

## 特集「衝突実験」

## 衝突破壊のスケール則

加藤學<sup>1</sup>，飯島祐一<sup>1</sup>

## 1. 水谷による衝突破壊のスケール則

われわれの衝突実験は，これまでに提唱されたスケール則（特に水谷によるものを中心として）の妥当性，有用性を実験的に検証することから始まった．水谷によるスケール則は世の中に数多く出回っているが，ここで言うスケール則は衝突破壊現象に関わる法則である [1]．クレータの形成に関し，水谷は，クレータの直径  $D_s$  がレートステージ有効エネルギー  $E_{LS}$ （初期発生圧力  $P_0$  にその圧力で加圧される体積（弾丸の体積） $V$  をかけたもの）のベキ乗で表されると提案した．

$$D_s \propto n_1 \log E_{LS} = n_1 \log P_0 V$$

また，ベキ  $n_1$  は砂のように粒子に結合力がほとんどなく現象が重力に支配される場合は  $1/4$ ，岩石のような物質強度が破壊を支配する場合には  $2/5$  であるとした．

一方カラストロフィックな衝突破壊に対し，無次元衝突応力  $P_1$ （衝突点に発生した圧力が距離の3乗で減衰するとして，標的の大きさから背面（antipode）での圧力を見積もり，標的試料の持つ物質強度  $Y$  との比をとったもの）によって最大破片の大きさや破片のサイズ分布がうまく整理できるとした．

$$P_1 = \left( \frac{L_p}{L_t} \right)^3 \frac{P_0}{Y}$$

クレーター形成については砂を使った実験で，ま

た衝突破壊については玄武岩，パイロフィライトを使った実験で検証されている[2][3]．氷を使った実験でも上記のスケール則の有効性が一応検証されていたが[4][5]，氷どうしの衝突例がないことや実験の温度条件に不確定さがあったので改めて氷の衝突実験をする必要があった．氷は岩石に比べ，物質強度が1ケタ以上小さく，スケール則の有効性の検証には最適の物質の一つであると考えた．先の「太陽系」重点領域研究で名古屋大学の15 mm 銃を使って荒川君（現，北大低温研）とサボに工夫をして氷どうしの衝突実験を始めた．名古屋大学の銃は縦型で，サボにネジを付け氷を落ちなくし，弾を込めた後すばやく発射することとしたが，発射する前に弾丸が融けて落下することもしばしばであった．一方，前野先生（北大低温研）から，氷は力学的異方性が大きいので均質な多結晶試料を作る必要があると示唆され，標的氷試料作りに荒川，早川（現，宇宙研）両君とともに冬の低温研を訪れた．低温室内で成田先生や水野先生に直径30 cm の多結晶氷の試料の作製を習っている最中に，この室内に衝突銃を置けないものかと考えるようになった．名古屋に帰ってから宇宙研の水谷さんにその希望を述べたら，宇宙研に窒素ガス銃があって貸与しても良いとのことであった．藤村さんに銃を名古屋に送ってもらって砲身は名古屋で以前に使っていたものを，真空容器は新たに作製し，装置を組み立て低温研に送り出した．89年の12月のことであった．その後衝突速度を上げ

<sup>1</sup>名古屋大学理学部地球惑星科学教室

る必要から、ヘリウムガスを使用できるように新たに高圧ガス容器と砲身を設計製作し、名古屋から高圧ヘリウムガスとともに送り、現在の装置になっている。装置本体も低温室の倉庫から広い風洞実験室に移して頂いて快適に実験ができるようになった。

## 2. 氷-氷 衝突実験

上記の経緯を経て氷の標的を用いて衝突実験を開始した。弾丸には金属の型に水を入れて凍らせた直径 15 mm、長さ 10、20 mm のものを使用した。1 km/sec 程度の速度を得るためには、ヘリウムガス 100 kg/cm<sup>2</sup> 程度の圧力が必要であったが、弾丸自身が発射に際して壊れることもなく所定の速度まで加速できた (S.K. Croft に壊れやしない

かと指摘されたが)。また弾丸の材質による効果を見るためポリカーボネイト、アルミニウム、玄武岩、鉄なども使用した。標的には市販の氷 (Ice C, 結晶が a 軸方向に 5~10 cm 伸長している) と、雪粉と 10 vol% の水を混ぜ、ゆっくり凍らせたもの (Ice F, 結晶粒径は約 1 mm) を用いて標的の結晶粒径依存性も調べた。

クレータ形成実験 直径約 30 cm の Ice C と Ice F, 衝突速度が 900 m/s を越え、クラックが標的の端まで達するようになってからは 45 cm の氷を使って実験を行った。図1は、クレータの直径と弾丸の運動エネルギーの関係を示したものである[6]。この実験結果は、(1)どちらのエネルギーをパラメーターと取っても弾丸の材質依存性がある

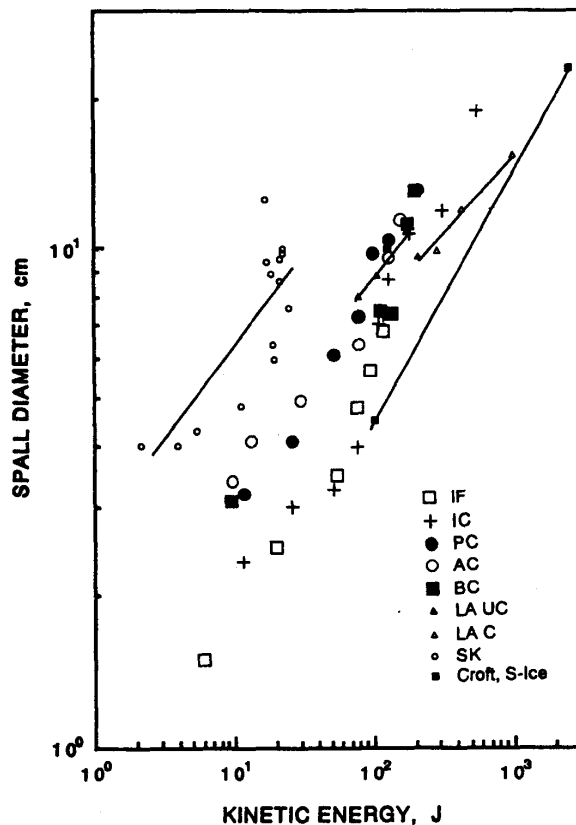


図1. 氷クレータの直径と弾丸の運動エネルギーの関係。記号は弾丸と標的の組み合わせを表している。IF, Ice-Ice F; IC, Ice-Ice C; PC, polycarbonate-Ice C; aluminum-Ice C; BC, basalt-Ice C。また先に行われた実験のデータも加えてある。LA UC, unconfined ice by Lange & Ahrens; LA C, confined ice by Lange & Ahrens; SK, Kawakami et al.; S-ice, supercooled ice by Croft et al.

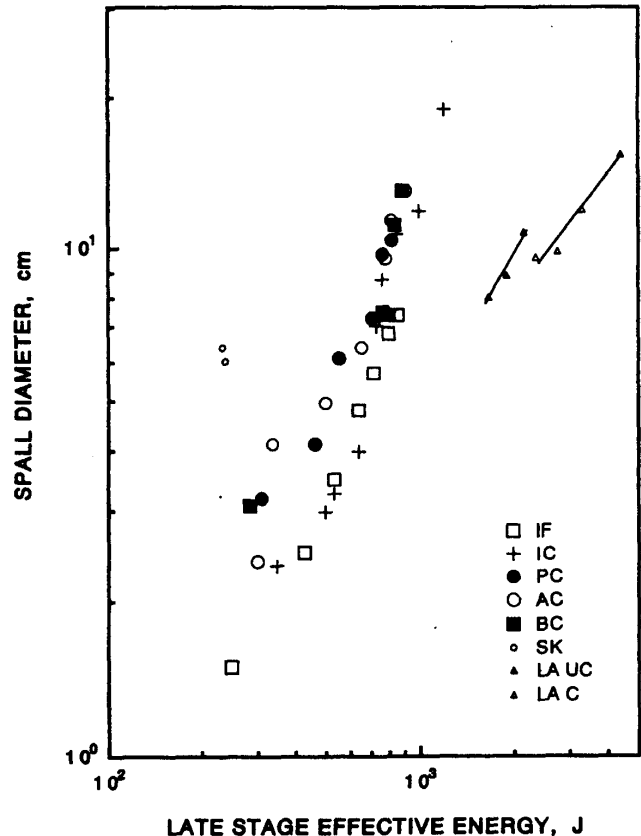


図2. 氷クレータの直径とレートステージ有効エネルギーの関係。

こと，特にエネルギーが小さい領域で顕著であること，(2)あるエネルギー値以上では折れ曲がりが見られることを示し，クレーターの形状が二重構造に変化する所（氷弾丸ではピット型へ，アルミニウム，ポリカーボネイトでは二重お椀型，もしくは二重平底型へ）に対応する。これは，両パラメーター共スケールパラメーターとしては適さなく，再考する必要があることを示唆している。ちなみに氷-氷衝突の場合の(1)式のベキ  $n_1$  は，低いエネルギー領域では1.2，高い領域では2.2となり，水谷の予測した0.4とは大きくかけ離れている。また従来の氷標的を用いた実験データともほとんど一致は見られない。これは主として実験温度条件の違いによってもたらされたものであろう。川上らのデータは270 K[4]，Croftらのものは203 K[7]で得られたものである。Langeらのもの[5]は257 Kでわれわれの実験条件（255 K）と近く，標的試料の側面を拘束していない場合のデータはわれわれのものと良く一致している。

**衝突破壊実験** 標的氷の大きさを10 cm以下にすると破壊が側面まで進行し，この実験での衝突速度でもカタストロフィックに破壊が生じる。破片の分布を詳細に調べることで玄武岩，パイロフィライトなど岩石のものと比較することが可能になった。最大破片とエネルギー密度（弾丸の運動エネルギーを標的質量で割ったもの），及び(2)式で表された無次元衝突応力  $P_1$  との関係を図3，4に示す。エネルギー密度では氷と岩石（玄武岩，パイロフィライト）で一致が見られないが，無次元衝突応力では壊れ始め（最大破片が1に近い）では良い一致が見られる。無次元応力を計算するのに静的な破壊実験から得られた物質強度ではなく，実際に衝突実験を行った結果から得られた値を用いた。氷は-18℃で60 MPa，玄武岩では1.25 GPa，パイロフィライトでは980 MPaとした。図4に見られるように最大破片が，小さい場合には岩石と大きく離れてしまう。この原因は，(2)式の導出で仮定した衝突応力の距離に対する減衰率が物

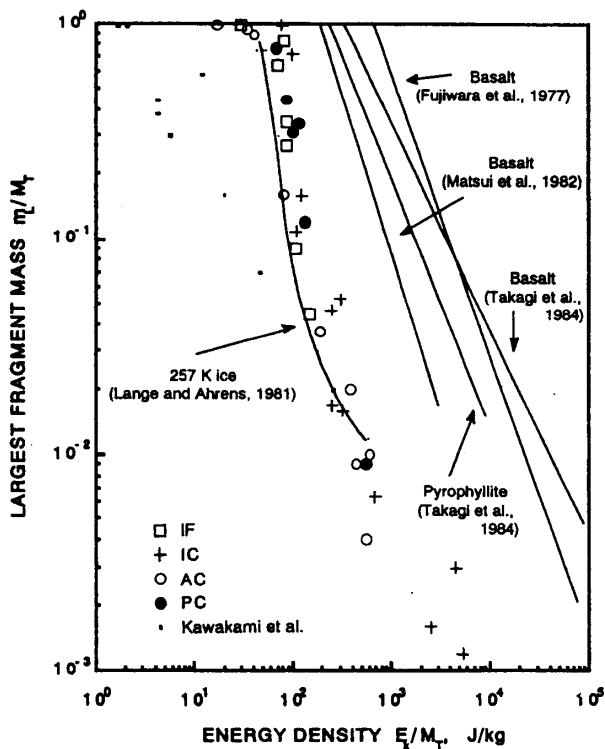


図3. 最大破片と衝突のエネルギー密度との関係。

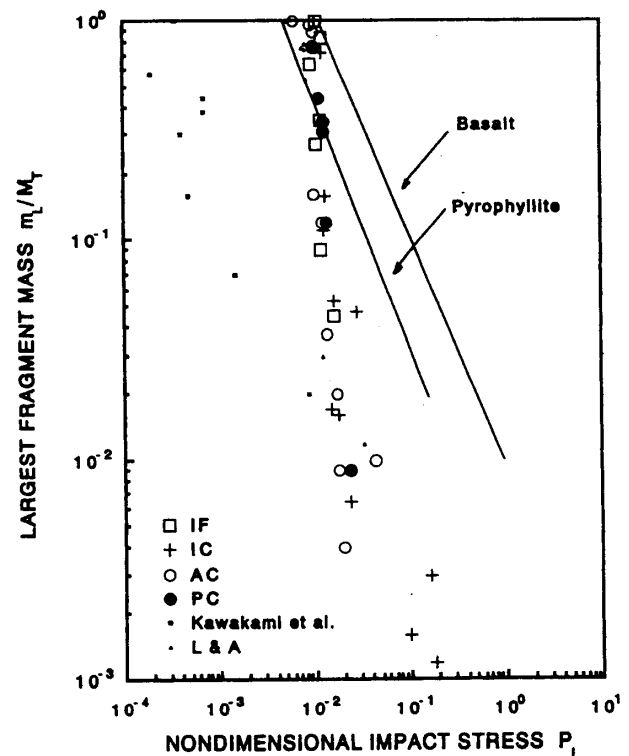


図4. 最大破片と無次元衝突応力との関係。

質によって（ここでは氷と岩石）異なっていることに起因すると考えられる。この点については衝突時に対蹠点から飛び出す破片の速度から減衰率を見積もった結果が荒川の文献[8]に詳細が述べられている。

図5は、氷-氷衝突による破片の質量分布を累積個数でとったものであり、ここでの実験条件では無次元応力に1ケタの開きがある。玄武岩の場合と比べ最も顕著な違いは、微小破片領域での勾配が約0.7であり、玄武岩の場合の0.5より大きく、微小破片の個数が2ケタ多く生成されることを意味している。この差は物質強度の差から生じていると推測されるが、まだ明確には答えられない。このべきはボイジャーのマイクロ波掩蔽によって測定された土星のCリングのものと極めて近いものであり、リングの起源が衝突破壊であることを意味しているかもしれない。衝突破片のサイズに下限があるかどうかは破片の生成メカニズムとの関わりで非常に興味深い。図6[9]は図5より1ケタ以下の10<sup>-6</sup>g近傍に累積個数の飽和が見られることを示している。低温室は乾燥しているため昇華によって微小破片が失われている可能性があったので、そのロスの測定も行ったが、このサイズ領域では昇華によるロスはまだ僅かであることがわかった。衝突時の昇華ということも推測されたが、氷標的をポリカーボネイトで覆い破片が飛散しないように工夫した回収実験でクラックの間隔に下限があることから破砕に限界があることが強く示唆されている。

### 3. 水谷パラメーターの見直し

上記のように水谷の提案した衝突のスケーリング則でも氷の場合には大きなずれや折れ曲がりがあり、特にクレーター形成において顕著に見られた。従来提唱されてきたスケールパラメーター（弾丸の衝突エネルギー、 $\Pi$  スケール）と同様に、スケー

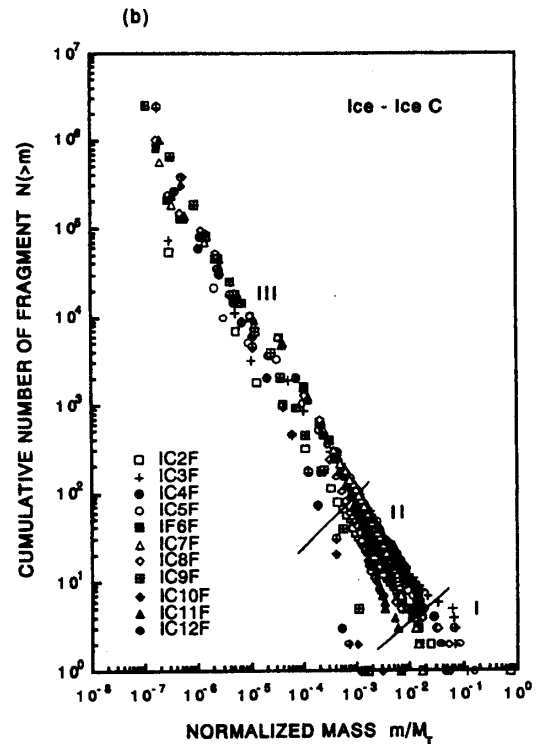


図5. 11回の実験についての破片の質量分布。

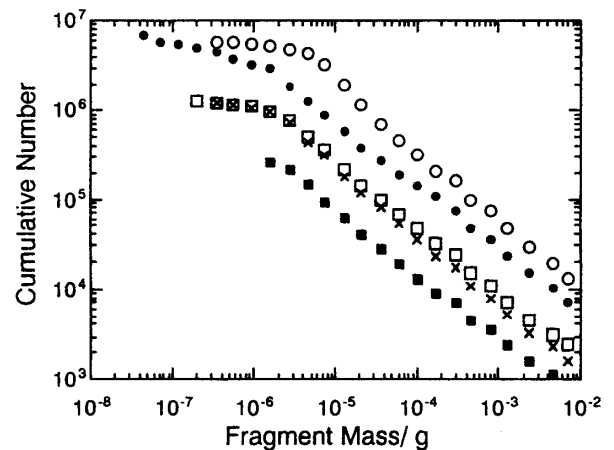


図6. 氷破片の微小領域での質量分布。

ルパラメーターとして氷の場合は不適當であるとしてこのパラメーターを捨てる前にもう一度考えて見ることにした。式(1)の初期発生圧力 $P_0$ の見積りに問題点はないか。図2での見積には263 Kの氷のエゴニオ (Larson [10], Gaffney [11]) を我々の実験温度条件255 Kと同じだとして使用した。しかしながら氷の相図を見ると解るようにこの温度領域では複雑に相、特に液相が入り組んでおり、

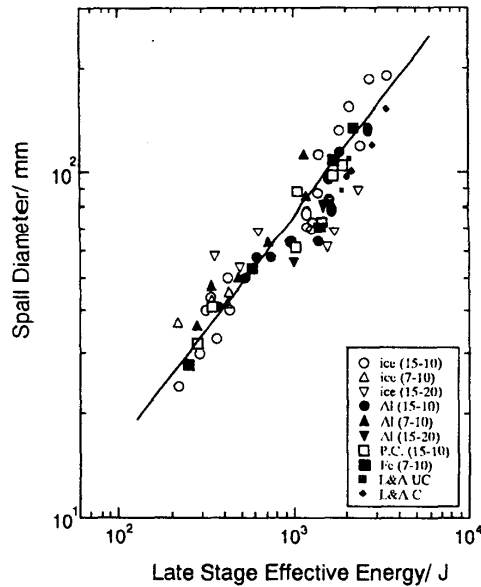


図7. 氷クレーターの直径と見直しを行ったレートステージ有効エネルギーの関係。

ユゴニオの見直しをする必要がある。実際にストレスセンサーを氷標的の衝突点直下に埋め込んで発生圧力を，ピエゾゲージを深さを変えて埋め込んだ実験で衝撃波速度の測定を行って，255 Kでのユゴニオを決定し，初期発生圧力を見積直した。式(1)では初期発生圧力  $P_0$  で加圧される体積 (Isobaric core) を弾丸の体積と近似している，即ち衝突の継続時間を，弾丸前面と標的の界面で発生した衝撃波が弾丸内部を伝わり，弾丸背面で反射して希薄波となって標的界面まで到達する時間としている。しかし氷の弾丸の場合，容易にその引っ張り強度を超えてしまうため弾丸側面から反射する希薄波によって破壊され，アルミニウムなど引っ張り強度が大きくてこの実験条件範囲では破壊されない弾丸に比べ衝突継続時間が著しく短くなっている。ストレスセンサーの波形から衝突継続時間を読みとり，衝撃波速度も先のユゴニオで決めたものを用いて Isobaric core の体積の見直しを行った。図7[12]は  $P_0$  と  $V$  を見積直したレートステージ有効エネルギーとクレーター直径の関係を表している。ここでは弾丸の直径と長さを変えたもの，鉄の弾丸を使用した実験結果も加えて

ある。いくら直線からずれた点も見られるが，先の図2に比べ，折れ曲がりや弾丸物質依存性が少ない点で著しい改善が見られる。ここでのベキは水谷の予想した  $2/5$  より大きく，おおよそ  $0.55$  である。 $2/5$  という予測は破壊強度の標的サイズ依存性から出てきたものであり，氷の場合岩石よりサイズ依存性が，大きいのかもしれない。また動的破壊の場合の試料サイズ依存性についてもまだ解っていないのでそこに起因するかもしれない。

何故ベキが  $2/5$ ,  $0.55$  になるかは衝突破壊の物理を理解しなければ明らかにはならないが，現象論的にクレータ形成のスケール則を決定するためのみでもユゴニオと衝突継続時間を決めるための衝撃波測定，また動的破壊強度のサイズ依存性の測定を岩石について行う必要がある。

#### 4. 今後の課題

岩石や氷のような破壊強度を持つ物質のクレーター形成実験によるデータは，天然では直径数10 km 程度までの小天体に適用される。それよりも大きな天体では重力に支配されてクレーターの直径が決まると考えられ，小天体の画像はまだ多くない現在では岩石・氷のクレーター形成実験は無意味であると主張する人もいる (データとしては価値を認めるが)。クレーター形成実験を衝突破壊の初期過程と捉える必要がある。クレーターの最終的な外径を決定するのは，引っ張りによる表面のスポーリング破壊と破片をそこに押し止めようとする重力の競争で決まるが (理論的にも実験的にもまだ明らかではない)，クレーター中心付近から放出される微小破片は，カタストロフィックな衝突破壊によるものと同様の過程で生成される。カタストロフィックな衝突破壊は衝突点近傍の微小破片を形成する破壊に始まって，標的の中を伝わった衝撃波が標的背面や側面で反射し，引っ張り力によって大きな破片を形成するのであろう。我々

はこれまで従来からの衝突破壊実験で行ってきた実験手法をそのまま踏襲し、まず「手習い」として氷を対象に実験を行ってスケールパラメーターを使って実験結果を整理し、見直しをした。このようなアプローチは破壊現象を積分した結果で見ているものであり、これ以上の解釈にはもっと詳細に立ち入ったアプローチによる衝突破壊現象の理解が必要である。

実験により明らかにしなければならない具体的な課題として以下のことが挙げられる。(1) 岩石・氷のユゴニオの確立。岩石については60年代に爆薬を用いて行われた実験例があるのみであり、我々が実験室で行っているような圧力領域での詳細は全く不明。(2) 標的中を伝搬する衝撃波のモード、大きさと減衰のメカニズム。(3) 破壊(クラックの生成と伝搬)のメカニズムとクラックの大きさを支配する要因。(4) (2)と(3)の相互作用の解明。静的な岩石破壊の研究でもまだこれは明らかにされているとはいいがたく、破壊強度といったマクロな破壊物性の歪み速度依存性なども含めて明らかにする必要がある。

このような破壊の物理学の基盤に立って初めて天然の惑星物質集積過程に適用できるスケール則の構築が可能になると考える。

## 謝辞

ここで述べた氷の衝突実験は、名古屋大学、北海道大学、宇宙科学研究所の3研究機関の共同で行われた。第1項に登場願った方々のみならず、西村浩一さんの他、両機関の多くの技官の方々にも支援された。また長時間の耐寒実験に付き合ってくれた比嘉、沖村、白井君他、多くの学生諸君にも感謝致します。

## 参考文献

- [1] Mizutani, H., Takagi, Y., and Kawakami, S., 1990: New scaling laws on impact fragmentation. *Icarus* **87**, 307-326.
- [2] Mizutani, H., Kawakami, S., Takagi, Y., Kato, M., and Kumazawa, M., 1983: Cratering experiments in sands and a trial for general scaling law. *J. Geophys. Res.* **88**(Suppl.), A835-845.
- [3] Takagi, Y., Kawakami, S., and Mizutani, H., 1984: Impact fragmentation experiments of basalts and pyrophyllites. *Icarus* **59**, 462-477.
- [4] Kawakami, S., Mizutani, H., Takagi, Y., Kato, M., and Kumazawa, M., 1983: Impact experiments on ice. *J. Geophys. Res.* **88**, 5806-5814.
- [5] Lange, M., and Ahrens, T. J., 1987: Impact experiments in low-temperature ice. *Icarus* **69**, 506-518.
- [6] Kato, M., Iijima, Y., Arakawa, M., Okimura, Y., Fujimura, A., Maeno, N., and Mizutani, H., 1995: Ice-on-ice impact experiments. *Icarus* **113** (in press).
- [7] Croft, S. K., Kieffer, S. W., and Ahrens, T. J., 1979: Low-velocity impact craters in ice and ice-saturated sand with implications for martian crater count ages. *J. Geophys. Res.* **84**, 8023-8032.
- [8] Arakawa, M., Maeno, N., Higa, M., Iijima, Y., and Kato, M., 1995: Ejection velocity of ice impact fragments. submitted to *Icarus*.
- [9] Iijima, Y., Sirai, K., Watanabe, S., Kato, M., Arakawa, M., and Maeno, N., 1994: Formation of fine fragments in impact process. *Proc. 27th ISAS Lunar & Planet. Sympo.*, 208-211.
- [10] Larson, D. B., 1984: Shock-wave studies of ice under uniaxial strain conditions. *J. Glaciol.* **30**, 235-240.

- [11] Gaffney, E. S., 1985: Hugoniot of water ice. *In Ice in the Solar System* (J. Klinger et al., Ed.), pp.119-148. Reidel, Dordrecht, Netherland.
- [12] Iijima, Y., Arakawa, M., Kato, M., Fujimura, A., Maeno, N., and Mizutani, H., 1995: Cratering experiments on ice: Dependence of crater formatin on projectile materials and scaling parameter. submitted to *Geophys. Res. Lett.*.