

特集「21世紀へ向けての惑星科学」

惑星科学における地上観測

渡部 潤一¹

惑星科学において、地上からの天文学的手法による観測や天文観測衛星と呼ばれる地球周りの人工衛星などからの観測（ここでは惑星探査に対し、広い意味でこれらも地上観測と呼ぶことにする）が再び重要になりつつある。という、惑星科学でも天文から比較的遠い研究分野の人には意外に感じる人もいるかも知れない。だが、21世紀を見通し、やや長い時間尺度で惑星科学の流れを見てみると、かなりはっきりした事実であることがわかる。本稿は、この一見不思議にも思える惑星科学の「地上観測」の現状と、その将来の展望を簡単にまとめたものである。

1. 地上観測を取り囲む状況

月を歩く人間。岩石だらけの火星の荒野。高く吹きあげるイオの火山。巨大な海王星の斑点。たちのぼるトリトンからの黒い煙。そしてハレー彗星から吹き出す複雑なジェット。そんな迫力のある映像がお茶の間のテレビや新聞を賑わし、惑星科学はまさに探査の黄金時代をむかえた。同時に、「地上観測ではもうやることがなくなった」という誤った認識が一般に広まっている。この誤解は、特に層の薄い日本では天文学や地球物理学の研究者にもあるようである。しかし、一度アメリカのDPS（天文学会の惑星科学分科会）などの会合に出てみると、あるいはそのプログラムを眺めただけでも、こういった認識が浅いものであるかわかるはずである。

地上観測は探査と並んで惑星科学においては車の両輪に例えることができよう。もちろん、1960

年代から次第に探査の占める比重が大きくなってきたが、これは単に惑星探査という新しい手法が発展しただけで、地上観測でなくては手が出せないことはあいかわらず多い。逆に探査の結果を受け、さらなる地上観測が望まれる部分も増えている。

惑星科学研究において、各研究手法がどのような割合になっているのだろうか。表1はDPSのフォーマルジャーナルであるICARUSに1991年度に掲載された論文の研究手法別の比率を示したものである。さらに、表2には観測結果に基づく論文の手法別の比率を示した。地上観測の高い比率が目につく。もともとICARUS自身がJ.G.R.などの地球物理学系の雑誌と異なり、天文学寄りの読者層を持っていることも高い比率の一因でもあるが、それを勘案しても惑星科学の中での地上

表1 1991年中にイカルスに発表された論文の研究手法

| | |
|-------------|-------|
| 理論/シミュレーション | 52.8% |
| 地上/探査による観測 | 33.0% |
| 実験 | 11.9% |
| その他 | 2.3% |

表2 表1の観測に基づく論文の観測手法

| | |
|----------------|-------|
| 地上施設による観測 | 60.3% |
| 地球近傍の衛星などによる観測 | 10.3% |
| 惑星探査機による観測 | 29.3% |

¹国立天文台光学赤外線天文学研究系

観測の重要性を示すものにはちがいない。

また、現実問題として未探査の天体（彗星、小惑星などの小天体や冥王星以遠の天体）も多く、これらの天体の研究はいまのところ地上観測の独壇場である。

さらに、惑星探査を取り巻く状況がきびしくなりつつあることが相対的に地上観測の地位を押し上げつつある。というのも、アメリカが今までのような大型惑星探査を次々と中止し、宇宙開発計画自身が見直されているからである。2月のクリントン新大統領の演説でも、宇宙ステーション計画を含めた大幅な支出削減を行うようである。これと歩調を合わせるようにしてヨーロッパ連合の計画もやや遅れ気味である。したがって、その代替として地上観測への要求は強くならざるを得ない。もともと超大国の惑星探査は国家の威信やらなにやらの政治的な思惑主導で進んだ面があり、純粋に科学的な要求だけから始まったことではない。さらに、アメリカ国民の大半はボエジャーの海王星接近を最後に「惑星探査は終わった」との印象をもっているようで、よほど経済がよくなる限り、将来の大型の惑星探査が実現する可能性は少ないだろう。

2. 地上観測とその手法

それでは、地上観測とはどんなものか、その概要を簡単に紹介してみよう。

一般に天文学の地上観測では、天球上の観測対象の情報は空間2次元、波長1次元、時間1次元の4次元で構成されている。これらをすべて同時に取り込めば完全な観測ということになるが、実際には観測機器・検出装置の限界や対象天体の光子数不足、さらには観測装置のおかれた環境からの制約などにより、目的の応じて特定の次元のある領域だけを重視したデータ取得を行うのが普通である。

このうち空間情報を重視したものが撮像観測であり、惑星表面の模様や彗星の姿を撮影したり、

小惑星の位置をまわりの恒星から決定する観測などがその例である。波長情報を重視したものは分光観測と呼ばれ、プリズムやグレーティングなどを通して得られるスペクトルから分子や原子に特徴的な輝線や吸収線を見いだすことができる。さらに、こういったスペクトルからドップラー効果を利用して視線方向の運動も知ることができる。対象天体が暗い場合などは波長方向の分解能を落とすことがあるが、これは測光観測と呼ばれる。時間情報を重視するのはモニター（監視）観測と呼ばれるが、特殊なものを除いて他の手法と併用するのが普通である。

これらのうちひとつ、あるいはいくつかの手法を組み合わせ、特定の波長で目的の天体を狙うことになる。観測装置は可視光から中間赤外線ならば地上の光学・赤外線望遠鏡、電波ならば電波望遠鏡や電波干渉計などが用いられる。紫外線から短い波長領域、あるいは中間赤外線よりも長い遠赤外線領域では地球大気や水蒸気が邪魔となり、地球周回軌道の天文観測衛星や高高度のロケット、気球、飛行機などの手段に頼らざるを得ない。表3は地上観測に基づく論文で、その観測がどの波長で、どの手法を利用したのかを調べたものである。

波長別で見ると可視光が圧倒的に多い。これは、従来の天文観測の手法が容易に使えること、地上からもっとも好条件で観測できる波長域であるこ

表3 地上観測の波長別／観測手法別の割合 (%)

| 波長\手法 | 撮像 | 測光 | 分光 |
|-------|--------|--------|--------|
| 紫外線 | 0. 0 | 0. 0 | 7. 3 |
| 可視光 | 1 7. 1 | 1 4. 6 | 1 4. 6 |
| 近赤外線 | 4. 9 | 0. 0 | 9. 8 |
| 中間赤外線 | 0. 0 | 0. 0 | 9. 8 |
| 遠赤外線 | 0. 0 | 2. 4 | 2. 4 |
| ミリ波 | 2. 4 | 0. 0 | 9. 8 |
| センチ波 | 4. 9 | 0. 0 | 0. 0 |

と、一般に太陽系天体は太陽の光を反射するので他の波長域に比べ光子数も多く、それに含まれる情報も少なくないこと、さらに近年では観測機器も進歩して、光子検出の量子効率が90%をこえるような CCD 撮像素子が普及してきたことなどが主な要因である。ついで比率の多い近赤外線領域は、これまで検出機器が少なかったため、取り残されてきた波長域である。現在、急ピッチで装置開発が進みつつあり、赤外線 CCD 素子も普及しはじめたので、今後は中間赤外線領域ともども観測の需要は増えていくと考えられる。遠赤外線領域は飛行機を利用したカイパー天文台と赤外線天文衛星アイラス、紫外線領域は国際紫外線天文衛星 (IUE) という衛星による観測である。電波領域はアメリカの電波望遠鏡・干渉計を利用した撮像・分光観測が主である。

なお、太陽系天体では上記以外にその特徴を生かした独特の観測が可能である。そのひとつは、天体が天球上を動いて恒星を覆い隠す掩蔽現象を利用する方法である。かつては月が恒星を隠す掩蔽の時刻測定により、月の運動が詳しく調べられていたが、惑星の位置予報や恒星の位置が高精度でわかってくると、隠す天体として惑星や小惑星が考えられるようになった。この現象を利用して、天王星や海王星の輪、冥王星の大気が発見されたのはご存じの通りである。観測に成功すると、恒星の減光曲線の解析から惑星の大気構造や小惑星の形などが調べられるため、今では多くの予報が計算されるようになっている。

もうひとつ太陽系天体だけで可能な観測手法がアクティブな電波観測、すなわちレーダー観測である。アレシボやジェット推進研究所などの送信可能なパラボラアンテナからレーダー波を直接天体に当て、その反射波から自転速度や大きさ、表面状態を調べるものである。火星、金星、小惑星、彗星などが観測されているが、最近では水星のレーダー観測で極付近に氷のものとみられる反射強度の高い場所が見つかり話題になった[1]。反射

波の強度が距離の4乗に反比例するので、地球に近くないと実質的には有益な観測ができないが、逆に地球に近づく小惑星などでは天体が小さくても1992年末のトータチスのように高解像度の観測ができる。

3. 地上観測での惑星科学

地上観測装置が太陽系のどの天体に向けられているかを調べたのが表4である。

始原天体として太陽系形成時の鍵を握るものの、探査が難しい小天体である彗星が高率を占め、さらに探査しにくい天王星以遠の惑星、小惑星と続く。これからもほとんどの惑星や衛星に望遠鏡が向けられているのがわかる。

それでは、こういった地上観測で実際に何が明らかにされつつあるのだろうか。当然、論文の数ほどおもしろいことはあるはずだが、いくつか大きな柱がある。それらを独断してしまえば惑星大気の観測、固体小天体・衛星の表面物理観測、そして天体探索の3つである。

惑星の大気観測では大気分光観測と狭帯域波長域での撮像観測が中心手法となる。分光観測では成分同定や微量成分・同位体等の検出がオーソドックスな目的で、これらは惑星の起源と進化を論じる上でキーである。例えば、水素の同位体である重水素の量は近赤外線の1.6ミクロン付近のメタン分子の吸収スペクトルを利用し、通常のメタンとメタン分子中のひとつの水素が重水素にお

表4 地上観測の対象天体の割合

| | |
|-------|-------|
| 金星 | 9.8% |
| 火星 | 2.4% |
| 木星 | 12.2% |
| 土星 | 9.8% |
| 天/海/冥 | 19.5% |
| 小惑星 | 12.2% |
| 彗星 | 29.3% |
| その他 | 4.8% |

き変わった CH_3D の比から決めることができる。今までの所、木星や土星では重水素量が星間物質に近いが、地球や外惑星の衛星などでは一桁大きい。彗星、隕石などの固体物質には重水素が多いため、木星や土星の大気は原始太陽系ガス起源、それ以外は彗星や隕石などの衝突起源だったという類推がつく [2]。地球型惑星の大気が一次大気（もともと惑星に存在していたもの）か、二次大気（一次大気がはぎ取られたあとから惑星内部や彗星からの供給によってできたもの）かを議論する上でも、同位体比は希ガスとともに重要な情報を提供する。この種の観測は、今後は検出素子の発達に伴い、旧来の可視光領域から、分子スペクトルが豊富に存在する赤外線領域（図1） [3] が中心になりつつある。近赤外線は現在もまだ発見の時代が続いており、最近ではイオに火山活動起源と思われる未知の吸収線が検出され話題になった [4]。

同じ大気の分光観測でも、ややちがった観点からのアプローチも行われている。特定のスペクトル線の波長のドップラー効果を利用して、大気の運動を調べるものである。今までは大気運動というと、木星や土星の縞構造の時間変化といった平面的な情報を撮像観測によって議論するだけだったが、分光観測では視線方向の速度の情報を取り出すことができ、三次元的な運動を理解する上で貴重である。分光観測でもヘテログイン型などの高分散分光器を大望遠鏡と組み合わせ、火星表面上の各場所でオゾンなどの微量元素の吸収線を測定し、火星大気の運動を調べたり [5]、あるいは干渉計により金星大気の一酸化炭素の出す波長2.6ミリの電波で金星上層大気の大規模運動など議論できるようになっている [6]。また、超高層大気から電磁気圏にかけての観測は地上からは難しいと思われていたが、最近木星型惑星でオーロラの発光が赤外線撮像観測されるようになり、一挙におもしろくなってきている [7]。

二つ目の柱である固体小天体・衛星の表面物理

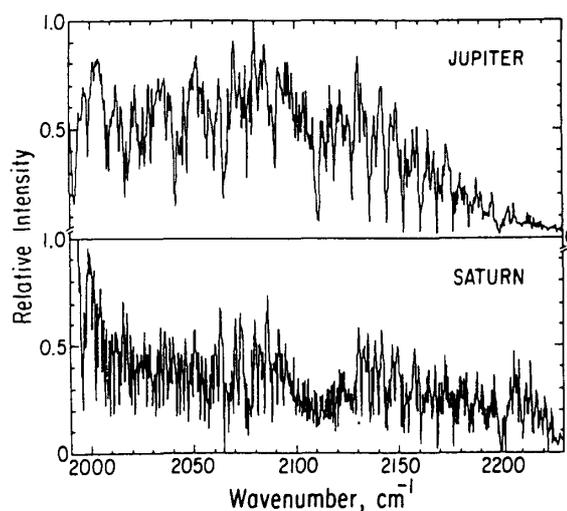


図1 波長5ミクロン付近での木星と土星のスペクトル。AsH₃、CH₃D、CO、GeH₄、NH₃、PH₃などの分子の吸収線で、両者の差は主にPH₃による [2]。

観測も、手法としては可視光から赤外線の分光観測が主である。一般に対象天体が暗いので、低分散での分光観測となる。これに関しては、日本は隕石保有国として、隕石と実際の小惑星などのスペクトルの比較などの研究が進みつつある [8] ので、ここで改めて紹介する必要もないだろう。アポロ・アモール型小惑星などのように地球に近づく場合、レーダーによる観測や位相角（太陽-小惑星-地球のなす角）が大きく変化するようなときには偏光測光なども表面状態を知るのに有効な方法である。

三つ目の柱である天体探索では、太陽系内では彗星・小惑星などの天体、特に最近では地球に衝突する可能性もあるアポロ・アモール型小惑星の探索が検討されているほか、後で述べるような新種の天体の探索も行われている。

4. 新しい惑星科学の流れ

ところで、これまでの地上観測による惑星科学とは、やや趣を異にする新しい流れが起こっている。そのうちでも、21世紀へ向けて特に注目した

いのが次のふたつである。

4.1. 他の惑星系／原始惑星系円盤

惑星科学の研究の究極の目的のひとつは起源の解明であろう。われわれ惑星系がどうやってできたのか、その形成過程はどうだったのか、そしてこのような惑星系となったのは必然か、偶然か？われわれは現在の太陽系、つまり1太陽質量の星の周りでできあがった46億年後の状態というたったひとつのサンプルしか得ていない。

ところが、最近若い生まれたての星のまわりでガスや塵の円盤構造が観測されつつある。そして、赤外線望遠鏡や野辺山の電波望遠鏡が大活躍している。その空間分解能はまだ100天文単位で物足りなさは感じるが、惑星科学にとってみると太陽系以外のサンプルを観測することで、いままでの不可能であった太陽系形成理論の検証に迫ることができる。さらには、惑星系形成のバラエティが明らかになるかもしれない。惑星形成過程といった時間軸方向の進化だけでなく、中心星の質量や角運動量、あるいは磁場といった初期条件の違いがどのように惑星系形成にかかわるのかわかる可能性があるのである。比較惑星学ならぬ、比較惑星系学の誕生といえるだろうか。

このあたりの事情は本誌第一号に林正彦氏 [9] がまとめて紹介しておられるので、内容については詳しく述べないが、天文学で星形成に関わっている研究者と惑星科学の研究者との間の新しい境界領域として、また地上観測に依存する惑星科学の大きな流れとして定着しつつあることは確かである。観測限界が観測装置で決まっている事情から将来の地上大型観測装置への要求が強まることは確実だろう。

4.2. 太陽系外縁部の探索

上で述べたように他の原始惑星系円盤と思われる観測がぞくぞくと見ついているが、そのスケールは観測限界から来る分解能の不足ではなく、

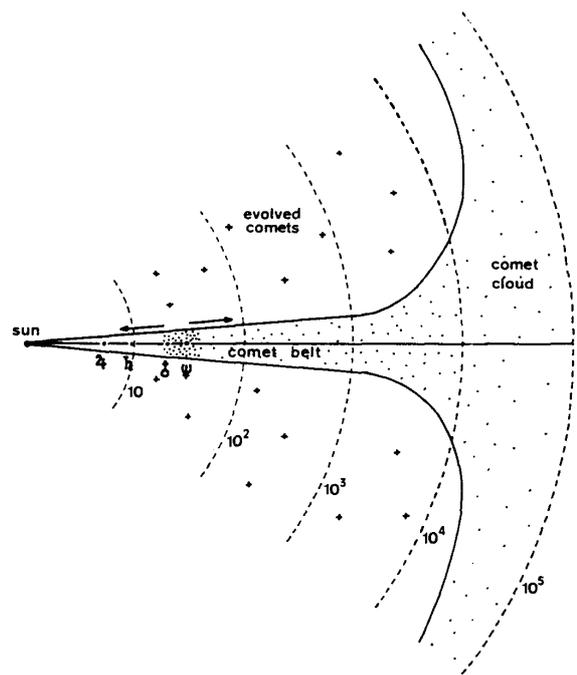


図2 カイパー・ベルトを含む太陽系外縁部の想像図(断面)。

実際に100天文単位を越えている例が多い。が、座β星のまわりでは400天文単位まで広がった塵円盤が見ついている [10]。一方、われわれの太陽系は冥王星が40天文単位である。これはちょっと小さすぎやしないか？冥王星の外側にまだ未知の天体があってもいいのではないか？

昔から第十惑星の発見を目指した試みがいくつかあったが、すべて失敗に終わっている。最近では第十惑星の存在の有力な証拠と思われていた海王星や冥王星の軌道の“ふらつき”が否定され、パイオニアなどの探査機の軌道も揺らいでいないことから、少なくとも海王星クラスの大惑星が存在することはないだろうといわれている。しかしながら、一部の天文学者は、冥王星の外側には「カイパー・ベルト」と呼ばれる彗星の巣があると予想していた (図2) [11]。彗星の進化の研究から現在の短周期彗星の数を説明するには「オールトの雲」だけでは不可能だからである。

そして、ついにその候補が見つかった。1992QB1

という仮符号がつけられた天体である(図3)。ハワイ・マウナケア山頂にあるハワイ大学の口径2.2m望遠鏡で発見されたもので、少なくとも軌道の平均長半径は44天文単位、かなり円軌道に近く、冥王星よりは遠い。周期も300年と、冥王星の248年を大きく越えている。明るさは24等で、直径は100kmから200kmと小さい。おそらく巨大な彗星のひとつだろう。

こういった太陽の熱変成をそれほど受けていない天体は物質科学的にも非常に興味を引く。現在のところ、表面物質を特定するようなスペクトルを得ることはできないが、見方を変えてみれば、

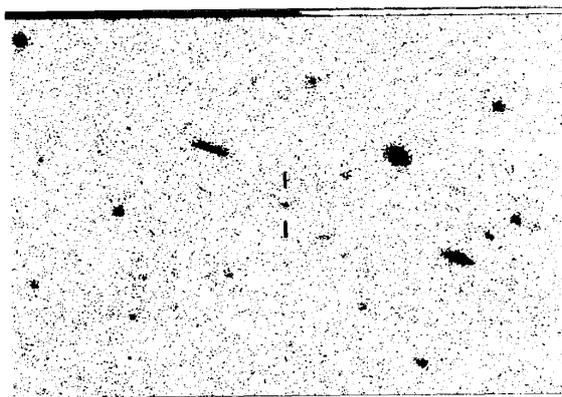
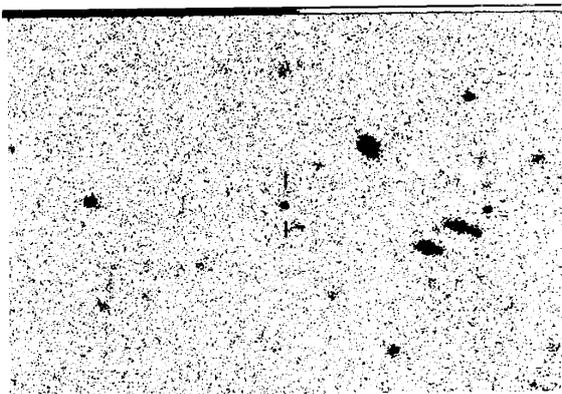


図3 1992QB1の発見画像。マウナケア山頂ハワイ大学2.2m望遠鏡にCCD素子をつけて撮像したもの。長いのは手前の小惑星帯にある普通の小惑星で、1992QB1の動きがきわめて遅いことがわかる。デーブ・ジュイット提供。

これらの天体はオールトの雲から来る“新”彗星と類似しているはずである。そして、“新”彗星の遠方での活動はあまり観測が無い。当然の事ながら、いつどこから来るかがわかっていないため、太陽に充分近づき、明るくなってから発見されるからである。しかし、それでも情報を得る方法はある。こういった新彗星で二酸化炭素や一酸化炭素などがどのくらいあるのか、そして太陽に近づいて何が起るのか、を地上観測で塵の尾や核近傍の撮像観測から推測できるからだ[12]。私は個人的には最近この種の観測に傾注しているが、こういった既存の天体との物理的、化学的な関連にも研究の目が向けられることになるだろう。

あるモデルによれば「オールトの雲」の5-10倍以上の彗星が「カイパー・ベルト」に存在するという理論もあり、これから21世紀にかけて大型望遠鏡が動き出せば、さらに遠くにこのような天体がぞくぞくと見つかるだろう。太陽系外縁部にまだまだ未知の構造が存在するとすれば、それはいままでの太陽系のスケールを広げるだけでなく、われわれ太陽系の起源を解く重要な鍵にもなるはずだ。太陽系でも初期には、このような大きなスケールの円盤が存在し、冥王星の外側でも氷や塵が凝縮・成長して多数の彗星核ができていたのかもしれない。この天体を発見した望遠鏡と同じ場所には、やがて日本の口径8m「すばる」望遠鏡も完成する[13]。この望遠鏡は大型望遠鏡には珍しく、探索のための主焦点広視野観測モードをもった大型望遠鏡である。しかも、CCD素子をたくさんならべ、一挙に広い視野をカバーするモザイク型CCD撮像装置の開発も順調である。これが完成すれば、太陽系の地図を大きく塗り変えるかもしれない。

5. 日本の地上観測環境

最後に、日本における地上観測環境についても触れておこう。まず、日本ではジェット気流や複雑な地形がもたらす乱流のために星の光がちらち

らする。これは見ているだけならきれいでもいいのだが、観測するときには星像がひろがってしまい限界等級を下げることになってたいへんに不利で、光学系を能動的に動かして星像をよくする試みも進んでいる(図4)[13]。また、都市化が進み、光の害も年々ひどくなってきている。さらに赤外線やサブミリ波では大敵である水蒸気量が多い。装置環境についていえば、野辺山には世界最先端の電波望遠鏡があるものの、光学・赤外線での望遠鏡は小さく、検出装置のCCD開発・導入などにもかなり遅れを取った経緯がある。現在ハワイ・マウナケア山頂に建設中の「すばる」望遠鏡(図5)はその不利な面を一掃し、光学赤外線分野で



図4 気流の乱れによる星像の広がりシミュレーション[13]。下の画像が典型的な日本の空、上が典型的なハワイ・マウナケア山頂の空。

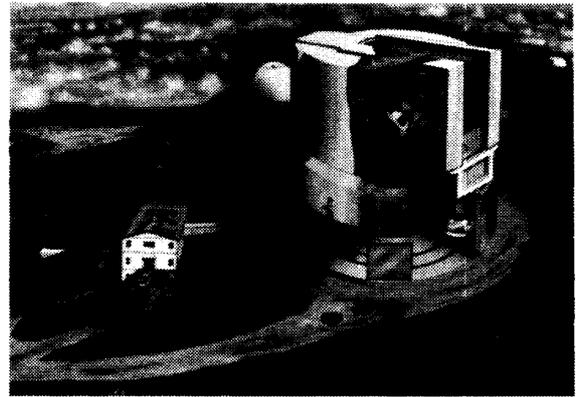


図5 ハワイ・マウナケア山頂に建設中の大型光学赤外線望遠鏡「すばる」。

われわれは世界一級の装置を手にするはずである。またそれに続いて大型の電波干渉計なども計画中である。

このような大型装置が完成した暁に惑星科学でも様々な成果が出るように、少しずつ地上観測を惑星科学へ応用していく研究者が増えることを願っている。

参考文献

- [1] 上野茂樹, 1992: 水星や月に氷はあるのか?, 日本惑星科学会誌, 1, 56-59.
- [2] Owen, T., Bar-Nun, A., and Kleinfeld, I., 1991: Noble Gases in Terrestrial planets: Evidence for Cometary Impacts?, in Comets in the Post-Halley Era (*IAU Colloq.* 116), 429-437.
- [3] Noll, K.S., and Larson, H.P., 1990: The Spectrum of Saturn from 1990 to 2230 cm⁻¹: Abundance of AsH₃, CH₃D, CO, GeH₄, NH₃, and PH₃, *Icarus*, 89, 168-189.
- [4] Trafton, L.M., Lester, D.F., Ramseyer, T. F., Salama, F., Sandford, S.A., and Allamandola, L.J., 1991: A New Class of Absorption Feature in Io's Near-Infrared Spectrum, *Icarus*, 89, 264-276.

- [5] Espenak, F., Mumma, M.J., Kostiuk, T., and Zipoy, D., 1991: Ground-Based Infrared Measurements of the Global Distribution of Ozon in the Atmosphere of Mars, *Icarus*, **92**, 252-262.
- [6] Shah, K.P., Muhleman, D.O., and Berge, G., 1991: Measurement of Winds in Venus' Upper Mesosphere Based on Doppler Shifts of the 2.6-mm ^{12}CO Line, *Icarus*, **93**, 96-121.
- [7] Baron, R., Joseph, R.D., Owen, T., Tennyson, J., Miller, S., and Ballester, G., 1991: Imaging Jupiter's Aurorae from H_3^+ Emissions in the 3-4 μm Band, *Nature*, **353**, 539-542.
- [8] 武田弘, 1993: 小惑星・隕石・惑星科学, 本誌.
- [9] 林正彦, 1991: 日本で進む原始惑星系円盤の研究, 日本惑星科学会誌, **1**, 10-17.
- [10] Smith, B.A., and Terrile, R.J., 1984: A Circumstellar Disk Around Pictoris, *Science*, **226**, 1421-1424.
- [11] Ip, W.-H., Fernandez, J.A., 1991: Steady-State Injection of Short-Period Comets from the Trans-Neptunian Cometary Belt, *Icarus*, **92**, 185-193.
- [12] 渡部潤一, 1993: はるかな時空をかける処女たち: 一その彗星のささやきを聞け一, 天文月報, **86**, 16-23.
- [13] 家正則, 海部宣男, 小平桂一, 1992: 口径8m「すばる」望遠鏡計画: 宇宙の生い立ちを解明する, 日本物理学会誌, **47**, 269-276.