

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とき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。

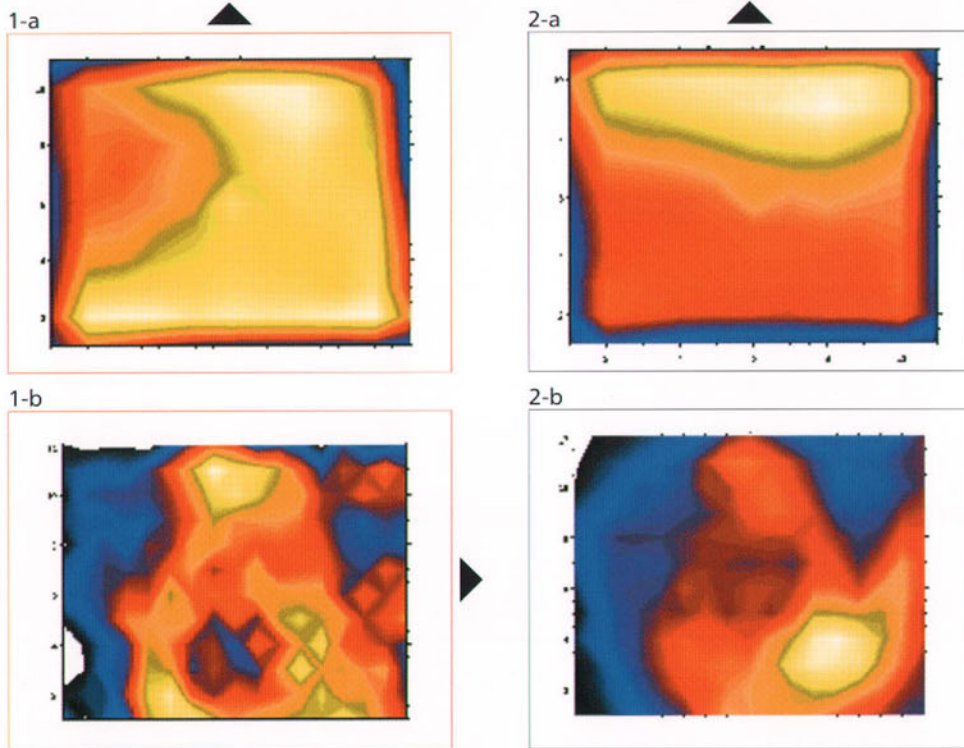
ねじれた磁場の中にプラズマを閉じ込めるため、プラズマもねじれた構造をとり、断面の状態が一定ではない。そのため、放射光を3次元で計測する必要が生じたのだ。

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ると。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。

基本原理は通常のパ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台で通常のパロメーターを100個以上並べたのと同じ2次元画像を得られる。また、通常のパ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、何らかのブレー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)

長倉研究奨励賞受賞

最も若い原始惑星状星雲を発見

中島淳一 総合研究大学院大学天文科学専攻／国立天文台野辺山宇宙電波観測所

研究をする上で「発見」ほど心躍るものはない。

もの心ついた時から星が好きで、小学生でアマチュア無線の免許を取ったという青年は、天文と電波の両方の知識を使って、観測史上最も若い原始惑星状星雲「IRAS19312+1950」を発見した。

SiOメーザーとの出会い

長野県野辺山、空気の澄んだこの地に国立天文台野辺山宇宙電波観測所はある。ここの45m電波望遠鏡は、ミリ波と呼ばれる領域の電波を、世界一級の性能で観測することができる。とても人気の高い望遠鏡で、観測提案の採用は競争率2倍を越す。

中島さんがここで観測をするようになったのは、大阪教育大学の修士課程の時で、あるプロジェクトに参加したのがきっかけだ。そのプロジェクトでは、特殊な電波「SiOメーザー」を出す星を、銀河系内でたくさん観測して、それぞれの星がどの方向に運動しているかを調べ、そこから銀河系全体の運動の様子



中島淳一（なかしま・じゅんいち）

を探ろうとしていた。

SiOメーザーを出すのは、太陽程度の質量をもつ恒星が進化した「晩期型星」だ。つまり太陽の晩年の姿で、中島さんはこれを「おじいちゃん、おばあちゃんの星」と呼んでいる。

晩期型星が放出する大量のガスは、広がるにつれて冷やされ、分子や塵を形成する。まず一番安定なCO分子がつくられるが、O原子が余った星はO-rich星、C原子が余った時はC-rich星と呼ばれる。O-rich星に多く含まれるのがSiO分子だ。晩期型星のまわりでは、星からの放射や分子同士の衝突によって、多くのSiO分子がエネルギーの高い状態になっている。これらが元のエネルギー状態に戻るとき、その差をミリ波領域の電波として出す。一つのSiO分子が電波を出すと、それに刺激されてSiO分子が次々と電波を出し、増幅されてSiOメーザーとなる。このSiOメーザーのドップラー効果を観測すれば、秒速1kmの精度で、晩期型星の視線方向の速度を知ることができるのだ。

銀河系内のたくさんのSiOメーザー源を見つけるには、ガス放出が活発で、比較的低い温度の塵をまとった天体を観測すると効率が良い。そのためこれま

では、絶対温度で300度程度に相当する赤外線を出す天体(赤外線源)が、観測されてきた。

「しかし、さらに温度の低い、つまりもっと進化の進んだ晩期型星のSiOメーザーに興味がありました。当然、物理状態も違ってくるので、これを観測すれば、まだ明らかになっていないSiOメーザーの放射機構の解明にもつながると思いました」

そこで、150~250K程度に相当する赤外線源をたくさん観測して統計的に分析し、博士論文にまとめることにしていた。

ナゾがいくつかの発見

2000年5月、野辺山の45m電波望遠鏡で奇妙なSiOメーザー天体を検出した。横軸を視線方向の速度としたスペクトル図の中で、SiOメーザーのピークが2つになっていたのだ。通常、晩期型星からは「1つの」ピークを持つスペクトルが観測されるはずなのに、である。

以前にも2つのピークを観測した経験があったが、その時は、たまたま同一方向にある2つのSiOメーザー源（二重SiOメーザー天体）を同時に観測していたことが、追加観測で確認された。「今回もきっとそうだろう」と思いつつ、ウェブ上に公開されている「2MASS (Two Micron

All Sky Survey)」という天体の赤外線画像アーカイブで、当該天体の画像を見ることにした。画像が現われた途端、「これはすごいことだと思いました」

通常の晩期型星と異なる3つの特徴が瞬時に見てとれたからだ。まず、二重SiOメーザー天体ではなかった。どうやら、2つのピークに対して新しい説明が必要そうだ。2つ目は、この星が広がった塵におおわれていることだ。通常、SiOメーザーを放射するのは、晩期型星の中でも、若くて塵の雲のまだ発達していない、見かけの大きさを持たない点源（天体）である。そして3つ目は、SiOメーザーを放射する天体、つまりO-rich星でありながら、C-rich星でしか見られないHCN分子の出す電波が検出されたことだ。

たくさんの謎の発見で、中島さんの研究はその解明へと大きくシフトした。

この星の正体は

正体解明のための観測が急ピッチで進められた。知り合いに依頼したプエルトリコのアレシボ天文台での観測や2001年4月の野辺山での再観測から、化学組成の複雑なこと、比較的重い質量を持つ星であることが明らかになった。さらに8月にはハ

ワイのすばる望遠鏡で近赤外画像を撮影し、腕状の構造を持つこと、腕の付け根に伴星らしき点光源が見えることを確認した。

伴星をもつこの天体は、将来双極状の惑星状星雲に進化する可能性がある。太陽型恒星は、晩期型星を経た後、ガスを周りに出して惑星状星雲になるが、これには双極型をはじめ、いくつかの形態があることが知られている。

広がった天体でありながらSiOメーザーを出していることや、追認観測の結果、この星の正体は、できたばかりの惑星状星雲「原始惑星状星雲」で、しかも観測史上最も若い原始惑星状星雲であると結論された。

中島さんたちはみなに親しまれることを願って、この星雲に「Jellyfish nebula (クラゲ星雲)」という名前をつけた。

SiOメーザーを出す惑星状星雲は、過去数百年以内に惑星状星雲になったと推定される。そのような天体は、これまでに一例しか発見されていなかった。硫黄を大量に含んでいるため「腐った卵星雲」というなんとも強烈な名前がついている天体だ。腐った卵星雲では、周りのガスがすでに晴れ上がっているため可視光線で観測できた。しかしクラゲ星雲は、まだ周辺のガスが可視光線を遮るので、赤外線でのみ観測される。つまりクラゲ星雲は、腐った卵星雲よりも、さらに若い進化段階にあると考えられる。

晩期型星がどのようにして惑星状星雲になるかは、そのプロセスが非常に早く進むこともあって、よくわかっていない。できたてホヤホヤの原始惑星状星雲を発見して調べることが、解明の鍵とされており、クラゲ星雲の観測にかかる期待は大きい。

また、最近の研究では、双極型の原始惑星状星雲の中心近辺

には、回転するディスクや、細長いジェットが存在が示唆されている。クラゲ星雲のSiOメーザーの2ピークは、このようなディスクやジェットに起因するものではないかと中島さんは考えている。

研究の面白さを伝える学者になる

発見に必要なのは幸運と、そして何よりも幸運を見逃さないための地道な努力だが、中島さんにはこの両方が揃ったと、指導教官の国立天文台出口修至助教授も評価する。

天文学者を職業としよう。そう中島さんが決めたのは、大学院に進学するときだった。

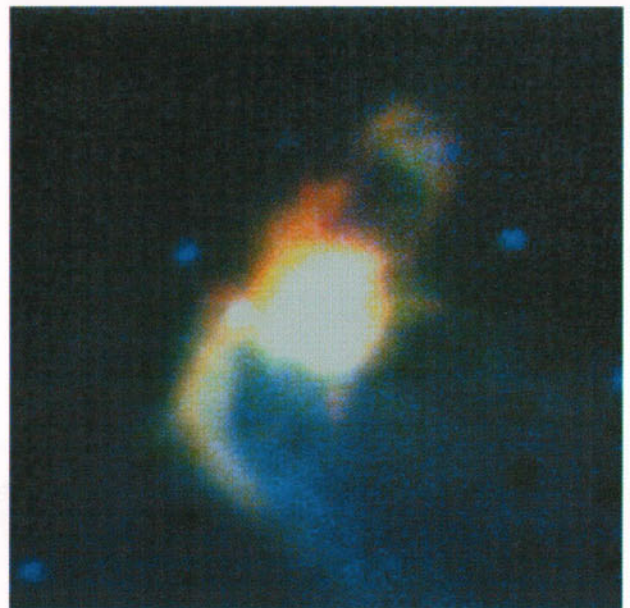
「天文学者の使命は、専門外の人聞いても面白いクリアな研究をすること」という信念を抱き、天文学を伝える活動にも熱心に取り組んでいる。わかりやすく楽しいその文章は評価も高く、天文雑誌『スカイウォッチャー』（立風書房、現在休刊）が主催するスカイウォッチャーグランプリ2000で、文芸部門2席に入賞している。

また、飛行機内で知り合った札幌大学環境経済学の和田喜彦さんと語り合ううちに、上方に漏れる光に興味をもち、その経済損失についてまとめ、日本育英会の懸賞論文で受賞を果たしている。

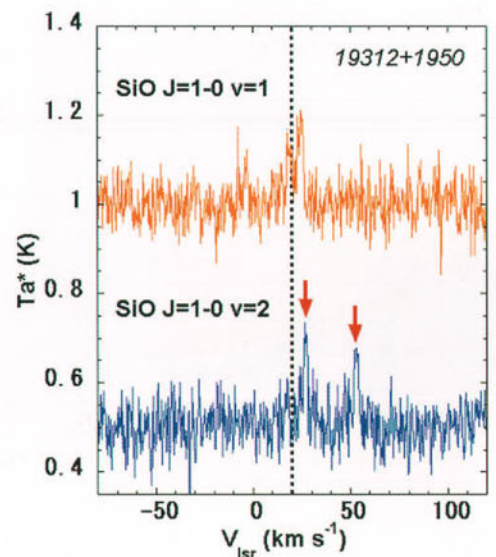
夜空に輝く星々は、宇宙空間に漂う塵の中から生まれた。そして、星がその生涯を終えると、また塵となって宇宙に散っていく。遠い将来には、惑星状星雲から拡散した塵が、地球のような星を創り出し、新たな知的生命を育むかもしれない。

「惑星状星雲の研究を深めていけば、人類のような知的生命の起源にたどりつけるかもしれません」と、その夢は果てしなく広がる。

(インタビュー:横山広美 写真:細川隆平)



ハワイ島のすばる望遠鏡で撮影されたクラゲ星雲こと“IRAS19312+1950”の近赤外写真。腕状に伸びた構造が確認できる。提供：国立天文台/田村元秀・村川幸史



SiOメーザーのスペクトル。矢印で示されているのが、確認された2つのピーク。