

論文の内容の要旨

論文題目 Research on robust control for fusion core plasmas
(核融合炉心プラズマのロバスト制御に関する研究)

氏名 三善 悠矢

1. 研究背景

近年様々な代替エネルギーが研究されているが、核融合炉もその中の一つとして世界各国で研究がなされている。現在エネルギー利得が10倍を超えることを目標に、日本、アメリカ、ロシア、EU、インド、中国、韓国の七カ国の協力の下、実験炉ITERがフランスにおいて建設中である。ITERでの成果を受け、原型炉を建設し、21世紀半ばを目途に核融合発電炉の見通しをつけるべく研究開発が進められている。特に核燃焼プラズマを対象とするITERや原型炉、さらには商用炉において、炉心プラズマの制御は最も重要な課題の一つである。将来の炉の制御を考えた際、高い熱負荷や中性子負荷の影響で、設置可能な機器に制限が掛ることが予想される。そのため最優先で制御すべき物理量は何か、そのために設置すべき、もしくは設置可能な制御機や測定機は何かという議論が必要となる。また、複数のプラズマ物理量の同時制御だが、一般的に制御機と制御量は必ずしも1対1対応しない。このような状況の中、設置可能機器や制御対象といった条件に対し柔軟に対応できる制御系の設計手法が求められる。本研究においては現代制御理論、ロバスト制御理論を用いた制御機を設計することにより、将来の核融合炉における制御系設計手法の構築を目標とした。

2. 1次元コードによる燃焼制御シミュレーション

現在、産業界において最も広く使われている制御理論は、制御対象の応答特性に基づいたPID制御理論であり、現在のプラズマ実験においてもそれは同様である。PID制御理論は古典制御理論の中の一つであり、この理論の中において制御機の出力は制御対象と目標値との偏差の比例量 (Proportional)、積分量 (Integral)、微分量 (Differential) の線形和に依って決定される。それぞれの項の係数はゲインと呼ばれ、ゲインの選び方により制御系の性能が決定される。PID制御理論の最大の利点は、応答特性から実用的なゲインを決定する手法が確立されており、制御対象の物理モデルが分からずとも制御が出来る点にある。しかしこれは1入力1出力のシステムを前提とした手法であるため、将来の核融合炉の様な複数入出力のシステムにおいても使用できるか否かは自明では無い。本研究においては1次元プラズマ輸送解析コードによる燃焼制御シミュレーションを通し、応答特性からのゲイン決定によるPID制御が核融合炉制御に適しているかを検討した。その結果、ガスパフによる核融合出力 P_{fus} 制御、NBIによる安全係数最小値 q_{min} 制御の2パターンの1入出力制御シミュレーションにおいて、

上記手法によって設計されたPID制御機は制御対象を目標値と追従させることが出来た。次に、両者の同時制御を試みたところ、2時制のゲイン行列要素を丹念に微調整することにより、ほぼ目標値に追従させることはできた。ただし、さらに多くの制御パラメータを同時に制御するためには、従来のPIDゲイン決定法をそのまま核融合炉に使用することは困難であると言えよう。

3. モデルベースのPID制御

本研究においては物理モデルからの制御機設計、複数入出力システムに対する制御機設計と言う二つの特徴を内包した理論である現代制御理論を使用し、炉心プラズマの多変数同時制御を試みた。現代制御理論においては、制御対象の物理モデルを $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{y} = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ という形式で表現する。ここで \mathbf{y} は制御対象のベクトルであり、 \mathbf{u} は制御機、 \mathbf{x} は内部状態を表している。現代制御理論においては、これらの常微分方程式を線形化することによって得られる以下の方程式を使用して制御機を設計する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$$

上式は線形状態方程式と呼ばれ、この式を使用することで制御問題を線形代数問題へと帰着させることが出来る。ここではまず代表的な手法である極配置法を使用した。 $\mathbf{C} = \mathbf{I}, \mathbf{D} = \mathbf{0}$ の場合において、 $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ と言うフィードバックを考える。その時微分方程式は $\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x}$ となり、その解の各成分は指数関数の線形和となり、それぞれの時定数は $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$ の固有値になることが知られている。よって制御要求を満足する固有値（極）を持つように \mathbf{K} を決定すれば良い。

本研究においては、まず制御手法の妥当性を検証するため、プラズマ電流 I_p 、全プラズマ粒子数 N 、全プラズマ蓄積エネルギー W_p の3つのパラメータの時間発展方程式を導き、0次元のプラズマ制御シミュレーションに基づく炉心プラズマ制御を試みた。まず、構築した0次元モデルより線形状態方程式を導き、制御対象をプラズマ電流 I_p 、核融合出力 P_{fus} 、平均プラズマ密度 $\langle n_e \rangle$ とし、制御機を誘導電流、NBI、ガスパフとしたうえで以下のように拡張した線形状態方程式を元にし、極配置法を用いPIゲインを決定した。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \int \mathbf{y} dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{C}^{-1} & 0 \\ \mathbf{I} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \int \mathbf{y} dt \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C}\mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{u}$$

設計したPI制御機を使用し、0次元シミュレーションを行った。まず $I_p = 15\text{MA}$ 、 $P_{fus} = 400\text{MW}$ 、 $\langle n_e \rangle = 1.0 \times 10^{20}/\text{m}^3$ と言う初期状態より、 P_{fus} のみ目標値を500MWに変化させたところ、他の2つのパラメータは一定に保たれたまま20秒程度で目標値に追従した。また、外乱としてプラズマ閉じ込め特性の指標であ

るHHファクターを10パーセント減らしたところ、出力に1割ほどのアンダーシュートが出たが30秒程度で回復した。これらの結果より、核融合プラズマに対し現代制御理論を用いれば、カップリングの強いパラメータを独立して制御できる可能性を示せた。

4. H^∞ 制御

核融合プラズマは非常に複雑な系であり、その正確な物理モデルは未だに確立されていない。そのため現代制御理論の様な物理モデルを元とした制御機設計手法を用いた際、実際のプラズマの挙動と物理モデルとの差（以下モデル化誤差）の影響が大きくなる可能性が高い。そのため核融合炉制御を考えた際、モデル化誤差の影響を抑えるための理論であるロバスト制御理論が適していると考えられる。 H^∞ 制御理論は代表的なロバスト制御理論の一つでありモデル化誤差の影響を H^∞ ノルムと呼ばれる量で評価する。 H^∞ ノルムとはある系の伝達関数の最大ゲインを表しており、これが最小となるよう制御機は設計される。線形状態方程式で表される伝達関数を $P(s)$ とし、実際のシステムの挙動が $P(s)(I + \Delta)$ とモデル化誤差 Δ を使って表せるとすると、 Δ の影響を抑えるためには $T(s) = (I + PK)^{-1}P$ の H^∞ ノルムを最小とするようなフィードバックゲイン K を決定すれば良いことが知られている。また、目標追従性能を上げるためには $S(s) = (I + PK)^{-1}$ の H^∞ ノルムを最小とすればよい。しかしここで $S(s) + T(s) = I$ という関係が成り立つため、モデル化誤差の影響を抑える性能（以下ロバスト性能）と、目標追従性能を同時に達成することは不可能となる。ただし一般的に、目標追従性能が求められるのは低周波数帯であり、またロバスト性能が求められるのは高周波帯である。そのためローパスフィルタ $W_s(s)$ と、ハイパスフィルタ $W_t(s)$ を用い、 $W_s(s)S(s)$ と $W_t(s)T(s)$ の H^∞ ノルムを同時に低減させるような制御機を設計すれば良い。重み関数の選択が H^∞ 制御機の性能を決定することになる。

本研究においては試行錯誤的に決定された重み関数により設計された H^∞ 制御機を用い、前節と同様の条件で0次元シミュレーションを行った。結果として P_{fus} 目標値の変化に対して1秒程度で追従でき、またHHファクターの変化に対して即時に対応し変動がほぼ0となった。これは前節のPI制御機よりもはるかに高い目標追従性能とロバスト性能を表しており、核融合炉に対する H^∞ 制御理論の適性が示唆された。また、設計された H^∞ 制御機と、対角項の低周波成分が一致するようにゲインを再調整したPI制御機によって各パラメータに対する目標追従性、内部状態の変化に対するロバスト性能を比較したところ、ほぼ同性能と言う結果が得られた。これらの結果より、ゲインの適切な調整により、PI制御でも目標追従性、ロバスト性能が得られる可能性が示唆された。

5. 分布制御

将来の核融合炉においては、0次元の物理量だけでなく、分布制御が求められる。この際、制御対象の数が制御機の数よりも多いという状況が想定される。この場合全ての物理量を目標値に追従させることは不可能であるため、それぞれの偏差の和を最小とする等の制御を行う必要があると考えられる。本研究においてはプラズマの安定性への寄与が大きい電流分布制御を対象とし、制御手法の検討を行った。プラズマの電流分布情報を表す式は以下の様な磁束の拡散方程式となる。

$$\frac{\partial \Phi_p}{\partial t} = \frac{\eta}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi_p}{\partial r} \right) + 2\pi R \eta j_{ni} - \dot{\Phi}_{CS}$$

現代制御理論、ロバスト制御理論を使用するためには状態方程式、すなわち常微分方程式が必要となるため、上記拡散方程式を何かしらの手法で常微分方程式に変形する必要がある。今回は基底関数を用いて両辺を以下のように近似的に分解する手法を用いた。

$$\sum \frac{d}{dt} \Phi_k(t) f_k(r) = g_k(t) f_k(r)$$

この手法により今回は4つの分布パラメータの時間発展方程式を導き、総エネルギー、総粒子数も加えた6成分の時間発展方程式を構築した。構築された式を用い、ガスパフ、NBI、RF、CSコイル磁束の4つの制御機により I_p 、 P_{fus} 、 $\langle ne \rangle$ 、 q_0 、 q_{min} 、 r_{min} (q_{min} の位置) の6変数を制御する制御機的设计、及びベンチマークを行った。制御機的设计においては、以下に示される評価関数を最小とする最適制御理論を用いた。

$$J = \int_0^{\infty} [x^t Q x + u^t R u] dt$$

ここで Q 、 R はパラメータに対する重みづけである。ベンチマークの結果、各パラメータを目標値近くに維持することに成功した。分解のための最適基底関数の選定、最適な重み関数の選定など課題は残るものの、分布制御に対する基本方針を提示できた。

6. まとめ

将来の核融合炉運転に向け、制御対象、設置可能機器などの条件に柔軟に対応できる制御系設計手法が求められている。本研究では、モデルベースの制御系設計手法である現代制御理論、ロバスト制御理論の核融合炉への適用を行うことで制御系設計手法の基本方針を提案し、0次元および1次元のシミュレーションを通して炉心プラズマ制御に対する有効性を示した。より厳密なシミュレーターや、プラズマ実験を通しての有効性の確認が今後の課題となる。