



T O M O · E
G O Z E N

小惑星が経験した衝突イベント時期を ライトカーブから推定する方法

浦川 聖太郎¹, 大澤 亮², 酒向 重行², 奥村 真一郎¹, 櫻井 友里³, 高橋 隼⁴,
今村 和義⁵, 内藤 博之⁶, 岡崎 良⁷, 関口 朋彦⁷, 石黒 正晃⁸, 道上 達広⁹,
吉川 真¹⁰, Tomo-e Gozenメンバー

¹日本スペースガード協会, ²東京大学, ³岡山大学, ⁴兵庫県立大学, ⁵阿南市立科学センター, ⁶なよろ市立天文台, ⁷北海道教育大学, ⁸ソウル大学, ⁹近畿大学, ¹⁰JAXA

(Urakawa et al., 2019)

今日のはなし

- ▶ 昨年のおさらい
- ▶ 小惑星における衝突事象
- ▶ 小惑星ライトカーブから衝突時期を推定
- ▶ Tomo-e Gozenを用いた観測的惑星科学の新展開

昨年のおさらい

- ▶ 小惑星2012 TC4が地球に約50000kmまで接近
- ▶ Tomo-e Gozenで観測(2017年10/9-11)
- ▶ 高速で歳差回転をしている一枚岩小惑星
- ▶ 自転周期: 8.47分 歳差周期: 12.25 分
- ▶ 直径: 8m (6 - 20) m
- ▶ パンケーキのような形。衝突破片であろう。
- ▶ NEW! 母天体での衝突時期を推定

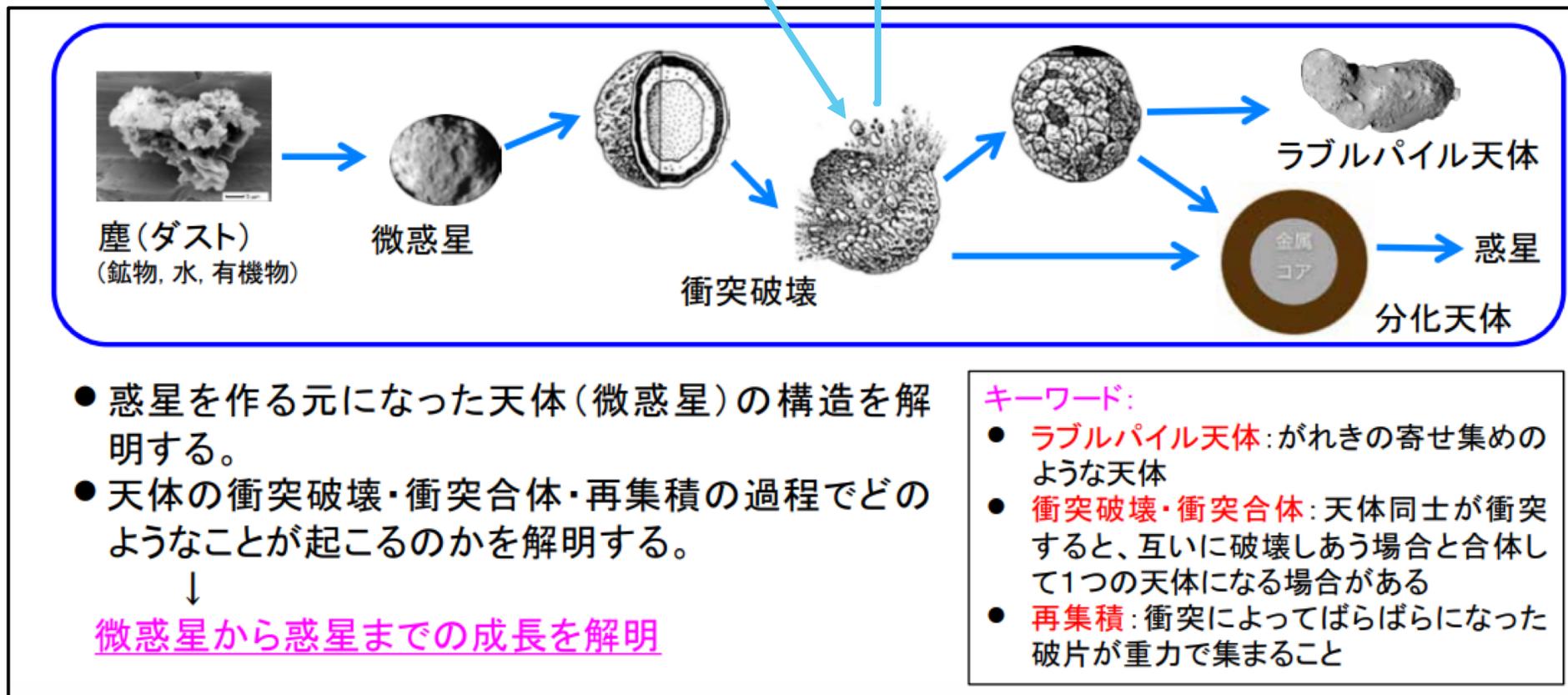


研究の効能：小惑星の衝突時期からわかること

Tomoeの観測により2012 TC4母天体の衝突破壊時期を推定することができた



一枚岩小惑星

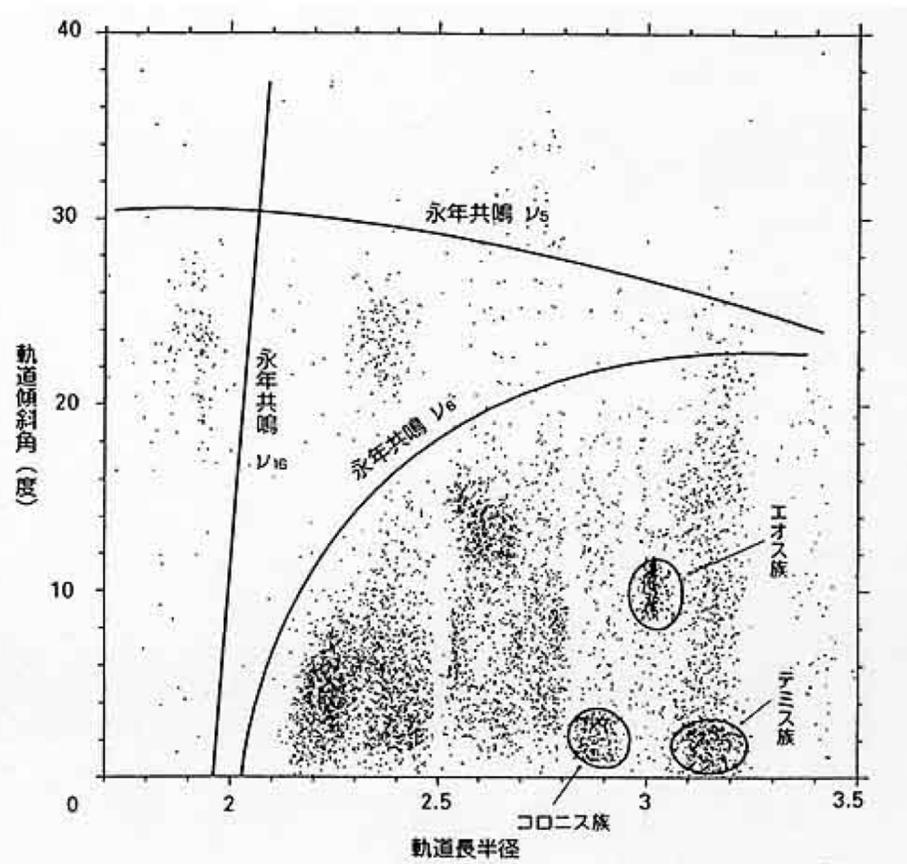


衝突は小惑星研究の重要なキーワード

JAXA はやぶさ2 プレス向け資料を一部改変

研究の効能：小惑星の衝突時期からわかること

衝突はメインベルト小惑星から地球接近小惑星へ軌道進化させるトリガー



(ISASニュース 吉川 1998)

衝突やヤルコフスキー効果による僅かな軌道変化で、小惑星が共鳴帯に侵入。短時間で、地球に近づく軌道へ進化

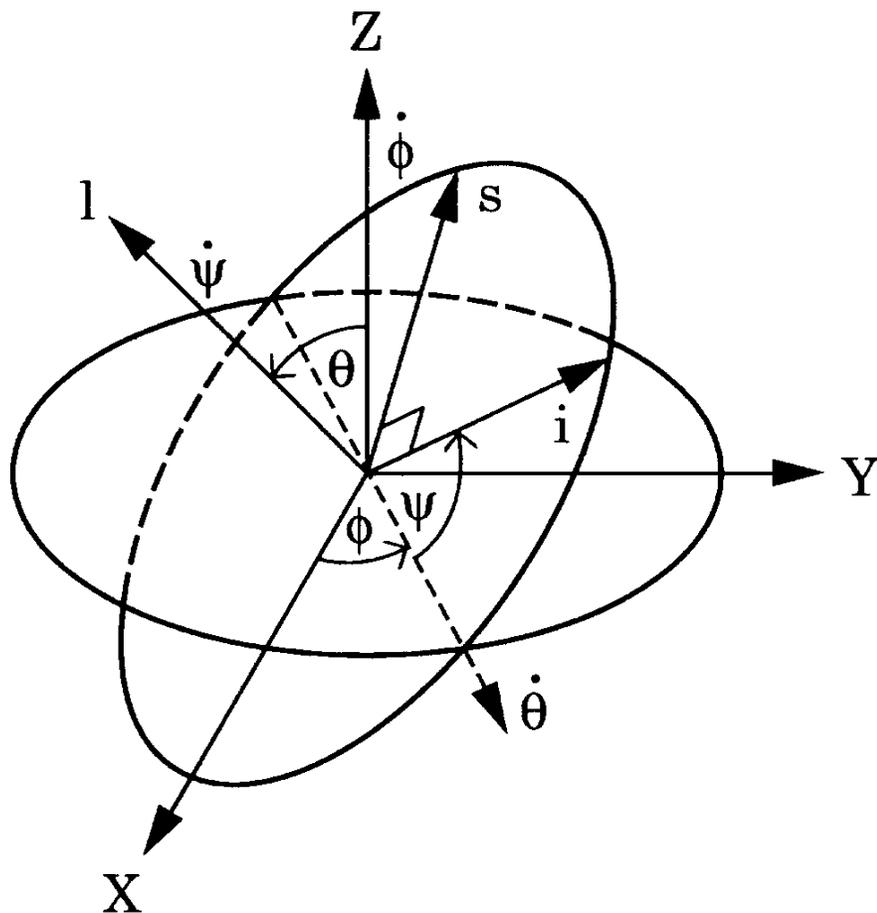
衝突事象であれば、タンブリング運動が起こる

タンブリング運動が継続している小惑星は比較的最近に衝突事象を経験したのでは？

宇宙風化の影響がない表面：タンブリング小惑星は太陽系形成期の情報があるかも

小惑星内部の歪みなどの内部エネルギー散逸で、安定な回転に落ち着く

外力のない剛体の運動の物理I



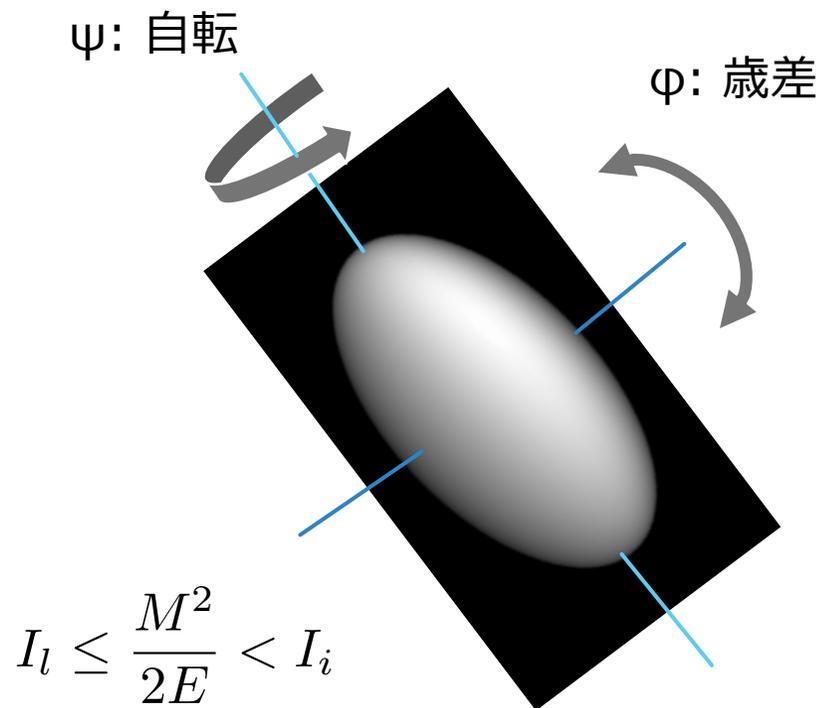
- ψ : 長軸周りの回転
- ϕ : 短軸周りの回転
- θ : 全回転角運動量ベクトルと長軸がなす角
- L_l : 長軸長さ
- L_i : 中間軸長さ
- L_s : 短軸長さ
- I_l : 長軸周りの慣性モーメント
- I_i : 中間軸周りの慣性モーメント
- I_s : 短軸周りの慣性モーメント

オイラー角 θ, ϕ, ψ で剛体の運動を記述

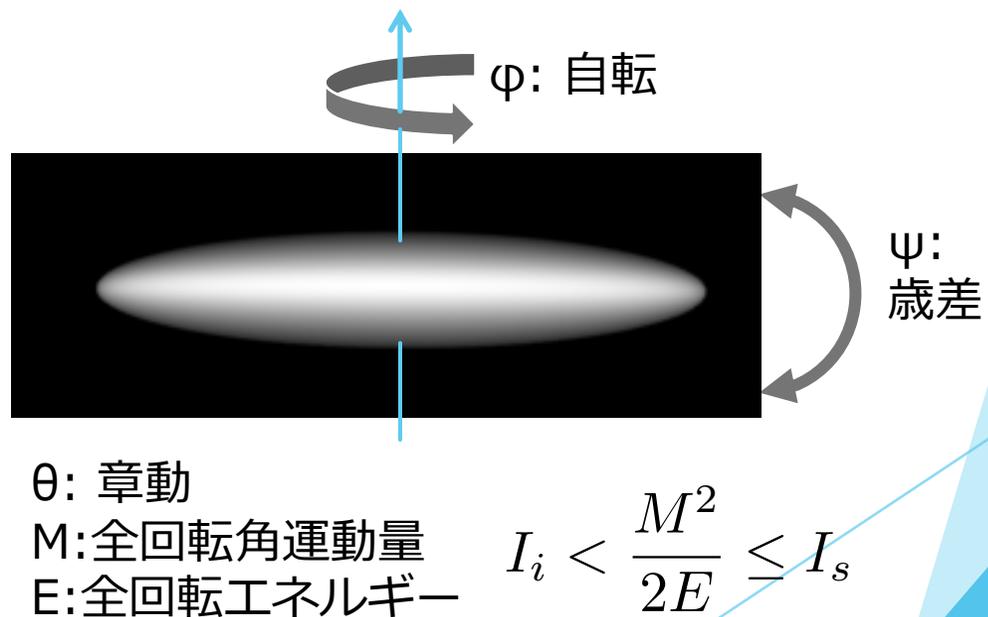
外力のない剛体の運動の物理II

オイラー角で運動を表記

長軸回転モード



短軸回転モード



ライトカーブから形状や回転状態を推定

入力値
観測結果

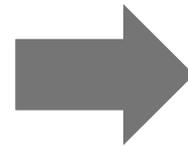
自転周期

ライトカーブ
の最大振幅

直径



三軸不等楕
円剛体の運
動解析



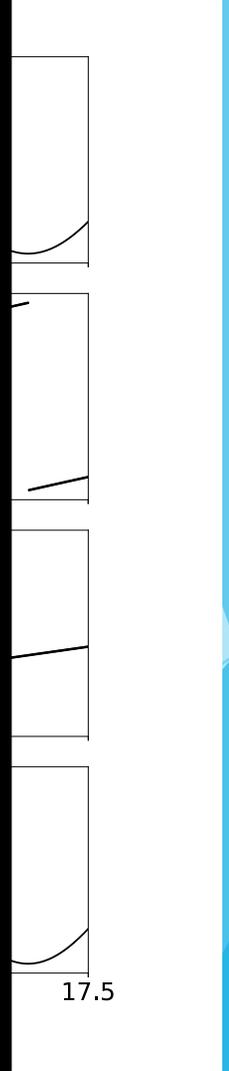
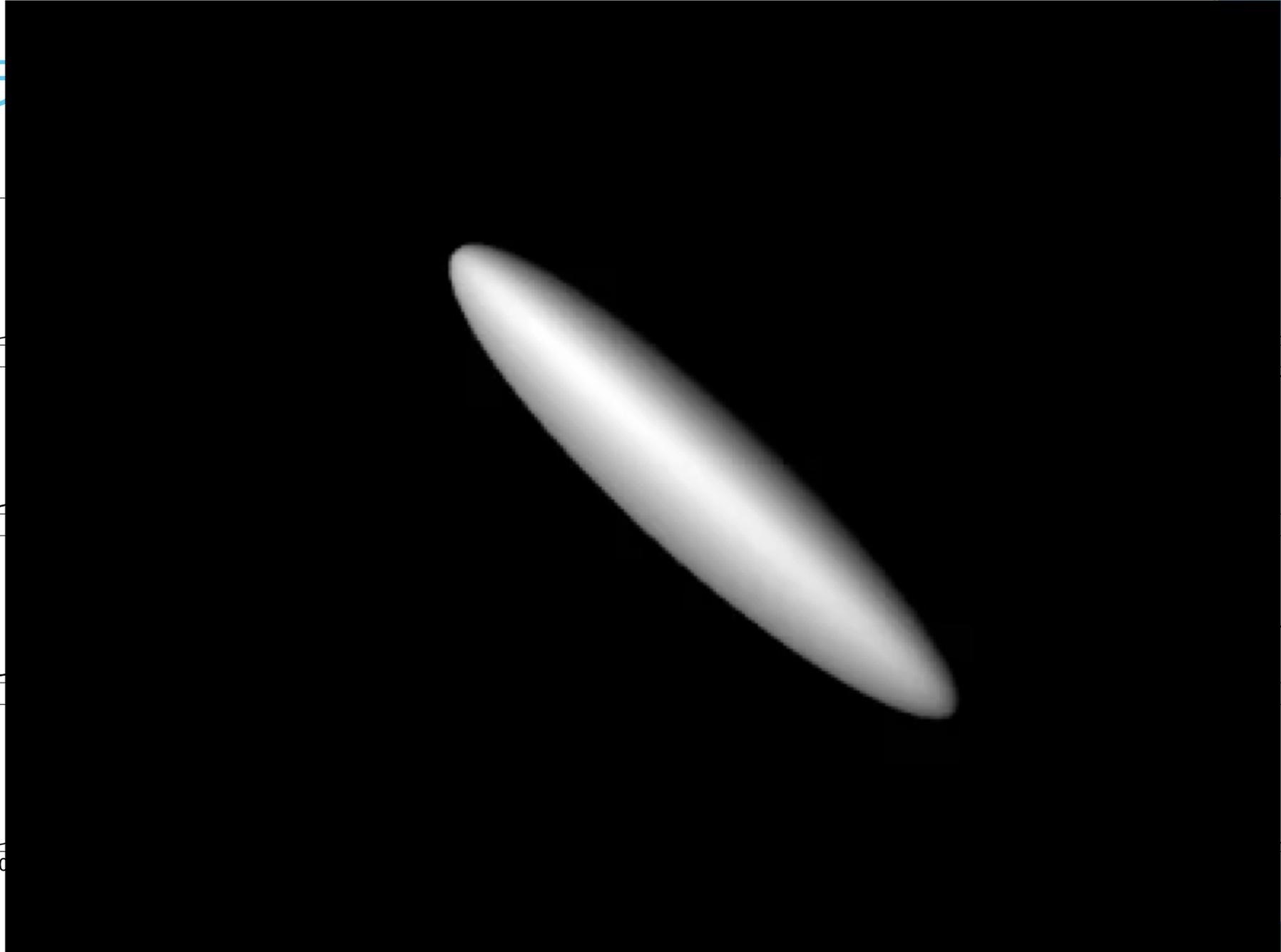
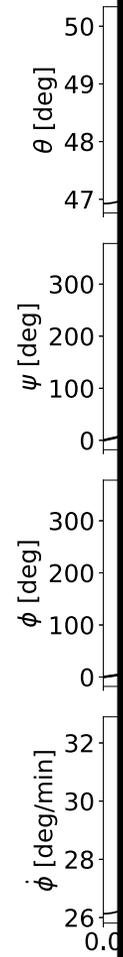
出力
3軸比や回転状態

長軸非主軸回転モード

モデルその1 : 6.2 m × 8.0 m × 14.9m
モデルその2 : 3.3 m × 8.0 m × 14.3m

モデルその1:
 $\theta = 29.0 \text{ deg}$, $d\phi/dt = 29.4 \text{ deg/min}$
モデルその2:
 $\theta = 48.5 \text{ deg}$, $d\phi/dt = 29.4 \text{ deg/min}$

モ



タンブリング運動の物理 -弾性体の回転-

小惑星は完全剛体ではない

引っ張りや歪みのエネルギーに回転エネルギーが使われる(内部エネルギー散逸)

=>最小エネルギー状態(短軸純粋回転)へ

Excitation timeから衝突時期を推定

長軸非主軸回転モード



Excitation time

短軸非主軸回転モード



Damping time

短軸純粋回転モード

衝突はいつ起こったか

Excitation time (Damping timeも同様なパラメータに依存)

$$T_1 = D_1(h_1, h_2) \frac{(h_1^2(1 + h_2^2))^3 h_1^2 \mu Q P_\phi^3}{(1 + h_1^2 h_2^2)^3 2\pi^3 \rho D_m^2},$$

直径が大きく重たい、ゆっくりした自転をする小惑星のタンブリング運動はすぐに安定する

Shape parameter

$$D_1(h_1, h_2) = \left[\frac{h_1^2(1 - h_1^2)(1 + h_2^2)}{5(1 + h_1^2 h_2^2)} \right] \int_{\theta_1^0}^{\theta_1'} \frac{\sin\theta_1 \cos\theta_1}{\Psi_1} d\theta_1, \quad h_1 \equiv L_i/L_l, h_2 \equiv L_s/L_i$$

μ : elastic module = 10^9 Q: quality factor = 100 ρ : 密度 = 3000 kgm^{-3}

D_m : 直径 = 8m P_ϕ : 歳差周期

θ : 章動角(モデル1 0.1度=>29.0度まで積分、モデル2 0.1度=>48.5度まで積分)

Ψ_1 : エネルギー損失率の無次元ファクター

Ψ_1

$$\Psi_1 = Z_1^5 (P_1(k_1)M_{13} + P_2(k_1)M_{12} + P_3(k_1)M_0 + P_4(k_1)M_{23})$$

$$Z_s = \frac{\Omega_s}{\tilde{\omega}_s} = \frac{\pi n_s}{2a_s \mathbf{K}_s}, \quad N = \frac{32}{35} \left(\frac{h_{12}^2}{(1-h_1^2)(1-h_2^2)(1-h_{12}^2)} \right)^2, \quad M_0 = \frac{N}{3h_2^4 N_9} \sum_{j=1}^8 N_j h_2^{2j}.$$

$$P_1(k_s) = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(2p-1)^3 q_s^{2p-1}}{(1-q_s^{2p-1})^2}, \quad M_{13} = N (1-h_1^4)(1-h_2^4) \left(2 - \frac{5h_2^2}{5+8h_1^2+15h_2^2+5h_{12}^2} \right), \quad (\text{B2})$$

$$P_2(k_s) = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(2p-1)^3 q_s^{2p-1}}{(1+q_s^{2p-1})^2}, \quad M_{23} = N (1-h_{12}^4)(1-h_1^4) \left(2 - \frac{5h_1^4 h_2^2}{8+5h_1^2+5h_{12}^2(1+3h_1^2)} \right), \quad (\text{B3})$$

$$P_3(k_s) = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(2p)^3 q_s^{2p}}{(1-q_s^{2p})^2}, \quad M_{12} = N \frac{(1-h_{12}^4)(1-h_2^4)}{h_2^4} \left(2 - \frac{5}{15+5h_2^2+h_{12}^2(5+8h_2^2)} \right). \quad (\text{B4})$$

$$P_4(k_s) = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{(2p)^3 q_s^{2p}}{(1+q_s^{2p})^2},$$

(Breiter et al. 2012)

Ψ_1

Using an auxiliary variable

$$\xi = (h_1 + h_1^{-1})^2, \quad (\text{B6})$$

we can compress N_j to read

$$N_0 = 225 (\xi - 1), \quad (\text{B7})$$

$$N_1 = 6 (1 + h_1^2) (29\xi - 21), \quad (\text{B8})$$

$$N_2 = h_1^2 (31\xi^2 + 82\xi - 62), \quad (\text{B9})$$

$$N_3 = h_1^2 (1 + h_1^2) (-92\xi^2 + 305\xi - 216), \quad (\text{B10})$$

$$N_4 = h_1^4 (31\xi^3 - 341\xi^2 + 99\xi + 295), \quad (\text{B11})$$

$$N_5 = h_1^4 (1 + h_1^2) (174\xi^3 - 1012\xi^2 + 1185\xi - 458), \quad (\text{B12})$$

$$N_6 = h_1^6 (225\xi^4 - 1404\xi^3 + 2412\xi^2 - 1409\xi - 124), \quad (\text{B13})$$

$$N_7 = h_1^6 (1 + h_1^2) (225\xi^3 - 1179\xi^2 + 1376\xi - 368), \quad (\text{B14})$$

$$N_8 = h_1^8 (3\xi - 4) (75\xi^2 - 292\xi + 64), \quad (\text{B15})$$

$$\begin{aligned} N_9 = & 48\xi - 57 + h_1^2 h_2^4 (48\xi^2 - 119\xi + 100) \\ & + h_2^2 (1 + h_1^2) (32\xi - 23 + h_1^2 h_2^4 (39\xi - 44)) \\ & + 16h_1^4 h_2^8 (3\xi - 4). \end{aligned} \quad (\text{B16})$$

(Breiter et al. 2012)

衝突はいつ起こったか

衝突イベント発生/レゾナンスに入りNEO領域へ

3.1×10^5 年前(モデル1)/ 3.2×10^5 年前(モデル2)

短軸非主軸回転モードへ

2.7×10^5 年後(モデル1)/ 1.8×10^5 年後(モデル2)

短軸純粹回転モードへ

1.5×10^7 年後(モデル1)/ 3.8×10^7 年後(モデル2)

> 10mサイズNEOの軌道力学的寿命:数百万年 (Morbidelli et al. 2002)

ここまでのまとめ

- ▶ 2012 TC₄ はタンブリング小惑星
- ▶ 自転周期8.47分、歳差周期12.25分
- ▶ 6.2m×8.0m×14.9m (モデル1)/3.3×8.0m×14.3m(モデル2)
- ▶ 運動モデルを作成(章動角 29.0度(モデル1)/48.5度(モデル2))
- ▶ 衝突破片一枚岩小惑星
- ▶ 長軸非周期回転していれば衝突時期の推定が可能
- ▶ $\approx 3 \times 10^5$ 年前に衝突を経験/フレッシュな表面組成

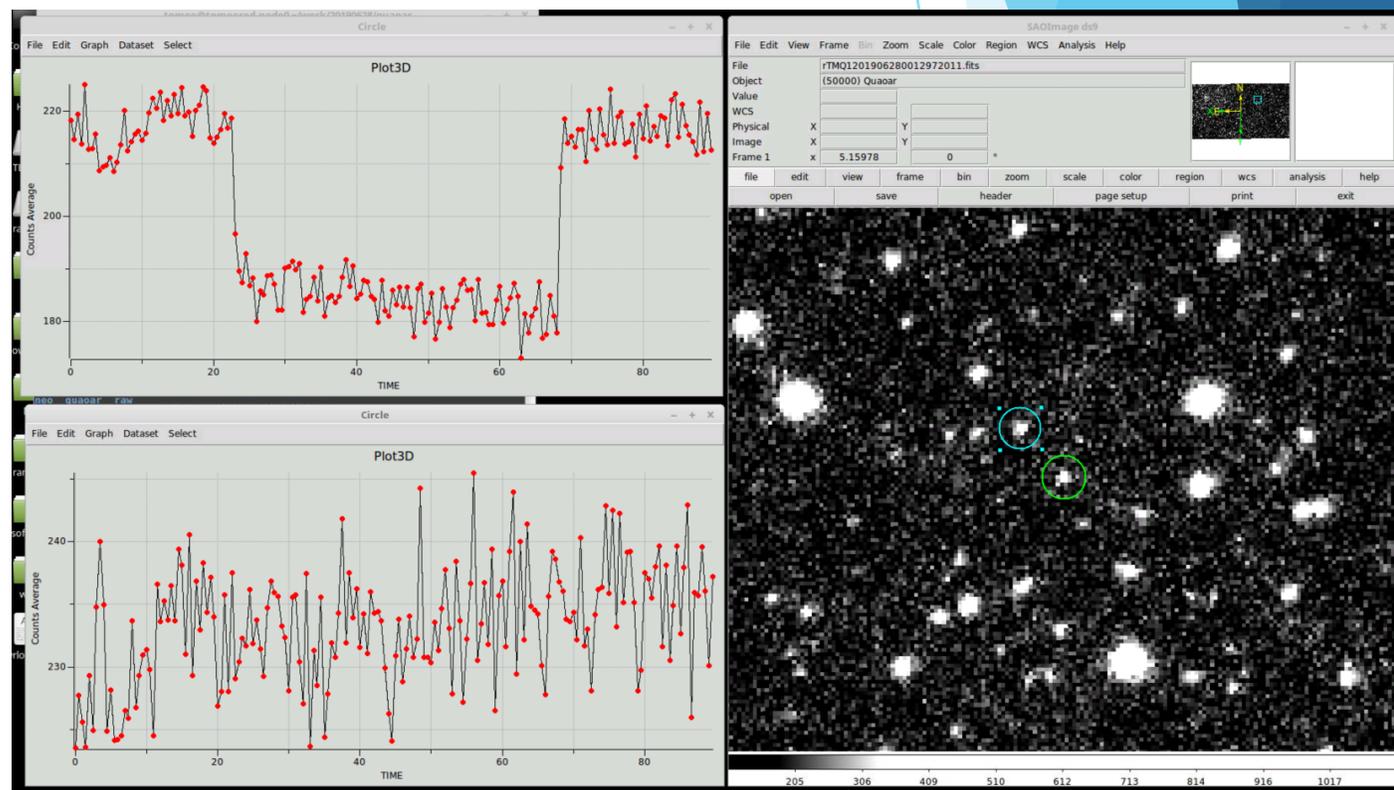
Tomo-eによる観測的惑星科学の新展開I

- ▶ 掩蔽観測による冥王星(準惑星)やTNOの希薄大気の観測(岡山大、はしもとじょーじ氏)

日心距離の変わる冥王星の大気厚さは季節変化する。どのように変わるのだろうか？(2019年7月17日、冥王星掩蔽観測)

冥王星以外の準惑星やTNOに大気はあるのだろうか？(2019年6月28日、TNOクワオワーの掩蔽観測)

Tomo-eの高時間分解ライトカーブで大気による減光を捉える



Tomo-eによるクワオワーによる掩蔽の様子(大澤氏提供)

Tomo-eによる観測的惑星科学の新展開II

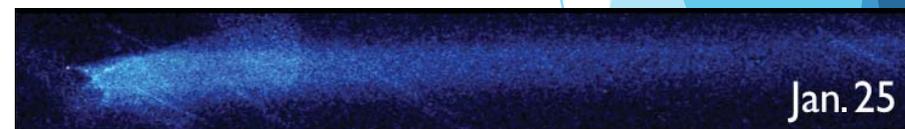
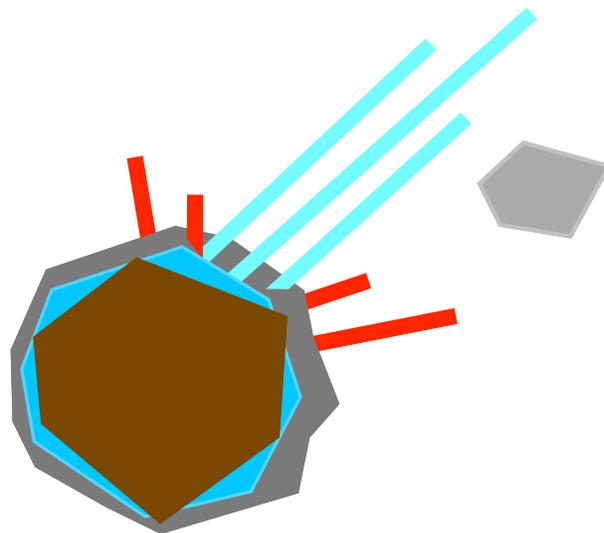
- ▶ メインベルト彗星のような突発増光小天体の検出(ソウル大、石黒正晃氏)

メインベルト彗星：メインベルト帯の小惑星の彗星活動
太陽系における揮発性物質はどこにあるのか？
小天体の衝突頻度はどのくらいか？見逃しているメインベルト彗星もあるはず。

彗星活動の原因

- 他天体衝突
- 氷の蒸発

Tomo-eによる全天サーベイで既知小惑星の突発増光を捉える。
超新星サーベイデータでできそう



P/2010 A2 (Jewitt et al. 2010)



まとめ

- ▶ Tomo-eは太陽系分野でも非常な強力なツール
- ▶ データは増えるが人が増えない。。。。