



# 小惑星力学シミュレータ **Astroshaper** の開発

金丸 仁明<sup>1</sup>、出村 裕英<sup>2</sup>、平田 成<sup>2</sup>、千秋 博紀<sup>3</sup>、岡田 達明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東京大学、<sup>2</sup>会津大学、<sup>3</sup>千葉工業大学、<sup>4</sup>ISAS/JAXA

ARC-Space Symposium

2024年12月19日

# 金丸 仁明 Masanori KANAMARU



## 研究テーマ

- 小惑星の力学進化・熱物理・地質
  - 小惑星Itokawa内部の密度分布  
[Kanamaru & Sasaki, 2019; Kanamaru+2019]
  - 小惑星Ryuguの自転進化史 [Kanamaru+2021]

## 小惑星探査ミッション

- はやぶさ2
  - 光学航法カメラ・熱赤外カメラ
- Hera
  - 熱赤外カメラ
  - 非重力効果検討チーム (Co-Lead)

## 略歴

2015	大阪大学・理学部物理学科 卒業
2017	大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻・修士課程 修了
2020	大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻・博士課程 修了
2020-2022	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、招聘職員
2022-2025	JSPS特別研究員PD (受入機関：東京大学)
2025-	JSPS海外特別研究員 (受入機関：コートダジュール天文台)

# 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

- 熱物理シミュレーションの計算モデル
- Astroshaperを使った研究の例
- 今後の開発計画

**Astroshaper**  
Asteroid dynamical simulator

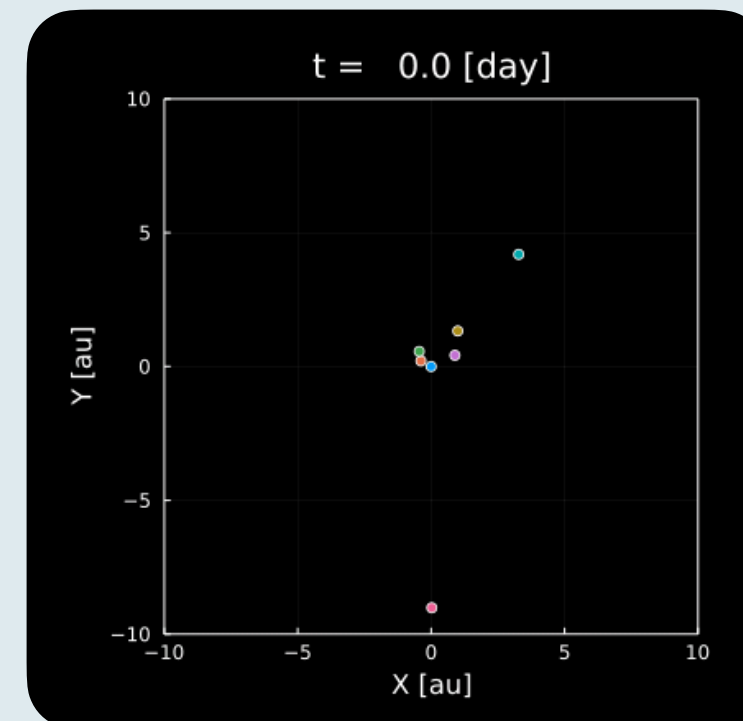


# Astroshaper 小惑星の力学・熱物理のシミュレータ

## 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

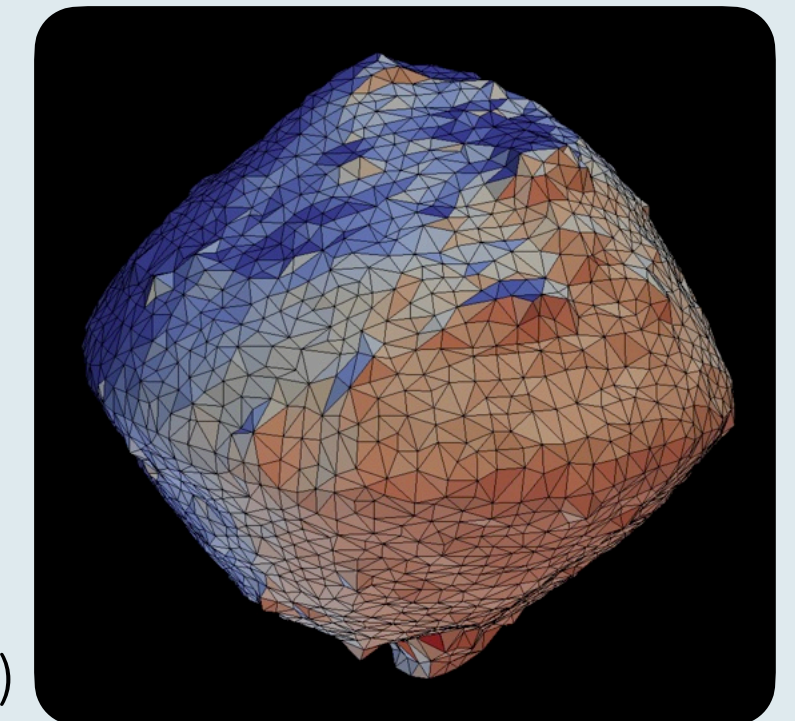
4次エルミート法 + 惑星の重力



## 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)

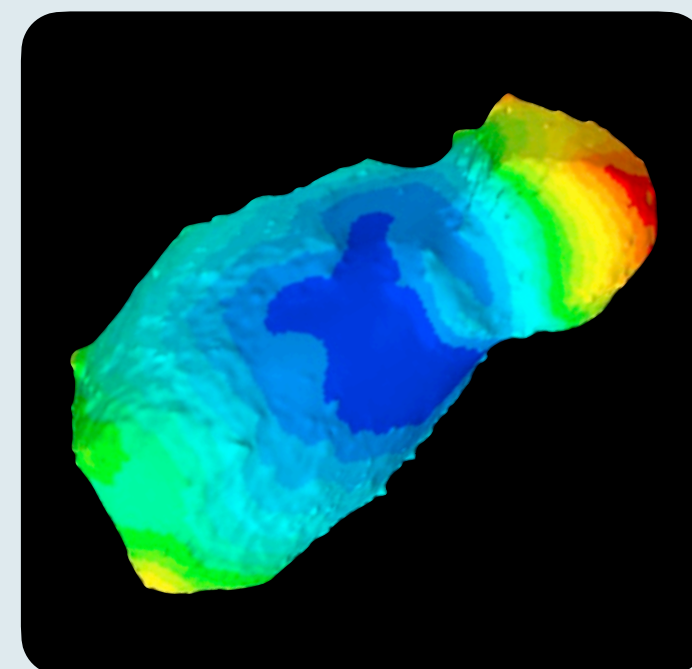
小惑星Ryuguの温度分布 (200–400 K)



## 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

# 開発体制

## ● GitHub上で開発

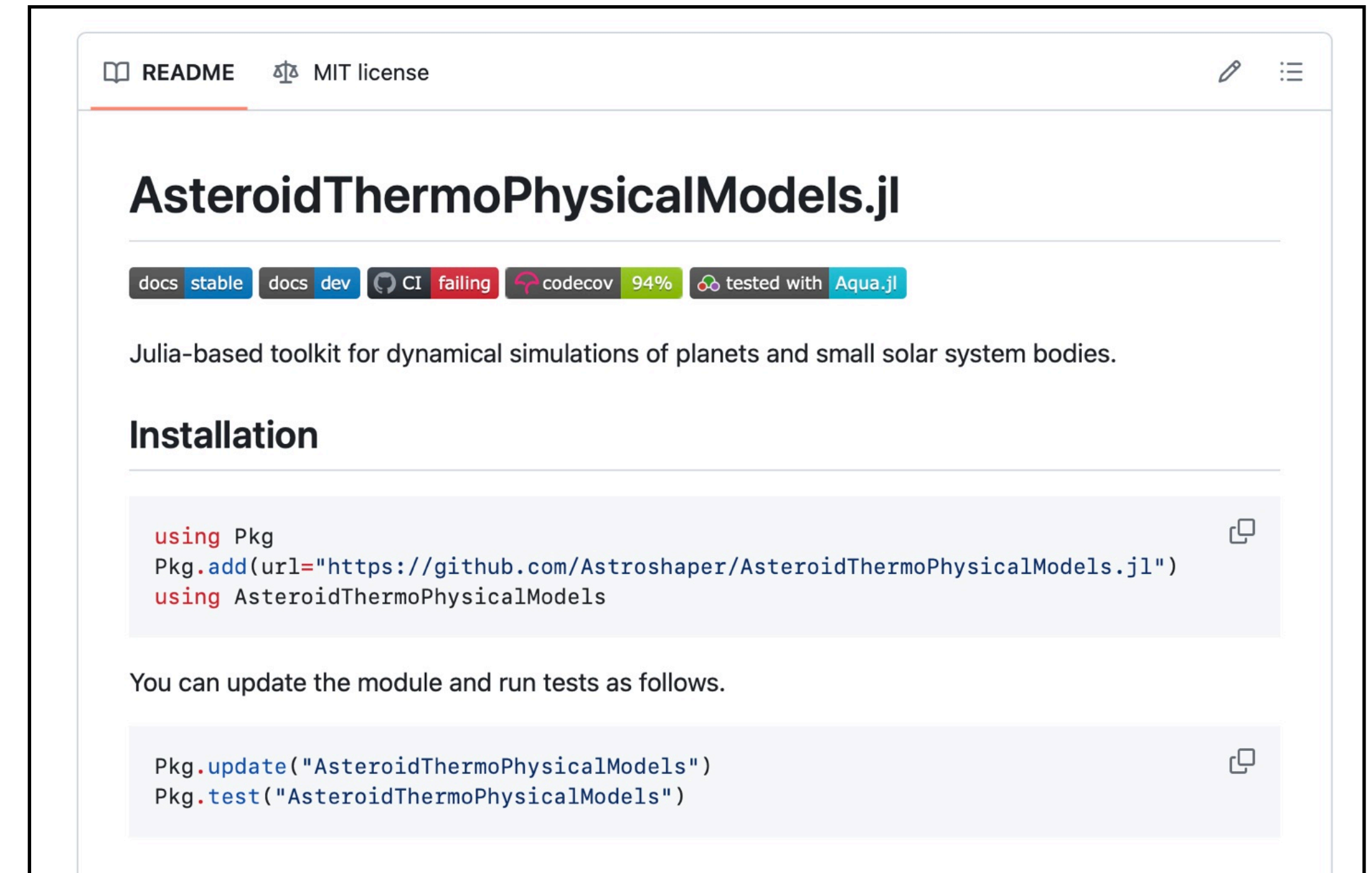
- GitHub organization “Astroshaper” 内に各パッケージを格納
- オープンソース (MITライセンス)
- Gitによるバージョン管理
- 継続的インテグレーション (continuous integration) によるテストの自動化
- 共同開発者：堀川由人、北原大地

## ● 開発言語：Julia言語

- 「C言語のように速く、Pythonのように書きやすい」

## ● 公開方法

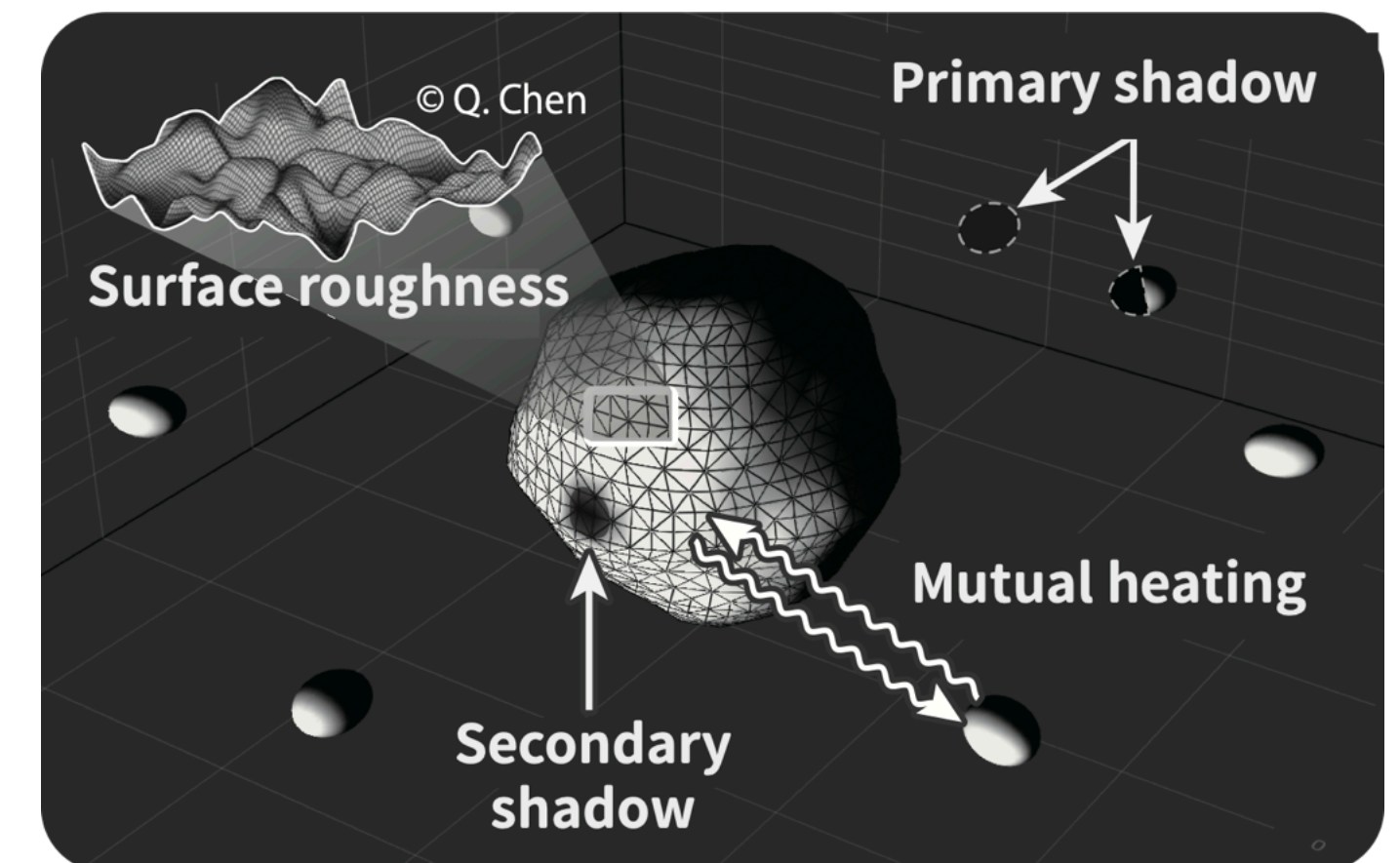
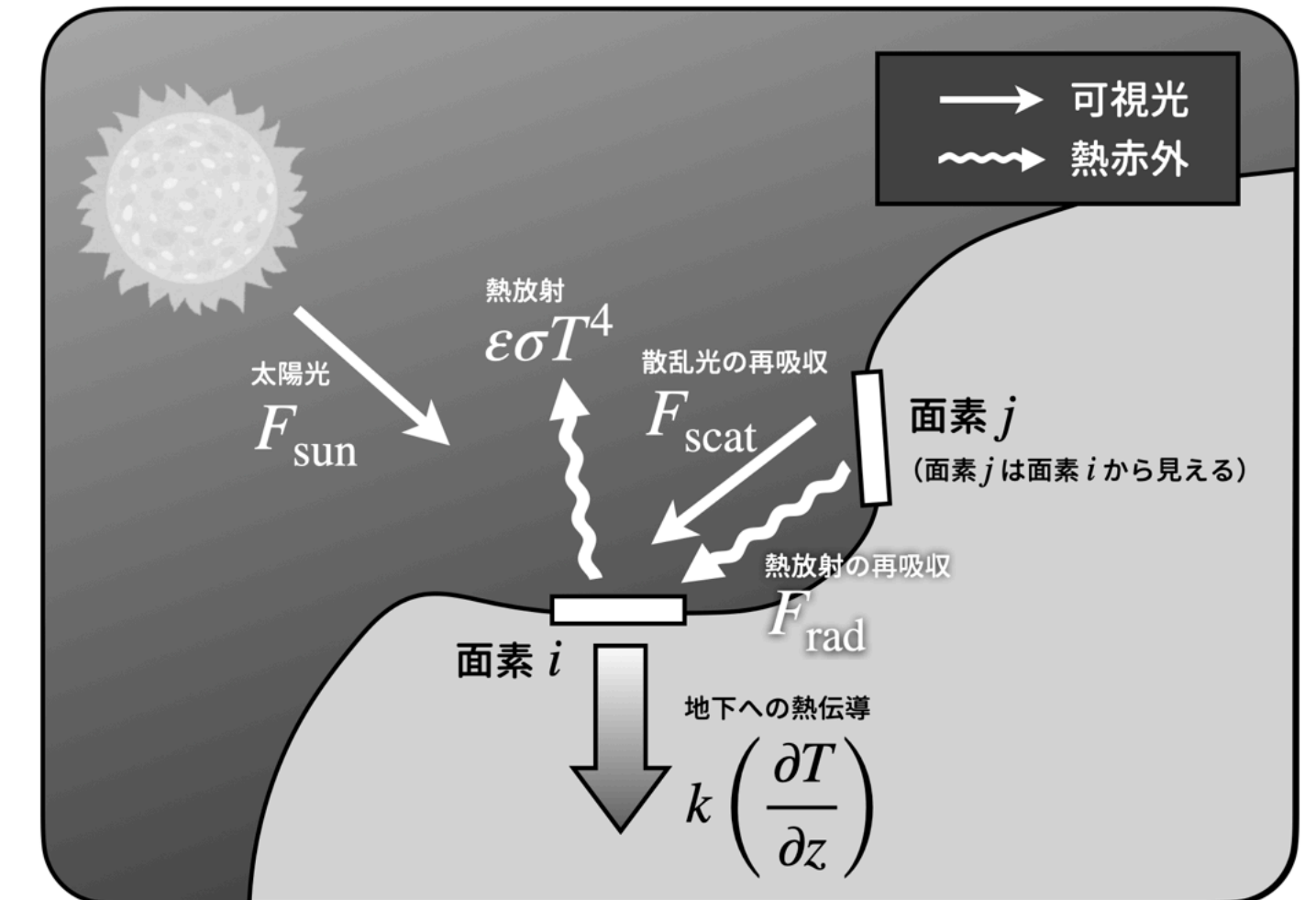
- Julia言語をインストールしたマシンなら誰でも利用可能 (macOS, windows, ubuntuでテスト済み)
- サンプルコードも公開中 (Astroshaper-examples)



小惑星の熱物理シミュレーションのパッケージ

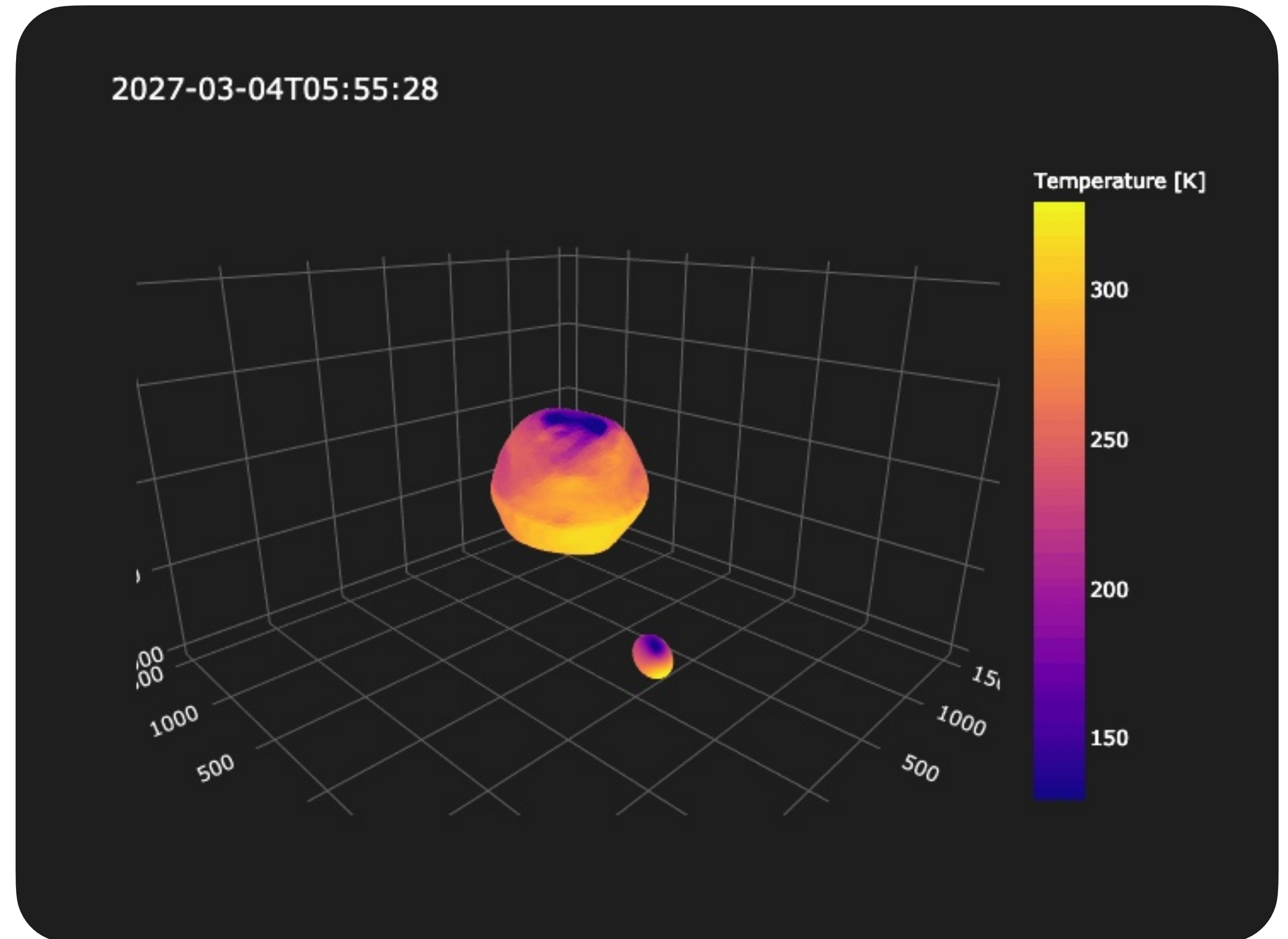
# AsteroidThermoPhysicalModels.jl の機能

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。現在使える数値解法はオイラー法のみ。
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。



# 二重小惑星の熱物理シミュレーション

- Heraミッション提供のSPICEカーネルを使用
- ライトカーブとレーダーによる地上観測にもとづく形状モデルを使用した。
- 右の場合では、S型小惑星に典型的な熱慣性  $\Gamma = 403 \text{ tiu}$  を仮定した。
- 各メッシュに働く力を積算して、小惑星の軌道に対する摂動を計算した。



# Astroshaperの活用事例

- 小惑星の力学進化や熱物理の研究に用いられている。
- はやぶさ2やHeraの熱赤外カメラの解析に用いている。
- 共同研究を進める中で利用者が増えつつある。

活用事例	利用者	参考
小惑星Ryuguに働くYORP効果と自転進化史	● はやぶさ2科学チーム	● [Kanamaru+2021, JGR-Planets]
二重小惑星に働く非重力効果	● Hera科学チーム ● ピサ大学 (Giacomo Tommei, Giacomo Lari, Roberto Paoli, Maddalena Mochi) ● コートダジュール天文台 (Wenhan Zhou)	● [Kanamaru+2024, JESA] ● [金丸ほか2024, 遊星人] ● [Zhou+2024, ApJL]
彗星表層の温度環境の検討	● 次世代小天体サンプルリターン計画	
小惑星近傍における放出物のダイナミクス	● コロラド大学 (Anivid Pedros, Jay McMahon)	
火星衛星に働くYORP効果	● 大阪大学 (北原 大地、佐々木 晶)	



# 二重小惑星の衛星に働く Yarkovsky 効果

## 衛星に働く Yarkovsky 効果

1. **Yarkovsky-Schach (YS) 効果** — 蝕による温度低下
2. **Planetary Yarkovsky (pY) 効果** — 主星からの照り返し

● 土星リング粒子の軌道進化メカニズムとして研究されてきた。

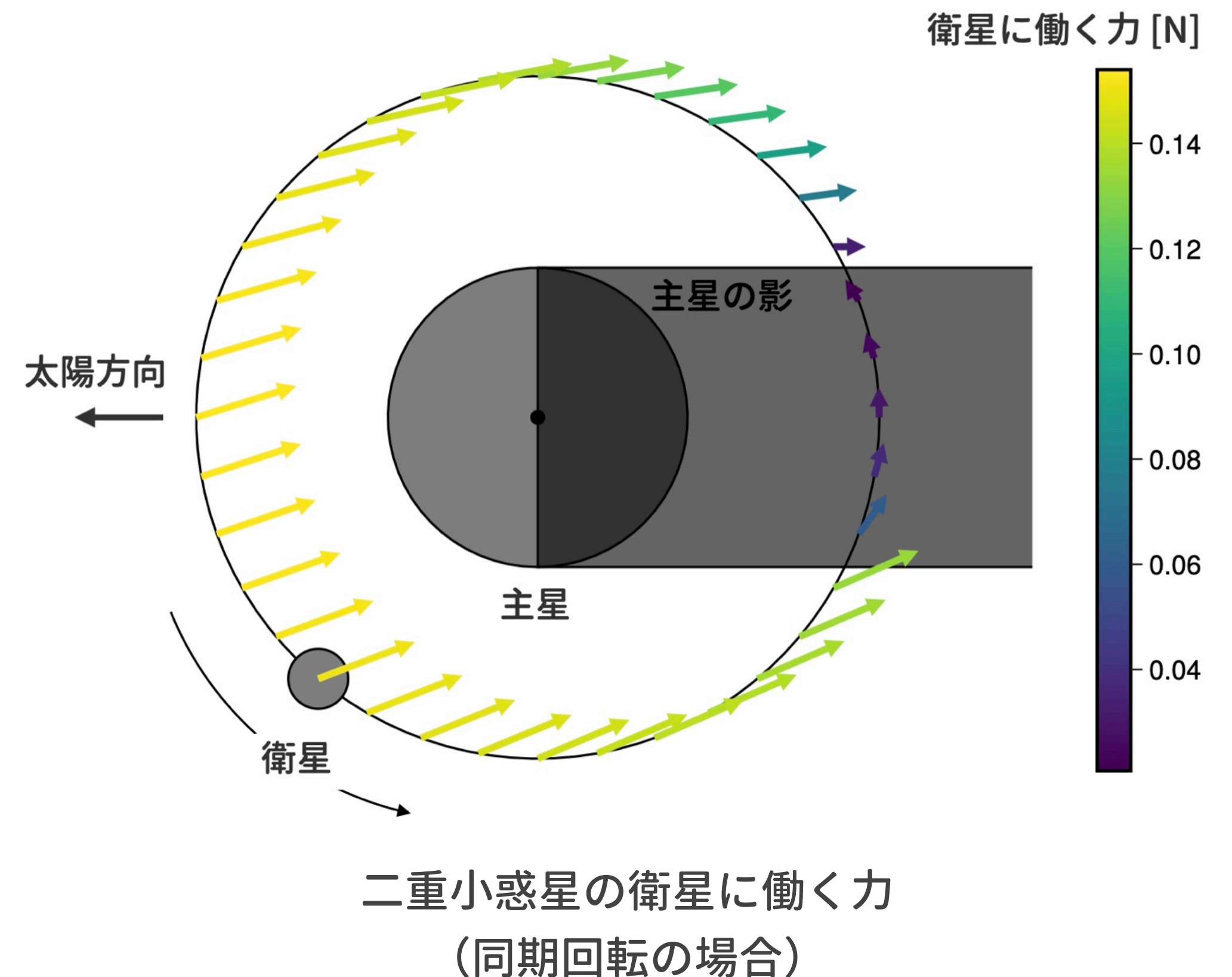
[Rubincam2006; Vokrouhlický+2007]

- リング粒子が惑星の影に入ること、熱放射の非対称性が生じる。
- 数cmサイズの粒子は、 $\sim 10^8$ 年ほどの時間スケールで主リングを横断する。

● Yarkovsky 効果によって二重小惑星の衛星が軌道進化する。

[Zhou, Vokrouhlický, Kanamaru, et al. (2024)]

- 軌道傾斜角の小さな相互軌道をもつ場合、頻繁に蝕が生じ、YS効果が働く。
- 解析的なモデルを構築し、数値シミュレーションと比較した。



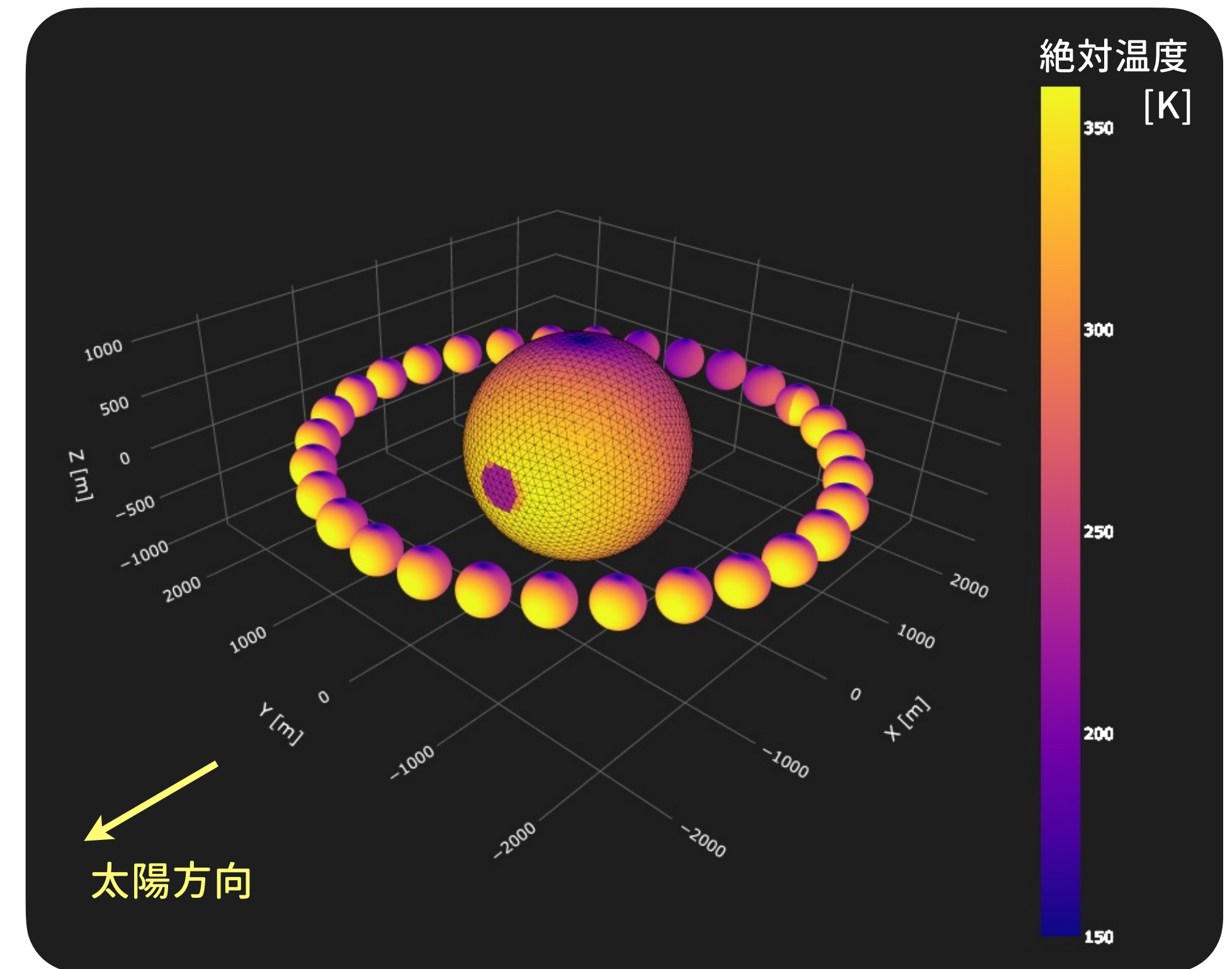
# 二重小惑星の熱物理シミュレーション

## 計算の設定 (固定したパラメータ)

- 形状モデル : 主星・衛星とも 5,120 メッシュの球
- 小惑星の半径 :  $r_p = 1,000$  m,  $r_s = 200$  m
- 熱伝導率 :  $k_p = k_s = 0.1$  W/m/K
- 定圧熱容量 :  $C_p = C_s = 550$  J/K/kg
- 密度 :  $\rho_p = \rho_s = 2,000$  kg/m<sup>3</sup>
- 熱慣性 :  $\Gamma_p = \Gamma_s = 332$  J · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup> · s<sup>-1/2</sup>
- 太陽距離 :  $a_h = 1$  au (円軌道を仮定)
- 自転周期 :  $P_p = 3$  h

- 衛星の公転周期  $T_s$  (相互軌道の半径  $a_s$ ) と自転周期  $P_s$  を変えて、衛星の軌道長半径の変化率  $da_s/dt$  を調べた。

- 二重小惑星の相互軌道は、傾斜角ゼロの円軌道と仮定した。



二重小惑星の温度分布

( $P_s = T_s = 8$  h の同期回転の場合)

# Yarkovsky-Schach (YS) 効果による衛星の軌道進化

YS効果による  
軌道長半径の変化率

$$\dot{a}_{YS}$$

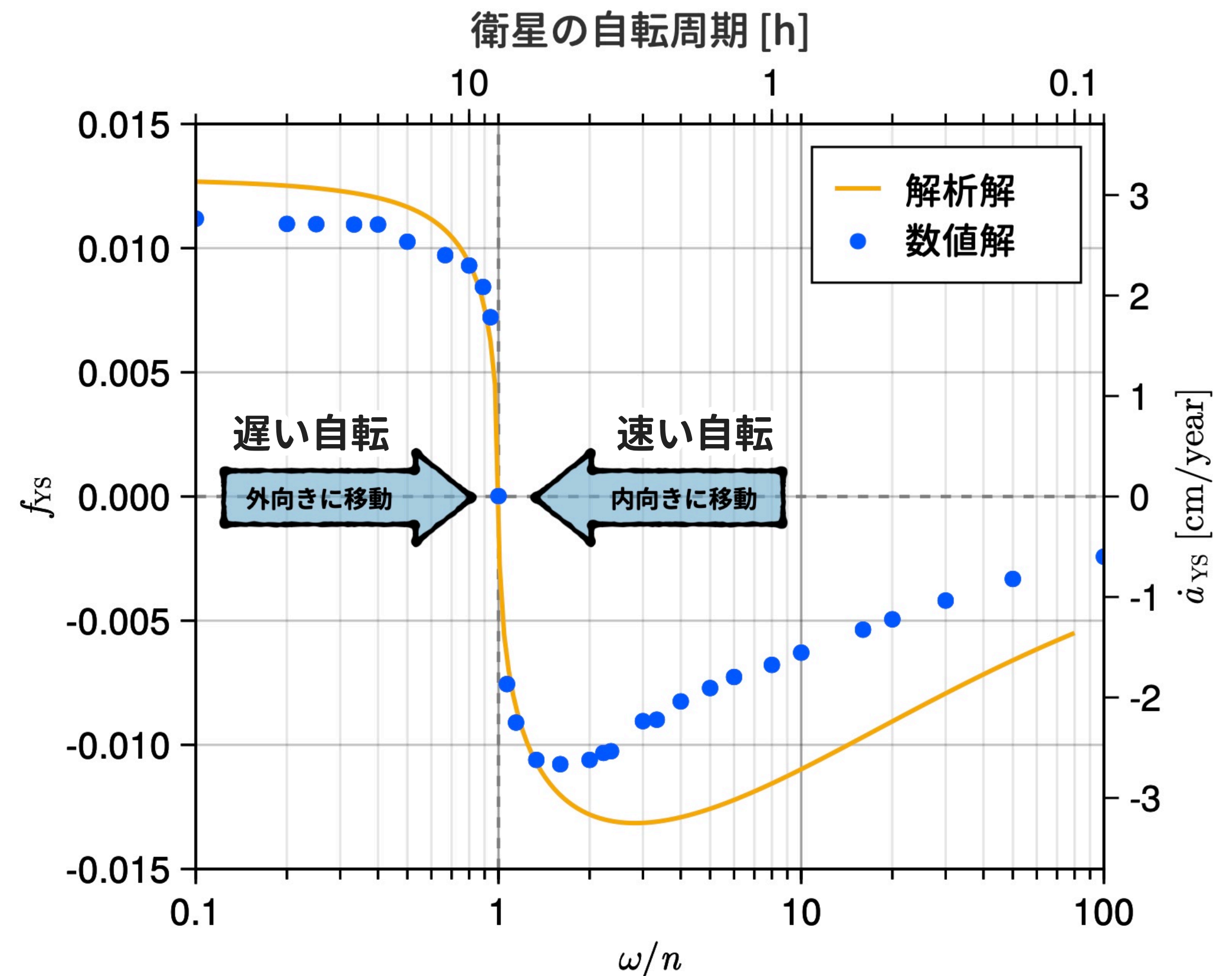
vs.

自転速度と  
軌道平均運動の比

$$\omega/n$$

- 同期回転 ( $\omega = n$ ) の場合、YS効果は働かない。
- 自転が公転に比べて遅い場合 ( $\omega < n$ ) :  $\dot{a}_{YS} > 0$   
衛星は外側へ軌道進化する。
  - 衛星が同期回転の軌道より内側にいる場合に相当する。
- 自転が公転に比べて速い場合 ( $\omega > n$ ) :  $\dot{a}_{YS} < 0$   
衛星は内側へ軌道進化する。
  - 衛星が同期回転の軌道より外側にいる場合に相当する。

YS効果は、衛星を同期回転の軌道まで運ぶ！



# 衛星の軌道進化・自転進化

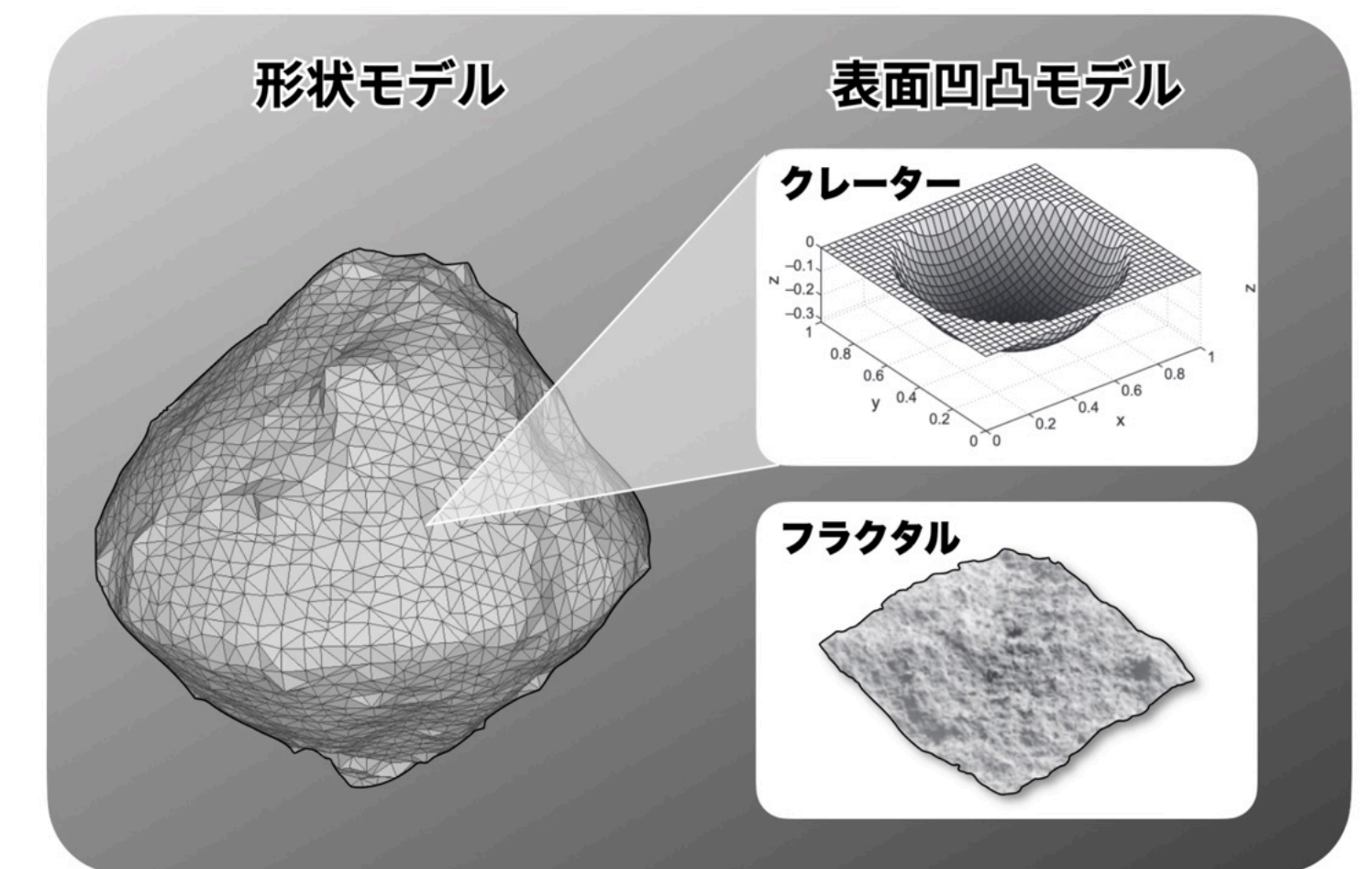
- 潮汐進化に比べると、YORPやYarkovskyの時間スケールは短い。
- Yarkovsky効果は、衛星を同期回転軌道まで運ぶ“quick”なメカニズムとして重要。
- 潮汐固定した二重小惑星が多く見つかっている。[Pravec+2006]

記号	下付き文字
$a$	: 軌道長半径
$G$	: 万有引力定数
$k$	: 潮汐ラブ数
$m$	: 質量
$n$	: 軌道平均運動
$P$	: 自転周期
$Q$	: Q値
$r$	: 半径
$t$	: 時間
$\mu$	: 剛性率
$\rho$	: 密度
	$p$ : 主星
	$s$ : 衛星
	$h$ : 太陽中心

	時間スケール	備考
潮汐	$t_{\omega_s, \text{tide}} \simeq \underline{10 \text{ Myr}} \left( \frac{8.7 \text{ h}}{P_s} \right) \left( \frac{a_s/r_p}{2.5} \right)^6 \left( \frac{r_s}{200 \text{ m}} \right)^{-2} \left( \frac{\mu_s Q_s}{10^{11} \text{ Pa}} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ [Murray &amp; Dermott, 1999]</li> <li>■ 一枚岩の構造を仮定。ラブルパイル天体の潮汐応答は不確定性が大きい。</li> </ul>
YORP	$t_{\omega_s, \text{YORP}} \simeq \underline{42 \text{ kyr}} \left( \frac{r_s}{0.2 \text{ km}} \right)^2 \left( \frac{8 \text{ hr}}{P_s} \right) \left( \frac{a_h}{1 \text{ au}} \right)^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ [Rubuncam2000; Marzari+2020]</li> <li>■ YORPトルクは天体形状に強く依存することに注意 [Statler2009]</li> </ul>
Binary Yarkovsky	$t_{a_s, \text{Yarkovsky}} \simeq \underline{160 \text{ kyr}} \left( \frac{r_p}{1 \text{ km}} \right)^2 \left( \frac{r_s}{0.2 \text{ km}} \right) \left( \frac{a_s/r_p}{2.5} \right)^{1/2} \left( \frac{0.005}{f_{Y,0}} \right) \left( \frac{a_h}{1 \text{ au}} \right)^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ This study [Zhou+2024]</li> <li>■ 相互軌道の傾斜角が小さく、蝕が頻繁に起こる場合に効果的。</li> </ul>

# 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。
  - 高精度の数値解法の実装
  - 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
- 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。



表面凹凸モデルの例