

平成21年度最優秀発表賞受賞論文

氷・シリカ混合物の流動則に対する空隙の効果：
氷衛星の地形緩和への応用保井 みなみ¹, 荒川 政彦¹

2010年3月15日受領, 2010年4月15日受理.

(要旨) 本研究では氷粒子・ $1\mu\text{m}$ シリカ微粒子混合物の変形実験を行い, 流動則に対する空隙率の影響を調べた. シリカ質量含有率は0, 30, 50 wt.%, 空隙率は0%から25%とした. 温度を -10°C から -20°C に制御した低温室で等歪速度一軸圧縮実験を行い, 歪速度は $1.2 \times 10^6\text{s}^{-1}$ から $4.2 \times 10^4\text{s}^{-1}$ まで変化させた. 今回求めた流動則は, 応力-歪み曲線上の最大応力 σ_{max} と歪速度 $\dot{\epsilon}$ の関係式 $\dot{\epsilon} = A_0 \exp(-Q/RT) \cdot \sigma_{\text{max}}^n$ で表される. 実験の結果, 応力べき n と活性化エネルギー Q は空隙率に依存せずシリカ質量含有率の増加とともに大きくなった. さらに, 定数 A_0 は空隙率 ϕ を用いて $A_0 = B_{\text{fit}}(1-\phi)^{-\alpha_{\text{fit}}}$ と表され, 定数 B_{fit} と α_{fit} もまたシリカ質量含有率の増加とともに大きくなった. この実験結果を用いて氷衛星の地形緩和に関する議論を行った. その結果, 岩石含有率が大きく空隙率が大きいほど, 形状変化が起こるための氷衛星の半径が小さくなった.

1. はじめに

近年行われている惑星探査や地上観測によって, 氷衛星やカイパーベルト天体といった氷天体は様々な形状を持つことが知られている. 半径100 km以下の氷衛星は非対称な形状を持ち, 不規則形状天体と呼ばれている. 一方, それより大きな氷衛星は形状がほぼ球形なため, 球形天体と呼ばれる. これは氷天体だけでなく, 小惑星のような小岩石天体でも同じような形状を持つものが発見されている [1]. 天体の形状変化は, 天体を構成する物質強度とその天体に及ぼされる重力による応力との比によって制御される [2]. 構成物質の強度が重力による応力より十分大きい場合, 天体は物質強度によって支えられ不規則形状を保つことができる. 一方, 重力による応力が物質強度を超えた場合, 天体は重力に従った形状, つまり球形となる. 氷衛星の場合, 主な構成物質は氷であるため, この天体の形状変化をもたらす最も支配的なメカニズムは氷の粘性緩和であると考えられている [3]. 粘性緩和は天体の温度や天体に及ぼされる応力に依存するため, Croft

[3]はマクスウェル粘弾性モデルを用いて粘性緩和が起こる条件を計算し, 議論を行なっている. 彼の計算では, 土星系衛星で地形緩和が起こって形状が変化するには温度が120 K から130 K 程度であるという結果を得ているが, 土星系の集積温度である60 K から100 K と比べてかなり温度が高いのがわかる [4]. このことから, 形状変化が起こる条件を見積もるには, 氷衛星の熱史を十分考慮した上で, モデル計算をする必要がある. さらに, このマクスウェル粘弾性モデルを用いて氷衛星の形状変化が起こる条件を見積もるには, 氷衛星を構成する物質の粘弾性的性質を調べる必要がある. この粘弾性的性質は温度や構成物の構造に依存すると考えられる.

氷物質の粘弾性的性質を表す物性値の1つが粘性率である. マクスウェル粘弾性モデルに用いられるマクスウェル緩和時間も, 構成物質の粘性率と弾性率の比で示される. 粘性率は流動則によって決まるものである. 流動則とは, 応力一定時の定常クリープにおける応力と歪速度の関係から得られる経験式である. 従って, 粘性率を得るためには流動則を調べなければならない. しかし, 流動則は構成物, 構造, 温度といった様々なパラメータに依存する. 惑星探査によって氷衛星の

1. 名古屋大学大学院環境学研究所
yasui.minami@jaea.go.jp

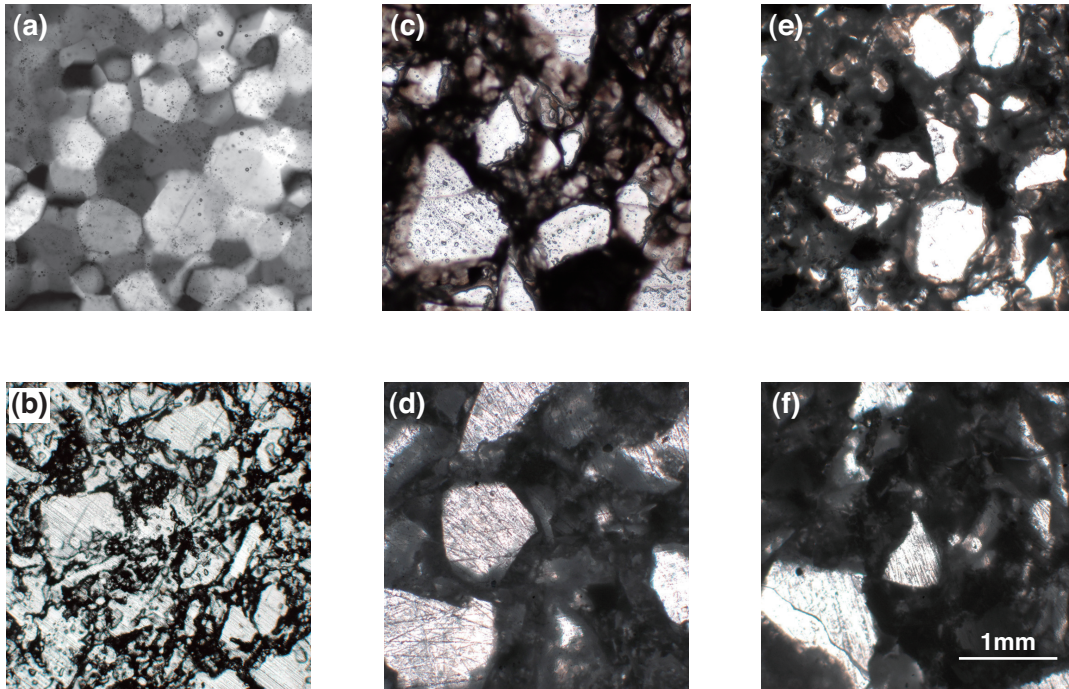


図1：純水及び水・シリカ混合物の薄片写真。(a) 純水の空隙率0%，(b) 純水の空隙率20%，(c)30wt.%試料の空隙率6%，(d) 30wt.%試料の空隙率20%，(e) 50wt.%試料の空隙率8%，(f)50wt.%試料の空隙率20%。

密度は推定されており，その結果から氷衛星は様々な岩石含有率をもった氷と岩石の混合物からなることが予測されている．さらに，氷衛星の密度は集積過程において圧密を受けて変化してきたと考えられており，氷衛星は現在でも内部に様々な割合で残存空隙率を含むと予測されている．また，土星軌道よりさらに外側に存在する氷衛星の放射平衡温度は100 K 以下と推測されている一方，氷衛星の内部温度は放射性核種の壊変や集積加熱といった熱源による熱進化によって，表面温度よりも高いと考えられている [5]．現在までに，様々な岩石含有率および温度における氷・岩石混合物の流動則に関して，詳細に調べられてきた [6, 7, 8]．しかし，流動則に対する空隙率の効果に関しては今まで系統的に調べられた研究はない．

そこで本研究では，氷衛星の構成物を模擬した水・岩石混合物の流動則を調べ，それに対する空隙率，岩石含有率，温度の依存性を明らかにした．特に，氷・岩石混合物の変形実験を行って流動則に対する空隙率依存性を調べ，空隙率を用いて記述される新たな流動則を確立した．

2. 実験方法

水・岩石混合物の流動則とそれに対する空隙率の効果調べるため，圧縮実験により試料を作成した．試料は，直径 $710\ \mu\text{m}$ 以下の氷粒子と直径 $1\ \mu\text{m}$ のアモルファスシリカペースを混合したものを直径 20 mm のシリンダーに入れ，上部にピストンをセットして変形試験機を用いて荷重を与え，圧縮させて作成した．圧縮速度は $2.0\ \text{mm/min}$ で，シリカ質量含有率は0, 30, 50 wt.%とした．試料は直径 20 mm，高さ40 mm の円筒形である．空隙率は，試料の体積を一定にして，試料の質量を変化させることで制御し，今回は0% から 25% までとした．試料作成時は混合物内の空気を取り除くために，真空ポンプでシリンダー内を10 kPa 以下まで減圧し，荷重は最大 30 MPa まで与えた．

試料の内部構造は，光学顕微鏡を用いて観察した．試料の薄片写真を図1に示す．そして，試料の内部構造の模式図を図2に示す．薄片写真から，純水と水・シリカ混合物でその様子が全く異なるのが分かる．空隙率が0%の純水の場合(図1a と図2a)，数百 μm サイズの氷粒子が一様に並んでおり，粒子サイズもほぼ均

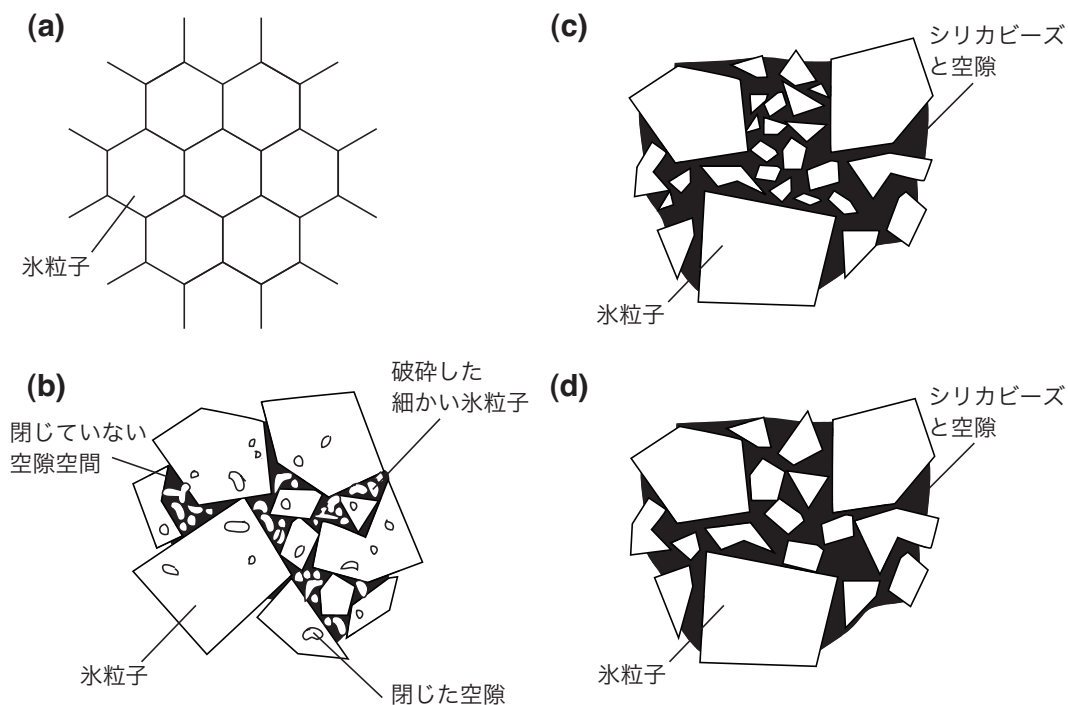


図2：純水及び氷・シリカ混合物の内部構造の模式図。(a)は純水の空隙率0%，(b)は純水の空隙率5%以上の場合で、それぞれ図1aと図1bに対応する。(c)は氷・シリカ混合物の空隙率が小さい場合、(d)は氷・シリカ混合物の空隙率が大きい場合で、それぞれ図1cと図1e、図1dと図1fに対応する。

一に見える。さらに、氷粒子の粒界がはっきりしている。一方、空隙率が20%の純水の場合(図1bと図2b)、碎かれて細くなった氷粒子が数百 μm サイズの氷粒子の粒界に分布し、また氷粒子内には閉じた空隙が観察される。氷粒子間に存在する黒い領域は閉じていない空隙(開いた空隙)の領域である。Yasui and Arakawa [9]によると、空隙率0%の純水では氷粒子の再結晶や塑性変形が試料作成時(圧密過程)でかなり進行しており、そのため図1aのように氷粒子がほぼ均一サイズで存在し、形状が多角形で粒界が明確であると考えられる。空隙率が大きくなると氷粒子の再結晶や塑性変形がまだ完全に進行しておらず、氷粒子内の閉じた空隙や粒界の閉じていない空隙が存在すると考えられる。氷・シリカ混合物の場合、空隙率が同じであれば30 wt.% 試料と50 wt.% 試料の構造に違いは見られない(図1cから図1f)。しかし、空隙率が低くなるほどより細かい氷粒子が多く分布しているのがわかる(図2cと図2d)。Yasui and Arakawa [9]では、氷・シリカ混合物の圧密メカニズムは脆性破壊が最も支配的であると示唆しているため、空隙率が低いほど細か

い氷粒子が多くなるのは、脆性破壊によって氷粒子が破壊されたためだと考えられる。また、空隙率が20%の純水の薄片写真(図1b)のような閉じた空隙が氷・シリカ混合物の氷粒子の中に見られないため、図1cから図1fに存在する黒い領域はシリカビーズと空隙からなると考えられる。

実験は北海道大学・低温科学研究所の大型低温室に設置された変形試験機(TENSILON-25T)を用いて、等歪速度一軸圧縮実験を行った。歪速度は $1.2 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ から $4.2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ とし、温度は -10 、 -15 、 -20°C と設定した。

3. 結果

3.1 応力-歪み曲線

純水及び氷・シリカ混合物の応力-歪み曲線を図3に示す。応力-歪み曲線は、空隙率やシリカ質量含有率に関わらず次のような特徴をもつことが分かった。最初、応力は歪みの増加に比例して大きくなり、降伏

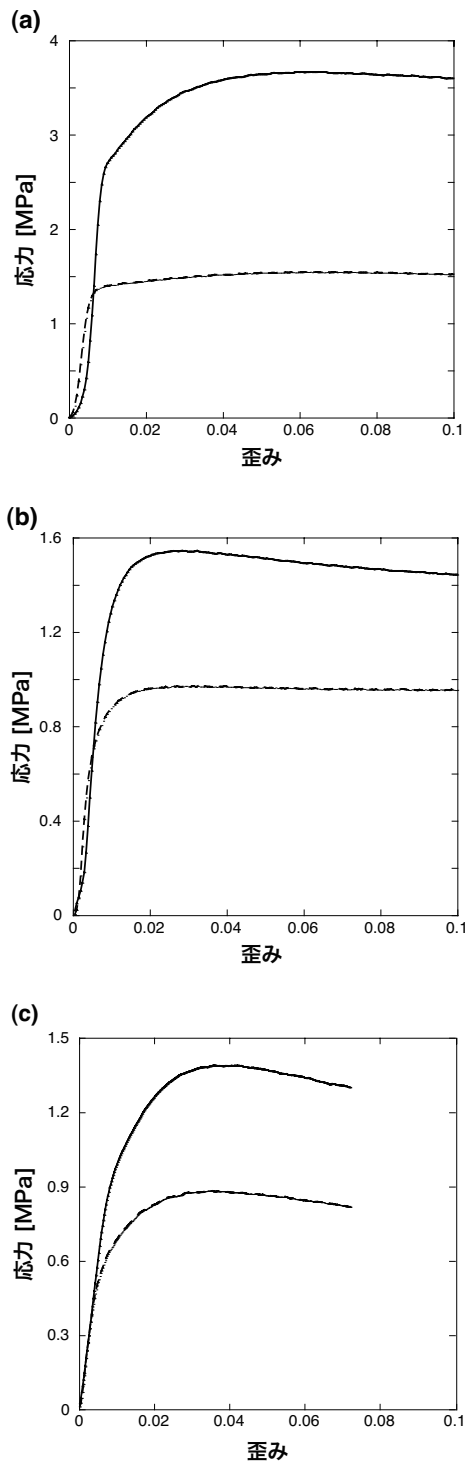


図3：純氷及び氷・シリカ混合物の応力-歪み曲線。(a)が純氷の空隙率10%，(b)が30 wt.%試料の空隙率9%，(c)が50 wt.%試料の空隙率8%の結果である。実線は歪速度が $4.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，点線が $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ を示す。

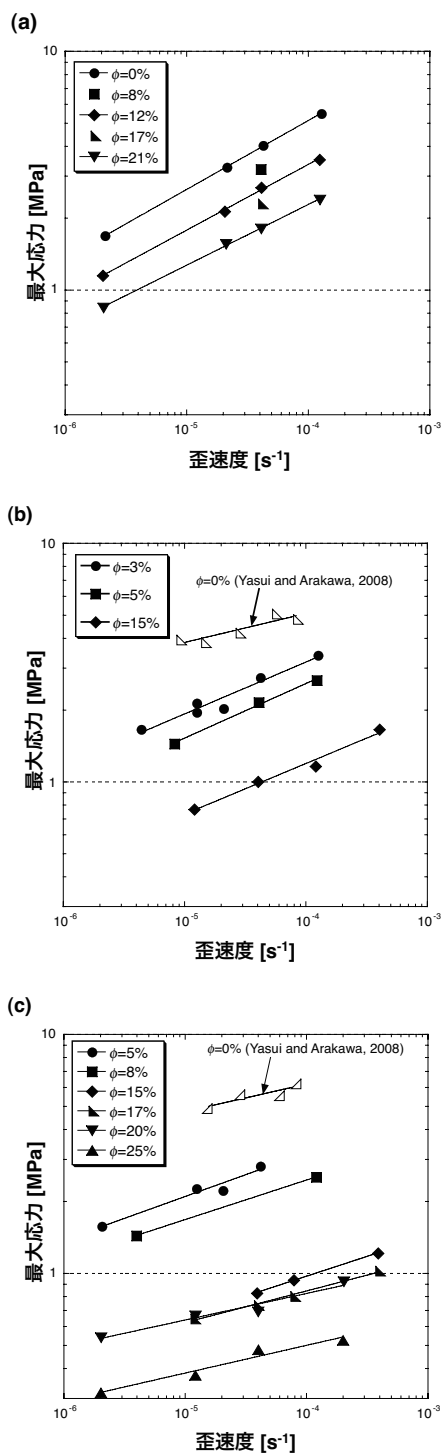


図4：空隙率を変化させた場合の最大応力と歪速度の関係。(a)が純氷、(b)が30 wt.%試料、(c)が50 wt.%試料の結果である。温度は全て -15°C である。30 wt.%試料と50 wt.%試料の空隙率が0%の結果は、Yasui and Arakawa [8]の結果を引用した。

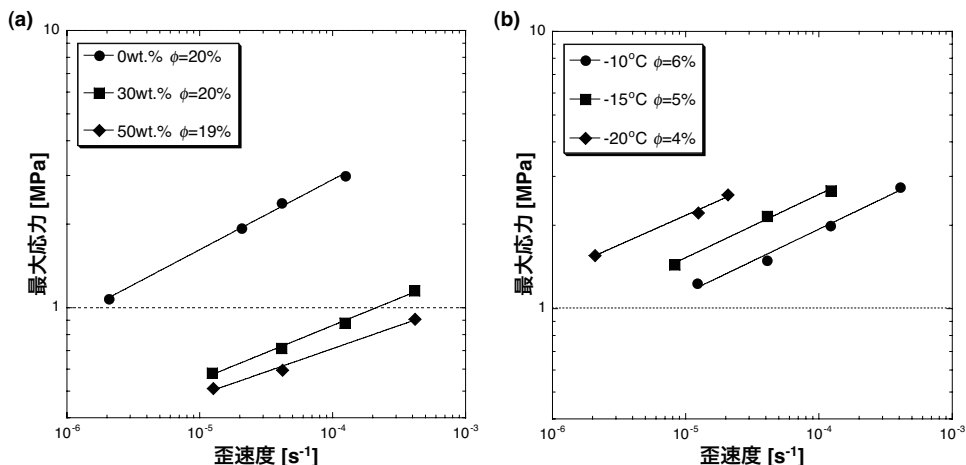


図5: (a) シリカ質量含有率を変化させた時の最大応力と歪速度の関係. 空隙率が約20%で温度が-20°Cの結果を示す.
(b) 温度を変化させた時の最大応力と歪速度の関係. 空隙率が約5%でシリカ質量含有率が30wt.%の結果を示す.

応力に達する. その後、応力-歪み曲線の傾きが徐々に小さくなり、歪みが1%から4%に達すると傾きが0になって応力が最大となる. 応力が最大になった後は、純氷及び30 wt.% 試料の歪速度が小さい場合はそのまま応力は一定となり、50 wt.% 試料、そして純氷及び30wt.%試料の歪速度が大きい場合は応力が減少し続ける、という振る舞いを見せた.

応力-歪み曲線上の最大応力は、氷・シリカ混合物の流動則を表すのに用いられている[8]. また、数%の歪みに達したときにあらわれる最大応力は、クリープ実験(応力一定)の定常クリープから得られる歪速度と一致することが室内実験及び数値モデル計算によって示されている [10, 11]. 故に、歪速度一定の場合に用いる流動則は以下のような式で書くことができる.

$$\dot{\epsilon} = A_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot \sigma_{\max}^n = A \cdot \sigma_{\max}^n \quad (1)$$

$\dot{\epsilon}$ が歪速度 (s⁻¹), σ_{\max} が応力-歪み曲線上の最大応力 (MPa), Q が活性化エネルギー (J mol⁻¹), R が気体定数 (8.314 J mol⁻¹ K⁻¹), T が温度 (K), A (s⁻¹ (MPa)⁻ⁿ) と n が定数である. 定数 n は応力べきと呼ばれ、シリカ質量含有率や空隙率といった物性値に依存する. 定数 A は活性化エネルギー Q や温度 T を用いてアレニウス型の式で記述でき、温度依存性をもつ. A_0 は一般に、基準となる物質の A_0 との比をとって enhancement factor と呼ばれる定数として使われる

[12]. 図3a や図3b のように応力が最大にならず一定になった場合は定常状態に達したことを表すため、式1を求める際には最大応力の代わりに一定応力を用いる. 次節では、氷・シリカ混合物の流動則を求めるために最大応力と歪速度の関係を調べ、それに対する空隙率、シリカ質量含有率、温度の依存性を明らかにする.

3.2 最大応力と歪速度の関係

3.2.1 空隙率依存性

最大応力と歪速度の関係に対する空隙率依存性を図4に示す. 温度は-15°Cと一定である. 各線は、式1を用いて近似したものである. 空隙率0%の30 wt.% 試料および50 wt.% 試料の結果は先行研究の結果を引用した [8]. 図4から、各シリカ質量含有率において最大応力が空隙率の増加と共に小さくなることがわかった. 例えば、30 wt.% 試料と50 wt.% 試料の空隙率が0%の最大応力は、空隙率が15%の最大応力と比べて約4倍も大きくなった. しかし、各シリカ質量含有率で近似線の傾きは空隙率が変化してもほぼ同じであることがわかった.

温度が-10°Cや-20°Cの場合、絶対的な最大応力の値は温度に影響するが、系統的な最大応力の変化は-15°Cの場合と同様であった. 空隙率の変化に伴う最大応力のこのような変化は、試料内の氷粒子同士の接触面に及ぼされる有効応力によって制御されていると考えられる. なぜなら、その接触面積は空隙率が増加す

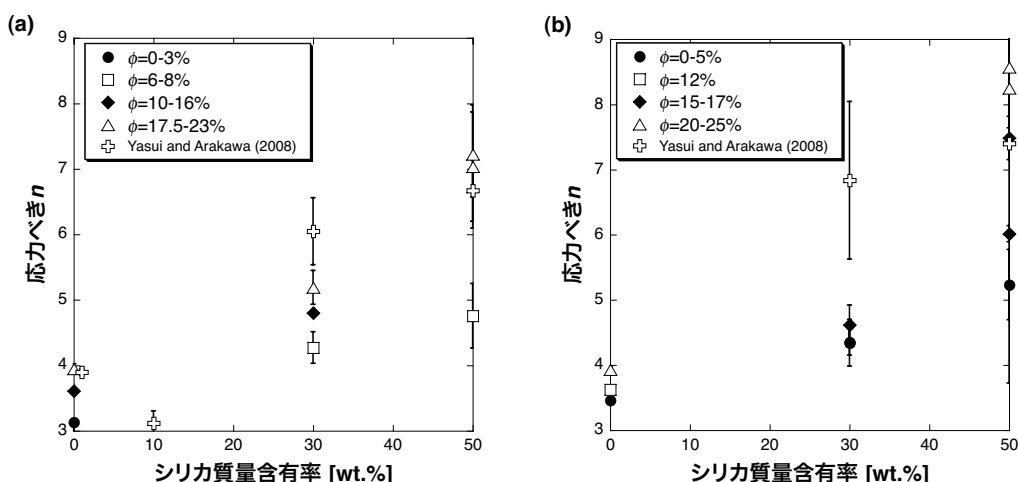


図6：流動則とシリカ質量含有率の応力べき n との関係。(a)が温度 -10°C 、(b)が温度 -15°C の結果を示す。

る程小さくなるからである。つまり、図1で見られるように、黒い領域(純水であれば空隙、氷・シリカ混合物であればシリカビーズと空隙からなる)は各々の氷粒子の接触を妨げるように氷粒子間に分布しており、その領域は空隙率が増加する程広がっている。そのため、氷粒子同士の接触面に及ぼされる有効応力は空隙率の増加とともに大きくなり、実際に試料に与えられる荷重と試料の断面積から計算される平均応力と比べて、その有効応力は数倍大きくなることが予測される。故に、空隙率の大きい試料は変形しやすくなり、最大応力が空隙率の増加とともに小さくなると考えられる。

3.2.2 シリカ質量含有率依存性と温度依存性

最大応力と歪速度の関係に対するシリカ質量含有率依存性を示したのが図5aである。空隙率は約20%、温度は -20°C と一定にした。図5aから、最大応力はシリカ質量含有率の増加とともに小さくなり、近似線の傾きはシリカ質量含有率の増加とともに緩やかになることがわかった。この系統的な最大応力の変化は、他の空隙率や温度の場合でも見られた。

最大応力と歪速度の関係に対する温度依存性を示したのが図5bである。空隙率は約5%、シリカ質量含有率は30 wt.%と一定にした。図5bから、近似線の傾きが変化することなく、温度が低下するにつれて最大応力が大きくなる方向に近似線が平行移動することがわかった。この系統的な最大応力の変化は、他のシリ

カ質量含有率や空隙率の場合でも見られた。

最大応力に対するシリカ質量含有率の効果については、3.2.1節で述べた空隙率の効果と同じ理由で説明できる。最大応力に対する空隙率の効果は、氷粒子同士の接触面に及ぼされる有効応力が空隙率の増加に伴って大きくなることで定量的に説明することができた。図1dや1fのように空隙率の大きい氷・シリカ混合物の場合、50wt.%試料の黒い領域は30wt.%試料の黒い領域に比べて明らかに広いことがわかる。そのため、50wt.%試料の氷粒子同士の接触面積は30wt.%試料に比べて小さくなるため、50wt.%試料の方が有効応力が相対的に大きくなり、最大応力が小さくなると考えられる。しかし、この説明が適応できるのは、試料内のシリカビーズ間の空隙率が40%(シリカビーズの最密充填率)以上の場合に限られると考えられる。シリカビーズ間の空隙率を40%以下にするのは不可能なため、試料全体の空隙率をさらに小さくするには氷粒子の中にシリカビーズを入り込ませなければ実現できない。この場合、シリカビーズは試料の強度にかなり影響を与えると思われる。なぜなら、氷粒子中に入り込むシリカビーズの量は、シリカ質量含有率の増加とともに増え、一方で氷粒子同士の接触面積は空隙率の減少と共に大きくなるからである。この場合、既に報告されているように氷粒子中のシリカビーズの量によって、試料の強度は増すと考えられる [8]。故に、空隙率が小さい場合はシリカ質量含有率の増加に伴って最

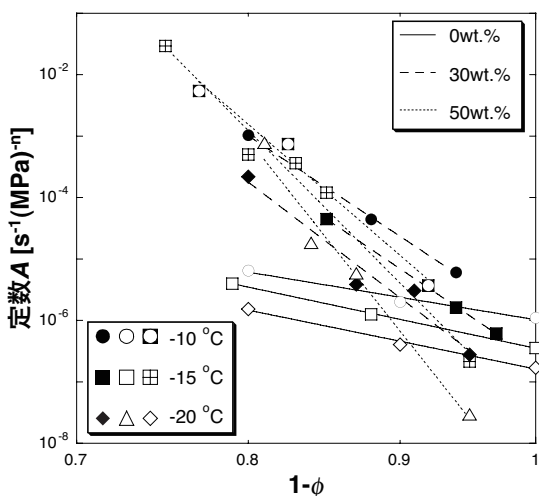


図7：式1の定数 A と充填率1-φ (φ は空隙率)の関係。両軸とも対数である。各線は各シリカ質量含有率・温度で式2を用いて近似した結果である。

シリカ質量含有率 [wt.%]	温度 [°C]	A₀' [s⁻¹(MPa)ᵃ]	α	Bₙ [s⁻¹(MPa)ᵃ]	αₙ	平均 n	k
0	-10	1.0x10⁻⁶	8.0	3.9x10¹¹	9.4	3.6	2.7
	-15	3.5x10⁻⁷	10.3				
	-20	1.6x10⁻⁷	9.9				
30	-10	8.0x10⁻⁷	32.0	1.3x10¹⁹	34.2	4.9	6.5
	-15	2.2x10⁻⁷	32.6				
	-20	4.9x10⁻⁸	36.7				
50	-10	1.4x10⁻⁷	41.6	6.1x10²⁰	49.1	6.5	7.4
	-15	2.5x10⁻⁸	48.5				
	-20	1.1x10⁻⁹	60.9				

表1：式1、式2、式4および式5における流動則の各パラメータ

大応力は大きくなると考えられる。

空隙率の変化に伴う最大応力の振る舞いは非常に複雑であり、シリカ質量含有率や温度によって変化する。しかし、このような複雑さは式(1)の定数 A₀や応力べき n に対する空隙率依存性を定量的に明らかにすることで説明できる。次節では、流動則が空隙率やシリカ質量含有率、温度によってどう変化するかを調べるために、定数 A₀ や n を詳細に調べる。

3.3 氷・シリカ混合物の流動則

3.3.1 応力べき n

純水と氷・シリカ混合物の応力べき n とシリカ質量含有率との関係を示したのが図6である。温度は-10°Cと-15°Cの場合を示した。図6 から、応力べき n

がシリカ質量含有率の増加とともに大きくなっているのがわかる。つまり、純水は n が約3 から4、30 wt.% 試料は約4から6、50 wt.% 試料は約5から8となった。また、応力べき n はシリカ質量含有率の依存性は見られたが、空隙率や温度に対しては系統的な変化は見られなかった。これは本研究の結果が先行研究の空隙率0%の結果とよく一致することからもわかる[8]。このような傾向は-20°Cの場合でも見られた。Yasui and Arakawa [8]によると、氷・シリカ混合物の応力べき n が大きくなる理由は、試料内に発生するマイクロクラックが原因であると結論づけている。本研究の場合も同様に、氷・シリカ混合物の場合は空隙率に関係なく、マイクロクラックの生成によって応力べき n が大きくなったと考えられる。一方、50 wt.%試料の場合、空隙率が20%以上の応力べき n が空隙率が小さい場合の n に比べて大きくなるのがわかった。これは-10°Cと-15°Cの場合に確認され、-20°Cでは確認されなかった。50 wt.%試料の結果は他の結果よりもばらつきが大きいので、空隙率の大きい50 wt.%試料の応力べき n について、空隙率が小さい場合との n の違いを議論するには、さらに信頼性のある結果を得ることが必要となる。

3.3.2 活性化エネルギー Q と定数 A₀

式1の定数 A は、図4、5から各シリカ質量含有率・温度の場合で計算できる。その計算結果が図7である。定数 A は各シリカ質量含有率で空隙率の増加とともに大きくなり、さらに温度の低下とともに小さくなるのがわかった。定数 A は応力が 1MPa の時の歪速度を意味するため、応力べき n が一定ならば、定数 A が小さくなるほど試料の強度が大きくなることを意味する。3.3.1節より、シリカ質量含有率が同じであれば、空隙率や温度に依存せず応力べき n はほぼ同じであるということがわかっているため、図7 から各シリカ質量含有率において空隙率が減少する、または温度が低くなるほど試料の強度が大きくなるが言える。この結果から、定数 A と空隙率φは以下のような関係を示すことがわかった。

$$A = A_0' (1 - \phi)^{-\alpha} \tag{2}$$

A₀' と α はシリカ質量含有率や温度に依存する定数である。各シリカ質量含有率・温度におけるこれらの値は表1にまとめてある。

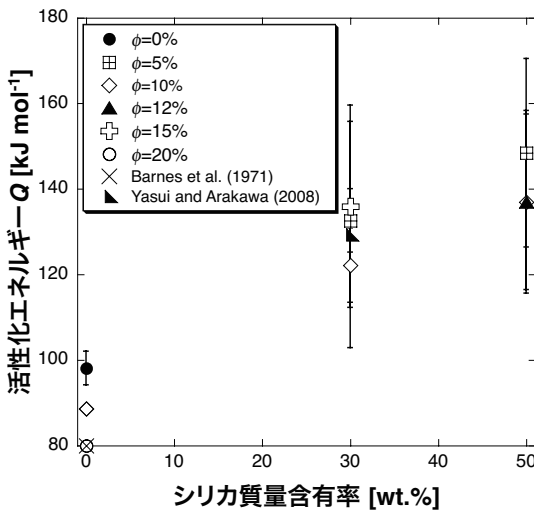


図8：活性化エネルギー Q とシリカ質量含有率の関係。先行研究は純氷および30wt.%試料の結果で、ともに空隙率は0%である [8] [14]。

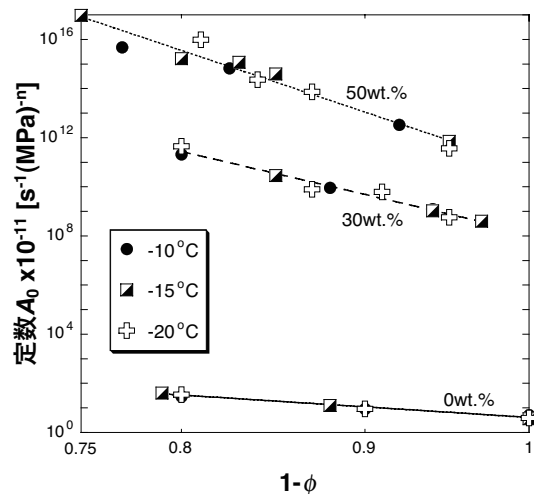


図9：定数 A_0 と充填率との関係。両軸ともに対数である。各線は同じシリカ質量含有率で式4を用いて近似した結果で、実線は純氷、破線が30 wt.%試料、点線が50 wt.%試料である。

空隙率が影響する最も重要なパラメータは、式1の定数 A_0 である。しかし、各シリカ質量含有率で A_0 を得るためには、各シリカ質量含有率・空隙率で活性化エネルギー Q を計算しなければならない。活性化エネルギーは次のように計算する。先行研究から、応力-歪み曲線上の最大応力と温度の関係は以下のように記述されることがわかっている [13]。

シリカ質量含有率 [wt.%]	空隙率 ϕ	活性化エネルギー Q [kJ mol ⁻¹]	平均 Q
0	0.00	98.1	88.9
	0.10	88.7	
	0.20	80.0	
30	0.05	132.6	130.2
	0.10	122.2	
	0.15	135.9	
50	0.05	148.4	140.8
	0.10	137.0	
	0.12	137.0	
0 [14]	0.00	80.8	--
30 [8]	0.00	129.3	--

表2：活性化エネルギー Q

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{A_0} \right)^{1/n} \exp \left(\frac{Q}{nRT} \right) \quad (3)$$

そこで各シリカ質量含有率で3つの空隙率を選択し、その活性化エネルギーを計算することにする。各空隙率での最大応力は式1と式2を用いて計算することができる。応力べき n は、各シリカ質量含有率・温度において、選択した空隙率とその値に近い n の実験値を用いる。各シリカ質量含有率および各空隙率において得られた活性化エネルギー Q を図8に示す。計算した結果、活性化エネルギーはシリカ質量含有率の増加とともに大きくなることがわかった。さらに、本研究の結果が空隙率0%の純氷および30 wt.% 試料を用いた先行研究の結果と一致した [8] [14]。つまり、活性化エネルギーは空隙率に依存しないことがわかった。

最後に、各シリカ質量含有率で得られた活性化エネルギーを用いて定数 A_0 を計算した。その結果を図9に示す。 A_0 は、各シリカ質量含有率の活性化エネルギーの平均値を用いて計算した。活性化エネルギーの平均値は表2に記してある。その結果、 A_0 は空隙率の増加とともに大きくなり、各シリカ質量含有率で桁で変化し、温度には依存しないことがわかった。定数 A と同様に、活性化エネルギーや応力べきが一定ならば、 A_0 が小さいほど試料の強度が大きくなることを意味している。既に前節で示したように、活性化エネルギーと応力べきは各シリカ質量含有率で一定であるため、

A_0 は様々な空隙率での相対強度と見なすことができる。つまり、純氷の場合は空隙率が変化しても強度はほとんど変化しないが、50 wt.% 試料の場合は空隙率が増加すると強度もかなり小さくなることになる。以上から、 A_0 は各シリカ質量含有率でべき乗則を用いて近似することができた。その経験式は次のように表される。

$$A_0 = B_{fit}(1-\phi)^{-\alpha_{fit}} \tag{4}$$

B_{fit} と α_{fit} は定数である。各パラメータは表1にまとめられている。表1に示したように、 B_{fit} と α_{fit} はシリカ質量含有率のみに依存し、シリカ質量含有率が増加するにつれて大きくなるのがわかった。 B_{fit} は先行研究の空隙率0%の結果から、シリカ質量含有率と指数関数で表されることが予測される [8]。

式4から、式1で示される流動則は次のような式で書けることがわかった。

$$\dot{\epsilon} = B_{fit} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot \left[\frac{\sigma_{max}}{(1-\phi)^k}\right]^n \tag{5}$$

k は定数 α_{fit} と応力べき n を用いて、 $k = \alpha_{fit}/n$ と示される。定数 k は表 1 に示す。定数 k も同じくシリカ質量含有率のみに依存し、シリカ質量含有率の増加とともに大きくなるのがわかった。以上より、流動則をシリカ質量含有率と空隙率の効果を考慮した新たな流動則(式5)として表す事に成功した。

4. 氷衛星の地形緩和への応用：形状変化条件の見積もり

1 節で述べたように、氷衛星の形状変化は表面地形の粘性緩和と密接に関係している。氷衛星の表面地形の粘性緩和は、氷・岩石混合物のレオロジーや氷衛星の熱史と深く関わる非常に興味深い地質学的現象である。先行研究において、粘性緩和が起こる条件はマクスウェル粘弾性モデルを用いて調べられているため、本研究では実験で得られた流動則を用いたマクスウェル粘弾性モデルを適用し、粘性緩和が起こる条件を調べる [3]。一方、氷衛星の内部温度分布は、その熱進化過程において氷惑星の集積熱や放射性核種の壊変熱による熱源に左右されて常に変化している。本研究で得られた流動則から、氷・シリカ混合物の粘性率は温度に強く依存することがわかっているため、表面地形の地形緩和は氷衛星の内部温度分布に強く影響すると思われる。そこで、氷衛星の内部温度分布を熱伝導方程式から計算し、その温度計算結果を用いてマクスウェル粘弾性モデルを計算して、氷衛星の地形緩和が起こる条件、つまり形状変化が起こる条件を見積もることにする。さらに、空隙率や岩石含有率の効果も議論する。

氷衛星の内部温度計算には、熱伝導方程式を用いる。今回の計算では、対象とする氷衛星は氷と岩石の混合物からなる非分化均質構造であるとし、熱源は放射性

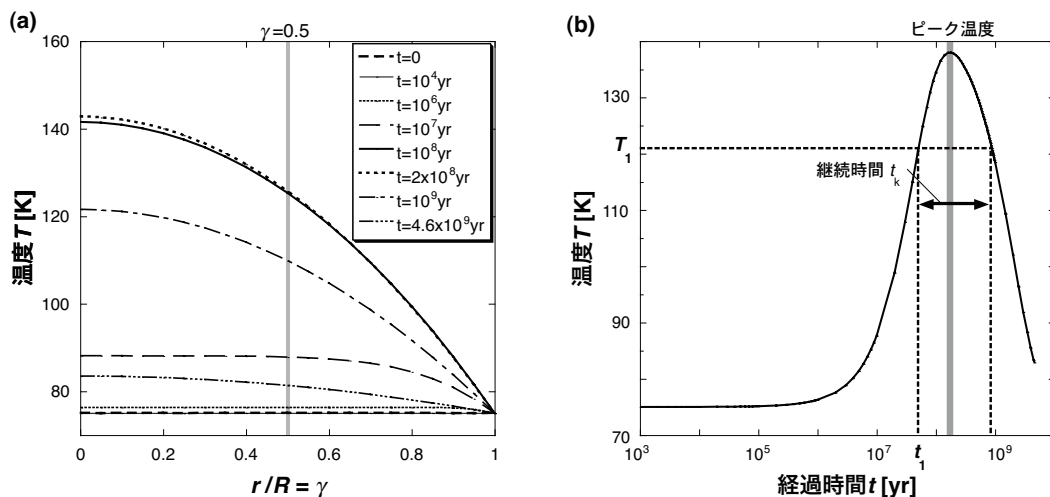


図10：式6の解析解を解いた例。岩石質量含有率が50wt.%, 空隙率が0%, 氷衛星の半径が200kmの場合。(a)は γ と温度の関係の時間変化, (b)は $\gamma=0.5$ の時の経過時間と温度の関係を示す。

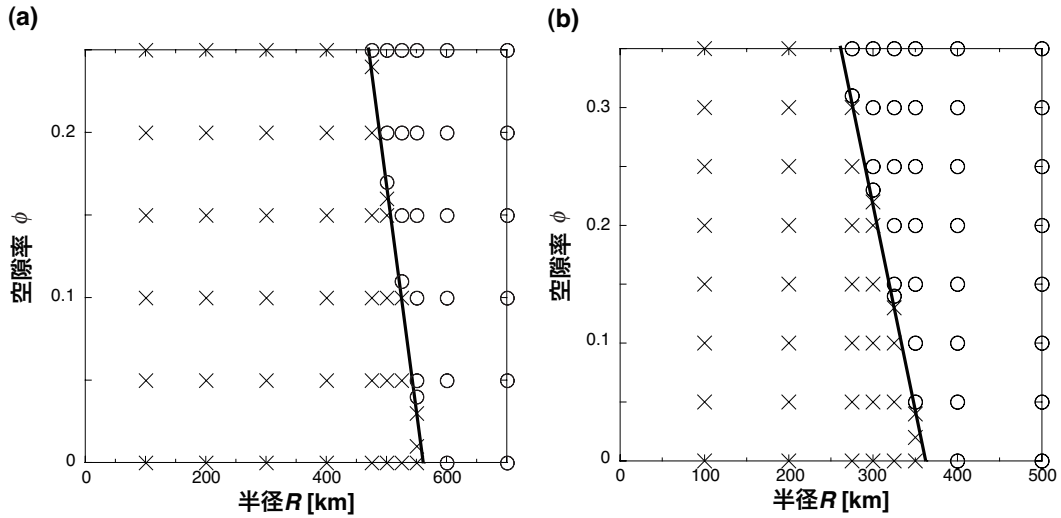


図11：式6から得られる継続時間 t_c と式7を用いて計算したマクスウェル緩和時間 τ_M の比較から見積もった、形状変化が起こるために必要な氷衛星の半径と空隙率の条件。丸印が形状変化が可能、バツ印が形状変化が不可能を表し、その境界が実線である。(a)が岩石質量含有率が30wt.%, (b)が岩石質量含有率が50wt.%の結果を示す。

元素壊変熱のみ、熱拡散は熱伝導のみで起こると仮定する。熱伝導方程式は次のような式で表される。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(Kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + g(r, t) \quad (6)$$

ρ は氷衛星の平均密度 (kg m^{-3})、 C_p は定圧比熱容量 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 K は熱伝導率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 t は氷衛星形成時 ($t=0$) からの経過時間 (s)、 r は氷衛星中心からの距離 (m)、 T は温度 (K) である。式6の計算には解析解を用いる [15]。 $g(r, t)$ は $g(r, t) = f \cdot g_{\text{ch}}(0) \exp(-\lambda t)$ と表される。 $g_{\text{ch}}(0)$ は放射性核種の壊変による初期熱生成量 (W m^{-3})、 λ は壊変定数 (s^{-1}) で両値ともにコンドライト隕石の値を用いる [16]。 f は岩石体積含有率である。また解析解に含まれる氷衛星の表面温度 T_s は土星系衛星の平均表面温度 75 K と仮定し、初期条件は氷衛星の内部温度が 75 K と一定とし、境界条件は表面温度が時間によらず一定であるとする。 C_p は純氷の定圧比熱容量 $C_{p\text{-ice}}$ と岩石の定圧比熱容量 $C_{p\text{-rock}}$ を用いる。 $C_{p\text{-ice}}$ は先行研究から $C_{p\text{-ice}} = 7.8T - 12.4$ となることがわかっているため、 T に 75 K を代入した値 $572.6 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ を用いる [17]。 $C_{p\text{-rock}}$ は、玄武岩の値 $840 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ を用いる [18]。これらの値を用いて、氷・岩石混合物の C_p は、 $C_p = C_{p\text{-ice}} \cdot (1 - f) + C_{p\text{-rock}} \cdot f$ と表される。 K は同様に、純氷の熱伝導率 K_{ice} と岩石の熱伝導率 K_{rock} を用いる。 K_{rock} はかんらん岩の熱伝

導率 $2 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ を用いて、温度に依存しないとする [5]。 K_{ice} は室内実験で得られた経験式 $K_{\text{ice}} = 3.6 \times 10^{-6} \rho^2 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ を用いる [19]。 ρ は純氷の空隙率 ϕ 分の体積を含めた密度である。これらの値を用いて、氷・岩石混合物の K は、 $K = K_{\text{ice}}^{(1-f)} \cdot K_{\text{rock}}^f$ と表される。このため、空隙率が大きくなると熱伝導率は小さくなるため熱拡散が効きにくくなり、空隙がない氷衛星に比べて温度がかなり上昇することが予想される。

式6の解析解を解いた例を図 10a に示す。図 10a から、時間経過とともに温度が上昇し、ある時間を超えると温度が低下しているのがわかる。温度の上昇は放射性核種の壊変により生じた熱が熱伝導によって徐々に拡散しているため、温度の低下は放射性核種の減少によって熱源が低下しているためである。氷衛星中心からの距離 (r) を氷衛星の半径 (R) で規格化した値を γ とし、 $\gamma = 0.5$ において時間と温度の関係を示したのが図 10b である。今回はこの図 10b を例に、氷衛星の形状変化が起こる条件を見積もる。図 10b 上で、ピーク温度に達する前のある時間 t_1 における温度を T_1 とする。そして、ピーク温度を超えて再び温度が T_1 になるまでの時間 t_k が決まる。一方、温度 T_1 の時のマクスウェル緩和時間 τ_M 、つまり粘性緩和に必要な時間が計算できる。これをあらゆる時間 t において継続時間 t_k と緩和時間 τ_M を計算し、ピーク温度になる前に緩和時間の方が継続時間よりも短くなれば、

緩和可能つまり形状変化が可能とする。次にマクスウェル緩和時間について説明する。

マクスウェル緩和時間は先行研究を参考にして計算する [3]。マクスウェル緩和時間 τ_M は粘性率 η とヤング率 Y の比、 η/Y と表される。今回の計算では、有効粘性率 η_{eff} を用いる。有効粘性率 η_{eff} は式 1 から次のように表される。

$$\eta_{\text{eff}} = \left[A_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \right]^{-1} \sigma^{1-n} \quad (7)$$

定数 A_0 は式 4 を用いる。活性化エネルギー Q 、応力べき n 、定数 B_{fit} と α_{fit} は、各シリカ質量含有率の平均値を用いる (表 1, 2 参照)。応力 σ は、各岩石含有率 (岩石の密度はかんらん岩の密度 $3,300 \text{ kgm}^{-3}$ を用いて、含有率を計算する) から決まる平均密度 ρ を用いて、 $\sigma = 2\pi G \rho^2 R^2 (1 - \gamma^2) / 3$ と仮定する [2]。観測によって、氷衛星表面の地形起伏の最大値が氷衛星の半径の約 5分の 1 であることがわかっているため、今回は $\gamma = 0.8$ として計算した [3]。ヤング率は、音速測定実験より得られた P 波速度と S 波速度を用いて計算した。音速測定は変形実験で用いたものと同じ 30 wt.% 試料と 50 wt.% 試料を使用し、空隙率は各試料で数種類選んだ。測定の結果、ヤング率 Y (GPa) と空隙率 ϕ の関係は 30 wt.% 試料が $Y = 8.1-27.8\phi$ 、50 wt.% 試料が $Y = 7.8-18.9\phi$ と表されることがわかった。得られた経験式を用いて、岩石質量含有率が 30 wt.% と 50 wt.% の場合でマクスウェル緩和時間を計算した。空隙率範囲はヤング率の経験式の使用可能範囲 ($Y > 0$)、30 wt.% が 0% から 25%、50 wt.% は 0% から 35% とした。

式 6 から得られる継続時間 t_c と式 7 を用いて計算したマクスウェル緩和時間 τ_M を比較し、形状緩和が起こるかどうかを調べた結果を図 11 に示す。この結果、岩石質量含有率が大きいほど、さらには空隙率が高いほど形状変化が起こる氷衛星の半径が小さくなることがわかった。この理由は、岩石質量含有率が大きくなるほど放射性核種の量が増加し、また、前に予想したように空隙率が増加するほど熱伝導率が小さくなり、そのため温度が上昇しやすくなり、結果的に継続時間が長くなるためである。この場合、形状変化が起こる最小半径は、岩石含有率が 50 wt.%、空隙率が 35% の約 250 km となった。しかし、実際に氷衛星の形状

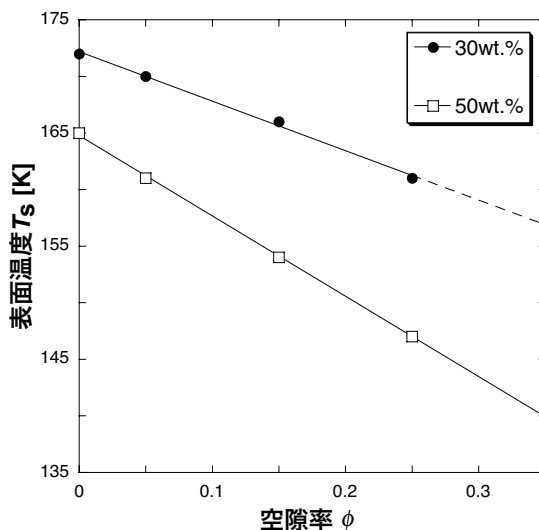


図12: 半径100kmの氷衛星で形状変化が起こるために必要な表面温度 T_s の下限値。点線は外挿線である。

変化が起こるのは氷衛星の平均半径が約 40 km から 100 km であることがわかっている。故に、氷衛星は空隙率50%以上の高空隙率天体である、もしくは過去に何らかのイベントにより温度がさらに上昇した時期があったことが考えられる。そこで最後に、氷衛星の半径が約 40 km から 100 km の範囲で形状変化が起こるために必要な温度を、同様の手法を用いて計算した。

今回は、半径100 km の氷衛星で形状変化が起こるための表面温度 T_s の下限値を計算した。その結果を図12に示す。計算した結果、岩石含有率が大きいほど、さらに空隙率が大きいほど、必要な表面温度が低くなることがわかった。また、今回の計算範囲では 135K から 170K が必要であることがわかった。木星や土星の氷衛星は、惑星集積の最終段階に形成された周惑星円盤内で形成されたと考えられている。よって、周惑星円盤の温度が 135K から 170K になれば、氷衛星の形状変化が可能であることが示唆された。

5. まとめと今後の展望

氷・シリカ混合物の変形実験を行って流動則を求め、それに対する空隙率依存性およびシリカ質量含有率依存性を調べた。その結果、空隙率やシリカ質量含有率の増加とともに、氷・シリカ混合物の強度が小さくなることがわかった。また、流動則の応力べき n や活

性化エネルギー Q はシリカ質量含有率のみに依存し、シリカ質量含有率の増加とともに大きくなることがわかった。さらに定数 A_0 は、空隙率 ϕ を用いて $A_0 = B_{fit}(1-\phi)^{-\alpha}$ と表され、定数 B_{fit} や α_{fit} もまたシリカ質量含有率のみに依存し、シリカ質量含有率の増加とともに大きくなることがわかった。最後に、熱伝導方程式を用いた氷衛星の内部温度分布の計算と実験で得られた流動則を用いたマクスウェル緩和時間の計算比較から、氷衛星の形状変化が起こる条件を見積もった。その結果、岩石含有率が大きいほど、さらに空隙率が大きいほど、形状変化が起こるための氷衛星の半径が小さくなることがわかった。

今後は、変形実験で得られた流動則の各パラメータの物理的意味を調べるために、変形メカニズムを解明することが重要となる。例えば、応力べき n や活性化エネルギー Q は変形メカニズムと関連があり、今回の実験から純氷と混合氷ではその値が異なることがわかった。これは変形メカニズムの違いが反映されていると考えられる。今後はそれを解明する 1 つの手段として、中性子回折実験を用いた氷試料の変形に伴う氷結晶の構造解析を行い、氷・岩石混合物の粘弾性的性質を明らかにしたいと考えている。

謝 辞

本稿をまとめるにあたって有用な議論をしていただきました。長岡技術科学大学の東信彦教授、マサチューセッツ工科大学の W. B. Durham 博士に感謝致します。また、本実験を円滑に進めるにあたって技術的なサポートをしていただきました。北海道大学・低温科学研究所の中坪俊一氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Thomas, P. C., 1989, *Icarus* 77, 248.
- [2] Farinella, P. et al., 1983, *The Moon and the Planets* 28, 251.19
- [3] Croft, S. K., 1992, *Icarus* 99, 402.
- [4] Pollack, J. B. et al., 1991, in *Uranus*, 469.
- [5] McKinnon, W. B., 2002, in *Proc. ACM* 2002, 29.
- [6] Durham, W. B. et al., 1992, *JGR* 97, 20883.
- [7] Mangold, N. et al., 2002, *Planet. Space Sci.* 50, 50385.
- [8] Yasui, M. and Arakawa, M., 2008, *GRL* 35, doi:10.1029/2008GL033787.
- [9] Yasui, M. and Arakawa, M., 2009, *JGR* 114, doi:10.1029/2009JE003374.
- [10] Mellor, M. and Cole, D. M., 1982, *Cold Reg. Sci. Technol.* 5, 201.
- [11] Sinha, N. K., 1988, *J. Mater. Sci.* 23, 4415.
- [12] Paterson, W. S. B., 1994, *The physics of Glaciers* 3rd ed. (Oxford, UK: Elsevier)
- [13] Arakawa, M. and Maeno, N., 1997, *Cold Reg. Sci. Technol.* 26, 215.
- [14] Barnes, P. et al., 1971, *Proc. R. Soc. Ser. A* 324, 127.
- [15] Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1986, *Conduction of heat in solids* 2nd ed. (Oxford, UK: Clarendon Press)
- [16] Ellsworth, K. and Schubert, G., 1983, *Icarus* 54, 490.
- [17] 前野紀一・黒田登志雄 (1999), *雪氷の構造と物性* (古今書店)
- [18] Kappelmeyer, O. and Haenel, R., 1974, *Geothermics with special reference to application* (Berlin: Gebrueder Bomtraeger)
- [19] Mellor, M., 1964, in *Properties of snow*, 1.