

平成28年度 学内研究助成金 研究報告書

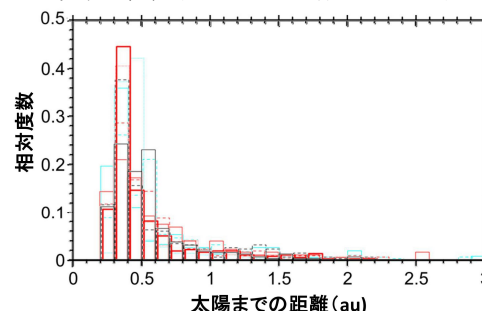
研究種目	<input checked="" type="checkbox"/> 奨励研究助成金	<input type="checkbox"/> 研究成果刊行助成金
	<input type="checkbox"/> 21世紀研究開発奨励金 (共同研究助成金)	<input type="checkbox"/> 21世紀教育開発奨励金 (教育推進研究助成金)
研究課題名	水星・金星・地球・火星の形成と水の起源の解明	
研究者所属・氏名	研究代表者：総合社会学部 総合社会学科 准教授・パトリック ソフィア リカフィカ 共同研究者：(該当なし)	

1. 研究目的・内容

地球型惑星形成（水星・金星・地球・火星の形成）は惑星系における原始的な微惑星（小天体）の相互衝突により形成されたことと同時にそれらの惑星の水も供給されたと考えられている。本研究ではN体シミュレーション（数値計算）を実施することによって水星、金星、地球、火星の水の起源と供給を解明するために地球型惑星形成時の水供給を正確に定量化することを目指している。

2. 研究経過及び成果

本研究では、研究目的に説明した主要なテーマを結合し未解決課題を克服する理論モデルを構築し、地球型惑星の創成に対して特に水星形成および惑星への水の供給を理解できるようにコンピュータ上で初期太陽系を再現した。そのため、徹底的に初期条件を用意した上で力学的に初期太陽系における多数小天体のN体シミュレーション（数値計算）を実施した。大規模計算であったため、研究が円滑に遂行できるように国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの共同利用計算機「計算サーバ」を大いに活用した。地球型惑星形成および惑星系にあった小天体の軌道進化を詳細に分析したことで、惑星の構成天体の由来も把握できた。地球型惑星形成に関する未解決課題は多いため、今回の1年間の研究は、特にこれまでの先行研究で検証されていない水星形成および水星と金星への水供給のメカニズムを中心に数値計算の分析より得られたデータに基づき、下記の主な成果を挙げることであった。地球型惑星の構成天体である多数の小型微惑星（以下「微惑星」）と数の大型微惑星（以下「embryos」）及び巨大惑星（木星と土星）といった初期太陽系の円盤において、それらの天体の衝突進化・軌道進化をシステム上で10億年間にわたり数値計算で調べた。水星形成の条件をより詳しく理解するために円盤の内側領域（水星領域）を考慮した。数値計算に組み込んだ円盤中の水の質量分率モデルを使い、形成された水星と金星のような惑星への水供給を調べた。また、大型/小型微惑星の総質量の比や、円盤における水の凝固により円盤の増加質量（以下「凍結線」）の影響など、様々なパラメータを検証した。数ヶ月にわたり合計110件の正確な数値計算を行った。形成された惑星の分類については軌道と質量という基準を基に太陽系地球型惑星と比較することで軌道範囲以内の場合「○のような惑星」と呼ぶ。さらに、それらの惑星のうち質量がある程度範囲以内なら太陽系地球型惑星と最も似た惑星として「○analog」と呼ぶ。主な成果は、次の通りである。まず、数値計算より得られた惑星系では、10億年間経過すると金星と地球analogが一般的に形成される状況が見られたが、形成された水星analogが比較的少なかつた。また、惑星系等の中で形成された地球型惑星で52個の水星のような惑星中、9個が水星analogを特定できた。水星analogは、水星から太陽までの軌道距離（ $a = 0.39 \text{ au}$ （天文単位））よりわずかに内側に形成され、比較的小さな離心率と傾斜角、および中央値の質量 $m \sim 0.2 \text{ ME}$ （地球質量の2割）という特徴に集中したと見られた。さらに、水星analogは、主に約1000万年間の形成で初期太陽系の円盤の内側領域に位置した微惑星とembryo（ $\sim 1.5 \text{ au}$ まで集中）から大部分の質量を獲得したが、残りの質量はより長い期間でより外側領域に位置した天体からもたらされた（ $\sim 3 \text{ au}$ まで広がった）。水星analogを形成した円盤における構成天体の初期位置は右下の図で表している。また、原始惑星系円盤における微惑星とembryosの総質量比が1:1か2:1の方が多くの水星analogが見られた。つまり、それらの結果は、水星の軌道と質量を再現するためには、原始惑星系円盤の内縁が 0.3 au 以上であり、円盤の質量ピークが 0.6 au 以上でなければならないことを示唆している。また、水星領域は今回検証した質量よりもさらに枯渇していたということが分かった。凍結線は水星領域に位置する惑星の形成にごくわずかな影響があったが、全ての形成された惑星の水を豊かにしたという関係を明らかにした。実際、地球型惑星形成が終わった時点で水星と金星のanalogは、広い範囲の水分率を持つことになったことが分かった。特に、初期太陽系の円盤の 1.5 au 以遠の領域では、地球型惑星形成の後期中に（ $t > 1000$ 万年以上の時期）水星および金星に水（おそらく他の揮発性物質も含む）を供給する可能性が高いという傾向が見つかった。その結果からは、水星の地殻と表面の揮発性物質の存在を説明することができるかもしれない。つまり、本研究と今後の研究において、地球型惑星形成や太陽系のその他の残されている課題に関する新たな知見の発見・集積・手掛かりになる最先端成果であると期待される。



3. 本研究と関連した今後の研究計画

本研究で実施した数値計算の分析と得られた専門内容について H29.3 に国立天文台所属の研究者と同機関で研究打ち合わせをした。毎日昼～夜数時間に行った議論の結果、より詳細なデータと深い協同作業の進捗を得たので、今回の1年間の研究について研究成果をまとめ、後日査読つきで学術論文1本を執筆することができた。その論文の掲載がある国際専門誌に H28 年度以内に決定され、4月1日に正式に出版された。また、打ち合わせの結果として H29 年度からはさらに地球型惑星形成に残されている課題に直面し、関連した研究課題（例：水星と同時に火星形成）について、天文台の研究者と議論しながら取り組む方針である。以前から継続中のこのような研究の成果を踏まえると、国立天文台と近畿大学の両機関にとって有意義であることも考えられる。今後、水星と金星に加えて地球と火星の軌道・質量といった特徴を正確に再現できるようにモデルを改善する予定である。現在（H29.6）、既に他の多数パラメータを検証し、水星形成をはじめ金星・地球・火星形成とそれらの惑星の水の供給について研究中である。更に、関連した研究課題の真相を把握するため、テスト数値計算を実行中であり、また新たな数値計算も準備中である。最後に、国内外の学会・研究会に積極的に参加し、本研究の成果を幅広く公開し普及に取り組みたい。今年度中に少なくとも2回学会で発表することを目指している。

4. 成果の発表等

発表機関名	種類(著書・雑誌・口頭)	発表年月日(予定を含む)
The Astrophysical Journal 838:106	国際専門誌査読つき論文	H29.4.1
日本地球惑星科学連合	ポスターと口頭発表(2件)	H29.5.20 と H29.5.24
日本惑星科学会	ポスター発表(1件検討中)	H29.9 下旬