

「2025年度iSALE講習会」参加報告

松原 光佑¹



図1: 講習会最終日に撮影した集合写真.

2025年9月30日から10月28日にかけて、全5回のiSALE講習会初級編が隔週で開催された。iSALEとはImpact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)のことであり、主に惑星科学において衝突研究に用いられている計算コードの1つである[1-4]。SALEコードを基に、欧州、米国、ロシアの研究者たちによって開発が進められており、流体運動に加えて物質の弾塑性挙動を扱うことができるため、HydrocodeではなくShock physics codeと呼ばれている。iSALEについての詳細は、iSALEのホームページ[5]や今年度のiSALE講習

¹神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻
k_matsubara@stu.kobe-u.ac.jp

会の案内[6]を参照していただきたい。

本講習会は国立天文台シミュレーションプロジェクト(以下、CfCA)の支援のもと開催され、9名(博士学生3名、修士学生3名、学部学生3名)が参加した。講師は黒澤耕介氏(神戸大学/千葉工業大学)、黒崎健二氏(防衛大学校)、松本侑士氏(神戸大学)の3名に務めていただいた。また、伊藤孝士氏(国立天文台CfCA)、加納香織氏(国立天文台CfCA)には機材の準備や講義動画のアップロード等の支援を行っていただいた。各回の講習では、衝突物理や数値計算の原理を座学で学ぶ講義編と、実際にiSALEを用いて計算結果を解析する実践編が並行して行われた。今回は初級編ということで、計算機

のログイン方法やiSALE配布ファイルの構造といった初歩的な部分から丁寧に解説していただいた。講習はCiscoWebExを用いてオンライン上で開催され、業務連絡や質疑応答はSlackを通じて行われた。講習の際の集合写真を図1に示す。

講習会には筆者も含め、日常的に数値計算を行っていない参加者も複数参加していたが、そのような人も無理なく理解を深められるように細やかな配慮がなされていた。講義内容への疑問や計算のエラーが生じた際はSlackの専用チャンネルに質問を投稿することで、講師陣によって迅速に回答していただいた。講習の際に疑問やトラブルが生じた際にはBreakout roomに案内され、講師の方に1対1で丁寧にフォローしていただいた。さらに、講習の録画がYouTube上で限定公開されることで、講習会の後も講義を何度も復習することができる環境も整えられていた。

本講習会では開催3週間前から終了1週間後まで国立天文台CfCAの共同利用計算機の一部を講習会専用で貸し切って使用した。講習会の進捗に拘わらず、参加者は自由にiSALEを用いて計算の実行や結果の解析を行うことができた。以下に講習会の時間割を示す。

● 2025年9月30日

13:30-15:30 講義:iSALEの概要および衝突物理学と数値流体計算の基礎1

15:30-15:40 実践:国立天文台共同計算機およびそのログイン方法についての解説

15:40-16:10 実践:講習会専用サーバー上でのiSALE実行と配布ファイルの解説

16:10-16:40 実践:iSALE開発チームによる例題の紹介

● 2025年10月7日

13:30-14:45 講義:衝突物理学と数値流体計算の基礎2

14:50-16:00 実践:iSALE入力ファイル (asteroid.inp, material.inp)の読み方の解説

16:00-16:30 実践:iSALEの計算出力についての解説

● 2025年10月14日

13:30-14:30 講義:衝突物理学と数値流体計算の基礎3

14:30-15:30 実践:iPythonを用いたpySALE-Plotの解説

15:30-16:30 実践:初級課題の解説

● 2025年10月21日

13:30-16:30 実践:中級課題の解説

● 2025年10月28日

13:30-15:30 各自の計算の実行・解析

15:30-16:15 各自の計算結果の発表

16:15-16:30 計算サーバーへの申請方法の解説

1日目は講習会の概要とiSALEの特徴の解説から始まり、天体衝突現象の解析の中核を担う衝撃物理学の基本や数値計算の原理を学んだ。数値計算では室内衝突実験では再現不可能な天体スケールでの超高速度衝突を計算することが可能である一方、支配方程式に組み込まれていない効果(熱伝導や放射による冷却など)は考慮されていないことに注意が必要であることを学んだ。また、iSALEではANEOSとTillotsonの2種類の状態方程式モデルを選択できるが、両者は相図への厳密性や計算コストなどの観点において一長一短であり、どちらを採用するのかが計算前に吟味する必要があることも強調された。その後、国立天文台のサーバーに各自でログインし、配布されたファイルの構造の解説や豊富な例題の紹介が行われた。

2日目の講義は、衝撃波のように不連続な現象を計算する際に不可欠である人工粘性の解説に始まり、弾性体・塑性体モデルや熱弱化モデル、微小空隙圧密モデルの基本について学んだ。実践編では、計算する物質や衝突条件を決定するための入力ファイルの内容について、初級課題として配布された計算を実行しながらの解説が行われた。また、計算後に出力されるファイルを解説することで、計算のログやエラーの内容を確認したり、計算時間を推定したりする方法を学んだ。

3日目は、iSALEを使った計算の注意点として、原理的に解けない物理量が存在することや、物体の境界面付近は人工粘性などの影響により非物理的な挙動を示すことなどを学んだ。実践編ではJupyterLabを使用して初級課題の計算を実行しながら、自身の望む計算を実行できるよう入力ファイルの編集を行った。その後、pySALEPlotを用いて計

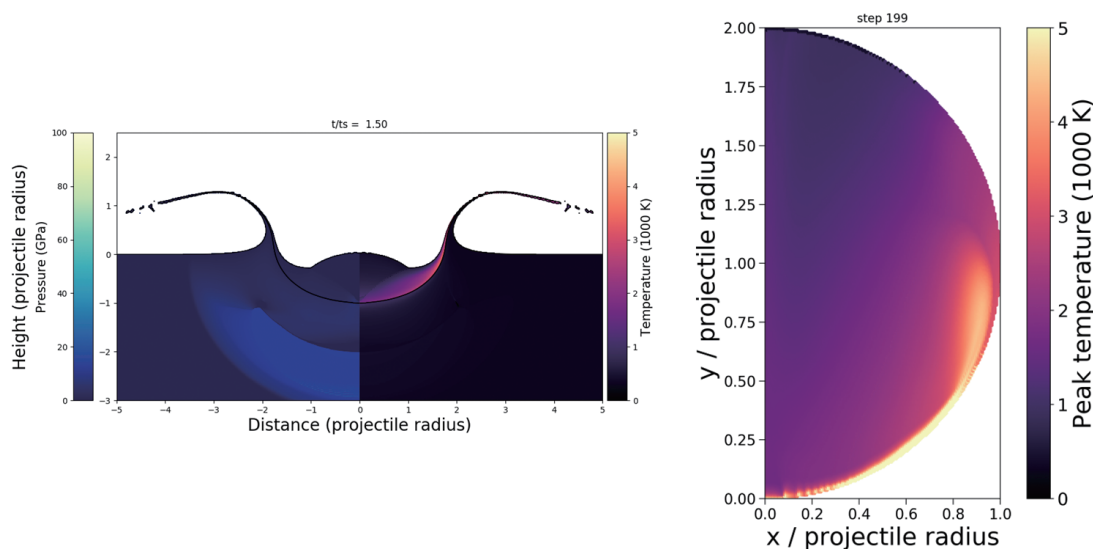


図2: 室内衝突実験を模擬し、鉄平面に対して直径 3 mm のカンラン岩球を 5 km/s で衝突させた場合の計算結果。左図は弾丸が貫入する最中の圧力と温度の分布を示す。右図は衝突を通じて弾丸のトレーサー粒子が経験した最高温度の初期位置に対するプロット。衝突の向きは下方向である。弾丸内部の最高経験温度には数千 K の不均質性があり、ターゲットと接する境界面付近が最も高温を経験することが可視化された。

算結果を描画し、カラーバーや物質境界線を編集して見やすい図に改良していった。

4日目は中級課題の計算結果を用いてトレーサー粒子が記録した情報を抽出し、衝突圧力の評価や特定のトレーサー粒子の流跡線の可視化などを行った。pythonを用いて長い描画スクリプトを編集するため、これまでの実践編よりも大幅に難しく感じたが、講師の方々の丁寧な解説と、トラブル時の手厚いサポート体制が整えられていたことにより、全員が時間内に課題をこなすことができたようである。これまでの学習内容では衝突の全体像の描画に留まっていたが、今回の講習により解析範囲を特定の領域に絞り、圧力や温度などのパラメーターを具体的に定量して評価できるようになった。

5日目は各自で計算結果をスライドにまとめ、その内容を1人あたり5分ほどで発表した。参加者の研究のバックグラウンドは実に多様であり、各々が課題や例題の計算を適切に改変して計算に取り組んだことが伺えた。筆者が行った計算の例を図2に示す。各自の発表の後には質疑応答や講師の方からのフィードバックがあり、今後の研究のために大いに参考になった。最後には国立天文台 CfCA 計算サーバーへ

の利用申請の方法について解説があり、今回の講習で学んだことを来年度以降の計算機利用に円滑に活かせるようになっていた。

iSALEの配布ファイルには巨大天体衝突や室内衝突実験、地滑りなど多様な状況を想定した例題が予め格納されており、計算を実行するだけで様々な現象をシミュレートすることが可能である。物質のパラメーターも火成岩や堆積岩、鉄、氷など多くの物質について用意されているため、利用者は想定している状況に近い例題を選び、そのパラメーターを調整することで、初心者でも比較的手軽に数値計算に取り組めるということが大きな利点である。3回目の講習の宿題として行った計算では、半球殻の銅を天体に 2 km/s で衝突させることで、はやぶさ2のSCIが小惑星 Ryugu に対して行ったクレーター形成実験を再現できたことが印象的だった。

以上、2025年度iSALE講習会への参加報告を行った。筆者は室内衝突実験を主として研究を行っているため、普段は数値計算を行うことはない。しかしながら、2023年、2024年に続き3回目の講習会へ参加することで、数値計算の基礎知識を身につけるとともに、基本的な計算の実行・解析はできるように

なったと自負している。当然，学会や論文で発表できるレベルの計算を行うには，さらなる習熟が必要である。今後は，室内実験で直接測定することが困難であるパラメーターを解析するための相補的なツールとしてiSALEを扱えるよう，継続的に利用して理解を深めていきたいと考えている。

最後に，本講習会の開催にあたりご尽力いただいた講師の黒澤耕介氏，黒崎健二氏，松本侑士氏に深謝いたします。また，国立天文台 CfCAの伊藤孝士氏，加納香織氏には計算のための機材を準備していただくとともに，講義の録画配信やトラブル時の対応など，細やかなサポートを頂きました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
- [2] Ivanov, B. A. et al., 1998, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
- [3] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
- [4] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.
- [5] <https://isale-code.github.io/>
- [6] <https://www.cfca.nao.ac.jp/node/1876>

著者紹介

松原 光佑



神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 博士後期課程 1年。日本惑星科学会，日本地球惑星科学連合に所属。