

# 火星にリングはあるのか?

石元裕史<sup>1</sup>

## 1. あってもいいじゃないか!?

この問題を考えることになったのは、実はよく憶えていないのだが、私が博士課程の2年の時、ボスに「こうゆうことをやってみないか?」と言われてからだったと思う。ちなみに我が神戸大学理学部太陽系物理学講座では、指導教官である向井正教授のことを(もっぱら、本人がいない時ではあるが)「ボス」と呼んでいる。その当時から、この講座では惑星間固体微粒子(ダスト)について、その光散乱特性や生成過程、力学問題などに取り組んできた。恐らくボスは、日本での火星ミッションが本格化して、何かうちで出来る事はないか? そう考えたのだろう。

火星にダストリングがあるのではないかと、という議論は、恐らくSoter (1971)あたりが始めであって[1], その後NASAによる火星ミッションが計画されるに従い、何人かの研究者が火星リングを研究テーマとして活動をはじめたと思われる。リングと言っても土星のメインリングの様に地球から見えるようなものではない。それはあるとしても、ボイジャーが直接近づいて発見したような木星や天王星、海王星のリングのように、あるいはそれ以上に、非常に薄いリングであろう。

火星は2つの小さな衛星(フォボス, デイモス)を持っている。それら衛星表面は多数のクレーターに覆われており、多くの惑星間天体(Interplanetary Meteoroids)の衝突があったことを物語っている。

程度の差こそあれ、それは現在でも続いているはずである。惑星間天体の衛星に対する衝突速度はおおよそ10~15 km/sであり、そのような衝突が起こる時、衝突放出物は、脱出速度が5~10m/sといった衛星の弱い重力圏から比較的容易に脱出できる。ところが衛星の重力圏から脱出しても、多くの放出物は惑星本体の重力圏から脱出することはできない。放出物質は、それら同士の間で相対速度によって衛星軌道に沿って広がり、リングを形成する。これが火星ダストリング形成の大まかなシナリオである。このように、小さな衛星が出す放出物が衛星軌道付近にリングを形成するという考えは、ボイジャーで発見された数々の淡いダストリングの多くが小さな衛星の軌道近くに存在していることから推測しても、一つの妥当な考えと思われる。

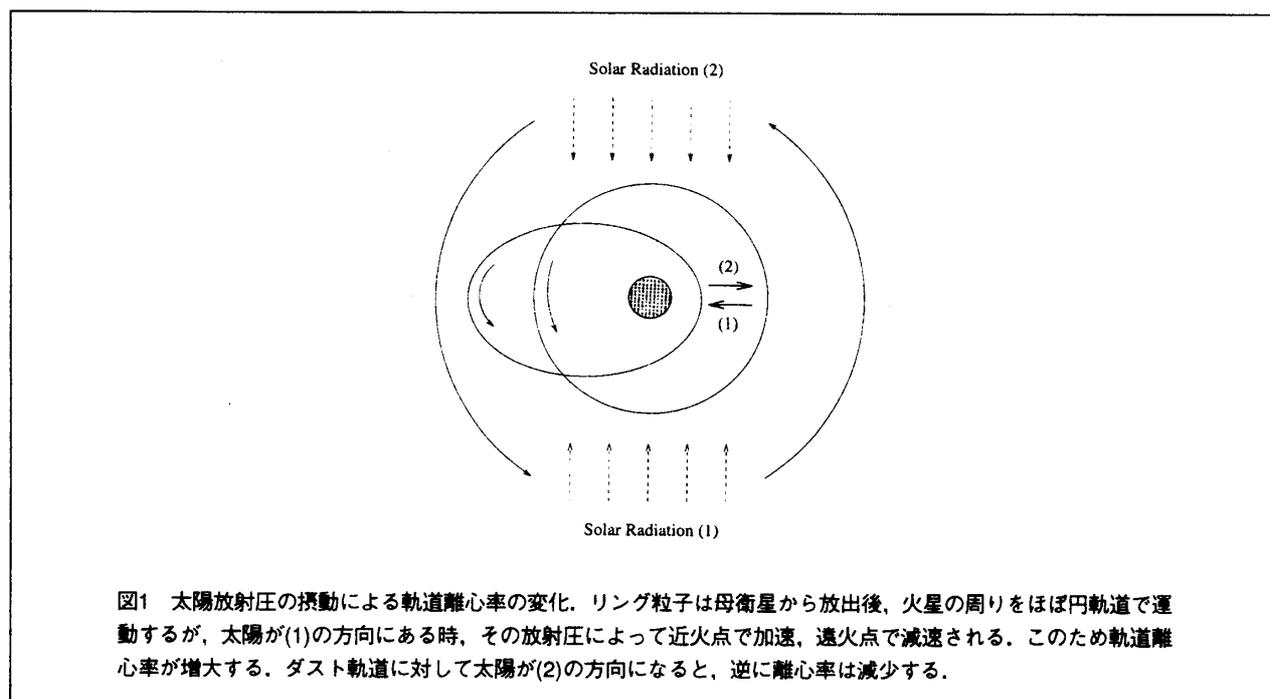
このように見ると、火星にもリングがあっというように思えるが、本当にあると言うためには十分な量のリング物質が必要になる。そして、リング物質の量を見積もるにはリング粒子の生産量、振舞い及びその生存時間を調べなければならない。リング物質の量が、例えば火星軌道での惑星間塵の量に比べて十分大きく、なんらかの方法で写真にうつすことでもできれば、「リングがある」と断言してもよからう。逆にそうでなければ、「リングはなかった」ことになる。もし、上記のような衝突放出物によるリング形成のシナリオをとるとすれば、小さな衝突破片ほど多くの数放出されるはずである。小さくて数の多い方がその占める断面

<sup>1</sup>神戸大学自然科学研究科

積は大きくなるから、結局リングの存在を左右するのは、「ダスト」と呼ばれる $\mu\text{m}$ オーダーのサイズ領域の粒子がどの程度の数密度で存在しているかということになる。ところが、バイキングが火星に行ったときには、リングは発見されなかった[2]。このことは、火星リングを信じる者にとってはつらい事実であるが、それでもなおその存在を主張するのは、バイキングオービターの観測が後方散乱光による撮像であったことによる。一般に $\mu\text{m}$ サイズの粒子では、可視光の散乱は前方散乱が卓越し、後方散乱光の強度は前方散乱光に比べてオーダーで小さくなる。木星以遠の惑星に存在する薄いダストリングの大部分がポイジャーによる前方散乱光の撮像によって発見されたものであったことを考えても、バイキングの観測結果は火星リング密度の上限は決めることができても将来における火星リングの発見可能性そのものを否定している訳ではない。さらに火星リングの研究者達が種々の学会や学会誌等でその存在をふれ回ったおかげで、最近は「ふーん、まあ、あってもいいんじゃないの?」と思われるようになってきた。

## 2. 太陽放射圧によるダストの分別

ダストは、その小さなサイズのために、重力以外にも多くの摂動力が有効に働く。どの力が有効に働くかは、ダストの存在する環境によるが、一般に惑星周囲で重要となるのは、重力(太陽、惑星、衛星による)、惑星磁場および太陽風磁場によるローレンツ力、太陽放射圧、惑星大気によるガス抵抗、といったところであろう。もちろんダストの挙動を考える上では、これらの力の一つをそれだけ区別して議論できる訳ではなく、幾つかの力の組合せによるダストの振舞いが重要である(その証拠に、この分野では一つ別の摂動力を加える毎に、これまでとは違ったダストの振舞いが発見され論文になっている。いつかは収束するはずだが)。しかし、どの摂動力が主要な役割を担っているかを議論することは意味があるだろう。木星や土星の周囲では、惑星周囲のプラズマとの相互作用によって帯電したダストが強い惑星磁場内で受けるローレンツ力が主要な役割を担っており、この効果と惑星の扁平による重力の摂動及び太陽放射圧を



組み合わせることで、完全ではないがある程度ダストリングの形状などについて説明がなされている。火星の場合は、惑星磁場が非常に弱い(あるいは存在しない)と考えられており、この効果は無視してもよさそうである。また、フォボスやディモスの軌道付近では火星大気的气体抵抗も無視できる。一方主要な摂動力となるのは太陽放射圧と太陽風磁場であろう。このうち、太陽放射圧はダストの生存時間を見積もる上で重要な役割を果たしている。ダストは衛星から放出した時点では、母衛星と同様ほぼ円軌道であるが、太陽放射圧はダスト軌道の離心率を変動させる[3](図1)。もし離心率の増加によってダスト軌道の近火点が火星半径を下回れば、ダストは火星に落下してしまうことになる。一般に太陽放射圧の摂動は粒子サイズが小さい程有効に働くから、結局あるサイズ以下のダストは衛星から放出後、比較的短期間(数日~数年)のうちに火星に落下してしまうことになる。その境界の粒子サイズは、シリケート鉱物を仮定するとフォボス/ディモス起源のダストとも、およそ $10\mu\text{m}$ ( $10^{-7}\sim 10^{-9}\text{g}$ )程度であった。太陽風磁場による摂動効果はダスト軌道をさらに変化させることになるが、火星軌道付近での光電効果による平衡電荷量をダストが持っていると仮定すると、その摂動が軌道を有意に変化させるようなダストのサイズは $1\mu\text{m}$ ( $10^{-11}\text{g}$ )以下となる[4]。また基本的に太陽風磁場の摂動は太陽放射圧による離心率の増大を抑制することがない。従って $10\mu\text{m}$ 以下のダストでは、太陽風磁場の摂動によってその軌道を多少変化させることがあっても、その生存時間は太陽放射圧の摂動が決めていることになる。

火星のダストリングは、火星に落ちない $10\mu\text{m}$ 以上のダストで構成されているとするのはある意味で素直な考え方である。そして、その起源がフォボス/ディモスからの衝突放出物であると考えれば、小さい粒子の方が数が多いはずであるから、ダス

トリングを構成する主な粒子サイズは $10\mu\text{m}$ 程度であると予想できる(これ以降では主に $10\mu\text{m}$ 程度のダストに注目してダストの振舞い、ダストリングの様相について述べるが、話しが進むにつれ、この考えもだんだん怪しくなることになる)。 $10\mu\text{m}$ 以上のダストは、再び母衛星に捕獲されるまでリング粒子として存在する。再捕獲までの時間は、ダストの母衛星に対する平均ランダム速度から近似的に求めることができ、フォボス起源ダストで数十年、ディモス起源ダストで千年というオーダーであった(図2)。

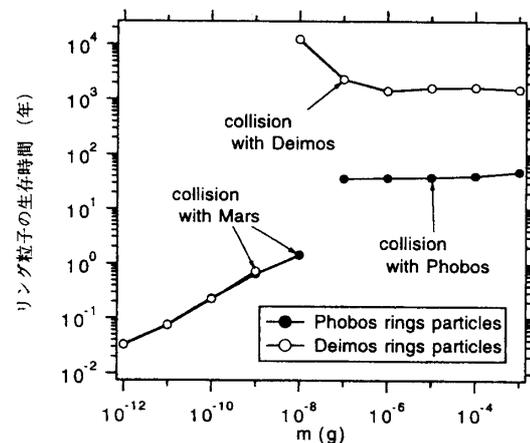


図2 火星への落下と衛星による再捕獲から見積もったリング粒子の生存時間。粒子はシリケート鉱物を仮定している。リング粒子はおよそ $10^9\text{g}$ ( $10\mu\text{m}$ )を境として、火星に落下するものと衛星に再捕獲されるものに分けられる。火星に落下するタイムスケールは、フォボス/ディモスの違いにはあまり依存しないが、母衛星に捕獲されるタイムスケールはランダム速度の違いでディモスリングの方がフォボスリングより1桁以上大きい。

### 3. 火星リングの形

93年までの研究では、火星ダストリングの様相は主に太陽放射圧の摂動によって太陽と反対の方向にシフトした形で考えられていた[4,5]。その時はまだ、火星の扁平による重力摂動がダストリングの軌道を大きく変化させるとは誰も考えていなかった。というのも、木星や土星ならいざ知らず、

火星の扁平率は0.005しかなく、地球と同様ほとんど球に近い。従って、軌道計算するに当って、惑星扁平の効果は無視できるほど小さいと考えていたのだ。ところが94年ごろから、話しは変わってくる。火星の扁平を考慮して計算してみると、太陽放射圧が効かない大きな粒子では大きな軌道変化は起こらないのだが、太陽放射圧が有効な粒子では、非常に大きな軌道の変動を示すことがわかった。単純に考えると、太陽放射圧によってダスト軌道の近日点が惑星に近づいたから、それだけ惑星扁平による摂動が効いてくる、ということになるのだが、その軌道変化はフォボス起源のダストとディモス起源のダストとは全く異なっている。このことは、ほぼ同時期に複数の研究者によって独立に確認されたのであるが、この摂動効果の説明がうまくできなかった事と、粗い軌道計算をした者と厳密な計算をした者との間で結果が大きく違っていたこともあって、論文として出てくるのに時間がかかったようである(ちなみに一番最初にでた論文[6]では、軌道計算の結果が一部オカシイことが後になってわかったのであるが、それを指摘し、摂動効果の説明を試みた新しい論文[7,8,9]はこのごろやっと発表される運びとなった、

というほど最近の話である)。惑星扁平を考慮すると、フォボスダストでは、最大離心率が増大し、惑星扁平を考慮しなかった時の逆に、太陽方向にシフトしたリングを形成する。一方ディモスダストの場合は、惑星扁平を考慮したことによる離心率の効果は小さく、太陽と逆方向にシフトするが、軌道傾斜について長周期の大きな変動が起こり、フォボスリングに比べて厚みを持ったリングを形成するようになる(図3,4)。このような変化を起こす理由の詳しい説明はここでは割愛するが、結局はこれも太陽放射圧の摂動効果における一形態であることがわかった。火星の小さな扁平率は太陽放射圧による軌道変化のタイミングを微妙にズラして、その効果を増幅させていたのである。一方、惑星扁平の大きな惑星では太陽放射圧の摂動効果が蓄積せず、小さな空間に密集したダストリングを作ることができる。もちろん、前述したように惑星扁平と太陽放射圧だけで全ての惑星まわりのダストの挙動を説明することはできない。しかし、一つの示唆として、密集した(見えやすい)ダストリングの出来やすさと太陽からの距離(太陽放射圧)、惑星の形(扁平)との間には密接な関係があると言えるかもしれない。

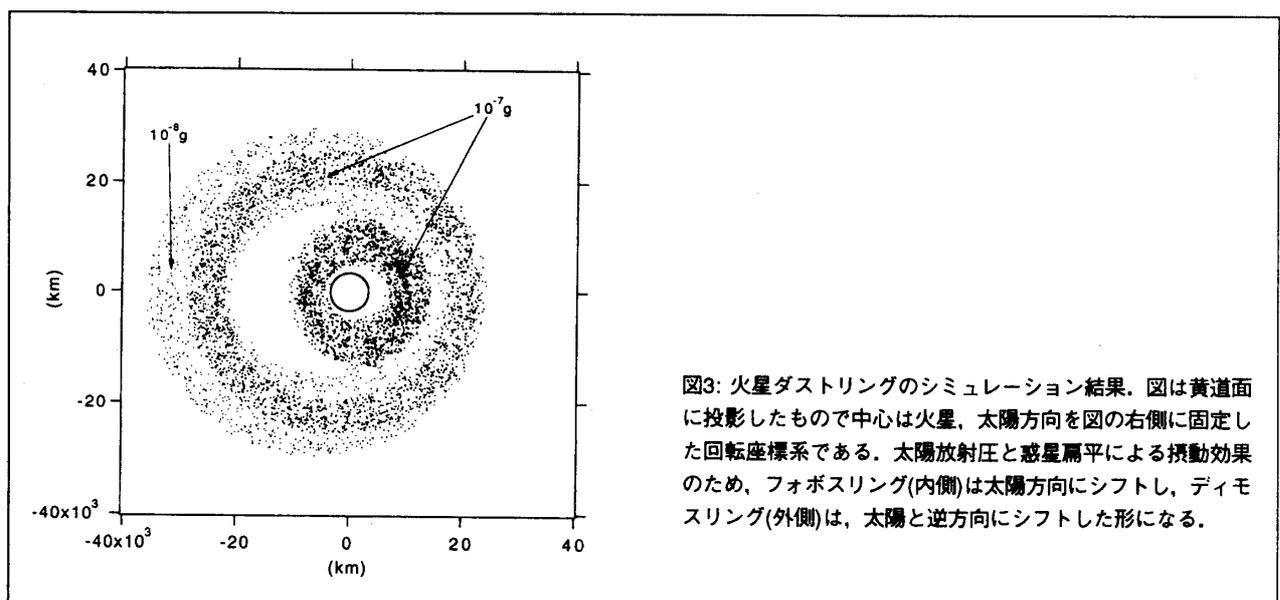


図3: 火星ダストリングのシミュレーション結果。図は黄道面に投影したもので中心は火星、太陽方向を図の右側に固定した回転座標系である。太陽放射圧と惑星扁平による摂動効果のため、フォボスリング(内側)は太陽方向にシフトし、ディモスリング(外側)は、太陽と逆方向にシフトした形になる。

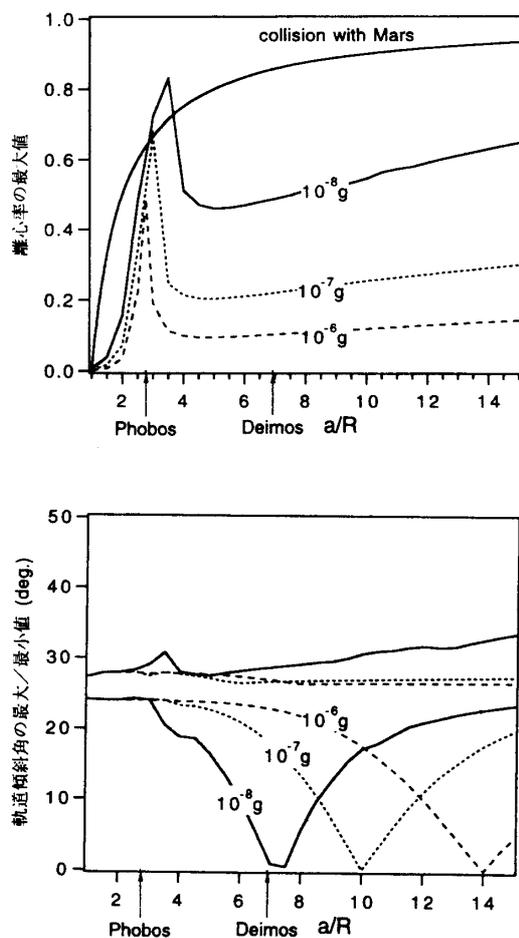


図4 火星周囲のダスト軌道の最大離心率及び軌道傾斜角の最大/最小値を初期軌道長半径に対してプロットしたもの。軌道傾斜角は黄道面に対しての角度である。初期軌道はフォボス/ディモスと同様、火星赤道面( $i \sim 26^\circ$ )を運動する円軌道とした。フォボス軌道( $a/R = 2.76$ )では、軌道傾斜角は大きく変化しないが、軌道離心率の大きな変動が起こる。一方ディモス軌道( $a/R = 6.92$ )では、 $10^6$ g ( $\sim 10\mu\text{m}$ )粒子の軌道傾斜角が大きく変化し、比較的厚いリングを形成することになる。

#### 4. ダストリングの自己保持機構

ある研究対象に関しては、この人を抜きには語れない、という研究者が何人かはいるものだが、ダストリングに関して、その一人である「切れ者」D. P. Hamilton (J. A. Burnsの愛弟子)は、1994年のScience誌に土星のEリングの形成メカニズムについてある興味深い論文を発表した[10]。土星Eリン

グのダストは惑星磁場、惑星扁平、太陽放射圧などの摂動の組合せによってその軌道離心率を周期的に変動させる。離心率が大きくなると、ダストが母天体(エンセラドス)に衝突する時の相対速度が大きくなるが、もしリング粒子の母天体への衝突によって、その二次放出物が再び衛星から脱出し、新たなリング粒子を作ることができれば、惑星間天体の衛星への衝突が続いていなくてもダストリングは消滅しなくなる。むしろ逆に、二次放出の効率がよければ、ダストリングの数密度はどんどん増大してゆく。そこまでいかないにしても、この自己保持機構がある程度働いていれば、例えばたった一発の大きな天体が衛星にぶつかるだけでかなりの長い時間ダストリングは存在し続けることになる。ここでHamiltonはリング粒子衝突によるダストの二次放出が本当に有効であるかは見積もっておらず、Eリングの形成機構についての一仮説を報告しただけであったが、本人も含めて火星にある程度濃いダストリングを期待する研究者たちは、このアイデアを歓迎した。火星のリング粒子も、その摂動効果によって軌道離心率/軌道傾斜角が変化し、母衛星に衝突する時の相対速度が増大する。火星ダストリングにもこの自己保持機構が働いているかも知れない。

#### 5. 数密度の見積り

火星ダストリングの力学問題が、ある程度まとまってきたおかげで、ダストリング存在の有無を決める重要なポイントが明らかになってきた。それは、上記ダストリングの自己保持機構が火星周囲で働くかどうか大きく依存している。もし自己保持機構が働いておらず、衛星による再捕獲と衛星から一次放出が平衡状態にあるとすれば、火星に落下しない $10\mu\text{m}$ 以上のダストではダストリングの数密度は惑星間天体の衝突によって単位衛星表面から飛び出す放出物のフラックス  $f$  とリング粒

子の母衛星に対する平均ランダム速度  $v_r$  との比  $f/v_r$  によってほとんど決まってしまう[9]. 平均ランダム速度は軌道計算の結果から見積もることができるが、衛星表面からの放出物フラックスは、多くの不確定要素があるためあまり正確な見積もりができない。基本的に、はたして数十 $\mu\text{m}$ から数百 $\mu\text{m}$ といった典型的なサイズの惑星間塵がフォボス/ディモスにぶつかって、本当に $\mu\text{m}$ サイズの放出物を出すのか？出すとしても、ではどのようなサイズ分布/速度依存性を持っているのか？ということ、今だよくわかっていない。であるから逆に最初のうちは、ある研究者(私も含めて)が、どのようなパラメータを用いて放出物の量を見積もっても、それが明らかに変な結果を導くものでなければ、受け入れざるを得ない状況であった。そして、そのことは今も大して変わっていない。しかし、過去に発表された論文での手法を(手を加えながらも)踏襲することによって、なんとなく、あたかも当然のこととして受け入れられているものがある。それは、考えている粒子サイズよりずっと大きな衝突物による破壊現象との類似性、すなわち放出物のサイズ分布のベキが2.7~3.5で[11]、放出物質の速度依存性及び衝突物質と全放出物質の質量比が室内実験結果でのそれらと同じとする考えである(繰り返し言うようだが、ダストの衝突による放出物がそのような規則性を持っているという仮定はかなり怪しい)。しかしこのような仮定をした後でも、不確定なパラメータはまだある。衛星表面の組成や状態の違い(硬い岩石質であるか、砂質のレゴリスであるか)でも放出物の量、速度依存性は大きく変化するだろうし、火星軌道付近での惑星間塵フラックスもちゃんとわかっているわけではない。そんな訳で、複数の研究者が見積もった火星ダストリングの数密度は $10^9 \sim 10^3 \text{ m}^{-3}$ といった6桁も幅のあるものとなってしまった[6,8,9]。自分が行なった見積り結果がその中で一番低いという

のは、複雑な心境ではあるが、ただ共通して言えることは、リングの数密度は母衛星に対するダストのランダム速度が小さい程大きく、軌道速度(リング粒子のランダム速度に直接影響する)の小さいディモス起源のダストリングの数密度の方がフォボス起源のダストリングのそれよりも1桁程度大きくなるだろう、ということである。

では、自己保持機構が働いていればどうであろうか？自己保持機構がどの程度働くかも、上記と同様な不確定要素のために、はっきりしたことは言えない。しかし、リング粒子のランダム速度が大きなフォボスリングの方が、この機構は有効に働くであろう。ここでフォボスリングとディモスリングの立場は逆転する。リング粒子の衝突による二次放出の効率は、衛星表面の状態に大きく依存する。衛星表面がむきだしの岩石質であれば、リング粒子の衝突による放出物の速度は砂質の表面の場合より大きくなることが予想される。ダストの衝突現象について上記と同様な経験則をあてはめると、フォボスリングはフォボス表面が岩石質であれば自己保持機構が有効に働きうることが見積もられた[9]。しかしディモスは表面が岩石質であってもリングの自己保持機構は有効に働かず、フォボスリングでもフォボスが砂質のレゴリスで覆われている場合では、二次放出は有効でない。もしフォボスリングが自己保持機構を持っているとすれば、リング粒子の数はどんどん増加してゆく。数密度の平衡状態を規定するのは、もはや衛星への再捕獲ではなく、リング粒子同士の衝突破壊による喪失ということになってくる[12]。粗い見積もりとして、もしリング粒子同士の衝突破壊がカタストロフィックであり、これによるリング粒子の喪失と衛星表面でのリング粒子の生産とが平衡状態になるとすれば、フォボスリングの数密度はおおよそ $10^3 \text{ m}^{-3}$ となる。ここで注意しなければならないのは、この数字があくまで火星に落下し

ない10 $\mu\text{m}$ 以上の粒子のことであって、自己保持機構が働いている時には、火星に落下するより小さな粒子の数密度が10 $\mu\text{m}$ 粒子の数密度を定常的に上回る可能性があり、もしそうであれば、もはやダストリングというものではなく、火星に流れ込むダストディスクとも呼んだ方がよいかもしれない。しかし、ここで一つ問題が起こる。いま述べたように、リング粒子は10 $\mu\text{m}$ より小さなものになると火星に落ちてしまっ、もう衛星には戻ってこないのであるから、衛星の質量はダストリングを介してどんどん軽くなってゆくはずである。自己保持機構が働いていなければ、衛星質量の減少は微々たるものであろうが、自己保持機構がもしフォボスリングですずっと働いているとすれば、フォボスは太陽系の歴史のタイムスケールにおいて消滅してしまいかねない。Sasaki (1996) は、このジレンマはフォボスの軌道進化を考慮すれば解決できるとした[13]。つまり、フォボスリングの自己保持機構は「今は働いているが、昔は働いていなかった」とする考えである。またその逆も考えられる。バイキングの観測結果から見ると、フォボス表面は数mのレゴリスで覆われているようである。前述したようにフォボスリングの自己保持機構がフォボス表面の状態(岩石かレゴリスか)に大きく依存するのであれば、フォボスがまだレゴリスを形成していない時期にはフォボスリングに自己保持機構が働いており、比較的濃いダストリングを作っていた可能性が高い。その後、フォボス表面のレゴリス形成に伴ってリングはどんどん薄くなり、今の状態になったのかも知れない。これは、フォボスリングの自己保持機構が「今はあまり働いていないが、昔は活発であった」とする考えである[9]。いまのところ、どちらが正しいか、それともどちらも正しくないか、はわからない。いずれにせよ、衛星の表面状態とレゴリス形成機構、それに対する微粒子の衝突破壊現象などを知ること

が問題解決の大きな鍵となろう。

それぞれの場合について見積もった火星ダストリング数密度の最大値はだいたい同じで、およそ10<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>であった。これは(幸いにも?)バイキングが行なった観測では発見できないという条件を満たしているが、ボイジャーが他の惑星で行なった観測条件であれば「見る」ことができる量である。さて、今度の火星探査ではたしてリングは発見されるであろうか?

## 6. PLANET-Bでの観測

PLANET-Bは、98年に打ち上げられる国産初の火星探査機で、約1年のクルージングフェイズを経て99年に火星周回軌道に投入される。火星周回軌道での観測期間は約2年である。話しをダストリング観測のみに限定すると、直接的にダストリングを発見する可能性を持つ観測機器は、Mars-Imaging-Camera (MIC)とMars-Dust-Counter (MDC)ということになろう(MDCは主にドイツ・ミュンヘン工科大学のダスト計測グループの手で作られており、少なくともドイツではMunich-Dust-Counterと呼ばれている)。MICは火星表面の全体及び科学研究対象となる特定地域についての撮像を主目的とした、衛星側面に固定される1次元CCDであり、衛星のスピンによって撮像対象をスキャンする方式をとっている。前にも述べたように、このMICでダストリングを撮像するためには、できるだけ小さな散乱角でダストの前方散乱光を撮像することが重要である。ダストリングが主に $\mu\text{m}$ オーダーの粒子で構成されているとすると、前方散乱光に対して後方散乱光ではその散乱光強度は数桁落ちることになり、火星表面を撮っている時についてリングも写すなどということとはできない。当然のことながらMICは太陽を直接見ないように配置されることになるから、2年間のミッション期間中に変化するPLANET-B軌道を追いつつ、最も小さ

な散乱角でリング方向を向く時期を選定し、観測する必要がある。現在計算されているPLANET-B軌道から、最小の散乱角でダストリングを狙える時期はミッション期間のほぼ最後の頃にあり、その散乱角はおよそ $20^\circ$ であった[14]。もちろん、この条件ならダストリングを撮像できるという保証はない。暗い対象の撮像を目的としていないMICの性能からみて、ダストリング数密度の上限を仮定しても、写るかどうかがぎりぎりのところである。しかし、やってみる価値はあるだろう。ここで見積もったダストリングの数密度はあくまで静的な惑星間天体のフラックスを仮定した時間平均の値であり、多くの不確定要素を含んだ見積りである。またPLANET-Bが火星に行く時の前後に、たまたま大きな惑星間天体の衝突でもあれば、見積もった上限を大きく越える量の濃いダストリングが見えても不思議ではないし、ダストリングの中にも局所的にダストが密集している部分があるかもしれない。

MICに対してMDCは、その観測結果から直接リングの姿を世間にアピールすることはできないが、ダストリングの具体的な物理量やその振舞いを調べる上で重要である。MDCはダストがセンサー面に衝突/電離した時の総電荷量とその時間特性から、衝突したダストの質量と速度を見積もることができる。さらに衝突時のセンサー面方向から、入射粒子の運動方向が(大まかではあるが)特定できる。リング粒子はフォボス/ディモスと同様、順行の火星周回軌道をとっているはずであり、PLANET-Bとの相対速度はおよそ $2\text{km/s}$ まで小さくなる。このことは、平均速度 $10\sim 15\text{km/s}$ と予想される惑星間塵との区別が比較的容易であることを示している。また、その入射方向からもリング粒子の同定ができるだろう。かといってミッション期間中に観測されたリング粒子の数があまりにも少なければ、「リングがあった」などと公言はできない。予想さ

れるダストリング内でのフラックスは明らかに火星軌道付近での惑星間塵フラックスを上回っているが、PLANET-Bはいつもダストリング内にいる訳ではなく、むしろ周期的にリングを通過するような軌道をとっている。このため、ダストリングの数密度によってはリング粒子の観測数がバックグラウンドとなる惑星間塵の観測数の中に埋もれてしまうこともありうる。いったい幾つぐらいのリング粒子がMDCで観測されるかは、それこそ行ってみないとわからないが、前述した上限の見積もりでは、一度ダストリングに遭遇する毎に数百個のリング粒子が観測できることになる。もしそうであれば、全ミッション期間を通じて観測されるであろう惑星間塵の数(数百個)をかるく上回ることになり、ダストリングの存在は疑いないものとなろう。しかし見積もりの下限値を用いると、観測されるリング粒子の個数は全ミッション期間を通じてせいぜい十個程度になってしまう[15]。これでは、その粒子がたとえ火星周回軌道であることが同定されたとしても、例えばPLANET-B本体が火星周回軌道に投入した時に出したデブリではないか?といった疑いを払拭できなくなる。

個人的には、火星のダストリングは、この研究のおかげで学位がとれたこともあって、(PLANET-Bに)ぜひ発見してもらいたいものであるが、もし観測結果が否定的なものであったとしても、ではなぜなかったのか?見積もりのどこがマズかったのか?など考えるべき事柄は多い。また結果はどうであれ、もっと広い意味でダストリングができる惑星の条件や、関連のある問題である衛星/小惑星表面のレゴリス形成過程や小惑星周囲のダスト環境などを考える上でも重要な情報が得られることであろう。少なくとも研究課題が増えることは間違いない。

## 参考文献

- [1] Soter, S., 1971: The dust belts of Mars, Rep. 462, Cornell Cent. for Radiophys. and Space Phys., Ithaca, N. Y..
- [2] Duxbury, T. C., and Ocampo, A. C., 1988: Mars: Satellite and ring search from Viking. *Icarus* 76, 160-162.
- [3] Burns, J. A., Lamy, P. L., and Soter, S., 1979: Radiation forces on small particles in the solar system. *Icarus* 40, 1-48.
- [4] Juhasz, A., Tatrallyay, M. Gevai, G., and Horanyi, M., 1993: On the density of the dust halo around Mars. *J. Geophys. Res.* 98, 1205-1211.
- [5] Ishimoto, H., and Mukai, T., 1994: Phobos dust rings. *Planet. Space Sci.* 42, 691-697.
- [6] Juhasz, A., and Horanyi, M., 1995: Dust torus around Mars. *J. Geophys. Res.* 100, 3277-3284.
- [7] Hamilton, D. P., 1996: The asymmetric time-variable rings of Mars. *Icarus* 119, 153-172.
- [8] Krivov, A. V., Sokolov, L. L., and Dikarev, V. V., 1996: Dynamics of Mars-orbiting dust: Effects of light pressure and planetary oblateness. *Celest. Mech. and Dynam. Astron.* in press.
- [9] Ishimoto, H., 1996: Formation of Phobos/Deimos dust rings. *Icarus* in press.
- [10] Hamilton, D. P., and Burns, J. A., 1994: Origin of Saturn's E ring: Self-sustained, naturally. *Science* 264, 550-553.
- [11] Asada, N., 1985: Fine fragments in high-velocity impact experiments. *J. Geophys. Res.* 90, 12445-12453.
- [12] Sasaki, S., 1994: Martian dust tori formation: Ejecta at collision of torus particles with the satellite can sustain dust abundance. *Proc. of the 27th ISAS Lunar and Planetary Symp.* 47-50.
- [13] Sasaki, S., 1996: Martian Self-Sustaining Dust Torus. *Proc. of IAU Coll. 150. Physics, Chemistry, and Dynamics of Interplanetary Dust*, in press.
- [14] Nakagawa, N., Ishimoto, H., Kimura, H., and Mukai, T., 1994: PLANET-Bによる火星ダスト環境の観測, 第3回科学衛星・宇宙観測シンポジウム, 宇宙科学研究所, 204-207.
- [15] Ishimoto, H., Kimura, H., Nakagawa, N., and Mukai, T., 1996: Planned observation of Phobos/Deimos dust rings by PLANET-B. *Adv. Space Res.* in press.