

「土星系氷衛星熱進化史の解明：将来探査に向けての画像解析に基づく研究」

神戸大学大学院理学研究科

平田 直之

1 研究の背景と目的

1996年から2003年にかけて行われた木星圏探査機ガリレオによる観測によって、衛星エウロパの外側は氷で覆われているがその内部には液体の水から成る海があることが示唆された(図1)。さらに、2006年から2015年にかけて実施された土星系探査機カッシーニによる観測によって、衛星のエンセラダスやディオオーネにも内部に液体の海がある可能性が高いことがわかった。これまで惑星科学において、地球以外で生命が居るとしたらその筆頭の候補は火星であるとされていたが、現在ではこれらの木星・土星圏の氷衛星がもっとも可能性が高い場所と考えられるようになった。このような衛星の内部は地球の深海底に似た熱水鉱床のような複雑な化合物を生成する化学反応が起きていると考えられている。地球の最初の生命は深海底で生まれたともいわれており、その観点でもこの氷衛星内部の環境や進化について関心が持たれている。

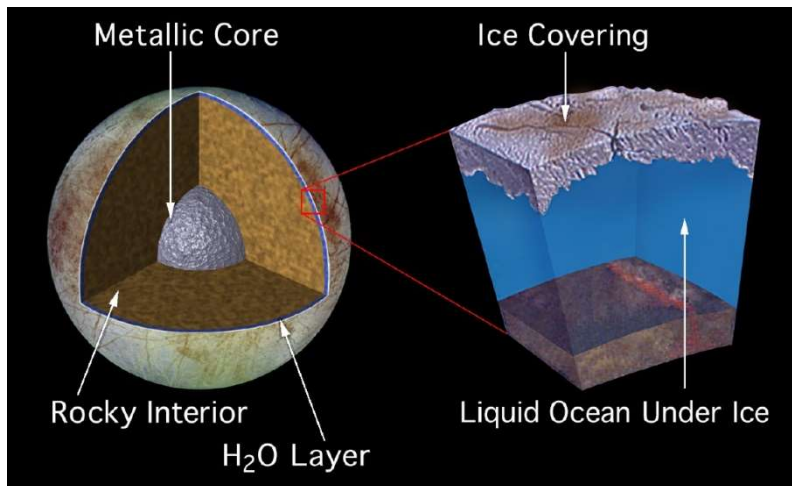


図1 氷衛星の内部構造の予想図 (エウロパの例)

Photojournal より

これらの衛星がなぜ凍らずに内部海を維持できるのか、という惑星による潮汐加熱が重要であると考えられている。衛星が木星や土星の潮汐力によって揉まれることで加熱されている。この結果、形成されると考えられるのが、氷衛星表面の正断層地形である(図2)。衛星は加熱されると、マントルの熱膨張や内部海の体積の変化によって、体積が変化する。体積が

ふくらむことで表面がひびかれて亀裂(正断層地形)がはいる(図2)。そのため、この断層を詳しく調べることで、氷衛星の内部状態を推定できる可能性がある。この研究では、氷衛星ディオオーネ・レアの表面にある正断層地形を対象に、リモートセンシング画像データ

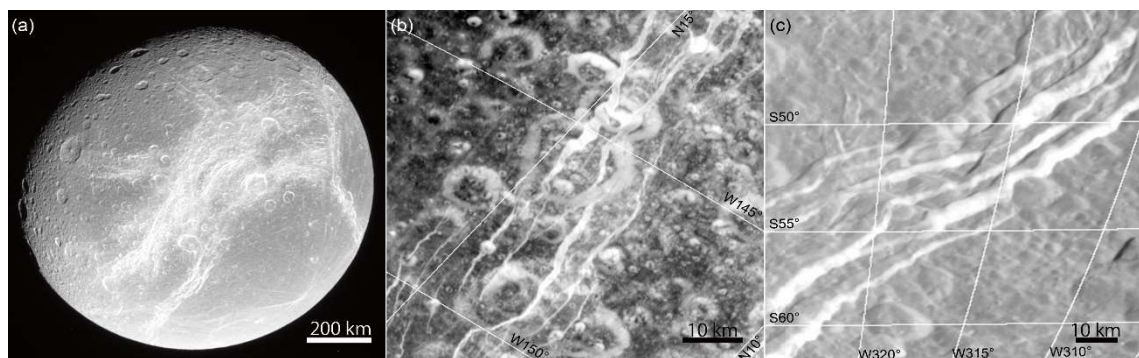


図2 氷衛星ディオオーネの表面にある亀裂(正断層地形) (a)ディオオーネ全体、白い線状の部分がすべて正断層帯である。(b,c)断層帯のクローズアップ画像

の解析を行い、氷衛星の実際の膨張を測定し、内部状態を推定することを目指す。その上で、氷衛星がどの程度の加熱（もしくは冷却）を受けたのかを明らかにする。

## 2 研究方法・研究内容

### (1) 画像データと探査機位置姿勢情報の収集と整理

NASA は観測データをすべてインターネット上に公開し、世界中のだれもが自由にアクセスできるようになっている。そこ (Planetary Data system) には単にデータを置いてあるだけなので、解析に有用かどうかを選択し、各画像データの特性事に分類しなければならない。この研究では、土星衛星のディオオーネとレアを対象に取り組む予定である (図2)。この2天体に取り組む理由は、断層が比較的あたらしく視認しやすいからである。さらに断層が縦横無尽に存在しているというよりも、まばらに分布しているために一つ一つを現在得られているデータからでも明瞭に視認しやすい。この2天体の画像データは大まかにいうと2000枚程度あることがわかっているが、あまり科学観測には適さない撮影条件のものや、ディオオーネやレアを撮影しているものの断層面が見えていないものなどが多数含まれており、これらの分類整理をまず進める。

### (2) 画像解析。具体的には、地形状の解析と探査機の位置・姿勢情報の高精度を行う

また、これらの画像データは天体のどの部分を撮影しているのかわからない。画像の各画素が天体の緯度経度でいうと何処にあたるのかを求める必要がある。そこで、公開されているカッシーニの軌道・姿勢と天体の位置・姿勢情報を利用する。しかし、この公開軌道 (SPICE という) はさほど精度が高くなく、大概の場合、大きくずれてしまっている。これを高精度化する作業 (Bundle Adjustment と呼ばれる) を行う (図3)。天体地表上の目立つ特徴点を数千点ほど選び出し、各点が各画像の画像面座標のどこに写っているかを結びつける。この点群をコントロールネットワークとよぶ。このプロセスでは画像をすべて読み込んで、同一地点を探し出し、コントロールネットワークを微調整していくことになる。コントロールネットワークと探査機の位置・姿勢がすべて整合する解はただ一つに定まる (鏡面関係にある別解を除く)。複数視点のカメラ画像と天体表面上の各地点が整合的になるような (誤差がもっとも少なくなるような) 最尤推定解をさがすことによって、探査機の位置・姿勢精度を大きく向上させることができ、これによって各画像の各ピクセルの緯度経度情報を大きく向上させることができる。

この次に実施するのが、地形状解析である。画像間の微かな視差を利用することによって、天体表面の標高を計算する。三角測量と同じ原理で、天体上のすべての地点の標高を、画像を利用することによって計算する。地球のリモートセンシング画像解析の分野ではDTM (Digital terrain model) と言われる (図4)。この作業によって、断層面の幾何学的な形状を調べることができるようになる。これら一

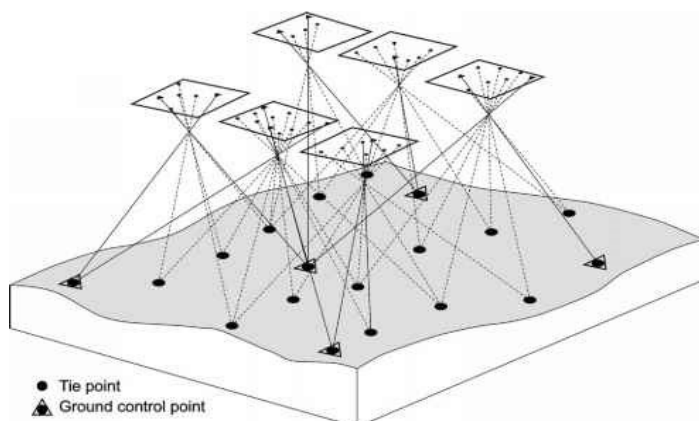


図3 Bundle Adjustment 法の例。表面の黒●点がコントロールネットワークを表し、それらが複数の画像 (上方の四角) 内にどのように映し出されているかを示している。これらの幾何学的関係から、地表面のコントロールネットワークの位置と各カメラの位置・姿勢を一意に求めることができる。USGS より

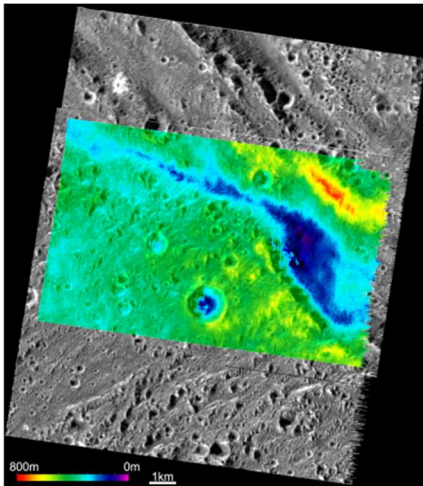


図4 DTMの例。申請者が作成した木星氷衛星ガニメデの高解像度DTMである。カラーで標高を示している。

連の作業は基本的には計算機を利用する。このプロセスはかなり労力が必要である。

(3) 断層面の調査と解析による衛星の膨張した体積を推定する

結果として得られた地形形状から、天体の体積の変化量を求める。方法は行く通りか知られているが、もっとも簡易な方法が正断層性の斜面を真上から見下ろした時の面積の累計を調べる方法である(図5)。この手法では、正断層の斜面がある部分を垂直に見下ろした時の面積を、天体の表面積の増加分と見なす。すべての正断層の面積を求めることで、天体の表面積の増加分を見積もることができ、そこから半径や体積の増加分に変換することができる。この手法は水星などで実際に実施されている手法を参考にする。

(4) 熱進化モデルに内挿することによって熱進化史に制約をあたえる

そして体積膨張量から天体の熱進化について制約を与えることができる。天体が膨張するメカニズムは主に2つあることが知られている。考えられる可能性の一つは氷マンツルの熱膨張である。天体が土星の潮汐によってもまれ、加熱を受けることによって、天体が温められると、氷マンツル全体が熱膨張する。氷は熱膨張率が高いこともあって、天体表面には大規模な亀裂が生じる。この場合、膨張した体積から天体の温度がどの程度上昇したかを求めることができる。もう一つの可能性が内部に液体の海があり天体が冷却することによって、それが穏やかに凍結した可能性である。水は氷になるときに10%ほど膨張するので、天体がもともと内部に液体の水をもっ

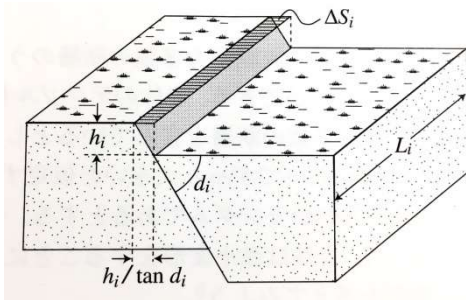


図5 断層を真上から見下ろしたときの面積  $S_i$ 。天体上にあるすべての断層について  $S_i$  を集計することで、天体全体の膨張量を見積もることができる。理論テクトニクス(山路敦著)より

ていた場合、それが凍結すると天体は膨張する。この場合、どのくらいの液体の水が凍結したかを推定できる。この二つのケースのどちらが正しいのかを判定できる可能性もあるし、判定できない可能性もあるが、熱進化史において重要な制約を与えることができるだろうと期待している。

### 3 研究成果

前年度は様々な不確定の事象があったが、前節の(1)(2)の過程を完了することができた。画像データを収集し、おおよそ300枚ほどの画像データが撮像条件・解像度・断層地形の視認性といった観点で解析に有用であることがわかった。そして、これらの画像から、天体地表上の目立つ特徴点を数千点ほど選び出し、各点が各画像の画像面座標のどこに写っているのかを結びつける作業を行い、探査機・天体の位置情報の高精度化を行った。さらに、地形形状解析を行い、画像間の微かな視差を利用することによって、天体表面の標高を計算した。この作業によって、断層面の幾何学的な形状を明らかにすることができた。これらの過程で購入した計算機を大いに活用した。



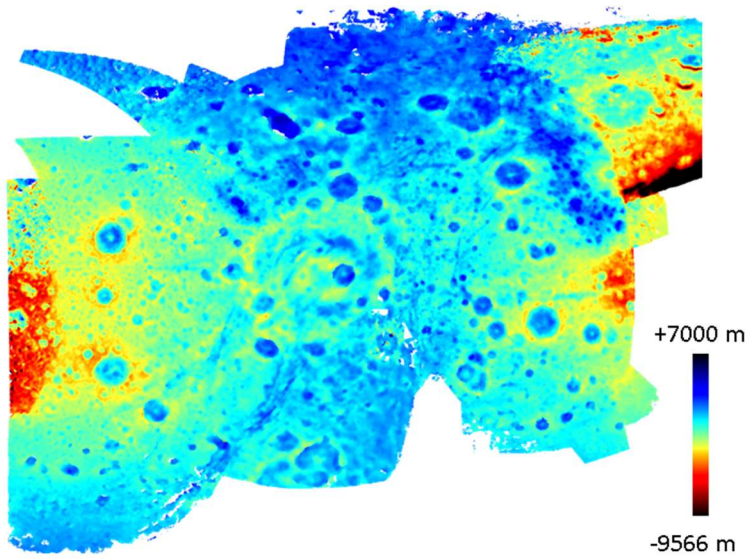


図6 本研究で作成されたディオオーネの Wispy 地形周囲の DTM

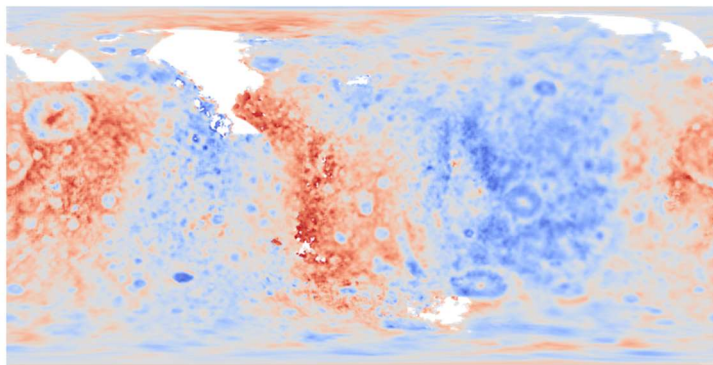


図7 本研究で作成されたレア全球の DTM

作業の結果、作成された DTM を図 6・7 に示す。図 6 に示すものがディオオーネの Wispy 構造近傍の形状モデルであり、図 7 がレアの全球形状モデルである。これらの形状モデルは過去のものと比較しても 10 倍を超える高い精度を有している。図に示す通り、断層地形が明瞭に見えており、ここから 100m 規模の断層構造が存在していることが見て取れる。これら高精度の形状モデルを用いると、おおよそ衛星ディオオーネの全周が 1-2km 程度伸びたことが明らかとなった。これは衛星の半径に換算すると、200-400m ほどディオオーネが膨張した結果であることがわかる。これは一方で、ごく一部分の解析をした結果であり、より詳しい調査 (前節の (3) (4) の過程) を今後進めることで、衛星全体の膨張をより高い精度で求める

ことができる目途が立った。さらに精密な膨張量を計測することによって、前節で述べたように内部でどのような熱進化を得ているのか理解を深めることができると期待される。これらの作業を経て国際学会誌に論文を投稿する予定である。

#### 4 生活や産業への貢献および波及効果

小惑星探査機はやぶさ・はやぶさ 2 の成功によって、日本の青少年が科学に興味をもつ良い契機になったと言われるように、惑星科学探査は社会的な波及効果が大きい。この研究は、十年後の氷衛星探査において貢献するものであり、社会的な波及効果が期待できる。また、国内外でも盛んに氷衛星の内部状態について関心をもたれ研究がなされている。米国や中国・インド等の諸外国において次期木星圏・土星圏氷衛星の探査が計画されており、わが国においてもこれらの外惑星系氷衛星を探査するために欧州宇宙機関 ESA と共同ミッションとして木星氷衛星探査機 JUICE が計画推進されている。本研究は基礎研究の一つとして、これらの将来探査に資するものであり、日本の国際競争力向上と科学技術力の高さを内外に示すことに貢献できるものと考えられる。