太陽系小天体の変遷

Evolution of small bodies in the solar system

佐々木 晶 (Sho SASAKI)*

Orbital evolutions and spectral changes of small bodies in the solar system are discussed. Recent discovery of Kuiper belt objects changed the image of our solar system. The size of the largest body is close to that of Pluto. Orbital stability and simulation studies clarified a route from Kuiper belt objects to short period comets through Jupiter family comets. Recent dynamical studies including chaos and Yarkovsky effect clarified a route from main belt asteroids to near Earth asteroids and meteorites. Space weathering process not only solved spectral mismatches between asteroids and meteorites but also should provide age information of asteroids. Color variation of Kuiper belt objects may reflect ongoing surface alteration process.

Keywords: Asteroids, Comets, Kuiper belt objects, Space weathering, Orbital evolution, Yarkovsky effect

I. はじめに

太陽系の小天体の代表的なものは、彗星と小惑星である。これらの中には、太陽系初期の情報を保持しているものもあると考えられている。しかし、太陽系の中で、小天体がどのような道筋を辿って進化して現在に至ったかは、明らかにされていなかった。近年のカイパーベルト天体の発見、さらに力学的な研究、反射スペクトル研究の発展によって、明らかにされつつある、太陽系小天体の変遷をここでは紹介したい。

II. カイパーベルト天体から彗星へ

1. カイパーベルト天体の発見

1990年代のはじめまで、私たちの知っている太陽系の最も外側は冥王星であった。太陽系形成の理論的研究からは多数の100 km サイズ氷微惑星が冥王星軌道以遠でも形成されることが期待される。また、80年代以降観測されていた太陽系外天体のダストディスクの半径は200天文単位以上に広がっていて、遠方での天体の存在は期待できた。それにもかかわらず、長周期彗星を除いた大きな天体は、冥王星の外側には確認されていなかった。アイルランドのエッジワース (Edgeworth) とアメリカ (もとはオランダ) のカイパー (Kuiper) は、それぞれ1943年、1951年に、冥王星の外側にディスク状の彗星の巣があるのではないかと提唱した (Edgeworth, 1943; Kuiper, 1951)。しかし長周期彗星の源としてオールト (Oort) により提唱された

オールト雲ほどは支持されなかった。

1992年8月30日、ハワイ大学のジュイット (Jewitt) とカリフォルニア大学バークレー校のルー (Luu) はマウナケア山のハワイ大学望遠鏡で撮影した写真の中に、小惑星よりもゆっくりと移動している天体があることを発見した (Jewitt and Luu, 1993) (Fig. 1)。写真に残った軌跡から距離を計算すると太陽から41.2天文単位程度の距離にあることが分かった。この天体は1992QB1と命名された。明るさから推定された直径は200 km程度である。最初に発見されると、多くの観測家が探索をはじめた。たちまちのうちに続々と、遠方の天体が発見された。これは、エッジワース、カイパーが予測していたものであるということから、エッジワース = カイパーベルト天体もしくはカイパーベルト天体と呼ばれるようになった。(私はエッジワースの名前を入れた方がいいと思うが、通常ではカイパーベルト天体と呼ばれている)。

2. カイパーベルト天体の種類と大天体

カイパーベルトの天体の中には、1992QB1のように比較的円に近い軌道を描くものと、彗星にも似た楕円軌道を描き遠日点が大いなものがあることがわかってきた。後者は散乱カイパーベルト天体 (Scattered Kuiper Belt Object) と呼ばれる。さらに、冥王星と同じく海王星との3:2の共鳴軌道 (公転周期が海王星の3/2倍) にあるものが多数発見され、プルティーノ (Plutino) と命名された。また、海王星軌道より内側を公転する天体も多く発見され、ケンタウルス (Centaur) と名付けられている。

(平成17年4月6日受付, 平成17年4月15日受理)

* 国立天文台水沢観測所 RISE 推進室, 〒023-0861 岩手県水沢市星ガ丘町2-12

* RISE Group, Mizusawa Astrogeodynamics Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa, Iwate 023-0861, Japan E-mail: sho@miz.nao.ac.jp

Fig. 1. Discovery images of Kuiper belt object 1992QB1. 1992QB1 is described by arrows in the figure. "A" denotes an asteroid which moves during 20 min exposure time. Courtesy of Prof. Dave Jewitt of Univ. Hawaii.

カイパーベルト天体は広い意味での小惑星であるという主張もある(実際に 1992QB1 といった天体の呼称は小惑星になっている, また小惑星番号がつけられている天体もある)が, 一般には区別されている。むしろ, キロンのように彗星活動が確認された遠方の比較的大きな天体(彗星として分類されている)や冥王星を, カイパーベルト天体のグループに入れて考えるようになっている。

現在までに発見された Plutino, Centaur などを含めたカイパーベルト天体の総数は, 1000 に近づいている。おそらく 2005 年中に 1000 を越えるだろう。中には, 巨大で非常に遠方にある天体も発見されている。まず直径約 1250 km のクワワー (Quaoar) が発見された。2003 年 11 月にアメリカ・パロマー山天文台の 1.2 m サミュエル・オースチン望遠鏡で発見されたセドナ (Sedna, 2003VB12) は, 近日点 76 天文単位, 遠日点は約 850 天文単位, 周期は 1 万年という非常に大きな軌道を描く (Brown *et al.*, 2004) (Fig. 2)。明るさから推定されるセドナの直径は約 1700 km, 冥王星の次に大きな天体である。現在では, 冥王星やその衛星のカロンは, カイパーベルト天体のなかの相対的に大き

Fig. 2. Orbit of Sedna. The inner circle is Neptune's orbit and distribution of other Kuiper belt objects is also shown. Numbers in the axes are in astronomical unit.

な天体であると考えられている。今後, 探索が続くと, そのうちに冥王星よりも大きな天体が発見されるかも知れない。

3. カイパーベルト天体の存在時間と彗星への軌道進化

カイパーベルト天体は公転周期が長いので, 長期間の軌道計算が比較的容易である。外惑星の重力を考慮して, 軌道長半径, 軌道傾斜角, 軌道離心率を変えて, カイパーベルト天体の安定性を求める数値計算が直接行われるようになった (Malhotra *et al.*, 1999)。Figure 3 は, 軌道計算を行い海王星のヒル圏 (重力圏) に到達するまでの時間を, 様々な軌道長半径, 軌道離心率の初期値について表している。この力学的存在時間が長いほど, カイパーベルト天体は安定である。Figure 3 でわかるように, 冥王星と同じ軌道長半径 (40 天文単位) は広い軌道離心率で安定になっている。そのすぐ外側の領域 (軌道長半径が 40-42 天文単位) は不安定領域で短い時間で海王星の重力の影響を受けて散乱される。さらに 42 天文単位より外側が広い安定領域になっている。これは発見されたカイパーベルト天体の分布とも一致する。海王星と 3:2 共鳴のところにあるプルティーノの軌道は長期間安定である。プルティーノは海王星の軌道進化により共鳴軌道に補獲されたという説が有力である (Malhotra *et al.*, 1999)。

数億年から数十億年の時間スケールで軌道が安定である領域も存在する。そのため太陽系形成時からかなり経った時点で, 離心率が変動して海王星に接近して, 大きく軌道を変える天体も存在する。そのうち一部はやがて木星の重力で軌道が変わり, 太陽系の内側に移動する。これが短周期彗星の起源ではないかと現在では考えられて

Fig. 3. Dynamical lifetime of Kuiper belt object calculated under various initial values of orbital eccentricity and semi-major axis. Initial orbital inclination is 1 degree. The lifetime is defined by elapsed time by reaching the Hill sphere of Neptune. Dark (light) dots denote observed Kuiper belt objects whose inclination is smaller (larger) than 10 degree. The figure is modified from Malhotra *et al.* (2001) with permission of Prof. Renu Malhotra of Univ. Arizona.

Fig. 4. Comet Wild 2 by STARDUST. Size is 4.5 km.

いる (Duncan and Levison, 1997)。これまでに観測されているカイパーベルト天体と短周期彗星ではサイズが違うため、カイパーベルト領域に小天体が存在するか、軌道進化の間に分裂したかの可能性が考えられる。2004 年 1 月にスターダストミッションが探査した、ビルト 2 (Wild2) という彗星は、もともと太陽系の外側にあった天体が 1974 年の木星接近によって軌道が変わり、内側に来たことがわかっている (Fig. 4)。有名なシューメーカー・レービー第 9 彗星は、1993 年に分裂天体として発見され 1994 年 7 月に木星に衝突した。実は、この彗星は発見前年の 1992 年 7 月に木星から数万キロメートルまで接近して、軌道が大きく変化するとともに潮汐力で分裂した天体である。

外惑星領域で形成された氷微惑星や、それらが衝突成長した天体が、天王星や海王星に散乱されてカイパーベルト天体を構成した。なかにはもともと遠方で形成された氷天体もあるかも知れない。そして、長い時間をかけて再び軌道進化と辿って太陽系の内側に到達するものがある。衝突や木星型惑星による潮汐力の影響を受けて破壊されてサイズが小さくなり、現在我々が確認できる短周期彗星になる。このシナリオが正しければ、彗星探査により、太

Fig. 5. Distribution of asteroids projected onto the zodiacal plane on 2005-01-01. 270000 asteroids are plotted with orbits of Mercury, Venus, the Earth, Mars and Jupiter. The figure is from Prof. Makoto Yoshikawa of ISAS/JAXA.

陽系形成期の氷物質を調べることができるはずである。さらに、天体の進化はこれだけで終わりではない。短周期彗星の活動が枯渇したものが炭素質小惑星の一部を構成すると考えている研究者が多い。実際に、小惑星とされている天体の中には軌道が短周期彗星に近いものが存在する。

III. 惑星から隕石へ

1. 小惑星の分布

今から 200 年前に、シチリア島のパレルモでピアッツィがセレス (直径 910 km で最大の小惑星) を発見してから以来、小惑星の数は増えている。特に最近の全天搜索観測により、小惑星数は飛躍的に増加していて、これまでに総数は 27 万個を越えている。ほとんどの小惑星は、火星軌道と木星軌道の間の、主小惑星帯 (メインベルト) に存在する (Fig. 5)。一方、3000 あまりの小惑星は軌道長半径が小さい内側の軌道を持ち、地球軌道に近づき、さらには地球軌道の内側に入るものもある。これらは近地球小惑星と呼ばれており、小惑星探査計画の主なターゲットになっている。落下軌道が確認されている隕石の軌道は、遠日点が火星付近から主小惑星帯にあり、近地球小惑星の多くの軌道と同じである (Fig. 6)。それでは、近地球小惑星 (や隕石) は主小惑星帯をもととの源とするのであろうか？

2. 主小惑星帯から近地球小惑星へ

小惑星の分布は、木星や土星との軌道要素の比が整数比になる、いわゆる共鳴の影響を受けている。特に、公転周期が木星の公転周期の 3 分の 1, 2 分の 1 になる 1 : 3 共

Fig. 6. Orbits of some observed meteorites. IN, Inniafree; LC, Lost City; PK, Peekakill; PR, Pribram; TL, Tagish Lake. Orbits of Venus, the Earth, Mars and Jupiter are also shown.

鳴, 1 : 2 共鳴になるところは、小惑星の軌道長半径分布のギャップになっている。同様に木星との 2 : 5, 3 : 7 共鳴のところも小惑星は少ない。ところが、実際には共鳴状態に天体があるときは、軌道離心率が少し高くなった状態でむしろ軌道が安定になる傾向がある。

Wisdom (1983; 1985) は、共鳴軌道では長期間たつとカオスの効果により小惑星の軌道離心率が著しく増大して、火星や地球の軌道を横切って重力の影響を受ける。結果として小惑星の分布にギャップが生じることを示した。Gladman *et al.* (1997) は共鳴帯での天体の存在時間が短いことを明らかにした。惑星重力の影響を受けて軌道長半径が減少したものが、近地球小惑星になる。近地球小惑星は、引き続き惑星重力の影響を受けるため、長期間安定には存在できない。中には惑星に衝突するもの、逆に再び遠方に飛ばされるものがある。大部分の隕石は、近地球小惑星と同様に、主小惑星帯の共鳴軌道からカオスの効果により運ばれてきたと考えられている。

小惑星帯の共鳴軌道から近地球小惑星や隕石への道筋は明らかになったが、小惑星帯の中で共鳴軌道へ小惑星を供給する機構が無ければ、継続的に近地球小惑星を生み出すことはできない。これがもう一つの謎であった。小惑星どうしの重力散乱では軌道長半径を変化させて共鳴軌道へ天体を運ぶことはとても困難である。

3. ヤルコフスキー効果による共鳴軌道への輸送

これに答えたのが、ヤルコフスキー効果の再発見である (Robincam, 1995)。100 年ほど前にロシアのヤルコフスキーがまとめた理論によると、太陽系空間で自転している物体は、吸収した太陽光を赤外線として再放出するときに、運動量 (公転角運動量) が変化して、軌道長半径がかわ

る。自転物体の表面では夜明けから温度が上がり太陽直下で最大になる。夕方から夜になると、熱放射で温度は低下して、夜の間は徐々に下がっている。昼の間では温度変化は対称であるが、夜間では非対称である。自転物体では夕方側の半球の方が朝方の半球より平均温度が高く、結果として放射による運動量を多く失うことになる。そのため、順行自転天体では反作用として天体は加速される（公転運動では角運動量が増加して軌道が外側に動く）。逆行自転天体では天体は減速される（公転軌道は内側に動く）。

このヤルコフスキー効果によりキロメートルサイズの天体でも軌道が変化する。これが共鳴軌道へ小惑星を供給する機構と考えられる (Miglorini *et al.*, 1998)。ヤルコフスキー効果には、天体のサイズや自転速度、表面状態など様々な要素が効いてくる。これにより、近地球小惑星とメインベルト小惑星との間で、サイズ分布や組成分布に違いが生じるのではないかという説もあるが、確立していない。ただし、数十キロメートルを超えるような大きな天体をヤルコフスキー効果で動かすのは困難である。実際に、近地球小惑星で最大の天体は、NEAR 探査機が訪れたエロスでサイズは約 20 キロメートルである。

ヤルコフスキー効果により軌道要素が広がることを考えると、小惑星の族の分布も説明できる。Bottke *et al.* (2001) はヤルコフスキー効果を入れて数億年以上の小惑星の軌道進化を計算して、数の多いグループのコロニス族の分布を説明することに成功した。共鳴軌道の効果を考えると離心率に変化があることも説明することができた。衝突破壊から 7 億年で現在の分布まで広がることを明らかにした。このように、最近の力学的研究の進展により、小惑星の軌道進化像はかなり明らかになってきた。

IV. 宇宙風化作用: 小惑星の年代学

1. 反射スペクトルの謎

月や小惑星のように大気の無い固体天体の表面は、隕石の激しい衝突で生成されたレゴリスというソイル状の微粒子で覆われている。アポロ探査が持ち帰った月の石とソイル状物質には光学的に大きな違いがあった。平均的な化学組成は同じでも、月の石を粉末にしたものと、月ソイルの反射スペクトル（光の波長ごとの反射率）では、ソイルの方が暗く、しかも赤外領域よりも可視領域の方が暗いというスペクトルの「赤化」を示していた。この変化は、宇宙風化作用 (Space Weathering) と呼ばれ、その原因はソイルに大量に含まれる衝突で生成したガラス状物質であると考えられてきた。しかしガラス質が形成されるだけでは、暗化や赤化を単純に説明することは難しいため、ハブケは、「色」変化の原因はソイル粒子中に、ナノメートルサイズの鉄微粒子が形成されたことが原因であると 30 年以上前に考えた (Hapke, 1975)。

一方、小惑星の反射スペクトルでも大きな問題が長い間未解決だった。地球上に落下する隕石の大部分を占める普通コンドライトの反射スペクトルに対応する小惑星

が非常に少ない一方で、小惑星帯の多くを占める S 型と呼ばれる小惑星の反射スペクトルに対応する隕石は非常に少ない (石鉄隕石) ことである (Chapman, 1996)。S 型小惑星の反射スペクトルは明らかな赤化傾向がある。観測データが増えるとともに、月と同様に宇宙風化作用により、普通コンドライトの反射スペクトルが S 型の反射スペクトルに変化するという意見が強くなってきた。

しかし、地球に到達する隕石は小惑星帯の限られた共鳴軌道に由来するため、小惑星帯の型の分布と隕石の種類分布は一致しないという反論があった (ヤルコフスキー効果による共鳴軌道への天体移動機構が説明されたことで、この反論は弱くなる)。さらに普通コンドライトの源になる天体は、小さくて観測されていない、という極論もあったが、Binzel *et al.* (1996) は普通コンドライトと S 型の間の反射スペクトルを持つ小さな小惑星を続々と発見した。さらにガリレオ探査機による S 型小惑星イダの観測では、比較的新しいクレータ内部や放出物のエジェクタでは、赤化が進んでいなくて S 型と普通コンドライトの間の反射スペクトルを示している (Chapman, 1996)。新鮮な物質は普通コンドライトの「色」に近く、宇宙空間に晒されていると時間とともに S 型の「色」へと変化していくと考えられ、宇宙風化作用が小惑星の反射スペクトルの不一致を説明することは決定的となった。さらに、NEAR 探査機による S 型近地球小惑星エロスの観測は、エロスが普通コンドライトに近い元素組成を持つことを明らかにした (Trombka *et al.*, 2001)。

2. 宇宙風化作用の原因

それでは宇宙風化作用の原因はどうなったのだろうか。ようやく 1993 年に、ケラーらは、月のソイル粒子にハブケが予想したような、ナノメートルサイズの鉄微粒子をソイル粒子の周囲にあるアモルファス状の層 (リム) の中に発見した (Keller and McKay, 1993)。ダストの高速衝突で表面物質が蒸発して、凝結するときに微粒子を伴うリムができるのではと考えられた。しかし、鉄微粒子の存在と反射スペクトルの変化の関係は明らかではなかった。

我々は 1990 代の半ばから、宇宙空間でのダスト計測器の開発を行っており、ナノ秒パルスレーザー照射が、急速な加熱・蒸発を伴うダストの高速衝突を模擬できることを知っていた。そこで、真空中で、鉱物粒子にパルスレーザー照射を行えば、実際に宇宙空間でのダスト高速衝突による宇宙風化作用を再現できると考え、チェンバーを製作して、真空中でカンラン石、輝石にパルスレーザーを照射した (Yamada *et al.*, 1999)。その結果、カンラン石粉末へのレーザー照射で色が変わること、さらに、反射スペクトル全体としても赤化の傾向を示すことが明らかになった (Fig. 7)。同じ強度・回数の照射では、輝石よりもカンラン石の方が反射率の低下・赤化が大きい。宇宙風化作用に鉱物組成依存性があることも明らかになった。また、得られた反射スペクトルが一部の小惑星の観測データを再現することがわかった (Hiroi and Sasaki, 2001)。

Fig. 7. Bidirectional reflectance spectra of olivine pellet samples before and after pulse laser irradiation (Sasaki *et al.*, 2001). Each 2-cm pellet is made up of grains smaller than 75 μm of San Carlos Olivine (Fo_{91}). Wavelength range is between 250–2500 nm. 1, 5, 30mJ denote pulse energy.

Fig. 8. Comparison between nanophase iron particles in the rim of a lunar soil grain and those in the rim of laser-irradiated olivine grain. Courtesy of Dr. Keiko Nakamura of NASA-JSC.

しかし反射率が合うだけでは宇宙風化作用過程を解明したことにはならない。さらに、サンプルの透過型電子顕微鏡による観察を行った。その結果、カンラン石粒子の周囲に、蒸発物質が凝結してできたアモルファスのリムが形成されていて、その中に数ナノメートルから数10ナノメートルの微小粒子が存在することが確認された (Sasaki *et al.*, 2001)。電子線回折の結果から、その微小粒子は体心立方格子の金属鉄結晶であることも明らかになった。微小粒子の分布形態は、ケラーらが月ソイルで観察したものと非常によく似ている (Fig. 8)。その後、輝石サンプルでも鉄微粒子の存在は確認された。まだ、電子スピン共鳴による計測から、反射スペクトルの変化と鉄微粒子の存在量には相関関係があることも明らかになった (Kurahashi *et al.*, 2002)。

3. 若い小惑星の観測

実験の過程で、私は宇宙風化度が小惑星の年代決定に使えるのではないかと考えるようになった (Sasaki *et al.*, 2001)。実際に月のクレーターの光条は宇宙風化作用を受

Fig. 9. Infrared reflectance spectra of asteroid Karin obtained by Subaru telescope on 2003-09-14. Rotation period of Karin is 18.35 hr. Three observations are plotted (, ,) with 0.2 displacement vertically. Each spectrum requires 40 minutes observation. Start times of observations are (7:57UT), (8:46UT), and (10:45UT). Notice that the difference of the first and the second spectra. From Sasaki *et al.* (2004).

けて10億年程度で消えると言われていた。そのため、年代の若い小惑星を観測することができれば、宇宙風化作用を受けていない普通コンドライトに近い反射スペクトルを示すはずである。

そのための格好のターゲットが提示された。ネスボルニらはコロニス族の中の天体の軌道計算から、580万年前に軌道要素が揃うグループを発見した。この、カリン族と名付けられたグループは、580万年前に衝突破壊を受けて形成されたばかりであると考えられた (Nesvorný *et al.*, 2001)。

我々は2003年9月14日(UT)、すばる望遠鏡を用いてカリン族中で最大の大きさを持つ小惑星カリン(832 Karin)の近赤外分光観測を行った。近赤外のJ, H, K_sバンド(0.9–2.4ミクロン)の反射スペクトルを3セット取得した。結果は予想外のものであった。カリンの反射スペクトルが、赤化したものから普通コンドライトに近いものへと変化したのである (Sasaki *et al.*, 2004) (Fig. 9)。つまり、新しい表面だけではなく、古い表面もカリンは残している。地上観測で、このように明確な色の違いが発見された小惑星は、ベスタを除いては始めてである。

一方、Jedicke *et al.* (2004) は Sloan Digital Sky Survey (SDSS) によって得られた1万に近い小惑星の可視・近赤外多波長データを、小惑星の族により分類した。小惑星の族多くはS型(普通隕石に対応)、C型(炭素質隕石に対応)に分類されている。一方で、それぞれの族の軌道長半径広がりからヤルコフスキー効果を考慮した族のおおよその年代を推定した。S型天体では、反射スペクトルの赤化を表すデータと小惑星の年代との間に相関関係があることが確認された。つまり、S型天体では古い天体ほど「赤い」のである。一方ではアルベドと年代との間にはよい相関

関係は得られていない。

4. 「はやぶさ」によるS型小惑星イトカワの観測

2005年9月、日本の小惑星探査機「はやぶさ」が、長径600mほどの近地球小惑星イトカワに接近する。地上観測からイトカワは少し赤化したS型天体であると予想されている。我々の室内実験では、表面に粒子状物質すなわちレゴリスが存在することが、微小鉄粒子を含有するアモルファス層が形成されるためには非常に重要であることがわかっている。もし、小惑星表面にレゴリスが無く岩盤のみであると、風化作用による反射スペクトルの赤化は期待できない。一方レゴリス層が発達していれば、宇宙風化作用が進行している可能性がある。イトカワのような非常に小さな天体は重力が弱いので、衝突放出物の再集積が難しくレゴリスが発達していないかも知れない。また、粒子表面に電荷がたまると電磁作用により重力を振り切って散逸するため、数100ミクロン以下の粒子が枯渇している可能性もある。「はやぶさ」の観測により、まずイトカワの反射スペクトルを正確に求めること、X線分光により化学組成を確認することが期待できる。さらに、赤化が弱かった場合、レゴリスが少ないためなのか、そもそも(年代が若く)風化が発達していないのか、検証することも可能である。「はやぶさ」はイトカワ表面からサンプルを採取して、2007年に地球に持ち帰る予定である。帰還サンプルにレゴリス粒子が含まれていれば、微小鉄粒子が存在するかどうかを判定することにより、宇宙風化作用が小惑星表面で進行しているかどうか、直接確かめることもできる。

5. カイパーベルト天体の色

最後にカイパーベルト天体にもう一度話を戻したい。カイパーベルト天体のうち明るいものについては、異なるフィルターでの観測により反射スペクトルが求められるようになった。まず、テグラーとロマンシンは、カイパーベルト天体の色に大きな違いがあり、赤いものとそうではないものの2つのグループに分けられることを指摘した(Tegler and Romanishin, 1998; Romanishin and Tegler, 2000)。グループに分かれるかどうかは議論があるが、反射スペクトルが平坦なものから強く赤化したものまで大きな違いがある。前述の大天体、セドナも非常に赤い天体である。一般的な彗星核の反射スペクトルはどちらかというと平坦に近い(Jewitt, 2002)。カイパーベルト天体の表面では、氷、有機物、シリケートなどの混合物が、宇宙線や紫外線を受けている。長期間の間に表面が変成することが、色の変化の原因と考えられているが、細かな機構は推定の域を出ない。単純には時間が経つと赤化が進む、一方で彗星核はガス噴出により表面が更新された、というモデルが考えられる。しかし、炭素質の小惑星族の表面の色の変化からは、時間が経つと逆に赤化が弱くなる可能性も考えられる。

分布図を提供していただきました。大阪大学の土山氏の査読により論文内容が明瞭になりました。感謝いたします。

引用文献

- Binzel, R.I., Bus, S.J., Burbine, T.H. and Sunshine, J.M. (1996): Spectral properties of near-Earth asteroids: Evidence for sources of ordinary chondrite meteorites. *Science*, **273**, 946-948.
- Bottke, W.F.Jr., Vokrouhlický, D., Bro, M., Nesvorný, D. and Morbidelli, A., (2001): Dynamical spreading of asteroid families by the Yarkovsky effect. *Science*, **294**, 1693-1696.
- Brown, M.E., Trujillo, C.A. and Rabinowitz, D. (2004): Discovery of a candidate inner Oort cloud planetoid. *Astrophys. J.*, **617**, 645-649.
- Chapman, C.R. (1996): S-type asteroids, ordinary chondrites, and space weathering: The evidence from Galileos fly-bys of Gaspra and Ida. *Meteorit. Planet. Sci.*, **31**, 699-725.
- Duncan, M.J. and Levison, H.F. (1997): A disk of scattered icy objects and the origin of Jupiter-family comets. *Science*, **276**, 1670-1672.
- Edgeworth, K.E. (1943): The evolution of our planetary system. *J. British Astro. Assoc.*, **20**, 181-188.
- Gladman, B.J., Migliorini, F., Morbidelli, A., Zappalà, V., Michel, P., Cellino, A., Froeschlé, C., Levison, H.F., Bailey, M. and Duncan, M. (1997): Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances. *Science*, **277**, 197-201.
- Hapke, B., Cassidy, W. and Wells, E. (1975): Effects of vapor-phase deposition process on the optical, chemical and magnetic properties of the lunar regolith. *Moon*, **13**, 339-353.
- Hiroi, T. and Sasaki, S. (2001): Importance of space weathering simulation products in compositional modeling of asteroids: 349 Dembowska and 446 Aeternitas as examples. *Meteorit. Planet. Sci.*, **36**, 1587-1596.
- Jedicke, R., Nesvorný, D., Whiteley, R., Ivezić, Z. and Juric, M. (2004): An age-colour relationship for main-belt S-complex asteroids. *Nature*, **429**, 275-277.
- Jewitt, D. (2002): From Kuiperbelt object to cometary nucleus: The missing ultrared matter. *Astrophys. J.*, **123**, 1039-1049.
- Jewitt, D. and Luu, J. (1993): Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992QB1. *Nature*, **362**, 730-732.
- Keller L.P. and McKay, D.S. (1993): Discovery of vapor deposits in the lunar regolith. *Science*, **261**, 1305-1307.
- Kuiper, G. (1951): On the origin of the solar system. In *Astrophysics: A topical Symposium* (Hynek, J.A. Ed.). McGraw Hill, New York, 357-414.
- Kurahashi, E., Yamanaka, C., Nakamura, K. and Sasaki, S. (2002): Laboratory simulation of space weathering: ESR measurements of nanophase metallic iron in laser-irradiated materials. *Earth Planets Space*, **54**, e5-e7.
- Malhotra, R., Duncan, M. and Levison, H. (1999): Dynamics of the Kuiper belt, In *Protostar and Planets IV*.
- Migliorini, F., Michel, P., Morbidelli, A., Nesvorný, D. and Zappalà, V. (1998): Origin of Multikilometer Earth- and Mars-crossing asteroids: A quantitative simulation. *Science*, **281**, 2022-2024.
- Nesvorný, D., Bottke, Jr.W.F., Dones, L. and Levison, H.F. (2002): The recent breakup of an asteroid in the main-belt region. *Nature*, **417**, 720-722.
- Romanishi, W. and Tegler, S.C. (1998): Two distinct populations of Kuiper-belt objects. *Nature*, **392**, 49-51.

- Robincam, D.P. (1995): Asteroid orbit evolution due to thermal drag. *J. Geophys. Res.*, **100**, 1579-1584.
- Sasaki S., Nakamura, K., Hamabe, Y., Kurahashi, E. and Hiroi, T. (2001): Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar-like space weathering. *Nature*, **410**, 555-557.
- Sasaki, T., Sasaki, S., Watanabe, J., Sekiguchi, T., Kawakita, H., Fuse, T., Takato, N., Yoshida, F., Dermawan, B. and Ito, T. (2004): Mature and fresh surfaces on the new-born asteroid Karin. *Astrophys. J. Lett.*, **615**, L161-L164.
- Tegler, S.C. and Romanishi, W. (2000): Extremely red Kuiper-belt objects in near-circular orbits beyond 40AU. *Nature*, **407**, 979-980.
- Trombka, J.I., Squyres, S.W., Brückner, J., Boynton, W.V., Reedy, R.C., McCoy, T.J., Gorenstein, P., Evans, L.G., Arnold, J.R., Starr, R.D. Nittler, L.R., Murphy, M.E., Mikhcheva, I., McNutt Jr., R.L., McClanahan, T.P., McCartney, E., Goldsten, J.O., Gold, R.E., Floyd, S.R., Clark, P.E., Burbine, T.H., Bhangoo, J.S., Bailey, S.H. and Petaev, M. (2000): The elemental composition of asteroid 433 Eros: Results of the NEAR-Shoemaker X-ray spectrometer. *Science*, **289**, 2101-2105.
- Yamada M., Sasaki, S., Nagahara, H., Fujiwara, A., Hasegawa, S., Yano, H., Hiroi, T., Ohashi, H. and Otake, H. (1999): Simulation of space weathering of planet-forming materials: Nanosecond pulse laser irradiation and proton implantation on olivine and pyroxene samples. *Earth Planets Space*, **51**, 1255-1265.
- Wisdom, J. (1983): Chaotic behavior and the origin of the 3/1 Kirkwood gap. *Icarus*, **56**, 51-74.
- Wisdom, J. (1985): Meteorites may follow a chaotic route to Earth. *Nature*, **315**, 731-733.