

宇宙雪氷学から見た土星衛星系の成り立ち

荒川政彦

北海道大学 低温科学研究所

〒060-0819 札幌市北区北 19 西 8

TEL : 011-706-7449, FAX: 011-706-7142

E-mail: arak@lowtem.hokudai.ac.jp

要旨：

雪氷のフィールドを地球から太陽系の惑星・衛星にまで広げた時に現れる雪氷学の新たな研究課題を総称して宇宙雪氷学と呼ぶ。この課題の一つに土星の衛星系が持つサイズと平均密度の正の相関関係がある。この関係は、衛星の衝突集積時に起こる衝突分別過程で説明できる。この分別過程は、氷衛星の岩石含有率の差に起因する衝突破壊強度の違いにより引き起されると考えられる。

キーワード：氷衛星，衝突，土星，宇宙雪氷，惑星探査

Key words: Icy satellites, Collision, Saturn,

Cosmo-Glaciology, Planetary exploration

1. 太陽系の雪氷

惑星探査の対象として雪氷は大変魅力的な対象である。それには幾つもの理由があるが、第一に水と生命を連想させるからである。近年、アメリカを中心に推進されている火星探査や外惑星探査なども一つの研究の柱としてアストロバイオロジーを掲げており、生命を育む場としての地球外環境を探査対象としている。現在、火星で行われている探査は、その表層に過去において大量の水（海や湖）が存在したかどうか、そして現在でも地下に水もしくは氷が蓄えられているかどうかを明らかにするのが重要な目的となっている。一方、ガリレオ探査機による木星の氷衛星探査の結果、衛星の一つであるエウロパの内部に海が存在する可能性が示され、惑星科学者のみならず生命の発生する場として多くの研究者の興味を引いている。第二に氷天体や氷を持つ惑星が多様性に富んでいるからである。氷は、土星周回において粒子としてリングを構成し、その衛星においては氷地殻やマグマとして地質活動を支配する。火星や地球では氷床や凍土を構成し、彗星では蒸発してジェットとなる。地上とは異なる環境下におかれた氷を研究することにより、多様な天体の起源や進化を探ることができる。雪氷は我々にとって生活環境に密着した身近なものであるが、このように地球圏外においても非常に興味深い研究対象である。現在、我々は、雪氷のフィールドを地球から太陽系の惑星・衛星にまで広げた時に現れる雪氷学の新たな研究課題を総称して宇宙雪氷学と呼び、その普及に勤めている。

2. 土星衛星系の成り立ち

2004年の夏にアメリカの惑星探査機カッシーニが土星に到着し、現在、様々な観測がなされている。以前に行われたボイジャーによる観測を大きく凌ぐ観測成果が期待されており、すでに厚い大気に覆われてこれまで見ることはできなかった衛星タイタンの表面地形の観測結果が公開されている。土星リングのサイズ分布や組成に関する全く新しい知見も得られており、これらの新たな情報によりこの分野の研究が大きく進展することは間違いないであろう。一方、ボイジャーによる探査で見つかった土星の衛星に関する特徴の中で、その起源に関連して最も重要だと思われるのは衛星のサイズと平均密度の関係である(図1)。今後、カッシーニの探査を経て、衛星の数が増えることが予測されるが、この関係は質的には変化しないと思われる。土星の衛星はサイズが小さいものは密度が非常に小さく 1g/cm^3 以下であり、純氷よりも軽いと言われている。そしてサイズの増加とともに平均密度が大きくなり、最大の衛星タイタンでは 2g/cm^3 程度の密度となる。このサイズと密度の関係を説明するために、これまで幾つかの仮説が提案されてきた。

図 1

氷衛星の形成は、他の惑星と同じように微小天体の衝突集積によると言われている。この過程において高速度衝突により発生する高温のため、氷が気化・蒸発し選択的に揮発性の珪酸塩鉱物が天体上に残ると考えられる。Ahrens and O'Keefe(1985)は、このメカニズムをもとに氷天体のサイズと蒸発量の間を理論的に計算した(図2)。図2は仮想的な純氷天体と氷60%+珪酸塩40%の混合天体が、衝突集積により成長した時のそれぞれの衝突蒸発量を見積もったものである。純氷天体の場合、タイタンの大きさ

にまで成長すると降り積もる天体の 80%以上が蒸発してしまうことがわかる。これはタイタン以上大きな天体は衝突集積では成長が難しいことを意味する。一方、より現実的な氷・岩石混合物においてはタイタンサイズでは 40%ほどの氷が蒸発することになり、氷衛星が成長するとともに平均密度が徐々に上昇して行くことが推測される。氷衛星の成長とともに蒸発量が大きくなるのは、集積する天体の衝突速度が大きくなるからであり、その速度は氷衛星の重力により決まっている。このように土星衛星系のサイズ-密度関係は、密度の低い（氷成分が多い）氷・岩石混合物天体はその集積過程において衝突蒸発を経ることにより形成されたと考えることができる。

図 2

上記の議論は氷衛星の元となる氷微衛星の組成が土星系のどこでも均一であることを仮定している。しかしながら最近の理論的研究では、氷衛星が成長した土星系には温度分布があり、土星近傍では高温により氷の蒸発が起きた可能性があることが示唆されている（Canup and Ward, 2002）。この場合、氷微衛星の組成自身が中心惑星との距離により変化するはずである。すなわち、土星系には様々な氷・岩石混合比を持つ氷微衛星が存在したことになる。氷・岩石混合物の破壊強度は、その岩石含有量により大きく変化すると思われる。この力学強度の差が、氷微衛星の衝突集積時にその成長速度に影響を及ぼし、サイズ-密度関係に寄与したかもしれない。また、氷微衛星は、その大きさを km 程度と仮定すると、重力が小さいため圧密が起きず、最初は大きな空隙率を持っていたはずである。その後、氷衛星は成長とともにその重力が大きくなるので圧密が進行し、空隙も少なくなり氷化すると考えられる

（Maeno *et al.*, 1993）。このように氷微衛星や成長中の氷

衛星は様々な空隙率を持っていた。そして、良く知られているように雪の破壊強度は空隙率と共に大きく変化するので、空隙率も氷衛星の成長速度に影響を及ぼす重要な要素である (Mellor, 1975)。

そこで Arakawa *et al.* (2002) と Arakawa and Tomizuka (2004) では、氷微衛星の力学強度の差による氷・岩石の分別過程とその結果起こる氷衛星のサイズ-密度関係の成立を調べるために、様々な空隙率を持つ氷・岩石混合物の衝突破壊実験を行なっている。

3. 雪の衝突物性

図 3

3.1 クレーター放出物の速度

雪の衝突物性を調べるために Arakawa *et al.* (2002) では、低温室に設置した軽ガス加速装置により、高速度衝突実験を行なっている。氷の弾丸を速度 100~700m/s で空隙率を変化させた雪試料に衝突させることにより、その時の衝突破片分布とクレーター放出物の最大速度を計測している。図 3 a,b は衝突時のクレーター形成過程をイメージコンバーターカメラで撮影した写真である。黒く見えるのが雪試料と弾丸で、時間経過は各コマに示されている。雪試料は両者ともサイズが 10cm で、図 3 a は試料の空隙率が 10%、図 3 b は 37% である。衝突速度は 217m/s である。この写真を比較してわかるように空隙率が大きいとクレーターから放出される破片速度が小さくなる。詳しい解析によればクレーター放出物の最大速度は、衝突速度 (V_i) に比例する。また最大速度を持つ方向が試料面となす角度 (Ejecta Angle) は衝突速度とともに大きくなると報告されている

(図 3 c 参照). Ejecta Angle が衝突速度の増加とともに大きくなることは, 放出物がより垂直に飛び出すことを意味する. この性質は, Sirono (2003) による高空隙率物体の数値シミュレーションでも再現されており, その理由は速度とともに弾丸の潜り込みが深くなり, 放出物を押し出す圧力の中心点が深くなるからだと解釈されている. 一方, 放出物の最大速度が衝突速度に比例するという事は, 衝突速度で規格化した最大放出速度は一定になるということである. この規格化最大放出速度 (V_{e-max}/V_i) の空隙率依存性を図 4 に示す. この図のように規格化最大放出速度と空隙率 (ϕ) は負の相関関係を持っており, 空隙率の増加と共に急激にその値が小さくなる. 雪の場合の実験式は以下のように表される.

$$V_{e-max} / V_i = -2.17\phi + 1.29 \quad (1)$$

この関係を外挿すると空隙率が 60% を超えた条件で放出物が全く出ないことになる. 残念ながら 60% 超える空隙率を持つ試料のデータはないが, 密度の低い雪は弾丸により容易に圧縮され, 深い貫入孔を作るので放出物が出ないことも充分にあり得る. いずれにしろ, 空隙率が高くなるほど放出物速度が小さくなる傾向は, 氷微衛星同士が衝突した時に合体成長を促進する効果があると思われる. 衝突成長は, 氷微衛星同士の直接合体だけでなく, 微衛星の持つ重力場により衝突破片が捕獲されて起こる. それゆえ, 破片速度が小さいほど重力捕獲を受けやすくなり, しいては衛星の成長に寄与することになる.

図 4

3. 2 衝突破壊強度

氷微惑星同士が衝突する場合、両者とも衝突によりばらばらに砕け散ってしまえば、衛星に成長することはできない。そこで衝突による破壊を免れるかどうか、衛星の成長条件として重要な要素となる。このようなことを加味して衝突破壊強度の定義は、通常の実験における破壊強度とは異なるものを用いる。破壊は統計的な物理過程が支配する現象であるので実験データがばらつくことが多い。そこで雪の場合、衝突破壊強度の空隙率依存性を調べるため以下のような手法が Arakawa *et al.* (2002) で提案され、その後の研究に利用されている。これは衝突により破壊された破片の積算質量分布から破壊強度を定義するものである。図 5 に空隙率 37% の場合に得られる各衝突速度での破片の積算質量分布を示す。縦軸の積算質量の意味は（正確には試料の初期質量で規格化した積算質量）、横軸のある値を指定した時、その破片質量より小さい破片の質量をすべて積算したものである。積算質量が 1 の時の破片サイズは、それぞれの衝突破壊で生ずる最大破片に相当する。大まかに言って、衝突速度が大きくなるとこの最大破片が系統的に小さくなり、サイズ分布が上方に移動する。すなわち、同一破片質量での積算質量が大きくなる。これは衝突速度が大きいと破壊が激しくなり、破片のサイズが小さくなり、微細破片の量が増えることに対応している。それぞれの破片分布で、衝突破壊の程度を代表する値として積算質量が 0.5 の時の破片質量を取ることとし、これを $f_{0.5}$ と名付ける。この $f_{0.5}$ と衝突条件の代表的値であるエネルギー密度 (Q) の関係を図 6 に示す。ここでエネルギー密度とは弾丸の運動エネルギーを試料の質量で割った値を言う。空隙率毎に $f_{0.5}$ とエネルギー密度の関係を示すこ


 図 5

とができ、それぞれをフィッティングして実験式を得ることができる。それらの実験式と $f_{0.5}=0.5$ の交点のエネルギー密度をここでは衝突破壊強度 ($Q^*_{0.5}$) と定義する。この衝突破壊強度と空隙率の関係を図 7 に示す。大変興味深いことに衝突破壊強度は空隙率の増加とともに、以下の実験式に従って 3 倍以上増加することがわかる。



$$Q^*_{0.5} = 20.7 (1 - \phi)^{-1.6} \quad (2)$$

良く知られているように雪の力学強度は空隙率の減少と伴に急激に大きくなる (Mellor, 1975)。Arakawa and Tomizuka (2004) では空隙率 37-12.5% における雪の静的一軸圧縮実験を行ない歪速度 $5.6 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ における空隙率 (ϕ) と最大耐応力 ($\sigma_{\max}, \text{MPa}$) の関係を調べている。その結果は以下の実験式で表されている。



$$\sigma_{\max} = 9.8 (1 - \phi)^{3.4} \quad (3)$$

最大耐応力は空隙率の増加に従って 1 桁以上大きくなっており、衝突破壊強度とはまったく逆関係を持つことがわかる。

その理由について Arakawa *et al.* (2002) は、衝突破壊強度が局所的な雪粒子の結合力だけではなく、衝撃圧力の発生とその伝播により決まる量であるからだと説明をしている。図 8 a にあるように高速度衝突が起こると衝突点ではユゴニオ状態方程式に従って衝撃圧が発生する。この発生圧力は近似的には試料密度に比例するので、図のように空隙率に従って衝突点圧力が変化する。発生した圧力は試料全体に広がっていき、伝播距離とともに減衰する。その

減衰率は距離の3-4乗であり、特に雪のような高空隙率物質中での減衰率は大きいとされている。その結果、衝突点から試料全体に圧力が行き渡ると、試料サイズに相当する距離の圧力にまで衝撃圧は減衰することになる。この減衰した圧力が及ぼす力が雪粒子の結合力を超える時、試料全体の破壊が起こる。雪粒子の結合力は静的な圧縮実験で観察される量に比例すると考えられるので、空隙率が高くなると減少する。例えば図中にそれぞれの空隙率について結合強度を書き入れることができる。この強度と試料全体に広がった時の衝撃圧を比較すると面白いことがわかる。空隙率が低い（高密度）場合は、衝撃圧は、結合強度より大きいため、試料全体が破壊されることがわかる。一方、空隙率が高い（低密度）場合は、衝撃圧は、結合強度より小さいため、試料の破壊は起こらないことになる。これは、雪の衝突破壊強度が空隙率の増加とともに大きくなる理由を定性的に良く説明している。氷微衛星を考えた時、それが純氷に近い天体であったならば、空隙率が高い時は衝突破壊から免れ、空隙率が小さくなると破壊によりその成長が妨げられたと推測される。

図 8

4. 氷・岩石混合物の衝突物性

現実の氷微衛星には岩石がある程度含まれていたと推測されるので、氷・岩石混合物の衝突物性は重要である。Arakawa and Tomizuka (2004) は、蛇紋岩粉末と雪の混合物について、空隙率を系統的に変化させた衝突破壊実験を行なっている。彼らが行なった岩石含有率 50wt.%の結果によれば、クレーター形成時の最大放出速度の空隙率依存性は雪の場合と良く似ている。図 4 に示すように、雪の場

合より少し速度が小さめになってはいるが、空隙率の増加にともない規格化最大放出速度が減少する傾向は同じである。一方、衝突破片の積算質量分布から定義される破壊強度 ($Q^*_{0.5}$) の空隙率依存性であるが、これは雪の場合と大きく異なる。図 7 に示すように混合物の衝突破壊強度は空隙率の増加とともに減少し、以下の実験式により表される。

$$Q^*_{0.5} = 124 (1 - \phi)^{2.5} \quad (4)$$

空隙率 40% では、両者の強度はほとんど変わらないが、空隙率の減少とともにその差は広がり、真密度では 5 倍以上混合物の強度が大きくなる。このように雪と混合物ではまったく正反対の依存性を持つことが報告されている。混合物の静的圧縮強度は空隙率 40% 以下では以下の式に表されるように雪よりも混合物の方が小さい。

$$\sigma_{\max} = 9.5 (1 - \phi)^{6.4} \quad (5)$$

ただし、その差は空隙率の減少とともに縮まり、真密度では同程度であると推測される (Arakawa and Tomizuka, 2004)。混合物が持つ特徴として、圧縮強度の空隙率依存性が大きい点が挙げられる。雪では強度の差は 5 倍程度であるが、混合物では 20 倍以上強度が変化している。この圧縮強度が表す粒子間結合力の空隙率依存性をもとに、図 8 a の説明にしたがって混合物の衝突強度の特徴を理解できる。図 8 a の衝撃圧力分布に混合物の結合強度を書き入れる時、式(5)を考慮して空隙率による差を大きく取ることとする。例えば図 8 b のように考えると、雪の場合と同

様に試料全体に衝撃圧が伝播した時の圧力と混合物の結合力を比較して試料の衝突破壊の有無を検討できる。混合物の場合、空隙率による強度の差が大きいため、低空隙率では結合強度が衝撃圧を上回って破壊が起きない条件でも、高空隙率では衝撃圧が結合強度を超えて試料の破壊が起こることがわかる。これは混合物の衝突破壊強度の空隙率依存性を定性的に良く説明する。以上、見てきたように結合強度の空隙率依存性と衝撃圧力の発生・伝播の関係が衝突破壊強度の複雑な振る舞いを支配していることがわかる。今後、より定量的な衝突破壊モデル構築のため、これら物理素過程の実験的研究が必要とされる。

5. 氷衛星の衝突集積過程への応用



土星の氷衛星のサイズと平均密度の関係を氷微衛星の衝突力学強度の差による分別作用の結果と捉えることが可能であろうか？図9に上記の実験結果から推測した氷微衛星が衝突した時に起こる衝突イベントを示す。半径100kmの衛星に半径20kmの氷微衛星が衝突することを仮定しており、衛星の空隙率と天体同士の衝突速度をパラメータとして起こりうるそれぞれのイベントの条件を雪天体と混合物天体の場合に分けて示している。右上がりの実線は衝突破片が天体の自己重力により捕獲されるかどうかを示しており、この線の下側では衛星は微衛星の衝突により成長することができる。なお、この実線は図4から決まる条件であるので雪の場合も混合物の場合もほぼ同じ線となる。右上がりの点線は雪の場合の衝突破壊条件を表している。右下がりの1点鎖線は混合物の場合の衝突破壊条件を表している。それぞれの曲線より上の条件下では衝

突破壊が起こる。この2つの曲線は途中で交差しているので、空隙率が低く衝突速度も低い条件では、雪では破壊が起こるが混合物では起こらないという条件が出てくる。また、衝突成長を表す実線の条件も考慮すると、灰色に覆った領域では雪の場合、突破壊により衛星が破片化してしまうが、混合物の場合は成長こそ起こらないが衝突時に衛星自身は破壊を免れることができることがわかる。土星の氷衛星が衝突成長していく途中、この灰色の領域を通過して成長したと仮定するならば、岩石含有率に起因する力学的強度の差が、衛星の平均密度とサイズ関係を作った可能性がある。

図 10

一般に氷微衛星はサイズが小さく空隙率が高いと思われており、それが氷衛星に成長する過程でサイズの成長と圧密による空隙率減少が起こると言われている。この進化過程と衝突イベントの関係を図示すると図 10 のようになる。空隙率 40% の天体が直径 400km の衛星に成長する過程で、天体サイズに比例して空隙率が減少すると仮定した時、その進化過程は矢印の直線のようになる。ここで衝突する天体同士のサイズは常に 1 : 5 と仮定し、衝突速度は大きい方の天体の脱出速度で決まるとしている。氷微衛星は半径 100km 以下では突破壊は起こらない。100km を超えると雪天体の場合、破壊が起こり、微衛星の成長は阻害される。一方、混合物天体の場合、この成長過程では破壊領域を通過しないので、破壊を免れて成長することができる。もちろん、この成長過程（サイズと空隙率の関係）は圧密モデルや構成物質の物性値によるので今後の検討が必要である。ここでは氷衛星の成長過程において、岩石含有率により、成長の阻害が起きたり、起きなかったりするものの重要性を指摘するに留める。より定量的に土星の

氷衛星におけるサイズ・密度関係を説明するにはこれまで述べてきたような、雪氷物性に関する詳細な実験的研究が必要である。

6. 雪氷学と惑星科学の接点

表 1

ここまで土星の氷衛星の形成過程に関わる雪氷物理の実験的研究、特に衝突破壊実験について紹介してきた。宇宙雪氷において実験は重要な一分野だからである。しかしながら、宇宙雪氷の魅力はなんと言っても探査により得られる新しい未知の観測事実と向き合えることである。ゆえに宇宙雪氷と惑星探査は切っても切れない関係にある。惑星探査に直接参加する機会を得ることは難しいが、その観測データを用いた解析や解析成果に基づいた理論、実験、数値計算などの研究は現在でも盛んに行われており、その領域は大きく広がっている。例えば現在最も活発に行われている火星探査には2つの柱がある。それらは、現在の気候システムの理解と過去における表層進化の理解である。表1に示したように、それぞれの柱で重要な研究課題が挙げられている。ここで、キーワードとなるのは水、氷、 CO_2 であることがわかる。表層環境における水・氷の研究はまさに雪氷学の範疇であり、宇宙雪氷学の活躍の場であると言える。例えば雪氷学と「火星の科学」の関係は図11のように考えることができる。幅広い雪氷学の中から特に6つの分野を取り上げている。それらの分野と火星の間には想像を働かせると様々な接点を見いだすことができる。雪氷物性においては火星氷床での存在が予測されており、火星での CO_2 存在量を見積もる鍵となる CO_2 クラスレート・ハイドレートの研究や火星氷床の流動と関連した地質

図 1 1

学的タイムスケールの適応に堪えうる流動則の構築等の課題があろう。また、全火星表面にも及ぶダストストームの理解には、砂嵐の素過程を理解する必要があるが、これは物理的には吹雪の研究と等価である。地球の衛星観測における水・氷の調査は火星凍土や地下水の探査と直接結びつくものである。この他にも雪氷のフィールドを地球から火星にまで広げた時に現れる雪氷学の新たな研究課題は無限にあるはずである。

謝辞

本文は 2004 年度日本雪氷学会全国大会で開催されたシンポジウム「惑星探査の発展と宇宙雪氷の魅力」での発表をもとに執筆されました。執筆の機会を下さったシンポジウムのコンビーナである長岡技科大の東先生にこの場をかりてお礼申し上げます。

文 献

- Ahrens, T.J., O'Keefe, J.D. 1985: Shock vaporization and the accretion of the icy satellites of Jupiter and Saturn. *Ices in the solar system*, Edited by Klinger, J., Benest, D., Dollfus, A., Smoluchowski, R. Reidel, Dordrecht, 631-654.
- Arakawa, M. Leliwa-Kopystynski, J., Maeno, N. 2002: Impact experiments on porous icy-silicate cylindrical blocks and the implication for disruption and accumulation of small icy bodies, *Icarus*, **158**, 516-531.
- Arakawa, M. and Tomizuka, D. 2004: Ice-silicate fractionation among icy bodies due to the difference of impact strength between ice and ice-silicate mixture, *Icarus*, **170**, 193-201.
- Canup, R.M., Ward, W.R., 2002: Formation of the Galilean satellites: conditions of accretion, *Astronom. J.*, **124**, 3404-3423.
- Maeno, N. Arakawa, M., and Leliwa-Kopystynski, J., 1993. Deformation of porous ice-rock mixtures and an application to the densification of icy satellites, *Primitive Solar Nebula and Origin of Planets*, Edited by Oya, H., Terra Scientific Pub. Comp., Tokyo, 341-353.
- Mellor, M. 1975: A review of basic snow mechanics. IAHS-AISH Pub. 114, 251-291.
- Sirono S. 2004: Conditions for collisional growth of a grain aggregate, *Icarus*, **167**, 431-452.

The formation process of Saturnian satellite system from the
point of view of Cosmo-Glaciology

Masahiko Arakawa

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Kita-ku Kita 19 Nishi 8, Sapporo 060-0819

表の説明

表 1 火星表層環境に関する主な研究課題

図の説明

図1 土星の氷衛星の平均密度と半径の関係。代表的な衛星の名前も列挙している。フェーベの密度が高いのはカイパーベルト天体起源だからとされている。

図2 氷天体と混合物天体が集積する時の衝突蒸発残差の質量比。横軸は衝突蒸発残差を衝突前の集積天体の質量で規格した値。3つの巨大氷衛星の質量を図中に示す。

Ahrens and O'Keefe(1985)を一部変更。

図3 氷-雪衝突時のクレーター形成過程のその場観察。a 空隙率 10%，衝突速度 217m/s。b 空隙率 37%，衝突速度 217m/s。試料は円筒形で直径 10cm，高さ 10cm。一コマ目に見える氷の弾丸はサイズ 15mm。c Ejecta Angle の定義。試料表面と放出物が最大速度を持つ方向のなす角度。

Arakawa *et al.* (2002) より一部変更。

図4 クレーター形成時に観測される規格化最大放出速度と試料空隙率の関係。細線は雪試料の場合，太線は混合物試料の場合の関係。Arakawa and Tomizuka (2004)から一部変更。

図5 衝突破片の積算質量分布。空隙率 37%の雪試料の場合の衝突速度依存性を表す。両軸の値は衝突前の試料質量で規格化されている。矢印は衝突速度 652m/s の分布の場合の $f_{0.5}$ を表す。Arakawa *et al.* (2002) より一部変更。

図6 異なる空隙率を持つ雪試料の $f_{0.5}$ とエネルギー密度

の関係. 矢印は空隙率 55% の場合に定義された衝突破壊強度 ($Q^*_{0.5}$). Arakawa *et al.* (2002) から一部変更.

図 7 衝突破壊強度 ($Q^*_{0.5}$) の空隙率依存性. 雪の場合と混合物の場合では依存性がまったく逆転する. Arakawa and Tomizuka (2004) から一部変更.

図 8 試料中の衝撃圧分布と粒子間結合モデルに基づく衝撃強度の説明. a 純氷の場合. b 混合物の場合. $\sigma(\phi)$ は空隙率に依存する結合強度を表す. $P\phi(L)$ は試料サイズ L まで伝播・減衰した衝撃圧.

図 9 衝突イベントマップ. 氷微衛星同士が衝突した時に起こるイベントを衝突速度と空隙率で場合分けしている. 太い実線は衝突破片が微衛星の自己重力で再集積する条件の境界を表す. 点線と一点鎖線はそれぞれ純氷と混合物天体の破壊条件の境界を表す. 灰色の領域は混合物天体のみが衝突により破壊を免れる条件.

図 10 衝突イベントマップ上で見た氷衛星の密度進化過程. 初期空隙率が 40% の場合, サイズ成長に比例して空隙率が減少すると仮定する. 点線と実線はそれぞれ純氷と混合物天体の衝突破壊を表す条件. 衝突する天体どうしのサイズ比は常に 1:5 と固定する.

図 11 雪氷学と「火星の科学」の接点.

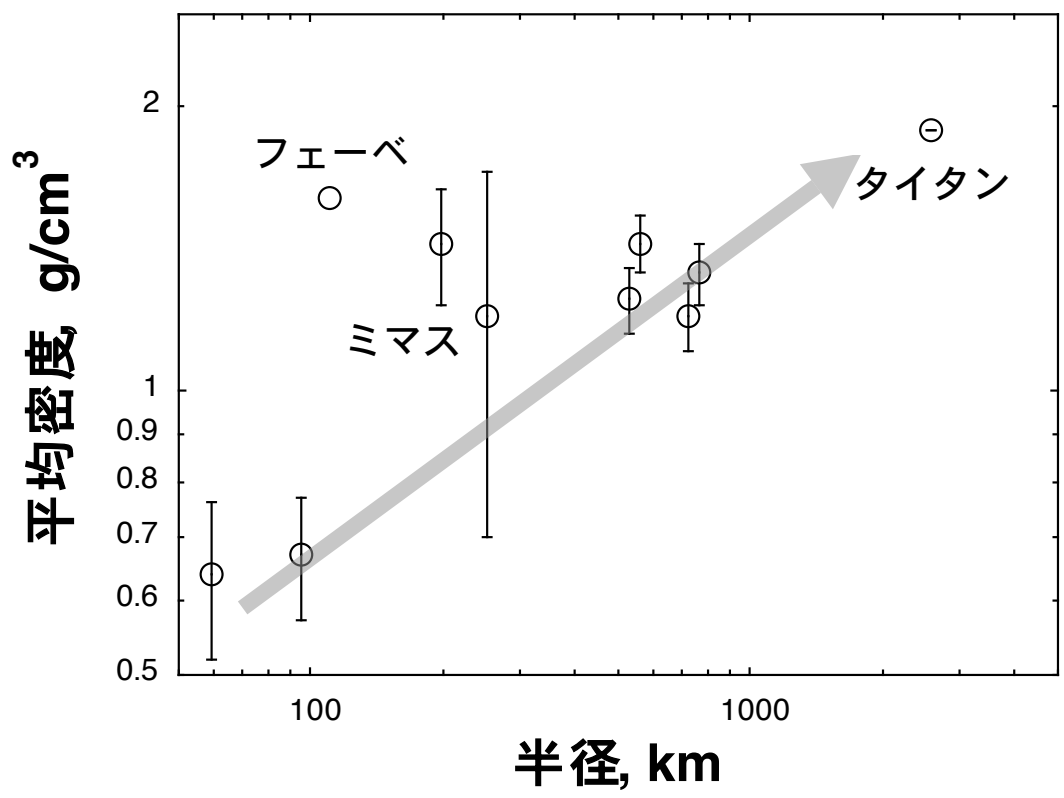


図1 荒川

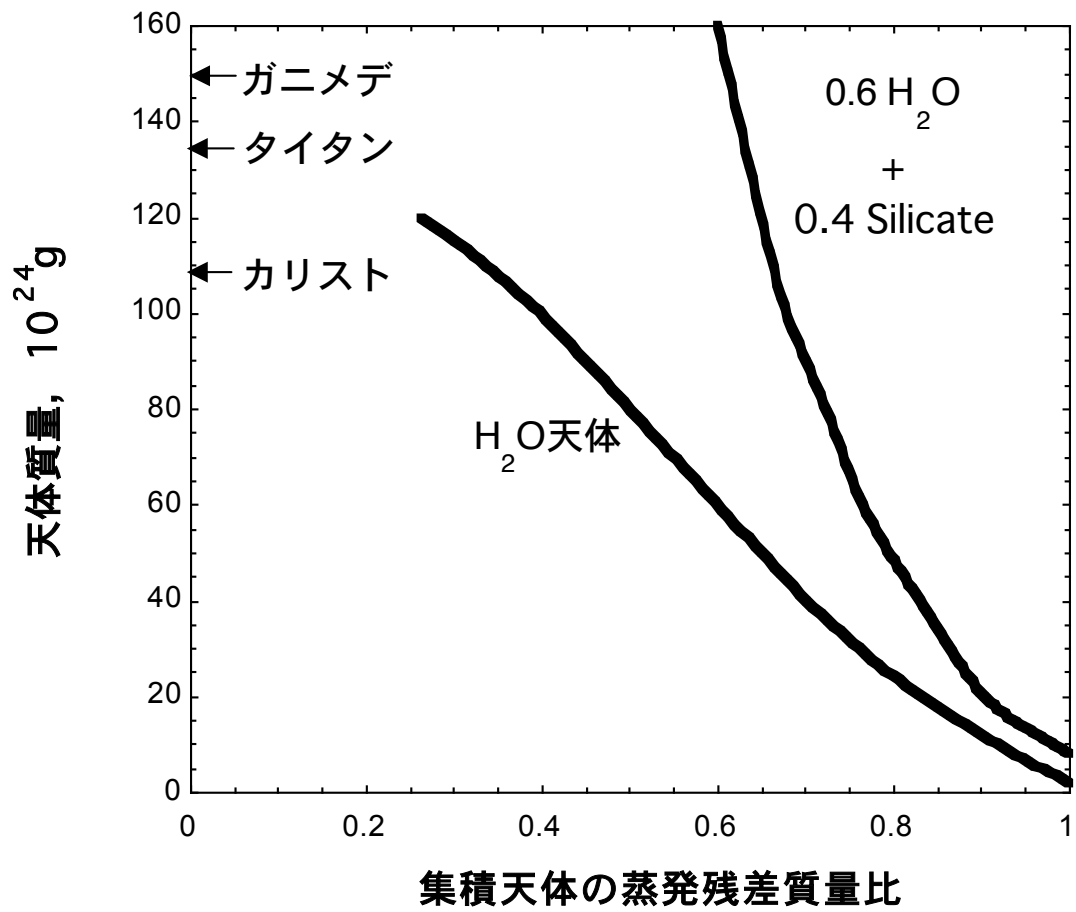


図 2 荒川

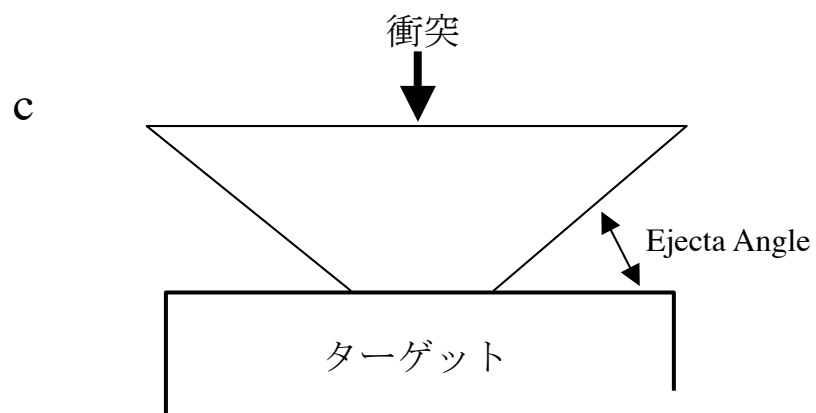
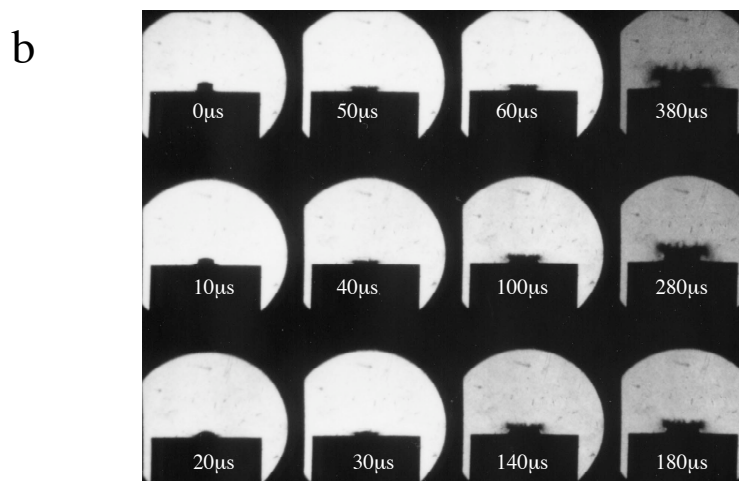
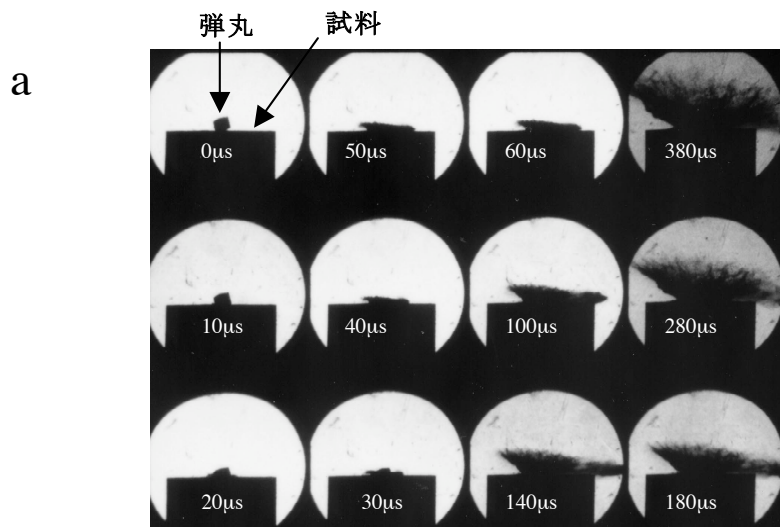


図 3 荒川

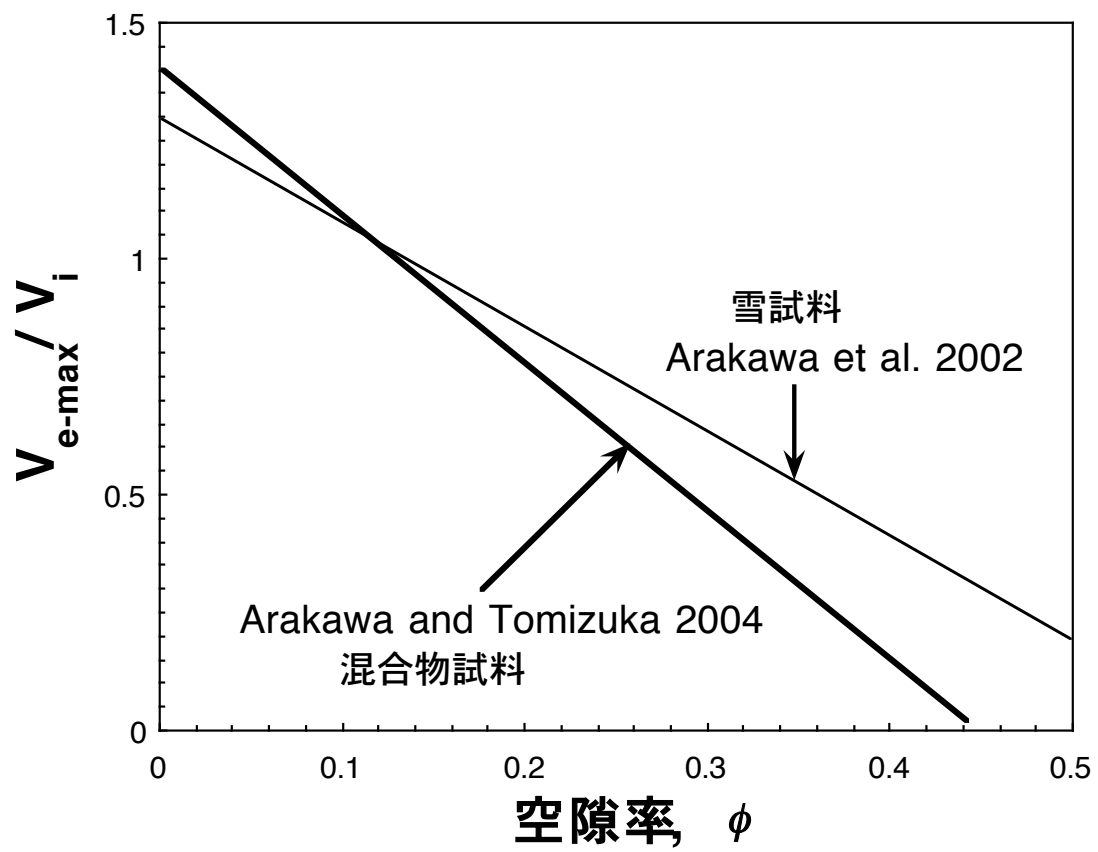


図4 荒川

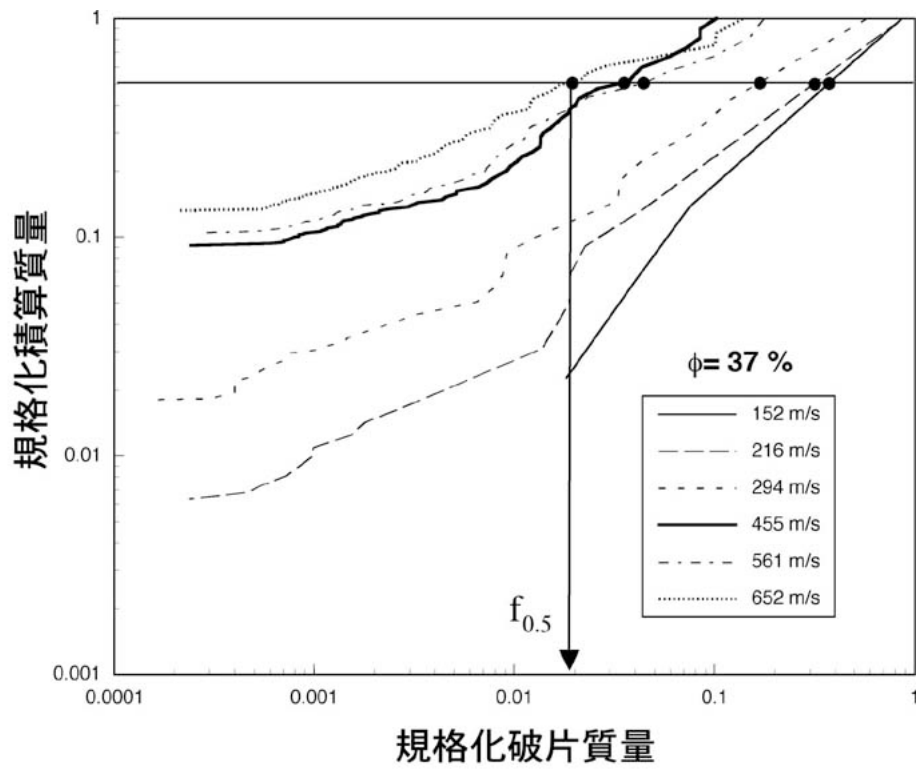


図5 荒川

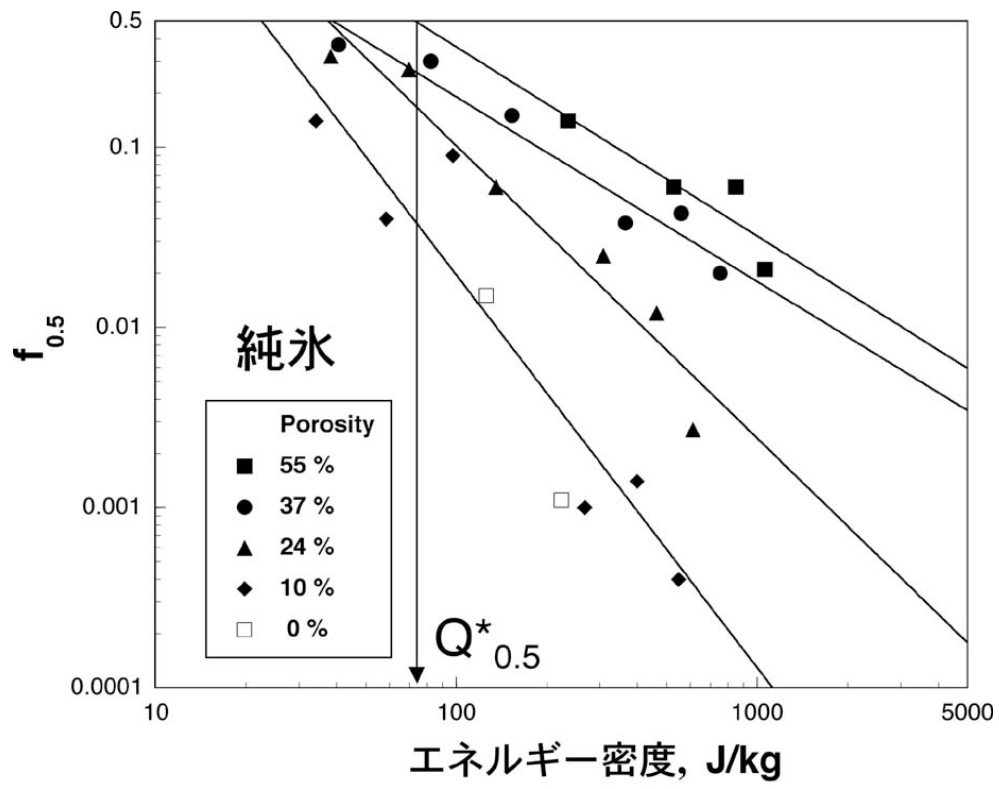


図 6 荒川

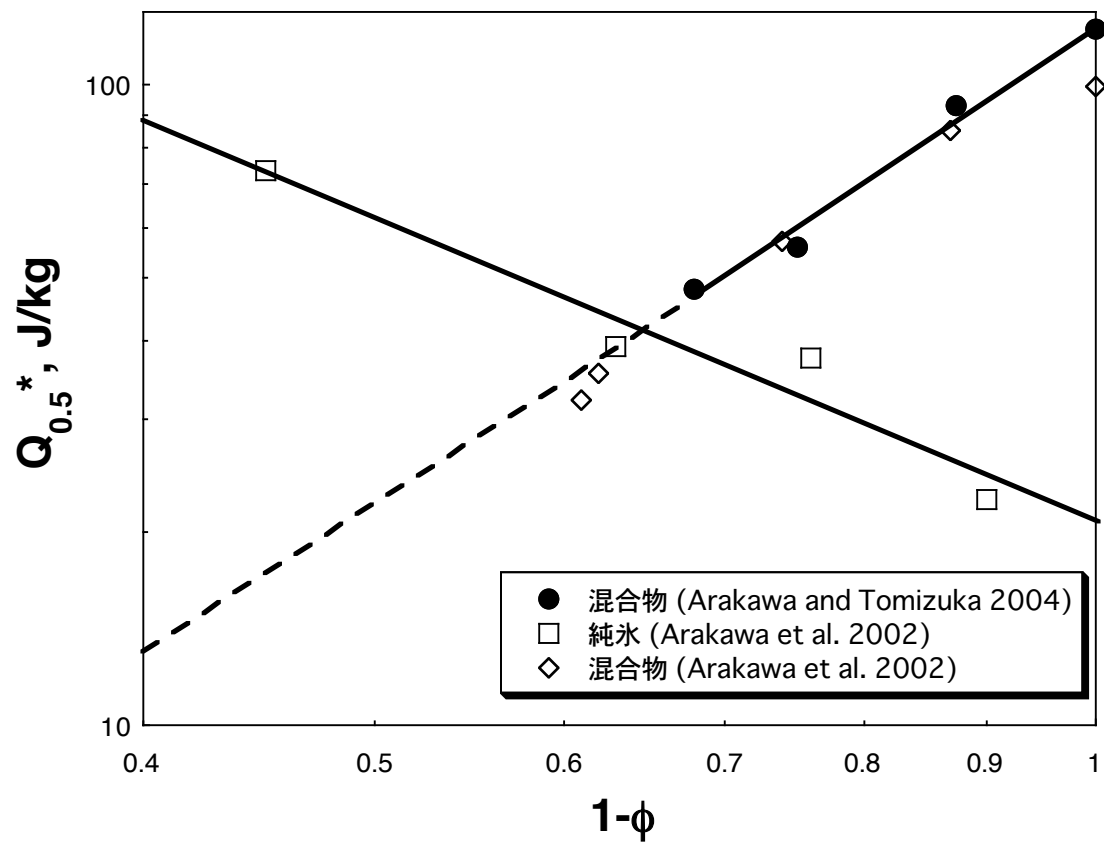


図 7 荒川

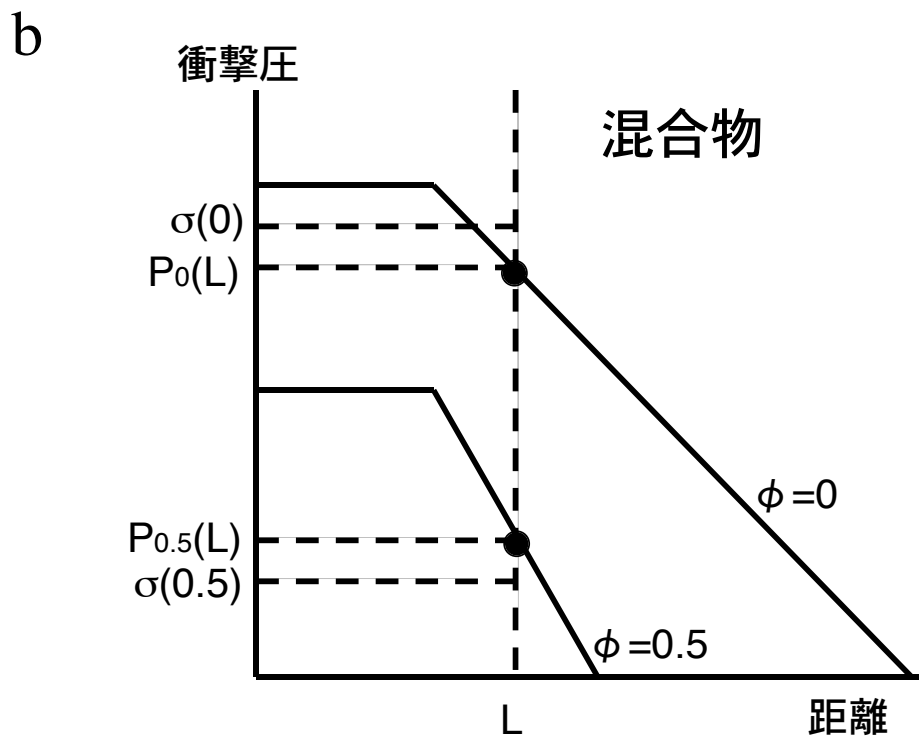
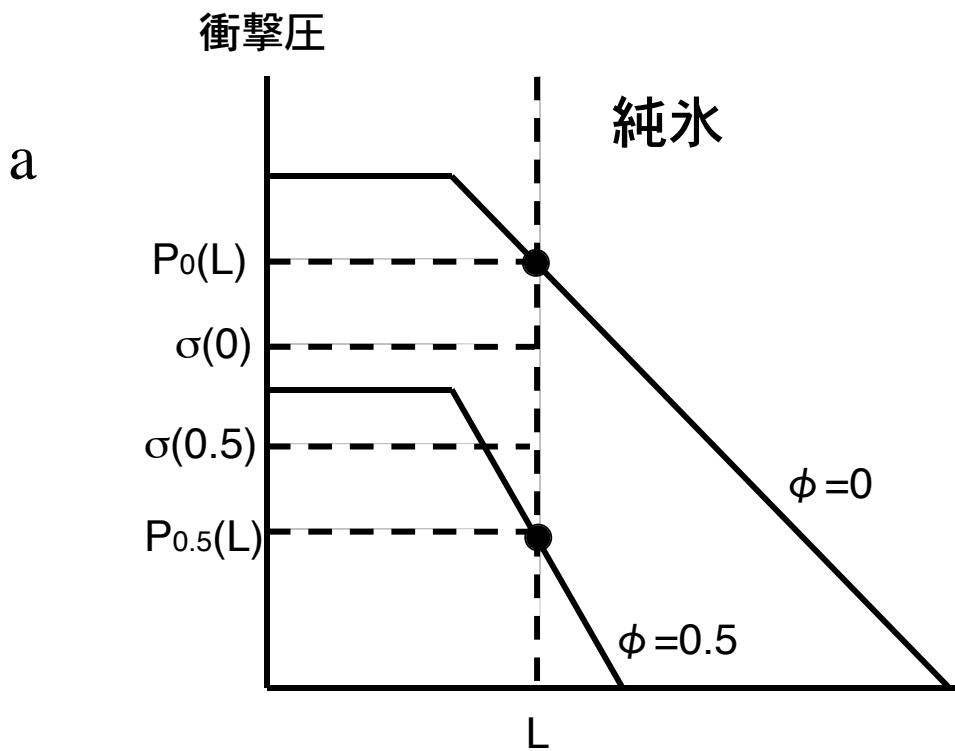


図 8 荒川

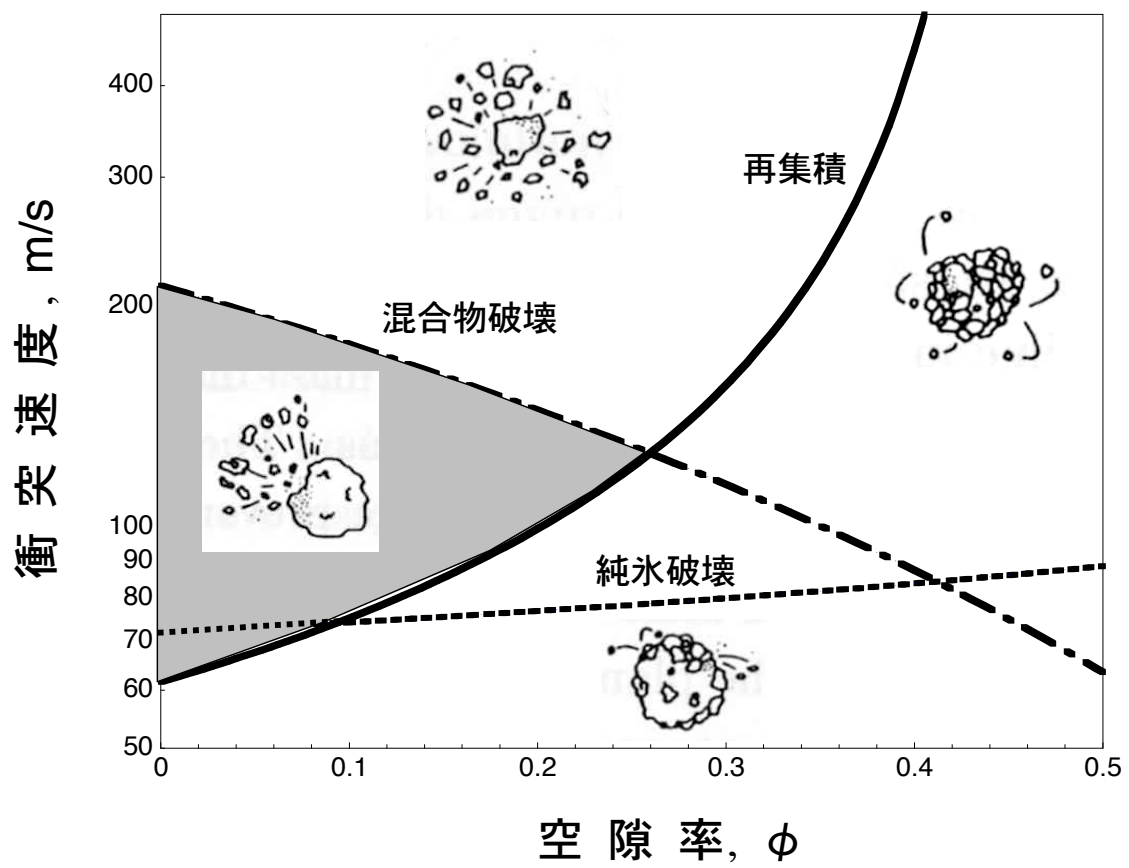


図9 荒川

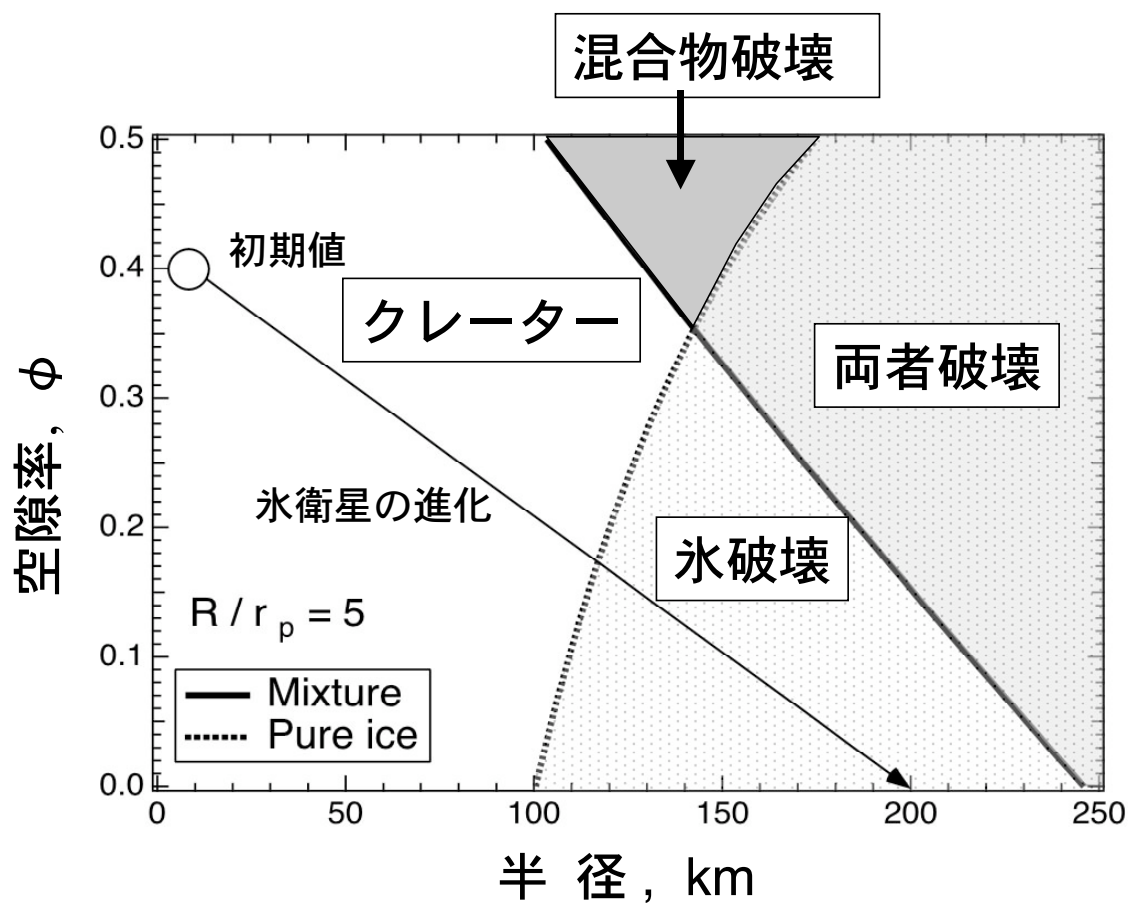


図 10 荒川

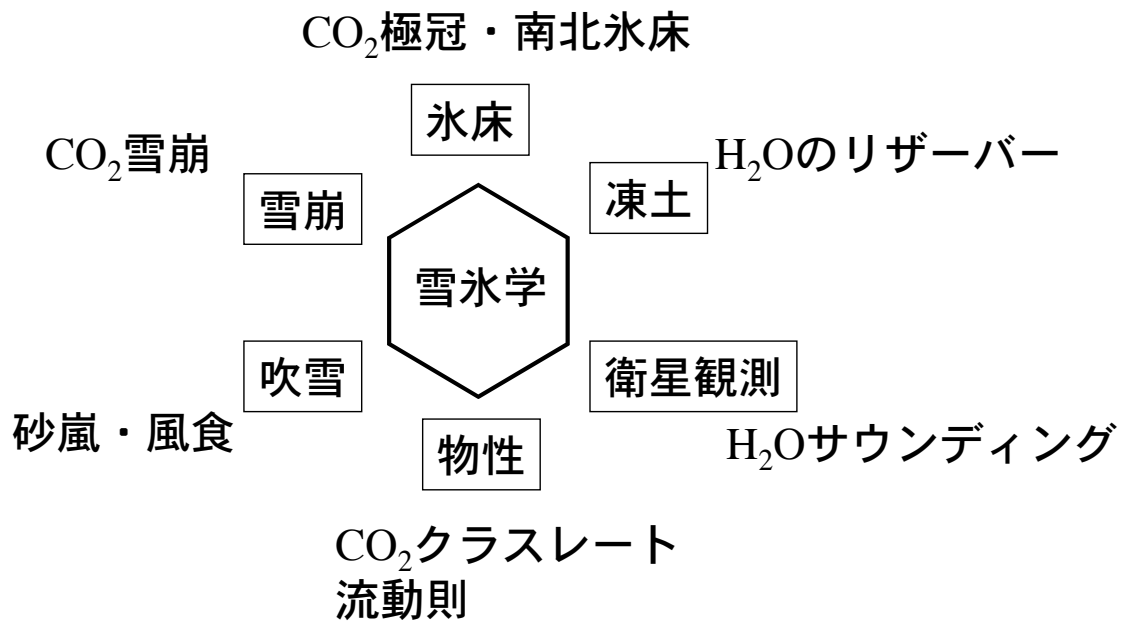


図 11 荒川

■ 現在の気候システムの理解

- 希薄な**CO₂**大気の役割
 - ダストストーム
 - 極冠、両極氷床の役割
-

■ 過去の表層環境の進化

- 大洪水のメカニズムは。
 - 海はあったのか。
 - 洪水をおこした水はどこに行ったのか。
 - 生命の痕跡は。
-

キーワード：水、氷、CO₂
