

「ひので」—実験室プラズマ共同研究による 彩層ジェット再現実験に成功



西 塚 直 人

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所太陽系科学研究系 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉

e-mail: nishizuka.naoto@jaxa.jp

太陽観測衛星「ひので」の彩層観測は、小さな彩層爆発が恒常的に発生し、ジェット現象（高速ガス流）や波動に満ちたダイナミックな世界を明らかにした。何が彩層ジェットを引き起こしているのかを解明するため、世界で初めて地上実験室のプラズマ実験装置を用いて再現実験を試みた。観測から推定された磁場形状を実験装置内で模擬し、磁気リコネクションに伴う時速2万キロメートルのジェット、約3万度まで急速に加熱されるガス、そして磁場の激しい振動（波動）を観測することに成功した。これらの発見はコロナ加熱機構の解明に向けて重要な知見をもたらしたが、その一方で実験で再現されるミクロなスケールよりも何桁も大きなスケールで起きる太陽ジェットの特徴を説明しきれない面があることも明らかになった。これは従来の完全電離プラズマのミクロな物理だけでは太陽彩層を再現しきれないことを意味し、新たな課題をわれわれに突き付ける。

1. 「ひので」で発見されたダイナミックな彩層磁気活動

太陽は私たちにさまざまな恵みを与えてくれますが、静穏に見えるこの太陽も、その表面ではさまざまな活動現象が見られます。私たちの目に見える太陽表面は「光球」と呼ばれますが、そこに見られる黒点も、太陽活動現象の一つの現れです。光球の上空には「彩層」と呼ばれる薄い層があり、さらにその外側には「コロナ」が広がっています。

太陽では、1,500万度もある中心核の熱が放射や対流によって表面に伝わり、光球では6,000度に下がります。ところが、そこを通り過ぎると逆に表面から遠ざかるほど高温になり、コロナでは100万度を越えることが知られています。熱源か

ら離れるほど熱くなるというこの逆転現象は「コロナ加熱問題」として知られ、これを解き明かすことが太陽研究の長年の課題となっています。

これらの問題に挑むため、JAXA/国立天文台が2006年に打ち上げた太陽観測衛星「ひので」は、陽炎（かげろう）のない宇宙空間から太陽を詳細に観測しています。「ひので」衛星¹⁾は、軟X線、極端紫外線、可視光の三つの望遠鏡で太陽を観測し、6年に及ぶ観測を通じて、光球からコロナにおける活動的な姿を観測してきています。特に、可視光磁場望遠鏡は、光球の上空にある彩層を見ることが出来る波長（Ca II H線^{*1)}）の画像観測によって彩層中で頻発する微小な爆発現象を観測し、それに伴って大小さまざまな形態の彩層ジェット（ガス噴出現象）と波動（磁気揺動）が発生していることも発見しました²⁾⁻⁶⁾。これら

*1 太陽大気に含まれるCa⁺イオン（Ca II）によるスペクトル線の一つ。H線とは太陽吸収スペクトル線観測で発見したフラウンホーファーが命名したもの。波長は397ナノメートル（青色域）。

の予想外に動的な彩層の発見は、コロナ加熱などの解明の鍵になると期待され、彩層は今後重点的に観測研究すべき領域として認識されるようになりました。また、彩層活動を説明するものとして、彩層磁場が大きな役割を果たしていると考えられています。

2. 彩層ジェットをプラズマ実験室で再現する

一般に太陽フレアやジェット現象は、黒点などの太陽磁場の磁力線がつなぎ替わるときに、磁場がもつエネルギーが熱や運動エネルギーに急激に変換されて解放される現象であると考えられています。この磁力線のつなぎ替わる素過程を磁気リコネクション（磁気再結合）と呼び、実験室プラズマと同様の物理現象が起きていると考えられています。

太陽表面で起きているこのような現象を理解するために、「ひので」のような高性能の望遠鏡を用いて詳しく観測する「観測的手法」と、スーパーコンピューターなどを用いて現象を理論的に予想する「理論的手法」とを組み合わせた研究が進められてきました。「ひので」によって初めて太陽表面の3次元光球磁場の精密な観測ができるようになり、太陽彩層中で恒常的に発生する彩層ジェット（図1）の3次元磁場形状が初めて推測可能になりました⁷⁾。しかしながら光球面でしか磁場を観測できない「ひので」では磁場の立体構造（特に高度方向の構造）を正確に把握することは難しく、また長い露光時間も必要で短時間の磁場形状変化をとらえることができません。さらに遠方観測のため、彩層中でのプラズマの物理状態やマイクロなスケールでの振る舞いを知ることもできないという課題もあります。

今回行った研究は、彩層ジェットに類似な磁場構造をプラズマ実験装置にて模擬し、彩層での加熱とジェット現象とを地上実験室で再現することを世界で初めて試みたものです。「ひので」によ



図1 太陽観測衛星「ひので」がとらえた彩層ジェットの例。太陽表面での活動現象としてフレアやプロミネンス（紅炎）があるが、フレアが主に黒点周辺での磁力線のつなぎ替えによる大規模な爆発現象であるのに対し、彩層ジェットは上昇流を伴う規模が小さな爆発現象である。また、プロミネンスは彩層ガスがコロナ中に浮かんだ大規模な構造である。

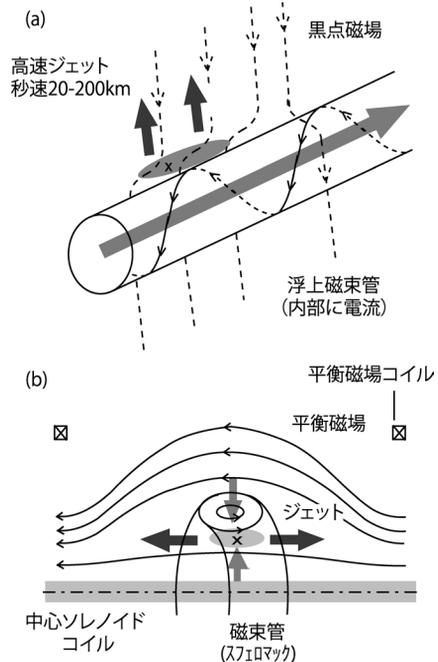


図2 彩層ジェット（ライトブリッジにおける光球磁場観測による磁場推定）とプラズマ実験室でのスフェロマック磁場配位との比較。どちらも磁束管が浮上や外圧による移動の際に、外部磁場と磁気リコネクションを起こす。

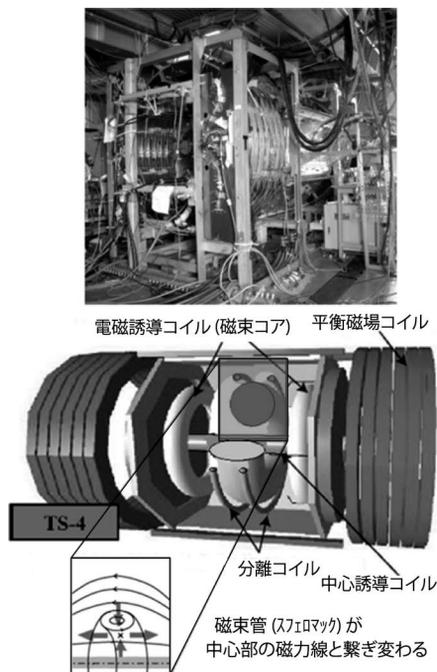


図3 東京大学のTS-4球状トーラス実験装置. コイルに電流を流すことで、放電ガスの中に磁場を作り、ドーナツ状に集まった約1-100万度のプラズマを装置内に作るができる。さらに、それを複数生成して合体させることもできるため、磁気リコネクションの実験的な検証や、その応用としての核融合プラズマの急速加熱・電流駆動を検証できる。©東京大学

東京大学TS-4球状トーラス実験装置

今回の実験では、東京大学TS-4球状トーラス実験装置⁸⁾⁻¹⁰⁾(図3)を用いて装置内の強い磁場に閉じ込められたドーナツ状のプラズマを作り、周囲の磁力線と近接させることで磁気リコネクションを発生させました。TS-4球状トーラス実験装置は、コイルに電流を流すことで放電ガス中に磁場を作り、スフェロマックなど内部電流系球状トーラスと呼ばれるドーナツ状に集まった高温プラズマ(約1-100万度)を真空槽内に作ります。さらに複数の球状トーラスを生成させることができ、それら複数トーラスの軸方向合体実験を行うことができます。そして、この合体実験によって磁気リコネクションの実験的な検証や、磁気リコネクションの応用として核融合プラズマの急速加熱と電流駆動を検証することができます。

今回の実験では、磁気リコネクションで起きるエネルギー変換をとらえるため、輝線分光装置によるドップラー速度とイオン温度の計測、マッハプローブを用いたプラズマ流速の直接計測、さらに磁気プローブを用いた磁場の時間変動を高速に測定する低周波計測器を新たに導入しました¹¹⁾。

3. 再現実験で明らかになったこと

東京大学本郷キャンパスの工学研究科の実験室に通い、彩層ジェット再現実験に取り組みました。磁気リコネクション実験装置は非常に強い電流と磁場を扱うため、実験制御は実験装置と隔離された隣の部屋で行います。まず真空槽内に水素やアルゴンといったガスを充填させた後、コンデンサーに電圧を蓄積します。そしてその高電圧を一気に放電することでプラズマを生成し、600マイクロ秒という短時間の間にトーラスを形成、合体、そして生成されたスフェロマック磁場と周囲の磁場とによる彩層ジェット配置での磁気リコネクションを起こします。実験開始の合図とともに、「パンッ」という音が隣の制御室にも鳴り響きます(放電の音で、磁気リコネクションの音は

る彩層ジェットの推定磁場構造はプラズマ実験装置で発生する磁場形状に類似していることがわかり(図2)、さらにプラズマ実験における診断技術の進歩もあって、地上プラズマ実験装置にて太陽の活動現象に類似な現象を再現させ、プラズマを直接計測する新たなアプローチが初めて可能になりました。至近距離から計測が可能なプラズマ実験装置を用いることで、「ひので」の観測では特定が難しい磁場の3次元立体構造や短時間変動、プラズマ状態(温度、密度、速度や電気抵抗値)のマイクロなスケールでの振る舞いを診断することが可能になり、素過程研究の新たな道が切り拓かれました。

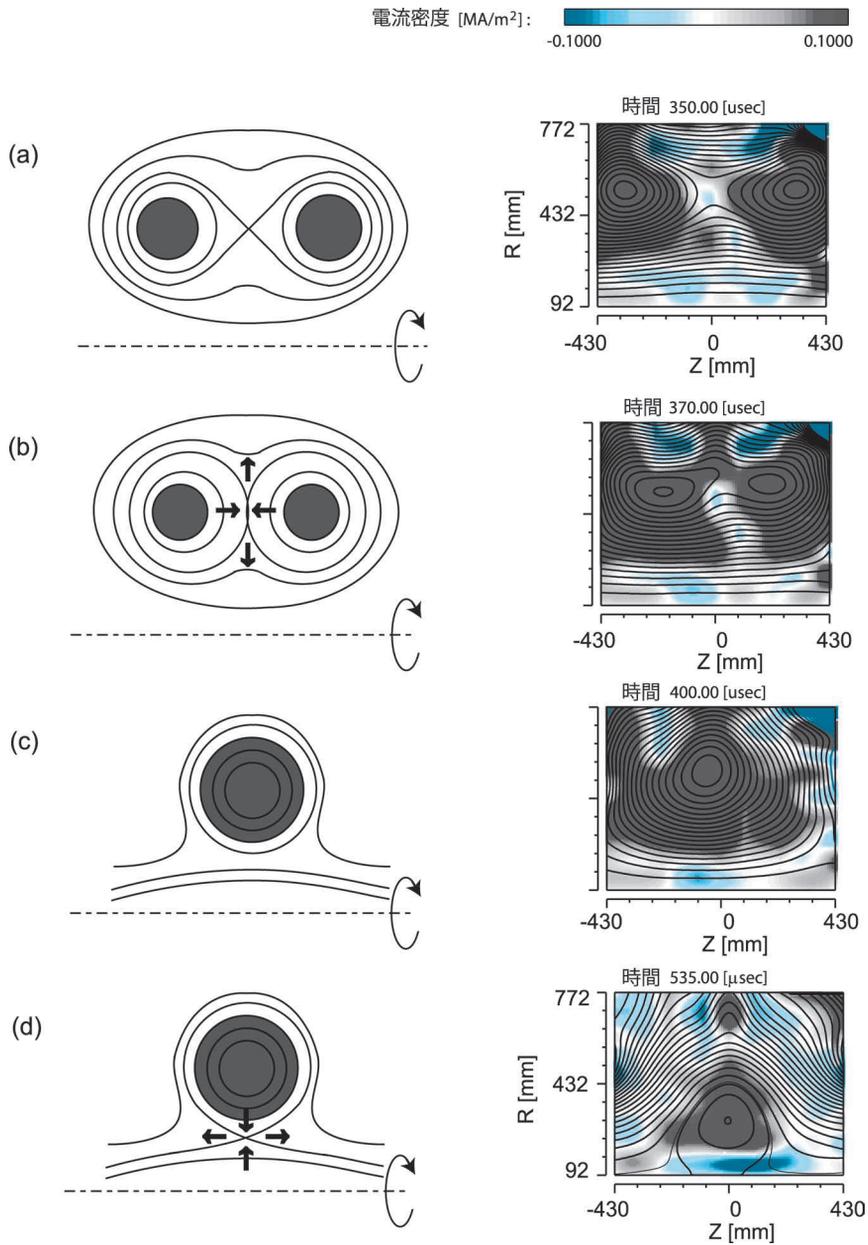


図4 (左図) 実験中の磁力線のつながり替わりの時間発展の模式図. プラズマの密度の高い部分を着色. (右図) 実際の磁場測定結果. 線は磁力線を表し, 紙面垂直方向の電流を黒青スケールで表示. 青色部分は電流シートを表す.

聞こえません). 充電電圧や放電のタイミングを変えながら彩層ジェットを再現する最適の条件を施行錯誤で探し出し, さらに再現性の確認のために何度も実験と測定を繰り返しました. なお太陽彩層の状況を模擬するため, プラズマの密度や温

度, 磁場強度を近い値になるように調整しました. しかし電離時間を長時間維持することが難しく, 今回弱電離という環境は再現できず, 完全電離プラズマの条件下で実験を行っています.

実験結果を図4(右側)に示します. 黒線は磁

力線を表し、青色が紙面垂直奥行き方向の電流、すなわちリコネクション電流シートを表しています。二つのトーラスが合体してスフェロマック磁場配位が形成された後、装置の中心ソレノイドコイルに電流を流して内部から新しい逆向きの磁場を生成し、互いに反平行磁力線の間で磁気リコネクションを観測します。磁気リコネクションによってスフェロマック磁場は消耗し、縮小していきます。この間、以下に示すように磁気リコネクション理論が予測するような双方向ジェットとイオン・電子の加熱、そして磁気揺動（波動）と古典抵抗を上回る大きな抵抗とが検出されました。

1) 磁気リコネクション双方向ジェットの測定

実験装置の窓に取り付けた23チャンネルの光ファイバーにつながった分光器によって、プラズマが発する輝線観測から、いろいろな角度から見た視線方向ドップラー速度を見積もりました¹²⁾。この実験ではアルゴンの輝線を用いました。その時の視線方向と測定結果を図5に示します。磁気リコネクションが軸対称で起こっていると考えたときに、対称軸を含む2次元面を走査するように分光器を配置し、軸方向の中心部を境に正反対方向の外向きに流れるアウトフローを観測しました。ドップラー速度から見積もられる最大速度は秒速3-5キロメートル程度で、アルフヴェン速度や音速よりも小さな値です。速度は中心部から外側に向かって単調に増加するのが観測されました。

またこの結果を裏づけるために、マッハプローブを用いた独立な方法でプラズマの速度を直接計測しました。マッハプローブはその場観測により一方方向のイオン速度を測定可能な計測器です。ただ計測点が一度に一つしかとれず、各ショットで位置をずらしながら計測しました。結果は図6(b)に示すように分光測定結果と定性的に一致するものでした。反平行磁場の接触する領域の近傍を始点として双方向ジェットが観測されたことは、磁力線のつなぎ替わりによって左右にプラズ

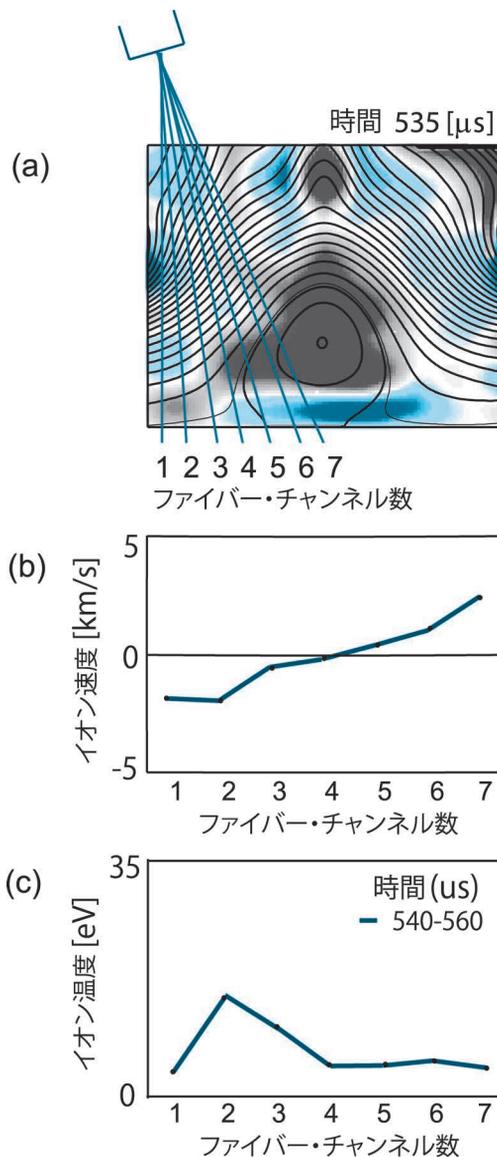


図5 (a) スフェロマック磁場と分光器の視線方向の位置関係 (青線: 1-7チャンネル). 8-23チャンネルは中央真上と右側から. (b) (c) イオン流速とイオン温度の測定結果.

マが加速されたことを意味しており、彩層条件下での磁気リコネクションの発生の証拠として考えられます。しかしながら定量的には、分光器の視線方向成分やマッハプローブの測定方向成分を補正したとしても、理論で予測される速度よりも非常に小さな値となりました。運動エネルギーは、

解放磁気エネルギーに比べ3桁も小さな値であり、本実験結果では太陽観測や理論から予測されるほど十分に加速されていないことを意味しています。

2) 磁気リコネクションによるプラズマ加熱

軸対称を仮定すると、分光測定結果の輝線プロファイルからイオン温度を求めることもできます。図5(c)は求めたイオン温度分布を示しています。ちょうど高速ジェットが両端の境界にぶつかる手前あたりで、1万度から約3万度まで加熱が起きていることが観測されました。これは推定される磁場の解放エネルギーのうちの1割程度が熱エネルギーに変換されたことに該当し、次の節で述べる波のエネルギーとほぼ同じ大きさだとわかりました。加熱の原因の究明はまだ十分にされていない状況ですが、加熱の場所と時間から両端近くに形成されたファーストショックか、異常粘性などで加熱が起きたのではと解釈しています¹³⁾。

一方で電子の温度は静電プローブで測定され、リコネクション電流シート内で上昇していることがわかりました¹³⁾。この電子の加熱も磁気リコネクションに伴うものであり、磁場のエネルギーが電子の熱に変換されたと考えられます。ただし問題は電子とイオンの加熱場所や加熱時間が異なることで、これは彩層のような高密度条件下においてもイオンと電子とが異なった過程において加熱されていることを示す発見です。

こうした電子やイオンの温度計測は「ひので」の可視光撮像観測ではできず、極端紫外線分光装置による観測でも難しいことで、太陽観測による増光とプラズマ加熱との関係を探る貴重な結果です。同時に、数値シミュレーションのモデルの検証にも役立つと期待されます。

3) 磁気リコネクションに伴う波動の発生

磁気リコネクション電流シートに垂直な方向に、磁気揺動(波動)を検出するための磁気プローブ¹⁴⁾を複数設置しました(図6)。二つのトーラスが合体するとき、彩層ジェット・リコ

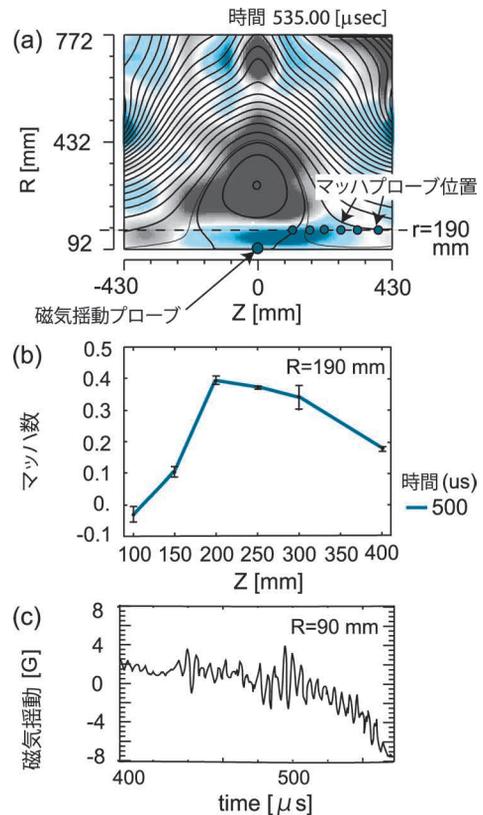


図6 (a) 磁場測定結果とマッハプローブ、磁気(揺動)プローブ配置場所。(b) マッハプローブによるイオン速度の直接測定と(c) 磁気プローブによる磁気揺動の計測結果。

ネクションの起きるときの2回、磁気揺動を検出することに成功しました。磁気揺動の周期は5-10マイクロ秒の振幅が最も大きく、イオンジャイロ周期程度か少し小さい値です。ここで単純に太陽と実験室の系の大きさの比でスケールリングしてやると、周期は50-100秒程度となり、太陽観測値と近い値になります。

磁気揺動は電流シート内で観測され、トーラス合体の際には磁力線に沿った方向に波動が伝播していくのが観測されました。波動の伝播を仮定して、彩層リコネクションに伴う波動のエネルギー流束を見積もったところ、解放エネルギーの1割程度に相当します。これらは、解放エネルギーの

一部が波を励起していることを示しています。波がコロナを加熱しているのではというコロナ波動加熱説がありますが、それに必要な波の発生源に磁気リコネクションもなりうるということを示す貴重な実験結果であると考えられます。さらに同様の波が至るところで励起されていると仮定すれば、コロナ加熱に必要なエネルギー量が磁気リコネクションにより励起された波の伝播だけで説明することもできます。

4. 今後期待される成果

今回行った彩層ジェットの実験は、「ひので」観測研究グループとプラズマ実験研究グループが共同で行った初めての試みです。太陽物理研究者がプラズマ実験装置での実験に参加することで得られた初めての成果で、太陽研究にとって、太陽観測だけでは決して知ることのできないマイクロなスケールでの振る舞いについて新しい知見を得ることができました(図7参照)。今回測定されたプラズマ加熱や波動の発生は、コロナ加熱を解く重要な手がかりとなるかもしれません。

一方で、今回の実験装置内で観測されたプラズマのマイクロな振る舞いのみでは、実際に観測される太陽ジェットの特徴を定量的に説明できないこ

とも明らかになってきました。例えば、再現されたジェットの速度は、実際に太陽で観測される速度に比べて、非常に遅い点です。実際の太陽ジェットは秒速30-200キロメートルと非常に高速ですが、実験では秒速3-5キロメートル程度までしか再現できていません。この大きな相違は、何桁も大きな巨大なスケールで起きる太陽ジェットとの空間スケールの違いや、電離度の違いが関係しているのではないかと想像しています。

これを踏まえ、今回開拓された実験的手法に基づく研究をさらに進め、観測的手法による磁気リコネクションの直接的証拠の検出や理論的手法を補うことができれば、ダイナミックな太陽活動やコロナ加熱問題の理解が大きく進むと期待されます。今後の太陽観測は、より小さなスケールのダイナミクスをとらえるための高解像度化や彩層磁場の直接計測など新しい診断を可能とする観測を推進することが重要です。そして、今後も太陽観測研究と実験室プラズマに基づく研究の相互理解を積み重ねることで、さらに上述の課題を克服し、ダイナミックな太陽活動の源泉やコロナ加熱のいっそうの究明につなげたいと考えています。

謝 辞

本研究は、JAXA宇宙科学研究所の清水敏文氏、東京大学新領域創成科学研究科の小野靖氏、井通暁氏、林由記氏、田辺博士氏、桑波田晃弘氏、神納康宏氏ら共同研究チームをはじめ、協力くださった東大小野研究室のTS-4実験チームのメンバー、真柄哲也氏ら多くの共同研究者らに支えられて進めてきました。ここに改めて感謝を申し上げます。また本研究は、日本学術振興会の先端研究拠点事業「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」(課題番号: 22001, 拠点機関: 東京大学大学院新領域創成科学研究科, コーディネータ: 小野靖教授)に基づく共同研究により実現しました。

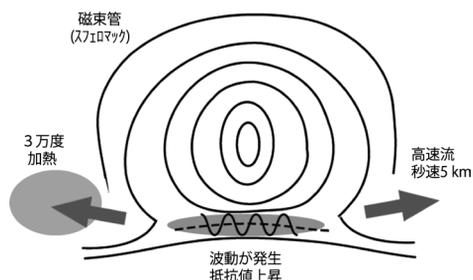


図7 実験装置で再現された現象の模式図。黒線は磁力線を表す。磁束管と下側の磁力線間に電流シートが作られ、磁気リコネクションが起きている。観測された現象は、外側ほど加熱が大きく、中心で波動の発生と抵抗の上昇が起き、外側で加熱が起きるなど、太陽彩層で起きている現象と類似している。

参考文献

- 1) Tsuneta S., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 167
- 2) Shibata K., et al., 2007, Science 318, 1591
- 3) Katsukawa Y., et al., 2007, Science 318, 1594
- 4) Nishizuka N., et al., 2008, ApJ 683, L83
- 5) Nishizuka N., et al., 2011, ApJ 731, 43
- 6) Singh K. A. P., et al., 2011, Phys. Plasmas 18, 111210
- 7) Shimizu T., et al., 2009, ApJ 696, L66
- 8) Ono Y., et al., 1993, Phys. Fluids B 5, 3691
- 9) Yamada M., et al., 1997, Phys. Plasmas 4, 1936
- 10) Kawamori E., et al., 2005, Phys. Rev. Lett. 95, 085003
- 11) Nishizuka N., et al., 2011, ApJ 756, 152
- 12) Tanabe H., et al., 2010, Inst. Electr. Eng. Japan Trans. Fund. Mater. 130, 772
- 13) Ono Y., et al., 2011, Phys. Rev. Lett. 107, 185001
- 14) Kuwahata A., et al., 2011, Plasma Fusion Res. Rapid Commun. 6, 1201127

A Laboratory Experiment of Magnetic Reconnection: Outflows, Heating, and Waves in Chromospheric Jets

Naoto NISHIZUKA

*Institute of Space and Astronautical Science/
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa
252-5210, Japan*

Abstract: Hinode observations have revealed various and dynamic plasma ejections or jets in the chromosphere. We reproduced their magnetic configurations using a laboratory experiment and investigated their dynamics for the first time, such as outflow, heating and wave generation triggered by magnetic reconnection in the chromosphere. We succeeded in reproducing chromospheric jets qualitatively, but quantitatively not. These results may indicate important roles of reconnection for coronal heating and jet activity and also suggest the difference of macro/microscopic physics and contribution from neutral particles in the chromosphere.