

107P Wilson-Harringtonの可視測光観測

-タンブリング運動・衛星を伴う可能性-

浦川 聖太郎¹、奥村 真一郎¹、西山 広太¹、坂本 強¹、高橋 典嗣¹、阿部 新助²、石黒 正晃³、北里 宏平⁴、黒田 大介⁵、
長谷川 直⁶、太田 耕司⁷、河合 誠之⁸、清水 康広⁵、長山 省吾⁵、柳澤 顕史⁵、吉田 道利⁹、吉川 真⁶

¹日本スペースガード協会、²台湾中央大学、³ソウル大学、⁴会津大学、⁵国立天文台、⁶JAXA、⁷京都大学、⁸東京工業大学、⁹広島大学

■ 概要

我々は、107P/Wilson-Harringtonの可視測光観測を行い、ライトカーブから自転状態や形状の推定を行った。その結果、ライトカーブには6回の光度のピークがあり、自転周期が0.2979日であることが分かった。また、1周期の間に自転周期と3:1の関係にある0.0993日の微小な周期を検出した。ライトカーブから次のモデルが考えられる。1)107P はタンブリングを起こしている。0.0993日の周期は歳差周期を反映している。2)107P はタンブリングを起こしていない。6 回のピークは形状を反映したものである。あるいは伴星を伴っている可能性を示唆している。

■ 背景 -あいまいになる小惑星/彗星の境界-

彗星・小惑星遷移天体

代表例 3200Phaethon : ふたご座流星群の母天体 → 過去の彗星活動を示唆 → 結核彗星核!?

(Gustafson 1986)

軌道力学的な起源: 2 Pallas (メインベルト小惑星帯の外側/水質変成物質を示唆)/スペクトルタイプ: B-type

(Clark et al. 2010; de Leon et al. 2010)

Main-belt Comets (MBCs) (Hsieh and Jewitt 2006)

メインベルト小惑星帯に彗星活動をする天体を発見 (133P, 176P, P/2005 U1, P/2010 A2, 596 Scheilaなど7天体)

軌道力学的な起源: 133P, 176P, P/2005 U1はThemis族 (Haghighipour 2009)

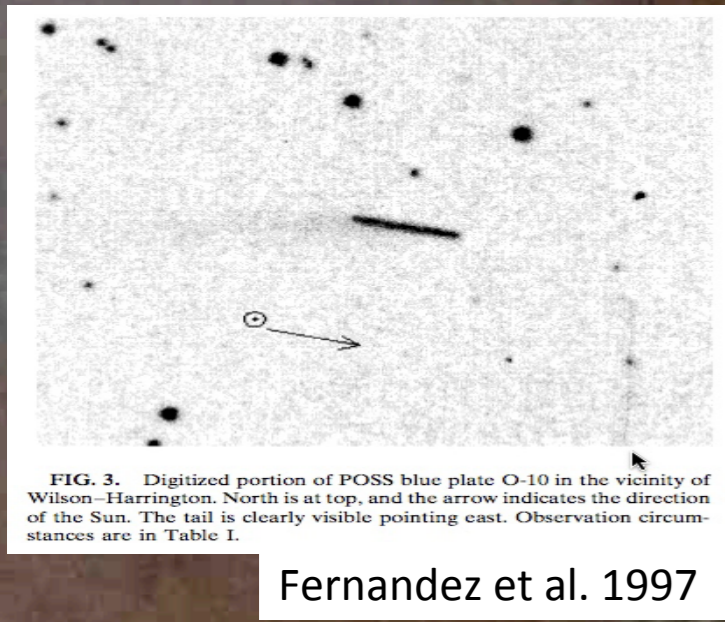
Themis族は水質変成物質・氷・有機物の存在を示唆, B-type) (Yang and Jewitt 2010, Rivkin and Emery 2010)

彗星活動の原因: 他的小天体の衝突/YORP効果によるスピナップでの分裂/熱的な効果

彗星・小惑星遷移天体/MBCs研究

- ・小惑星の起源(ニースモデル由来のprimordial TNOsを捕獲という説 (Levison et al., 2009)の検証)
- ・彗星/小惑星の相違点
- ・地球近傍天体の起源
- ・海の起源

■ 107P Wilson-Harrington



1949年パロマ天文台で発見。淡い尾を確認。その後行方不明。1979年に発見された地球近傍小惑星 (4015)/1979VAが107Pと同一天体であると同定。発見時を除き、彗星活動は検出されていない。

既知の物理量

a: 2.639 AU e: 0.824 i: 2.785° Tisserand パラメーター (T): 3.08

軌道力学的な起源:

木星族彗星である可能性 (4%), outerメインベルト天体である可能性(65%) (Botke et al. 2002)

アルベド: 0.059 ± 0.011, 直径: 3.46 ± 0.32 km (Licandro et al. 2009)

スペクトルタイプ: CF (Tholen 1989)

自転周期は異なる2つの報告:

3.556時間 = 0.1482日 (Harris and Young 1983)/6.1 ± 0.05 時間 = 0.2542日 (Osip et al. 1995)

■ 彗星活動の原因は何か？

- ・ MBCsの発見/TNOsを起源とする小惑星の存在: 小惑星帯に彗星活動を起こす程、揮発性物質が豊富な小惑星が存在していても不思議ではない。
- ・ 軌道力学的な起源は、MBCsと同じような小惑星帯の外側

仮説: 107Pは元々MBCsのような天体で、小惑星帯の外側からNEO領域に移動してきた。その後、他天体衝突で彗星活動が起こった。
→自転運動がふらついていた(タンブリング)、表面カラーに不均一性があるのでは？

■ 観測

ライトカーブ(可視相対測光)観測: 2009/8/17 - 2010/3/11 (計: 71夜)

一次処理の後、アパーチャー測光(IRAF)/十分明るい比較星を用いた相対測光→ライトカーブ取得

多色測光観測: 2009/12/18 (美星スペースガードセンター(BSGG) 1.0m + 岡山天体物理観測所(OAO) 0.5m)

多色測光での使用フィルター: SDSS g', r', i', z' (BSGG), g', R_c, I_c (OAO)

標準測光星: 107Pと同一視野内に撮像されるSDSSカタログの星



■ 結果1 -自転周期-

周期解析方法: Lomb-Scargle periodogram (Lomb 1976, Scargle 1982)

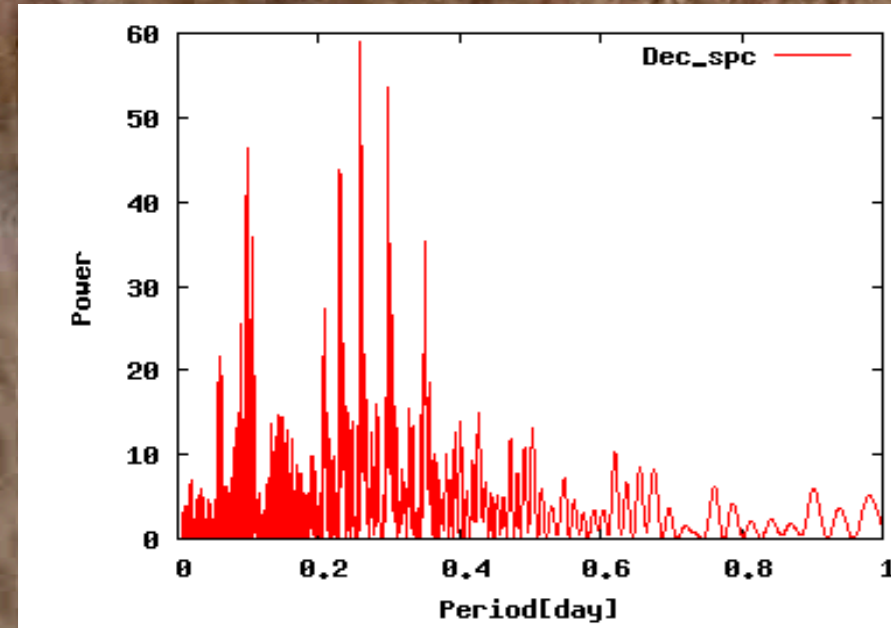


図1. ライトカーブのパワースペクトル
候補1: 0.2591 日 (≒6.22 時間=3.86回転/日)
候補2: 0.2979 日 (≒7.15 時間=3.96回転/日)
候補3: 0.2294 日 (≒5.51 時間=4.36回転/日)
候補4: 0.0993 日 (≒2.38 時間=10.07回転/日)

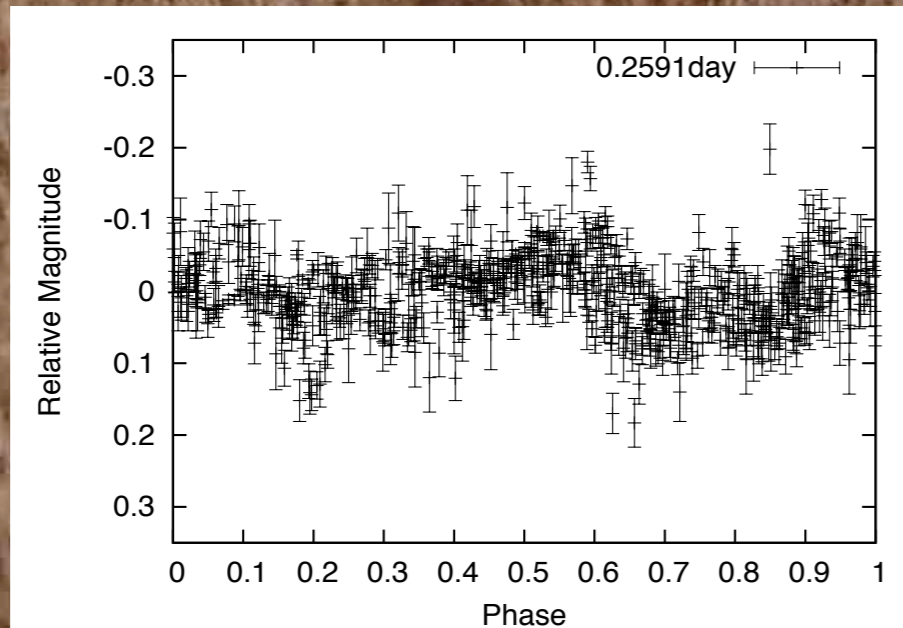


図2. 0.2591日で折り畳んだライトカーブ。Phase 0.2-0.4の間のピークと谷が一致しない。

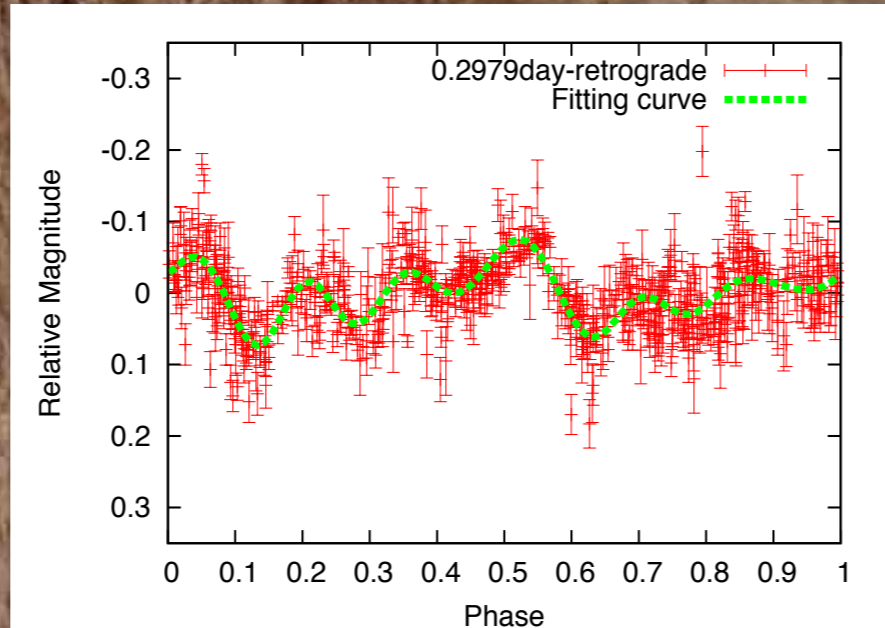


図3. 0.2979日で折り畳んだライトカーブ。典型的な小惑星ライトカーブ(ダブルピーク)と異なる6回のピーク。

107Pの自転周期: 0.2979日

- ・ 他の自転周期候補の棄却理由

理由1: 周期0.2979日のライトカーブは全てのphaseでピークと谷が良く一致。候補1,2,3の間には0.5回転/日の差異がある。小惑星の明るさは太陽光の散乱断面積を反映しているため、半回転の差を見分けるのは難しい。

理由2: 周期0.2979日は先行研究の結果を矛盾なく説明できる。

周期0.2979日は、Harris and Young 1983の周期(0.1482日)の約2倍、3回ピークのライトカーブを仮定するとHarris and Youngの結果と矛盾しない。しかし、Osip et al. 1995のデータと整合性がなく、自転周期と考えられない。

→ Harris and Youngは1回分の振幅を検出できず、3回のピークを典型的な2回ピークのライトカーブとみなした。

Osip et al. 1995による周期6.1±0.05時間は、凡そ0.2591日(≒6.22時間)に一致。

→ 0.5回転/日の違いを区別できなかった。

理由3: 0.0993日は0.2979日のちょうど1/3の長さ。振幅が異なる3つのピークと谷が重なりあっている。

- ・ 0.0993日の周期はタンブリング運動の歳差周期である可能性

タンブリング運動をしていた場合、歳差周期と自転周期を重ね合わせると周期性が表れる (Kasalainen, 2001)

重ね合わせ周期:
1/(P_{rot}⁻¹-P_{orb}⁻¹)=0.1490日
0.1490日は3回ピークを仮定した時の周期/Harris and Young 1983の周期

→ 周期性あり、タンブリング運動の可能性あり

■ 結果2 -自転軸(全角運動量)の方向と形状-

エボック法 (Magnusson, 1986) : 数ヶ月を超える長期間の観測では、“地球-107P-太陽”の位置関係の変化によりライトカーブには位相ズレが生じる。この位相ズレの大きさを最も良く再現する自転軸(全角運動量)方向を全ての黄経、黄緯方向に対してサーチ

Lightcurve-inverse法 (Kasalainen and Torppa, 2001; Kasalainen et al., 2001, 2002) : ライトカーブを最もよく再現する形状モデルの自転軸(全角運動量)方向を全ての黄経、黄緯方向に対してサーチ

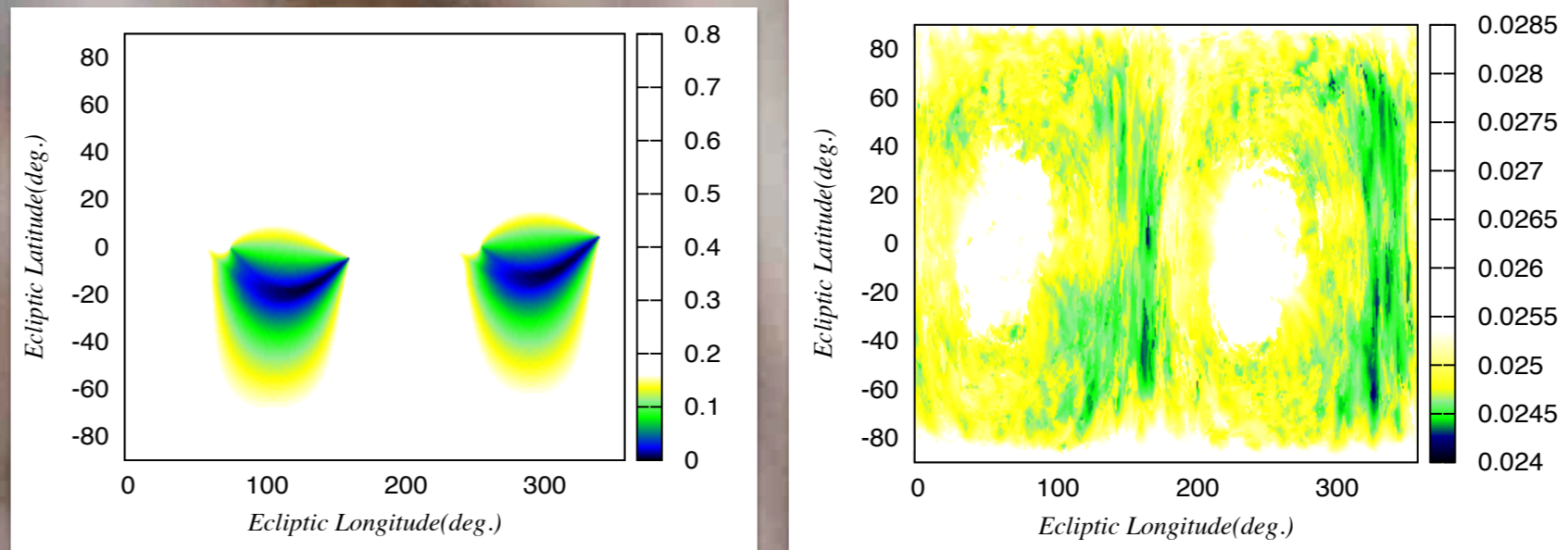


図4. エボック法の結果

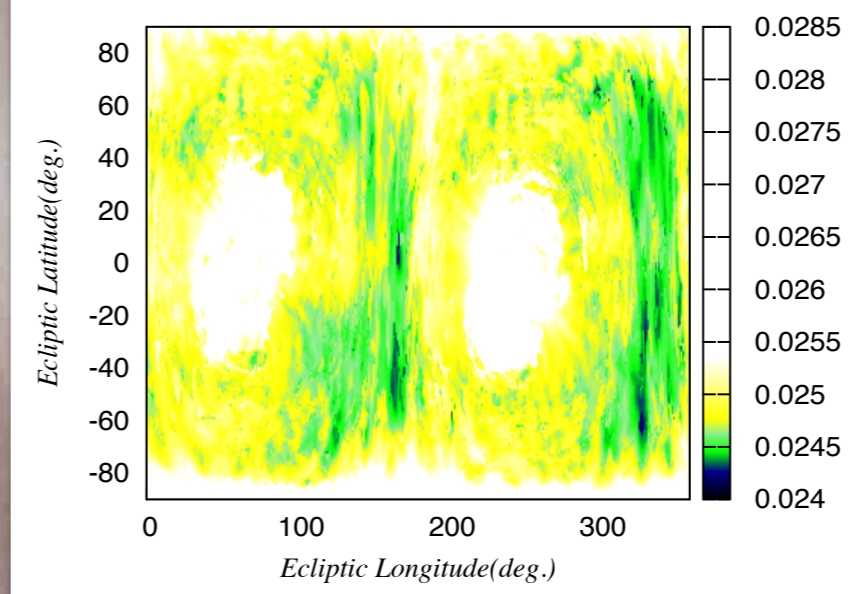


図5. Lightcurve-inverse法の結果

タンブリングしていない自転軸方向 = 全角運動量方向
タンブリングしている: 自転軸方向 ≠ 全角運動量方向

両手法で有意性のある値を自転軸(全角運動量)方向の候補とする。

自転軸(全角運動量)方向
候補A (λ = 310°, β = -10°)
候補B (λ = 132°, β = -17°)
候補C (λ = 330°, β = -27°)

- ・ Lightcurve-inverse法による形状モデル

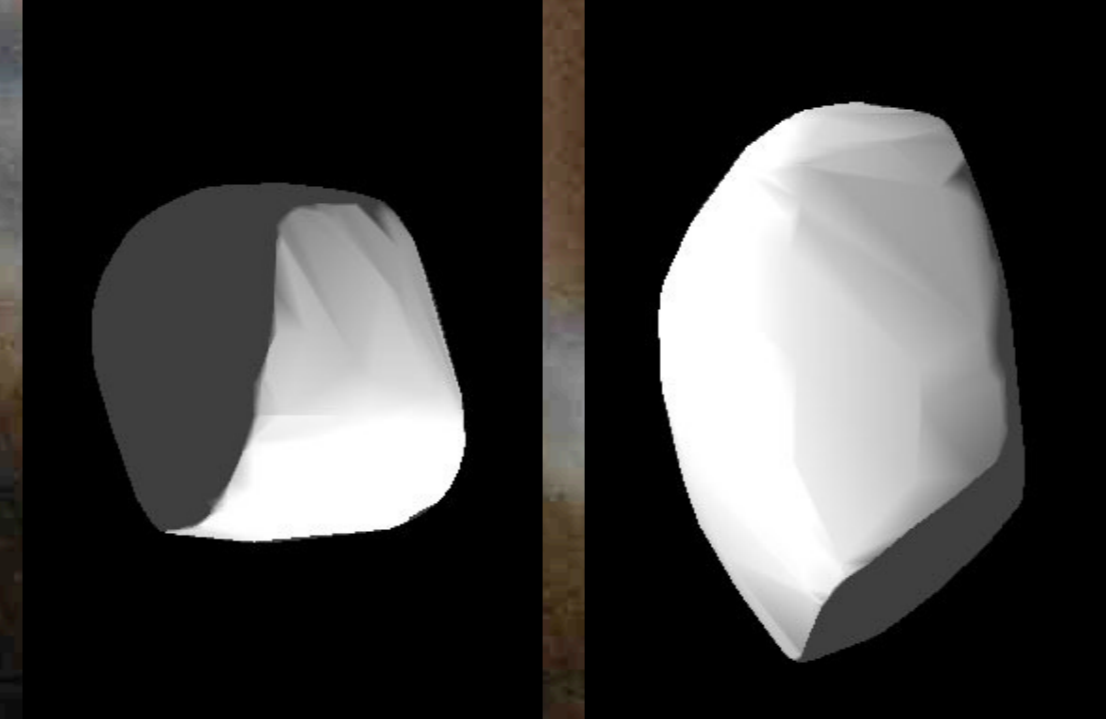


図6. 候補Aでの形状モデル。左) Pole-on方向からの俯瞰。右)赤道方向からの俯瞰。候補Bのモデルもほぼ同様な形状

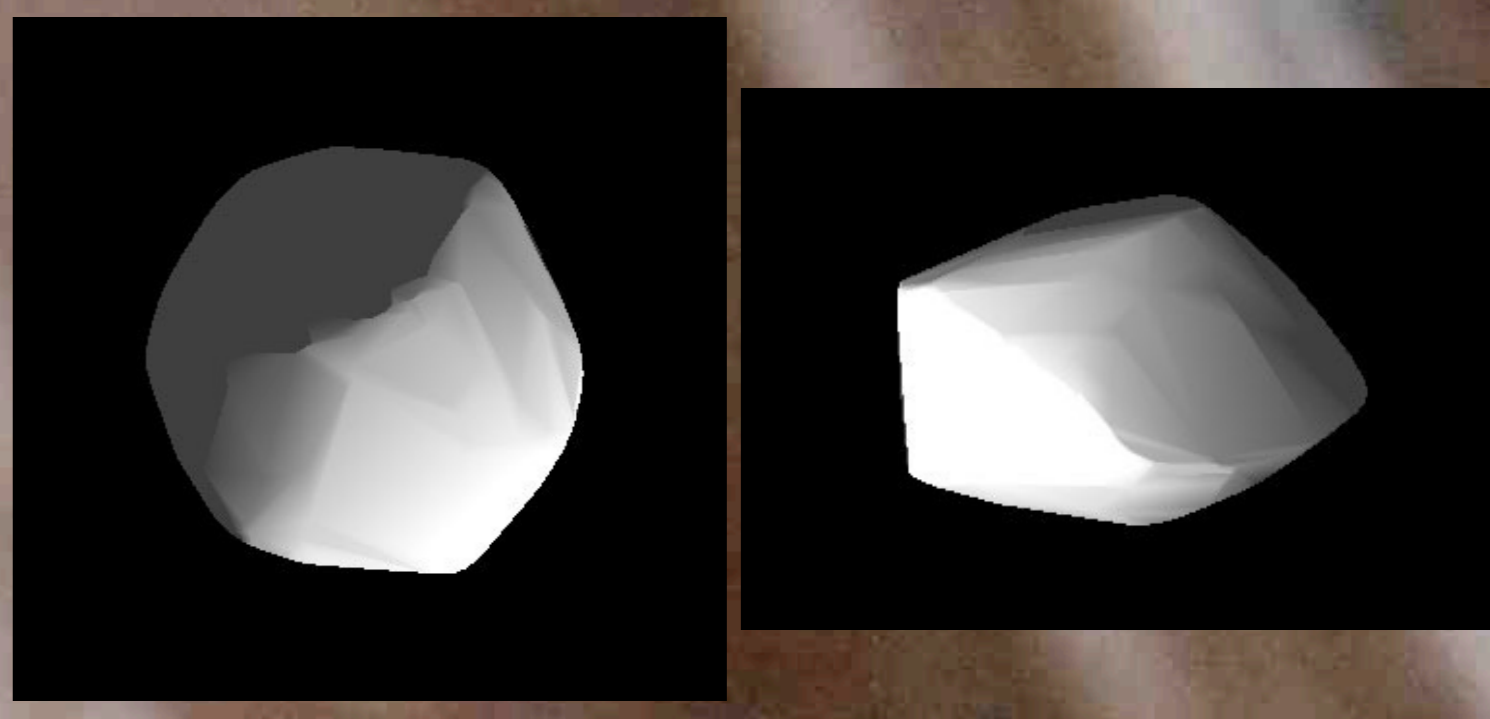


図7. 候補Cでの形状モデル。左) Pole-on方向からの俯瞰。右)赤道方向からの俯瞰。

候補A, Bの形状3軸比、L₁:L₂:L₃ (L₃が自転軸) = 1.0:1.0:1.6
縦長形状、安定した回転状態は困難→タンブリングの可能性

- ・ 観測値はタンブリングする剛体の運動方程式を満たすか？

$$\dot{\psi} = \cos \theta \left(\frac{M}{I_3} - \dot{\phi} \right) \quad \dot{\phi} = \frac{M}{I_1} \quad I_1 = \frac{\mu}{20} (L_2^2 + L_3^2) \quad I_3 = \frac{\mu}{20} (L_1^2 + L_2^2)$$

ψ, φ, θ: 自転、歳差、章動に対するオイラー角 I₁, I₃: 3軸不等楕円体の各軸に対する慣性モーメント M: 全角運動量 μ: 質量

φ̇ = 3ψ̇, L₁=L₂=1.0, L₃=1.6 を代入
θ (章動角) = 65°で運動方程式を満たす

形状モデルその1: 65°横倒しになり、自転周期0.2979日、歳差周期0.0993日でタンブリングしている

候補Cの形状3軸比 L₁:L₂:L₃ = 1.5:1.5:1.0の横長形状

観測値は運動方程式を満たさない

形状モデルその2: タンブリングしていない。0.0993日は六角形のような形状を反映したもの

■ 結果3 -多色測光-

2009/12/18日の一晩に3回実施。Color-color図で判断

表1. 図3のライトカーブ中の位相で表した多色測光の実施期間

Obs term	[Phase]
Phase-1	0.0365-0.1221
Phase-2	0.0048-0.1590
Phase-3	0.1348-0.2177
Phase-4	0.1941-0.3335
Phase-5	0.2345-0.3177
Phase-6	0.3461-0.5045
Phase-7	0.4662-0.5426
Phase-8	0.9590-1.0239

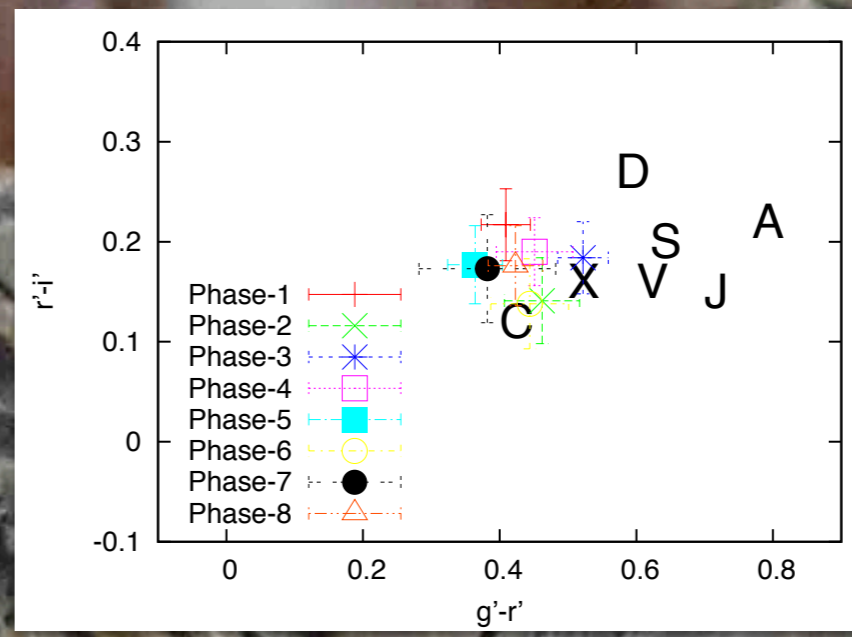
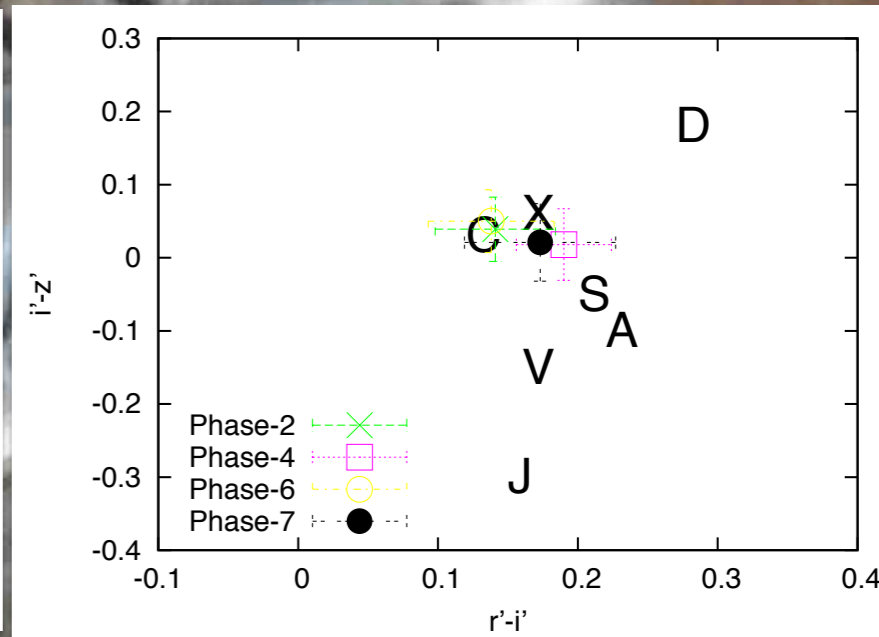


図8. "A, C, D, J, S, V, X"は対応する小惑星のスペクトルタイプを表す (Ivezic et al. 2001)



r'-i'でやや赤みがあるが、おおそCタイプの範囲内。Phase-3のg'-r'がわずかにX-typeの兆候を示すものの有意ではない。

Cタイプ小惑星。明らかな表面カラーの不均一性は見られない

■ 議論

- ・ タンブリング

他天体の衝突がタンブリングを起こした場合の、ダンピングタイムスケール(Harris 1994)

$$\tau = \frac{P_{\psi}^3}{C^3 D^2} \quad D: 107Pの直径 \quad C: 定数 (=17)$$

ダンピングタイムスケール: 620万年
1949年の彗星活動の原因が他天体衝突であった場合、その運動は現在まで十分継続している。

- ・ 衛星を伴う可能性

図3のライトカーブで、位相0.15(0.30, 0.40)と0.65(0.80, 0.95)の減光を衛星による掩蔽の主極小と副極小とみなす (107Pの自転周期と衛星の公転周期が0.2979日でロックしている状態)

衛星の質量を無視、円軌道、107Pの密度に2g/cm³、減光量を0.05等級と仮定

$$a = \left(\frac{G M P_{orb}^2}{4 \pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad a: 軌道長半径 \quad G: 重力定数 \quad M: 107Pの質量 \quad P_{orb}: 107Pの公転周期$$

衛星の軌道長半径: およそ3.65km

衛星の直径: およそ0.4km

衛星形成のメカニズム: 惑星への接近による潮汐力破壊/YORP効果によるスピナップでの分裂/衝突破片

→ いずれも彗星活動と密接に関係

■ まとめ

- ・ ライトカーブから107Pの自転状態と形状を推定。自転周期である0.2979日と3:1の尽数関係にある0.0993日の微小周期を検出
モデル1) タンブリングをしている。
モデル2-A) タンブリングをしていない。ライトカーブは形状を反映。
モデル2-B) タンブリングをしていない。ライトカーブは衛星を伴う可能性を示唆
- ・ 107Pは探索可能な軌道にある天体。はやぶさMK2など将来の探索計画に期待。ただし、タンブリング・衛星を伴う場合、タッチダウンに対する技術要求は高くなる。