



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷粒子の物性・組成と惑星リングの進化
Author(s)	大槻, 圭史; 台坂, 博; 武田, 隆顕
Description	2章 惑星形成と氷微粒子
Citation	低温科学, 66, 73-81
Issue Date	2008-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/34714
Type	departmental bulletin paper
File Information	OHTSUKI.pdf





氷粒子の物性・組成と惑星リングの進化



大槻 圭史 コロラド大, 台坂 博 一橋大, 武田 隆顕 国立天文台

リング・衛星系は巨大惑星形成過程の自然な副産物であると考えられる。本稿では、土星リングを構成する氷粒子の物性がリングの力学進化や構造形成に及ぼす影響について述べる。氷粒子の反発係数はリングの力学進化を考える上で重要な物理量であり、室内実験結果が理論研究に使われてきた。粒子表面の摩擦は粒子自転を引き起こし、土星リングからの熱輻射の観測結果を解釈する上で重要となる。また粒子間の非重力的吸着力がリングの進化や構造形成に及ぼす影響、隕石衝突によるリング組成進化に関する研究等も行なわれているが、これらについては今後さらに詳しく調べる必要がある。

1. はじめに

土星のリングの存在は古くから知られていたが、1970年代後半から1980年代にかけての地上観測ならびにボイジャーによる惑星探査によって、他の巨大惑星である木星、天王星、海王星にもリングの存在することが明らかになった(図1)。従って、今ではリングは土星特有のものではなく、巨大惑星に普遍的に存在するものであると考えられている。しかしリングの特徴は個々の惑星によって大きく異なる。発見が遅れたことからわかるように、土星以外の惑星のリングは極めて細いか、あるいは粒子空間密度が小さい。例えば土星の主要リングと呼ばれるリングは土星に近い側からCリング、Bリング、Aリングという名前がつけられており(このうちAおよびBリングは地上の望遠鏡から容易に観測でき、その間

にカッシーニの間隙という、粒子空間密度の低い場所がある)、これら全体の幅は数万キロメートルに達するのに対し、天王星リングは幅が数キロメートルから100キロメートルという、細いリングの集まりである。また土星の主要リングの粒子サイズは数センチメートルから数メートルであるのに対して、木星リングはミクロンサイズのダスト粒子からなる。リングの起源についてはまだ明らかでない部分が多いが、土星の主要リングは衛星形成の名残あるいは氷衛星の破壊といった過程が関係している可能性が指摘されている一方、木星のダスト・リング(および、土星や天王星に存在する希薄なダスト・リング)は、小衛星に隕石が衝突して破片をまき散らして形成されたのだと考えられている。このように、様々な姿をした惑星リングの形成には、複数の過程が関係していると考えるのが自然である。

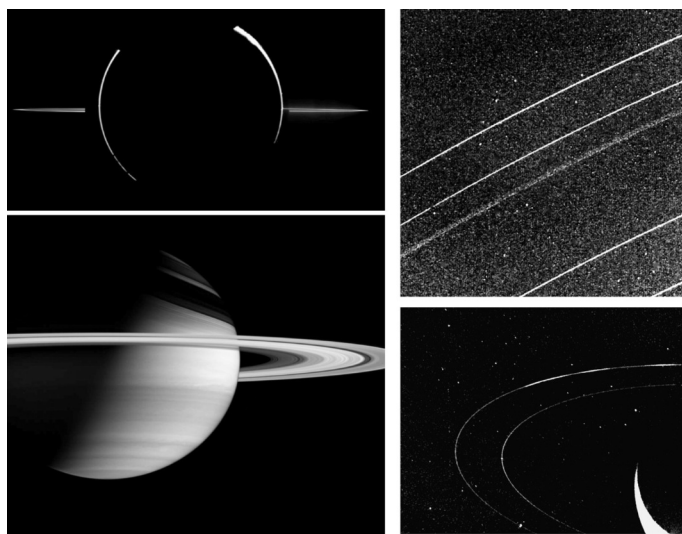


図1：(左上) 木星リング。探査機ガリレオが1996年11月9日に撮影(NASA/Galileo, P-50085)。(左下) 土星リング。探査機カッシーニが2005年1月23日に撮影(NASA/JPL/Space Science Institute/Cassini, PIA06594)。(右上) 天王星リング。探査機ボイジャー2号が1986年1月23日に撮影(NASA/Voyager 2, PIA01981)。(右下) 海王星リング。探査機ボイジャー2号が1989年8月1日に撮影(NASA/Voyager 2, PIA01493)。

本稿では特に土星のリングに着目する。土星リングは H_2O の氷を主成分とする粒子からなっていると考えられている。以下では、土星の主要リングを構成する氷粒子の物性がリングの力学進化や構造形成に及ぼす影響について述べる。一方、主成分である H_2O 氷への不純物の混ざり方が土星リングの光学的厚さに依存することが観測により示唆されている。これをもとにリングの組成進化を論じた研究もあり、それについても短く紹介する。

2. 氷粒子反発係数とリングの力学進化

上述のように土星のAリングやBリングといった主要リングは半径数センチメートルから数メートルの氷粒子からなっており、これらが互いに衝突を繰り返している。通常、土星リングの力学進化に関する理論的研究では粒子は球状であると仮定し、衝突による粒子速度変化を表すパラメータとして反発係数を用いる。

いま、衝突する二粒子の接触点における二粒子表面の相対速度を u とする。 u には二粒子の中心の相対速度 v のほかに、それぞれの粒子が自転していることによって粒子表面が粒子中心に対して持つ速度の分も含まれる。 u を粒子接触平面に垂直な成分 u_n ($=v_n$; v_n は粒子中心相対速度の垂直成分) ならびに平行な成分 u_t に分け、衝突によるそれぞれの成分の変化を二種類の反発係数を用いて記述する。すなわち、垂直方向ならびに接線方向の反発係数を ϵ_n , ϵ_t ($0 \leq \epsilon_n \leq 1$, $-1 \leq \epsilon_t \leq 1$) とするとき、衝突後の速度は次のように書ける。

$$\begin{aligned} u'_n &= v'_n = -\epsilon_n v_n, \\ u'_t &= \epsilon_t u_t. \end{aligned} \quad (1)$$

摩擦のないなめらかな表面のとき $\epsilon_t = 1$ であるのに対し、スーパーボールや体育館の床の上でのバスケットボールのパウンドのように衝突時に接触面同士がほとんどすべらない場合には $\epsilon_t < 0$ ($\epsilon_t = -1$ のとき完全なグ

リップ) となり衝突前と反対方向に回転して跳ね返ってくる。実際のリング粒子では $0 < \epsilon_t < 1$ に相当すると考えられる。

反発係数は、リングの力学進化に影響を及ぼす重要な物理量である。そのことを示すために、実際に多数のリング粒子同士の衝突進化の数値シミュレーションを行なった結果の例を図2に示す。これは、惑星からの距離や粒子間重力などについては土星リングに相当するパラメータの下で行なったシミュレーションの結果であり、粒子軌道の離心率の時間変化を表わしている (ただし粒子空間密度は実際のリングより小さく、さらに等質量粒子を仮定した場合の結果を示している)。最初は離心率の小さな軌道であるが粒子同士の衝突ならびに重力散乱を繰り返した結果、軌道がより乱されて円軌道からのずれが大きくなっていく様子がわかる。図2aの計算では粒子表面はなめらかで摩擦がないと仮定しており ($\epsilon_t = 1$), ϵ_n の値を何通りか変えた場合の結果を示している。 $\epsilon_n = 0.1 \sim 0.5$ の場合は結果はほとんど変わらない。離心率が大きくなろうとすると非弾性衝突によってエネルギーが失われ、円軌道に近づこうとする効果が働く。その一方、さらに離心率が小さくなろうとすると、今度は粒子が有限のサイズ持っているという効果が効いて、粒子衝突によって軌道が乱されることにより、円軌道に近づこうとするのを妨げる。そのつり合いの結果、離心率はほぼ平衡値を取るようになる。 $\epsilon_n = 0.6$ の場合も、値はやや大きいですが、平衡状態に達していることがわかる。

詳しい理論研究により、 $\epsilon_n \leq 0.627$ の場合に、このような平衡状態の存在することが知られている^{1),2)}。 ϵ_n がこの臨界値を超えると衝突時のエネルギー散逸が不十分で上述のようなつり合いを保つことができなくなり、離心率は時間とともに単調増加するようになる (図2a)。

上のシミュレーションでは反発係数 ϵ_n は一定であると仮定したが、実際の氷粒子の反発係数は衝突速度に依

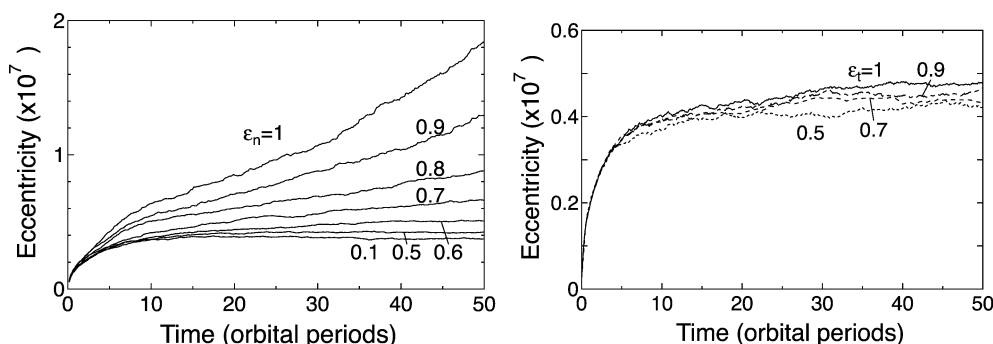


図2：(a) リング粒子同士の衝突及び重力散乱による離心率の進化。N体シミュレーションを用いた数値計算結果による ($\epsilon_t = 1$)。 (b) リング粒子の軌道離心率の ϵ_t 依存性。 ϵ_n は(2)式の形を仮定 (図2bは Ohtsuki & Toyama (2005)¹⁰⁾ の図を改変)。

存する。リング粒子同士の衝突に相当するような環境での氷粒子の反発係数を実験的に求めようとする試みは、これまでにいくつかなされてきた。図2の計算に相当する土星Bリング付近での粒子の公転速度はおよそ $2 \times 10^6 \text{ cm s}^{-1}$ であり、これに離心率の典型的な値として 5×10^{-8} を掛けると、リング粒子のランダム速度(円軌道からのずれの速度成分)として約 0.1 cm s^{-1} を得る。これがリング粒子同士の典型的な衝突速度と考えられる。Bridges et al. (1984)³⁾ は、円盤型の振り子に氷粒子を取り付けた装置を用いてそのような低速衝突を実現し、反発係数 ϵ_n の衝突速度依存性を調べた。彼らの実験結果は次のような形にまとめることができる(図3)：

$$\epsilon_n(v_n) = \min\{0.32(v_n/1 \text{ cm s}^{-1})^{-0.234}, 1\} \quad (2)$$

すなわち、十分低速な衝突では $\epsilon_n \approx 1$ の弾性的な衝突になるのに対し、衝突速度が大きくと非弾性的($\epsilon_n \ll 1$)となる。リング粒子の衝突速度は上に述べたランダム速度程度と考えてよいので、彼らの結果に基くと、離心率が小さいときには衝突速度も小さく $\epsilon_n \approx 1$ となるためランダム速度を大きくする方向に働き、離心率の増加に伴って衝突速度が大きくなると $\epsilon_n \ll 1$ となってランダム速度の増加が抑えられる。このように、実験結果はリング粒子集団速度進化の平衡状態の存在と矛盾しない。

Bridges et al. (1984)³⁾ の実験はリング粒子衝突に相当する状況で反発係数を求めた最初の研究であったため、リングのN体シミュレーションなど理論研究では今なお彼らの結果が幅広く用いられている。しかし、同じグループによって後に行なわれた、さらに詳しい実験によると、反発係数は氷粒子の表面状態にも大きく依存する⁴⁾。それによると、Bridges et al.³⁾ の実験で用いられた氷粒子の表面には霜が多量に付着しており、霜が少ない場合に

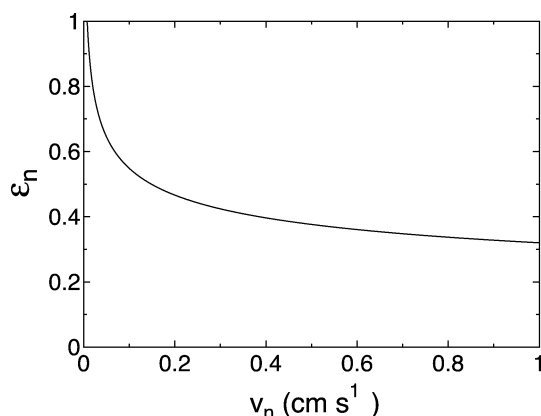


図3：氷粒子の衝突実験³⁾に基づく反発係数 ϵ_n の衝突速度依存性(2式)をプロットしたもの。

は、反発係数はより大きくなる。しかし衝突速度が増加するにつれて反発係数が小さくなるという結論には変わりはない。一方、円盤振り子ではなく、氷粒子を氷板の上に自由落下させ反発の様子を高速度ビデオカメラ等を使って調べるという、より直接的な方法を用いた実験も、比嘉、荒川、前野により北大低温研で行なわれた^{5),6)}。彼らはより衝突速度の大きい領域での振舞いも調べた。上にも述べたように低速衝突では氷粒子は弾性的に振舞うが、衝突速度が大きくなると破壊が起きようになる。彼らは衝突速度によって反発係数の速度依存性が変わることを、反発係数の振舞が変わる臨界衝突速度の粒子サイズ依存性は氷の衝突破壊強度を用いて理解できること、等を明らかにした。リングの力学進化に関する理論研究では、通常、粒子の破壊の効果は無視されている。しかし、探査機カッシーニによる観測でも明らかになったように土星のまわりの小衛星の密度がかなり小さいことから、リング粒子もより小さな粒子が弱い重力で集まった、空隙率の高い壊れやすい集合体である可能性もある。今後、破壊の効果も詳しく考慮した研究が必要である。

また、以上の実験は正面衝突の場合のみを調べていたが、斜め衝突の場合の速度変化を調べた実験もある⁷⁾。この場合、粒子表面の摩擦による速度変化の効果が加わる。図2bには、 ϵ_t を変えた場合の粒子離心率進化を調べた計算結果を示している。 ϵ_t が1より小さくなり摩擦の効果が加わると離心率はやや小さくなるが、表面摩擦がランダム速度進化に及ぼす影響は小さいことがわかる。一方、粒子表面に摩擦があると衝突時に粒子の自転を引き起こす。図4は、粒子自転速度のサイズ依存性を数値シ

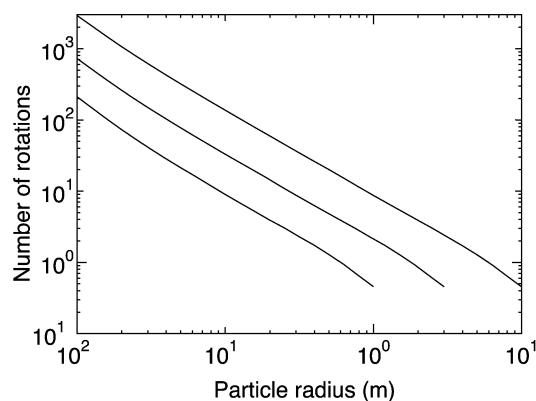


図4：リング粒子自転速度のサイズ依存性を数値シミュレーションにより求めたもの。粒子サイズ分布($n(r) \propto r^{-3}$)を持つ粒子集団で衝突・重力散乱を繰り返した結果得られた平衡状態において、一公転あたりの粒子自転数を粒子半径の関数として表わしたもの。最大粒子サイズを三通り(1 m, 3 m, 10 m)に変えた場合の結果を示している(Ohtsuki (2006)⁹⁾の図を改変)。

ミュレーションにより調べたものである^{8),9)}。粒子がサイズ分布を持っていると仮定し、表面摩擦を考慮した場合の数値計算結果に基づいて、一公転間のリング粒子の自転数を粒子サイズの関数として表わしている。これによると、大きな粒子はゆっくりと自転しているのに対し、小さな粒子は高速で自転し、半径1 cm程度の粒子では一公転あたりに数百～数千回も自転することがわかる⁸⁾⁻¹¹⁾。このような粒子自転は、地上の望遠鏡や探査機による土星リングの熱輻射の観測結果を解釈する際に重要となる。土星リング粒子が受ける主な熱源は太陽光である。粒子が土星の周りを一公転する間にほとんど自転していないと粒子表面のうち太陽に向いた面だけが温められるのに対し、粒子が高速で自転し自転軸の方向がランダムであれば粒子表面は等温であると考えてよい。土星リングの熱輻射のモデルに関する従来の研究では、上に述べたような粒子自転のサイズ依存性は正しく考慮されていなかった。これらを考慮したモデル計算を実行して観測と比較することにより、リング粒子のサイズや熱伝導度、さらには運動状態に対しても制約を得ることができる^{12),13)}。

粒子同士の非弾性衝突は粒子集積過程においても重要となる。惑星は微惑星と呼ばれる小天体が、太陽の周りを公転しながら衝突合体を繰り返した結果、形成されたと考えられている。土星の周りを公転しながら衝突を繰り返すリング粒子集団もこれと似たような系であるが、大きく違うのが中心天体重力に対する、衝突する二天体の相互重力の強さである。より厳密に言うと、中心天体の重力に比べて衝突する二天体の相互重力が支配的となる“重力圏”（ヒル圏と呼ばれる）の大きさと、二天体の物理半径の和の大小が重要になる^{14),15)}。前者はヒル半径と呼ばれ、中心天体の質量 M_c 、粒子の軌道長半径 a 、質量 (m_1, m_2) を使って次のように書ける。

$$R_H = a \left(\frac{m_1 + m_2}{3M_c} \right)^{1/3} \quad (3)$$

このとき、粒子の密度を ρ 、さらに $\mu \equiv m_1/m_2$ とすると、二粒子の物理半径の和 ($R_1 + R_2$) とヒル半径の比は次式で与えられる。

$$\frac{R_1 + R_2}{R_H} = \left(\frac{9M_c}{4\pi\rho} \right)^{1/3} a^{-1} \frac{1 + \mu^{1/3}}{(1 + \mu)^{1/3}} \quad (4)$$

太陽の周りで地球軌道付近を公転する微惑星の場合、 $(R_1 + R_2)/R_H \sim 0.005$ となる。また、木星のガリレオ衛星や土星のタイタンなど、規則衛星と呼ばれる大きな衛星の軌道付近では、この値は0.1程度となり、この場合もヒル半径の方が粒子の物理半径に比べて十分大きい（図5c）¹⁴⁾。この場合、微惑星（あるいは衛星を作る材料であ

る“微衛星”）同士の衝突は、衝突する二体の相互重力ポテンシャルの深いところで起きるため、十分なエネルギー散逸があれば衝突した微惑星は相互重力圏内にとどまり合体する。一方、惑星の極めて近傍では粒子の物理半径がヒル半径を上回るため、たとえ非弾性衝突で運動エネルギーが失われても衝突した粒子が相互重力で合体することはできない（図5a）。その間の領域では、大きな粒子と小さな粒子というように質量差のある粒子が衝突した場合には合体可能であるが、似たような質量の粒子同士は合体できないという領域がある（図5b）。土星リングの場合、土星近傍からC、B、Aリングと場所を移動するにつれて、図5aから図5bの状況へと変わる^{14),15)}。

図5bのような状況での粒子衝突を軌道計算によって調べた例を図6に示す。点線は R_H を単位とした場合の粒子半径の大きさを表わす。二つ円があるのは $(R_1 + R_2)/R_H$ を変えた場合、即ち（4）式で土星からの距離 a を変えた場合の結果である。点線の半径の大きい方（即ち R_H が相対的に小さい方）はより惑星に近い軌道の場合に相当し、点線の半径の小さい方は、より遠方の軌道に相当する。同じ初期条件の軌道を計算したものであるが、半径の大きい方（惑星に近い軌道の場合）は衝突後跳ね返って再び離れていくのに対し、半径の小さい場合（惑星から遠い場合）は、非弾性衝突によってエネルギーを失った後、相互重力によってヒル圏内に捕獲されている。このように惑星から遠い方が、粒子の集積が起きやすいことがわかる。これは二体衝突の例であるが、実際の土星リングでは粒子空間密度が高く、より密集した状態にある。この場合、多数の粒子が重力で集まりあってアグリゲイトを形成するようになる。そのようなアグリゲイト形成も、惑星から遠方で、かつ粒子衝突の際の反

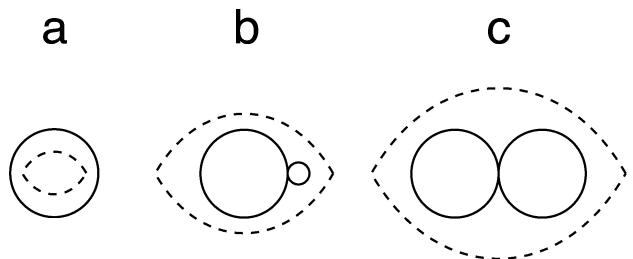


図5：ヒル圏（粒子の重力圏；破線）の大きさと粒子半径の関係の模式図。中心天体のごく近傍では中心天体重力の影響が強いためヒル圏は粒子半径より小さくなり、粒子同士の重力による合体は起きない(a)。中心天体より十分遠方ではヒル圏が粒子半径に比べて十分大きくなるため、衝突によって運動エネルギーが十分失われれば、衝突した二天体は相互重力により合体する(c)。その中間的領域(b)では、衝突する二天体に質量差がある場合にのみ合体が可能となる^{14),15)}。

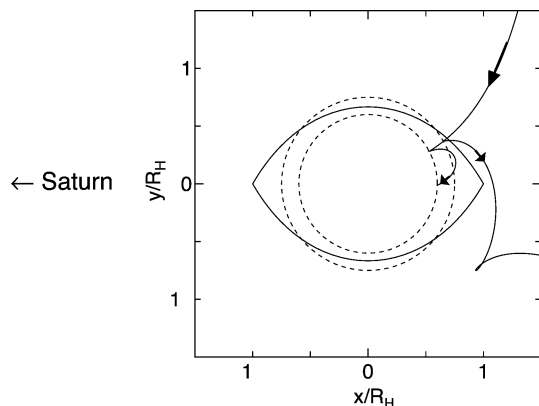


図6：リング粒子同士の衝突の軌道計算例。一方の粒子が原点に静止して見える回転座標系での図であり、土星は左側遠方にある。ヒル圏（レモン型の領域）のx方向のサイズを R_H とする。点線は R_H を単位とした場合の粒子半径の大きさを表わす。二つ円があるのは R_H を変えた場合（即ち土星からの距離を変えた場合）の結果である。点線の半径の小さい方（即ち R_H の大きい方）は土星からより遠方に粒子がある場合に相当し、そのような場合の方が、粒子は合体しやすい（Ohtsuki (1993)¹⁴⁾の図を改変）。

発係数の小さいときに容易に起きることが、数値シミュレーションによって明らかにされている^{16),17)}。

3. 吸着力の影響

以上では粒子間重力による集積を考えたが、非重力的な吸着力はリングの力学進化に影響を及ぼすのであろうか？ 惑星リングの環境下で粒子間の吸着力がどのようなものであり、それがどのような影響を及ぼすかについては、実際のリング粒子の表面状態がどのようなものか明らかでないため、詳しいことはわかっていない。しかし、これに関するいくつかの実験及び理論的研究がなされている。

前述した円盤振り子を用いて氷粒子の反発係数を求めたグループは、同様の装置を用いて衝突後の粒子と氷板の合体ならびに吸着力の測定も行なっている¹⁸⁾。衝突後、氷粒子が氷板に付着した場合について、それを引き離すのに必要な力を測定することにより、吸着力を求めるのである。実験により、次のような結果が得られた。まず、衝突速度一定で衝突を繰り返したとき、衝突回数を増やすにつれて、吸着力は小さくなる。衝突速度が約 0.1 cm s^{-1} のときに吸着力は最大となる一方、 1 cm s^{-1} 程度以上になると吸着は起きない。さらに、いったん 1 cm s^{-1} 程度以上の速度で衝突させた後は、同じ氷粒子と氷板の組み合わせについて低速で衝突させても吸着は起きない。これらの実験結果を説明するために Hatzes et al.¹⁸⁾は、吸着が起きるのは氷表面の霜による不規則微細構造が原

因であると考えた。ある程度の衝突速度（ $\sim 0.1 \text{ cm s}^{-1}$ ）のとき、衝突によりこれら表面構造同士がうまくからみあって（マジックテープがくっつく時のように）最大の吸着力を生じる。一方、いったん 1 cm s^{-1} 程度以上の高速で衝突するとそのような霜構造が圧縮されてならされてしまうため、その後、低速で衝突させても吸着しない、というのである。

Albers & Spahn (2006)¹⁹⁾は吸着力がリング粒子の集積に及ぼす影響について、簡単な理論モデルに基いて調べた。彼らは衝突する粒子の吸着を粘弾性モデルを用いて記述し、吸着を考慮すると重力だけを考慮した場合に比べて粒子の集積が起きやすくなることを示している。しかし実際のリング粒子間の吸着力がこの論文で仮定されているモデルで記述できるのかどうか、明らかでない。

以上では吸着力が衝突した二粒子の合体に及ぼす影響について述べたが、粒子間の吸着力がリングの構造形成の原因になりうるという指摘もある。土星リングには様々なスケールの構造があり、その中にはリングと衛星の相互作用で説明できるものも多くある。しかし、まだ成因が明らかでない構造もあり、Bリング中に見られる不規則構造もそのひとつである。土星リングの中で粒子数密度が最も高い領域であるBリングには多数の円環状の構造があるが、密度の濃淡の変化の動径方向の波長は衛星軌道とは関連付けることはできず、またそのスケールも様々であり、不規則構造と呼ばれる所以である。大規模な構造の典型的波長としては 100 km という値がボイジャーの観測から得られている²⁰⁾。一方、短い波長の構造としてはカッシーニの詳細な観測により、 100 m 程度の波長を持った動径方向の構造が多数見つかった²¹⁾。

このような不規則構造は、リング粒子集団における何らかの不安定が原因で形成されるというのが有力な考えである。このうち、粒子数密度の高いリング中に励起された密度揺らぎが、粒子衝突・重力散乱に起因するリングの粘性と粒子の軌道運動の効果により振動しながら増幅されるという粘性過安定（viscous overstability）という現象が、Bリング構造の成因として有力視されている。実際、粒子数密度の高いリングに対するN体シミュレーションにより、そのような過程による構造形成の例が示されている^{22)–24)}（図7）。それに対し Tremaine (2003)²⁵⁾は、吸着力を持った粒子が集まって円環状の塊を作った結果として、上のような不規則構造が形成される可能性を指摘している。しかし吸着力を考慮したリングの構造形成過程はまだ詳しく調べられていない。今後、実際の土星リングの環境で粒子間の吸着力がどのようなものであるか実験等によって明らかにすることが必要である。

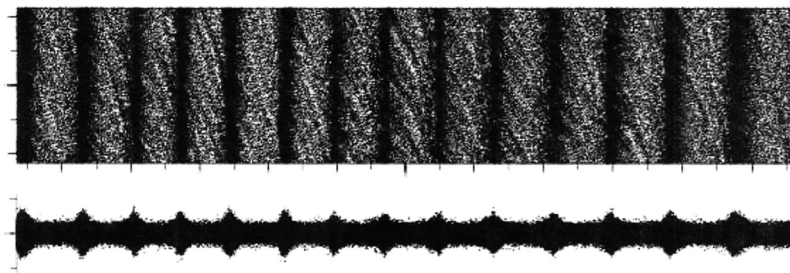


図7：リングにおける粘性過安定（viscous overstability）による構造形成のN体シミュレーションの例。回転座標系を採用しており、土星は左側遠方にある。図の横方向が動径方向、縦方向が軌道運動の方向に相当する。図に示した領域の大きさは、縦が約200 m、横が約1100 mである。上図はリングを上から見た図、下図は横から見た図である（Daisaka et al., 投稿準備中²⁴⁾）。

う。そして、吸着力の効果も重要であるということになれば、それを考慮したN体シミュレーションなどにより、リング進化ならびに構造形成への影響を明らかにしていく必要がある。

4. 隕石衝突とリングの形成・組成進化

巨大惑星の衛星・リング系の形成進化において、隕石の衝突は重要な役割を果たしたと考えられている。たとえば木星リングのうちメイン・リングと呼ばれる最も粒子空間密度の高い部分は、二つの小衛星、アドラステアとメティスの軌道にほぼ一致する。このためメイン・リングはこれらの小衛星に、木星系外から飛来した隕石が衝突してダストをまき散らした結果、形成されたのだと考えられている²⁶⁾。土星²⁷⁾や天王星²⁸⁾でも、小衛星から生成された微粒子が原因と考えられるダスト・リングが観測されている。冥王星でも大きな衛星シャロンの他に、最近、小さな衛星二つがハッブル宇宙望遠鏡の観測により発見された²⁹⁾。この小衛星に隕石が衝突すればダスト・リングを生成する可能性が高いため、現在冥王星に向かいつつある探査機ニュー・ホライズンズが冥王星リングを発見することも期待されている。

一方、前述のように、土星の主要リングのような質量の大きいリングは、衛星形成の名残あるいは氷衛星の大規模破壊といった過程が関係していると考えられるが、そのような粒子空間密度の高いリングに隕石が衝突すると素通りせずに隕石が破壊され、破片はリングに交じり合う。土星系外からやってきた隕石の組成がリング粒子のもともとの組成と異なる場合、このような隕石衝突がリングの組成変化を引き起こす可能性がある。Cuzzi & Estrada (1998)³⁰⁾は、土星リングの光学的厚さ（粒子空間密度）が土星からの距離によって変化の様子と、リングの組成（アルベド、色などから推測）の変化に相関があることに注目し、隕石衝突によるリング組成進化モ

デルを考えた。すなわち、ボイジャーの観測によると、土星リングのうち光学的厚さの薄い領域（Cリングならびにカッシーニの間隙）の方が、光学的厚さの濃い領域（A及びBリング）に比べて、暗い、炭素質のような物質を多く含むように見える。彼らは、もともと純粋なH₂O氷に近い組成であった土星リングが、不純物を多く含む隕石の衝突により汚染されたと考えた。光学的厚さの薄い領域の方が、汚染の影響を受けやすいので、観測されているような組成分布になるというのである。しかし彼らのモデルは様々な単純化をしており、さらに詳しい検討が必要である。例えば、汚染が動径方向に伝播していく効果を正確に見積もるためには、リング粒子同士の衝突時の組成混合の効果³¹⁾（図8）や、粒子同士の衝突や相

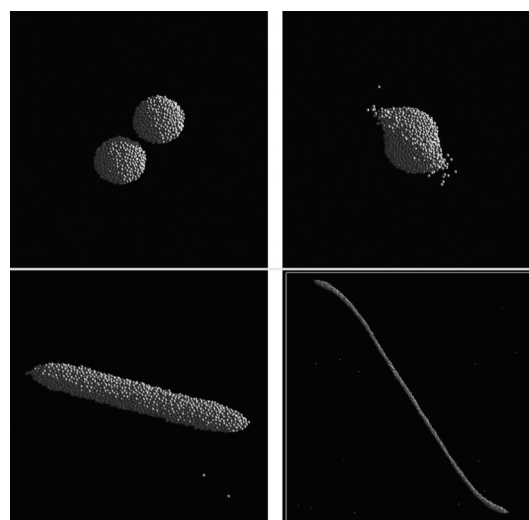


図8：土星重力場におけるリング粒子同士の衝突過程の数値シミュレーション例。リング粒子は小さな粒子が重力で集まったアグリゲイトであると仮定している。シミュレーション方法については、同様の方法を小惑星衝突に適用した Takeda & Ohtsuki (2007)³²⁾を参照のこと。二つのアグリゲイトがパネル上方と下方から近づいてきて（左上）衝突し（右上）、惑星潮汐力のために引き伸ばされる（左下）。最後の図（右下）ではスケールが異なる（Takeda & Ohtsuki, 投稿準備中³¹⁾）。

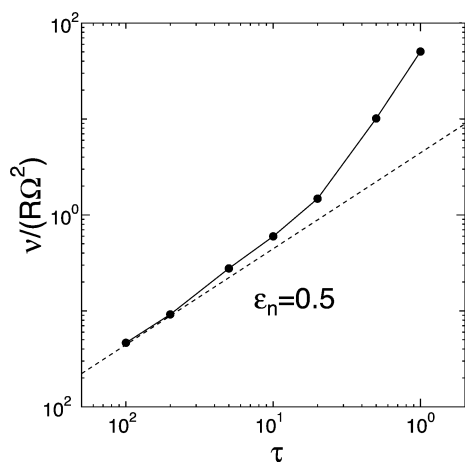


図9：数値計算によって求めた土星リングの粘性 v を、リングの光学的厚さ τ (粒子面数密度に比例) の関数として表わしたもの ($\epsilon_n=0.5$, $\epsilon_t=1$; R は粒子半径, Ω は公転角速度)。実線はN体シミュレーションの結果。点線は粒子同士の二体相互作用 (衝突及び重力散乱) の結果から得られる粘性。 τ が小さい時には個々の二体相互作用の積み重ねで角運動量が輸送されるため両者は一致する。 τ が大きくなると粒子同士が集まって構造を作るなどする多体効果が重要になり^{23),33),34)}, 粘性は二体相互作用の積み重ねから予想される値よりもはるかに大きくなる (Ohtsuki et al., 投稿準備中³⁵⁾)。

互重力作用によるリングの粘性^{23),33)–35)} (図9) を考慮した動径拡散も考慮する必要がある。これらを考慮した詳しい組成進化の研究は、まだなされていない。

5. まとめ

以上、土星リング粒子の主成分である氷粒子の反発係数や吸着力がリングの力学進化に及ぼす影響、そして隕石衝突によるリング組成進化の可能性について簡単に述べてきた。最初に述べたように衛星・リング系は、巨大惑星形成過程の自然な副産物として生成される、普遍的な存在と考えられる。一方で、その姿の多様性は、惑星及び衛星・リング系の形成の途上で起きた複数の過程を反映していると思われる。従って衛星・リング系の組成進化も含めた形成進化過程を明らかにしていくことは、巨大惑星形成過程に制約を与えることにもつながるであろう。巨大惑星の衛星・リング系は大型望遠鏡や探査機などによって、これから次々と新しい知見が得られることが期待される。観測、実験、理論研究など様々な手法を統合して、これらの研究を今後さらに進めていくことが必要である。

謝辞

本稿で紹介した研究内容のうち、筆者らによるN体シミュレーションの多くは、国立天文台の GRAPE システ

ムを用いて行なわれた。

参考文献

- 1) P. Goldreich, & S. Tremaine, *Icarus* **34** (1978) p. 227.
- 2) K. Ohtsuki, *Icarus* **137** (1999) p.152.
- 3) F. Bridges, A. P. Hatzes, & D. N. C. Lin, *Nature* **309** (1984) p.333.
- 4) A. P. Hatzes, F. Bridges, & D. N. C. Lin, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **213** (1988) p.1091.
- 5) M. Higa, M. Arakawa, & N. Maeno, *Planet. Space Sci.* **44** (1996) p.917.
- 6) M. Higa, M. Arakawa, & N. Maeno, *Icarus* **133** (1998) p.310.
- 7) K. D. Supulver, F. G. Bridges, & D. N. C. Lin, *Icarus* **113** (1995) p.188.
- 8) K. Ohtsuki, *Astrophys. J.* **626** (2005) p.L61.
- 9) K. Ohtsuki, *Icarus* **183** (2006) p.384.
- 10) K. Ohtsuki, & D. Toyama, *Astron. J.* **130** (2005) p. 1302.
- 11) R. Morishima, & H. Salo, *Icarus* **181** (2006) p.272.
- 12) R. Morishima, H. Salo, & K. Ohtsuki, K., *Icarus* (2007) Submitted.
- 13) R. Morishima, H. Salo, K. Ohtsuki, K., L. Spilker, & N. Altobelli, *Icarus* (2007) Submitted.
- 14) K. Ohtsuki, *Icarus* **106** (1993) p.228.
- 15) K. Ohtsuki, *Astron. J.* (2007) Submitted.
- 16) H. Salo, *Icarus* **117** (1995) p.287.
- 17) H. Daisaka, & S. Ida, *Earth Planets Space* **51** (1999) p.1195.
- 18) A. P. Hatzes, F. Bridges, D. N. C. Lin, & S. Sachtleben, *Icarus* **89** (1991) p.113.
- 19) N. Albers, & F. Spahn, *Icarus* **181** (2006) p.292.
- 20) L. J. Horn, & J. N. Cuzzi, *Icarus* **119** (1996) p.285.
- 21) J. E. Colwell, L. W. Esposito, M. Sremcevic, G. R. Stewart, & W. E. McClintock, *Icarus* **190** (2007) p. 127.
- 22) H. Salo, J. Schmidt, & F. Spahn, *Icarus* **153** (2001) p.295.
- 23) H. Daisaka, H. Tanaka, & S. Ida, *Icarus* **154** (2001) p.296.
- 24) H. Daisaka, et al., in preparation.
- 25) S. Tremaine, *Astron. J.* **125** (2003) p.894.
- 26) J. A. Burns, D. P. Simonelli, M. R. Showalter, D.

- P. Hamilton, C. D. Porco, H. Throop, & L. W. Esposito, Jupiter: The planet, satellites and magnetosphere, ed. F. Bagenal, T. E. Dowling, W. B. McKinnon, Cambridge, 2004, p.241.
- 27) M. M. Hedman, J. A. Burns, M. S. Tiscareno, C. C. Porco, G. H. Jones, E. Roussos, N. Krupp, C. Panicas, & S. Kempf, *Science* **317** (2007) p.653.
- 28) M. R. Showalter, & J. J. Lissauer, *Science* **311** (2006) p.973.
- 29) H. A. Weaver, S. A. Stern, M. J. Mutchler, A. J. Steffl, M. W. Buie, W. J. Merline, J. R. Spencer, E. F. Young, & L. A. Young, *Nature* **439** (2006) p.943.
- 30) J. N. Cuzzi, & P. R. Estrada, *Icarus* **132** (1998) p.1.
- 31) T. Takeda, & K. Ohtsuki, in preparation.
- 32) T. Takeda, & K. Ohtsuki, *Icarus* **189** (2007) p.256.
- 33) T. Takeda, & S. Ida, *Astrophys. J.* **560** (2001) p.514.
- 34) H. Tanaka, K. Ohtsuki, & H. Daisaka, *Icarus* **161** (2003) p.144.
- 35) K. Ohtsuki, H. Daisaka, & H. Tanaka, in preparation.

(2007 年 11 月 30 日 改訂受付)

Planetary Rings: Particle Properties and Evolution

Keiji Ohtsuki

Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado, 392 UCB, Boulder, Colorado 80309-0392, U. S. A.

Hiroshi Daisaka

Graduate School of Commerce and Management, Hitotsubashi University, 2-1 Naka, Kunitachi-shi, Tokyo 186-8601, Japan

Takaaki Takeda

National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka-shi, Tokyo 181-8588, Japan

abstract:

All the four giant planets in our Solar System have rings, thus ring-satellite systems seem to be a natural byproduct of giant planet formation process. Therefore, studies on the origin and evolution of ring-satellite systems would constrain the formation processes of giant planets. Saturn's rings are mainly composed of water ice, and particles in the main rings have sizes between centimeters to several meters. We first describe effects of normal and tangential coefficients of restitution of icy ring particles on dynamical evolution of planetary rings. Restitution coefficients for icy particles for low-velocity impacts relevant to Saturn's rings have been measured by laboratory impact experiments. Restitution coefficients influence random velocity evolution of ring particles, their rotational states, and accretional evolution. We will also discuss possible effects of adhesive forces between ring particles on accretional evolution and structure formation in rings, although it is not clear at present whether non-gravitational cohesive forces would play a major role in the dynamics of planetary rings. Finally, we will discuss effects of meteoroid impacts on the creation and evolution of planetary rings. Dilute dust rings including the Jovian rings are created by meteoroid impacts on small satellites. Such impacts would also cause compositional evolution of Saturn's rings. Further theoretical as well as observational studies of compositional evolution of Saturn's rings would provide a unique constraint on the origin and evolution of the rings.

大槻圭史

コロラド大学大気宇宙物理学研究所

392 UCB, Boulder, Colorado 80309-0392, U. S. A.

Tel: 1-81-303-492-0260 Fax: 1-303-492-6946

Email: ohtsuki@lasp.colorado.edu

台坂 博

〒186-8601 東京都国立市中 2-1

一橋大学大学院商学研究科

Email: hiroschi.daisaka@srv.cc.hit-u.ac.jp

武田隆顕

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

国立天文台

Email: takedatk@cfca.jp