

太陽系外惑星の発見と研究の現状

伊藤孝士 Takashi ITO

1995年に最初の発見がなされて以来、太陽系以外の惑星系、いわゆる太陽系外惑星系の発見は加速度を増しており、2001年2月現在でその数は60個近くにも及んでいる。本稿では現在までに発見された太陽系外惑星の特徴や主要な観測方法について簡単に触れ、そこから派生した現状の問題点についてまとめてみたい。本稿には太陽系外惑星系研究のごく基本的な事項のみを記してあるが、参考文献を多めに挙げておいたので、より深い関心を持った読者はそれらの文献に直接当たることをお勧めしたい。

1. 太陽系外惑星の発見とその定義

1995年に Mayor と Queloz によって最初の発見がなされて以来 [31]、太陽に似たスペクトル型をもつ他の恒星の周りに、惑星が次々と発見され始めた [3,51,41,30,28,29]。G. Marcy らを中心とした exoplanets.org のウェブサイトにあるデータをもとにして、太陽系外惑星系の軌道半長径と軌道離心率および質量の関係を図示したのが図1である。白丸で示された私たちの太陽系の木星型惑星 (木星・土星・天王星・海王星) と比べると、太陽系外惑星の姿が実に多様であることがすぐにわかる。惑星の質量は、木星の質量の0.16倍から17倍と大きくばらついている。惑星の軌道半長径はどれも3.5AU (AU=天文単位) 以内に収まっているが、特筆すべきは0.1AUよりも小さな軌道半長径をもつ惑星が非常に多いということである。すなわち、木星に匹敵する巨大な質量をもつ惑星が主星のごく近傍を短い周期で公転しているという描像が得られているの

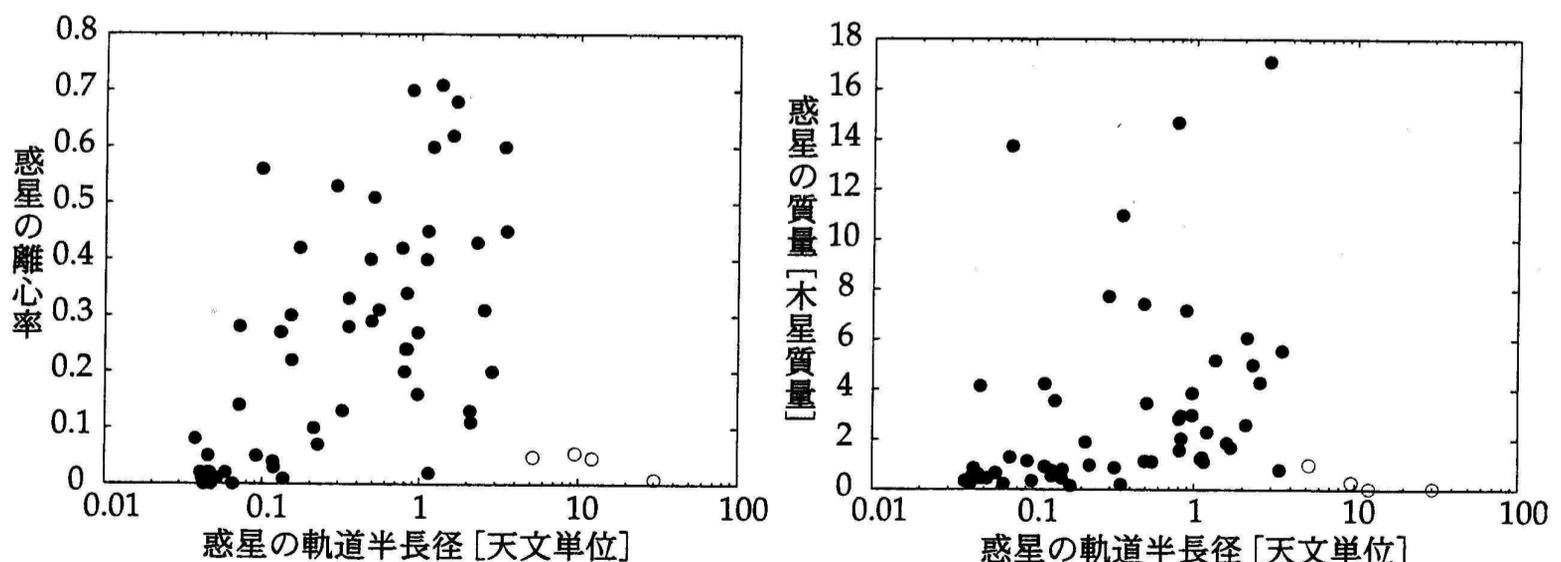


図1 2001年2月現在までに発見された太陽系外惑星の軌道半長径、離心率、質量の関係
黒丸 が太陽系外惑星、白丸 は太陽系の木星型惑星 (木星・土星・天王星・海王星)

である。また多くの場合、惑星の軌道離心率は私たちの太陽系惑星のそれに比べてかなり大きい。これらの事実から、太陽系外惑星系の姿は一般に私たちの太陽系とは大きく異なることがわかり、時には異形という形容で表現されることすらある。

けれども、図1に示されるような太陽系外惑星の描像には、その観測方法と観測限界に依存する選択効果が大きく寄与していることに留意する必要がある。太陽系外惑星の検出は現在のところ、主として中心星の視線方向速度の変化によるスペクトル線のドップラー偏移を観測することによってなされている。この視線速度変化の振幅は、惑星の質量が大きくかつ軌道半長径が小さい(=公転周期が短い)ほど大きい。すなわち、上述されたような中心星の近傍を周回する巨大惑星は、観測的に最も発見されやすい種類の天体なのである。

ところで、太陽系外惑星とはどのように定義される天体であろうか？実のところ厳密な意味での定義は存在しない。本稿では、以下の3つの性質を満たす天体を便宜的に太陽系外惑星と呼んで話を進める。①主星である恒星の周りを回っており、②自分では光を放っておらず、③質量が13木星質量以下の天体。

太陽系外惑星と区別が難しい天体に、褐色矮星がある。褐色矮星は恒星と木星型ガス惑星の中間的な性質をもつ天体であり、太陽系外惑星同様に多くの発見がなされ続けている[54]。本稿では木星質量の13倍で惑星と褐色矮星を線引するが、その境界は明確ではなく、曖昧な部分がある。図1の右図には質量が木星の13倍より大きな天体も描かれているが、この辺りはまさに惑星と褐色矮星の境界に相当する領域である。

2. 太陽系外惑星の観測

太陽系外惑星の観測方法

いくつかの方法があるが、すぐに思い付くのは、惑星を直接に望遠鏡で撮像してしまうというものである。原理的にはとてもわかりやすい方法だが、実現するのは非常に難しい。一般に惑星と主星は明るさのコントラストが非常に大きく(惑星は暗く主星は明るい)、そのわりに惑星は主星の近傍に存在するので、撮影された画像から惑星の像を分離するのが簡単ではないためである。現在のところ、太陽系外惑星を直接撮像した明快な例は未だに報告されていない(cf. [44])。ただし一回り大きな褐色矮星については直接撮像が成功しており[34,37]、太陽系外惑星の直接撮像が実現されるのも、時間の問題であろうと予想される。

天球上における主星の位置変化の観測によっても、太陽系外惑星の存在を検証できる[24]。惑星と主星は、厳密に言えばその共通重心の周りを回っている。ただし惑星は暗く、主星は明るい。したがって、明るい主星の位置変化を精密に観測すれば、主星の周りをどのような惑星がどのような軌道で周回しているのかという情報を得られるはずである。この方法で発見された太陽系外惑星はまだないが、主星の運動の振幅変化を統計的に解析することにより、他の方法で発見された太陽系外惑星の質量に上限値を与える方法として用いられた例がある[33,50]。

また、MACHOs (Massive Astronomical Compact Halo Objects) の発見手段として用いられる重力マイクロレンズ効果を利用して、遠方にある太陽系外惑星系を発見する試みも行われてい

る [2,12,1,39]。重力マイクロレンズとは、遠方にある光源天体 (銀河やクェーサー) からの光が、手前にあるレンズ天体 (この場合には太陽系外惑星系) によって集光される現象である。この時、観測者から見ると光源天体の明るさが時間的に大きく変化する。この時間変化を詳細に分析することにより、レンズ天体が惑星をもっているかどうかを判断できる。この方法は、他の方法と異なって再現性に乏しく、一度観測されたレンズ天体の追跡観測はほぼ期待できない。けれども重力マイクロレンズ現象は、全天を見渡せば高い頻度で発生しており、また、レンズ天体までの距離も長い。全天で発生する重力マイクロレンズ効果を常に観測し続けることにより、大きなスケールの宇宙空間に惑星系がどのくらいの頻度で存在するのか、という統計的な帰結を導くことができるかもしれない。

このほか、主星の前面を惑星が通過することによる主星の光度曲線の減衰を観測するという方法でも、太陽系外惑星の存在が確認されている [10,8,15,18,32]。

主星のドップラー偏移観測

太陽系外惑星系の観測で現在主流になっているのは、主星の視線方向速度変化による、スペクトル線のドップラー偏移を検出する方法である [13]。前述したように、惑星の運動によって主星も共通重心の周りを振り回される。位置天文観測が主星の位置変化を観測するのに対し、ドップラー偏移観測は惑星運動による主星の速度変化を観測する。と言っても主星の運動をそのまま検出できないので、主星からの光を分光し、主星の視線方向の運動に起因する光のドップラー偏移を測定し、そこから視線方向の主星の運動速度を推定するのである。

主星の速度変化といっても、実際に検出できるのは観測者から見て視線方向に投影された見かけの速度という一次元情報に過ぎない。したがってそこから得られる情報は、惑星の公転周期、軌道半長径、質量の下限値、離心率、近点経度のみである。けれどもこの方法は、多数のスペクトル線の変化の足し合わせにより S/N(signal/noise) 比を向上させられるため、他の観測方法に比べて相対的に精度が高い。G. Marcy らのグループは米国カリフォルニアの Lick 天文台やハワイの Keck 天文台らの大型望遠鏡で長期間にわたって観測し、膨大なドップラー偏移データの中から多くの太陽系外惑星を発見している。図1に示された太陽系外惑星のデータはすべてがこのドップラー偏移観測を用いてなされたものである。

ドップラー偏移観測のデータから得られた典型的な主星視線速度の変化例を、図2に示した。黒丸は実際の観測データであり、実線は主星の周囲に惑星が存在すると仮定した理論的な力学モデルを作って、主星の視線速度変化をシミュレートした結果である。図2に示した4例ではいずれも観測データと理論的な惑星系のモデルが非常に良く一致している。これは、観測された主星の視線速度変動が、惑星の存在によってうまく説明できることを意味している。図2を見てすぐわかるのは、視線速度のきわめて正確な規則性であり、これはそのまま惑星の公転周期を反映している。公転周期が判明すれば、ケプラーの第三法則を用いて惑星の軌道半長径がわかる。一方、惑星の軌道が完全に円ならば、視線速度変動はきれいな正弦曲線になるはずである。HD 195019, Boo などは純粋な正弦曲線に近く、周回している惑星の軌道離心率がほぼ0に近い

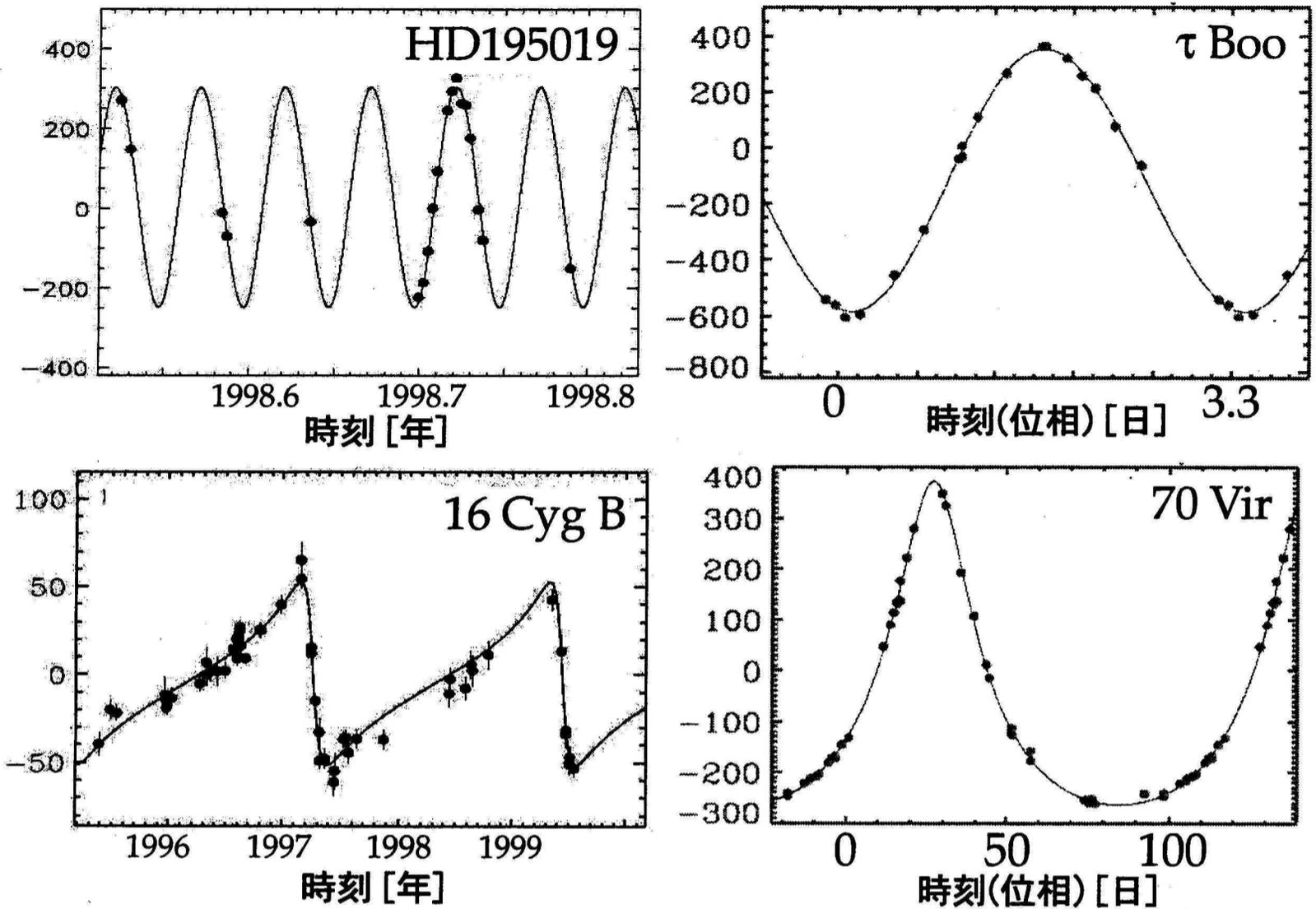


図2 ドップラー偏移の観測から主星の視線方向速度の変化を算出した4例 (HD 195019, 16 Cyg B, τ Boo, 70 Vir). 横軸は時刻あるいは位相、縦軸は視線方向の速度 (m/秒). 惑星が存在すると仮定して力学モデルを作って計算した視線方向速度変化の結果が実線で示されている.

ことをうかがわせる。それに対して 16 Cyg B や 70 Vir では視線速度変化の曲線が正弦曲線とは大きく異なっており、惑星の軌道離心率が大きいことを意味している。惑星の軌道が楕円の場合、惑星の運動速度は近点で大きく、遠点で小さい。主星の移動速度の大きさもこれに比例するので、惑星が近点付近にいる場合には主星の視線速度変化が大きくなり、遠点付近にいる場合には視線速度変化が小さい。この事実にもとづいて上述の理論的力学モデルと観測データを比較すると、ドップラー偏移のデータから惑星の軌道離心率と近点経度 (惑星の近点がどの方向にあるのか) を知ることができる。惑星の質量に関する情報は、図2の縦軸の値、すなわち主星の視線速度変動の振幅から得ることができる。

図2の τ Boo や 70 Vir は、惑星の公転周期が数日から数十日と比較的短いので、公転周期の数倍の期間にわたって主星の視線速度変化を追いかけることができる。それに対して HD 195019 や 16 Cyg B では、惑星の公転周期が数ヶ月から数年であり、追跡観測には長期間を要する。ちなみに私たちの太陽系を、遠方からドップラー偏移観測で眺めてみたとしても、太陽の相対運動を励起する最大の惑星は木星で、その公転周期は約12年である。また、現在までに発見されている太陽系外惑星に比べると木星は小さい方であり、主星からの距離も遠い。このことは、太陽の視線速度変化の大きさ (10数 m/秒) が、他の太陽系外惑星系に比べて小さいものになることを意味する。したがって、太陽という星の周りに惑星が存在するかどうかは、この小さな変動を少

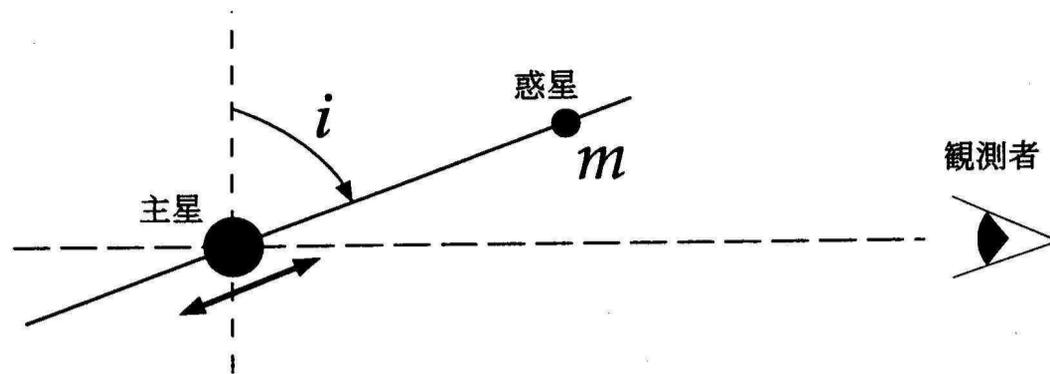


図3 ドップラー偏移観測の模式図．太陽系外惑星の質量を m ，惑星の軌道面と視線方向の法線の成す角度が i ．観測者が検知できるのは，主星の運動速度を視線方向に投影した成分のみである．

なくとも12年以上にわたって連続観測しなければわからない。太陽系外惑星が多く見付かってはいるものの、私たちの太陽系と似たような姿の惑星系がなかなか発見されないのは、このような観測的制約によるところが大きい。逆に言えば、今後の精密かつ長期間の観測によって私たちの太陽系と類似した惑星系が次々と発見される可能性が高いということである。すでに土星質量（木星質量の1/3弱）程度の小さな惑星も検出されるようになっており [46]、今後はさらに質量の小さな太陽系外惑星が次々と確認されていくことが期待される。

なお、主星本体の視線速度変化のみならず、惑星が放つ主星の反射光のドップラー偏移を計測することで、惑星表面のスペクトルの分光に成功したという報告も既にある [7,9,42]。この報告自体は100%の確度をもたないようだが、ドップラー偏移観測の高い精度を示す好例と言えよう。

ドップラー偏移観測の欠点

このように現時点では独擅場ともいえるドップラー偏移観測であるが、短所がないわけではない。最大の欠点は、ドップラー偏移観測で得られる情報が、所詮は視線方向に投影された一次元情報であり、惑星の軌道面が視線方向に対してどのくらい傾いているかを知ることができないことである。主星の視線速度変化をドップラー偏移によって観測する場合の模式的状況を、図3に示した。地球上の観測者は、惑星の軌道面と視線速度の法線方向のなす角度 (i) がいくらであるかを直接に知る術はない。地球上から観測できるのは唯一、惑星の運動によって主星が振り回される運動速度を視線方向に投影した成分のみである。これにより、主星の運動の視線速度成分は単純に惑星の質量 m だけによるのではなく、惑星軌道面と視線速度の法線方向の角度 i の効果を含んだ $m \sin i$ という量に依存することがわかる。

ドップラー偏移の観測では惑星軌道面の傾き i を知ることはできないので、 i の不定性は惑星質量に押し付けられた形で公表される。すなわち図1(右側)で示された太陽系外惑星の質量はすべてこの $m \sin i$ の値ということになる。今、主星の視線速度成分の大きさを一定であると仮定すると、私たちが太陽系外惑星系を真横から見ている、すなわち $i = 90^\circ$ に近い状況の場合には $\sin i = 1$ であり、惑星の質量 m は下限値となる。逆に私たちが惑星系を真上から見る形 ($i \sim 0$) の場合には $\sin i \sim 0$ となり、同じ大きさの主星視線速度変化を産み出すためには、惑星の質量 m が非常に大きいことが必要となる。つまり、ドップラー偏移の観測による惑星質量の見積もりには、常に $1/\sin i$ の不定性が付きまとう。これはドップラー偏移観測の宿命的な短所であり、

この方法を採用する限り取り除くことができない。ちなみに天文雑誌や解説書あるいは専門誌に掲載された論文などでも、太陽系外惑星の質量見積りに関するこの不定性について「質量には $m \sin i$ の不定性が付随するが、これはせいぜい $0 < \sin i < 1$ の大きさなので、平均的には 0.5 くらいだと思えばよい」などという書き方がされている場合がある。これは大きな誤解を招く表現である。上述したように惑星質量の不定性は $\sin i$ ではなく $1/\sin i$ であり、その範囲は 0 から 1 ではなく $1 < 1/\sin i < \infty$ なのである。この $1/\sin i$ の不定性を取り除くためには、位置天文観測など他の観測手法あるいは理論的な数値計算を併用する以外になく、今後の太陽系外惑星研究における大きな課題である。

3. 新世紀の太陽系外惑星系研究

複数の惑星をもつ太陽系外惑星系

最初の発見から早や 6 年、新しい世紀を迎えて太陽系外惑星系の研究も新たな局面を迎えつつある。近年の重要な進展のひとつは、複数の惑星をもつ太陽系外惑星系が発見されはじめていることである。1999 年までに発見された太陽系外惑星系はすべて主星と単独の惑星から構成されたものであった。しかし 1999 年の初め、以前から 1 個の惑星の存在が確認されていたアンドロメダ座ウプシロン星 (Andromedae) に、実は 3 個の惑星が存在することが確認された [6,4,26,17]。長期間のドップラー偏移観測データの蓄積により、主星の運動の原因を複数の惑星の影響に細かく分離することが可能になった結果である。図 4 には Andromedae 惑星系の概略を私たちの太陽系と比較して図示してある。この他にも Gliese 876, HD 168443 の各星の周りにもそれぞれ 2 個ずつの惑星の存在が確認されている。

前述したように、主星の視線速度変化によるドップラー偏移の観測からは、惑星質量の下限値しか求めることができない。けれども Andromedae のように複数の惑星がある系においては、理論的な手法によって $1/\sin i$ の不定性を取り除き、惑星質量に対して上限値を与えられる可能性がある。惑星が単独で存在する場合とは異なり、複数の惑星が相互作用している系は無限の時間で安定にはいられない。しかも、その安定時間スケールは、一般に惑星の質量が大きいほど短いことがわかっている。そこで各種の $\sin i$, すなわち各種の惑星質量を初期値として、惑星達の軌道進化を理論的に追ってみれば、ある値よりも質量が大きい場合には、惑星系は主星の年齢以短の時間スケール (Andromedae の場合には約 30 億年) で不安定化し、瓦解するという結果が期待される。その時の値が惑星質量の上限値である。著者らの数値計算によれば、Andromedae の惑星系は $\sin i < 0.7$ であれば高い確率で主星の年齢以短の時間で不安定化すると予測されている [21,22]。したがって、この場合の惑星質量の最大値は最小値の $1/0.7 \sim 1.4$ 倍程度と見積もることができる。ドップラー偏移観測の精度向上に伴って発見が相次ぐと思われる複数惑星の系は、このような理論的研究の併用によってさらにその姿を明らかにされるだろう。

さまざまな環境での惑星系の存在

これまでの太陽系外惑星は、主として太陽と似たスペクトル型の単独星について探査されてきた。太陽型恒星の周りの探索における惑星発見の確率は、実に 10% 近くにものぼっており、宇宙に

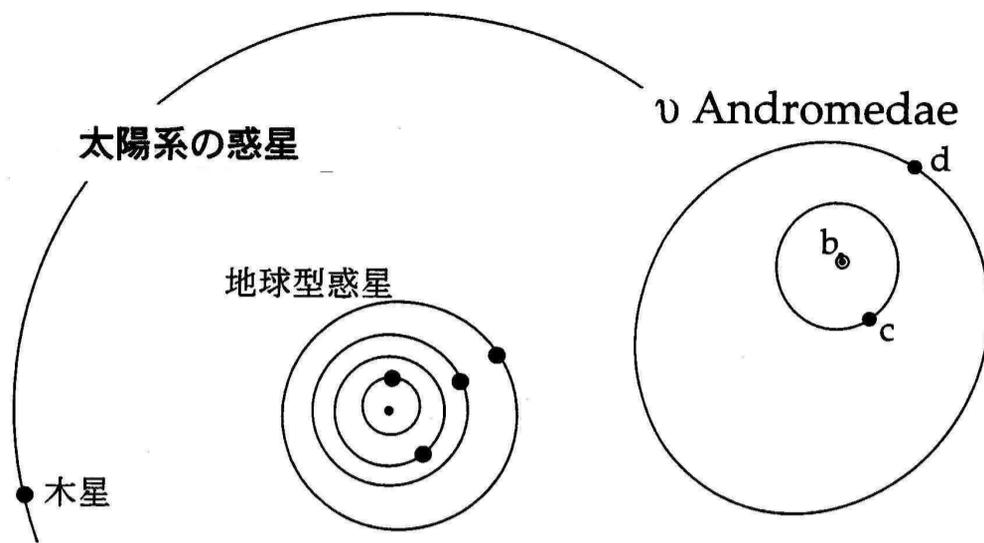


図4 Andromedae の周りの三惑星と太陽系惑星を同じスケールで図示して比較した。実際には最内の惑星 b はもっと主星に近いが、図を描く便宜上から目視で分離可能な位置に置いてある。

は惑星系が普遍的らしいという期待を抱かせてくれる [5]。しかし宇宙にある星は太陽と似たものばかりではない。単独で存在する場合よりも連星として存在する場合の方が圧倒的に多い。連星系の周囲あるいは内部に惑星が存在するかどうかは、全宇宙における惑星系の絶対的存在度に関わる重要な問題であり、理論的研究と並行して今後中心的に推進されるべき問題である [48,19,47,20,36]。一方、太陽系外惑星の存在は、主星の周りに漂うダスト円盤を観測することでもなされ得る。星周ダスト円盤自体はすでに多数が観測されており、その中に惑星存在の痕跡を探る試みも近年になり盛んに行われだしている [53,25,40,38,45]。

パルサーの周りに惑星系が存在するという話は太陽系外惑星系の発見以前からあり、現在でもその研究は盛んに行われている [23,49]。最近では白色矮星の周囲に惑星を探そうという試み [11] や、いわゆる惑星状星雲 (本来は惑星とは無関係であると思われていた) の中に太陽系外惑星を探そうという試み [43] も発表されている。そればかりではなく、宇宙には主星をもたない惑星 「系」 から逸れてひとり空間を漂う惑星も存在しているらしく [44,14]、今後はそのような「漂流惑星」が多く発見される可能性もある。

今回は紙面の都合でふれられなかったが、太陽系外惑星は、理論的な側面からも活発に研究されている。とりわけ、現在見られるような多様な姿の惑星系の形成過程に関する研究が中心となっている。だが、こちらの方は難航していると言わざるを得ない。惑星形成過程の現在の標準理論と呼ばれるものは、私たちの惑星系の起源と進化を説明するのが主目的である。しかるに現状では、その目的すらも十分に達成されているとは言えず、いわんや太陽系外惑星系への適用には不十分である。巨大惑星が主星の近傍に形成する要因、大きな離心率の起源、さらには地球型の岩石惑星が生命の発生と進化にとって「ほどよい」位置に長期間安定して存在できる可能性の探索 [27] など、太陽系外惑星系の理論的研究に対して与えられた課題は非常に多い。観測精度のさらなる向上に伴い、今後の発展が大きく期待される分野である [52]。

太陽系外惑星系研究の今後

太陽系外惑星系研究の究極の目的は、地球と似たような惑星を発見し、そこに生命存在の証拠を見い出すことであろう。残念ながら現在の観測精度は、地球程度の大きさの惑星を検出するにはまだまだ至っていない。だが、すでに太陽系外の地球型惑星発見に向けた計画は着々と進みつ

つある。例えば ESA の Darwin 計画 [16] や NASA の TPF 計画 [35] では、直径数メートルの望遠鏡群を人工衛星に搭載して宇宙空間に打ち上げ、光や赤外線干渉計を構築することによって大幅に分解能を向上させようとしている。この種の計画では、地球型惑星の存在を確認するのみならず、惑星表面の分光観測を行うことによってオゾンを始めとする生命活動起源 (と予想される) 分子の検出をももくろんでいる。天文学の究極の目標のひとつである "SETI(Search for Extra-Terrestrial Intelligence)" に向けて、太陽系外惑星の研究は、今まさにその黄金時代を迎えようとしている。

参考文献

- [1] Albrow, M.D. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 535, 176-189. / [2] Bennett, D.P. et al. (1999) *nature*, 402, 57-59. / [3] Boss, A.P. (1996) *Physics Today*, 49, 32-38. / [4] Butler, R.P. et al. (1997) *Astrophys. J.*, 474, L115-L118. / [5] Butler, R.P. et al. (1999) *Astrophys. J.*, 526, 916-927. / [6] Butler, R.P. et al. (2001) in "Planetary Systems in the Universe", ASP Conf. Ser. for IAU Symp. 202, Kluwer Academic Publishers, in press. / [7] Cameron, A.C. et al. (1999) *nature*, 402, 751-755. / [8] Castellano, T. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 532, L51-L53. / [9] Charbonneau, D. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 529, L45-L48. / [10] Charbonneau, D. et al. (1999) *Astrophys. J.*, 522, L145-L148. / [11] Chu, Y.H. et al. (2001) *Astrophys. J.*, 546, L61-L64. / [12] Covone, G. et al. (2000) *Astron. Astrophys.*, 357, 816-822. / [13] Cumming, A. et al. (1999) *Astrophys. J.*, 526, 890-915. / [14] de-la-Fuente Marcos, C. & de-la-Fuente Marcos, R. (1998) *New Astron.*, 4, 21-32. / [15] Doyle, L. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 535, 338-349. / [16] <http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/> / [17] Francois, P. et al. (1999) *Astron. Astrophys.*, 349, 220-224. / [18] Henry, G.W. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 529, L41-L44. / [19] Holman, M. & Wiegert, P.A. (1999) *Astron. J.*, 117, 621-628. / [20] Holman, M. et al. (1997) *nature*, 386, 254-256. / [21] Ito, T. & Miyama, S.M. (2001) *Astrophys. J.*, in press. / [22] Ito, T. & Miyama, S.M. (2001) in "Planetary Systems in the Universe", ASP Conf. Ser. for IAU Symp. 202, Kluwer Academic Publishers, in press. / [23] Konacki, M. & Maciejewski, A.J. (1999) *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 308, 167-179. / [24] Lattanzi, M.G. et al. (2000) *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 317, 211-224. / [25] Liou, J.-C. & Zook, H.A. (1999) *Astron. J.*, 118, 580-590. / [26] Lissauer, J.J. (2000) *nature*, 398, 659. / [27] Lissauer, J.J. (2000) *nature*, 402, C11-C14. / [28] <http://exoplanets.org/> / [29] Marcy, G.W. & Butler, R.P. (2000) *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 112, 137-140. / [30] Marcy, G.W. et al. (2001) in "Protostars & Planets IV", The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, in press. / [31] Mayor, M. & Queloz, D. (1995) *nature*, 378, 355-359. / [32] Mazeh, T. et al. (1999) *Astrophys. J.*, 522, L149-L151. / [33] Mazeh, T. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 532, L55-L58. / [34] Nakajima, T. et al. (1995) *nature*, 378, 463-465. / [35] <http://tpf.jpl.nasa.gov/> / [36] Nelson, A.F. (2000) *Astrophys. J.*, 537, L65-L68. / [37] Oppenheimer, B.R. et al. (1995) *Science*, 270, 1478-1479. / [38] Ozernoy, L.M. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 537, L147-L151. / [39] Rhie, S.H. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 533, 378-391. / [40] Schneider, G. et al. (1999) *Astrophys. J.*, 513, L127-L130. / [41] <http://cfa-www.harvard.edu/planets/> / [42] Seager, S. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 540, 504-520. / [43] Soker, N. (1999) *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 306, 806-808. / [44] Terebey, S. et al. (1998) *Astrophys. J.*, 507, L71-L74. / [45] Trilling, D.E. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 529, 499-505. / [46] Vogt, S.S. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 536, 902-914. / [47] Whitmire, D.P. et al. (1998) *Icarus*, 132, 196-203. / [48] Wiegert, P.A. & Holman, M.J. (1997) *Astron. J.*, 113, 1445-1450. / [49] Wolszczan, A. et al. (2000) *Astrophys. J.*, 540, L41-L44. / [50] Zucker, S. & Mazeh, T. (2000) *Astrophys. J.*, 531, L67-L69. / [51] 井田茂 (1997) *天文月報*, 90, No.3, 116-121. / [52] 井田茂・小久保英一郎 (1999) 『一億個の地球』, 岩波書店. / [53] 石黒正晃・中村良介 (1999) *天文月報*, 92, No.9, 433-438. / [54] 伊藤洋一 (1999), *天文月報*, 92, No.5, 257-264.

(国立天文台 天文学データ解析計算センター)

流星痕と地球大気

齊藤馨児 Keiji SAITO

しし座流星雨の回帰が世間の注目をあびたせいもあってか、『惑星地質ニュース』は、昨秋二度にわたって流れ星を話題にしている。長沢工氏は流星物質の構造と化学組成にかかわる知見をハレー彗星探査機の彗星ダスト分析まで含めて紹介され、つづいて田中剛氏が人工流星を飛ばしてみようと、意欲的な提案をされた。流星は天文や地球物理の研究対象としてマイナーではあるだろうが、大がかりな研究手段を使わず独立してやれる未知のことが、観測的、理論的に多々ある。大学などに属さない研究者にとって見逃せない対象といえそうだ。その意味でお二人の後ろにつらなって、流星の現象面から①痕、②持続痕について疑問に思っていることを述べてみたい。蛇足に終わらなければいいのだが。

①しし座群の流星を気をつけて見ていると、流星が通ったあと、経路のなかほどに白くうすいすじが残り、1秒ほどで消えるのがわかる。痕（こん）といい、しし座群の場合はほぼすべての流星に現れる。暗い小流星でも双眼鏡でのぞくと痕が見られる。

古い『理科年表』（1970年代以前）の「主な流星群」の表には「速、痕」と注をつけた群が多数載っている。痕はしし座群にかぎったことではなく、見かけの速度の大きな流星を特徴づける現象なわけだ。スペクトル観測によると、痕の光は波長 558nm の酸素緑線 ($^1S \rightarrow ^1D$ の禁制遷移) だけからなっている。 1S 準位の寿命は 0.74 秒で、痕が消えるまでの時間約 1 秒（流星の明るさによらない）はこれとよく合う。なお酸素緑線は、あとで述べる酸素赤線とともに、夜間大気光のおもな光のもとでもある。緑線の場合、高度 90km 付近を中心に高度幅数 km で光っている（赤線はもっと高い）。痕の高さもこれと同じと書きたいが、測定値の統計を見たことがなく、なんともいえない。むしろふつうはもっと高く、むろん流星の明るさが最大になる高度よりも上になる。

さてこれからが、わからないことだ。私の経験では、痕を認めた（双眼鏡で）速度最小の流星群は1月のりゅう座群（対地速度 43km/s）だった。これより速度の大きな流星にかぎって痕のできるしくみは何だろう。また 1D 準位もじつは半安定で、波長 630nm の酸素赤線を出して基底状態 3P へと落ちる（寿命 100 秒）が、こちらは痕に観測された報告はないと思う。寿命が長いので光度が弱くなるためかもしれないけれども、いまは弱い光を検出する技術がたいへん上がっている。観測できないものか（②参照）。またもしも個々の痕で検出できなくとも、流星雨のとき夜間大気光が強まるといった現象が生じていないだろうか。いや、100 秒の間に他の空気分子とぶつかってエネルギーをとられてしまうのか？

②木星より明るい大流星では、30 秒から 10 分以上も残る持続痕が見られることがある。短痕とならんで速度の大きな流星に限られるのかどうかは、報告例が少ないために明言できない。高さ 120~80km に生じ、大気の流れに乗ってみるまに形を変えていく。一定の高さに出る雲や飛行機雲の形が直線で安定しているのと、大きく違う点だ（昼間でも形がどんどん変わる飛行機雲

状のものを見たら大流星の飛んだ痕跡かと疑ってよい)。持続痕のおもな光はNa原子が出すD線(589nm)である。このことはかなり前からわかっている。

超高層の高さ92kmを中心にNa原子の光る層がある。Naは酸素原子と循環する化学反応を起こしてエネルギーをもらい、光を出す。また朝夕の薄明時には、太陽光を共鳴散乱してD線の光が強調される現象(ナトリウムフラッシュ)も知られている。こういうことから、持続痕の光はNa大気光と同じしくみで生じると説明されている。

ところがこのごろ、その説明でよいのかどうか、怪しく思われることがらが出てきている。それは持続痕のスペクトルにMg原子の光(518nm)が見つかったことだ。もう数年以上前になるが、栃木県の流星研究者杉本智氏の撮った、ペルセウス群流星の痕のスペクトルを見ていて、われわれは初めてMgに気づいた。Mgは長沢氏がレビューで紹介された1998年11月18日4時33分の持続痕にも出ている(鈴木智氏(杉本智とは別人)によるすばらしい写真が『天文ガイド』99年4月号に載った)。昨2000年も11月19日3時35分のしし座流星の持続痕(杉本智氏撮影、未発表データ)に見られた。一つの持続痕のなかでMgはNaに比べて高度の低いところで目だち、Naより先に消えてしまうようだ。そういうわけで持続痕の発光メカニズムはNaばかりか、Mgまで含む共通のしくみを示さなくてはならない。

なお最後のスペクトルには630nm付近に弱い線が見られる。酸素赤線だとすれば、①に述べた話と関連があるのか?またSi⁺(636nm)かもしれないが、こちらなら発光のしくみに遊離電子のことまで考えにいれる必要が出てくる。

このように流星のスペクトルを調べると、化学組成だけではなく、まだ観測的な研究の少ない流星と超高層大気との相互作用へまで話が広がりそうである。

以下は余談だが、90年代以後の『理科年表』は流星の表から現象的なことを落とし、物理的なことだけにして、縮めてしまった。遊びの余裕がなくなってしまって淋しい感じがする。このごろの理科教科書の傾向と似ている? (元東京天文台)

論文紹介

タギシュレイク隕石は新しいタイプの炭素質コンドライトか

Brown, P.G., ほか 21 名, 2000, The fall, recovery, orbit, and composition of the Tagish Lake Meteorite: A new type of carbonaceous chondrite. Science, 290, 320-325.

2000年1月18日にカナダのタギシュ湖に落下した隕石は、始源的な隕石の性質、小惑星との関係などについて、新しい情報をもたらしてくれた。

落下状況と軌道の復元 2000年1月18日16時43分(世界時、現地時間では同日午前8時43分)カナダ北西部のユーコン州とその周辺で、明け方の薄明の空に非常に明るい大火球が出現した。火球は爆発をおこしながら南方へ飛行し、ユーコン州とブリティッシュコロンビア州の境界(60°N)のすぐ南の、59°42'N、134°12'Wにあるタギシュ湖(Tagish Lake)一帯に破碎岩片が落下した(タギシュレイク隕石と名づけられた)。

この火球の出現は多くの人々に目撃され、アメリカの軍事衛星にも探知された。衛星の赤外、

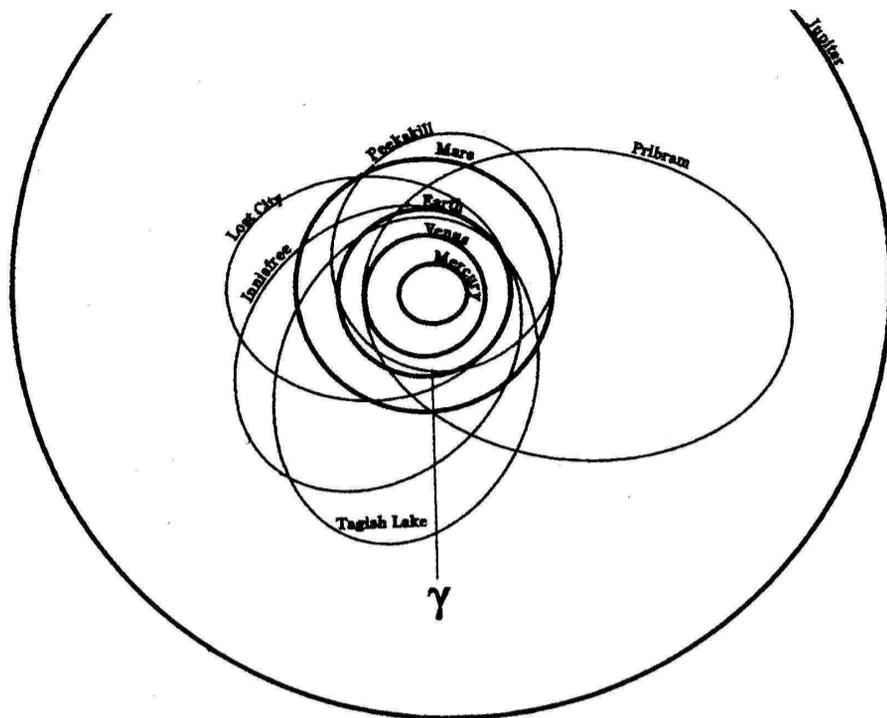


図1 タギシュレイク隕石の復元された軌道
プリブラム, ロストシティ,
イニスフリー, ピークスキルの各隕石の軌道と比較して示す。

光学センサーの測定によると、火球の発光エネルギーは $1.1 \times 10^{12} \text{J}$ で、全エネルギーの 5~10% が光になるとすると、この火球天体の総エネルギーは $2 \times 10^{13} \text{J}$ ほどになると推定される。

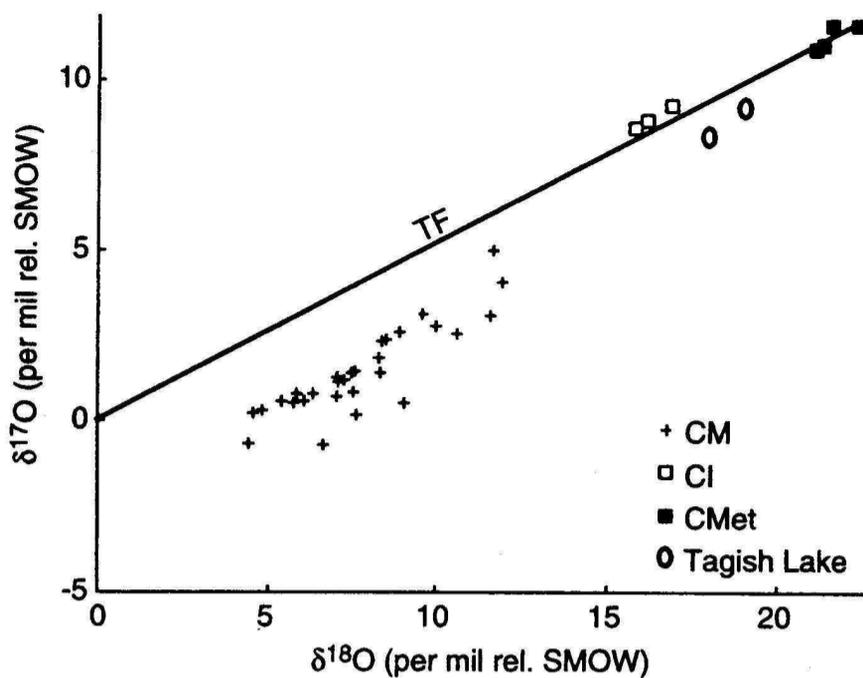
火球の運動と軌道を復元するために、70 以上の目撃記録や、火球にともなわれた持続痕の写真 (24 枚)、ビデオ画像 (5 本) が集められた。それらの解析結果によると、火球の地表面に対する突入角度 $16.5^\circ \pm 1.2^\circ$ 、方位角 $331.5^\circ \pm 2.2^\circ$ 、火球の平均速度 $15.5 \pm 0.6 \text{km/s}$ (突入時の初速度は $15.8 \pm 0.6 \text{km/s}$) と見積もられる。速度と総運動エネルギーをもとに、突入時の質量を見積もると $2 \times 10^6 \text{kg}$ はあったと推定される。また、回収サンプルの平均密度が約 1.5g/cm^3 であることから、この天体の当初の大きさは直径 4~6 m だったと思われる。

火球の速度と進入経路からもとの軌道を求めると、長半径 $2.1 \pm 0.2 \text{AU}$ 、近日点距離 $0.891 \pm 0.009 \text{AU}$ 、遠日点距離 $3.3 \pm 0.4 \text{AU}$ 、離心率 0.57 ± 0.05 、軌道傾斜角 $1.4^\circ \pm 0.9^\circ$ 、公転周期 3.0 ± 0.4 年、となる。これまでに知られた他の 4 つの隕石の軌道と比較した軌道復元図を図 1 にしめす。この図からもわかるように、タギシュレイク隕石の軌道は、地球軌道を横切る典型的なアポロ型小惑星と同じものである。

隕石の回収 落下から 1 週間後の 2000 年 1 月 25 日、落下地点近くに住む野外活動家の Jim Brook は、氷結した湖面上を車で移動中、黒い隕石片が散乱しているのを発見、翌 26 日にかけて総量 0.85kg の数ダースの破片を回収した。サンプルは清潔なプラスチック袋に入れ、凍ったままで保存された。

本格的な探査は 4 月 20 日~5 月 8 日にかけて、Jim を含む 13 人のチームによってなされ、氷の湖面から 410 個の隕石片が回収された。散乱地域は $59^\circ 39.5' \text{N}$ 、 $134^\circ 12' \text{W}$ から $59^\circ 48' \text{N}$ 、 $134^\circ 17' \text{W}$ までの $16 \text{km} \times 5 \text{km}$ の面積に広がっていた。回収サンプルの大きさは、南方の 2.3kg 大のものから北限の 1g 以下のものまでである。回収不能のものも含めて見積もると、氷の湖面に落下した破片は 1g より大きなもので 2×10^3 個以上あるとみられる。また湖周辺の森林と山岳地帯に落ちたものを合わせると、総計 10^4 個以上の破片があると考えられる。

タギシュレイク隕石の性質 この隕石は炭素質コンドライトであったため、氷結したまま素早く



カリビンの aggregates や分離した

図2 タギシュレイク隕石の酸素同位体比
CM, CI, CMet.(変成したもの)の各コンドライトと比較して示す.

粒子、Ca-Al 包有物 (CAI)、マグネタイト、Ca-Mg-Fe-Mn 炭酸塩、Fe-Ni 硫酸塩、少量のコンドルールなどの混合物がマトリクスで固められた、角礫岩状の組織を示す。aggregates のほとんどやコンドルールの一部は水による変質を受けている。CAI もほぼ完全にフィロシリケイトや Mg にとむ蛇紋石に変質している。CI または CM コンドライトに比べると、硫酸塩はそれよりも少なく、マグネタイトは CM よりも多い。炭酸塩は組成がカルサイト (CaCO_3) からシデライト (FeCO_3) とマグネサイト (MgCO_3) に変わっており、こうした Mg と Fe にとむ組成は、他のいかなる炭素質コンドライトにもみられない。EPMA 分析によると、マトリクスは主にフィロシリケイト、おそらく蛇紋石とサポナイトからなっている。

酸素同位体組成は CM コンドライトとはかなり異なり、CI コンドライトと一部の変成した炭素質コンドライトに近い (図2)。このことは、もしタギシュレイク隕石が母天体上で液体の水の作用を受けたならば、CM グループよりも水/岩石比が高く、水による変質温度は CI グループよりも低かった (ほぼ 0) だろう。

炭素含有量は 5.4 重量%あり、そのうちの約 3.7 重量%は炭酸塩中のものである。通常 CI と CM では炭酸塩中の炭素が 0.2 ~ 0.7 重量%であるのと比べると、かなり高い割合である。また、タギシュレイク隕石中には、星間起源と考えられるナノダイヤモンドやシリコンカーバイドの粒子が含まれていることも注目される。

全体的組成からみると、難揮発性親石元素 (Zn-Sr) の存在度は CM コンドライトに似ているが、揮発性親石元素 (Mn-Br) の存在度は CM と CI の中間にある。難揮発性親鉄元素 (Re-Pd) の存在度は CI、CM に近いが、揮発性親鉄元素 (Al-Ti) と揮発性親銅元素 (Zn-Cd) の存在度は CI と CM の中間にある。

これらのことからみると、タギシュレイク隕石は CI または CM のどちらのグループにもあてはまらないように思われる。著者らは、タギシュレイク隕石は新しいタイプの炭素質コンドライトであり、おそらく CI1 コンドライトよりも始源的ではないだろうか、と結んでいる。

なお、これまでにわかったアポロ型小惑星の軌道をもつ隕石 (図1のロストシティ隕石その他) は、どれも普通コンドライトで、炭素質コンドライトのはっきりした例は今回が初めてである。その点でもたいへん興味深い。

(小森長生)

書籍紹介

月の観察

North, G., 2000, Observing the Moon--The modern astronomer's guide. Cambridge University Press, 381pp, 25.4 × 19.5 × 3.0cm, 6310 円 (洋書店から購入), ISBN0521622743.

昨年は、アマチュア向きの月面観測ガイドが2冊出版されたので、まとめて紹介する。版元はいずれもケンブリッジ大学出版局である。

著者 Gerald North は、カバーの紹介文によると、British Astronomical Association (BAA) の月面課のいくつかのポストを勤めた人である。章の構成とページ数は以下の通り。1. すばらしい孤独 (28p) 2. 望遠鏡を通しての月 (17p) 3. 望遠鏡とスケッチ法 (21p) 4. カメラによる月 (30p) 5. CCD による月 (26p) 6. 月の物理 (20p) 7. 卓上での月 (10p) 8. 月の地形 “A から Z” (198p) 9. TLP の問題 (20p)

本書の特徴をいくつか挙げると、まず5章で CCD による撮影法を取り上げていることである。この分野は撮影機器の進歩が早いので、十分とはいえないが参考にはなるだろう。7章は月関連の書籍、地図、探査機画像、インターネット HP の紹介や入手法が述べられていて、役に立つ。8章は、地上からの望遠鏡のための観測ガイドで、本書の3分の2を占める。月表側の興味深い地域を48箇所取り上げ、主に1960年代後半にカタリナ天文台の1.5m望遠鏡で撮影された写真を使って解説している。著者は地質学者ではないので、地質・地形の説明が十分とはいえないが、それでもある程度は、アポロ探査以降の成果を反映して書かれている。20点ほどのスケッチも挿入されている。9章は、月の異常現象とも訳される TLP について取り上げられている。従来は月のみにその原因があるとされがちであったが、ここでは地球大気・望遠鏡・観測者側の原因も考察されていて、よいまとめとなっている。

アマチュアのための月面ガイドとしては、本書は1988年に同じ出版社から発行された The Moon Observer's Handbook (F.W.Price 著) 以来の本となる。ほとんど変化のない月面で何を観測したらよいか迷っているアマチュア観測家にとって、本書は多くのヒントが含まれている。

月の欠け際アトラス

Westfall, J.E., 2000, Atlas of the Lunar Terminator. Cambridge University Press, 292pp, 28.4 × 22.6 × 2.0cm, ISBN0521590020.

同じケンブリッジ大学出版局の発行で、この出版社がどうしてアマチュアの月面観測家向けの本作りにここまで熱心なのか、不思議なくらいである。著者の John Westfall は、アメリカの月惑星観測者連盟の理事で、英米のアマチュア月面観測者の両雄の対決といったところだろうか。

本書は2部構成で、1部はさらに第1章：月の観測とその欠け際 (25p) 第2章：月表面の地形 (20p) からなる。第1章は、月の欠け際が位相、秤動、太陽高度によってどのように見えるかが詳しく解説され、続いて眼視、写真、CCD 観測の方法が取り上げられている。第2章では探査機の写真を使って月の地形の成り方やその形成年代について述べられている。

2部のアトラスは約200ページもあり、本書の大半を占める。月面余経度の6度ごとに欠け際を紹介しており、説明の写真には28cmのシュミットカセグレンで撮影された CCD 画像が使われ

ている。この写真の写りの悪さが、本書の最大の欠点である。口径 10cm の望遠鏡に銀塩フィルムで撮影した程度のもので、これでは地形の細部が読みとれない。また解説文も事実の記載に終わっており、成因論にまで踏み込んでいない。

ということでこの英米 2 冊の対決は、North 著『Observing the Moon』の方が格段にすぐれており、アマチュア月観測家には一読をお薦めする。 (白尾元理)

INFORMATION

火星は地質時代を通して寒冷で乾燥していた(？)

マーズグローバルサーベイヤーの熱放射スペクトロメーター (TES) による観測データを解析したアメリカ地質調査所 (USGS) の R.N. Clark らは、火星がかつて温暖で多量の液体の水をもっていたという従来の考えに対する反論を 2000 年 10 月のアメリカ天文学会惑星科学部会年会で発表した。南北 45° までをカバーする TES 鉱物マップを作成した結果によると、火星面の暗い地域には豊富なオリビン (かんらん石) が存在する。オリビンのような Fe-Mg 珪酸塩は水による風化に弱い。したがって、このような鉱物がなまの形で長時間存在したとすれば、火星での化学的風化作用はひじょうに低く、火星は地質時代を通してずっと寒冷で乾燥したままだったにちがいないという。なおこれとはべつの観点から、オーストラリアの地質学者 N. Hoffmann も、火星は寒冷・乾燥した地史をたどったという考えを出している。この問題については次号でくわしく紹介する予定である。

火星隕石 ALH84001 中の磁鉄鉱は生物起源の可能性大

NASA の K.L. Thomas-Keprta らのグループによると ALH84001 隕石中の磁鉄鉱粒子は生物の作用でつくられた可能性が大きいという。2000 年 11 月に開かれたアメリカ地質学会年会でのこの報告を R.A.Kerr が Science 誌 290 (22 Dec. 2000), 2242 で紹介している。Keprta らは、ALH84001 中の磁鉄鉱が海生バクテリア MV-1 族のつくる磁鉄鉱におどろくほどよく似ていることを明らかにした。どちらの磁鉄鉱も、六面 - 八面体 (hexa-octahedral) とよばれる特異な結晶形 (平均 40nm の長さ) をしている。MV-1 族バクテリアでは、この磁性微粒子が連なって 1 つのより強い棒磁石としてはたらき、地球磁場に感応して運動をおこす。このような磁鉄鉱は無機的なプロセスではできにくいだろうことを、他の研究者も認めている。火星隕石中の生命痕跡については否定的な意見も多くなっているが、ふたたび新たな一石を投ずるものになるかもしれない。くわしくは同著者による論文 (Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.64, No.23, pp4049-4081, 2000) を参照されたい。

ニア - シューメーカーがエロスへの着陸に成功

2000 年 2 月 14 日に 433 番小惑星エロスとのランデブーに成功した探査機 NEAR-Shoemaker (NEAR から改名) は (本誌 Vol.12, No.1, March, 2000 参照) 以後エロスを周回しながら観測をつづけていたが、今年 2 月 12 日午後 3 時 02 分 (米国東部標準時、日本時間 13 日午前 5 時 02 分)、エロス表面への着陸に成功した。着陸準備は 4 時間前からはじまり、高度 35km の軌道からしだいに高度を下げ、最後の 47 分間は自由落下で降下し、1.5m ~ 1.8 m/s の速度で着陸した。着陸場所はエロスの南半球にある幅広い凹地ヒメロス (Himeros) のへりの部分である。降下中に 69 枚の画像が送信されたが、着陸寸前に 120 m の高さからとられた最近接画像には、細かいレゴリス上に多数の岩塊が散在している様子が写っている (解像度は 1cm だという)。着陸後もデータを送信しているが、カメラはこわれたらしい。詳細な観測結果の発表が待たれる。

編集後記： いま我が太陽系外に、別の惑星系がぞくぞくと見つかっています。そのホットな話題を伊藤さんが解説して下さいました。21 世紀の惑星科学は視野を大きく広げはじめています。前号の流星論議につづいて今回はさらに斉藤先生からの重要なご指摘。こうして議論の輪が広がっていくのはうれしいことです。誌上討論大歓迎します。今年もどうかよろしく。 (K)