

エウロパ内部海の存在可能性について  
Possibility for a subsurface ocean on Europa

澤越 春香

Haruka Sawagoshi

惑星物理学研究室

2003年1月31日提出

## 概要

エウロパは木星の衛星であり、氷で覆われていることが知られている。近年、NASAのガリレオ探査機によりエウロパに内部海が存在することを示唆するデータが得られた。本論文は、ガリレオ探査機によって得られたデータから推察される現象について述べたいくつかの論文を内部海の存在可能性という視点からまとめたものである。

ガリレオ探査機により得られた重力場のデータは、エウロパ内部が $\text{H}_2\text{O}$ の外殻、珪酸塩のマントル、金属の核からなる3層構造であることが強く示唆される。しかし、重力場のデータだけでは、外殻の $\text{H}_2\text{O}$ 層が完全に氷なのか一部が融解しているのかを判断できないため、高解像の画像を用いて表面地形から内部海の存在可能性について考える。表面には、局所的にカオスと呼ばれる地形や、大部分を覆う線状地形、衝突クレーターなど多様な地形が見られる。こういった地形の解析は様々な角度から行われているが、エウロパには内部海が存在し、その影響によりこのような地形が形成されると考えるとうまく説明がつく。また、表面地形からは、現在も地質学的活動が起こっていること、内部が高温であることもわかる。地質学的活動として氷殻内の対流や氷火山活動が考えられているが、これらは、エウロパで十分起こりうるという結果がでている。これらの地質活動にはエネルギーを必要とするが、エウロパの場合は潮汐加熱が主要な熱源であると理論的に考えられている。

現段階では、内部海の存在を証明する確固とした証拠はないが、以上のことから考えてエウロパに内部海が存在する可能性は極めて高いといえるだろう。

# 目次

第1章	はじめに	2
第2章	エウロパ概観	4
2.1	内部構造モデル	4
2.2	表面地形の概観	5
第3章	内部海の存在を示唆する表面地形	8
3.1	カオス地形	8
3.1.1	斑状地形	8
3.1.2	ドーム地形, くぼ地, 暗斑 (Dark spots, pits and domes)	9
3.2	線状地形	11
3.3	衝突クレーター	12
3.3.1	エウロパの衝突クレーターの特徴	12
3.3.2	個々の衝突クレーター	15
3.3.3	表面年齢	17
第4章	エウロパ内部の活動	18
4.1	氷殻内の対流	18
4.2	氷火山活動	20
4.3	熱源	21
第5章	さらなる観測	22
第6章	まとめ	23

# 第1章 はじめに

本論文は、エウロパの内部海の存在について、ガリレオ探査による観測結果をふまえた論文をピックアップして、まとめたものである。特に記述のない部分は、Greeley(1998)を参考にしている。

エウロパは非常に興味深い研究対象である。最近の探査機による様々な観測からエウロパに内部海が存在する可能性が高いことが明らかになってきた。全球にわたって液体水が存在していると考えられる天体は太陽系では数少ない。また、液体水の存在は生命が存在するための前提条件と考えられている。もしエウロパに内部海が存在すれば、そこに生命が存在する可能性もある。生命は地球だけに存在するのかという問題の答えを見出す上でも、エウロパの内部海の存在についての研究は重要であると言えるだろう。

1610年にガリレオによって発見された木星の大きな4つの衛星は、ガリレオ衛星と呼ばれているが、その第2衛星がエウロパである。発見以来、何世紀もの間、エウロパは望遠鏡によって観測されてきた。1960年代に入って、スペクトル反射曲線に水の吸収帯がよく現れること、波長 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ で70%に達する高い反射能を示すことなどが分かり、その表面が $\text{H}_2\text{O}$ の氷からなると考えられるようになった。そして、1970年代になり、探査機による観測が始まった。

探査機によるエウロパの観測は、パイオニアとボイジャーによるフライバイ(近傍を通過すること)がはじまりである。パイオニアによって、エウロパが木星の磁気圏にすっぽり覆われていることが明らかになった。ボイジャーは飛行ルート上、エウロパからかなり離れた所を通過せざるを得なかったが、得られた画像は非常に興味深いものだった。エウロパは、全体としては明るい球だが、その表面は縦横に走る多数の筋に覆われていることが分かった。また、クレーターが非常に少ないことから、表面は地質学的に若いと推測された。

1995年後半にガリレオ探査機が木星の軌道周回に入り、観測をはじめた。以来、ガリレオはガリレオ衛星に接近して、詳細な観測を行った。当初予定されていた探査は1997

年末までだったが、探査計画は1999年末まで延長された。延長期間中は特に木星、イオ、エウロパの探査に重点が置かれた。エウロパには、計12回以上接近した。そして、高解像度の画像の撮影や重力場の観測、スペクトルの観測などを行った。その後、ガリレオによる探査計画はさらに延長され、現在も観測を続けている。

現在までの探査による、エウロパに関する基本データを表1.1に示す。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、Anderson(1998)によって推定された内部構造についての説明と表面に見られる地形の概観を行う。第3章では、内部海の存在を示唆する表面地形とその解釈を紹介する。第4章では、表面地形から推測される内部での活動とその熱源について考察する。第5では、現在NASAによって提案されているエウロパオービターについて紹介する。第6章がまとめである。

Appendixでは、エウロパに生命が存在する可能性についての考察を紹介する。

なお以下で用いる画像のオリジナルは、主にNASAのウェブサイトに掲載されているのでそちらを参照した方がより見やすいだろう。

(<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/europa/>)

表 1.1: エウロパに関する基本データ

発見	1610. Jan. 7
質量	$4.8e^{22}$ Kg
直径	3138 Km
密度	$3.01\text{g}/\text{cm}^3$
表面重力	0.135 (地球=1)
木星からの距離	670, 900Km
自転周期	3.55 日
公転周期	3.55 日
反射能(アルベド)	0.64
表面温度	赤道付近 110K 極域 50k
表面組成	H <sub>2</sub> O の氷

## 第2章 エウロパ概観

### 2.1 内部構造モデル

内部構造の推定に利用できる観測情報には、質量、半径、平均密度、形状、重力場、磁場、地殻物質の組成、大気組成などがある。NASA のガリレオ計画によって、エウロパに関する情報は飛躍的に増した。特に、重力場と磁場の観測によって、内部構造の推定が大きく前進した。以下では、ガリレオ探査機による観測データを用いて推定された3層構造モデル (Anderson et al.,1998) を紹介する。

Anderson et al.(1998) により推定された内部構造は、図 2.1 のような3層構造モデルである。このモデルにおいてエウロパ内部は、金属コア、珪酸塩のマントル、 $H_2O$  の外殻に分化している。金属コアは直径約 1250km、外殻は約 80~170km の厚さであると推定されている。表面は、表面温度からわかるように氷である。

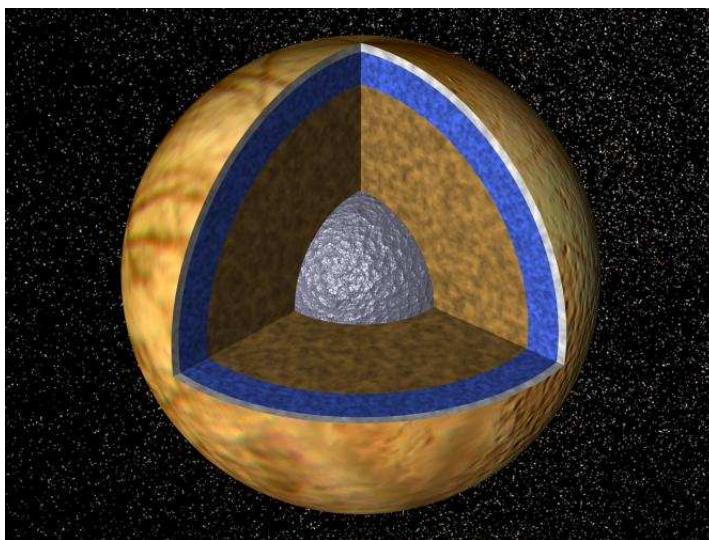


図 2.1: 3層モデル. Greeley(1998) より

エウロパ内部が分化していることは、重力場の観測から得られた慣性能率のデータが示している。慣性能率とは、半径方向の密度分布を表す指標である。 $MR^2$ で規格化した慣性能率は、密度一様の球の場合0.4に一致し、中心部に質量が集中するほど、小さい値になる。ここで、 $M$ は天体の全質量、 $R$ は天体の半径を表す。エウロパの規格化した慣性能率は0.346である (Anderson, J.D. et al.,1998)。これから、エウロパは中心部に質量が集中していることが分かる。

エウロパの表面は $H_2O$ の氷で覆われているが、内部を構成する物質としては、 $H_2O$ に加え、珪酸塩と鉄が考えられる。平均密度と慣性能率の値は、表層の $H_2O$ 層と分化していない珪酸塩・鉄混合物からなる核の2層構造でも説明可能である。その場合、核の密度は $3.8g/cm^3$ 以上となる。しかし、核の密度がこれほど大きいとは考えにくい。なぜなら、この大きな密度を説明するには、金属成分の割合が大きい必要がある。しかし、エウロパより木星に近いイオでも平均密度は $3.5g/cm^3$ であり、エウロパ内部がイオよりも金属成分に富むとは考えにくい。したがって、エウロパ内部は金属コアと岩石マントルにさらに分化している3層構造と考えた方が妥当である。

分化した3層構造の場合、内部に多量の金属成分が存在しなくても、慣性能率の値は満たされる。また、ガリレオ計画によって、磁場の存在も確認された。この磁場が、エウロパ固有のものか、木星の磁場により誘導されたものかは分からないが、磁場がエウロパ固有のものだとすると、金属コアの存在が示唆されることになる。結論としては、現段階の限られた情報の下では、3層構造がもっとも確からしいと考えられる。鉄のコアと岩石のマントルのとりうる密度の値を考慮すると、 $H_2O$ の外殻は80-170kmの厚さをもつと推定される。

## 2.2 表面地形の概観

エウロパの表面は他の天体に比べると非常に平坦でクレーターが少なく、地質学的に若い(図2.2)。ボイジャーによる低解像度の画像では、エウロパは明るい平原 (bright plains) と呼ばれる地形を背景に線状地形が重なっているように見える。ガリレオ探査では、重力場と磁場の観測のみではなく、エウロパに何回も接近して撮影を行い、高解像度の画像を得ている。画像には、表面に存在するくぼ地やドーム状地形、長く続く筋状

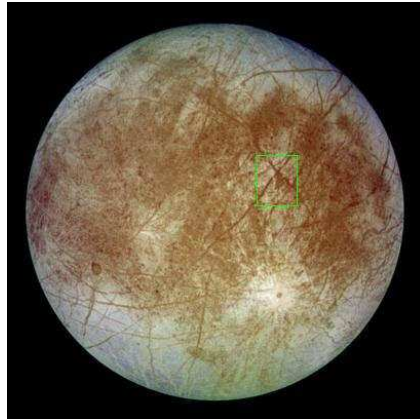


図 2.2: エウロパ全体像 (木星から見て裏側) 解像度:6900m/pixel 色はコンピューター処理で強調はされているが、実際このように見える。四角で囲まれている範囲が図 2.3 である。Courtesy of NASA/JPL/Caltech

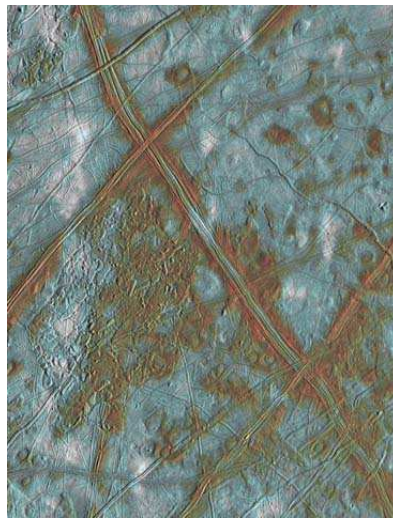


図 2.3: Disrupted zone at  $10^{\circ}$  N,  $271^{\circ}$  W 解像度:180m/pixel 写っている範囲は、縦が約 250km, 横が約 200km. 計 3 回のフライバイによる画像を合成している。Courtesy of NASA/JPL/Caltech

の隆起や溝などの地形がはっきりと捉えられている。これらから、ボイジャー探査以降、明るい平原 (bright plains) と呼ばれていたエウロパの基本地形は、実際は多数の筋状の



隆起にぎっしりと覆われていることも明らかになった(図3.4).

ガリレオによる画像をもとにすると、表面地形は、線状地形とカオス地形に大別できる。表面全体を覆う線状地形は木星との潮汐力によって表面に生じた応力が作り出したと考えられている。カオスは、局所的に存在する、大小様々なくぼ地やドーム状地形、斑状の地形の総称で、様々な形成説が考えられている。さらに、カオス地形は、斑状地形とドームや窪みなどのより局所的な地形に大別できる。

図2.3は、エウロパの代表的な地形である。長く続く筋状の隆起が十字に交差している。その交差点の南に斑模様の地域が見られる。また、局所的に表面が盛り上がったドームも見られる。この画像は、スペクトルによって、3色に分けられている。白色の部分は、この地域の南約1000kmにある Pwyll クレーターからの噴出物である。赤茶色の部分は、氷以外の成分を含むことを示す。赤茶色の部分は、筋状の隆起沿いや、斑状地形、ドームの近くに見られる。したがって、内部で地質活動がおこっている地域は、赤茶色に見えると考えられる。青色の部分は、比較的古い氷の平原である。

図2.2には暗赤色の領域が見られるが、単純に木星から飛来する硫黄が氷に混ざっていることでは説明できない。ガリレオ探査機は、可視光より少し波長が長い近赤外光を観測する近赤外マッピング分光器も搭載しており、これで、エウロパ表面からの反射光を分析した。その結果、周囲の明るい領域は主に氷から成ることが示された。これに対し、暗赤色の領域では氷に不純物が含まれていることが示された。この領域のスペクトルから、不純物は硫酸マグネシウムである可能性が高い。

## 第3章 内部海の存在を示唆する表面地形

慣性率のデータだけでは、 $H_2O$ の外殻が完全に氷なのか、内部で融解して液体になっているのかは判断できない。しかし、ガリレオ探査機によって、内部海が存在することを強く示唆する画像が得られている。以下では、それらの地形とその解釈について述べる。

### 3.1 カオス地形

#### 3.1.1 斑状地形

図3.1はConamaraカオスと呼ばれている地域の高解像度画像である。筋状模様のついた多数の氷のブロックが乱雑に散らばっている様子がわかる。地球の海で氷山が分裂し、流氷となって漂っている様子に似ている。

以下にCarr et al.(1998)による地形の解釈をまとめる。それぞれのブロックの表面に見られる筋状模様は、パズルのようにあわせることができる。このことから、この地域は、もとは周囲の地形と同じく、筋状模様が縦横に走る地域であったと推測される。

この地域は次のように形成されたと考えると説明がつく。まず、この地域は現在はすべて氷になっているが、ある時期、短期間だけ表面が局所的に融解し、海のようになっていた。そして、表面の氷の層が分裂し、海の上を分裂した氷のブロックが漂った。その後、再びこの地域は凍結し、図3.1に見られるような地形となった。

図3.1からは、氷殻の断片の移動した痕跡や、いくつかの断片が沈むように傾いていることもわかる。表面は水平なので、地滑りによって移動したとは考えにくい。やはり、上記のように局所的な融解がおり、表面の氷の分裂によって開いた隙間に表面下の物質が流れ込んだと考えることで説明可能である。

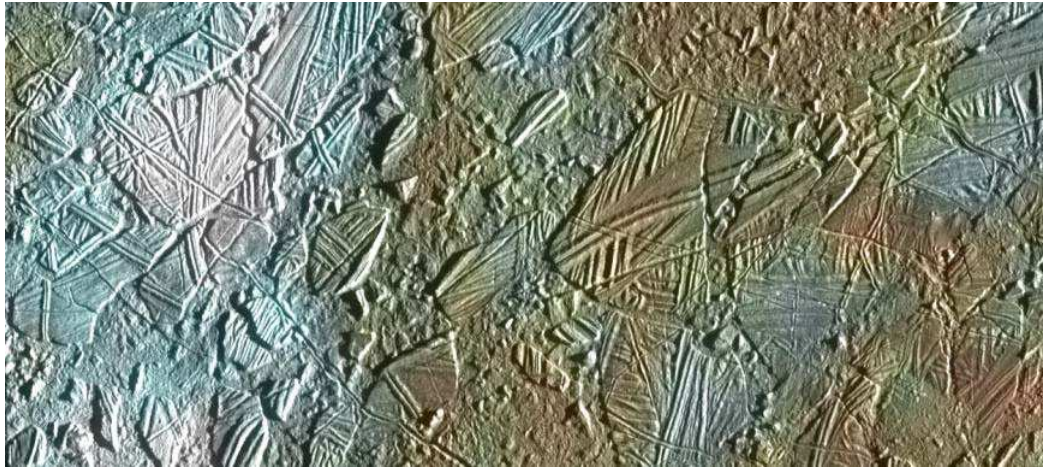


図 3.1: Conamara カオスと呼ばれる地域 at  $9^{\circ}$  N ,  $274^{\circ}$  W 解像度: 54m/pixel 写っている範囲は、縦が約 30km, 横が約 70km. 図 2.3 の中央に見られる斑状地域のクローズアップである. 図 2.3 と同様に 3 回のフライバイによる画像を合成したものであり, スペクトルによって 3 色に分けられている. それぞれの斑点は, 数 km の大きさで, 表面からの高さは 25-200m である. Carr et al.(1998) より

画像からは, 分裂による隙間を埋めた物質が液体水なのか, 延性のある氷なのかは分からない. どちらにしろ, 比較的浅いところに液体水が存在することが予想される. 液体水が隙間を埋めたのであれば, 液体水が存在する直接的証拠となる. 一方, 延性のある氷が隙間を埋めたとする場合は以下のように考えられる. 比較的浅いところで氷が延性を示すには, 表面付近の温度勾配が大きい必要がある. 温度勾配が大きければ,  $H_2O$  層の基部に達する前に温度は氷の融点に達すと推測されるからである.

### 3.1.2 ドーム地形, くぼ地, 暗斑 (Dark spots, pits and domes)

図 2.3 には, 全体にわたって, 局所的なドーム地形やくぼ地が見られる. また, 平坦な暗い色の円も見られる (図 3.2). それぞれの間隔は 5 – 20km ほどで, 直径は 7 – 15km 位である. このような地形は, 高度変化が滑らかであり, 高さ自体も低いため, 低解像度の画像では発見は困難であるが, エウロパ全体に広く存在すると考えられている.

以下に Pappalardo et al.(1998) によるこの地形の解釈をまとめる. ドーム地形は筋状

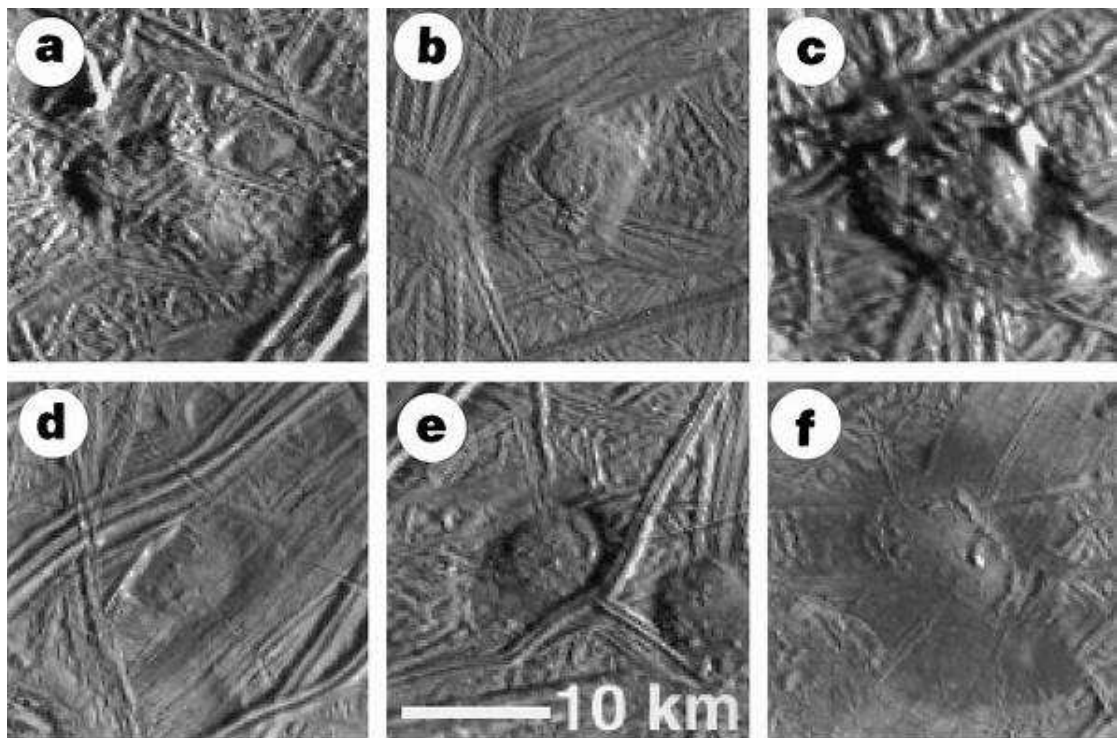


図 3.2: Dark spots, pits and domes a-筋状模様に覆われたドーム状の盛り上がり b-中央に裂け目のあるドーム状の盛り上がり c-崩れたドーム状の盛り上がり d-くぼ地 e-堀のような窪み f-平坦な暗色の円スケールはすべて同じ. Pappalardo et al.(1998) より

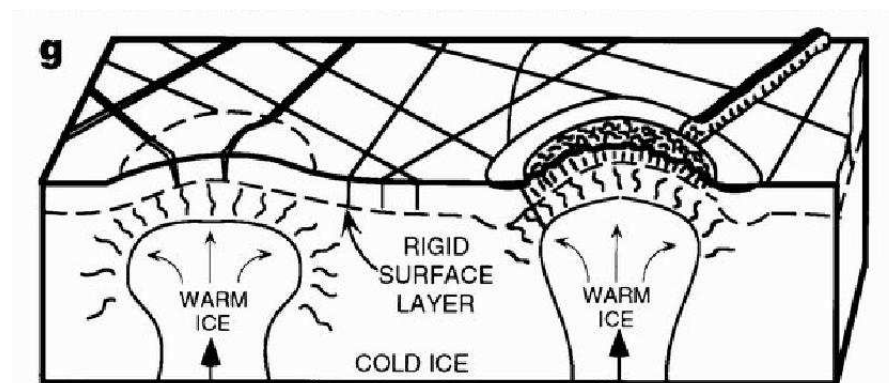


図 3.3: ダイアピルの上昇. Pappalardo et al.(1998) より]

模様で覆われており、もとの地表の一部のように見える(図3.2a)。このような地形は、もとは平坦だった氷の表面が何らかの下からの力を受けて、ドーム状に盛り上がったと考えられる。

こういった様々なタイプの地形は、いずれも下から何かが湧き上がってきたために形成されたように見える。実際、これは地下からのダイアピルの上昇によって形成されたと考えたと説明がつく(図3.3)。ダイアピルとは、浮力のある低密度物質のかたまりのことをいう。ここでは、暖かい氷のかたまりがその候補である。例えば、ドーム地形は、氷のかたまりが表面の冷たく硬い氷の層を下から押し上げて形成されたと考えられる。また、暗斑は、ダイアピルの上昇に伴い、液体水が噴出して広がり、再び凍結した跡と考えることができる。さらに、図2.3でドーム状の盛り上がりの近くに赤茶色の部分が見られることも、ダイアピルの上昇によって、地下の物質が侵入したことで説明できる。

ダイアピルの上昇は、組成成層や固体の対流によって引き起こされうる。氷殻内の対流は、内部が高温であることを示唆し、内部が高温であれば、 $H_2O$ 層下部が融解している可能性が高い。

## 3.2 線状地形

ボイジャーによって得られた画像から、エウロパの表面に線状模様が見られることが分かっていた。その多様性は非常に興味深いものであった。その後、ガリレオによる観測によって、線状模様の背景となっていた地域も実際は線状地形に覆われていること、複雑に見えた線状地形は、縦横に走る隆起や溝が互いに交差している地形であることがわかった。

図3.4(左)から、多数の筋がぎっしりと表面を覆っていること、それぞれの筋は1対の隆起から成り、その間は細い溝になっていることがわかる。重なり具合から、左下から右上へ走る筋は新しいものであることがわかる。この筋は、幅2.6km、高さ300mである。この筋以外は、比較的平坦であることから、時間がたつとこの筋は平坦になるとも考えられる。

1対の隆起ではなく、複数の隆起から成る筋もある。図3.4(右)の左上には平行に走る複数の筋が見られる。これは、図2.3で見られる長く続く筋状の隆起の一部分であり、全

体では数100kmの長さをもつ。このような複数の筋は、低解像度の画像では、明るく細い筋が2本の暗い帯に挟まれているように見えたため(図3.5)、3重帯(Triple band)と呼ばれている。

これらの線状地形の形成メカニズムについては、様々な説が提出されている。1つには、周期的な潮汐力によって硬い氷の表面に生じた亀裂に沿って、地下から液体水が、暖かく延性のある氷が上昇して形成されたとするものがある。しかし、図3.4の隆起の外側の縁は、亀裂の特徴であるシャープさはなく、周囲へとなめらかにつながっている。

また、湧昇によって局所的に熱が表面へ運ばれていけば、その熱によって表層の氷は昇華し、その中の不純物が取り残される。その後、地下から比較的純粋で延性のある氷が上昇し、隆起を形成するという考えもある。

この地形は氷火山活動に起因するという説もある。線状に起こった間欠泉によって、地下の物質が噴出して、割れ目の両側に積もって隆起を形成するという考えである。この場合、縁がなめらかであることも説明できる。噴出物は割れ目を中心に堆積し、緩やかに拡散するためである。この火山活動は、潮汐力によって繰り返しエウロパが伸び縮みすることによって、促進されている可能性もある。

線状地形の形成メカニズムが何であれ、線状地形はエウロパで地質学的な活動が何度も起きたこと、内部に流動性のある層があることを示している。

蛇足であるが、ボイジャー探査時の低解像度画像から、誤解をまねく地形名がついているものもあることを心に留めておくといわれる。例えば、平原(plains)は何もない印象を与えるが、実際は筋状の隆起が密集している地域である。3重帯(Triple Band)も実際に3重帯からなるわけではなく、複数の隆起からなる。

### 3.3 衝突クレーター

#### 3.3.1 エウロパの衝突クレーターの特徴

ガリレオの画像によって、エウロパの表面上にある衝突クレーターの詳細が判明した。現在までにガリレオやボイジャーによって、直径4km以上の衝突クレーターは28個観測されている。その中で直径が20kmを超える大きなクレーターは7個である。衝突クレーターは小天体の衝突によって形成され、時間とともに惑星や衛星の表面はクレーターに覆われていく。しかし、他の太陽系の天体と比較して、エウロパにクレーターが

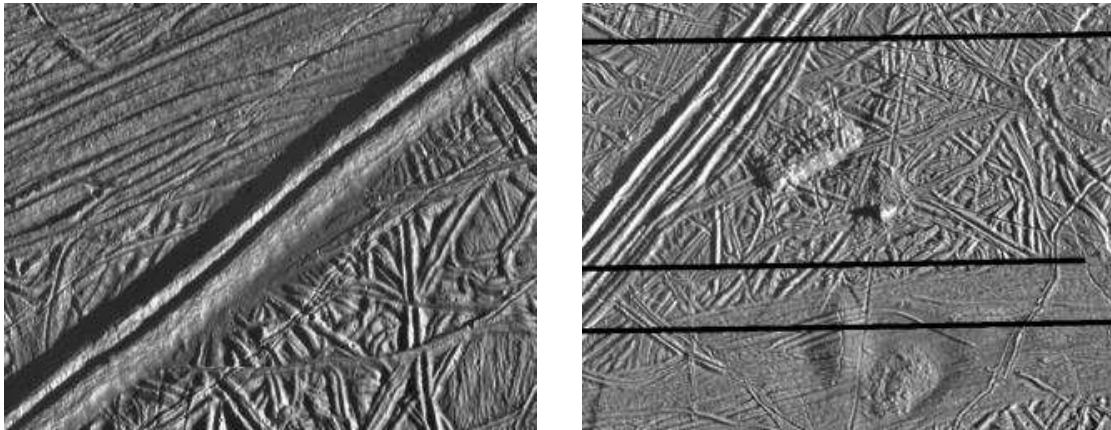


図 3.4: (左) 線状地形の高解像度画像 at  $14.8^{\circ}\text{N}$   $273.8^{\circ}\text{W}$  解像度: 20m/pixel 写っている範囲は縦 14km, 横 17km. Greeley(1998) より (右) Triple Band at  $9.3^{\circ}\text{N}$   $275.7^{\circ}\text{W}$  解像度 54m/pixel 写っている範囲は縦 32km, 横 40km. Courtesy of NASA/JPL/Caltech

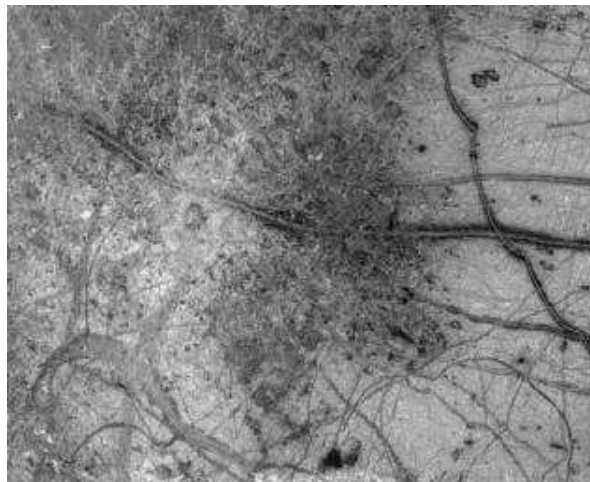


図 3.5: 線状地形の低解像度画像 at  $2^{\circ}\text{N}$   $239^{\circ}\text{W}$  解像度: 1600m/pixel 写っている範囲は縦 860km, 横 700km. 東から西に 3 重帯がのびている. 中心の左側に見られるクレーターは Mannann'an. Courtesy of NASA/JPL/Caltech

少ないのは、表面の更新が盛んであることを意味する。

以下に荒川 (1999) によるクレーターの特徴の解釈をまとめる。エウロパの衝突クレーター全般の特徴は浅いことである。サイズの大きいものほど、エウロパ同様に表面が氷

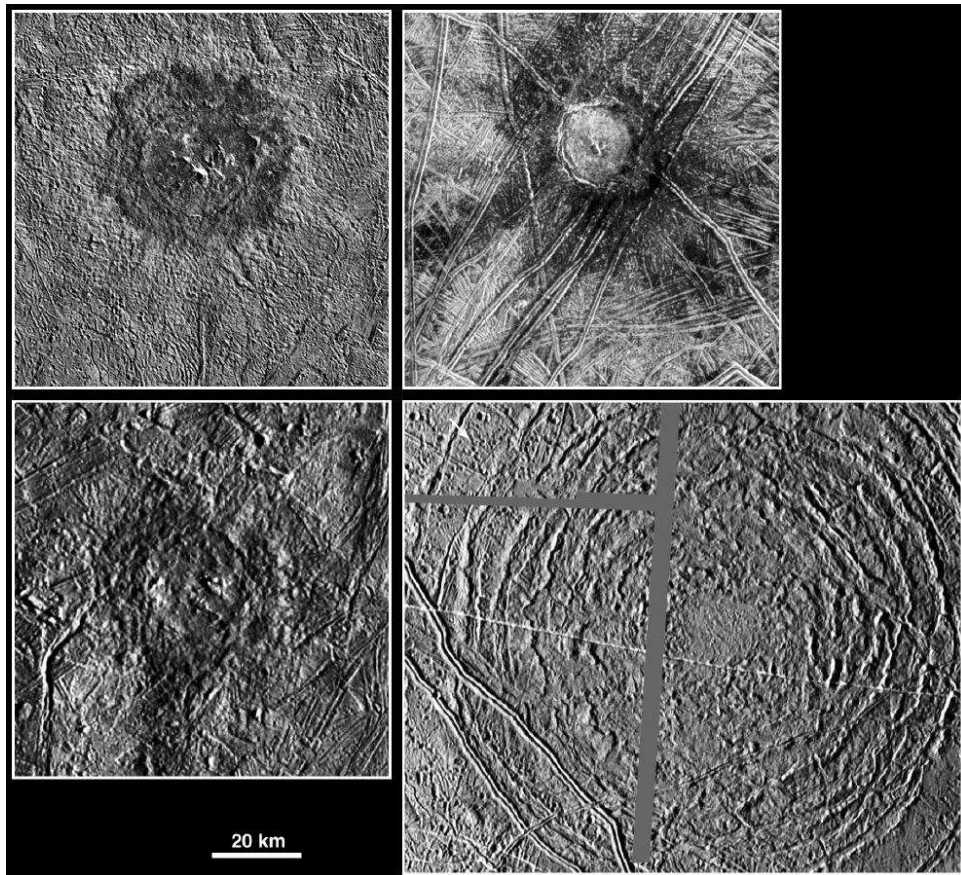


図 3.6: エウロパの代表的な大きな衝突クレーター 左上:Pwyll 右上: Cilix 左下: Mannann'an 右下:Tyre Tyre の画像に見られる黒い太線はデータの欠落によるものである. Courtesy of NASA/JPL/Caltech

で覆われた他の衛星と比べても浅さが際立ち、周囲とクレーター内部の底面の高さはほぼ等しくなってくる。この特徴は、緩和現象が促進された結果であると考えられている。緩和を促した要因の1つとして、地殻がかなり暖かいことが挙げられる。表面温度は放射平衡温度で決まるため160Kより高くなることは難しいが、内部に液体水の存在が考えられているので、内部が200K位まで高温になっている可能性はある。もう1つの要因としては、クレーター形成時に地下から液体水あるいは延性のある氷が侵入したということが考えられる。



### 3.3.2 個々の衝突クレーター

エウロパ上に発見されたクレーターをみると、様々な形と構造をしていることがわかる。クレーターの形と構造は、クレーター形成の起源と表層の性質を探る手がかりとなる。以下では、Moore et al.(2001)をもとに図3.6のクレーターの特徴をまとめる。その特徴は、表面の硬い氷の層の下に、液体水あるいは延性のある氷があることを物語っているようである。ここで、直径はリム(クレーター縁の盛り上がった部分を指す)にあうような円のものとする。Tyreについては、リムがはっきりしないので、一番外側のリムにあうような円を考える。

#### Cilix 直径~18km

Cilixには、リムや平坦な底面の中心に小山があり、クレーターの周囲には暗い色の物質が見られる。底面の中心にある小山は、中央丘と呼ばれる。リムと中央丘の高さは、同じ位で表面から約300mである。また、クレーターの底面は、周囲の地形と同じ高さである。クレーターの周囲の暗い物質は、リムを越えて8-20kmほど伸びている。クレーターの周囲には、他に多数の2次クレーターも見られる。

Cilixは深さはかなり浅いが、形状は他の氷衛星上の同じ位のサイズのクレーターと同じ特徴を示している。このことから、クレーターが形成する間という短いタイムスケールでは、表層は脆性を示すと考えられる。計算では、Cilixのトランジェントクレーターの深さは、2.4 - 4.7kmである(Moore et al.,2001)。トランジェントクレーターとは、掘削段階後のクレーターのことである。この深さが確かであれば、かつCilixが脆性を示す層において形成されたのであれば、エウロパの氷殻は、この地域では少なくともCilixのトランジェントクレーターの深さまでは、短いタイムスケールで脆性を示す固体であるといえる。

#### Pwyll 直径~24km

このクレーターの注目点は、Pwyllからのレイ(噴出物による放射線状の線のことを指す)や2次クレーターが1000km以上にわたり、様々な地形の上に重なっていることである。そのレイや2次クレーターは図3.1においても見られる。クレーター内部の底面は周囲と同じ高さである。また、Pwyllでは中央丘がリムよりも高い。その他にクレーター

を中心に円状に暗く見える。

レイや2次クレーターの様子から、Pwyllは比較的若いクレーターであると推測される。衝突クレーターは、時間とともに緩和によって、その深さが浅くなっていくのが特徴である。したがって、若いクレーターはそれほど緩和を受けないので、周囲より底面は低いのが一般的である。しかし、Pwyllは非常に浅く、緩和が促進されていると考えられる。中央丘がリムより高いことも含めて考えると、これは、衝突直後に衝突孔が流動性のある物質によって埋められたためと推測される。

#### Mannann'an 直径~22km

Pwyllと同じ位のサイズであるが、中央丘は見られず、レイも目立たない。PwyllやCilixほど、岩石質天体に見られるような一般的なクレーターの特徴もない。しかし、クレーターの底面にはいくつかの盛りあがりが見られる。その最も大きいものは、5kmの幅をもち、高さは200mほどである。またリムや、100mの厚さの堆積(pedestal deposit)も見られる。このクレーター内部の底面も、周囲の地形と同じ高さである。

以上の特徴から、Mannann'anは上記のCilixやPwyllのような特徴をもったクレーターの時間の経った姿であると考えられる。また、これはカオス地形に形成したクレーターであるとも考えられる。

#### Tyre 直径~43-44km

Tyreは、エウロパに見られる最大のクレーターであり、多数の同心円状のリングをもつ多重リングクレーターと呼ばれる。リング以外は比較的平坦だが、特に中心部は平坦で滑らかである。

Tyreの形状の特徴は、ガニメデ上のパリンプセストと呼ばれる衝突クレーターに似ている。パリンプセストとは、アルベドが周囲とは異なった円形領域で、もともとあったクレーターが緩和してしまい、地形的にはクレーターの形をとどめていないものである。パリンプセストの形成について少なくとも2つの考えがある。1つ目は、クレーターが氷に富む地域に形成されるため、緩和によって周囲とつりあいに達したと考えられる。緩和は氷に富む、大きな地形を変形させるには非常に有効である。もう1つは、衝突が延性のある氷や液体の上にある、薄く脆弱な地殻の上で起こったため、衝突による穴はクレーターを形成することなく、崩壊したと考えられている。

Moore(2001)では、Tyreは、粘性の低い物質の上にある、約10kmの厚さの氷の層へ

の衝突によって形成されたとしている。この結論は、Tyreのトランジェントクレーターの深さ、所々欠けたリムや多重リングクレーターの形成モデルに基づいている。

### 3.3.3 表面年齢

クレーターの数からは表面年齢を推定することが可能である。クレーターの数を調べることによって、過去にその天体に衝突した小天体の数についての手がかりが得られる。そして、惑星間空間での過去の小天体の数が時間の関数として推定できれば、クレーターの数からその年代が推定できる。

木星系の中の小天体の数を、木星の近くを通過する彗星をもとに推定し、エウロパにどの程度の割合で衝突するか見積もる。これをもとに推定すると、エウロパの表面年齢は、数100万年という結果になる。太陽系の歴史から考えると、この年数は非常に短く、エウロパが現在も活動を続けていることは十分考えられる。しかし、この推定法では、クレーターの数に2次クレーターの数も入っている可能性や推定した衝突の割合にかなりの不確かさがあり、正確な表面年齢とは言えない。

## 第4章 エウロパ内部の活動

### 4.1 氷殻内の対流

ここでは、氷殻内での対流について考察する。氷殻内で対流が起きていれば、カオス地形の説明もでき、内部に液体水がある可能性も裏づけられる。対流の激しさにもよるが、対流の沸きだし口では圧力や温度が高くなり、地表が持ち上げられたり、融解した氷が噴出すると考えられる。

氷殻内での対流とは、地球のマントル対流のように、固体の氷が長時間かけて流動することである。氷衛星での対流は、対流層内に十分な熱勾配があり、さらに対流層下部の温度が融解点に近い場合に起こる。

エウロパでの対流に関する問題は理論的に解析されており、対流開始の条件が提案されている (Pappalardo et al.,1998;Mckinnon,1999)。対流が起こる条件としては、一般にレーリー数をを用いる。エウロパについての適当な値を導入して、対流開始の条件を求める。その結果、エウロパでは対流が起きていることが示唆されている。

Pappalardo et al.(1998)による対流の開始条件の推定について、少し触れておく。対流する層として考えられているのは、低温で脆性のある氷から成る最表層部の下の延性のある氷から成る層である。対流が起こるぎりぎりの値を限界レーリー数  $R_a$  と呼ぶ。レーリー数が小さいと対流は起こらず、大きいと乱流になる。限界レーリー数は、対流層の厚さ  $h$ [m]と、対流層の上下面の温度差  $\Delta T$  の関数として次のように表される。

$$R_a = \frac{\rho g h^3 \alpha \Delta T}{\kappa \eta} \quad (4.1)$$

ここで  $\rho$  は密度、 $g$  は重力加速度、 $\alpha$  は熱膨張率、 $\kappa$  は熱拡散率、 $\eta$  は粘性率を表す。

エウロパについて、4.1 式に適当な値を代入する。様々な粘性流体に適用できるように、限界レーリー数は  $R_a=2000$  に設定する。エウロパの重力加速度は  $g=1.31\text{m/s}^2$  である。氷に関するパラメータは、対流層の平均温度で求める。対流層下部の温度を 273K と仮定すると、計算から、対流層上部の温度は 197K と求まる。したがって  $\Delta T=76\text{K}$ 、対

流層の平均温度は  $T_{ave}=235\text{K}$  である。235K における氷の密度は  $923\text{kg/m}^3$ ，熱膨張率は  $1.4\times 10^{-4}/\text{K}$ ，熱拡散率は  $1.4\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  である。また，対流層における氷の粘性率は，およそ  $\eta \approx 10^8 - 10^9\text{Mpa s}$  と推定される。これらの値を 4.1 式に代入すると，対流層の厚さは 3 - 7km と求まる。最表層部の下の延性のある氷から成る層の厚さが 3 - 7km 以上である場合，対流が起こっていると考えられる。

## 4.2 氷火山活動

局所的融解や、ダイアピルの上昇、線状地形、氷殻の対流などは、氷火山活動 (Cryovolcanism) によって説明することも可能である。氷火山活動によって、氷殻底部に局所的な熱の集中が起きていると考えられる。氷火山活動とは、氷衛星でみられる火山噴火活動のことをいう。明らかな噴火口は、エウロパの表面には見られない。しかし、地球上で玄武岩の噴出口のほとんどが覆われたように、その噴火口は覆われたと考えられる。

氷火山活動によって、表面は局所的に暖められうる。局所的に暖められたことを示唆するような地形はエウロパのいたるところで見られる。その例として図4.1を挙げる。平坦で滑らかな地域が約3.2kmにわたって、周囲の線状地形の上に重なっているのがわかる。この地域には縁がないことから、この地域の形成時、ここの表面のみ非常に流動的だったと予想される。それは、地下から表面への流体の噴出によるのかもしれない。また、噴出することなく、表面を融解させたり、流動させることのできるホットスポットが存在する可能性もある。

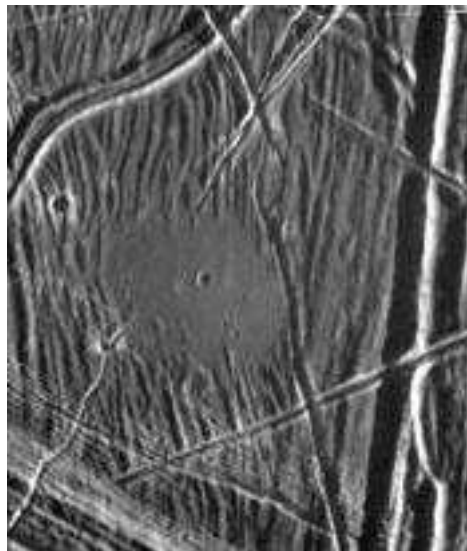


図 4.1: Puddle と呼ばれる地形 解像度:21m/pixel. Courtesy of NASA/JPL/Caltech.

### 4.3 熱源

エウロパ内部が高温であることを説明するには、熱源について考える必要がある。エウロパは表面地形から、現在でも活発な活動をしていることが推測される。つまり、内部が高温であることが示唆される。以下では、Pappalardo et al.(1999)をもとにエウロパの熱源についてまとめる。

固体天体の熱源には、天体形成初期に閉じ込めた熱や放射性元素の崩壊熱、潮汐加熱が挙げられる。天体形成初期に閉じ込めた熱とは、形成時に発生した重力エネルギーが熱として蓄えられたものである。ここで、物質が落下(収縮)することで得られるエネルギーのことを重力エネルギーという。放射性元素の崩壊熱とは、放射性元素が核分裂する際に放出するエネルギーのことである。放射性元素の1年間、1g当たりの発熱量は、微々たるものだが、天体の年齢や質量を考えるとトータルとして大きな量になる。したがって、初期に閉じ込めた熱や放射性壊変熱の大きさは天体のサイズによって変わる。

しかし、エウロパと同じ位のサイズである地球の月では、現在活発な活動は見られないことから、初期に閉じ込めた熱や放射壊変熱では、エウロパの現在の活動は説明できない。エウロパでは、潮汐加熱によってかなりの熱量が発生していると考えられる。

潮汐加熱とは、衛星の軌道が楕円であるために変化する潮汐力によって、衛星が伸び縮みを繰り返して熱が発生することをいう。イオとエウロパ、ガニメデの公転周期の間には、ラプラス共鳴という関係(Laplace,1805)があり、ガニメデが木星の周りを1回公転する間に、エウロパは2回、イオは4回、正確に公転する。この結果、それぞれの衛星は、一定の時間ごとに相互に引っ張り合いを繰り返し、軌道は次第に歪み、楕円形となる。楕円軌道になったエウロパは、1回公転する間に木星に大きく近づいたり、遠く離れたりする。それに応じて、エウロパに働く木星からの潮汐力は強くなったり、弱くなったりする。そのたびに、エウロパは伸びたり縮んだりする。こうしたことの繰り返しで内部には摩擦熱が発生する。

計算によるとエウロパでは、内部海が存在していれば、潮汐加熱によって表面下10~30kmより深部の温度は氷の融点以上に保つことが可能である(Squyres et al.,1983;Ross and Schubert,1987)。しかし、潮汐加熱によって発生する熱量は、内部海をつくるには不十分である。

## 第5章 さらなる観測

現段階ではエウロパに内部海が存在することは推測に過ぎず、その存在を確認するには新たに探査機を送り、詳しく観測をする以外にない。現在、NASAによってエウロパオービターミッションが提案されている。2008年の打ち上げを想定しているエウロパオービターの目標は、内部海が存在を確認すること、内部構造を明らかにすること、表面地形の成因の理解することである。そのためにエウロパオービターはレーダーを搭載し、内部海を探査する。レーダーによって、内部海の深さまで探査できる可能性もある。また、探査機の位置と高度を精密に追跡し、エウロパの正確な形状と重力場を明らかにする予定である。

エウロパオービターによって内部海が存在が確認されれば、次の目標はエウロパに着陸して、表面を直接調べることになるだろう。エウロパオービターの任務の1つには、将来、探査機が着陸する際のふさわしい場所を見つけることも予定されている。最終的に、氷殻を掘り抜いて内部海に到達してはじめて、エウロパの内部海が存在は実証される。



## 第6章 まとめ

本論文では、ガリレオ探査によって得られたデータから推測される現象を、エウロパに内部海が存在するといわれる根拠についてまとめた。

本文中で紹介したエウロパの表面地形の解釈を簡単にまとめると次のようになる。

地形	成因
斑状地形	局所的な融解による表面の氷の分裂
ドーム地形やくぼ地, 暗斑	ダイアピルの上昇
線状地形	潮汐力による応力 氷火山活動
浅い衝突クレーター	地下からの液体水あるいは延性のある氷の侵入 内部が高温

この他にも形成説は多数提案されており、内部海が存在せずとも、このような地形の形成を説明できる可能性はある。しかし、地下に液体水の層があると仮定すれば、このような地形の成因はより簡単に説明できる。確固とした証拠を得るためには、さらなる観測が必要である。2008年に打ち上げが予定されているエウロパオービターの成果に期待したい。

# appendix

## 生命の存在可能性

ここでは、エウロパを研究する最終目的である生命の存在する可能性についての考察を紹介する。

エウロパでは生命の存在に必須と考えられる3つの条件がそろっている可能性が高い。その条件とは、エネルギー、液体水、有機化合物である。太陽系において、これらの条件を満たしそうな所は数少ない。

エネルギーは潮汐加熱によって発生していると考えられる。また、液体水は、本論文でみてきたように存在する可能性が高いと考えられている。残る条件は、有機化合物であるが、おそらく彗星や隕石によってエウロパにもたらされていると考えられる。

しかし、上記の3つの条件を満たすことが、生物の誕生や進化を意味するわけではない。生命が存在する前提条件に過ぎない。もし、内部海に生物が存在したとしても、地球上に存在するような複雑で多様性のある生物ではないと予想される。エウロパは太陽から遠い天体であり、内部海は厚い氷の下に存在するため、おそらく太陽光は内部海に届いていないと考えられる。そのため、地球上の植物のような光合成を行う生物は存在しないと予想される。エウロパの環境に適応した独自の生命が誕生している可能性もある。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり，非常に多くの方々のご助言及びご指導を賜りました．特に，北海道大学 倉本圭助教授には，本論の構成から，原稿のチェックに至るまで，つきあっていただきました．

エウロパの画像を提供していただいた NASA，そして画像作成に携わったガリレオプロジェクトの方々，そしてお世話になりました北海道大学 理学部 惑星物理学研究室の皆様へ，ここに深く感謝と御礼を申し上げます．

## 参考文献

Anderson, J.D., G.Schubert, R.A.Jacobson, E.L.Lau, W.B.Moore, and W.L.Sjogren, 1998, Europa's Differentiated Internal Structure: Inferences from Four Galileo Encounters, *Science*, 281, 2019-2021

Carr, M.H., M.J.S.Belton, C.R.Chapman, M.E.Davies, P.Geissler, R.Greenberg, A.S.McEwen, B.R.Tufts, R.Greeley, R.Sullivan, J.W.Head, R.T.Pappalardo, K.P.Klaasen, T.V.Johnson, J.Kaufman, D.Senske, J.Moore, G.Neukum, G.Schubert, J.A.Burns, P.Thomas, and J.Veverka, 1998, Evidence for a subsurface ocean on Europa, *Nature*, 391, 363-365

Greeley, R., 1998, Europa, *The New Solar System*. Fourth Edition Edited by J.Kelly, C.C.Petersen, A.Chaikin, Cambridge University Press, 253-262

McKinnon, W.B., 1999, Convective instability in Europa's floating ice shell, *Geophysical Research Letters*, 26, 951-954

Moore, J.M., E.Asphaug, M.J.S.Belton, B.Bierhaus, H.H.Breneman, S.M.Brooks, C.R.Chapman, F.C.Chuang, G.C.Collins, B.Giese, R.Greeley, J.W.Head, S.Kadel, K.P.Klaasen, J.E.Klemaszewski, K.P.Magee, J.Moreau, D.Morrison, G.Neukum, R.T.Pappalardo, C.B.Phillips, P.M.Schenk, D.A.Senske, R.J.Sullivan, E.P.Turtle, and K.K.Williams, 2001, Impact Features on Europa: Results of the Galileo Europa Mission (GEM), *Icarus*, 151, 93-111

Laplace, P.S., 1805, *Mecanique Celeste*, vol.4, Courcier, Paris, 1805 (English translation

by N.Bowditch, Chelsea, New York, 1966)

Pappalardo,R.D., J.W.Head, R.Greeley, R.J.Sullivan, C.Pilcher, G.Schubert, W.B.Moore, M.H.Carr, J.M.Moore, M.J.S.Belton,and D.L.Goldsby, 1998, Geological evidence for solid-state convection in Europa's ice shell, Nature, 391, 365-368

Pappalardo,R.D.,J.W.Head,and R.Greeley, 1999, oct, The Hidden Ocean of Europa, Scientific American, 54-63

Ross,M.N.,and G.Schubert, 1987, Tidal heating in an internal ocean model of Europa, Nature, 325, 133-134

Squyres,S.W., R.T.Reynolds, P.M.Cassen,and S.J.Peale, 1983, Liquid water and active resurfacing on Europa, Nature, 301, 225-226

松井孝典,1997, 岩波講座 地球惑星科学 12 比較惑星学, 岩波書店

松井孝典,1996, 惑星科学入門, 講談社学術文庫

## 参考ウェブサイト

・ エウロパオービター

<http://www.jpl.nasa.gov/europaorbiter/>

・ エウロパの写真

<http://galileo.jpl.nasa.gov/images/europa/eurimages.html>

・ ガリレオ計画

<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/europa/>

・ 荒川政彦,1999, 宇宙・惑星環境における雪氷物性

<http://risu.lowtem.hokudai.ac.jp/arak/seppyou.html>