

令和 6 年 5 月 10 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04054

研究課題名(和文) ケンタウルスの軌道進化と太陽系内物質輸送

研究課題名(英文) Orbital evolution of Centaurs and transport of materials in the Solar system

研究代表者

樋口 有理可 (Higuchi, Arika)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：90597139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：木星と海王星の間に軌道を持ち、惑星と1:1共鳴に入っていない天体をケンタウルスと呼ぶ。現在も海王星外から内部に流入するケンタウルスの軌道進化の素過程は制限三体問題で記述できる。本研究では、ケンタウルスの軌道進化を円制限三体問題の重ね合わせにより記述し、天体の動径方向移動や軌道離心率・軌道傾斜角の変化の傾向の解析的表記の妥当性を数値計算を用いて評価した。よく知られた円制限三体問題の保存量であるティスランパラメタ(ヤコビエネルギーを近似し軌道要素で表したものを)、惑星が2体以上ある系において変化量として扱い、その変化率と軌道要素の変化率を関係づけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ケンタウルスは巨大惑星領域にあり惑星の摂動を強く受けるため、典型的には数百万年という短い時間でケンタウルスと呼ばれる領域から去ってしまう。このことはケンタウルスが海王星以遠から絶えず供給されているということを示す。この定常的な質量の内側への輸送は過去、現在、未来においてどれくらいあるのかを知ることができれば、地球など内側の惑星の表層への物質輸送の可能性を示すことができる。本研究は、観測されるケンタウルスの現在の軌道から、ケンタウルスとなつてからの経過時間や今後の滞在時間を推測することに役立つ。

研究成果の概要(英文)：Celestial bodies that orbit between Jupiter and Neptune and are not in 1:1 resonance with the planets are called centaurs. The elementary process of orbital evolution of centaurs that still flow into the interior from outside Neptune can be described by the restricted three-body problem.

In this study, the orbital evolution of Centaurs is described by superposition of the circular restricted three-body problem, and the validity of the analytical description of the trends in the radial migration of the object and changes in the orbital eccentricity and inclination is evaluated using numerical calculations. The well-known conserved quantity of the circle-limited three-body problem, the Tisserand parameter (which approximates the Jacobi energy and is expressed in terms of orbital elements), is treated as a variable in systems with more than one planet, and the rate of change is related to the rate of change of orbital elements.

研究分野：太陽系科学

キーワード：ケンタウルス 制限三体問題

### 1. 研究開始当初の背景

小天体の誕生と移動 太陽系には小惑星や彗星と呼ばれる無数の小天体が存在する。これら小天体は、微惑星(太陽系形成初期に誕生した小天体、これが合体成長して惑星となった)の生き残りであったり、大きな天体の衝突破片であったりする。小天体は地球の近傍から海王星以遠という広い範囲に存在しており、軌道的性質によりいくつかのグループに分類される。これまでの多波長測光観測により、グループによって天体の色が異なることなどが知られている。色は天体の誕生場所、表面の組成、熱史などを反映していると考えられる。海王星以遠には、ほぼその場で誕生したと考えられる天体(以下、外縁天体)がある。対して、ケンタウルスとは木星と海王星の間に軌道を持つ小天体である(Jewitt(2009)[1]の定義に従い、軌道長半径と近日点距離が 5.2au と 30au の間にあり、惑星と 1:1 共鳴に入っていない天体をケンタウルスと呼ぶ)。ケンタウルスは、元は海王星以遠で誕生した天体であったが、海王星の摂動を受けることで海王星より内側に入り込んだ天体であると考えられている。ケンタウルスが木星の内側に入り込む軌道に進化すると木星族彗星と呼ばれるようになる。

小天体の彗星活動 ケンタウルスには彗星のようにダストを放出しているもの(活動的ケンタウルス)があることが近年の光学観測でわかっている。ダストを放出するためにはガス圧が必要なため、ダストが観測されるということはその天体からガスが放出されていることを示す。これは非常に不思議なことである、というのは、この領域は水が昇華するには低温すぎ、主に水の昇華で説明される一般の彗星と同様の機構ははたらかない。その一方で、一酸化炭素などを表面に保持するには高温すぎるのである。現在もっとも有力と考えられている仮説は、非結晶状態にある水の氷の隙間に閉じ込められていた一酸化炭素の気体が、温度上昇による水氷の結晶化にともない天体表面に出てきたものとする仮説(以下、結晶化仮説)である[2]。結晶化は高温になると短時間で進行するため、この彗星活動はケンタウルスの軌道が太陽に近づく形に変化することで高温となった直後のみに発生する短時間の現象と考えられている(図 1)。すなわち、活動的ケンタウルスは太陽系内部への単位時間あたりの流入量の情報を持つ。また、メインベルト小惑星の活動性も近年発見されてきた[3]。天体の活動性は氷成分を保持していることと加熱されることで引き起こされる。活動性の有無は軌道進化の程度を知るひとつの指標となりうる。

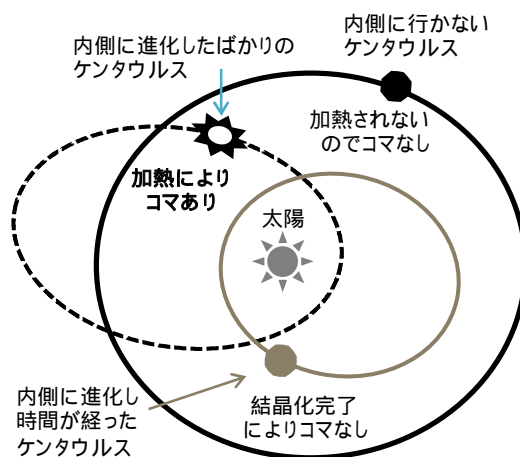


図1 ケンタウルスの軌道進化とコマの有無

小天体の色の分布 ケントウルスと木星族彗星の色の分布が大きく異なることが知られている[4][図 2]。ケントウルスは赤いものと青いものにピークがあるふた山の分布を持つ[図 2、縦縞丸と濃灰色丸]が、木星族彗星(SPC)は青いものしかない[図 2、小さな薄灰色丸]。活動的ケントウルスも木星族彗星と同じく青い[図 2、エラーバー付きの灰色丸]。これは活動性による色の变化を強く支持する。そして中間的な色を持つ小天体は非常に少ないことが知られている。これは天体が彗星活動を持つと青くなるがその変化があまりに早いために中間色を示す期間が短いために観測されづらい可能性が考えられる。

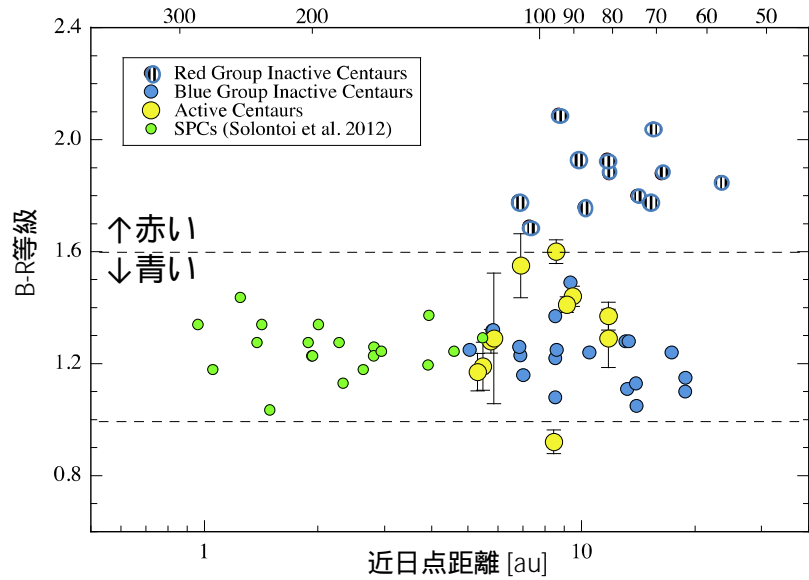


図2 ケントウルスと木星族彗星の色分布と軌道 Jewitt(2015)より改変  
縦軸は色の違いの指標、横軸は太陽に最接近した時の距離。

## 2. 研究の目的

ケントウルスの活動性の有無と分布の進化を数値実験により詳細に調べ、その結果を観測される軌道や色の分布と比較することで、太陽系内の物質の動径方向移動を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### A 解析的手法

ケントウルスと重力相互作用する惑星(海王星、天王星、土星、木星)を、円制限三体問題の重ね合わせで記述する。特に、2個の惑星に着目し、それぞれの円制限三体問題特有の保存量であるティスランパラメタが作る平面上での移動を記述する。

### B 数値計算

ケントウルスの源であると考えられる海王星以遠の領域に多数の粒子を分布させ、それらの軌道進化を計算する。計算時間は、ケントウルスの平均的力学的寿命である数百万年程度行う。統計的な議論を行うため、各ケントウルスの観測誤差をもとに与えた軌道要素範囲内で作成したクローンも同様の軌道計算を行う。軌道進化と熱進化を追いながら、(a)未活動のケントウルス、(b)活動的ケントウルス、(c)活動を終了したケントウルス、に分類し、それぞれの分布や個数の時間進化を調べる。その結果に統計的な手法を用い、(a)-(b)それぞれに特徴的な軌道要素の分布を見出す。その結果が、現在観測されている活動的ケントウルスの分布と整合的かどうかを吟味する。

## 4. 研究成果

まず、円制限三体問題と二体散乱を組み合わせ軌道進化の素過程を記述した。具体的にはケントウルスの軌道要素、惑星との遭遇距離をパラメタとして、惑星との遭遇前と遭遇後の軌道を関連づけた。また、初期軌道分布と遭遇距離の確率分布を仮定することにより、遭遇前後のティスランパラメタ平面上での分布の進化を表現することができた。結果の重ね合わせにより、木星軌道付近への進化へのパスを推測することができた。海王星付近からいきなり木星軌道へとジャンプするものは少なく、多くは天王

星、土星の重力支配領域を経由することで内部へ進化することが推測される。

次に、以上の結果を数値計算で段階をおって検証した。その結果、解析解が示唆する結果をある程度再現できた。今後、現実の惑星が持つ離心率の効果の評価したのちに論文化を進めたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fouchard Marc, Emel'yanenko Vacheslav, Higuchi Arika	4. 巻 132
2. 論文標題 Long-period comets as a tracer of the Oort cloud structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy	6. 最初と最後の頁 0-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10569-020-09978-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 樋口有理可
2. 発表標題 制限三体問題を用いたケンタウルスの軌道安定性の評価
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年度秋季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Observatoire de Paris <a href="https://www.observatoiredeparis.psl.eu/">https://www.observatoiredeparis.psl.eu/</a> IoA, Russian Academy of Sciences <a href="http://www.inasan.ru/en/">http://www.inasan.ru/en/</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊藤 孝士  (Ito Takashi)  (40280565)	国立天文台・天文データセンター・助教    (62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------