

# 太陽系外縁部小天体

## ——微惑星を見てみたい——

関口朋彦<sup>1</sup>

### 1. 緒——太陽系の果て——

これからする話は太陽系の一番外側の方の話である。しかし太陽系の外側と言っても太陽系の一番端っこをどこに置くかは難しい。いささか最初から話が脱線してしまっているようで恐縮であるが、太陽系外縁部天体に関する話をする以上、どこまでが太陽系かを知っておく必要がある。各自の専門によりいろんな捉え方があると思うが、電磁気的学的な観点からは

(a) 太陽風が銀河宇宙線に卓越する領域ヘリオスフェアの果てが太陽系の果てである

と決められそうだ。ただし、これは実質的な物のある領域ではない。やはりたいいてい人は「実質的な物のある範囲」という点において太陽系を決めたいはずだ。だから太陽系を「太陽重力の影響の及ぶ範囲」としてみよう。この場合には

(b) オールトの雲の端までが太陽系である

と言えるかもしれない。ただしオールトの雲というのは天体力学による軌道計算がもたらした仮想の領域に過ぎない。現在の観測能力では直接オールト雲を観測する事は不可能だ。一方

(c) 観測され得る一番遠くの太陽周回天体までを太陽系

と定義すれば「エッジワース・カイパーベルト天

体 (EKBOs)」までとなり、最も現実的だと言えるだろう。ただし、これもこの先どんどん遠くのEKBOsが見つければそこを端っこにせねばならず、そのつど変更が生じ面倒極まりないのは自明である。ならばいっその事

(d) “最後の惑星”までが太陽系である

とすればいいではないか。おそらく一般的にはこの定義が自然となされている事と思う。しかし何を持ってある天体を惑星として位置付けるのか？惑星と呼ぶための定義そのものを私は知らない。

### 2. 冥王星が小惑星になってしまう!?

1998年10月16日の事だった。私の所属する国立天文台・天体力学部門のメーリングリストは国立天文台・計算機センターの伊藤孝士助手が主催し、普段はセミナーの案内などがその主な内容なのだが、この日のMLの議論は大きく賑いをみせた。福島登志夫教授の提供された話が発端である。それは、「IAUのCommission 4 (暦)のニュースレターによると、惑星系命名作業部会 (WG for Planetary System Nomenclature) 委員長の名で「(Edgeworth) Kuiper Belt Objects なるものを創設し、その第1号としてK/1 Plutoのような記法を容認する」という案が提出された。そしてこの件に関し投票を行う」というものであった。

日本の天体力学研究者達はこのML上でさまざま

<sup>1</sup> 欧州南天文台, チリ

な賛否両論を唱えた。その中、電通大の柳澤正久助教授が以下のような指摘をされた。「太陽系天体を質量の大きい順番に並べればおそらく太陽、木、土、海、天、地、金、火、水、ガニメデ、タイタン、カリスト、イオ、月、エウロパ、トリトン、冥王星、チタニア、オベロン、レア、ヤベタス、カロン、ウムブリエル、エリアル、ディオオーネ、その次辺りが小惑星ケレスとなる。天体の質量の観点では冥王星に小惑星番号を振るのもうなづける」と。天体の特徴付ける最も基本的な物理量は質量であるから、木星土星の衛星、さらには地球の月（赤道半径：1738km）などよりも小さい冥王星（赤道半径：1100km程度）はこの点においては“最大の小惑星”といっても差し支えなさそうである。小惑星と、衛星との違いは大きさではなく、その軌道を決定しているのが太陽か惑星かによる、という議論も冥王星については少々弱い。冥王星の軌道は、周期が海王星と3:2の力学的共鳴関係にあり、海王星の力学に束縛されていると言っても過言ではないからである。惑星物質科学的見地からしても、冥王星の反射スペクトルは海王星の衛星トリトンやEKBOsなどと比較される事が多く[1]、実際今年度秋のアメリカ天文学会惑星分科会（DPS1998）では“Triton and Pluto”という枠組でセッションが構成されている。物質科学的な取り扱いでは実は冥王星はもうすでに惑星としてではなく、海王星の衛星トリトンなどと共に一番大きなEKBOsのように取り扱われているようだ。——冥王星が小惑星になる——しかしこれは少なくとも一般の方々や、マスコミ相手には問題である。まだどのように決まるかわからないが、この提案が通れば福島氏がML上で懸念されたように、小惑星番号を持つ→小惑星と公認される→「惑星ではなくなる」といった捉えられ方は避けられない。教科書などの記述の仕方も工夫しないと、教師にまで混乱を招きかねない。

### 3. 彗星とオールト雲とエッジワース・カイパーベルト

太陽系の外縁部を直接知る手段としては、太陽系の果てからやって来る彗星の性質の研究がある。彗星の出生地に対する研究者たちの見解は1990年代になってほぼ一致を見たと思われる。その考えは(a) 離心率が大きく、軌道傾斜角がランダムに分布している長周期／中間周期の彗星はオールト雲から、(b) ほぼ黄道面に沿った軌道傾斜角の小さい軌道を持つ短周期の木星族彗星はエッジワース・カイパーベルト (EKB) からやって来る、というものである。以下に、この考えの詳細を述べる。

#### 3.1 彗星の起源：天体力学研究

エドモンド・ハレーが活躍し力学物理が成長した時代から、天体力学の研究者達は彗星を長周期と短周期の2グループに分類していた。公転周期が200年以上のものが長周期彗星であり、ハール・ボップ彗星や百武彗星がその代表だ。これに対し周期200年未満の短周期彗星は実はここ10年位からさらに二つに分類され出している[2]。1つは周期が20年以下の短周期彗星で木星族 (Jupiter Family) と呼ばれる。エンケ彗星やテンペルII彗星などがそうだ。もう1つは、公転周期が20~200年という中間的な周期をもつ彗星 (中間周期彗星) のグループで、有名なハレー彗星が属している事からハレー型 (Halley Type) と呼ばれている。中間周期彗星と長周期彗星は、あらゆる方向からランダムに太陽系の内側領域 (惑星領域) にやって来る。長周期だったものが巨大外惑星の重力によってその軌道を変えられ、短い周期となったものがハレー型となる事が数値計算によって示された。一方、木星族の彗星は、その軌道面は黄道面に対して40°以内の傾斜角におさまっている。中間周期彗星と長周期彗星はオールトの雲からやって来ると

思われるが、木星族の彗星は、今ではEKBOs が故郷だと考えられている。EKBOs,あるいは海王星外域天体 (TNOs:Trans-Neptunian Objects) と呼ばれる天体は現在68個が発見・登録に至っている。図1にオールトの雲・カイパーベルト・惑星間空間の概念図を示す。

### 3.2 微惑星候補天体

太陽系の外縁部の観測を行い、EKBOs の空間分布を知る事は天体力学の研究に大いに貢献する事になるだろう。では、これらの天体の物理観測にはどんな意味があるのだろうか？

京都モデルなどに代表される太陽系形成論では、微惑星を惑星集積過程の出発点としている[3]。微惑星は原始太陽系において、太陽から数百AUの領域まで存在したと考えられる。それらの内、太陽に近い数密度の大きな領域では衝突・合体成長を繰り返し、現在の惑星へと成長していった。しかし太陽から離れた数密度の小さな領域では惑星サイズには成長できずにいたはずだ。もしかしたらこれらがその軌道半長径をほぼ保ったまま、40数億年に渡って太陽の周りをまわり続けたかもしれ

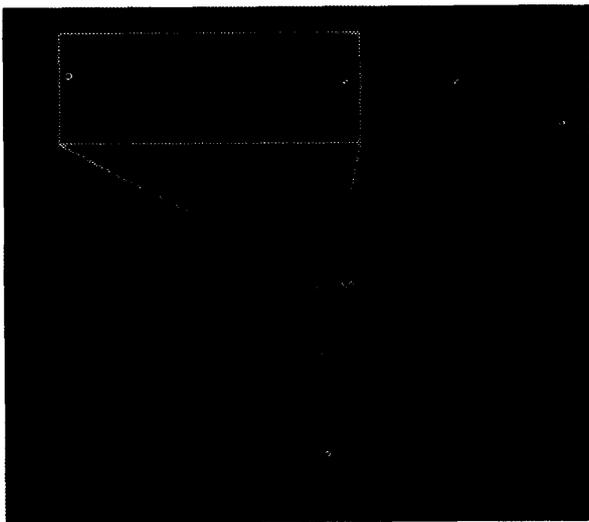


図1 オールトの雲、エッジワースカイパーベルト、惑星間空間領域の概念図。それぞれの小天体の大きさは誇張して描かれている。太陽系外縁部を実スケールで表現した。

ない。現在までに見つかったEKBOs は明るいものに限られ、それらは100kmサイズスケールである。つまりEKBOs は惑星形成の出発点天体、微惑星の集合体である事が予想される。この事から、EKBOs は太陽系に現存するもっとも始源的な天体であると言えよう。原始太陽系の情報を最も直接的に知る事のできる天体、太陽系の生きた化石、いわば太陽系のシーラカンス天体(!?) である。EKBOs を見れば微惑星を見る事になり、ひいては太陽系の起源論に直接的な物的証拠を突き付ける事を意味するのだ。

### 3.3 彗星への遷移天体ケンタウルス

いかにしてEKBOs が太陽系の内側へと落ち込み、短周期彗星へと進化していくのか？ この進化の過程を観測できる天体がCentaurである。1977年、Kowalによって、それまでで最も遠い小惑星が発見された。土星と天王星の間を50年の周期で公転する事から、彼はこの小惑星に対しローマ神話におけるサターン（土星）の息子、つまりウラヌス（天王星）の孫にあたるケンタウルス族の男キロン（又はカイロン-Chiron）の名を与えた。ところが、その後の詳細な軌道計算によりキロンは巨大惑星による摂動の影響により力学的に不安定であり、数百万年のオーダーで今の軌道を外れる事が予想されたのである。これはEKBOs から内部太陽系に落ち込んでくる一般的な短周期彗星の軌道進化過程である。そして発見から十年以上経て、とうとうコマ（彗星の本体を取り巻くガスや塵の領域）が観測された[4]。これは、キロンが小惑星のようなケイ酸塩物質だけではなく、揮発性成分も持っていることを意味している。キロンは、今まさにEKBOs から彗星へと進化の途中段階にある天体であったのだ。それ以後キロンのように巨大ガス惑星領域（海王星よりは内側だが木星よりも遠い領域）を公転し、常に惑星摂動によって軌道を変え

られ、どこかに放り出される可能性を秘めた天体が見つかり、ローマ神話のケンタウルス (Centaur) 族の名を付けていくようになった。このような天体はこれまでのところ8個が発見されている。

### 3.4 EKBOs の可視・近赤外線観測—微惑星って何色だろう

EKBOs はどれもひじょうに暗いため、物理観測の例は少なく、その表面組成などの情報はほとんどない。ケンタウルス天体のキロンのスペクトルは可視域に渡ってひじょうにフラットで、あまり特徴がないのが特徴であり、一方同じケンタウルス天体に分類されるフォルス (Pholus) は長波長側で大きな反射率を示す右上がりの「赤い」スペクトルである。他のEKBOs はいくぶんフォルスと似た傾向を示すものがある、という程度である。この色の違いの解釈として、当初は日心距離依存性が唱えられた[6]。炭素化合物の混ざったH<sub>2</sub>O氷は高エネルギー線の照射により赤く黒く変化する。フォルスはこれに相当する。一方キロンのように比較的内側を回るものは彗星としての活動を見せて、内部より噴き出した物質が再び表面を覆ってしまう。そのため、スペクトルはフラットになるという説明である。しかし今年になって、EKBOs の色は距離に関係なく、フラットと赤との二種類に分類される[7]という報告がNature誌に載った。今はちょうど1970代に（私は全く存じないのだが……）メインベルト小惑星の観測が増加し論文が提出されるにつれて、小惑星がさまざまな型に分類されていった頃の状況に似ているのではないだろうか。EKBOs・ケンタウルスの色の違いが表面の組成や表面の物質状態・形状など何によるものかを知る研究は、これからの観測的惑星科学研究の焦点の一つだと私は考えている。

## 4. 現在始動中のプロジェクト

### 4.1 木曾太陽系深縁部天体サーベイ

CCDカメラは視野が狭いために、多くの天体を発見するためのサーベイ観測には、あまり向いていないと考えられてきた。しかし東京大学木曾観測所の105cmシュミット望遠鏡は、2kCCDカメラを採用する事により48分×48分の稀れに見る広視野を持つ。これは満月がすっぽりと納まってまだ余る範囲だ。私は97年度の春より「木曾太陽系深縁部小天体サーベイ」プロジェクトを開始した。Jewittら[9]によればEKBには直径100-500kmクラスのEKBOsは総質量で0.06地球質量、直径2000kmまでのものは0.25地球質量分、存在すると見積られている。彼らによって実際に行われた観測の検出効率から木曾シュミットでの観測効率を見積もってみよう。仮りにVバンドで22等級の点源が木曾で受かるとすると1平方度におよそ0.4個のEKBO&Centaurが検出可能である。しかし実際には木曾の空ではそのような測光夜はめったになく、晴れの夜も多くはない。観測した春夏の二シーズン（割り当て時間はそれぞれ4、5日間程度）の内、実際にサーベイができたのは二晩のみである。今のところまだ遠方小天体は発見できていない。現在二名の修士課程学生がこの画像とNTT (ESO, Chile) 望遠鏡から譲り受けた画像の解析をすすめている。この解析過程で開発されるEKBOs 自動検出プログラムは、最終的にはSUBARU望遠鏡の主焦点カメラによるサーベイのデータ解析を目的としている。

### 4.2 野辺山45m 電波望遠鏡によるキロンからの彗星ガスの検出

八つのケンタウルスの内、観測によって彗星コマが検出されているものはこのキロンのみであり、短周期彗星への進化を探る上で重要な天体である。一般に彗星は太陽に近い地球軌道付近では、その主成分であるH<sub>2</sub>O（昇華温度152K）をさかんに蒸

発させ、急激に輝度を増す。しかし、 $H_2O$ があまり昇華しないような距離でも、暗いながらも彗星コマが観測されたり、急激な増光が起きたりすることが知られている。最近、遠方で活発な活動を起こす彗星として有名なSchwassmann-Wachmann I 彗星の電波観測により、この活動の源はCO（昇華温度25K）の昇華噴出によるものである事が示唆された。またハール・ボップ彗星では、さらに遠方でCOが検出され、長周期彗星においても遠方で活動源はCOの氷のOutgassingである事が示された。そのためこれまでも電波望遠鏡によるキロンからのCO検出が試みられて来たが、まだ確定的な結果はでていない。これまでの結果は表1にまとめである[8]。電波観測は惑星科学研究者にはおそろくなじみが薄いであろう。しかし国立天文台野辺山宇宙電波観測所にある45m 電波望遠鏡は、ミリ波領域では世界最高性能を誇る。我々は1998年春、キロンに鏡を向けた。ケンタウルスからCO分子の回転遷移輝線（ $J=1-0$ 115GHz）を検出し、これまでの2つの相反する結果に決着を付けるのが目的であった。しかし観測期間中の降雪のため鏡が着氷するという悪条件やマシンの不調もあり、残念ながらCO輝線は見い出せなかった。次回の観測はちょうど本稿が出版される頃である。今度こそ45m

大望遠鏡を用いて、COのシグナルをキャッチしたい。

## 5. これからのサイエンス

EKBOs は最も明るいものでも20等級台であるため、物理観測はひじょうに困難である。可視・近赤でのこれらの天体の分光観測はひじょうに少なく、公表されたものはKECK10mによる数例のみである。国内で可能な物理観測としては、明るいEKBOs か、あるいは距離の近いCentaurの測光観測がやっただろう。

### 5.1 次世代望遠鏡

可視光・赤外線域での観測天文学分野では、次世代望遠鏡と呼ばれる口径8-10mクラスの望遠鏡計画が成就の時を迎えている。これらは電磁波観測における限界の性能（回折限界）を追求した、言わば究極の観測装置群である。すでに稼働している、KECK I & II（California KECK財団）、VLT（欧州南天天文台）のほか、1999年2月にファーストライトを迎える日本のSUBARU（国立天文台）やGEMINI（米英加ほか）である。これらの観測機器によって、この分野のサイエンスは大躍進を遂

表1：遠方の彗星とキロンにおいてこれまでになされているCOの電波観測の結果。

Table 1. 遠方彗星とChironにおけるこれまでの'COの電波観測'

彗星 & Chiron	日心距離	地心距離	line area	観測
P/Schwassmann-Wachmann 1	6.075(AU)	5.905(AU)	$0.08 \pm 0.01$ (K km/s)	Matthews <i>et al.</i> (1994)
C/Hale-Bopp	6.7	6.5	$0.090 \pm 0.07$	Biver <i>et al.</i> (1996)
C/Hale-Bopp	6.649	6.437	$0.042 \pm 0.08$	Jewitt <i>et al.</i> (1996)
P/Chiron(2060 Chiron)	8.5	8.6	$0.013 \pm 0.0005$	Womack <i>et al.</i> (1995)
P/Chiron(2060 Chiron)	8.50	8.65	上限値のみ(不検出)	Rauer <i>et al.</i> (1996)

Senay *et al.* (1994) Nature 371, pp.229-231., Biver *et al.* (1996) Nature 380, pp.137-139., Jewitt *et al.* (1996) Science 271, pp.1110-1113., Womack *et al.* (1997) LPSC XXIII pp.1575--1576., Rauer *et al.* (1997) P.S.S. 45, pp.799--805.

げるはずだ。現在発見されている明るさのEKBOs, ケンタウルスなら, 可視・近赤・中間赤外と様々な波長で様々な分光・測光観測が可能となるだろう。特に我々のグループが期待するものには, SUBARU望遠鏡を用いたサーベイ観測である[10]。これら次世代望遠鏡の中において, 実は日本のSUBARUだけが, 広視野撮像を可能ならしめる“主焦点”を持っているのだ。観測限界等級は同程度であっても観測効率は桁違いである。これによりたくさんより遠くの太陽系天体が見えて来る事だろう。見える太陽系が今までよりずっと広がるのだ。それは我々人類の太陽系に対する知見が大きく広がる事を意味している。

この他, 現在国立天文台が中心となって計画しているLMSA (Large Millimeter and Sub-millimeter Array) は電波波長域でのブレークスルーである。電波観測特有の高速分解能に加え, アレイによる0.01秒角という未踏の空間分解能, 電磁波の最後のフロンティアであるサブミリ波観測を可能にしようという大プロジェクトである。現在サイトをチリ・アンデスの山の上に置くべく計画がすすめられている。

## 5.2 彗星探査, 冥王星・EKBOs 探査ミッション

あまり大きく取りざたされないのが残念だが, 本稿執筆中にはNASAディープスペース1が打ち上がった。小惑星フライバイの後にはボレリー彗星に向かう事が予定されている。この他にも, 現在いくつかの探査計画の準備が着々と進んでいる。1999年打ち上げ予定の探査機スターダストは, ウィルドII彗星のコマを通り抜け, 彗星塵のサンプルを採取後, 地球に再び戻って来る予定だ。さらに数年後にはコンター探査機が3つの彗星に接近し, それらの組成の比較を行う。また, ディープスペース4・シャンポリオンミッションではテンペルI彗星に, ロゼッタミッションではウィルトナネン彗

星にそれぞれ着陸を敢行する。

また冥王星-カイパーエクスプレスは2003年11月から2004年12月の打ち上げを予定しており, 8-9年間かけて冥王星へ向かう。ボイジャーもたどり着かなかった天体, 冥王星ははたして最後の「惑星」なのか, それとも最初のEKBOなのか, おそらく表面組成の問題は, このミッションで明らかにされる事だろう。

## 6. Pluto, Charon, EKBOs and Centaurs

たとえ近い将来に冥王星が惑星でなく, 一番大きなEKBOsの一つとして取り扱われるようになったとしても, “微惑星”から“原始惑星”への成長過程のスナップショットとして興味深い対象であることに変わりはない。しかし, 冒頭に述べたように「どこまでが太陽系で, なにが惑星か?」は, 一般の人々だけでなく科学者もまた定期的な振りかえってみるべき疑問であると言えるだろう。

1998年11月2-5日, ドイツのミュンヘンで太陽系外縁部小天体の会議 Workshop on Minor Bodies in the Outer Solar Systemが催された。ここでの晩餐会

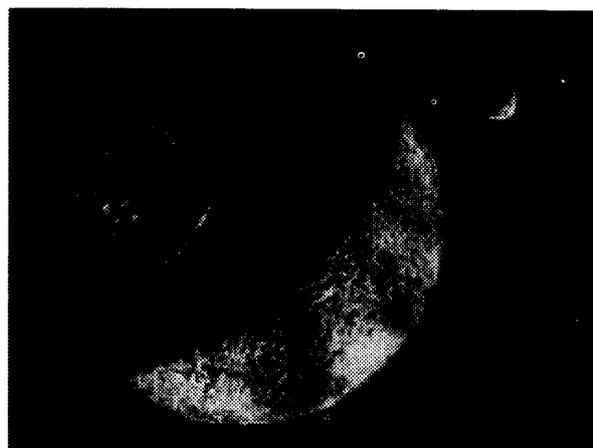


図2 Pluto-Kuiper Express

冥王星・カロンを探査する目的で現在計画中のミッション。NASAが2004年位に打ち上げを予定している。到着はさらに8-9年後。冥王星をフライバイした後はEKBOsに向かう。提供: NASA

[http://www.jpl.nasa.gov/ice\\_fire/](http://www.jpl.nasa.gov/ice_fire/)

でも冥王星問題の投票が行われた。冥王星にエッジワース・カイパーベルト天体の称号をあたえるべきか？会の終幕、LOCのAlan Fitzsimmonsは投票結果をトラベにして公表した。スクリーンにはただこう書かれていた。

PLUTO IS "NEIN".

## 参考文献

- [1] Brown, R., Cruikshank, D., Pendleton, Y., and Veeder, G., 1997 : Surface Composition of Kuiper Belt Object 1993SC. *Science*, 276, 937-939.
- [2] Weissman, P. R. (訳渡部潤一, 関口朋彦), 1998 : 彗星の故郷オールトの雲. *日経サイエンス*12月号, 48-57
- [3] Hayashi et al., In *Protostars and Planets II*, edited by Black, D. C. and Matthews, M. S., p.1100-1153.
- [4] Hartmann, W., D. J. Tholen, K. J. Meech and D. P. Cruikshank., 1990 : 2060 Chiron: Colorimetry and Possible Cometary Behavior. *Icarus* 83, 1-15.
- [5] Luu, J. X., and Jewitt, D. C., 1996 : Color Diversity Among the Centaurs and Kuiper Belt Objects. *Astron. J.* 112, 2310-2318.
- [6] Weintraub, D. A., Tegler, S. C., and Romanishin, W., 1997 : Visible and Near Infrared Photometry of the Centaur Objects 1995 GO and 5145 Pholus. *Icarus* 128, 456-463.
- [7] Tegler, S. C., and Romanishin, W., 1998 : Two Distinct Populations of Kuiper-belt objects. *Nature* 126, 212-217
- [8] Sekiguti, T., Ukita, N., Watanabe, J., Fuse, T., Hasegawa, H. and Boice, D. C., 1998 : Millimetric Observation of CO (J=1-0) in (2060) 95P/Chiron with NRO 45m Radio Telescope. In *Abstracts of ESO Workshop on Minor Bodies in the Outer Solar System*
- [9] Jewitt, D. C., Luu, J. X., and Chen, J., 1996 : The Mauna Kea - Cerro Tolol (MKCT) Kuiper Belt and Centaur Survey. *Astron. J.* 112, 1225-1238.
- [10] 布施哲治, 渡部潤一, 関口朋彦, 1998 : 憧れの“えくぼ”を追い求めて, *天文月報*, 第91巻, 第5号, 203-209