

実用研究

**小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラ較正ツールHEATへの
熱モデル解析機能の追加実装**

Implement of heat model analysis for HEAT database of
Thermal Infrared Imager onboard Hayabusa2

2023年12月22日

前橋工科大学 工学部 生命工学領域

荒井 武彦

坂谷 尚哉, 寫生 有理, 千秋 博紀,
出村 裕英, 斎藤 啓仁, 金野 龍二
岡田 達明, 田中 智

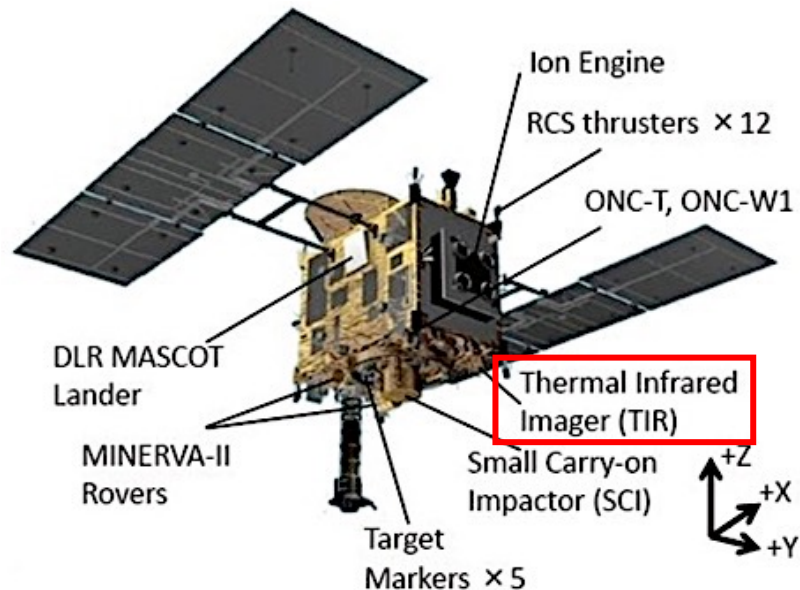
1 背景

2018年6月～2019年11月

はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRによる小惑星162173リュウグウの熱撮像

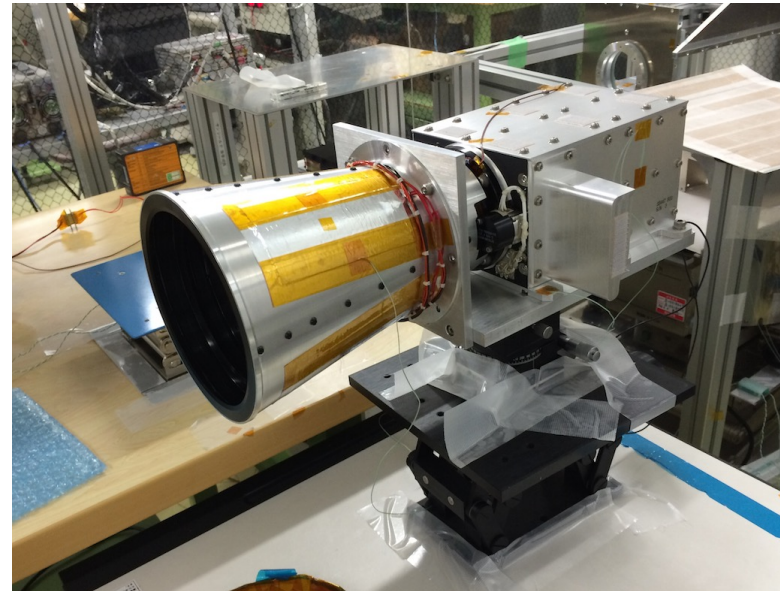
観測したリュウグウの熱画像を熱物理モデルと比較して，表層の熱慣性・空隙率などを推定し，母天体の集積過程やリュウグウの熱進化過程を解明中

小惑星探査機はやぶさ 2



Tsuda et al., 2017

中間赤外カメラTIR

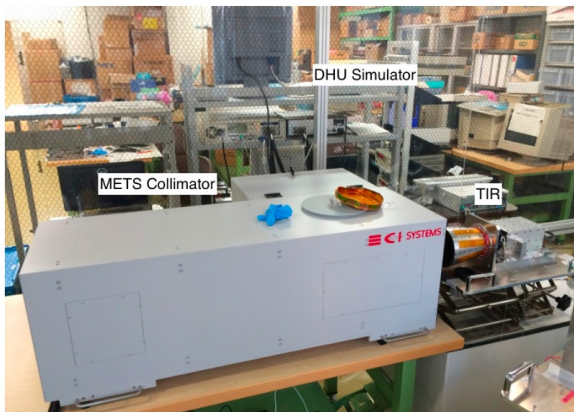


- 非冷却マイクロボロメータアレイ
- 328 x 248 ピクセル
- 16.7° x 12.7° FOV
- 0.051° / ピクセル
- ~ 5 m @ 5 km
- 8-12 μm バンドパスフィルター

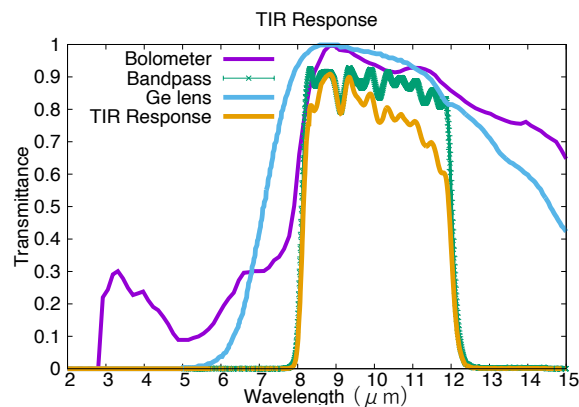
1 背景

Level-1 → Level-2

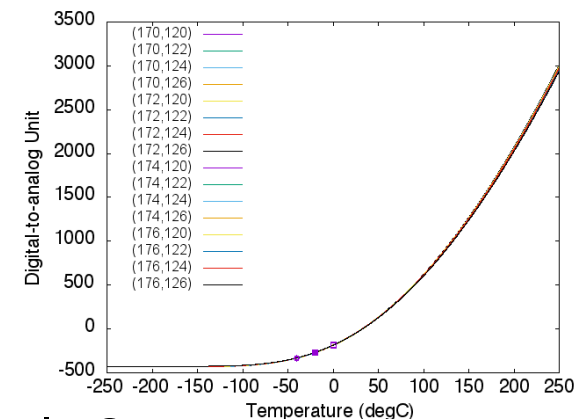
TIR地上校正試験



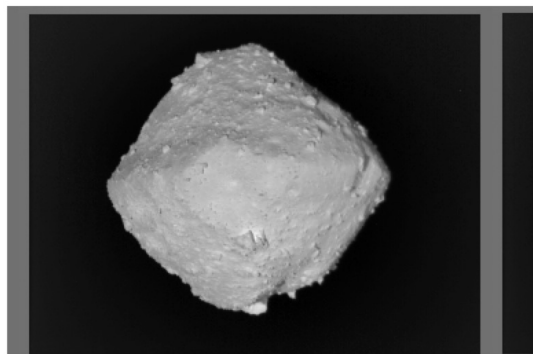
TIR応答関数



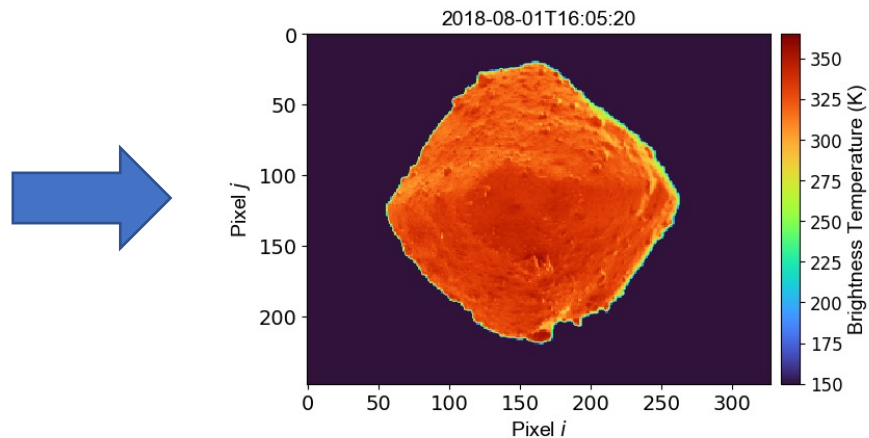
プランクの法則



TIR Level-1 デジタル値画像



TIR Level-2 輝度温度画像

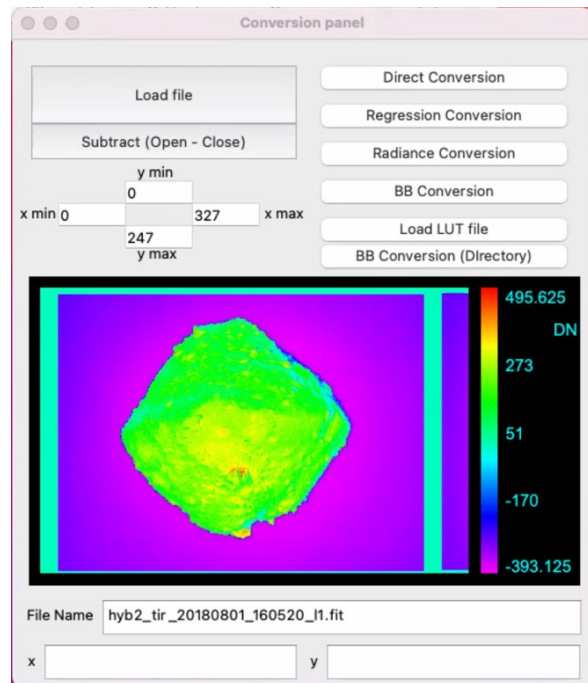


1 背景 HEAT

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
- 解析機能を充実化

1 背景 HEAT

GitHubでオープンソースとして公開中

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

Product Solutions Open Source Pricing

Search or jump to... Sign in Sign up

HEAT-Develop / HEAT Public

Notifications Fork 1 Star 2

Code Issues 1 Pull requests 1 Actions Projects Security Insights

main 1 branch 0 tags

Go to file Code

About

No description, website, or topics provided.

Readme

GPL-2.0 license

Activity

2 stars

1 watching

1 fork

Report repository

Releases

No releases published

File/Folder	Commit Message	Commit Date
HEAT-Develop	Add files via upload	14009c5 on Mar 19 23 commits
HEAT_ver1.5	Add files via upload	9 months ago
src	Add files via upload	last year
HEAT.icns	Add files via upload	last year
HEAT.pro	Add files via upload	last year
LICENSE	Initial commit	last year
README.md	Update README.md	9 months ago
calibration.cpp	Add files via upload	last year
calibration.h	Add files via upload	last year
calibration.ui	Add files via upload	last year

1 背景 HEAT

R3年度 萌芽研究

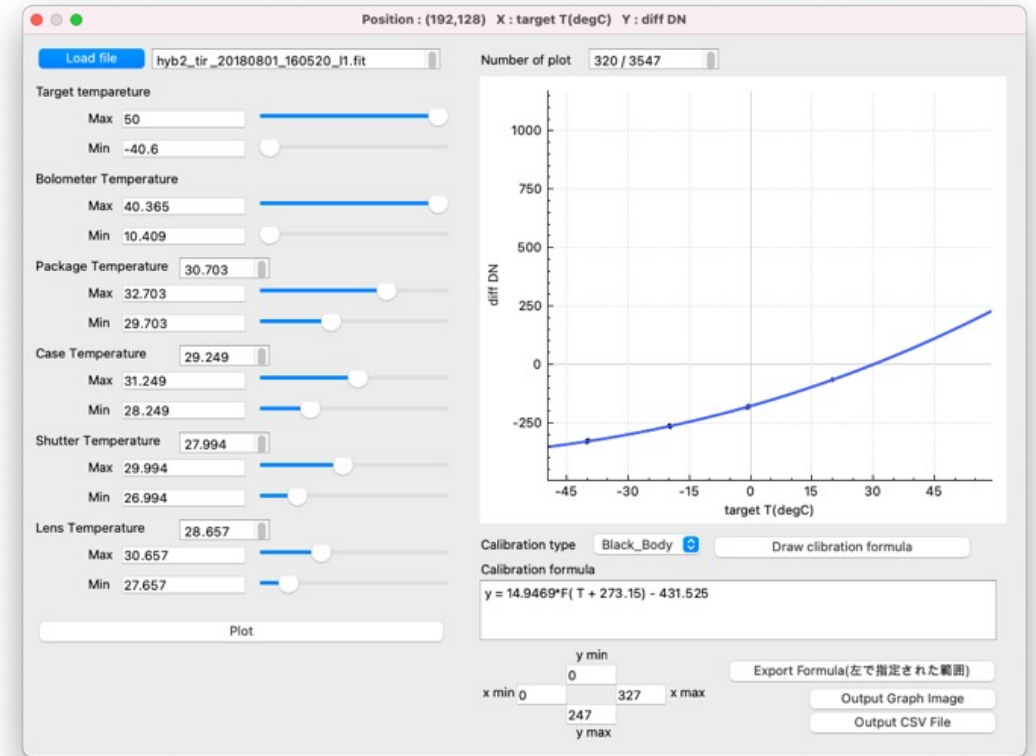
(協力 株式会社 会津ラボ)

改修項目

- メモリの動的確保への対応
- 可変長サイズの観測データへの対応
- 多プラットフォーム対応 (Mac, Win, Linux)
- 推奨開発環境の確認 (Qt5 推奨)

納品物

- Mac, Win, LinuxのHEAT実行形式ファイル
- ライセンスチェックされたソースコード (GPLライセンス)
- 作業報告書 (セットアップ手順メモ, 開発レポート)



Saito et al. (2022)

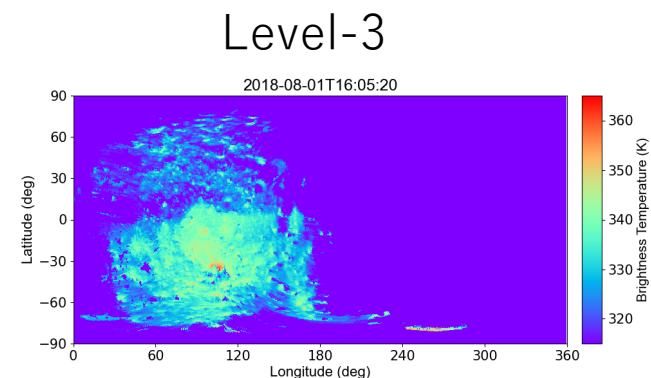
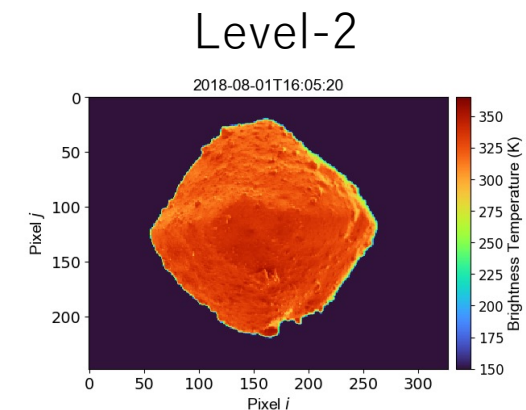
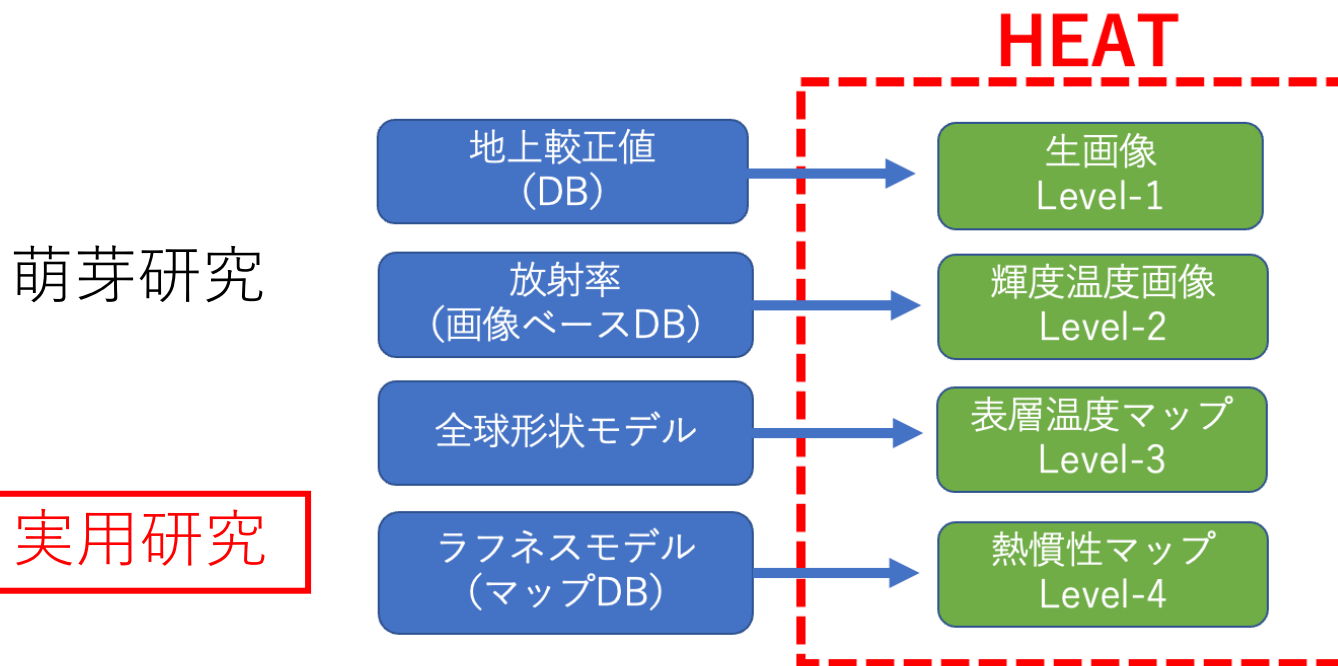
1 背景

高次データの作成

Level-1・Level-2 JAXA/DARTS・NASA/PDSを公開中

https://data.darts.isas.jaxa.jp/pub/hayabusa2/tir_bundle/browse/

<https://sbn.psi.edu/pds/resource/hayabusa2/tir.html>



Level-3・Level-4 を近々公開

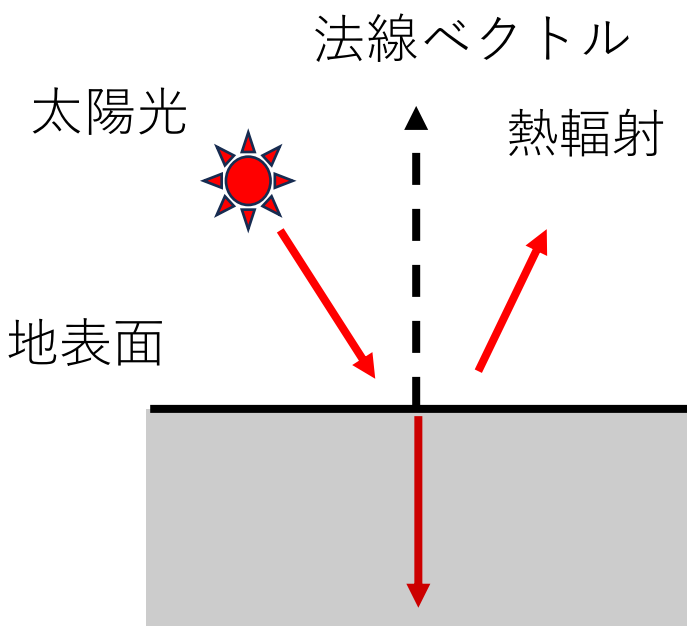
目的 (実用研究)

HEATをデータ正較・可視化ツールとしてだけでなく，高次プロダクトを出力する解析ツールにアップデートするオープンソースとして，多くのユーザに提供し，TIRデータの利用を促進させる

2 解析機能

熱物理モデル + ラフネス

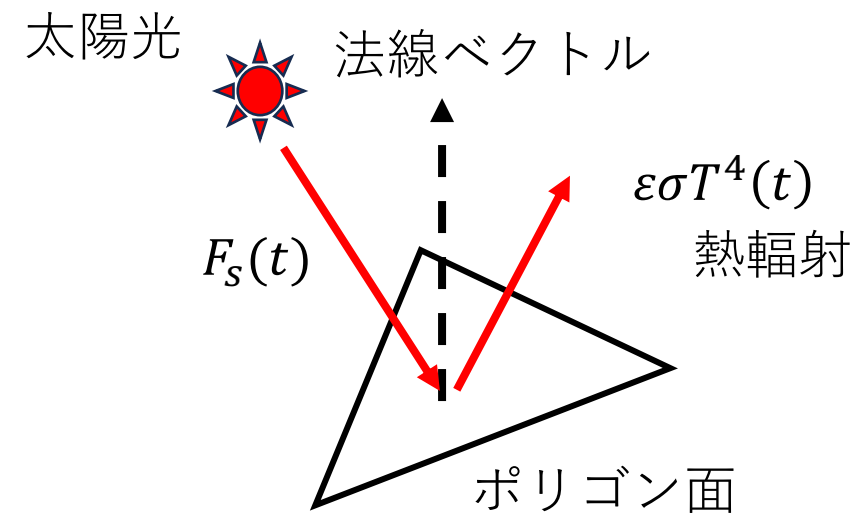
Takita *et al.*, (2017) & Senshu *et al.*, (2022) によって開発



境界条件

$$\kappa \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{x=d} = 0$$

$$\kappa \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{x=0} = \varepsilon \sigma T^4(t) - (1 - A) F_s(t) \cos \theta$$



熱慣性 $\Gamma = \sqrt{\rho c \kappa}$

A アルベド
 ε 放射率

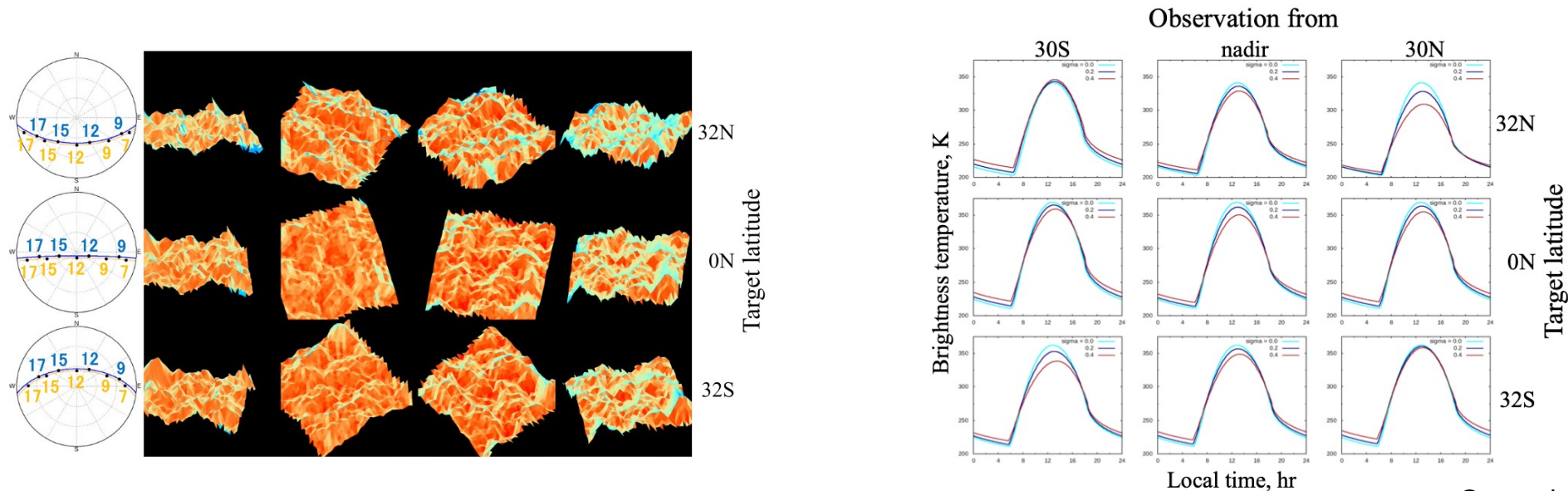
σ Stefan-Boltzmann定数
 θ 太陽光入射角

κ 熱伝導率
 ρ 密度
 c 比熱

2 解析機能

熱物理モデル+ラフネス

ラフラフネスモデルデータ(熱慣性, ラフネス, 緯度経度, 入射角, 出射角)をリュウグウ形状モデルの各ポリゴンへ対応づけるデータベースを構築



Senshu et al., (2022)

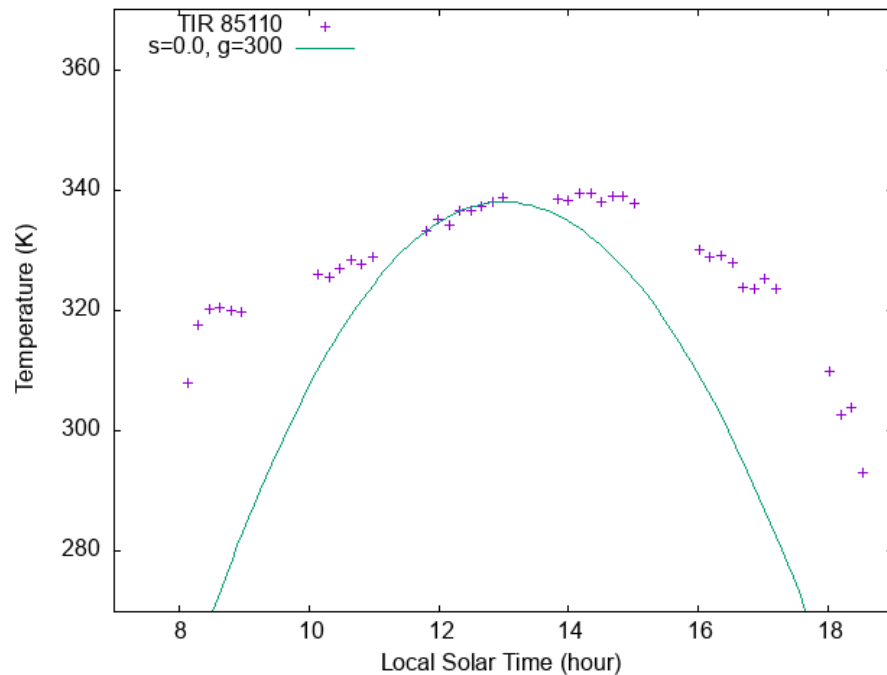
- 球面 32 x 32 分割 **緯度経度→PolygonID**
- rmsSlope σ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
- 熱慣性 Γ 10, 100, 200, 400, 600, 800

2 解析機能

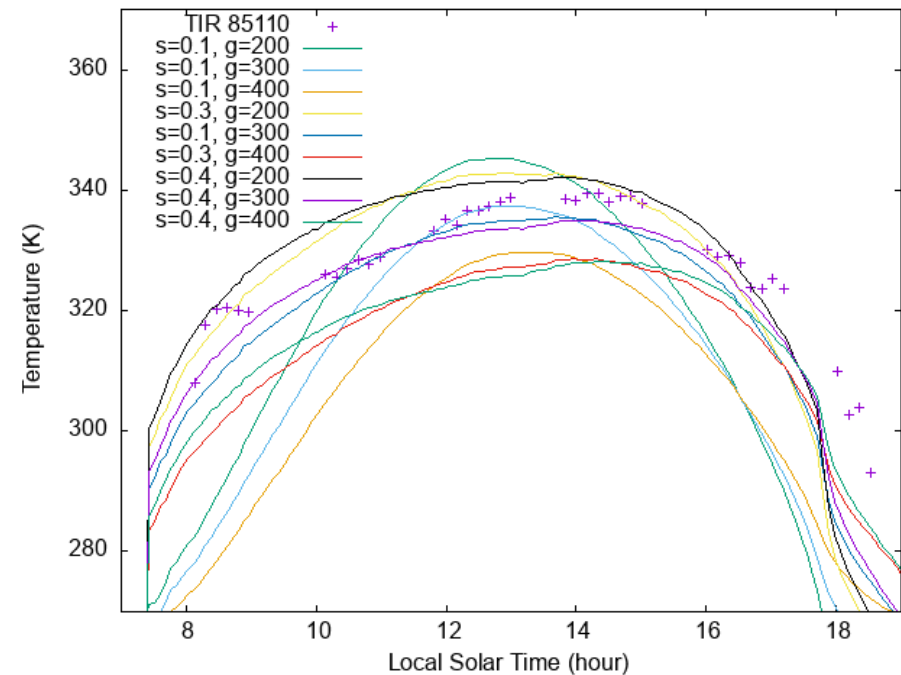
熱慣性マップの作成

Senshu *et al.* (2022)の熱物理モデル(ラフネスモデル)をデータベース化し、観測温度プロファイルと比較して、熱慣性を地域毎に導出

ラフネスなし



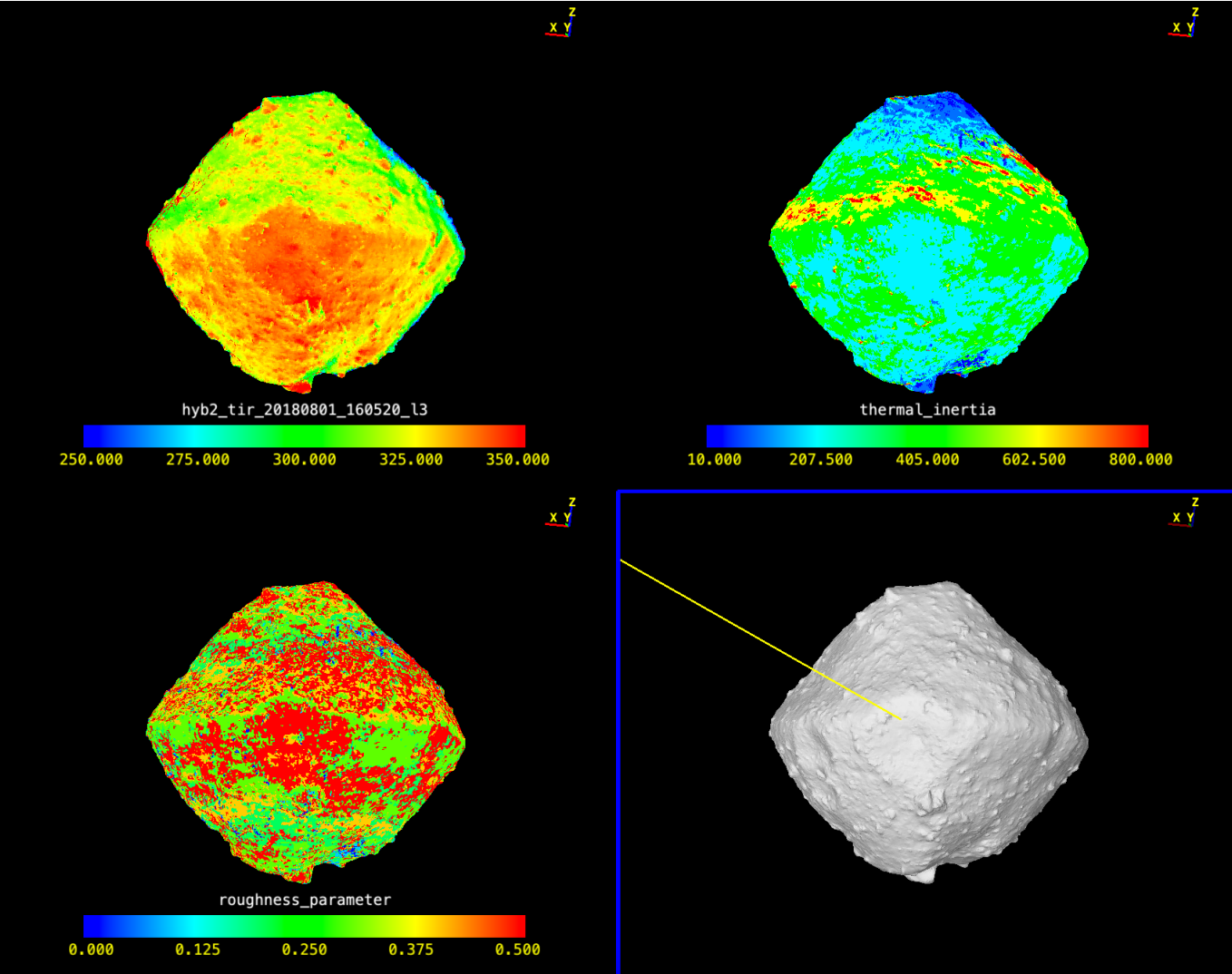
ラフネスあり



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)

3 結果 熱慣性マップ

TIR観測
データ



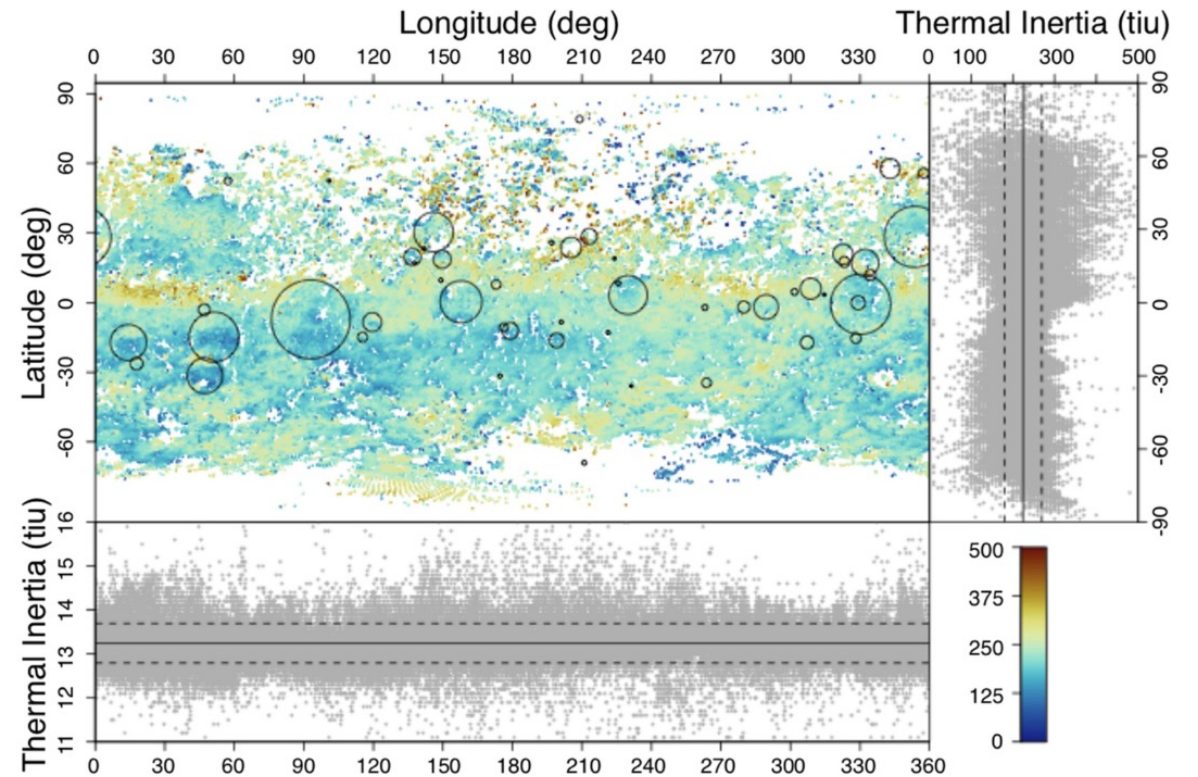
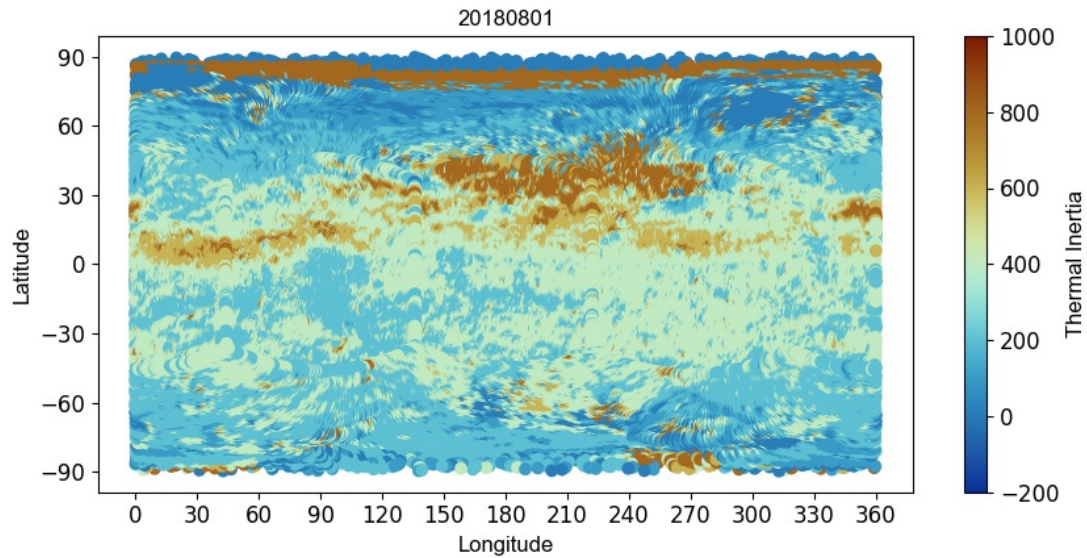
熱慣性
マップ

rmsSlope
マップ

3 結果

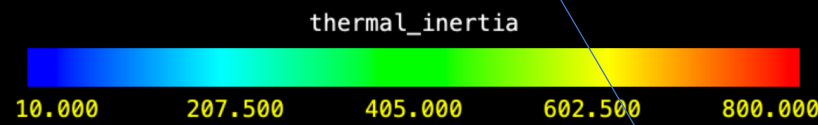
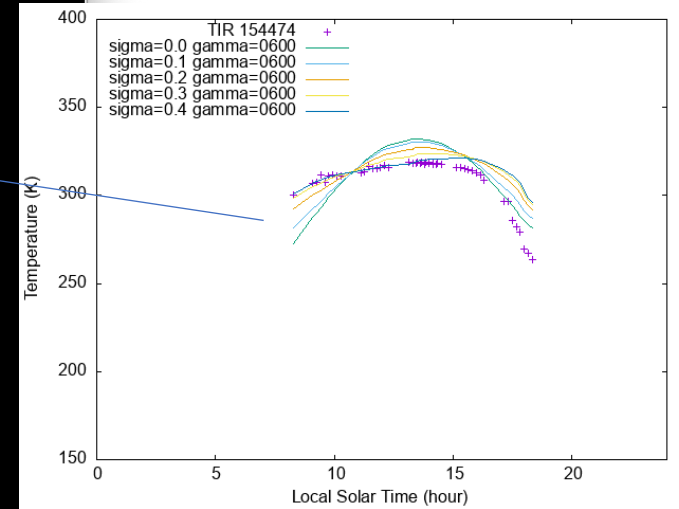
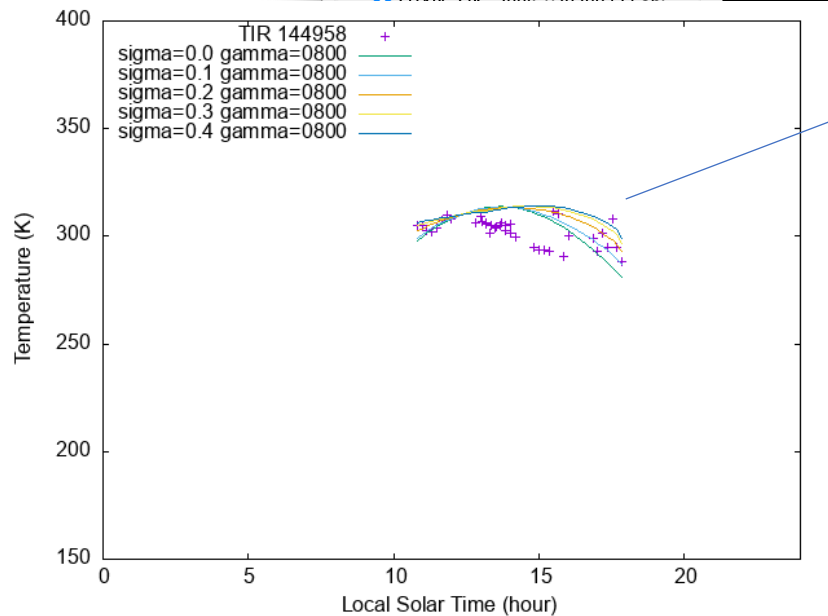
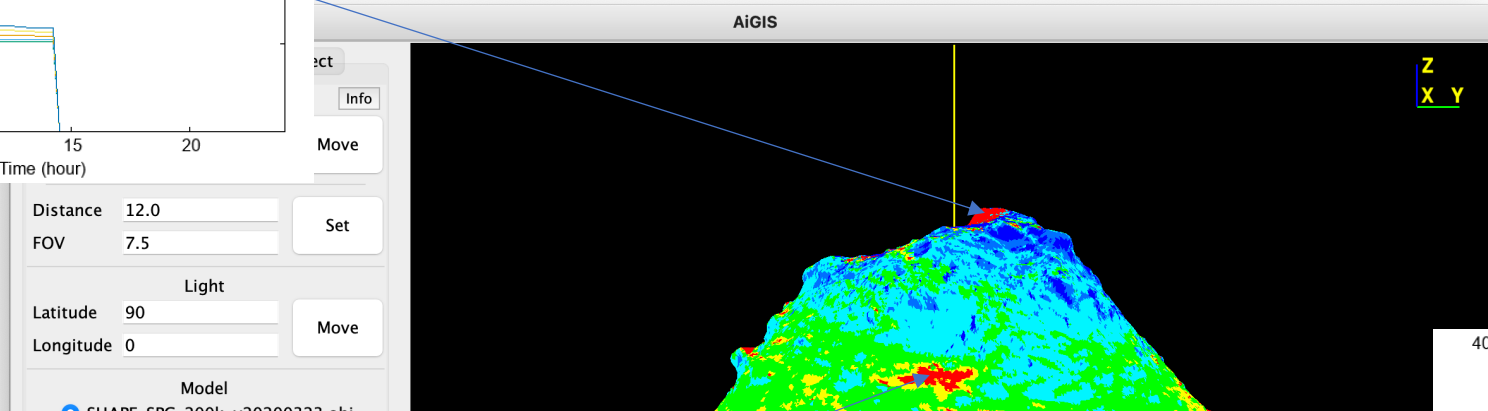
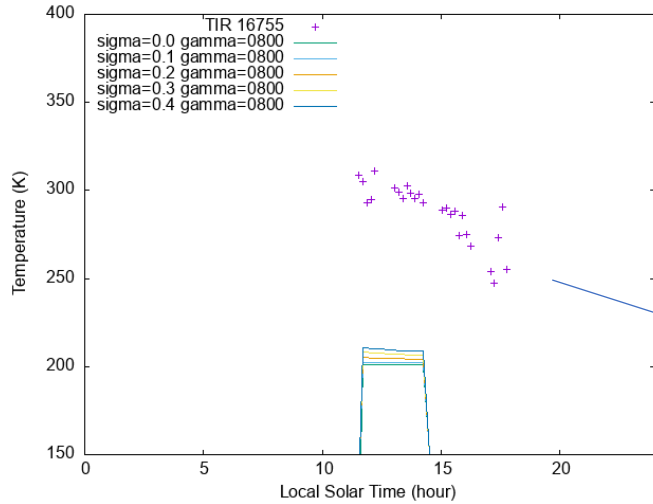
熱慣性マップ

熱物理モデルとの比較により，地域毎の熱慣性を推定



4 議論

- ミスフィットしている地域の熱慣性が高い
- 地形の影響によって、暖められている地域の熱慣性が低い

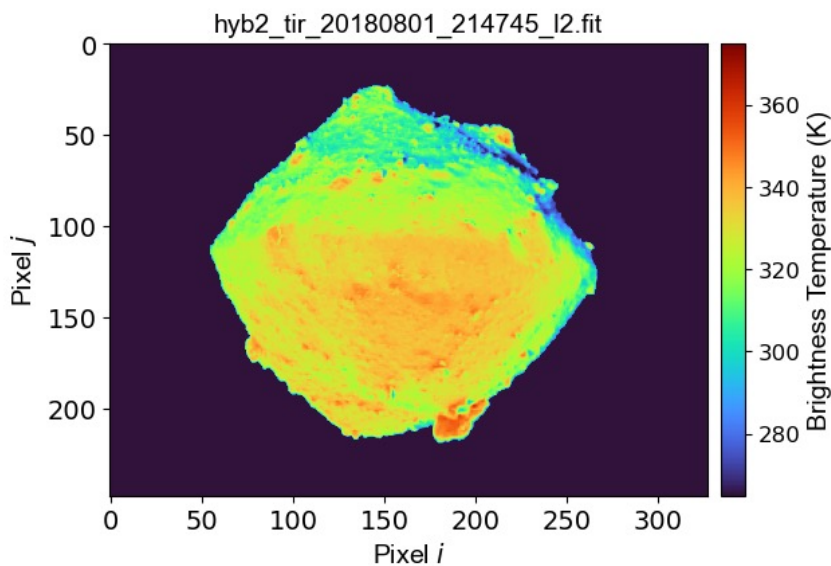


経度0度の岩

4 議論

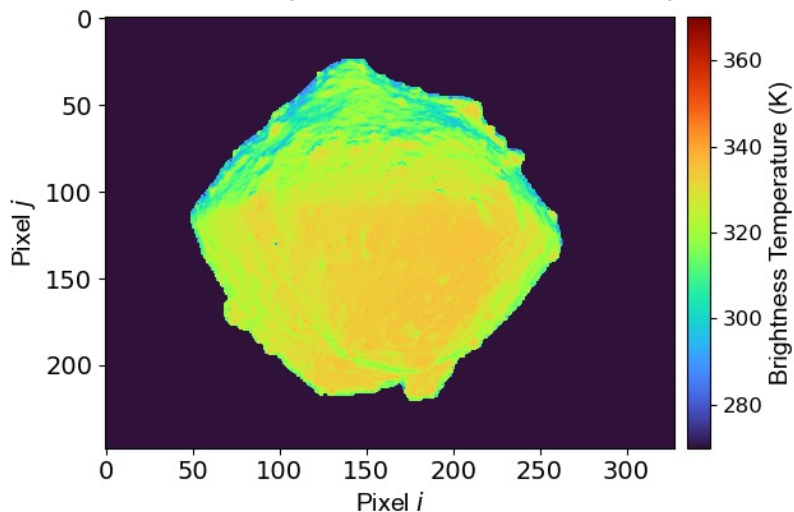
- 地域毎でフィットせずに、全球でフィットする解析結果も出力できるようにする
- Takita et al. (2017)の放射再吸収モデルに擬似ラフネスを付加したモデルを実装する
- Takita et al. (2017)モデルの熱慣性と放射率をパラメータサーチして決定するモデルを実装する

TIR観測熱画像



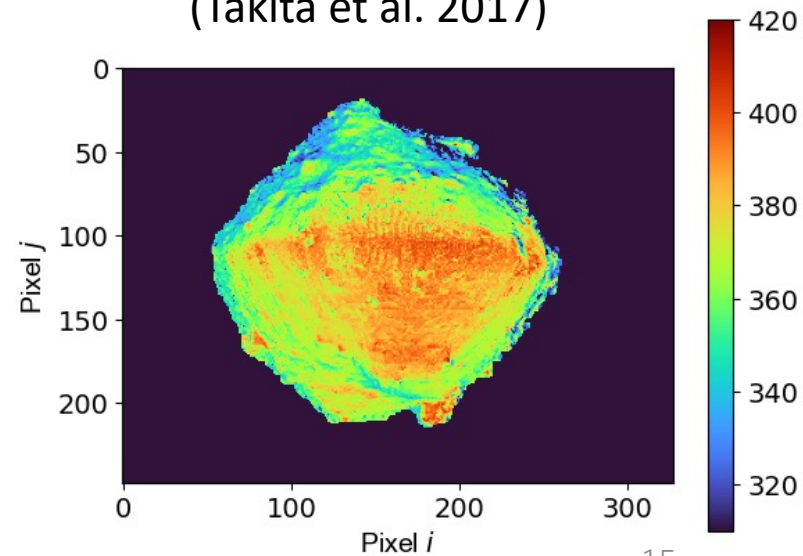
簡易ラフネスモデル

$\Gamma=350$ $\sigma=0.4$
(Senshu et al., 2022)



滝田モデル+擬似ラフネス

$\Gamma=225$ $\Theta=47$ $A=0.045$
(Takita et al. 2017)



まとめ

- HEATにSenshu et al. (2022)のラフネスモデルを用いて解析を行うためのデータベースをHEATに実装した
- 高速化 & 解析機能を実装したHEATをGitHubで近々に公開する
- 次期ミッションのために解析機能を強化し，小天体探査の熱観測で汎用的に世界で活用される熱物理モデル解析ツールに成長させる

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* (Submitted)
- 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

- 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)
- 斎藤 啓仁, Extending HEAT to Hera Mission~ Smart Calibration Tool of Thermal Cameras ~, 会津大学 修士論文 (2023)

成果発表

学会発表・研究集会発表

- 荒井ほか, 小惑星リュウグウの熱データ解析ソフトウェアのベンチマーク, 日本惑星科学会2023年度秋季講演会 (2023)
- Vilardell *et al.*, Current Status of HEAT: Calibration package for thermal imagers on Hayabusa2 and Hera, The Asia-Pacific Regional IAU Meeting (2023)
- 荒井ほか, Data achieve of high degree products for Thermal Infrared Imager onboard Hayabusa2, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023)
- 金野ほか, 現在のHEATの開発状況, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023)
- 大杉ほか, Relationships between temperature distributions and thermal inertias of boulders on the asteroid Ryugu observed by the low-altitude operation of the Hayabusa2, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023)
- Okada *et al.*, Thermal properties of asteroid Ryugu from global, local, and micro-scale observations and the possible formation and evolution scenario of Ryugu, Hayabusa Symposium (2022)
- 荒井ほか, 小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRによって観測された小惑星162173リュウグウの日中の影領域, 日本惑星科学会2022年度秋季講演会, (2022)
- 齊藤ほか, はやぶさ2中間赤外カメラの較正・可視化ツールHEATの安定化と機能拡張, 日本地球惑星科学連合2022年大会, (2022)
- 荒井ほか, Corrected Temperature Map on Shape Model of Ryugu observed by Thermal Infrared Imager onboard Hayabusa2, はやぶさ2中間赤外カメラの較正・可視化ツールHEATの安定化と機能拡張, 日本地球惑星科学連合2022年大会, (2022年)
- Ohsugi *et al.*, Analysis of the Temperature Distributions of Boulders on C-Type Asteroid 162173 Ryugu Observed in Low Altitude Operation of the Asteroid Explorer Hayabusa2, 53rd Lunar and Planetary Science Conference (2022)
- 大杉ほか, 小惑星探査機はやぶさ2の低高度運用で観測された小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度分布変化並びに熱物性解析, 日本惑星科学2022年会秋季講演会 (2022)
- 坂谷ほか, Local variation in thermal inertia around the artificial impact crater on Ryugu, 日本地球惑星科学連合2021年大会, (2021)
- 鳶生ほか, High-resolution global thermal images of Ryugu acquired from the dawn side, 日本地球惑星科学連合2021年大会, (2021)
- 大杉ほか, Analysis of the temperature distributions of boulders on C-type asteroid 162173 Ryugu observed in low altitude operation of the asteroid explorer Hayabusa2, 日本地球惑星科学連合2021年大会, (2021)
- 荒井ほか, 小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRによる小惑星リュウグウ表層の高精細温度マップの構築, 日本地球惑星科学連合2021年大会, (2021)
- 岡田ほか, Thermophysical Properties of C-Type Asteroid 162173 Ryugu Revealed by the Thermal Infrared Imager TIR on Hayabusa2, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN (2021)
- 大杉ほか, 小惑星探査機はやぶさ2の低高度運用で観測された小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度変化分布解析 (2), 日本惑星科学2021年会秋季講演会 (2021)
- 荒井ほか, 小惑星探査機はやぶさ2 搭載中間赤外カメラTIRのデータリリース, 日本惑星科学2021年会秋季講演会 (2021)

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。