

研究課題：ディスラプション予知のためのスパースモデリングによる物理機構の探索

研究代表者：山田弘司（東京大学新領域創成科学研究科）

量研機構担当者：諫山明彦

研究協力者：横山達也（東大）、今川直人（東大）、小川雄一（東大）、岡田真人（東大）、松永剛（量研）、大山直幸（量研）、日渡良爾（量研）、吉田善章（東大）

研究期間：平成 31 年度-令和 3 年度

1. 研究目的・意義

本研究課題は、ディスラプション発生予知モデルを JT-60U の実験データに基づいて機械学習により構築することを目的とし、ディスラプションが発生する確率を運転領域に照らして定量的に同定することを目指した。ディスラプションは様々な物理過程が絡み合う複雑な非線形現象であるため時間発展を表す微分方程式によって a-priori に予知することは極めて困難であることから、実験観測から a-posteriori に帰納モデルを構築するアプローチとして取り組むものである。ディスラプションの予知に重要なパラメータを抽出するために、データ駆動科学の枠組みの一つであるスパースモデリングを用いた。この手法は、予知性能を高めるだけでなく、得られた表現式を手掛かりにディスラプション物理機構の探求にもつなげることができる。得られた知見は炉心プラズマの運転制御への応用が期待される。

2. 研究成果

JT-60U で行われた高ベータプラズマ生成実験から、機械学習モデルの訓練に使用するデータセットを作成した。データはディスラプションが生じた放電と生じなかった放電のそれぞれから取得し、マクロなパラメータと径方向の分布を持つパラメータ（有理面位置・イオン温度・プラズマ回転方向・プラズマ回転速度・磁気シア）の合計 14 種類のパラメータからなる。径方向の分布を持つパラメータについては、 $q = 2$ 有理面位置の値を使用した。

予知モデルの構築に用いた機械学習モデルは、線形サポートベクターマシン (SVM) である。SVM は多次元の入力データがディスラプションを起こす放電か否かの二つのクラスのどちらに属するかを分類する 2 値分類器で、分類境界は線形な決定関数 $f(x)$ を用いて記述される。ここで、線形な分類境界が必ずしも適切であるとは限らず、べき乗の形で分類境界を記述することができれば、スケール不変性を持つ予知器モデルを作成できると期待される。そこで、機械学習モデルの訓練前にデータの対数をとることにより、SVM によってべき乗の形で表現された分類境界を得た。分類境界の方程式は $f(x) = 1$ の形で表現される。

予知モデルに入力するプラズマパラメータは、全状態探索 (Exhaustive Search, ES) によって抽出した。ES はスパースモデリングの手法の一つで、実現可能なパラメータの組合せをすべて比較することで最適なパラメータの組合せを求める。個々のパラメータの分布だけでなくパラメータ間の関係性を考慮してデータの特徴を抽出することができる。

パラメータ選択の結果、規格化ベータ値・楕円度・イオン温度・磁気シアの 4 パラメータが、ディスラプション予知に有効なパラメータの組み合わせとして抽出された。これらのパラメータを用いて、ディスラプションの発生確率を推定した。

図 1 の下段に、データセットに含まれるデータを入力した場合の決定関数の値の分布を、上段に各領域でのディスラプション放電のデータの頻度割合を示し、シグモイド関数でフィッティングした。この関数は決定関数の値、すなわち SVM で求めた分類境界とプラズマの状態との距離によってディスラプションの発生確率を表すものと解釈できる。

この発生確率に基づいて表

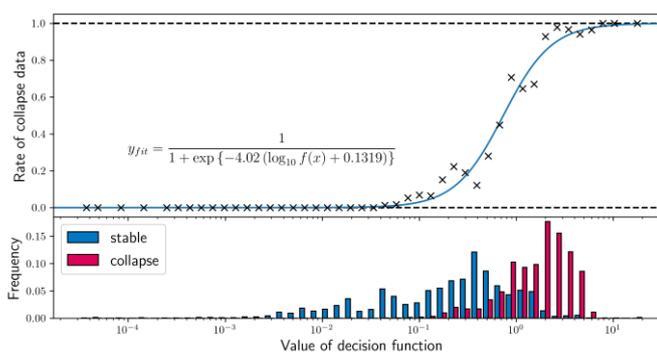


図 1 べき乗形の分類境界を仮定した SVM の結果から求めたディスラプションの発生確率を表す曲線

現した運転領域を図 2 に示した。赤と青の等高線状の着色は推定された発生確率を表す。このような形に表現することにより、プラズマ実験の運転に適用しやすい形でディスラプション予知器を応用することが可能である。

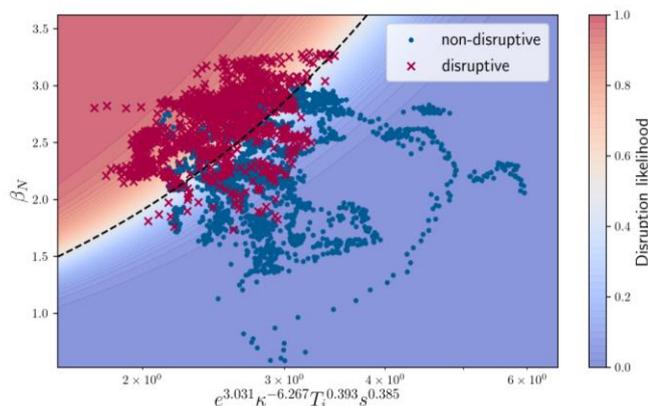


図 2 運転パラメータで表現された 2 次元平面でのディスラプション発生確率

3. まとめ

JT-60U での高ベータプラズマ実験のデータに基づいて機械学習を用いたディスラプション予知器モデルを作成し、全状態探索を用いたスパースモデリングによって予知に用いるプラズマパラメータの抽出を実施した。抽出されたパラメータに基づいて、ディスラプションに近い状態と安定な状態の非線形な分類境界を求め、境界への近接度からディスラプション発生確率を定量的に評価できることを示した。

4. 今後の課題・予定

抽出された特徴パラメータと境界表現式は、運転制御へ応用が期待できる予知器モデルであるだけでなく、ディスラプションが発生する物理的背景の探求にも役立つことが期待される。

本課題で得られた特徴パラメータは、JT-60U における高ベータディスラプションについてのものであり、これらが異なる原因のディスラプションや他のトカマク装置でのディスラプションにも普遍的なものであるとは限らない。将来の核融合炉へ応用可能なディスラプション予知の確立には、装置や要因によらない普遍的な特徴の抽出が必要である。そのため、帰納性検証実験及び異なる種類のディスラプションへのデータセットの拡張、他のトカマク装置での予知研究との相互比較が必要である。

さらに、本研究課題で開発したデータ駆動型手法は L-H 遷移などの分岐現象にも応用できると考えられる。

5. 成果リスト

- 1) 学術雑誌等に発表した論文 (査読あり)
 1. Tatsuya Yokoyama, Hiroshi Yamada, Akihiko Isayama, Ryoji Hiwatari, Shunsuke Ide, Go Matsunaga, Yuya Miyoshi, Naoyuki Oyama, Naoto Imagawa, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada, and Yuichi Ogawa, “Likelihood identification of high-beta disruption in JT-60U,” *Plasma and Fusion Research* **16**, 1402073 (2021).
- 2) 学術雑誌等に発表した報文 (査読なし)
 1. 若月琢馬、横山達也、大山直幸、山田弘司、「プラズマ・インフォマティクス-データ駆動科学のプラズマへの応用 4 トカマクプラズマ運転への応用展開」、*プラズマ・核融合学会誌* **95**, 548-553 (2018).
- 3) 国際会議における発表 (口頭発表、査読なし)
 1. Tatsuya Yokoyama, Yuya Miyoshi, Ryoji Hiwatari, Akihiko Isayama, Go Matsunaga, Naoyuki Oyama, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada, Naoto Imagawa, Yuichi Ogawa, and Hiroshi Yamada, “Data-driven study of high-beta disruption prediction in JT-60U using exhaustive search,” 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2019), MF-041, Hefei, November 2019.
- 4) 国際会議における発表 (ポスター発表、査読なし)
 1. Tatsuya Yokoyama, Takamitsu Sueyoshi, Yuya Miyoshi, Ryoji Hiwatari, Akihiko Isayama, Go Matsunaga, Naoyuki Oyama, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada, Naoto Imagawa, Hiroshi Yamada, and Yuichi Ogawa, “Feature extraction using exhaustive search in disruption prediction based on JT-60U experimental data,” 2nd

International Conference on Data Driven Plasma Science, P1.11, Marseille, May 2019.

2. Tatsuya Yokoyama, Yuya Miyoshi, Ryoji Hiwatari, Akihiko Isayama, Go Matsunaga, Naoyuki Oyama, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada, Naoto Imagawa, Yuichi Ogawa, and Hiroshi Yamada, “Applied study of feature extraction using exhaustive search on high-beta disruption in JT-60U,” 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2019), MF-P13, Hefei, November 2019.