

PHYSOR2026 参加報告

日本原子力研究開発機構 近藤諒一

1. はじめに

国際会議には M&C などに参加したことがあるが、PHYSOR への参加は今回が初めてである。以前、PHYSOR2020 にペーパーを投稿したがコロナ禍にあり現地開催が中止され参加できなかった。以下では、PHYSOR2026 における筆者の報告内容と関連する発表、所感について述べる。

2. テクニカルセッション

筆者はセッション” Monte Carlo Methods - V”にて報告した。内容は、固有直交分解(POD)を用いたモンテカルロ法による分布量計算手法(POD タリー)の核熱連成計算に対する適用である[1]。POD タリーでは中性子束分布や出力分布などの分布量を、教師データから得られる直交基底(POD 基底)で展開する。モンテカルロ計算では POD 基底に対する展開係数のみをタリーする。したがって、分布を構成するメッシュの数から展開係数の数まで未知数の次元を減らすことができる。また、分布の標準偏差の二乗平均平方根は展開次数に対して単調増加するという性質を持つため、展開次数を減らすことにより統計誤差を減らすことができる。本発表では、核熱反復計算における収束途中の核分裂率分布を教師データとして POD 基底を作成し、収束後の核分裂率分布を再構成できることを報告した。質疑では POD タリーの理論と核熱連成計算に関する今後の展開についての 2 つの質問があった。発表会場はプレナリーセッションの会場と同じであり、座席数が数百あるものの聴講者は数十でやや寂しく感じた。

モンテカルロ法では対象分布の解像度が高くなるにつれて各メッシュの統計誤差は増加する。POD タリーはこの課題に対する解決策となり得る。一方で、POD タリーと類似した分布量を展開する手法として関数展開タリー(FET)がある。FET では対象の分布をルジャンドル多項式などの関数で展開することで連続的な分布が得られる。FET に類似の研究は 1970 年代から報告があるが、Griesheimer 氏の博士論文[2]には理論式の導出や計算手順などが体系的に記載されているため、FET について知りたい方は参照されたい。近年は空間的な解像度の高い解析が増えていることから FET に関する研究も活発であり、最近の国際会議では複数の発表がみられる。本会議における FET に関する発表について 2 つ紹介する。

a. 非構造メッシュ上での空間連続な関数展開タリー[3]

従来の FET は展開領域上で定義される直交基底関数を必要とし、また隣接領域の境界で値が不連続となるため、有限要素法(FEM)ベースのマルチフィジックス連成解析との結合が難しいという課題があった。本研究ではラグランジュ形状関数を用いて非構造メッシュ上で空間連続な分布量を再構成する Lagrange FET が提案されている。直交基底を仮定しな

いため FEM 標準の補間方法を直接利用でき、非構造メッシュへの拡張も容易である。本手法はモンテカルロコード Abeille に実装され、1 次元平板問題および 2 次元 C5G7 ベンチマークで検証された。少ない節点数で参照解をよく再現する一方、燃料-減速材境界の急峻な勾配では誤差が増大する傾向も報告されている。

b. 関数展開タリーとヒストグラム近似のスペクトル収束特性と最適性能[4]

FET では展開次数の増加に伴い打ち切り誤差は減少する一方で、各展開係数の統計誤差は増大するため、粒子数 N に対して総誤差を最小化する最適次数が存在する。本論文では Sturm-Liouville 理論を用いてスペクトル解析を再定式化し、ルジャンドル多項式を主対象として、Sobolev 空間における滑らかさ指数 s に基づく展開係数の減衰率および打ち切り誤差 L_2 ノルムの収束率に対する厳密な上下限を導出している。同様の解析を従来のメッシュタリーに相当するヒストグラム近似(HA)にも適用し、FET では最適次数および二乗平均平方根誤差が HA より速く減衰することを示した。対象分布が滑らかなほど FET の利点は大きく、最適条件下では理論上 FET が常に HA に対して優位となる。簡易な検証問題による数値結果は理論予測と良く一致しており、多次元問題への拡張が今後の課題となる。

3. 所感

日本の炉物理コミュニティの方々からの紹介やこれまでの海外出張を通じて、海外の炉物理コミュニティにおける知り合いが増えたように感じている(相手に覚えてもらっているかはわからないが...)。特に筆者の研究と関連するため、モンテカルロコードの開発者の数名とは会議で顔を合わせるたびに情報交換することができるようになった。今回も University of Cambridge (SCONE)、CEA (TRIPOLI)、VTT (Serpent)、Naval Nuclear Laboratory (MC21)、Amentum (MONK)の方々話し(括弧内はモンテカルロコード名)、新しく Studsvik Scandpower のコード Peacock の開発者とも知り合うことができた。

イタリアは料理が美味しいのでバンケットではコース料理を期待していたが、立食形式だったためやや残念であった。一方で、移動が容易だったため多くの方と話すことができたことは良かったと思う。美しい街並みに加えて会場の東に流れる「ポー川」沿いは自然豊かで散歩するのに気持ちが良い場所であり、夕方は地元の方々が集う場所となっていた。なお本稿は、北米出張からの帰国便の機内にて執筆しているが、北米の都市と比較してトリノの治安は非常に良かったと感じている。

4. むすびに

今回は参加者が多く集まり、各国の炉物理の専門家と交流する非常に良い機会だったと思う。これまでに海外の研究所や大学で弊機構や自身の研究について紹介する機会があったため、我々の研究を知る方から声をかけていただくこともあった。今後も積極的に国際会議に参加しコミュニティを広げていきたいと思う。

参考文献

- [1] R. Kondo, C. Liong, A. Yamamoto, and T. Endo, "Feasibility Study of POD Tallies for the Coupled Simulation with a Single Fuel Assembly," *Proc. PHYSOR2026*, Torino, Italy, Apr. 19–23, 2026.
- [2] D. P. Griesheimer, "Functional Expansion Tallies for Monte Carlo Simulations," Ph.D. Thesis, University of Michigan, 2005.
- [3] J. S. Merson, H. Belanger, and P. Singh, "Spatially Continuous Functional Expansion Tallies on Unstructured Meshes," *Proc. PHYSOR2026*, Torino, Italy, Apr. 19–23, 2026.
- [4] M. Skretteberg and P. Cosgrove, "Spectral Convergence Properties and Optimal Performance of Monte Carlo Functional Expansion Tallies vs. the Histogram Approximation," *Proc. PHYSOR2026*, Torino, Italy, Apr. 19–23, 2026.

写真ギャラリー



写真 1 プレナリーセッションおよび筆者発表の会場



写真 2 会場の東側を流れるポー川



写真 3 シーフードトマトパスタ



写真 4 ポー川沿いの露店で購入したジェラート