

特集「氷衛星」

氷衛星, その多様性と進化

山岸保子¹, 栗田 敬¹

1. 序～氷衛星研究の意義～

外惑星系には、氷が主要な構成物質として存在する衛星があり、これらを総称して氷衛星と呼ぶ。氷衛星はその数がとても多い。また非常に様々な表面の形態や物理的性質をもつことから極めて大きな多様性を示し、多くの研究者を魅了してきた。「多様性」が氷衛星を語るときの最も適したキーワードである。今日までの氷衛星に関する主要な情報源はボイジャー1・2号およびガリレオの3機の探査機であり、更にそのもたらす情報の大部分は表面形態の画像ではない。地球、月、火星といった天体と比較すると我々の有している情報量は極めて少なく、科学的な研究対象としてどこまで耐えうるのか疑問を呈する向きもあった。

現在進行中のガリレオによる木星系の探査は、ガリレオ衛星においてボイジャーが示したものよりも更に広い多様性を明らかにし、科学的興奮を引き起こしている。そのエキゾチックな表面画像は見るものを魅了し、科学的興味を刺激する。だが同時に、それらは単なる物珍しさだけではなく、本質的に重要な意義を持っていると我々は考えている。氷衛星の示す大きな多様性の幅の中に地球や他の惑星を対置させることにより、今まで個別的な現象として認識されてきたものの関連が明確になり、より本質的な理解に繋がる可能性があると考えからである。

本稿の目的の一つは、このような認識のもとに氷衛星の研究が地球などの惑星の構造や進化と言った

問題にどのように関わっているのか、解説を試みることである。

2. 氷衛星観測の概略

氷衛星の最大の特徴は、表層状態・内部構造・構成物質等の様々な点における多様性の大きな幅である。しかもその多様性の幅は観測が進めば進むほど拡大しており、我々にはまだ、氷衛星に対して共通認識というものがほとんど存在しない。したがって現在までのところ、氷衛星を統一的に論じる視座というべきものは見当たらない。そこでまず、過去の観測結果を紹介することによりその多様性とはなにかを浮き彫りにする。

2.1 ボイジャー1号、2号による観測

ボイジャーによる観測は外惑星系の研究に対しエポックメイキングな情報をもたらした。だがしかし、その打ち上げは1977年、すでに今から約20年以上も前となる。木星系への到達は1979年、土星系が1980年。ここで1号、2号の行く手はわかれ、2号は1986年天王星接近、1989年海王星接近を果たした。しかし、残念ながらついに冥王星とは会い見えることはなかった。氷衛星に関して言えば、その最大の成果は大量に撮影された衛星表面の画像データの入手であろう。これら画像データにより、初めて氷衛星の表面が白日の下にさらされ、なおかつそれまで予測されていた氷衛星像がことごとく覆されることとなった。

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻

まず観測された氷衛星のほとんどの、過去、何らかの内因的活動がおき形成されたと考えられる地形が発見された。特筆すべきは、土星や天王星系に存在する非常にサイズの小さな衛星にもこれらの地形が存在したことである。ボイジャー以前は、いくつかのサイズの大きなものを除くと、多くの氷衛星にはそのサイズの小ささと外惑星領域の低温によって何れの内部活動の形跡も見えないであろう、と考えられていた。これら発見された地形の形態は、多くの衛星に共通したものもあれば、衛星ごとにまったく個性あふれるものも存在し、その形成の活動源は未だ明らかにされていない。共通して見られるものとしては、引っ張り応力により形成されたと考えられる全球規模の線状地形や、衛星内部から物質が上昇して表面にあふれ、これにより更新されたと考えられる地域の存在があげられる。圧縮力によって形成されたと認定される地形は、今のところほとんど発見されていない。したがってこれらのことは、表面地殻形成後、体積膨張を生じるような何らかの現象が一般的に起こったことを示している。

ボイジャーによって観測されたすべての氷衛星の表面地形についてここで述べることはしないが、ポイントとなるいくつかの氷衛星について簡単にふれる。まず、太陽系内最大の衛星である木星の衛星ガニメデは、年代の大きく異なる二つの地表を持つ。非常に古くクレータに覆われた地域と比較的新しく線状地形に覆われた地域である。土星の衛星エンセラダスはガニメデと非常に類似した地表を持つが、その半径はガニメデの10分の1にも満たない。一方、同じ木星の衛星カリストは、サイズ・岩石成分の存在量の値がほとんどガニメデと類似しながら、その表面はクレータに覆われ、何れの内部活動の形跡も示さなかった。やはり同じ木星の衛星エウロパは、非常に近年更新されたと考えられる地表をもつ。このことは、エウロパが氷衛星の中で最も活発な活動をしている(た)ことを示しているが、そのサイズはガニメデ・カリストよ

り半径で約1000km小さく、なおかつ土星・天王星の衛星より約2~8倍大きい。

2.2 ガリレオによる観測

ボイジャーによる探査により、氷衛星は一躍惑星科学の中で重要な研究対象となり一分野を形成するに至った。しかし、その内部に関する情報は平均密度を除いてほとんど手に入れることができなかった。そのため、どうしてもその後の研究報告はモデル依存性の高いものに終始し、ボイジャー観測開始から実に20年の間、氷衛星の研究は統一見解が不在のまま発散していると言える状況下にあった。しかし、1995年に木星系に到達したガリレオは、ボイジャーと同様にその観測の多くを画像撮影に割くものの、内部構造に拘束条件を与えるいくつかの重要な情報ももたらした。

まずガリレオによる重力場の観測は、ガニメデとエウロパは岩石コアと H_2O 殻の、少なくとも二層に分化していること示した。なおかつ、鉄のコア、岩石の下部マントル、 H_2O の上部マントルの三層に分化したモデルも観測データのパラメータ内におさまることが明らかとなった [1, 2]。一方カリストは、ガリレオの一回目の最接近時に記録された重力場データから、内部は分化しておらず岩石と氷が均質に混合しているという構造が提示された[3]。このカリストの構造は、続く複数回の最接近時のデータを利用した再見積りにより、部分的には氷と岩石に分化していると訂正された[4]。加えて、ガリレオに搭載された木星磁場計測器の記録によると、木星磁場はガニメデにより非常に強い擾乱を受けていることがわかった。この観測に基づき、ガニメデには自転軸に対しおよそ10度傾き赤道付近で750nTの強度を持つ磁気双極子による固有磁場が存在していることが明らかとなった[5]。一方、エウロパとカリストについては非常に弱い擾乱は記録されたものの、ガニメデのような自身が形成する磁場は存在しないことがわかった[6, 7]。

ボイジャーに対しはるかに高解像度を誇る画像デー

タは、特にエウロパの全く新たな表情を我々に見せてくれた。ボイジャーの乏しい画像数に比べると、その数は膨大で、かつ現在も着々と送られ続けている。これら画像からは、エウロパに対し非常に多くの新たな知見を得ることができる。それら全てをここで逐一報告するのは不可能だが、やはり最も衝撃的だったのは、「流水地形」状の構造の発見であろう。これは地球の極地域にみられるバックアイスと非常に良く似ている[8]。この類似地形の発見がなぜ衝撃的であったのかは後に述べる。他に、あたかも液体の水が流れ、以前に形成された地形を塗りつぶしたと見受けられる地表部も発見された。これは、マグマ物質が水というまさに氷衛星の異端性を良く示す「低温火山活動」の痕跡だと考えられている。しかしエウロパの表面という低温・低圧環境下で水が液相を保ったまま流れることができるかはまだ疑問の余地が大きい。この低温火山活動の存在を指示する別の証拠と考えられているのが、直径5～10kmという小さなクレータ状の構造物である[9]。つまり、これらは隕石孔ではなく火口であるとの解釈であるが、現在のところ共通認識には至っていない。

3. 観測がみつつけた問題

以上のようにボイジャー1・2号及びガリレオの観測により、我々が最も親しんだ岩石型惑星・衛星とは全く異なる氷衛星の世界が広がった。その世界は岩石型天体の研究から得られた常識が簡単には通用しない、まさに「多様」な場所であった。この「多様」と称される理由の一端を以下に述べる。

3.1 氷衛星の地殻活動

まず表面地形に残された内部活動の痕跡は、一見相矛盾する傾向を示す。なぜなら、痕跡から予測される内部活動の継続時間や活発度は、衛星の大きさと単純な比例関係を示していないからである。

天体の内部活動は、利用できるエネルギー源の量及び熱輸送効率で決められる。一般的に、衛星や惑星の有する熱源は、集積形成時や内部分化による重力エネルギーと放射性核種の壊変によって得るエネルギー、及び他の天体から受ける潮汐により得るエネルギーの3種類が主なものである。得られる集積エネルギーと放射性核種の壊変エネルギーは、その天体の大きさと構成物質中の岩石成分の割合に比例する。そのためこの2種のエネルギーのみが働いている天体では、サイズと内部活動の継続時間は比例関係にあると予想される。また表面積と体積の関係により、小さな天体では発熱よりも外部への熱輸送、即ち冷却が有効に進むと考えられる。これらのことを結合すると、小さな氷衛星は、誕生後非常に短時間のうちに熱的に死んだ状態に達すると予想される。

しかしながら、繰り返して述べてきたように氷衛星の表面画像はこれら予測を大きく裏切るものであった。ボイジャー以前には「冷え切った静かな天体」と考えられていた土星・天王星系の小さな氷衛星～中には半径が200kmに達しないものも含む～に何らかの内部活動の痕跡が発見された。ある小さな氷衛星の地表の年代は、最大の大きさを誇るガニメデよりも若い可能性もある[10]。

残る熱源の潮汐エネルギーは、衛星のサイズよりも軌道要素によりその大きさが決まる。この潮汐エネルギーを得ることのできる軌道要素を持つ天体は非常にかぎられている。故に、内部活動の発生・継続時間と衛星のサイズに関するパラドックスを、その原因の全てを潮汐エネルギーに押し付けて説明することは不可能である。

3.2 ガニメデに融解鉄のコア？

ガリレオの観測はガニメデに固有磁場が存在することを明らかにした。このことは地球の磁場の形成から類推すると、融解鉄のコアが衛星内に存在していること、加えてダイナモが駆動されていることを示唆する。

氷衛星の場合、もし氷地殻下に内部海が存在すれば誘導磁場を形成することも可能である[11]。しかしガニメデにおいて観測された磁場の強度・方向は融解鉄コアの存在を支持するものであった。

ガニメデは大きく、その岩石コアも月に匹敵するサイズを持つ。しかし月や火星、水星等の研究から、月サイズの天体が大きな融解鉄のコアを持つとは想像しにくい。過去の様々な形成モデルの研究により、ガニメデサイズの大氷衛星は、集積エネルギーによって衛星内の大部分の氷が融解し、岩石コアと水のマントルに分化したと考えられている[12]。しかし、融解鉄のコアを形成するには、集積エネルギーでは不十分であるとも見積もられている。一方形形成後、放射性核種の壊変エネルギーによって衛星は加熱される。しかしこの熱は衛星内で駆動される対流により効率よく輸送されてしまう為、岩石コア内の温度は十分上昇することができないと考えられてきた[13, 14, 15]。従って磁場の存在はこれらの予想とは相矛盾しており、前段とは別のパラドックスを呈している。

これら2つのパラドックスは、我々の氷衛星の内部プロセスの理解が未熟であること、重要な点を未だ把握していないことを的確に示している。

3.3 エウロパに内部海？

一方、衝撃的と冠したエウロパ表面上の流水地形の発見は何を意味するのであろうか。これはその地球上に見受けられるものとの類似性から、氷地殻の下に現在も融けた水の層、内部海が存在することを示唆する[8, 16]。また、エウロパによって受けた木星磁場の擾乱の方向・強度は、この内部海が存在によって発生する誘導磁場を用いれば、非常に良く説明できる[11, 17]。もし内部海が存在が事実だとすれば、エウロパは液相の水が存在する唯一の地球外天体となる。水の存在は生命の誕生の不可欠要素の一つであり、その存在の有無は惑星科学のみならず生命科学の分野にも大きな影響を与えうる。生命の存在の可

能性以外にも、この内部海は低温火山活動のマグマの供給源の有力候補となり、活動の理解につながる。

エウロパは集積加熱、もしくは集積後の放射性核種による加熱により岩石成分と水に分離し、衛星史の初期において氷地殻下に水のマントルが存在したと考えられている[18, 19]。だがしかし、この水のマントルは氷地殻内で駆動される対流によりすみやかに固化してしまうであろうと予測されてきた[13]。エウロパの軌道要素は潮汐エネルギーが得られる可能性のある値を持つため、この余剰熱源によって初期に形成された内部海が存在は維持されるという意見も多く提案されている[20, 21]。しかしこの潮汐エネルギーをもってしても維持はむずかしいとの報告もあり[22]、決着は着いていない。このような状況下で内部海が存在を強く指し示すような観測結果が報告されたことにより、エウロパ内の熱的状态の研究は、ますますその混迷の度合いを深めたと言える。

このことも、やはり氷衛星における理解不足を示している。衛星の、特に内部の熱的状态には、なんらかの独特の物理機構が働いている可能性があるということを示唆している。

3.4 謎を解く為には

なぜ氷衛星には、サイズに一意に依存しない内部活動が存在するのか？本当にエウロパには内部海があるのか？もしエウロパに内部海が存在するのならば、より大きい衛星のガニメデに、なぜその存在を示すような構造が発見されていないのか？エウロパがサイズの違いを凌ぐほど高温状態におかれているのであれば、なぜエウロパには固有磁場が存在しないのか？ガニメデに本当に融解鉄のコアが形成できるのか？ガニメデとカリストという、双子のように類似点をもつ衛星の全く異なる挙動の原因はなんなのか？

ボイジャー1・2号、及びガリレオという3基の探査衛星の情報により、氷衛星は「多様性」という謎を我々に与えつつけてくれている。各々の謎の根源を追求する

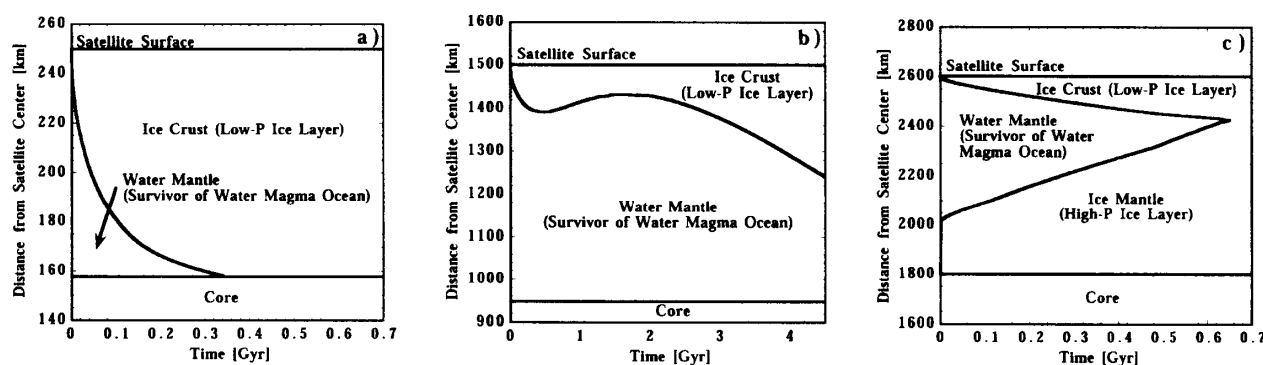


図1 水マントルの固化に伴う、水-氷境界面の位置の時間変化。ただし、衛星内の岩石の存在比は50%と一定。a) 衛星半径、 $R_s=250\text{km}$, b) $R_s=1500\text{km}$, c) $R_s=2600\text{km}$ 。

には、何よりもその前にこれら氷衛星の内部プロセスの理解を深めることが必要である。その為には、衛星の辿ってきた熱的状態の時間変化～熱史～に働く独自の物理機構を探し出すことが重要である。このことは、氷衛星の詳細な熱史の再現の必要性を意味する。

そもそも氷衛星を氷衛星たらしめているのは大量の H_2O の存在であり、この成分がもつ独自の物性が熱史に多大な影響を与えていることを予測するのは難しくない。特に、氷のもつ融解曲線はその低圧領域では圧力に対し負の傾きを持ち、高圧領域では正の傾きを持つという特異な形を示す。

密度になおせば低圧氷は液層よりも軽く衛星上部に安定して存在できる。このことは、岩石系のそれが圧力に対し正の傾きを持つことと大きな対照性をもつ。よって岩石型天体の熱史とは大きく異なるふるまいをもたらす。

以上のような概念に基づき、次章では、 H_2O 独自の物性の影響を考慮した熱史と、伴って生じる内部構造進化の再現の一例を示す。

4. 熱史と内部構造進化

以下に筆者による、大きさ・岩石の存在量が異なる様々な氷衛星の熱史計算の結果の一例を示す。得られた衛星の内部構造進化は、氷のもつ融解曲線の特異性を極めて強く反映するものであった。紙面の関係

上結果のみにとどめ、その詳細な計算方法、モデル、使用した物性値等については述べる。ただし今回は、すべてのサイズの衛星について集積中に岩石コアと水のマントルに分化すること、及び熱源は放射性核種の壊変エネルギーのみであることを仮定した。前述のとおり、氷の融解曲線の影響を正しく反映させるため、全体のエネルギー収支ではなく局所熱輸送を丹念に見積もり衛星内のすべての領域を連結した熱史の数値実験を行った。このとき対流がおきている領域の熱流束は混合距離理論[23, 24]を用い見積もった。

4.1 水マントルの固化

氷の融解曲線は圧力に対し低圧領域では負、高圧領域では正の値を持つ。そのため氷衛星の進化モデルは、そのサイズ、岩石成分の存在量によっていくつか異なるケースに分類できる。大氷衛星内では、コアの表面は高圧氷領域に属するため、水のマントルの固化はコア表面から地表に向かう高圧氷層の成長と、衛星表面から内部に向かう低圧氷層、即ち氷地殻の成長の同時進行による。衛星のサイズが小さくなる、もしくは大氷衛星でも岩石の存在量が増えると、コア表面の圧力が下がり、固化の進行は氷地殻の成長のみが主となる。

図1は水マントルの固化の進行状況を表したものである。各々の氷衛星は同じ岩石存在比を持ち、サイ

ズが大きく異なる。水マントルが完全に固化するまでにかかる時間は、一番サイズの小さい、半径が250kmの衛星で約3.8億年、最も大きく、半径が前者より一桁大きい2600kmの衛星は約6.5億年であった。ところが中間のサイズ、半径1500kmの衛星の水マントルは45億年たっても完全に固化することなく存在し続けた。この結果は、水マントルの寿命が、より大きなサイズの衛星のものより長くなるような氷衛星が存在することを示す。即ち、衛星サイズの増加に対する水マントルの寿命の減少という逆転現象が見られた訳である。他のサイズの氷衛星に対する計算結果をまとめると、このような逆転がおこる臨界のサイズが存在する。臨界サイズよりも小さいと、水マントルの寿命と衛星の大きさは単純な比例関係を示す。が、臨界値を超えると寿命は突然短い値を示す(図3)。次に、衛星のサイズを一定とし岩石の存在比、即ち岩石コアのサイズを変化させた場合の計算結果の一例を図2に示す。この場合も、岩石存在比においてある臨界値が存在することがわかる。この臨界値以下の値をもつ氷衛星では、水マントルの寿命は岩石存在比に対し逆比例の関係を示し、臨界値を挟んで寿命が急激に長くなる(図3)。これらサイズ臨界値、岩石存在比臨界値は、氷の相図に従った水マントル固化の進行パターンの違いと一致する。臨界値を挟んで、進行パターンは氷地殻のみの成長による場合と、氷地殻・

高圧氷層が同時に成長する場合に対応する。

それでは、なぜ水マントル寿命が固化の進行パターンの違いで激しく長短するのかを、固化の進行のプロセスの違いから考察する。水マントルの固化を最も特徴づけているものは上部からの氷地殻の成長である。融解曲線の圧力依存性が無視できない場合、一般的な物質はその傾きが正である為、固化は下部からの進行が主となる。この下部からの固化は融解層内の対流によって急激に進行する。ところが、上部からの固化の進行にとって、この融解層内の対流は逆に妨げとなる。そもそも氷地殻の成長は、低圧氷の融解曲線が負の傾きを持つことから、水マントル内の温度差を大きくし対流を活発化させる働きを持つ。

まず高圧氷が成長する系においては水マントル内で対流はほとんど駆動されない。もし激しい対流が生じて、高圧氷が急激に成長することにより、水マントル内の温度分布は非常に短時間に断熱温度勾配近辺に落ち着くことが可能な為である。なおかつ、岩石コア内での放射性核種の壊変による発熱は、高圧氷層の存在が緩衝剤として働くため水マントルに効率よく輸送されない。そのため、水マントルの固化は氷地殻内の熱輸送効率によってのみ支配される。氷地殻内の熱輸送は、自身の成長とともに伝導から対流へと比較的短い時間で移り変わる。よって、固化の時間スケールは氷地殻内の固相対流により決定される。

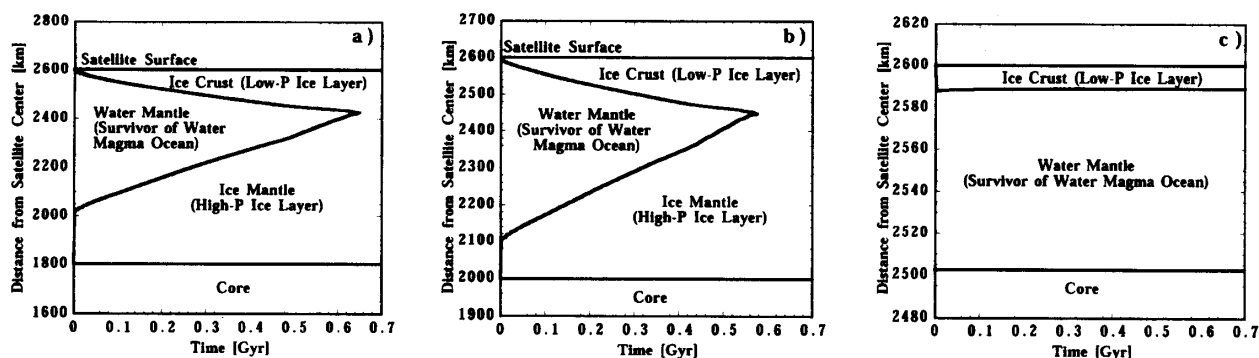


図2 水マントルの固化に伴う、水-氷境界面の位置の時間変化。ただし、衛星サイズを半径2600kmと一定にし、岩石存在量、即ち岩石コアのサイズをパラメータとした。a) 岩石コアの半径、 $R_c=1800\text{km}$, b) $R_c=2000\text{km}$, c) $R_c=2500\text{km}$ 。

一方、氷地殻の成長のみにより水マントルの固化が進行する系では、岩石コア内の発熱が水マントルを直接加熱する。そのため水マントル内では、常に弱いながらも対流が生じている状態となり、氷地殻の成長は妨げられる。何故弱い対流かと言うと、水マントルの加熱の強弱を決める岩石コア内の熱輸送は、ほとんど伝導のみによって支配されるからである。もちろん、後に述べる通り岩石コア内でも対流が駆動される時もあるが、その場合も対流の開始まで長い時間がかかる。すなわち加熱は非常に静かに行われ、なおかつ岩石コアそのものが冷却に転じるまで続くという長いタイムスパンを持つ。つまり水マントルの固化はコアによる加熱という非常に長い時間スケールにより支配されている。以上をまとめると、水マントルの寿命は高圧氷が成長しうる系に比べ、氷地殻しか成長しえない系の方がはるかに長い値をもちうる。

これらのことは、氷衛星における水のマントルの固化は、本質的に氷がもつ相図の特性によって支配されているということを示している。水マントルの寿命で示される衛星の冷却過程は、大きさや岩石成分の存在量によって単純に記述することはできず、時にはパラドキシカルな傾向を示す。さらに、今回の熱史の計算において、現在も水のマントルが氷地殻下に生き残って存在するという衛星のパラメータ領域が存在する。エウロパの大きさ、岩石成分の存在量はこのパラメータ領域にあり、ガニメデは領域外に位置する。換言すれば、エウロパには特に潮汐加熱等の新たな熱源を考慮しなくても現在氷地殻下に内部海が存在可能、かつガニメデには存在しないというシステムがあることが示された。

4.2 岩石コアの分化

一方岩石コア内の熱的状态であるが、あるサイズ以上、ある岩石成分存在量をもつ衛星であれば、鉄と硫化鉄の共融点以上に加熱され、なおかつその後衛星史の比較的后期において対流が駆動されること

がわかった。しかしサイズの、対流が発生するような岩石コアを持つ氷衛星の数は非常に限られる。その一例を図4に示す。このようなパラメータを持つ衛星のコア内の熱史の特徴は、共融点に達するのが対流の駆動以前である点と、対流が駆動された後もしばらくの間は引き続き温度が上昇しつづけたという点である。対流の発生直後は、その領域がコア内の上部付近に制限される。これは中心部では重力が小さいので十分な浮力を稼ぐのが難しい為である。このような場合、発熱量全てを効率よく輸送することはできない。故に対流発生後も温度は上昇しつづけ、この温度上昇に伴い対流領域も拡大しやがて熱輸送量が発熱量を上回るようになる。共融点の温度に達してからコア内全体へ対流領域が拡大する迄に比較的長い時間かかることは鉄成分の融解が充分進行することを示す。大きさと岩石成分の存在量から、ガニメデでは鉄成分の融解と対流の駆動が充分可能である。しかしこの鉄成分の融解は、岩石コア内のシリケート成分と鉄成分の体積存在比を考慮すれば必ずしも鉄とシリケート

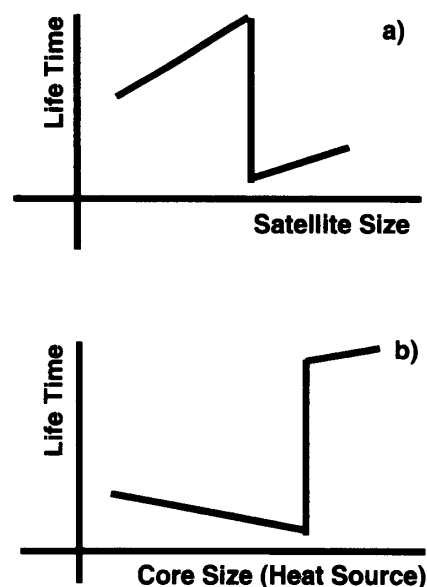


図3 水マントルの寿命のサイズ、岩石存在比に対する依存性を示した模式図。a) 衛星のサイズをパラメータとし岩石存在比を一定とした場合。b) 衛星のサイズを一定とし、岩石存在比をパラメータとした場合。

の分化を意味するとは言えない。よって、この鉄成分の融解やその後の対流などにより融解鉄のコアが形成されるかどうかは、きちんと「岩石コアの分化」を考慮した計算を待たなくてはならない。

5. 全ての謎は解けたか？

衛星の熱史と内部構造進化が、今までの常識とは大きく異なるプロセスを辿ること、その独特の物理機構は水の持つ物性に起因していることを示した。つまり各々の個性によってのみ語られてきた氷衛星の熱的進化は、氷の融解曲線の特徴をもとに系統的に整理することが可能となった。このことにより観測は理論的にある程度説明しうる。ただし、残念ながら今回の計算結果により全ての謎に明確に答えが与えられた訳ではない。

まず第一に、初期状態を岩石のコアと水のマントルの2層からなるとの仮定は、小さい氷衛星に対してはあまり適切であるとは言えない[25]。つまり非常に「熱い」初期状態を採用したと言える。加えて、今回示した熱史計算にはコア内の分化の状況は組み込まれて

いない。よって前述の通り、鉄成分が十分融解可能な岩石コアであっても、融解鉄のコアが形成できるのか、また形成された融解鉄のコアが現在も融けているのか、その中で固有磁場が形成可能なほどの対流が発生しているかどうかについてはいずれも確かなことは言えない。最後に、今回の計算ではガニメデとカリストの違いは、集積時の状態の違いを暗に仮定しており、なんら示唆を与えることはできなかった。

6. 比較惑星学における氷衛星の意義

ここでは氷衛星と対比させて、岩石型惑星の内部構造の進化プロセスの理解を試みる。まず集積中に形成される氷衛星の水のマントルとは、岩石型天体においてはとりもなおさずマグマオーシャンに相当する。マグマオーシャンの固化の進行がいったい何によって支配されているのか、考察を進めよう。

そもそも氷衛星の水マントルをマグマオーシャンと言い換えたとき、驚くべきはその寿命の長さであろう。氷衛星の内、水マントルの寿命が短いシステムである高圧水が存在する系であっても、その寿命は数億年に達する。短い寿命しかもちえない岩石型マグマオーシャンとの違いは何であろうか？岩石型天体においては、マグマオーシャン内で起こる激しい対流によって固化は進行する。この対流の駆動と固化の促進の本質を理解する為、氷衛星と対比して考える。何度も述べてきたように、水マントル=水のマグマオーシャンの固化を強く支配したのは氷の融解曲線の特性であった。即ち、融解曲線の圧力勾配が正、負と両方の値をとる領域が存在することと、地殻を形成する低圧氷(氷I)が液相よりも小さな密度を持つことである。一方、岩石型マグマオーシャンの構成物質のソリダス・リキダスの圧力勾配は正の値をとり(水を含んだ系や超高圧下では負になり新たな視座を提供してくれる)、なおかつ固体は液体より大きな密度をもつ。

融解曲線の傾きが正の値のみしか取り得ないとい

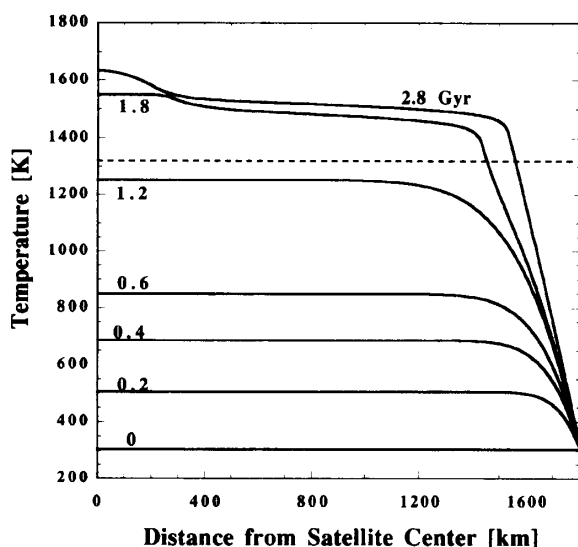


図4 ガニメデサイズ(半径2600km、コア半径1800km)の衛星の岩石コア内の温度分布の時間変化。

うことは、融解層内の温度分布は常に断熱温度勾配よりも大きな傾きをもち、対流が駆動され続けることを意味する。なぜなら、対流が駆動されるとその下部より部分融解層が急激に成長するが、水のマグマオーシャンと異なりどんなに成長しようとも融解層内の温度分布は断熱温度勾配をとりえないからである。故に、固化はこの融解層内の対流の時間スケールで進行し、非常に短時間で完全に融解層は消失する。加えて、固相が液相より重いと言うことは、マグマオーシャンの表面に形成される地殻は安定に存在・成長できず、ある程度成長すると自身が沈むことにより直接天体内部を冷却する。何れの点もマグマオーシャンの固化を促進するように働く。岩石型マグマオーシャンの寿命が非常に短いのは、対流そのものを駆動する物理が構成物質の融解曲線の制約を大きく受けていることから明瞭に理解できる。

岩石型マグマオーシャンではソリダス・リキダス間の温度間隔が大きく部分融解層の固化も重要な問題である。氷衛星においても低温で形成された場合の NH_3 , CO_2 , CH_4 といった成分が加わった系, NaCl , 炭酸塩, 硫酸塩などが加わった系等では大きな部分融解層が形成される[26]。部分融解層では熱輸送のモードに均質流体の対流以外に浸透流の熱輸送が加わり、流体・固体間の熱輸送効率の大きなギャップを埋める。完全固化にかかるタイムスケールは単純な固液転移にくらべ大幅に長くなる可能性を示し、様々な問題に活路を開くかもしれない。

氷衛星と岩石型惑星を対比し、惑星・衛星一般のマグマオーシャンの物理の理解を試みた。もちろん岩石型天体の固化現象については、斜長石のようにマグマオーシャンよりも軽い鉱物が析出し地殻を形成する場合や、そもそもマグマオーシャン内で融解曲線の圧力依存性が無視できる場合など、個別的な状況が存在する。同様に氷衛星においても個々の衛星独自のシステムを無視した記述では理解しきれない観測事実も多数存在する。しかしながら個別的な状況に注

目する研究と同時に、一見大きく隔たった対象や現象を共通のスケールにのっとり比較・対照させ、位置づけを明確にすることにより従来の個別的研究では見えなかった特徴を明らかにする研究手法も有効である。氷衛星はその大きな多様性から「共通のスケール」としての視座を提供してくれる研究ターゲットであると我々は信じている。

7. 氷衛星に関する文献紹介

氷衛星を取り扱った成書として[27]がありガリレオ以前の研究が手際よくまとめられている。[28]は主として表面地形という観点から、[29], [30], [31]は火山活動という観点からかなりの部分を氷衛星の記述に費やしている。又 Univ. of Arizona Press の一連のまくら本 (昼寝の枕に丁度良い厚さを持っている、が重くて持ち歩きたくはない) にボージャーの観測結果、モデルがよくまとめられ、入門用論文としては最適である[32, 33, 34] ([35]:ボージャー以前)。しかし最近ぞくぞくと報告されるガリレオの探査結果はこれらの本の記述に収まりきらない新たな展開を見せている。その意味ではガリレオの Web Site (<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/>) から目が離せない。

ボージャーの観測報告の論文としては[36, 37, 38, 10, 39]が重要であろう。

ガリレオ報告の特集号を以下に記す。

- 1996, Science 274, 377-391: 画像と近赤外線観測結果等
- 1996, Nature 384, 535-545: ガニメデの磁場と内部構造
- 1997, Nature 387, 261-266: カリストの磁場と内部構造
- 1997, Science 276, 1,236-1,241: エウロパの磁場と内部構造
- 1998, Nature 391, 363-373: エウロパについて
- 1998, special issue on remote sensing of the

Galileo orbiter mission, ICARUS 135.

参考文献

- [1] Anderson, J. D. et al., 1996, Gravitational constraints on the internal structure of Ganymede, *NATURE* 384, 541-543.
- [2] Anderson, J. D. et al., 1997a, Europa's differentiated internal structure: inferences from two Galileo encounters, *SCIENCE* 276, 1,236-1,239.
- [3] Anderson, J. D. et al., 1997b, Gravitational evidence for an undifferentiated Callisto, *NATURE* 387, 264-266.
- [4] Anderson, J. D. et al., 1998, Distribution of Rock, Metals, and Ices in Callisto, *SCIENCE* 280, 1,573-1,576.
- [5] Kivelson, M. G. et al., 1996, Discovery of Ganymede's magnetic field by the Galileo spacecraft, *NATURE* 384, 537-541.
- [6] Kivelson, M. G. et al., 1997, Europa's magnetic signature: report from Galileo's first pass on December 19, *SCIENCE* 276, 1,239-1,241.
- [7] Khurana, K. K. et al., 1997, Absence of an internal magnetic field at Callisto, *NATURE* 387, 262-264.
- [8] McKinnon, W. B., 1997, Sight the seas of Europa, *NATURE* 386, 765.
- [9] Belton, M. J. S. et al., 1996, Galileo's first images of Jupiter and the Galilean Satellites, *SCIENCE* 274, 377-385.
- [10] Smith, B. A. et al., 1982, A new look at the Saturn system: the Voyager 2 images, *SCIENCE* 215, 504-537.
- [11] Kuramoto, K. et al., 1998, Probing Europa's Ocean by Magnetic Study, Proceedings of the 31st ISAS lunar and planetary symposium, 149-151.
- [12] Kuramoto, K., and T. Matsui, 1994, Formation of a hot proto atmosphere on the accreting giant icy satellite: implication for the origin and evolution of Titan, Ganymede and Callisto, *J. Geophys. Res.* 99, 21,183-21,200.
- [13] Reynolds, R. T. and P. M. Cassen, 1979, On the internal structure of the major satellites of the outer planets, *Geophys. Res. Lett.* 6, 121-124.
- [14] Cassen, P. M. et al., 1980, On the comparative evolution of Ganymede and Callisto, *ICARUS* 41, 232-239.
- [15] Kirk, R. L. and D. J. Stevenson, 1987, Thermal evolution of a differentiated Ganymede and implications for surface features, *ICARUS* 69, 91-134.
- [16] Carr, M. H. et al., 1998, Evidence for a subsurface ocean on Europa, *NATURE* 391, 363-365.
- [17] Khurana, K. K. et al., 1998, Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto, *NATURE* 395, 777-780.
- [18] Consolmagno, G. J. and J. S. Lewis, 1978, The evolution of icy satellite interiors and surfaces, *ICARUS* 34, 280-293.
- [19] Schubert G. et. al., 1981, Internal structure of the Galilean Satellites, *ICARUS* 47, 46-59.
- [20] Cassen, P. M. et al., 1979, Is there liquid water on Europa?, *Geophys. Res. Lett.* 6, 731-734.
- [21] Squyres, S. W. et al., 1983, Liquid water and active resurfacing on Europa, *NATURE* 301, 225-226.
- [22] Ross M. N. and G. Schubert, 1987, Tidal

- heating in and internal ocean model of Europa, NATURE 325, 133-134.
- [23] Sasaki, S. and K. Nakazawa, 1986, Metal-silicate fractionation in the growing earth: energy source for the terrestrial magma ocean, J. Geophys. Res. 91, 9,231-9,238.
- [24] Abe, Y., 1995, Basic equations for the evolution of partially molten mantle and core, In The Earth's Central Part: Its Structure and Dynamics (Yukutake, T. Ed.), Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 215-230.
- [25] Ellsworth, K. and G. Schubert, 1983, Saturn's icy satellites: thermal and structural models, ICARUS 54, 490-510.
- [26] Kargel J. S., 1991, Brine volcanism and the interior structures of asteroids and icy satellites, ICARUS 94, 368-390.
- [27] Rothery, D., 1992, Satellites of the outer planets, Oxford Univ. Pr.
- [28] Uchupi, E. and K. Emery, 1993, Morphology of the Rocky Members of the Solar System, Springer.
- [29] Frankel, C., 1996, Volcanoes of the Solar System, Cambridge Univ. Pr.
- [30] Mursky, G., 1996, Introduction to Planetary Volcanism, Prentice Hall.
- [31] Cattermole, P., 1996, Planetary Volcanism, 2nd ed., Wiley.
- [32] Burns, J. A. and M. S. Matthews, Eds., 1986, Satellites, Univ. of Arizona Press, Tucson.
- [33] Morrison, D. Ed., 1982, Satellites of Jupiter, Univ. of Arizona Press, Tucson.
- [34] Cruikshank, D. P. Ed., 1995, Neptune and Triton, Univ. of Arizona Press, Tucson.
- [35] Burns, J. A. Ed., 1977, Planetary satellites, Univ. of Arizona Press, Tucson.
- [36] Smith, B. A. et al., 1979a, The Jupiter system through the eyes of Voyager 1, SCIENCE 204, 951-972.
- [37] Smith, B. A. et al., 1979b, The Galilean satellites and Jupiter: Voyager 2 imaging science results, SCIENCE 206, 927-950.
- [38] Smith, B. A. et al., 1981, Encounter with Saturn: Voyager 1 imaging science results, SCIENCE 212, 163-191.
- [39] Smith, B. A. et al., 1986, Voyager 2 in the Uranian system: Imaging science results, Science 233, 43-64.