

「高速相関サンプリング法開発における Eureka!」

(株)日立製作所 電力・電機開発研究所 森脇 正直

masanao_moriwaki@pis.hitachi.co.jp

1 はじめに

高速相関サンプリング法¹⁾は、モンテカルロ法の摂動手法である相関サンプリング法に基づいて開発した中性子輸送解析手法である。元々の相関サンプリング法は、モンテカルロ法による微小変化の計算（摂動計算）を可能とすることを目的として開発されたものである。すなわち、変化前後のそれぞれの状態に対して独立のモンテカルロ計算を行って評価すると、その微小変化がそれぞれの計算の統計誤差に隠れてしまい有意な結果を得ることが困難であることから、それぞれの計算に統計的な相関を持たせてその差をうまく抽出しようとするものである。一方、高速相関サンプリング法は、相関サンプリング法の名を借りているものの、開発の動機・目的はこれとまったく異なるものである。以下その開発の経緯を、その時々的心情を交えて紹介することとする。

2.高速相関サンプリング法の開発の経緯

当初私はモンテカルロ法を高速にする手法を探していた。モンテカルロ法はどんな形状にもフレキシブルに対応できるため、集合体構成が複雑化する傾向にある将来炉設計には最適な設計ツールである一方、決定論的手法に対して計算時間が多大であるという短所がある。当研究所で開発したモンテカルロコードVMONT²⁾は、他のモンテカルロコードに比べ高速で、燃焼計算にも対応できるため十分設計に適用できていたが、パラメータを多く振る計算に対してはさらなる高速化が望ましかった。

最初に私が目を付けたのは燃焼計算における高速化である。集合体燃焼計算では、通常何十点もの燃焼点に対し同様のモンテカルロ計算を繰り返す必要がある。燃料組成が徐々に変化するだけで計算体系自体はまったく変わらない計算対象に対して、計算時間がかかるモンテカルロ計算を個々の燃焼点で独立に行うことは、いかにも無駄が多いように思えたのである。

そこで、計算する際に個々の中性子のパス（飛行経路、飛跡）の情報を記録しておき、それを再利用できないか考えた。モンテカルロ法では中性子のパスを決定する、すなわち、どの方向にどのエネルギーで飛んでどこで衝突してどのような反応を起こすかを決定するためにほとんどの計算時間が使われている。同じ中性子パスが使えれば、ほとんどの処理が省略できると考えたのである。計算対象の違い、すなわち、燃料組成の違いは元々モンテカルロ計算（ノンアナログ法）で行っている中性子の重みの調整で考慮できると考えた。

以上の考えをプログラム化しテスト燃焼計算を行った。そして結果を得てとても驚いた。まずとにかく早いのである。1燃焼点数分かかる中性子解析計算が、数秒で済んでしまった。最初は何か重要な処理を飛ばしてしまったかと考えたが、計算結果はレファレンス計

算と $0.1\%dk/k$ 以内で一致していた。この時、まったく新しい手法を発見したという高揚した気分で、コンピュータディスプレイの前で飛び上がらんばかりであったことを覚えている。

一方で、頭の中の冷静な部分では、このような単純な着想がこれまでやられていないわけがないとも訴えていた。この段階では私は相関サンプリング法のことをまったく知らなかったのである。とりあえず、この手法を「共有パス法」と勝手に名付けると、もう一度モンテカルロ法の教科書を読み返して見た。また過去のモンテカルロ法の論文を読んで行くうちに、相関サンプリング法の基本的な概念が共有パス法とほぼ同じであることを確信した。この段階で自分の発見した手法がまったくの新規なものではないことに少し落胆を覚えたが、同時に、共有パス法独自の部分がいくつかあることを発見した。

これらは大きく分けて以下の3点である⁴⁾。

- ①VMONT⁵⁾で用いられている仮想散乱法を適用することで、中性子の衝突経路ではなく、衝突点だけで中性子重みの調整ができる。これにより衝突経路探索が必要でなくなり、摂動計算速度が大幅に向上する。
- ②①と同じ理由から、中性子吸収断面積が大幅に変化する体系も精度良く計算できる。
- ③相関サンプリング法が基準計算（変化前の計算）と摂動計算（変化後の計算）を同時に計算するのに対して、共有パス法では一度基準計算の中性子パスの情報をメモリに保存してそれを繰り返し使う。

①は本手法の本来の目的、すなわち、モンテカルロ法を高速化するために必要な特性である。②③は、燃焼計算を行うために必須な特性である。このように、従来の相関サンプリング法が微小反応度変化を精度良く解析することを目的としているのに対し、共有パス法は大きな反応度変化を伴う燃焼計算を精度良く高速に解析することを目的としているため、基本概念は同じであっても、手法的・構成的に大きな相違があったのである。

本手法の名前は、相関サンプリング法に敬意を表して、高速相関サンプリング法と名付け直したが、名前から連想されるような相関サンプリング法を単に高速化したのではなく、まったく違った枠組みから開発されたものであることを理解して頂けたと思う。

3.おわりに

幸いにも本手法は、上記の独自性を評価して頂き論文としてまとめることができた⁴⁾。また、本手法に基づく高速モンテカルロコードは、将来炉設計におけるパラメータサーベイ用コードとして実際に使用されている。これらは、研究者として、またエンジニアとしての最大の喜びである。

思えば、もし初めに相関サンプリング法を知っていたら、その枠組みにとらわれてしまってこのようなまったく違った発想はできなかつたも知れない。私には、過去の業績を良く調べずにすぐ行動に移してしまう癖があり、結局遠回りになることがあるが、今回はそ

れが逆にうまく行ったと言えるだろう。今回の開発で大事だったのは、直感に従って行ったことだと思う。数式をいくら見つめても良い発想を出すのは難しい場合が多い。逆に、直感的に捕らえられることを数式化するのは比較的簡単である。良い直観を養うためには、物理現象を数式でではなく、概念として理解する必要があると思う。

最後に、本手法の発想は、当研究所の森本裕一氏との議論の中から生まれたものである。言うまでもなく、良い先輩研究者との議論は新たな手法開発に欠かせないものである。同氏に感謝したい。最初のテスト計算に成功したのはかなり夜遅くであったが、すでに帰宅していた森本氏の自宅に電話し、興奮して報告したことを覚えている。まさに、この時が私の Eureka! だったと思う。

4.参考文献

- 1) 森脇 他、「相関サンプリング法によるモンテカルロ計算の高速化」、日本原子力学会 1998 年秋の大会 D37
- 2) 森脇 他、「相関サンプリング法のマルチ集合体解析への適用」、日本原子力学会 1999 年春の年会 G26
- 3) 森脇 他、「高速相関サンプリング法による全炉心解析及びその加速法の開発」、日本原子力学会 1999 年秋の大会 E14
- 4) M. Moriwaki, et al., "Improvement of Monte Carlo Lattice Burn Up Calculation Performance with the Correlated Sampling Method," J. Nucl. Sci. Technol., 39[6],587 (2002).
- 5) Y. Morimoto et al., "Neutronic Analysis Code for Fuel Assembly Using a Vectorized Monte Carlo Method," Nucl. Sci. Eng., 103, 351 (1989).