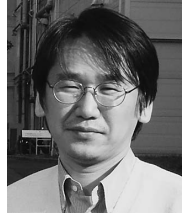


氷微惑星の衝突破壊



荒川 政彦¹, 嶋生 有理², 保井 みなみ³

〈名古屋大学大学院環境学研究科 〒464-8601 名古屋市千種区不老町 名古屋大学理学館 203-1〉

¹ e-mail: arak@eps.nagoya-u.ac.jp

² e-mail: shimaki@eps.nagoya-u.ac.jp

³ e-mail: yasui@eps.nagoya-u.ac.jp

氷微惑星の化石の一つと言われる土星の小氷衛星は40%を超える高い空隙率をもち、多くの場合その表面には天体サイズの1/3にも及ぶ大きなクレーターが見られる。さらに小氷衛星の不規則な形状は構成物質がもつ力学強度が重力を支えることにより実現されており、その強度は焼結により100 kPa–1 MPaに達していると考えられる。この焼結が及ぼす衝突破壊への影響を室内実験により調べるため雪の衝突破壊実験を行った。その結果、焼結時間の0.2乗に比例して雪の引張強度は大きくなり、同様に衝突破壊強度も大きくなることがわかった。

1. 太陽系の氷

太陽系外縁領域には近年数多くのカイパーベルト天体が発見されている。このカイパーベルト天体をはじめとして、彗星核、それに木星、土星、海王星、天王星の衛星は、氷が主構成物質であるため氷天体と呼ばれている。氷はケイ酸塩鉱物と並んで固体天体の重要な構成物質であり、太陽系においては木星以遠の低温下で固体として安定に存在できる。系外惑星系の直接観測では、中心星から十分に遠い外縁部の低温領域の観測において、これら氷天体の相互衝突によって生じたと考えられるデブリディスクが観測されている。系外惑星系の観測では、ダストから惑星に至るさまざまな進化段階にある太陽系が観測される可能性がある。このような観測と惑星形成理論を比較するうえで、明らかにしなくてはならない物理過程がいくつかある。その中でわれわれは天体の衝突過程に興味をもって研究している。特に氷ダストから氷惑星ができる過程において鍵となる氷微惑星の衝突過程を室内実験において研究している。氷

微惑星は氷ダストのアグリゲイト（集合体）であると言われるが、仮想的な天体であるため実体がどのようなものかはわかっていない。彗星核が氷微惑星の生き残りによく言われるがその観測例は少ない。一方、木星や土星の氷衛星はNASAのガリレオ探査機やカッシーニ探査機などの周回衛星により詳細に調査がなされており、そこで観測された小氷衛星の特徴は氷微惑星に対する重要な示唆を与えている。

2. 氷衛星と氷微惑星

最近のカッシーニ探査機による土星衛星系の観測により、これまで不確定要素の大きかった小氷衛星の密度が正確に求められるようになってきた。その結果、捕獲されたカイパーベルト天体と言われるPhoebeを除く主な小氷衛星は極めて低い密度をもつことが明らかになった。その密度は0.5–0.7 g/cm³であり、純水の密度(0.92 g/cm³)よりさらに低いことがわかる。これらの天体が純水できていと仮定しても、天体内部には40%から20%の空隙が存在することになる。実際には質

量で半分程度の岩石を含むと考えられるので70%もの高い空隙率をもつこともありえる。この高い空隙率は、土星の小氷衛星では氷やケイ酸塩ダストが重力により弱く結合した構造をもつことを意味している。

一方、これらの小氷衛星のもう一つの特徴としてその形状がいびつであることが挙げられる。すなわち多くの小惑星と同様に三軸不定形をしており、その形状は球形とはずいぶん異なっている。一般的に天体サイズが大きくなるといびつな天体は少なくなりほとんどが球形となる。これは天体が大きくなると重力による応力が天体構成物質の力学強度を超えるため、形状が重力ポテンシャルエネルギー最小の球形に変形するからである。したがって小氷衛星のいびつな形状は構成物質の強度により支えられていることを表しており、小氷衛星が、高い強度をもつことを意味している。例えばサイズ100–300 kmの氷天体表面にその20%程度の凸凹があったとしたとき、その凸凹を支えるには表層物質は100 kPaから1 MPaの強度が必要である。重力により弱く結合した「さらさら」の雪はこのように高い強度はもたない。そこで小氷衛星が高い強度をもつ原因として氷微粒子の「焼結」が考えられている。

3. 焼結と氷微惑星の強度

焼結とは粒子同士が接触しているとき、その接触点で時間とともに物質の移動が起こり、ネックと言われる粒子間の架橋ができる現象を言う¹⁾。物質の移動は、粒子表面や内部での分子の拡散や粒子表面における蒸発・凝縮によって起こることが知られており、それゆえネックの太さは、温度と時間によって大きく変化する。小氷衛星のような高い空隙率であっても氷粒子間のネックは十分に成長し、その結合部分を共有して天体全体に結合ネットワークを巡らすことが可能である。その結果、天体強度が大きく増加することもありうる。一般に焼結は、温度だけでなく応力によって

粒子自身に変形し粒子間の結合が強くなる。そのような場合は空隙が小さくなり、密度の上昇を伴うことが多い。しかしながら温度・応力が低い場合には密度はほとんど変化せず、粒子間のネックだけが成長する。小氷衛星が置かれた低温、低応力条件は氷にとってまさにそのような場であったと想像される。土星の小氷衛星は簡単に言うなら「中途半端に焼結した雪」によりできていると思われる。

このような状況は氷微惑星においても十分に想像される。すなわち、氷微惑星は高い空隙率をもちつつ、焼結により数百 kPa の力学強度を併せもつ天体と言える。小氷衛星の地形的特徴として、天体サイズに比べて大きなクレーターをもつことが挙げられる²⁾。直径の1/3以上の大きなクレーターをもち、このように大きなクレーターは500 km以上の天体には見られない。天体半径に匹敵するようなクレーターが小氷衛星で実現可能なのは、衝突エネルギーが衝突点近傍で散逸して天体全域にわたってエネルギーが行き渡りにくいからだと言われている。その理由は高い空隙率である。空隙は衝突エネルギーを効率よく熱に変換し散逸させる。そのエネルギー散逸の効果に加えて、焼結により生じた数百 kPa もの強度が巨大クレーターを作り出したもう一つの理由であると考えられる。この強度は衝突により発生・伝播する衝撃圧力に十分耐えうる強さであったはずである。

本研究では小氷衛星から類推される氷微惑星のもつ二つの特徴、高空隙率と焼結強度が、天体衝突に対してどのような影響を及ぼすかを実験的に調べたものである。そのために、氷微惑星の最も単純な模擬物質として雪を用いた衝突破壊実験を行い、衝突破壊条件に対する焼結の効果を実験的に明らかにした。

4. 雪の引張強度

氷微惑星の焼結度はその天体がおかれた温度、

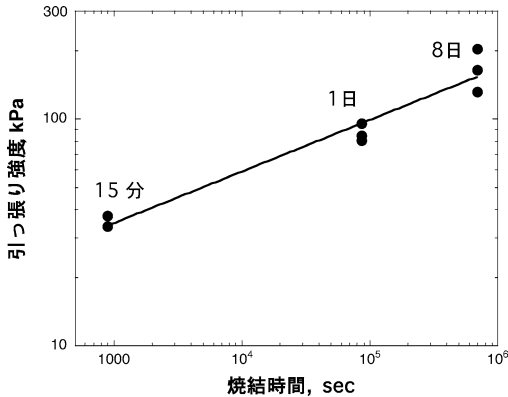


図1 雪の引張破壊強度と焼結時間の関係

時間により大きく変化する。そこで時間による焼結度の変化を調べるため、焼結した雪の引張強度を計測した。実験試料を作成するために、まず市販の水を砕いてミルで細粒化し、さらにふるいにより $750\ \mu\text{m}$ 以下の氷粒子を用意した。この $750\ \mu\text{m}$ 以下の氷粒子を円盤状（直径 $30\ \text{mm}$ 、厚さ $20\ \text{mm}$ ）に整形し、温度 -15°C において、15分、1日、8日間焼結させて実験試料とした。この円盤試料を用いてブラジリアン試験という方法で引張強度を計測した。ブラジリアン試験では円盤側面に力がかかることより、その力をかけた方向と直角方向に強い引張応力が生ずる。この引張応力により破壊が生ずるとき、その破壊に必要な応力を強度とする。図1に焼結時間と引張強度の関係を示すが、この図を見てわかるように焼結時間とともに引張強度が徐々に大きくなる。焼結時間15分では $30\ \text{kPa}$ 程度の強度しかもたなかった雪が、8日間焼結すると $150\ \text{kPa}$ 程度まで強度が上昇する。さらに解析によれば引張強度は焼結時間とべき乗の関係にあり、焼結時間の約0.2乗で強度が大きくなっていることがわかる。この強度増加は氷粒子間のネック成長に起因すると思われる。実際の小氷衛星や氷微惑星がおかれた環境は、ここでを行った実験温度 -15°C に比べたらずっと低い温度（およそ -120°C 以下）であると考えられる。同程度の焼結度をもつまでに必要とされる時間はずっ

と長い。

5. 雪の衝突破壊実験

焼結した雪の衝突実験には球形の雪標的と球形の雪弾丸を用いた。球形の雪標的の大きさは直径 $60\ \text{mm}$ であり、球形の雪弾丸の大きさは直径 $15\ \text{mm}$ である。それぞれ空隙率は 40% と 30% となっている。雪標的は氷粒子を球形の型にゆっくりと詰め込み、そして所定の質量まで詰めてから、上載荷重をかけて成形する。取り出した球形雪試料は密度を計測した後、必要な時間だけ -15°C の環境で焼結させる。この実験では1時間、1日、4日、1カ月間焼結させた。雪弾丸は空隙率が 40% では加速中にばらばらになってしまうので、空隙率を 30% まで下げて実験に用いた。それでも衝突速度 $200\ \text{m/s}$ 以上ではガス圧によりばらばらに破壊されてしまう。そこで $200\ \text{m/s}$ 以上の衝突実験では円筒氷（直径 $15\ \text{mm}$ 、高さ $10\ \text{mm}$ ）を弾丸として用いた。

衝突実験は北海道大学・低温科学研究所の大型低温室において行った。この低温室には縦型一段式ガス銃が設置されており、共同利用に資せられている（図2）。低温室の温度は -15°C と一定であり、この温度で試料作成や回収後の試料解析も行った。衝突速度は $30\text{--}448\ \text{m/s}$ であり、弾丸と標的を正面衝突させた。標的はアクリルの箱に入れて、破片が広く飛び散らないようにした。アクリル箱の内壁にはスポンジを置き雪の破片が2次衝突を起こして割れないように工夫した。また標的自身はかなり弱いので標的半径より小さめの糸輪を作り、その上に標的を載せることにした。そのため、標的下部においてこの糸が破壊や破片の飛び出しに影響を及ぼしている可能性がある。回収した破片は質量が $0.1\ \text{g}$ 以上のものはすべて電子天秤で質量を計測した。それ以下のものはまとめて破片質量を計測した。衝突破壊の様子は高速度デジタルビデオカメラで撮影し、破壊の様子や破片の飛翔速度を解析した。ビデオの撮影速度は



図2 縦型一段式ガス銃の写真。銃身の長さは1 mで、約700 m/sまで氷を加速できる。北大・低温研の大型低温室に設置されている。

10,000 コマ毎秒で、シャッタースピードは $10 \mu\text{s}$ である。撮影用の光源には2台のメタルハライドランプを用い、雪標的からの散乱光を撮影した。今回は、破片の中でも最も代表的な速度である反対点速度の解析データのみ示すことにする。

6. 衝突破片のその場観測

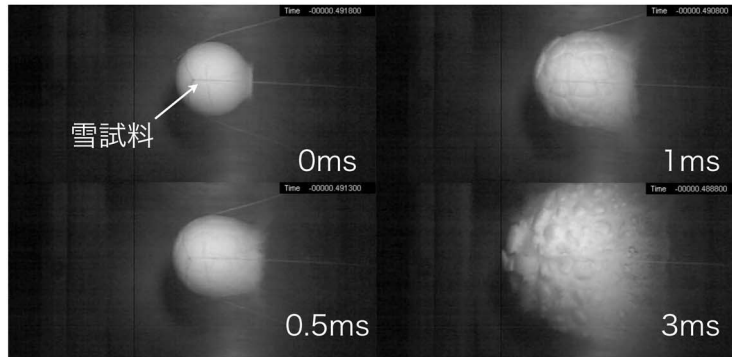
図3に高速度デジタルビデオカメラによって得られた画像(図3(a))とその解析例(図3(b))を示す。図3(b)では0.5 msごとに飛翔破片が形作る輪郭部がトレースして重ね合わされている。こ

の図の衝突点の真反対に当たる標的左端から飛び出す破片速度が反対点速度である。この速度をすべての実験結果について計測した。図4は標的の焼結時間ごとに整理した反対点速度(V_a)とエネルギー密度(Q)の関係である。エネルギー密度とは衝突条件を表すために最も頻繁に使われるパラメーターであり、弾丸の運動エネルギーを標的質量で割った値で表される。比較のために過去の玄武岩のデータ³⁾(Fujiwara and Tsukamoto, 1980)と氷のデータ^{4),5)}(Arakawa, et al., 1995; Arakawa, 1999)を点線で表すことにする。この図から雪の実験結果は焼結時間にほとんど関係なく氷データの周囲に集まっていることがわかる。各焼結時間に関して関数 $V_a = aQ^b$ でデータをフィッティングすると傾き b は $0.71 (\pm 0.06)$ とほぼ一定になることがわかる。さらに a についても、ほぼ一定になることがわかった。このように雪試料が反対点速度に関して全く焼結時間依存性がなく、さらに驚くべきことには空隙率が全く異なる氷の結果とほぼ一致する。これは、反対点速度が物性依存性のないメカニズムで決まっていることを示唆する。

7. 衝突破片質量分布と衝突破壊強度

図5に回収された衝突破片の一例を示す。これは4日間焼結した試料を衝突速度140 m/sの雪弾丸で破壊した結果である。このように焼結した雪は強度をもつため、破壊により小さな破片まで形成されることがわかる。ただし、0.1 g以下の小破片は出発試料として用いた粉碎氷粒子にまで細粒化されているものが大多数である。図6に破片の積算質量分布を示す。この図の縦軸は、横軸に示されたある破片質量以下の総破片質量を初期標的質量で割った値を表す。縦軸が1のときの横軸は、破片の中の最大値(最大破片質量 m_i/M_t)を表す。また、横軸が小さいときに縦軸の値が大きいうことは、細かい破片が多いことに対応する。この図6では焼結時間の異なる四つの標的について、一定の衝突速度(190 m/s)で破壊したと

(a)



(b)

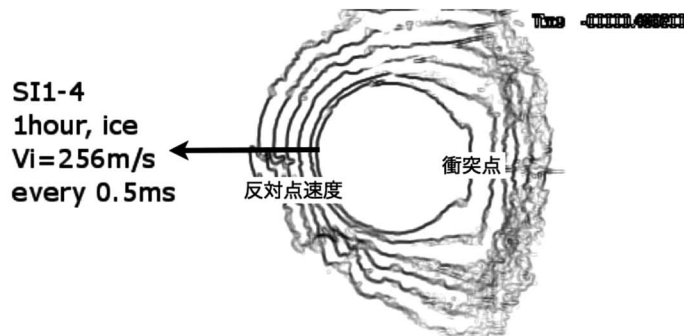


図3 (a) 雪球の衝突破壊を高速度ビデオカメラで撮影したスナップショット。写真内の時間は最初のフレームからの経過時間を示す。右から氷の弾丸が256 m/sで衝突している。雪球の直径は60 mmで -15°C 、1時間焼結した試料。(b) 衝突破片が作る外縁の広がりを示すコンターマップ。コンターの時間間隔は0.5 msであり、ビデオ画像を解析して作成した。

きの積算質量分布を表してある。焼結時間が長いほどある破片質量で見たときに縦軸（すなわちその破片質量以下の積算質量）が小さくなっていることがわかる。また1日と4日の焼結時間の差はそれほど積算質量分布に影響を及ぼさないが1時間と1日では大きく変化することがわかる。さらに1カ月間では確かに破片の数が減っていることは確認できるが、4日間の焼結時間から劇的に変化しているわけではない。最大破片質量を見ると焼結時間が長くなると単純に大きくなっており、それぞれの積算質量分布を代表していることがわ

かる。最大破片が小さい1時間焼結試料では破片分布においても細かい破片の質量が多くなっており、最大破片が大きくなると小破片の量もそれとともに減っている。このような特徴は雪に限らず多くのぜい性物質の衝突破壊において確認されており、それゆえこの最大破片を試料全体の破壊の程度を表す指標として用いることが多い。

そこで図7に各焼結時間の標的に関して最大破片質量とエネルギー密度の関係を示す。比較のために点線で純水の結果を示す。またクロス印は以前行った2カ月間焼結した雪試料の実験結果であ

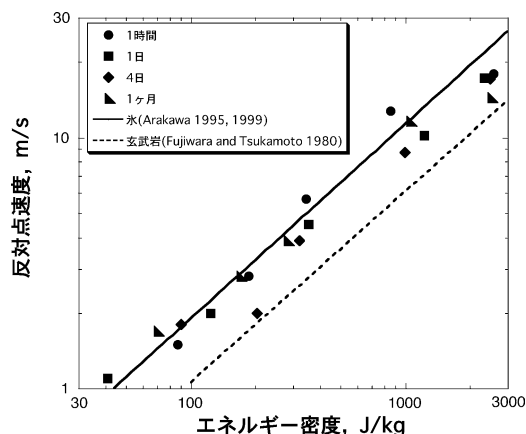


図4 焼結した雪球が衝突破壊したときのエネルギー密度と反対点速度の関係。印の違いは焼結時間の異なる試料を表す。実線は Arakawa による氷の実験結果、破線は Fujiwara and Tsukamoto による玄武岩の実験結果を示す。

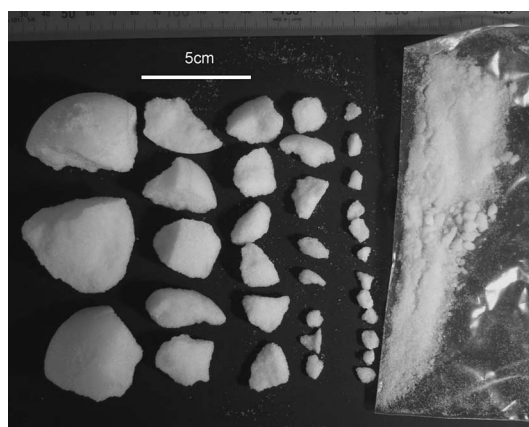


図5 衝突破壊後に回収された破片の写真。-15°Cで4日間焼結した試料を雪弾丸を用いて140 m/sで破壊した結果。10 mm以下の破片はビニール袋に入れてある。

る⁶⁾。この図から1時間焼結試料は純水の結果と非常に近いことがわかる。焼結時間が長くなるにつれて同一のエネルギー密度で見ると最大破片は徐々に大きくなる。そこで、それぞれの焼結時間の試料に対して、最大破片質量とエネルギー密度の関係を $m_i/M_i = cQ^d$ でフィッティングするとその傾き d は焼結時間にかかわらずほぼ一定で -0.7 となることがわかった。衝突破壊強度はこ

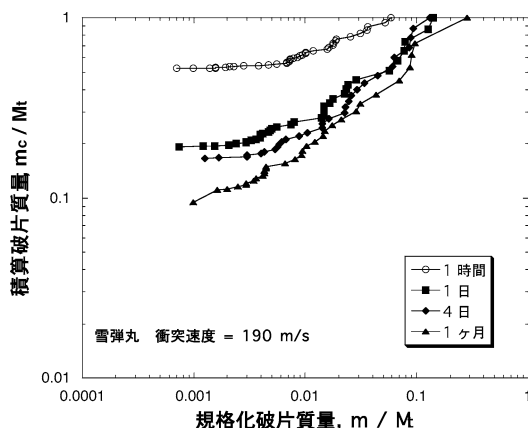


図6 衝突破片の積算質量分布。雪弾丸を190 m/sで衝突させたときの実験結果。雪球標的の焼結時間は1時間から1カ月と変化させている。なお、縦軸、横軸の値は破壊前の標的質量で規格化してある。

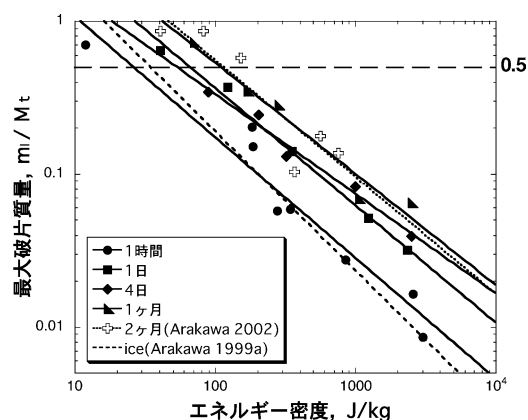


図7 最大破片質量とエネルギー密度の関係。縦軸の最大破片質量は破壊前の標的質量で規格化してある。各焼結時間の試料を用いた結果はそれぞれ最小2乗法でフィッティングしてある。それぞれの実験で最大破片質量が0.5になるときのエネルギー密度を衝突破壊強度と定義する。

の最大破片質量とエネルギー密度の関係から求められる。定義では最大破片質量が0.5となるときこのエネルギー密度が衝突破壊強度なので、この図からそれぞれの焼結時間の試料に対して衝突破壊強度を求めることにする。図8に衝突破壊強度 $Q^*(J/kg)$ と焼結時間の関係を示す。衝突破壊強

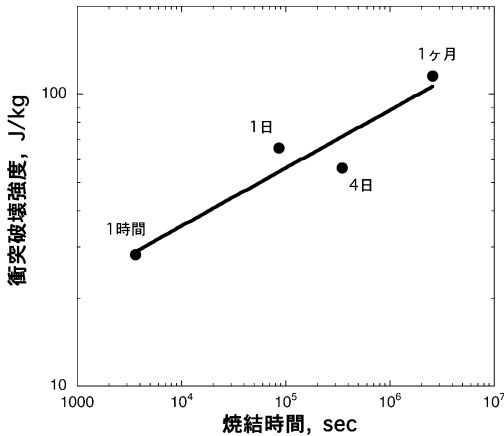


図8 雪の衝突破壊強度と焼結時間の関係。

度は焼結時間 t (s) が長くなるとともに大きくなり、その関係は以下の式で表される。

$$Q^* = 5.7 t^{0.2}$$

この衝突破壊強度の時間依存性は、焼結による粒子間のネックの成長とそのネックの成長による強度増加と関連していると思われる。引張強度を計測した結果を紹介したところで示したように、引張強度は焼結時間の約0.2乗に比例して強くなる。このべき指数は衝突破壊強度の焼結時間依存性のべき指数と極めて近い。これは、両者の強度を支配するメカニズムが粒子間ネックの破壊であることを示唆していると思われる。雪の衝突破壊はその空隙が衝突エネルギーを効率よく吸収することに特徴があることがすでに知られている⁹⁾。今回の実験から焼結により成長するネックが雪の強度を支配し、そのネックがさらに衝突破壊強度を決める役割を果たしていることが明らかになった。

氷微惑星や小氷衛星においても、それらの天体

がおかれた温度環境や内部温度進化に伴い時間とともに焼結が進行し、その力学的強度が徐々に増加していったと考えられる。この焼結の進行とともに氷微惑星は衝突破壊が起きにくくなり、より大きな天体へと衝突合体・成長していった可能性が高い。

謝辞

本研究の実施にあたっては北海道大学低温科学研究所共同研究の補助を受けている。また、科研費(17340127)の補助および特定領域研究「太陽系外惑星科学の展開」からの補助を受けている。

参考文献

- 1) Maeno N., Ebinuma T., 1983, J. Phys. Chem. 87, 4103
- 2) <http://photojournal.jpl.nasa.gov/targetFamily/Saturn>
- 3) Fujiwara A., Tsukamoto A., 1980, Icarus 44, 142
- 4) Arakawa M., et al., 1995, Icarus 118, 341
- 5) Arakawa M., 1999, Icarus 142, 34
- 6) Arakawa M., et al., 2002, Icarus 158, 516

Collisional Disruption of Icy Planetesimals

Mashiko ARAKAWA, Yu-ri SHIMAKI, Minami YASUI

Graduate School of Environmental Studies,
Nagoya University, Rigaku-kan 203-1,
Chikusa-ku, Furo-cho, Nagoya 464-8601, Japan

Abstract: Small icy satellites are observed to have porosities larger than 40% and irregular shapes. Their morphological irregularities could be supported by the mechanical strength of their constituent materials. Such strength should be originated from sintering among icy dusts. So, the impact strength of sintered icy dusts was studied by laboratory experiments, and then we found that the strength had a power law relationship to the sintering time.