

若い小惑星族の光度曲線

伊藤孝士^{1, 2}・吉田二美³・Budi Dermawan^{4, 5}

太陽系の歴史は衝突の歴史である。特に小惑星はお互い頻繁に衝突して破片を撒き散らし、その一部は月や惑星と衝突してクレーターを作り、現在に至るまでその痕跡を留めている。小惑星帯に於ける小惑星同士との衝突破壊によって形成した破片の集団は族と呼ばれる。小惑星の族は現実の太陽系を実験室にした衝突実験の生々しい結果とも言える貴重な存在であり、その光度曲線の観測は衝突によって生成された破片の自転速度や形状、内部構造に関する重要な情報を与えてくれるはずである。本稿では私達の研究プロジェクトである若い小惑星族の光度曲線観測の結果を紹介しつつ、族を構成する小惑星の観測から太陽系史に関するどのような情報が導き出されるのかを考えてみたい。

1. 小惑星の族

紀元前の昔からその存在が知られている惑星とは異なり、小惑星の発見は新しい。小惑星番号1の Ceres が発見されたのは十九世紀の最初の日、つまり1801年1月1日である。それから二百年余り経った2004年9月現在、何らかの形で軌道要素が求められた小惑星は25万個を越えており、その数は更に増え続けている。カイパーベルト天体や彗星などと比べても圧倒的に大きな絶対数が発見されている小惑星は、それ故に統計的な研究の対象として絶好のものである。

小惑星の力学的分類には固有軌道要素という概念が用いられる。小惑星の瞬時の軌道半長径・離心率・軌道傾斜角（いわゆる接触軌道要素）から公転周期起源の短周期変動と木星などからの強制振動の寄与を取り

除いた量がそれぞれ固有軌道半長径（記号 a で表されることが多い）、固有離心率（記号 e ）、固有軌道傾斜角（記号 i ）と呼ばれ、長い時間スケールでの小惑星の運動状態を表す際にしばしば用いられる。小惑星の固有軌道要素を丁寧に見て行くと、幾つかの小惑星達はとても良く似た固有軌道要素を有していることがわかる。例えば小惑星番号1824の Haworth は $a=2.8846$ 天文単位、 $e=0.04844$ 、 $i=2.1020$ 度、小惑星番号2224の Tucson は $a=2.8810$ 天文単位、 $e=0.04807$ 、 $i=2.0290$ 度、小惑星番号4927の O'Connell は $a=2.8883$ 天文単位、 $e=0.04801$ 、 $i=2.0823$ 度、という具合に、各々の固有軌道要素の値が極めて近い。この例のように似通った固有軌道要素を持つ小惑星の一群は族 (family) と呼ばれる。族を構成する小惑星は同一の母天体の衝突破壊によって形成されたと考えられており、反射スペクトルによる分類型 (taxonomy) も近いのが普通である。上の三小惑星はどれもみな S 型小惑星であり、コロニス族 (Koronis family) という大きな小惑星の族に属している。小惑星族という概念は東京大学の平山清次による1918年の論文にその起源を求めることができる[1]。このために小惑星の族は平山族 (Hirayama family) と呼称されることもある。平山清次が1918年の論文で示した族は三個だけであったが、本稿執筆時の時点で確認されている族の数は60を越えており、相当な数の小惑星が衝突破壊起源の族に属していることが判明しつつある[2]。

平山清次による提唱から80年以上経った現在、小惑星の族に関してはそれなりの知識が蓄積されつつある。例えば、族を形成した衝突発生時に飛び散った破片の

1. 大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台天文学データ解析計算センター
 2. Lunar & Planetary Laboratory, The University of Arizona
 3. 大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台ハワイ観測所
 4. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程
 5. Department of Astronomy, Bandung Institute of Technology

速度は現在の固有軌道要素の分布から大体100m/sのオーダーであったろうと推定されている。特定の族に属する多くの小惑星は似たような反射スペクトル型を持つが、これは共通母天体の衝突破壊によって族構成員の小惑星が生成したという事実を支持するものである。また、族を構成する小惑星のサイズ分布曲線は族を構成しない小惑星のサイズ分布に比べて急な傾きを持っているらしいということも推測されている。このように昨今の観測技術の発達と共に小惑星の族についても少しずつ知見が得られつつはあるものの、実のところ族については分かっていることよりも分かっていないことの方が多いと言って良い。例えば族の年齢、つまり衝突破壊によって大量の破片が発生した時期については、多くの小惑星族について数億年から数十億年と古いものであるという大雑把な見積りが成されているに過ぎない。衝突破壊現象の物理過程を直接反映する情報である破片のサイズ頻度分布については、前述したように族を構成する小惑星のそれは一般の小惑星に比べて急な勾配を持つようであるが、それは直径が10-15km程度の中型以上の小惑星について言えることであり、より数が多い直径数km以下の小さい小惑星のサイズ分布がどうなっているのかについては確かな情報はまだほとんど無い。そもそも現在観測される族構成員のサイズ分布は族の形成事象発生後に長い時間にわたる衝突進化を経たものであり、衝突直後の破片のサイズ分布を知るための情報とはなり得ない。これは小惑星の反射スペクトル型についても言えることであり、衝突発生から長いこと宇宙空間を漂い続けた小惑星の表面が衝突破壊直後の情報、つまり母天体の内部物質を反映したスペクトルを保持し続けているという保証はどこにも無い。

こうした曖昧な情報あるいは情報の欠如に加え、更に話を面倒にする物理過程が最近人々の耳目を集めている。ヤルコフスキー効果 (Yarkovsky effect) と呼ばれるものがそれである [3]。ヤルコフスキー効果は太陽からの輻射エネルギーを小惑星が吸収・再放出する際の非等方性と時間差が引き起こす力学的効果 (小

惑星からの運動量の放出) であり、小惑星の軌道半長径の拡大または縮小、また自転速度の増大や減少を長い時間スケールでじわじわと持たらす。小惑星の形状、自転周期、自転軸の傾き、自転の方向、軌道要素、それに小惑星を構成する物質の熱伝導率などに依存してヤルコフスキー効果の大きさはかなり異なるが、直径が約20kmより小さい小惑星にとっては非常に有効かつ重要であり、小惑星に関する観測事実のうち純粋なニュートン力学だけでは説明のつかない幾つかの事項がヤルコフスキー効果を用いると説明できることが知られている。例えば隕石の宇宙線照射年代が力学的な予想に比べてずっと長いことや、近地球小惑星が休むことなく地球付近に供給され続けているという事実である [4, 5]。

ヤルコフスキー効果が小惑星族の研究にとって厄介な理由は、衝突イベントによって形成された小惑星破片の固有軌道半長径がヤルコフスキー効果によってどんどん拡散してしまう可能性が高いからである。前述したように族の構成員がその族に属しているかどうかは小惑星の固有軌道要素により判断される。木星の近くに位置する小惑星帯には様々な力学的共鳴領域が複雑に交錯しており、小惑星が共鳴領域に近付いた場合の運動は複雑である。けれども共鳴領域から遠い場所にある小惑星の軌道運動は比較的安定であり、特に固有軌道半長径の値は何億年にも渡って不変に保たれるであろうと考えられて来た。族構成員の現在の固有軌道要素から衝突発生直後の破片の射出速度を推定できるのはこうした仮定に従った場合である。けれどもヤルコフスキー効果を考えると、共鳴があろうとなかろうと小さな小惑星の固有軌道半長径は数億年の時間スケールでどんどん拡散する。この効果を考えずに現在の固有軌道要素から衝突発生時の破片の射出速度を推定すると、現実以上に大きな射出速度が算出されてしまう心配がある。またそもそも、非常に古い時代の衝突現象により形成された族はヤルコフスキー効果により完全に拡散し切ってしまう、現在は族として認識不可能な状況に陥っているかもしれない。かつて小惑星

帯にはもっと多くの小惑星族が存在していたかもしれないが、ヤルコフスキー効果がそうした痕跡を消し去ってしまった可能性を否定することは出来ないのである。

ヤルコフスキー効果は小惑星の自転状態にも影響を与える。ヤルコフスキー効果が取り得る形態のひとつに YORP 効果 (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack) と呼ばれるものがあり、 10^7 年から 10^8 年の時間スケールで直径10-20kmより小さな小惑星の自転速度を速めたり緩めたりする[6]。従って現在私達が観測できる小惑星の自転状態は軌道要素の分布と同様に衝突現象直後のものではなく、その後の長い時間にわたる進化を経てしまったものということになる。本稿の冒頭では小惑星の族が太陽系に於ける衝突現象の天然実験室であるなど書いたが、実のところその実験室から得られる情報は不確定性を多く含み、しかもヤルコフスキー効果によって汚染されており、新鮮なものとは言い難いのである。この原因はひとえに小惑星の族の年齢が数億年から数十億年と古いためであるから、もっと新しい時代に作られた小惑星族がひとつでも見付かれれば、そこから族の形成に関する多くの情報を抽出できる可能性がある。そして2002年6月、まさにこの目的に最適な小惑星の一群が確認された。カリン族と呼ばれる数十個の小惑星達である。

2. 生まれたてのカリン族

複数の小惑星が族を構成しているかどうかを見極めるには、前述したように各々の固有軌道要素の値がどれくらい近いか(あるいは遠いか)を見て判断する。この作業のための専用数値算法も幾つか考案されている。こうした算法を最新の小惑星固有軌道要素データベースに適用した結果、新たに確認されたのがカリン族である[7]。カリン族は39個の小惑星からなる小規模なクラスターであり(最新の見積もりではこの総数は70個にまで増えている[8])、固有軌道要素空間で見ると冒頭にも例として挙げたコロニス族の内部に位置している。これよりカリン族はコロニス族内の族

(subfamily) とも呼ぶことが出来る。カリン族生成時の衝突破壊イベントにより発生したと思われるダスト・バンドの存在なども既に報告されている[9]。

カリン族の構成小惑星のうち最大のものは直径20km弱の832 Karin (反射スペクトルはS型, 1916年に発見)であり、その他の構成員は直径約2kmから約6kmと小さい。832 Karinの固有軌道要素は $a = 2.864$ 天文単位, $e = 0.04390$, $i = 2.1131$ 度であり、取り立てて特徴のないメインベルト小惑星のひとつのように見える。けれどもこの832 Karinを含めた39個の小惑星の固有軌道要素を(a , e)平面および(a , i)平面に描いてみると、単一母天体の衝突破壊によると推定される等方的な破片の放出によって形成された小惑星族の姿がくっきりと浮かび上がる(文献[7]のFigure 1)。各構成員の固有軌道要素の散らばり具合から、衝突時の破片の放出速度は15m/s程度だったろうと推定されている。これは他の族に関する推定値である約100m/sに比べるとだいぶ小さい。構成員の大きさから推定される母天体の直径は約25kmである。最大構成員832 Karinの直径が20km弱であるから、この小惑星ひとつで母天体の半分ほどの質量を占めていることになる。但し後述するように今後の観測やデータ解析によりカリン族構成員の数が増えて行く可能性は高い。そうなれば推定される母天体のサイズは次第に大きくなって行くことであろう。

カリン族に関して最も特筆すべき事柄はその形成年代が非常に新しいことである。カリン族の現在の軌道要素から数値積分を用いて各構成員の軌道進化を過去に遡ると、約580万年前の時点で多くの構成員の昇交点経度と近日点黄経がほぼ一点に収束する。これはこの時に小惑星帯で衝突破壊イベントが発生し、ある特定の一点から多くの破片が飛び出して現在のカリン族を形成したという事実の強力な証左である。580万年というカリン族の年齢は今まで推定されていた多くの族に比べると飛び抜けて若い。私達はまさに小惑星の衝突破壊直後の極く新鮮な状態を目の当たりしているのである。

このような新しい族を前にして私達が観測すべき事は沢山ある。前述したような破片のサイズ分布や表面の反射スペクトルが典型的なものである。私達としてはカリン族が提供してくれるすべての情報を隈なく取り込むために手段を選ばずに観測を遂行する予定であるが、まず手始めに目を付けたのがカリン族構成員の光度曲線 (lightcurve) 観測である。ひとこと言えば、光度曲線は対象天体の自転運動と形状に関する情報を与えてくれる。光度曲線に関する理想的なデータが揃っていれば、対象天体の自転速度に関する情報は勿論のこと、自転軸の傾きや対象天体の形状・表面地形に関する情報が得られる可能性がある。光度曲線の観測から対象天体の非主軸回転、いわゆる揺動 (自由章動) が検出できれば天体の内部構造に関する情報が得られるかもしれない。揺動の検出は特にカリン族小惑星に関しては有望である。連続的な励起源が存在しなければ天体の揺動は一般に時刻の経過とともに急速に減衰するが、衝突破壊のような激しい事象を経験したばかりのカリン族構成員の中にはまだ揺動しているものがあるかもしれないからである。また多くの構成員の自転速度の分布が判明すれば、衝突時の破片への自転エネルギー・角運動量分配に関する何らかの情報が得られる可能性もある。自転速度の分布はまた、長い時間スケールでの破片の軌道進化を数値的に見積もる際に必須な物理量でもある [10, 11]。前述したように小惑星の軌道進化はヤルコフスキー効果から甚大な影響を受ける。ヤルコフスキー効果がどのくらい (あるいはどのように) 有効であるかは小惑星の自転状態や形状に大きく依存しているので、自転運動に関して光度曲線観測から得られる情報は小惑星破片の長期力学進化計算のための基礎的な初期条件となるのである。

このように、カリン族が生まれだてのほやほやであるという事実は幾つもの重要で新しい情報を私達に与えてくれる。次節からはカリン族に関する私達の観測結果の一部を紹介して行くが、その前に謝辞を兼ね、私達がカリン族にここまでハマるようになった経緯をここに短く記しておこう。本稿の著者は三名だけであ

るが私達の観測計画にはこの何倍もの数の人間が日本の内外から関与しており、それらの人々の協力・支援がなければこの観測計画を実施することはまったく不可能だからである。

カリン族に関して2002年6月に発表された論文 [7] を見た国立天文台の中村士助教授は、ハレー彗星や小惑星 Toutatis に見られる天体の非主軸回転がカリン族構成員に於いても発見される可能性を考えた [12]。これが本観測計画の端緒である。中村氏は東京大学の Budi Dermawan や国立天文台の佐藤英男・福島英雄両氏および学生達に呼びかけ、国立天文台三鷹にある口径50cmの光学望遠鏡を用いてカリン族小惑星の観測を開始した。2002年11月上旬のことである。アマチュア天文家である宮坂正大氏も自らの25cm望遠鏡を用いてこの観測計画に参加した。後に彼らの観測は東京大学の木曾観測所1m シュミット望遠鏡でも行われ、福岡教育大学のグループも当地の40cm望遠鏡を用いて私達の観測に参加している。

吉田二美は当時、台湾の国立中央大学にポスドクとして勤務していた。折しも2002年の夏には台湾最大の望遠鏡である1m 望遠鏡が台湾中央部の山中にある鹿林天文台に完成し、稼働を開始したばかりであった。中村士氏が吉田のかつての指導教官だったこともあり、連絡を受けた吉田は同僚の高橋茂や Wing-Huen Ip 教授らと共に鹿林天文台の1m 望遠鏡を利用してカリン族小惑星の観測を開始した。これ以降は吉田がカリン族小惑星観測計画の中心となる。吉田は国内外を問わずこの目的に使えるような望遠鏡があれば直ちに観測所に手紙を書き、あるいは直接現場に飛び、カリン族の観測に望遠鏡時間を提供してくれるようにロビー活動を展開した。例えば台湾国立中央大学の Wen-Ping Chen 教授は永らくウズベキスタンの天文学者と共同研究をしており、吉田が Chen 教授に依頼することでウズベキスタン科学アカデミーが運営する Maidanak 天文台の1.5m 望遠鏡をカリン族の観測のために利用できることになった。Maidanak での私達の相棒は Mansur A. Ibrahimov である。更に吉田は米国アリゾ

ナ大学月惑星学科の大御所 Tom Gehrels と Renu Malhotra に支援を仰ぎ、当地にある Kitt Peak 観測所の2.3m望遠鏡（通称 Bok）と Vatican 天文台の1.8m望遠鏡（通称 VATT）を利用する資格を取得した。このふたつは現在私達のメイン望遠鏡となっている。吉田はまた伊藤孝士を経由して Matthew Holman（ハーバード大学）をもこの観測計画に誘い入れ、チリにある口径6.5mの Magellan 望遠鏡に於いてもカリン族小惑星の観測を行っている。カリン族小惑星の光度曲線観測には何年もの時間が掛かるので、こうした共同研究の輪はどんなに広がっても広がりすぎということはない。私達は現在も、共同研究に加わってくれる観測者を日本の内外で探し続けている。

上記のように吉田二美は各地の観測所を渡り歩いて多くのデータを取得し、それを解析して小惑星の光度を測定する。Budi Dermawan はそうした測定結果を元にして実際の光度曲線を描き、小惑星の自転周期を決定する役目を果たしている。私達の観測計画はまだ緒に付いたばかりであるが、次節以降では現在までに得られた予備の結果のうち代表的なものを幾つか紹介して行きたい。

3. カリン族の光度曲線

2004年6月末までに私達は10ヶ所の観測所で70夜以上の観測を行い、15個のカリン族小惑星を測光してそのうち8個について光度曲線（自転周期）を決定した。70夜の観測で8個の光度曲線と言うと効率があまり良くないように聞こえるかもしれないが、一晩の観測で一個の小惑星に使える観測時間はせいぜい5-6時間である。後述するようにカリン族構成員の自転周期は数時間から20時間以上と長いものもあるので、一個の小惑星の自転周期を決定するだけでも数晩以上の観測が必要となる。また、台湾や日本の夜空の環境は観測者にとって決して良いものではなく、70夜すべてが満足に観測に使用しているわけでは決していない。そうした条件のもとで私達が得て来たカリン族小惑星8個の光度

曲線を図1に示した。図1の横軸は時刻を光度曲線の位相に直したものであり、一位相（一周期）の時間的長さはもちろん小惑星によって異なる。

光度曲線および自転周期決定のためのデータ処理過程を詳しく書くと長くなり過ぎるので、ここでは概略だけを記しておく。私達の観測は基本的に R バンドフィルタ（中心波長6338.14Å）を用いた撮像である。小惑星の反射スペクトル型と CCD の感度特性により、小惑星は R バンドフィルタの波長帯で最も明るく見えるからである。小惑星を撮像する際には同時に較正用の標準星も撮像しておく。観測が終了したら、光天文学の分野では標準的な天文データ解析ソフトウェアである IRAF の APPHOT と呼ばれるパッケージを用いて各小惑星の正確な等級を測定する。ここまでは素直に進められる作業だが、ここからが大変である。私達の観測は同一の小惑星に関しても異なる望遠鏡、異なる観測装置、異なる期日に行われる。そうした観測から得られたデータはそれぞれに異なる特質を持っており、それらを組み合わせると正確な光度曲線を得る作業は単純なものではない。しかも前記したようにカリン族構成員には私達の予想よりも長い自転周期を持つものが多く、一晩の観測だけで自転周期を決定できるものはほとんど無いことが判明した。こういう場合にはまず、数晩の観測データを組み合わせると自転周期の第零近似を推定し、それを基本周期として数次のフーリエ級数を作る。次には最小二乗法を用いてこの級数を光度曲線データにフィットさせ、平均等級すなわち光度曲線の零点を求める。異なる観測所で得た光度曲線データについても同様な作業を行う。然る後に各々の光度曲線の零点を基準にして複数の光度曲線を繋ぎ合わせ（または重ね合わせ）、そこで改めて周波数解析を行い、より精度の高い自転周期を確定する。後日になり新たな観測データが加えられた場合には上記の手順を繰り返す、再び周波数解析を行って自転周期の値を得る。また小惑星の光度は小惑星と観測者（地球）と太陽の位置関係によっても変わるので、得られた光度を衝の位置（太陽と地球と小惑星がこの順番で一直

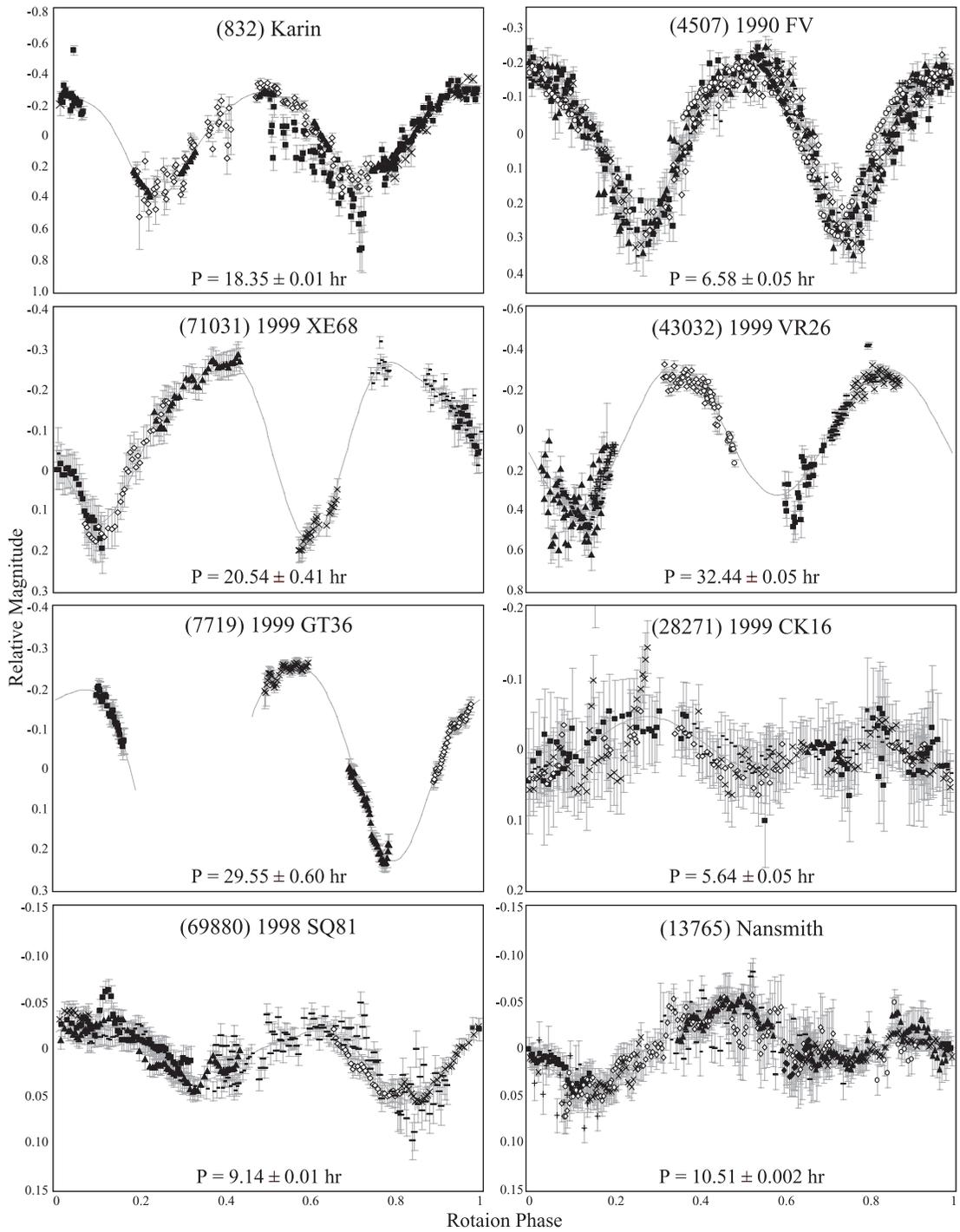


図1：カリン族小惑星8個の光度曲線。横軸は光度曲線の位相、縦軸は相対光度。異なるシンボルは異なる観測からのデータを示す。Pはこのデータから決定した自転周期の値。データ点群の上に描画された曲線は最も良くフィットしたフーリエ級数。

線に並んだ状態であり、小惑星がもっとも明るく見える)での値に補正しておくことも必要である。

このようにして得られた光度曲線達を眺めてみると、自転周期が精度良く決定されているものと誤差が大きいものが入り混じっていることが見て取れる。1990 FVなどは全周期に関して万遍なく観測が行われているが、1999 XE68, 1999 VR26, 1997 GT36などはデータが細切れであり、更に長い期間の観測が必要であることは明白である。1999 CK16に関しては個々の光度データの誤差がまだ大きい、これは私達がこの暗い小惑星を台湾の鹿林天文台 1m 望遠鏡でしか観測していないからである。

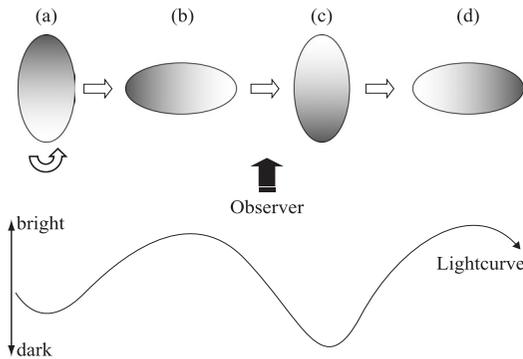


図2：光度曲線が二山で一周期となる理由を説明する模式図。観測者は“Observer”の方向から小惑星を見ており、小惑星は時間の経過と共に a → b → c → d と自転する。

カリン族構成員ほどの大きさ（直径数 km から20 km）の小惑星は球よりも楕円体、あるいは更に不規則な形状を取ることが多いと予想される。衝突破壊によって形成した小惑星の破片が球形になるには衝突破壊後に一旦溶解して再び固化する過程を経ることになるが、この過程はかなり大型の小惑星でなければ発生しないと考えられるからである。従って私達はカリン族構成員の形状が球ではなく細長い楕円体であると想定し、それ故にその光度曲線は二山で一周期を構成すると仮定してデータ解析を行った。この理由の簡略な説明を図2に示している。小惑星の光度は観測者から見た小惑

星の断面積に大きく依存し、細長い小惑星がその短辺方向を観測者（図2の“Observer”）に見せた時が光度曲線の一度目の谷（図2(a)）、長辺方向を観測者に見せた時が一度目の山（図2(b)）、初期状態から180度回転して再び短辺方向を観測者に見せた時が二度目の谷（図2(c)）、更に90度回って初期状態から270度回転した状態が二度目の山（図2(d)）、という具合である。私達が得たすべての光度曲線はこの仮定に従うとしているので、すべて二山二谷を持つものになっている。もしも小惑星がかなり球形に近く、しかもその裏と表の反射率に大きな違いがあるような場合には、明るい暗いの一山一谷で一周期となろう。例えば図1にある1990 FVの光度曲線は位相=0.5を中心としてかなり左右対称的な形をしている。もしかするとこれは上で述べたような理由（小惑星が球形に近く、光度曲線の変化は表面の反射率の反映）によっており、図1の1990 FVの光度曲線は一周期分ではなく二周期分なのかもしれない。これを区別するにはこの光度曲線が位相=0.5を中心にして本当に対称なのか非対称なのかを判別できるための精度の高い観測データが必要となる。

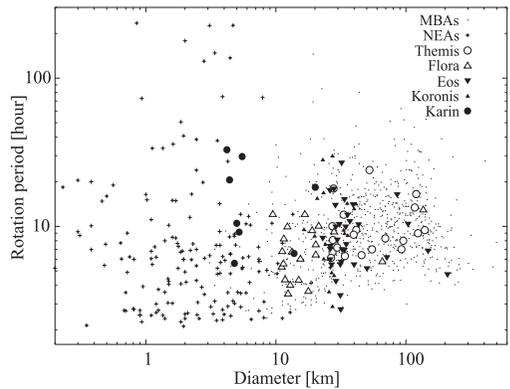


図3：小惑星の直径 (km) と自転周期 (hour)。

本稿にデータを示すことはしていないが、現時点での周期解析に於いては二個のカリン族構成員（1990 FVと1998 SQ81）の光度曲線に多重の周期性（図1に示した自転周期よりも更に長い周期の存在）が見え隠れしている。「見え隠れ」とは誠に玉虫色な表現だが、

データの精度や期間、解析に要した時間を考えると決定的なことはまだ言えないことから来る歯痒い言い回しである。玉虫色ではあるがしかし、原理的にはこの多重周期性はこれらの小惑星が非主軸回転（揺動）を行っている可能性を示唆するものである。このことを確認するため必要なのはひとえに長期かつ高精度の観測データである。地球に於けるチャンドラー揺動のように年がら年中観測可能な現象とは異なり、限られた期間にしか観測できない小惑星の非主軸回転の観測には大きな忍耐が必要なのである。

なお非主軸回転を“確実に”検出するためにはどの程度の観測が必要なのかという問いに答えるのはなかなか難しい。観測データが多く蓄積されればされるほど良い、という自明な回答になりがちだからである。私達がやるべき最初のことは、現時点での手持ちのデータを詳細に周期解析して非主軸回転を持つ可能性のあるカリン族構成員の一覧を作り、論文の形で公表することであろう。そうすることで同業者の興味を惹き付ければ共同観測者を募りやすくなるので、そのような小惑星についてより多くの観測機会・観測人数を動員して集中的な観測を実行することが可能になるものと予想している。また、周期解析の方法も私達が現在主に使っているフーリエ分解だけでは不十分かもしれない。小惑星の光度曲線自体は周期的であるが、観測によるデータの取得間隔が不規則なため、入力データの連続性が前提になっているフーリエ分解だけでは非主軸回転を確実に検出することは難しい可能性がある。今後はMEM（最大エントロピー法）など様々な方法を用い、それらから得られる結果を比較して非主軸回転の存在あるいは非存在についてより詳しく議論して行くことになる。

小惑星の光度曲線観測は原理的にその目的と手段が明快であるが故に、古くから観測が行われて来た。世界各地にある小惑星のデータベースを見ると既に1000個以上の小惑星に関する自転周期のデータが蓄積されている。図3にはその結果の一例として、メインベルト小惑星 (main belt asteroids; MBAs) と近地球小惑星 (near-Earth asteroids; NEAs)、および主要な族

(Themis, Flora, Eos, Koronis) を構成する小惑星の直径と自転周期の関係を示した。もちろん私達が観測したカリン族の結果も含まれている。小惑星の直径は小惑星の等級と反射率（アルベド）から推定されるものであるが、アルベドの真の値を知ることは容易ではない。この図のデータに於いて使われているアルベドは反射スペクトル型の情報などを元に仮定されたものであり、それ故に小惑星の直径の推定には不確実性が含まれている。メインベルト小惑星については804個分のデータが示されているが、そのほとんどが直径10km以上の大きな小惑星である。直径が10kmより小さいような小惑星の光度曲線を正確に決定するにはそれなりに大口径の望遠鏡を用いて観測を行う必要があるが、小惑星の光度曲線観測のように長い時間のかかる観測に大口径望遠鏡の観測時間が割り当てられることは稀にしかない。そのために小さな小惑星の自転周期はまだほとんど知られていないのである。一方で近地球小惑星はその名の通り地球に近付いてくれるので、かなり小さな小惑星でも観測が可能になる。図3に示されている近地球小惑星のデータ個数は180個であるが、近地球小惑星に関しては世界各地で活発なサーベイ観測が行われているので、観測データの量は今後どんどん増えて行くであろう。なお図3の描画範囲からは外れているが、近地球小惑星の中には高速回転体 (fast rotators) と呼ばれる一群の小惑星があり、直径が1km以下かつ自転周期が2時間以下という特殊な天体が数十個発見されている。同時に近地球小惑星には100時間を越える長い自転周期を持つものもある。つまり小惑星のサイズが小さくなるほど自転速度のばらつきは大きくなる傾向を示すのである。近地球小惑星の発祥の地がメインベルトであるとすれば、現在は観測できていないようなメインベルトの微小な小惑星もこの傾向を示すのではないかという予想もある。

さて私達の議論の対象は近地球小惑星や一般のメインベルト小惑星ではなく、族を構成する小惑星であることを思い出さなくてはならない。けれども図3を見るまでもなく族を構成する小惑星に関する自転周期デー

タは実に乏しく、統計的に有意な議論が出来る段階に到達しているとは言えない。図3に示した主要な小惑星の自転周期データの頻度分布を描いてみたのが図4である。小惑星族に関するデータ数はコロニス族 (Koronis) が18個、テミス族 (Themis) が20個、イオス族 (Eos) が33個、そしてカリン族が8個である。前述したようにメインベルト小惑星 (MBAs) と近地球小惑星 (NEAs) についてはそれぞれ804個と180個のデータがある。まだ私達が一年半観測しただけのカリン族のデータ数が少ないとは当然としても、平山清次の時代から知られて来たコロニス族やテミス族、イオス族などの超メジャーな小惑星族に関してこの程度の数しか光度曲線観測のデータが蓄積されていない、あるいはアルベドが不明なためにサイズ (直径) に関するデータが無いという事実は驚くべきことかもしれない。固有軌道要素から推定される族の全構成員数はそれぞれの族で数百個から数千個に上るにも関わらず、である。ということで残念ながら現時点では、図4のように族を構成する小惑星の自転速度に関する頻度分布図を描いても何らかの統計的議論を行うことは容易でないと云えよう。言葉を変えれば、こういう状況であるが故に小惑星族の光度曲線観測には大きな意義があるとも言える。カリン族だけではなく、上述したような古くて大きな小惑星族に関しても将来はもっと積極的な光度曲線観測が望まれることを指摘しておきたい。族構成員のうちサイズの小さなもの (例えば直径10km 程度以下) の光度曲線データを蓄積して行けば、図4にあるような自転周期の頻度分布に関する統計的議論もより実りあるものになるものであろう。ちなみに直径10kmの小惑星はメインベルトの外側領域にあったとしても19-18等級程度の明るさを持ち、メインベルトの内側領域にあれば更に明るく見える (~14等)。このくらい明るさであれば、ハイ・アマチュア天文家が保有する望遠鏡や各地に教育普及目的で設置されている望遠鏡でも何とか観測が可能となる。そのような望遠鏡を用いた光度曲線観測が活発になり、この分野の発展に欠かせないデータがどんどん蓄積されて行く

ことにも期待したい。

さて以下には、上に記した事柄と矛盾するようなことを書いてしまおう。コロニス族やテミス族など既知の小惑星族構成員の光度曲線観測、特にサイズの小さなものに関する観測が重要になろうと書いたばかりであるが、そうした観測は実は大きな困難を抱えると予想される。これは何も小さな小惑星の観測が難しいということの意味するのではなく、古い族に属する小さな小惑星の光度曲線を観測したとして、一体それが何を意味するのかという問題である。前述したように小さな小惑星の自転運動は YORP 効果の強力な影響下にある。YORP 効果の典型的な時間スケールは 10^7 年から 10^8 年であると言いたが、コロニスやテミスなど古い族の年齢は少なくとも 10^8 年から 10^9 年のオーダーであろうと見積もられている。これだけの時間を経た後では、直径10kmより小さな小惑星の光度曲線がそれらの自転運動状態に関する衝突破壊イベント直後の新鮮な情報を保持しているとは考え難い。従って、こうした光度曲線データを将来得たとしてもその解釈が難しくなることは明らかである。既知の小惑星に関するこうした状況を考えるにつけ、カリン族が小惑星の研究者にとっていかに幸運かつ祝福された存在であり、その光度曲線観測がいかに重要な意味を持つかが読者にも理解されるのではないかと思う。

ところで光度曲線観測から得られる情報は小惑星の自転周期のみではない。十分に長い期間の観測があれば、小惑星の自転軸の方向や形状についても何がしかの推測を行うことが出来る。メインベルト小惑星と地球との会合周期は一年数ヶ月である。その機会毎に衝の状態が発生して地球から小惑星を観測し易くなるが、重要なことは衝のたびごとに私達が小惑星を異なる角度から見ることになるという事実である。小惑星が細長いものだと仮定すると、光度曲線の振幅は私達がその小惑星をどの方向から見るかに依存して変わる。細長い小惑星はその最短軸の周りに自転していることが多いから、それを赤道方向から見るとすると私達から見える小惑星の断面積は自転の位相によって大きく変

化するであろう。図2と同様な状況である。この大きな断面積の変化はそのまま大きな光度曲線振幅となって観測される。一方で小惑星をちょうど極の方向から見た場合には、形状がどうであろうと自転による小惑星の断面積は変わらないから、観測される光度曲線の振幅は小さいものになる。このような観測方向への光度曲線振幅の依存性を逆に利用して、複数の光度曲線の振幅の違いから小惑星の自転軸の方向を推定するこ

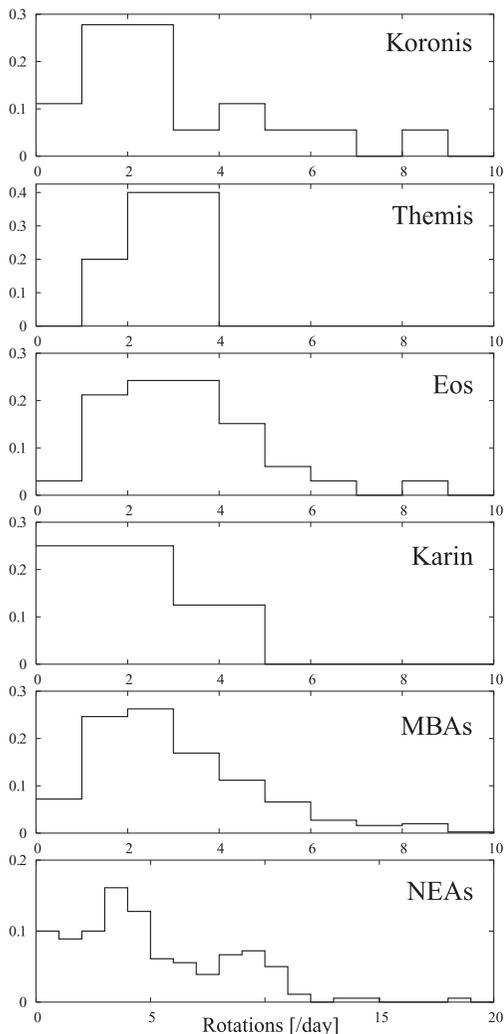


図4：小惑星の自転周期の相対頻度分布。横軸の単位は24時間での自転回数。

とが可能である。理論的には、こうした観測機会が三回以上あると小惑星の自転軸の方向を決定出来ることが知られている¹。私達の観測では1999 CK16に関して二度の衝に於ける観測を行っており、あと一度衝での観測機会があればこの小惑星の自転軸の方向を確定できる可能性がある²。また最大構成員の832 Karinに関する私達の観測は一度の衝だけであるが、私達の観測以前に文献[13]により光度曲線の観測が行われている。従って私達が832 Karinをあと一度だけ衝に於いて観測すれば、文献[13]のデータと合わせることでより自転軸の方向が確定できるものと期待される。

自転軸が決定されないうちは小惑星の形状について確かなことは言えない。しかし話を思い切り単純化して私達が小惑星を赤道方向から見ていると仮定すると、以下のようにして小惑星の形状を極めて大雑把に推測することができる。小惑星の形状を三軸不等楕円体と仮定し、その軸長を長い順に a , b , c とする。小惑星は最短軸 c の周りで自転していることが多いだろう。小惑星の光度は大まかに言って地球に向けた小惑星の断面積に比例する。小惑星の短軸 b が観測者の方向を向いた時（正確ではないが図2の(b)や(d)のような状態）の断面積は ac 、小惑星の最長軸 a が観測者の方向を向いた時（図2の(a)や(c)のような状態）の断面積は bc である。この断面積の比がそのまま小惑星の光度曲線振幅の大きさになると考えれば、観測データとの比較から小惑星の軸長の比 a/b を推定することが出来る。例として832 Karinにこの方法を適用してみると $a/b \sim 1.91$ となったので、扁平な形をした小惑星を思い描くことが出来る。極めて大雑把な推定ではあるが、観測データが少ない段階で小惑星の形状に関して言えることはこれくらいである。しかし近年では光度曲線データから小惑星の形状を精度良く決定するアルゴリズムも長足の進歩を遂げているので[14]、小惑星の形状決定に関する光度曲線観測の寄与は今後存外に大きくなって行くかもしれない。

1. ここでは小惑星の自転軸の方向が慣性系に対して不変であるという仮定を置くので、小惑星の非主軸回転などにより自転軸がふらふら動いている場合にはもっと多くの観測機会が必要となる。

4. カラーとサイズ分布

新しい小惑星の族を眼前にして私達が知りたい情報は自転周期に関するものだけではない。小惑星の表面状態の情報を示す反射スペクトルや、衝突破壊現象に関する重要な情報を持たらしてくれるはずの破片のサイズ頻度分布など、多くの情報が太陽系研究に関して大きな意義を持っている。小惑星表面の反射スペクトルに関する観測について、私達はカリン族の最大構成員である832 Karinに関する試験的な観測を行っている[15]。また、破片のサイズ分布については吉田二美の研究グループがハワイにある国立天文台のすばる望遠鏡を用いて行って来たサーベイ観測の手法がそのまま適用できると考えている。本節ではこうした観測について簡単に記してみたい。

私達の光度曲線観測がRバンドと呼ばれるフィルタを用いたものであることは前述したが、光学観測に使われるフィルタにはこの他にも様々なものがある。中心波長4359.32ÅのBバンド、5394.84ÅのVバンド、8104.87ÅのIバンドなどである。単一波長帯では似たような光度を持つ天体でも、それらを異なる波長のフィルタで撮像し、その結果をB-V、V-Rなどという具合に引き算してみると大きな違いが現れることがある。複数のフィルタを用いた観測は多色測光観測（カラー観測）と呼ばれる。カラーの違いは小惑星の表面状態の違いを表しており、こうした情報を元にしてS型やC型といった小惑星の反射スペクトル型が定められる。私達は米国アリゾナ州にあるパチカン天文台(VATT)にて832 Karinの光度曲線観測を行いながら、同時にカラー観測をも実行した。

小惑星のカラー観測は通常は小惑星の反射スペクトル型を決定するために行われるが[13]、カリン族小惑星のカラー観測にはまた別の意義がある。小惑星の表面は長年にわたり宇宙線や太陽風に晒されており、表面の反射スペクトルはそうした風化作用（宇宙風化）により相当な変化を経ていると考えられる。しかし小惑星同士が激しく衝突して内部の新鮮な構造が露出す

れば、その時点で表面のカラーはリセットされ、その小惑星が本来持つべきカラーの情報が姿を現すであろう。衝突破壊イベントによってカリン族の破片が発生した時期は580万年前とかなり正確に判明している。もしもカラー観測によりカリン族構成員の表面に新鮮な部分を見出すことが出来たとしたら、それは「正確に580万年間宇宙線や太陽風に晒され続けた小惑星の表面」のデータを与えるものとなる。このような観測を他の小惑星（衝突時期がそれなりに推定されているもの）に対しても繰り返すことにより、小惑星の表面のカラーの時間変化と年代の関係についての情報が得られる可能性がある。それは太陽系小天体の研究に新しい時間軸を与えてくれるものとなるだろう。

私達が得た832 KarinのV-R、B-V、V-Iのカラー観測データと図1の光度曲線位相との関係が図5(a)である。私達のカラー観測は832 Karinの自転周期の八割以上をカバーし、この小惑星の表面全域をほぼ見渡していることになる。この中でも注目すべきは位相約0.2に於けるV-Iの突出であろう。V-Rの値が全位相にわたってほぼ0.08から0.09の前後で安定し、B-Vの値もさほど急激な変化は見せていないのに比べると、V-Iの変化はとて大きい。これは即ち832 Karinの表面状態が特定の部位に於いて何らかの急激な変化を持つことを示唆している。カリン族の起源が衝突破壊イベントであったことを考えると、このV-Iの急激な変化は832 Karin表面の新鮮さの違いを表している可能性がある。衝突前の母天体が持っていた古い表面と、衝突破壊によって現れた母天体の新鮮な内部との差異である。この差異をより顕在化させるために、B、V、R、I各バンドに於ける光度を元に計算した相対反射率の波長依存性を示したのが図5(b)である。横軸はB、V、R、Iの各バンドが持つ波長になるので、これはある種の分光観測結果とも言うことが出来る。図5(b)には図5(a)で特異な振る舞いを見せた光度曲線位相0.2付近の相対反射率とそれ以外の位相での平均的な相対反射率の二種類のデータが示されているが、注目すべきはこの二本の線の平均的傾きが明確に異なることで

2. 小惑星を異なる角度から見るといっただけなら特に衝が必要とされるわけではない。各観測の間隔が大きく開いていて、私達が小惑星を見る方向が十分に異なっていれば良い。けれども観測のやり易さという点では衝の位置が圧倒的に有利なので、私達は次の衝を待ってからこうした小惑星を再観測する予定である。

ある。位相0.2付近での相対反射率の傾きはそれ以外の部分を平均した相対反射率の傾きに比べて急であり、長波長領域に於ける相対反射率が短波長領域に於けるそれに比べて随分と高い。要するに「赤い」のである。832 KarinのようなS型小惑星の相対反射率の波長依存性にはこのような急な傾きがしばしば見られ、宇宙風化作用 (space weathering) が原因するものと考えられている [16, 17]。即ち832 Karinの光度曲線位相0.2付近の表面は他の部分と比べて風化が進んでいる、つまり衝突以前の母天体の歴史を残した古いものであるという予測が立つ。位相0.2以外の部分についてはこうした赤いスペクトルが見られないことから、カリン族形成時の衝突破壊イベントにより露出した母天体の内部が反映されているのであろうと推測される。

この推測を更に強固なものとする観測が東京大学の佐々木貴教・佐々木晶や国立天文台の渡部潤一らによって行われている [18]。彼らは私達とほぼ同時期にすばる望遠鏡を用いて832 Karinの近赤外分光観測を行い、832 Karin表面に於ける近赤外スペクトルの非一様性を確認した。彼らの観測データが示すところによると、光度曲線の位相 ~ 0.5 付近での832 Karinの近赤外スペクトルが代表的な普通コンドライトのそれにかなり近いのに対し、位相 ~ 0.3 付近でのそれは他のS型小惑星にもよく見られる近赤外スペクトルに近い。832 KarinのようなS型小惑星はメインベルトの内側領域に普遍的に見られる小惑星であり、長い期間にわたる宇宙線や太陽風の照射によって宇宙風化していると考えられる。一方で普通コンドライトのスペクトルは隕石の内部物質の情報を反映しており、宇宙風化が及んでいない状態を表すものであろう。こうした結果は、可視光領域に於ける私達のカラー観測が示唆した832 Karin表面の風化状態の違いが近赤外スペクトル領域に於いても発生していることを示すものである。私達の観測と佐々木らの観測では宇宙風化の見られる位相がそれぞれ0.2, 0.3とやや食い違っているが、これは832 Karinの自転周期決定にまだ不確実性が含まれていることと、そもそも佐々木らの観測では光度曲線の

位相0.2付近のデータが取得されなかったことに起因していると予想される。いずれにせよ太陽系小天体の

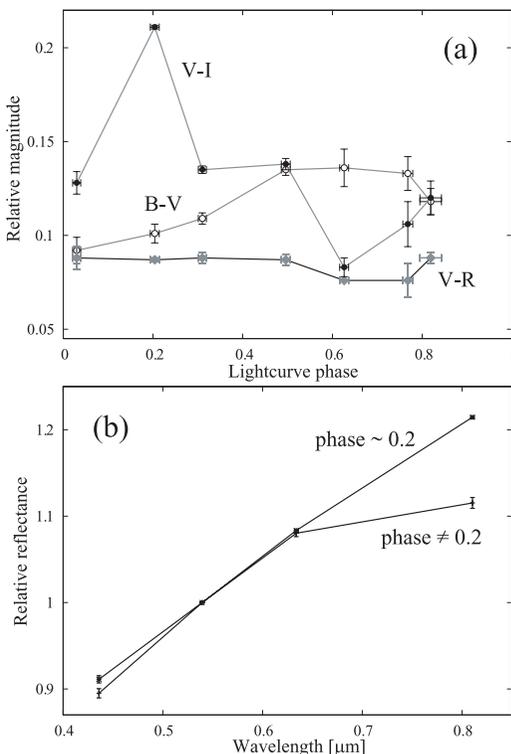


図5 : (a) 832 Karinのカラー観測結果。横軸は光度曲線の位相。(b) 図(a)のデータから計算した相対反射率の波長依存性。データ点は波長の短い方からB, V, R, Iバンドに対応しており、Vバンド(5394.84Å=0.539484 μm)の値で規格化されている。

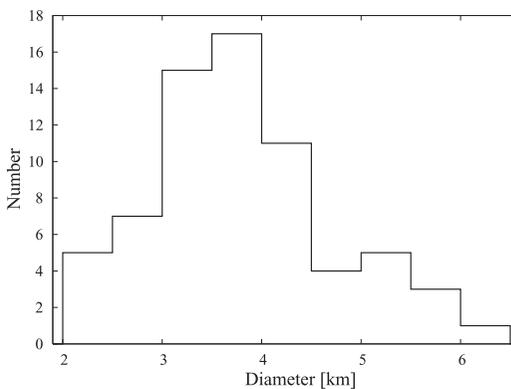


図6 : カリン族小惑星の直径頻度分布 (直径約20kmの832 Karinは除く)。反射率(アルベド)は全構成員について0.16を仮定している。

表面状態変遷という観点でこの結果は誠に興味深い。このような光度曲線観測とカラー観測・分光観測を組み合わせる手法は今後の小惑星研究に於いてますます重要な意義を持って行くことであろう。

カリン族小惑星のサイズ頻度分布については光度曲線以上にまだ何もわかっていない状態であると言える。現在確認されている構成員（約70個）の直径は832 Karinを除くと約2kmから6.5kmの範囲内にあるが[8]、サイズ頻度分布を図6のように描いてみると直径の小さな領域（例えば直径3.5km未満）では観測データの不足と思われる頻度の減少が見られる。メインベルト小惑星の一般的なサイズ頻度分布の見識から言って、直径2kmの小惑星の数が直径3.5kmの小惑星の数よりも少ないということは考え難いからである。このことは、メインベルトには未知のカリン族構成員がまだ数多く埋もれている可能性を示す。カリン族の破片はその自転運動がYORP効果に汚染されていないだけではなく、サイズ分布も衝突進化の影響をほとんど受けていないと予想されるので、小惑星の衝突破壊直後の破片のサイズ分布を知るにはもってこいの観測対象である。小惑星の衝突破壊に関する数値実験結果と現在の小惑星族のサイズ分布との比較から、族を作った母天体はがっちりとした一枚岩のものではなく、最初から亀裂や隙間が多く入った（pre-shatteredな）ものであったろうという予想がなされている[19, 20]。一枚岩の母天体の衝突破壊では最大破片とそれ以外の破片の大きさの違いがあまりに大き過ぎたりするのである。カリン族構成員のサイズ分布の観測データを蓄積してそのような数値実験の結果と比較することで、私達は小惑星の衝突破壊メカニズムや衝突前の母天体の本来の姿により近づくことが出来るかもしれない。けれどもサイズの小さな小惑星を発見し、しかもそれがカリン族構成員であることを確認する道程は単純ではない。吉田二美らはすばる望遠鏡を用いたメインベルトの微小な小惑星のサーベイ観測を行い、直径1km以下という微小な小惑星のサイズ頻度分布を導いた[21, 22]。すばる望遠鏡の主焦点カメラは口径8mクラスの望遠

鏡としては破格に広い0.25平方度という視野を持つ。このカメラを用いれば、メインベルトの小惑星なら直径0.5kmの程度のもので見落とさずに発見できる可能性がある。カリン族構成員、とりわけ数が多いと思われる微小な構成員を新たに発見してサイズ頻度分布の統計を有意なものにして行くには、こうした広い視野を持つ高性能望遠鏡でのサーベイを繰り返して小さな小惑星を多く発見し、その軌道要素を決定し、カリン族が同定された時に使われたのと同様な方法でそうした小惑星がカリン族の一員かどうかを確認する、という手順を経ることになる。もちろん原理的に不可能なことではないので私達はこちらにも挑戦して行きたいが、すばる望遠鏡の極めて高い競争率を考えると現時点では光度曲線観測に集中しておくのが賢い選択であるようにも思われる。

5. 次なる観測対象へ

本稿末尾にある参考文献リストを見ると、読者はそこにある文献のほとんどがここ1-2年以内に出版されたものであり、更には“in press”や“submitted”の論文さえも幾つかあることに気が付くだろう。その事実はこの分野がまだ若く、急速な発展を遂げつつあることを示すものである。私達はそうした流れを主導するような心意気を持ちつつ、今後もカリン族小惑星の光度曲線観測を続けて行く予定である。現在までに確認されているカリン族小惑星の総数は70個程度だが、今後の研究によってその数は更に増えて行くであろう。私達の現在の光度曲線観測はおよそ10小惑星/年というペースだから、カリン族構成員のすべての光度曲線データを得るには少なくともあと6-7年、もしかすると10年以上の時間が必要になるかもしれない。実に気の長い研究計画である。そうこうしている昨今、カリン族と同様にとても若い小惑星族が他にも確認されつつある。カリン族よりもやや内側に位置し、カリン族と同様にS型のスペクトルを持つイアニーニ族（Iannini family, 約500万年前の衝突破壊で形成された

と予想されている) や, カリン族よりやや外側に位置し, C 型の反射スペクトル型を持つベリタス族 (Veritas family, 約830万年前の衝突破壊で形成されたと予想されている) である[9]. イアニーニ族小惑星はまだ18個が確認されたただだが, ベリタス族に至っては既に259個もの構成員が確認されており, これらの光度曲線をつぶさに観測して統計的な議論が出来れば小惑星の衝突破壊研究にとって大変に意義深いデータが得られることになろう. 私達はカリン族と並行してこれらの若い小惑星族の光度曲線観測も行ってゆく予定であり, そのための望遠鏡資源の確保や共同研究者の獲得に日夜忙しく立ち回っている.

最近世の中の望遠鏡の口径がどんどん大きくなっており, そうした大型望遠鏡を使って一夜にして画期的(?) な新発見を行うというタイプの研究が人気を博しているように見える. 小惑星の光度曲線観測はこれと全く対極にあり, 中小の望遠鏡を長い時間利用してひたすら単純な観測を続け, その積み重ねとして惑星科学研究に欠かせない基礎データをきっちり算出することを目的としている. 研究業界全般の風潮が “Publish, or perish.” である現在の世情では前者のような発見的研究がより歓迎されるのかもしれない. けれども長い目で見た学術分野の発展には, 後者のような泥臭くて地道で愚直と言えるほど基礎的で, しかも非常に長い時間の掛かる研究を欠くことは決して出来ない. カリン族の光度曲線観測に臨むたびに私達はそのような思いを強くし, 自分達は将来の学術の基礎を担うデータを産出するのだという矜持を持って望遠鏡に向かっている.

謝辞: 本稿の執筆に際しては東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻の田中秀和さんから多数の助言を頂いた. この場を借りて深く御礼を申し上げたい.

参考文献

- [1] Hirayama, S., 1918: *Astron. J.* 31, 185.
- [2] Ivezić, Ž. et al., 2002: *Astron. J.* 124, 2943.
- [3] Rubincam, D. P., 1995: *J. Geophys. Res.* 100, 1585.
- [4] Bottke, W. F. et al, 2002: in *Asteroids III*, 395, Univ. Arizona Press.
- [5] La Spina, A. et al., 2004: *Nature* 428, 400.
- [6] Rubincam, D. P., 2000: *Icarus* 148, 2.
- [7] Nesvorný, D. et al., 2002: *Nature* 417, 720.
- [8] Nesvorný, D. and Bottke, W. F., 2004: *Icarus* 170, 324.
- [9] Nesvorný, D. et al., 2003: *Astrophys. J.* 591, 486.
- [10] Bottke, W. F. et al., 2001: *Science* 294, 1693.
- [11] Ito, T. and Malhotra, R., 2004: *Icarus*, submitted.
- [12] 中村士, 木下宙, 2003: 第24回太陽系科学シンポジウム集録, 77.
- [13] Binzel, R. P., 1987: *Icarus* 72, 135.
- [14] Kaasalainen, M. et al., 2002: in *Asteroids III*, 139, Univ. Arizona Press.
- [15] Yoshida, F. et al., 2004: *Publ. Astron. Soc. Japan*, 56, in press.
- [16] Sasaki, S. et al., 2001: *Nature* 410, 555.
- [17] Clark, B. E. et al., 2002: in *Asteroids III*, 585, Univ. Arizona Press.
- [18] Sasaki, T. et al., 2004: *Astrophys. J. Lett.*, 615, L161.
- [19] Michel, P. et al., 2003: *Nature* 421, 608.
- [20] Michel, P. et al., 2004: *Icarus* 168, 420.
- [21] Yoshida, F. et al., 2001: *Publ. Astron. Soc. Japan* 53, L13.
- [22] Yoshida, F. et al., 2003: *Publ. Astron. Soc. Japan* 55, 701.