり、今後の応用研究に向けて大きなインパクトがあった。プラズマ電流 150kA でも、の加熱が得られたメカニズムがリコネクションアウトフローとファーストショックによるダンピングであることも 2 次元計測によって明快になった。電子のアウトフローがイオンに先行するため、アウトフロー下流領域に負のポテンシャルが形成されて、追いかけるイオン加速が静電的に行われる点が議論された。実験、理論・シミュレーションの比較により、エネルギーの流れが誘導電場、静電場によって役割分担されることがわかってきた。

ひので 8 会議は、太陽プラズマの現場で起きている磁場の自己組織化に注目して、観測・理論・実験等から多角的な科学討論を行い、また中核となる日米欧の研究者との討議を通じて今後の計画協力の先鋭化を行う機会として、米国オレゴン州ポートランドで 2014 年 11 月に米国の主催で開催した。日本や米国がそれぞれ観測運用を行う「ひので」「IRIS」「SDO」といった太陽観測衛星による最新の研究成果をセミナー参加者で討議を行い、新たな研究の方向性や研究協力を模索する機会となった。本プログラムによる研究成果を広く広める機会として、また、若手研究者が発表を行って、海外研究者と広く議論を行う機会として効果的に機能した。また、昨年からは観測を開始した米国の磁気圏観測衛星 Van Allen Probes の最新成果や太陽活動と地球磁気圏を結ぶ宇宙天気研究など、従来の枠を超えた研究分野との研究交流が行われ、将来の分野融合の可能性や学際的研究のアイデアを持つ効果があった。また、本プログラムの終了後に発展させるべき新たな将来の研究・協力計画について日本の主導で欧米研究者らと先鋭化のための討議を行うこともできた。

ひので実験室会議は若手に運営を任せて、計画を自由に立ててもらったことが功を奏して、20-30 名程度の規模ながら、活発に運営されている。テーマは毎回、機動的に変化し、実験・観測・理論の連携を意識したテーマに力点が置かれている。外部資金の調達も進んでおり、もはや本プログラムの予算をほとんど必要としない状態になっている。この会議で新たな分野連携研究が計画され、実際に共同研究テーマに成長したものも多い。大きく注目された研究として彩層ジェットのシミュレーション実験の成果があり、引き続き、NHK をはじめ取材をうけている。

(様式7)

現在は、プラズモイド放出が新たな共同研究テーマとして若手研究者が共同研究を進めている。本会議は若手が主役となって連携・融合研究を進めるスタイルが定着したといえる。

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

(1) 平成26年度実施状況

本プログラムにおける研究者交流は、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活動を広げるために利用してきた。最終年度も米国物理学会招待講演、IAEA Fusion Energy Conferenceの日本代表講演、COSPAR会議の招待講演など積極的に会議からの招待講演に応じた。内容は、リコネクション室内実験、特に話題性のあるリコネクション加熱に関する講演、実験・観測・理論の異分野連携に関する講演であった。また、本プログラムがアジアに拡大されたことは特筆できる。これは、第4回東アジアプラズマ夏の学校とよばれ、本プログラムと全く同じ実験・観測・理論の異分野連携を日中韓の3カ国で行うものである。招待に応じて本プログラムからも3名の講師を派遣してサポートを行った結果、この会議は日中韓の回り持ちで定着したと言える。また、蔚山科学技術大、ハルビン工科大学をはじめ、いくつかのアジアの大学から先方経費で本プログラムの紹介を行っており、本プログラムのアジアでの波及が大きくなっている。

(2) 全期間にわたる実施状況概要

研究者交流は、一貫して、我々が目指してきた自己組織化に関する実験・観測・理論(シミュレーション)の異分野・国際連携研究の成果を分野内外に広く発信し、本国際COE活動を広げるために利用してきた。研究者交流枠を使った体験的な若年学生の派遣は行わず、派遣前にスクーリングを行って、共同研究として意味のある派遣に高めた段階で、実際の派遣を共同研究として行ってきた。従って、研究者交流の主たる派遣は、1) 海外学会、異分野学会からの招待講演の依頼に応えること、2) 分野融合に興味を持たれる学会に直接参加し、異分野連携を拡大すること、3) アジアを中心に本プログラムの自己組織化に関する異分野連携・国際連携の拡大の動きをサポートするために行われてきた。1) の典型は、海外の一流学会からの招待講演、例えば米国物理学会、欧州物理学会、米国地球物理学会、COSPAR会議などの招待講演、基調講演であった。また、太陽観測、地球磁気圏観測、核融合プラズマ、プラズマ応用などに特化した学会からの招待も多数あり、分野融合の更なる推進を目指して積極的に応じてきた。2) の典型は、天文・降着円盤などに関する新分野におけるリコネクション・自己組織化関連学会への参加である。こうした学会への参加を通じて、我々の主催するMR会議、IPELS会議への参加・連携を進めることができた。3) の典型は、我々のプログラムから刺激を受けてスタートした東アジアプラズマ夏の学校である。自己組織化に関する実験・観測・理論の連携のアジアへの拡大をサポートするため、招待に応じた講師派遣を行ってきた。結果として毎年スクールを開催する体制が整ったといえる。太陽プラズマの自己組織化現象に関する研究成果は、その他、中国、韓国、メキシコ、欧州(5カ国)、オーストラリアからも招待講演を依頼されてきた。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、太陽プラズマと実験室、理論シミュレーション、さらに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といえる。

3. 研究交流活動の成果

全期間の交流を通じての成果を、「国際学術交流拠点の形成」「成果の学術的価値」及び「若手人材育成への貢献」の観点から記入してください。また、活動成果の「情報集約性」「社会貢献性」がある場合には記入してください。

3-1. 国際学術交流拠点の形成

5年にわたり、総体としてのプラズマの自己組織化と要素としての磁気リコネクションに焦点を絞って、本格的な実験・観測・理論（シミュレーション）の異分野連携と日米がタイアップした自己組織化 COE を中心に日米欧の国際連携を実践したことにより、今後に持続する自己組織化国際研究拠点が形成できた。実験・観測・理論の連携は多くの若手研究者により実践され、効率的に自己組織化や磁気リコネクションの物理を解く効果的な手法であることが実証できた。はじめての太陽観測者によって書かれた室内シミュレーション実験の論文は話題になり、学術論文、天文月報などの解説の他、毎日新聞をはじめ全国紙で取り上げられ、広く知られるようになった。また、理論・実験、観測・理論の学術論文も5年間で多数にのぼり、これに日米欧の国際連携が加わって、5年間で200編を超える学術論文の実績を残したことは特筆できる。特に日米が日本学術振興会と全米科学財団を基盤とする自己組織化 COE を同時に立ち上げて、協調運用した効果は絶大であり、多くの成果と共に今後持続可能な国際研究拠点の形成に成功した。

国際連携・異分野連携が育てた国際会議は、磁気リコネクションとして MR 会議、自己組織化は IPELS 会議として発展し、それぞれの分野で NO.1 といわれるまで成長したことも、本プログラムが自己組織化・リコネクション分野のみならず、プラズマ分野で最も進んだ異分野連携・国際連携を行った組織として各所で紹介される基礎となっている。分野間連携と国際連携の核担った組織が、3番目の会議：ひので実験室会議である。現場の運営をすべて若手に任せたことで、思い切った連携研究の企画を会議と一体化させる手法で行い、多くの連携研究を成功に導いた。

また本プログラムは国際的には J-CMSO と呼ばれ、日本の自己組織化 COE として知られるようになり、個別 COE の無かった欧州においても好意的に受け止められ、積極的に国際連携研究を受けて入れていただけたことも特筆できる。提携先からの独自予算により派遣人数を増やし、派遣に数を積みますことが行われ、今後の活動継続にも弾みがついたと言える。日本の有能な研究者派遣のエンジンとして機能すると共に、海外提携先からの共同研究を多数受けることにつながり、常に派遣人数を2倍以上の欧米研究者が日本で共同研究を行うという状態はプログラム終了後も定常化することになった。

そうした環境の中で、我々が企画した若手研究者育成プログラム「自由な留学」は確実に機能し、多くの若手研究者が、自らの研究にとって、必要な時期に、最適な研究機関に、必要な期間、共同研究を行う事ができた。若年層の学生の留学も、日米を中心とする COE 連合の入念なスクーリングにより、十分な準備と打ち合わせ、議論を行った後、共同研究として意味のある派遣となり、全員が研究者交流枠ではなく、共同研究枠で派遣されたことも特筆できる。本プログラムの成功が次なる予算や派遣システムの獲得につながり、例えば、東京大学では、プリンストン・東京大学戦略パートナーシップ予算が獲得されたほか、新領域創成科学研究科の学融合研究調査費の獲得、プリンストン大学から客員教授の招へいが平成27年度に実現している。その他、自然科学研究機構と東京大学、ブリッジトン大学、マックスプランク研究所を巻き込んだ人材育成プログラムも企画されている。

本派遣制度によって築き上げてきた今までの研究成果を起点として、規模を拡大し産総研と The Italian National Research Council (CNR) が包括的な研究協定を調停する可能性についても議論を行ってきた。特に、材料、計測、標準、医療などの分野も含めて展開していくための具体的な内容についてセミナーを開催し議論を深めた。Consorzio RFX の上部機関である CNR は、イタリア国の Ministry of Education, Research, and University に属しており、11の分野 (Information and Communication Technologies, Earth and Environment, Materials and Devices, Energy and Transportation, Production Systems, Cultural Heritage, Molecular Design, Cultural

(様式 7)

Identity, Life Sciences, Agrifood, Medicine)を有しており、イタリア国内の各都市に分散して約 100 の Institutes が設置されている(常勤研究者数約 5,000 人)。現在、調印に向けて両機関が作業を行っている。今後の研究計画として、RFXでは大型プラズマ放電装置の改造を1年後に控え、産総研から持ち込んだビームシステムをその実験計画の中核を担う装置として活用される事が決まり、研究が継続的に実施されることとなった。包括研究協定は、当該研究を更に加速させるものと考えられる。米国・英国との拠点形成 - 実験室プラズマ+太陽観測研究でさらに発展加えて、ドイツとスペインを学術拠点の形成に取り込んだ。ドイツは数値シミュレーション・太陽観測(地上および気球)との連携、スペインとは新しい磁気プラズマ診断手法の開発と観測への応用の視点を持っている、今後の太陽プラズマ研究を日本がリードして行う上で伸ばすべき分野であり、ひので後の観測・理論研究の展開の拠点形成としても重要と考えられる。

3-2. 成果の学術的価値

自己組織化の問題意識を、要素としての磁気リコネクション、総体としての自己組織化に分け、実験室、理論、観測の3分野連携と国際連携で従来の一流体(MHD)的解釈を粒子運動論的解釈に衣替えしつつ、現場の自己組織化として太陽物理を中心とする観測を加えて、連携、さらに融合が現実問題の解決に有用であることを示した。明らかにした物理は、一言で言えば、磁気リコネクションから自己組織化に至る物理について従来のMHD(一流体)的な解釈を粒子運動論的解釈に一新したもので、新規性に富んだ新しい物理や新たな応用研究に結びついた。従来、異分野同士で結果を比較することもなかったものが、分野連携によって多方面から検討した上で明らかになった分野を超えた、スケールギャップを越えた物理であるため、学術的には大きな意味がある。リコネクション研究としては、リコネクションのエネルギー変換作用、特にX点下流に特化した大きなイオン加熱とX点領域に局在化した電子加熱の存在は全てのリコネクション加熱に共通する基本であり、大きな一歩と言え、アルヴェン速度に近いリコネクションアウトフローとX点下流のピルアップ領域における熱化や電子のアウトフローが先行して負電位の井戸を形成し、イオンが遅れてエネルギーを得る運動論的描像は新しい発見であり、実験・シミュレーションが一致する意味での学術的価値も高い。特に注目されるのは、リコネクションによるイオン加熱が再結合磁場の二乗に比例するスケーリング則の発見である。このため、高磁場化という新たな実験に発展し、一方で、リコネクション加熱研究は大型強磁場合体実験の必要性から、英国MASTを用いた共同実験さらにその工学応用につながった。最終的に0.2Tの合体で1.2keVに達する高いイオン温度が得られ、大きなニュースとなった。米国物理学会や欧州物理学会の招待講演、基調講演の他、2013年科学雑誌パリティでは、「物理科学この1年」に合体実験に取り上げられた。自己組織化については、中性粒子ビームによる運動量注入を用いて、自己組織化の行き先を制御した一連実験もインパクトがある。リコネクションを繰り返すプラズマ電流が大きい場合(~500kA)、単一ヘリシティー状態が生じているときに中性粒子ビームを入射したところ、高エネルギーイオンの空間的な閉じ込めが悪いものの、プラズマの電流が小さい場合、中性粒子ビームによる運動量を注入すると、単一ヘリシティー状態への遷移(自己組織化遷移)が抑制されることが見出された。ビームで運動量を注入すると、磁場構造の変化に伴う磁場揺動の減少とプラズマ温度の上昇が計測され、自己組織化によるプラズマ性能の向上も報告されており、米国物理学会招待講演に3回選ばれるなど評価されている。また、太陽大気「現場」での磁気リコネクション現象の理解、磁気リコネクションは天体プラズマや宇宙で普遍的に起きている、動的な宇宙を作る物理機構として、空間的に解像できる雛形としての太陽プラズマで磁気リコネクションまたそれを核として起きる磁場の自己組織化を理解すること。これは、宇宙天気としての太陽フレアや宇宙空間への噴出の理解、100万度以上の高温プラズマを形成するコロナ加熱や太陽風起源、などの学術的理解に重要な貢献といえる。実験・観測・理論の融合によって解決した太陽黒点のライトブリッジの磁場構造の同定とジェット発生の実証は、現場の自己組織化問題の解決に直接貢献した。共同記者発表から新聞掲載、科学誌への掲載などを通じ、実験・観測・理論の融合は新しく効率的な問題解決法として高く評価されている。観測と実験、シミュレーションにおけるプラズモイドの放出現象についてもリコネクション速度向上に結びつく効果、プラズマ加速・加熱効果などが分野融合研究によって立証されており、新手法は急速な広がりを見せている。要素としての磁気リコネクションがプラズモイドという閉じた磁力管構造を自己組織化し、総体である磁力管構造の放出によって逆に要素の磁気リコネクション速度が変わるという要素と総体の関係を示す好例といえ、成果を論文投稿中である。

3-3. 若手人材育成への貢献

プラズマの自己組織化の COE を日本と米国、拠点を欧州に構築し、COE のリエゾン室同士が連携して「自由な留学」プロジェクトをスタートできた。結果として、若手 100 名超を海外派遣して、実験室天文学分野の 1) 国際的な垣根と、2) 実験・観測・理論の垣根の両方を取り払う成果をあげた。「自由な留学」のため、必要な研究段階、必要な時期に若手や学生を派遣する体制を日米欧の COE が構築した。経費節減の努力により 100 名ものポストドクや博士学生等の若手を海外派遣し、10 名は 1 ヶ月以上の長期派遣できた。学生には国際 COE が連携して事前教育を施し、別表 1「研究交流」枠（他学会からの招待講演に使用）ではなく、必ず研究課題を持つ「共同研究」を主務として派遣した点は大きな特徴である。従って学生は「国際連携」「分野間連携」の 2 目標を担って多くの成果を生み、例えば最大の磁気リコネクション実験 MAST による急速加熱の実証は学生が英国への長期派遣で担い、米国物理学会、欧州物理学会、COSPAR 会議等の多くの招待講演となった他、若手・学生も電気学会、プラズマ核融合学会をはじめ多くの受賞を獲得し、内外より高く評価されている。「自由な留学」は東京大学共同記者会見で大学教育として注目され、「学融合」を理念とする研究科サポートの下、必修単位の弾力認定が認められる一方、研究科より客員教授の利用を許可され、米国 COE より教授を招聘して海外派遣の準備が整わない年少の学生を含めて継続的な若手教育が可能となった。年長研究者の短期派遣で枠組みを作り、優秀な若手研究者の長期派遣で成果をあげて「国際連携」「分野間連携」を進める組織的取り組みと中性粒子ビーム等の日本独自技術を持ち込んだ海外派遣が若手研究者の海外での価値を高め、次の派遣につながる好循環を生んだ。また、太陽関係では、若手人材育成として、大学院生 8 名を支援し、国際的な環境で経験を積んだ。ポストドクも延べ 17 名を国際交流で海外に派遣し、国際連携により成果を積んで、多くの論文発表、総体講演を得ることができた。異分野連携の 1 つの核になったのが、「ひので・実験室会議」であり。ここでは若手が主役として会議を主導し、次の分野誘導プロジェクトを自ら提案、実行する役割を果たした。分野融合のエンジンとして内外より評価されている。強い要望と高い評価の結果、プログラム終了後も東京大学学融合研究調査費の支給を受けて継続が決まっている。若手向けの大規模なスクールは期間中に 2 回行われ、新しい分野融合研究、国際連携研究の先駆けとして内外から大変好評であった。その評価を基に運動した結果、スクールは 1) プリンストン大学・東京大学戦略的パートナーシップのサマースクールという形で定常化することに成功した。本プログラムに刺激を受けて発足した 2) 東アジアプラズマ夏の学校についても講師派遣によるサポートが功を奏し、継続・定着に貢献したと言える。

3-4. 情報集約性

日米欧の COE の緊密な協力により、「国際連携」「分野間連携」が進展した結果、分野融合した学術情報交換の場が内外の学会より注目を浴び、さらに広範囲の学術情報交換が可能となった。15 年目となる MR2014(Magnetic Reconnection in Space and Laboratory Plasmas 2014)会議は本組織で主催し、実験、観測、理論の世界の主要研究者が集合して国際的な最新学術情報がまとめられている。結果として磁気リコネクション分野で NO.1 の国際会議に成長したといえる。分野融合が実現した同会議の内外の評価は高く、会議録は米国 Institute of Physics の一流誌: Physics of Plasma の特集号に 2010 年、2012 年、2014 年の 3 度に渡ってまとめられることが決まり、国際的学術情報の情報集約性は国内随一にも大きな進展があった。キーとなる要素である磁気リコネクション研究に続き、総体としての自己組織化研究でも IPELS (Interrelationship of Plasma Experiments in Laboratory and Space) 国際会議も自己組織化分野では NO.1 の会議といえ、主要な研究者が集結し、日米欧 COE の主要メンバーによる講演とパネル討論により、十分な情報交換と会議録のとりまとめを行う事ができた。最新成果を集めた PASJ でひので特集号が発刊された。本プログラムによる成果も集録された。日米 COE による組織的な会議運営により、MR, IPELS, ひのでなどのトップオリティの国際会議の情報集約性は更に高まっている。要素と総体に照準を合わせた 1 つの分野融合会議は宇宙から応用まで対象を特定した国際会議を中心に国際的学術情報の収集整備は確実に進展している。

3-5. 社会貢献性

本プログラムの磁気リコネクション・自己組織化研究は、直接プラズマ物理の運動論的側面を一新したといつてよく、プラズマ物理の発展に貢献してきた。研究例として、磁気リコネクションおよび 3 次元磁場の自己組織化の良い例である太陽フレアの発現機構の学術的理解を通じたことは、そのまま太陽フレアの爆発を予想し、宇宙天気予報の学術的基礎を作ることにつながった、太陽の地球への影響を解析することによって宇宙天気予報、さらに地球環境問題に貢献できる。社会インフラへの宇宙天気現象の影響を評価するための基礎ができたと言える。また、2000 年に 1 回地球全体が被爆する太陽におけるスーパーフレアの可能性についても予報研究が行われており、一般社会へ貢献する研究といえる。我々の活動が、直接工学応用につながる可能性も各所で指摘・実行してきた。即ち、見つかったリコネクションによる巨大加熱は、そのまま追加加熱無しに合体するだけで、核融合（人工太陽）の点火が得られる可能性がある他、プラズマプロセスの中でイオン加速に用いる可能性もあり、リコネクション・自己組織化の工学応用はこれからのポテンシャルのある課題といえる。また、本プログラムをサマープログラム、研究公

(様式7)

開という形で教育に生かす試みも成功した。日本・アジアの大学学部生，若年大学院生がサマープログラムで外国人学生と一緒に受けた刺激は大きく，学生アンケート結果も極めて好評であり，その後，多くの学生がプラズマ分野に進学している。研究室公開は，普段馴染みのない宇宙プラズマ現象を東京大学本郷キャンパス（5月）および柏キャンパス（10月）に一般向け，中学高校生に公開したが，来訪者の反応は極めて良好であった。小野が高校生向けの太陽と人工太陽に関する講義を東京大学五月祭で行い，好評を博すなど5年間の活動の間，大学のイベント合わせた本プログラムの紹介を行ってきたことが，東京大学五月祭展示の定常化につながった。

(様式7)

4. 経費の執行状況

4-1. 平成26年度の状況

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)

最終年度はMR国際会議を主催しつつ、ひので8国際会議を海外で行ったため、事業経費は国内派遣と海外旅費のバランスがとれるはずであったが、プログラム終了後の持続的な活動のための予算が色々獲得出来たため、国内旅費はそれらでカバーし、旅費は円安のために一気に航空券が高額になり、予算オーバーが現実となった海外旅費に回すことになった。197万円の国内旅費でMR2014会議(東京大学他)の31名の旅費をサポートし、更に会議予算で20名程度をサポートした。海外外国旅費1466万円は、本プログラムのまとめの会議となったMR2014会議にリコネクション研究創成の功労者で86才になるParker先生、Kulsrud先生を招へいするために148万円、米国のひので8会議の旅費を13人に454万円を支出したが7名は別途外部予算を調達できたので実際は表に現れない派遣があった。最終年度であるため、共同研究も短期の論文取りまとめや学会での成果発表のための渡航が増え、長期2人を含む43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が、円安のため航空券がかなり高価になっており、渡航日数を削減せざるを得ない場面もでてきた。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。海外提携先からの日本の関連機関への渡航は活発であり、日本で主催した国際会議への参加者も30名程度で、さらに共同論文執筆、共同実験、共同データ解析のための来訪者が60名程度であった。研究は双方向に行われ、来訪者数が渡航者の倍程度であり、今後も増加するものと思われる。

【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)

4-2. 全期間にわたる状況

(1) 執行額(単位:千円)

	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度
国内旅費	2,256,310	2,376,896	1,283,752	7,100,562	1,967,100
外国旅費	8,558,199	9,119,672	15,054,841	11,283,257	14,662,833
物品費	3,761,416	4,495,056	6,929,826	5,043,682	5,883,505
謝金	0	0	103,320	0	0
その他の経費	1,036,331	572,294	0	0	270,090
外国旅費・謝金に係る消費税	387,744	436,082	628,261	572,499	1,216,472
合計	16,000,000	17,000,000	24,000,000	24,000,000	24,000,000

(2) 本事業経費による派遣/受入人数(相手国側マッチングファンドによる受入は含まない)

	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度
派遣人数(人)	43	43	49	30	43
受入人数(人)	0	1	0	0	2

5. 全期間における問題点・反省点

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新たに見つかり、除去に半年以上を費やした遅れが、引き続き 26 年度の同大型リコネクション実験の遅れにつながった。最終年度に残した作業が限定的であったため、限られた時間で効率的にデータ処理を行い、概ね計画を完了することができた。米国政府の科学技術予算削減による海外渡航禁止が 25 年度に行われ、米国の国立研究所を中心に日本主催の会議に出席できない問題が発生して大きな障害となったが、26 年度は多くのに研究者にとって状況が改善し、日本渡航は計画通りであった。反面、ウクライナ問題のため、ロシア開催の国際会議は米国側のボイコットがあり、現地打ち合わせに問題がでた。イタリア国の経済状況の悪化により、科学研究予算の一律の大幅削減があり、Consorzio RFX も削減を受けたため、大型自己組織化プラズマ実験装置の運転期間が制限され、実験を集中的に行う必要が生じ、渡航期間・時期の調整を行う必要が生じた。

6. 今後の展望

本プログラムにより、総体：自己組織化と要素：磁気リコネクションの国際 COE が設立されたことにより、自己組織化、磁気リコネクション研究は急速に進み、この分野の実験・観測・理論（シミュレーション）の連携、および日米欧の国際連携は多くの学術論文、招待講演、新聞発表、受賞を通じて多くの成果をあげた。特に日米の COE を同時に立ち上げ、連携して自己組織化の異分野・国際連携更に融合を推進した効果は絶大であった。これらの活動が後戻りすることなく、この COE 活動は資金源を変えながら継続される予定である、具体的には、プリンストン東京大学戦略パートナーシップとして本組織が両大学から認められたことにより、若手研究者派遣からサマースクールまで主要な活動は拡大して引き継がれることが決まった。また、東京大学大学院新領域創成科学研究科から学融合研究調査費の配分が決まり、本プログラムの実験・観測・理論の共同研究、連携は維持されることがきまっている。又自然科学研究機構からはネットワーク研究予算として、こうした異分野連携をサポート指定猛ることになり、本プログラムの高い評価が活動を継続に導いてくれた、また、磁気リコネクション、自己組織化それぞれの分野異分野連携で NO. 1 となった MR 国際会議と IPELS 国際会議は各所から予算を獲得し、それぞれ継続予定であり、我々の活動は定常化されたいってよい。ひので・実験室会議は、全てを若手が担当し、異分野連携を次の研究計画に具体化する功績を挙げ、若手研究者から人気がある。これも、東京大学学融合研究調査費や自然科学研究機構ネットワーク型共同研究としてサポートを受け、継続される。更に若手研究者、学生向けスクールについては、プリンストン東京大学戦略パートナーシップとして規模を拡大して行われることになった。また、一部は東アジアプラズマ夏の学校として本プログラムのアジア拡大を先導することになった。2020 年代前半をターゲットとした次期観測衛星計画は、本プログラムに参加している日米欧の研究者が中心となって特に観測・実験・理論の連携も考慮されたサイエンスの検討が行われ、各国の宇宙機関への提案等働きかけが始まっている。また、本プログラムを契機に領域を材料、化学、計測、標準、医療、地質などの分野に広げて、大規模な産総研とイタリア・CNR の包括的な研究協定の締結も進んでいる。リコネクションから自己組織化至るプラズマ物理を中心に、5 年間かけて構築してきた異分野の連携・融合、国際的な連携・融合は速度を速めて進行しており、若手教育を目指した「自由な留学」プログラムも形を変えて拡大している。分野や国の垣根を取り払った研究活動体制の継続的構築と若手活用を重視した研究活動の拡大、更には広い分野への波及が続いており、今後も更なる発展が期待出来る。