

JT-60SAにおける強化学習を用いた安全係数分布制御の検討 Investigation of safety factor profile control in JT-60SA using reinforcement learning

若月琢馬、林伸彦、吉田麻衣子
T. Wakatsuki, N. Hayashi, M. Yoshida

量研
QST

安全係数分布は核融合プラズマの閉じ込め性能、MHD安定性に強く影響する重要なパラメータであるため、様々なトカマクにおいて実時間制御の研究が行われている。ASDEX-U、DIII-D、TCV等の装置ではモデル予測制御を用いた制御が行われているが、実時間制御を実現するために計算処理時間の短い線形化したモデルを用いている。一方で、線形モデルは事前に行う非線形シミュレーションで得られたプラズマパラメータの周りで構築されるため、プラズマの応答が事前の想定から大きく異なるような場合に適切な制御を行うことができるかは明らかではない。

そこで本研究では、全く異なるアプローチとして、統合コードを用いた多数回の非線形シミュレーションの結果を学習して安全係数分布制御を構築することを検討した。プラズマの状態に応じて加熱・電流駆動を調整して安全係数分布制御を行うために、状態ベクトル $\mathbf{s}_i = [t_i, \mathbf{q}(\rho, t_i), \mathbf{q}(\rho, t_{i-1}), \mathbf{T}_e(\rho, t_i), \boldsymbol{\alpha}(\rho, t_i), \mathbf{P}_{\text{heat}}(t_i)]$ (\mathbf{q} :安全係数分布、 \mathbf{T}_e :電子温度分布、 $\boldsymbol{\alpha}$:規格化圧力勾配分布、 \mathbf{P}_{heat} :各アクチュエータの加熱パワー)を入力すると次の時刻の加熱・電流駆動パワー $\mathbf{P}_{\text{heat}}(t_{i+1})$ を返すニューラルネットワークを構築し、学習による最適化を行った。学習対象はJT-60SAのプラズマ電流ランプアップ中及びフラットトップにおける安全係数分布制御である。

適切な制御を学習するためには一万回程度の試行が必要であるため、高速に計算可能な統合輸送コードRAPTOR[1]を利用した。RAPTORを用いた学習時には、磁気シアが小さくなる領域で熱拡散係数が小さくなる関数形であらわされる熱拡散モデルを使用したが、関数のパラメータをランダムに変更することで、多様な閉じ込め特性をもつプラズマを模擬して学習した。これにより、ニューラルネットワークが現在の輸送特性に適応して適切

な加熱・電流駆動パワーを決定できるようになることを目指した。この特性を生かして、学習したシステムがシミュレーションと実験の間に存在するモデル化の誤差に対してロバストに制御できるようになることを期待している。

本研究では閉じ込め性能と高いMHD安定性を両立すること目的とし、安全係数の最小値 q_{\min} が1以上のなるべくフラットな安全係数分布を実現するための制御を学習した。1万回の試行を通じて、ランダムに選ばれた輸送特性を持つプラズマに対してほとんどの場合で期待通りの安全係数分布を実現できるようになった。(図1参照)

学習したニューラルネットワークを用いた制御システムの検証を、JT-60SAの加熱実験を模擬した統合輸送コード(TOPICS)と輸送モデルを用いて行った。熱拡散モデル、及び加熱・電流駆動のモデルをRAPTORとは異なるものを用いることで、学習したモデルと異なる応答をするプラズマに対してどのような制御が行われるかを確認した。結果として、JT-60SAの加熱実験を模擬したシミュレーションに対しても、制御誤差は増大するものの制御できることが確認できた。この結果から、モデル化の誤差がある場合でも制御を行うことができることが示された。

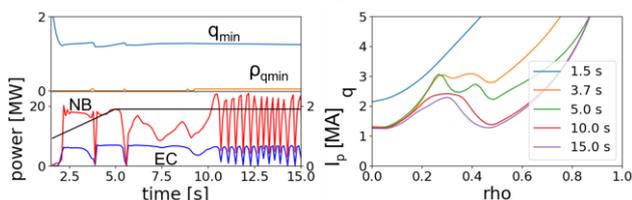


図1:RAPTORで学習した安全分布制御の結果例。中性粒子ビーム(NB)及び電子サイクロトロン波(EC)入射により $q_{\min} \sim 1.25$ を維持している。

[1] F. Felici et.al. Plasma Physics and Controlled Fusion 54 (2012) 025002