



図1：国立天文台・三鷹キャンパス内にある計算サーバの前において、講師と参加者の全員で撮影した集合写真。

天文台・CiCAの計算サーバを利用している。図1は、国立天文台・三鷹キャンパスにある計算サーバ前で撮影された講習会参加者の集合写真である。計算サーバの利用は、iSALEのwikiページ(<https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/>)を参照の上、CiCAのwebページから申請を行う必要がある。ただし、申請する者は、(1)天文学または関連分野の研究者・学生であり、かつ、(2a)日本の研究機関・大学院に所属する者、または、(2b)日本の大学院の修士か博士号を取得し、国外の研究機関に所属する者に限られる。iSALEの出力結果ファイル(jdata.dat)はバイナリデータであるが、それを画像として出力するために、Tom Davisonによって作成されたpySALEPlotと呼ばれるpythonで記述されたプログラムが用意されている。これを利用・編集することで、簡単に計算結果を出力することが可能となる。また、今回の講習会では、入力ファイルにおけるトレーサー粒子の設定の説明も受けた。この設定をしておくと、pySALEPlotによって、ターゲットに配置したピクセルが、衝撃後、どのように移動したかをトレースすることができる。pySALEPlotを利用する場合は、謝辞にそのことを記述する必要がある。

iSALEは、完全なオープンソースコードではなく、科学的な研究目的のみに、利用申請をすることで、無償で利用することが可能となる。ただし、開発者以外の方は、3次元コードを利用することはできず、2次元コードの使用のみに制約される。また、2次元コードは、さらに、円柱座標系またはデカルトで固定され



図2：講習会の様子。参加者は、自分が行いたいiSALEシミュレーションに取り組んでいる。講師の方々は、個別に、参加者からの質問に答えたり、アドバイスをしたりしている。

ており、斜め衝突のような計算はできない。また、iSALEの利用は、iSALE管理委員会で厳重に管理されているため、iSALEのwikiページを参照の上、日本国内のiSALE管理委員会へ申請をする必要がある。

2. iSALEの方程式系

iSALEの基礎方程式は3つ(連続の式、運動方程式、エネルギー方程式)あり、これらは、4つの未知数から成り立っている。このままだと方程式が閉じていないため、EOSと呼ばれる上記の未知数を利用した状態方程式を導入することで、iSALEは方程式を解いている。iSALEでは、オイラー的数値解法またはラグランジュ的数値解法のどちらを選択することで、方程式を解くことができる。ただし、差分法による数値計算は、衝撃波を捕捉するために、人工粘性と呼ばれるパラメータが運動方程式内に加えられている。

EOSは物質の相図に関係しており、同じ物質でも、EOSには2種類(ANEOSとTillotson)ある。ANEOSは相図の再現が完全であるがパラメータが多いため計算コストが高く、Tillotsonは相図の再現が不完全であるがパラメータが少いため計算コストが低い特徴がある。ANEOSとTillotsonには利点・欠点が含まれるため、利用者はそれを理解した上で使用する必要がある。

iSALEには、上記の基礎方程式の他に、さらに、弾性体・塑性体を取り扱うための方程式が追加されており、応力場なども計算することが可能である。それゆ

え、物質の破壊にも関するモデル(強度・ダメージ・音響流動・空隙・熱弱化・低密度弱化モデル)が組み込まれているが、モデルの組み合わせには条件があるため、注意が必要である。

3. 入力ファイル

asteroid.inpは数値計算条件の設定に関する入力ファイルであり、(1)座標系の選択、(2)計算領域の範囲・分解能の設定、(3)計算時間・ファイル書き出し間隔設定、(4)グローバル変数(重力加速度、地表面温度など)、(5)衝突天体の設定、(6)標的天体の設定、(7)書き出す物理量の選択、(8)トレーサー粒子の設定などがある。asteroid.inpは、「GRIDSPC grid spacing : 100」のような順で記述されており、それぞれ、iSALE上の変数(8文字以下)、その変数名の説明(20文字以下)、その変数入力欄を表す。注意点として、例えば、変数名の説明は必ず必要であり、このファイルの行間は空欄で絶対に空けてはいけない、変数名の前には必ずコロン(:)が必要などあり、これらを怠るとエラーとなってしまう。

material.inpは物質モデルの設定に関する入力ファイルであり、(1)EOSの選択、(2)強度モデル、(3)ダメージモデル、(4)音響流動モデル、(5)空隙モデル、(6)熱弱化モデル、(7)低密度弱化モデルの設定などがある。material.inpもasteroid.inpと同様で、「EOS-

NAME EOS name : dunite_」のような順で記述されており、それぞれ、iSALE上の変数(8文字以下)、その変数名の説明(20文字以下)、変数入力欄を表す。ただし、注意点として、material.inp内の変数のMATNAMEとEOSNAMEに限っては、必ず変数入力欄を7文字にしないとイケない。例えば、duniteは6文字なので、アンダーバー(_)も使って7文字にする。加えて、複数の物質モデルを用意すると、場合によっては、material.inpの仕様上、いくつかの物質モデルで不要なパラメータが生じることがある。その時は、変数入力欄を「XXX」などして埋める必要がある。また、各モデルに必要な変数が記述されていない場合は、当然、エラーとなってしまう。その時は、ログを調べることで、入力ファイルの詳細なエラー情報を確認することが可能である。

4. iSALEの出力結果

今回は、iSALEを利用して、球形の地殻・マントル・核から構成される「月」に直径200kmの天体が衝突した時、どのような衝突が起こるのかをシミュレーションした。地殻はBasaltのANEOS、マントルと衝突天体はDuniteのANEOS、核はIronのANEOSにした。空間分解能は10 km/cell、計算空間は横1800 km、縦4200 kmである。このような計算は、iSALEの本家のwebページ(<http://isale-code.de/redmine/projects/>

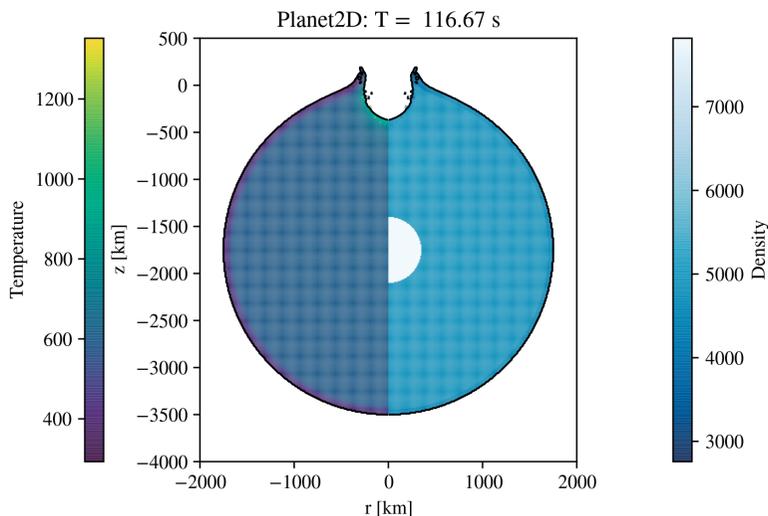


図3：iSALEシミュレーションの出力結果の一例。左側が温度、右側が密度を表す。

isale/wiki/ISALE)に、入力ファイルのサンプル(Planet 2D)が公開されており、今回は、それを修正して利用した。この講習会の実習で苦労した点は、月への衝突を考えたため、サンプルの入力ファイルの設定を変更したことから、iSALEのエラー情報が大量に出てしまい、末次氏と脇田氏に聞きながら、1つ1つ解決した点である。図3は、衝突前と衝突の約2分後の結果を示しており、とても綺麗な図を作ることができた。実習時間が短かったこともあり、残念ながら計算時間に制約があったが、今後に結びつくようなスキルを身につけられたと考えている。

参考文献

- [1] 黒澤 ほか, 2014, 遊星人 23, 103.
- [2] Wakita, S. et al., 2017, The Astrophysical Journal 834, 125.
- [3] Suetsugu, R. et al., 2018, Icarus 314, 121.
- [4] Collins, G. al., 2016, figshare.
- [5] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
- [6] Ivanov, B. A. et al., 1997, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
- [7] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
- [8] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.