

|||| 特集：惑星科学×微小重力（惑星科学における微小重力の役割）||||  
(解説)

## 小惑星表面の浮遊ダストの観測可能性について

千秋 博紀

## Levitation Dust Around Asteroids: Numerical Model and Near Future Observation

Hiroki SENSU

## Abstract

This paper reviews studies on dust motion above the surface of asteroids. Photoelectron emission effect makes asteroidal surface charged-up positively resulting in a thin electron sheath above the surface. At the same time, a dust grain on or above the surface is also charged-up positively or negatively due to the balance between photoelectron emission and injection of solar wind and electron sheath electron. Thus motion of dusts above the surface is affected not only by gravitational acceleration but also electric force from the electric field above the surface. Under some special condition, a dust levitates above surface for a longtime, which might result in characteristic morphology such as "pond" on Eros. If dust size is smaller than a threshold value, the dust can escape from the gravity of the asteroid due to electric repulsion. Such an electric escape can be one of source mechanisms of interplanetary dust grains.

**Keyword(s):** dust, asteroid, horizontal glow, photoelectron emission, electron sheath

## 1. 惑星間空間にはダストが飛んでいる

太陽の重力圏の中を運動しているのは惑星、準惑星、小天体とそれらの衛星だけではない。惑星間空間にはダストが飛び交っている。ダストは体積に比べて表面積が大きいため、その運動は太陽重力のみならず、太陽光圧や静電力など、表面力や断面積に依存する力からの影響も受ける。そのためダストの軌道の進化の様子は惑星の軌道の進化とは異なる。

探査機が地球を飛び出すよりもずっと前から、地球の公転面上にはダストが存在している事が知られていた。ダストは太陽光を反射するため、良く澄んだ夜空では淡い光の帯として観測される。この光の帯を地球から見ると、太陽を中心として、見かけ上の太陽の軌道に沿って存在している。このため、この光の帯は「黄道光」と呼ばれている。黄道光のスペクトルは太陽光と良く似ていることから、光を散乱しているダストのサイズは、 $1\mu\text{m}$ 以上と考えられている。

探査機が地球を飛び出す事に成功するようになると、黄道光の起源となるようなダストが探査機に衝突して影響を与えるのではないか、と言う事が心配され始めた。そのため黎明期の探査機には、ダストの衝突を検知する装置が搭載され、惑星間空間のダスト密度の直接観測が行われた。初期の探査機に搭載された検知器では、信号

と雑音の区別がうまくできなかつたため、 $1\mu\text{m}$ よりも大きなダストが  $1\text{m}^2$  当たり毎秒 100 個以上も衝突しているのではないかと考えられていた事もあったようである。しかし現在では、 $0.1\mu\text{m}$ よりも大きなダストの衝突は、 $1\text{m}^2$  当たり 1 時間に 1 回以下しか起きないことがわかつてきたり<sup>1)</sup>。余談だが、衝突頻度を観測するために、内蔵されたマイクでダストの衝突による音（機体の振動）を観測した NASA の衛星エクスプローラー 8 号は、打ち上げから 52 年後の今年（2012 年）、地球大気圏に突入したそうである。

ダストによる衝突の頻度は、探査機にとってあまり脅威ではない事がわかつたが、それでも衝突が起きないわけではない。例えばスペースシャトルによって回収された人工衛星の表面には、ダストの衝突によって作られたマイクロクレーターが観察される。また、アポロ計画などで持ち帰られた月のサンプルは、探査機よりも長時間宇宙空間に曝されていたため、表面には無数のマイクロクレーターが空いている事が知られている。これらのマイクロクレーターの密度から、地球や月へのダストの流入フラックスが求められているが、その値は研究者によってまちまちで、まだ数桁の開きがある。なお、このようなクレーターは隕石の分析では発見する事ができない。と言うのも隕石は、地球の大気に突入する際に前面の大気を強烈に圧縮加熱し、その結果、圧縮された大気

からの輻射熱で表面が焼けてしまうからだ。

ところで、このようなダストの起源はどこにあるのだろう。黄道光を作り出すような、 $1\mu\text{m}$  から数 cm のサイズのダストは、ポインティングロバートソン効果などの影響で、およそ 1 億年で太陽に落下してしまう。つまり、黄道光を維持するためには、定的にダストが供給されている必要がある。

ダストの供給源としてまず思いつくのは彗星だろう。氷を主成分とする彗星は、太陽に近づくたびにその一部が昇華する。その際にダストをまき散らし、それが彗星の「尾」として観測される（正確には彗星の尾にはダストテイルとイオンテイルがあるが、ここでは詳細は省略する）。彗星がまき散らしたダストは、地球上からは流星群として観測される事が知られている。流星群は、彗星が軌道上にまき散らしたダストの中に、地球が突っ込んでゆくために生じる現象だ。流れ星として観測される粒子の大きさは、 $0.1\text{mm}$  から数 cm 程度と見積もられており、黄道光ダストとも整合的である。

次にダストの起源として挙げられるのは、小天体同士の衝突である。惑星間空間は広いので天体同士の衝突はめったに起きないが、衝突が起きると多量の破片が放出される。大きな天体であれば重力が強いため、衝突破片の多くは再び天体表面に落下するが、小天体同士が衝突した場合には、放出された破片は重力を振り切って逃げだす事ができる。衝突によって放出された破片も太陽の周りを回るような軌道を持つが、大きな離心率や軌道傾斜角を持つためやがて他の天体と衝突し、さらに次の破片を作り出す原因となる<sup>2)</sup>。

著者らは、惑星間ダストの起源としてはもう一つ、小天体表面から静電力によるダストの放出があると考えている<sup>3)</sup>。これについては後で述べる。

## 2. 小惑星の進化とダスト

ダストは惑星間空間だけでなく、天体の表面や上空（ごく近傍）にも見られる。例えば月の表面はレゴリスと呼ばれる細粒の岩石に数 cm から数十 m の厚さで覆われている。アポロ計画などで回収された月試料の分析によれば、月レゴリスは天体衝突などによって砕かれた岩石の破片や、衝突や火成活動で融けた岩石が急冷して作られたガラスから成っており、平均的な大きさは  $70\mu\text{m}$  程度である。衝突起源のダストは、表面が摩耗しておらず、角ばった形をしている。このため、有人探査をする際に宇宙飛行士の健康被害が心配されている。事実、アポロ計画の際にはエアロック内で宇宙服を脱いだ際に宇宙服に付着していたレゴリスを吸い込んでしまい、花粉症に似た症状が発症した、という報告がある。

月面上で、ダストに関連する現象として、Horizontal glow と呼ばれる現象が知られている<sup>4-6)</sup>。月面上に置かれたカメラがとらえた現象で、日没後、太陽の方向に太

陽の光を散乱する層が見られるというものである。これがもし、ダストによる光の散乱だとすると、ダスト層の高さは地面から 30cm 程度、ダストの特徴的なサイズは  $3\mu\text{m}$  と見積もられる。同様の現象は、周回機からも観測されている。ただしこちらはダスト層の高度は 100km、ダストの特徴的なサイズは  $0.1\mu\text{m}$  と見積もられている<sup>7)</sup>。月の Horizontal glow を起こすためのダスト浮遊のメカニズムはまだよくわかっていないが、表面付近の電場によって起きているというモデルが有力である。このモデルについては次の章で解説する。

月よりももっとずっと小さな天体でもダストは発見されている。小惑星エロスは、NEAR シューメーカーによって詳細な観測が行われた<sup>8-10)</sup>。小惑星エロスの表面に残されたクレーターは、月に比べると非常に少ない。重力が小さい天体上でクレーターが失われているという事は、水平方向に物質の移動が行われている事を示唆している。また、直接降り立ってサイズを測ったわけではないが、小惑星エロスには明らかに滑らかな地域がある。さらに良く見ると、クレーターなどの大きなくぼみの底が、水溜りのように非常に滑らかになっている地形が見られる<sup>9)</sup>。この地形は“pond”と呼ばれ、細かなダストが降り積もって作られたものと考えられている。これらの証拠から、小惑星エロスの表面にはダストが存在し、それらが天体表層で移動する事で特徴的な地形を作り出しているようだ。天体表面での物質移動の原因としては、他の天体との衝突によって引き起こされる星震（地球で言うところの地震）が挙げられる。しかし星震はクレーターのような大きな地形を崩して平らにするには有効だが、“pond”のような滑らかな地形をつくるかどうかについては疑わしい。最近では、表面付近の電場が原因で、細粒のダストが優先的に水平方向に運ばれる、というモデルが提案されている。このモデルについては次の章で解説する。

日本の小惑星探査機「はやぶさ」が訪れた小天体イトカワには、エロスの「pond」のような平滑な地形は見られなかった<sup>11)</sup>。ミューゼズの海と名付けられた、イトカワの中では滑らかな地域があるが、最も接近して撮影した画像（解像度 6mm）を見ると、解像度以下の粒子が卓越して滑らかになっているというよりは、解像度よりは大きな無数の粒子が地面を覆っているように見える<sup>12)</sup>。探査の前から、イトカワのように小さな天体の場合には、重力が小さいため天体衝突やダストの衝突によって作られたダストを維持できないのではないか、と言われていた。近接画像は、小天体にはダストが無い、と言う事を証明したように思われた。

しかし、「はやぶさ」が地球に送り届けたサンプル室を開けてみると、そこには  $200\mu\text{m}$  以下のダストが入っていた。「はやぶさ」のサンプル回収装置は弾丸の発射に失敗したため、これらのダストがどのようにしてサンプル室に「混入」したのかについては良くわかっていないが、

成分分析の結果は、これらの粒子がイトカワ起源である事を示している<sup>13)</sup>。この事から、イトカワの表面、又は表面付近には少なくとも、200μm 以下のダストが存在する領域がある事が明らかになった。

ところで、「はやぶさ」が回収した試料の分析から興味深い結果がわかった。大気を持たない天体の表面には、太陽風を起源とする希ガスや酸素などのイオンが打ち込まれる。同時に、太陽系外に起源を持つ、銀河宇宙線も打ち込まれる。太陽風と銀河宇宙線とではエネルギーが大きく異なるため、打ちこまれる深さが異なる。このため、試料に打ちこまれた太陽風起源の元素と宇宙線起源の元素の量をそれぞれ計測し、比較する事で、その試料がどれくらいの深さにいたのかを見積もることができる。しかし「はやぶさ」回収試料を分析しても、宇宙線起源の元素は検出されなかったのだ<sup>14)</sup>。この事は、この試料が表層 1m 以内にいた時間は 800 万年以下であった事を意味している。イトカワは、表層からどんどん物質が失われているのかもしれない。物質が失われるメカニズムとしては天体同士の衝突が有力だが、イトカワの表面を見る限りクレーターは多くない。そこで筆者らは、①マイクロインパクトによって表面にある岩石からダストが作られる②イトカワ表面に作られた電場の影響でダストが天体から失われる、というプロセスが有力なのではないかと考えている。電場の影響でダストが失われるメカニズムについては次の章で解説する。

### 3. 浮遊ダストの研究

大気を持たない天体の表面が太陽光に含まれる極端紫外線を受けると、表面物質から電子が放出される。これを光電効果と呼び、放出された電子を光電子と呼ぶ。光電効果によって天体の表面物質は正に帯電し、一方光電子は天体上空に薄い電子の層を作る。光電子層と天体表面の間には、上向きの電場が形成される。

光電子層の電子密度分布や電場の構造は、光電子のフラックスとエネルギー分布によって決められる。1960 年代から 70 年代の初頭にかけて、人工衛星が太陽光を浴びると帯電する事が問題となり、光電効果やそれに伴って作られる光電子層の構造についての詳細な解析的研究がなされてきた<sup>15,16)</sup>。また、人工衛星で使われる部材に太陽光を当てると、どのようなエネルギー分布の光電子が放出されるのかについての実験的な研究も進められた<sup>17)</sup>。これらの研究から、人工衛星の周りに作られる電場は良く理解できるようになった。しかし残念ながら、天体表面を構成するような複雑な物質に対しての実験は、これまでにあまりやられておらず、アポロが回収した月試料に対しての紫外線照射実験が 1 件あるだけである<sup>18)</sup>。小天体や月の周囲の電場のモデルでは、今でもこの実験値が使われている。

その後、1996 年に Lee が、光電効果によってダストが

帶電すると、天体表面から浮き上がる可能性がある事を示した<sup>19)</sup>。この論文では光電効果と太陽風電子の打ち込みのバランスを考えて、天体表面とダストそれぞれの帶電量を見積もっている。その結果、小天体のサイズによるが、100μm よりも小さなダストは静電反発によって表面から浮かび上がり、さらに 0.01μm よりも小さなダストは静電反発による加速で重力を振り切る事を示した。

Nitter らは、光電子層内を運動するダストには、層を構成している光電子の打ち込みも起こる事も考慮して、ダストの運動の数値計算を行った<sup>20)</sup>。このモデルは鉛直 1 次元モデルで、ダストの運動は重力と電場から受ける力で決まる。その結果、特定の条件を満たすダストは上空で鉛直方向に振動運動する事を示した。これは、天体から離れた場所では重力が効くのに対して、天体に近づくと静電反発による鉛直上向きの力が重力に勝り、ダストを跳ね返すからである。

Colwell らは、Nitter らのモデルを簡単化したものを、小天体エロスに応用した<sup>21)</sup>。彼らの結果によれば、小天体エロスの場合、0.5μm のダストが 0.5m/s から 2.5m/s の速度で打ち上げられた場合には、鉛直方向に振動運動をする。打ち上げられたダストが、最初に水平速度成分を持っていれば、振動運動をしている間に、水平方向にも移動する。一方、天体表面のうちで太陽光が当たらぬい場所（例えばクレーターの底）では、光電効果による帶電が生じていない。そのため、ダストがこのような場所の上空に差し掛かると、地面からの静電反発を受けなくなるため地面（クレーター内部）に墜落してしまう。その結果、クレーターのような窪地には自然とダストが濃集し、ポンド地形を形成するというのだ。

Colwell らの数値モデルは、厳密には内部の整合性が取れていない部分があるが、直感的で理解しやすい。そこで次の章では、このモデルの解説をするとともに、他の天体に応用するとどうなるのかを紹介する。なお、このモデルを発展させ、月面上のダスト浮遊に応用した研究<sup>22)</sup>や、内部の整合性を追求したモデル<sup>3)</sup>もある。興味のある方はぜひ参照されたい。

### 4. ダスト浮遊のメカニズム

モデルは大きくふたつの部分から成る。ひとつは天体表面の電場を求める部分、そしてもうひとつは、光電子層内のダストの電荷と位置が変化してゆく様子をシミュレートする部分である。以下では順に解説する。

#### 4.1 電子層モデル

光電子層内の電子密度分布  $N$  と各位置での電場の強さ  $E$  は、天体表面直上での光電子層の電子密度  $N_0$  と、光電子が天体表面から飛び出す際の速度分布  $f(v_0)$  を用いて次のように解析的に求められる<sup>16)</sup>。

$$\frac{N(z)}{N_0} = \int_0^\infty dv_0 \frac{f(v_0)v_0}{\sqrt{v_0^2 - u^2}} \quad (1)$$

$$\left(\frac{E(z)}{E_0}\right)^2 = \frac{\int_0^\infty dv_0 f(v_0)v_0 \sqrt{v_0^2 - u^2}}{\int_0^\infty dv_0 f(v_0)v_0^2} \quad (2)$$

ここで下添え字 0 は天体表面（高度 0）での値である事を表す。u は、高度 z での静電ポテンシャルを  $\phi$ 、電子の電荷を  $-e$ 、電子の質量を  $m_e$  としたときに  $u = \sqrt{2e(\phi_0 - \phi)/m_e}$  で表される速度である。

天体表面直上での電子密度  $N_0$  は、光電子のフラックス  $I_{ph,0}$  と光電子の平均速度  $\langle v \rangle$  を用いて、 $N_0 = 2I_{ph,0}/\langle v \rangle$  として求められる。ここで、定常な系では表面から飛び出した光電子と同じ数の電子が天体表面に衝突するものとして、 $N_0$  には係数 2 がかかっている。 $I_{ph,0}$  や  $\langle v \rangle$  は、月試料への紫外線照射の実験結果を、太陽光のスペクトルを考慮した波長積分する事で求めた値を用いる。太陽からの距離を  $d$  とすると、 $I_{ph,0} = 2.8 \times 10^{13} (d/1AU)^{-2}$  個/s、 $\langle v \rangle$  は太陽からの距離に依存せず、880km/s である<sup>18)</sup>。

Colwell ら (2005) は、光電子の速度分布は平均速度が 880km/s になるマクスウェル分布で与えられるものとして、電子密度と電場強度を求めている (Fig. 1)。しかし、実際に測定された結果を見ると、光電子の速度分布はマクスウェル分布ではない<sup>18)</sup>。実験で求められた光電子の速度分布と、平均速度を合わせるように求めたマクスウェル分布とでは、マクスウェル分布の方が、高速度成分が多い。このため、光電子層が上空に広がってしまい、電場強度が弱くなる傾向がある。この点については、後に Poppe と Horányi<sup>22)</sup> や Senshu ら<sup>3)</sup> が考察を行っている。

ダストの運動モデル

ダストの運動は次の運動方程式から求められる。

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 a \Phi}{m_d} E(z) - g \quad (3)$$

ここで  $z$  はダストの高度、 $t$  は時間、 $\epsilon_0$  は真空の比誘電率、 $a$  と  $m_d$  はダストの半径と質量、 $g$  は重力加速度である。ダストの静電ポテンシャル  $\Phi$  は、光電効果による電子の放出  $I_{pe}$ 、太陽風の打ち込み  $I_{sw}$ 、そして光電子層内の電子の打ち込み  $I_e$  よりて時間変化する。

$$4\pi\epsilon_0 a \frac{d\Phi}{dt} = I_{pe} - I_{sw} - I_e \quad (4)$$

それぞれの効果は、次の式で与えられる。

$$I_{ph} = \begin{cases} \pi a^2 e I_{ph,0}, & \Phi \leq 0 \\ \pi a^2 e I_{ph,0} \exp\left(\frac{-e\Phi}{k_B T_{pe}}\right), & \Phi > 0 \end{cases} \quad (5)$$

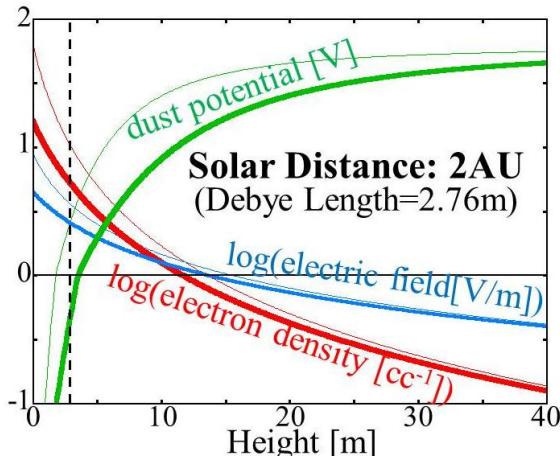
$$I_{sw} = \begin{cases} \pi a^2 e n_{sw} \sqrt{\frac{8k_B T_{sw}}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{-e\Phi}{k_B T_{sw}}\right), & \Phi \leq 0 \\ \pi a^2 e n_{sw} \sqrt{\frac{8k_B T_{sw}}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{e\Phi}{k_B T_{pe}}\right), & \Phi > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$I_e = \begin{cases} \pi a^2 e N \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \exp\left(\frac{e\Phi}{k_B T_e}\right), & \Phi \leq 0 \\ \pi a^2 e N \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{e\Phi}{k_B T_e}\right), & \Phi > 0 \end{cases} \quad (7)$$

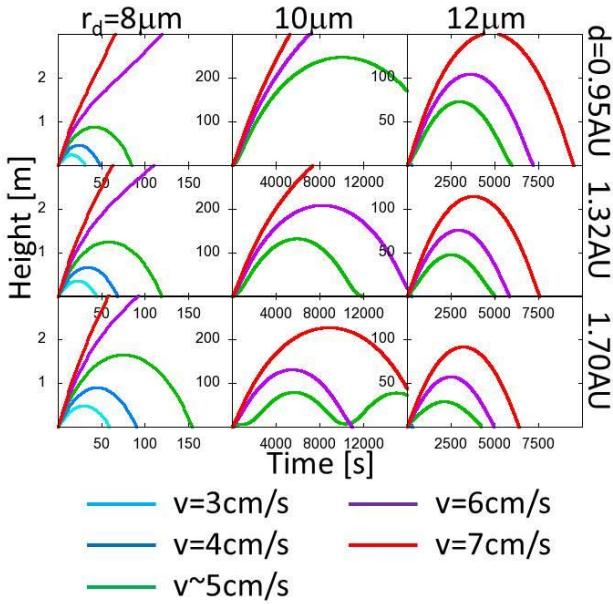
ここで  $T_{pe}$ 、 $T_{sw}$ 、 $T_e$  はそれぞれ光電子、太陽風電子、光電子層を構成する電子の温度、 $k_B$  はボルツマン定数、 $n_{sw}$  は太陽風電子の密度、 $m_e$  は電子の質量である。

以上の式を連立して数値的に解く事で、ダストの運動が求まる。

ただし、これらの式を見るとわかるように、Colwell ら<sup>21)</sup> は太陽風電子、光電子層内の電子、ダストから放出される光電子それが、熱的に緩和しており、エネルギー分布が温度で表現できると仮定していることに注意が必要である。しかし既に述べたように、光電子の速度分布はマクスウェル分布ではない。また、光電子層の構



**Fig. 1** Vertical structure of photoelectron sheath for the case at 2AU. Red, green, blue curves represent logarithm of electron density in the unit of  $cc^{-1}$ , dust potential in the unit of volts, and logarithm of electric field in the unit of the volts per meter, respectively. Thin curves represent the same but for the case at 1AU.



**Fig. 2** Vertical motion of dust grains above Eros. The initial velocity is 0.5 m/s (cyan), 1.0 m/s (blue), 2.0 m/s (green), and 3.0 m/s (purple), respectively.

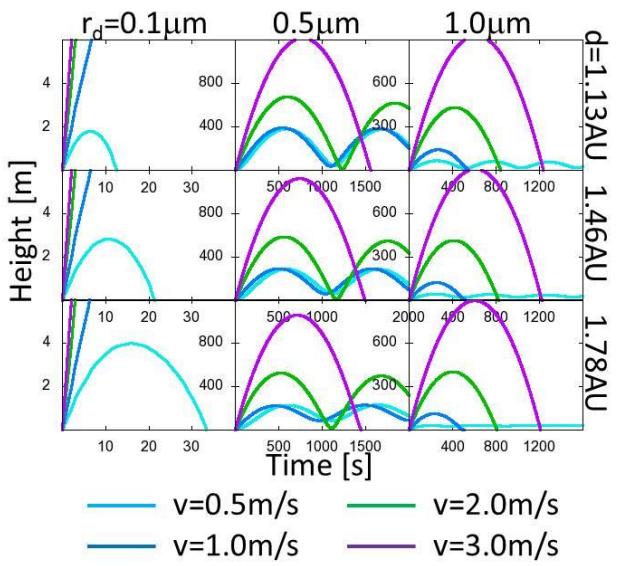
造はそもそも、光電子同士は直接相互作用をしない事を前提に求められている。これについては後に、Senshu ら<sup>3)</sup>が議論しているので、興味のある方は参照されたい。

### 4.3 結果

#### 4.3.1 小惑星エロスの場合

半径 0.5 μm のダストは、Colwell らが示したように、天体上空で振動運動を行う (Fig. 2 中央カラム)。これは重力の影響で表面付近まで落ちてきたダストが、再び天体表面との静電反発によって上空に打ち上げられるために生じる。Colwell らは、打上げ速度が 2.5 m/s よりも速い場合については言及していないが、この場合には、ダストは上空で振動せず、天体表面に落下する。これは、打上げ速度が速いとダストが天体表面付近に落下してきた際の速度が速いため、天体表面との静電反発で落下を食い止める事ができないためである。

ダストのサイズが小さい場合には、速やかに天体表面に落下するか、天体重力を振り切って飛び出す (Fig. 2 左カラム)。ダストが表面から離れた直後は、光電子層内の電子の衝突が卓越し負に帯電するため、強く天体表面に引きつけられる。しかしデバイ長に相当する高度を越える事ができれば、表面との静電反発で重力を振り切り、宇宙空間へと逃げてしまう。これは惑星間空間のダストの起源になり得る。ダストのサイズが十分に大きい場合には、電場の影響を受けないため、重力に従って放物運動をする (Fig. 2 右カラム)。



**Fig. 3** Vertical motion of dust grains above Itokawa. The initial velocity is 0.5 m/s (cyan), 1.0 m/s (blue), 2.0 m/s (green), and 3.0 m/s (purple).

#### 4.3.2 小惑星イトカワの場合

小惑星イトカワは、小惑星エロスに比べて小さく、重力加速度は地球の 10 万分の 1 (エロスの 70 分の 1) 程度しかない。このため、小惑星エロスと小惑星イトカワとで似たような運動をするダストを選び出すと、そのサイズは、小惑星イトカワの方が数倍から 10 倍程度大きい (Fig. 3)。ただし、ダストが鉛直振動をする条件は非常に厳しく、初速度が 0.01 cm/s 異なるだけで振動しなくなる。

小惑星イトカワでは、数  $\mu$  のサイズのダストですら静電反発によって表面から逃げ出し、惑星間空間ダストを形成しうる。もし、静電反発によって表面から放出されるダストが、惑星間空間ダストのうち一定の割合を占めるのであれば、天体のサイズ分布と惑星間空間のダストのサイズ分布の間には何らかの関係が見られるだろう。

### 5. 固着力～ダストは離れられない？～

近年、Hartzell と Scheeres は小天体表面にあるダストにかかる力、重力と静電力、地面との付着力の大きさの比較を行い、静電力だけで 100 μm よりも小さなダストを天体表面から引き剥がすのは困難であることを示した<sup>23)</sup>。ダストにかかる重力は半径の 3 乗に比例するが、静電力、地面との付着力はそれぞれダスト半径の 2 乗、1 乗に比例する。3 つの力のうち、ダストを地面から離すまいとする力である重力と付着力に着目すると、大きなダストの場合には重力が付着力に勝り、逆に小さなダストの

場合には付着力が重力に勝る。どのサイズで逆転が起きるのかは天体の重力で決まっていて、月ならば  $100\mu\text{m}$  から  $1\text{mm}$ 、小惑星エロスならば  $1\text{mm}$  から  $1\text{cm}$ 、小惑星イトカワの場合には  $1\text{cm}$  から  $10\text{cm}$  となる。静電力が、重力と付着力の大きさが逆転するサイズのダストを表面から引き剥がせるか否かでダストが浮遊するか否かが決まるのだが、これだけ大きな粒子を表面から引き剥がすためには、ダストは周囲よりも  $100$  倍以上も強く帶電しなくてはならない。その結果、これらの天体ではダストは表面から離れない、というのだ。

しかしこの論文では、付着力を求める際に、弾性球のダストを考えている。これに対して、ダストが不均質な形をしていて、地面とは数点でしか付着していない場合には、付着力はもっと小さくなる（付着面積は、局所的な曲率に依存するため）。また、ダストが単独で運動するのではなくて、集合体として運動する場合にも、実行的な付着面積は小さくなる。このような場合には、より小さなダストも天体表面から離れる事ができる事になる。さらに Hartzell と Scheeres はダストが天体表面から離れた後の運動について考えていない。ダストがいったん天体表面から離れると、その後の運動は小天体の重力と、小天体表面からの静電反発のバランスで決められる。このため、一番高く飛び上がるダストは、天体表面から離れやすいサイズのダストではない。むしろ、天体表面から離れられるダストのうち、最も小さいダストが一番高く飛び上がる。そもそも、前章で紹介したように、月や小天体ではダストの浮遊が原因と考えられる現象や地形が観測されている。このため、彼らの主張は現実とはうまく整合していないように見える。

## 6. 直接観測へ

モデルは、観測によって実証されるべきである。小天体周囲のダストを直接観測する事はできないだろうか

5 機編制の探査機で地球の磁気圏尾部のプラズマ環境を観測していた NASA の探査機 THEMIS のうち 2 機が 2010 年より月周回軌道に入り、月周囲のプラズマ環境を計測している。改めて ARTEMIS と名付けられたこれらの探査機は、太陽風と月表層がどのような相互作用を行っているのか、月表層のプラズマ環境を明らかにしようとしている<sup>24, 25)</sup>。プラズマ環境が明らかになれば、これまでに観測されている浮遊ダストのデータを定量的に見直す事ができるようになるだろう。

月表面から飛び出したダストを、月周回軌道から直接計測する計画もある。NASA の LADEE は、月の周りを、最低高度  $30\text{km}$ 、最高高度  $100\text{km}$  の軌道で周回し、月周囲の環境を調べるという計画だ。この LADEE には LDEX と名付けられた、ダスト分析装置が搭載されている。LDEX が観測対象としているのは  $0.3\mu\text{m}$  以下の小さなダストだが、これらのダストの分布がわかれば、表層

付近のダスト環境も推定できるだろう。

日本の小惑星探査機はやぶさ 2 でも、レーザー高度計を用いて、ターゲット天体の周囲のダストの観測をする予定である。レーザー高度計は、反射体までの距離がわかる。このため、閾値を適切に設定すれば、天体の手前側にあるダストからの反射と、天体表面からの反射を区別する事ができる。著者らの見積もりによれば、はやぶさ 2 に搭載されるレーザー高度計を利用すれば、1 立方メートル当たり  $10^6$  個（1 個/cc）のダストが存在すれば、ダストからの反射光を検知することができる。これが成功すれば、世界で初めて、小天体表層でのダストの存在とその運動を直接とらえる事になる。

## 謝辞

本原稿を執筆するきっかけを下さった東北大学三浦均氏に感謝します。

## 参考文献

- 1) E. Grün, M. Horányi and Z. Sternovsky: *Planet. Space Sci.*, **59** (2011) 1672.
- 2) A. V. Krivov, M. Sremčević, F. Spahn, V. V. Dikarev and K. V. Kholshevnikov: *Planet. Space Sci.*, **51** (2003) 251.
- 3) H. Senshu, H. Kobayashi, T. Yamamoto, K. Wada, M. Kobayashi, N. Namiki and T. Matsui: *in preparation*.
- 4) D. R. Criswell: in *Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space*, edited by R. J. L. Grard, Springer, New York (1973) 545.
- 5) J. E. McCoy and D. R. Criswell: *Proc. Lunar Sci. Conf. 5th*, (1974) 2991.
- 6) J. J. Rennilson and D. R. Criswell: *Moon* **10** (1974) 121.
- 7) O. E. Berg: *Earth Planet. Sci. Lett.*, **39** (1978) 377.
- 8) J. Veverka, M. Robinson, P. Thomas, S. Murchie, J. F. Bell III, N. Izenberg, C. Chapman, A. Harch, M. Bell, B. Carcich, A. Cheng, B. Clark, D. Domingue, D. Dunham, R. Farquhar, M. J. Gaffey, E. Hawkins, J. Joseph, R. Kirk, H. Li, P. Lucey, M. Malin, P. Martin, L. McFadden, W. J. Merline, J. K. Miller, W. M. Owen Jr., C. Peterson, L. Prockter, J. Warren, D. Wellnitz, B. G. Williams and D. K. Yeomans: *Science* **289** (2000) 2088.
- 9) J. Veverka, B. Farquhar, M. Robinson, P. Thomas, S. Murchie, A. Harch, P. G. Antreasian, S. R. Chesley, J. K. Miller, W. M. Owen Jr., B. G. Williams, D. Yeomans, D. Dunham, G. Heyler, M. Holdridge, R. L. Nelson, K. E. Whittenburg, J. C. Ray, B. Carcich, A. Cheng, C. Chapman, J. F. Bell III, M. Bell, B. Bussey, B. Clark, D. Domingue, M. J. Gaffey, E. Hawking, N. Izenberg, J. Joseph, R. Kirk, P. Lucey, M. Malin, L. McFadden, W. J. Merline, C. Peterson, L. Prockter, J. Warren and D. Wellnitz: *Nature* **413** (2001b) 390.
- 10) J. Veverka, P. C. Thomas, M. Robinson, S. Murchie, C. Chapman, M. Bell, A. Harch, W. J. Merline, J. F. Bell III, B. Bussey, B. Carcich, A. Cheng, B. Clark, D. Domingue, D. Dunham, R. Farquhar, M. J. Gaffey, E. Hawking, N. Izenberg, J. Joseph, R. Kirk, H. Li, P. Lucey, M. Malin, L. McFadden, J. K. Miller, W. M. Owen Jr., C. Peterson, L. Prockter, J. Warren, D. Wellnitz, B. G. Williams and D. K. Yeomans: *Science* **484** (2001a) 484.
- 11) T. Noguchi, A. Tsuchiyama, N. Hirata, H. Demura, R. Nakamura, H. Miyamoto, H. Yano, T. Nakamura, J. Saito, S. Sasaki, T. Hashimoto, T. Kubota, M. Ishiguro and M. E. Zolensky: *Icarus* **206** (2010) 319.
- 12) H. Miyamoto, H. Yano, D. J. Scheeres, S. Abe, O.

- Barnouin-Jha, A. F. Cheng, H. Demura, R. W. Gaskell, N. Hirata, M. Ishiguro, T. Michikami, A. M. Nakamura, R. Nakamura, J. Saito and S. Sasaki: *Science* **316** (2007) 1011.
- 13) H. Yurimoto, K. Abe, M. Ebihara, A. Fujimura, M. Hashiguchi, K. Hashizume, T. R. Ireland, S. Itoh, J. Katayama, C. Kato, J. Kawaguchi, N. Kawasaki, F. Kitajima, S. Kobayashi, T. Meike, T. Mukai, K. Nagao, T. Nakamura, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, C. Park, N. Sakamoto, Y. Seto, M. Takei, A. Tsuchiyama, M. Uesugi, S. Wakaki, T. Yada, K. Yamamoto, M. Yoshikawa and M. E. Zolensky: *Science* **333** (2011) 1116.
- 14) K. Nagao, R. Okazaki, T. Nakamura, Y. N. Miura, T. Osawa, K. Bajo, S. Matsuda, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, H. Naraoka, T. Noguchi, A. Tsuchiyama, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, M. Uesugi, K. Shirai, M. Abe, T. Yada, Y. Ishibashi, A. Fujimura, Y. Mukai, M. Ueno, T. Okada, M. Yoshikawa and J. Kawaguchi: *Science* **333** (2011) 1128.
- 15) R. L. Guernsey and J. H. M. Fu: *J. Geophys. Res.* **75** (1970) 3193.
- 16) R. J. L. Grard and J. K. E. Tunaley: *J. Geophys. Res.* **76** (1971) 2498.
- 17) B. Feuerbacher and B. Fitton: *J. Appl. Phys.* **43** (1972) 1563.
- 18) B. Feuerbacher, M. Anderegg, B. Fitton, L. D. Laude, R. F. Willis and R. J. L. Grard: *Geochim. Cosmochim. Acta, Suppl.* **3** (1972) 2655.
- 19) P. Lee: *Icarus* **124** (1996) 181.
- 20) T. Nitter, O. Havnes and F. Melandso: *J. Geophys. Res.* **103** (1998) 6605.
- 21) J. E. Colwell, A. A. S. Gulbis, M. Horányi, S. Robertson: *Icarus* **175** (2005) 159.
- 22) A. Poppe and M. Horányi: *J. Geophys. Res.* **115** (2010) A08106.
- 23) C. M. Hartzell and D. J. Scheeres: *Planet. Space Sci.* **59** (2011) 1758.
- 24) A. Poppe, J. S. Halekas, G. T. Delory, W. M. Farrell, V. Angelopoulos, J. P. McFadden, J. W. Bonnell, and R. E. Ergun: *Geophys. Res. Lett.* **39** (2012) L01102.
- 25) J. S. Halekas, A. Poppe, G. T. Delory, W. M. Farrell and M. Horányi: *Earth Planet. Space* (2012) *in press*.

(2012年9月14日受理)