

## 「第4回iSALE講習会」参加報告

藤谷 渉<sup>1</sup>

本稿では2019年7月30日から8月1日にかけて開かれた第4回 iSALE 講習会@国立天文台三鷹キャンパスの参加報告を行う。講習のスケジュールは以下の通りである。

### ■2019年7月30日(火)

- 13:30–14:00 iSALEの解説
- 14:00–14:30 iSALEを使った計算紹介
- 14:45–15:45 計算サーバへのログイン/ iSALE2Dの実行
- 16:00–17:00 iSALE2Dの初期設定ファイルの編集の仕方

### ■2019年7月31日(水)

- 10:00–12:00 初級課題(pySALEPlotによる描画方法も含む)
- 14:00–15:30 初級課題続き
- 15:30–16:00 計算サーバ見学
- 16:00–17:00 pySALEPlotの使い方

### ■2019年8月1日(木)

- 10:00–11:30 中級課題
- 11:30–15:00 残りの初級・中級課題or自分の課題
- 15:00–15:30 参加者の成果発表
- 15:30–16:00 計算サーバへの申請方法等

iSALEとはimpact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian) のことで、SALEコードに改良を加え、衝突現象に特化した仕様になっている[1-4]。

1. 茨城大学 理学部  
wataru.fujiya.sci@vc.ibaraki.ac.jp

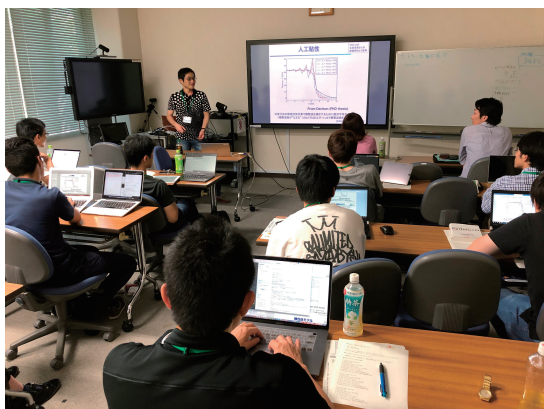


図1：講習会の様子。iSALE計算の概要を講師の黒澤氏が説明している。



図2：国立天文台・三鷹キャンパス内に設置されているCiCAの計算サーバと講師および受講生。

iSALEを用いて行われた研究成果はこれまでに100報を超える査読付論文として出版されている。

今回の講習会の講師は黒澤耕介氏(千葉工業大学惑星研究センター)と末次竜氏(産業医科大学)で、受講生は12名であった。本講習にはいらっしやらなかつ

たが、講習で用いられた資料スライドや中級課題の解析スクリプトの大半は脇田茂氏(Purdue University)によって作成された。資料スライドは国内のiSALEホームページからダウンロードが可能である[5]。受講生の研究分野は天体衝突のみならず、惑星・衛星の進化、月面衝突閃光、隕石などと幅広く、身分は学部学生から大学教員までと様々であった。様々な分野の研究者がiSALEに関心をもっていることは、天体衝突が太陽系の歴史において惑星や小天体の形成と表面環境の進化などに重要な役割を果たした普遍的な現象であることを物語っている。

さて、研究会初日にはiSALEの特徴が説明され、数値解法と理論背景(の概要)について解説がなされた(図1)。iSALEでは衝撃波を捕捉できる流体コードに弾塑性体応答が組み込まれており、その方程式系は質量・運動量・エネルギーの3つの保存則と状態方程式からなる。数値解法はオイラーの解法であり、空間に対して一次精度であることに留意が必要である。通常、衝突現象で発生する衝撃波は差分法による流体計算で扱えないため、空間的に不連続な衝撃波面を人工粘性の導入により“なます”ことで表現する。その他、弾性体モデル、塑性体モデルについてその概要と取扱いについて解説があった。受講生はブラックボックスになりがちな汎用コードを用いた計算の裏側を、完全ではないものの把握することができたのではないだろうか。また、現象によってはiSALEを使わずとも、オーダーの見積もり程度なら解析的にできる場合があるため、iSALEを本当に必要な部分にだけ上手に適用する必要があることもわかった。

理論背景は上記のとおりだが、iSALEでは個人の扱いたい問題設定に合わせて入力する条件やパラメータセットを選択する必要がある。例えば、状態方程式はTillotson EOSおよびANEOSから選択する。Tillotson EOSはパラメータが少なく計算コストが小さい反面、熱力学的には不完全で相図を簡略化している。ANEOSは熱力学の第一原理から計算しており熱力学的に完全である一方パラメータが非常に多い。また、物性(強度やダメージに対する応答など)のモデルにもいくつか選択肢がある。正直なところ、筆者はまだiSALEに不慣れなため適切なパラメータセットがよくわからなかった。しかし、論文公表に耐える計算をするためにはこれらのパラメータも精査する必要がある。

る。

続いて、講師によるiSALEを用いた計算例が紹介された。例えば惑星の衝突過程[6]や火星隕石の放出過程[7]などである。紹介された計算例はサイエンスとして面白く、筆者も計算例を見て自分のやりたい計算にどう応用が可能か考えながら、思わず夢中になって聞き入ってしまった。また、iSALEの自由度の高さと豊富な研究テーマを改めて認識した。時間の関係上あまり質問を受け付ける余裕がなかったが、時間が十分にあればたくさん質問をしてみたかった。受講生はみな漠然とやってみたい計算があってこの講習会に参加していたと思うが、実際の計算例を見てそれが具体的なイメージとなったと思う。

受講生が手を動かす実習は、国立天文台の計算サーバへのログインから始まった。筆者のようにターミナルによるコマンド操作や計算機を用いた数値計算に慣れていない者にも無理なく進められるように工夫されていた。使用する天文シミュレーションプロジェクト(Center for Computational Astrophysics: CfCA)の機材、すなわち計算サーバと解析サーバおよびその構成についても説明があった。iSALE講習会で用いる計算サーバ(grd0系機器)は使用期限が2週間強と制限されているため、今後もCfCAの計算サーバを使用するのであれば各人による利用申請が必要となる。

続いて、demo2Dという例題的な計算を実行した。この計算の詳細は追って説明されるとのことで、とにかく教えられたとおりにターミナルにコマンドを打ち込んで計算させてみた。iSALE計算の実行ファイルは計算の条件やパラメータが入力された二つのファイルを参照する。それが(デフォルトでは)asteroid.inpとmaterial.inpという名前のファイルである。初日の最後にこの二つの入力ファイルの中身について説明があり、例題ではどのような計算を行っていたのか種明かしされた。asteroid.inpは数値計算の条件が書かれたファイルであり、座標系、計算領域と格子サイズ、衝突天体や標的天体の形状やサイズ、トレーサ粒子などの設定を行う。material.inpは物質モデルの設定であり、状態方程式の選択、強度モデルの選択などを行う。もちろん、material.inpで設定した物質をasteroid.inpで参照するよう紐づけておく必要がある。基本的にはこれらのファイルを変更して計算の条件を設定するわけである。

講習の二日目は、初級課題に取り組むと同時に pySALEPlot の基本的な使用法についても学んだ。pySALEPlot とは iSALE での計算結果を解析・描画するための Python ライブラリである。初級課題は 1) 多層標的への衝突、2) 二天体の衝突、3) はやぶさ 2 の SCI (Small Carry-on Impactor) を模擬した半球殻弾丸の衝突、であった。これらの課題にはあらかじめ作成されたデモ計算が存在するため、それを修正することで初学者でも比較的容易に条件を変更して計算を実行することができる。受講生が課題に取り組んでいるとき、講師の方々はいつでも質問に答えてくださった。

二日目の後半には、CfCA の計算サーバを見学した (図2)。本講習会でも iSALE 計算の実行に本機材を利用させていただいている。計算サーバは合計コア数 1344 の PC クラスタであり、CfCA により共同利用計算機システムの一部として小規模・長時間ジョブ用に運用されている [8]。

三日目の最終日には、中級課題に取り組んだ。中級課題は 1) 衝撃加熱度評価、2) 衝撃圧力分布、3) 掘削の流跡線描画、4) 衝撃波伝播の様子の可視化、である。これらはもともになる pySALEPlot スクリプトが存在し、それらを修正して計算結果を解析することができる。つまり、はじめからスクリプトを書く必要がないため、初学者でも課題に取り組むやすくなっている。例えば課題 1) では、もともになるスクリプトはトレーサー粒子の ID と最高到達温度の関係を表示する。これを修正し、まず最高到達温度が高い順にトレーサー粒子を並び替えてその温度を  $x$  軸の変数にする。次に、差が 1 でトレーサー粒子の数が最大になる等差数列を作り、これを  $y$  軸の変数とする (1, 2, ..., N: N はトレーサー粒子の数)。上記  $x$ ,  $y$  をプロットして、最高到達温度と累積トレーサー粒子数のグラフを作成することができる、というわけである。

講習の最後には受講生が好きな計算を走らせて、得られた結果を皆の前で発表した。筆者は中級課題の流跡線描画を応用したプロットを作成した。中級課題では、初期状態である位置に存在しているトレーサー粒子の位置を時々刻々と記録していくことで、流跡線を作成した。筆者は計算終了時にある位置に存在しているトレーサー粒子を追跡することで流跡線を作成してみた (図3)。

以上、簡単ではあるが「第4回 iSALE 講習会」参加

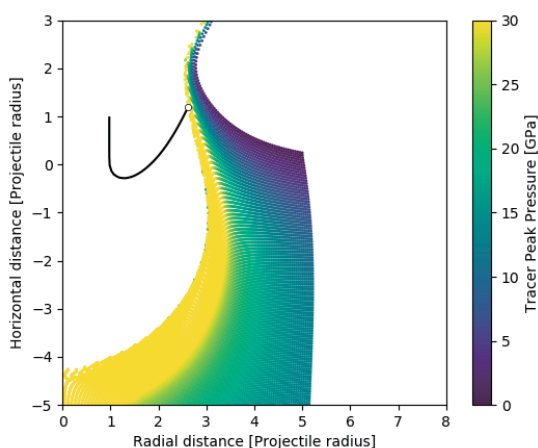


図3：筆者による iSALE 計算の例。衝突天体と標的天体とともに花崗岩で、衝突天体の初速は 12 km/s。二次元空間上でトレーサー粒子の最大衝撃圧力がカラーで示されている。計算終了時に白丸の位置に存在しているトレーサー粒子に着目し、追跡することで流跡線を作成した。

報告を行った。全体として講習会は非常によく計画されていた。初学者でも無理なく講習についていけるようにデモ計算や出発点になるスクリプトなどが用意されていて、様々なバックグラウンドや経験をもつ人にも対応していただけたと感謝している。筆者は隕石を研究しているが、隕石には衝突による変成作用の痕跡がしばしば確認される。今後は隕石で観察される組織や結晶構造、組成などの情報と、天体サイズや衝突速度などの物理的な情報がリンクできるように iSALE を応用していきたいと考えている。

最後に、本講習会の開催のために尽力してくださった方々に御礼を申し上げる。講師の黒澤耕介氏、末次竜氏、脇田茂氏のおかげで衝突現象の物理や数値計算に不慣れな筆者でも無理なく iSALE 計算に親しむことができた。また、国立天文台 CfCA の伊藤孝士氏、加納香織氏には計算サーバなど iSALE 講習の環境を提供していただいた。ここに感謝の意を表したい。

## 参考文献

- [1] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人 23, 103.
- [2] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
- [3] Ivanov, B. A. et al., 1997, International Journal of Impact Engineering 20, 411.

- [4] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.
- [5] 第4回iSALE講習会のウェブサイト(<https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/?第4回+iSALE講習会>)
- [6] Suetsugu, R. et al., 2018, Icarus 314, 121.
- [7] Kurosawa, K. et al., 2018, Icarus 301, 219.
- [8] 国立天文台 CfCA のウェブサイト(<https://www.cfca.nao.ac.jp>)