

## 先端研究拠点事業 平成23年度 事業実績報告書

平成24年4月13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24年3月31日（24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	3
参加者数	47

#### 相手国1

国名	米国
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	2
参加者数	10

#### 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

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	0
参加者数	4

※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23年度事業計画における達成目標

**A 学術的な成果：** MAST（英）装置実験で見出した 1keV を超える磁気リコネクションのイオン・電子加熱機構を検証する他、MRX（米）、TS-4(日)でプラズモイドをはじめとするリコネクションの高速化機構の解明を進める。日米伊で中性粒子ビーム入射を用いたトーラスプラズマの自己組織化の制御を進め、運動論領域まで範囲を広げて自己組織化を説明する道筋の検証を開始する。IPELS2012 会議にこれらの最先端研究、ひので5 会議に太陽観測現場の自己組織化問題を集め、実験・観測・理論の学融合、分野連携、国際連携を前進させる。

**B 持続的な協力関係の基盤構築：** IPELS 会議で、幅広い自己組織化に関する物理成果をレビューしつつ、今後の日米 COE 組織による協力研究と若手育成について打ち合わせを行う。ひので5 国際会議を通じて、太陽観測を中心とする観測現場の問題を解くことで観測、実験、理論・シミュレーションの異分野間連携を大きく発展させるとともに、日米の自己組織化 COE を中心に日米欧の国際連携を進める。

**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 回開催して、分野融合と若手の研究の活性化を図る。また、各機関で共同研究を進める際に若手向きスクールを必ず行い、若手を共同研究の担い手に育てる。

**D 国際的学術情報の収集整備：** IPELS 国際会議にリコネクション・自己組織化の最先端研究を一同に集め、ひので5 国際会議に、太陽観測現場の自己組織化問題を集めて、分野融合された本プログラムの研究成果を公表する。米国、フランス、中国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：** 共同研究や IPELS 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5 国際会議等を通じて宇宙観測分野を本組織に取り込んで、分野融合組織で太陽観測現場の問題を解く。枠組みの拡大によって次の飛躍を期する。広く学会の招待講演、講演依頼に応じて、自己組織化の国際 COE の国際連携、分野間連携の裾野を拡大する。

### ② 平成23年度事業計画の達成状況

**A 学術的な成果：** 44 名の派遣と相手国による 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) MAST 装置（英）のリコネクションで観測した 1keV 以上の電子加熱がリコネクション点付近に局在することや2) アウトフローがショックとイオン粘性の双方を介してイオン加熱につながる機構を解明し、3) 磁気面を持つプラズモイドの放出に加えて、4) それを持たない電流シートの放出、4) 電流シートの3次元変形といった新しい高速非定常リコネクション機構を見出した。自己組織化研究では、5) MST（米）に加え RFX 実験（伊）の中性粒子ビーム入射が始まり、6) 多数のリコネクションが構成される自己組織化現象がビームによる運動量注入で弱められる新現象を見出した。これらの成果は Physical Review Letters を初めとした 40 を超える論文や 20 を超える招待講演となり、さらに MR2010 の主要論文は、米国 AIP の学術誌 Physics of Plasmas の論文特集号に招待され、学術的な成果が広く認められるに至っている。

**B 持続的な協力関係の基盤構築：** IPELS 国際会議で日米 COE の連携と人材派遣計画について入念に打ち合わせたため、理論・実験・観測が一体となった米英伊との多数の派遣・受入が十分な成果をあげ、集大成の MR2010、IPELS 国際会議が、同分野のトップクオリティの国際会議に成長したことから、日米欧 COE 連合を持続的に発展させる基盤が出来た。米国側は日本側を分担者として NSF の COE 予算を獲得し、日本側も宇宙観測分野を大幅に取り込んで国際戦略型への発展するに当たって米欧が積極的に協力しており、国際 COE 組織間のより緊密な運営が行われるようになった。

**C 若手研究者育成における成果：** 日米 COE 同士の入念なスクーリングにより若手を共同研究の主力に育てることに成功し、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 Plasma Conference 2011 優秀論文賞、電気学会学術奨励賞、工学部長賞、修論論文賞などの受賞につながった。分野融合の成果として、観測者が実験を行ない、その逆も行う研究スタイルが定着し、学生の研究能力がかなり高まった他、観測、実験の若手研究者がそれぞれ相手の分野で共同論文投稿を行うなど分野融合を具体化する新潮流が生じている。

**D 国際的学術情報の収集整備：** IPELS 会議、ひので5 会議は分野を代表する会議に成長し、分野の先端研究を一同に集め、効率の良い情報交換ができた。米、仏、中の招待講演にも積極的に応じ、本研究の裾野は広がっている。広分野の国際学術情報の収集を目指した IPELS（宇宙と実験室のプラズマ実験の連携）国際会議の来年度日本開催が採択された。

**E 事業の波及効果：** ひので・実験室会議や IPELS 会議を契機に宇宙観測分野の若手の参加が急増し、23 年度より国立天文台、宇宙科学研究所も事実上、協力機関に加わって本 COE 組織の規模が約 2 倍に拡大した。合体を用いたプラズマ急速加熱法は UTST にそっくりの合体装置 VEST が韓国に建設されるなど波及範囲は益々広がっている。昨年主催した MR2010 会議の主要論文は米国 AIP の雑誌：Physics of Plasma の特別号に招待され、本 COE の内外の評価も高まっている。

## 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。

本 COE 組織に対応する米国側 COE 組織はプリンストン大学、ウィスコンシン州立大学ともに米国科学財団、エネルギー省の COE プロジェクト継続が採択されており、東京大学も引き続き、海外メンバーとしてリエゾン室を担当している。日米 COE は緊密に連携し、相手国がスクーリングを行う形で日米の COE 組織同士の若手研究者の相互派遣が実現されている。新たに英国、イタリアのコーディネータも参加する予定で、日米 COE 連携は欧州に拡大しつつある。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 がスクーリングで受入をサポートする形で体制が定まりつつある。MR, IPELS, ひので国際会議の共催を契機に、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具体的に解くための実験も初の論文投稿に至るなど着実に実績をあげ、国際 COE 連携の影響力は急拡大している。

#### 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、本プログラムの分野間連携・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。23-24 年度は学融合研究調査費、24-25 年度には米国側 COE 組織とのスクーリング充実のため、再び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、27名の派遣と相手国による15名の来訪により計画以上の成果を上げることができた。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、1) MAST 装置（英）を用いた過去最大のリコネクション加熱実験は1 keV を超える加熱機構の解明が進み、強い電子加熱が X 点付近に局在化すること、リコネクション下流領域の強いイオン加熱が電子-イオン間のエネルギー緩和により周辺磁気面の電子加熱を引き起こすこと、さらにこのイオン・電子加熱が GW クラスの核融合プラズマ急速加熱に有用であることが明らかになった。2) 一方、東京大学・カラム研究所・プリンストン大学の協力と人員の相互派遣により、TS-3 装置では、リコネクションのイオン加熱はアウトフローがイオン粘性とファーストショックにより熱化されたことを2次元画像計測で明らかにし、その成果は Phys. Rev. Lett. を初めいくつかの論文となり、ヨーロッパ物理学年会 plenary talk が予定されている。さらに電流シートにコヒーレントな磁場揺動が発生しているのが見出され、揺動が異常抵抗を発生するメカニズムが解明されつつある。3) 東京大学・プリンストン・ウィスコンシン大学間で多くの短期間派遣を行い、理論・実験・太陽観測が一体となったチームにより、1) 電流シートの放出、2) プラズモイドの放出、2) 電流シートの3次元変形が高速リコネクションにつながることを見出した。この成果は Plasma Conference 2011 のシンポジウムに選ばれ、本研究グループが成果発表を行い、討論を担当した。

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と太陽模擬実験に集中し、

- 1) MST 実験（米）、RFX 実験（伊）は、短期派遣を繰り返し、多数のリコネクションから成るトラスプラズマの自己組織化を行う磁場揺動が中性粒子ビーム（イオン流）で抑制されることがわかった。更なる検証に向けて、計測器の準備、及び NIMROD コードによる解析作業を開始した。
- 2) 産総研で考案した中性ヘリウムビーム入射を用いた磁場方向計測の RFX 装置への適用を進め、
- 3) 観測と実験が協力して太陽彩層のライトブリッジの模擬実験を開始し、理論予測通りのジェットの発生を見出し、分野融合論文を投稿中であるほか、ひので5会議などで公表し、新潮流として注目を浴びた。

## 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 Physics of Plasma の特集論文号に採用されるなど、計画以上の成果が上がったといえる。

- 1) 7月に行った IPELS 国際会議では、日米の自己組織化に関する COE 組織 (US-CMSO, J-CMSO) 関係者を中心に宇宙と実験室の共通物理を明らかにするため、幅広く 100 名が出席し、最新の研究成果をレビューした。同分野 NO.1 といえる国際会議となり、境界領域を 1) 磁気リコネクション、2) ダイナモ効果、3) ショック、4) 乱流、5) アルヴェン波の 5 つの観点で整理して、研究の進展を評価した。特に日英のリコネクション加熱実験、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、セミナー活動を協調して行うことを申し合わせ、次回会議は 2013 年日本側 COE の東京大学がホストすることになった。
- 2) 10 月には太陽観測現場を重視し、緊密な連携を進めるため、本分野融合グループがひので 5 国際会議を共同運営し、ひので太陽衛星観測の現場の自己組織化、リコネクションの問題について研究発表を行った。170 名の参加者があり、高精細な衛星観測を中心に理論、実験が加わり、分野融合的な新潮流をつくることができた。フレアやジェット、彩層リコネクションなど活動現象について最新の「ひので」観測やそれを解釈する理論・実験を比較検討し、結論を導いた。
- 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 回目は実験室側の東京大、2 回目はひので観測の現場の京都大、3 回目は内外の観測、実験室、理論の研究者を多数あつめて東京の会議場で行った。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、分野融合が進展した。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、米国側研究者が東京大学を来訪して行なった。
- 4) 昨年、主催した MR2010 国際会議は内外より注目され、その主要論文は米国 AIP の学術雑誌 Physics of Plasmas の論文特集号に採用されることとなり、11 月に発刊されるに至っている。

## 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立てており、実際、本グループの規模は2年間で約2倍になった。今年度も招待講演による成果公表により当分野の国際的プレゼンスを高めることができた。特に、プラズマ系3学会が隔年で主催するPlasma Conference 2011では、本COEのプラズモイド・リコネクションがシンポジウムに選ばれ、15名を派遣して最新研究をレビューし、総合討論で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進んだ研究スタイルを定着させたといえ、最近では類似したスタイルの会議も内外で企画されるようになってきている。東大がプログラム委員となったアジアプラズマスクールも3分野のプラズマ研究の連携が対象となり、類似会議がアジアに広がったといえる。同会議では招待講演、プログラム委員をつとめた。自己組織化に関するヨーロッパ物理学会招待講演や、リコネクション加熱を核融合プラズマへ応用する意味での核融合分野での招待講演など多くの成果が上がった。磁気リコネクション加熱の応用が開拓されつつあることと、本プログラムの自己組織化研究を周知させる意味で成果が上がった。なお、本COE組織では各極COEによる入念なスクーリングを行うため、若手の長期派遣は研究者交流ではなく、共同研究として行われている。