

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 9日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340162

研究課題名（和文） 高圧氷のレオロジーと大型氷天体内部の粘性流動

研究課題名（英文） Rheological properties of planetary ices at high pressure

研究代表者

久保友明（KUBO TOMOAKI）

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：40312540

研究成果の概要（和文）：

氷天体の熱進化や内部ダイナミクス、内部海、表面地形に密接に関連した氷天体内部の流動特性を明らかにするために、氷天体物質の相転移、塑性流動、結晶粒成長および原子拡散に関する実験を行った。これまでの実験圧力領域を大幅に拡大して氷 VII 相の塑性流動プロセスを初めて観察し、大型氷天体内部の粘性率の推定が可能になった。また H₂O 氷に微量の CO₂ 氷が含まれることで劇的に軟化することを見出して、火星南極氷床や太陽系外縁部氷天体の化学組成や表面地形の理解に貢献した。さらに高圧氷の相転移カイネティクスや氷多結晶体の原子拡散実験などに関連した新規実験手法の開発に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：

Rheological properties of planetary ices are one of key issues to understand the convecting interiors of icy moons and planets. We conducted high-pressure transformation, plastic deformation, grain growth, and atomic diffusion experiments for various planetary ices by using gas-medium and multi-anvil high-pressure deformation apparatus and diamond anvil cell combined with synchrotron radiation and micro-Raman spectroscopy. These techniques enable us to examine the ice rheology at much higher pressures than previously conducted. We newly observed creep strength of ice VII, weakening of H₂O ice due to small amounts of CO₂ ices, effects of strain energy on the growth kinetics in the ice VI-VII transformation, and grain-boundary diffusion in polycrystalline ice.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2011年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2012年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石鉱物鉱床学

キーワード：氷天体、レオロジー、鉱物物理、地球惑星物質

1. 研究開始当初の背景

太陽系内にはカイパーベルト天体も含め

高圧氷が存在する可能性のある低密度氷天体（密度約 2g/cm³以下）が 13 個発見されて

おり、その中には Ganymede, Callisto, Titan のように半径 2000km 以上、中心圧力 3GPa 以上で氷 VI 相のマントルや氷 VII 相の中心核を含むような大型氷天体も存在する。さらに太陽系外では地球サイズを超える大型氷天体が発見されており、そこでは氷 VII 相の分厚いマントルが存在しているであろう。

地球内部に比べ氷天体内部で起こる高圧相転移はより大きな密度変化をともなう場合が多く、その内部ダイナミクスに与える影響は極めて大きいと予想される。中型～超大型氷天体の熱的進化や内部ダイナミクス、多様な表面地形、内部海の存在の有無を議論するには、高圧氷の流動特性を明らかにすることが極めて重要である。しかしこれまでの実験手法では圧力領域に制限があった。また氷天体には、 H_2O 氷の塑性流動特性のみでは解釈できない地形が数多く存在しており、粘性率やレオロジーの異なる第 2 相の影響を考慮することも必要不可欠である。

2. 研究の目的

上記の背景をふまえ本研究では、放射光 X 線を用いた高圧氷の塑性変形実験と結晶粒成長実験、顕微ラマン分光装置を用いた高圧氷の相転移カイネティクスや氷多結晶体の原子拡散実験、さらに CO_2-H_2O 2 相系の氷天体物質を用いた塑性変形実験を行う。これらの新規手法を用いてこれまでの氷天体物質のレオロジー研究の圧力領域を大幅に拡大し、高圧氷や 2 相系氷の流動特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 放射光単色 X 線とマルチアンビル型高圧変形装置(D-DIA)を用いた高圧氷の塑性変形実験手法を確立し、これまでの圧力領域を大幅に上回る条件で定量的な高圧氷の流動則を得て、大型氷天体内部の塑性流動を考察する。

(2) 放射光単色 X 線とダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた高圧氷の結晶粒成長実験を行い、常圧に回収困難な高圧氷の粒成長カイネティクスを X 線その場観察し、氷天体内部の粘性率に大きな影響を与える結晶粒成長進化を考察する。

(3) 顕微ラマン分光システムと DAC を用いて高圧氷の相転移実験を行い、体積変化により発生する相転移応力が相転移のカイネティクスに与える影響をその場観察する。

(4) 顕微ラマン分光システムと低温ステージ、精密マッピングステージ、DAC を用いて高圧氷多結晶体の原子拡散実験技術を確立する。氷多結晶体の原子拡散データと上記の塑性変形実験データを相補的に解析し、高圧

氷の流動則を確立する。

(5) 低温ガス圧変形装置を用いた CO_2-H_2O 2 相系の変形実験を行い、粘性の異なる 2 相系氷天体物質のレオロジーを系統的に明らかにする。太陽系外縁部の氷天体や火星極氷床において、非常に軟らかい non-water ice 成分が含まれた場合に塑性強度がどのように変化するか考察する。

4. 研究成果

(1) 放射光単色 X 線と D-DIA 装置を組み合わせることにより、相変化、粒径変化、クリープ曲線が同時その場観察できる、高圧氷の定量的な塑性変形実験手法が新たに確立した。これまでの低温ガス圧変形試験機実験条件を大幅に更新し、これまで不十分であった氷天体マントル深部のレオロジー研究する新しい実験技術となる。この手法を用いて圧力 15 万気圧、温度 650K 付近までの条件で歪み速度を変化させながら定量的な高圧氷 V I I 相の塑性変形実験を行い、流動則の応力依存べき指数と温度圧力依存性を制約した。氷 VI 相に比べて活性化体積の値はかなり小さい。これまで行った高温下の実験では氷の柔粘性結晶に関連した変化は認められなかった。大型氷天体内部の氷マントルの粘性率は、圧力 2GPa までは急激に上昇するが、それ以深では緩やかな上昇になると予想される(Kubo et al., EPSL 投稿準備中)。

(2) 放射光単色 X 線と DAC を用いて 1-3GPa、300-400K 付近において氷 VI 相および VII 相多結晶体の結晶粒成長実験を行った。二次元 X 線回折図形に記録された回折斑点数の時間変化を利用して、高圧氷多結晶体の結晶粒径変化、粒成長速度をその場観察することに成功した。特に融点直下の条件において顕著な粒成長を観測し、斑点数が時間とともに減少する時分割データを得た。この手法は地球惑星内部の粒径進化を実験的に明らかにするうえで新規でユニークな手法であるが、粒径変化の定量的解析を行うには高圧装置と揺動機構を組み合わせた時分割測定が必要である。

(3) 偏光顕微鏡、精密ステージ、顕微ラマン分光装置、DAC を組み合わせて、常温下、圧力 2-3GPa において氷の VI-VII 相転移における高圧氷 VII 相の成長距離と圧力変化を時分割測定した。氷 VII 相の成長速度と試料容器内の圧力はカップリングしながら両者とも時間とともに急激に減少した。この成長速度変化は相転移応力が緩和されず圧力低下したことによる駆動力の低下でおおよそ説明可能である。顕微ラマンマッピングでは高圧氷内に顕著な差応力は検出されず、おもに周囲の金属ガasket のレオロジーが相転移応力の緩和を律速していることが予想さ

れた。高圧水のカイネティクス研究はこれまでほとんど例がなく、また顕微ラマン分光を用いた相転移応力の検出は高圧相転移のカイネティクスを理解する上で重要な実験手法となる可能性が見出された(Kubo et al., PCM 投稿準備中)。

(4) D₂O や H₂¹⁸O 氷のラマンスペクトルの定量分析手法を確立した。これまでに氷 Ih 多結晶体の H₂O-D₂O 相互拡散実験を、常圧下 268-253K、低温ガス圧装置を用いて 100MPa、236-256K の条件で行い、回収試料の研磨断面を低温ステージに設置し顕微ラマン分光法を用いて拡散プロファイル測定を行う技術をほぼ確立した。これまでの手法に比べより高い空間分解能をもつ氷原子拡散プローブであり、氷 Ih の体拡散だけでなく、粒界拡散現象を初めて観察した(Noguchi et al., 投稿準備中)。この手法は DAC を用いた高圧氷の原子拡散実験に適用可能である。上記 1 の手法では低応力のために再現が困難な氷の拡散クリープ流動則を、原子拡散に基づいて明らかにできると期待される。

(5) 非常に軟らかい CO₂ 氷が少量含まれたときの氷天体物質のレオロジーを理解するために、低温ガス圧変形実験装置を用いて 20-100MPa、170-190K の条件で H₂O 氷-CO₂ 氷 2 相系の塑性変形実験を行った。流動則パラメーターである応力べき指数、活性化エネルギーおよび pre-exponential factor の CO₂ 氷成分比依存性を明らかにした。この 2 相系の塑性流動は応力均質モデルに近い挙動を示し、流動応力 0.1MPa において 5vol% の CO₂ 氷が含まれると粘性率が約一桁低下することが明らかになった。それを基に火星南極氷床の安定性について検討を行い、南極氷床に含まれる CO₂ 氷成分比の最大値を制約した。CO₂ 氷は少量ではあるが太陽系外縁部の氷天体にも幅広く存在する可能性があり、極低温下での氷天体のテクニクスを理解する上で重要となる(Kubo et al., Icarus 投稿準備中)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) R. Shiraishi, E. Ohtani, T. Kubo, N. Doi, A. Suzuki, A. Shimojuku, T. Kato, T. Kikegawa, Deformation cubic anvil press and stress and strain measurements using monochromatic X-rays at high pressure and high temperature, High Press. Res., 31, 399-406, 2011 (査読有)
- (2) T. Kubo, M. Noda, N. Doi, T. Kato, T. Kikegawa, W. B. Durham, A synchrotron

radiation study of high-pressure ice rheology, Photon Factory Activity Report 2010 #28 Part B, 239, 2011 (査読無)

[学会発表] (計 11 件)

- (1) T. Kubo et al., Plastic deformation of ice VII in sub-Neptune-size icy planets, Japan Geoscience Union Meeting 2013, 2013/05/19, 幕張
- (2) 久保友明・野口直樹・野田真彦・土井菜保子・加藤工・亀卦川卓美・William Durham, 氷 VII 相の塑性流動と分子配向無秩序化、第 30 回 PF シンポジウム、2013/03/14、つくば
- (3) 久保友明、次世代放射光源を用いた高圧下でのカイネティクス研究の模索、第 53 回高圧討論会、2012/11/07、大阪
- (4) 野口直樹、鍵裕之、久保友明、氷 Ih 相の自己拡散その場観察実験、2012 年度日本地球化学会第 59 回年会、2012/09/11、福岡
- (5) 久保友明他、氷 VII 相の塑性変形実験、第 52 回高圧討論会、2011/11/11、沖縄
- (6) 野田真彦、久保友明、加藤工、DAC を用いた氷の VI-VII 相転移カイネティクスの観察、第 52 回高圧討論会、2011/11/10、沖縄
- (7) 久保友明、William Durham, Rheology of two-phase aggregates of H₂O and CO₂ ices, 2011 年地球惑星科学連合大会、2011/5/24、幕張
- (8) T. Kubo et al., Rheology of two-phase aggregates of H₂O and CO₂ ices, AGU Fall Meeting, 2010/12/13, San Francisco, USA
- (9) 野田真彦、久保友明、加藤工、DAC を用いた氷 VI-VII 相転移の速度論的研究、第 51 回高圧討論会、2010/10/21、仙台
- (10) 久保友明他、放射光 X 線を用いた高圧氷のレオロジー研究、第 51 回高圧討論会、2010/10/21、仙台
- (11) T. Kubo et al., Toward a synchrotron radiation study of high-pressure ice rheology, 12th International conference on the Physics and Chemistry of Ice, 2010/9/6、札幌 (Invited)

[その他]

ホームページ等

http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/faculty2_j.cgi?ID=K002558

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保 友明 (KUBO TOMOAKI)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号：40312540

(2) 研究分担者

加藤 工 (KATO TAKUMI)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：90214379

(3) 連携研究者

野口 直樹 (NOGUCHI NAOKI)
広島大学・大学院工学研究科・特任助教
研究者番号：50621760

(4) 研究協力者

William Durham
マサチューセッツ工科大学地球大気惑星
科学科・上級研究員