

|      |     |   |
|------|-----|---|
| 報告番号 | 甲 第 | 号 |
|------|-----|---|

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 **IMPROVEMENT OF NUMERICAL STABILITY AND CALCULATION EFFICIENCY OF THE METHOD OF CHARACTERISTICS BASED ON THEORETICAL APPROACHES**  
(理論的アプローチに基づくキャラクターリステックス法の数値安定性及び計算効率の改善)

氏 名 田 渕 将 人

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、原子力発電の安全性向上及び原子燃料の有効利用に資することを目的として、商業用軽水炉の炉心管理における炉心核計算手法の高度化を検討した。それを達成する具体的方法として、現行の燃料集合体計算や将来の炉心計算の高度化において重要な核計算手法である Method of Characteristics (MOC)に着目し、理論的なアプローチにより、MOCの現状の課題である数値安定性及び計算効率の改善を図った。

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、研究の背景及び目的等について示す。第 2 章では MOC の数値安定性の改善、第 3 章及び第 4 章では MOC の計算効率の改善に対する研究成果をそれぞれ示す。最後に第 5 章にて本論文の要点及び成果を総括する。以下、第 2 章以降の要旨を示す。

第 2 章では、MOC の数値安定性の改善について検討した。MOC において特に数値安定性が問題となるのは、非等方散乱の効果を考慮するため、巨視的全断面積に輸送補正を適用した場合であり、効率的な手法として既存の輸送計算コードにおいて広く用いられている。輸送補正では、等方散乱近似を仮定した中性子輸送方程式において、全断面積を用いるべき箇所を輸送断面積に置換することのみで非等方散乱の効果を考慮することが可能で

ある。つまり、計算負荷の小さい等方散乱近似を用いつつ非等方散乱の効果を考慮することができる。その一方で、前述のとおり、輸送補正を用いた場合に反復計算の収束性悪化が見られ、水反射体を多く含む計算体系などのある特定の条件下において特に顕著になる。この問題に対して、本研究では MOC の内部反復に着目し、輸送補正に伴う収束性悪化の理論的原因を調査した。また、収束性を改善する手法を検討した。

輸送補正に伴う収束性悪化の原因を調査するにあたり、領域平均中性子束の収束過程を漸化式で表現した際の反復行列の固有値に着目した。これは、反復行列の固有値の絶対値のうち最大のものとして定義されるスペクトル半径が、1 未満であれば収束、1 を超えると発散という性質を持っているためである。そこで、反復行列を解析的に導出したうえで、その固有値の範囲を Gerschgorin の定理に基づき求めた。その結果、輸送補正を適用しない場合、スペクトル半径は必ず 1 未満になる一方、輸送補正を適用する場合において、スペクトル半径が 1 以上になる可能性があることが判明した。さらに考察を進め、輸送補正適用時に自群散乱断面積を大きく負側に変化させることが、収束性が悪化する根本原因であることを突き止めた。導出した理論が妥当であることは数値計算を通して実証しており、本理論により輸送補正に伴う収束性悪化の原因を初めて明らかにすることに成功した。

収束性改善の検討では、線形方程式の反復解法における加速法の一つである SOR 法に着目した。SOR 法において重要となるのは加速因子の与え方であり、不適切な加速因子を与えた場合、むしろ収束性の悪化を招くこともあり得る。本研究では、MOC の内部反復に SOR 法を適用した場合の固有値の変化に基づき、最適加速因子を求めるための式を解析的に導出した。また、本研究にて導出した加速因子に基づく SOR 法の効果を数値的に検証し、予期したとおりの収束性改善効果が得られることを確認した。同加速因子を用いることにより、収束が困難な条件に対しても安定して収束解が得られるようになり、MOC における輸送補正適用時の収束性悪化の問題を解決できたことを確認した。

第 3 章では、MOC の計算効率の改善について検討した。MOC の計算効率改善を図る手法として、過去の研究において離散化誤差を低減する計算手法が数多く提案されてきた。これに対し、本研究では過去に提案された手法とは異なる観点として、核計算において重要なパラメータである透過確率に着目し、それを保存することによる離散化誤差低減手法の構築を図った。なお、透過確率の保存とは、粗いレイトレース条件で評価した透過確率が詳細なレイトレース条件での値と一致することを指しており、セグメント長を補正することによりその実現を図る。透過確率を保存するための実効的なセグメント長（以降、実効セグメント長）は数式にて容易に表現することが可能であるが、実際にそれを求めるためにはセグメント内の詳細な線長分布を基にした演算量の多い数値積分が必要となる。また、実効セグメント長はレイトレース情報のみならず、全断面積や極角によっても異なり、多くのパラメータに依存する性質を持つ。したがって、全ての実効セグメント長を求めて記憶しておくことは、演算量及びメモリ量のいずれの観点からも大きな計算負荷を要する

こととなり効率的ではない。そこで、本研究では大幅な計算負荷の増加なく実効セグメント長を評価可能な手法を検討した。実効セグメント長を求めるうえでの問題点の 1 つであった数値積分による演算量の増加を防ぐため、本研究ではセグメント内の線長分布を線形と仮定することにより、解析的な積分を試みた。その結果、実効セグメント長を求めるための数式として数値積分を含まないシンプルなものを出し、演算量増加の問題を解決した。また、当該数式には新たに定義した特殊関数が含まれているが、それは全てのセグメントにおいて共通のものであるため、それを記憶しておくためのメモリ量は全体に対して無視できるほどである。よって、メモリ量増加の問題についても本手法により解決した。以上より、本研究にて、大幅な計算負荷の増加なく透過確率を保存可能な手法（以降、線形近似透過確率保存法）の開発に成功した。

線形近似透過確率保存法での計算精度を確認するため、4 種類の単一燃料集合体体系を想定し検証計算を実施した。その結果、従来手法では粗いレイトレース条件を設定した場合において、参照解との差異が急激に拡大する傾向が見られた。また、参照解との差異はレイトレース幅の増加に従って単調に変化せず、振動する傾向も見られた。これに対して、線形近似透過確率保存法を用いた場合、極めて粗いレイトレース条件であっても安定して参照解との良好な一致が見られた。これらの結果より、線形近似透過確率保存法の適用による MOC の計算効率改善を確認した。

第 4 章では、第 3 章とは異なる観点からの MOC の計算効率改善を目的とし、簡易な計算条件での計算により詳細条件での計算と同等の結果を得られる手法（以降、等価因子法）について検討を実施した。代表的な等価因子法として SPH 法が知られており、均質化やエネルギー群縮約に伴う誤差の低減に対して有効であることが実証されている。本研究では、等価因子法を活用した燃焼計算スキームを考案し、それによる離散化誤差低減を図った。本研究にて考案した計算スキームでは、特定の燃焼ステップにおいて等価因子を計算し、それを他の燃焼ステップに流用する。等価因子の計算には付加的な計算負荷を要するが、等価因子が他の燃焼ステップに流用可能であれば、それを計算するための計算負荷を最大限抑えられることを狙いとしている。よって、本スキームにより、計算負荷の増加を最大限抑えつつ離散化誤差の低減が達成できれば計算効率の改善が期待できる。しかしながら、従来の等価因子法である SPH 法に基づいて本計算スキームを適用すると、燃焼に伴う全断面積及び中性子源の変化が大きい条件では、離散化誤差低減が困難であることを理論的に明らかにした。そこで、本研究では上記の計算スキームにおいて離散化誤差の発生を抑えられる新たな手法について検討を実施し、中性子束の離散化誤差の大きさが全断面積の逆数に比例すると仮定することで、中性子束を補正するための式を導出した。その式について考察した結果、領域ごとの中性子源と全断面積の比（以降、中性子源比）の分散を最小化する補正因子の導入により、中性子源変化に起因する離散化誤差成分を最小化できることを導いた。これにより、SPH 法と比較し離散化誤差が発生しにくい手法である中性子源

比最小化法を開発した。

中性子源比最小化法での計算精度を確認するため、4種類の単一燃料集合体体系を想定し検証計算を実施した。その結果、従来手法であるSPH法では、特にガドリニア入り燃料集合体体系において、極めて大きな離散化誤差が発生することが確認された。これは同体系では燃焼に伴う全断面積及び中性子源変化が顕著であるため、予想通りの結果である。これに対し、中性子源比最小化法では燃焼を通して参照解との一致は良好であることを確認した。ただし、中性子源比最小化法を適用するためには、従来のMOCに対して付加的な計算が必要となるため、計算時間は増加する傾向にある。よって、計算効率の評価の観点からは離散化誤差だけでなく、計算時間も考慮に入れた評価が必要である。そこで、得られた結果を計算時間と離散化誤差の関係で整理したところ、中性子源比最小化法の適用により、十分な計算精度を得るための計算時間は従来のMOCと比較し3分の1程度に短縮できることを確認した。また、MOCでの全炉心計算を見据えて、2×2燃料集合体体系においても同様の検証計算を実施した。その結果、中性子源比最小化法の適用により、十分な計算精度を得るための計算時間は従来のMOCと比較し4分の1程度に短縮でき、炉心計算への適用にも期待できることを確認した。これらの結果より、中性子源比最小化法の適用によるMOCの計算効率改善を確認した。

最後に第5章では、第1章から第4章における要点を示すとともに、各章で得られた成果をまとめ本論文の総括とした。本研究により、MOCにおける数値安定性及び計算効率上のいくつかの問題点を解決した。この成果は、炉心管理における炉心核計算手法の高度化を通じて、原子力発電の安全性向上及び原子燃料の有効利用に資するものである。