



# 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 拠点集会  
2023年12月22日

# 概要

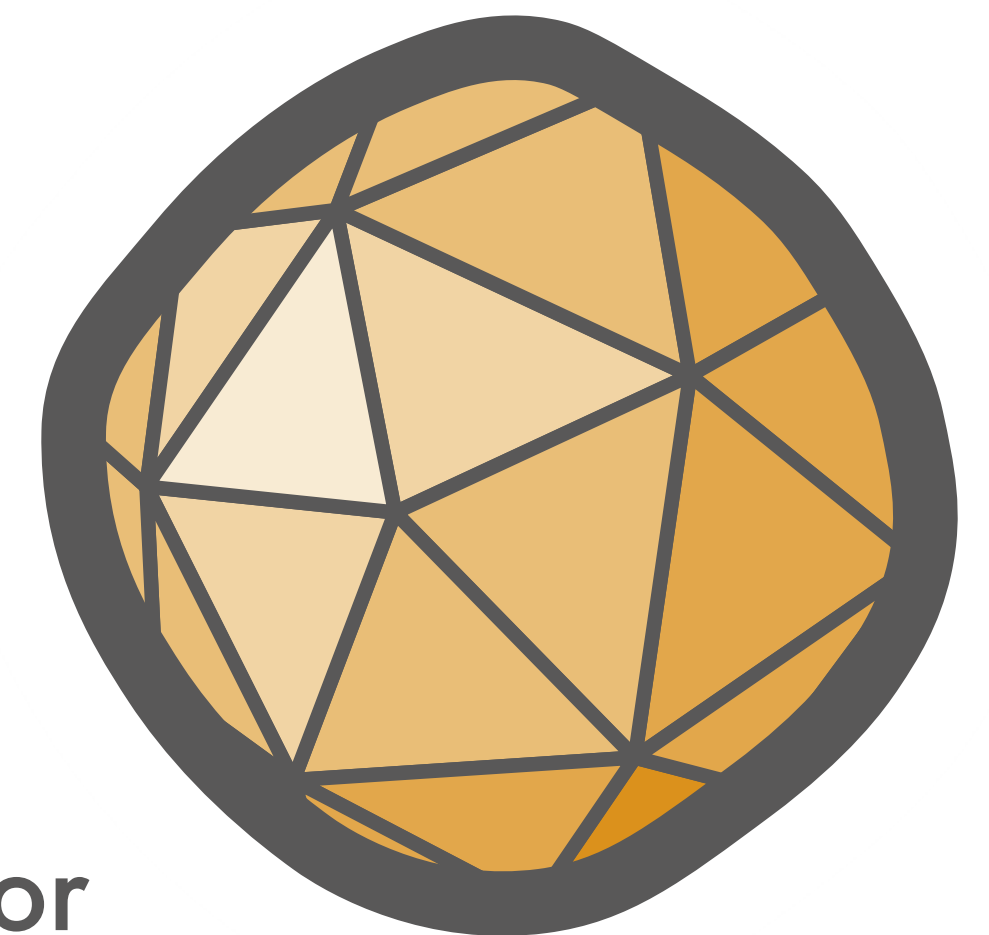
## 小惑星の力学シミュレータ Astroshaper

- 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
- 2022年度萌芽研究、2023年度実用研究の支援を受けて開発を行なっている。

## 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

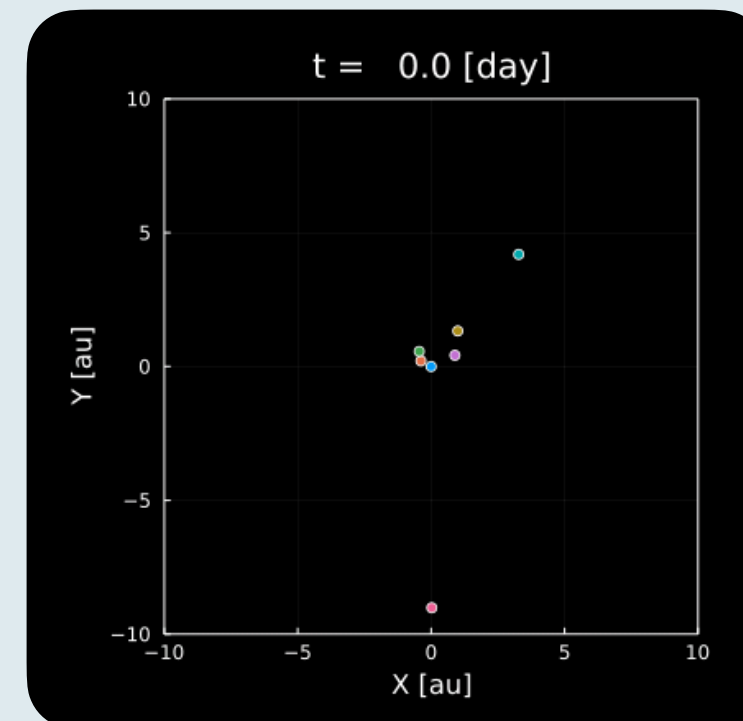
**Astroshaper**  
Asteroid dynamical simulator



# Astroshaper 小惑星の力学・熱物理のシミュレータ

## AsteroidOrbits.jl

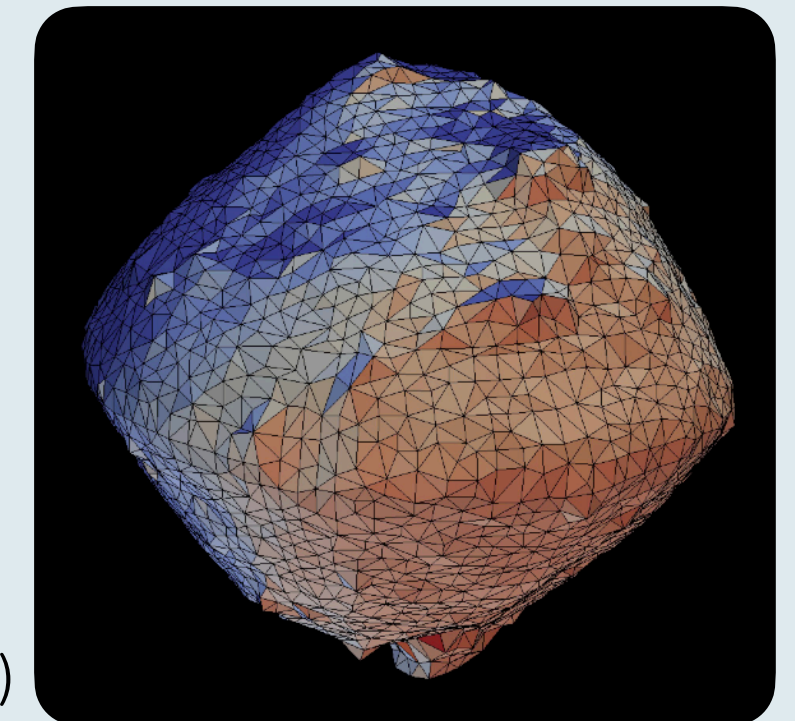
- ケプラー運動の計算
- N体計算にもとづく天体の軌道計算



4次エルミート法 + 惑星の重力

## AsteroidThermoPhysicalModels.jl

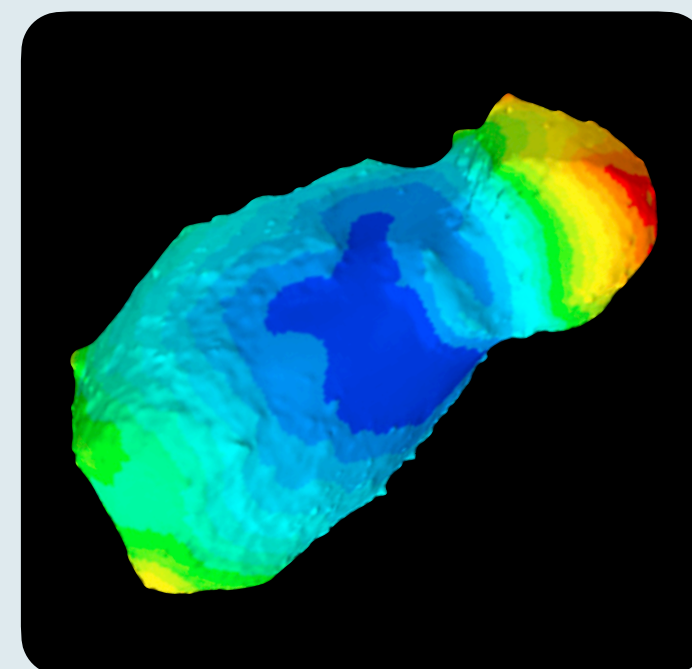
- 小惑星の3次元形状にもとづく熱物理シミュレーション
- 軌道や自転に対する摂動の計算 (Yarkovsky効果、YORP効果)



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
  - N体計算と非重力効果のカップリング

# 開発体制

## ● GitHub上で開発

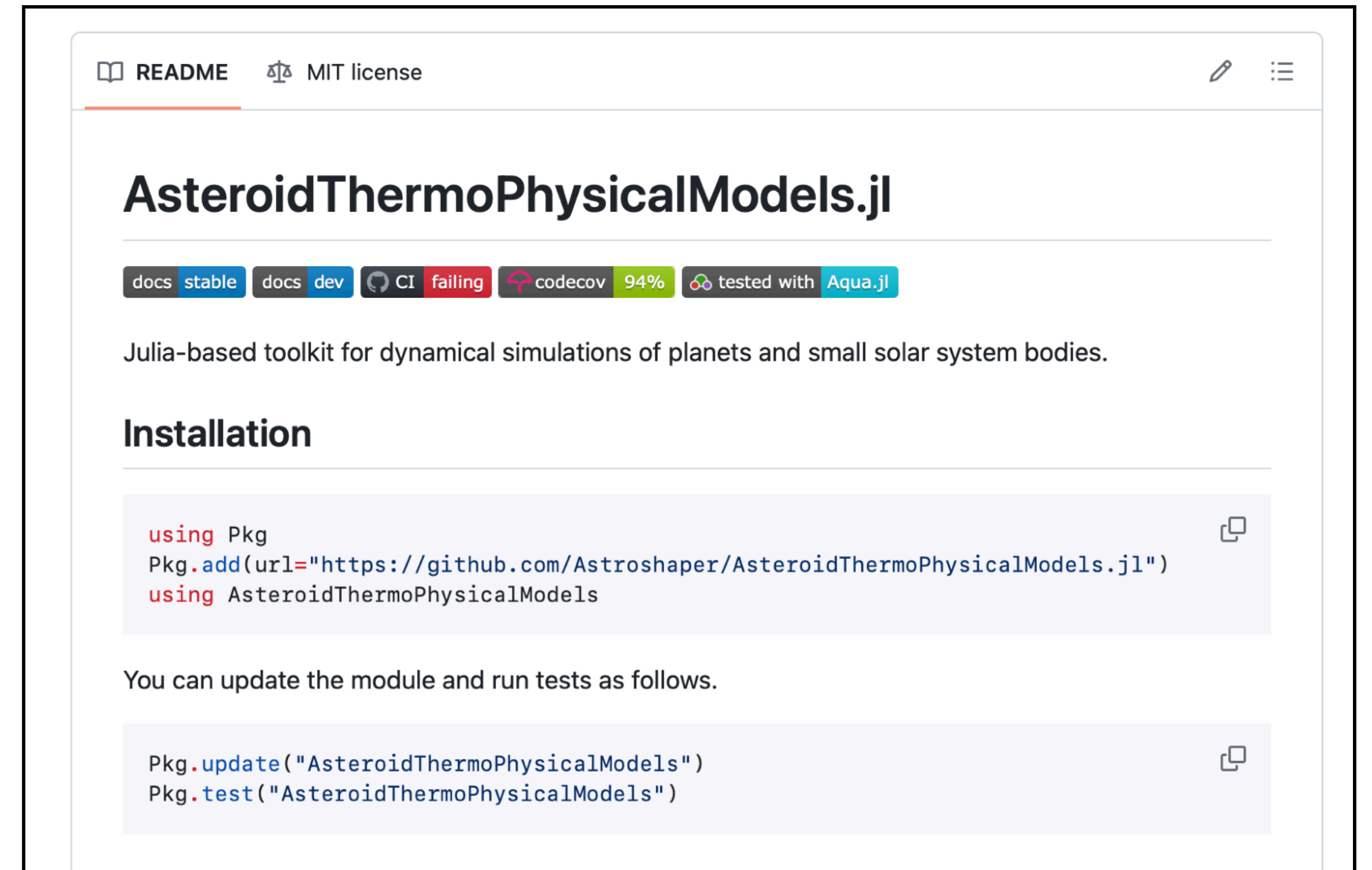
- Astroshaper (GitHub organization) 内に各パッケージを格納している。
- オープンソース (MITライセンス)
- Gitの利用、CI (continuous integration) によるテストの自動化
- 共同開発者：堀川 由人氏

## ● 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](#))



# 小惑星の熱物理モデル

- 太陽光（主に可視光）で温められ、熱放射（主に中間赤外）で冷える

- 1次元の熱伝導方程式：
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

- 仮定①：Thermal skin depth よりも十分に大きな平面を考える。
- 仮定②：熱伝導率  $k$  は温度や深さ  $z$  によらず一定とした。
- 仮定③：天体内部に熱源はないものとした。

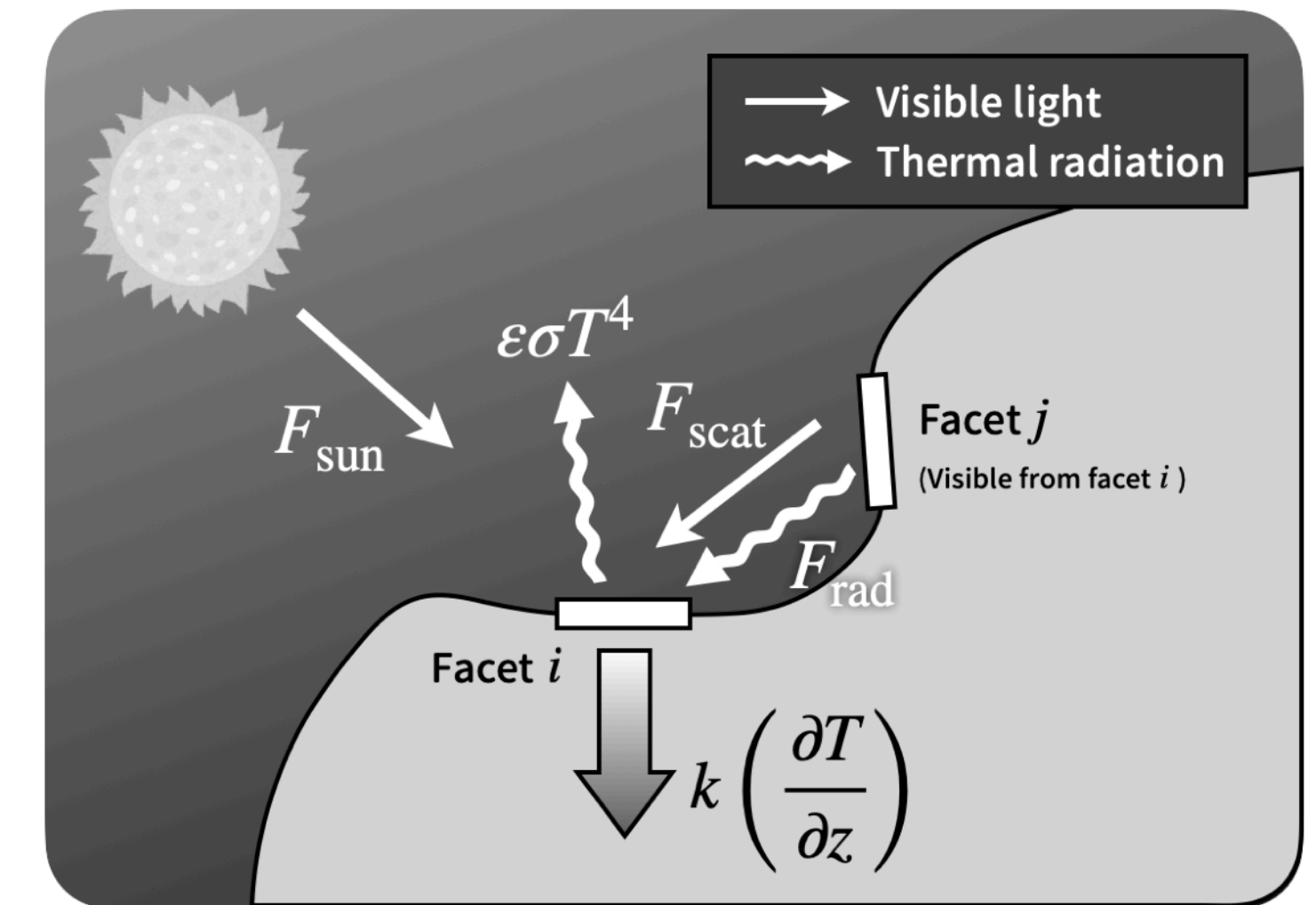
- 境界条件@**表面**：入射フラックス・地下への熱伝導・熱放射の平衡

$$F_{\text{total}} + \frac{\Gamma}{\sqrt{4\pi P}} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \varepsilon \sigma T_{z=0}^4$$

- ある面素  $i$  が吸収するエネルギー： $F_{\text{total}} = (1 - A_B)F_{\text{sun}} + (1 - A_B)F_{\text{scat}} + (1 - A_{\text{TH}})F_{\text{rad}}$

- 境界条件@**底面**：断熱 
$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z \rightarrow \infty} = 0$$

- Thermal skin depth の数倍の深さでは熱流量をゼロと見なす。



小惑星の熱物理  
[Kanamaru+2023, arXiv]

# 小惑星に働く非重力効果

- 温度分布をもとに小惑星に働く摂動を計算する

- ある面素  $i$  から出ていくエネルギー

$$E_i = A_B F_{\text{sun},i} + A_B F_{\text{scat},i} + A_{\text{TH}} F_{\text{rad},i} + \varepsilon \sigma T_i^4$$

- 仮定④：散乱光や熱放射は等方的であるとする (i.e., Lambertian emitter)

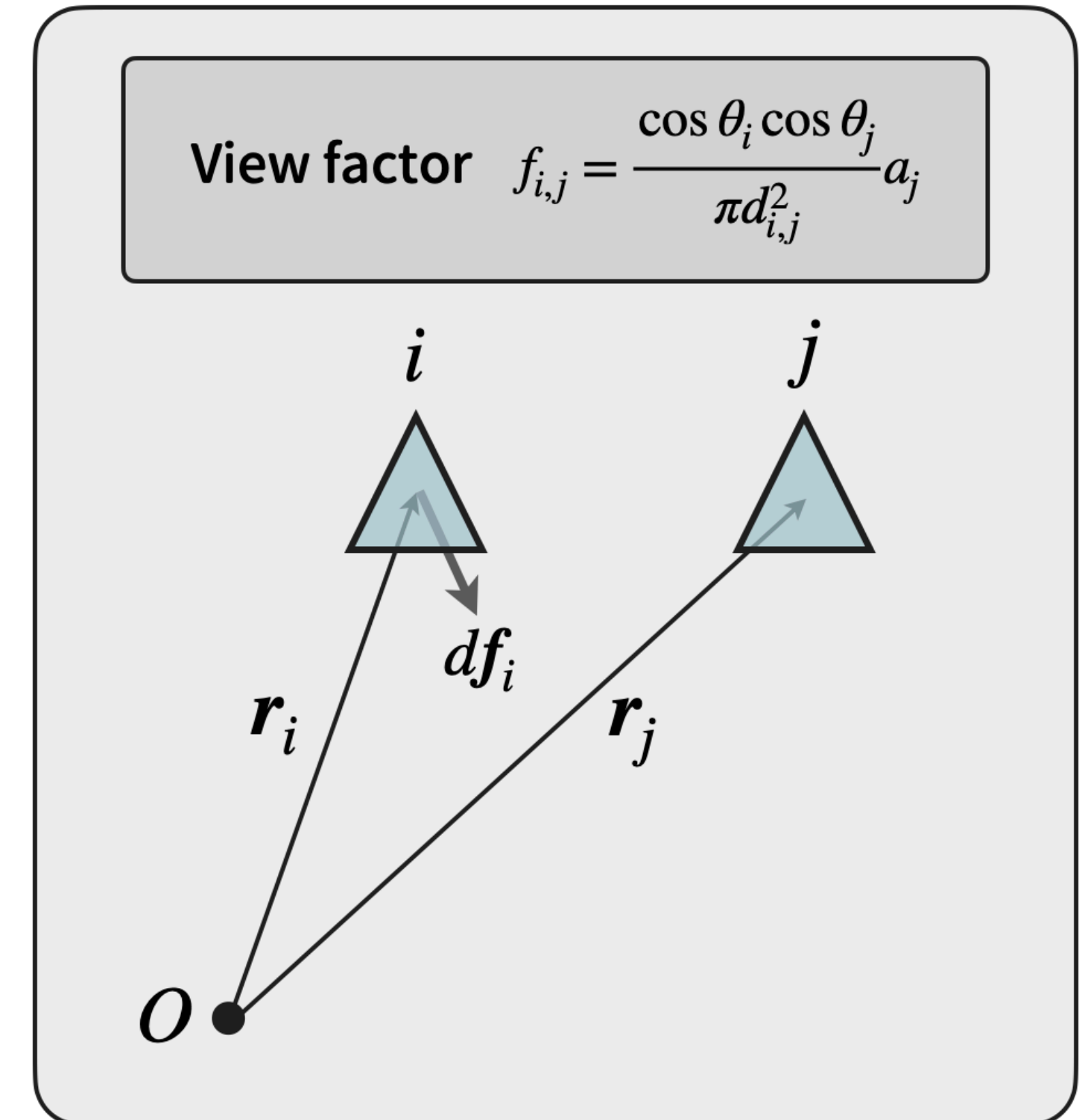
- 面素  $i$  が光子から受ける力

$$df_i = -\frac{2E_i a_i}{3c_0} \hat{n}_i + \sum_{j \in \text{visible from facet } i} \frac{E_j a_j}{c_0} f_{i,j} \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|}$$

- 全球で積分し、重心運動 (Yarkovksy) と回転運動 (YORP) への摂動を得る

力：
$$\alpha = \sum_i \left( \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} \cdot df_i \right) \frac{\mathbf{r}_i}{r_i}$$

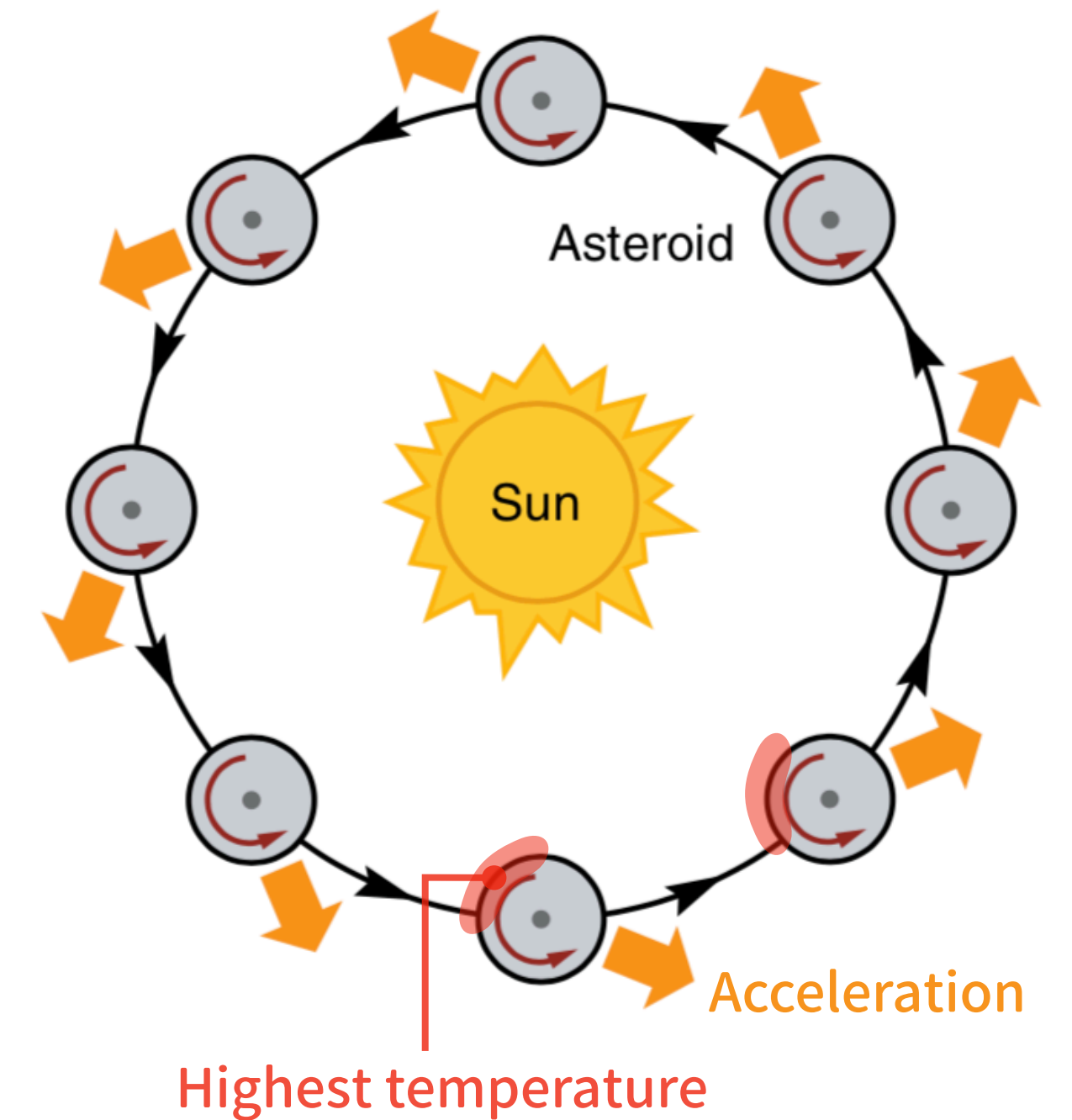
トルク：
$$\tau = \sum_i \mathbf{r}_i \times df_i$$



# 小惑星に働く非重力効果

	Yarkovsky効果	YORP効果
変化	軌道 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 軌道長半径</li> <li>● 離心率</li> </ul>	自転 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 自転周期</li> <li>● 赤道傾斜角（自転軸の向き）</li> </ul>
主な原因	熱慣性	天体形状の非対称性
天体サイズの依存性	$\propto D^{-1}$	$\propto D^{-2}$
表面凹凸の影響	強める <sup>1</sup>	弱める <sup>1</sup>
分類	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Diurnal Yarkovsky</li> <li>● Seasonal Yarkovsky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● NYORP<sup>2</sup> – Normal YORP</li> <li>● TYORP<sup>3</sup> – Tangential YORP</li> <li>● CYORP<sup>4</sup> – Crater YORP</li> <li>● BYORP<sup>5</sup> – Binary YORP</li> </ul>

順行自転小惑星のYarkovsky効果



[Additions to Bottke+2006]

<sup>1</sup>Rozitis & Green (2012), <sup>2</sup>Rubincam (2000), <sup>3</sup>Golubov & Krugly (2012), <sup>4</sup>Zhou et al. (2022), <sup>5</sup>Ćuk & Burns (2005)

# Astroshaperの活用事例

● 共同研究を進める中で利用者が増えつつある

- 小惑星の力学や熱物理
- 小惑星探査ミッションの事前検討

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	● <a href="#">[Kanamaru+2021, JGR-Planets]</a>
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) ● ニース天文台 (Wenhan Zhou)	● <a href="#">[Kanamaru+2023, arXiv]</a>
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)	



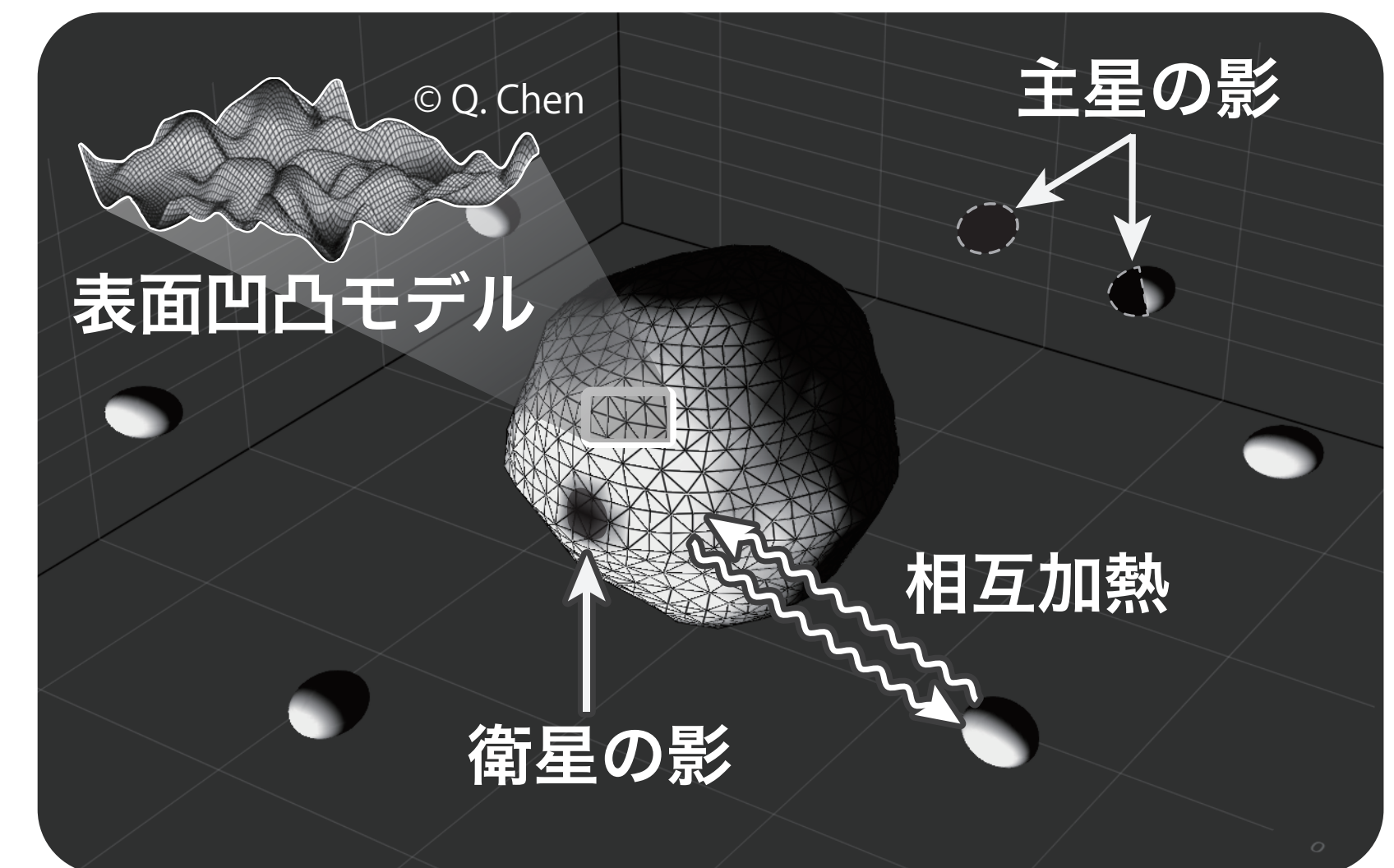
# 二重小惑星に働く非重力効果の検討

## Heraミッション

- ESAが主導するプラネタリー・ディフェンスのための小惑星探査ミッション
- DARTが衝突実験を行なった二重小惑星 Didymos & Dimorphos にランデブー予定（2026年12月）
- 探査機の軌道決定と熱物理シミュレーションを用いて、非重力効果の検出を目指す。

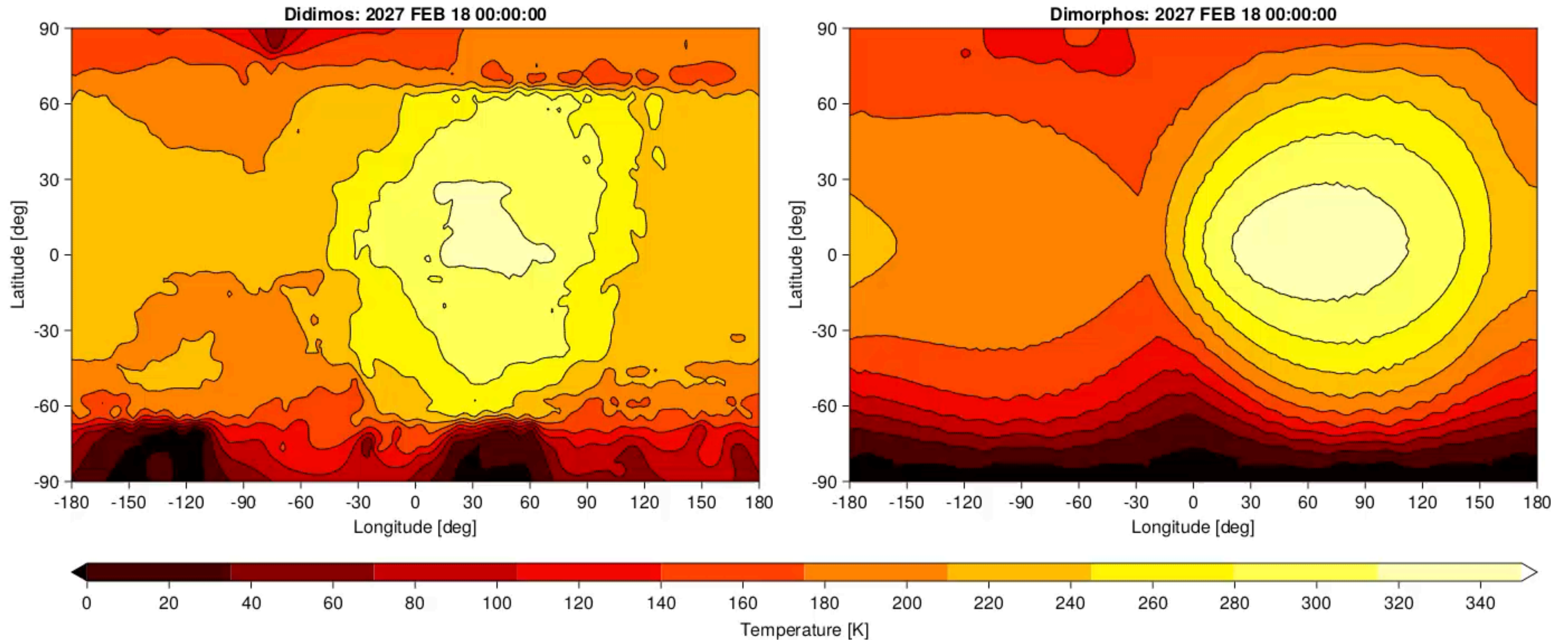


Asteroid Didymos and Dimorphos [DART/DRACO]

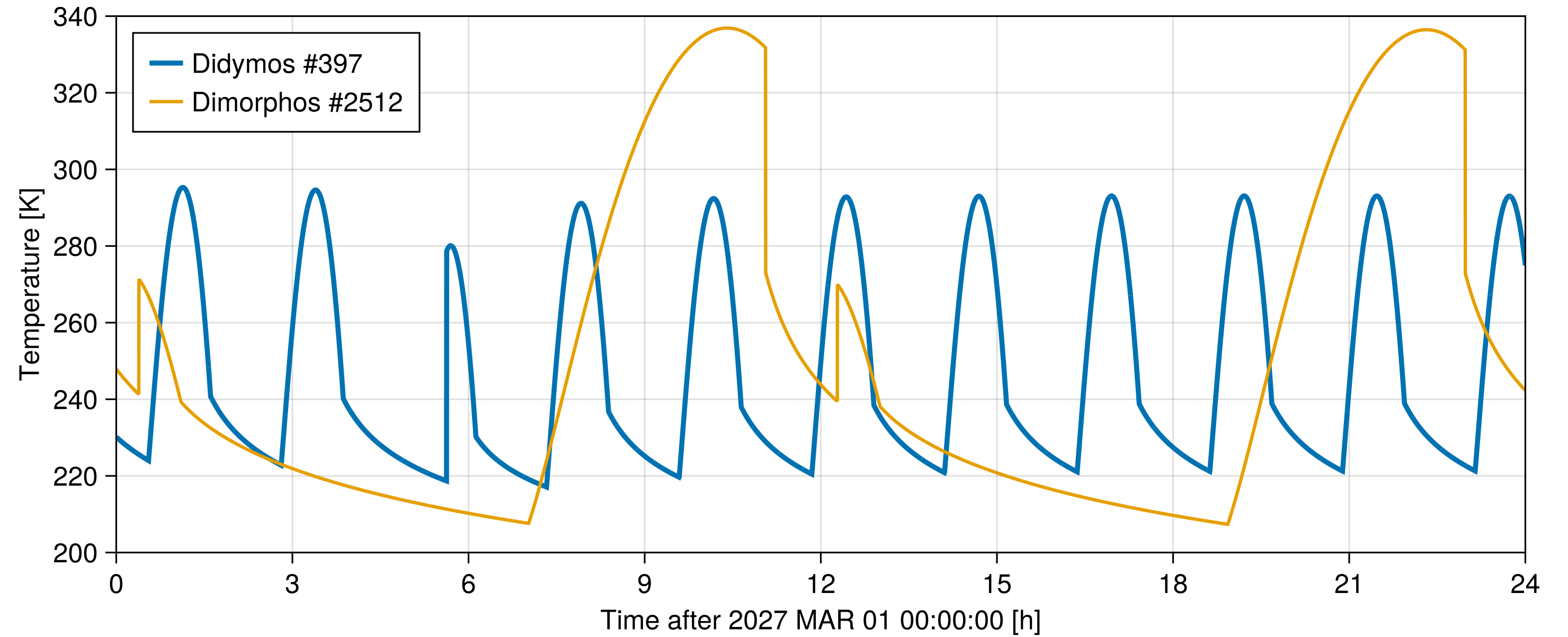
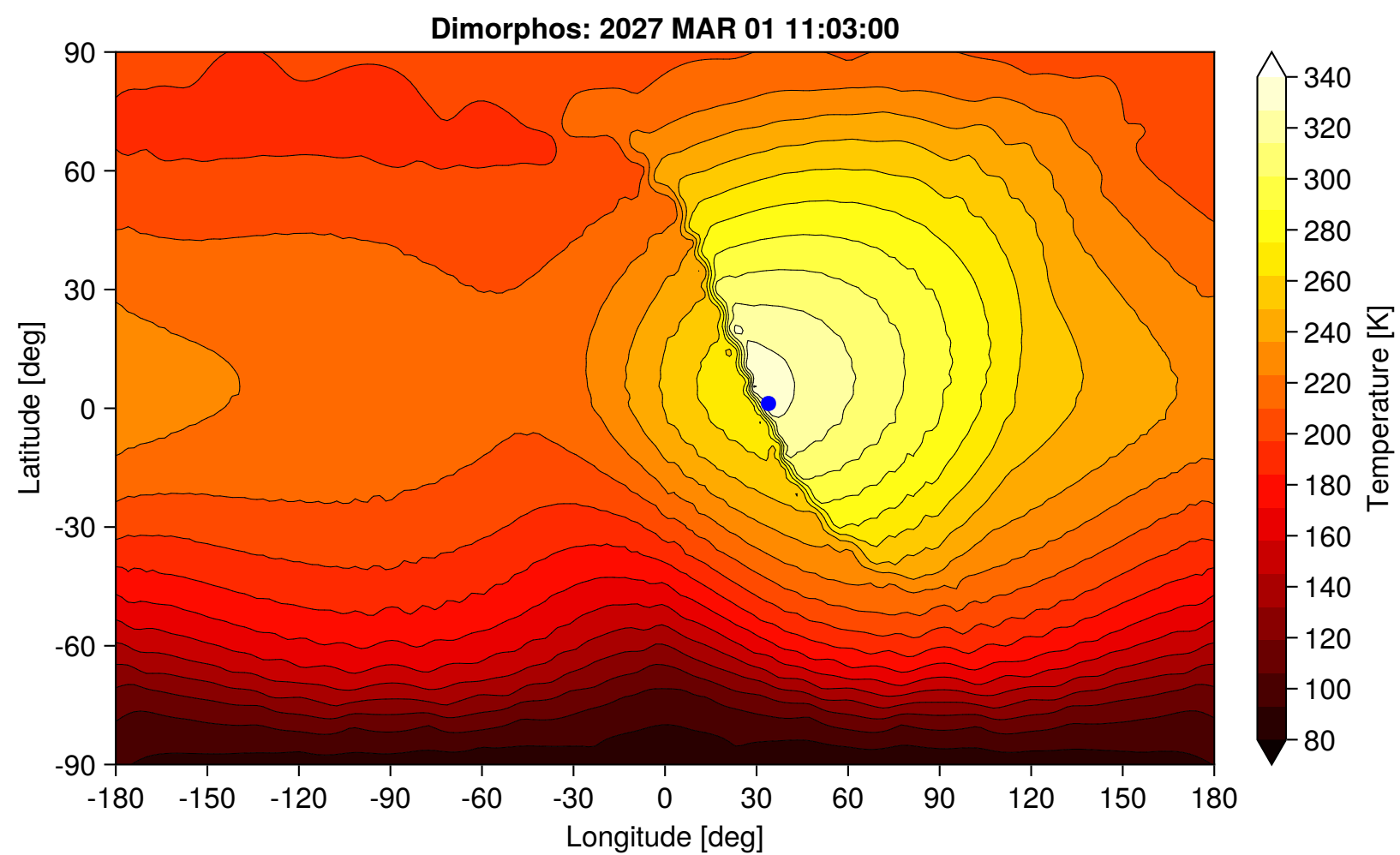
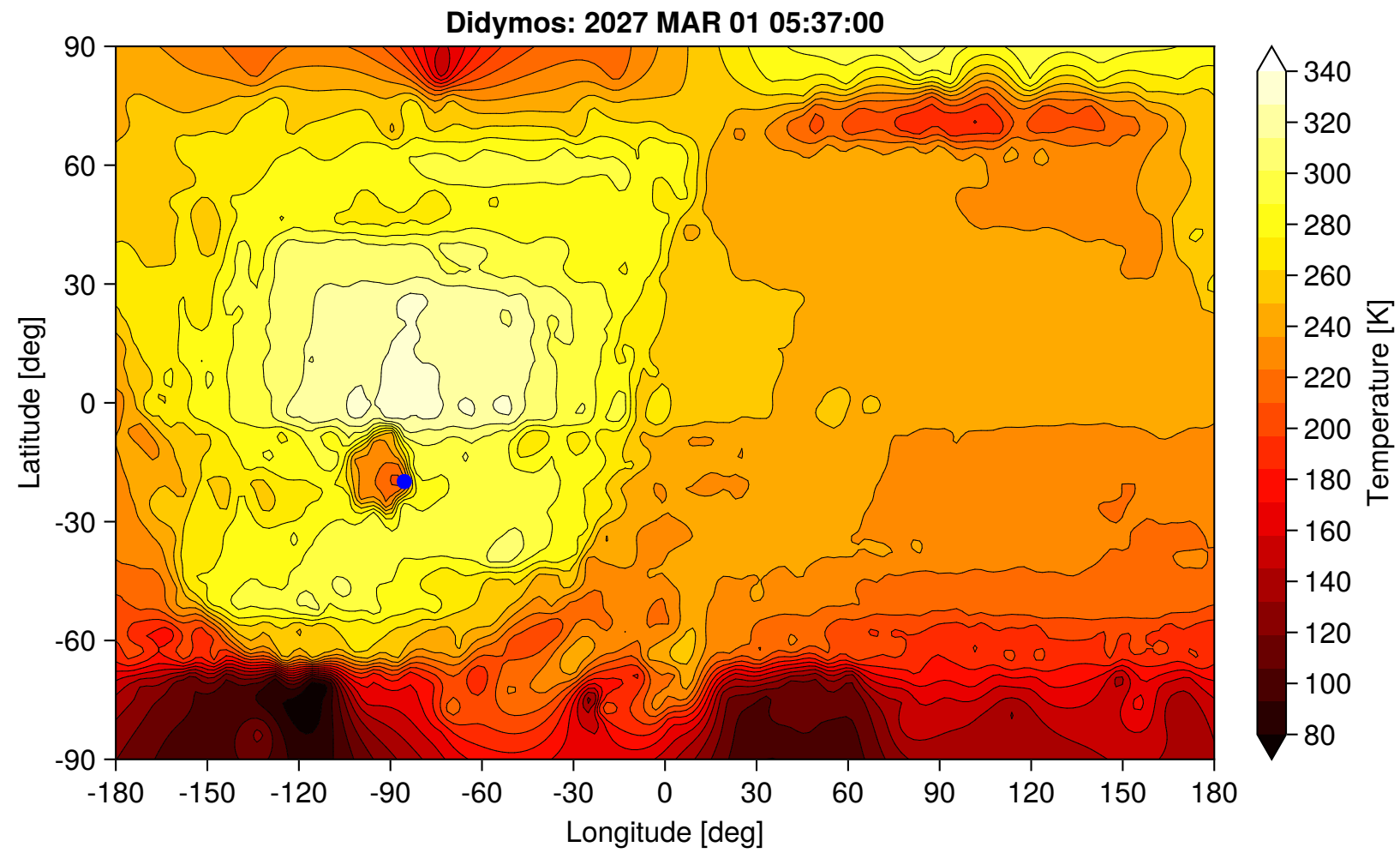


二重小惑星の熱物理

# 二重小惑星 Didymos-Dimorphos の温度分布



# 二重小惑星 Didymos-Dimorphos の温度分布



- 衛星が主星の影に入る蝕では、数十Kの温度低下が予想される。
- 蝕による急激な温度変化を熱赤外カメラ (TIRI) で観測することで、日周期とは異なる熱応答を観測できる。
- 二重小惑星に働く力・トルクから長期的な力学進化を予測する。

# 今後の開発計画

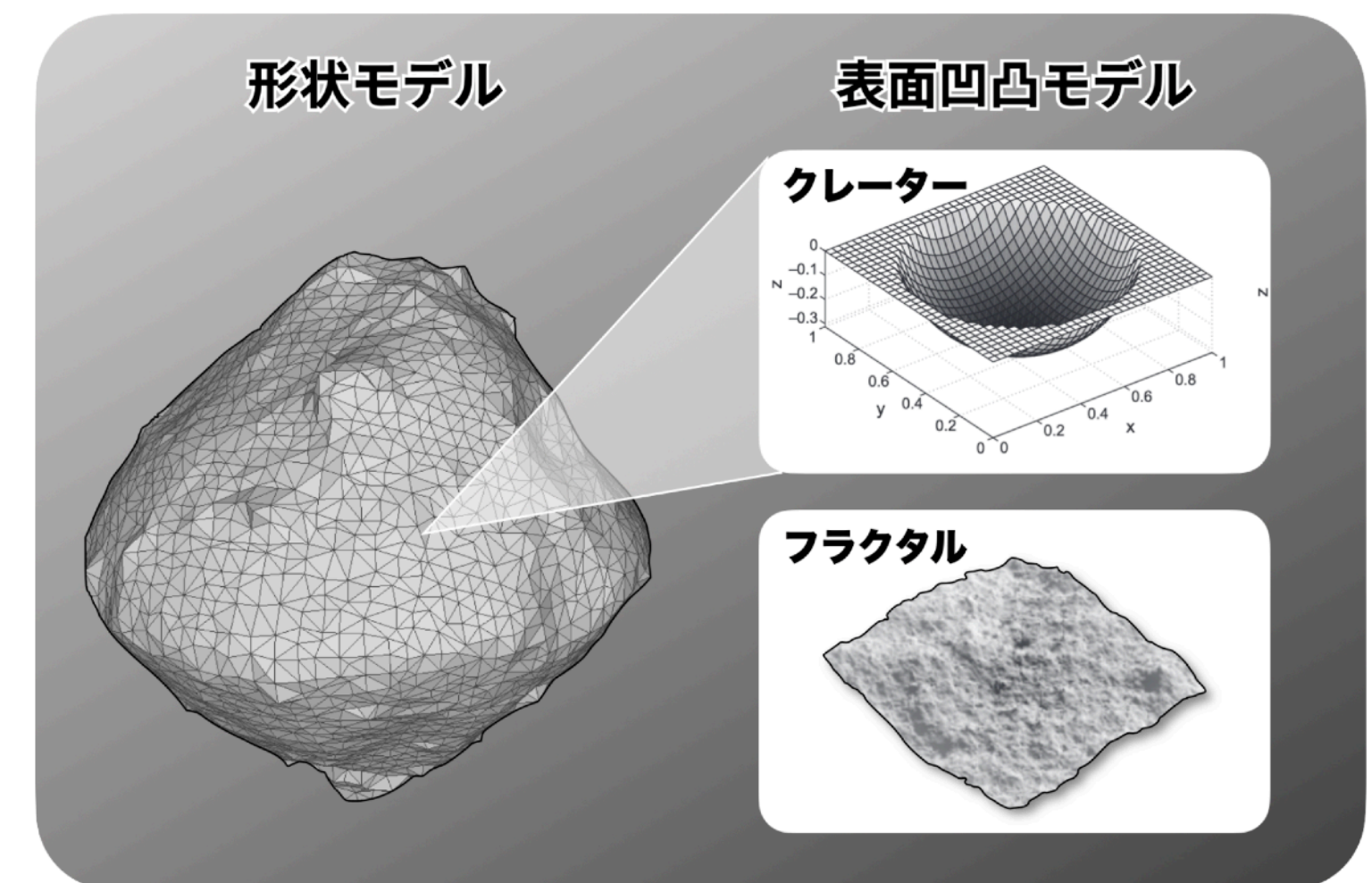
## ● 探査機データとの連携強化

- 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。  
▶ HEAT等、他ツールとの連携が必要。

## ● 利用促進に向けて

- ドキュメントやサンプルコードの充実
- Jupyter NotebookやPlutoといった実行しやすい配布形式を検討する。

## 表面凹凸モデルの例



# 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。
  - **AsteroidThermoPhysicalModels.jl** を用いると（Juliaユーザであれば）熱物理シミュレーションを気軽に実行できる。
- 小惑星探査ミッションの事前検討や小惑星の力学研究においてユーザが増えている。
  - ドキュメントやサンプルコードの充実が望まれる。
  - さらなる利用者拡大のためには、他のツールやプログラミング言語との連携が必要となる。

**Astroshaper**  
Asteroid dynamical simulator

