

長倉研究奨励賞受賞 核融合炉のプラズマを 赤外線カメラで撮る

芦川直子 総合研究大学院大学核融合科学専攻／核融合科学研究所

核融合科学研究所が誇る世界最大のヘリカル型核融合炉「LHD」が生成したプラズマの振る舞いを、赤外線カメラを用いて2次元的にとらえることに世界で初めて成功した。2台の赤外線カメラを使って、LHD内のプラズマ特性を3次元的に解明する日も近い。

プラズマに出会う

初めてプラズマを見たのは九州東海大学学部1年のとき、学内のある研究室で卒業研究のために用意されたものだった。チェンバーの中のプラズマをのぞいて「きれいだなあ」と思うと同時に、発生装置にも心ひかれた。「小さい時から大きな機械を見るとわくわくする」という芦川さんは、東海道新幹線の500系と700系の減速音を聞き分ける。

修士ではレーザー音波計測に携わっていたが、1年の夏に日本原子力研究所のトカマク型核融合炉JT-60のある計測グループに実習生として参加したことがプラズマ研究の道を選ぶきっかけになった。



芦川直子(あしかわ・なおこ)

博士課程で核融合科学研究所に所属し、核融合のプラズマ計測を研究テーマとした。このテーマには、趣味のロッククライミングに通ずる魅力を感じている。ロッククライミングの練習では実力を少し上回る壁を選んでテクニックを磨く。「テクニックを向上させると、できなかったことができるようになる、この達成感がうれしいですね。プラズマ計測も同じです」

計測の対象は、大型ヘリカル型核融合炉、通称LHD (Large Helical Device) だ。日本独自の設計で、主半径3.9mと、ヘリカル型では世界最大である。1998年に実験が開始されたが、そのプラズマ計測には、新しい手法の開発が必要不可欠だった。

プラズマを放射光の変化で描く

そもそも核融合炉は、軽い原子核同士が融合してより大きな原子をつくる時に放出される莫大なエネルギーを利用しようという装置だ。核融合炉からエネルギーを取り出すためには、原子核同士を 10^{-10} cm以下に接近させなければならない。

このような高密度下では、原子は原子核と電子がバラバラになったプラズマ状態となり、必要な密度を達成するには、プラズマを1億度で1秒間以上閉じ込

める必要がある。LHDでは昨年の10月に、プラズマ温度1億度を0.06秒の間達成している。

プラズマをいかに高密度の状態に閉じ込められるか、これが核融合炉開発の最大の課題だ。閉じ込めの様子を知るには、プラズマの振る舞いを計測することが第一である。プラズマはそのエネルギーを強い電磁波「放射光」にして失うので、この放射光の強さを、ポロメーターとよばれる装置で測定し、プラズマの姿を描いてきた。

従来のポロメーターは、温度による電気抵抗の変化から、温度変化を伴う現象を測定する装置だ。放射光測定には金属薄膜の裏に電気抵抗をつけたものを使う。放射光が薄膜をたたくと薄膜の温度が上昇するので、そこからプラズマが失ったエネルギーを計算できる。

今までは、ポロメーターを直線状にたくさん並べて測定するのが主流だった。というのは、JT-60をはじめ従来の実験炉は、環状の磁場の中にプラズマを閉じ込めるトカマク型とよばれるもので、どの断面で切ってもプラズマの状態が同じだったためだ。ポロメーター1つ1つの情報を合わせて、2次元の計測ができれば十分なのである。

しかしLHDでは、らせん状に

総合研究大学院大学・長倉研究奨励賞
長倉三郎初代学長からの奨学金寄付金をもとに、優秀な学生の研究を奨励し、先導的な学問分野を開拓するために、1995年に設置された。2002年3月までに16名が受賞。

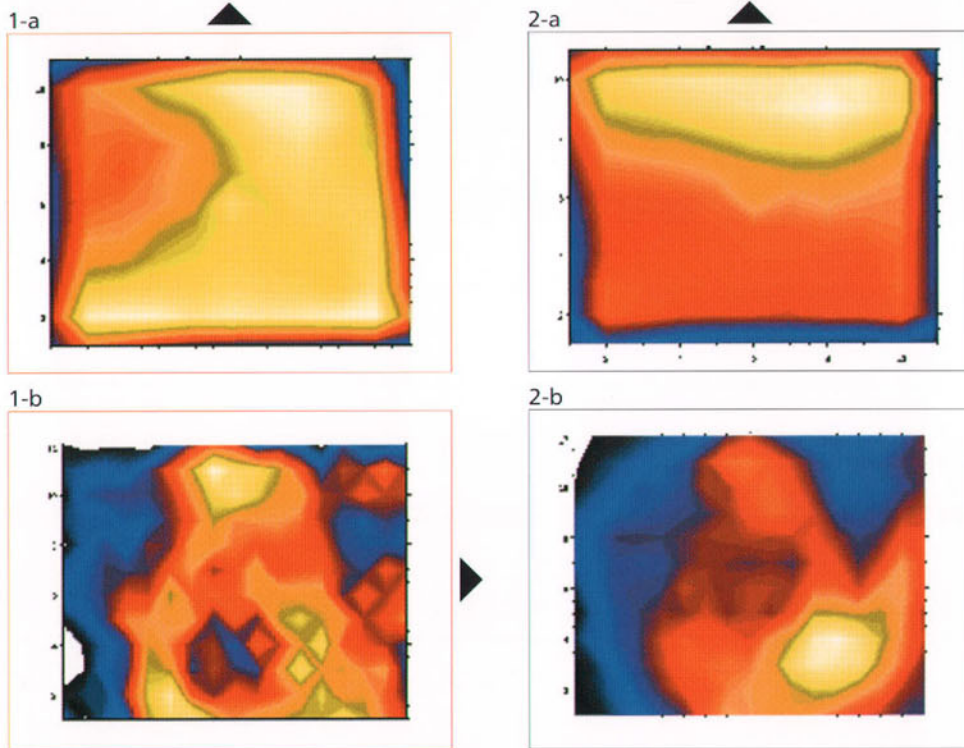
ねじれた磁場の中にプラズマを閉じ込めるため、プラズマもねじれた構造をとり、断面の状態が一定ではない。そのため、放射光を3次元で計測する必要が生じたのだ。

赤外カメラで放射光を撮る

核融合科学研究所のB・J・ピーターソン (Peterson) 助手は、赤外線 (IR: infrared) カメラを使って、LHDのプラズマの2次元分布を直接測定することを提案した。2台のカメラを用いれば、3次元的な情報を得ることができからだ。そして、LHDプロジェクトに参加した芦川さんが、須藤滋教授の指導の下、設計から実用段階に至る全てを担当することになった。

基本原理は通常のポロメーターと同じだ。IRカメラとプラズマの間に10cm四方の金属薄膜を置き、放射光による薄膜の温度上昇を、放出する赤外線の強度変化としてIRカメラで2次元的に直接とらえる。このシステムをIRポロメーターとよぶことにした。

IRポロメーターを使えば、1台で通常のポロメーターを100個以上並べたのと同じ2次元画像を得られる。また、通常のポロメーターのように信号線を核融合炉の真空容器の外に出す必



▶ 矢印はドーナツ形真空容器の中心方向の壁の位置を示す

IRボロメーターで得られた放射光の二次元画像

プラズマが崩壊するとき、そのエネルギーは「放射光」で失われる。プラズマの失うエネルギーが大きいほど、放射光は強くなる(青→赤→黄)。1-aと1-bはプラズマ崩壊前の画像で、2-aと2-bはプラズマ崩壊時の画像である。aはドーナツ形LHDの上部から、bは接線方向から撮った画像となっている。1-a、1-bでは周辺の低温プラズマが放射光を出している。しかし、プラズマ崩壊時の2-a、2-bではドーナツ形真空容器の壁の近くで局所的に強い放射光を出す分布に変化している。従来のボロメーター測定でもこの現象は知られていたが、IRボロメーターによってはじめて放射光の分布を広範囲で確認することができた。

要もない。ときには数百にのぼる信号線を外に出す必要があったが、金属薄膜だけを真空容器中にセットするシンプルな構造になった。IRカメラは、ドーナツ形LHDの上部と接線方向に設置したIRカメラ用のポートに設置する。

次のステップとして、2台のカメラからの画像を組み合わせるとモグラフィ3次元計測を行う予定だ。この装置には、将来の大型核融合実験装置計画からも期待がかかっている。

開発過程ではさまざまなことを、1つ1つていねいにクリアしていかなければならなかった。金属薄膜の選定1つにしても、LHDの数ヶ月にわたる運転期間中は破損しても取りかえられないので、非常に気がつかった。また、赤外線カメラを強い磁場から守る遮蔽ボックスの作成や、カメラの設定位地や視野の決定などは、何が最適かを求めて時間を費やした。

IRボロメーターをLHDに導入し、初めてそのプラズマを測定したのは1999年、博士課程1年の8月だった。

LHD自体は3回目の稼働を始めた時で、ピーターソン助手と芦川さんはIRカメラの画像を映した画面をにらんで最初のデータを待っていた。

2人が最も心配していたのは信号強度だ。たとえ不足していても稼働中は触ることができない。

「最初のデータは思ったより強度があって、ほっとしました」

この時の計測経験を生かしてIRボロメーターを改良し、LHD4回目の稼働時にはプラズマ物理の観点からも意義深いデータを得ることができた。

プラズマの崩壊の仕方の1つに、温度の低い周辺部が中心の高温部に流れ込む現象がある。LHDでこの崩壊が起こる様子を、IRボロメーターでとらえたのだ。現在、この結果を論文に

すべく格闘中だ。

自分の目でしかとらえられないものを追う

これらの成果を芦川さんは、2001年にポルトガルで開かれたヨーロッパ物理学会で発表した。「まったく新しい計測手法であるIRボロメーターの話に興味深く聞いてもらえました」と発表を振り返る。会場では、かねてから論文でその名を知っていた、英国カラム研究所トカマク型核融合炉JETのボロメーター計測をしているC・インガソン(Ingesson)博士と、1対1で議論ができたことが、うれしい思い出として残っている。

装置を見ることも好きなので、学会後には各国の研究所に足をのびした。ドイツのマックス・プランク研究所のヘリカル型装置W7-AS、同じくドイツのユーリッヒ総合研究機構のTEXTOR-94などを見学し、大きな成果をあげている実験炉が

意外とコンパクトなことに感銘を受けた、という。研究者や院生たちとも語り合い、共通する問題を確認した。ドイツではさらに2つのトークもこなした。

核融合の研究が始まってすでに40年。入力エネルギーに対する生成エネルギーの割合を示すQ値は、1を達成したばかりだ。プラズマ制御の難しさは、当初の予想をはるかに超え、実用化まであと50年ともいわれている。核融合研究では、今、何らかのブレイクスルーが求められている。その中で、「私の目で見しかとらえられない何かを見つける、その努力をしていきたい」と謙虚に研究への決意を語る。

ロッククライミングに加え、最近の趣味は野菜づくり。活発な行動を語る穏やかな口調に象徴されるように、動と静、剛と柔を併せもつ芦川さんの活躍が、核融合研究にどのような実をもたらすかとても楽しみだ。(インタビュー:横山広美 写真:細川隆平)