

## 2008年度内地留学奨学金による成果報告書

大塚 勝 仁 (東京都世田谷区在住)

研究テーマ: ヒルダ小惑星と彗星

受入機関: JAXA

担当教官: 吉川 真

研究内容の概要: ヒルダ領域には小惑星のみならず短周期彗星も存在し、これを準ヒルダ彗星という。その中には、非常に不安定な木星との3:2平均運動共鳴を示すものがある。さらに木星に重力的に捕らえられて暫間的に衛星として周回したり、木星に衝突するものもある。これは、共鳴から離脱したヒルダ群小惑星の特徴でもある。われわれは本研究で、木星に暫間衛星捕獲された履歴のある準ヒルダ彗星の運動を、過去にさかのぼって再現した。

太陽系小天体である小惑星と彗星は、それらの軌道特性から“住み分け”がはっきりしているように思われていたが、最近では共存する部分が太陽系内のあちらこちらにありそうであることがわかってきた。従来から指摘されているのは、アポロ・アモール型小惑星の中に紛れているであろう活動停止彗星核で、木星族短周期彗星 (JFC) の軌道に似た候補天体が多く見つかっている。しかし近年、小惑星帯の中に彗星が見つかったり、カイトンほかセンタウルス天体の彗星活動が観測されたりしている。また最新の宇宙化学的な研究によれば、スターダスト計画により回収された 81P/ヴィルト 2 彗星塵サンプルの分析から、炭素質コンドライトのコンドリュールや CAI (カルシウム、アルミニウムリッチな包有物) が存在する証拠が見つかった。したがって彗星は始原的な炭素質コンドライトあるいは C-タイプ小惑星とリンクしそうである。こうなると揮発成分をいまだ保有している C-コンプレックス小惑星あるいは D-タイプ小惑星も実は彗星であるかもしれないし、そういった小惑星の中には、実は過去に彗星活動していたものもあるかもしれない。

小惑星帯外縁部のヒルダ領域も、彗星と小惑星の軌道が、オーバーラップしている部分である。木星と 3:2 平均運動共鳴 (MMR) 下にあるヒルダ群小惑星 (Hilda asteroids) は、現在まで仮番号のものまで含めると 1,000 個以上発見されており、その運動は長期間安定している。(広義の) ヒルダ領域は、軌道長半径が  $3.7 \text{ AU} \leq a \leq 4.2 \text{ AU}$ 、軌道離心率  $e \leq 0.3$ 、軌道傾斜角  $i \leq 20^\circ$  のゾーンであるが、実際の共鳴領域はもう少し狭く、それを超えると急速にカオスの領域となる。また木星とのティスラン値  $T_J$  は、3.0 前後で、JFCs と小惑星の境界上にある。その表面特性は、低アルベド ( $\sim 0.04$ ) で、反射分光は太陽光より赤く、サイズにより  $> 40 \text{ km}$  のものは X(P)-タイプが、 $< 40 \text{ km}$  のものは D-タイプに属するものが卓越している。この傾向は木星トロヤ群と似ており、さらにこの赤い分光特性は JFCs と一致する。特に  $< 40 \text{ km}$  サイズのヒルダ群はライトカーブの振幅が大きく、これは衝突により生じた破片の形状であることも指摘されている。そんな形状、すなわち大きな軸比も、同様に JFCs の彗星核に類似するかもしれない。このヒルダ領域にいる JFCs を準ヒ

ルダ彗星 (QHC: quasi-Hilda comet) といい、そうしたものが現在数十個存在する。木星に重力的に捕獲されたとされる、今まで 50 個以上見つかった木星不規則衛星 (irregular satellites) もヒルダ群と通じるものがあるかもしれない。その中のヒマリア (JVI) 族 (Himalia family) はまだ原始太陽系ガス円盤が残っている初期太陽系において、ガス抗力によってヒルダ小惑星が捕獲されたものではないか? という研究もある。よってそれぞれの天体同士に、実際に相関があるのかどうか? 興味深い。

ヒルダ群は見積もられた非常に長いリアブノフ時間に基つけば、初期太陽系から、3:2 MMR に居続けているのであれば、すなわち JFCs のように太陽近傍に接近しなければ、表層下の水氷はじめ揮発成分が、いまだ保たれているかもしれない。これまでは JFCs はカイパーベルト天体が力学進化したものであると考えられてきた。しかし最近の研究では、ヒルダ群の衝突片の共鳴からの離脱と軌道のカオス化が、JFC の供給源となりえるという研究もある。QHCs はカイパーベルトから JFCs に進化した途上の“通りすがり”のものであろうか? 角運動量の保存を考えると、なかには離脱ヒルダ群そのものが存在しそうである。いずれにしろ、ヒルダ群小惑星は初期太陽系の情報を保ち続けている可能性があり、いろいろな方面から研究する価値ならびに意義があると思われる。

共鳴から離脱したヒルダ群の力学進化的特徴として、木星にその運動に対して接線方向から低速遭遇するため、しばしば木星 (ないしガリレオ衛星) への衝突や木星の暫間的衛星捕獲 (TSC: temporary satellite capture) が起きる可能性が指摘されている。前者の代表的なケースとして、短周期彗星 D/1993 F3 (シューメーカー-レビー 9, SL9) が 1994 年 7 月に木星に衝突したイベントが思い出されるが、この天体は起源として QHC であった可能性が指摘されており、その衝突直前まで

TSC の状態にいた。TSC とは、ヒル圏において、小天体が制限 3 体問題の直線平衡解における  $L_1$  あるいは  $L_2$  ラグランジュ点をゼロ速度に近い速度で通過したときに起きて、惑星を周回するイベントで、その際、小天体は木心軌道エネルギー  $E_J < 0$  の状態にいる。捕獲期間が 10 年前以上となり、また 1 周回以上する TSC を、それぞれ長期 TSC とオービターといいまねな現象である。そのようなイベントにおける近木点距離は、概して  $< 0.02$  AU で、最小  $E_J < -2$  である。

そこで、われわれは長期 TSC/オービターイベントを探すために、現在ヒルダ領域にいる QHCs から、過去に、実際にイベントを引き起こしたものがあつかどうか調査した。計算は彗星の元期から過去に数百年さかのぼった  $N$  体数値計算コードによる。各彗星の初期値は JPL Horizons system から引用した。積分法は、刻み幅自動調整の外挿法であり、惑星の位置と座標は、JPL 惑星暦 DE 409 に基づいている。座標系は、木星の日心軌道面に準拠した木心回転座標である。その際、太陽は常に  $-X$  軸方向にあり、 $+Z$  軸は北を示す。これまで長期 TSC/オービターイベントが SL9 を除くと 3 例あることが報告されているが、その現象を再現して追認した。それらは短周期彗星 82P/ゲレールス 3 (TSC 期間 7.6 年: 1966 年 12 月-1974 年 7 月)、111P/ヘリン-ローマン-クロケット (同 18.5 年: 1973 年 12 月-1985 年 7 月)、P/1996 R2 ラガルクピスト (同 9.8 年: 1983 年 9 月-1993 年 6 月)、である (図 1)。82P と 1996 R2 は相対速度それぞれ  $0.7 \text{ km s}^{-1}$  と  $0.6 \text{ km s}^{-1}$  で  $L_2$  から入ってきて  $L_1$  に抜けていく。他方、111P は  $1.0 \text{ km s}^{-1}$  で入ってきて  $L_1 \rightarrow L_1$  と移行する。

そして今回の調査で新たに、短周期彗星 147P/串田-村松が、20 世紀半ばに長期 TSC/オービターを起こしたであろうことを見つけた。しかし、他の長期 TSC/オービターを引き起こした QHCs の彗星発見 (観測) から TSC までの時間差  $\Delta t$  が、短時間 ( $< 3$  年) であってイベントの確実

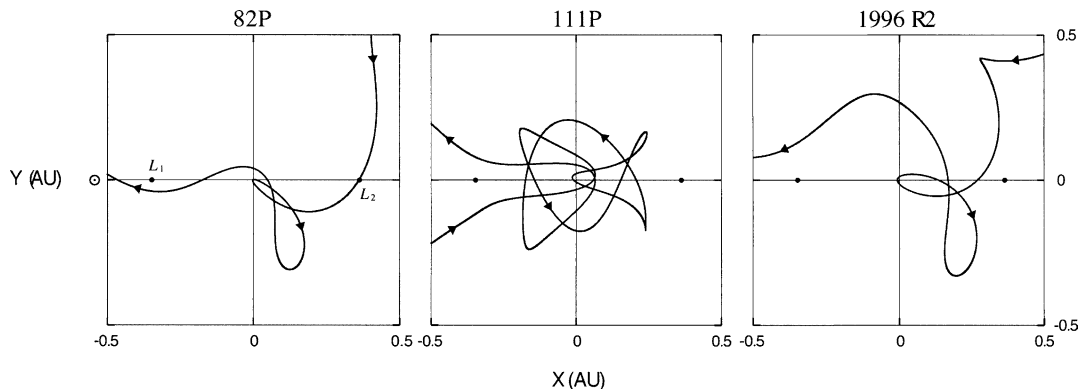


図1 木心回転座標 (X-Y 投影) における 82P/ゲーレルス 3, 111P/ヘリン-ローマン-クロケット, P/1996 R2 ラガルクピストの TSC 軌道のシミュレーション.

性が高かったことと比較すると、147P の場合、 $\Delta t \geq 30$  年以上も時間経過しており、彗星の観測位置精度を考えると、本当に TSC が起きたのかどうか？ わからない。そこで 147P の初期値を、より信頼性のある中野主一氏による誤差付きの NK データから採用し、軌道要素の  $1\sigma$  誤差とノミナルの値をもとに、重複順列を用いてノミナルなものを含めて 243 個のクローンを生成し、同様にしてそれらの運動を調べた。その結果は図 2 のとおりで、すべてのクローンが TSC の状態にあり、よって 147P が 20 世紀半ばに TSC を経験したことは確実である。TSC 経路の拡がりは、ひいては軌道要素の誤差伝播を意味するものであり、これはわれわれが思ったよりも小さい拡がりであった。結論として 147P は 1949 年 5 月 14 日 (+97 日/-106 日)-1961 年 7 月 15 日の期間、すなわち  $12.17^{+0.29}_{-0.27}$  年、木星による長期 TSC/オービターを経験したことがわかった。この期間中 147P は木星を 2 周回した。これらの値は共に、長期 TSC/オービターとしては SL9 (>40 年, >30 周回) と 111P (18.45 年, 3 周回) に次ぐものである。

このような珍しいイベントは、サイズが >0.5 km の JFC (QHC) に対して、過去 50 年間で 5 度、そして (見逃しているイベントもあるかもしれないので) 少なくとも 10 年に一度は起きてい

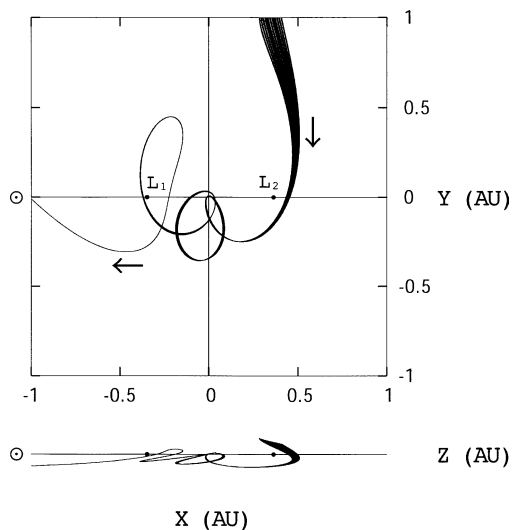


図2 図1同様 X-Y 投影, および X-Z 投影された 243 個の 147P クローンの TSC 軌道のシミュレーション. センタウルスから由来し、低軌道傾斜角の逆行軌道で木星圏に入ってきた。ノミナルのものは相対速度  $0.9 \text{ km s}^{-1}$  で入ってきて  $L_2 \rightarrow L_1$  に移行する。

ることも判明した。なお、それよりまれな彗星の木星衝突の頻度は、諸研究により、その数十分の一と見積もられている。これら長期 TSC/オービターや木星衝突を履歴した QHCs は、離脱したヒルダ小惑星である可能性がある。今後、さらに長期間の運動を調べ、一般的な JFCs と QHCs に違いがあるかどうか調べてみるつもりである。また過去に長期 TSC/オービターとなった QHCs は

木星の潮汐力の影響を受けているかもしれない。それが彗星活動のトリガーとなった可能性もある。そういうことも今後、調べてみたい。QHCsは74Pを除いて、概して彗星活動が弱く、いくつかは小惑星として発見観測されている。

また2008年9月上旬に、春日敏測氏（現、西オントリオ大）とハワイ大のUH88望遠鏡で、147PほかのQHCsの多色測光観測を目指したが、天候不良や“邪魔な彗星活動”に苛まれて、いいデータを取得することはできなかったが、今後も機会があれば、このような天体の観測に、再度挑戦していきたい。以上が内地留学の研究報告であるが、自分にとっては、まだこの研究は終わったものではなく継続中であり、完遂したあかつきには、天文学会欧文研究報告に投稿したいと考えている。なお、初期の結果については、2008年3月

の第一回スペースガード研究会 & N 体力学研究会に口頭で発表済みである。

今回の内地留学研究にあたり、指導教官の吉川真先生のみならず国立天文台の伊藤孝士先生、アーマー天文台のD. アッシャー氏、早稲田大の荒木田英禎氏から、ご多忙にもかかわらず、強力なサポートかつご指導ご鞭撻賜ったことは、甚だ幸いであった。ヒルダ小惑星とQHCsの観測では、春日氏のほかに臺灣国立中央大の木下大輔老師と宮坂天文台の宮坂正大氏と北海道教育大旭川の関口朋彦先生のご協力を得た。以上の方々には、厚く御礼申し上げたい。また栄えある100周年記念の年度に、このようなチャンスを与えてくださった日本天文学会に深く感謝の意を表したい。