



太陽系外縁天体掩蔽観測の新展開： 大気検出からTNO観測ネットワークの展望まで

有松 亘 (国立天文台／石垣島天文台)

論文情報：

Ko Arimatsu, Fumi Yoshida, Tsutomu Hayamizu, Satoshi Takita,
Katsumasa Hosoi, Takafumi Ootsubo & Jun-ichi Watanabe

“Detection of an atmosphere on a trans-Neptunian object beyond Pluto”

Nature Astronomy, 2026,

DOI: 10.1038/s41550-026-02846-1

太陽系外縁部・太陽系外縁天体(TNO): 太陽系最後にして最大のフロンティア



□ 最遠の惑星である海王星よりも遠くに存在

- ・ 太陽・地球からの距離

カイパーベルト: 約30 – 50 au

散乱円盤・オールトの雲: さらに遠方

- ・ 直接探査、詳細な観測が困難

□ 暗く・冷たい

- ・ 表面温度は50 K以下

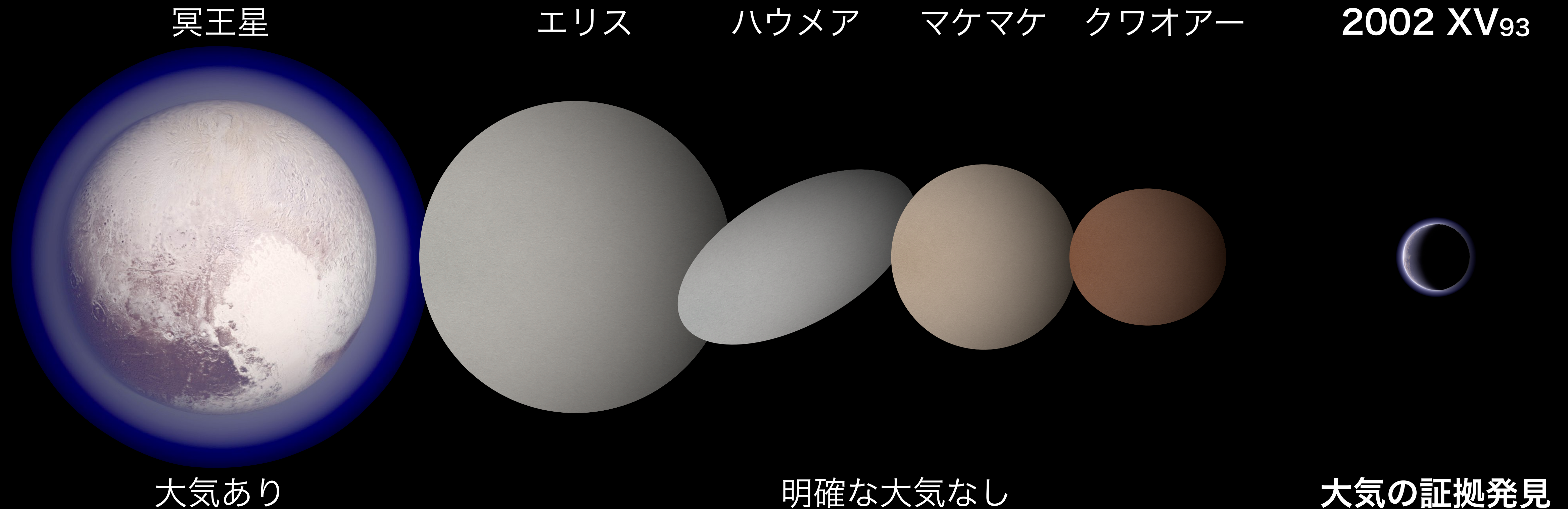
- ・ 大気を作りうるのは

ごく一部の『超揮発性物質』に限定

– メタン、窒素、一酸化炭素

➡ 活動性や変化のほとんどない静かな世界

これまでの常識: 大気を持つTNOは「大きな天体だけ」



□ これまで明確な大気が発見されていたTNOは冥王星(直径2,377 km)のみ

- ・ 冥王星以外の準惑星(直径1000–2000 km)のTNOには、明確な大気の証拠は見られず
- ・ 小さい天体は重力が弱く、表面で気化した超揮発性物質が逃げやすいという理論的理解と整合

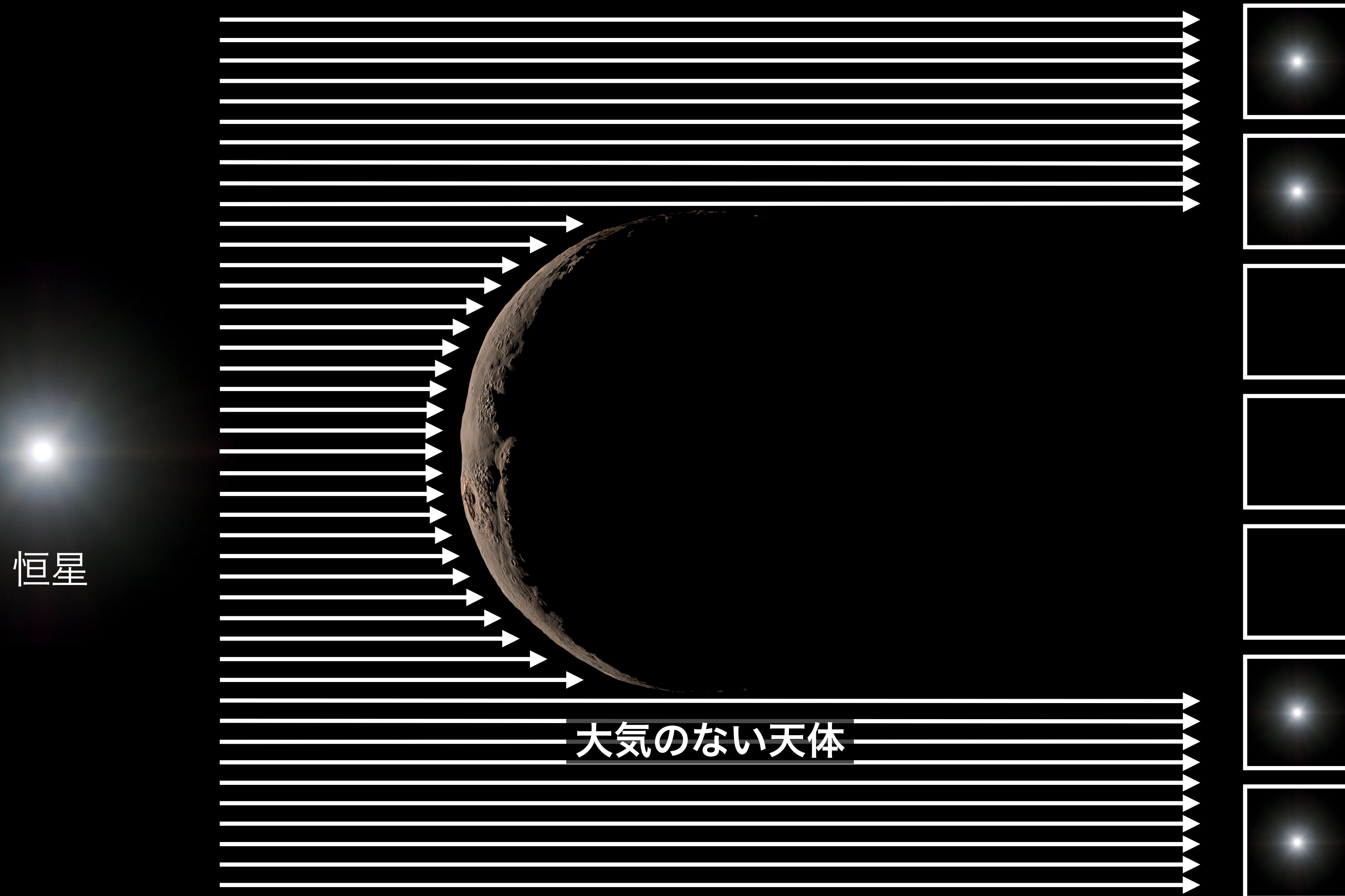
本研究成果を導き出した観測プロジェクト: TABASCO(タバスコ)

TABASCO

Trans-neptunian Atmospheres and Belts Analysis through
Stellar-occultation Coordinated Observations

国内の中小望遠鏡の連携によって太陽系外縁天体の詳細研究を目指す観測キャンペーン

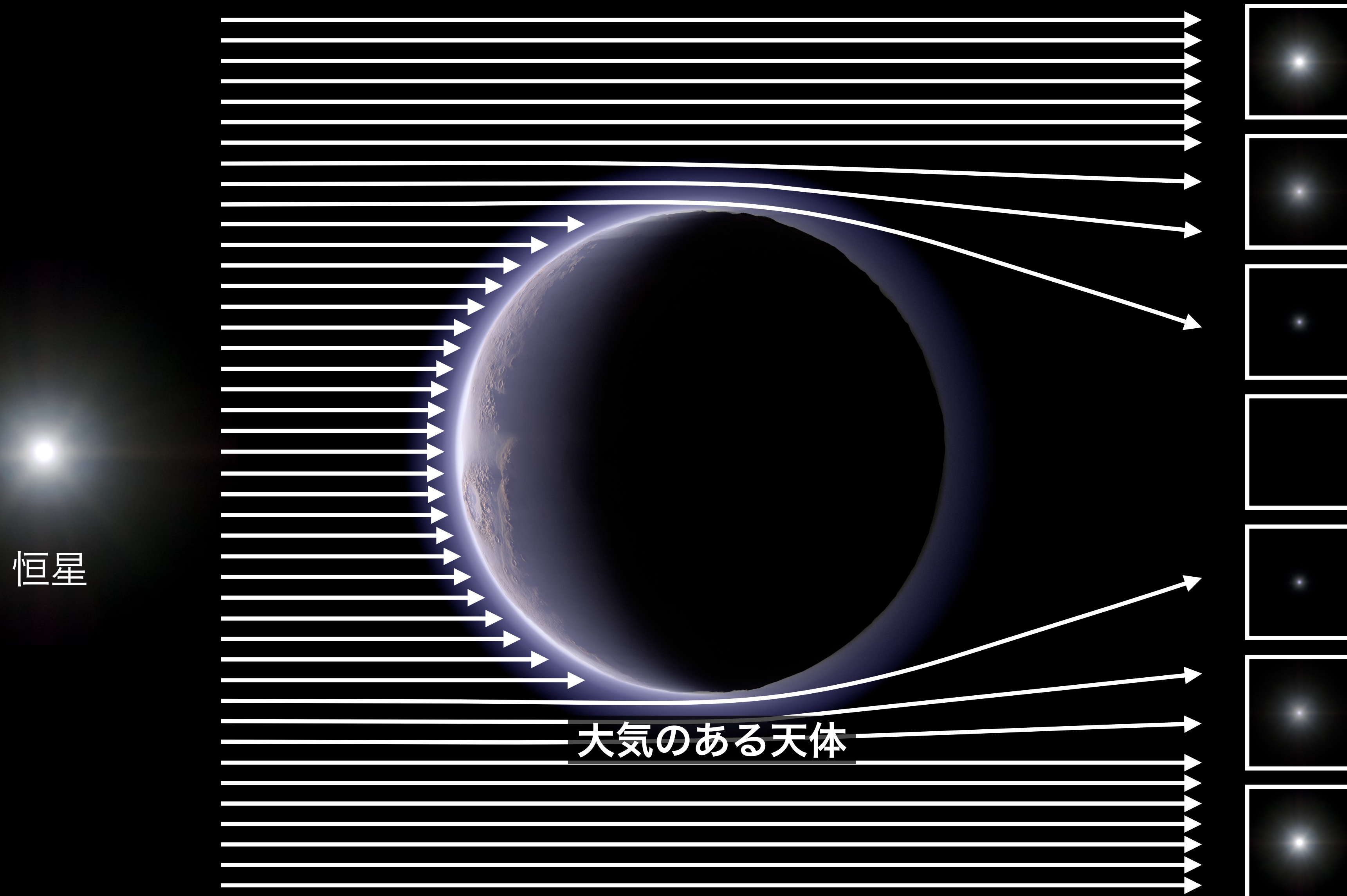
なぜ恒星掩蔽観測でTNOの大気がわかるのか



宇宙空間(真空)では
恒星からの光は直進
恒星は天体影の縁で
ほぼ瞬間的に明滅

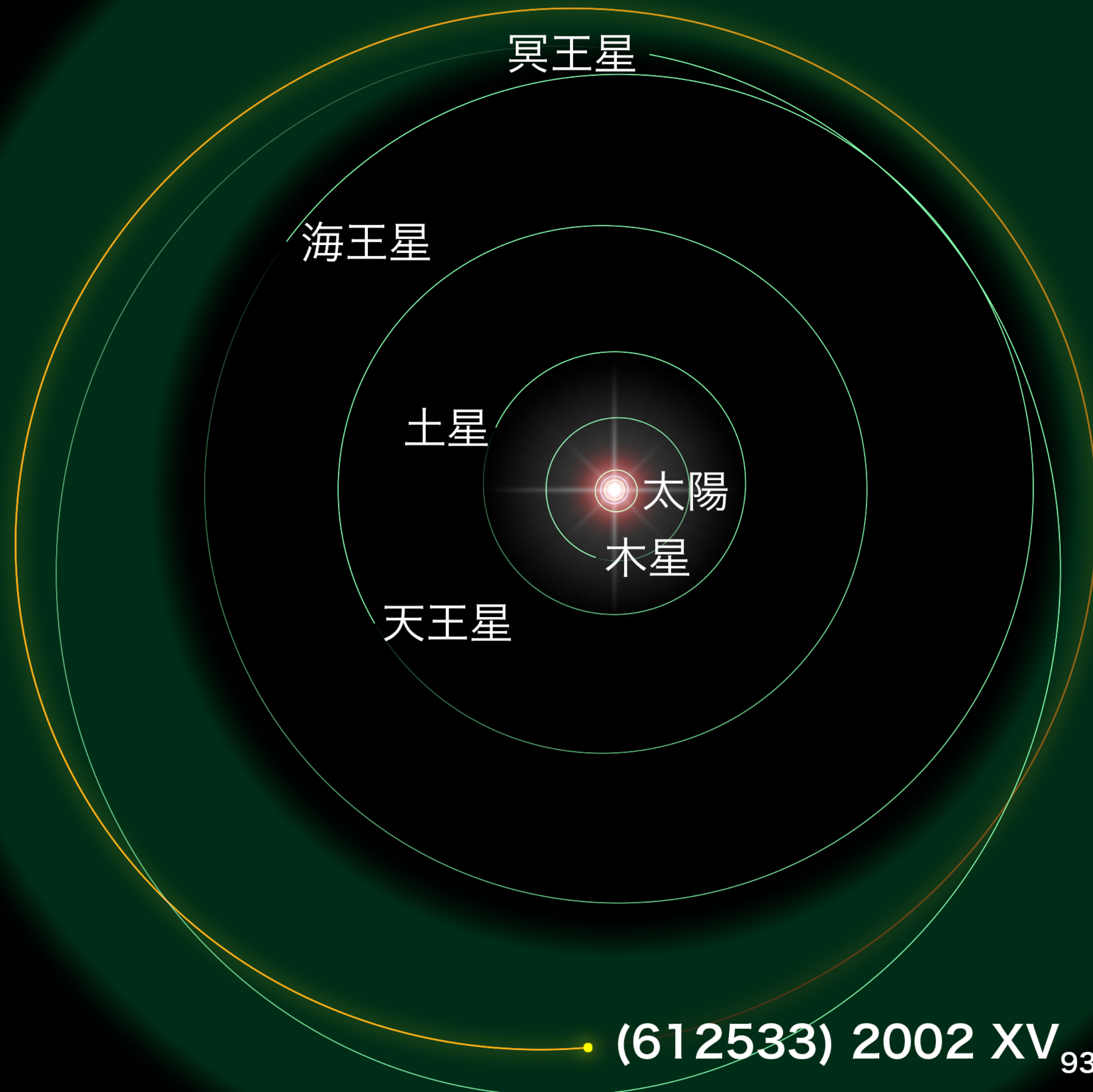
↓
天体のサイズ・形状
測定に利用

なぜ恒星掩蔽観測でTNOの大気がわかるのか



大気を通過するとき
恒星からの光が屈折
恒星は天体影の縁で
ゆっくりと明滅
↓
大気の発見・確認
に利用

本研究の観測対象: (612533) 2002 XV₉₃ はどんな天体か



□ 軌道

- ・ **カイパーベルトに位置するTNO**
- ・ 観測時: 太陽・地球から見て冥王星より遠方
- ・ 観測時の地球からの距離: 約37 au

□ 大きさ

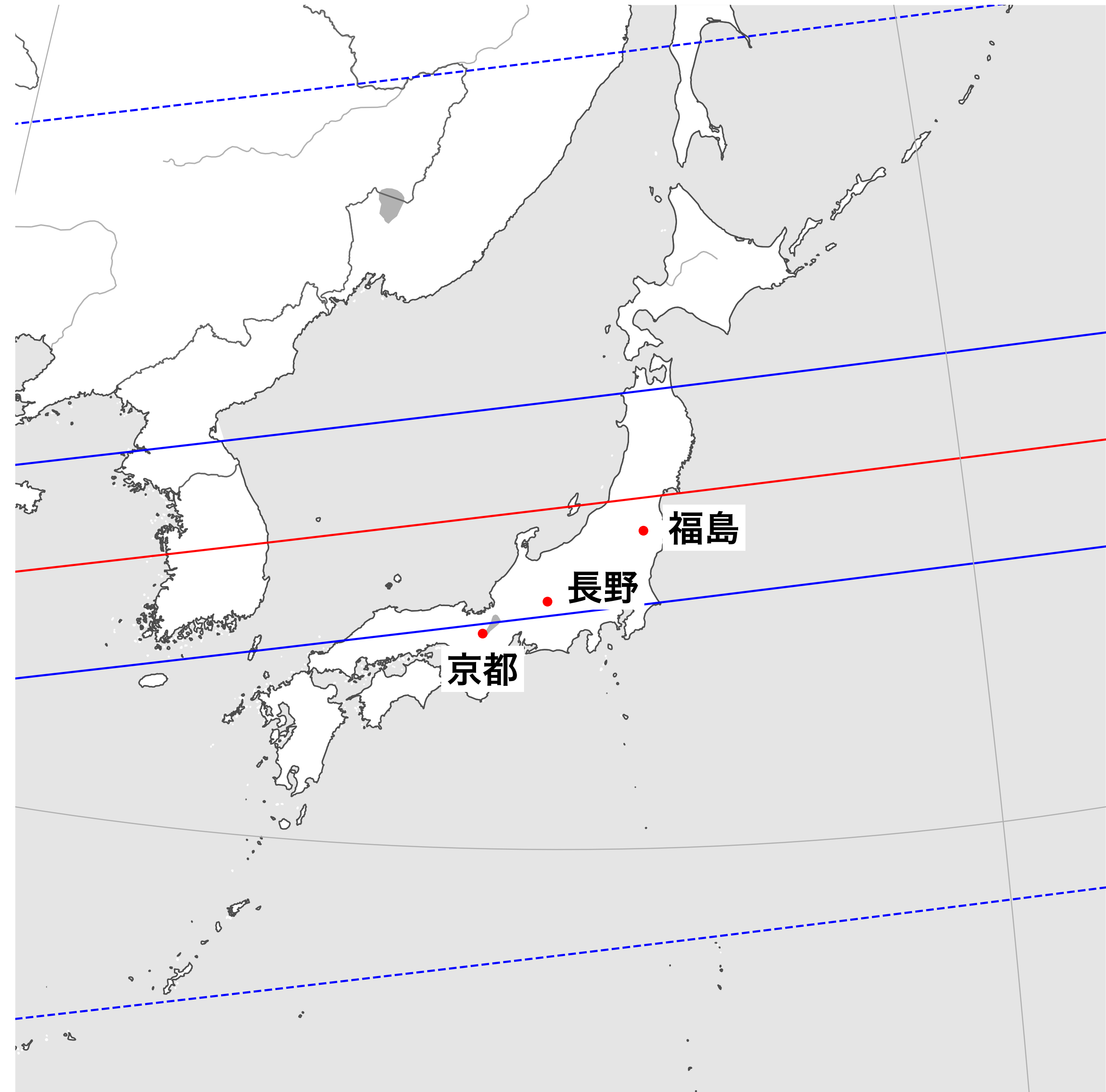
- ・ 推定直径: 約500 km
- ・ 見かけの視直径: 約0.02秒角

□ 表面のようす

- ・ 推定表面温度: 47 K
- ・ 推定表面重力加速度: $\sim 0.1 \text{ m s}^{-2}$

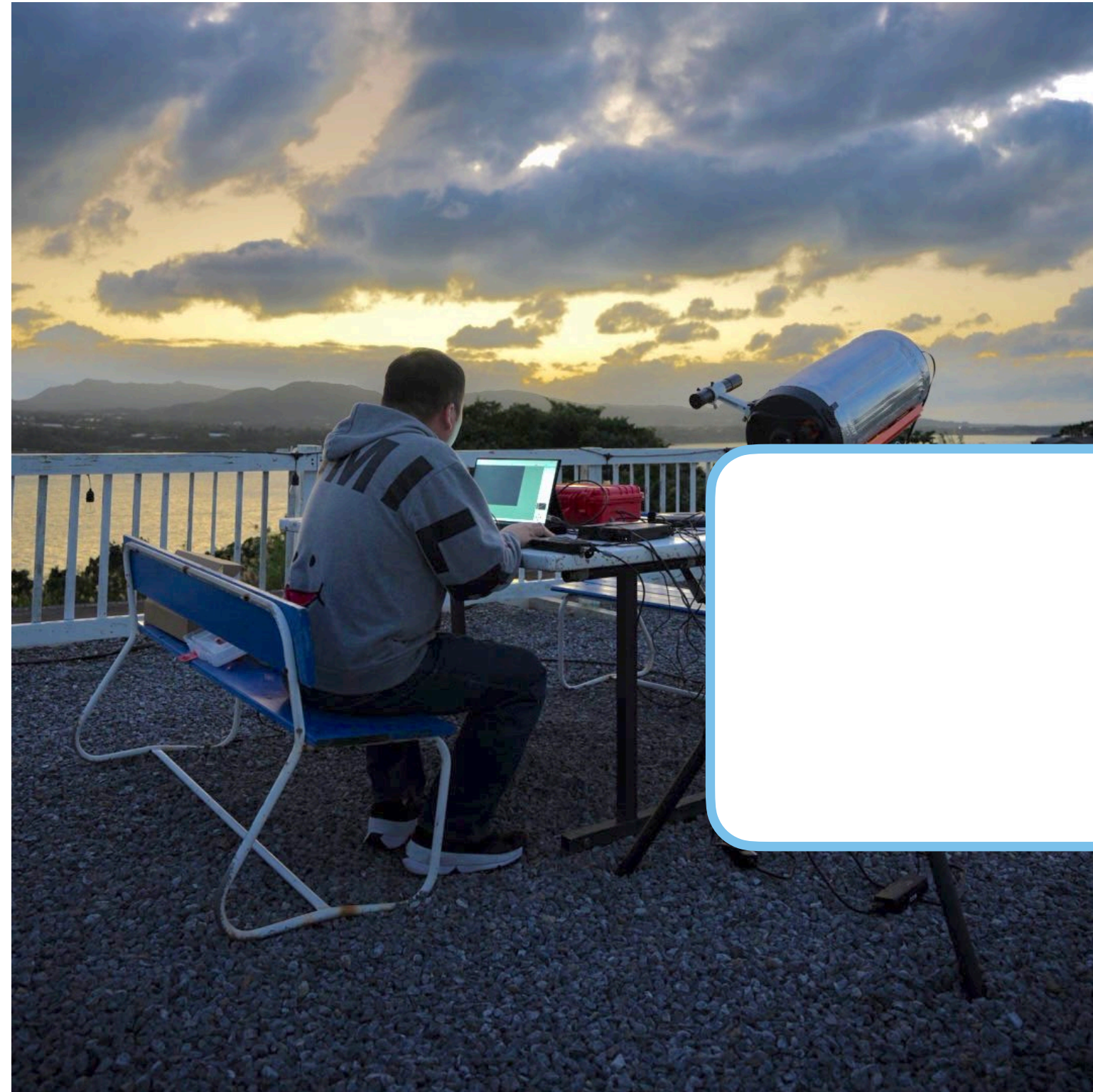
2024年1月10日: (612533) 2002 XV₉₃ による恒星掩蔽イベントの観測

- 2002 XV₉₃による恒星掩蔽を独自に予報
 - 発生日: 2024年1月10日夜
 - 掩蔽される恒星:
Gaia Gmag ~15
- 日本付近で掩蔽が観測される可能性
 - ➡ 京都・長野でキャンペーン観測
 - 京都大学(京都府京都市)
 - 東京大学木曽観測所(長野県木曽郡木曽町)
- アマチュア観測者、細井克昌氏も
福島県田村郡三春町で独自に観測
- ➡ 日本国内3地点で観測を実施



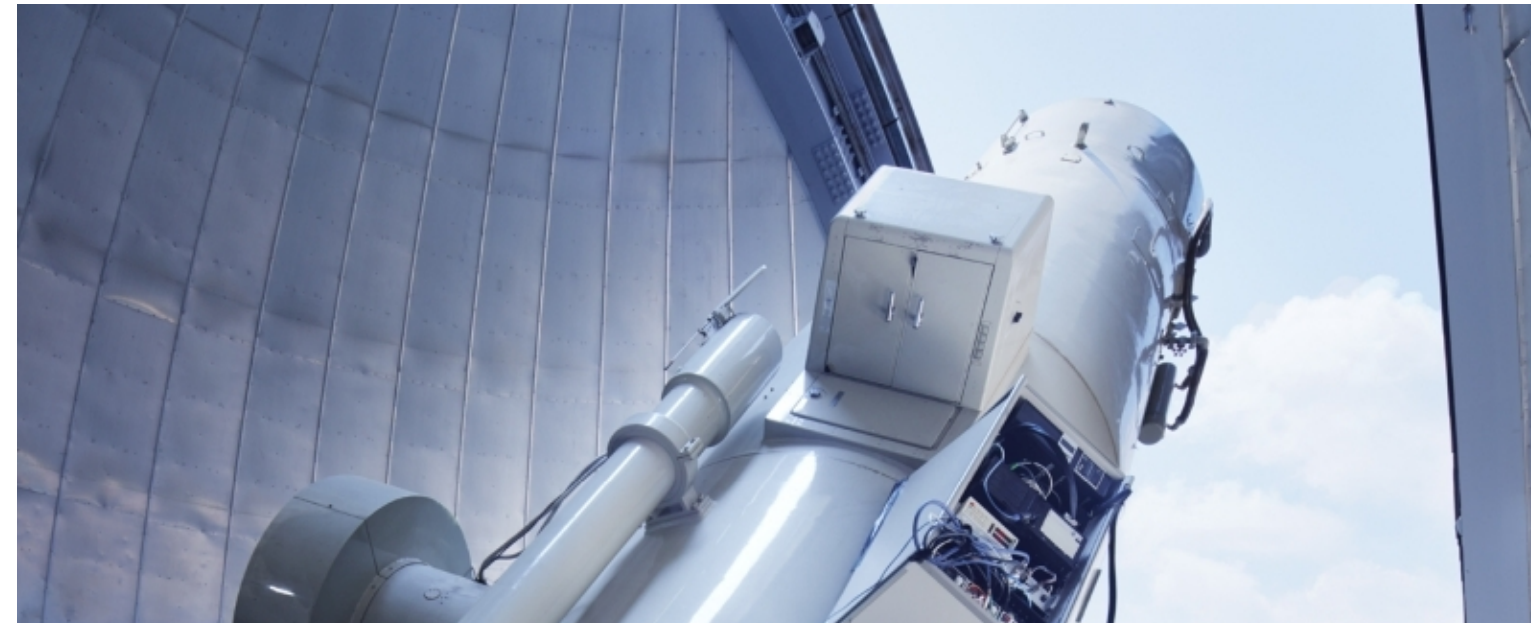
使った観測装置：国内中小望遠鏡による動画ネットワーク観測

京都: SoCoSoCo PONCOTS



口径20cm望遠鏡 + 小型CMOS
小型ながら動画観測可能
2022年には木星衝突閃光を検出

長野: 木曽シュミット+Tomo-e

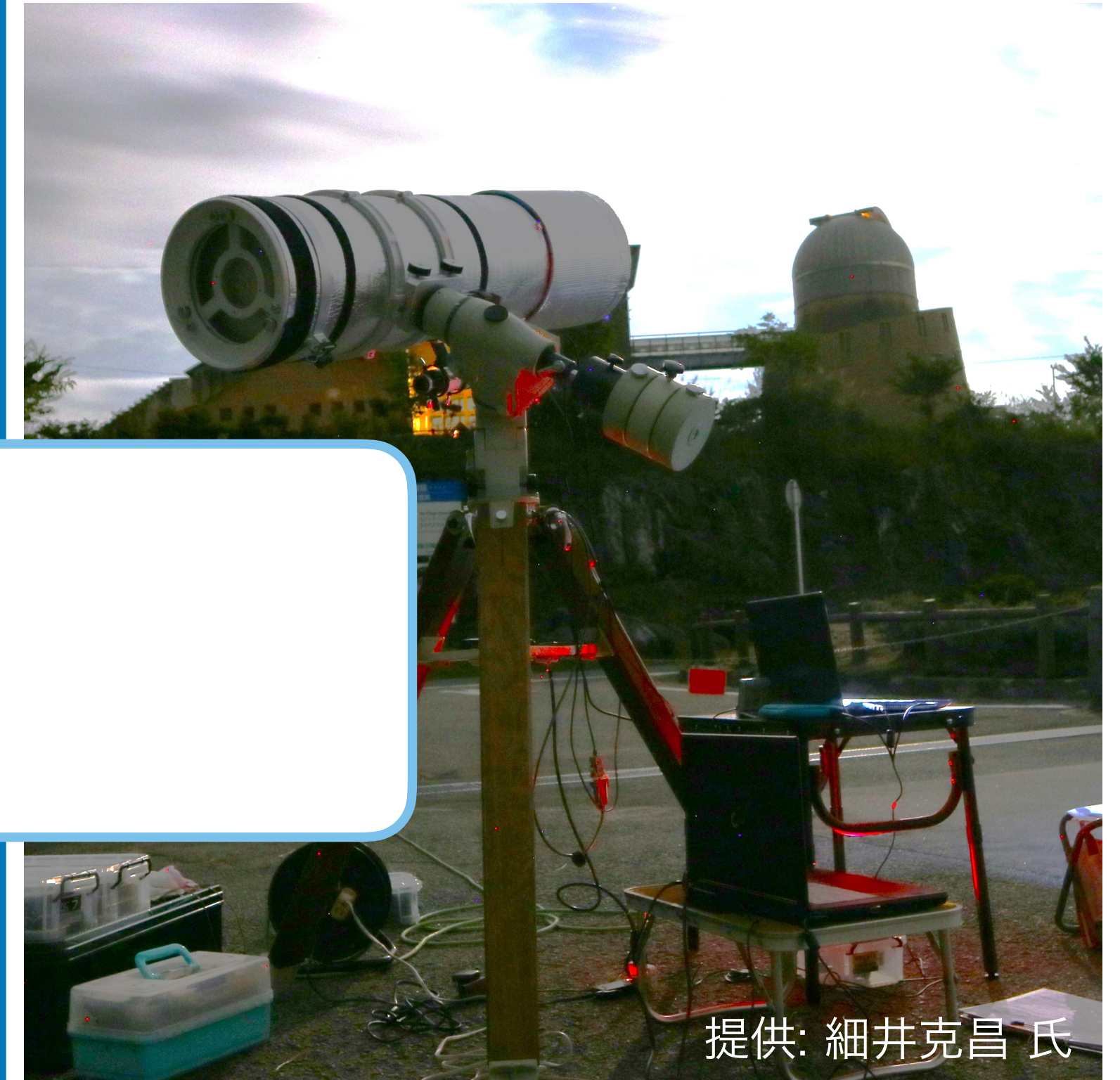


アマチュア・プロの枠組みを超えた、
ネットワーク観測を実現



口径1.05m + 超広視野CMOS
『動画天文学』の先進拠点
掩蔽観測での実績あり

福島: 細井克昌氏による観測



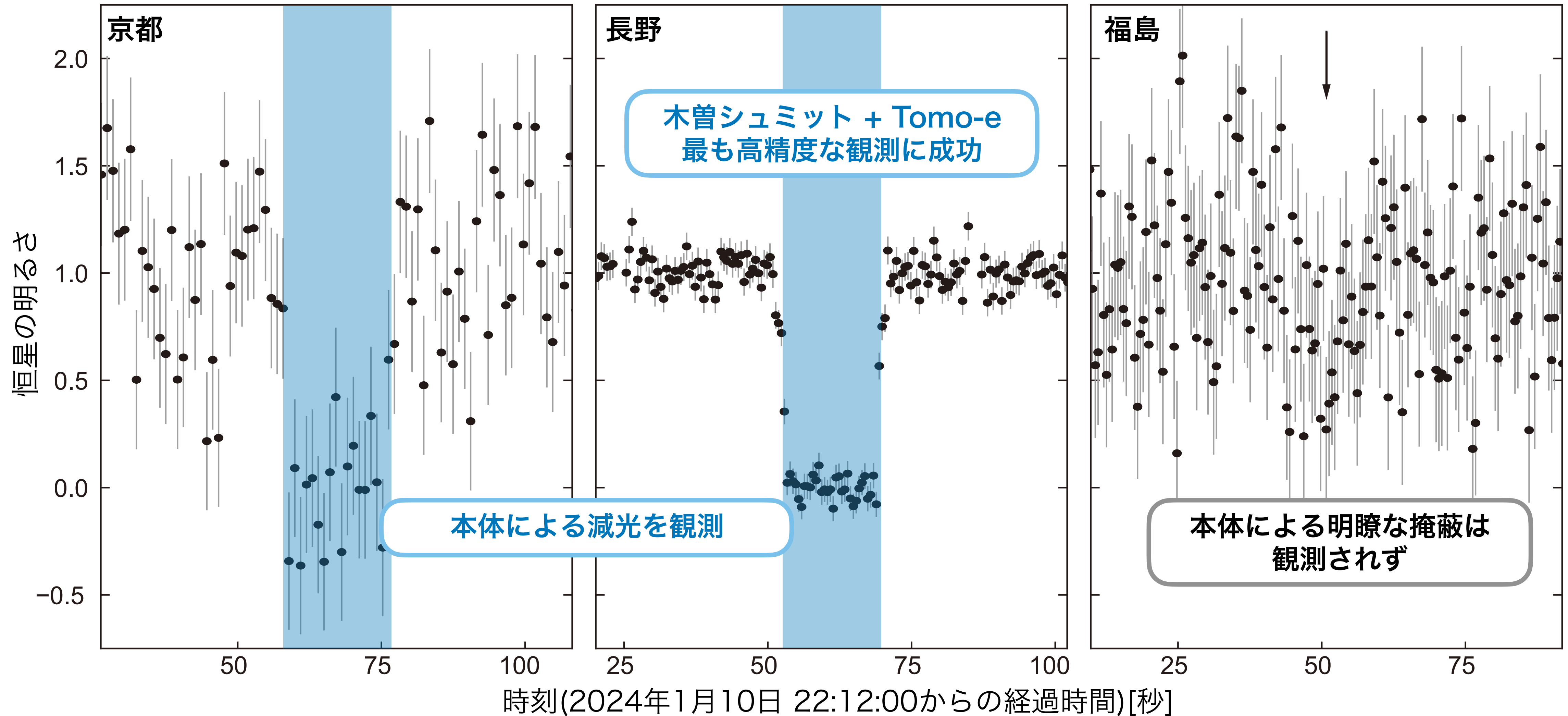
口径25cm望遠鏡 + 小型CMOS
小型ながら動画観測可能
実績豊富なアマチュア観測家

提供: 細井克昌 氏

2002 XV₉₃ 掩蔽観測結果: 恒星の光度曲線

□ 2地点(京都・長野)で2002 XV₉₃本体による恒星の掩蔽を観測成功

- 継続時間: 約18.0秒(京都)、約16.5秒(長野)
- 福島では本体による明瞭な掩蔽は観測されず



2002 XV₉₃ 掩蔽観測結果: 掩蔽の影の制約図

□ **制約図:** 複数地点での観測結果から掩蔽影部分の線分を表示

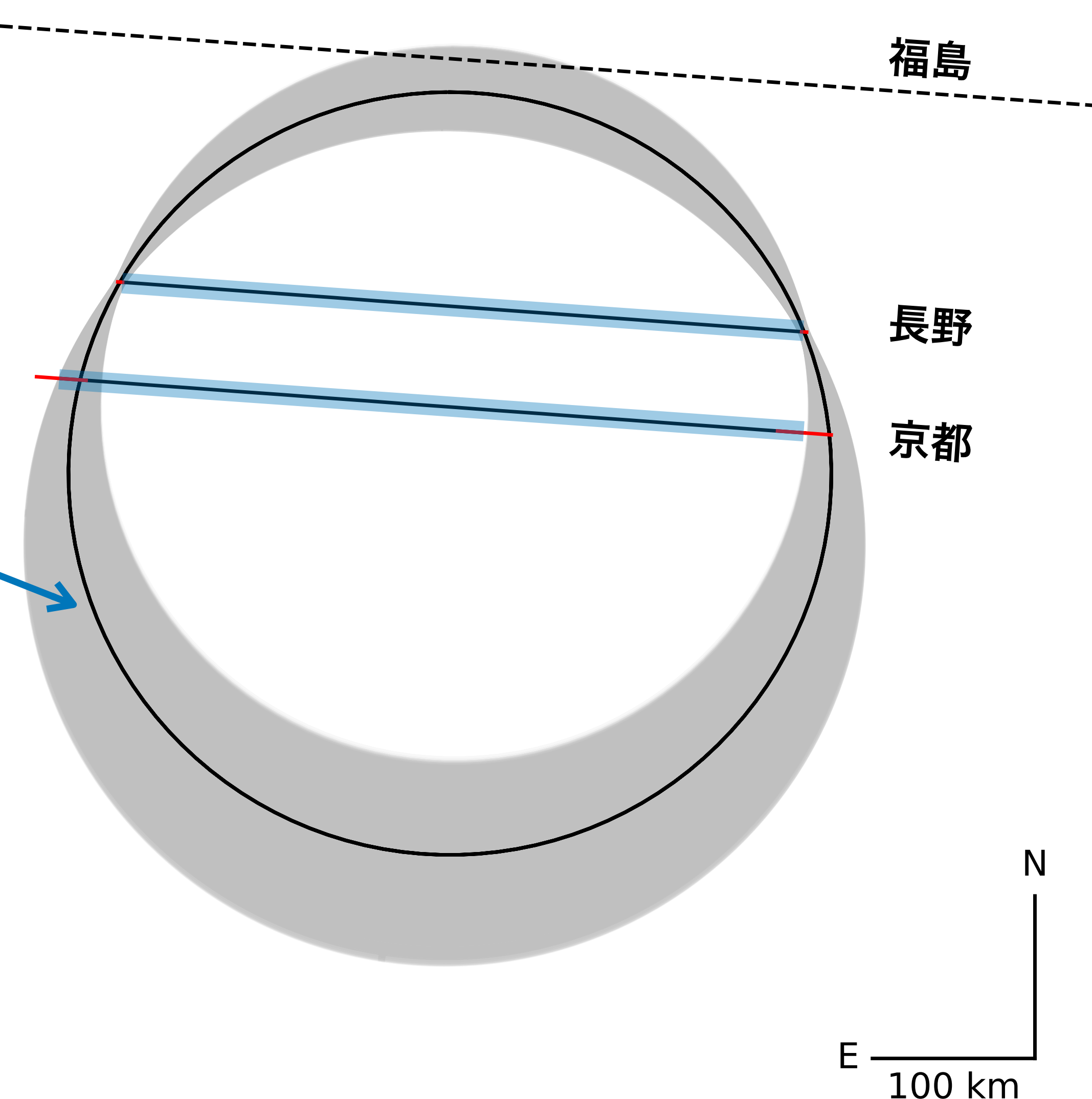
円形の影を仮定し2002 XV₉₃の位置・サイズを推定:

推定直径: 470^{+44}_{-30} km (およそ 500 km)

→冥王星・他の準惑星等(1000–2000 km)より小型

□ 各地点での影の通過位置を推定

- 京都: 中心付近の影で掩蔽発生
- 長野: 中心やや北方の影で掩蔽発生
- 福島: 影の縁に近い位置を通過



2002 XV₉₃ 掩蔽観測結果: 影の縁における恒星の明るさのゆるやかな変動

□ 木曽:木曽シュミット・Tomo-eのデータ

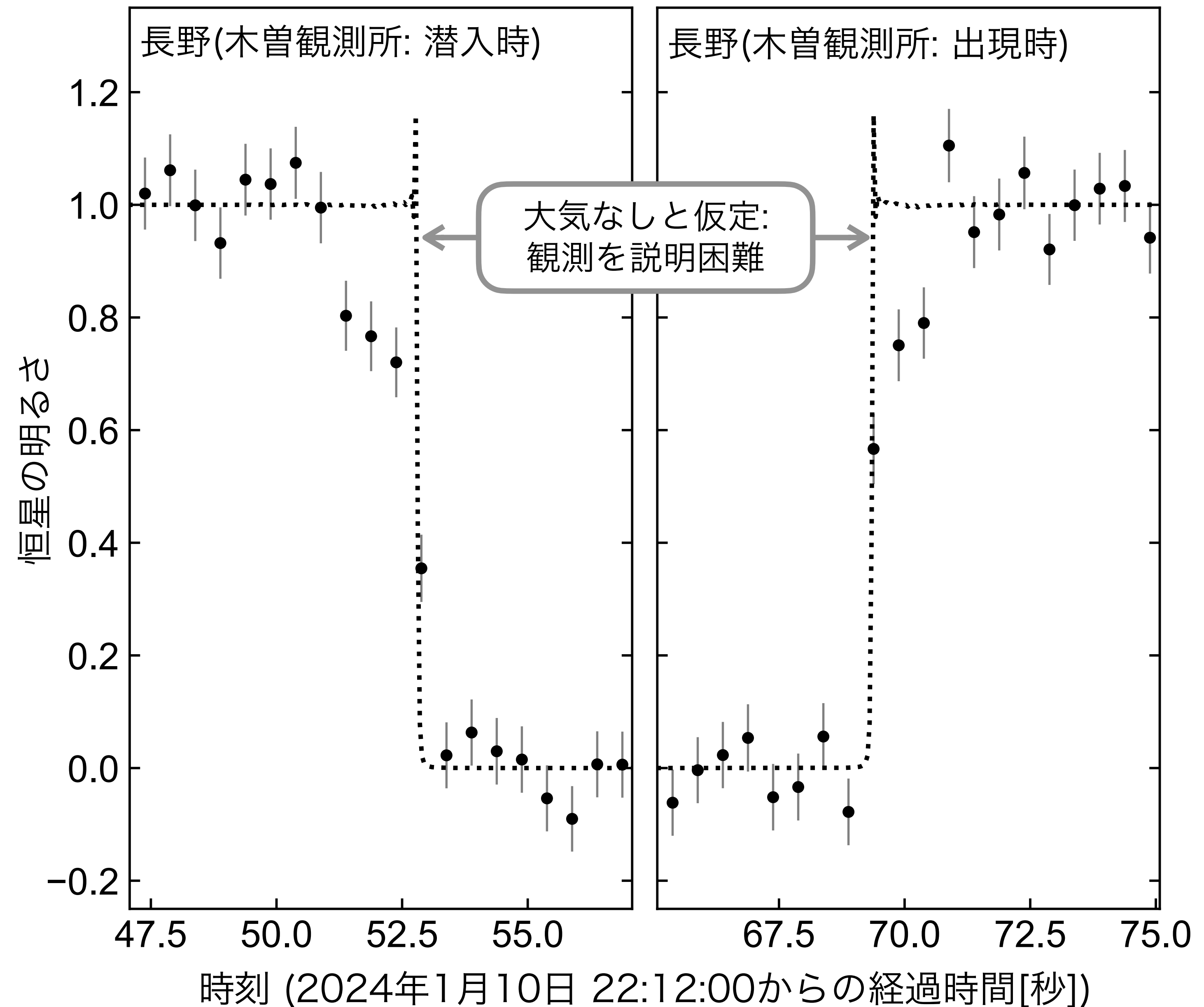
- 最も高精度な観測に成功

□ 掩蔽開始・終了時になだらかな減光

- 約1.5秒かけてゆっくり変動
- 両端でよく似たふるまい

➡ 通常(大気がない場合)では説明困難

- 光の『回折』+恒星の大きさの効果
では0.05秒程度で明滅のはず



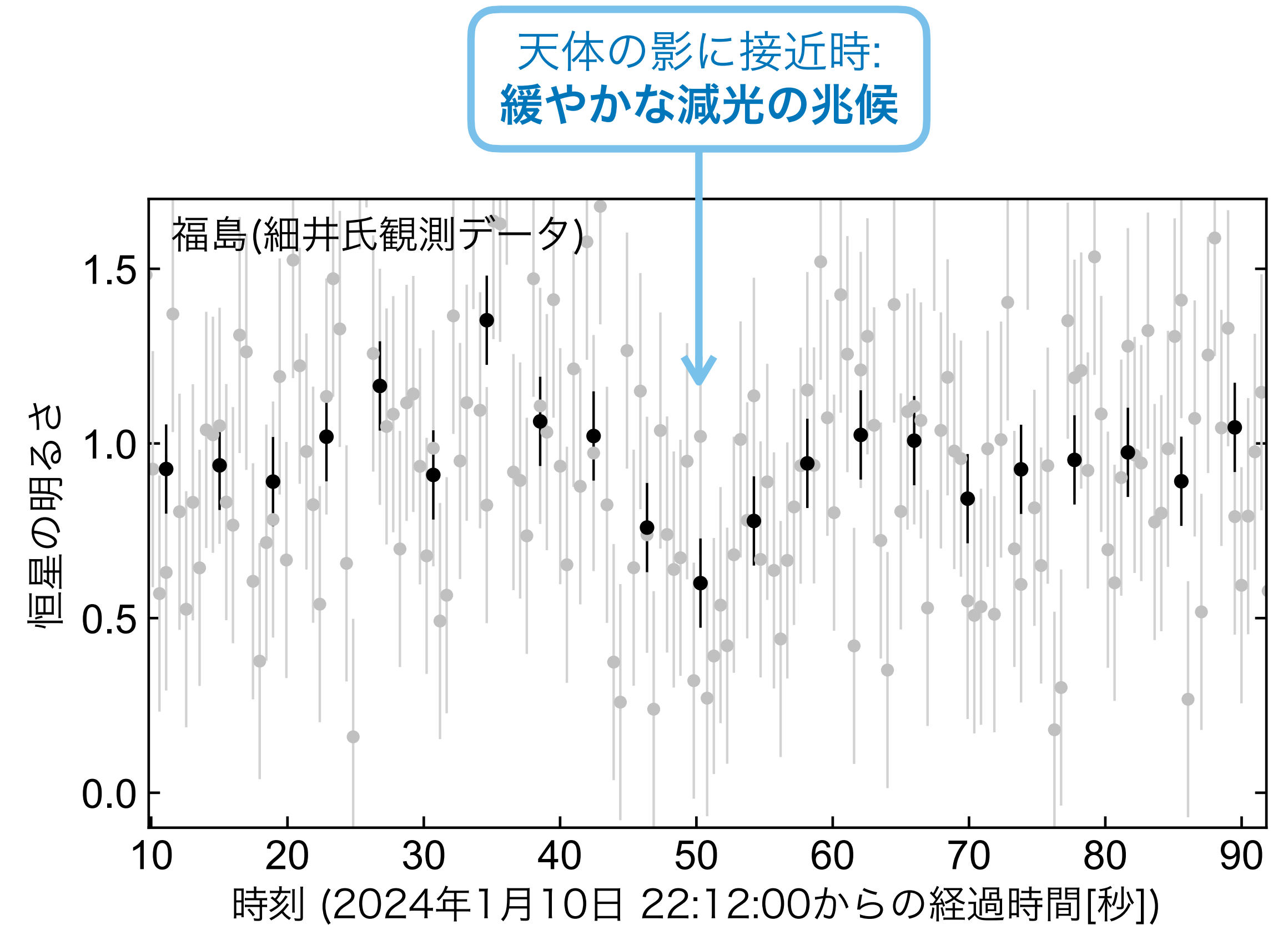
2002 XV₉₃ 掩蔽観測結果: 影の縁における恒星の明るさのゆるやかな変動

☐ 福島: 細井克昌氏の観測データ

- 影の縁に近い位置での観測に成功

☐ 天体の影に接近時に緩やかな減光の兆候

- 継続時間: 約10 秒
- 影に最接近時に最も強い減光を観測



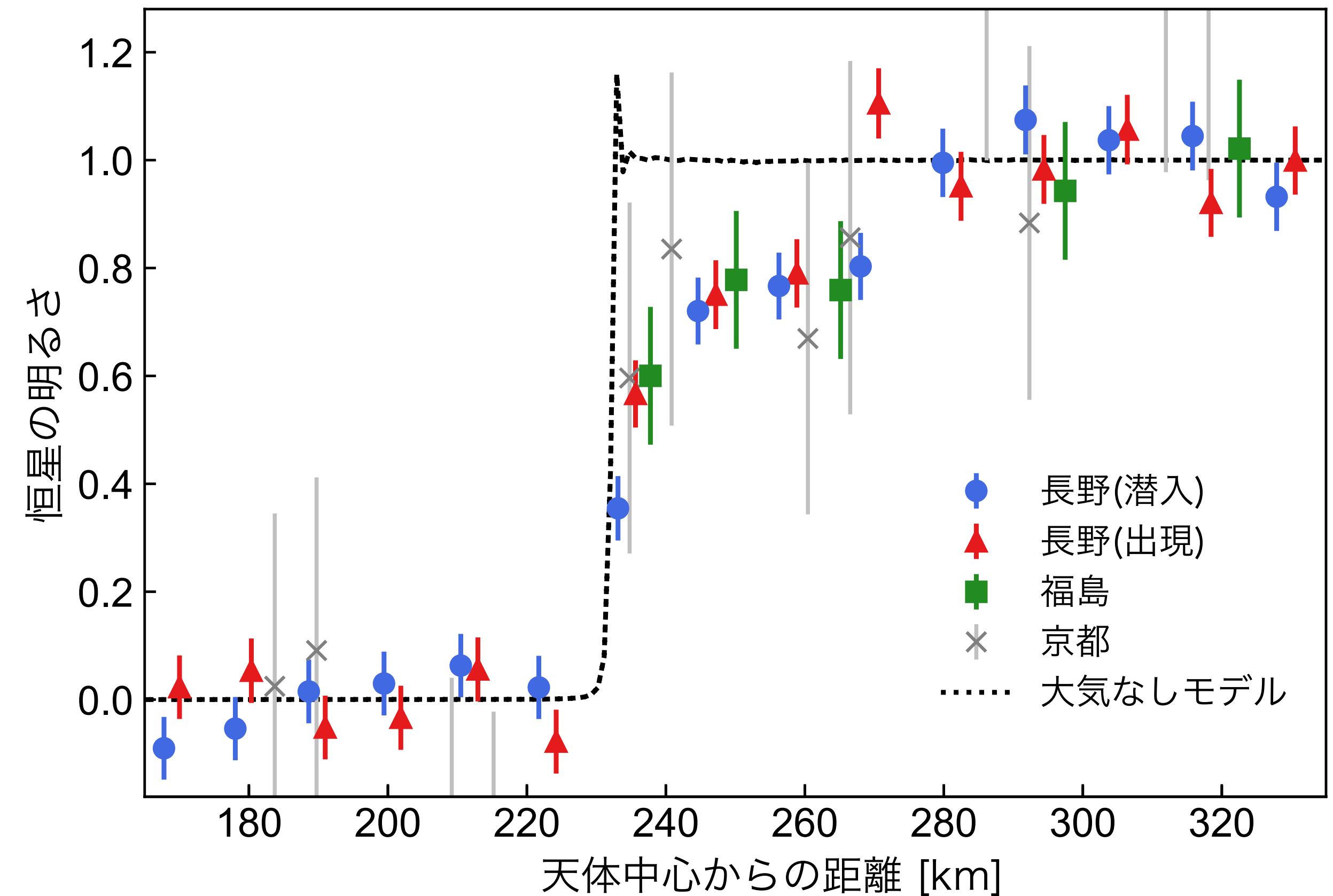
2002 XV₉₃ 掩蔽観測結果: 影の縁における恒星の明るさのゆるやかな変動

□ 3地点観測データの動径方向プロファイル

- 長野・福島の緩やかな変動は無矛盾
- 京都でも有意な検出はできていないが、
全体の傾向は矛盾せず

➡ 全観測点で矛盾しない、緩やかな変動を示唆

➡ 表面近傍に緩やかな変動が共通して存在



2002 XV₉₃ 掩蔽観測結果: 影の縁のゆるやかな変動を、大気屈折モデルが再現

□ 大気を仮定すると、

観測された変動を非常に良く再現

- 大気屈折効果を仮定し、モデル化すると
観測結果とほぼ一致

- メタン、窒素、一酸化炭素

いずれが主成分の大気でも観測を再現

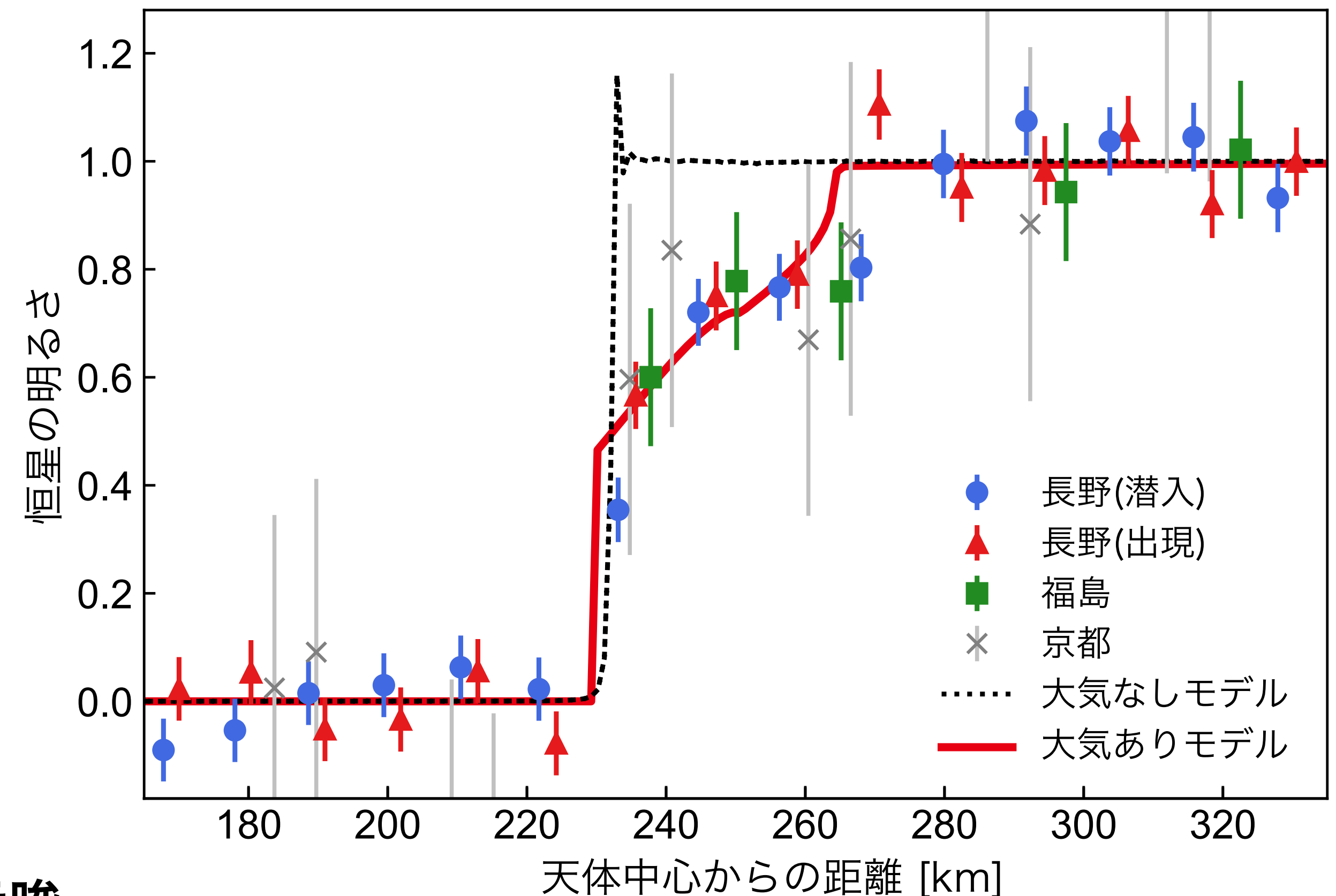
➡ 大気を示す屈折効果を検出

□ 推定表面大気圧: 100~200ナノバール(nbar)

- 1 nbar = 1/10億 bar (1 bar = 1,000 hPa)

➡ 冥王星の約50~100分の1,

地球の約500万~1,000万分の1の表面気圧を示唆



2002 XV₉₃ 掩蔽観測結果: 影の縁のゆるやかな変動を、大気屈折モデルが再現

□ 大気を仮定すると、

観測された変動を非常に良く再現

- 大気屈折効果を仮定し、モデル化すると観測結果とほぼ一致

- メタン、窒素、一酸化炭素

いずれが主成分の大気でも観測を再現

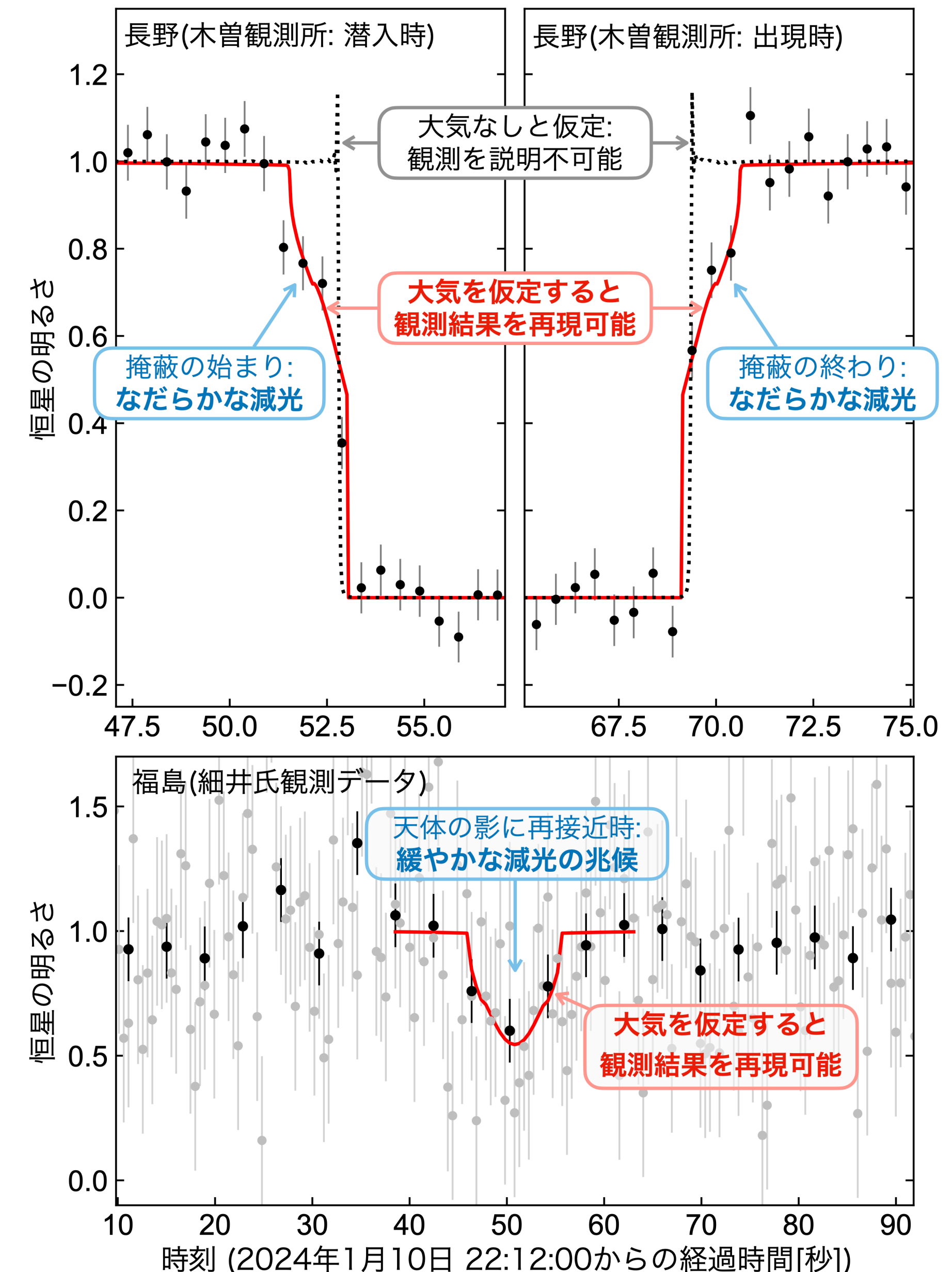
➡ 大気を示す屈折効果を検出

□ 推定表面大気圧: 100~200ナノバール(nbar)

- 1 nbar = 1/10億 bar (1 bar = 1,000 hPa)

➡ 冥王星の約50~100分の1,

地球の約500万~1,000万分の1の表面気圧を示唆



今回の研究成果: 何が驚きで、なぜ重要なのか

- 500 km級の太陽系外縁天体は、大気を長く保てないはず
 - ・ 弱い重力(地球の約100分の1と推定)
 - ・ 表面の超揮発性物質は約100～1000年で宇宙空間に散逸
 - ・ 太陽系の年齢にわたっての大気保持は不可能

「明確に観測可能な大気は大きな惑星・準惑星・一部の大型衛星に限られる」
という従来の常識が、必ずしも成り立たない可能性

➡ 「現在進行中の供給」または「最近の一時的な大気生成」か



2002 XV₉₃ の薄い大気はどこから来たのか

仮説① 内部からのガス供給

☐ 氷火山活動で表面にガス放出

- ・ 地下の揮発性物質や融解層
- ・ 長期的・季節的な大気供給か

☐ 比較的小さな天体にも想定外の内部活動性？

- ・ 氷天体の熱史・内部構造の知見を大きく変える可能性

仮説②：小天体衝突による一時的な大気

☐ 比較的最近の100～数百m級氷天体衝突

- ・ 衝突天体や地下物質から揮発性ガスが放出・昇華
- ・ 衝突後は比較的短期間で大気減少か

☐ 予想以上に天体衝突頻度が高い？

- ・ 衝突が少ないという外縁部の知見を更新する可能性

今後の展望: 地上掩蔽観測とジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡で、大気の起源と素性に迫る

□ 地上観測ネットワークによる掩蔽継続観測: 大気圧変化の追跡

- ・ 恒星掩蔽観測で大気圧の時間変化を調査
- ・ 衝突起源なら単調な大気圧低下が予測
- ・ 季節変動や単調でない変化は内部供給を示唆

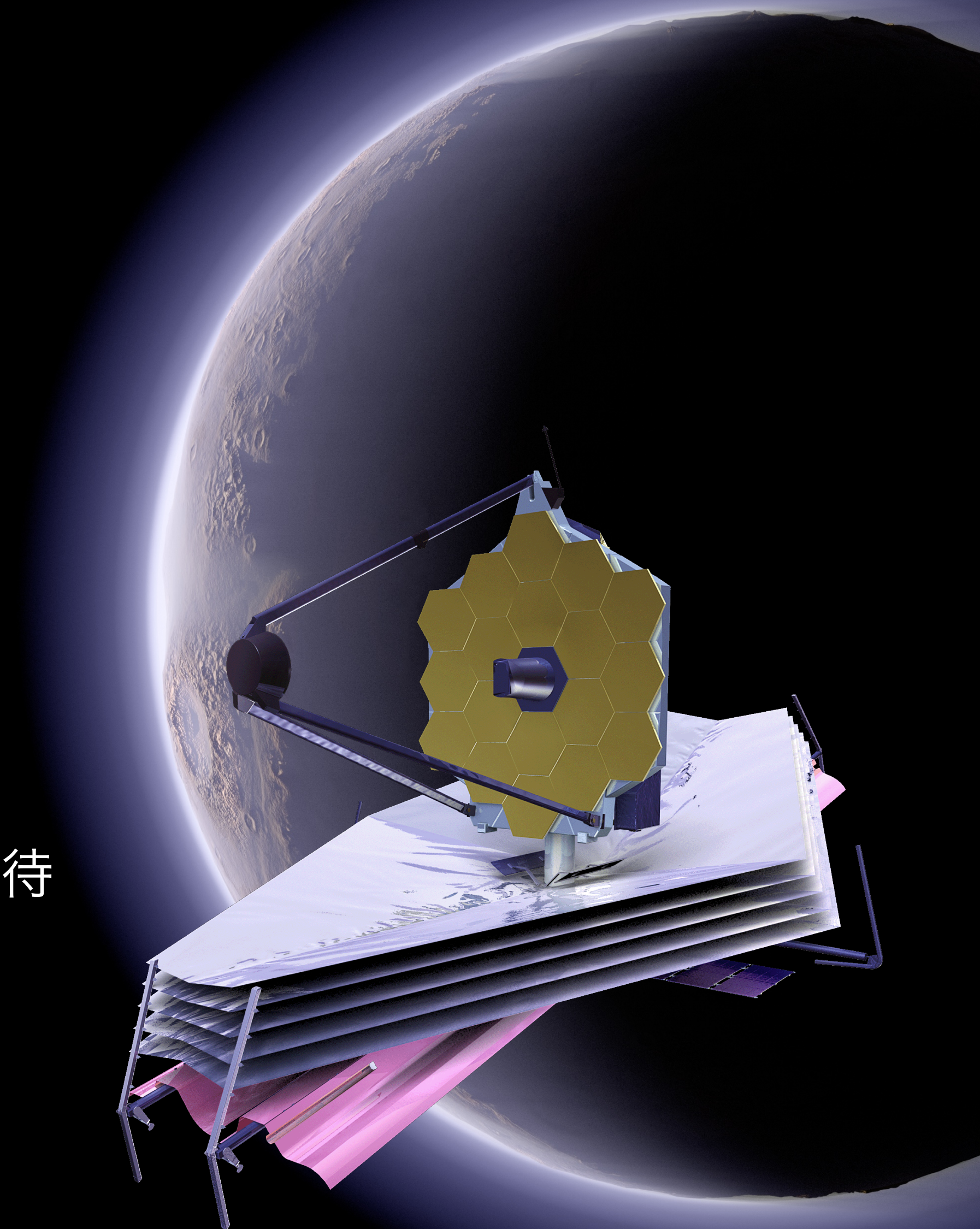
➡ 大気の起源を区別できる可能性

□ ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡による分光観測: 大気組成の解明

- ・ 地上では困難な超高感度の近・中間赤外線分光観測が可能
- ・ メタンや一酸化炭素など大気成分の手がかりとなる分子の検出を期待

➡ 微弱大気の組成制約に有力な手段

➡ 大気の起源と素性を今後の観測で解明へ



- 2002 XV₉₃の恒星掩蔽観測から、
冥王星以外の太陽系外縁天体で初めて大気の実在を示す観測結果を取得
 - ・ 明確な大気の実在が示された例としては、
惑星・準惑星・大型衛星を除く太陽系天体で初
 - ・ 太陽系最遠の大気保有天体の発見
- 『太陽系外縁部は活動性や変化のほとんどない世界』
という従来の理解を見直す成果
- アマチュア・プロの垣根を超えた中小望遠鏡ネットワークが、
観測天文学の新境地を開拓

