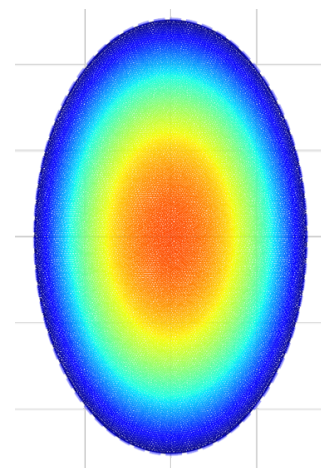
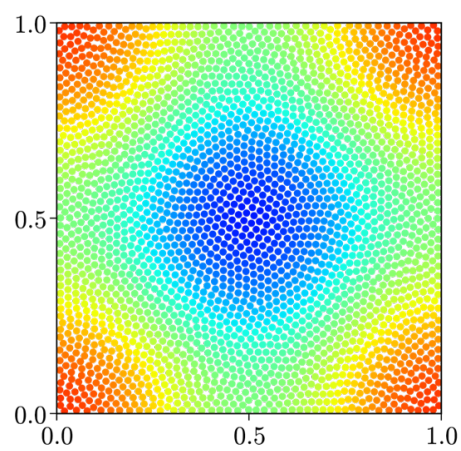
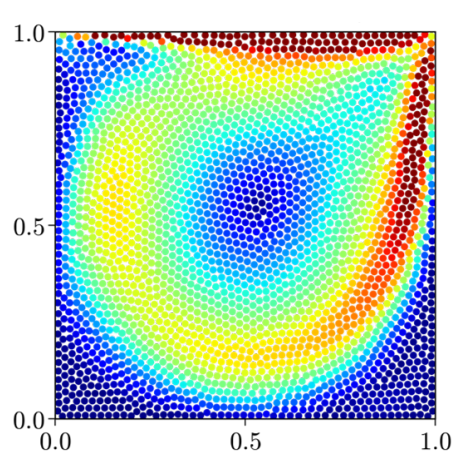


LS-SPH Fluid Simulator User Manual

菖蒲迫健介・藤川浩希・久賀凌・吉田茂生



第1版 (2025/6/21)

本書は LS-SPH-Fluid-Simulator のユーザーマニュアルです.

はじめに

本プログラムは筆者らの SPH 法を用いた流体計算に関する研究成果をまとめたもので、本マニュアルはその内容および実装に関する覚書です。SPH 法 [1,2] とは、計算点が空間的に固定されない粒子法 (メッシュフリー法) の代表例であり、連続体の合体・分裂、自由表面を含む混相流、複雑なジオメトリーを持つ流体計算の取り扱いに長けています。LS-SPH 法 [3] とは、筆者らが開発した SPH 法の一般化モデルであり、最小二乗法に基づいて定式化された高精度な SPH 法のことを言います。本プログラムでは、LS-SPH 法 (あるいは従来の SPH 法) を用いた流体計算の標準的な例題や発展的な応用例を提供します。本マニュアルは、本プログラムの構成や使用方法、入力ファイルの設定、解析結果の可視化などについて解説します。

本マニュアルは、LS-SPH 法 (あるいは SPH 法) の導入を検討している研究者・技術者を主な対象とし、数値計算や流体解析に関する基礎的な知識を有する読者を想定しています。一部の例題を除き、一般的な PC 環境での実行を前提としており、SPH 法に初めて触れる方にも配慮した内容となっています。今後、より複雑な流体解析に取り組む際の出発点として、本マニュアルが有用な資料となることを願っております。

筆者らの研究遂行にあたっては、多くの方々より温かいご指導とご支援を賜りました。特に、東京大学の川田佳史さん、神戸大学の中島涼輔さんには多大なご協力を頂きました。川田さんには研究の細部に至るまで丁寧なご助言を頂き、困難な課題に直面した際には根本から問題を見直し、多くの有益な解決策をご提案して頂きました。中島さんには、研究遂行に不可欠であった数理的テクニックの数々を賜り、また解析的計算の細部に渡るチェックをして頂きました。

さらに、九州大学工学府の浅井光輝さんには、SPH 法を中心とした数値流体解析に関する最先端の知見を惜しみなくご教授頂きました。また、浅井研究室の門下である辻勲平さん、藤岡秀二郎さんには、SPH 法に関する未発表の知見やコード開発に関する基礎的な情報をご提供頂きました。特に藤岡さんには、筆者の菫蒲迫を浅井研究室にご紹介頂き、SPH 法を用いた一連の研究における大きな転機を与えて下さいました。加えて、九州大学理学府の中村草平さんには、数多くの解析的計算を手伝って頂き、物理学の観点に基づく貴重なご助言を賜りました。

筆者らの研究に際して、多くの先生方、友人、そして家族に様々な形で応援して頂きました。この場をお借りして深く感謝申し上げます。

■ 改訂歴

- 第 0 版 (2024/03/19) : プログラムとマニュアルの大枠作成
- 第 1 版 (2025/06/21) : 第 1 部作成

■ 著者と担当

著者	所属 * と担当内容	作成版
菖蒲迫健介	九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 博士後期課程 3 年 プロジェクト統括 / マニュアル第 1 部執筆 / プログラム全体の設計および実装	1
藤川浩希	九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 修士課程 1 年 マニュアル第 2~4 部執筆中	-
久賀凌	九州大学理学部地球惑星科学科 学部 4 年 マニュアル第 2~4 部執筆中	-
吉田茂生	九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 准教授 監修 (指導教員)	1

* 作成当時の所属.

■ 著作権

本プログラムおよび本マニュアルは, MIT ライセンスに基づいて公開されており, 利用者はこれらを自由に使用, 複製, 改変, および再配布することができます. ただし, 利用目的に応じて以下の文献情報を適切にご引用ください.

(1) LS-SPH 法の手法開発および SPH 法の離散化精度に関する論文
K. Shobuzako, S. Yoshida, Y. Kawada, R. Nakashima, S. Fujioka, and M. Asai, A generalized smoothed particle hydrodynamics method based on the moving least squares method and its discretization error estimation, *Results in Applied Mathematics*, **26** (2025) 100594.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590037425000585>.

目次

第 1 部	プログラムの概要と利用方法	1
1	概要	1
1.1	実装されている計算例	1
2	利用方法	2
2.1	実行環境	2
2.2	実行手順	2
3	プログラムの構造	3
3.1	ディレクトリ構成	3
3.2	各ディレクトリの構造	3
3.3	命名規則	4
3.4	依存関係	4

第 1 部

プログラムの概要と利用方法

第 1 部では、本プログラムの概要および利用方法について説明します。内容には本プログラムの構造や、ファイルの命名規則、依存関係などが含まれます。

1 概要

本プログラムは、粒子法 (メッシュフリー法) の一種である Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法 [1,2] および、その高精度版である Least Squares SPH (LS-SPH) 法 [3] に基づいた流体解析コードです。本プログラムの特色は以下の通りです。

本プログラムの特色

- LS-SPH 法 (あるいは SPH 法) に基づく流体計算プログラム (Fortran) を提供
- Python による作図テンプレートを提供
- 固定壁条件 / 周期的境界条件 (工事中) / 自由境界条件 (工事中) を利用可能
- バックグラウンドセルを用いた近傍粒子探索アルゴリズム (e.g., [4]) を実装
- 複数の離散化モデル (例: Standard SPH, Corrected SPH [5–7], LS-SPH) を選択可能
- OpenMP を利用した共有メモリ並列計算に対応

1.1 実装されている計算例

本プログラムに実装されている計算例を表 1.1 に示します。各セットアップや代表的な結果などの詳細については、今後のアップデートにて順次追加していく予定です。

表 1.1: 本プログラムに実装されている計算例。

計算例	説明	ディレクトリ
Taylor–Green vortex	非圧縮性粘性流体の運動エネルギーが粘性によって散逸する問題	2d_fixed_wall
Lid-driven cavity flow	上壁境界に一定の速度を与える問題	2d_fixed_wall
Boussinesq convection	熱膨張のみによって浮力が生じる対流問題 (ブシネスク対流)	2d_fixed_wall

2 利用方法

2.1 実行環境

本プログラムでは**流体計算を Fortran が担い、解析や作図を Python が担います**。Linux 環境下での実行を前提としています。Fortran のコンパイラとして Intel Fortran を使用しており、プログラム中では Intel MKL (Math Kernel Library) を利用します。Fortran コードのビルドには make を利用します。

なお、SPH 法による流体計算は計算負荷が高いため、OpenMP を用いた共有メモリ並列計算の使用を推奨します (デフォルト設定)。Python のバージョンは 3.10.12 を使用しており、解析には matplotlib や scipy などのライブラリを利用します。その他、MP4 形式の動画作成のために ffmpeg を利用します。

以上の必要な環境はご自身でご用意ください。筆者らは WSL2 (Windows Subsystem for Linux 2) を用いてこれらの環境構築を行いました^{*1}。その際の構築手順を Qiita 記事として公開しております。なお、ffmpeg も忘れずにインストールしておいてください。

- WSL2 のインストールとアンインストール^{*2}
(<https://qiita.com/zakoken/items/61141df6aeae9e3f8e36>)
- WSL2 による gfortran と intel fortran の環境構築^{*3}
(<https://qiita.com/zakoken/items/2a5e629020ce68f3efef1>)
- WSL2 による Python3 の環境構築
(<https://qiita.com/zakoken/items/8dddfa7267e7d95b3c46>)

2.2 実行手順

Taylor–Green vortex を例として実行手順を説明します。なお、以下の「編集」部分は配布時に予め設定されています。その他の計算例のパラメータ設定については、今後のアップデートにて順次追加します。

実行手順

手順 (1) 該当ディレクトリに移動します (本例では sph_code/benchmarks/2d_fixed_wall/)

手順 (2) source_code ディレクトリに移動し、`makefile` を編集して計算系を選択します

手順 (3) 続けて、`input.f90` を編集し、系のパラメータや物性値を設定します

手順 (4) ターミナルから `make` を実行し、Fortran コードをビルドします

以下のような出力があればビルド成功です：

[message] compilation has finished

[message] input ./start_calculation

手順 (5) 続けて、`./start_calculation` を実行すると計算が始まります

手順 (6) 計算終了後、同じディレクトリにある `TG_main.py` を実行して解析を行います

^{*1} WSL2 とは Windows 上で仮想的に Linux を動作させることができるシステム環境です。

^{*2} WSL2 では make がデフォルトで利用可能です。

^{*3} この方法でインストールした場合、MKL がデフォルトで利用可能です。

3 プログラムの構造

3.1 ディレクトリ構成

全ての計算および解析コードは、`sph_code` ディレクトリ配下に格納されています。各ディレクトリに対応する計算例の一覧は、表 1.1 をご参照ください。

```

└─ sph_code
  └─ benchmarks
      ├── 2d.fixed.wall      (2次元・固定壁境界)
      ├── 2d.free.surface   (2次元・自由表面境界)
      └─ 2d.multi.boundary (2次元・固定壁＋自由表面境界)

```

3.2 各ディレクトリの構造

`2d.fixed.wall` ディレクトリの構造を例として説明します。続く、3.3 節および 3.4 節で、各ファイルの命名規則と依存関係を述べます。ソースコードの詳細は今後のアップデートにて順次追加します。

```

└─ 2d.fixed.wall
  ├── initialize_local.py      (配布時の状態にリセットする python コード)
  ├── fig                     (図の格納場所 ← プログラム実行時に作成される)
  ├── output                  (計算結果の格納場所 ← プログラム実行時に作成される)
  ├── reference_solution      (参照解の格納場所)
  └─ source_code              (ソースコードの格納場所)
      ├── ana_〇〇.py          (解析コード (Python) で用いるモジュール)
      ├── BC_〇〇.py           (Boussinesq Convection (BC) 用の解析コード)
      ├── CF_〇〇.py           (Lid-driven Cavity FLOW (CF) 用の解析コード)
      ├── TG_〇〇.py           (Taylor-Green vortex (TG) 用の解析コード)
      ├── cal_〇〇.f90          (計算を行うサブルーチン)
      ├── check_compile_options.f90 (コンパイルオプションの確認)
      ├── global_variables.f90 (グローバル変数を格納したファイル)
      ├── input.f90           (入力ファイル)
      ├── lib_〇〇.f90          (計算で用いるモジュール)
      ├── main.f90            (メインプログラム)
      ├── Makefile            (ビルドを行う make ファイル)
      ├── out_〇〇.f90         (書き出しサブルーチン)
      └─ set_〇〇.f90          (初期設定サブルーチン)

```

3.3 命名規則

source_code ディレクトリ内の各ファイルは、以下の規則に基づいて命名されています。

ファイルの命名規則

- 解析コード (Python ファイル) は、各計算例の頭文字などを接頭辞として使用
(例: Taylor-Green vortex → TG_〇〇.py)
- ただし、全ての解析コードで共通なソースコードには ana_〇〇.py と命名
(例: カーネル関数や Fortran による書き出しファイルを読み込む関数など)
- 計算コード (Fortran ファイル) は以下に準拠
 - ・ 計算を行うサブルーチンの接頭辞には cal を付与・・・SPH の相互作用計算など
 - ・ 計算で用いるモジュールの接頭辞には lib を付与・・・カーネル関数や行列演算など
 - ・ 書き出しサブルーチン の接頭辞には out を付与・・・書き出しなど
 - ・ 初期設定サブルーチン の接頭辞には set を付与・・・配列の設定など
 - ・ それ以外の Fortran ファイルの説明は 3.2 節を参照

3.4 依存関係

計算コード (Fortran ファイル) には明確な依存関係が存在し、これは `Makefile` に記述されたコンパイル順と一致しています。最上位には、多くのファイルから参照される `input.f90` および `global_variables.f90` モジュールが配置されます。次に、関数モジュール `lib_〇〇.f90` が続き、その後に具体的な処理を行う `set_〇〇.f90`, `cal_〇〇.f90`, `out_〇〇.f90` が並びます。最後に、メインプログラム `main.f90` がこれら呼び出す構成となっています。

なお、`set_〇〇.f90`, `cal_〇〇.f90`, `out_〇〇.f90` は基本的に相互に独立していますが、一部において依存関係が存在します。こうした依存関係は `main.f90` における呼び出し順に対応しています。

解析コード (Python ファイル) にも依存関係はありますが、Python では明示的なコンパイルが不要であり、本マニュアルでは詳細な説明を省略します。

参考文献

- [1] L. B. Lucy, [A numerical approach to the testing of the fission hypothesis](#), The Astronomical Journal 82 (1977) 1013–1024.
URL <https://doi.org/10.1086/112164>
- [2] R. A. Gingold, J. J. Monaghan, [Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars](#), Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 181 (3) (1977) 375–389.
URL <https://doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>
- [3] K. Shobuzako, S. Yoshida, Y. Kawada, R. Nakashima, S. Fujioka, M. Asai, [A generalized smoothed particle hydrodynamics method based on the moving least squares method and its discretization error estimation](#), Results in Applied Mathematics 26 (2025) 100594.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590037425000585>
- [4] C. E. Rhoades, [A fast algorithm for calculating particle interactions in smooth particle hydrodynamic simulations](#), Computer Physics Communications 70 (3) (1992) 478–482.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001046559290109C>
- [5] P. Randles, L. Libersky, [Smoothed particle hydrodynamics: Some recent improvements and applications](#), Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 139 (1) (1996) 375–408.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782596010900>
- [6] J. K. Chen, J. E. Beraun, T. C. Carney, [A corrective smoothed particle method for boundary value problems in heat conduction](#), International Journal for Numerical Methods in Engineering 46 (2) (1999) 231–252.
URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291097-0207%2819990920%2946%3A2%3C231%3A%3AAID-NME672%3E3.0.CO%3B2-K>
- [7] J. Bonet, T.-S. Lok, [Variational and momentum preservation aspects of smooth particle hydrodynamic formulations](#), Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 180 (1) (1999) 97–115.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782599000511>