

ペレット入射による燃料補給シミュレーション

石崎 龍一

核融合を持続するためには燃料となる水素を供給しなければなりません。固体水素を用いたペレット入射法はその一つで、これはマイナス263度という極低温で固化させた水素の氷の粒(ペレット)を毎秒1kmもの高速で、磁場で閉じ込められたプラズマに入射する方法です。ペレットは電気的に中性であるため磁場の影響を受けませんが、溶発して低温高密度のプラズマ(プラズモイド)になると磁場の影響を受けて運動します。磁場閉じ込め装置の一つ、トカマクでは、図1のようなドーナツ形状のプラズマ中で、プラズモイドがA面からB面の方向に運動することが明らかになりました。そこで、その運動特性を活かした燃料補給を行うために、A面側からペレットを入射しています。一方、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では、磁場構造の違いによりプラズモイドは複雑な挙動を示します。もし、ペレット入射位置の最適化によりプラズモイドの運動特性を活かした燃料補給ができれば、プラズマ中心の密度を更に上昇させ、核融合実現に一步近づけることができます。そこで、LHDにおけるプラズモイドの挙動を調べるために電磁流体シミュレーションを行っています。本稿ではLHDの二つのケースについて、トカマクの場合と比較しながら紹介します。

図2(a)は初期のプラズモイドがLHDプラズマのB面側に位置している場合(LHD①)で、(b)は

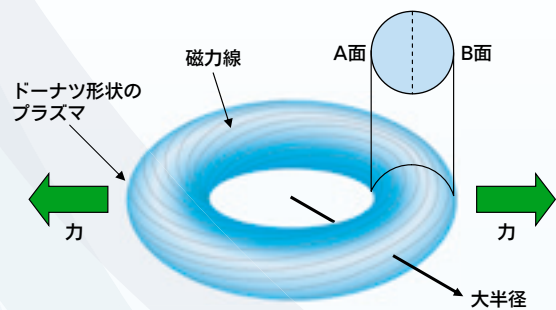


図1 ドーナツ形状の磁場閉じ込めプラズマ。内面、外面をそれぞれA面、B面と定義し、中心からの距離を大半径と定義します。矢印はプラズマに動くタイヤチューブ力を示します。

時間発展した後の状態を示しています。プラズモイドは溶発により磁力線方向に伸びていくと同時に磁場を横切って外向き(右方向)に移動(ドリフト)しています。一方で、図2(c)はプラズモイドがLHDプラズマのA面側に位置している場合(LHD②)で、時間発展したあとの(d)ではほとんどドリフトしていないように見えますが、実際は磁場を横切る方向(左右方向)に行ったり来たりしています。つまり、LHDにおけるプラズモイドの運動は、その位置により異なります。ちなみにトカマクにおいてはプラズモイドの運動は常に外向き、つまり図2(b)のように右方向であり、プラズモイドの初期位置にはよきません。これはトカマクとLHDでプラズモイドの運動の大きく異なる点です。では、なぜこのような違いが生じるのでしょうか。

プラズモイドをドリフトさせる力には主に2種類あります。第1の力はタイヤチューブ力です。図1に示すようなドーナツ形状の磁場に閉じ込められたプラズマにおいては、A面とB面はそれぞれ内圧による力を受けます。しかしB面の方がA

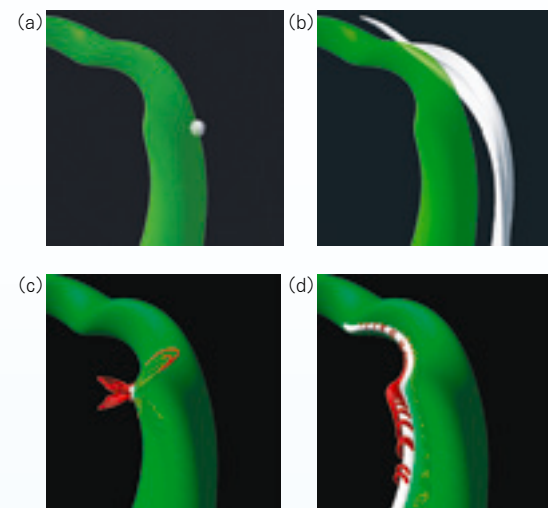


図2 プラズモイドがLHDプラズマの(a)(b)B面側に位置している場合(LHD①)、および(c)(d)A面側に位置している場合(LHD②)のシミュレーション結果。(a)(c)は初期状態、(b)(d)は時間発展した後の状態を示し、白はプラズモイド、緑はLHDの磁気面を表します。(c)(d)の赤は磁場揺動の磁力線を示します。

面より面積が大きいため、B面に働く力の方が優位となり、結果としてプラズマは外向き(矢印の方向)に力を受けます。これがタイヤチューブ力です。ゴム製のタイヤが内圧により外向きに膨張することに似ていることから、このように呼ばれます。プラズモイドはドーナツ形状の磁力線に沿って溶発するのでタイヤチューブ力により外向きに力を受けます。

一方で、第2の力はダイポール磁場による力です。プラズモイドは反磁性の性質を持つため、プラズモイド中心部において磁場強度は弱くなり、その反面、周辺部の磁場強度は強くなります。従って、プラズモイドによる磁場の変動分(磁場揺動)は図3(a)に示すダイポール磁場になります。また、図のように磁力線 B_0 が湾曲していると、プラズモイドを挟んで右の場合(青)は左の場合(赤)よりも強くなり、プラズモイドは左方向に力を受けて運動を始めます。一方で、紙面に垂直方向の縦磁場がその運動を妨げ、バネのような役割をするため、プラズモイドは左右に振動します。図2において(c)まずダイポール磁場(赤)が発生し、(d)磁力線に沿ってプラズモイドが溶発していくにつれ縦磁場が加わる様子が分かります。

次にこのような2種類の力のうち、どちらが支配的になるかを説明します。磁場閉じ込めプラズマにおける磁力線は図1に示すようにドーナツ形状の表面を、らせんのように巻き付いています。磁場強度はA面では強く、B面では弱くなるため、磁力線に沿って磁場の強弱が繰り返されます。

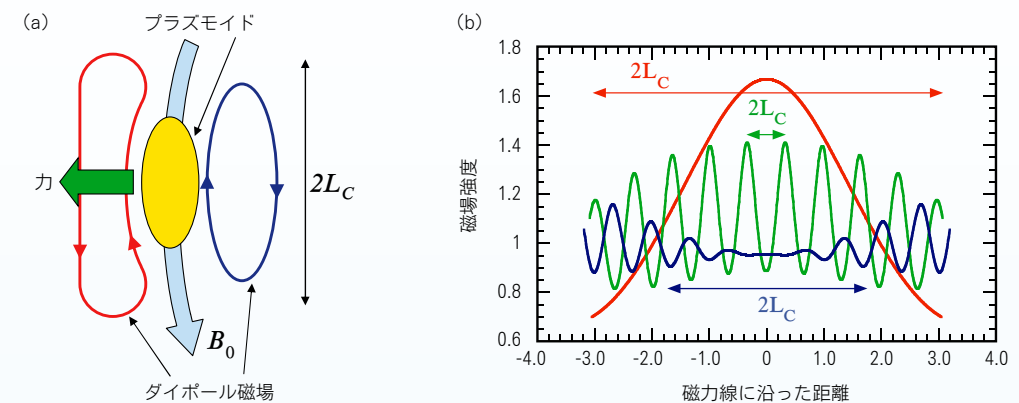


図3 (a)磁場 B_0 が湾曲している場合、プラズモイド周辺に形成されるダイポール磁場。 L_c は結合長を示します。(b)トカマク(赤)、LHD①(青)、およびLHD②(緑)における、プラズモイド初期位置を通る磁力線に沿った磁場強度の変化。横軸はドーナツ形状の一周分を示しており、プラズモイドは0.0に位置しています。トカマクとLHDの比較のため、横軸と縦軸はそれぞれA面とB面の間の大半径と磁場強度で規格化してあります。

トカマクではドーナツ形状を一周する間に、磁力線はB面→A面→B面の順番で一周するので、磁場強度は図3(b)の赤線のようにほぼ一周変化します。LHDの場合は、更にヘリカルコイルによる約10周期の強度変化が加わります(LHD①:青、LHD②:緑)。ここで特に注目すべきは、磁場強度の山と谷の間の磁力線の長さです。これを結合長 L_c といいます。トカマクに比べてLHD②の L_c は非常に短くなっています。第2の力を評価したところ、この L_c に反比例することが分かりました。従って、 L_c の長いトカマクでは相対的に第1の力が支配的になり、プラズモイドは常に外向きにドリフトします。一方で L_c の短いLHD②では第2の力が支配的になり、プラズモイドは振動します。LHD①の場合は、図3(b)の青線で示すようにプラズモイド近傍の磁場強度の変化が小さいため、実質的には L_c が長くなります。従ってトカマク同様、第1の力が支配的になり、プラズモイドは外向きにドリフトします。

以上、LHDにおけるプラズモイドの挙動について解説しました。これまではプラズモイドの初期位置を与えていましたが、今後は、LHDプラズマに向かって一定速度で入射したペレットから生じるプラズモイドのシミュレーションを行い、入射場所や入射速度に対する依存性を調べる予定です。これにより、更に効率的な燃料補給の方法が明らかになると考えています。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)