

Rubin/LSSTとTomo-e Gozenによる 地球接近小惑星の含水特性の調査

長澤春香

酒向重行(東京大学)、紅山仁(Observatoire de la Côte d'Azur/東京大学)、

深井稜汰(JAXA)、大澤亮(国立天文台)

木曾シュミットシンポジウム2026

2026年6月3日(水) 14:20-14:40

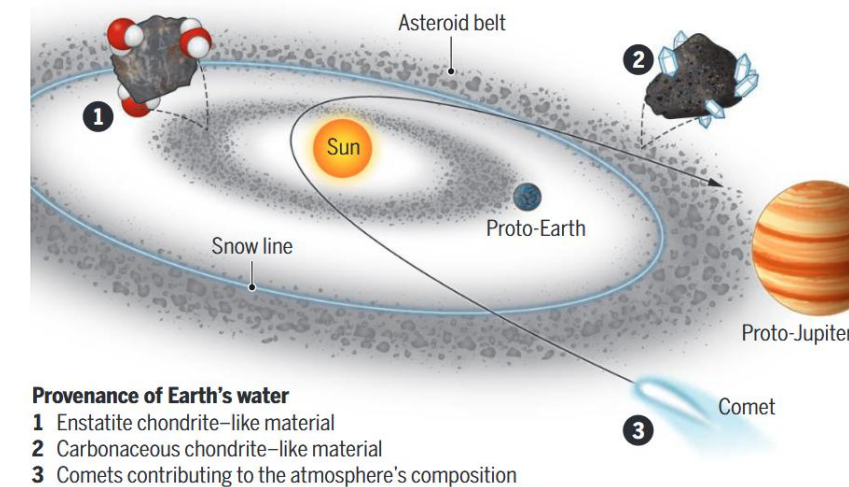
地球の水の起源

2

- 原始地球は、水が固相で存在できる境界「スノーライン」の内側で形成されたため、水をほとんど含まなかった(Meech & Raymond 2020)。
- 現在の地球に存在する大量の水はどこからやってきたのか？
- スノーライン外側のC型メインベルト小惑星(MBA)は、含水鉱物として多くの水を保持
- これらが軌道進化によって地球接近小惑星(NEA)となり、地球へ衝突して現在の大量の水を供給したとする説が有力



地球(気象庁)



太陽系のスノーライン (Peslier 2020)

地球接近小惑星の軌道

- メインベルト小惑星 (MBA)

火星と木星の公転軌道の間、多くの小惑星が分布

- 地球接近小惑星 (Near-Earth asteroids: NEAs)

近日点距離 $q < 1.3$ AU

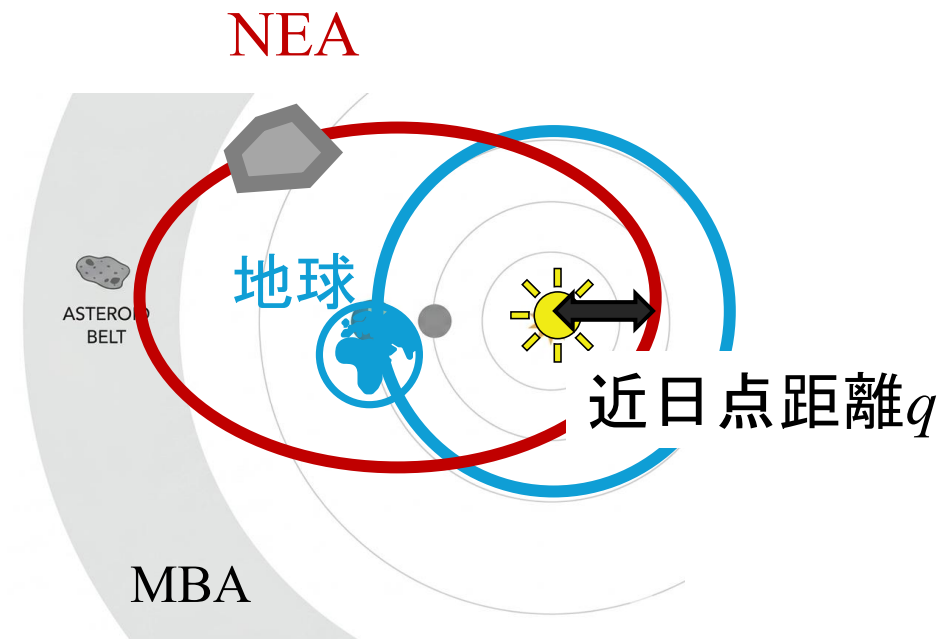
メインベルトから軌道進化したものと考えられる。

太陽光により変成を受けやすい。



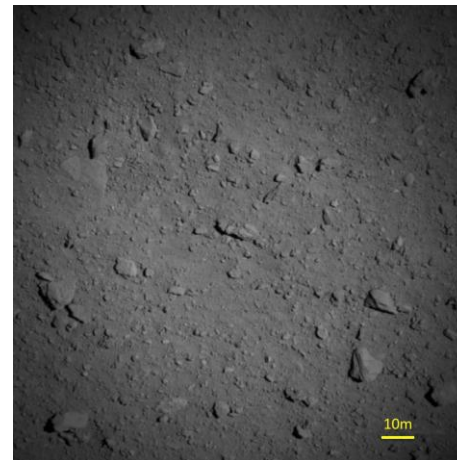
木星

NEAの軌道のイメージ
(Planetary Resources Inc.より改変)

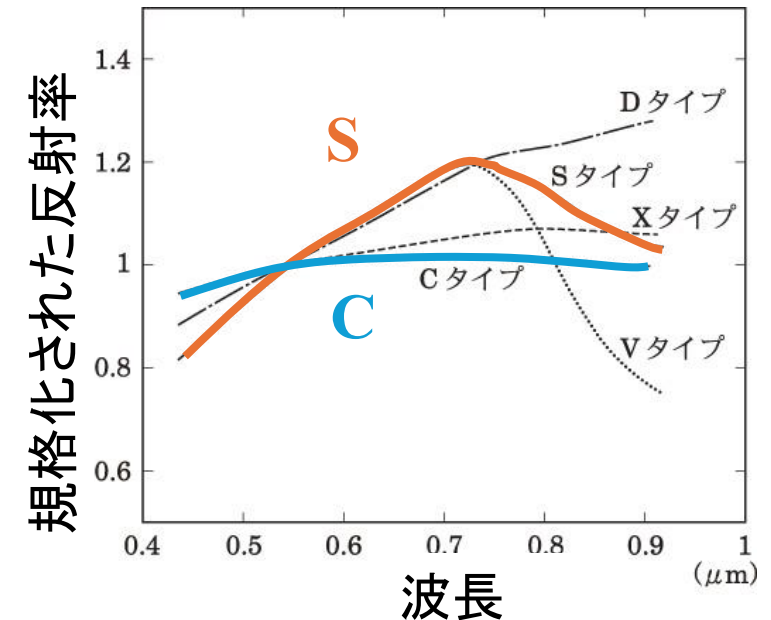


小惑星の種類

- 小惑星から届く光は太陽光の反射
- 小惑星のスペクトルを太陽のスペクトルで割ると、小惑星表面の反射特性(反射スペクトル)が得られる。
- 反射スペクトルは大きく2種類に分類(Zellner 1973)
 - **S型** | 石質(stony)
 - **C型** | 炭素質(carbonaceous)
含水鉱物(-OH基)を多く含む



Ryugu(C型)の表面
© JAXA, 東京大学ほか



小惑星の代表的なスペクトル型
(「太陽系と惑星」シリーズ現代の天文学第9巻より改変)

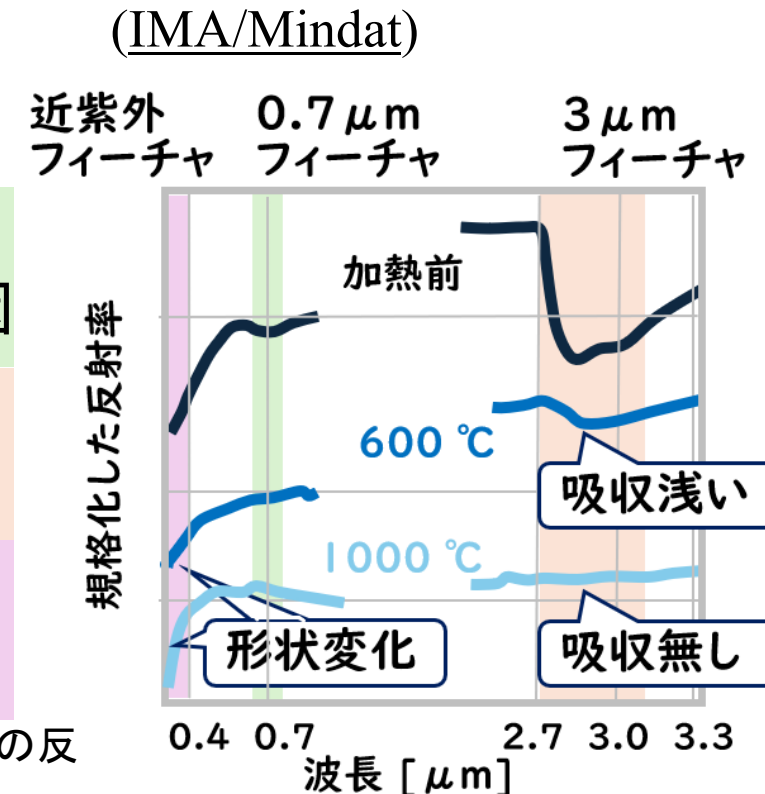
隕石に含まれる含水鉱物

- 岩石の結晶構造にOH基を含む、もしくは、層間水(H₂O)を保持する鉱物
- 別名: 含水ケイ酸塩、粘土鉱物
- 例: 蛇紋石 (Mg, Fe)₃Si₂O₅(OH)₄ (Minerals.net)
サポナイト (Ca, Na)_{0.3}(Mg, Fe)₃(Si, Al)₄O₁₀(OH)₂ · 4H₂O (IMA/Mindat)

3種の含水フィーチャ

- 0.7 μmフィーチャ
 - 含水変成により生成したFe²⁺とFe³⁺の電荷移動に起因
- 3 μmフィーチャ
 - 水(OH)や水氷に起因
- 近紫外フィーチャ
 - O²⁻→Fe³⁺の電荷移動に起因

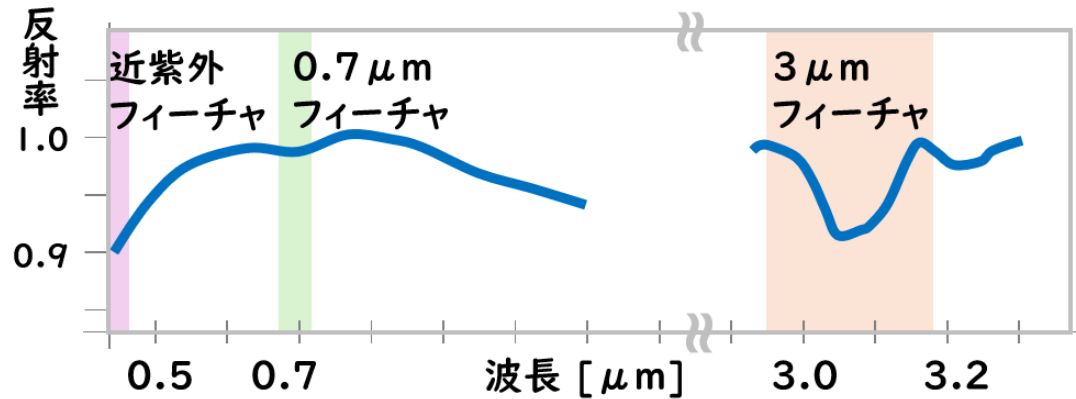
加熱したMurchison隕石(~C型小惑星と同等)の反射スペクトル (Hiroi+1996より改変)



遠隔観測による含水フィーチャの検出率の乖離問題

6

C型小惑星に観測される含水フィーチャ



例：小惑星Ceresのスペクトル

(Rivkin+2011,2009,Vernazza+2005より改変)

C型小惑星の含水フィーチャの検出率

	MBA	大きな乖離	NEA	
			地上観測	探査機(その場観測)
0.7 μm フィーチャ (Feの弱い酸化)	30%	↔	約7% (n=88)	 2例で検出：Ryugu, Bennu
3 μm フィーチャ (水氷, OH基)	77%		3例で検出 (n=4)	

(Rivkin&DeMeo2019,Usuietal.2019,McGrawetal.2022)

C型NEAはC型MBAより有意に低く見える

NEA本体の含水量を反映している場合：地球の水供給モデルの見直しを迫る必要がある。

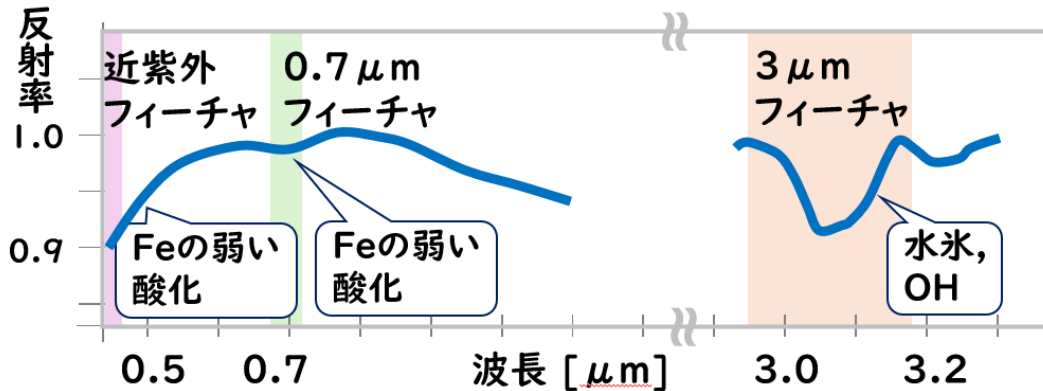
NEA表層の状態を反映している場合：含水フィーチャは軌道進化の歴史を色濃く反映するはず。

→ C型NEAの含水フィーチャの更なる系統的な調査が必要。

遠隔観測による含水フィーチャの検出率の乖離問題

7

C型小惑星に観測される含水フィーチャ



例: 小惑星 Ceres のスペクトル

(Rivkin+2011,2009,Vernazza+2005より改変)

C型小惑星の含水フィーチャの検出率

	MBA	大きな乖離	NEA	
			地上観測	探査機(その場観測)
0.7 μm フィーチャ (Feの弱い酸化)	30%	↔	約7% (n=88)	 2例で検出: Ryugu, Bennu
3 μm フィーチャ (水氷, OH基)	77%		3例で検出 (n=4)	

(Rivkin&DeMeo2019,Usuietal.2019,McGrawetal.2022)

C型NEAはC型MBAより有意に低く見える

問題点: 0.7 μm フィーチャおよび3 μm フィーチャの観測のみでは、原因究明に向けた進展は難しい。

理由:

- 0.7 μm フィーチャは吸収が浅く信頼度が低い。
- 3 μm フィーチャは地球大気の影響が大。宇宙望遠鏡が必要なため観測が発見数日後に限られるNEAへの適用が難。

本研究のねらい

8

着眼点

- NEAでの観測例がほとんど無い含水近紫外フィーチャに着目。
- 近紫外フィーチャを新たな指標とすることで、従来と異なる視点からNEAの含水鉱物に迫る。

アプローチ

本日の発表

- ① Rubin/LSSTの測光サーベイデータを用いて、近紫外フィーチャの検出率を調査
- ② TAO/Laguna分光器を用いて、近紫外フィーチャの形状を調査

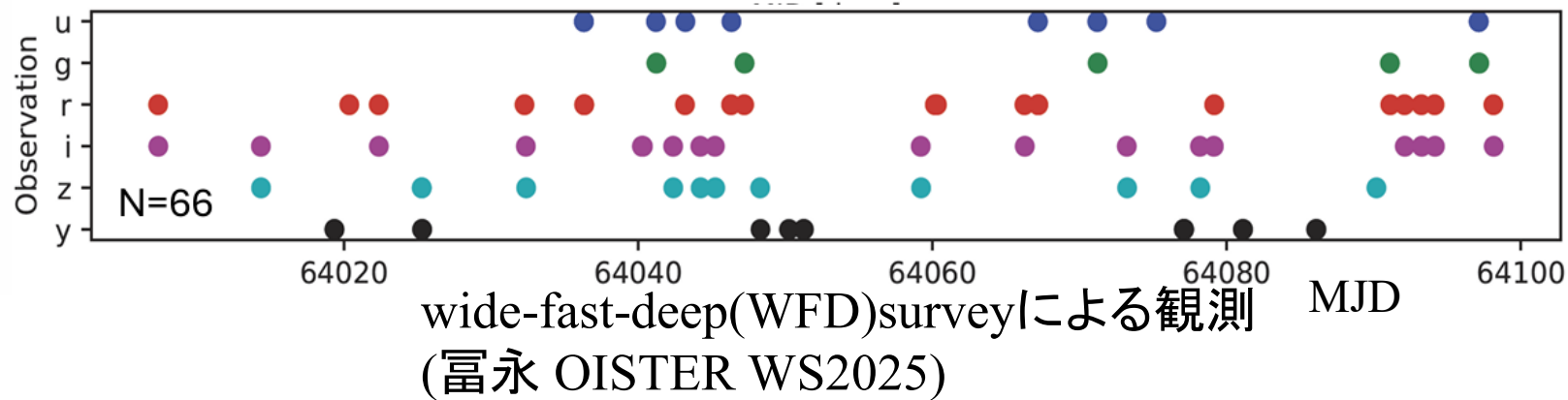
Rubin/LSSTのデータの特徴

- サーベイの一種: Wide Fast Deep (WFD)

- 15秒露光×2、18,000平方度をカバー

広範囲をカバー 小惑星の検出に適している

- 6種のバンド、1バンドは数日おき、1晩では2-3バンドで観測



- 現在はpre-LSST surveyを行っており、データは随時公開中

- 今夏頃から本格的に観測開始の予定

- NEAは10年間で約10万個の軌道を同定する想定 (LSST Solar System Science Collaboration2020より、現状の約2.5倍)

pre-LSST surveyのデータ構成

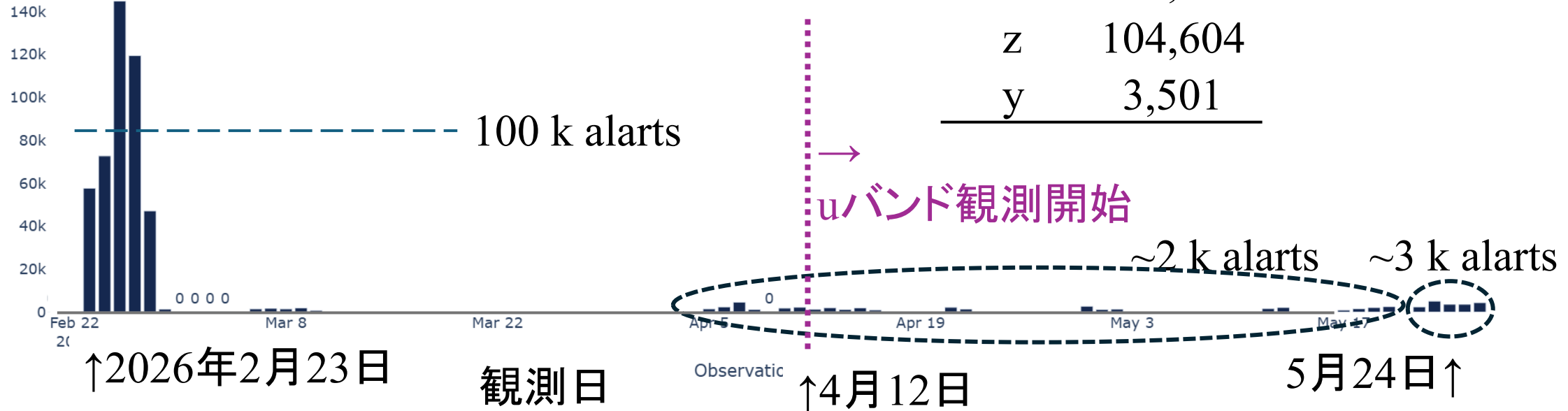
10

- 2026年2月23日から2026年5月24日までの
太陽系小天体のアラート500,860を取得

バンドごとの観測数

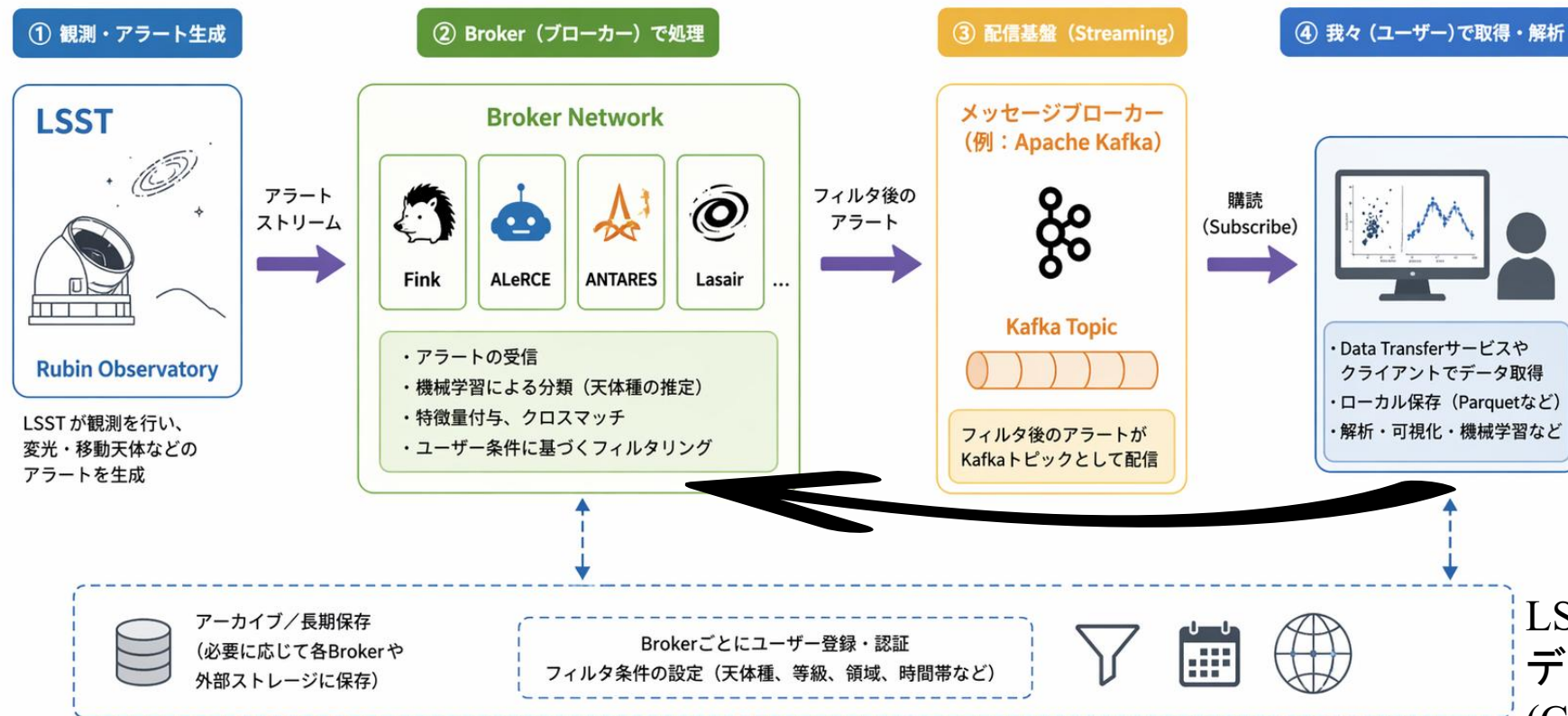
バンド	観測数
u	3,119
g	182,659
r	148,570
i	326,899
z	104,604
y	3,501

太陽系小天体の アラート件数



Rubin/LSSTの小惑星データの取得方法

- LSSTパイプラインにより太陽系小天体や突発天体を検出（アラート生成）。
- Broker (Fink等) にアーカイブ。
- Kafkaトピックとして配信され、Data Transferサービスを通じて取得可能 (Finkの場合)。



データ解析の流れ

(1) Fink経由でデータを取得

(2) 6種のバンドごとに絶対等級 H に変換し、距離を補正

$$V = H + 5 \log_{10}(r\Delta) - 2.5 \log_{10}(\Psi(\alpha))$$

V :観測された見かけの等級

r :太陽から小惑星までの距離 [AU]

Δ :地球から小惑星までの距離 [AU]

$\Psi(\alpha)$:位相関数 (位相角 α に依存する明るさの変化)

(3) Rubin/LSSTの等級をSDSS相当に変換

例: g バンドの変換式 $g_{\text{sdss}} = +0.066 (g - i)_{\text{lsst}} - 0.006 + g_{\text{lsst}}$

(4) バンド内でデータが複数ある場合は、平均値をとる

(測定誤差と等級変換による誤差は微小、自転による等級誤差は標準偏差として扱う予定)

(5) 二色図などを作成

データに含まれる小惑星の軌道分布

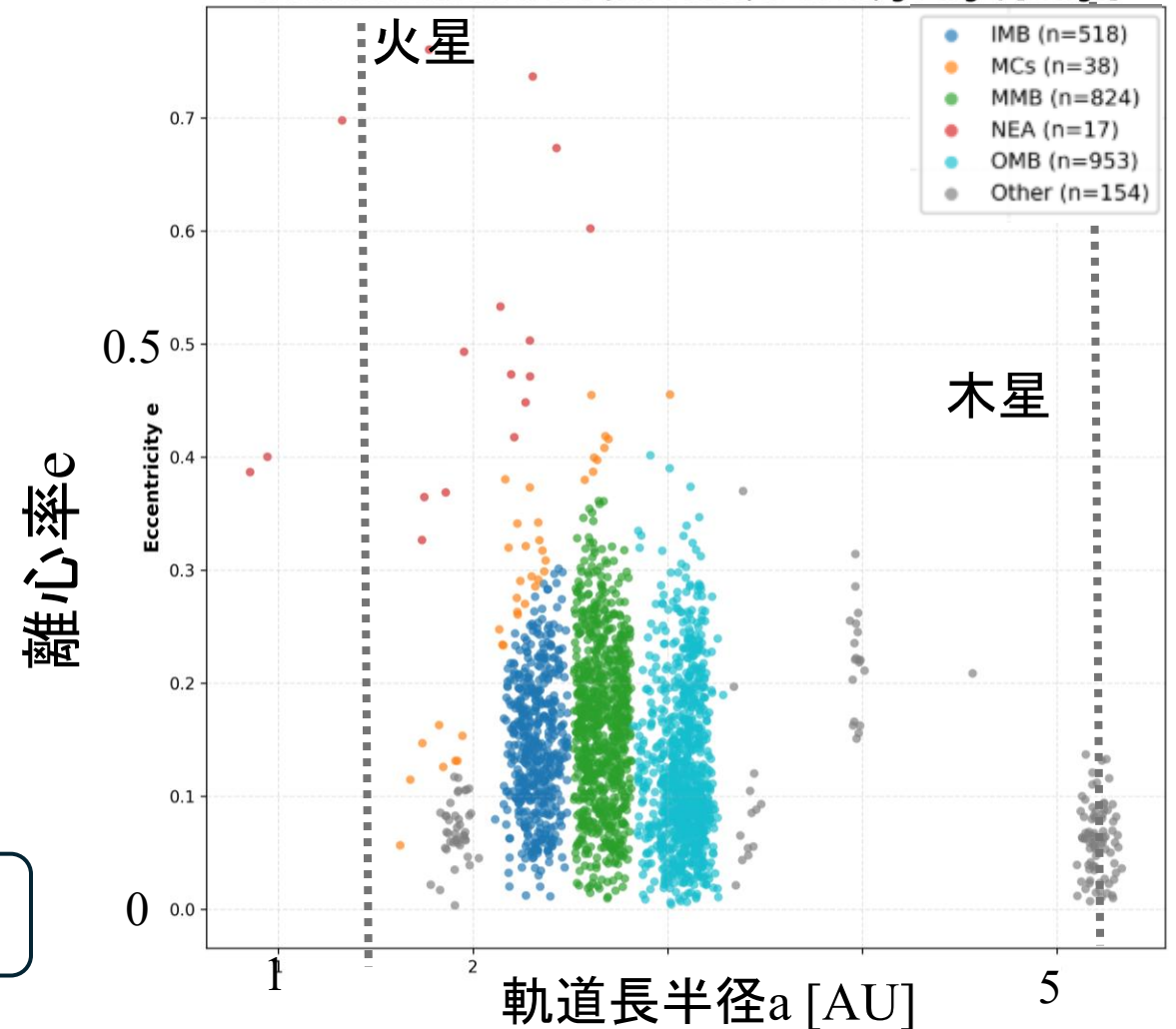
13

選択条件: 該当バンドで少なくとも1回観測されていること

小惑星の数

バンド	総数	内NEA数
いずれか	12078	34
g,i,r	2457	17
u,g,r,i	212	0

u,g,r,iが揃ったNEAは今回は存在しない



g,r,iを満たす小惑星の軌道分布

二色図 g-r vs g-i

- 過去のサーベイ(SDSS)と比較。
整合性を確認した。

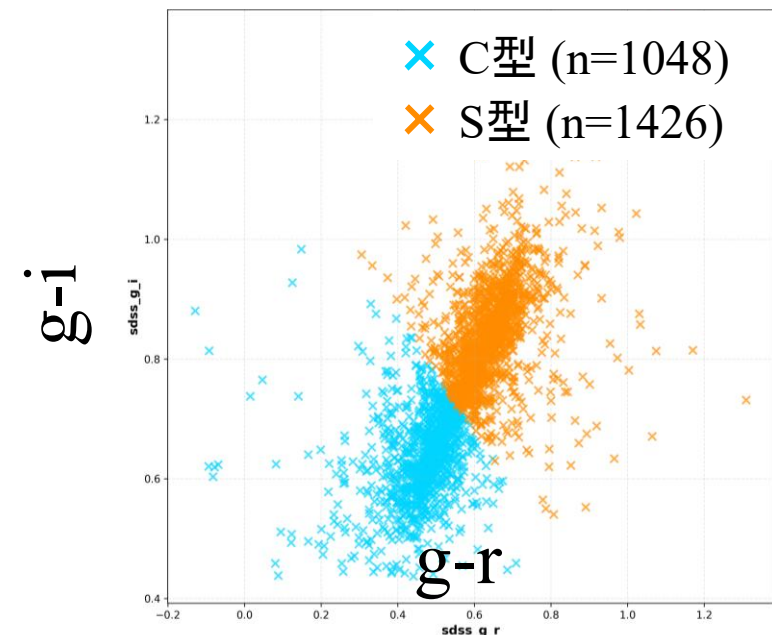
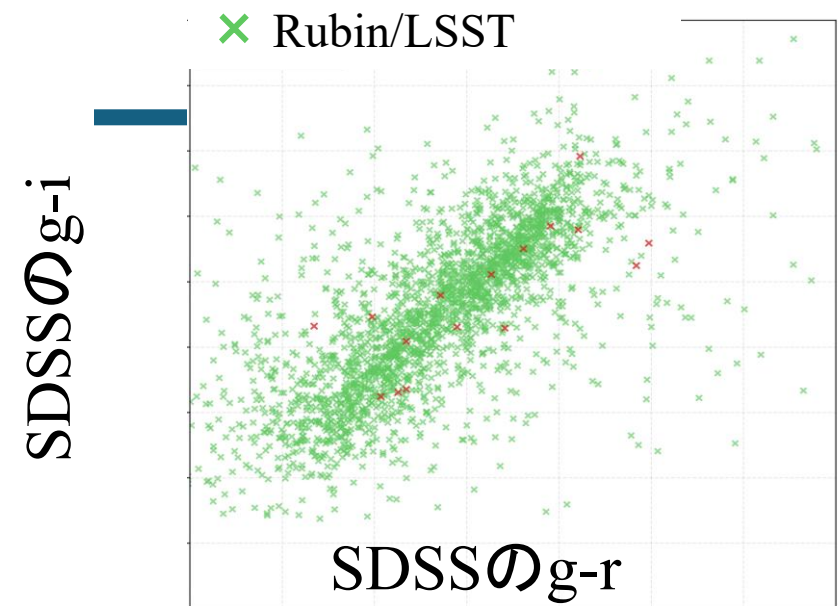
Rubin/LSSTのデータによる二色図

SDSSによる二色図 (Sergeyev&Carry 2021)

- C型とS型を簡易的に分離した。

$$a^* = 0.89 (g-r) + 0.45 (r-i) - 0.57$$

$a^* < 0$ をC型 (Ivezic+ 2001)



二色図 g-r vs g-i

- 過去のサーベイ(SDSS)と比較。
整合性を確認した。

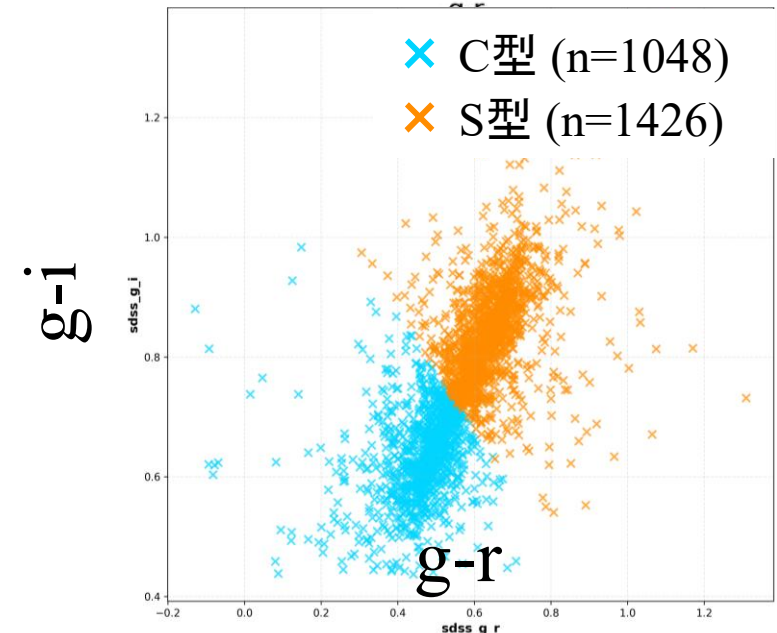
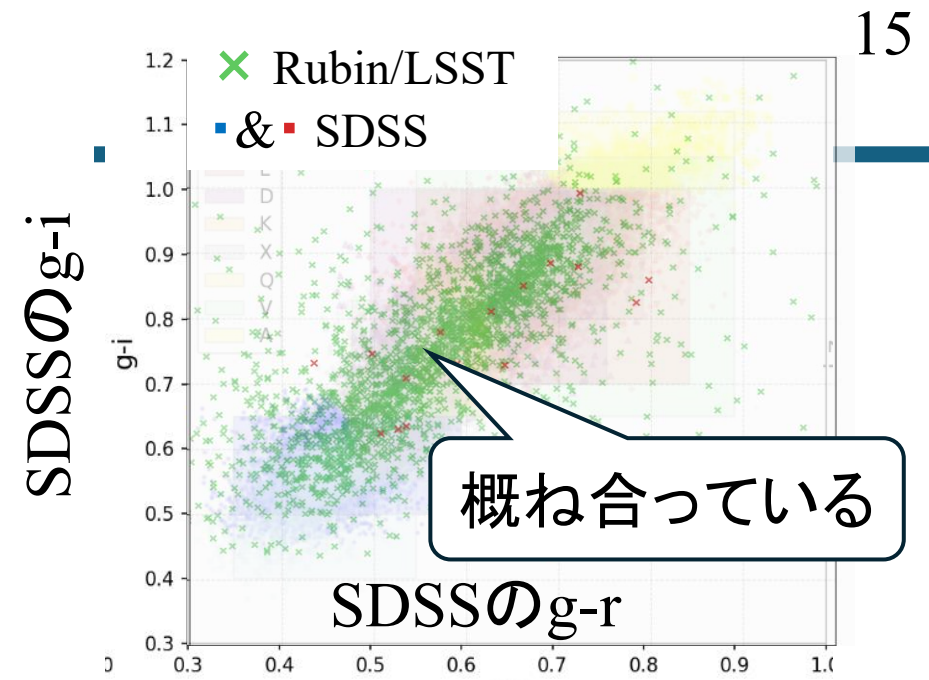
Rubin/LSSTのデータによる二色図

SDSSによる二色図 (Sergeyev&Carry 2021)

- C型とS型を簡易的に分離した。

$$a^* = 0.89 (g-r) + 0.45 (r-i) - 0.57$$

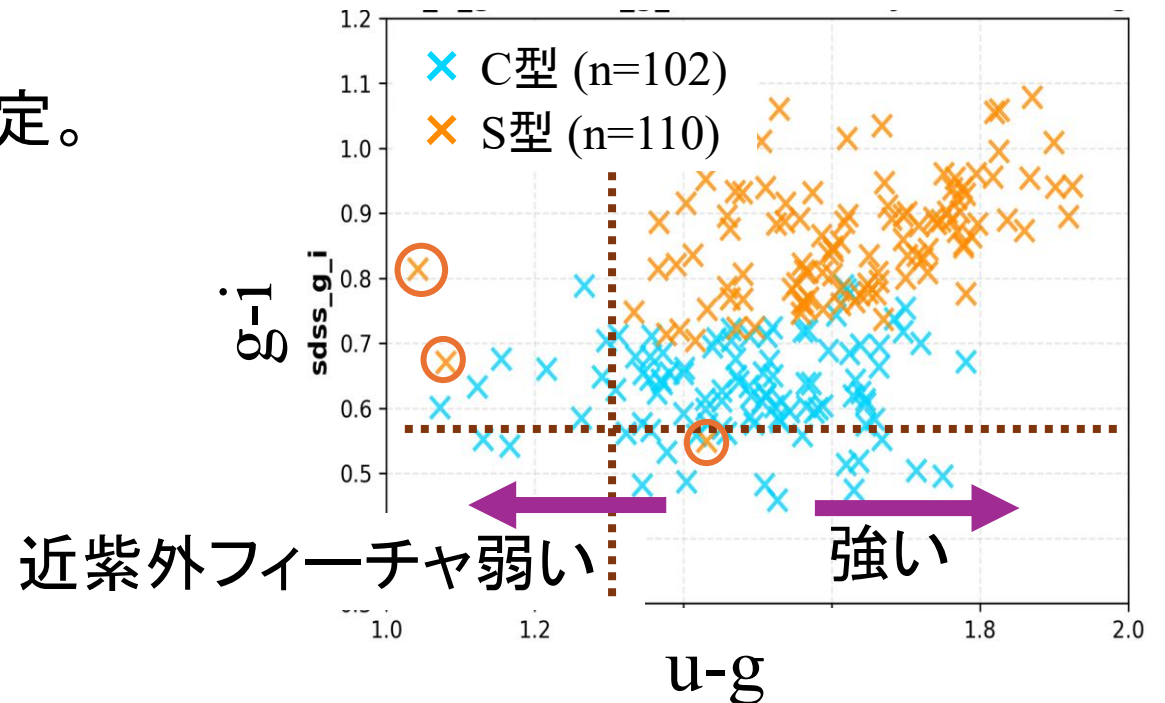
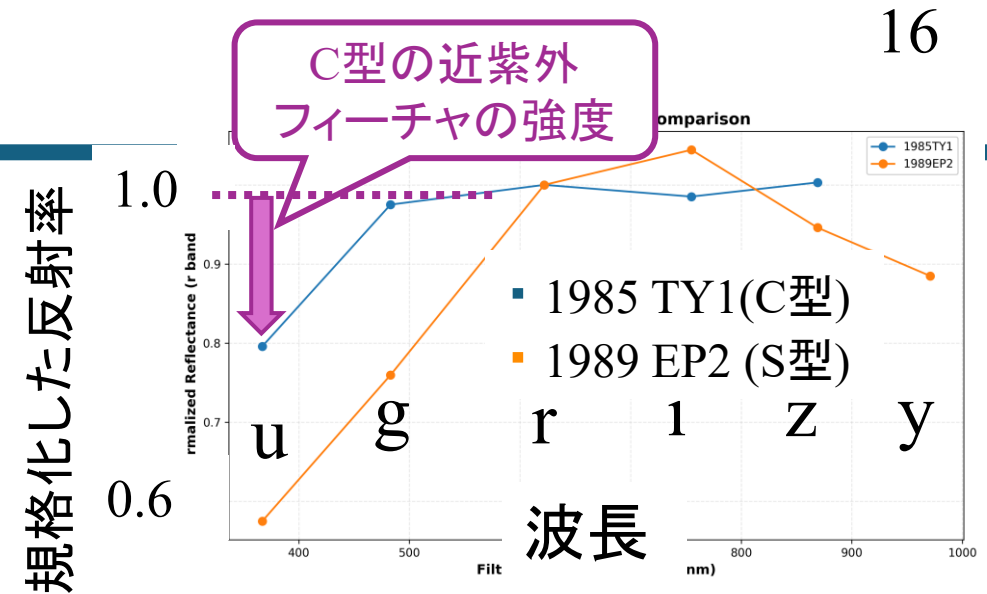
$a^* < 0$ をC型 (Ivezic+ 2001)



近紫外フィーチャの強度

- 近紫外フィーチャの強度分布をu-g vs g-iの二色図にて統計的に調査
- u-g vs g-iの分布が先行研究(Tatsumi+2023)とおおよそ一致したことを確認。
- 外れ値の要因: 自転による誤差が主要因
- 今後、NEAのデータが増えたら再議論の予定。

上図: 例: 小惑星1985 TY1(C型)と1989 EP2 (S型)のLSSTによる反射スペクトル



下図: 二色図状の分布
点線は太陽相当の色指数

近紫外フィーチャ強度と軌道要素の関係の考察 17

- 軌道要素とC型小惑星の近紫外フィーチャの強度の相関を調査
- 現段階ではNEAのuバンドのデータ不足により、NEAのデータ点無し
- C型MBAでは、特徴は無し
- 仮に、太陽への接近に伴い近紫外フィーチャが消失する傾向にある場合は、近紫外フィーチャ強度と近日点距離の間に相関が見られると予想される。

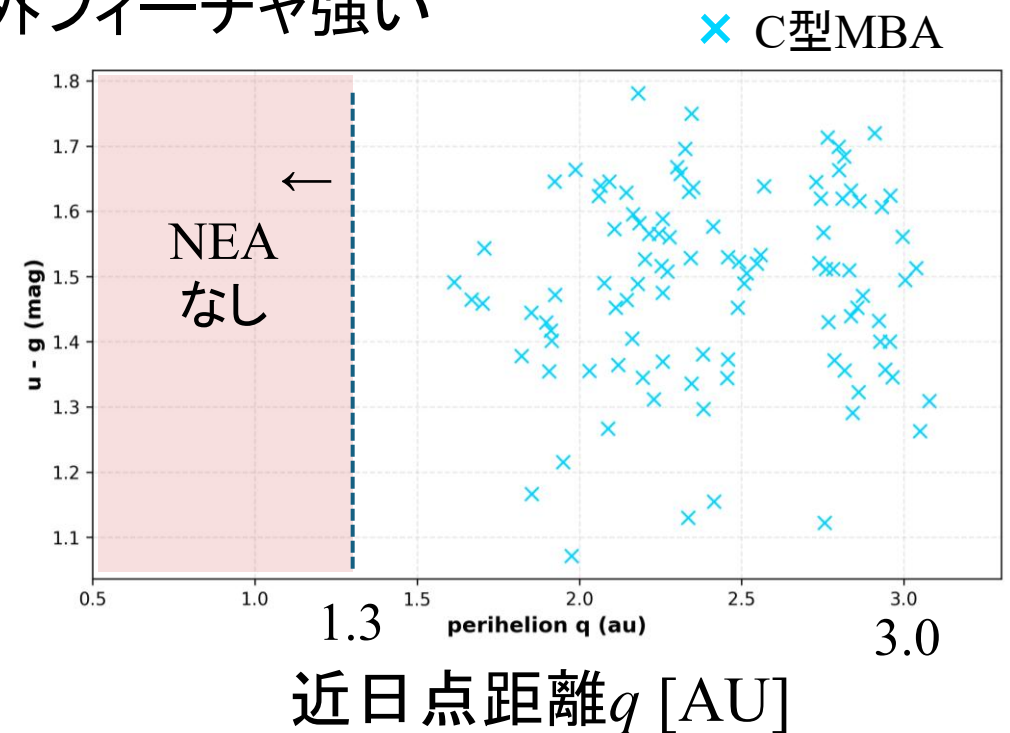
近紫外フィーチャ強い



u-g



弱い



C型小惑星の近紫外フィーチャと近日点距離 q の関係

近紫外フィーチャ強度と自転周期の関係の考察 18

- 自転周期と近紫外フィーチャの強度に相関が見られる可能性がある。

理由

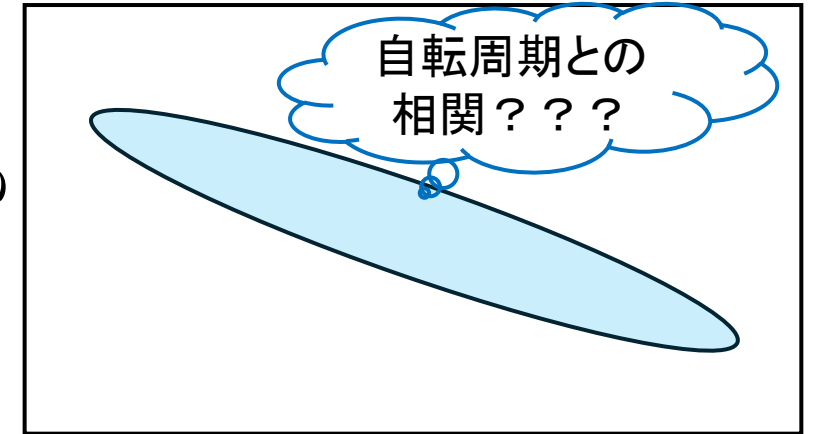
1. 高速自転により
 - 表面のレゴリスがフレッシュになる可能性 (Jawin et al.2020)
 - 場所による不均質の発生の可能性 (Dai et al. 2024) が示唆されている。
2. 一枚岩かラブルパイルかで表面状態が異なる可能性。

LSSTにより発見されたNEAを、即時(数時間~数日)にTomo-e Gozenやせいめい/TriCCSにて follow up観測し、自転周期を計測することが有効。

近紫外フィーチャ強い



u-v



自転周期p



弱い

C型小惑星の近紫外フィーチャと自転周期の関係の予想

即時観測の例 2026 JH2

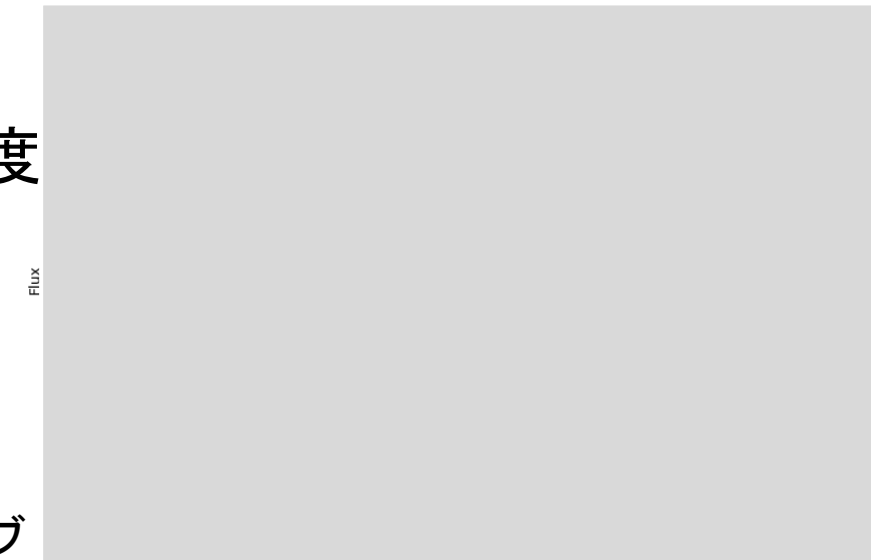
19

- 2026年5月10日 Lemmon天文台が発見
- 2026年5月17日晚 Tomo-e Gozenにて観測
→即時解析により、高速自転していることが判明
- 2026年5月18日晚 Tomo-e Gozenとせいめい/TriCCS
にて同時観測
→自転による色変化を現在解析中
- 2026年5月19日日本時間早朝 地球に最接近
約9万1000 km (月までの距離の約4分の1)で通過

光度



光度



上図: Tomo-e Gozenによるライトカーブ

下図: せいめい/TriCCSによる、2周期分でfoldしたライトカーブ

今後の展望

20

- Rubin/LSSTのデータの解析準備の強化
 - 観測が本格的に始まると、爆発的にデータ数の増加が見込まれる
 - 大規模データに対応した、解析パイプラインの強化
 - NEAのデータ数増加に伴い、C型MBAに対するC型NEAの近紫外フィーチャ強度分布の差異を統計的に調査
- Tomo-e Gozenによるfollow up観測により、自転周期の情報を取得
 - 発見されて間もないNEAの即時アラートを受けてから、Tomo-e Gozenによるfollow up観測を行う判断基準の選定、体制を構築
 - 自転周期の情報に加えて、軌道要素・サイズ・位相角による関係を調査
 - 表面組成や変成の議論

- 地球の水の起源のを解明するべく、既存の検出においてMBAとNEAの含水フィーチャの検出率の違いを問題視している。
- Rubin/LSSTの測光サーベイデータを用いて、近紫外フィーチャの検出率を調査
- 二色図の分布が、先行研究とおおよそ一致
- u-gと他の要素の関係性について調査。C型MBAと近日点距離の特徴は無く、現状NEAのデータはなし。
- 今後、NEAのデータ数増加に伴い、C型MBAに対するC型NEAの近紫外フィーチャ強度分布の差異を統計的に調査