

「月惑星探査の来たる 10 年」第一段階パネルへの意見書

提出： 電子ファイル（Word または PDF 形式）で「月惑星探査の来たる 10 年」事務局（decade_sec@wakusei.jp）に送って下さい。事務局で取りまとめて、パネルリーダーに展開します。

■ **意見提出先パネル**（希望するパネルに○をつけて下さい。複数回答可）

- 地球型惑星固体探査パネル
- 地球型惑星大気・磁気圏探査パネル
- 小天体探査パネル
- 木星型惑星・氷衛星・系外惑星探査パネル

■ **提案タイトル**

- 氷衛星の多様な内部進化と地球との比較)

■ **代表者の氏名・所属・連絡先**（E-mail アドレス、または電話番号と Fax 番号）

- 栗田敬・東京大学地震研究所・kurikuri@eri.u-tokyo.ac.jp)

■ **共同提案者の氏名・所属**（適宜追加して下さい）

- 木村淳・惑星科学研究センター／北海道大学)
- 庄司大悟・東京大学地震研究所)
- 小川佳子・会津大学)
-)

■ **要約**（400 字程度）

（氷衛星の表層・内部構造はきわめて多様性に富んでおり、太陽系の天体の多様な進化の姿が氷衛星の中に縮図として織り込まれている。この多様性が氷衛星の研究の原点として誰もが認めるところであるが、我々は特に地球との関連性に着目したい。氷衛星と地球の間には内部構造・構成物質に顕著な類似性が存在している。0）密度成層をしたマントル・中心核という分化した 2 層構造、1）表層部の硬いリゾスフェアと内部の柔らかなアセノスフェア、2）マグマ（融解物）の生成は固相融点よりも低い温度での多成分系 eutectic/cotectic な融解関係に支配、3）圧力誘起相転移の存在、4）マントル構成鉱物（ケイ酸塩と氷）のレオロジーの類似性。これらの類似性を通して、地球が経てきた進化の道筋が現在の多様な氷衛星の中に埋め込まれている。このような視点に基づいて氷衛星の現在の姿の研究（探査結果）から地球の歴史を読み解く、というものが我々の基本的な姿勢・研究戦略である。地球の進化の初期段階はほとんど痕跡が残されていないために、氷衛星の広大なコレクションの中に対応するもの見つければ地球科学の新しい展開に結びつくと期待される。

■ 本意見書の内容（テキストおよび図表）をパネルリーダー並びに事務局がパネル討論と各種報告書へ引用することについて承諾しますか？（いずれかに○）

- 承諾する 承諾しない

■ （上で「承諾する」に○をされた方のみ）引用時には協力者リストを付加する場合があります。協力者リストに氏名を公表することを希望しますか？（いずれかに○）

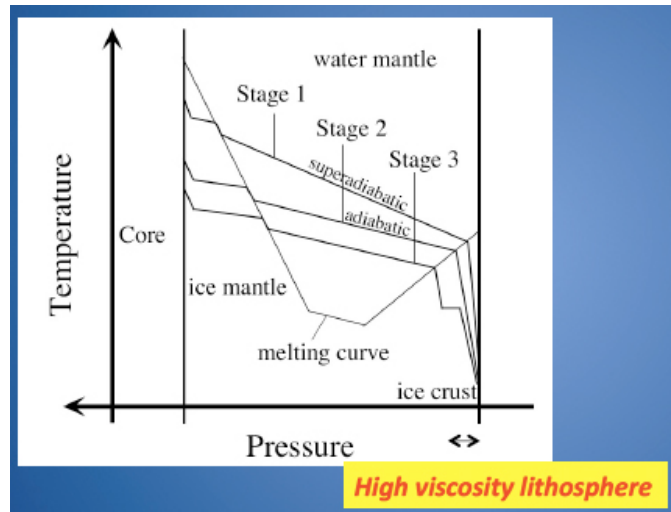
- 希望する 希望しない

・自由記述 (3 ページ以内, 図表の貼り付け可)

■類似点の補足:

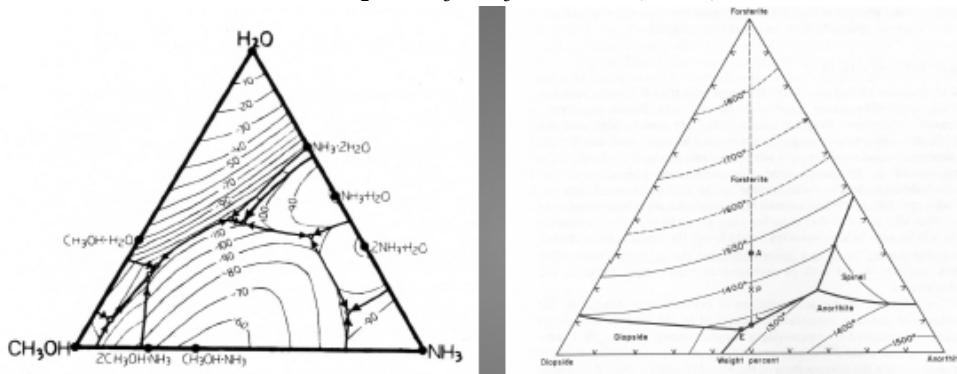
1) 表層部の硬いリゾスフェアと内部の柔らかなアセノスフェアという対比

氷衛星では表層部の氷 Ih 相の融点の負の圧力依存性、および粘性率の強い温度依存性を反映して表層部は極めて高い粘性率を有するリゾスフェアが存在している。多くの物質では粘性率は融点で規格化した温度 (Homologous Temperature) に依存するために低融点の高圧下では粘性が著しく低下し、アセノスフェアを形成する。地球の場合は融点の圧力依存性と温度勾配との関係から同様の構造: リゾスフェアとアセノスフェア、が実現されている。これは表層のテクトニクスを考える上で基本的な構造ユニットであると同時に、天体の熱輸送・冷却過程を支配するものでもある (リゾスフェア:伝導、アセノスフェア:対流)。



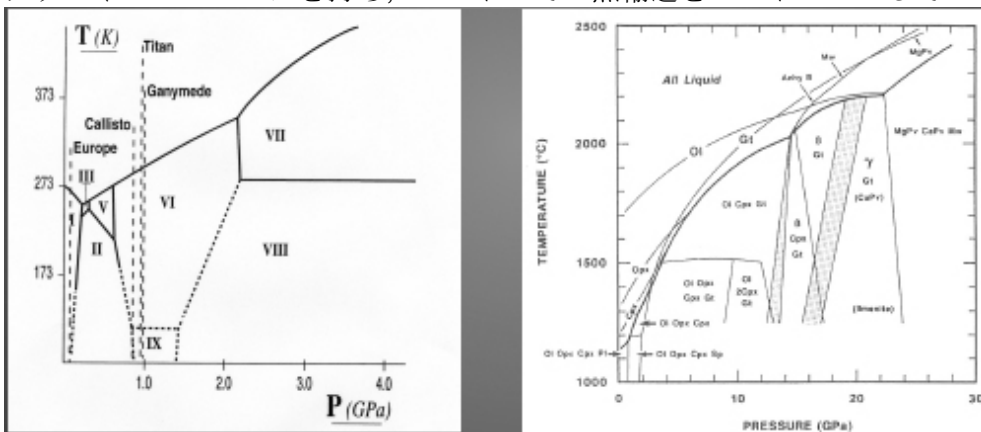
2) マグマ (融解物) の生成

地球の場合、火成活動の生成物であるマグマの組成や生成温度はケイ酸塩多成分系の Eutectic/Co-tectic な融解関係に支配されている。すなわち固相鉱物の融点よりも遙かに低温で固相の平均組成とは異なった成分のマグマが形成される。このプロセスが地球の化学的分化を支配している。氷においても炭酸塩・硫酸塩・アンモニア・アルコール・メタンなどの第 2 成分、第 3 成分が関与し、同様な融解関係が存在している。氷衛星の内部構造進化、化学分化から地球の普遍性・特異性を明らかにできる。下図左側は H₂O-NH₃-CH₃OH の融解関係、右図は Fo-Di-An の融解関係である。



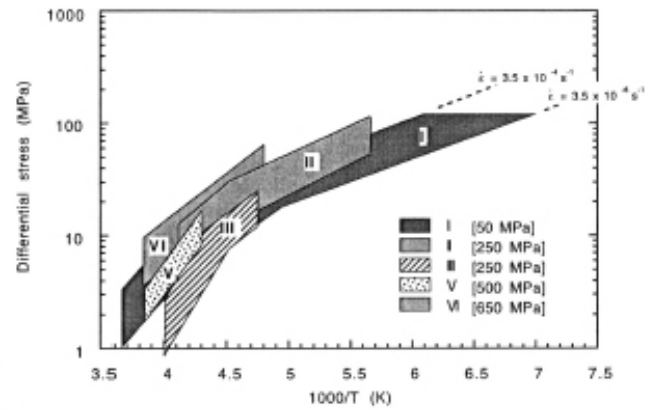
3) 圧力誘起相転移の存在

大きな氷衛星では高い内部圧力のために複数の高圧氷が存在しており、地球のマントルでのケイ酸塩鉱物の結晶構造相転移ときわめて類似している。この相転移はケイ酸塩鉱物と同様に正負のクラペイロンスロープを持ち、マントルでの熱輸送をコントロールしている。



4) 氷とケイ酸塩鉱物のレオロジーの類似性

氷もケイ酸塩鉱物（地球のマントルの主要構成鉱物であるオリビンなど）も、ともにそのレオロジーは対応温度領域では次数3のべき乗クリープ則を示す。また両者ともに敏感な温度依存性を示す。これらのことはマントルの熱構造（対流に支配される）やテクトニクスが地球と氷衛星では似たものであることを示唆する。



■氷衛星と地球の「類似点と相違点」

氷とケイ酸塩には多くの類似点が存在するが、決定的な違いが存在する。それは長寿命放射性元素（熱源元素）の存在量である。ケイ酸塩岩石には Lithophile 元素である U, Th, K が含まれるが、これらは水・氷中には存在しない。地球においてはマントルは大きな熱源であり、45 億年というタイムスケールで考えるとこれらの元素の崩壊の熱による加熱と枯渇による加熱減速が地球の内部活動度を大きく支配している。一方氷衛星のマントル（氷部分）には熱源が存在しないために、低いケイ酸塩濃度の天体（小さなケイ酸塩中心核を持つ分化天体や低密度の未分化天体）では冷却が進行する。また主惑星に近い軌道にある氷衛星では、潮汐加熱が地球では想定されない熱源として重要である。潮汐加熱がどこで起きうるかは内部構造に敏感に依存するため、現時点で詳細は不明である。厚い氷マントル層が最も有効なエネルギー散逸の場として想定され、その場合は放射性元素の熱源を有している地球のマントルとのアナロジーが成立する。

■地球における「プレートテクトニクス」の特異性

地球におけるプレートテクトニクスというスタイルは惑星全般を眺めると極めて異例なものであり、どのような条件で成立しうるのかは固体地球科学の最大のテーマの一つである。プレートテクトニクスの確立以降30年以上にわたりこの問題は追究されてきたが、本質的な進展は見られていない。地球に囚われすぎている現在の視点を転換し、氷衛星の多様性の中でプレートテクトニクスの成立条件を再考察してみることは大いに意味のあることである。かつての Ganymede や現在の Europa はプレートテクトニクスに近いスタイルの活動（H₂O を中心とした揮発性（低融点）物質が駆動するテクトニクス）をしており、鍵を握っていると思われる。

■氷衛星探査で注目する研究テーマ：

地球との類似性・相違点という視点から氷衛星の探査の着目点をいくつかリストアップする。

1) 内部海の形成・寿命・進化・構造・化学進化

内部海がどのように維持され（寿命）、固化・消滅していくのかは、地球のマグマオーシャンの進化を考える上で重要な指針となる。現在内部海を維持している Europa, 固化した Ganymede, グローバルかローカルかの議論が進む Enceladus など、多様な氷衛星と地球との対比が新たな視点を提供しよう。またシリケート層と内部海が直接に接する Europa と、シリケート層の海の間に高圧氷層が存在する Ganymede とでは、内部海組成の化学的進化が異なっている。内部海の化学組成の多様性も新たな注目点である。

2) 内部海・表層氷層の作り出すテクトニクススタイル

いくつかの氷衛星で存在が予測されている内部海は、表層のテクトニクスに独特の様式をもたらす。例えば亀裂や断層などの線状地形や、既存の地形が斑状に破壊された地形は、氷地殻の局所的な融解・破壊に伴う内部海物質の表出や、氷地殻内での対流運動がもたらす表面変形が主な原因と考えられている。しかし現状では理論モデル先行であり内部海の存否や氷地殻の厚さといった基礎情報が欠けているため、次期探査ではこれを検出することが最重要課題となる。また周回探査による地殻重力異常の検出や、赤外観測による hot spot（地殻の局所融解領域）の探索も、着

陸探査サイト探しの側面で重要なアプローチである。

3) 氷衛星の膨張・収縮メカニズムと表層テクトニクス

氷衛星表面に共通して見られる特徴として、表面が拡張あるいは伸張性の応力を受けて形成したと思われる地形の存在がある。この主な原因のひとつとして、内部海が固化することに伴う体積変化がある (Kimura et al., 2007, Manga and Wang, 2007)。Europa のような低圧相氷 (氷 Ih) のみが出現する天体では、内部海の固化に伴い衛星の膨張が起こり、従来の観測事実と整合的である。一方で Ganymede 等の高圧相氷も同時に出現する天体では、内部海の固化に伴って衛星全体が収縮し、表面には圧縮性の地形が生じるはずだが、従来の探査では画像の解像度や取得率の低さからそうした地形は確認されていない。次期探査では表面全体を均一かつ高解像度で撮像し全球的な地形分布と応力分布の推測とを照合して、氷衛星のテクトニクスを理解する必要がある。

4) 表層テクトニクスにおける潮汐変形的作用

氷衛星のテクトニクスは、前項で述べたような天体の膨張収縮だけで支配されるのではなく、その上に潮汐変形という比較的短周期の現象が重なって駆動されていると考えられる。このメカニズムの理解には、潮汐変形に関する理論モデルから予測される地殻応力分布と実際の地形分布およびそれらの年代を照合することが必須であるため、今後の探査では衛星の潮汐変形度を直接に検出することが最重要課題となる。これにはレーザー高度計や衛星周辺重力場の観測を通じた表面変位の測定が必要である。

5) 氷衛星の進化における潮汐加熱の貢献・役割

前項で述べた潮汐変形の測定は、衛星の内部熱構造進化の視点でも極めて重要な側面を持つ。潮汐変形に伴う内部での熱散逸は氷衛星の熱史における重要な熱源であるとともに、軌道進化とのカップリングを通して衛星系の進化全体を支配する (潮汐で駆動されるシステムとしての重要性)。現状では潮汐散逸機構の理解や定量的な評価法は確立されていないが、まず潮汐変形度や表面熱流量を測定することでこの問題の解決に迫ることができる。

6) Cryovolcanism/Cryomagmatism のスタイル

表層が真空・低温状態にある氷衛星 (Titan を除く) ではどのようなスタイルの火成活動・火山噴火活動が起きうるのか明白ではない。表層画像からは粘性流動を示すような地形 (溶岩流に対応?) も示唆されているが、どのような条件下で可能なのか興味深い。液体層の表面に低温のために硬い固体膜が形成され、枕状溶岩のような流動が提案されているが、実験・シミュレーションでの物理的な検討が画像解析とともに必要である。

7) クレーター形状と内部構造探査

硬い氷リゾスフェアと柔らかなアセノスフェア、内部海の存在、表層部の impact-plow layer や未固結粒子層など力学的特性の異なる氷衛星の内部構造がクレーターの形成にどのように反映されるのか、また形成後の緩和過程にどのように反映されるのか、はクレーターの形状解析によって内部構造を探る研究の基礎となる。特に薄い氷層の下に内部海が存在する条件下でのクレーターの形状は重要な情報となる。

■参考文献:

Kimura, J., Y. Yamagishi, and K. Kurita, *Earth Planets and Space*, 59, 113-125, 2007.

Manga, M., and C. Y. Wang, *Geophys. Res. Lett.* 34, L07202, DOI: 10.1029/2007GL029297. 2007.