

本論文はビッグバン後の最初の天体である初代星（種族 III）の超新星爆発によって放出されるガスの元素組成パターンを広い星質量範囲にわたって系統的に計算し、宇宙初期の天体形成に新たな知見を与えたものである。

本論文は6章からなる。第1章は序論であり、ここでは、初代星は宇宙初期の再電離や化学進化の研究にとって本質的に重要であることが述べられている。最近の宇宙論的シミュレーションによると初代星の最終質量は $10 - 1000 M_{\odot}$ の広い範囲で回転を伴って形成されることが示唆されているが、初代星からの紫外線放射や爆発的要素合成は星質量に強く依存するため、実際の質量範囲を特定することが緊急の課題であることが強調されている。また、星形成と化学進化の研究から、低質量で寿命が長く、現在まで生き延びて観測される金属欠乏星は、先に爆発した大質量星が放出したガスから誕生したと考えられている。従って、初代星の爆発による元素組成パターンを、極端に重元素量が少ない低質量星の元素組成パターンと比較することで、初代星の質量範囲を特定することができる。ここでは、本研究におけるこの基本的な考えが表明されている。

第2章では、本研究で使用した星の進化計算と爆発の流体力学計算のコードが概説されている。星の回転については、遠心力による球対称からのずれ、等圧力面の球面からのずれ、子午面循環による元素の混合、遠心力が存在するときの表面物質の放出、それぞれの効果を取り入れているとの説明があり、その方法を詳述している。また、星の誕生時の主系列（ZAMS）段階では、赤道の回転速度には近傍の大質量星の典型的な自転速度を与え、回転則には剛体回転を仮定している。

第3章では、初代星の重力崩壊型超新星（CCSN）における元素合成計算の結果が示されている。この計算結果と比較する極端な金属欠乏星は炭素超過であることを念頭におき、それを再現する弱い爆発モデルに基づいて、 $12 - 140 M_{\odot}$ の質量をもつ超新星爆発の元素合成を、回転を入れない場合と入れた場合の両方について計算した。その結果、回転を入れない場合は $60 - 80 M_{\odot}$ より重い星では Mg と Si の組成が顕著に増加すること、 $80 M_{\odot}$ より重い星では CNO サイクルの爆発的核反応に起因して Ca が増加することが示されている。他方、回転を入れた場合は物質混合の促進によって、 $40 M_{\odot}$ より重い星で既に Mg と Si が増加すること、また、N、Na、Al も増加することが示されている。

第4章では、電子-陽電子が対生成する際に生じるペアー不安定型超新星（PISN）について、まず従来の星の進化計算におけるエネルギー生成率の近似的な手法を正し、より適切な手法に基づいて爆発質量を計算した。その結果、初代星では $145 - 260 M_{\odot}$ の質量範囲で爆発が起ることを確認し、それらの元素合成計算から、元素組成パターンは3つの特徴的なグループに分けられることを明らかにした。第1はCからAlまでの軽質量元素にScを加えたグループで、これらの元素組成パターンは爆発した星の質量には依存しない。第2はSiからCaまでの中間質量元素のグループで、元素組成パターンは星の質量に依存する。第3はTiからGeまでの重質量元素のグループで、元素組成パターンは星の質量に強く依存し、特に陽子数28から32にかけてのパターンは急降下する特徴がある。具体的には、PISNが存在するか否かは、第1グループの [Na, Al, Sc/Mg] 組成比と第3グループの [Ni/Fe] あるいは [Zn/Ni] によって総合的に判断でき、存在する兆候があれば、第

2 グループの $[\text{Si}, \text{Ca/Mg}]$ で初代星の質量を制限できることを指摘した。

第5章では、章の前半で CCSN の元素組成パターンを、これまでの観測で最も鉄組成量が少ない3つの金属欠乏星の組成パターンと比較している。その結果、SMSS 0313-6708 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -7.1$) の元素組成パターンは、回転しない $50 - 80 M_{\odot}$ の初代星で矛盾無く説明できると結論した。また HE 0107-5240 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -5.3$) の $[\text{N}, \text{O}, \text{Na/C}]$ 組成比は回転する $30 M_{\odot}$ の初代星で、HE 1327-2326 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -5.7$) の $[\text{O}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{Al/C}]$ 組成比は回転、非回転によらず $15 - 40 M_{\odot}$ の初代星でそれぞれ説明できると結論した。続く本章の後半で PISN の元素組成パターンを、金属欠乏星の大データベースに登録された多数の種類の元素の組成と比較した結果、PISN 起源の元素組成パターンを示す金属欠乏星は存在しないことを明らかにした。総合すると、 $100 M_{\odot}$ 以上の CCSN と PISN の存在を示唆する兆候は見い出せず、現状の銀河系内の金属欠乏星のデータは、約 $100 M_{\odot}$ 以下の初代星で説明できるという結論を得た。

第6章は本論文のまとめと将来への展望である。

以上に述べたように、本論文は、理論と観測の元素組成パターンを比較することによって、初代星の質量の上限は、従来の宇宙論的シミュレーションで求められていたよりも遥かに小さい可能性を提起したもので、今後の宇宙初期の天体形成の研究に重要な示唆を与えたものとして、高く評価できる。なお、本論文は吉田敬氏、梅田秀之氏、住吉光介氏、山田章一氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析・結果のまとめを行ったもので、論文提出者の寄与は十分である。

従って博士（理学）の学位を授与できると認める。