

The background of the slide is a composite image. At the top, an asteroid is shown with a series of dashed lines representing light rays reflecting off its surface towards a bright light source (the Sun) on the right. Below this, a green rectangular box contains the title. The bottom half of the slide shows a view of Earth from space, with a bright streak representing a meteor entering the atmosphere. A green rectangular box is overlaid on the Earth image, containing citation information. In the bottom right corner, there is a small credit line.

# Asteroid polarimetry

ASTEROIDS IV p151 - 164

Belskaya et al., 2015.

20243069 M1 土井知也

# Contents

1. INTRODUCTION
2. TELESCOPES AND INSTRUMENTS
3. NEW FINDINGS FROM OBSERVATIONS
  - 3.1. Asteroids with Small Inversion Angles
  - 3.2. Asteroids with Large Inversion Angles
  - 3.3. Polarization Behavior at Small Phase Angles
  - 3.4. Spectral Dependence of Polarization Parameters
4. ADVANCES IN THEORETICAL AND EXPERIMENTAL MODELING
  - 4.1. Theoretical Modeling
  - 4.2. Laboratory Experiments
5. POLARIMETRIC MEASUREMENTS AS A TOOL TO ASSESS SURFACE PROPERTIES
  - 5.1. Polarimetric Method of Asteroid Albedo Determination
  - 5.2. Regolith Properties Derived from Polarimetry
  - 5.3. Application to Study Near-Earth Asteroids
6. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

# 1. INTRODUCTION

太陽は無偏光の光を出す  
小惑星は太陽光を反射、  
その際に光が偏光される

- ・ **偏光**とは、、、  
様々な方向に振動している光の波のうち、  
特定の方向に振動する光の波（を観測すること）

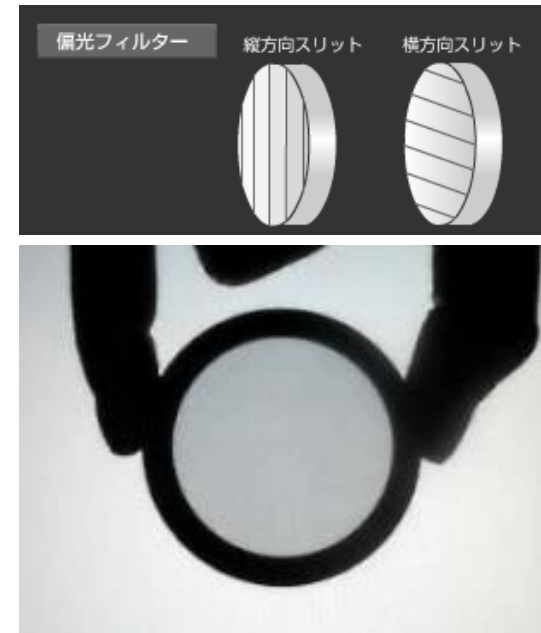
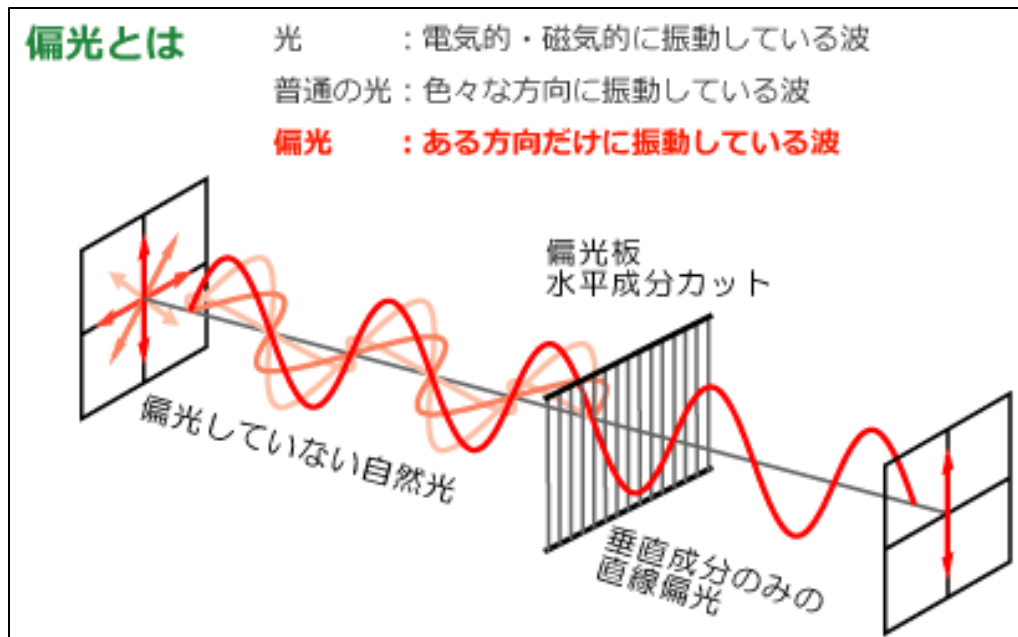
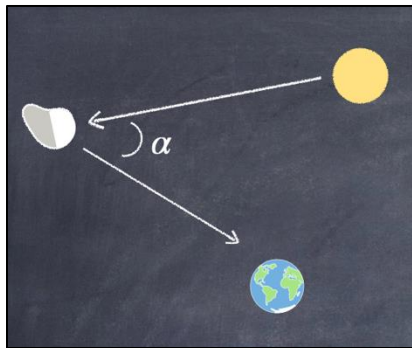


Fig. 1, 2, 3. Polarization, Polarization filter, <https://ja.wikipedia.org/wiki/偏光>.

# 1. INTRODUCTION

- ・ **偏光観測**は小惑星の表面状態を調べる強力な観測方法  
反射率（アルベド）、粒子サイズ $\leftrightarrow$ 密度（空隙率）



- ・ 偏光度  $P_r = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}$

$I_{\perp}$  : 反射フラックスの散乱面垂直成分     $I_{\parallel}$  : 水平成分

- ・ 小惑星には小さな**位相角**での「負の偏光度」が存在

$\rightarrow I_{\parallel} > I_{\perp}$

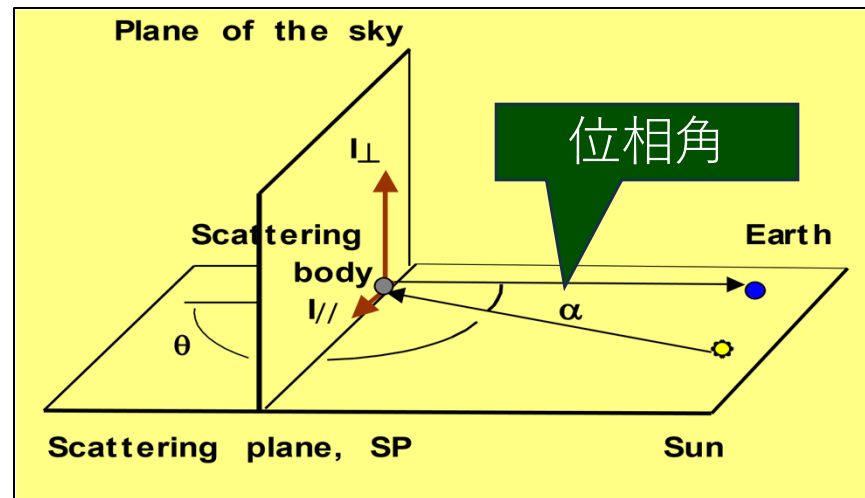
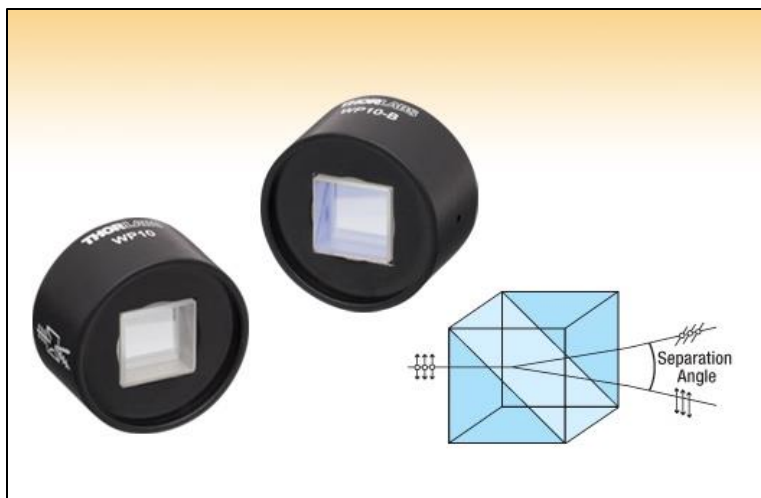


Fig. 4, 5. Phase angle (Sun-Target-Observer), Scattering plane of S-T-O.

## 2. TELESCOPES AND INSTRUMENTS

- 本格的な偏光観測は2000年ごろから  
メインベルト小惑星→地球近傍小惑星、トロヤ小惑星
- Wollaston Prism（偏光装置）を中心に世界中の  
望遠鏡に設置



偏光装置に  
対し垂直な光

偏光装置に  
対し平行な光

Fig. 6, 7. Wollaston Prism, Separation beam (Pirka telescope & MSI FOV).

### 3. NEW FINDINGS FROM OBSERVATIONS

- 位相角 :  $\alpha$  ( $0 \sim 180^\circ$  )  
に依存して偏光度が変化していく  
 $\alpha = 0^\circ \rightarrow P_r = 0\%$
- 偏光カーブ上のいくつかの重要なパラメータ  
偏光度の最小値 :  $P_{\min}(\alpha_{\min})$   
偏光度の最大値 :  $P_{\max}(\alpha_{\max})$   
偏光度の反転角 :  $\alpha_{\text{inv}}(P_r = 0)$   
偏光度スロープ :  $h$

E-(M-) type アルベド 0.19  
散乱の原因は表面不均一？

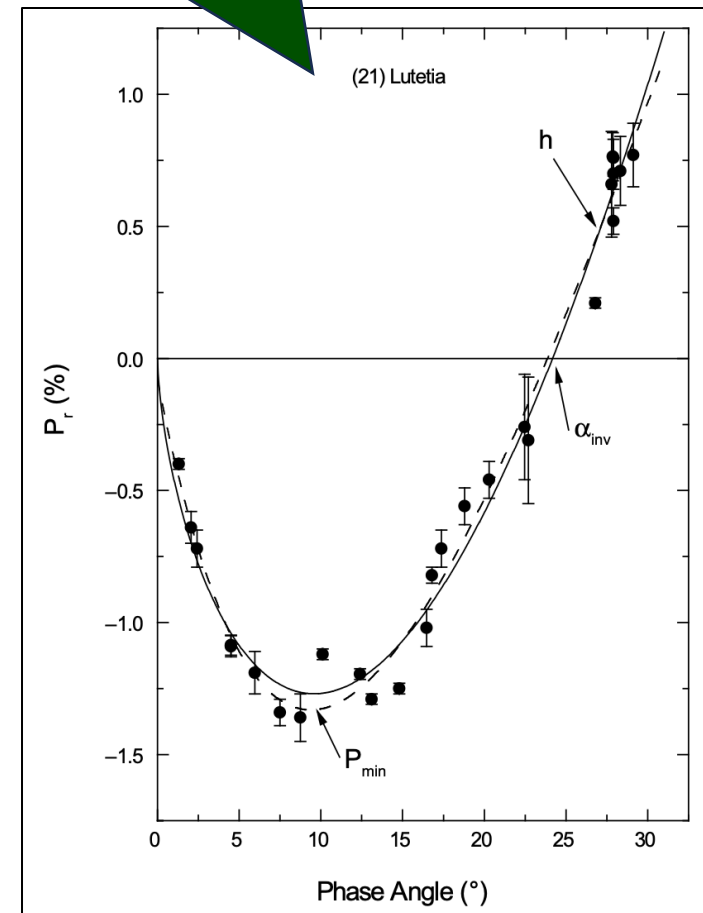


Fig. 8. Polarization curve (21)Lutetia.

### 3. NEW FINDINGS FROM OBSERVATIONS

- 三角関数フィッティング (実線)

$$P_r(\alpha) = b(\sin\alpha)^{c_1}(\cos\frac{\alpha}{2})^{c_2}\sin(\alpha - \alpha_{inv})$$

Lumme-Muinonen関数(1993)

- 線形指数フィッティング (点線)

$$P_r(\alpha) = A\left(\exp\left(-\frac{\alpha}{B}\right) - 1\right) + C\alpha$$

(Muinonen 2009.)

$\alpha \sim 30^\circ$  まではよくフィットするが、 $P_{\max}$ 付近では使えず

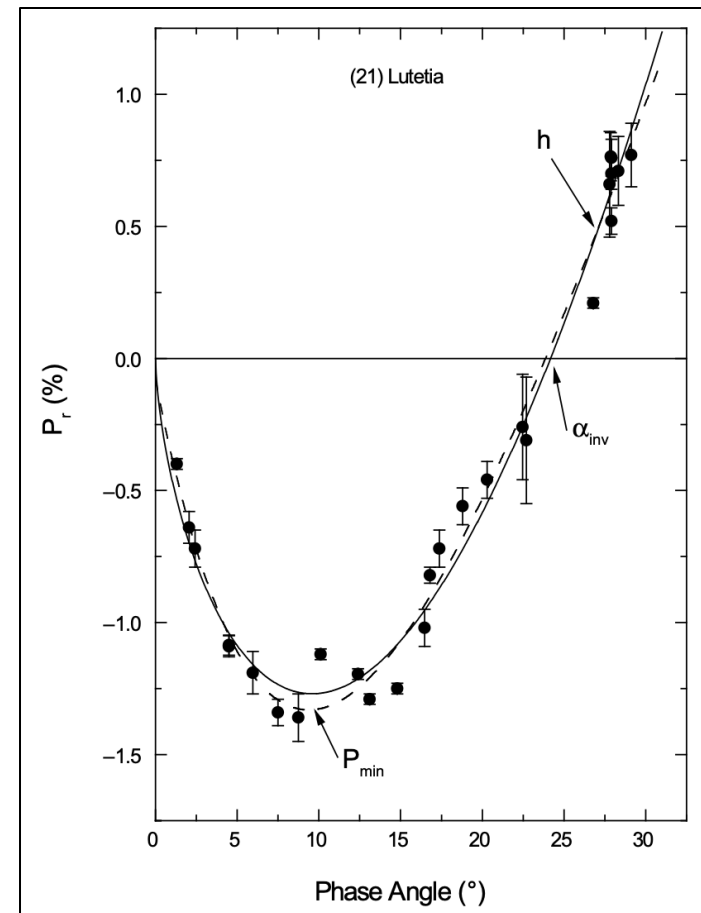


Fig. 8. Polarization curve (21)Lutetia.



### 3.1. Asteroids with Small Inversion Angles

Tab. 1. Polarimetric parameters of C type & S type asteroids.

Polarimetric parameters	Albedo	$\alpha_{\text{inv}}$	h	$P_{\text{max}}$	$P_{\text{min}}$
C-type	Low, 0.03-0.10	Small	Steep	High	Deep
S-type	High, 0.10-0.22	Large	Mild	Low	Shallow

- 小さな $\alpha_{\text{inv}}$  : 14-16°  
 →ダストのない裸岩の表面  
 →F-(C-) type : 炭素質で脆い  
 →レゴリスサイズが可視光  
     0.4 – 0.7  $\mu\text{m}$ より小さく  
     均一に見える
- 枯渇彗星も似た反転角

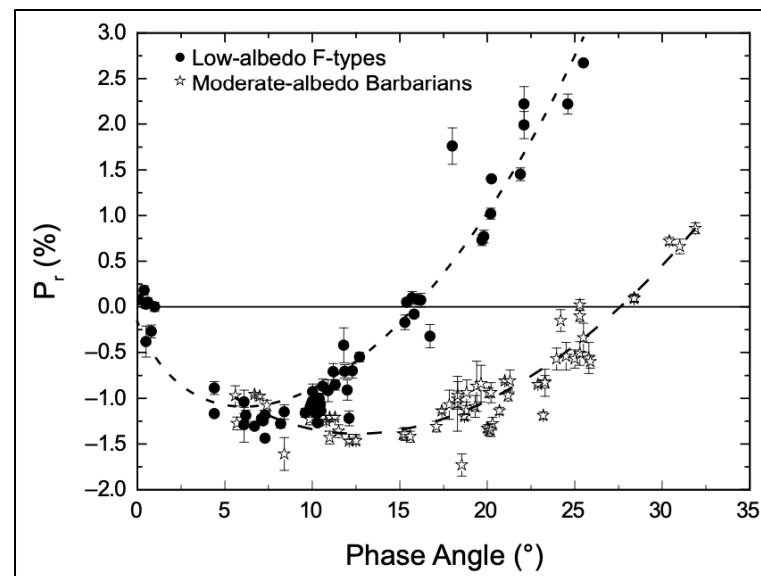


Fig. 9. F- & S-type asteroid polarization phase curve.



## 3.2. Asteroids with Large Inversion Angles

Tab. 1. Polarimetric parameters of C type & S type asteroids.

Polarimetric parameters	Albedo	$\alpha_{\text{inv}}$	h	$P_{\text{max}}$	$P_{\text{min}}$
C-type	Low, 0.03-0.10	Small	Steep	High	Deep
S-type	High, 0.10-0.22	Large	Mild	Low	Shallow

- 大きな $\alpha_{\text{inv}}$  :  $\sim 28^\circ$ 
  - L-(S-) type : 石質、シリカ
  - S-typeの中でも低アルベド
  - CAI中のスピネルが高屈折率を持ち、偏光特性に影響？

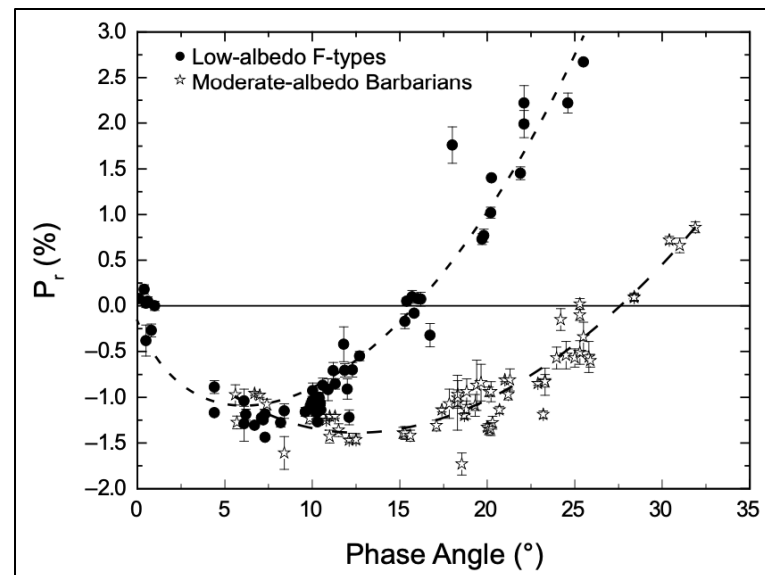


Fig. 9. F- & S-type asteroid polarization phase curve.

### 3.3. Polarization Behavior at Small Phase Angles

- 木星の高アルベド衛星で**衝効果**が確認、小惑星では？  
→**衝効果**：大気のない（少ない）天体が $\alpha \sim 0^\circ$  で急増光する現象

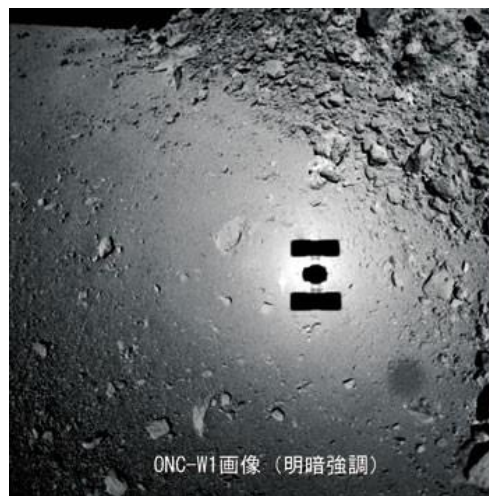
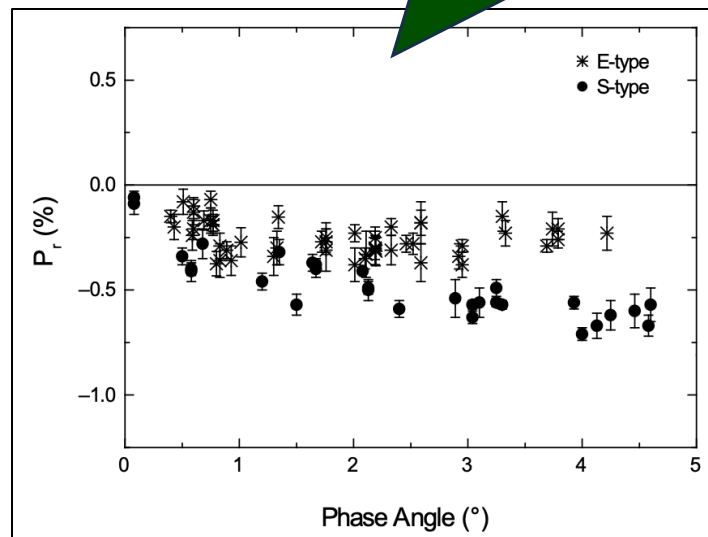


Fig. 10, 11, 12. Opposition surge of lunar surface, Opposition surge of Itokawa & shadow of Hayabusa, Polarization dependence at small phase angles for the high albedo E-type & S-type asteroids.

高アルベドのE-typeでは、  
2つの極小値が存在？  
今後さらなる観測が必要



# 3.4. Spectral Dependence of Polarization Parameters

- S-typeの反射スペクトル（反射率）は可視光長波長側（赤、赤外側）で大きく
- Umov効果： $P_r \propto \frac{1}{\text{Albedo}}$   
アルベドと偏光度の逆相関

S-typeは輝石・かんらん石による0.9  $\mu\text{m}$ の吸収帯（反射率の減少）→アルベドが低下、偏光度の上昇

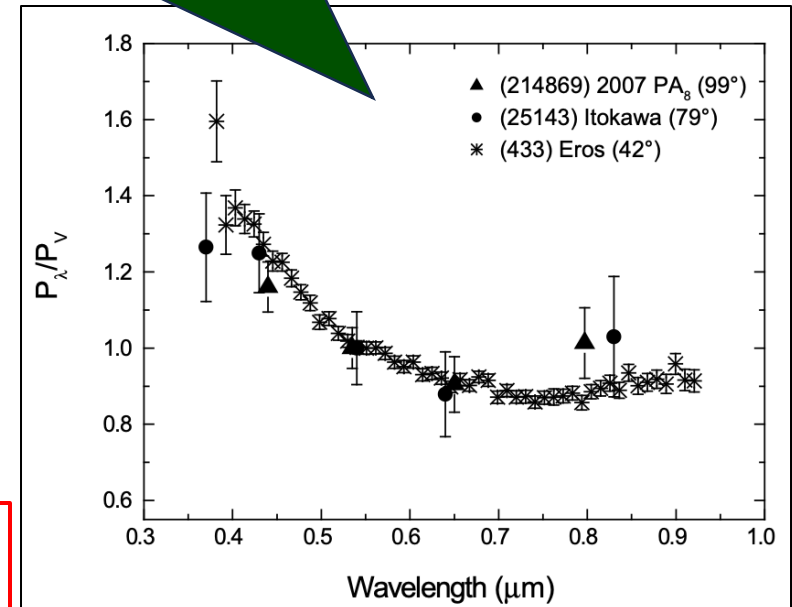
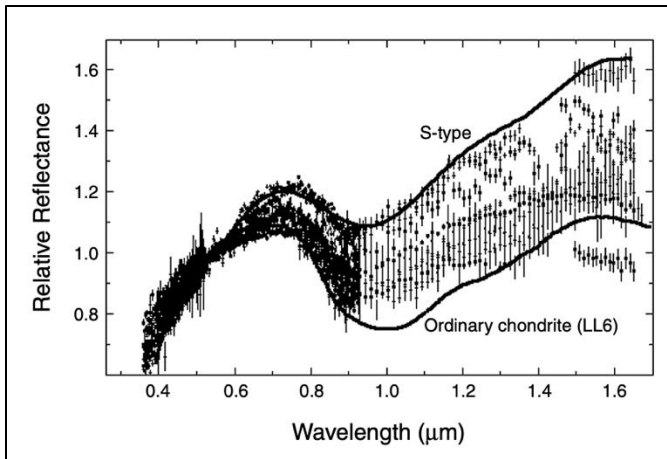


Fig. 13, 14. Relative reflectance of S-type asteroids, Wavelength dependence of moderate albedo S-type NEAs.

## 4.1. Theoretical Modeling

- ・ 粒子表面での負の偏光を発生させるシミュレーション
    - ・ 負の偏光度
      - 後方散乱
    - ・ 広い負の偏光度の範囲 (S-, E-type)
      - 単一粒子散乱、定在波偏光メカニズム
- これらのモデルを現実的な粒子モデルに拡張する  
試み

## 4.2. Laboratory Experiments

- ・ ロゼッタ探査機のフライバイターゲット、  
(21)Lutetiaと(2867)Steinsのレゴリス粒子サイズは  
似ている隕石カタログより $50\text{ }\mu\text{m}$ より小さいと推定
  - ・ 単一粒子と粉末表面の比較
    - ・ 表面が圧縮されると負の偏光が強く、大きな位相角  
で偏光度が増加 (C-type)
    - ・ 粒子密度が最大偏光度 ( $P_{\text{max}}$ ) に影響
- 表面構造や粒子の特性が偏光度に与える影響のより  
詳しい理解

## 5. POLARIMETRIC MEASUREMENTS AS A TOOL TO ASSESS SURFACE PROPERTIES

- ・ 経験的な関係式から、表面状態を推定可能
  1. 偏光パラメータとアルベドの関係
    - 研究の中心
  2. 各小惑星での偏光度の共通点と相違点
    - 比較によって表面物質や粒子サイズを推定

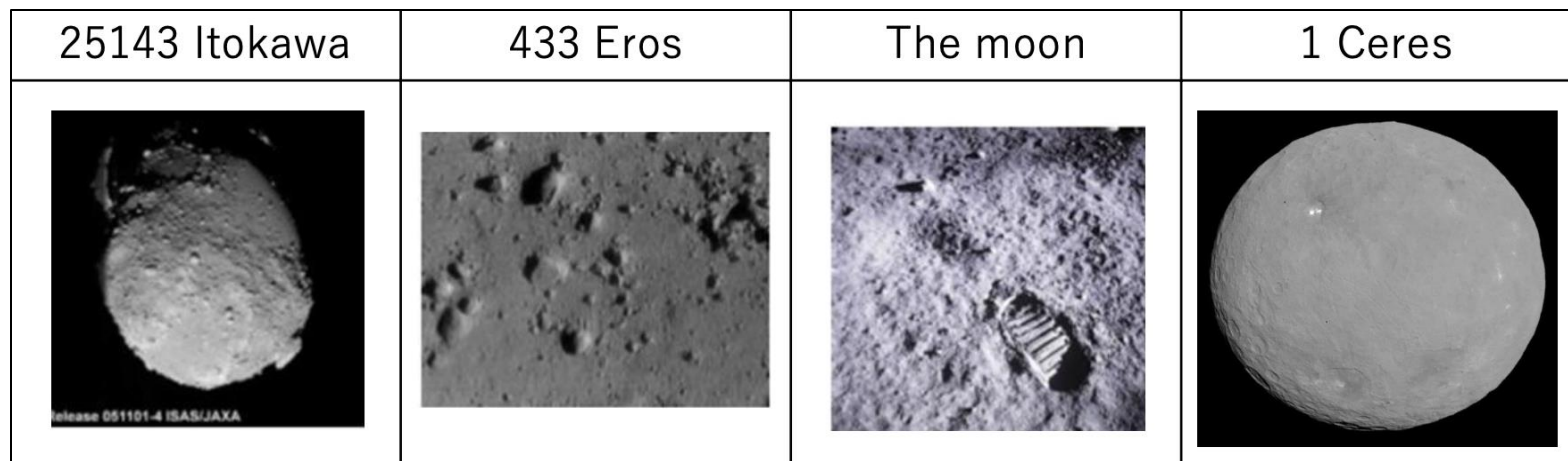


Fig. 15. Regolith properties of several asteroids and Moon.

## 5.1. Polarimetric Method of Asteroid Albedo Determination

- $\alpha \sim 7\text{-}10^\circ$  の  $P_{\min}$  付近 or  $\alpha < 30^\circ$  の正偏光度部分のワンショット（1回の観測）
  - 低（C）、中程度（S）、高（E）アルベドの推定
- 最低でも4箇所の異なる位相角での観測
  - 詳細なアルベド、正確な偏光スロープ  $h$  の決定
  - 「アルベドー  $h$ 」関係式（経験式）
    - 「アルベドー  $P_{\min}$ 」関係式（経験式）
  - 熱赤外観測や掩蔽観測でのデータを利用し、経験式を改良していく試み



# 5.1. Polarimetric Method of Asteroid Albedo Determination

- 「アルベドーh」関係式（経験式）

$$\log A_g = C_1 \log h + C_2$$

$A_g$  : (ジオメトリック) アルベド、  $h$  : スロープ

$C_1$ 、  $C_2$  : 定数（研究によって異なる）

Tab. 2. List of the constants  $C_1$  and  $C_2$  for the relationship between the geometric albedo and the polarimetric slope  $h$  used for asteroid albedo estimation.

Source of albedo data used for calibration	$C_1$	$C_2$	Albedo			References
			$h = 0.04$	$h = 0.10$	$h = 0.30$	
Meteorites	-1.00	-1.78	0.415	0.166	0.055	<i>Bowell and Zellner (1974)</i>
Meteorites	-0.92	-1.72	0.368	0.158	0.058	<i>Zellner et al. (1977)</i>
IRAS/ Occultations/ Spacebased	$-0.983 \pm 0.082$	$-1.731 \pm 0.066$	0.440	0.179	0.061	<i>Lupishko and Mohamed (1996)</i>
IRAS	$-1.118 \pm 0.071$	$-1.779 \pm 0.062$	0.608	0.218	0.064	<i>Cellino et al. (1999)</i>
Occultations	$-0.970 \pm 0.071$	$-1.667 \pm 0.083$	0.489	0.201	0.069	<i>Cellino et al. (2012)</i>
WISE	$-1.207 \pm 0.067$	$-1.892 \pm 0.141$	0.624	0.207	0.055	<i>Masiero et al. (2012)</i>
Occultations	$-1.124 \pm 0.032$	$-1.789 \pm 0.025$	0.606	0.216	0.063	<i>Cellino et al. (2015b)</i>

## 5.1. Polarimetric Method of Asteroid Albedo Determination

- ・ 「アルベドー $P_{\min}$ 」 関係式（経験式）

$$\log A_g = C_3 \log P_{\min} + C_4$$

→  $P_{\min}$  の使用は信頼性に欠ける

- ・ 「アルベドー $P_{\max}$ 」 関係式（経験式）

$$\log A_g = C_5 \log P_{\max} + C_6$$

$P_{\min}$  : 最小偏光度、  $P_{\max}$  : 最大偏光度

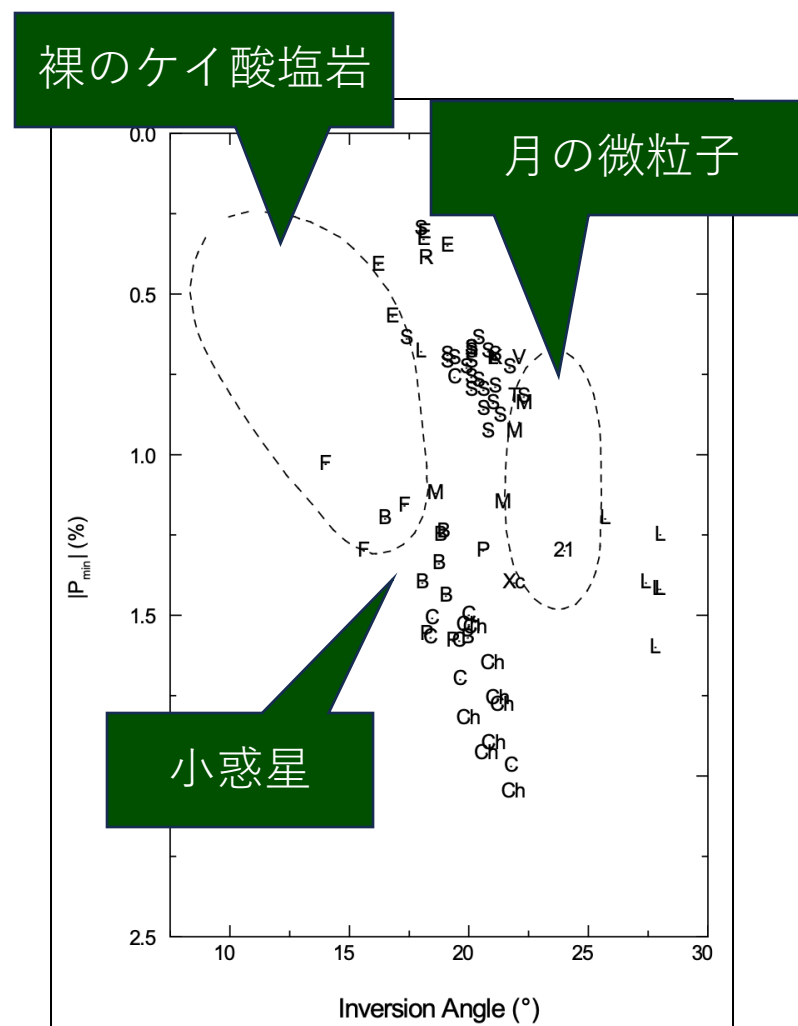
$C_3$ 、  $C_4$ 、  $C_5$ 、  $C_6$  : 定数（研究によって異なる）

→ 「アルベドー $h$ 」 関係式が最も「その場」観測と一致

## 5.2. Regolith Properties Derived from Polarimetry

- 「 $P_{\min}$  vs  $\alpha_{\text{inv}}$ 」関係  
(偏光カーブの形)
  - 表面の粒子サイズの推定
- 裸のケイ酸塩岩と月の微粒子がことなる領域にプロット
- 小惑星はその中間にプロット
  - 粒径が30~300  $\mu\text{m}$ の隕石と一致
  - 小惑星表面の粒径も同程度

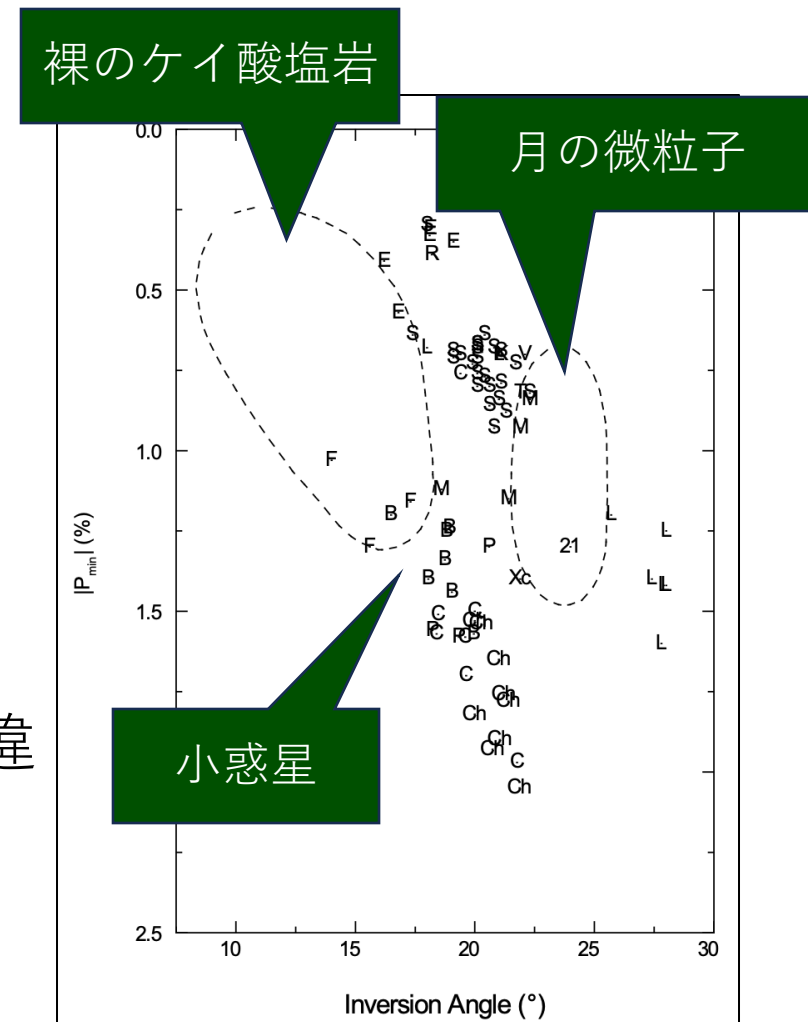
Fig. 16. Relationship between  $P_{\min}$  vs.  $\alpha_{\text{inv}}$  for asteroids of different taxonomic types.



## 5.2. Regolith Properties Derived from Polarimetry

- F-(C-) type (小さな $\alpha_{inv}$ ) は裸岩の領域にプロット
- L-(S-) typeは月の微粒子の外側の領域にプロット  
→ 偏光位相曲線の形と各タイプの共通点  
→ 分光観測以外の分類法
- 同じタイプでの偏光特性の相違  
→ レゴリスの構造の相違

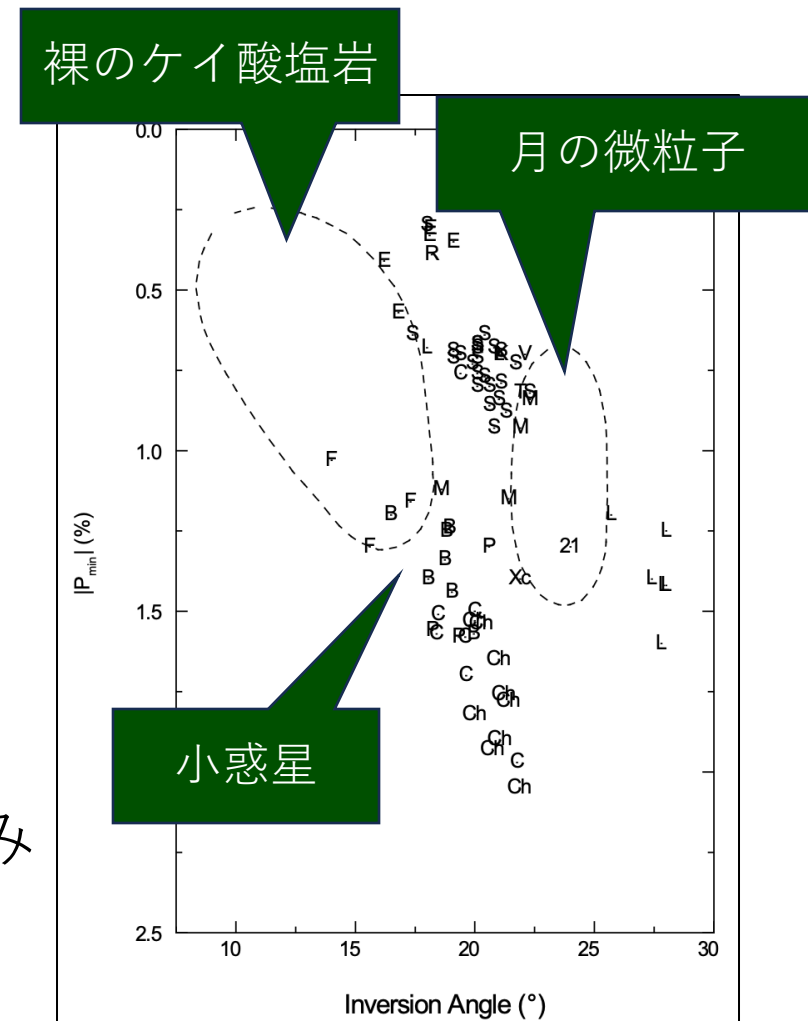
Fig. 16. Relationship between  $P_{min}$  vs.  $\alpha_{inv}$  for asteroids of different taxonomic types.



## 5.2. Regolith Properties Derived from Polarimetry

- 小さな $\alpha_{\text{inv}}$   
→ 光学的に均質なレゴリス  
(微細な構造で裸状)
- 大きな $\alpha_{\text{inv}}$   
→ 異なるサイズのレゴリス  
の集まり
- 偏光観測の精度向上、表面  
状態の正確なモデリングの試み

Fig. 16. Relationship between Pmin vs.  $\alpha_{\text{inv}}$  for asteroids of different taxonomic types.

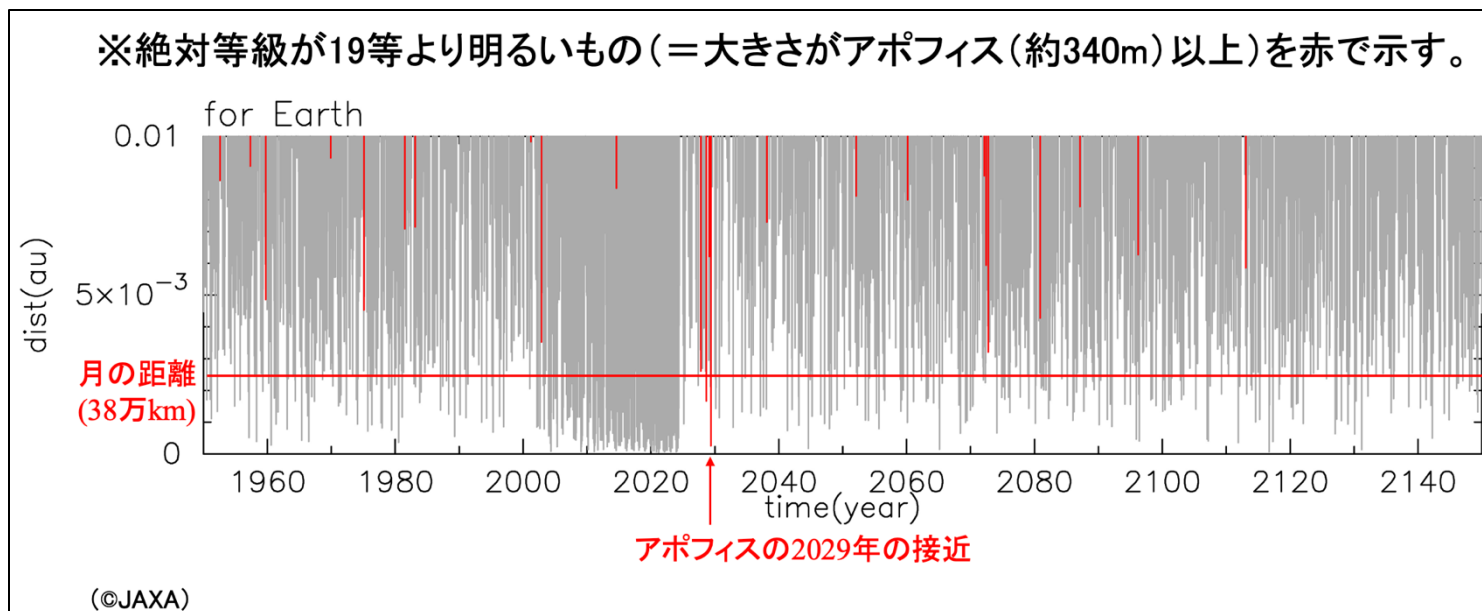


## 5.3. Application to Study Near-Earth Asteroids

- 地球近傍小惑星は高位相角での最大偏光度を観測可能
- 2000 PN9 :  $P_{\max} \sim 7.7 \%$ ,  $\alpha_{\max} \sim 103^\circ \rightarrow$  S-type  
高アルベド :  $P_{\max} \sim 2.3 \%$ ,  $\alpha_{\max} \sim 80^\circ \rightarrow$  E-type  
Ra-Shalom :  $P \sim 11 \%$ ,  $\alpha \sim 60^\circ \rightarrow$  C-type
- アルベド（タイプ）は高位相角での観測で推定可能  
→PHAでのアルベド推定に利用
- ESOのVLTなど大きな望遠鏡を用いれば、  
「アポフィス」のような危険天体のアルベドとサイズ  
を導出可能（アルベド & V等級 → サイズ）

## 5.3. Application to Study Near-Earth Asteroids

- ・ アポフィス：～340 mのPHA,  
2029年4月13日に再接近予定  
再接近距離 ～3 万km  
地球-月間の10%（静止衛星）

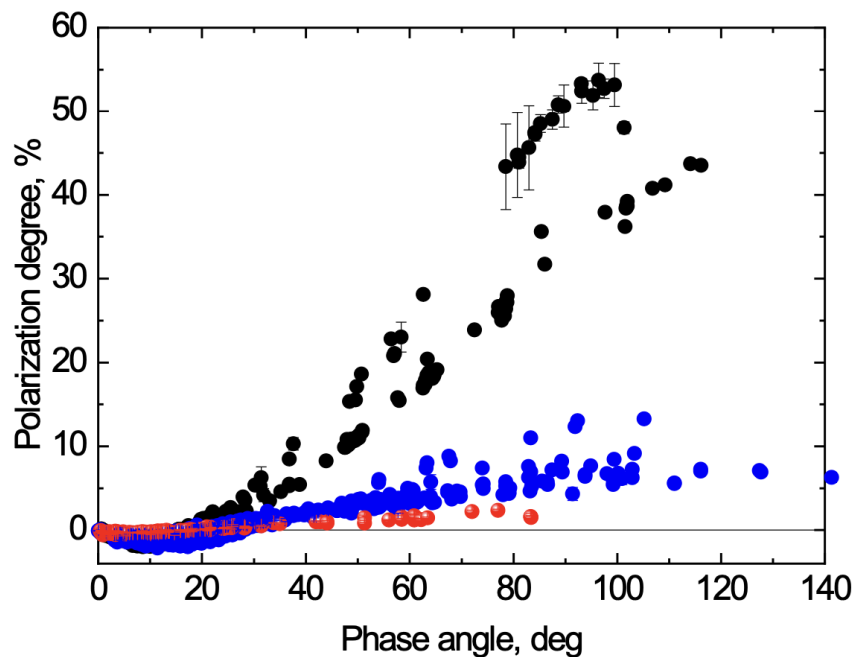




## 5.3. Application to Study Near-Earth Asteroids

### Albedo determination based on $P_{\max}$

#### II. Near-Earth Asteroids



C-complex ( $p \sim 0.07$ )  $P_{\max} \sim 40-50\%$

S-complex ( $p \sim 0.2$ )  $P_{\max} \sim 6-12\%$

E-type ( $p \sim 0.4$ )  $P_{\max} \sim 2\%$

Asteroid	$P_{\max}$	$\alpha_{\max}$	Reference
Ryugu	$53 \pm 0.4\%$	$102 \pm 2^\circ$	Kuroda+2021
Phaethon	$50 \pm 1\%$	$106 \pm 2^\circ$	Ito+2018
Phaethon	$>42\%$	$>114^\circ$	Shinnaka+2018
Phaethon	$\sim 45\%$	$\sim 130^\circ$	Devogele+2018
Phaethon	$45 \pm 1\%$	$124 \pm 1^\circ$	Kiselev+2022
1998 KU2	$\sim 49\%$		Kuroda+2018
2005 UD	$\sim 36\%$	$\sim 100$	Ishiguro+2022

## 6. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

- 狭い負の偏光と小さな $\alpha_{\text{inv}}$   
→F-(C-) type  
広い負の偏光と大きな $\alpha_{\text{inv}}$   
→L-(S-) type、スピネルの影響？
- 高位相角でのワンショットの観測でアルベドを推定  
→分光せずにタイプを推定可能
- 観測技術と観測天体の拡大、理論モデリングの発展  
→メインベルトからNEAへ、偏光と表面散乱の関係性