小惑星の力学シミュレータ Astroshaperの開発状況

金丸 仁明[1]、出村 裕英[2]、平田 成[2]、千秋 博紀[3]、岡田 達明[4]

[1]Côte d'Azur Observatory、[2]会津大学、[3]千葉工業大学、[4]ISAS/JAXA

ARC-Space Symposium

2025年12月19日

概要

小惑星の力学シミュレータ Astroshaper

- 小惑星の力学や熱物理の数値シミュレーションを行うJulia言語の計算パッケージ群
- 研究チーム：金丸仁明、出村裕英、平田成、千秋博紀、岡田達明
- ARC-Space公募型共同研究の支援を受けて開発を行なっている。
  - 萌芽研究（2022年度）、実用研究（2023年度・2024年度）、海外招聘共同研究（2024年度）

本日の発表内容

- Astroshaperの概要・機能
- Astroshaperの開発状況
- 小惑星の熱物理シミュレーションの例
- 今後の開発の展望

Astroshaper
Asteroid dynamical simulator

Astroshaper 開発の動機

小惑星研究の意義

- 太陽系の形成過程の手がかりとして、あるいは、揮発性物質の運び手として
- プラネタリー・ディフェンスにおける監視対象として

古くて新しい問題：小惑星の力学と熱物理

- 小惑星の軌道や自転の進化は、熱放射による摂動を受ける（Yarkovsky効果・YORP効果）
- 小惑星探査による接近観測で、理論や数値シミュレーションを直接検証できる機会が増えている。

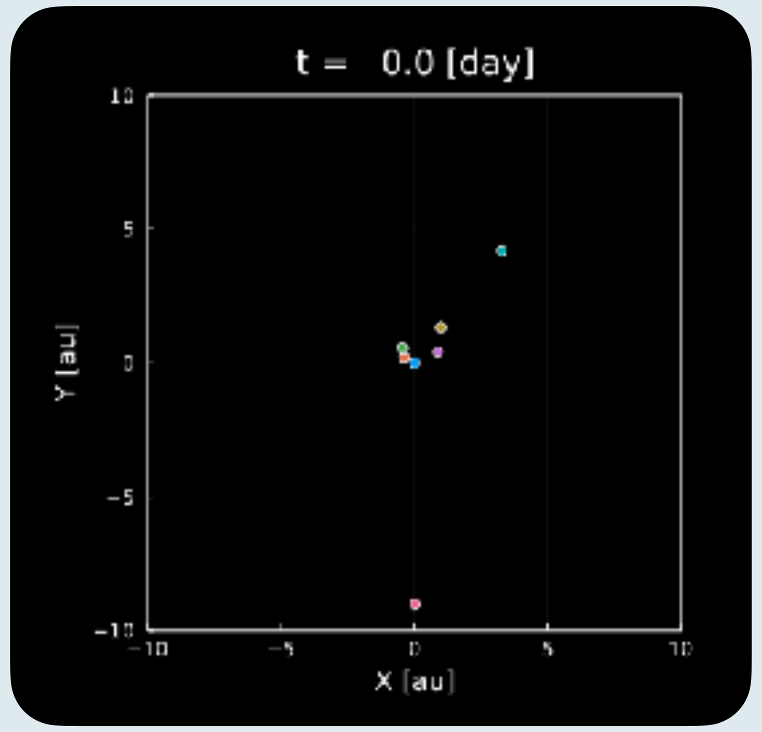
ソフトウェア開発による貢献

- 基礎的な計算コードでも（例えば、熱物理計算コード）研究者・プロジェクトごとに開発されている現状がある。
- テストやドキュメントが充実したOSS (open-source software) パッケージがあると、研究コミュニティの利益になる。
- Astroshaperは、小惑星の力学と熱物理に関するシミュレーションを行うパッケージとして、国際的な小惑星探査ミッションで使われるようになりつつある。

Astroshaper 小惑星の力学・熱物理のシミュレータ

AsteroidOrbits.jl

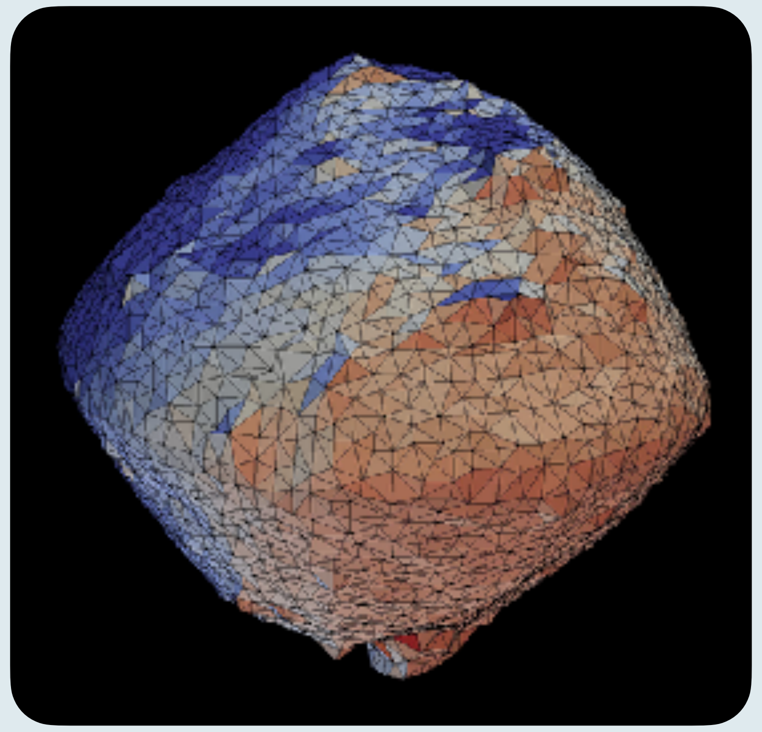
- ケプラー運動の計算
- N体計算にもとづく天体の軌道計算



4次エルミート法 + 惑星の重力

AsteroidThermoPhysicalModels.jl

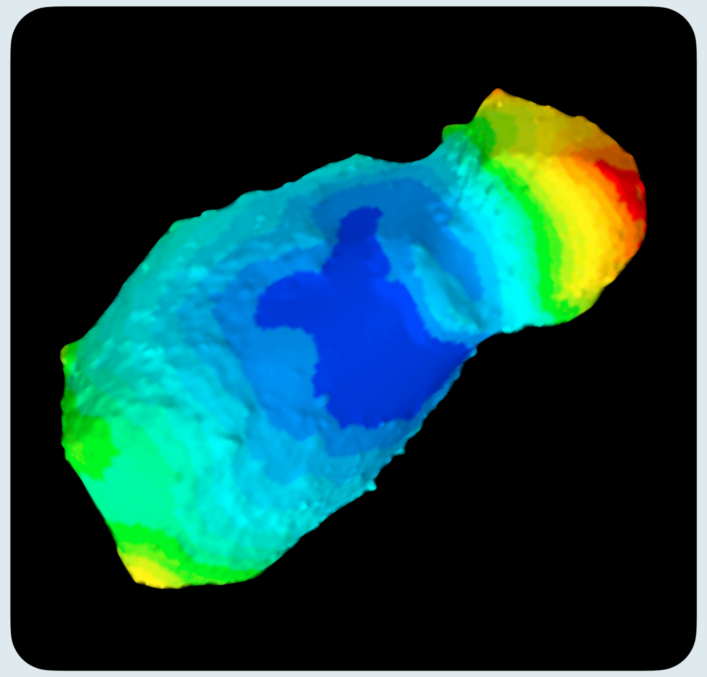
- 小惑星の３次元形状にもとづく熱物理シミュレーション
- 軌道や自転に対する摂動の計算（Yarkovsky効果、YORP効果）



小惑星Ryuguの温度分布 (200–400 K)

AsteroidGravityFields.jl

- 密度一定の多面体の重力場
- 小惑星内部の密度分布



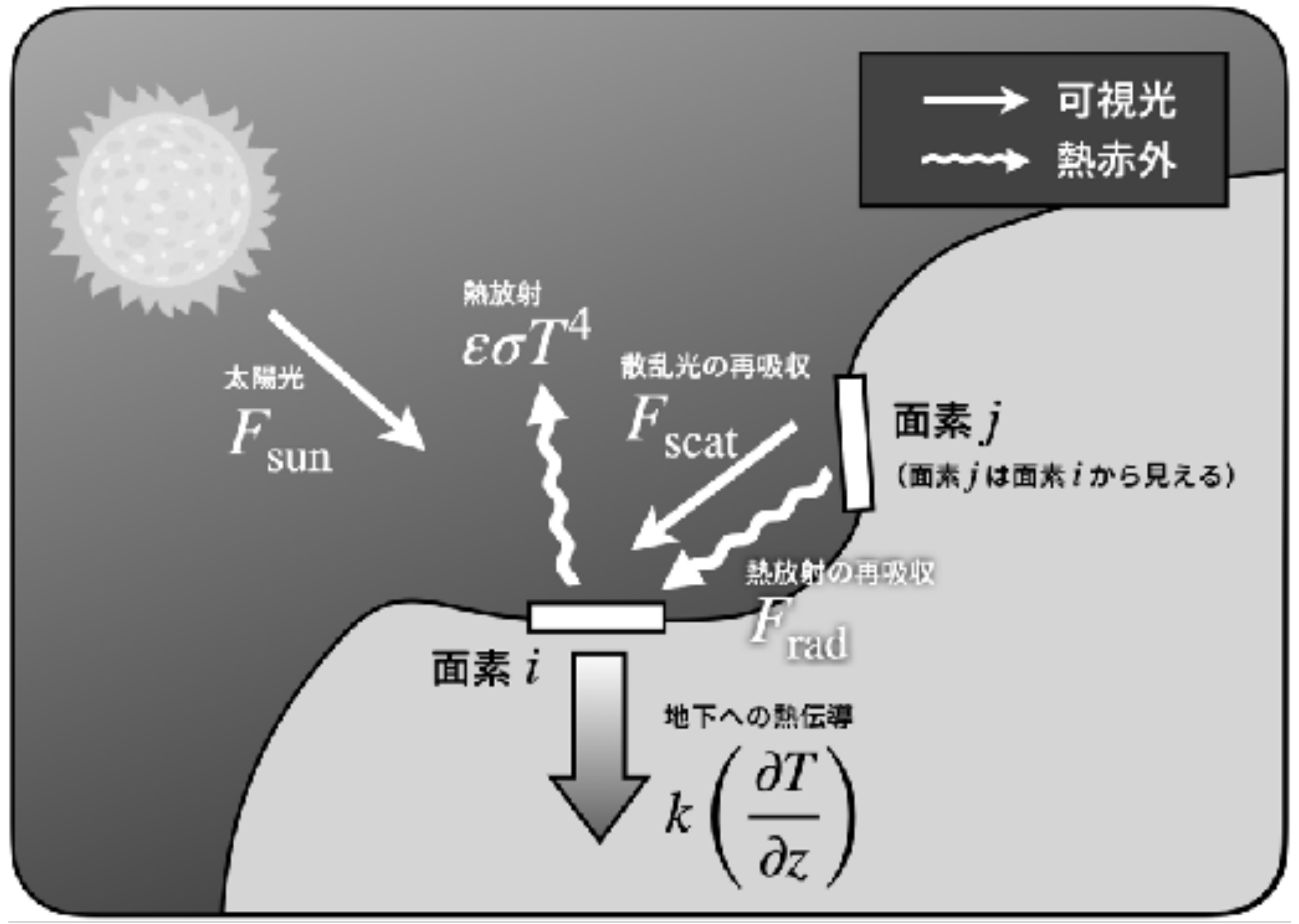
小惑星Itokawaの標高分布 (-25–55 m)

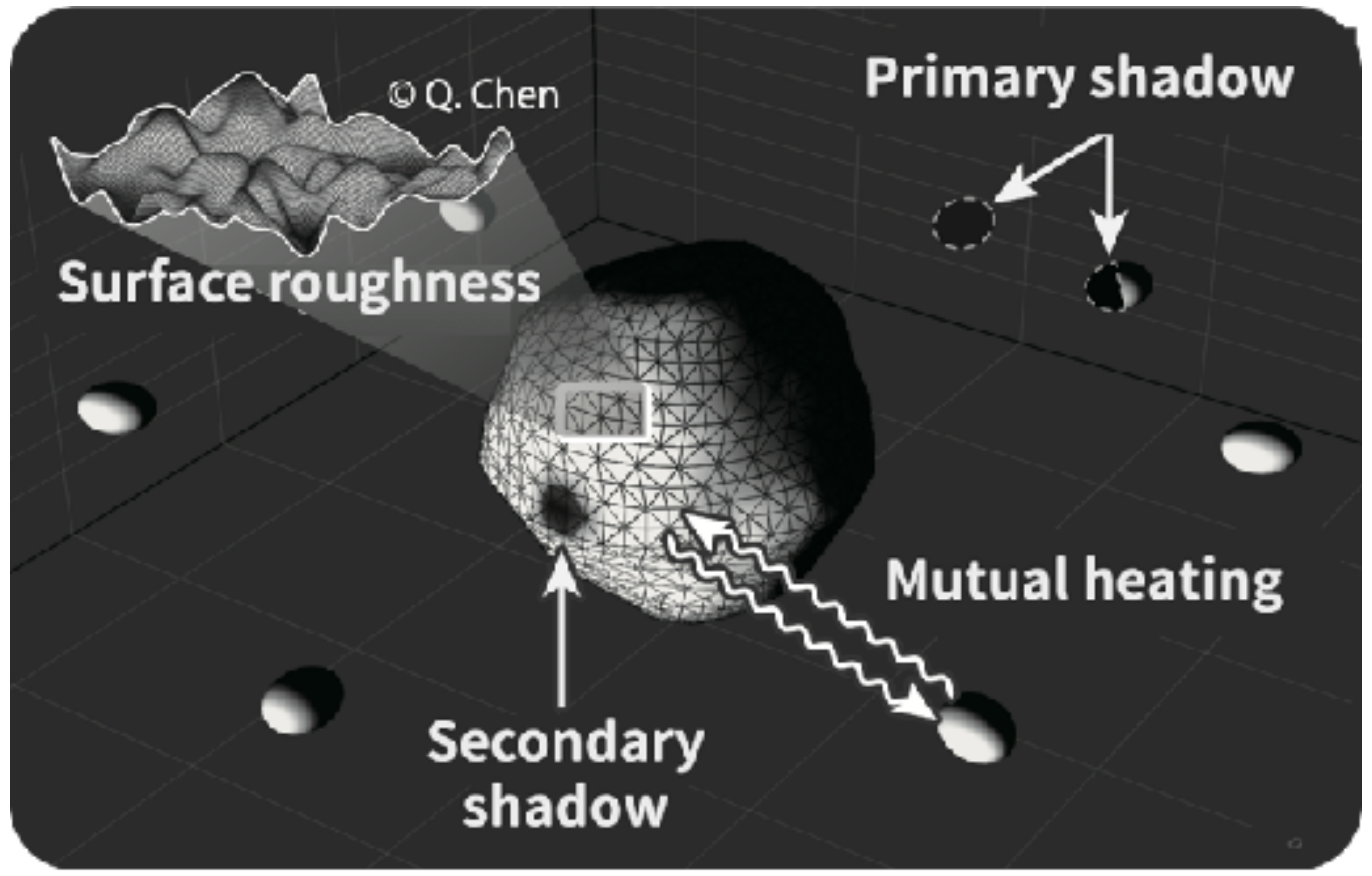
開発状況

- オープンソースのJulia言語ライブラリとして開発中
  - https://github.com/Astroshaper
- はやぶさ２#やHeraに向けて機能強化中
  - 二重小惑星の熱物理モデルと熱物性の推定
  - 小惑星の軌道計算と非重力効果のカップリング

AsteroidThermoPhysicalModels.jl の機能

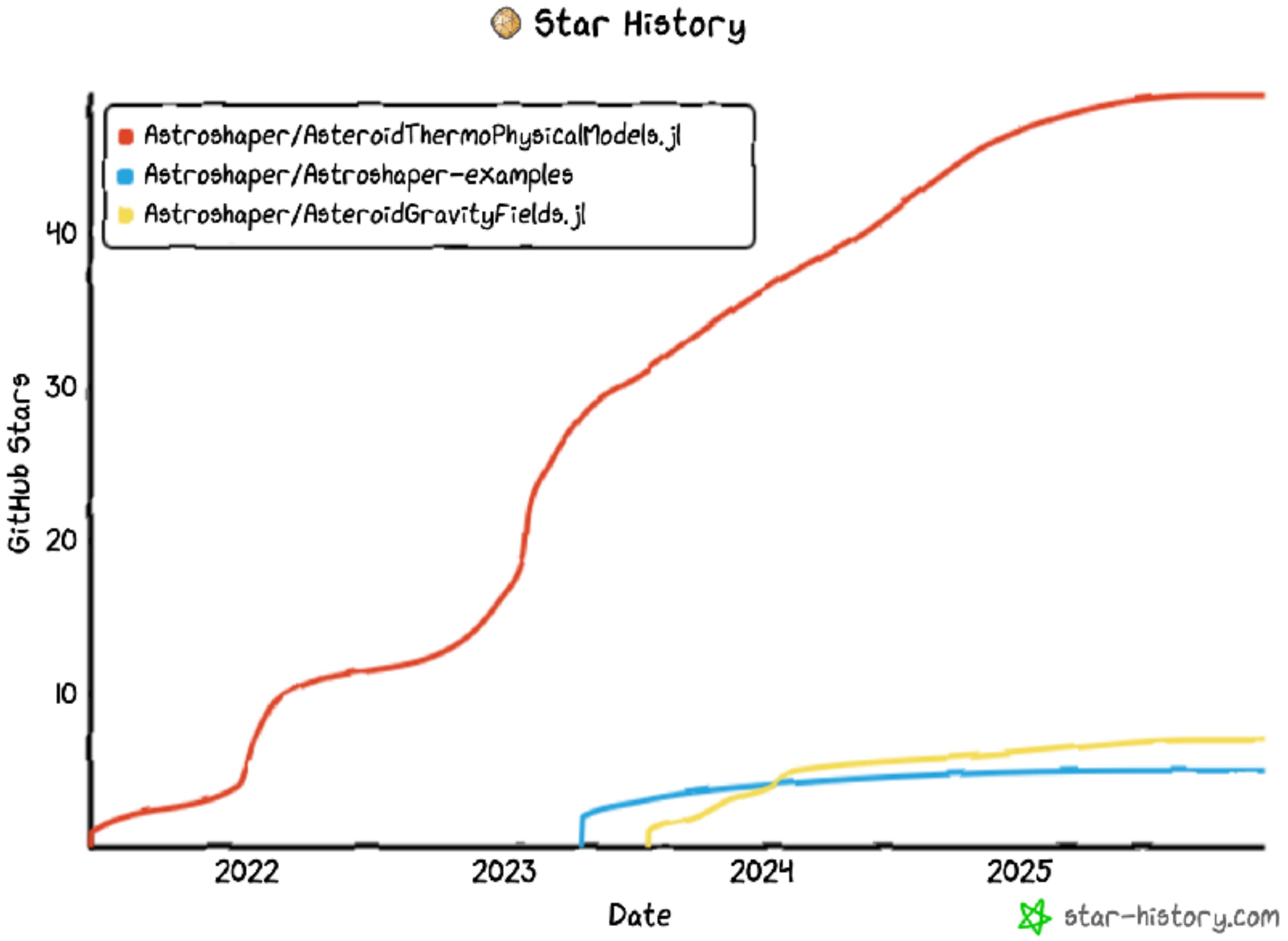
小惑星の３次元形状	（三角形メッシュで表現されていれば）任意の形状が扱える。現在はWavefront OBJ形式のみ入力可能。
熱伝導	深さ方向１次元の熱伝導方程式を形状モデルのメッシュごとに解く。
影の検出 Self-shadowing	地平線によって生じるローカルな影を検出できる。
自己加熱 Self-heating	向かい合う面が吸収する散乱光と熱放射を考慮できる。
蝕 Mutual-shadowing	二重小惑星に生じる蝕を検出できる。
相互加熱 Mutual-heating	二重小惑星の主星と衛星の間で吸収される散乱光と熱放射を考慮できる。計算に時間がかかる。
表面凹凸 Surface roughness	ローカルな地形モデルを用いたシミュレーションは可能。グローバルな形状モデルとの連携が今後の課題。
非重力効果	温度分布にもとづいて、Yarkovsky効果とYORP効果の計算が可能。





Astroshaper 開発の現状

- 熱物理シミュレーションの基本機能（温度分布と非重力効果の計算）および二重小惑星への拡張は完了している。
- 今後の機能追加を前にリファクタリングを進めてきた。ユーザビリティを改善するための準備ができつつある。
- ドキュメントやテストも次第に充実してきている。
  - Claude Codeをはじめとする生成AIの普及によるところも大きい。
- 小惑星探査ミッションでの利用実績が増えつつある。
  - e.g., Hayabusa2, Hera, Ramses, MMX



2025年度に完了した作業

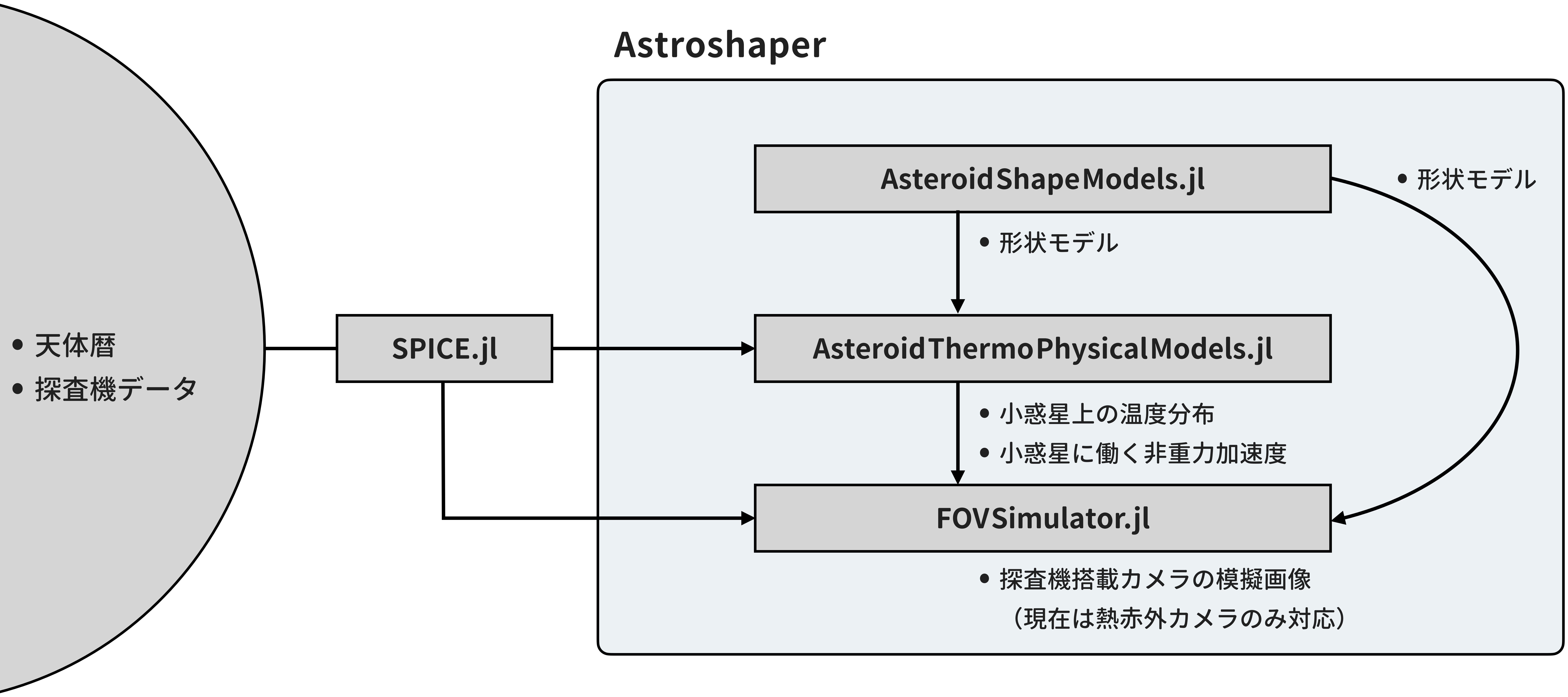
バックエンドの強化

- 高精度の数値解法の追加
  - 熱伝導方程式のソルバーとして、陽的オイラー法・陰的オイラー法・Crank-Nicolson法を選択できるようになった。
  - 2024年度の海外招聘共同研究におけるZhou Wenhan博士との議論がもとになった。
- 計算速度・メモリ効率の向上
  - **BVH** (Bounding Volume Hierarchy) の導入によって、レイトレーシングの計算速度が向上した。
  - 互いに向かい合うメッシュの関係を保持する可視面グラフを**CSR** (Compressed Sparse Row) 形式にして、メモリ使用量を圧縮した。

パッケージの整備・登録

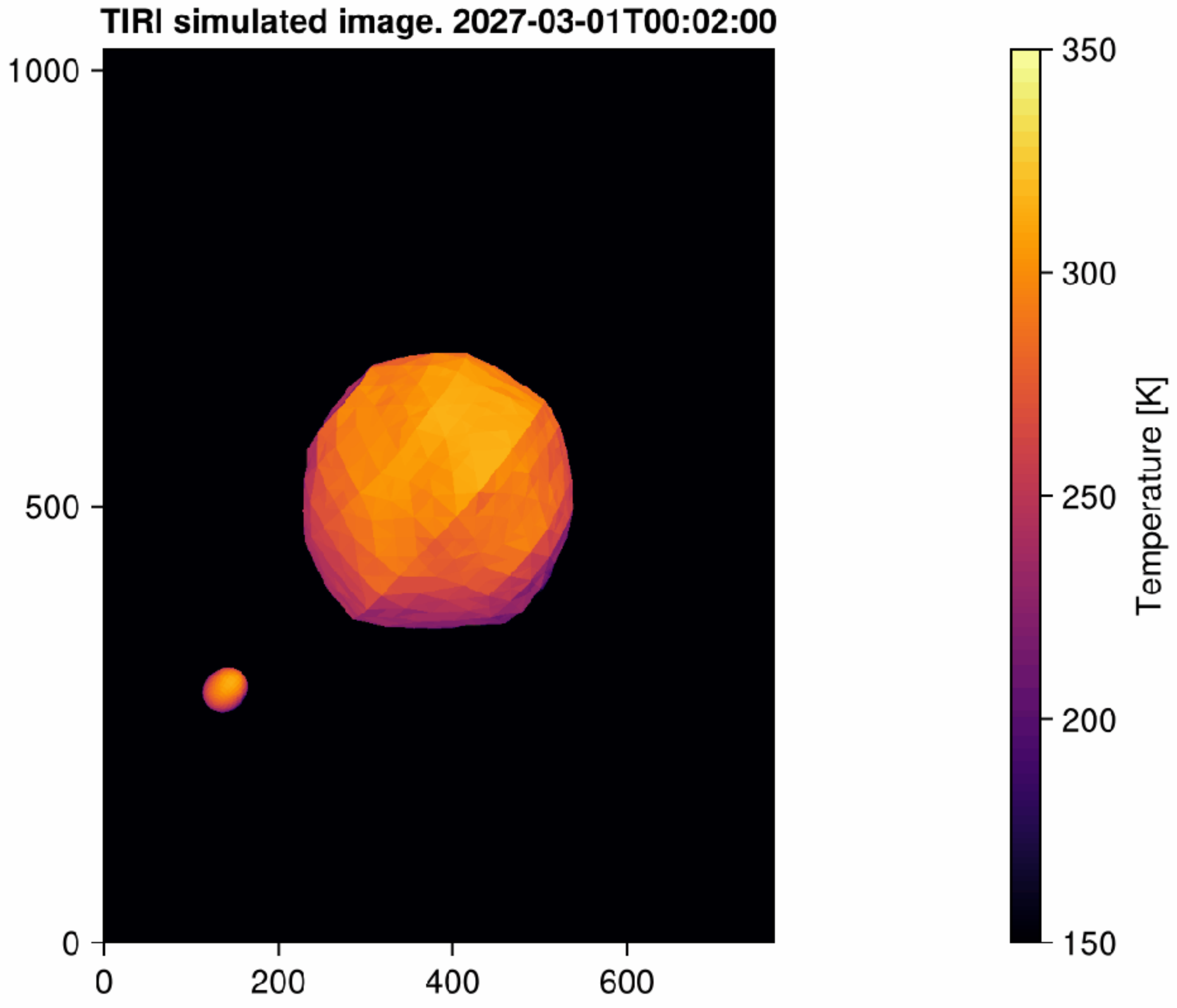
- 小惑星の３次元形状モデルに関する幾何学処理をAsteroidShapeModels.jlとして切り分けた。
- **Julia公式パッケージ**として、AsteroidShapeModels.jl（最新版：v0.4.2）と AsteroidThermoPhysicalModels.jl（最新版：v0.1.0）を登録した。
- 新たにFOVSimulator.jlを開発＆公開した。
  - SPICEカーネルにもとづき熱赤外カメラ（thermal infrared imager; TIRI）の模擬画像を生成できるようになった。

小惑星の熱物理計算のワークフロー



二重小惑星の熱物理シミュレーション

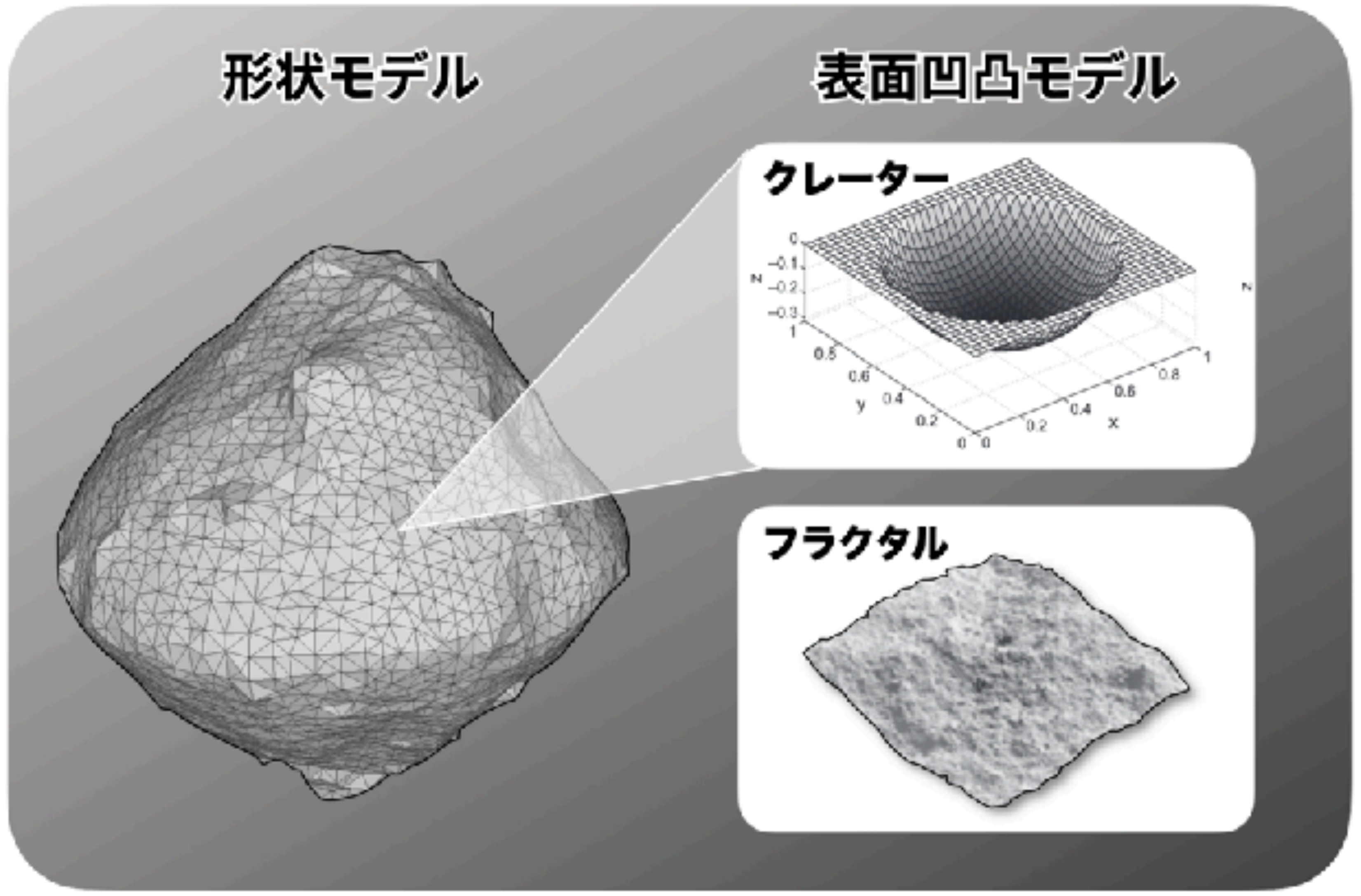
- ESA/Heraプロジェクトが提供するSPICEカーネルをもとに、二重小惑星Didymos–Dimorphos表層の温度分布を計算した。
  - 地上観測にもとづく形状モデルを使用した。
    必要に応じて高解像度の形状モデルに差し替え可能。
  - ここでは、S型小惑星に典型的な熱慣性 $\Gamma = 403\ \mathrm{tiu}$ を仮定した。
- 各メッシュにおける太陽光の散乱や熱放射をもとに、非重力効果も計算した。
  - 長期的な力学進化の解析に用いることができる。
- 形状モデル・温度分布・探査機位置・カメラの視線方向をもとに模擬画像を作成した。



最近の開発状況・今後の課題

表面凹凸モデルの実装

- 階層化した形状モデルによって、sub-meshスケールの表面凹凸を表現する。
- おおよその実装作業は完了して、テストの追加やコードの検証を行っている。
- 表面凹凸によって、熱放射の方向依存性や非重力効果が変化する。小惑星の軌道予測の精密化にも資することが期待できる。



表面凹凸モデルの例

小惑星探査ミッションとの協働

ESA/Hera

- 熱赤外カメラ（TIRI）による小惑星Didymos-Dimorphosの熱撮像データと熱物理シミュレーションを比較して、熱物性の推定を行う。
- NGA (Non-Gravitational Acceleration) チームにおいて、二重小惑星に働く非重力効果の予測・検出に向けて、Astroshaperの熱物理シミュレーションを提供している。ピサ大学・ボローニャ大学との共同研究。

ESA/Ramses

- 2029年4月に地球に接近する小惑星Apophisの接近観測を行うミッション
- 金丸は小惑星表層の研究チーム（WG1）とデータ解析チーム（WG4）に参加しており、Astroshaperを提供予定。

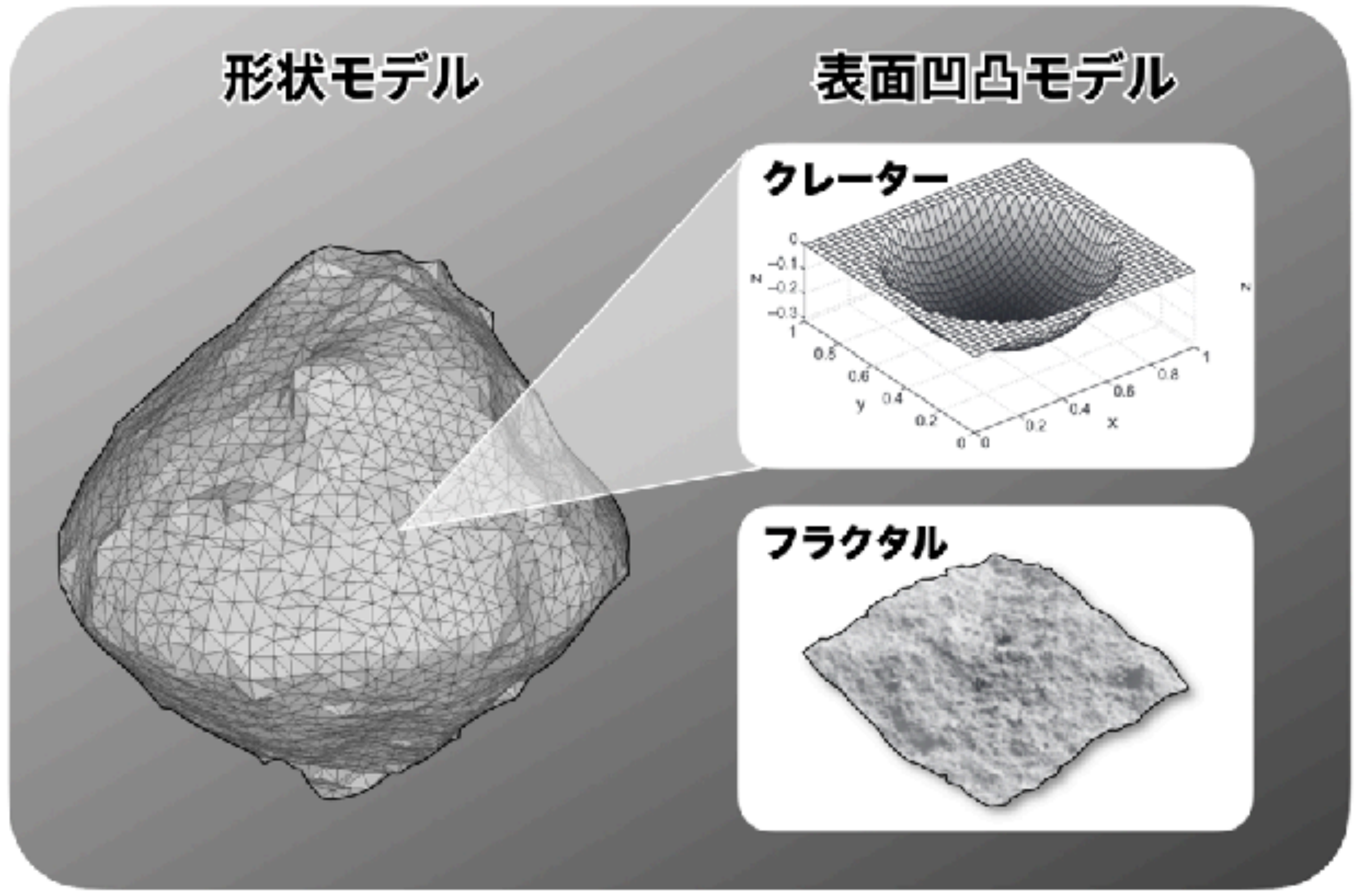
JAXA/MMX

- 赤外分光器MIRS（MMX InfraRed Spectrometer）のデータ解析、特に火星衛星Phobosの赤外スペクトルの補正（thermal tailの除去）に用いる予定。湯本航生さん（パリ天文台）、Marco Delbo（コートダジュール天文台）との共同研究。

まとめ

- 小惑星の力学シミュレータ **Astroshaper** を開発し、オープンソースで公開中である。
  - Juliaの環境があれば **AsteroidThermoPhysicalModels.jl** で熱物理シミュレーションを気軽に実行できる。
- 今後、探査機データとの連携強化を行なっていく。
  - 表面凹凸モデルの実装
  - 探査機の熱画像（はやぶさ２、Hera）と熱物理シミュレーションを比較して、小惑星の熱物性を推定する。
  - 大規模計算機での実行
  - 類似のソフトウェアとの比較を通して、コードの検証を行う。
- 利用促進に向けて
  - ドキュメントやサンプルコードを充実させる。
  - Jupyter NotebookやPlutoといった実行しやすい配布形式を検討する。
  - （余力があれば）Python等、多言語のインターフェースを用意する。

Astroshaper
Asteroid dynamical simulator



表面凹凸モデルの例