

## 論文内容の要旨

論文題目

### Tectonic History of the Icy Satellites: Discussions on the Internal Evolution and its Surface Manifestation

(氷衛星の内部構造進化と応力史についての研究)

氏名 木村 淳

氷を主成分の1つに持ち、木星型惑星の衛星の大部分を占める氷衛星は、表面に様々な地殻変動の痕跡を残しているものが多く、幅広い外見的多様性を示す。この多様性が氷という身近で単純な物質で作られていることに注目し、氷衛星での様々な活動に対する氷 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) の役割を考えることが、地殻変動の要因や進化を論じる上で最も重要となる。本研究では氷衛星における地殻変動の原因を解明すべく、応力源として液体  $\text{H}_2\text{O}$  の固化とそれに伴う体積変化に注目し、氷地殻に生じる造構応力の定量的評価を行った。本研究では多くの氷衛星を、内部で低圧相の氷だけが出現するケースと、サイズが大きく高圧相の氷も出現するケースの2つに分類し、そのサンプルとして衛星エウロパとガニメデをモデルとした計算を行った。

氷衛星の表面に見られる地殻変動の痕跡の例として、帯状の地形や亀裂の存在が主に挙げられる。その地形学的特徴から、これらの地形は引張応力を受けた表面が開裂し、表面拡大を伴って形成したと考えられている(図1)。一方で、表面積の増加を補償するような表面収束域はほとんど確認されていないことから、表面拡大地形の存在は、内部の体積変化が起こったことを示唆している。

過去の研究では、地殻変動の応力源としていくつかのプロセスが議論されてきた。第一に、木星との潮汐相互作用による変形で生じる応力[Greenberg et al. 1998, Harada 2004]と、第二に氷地殻内で生じる固相対流運動による応力である[Squyres and Croft, 1985, McKinnon, 1998]。これらはいずれも、最大でも約 0.1MPa 程度と見積もられた。また衛星内部の体積変化という点に注目すると、内部分化や温度変化による熱膨張で有意な応力が生じるとも考えられる。しかしこれらは衛星史の初期にのみ発生、卓越するイベントと考えられ、エウロパの表面年齢が数千万から一億年であることを鑑みると、現在我々が目にする表面地形の形成には寄与しないと言える。地殻に発生した応力に対し地殻変動の可否を論じる際には、氷の引張応力に対する強度との比較が1つの指標となる。この強度は実験によって約 1~10 MPa とされることから[Hobbs, 1974, Arakawa and Maeno, 1997]、予想される応力では地殻変動が生じないことになり、この応力不足の問題は未解決のまま残されてきた。

これを解決するために、本研究では別の応力源として、氷衛星内部の液体  $\text{H}_2\text{O}$  の固化とそれに伴う体積変化に注目した。エウロパ程度のサイズを持つ氷衛星では、集積直後に  $\text{H}_2\text{O}$  が岩石から分離し液体層を形成すると考えられている[Lunine and Stevenson, 1982; Kuramoto and Matsui, 1994]。この液体層

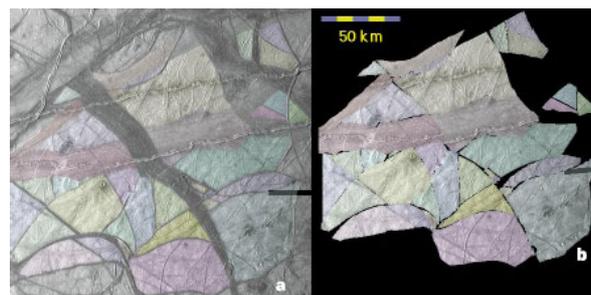


図1. (a) ガリレオ探査機が撮影した、エウロパに見られる典型的な表面拡大地形。多数の暗灰色の帯状地形が表面を切っている[Tufts et al., 2000]。 (b) 帯状地形を除去すると周辺の地形が明瞭に復元されることから、帯状地形の存在は表面積の増加を示唆している[Sullivan et al., 1998 より]。

が衛星の冷却とともに固化し低圧氷に相変化する際に、約 10%の体積増加をもたらす。このプロセスはこれまで地殻変動の要因として重要視されながらも、その具体的な見積もりはほとんど行われてこなかった。

氷衛星における液体 H<sub>2</sub>O の固化は、その現象のタイムスケールが非常に長いため、応力の評価を行う際には氷の粘弾性的な挙動を考慮する必要がある。本研究では発生する応力の蓄積と緩和の競合を考え、表面における造構応力の定量的評価とその時間変化を調べた。また、造構応力の見積もりにおいては液体 H<sub>2</sub>O の固化速度は重要なファクターとなるので、これを内部熱史の計算から制約し、応力の計算にカップリングさせた。

造構応力の計算においては、まず一次元球対称の殻問題を考える。単位時間あたりの液体 H<sub>2</sub>O の固化によって内部に生じる過剰圧を求め、それを境界条件として地殻の造構応力場が計算される。これに対応原理を適用して応力場の時間発展の式を導き、氷地殻での応力状態を見積もった。計算に際しては、氷の融点粘性率（氷地殻の熱輸送効率、すなわち液体層の固化速度を支配）、および表面での粘性率（応力の緩和速度を支配）に不確定性が大きいため、本研究ではこの2つをパラメータとし、依存性を調べた。

まず熱史計算の結果によると、エウロパでは最近 20 億年間に液体層がゆっくりと固化するステージが見られ、現在も液体層を保持する状態が得られた（図 2）。これは液体層が固化すると液体層の温度差が大きくなり、かつコアが液体層を直接暖めているので、液体層内の対流がコアの熱を効率よく運び、氷地殻の成長を妨げているためと考えられる。これは氷の粘性率が持つ不確定性に関わらず、同様の傾向が得られる。ここで、エウロパの表面年齢はクレタ年代学から数千万年から数億年とされるため、応力の評価においては熱史初期の液体層固化ステージは現在の地形形成には寄与しないと、棄却した。

これを踏まえて氷地殻の造構応力を見積もると、表面で生じる引張応力が氷の強度を上回るケースが存在し、応力源として十分な寄与を果たすことが分かった（図 3）。本プロセスはエウロパにおける地殻変動の有効な応力源となり得ることが明らかとなった。

一方で衛星ガニメデでは、コア表面において高圧相の氷の層が出現する。内部液体層はこの高圧氷層と氷地殻との同時成長によって急速に固化が進み、最終的に数億年で完全に固化してしまう（図 4）。これは、高圧氷層があるためにコアからの熱が液体層に十分に輸送されないことが主な原因と考えられる。このようなガニメデの熱史に対しては、氷地殻では圧縮性の応力が発達する（図 5）。液体 H<sub>2</sub>O から高圧氷へと相変化する際には体積の減少を伴うため、ガニメデの地殻応力史は体積増加を伴う氷地殻の成長との競合によって支配される。ガニメデでは氷地殻に比べて高圧氷層の成長の方が早いので、衛星全体として体積が減少することになる。これに対し、ガニメデでは圧縮力を起源とする地形は見つかっていないことを鑑みると、内部液体層の固化ステージは現在目にする地形の形成には寄与していないか、もしくは圧縮性の地形は実際に存在しているものの、画像解像度が原因で識別されていない可能性が考えられる。

以上、本研究では液体 H<sub>2</sub>O 層の固化と体積変化がもたらす造構応力の定量評価を行い、エウロパにおいては地殻変動の発生に充分有効なプロセスであることを明らかにした。液体層の固化による応力は等方的な性質を持っている。一方で一部の地形は、潮汐変形による応力の表面パターンに一致する

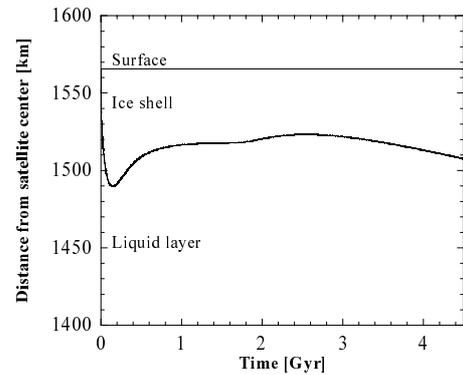


図 2：融点粘性率が  $10^{15}$  Pas の場合の、エウロパ氷地殻・内部液体層境界面の位置変化。

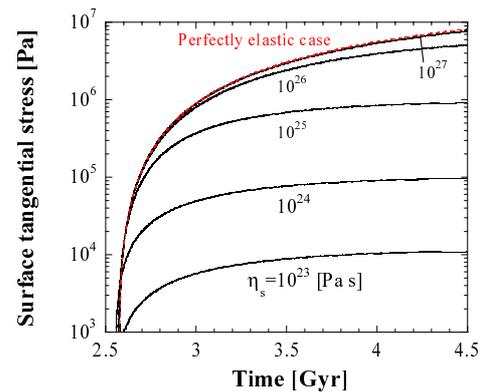


図 3：エウロパ内部液体層の固化が図 2 のように進行する場合の、表面における引張応力の時間変化。氷地殻の融点粘性率は  $10^{15}$  Pas。曲線は、上から表面粘性率が  $10^{27} \sim 10^{23}$  Pas の場合。

という特徴を持っている。このことから、液体層の固化により生じた体積変化は、応力を氷の強度まで引き上げる“ベースアップ”効果を担い、一方でより短周期の変形である潮汐変形や地殻内対流は、実際の地形の形状や方向性を決定づける“トリガー”としての役割を持つと推測される。

2011年より開始が予定されている Jupiter Icy Moons Orbiter ミッションでは、木星系衛星表面の高解像度マッピングや、地殻透過レーダーによる氷地殻厚さ測定などが行われる予定である。これによって、エウロパやガニメデにおける表面拡大地形の全球分布が判明し、さらに詳細な地形学的特徴が捉えられれば、本研究のモデルをより定量的に評価することが可能となる。

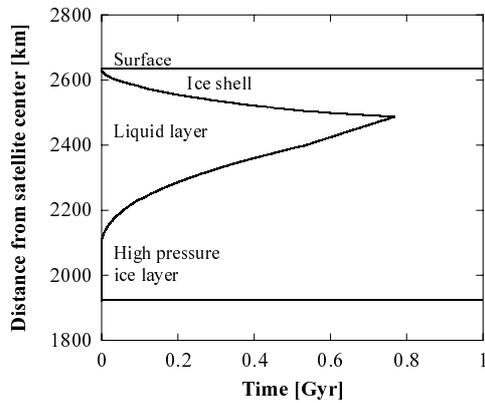


図 4：融点粘性率が  $10^{15}$  Pa s の場合の、ガニメデ氷地殻・内部液体層境界面の位置変化。

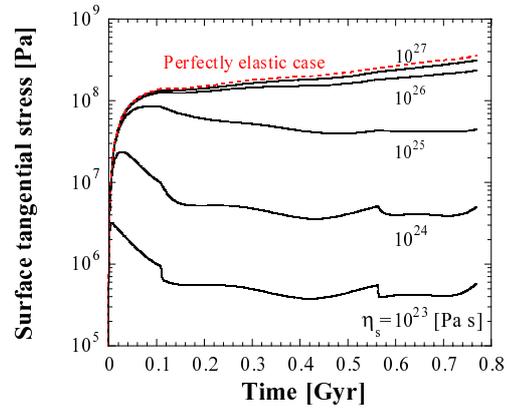


図 5：液体層の固化が図 4 のように進行する場合の、表面における引張応力の時間変化。氷地殻の融点粘性率は  $10^{15}$  [Pa s]。曲線は、上から表面粘性率が  $10^{27} \sim 10^{23}$  の場合。