

憧れの“えくぼ”を追い求めて

布施 哲治* , 渡部 潤一** , 関口 朋彦***

*, *** <総合研究大学院大学/国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1>

** <国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1>

*e-mail: tetsu@pluto.mtk.nao.ac.jp

近頃、どうも太陽系が賑やかである。彗星の木星衝突、巨大彗星の出現、火星探査、天王星に新衛星発見……。ところが、実はもっと注目すべきものがある。それは、Edgeworth-Kuiper Belt Objects, 略してEKBO（えくぼ）。太陽系外縁部に広がり、惑星になれなかった微惑星の生き残りであると考えられているEKBOについて、最近になり少しずつではあるがわかり始めてきた。我々はこの“えくぼ”の微笑みを眺めることができるだろうか。

1. えくぼ!?

笑顔に現れるエクボも素敵ではあるが、太陽系にはもっと魅力的な“えくぼ”が存在する；－EKBO－1949年にエッジワースは、太陽系の外側について「太陽系形成時の状況を考えると、海王星近傍で突然天体がなくなることはおかしい」と主張した¹⁾。一方で、1951年にカイパーはエッジワースと同様に、「太陽系の外縁部に惑星になれなかった天体が残っているに違いない」と指摘した²⁾（しかしカイパーは、この論文の中でエッジワースのことを引用しなかった）。歴史的な順序に従い、太陽系の外側に広がっているとされる天体の集まりをエッジワース・カイパーベルトと呼ぶことにする（図1＝表紙）。略してEKB（Edgeworth-Kuiper Belt）とし、EKBに属する天体をEKBO（EKBO Objects；えくぼ!?)とする。

1992年8月にとうとうその日がやってきた。ハワイ大学の口径2.2 mの望遠鏡により、最初のEKBOである1992QB1が発見されたのである（“1992QB1”は仮符号と呼ばれ、正式な固有名はまだ付いていない）。太陽からの距離（日心距離）は、約40天文単位であり、明るさは24等級と非常に暗かった。1992QB1の表面の反射能を彗星の

核と同程度（0.04）と仮定すると、その大きさは直径約280 kmであることがわかった^{3),4)}。

EKBOを発見するための観測は以前から行われてきたが、1992QB1の発見により観測に拍車がかかったことはいうまでもない。現在でも、世界中の大型望遠鏡が太陽系の彼方を見つめている。5年間の観測の結果、現在までに50個を超えるEKBOが発見された。それらの大きさは、小さいもので直径100 km、大きいもので直径300 km程度である。

なぜそれほどまでEKBOを発見しようとするのであろうか？ それは、エッジワースやカイパーらも指摘しているように、太陽系形成時に、太陽から遠い領域で惑星になりそこねた微惑星こそがEKBOであると考えられているためである。つまりEKBOを観測することは、『微惑星を直接観測することになり、ひいては46億年前の過去の太陽系を眺めている』ことになる。さらに、EKBOは彗星の起源であると考えられている。以上のことから、EKBOを発見・観測することは、太陽系形成論のみならず、彗星の起源に対しても制限を与えられるのである。

～“えくぼ”って、EKBOのことだったのか～

2. 億千万のえくぼ

我々が発見したEKBOは、まだわずか50個程度である。たった50個なのである。もちろん、広い空間にこれだけとは考えにくい。これらの発見は、非常に多く存在しているEKBOの中から、偶然に発見した50個なのであろう。いったい、どれくらいのEKBOが存在しているのであろうか。

EKBOが発見されるはるか以前の1968年に、ハレー彗星の運動から太陽系の外側の質量が見積もられていた。ハミッドら⁵⁾は、海王星の外側にベルト状の質量分布を仮定し、ハレー彗星の観測データと軌道計算の結果から、その質量を0.5地球質量以下(～40天文単位)、1.3地球質量以下(～50天文単位)と求めた。

またジュウィットら⁶⁾によると、EKBOの発見確率を外挿すると、直径100～500kmのEKBOは0.06地球質量、直径100～2000kmのEKBOは0.25地球質量であり、40～50天文単位における直径100km以上のEKBOの数は、70,000個であるという。

つまり、EKBO全体の質量は上限値として地球質量程度、またEKBOの数は、現在発見されている大きさ程度のものが数万個存在するということになる。さらに小さいEKBOになると、その数は急激に増えると予想される。

～“えくぼ”の数は、まさに天文学的数字らしい～

3. 新聞に載ったえくぼ

1996年10月9日、1992QB1を発見したハワイ大学の望遠鏡により、また新しいタイプのEKBOが発見された(図2)。付いた名前(仮符号)は、1996TL66。一見、今まで発見されたEKBOとの違いはないようであるが、実はいくつか異なる点があった。まずは発見時の明るさである。多くのEKBOは、22～24等級であるが、1996TL66は20.9等級と他のEKBOに比べて明るかった。表面の反射能

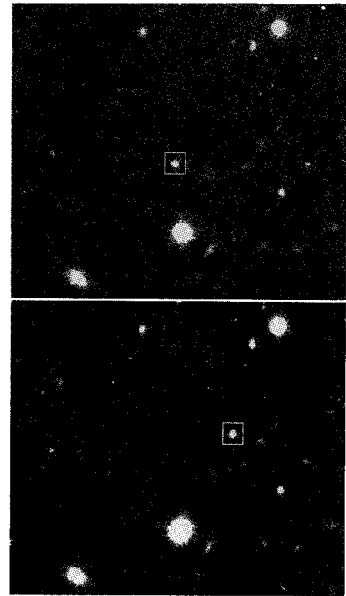


図2 1996TL66発見の画像⁷⁾。ハワイ山頂にあるハワイ大学の2.2m望遠鏡にて、恒星に対して移動しているのがわかる。上が1996年10月15日7:14 UT、下が12:41 UT。視野は、6×14分角。

を0.04と仮定すると、直径は約490kmにもなる。ところが、特徴は明るさや大きさではなかった。軌道が決定されると、1996TL66の平均軌道半径は約84天文単位、離心率は約0.6であることがわかったのである。今まで発見されたEKBOの平均軌道半径はおよそ40天文単位、離心率は0に近いものがほとんどである。1996TL66が太陽から最も遠くなる距離は、なんと約130天文単位にもなる(図3)。

この天体の発見がNature⁷⁾に発表されたことで、1997年6月5日付けの新聞紙面を1996TL66が賑やかすことになった；「太陽系の大きさ2倍以上に」－「冥王星の外側に新"惑星"」－「太陽系の半径3倍？」など、さまざまな見出しが一面を飾ったのである。掲載されているほとんどの図は、1996TL66が日心距離130天文単位の位置で発見されたように描かれていた。しかし実際に発見されたのは、太陽に最接近したところなので、日心距離

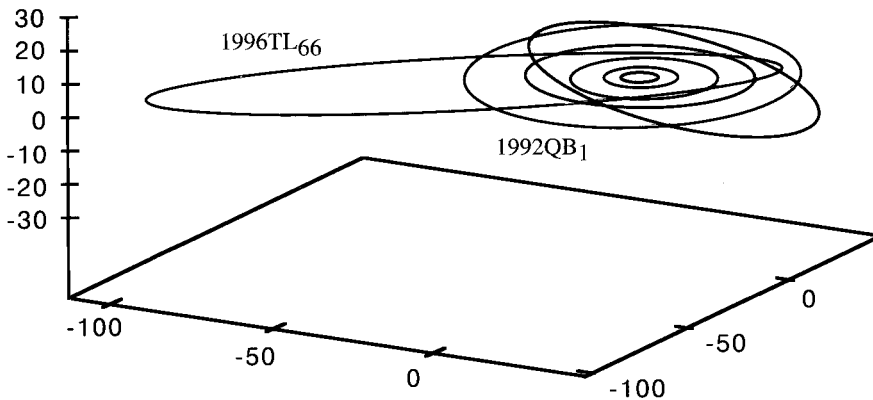


図3 1992QB1と1996TL66の軌道を斜めから見たところ。内側から木星、土星、天王星、海王星、右手前に傾いている冥王星の各惑星の軌道も描いてある。

は約35天文単位であった。

一方、地球の軌道面（黄道面）に対する1996TL66の軌道面傾斜角は約24度である。他のEKBOの傾斜角はほとんど0度に近いことから、かなり大きいことがわかる。1996TL66の発見により、我々のEKBOの大きさや軌道に関する知識は、大きく広がることになった。

～新聞に載るためには、普通の“えくぼ”では無理らしい～

4. どこまで広がるえくぼ

1996TL66の発見により、EKBOの分布が少なくとも100天文単位程度まで広がっていることが「観測から」わかった。そこで、微惑星の集積理論から予想されるEKBOの「理論的な」広がりを見してみる。

図4は、現在残っていると予想される惑星になれなかった微惑星の数密度分布を日心距離の関数として示している⁸⁾（図中の γ は、微惑星の初期質量に関するパラメータで、 $10^7 < \gamma < 10^3$ と考えられている）。この図からわかることは、微惑星の残りは、日心距離にして100～200天文単位の周辺に多く存在するということである。これら残存微惑星こそがEKBOであると考えられていることは、先に述べた。つまりEKBOは、現在発見されてい

る日心距離40天文単位付近よりも、むしろさらに遠い空間に多く存在するということになる。

今見つかっているEKBOと同程度の大きさの天体が、仮に日心距離100天文単位に存在したとしても、現在の観測能力では発見することは不可能である。このような遠方に存在するEKBOを発見するためには、日本のすばる望遠鏡による観測を待たなければならない⁴⁾。

～“えくぼ”そのものは小さいが、その広がりには計り知れないらしい～

5. 身近なえくぼ

太陽系の外側に存在するEKBOが、もっと身近なところにもいるといったら、信じていただけるであろうか？ 発見されているほとんどのEKBOは、現在の日心距離が約40天文単位と非常に遠いことは確かである。太陽に近づくと、その熱により表面の揮発性物質が蒸発し、美しいコマや尾を見せてくれる彗星。実はこの彗星は、EKBOが軌道進化したものなのである。

彗星の起源がEKBOであるということは、多くの人達が指摘してきた。それは、主に次のような理由による；(0)太陽系の外側には、惑星になれなかった天体が残っているはずである（＝EKBO）、(1)もともと彗星は、揮発性物質を保つだけの低温、

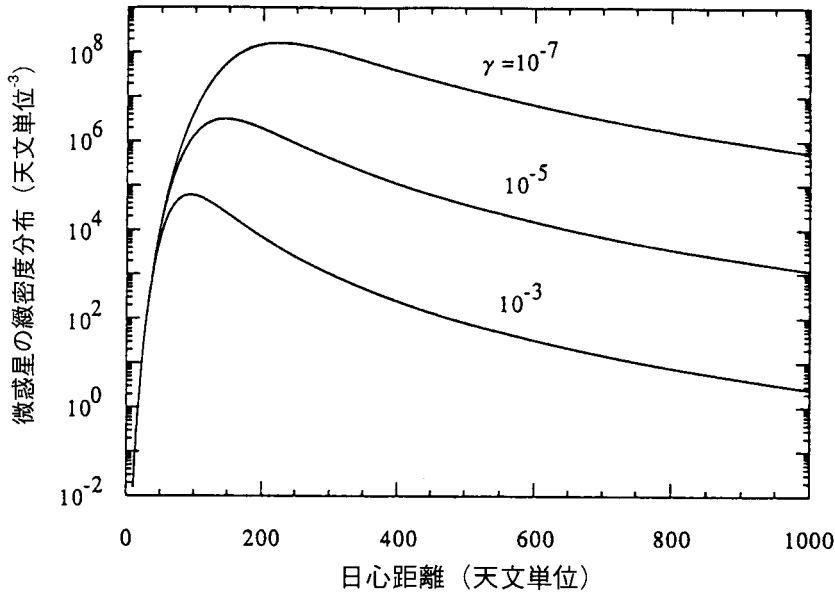


図4 残存微惑星の日心距離（横軸）と数密度分布（縦軸）の関係⁸⁾。
約100～200天文単位の辺りに多くの微惑星が存在していることを示す。

つまり太陽から遠方に存在していなければならない（＝EKB領域）、(2) 特に周期が200年以下の短周期彗星について、観測された軌道の分布をみると、黄道面に対する傾斜角が0度に近いものが多い（＝EKBO）、(3) Monte Carlo シミュレーションによると、EKBOは惑星の影響を長期間受けることにより、太陽方向に落ちてくるものがある（＝彗星）。特に(3)については、最近になり、惑星の影響を考慮した多体問題を直接数値的に解くことが可能となったことから、(3)' EKBOの軌道計算を長期間行なった結果、EKBO→短周期彗星という軌道進化や短周期彗星の観測から得られた軌道分布を再現することができた¹⁰⁾。以上(1)～(3)'の考察から、今ではEKBOはほとんどの短周期彗星の起源であると考えられている。

一方で、最近美しい姿を見せてくれた百武彗星やハール・ボップ彗星のような周期が200年以上ある長周期彗星は、軌道面の傾斜角が空間に対し

て等方的に分布している。そのため、その起源は黄道面に沿ったEKBOではなく、太陽系を球殻状に包むオールト雲であるとされている。このオールト雲は、微惑星が衝突・合体し惑星が形成されていく過程で、微惑星がある程度大きくなった微惑星（原始惑星）に接近し、太陽系の外側に飛ばされ、球殻状に分布し形成されたと考えられている。

実はEKBO→短周期彗星という進化の途中で、EKBOよりは太陽に近く、短周期彗星ほ

ど太陽には近づかないという過程を通ることがある；このような天体をケンタウルス天体と呼んでおり、現在までに1977UB（キロン）や1992AD（フォールス）など7個が発見されている。いずれのケンタウルス天体も惑星の軌道を頻繁に横切るため、現在の軌道にいる寿命は数百万～数千万年と比較的短いことが数値計算により確かめられている。ケンタウルス天体の中で、特に注目すべき天体としてキロンが上げられる。1977年の発見時は普通の小惑星（確定番号2060）として登録された。しかし1980年代になり、コマを形成していることが確認され、彗星としての特徴も示していることがわかった。これはまさに、ケンタウルス天体と彗星の関係をつなぐ重要な証拠であると言えよう。このようなケンタウルス天体は、今までの発見確率から数千個は存在すると考えられている。EKBOに比べて比較的明るいため、日本での観測も可能であるということは、我々にとって朗報であろう。46

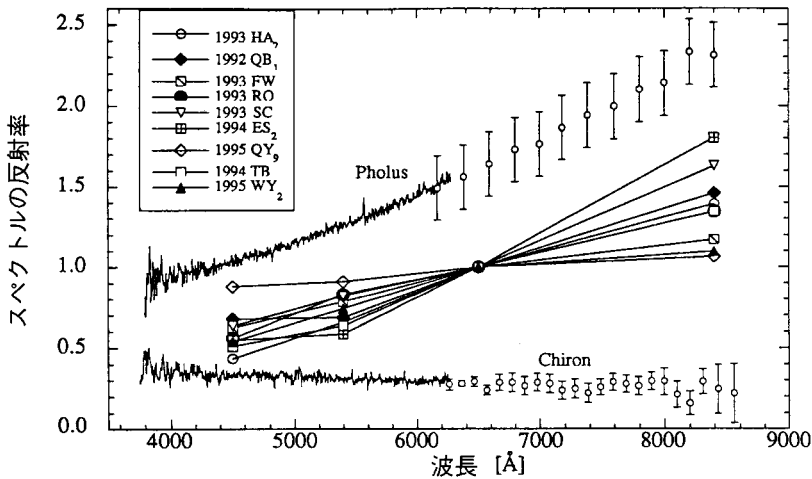


図5 EKBOとケンタウルスの可視光の反射スペクトル⁹⁾。横軸は波長，縦軸は相対的な強度。ケンタウルスのキロンは，フラットな特徴を示す。

億年前の物理・化学情報が残されたEKBOの中で、内側に軌道進化しつつあるケンタウルス天体は、まさにEKBOを少しずつ太陽熱である実験を我々に見せてくれている格好の実験対象といえるのである。

以上のことをまとめると、「微惑星の生き残り＝EKBO→(ケンタウルス天体→)短周期彗星」、また「太陽系形成時に飛ばされた微惑星＝オールド雲→長周期彗星」ということになる。

～遠いところにある"えくぼ"は、実は身近なところにやってくる彗星らしい～

6. 恥ずかしがり屋のえくぼ

最初の1992QB1の発見から5年をかけて発見された50個のEKBOも、その物理量についてはほとんどわかっておらず、多くは未だ謎に包まれている。

例えば、小天体の基本的な物理量として、自転周期があげられる。自転周期は、連続した測光観測を行うことにより、その等級の変化から求めることができる。しかしEKBOの明るさは非常に暗く、等級の変化を検出することはなかなか難しい。

1993SCは比較的明るいEKBOであり、自転周期について多くの観測例がある。しかし統一のとれた結果は、今のところ得られていない。

さらに分光観測となると、一層難しくなる。そのため、今まで分光観測されたEKBOは、近赤外波長域での1993SCのみである。一方、その他の約10個のEKBOは、図5のように広帯域フィルターによる多色観測があるのみである⁹⁾。

図5には、ケンタウルス天体の分光観測の結果も示した。これらからわかることは、EKBOやケンタウルス天体のフォラスは、太陽系内の他の小天体と比べて、「赤い」表面をしていることである。表面が赤いことの解釈としては、表面を覆っていた有機物が長い間宇宙線によりたたかれて、赤く変色したというものがあるが、定かではない。

また、ケンタウルス天体の多色観測から、興味深いことがわかってきた。横軸に日心距離を、縦軸に色指数V-Jをとる¹¹⁾(図6；上にある天体ほど、見た目に赤いことを示す)と、日心距離が大きい天体ほど、つまり太陽から遠いところをまわる天体ほど、より赤い表面をしていることがわかる。このことは、何を意味するのであろうか。一つの考え方として、次のようなものがある；(1)長期間の宇宙線の照射により表面が赤くなったEKBOが、惑星の影響などにより、太陽方向へ落ちてきた、(2)太陽に近づいたため、その熱により赤い表面がはがれ落ち、内部の始源的な部分が現れてきた、(3)その結果、太陽に近い天体ほど赤くはない、というものである。このことにより、ケンタウルス天体であるキロンの反射スペクトル

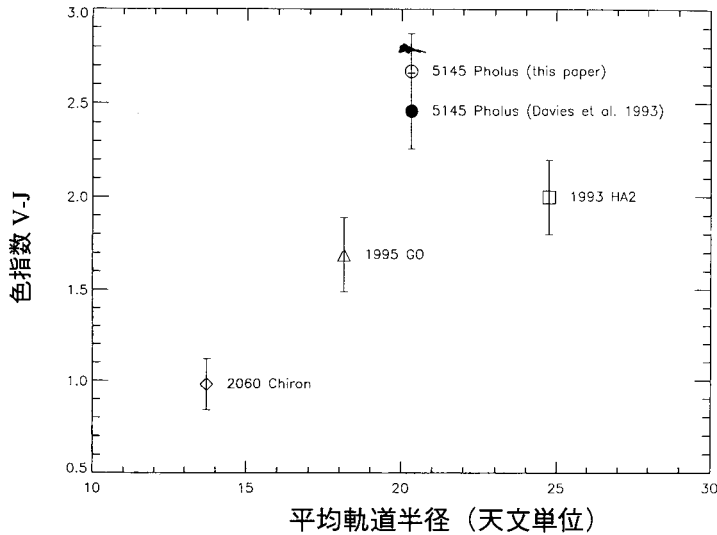


図6 ケンタウルス天体の色指数 V-J (縦軸) と日心距離 (横軸) の関係¹¹⁾。太陽から遠いほど、表面が赤い傾向を示す。

がフラットであることも説明される。

実は、小惑星についても同じように、日心距離による表面物質の違いが指摘されている。小惑星は、その反射スペクトルの特徴からタイプと呼ばれるいくつかのグループに分類されている。これらを日心距離の分布に直すと、太陽に近い小惑星ほど熱変成を受けた小惑星であり、逆に太陽から遠い小惑星ほど始源的な物質で覆われているというのである。

いずれにしても、EKBO の表面の特徴について、日心距離の依存性を議論するためには、多くの EKBO について物理観測を行うことが必要であろう。そのためには、何よりもまずは発見することが大切である。

～“えくぼ”が赤いのは、恥ずかしがり屋であるためではないらしい～

7. えくぼに出会うために

では、多くの EKBO を発見するためには、どのようにすればよいのだろうか。今までの EKBO の

発見に貢献しているのは、世界でも第一線で活躍している望遠鏡である；ハワイ大学の UH 2.2 m, Keck 10 m, Palomar 5 m, William Herschel 4.2 m など……。非常に暗い EKBO を発見するためには、日本国内では不可能である。そこで我々は、日本が誇るすばる望遠鏡を用いた EKBO サーベイ観測を計画している⁴⁾。このサーベイ観測では、「口径 8 m + 主焦点モザイク CCD & 分光装置」を最大限に利用することで、今までの観測に比べて、効率よく EKBO を発見し、物理観測を行うことができると期待される。

一方で、EKBO 発見の手段として

は、何も光学望遠鏡だけではない。例えば、宇宙科学研究所が計画している赤外線天文衛星 IRIS による全天サーベイからは、直径約 300 ~ 500 km の EKBO であれば検出できる可能性があるという¹²⁾。また国立天文台が計画中の大型ミリ波サブミリ波干渉計 LMSA を用いれば、その分解能を活かし、うまくいけば EKBO 同士の衝突現場を垣間見することも可能かもしれない。さらに別な方法としては、EKBO が恒星の前を通過する際の減光を検出する掩蔽観測があげられる。非常に粗い近似として、40 天文単位にある半径 0.2 km 程度の EKBO を検出できるという。この場合、矩（地球より外側の天体が、太陽から 90 度離れた位置にいる時）近くにある恒星を観測することで、掩蔽の持続時間が長くなることを利用する提案が出されている¹³⁾。

多くの EKBO に出会うためには、まだまだ時間が必要である。しかし必ずや、太陽系外縁部の構造図だけでなく、「過去の」太陽系形成時の情報を「現在の」観測から手に入れられる日が来るであろう。

～なかなか会えない“えくぼ”だから、ますます会いたくなってしまふ～

エピローグ

去る11月8日、秋晴れのもと、国立天文台三鷹キャンパスの一般公開が行われた。筆者の所属する研究部門では、約100億分の1のスケールにした太陽系の模型を台内に展示した。太陽や惑星の大きさのみならず、軌道の大きさも約100億分の1にしたことで、冥王星は、直径12cmの太陽から、約500mも離れたところある直径わずか0.2mmのつぶになった。これら惑星を順々にまわることで、太陽系空間の大きさを実感してもらおうというのがねらいであった。

木星のところで、お子さんとその保護者の方に簡単な説明をしたときのこと；

(子)「木星って大きい！」

(筆)「木星は、太陽系の中で最も大きな惑星で、……」

(保)「そうですね、でも宇宙は太陽系だけではないですよ。」

なるほど、至極もつともな話である。銀河や恒星は、なによりも見ていて美しい。しかし、我々に最も身近な太陽系を“通り越して”しまうのは、実にもったいないであろう。(個人的には)太陽系のより遠いところに、さらには太陽系の形成に、多くの方が興味を持っていただけることを望みながら、えくぼの素敵な親子を見送ったのである。

～未知の“えくぼ”に想いを寄せて～

追記

最近になり、1996TL66の近赤外波長域の分光観測が行われた(Luu, J. X. and Jewitt, D., 1998, Ap. J. 494, L117)。一方で、今まで発見されたEKBOのうちの4分の1について、2年間にわたる多色観測が行われ、表面の“赤さ”が2つのグループに分かれていることがわかってきた(Tegler, S. C. and Romanishin, W., 1998, Nature 392, 49)。

参考文献

- 1) Edgeworth, K.E., 1949, MNRAS 109, 600.
- 2) Kuiper, G.P., 1951, in *Astrophysics: A Topical Symposium*, 458, MacGraw-Hill, New York.
- 3) Jewitt, D. and Luu, J.X., 1993, Nature 362, 730.
- 4) 渡部潤一 and Jewitt, D., 1993, 天文月報, 86(12), 504.
- 5) Hamid, S.E., Marsden, B.G. and Whipple, F.L., 1968, AJ 84, 828.
- 6) Jewitt, D., Luu, J.X. and Chen, J., 1996, AJ 112, 1225.
- 7) Luu, J.X., Marsden, B.G., Jewitt, D., Trujillo, C.A., Hergenrother, C.W., Chen, J. and Offutt, W.B., 1998, Nature 488, 584.
- 8) Yamamoto, T. and Kozasa, T., 1988, Icarus 85, 540.
- 9) Jewitt, D. and Luu, J., 1996, ``Asteroids, Comets, Meteors '96'' meeting.
- 10) Quinn, T., Tremaine, S. and Duncan, M., 1990, ApJ 355, 667.
- 11) Weintraub, D.A., Tegler, S.C. and Romanishin, W., 1997, Icarus 128, 456.
- 12) 長谷川直, 横川創造, 中村良介, 安部正真, 1997, 第19回太陽科学シンポジウム, 宇宙科学研究所.
- 13) Brown, M.J.I. and Webster, R.L., 1997, MNRAS 289, 783.

Hunting for longing "EKBO"

Tetsuharu FUSE*, Jun-ichi WATANABE**, Tomohiko SEKIGUCHI*

*The Graduate University for Advanced Studies / National Astronomical Observatory 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

**National Astronomical Observatory 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: We have a lot of hot topics about the Solar System these days; collision between a comet and Jupiter, appearance of a large comet, survey of Mars, discovery of new satellites of Uranus..., and moreover, we should have an eye to Edgeworth-Kuiper Belt Objects (EKBO). We have been able to know EKBO recently, which are considered to be survivals of planetesimals and spread out in the outer Solar System. We review EKBO on the basis of the newest results.