

氏 名 布 施 哲 治

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第427号

学位授与の日付 平成11年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Dynamical Structure of Edgeworth-Kuiper Belt Objects
in/around Mean Motion Resonances with Neptune

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 福 島 登 志 夫
教 授 木 下 宙
助 教 授 佐 藤 弘 一
助 教 授 田 中 培 生 (東京大学)
助 教 授 吉 川 真 (宇宙科学研究所)

1992年8月海王星軌道の外側に直径数百 km の新小天体が発見されて以来、同様な天体の発見数は 200 に迫る勢いである。これらの小天体が示す力学的な特徴として、海王星との平均運動共鳴と永年共鳴が上げられる。本論文では、海王星との平均運動共鳴およびその周辺に存在する小天体の軌道進化に関して、相補う 2 つの手法により定性的にかつ定量的に解析を行い、太陽系外縁部の力学的構造を明らかにした。さらにその結果から、すばる望遠鏡による太陽系外縁部の新天体サーベイ観測についての検討を行った。

1950 年前後に Edgeworth と Kuiper は、太陽系外縁部における小天体の存在について、"惑星になりきれなかった微惑星が存在しているに違いない" と示唆していた。現在では海王星軌道より大きな軌道を持つ天体を Edgeworth-Kuiper Belt 天体 (以後 EKBOs) と呼んでいる。一方、期待される EKBOs の軌道分布から、短周期彗星の起源が EKBOs であるとする説が有力である。このような背景から、EKBOs に関する議論は始源的な天体とされる彗星の研究だけに留まらず、過去の太陽系形成期についての探究につながるといえる。

平均運動共鳴 (以後レゾナンス) とは、天体間の公転周期の比が整数で表されるときに起こる得る共鳴現象である。例えば小惑星帯内では、木星とのレゾナンスに対応する領域に小惑星が少ない "ギャップ" が存在し、また小惑星帯の外側ではレゾナンスに対応する周辺に小惑星が存在している。このように、レゾナンスはその系の力学的構造を決める重要なメカニズムであるといえる。そこで本論文では、実際に EKBOs が発見された海王星との 3:4, 2:3, 3:5 レゾナンスとその内側・外側の 5:6, 1:2 レゾナンス、およびこれら周辺の力学的構造について、従来にない大規模な解析を行った。

まずレゾナンスにある EKBOs が示す軌道要素の変化のうち、中周期 (数万年) と長周期 (数百万年) の振る舞いについて、1 つ目の手法である半解析的手法を用いて定性的に調べた。まず従来の平面モデルを発展させ、より現実に近い "海王星の離心率を考慮した 3 次元モデル" を採用した 2 種類の半解析的手法を開発した。1 つ目の Model A では、数百年の短周期成分を平均化しまた長周期成分を固定することで、5 つのレゾナンスにある EKBOs の中周期成分である軌道長半径と臨界引数 (レゾナンスにあると称動する変数) の変化を等ポテンシャル曲線として表現した。その結果、各レゾナンスを特徴づける臨界引数の振る舞いを明らかにした。さらにその解析から、それぞれのレゾナンスが起こり得る境界条件を軌道長半径 - 離心率平面上に表した。2 つ目の Model B では、短周期・中周期成分を平均化することにより、各レゾナンスにある EKBOs の長周期成分である離心率と近点経度の変化を等ポテンシャル曲線として表現した。この結果により、EKBOs の離心率が大きく変化する可能性のある海王星との永年共鳴 (ν_8 永年共鳴) の存在領域を明確にした。

次に半解析的手法により明らかになった軌道要素の振る舞いを定量的に確かめるため、2 つ目の手法である軌道進化に関する数値シミュレーションを行った。まず長期間の数値積分に最適なコードである Symplectic 積分法を開発した。このコードを用い、発見された EKBOs のうち海王星とのレゾナンスにある 24 天体について、1 億年間の数値積分を行った。その結果、21 天体の軌道は計算期間中安定であったが、1:2 レゾナンス

の 1 天体と 2:3 レゾナンスの 2 天体は数千万年のうちにレゾナンス関係が崩れ、軌道が大きく変化した。一方、数値積分における軌道長半径と臨界引数の振る舞いは、Model A による結果とよい一致を示すことがわかった。また、いずれの天体も Model E による結果の通り、 ν_8 永年共鳴は示さなかった。

従来行われていた軌道進化に関する数値シミュレーションは、太陽系外縁部の広い初期値空間に対して、テスト天体数が明らかに不足している。またレゾナンスやその周辺の力学的構造を詳しく議論した例は、ほとんど見当たらない。そこで次にレゾナンスおよびその周辺の力学的構造について明らかにするために、従来にない大規模な数値シミュレーションによる解析を行った。具体的には、総計約 21 万個のテスト天体を先ほどの 5 つのレゾナンスやその周辺に配置し、Symplectic 積分法をさらに改良したコードにより 500 万年間の数値積分を行った。シミュレーションの結果、海王星から遠いレゾナンスにある天体ほど、取り得る最大の離心率が大きいことを示した。さらに ν_8 永年共鳴の存在は、最大の離心率を決める 1 つの要因であることがわかった。一方レゾナンス周辺の構造も、 ν_8 永年共鳴により大きく変化することを明らかにした。また軌道進化の過程で、レゾナンス境界のはるか外側からレゾナンスに飛び込む天体や逆にレゾナンスから飛び出す天体が確認された。特にレゾナンスから出る天体の存在は、EKBOs が彗星の起源であることを示唆するものである。

先の大規模な数値シミュレーションの結論より、海王星とのレゾナンスやその周辺の構造決定に天王星が関与していることが考えられた。そこで天王星の軌道長半径を変えた仮想太陽系モデルを考え、同様な数値シミュレーションにより天王星がレゾナンスやその周辺の構造に与える影響を定量的に調べた。その結果、レゾナンスにある天体の取り得る最大の離心率は、天王星とレゾナンスの距離に依存していることが明らかになった。一方、天王星の軌道を変えることにより海王星の軌道が変化し、海王星による ν_8 永年共鳴の起こる場所も移動するため、レゾナンス周辺の構造が変わることを示した。以上のことから、天王星は、海王星とのレゾナンスやその周辺にある EKBOs の力学的構造を決める重要な役割を果たしていることを明らかにした。

シミュレーションの結果を踏まえ、ハワイ島マウナケア山頂のすばる望遠鏡による EKBOs サーベイ観測計画を検討した。まずすばる望遠鏡の主焦点に設置する広視野モザイク CCD カメラによる EKBOs の発見効率は、従来のサーベイ観測に比べ数倍から数十倍も高いことを示した。次に大規模な数値シミュレーションの結果から、5 つのレゾナンスおよびその周辺に存在する EKBOs の予想空間分布図を提示した。これらの領域を探索することにより、従来にない高い効率で新しい EKBOs を発見できることが期待される。

太陽系の外縁部に関しては、1930年の冥王星の発見以後、長らく観測上の発見がなく、もっぱら海王星と軌道が交差する冥王星の軌道安定性などの力学的研究が中心であった。もちろん、海王星および冥王星軌道の外から飛来する彗星などの小天体の起源として、オールトが主張した球状のオールト雲およびエッジワースとカイパーが独立に提唱した円盤状のエッジワース・カイパー帯が有名であったが、いずれも作業仮説と見られていた。しかるに、1992年に海王星軌道の外にほぼ円軌道を動く小天体が発見され、これがエッジワース・カイパー帯に属する天体ではないかとの疑問が呈されるや否や、多くの研究者がこの問題に取り組み、次々と同種の小天体（略してEKBOと呼ばれる）が発見されるにいたって、この分野の研究は劇的に進展をみせることとなった。しかしながら、これまでのところ、観測から得られたEKBOの軌道要素空間における分布がなぜそうなるのかという根源的問題については、いくつかの理論的研究はあるものの、その全貌は明らかにされていない。

本申請者は、申請者自身の工夫に基づく二種類の準解析的な摂動論による緻密な解析と、申請者が独自に改良を施した高速数値積分法に基づく長期間数値シミュレーションの二つの手法を駆使して、現在得られているEKBOの軌道情報を元に、その母集団であるエッジワース・カイパー帯の力学的構造を明らかにした。本研究により、太陽系外縁部に関する力学的研究に対し、重要な進展がもたらされたと言える。本研究の独創性と主要な成果は以下のとおりである。

1. その平均運動が海王星の平均運動と小さな整数比となる状態（平均運動共鳴という）および同状態に近い場合のEKBOの軌道進化を準解析的に求めるために、小惑星に対する木星など軌道の外側の天体の影響を評価するための吉川（1990）の方法にならい、EKBOに対する海王星の場合などのように、軌道の内側の天体の影響を評価できる新方法を、代表的な周期の長短に着目することにより、二種類開発した。

2. EKBOの軌道進化を数値的に求めるために、この種の問題によく使われる混合変数型シンプレクティック数値積分法に対し、EKBOの軌道変化によって左右されない海王星など摂動天体の軌道進化の部分を共通ファイル化するという改良を施し、同積分法の大幅な高速化を実現した。このことにより、下記に述べる長期間数値シミュレーションの多数回の実現が可能となった。

3. 発見されたEKBOの分布を十分カバーする軌道領域にある5つの重要な平均運動共鳴（1:2、2:3、5:6、3:4、3:5）のそれぞれに対し、(1) 1.の準解析的手法を適用して、共鳴に近い場合に時間的にゆっくり変化する変数である臨界引数の時間変化の解析を通じて、軌道要素空間における共鳴近傍の力学的構造を求め、(2) 2.の数値積分法による長期間シミュレーションを多数実施すると共に、(3) 両者の結果がよく一致することから、準解析的手法の有効性を確認し、(4) 準解析的に予想される構

造が、観測から得られる軌道要素分布をよく説明することから、EKBO の軌道分布が主に平均運動共鳴およびその周辺領域の安定性の議論によって支配されていることを実証したばかりでなく、(5) 重要な軌道要素である軌道離心率の大きな変化が、平均運動共鳴ではもたらされず永年共鳴によってもたらされることを明らかにした。

4. さらに「EKBO の分布を直接支配していると思われる海王星ではなく、EKBO から見てさらに内側の惑星である天王星をなくす、あるいはその軌道をずらすという仮想条件の下で、同様な数値シミュレーションを行い、その結果を3. の結果と比較する」というまったく独創的な着想を実施することによって、天王星の軌道の位置が、EKBO の軌道離心率の最大値だけでなく平均運動共鳴近傍の力学的構造を左右することを明らかにした。

5. 最後に、上記で得られた力学的構造の解析結果を元に、近々その運用が開始される「すばる」望遠鏡を用いた EKBO 探索の効率的な観測提案を行った。

本申請者の以上の成果は、天体力学の研究にとってきわめて重要な新知見を含むばかりでなく、太陽系の観測的研究に対して独創的な観測提案を含んでおり、当該分野の今後の研究を大きく進める原動力となるものと評価される。

以上を勘案して、本審査委員会は、全員一致により、本論文が博士（理学）の学位を受けのにふさわしい内容をもつものとして判定した。