

報告番号	甲 第	号
------	-----	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Improvement of Computational Efficiency for Time-dependent Transport Calculations using Method of Characteristics**
(キャラクターリスティクス法を用いた時間依存輸送計算の効率改善)

氏 名 辻田 浩介

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、解析技術の高度化を通じ原子力の安全性向上に資することを目的として、Characteristics 法を用いた時間依存非均質輸送計算の計算効率の改善に関する検討を実施した。

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、本研究の背景及び目的について示す。第 2 章では、時間及び空間の離散化に関する取扱いの高度化による計算効率の改善、第 3 章及び第 4 章では次元圧縮モデルを用いた計算効率の改善に関する研究成果をそれぞれ示す。最後に、第 5 章で本論文の要点、成果及び今後の展望を総括する。

炉心解析は従来、複雑な中性子核反応のエネルギー依存性や体系の幾何形状を限られた計算機資源で効率良く取り扱うために、単一の燃料集合体内における中性子の挙動を詳細に取り扱ったうえで集合均質化断面積を計算する「集合体計算」と、集合体計算で得られた均質化断面積をもとに炉心全体の核特性を評価する「炉心計算」の二段階で構成されてきた。しかし、従来の集合体計算では隣接する燃料集合体との中性子のやり取りを考慮できておらず、得られた均質化断面積に含まれる二段階手法起因の近似誤差が予測精度の悪化の要因となっている。そこで燃料集合体の幾何形状を均質化することなく炉心全体の核特性を予測する高忠実度シミュレーションが注目されている。特に、時間依存の問題を取り扱う動特性計算における高忠実度シミュレーションには、空間的非均質性の取り扱いや

燃料棒出力等の局所的なパラメータに対する計算精度と計算コストの観点から **Characteristics** 法を用いた直接炉心計算が広く採用されている。しかし、**Characteristics** 法は原子炉内を様々な方向に飛行する無数の中性子の飛行パス（一集合体あたり約 $10^6 \sim 10^7$ 本程度）に沿った中性子の収支をそれぞれ解くことで最終的に各領域の中性子束を求める手法であり、商用炉のような大規模非均質体系の解析には近年の計算機性能の向上をもってしても膨大な計算時間を要する。ゆえに、商用炉の設計解析や事故時の安全性評価、炉心監視等のリアルタイム性が要求されるアプリケーションに対する **Characteristics** 法を用いた直接炉心計算の適用は極めて困難である。

本研究では、**Characteristics** 法を用いた時間依存中性子輸送計算を対象として、解析手法の計算効率の改善に関する検討を実施した。本研究の成果の要旨を以下に示す。

第 2 章では、**Multigrid Amplitude Function (MAF)** 法及び **Linear source** 近似法の適用により、**Characteristics** 法を用いた時間依存中性子輸送計算の高速化を図った。

Characteristics 法を用いた時間依存中性子輸送計算では、均質化を行わないことによる高い空間的非均質性とその時間的変化の両方を取り扱う必要があり、詳細な空間離散化と時間離散化により膨大な計算コストを要する。過去の研究では、**MAF** 法を用いた時間離散化誤差の低減により大幅な計算速度の改善を図ったが、空間離散化誤差が大きい非均質性の高い問題においては、詳細な空間メッシュ分割を要することで計算効率が悪化する点が課題であった。

本研究では、空間離散化誤差を低減し計算効率の向上を図るため、時間離散化に **MAF** 法、空間離散化に領域内での中性子束の勾配を考慮する **Linear source** 近似法を適用した計算スキームを開発した。提案手法の検証を空間的非均質性が高い **C5G7-TD 2** 次元ベンチマーク問題を対象に実施し、従来の **MAF** 法単体と比較して約 6.2 倍の高速化を実現した。

ただし、**Characteristics** 法では無数の中性子についてその飛行線上の中性子収支を計算する必要があり、**C5G7-TD 2** 次元ベンチマーク問題のような小規模炉心体系における 10 秒間の過渡事象の解析でも約 1 時間の計算時間を要しており、リアルタイム性が要求されるアプリケーションでの活用は依然として困難であった。そこで、以降の章では、リアルタイム性が要求されるアプリケーションでも活用可能な高効率な計算モデルの開発を目指し、次元圧縮技術の適用について検討した。

第 3 章では、リアルタイム性が要求されるアプリケーションに対しても適用可能な高効率な計算モデルの開発を目指し、次元圧縮技術として流体解析の分野でも活用されている **Proper Orthogonal Decomposition (POD)** の時間依存拡散計算に対する適用について検討した。

POD では、対象とする問題で現れる中性子束分布をより少ない自由度で表現する直交基底を予め特異値分解によって求めておき、中性子束分布の直交基底展開を行う。これによ

り、中性子のバランス方程式を直交基底の展開係数に関する方程式に変換することができ、大幅な自由度削減が実現される。ただし、動特性計算に対し POD を適用する上では、過渡時に現れる高次モードの中性子束分布の形状を表現可能な直交基底を構築する必要があり、そのような直交基底の効率的な推定方法が必要であった。

本研究では、過渡時における高次モードの中性子束分布を表現する直交基底の効率的な推定方法の探索を目的として、時間依存拡散計算を対象に、固有値計算や動特性計算からそれぞれ得られた中性子束分布を用いて直交基底を構築し、直交基底の違いが計算精度に与える影響について検証を実施した。TWIGL ベンチマーク問題における検証では、動特性計算から得られた中性子束分布を炉心出力で規格化した「中性子束分布の相対的な形状」を粗タイムステップの動特性計算から十分精度良く推定可能であることに着目した。粗タイムステップの動特性計算で得られた中性子束分布の相対的な形状に対して直交基底を構築することで、計算コストを抑えつつ、過渡時に励起される高次モードの中性子束分布を精度良く表現可能な直交基底を構築できることを示した。また、本検証では POD の適用により動特性計算自体については従来法の約 100 倍の高速化を実現しており、リアルタイム性が要求されるアプリケーションに対して POD が極めて有効なアプローチであることを示した。

本検証では、動特性計算に対する POD の実用性の検証のため集合体均質の時間依存拡散計算を対象としたが、非均質中性子輸送計算のように詳細度の高い計算ではメッシュ間の相関の増加に伴う圧縮効率の上昇により、POD の利点をより効果的に活用できる可能性があることから、第 4 章では Characteristics 法を用いた時間依存中性子輸送計算に対する POD の適用について検討した。

第 4 章では、Characteristics 法を用いた時間依存中性子輸送計算に対する POD の適用方法に関して検討を実施した。

POD では、行列で表現された中性子のバランス式を直交基底によって圧縮することで大幅な自由度の低減が可能である。一方、Characteristics 法で取り扱う中性子のバランス式は無数の中性子の飛行線毎に定義されることから、それら全てを行列で表現し、直交基底を用いて圧縮するには極めて膨大なメモリ量・計算量を要する。ゆえに Characteristics 法に POD を直接適用することは極めて困難であり、先行研究でも適用例はない。

本研究では、Characteristics 法で求めた非均質領域間の正味の中性子流と中性子束分布から、Characteristics 法における中性子バランスと等価となる拡散方程式を再構成し、当該拡散方程式に対して POD を適用した。提案手法を用いて C5G7-TD 2 次元ベンチマーク問題で検証を実施し、提案手法では Characteristics 法と同等の計算精度を保ちつつ、約 5000~6000 倍の高速演算を実現した。本検証における本手法の 1 ステップあたりの計算時間は約数ミリ秒であり、リアルタイム性が要求されるアプリケーションにも本手法を十分適用できることを示した。本研究では本手法の計算理論の実現性を実証するため、2 次元体

系を対象に検証を実施したが、直交基底による展開次数を小さく抑えることができれば、本手法は 3 次元炉心における中性子輸送計算のリアルタイム解析も実現できる可能性がある。

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と今後の展望をまとめ、本論文の総括とした。

以上の研究成果より、炉心計算における高忠実度シミュレーション技術の 1 つとして注目されている **Characteristics** 法を用いた時間依存中性子輸送計算において、計算コストに関する課題を解決できる手法を開発した。本成果を活用することで、高忠実度シミュレーションを、事故時の安全性評価における安全余裕の定量化や、オンライン炉心監視等のリアルタイム性が要求されるアプリケーションに適用できる可能性がある。本成果は高忠実度シミュレーションを適用可能な対象の拡大を通じて、炉心計算の予測精度改善、ひいては原子力の安全性向上に資するものである。