

Nonlinear Diffusion Acceleration Based on the Local Discontinuous Galerkin Method for the Neutron Transport Equation with Anisotropic Scattering

非等方散乱を考慮した中性子輸送方程式に対する 局所不連続ガラキン法に基づく非線形拡散加速

原子核エネルギー制御工学グループ 山本研究室 笠間 陸斗

1. 緒言

小型モジュール炉や核融合炉ブランケットの設計では、複雑な幾何形状と中性子の非等方散乱を正確に取り扱うことが重要である[1]。そこで、複雑形状への高い適用性を持つ不連続ガラキン有限要素法(DGFEM)に基づく中性子輸送計算が注目されている。しかし、非等方散乱がある体系では、散乱中性子源に起因して反復解法の収束性が低下するという課題がある。本研究では、DGFEMに基づく固有値輸送計算を対象として、非等方散乱を考慮する計算の収束性を改善可能な解法の開発と実装を行った。具体的には、輸送計算と整合する拡散計算を用いて、非等方散乱源の収束を加速する非線形拡散加速(NDA)を確立した。

2. 提案手法

NDAは、輸送計算の各反復ステップにおいて、計算負荷の低い低次元モデル(拡散方程式)を解くことで、輸送方程式の収束解を推定し、反復解法の収束を加速させる手法である。従来のNDAでは、低次拡散計算で中性子束(P0モーメント)のみを解き、その中性子束を用いて輸送計算の核分裂源と等方散乱源を更新する。しかし、非等方散乱源は中性子流(P1モーメント)に大きく依存するため、非等方散乱の加速が不十分であった。

本研究では、中性子束に加えて中性子流を独立変数として拡散方程式を解くことにより、非等方散乱源の更新を可能とする新たなNDAを提案する。拡散計算の離散化には、中性子流を陽に扱える局所不連続ガラキン法(LDG)を採用した。本手法の主要な課題は、輸送方程式の収束解を再現する拡散方程式を導出することである。これに対し、中性子束だけでなく中性子流も再現する補正係数を導出し、新たな補正項として拡散方程式に加えることで、この問題を初めて解決した。

3. 数値実験

提案手法の有効性を検証するために、図1に示す燃料領域と非等方散乱が生じる反射体領域から構成される体系の計算を行った。計算領域を三角形の有限要素メッシュに分割した。比較手法として、(1)NDAなし、(2)核分裂源と等方散乱源を更新する従来NDA、(3)非等方散乱源も更新する提案手法(LDG-NDA-P1)について、収束までの反復回数と計算時間を比較した。

計算結果を図2に示す。「従来NDA」と比較して反復回数を62回から18回に削減できた。計算時間は「NDAなし」から91%の短縮、「従来NDA」に対しても65%の短縮を実現した。以上より、LDGとNDAを用いて非等方散乱を含む輸送計算の収束を加速し、計算時間を短縮する手法を構築できた。

4. 参考文献

[1] A. YAMAMOTO et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, 3, 217 (2008).

公刊論文(口頭発表を含む) [I] 笠間 陸斗 他, 日本原子力学会 2025年秋の大会, 1N01 (2025); [II] R. KASAMA et al., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **133**, 678 (2025); [III] 笠間 陸斗 他, 日本原子力学会 2026年春の年会, 2D09 (発表予定); [IV] R. KASAMA et al., *Nucl. Sci. Eng.* (submitted for publication).

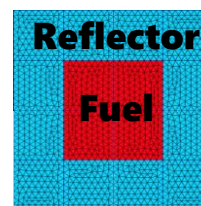


図1 計算体系

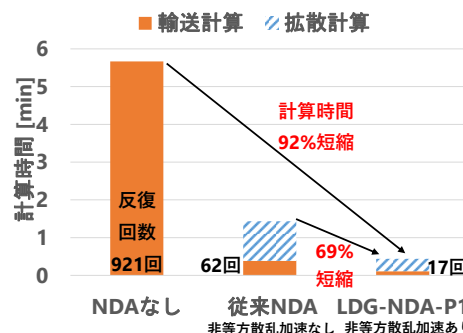


図2 計算結果