

## 特集「氷物性と新しい物質科学」

# 氷天体物質の流動物性

久保友明<sup>1</sup>

(要旨) 氷天体の進化過程や内部構造，内部ダイナミクスを理解する上で，その構成物質の塑性流動特性を知ることが非常に重要である．低温ガス圧変形装置の活躍により，ハイドレートも含めた主な氷天体物質に関して，高応力下で卓越する転位クリープの流動則はほぼ揃いつつある．最近，より低応力下で働く結晶粒径依存クリープが氷Ih相および氷II相において発見され，以前に考えられていたよりも氷天体内部が流動しやすいことが明らかになってきた．今後は，拡散クリープも含めた低応力下で卓越してくる流動機構を中心に研究を行い，氷天体内部の粘性構造を定量的に理解していくことが望まれる．そのためには，塑性変形実験に加えて，原子拡散や結晶粒径進化に関する系統的な研究が必要である．

## 1. Rheology as Master of the Satellite Universe

昨年のAGU Fall Meetingでの氷物性セッションは，このような講演タイトルとともに始まり，氷天体を理解する上で，その構成物質の塑性流動の重要性を再認識させるものとなった[1]．近年，太陽系内のみならず，系外惑星の中にも氷と岩石を主成分とする氷天体が存在することが明らかになってきている．その魅力は，人工衛星探査や各種観測によって明らかにされつつある多様性である．氷の塑性流動は，天体の大きさや密度と並んで，多様な氷天体の特徴づける重要な物性である．

図1に分化したガニメデ内部で予想される温度構造モデル（内部海のある場合とない場合）を，氷の相平衡図とともに示す[2]．集積段階や集積直後の未分化な氷天体においては，氷＋岩石混合物質の塑性流動が氷天体の進化の運命を握っており[3]，もし対流による効率的な熱輸送が行われなければ，温度上昇により氷が融けて氷マントルと岩石核への分化が起こ

る．その後の熱的進化や内部海のfreezingなどは，対流する氷マントル（convective icy mantle）の粘性に依存した熱輸送プロセスに支配される．一方，低温の氷天体表面では，対流運動の起こらない安定な氷外殻（stagnant lid）が形成される．最近では，氷外殻下部においても対流不安定化が起こると指摘されており[4,5]，それは表面地形や氷外殻直下の内部海の存在に大きな影響を与えている．また，氷外殻の潮汐変形に

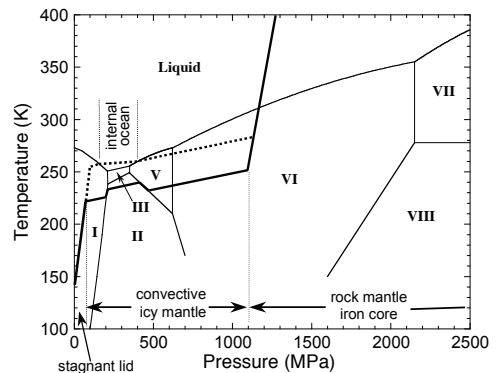


図1：分化したガニメデ（半径 2640 km，中心圧力～3600 MPa，氷－岩石マントル境界の深さは約 900 km）内部で予想される温度構造モデルと氷の相平衡図（実線：内部海のない場合，点線：内部海のある場合，[2] から一部改変）。

1. 九州大学大学院理学研究院・地球惑星科学部門

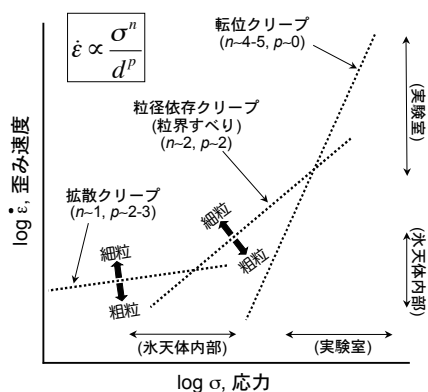


図2：氷I相の流動則に対する応力 ( $\sigma$ ) および結晶粒径 ( $d$ ) 依存性。

よる発熱と表面クレーターの緩和現象などは、氷の粘弾性特性の理解なしには定量的な議論はできない。このように、氷天体物質の流動物性は天体内部の熱輸送とダイナミクスを支配し、氷天体の進化、内部構造、内部海の有無、表面地形の多様性、潮汐力への力学的応答などを理解するうえで必要不可欠なパラメーターである。

探査機ボイジャーによって、氷天体表面の活発な地質活動の証拠が得られたことを受けて、氷天体物質の塑性流動の重要性は以前から指摘され[6]、数多くの実験的研究が行われてきている。しかし、最近の探査機ガリレオやカッシーニなどによって氷天体に関する多くの情報がもたらされる中で、氷天体物質の塑性流動特性への理解は未だ不十分な点が多い。その主な要因は、変形実験の際に再現できる歪み速度や応力条件が実際の氷天体内部の条件と大きく異なっていること、そして固体の流動の素過程が歪み速度や応力によって変化することにある。

図2に氷Ih相（以下、氷I相と表記する）において明らかになってきた、塑性変形速度に対する応力および結晶粒径依存性を模式的に示す。一般に、固体の塑性流動は、以下のような流動則（歪み速度  $\dot{\epsilon}$  と応力  $\sigma$  の関係）によって表される。

$$\dot{\epsilon} = A \frac{\sigma^n}{d^p} \exp\left(-\frac{E^* + PV^*}{RT}\right)$$

ここで、 $d$ は結晶粒径、 $E^*$ は活性化エネルギー、 $V^*$ は活性化体積、 $P$ は圧力、 $T$ は絶対温度、 $R$ は気体定数である。応力依存指数 $n$ と結晶粒径依存指数 $p$ の値によって、転位クリープ ( $n=4 \sim 5$ ,  $p=0$ )、結晶粒径依存クリープ ( $n=2$ ,  $p \sim 2$ )、拡散クリープ ( $n=1$ ,  $p=2 \sim 3$ ) の、大まかには3つの流動機構が固体結晶に存在することが知られている[7]。それぞれ、結晶内の転位の移動、結晶粒界すべり、原子拡散が主要プロセスとなって固体の流動が起こっている。高応力下では $n$ 値の大きい転位クリープが卓越し、低応力下では $n$ 値が小さく結晶粒径に依存したクリープが卓越する。

実験室で再現できる歪み速度は、氷天体内部の対流運動の歪み速度に比べ10桁近くも大きく、氷天体内部の流動を議論するには実験データの大きな外挿が必要となる。よって、転位クリープから拡散クリープまでのそれぞれの流動則を実験的に決定し、氷天体内部条件において実際に卓越している流動機構を明らかにすることが極めて重要である。しかし現実には、以下に述べるように、氷I相においても十分ではなく、氷の高圧相や各種ハイドレート、固体二酸化炭素などの non water iceについては非常に限られたデータしか得られていない。

本稿では、低温高圧下における氷天体物質の塑性流動に関する実験的研究について概説する。特に、最近得られた氷の結晶粒径依存クリープに関する実験を詳しく紹介するとともに、氷天体内部の流動を定量的に理解していくために必要不可欠な事柄について、今後の展望をまとめる。

## 2. 低温高圧下における氷天体物質の塑性変形実験

低温高圧下における氷の塑性変形実験にはいくつかの研究例があるが、定量的な実験データは、米国立ローレンスリバモア研 (LLNL) のHugh Heard, Bill Durham (現在MIT)、米国地質調査所 (USGS) の

Steve Kirbyらのグループによって開発された、低温ガス圧変形試験機[8]によって得られたものが中心となる。この装置では、ガス圧によって封圧をかけ、モーター駆動の一軸ピストンによって歪み速度一定および応力一定の条件で変形実験を行うことができる。高压容器内に挿入されるピストン摩擦の影響を避けるため、試料の応力は試料直上にある内部応力計（ステンレス製円柱状の歪みゲージ）を用いて封圧下で測定される。試料にクラックや空隙が存在すると試料の流動特性に影響を及ぼすため、それらを避けるためにも封圧下で実験を行うことが望ましい[9]。

温度は、高压容器の外側を取り囲むbathに通常はエタノール冷媒（融点158K）を満たし、その中に銅管を張り巡らし液体窒素を循環させることによってコントロールしている。より低融点の冷媒もしくは液体窒素を直接bathに満たすことで、77Kまでの条件で実験が可能である。この装置により、温度77-300K、最高圧力700MPa、最低応力 $\sim 0.5$ MPa、最低歪み速度 $\sim 2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ の条件で氷天体物質の定量的な塑性変形実験が可能である。試料はインジウムカプセルに溶接封入される。試料内のガス分圧を封圧とは独立に制御することが可能であり、ガスハイドレートをを用いた変形実験も可能である。

この装置は、岩石の変形実験で有名なPaterson型ガス圧変形試験機とならんで、地球惑星物質の塑性流動特性に関する研究を大きく前進させたパイオニアの実験装置と言える。

### 3. 氷天体物質の転位クリープによる流動

氷I相の塑性流動に関しては、地球氷床の流動に関する研究にともない、主に常圧融点付近において数多くの実験が行われてきた。氷I相は圧力約200MPaまで安定に存在して氷天体外殻のダイナミクスを支配しており、その低温高压下での塑性流動特性を知る必要がある。また一般的に言えば、密度 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 程度の

比較的低密度の氷天体においてIapetusやRheaなど半径が約700km以上に達する場合は、内部の圧力が200MPaを超えて氷II相や氷III相が存在できる条件が実現している[2,10]。TitaniaやOberon, Triton, Plutoの内部にも氷高压相が存在できるであろう。さらにGanymede, Calisto, Titanなど半径が2500kmに達するような氷天体では、内部圧力が2GPaを超えて氷V相や氷VI相が存在する圧力に達している(図1)。また、氷天体にはwater iceの他に、硫酸塩やメタン、アンモニアなどのハイドレート、固体二酸化炭素や固体窒素などnon water iceの存在も示唆されており、それらの塑性流動特性を理解することも重要である。

主に低温高压下で得られた氷天体物質の流動則を表1にまとめる[9,11-17]。上述した低温ガス圧変形装置を用いた20年以上にわたる実験的研究によって、氷天体物質の流動特性の概要が明らかになりつつあるが、氷天体内部の対流運動や熱的進化のモデリングに際して、実際にこれらの実験データが用いられることはあまり無かったと言える。その主な原因は、表1に見られるように、これまでに得られた流動則のほとんどが、応力依存指数 $n$ 値が4～6で結晶粒径に依存せず、高応力下で卓越する転位クリープのものだからである。この流動則を氷天体内部条件へ外挿することは可能であるが、それは粘性の最大値を示しているにすぎず、実際にはもっと軟らかい流動機構が働いている可能性が高い。

### 4. 氷の結晶粒径依存クリープの発見

そのような背景の中、最近、氷のI相[9,12,13]およびII相[14]において、より低応力下で卓越してくる結晶粒径依存クリープが発見された。特に氷I相の結晶粒径依存クリープにおいては、常圧下ではあるが定量的な流動則が得られた[12,13]。それは氷天体において実際に働く流動機構として注目され、その流動則を用いて外殻水層の熱輸送や対流運動のモデリング、外殻

表 1： これまでに実験的に得られている主な氷天体物質の代表的な流動則パラメーター。  
\*印以外は、転位クリープ領域の流動則を示す。

| Phase                                              | log A<br>(MPa <sup>-n</sup> s <sup>-1</sup> ) | p    | n   | E*<br>(kJ/mol) | V*<br>(cm <sup>3</sup> /mol) | Ref       |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------|-----|----------------|------------------------------|-----------|
| Ice I                                              | 5.1                                           | 0    | 4.0 | 61             | -13                          | [11]      |
| Ice I*                                             | -2.4                                          | 1.4  | 1.8 | 49             | P=0.1MPa                     | [9,12,13] |
| Ice II                                             | 1.84                                          | 0    | 5.3 | 55             | 7                            | [11]      |
| Ice II*                                            | -2.4                                          | >1.5 | 2.5 | T=200K         | P=200MPa                     | [14]      |
| Ice III                                            | 13.3                                          | 0    | 6.3 | 103            | P=250MPa                     | [11]      |
| Ice V                                              | 23                                            | 0    | 6   | 136            | 29                           | [11]      |
| Ice VI                                             | 6.7                                           | 0    | 4.5 | 66             | 11                           | [11]      |
| NH <sub>3</sub> 2H <sub>2</sub> O                  | 21.6                                          | 0    | 5.8 | 108            | P=50MPa                      | [11]      |
| MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O                | 36.2                                          | 0    | 3.5 | 270            | P=50,100MPa                  | [15]      |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O | 12.1                                          | 0    | 5.4 | 128            | P=50,100MPa                  | [15]      |
| CH <sub>4</sub> 6H <sub>2</sub> O*                 | 8.55                                          | -    | 2.2 | 90             | 19                           | [16]      |
| CO <sub>2</sub>                                    | 3.86                                          | 0    | 5.6 | 33             | P=5-10MPa                    | [17]      |

氷層直下の内部海の存在条件を制約するための議論が行われている[4,18].

卓越する流動機構が転位クリープから結晶粒径依存クリープへと変化する応力条件は、結晶粒径に大きく左右される(図2)。実験室の応力条件において結晶粒径依存クリープを実現させるためには、なるべく細粒の結晶を用いて低応力下で長期間にわたって慎重な変形実験を行うことが重要である。そのため、これまでの変形実験手法に加えて、氷多結晶試料の結晶粒径を制御し測定する技術が必要不可欠となる。以下に、筆者が行った氷II相の結晶粒径依存クリープに関する実験[14]について概説する。

#### 4.1 氷II相の細粒多結晶体の合成

氷II相の細粒多結晶体の合成およびその変形実験は、前述したLLNL設置の低温ガス圧変形試験機を用いて、圧力150-300MPa、温度77-240Kの条件で行った。空隙のない氷I相の多結晶体(粒径約250 $\mu$ m)を出発物質として使い、氷のI-II相転移を利用して、氷II相の細粒多結晶体を合成することを試みた。氷I相多結晶体を、温度一定、pumping rate一定の条件下で加圧したときに、I-II相転移が起こる温度圧力条件を氷の相平衡図とともに図3に示す。この高圧相転移は約20%の体積減少を起こすため、加圧時の圧力変化をモニターすることで相転移を検知することが可能である。

相転移のカイネティクスが影響するため、低温ほど相平衡境界から離れた大きな過剰圧条件で相転移が起こる。核生成-成長機構による一般的な相転移の進行を考えた場合、より低温で大きな過剰圧条件下で相転移させるほど結晶が細粒化することが予想される。しかし、本研究で行った温度175K、過剰圧約150MPaまでの条件では、結晶粒径依存クリープが出現するほどの細粒化は起こらなかった。

一方、氷II相を200K付近において急激に脱圧させると、粒径数 $\mu$ mの氷I相細粒多結晶体になることが知られており[19]、その手法は氷I相の結晶粒径依存

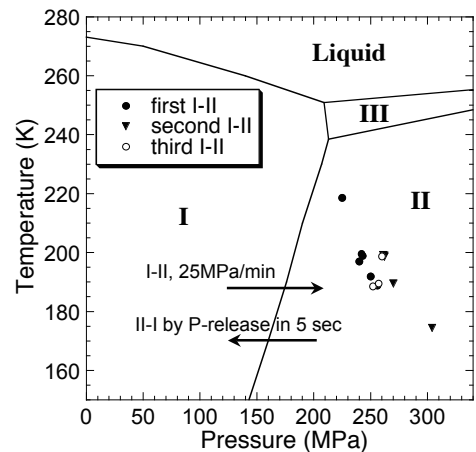


図 3： 等温加圧により氷の I - II 相転移が起こる温度圧力条件 ([14] から一部改変)。細粒の氷 II 相を合成するために最高 3 回まで I - II 相転移を繰り返した。

クリープの発見[12]につながった．ここでは，I-II相転移で合成した氷II相を急減圧により細粒氷I相にもどし，それを再びI-II相転移させる，というプロセスを繰り返し，細粒の氷II相を合成することを試みた．このプロセスを繰り返すほど，より大きな圧力低下を伴う急激なI-II相転移が起こる．

## 4.2 氷II相多結晶体の電子顕微鏡観察

氷天体物質の走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた低温下での組織観察は，これまでにUSGSのLaura Sternらを中心に，氷I相や各種ハイドレートに対して行われている．電界放出型のSEMに液体窒素温度まで制御可能な冷却ステージを装着し，電子線によるダメージを避けるため低加速電圧を用いている．低温を保持したまま安全に氷試料をSEM内に移動させるため，SEM試料室前に低温予備排気室が配備されている．そこでは低温真空中においてダイヤモンドナイフを用いて氷試料をカットすることができ，大気下で移動中に試料表面に凝縮した霜を取り除き，新鮮な試料断面を露出させることができる．

これまで氷高圧相の変形試料組織の直接観察は行われておらず，試料を包み込んでいたインジウムカプセル内側に刻印された試料のレプリカ観察にとどまっ

た．氷II相は約120K以下であれば常圧下においても準安定に存在することが知られている．本研究では変形実験終了後，液体窒素温度まで試料を冷却した後には脱圧し，氷II相のまま回収して（図4），その多結晶組織を低温SEMで直接観察することを試みた．しかし氷II相のSEM直接観察には成功したものの，試料断面は塊状で結晶粒界や結晶粒径の観察は困難であった．

そこで，変形実験終了後，試料に少量のII-I相転移を施し，氷II相の結晶粒界に氷I相を析出させて氷II相の粒径を観察することを行った．一般に固相の相転移は，エネルギーの高い結晶粒界から反応が進行することが多く，その性質を利用したものである．この手法により，3回のI-II相転移を繰り返した場合，粒径が約6  $\mu\text{m}$ の氷II相多結晶体が合成されることが明らかになった（図5）．

## 4.3 氷II相の結晶粒径依存クリープと氷天体内部の流動

図6に氷II相多結晶体の塑性変形実験によって得られた応力-歪み曲線を示す．歪み速度を $3.9 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ で一定にして変形させた場合，約0.5%の歪み量で流動応力がほぼ一定となり定常クリープに達している．この

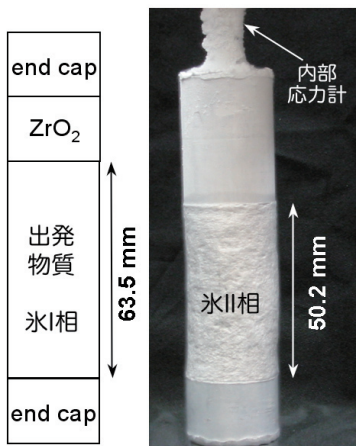


図4：変形実験後，77Kにて常圧に回収された氷II相試料（I-II相転移を3回繰り返して合成し，約10%の歪み量まで変形を行った）．比較のために出発試料の模式図を示す（[14]から一部改変）．

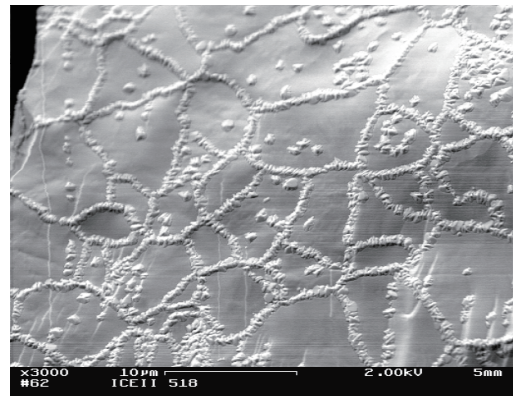


図5：氷II相多結晶体の破断面のSEM写真．I-II相転移を3回繰り返して合成した後に，変形実験を行った試料．回収直前に少量のII-I相転移を行い，氷II相の結晶粒界を氷I相でデコレーションした．



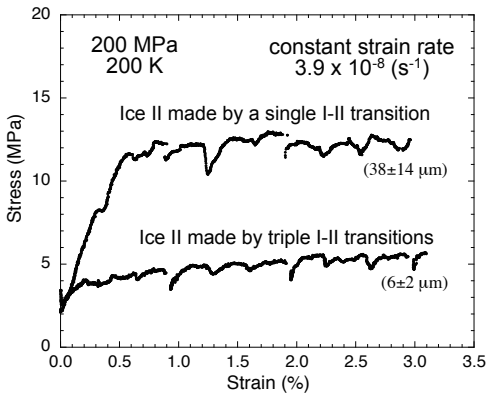


図6：氷Ⅱ相多結晶体の定歪み速度下における応力-歪み曲線〔14〕から一部改変。

歪み速度では、3%の歪み量を得るのに約10日間を要する。図6から、I-II相転移を3回繰り返して合成した粒径約6  $\mu\text{m}$ の氷Ⅱ相多結晶体は、I-II相転移を1回のみで合成した粒径約40  $\mu\text{m}$ の氷Ⅱ相よりも、非常に小さい流動応力で変形していることが分かる。

実験結果を応力-歪み速度の関係としてまとめたものの一例を図7に示す。結晶粒径が約40  $\mu\text{m}$ の場合、以前に応力が20MPa以上の条件で得られていた応力

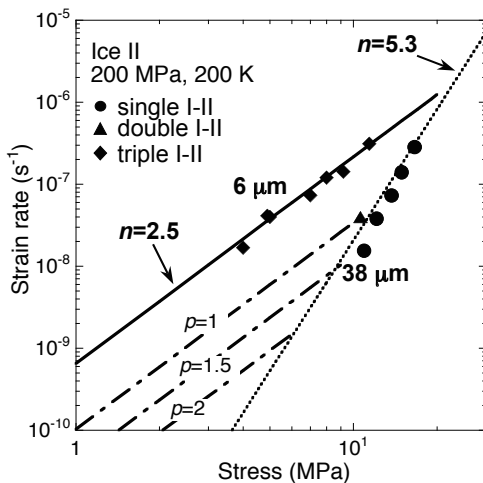


図7：氷Ⅱ相多結晶体の歪み速度に対する応力および結晶粒径依存性〔14〕から一部改変。点線はこれまでに得られていた $n=5.3$ の流動則〔11〕。粒径6  $\mu\text{m}$ で得られた $n=2.5$ の流動則を基に、粒径依存指数 $p=1, 1.5, 2$ を仮定して推定した粒径38  $\mu\text{m}$ の歪み速度を一点鎖線で示す。

指数値 $n=5.3$ の流動則を、応力10 MPa付近まで再現しており、新しい流動機構が出現する兆しは得られなかった。一方、結晶粒径が約6  $\mu\text{m}$ の場合では、40  $\mu\text{m}$ の場合に比べ流動応力がより小さくなるとともに、より小さい応力指数値 $n=2.5$ を示しており、氷Ⅱ相の結晶粒径依存クリープが出現したことが明らかになった。粒径40  $\mu\text{m}$ では応力10MPaにおいても $n=5.3$ の流動則を示すことから、今回発見された結晶粒径依存クリープの粒径依存指数値 $p$ は1.5以上の値をとると予想される。

図8に氷Ⅰ相およびⅡ相について、圧力200MPa、温度200Kにおける転位クリープと粒径依存クリープの粘性値を比較する。氷Ⅱ相については、他の物質などで得られている典型的な粒径依存指数値 $p=2$ を仮定した。結晶粒径が1mmおよび10mmの場合、それぞれ応力が0.5MPaおよび0.1MPa以下であれば、氷Ⅰ相、氷Ⅱ相とも結晶粒径依存クリープが転位クリープよりも卓越してくることが分かる。太陽系内に存在するRhea, Iapetusなどの中型氷衛星、およびGanymede, Calistoなど大型氷衛星内部の対流運動による流動応

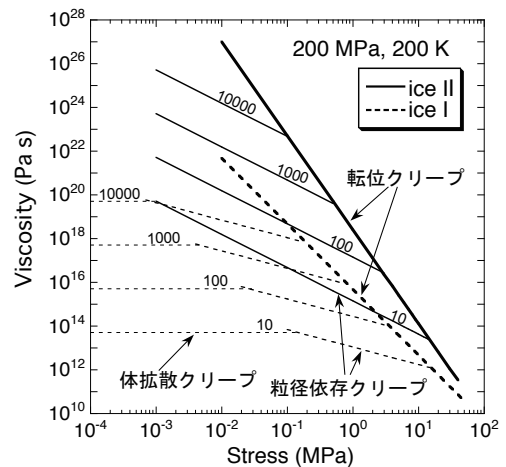


図8：氷Ⅰ相と氷Ⅱ相の塑性流動特性の比較。粘性値に対する応力および結晶粒径依存性を示す。数字は粒径(単位ミクロン)。

力は、それぞれ $\sim 0.01\text{MPa}$ および $\sim 0.1\text{MPa}$ と推定されている[10]。よって結晶粒径が $10\text{mm}$ 以下であれば、氷I相，II相とも氷天体内部において結晶粒径依存クリープによる流動が起こることが予想される。応力 $0.1\text{MPa}$ ，粒径 $1\text{mm}$ の条件を考えた場合，氷I相およびII相の結晶粒径依存クリープによる粘性値は，それぞれ $4.4 \times 10^{16}\text{Pas}$ および $4.7 \times 10^{20}\text{Pas}$ と計算され，氷天体内部の氷I-II相境界において4桁近い粘性増加が予想される。氷I-II相境界は正のクラペイロン勾配(冷たい物質がより浅いところで，暖かい物質がより深いところで相転移する)をもち，一般には相転移が対流運動の障壁とならずに促進する働きをすると考えられている。しかしこのような大きい粘性コントラストが存在した場合，対流パターンを変化させ氷天体内部の熱輸送に大きな影響を与えている可能性がある。

## 5. 氷天体物質の塑性流動 ～今後の展望～

特に結晶粒径に注意を払わずに出発物質を準備し，一日で何点かのデータを取ることができるよう比較的高応力下で実験を行った場合， $n$ 値の大きい転位クリープによる流動が起こることが多い。上述した低温ガス圧変形装置の活躍により，主な氷天体物質に関してそのようなサーベイは一通り終了したと言える。しかしここに紹介したように，実際の氷天体内部では転位クリープとは異なる素過程で流動が起こっている可能性が高い。今後は特に，低応力で卓越してくる流動機構を中心に実験的研究を進めていく必要がある。それには変形実験だけでなく，氷天体物質の原子拡散や結晶粒径進化に関する系統的な研究が必要である。以下に，氷天体内部の流動に関して，今後必要となるであろう事柄についてまとめる。

### 5.1 氷の拡散クリープと原子拡散

氷I相の拡散クリープを定常状態で実験的に再現することは極めて困難である。数 $\mu\text{m}$ の細粒多結晶体を

準備しても，歪み速度を少なくとも $10^{-9}\text{s}^{-1}$ オーダー（1%の歪みを得るのに100日以上かかる）にする必要があるだろう。最近では，氷の拡散クリープ領域の超低歪み速度条件における変形実験を行うために，レーザー干渉測長技術を用いてナノメートルオーダーの微小変位の観測手法を確立する研究も行われている[20]。氷は融点規格化温度に対する拡散係数が共有結合結晶なみに小さく，その性質により拡散クリープが出現する応力条件が極めて低くなっていると考えられている[21]。しかし，氷天体内部で拡散クリープが働いている可能性は十分に考えられ，対流のモデリングなどで線形流動を仮定した研究も多く見られる。拡散クリープの粘性値は，原子拡散係数が得られていれば以下のような式から推定することが可能である。

$$\dot{\epsilon} = A \frac{\alpha \Omega}{RT} \frac{D_{\text{eff}}}{d^2}$$

ここで， $\Omega$ はモル体積， $D_{\text{eff}}$ は体拡散と粒界拡散を含むような多結晶体における有効拡散係数である。拡散クリープには体拡散を主要な素過程とする体拡散クリープ(Nabarro-Herring creep)と粒界拡散を主要な素過程とする粒界拡散クリープ(Coble creep)がある[7]が，氷I相の場合，常圧下において体拡散の実験データのみが得られており前者のクリープのみ推定可能である[13]。それを基に，図8に圧力 $200\text{MPa}$ ，温度 $200\text{K}$ における氷I相の体拡散クリープの粘性値をまとめる。なお拡散係数の圧力依存性を示す活性化体積は，転位クリープの値 $-13\text{cm}^3/\text{mol}$ を仮定した。結晶粒径が $1\text{mm}$ の場合，流動応力が小さくなるに従い，応力 $0.5\text{MPa}$ 付近で転位クリープから粒径依存クリープへ，さらに応力 $0.005\text{MPa}$ 付近で拡散クリープへと，卓越する流動機構が変化することが分かる。このように，氷I相に関しては主な流動機構に関してその流動則が揃いつつあり，氷天体の特に外殻水層の対流運動を定量的に議論できるようになった。

氷の高圧相の原子拡散に関する実験的研究は非常に少ないが，最近，氷VII相に関して水素の拡散係数が報告されている[22]。氷I相では水素と酸素の拡散係数が同程度であり，それらは $\text{H}_2\text{O}$ 分子として拡散していると考えられている。しかし氷VII相では水素の拡散が酸素に比べて格

段に速くなっており、拡散機構が圧力とともに氷多相間で変化していくことが明らかになった。流動を律速するのは最も遅い拡散種であるが、残念ながら酸素の拡散係数の測定にはいたっていない。この研究はダイヤモンドアンビルセルと赤外分光測定を組み合わせ得られた結果であるが、更なる技術開発を行って酸素も含めた高圧氷の拡散係数を系統的に明らかにし、氷天体内部の拡散クリープによる流動を推定していくことが重要であると考えられる。

## 5.2 結晶粒成長と氷天体内部の結晶粒徑進化

固体の流動において、結晶粒徑は流動の素過程や歪み速度を支配する極めて重要なパラメーターであり、氷天体内部の粘性構造は氷の結晶粒徑に大きく依存していると予想される。天体内部の結晶粒徑を支配するプロセスには、結晶粒成長による粒子の粗大化と変形場での動的再結晶による細粒化がある。また、対流運動が相転移境界を通過するような場合には、相転移による結晶細粒化も重要なプロセスとなる。

地球氷床の流動では実際のサンプルを用いて、歪み速度と温度によって結晶粒徑がどのように変化するかについて研究が行われており[23]、氷天体外殻の氷I相領域に対して部分的には適用可能かも知れない。しかし、温度や圧力、歪み速度の条件も異なるので、上述した結晶粒徑を支配するそれぞれのプロセスについて、実験的研究が必要であろう。氷高圧相の場合は、回収試料のミクロなレベルでの多結晶組織観察や相同定を行うために、低温SEM-Raman装置などを利用することが有効であると考えられる。さらに常圧下では既に行われているが、2次元検出器を用いたX線回折法により粒徑変化を定量的にその場観察する手法[24]を、ダイヤモンドアンビルセルなどを用いて高圧下でも確立し、氷高圧相の結晶粒成長カインेटクスや相転移にともなう粒徑変化などの系統的な研究が必要である。

また、多結晶体において第2相の存在は結晶粒徑に

大きな影響を与えることが知られており、硫酸塩水和物や岩石微粒子など氷以外の不純物が、氷の結晶粒成長をどの程度阻止するかについて、実験的な検討が必要不可欠である。存在量が少なく氷よりも硬いために第2相自身の流動が効いてこないような場合であっても、少量の不純物の存在が氷の結晶粒徑を細粒に保ち、氷の流動機構や粘性をコントロールしている可能性も十分に考えられる。

結晶粒徑を支配する素過程に関する実験的研究とともに、それを基にして、対流運動する氷天体内部の結晶粒徑進化をモデリングする数値シミュレーションが必要である。氷天体の外殻氷層[25]や地球深部マントル[26]などで最近得られている予備的結果では、対流運動の中で結晶粒徑分布はかなり不均質となり、それが不均質な粘性分布につながる結果が得られている。天体内部の粘性構造を理解するには構成物質の流動則だけでは不十分であり、実験と数値モデリングを組み合わせ天体内部の結晶粒徑進化を明らかにすることが必要である。

## 5.3 氷VII相の塑性流動と系外氷惑星の内部ダイナミクス

氷VII相は圧力約2GPaで出現し、60-70GPa付近で水素結合の対称化を起こすまで、非常に幅広い圧力範囲において安定に存在する。上述した低温ガス圧変形試験機では圧力が足りず、また他の装置によっても氷VII相の塑性流動特性に関する研究は行われておらず、結晶構造の観点から検討[6]されているのみである。

太陽系内のGanymedeなどの大型氷衛星の中心圧力は約3GPaに達するが、分化したモデルでは氷マントル最下部の氷マントル～岩石核境界付近は氷VI相が安定な圧力領域である（図1、ただし未分化モデルでは氷VII相の中心核が存在すると予想される）。また天王星や海王星内部においても水成分は重要な構成物質であるが、厚い大気によって温度が上昇しているため、固体の水は存在していないと考えられる。

一方、系外惑星についてはこれまでいわゆるhot



Jupiterのような恒星近傍にある巨大ガス惑星が主であったが、観測技術の発達により、恒星から遠く離れた冷たくて比較的小さい系外惑星が最近発見された[27]。それは天王星よりも小さいが地球の5倍ほどの質量をもち、中心星は太陽の1/5ほどの質量で公転軌道約2.6AUと推測されている。そのため、表面温度は海王星並みに冷たく50K程度であり、厚い大気をまとわずに固体氷が存在している可能性が指摘されている。そういったsub-Neptune-mass cool planetsは、Ganymedeと天王星の間のサイズをもつ太陽系にはない新しいタイプの氷天体であるが、実は巨大ガス惑星よりも一般的に存在しているのではないかと考えられている。sub-Neptune-mass cool planets内部では、幅広い温度圧力にわたって安定領域をもつ氷 VII相が主要なマントル鉱物となって、天体の熱的進化や内部ダイナミクスをコントロールしていると予想される。

氷VII相の塑性流動特性に関する最初の実験データは、最近開発されたDeformation-DIA (D-DIA) と呼ばれる高圧変形装置を用いて得ることができるかもしれない[28]。この装置は、六方圧縮マルチアンビル型高圧装置の上下方向を独立に駆動できるようにしたもので、立方体セルの封圧をコントロールしながら一軸圧縮変形を行うことができる。試料の歪みや応力は放射光X線を用いて定量的な測定が可能であり、これまでに約15GPaまでの条件で地球内部物質を用いた塑性流動実験が行われている[29]。氷の場合、試料の封入法や圧媒体の選択、X線回折による応力測定の精度など検討すべき点はあるが、氷VII相を用いて少なくとも高応力下でのクリープ実験は可能であろう。低応力下の流動特性は、前述した原子拡散と結晶粒径に関する実験的研究から推定していくことも可能である。

## 5.4 中性子回折を用いた氷の塑性流動に関する研究

中性子はX線と異なり水素によって十分散乱されることから、氷結晶中の水素位置や水素結合対称性に関する構造解析などの研究が行われてきた。氷の塑性流

動に関する研究は多くはないが、中性子の優れた透過能を利用して、多結晶試料全体の3次元結晶方位分布の解析が行われている[30]。例えば、低温高圧下で塑性変形させた氷II相多結晶を液体窒素温度で常圧に回収し、そのバルク試料の結晶方位分布が中性子回折により解析され、氷II相のa軸が圧縮軸方向にほぼ平行に配向し、塑性変形によって結晶方位選択配向が起きていることが明らかになっている。一般に、転位クリープで変形した場合には選択配向が起ることが多く、氷I相ではc軸が圧縮軸に平行に配列することが実験的にも天然サンプルにおいても知られている。このような変形試料における結晶方位選択配向の解析は、流動機構を理解するうえで非常に重要である。

また最近では、米国のロスアラモス国立研の中性子回折実験施設に、高圧下で変形組織解析を行うための中性子回折装置High-pressure-preferred orientation (HIPPO) diffractometerが開発された。多結晶の結晶方位分布を調べるには、試料に対して様々な方向からの回折情報が必要であり試料を回転させる必要があるが、高圧セルやクライオスタットなどに封入した試料を自由に回転させることは困難である。この回折装置は大容量のsample chamber (直径30 cm, 高さ183 cm) に比較的大型の実験装置をセットすることが可能で、その周囲を大量の検出器が取り囲んでいる。パルス中性子を用いた飛行時間法と呼ばれる回折法と組み合わせることにより、セットアップした実験装置をほとんど回転させることなく、試料の結晶方位分布のその場観察を行うことが可能である。実際に、HIPPOに一軸圧縮の低温変形装置を組み込んで、常圧下で氷I相に対して変形組織発達その場観察実験が行われ[31]、変形が進行するとともにc軸が圧縮軸に対して平行に配向していく過程が観察されている。

HIPPOには、コンパクトなD-DIAをセットすることが可能であり、低温高圧下での氷変形その場観察実験も計画されているようである。この中性子回折法を用いれば、氷の格子定数を非常に精度良く測定できるため、X線回折を用いる場合に比べて非常に低い応力

下での定量的な変形実験も可能になるかも知れない。

## 5.5 Non-water iceの塑性流動

固体窒素、固体メタン、固体二酸化炭素などのnon-water iceの流動は、Tritonやカイパーベルト天体など外惑星系の氷天体を理解するうえで非常に重要である[32]。これまでに、原子拡散係数などを用いた流動則の推定[33]とともに、粘弾性特性を明らかにする実験[34]も行われている。それによれば、固体メタンや固体窒素は、water iceではbrittle破壊するような液体窒素温度付近においても、非常に低い流動応力で塑性変形することが明らかになっており、外惑星系氷天体の進化や表面地形特性を理解するうえで大変興味深い。今後、non-water iceの流動特性をより定量的に明らかにしていくために、液体窒素温度以下の超低温下、かつ非常に低い流動応力条件において、定常的な変形が行える実験装置の開発が必要不可欠である。

## 6. 謝辞

本稿発表の機会を与えて頂いた奥地拓生博士、常日頃議論して頂いている加藤工教授、有意義なコメントを頂いた査読者の荒川政彦博士に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] McKinnon, W. B., 2006, Eos Trans. AGU, 87 (52), Fall Meet., Abstract P42B-01
- [2] Rothery, D. A., 1999, Satellites of the Outer Planets (Oxford Univ. Press)
- [3] Friedson, A. J. and Stevenson, D. J., 1983, Icarus 50, 1
- [4] Pappalardo, R. T. et al., 1998, Nature 391, 365
- [5] McKinnon, W. B., 2006, Icarus 183, 435
- [6] Poirier, J. P., 1982, Nature 299, 683
- [7] Poirier, J. P., 1985, Creep of Crystals (Oxford Univ. Press)
- [8] Heard, H. C. et al., 1990, in The Brittle-Ductile Transition in Rocks (AGU monograph), pp 225
- [9] Durham, W. B. et al., 2001, J. Geophys. Res. 106, 11031
- [10] Schubert, G. et al., 1986, in Satellites (Univ. Ariz. Press, Tucson), pp 242.
- [11] Durham, W. B., 1998, in Solar System ices (Kluwer, Dordrecht), pp. 63
- [12] Goldsby, D. L. and Kohlstedt, D. L., 1997, Scr. Mater. 37, 1399
- [13] Goldsby, D. L. and Kohlstedt, D. L., 2001, J. Geophys. Res. 106, 11017
- [14] Kubo T. et al., 2006, Science, 311, 1267
- [15] Durham, W. B. et al., 2005, J. Geophys. Res. doi:10.1029/2005JE002475
- [16] Durham, W. B. et al., 2002, J. Geophys. Res. doi:10.1029/2002JB001872
- [17] Durham, W. B. et al., 1999, Geophys. Res. Lett., 26, 23
- [18] McKinnon, W. B., 1999, Geophys. Res. Lett., 26, 951
- [19] Stern, L. A. et al., 1997, J. Geophys. Res. 102, 5313
- [20] 木暮貴博他, 2006, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 2006, 122
- [21] Duval, P. et al., 1983, J. Phys. Chem., 87, 4066
- [22] Katoh, E. et al., 2002, Science, 295, 1264
- [23] De La Chapelle, S. et al., 1998, J. Geophys. Res. 103, 5091
- [24] Offerman, S. E. et al., 2002, Science, 298, 1003
- [25] Duval, P. et al., 2006, Eos Trans. AGU, 87 (52) , Fall Meet., Abstract P42B-07
- [26] Solomatov, S. and Reese, C. 2006, Eos Trans. AGU, 87 (52) , Fall Meet., Abstract MR21A-001
- [27] Beaulieu, J. P. et al., 2006, Nature 439, 437
- [28] Wang, Y. et al., 2003, Rev. Sci. Instrum., 74, 3002
- [29] Nishiyama, N. et al., 2005, Geophys. Res. Lett.,

doi:10.1029/2004GL022141

- [30] Schafer, W. 2002, *Eur. J. Mineral.*, 14, 263
- [31] McDaniel, S. 2006, *Rev. Sci. Instrum.*, 77, 093902
- [32] 山下靖幸, 1999, *遊星人* 8, 34
- [33] Eluszkiewicz, J. and Stevenson, D. J., 1990, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1753
- [34] Yamashita, Y. and Kato, M. 1997, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1327