

小惑星モデルについての検討  
- 局所的詳細化及び係るレンダリング手法 -

三浦 昭\*, 坂谷 尚哉\*, 横田 康弘\*, 本田 理恵†

\*宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

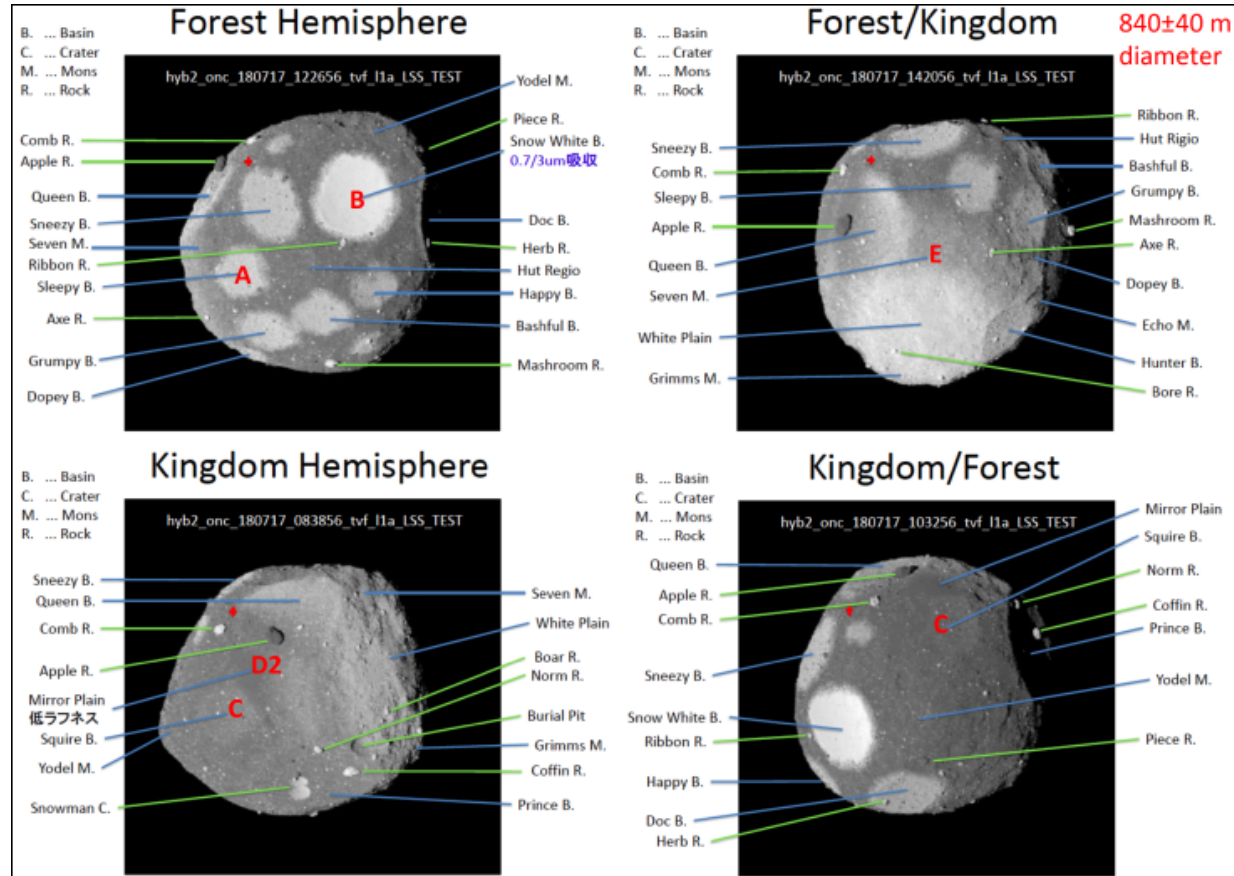
†高知大学

# 背景

- 「はやぶさ2」のリュウグウ近接運用
  - 訓練における模擬画像生成の必要性
    - 運用訓練(RIO)
    - タッチダウン地点の選定(LSS)
  - 模擬小惑星の作成(リュウゴイド)
    - 小惑星全体(~1km)を10~20cm程度のポリゴンで構成
      - 3億~4億ポリゴン
    - 理学観測にも耐えうる, 地質や熱を考慮した小惑星モデル
- タッチダウンに向けて
  - 局所的な形状モデルを用いた訓練・評価
    - 目標分解能(ポリゴンサイズ): 1mm~2mm
  - 予想を超える, 岩石質のリュウグウ表面

# リュウゴイドの事例

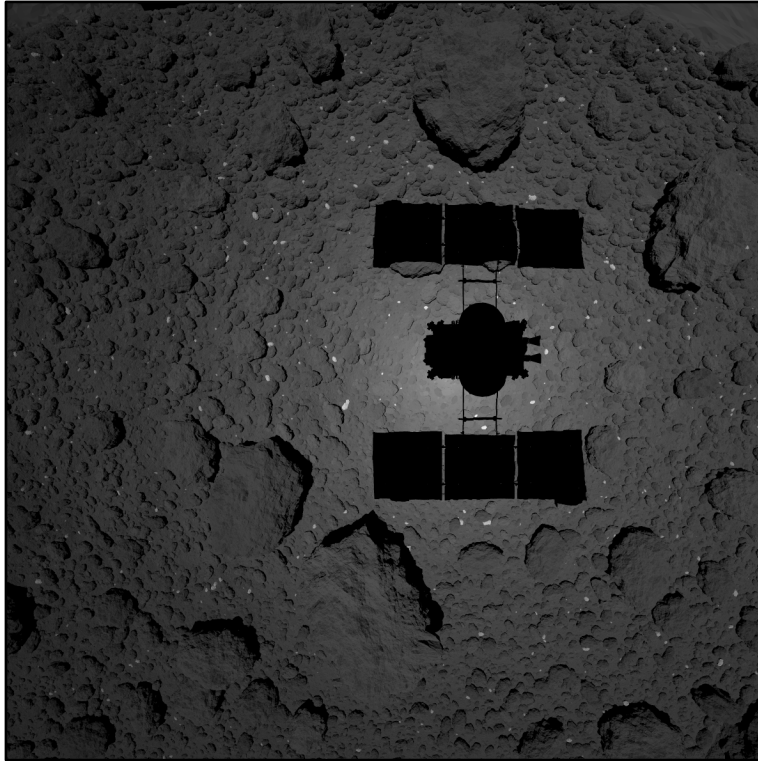
## • レンダリング, LSS訓練事例



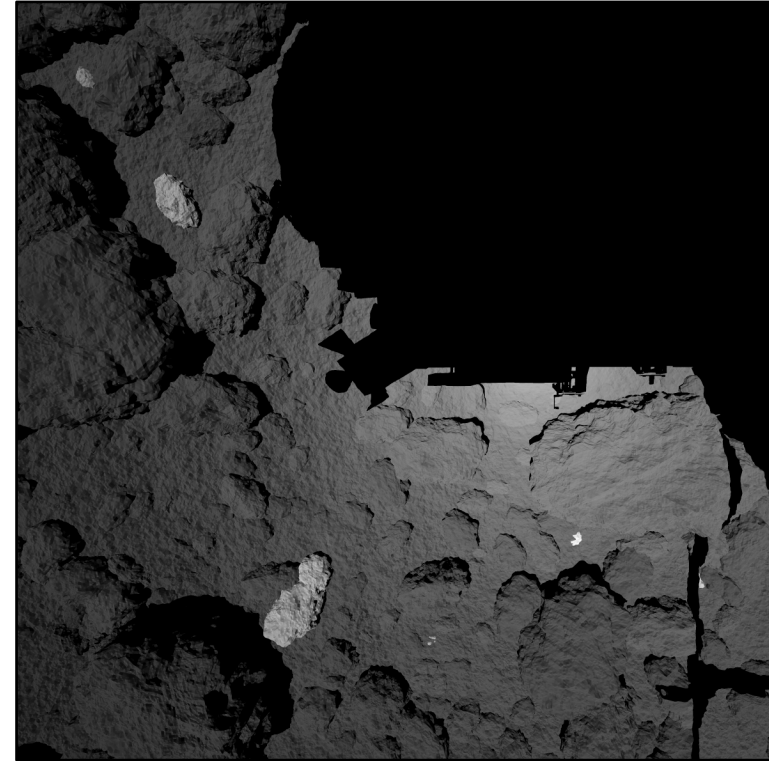
H. Yabuta, et al., "Hayabusa2 landing site selection (LSS) training: Summary report of scientific evaluation", 49th Lunar and Planetary Science Conference, Texas, March 2018.

# 本研究の立ち位置

- 訓練や事前評価のための模擬画像を生成する  
– 例: 近接撮像



距離: 10m



距離: 1m

A. Miura et al., “Simulation of proximity imaging of Ryugu’s surface during Hayabusa2 touch-down sequence”, DPS meeting #50, id.411.10, 2018.

# 課題

## • モデリング

- 詳細化の目標(ポリゴンサイズ): 1~2mm
  - リュウゴイドの1/100程度
- 現有システムにおける限界: 4億ポリゴン程度
  - 主記憶100~200GB
- タッチダウン目標点近傍の, 局所的詳細化

## • レンダリング

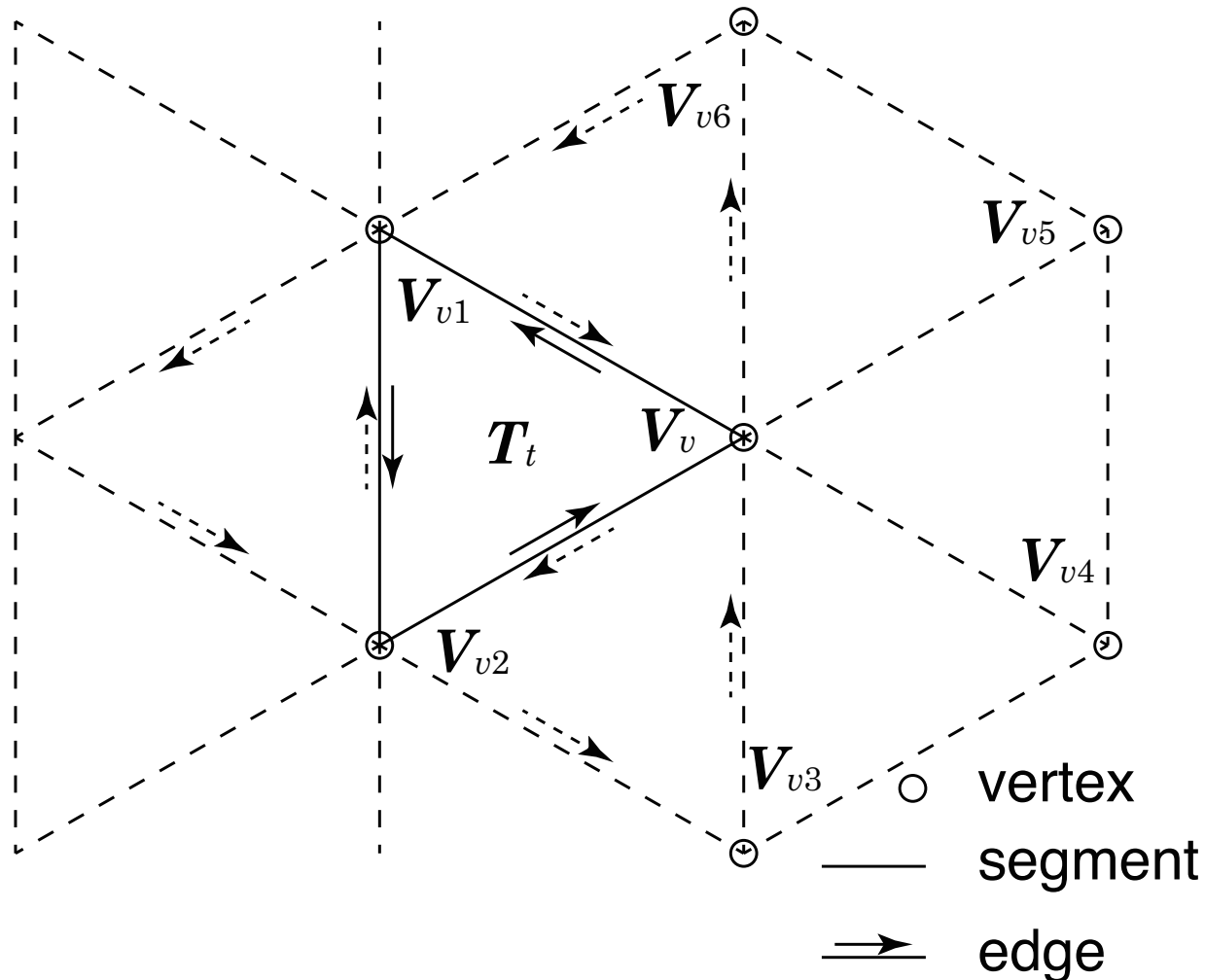
- 光源(太陽, フラッシュランプ)
- 地質(リュウグウの実態に即して)
- ターゲットマーカ, 等

# モデリング

- 形状モデルの基本構造
- 形状モデルの生成(基本)
- 岩石類の生成
- 詳細化の観点
- 局所的詳細化
  - 事例
  - 本研究の手法

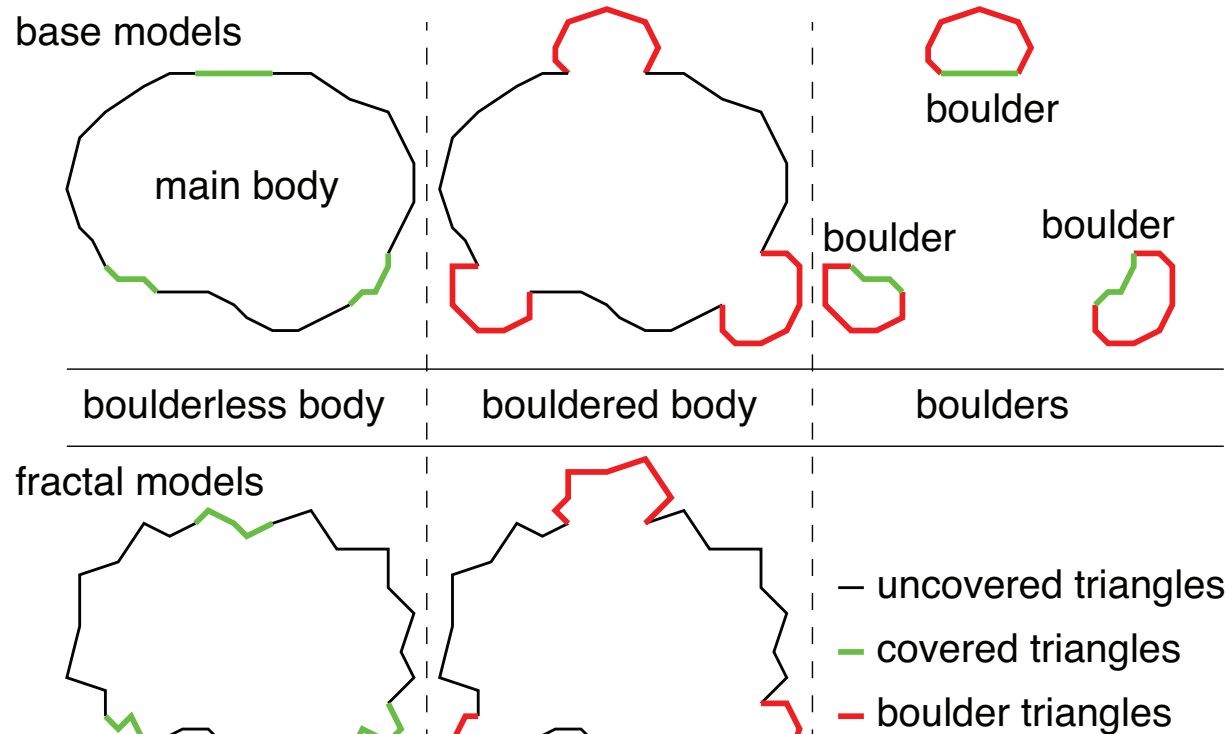
# 形状モデルの基本構造

- 頂点と辺を共有する三角形の集合体
  - 比較的均質な三角形を想定



# 形状モデルの生成(基本はリュウゴイドと共通)

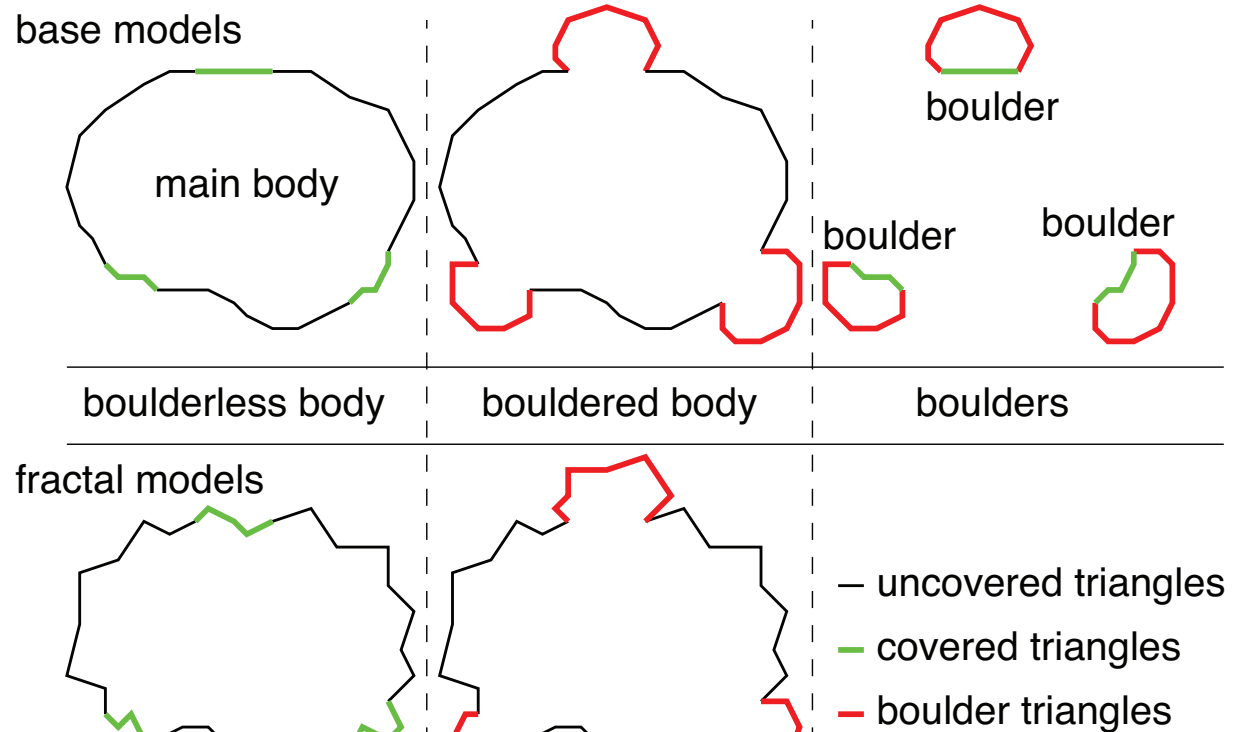
- 1つの形状モデルから用途に応じて生成
  - ベースとなる形状モデル
  - フラクタルを付加した形状モデル
  - 小惑星本体の形状モデル
  - 岩石の形状モデル
  - 両者の組み合わせ





# 形状モデルの生成(基本はリュウゴイドと共通)

- 小惑星本体と岩石類とがポリゴンを共有
- 小惑星本体のポリゴンを基準に岩石類を生成



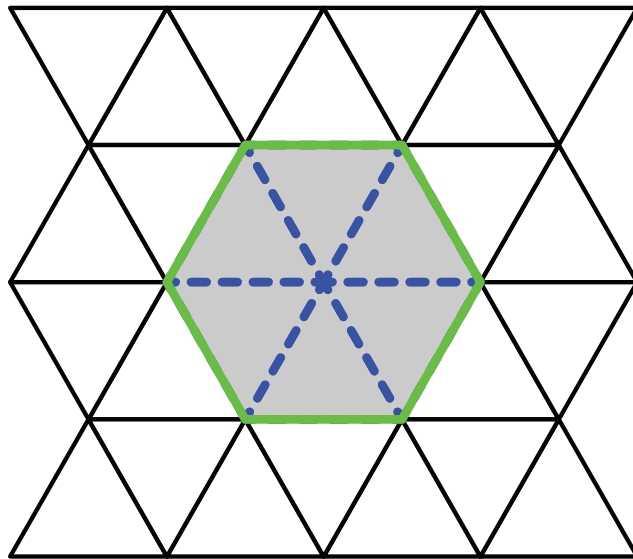
# 岩石類の生成

- 生成
  - リュウゴイドの事例
  - 本手法
- 配置
  - 実測に基づく配置
  - 分布則に基づく配置
  - フラクタル近似






# 岩石類の生成

- 小惑星本体のポリゴンに接続するように生成

Top View



(1) Surface of the body

-  Uncovered Triangles
-  Triangles of the Boulder
-  Triangles covered with the Boulder
-  Segments covered with the Boulder
-  Marginal Segments

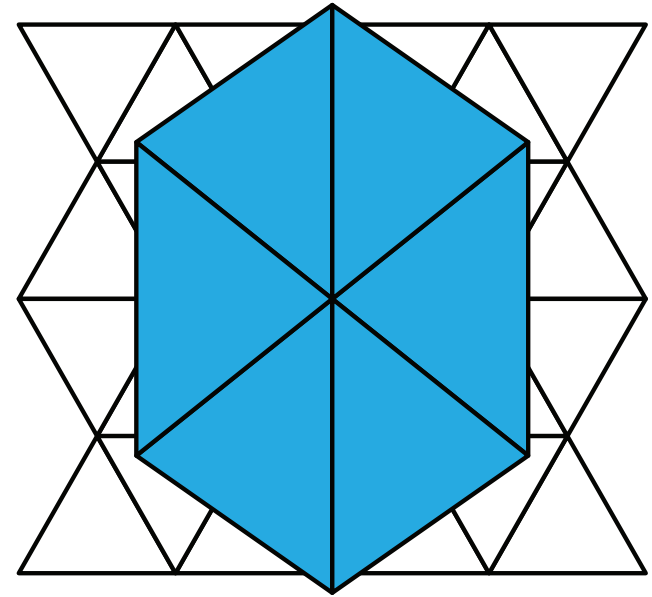
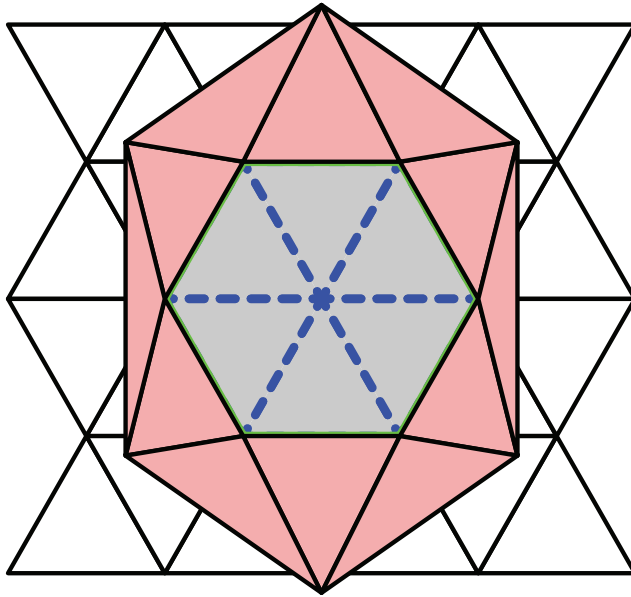
# 岩石類の生成

- リュウゴイドの事例

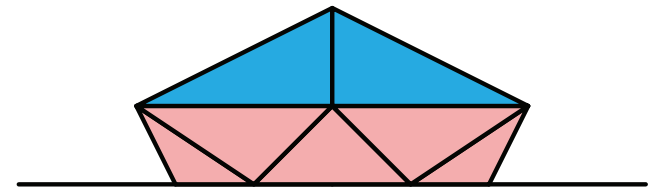
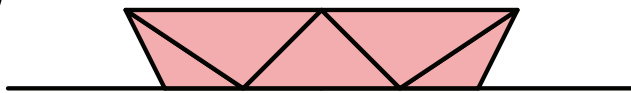
- 2層構造

- 岩石を構成するポリゴンが大きくなりがち

Top View



Side View



(2) Boulder (Lower Layer)

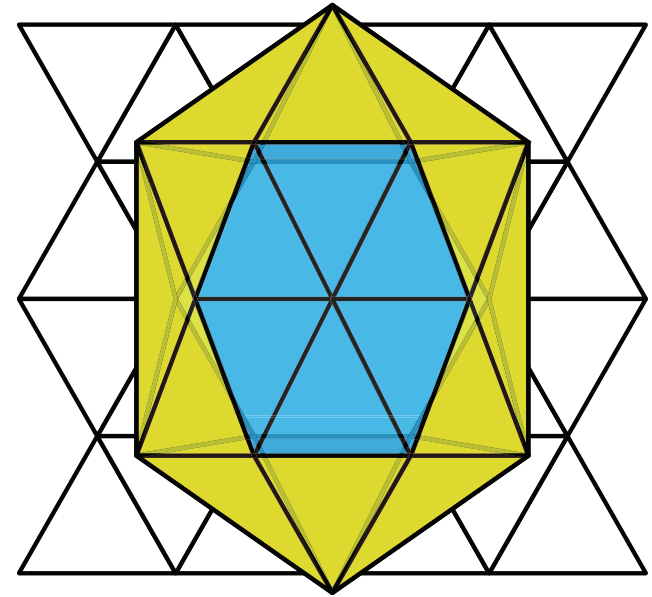
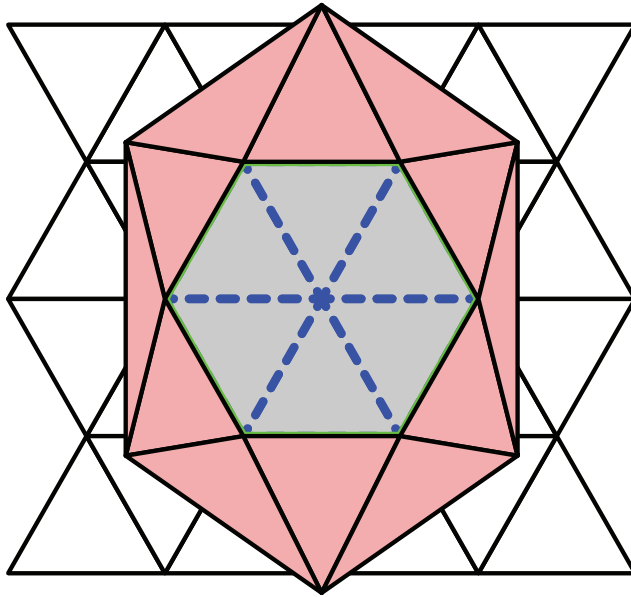
(3) Boulder (the whole shape)

- **本手法**

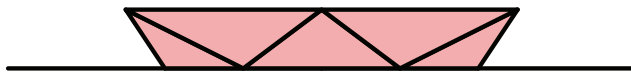
- 3層構造を導入

- ポリゴンサイズの均質化

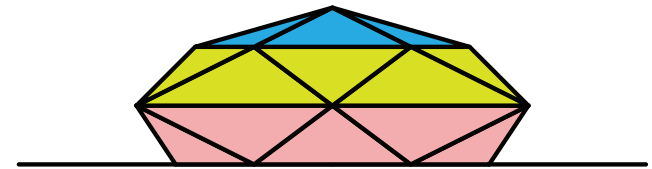
Top View



Side View



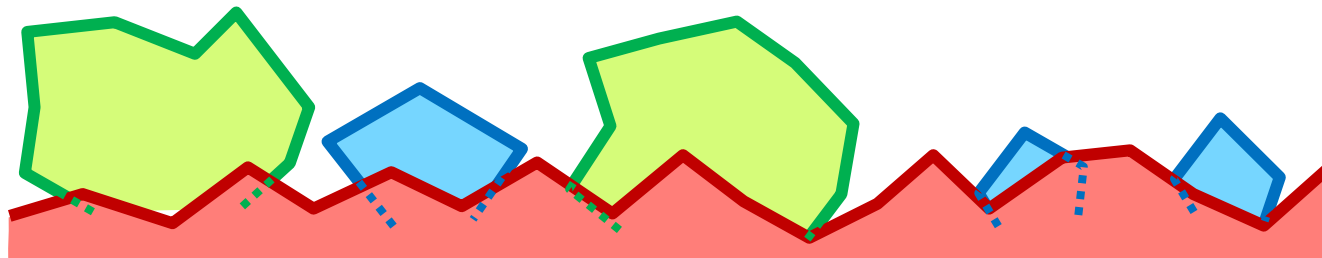
(2) Boulder (Lower Layer)



(3) Boulder (The whole shape)

# 岩石類の配置

- **大型 ( $\geq 1\text{m}$ )**
  - 実測の位置・方向・サイズに基づいて岩石を生成
    - 詳細な凹凸はランダムに決定
- **中型 ( $\geq 10\text{cm}$ )**
  - 分布則に基づいて岩石をランダムに生成
    - 位置・方向・詳細な凹凸はランダムに決定
- **小型 ( $\leq 10\text{cm}$ )**
  - フラクタル形状での代用
  - 分布則に従うと, 飽和する

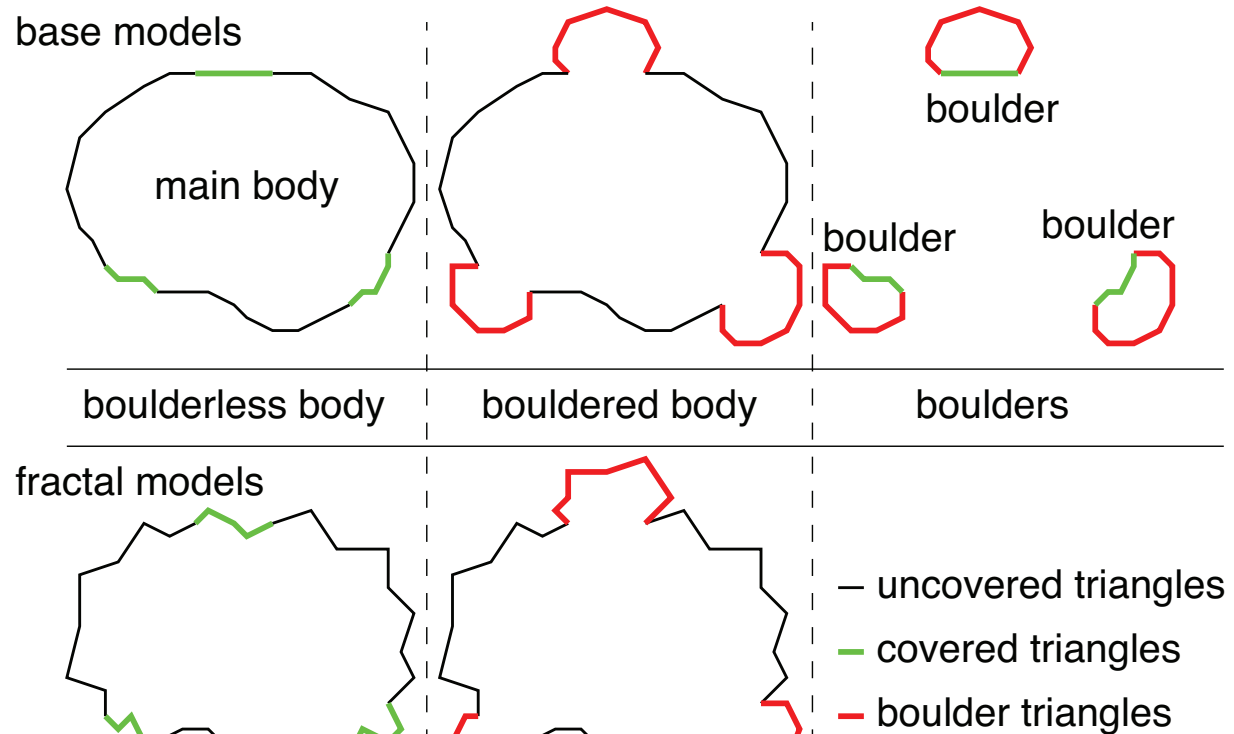


# 形状モデルの生成(基本はリュウゴイドと共通)

- ベースとなる形状モデル

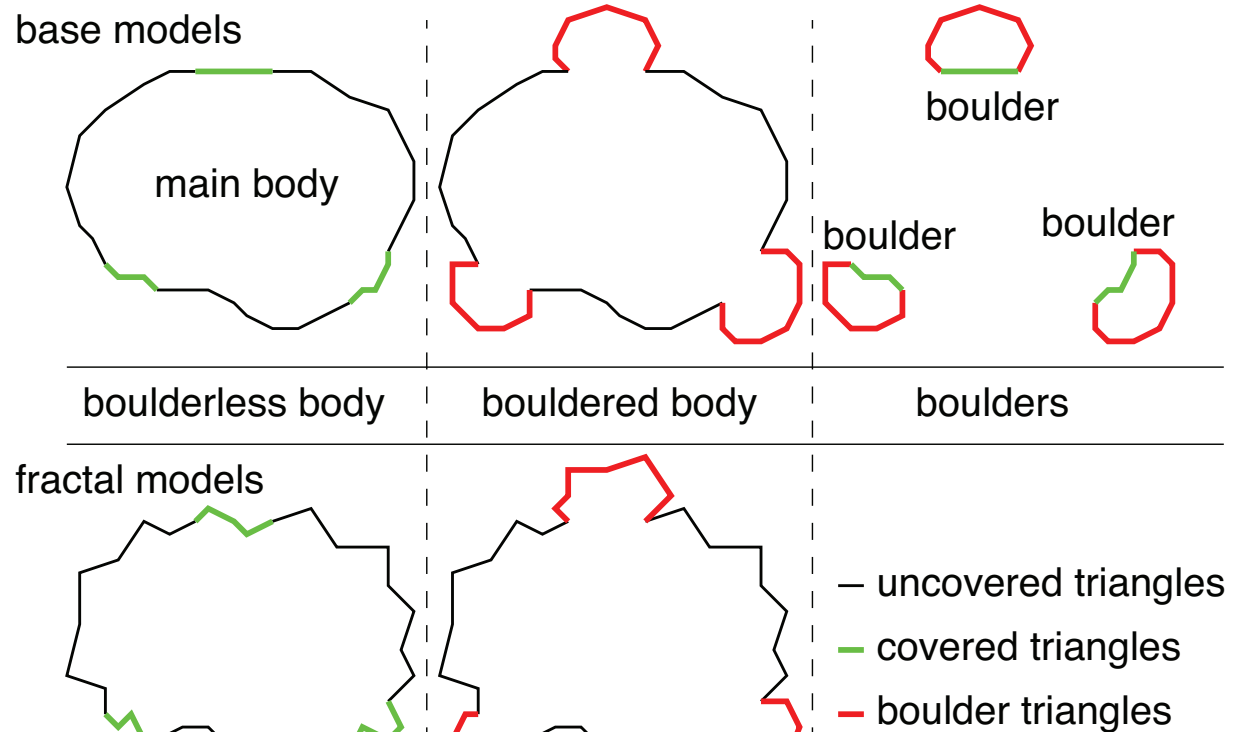
- 細分化+スムージング

- 小惑星本体の細分化+スムージング
    - 岩石の細分化+スムージング



# 形状モデルの生成(基本はリュウゴイドと共通)

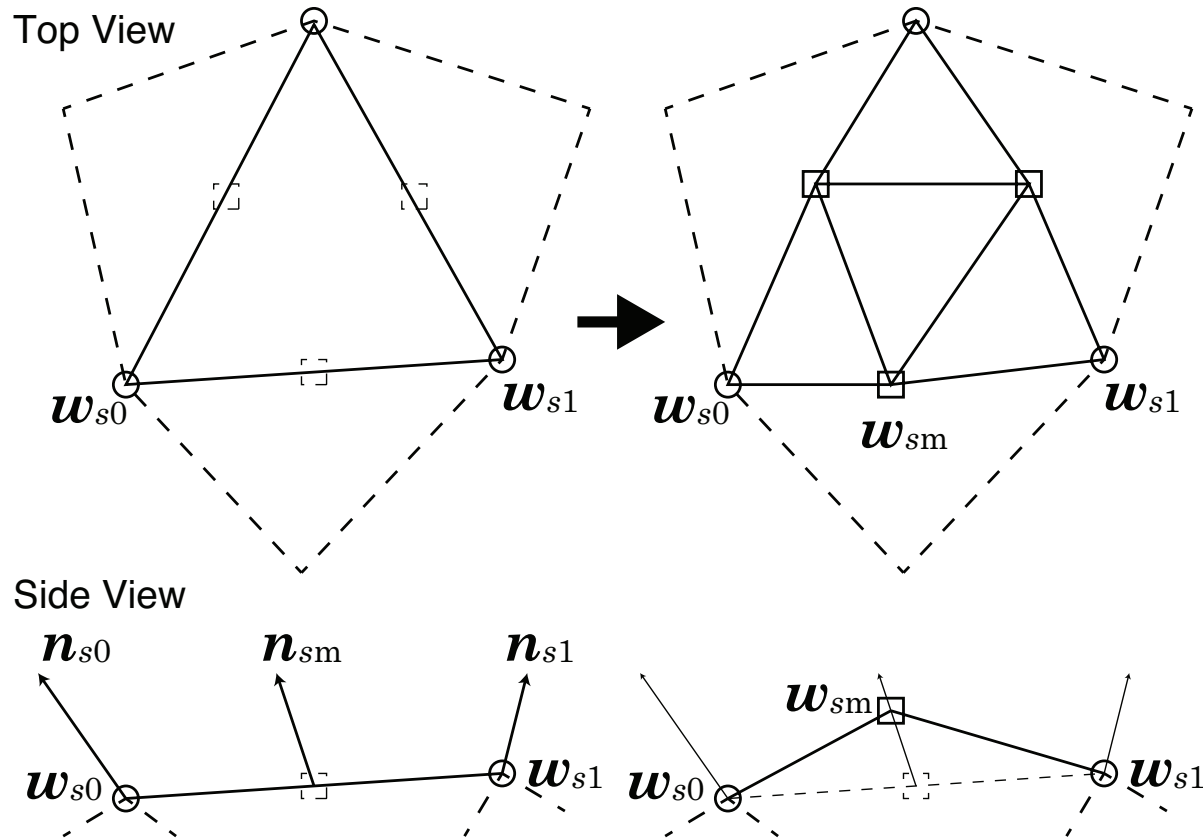
- フラクタルを付加した形状モデル
  - ベースモデルに対してフラクタルを付加
    - 小惑星本体: フラクタル+スムージング
    - 岩石: フラクタル





# 詳細化の観点

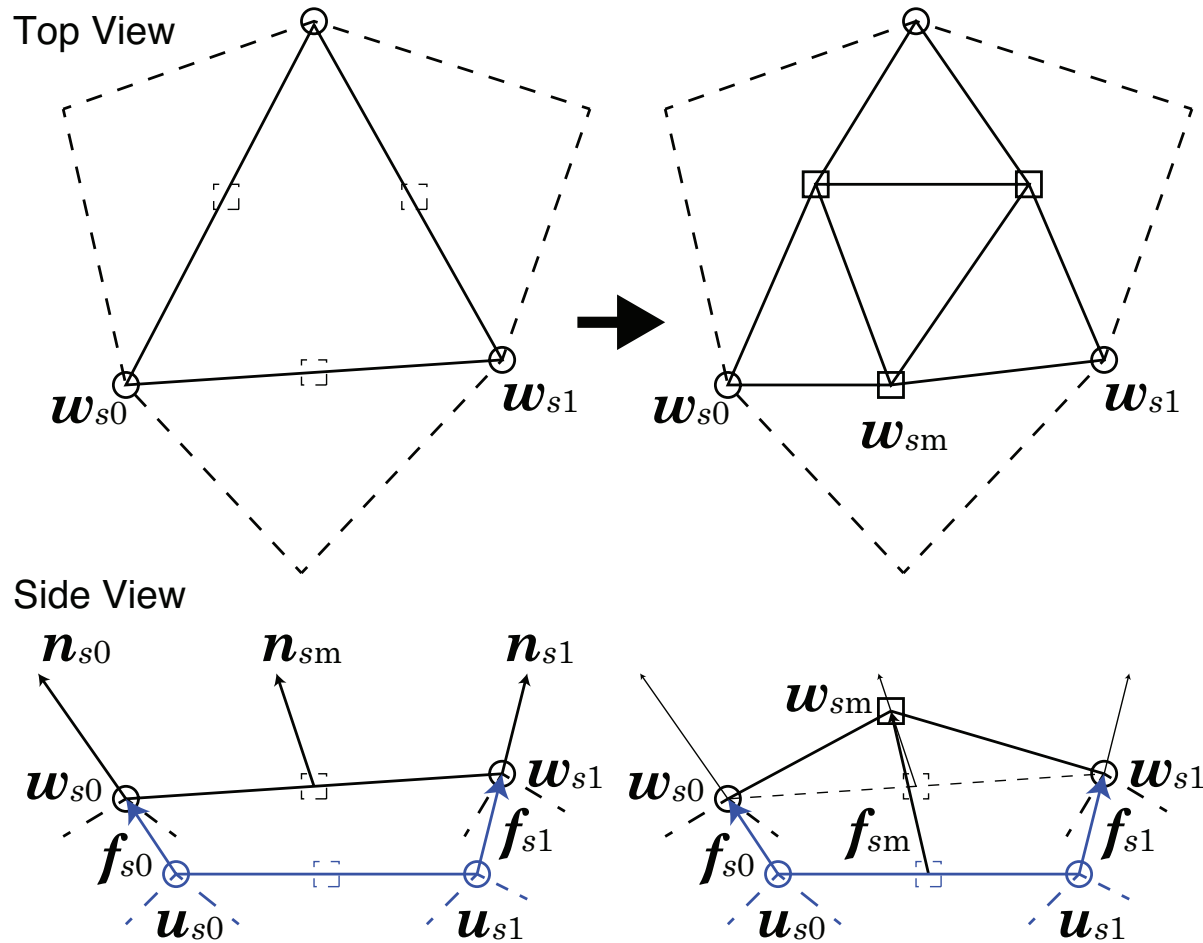
- フラクタルを用いた詳細化
  - 中点変位法



# 詳細化の観点

- フラクタルを用いた詳細化

- $u_{si}$ : ベースモデルの頂点.  $n_{si}$ : ベースモデルの法線



# 詳細化の観点

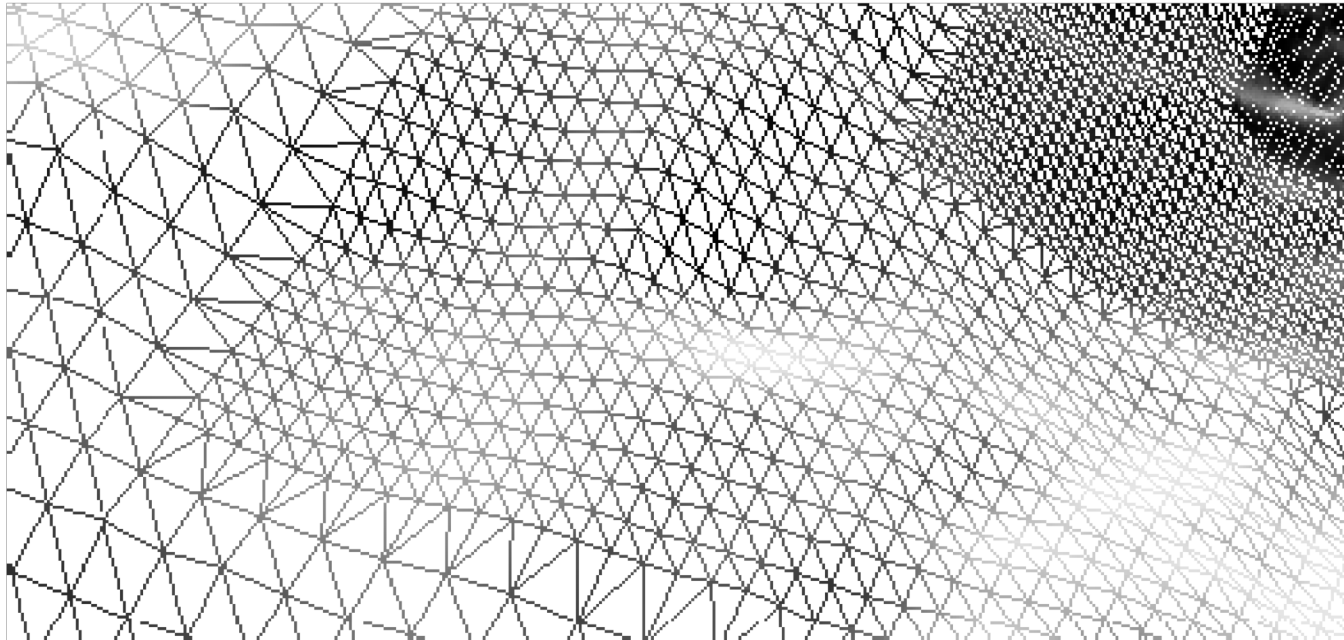
- フラクタルを用いた詳細化
  - 中点変位法
  - 原則として均質なポリゴン構成とする
    - 不規則なポリゴン形状を細分化すると、元の形状が見え隠れする
- タッチダウン地点等、特に詳細化したい領域を指定
  - 詳細化の境界は、任意の形状を想定
  - 指定された領域のみ、詳細化を継続

# 局所的詳細化

- 事例
  - PANGU
  - チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星
- 本研究の手法

# 詳細化事例

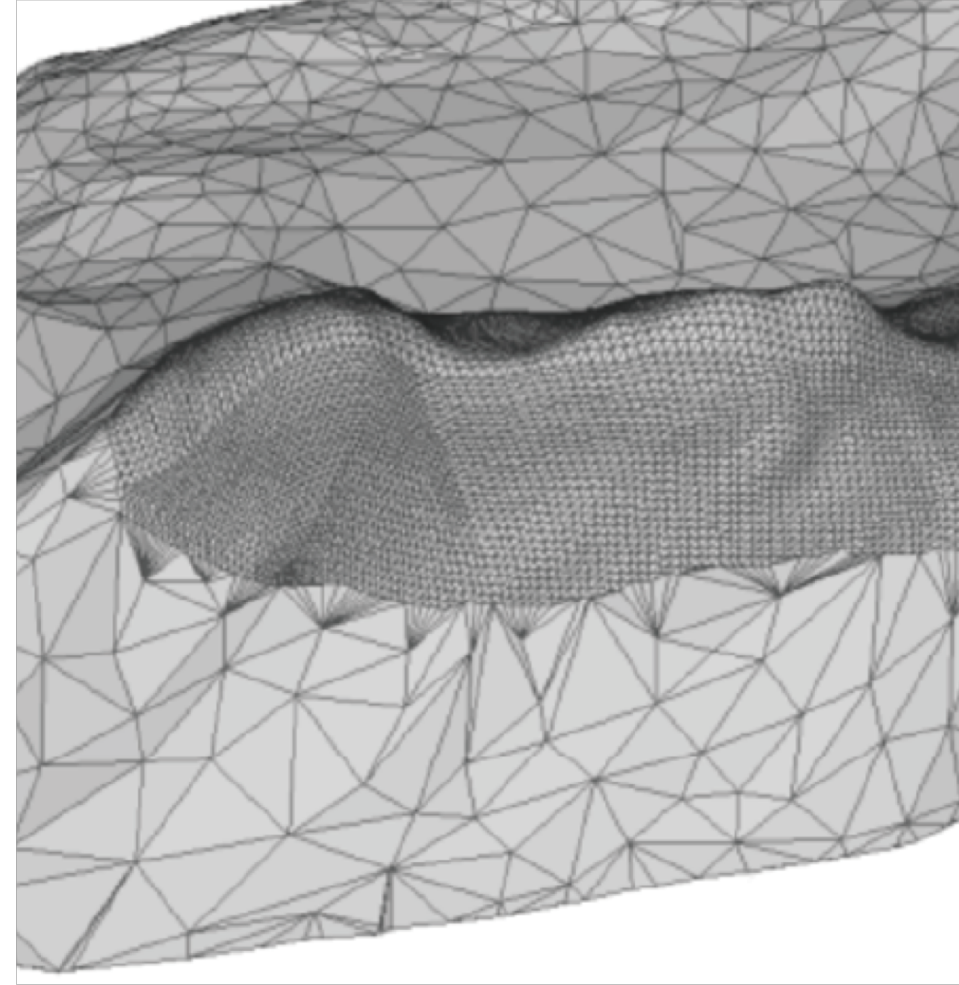
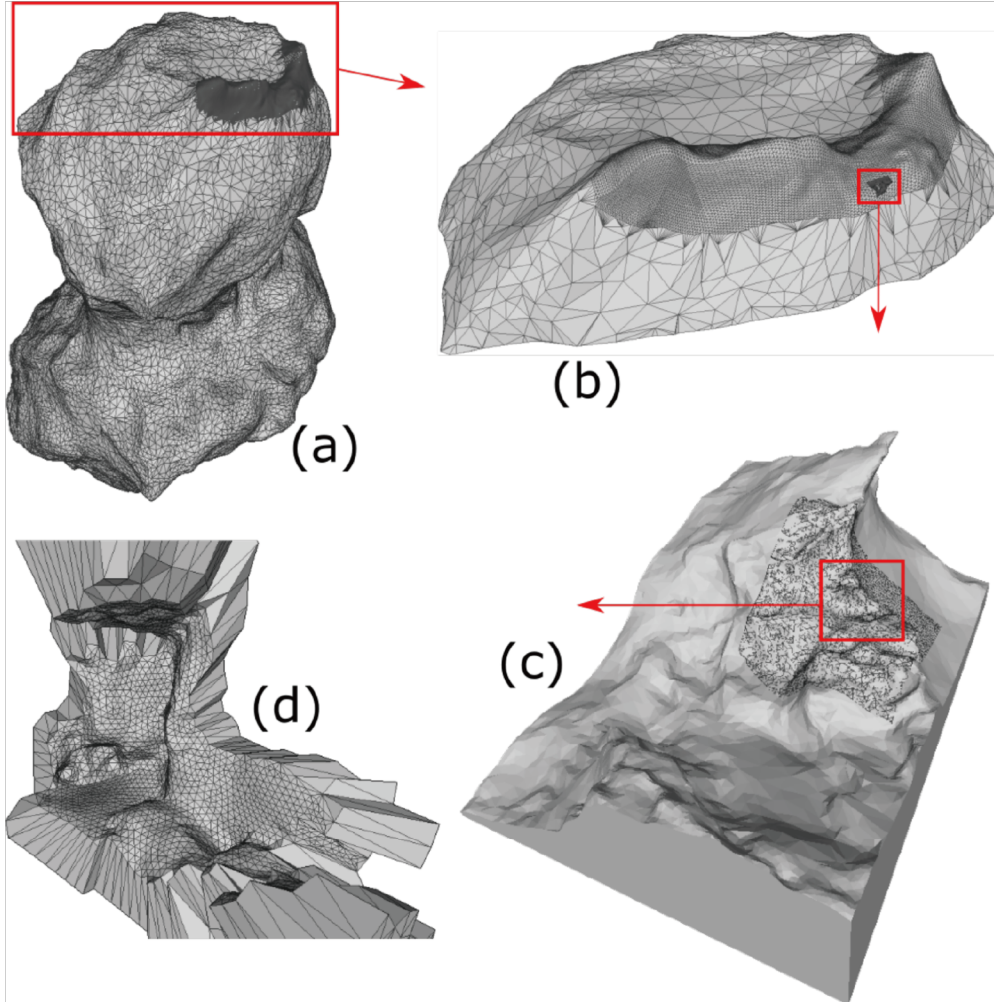
- PANGUを用いた事例
  - 四角形のタイルをベースとした細分化



Olivier Dubois-Matra, TESTING AND VALIDATION OF PLANETARY VISION BASED NAVIGATION SYSTEMS WITH PANGU, LSSFD, 2009.

# 詳細化事例

## ・ チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の例

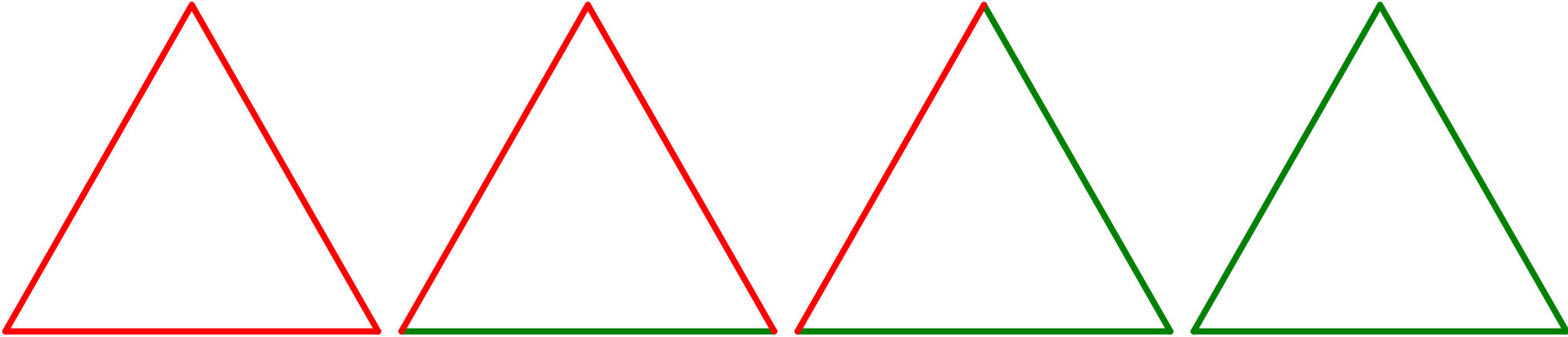


Norbert I. Kömle et al., Three-dimensional illumination and thermal model of the Abydos region on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, MNRAS 469, S2-S19 (2017)

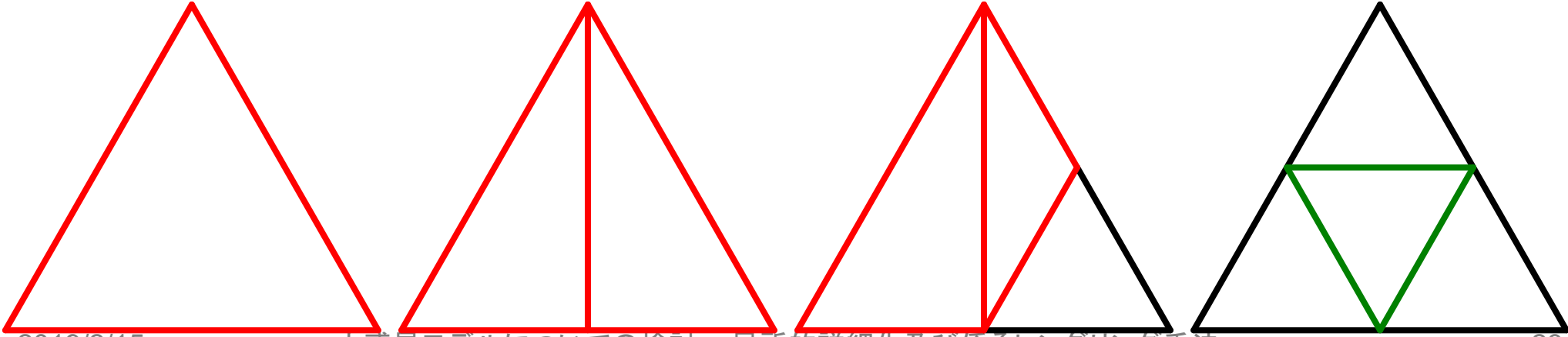
# 本研究の手法

— 詳細化可  
— 詳細化不可

詳細化前



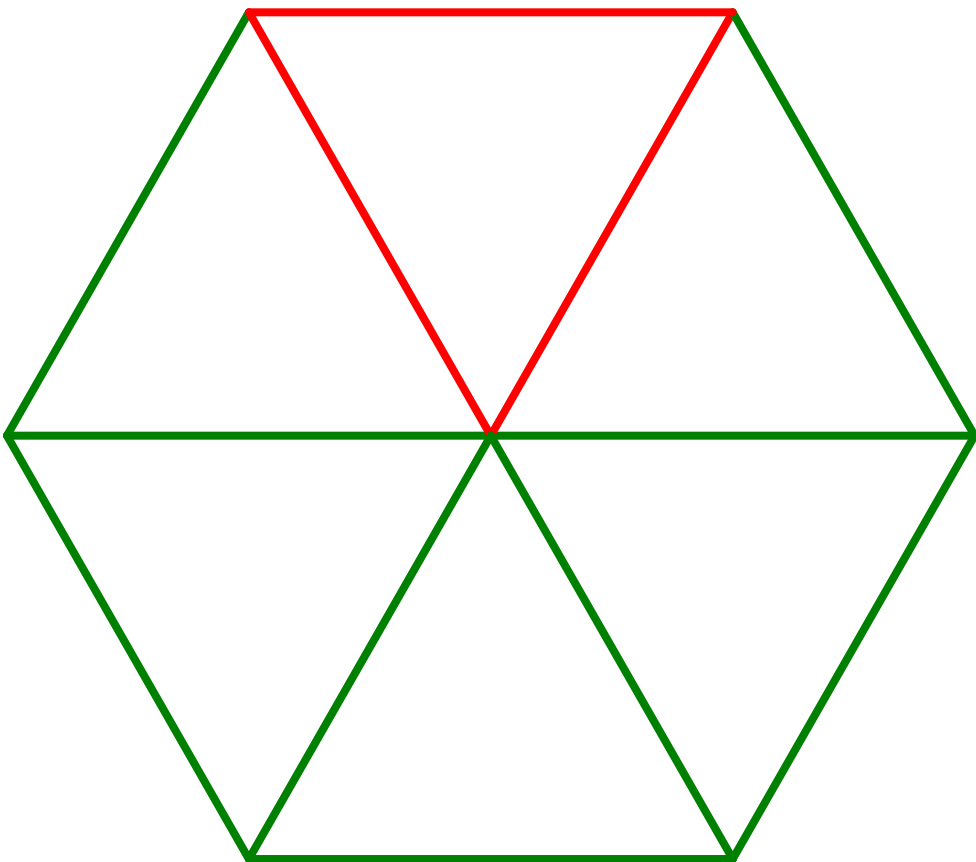
詳細化後



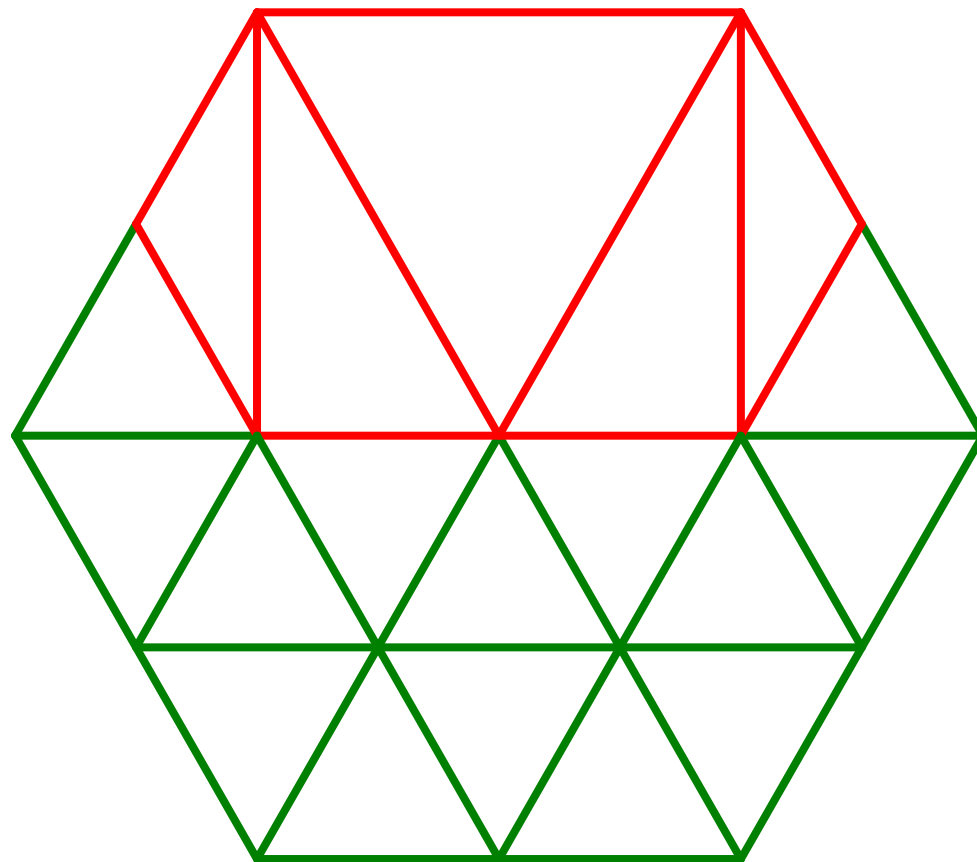
# 本研究の手法

- 詳細化可
- 詳細化不可

## 詳細化前



## 詳細化後

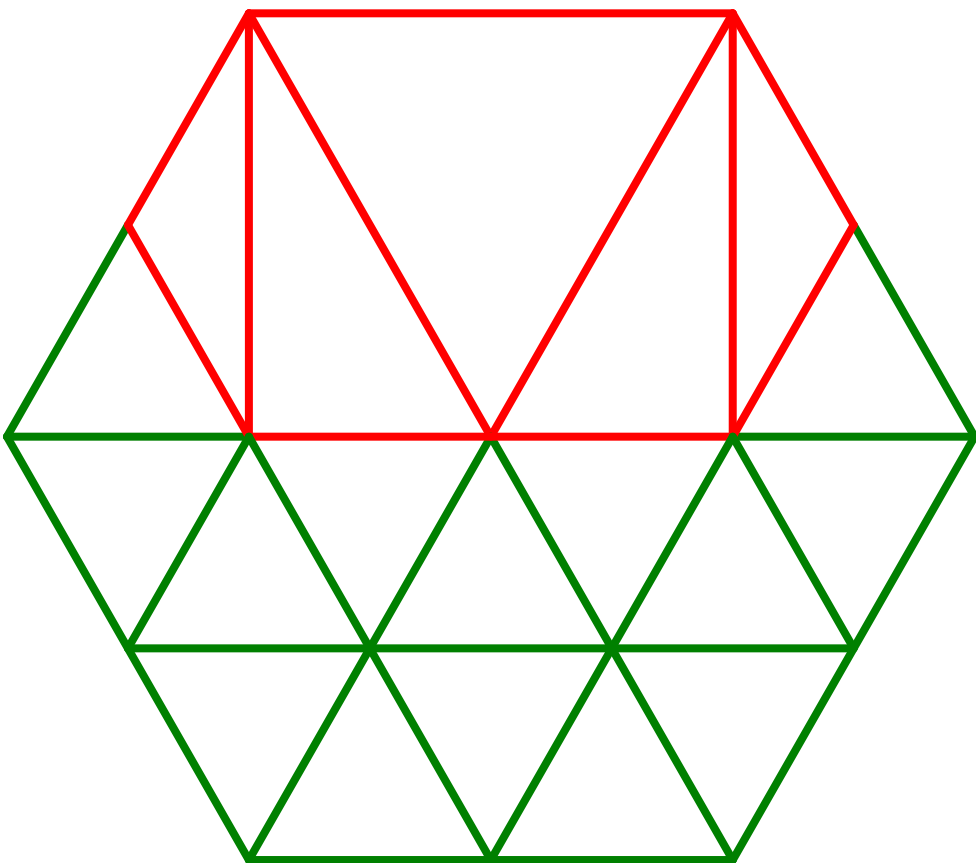




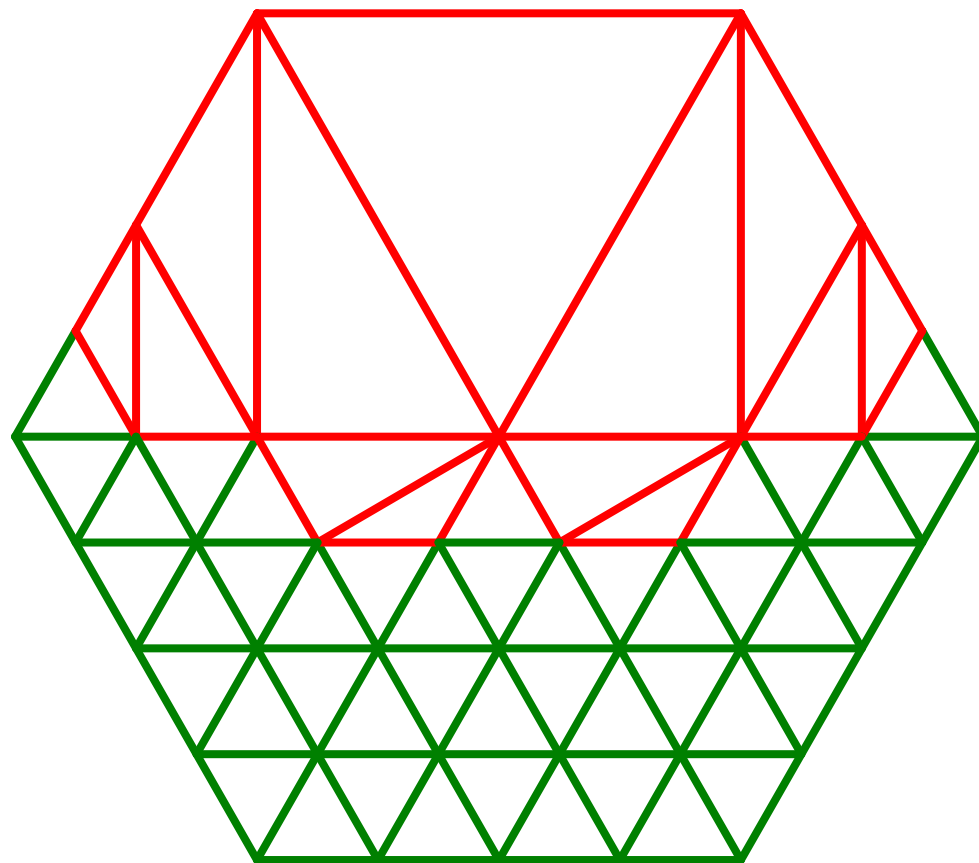
# 本研究の手法

- 詳細化可
- 詳細化不可

## 詳細化前



## 詳細化後

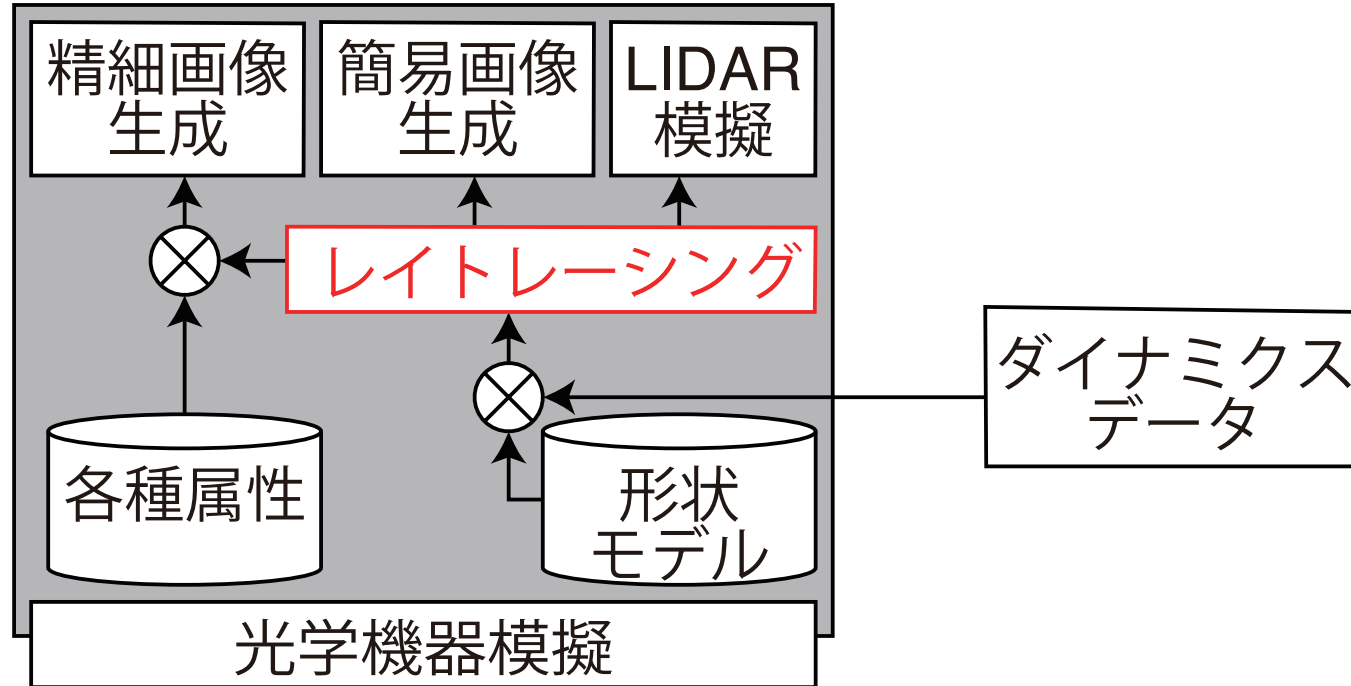


# レンダリング

- 画像生成用エンジン
- 地質等の属性, 計算アルゴリズム
- 光源属性の追加
- レンダリング時の詳細化

# 画像生成用エンジン

- リユウゴイドの画像生成装置用エンジンに機能付加



リユウゴイド画像生成の光学機器模擬部分(概略)

三浦昭, 武井悠人, 山口智宏, 高橋忠輝, 佐伯孝尚, 「はやぶさ2」ハードウェアシミュレータに係るレイトレーシングソフトウェアの開発と評価, 宇宙科学情報解析論文誌第8号, 2019

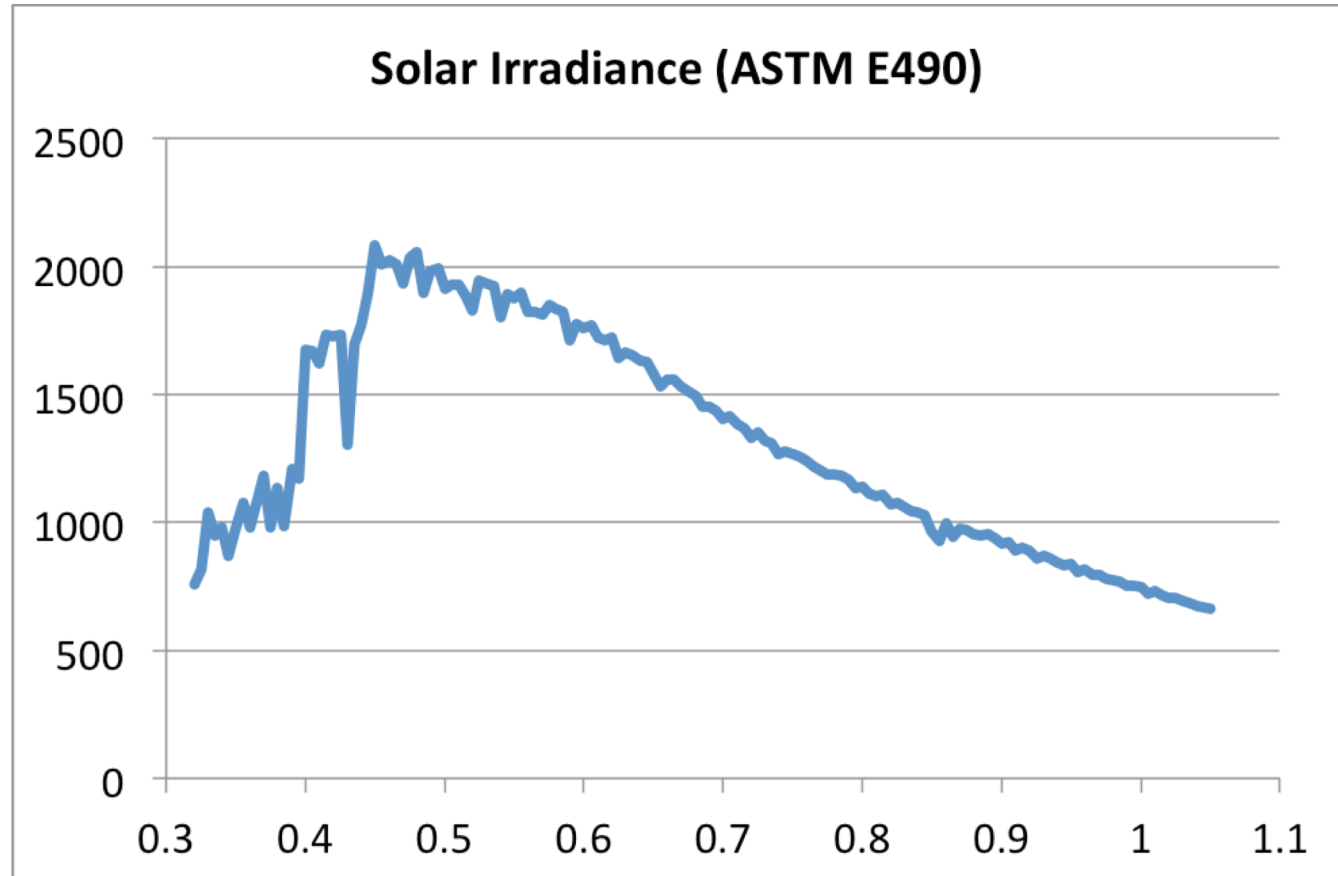
# 地質等の属性

- リュウグウの観測に基づいた地質属性パラメータ整備
- 撮像値演算アルゴリズム追加(進行中)
  - LSLモデル
  - Phong shading
- ターゲットマーカ(再帰性反射シート)の模擬

Y. Yokota et al., “Photometric Correction of Ryugu Multiband Visible Image Data”, DPS meeting #50, id.411.11, 2018.

# 光源

- 一般的なCGソフトとの相違点
  - スペクトル分布を考慮
    - 手法はリュウゴイド模擬を踏襲
- 太陽光
  - スペクトル分布
  - 点光源



ASTM E490: Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables

# 光源

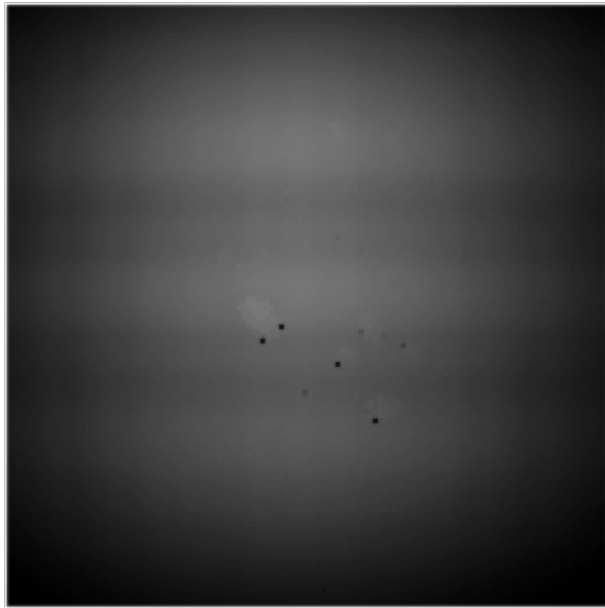
- 一般的なCGソフトとの相違点
  - スペクトル分布を考慮
    - 手法はリュウゴイド模擬を踏襲
- 太陽光
  - スペクトル分布
  - 点光源
- フラッシュランプ(新規)
  - スペクトル分布
  - 配光特性

# 光源

- 配光特性模擬機能(新規)

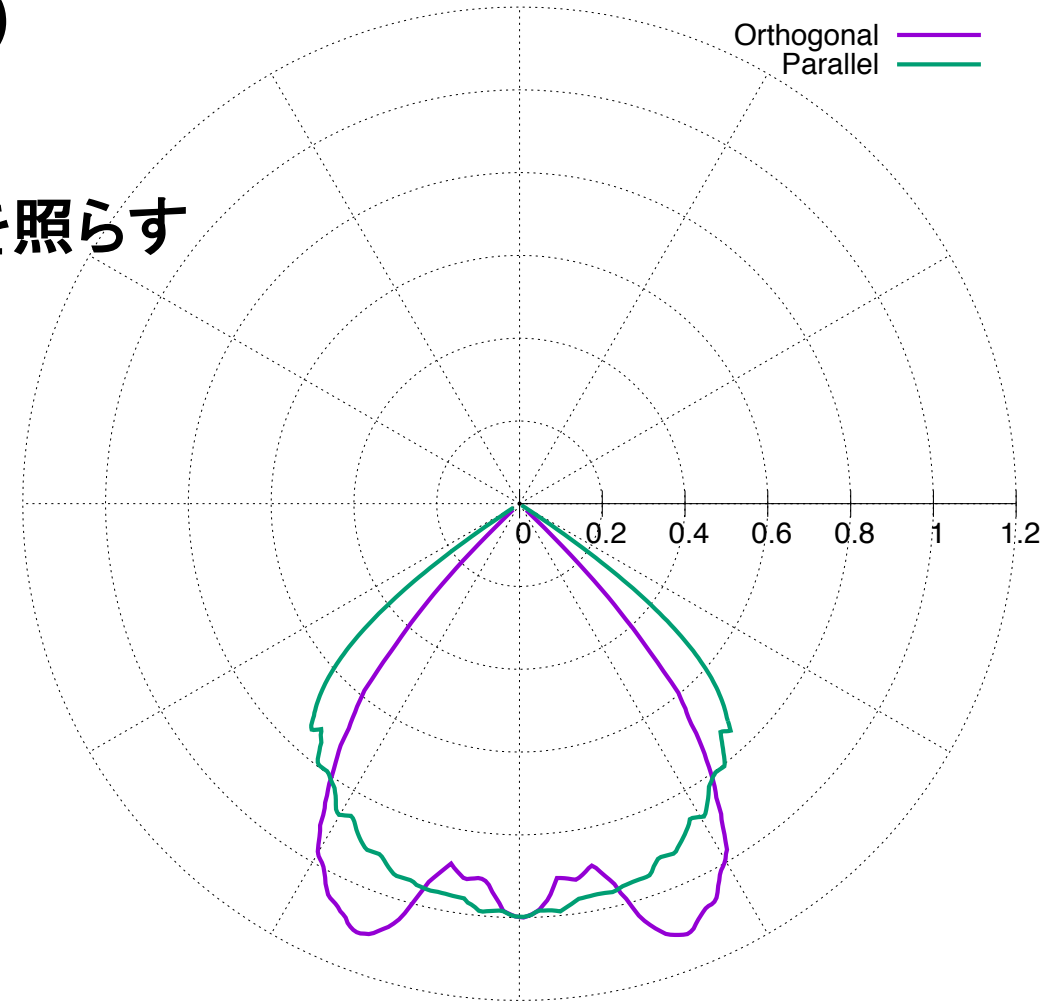
- フラッシュランプ

- 概ねONC-W1の撮像範囲を照らす



撮像模擬例(フラッシュランプのみ)

A. Miura et al., DPS meeting #50,  
id.411.10, 2018.



配光特性

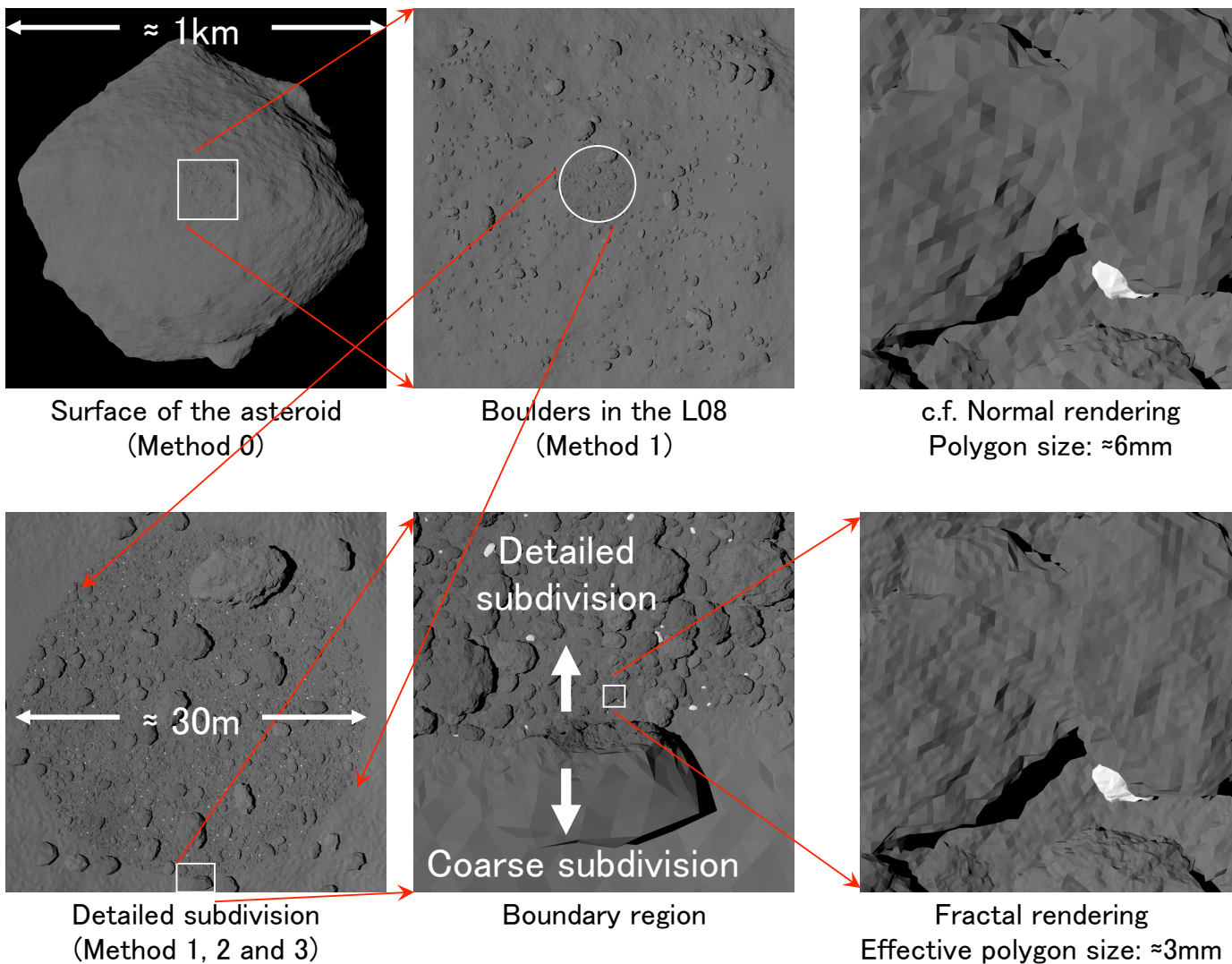
『はやぶさ2 飛行計画書』から推定

# レンダリング時の詳細化

- モデリングによる詳細化の限界を補う
  - レンダリング時のフラクタル演算
    - エッジや影 (shadow) の計算は形状モデルに従う
    - 陰 (shading) の計算は中点変位法を適用

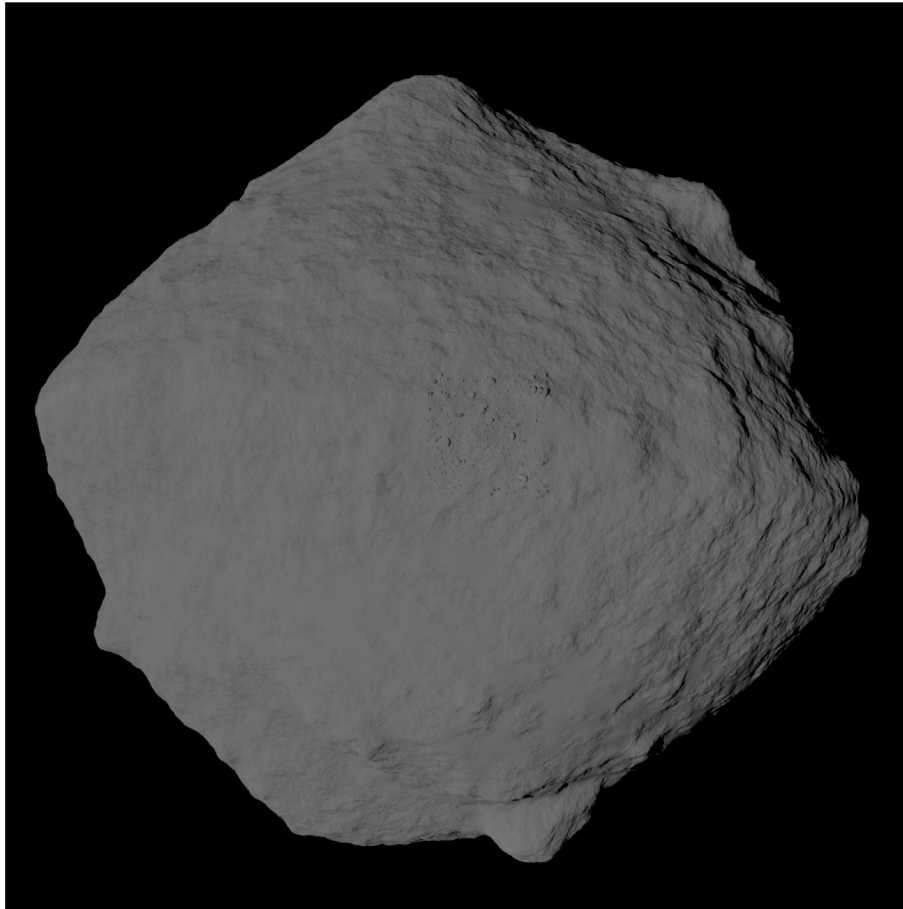


# 局所的細分化 レンダリング例

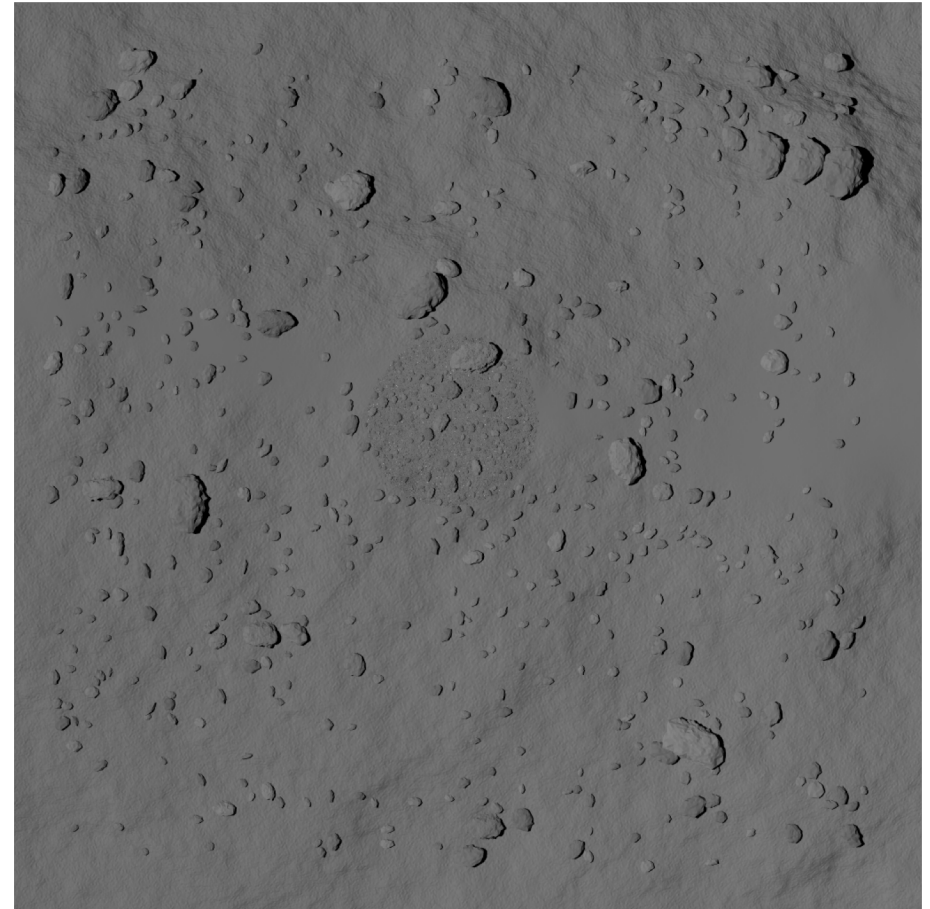


A. Miura et al., "Simulation of proximity imaging of Ryugu's surface during Hayabusa2 touch-down sequence", DPS meeting #50, id.411.10, 2018.

# 局所的細分化 レンダリング例



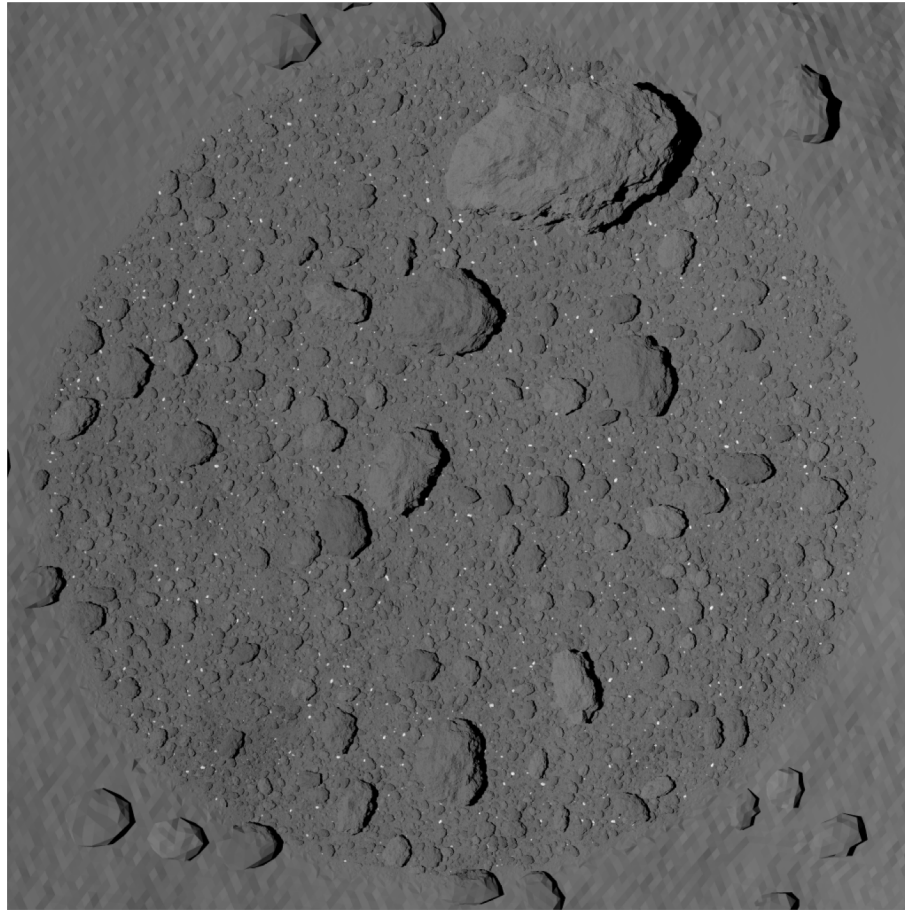
全景



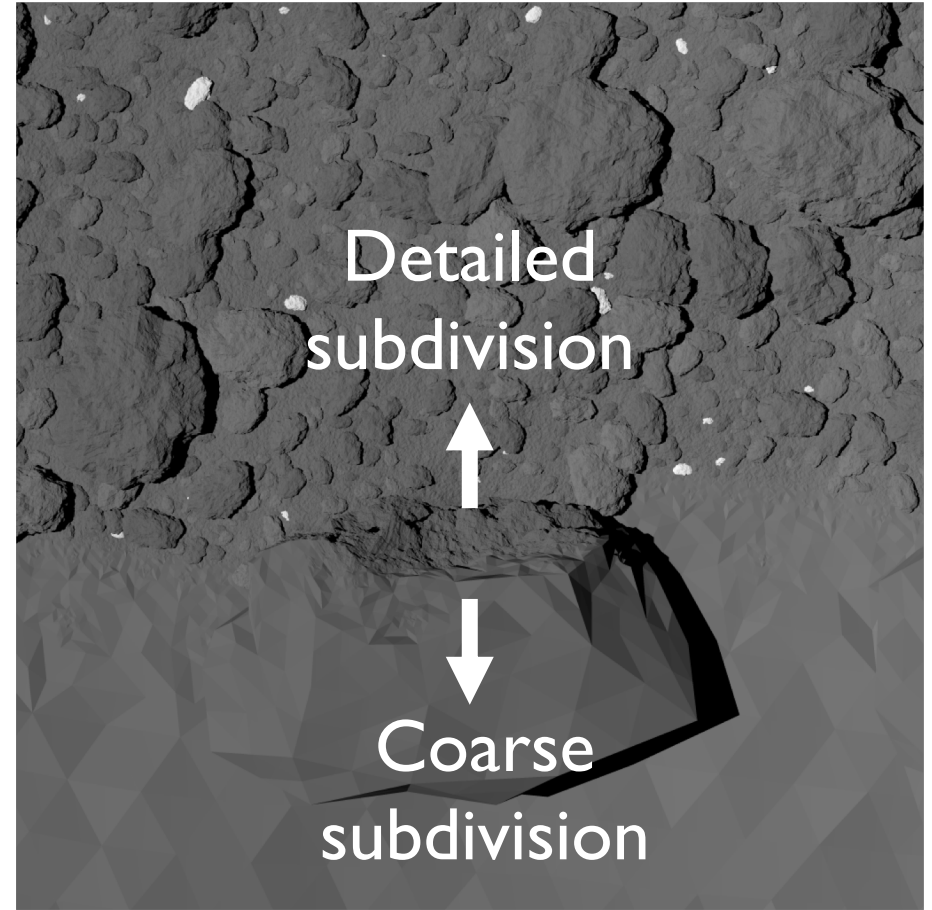
大型の岩石分布

A. Miura et al., “Simulation of proximity imaging of Ryugu’s surface during Hayabusa2 touch-down sequence”, DPS meeting #50, id.411.10, 2018.

# 局所的細分化 レンダリング例



中型の岩石分布



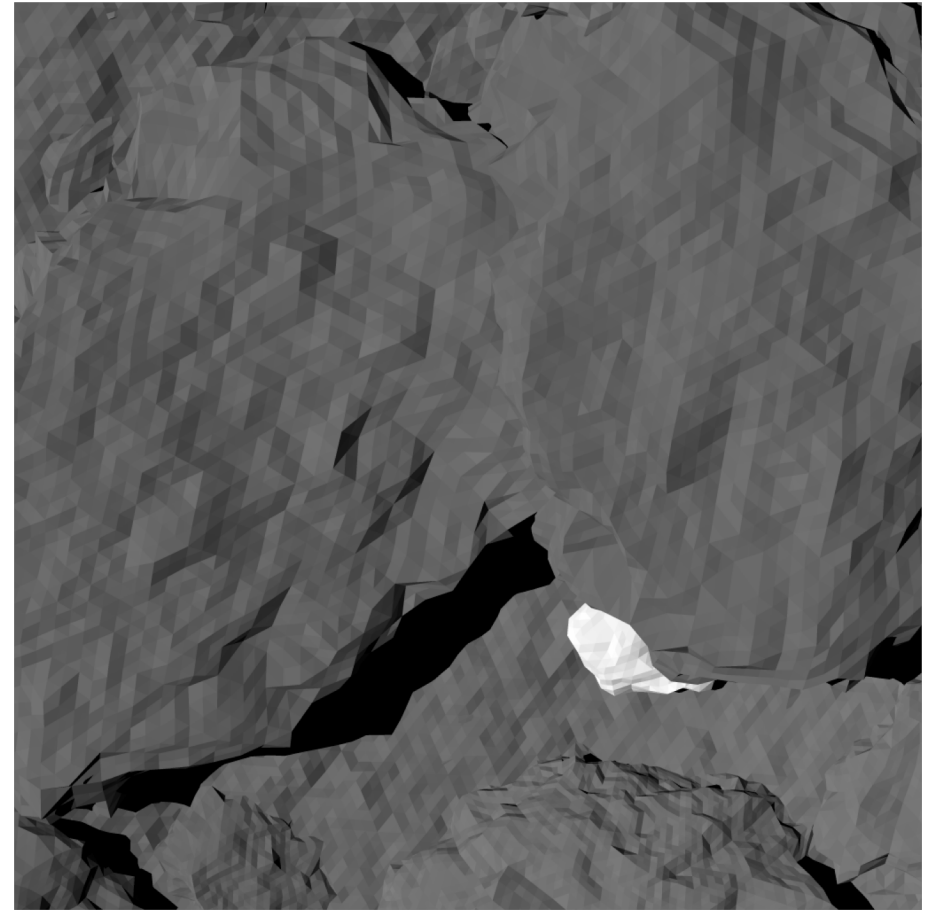
境界領域

A. Miura et al., “Simulation of proximity imaging of Ryugu’s surface during Hayabusa2 touch-down sequence”, DPS meeting #50, id.411.10, 2018.

# 局所的細分化 レンダリング例



通常 of レンダリング

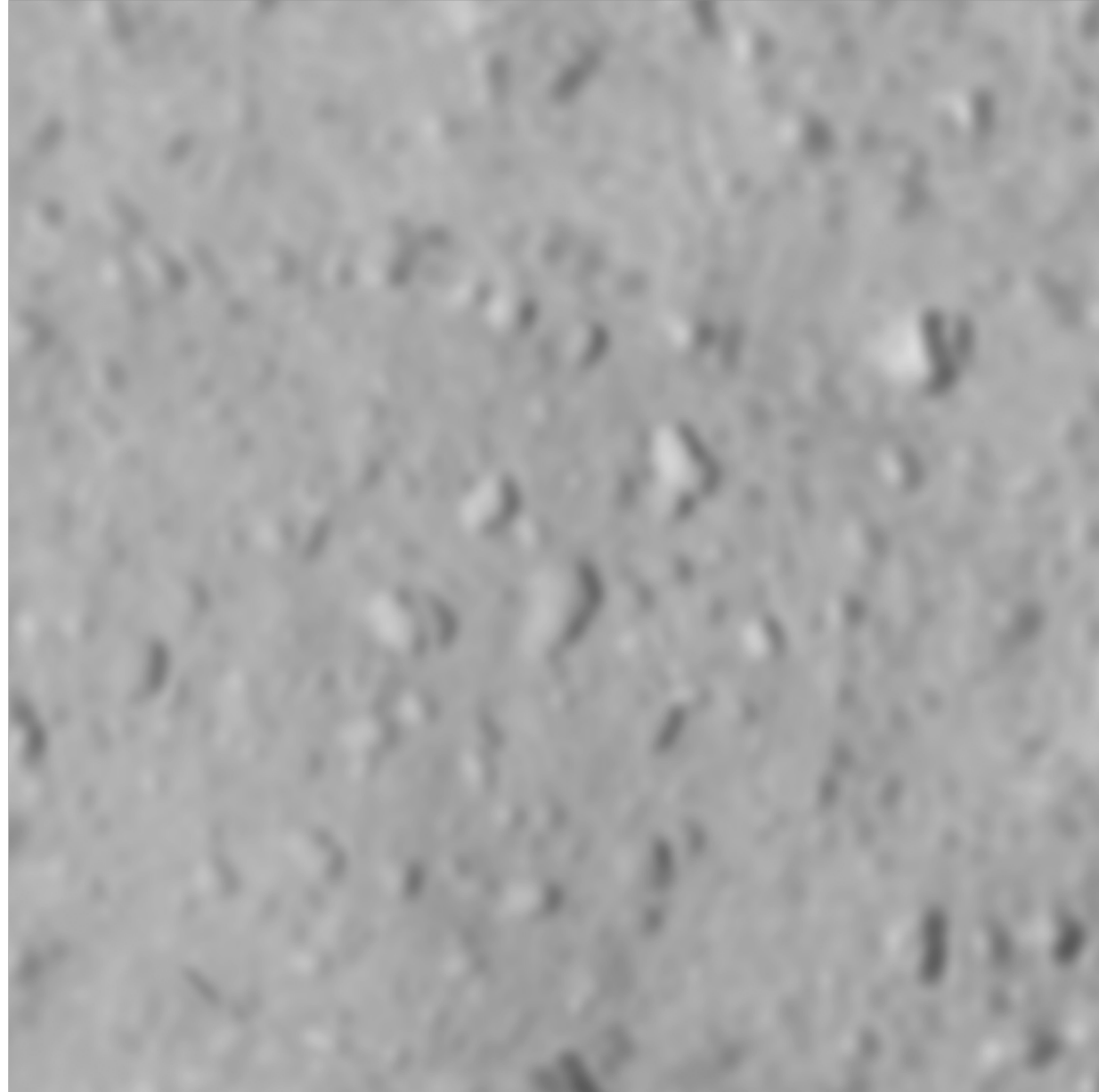


フラクタル付のレンダリング

A. Miura et al., “Simulation of proximity imaging of Ryugu’s surface during Hayabusa2 touch-down sequence”, DPS meeting #50, id.411.10, 2018.

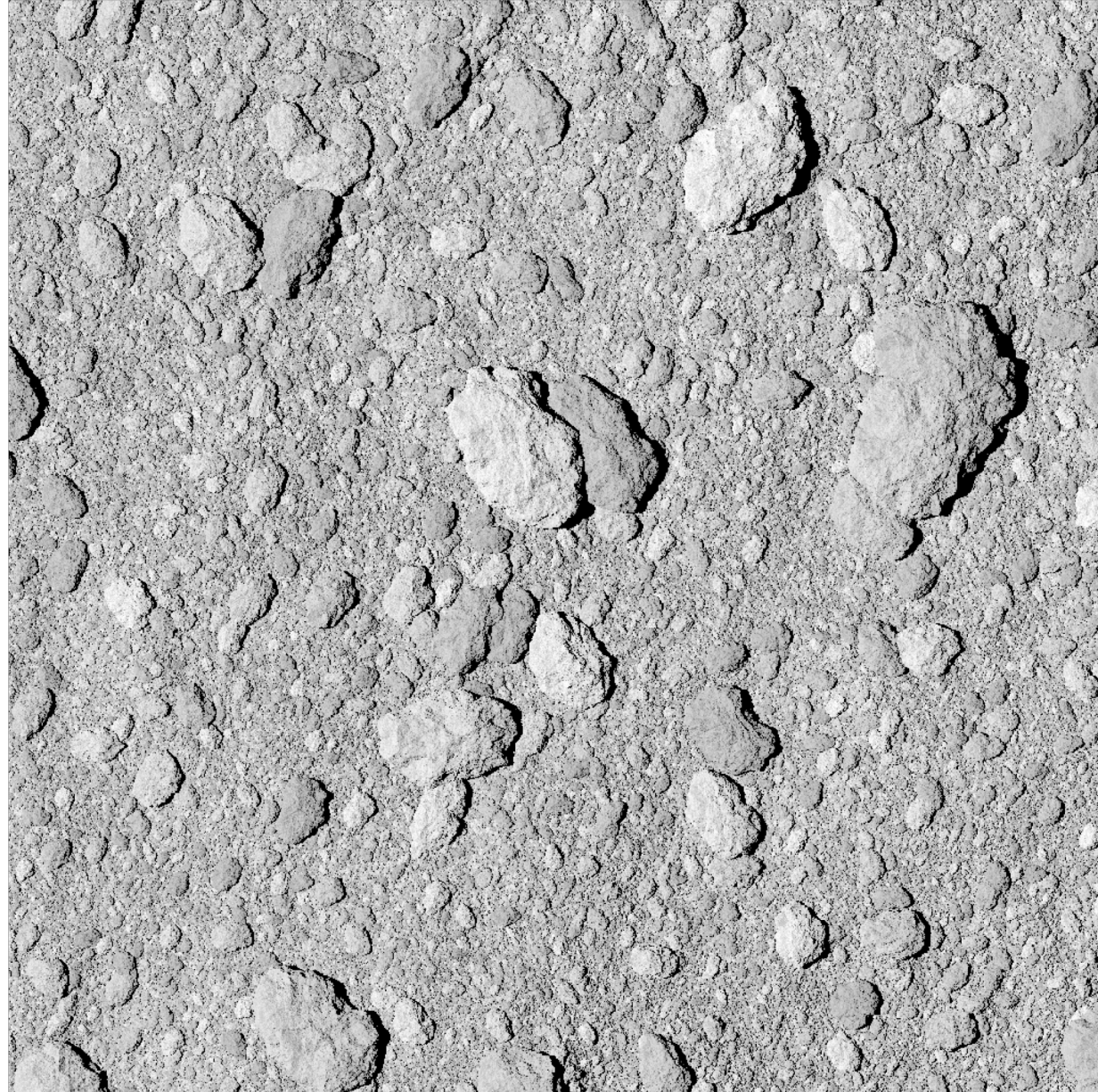
# リアリティ

- レンダリング例
- 実データと本研究のCGとの合成例
  - 2018年8月のデータ
  - 面積比は半々程度
  - 実データ風のぼかし



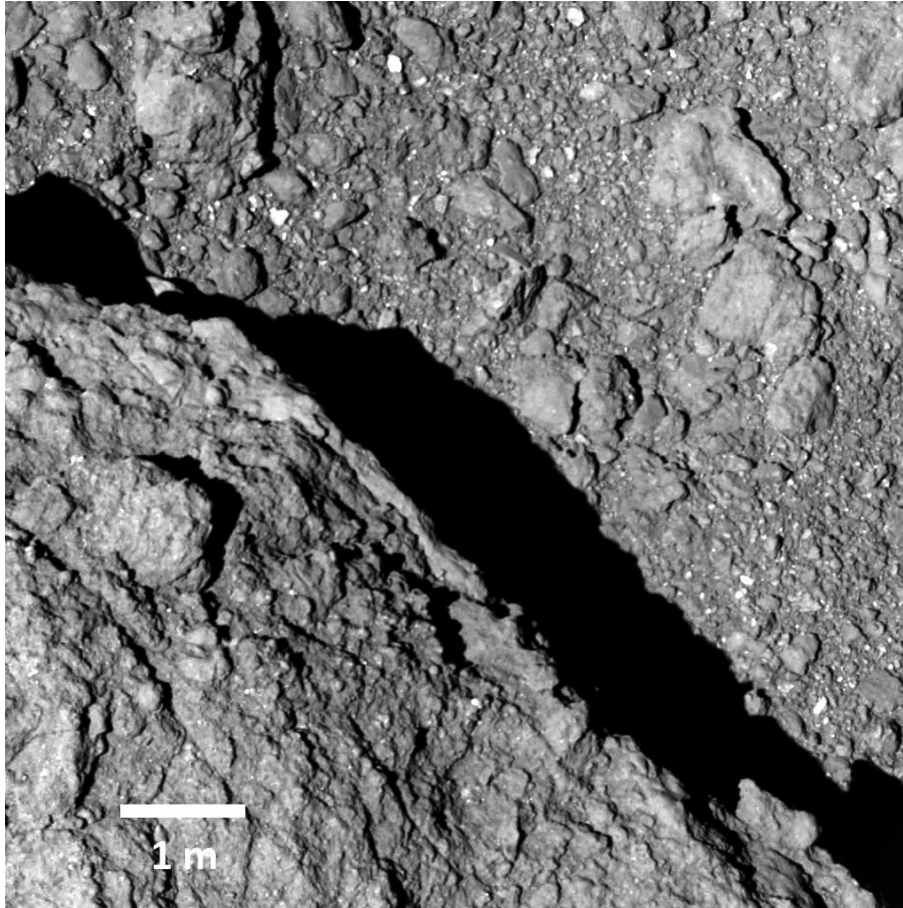
# リアリティ

- ぼかしの無い画像  
- (拡大)

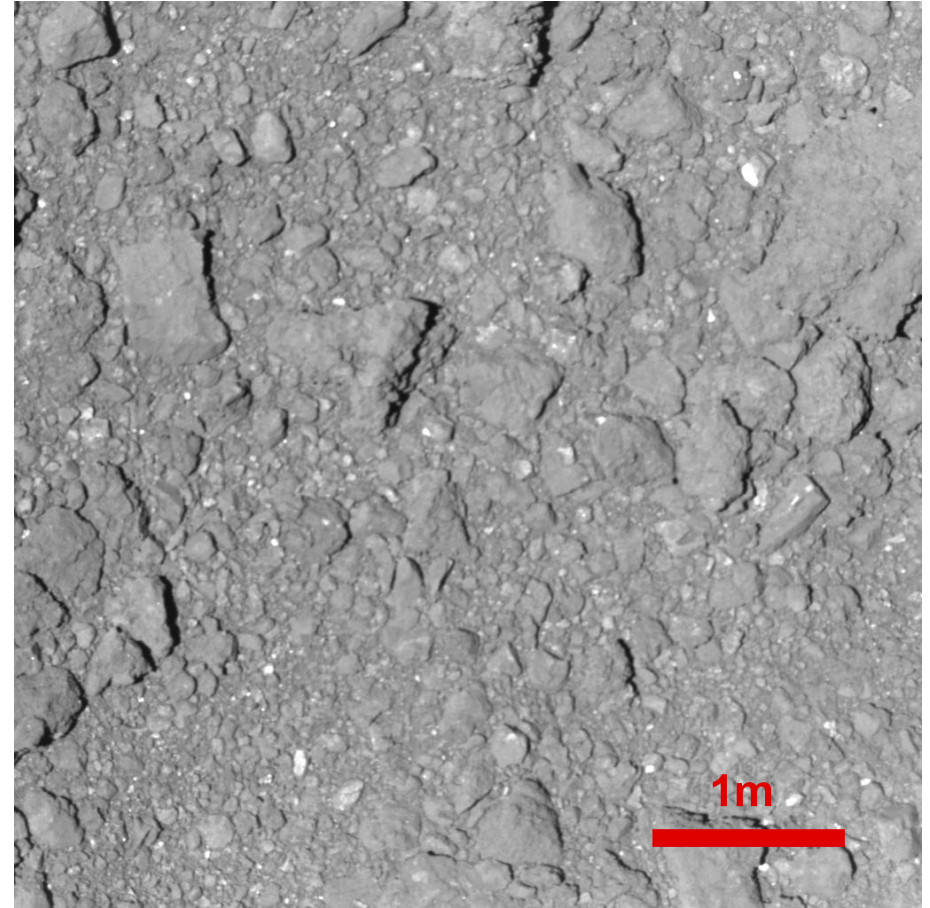


# リアリティ

- 実画像の例
  - リアリティをどう評価するか？



[http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180927\\_HighestRes/](http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180927_HighestRes/)



[http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20181026\\_TD1R1A\\_ONCT/](http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20181026_TD1R1A_ONCT/)

# 現状と今後の展開

- **バリエーション**
  - **SCI(インパクト)分離時の模擬画像生成に応用**
    - フラッシュ撮影
    - 再帰性反射素材
- **現状(進行中)**
  - **1回目のタッチダウンに向けて, 模擬画像を生成**
- **課題**
  - **手法の評価**
    - **訓練や評価に耐えうるリアリティとは.....**