

「2024年度iSALE講習会」参加報告書

山口 祐香理¹

2025年1月7日から28日にかけて、週1回・全4回の離散日程でiSALE講習会中級編がオンライン形式で開催された。iSALEとは、Impact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian) の略で、惑星科学における衝突現象の研究に広く用いられている数値衝突計算コードの一つである[1-4]。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、PD以上3名、博士学生5名、修士学生3名の計11名が参加した。講師は、黒澤 耕介氏(神戸大学)、黒崎 健二氏(神戸大学)、松本 侑士氏(国立天文台CfCA)の3名にご担当いただいた。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、計算機材の準備や講義動画の共有等のご支援をいただいた。講習会では、講師による衝突物理学および数値流体計算に関する講義に加え、CfCAの共同利用計算機を用いたiSALEの実行およびpySALEPlotによる解析といった演習が行われた。中級編として開催された今回は、基本操作の習得を前提に、より実践的な内容に重点が置かれ、参加者各自の研究テーマに基づく計算に取り組む時間も多く確保された。必要に応じて講習日翌日には補講も実施され、個別の課題にも柔軟に対応する手厚い体制が整えられていた。最終日には成果発表会が行われ、各参加者が取り組んだ計算とその結果を報告した。講習会の時間割を以下に示す。

■ 2025年1月7日(火)

- 13:30 - 13:45 講習会の流れについての説明
- 13:45 - 14:50 講義(状態方程式と衝撃加熱について)
- 15:00 - 15:30 課題1(衝撃加熱に着目した解析)

■ 2025年1月14日(火)

- 13:30 - 14:40 講義(衝突放出過程について)
- 14:40 - 14:50 講義(CfCAの共同利用計算機について)
- 15:00 - 15:30 課題1の続き
- 15:30 - 16:30 課題2(衝突放出物の解析)

■ 2025年1月21日(火)

- 13:30 - 14:30 課題1, 2
- 14:30 - 16:30 各自の計算・解析

■ 2025年1月28日(火)

- 13:30 - 15:30 各自の計算・解析・発表準備
- 15:30 - 16:30 成果発表会

¹神戸大学大学院理学研究科
y_yamaguchi@stu.kobe-u.ac.jp

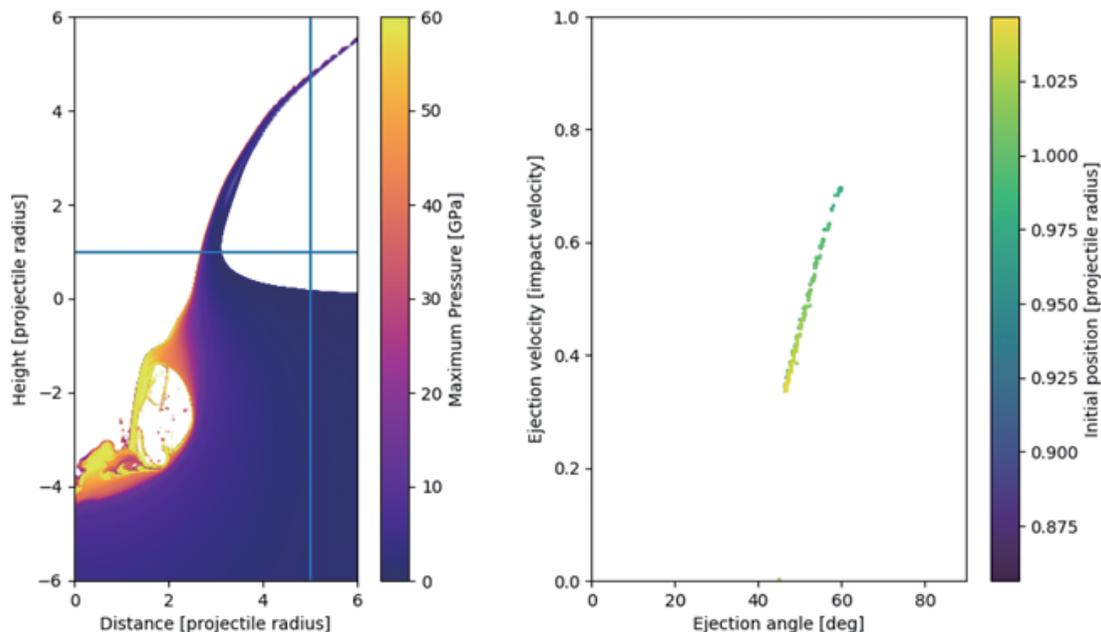


図1: 直径3 mmのアルミニウム弾丸の玄武岩への7 km/s衝突の計算例。弾丸と標的の状態方程式には、それぞれアルミニウムのTillotson EOS、玄武岩のANEOSを用いた。左図は、10弾丸貫入時間経過後の圧力分布を可視化したものである。右図は、左図の青線で区切られた右上の領域に存在するエジェクタ(トレーサー粒子)の放出速度と角度の関係を示したものである。ここで、放出角度は図の縦軸とエジェクタ軌道(位置から算出)のなす角度として算出している。また、カラーバーを用いてエジェクタの水平方向の初期位置を可視化している。人工粘性の影響が大きい表面下5セル分にあるトレーサー粒子を除外しているため、高速度なエジェクタが少ない。

iSALEは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一つで、SALEコード(Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)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いる。流体運動に加えて物質の弾塑性体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に関する詳細はiSALEのホームページ¹や、iSALE講習会初級編のテキスト²を参照していただきたい。

本講習会では、講習会の3週間前から講習会終了1週間後(12/18-2/4)まで国立天文台 CfCA の共同利用計算機を一部講習会専用に貸し切って使用した。あらかじめiSALE実行環境が整備されたこの計算機に、参加者は各自リモートログインすることで、iSALEの実行および計算結果の解析を自由に行うことができた。中級編として開催された今回は、

過去の初級編講習会で扱われた内容(リモートログイン、基本的な計算の流れ等)を事前に復習しておく必要があった。その分、講習会ではiSALEを研究に役立てるための応用を意識したより実践的な演習が中心となった。本講習会は過去数年間と同様に離散日程でのオンライン開催であり、講義に関する連絡はSlack上で、講義及び補講はCisco WebEx上で行われた。さらに、前回と同様に講義の録画が限定公開されたことで、講義にリアルタイムで参加できない場合も、録画視聴によって柔軟に学習を進めることができた。また、講義や計算、解析に関する質問は、Slackを通じて講習会開始前から随時行うことができ、講師陣による迅速な対応が行われた。

1日目は、講習の概要説明に続き、状態方程式と衝撃加熱に関する講義から始まった。iSALEで選択できるTillotson EOSやANEOSといった状態方程式の解説に加えて、自作の状態方程式の導入事例も紹介された。また、衝突後の標的物質の温度とエ

¹<https://isale-code.github.io>

²<https://www.cfca.nao.ac.jp/node/1683>

ントロピーの計算方法に関する講義の後、iSALE開発チームが提供する例題ファイルを用いた計算を実行し、JupyterLab上でpySALEPlotによる衝撃加熱に着目した解析を行った。具体的には、温度場やトレーサー粒子の経験した熱力学経路(経験温度と圧力)を可視化・解析し、加熱された物質の分布や割合を定量的に評価した。

2日目は、衝突物放出過程(衝突噴射過程(Impact jetting)、衝突剥離(Impact spallation)、衝突掘削(Normal excavation))の詳細な解説、衝突放出物の熱力学、強度支配領域での衝突掘削に関する講義が行われた。また、高速度放出物の解析における注意点として、放出物の量が空間解像度や数値解法に依存することや、自由表面から5-10セル程度は人工粘性の影響により衝撃圧力が信用できないことを学んだ。さらに、国立天文台CfCA共同利用計算機に関する解説の後、1日目の続きと衝突放出物の放出速度・角度分布に関する解析に取り組んだ。

3日目は、これまでの課題の継続に加え、4日目の発表を念頭に置いた各自の計算と解析を進めた。随時質問が可能であり、必要に応じてBreakout Roomを活用した個別指導も行われ、手厚い支援体制が整えられていた。

4日目は、各自が取り組んだ計算と解析の最終確認のち成果発表が行われた。参加者は、室内衝突実験の模擬、天体で観測された地形や現象の再現など、自由度が高く、初級編からステップアップした発表が多数見られた。講師陣からは、iSALEの適用範囲や数値的な留意点に基づく的確なフィードバックが与えられ、非常に実りのある時間となった。

図1に筆者が作成した計算結果の一例を示す。

以上、2024年度iSALE講習会への参加報告を行った。筆者は、2022、2023年度の初級編講習会に続いて3度目のiSALE講習会参加であった。普段は室内衝突実験を行っているため数値計算には不慣れで未だにコードをすらすら打つこともままならないが、初回参加時と比較するとiSALEに対する理解は着実に深まり、苦手意識も薄れつつある。こうした成長は、講師陣による丁寧かつ確かな指導、充実した教材と支援体制によるものであると感じている。また、Slackによる連絡・質疑対応・資料共有、Cisco WebExでの講義・補講、さらに録画視聴の併用により、時間・場所の制約を受けず柔軟に学習できる環境も有用であった。

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 侑士氏に心より御礼申し上げます。また、国立天文台 CfCAの伊藤 孝士氏、加納 香織氏には、機材準備や録画配信など細やかなご配慮をいただきました。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.

著者紹介

山口 祐香理



神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 博士後期課程2年、日本惑星科学会、日本地球惑星科学連合に所属。