

「そして、冥王星の彼方に」

——すばる望遠鏡が拓く新しい太陽系の夢物語——

渡部 潤一

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: owatana@c1.mtk.nao.ac.jp

デーブ・ジュイット

〈Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, Hawaii 96822〉

e-mail: jewitt@murk.ifa.hawaii.edu

1781年天王星発見。望遠鏡の発明は太陽系に未発見天体があることを教えてくれた。1846年海王星発見。他の惑星の軌道解析による予測位置に近く、天体力学の勝利とうたわれた。1930年冥王星発見。それを可能にしたのは天体写真技術だった。1992年、冥王星の外に小天体発見。高感度CCD素子というエレクトロニクスの勝利である。そして、21世紀。大型光学赤外線望遠鏡すばると広視野CCDアレイが、まだ見ぬ冥王星の彼方に広がる空間を解きあかそうとしている。

1. 真夏の夜の夢

1991年、真夏の深夜。ハワイ・マウナケア山頂にあるハワイ大学の口径2.2m望遠鏡の観測室にて。

J: 「ところで、デーブ。新月期にずいぶんマシンタイムをもらってるけど、いったい何やってんだい？」

D: 「ああ、あれはカイパーベルト・サーベイさ。」

J: 「カイパーベルト・サーベイだって？ 本気か、おい？ たとえあったとしても、暗すぎて見えないだろ。」

D: 「いやー、そうでもないよ。大きさがキロンくらいあればなんとか見えるさ。ここの望遠鏡は口径こそパロマーやキットピークの望遠鏡に負けるけど、シーイングがいいから限界等級は結局は勝つんだ。まあ、ネガティブ・リザルトでもカイパーベルトの彗星数の上限値が出るからいいと思ってるけどね。」

J: 「なるほどね。」

Beyond the Pluto. Jun-ichi Watanabe

Dave Jewitt

そして、一年後の1992年夏、ついにカイパー・ベルトに属する「可能性のある」天体が見つかった(図1)。現在の日心距離41天文単位という太陽系最遠の小惑星1992 QB1の誕生である(図2)。明るさ24等。とても日本では観測できない。それでも直径は200kmから250km、彗星としては大きなほうだ。そして、1993年春、二つ目の候補1993 FWが発見された。

これらの小惑星状天体は本当に冥王星の彼方にあるカイパー・ベルトに属するのだろうか？ 真夏の夜に見た夢が本当に現実になりつつあるのか？

最近になって変わりつつある太陽系小天体の進化に対する理解、進みつつある観測事実、そして「すばる」を使ったカイパーベルトサーベイ計画を紹介する。

2. かすかな夢の予感

冷静に思い直してみると、かすかな夢の予感はあった。

小惑星のほとんどのものは火星と木星の間にあり、小惑星帯をなしている。しかし、1977年、小

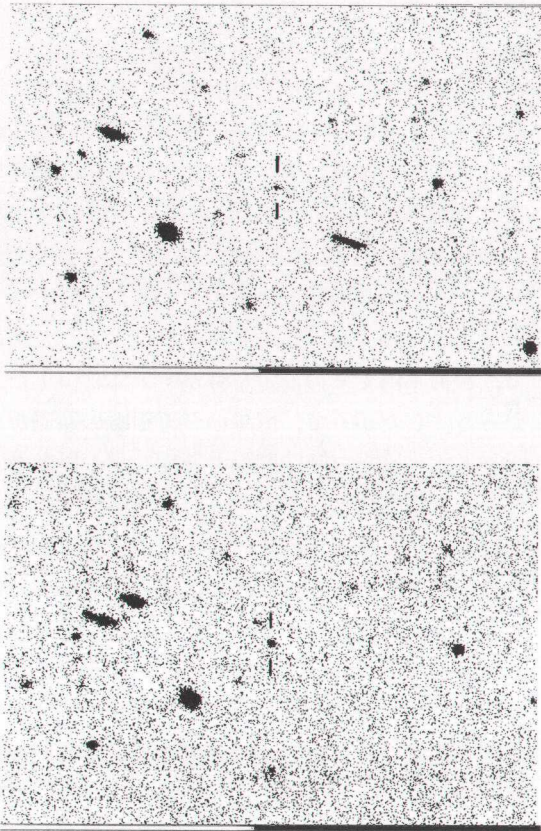


図1 1992QB1の発見画像。マウナケア山頂ハワイ大学2.2m 望遠鏡にて、デーブ・ジュイットおよびジェーン・ルー撮影。長細いのは手前の小惑星帯にある無名の小惑星。普通の小惑星に比べ、1992QB1の動きはきわめて遅いことがわかる。

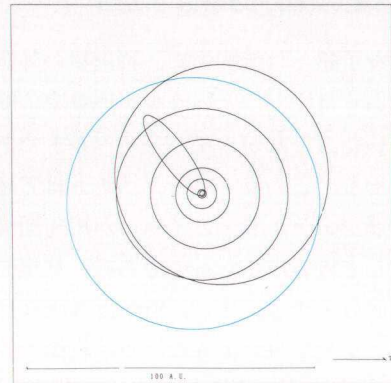


図2 1992QB1の軌道。冥王星と交差する部分もあるが、冥王星に比べて軌道は丸く、安定な軌道を示唆する。(細長いのは、ハレー彗星の軌道。)

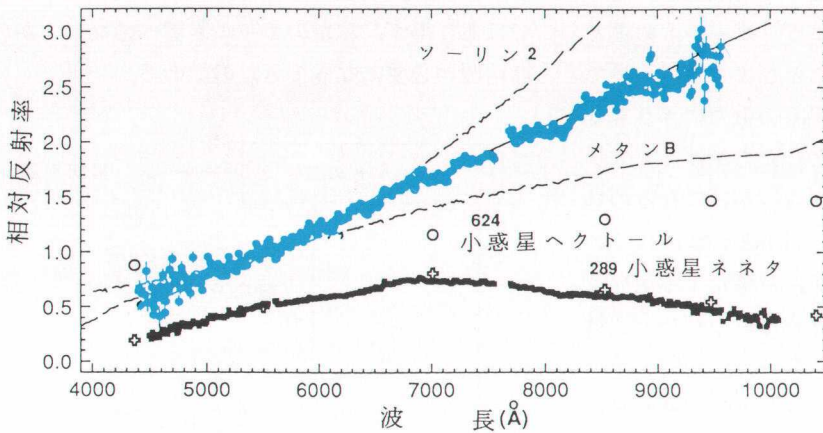


図3 特異小惑星フォラス(5145)の可視光スペクトルといくつかの小惑星、および実験室データとの比較[1]。表面はある種の化学変化を起こした有機物と氷からできていることを強く示唆している。

惑星は木星軌道より内側という固定観念はもろくも崩れる。土星と天王星の間に小惑星キロン(2060)が発見されたのである。この小惑星は近日点に近づいてきた1988年になって、はじめて彗星特有のコマが発見され、軌道進化の観点からも、

物理観測からも巨大な彗星であると思われる。さらに1992年1月、今度は天王星と海王星の間に小惑星が見つかった。小惑星フォラス(5154)である。発見時には日心距離が9天文単位にまで近づいていたが、今のところ彗星的な活動を示し

ていない。ただ、そのスペクトルは普通の小惑星には似ても似つかない、太陽系で最も「赤い」天体である [1] (図3)。

いずれにせよ、太陽系の中の小天体の発見は外へ外へと伸びていた。かすかな夢の予感があったのである。

3. 理論家たちが見続けた夢：見えない彗星の巣があるはずだ！

そんな予感とは無関係に、冥王星の外側に彗星の巣があるはずだ、という説が理論家の間で唱えられていた。これがカイパー・ベルトである。

そもそも、このカイパー・ベルトはアメリカの天文学者ジェラルド・カイパーが短周期彗星の供給源として言い出したものである。彗星のような氷を主成分とする天体が、無数に太陽系外縁部に存在し、小惑星帯のようなベルト状構造をしている、というアイデアだ。このアイデアは、しばらく有名なオールトの雲説に隠れて影が薄かった。しかし、いくつかの理由から近年になって急速にクローズアップされてきた。

まず、短周期彗星の起源として常識となっているオールトの雲説を説明しよう。オールトの雲とは、太陽系を大きく球殻状にとりまく彗星の巣である。それぞれの彗星は太陽系の重力にぎりぎりで束縛されていて、ちょっとした力かげんで太陽へ向かって落ちて来る。そのきっかけになるのは太陽のそばを通過した恒星の摂動とされていた。そこから飛来した彗星が、たまたま木星などの惑星に近づき、トラップされたものがハレー彗星などのような短周期彗星になる、というアイデアである。実際、新しく発見される長周期彗星の軌道を調べると、その遠日点は確かにオールトが唱えた雲の周辺 (1-10 万天文単位) になるものが多く、オールトの雲が実在していることがわかる。

しかしながら、このオールトの雲説にはふたつの大きな問題があった。ひとつは観測される彗星の数のアンバランスである。彗星の物理的寿命の

短さから考えると、観測される短周期彗星が多すぎる。つまり、彗星の供給と消滅がバランスしているとする、オールトの雲からの彗星を惑星摂動で捕まえるだけでは現在の短周期彗星の数を説明できない。定常状態なら、放物線軌道の新彗星の数は10倍から100倍ほど多くなくてはならないのである。

もうひとつの問題はオールトの雲の不安定性である。オールトが、このアイデアを主張した頃には、銀河系内でその安定を脅かす天体は恒星だけだった。したがって、恒星の至近距離の通過がオールト雲へ適当な時間間隔で適度な量の摂動を及ぼし、継続的に内部太陽系に彗星を供給できる好都合な存在と考えられたのである。しかしながら、その後の電波天文学の発展で、質量が太陽の1-10万倍もある巨大分子雲がぞくぞくと見つかり、それらとの遭遇が無視できないことがわかった。さらに銀河そのものの潮汐力の影響も見過ごせないことも指摘された。これらの摂動は恒星の至近距離の通過に比べると強すぎて、もともとオールトが考えたような彗星の雲は完全に払拭されてしまう。つまり、45億年にわたってオールト雲は安定ではあり得ず、彗星のオールト雲へのなんらかの補給源が必要になってきたのである。

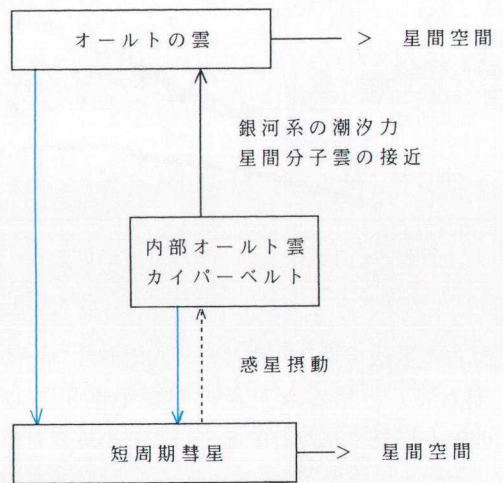


図4 短周期彗星へのふたつの進化のルート。

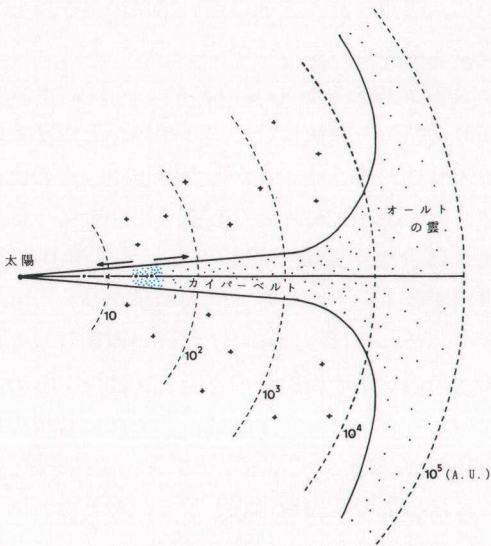


図5 黄道面と垂直に切ってみたカイパーベルトからオールト雲にいたる彗星の分布の断面。冥王星の外側に黄道面に集中したカイパーベルトがあり、やや広がって内部オールト雲、球殻状のオールト雲とつながっている。

以上の理由から、彗星の新たな供給源が必要になった。ここでいう供給源という言葉にはふたつの意味がある。ひとつはオールト雲への供給であり、もうひとつは内部太陽系へのオールト雲を通さないルートでの短周期彗星の供給である(図4)。その供給源としてカイパー・ベルトが一躍脚光を浴び始めたわけだ。

まず、巨大分子雲の摂動で外側のオールト雲ははぎ取られても、それと同時にカイパー・ベルトから外側へ彗星を供給できる。これにより、オールトの雲を新たにつくるのである。この意味ではカイパー・ベルトが内部オールト雲と呼ばれることもある(図5)。ただ、このような外側への軌道進化には異議を唱える研究者も多い。さらに、カイパーベルトから、直接太陽系内部へ軌道進化するルートで短周期彗星の数を説明することができる[2]。海王星や天王星といった外惑星によって軌道進化し、内部に入り込んでくるため、この量

的な不一致の問題は解決する。これが本当なら、巨大分子雲との遭遇頻度などから、現在のオールトの雲の5-10倍以上の彗星がカイパー・ベルトに存在するはずである[3]。

冥王星の彼方に見えない彗星の巣があるはずだ！理論家たちは既に果てしない夢を見続けていたのである。

4. 新たな夢の予感

一方、古典的な太陽系惑星科学の研究とは全く別な観点からもある種の予感があったといえるかもしれない。それは、最近とくに注目されている原始惑星系円盤などの他の恒星系での観測結果である[4]。そこで観測される構造は現在の太陽系の大きさ(40天文単位)に比べて一桁大きい。例えば、がく座β星、へびつかい座68番星やフォーマルハウト[5]のまわりでは400天文単位を越える広がった塵円盤が見つかっているし、いままさに生まれつつある星と考えられているおうし座T型星のいくつかにはガスや塵が星の周りに同じ様なスケールで存在しているのが観測されている。これらの観測では角度分解能が足りないため、100天文単位より内側を詳しく知ることはできないものの、構造の大きさ自体は観測手段の限界に起因するようなものではない。それならば、われわれの太陽系でも、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・成長して多数の小天体にまで進化し、彗星核ができていても不思議ではないではないか？とすれば、これらはそのままカイパー・ベルトとして残っているのではないだろうか。

もともと冥王星の彼方に未知の第10惑星があるのではないかと、いわれて久しい。その発見を目指し、いまままでいくつかの試みがあったが、すべて失敗に終わっている。最近では第10惑星の存在の有力な証拠と思われていた現象：海王星や冥王星の軌道の「ふらつき」から、現在の第10惑星はさそり座の方向にある、と主張する研究者もい

る [6] が、これらのもとになっている位置観測にかなりの誤差があるのではないかと疑われている。また、冥王星を越えて飛行を続けるパイオニアなどの探査機の軌道も大きな摂動を受けた形跡はない。少なくとも海王星クラスの大惑星が、いわゆる第 10 惑星として安定な軌道で存在することはないかもしれない。しかしながら、たとえそうであっても大きな重力作用を及ぼさないような天体——これこそまさにカイパーベルトなのだ——ならば存在してもおかしくはないのである。

5. 逆夢：見えない彗星の巣は無くてもいいのか？

さて、こうしてみると見えない彗星の巣、カイパーベルトは確かに存在しているような気もしてくる。だが、本当にこれらの観測事実を説明する

ために、観測されたことの無い彗星の巣を持って来る必要があるのだろうか？

ここで異説を紹介しよう。たとえば、キロン(2060)の軌道を数値積分で追っていくと内部太陽系に入り込んでくるのがわかる [7]。その直径は 200 km 近い巨大彗星である。これをばらばらにすれば少なく見積ってもハレー彗星が 1000 個は供給できる勘定になる。巨大彗星をひとつもってきて、それをばらばらにすれば短周期彗星と放物線軌道の彗星の供給量のギャップは埋まるのではないだろうか？ とすれば、見えない彗星の巣など必要ない。

これは彗星の分裂進化説として、もともと国立天文台の中村 [8] が提案していたアイデアである。1993 年になってから、木星に捕捉され、核が 10 個以上に分裂しながら、そのひとつひとつが独立した彗星になりつつある驚くべき彗星が見つ



図 6 シューメーカー・レビー第 9 彗星 (1993e) の核が分裂して数珠つなぎになっている様子。ハワイ・マウナケア山のハワイ大学 2.2m 望遠鏡にて。

った。シューメイカー・レビー彗星 (1993 e) である (図6)。残念ながら、これらは1994年に木星に衝突してしまうが、こういった分裂によって短周期彗星の供給があってもおかしくないと思えてくる。

さらに突っ込んで、いま観測されている短周期彗星は実は最近あった彗星シャワーの名残りで、決して定常状態にはなっていない、という考え方もできる。これは彗星の星間起源説を唱える研究者に多い。事実、赤外線天文衛星アイラスでは母彗星がないダストトレイルが数多く見つかっている[9]。この種の考え方はあまり一般的ではないものの、銀河潮汐力が無視できないこととからんで、けっして完全に否定されたわけではない。これらの異説はオ尔特雲の安定性に関しては不利だが、後者では銀河面を通過するときに星間彗星を捕獲して新たなオ尔特雲を形成させたり、内部オ尔特雲から供給することで切り抜けられる。

はたして、見えない彗星の巣は必要なのだろうか？ 逆夢か、正夢か。ふたつのカイパーベルト

候補が見つかった今でも、まだまだ観測が必要な理由はここにもあるのだ。

6. 夢追い人たちの夢：そして、冥王星の彼方へ

わが太陽系の地図は技術革新によって人類の宇宙を見る「目」が良くなるたびに書き換えられてきた。望遠鏡の発明が土星の外側に新しい惑星の発見をもたらした。天体写真技術の導入が、冥王星の発見を与えてくれた。そして、いま CCD 素子というとびきり感度のいい「目」が、再び太陽系、しかも冥王星の外側の地図を書き換え始めたのである。いま、太陽系は新たな発見の時代へ突入した。

そして、この発見の時代を新たな天文学へつなぐリード役として日本が期待されている。その理由は三つある。

ひとつはカイパーベルト天体の発見を「すばる」で独占できることである。この種のサーベイでは視野の広さと集光力がものをいう。しかし、他の次世代大型望遠鏡では、このようなサーベイを初

表1 カイパーベルト天体の「すばる」での発見効率と期待値のハワイ大学望遠鏡との比較

カイパー・ベルトの条件	新天体発見効率	
	すばる	UH88
性能比較		
口径	8m	2.2m
限界等級	28-9等 (R)	25等 (R)
露出時間	15分 (以下)	15分
視野	22分角 (以上)	7.5分角
質量分布/空間分布を考えない場合、一個当りの発見に要する検索時間	5時間	50時間
1992QB1クラスの天体の検出限界距離	100A.U.	50A.U.
50A.U.での検出限界直径	50km	200km
質量分布が小惑星と同じ場合の1時間あたりの期待値	2-5個	1/50個

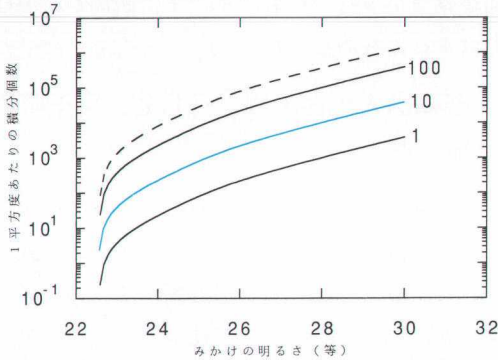


図7 山本・小笹理論 [11] によるカイパーベルト天体の見かけの明るさとその個数の関係。図中の数値はカイパーベルト全体の質量で地球質量を1としている。現在までに2つの天体が見つかったことで、全質量は地球の10倍程度と推定されている。ハワイ大学2.2m望遠鏡の限界等級24等とすばるの限界等級28等ではその数は2桁も大きく異なることがわかる。

めから考えていなかった。8 mクラスの大型光学望遠鏡として主焦点広視野サーベイモードを持っているのは、ただひとつ「すばる」だけなのである[10]。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。すばるを用いたとき、現在のハワイ大学の望遠鏡に比べていかに発見効率がよくなるかは明らかである(表1)。これは、宇宙科学研究所の山本・小笹 [11] らの微惑星集積理論による予想とも矛盾していない(図7)。

もうひとつは、カイパーベルトは正論なら天体の数はかなり大量にあり、天体力学の新たな研究課題を提示することである。この中には小惑星帯のように族やギャップなどの力学的構造があるか

もしれない。どのような軌道進化をするのか、内側の惑星に起因する永年摂動やレゾナンスはどの様に効くのか。天体力学の研究者にとって、再びおもしろい時代がやって来る。

最後は、このカイパーベルトが太陽系起源論への新たな問題提起になりうることである。外縁部での惑星・微惑星形成のタイムスケールや、海王星の形成タイムスケールパラドックスなどの解決への糸口が見つかるのかもしれない。

いずれにしても上記の3つの項目が日本の天文学の(伝家の?)宝刀(「すばる」, 天体力学, 惑星形成論)であり、総合的な研究をすすめることが可能なのは明らかである。夢追い人の夢は、世界に類を見ないすばる望遠鏡のオリジナルな重点計画のひとつとして、この種のサーベイ計画を実現させることだ。そして、その夢の実現は近い。冥王星の彼方にまだ見ぬ天体を求めて――。

参考文献

- 1) Binzel, R. P. 1992, *Icarus*, **99**, 238.
- 2) Bailey, M. E., Clube, S. V. M., and Napier, W. M. 1986, *Vistas Astron.*, **29** 53.
- 3) Duncan, M., Quinn, T., and Tremaine, S. 1987, *Astrophys. J.*, **94**, 1330.
- 4) 林 正彦 1993, 遊星人(日本惑星科学会誌), **1**, 10.
- 5) 半田利弘 1993, 天文月報, **86**(8), 342.
- 6) Harrington, R. S. 1988, *Astron. J.*, **96**, 1476.
- 7) Oikawa, S., and Everhardt, E. 1979, *Astron. J.*, **84**, 134.
- 8) 中村 士 1980, : 太陽系内小天体小天体シンポジウム集録, p.31.
- 9) Sykes, M. V., and Walker, R. G. 1992, *Astron. J.*, **95**, 180.
- 10) 家 正則 1993, 天文月報, **63**(8), 328.
- 11) Yamamoto, T., and Kozasa, T. 1988, *Icarus*, **75**, 540.

筆者追記:

1993年9月現在、カイパーベルト起源と思われる天体が4つ(1993 RO, 1993 RP, 1993 SB, 1993 SC) 新たに見つかった。

特に1993 ROは海王星と経度で60°離れており、海王星の「トロヤ群」天体の可能性が指摘されている。