

特集「氷衛星」

Non-water Ice のレオロジー

山下靖幸¹

1. 氷天体の表層を覆うもの

外惑星系においては天体の主要構成物質として“氷”が卓越しており、ほとんどの天体ではその表面もしくは内部に“氷”が存在すると考えられている。それらの天体のうち表面が“氷”で覆われている衛星を特に氷衛星 (Icy satellite) と呼ぶ。ただし、ここでいう“氷”とは単なるH₂Oの固相であるWater Iceのみを指すものではなく、外惑星系に多く存在する固体窒素・メタン・一酸化炭素・二酸化炭素等のNon-water Iceと呼ばれる物質を含めた総称である。Non-water IceはVolatile Iceと呼ばれることもあることから分かる通り融点が高い。そのため温度が100K以下となる外惑星系でも、単体もしくはWater Iceとの混合物として大きな流動性をもつことも考えられ、外惑星系天体、特に氷衛星の表層環境を考える上ではそれらの物性を知ることは非常に重要である。

1.1 赤外分光による氷天体表層物質の同定

天体に存在する物質を同定する有力な方法のひとつに赤外反射スペクトルの観測がある。原子間結合の伸縮・屈曲によって、それぞれの分子固有の吸収帯を持つ。通常窒素の様な二原子分子は気体では赤外領域に吸収帯を持たないが、固体の場合は弱いながらも吸収帯を持つ。それぞれの吸収帯の温度・粒径に対する依存性を室内実験によって調べることにより、天体からの赤外分光スペクトル観測から、その表層を構成する物質が同定できるだけでなく表層温度や粒子サ

イズも見積もることができる。地上からの観測が可能である近赤外領域では、非常に強い吸収帯をもつWater Iceについてボイジャーが訪れる以前からガリレオ衛星での存在が示唆されていた。その後トリトン、冥王星に固体メタンが発見されたことによってNon-water Iceの研究の重要性が明らかになったと言えよう[1]。近年の地上からの近赤外分光観測技術の進歩はめざましく、トリトン表層には固体窒素・二酸化炭素・一酸化炭素、冥王星表層でも固体窒素・一酸化炭素と言ったNon-water Iceが発見されただけでなく、近年ではエッジワース・カイパーベルト天体やケンタウルス天体でもWater Ice以外に固体メタン、固体メタノールといったNon-water Iceが発見されている[2]。また地上からの観測以外では、木星探査機ガリレオに搭載されている高性能の分光計により、ガニメデ、クリスト、エウロパ表層でも固体二酸化炭素をはじめとしたNon-water Iceが見つかった[3]。

1.2 惑星探査機による氷天体の表層地形

アメリカ航空宇宙局 (NASA) によって打ち上げられたボイジャー1号は1979年3月に、同じく2号は同年7月に木星に接近し、エウロパ・ガニメデ・クリストといった氷衛星の素顔を初めて人類の前に示した。これら氷衛星については現在も探査機ガリレオによってより詳細な表層地形が得られている。1980年11月にはボイジャー1号が1981年8月には2号がそれぞれ土星に接近し、タイタンの素顔に迫った。残念ながらタイタンの厚い大気に阻まれ地表を観測することは出来なかつ

¹ 宇宙科学研究所

たが、その大気の詳細な組成を調べた。またエンケラダスの奇妙な表層地形を明らかにした。その後1986年1月にボイジャー2号は天王星に接近し、ミランダ・アリエル・チタニアといった衛星表面に著しい地質活動の証拠が残っていることを発見した。そして1989年8月に海王星に接近したボイジャー2号はトリトン表面のすばらしい画像を送ってきた(図1)。それから見ることに出来るトリトンの地形の特徴は、南半球で卓越している起伏のほとんどない再形成されたように見える平原と北半球に広く分布しているカンタロープと呼ばれるテレーンである[4]。カンタロープは今までの天体でも見つかっていなかった極めて特徴的な地形であり、トリトンの表層を覆っている固体窒素をはじめとするNon-water Iceの物性とその地形が形成されたメカニズムを明らかにする鍵であると考えられている。

1.3 太陽系に存在する“氷”

これまで述べてきた地上及び探査機による観測により明らかになってきた太陽系天体に存在しているNon-water Iceを含めた“氷”についてまとめたものを表1に示す。ガリレオ衛星のような大型の天体のうちその平均密度等から内部まで氷があると考えられるガニメデやカリストではその圧力に応じた高压相のWater Iceが存在していると推定されている。エンケラダスやミランダではその表面の複雑さから表層部分が何度も融解した可能性があり、その原因としてNon-water Iceもしくはクラスレート・ハイドレートの存在が示唆されている。タイタンはその大気にメタンが存在し更に地表付近の温度と圧力がメタンの三重点に近いことから固体メタンが存在すると考えられている。また天王星のリングはその反射能が土星のリングに比べて低いことからメタン及びその化合物の存在が示唆されている。トリトンと冥王星では現在までWater Iceの存在を示す確固とした証拠は見つかっておらず、その表面は固体窒素を中心としたNon-water Iceの宝庫であると考えられる。

外惑星系の天体の奇妙な表面地形やその内部構造の進化あるいは衝突などによる集積形成過程を知る手がかりとして、Non-Water Iceの物性を知ることは非常に重要である。しかしこれまでにNon-Water Iceの物性はほとんど調べられていないのが現状である。今回はボイジャーによってその地形が明らかになっているトリトン表層の主要構成物質である固体メタンと固体窒素の物性のうち、特にそれらのレオロジーに主眼をおいた研究として、超音波測定法による弾性定数の測定及び一軸圧縮変形実験による非弾性物性の測定[5,6]について以下に述べていきたいと思う。

2. 超音波測定法による弾性定数の測定

2.1 弾性定数と衝突現象

弾性定数はレオロジーと呼ばれる物質の粘弾性を考える上で重要な物性値である。元々の定義は弾性体内部の応力と歪みとが互いに比例するとしたフックの法則における比例定数であり、その例としてラメの定数・ヤング率・剛性率・体積弾性率・ポアソン比がある。惑星科学の分野では弾性定数は天体同士の衝突現象といった歪速度が大きな現象を考える場合に特に重要になってくる。二つの固体が衝突する時にはそれぞれの固体内部にパルス状の高压力が発生する。この時の圧力を衝突発生圧力 P と呼び、衝突する

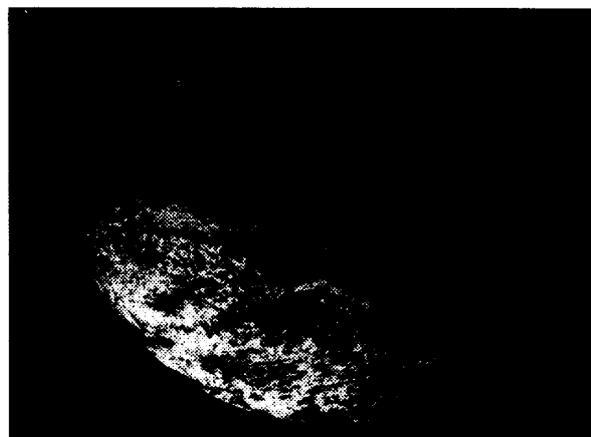


図1 トリトン表層の地形。ボイジャーの撮影した12枚ほどの写真を合成したもの。

固体が同じ物質の場合に P は以下の式で表される

$$P = \frac{1}{2} \rho_0 v \left\{ V_\phi - \frac{1}{4} v (\gamma + 1) \right\}$$

ここで、 ρ_0 は初期密度、 V_ϕ はバルク音速、 v は衝突速度、 γ はGrüneisen定数である。バルク音速は弾性定数のひとつで高速度衝突の際に発生する衝撃波の伝播速度と考えられ、縦波速度 V_p 、横波速度 V_s から以下の式で求められる

$$V_\phi = (V_p^2 - V_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

衝撃発生圧力は実験室内での衝突実験と実際の天体スケールの衝突現象の間の橋渡しをする基礎的かつ重要なパラメータである。

2.2 超音波測定法

物質の弾性定数の測定には様々な方法があるが、試料を真空中で極低温状態に保持する必要があるが、加えて作成できる試料の大きさに制限があることから超音波測定法を用いた。今回の測定では低温のため、振動子と試料の固定に接着剤を使用することが困難

表1 太陽系の外惑星領域に存在する“氷”の一覧表

Object	Radius(km)	Average density (g/cm ³)	Visual geometric albedo	Varieties of ices	
				identified	inferred
Io	1815	3.57	0.6	SO ₂	H ₂ S, H ₂ O(I)
Europa	1569	2.97	0.6	H ₂ O(I), SO ₂	
Ganymede	2631	1.94	0.4	H ₂ O(I), O ₂ , O ₃ , SO ₂ , CO ₂	H ₂ O(II, V, VI, VII), amorphous in polar caps)
Callisto	2400	1.86	0.2	H ₂ O(I), SO ₂ , CO ₂	H ₂ O(II, V, VI, VII)
Rings of Saturn			0.2 - 0.6	H ₂ O(I)	H ₂ O(amorphous)
Mimas	197	1.17	0.77	H ₂ O(I)	
Enceladus	251	1.24	1.0	H ₂ O(I)	H ₂ O(amorphous), clathrate hydrate, ammonia hydrate
Tethys	524	1.26	0.80	H ₂ O(I)	
Dione	559	1.44	0.55	H ₂ O(I), O ₃	
Rhea	764	1.33	0.65	H ₂ O(I), O ₃	H ₂ O(II)
Titan	2575	1.881	0.2	H ₂ O(I)	H ₂ O(II, V, VI, VII), CH ₄ , clathrate hydrate
Hyperion	175x120x100		0.25	H ₂ O(I)	
Iapetus	718	1.21	0.04 - 0.5	H ₂ O(I)	
s10 - s17	10 - 100		0.5 - 0.9		H ₂ O(I)
Rings of Uranus			~0.03		H ₂ O(I), modified CH ₄
Miranda	235	1.35	0.22	H ₂ O(I)	CH ₄
Ariel	580	1.66	0.38	H ₂ O(I)	
Umbriel	585	1.51	0.16	H ₂ O(I)	
Titania	790	1.68	0.23	H ₂ O(I)	
Oberon	760	1.58	0.20	H ₂ O(I)	
Triton	1350	2.075	0.6 - 0.9	CH ₄ , N ₂ , CO, CO ₂	H ₂ O(I), clathrate hydrate
Pluto	1145	1.84	0.612	CH ₄ , N ₂ , CO	H ₂ O(I), clathrate hydrate
Charon	642		0.424	H ₂ O(I)	
Centaur 1997 CU26	123			H ₂ O(I)	
KBO 1993 SC	78			CH ₄	
Centaur 5145 Pholus	78			H ₂ O(I), methanol	

注) Radius, Average density, Visual geometric albedoに関しては参考文献12, 13を, Varieties of icesに関しては参考文献14, 15を元に筆者の判断で加筆修正し作成した。

であった。接着剤による固定を行わなくても出来るだけ大きな信号を取り出せるという理由から、様々な超音波測定法の中からパルス透過法 (pulse transmission method) という最も単純な方法を用いた。この方法では入力信号と出力信号の時間差と測定試料の厚み L から音速を求める。測定に使用する振動子には以前は水晶振動子が用いられていたが、近年は大きな出力が得られるセラミック振動子を用いることが多く、今回の測定でも圧電セラミック $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ を用いた。また、これまで固体メタン・固体窒素の音速測定に関しては、試料の粒径やクラック等をきちんと観察することなく測定が行われてきた。今回の測定では、そういった試料の状態による測定値のばらつきを軽減するために、試料を観察できるような装置を開発した。測定中の試料はビデオカメラによって常にモニタした。

真空にしたガラス容器の中に直径17.5mm、高さ約10mmの円柱の試料を作成し測定を行った。試料はセルの内部をロータリーポンプにより0.1Torr程度の真空にひいてからガスを送りゆっくりと成長させる。試料作成時の冷却速度は毎分1K以下に制御した。このようにして、クラックがなく空隙率が小さく均質である粒径約2mmの多結晶の試料を作成した。ここでは実際の超音波測定装置及び測定方法についての詳細は[5]に

委ねることとする。

固体メタンの4Kから90Kにおける縦波及び横波速度の変化を図2aに示す。縦波及び横波速度はどちらも温度の減少とともにその値が大きくなっていることが分かる。固体メタンの α 相から β 相への転移温度である20.4K付近でどちらの値も大きく変化している。今回測定した64K以上の値は我々が以前測定した結果[6]ともよく一致していることが分かる。縦波速度は、これまで測定されているもの[7, 8]よりも大きな値が得られた。試料中にクラックや空隙が存在すると超音波の散乱及び減衰が起こり出力信号の波形の立ち上がり鈍り、得られる音速の値は見かけ上小さくなる。これらのことから今回作成した試料は非常に空隙率が少ないということが分かる。また横波速度はWolfらの測定結果[7]に近い値が得られた。TarasenkoはWolfらの結果は単結晶の試料を測定しているからである[8]と指摘していたが、今回の測定から多結晶の試料であると考へた方が妥当であり、また測定する試料の状態を観察することが如何に重要であることが分かる。

同様にして固体窒素の4Kから64Kにおける縦波及び横波の変化を図2bに示す。縦波及び横波は両者とも温度が下がるとともに速度が大きくなる。また固体窒素の α 相から β 相への転移温度である

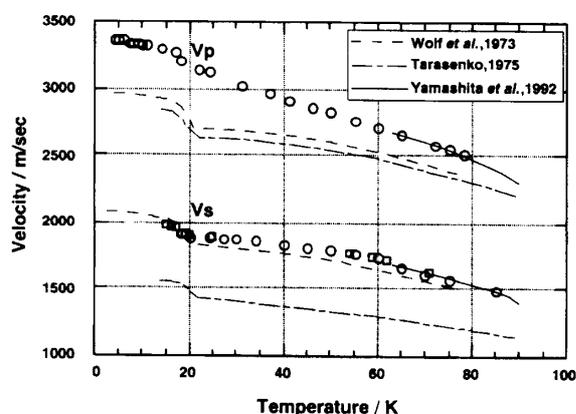


図2a 固体メタンの音速。測定した試料ごとに異なる記号でプロットしてある。誤差の範囲はそれぞれの記号の大きさ以下である。

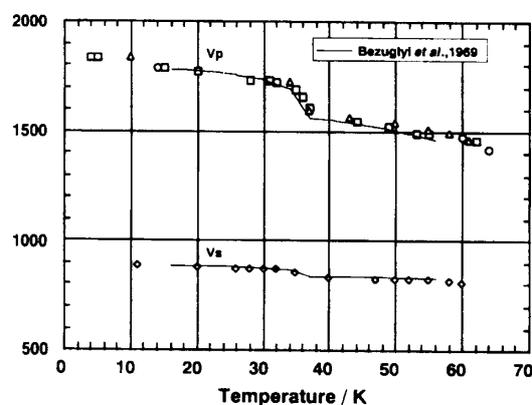


図2b 固体窒素の音速。測定した試料ごとに異なる記号でプロットしてある。誤差の範囲はそれぞれの記号の大きさ以下である。

35.6K付近で大きくそれらの値が変化している。今回の測定結果は過去の研究における測定結果[9]と比べてほとんど差はみられなかったが、試料の状態を観察しながら測定したことにより、これらの測定値はより定量性を増したといえる。

今回、クラックの有無や粒径といった測定試料の状態までモニタしながら、連続した広い温度範囲の音速を測定することができた。これら空隙率の小さい試料を測定して得られた音速から2.1節の式を用いることにより、試料の空隙率のばらつきに左右されない定量的なバルク音速を求め、衝突発生圧力を見積もることが可能となった。これによって固体メタンや固体窒素による基礎的な衝突実験の準備が整ったと言える。

3. 非弾性的物性の測定

レオロジーという観点から考えた場合に、弾性定数が歪み速度の大きな現象に対する指標となるのに対して、非弾性的な物性は歪速度が小さな現象を表す指標となる。例えば粘性率といった非弾性的性質は天体表層のクレータの緩和といったような地形進化を研究する上で必要不可欠な物性である。しかしながら、極低温での試料作成の難しさからこれまでNon-Water Iceに関するこの種の物性は全く測定されていない。

3.1 一軸圧縮変形実験

Non-Water Iceの非弾性的性質を測定する一つの方法である一軸圧縮変形実験を行った。この方法は過去に低温での金属の測定例があるだけでなく、Water Iceでの実績があり、極低温でも測定が可能であること、また構造的に実験中の試料を観察する事が可能な実験装置を作成可能であることから、今回の研究で採用した。

今回の実験で用いた極低温一軸圧縮装置の模式図を図3に示す。試料の作成及び変形を行う実験装置は二重のデュワーの中に置かれていて、外側のデュワー

は液体窒素用、内側のデュワーは液体ヘリウム用である。どちらのデュワーも外部からの輻射熱を軽減するために、その内側は銀メッキが施されている。ただし、外部からの試料の観察が可能ないようにメッキを施さない部分をスリット状に縦に残した。試料用のセルは円筒形のガラス製で高さは15mmで直径は10mmである。熱電対は金+0.07%鉄-クロメルを用い、試料用セルを固定しているアルミニウムの台に取り付けてある。試料は2.2節と同様の方法で作成した。この方法を用いて作成した試料の空隙率が小さいことは超音波測定法の結果で示されている通りである。試料の形状は直径10mm、高さ6~7mmの円柱形である。変形実験は試料用セルを試料から取り外した後に行う。実験時の温度は液体ヘリウム温度(4K)から試料の融点近くまでで、歪速度は $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ である。温度制御の精度は $\pm 1\text{K}$ である。変形用のロッドの変位はステップモーターの回転によりマイクロメーター・ヘッドを駆動することにより行った。応力はロードセルにより測

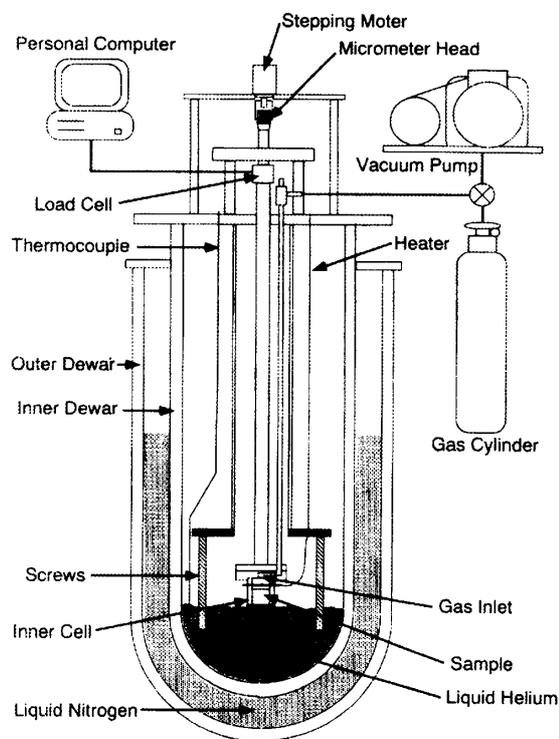


図3 極低温一軸圧縮変形実験装置の模式図

定し、そのデータはA/D変換器を通してマイクロコンピュータに記録した。試料の変形は歪みがおよそ50%になるまで行った。全ての実験過程における試料の変形はビデオカメラを使って記録した。

実際に測定した試料のうち固体メタンの変形前の様子を図4aに示す。温度は45Kで、直径10mm、長さ7.0mmの試料が出来ているのが分かる。液相を通してゆっくりと固化させた試料は粒径が約2 mmの透明な結晶になる。変形実験中の試料について示したのが図4bである。試料の歪みはおよそ30%である。試料の中央部分が膨れるような形で変形していることがわかる。試料はクラックを生じることなく変形していくことから、ductileな変形をしていると考えられる。



図4a 変形前の固体メタンの試料。上に見えるのはガラス製試料用セルである。

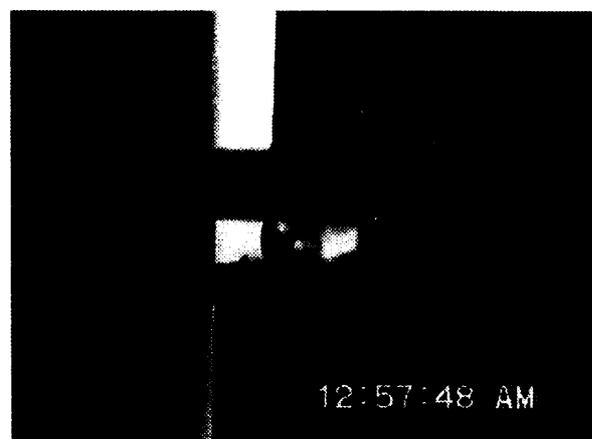


図4b 変形中の固形メタンの試料。試料の中央部分が膨らんでいるのが分かる。

3.2 固体メタンと固体窒素のレオロジー

固体メタン、固体窒素それぞれの測定結果について歪み速度と最大差応力もしくは最大物質強度の関係についてまとめたものが図5a, 5bである。白抜きの記号がductileに変形したものである。矢印が書いてあるデータについてはモータが最大トルクを越えてしまったために指定した速度で回転しなくなってしまったもので、プロットされている最大物質強度はその下限値である。固体メタン、固体窒素のductile領域の測定についてはフィッティングした直線の傾きが1ではないことから、歪み速度と応力の間にはべき乗の関係が成り立ち、直線の傾きから固体メタン、固体窒素のべき乗数はそれぞれ $n=1.8 \pm 0.2$, $n=2.2 \pm 0.2$ と求められた。

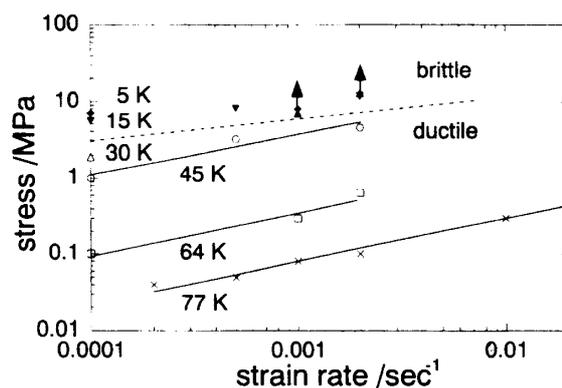


図5a 固体メタンの最大差応力と歪み速度の関係

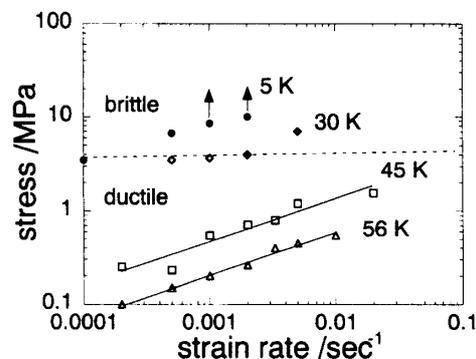


図5b 固体窒素の最大差応力と歪み速度の関係

通常べき乗則が成り立つような場合、その物質の変形は結晶がある面を境にして滑り変形を行う転位クリープに支配されていると考えられる。しかし、その場合には $n=3\sim 5$ 程度の値を持つことが普通である。今回の固体メタン・固体窒素の結果は、それに比べて n の値が小さいので転位クリープのみでは説明できない。点欠陥の拡散によって起こる拡散クリープは通常 $n=1$ であるので、固体メタン及び固体窒素の変形は転位クリープと拡散クリープの重ね合わせとして理解できる。図中にはそれぞれのbrittle-ductile領域の境界が点線で表されている。歪速度による依存性よりも温度に対する依存性の方が大きく、どちらも α 相と β 相の転移温度近傍を境にして、その変形メカニズムが大きく異なっていると考えられる。

次に固体メタン、固体窒素それぞれのductile領域について最大差応力をアレニウスプロットして、まとめたものが図6a, 6bである。それぞれの歪み速度について直線でフィッティングすることにより、以下の関係式から固体メタン及び固体窒素の変形に関する活性化エネルギー Q を見積ることが出来る。

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ は歪み速度、 σ は差応力、 R は気体定数、 T は絶対温度である。この式を用いて固体メタン、固体窒素のductile領域の活性化エネルギーはそれぞれ

$Q=4.9\pm 0.3\text{kJ/mol}$, $Q=4.3\pm 0.3\text{kJ/mol}$ と求めることが出来た。これらの値は243~268KにおけるWater Iceについて得られてる値 $Q=90\text{kJ/mol}$ と比べると非常に小さく、固体メタン及び固体窒素の極低温における流動性をよく示していると考えられる。

今回得られたべき乗数 n と活性化エネルギー Q を用いて以下の関係式から0.1MPaにおける固体メタン及び固体窒素の見かけの粘性率 η を求めた。

$$\eta = \frac{\sigma}{3\dot{\epsilon}}$$

固体メタンの粘性率は56 Kで 3×10^8 Pa sec, 45Kでは 4×10^{10} Pa sec, 固体窒素の粘性率は56Kで 2×10^8 Pa sec, 45Kでは 9×10^8 Pa secと見積もることが出来た。今回得られた固体メタン、固体窒素のductile領域における粘性率は同程度の融点換算温度におけるWater Iceの粘性率[10]と比べて4~6桁程小さな値である。これらの結果は極低温下においても固体メタン、固体窒素が変形しやすいことを示唆するものである。

3.3 トリトンの表層モデル

今回求められた固体メタン、固体窒素のductile領域の粘性率から100kmサイズのクレータの緩和時間は10年以下と見積もることができる。この結果はトリトン表層には、ほとんどクレータが見られないという観測事実と一致する。逆に数Kmの高低差がある北半球のカ

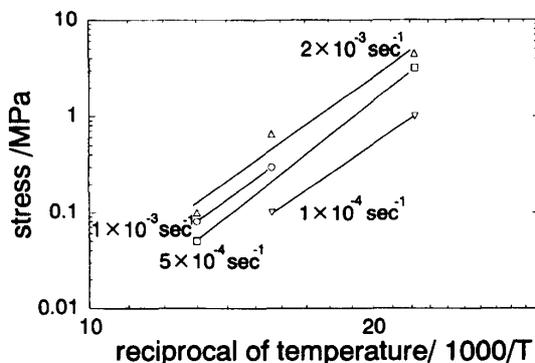


図6a 固体メタンの最大差応力と温度の関係

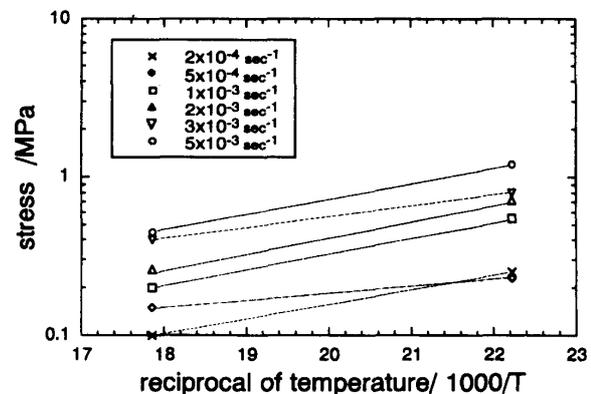


図6b 固体窒素の最大差応力と温度の関係

ンタロープ地形は長期間存在できない事になる。これらの地形はトリトン表層の大部分を占める固体窒素のレオロジーが $\alpha - \beta$ 相の転移温度近くで大きく変化しているという実験結果から, brittle で高粘性の α 相が北半球のカンタロープ地形を支え, ductile で低粘性の β 相が南半球の起伏のない地形を形作っているとする単純な表層モデルを考えることで上手く説明できる(図7)。トリトンの地表面温度は全球で一定であるとする大気モデルもあるが, 近年では南北半球での熱流量の違いによる表層温度の違いを指摘する研究もある[11]。今回の実験結果は後者の説を支持するものである。

4. 今後の実験と探査

これまでの研究により外惑星の主要構成物質のうち Water Ice だけでなく, 固体メタン, 固体窒素といった Non-Water Ice のレオロジーが明らかになった。しかし, これらは Non-Water Ice の一部にすぎないだけでなく, 実際の天体表層に存在するのは Water Ice も含めた“氷”の混合物であると考えられる。今後はクラス

レート・ハイドレートなどの水和物も含めた研究が必要となるであろう。

また今後の惑星探査により今回示したトリトンだけでなく, 例えば火星極冠と固体二酸化炭素のレオロジー, タイタン表層地形と固体メタンのレオロジー, 冥王星表層地形と固体窒素のレオロジーといった Non-Water Ice の地質学といった新しい研究分野が開けるかもしれない。

参考文献

- [1] Cruikshank, D. P., C. B. Plicher, and D. Morrison, 1976: Pluto: Evidence for methane frost. *Science*, **194**, 835-837
- [2] Cruikshank, D. P, T. L. Roush, M. J. Bartholomew, T. R. Geballe, Y. J. Pendleton, S. M. White, J. F. Bell, III, J. K. Davies, T. C. Owen, C. de Bergh, D. J. Tholen, M. P. Bernstein, R. H. Brown, K. A. Tryka and C. M. Dalle Ore, 1998: The composition of Centaur 5145 Pholus. *Icarus*, **135**, 389-407
- [3] McCord, T. B., G. B. Hansen, F. P. Fanale, R. W. Carlson, D. L. Matson, T. V. Johnson, W. D. Smythe, J. K. Crowley, P. D. Martin, A. Ocampo, C. A. Hibbitts, J. C. Granahan and the NIMS Team, 1998: Salts on Europa's surface detected by Galileo's Near Infrared Mapping Spectrometer. *Science*, **280**, 1242-1245
- [4] Smith, B. A., L. A. Soderblom, D. Banfield, C. Barnet, A. T. Basilevsky, R. F. Beebe, K. Bollinger, J. M. Boyce, A. Brahic, G. A. Briggs, R. H. Brown, C. Chyba, S. A. Collins, T. Colvin, A. F. Cook II, D. Crisp, S. K. Croft, D. Cruikshank, J. N. Cuzzi, G. E. Danielson, M. E. Davies, E. De Jong, L. Dones, D. Godfrey, J. Goguen, I. Grenier, V. R.

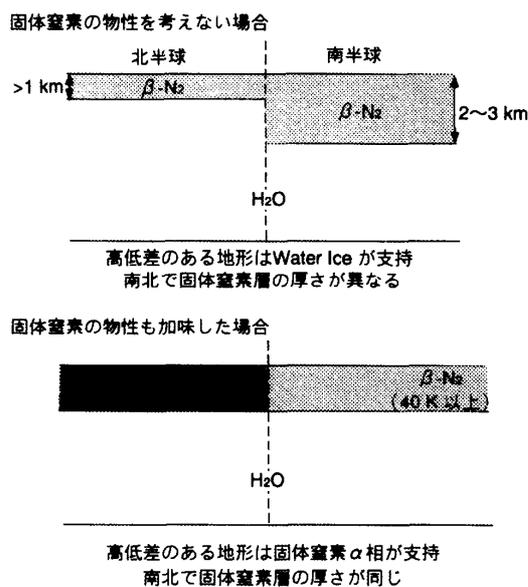


図7 トリトンの表層構造モデル。

- Haemmerle, H. Hammel, C. J. Hansen, C. P. Helfenstein, C. Howell, G. E. Hunt, A. P. Ingersoll, T. V. Johnson, J. Kargel, R. Kirk, D. I. Kuehn, S. Limaye, H. Masursky, A. McEwen, D. Morrison, T. Owen, W. Owen, J. B. Pollack, C. C. Porco, K. Rages, P. Rogers, D. Rudy, C. Sagan, J. Schwartz, E. M. Shoemaker, M. Showalter, B. Sicardy, D. Simonelli, J. Spencer, L. A. Sromovsky, C. Stoker, R. G. Storm, V. E. Suomi, S. P. Synott, R. J. Terrile, P. Thomas, W. R. Thompson, A. Verbiscer and J. Veverka, 1989: Voyager 2 at Neptune: Imaging science results. *Science*, **246**, 1422-1449
- [5] Yamashita, Y. and M. Kato, 1997: Viscoelastic properties of polycrystalline solid methane and carbon dioxide. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1327-1330
- [6] Yamashita, Y., M. Kato, K. Suzuki, Y. Iijima, and A. Yoneda, 1992: Impact properties of solid methane: Crystal growth and ultrasonic measurement. *Proc. 25th ISAS Lunar Planet. Sympo.*, 136-140,
- [7] Wolf, R. P., F. A. Stahl and J. A. Watrous, 1973: Ultrasound velocity in solid CH₄. *J. Chem. Phys.*, **59**, 115-120
- [8] Tarasenko, L. M., 1976: Ultrasound studies of polycrystalline methane. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, **1**, 688-689
- [9] Bezuglyi, P. A., L. M. Tarasenko and Yu. S. Ivanov, *Sov.*, 1969: Sound velocity and elastic and thermal characteristics of crystalline nitrogen and oxygen. *Phys. Solid State*, **10 (7)**, 1660-1664
- [10] Kirby, S. H., W. B. Durham, M. L. Beeman, H. C. Heard and M. A. Daley, 1987: Inelastic properties of ice Ih at low temperatures and high pressures. *J. Phys. C1*, **48**, 227-232
- [11] Robert H. Brown & Randolph L. Kirk, 1994: Coupling of Volatile Transport and Internal Heat Flow on Triton. *J. Geophys. Res.*, **99**, 1965-1981
- [12] Buratti J. Bonnie, 1999: Outer planet icy satellites, in *Encyclopedia of the solar system*, eds. Paul R. Weissman, Lucy-Ann McFadden and Torrence V. Johnson, p.435-455, Academic Press
- [13] 小森長生, 1998: 衛星と環, 天文年鑑1999年度版, 天文年鑑編集委員会編, p.191-195, 誠文堂新光社
- [14] Klinger, J., 1985: Icy satellites, rings and Pluto, in *Ices in the solar system*, eds. J. Klinger et al., p.621-629, D. Reidel Publishing Company
- [15] Cruikshank, D. P., R. H. Brown, W. M. Calvin, T. L. Roush and M. J. Bartholomew, 1998: Ices on the satellites of Jupiter, Saturn, and Uranus, in *Solar system ices*, eds. B. Schmitt, C. De Bergh and M. Festou, p.579-606, Kluwer Academic Publishers