

適応的なチコノフ正則化による
 プラズマ位置形状パラメーター制御手法の開発
 Development of plasma position and shape controller
 via using adaptive Tikhonov regularization

井上静雄、小島信一郎、宮田良明、浦野創、鈴木隆博
 Inoue Shizuo, Kojima Shinichiro, Miyata Yoshiaki, Urano Hajime, Suzuki Takahiro

量研
 QST

楕円度 (κ) や三角形度 (δ) の制御などの精密な制御はトカマク装置で高い核融合出力を達成するためだけでなく、プラズマ物理探索のためにも必要不可欠である。一方超伝導トカマクでは、限られた電源電圧とコイル数の中で、 κ と δ の制御だけでなく、プラズマの垂直・水平位置とプラズマ電流 (I_p) の制御を実現する必要がある。これまで、形状制御と I_p 制御のバランスを適応的に調整し両者の制御を両立する Adaptive Voltage Allocation 法[1]を開発した。本発表ではこれを発展させ、プラズマ形状パラメータ (κ , δ) をロバストに制御するために、制御行列を適応的に変化させる手法を開発した。これまで多数の制御点を用いて、SVD (Singular Value Decomposition) 法に基づき制御行列を計算しプラズマ形状の制御が行われてきたが[2]、制御点>コイル数となることでその解がノルム最小解から最小二乗解になることと、近接する制御点により制御行列が悪条件性を有することにより制御が不安定になりやすい問題を有していた。我々は、前者/後者の課題を制御点動的探索法/適応的なチコノフ正則化法 (ATR) により解決した。以下では ATR 法について述べる。

本研究では制御方式に ISO-FLUX 法を採用し、制御点と LCFS 間のポロイダル磁束の残差 $\delta\psi$ を制御量とする。制御方程式は $M\delta I = \delta\psi$ 、ここで δI は制御に必要な電流変化量である。M は各制御点と各コイル電流の間のグリーン関数から計算される。 δI と $\delta\psi$ は要素数が異なるため、M の擬似逆行列を用いて δI を求める。解は $\|M\delta I - \delta\psi\|^2 + \lambda\|\delta I\|^2$ を最小化するように決定される。ここで電源の電圧飽和率を評価することにより、正則化パラメータ λ を最適化する手法 (=ATR 法) を開発した。

図1において、JT-60SA の増力後の装置条件下 (シナリオ2、5.5 MA) で、プラズマシミュレーター MECS を用いて楕円度を1.5から1.9まで変化させるシミュレーションを行い、ATR 法の効果を調べた。図に示すように、ATR 法を用いない従来

方式(SVD法)の場合、プラズマ電流や楕円度、三角度が目標値から外れ、制御不能になり、垂直位置移動現象により計算不能となる。これは多数の制御点を最小二乗的に制御するのに必要な電源電圧が大きく、図(e)に示すように、ポロイダルコイル(例えばEF3)電源電圧が定格 ($\sim\pm 1\text{kV}$) に対して飽和してしまうことで生じる (10 s 付近や、14 s 付近)。一方で、ATR 法を用いることで、適切な正則化がなされ、電源電圧の飽和を回避し (図(e))、楕円度・三角度両者の制御に成功した。

本発表では ATR 法による悪条件性の解消に加えて、制御点動的探索法を用いて、解の性質を最小二乗解からノルム最小解へと変化させることで、目標楕円度・三角度に対する追従性や応答性がさらに改善することも併せて示す。

参考文献

- [1] S. Inoue *et al.*, Nucl. Fusion 61, 096009 (2021).
 [2] D. Corona *et al.*, Fusion Eng. Des 146, 1773 (2019).

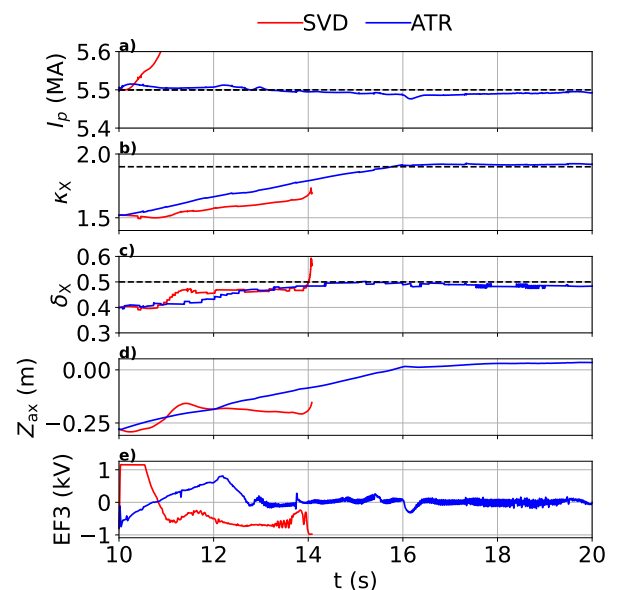


図1 プラズマパラメータの時間発展。上から(a)プラズマ電流、(b)楕円度、(c)三角度、(d)プラズマの垂直方向位置、(e)EF3 電源電圧。