

## 論文の内容の要旨

論文題目 Data-driven study on abrupt termination events in fusion plasmas  
(核融合プラズマの突発的崩壊現象に関するデータ駆動型研究)

氏名 横山 達也

### 1. 序論

核融合エネルギーの実用化に向けては、高温のプラズマ状態にした水素同位体燃料を磁場によって閉じ込める方式の研究開発が進められている。高いエネルギー利得を実現するためには、高密度・高圧力といった高性能プラズマが必要である。一方、高性能プラズマは物理的な運転限界に近く、プラズマが維持できなくなる突発的崩壊現象が発生しやすい。例えば、閉じ込め磁場の生成にプラズマ電流を利用するトカマク方式では、プラズマ電流がごく短時間で失われるディスラプション現象が大きな問題になる。コイル自体をねじることで閉じ込めを実現するヘリカル方式では、プラズマ電流を必要としないためディスラプションは原理的に発生しないが、放射損失の増大によって引き起こされる放射崩壊現象によって運転密度が制限されている。

これらの突発的崩壊現象は非線形な現象であり、その現象の規模や要因は様々である。そのため理論的な解明は未だ途上であり、微分方程式によるモデル化も困難である。そこで、蓄積されてきた実験データと機械学習によって崩壊を予知するデータ駆動的な研究が注目されている。将来の核融合炉で利用できるよう信頼できる予知を実現するためには、機械学習によるブラックボックス的な予知にとどまるのではなく、物理的に解釈可能であることが求められる。機械学習に用いる入力パラメータを適切に選択することは、予測性能を向上するだけでなく、崩壊現象の物理的背景を解明することに繋がる。

本研究では核融合プラズマ中で起こる突発的崩壊現象の機械学習による予知の性能向上と、崩壊の物理背景の理解の両者に取り組むために、スパースモデリングによるパラメータ選択を用いた。崩壊現象としては、ヘリカル型実験装置である大型ヘリカル装置 (Large Helical Device, LHD) で観測される放射崩壊現象とトカマク型実験装置 JT-60U における高ベータディスラプションを主に取り上げる。機械学習を用いてプラズマが安定な状態にあるか、崩壊に近い状態にあるかを分類することで、崩壊予知モデルを構築

した。さらに、スパースモデリングの一手法である全状態探索を用いて崩壊現象の特徴パラメータを抽出した。抽出されたパラメータに基づいて、崩壊の発生可能性を定量的に評価した。

## 2. 機械学習の手法

プラズマが安定な状態にあるか崩壊に近い状態にあるかを判別するために、線形サポートベクターマシン (SVM) を 2 値分類器として用いた。SVM は機械学習の一種で、データ  $x_i \in \mathbb{R}^d$  をラベル  $y \in \{-1, 1\}$  に従って分類する線形な境界を与えるモデルである。特に線形 SVM は分類境界の方程式  $f(x) = 0$  を線形な方程式と仮定する。 $f(x)$  は決定関数と呼ばれる。本研究では、予めデータの対数を取り、最小値が 0、最大値が 1 になるように規格化した。この操作により分類境界の方程式はべき乗形に変形され、物理現象をより良く記述できるものと期待される。

機械学習に用いる入力パラメータの選択では、個別のパラメータの分布だけを考慮するのではなく、パラメータ同士を組み合わせた際の効果を考慮する必要がある。本研究では、全状態探索 (Exhaustive Search, ES) を用いたパラメータ選択により、崩壊現象の特徴抽出を行った。ES では、考えられるすべての組み合わせについてモデルの訓練と評価を行い、互いに比較することで、最適なパラメータの組み合わせを探索する。これにより、組み合わせの効果を考慮しながら、局所最適に陥ることなく、特徴パラメータを選択することができる。

## 3. 放射崩壊の予知と特徴抽出

LHD における高密度水素・重水素プラズマのデータを対象としてデータセットを作成した。放電は予め、放射損失の時間変化を用いて、崩壊に近い状態と安定な状態にラベル付けされている。15 種類の候補パラメータから、ES によって線平均電子密度  $\bar{n}_e$ 、炭素不純物の発光強度 CIV、酸素不純物の発光強度 OV、プラズマ周辺部での電子温度  $T_{e,edge}$  の 4 個のパラメータの組み合わせが抽出された。この特徴パラメータを用いて SVM で求めた分類境界からの距離に基づき、放射崩壊の発生可能性 (collapse likelihood) を定量的に評価できることを示した。崩壊可能性は 0 から 1 の連続値を取り、分類器の制御や物理の議論への応用を容易にする。例えば、崩壊可能性がある値を取るときの線平均電子密度を他の特徴パラメータの関数として表現することで、運転可能な密度領域を表現することができる。このモデルによって訓練データ外の放電を用いて崩壊可能性を評価したところ、崩壊のある放電のうち 85% に対して、制御に十分な時間的余裕をもって発生を予知することができた。一方、予知できなかった崩壊の多くは、訓練データ

に含まれていないヘリウム放電中の崩壊であった。この点を改善するため、ヘリウム放電を加えたデータを用いた特徴抽出も実施した。

次に、崩壊可能性を用いた制御系を構築し、LHD の高密度プラズマ運転において放射崩壊を回避する実験を行った。制御器は Raspberry Pi で構築され、計測データを受け取って崩壊可能性を実時間で計算する。崩壊可能性がしきい値を超えると、ガスパフによる燃料供給の遮断と、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) による追加熱を行う。LHD の水素プラズマ実験に制御を適用したところ、密度ランプアップ時の崩壊を回避し、 $\bar{n}_e > 1.2 \times 10^{20} [\text{m}^{-3}]$  の高密度を維持することができた。この放電中、プラズマが崩壊に向かう時間帯と崩壊を回避した時間帯に着目して、崩壊のメカニズムを議論した。粒子輸送解析の結果、崩壊へ近づく際にはプラズマ周辺部で内向き対流速度と拡散が不均衡になっていた。また、崩壊中に計測されたイオンスケールの密度揺動と、プラズマ周辺部で径方向電場が作る流れの勾配との関係を議論した。

さらに、抽出された特徴パラメータから、プラズマ周辺部での低価数不純物の挙動に着目して放射崩壊の背景を議論するために、周辺プラズマ輸送コード EMC3-EIRENE を用いて、崩壊可能性が上昇する時間帯のプラズマと炭素不純物の挙動を調べた。その結果、プラズマ周辺部での電子温度の低下・電子密度の増加による放射損失の増大と、炭素不純物の局在化が見られ、これらの現象が放射崩壊の発生に寄与している可能性が示された。

#### 4. ディスラプションの予知と特徴抽出

JT-60U における高ベータ放電を対象としてデータセットを作成した。放電は予め、ディスラプション放電・非ディスラプション放電にラベル付けされ、14 種類のパラメータを用いた。このうち 4 種類は径方向に分布を持つパラメータであり、安全係数  $q = 2$  有理面での値を用いた。ES による特徴抽出の結果、規格化ベータ値  $\beta_N$ 、楕円度  $\kappa$ 、 $q = 2$  有理面でのイオン温度  $T_i$ 、 $q = 2$  有理面での磁気シア  $s$  の 4 個のパラメータからなる組み合わせが抽出された。これらのパラメータを用いてディスラプション発生可能性を定量的に評価し、規格化ベータ値  $\beta_N$  の運転領域を表現した。

機械学習による崩壊現象の予知研究では、未知の装置でも崩壊を予知することが求められる。そこで、ES によって抽出された JT-60U の高ベータディスラプションの特徴が普遍的なものか否かを議論するため、米国のトカマク装置 DIII-D における高ベータ放電中のディスラプションを対象として、ES による特徴抽出を行った。その結果、Greenwald 密度比  $f_{GW}$ 、 $q = 2$  有理面でのプラズマ回転速度  $V_t$ 、 $q = 2$  有理面でのイオ

ン温度  $T_i$  の 3 個のパラメータからなる組み合わせが抽出された。JT-60U での結果と比較すると、規格化ベータ値  $\beta_N$  が抽出されていない点が大きく異なる。この要因としては、高ベータ放電を対象としているが、タイプの異なるディスラプションがデータに含まれていた可能性が考えられる。また、DIII-D ではプラズマ回転速度  $V_t$  が抽出されている。  $V_t$  は高ベータディスラプションの要因の一つである抵抗性壁モードの発生と関係しているが、JT-60U では抽出されなかった。これは安全係数  $q$  の計算方法が JT-60U と DIII-D で異なることが影響しており、JT-60U で用いた  $q = 2$  有理面の位置は実際的位置よりも外側だった可能性がある。今後の議論のためには、この計算方法の相違を考慮して  $V_t$  を取り扱う必要がある。

## 5. 結論

本研究では、実験データと機械学習の手法を用いて、核融合プラズマの突発的崩壊現象の予知モデルを構築した。スパースモデリングによる特徴抽出によって、予知性能を向上し、崩壊可能性を定量的に評価できることを示した。崩壊可能性を実時間で評価するシステムを構築し、実際に崩壊を回避する運転を実証した。以上により、データ駆動的な手法による突発的崩壊現象の予知が、その回避・影響の緩和に有用であることを示した。また、得られたモデル表現を手掛かりに崩壊の物理背景の仮説の検証を進め、データから抽出されたスパースな表現が現象の物理背景の議論につながることを示した。