



# LIDARの科学目標

並木則行<sup>1</sup>，水野貴秀<sup>2</sup>，平田成<sup>3</sup>，

阿部新助<sup>4</sup>，池田人<sup>2</sup>，佐々木晶<sup>5</sup>，荒木博志<sup>5</sup>，  
松本晃治<sup>5</sup>，野田寛大<sup>5</sup>，石原吉明<sup>5</sup>，田澤誠一<sup>5</sup>，  
山田竜平<sup>5</sup>，岩田隆浩<sup>2</sup>，宮本英昭<sup>6</sup>，小林正規<sup>1</sup>，  
千秋博紀<sup>1</sup>，和田浩二<sup>1</sup>，押上祥子<sup>7</sup>，出村裕英<sup>3</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学，<sup>2</sup>ISAS/JAXA，<sup>3</sup>会津大学，<sup>4</sup>台湾国立中央大学，<sup>5</sup>国立天文台，<sup>6</sup>東京大学，<sup>7</sup>名古屋大学

2011年12月15日 神戸 第6回はやぶさ2から考えるサイエンス研究会

**Hayabusa-2 LIDAR**



# LIDARの科学目標

並木則行<sup>1</sup>，水野貴秀<sup>2</sup>，平田成<sup>3</sup>，

阿部新助<sup>4</sup>，池田人<sup>2</sup>，佐々木晶<sup>5</sup>，荒木博志<sup>5</sup>，  
松本晃治<sup>5</sup>，野田寛大<sup>5</sup>，石原吉明<sup>5</sup>，田澤誠一<sup>5</sup>，  
山田竜平<sup>5</sup>，岩田隆浩<sup>2</sup>，宮本英昭<sup>6</sup>，小林正規<sup>1</sup>，  
千秋博紀<sup>1</sup>，和田浩二<sup>1</sup>，押上祥子<sup>7</sup>，出村裕英<sup>3</sup>

ONCとの協調

杉田精司，中村良介ほか

**Hayabusa-2 LIDAR**



# 奥州・東関東連合

(命名 飯島祐一)

相模原潰して，天下奪っちゃう  
るけん！





# はやぶさ2 LIDAR

- 有効測距範囲: 30 m以上 ~ 20 km以下
- レンジ精度 (ランダム ( $1\sigma = 0.6$  m) + バイアス誤差)
  - 30 m:  $\pm 0.845$  m
  - 50 m:  $\pm 0.856$  m
  - 20 km:  $\pm 1.973$  m
- 測距分解能: 0.5 m
- 反射率分解能:  $0.007 \pm 18.8\%$
- データ更新レート: 1 Hz

**Hayabusa-2 LIDAR**

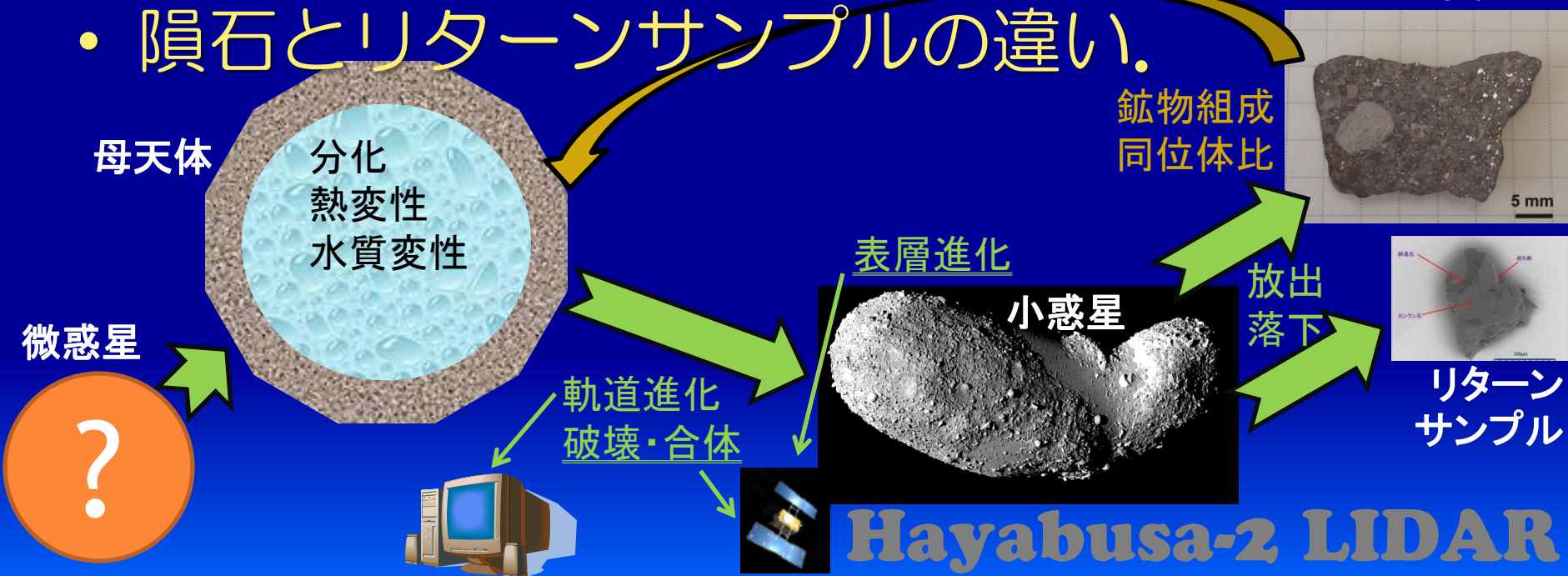


# LIDAR観測とグラウンドヴィジョンのリンク (1)

## 小惑星探査の科学的意義

- 原始惑星系円盤~微惑星~小惑星へといったる過程の missing piece を明らかにする。
- 隕石とリターンサンプルの違い。

隕石・  
宇宙塵







# LIDAR観測とグラウンドヴィジョンのリンク (2)

## 対象天体についての先験的情報：背景



- i. 1999JU3は軌道力学計算から，メインベルトの最内縁部から移動してきた可能性が高い。



- ii. 最内縁部のcollisional familyの中でC型小惑星は少ない。（故郷の候補が絞り込みやすい）



- iii. 1993JU3は地上スペクトル観測（可視，近赤外）から，表面に大きな不均質を晒している可能性が有る。（衝突破壊の歴史を読み解くことが出来るかも知れない）



# LIDAR観測とグラウンドヴィジョンのリンク (3)

LIDAR：**バス機器**（AOCSサブシステム）  
– HW設計変更は間に合わなくても運用でカバー

② 衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き

+ **Itokawa**探査の科学成果を発展させる  
リターンサンプルを活用するために何をすべきだったか？

- **Rubble Pile**天体の実証
  - 普遍性とバリエーション
  - 空隙率の均一/不均一性
- **小惑星ダスト**のその場観察
  - はやぶさサンプルの出自
  - Regolithの水平・鉛直混合（regolith breccia 隕石）

**Hayabusa-2 LIDAR**



# LIDAR観測とグラウンドヴィジョンのリンク (4)

(1) 1993JU3の分光スペクトル観測 (AMICA, NIRS3, **アルベド**) から, collisional familyを同定する

(2) 形状と重力から**空隙率の平均と偏り**を決定し, rubble pile天体の衝突破壊・合体の歴史を推定する.

(3) リターンサンプルの宇宙線照射年代, 太陽風インプランテーションから軌道進化を制約する. その解釈に重要な**小惑星ダストの移流・攪拌をその場観察**する.

**Hayabusa-2 LIDAR**



# 科学目標：微惑星から小惑星に至るまでの熱変成とそれに伴う物質進化の紐解き

## ミッション目標

Potential hazardous asteroidでもある1993JU3は潮汐力の影響を受け易く、急斜面では地表更新が頻繁に起きて**宇宙風化の著しいムラ**が生じている可能性が有る。ジオメトリックアルベドの測定により、これまで理解が遅れていた**C型小惑星の宇宙風化**に関する知見が得られると期待。

## ミッション要求

全球で1000点以上の観測点分布。

ジオメトリックアルベド（予想平均は0.06~0.07、変動幅はその10%程度）を**数段階に分けて区別**できること。

Opposition効果推定のために**地形傾斜を数度の精度で推定**する。（参考資料 課題1と2）

## LIDAR要求仕様

1 Hzの観測レートで15 min分の観測を行うこと（1.5年のノミナルミッション期間で達成可能であり、現状の設計は要求を満たしている）

送信光に対して1%の変化を受信光で検出できること（参考資料 課題1と2）。  
**試作機の試験で確認する。**

## システム運用要求

小惑星自転は7.6 hr以上の観測を行うこと。（現状のミッションシナリオで要求を満たしている）

ステレオカメラ接写による詳細地形モデル作成  
接写回数はLIDARアルベド測定結果による。アルベド変化量の大きな境界領域の接写を要望する（参考資料 課題1と2）

ONC-Tを使い、衝効果を小惑星到着後のなるべく早い段階で観測すること。HPからのopposition観測では探査機を移動させる必要有り。（参考資料 課題1と2）



# Opposition効果の補正

- 佐々木, 阿部, 野田
- Itokawaでは, 岩塊の多いrough terrainが、MUSES-Seaと同じかむしろ高い位相角依存性を示す。岩塊表面の反射特性は粉体に近い。[Yokota et al., 2006]
- 第一の方針：クローズアップ観測でのステレオ撮像（ONC-T）を実施し，1度以下の精度で微傾斜を実測する。
  - LIDAR アルベドが変化している境界領域を狙ってJU3に近づき，ステレオ視で詳細な地形データを取得。 → 精度を要確認
- 第二の方針：衝効果を小惑星到着後のなるべく早い段階で観測（ONC-T）する。
  - HPからのOpposition観測では探査機を移動させる必要が有る。 → シナリオを要確認

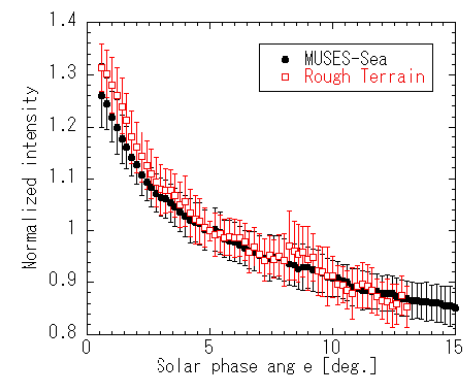
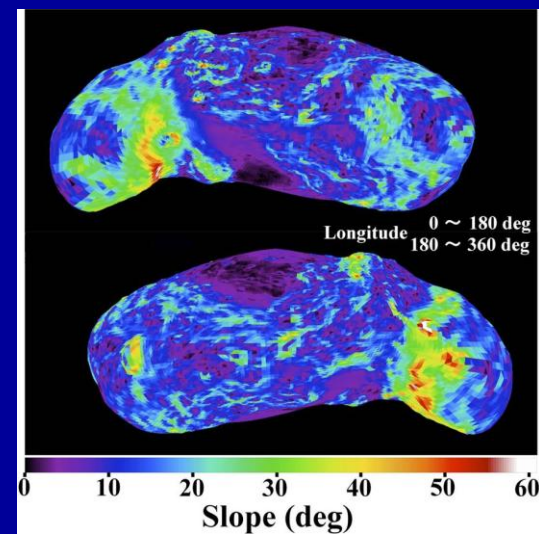


Figure 1. Disk-resolved phase curve of Itokawa. Data are normalized at phase angle 5 degrees. ONC-W1 images SW1\_2563322681 and SW1\_2539215961 were used.



(左) 位相角35度, (右) 10度

Hayabusa-2 LIDAR

# 科学目標：衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き (1)

## ミッション目標

ジオメトリックアルベド測定から炭素質/シリケートの混合比が空間的に変化するプロファイルを調べ、regolithの混合過程を制約する。  
(AMICA, NIRS3との共同観測項目)

## ミッション要求

想定される不均一（全表面積の15%程度）中で100点以上の観測データ。

アルベドを10%以下の精度で区分できること。

## LIDAR要求仕様

1 Hzの観測レートで15 min分の観測を行うこと（1.5年のノミナルミッション期間で達成可能であり、現状の設計は要求を満たしている）

LIDARは送信光と受信光の比を左記の精度で観測できること。  
試験で温度較正パラメータを取得する。

## システム運用要求

小惑星自転は7.6 hr以上の観測を行うこと。（現状のミッションシナリオで要求を満たしている）

# 科学目標：衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き (2)

## ミッション目標

空隙率の平均値を計測する。

Itokawaの成果 (rubble pileの実証) を補完し, Eors, Mathildaの観測結果と合わせて, 空隙率の変動から小惑星進化を考察する。

空隙率の平均値を計測する。

**C型隕石の coherent密度は多様** (1000 ~ 4000 kg/m<sup>3</sup>) である。

## ミッション要求

形状  
ステレオカメラによるDEM作成の前に, 高度精度5m以内の**コントロールポイント**を確立する。

リターンサンプリングからCoherent密度を計測する。

## LIDAR要求仕様

5 m以下のレンジ精度。

## システム運用要求

探査機軌道伝搬誤差が3 cm/sの場合は150秒間, 3 mm/sの場合は1500秒間, 軌道制御を行わずにスキャン観測を実施する。  
(参考資料 課題3と4) スキャン観測はグローバルマッピングを完了するまで続ける。即ち, 緯度線方向に自転周期の数回分と, 経線方向に数周回。

RWが冗長であること。

光学航法 1画像/2 min.

ONC-Tとのアラインメント要求  
Preflight 0.6度以内であること。Inflightで50回のlimb観測を実施すること  
(参考資料 課題5)。

現状予定のサンプル総量から測定可能



# 形状決定のシナリオ：コントロールポイント

- 池田，松本
- 小惑星，探査機，ともに1~10 kmの位置誤差
- Itokawa観測（RW故障）：LIDARデータとステレオ地形の間で複数回のイタレーション
- RW正常：軌道・姿勢制御を実施せずに軌道伝搬誤差を抑制する運用要求
- LIDARデータとステレオ地形の対応のためにアライメント要求







# ONC/LIDAR アライメント ント

1. LIDARとONC-T (AMICA)とのアライメント  
(打ち上げ後の変動を含む) =  $0.6^\circ$   
(第8回設計会議資料7-6-7 2/2 表6.7より算出)

2. LIDARのfootprint size =  $0.057^\circ$

3. ONC-Tのpixel size =  $0.0061^\circ$

4. 姿勢制御精度

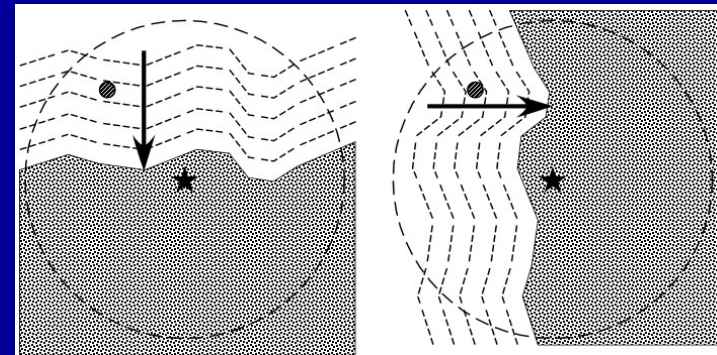
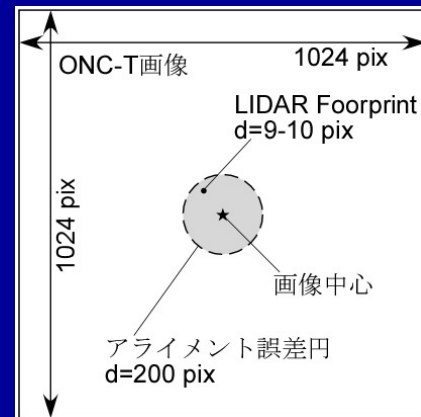
姿勢制御精度 ( $3\sigma$ ) :  $0.1^\circ$

姿勢安定度 (5秒間) ( $3\sigma$ ) :  $0.02^\circ$

姿勢安定度 (1秒間) ( $3\sigma$ ) :  $0.005^\circ$

姿勢変動速度幅 :  $0\sim 0.3\%/s$  (各軸)

(はやぶさ2ミッションシナリオ p. 44, はやぶさ実績に基づく)



• Limb観測で, footprintを確定(横方向20枚, 縦方向20枚)

**Hayabusa-2 LIDAR**

# 科学目標：衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き (3)

## ミッション目標

空隙率の偏りを計測する。

Itokawaの成果  
(rubble pileの実証)を発展させる。  
Rubble pile小惑星の再集積の実証。

1999JU3がモノリシック、または枯渇彗星であった場合の確定。

## ミッション要求

形状中心と重心のずれを10 m以下の精度で推定する。  
(参考資料 課題6)

可能であれば2次の重力係数。

自転軸と慣性主軸のずれを1度以内の精度で計測する。

平均密度を1000 kg/m<sup>3</sup>の精度で決定。

## LIDAR要求仕様

5 m以下のレンジ精度。

## システム運用要求

小惑星近傍(距離=20~1.5 km)での無制御の弾道飛行を4回以上実施すること。(参考資料 課題3と4)

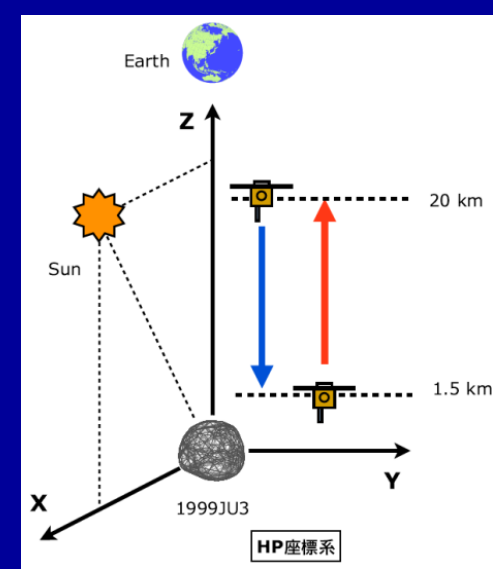
上昇・降下のいずれの方向でも可。弾道飛行経路は小惑星形状による。

現状のグローバルマッピング(HPから全周観測)で、要求を満足している。(参考資料 課題7)

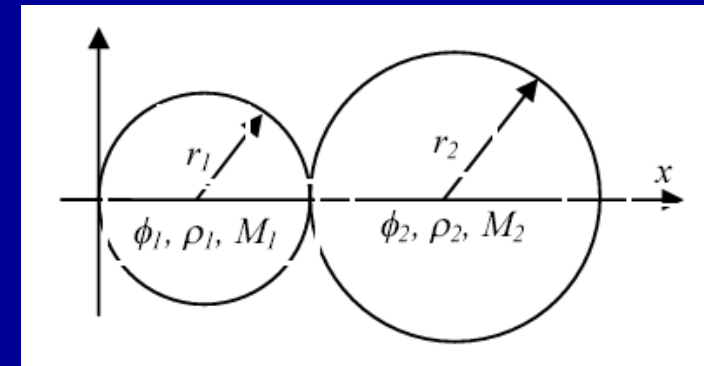


# 自由落下実験への要求

- 池田, 並木
- 簡単な二球の組み合わせから, 重心ずれの観測目標を設定

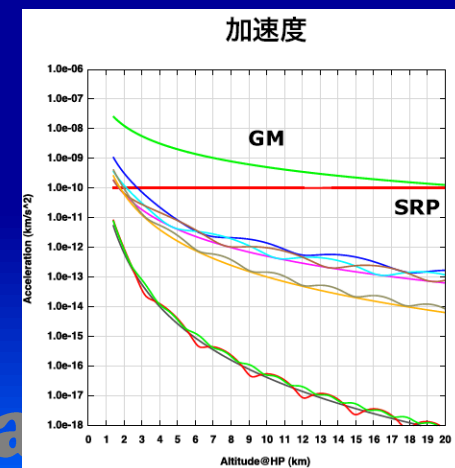


- 10 m以下
- シミュレーション計算で必要回数を推定



- 2パス : 41 m
- 4パス : 11 m
- 6パス : 3 m
- 落下, 打ち上げは問わない

- 降下 温度条件緩, リスク回避制御
- 上昇 温度上昇厳, リスク少



Hayabusa

# 科学目標：衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き (4)

## ミッション目標

浮遊ダストの水平移流を観察する。  
小惑星だからこそダストのその場観察。(Itokawaサンプルの出自に関わる問題、且つ表層進化の主要プロセス)。

## ミッション要求

レーザー散乱光によるレビテーションダストの発見

空間密度として1個/cm<sup>3</sup>以上の感度  
(参考資料 課題12)

ダスト空間密度の地域差を観測する。  
精度、空間分解能は要検討(並木)

衝突実験前後でのダスト空間密度分布の時間変化。  
精度、空間分解能は要検討(並木)

## LIDAR要求仕様

受光の閾値とアンプのレベルを変更できること。

積算回数とAPDの雑音、量子効率への要求要確認  
(小林)

FPGAソフトを書き換えて段階的受信レベル変更を可能にすること。  
要確認(小林)

## システム運用要求

探査機軌道伝搬誤差が3高度300 m付近での観測実施。  
要確認(小林, 千秋)

Nadir観測。

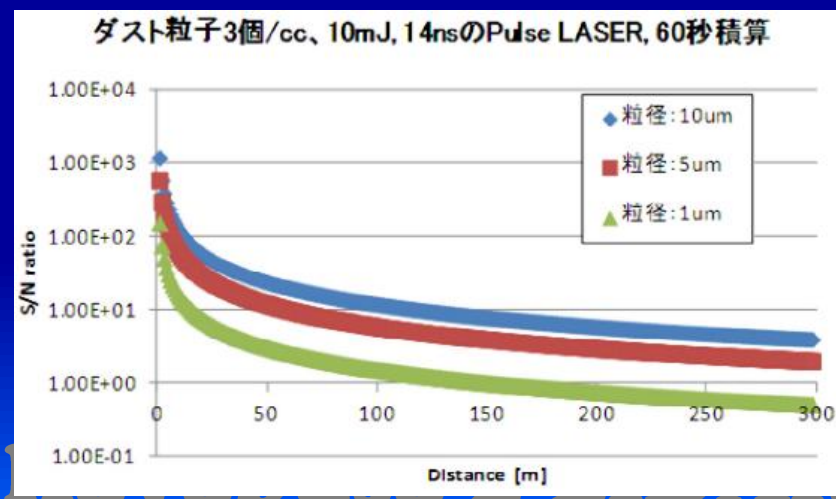
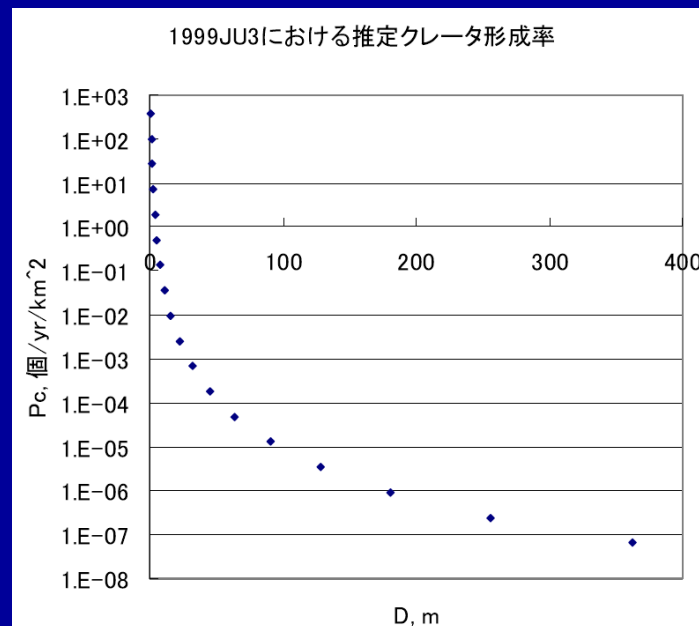
Minerva IIとの同時観測

夜昼境界の観測。



# ダスト観測の検討

- 押上, 小林, 和田, 千秋
- 表層進化に有意なダスト空間密度の見積もり  
クレーター生成に影響しうるフラックス  
→ 1個/cm<sup>3</sup>以上の感度
- ライダー方程式による受信光強度の見積もり (ただし, APDの雑音レベルに強く依存)
- 単一光子検出 (シングルフォトンカウンティング)







# 次回LIDAR会合議題

## (1) LIDAR検証計画

LALTで行った試験項目と試験時の問題点のリストアップ (荒木, 田澤)

アルベド測定のための試験概要, 特に受信レベルの温度較正 (佐々木, 阿部, 野田)

limb観測 (地形傾斜が大きい) のための試験 (並木, 平田)

ダスト観測のための試験項目 (千秋, 小林, 和田)

## (2) 他機器と共通の科学目標

探査機の軌道決定, 小惑星の軌道決定をシステムの誰が担当しているのか確認, 特にスキャン観測の実現性 (池田)

「はやぶさ」の小惑星地形学 (押上, 宮本)



# 経過

10月 メンバー拡充・PI交代  
10/14, 17 LIDARチーム会合

科学目標再検討

10/18 サイエンス会議 #7

10/20 理学委員会

～11/1 設計フロー作成

11/2 LIDAR開発会議

11/4 ミッション運用要求をミッ  
ション系に送付

11/14 開発会議（追加）

11/15 太陽系科学シンポ

～ 11/18 開発会議AI（LIDAR寿  
命，受信閾値）について開  
発者に回答

11/25 AOCS（含むLIDAR）  
CDR →延期（1月末）

12/14 サイエンス会議 #8

12/20, 22 LIDARチーム会合

LIDAR検証計画

他機器と共通の科学目標

12/26 システム CDR →延期  
（2月）

試験準備（試料など）

2012/5月 LIDAR試験

地上観測

ミッションシナリオ検討  
（LIDAR固有，機器間）

**Hayabusa-2 LIDAR**