

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03508

研究課題名(和文) 深層学習とロバスト制御を応用した核融合炉心プラズマの予測・予知制御に関する研究

研究課題名(英文) Research on robust control of fusion plasma based on deep learning

研究代表者

小川 雄一 (Ogawa, Yuichi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・客員共同研究員

研究者番号：90144170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：ITERをはじめとしたトカマク核融合炉心プラズマ制御での最も重要な課題の一つである電流崩壊現象ディスラプションに対して、データ駆動科学の知見を導入し、ディスラプション予知とその主要物理因子の抽出を試みた。機械学習の手法である全状態探索法を用いて、実験的に測定された23個の物理パラメータの時間・空間データの中から、ディスラプションに關与する5～7個のパラメータ抽出に成功した。またこれらのパラメータを使って、ディスラプションの起こる確率の評価や、炉心プラズマ制御への応用の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境に優しく人類の恒久的なエネルギー源の有力な候補である核融合エネルギー開発は、国際プロジェクトITER計画を中心として精力的に推進されている。ITERをはじめとした将来の核融合炉心プラズマ制御の大きな課題として、プラズマが突然消滅するディスラプション現象があり、その制御に向けて実験や理論・シミュレーションで盛んに研究されている。

本研究では、最近急速に発展してきているビッグデータを活用したデータ駆動科学の手法をディスラプション予知に導入し、ディスラプションを引き起こす主要パラメータの抽出に成功すると共に、それらを用いたディスラプション制御の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Data-driven science has been introduced for the foresight of plasma disruption which is one of the most important problems on tokamak plasma control including the ITER, paying attention to extracting dominant physical parameters among a lot of experimental data. By applying the Exhaust Search method in the machine learning technique for disruption prediction, a few key parameters (typically 5～7 ones) have been extracted though 23 physical parameters temporally and/or spatially measured.

In addition, using those parameters, the probability function of disruption occurrence has been derived, and the application to core plasma control has been proposed.

研究分野：核融合工学

キーワード：核融合 プラズマ トカマク ディスラプション 機械学習

1. 研究開始当初の背景

核融合研究は、ITER 装置の建設が進み、原型炉の設計や R&D が精力的に推進されるなど、新たな段階へと踏み出そうとしている。ITER や原型炉では高性能プラズマの安定保持やディスラプション回避などの安全性の高い運転に対する炉心プラズマ制御手法の開発が強く求められているが、プラズマの振る舞いを予測する物理モデルには、どうしてもある程度の不確実性が存在する。一方、人工知能は情報分野のみならず、創薬や医療診断など幅広い分野で爆発的に活用され始めており、核融合分野でも長年蓄積されてきたプラズマ実験でのビッグデータを炉心プラズマ制御に応用することが強く求められている。

2. 研究の目的

核融合炉では、核融合出力の制御は当然として、高性能化の面からは高ベータプラズマの安定保持が、安全性の面からはディスラプションの回避やダイバータ板への過度の熱負荷の回避などが求められる。そのためには、核融合出力のようなマクロパラメータのみならず、電流分布などのプラズマ内部の情報およびその制御が必須である。一方、ディスラプションに関する物理モデルの構築を目指して理論や大規模シミュレーションが精力的に行われているが、その原因および制御は確立していない。

本研究では、核融合炉心プラズマ制御の課題を包括的に解決すべく、図1のような制御システムを構想した。核融合炉の運転状況を「計測」により常時把握することは必須である。ただし強い放射線環境下では計測できるデータに限りがある。従って、ここでは、計測可能な計装制御データ（例えば、中性子出力など）に加えて、物理モデルを基盤とした統合コードを並行して走らせ、炉心プラズマの分布制御を行うために必要な情報（温度・密度や電流分布）を刻一刻とシミュレーションにより「予測」する。ただし、現実の核融合炉心プラズマには、物理モデルでは予測不可能な現象が発生する可能性が高い。具体的には、物理モデルに採用されている拡散係数等の妥当性、非局所輸送やディスラプションなどの物理モデルに取り込まれていない現象、壁からの不純物破片の突然の混入などが挙げられよう。そこで、第1原理に基づく物理モデルの開発が完全でない事象（例えば、ディスラプション、LH 遷移等の閉じ込め改善など）については、過去の大量の運転データ（以下、ビッグデータと呼ぶ）に基づく「予知」手法も開発して、物理モデルによる予測値と併用することで、物理モデルの不確実性をできる限り小さくすることを考える。具体的には、データ駆動科学の手法を導入し、プラズマ挙動の予測精度を向上させる。

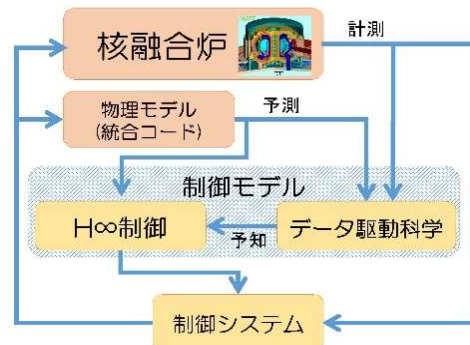


図1 核融合炉心プラズマの制御体系

3. 研究の方法

現在までの研究で、1.5次元輸送コードを用いて核融合出力と安全係数の最小値を同時に制御することを試み、ほぼ所期の目標値近くに制御することに成功したが、輸送コードの応答特性から制御パラメータを試行錯誤的に決定する必要があるなど、複数入力複数制御の課題が明確になった。一方、核融合分野において、従来の実験と理論・シミュレーション研究に加えて、ビッグデータを用いてのデータ駆動科学に基づく研究が大いに期待されている。特に ITER の建設・運転にあたり、ディスラプション制御に関する研究が強く求められているので、本研究ではディスラプション制御に焦点を当てて研究を進めることとした。

その手法として、機械学習と深層学習を取り上げた。予備的な解析を行った結果、共にほぼ同等の結論が得られそうであるが、機械学習の方が、結論に対する統計的・物理的な評価に適しているため、本研究では機械学習をベースとし、サポートベクターマシンの使った全状態探索 (Exhaust Search) 法を採用した。これは、図2に示すように、N個のパラメータの内から適当なK個を選択し、最適なパラメータの組み合わせを抽出する ES-K 法を用い、K を 1~N までスキャンすることにより、最も予知性能が高いパラメータの個数と組み合わせを求める手法である。

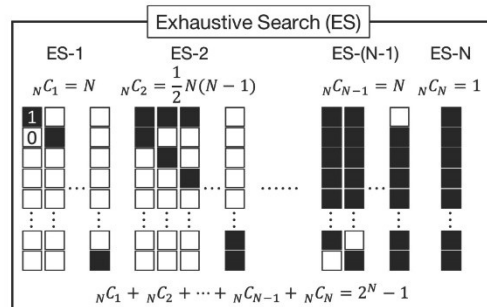


図2 全状態探索 (Exhaust Search) 法

具体的には、JT-60U における高ベータプラズマ実験を対象とし、ディスラプションを起こした 82 ショットと、ディスラプションを起こさなかった安定な放電 72 ショットの合計 154 ショットを選んだ。また、予知に用いる候補変数として、プラズマ電流、規格化ベータ値、安全係数

Spatial distribution of parameters (#49518, 6.75[s])

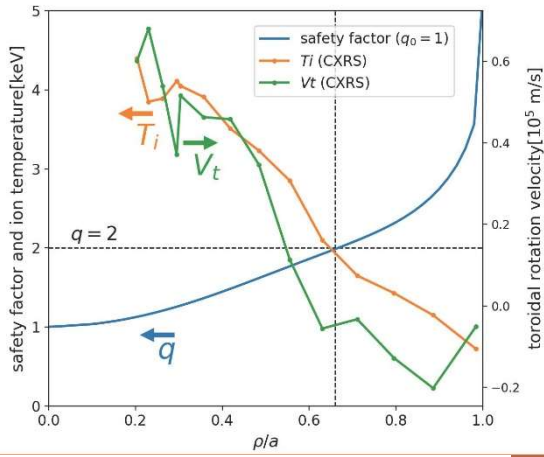


図3 プラズマパラメータの空間分布

など 10 個のグローバルパラメータを選出し、それらの中のいくつかについては時間微分値も独立パラメータとして採用した。さらに、ディスラプションが $q = 2$ 面での物理に関連している点を鑑み、イオン温度、プラズマ回転、磁気シアなどのローカルなプラズマパラメータも予知の候補変数として加えることとした。図 3 に代表的なイオン温度およびプラズマ回転の空間分布を示す。ここで安全係数 q 値の空間分布は平衡計算から求めた。以上、グローバル・ローカルパラメータおよびその時間・空間微分などを加えた、合計 23 個を入力パラメータとして選出した。

代表的なディスラプション放電である図 4 に示されているように、ディスラプション直前に磁場揺動が大きく増える。これはディスラプションが発生し始めるトリガーであることが判る。従って、この磁場揺動はディスラプション予知に使えるが、ディスラプション発生前の 10 ~ 30 ms 前であるので、たとえその時点で磁場揺動の増大を検知しても、ディスラプション抑制のためのフィードバックには間に合わない可能性が高い。従って、ディスラプション予知に関しては、ディスラプション発生より少なくとも 30 ms 程度以前のデータしか予知およびフィードバックに使用できない。そのため、それぞれの放電に対して、ディスラプション発生から遡って 30 ~ 125 ms 前までを 5 ms ごとにサンプリングして機械学習用のデータとした。従って、機械学習へは、23 変数で構成される 154 放電 \times 200 時間スライス = 30,899 のデータがインプットされた。これらのデータ分布を図 5 に示す。ディスラプションの有無により、ある程度分布が離れるパラメータもあるが、かなりのパラメータは重なり合っている。

なお、ディスラプションには、高密度化、高ベータ化、不純物が多い場合など多様な形態があり、それらを同一のプラズマ物理として理解するのは適当でない。そこで本研究では、高ベータ起因のディスラプション放電に絞るように図 6 のようなフィルターを設置した。さらに、次元を持った広範な数値広がりのある物理パラメータに対して、平均値と分散を用いてインプットデ

表 1 入力パラメータリスト

パラメータ	時間微分値	勾配
I_p	—	—
β_N	$d\beta_N/dt$	—
β_P	$d\beta_P/dt$	—
l_i	dl_i/dt	—
q_{95}	dq_{95}/dt	—
δ	—	—
κ	$d\kappa/dt$	—
$ B_r^{n=1} $	$d B_r^{n=1} /dt$	—
$f_{GW} = \bar{n}_e/n_{GW}$	df_{GW}/dt	—
$f_{rad} = P_{rad}/P_{input}$	—	—
V_t	—	dV_t/dr
T_i	—	dT_i/dr
ρ/a	—	—
$s = \frac{\rho}{q} \frac{dq}{d\rho}$	—	—

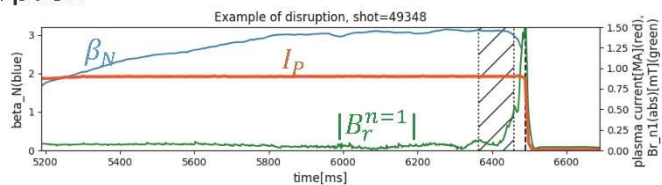


図4 ディスラプションの代表的な放電

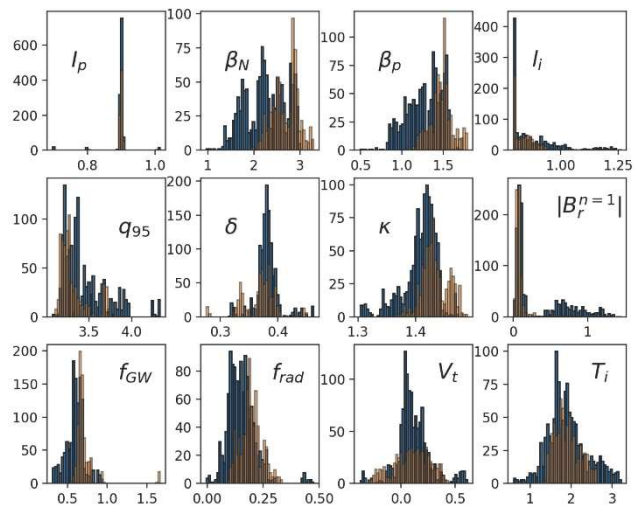


図5 各種パラメータの分布

(青 : non-disruption、赤 : disruption)

一タの規格化を行うなど、解析の普遍性・一般性を高めた。

4. 研究成果

(1) ディスラプションの主要因子抽出

ディスラプション予知に関して、正しくディスラプションと判断した割合（予測成功率 PSR: Prediction Success Rate）と、誤ってディスラプションと判断した割合（誤警報率 FAR: False Alarm Rate）を計算した。図 7(a) は $K=7$ の場合について、PSR-FAR 平面上に、その度数をプロットした Density of State である。理想的なディスラプション予知は左上隅の PSR=100%, FAR=0% となる点である。従って、その”理想性能”点までの距離をここでは Distance と定義し、この距離が短い順に並べたのが図 7(b) である。この図より、理想性能に近い点は、 β_p 、 q 、 κ 、fgw、Ti、dq/dt が含まれていると見て取れる。

次にこのような解析を $K=1 \sim 23$ まで行った結果を図 8 に示す。理想性能に最も近い点を与えるのは $K=7$ の場合であるが、 $K=5 \sim 10$ では、Distance の評価値はほぼ横ばいであるといえる。しかも、これらの K 値の評価でも、 β_p 、 q 、 κ 、fgw、Ti、dq/dt が含まれていることから、ディスラプション予知には、これらのパラメータが重要な役割を果たしていると言える。

(2) ディスラプションの評価指標

ディスラプション予知に関して、本研究では予測成功率 (PSR) と誤警報率 (FAR) を、PSR-FAR の 2 次元度数密度上にプロットし、理想性能 (PSR=100%, FAR=0%) からの距離 (Distance) を評価指標として用いたが、医療現場などでは、ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲線が使われている。これは図 9 に示したような 23 個のパラメータ空間において、ディスラプション発生の有無を左右する超平面 $f(x)=0$ をサポートベクターマシンで求めるが、ここで $f(x)=s_{th}$ とし、 s_{th} 値を正負に変化させながら、PSR と FAR を計算し、PSR-FAR 平面状にプロットするものである。例えば、 s_{th} 値が正值として十分大きいと、すべての正常放電をカバーできるが、かなりのディスラプション放電も含まれてしまうため、予測成功率は下がる。具体的には図 10 で FAR=0% の時に PSR=40% となっているのが読み取れる。一方、 s_{th} 値を十分大きな負値にすると、すべてのディスラプション点を避けることができるので、PSR=100% になる。ただし、その中にはかなりの正常放電も含まれているので誤警報率が上昇する。図 10 では、PSR=77% まで増えていることが判る。ちなみに $s_{th}=0$ の場合のデータが Distance を評価指標として用いた時の値である。

ここで PSR-FAR 平面状に描かれた ROC 曲線を使って、2 つの評価指標を導入した。医療分野では、この ROC 曲線に囲まれた領域 (AUC: Area Under Curve) を評価指標として用いている。具体的には、AUC の面積が広いほど、予測性能が高いと言える。もう一つは、PSR=100% になる点の

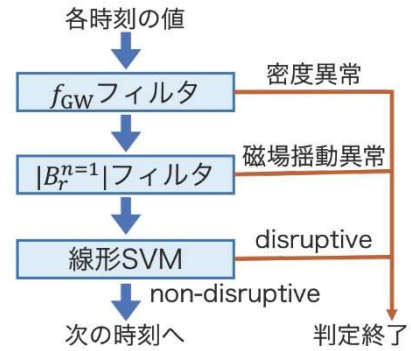


図 6 データの選別スキーム

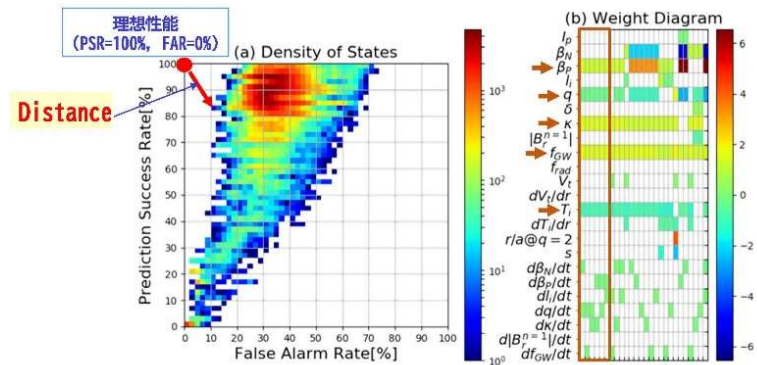


図 7 $K=7$ の場合の度数分布と抽出された主要パラメータ

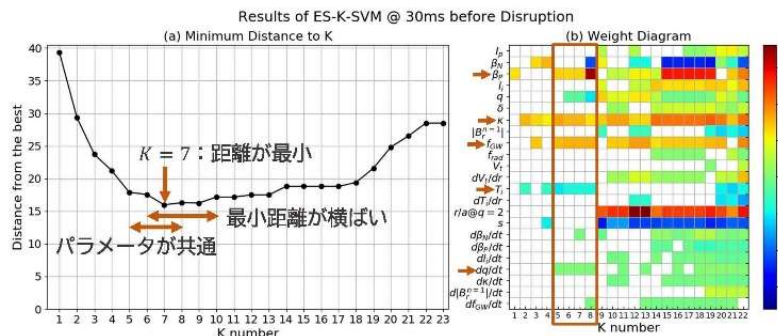


図 8 $K=1 \sim 23$ の理想性能までの Distance と主要パラメータ

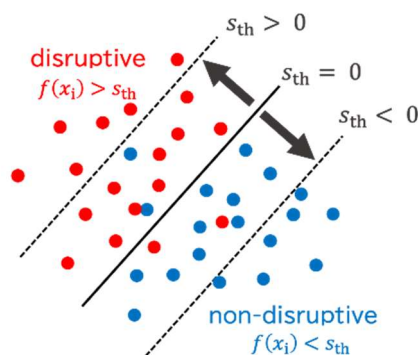


図 9 23 個のパラメータ空間における超平面

ちなみに $s_{th}=0$ の場合のデータが

FAR 値に注目したもので、これを FAR_{top} と呼び、我々が新規に導入した指標である。これは 100% の確率でディスラプションを回避できるという状態であり、実験的にどうしてもディスラプションを回避したい場合などに活用できると考えられる。

この 3 つの評価指標により抽出された主要パラメータとして、 κ 、fgw はどれも重要なパラメータとして選択されており、AUC や FAR_{top} は β_N または β_p が必ず含まれていることなどから、規格化ベータ値も共通因子である。またイオン温度勾配も重要な役割を果たしているのが判った。

なお Distance ではサポートベクターマシンでの解析において、ディスラプション有無の境界である超平面を決定論的に選択しているのに対して、AUC および FAR_{top} では、その境界を恣意的に変化させて、ディスラプションの発生を確率論的に決定している。従って、ディスラプションの誘起因子を理論的に演繹するには決定論に基づく Distance の手法が適しているのに対して、実際の実験において実験家ができるだけディスラプションを避ける運転をしたいなら AUC や FAR_{top} が適している、といえよう。

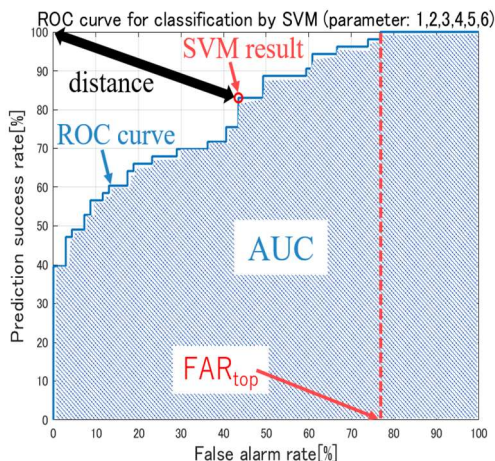


図 1 0 S_{th} を変化させて得られた ROC 曲線

(3) ディスラプション発生確率

全状態探索法により抽出された特徴パラメータの超平面の両側には、予知を誤認したデータが染み出している。そこでそれらのデータの分布を評価することにより、ディスラプション予知確率を定量的に導出した。図 11 は、超平面からの距離を指標としたディスラプション発生度数をプロットし、その確率を定量的に評価したものである。

さらに、超平面は複数の抽出パラメータによる解析式として与えられる。例えば、重要因子が β_p 、 q 、 κ 、fgw、 T_i である場合の境界となる超平面は以下の式で与えられる。

$$f(\hat{x}) = 1.32\hat{\beta}_p - 0.288\hat{q}_{95} + 1.57\hat{\kappa} + 1.58\hat{f}_{GW} - 0.889\hat{T}_i - 1.61$$

従って、もしプラズマ実験において、前述の 5 つのパラメータセットで評価される $f(x)$ 値がこの境界に近づいてきたら、出来るだけ避けるように（例えば、 β_p が増えてきたら、 κ を下げるとか）プラズマ運転を制御する場合に使える。

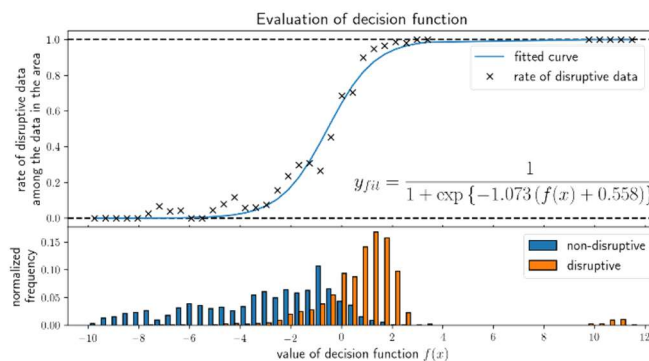


図 1 1 ディスラプションの度数分布と発生確率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Yokoyama, T. Sueyoshi, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, Y. Igarashi, M. Okada, Y. Ogawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Disruption Prediction by Support Vector Machine and Neural Network with Exhaustive Search	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3405021-1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.13.3405021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yokoyama, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, A. Isayama, G. Matsunaga, N. Oyama, Y. Igarashi, M. Okada, and Y. Ogawa	4. 巻 140
2. 論文標題 Prediction of high-beta disruptions in JT-60U based on sparse modeling using exhaustive search	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 67-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 T. Yokoyama, T. Sueyoshi, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, Y. Igarashi, M. Okada, and Y. Ogawa
2. 発表標題 Disruption prediction by Deep Neural Network with Exhaustive Search
3. 学会等名 Plasma Conference 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Sueyoshi, T. Yokoyama, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, Y. Igarashi, M. Okada, and Y. Ogawa
2. 発表標題 An Exhaustive Search with Support Vector Machine for Prediction of Disruption
3. 学会等名 Plasma Conference 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Yokoyama, T. Sueyoshi, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, Y. Igarashi, M. Okada, and Y. Ogawa
2 . 発表標題 Disruption prediction by Support Vector Machine and Neural Network with Exhaustive Search
3 . 学会等名 the 26th International Toki Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Yokoyama, T. Sueyoshi, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, A. Isayama, G. Matsunaga, N. Oyama, Y. Igarashi, M. Okada, and Y. Ogawa
2 . 発表標題 Disruption prediction with sparse modeling by exhaustive search
3 . 学会等名 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Igarashi, T. Yokoyama, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, A. Isayama, G. Matsunaga, N. Oyama, Y. Ogawa, H. Yamada, M. Okada
2 . 発表標題 Sparse modeling for a data-driven approach in Plasma Physics
3 . 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Yokoyama, T. Sueyoshi, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, A. Isayama, G. Matsunaga, N. Oyama, Y. Igarashi, M. Okada, N. Imagawa, H. Yamada, and Y. Ogawa
2 . 発表標題 Feature extraction using exhaustive search in disruption prediction based on JT-60U experimental data
3 . 学会等名 2nd International Conference on Data Driven Plasma Science (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yokoyama, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, A. Isayama, G. Matsunaga, N. Oyama, Y. Igarashi, M. Okada, N. Imagawa, Y. Ogawa, and H. Yamada
2. 発表標題 Applied study of feature extraction using exhaustive search on high-beta disruption in JT-60U
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yokoyama, Y. Miyoshi, R. Hiwatari, A. Isayama, G. Matsunaga, N. Oyama, Y. Igarashi, M. Okada, N. Imagawa, Y. Ogawa, and H. Yamada
2. 発表標題 Data-driven study of high-beta disruption prediction in JT-60U using exhaustive search
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山達也、末吉孝充、三善悠矢、日渡良爾、五十嵐康彦、岡田真人、小川雄一
2. 発表標題 全状態探索による特徴抽出を用いたディスラプション予知
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山達也、三善悠矢、日渡良爾、諫山明彦、松永剛、大山直幸、五十嵐康彦、岡田真人、今川直人、小川雄一
2. 発表標題 全状態探索によるデータ駆動アプローチを用いたJT-60Uの高ベータディスラプション予知と物理背景の抽出
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	日渡 良爾 (Hiwatari Ryoji) (40371348)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合 研究所 核融合炉システム研究開発部・主幹研究員(定常) (82502)	
研究 分担者	三善 悠矢 (Miyoshi Yuya) (50758638)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合 研究所 核融合炉システム研究開発部・任期付職員(任常) (82502)	平成29年度のみ