

Title	氷天体の流動特性に関する実験的研究
Author(s)	近藤, 忠; 久保, 友明
Citation	大阪大学低温センターだより. 2008, 141, p. 6-10
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/10391">https://hdl.handle.net/11094/10391</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 氷天体の流動特性に関する実験的研究

理学研究科 近藤 忠 (内線5793)

九州大学大学院理学研究科 久保 友明

## 1. はじめに

近年、惑星探査機から得られた知見をもとに、地球から遙かに離れた惑星や衛星の表面地形や内部構造の解釈に関して実験的研究が盛んに行われるようになってきた。太陽から遠いこれらの天体は、低温の世界に存在しており、氷が主成分である。本稿では氷天体のダイナミクスを研究対象とした低温・高圧実験について報告する。

## 2. 氷天体のレオロジー

惑星を構成する物質は太陽からの距離に対して異なることが知られている。地球型惑星が珪酸塩・酸化物を主成分とするのに対して、太陽から遠い側では水素・ヘリウムを主成分とする木星や土星を経て、天王星、海王星などの氷 ( $H_2O$  の他、メタン、アンモニア等) を主成分とする天体へと変わっていく。有名なガリレオ衛星のうち、エウロパ、ガニメデ、カリストなどの木星から離れた側の軌道を持つ衛星も、氷を主成分とする天体であり、もちろん土星系・天王星系以遠カイパーベルト天体に至るまで氷天体が確認されている。ボイジャー計画の探査機データから、氷天体の表層地形は地球と類似または異なる地質学的構造を持っていることが分かっており、この氷天体の表層から内部に至る進化過程を実験的に調べるには、氷の低温・常圧付近から高温・高圧状態の氷の諸物性を調べる必要がある。惑星や衛星表層の氷は低温・低圧で、我々もなじみの深い氷であるが、その深部では断熱圧縮の影響によって、高温・高圧側へとその状態を変化させていくため、幾つかの相転移を起こすことが予想される。 $H_2O$  の状態図 (図1) と氷天体内部の温度構造モデルを比較すると分かるように、温度構造によっては惑星深部に海 (内部海) が存

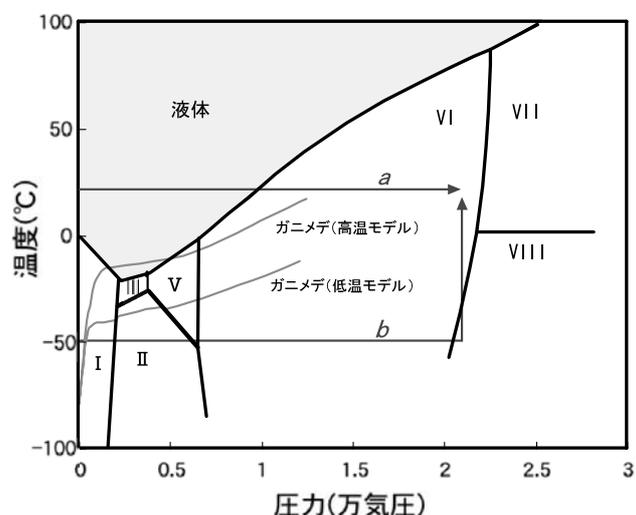


図1 氷の状態図とガニメデの温度構造モデル<sup>[1]</sup>

在する場合も考えられる。探査機の観測から幾つかの氷天体が外部磁場を持っていることから、地球核のダイナモ作用に相当する、何らかの流体の運動が内部の塩海に起こっているとする考えもある。表層の氷の下部に対流が可能な層が存在することは地球の地殻とマントルの関係に相当し、地球のプレートテクトニクスに代表されるような氷天体内部の流動的な活動（レオロジー）が表用の地質学的構造に影響を与えている事は容易に想像できる。大きく異なることはこれらが岩石の地殻ではなく氷であるという点である。氷は氷河に見られるように流動性の高い固体であることはよく知られているが、氷天体内部のような低温・低応力・低歪の条件でも流動性が高い事が分かってきており<sup>[2]</sup>、衛星規模以上の天体内での対流を考える上では、必ずしも液体である必要はない。これらの氷天体内部条件下での塑性変形機構は、転移クリープよりは拡散クリープが卓越していると考えられ、これに粒径（粒界すべり）に依存する中間領域が加わり、温度が上昇する氷天体内部では重要な役割を果たしていると思われる<sup>[3]</sup>。ガス圧・低温下で扱える氷に対しては大型試料が扱えることから、変形測定装置を組み合わせることも可能で既に様々なレオロジーの研究が行われているが<sup>[例えば4・5]</sup>、ギガパスカル領域の高圧相に関しては、実験装置の制約からレオロジーや粒成長（原子拡散）に関する実験データはまだ十分得られていない。そこで、昨年九州大学およびKEKとの共同研究として、まだ殆ど基礎的なデータが得られていない、高圧下の氷の粒成長の実験を開始することになった。

### 3 . 高圧・X線時分割回折実験

冷凍庫など常圧・低温下で生成される氷は、 $I_h$ 相と呼ばれるが、本研究で扱った氷は、VI相と呼ばれる高圧力下で安定化する「重い」氷で、氷衛星のマントルを代表する相と考えられる。粒成長は熱活性過程であり、一定温度に保持した多結晶体のサイズを時間変化と共に測定する事によって平均粒径を調べ、成長速度を得る。最終的には異なる温度で得たこれらのデータに対してアレニウスの関係から活性化エネルギーを決定し、氷天体内部の温度構造に応じた議論を行うことになる。ギガパスカル領域の実験装置として一般に用いられるダイヤモンドアンビルの大きな長所は、高圧下の試料を直接観察できることであり、図4のように実は偏光板を通して顕微鏡下での試料の直接観察が可能である。しかしながら、今回の高圧氷のように圧力下にある単一相多結晶体の粒界を



図2 ガス駆動型低温・高圧実験用セル



図3 低温・高圧粉末X線回折装置@KEK-PF:BL-18C

すべて光学的に観察することは、結晶粒界での屈折率変化がわずかであるために容易ではない。そこで、今回はX線回折法を用いて粒子数変化の定量化を試みることになった。平均原子量の小さな極微量試料からの高速X線回折実験を行わねばならないため、実験は高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設BL-18C (E=20KeV) の高圧下粉末回折ステーションもしくはBL-13A (E=30KeV) の高温高圧粉末回折ステーションで行った。高圧発生にはガス駆動型のダイヤモンドアンビルセル (図2) を用い、ヘリウムのガス圧でピストン加重を変化させて圧力制御を行った。BL-18Cでの冷却には、ヘリウム循環型クライオスタット (米国RMC社製LTS-22型: 図3) を用いた。実験の温度範囲は、低温側だけでなく室温より高温側にまで至るので、BL-13Aではアルコール循環の簡易冷却とヒーター制御を用いた室温前後の実験も併せて行っている。1次元検出機では粒変化の全体像が不明であるため、結晶の粒子数変化を見るのは困難であるが、2次元検出機で特定の回折面からのデバイ環を得ることが出来ればこの問題は解決できる。そこで検出器には共にイメージングプレートを用いた。相転移による核形成直後の微粒子はX線回折図形中ではサイズ効果による回折線幅の増加やハローを伴っていると思われるが、すぐ一定の粒子サイズに成長して回折条件を満たすようになり、検出器上ではなめらかなデバイ環を経て、スポット上の強度分布を持つようになる (図5)。粒の成長が進むに従い成長粒の近傍の粒は減少していくので、時間と共にスポットの強度は上昇し、スポットの数は減少していく。従って、ある温度でこの特定の回折面からのスポット数や強度の時間変化を測定していけば、それは回折に寄与した結晶粒の変化が得られる事になる<sup>[6]</sup>。検出機として用いるイメージングプレートは自動読み取りを行っても次の測定が可能なるまで5分以上の時間が必要になるため、この間に成長が進んでしまう条件では必要なデータが得られない。一方で限られた放射光利用の時間内で測定を終了するには、一定速度以上の粒径変化が得られなければならない、この条件合わせが難しい。また、ダイヤモンドアンビルセル中の試料は図4に見るように大変小さいので、直径約100ミクロン程度のコリメーターを用いており、回折に寄与する事が出来る試料体積の関係から、成長則で解析できる統計的に有意な結晶粒数は得られる範囲も限られる。実験ではこれらの条件出しが鍵となった。

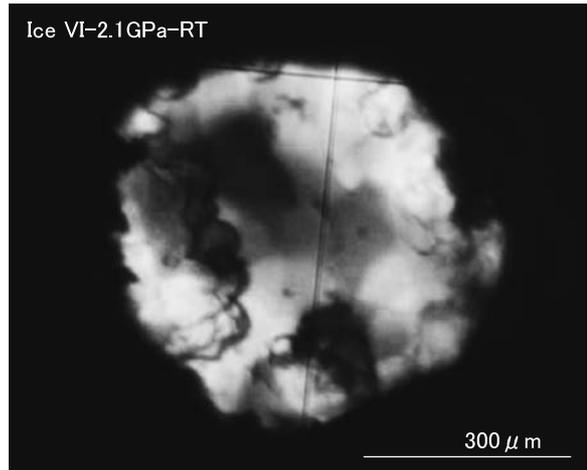


図4 顕微鏡下で見た融点近傍の氷VI相

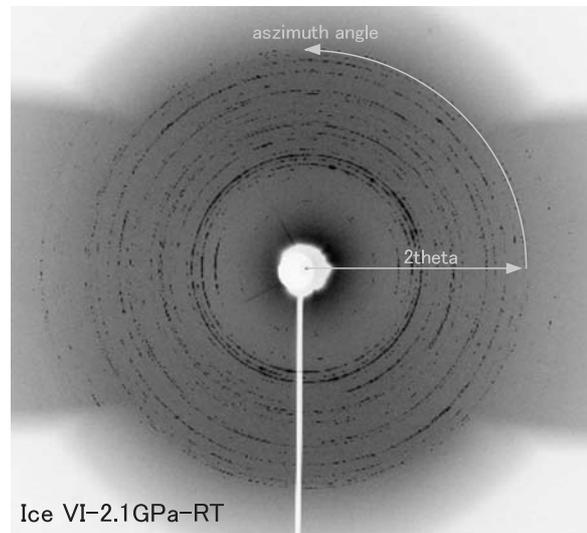


図5 氷からのX線回折図形例

#### 4 . 氷VI相の成長過程

通常の実験では、氷VI相は図1中のaの矢印のように室温下で水を圧縮すれば簡単に得られるが、予備的な実験を何度か行ったところ、室温下でVI相の多結晶体はかなりの速度で成長が進むため、測定開始時に必要な初期粒径が大きすぎるため、より低温で高圧氷（VI相）を生成する必要があることが分かった。そこで本実験では、図1中のbの矢印のように、最初に常圧付近で試料を-50程度の低温にしてI<sub>h</sub>相を合成し、その後に加圧を行って低温下高圧相転移を起こさせた。この結果、核形成後の微粒多結晶状態を長時間にわたって保持できることが分かった。この状態から温度を室温方向に戻して、約20分の時間間隔で回折線変化を調べたところ、回折線の変化が殆ど見られなかったため、融点付近まで温度を上昇したところ、顕著な粒子数変化が見られた。時間と共に変化する氷VI相のX線回折図形を図6に示す。図6(a)では図5と同様の極座標図形をデカルト座標系に変換した中から氷VI相の(201)回折線に着目し、時間変化を追って並べた。回折線の数(粒子数)が時間と共に減少していく様子が分かる。ほぼ融点近傍であるため、圧力勾配に起因する部分溶解が起こり、試料室の圧力も若干変動し、最終的には固液共存状態になって、液体からの寄与と思われるハローも重なっている。(b)には、これらを1次元プロファイルに積分して表示した。実際には全ての結晶粒が等粒ではなく、ある分布を持っているので、予め粒径の分かっている標準試料を同条件でX線回折を行い、得られたプロファイルと本実験から得られたプロファイルとの比較に基づいて平均結晶粒径を決定する。(c)では、この方法で得られた粒成長の時間変化を示している。本研究で得られた結果は、粒径依存クリープを示す粒成長則でフィットすることができ、氷天体の深部での流動機構に結晶粒のサイズ効果が大きく寄与している可能性があることが分かった。

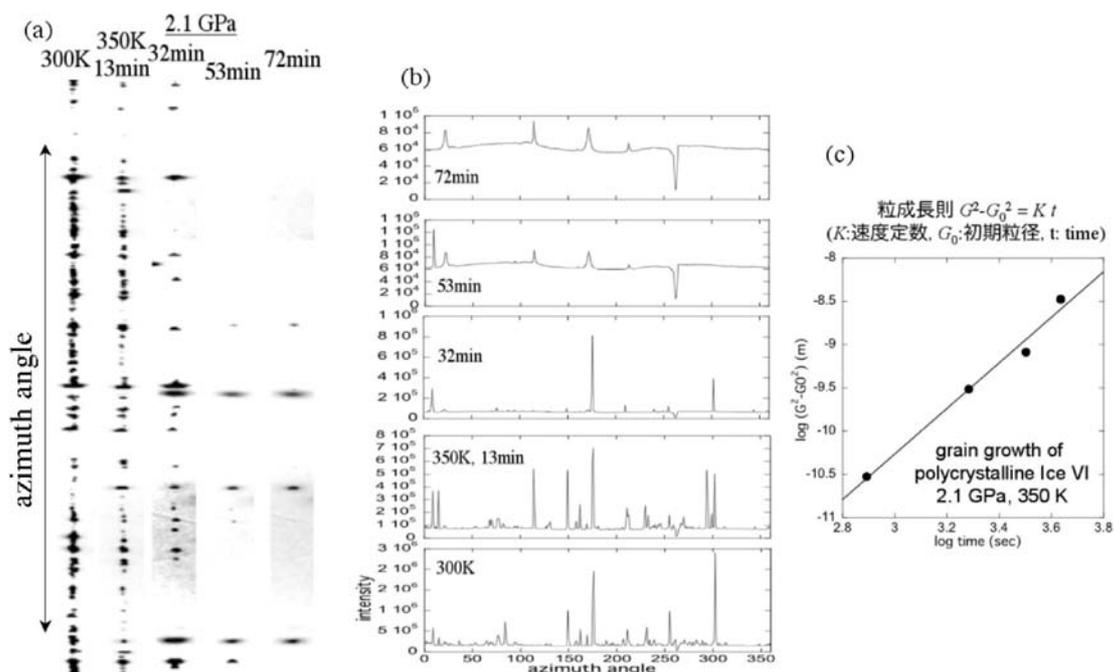


図6 2.1GPa-350Kにおける氷VI相の回折線変化。(a) (201)面のデバイ環を直線状に変換した2次元回折図形の時間変化。(b) (a)を積分して得られた1次元プロファイル。(c) (b)の回折線数を結晶数密度に換算して成長速度定数を得る。

## 5 . おわりに

惑星内部を実験的に研究する場合、多くの研究者は惑星内部の条件に応じて高温・高圧発生装置を用いた様々な実験を行うのが一般的である。本研究は九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門の久保友明准教授が主体となって放射光施設での共同研究を行っているが、私にとっては初めて行う低温実験であった。また、解決すべき問題点が多い実験ではあるが、今後CCD検出機を用いた高速な時分割測定を行うことにより、更に早い相転移や粒成長に対応した研究を行う予定である。惑星や衛星の内部だけでなく、彗星や小天体を想定した実験は更に低温の実験が必要となり、今後様々な研究が展開されていくことと思われる。

## 参考文献

- [ 1 ] D.A.Rothery, *Satellites of the Outer Planets*, Oxford Univ. Press. ( 1999 )
- [ 2 ] T. Kubo, W.B. Durham, L. A. Stern, S. H. Kirby, *Science*, vol. 311, 1267 ( 2006 )
- [ 3 ] J.P.Porier, *Creep of Crystals*, Oxford Univ. Press. ( 1985 )
- [ 4 ] D.L.Goldsby, D.J.Kohlstedt, *J.Geophy.Res.*, 106,11017 ( 2001 )
- [ 5 ] W.B.Durham, L.A.Stern, S.H. Kirby, *J.Geophy.Res.*, 106, 11031 ( 2001 )
- [ 6 ] S.E. Offerman, N.H.van Dijk, J. Sietsma, S. Grigull, E. M. Lauridsen, L. Margulies, H. F. Poulsen, M. Th. Rekvelds, S. van der Zwaag, *Science*, 298, 1003 ( 2002 )