

エウロパの表面地形と内部構造・進化

木村 淳¹, 栗田 敬²

1. エウロパ・氷衛星・地球

1.1 エウロパの研究意義

太古の昔から豊富な水を湛えてきた地球は、生命の誕生とその多様な進化を可能にしたユニークな天体である。地球の他に多量の液体水を持った天体が存在するならばそれは生命誕生の謎を解く大きな鍵となり、地球の過去や未来の姿を推し量る貴重な比較対象にもなるだろう。その数少ない候補天体の1つが木星の衛星エウロパである。エウロパは表面を氷で覆われ、地球のような「岩石天体」とはかなり異なった天体に見える。エウロパを始めとする木星型惑星の衛星のほぼ全ては多量の氷を有しており、「氷衛星」としてグループ化され多彩な大きさと外見を持っている。エウロパはガリレオ探査機による最近数年間の調査から、氷衛星の中で最も魅力的な天体であることが明らかになった。表面には地球上で見慣れた構造もあれば甚だ奇妙に見える地形もあり、我々の想像をはるかに超える姿を見せていた。また観測と理論的研究の両面から、表面下には液体のH₂Oからなる全球規模の海、いわゆる「内部海」が存在する可能性が示唆されたのである。つまりエウロパ内部では液体層を保持できる熱的状态が実現しており、それを反映して表面の多彩な地形が作られたと考えられる。地球との共通点とエウロパ固有のシステムとを明確に区別し考察を深めることはまさに惑星科学という学問の本質であり、ひいては太陽系天体が持つ多様性の原因と意味の理解にも繋がるだろう。また内部海の存在可能性と合わせ、地

球から遠く離れた天体において生命発生の可能性を与える地球物理学的・化学的環境を探ることは、エウロパに対する最も重要な課題となる。

内部構造に関する情報が乏しいエウロパにあって、内部の熱的組成的構造を解明するための重要な情報源となるのは多彩な形態を持つ表面地形である。ガリレオ探査機はここ数年間の調査の中で、エウロパの複雑な表情を次々と露わにした。ガリレオが任務を終えようとしている今、エウロパに対して現在持ち得る知見を整理し明確に認識しておくことは大変に意義深いことである。本稿ではこのような観点に基づき、エウロパの表面地形解析に関する研究に焦点を絞った総括を行うとともに、内部海の存在を示唆する熱的モデルに関するレビューを行う。

1.2 内部海の存在とガリレオ探査

エウロパを取り上げる際に、「内部海」は最も重要なキーワードとなる。地上観測によって表面が主にH₂Oの氷で覆われていることや、3.02 g/cm³という平均密度からエウロパのH₂Oは天体質量の約1割に達することが分かっていた。それ以降長い間エウロパ内部に関する情報は手に入らなかったが、やがて訪れたガリレオ探査機による重力場観測によってエウロパの慣性率 J_2 は 0.346 ± 0.005 (MR²で規格化した値。Mはエウロパ質量、Rは半径。)であると判明した。この慣性率から、中心には鉄もしくは硫化鉄のコアがあり、次にシリケート岩石層、最も外側をH₂O層が覆う3層構造(図1)が妥当と考えられている[1]。H₂O層の厚さは80～170kmと見積もられて

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

² 東京大学地震研究所

いるが、固液間の密度差が小さいために慣性能率だけでは固液状態を判別することができず、内部海の有無を決定する直接的な情報にはならない。

H_2O 層の深部は果たして液体なのか、というエウロパに関する最大の問題に大きな示唆を与える観測結果は、探査機の磁力計からもたらされた。探査機がエウロパをフライバイした際に周辺での木星磁場を測定したところ、磁場の変動が捉えられたのである[2]。この変動はエウロパ内部に自転軸に対して90度近く傾いた磁気双極子の存在を考えることで説明でき、その双極子の向きは木星磁場の変動に従って変化していた。エウロパ内部に存在する電気伝導体が木星磁場の変動に応答して電流を生み、その電流が二次的な磁場を作り出したのが原因だった[3]。つまりこれは、エウロパ内部には地球の海水のように塩分を含んだ伝導性の良い液体が全球的に存在していることを強く想像させるものなのである[4]。

以上の点から推測されるエウロパの内部構造と

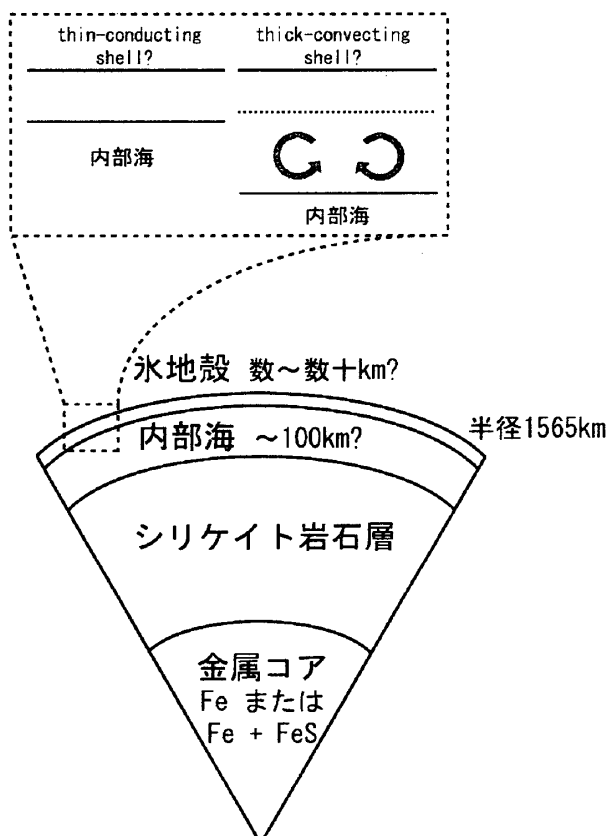


図1 慣性能率から推定されるエウロパの内部構造

多彩な表面形態とは、どのように関連付けられるのだろうか。次章ではこの点に着目しながら表面の地形を見ていく。なお本稿では、エウロパ最外部の H_2O の層のうち液体部を内部海、固体部を氷地殻と呼ぶことにする。氷地殻はある条件下では固相対流運動を起こすと考えられているが、この場合の対流領域をアセノスフェアと呼び、氷地殻上部の硬い領域をリソスフェアと呼ぶことにする。

2. エウロパの表面地形

我々が今日までにエウロパに対して得た情報のほとんどは、ボイジャー1号、2号とガリレオの3機の探査機によるものである。1979年に木星系に接近した2機のボイジャー探査機はエウロパから20万km以上離れていたが、そこから捉えた表面の画像には無数の線状模様や斑点状のシミの様な地形が存在し、逆に衝突クレーターは極めて少ないという特異な表情が映し出されていた。このことは表面を大規模に更新しクレーターを消し去るメカニズムが存在していたと解釈でき、研究者の関心を大いに集めた。

その後1995年に木星へ到達したガリレオ探査機は、数mから数百m/pixという高分解能で多地点の表面撮像を行った。ボイジャーによる画像では線と斑点にしか見えなかった表面の様子は、実は非常にダイナミックで変化に富むものだった。それらの地形は形態やアルベドの違い等から、線状のリニア(linear)、斑点状のカオス(chaos)、そして衝突クレーターの3種類に大きく分けられる。このようなエウロパ独特の地形の成因を解明するため、氷地殻で起こり得る諸現象に関してこれまでに数多くの研究がなされているが、エウロパでは地震波や重力異常の測定データのような地殻構造を決定できる直接的な情報が得られていない。そのため厚さ数十kmの“厚い地殻モデル”と数kmの“薄い地殻モデル”が提案され、それぞれのケースに則って地形の形成過程が議論されている。前者のモデルは氷地殻のレイリー数

が臨界値を超え固相対流が発生している、いわゆるアセノスフェアが存在するモデルである。それに対して後者の薄い地殻モデルは、内部発熱量が大きく地殻は薄いリソスフェアのみで構成され则认为。いずれのモデルもリニアやカオスの特徴に対する整合性と矛盾点とを合わせ持っており、地形の形成に関する体系的理解には不十分な点も多い。本節ではそれぞれの地形に関する外見的特徴をまとめ、これまでに提示されてきた形成モデルを紹介する。特に地形を見ることによって内部海の存在がどのようにして想像されるのかに注目していきたい。

2.1 衝突地形と表面年齢

大きな衝突クレーターがほとんど存在しないエウロパにおいて、衝突地形に関する情報はボイジャー時代にはほとんど得られなかった。ガリレオによって高解像度の画像が得られた結果、表面全体のクレーターの数は直径10km以上のものが約80個、20km以上のものは約20個程度と見積もられた。クレーターのサイズ個数分布とエウロパに衝突する天体の頻度推定から、表面の年齢を推定することができる。エウロパに衝突する天体として小惑星帯の小天体とカイパーベルト起源の彗星を想定し木星系における衝突頻度を計算したところ、衝突天体の大部分は彗星であり小惑星帯の天体はほとんど影響しないことが分かった。その結果エウロパでの直径10km以上のクレーターは約70万年に1個形成すると見積もられ、エウロパの表面年齢は約5千万年（衝突頻度とクレーター総数の不確定性を鑑みて1千万年から2億7千万年）と他の衛星に比べて非常に若いことが示唆された[5]。

また各クレーターの形状を調べることによって、衝突時の氷地殻の構造を推定することもできる(図2)。氷地殻の厚さやアセノスフェアの有無という問題に対して、個々の衝突クレーターが持つ情報は時間的・空間的にかなり限定されたものではあるが重要な制約条件となる。エウロパのクレーターは直径が3km

を越えたあたりから中央丘を持ち、8kmを越えると中央丘やリムの形状が崩れてくる傾向が見られる。衝突シミュレーションによれば、衝突による掘削が低粘性のアセノスフェアや内部海にまで達するとクレーターには中央丘が残らないため、リソスフェアは少なくとも3km以上の厚さを持つ必要があると言われていた[7]。また直径約8km以上の衝突クレーターはその深さがサイズに反比例して減少し、さらに直径約30km以上のものは窪みをほとんど持たず多重リングを形成する傾向がある。このことから、表面から約8kmの深さにはリソスフェア－アセノスフェア境界が存在し、表面から20～25kmの深さには氷地殻－内部海境界面が存在するという解釈もある[8]。エウロパのクレーターは大多数が何らかの緩和を受けており、他の氷衛星の表面で見られるクレーターのような新鮮な形状は示さない。クレーターの詳細な形態が明らかになれば、氷地殻の粘性緩和によるクレーターの変形の研究によって詳しい地殻構造が得られるものと期待される。

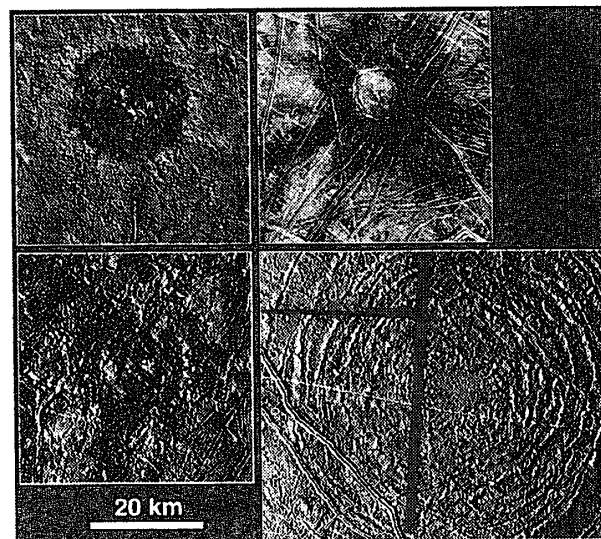


図2 エウロパで見られるクレーターの例。右上から時計回りに、Cilix, Tyre, Mannann'an, Pwyll クレーター。PIA01661[6]より

2.2 リニア（線状）地形

他の固体天体で普遍的に見られる衝突クレーターは、エウロパ表面では多くの内因性の地形によって

大部分が消し去られている。エウロパ上で最も多く見られるリニアは、低解像度の画像ではエウロパに何重にも巻き付いた糸のように見え、ボイジャー時代から目をひいた地形のひとつである。リニアは形態によってリッジ(ridge)とバンド(band)の二種類に区別でき、そのうちリッジは線状に隆起した山脈状の地形を指す。大部分のリッジは頂上部の溝を挟んで2本の隆起線が平行に走った形態を持ち、特にダブルリッジと呼ばれる(図3)。影の長さから起伏を見ると、隆起線の高度は数十から数百m、幅は数百mから数kmであることが分かる。長さは1000km以上におよぶものも多く、成因となる物理機構のスケールの大きさを物語っている。この点からリッジの成因として最も有力視されているのは、木星との重力相互作用によってエウロパに生じる潮汐変形である。エウロパは公転周期(約3.55日)と自転周期が一致した状態(同期状態)で離心率を持った楕円軌道上を運動しており、木星との距離の変化に従ってエウロパは周期的な変形を起こす。潮汐変形した楕円体の長軸は常に木星の方向を向いている一方、公転角速度が軌道上で一定ではないためにエウロパが木星に向ける面がわずかにぶれることになる。すなわち潮汐による変形は一回公転する間にエウロパに対して固定されているわけではなく、楕円体に膨らむ方向が表面に対して振動すると同時に膨らむ大きさも変わるという周期現象が起こる。この一連の過程を日周潮汐(diurnal tide)と呼ぶ。潮汐変形は表面での応力生成と内部での摩擦熱生成という2つの効果をもたらす。内部熱生成に関しては次章で触れることにして、ここでは表面応力によるリッジの形成過程を議論する。厚さ数kmから数十kmの氷地殻が内部海を覆っていると考えると、氷地殻は日周潮汐によって最大約30mの振幅で変形する[9]。リッジ形成の潮汐応力モデルは、この変形によって表面に生じた引っ張り応力が氷の強度を超えた時に地殻に亀裂が生じ、内部海まで達した亀裂に液体水が入り込む状況を考える。入り込んだ液体水は極度の低

温と低圧環境に晒されてその上部が凍結し、やがてエウロパの公転とともに応力の向きが逆転して亀裂が閉じる方へ働くと亀裂内で圧搾された氷片の一部が表出する。応力の方向が再び逆転して亀裂が開くと、表出した氷片は亀裂の両側に山脈状に残存する。この現象の反復によってリッジが成長していくという考え方である[10]。それと同時に二酸化炭素や二酸化硫黄等が溶解した液体水が表面付近で蒸発し、再凝結した物質が亀裂の両側に堆積することも考えられる[11]。

いずれにしろこの過程には内部海物質が表面まで達することが必要であり、氷地殻が薄いほど妥当性を持つモデルである。氷地殻の潮汐変形は内部海が存在しない場合には最大でも約1m程度にしかならず[9]、亀裂を作るために十分な応力が発生しない。一方で厚い地殻モデルを考えた場合には、リソスフェアに生じた亀裂に向かって下層の暖かい氷がスラブ状に上昇して表面を隆起させたという考え方がある[12]が、暖かい氷が上昇する過程で必要な熱源の扱いが明確ではない。

氷地殻の厚さがどうであれリッジの形成において必要なことは、地殻(リソスフェア)が引っ張り応力を受けて割れるという点である。リッジの派生型として横ずれ運動の断層面となっているもの(図4)



図3 特徴的なダブルリッジ地形。このリッジの幅は約2.6km、高さは約300m。PIA00589 [6]より

[13] [14]や、円弧状リッジが連なったサイクロイドと呼ばれるものも多く存在する[15]が、これらも典型的なリッジと同様に日周潮汐と亀裂の発生が原因と考えられている。潮汐応力モデルから見出される地形の分布や横ずれ断層のずれ方向の分布は、観測されるものを良く説明できる場合が多い。では実際に氷を割る為に十分な応力を生み出せるのだろうか。引っ張り応力に対する氷の強度は、実験によって約1 MPa程度とされている。それに対して、潮汐応力モデルから見積もられる表面応力は一桁近く小さい[10]。他の応力源としては内部海の固化による地殻の成長や地殻の温度変化といった体積変化の影響も十分に考えられるため、これらによって生じる応力と潮汐変形に伴う応力が同時に働くことで破壊が生じるというシナリオが実際には妥当かもしれない。

リニア地形の中で、リッジよりも幅が特に広く低アルベドの領域が帯状に広がったものをバンドと呼ぶ(図5)。形状は直線形、曲線形、尖形、楔形など様々で、バンドの両縁の形状が類似しているのが特徴だ。その両縁を合わせることによって周辺の地形を復元できる場合が多く、横ずれ断層運動の形跡を示すものもある。バンドの内部には多数の溝が平行に走りその中央には明瞭なトラフ(谷)を持つものが多いことから、バンドは地球海洋底の中央海嶺に類似したメカニズムで形成したいわゆる表面の発散域に当たると考えられている[16]。すなわち内部海の固化などを原因とする体積変化や潮汐変形による応力によって表面が拡張し、下層の暖かい氷が貫入したことによって帯状の地形が残ったらしい。トラフや溝構造がほとんど見られない滑らかなバンドも存在するが、これは表面の拡張が潮汐変形による引っ張り応力主導で行われ、下部からの物質上昇に対して拡張が比較的速く進行したためと考えられている。このようにバンドは表面拡張の痕跡であると一般的に解釈されているが、逆に地球での沈み込み帯に相当する表面収束域はほとんど見つかっていない。このことから、この地形はかつて衛星全体が膨張し表面積

が増加したことを物語っている。

さてリニア形成に重要なシナリオのひとつとして潮汐応力モデルを取り挙げてきたが、それだけで理論的に求められる応力場と全てのリニア分布とが適合するわけではない。一見するとリニアは様々な方向に乱雑に重なり合っている。このことは、衛星表面でのパターンが決まっている潮汐応力モデルとは一見矛盾しているように見える。しかしある領域のリニアを相対年代に従って分解すると、その領域内のリニアの方向は年代と共に時計回りに回転している傾向が見出される。これは表面における応力のパターンが、公転周期よりもはるかに長いタイムスケールで表面をゆっくり移動したと考えると説明がつく[17] [18]。先にエウロパは同期回転状態にあると言ったが、天体力学的な時間スケールにおいては木星重力が与えるトルクによって表面が同期回転速度よりもごく僅かに速く回転(非同期回転)する[19]。エウロパが内部海を持ち氷地殻が内部の岩石層と固着していなければ、氷地殻だけが非同期回転することになる。これを確認するためにガリレオは、ボイジャーが17年前に撮影した地域と同じ領域を再度撮影して木星に対するエウロパ表面の方向変化を調べたが、

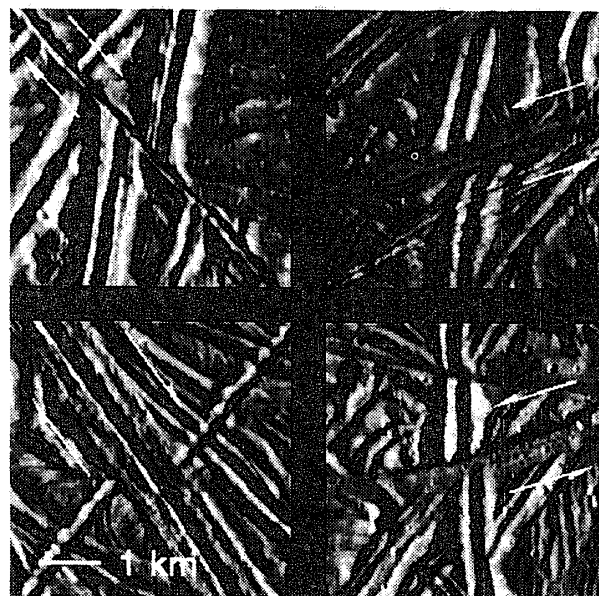


図4 横ずれ断層運動の形跡。幅約数百mから1kmのリッジが横ずれ運動を受けている。Hoppa et al.1999 [13]より

有意な違いは見られなかった。一方でリニア地形の相対年代と応力場の移動との関係から見た氷地殻の同期回転からのずれは非常に緩やかで、数万年から数十万年で自転1回分と考えられている[18] [20]。リニアの方向や横ずれ断層のずれ方向の分布等は、それらが形成した時代の応力場すなわち表面が現在よりも木星に対して経度方向にどれだけシフトしていたかを考えればかなりよく説明できる。また緯度方向のシフトを考慮すると調和的なリニア分布も見られることから、エウロパは数十度の極移動を経験したとも言われている[21]。地殻の厚さや物性の不均質などの影響もあるためエウロパ上に存在する全てのリニアを完全に説明できるわけではないが、潮汐応力モデルはリニアを作り出す主要な過程のひとつとして非常に合理的なモデルと言える。

リニアの形成を議論する際にもうひとつ重要な情報は、褐色がかった特徴を持つことである。ガリレオ探査機に搭載された近赤外マッピング分光計による観測では、リニアをはじめとするアルベドの低い領域にはH₂O氷とは明らかに異なる物質が大量に存在していることが判明し、反射スペクトルの解析からそれらの物質は硫酸マグネシウムや硫酸ナトリウムなどの水和物であることが確認された[22]。ただし純粋な塩は無色か白色なので褐色を発するためには他の物質の存在が必要であり、それらは酸化鉄や二酸化硫黄、有機化合物等だろうと言われている。また地形の層序を考慮すると、年代を経るに連れて褐色が薄くなる傾向がある [23]。これはエウロパが木星の強い磁気圏内にあり、荷電粒子が表面へ衝突することによって不純物に変成して色が次第に薄くなるためと考えられている[24]。最も興味深いのは、これらの不純物の分布が地形に強く依存している点である。不純物の存在が必ずしも内部海の出露を意味するとは言いきれないが、少なくとも塩分が出露する過程が地形形成過程に付随していたと言える。同様の傾向はカオス地形にも見られ、次節で再び触れることにする。

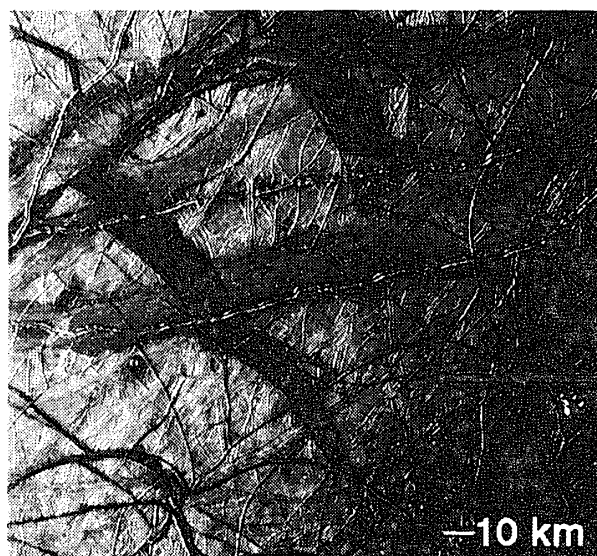


図5 バンド地形の例。曲線状の暗い帯が見られ、表面拡張の痕跡であることが良く分かる。PIA00518 [6]より

2.3 カオス(斑状崩壊)地形

エウロパには、これまでに取り上げた線状・帯状地形の他に、カオスと呼ばれる斑状地形が表面全体に散在している(図6)。カオスとは表面の一部が多角形や楕円形状に変形・崩壊した地形を指し、ボイジャー時代には画像解像度の低さから暗い斑点の様に見えたのでレンティキュラ(lenticulae: ラテン語で斑点の意味)と呼ばれていた。カオスには中央丘やクレーターリム、イジェクタといった衝突起源の地形が持つ特徴が見られないため、カオスは表面下での活動を反映した内因性の地形と言える。カオスのサイズは直径数kmから数百kmまで様々で、その外見も極めて多彩である。形態に従った区別として周囲よりも隆起しているドーム地形や、逆に沈降しているピット地形、起伏がほとんどなくアルベドやテクスチャだけが周囲と異なるスポット地形等がある。サイズの大きなカオスの中には、表面が多数のブロック状に破碎されまるで流水のように表面を漂ったかのように見えるものもあり非常に興味深い(図7)。このような流水状カオスを構成する破碎物は破碎前の地形が良く保存されておりジグソーパズルの様に復元できることから、表面またはその直下には比較的粘性が小さく流動性の高い物質が存在していたこと

を窺わせる。

カオスの成因としては現在までに「ダイアビルモデル」と「局所融解モデル」が提唱されており、このモデルの違いは前者は厚い地殻を仮定し後者は薄い地殻を仮定している点にある。前者は、氷地殻内部で発生した固相対流運動に伴う暖かい氷のプルームやダイアビルが表面を隆起させたり、氷が表出して氷河のような外見を作り出したとするモデルである。そもそも氷地殻内で対流が駆動するためには、氷地殻が臨界レイリー数を超える必要がある。エウロパの表面温度は約 100K、氷地殻の底は H_2O の融点であるから、氷の粘性にも依るが少なくとも氷地殻は 20km 以上の厚さを持っている必要がある [25]。このモデルはダイアビル上昇によるリソスフェアの押し上げを想定しているので、ドーム地形の形成には調和的だが沈降に伴うピット地形や流水状カオスを作り出すことは難しい。また氷地殻の厚さを大きく上回るサイズのカオスを作り出すことも困難である。

一方、氷地殻の局所融解によってカオスが形成したとする後者のモデルは、氷地殻底部に何らかの余剰熱が集中する状況を前提としている。具体的には内部海の海底で熱水噴出のように局所的に供給された熱が海中を上昇し、天体の回転作用で拡散を免れながら地殻へ到達するという過程が提示されている [26]。その熱によって地殻の局所融解が進むと、表



図6 小規模カオスの例。平均約 10km の直径を持つドーム状やピット状のカオスが点在している。PIA03878 [6]より。



図7 巨大カオスのひとつである Conamara カオス。画像は縦 34km、横 42km。表面が流水状に破碎されている。PIA00591 [6]より。

面はアイソスタシー効果によって沈降しピット地形を形成する。さらに融解が進んで表面に達すると、液体水の表出とともに激しい表面破壊を起こすというシナリオである [27] [28]。このモデルでは、必要な熱源を確保するためにエウロパの内側を回る衛星イオで観測された表面熱流量をエウロパの軌道要素やサイズでスケーリングし、エウロパ岩石コア(岩石層と金属コアを合わせて便宜上こう呼ぶことにする)の潮汐発熱率として想定している。しかし理論的解析から岩石コアでの潮汐発熱は氷地殻でのそれに比べて小さいと考えられている上、高い内部発熱に伴って地殻の厚さが薄いという状況も前述のクレーター解析によって推定される地殻厚さと相反しており、議論の余地が残っている。また地殻の局所融解では隆起した地形を作り出すことが出来ないといった問題も抱えている。

このように、エウロパにおいては地殻構造が決定していないために地形形成過程を1つに制約できていないのが現状である。ただし地殻には予測されていない不均質が存在する可能性もある上、そもそもカオスとして一括りされた地形群が全て単一のメカニズムで作られる必然性はない。ここで強調されるべき点は、どの形状のカオスを作るにも内部海の存在が必要だと言うことである。内部海が完全に固化している場合、観測されるスケールのカオスを局所

融解によって作り出すことは不可能であり、またダイアピルが H_2O 層底部で生じてもダイアピルの上昇時間よりダイアピル寿命の方が短くなるため、やはり地形形成には寄与できない[29].

カオスが氷地殻での何らかの熱的な異常を反映した地形であることに異論の余地はないが、地殻熱構造に寄与し得る要因として他に考えられるのは氷地殻中の不純物の存在とそれに伴う凝固点降下の影響である。リニアと同じくカオスも褐色を示すものが多く、水和塩物質の存在が示されている[22]. 形成直後のエウロパが次第に冷却し塩類が溶解した H_2O 水の固化によって氷地殻が成長していく過程では、基本的に塩類は液体層へ追いやりられ氷地殻は高純度の H_2O 水で構成される。しかし同時に、表面は小天体の衝突による継続的な塩類供給を受けている。塩類と H_2O の固体・液体が混在する系で地殻がどのような熱的物質的構造を持つかという問題については明確な議論が無いが、氷地殻にはかなりの物質的な不均質が存在するだろう。このようにして形成した“汚れた”氷地殻の中でダイアピルが塩分濃集部に達した場合、凝固点降下によって融解を起こし流水状カオスのような大規模な破碎が生じると考えられる[30] [31]. またダイアピルと潮汐発熱の相互作用によって地殻浅部で融解が生じる可能性もあるが、氷のレオロジーに強く依存する現象である点に注意を要する[32].

以上のようにエウロパ表面の地形形成は氷地殻での潮汐変形や熱異常が主要因であり、そのためには内部海が存在が必要であることが明らかになってきた。しかし個別の地形と内部構造との関係で見ると、地形によって必要とされる地殻の厚さが異なるということが重要な争点となっている。地殻の進化に従ってリニアとカオスとの間に形成年代の明瞭な前後関係が生じる可能性もあり、次世代探査で地形層序を詳しく調べる必要があるだろう。またこれまでの研究の大部分は H_2O の一成分から成る氷地殻を想定しているが、地殻

中の様々な不純物の存在を考慮した地殻進化を調べることによって、地形形成論に関わる様々な問題に活路が見出されるかもしれない。

3. 熱的進化と内部構造

観測的側面から内部海が存在が強く示唆されることは分かったが、では理論的側面からはどのような熱的状态と構造の進化が推測されるだろうか。エウロパにおいて利用できる熱的エネルギーの主な源は、集積形成時や内部分化時に解放される重力エネルギー、放射性核種の壊変エネルギー、木星から受ける潮汐によって得られる潮汐エネルギーである。エウロパは集積による加熱やその後の放射性核種の壊変による加熱によって、早い段階で岩石成分と H_2O が分離し内部海が形成されと考えられている[33]. 地球の月よりやや小さいエウロパは月と同様に大昔に活動を終えて内部海は凍り付き、表面はクレーターだらけだろうと予想されていた。ところが、先に述べたようにボイジャーがもたらした表面画像はその予想を大きく覆すものだった。これを機に数多くの研究者が、内部海は長期間にわたって存続できるのではないかという問題に取り組むようになったのである。数多くの議論が交わされた今、エウロパの熱的進化に重要な役割を果たす物理が次第にひも解かれ内部海の存続を可能にする様々な相互作用が見えてきた。以下にエウロパの熱的進化研究の変遷を詳しく見ていくことにする。

エウロパの内部海の寿命は、氷地殻の熱輸送と内部発熱によって支配されている。これは H_2O 層が存在するとみられる深さでの圧力条件と H_2O の相図から、内部海の固化が表面からのみ進行するからである。かつての熱史モデルでは、熱源として放射性核種の壊変熱だけを考えると氷地殻はその予想される厚さからレイリー数が臨界値を上回り、固相対流が駆動されることに伴う活発な冷却によって内部海は数億年で固化すると考えられた[34]. その後エウ

ロパの軌道は離心率を持っていることが注目され、それによる潮汐発熱が新たな熱源として考えられた。Cassenら[35]は、氷地殻における潮汐発熱によって内部海は現在まで固化を免れる可能性を示した。しかし潮汐変形のような低歪み速度変形を受ける物質の振る舞いが良く分かっていないために発熱量の定量的な評価が難しく、内部海は現在まで維持できないという逆の結論も後に出された[36]。さらにその後、岩石コアにおける潮汐発熱も考えれば内部海の維持に十分な熱を賄えるというシナリオ[37]も示されたが、氷地殻が内部海によって固体コアと切り離されている場合の岩石コアでの潮汐発熱は、氷地殻でのそれよりも有意に小さい。そのためにやはり発熱量は不足し内部海の維持は難しいという意見も出され[38]、熱的進化モデルは錯綜した。それまでの議論では、氷のレオロジー変化によって熱散逸率が変化する効果を見逃していた点に本質的な問題があった。潮汐発熱率は変形の周期や物質の粘性率、剛性率といったレオロジー特性に依存し、それらの特性は温度への依存性が大きい。Ojakangas and Stevenson[39]はこの点を考慮し、氷地殻での潮汐発熱は氷のMaxwell時間が潮汐変形の周期と等しくなる地殻下部で卓越する点に注目した。その結果、氷地殻が熱伝導平衡にあると仮定するとその厚さは30km以内に抑えられることが分かった。さらにHussmannら[40]は氷地殻での対流熱輸送も組み込み、内部発熱率との平衡状態を見出すと氷地殻厚さは約30kmで安定となるという結論を得た。固相對流が駆動される状況でも氷地殻厚さの平衡値があまり変化しないのは、対流によって熱輸送率が増加すると同時に熱散逸率の大きい柔軟な氷も増えるためである。一方、低圧氷の融解曲線が圧力に対し負の依存性を持つという特徴によって衛星全体の熱輸送効率が抑制される効果から、エウロパサイズの天体では潮汐発熱がなくても内部海は現在まで存在し得るという報告もある[41]。以上のようにエウロパ内部海の存在可能性という問題に対しては、氷物性が

持つ様々な不確定性を勘案した上で“存在可能”な条件が存在し、厚さ数kmから数十kmの地殻の下に厚さ約100kmほどの内部海が存在する、との認識で現在は一応の決着を見たようだ。

以上をまとめると、エウロパの熱的進化には氷地殻のレオロジー、特に粘性率の温度依存性によって潮汐発熱と対流による冷却の両方がカップリングしている点が重要だと言える。潮汐加熱を受けた氷は温度上昇と共に粘性率が減少する。粘性率の減少は対流による冷却率を増加させ、結果として温度が低下し粘性率が増加する方向へ働く。このような自己調節機能がエウロパの進化に大きな役割を果たしている。しかしこのシステムを定量的に評価することは、地殻を構成する氷の物性が不明確なため非常に難しい。困難を引き起こす最も顕著な例としては融点付近での氷の粘性率がある。この推定値には3桁以上の開きがあり、氷地殻の対流発生条件を大きく変えてしまう[42]ほか、上に述べた潮汐発熱との相互作用によって結果的にエウロパの熱構造を大きく変え得る[40]。現在はエウロパの熱史を制約する情報が少ないため、熱的進化モデルの現状においては内部海が今存在するという点のみを束縛条件として、それを達成できるような氷物性の条件を見出すという議論に集約される傾向がある。

4. 更なる課題と生命の存在

4.1 ガリレオが得たもの、残された謎

ガリレオ探査機の多角的な調査により、エウロパに関する知見は飛躍的に広がった。表面は驚くほど多彩な様相を示し、内部海の存在を示唆する数々の間接的な証拠が得られた。しかし同時に、究明がほとんど進まなかった問題や新たに浮上した謎も多い。これまでに提示してきた中でも最も重要な問題は、内部海の存在を示す「直接証拠」が未だに得られていない点である。言い換えれば氷地殻の厚さが決定できていないということである。これに対しては将来、

地殻透過レーダーによって固液境界面を検出する計画が検討されており、次世代探査の主目的のひとつとなっている。第二の問題として表面の絶対年代が不明である点が挙げられる。岩石天体ならば岩石中の放射性物質から絶対年代の決定が可能だが、氷衛星では仮に着陸探査が可能になったとしてもそのような手法は利用できない。衝突クレーターの個数及びその形成頻度から導かれた表面年齢には約1桁の不確かさがある。内部活動の特徴的な時間スケールを知るためにも、氷衛星表面の絶対年代測定法の検討は急務である。第三に、エウロパ表層を構成する氷のレオロジーと不純物の性質に関する情報が少ないという問題があり、それらが地形形成や熱史、生命発生環境などに与える影響は無視できない。その上で熱的構造進化モデルを再考し、衝突クレーター、リニア、カオスといった地形の形成史をエウロパ形成以来の軌道進化等と併せて追究しなければならない。

4.2 地球外生命を求めて

地球から遠く離れたエウロパにも果たして生命は存在する(した)のかという問いは、エウロパに対する最大の関心事である。生物学的議論はここでの論旨の範疇を超えるので触れないが、地球での生命発生場に類似した環境がエウロパにも存在する可能性を地球物理学的な視点で議論することは非常に重要である。地球生命の発生場として海底の熱水噴出孔が有力候補のひとつに考えられており、そこでは生命の材料物質を豊富に含んだ高温の水が供給されている。この点においてエウロパでの海の存在は非常に興味をそそるが、エウロパ深部の熱的・物質的構造に対する知見はほとんど無いため、地球海洋底の環境を安易にエウロパで想像することは危険かもしれない。しかし太陽風や木星磁気圏とエウロパ氷地殻との相互作用によって種々のアミノ酸が継続的に生成されたり、内部海に大量に溶け込んでいる可能性もある。そういった物質がたどる化学的進化や、地殻中の物質循環などに関する問題についてはほ

とんど議論されていない。H₂Oが大きな体積比を占める氷衛星において、そのような物質化学的な進化は地球型岩石天体のそれとどのように異なるのだろうか。理論的な考察が求められるとともに、近い将来エウロパへの着陸探査が実現した際には表面の水の組成を詳細に分析することによって驚くべき知見が得られるだろう。

次世代の探査計画については現在「Jupiter Icy Moons Orbiter」と称した、エウロパ、ガニメデ、カリストの三大氷衛星を周回探査する計画が提案され、2011年以降の実行が検討されている[43]。詳細な重力場測定、レーザー高度計による表面精査、レーダー電波による内部海探知、メートルスケールでの全球撮像などを主目的とし、さらに将来の着陸探査や表面掘削による内部海の直接調査計画に向けた予備探査の意味も含んでいる。

以上、本記事ではガリレオの探査結果と理論モデル研究に基づく、エウロパに関する総合的なレビューを行った。エウロパは太陽系の中でも特に知的好奇心を掻き立てられる、非常に興味深い天体である。日本においては氷衛星やエウロパを直接の調査対象としている研究者は少ないが、漠然とした関心を抱いている人はかなり多いのではないだろうか。今回のレビューを通してその関心が少しでも判然としたものになり、具体的な研究に踏み切る足がかりとなれば幸いである。そして将来の探査を見据えた様々なモデルや仮説が提示され修練されていくことを願っている。

5. 謝辞

査読者の方々には非常に有益な御指摘・コメントをいただきました。また倉本圭編集長には大変お世話になりました。ここに深く感謝致します。

参考文献

[1] Anderson, J. D. et al., 1998, Science 281, 2019.

- [2] 例えば Kivelson, M. G. et al., 1997, *Science* 276, 1239.
- [3] Kivelson, M. G. et al., 2000, *Science* 289, 1340.
- [4] Zimmer, C. et al., 2000, *Icarus* 147, 329.
- [5] Zahnle, K. L. et al., 1998, *Icarus* 136, 202.
- [6] NASA's Image Access Home Page:
<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- [7] Turtle, E. P. and Pierazzo, E., 2001, *Science* 294, 1326.
- [8] Schenk, P. M., 2002, *Nature* 417, 419.
- [9] Moore, W. B. and Schubert, G., 2000, *Icarus* 147, 317.
- [10] Greenberg, R. et al., 1998, *Icarus* 135, 64.
- [11] Fagents, S. A. et al., 2000, *Icarus* 144, 54.
- [12] Head, J. W. et al., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 24223.
- [13] Hoppa, G. V. et al., 1999, *Icarus* 141, 287.
- [14] Hoppa, G. V. et al., 2000, *J. Geophys. Res.* 105, 22617.
- [15] Hoppa, G. V. et al., 1999, *Science* 285, 1899.
- [16] Prockter, L. M. et al., 2002, *J. Geophys. Res.* 107, 4-1.
- [17] Geissler, P. et al., 1998, *Nature* 391, 368.
- [18] Kattenhorn, S., 2002, *Icarus* 157, 490.
- [19] Greenberg, R. and Weidenschilling, S. J., 1984, *Icarus* 58, 186.
- [20] Hoppa, G. V. et al., 2001, *Icarus* 153, 208.
- [21] Sarid, A. R. et al., 2002, *Icarus* 158, 24.
- [22] 例えば McCord, T. B. et al., 1998, *Nature* 280, 1242.
- [23] Geissler, P. et al., 1998, *Icarus* 135, 107.
- [24] Pappalardo, R. T. et al., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 24015.
- [25] Pappalardo, R. T. et al., 1998, *Nature* 391, 365.
- [26] Thomson and Delaney, 2001, *J. Geophys. Res.* 106, 12355.
- [27] Greenberg, R. et al., 1999, *Icarus* 141, 263.
- [28] O'Brien, D. P. et al., 2002, *Icarus* 156, 152.
- [29] Rathbun, J. A. et al., 1998, *Geophys. Res. Lett.* 25, 4157.
- [30] Head, J. W. and Pappalardo, R. T., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 27143.
- [31] Collins, G. C. et al., 2000, *J. Geophys. Res.* 105, 1709.
- [32] Sotin, C. et al., 2002, *Geophys. Res. Lett.* 29, 74-1.
- [33] Consolmagno, G. J. and Lewis, J. S., 1978, *Icarus* 34, 280.
- [34] Reynolds, R. T. and Cassen, P. M., 1979, *Geophys. Res. Lett.* 6, 121.
- [35] Cassen, P. M. et al., 1979, *Geophys. Res. Lett.* 6, 731.
- [36] Cassen, P. M. et al., 1980, *Geophys. Res. Lett.* 7, 987.
- [37] Squyres, S. W. et al., 1983, *Nature* 301, 225.
- [38] Ross, M. N. and Schubert, G., 1987, *Nature* 325, 133.
- [39] Ojakangas, G. W. and Stevenson, D. J., 1989, *Icarus* 81, 220.
- [40] Hussmann, H. et al., 2002, *Icarus* 156, 143.
- [41] 山岸保子, 栗田敬, 1999, *遊星人* 8, 23.
- [42] McKinnon, W. B., 1999, *Geophys. Res. Lett.* 26, 951.
- [43] Jupiter Icy Moons Orbiter Home Page:
<http://www.jpl.nasa.gov/jimo/>