

A decorative graphic consisting of six circles. The top row has three circles: an empty light purple outline on the left, and two solid light purple circles on the right. The bottom row has three circles: a solid light purple circle on the left, a solid light purple circle in the middle, and an empty light purple outline on the right. The text is centered over the bottom row.

# AMICAデータ解析

N. Hirata

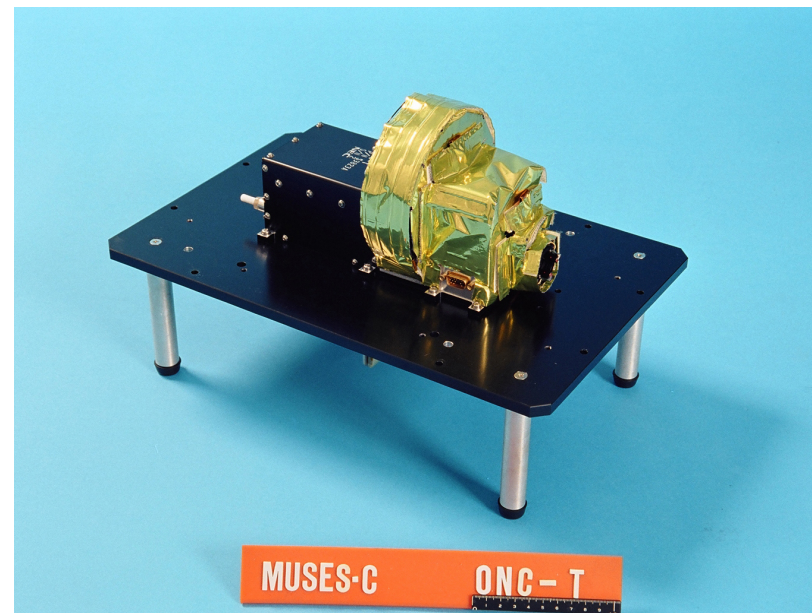
# Contents

- AMICA紹介
- 探査機画像データの処理
  - 輝度較正
    - 輝度変換, 反射率変換
    - MTF, PSFと deconvolution
  - 幾何補正
    - 幾何情報
    - 地図投影
    - 不規則形状天体画像の場合の処理

- 解析
  - スペクトル抽出
  - 比演算
  - 地形計測
- 実習
  - 幾何条件を考慮した地形 (boulder) の計測
    - 幾何条件の算出
    - ds9を用いた計測
    - 幾何情報を用いた計測値の較正

# AMICA

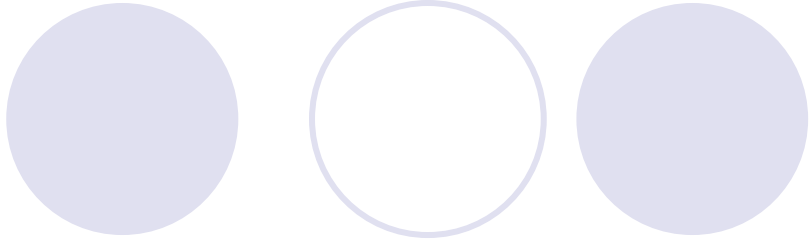
- はやぶさ搭載カメラ
  - 光学航法用カメラ (ONC-T) の別名
  - 可視-近赤外域の分光画像 (分光フィルタ)
  - 偏光フィルタ (使用せず)
- 機器スペック
  - Nakamura et al. (2001)
- 1<sup>st</sup> scientific result
  - Saito et al. (2006)



# SPEC



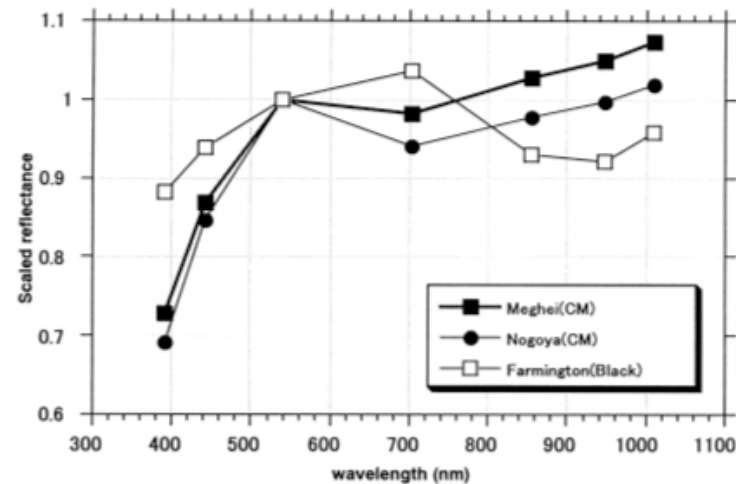
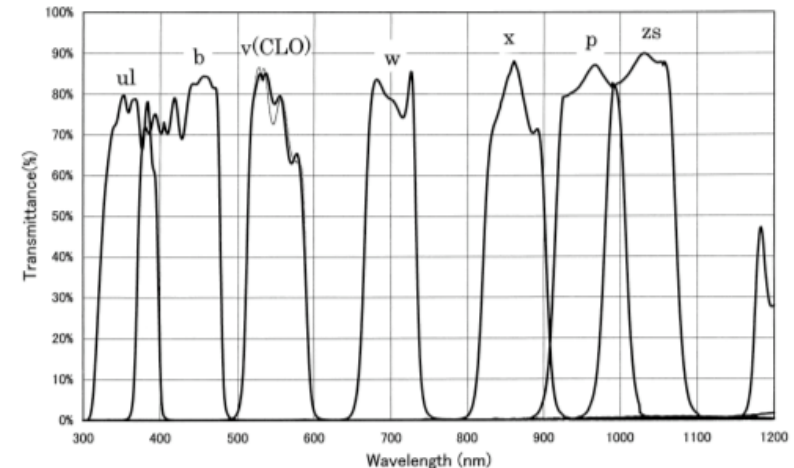
- FOV (field of view)
  - 5.7 x 5.7 deg
- 焦点距離
  - 仕様値: 120 mm
  - 実測値: 120.8 mm
    - 恒星観測による測定値, amica31.ti参照
- 検出器
  - 1024 x 1024 pixel (使用領域: 1024 x 1000)
  - pixel size: 12 x 12  $\mu\text{m}$
- IFOV (Instantaneous FOV)
  - ~20 arcsec

- 
- 分解能
    - 1 m/pixel@10 km
    - 50 mm/pixel@500 m
  - ビット分解能: 12 bit
  - 機上データ処理
    - スミア (smear) 補正
    - JPEG非可逆圧縮
      - 8 bit化
      - 主にv-bandデータ
    - 可逆圧縮
      - 主にマルチバンドデータ
      - ビニングとセット
    - ビニング (binning) 処理
      - 2x2, 4x4...



# AMICAのフィルタ体系

- ECAS system (小惑星の地上観測で使用) に近い波長を選択
- 300-1100 nmに7波長



Nakamura et al. (2001)

# AMICAのターゲットと成果

## 地形系

- 全体形状
  - Demura et al. (2006)
  - Gaskell et al. (2006)
- 表面詳細地形, 地質
  - Miyamoto et al. (2007)
- Boulder形状, サイズ分布
  - Nakamura et al. (2008)
  - Michikami et al. (2008)
- クレーター
  - Hirata et al. (2009)

## 分光, 測光系

- 多色分光, 宇宙風化
  - Ishiguro et al. (2007)
- 衛星探索
  - Fuse et al. (2008)

# リモートセンシングでの画像処理

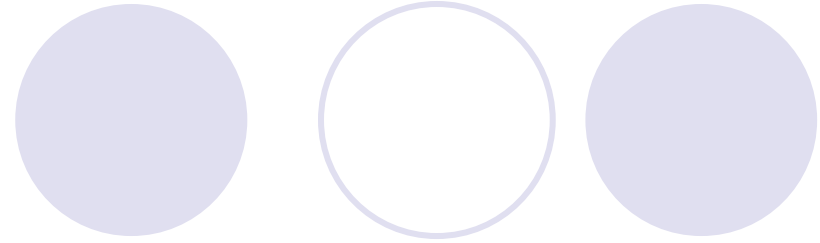
- 普通のデジカメ画像とリモートセンシング画像データとの違い
  - 何を， どうやって記録しているのか？
  - 何を：観測量は何か？
  - どうやって：記録時の諸条件はどうだったか？
  - これらの情報がないと解析（データから具体的な情報を読み取ること）ができない
  - 校正と補正が必要

# 輝度校正

## Radiometric Calibration

- 校正 (calibration)
  - 測定データの見盛り付け
    - 観測量を物理量 (単位を持った値) に変換すること
  - 観測量
    - 画像データの画素値 (DN: Digital Number)
    - 生のセンサ出力 (電圧値など) をA/D変換したもの
  - 物理量
    - 解析に必要な数値
    - 輝度 (どれくらいの光がセンサに入ったか)
    - (一定条件下での) 反射率

# 放射量と輝度



- 放射エネルギー

- 単位: J

- 放射フラックス

- 単位: W ( $J \cdot \text{sec}^{-1}$ )

- 放射輝度

- 単位:  $W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1}$

- 分光放射輝度

- 単位:  $W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$  ( $W \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{str}^{-1}$ )

# 反射率

- 入射光強度と反射光強度の比

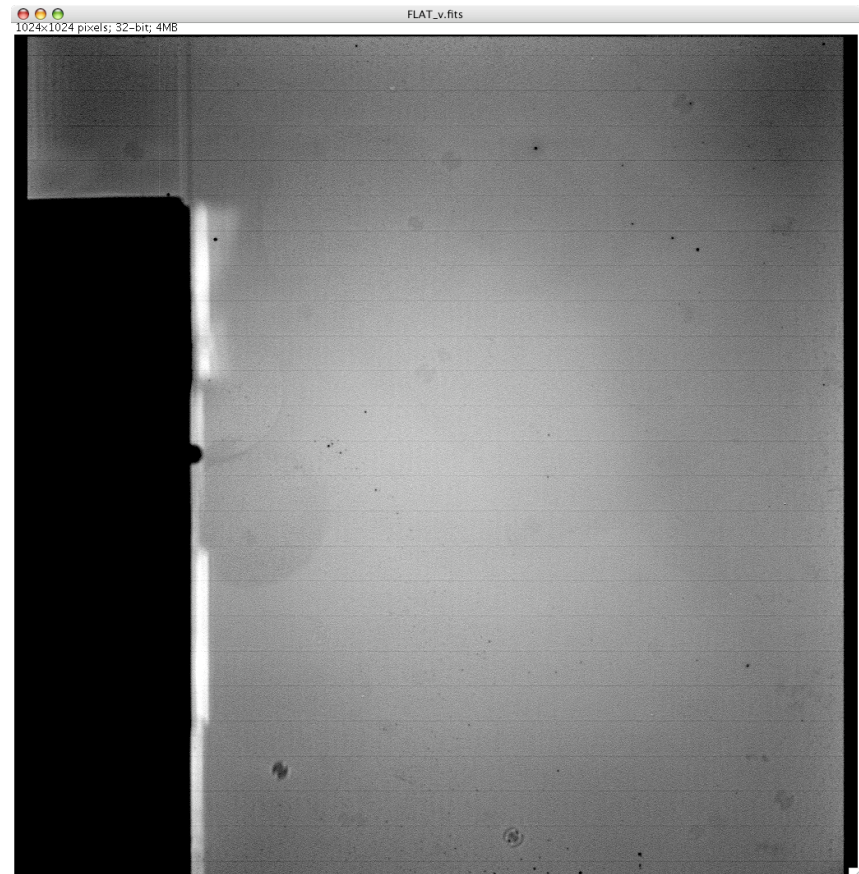
- 様々な反射率：「反射光強度」の定義や基準による
- 入射光強度（太陽フラックス）の測定も難しい
- 双方向反射率（bidirectional reflectance）
  - リモートセンシングでよく使われる
  - 入射光，反射光の方向（入射角  $i$ ，出射角  $e$ ）と位相角  $\alpha/g$  の定義が必要
  - よく使われる標準条件は，  
 $\{i, e, g\} = \{30^\circ, 0^\circ, 30^\circ\}$

# 輝度較正の手順

- DNのオフセット除去をのぞけば，基本的には乗算による
  - 暗時補正（ダークフィールド補正，オフセット除去）
  - $\text{DN} \rightarrow \text{電圧} \rightarrow \text{電荷量} \rightarrow \text{光子数}$
  - 蓄積時間<sup>-1</sup>，画素の視野（画素サイズ，F値）
- 画素単位での演算
  - 画素間の感度偏差，周辺減光もここで補正
  - フラットフィールド補正

# AMICAの フラットフィールドデータ

- 二次元検出器の画素間感度偏差
- 検出器, 光学系のゴミ
- 均質な光源を撮像して取得
  - 積分球
  - 空
  - 望遠鏡ドームの内側
  - 多数の画像のスタック





# フラットフィールド処理

- AMICAのフラットフィールドデータ
  - データアーカイブで提供
  - FITS形式のデータ
  - 相対感度マップ
- 元データをフラットフィールドで割る
  - 画像間演算
  - 今回使うds9では残念ながら処理できない
  - ImageJなどでは可能（持っている人はやってみてください）

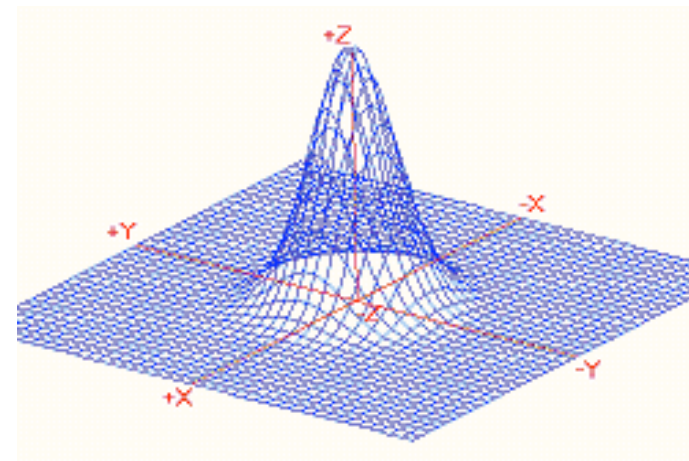
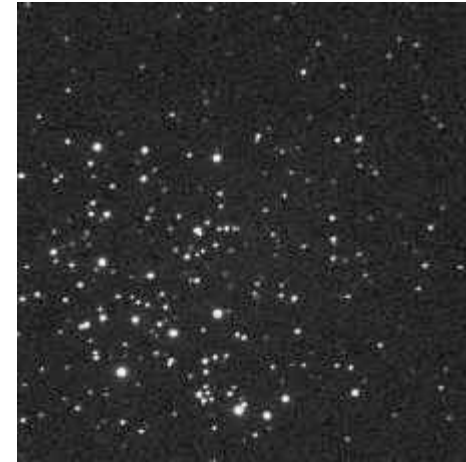
# MTFとPSF



- 完璧な光学系は存在しない
- 点光源の恒星も画像上では大きさを持つ
- 光学系による光源のにじみの量
  - MTF: modulation transfer function
    - 波, 縞を入力としたにじみ量 (信号の空間周波数の定義が必要)
  - PSF: point spread function
    - 点光源を入力としたにじみ量

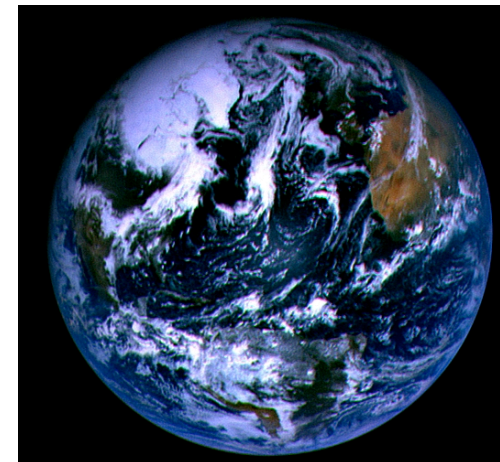
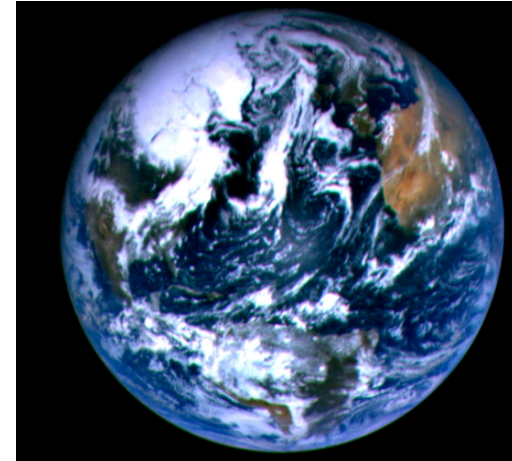
# PSF

- PSFをガウス分布でモデル化
- 半値幅 (FWMH: full width at half maximum) でPSF量を表現
- 点光源であれば, 全体を積分すれば輝度は測定できる
- 面光源は？



# 面光源対象のdeconvolution

- シャープフィルタ
  - 輝度情報が失われる
  - アーティファクトの発生
  - シャープフィルタに限らず、危険性を心得た上で使用すること
- PSFのモデル化によるdeconvolution
  - 各画素には、隣接する画素に入るべき光の漏れ込み（PSFによる拡散）が寄与
  - 漏れ込み量を逆算し、取り除く
  - 一応素性が明らかな処理



Ishiguro et al. (2007)

# 幾何補正 Geometric Correction

- 撮像時の幾何条件による対象の歪みを補正する
  - 幾何条件の算出 (georeferencing)
  - 実際の幾何補正 (geocoding)
- 関係する要素
  - カメラとその光学系
    - カメラの各画素の視線ベクトル (カメラ座標系)
  - プラットフォーム (探査機)
    - カメラの取り付け方向 (探査機の構体座標系)
    - 探査機の位置, 姿勢 (慣性座標系など, 外部の座標系)
  - 撮影対象物
    - 対象物の形状, 運動, 位置 (慣性座標系, または天体固定座標系: body-fixed)

# Georeferencing

- 各画素の経緯度（と標高）を知ることに対応
- 全ての幾何学的要素が既知なら可能
  - 系統的補正
- 座標が既知の物体を選び、GCP (geological control point) として、歪を推定
  - 非系統的補正
- 系統的補正と非系統的補正を併用する場合も

# 位置情報の保存方法

- 位置情報の形式
  - 緯度経度 (+ 標高) , body-fixed系でのx, y, z座標
- 画素毎に位置情報を与える
  - 最も詳しい (オーバースペック)
  - 間引きを行い, データ量を削減
  - geocodeを行う場合, 新たに変換式を求める必要がある
- 画像座標-位置情報の変換式を与える
  - 画像全体の変換を一つの変換式, 一セットの変換係数で表現するのは困難
- 位置情報は保持せず, 直ちにgeocodeを行う
  - リサンプリングに伴う質の劣化

# Geocoding

- georeferenceの結果を元に，画像全体を一定の投影法でリサンプリング
  - 通常は何らかの地図投影を行う
    - メルカトル図法，UTM（ユニバーサル横メルカトル）図法
    - 等緯経度図法，Sinusoidal（サンソン）図法
    - ポーラーステレオ図法
  - 標高値も既知であれば，オルソ化も可能
    - 正射修正（ortho-rectification）
    - 地形の倒れ込みを補正
    - 地図投影とは別概念だが，通常はセット



# 不規則形状対象の幾何補正

- 地図投影という概念は適用しにくい
- 一般化された手順はまだ存在しない
- 形状モデルを用いた幾何条件の算出
  - 実習課題として取り扱う

# マルチバンド画像データの解析

- 多数の波長で同時に撮像
- 波長の選択
  - 肉眼の三原色（RGB）：通常のカラーカメラ
  - 観測対象の特性にあわせた波長
    - クロロフィル，二酸化炭素，オゾン
    - 鉱物の吸収帯
- 波長間の位置合わせ（registration）
  - 幾何補正の過程で実施

# 月表面物質の反射スペクトル

- Clementine探査機  
UVVISカメラフィルタ波長
  - 415, 750, 900, 950, 1000 nm
  - 415-750 nmには吸収帯なし
  - 900-1000 nmに鉄を含む鉱物（mafic鉱物）の吸収帯
    - olivine
    - pyroxene

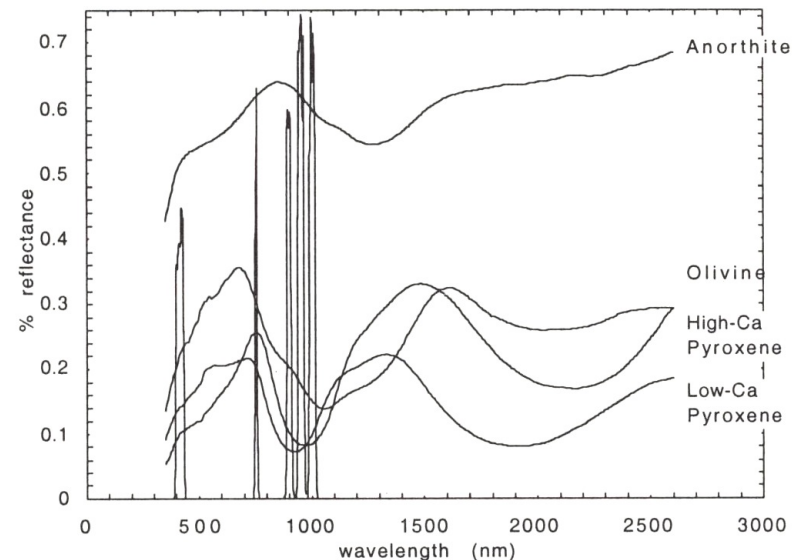


FIG. 2. Laboratory spectra of lunar minerals with Clementine bandpasses superimposed. All samples are particulate, with particle size  $\geq 250 \mu\text{m}$ . Lunar samples: 15415 (anorthite), 12063 (high-Ca pyroxene), 78235 (low-Ca pyroxene), and 72415 (olivine).

実験室で測定した  
月表面物質の反射スペクトルと  
UVVISの観測波長

Tompkins and Pieters (1999)

# カラー合成

- トゥルーカラー
  - true color
  - 通常のRGB合成
  - カラーバランスも肉眼に対して調整
- 疑似カラー
  - false/pseudo color
  - 三原色とは異なる波長帯をRGBに割り当て

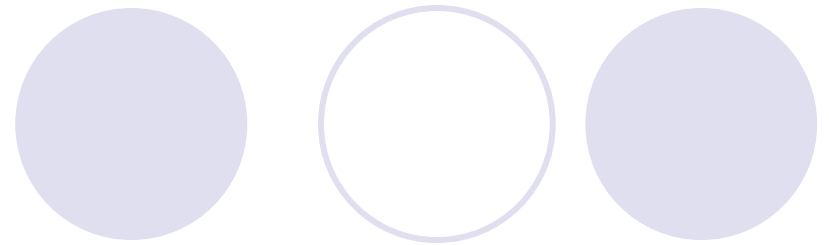


ASTER疑似カラー

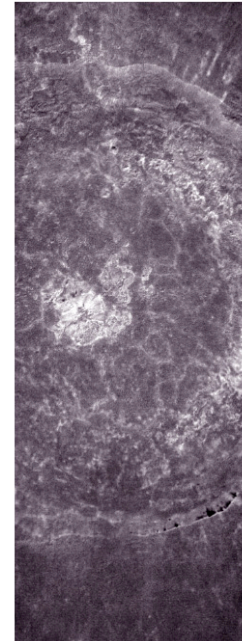
<http://cecom.kz.tsukuba.ac.jp/LAB/RS/RS.html>

# 比演算

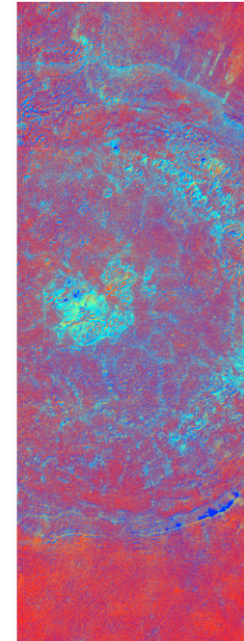
- 月惑星表面は「色」が乏しい
  - 波長ごとの反射率の違いより日照条件による明暗が強い
- バンド間で割り算
  - 波長ごとの輝度パターンの違いを強調
  - 三種類の比演算結果を疑似カラー表示



Clementine UV VIS Camera - Tycho Crater

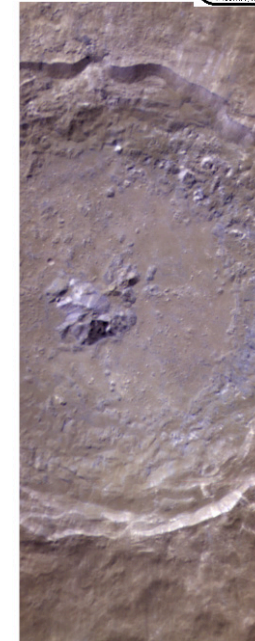


単色



比演算  
疑似カラー

R: 750/415 nm  
G: 750/950 nm  
B: 415/750 nm



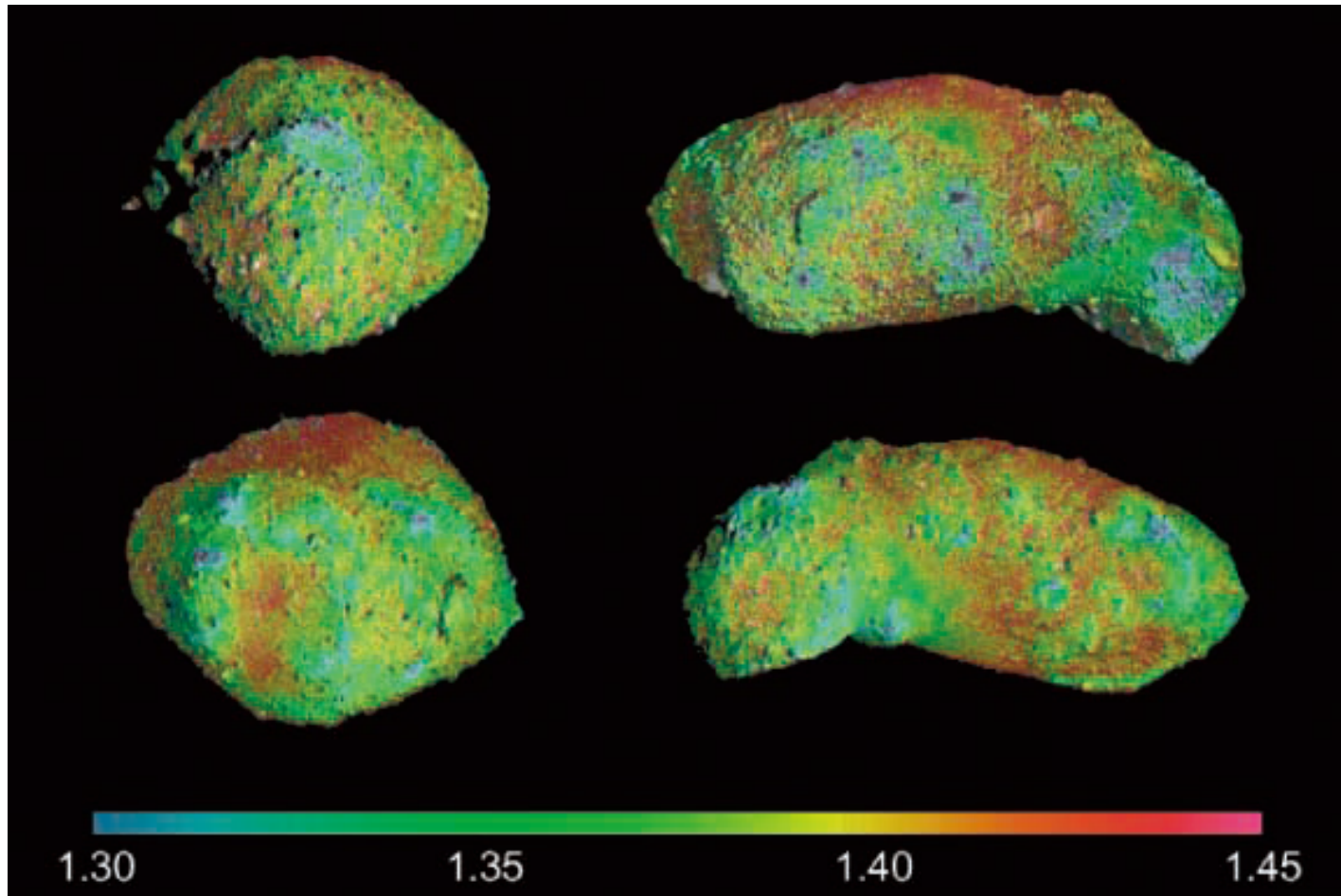
疑似カラー

R: 1000 nm  
G: 750 nm  
B: 415 nm

Clementine UVVISによる  
Tychoクレーターの画像  
NASA/USGS



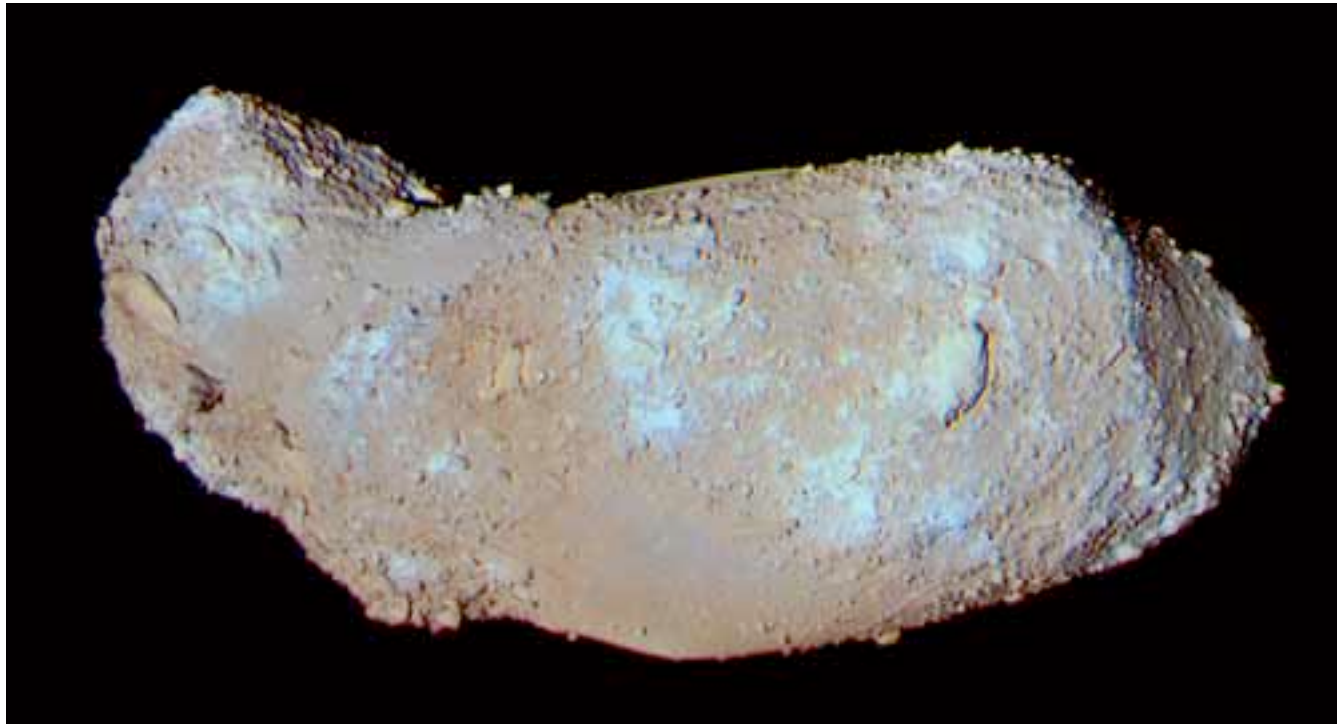
# AMICA比画像の例 (700/430nm)



Ishiguro et al. (2007)

<http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.315/ISASnews315.pdf>

# AMICA比画像（三色合成）

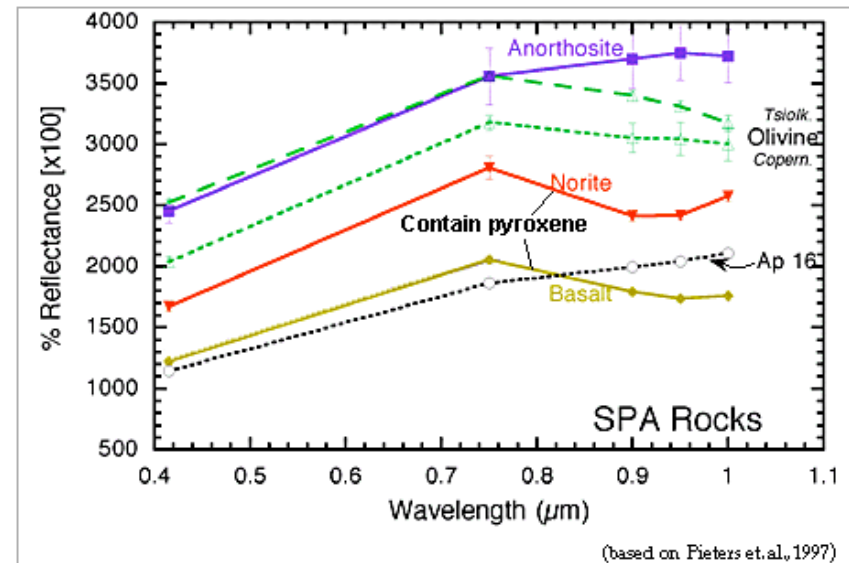


<http://www.isas.ac.jp/docs/ISASnews/No.302/isas-hayabusa.html>

# Clementine UVVIS 5-bandスペクトル

- mafic鉱物が多いほど、950nmの吸収が深い

- 950nm反射率が低い
- 750/950nmが大きい
- Green成分強い



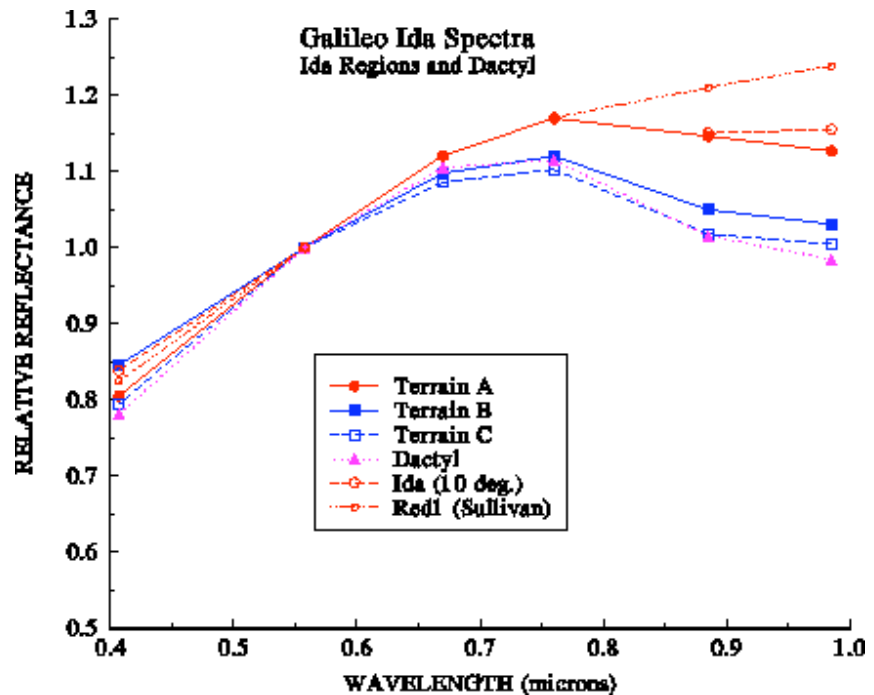
UVVIS画像から抽出した  
月表面物質の反射スペクトル

<http://www.psr.d.hawaii.edu/July98/spa.html>



# 宇宙風化 Space weathering

- 宇宙空間に直接暴露された物質表面に生じる経年変化
  - 微小隕石の衝突
  - 太陽風
  - 宇宙線
- 全体的に暗くなる
- スペクトルが右上がり
  - 赤化 (reddening)
- 鉱物の吸収が浅くなる



小惑星表面物質の宇宙風化

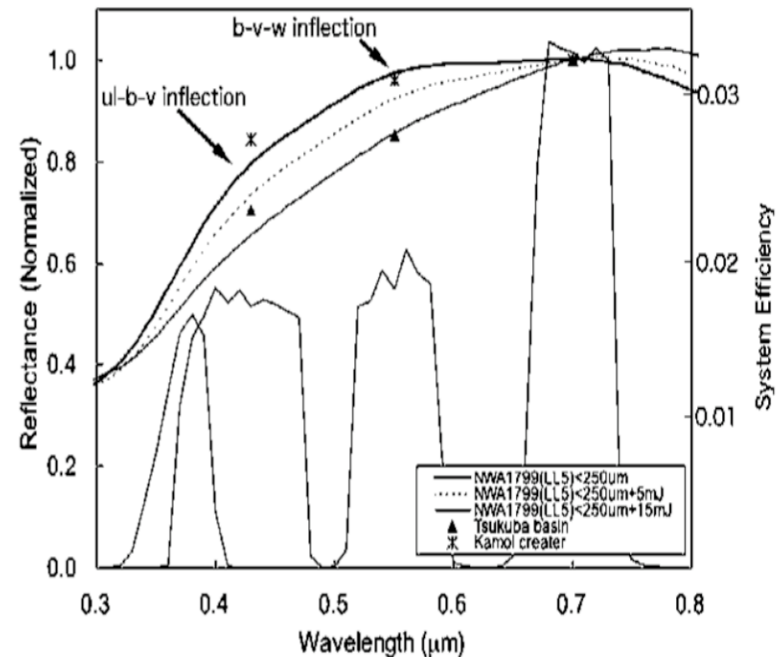
Chapman (1996)

<http://www.boulder.swri.edu/clark/ida.html>

# AMICAスペクトル

- Ishiguro et al. (2007)

- 430-550 nmの shoulderが宇宙風化とともに消失
- 隕石の人工風化実験結果も同じ傾向を示す



# 地形計測



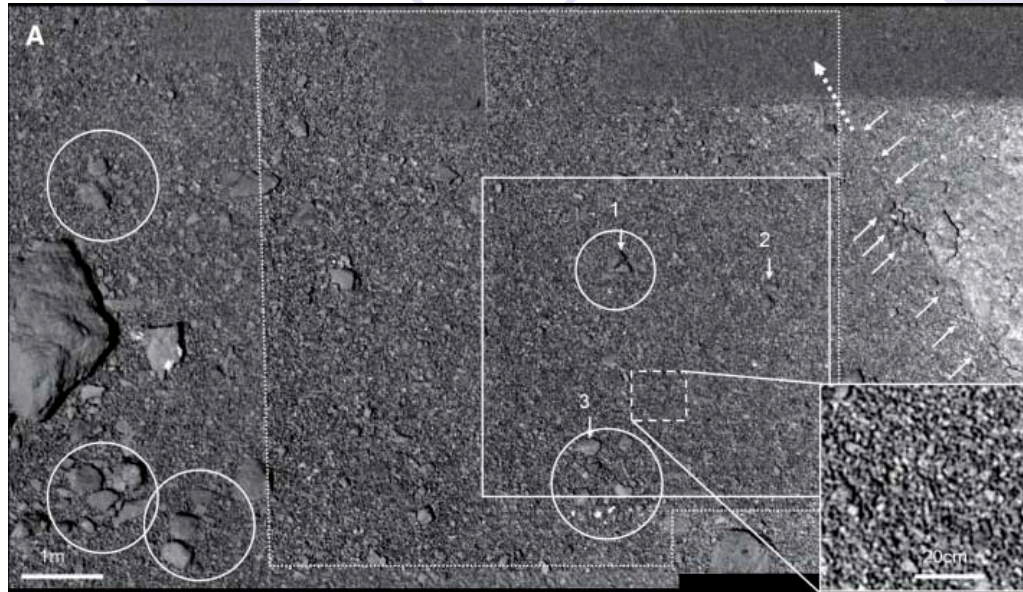
## ● 計測対象

- 全体形状， ボルダー， クレーター， その他の構造

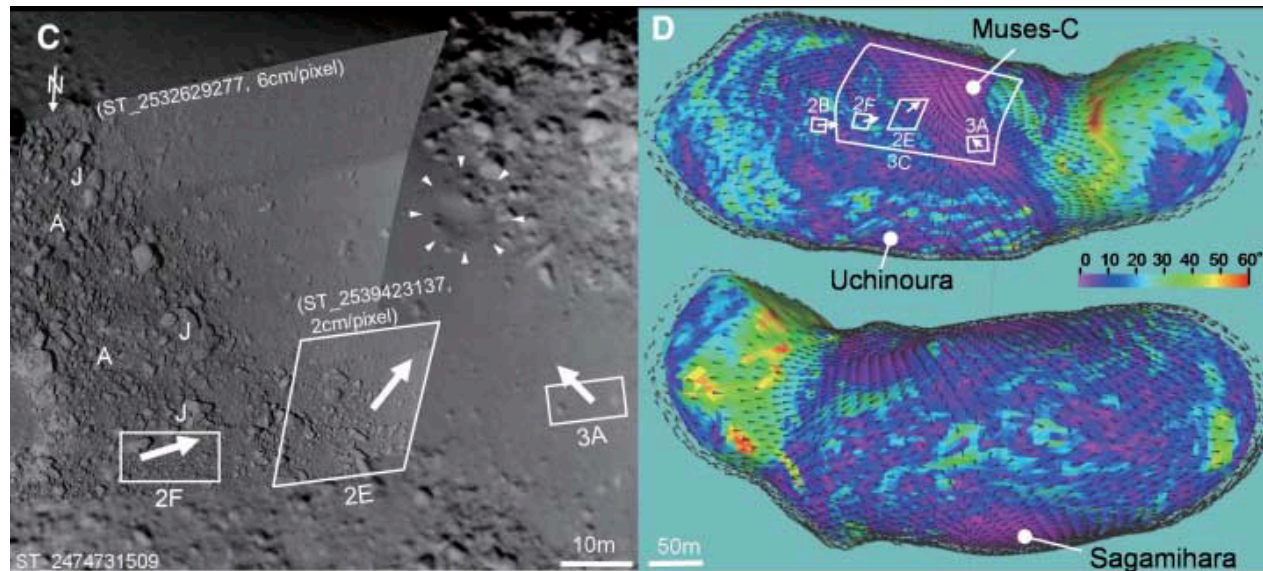
## ● 計測項目

- 対象の有無， 産状記載
  - 定性的， 見た目 > よく見えるような（前）処理
- サイズの計測
  - 定量的 > 縮尺など， 幾何条件を知る必要がある

# 全体形状

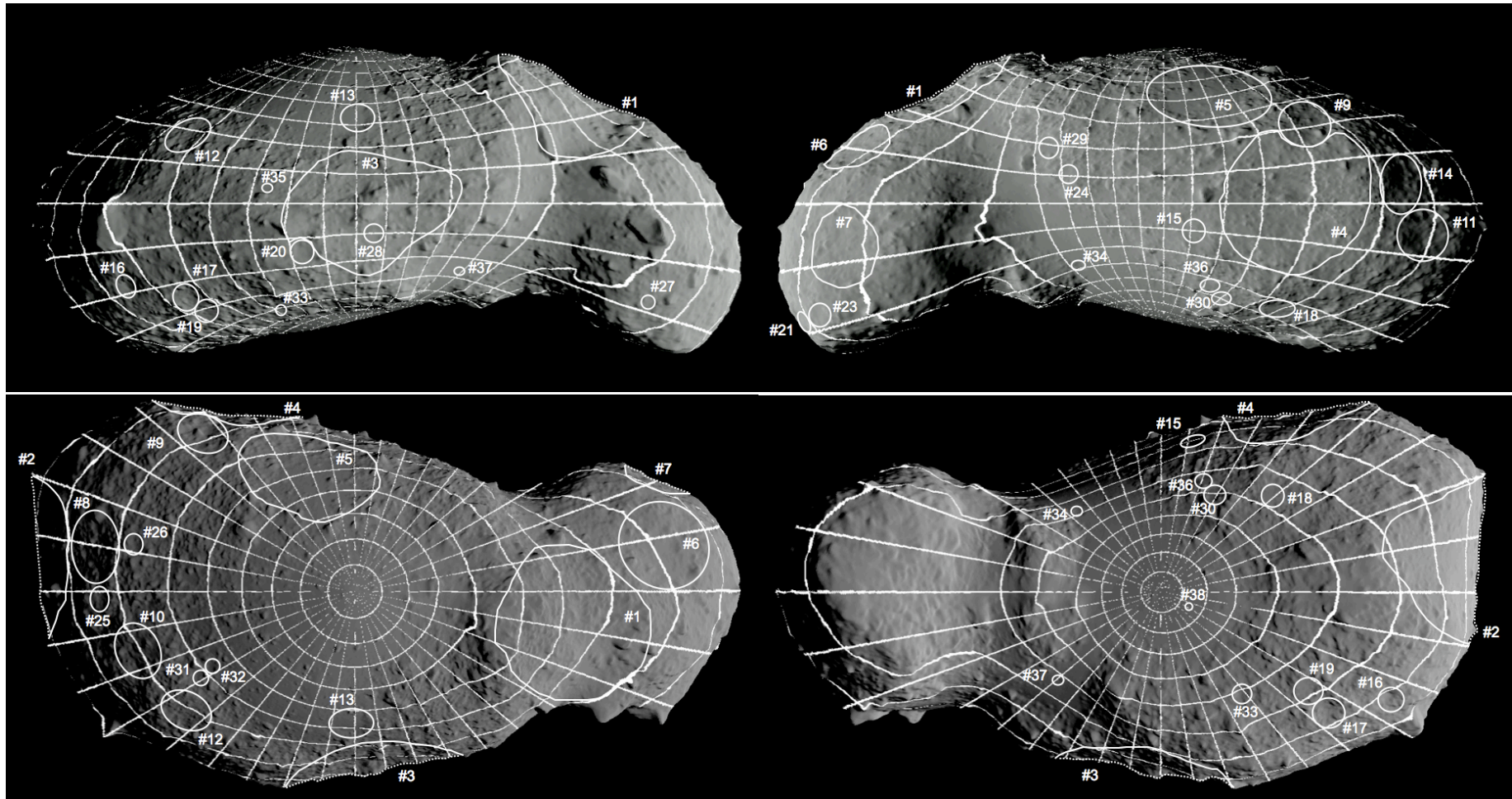


Miyamoto et al. (2007)





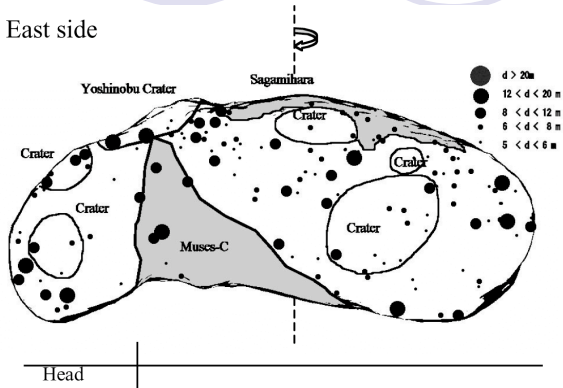
# クレーター



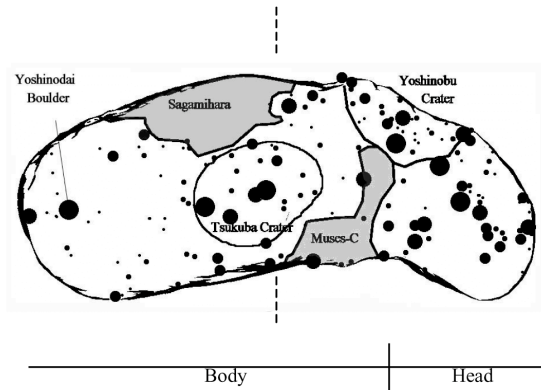
Hirata et al. (2009)

# ボルダー

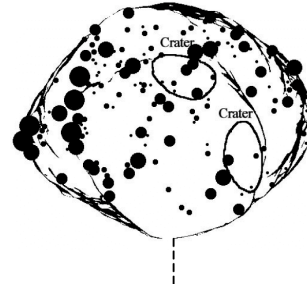
a) East side



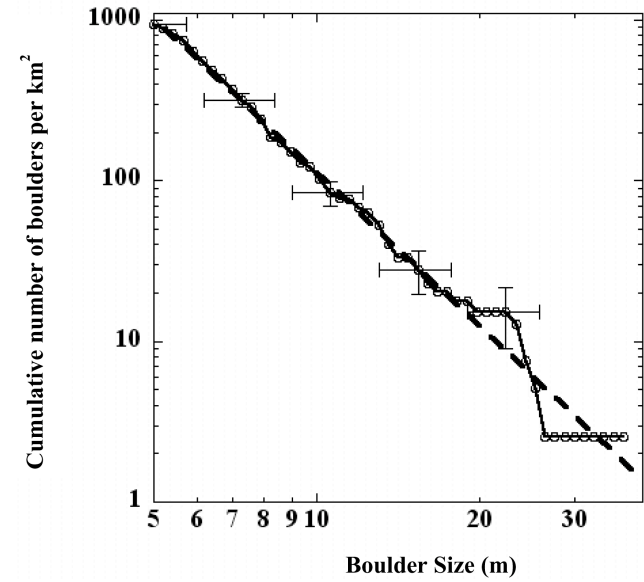
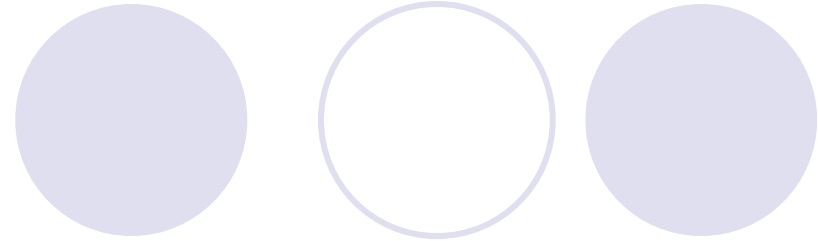
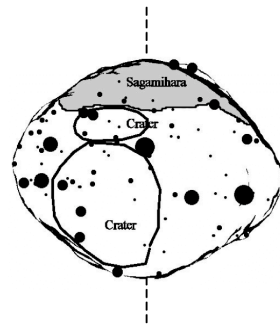
b) West side



c) Head side



d) Body side



Michikami et al. (2008)

# AMICA images at HAYABUSA Project Science Data Archive

- 撮像時期によって分類
  - クルージングフェイズ (恒星撮像など)
  - 地球スイングバイ (月, 地球)
  - ゲートポジション (距離~20km)
  - ホームポジション (距離~7km)
    - 全周撮像, 衝条件, 極方向移動, 位相角変更
    - カラー撮像
    - 後期の一部はクローズアップもあり
  - 降下, タッチダウン時 (距離<4km)
    - クローズアップ

# 代表的なデータの種類

- 非可逆圧縮撮像

- v-band
- フル解像度, ビニング, トリミングなし
- スミア補正済み (降下時データを除く)

- 可逆圧縮撮像

- カラー撮像
- ビニング, トリミングあり
- スミア補正済み



# ファイル名とヘッダの読み方

- ファイル名はオンボード処理時刻, フィルタ情報を含む  
ST\_2420773724 v.fits

オンボード処理時刻 (TI)

フィルタ

- FITSヘッダに撮像時刻など

TI\_0 = 2420769254 / 撮像時刻 (TI)

UTC\_0 = '2005-09-30T12:23:22.445238' / 撮  
像時刻 (UTC)

BINNING = 1 / ビニングの有無

OUT\_MODE= 'LOSSY' / 圧縮方式

- 基本的にはXX\_0の情報を参照すればよい
- XX\_1はスミア補正用の0sec撮像情報

# 画像による地形計測

- どういう調整をしてもよい。ただし，
  - 意図しないアーティファクトは発生させない
  - 元に戻れるor元データは保持
- 画像閲覧・解析ソフト
  - あった方がいい機能
    - 汎用データ読み込み
    - 画質調整
    - 画素値表示・抽出
    - 画像計測



ソフト

- 無償

- SAO ds9 (<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>)
- ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)
- GIMP?? (<http://www.gimp.org/>)

- 有償

- Adobe Photoshop
- ENVI

# ds9によるAMICA画像の閲覧

- ds9/FITSの場合，画像座標の原点は左下に来る
  - 一般には左上を原点とするソフト，データの方が多い
  - AMICAの画像座標系も左上原点
  - Zoom>Invert Yとすることで左上原点になる
- はやぶさはItokawaの自転面（～黄道面）上で観測
  - Zoom>Rotate 270°とすることで「北」が上になる
  - いわゆる「ラッコ」に見える向き
- Itokawaは逆行自転
  - Itokawaの北極は下向き
  - Itokawaの北を上にするにはrotate 90°

# TIPS

A decorative graphic at the top of the slide consists of six circles. On the left, the word 'TIPS' is written in large, bold, black letters, with the first circle partially overlapping it. The circles are arranged in two groups of three. The first group has a solid light purple circle on the left, a white circle with a light purple outline in the middle, and a white circle with a light purple outline on the right. The second group has a solid light purple circle on the left, a white circle with a light purple outline in the middle, and a solid light purple circle on the right.

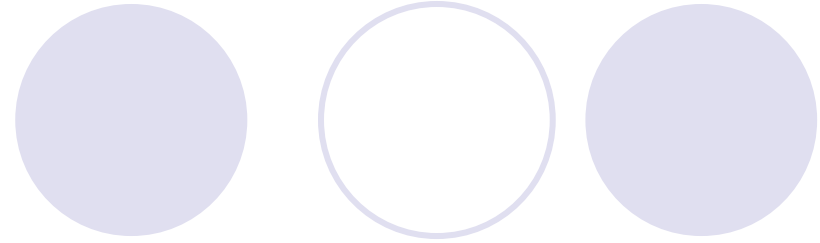
- **ブリンク**

- 画像間の変化
- 複数データの比較

- **立体視**

- 裸眼, 補助器具, 赤青合成

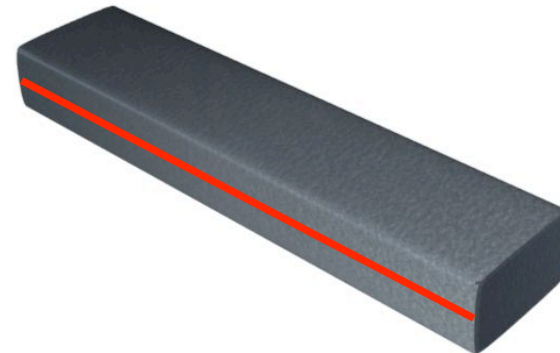
# 幾何条件の算出



- 距離
  - 縮尺
- 日照条件（入射角，出射角，位相角）
  - 影の長さを用いた地形計測
  - 測光補正にも必要な情報
- 地面の傾き（=出射角，傾斜方位）
  - 見かけのサイズから実際のサイズを算出

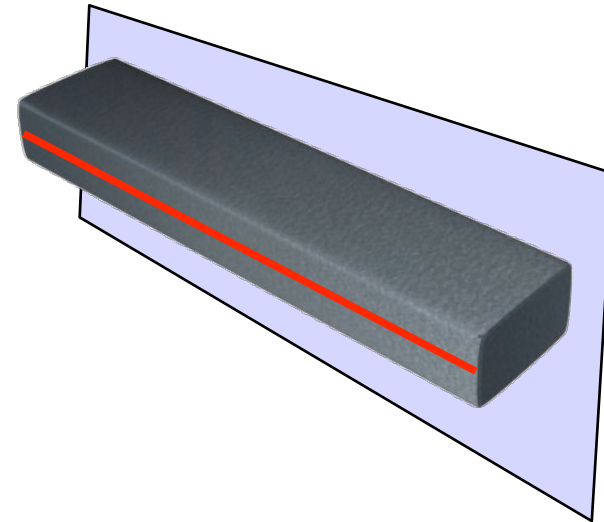
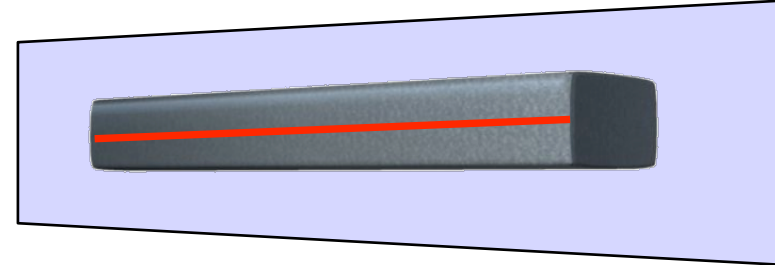
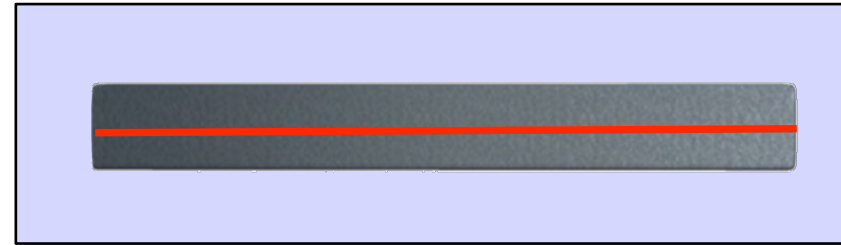
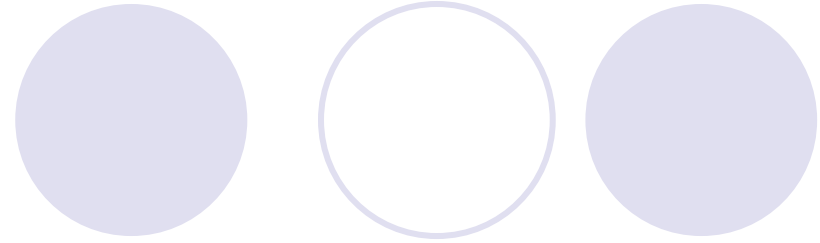
# 見かけサイズと実際のサイズ

- 右の物体は同じサイズだが，見る向きの違いによって見かけのサイズは異なる
- 見ている向きがあれば，見かけのサイズから実際のサイズを復元できる



# 必要な情報

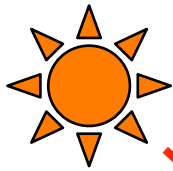
- 視線に対する面の傾き
  - dip/emission angle
- 傾きの方向
  - azimuth/strike angle



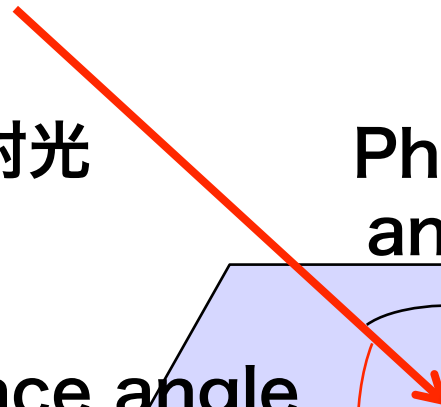


# 定義

光源



入射光

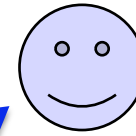


法線

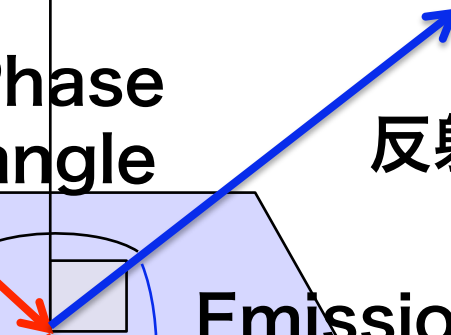
Phase angle



観測者

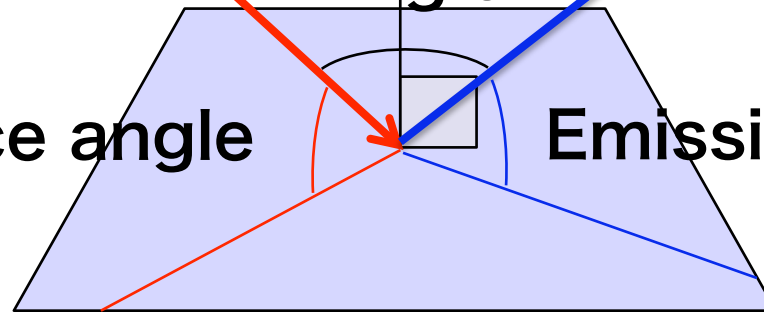


反射/散乱光



Incidence angle

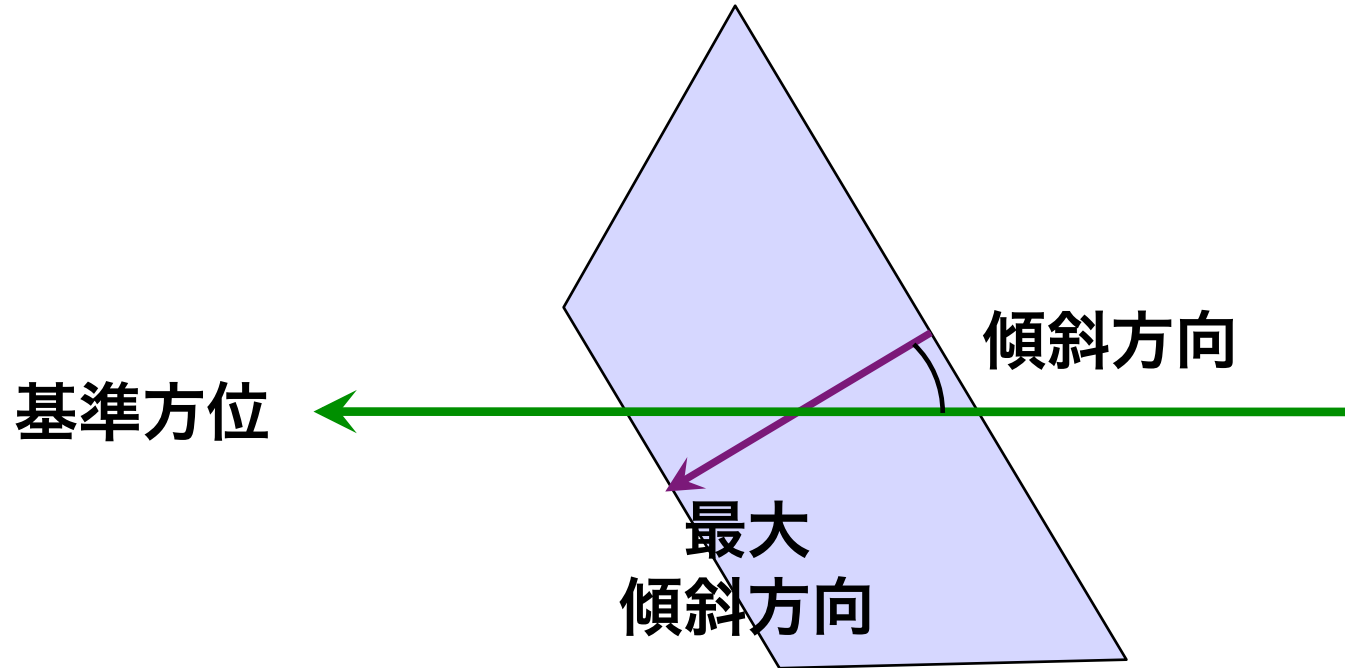
Emission angle



定義



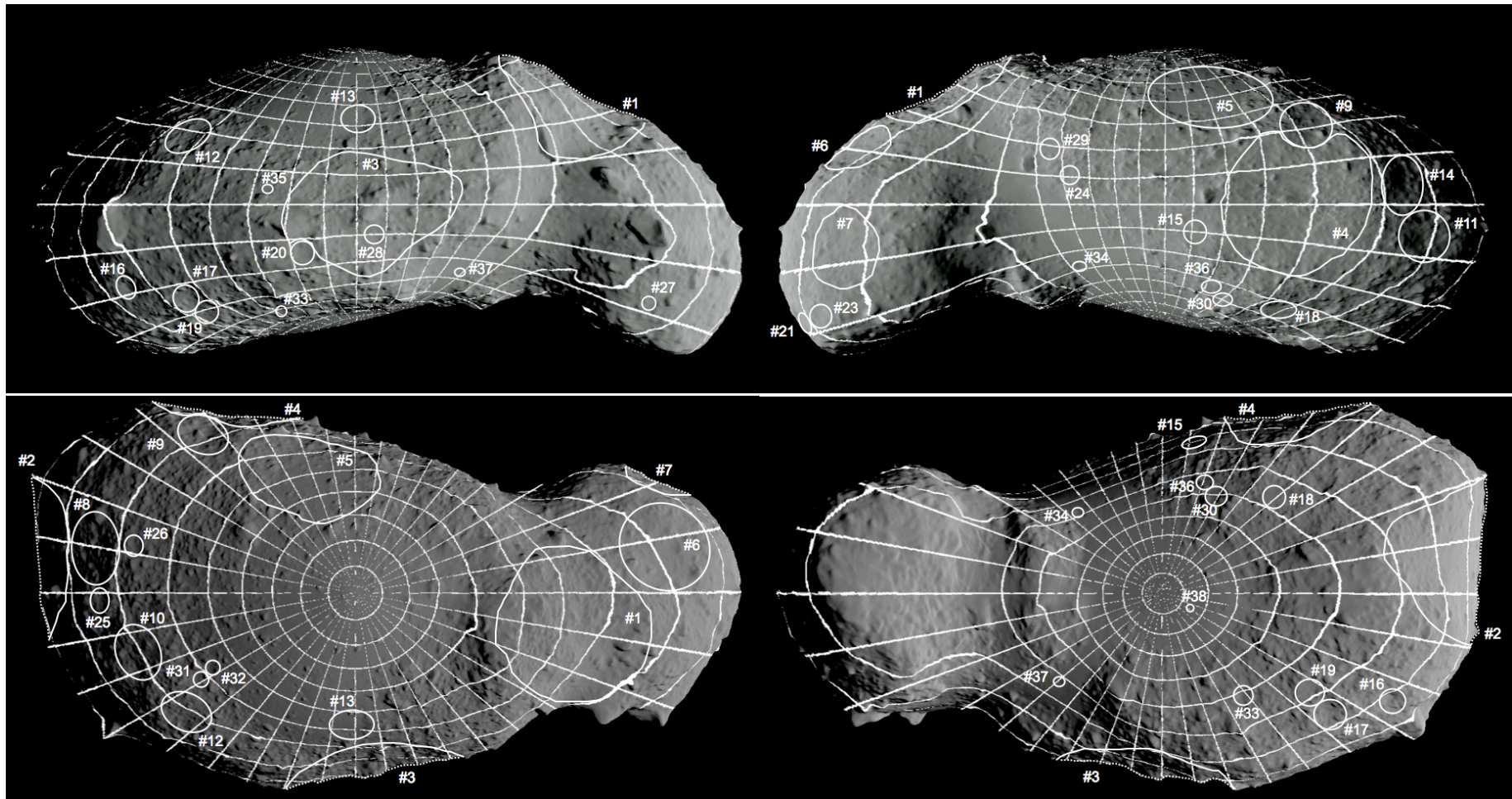
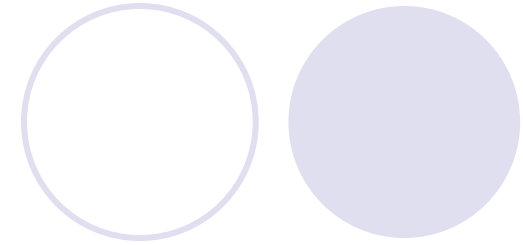
観測者視点



# plate\_renderer

- 平田作の幾何条件計算ツール
- 元は形状モデルから模擬画像を作成するのに使用
  - 光散乱モデルに必要な情報として、日照条件を算出
  - 撮像条件や日照条件を与えて実際には撮影していない（できない）画像を作成することも可能

# 応用例：Itokawa四面図 自由視点モード

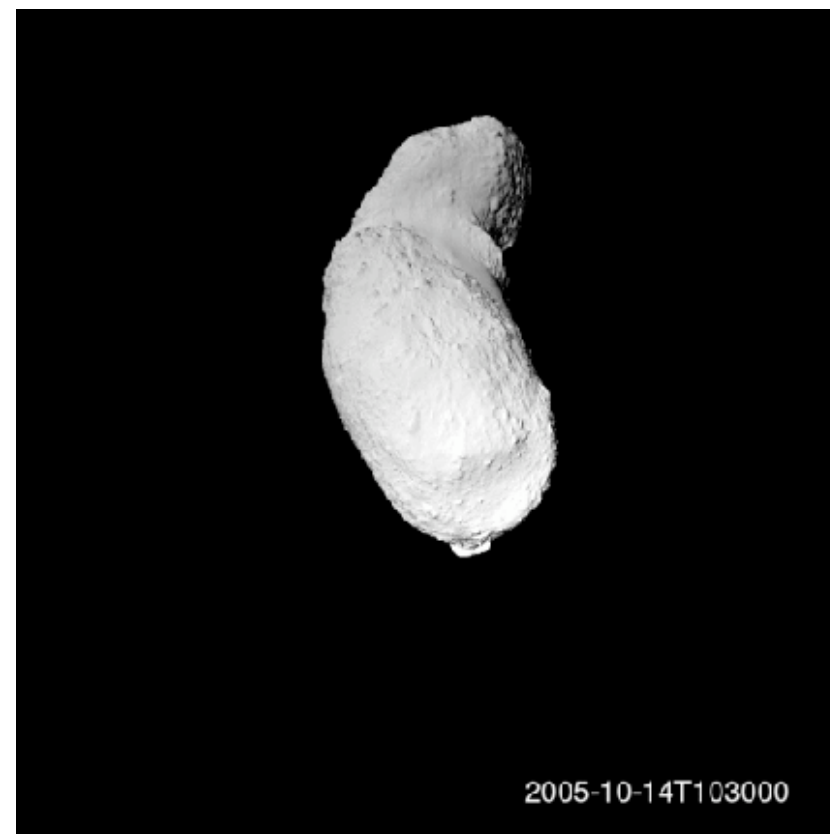


# 応用例：はやぶさ視点ムービー

RW故障前



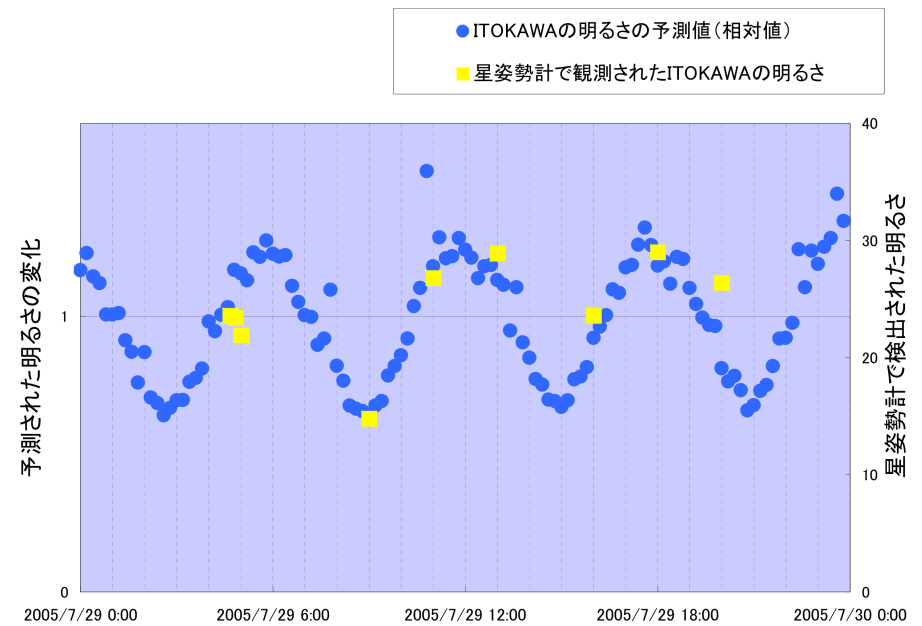
RW故障後



# 応用例

- Itokawaのライトカーブ

- 模擬画像の輝度積分値



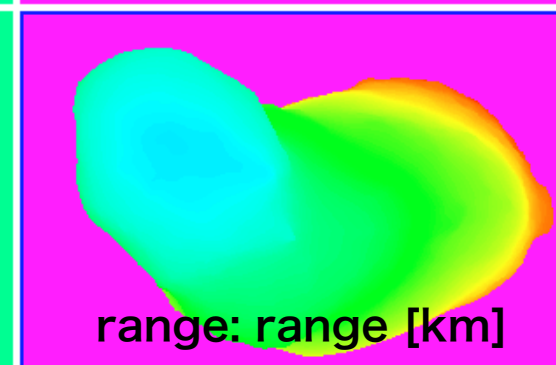
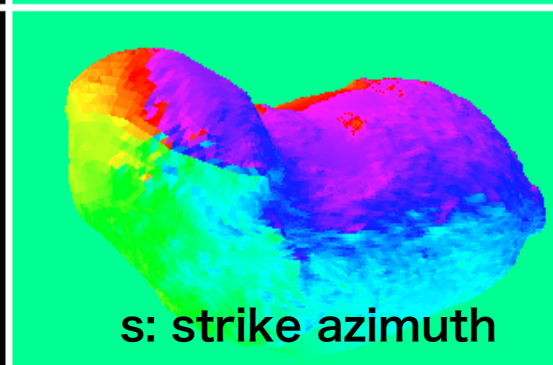
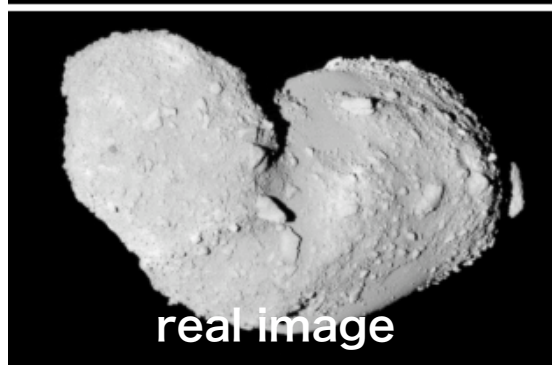
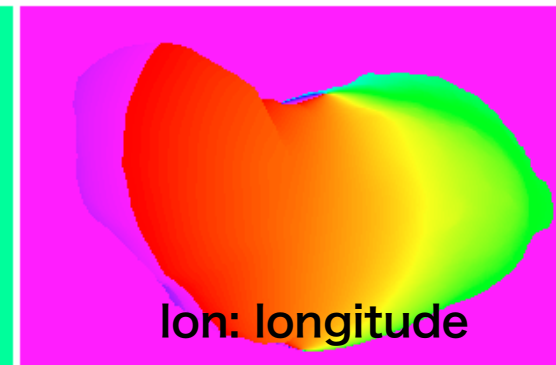
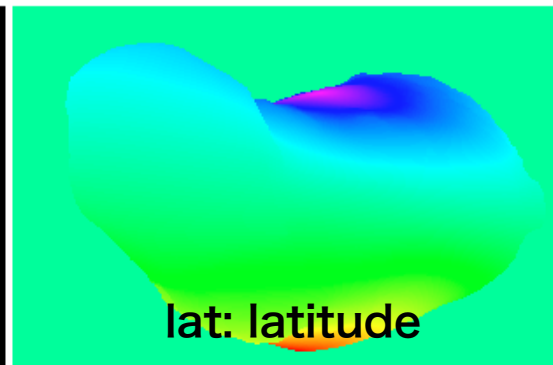
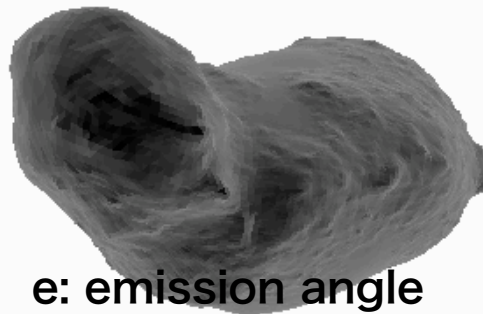
[http://www.isas.jaxa.jp/j/snews/2005/0815\\_hayabusa.shtml](http://www.isas.jaxa.jp/j/snews/2005/0815_hayabusa.shtml)

# platelib



- **SPICE toolkitの追加ライブラリ**
  - ポリゴンモデルを取り扱える
  - 試作段階で開発は停止
  - shape model subsystemに移行が予告されている
    - ただし未リリース
  - FORTRANのみ
  - Cから関数呼び出しは可能
- **plate kernel (.bpm)**
  - ポリゴンモデルのカーネル
  - アーキテクチャ依存性がある
  - toxfrで移動用の形式に変換
  - tobinでローカルアーキテクチャ用のファイルを生成
  - 一般的なポリゴンモデルのファイルからもmkplatで生成

# plate\_renderer出力



a: 省略



# 使い方



\$ ./plate\_rendere plate\_kernel kernels ...

- 再現モード

- S/C Mode: 1, Sun Mode: 1
- Instrument ID: -130102
- 時間を入力

- 自由視点モード

- S/C Mode: 0, Sun Mode: 0
- Instrument ID: -130901~904 (ideal\_cam.ti)
  - サイズ, 解像度などが異なる (自分で作ってもよい)
- 視線, 太陽方向方位 (緯度経度) を入力
- 距離は固定

# データの活用

- 日照条件

- $i, e, g$

- スケール

- range,  $e, s$

- 地形計測

- range

- 断面をとる, ただし高解像度版形状モデルが必要

- 地理情報

- lat, lon

# 実習課題

- 実画像と plate\_renderer 出力を比較
- ボルダールのリストを作成
  - サイズ (最長軸, または三軸全て)
  - 位置 (経緯度)
  - その位置における斜度 (3D-GISでチェック可能)
- どの画像でやっていいかわからない人向けサンプル
  - ST\_2420847483\_v.fits
  - ST\_2422936417\_v.fits