

# 論文審査の結果の要旨

氏名 石丸 亮

本論文は第0章、1章、2章の3章からなり、タイタン $N_2$ 大気の衝突起源について論じている。第0章はイントロダクションであり、先行研究の問題点とそれを解決するために本論文がとる理論方法の概要が述べられている。第1章では様々な組成の大気への衝突によって生じる反応のメカニズムを調べており、第2章では第1章の結果を踏まえてタイタン原始大気への微衛星衝突によってタイタン $N_2$ 大気が形成されるのかについて論じている。

本論文ではタイタンの原始 $NH_3$ 大気から $N_2$ 大気が形成されるメカニズムについて研究している。現在のタイタンが持つ分厚い $N_2$ 大気の起源は、惑星科学上の大きな問題である。また、原始 $NH_3$ 大気存在を示唆するデータが最近のホイヘンス探査によっても報告され、世界の惑星科学界が注目している研究テーマである。

従来の有力な仮説では、原始 $NH_3$ 大気が天体衝突に伴う衝撃加熱によって $N_2$ 大気が形成したことが提唱されている。その中で、先行研究では「衝突衝撃波によって加熱された大気がただちに高温の平衡組成に変化する」ことを仮定することにより原始 $CH_4-NH_3$ 大気から大量の $N_2$ が生成される結果を報告している。しかしながら、本論文が指摘しているように、この仮定は $CH_4-NH_3$ 大気では成立しない。なぜなら、振動モードの多い還元ガスが大気に含まれると比熱が大きくなるために衝撃波加熱が効かないからである。そのため、衝突による $N_2$ 大気形成を適切に議論するためには反応速度論を考慮する必要がある。さらに、原始大気として $CH_4-NH_3$ 大気しか考慮していないことも先行研究の問題点として本論文は挙げている。集積時間が短い場合には水蒸気大気が形成されるし、条件によっては $CO_2$ -richな微衛星がタイタンに集積するので、そのような場合には $H_2O$ や $CO_2$ も大気の主成分になりうるからである。本論文では反応速度論を考慮できるバウショックモデルを新たに構築し、そのモデルを使って様々な組成の原始大気( $CH_4/NH_3/H_2O/CO_2$ )で形成されるバウショックによる $N_2$ 生成を論じている。このモデルは、非平衡化学反応モデルと圧縮性流体モデルの2つを結合して構成している。本論文のモデルは上に挙げた問題を解決するものであり、 $N_2$

大気の衝突形成モデルを論じるうえで非常に意義がある。

CH<sub>4</sub>-NH<sub>3</sub> 大気への衝突を模擬した結果からは、比熱の大きい CH<sub>4</sub> によって衝撃波加熱が抑制されることから NH<sub>3</sub> の分解が阻害され広いパラメタ範囲の衝突において平衡組成が生成されないことがわかっている。つまり先行研究の仮定していた平衡組成は必ずしも生成されないことが示された。従って、先行研究の結果とは違って CH<sub>4</sub>-NH<sub>3</sub> 大気への衝突では広いパラメタ範囲において N<sub>2</sub> 大気が形成されないことが明らかとなった。

一方で、振動モードの少ない H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> は比熱を小さくするので衝撃波温度を高くする効果がある。温度が高いほど NH<sub>3</sub> の分解速度が速くなるので、H<sub>2</sub>O や CO<sub>2</sub> に富む大気では N<sub>2</sub> が生成されやすくなり、広いパラメタ範囲の衝突で N<sub>2</sub> 大気の形成に十分な N<sub>2</sub> 収率が得られることがわかっている。つまり、N<sub>2</sub> 大気が衝突起源であるならば、タイタンの原始大気は先行研究が仮定した CH<sub>4</sub>-NH<sub>3</sub> 大気ではなく、むしろ水蒸気大気もしくは CO<sub>2</sub>-rich 微衛星によって形成される CO<sub>2</sub>-rich 大気でなければならないことを本論文の結果は示している。水蒸気大気が形成するかどうかはタイタンの集積時間に依存する一方で、CO<sub>2</sub>-rich 微衛星が形成されるかどうかは土星系星雲中の化学組成に依存する。従って、本論文の結論はタイタンの集積時間や土星系星雲の化学進化に対して重要な制約になると考えられる。

本論文は、非平衡化学反応計算と非圧縮性流体力学の計算という、複雑で大規模な数値計算コードの開発を成し遂げている点において、非常に大きな価値がある。この2つの計算は、いずれもの先行研究が避けてきた計算であり、いわば始めて正攻法での取り組みを行った研究例である。さらに、得られた結果は、これまでのタイタン大気の起源論を刷新する可能性をもっており、ホイヘンス探査機がもたらした最新の探査データの意味を説き明かす上でも非常に重要な知見を与えてくれる。これら2つの意味において、本論文は、非常に重要な研究であると判断される。

なお、本論文第1章、第2章は、松井孝典・関根康人との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値計算および解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。