

現代版・火星の地上観測

中串孝志¹

1. 死に体?

小文は、現代の火星地上観測についてのレビューです。しかしながら、言うまでもなく火星の地上観測の歴史は非常に長いので研究事例も極めて多く、全てをフォローすることはとてもできません。このため、ここでご紹介する研究例は、いくぶん筆者による selection bias がかかっていることをご承知おき下さい。

「死に体」とは角界用語ですが、私を含め、悲しいかな日本の(プロの)火星地上観測屋は、絶滅危惧種としてレッドデータブック入りしてもおかしくない状態にあります。そんな中、この2003年は火星の大接近——いやむしろ「超」接近——に相当することもあって、私達のグループも思いきって日本の「すばる」望遠鏡の2003年前半期へのプロポーザルを提出しました。残念ながら不採用だったのですが、その不採用理由についてのすばる共同利用観測プログラム小委員会(Time Allocation Committee)からのコメントの中に、「探査機のこの時代に、あえて惑星の地上観測を行う意義が理解できない。」というような内容の(日本語の)ものがありました。もちろんこれは私のプロポーザル上での主張が甘かったのが原因でしょうが、万が一、これが(特に天文学・宇宙物理学関係者に実際根強く存在する)「惑星の地上観測は終わった」「(探査機が)飛んで行けるところの話なんだから」というような先入観から来るものであったならば、これは非常に悲しいことです。「(探査機を)持たざる者は観測するべからず」でしょうか? 否! 我々は、

立派に闘っているのです!!

以下、まず地上観測の特徴と意義について、他の研究手法との比較から検討してみます。その後地上観測で用いられる手法について各論的に述べ、第3節にて現在進行中の観測計画の概要を紹介します。最後に、まとめて代えて火星地上観測の課題と将来像について考えてみたいと思います。

2. 地上観測あれこれ・火星編

2.1 地上観測の特徴と意義

惑星科学に於ける研究の手法には、様々なものがあります。特に地球以外の大惑星(小さくない太陽系天体)を研究対象にする場合、大きく分けて飛翔体直接探査、理論計算/数値実験、そして地上観測の手法があります。このような分野は他にはないと言えるでしょう。中でも火星については、全ての手法について他の天体に比べてそのレベル・蓄積は群を抜いているのではないのでしょうか。歴史のなせる業です。

地上観測と必ず比較される探査機の長所は殆ど解説不要ですが、短所についてはあまり触れられることがありません。まず何と言っても大きいのが、サイエンス以前に「大変である」ということ。必要な予算・労力・時間は非常に重い問題です。そして忘れてはいけないのが成功の確率です。旧ソ連は探査機黎明期に殆どの探査機を打ち上げ時に失いました。アメリカも2機の探査機を続けて失ったことは記憶に新しいことです。地上観測はこういった「実行

¹ 日本学術振興会特別研究員(PD)
京都大学大学院 人間・環境学研究科

に於ける機動性」という一点だけでも大きな武器と言えます。この機動性は単に探査機の寿命と比較した時間的な問題だけでなく、観測装置の融通という「空間的」な意味合いもあります。飛翔体に搭載可能な観測装置には、サイズ・重量ともに非常に制限されます。これは例えば光学的観測について言えば、観測可能な波長が限定されるということを意味します。多波長観測を十分に実現している探査機はあまりありません。

地上観測の(探査機と比した)長所を考えてみます。惑星の中でも特に火星の場合、「季節」の概念を有し、永年的な変動もある天体であるため、定常的な観測が必要です。地上観測は、探査機の支援観測としての役割も大変重要ですが、地上観測の機動性は即ちこの長期観測を可能にするという意味で、単なる探査機のバックアップ以上の重要性があります。「探査機の支援観測は重要」と申しましたが、具体的には、探査機は火星に「近過ぎる」ために、全面撮像が困難な場合が多く、特に最近活躍している極周回軌道衛星タイプの探査機は観測する現地時刻が一定(一つの経度線にそった観測)なので、日変化についての情報を得ることができません。こと大気現象について言えば、空間スケールと時間スケールは正の相関がありますから、このような意味で、地上観測は全球規模ないし総観規模の物理を相手にするのが得意であるとも言えるでしょう。また、飛翔体の搭載可能な観測装置の制限について先述しましたが、「すばる」の観測装置を例に出すまでもなく、この自由度も地上観測の魅力と言えます。そしてこれらの帰結として、研究目的そのものの自由度も高いということも地上観測の特色と言えるでしょう。

ちなみに理論計算/数値実験とは、比較しようにも見ている物理対象が全く異なることが多く、またその成り立ちも然り、です。つまり、特に現代の数値実験の場合、計算機の能力が高いので、より時空間分解能の高い計算が主流になっていますが、この時空間分解能は地上観測のそれとは全く異なっていま

す。またそもそも理論計算の目的が「見えないもの」に焦点を当てている場合が多く、両者の物理的乖離が著しいように思われます。従って地上観測との親和性に乏しく、長所・短所の比較も現時点ではできないと考えています。いずれにせよ、理論的研究の発展を以て地上観測を捨ててしまう理由にはならないと思います。

従って「火星の地上観測の意義」は、例えば次のようにまとめられます。一つは、全球的・長期的観測による大局的な知見が得られること。空間的連続性を確保できることとも言えるかもしれません。探査機が何を見れば良いのか、という指針を与えることもここに含まれます。もう一つは、観測を実現させる際のフレキシビリティであると思います。このフレキシビリティが観測の多様性、時間的連続性を産み出します。後述しますが、例えば近赤外の新たなサイエンスの誕生やまだまだ発展途上の電波観測など波長域の多様性も地上観測を意義深いものにしていくと思います。

逆に、地上観測の持つ最大の欠点は言うまでもなく空間分解能の低さです。この一点だけで地上観測が「虐げられている」と言っても過言ではないでしょう。しかし近年では、大口径化や補償光学系(Adaptive Optics; AO)の開発も進み、勿論飛翔体や理論計算に及ばないにしてもかなりのところまでできています。火星は明るく大きい(近い)ので、1m程度の口径でも様々な研究が可能です。大口径を利用するに越したことはないのは当然です。さらに各種の高速撮像装置の開発により大気の揺らぎによる像の「ぶれ」(シンチレーション)を極限的に小さくすることが可能になってきています。しかし火星の場合、前者の大口径化・AOの成果が、火星本体の明るさのため、活かしきれていないところが問題です。即ち明る過ぎるために、(a)カメラのシャッター速度を最短にしてもサチュレーションを起こしてしまう(b)AOに必要なguide starsが写らない、などという皮肉な問題があります。このように問題点は山積して

いますが、ここに挙げなかったものも含め多くの天文学的手法の進展が、火星を含めた惑星の地上観測には反映されていません。原因は様々あると思いますが、いずれにせよ観測手法の発展を積極的に採り入れることで、新たな「地上観測の意義」が生まれてくるはずだと信じてやみません。

2.2 撮像観測

撮像による形態学的研究は、まず誰もが思い浮かべるであろうものだと思います。最近ではErard氏がPic-du-Midi天文台での観測で成果を挙げています[1]。この研究では、地表面の模様(albedo features)の経年変化から、レゴリスの風/砂嵐による移動を指摘しています。また、青色・赤色での展開図を作成し、自転に伴う異なる経度での画像を合成する過程から、地表面反射関数についての重要な指数(Minnaert index)を幾つかの波長帯について求めることに成功しています。さらに極雲・氷晶雲帯・山岳雲発生時期の確認及び形態学的考察から、極域・低緯度帯間に於ける水蒸気の移動の可能性を指摘しています。またMGS MOLAの観測成果を期に近年取り上げられるようになった極冠の後退曲線の経度依存性(非対称性)にも言及しています。

撮像測光観測について重要な業績は、1970年代のMcCord氏を中心としたグループのもので(たとえば[2])。彼らは多数の狭帯域フィルターを用いた多波長観測を行い、可視～近赤外域での地表面反射能スペクトルを地域毎に得ており、これは現在でも撮像データ解析の基礎となっています。

「地上観測」の語義からは少しずれますが、HSTによる撮像測光観測も重要です。James氏やWolff氏のグループは、1990年代のHST観測で見られた低緯度氷晶雲帯の光学的厚さとその季節変化・空間変化について研究し、Clancy氏らによって提唱された火星のH₂Oの役割の重要性[3]を支持する結果を提出しています(例えば[4,5])。

ここで誠に手前味噌ではありますが、我々のグル

ープの研究をご紹介します。先のErard氏の論文[1]の中では「火星など明るい天体の絶対測光では、光度補正のための基準星撮影との兼ね合いが非常に難しく、浮遊微粒子の光学的厚さの算出は無理である」と述べられています(HSTでは地球大気の影響がないためCCDの感度特性だけでキャリブレーションが可能です。ただし、その精度についてはいくぶん問題があるようです)。このため、氷晶雲、ダストともにその光学的厚さを算出した例が極めて少なかったのです。これは、特にバイキング時代以降、氷晶雲は「ないがしろにされてきた」ことも大きいと思います。我々は近年注目されている氷晶雲の光学的厚さを、(1)標準星を用いる代わりに、同一画面内で「澄んでいる」などと大気状態を仮定できる「標準地点」を選び出し、(2)その地点とターゲット地点との輝度比を用いて算出しました。ここで光の多重散乱問題の解法としてChandrasekharの創始したDiscrete Ordinate Methodを採用しています。これによって、低緯度氷晶雲帯・山岳雲の光学的厚さの日変化曲線を提示しました(図1)。午前中には減少し、正午～14時付近で最小値に至る傾向は見て取れます。これらの特徴は他の地域の日変化曲線にも共通します。未だ解析過程における精度不足から不十分なものではありますが、精度向上の可能性は十分にありまじ、それ以前にこの成果そのものが観測例が少ないため貴重なデータであると自負しています。また、この日変化曲線の地域差(絶対値の地域差ではない)が地上観測者を悩ませてきたブルークリアリング現象(青色像でのコントラスト増加現象)と統計的に有意に関連付けられることを示しました[6]。

次に、北半球夏季に発生するこの低緯度氷晶雲帯がcross-equatorialなハドレー循環の上昇流域に発生するものであることから、この氷晶雲帯の状態を連続的に観測することで、第一次近似としてハドレー循環(の上昇流域)の季節変化や経度依存性を明らかにできないか、との見地から、まず正午付近での緯度範囲の推移を調査しました(図2)。まだ

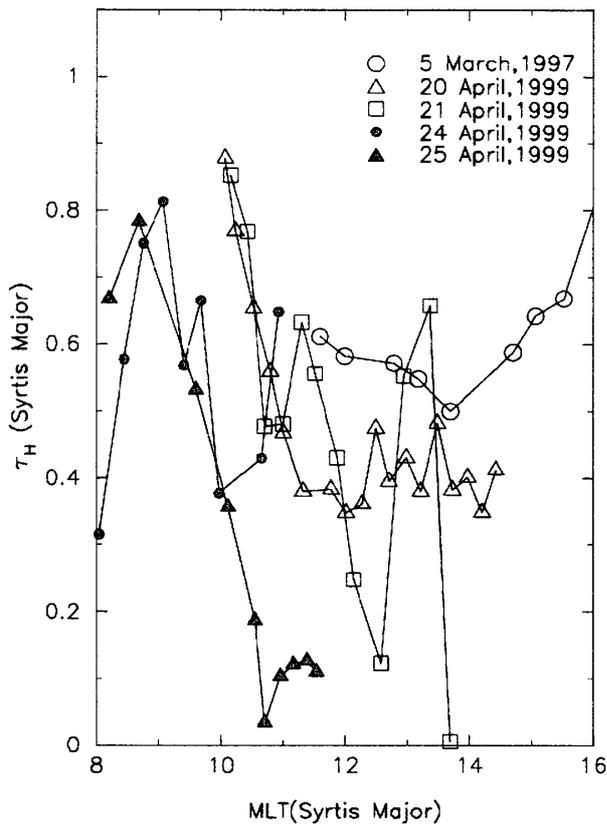


図1 Syrtis Major 上空の水氷雲の光学的厚さの日変化曲線。1997年と1999年の観測に基づく

サンプル数や表現方法についての不十分な点は多いですが、少なくとも衰退期までその緯度分布を変えていないことがわかります。またこの衰退期に於いては、特定の経度で雲のほとんどない地域が存在することを示し(図3)、これがハドレー循環の(経度方向の)局所化を示しているのではないかと示唆しました[7]。今後この水氷雲帯の存在条件と背景流、また大気波動との関連を理論的研究などに関連させながら調べることで、水氷雲を大気状態や大気運動の指標とすることができるのではないかと考えています。

2.3 偏光観測

特に可視域で我々が得る情報は、少なくとも1回以上の散乱を受けた太陽光です。先述の測光による浮遊微粒子の光学的厚さの解析でも重要になるのは、この散乱現象、より正確には多重散乱現象です。

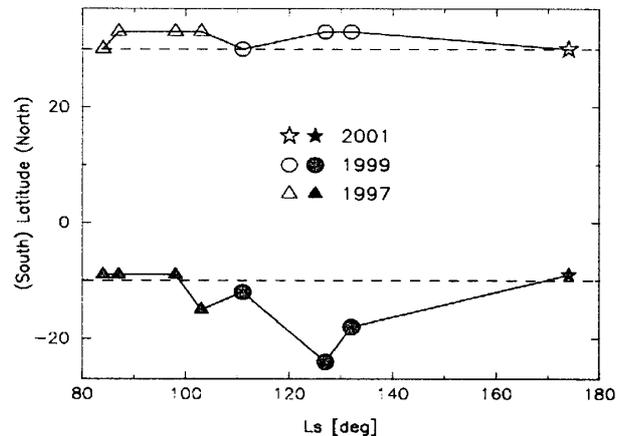


図2 低緯度水氷雲帯正午付近での南北境界の季節変化。横軸が季節を表すパラメータ(火星から見た太陽黄経)、縦軸に緯度がとってあり、白抜きで示したのが北端、黒塗りが南端である。1999年の南端のデータに雲幅の「膨らみ」が見られるが、少なくとも北緯30度-南緯10度の幅より小さくなることはないことがわかる。多くの研究が、この北緯30度-南緯10度の緯度帯がハドレー循環の上昇流域に一致することを示唆している



図3 1999年4月27日の青色像。低緯度水氷雲帯の「晴れ間」(矢印で挟まれた領域)。そのすぐ東側(右側)に淡い雲帯の「切れ端」が確認できる。紙面左から右へ時刻は進んで行く(自転している)。自転軸は各画像で左上が北、右下が南。自転に伴って朝側から雲帯が姿を現す。「晴れ間」「切れ端」も特定の経度に貼り付いている(「切れ端」はAmazonis南西部、170° W付近)。前半3枚には沈み行くOlympusの山岳雲が明るく輝いている

散乱の形態や性質・強度は散乱粒子に依存するため、逆に散乱光には散乱粒子の情報が含まれていると考えることができます。しかし、多重散乱によって個々の散乱の情報が希釈されるため、通常の測光観測だけでは散乱粒子の真の姿に迫ることがなかなか困難です。散乱による偏光状態の変化は、一次散乱の情報を比較的良く保存していると考えられており、この点で偏光観測は有力な手法と言えます。特に火星の場合、浮遊微粒子によって偏光度に顕著な変化が見られるものと考えられます。このように偏光観測が大きな武器になり得るにもかかわらず例が少ない(例えば[8])のは、結果が難解であること、

また解析そのものが難しいこと、顕著と言っても偏光度測定には高精度であることが要求されること、等の主として技術的な問題のためです。また、高分解能を実現するにはより大きな口径が必要ですが、反射望遠鏡は偏光観測には向いていません。このように、偏光観測は未だ発展途上であり、挑戦しがいのある分野であると思います。

2.4 分光観測

分光観測は天文学に於ける最重要観測手法と言ってもよいほどですので、当然火星についても多くの研究がありますが、20世紀中盤以降、殆ど行われなくなってしまいました。これはやはり地球大気の影響によって、分光観測の着眼点である化学種の特定とその測定が極めて困難であるからです。そこでエシエル分光など高分散分光が発達した昨今、火星と地球の相対視線速度によるドップラーシフトを用いて、CO₂やH₂Oの吸収線を捉える研究がなされています。このドップラー分光観測は視線速度が大きい時期即ち視直径の小さな時期しかできず大望遠鏡が必要になるため、観測成功例は多くはありませんが、特に水蒸気量の空間分布の季節変化は、飛翔体直接探査の間隙を補うものとして貴重なデータとなっています(例えば[9])。さらに近年では近赤外域のディテクターの開発・改良が進み、この波長帯での新たなサイエンス、例えばCO₂雲とH₂O雲の識別やレゴリスの化学組成分析などが生まれつつあります(例えば[10])。

2.5 電波観測

電波観測も偏光観測と同じく研究例は多くありません。しかし、バイキング計画の成功で誰も疑わなかった「高過ぎる火星大気温度」の問題を電波観測(1.3mmのCO回転ラインなど)から指摘し、さらにその他多くの精力的研究と統合させ、水循環の重要性を謳い新しい火星像を打ち出したClancy氏のグループの1996年の研究論文[3]は、現代そしてこれからの火

星業界を生きて行く上でまさに必読と言えます。Clancyグループの研究では「バイキングは特別に気温の高かった状況を観測していた」と断じたわけですが、その後実際に、バイキング周回船が搭載していた赤外観測装置の大気温度データにはより温かい地表面温度の寄与が混入しているという研究が発表され[11]、大きな衝撃を与えました。その結果火星の大気温度は下方修正され、よりH₂Oの役割が重要になり、その流れが近年の地下のH₂Oの話題にも影響していると思います。電波観測では解像度が低い(火星像全面でしかものが言えない)のですが、Clancy氏は有効な面積($\sin \theta$ を乗じたもの)から考えて実際に見えている温度は中低緯度域であると仮定することでこの問題を回避しています。Clancy氏の研究でもそうですが、今後の電波領域の主たるターゲットは、中・上層大気の光化学現象になると思います。「のぞみ」のメインターゲットは高層大気の電磁氣的・化学的なものですから、野辺山の施設などでの何らかの支援観測は一考に値するかもしれません。また、周回探査機を打ち上げた場合必ず行われる掩蔽観測も一種の地上電波観測と言えるかもしれませんが、これによる大気波動の研究も行われています。

3. 現行の火星地上観測

今年は「6万年ぶりの超接近」などと呼ばれる大接近の年に当たります。視直径は25秒角を越え、長期にわたる観測が可能です。火星は約2年2ヶ月ごとに地球に接近しますが、この大接近の時期は必ず南半球夏季/北半球冬季に相当します。ちなみに前回2001年の観測機は「中接近」等と呼ばれ、南半球春季/北半球秋季でした。今回のような南半球夏季には、何と云っても、大小はともかく砂嵐の発生が期待されます。この砂嵐はその加熱効果により大気の大変重要な存在ですので、その盛衰過程を詳らかにすることは大変意義があります。しかし、実は地上観測でこれを明確なか

たちで議論するのはなかなか難しいのです。というのも、明暗模様の暗部に乗り上げた砂塵はそれとすぐに分かりますが、明部の上に明るい砂塵があってもそれを同定するにはかなりの「眼力」が必要で、且つそれを明確に示すのは、地表面反射関数や反射能の空間分布についての詳しい情報がない限り、測光撮像だけでは大変困難だと思います。そこで、我々は先述の偏光撮像観測によって偏光度マップを作成し、ダストの分布を示すことを考えています。飛騨天文台の65cm屈折望遠鏡で惑星観測をすることを第一目標に東京理科大の川端教授のグループが開発した偏光撮像装置(Hida Observatory Polarimetry System; HOPS)を利用させてもらう予定です。また、青色光による(普通の)撮像観測を続け、山岳雲を始めとする氷晶雲の有無を確認していくのも重要だと考えています。通常は無いとされますが、バイキング観測の修正・再解析から、一概にそうも言えないという可能性が指摘されているからです。

極地方に目を向けると、ここにはある時期までは極雲の存在が期待されますが、その盛衰過程については、極冠の高アルベドが通常の撮像観測、特に連続光による同定を困難にしています。これを、 H_2O と CO_2 のそれぞれに特徴的な近赤外の波長で撮像し、比をとることによって CO_2 と H_2O を識別し、極雲の同定と分析を行うことが検討されています。この近赤外領域が注目されるようになった背景には、赤外線検出器の発達があります。赤外線検出器は、可視のCCDより開発が遅れていましたが(実は赤外線検出器はCCDではないのです)近年、感度向上、低ノイズ化、高画素化がどんどん進んでいます。特に近赤外では、急激に高画素化していて今最大 4096×4096 画素(あるいはそれ以上)が利用可能、感度も90%以上あると聞いています。画素数、感度等でCCDに引けを取らない近赤外検出器ができるようになったのは最近のことのようです。これにより、近赤外域で、可視と同じように高感度、高解像度のイメージングができるようになりました。

南米チリでは日米欧合同の電波観測施設建設開発計画が進んでいます。ALMAと呼ばれるこの電波望遠鏡システムは、ミリ波・サブミリ波領域が主たるターゲットですが、HSTを凌駕する驚異的な分解能0.01秒角を目標にしていると聞いています[12]。現在までこのような高分解能の電波観測は当然惑星でも系外天体でも行われていません。この来るべき新兵器を有効に活用するためにも、火星に限らずまだまだ活発とは言い難い惑星の電波観測を積極的に行っていく必要があるでしょう。

4. 火星地上観測の課題と将来像

よく言われる地上観測の長所は、少し先述しましたが、「長期観測が可能であること」です。しかし、近年惑星探査列強が矢継ぎ早に高性能探査機を打ち上げ、単体でも長い寿命を実現しているだけでなく計画を連続させることで長期化が図られるようになってきています。地上観測では見ている現象の時空間スケールが異なるのでこれを以て単純に地上観測の意義を低めることは避けなければなりません。が、実はそれだけではありません。確かに50年を優に超える観測アーカイブがありますが、その殆どはアナログデータ、つまり写真であるため、現代のCCDによる高品質デジタルデータとの比較、データ品質の連続性の確保が現状では難しいのです。地上観測の本当の威力を発揮するためには、過去数十年にわたる膨大なデータを地道に且つ早急にデジタル化していく必要があると考えています。現にいくつかの観測所では様々なネガフィルムのスキャンを始めているそうですが、惑星の撮像/分光データについては、残念ながら聞いたことがありません。これが「寡聞にして私が知らないだけ」であることを望みますが……。いずれにせよ、この課題は乗り越えるべきものであり、かつ乗り越えることが比較的容易なことなので、地上観測の意義を高めるためにも、またお蔵に眠るフィルムが劣化して「お蔵入り」する

前に、各観測所は是非検討して頂きたいと思います。

このように書いてきますと、何となく探査機屋・理論屋・地上観測屋が互いにライバル視しあっているようにも見えます(実際互いの短所ばかりをあげつらうだけの方々が居るのが困ったことです)が、本来そうであってはならないはずで、それぞれが互いに補完しあって行かねばなりません。探査機の浮遊微粒子やレゴリスの光学的性質についての成果を地上観測に取り入れて精度を高め、鉛直構造や流れの情報を理論計算し、それをまた探査機・地上観測の解析に役立て、地上観測での知見から新たな探査機のサイエンステータゲットを見いだして行く...といった融合が必要なのです。私はそのいくつもあるであろう融合に向けてのアプローチの一つに、「データ同化」があると考えています。これは観測値を随時シミュレーションの中に取り込んで行く際の手法のことで、現在、気象庁の数値予報などに用いられています。気象数値予報の場合には時空間的に非常に高密度の観測点が存在することを前提に構築されていますので、火星にひょいとそのまま応用することはとてもできないでしょうが、近年ようやくアメリカの連年の探査機によって少しずつ観測の密度が高くなるようになり、この「データ同化」の研究が始まっています。これらの研究に対し、地上観測からも、例えば何らかの物理量の総観・全球規模の分布についての制限を与えるなど、少なからず貢献ができるはずです。「データ同化」に限らずとも、このような探査機・理論計算・地上観測——あるいはさらに来るべき新たな手法——の融合が実現すれば、予報ではなく過去ないし現在のデータ解析に大きく寄与するのではないかと、という希望を抱いています。

5. 謝辞

まず始めに、著者の共同研究者である赤羽徳英氏、岩崎恭輔氏(京都学園大)、S. M. Larson氏(アリゾナ大)に感謝致します。赤外線検出器の現状など

については、京都大学大学院理学研究科の衛藤茂氏の協力を得ました。近赤外域での観測については東北大学大学院理学研究科の坂野井健氏、菅野麻里絵さんから有益な情報を提供して頂きました。また本稿の著者は日本学術振興会のサポートを受けています。拙稿に対し様々な指摘を下された査読者にも感謝致します。最後に、平素からご助力頂いており、また今回小文の投稿を勧めて下さった北海道大学大学院理学研究科の小高正嗣氏に感謝したいと思います。

参考文献

- [1] Erard, S., 2000, *Planet. Space Sci.*, 48, 1271
- [2] McCord, T. B., and Westphal, J. A., 1971, *Astrophys. J.*, 168, 141
- [3] Clancy, R. T. et al., 1996, *Icarus*, 122, 36
- [4] James, P. B. et al., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 18,883
- [5] Wolff, J. M. et al., 1999, *J. Geophys. Res.*, 104, 9027
- [6] Nakakushi, T. et al., 2001, *J. Geophys. Res.*, 106, 5043
- [7] Nakakushi, T. et al., 2002, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 54, L31
- [8] Dollfus, A., Ebisawa, S., and Crussaire, D., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 9207
- [9] Sprague, A. et al., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 23,229
- [10] Bell III, J. F. et al., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 9227
- [11] Wilson, R. J., and Richardson, M. I., 2000, *Icarus*, 145, 555
- [12] 関口朋彦ほか, 2003, *遊星人*, 12, 96