

地球接近小惑星の広視野動画観測と 近紫外線観測で迫る地球の水の起源

長澤春香

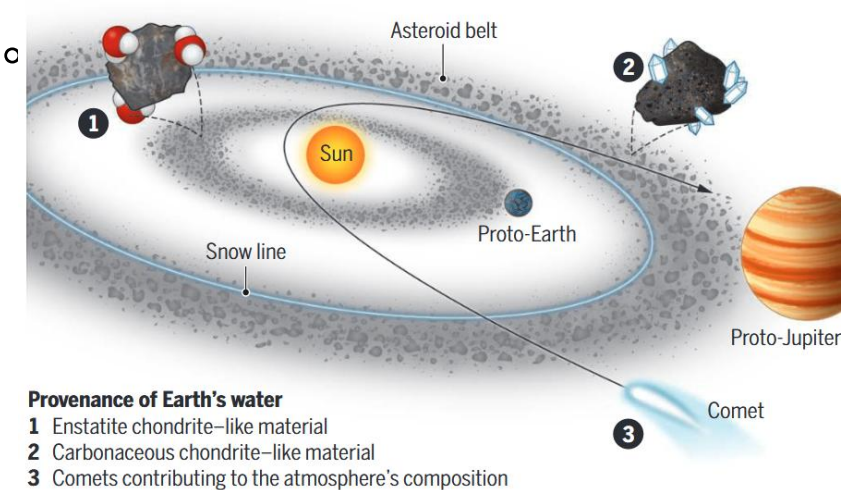
酒向重行、和田空大、倉島啓斗、瀧田怜 (東京大学)、

紅山仁(Observatoire de la Côte d'Azur)、深井稜汰(JAXA)

木曾シュミットシンポジウム2025
2025年5月27日(火)

地球の水の起源と小惑星輸送説

- スノーラインは水が固相で存在できる境界であり、その内側で形成された原始地球は水をほとんど含まなかったと考えられている (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？
- メインベルト小惑星 (MBA、火星と木星の間に位置する)
0.4 - 0.9 μm 帯のスペクトル形状によりS型とC型に分類
 - S型: スノーラインの内側に多く分布
 - C型: スノーラインの外側に多く分布、含水鉱物(-OH基)を多く含む



太陽系のスノーライン (Peslier 2020)

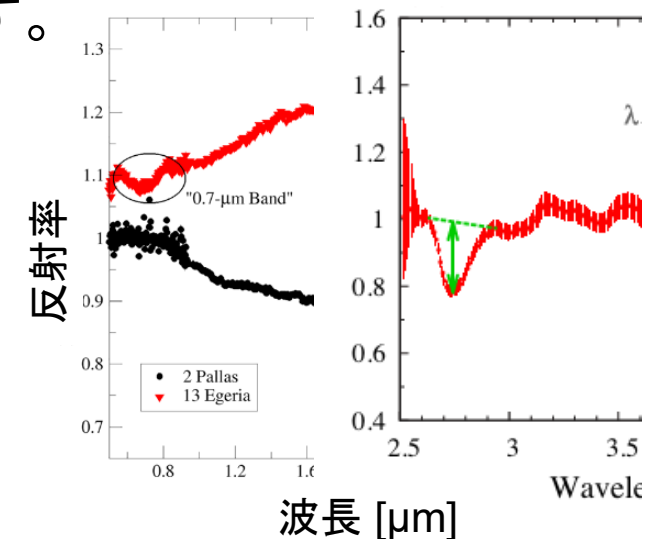
含水鉱物を多く含むC型MBAが地球接近小惑星 (NEA)として地球に飛来し、水を供給した説が有力

含水鉱物の検出率

- C型小惑星に対して含水鉱物の吸収フィーチャがある0.7 μm 帯と3 μm 帯の検出率を調査した結果、MBAとNEAで検出率に顕著な差が報告された。
- これが正しければ、小惑星による水の輸送説に大きな影響をおよぼす。

C型小惑星における含水鉱物フィーチャの検出率 (Rivikin 2015)

波長帯	MBA	NEA	
		地上観測	探査機
0.7 μm	33%	4%	2例
3 μm	77%	2例(サンプル少)	



0.7 μm 帯フィーチャ 3 μm 帯フィーチャ
(Rivikin&DeMeo2019) (Usui+2019)

0.7 μm 帯フィーチャは吸収が浅く、3 μm 帯フィーチャは熱赤外線のため高感度な観測ができないという困難のため、NEAの含水鉱物の調査は容易でない。

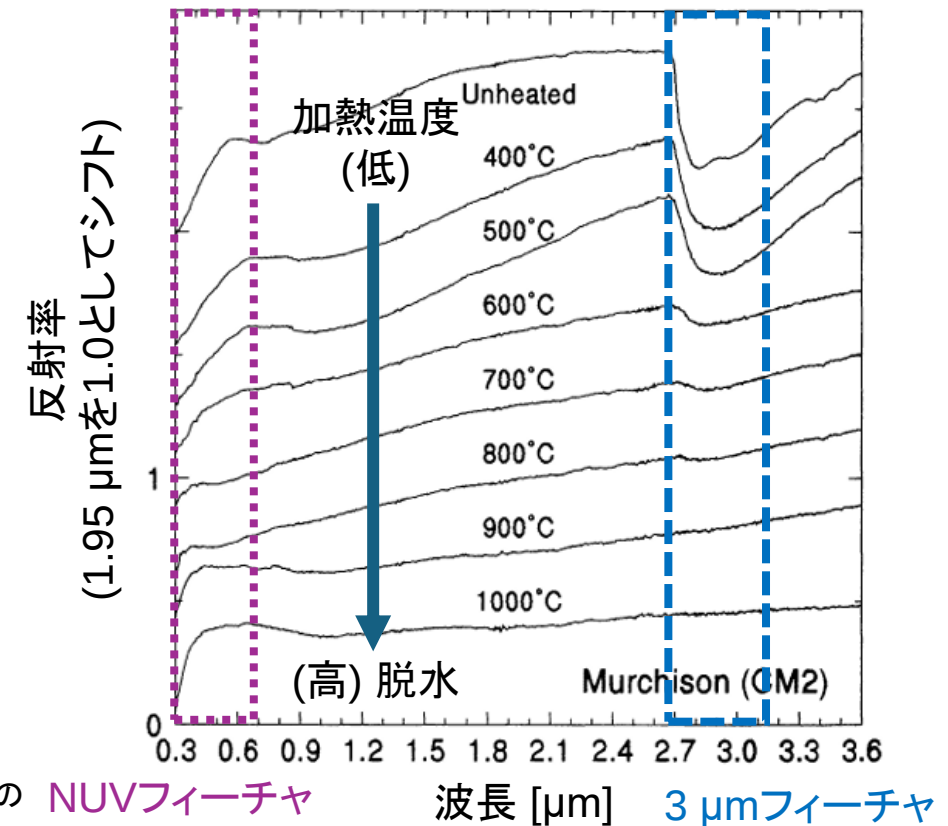
近紫外線(NUV)フィーチャに着目

- 地上観測の短波長の限界であるNUV(0.3 – 0.4 μm 帯)に含水鉱物の指標となる吸収フィーチャが存在。
- 観測好機が数日と短く観測の困難さゆえにC型NEAのNUVフィーチャはほとんど観測されていない。

NUVフィーチャの特徴

- 3 μm 帯に匹敵する深いフィーチャ。
- 加熱温度に依存して変化。

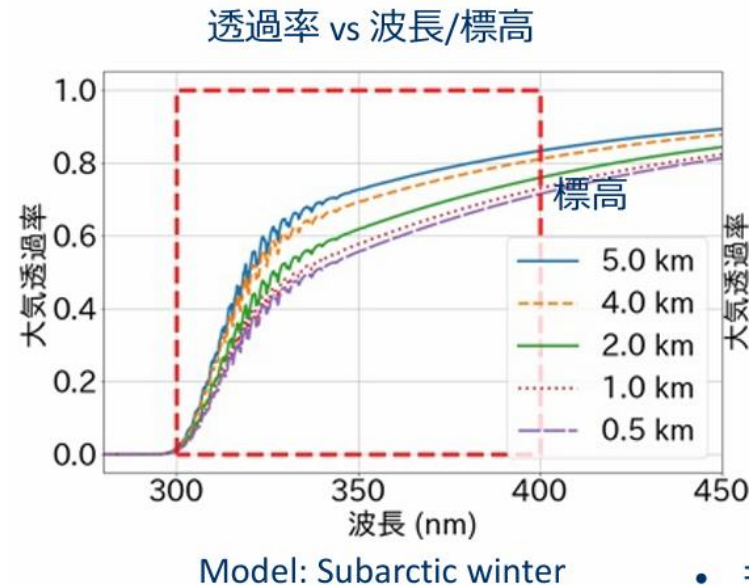
我々は、TAO 6.5m用にNUVをカバーする新分光装置を開発し、木曾Tomo-e Gozenと連携しながら、C型NEAに対する含水鉱物のNUVフィーチャの大規模サーベイを実施する計画である(基盤A研究 酒向ら)。



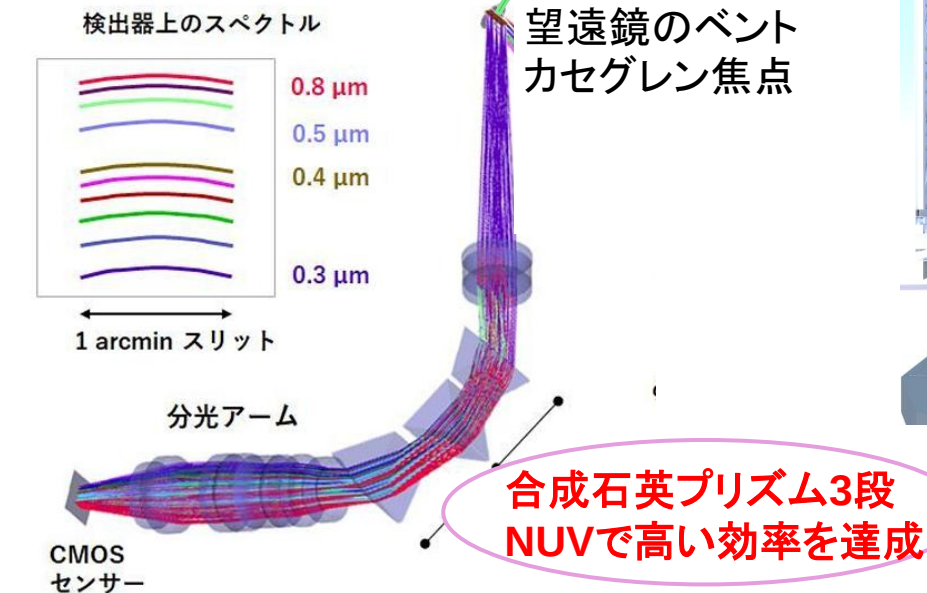
加熱したMurchison隕石(~C型小惑星と同等)の
反射スペクトル (Hiroi+1996)

TAO 6.5m用NUV分光観測装置

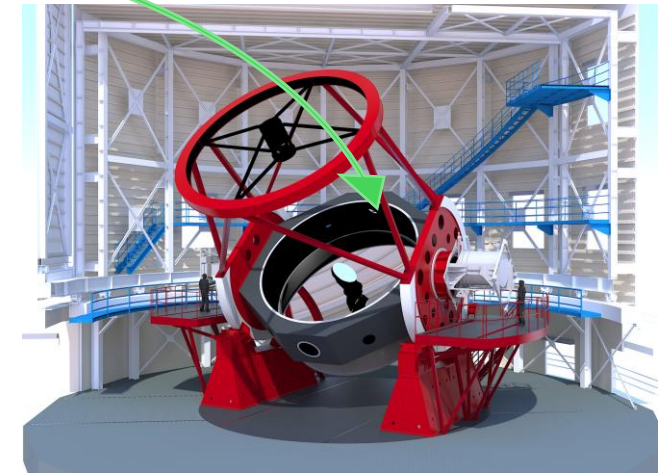
- TAOの環境(標高5,640m)がもたらすNUVの高い大気透過率を利用。
- NUVに最適化した高効率の低分散分光器を開発する。
- 合成石英プリズムを採用することで高い光学系スループット(~ 0.8)を達成する計画。



LOWTRAN7大気モデルによる計算結果
(秋田谷ら, U-band Instrument mini WS
発表資料より)

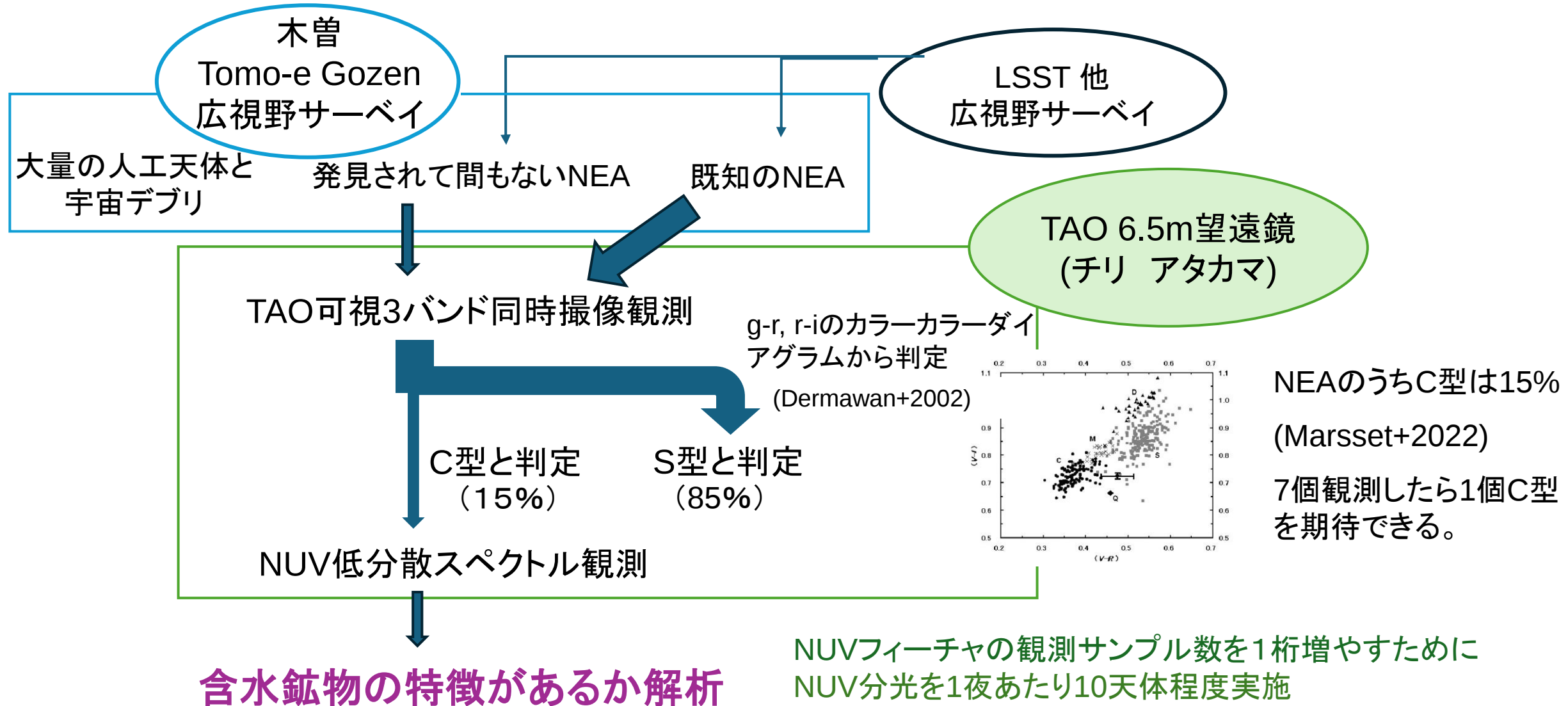


NUV低分散分光装置の光学系



口径6.5m TAO望遠鏡の模式図
(©東京大学TAOプロジェクト)

C型NEAに対するNUV含水鉱物フィーチャの分光サーベイの手順



TAOでの観測計画

1夜(約8時間)に10個のC型NEAを分光するには、
1セットあたり45分程度に収める必要がある。

- 経験をもとに現実的な時間配分を割り振った。
- 撮像に3分、分光に13分程度の配分で進める必要がある。

1個のC型NEAを分光するまでの手順と観測時間の配分案

S型または
C型の判定

C型

対象天体	観測種類	導入 [分]	露光 [分]	解析+判定 [分]	合計 [分]
NEA no.1	撮像	1	0.5	1.5	3
NEA no.2	撮像	1	0.5	1.5	3
NEA no.3	撮像	1	0.5	1.5	3
NEA no.4	撮像	1	0.5	1.5	3
NEA no.5	撮像	1	0.5	1.5	3
NEA no.6	撮像	1	0.5	1.5	3
NEA no.7	撮像	1	0.5	1.5	3
NEA no.7	分光	3	10	なし	13
標準星	撮像	1	0.5	なし	1.5
標準星	分光	3	5	なし	8

43.5

本研究では、この観測計画の実現性を確かめるために、配分した露光時間で得られる
限界等級を導出した後に、観測可能なNEAの個数を推定した。

方法: 撮像とNUV分光の限界等級の計算

以下の条件にて撮像と、NUV分光の10%までの吸収を検出するため
S/N=20 (5%のエラー) の限界等級を計算した。

地球大気の透過率

- マウナケア山頂の透過率を参照 (右図)
- 0.32 μm 以下はオゾン層による吸収があり大気透過率が急激に下がる。
- 高度60° 以上でないと大気吸収の影響を大きく受ける
- 0.3-0.5 μm の範囲で0.003 μm 刻みで検討した。

シーイングサイズ 0.6

望遠鏡および観測装置の透過率

- 望遠鏡透過率 0.55
- 3バンド撮像装置
 - 観測装置の光学系の透過率 0.8
 - CMOSイメージセンサーの量子効率 0.7
- NUV低分散分光装置
 - 観測装置の光学系の透過率 0.8
 - CMOSイメージセンサーの量子効率 0.5

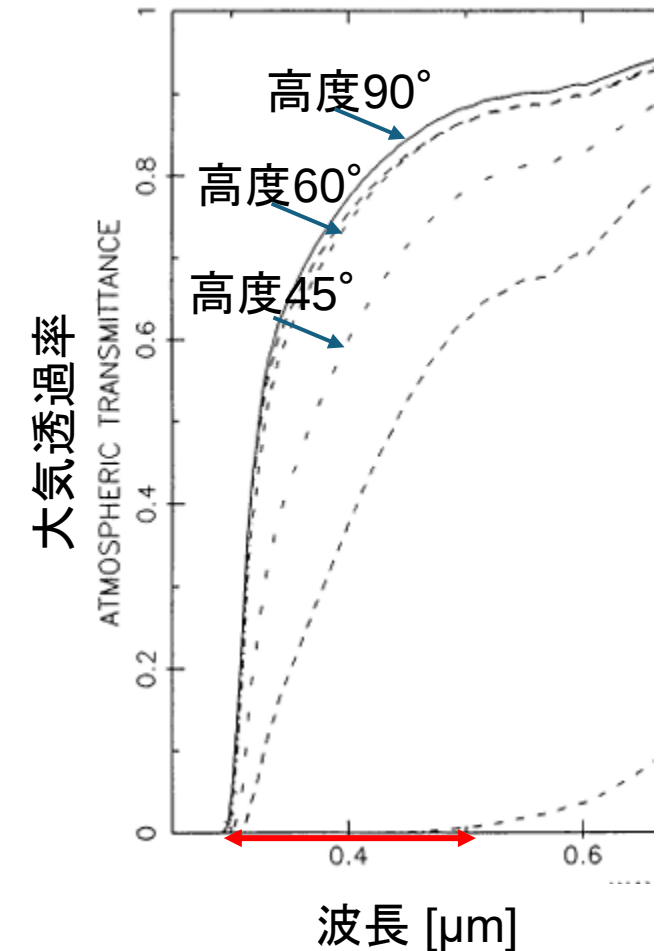
比波長分解能 R=100

pixel scale=0.075 arcsec/pix

露光時間 各観測に合わせる

ノイズ関連

- 背景光ノイズ 21.3 mag(NUV, g) 20.4 mag(r,i)
- CMOS読み出しノイズ 1.4 e-/pix
- CMOSダークノイズ 0.2 e-/sec/pix
- 天体光ポアソンノイズ



マウナケア(4,215 m)の大気透過率
(Nitschelm 1988)

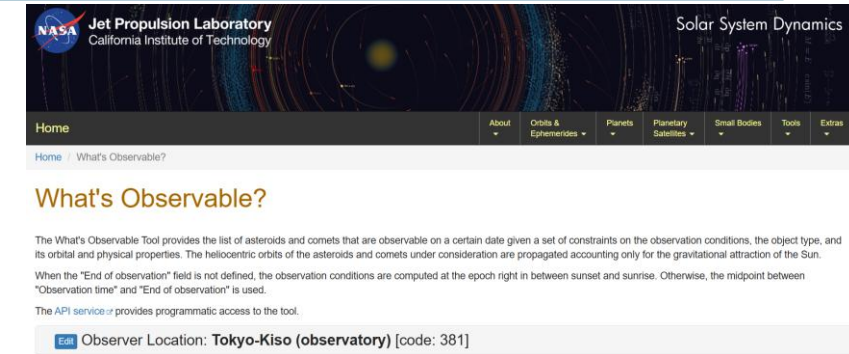
方法： 観測可能なNEA数の見積もり

観測計画が実行可能となるよう、NASAのJPLより以下の条件にて観測可能なNEAの個数を推定した。

場所	木曽またはTAO
調査対象日	2025年1月-12月のそれぞれ1日
高度	60° 以上
観測可能な時間	30 分以上
明るさ(V mag)	限界等級より明るい
対象天体	NEA

← 大気による透過率減少を避けるため

← MBAは除外



NASA JPL What's Observable?

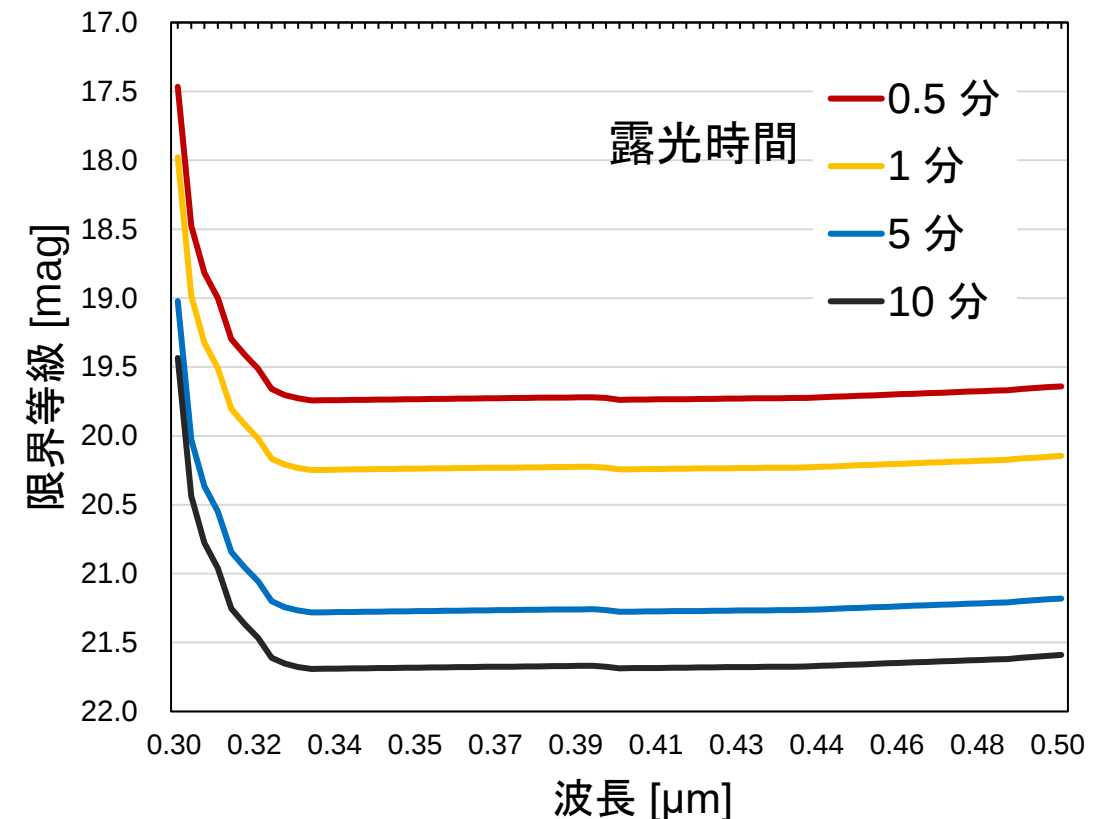
結果：撮像・NUV分光の限界等級

撮像の限界等級
(露光時間 0.5 分、S/N=20)

フィルター	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>
中心波長 [nm]	477.0	623.1	762.5
大気透過率	0.85	0.90	0.95
限界等級 [mag]	23.13	23.18	22.87



撮像の限界等級は**22.5 mag**である。

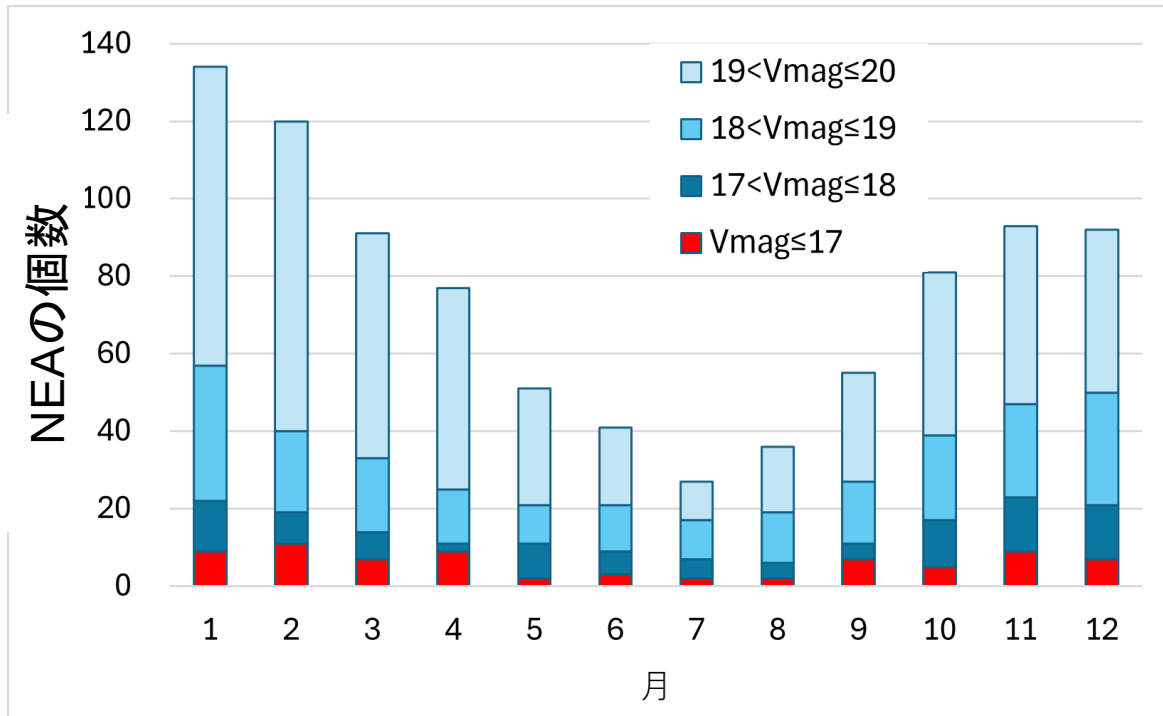


露光時間ごとのNUV分光の限界等級 (S/N=20)

露光時間10 分では波長0.306 μm にて20.5 magがS/N=20の限界等級となる。

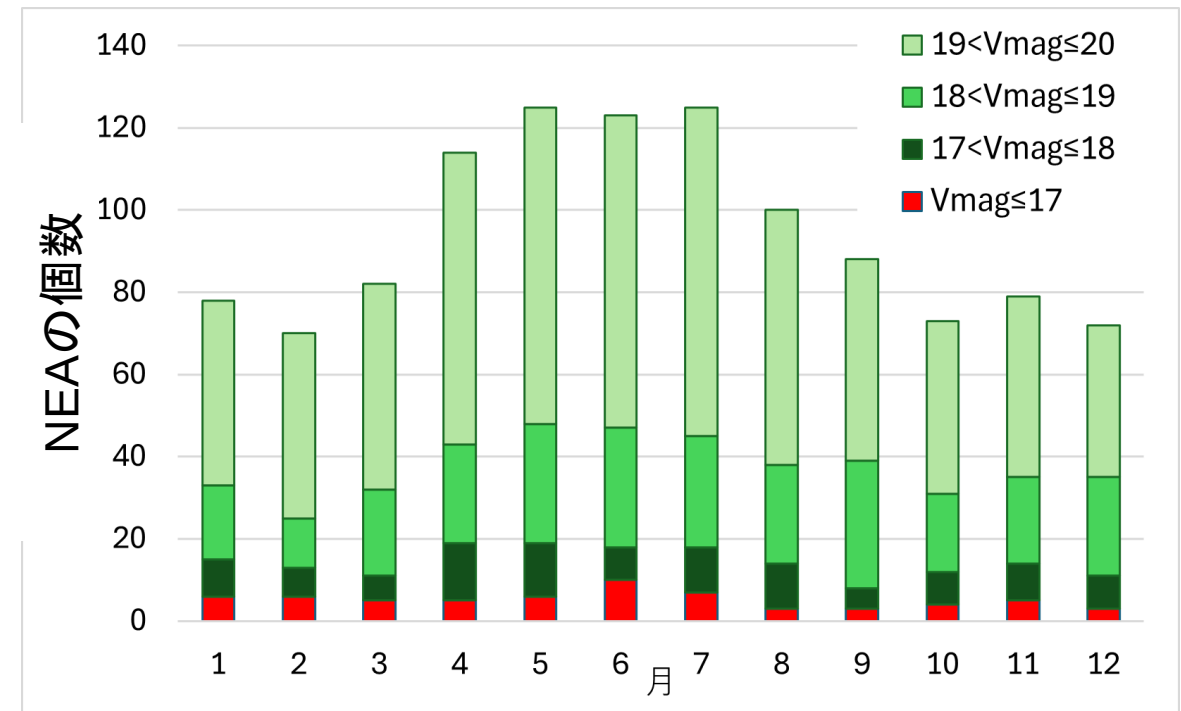
結果： 1夜に観測可能なNEA数

NEAの色(=おおよそ太陽の色)が $u-g=1.5$ mag、 $g-V=0$ magのため、 19.0 mag以下のNEAの個数を調査した。



木曽から30分以上観測可能なNEAの個数

19.0 mag以下は平均33個



TAOから30分以上観測可能なNEAの個数

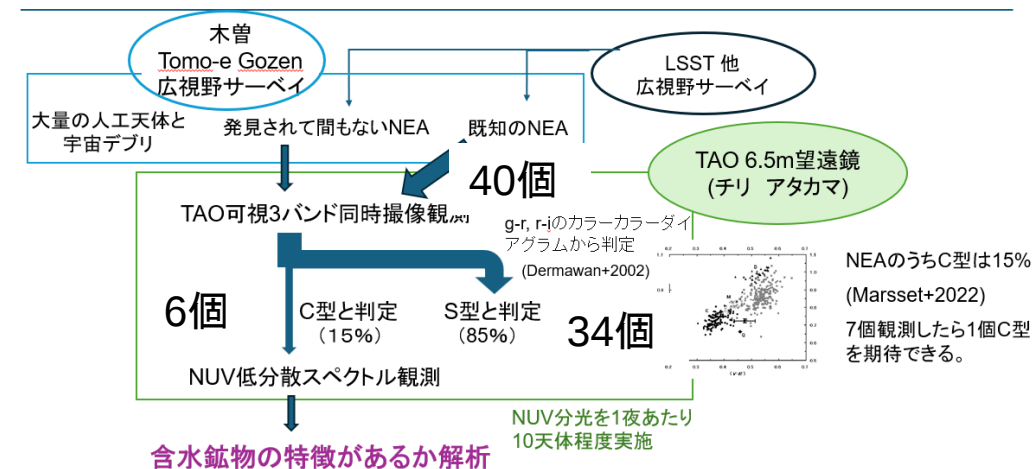
19.0 mag以下は平均38個

※2025年5月19日の調査

今後新たにNEAが発見&軌道が確定した場合は追加される

考察

- 露光時間10 分、波長0.306 μm で約10%減光のNUVフィーチャを検出する限界等級は、**20.5 mag**である。
- u バンドで20.5 magより明るいNEAは、1夜平均40個程度は軌道が判明しており、観測計画が必要とする約70個よりやや少ないが、十分な数が存在する。
- 撮像のg, r, i バンドの限界等級は22.5 magであり、u バンドで20.5 magより明るいNEAは30秒の露光時間で十分な検出が得られ、S型/C型の判定が可能である。
- よって、本観測計画の時間配分にてNUV分光が可能なNEAの個数は、明るい既知のNEAの個数で律速され、1夜あたり6天体程度を観測可能と言える。



今後の方針

- 観測等級に合わせた露光時間を再検討することで、観測戦略をより現実的なものにする。
 - より暗いNEAが対象天体の場合、露光時間を長くする必要がある。
- 木曽で新たに発見されたNEAも観測対象となるシステムを構築する。
 - 木曽で検出されるNEAは17 mag程度と明るい。
 - NEAの新規発見から含水鉱物の観測・判定を即時に行う。
- 既存の望遠鏡を使って、明るい既知のC型NEAに対してNUV分光(またはu-band測光)の試験的な観測を行う。
- 木曽で検出される高速移動天体は多数の人工衛星と宇宙デブリが含まれていることから、今後NEAおよび静止軌道衛星の精度の向上に取り組みたい。

まとめ

Introduction

- ・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の含水鉱物の検出率の違いを問題視している。
- ・私たちはNUVフィーチャに着目し、TAO6.5 m望遠鏡用に装置の開発を行っている。

Method

- ・NEA含水鉱物を調査するための観測計画から、露光時間の検出限界等級及びNEAの個数の推定を行った。

Result

- ・露光時間10 分、波長0.306 μm で約10%減光のNUVフィーチャを検出する限界等級は、**20.5 mag**である。
- ・小惑星の色($u-g=1.5 \text{ mag}$)を考慮し、1夜に19 mag以下のNEAは平均約40個存在し、観測計画よりやや少ないが十分な数が存在する。

Discussion

- ・観測計画は妥当であるが、さらなる改良を行いたい。
- ・木曾とTAOの綿密な連携システムを構築する。