

太陽系初期情報を残すトロヤ群小惑星

木星トロヤ群小惑星は木星のラグランジュ点のL4(木星前方)とL5(木星後方)付近に位置する小惑星群で、その総質量はメインベルト小惑星に匹敵するとされている¹⁾²⁾³⁾。これらの小惑星はL4あるいはL5点の周りに経度方向に約40度の広がりを持って分布し、各天体は太陽周りを公転すると同時に、L4、L5点の周りを約150年で振動している⁴⁾。

力学的には、トロヤ群小惑星は木星形成時に木星軌道付近にあった微惑星がL4とL5に捕獲されたものと考えられている⁵⁾⁶⁾。観測からトロヤ群小惑星の分光型はほとんどが始原的なDタイプであることが知られている。これらのことから木星トロヤ群小惑星は木星が集積した太陽系初期から現在に至るまで、ずっと木星付近にあった始原的天体であり、太陽系初期情報(特にメインベルトより外側の天体の振る舞いや物質組成等)を記録している可能性が高い。

現在のトロヤ群小惑星の分布は、L4付近に位置する小惑星の方がL5付近の小惑星より1.5倍ほど多い。これは注目に値する特徴である。なぜなら太陽、木星、小惑星の三体問題ではL4とL5での軌道安定性は同等であるにもかかわらず、L4とL5の人口に非対称性が生じているからである。この原因は長い間「謎」であった。観測は常に全天を様にサーベイしているわけではないから、L5付近の観測が進み、発見数が増えればL4とL5の小惑星総数の違いは小さなるだろうと考えた時代もあった。しかし今のところL4とL5の小惑星数の差は埋まっていな。観測biasを取り除いたSDSSのデータの最近の分析では、木星トロヤ群では絶対等級(H)で11.5等より明るい小惑星はすべて発見されているようなので⁷⁾、既知の小惑星のデータベース⁸⁾を使ってH<11.5等のトロヤ群小惑星の数をL4とL5で比較すると、どの明るさでも常にL4小惑星の数がL5を上回っている(図4参照)。従って、L4とL5の人口の非対称性は観測biasではなく実際に起こっている可能性が高い。

現在の知見では、L4、L5人口の非対称性の原因のメカニズムとして以下があげられる。

- (1) 木星の集積時に原始太陽系星雲のガス抵抗が十分大であり、小さい天体にとっては木星前方のL4より後方のL5周りが安定である⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。
- (2) 太陽系形成初期に木星と土星が動径方向にわずかに動き、現在の位置に納まったとすれば、その動きに伴ってトロヤ群も移動し、その際にはL4周りの軌道の方がL5より安定である¹²⁾。

上記(1)から推察される木星トロヤ群の現在の姿は、L4とL5でサイズ分布が異なり、L4ではより小さい小惑星の数が選択的に少ないようなサイズ分布になるはずである。(2)からはL4周りに多くの小惑星が残っていることが示唆され、このことは前述したL4の人口の方がL5より多いこの理由かもしれない。

このように、現在の木星トロヤ群のサイズ分布や総質量から、太陽系初期の原始太陽系星雲ガスや木星、土星の振る舞いを伺い知れる可能性がある。そのためにはこれまでに知られている10-100kmサイズのトロヤ群小惑星からガス抵抗が有効になると思われる小さいkmサイズの小惑星までのサイズ分布を調べることが必要であろう。そこで我々はこれまでの観測では届かなかった直径数kmの微小トロヤ群小惑星を大口径望遠鏡によって検出して、それらのサイズ分布をL4とL5でそれぞれ調べた。L5トロヤ群での系統的サーベイは我々のこの観測が初めてである。

観測と検出移動天体

すばる望遠鏡と広視野CCDカメラ Suprim-Camを使い、これまでに2回のメインベルト小惑星サーベイ(SMBASI, SMBASII)を行った¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。このサーベイの境界等級は24.4等で、この明るさ以上のトロヤ群の位置する日心距離5.2AUの位置でH=17.7等に相当し、トロヤ群に多いDタイプの平均アルベドp=0.04を仮定して直径(D)に換算すると(log D = 3.1295 - 0.5log p - 0.2H)、1.9kmまでの木星トロヤ群小惑星を発見できることになる。つまり既知のトロヤ群で100%発見されていると思われるH=11.5等(直径34km相当)より1桁小さいトロヤ群小惑がこのサーベイでは検出されるのである。

観測領域を図1に示す。SMBASIではL4から32度前方の衝の位置を、SMBASIIではL5の22度後方を掃天した。どちらもラグランジュ点からは少し外れるが、既知のトロヤ群小惑星はラグランジュ点周りに広がっている¹⁷⁾、日心距離が5.2AU付近にはトロヤ群小惑星しかないのので、検出された移動天体の内、5.2AUの軌道長半徑をもつ小惑星はほぼ間違いなく木星トロヤ群に属すると思つて良いだろう。

移動天体の検出は、同じ天域を別の時刻に撮った3枚以上の画像を重ねあわせ、恒星や銀河に対して移動している天体を抽出する¹¹⁾。SMBASIでは約3平方度を掃天してL4付近の51個のトロヤ群小惑星を検出し、SMBASIIでは約4平方度を掃天してL5付近の62個のトロヤ群小惑星を発見した。図2はSMBASI、IIで検出したトロヤ群小惑星の見かけ等級を比較したもので、L4、L5トロヤ群ともに検出限界は約24(R)等であるとわかる。

L4とL5での数密度

SMBASで掃天した面積と検出した小惑星の数から、ある直径でcut offした数密度を表1のように比較した。どの大きさでもL4の数密度の方が高くなっていることがわかる。また、既知のトロヤ群小惑星やJewittらの観測で得られている空間分布からは、ラグランジュ点に近い経度ほどトロヤ群小惑星の数密度は高くなる傾向にあるが、我々の観測した領域はL5の方がラグランジュ点に近いにもかかわらず、L4より数密度は低かった。このことはL5の小惑星の方がL4より全体的に少ない可能性を強く示唆する。

表1 SMBASI, SMBASIIで得たL4とL5の数密度

	数密度(個/deg2)		
L4から32度前方	14.7	6.0	3.3
L5から22度後方	13.8	4.0	2.0
サイズ範囲	D>2km	D>4km	D>5km

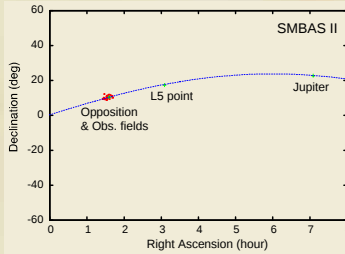
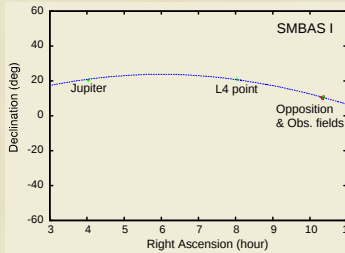


図1 SMBASの観測視野と木星とL4、L5の位置関係

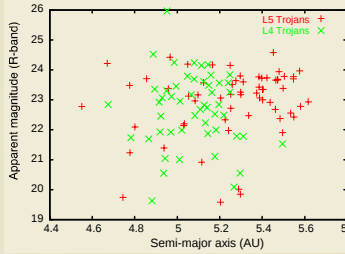


図2 ×: SMBASI I, +: SMBAS II

L4とL5でのサイズ分布

観測は衝の位置で行ったので、各天体の軌道離心率を0と仮定すれば、その天体の軌道長半徑と見かけの等級から絶対等級を算出できる。普通絶対等級はVバンドの明るさで定義されるが、観測はRバンドで行ったので、Dタイプ小惑星の平均的なカラーV-R=0.48を使ってR等級をV等級に変換して絶対等級を求め、既知のトロヤ群小惑星の平均アルベドを仮定して直径に換算し、サイズ分布求めた。小惑星のサイズ分布は、伝統的にその累積度数をベキ分布(直径Dより大きい小惑星総数N:>D)¹⁸⁾で近似して、ベキ状分布のインデックスの値bで議論されてきたので、ここでもそれに従う。

L4トロヤ群(図3上)では、D>5kmの大きい小惑星で、ベキ乗分布のインデックスはb=2.3±0.2、2km<D<5kmの小さい小惑星ではb=1.2±0.1となった。L4トロヤ群に関してはJewittら(2000)²⁾の先行研究があり、彼らの結果はL4の4km<D<40kmの小惑星でb=2.0±0.3であることを示した。この値は我々のサーベイのD>5kmの小惑星での値とエラーバーの範囲内で一致している。SMBASIで検出した51個のL4トロヤ群小惑星のうちJewittらの観測と同じサイズ範囲に属する小惑星は10個だけで、34個が2km<D<5kmであり、それらのbの値は1.2であった。図3上からも明らかに累積度数分布の傾きがD=5kmを境に緩くなっていることがわかる³⁾。

L5トロヤ群の系統的サーベイ観測はSMBASIIが初めてである。SMBAS Iで検出したL4トロヤ群と同じサイズ領域でのサイズ分布を調べたところL5は大きい小惑星の数が少なく、12kmより大きい小惑星が3個、それを除くと5kmより大きい小惑星は5個しかなかった。それに対して、2km<D<5kmの小惑星は47個あり、その累積度数サイズ分布のベキはb=2.1±0.1であった(図3下)。以上の結果はbinサイズを変えたり、binの範囲をシフトさせたりしてベキ乗分布の傾きが変わらないことを確かめた。

以上の我々の結果を、既知のトロヤ群小惑星とJewittらのサーベイと合わせたより広いサイズ範囲でのサイズ分布を図4に示す。JewittらとSMBASのプロットは既知のトロヤ群小惑星のH=11.5等の小惑星の数からベキを外挿して縦軸を合わせたものである。図4よりL4では直径5km-140kmの範囲のサイズ分布はほぼ一定の傾きであり、直径が5km以下の領域で傾きが緩くなる。L5の方は直径30kmあたりから5kmまでのサーベイ観測がないため、データが不足しているが、既知の大きい小惑星のベキとSMBASIIで検出した小さい小惑星でのベキはほぼ同じなので、直径が2km-140kmという広い範囲でほぼ一定の傾きであるかもしれない。

以上から、おそらく大きいトロヤ群小惑星に於いてはL4とL5でサイズ分布に違いはほないと思われるが、直径5kmより小さい小惑星では両者のサイズ分布は異なっていると言える。

考察 SMBASは以下のことを発見した。

- a. 小さいトロヤ群小惑星ではL4とL5でサイズ分布が異なっていること。
- b. L4トロヤ群小惑星の数はどのサイズ領域でもL5トロヤ群より多いこと。

これらの結果と最初に述べた2つの力学的研究結果より以下の太陽系初期の描像が描ける。

- (i) 木星集積時に木星付近では、原始太陽系星雲のガス抵抗が直径5km以下の小さい微惑星に十分効くほどガスが残っていた。
- (ii) 木星と土星は集積後に動径方向に移動した。

Stromら(2005)¹⁸⁾は月面の古いクレーターの起源は約38億年前の後期重爆撃期にメインベルトから大量に落下した小惑星によるものだという研究を発表し、月面に小惑星を大量に降らせた最も有力な原因は木星や他の大惑星の動径方向の移動に起因するメインベルト内の共鳴帯の移動ではないかとしている。このことも木星と土星の動径方向の移動の状況証拠の一つであり、理論的、観測的、月面の地質学的証拠等から太陽系初期における、木星の移動が確認されようとしているのではないだろうか。

一方、直径5kmより小さいトロヤ群小惑星に対してガス抵抗が有効であったかどうかは、まだわからない。既知のトロヤ群小惑星の軌道進化の数値積分からL4には小惑星族があり、L5にはないことが知られている¹⁹⁾²⁰⁾。小惑星族は衝突進化の結果生じるので、L4に小惑星族が存在するということは、L4トロヤ群はそれらがL4付近に捕獲された後に衝突進化を経験し、一方、L5ではこれまでに重要な衝突破壊現象は起きなかった可能性がある。つまりL4とL5トロヤ群で衝突進化が異なっており、L4の小さい小惑星でサイズ分布のベキが緩やかなのは、原始太陽系星雲のガス抵抗のせいではなく、衝突進化を反映したのものかもしれない。

今のところ我々の観測はL4で一点、L5で一点を終えただけである。今後は、他の経度でも観測し、ラグランジュ点周りの空間分布を決め、総質量を見積もることが必要だろう。さらに、現在のサイズ分布の空白部分であるL5の直径数km-数10kmの小惑星のサイズ分布を決めなければならない。また、L4とL5での小惑星の数の違いに衝突進化がどのくらい貢献しているかを見積もるためにはトロヤ群小惑星での衝突進化モデルの構築も必要であろう。

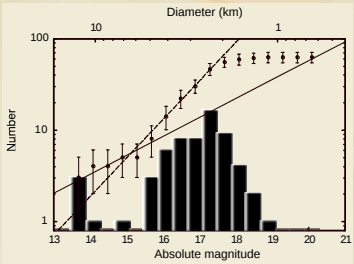
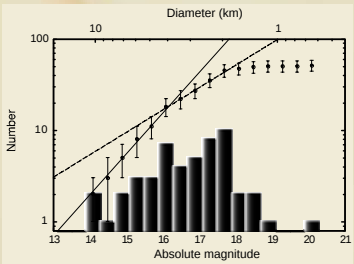


図3 上:L4トロヤ群のサイズ分布、下はL5。ヒストグラムが頻度分布、エラーバー付きの点は累積度数分布を示す。実線はD>5kmの小惑星でベキ乗分布を仮定して求めた傾き、点線は2km<D<5kmの小惑星でベキ乗分布を仮定して求めた傾き。

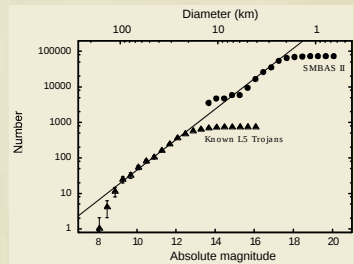
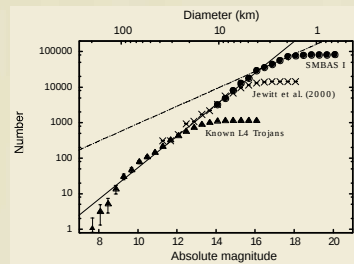


図4 上L4トロヤ群小惑星、下L5トロヤ群小惑星。▲既知のトロヤ群、×:Jewittらのサーベイ、●:SMBAS。

参考文献

1) Shoemaker, E.M., Shoemaker, C.S., and Wolfe, R.F. 1989, In Asteroids II, (R.P. Binzel, T. Gehrels, and M.S. Matthews,Eds.), pp.487-523. Univ. of Arizona press, Tucson. 2) Jewitt, D. C., Trujillo, C. A., and Luu, J. X. 2000, AJ, 120, 1140. 3) Yoshida, F., and Nakamura, T., 2005, Astron. J. 130, 2900. 4) Bien, B. & Schubart, J. 1987, A&A, 175, 292. 5) Marzari, F. & Scholl, H. 1998, Icarus, 131, 41. 6) Fleming, H. J. & Hamilton, D. P. 2000, Icarus, 148, 479. 7) Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Gomes, R. 2005, Nature, 435, 462. 8) <http://www.barycenter.edu/au/ists/InnerDisk.html> 9) Peale, S. J., 1993, Icarus, 106, 308. 10) Murray, C. D., 1994, Icarus, 112, 465. 11) Marzari, F. & Scholl, H. 1998, Icarus, 131, 41. 12) Gomes, R. S. 1998, AJ, 116, 2590. 13) Yoshida, F., Nakamura, T., Fuse, T., Komiya, Y., Yagi, M., Miyazaki, S., Okamura, S., Ouchi, M., and Miyazaki, M. 2001, PASJ, 53, 113. 14) Yoshida, F., Nakamura, T., Watanabe, J., Kinoshita, D., Yamamoto, N., and Fuse, T. 2003, PASJ, 55, 701. 15) Yoshida, F., & Nakamura, T., 2004, Advances in Space Research, 33, 1543. 16) Yoshida, F., & Nakamura, T., 2005 submitted to Planetary and Space Science. 17) <http://cdswww.barycenter.edu/au/ists/InnerDisk.html> 18) Strom, R. G., Malhotra, R., Ito, T., Yoshida, F., and Kring, D. A., 2005, Science, 309, 1847. 19) Milani, A. 1993, Celest. Mech., 57, 59. 20) Beuge, C. & Roig, F. 2001, Icarus, 153, 391.