

---

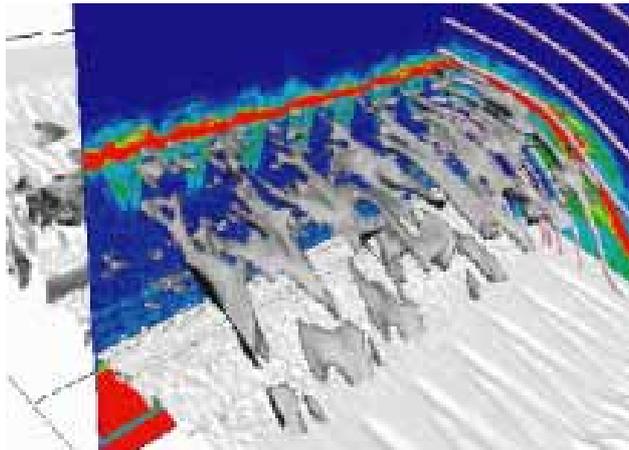
太陽、恒星および降着円盤における  
非線形電磁プラズマ活動現象の研究  
Study of Nonlinear Magneto-plasma Dynamics  
in the Sun, Stars, and Accretion Disks

---

平成15年度～平成16年度（2003年4月～2005年3月）

日本学術振興会 日欧科学協力事業共同研究（相手国：英国）

研究成果報告書



平成17年（2005年）3月

日本側 研究代表者 柴田一成

（京都大学大学院理学研究科教授）

相手国側 研究代表者 Nigel O. Weiss

(University of Cambridge, Professor)



## はしがき（目的と経緯）

本共同研究は、X線天文学、電波天文学の新しい発展によってわかってきた天体の超高温、高エネルギー現象の根源にあるプロセスを、天体の内部での磁場発生機構から、外部でのその発現の具体的プロセスまでについて、現実に近い3次元電磁流体シミュレーション解析により、内外の相互作用を扱うことによって、統合的理解を打ち立てようとするものである。

本共同研究のグループは、それぞれ、日本および英国で、天体電磁流体力学の発展にその初期から関わり、さらに電子計算機の発展と共に数値シミュレーションの手法をいち早く取り入れることによって、非線形性を持つ宇宙の電磁流体力学的活動現象の研究をスーパーコンピュータを用いた3次元時間依存解を追求することによって進めてきたグループである。本共同研究では、天体内部での磁場発生のダイナモ機構を中心とする高プラズマベータ値ダイナミックスの扱いを得意とする英国グループと、実際の天体で観測されている外部でのフレア、ジェット発生等の超高温、高エネルギー活動等の低プラズマベータ値の3次元グローバルモデリング、ダイナミックスで特色ある実績を挙げてきた日本のグループが協力することで、太陽、恒星、および降着円盤における高エネルギー活動現象発生機構の統合的解明を進めることを目的とした。

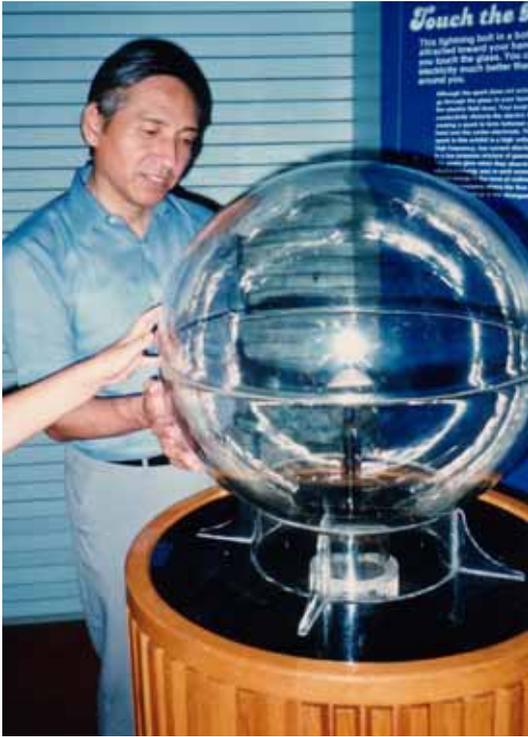
本報告書は、2003年4月から2005年3月までの2年間の研究成果（主に日本側の成果）をまとめたものである。日英双方の研究者を含むレフェリー論文はまだ出ていないが、2年間のうちに、本共同研究プロジェクトを通じて多くの研究成果が得られた。最大の成果は磯部洋明博士らによる浮上磁場の3次元電磁流体シミュレーション研究であろう。世界最高速のスーパーコンピュータである地球シミュレータを駆使することにより、太陽浮上磁場におけるフィラメント構造形成過程を解明するのに成功した。これはコロナ加熱の謎解明に一步せまるものである。論文は2005年3月に英国科学誌 Nature に出版され、新聞などでも広く報道された。その他、磁気対流、浮上磁場と対流の相互作用など、これまで日本のグループで未開拓の分野であった研究も、英国のグループとの交流のおかげで随分と進んだ。

本共同研究プロジェクトは元々、故内田豊教授（当時、東京大学、のち東京理科大）とケンブリッジ大の Weiss 教授の交流がきっかけで始まったものである。その最初のきっかけは平成7年（1995年）5月に内田教授がオーガナイズした国際天文学連合第153回コロキウムであった。その折に招待講演者と

して来日した Weiss 教授と内田教授との懇談で具体的な国際協力への話が始められたのである。その後、両教授の相互訪問が重ねられたのち、それぞれの国で国際共同研究の予算申請が開始された。まず英国側が先に認められ、英国側研究者が2年間にわたり日本（東京、京都、千葉など）を訪問した（2001 - 2002）。ところが、日本側の予算がなかなか認められず、内田教授から私に代表を代わってくれないかと、申請書のコピーが送られてきたのが2002年7月30日。その日からまだ1ヶ月もたたない8月17日の深夜、広瀬博士（当時、東京理科大）からの電子メールで内田教授の急逝を知ることになる。驚きと無念の思いで一杯の中、内田教授の意思を継いで申請書を何とか書き上げ提出した。これが幸い認められることになり、2003年度より、本共同研究プロジェクトが始まることとなった。このように、本共同研究プロジェクトが実現したのは、故内田豊教授のおかげである。ここであらためて謝意を表したい。上にも書いたように、共同研究者たちの努力のかいあって、幸い本共同研究では多くの成果をあげることができた。多少なりとも故内田教授の意思を継ぐことができたと思う。今後もこれをきっかけとして日英の実質的共同研究は続ける予定であり、さらなる成果を出していきたいと思っている。

20年近くに及ぶ内田教授と私との共同研究の最後をしめくくるかのように、内田教授の私への最後の手紙は、上記の本共同研究の代表を引き継いでほしいという手紙であった。本報告書を故内田豊教授に捧げたい。

平成17年（2005年）3月  
研究代表者 柴田一成  
京都大学理学研究科附属天文台・教授・  
同天文台長



故内田豊教授(1986年7月、米国にて)



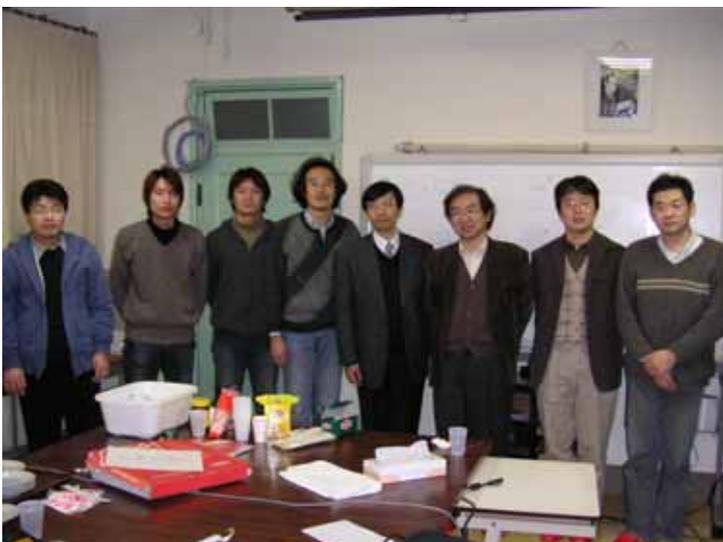
Prof. Weiss と柴田(2004年9月ケンブリッジ大にて)



2003年6月11日、  
本共同研究小研究会の際、  
京大理・宇宙物理学教室  
にて  
(左より、佐野、犬塚、Weiss、  
柴田、磯部)



2003年6月10日、  
うどん屋(近江屋、京都)  
にて  
(左より、横山、宮腰、Weiss、  
草野)



2005年2月24日、  
本共同研究最終報告会の際、  
京大理花山天文台にて  
(左より、田沼、宮腰、磯部、  
横山、松元、柴田、犬塚、  
野澤)

## 目次

はしがき（目的と経緯）

目次

- 1．研究組織
- 2．交付決定額
- 3．相互交流実績
- 4．研究内容
- 5．研究実施状況
- 6．研究成果
- 7．研究協力者の成果報告
- 8．研究発表リスト
- 9．添付資料

## 1. 研究組織

### (1) 日本側研究者

氏名	所属・職名	研究協力テーマ
代表者 柴田一成	京都大学大学院理学研究科・教授	代表、総括
研究協力者 松元亮治	千葉大学理学部・教授	降着円盤・銀河の電磁流体现象
犬塚修一郎	京都大学大学院理学研究科・助教授	降着円盤・銀河の電磁流体现象
草野完也	広島大学大学院先端物質科学研究科・助教授（平成16年9月より、地球シミュレータセンター・グループリーダー）	太陽フレアにおける磁気リコネクション
横山英明	東大大学院理学系研究科・助教授	太陽フレアにおける磁気リコネクション
野澤 憲	茨城大学理学部・助手	太陽・恒星における磁気対流と浮上磁場
磯部洋明	京大大学院理学研究科・博士課程	太陽・恒星における磁気対流と浮上磁場
田沼俊一	日本学術振興会・特別研究員（PD）	太陽フレアにおける磁気リコネクション
宮腰剛広	京都大学大学院理学研究科・附属天文台・機関研究員	太陽・恒星における磁気対流と浮上磁場

### (2) 相手国側研究者

氏名	所属・職名（国名）	研究協力テーマ
代表者 N. O. Weiss	University of Cambridge, Professor	太陽・恒星における磁気対流と浮上磁場
研究協力者 M. R. Proctor	University of Cambridge, Professor	太陽・恒星における磁気対流と浮上磁場
G. I. Ogilvie	University of Cambridge, Royal Society VRF	降着円盤・銀河の電磁流体现象
D. W. Hughes	Leeds University, Professor	太陽・恒星における磁気対流と浮上磁場
S. A. Falle	Leeds University, Professor	降着円盤・銀河の電磁流体现象
S. M. Tobias	Leeds University, Lecturer	太陽・恒星における磁気対流と浮上磁場

2. 交付決定額 (金額単位：千円)

平成15年度	2,500
平成16年度	2,500
総計	5,000

3. 相互交流実績

(1) 研究期間中に相手国を訪問した日本側参加者氏名、派遣期間、主たる訪問先

氏名・所属	期 間 (現地到着日～現地出発日)	主たる訪問先
磯部洋明・京大理	2003年7月16日 7月28日	ケンブリッジ大学他
犬塚修一郎・京大理	2003年8月5日 8月20日	〃
柴田一成・京大理	2003年9月28日 10月1日	〃
松元亮治・千葉大	2003年11月23日 11月29日	〃
野澤 恵・茨城大理	2004年2月26日 3月7日	〃
柴田一成・京大理	2004年6月21日 6月26日	マラード宇宙科学 研究所
横山央明・東大理	2004年7月31日 8月14日	ケンブリッジ大学
草野完也・地球シミュレータ	2004年8月8日 8月13日	〃
磯部洋明・京大理	2004年9月4日 9月20日	〃
柴田一成・京大理	2004年9月20日 10月2日	〃
計 10名(延べ人数)	計109日	

(2) 研究期間中に受け入れた相手国参加者氏名、来日期間、主たる訪問先

氏名・所属	期 間 (来日日～離日日)	主たる訪問先
N. O. Weiss	2003年6月9日 14日	京都大学花山天文台、同理学部宇宙物理学教室、および東京大学理学部地球惑星物理学教室
計 1名(延べ人数)	計 6日	

(3) 2003年以前に受け入れた相手国参加者氏名、来日期間、主たる訪問先

氏名・所属	期間	主たる訪問先
D. W. Hughes	2001年11月4日 14日	京都大学花山天文台、同理学部宇宙物理学教室、東京理科大学、千葉大学
M. R. Proctor	2002年1月14日 24日	"
S. M. Tobias	2002年4月5日 15日	"
N. O. Weiss	2002年4月13日 22日	"
S. Oglivie	2002年12月9日 18日	京都大学花山天文台、同理学部宇宙物理学教室、千葉大学
D. W. Hughes	2003年3月6日 15日	"

#### 4 . 研究内容

2006 年打ち上げの Solar B 衛星の観測により、磁気対流、浮上磁場、コロナ加熱、磁気リコネクションなどの研究が大きく進展すると予想されるが、その成果を最大にするためにも、今この時期にこれらの電磁流体過程について重点的に研究するのが重要である。このことを考慮し、以下の研究を進めた。また、類似の物理過程が現れる降着円盤の電磁流体力学についても研究を進めた。

##### a) 太陽浮上磁場と磁気対流

太陽活動の始まりは対流層から浮上してくる磁束管（浮上磁場）である。したがって、コロナやフレアなどの太陽活動を解明するには、浮上磁場の物理を解明することが不可欠となる。本研究ではまず、磁場を含まない対流の準定常モデルの構築を行い、次に、パーカー不安定性により浮上しつつある磁束管と対流の相互作用、さらに、浮上磁場とコロナ磁場の間で起こる磁気リコネクションを、2次元および3次元電磁流体数値シミュレーションにより調べた。

##### b) 太陽フレア・コロナ質量放出における磁気リコネクション

太陽 X 線観測衛星「ようこう」によって太陽フレアが磁気リコネクションによってエネルギーを解放していることが明らかになったが、リコネクション説が予言する流れや衝撃波が見つかっていなかった。本研究では、2次元電磁流体数値シミュレーションを用いてコロナ質量放出をともなうフレアの磁気リコネクション・モデルを構築し、シミュレーション結果を元にして、2006 年打ち上げ予定の SolarB 衛星搭載の X 線望遠鏡や極紫外線撮像分光装置などで観測されるリコネクションにともなう流れや衝撃波の X 線、極紫外線強度分布を計算した。

##### c) 降着円盤における電磁流体力学過程

降着円盤における粘性の起源としての磁気回転不安定性の非線形発展、それによって発生する電磁流体乱流、磁気リコネクション、さらには、降着円盤から噴出するジェットなど、これらの物理過程は太陽で発生している電磁流体力学過程と共通している。これらの電磁流体力学過程の研究を太陽の電磁流体力学過程と比較しながら進めた。

## 5 . 研究実施状況

### 平成 1 5 年 ( 2003 年 ) 度

6 月に Weiss 教授が来日し、今後 2 年間の日英の共同研究について全般的な議論、打ち合わせをした。

これに合わせて6 月 11 日に京大理・宇宙物理学教室で “ Study of Nonlinear Magneto-Plasma Dynamics in the Sun, Stars, and Accretion Disks ” というタイトルの小研究会を開いた ( 参加者 : Weiss, 柴田、横山、草野、磯部、宮腰、犬塚、ほか )。

7 月に磯部が渡英し、太陽の磁気対流、浮上磁場に関する 3 次元 MHD シミュレーションについて ( 特に技術的な面について ) 共同研究打ち合わせを入念に行った。

8 月には犬塚が渡英し、降着円盤の磁気回転不安定性の非線形飽和過程について、共同研究打ち合わせを行った。

9 月末には柴田が渡英し、全般的な共同研究、とくに太陽の磁気対流、浮上磁場に関する 3 次元 MHD シミュレーション研究の今後の方針について、詳しい打ち合わせを行った。

1 1 月には松元が渡英し、主に降着円盤に関連して、双方で得られ始めた結果に関してディスカッションを行った

12 月には野澤が京大を訪問し、太陽の浮上磁場の 3 次元 MHD シミュレーションに関して、詳しい共同研究打ち合わせを行い、それに基づいて、野澤は翌年 2 月に渡英し共同論文執筆などに関する議論および打ち合わせを行った。

## 平成16年(2004年)度

6月には柴田が渡英し、マラード宇宙科学研究所における国際会議"Exploring the X-ray Universe: hot plasma in space"において、招待講演 "MHD modeling of flares and jets in the Sun, stars, and accretion disks"を行い、本プロジェクトの研究成果を発表した。

7月29日に、花山天文台で本プロジェクトの小研究会(中間発表会)を開催した。参加者は、柴田、野澤、磯部、犬塚、草野、田沼、松元、宮腰、横山、ほか。

横山と草野は8月に渡英し、ケンブリッジ大学、Isaac Newton Institute program "Magnetic Reconnection"に参加し、太陽フレアにおける磁気リコネクションに関して共同研究を推進した。

磯部は9月に渡英し、磁気対流や浮上磁場のシミュレーションに関して、英国側と共同研究を推進した。また、Isaac Newton Institute program "MHD in Stellar Interiors" (本プロジェクトの英国側のWeiss教授とHughes教授が世話人)中の国際会議で、浮上磁場に関するシミュレーション研究の成果を発表した。

柴田は9月にケンブリッジ大学、Isaac Newton Institute program "MHD in Stellar Interiors"に参加し、"Modeling of Magnetic Activity in the Sun, Stars, and Accretion Disks"と題する招待講演を行い、本プロジェクトの共同研究の成果の一部を紹介するとともに、Weiss教授、Hughes教授らと共同研究打ち合わせを進めた。

2月24日に、京大花山天文台において本プロジェクトの最終報告会を開催した。参加者は、柴田、野澤、磯部、犬塚、田沼、松元、宮腰、横山、ほか。

## 6. 研究成果

### a) 太陽浮上磁場と磁気対流

太陽活動現象の発生機構を解明するには、対流層から彩層、コロナまで含む領域における磁場の浮上と対流との相互作用を明らかにする必要がある。本研究では、光球面の放射冷却と計算領域下部の加熱を仮定し、対流が継続する条件下での磁気シートや磁束管の彩層、コロナへの浮上を、世界で初めて 3 次元 MHD 計算した。その結果、磁場が対流によって変形を受けながら浮上する様子や、光球面での強い磁束管の形成、磁場により対流のセル(粒状斑)が小さくなる様子などを再現するのに成功した。(2003 年 9 月天文学会秋季年会と 2003 年 11 月の 5th SolarB meeting にて発表, see Isobe et al. (2005))。一方、H 線観測によれば、浮上磁場領域は筋状構造をしていることが知られているが、その形成メカニズムは謎であった。本研究では世界最高速の地球シミュレータを駆使することにより、筋状構造を再現することに成功し、その形成メカニズムが磁氣的レイリーテイラー不安定性であることを突き止めた。また同時に電流シートがフィラメント状に発達することもわかった。これは、非一様、非定常的にコロナが加熱されるというナノフレア説と良く一致する。この成果は 2004 年 9 月の Isaac Newton Institute における国際会議などで報告され、高い評価を受けた。さらに、2005 年 3 月 24 日発行の英国科学誌 Nature に掲載され(Isobe et al. (2005) Nature 434, 478)、新聞などで報道された(添付資料参照)。

### b) 太陽フレア・コロナ質量放出における磁気リコネクション

我々は熱伝導とカップルした磁気リコネクションを解くことにより、巨大アーケードに付随するコロナ質量放出の 2.5 次元電磁流体数値シミュレーションを行なった。シミュレーション結果に基づいて、Solar B (2006 年打ち上げ予定) 搭載の X 線望遠鏡 (XRT) および極紫外線撮像分光装置 (EIS) によって観測されるであろう画像を理論的に計算し、リコネクションの証拠となるスロー衝撃波やファースト衝撃波、さらにリコネクション・インフローやアウトフローの検出にはどのような観測が必要か理論的に検討した。(2003 年 11 月 5th Solar B meeting にて発表, see Brooks et al. (2005), Shiota et al. (2005))

### c) その他の太陽、恒星、降着円盤における電磁流体力学過程に関する研究

太陽に関する諸研究 (Alfven 波によるコロナ加熱、コロナにおける電磁流体衝撃波、磁気ヘリシティ注入と太陽フレア発生の関係など) のほか、恒星、降着円盤における電磁流体過程に関しても多くの成果をあげた (準周期振動、ジェット、磁気乱流、フレアなど)。(研究発表リスト、添付資料参照)