

## 1. 緒言

モンテカルロ法による輸送計算は、乱数を用いて中性子の輸送を模擬することで、幾何形状の近似を行わずに解を求めることのできる方法である。しかしながら、乱数を用いるため計算結果には統計誤差が付随し、統計誤差の小さな解を求めるには多大な計算時間を必要とする。そのため、通常炉心計算に用いられる CPU よりも演算性能の高い GPU(Graphical Processing Unit)をモンテカルロ法へ適用し、高速にモンテカルロ法による炉心計算を行う方法を検討した。GPU は CPU より高い浮動小数点演算性能を持つが、その演算性能を活かすためには並列計算への対応と GPU 向けの最適化が必要となる。本研究では、仮想散乱によって領域判定を簡略化することにより、GPU のアーキテクチャに適した実装を行った。

## 2. GPU での実装方法

GPU は本来、画像処理を主に担当するプロセッサであり、近年は並列計算用のプロセッサとして注目されている。GPU の演算コアは CPU に比べ、単純で性能が低く、複雑な条件分岐などの扱いを不得意とする。しかし、GPU は多数の演算コア (数百~数千個) から構成されており、この多数の演算コアで計算を並列実行することでプロセッサ全体として高い処理能力を持つ。そのため、GPU を用いる計算コードは並列計算に対応していなければならない。モンテカルロ法による炉心計算を並列化する場合、中性子の追跡がそれぞれ独立に実行されるため、中性子毎の追跡計算を並列化する。また、中性子束を求めるには、領域内で中性子がどれだけ衝突するかをカウントする必要がある。この処理は GPU において並列化されていると、データ競合の問題により正しく実行できない。データ競合とは、GPU 内で異なるコアから同時に同じメモリ領域への書き込みを行った場合に計算結果が不正になる現象である。本研究ではこの問題を回避するため、計算時間は増加するが、データ競合なく加算処理を行うための GPU 側の機能である、アトミック演算を利用している。

## 3. 仮想散乱

中性子の追跡計算では、衝突点を求めるために、領域境界と中性子の飛程の交点を何度も計算しなければならない。これは、中性子が全断面積の異なる体系を跨ぐとき、飛行距離を再計算しなければならないためである。この処理は高い計算コストと複雑な実装を必要とし、GPU の単純なコアには適さないと考えられる。仮想散乱[1]は、この追跡計算を簡略化するための手法である。この手法では、(1)式のように仮想散乱断面積を導入する。

$$\Sigma_t^* = \Sigma_t + \Sigma_s^* \quad (1)$$

ここで、 $\Sigma_{t,g}$  は位置  $r$  エネルギー  $g$  群の全断面積、 $\Sigma_{s,g}^*$  は仮想散乱断面積、 $\Sigma_{t,g}^*$  は補正後の全断面積である。仮想散乱が起こった場合に中性子はエネルギーも方向も変えないため、 $\Sigma_{s,g}^*$  は任意の値に設定できる。つまり、 $\Sigma_{t,g}^*$  を体系で最大の全断面積に等しくなるよう  $\Sigma_{s,g}^*$  を設定すれば、体系で全断面積が均一として取り扱うことができる。これにより、領域境界と中性子の交点を求める処理が不要となる。

## 4. 検証計算

C5G7 ベンチマーク問題の 3 次元 unrodded 体系を用いて検証計算を行った。このベンチマーク問題では、図 1 のように 17x17 に燃料棒が並んだ PWR 集合体(UO<sub>2</sub> 燃料と MOX 燃料)が 4 体配置され、周囲に減速材が存在する体系となっている。表 1 に計算に使用したハードウェアを、表 2 に計算された実効増倍率と計算時間を示す。計算時間の比(CPU/GPU)は 6 倍程度となり、GPU により高速化が出来ることが示された。また、GPU で中性子束計算を行った場合の計算時間は 506 秒であり、アトミック演算を用いても十分高速に中性子束計算を実行できることがわかった。また、計算された中性子束分布から核分裂率分布を求め、参照解との相対差異を求めたところ、図 2 のようになり、正しく分布を再現していることがわかった。

[1] 石井一弥, 丸山博見, “並列処理型モンテカルロ核特性解析コード VMONT”

### 公刊論文

- [1] T. Okubo, T. Endo, A. Yamamoto, Proc. PHYSOR2014, Kyoto, Japan, Sep. 28 - Oct. 3, (2014).  
 [2] T. Okubo, T. Endo, A. Yamamoto, 2015 ANS Annual Meeting, San Antonio, TX, June 7 - 11, (2015).  
 [3] 大久保卓哉, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会 2015 秋の大会, 静岡大学, (2015).

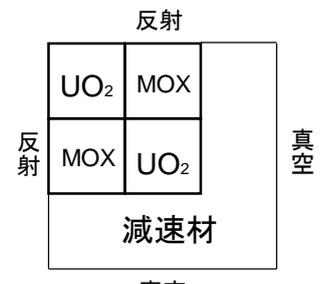


図 1 C5G7 計算体系

表 1 使用したハードウェア

GPU	Radeon HD 7950 800MHz
CPU	Intel Core i7-3770 3.40GHz (4Core 8Thread)

表 2 計算結果

	$k_{\text{eff}} [-]$	Time[s]
GPU	1.143032±0.00001	451
CPU	1.143021±0.00001	3076
参照解	1.14308±0.00003	-

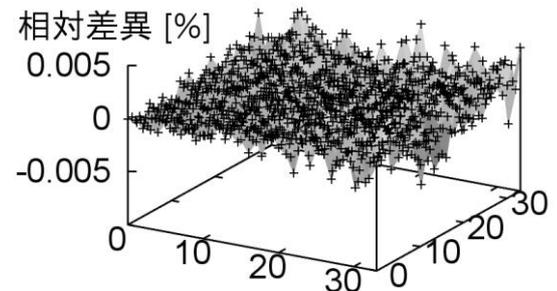


図 2 核分裂率相対差異