

プラズマのダイナミクスを測る

居田克巳

総合研究大学院大学教授核融合科学専攻／自然科学研究機構核融合科学研究所教授

加熱されるプラズマは自ら状態を変化させ、閉じ込めが悪化したり、改善したりする。計測技術の目覚ましい進歩によって、プラズマの性質が次々に明らかにされている。

今年6月に台風が二つも来て大きな被害があったが、大気の状態の予測はなかなかむずかしいようだ。大気に無風状態、季節風が強いとき、前線付近の突風が吹くとき、強風が吹き荒れる台風などいろいろな状態があるように、高温プラズマにもいろいろな状態がある。夜は無風でも太陽のエネルギーが注がれる昼間は風が強くなるのと同様に、プラズマも加熱されると多種多様な状態をとる。その状態がダイナミックに変化するため、「加熱されているプラズマは生き物のようだ」といわれる。

加熱によるプラズマの七変化

磁場を用いる核融合では、反応を起こすために強力な加熱を行う。そのために大気では、ミニ台風がいくつもあつ

て強風が吹き荒れた状態になっている。これをプラズマ物理では「乱流状態」と呼んでいる。このとき、じつは「プラズマに加えられたエネルギーをどう使うか」はプラズマ自身が決めてしまい、ある程度はエネルギーの使い方に口を出すこと（制御）はできるが、微妙なところはプラズマ任せなのである。この現象をプラズマの「自己組織化」と呼んでいる。

プラズマが加熱されているとき、プラズマ中を横切る熱流束と温度勾配との関係を「輸送」といい、プラズマ閉じ込めの良し悪しを、熱流束を温度勾配で割った値の熱伝導係数で示すことが多い。プラズマの中心に加えられた熱量は、すべてプラズマの周辺部に流れていくので、加熱パワーの量に応じて熱流束も決定される。温度勾配は熱流束に比例すると思

われがちだが、プラズマでは温度勾配によって乱流の大きさが変わるために、温度勾配が少し増しただけで、熱伝導係数が1桁以上も大きくなることもある。金属なども温度が変わると熱伝導率が変わるが、その変化量はプラズマに比べるとずっと小さい。プラズマは熱伝導係数を激しく変化させるのである。

一般に、プラズマの温度が上がると熱伝導係数は大きくなる。そのために加熱パワー・熱流束を10倍にしても温度勾配は3倍程度にしか上げることができず、閉じ込めの悪化を招く。このときプラズマは乱流状態で、温度の勾配は小さい(図1a)。この性質が核融合の実現を困難なものにしている。原因は、加熱の増加にともない乱流を引き起こすエネルギーが大きくなるからである。

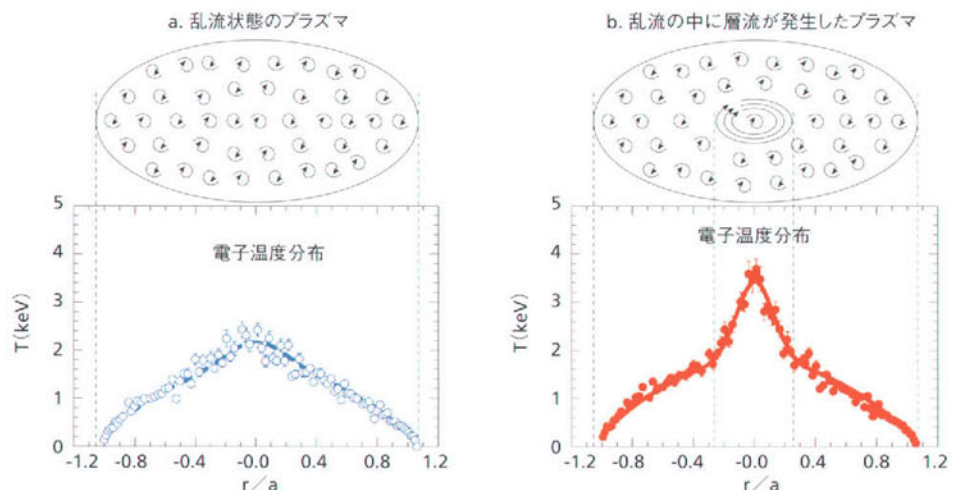


図1 乱流状態のプラズマ(a)と乱流と層流がミックスしたプラズマ(b)。YAG トムソン散乱計測器(強力なYAG レーザーをプラズマ中に入射し、プラズマ中の電子による散乱光の広がりから温度を測る)で得られた、プラズマの電子温度の空間分布からその状態が推測される。乱流状態の一部が層流になると、温度勾配が大きくなり中心に突出したピークができる。

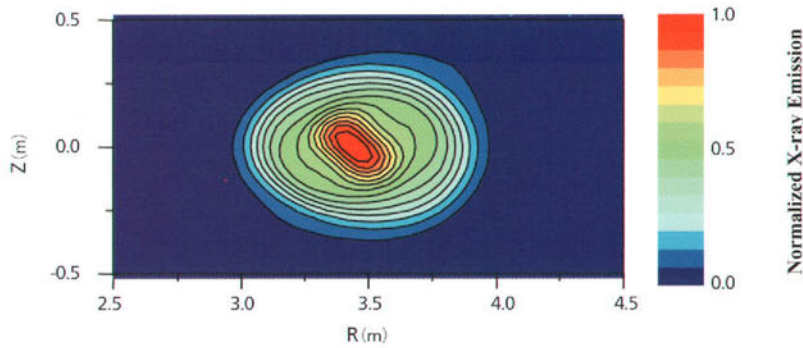


図2 X線用のCCDカメラで観測したプラズマのX線画像。プラズマの中心の赤い部分(X線の強度が強い部分)がプラズマ内に輸送障壁が出現したことを示している。

ところが、加熱の量がある程度を超えると、プラズマの一部にジェット気流のような層流が発生し、プラズマは層流と乱流のミックス状態に変化する。温度勾配は大きくなり、中心には高温のプラズマができる(図1b)。さらに加熱を行うと、乱流が小さくなるとともに熱伝導係数が下がり始める。これによって閉じ込めが改善されるのである。これはプラズマの「自己組織化」によって、乱流を発生させるのに使われていたエネルギーを、閉じ込め改善に必要な層流の発生に使うようになったためである。

この乱流が層流に変化する場所は、プ

ラズマの周辺部だったり、中間部だったり、中心近くだったり、条件によって異なる。また、この現象が起こると、部分的に急峻な温度分布が形成されるが、その輸送係数が小さくなった部分を「輸送障壁」と呼んでいる。

大型ヘリカル装置(LHD)では、プラズマの中心部に輸送障壁が現れる現象が、図2のようにX線のプラズマ画像でも観測されている。X線の強度はプラズマの温度とともに強くなるので、X線強度が強くなっている部分(図の赤い部分)はプラズマが高温になっていることを示している。どこに輸送障壁ができるかは、

プラズマの状態のちょっとした差がきっかけで決まる。たとえば、この図のようにプラズマの一部に磁場の乱れ(磁気島)があると、温度の平坦化(等高線が広がっているところ)が起こり、そこを境に内側が閉じ込め改善、外側が閉じ込め悪化に分かれることがある。

乱流と層流の計測がもたらした発見

気象では、「気圧」「温度」「風速」「湿度」等を計測するが、プラズマも「密度」「温度」「流速(電場)」「磁場」等を計測する。大気の場合だと、風速計をたくさん並べておけば、乱れた流れ(乱流)なのか、きれいな流れ(層流)なのかを容易に測ることができる。乱れた流れに置いた風速計は、風力、風向がたえず変化しているのに対し、きれいな流れに置いた風速計は一定の風力、風向を示す。

プラズマでは、どうやって乱流状態と層流状態を計測するのだろうか。プラズマの流れを直接測ることもできるが、磁場閉じ込めのプラズマでは、電場による力と運動しているイオンに働くローレンツ力が釣り合っているので、径電場から流れを測ることもできる。時間的に激しく変化(数十~数百kHz)する径電場があれ

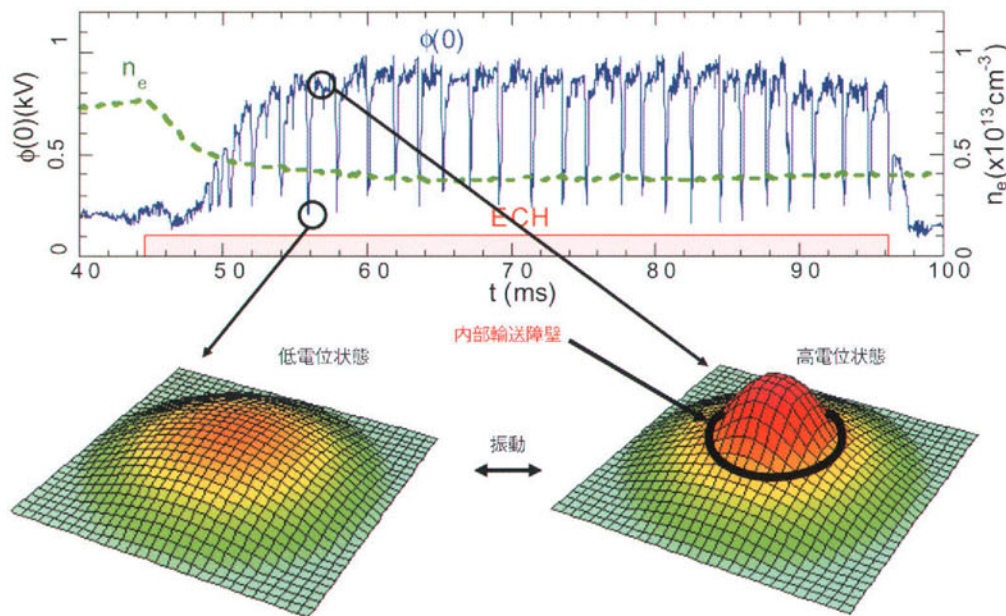


図3 プラズマの電位の自励振動(藤沢彰英氏提供)。プラズマの中心の電位が周期的に変化している。電位が高いとき(高電位状態)と低いとき(低電位状態)における電位の空間分布。この二つの状態が周期的に繰り返されている。

ば、それは乱流の存在を示す。一方、時間的に変化しない径電場があれば、それは層流の存在を示す。

しかしプラズマは液体や気体と異なり、流れの可視化が困難で、乱流状態を正確に測ることがむずかしい。乱流状態の程度はこれまでは主として密度・温度の勾配から推測してきた。すなわち乱流が大きくなると、密度・温度が平坦化して勾配がゆるくなり、乱流が小さくなると、密度・温度の勾配が大きくなると推測される。一般に加熱はプラズマの中心部を狙って行われるので、乱流が小さくなると、温度の勾配が大きくなり、中心部に高温のプラズマが形成される。ある物理量の微係数(勾配)を計測するのは、その物理量そのものを計測するのに比べ非常に高い精度が要求されるので、むずかしい計測となるが、乱流計測の困難さに比べればまだ容易である。

局在化した層流は、流速(流れの速さと向き)・径電場が時間的に変化しないので、乱流に比べればその計測は比較的容易である。「流速・径電場の計測」の重要性が認識されたのは、局在化した層流が乱流を抑えることが発見された15年ほど前である。その後、流速はプラズマに入射された粒子ビームからの発光を利用した分光法により計測されるようになった。

一方、電場はプラズマに入射された重イオンビームのエネルギーの変化量から計測することもできる。これは数百keV~数MeVのビームエネルギーのわずかな変化(数eV)を計測しようとする高度な計測である。LHDに先がけて建設されたコンパクトヘリカル装置(CHS)において詳細な計測が行われ、高電位状態と低電位状態が繰り返して起こる「電位の自励振動」という現象が発見された(図3)。電位の自励振動とは、エネルギーが乱流の生成に使われ閉じ込めが悪化する状態と、層流の生成に使われ閉じ込めが改善される状態の、二つの状態が周期的に起こる、いわば脈動現象といえる。生命体において脈動現象が生きている証であるように、このようなダイナミクスこそが

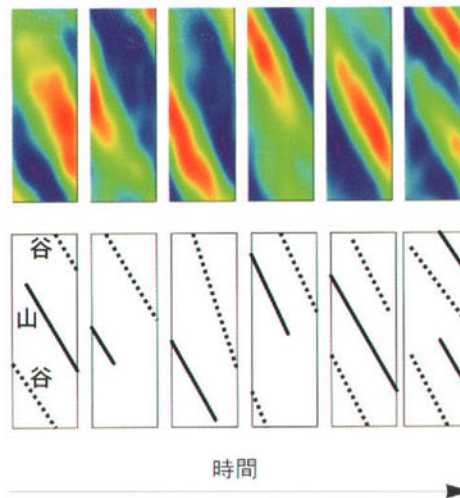


図4 炭酸ガスレーザーで計測したプラズマ密度の変化量(田中謙治氏提供)。密度の高いところ(山)と低いところ(谷)が海面に生じる波のように変化していく様子が観測されている。この密度の波が乱流の発生を示しており、層流ができて乱流が小さくなるとこの密度の波の高さが小さくなる。

「プラズマが生きている」と表現される所以である。

この重イオンビームプローブによる測定法はLHDにも導入され、計測準備が進められている。プラズマ中の乱流の計測は、プラズマの自己組織化のメカニズムを解くうえで重要であり、重イオンビームプローブをはじめ、ビームを使った分光法、レーザーを使った計測等、いくつかのアプローチが試みられている。現在のところ、どのアプローチもプラズマ全域にわたって乱流の状態を知ることができるレベルには達していないが、プラズマの一部を切り出して、乱流を測ることは成功している(図4)。

プラズマの解明と制御は表裏一体

核融合研究が始まった数十年前には、プラズマのダイナミックな振る舞いは予想されていなかった。研究の初期には、次々と新しいアイデアに基づいて実験装置が建設され、プラズマの温度や密度

(プラズマパラメータ)に関する記録が更新されてきた。その後、実験装置が大型化するにつれて、そのライフタイムが十年以上と長くなり、次々と新しい装置を建設することができなくなってきた。

それにもかかわらず、毎年のようにプラズマパラメータが更新されてきたのは、先に述べたプラズマの自己組織化を利用して温度や密度を上げてきたからである。この時点で核融合研究は大きな転機を迎えたといえよう。すなわち、装置学的側面が強かった核融合研究は、プラズマの性質を巧みに利用してプラズマパラメータを向上させる制御工学的側面が強くなった。どのように制御すればいいかを知るためにも、プラズマの性質を調べる必要があり、詳細な計測法の開発とそれを駆使した研究が進められている。こうしてプラズマの性質が一つ一つ明らかになるにしたがって、人類は核融合の実現に向かって一步一步近づいているといえよう。

居田克巳(いだ・かつみ)

主な研究分野はトラスプラズマにおける電場・磁場の空間構造形成とプラズマの輸送との相互作用。新しい計測器を実験装置に取り付け、ファーストデータを見るとき「わくわく」した気分を味わいたくて、数年ごとに新たな計測器を開発しては実験を行っている。でも頭の片隅では、以前に開発した計測器が私の「浮気心」に腹を立てて、ある日突然データを出すのを止めるのではないかと心配もしている。

