

報告番号	甲 第	号
------	-----	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Reduced Order Sparse Modeling for Sensitivity Coefficient Evaluation in Core Analysis**  
(炉心解析における感度係数評価に向けた次元削減スパースモデリング法の開発)

氏 名 方野 量太

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、スパースモデリング手法の一つである lasso 回帰と自由度削減のための Reduced Order Modeling (ROM) に着目し、炉心解析の信頼性を確立する上で重要な核データ起因不確かさの定量評価及び低減のための感度係数評価を効率的に行う手法の開発についてまとめたものである。

本論文は全 5 章で構成されており、第 1 章では本論文の導入として、本研究の背景及び目的を述べる。通常の炉心解析を行う forward 計算のみに基づく従来の感度係数評価手法が抱える課題を解決するため、第 2 章では lasso 回帰分析を改良した新たな罰則化回帰分析手法、第 3 章では Active Subspace (AS) 基底を用いた Reduced Order Modeling (ROM) と組み合わせた新たな回帰分析手法に基づく感度係数評価手法を考案する。第 4 章では、提案した手法で評価した感度係数を用い、革新的原子力システムへの応用の一例として加速器駆動システム (ADS) の核データ起因不確かさに関する検討結果を示す。最後に、第 5 章で本論文の結論及び今後の課題を述べる。

感度係数は、ある核データの微小な変化に起因する炉心核特性の変化の割合、すなわち一次偏微分係数で定義される量である。感度係数を用いることで、核特性への核データ起因不確かさの伝播の様子を分析することが可能となる。さらに、臨界ベンチマーク実験などの積分実験を活用して核データ起因不確かさの低減を狙うデータ同化を行う際にも、感度係数は重要な役割を担う。

従来、特に臨界ベンチマーク実験や高速炉に対する感度係数評価には随伴法が用いられてきた。随伴法では、各核特性に定義される随伴中性子束を求め、1回の forward 計算で得られた中性子束と随伴中性子束を用いた内積演算のみで感度係数を評価する。随伴法の計算コストは、入力となる核データの数ではなく、対象とする核特性の数に比例するため、核特性の数が考慮する核データ数より遥かに少ない場合には計算コストの観点で大きく有利である。しかし、随伴法は随伴方程式の定式化と解析システムにそれを解く機能を実装する必要がある。また、随伴中性子束の計算を行う adjoint 計算には、forward 計算とは異なる、時に物理的解釈が難しい直交条件や初期条件といった特別な取り扱いが必要である。さらに、燃焼及び熱水力フィードバックを考慮したマルチフィジックス解析においては良く知られた定式化は無く、adjoint 計算の実装や実行が困難となる。この問題は、従来システムとは異なる定式化と解析を要する可能性がある革新的な原子力システムにおいて特に深刻となることが予想される。加えて、複数の時間ステップにおける出力の空間分布や様々な核種の燃焼後の質量といった、多数の核特性を考慮する場合には随伴法の利点は小さくなる。したがって、adjoint 計算を用いない感度係数評価手法の開発が強く望まれる。

こうした背景から、本研究では forward 計算に着目する。最も単純な、forward 計算に基づく感度係数評価手法は、直接法である。直接法では、感度係数の定義に従い、対象とする核データの各々に摂動を与えた forward 計算を行い、興味のある核特性の変動量から感度係数を求める。この方法では、膨大な数の核データに対して都度 forward 計算を行う必要があり計算コストの観点で課題があるが、解析システムに大幅な変更を加えることなく実行可能であり、さらに、随伴法とは反対に、複数の核特性の感度係数を一斉に評価できるという利点がある。したがって、何らかの方法で必要な forward 計算回数を低減することができれば、そのような forward-based な手法は様々な炉心や核特性の感度係数評価を行う強力な手法となる。そこで本研究では、スパースモデリングと ROM に着目し、forward 計算のみで効率的に感度解析を行う手法開発を目的とする。また、手法の開発に加え、革新的な原子力システムの不確かさ評価及びデータ同化への感度係数の応用の一例として、ADS の核特性の核データ起因不確かさ及び低減に取り組むことで、感度係数評価から不確かさ評価やデータ同化まで行う forward-based な方法論の適用性を示す。

第 2 章では、lasso タイプ罰則化回帰分析に基づく新たな感度係数評価手法として、adaptive smooth lasso を提案した。

入力となる核データのランダムサンプリングを行い、感度係数評価を核データと核特性間の線形回帰分析問題に帰着させることで、計算コストを核データの数からサンプル数にまで低減するアプローチは既往研究において提案されていた。中でも、多くの核データに対して感度係数が小さくなく、感度係数を解ベクトルとみなした際に非ゼロ要素が疎ら、すなわちスパースであることに着目し、スパース性を誘導するために解ベクトルの要素の絶対値の和で与えられる L1 ノルムに拘束条件を加えるアプローチは、より少ないサンプル数、

すなわち、より少ない **forward** 計算回数で感度解析を行う有効な方法であることが示されていた。しかし、スパース性にのみ着目するアプローチでは、どの核データが大きな感度係数を有するのか否かについて、全くの未知であると仮定していたため、少ないサンプル数では感度係数の誤推定や統計誤差が大きくなるなどの課題があった。本論文の第 2 章では、このアプローチの改良を目的とし、感度係数のスパース性に加えて、i) 入射中性子エネルギーに対する感度係数の連続性と、同時に ii) 閾値反応や巨大共鳴に起因する入射エネルギーに対する感度係数の急峻な変化を考慮し、罰則化項を工夫した新しい回帰分析手法 **adaptive smooth lasso** を提案した。提案手法の罰則化項は、他分野で提案されていた回帰分析手法の一つである **smooth lasso** を参考に、解ベクトルのスパース性を誘導することを狙った L1 ノルムと、入射中性子エネルギーに対する連続性を誘導することを狙った隣接要素の差の二乗和との和で与えられる。さらに、提案手法の罰則化項は、要素の絶対値や隣接要素の差の二乗についての単純な和ではなく、罰則化項内の要素ごとに罰則の強さを変化させる重みを設定した、重み付け和を取るようになっている。これらの重みは、**smooth lasso** を予め実施して感度係数のおおよその分布を推定し、その推定結果に基づいて特に感度係数の絶対値が大きい要素とその隣接要素に対して急峻な変化を許容するよう、適応的に設定される。提案手法では、そのように設定された重みを用いて再び回帰分析を行う二段階の回帰分析により、感度係数の特徴をより良く捉え、より少ないサンプル数で感度係数を評価することを狙う。

提案手法の有効性を調べるために行った、サイクル初期 ADS の実効増倍率の感度解析を通じて、新たに提案した **adaptive smooth lasso** は、直接法による結果を、従来の L1 ノルム正則化の **lasso** 回帰と比べて半分程度のサンプル数で再現できることを示した。

第 3 章では、**Active Subspace (AS)** 基底を用いた次元削減手法によって劇的に計算コストが改善された **ROM-Lasso** 法を提案した。

第 2 章の検討において、**adaptive smooth lasso** により直接法と比較して計算コストが 10 分の 1 程度にまで低減可能であることを示したが、10000 個程度の核データに対して 1000 回程度の **forward** 計算を要し、依然として計算コストが高かった。そこで本論文の第 3 章では、更なる計算コストの低減に向けて、**AS** 基底を用いた次元削減手法に着目し、新たに **ROM-Lasso** 法を提案した。**ROM-Lasso** 法では、感度係数を少ない自由度で表現可能な **AS** 基底で展開し、展開係数のスパース性に着目した **lasso** 回帰分析によって展開係数を推定する。**AS** 基底は、既往研究で提案されていた **Multi-Level Reduced Order Modeling** の考え方を参考に、より計算コストの少ない低次元モデルで得られる感度係数行列を用い近似的に構築する。低次元モデルで得られた **AS** 基底を対象とする高次元モデルの感度係数ベクトルの展開に用い、実効的な自由度を大幅に削減することで、全体の計算コスト低減を狙う。

提案手法の有効性を調べるために行った、ADS の 1 サイクルの燃焼解析を通じ、**ROM-Lasso** 法では高次元モデルの感度係数評価に必要な **forward** 計算回数を、直接法では 13510

回必要であるところを、30回まで大幅に低減することができた。また、forward 計算の利点である、複数の核特性の感度係数を同時に評価できることも示した。

第4章では、ROM-Lasso 法で評価した感度係数を用い、ADS 冷却材ボイド反応度の核データ起因不確かさに関する検討を行った。

本論文の第2章及び第3章では、効率的な感度係数評価手法に取り組んだ。ただし、核データ起因不確かさを低減するためには、感度係数評価だけでなく、適切な積分実験データを活用したデータ同化を実施することが重要となる。データ同化とは、積分実験に関して、事前に予測された数値解析結果に測定結果を取り入れることによって、計算の入力値である核データを調整、予測結果のバイアスや不確かさの改善を図る方法論である。本論文の第4章では、革新的原子力システムの不確かさ評価及びデータ同化の応用の一例として、京都大学臨界集合体 (KUCA) で実施した鉛ビスマスのサンプル置換反応度実験の測定結果を活用したデータ同化を通じ、ADS 冷却材ボイド反応度の核データ起因不確かさ低減検討を行った。本研究では、データ同化に必要な実験不確かさ及び実験シリーズ間の相関を新たに評価した上で、データ同化を実施した。

解析の結果、KUCA で取得したサンプル置換反応度の計算値と実験値の比である C/E 値が実験不確かさの範囲内で 1 に近づき、KUCA 実験解析に対する核データ精度の向上が確認できた。さらに、第3章において ROM-Lasso 法によって得た感度係数を用いることで、ADS 冷却材ボイド反応度の核データ起因不確かさが、データ同化によって 6.3% から 4.8% 未満にまで低減することができ、経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) の核データ評価協力ワーキングパーティ (WPEC) において提案されてきた目標精度参考値 5% を達成できる点を解明した。本検討によって、感度係数評価から不確かさ評価やデータ同化まで行う forward-based な方法論の適用性を実証できた。

第5章では、第1章から第4章の要点を示すとともに、各章で得られた成果と今後の課題をまとめ、本論文の総括とした。

以上の成果により、随伴法に頼らない、様々な核特性に適用可能でかつ実用的な感度係数評価手法が開発できた。さらに、革新的システムへの感度係数評価から不確かさ評価やデータ同化まで行う forward-based な方法論の適用性を示した。本成果が炉心解析の信頼性を確立する上で重要な核データ起因不確かさの定量評価及び低減、ひいては原子力の安全性向上に資するものと期待される。