

# 令和6年度 萌芽研究

## 二重小惑星探査計画Hera搭載中間赤外カメラTIRI用のプロダクト生成・解析ツールの開発 -- TIR較正・可視化ツールHEATのモジュール化と再構成 --

Development of product generation and analysis tools  
for Thermal InfraRed Imager onboard Hera  
-- Modularization and re-construction of HEAT --

2025年12月19日

前橋工科大学 工学部 生命工学領域  
荒井 武彦

坂谷 尚哉, 嶽生 有理, 千秋 博紀,  
出村 裕英, 賀数 健吾, 岡田 達明

# 1 背景

## 二重小惑星探査計画Hera

2024年10月7日打ち上げ

2026年秋から近地球型のバイナリ小惑星ディディモス & ディモルフォスを探査  
プラネタリティフェンスの技術実証や基礎情報の取得

ディディモス

Hera探査機



子機 Juventas

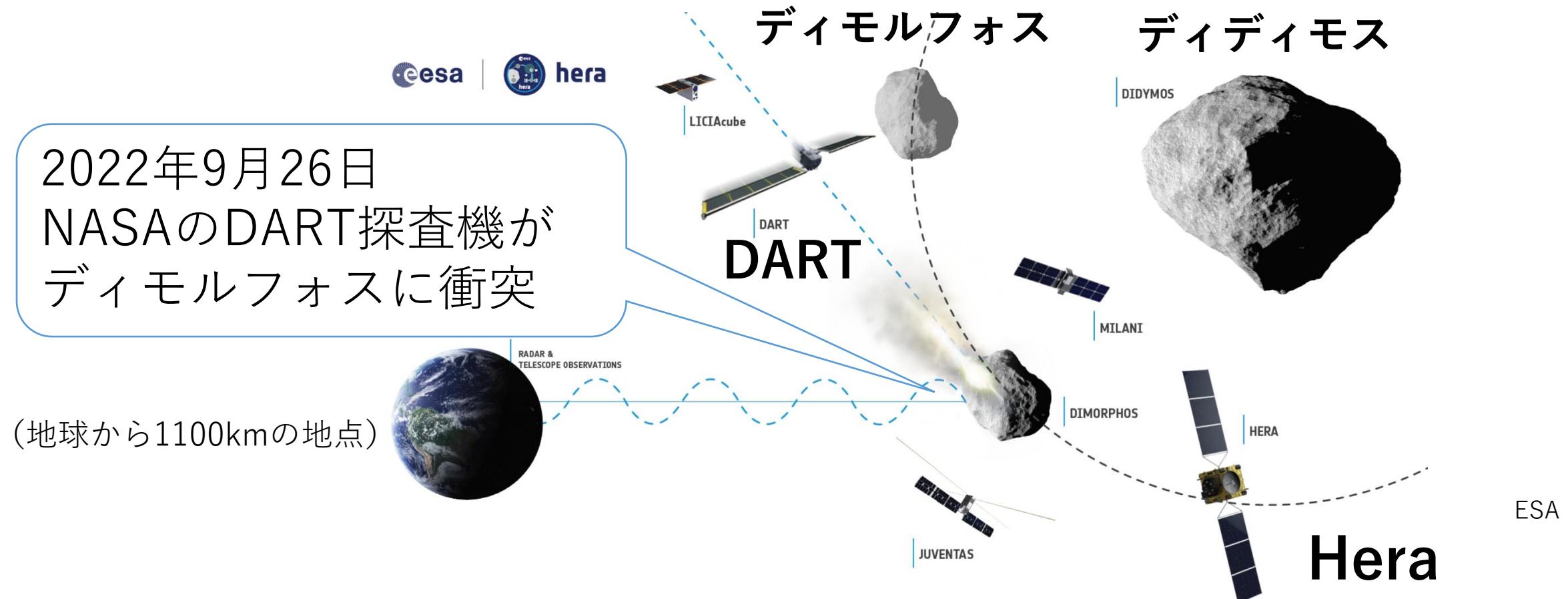
ディモルフォス

子機 Milani

ESA

# 1 背景 AIDAミッション

探査機を小天体に衝突させて、小惑星の軌道を変化させる実証実験



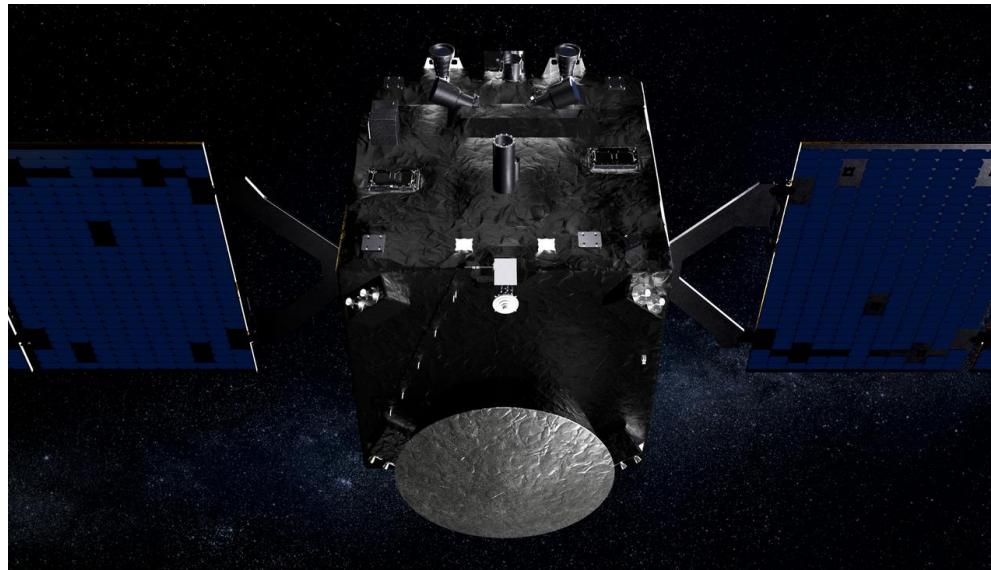
Hera探査機がその後の軌道変化や衝突痕を観測

# 1 背景 二重小惑星探査機Hera

Hera搭載ペイロード

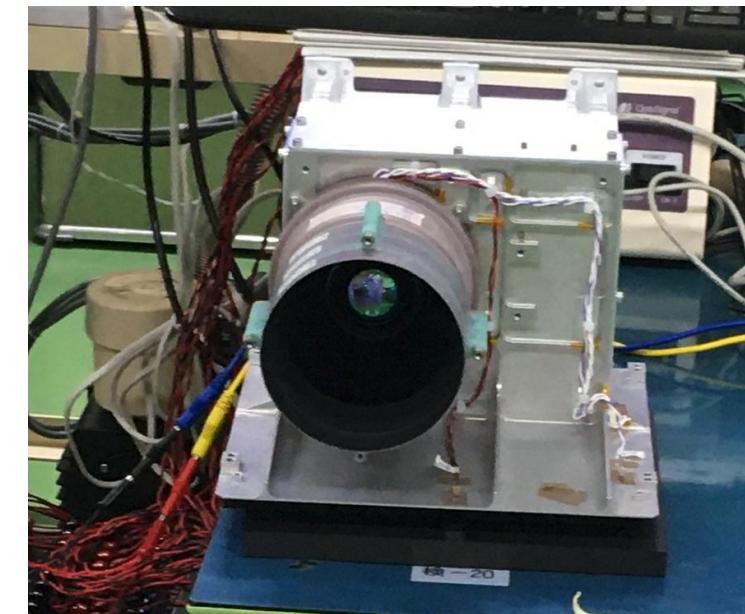
AFC	TIRI	AFC
MILANI	PALT	Juventas

Hyper  
Scout



ESA

Hera搭載中間赤外イメージヤTIRI

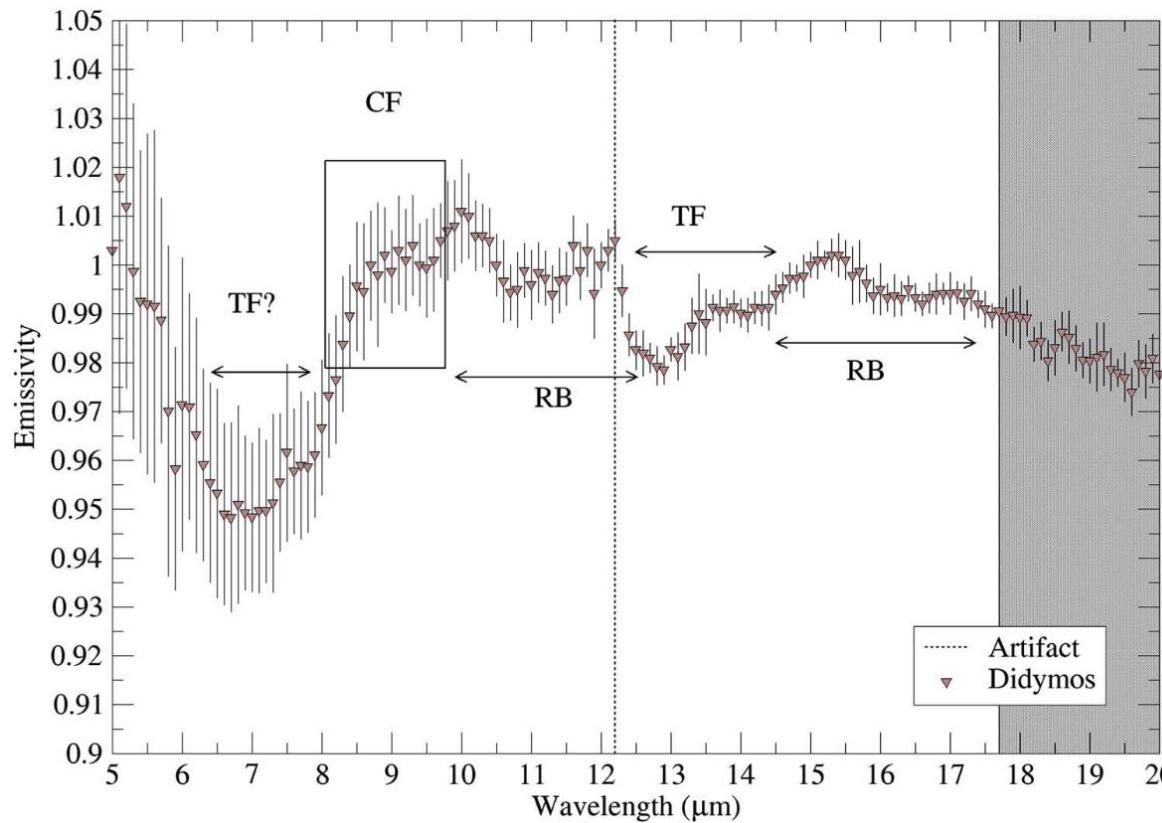


- センサ：非冷却マイクロボロメータアレイ
- 画素： $1024 \times 768$
- FOV： $13.3^\circ \times 10^\circ$
- フィルタ：中間赤外域の6つの狭帯域バンド（ $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ）

# 1 背景 Hera搭載中間赤外イメージヤ TIRI

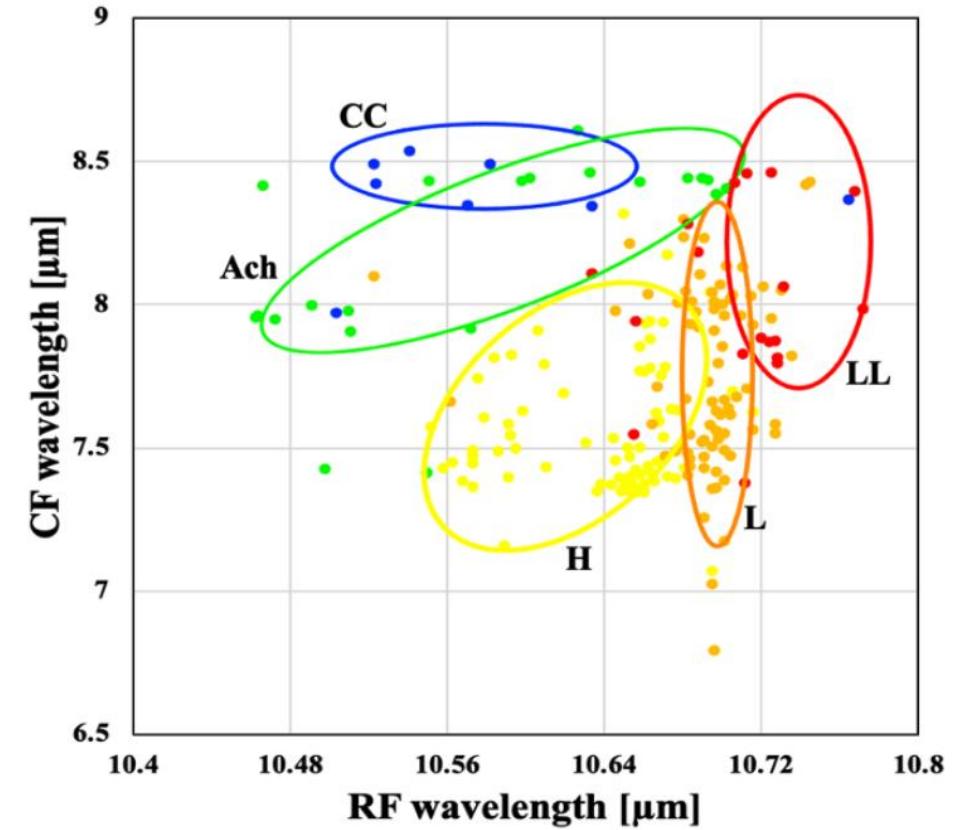
Christensen featureとReststrahlen Featureの観測

JWST MIRIによるDidymosの観測



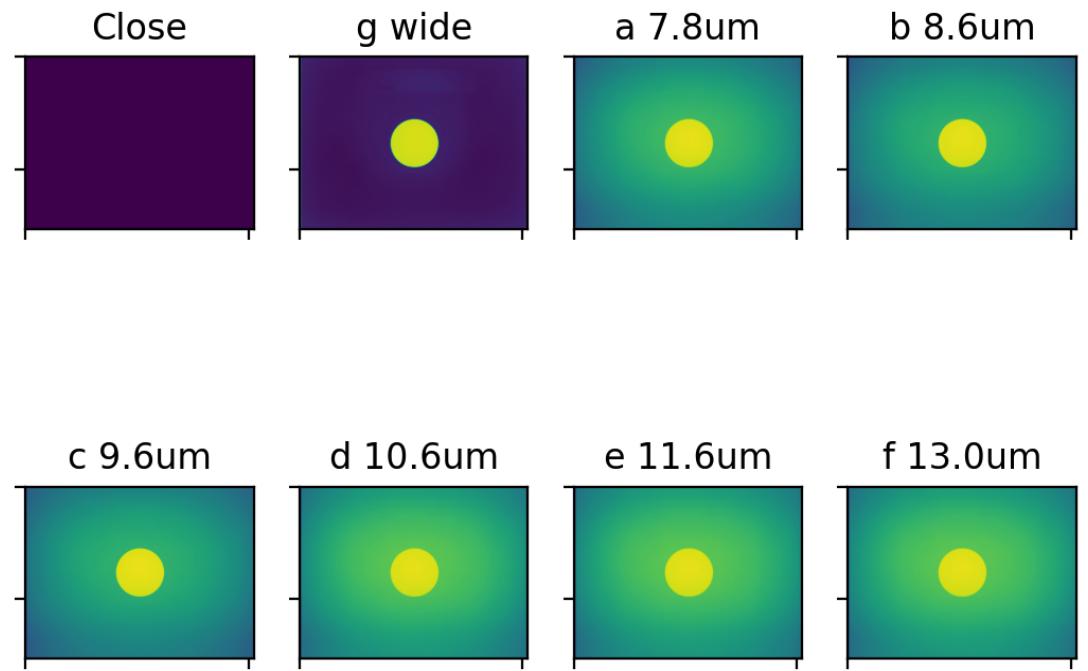
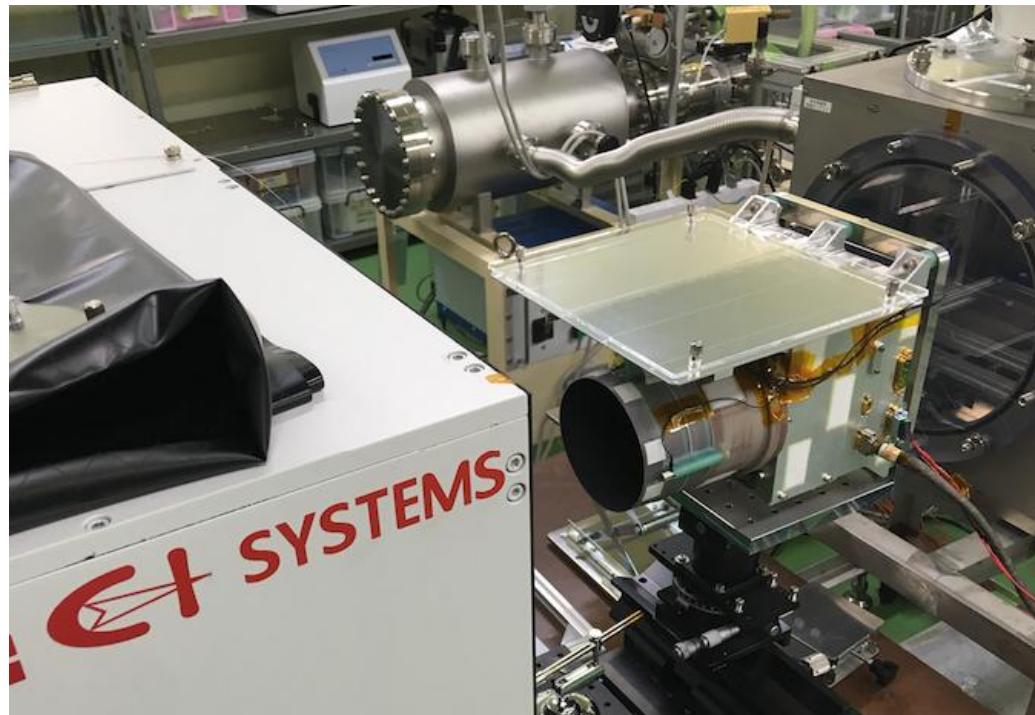
Rivkin et al., IOP 2023

CF, RFピーク位置と隕石の関係



Furukawa et al., LPSC 2024

# 1 背景 Hera搭載中間赤外イメージヤTIRI 地上較正試験

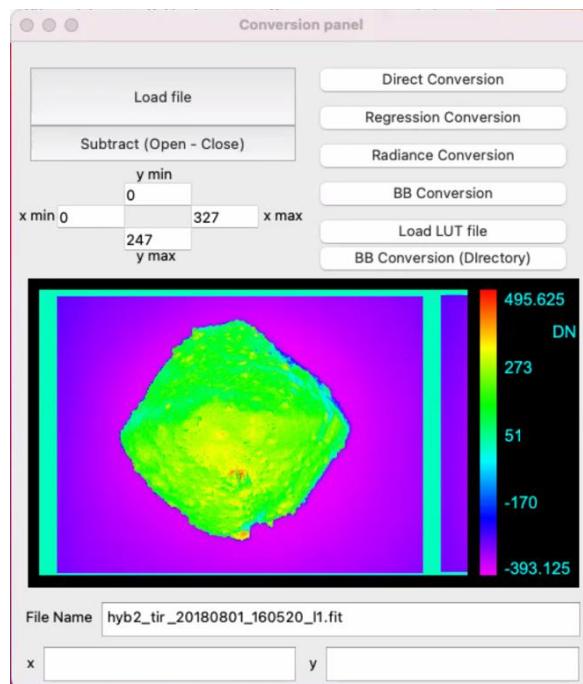


# 1 背景 HEAT

## Hayabusa2 Exploration Assistant for TIR

リュウグウ観測データを温度画像に変換する地上較正データのデータベースとして、会津大学の大学院生らによって開発された

Endo *et al.*, HEAT: Image and database browser for the thermal imager on Hayabusa2, *IEEE* (2017)



- 会津大学の大学院生らによって、  
アップデート
- 多くのユーザにTIRデータを活用  
してもらうためオープンソースと  
して公開(GitHub)
- 解析機能を充実化

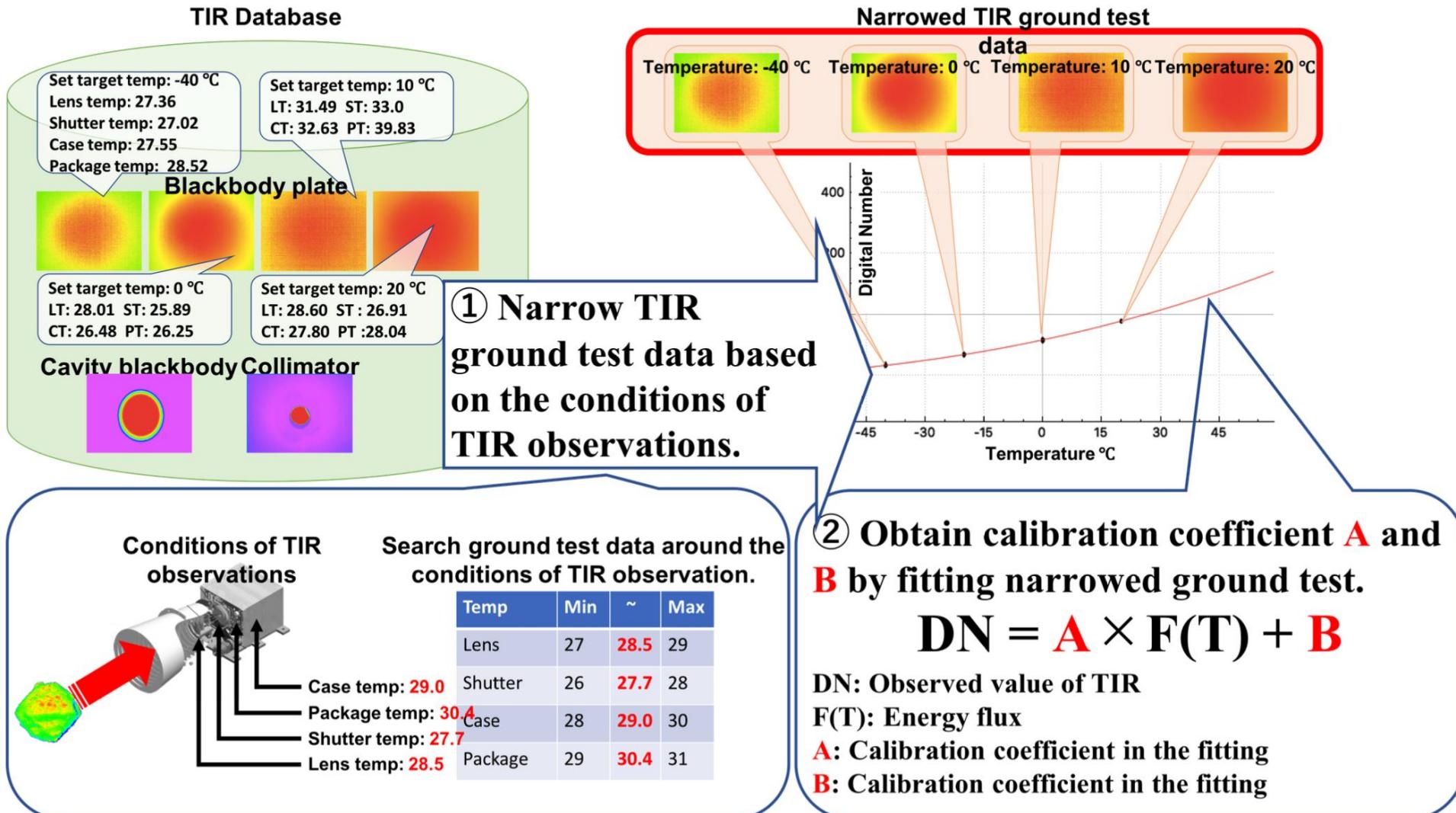
# 目的

Hera搭載TIRI用の較正・解析ツールを開発する

はやぶさ2TIR用に開発されたHEATの既存の機能を  
TIRI用にアップグレードする

C++で開発されたHEATの機能を細分化, Pythonで  
モジュール化し, ユーザビリティを向上させる

# 2 開発 HEATによる較正曲線の構築

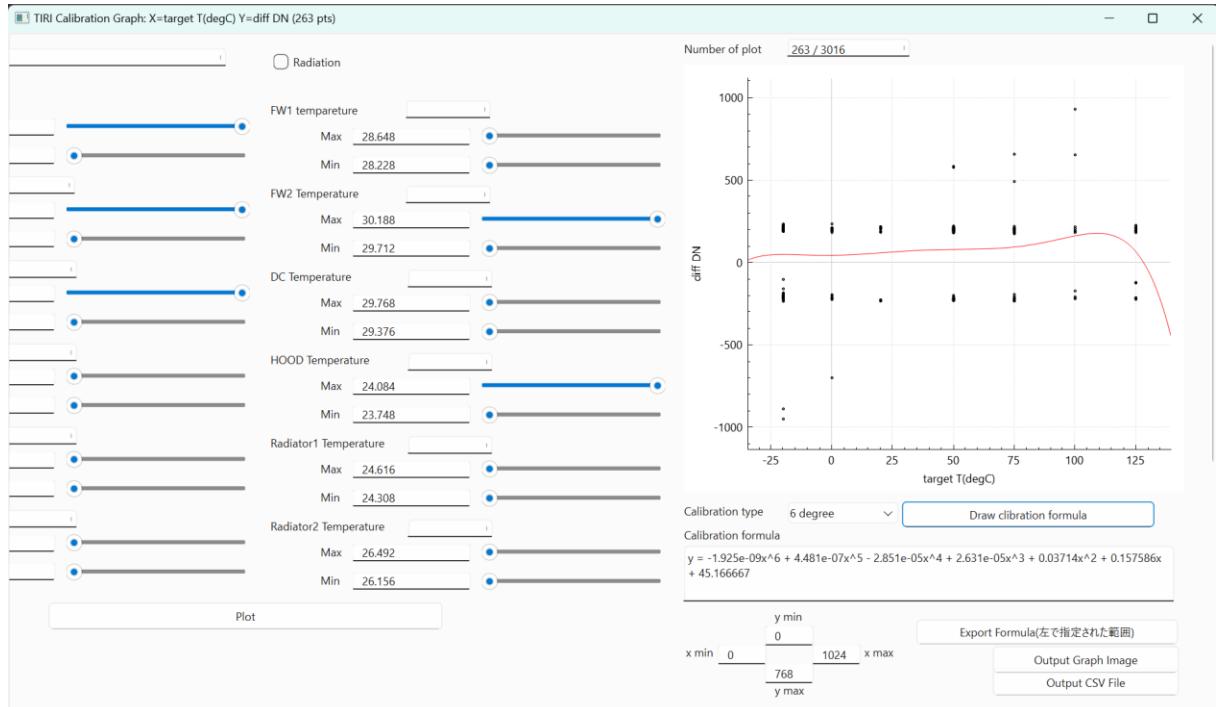


# 2 開発

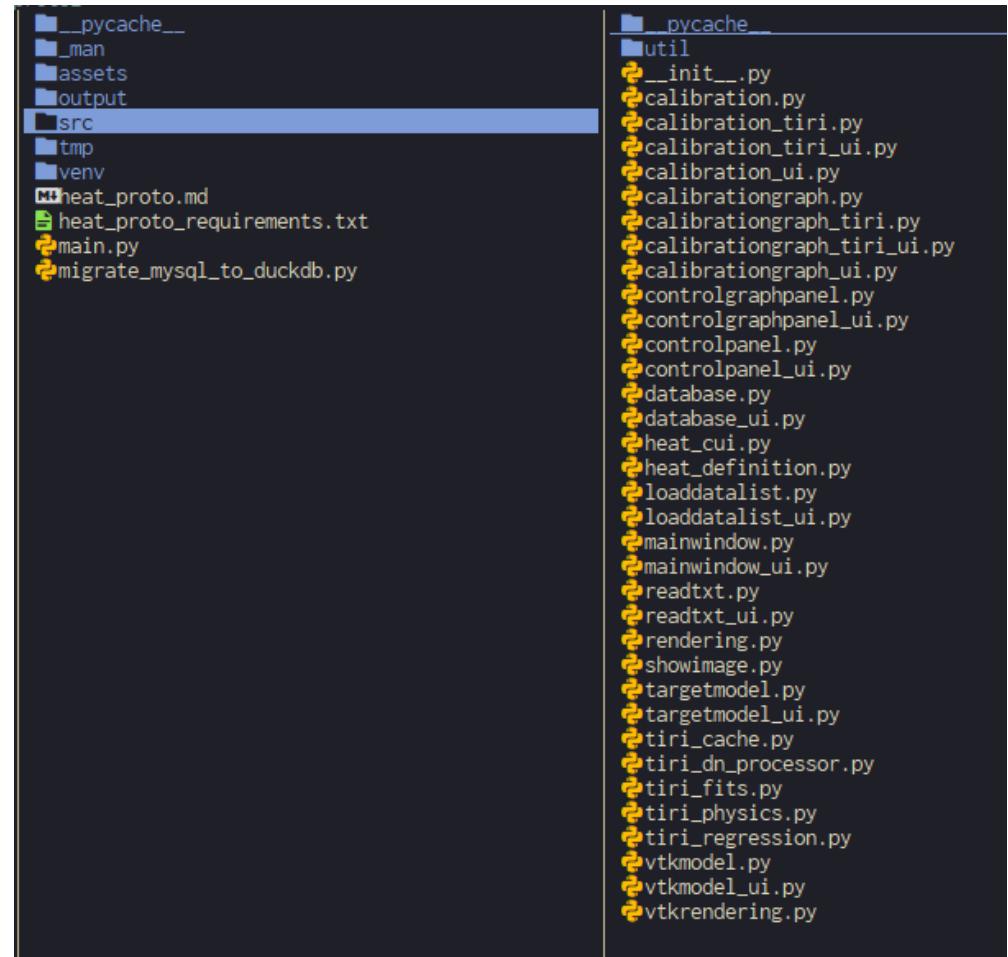
## HEATによる較正曲線の構築

C++ → Python

PyQt + MySQL

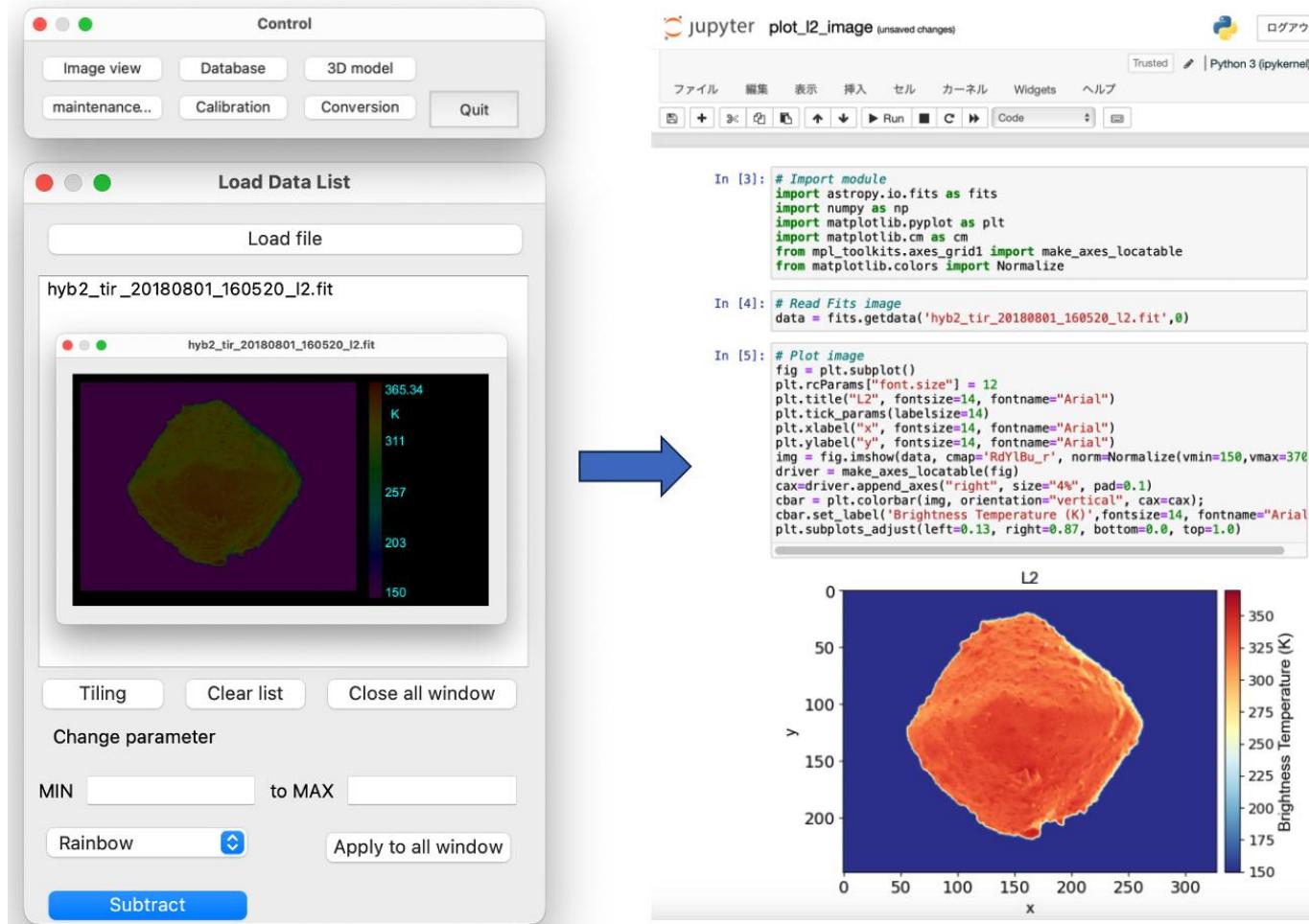


JSONファイルで初期設定  
main.pyでモジュール読み出し



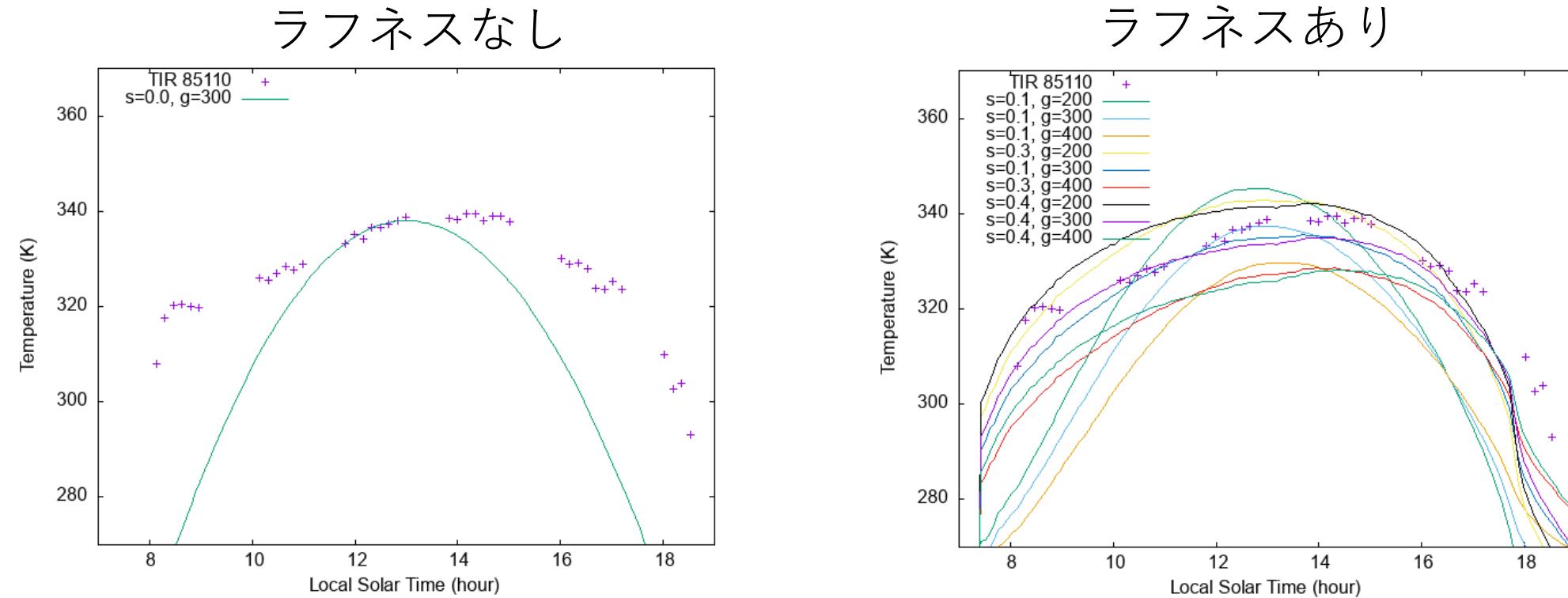
# 2 開発 Notebook形式

Google Colabで使用できるNotebook形式に移植中



## 2 開発 解析機能(熱物理モデル)

Senshu *et al.* (2022)の熱物理モデル(ラフネスモデル)と観測温度プロファイルを比較して、熱慣性を地域毎に導出

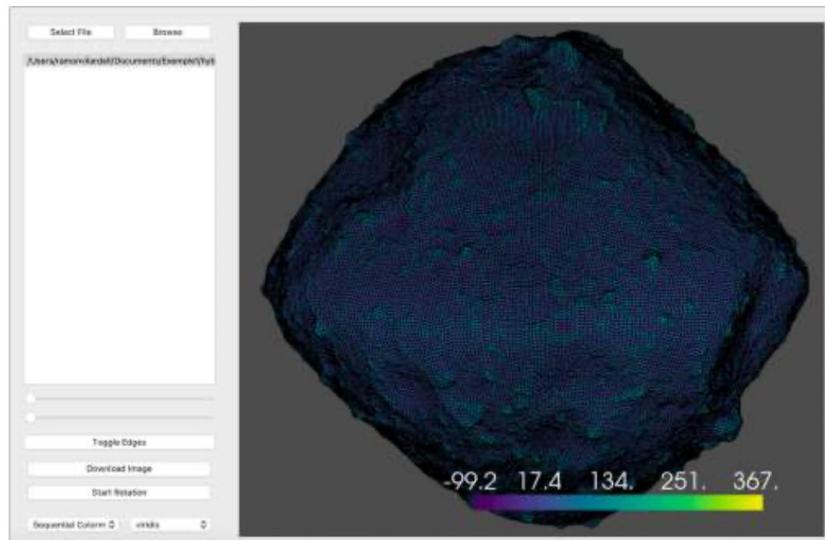


Senshu *et al.*, “Development of Numerical Model of the Thermal State of an Asteroid with Locally Rough Surface and Its Application”, *International Journal of Thermophysics* 43(7) (2022)

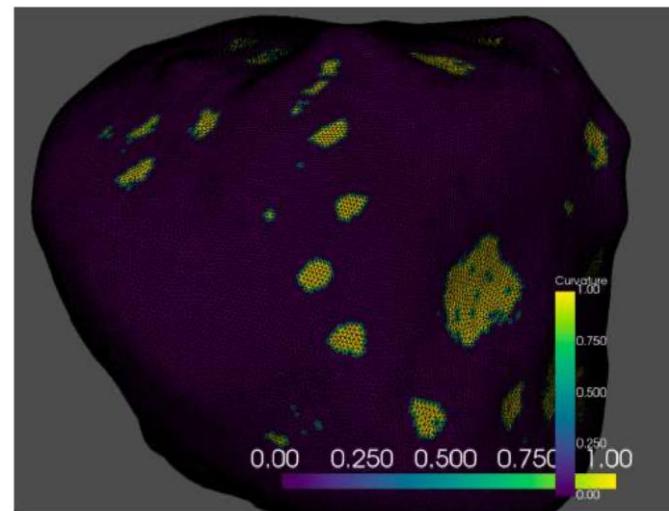
# 2 開発 解析機能(クレータ検出)

## HEAT\_VISANA

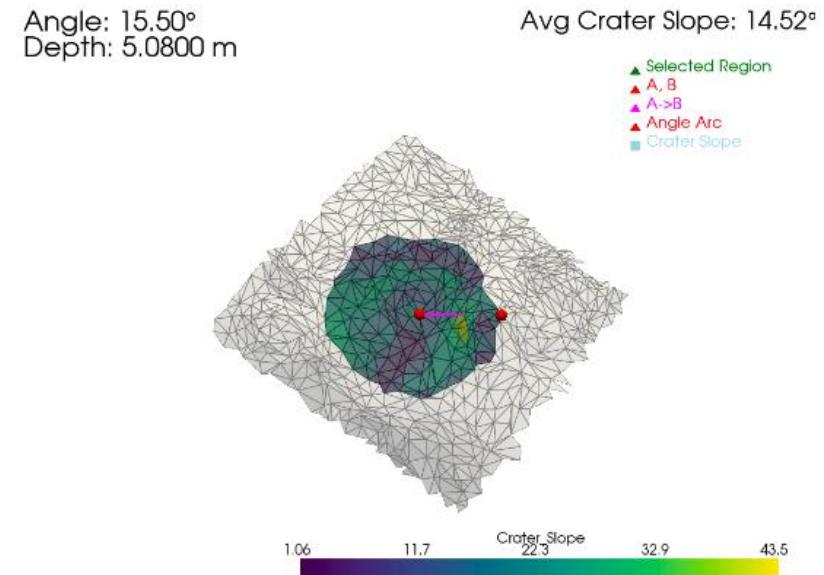
3D温度マップの表示



ラプラシアン・スムージング  
による窪地の検出



クレータの深さや平  
均スロープの導出



Vilardell *et al.*, IEEE Aerospace (2023)

Vilardell *et al.*, Apophis meeting 2025

# 3 結果と課題

## 開発済み

- 熱観測データを輝度温度に変換
- 観測画像と形状モデルのビューアー
- 地上試験データから温度較正テーブルを作成
- 形状モデルへ輝度温度画像データを射影
- ラフネスモデルを用いた温度シミュレーションと観測データの比較解析
- 形状モデルの窪地やクレータの抽出・解析(HEAT\_VISANA)

## 課題

- TIRI用の較正曲線を構築するためのアルゴリズムの開発
- Notebook形式にして、初期導入の負担を低減

# まとめ

- Qtで開発されたHEATをPythonに移植
- TIRI用の較正曲線を構築するツールにアップデート
- 熱物理モデルシミュレーションやクレータ検出機能を実装

GitHubでオープンソースとして公開中

<https://github.com/HEAT-Develop/HEAT>

# 謝辞

- This work was supported by MEXT Promotion of Distinctive Joint Research Center Program Grant Number JPMXP0619217839/JPMXP0622717003.
- 本研究は文部科学省特色ある共同研究拠点の整備の推進事業 JPMXP0619217839/JPMXP0622717003 の助成を受けたものです。

# 成果発表

## 査読付論文

- Vilardell *et al.*, “New Version of HEAT: Calibration and Visualization Tool for Thermal Imagers on Hayabusa2 and Hera”, *IEEE Aerospace* (2024)
- Senshu *et al.*, “Development of Numerical Model of the Thermal State of an Asteroid with Locally Rough Surface and Its Application”, *International Journal of Thermophysics* 43(7) (2022)
- Sakatani *et al.*, Anomalously porous boulders on (162173) Ryugu as primordial materials from its parent body, *Nature Astronomy* 5(8) 766-774 (2021)
- Arai *et al.*, Geometric correction for thermographic images of asteroid 162173 Ryugu by TIR (thermal infrared imager) onboard Hayabusa2, *Earth, Planets and Space* 73(1) (2021)

## 卒業論文・修士論文

- 金野 龍二, Extending for TIRI and high-performance computing based on ground tests ~ HEAT: Hayabusa2/Hera Exploration Assistant for TIR/TIRI, 会津大学 修士論文 (2024)
- 斎藤 啓仁, Extending HEAT to Hera Mission~ Smart Calibration Tool of Thermal Cameras ~, 会津大学 修士論文 (2023)
- 斎藤 啓仁, Redesign of HEAT, Calibration Tool of Thermal Imager for AIDA mission, 会津大学 卒業論文 (2021)
- 大杉 歩, Analysis of the temperature distributions of boulders on C-type asteroid 162173 Ryugu observed in low altitude operation of the asteroid explorer Hayabusa2, 東京大学修士論文 (2021)