

論文審査の結果の要旨

氏名 木村 淳

本論文は、太陽系の外惑星系に特徴的に存在する氷衛星に見られる地殻変動の痕跡がどのように形成されたのかという問題について、熱史に従った内部構造進化とそれに伴う地殻応力史を理論的アプローチによって解明したものである。

ボイジャーやガリレオ探査機による外惑星系の調査によって、氷衛星には地殻変動の痕跡が多数発見された。代表的な氷衛星である木星の衛星エウロパやガニメデに対しては、近年の調査によって詳細な地形学的特徴が明らかとなり、主に亀裂や断層などの伸張応力に伴い形成した地形が表面を覆っていることが分かった。氷衛星における地殻変動の発生源は長年にわたり大きな未解決の問題であり、様々な応力源が議論されてきたが、個々にはいずれも不十分とされてきた。本論文は応力源として液体層の固化現象に着目し、内部熱史の進化と関連づけた地殻応力計算の数値シミュレーションを行うことによって、この現象が氷衛星の地殻変動に重要な役割を果たすことを初めて見出したものである。

本論文は全8章から構成されている。第1章は序論であり、研究の背景や氷衛星での地殻変動とその応力源に関するこれまでの理論的研究の問題点をまとめたものである。また氷衛星を特徴づける H_2O 氷の物理的特性を概説し、内部液体層の固化に着目した本研究の位置づけと意義を述べている。

第2章では、本研究で氷衛星の代表例として扱う木星の衛星エウロパとガニメデに関する観測的事実を概説している。これらは内部構造進化や応力史の数値計算に対する制約条件として用いられる。

第3章では、内部液体層の固化に伴う氷地殻応力の計算手法について説明している。氷地殻は球対称な均質構造を持つとして取り扱い、内部の熱的条件の変化に伴う氷地殻厚さの変化量が与えられた場合の氷地殻応力が解析的に導かれる。 H_2O の相変化には体積変化が伴うため、内部には過剰圧が発生して氷地殻に応力が発生する。相境界面における圧力平衡を考えることによって内部過剰圧と氷地殻応力場が定式化される。さらに粘弾性体の解を導き、氷地殻厚さの変化量を逐次的に与えることによって、氷地殻応力の時間発展計算を可能にしている。これにより、内部熱史と応力史をカップリングさせた手法が確立されている。

第4章では、氷衛星の内部熱史および構造進化に関して本研究で用いたモデルが説明されている。エウロパやガニメデサイズの氷衛星は衛星形成時に岩石成分と氷成分の重力分離が起こり、岩石質のコアを液体水の層が覆う構造が達成されたと考

えられている。本研究ではこれを初期条件とし、液体層の固化現象や内部の温度構造の変化を追跡している。

第5章では、数値計算の結果を示したものである。第一に氷衛星内部の熱的進化に関して氷の融点粘性率の不確定性を鑑みた計算が行われている。その結果、エウロパの液体層は固化が比較的ゆっくり進行し、現在も液体層が保持される。これは固化で生じる氷Ⅰの融解曲線が負の勾配を持つ特性や、氷地殻に働く潮汐発熱の効果によるものである。一方ガニメデでは、液体層の固化が氷地殻と高圧氷層の同時成長によって進行し、数億年で完全に消滅する結果となった。これは岩石コアを覆う高圧氷層がコアからの熱の緩衝材として働くためである。またこの結果から氷地殻の応力史が見積もられる。エウロパにおいては液体層の固化に伴い大きな体積増加が生じ、表面で発生する引っ張り応力は従来考えられていたどの応力源よりも大きく、氷の強度を上回るケースも存在し、従って、液体層の固化がエウロパの地殻変動に対して極めて重要な寄与を果たすことが明らかになった。一方ガニメデは、相変化によって体積減少を伴う高圧氷層の成長が大きいため、表面では大きな圧縮応力が発生することが明らかとなった。このことから、ガニメデ表面で見られる伸張性地形は液体層の固化現象とは別のプロセスによって形成したことが示唆される。

第6章では結果に対する議論として、本研究で扱った応力源がエウロパの地殻変動に与える役割や、ガニメデの地殻変動に関して残された問題点が整理されている。

第7章では、本研究で考慮しなかったが影響を与え得る様々な要素に関する議論や、他の主要な氷衛星に対する示唆、将来の方向性が議論されている。

第8章では本論文の結論がまとめられている。

この論文は、氷衛星における地殻変動の原因としてこれまで具体的に扱われることのなかった液体層の固化現象に着目し、内部構造進化とカップリングさせた地殻応力計算モデルを定量的に構築した画期的なものである。また氷衛星の熱史と地殻応力史の両者に関して一貫した結果を得たことは特筆すべき点であり、これまでにない新たな成果として高く評価される。従来外惑星系の研究は観測量が少なく、定性的な議論が多い中で定量的な応力値、粘性率、形成年代を与えた本研究は、今後の氷衛星探査へ具体的な指針を与えた。その結果は氷衛星の進化という重要な問題に対して新しい知見・展望をもたらしたものであり、博士取得を目的とする研究として十分であると審査委員会一同が確認した。

なお、本論文は東京大学地震研究所の栗田敬教授との共同研究であるが、論文提出者が主体となってモデル構築・実験・解析を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。従って、博士（理学）を授与できると認める。