

称号及び氏名 博士（工学） 勝俣 久敏

学位授与の日付 令和 4 年 9 月 23 日

論文名 「興奮性媒体に生じる非線形時空現象のダイナミクス推定と
モデルベース制御」

論文審査委員 主査 小西 啓治
副査 久保田 寛和
副査 林 海

論文要旨

自然界には、秩序のある「リズム」や「パターン」を自律的に形成する「自己組織化現象」がいたるところで見受けられる。例えば、生物の分野では、動物の体表に現れる縞模様や一定のリズムで拍動する心臓、化学の分野では、結晶構造の生成や BZ 反応などが挙げられる。自己組織化現象のメカニズムは数理モデルを用いて調査されている。この数理モデルの代表例の一つに「反応拡散系」がある。反応拡散系は、系に生じるリズムやパターンの特徴によって、興奮性、振動性、チューリング性、双安定性というカテゴリに分けられている。

興奮性に分類される反応拡散系は「興奮性媒体」と呼ばれており、媒体の一部に刺激を受けると、その刺激が興奮波として周囲に伝搬する特性を持つ。この興奮波は、適切な条件を与えることで、同心円状や渦巻状の特徴的なパターンを形成する。これらは、前述した自己組織化現象が発生する心臓や BZ 反応で観測される。心臓に発生する渦巻状パターンは不整脈を引き起こす要因の一つであることが知られている。そこで、渦巻状パターンを除去する制御法が提案されている。これは、興奮波の伝搬によって生じる「ネガティブな事象」を避けることに相当する。それとは反対に、興奮波を「ポジティブな事象」として活用する事例も報告されている。例えば、伝搬する興奮波によって膨張・収縮運動する「BZ ゲル」や、興奮波の伝搬・衝突・分裂といった特性を利用した「情報処理」が挙げられる。

興奮性媒体を工学的な視点で活用する事例は多数報告されているが、これらの活用事例の更なる拡張や効率的な実装のためには、反応拡散系に生じるパターンを自由自在に制御する手法の確立が不可欠である。反応拡散系に生じるパターンの選択や抑制を「フィードバック制御」で実現する事例が報告されている。さらに、フィードバック制御により、自然界では観測できなかった新たなパターンが観測できる事例として、不安定な「wave segments」の安定化がある。Wave segments は、人為的に制御しなければ、渦巻状パターンや時空カオスに遷移する、または消滅

してしまう。しかし、wave segments の大きさに比例した強度の制御信号を印加することで、wave segments の形状を維持することができる。これらを実現する実験と数値シミュレーションが Sakurai らによって報告されている。また、安定化された wave segments に関する理論的なアプローチも進められている。

Wave segments を活用している代表的な事例としては、前述した「情報処理」への応用の一つである論理回路が挙げられる。Adamatzky らが提案した論理回路に存在する「fusion gate」と呼ばれる領域では、wave segments が一定の大きさと伝搬する必要がある。このような wave segments の活用事例をさらに拡張していくためには、次の 2 つの問題を解決しなければならない。1 つ目の問題は、wave segments を所望の大きさへ安定化することが難しい点である。wave segments の安定化に関する先行研究の大半では「比例制御 (P 制御)」が用いられていた。この比例制御には、定常位置偏差を伴うことがシステム制御工学分野では知られている。したがって、所望の大きさを目指値として与えたとしても、wave segments は目標値と異なる大きさへ収束してしまう。2 つ目の問題は、wave segments が外乱によって容易に消滅してしまう点である。実システムでは、媒体に不均一な領域が生じることは避けられない。この不均一性により、wave segments は形状を維持できなくなり、最終的に消滅してしまう。もしこれらの問題が解消できれば、wave segments の取り扱いが容易となり、実システムへの適用に要する手間や費用の削減が期待できる。

そこで、本論文では、wave segments の制御に関して、下記の 3 つの課題に取り組む。(課題 A) wave segments の大きさを、所望の値へ偏差無く安定化させる。(課題 B) wave segments の大きさを、変動する目標値へ俊敏に追従させる。(課題 C) 目標値が大きく変動したり、媒体に不均一領域(障害物)が存在しても、wave segments を消滅させない。これらの課題の解決が、本論文の目的である。以下に各章の内容を示す。

第 1 章では、本論文の研究背景・目的・各章の概略を示した。

第 2 章では、比例制御システムに積分器を追加した「PI 制御システム」を構築した(課題 A)。比例制御システムでは、wave segments を目標値へ正確に収束させたい場合、制御パラメータの一つである「オフセット入力」を適切な値に設定する必要がある。一方、構築した PI 制御システムでは、オフセット入力を試行錯誤して決定することなく、wave segments が目標値へ偏差無く安定化することを数値シミュレーションで確かめた。また、「目標値を異なる値へ変更する」「媒体に不均一な領域が存在する」とした状況においても、PI 制御システムでは目標値へ正確に安定化した。さらに、定常状態近傍では wave segments のダイナミクスが線形システムに近似できると仮定し、PI 制御システムに偏差が生じない根拠を解析的に示した。最後に、PI 制御システムのゲイン領域における安定領域を調査した結果、wave segments が安定化するゲインの組み合わせは数多く存在することが分かった。

第 3 章では、wave segments の定常状態近傍のダイナミクスを推定し、推定したモデルに基づいて「2 自由度制御システム」を構築した(課題 B)。Wave segments のダイナミクスを反応拡散モデルから解析的に導出するのは困難であるため、本論文では入出力の時系列データから伝達関数を推定した。ダイナミクスの推定は、次の 2 つのステップで実施した。1) wave segments を安定化させる PI 制御システムを構築し、ランダムに変動させた目標値(入力時系列)に対する出

力時系列を得る。2) 評価関数が最小となる未知パラメータを最適化計算により求める。この評価関数は、ステップ 1) で得た入出力時系列データと、未知パラメータを伴う伝達関数から算出される。次に、推定した伝達関数に基づき、2 自由度制御システムを構築した。このシステムでは、目標値から出力までの応答を所望の伝達関数で与えることができる。その結果、PI 制御システムに比べ、2 自由度制御システムでは目標値追従性能が向上した。

第 4 章では、推定したモデルの精度の検証と、「最適サーボシステム」の構築を行った(課題 C)。第 3 章で推定したモデルに基づいて構築した制御システムの性能は、推定モデルの精度に大きく左右される。推定モデルに大きな誤差が含まれる場合、制御性能が低下するだけでなく、制御システムが不安定になる可能性もある。そこで、第 3 章では検討されていなかった「根軌跡」「ゲイン安定領域」「周波数応答」の視点で推定モデルの精度を検証した。その結果、「根軌跡」「ゲイン安定領域」では 2 次および 3 次が妥当であり、「周波数領域」では 3 次での推定が適切と分かった。さらに、制御入力の変動量を重みで調節できる「最適サーボシステム」を構築した。最適サーボシステムでは、入力重みを大きな値に設定することで、「目標値の大きな変動」「障害物」が伴う場合でも、wave segments は消滅せずに目標値へ安定化した。最後に、本論文で用いた数理モデルの普遍性と、本章で取り組んだ頑健性向上が活用できる事例について、筆者らの見解を述べた。

第 5 章では、本論文の結論と今後の課題について述べた。

審査結果の要旨

本論文では、興奮性媒体を伝搬する wave segments の安定化制御に関する課題の解決に、システム制御工学の知見が有効に利用できることを示しており、以下の成果を得ている。

- (1) 従来の安定化制御で使用されてきた「比例制御」に積分器を追加した「PI (Proportional-Integral)制御システム」を構築した。このシステムにより、試行錯誤が伴うオフセット入力の調整をすることなく、wave segments は所望の大きさを保ちつつ安定化した。所望の大きさを異なる値に変更した場合でも、変更後の大きさを正確に安定化した。さらに、媒体が不均一であった場合でも、所望の大きさを維持しつつ安定化した。
- (2) モデルベース制御システムとして知られている「2 自由度制御システム」を構築した。この構築に必要な制御対象(wave segments)のダイナミクスは、PI 制御システムで観測した時系列データを用いて推定した。推定結果から、wave segments のダイナミクスは、2 次遅れ系の伝達関数で近似的に表現できることが明らかになった。この伝達関数を用いて構築した 2 自由度制御システムでは、wave segments は変動する所望の大きさへ敏速に追従した。
- (3) 上記で得た推定モデルの詳細な検証と、検証結果に基づいた「最適サーボシステム」を構築した。詳細な検証として、「根軌跡」「ゲイン安定領域」「周波数領域」の視点で、推定モデルの妥当性について考察した。結論としては、「根軌跡」「ゲイン安定領域」の視点では 2 次および 3 次遅れ系の伝達関数が妥当であり、「周波数領域」の視点では 3 次遅れ系の伝達関数に

よる推定が適していた。最適サーボシステムを、推定した 2 次および 3 次遅れ系の伝達関数に基づいて構築した。このシステムにより、「所望の大きさに大幅な変動」や「障害物」が存在しても、wave segments は消滅することなく、所望の大きさを維持しつつ安定化した。

以上の諸成果は、システム制御工学分野で体系化された知見が、異分野である非線形時空現象の高度な制御に有効であることを示しているだけでなく、反応拡散系の工学的活用に不可欠な基盤技術の一端を担う可能性も秘めている。また、申請者が自立的に研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。