

大西氏と高エネルギー原子核衝突の微視的シミュレーション

奈良 寧

国際教養大学

本稿では大西明教授と微視的輸送模型を用いたシミュレーションを通して学んだこと、共同研究したことについて述べさせていただきます。

大西氏は私の博士過程の指導教官です。彼は「大西先生」と呼ぶことを拒むので、ここでは大西氏と呼ぶことにします。私は、修士課程のときに、重イオン衝突における微視的シミュレーションに興味を持ちましたが、当時指導教官だった加藤先生は、北大ではそのような研究は難しいので博士課程はドイツのギーゼン大学に行ってみてはどうかと心配してくださっていました。しかし、その後、大西氏が北大に助手として赴任することが決まりました。加藤先生は私に、大西氏に指導教官をお願いすることを勧めてくれ、私は北大の博士過程に進むことになりました。このような経緯で、私は大西氏の博士課程の学生になりました。「大学院生とは共同研究者としてつきあっていきたい」と大西氏がおっしゃったのが印象的でした。

私が初めて大西明氏の名前を知ったきっかけは、京都大学の反対称化分子動力学 (AMD) に関する論文 [1] でした。当時はインターネットがまだ普及しておらず、研究者は新しい論文が完成すると、興味のある人たちに preprint を郵送していました。当時の指導教官であった加藤先生からこの論文を紹介されて読んだところ、非常に強い衝撃を受けました。そこで初めて微視的輸送模型というものが存在することを知り、興味を抱くようになりました。

調査してみると、重イオン衝突の微視的なシミュレーション計算は、ボルツマンの衝突項を取り入れたカスケード模型から始まり、これに核子の平均場の効果を取り入れた Vlasov-Uehling-Bhlenbeck (VUU) 方程式へと進化してきました。VUU は系の 1 対分布関数の時間発展を追うものであり、イベント平均の時間発展をシミュレートするものです。その後、イベント毎のゆらぎをとり入れた量子分子動力学 (QMD) が開発されました [2]。QMD は原子核クラスター生成などを扱うことができる模型ですが、系の波動関数をガウス波速の積と仮定しているため、フェルミオンの性質を正しく記述できません。これに反対称化の効果を取り入れたのが京大で開発された AMD でした。

当時大西氏は京大で初めて微視的シミュレーションを行った学生でした。大西氏が行った VUU 計算の図 [2, 3] は原子核理論の教科書にも掲載されています [4]。その後、丸山敏毅氏による QMD、小野章氏による AMD シミュレーションへと発展していきました。さらに、AMD による原子核構造の研究が金田佳子氏により始まりました。

私が、博士課程で最初に大西氏と行った研究は、もちろん AMD での計算でした。AMD のコード開発を通して、大西氏からはいろいろなノウハウを学びました。しかし、我々の最初の仕事は、2人共興味が他の方向に転移してしまい、結局、大西氏が国際会議で発表したプロシーディングスの出版だけで終わってしまいました。私は、これについては非常に反省しています。

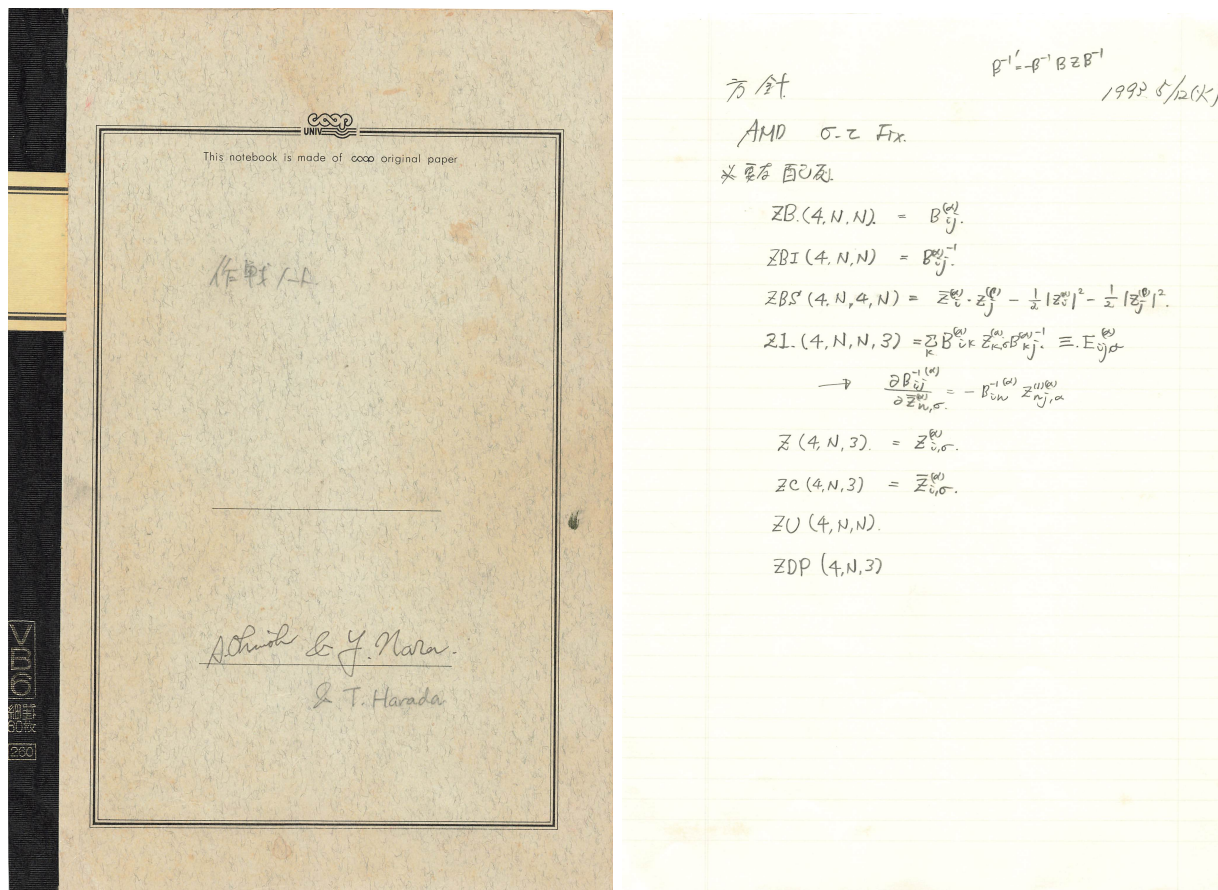


図 1: 大西氏が北大に着任し、私の指導教官になった際に作成された共同研究ノートの表紙と 1 ページ。どちらも大西氏の手書きです。

次に我々が取り組んだのは、AMD を用いたハイパーフラグメント生成の研究でした。当時の北大にはハイパー核を研究しているグループがあり、AMD をハイパー核の研究に用いれば面白いことができるのではないかと考えました。私は大西氏と同じ部屋で研究していました。私は問題にぶつかる何でもすぐ大西氏に相談する学生だったので、多くの助言を頂戴しましたが、今思えばかなり迷惑な学生だったと思います。大西氏は、いつでも丁寧に教えてくれて、問題に対して迅速で的確な解決策を提供してくれたので、非常に感謝しています。大西氏はいつも遅くまで付き合ってくれました。私の最初の論文は AMD を用いたハイパーフラグメント生成の研究で、大西氏ともう一人の共同研究者である原田氏との共著でした。その後、 (K^-, K^+) 反応の分布を様々なチャンネルを考慮することで説明できるという論文を完成しました。おかげで、ハイパー核生成のシミュレーションで学位を取得

することができました。博士課程の後半では、高エネルギー重イオン衝突のシミュレーションをするためのコードである JAM の開発に着手しました。北大で博士課程を修了した後に、1997 年に原子力研究所の博士研究員となった後も、JAM の開発をつづけ 1999 年に論文を完成しました。

私は、1999 年に理研-BNL の研究員として米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) に赴任してからは、カラーガラス凝縮や流体模型などを用いて、RHIC や LHC の物理を主に取り組んできました。この期間は大西氏とは直接の共同研究はほとんどしていませんでした。彼との新しい共同研究が始まったのは、2015 年に RCNP で行われた国際会議で大西氏と再び話す機会があったことがきっかけでした。その際、J-PARC で中間エネルギー重イオン衝突実験をサポートするために、原子核が止まる領域での原子核衝突の研究を再開してみないかと言われました。それで JAM の開発が再開しました。

現在 RHIC の STAR の Beam energy scan program や GSI の HADES などの中間エネルギー ($2.4 \leq \sqrt{s_{NN}} < 30$ GeV) の重イオン衝突は、様々な観測量の入射エネルギー依存性を調べることで、強く相互作用する物質の相構造を解明することが目的とされています。特に集団フローは状態方程式 (EoS) に敏感であり、1 次相転移による EoS の軟化の効果が側方フロー ($v_1 = \langle p_x/p_T \rangle$) に見えるという理論的予言があり、実験でも確かにそのような傾向が見えました。しかし、これまでのモデルでは、誰もその実験結果を再現することはできませんでした。2015 年から 2021 年にかけて、衝突項で EoS を調整する模型、相対論的平均場で相互作用する相対論的分子動力学 (RWMD.RMF)、流体模型と JAM カスケードを組み合わせたモデルなどを開発しましたが、 v_1 の入射エネルギー依存性を説明することはできませんでした。

2005 年に発表した論文に誤りがあったため、修正論文を書く際に、ベクターポテンシャルを使った相対論的分子動力学 (RQMDv) を開発しました。当初、このモデルでも v_1 の入射エネルギー依存性は再現できないだろうと考えていましたが、意外にも RQMDv は v_1 の入射エネルギー依存性を説明できたのです。最初はその理由がわかりませんでしたが、いつものように、大西氏からの解決の鍵になる助言をもとにその理由を解明することができました。これで 2022 年に世界で初めて陽子の v_1 の入射エネルギー依存性を再現する一つの解を見つけたことになりました。次に、 Λ の v_1 をこのモデルで計算しましたが再現できませんでした。大西氏に相談すると、すぐに、中性子星の性質を再現する Λ ポテンシャルを使えばよいというアイデアをもらい、大西氏の学生の神野君と基研の村瀬さんを含む共同研究が始まりました (中性子星ゼミ)。大西氏のアイデアから Λ の v_1 を通して中性子星と重イオン衝突をむすびつける研究が展開されました。「重イオン衝突の研究はいろいろなことを知らないといけないよね。」と北大時代に大西氏から教えられた言葉が思い起こされます。

私の大西氏との最後の仕事は、ローレンツ共変なカスケード法 (covariant cascade method) の開発でした。従来のイベント毎のシミュレーションで使用する 2 粒子の衝突時間は、計算しているフレームに依存していましたが、この問題点を解決しました。最後のオンラインミーティングでの会話では、大西氏から、「奈良さんが開発した covariant cascade method はこの業界では非常に重要な仕事です。」と、最後まで励ましの言葉をいただきました。現在私は、パリティ 2 重項模型 (parity doublet model) を用いたシミュレーションの開発に取り組んでいますが、大西氏は「いろいろなことを知っている」ので、パリティ 2 重項模型に関する仕事も行っており、彼と共同研究ができないことが残念

です。

大西氏には私を一人前の研究者に育ててくださり、長い間共同研究者として多くの仕事があったことに感謝申し上げます。大西先生のご冥福をお祈りいたします。

参考文献

- [1] Hisashi Horiuchi, Toshiki Maruyama Akira Ohnishi and Shinichiro Yamaguchi, “Time-dependent variational theory of interacting nucleon wave packets and molecular dynamics methods” preprint KUNS 1028.
- [2] 堀内 昶, 大西 明, 丸山 敏毅, 「重イオン核反応のシミュレーションによる微視的研究」日本物理学会誌 1991 年 46 巻 6 号 p. 471-474, doi:<https://doi.org/10.11316/butsuri1946.46.471>
- [3] 大西 明, 博士論文 「微視的輸送方程式を用いた重イオン反応の研究」 Fig.11
- [4] 岩波講座現代の物理学 第9巻 原子核の理論 (1993) 市村宗武, 坂田 文彦, 松柳 研一 (著) 9-5 節