

磁力線の可視化で分かったプラズマの流れを妨げる磁場の乱れ

稲垣 滋・居田 克巳

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) において、磁場で閉じ込められた高温プラズマが流れる様子を精密に観測し、磁気面の壊れ (ストキャスティック化) が流れを堰止めることを世界で初めて観測しました。この大発見にいたるまでの実験・解析技術の創意工夫や共同研究の役割と重要性についてお話しします。

プラズマの流れ

磁場閉じ込めプラズマでは、しばしば流れが生じます。トロイダル磁場のように磁力線が閉じた系では、上流と下流の区別が無くなり、プラズマの流れはぐるりと回って戻ってくるので、プラズマが回転しているように見えます。ちょうど鍋の中の水を一方にグルグルと回した時のような状態に似ています。鍋の場合は人間の力で水を回しています。プラズマの場合、外から力 (中性粒子ビームの入射等) を加えれば回転するのはもちろんですが、外からの力が無くても加熱すると自然と回り始めます。この自発回転というのは高温プラズマでの特徴的な現象といえます。このプラズマの回転 (流れ) は、閉じ込めの改善や安定性を向上する役割を担っており [1]、プラズマ核融合のためにはプラズマを回転させることが重要です。このため、プラズマの自発回転形成のメカニズムを解明することが必要になります。さて、回転 (流れ) の形成機構の解明というと回転を駆動する機構に注目しがちですが、同様に回転を妨げる機構も重要です。LHD では回転を妨げる機構に着目し、それほど重要では無いと 30 年前から思い込んできたことが実は大きな影響を及ぼすことを明らかにしました。

磁場の乱れ

LHD のようなトロイダルプラズマ閉じ込め装置では、磁力線で作った磁場の入れ物にプラズマを閉じ込めます。この磁場の入れ物では、一本の磁力線から磁気面を作ります [2]。LHD では図 1(a) のような入れ子状の磁気面構造でプラズマを閉じ込めます。プラズマは磁気面を横切るようには動きにくいですが、磁気面上では比較的自由に動ける

るので、磁気面に沿ったプラズマの流れを妨げる力は小さいです。しかし、このきれいな磁気面構造が壊れることがあります。外部から与えられた、あるいは自ら作り出した小さな摂動により、磁場が乱れ、磁気面が壊れるのです。図 1(b) のような状態になると、プラズマは流れにくくなることが予想されていました [3]。

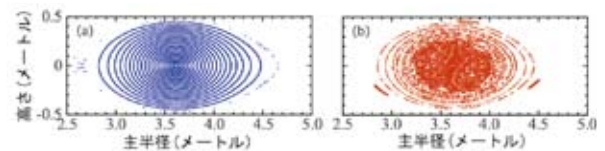


図1 LHDの磁力線構造の二次元切断面 (a) 入れ子状の磁気面が形成されている場合、(b) 磁気面が壊れている場合。

磁力線を見る？

プラズマがどのくらい流れにくくなるかを研究するためには、磁気面構造が壊れているかどうかを確認しなければなりません。図 1(b) は数値計算の結果であり、まだ誰も確かめたことはありません。目では見えない磁力線をどうやって見るのか？というのが問題になります。また、高温のプラズマは直接接触することもできないので、リモートセンシングすることになります。私たちは、九州大学との共同研究として、熱パルスの伝搬の様子から磁力線構造を可視化する実験解析法の開発を行ってきました。プラズマの中心部の加熱を 1 秒間に 25 回程度の頻度で on/off を繰り返して、中心部の温度を変動させます。この温度変動 (熱パルス) は、中心からプラズマの端へと伝搬します。高温プラズマでは、熱は磁力線を横切るようには伝わりにくいので、きれいな入れ子状の磁気面構造ができていると、図 2(a) のように熱パルスの伝搬には数ミリ秒かかります。一方で、熱は磁力線に沿っては 1 万倍以上速く伝わります。このため、パルスが速く伝搬している部分は磁力線がつながっている、といえます。図 2(b) でも、時間差が無くパルスが伝搬している領域が見えます。この領域は磁気面が壊れて磁力線がつながってしまっています。このよ

うにして、本来不可視な磁力線を、熱パルスによって可視化することによって、実際に“磁気面が壊れている”ことが観測できるようになりました。

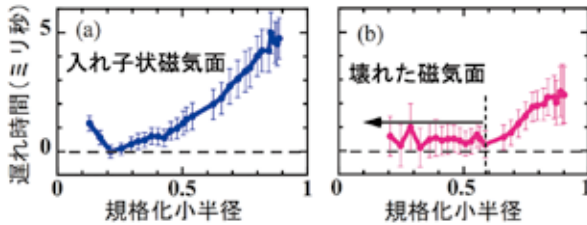


図2 熱パルス到来の遅延時間分布 (a) 入れ子状の磁気面が形成されている場合、(b) 磁気面が壊れている場合。加熱のon/offをしている場所は規格化小半径で0.2の位置。

予想を超える大ブレーキ

さあ、これでプラズマの流れのブレーキ機構を研究する準備が整いました。LHDで磁気面を壊すとブレーキがかかり、流れは小さくなるだろう、と予想して実験しました [4]。結果を図3に示します。なんと、予想をはるかに超えて流れがほとんど止まってしまいました。計算してみると、30年来信じられてきた理論よりも7倍強力なブレーキがかかっていることが明らかになりました。さらに、ブレーキの性質も変わっていると指摘されています。理論が提唱する流れの摩擦力(粘性)が大きくなった訳ではなさそうです。磁場の乱れがブレーキを生み出しているのは明らかですが、その基礎過程については更なる研究が必要です。

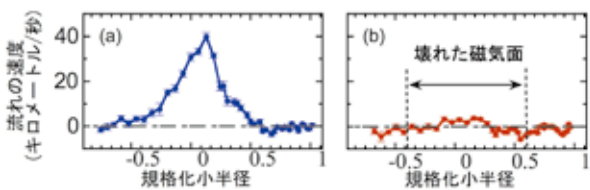


図3 プラズマの流れの径方向分布 (a) 入れ子状の磁気面が形成されている場合、(b) 磁気面が壊れている場合。

おわりに

本研究で、プラズマの流れを阻害する要因の一つが明らかになりました。この要因を取り除いて磁気面と流れを制御することで、プラズマの閉じ込め性能の向上が期待できます。プラズマの流れのブレーキ機構は、星の形成過程にとっても重要です [5]。今回発見した磁場の乱れによるプラズマの流れの

ブレーキ機構は、もしかしたらブラックホールの形成にも一役買っているかもしれません。

本成果はネイチャーコミュニケーションズに掲載され [6, 7]、「注目の論文」として取り上げられました [8]。本研究の一部は、九州大学応用力学研究所及び核融合科学研究所の共同研究によってサポートされました。ここに感謝の意を表します。

稲垣 滋 (九州大学 応用力学研究所 教授)

(核融合科学研究所 客員教授)

居田克巳 (高温プラズマ物理研究系 教授)

- [1] 鍋を加熱した場合も、回転させると急に温度が上がります。
- [2] 糸から布を作るのに似ています。
- [3] 磁場のトポロジーとしては、入れ子状の磁気面、壊れた磁気面、磁気島、と少なくとも3種類あります。
- [4] 磁気面を壊すような運転法を見つけるのも一苦労でした。これまで開発してきた、中性粒子ビームで磁力線のねじれを制御する手法が活躍しました。
- [5] プラズマ状のチリが星のコアに引き寄せられる際、角運動量が保存され、コアに近づけば回転速度が上がリ、遠心力によりなかなかコアまでたどり着けません。星を作るにはこの回転を止める機構が必要です。
- [6] Nature Communications 6 : 5816 doi: 10.1038/ncomms6816 (2015)
- [7] 多くの新聞やネット記事にも取り上げられています。
http://www.nikkei.com/article/DGXLASGG16H1M_Z10C15A1TJM000/
<http://www.zaikai.co.jp/article/20150109/229919.html>
http://scienceportal.jst.go.jp/news/newsflash_review/newsflash/2015/01/20150109_02.html
http://www.eurekalert.org/pub_releases/2015-04/nion-pfd040915.php
http://www.eurekalert.org/pub_releases_ml/2015-04/aaft_1041615.php
- [8] <http://www.natureasia.com/ja-jp/ncomms/abstracts/61426>