

## 偏光度で探る小惑星リュウグウの表層状態

黒田 大介 (京都大学)、高橋 隼、戸塚 都、川上 碧 (兵庫県立大学)、  
長谷川 直、吉川 真(JAXA)、Sunho Jin, Jooyeon Geem,  
Yoonsoo P. Bach 石黒 正晃 (ソウル大学)

# 本日の話

## 地球近傍小惑星(162173)リュウグウの可視偏光撮像観測

### ○どんな天体か

日本の小惑星探査機はやぶさ2が探査に行き、その岩石サンプルを採取して地球に持ち帰った(2020年12月)。

>> 地上観測および探査によって、網羅的に観測や測定が行われたが、光の偏り = 偏光度の測定は実施されず、代替の観測もなかった。

本研究は、国内外の4箇所13機関の研究者が協力して、直線偏光度の測定を行い、Kuroda+2021 ApJLとして出版、AASの研究ハイライトとしても紹介された。

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 911:L24 (6pp), 2021 April 20  
© 2021. The American Astronomical Society. All rights reserved. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abc25>

**Implications of High Polarization Degree for the Surface State of Ryugu**

Daisuke Kuroda<sup>1</sup>, Jooyeon Geem<sup>2</sup>, Hiroshi Akitaya<sup>3,4</sup>, Sunho Jin<sup>2</sup>, Jun Takahashi<sup>5</sup>, Koki Takahashi<sup>6</sup>, Hiroyuki Naito<sup>7</sup>, Kana Makino<sup>8</sup>, Tomohiko Sekiguchi<sup>9</sup>, Yoonsoo P. Bach<sup>2</sup>, Jinguok Seo<sup>2</sup>, Shuji Sato<sup>10</sup>, Hiroshi Sasago<sup>10</sup>, Koji S. Kawabata<sup>4</sup>, Aoi Kawakami<sup>1</sup>, Miyako Tozuka<sup>11</sup>, Makoto Watanabe<sup>11</sup>, Seiko Takagi<sup>12</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>12</sup>, Makoto Yoshikawa<sup>13</sup>, Sunao Hasegawa<sup>13</sup>, and Masateru Ishiguro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Okayama Observatory, Kyoto University, 3037-5 Honjo, Kamogata-cho, Asakuchi, Okayama 719-0232, Japan; [dikuroda@kwasan.kyoto-u.ac.jp](mailto:dikuroda@kwasan.kyoto-u.ac.jp)  
<sup>2</sup> Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea  
<sup>3</sup> Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan  
<sup>4</sup> Hiroshima Astrophysical Science Center, Hiroshima University, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan  
<sup>5</sup> Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan  
<sup>6</sup> Asahikawa Campus, Hokkaido University of Education, Hokumon, Ashikawa, Hokkaido 070-8621, Japan  
<sup>7</sup> Nayoro Observatory, Nisshin, Nayoro, Hokkaido 096-0066, Japan  
<sup>8</sup> Nayoro City University, Nishi 4-jo, Nayoro, Hokkaido 096-8641, Japan  
<sup>9</sup> Astrophysics Department, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8602, Japan  
<sup>10</sup> Sasago Co., Ltd., Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-0815, Japan  
<sup>11</sup> Department of Applied Physics, Okayama University of Science, Kita-ku, Okayama, Okayama 700-0005, Japan  
<sup>12</sup> Department of CosmoSciences, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan  
<sup>13</sup> Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan  
Received 2021 January 21; revised 2021 February 27; accepted 2021 March 12; published 2021 April 20

AAS NOVA Research highlights from the journals of the American Astronomical Society

NAVIGATE  Search

New View of Asteroid Ryugu's Surface

By Susanna Kohler on 28 April 2021 FEATURES

Share: [Twitter](#) [Facebook](#) [LinkedIn](#) [Google+](#) [Reddit](#) [Email](#)

## イントロ: 太陽系小天体(小惑星や彗星)の偏光度

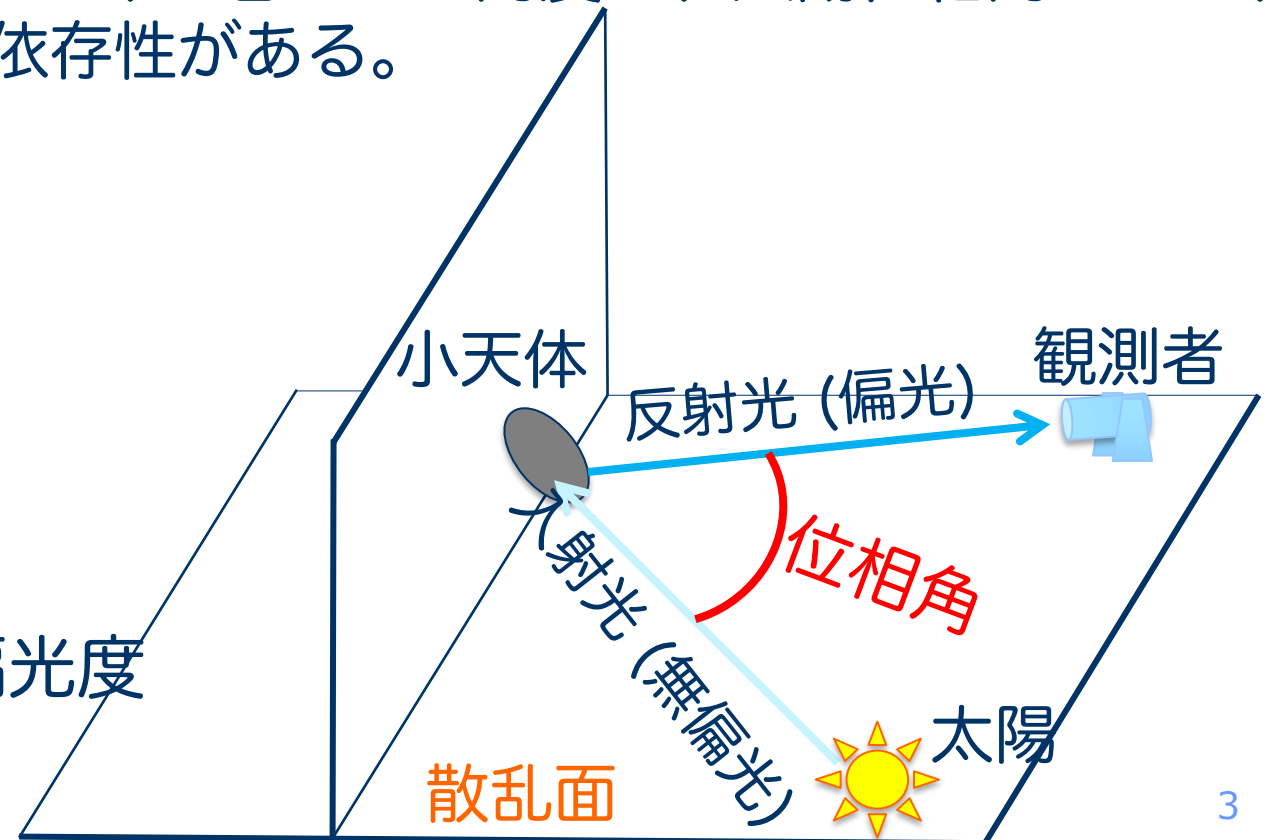
- 太陽系小天体の観測は、小天体表面に照射された太陽光の反射光を測定する。太陽光は無偏光(特定の方向に偏りが無い)なので、偏光度は小天体に起因する。
- 太陽-小天体-観測者の位置関係は、常に変化するため、その都度決まる散乱面を基準とした偏光度に変換する。また、3者のなす角度は、太陽位相角といい、太陽系小天体の偏光度は、位相角依存性がある。

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

$I_{\perp}$ : 散乱面に垂直な成分

$I_{\parallel}$ : 散乱面に平行な成分

$P_r$ : 散乱面を基準とした直線偏光度



# イントロ: 偏光度から何を調べるのか?

- 反射光の偏光率は散乱角によって変化し、散乱媒質の特性に依存する。  
 具体的には、**複素屈折率(化学組成)**、**散乱粒子のサイズ分布**、**形状**、**構造**など

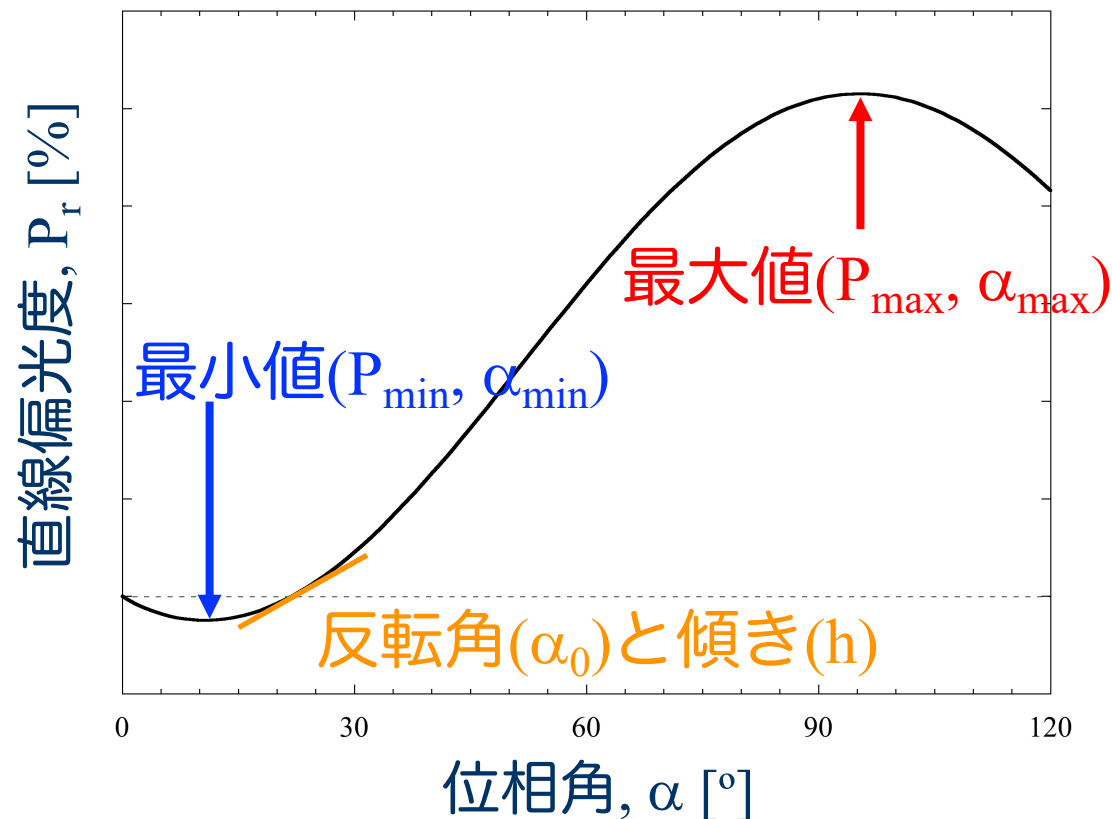
↕ ここを結びつける研究

直線偏光度の位相角依存性から導出可能なパラメータ

例えば..月の偏光度

- ・ 海 (暗, 玄武岩) > 高地 (明, 斜長岩)

アルベド ~反射率	散乱 回数	反転角	傾き	<b>Pmax</b>	Pmin
低	小	<20	急	<b>高</b>	深
高	大	~20	緩	<b>低</b>	浅



## 小惑星リュウグウの偏光観測

- 国内外4箇所の口径1.5~2mの望遠鏡と偏光撮像装置を用い、2020年9月から12月、合計24夜の観測を実施した。  
このうち、なゆた望遠鏡+WFGS2偏光モードによる観測は4夜である。

望遠鏡/観測所	装置	観測夜数	バンド
ピリカ/北海道大学附属	MSI	5	R <sub>c</sub>
なゆた/西はりま	WFGS2	4	V,R <sub>c</sub>
かなた/東広島	HONIR	10	R <sub>c</sub>
/Bohyunsan	TriPol#3	7	R <sub>c</sub>

なゆた望遠鏡による観測は、共同利用観測として申請した要求夜数を満たす。  
本講演では、主にWFGS2の偏光モードについて説明する。

## なゆた望遠鏡+WFGS2の観測(川上さんのポスター参照)

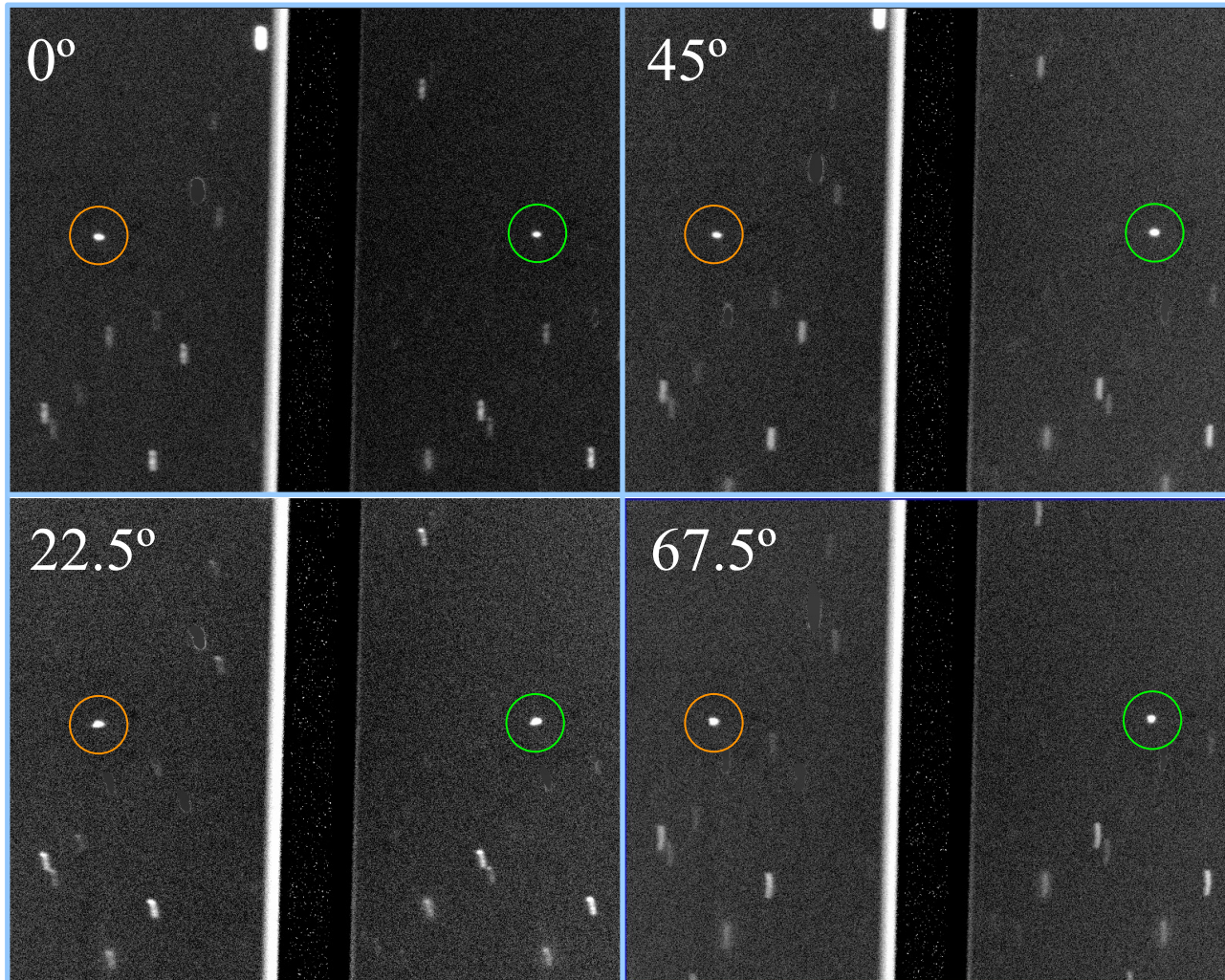
- 天体からの光を、偏光素子を使って成分を分離し、その強度を測定する  
WFGS2の観測では、偏光素子としてウォラストンプリズムを用いており、半波長板を4方向に回転させたデータから直線偏光を導出する。



半波長板の方位角を 0, 45, 22.5, 67.5度でそれぞれ、撮像を行い、1セットとして、1点の直線偏光度を導出する

## WFGS2の観測データ

- WFGS2の2020年11月15日の画像 (半波長板 4回転分)  
移動天体追尾を行っているため、背景の星は伸びている。

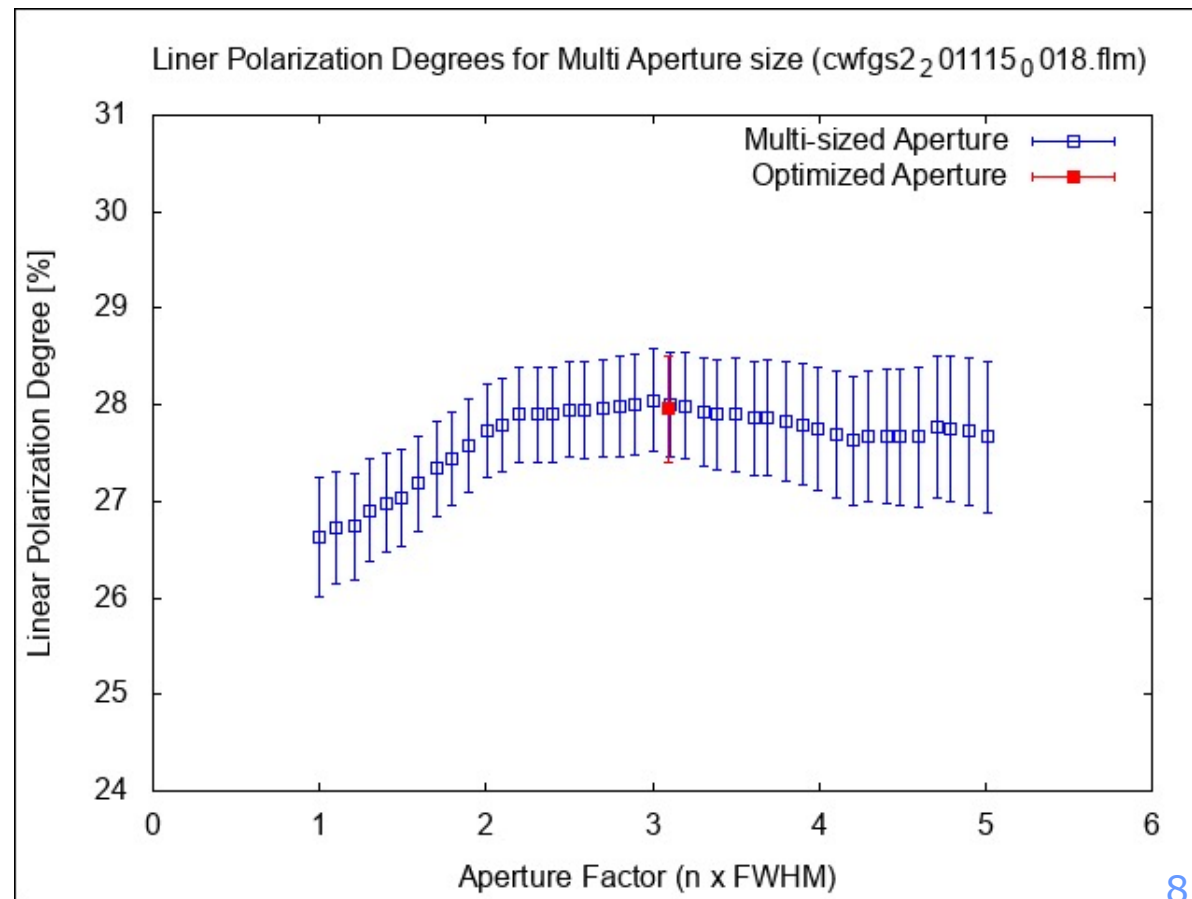
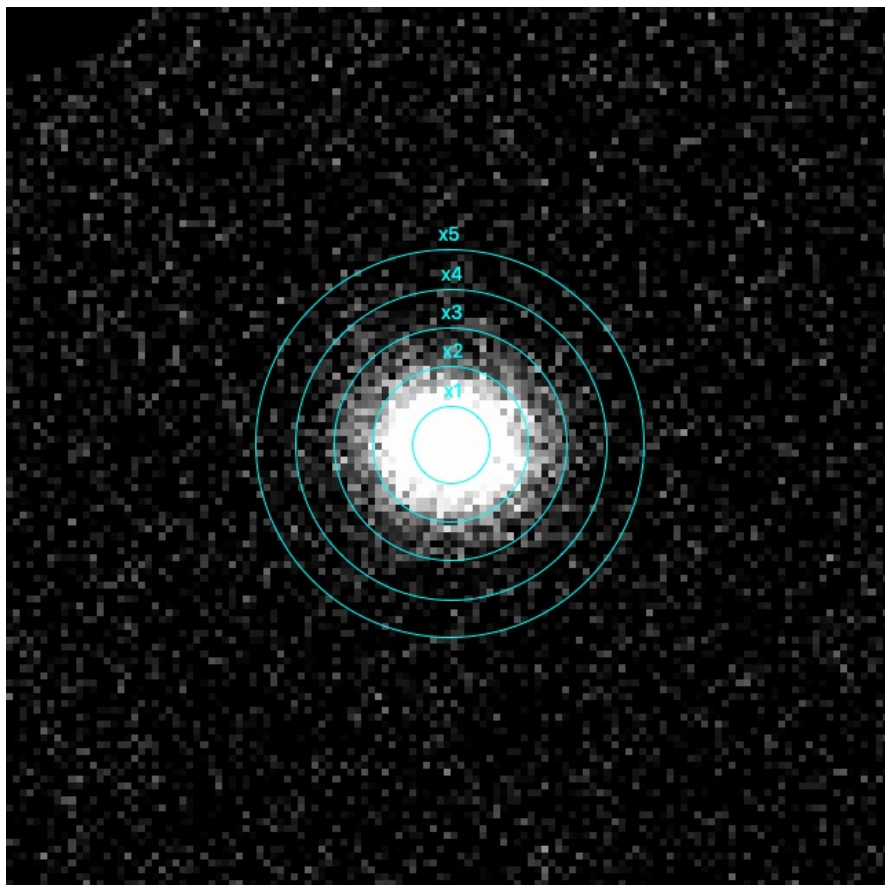


1枚の画像に常光と異常光と位相の90度異なる光点が結像する。

アパーチャ測光の手法で、それぞれのフラックスを測定する。

## 偏光度導出のためのアパーチャ測光

- FWHMを基準に0.1倍刻みで、アパーチャ測光を行い、適切なアパーチャサイズを決める。S/Nが最大になるところでは、アパーチャサイズが小さすぎる場合が多い。特に、小惑星は星像が乱れるケースもある。



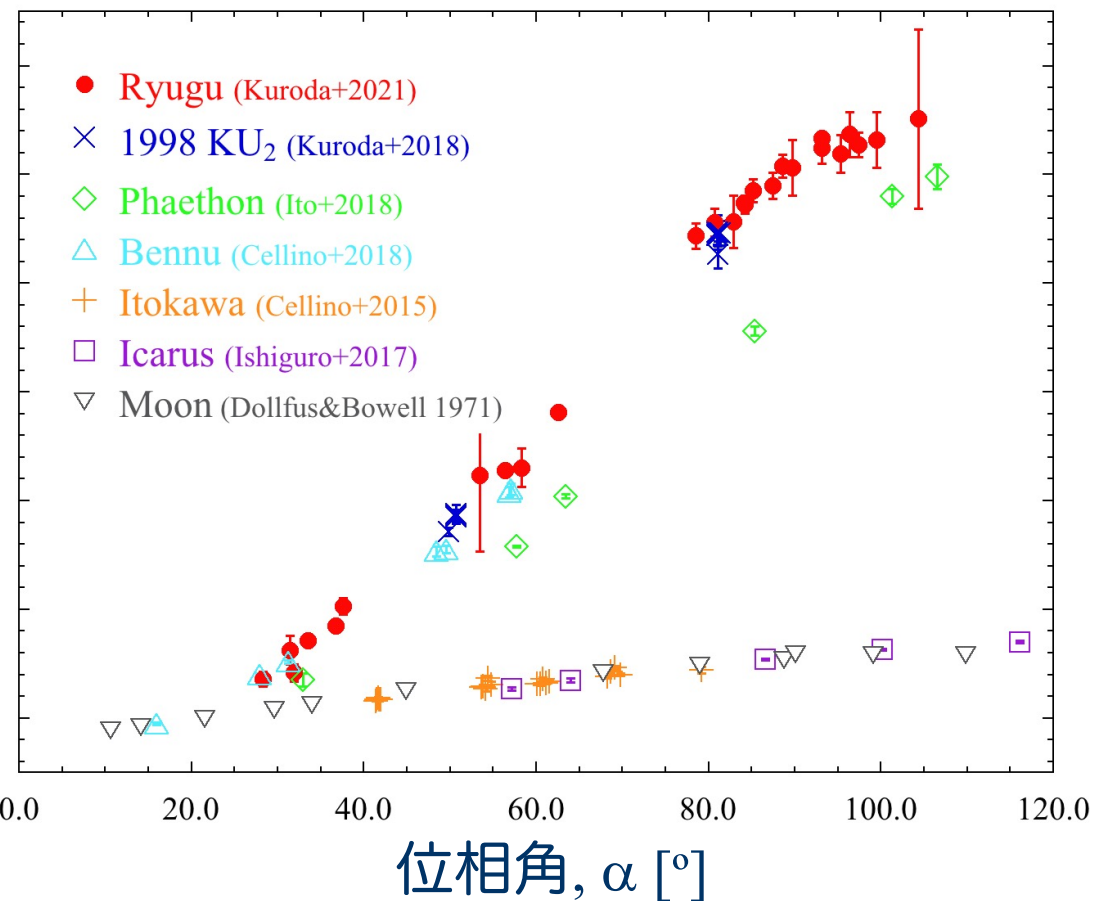
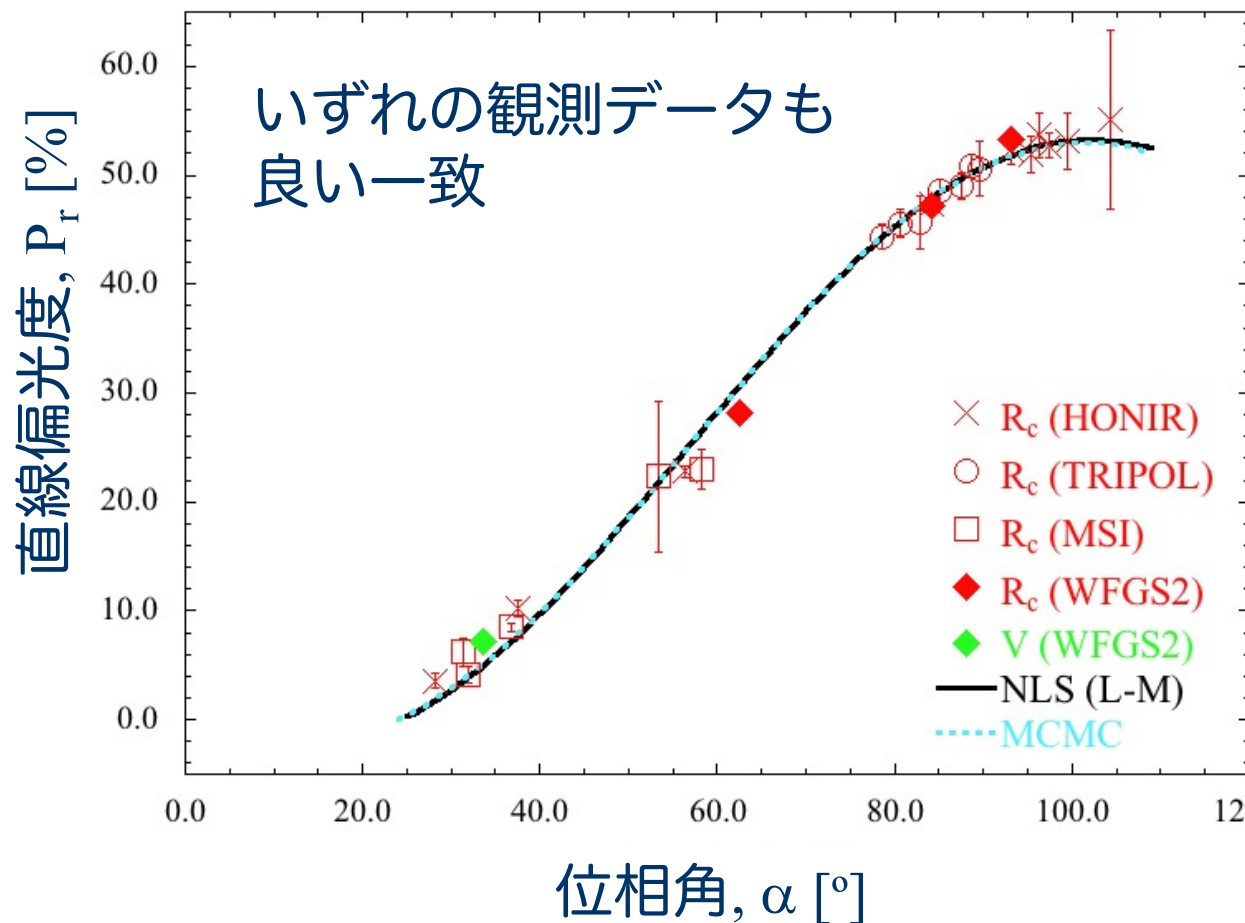


## 直線偏光度導出と補正值

- 1画像あたり2点、半波長板4方向のデータから、ストークスパラメータ(Q/I, U/I)を求め、直線偏光度と偏光方位角を導出
- 偏光標準星を使って、別途算出した  
器械偏光度 (0.64%@V, 0.31%@R<sub>c</sub>)、  
偏光方位角のずれ (5°.47@V, 5°.60@R<sub>c</sub>)を補正。  
→ 一般的な天体の直線偏光度と偏光方位角
- 散乱面を基準とした直線偏光度、偏光方位角に変換、  
→ 太陽系天体の直線偏光度と偏光方位角

# 小惑星リュウグウの直線偏光度

- 横軸に位相角、縦軸に偏光度をプロット  
リュウグウの偏光度の最大値は、**~53%**！ (過去最大)



## 小惑星の直線偏光度の要因は？

- 小惑星の偏光度の要因 ← まだ詳しく解明されていない  
小惑星の表層(散乱媒質)の特性に依存する ← これは確実

表層のアルベド(~反射率) → 低い方が高い偏光度

リュウグウのアルベドは、とても低いので、高い偏光度は当然か？

→ すでに例外が知られている(Ito+2018)

他にも、偏光度を変動させる原因があるはず。

### >> 表層の粒子サイズ <<

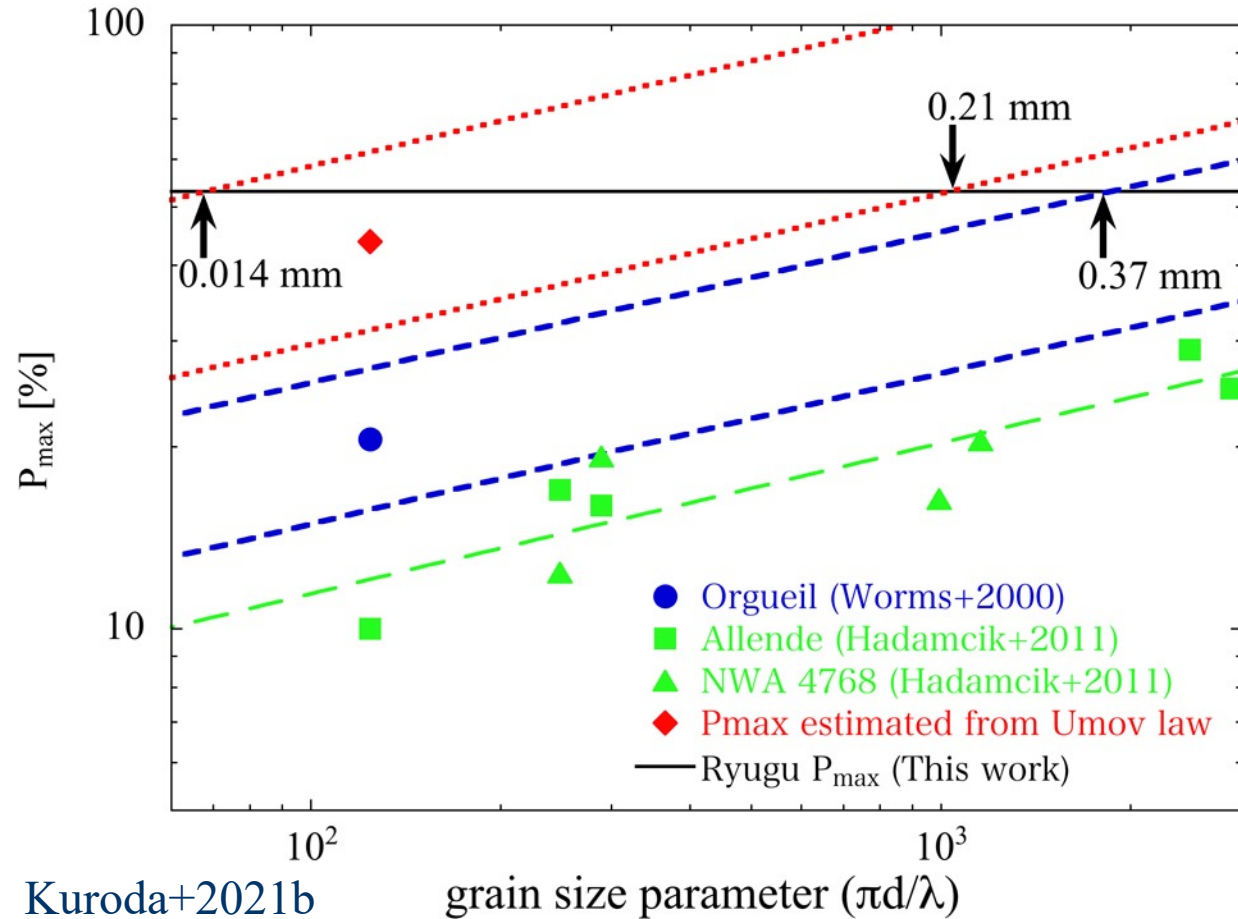
月表層の砂粒子に偏光度のサイズ依存性 (Dollfus+1971, Shkuratov+1992)。

小惑星リュウグウで収集した岩石を用いければ、同様な調査可能。

→ このような成果が出るのは、まだ先なので..

# 直線偏光度の最大値と粒子径の関係

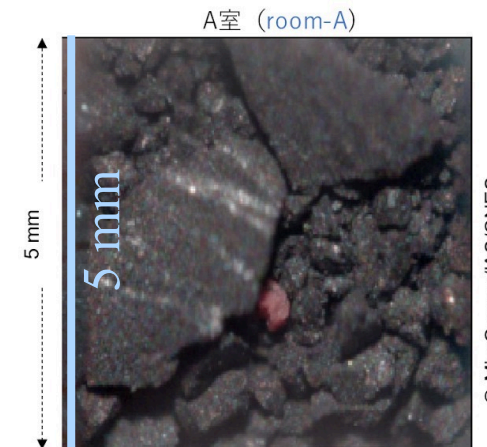
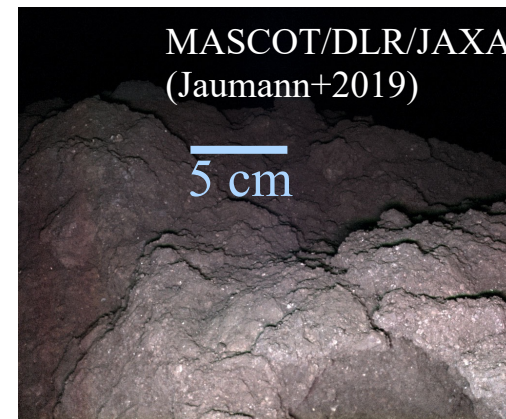
- 隕石の偏光度の粒子サイズ依存性が、リュウグウも同様にあると仮定する。リュウグウと鉱物組成の近い低アルベドの隕石のデータを使用した。



Kuroda+2021b

偏光度観測からみた小惑星リュウグウの粒子径は、**sub-mm**サイズを示す。

大きな石の構成粒子の可能性も。



© MicrOmega/IAS/CNES

着陸機による近接画像 サンプルの近赤外画像

## 小惑星リュウグウの偏光観測のまとめ

- なゆた望遠鏡を含む国内外4施設で、小惑星リュウグウの偏光観測を実施した。いずれのデータも整合性のある直線偏光度が得られた。
- 小惑星リュウグウの最大偏光度は、53%と過去の太陽系小天体の中で最大であった。
- 隕石サンプルとの比較から、リュウグウ表層にsub-mmサイズの粒子が支配的に存在する可能性が示唆された。
  - >> この結果は探査機による調査(解像度が足りないこともあるが)と矛盾する。
  - >> 一方で、リターンサンプル内には、このオーダーの粒子もあることが分かった。今後のリュウグウの表層サンプルを使用した調査に期待したい。

## 今後の計画

- 小惑星の偏光度最大値を指標として、その表層の物理量を導くことができる。まずは、スペクトルタイプ=表層の鉱物組成ごとに、どのような特徴があるか調査したい。
- 観測機会の限られる偏光度の最大値付近の観測は、まだ少なく我々の研究チームが世界をリードしている。

現在応募中の共同利用にも観測プロポーザルを申請予定である。

なゆた望遠鏡の観測に関して一言:

移動天体の追尾精度が改善されるとより良いと思う。