

特集「衝突実験」

氷の衝突過程

荒川政彦¹

1. 低温科学研究所での衝突実験の現状

本研究所には大小様々な広さの低温実験室が氷や低温度における生物の研究を行うために用意されている。その中の1室に今から5年前、名古屋大学・地球惑星科学の加藤氏らを中心とする研究グループにより縦型の一段式軽ガス銃が設置された(図1)。氷は外惑星領域の惑星形成過程を考える上でシリケートと並んで重要な構成物質であり、その衝突破壊実験は国内外の研究室で行われてきた。しかしながら、いずれも氷試料のみを局所的に冷却する方法を採っており、衝突破壊後の破片のサイズ分布の計測や大試料を用いた研究には不向きであった。低温研のように衝突銃全体を低温

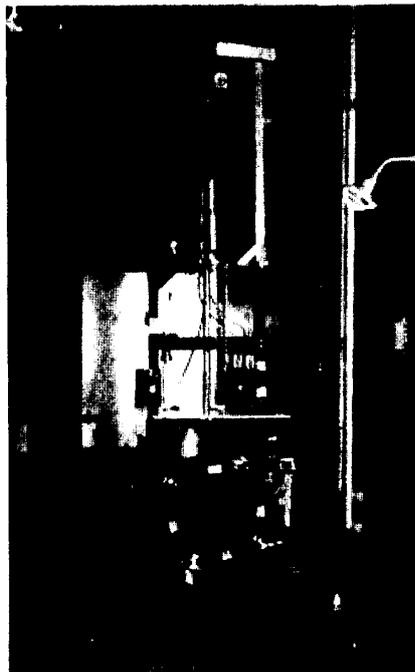


図1. 低温研の低温風洞実験室に設置された一段式軽ガス銃(縦型)。室温は-18℃に保たれているので氷は融けない。室内での作業は防寒服を着衣して行う。

室に置き、人間もその中で作業をする方法は氷を扱う実験には理想的な環境である。衝突装置の詳細な内容は、加藤・飯島らにゆずるとして、本稿では低温研における氷を用いた衝突実験の現状について簡単にまとめてみたいと思う。

低温研での実験の特徴は、イメージコンバーターカメラといわれる毎秒100万コマ程度の高速度で撮影できる装置を用いて衝突破壊のその場観察を行っているところにある。その超高速度カメラを用いた実験は、(1) 衝突によるクラックの発生と伝播、(2) 雪中の衝撃波伝播と衝撃圧縮過程、(3) 衝突破片の速度分布である。以下にそれぞれの実験の紹介をしていきたいと思う。

2. 衝突によるクラックの発生と伝播

2.1 破壊素過程の研究

脆性物質の破壊素過程の研究は衝突破壊を研究する上で避けては通れない道である。隕石中で見つかる種々の衝撃に関する情報や、計算機環境の発展により現実に近い状況を再現できるようになった衝突シミュレーションと相補的な研究をしていくためには、衝突破壊のメカニズムに関する研究を積極的に行う必要があると思われる。

氷は比較的容易に大きな均質試料を手に入れることができ、その整形もカンナやバンドソウなどで簡単に行うことができる。そして光学的に内部を可視化することもできるので、脆性破壊により生ずるクラックを観察するのに適した試料である。

¹北海道大学低温科学研究所

これまでの脆性物質の研究としてはシリケートガラスの研究が有名である。この物質については衝突点直下でのクラック形成のその場観察や、そのクラックの伝播速度の計測と理論的解釈が以前から行われてきた[1][2]。それによれば、脆性物質の衝突破壊は衝撃波の伝播に伴って変化する応力場の中で起こり、場所によりそのメカニズムは変化する。従って、衝撃波の伝播とともに試料のどの部分にどのような強さで応力が発生するかを調べるのが、衝突破壊を理解する鍵になる。

2.2 実験装置の概要

衝突破壊現象を実験的に解明するには破壊や衝撃波の伝播を直接観察することが必要である。そこで我々はイメージコンバーターカメラといわれる種類の超高速カメラを用いて衝突破壊の直接観察を試みた。このカメラは適当な光源による照明さえあれば毎秒2000万コマでの撮影が可能である。撮影のコマ数は最高で24コマ取れるので現象の時間変化をとらえるにも充分である。ただ画像データはポラロイド写真に記録されるため、1

画像が小さくコンピューターにより処理しないと空間分解能を得ることは難しい。衝突破壊のタイムスケールだが、例えば4cmの標的の中を衝撃波とクラックが伝播し破壊が起こるとするならば、氷の衝撃波速度2km/sを用いると $20\mu\text{s}$ となる。これなら50～100万コマ/秒の撮影速度でとれば充分に観測できるはずである。

衝撃波面では急激な密度変化があるのでそこでは屈折率も同様に変化する。そこでシャドウグラフやシュリーレン光学系により氷の内部を観察するとその面を可視化することができる。またクラックも同様に屈折率の不連続面としてとらえることが可能である。我々は図2の様な装置を用いて実験を行った。氷試料には粒子サイズが1cm以上の多結晶氷を用いている。本来なら単結晶氷が望ましいのであるが試料として必要なサイズが大きいことや入手のしやすさから市販の純氷を用いている。この水を $6\text{cm} \times 6\text{cm} \times 2\text{cm}$ の板状に成形してアクリルの試料ボックスに入れる。このアクリル製の箱は水を積めた後、空隙をフロリナートという水とほぼ同屈折率の液体で満たす。そうする

ことにより試料表面からの光の散乱を抑え平行光線が試料内を透過し、シュリーレン光学系が利用できるようになる。光源には50 J/Fのクセノンフラッシュランプを用いる。このランプの発光時間は1msと長く、十分にカメラ撮影の間光量保つことができる。短時間現象を観察する時もっとも問題となるのは、カメラやランプを起動するトリガーである。我々のシステムでもまだ充分とは言えないが、 $\pm 5\mu\text{s}$ 程度ではトリガーをかけることが可能である。現在は銅板を用いた接触型とレーザーを用いた非接触型の両方を併用している段階であるが、将来的には試料に物理的影響を及ぼさないレーザー

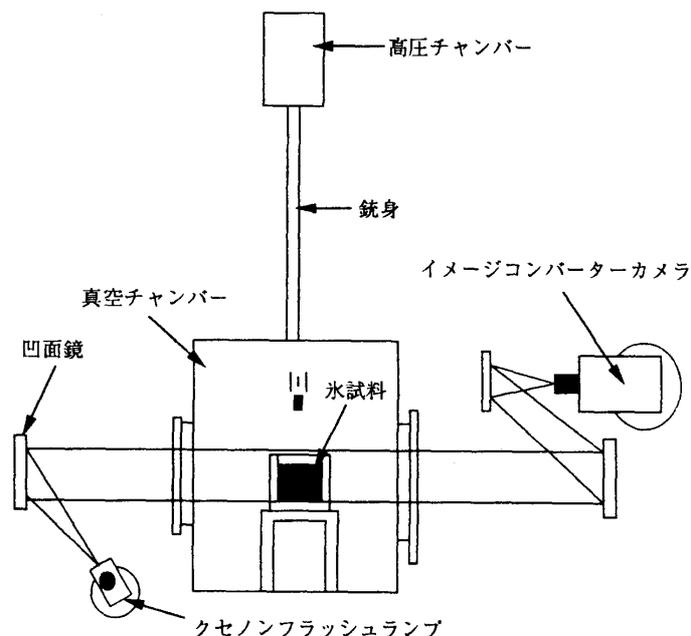
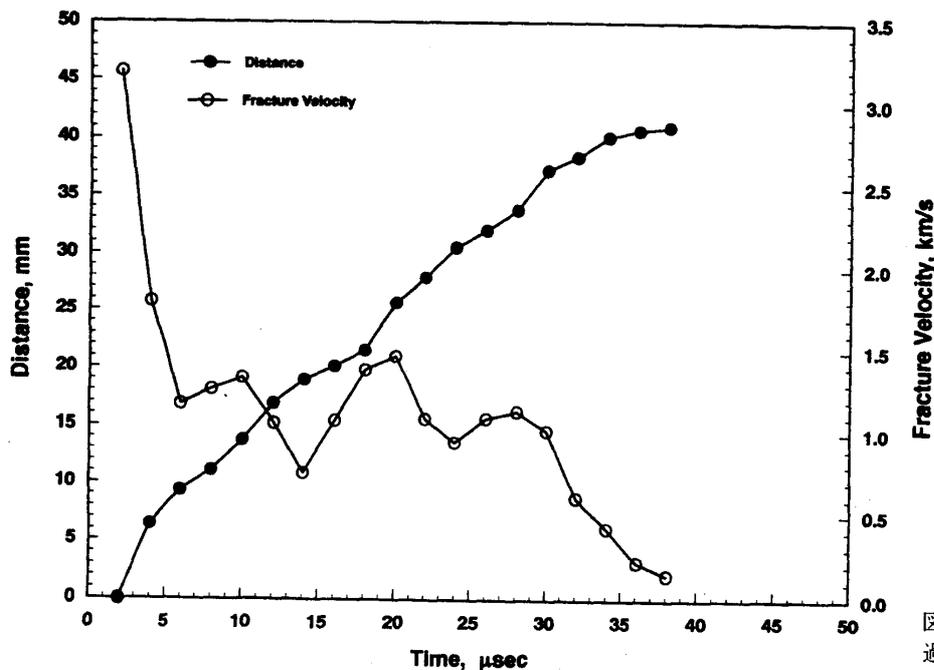
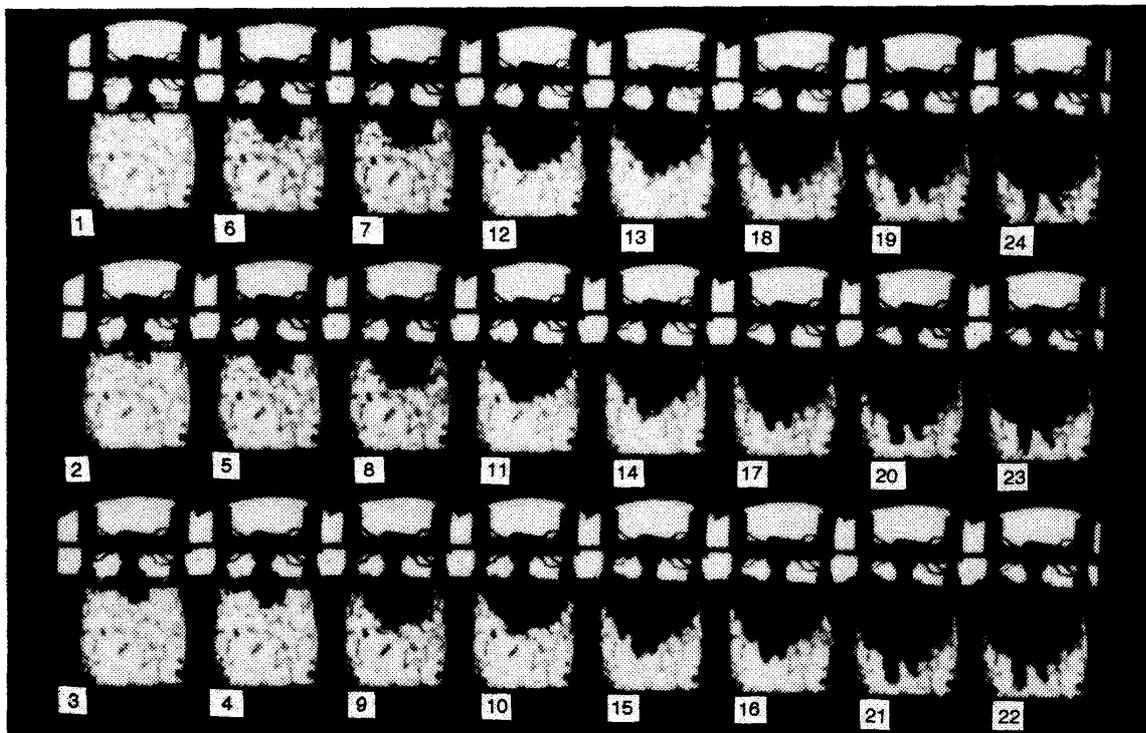


図2. 一段式軽ガス銃と超高速カメラを用いた撮影システム。縮尺は任意。型にすべて移行していく予定である。この

ように我々は氷の内部が可視化できるという利点を利用して、衝撃波とクラックの両方を同時に観測して破壊現象の解明を試みることにした。

2.3 破壊のその場観察

氷-氷衝突実験による破壊の撮影結果を図3に示す。なお撮影速度は50万コマ/秒であり、一コマのスケールは横8cm程度である。現象の推移は各コマに時間順の数字を打ってあるのでそれを参考



▲図3. 超高速カメラにより撮影された衝突破壊の瞬間。撮影速度は50万コマ/秒。衝突速度は231 m/s.

図4. 破壊の伝播距離・速度と経過時間の関係。図3の写真を解析した結果。

にしてほしい。最初のコマの中で筋状に見える黒い線は氷粒子の境界である。コマを追って行くに従って衝突点（試料上部，中央）から半円状に黒い領域が広がって行くのが分かるが，これは破壊領域の成長に対応している。これまでの実験では残念ながら衝撃波の観察には成功していない。衝突速度が 100～700 m/s と比較的遅いので観測にかかるほどの密度変化を及ぼす衝撃波が発生していないようである。破壊現象についてはこの写真のように十分に良いものが撮れているので，以降はそれらのデータについて紹介する。破壊の伝播速度の時間変化を図4に示す。衝突点直下では氷の横波速度 (2.04 km/s) を優に越えるような高速であることが分かる。氷のクラックの伝播速度はこれまでの研究から，1 km/s 程度であることが知られている [3]。今回観測された高速度で広がる破壊領域は，単一のクラックが成長して破壊領域を形成するというより破壊の発生領域が高速度で広がっており，その中で発生した小さなクラックが破壊領域を形成していると考えた方が理解しやすい。我々はこの破壊領域のことを“shear fracture zone”と呼ぶ。確かに，実験後の試料を取り出して薄片にして観察すると衝突点近傍では並行に走る小さなクラックで埋められていることがわかる (図5)。

これまでの氷のユゴニオの研究と我々の観察から，小クラックは氷がユゴニオ弾性限界 (HEL) を超えた圧力にさらされると起こることがわかった。ユゴニオ弾性限界を超えた衝撃圧縮状態では試料には高い剪断応力が生じ，その結果 shear crack が発生したり，shear band に沿った領域で融解が起こる [4][5]。この様なユゴニオ弾性限界を超える波は弾性前駆波として観測され，その伝播速度は縦波速度に近いことが知られている。つまり衝突点直下では衝撃圧縮と共にこの破壊が進行するので，縦波速度程度で破壊は進行してい

るように見えることになる。衝撃圧はその伝播とともに減衰していくので衝突点から離れると HEL 以下の圧力になり氷は圧縮による剪断破壊を受けなくなる。薄片試料の観察は，破壊領域がある距離を境に小クラックに満たされた領域とそうでない領域に明瞭に分離されることを示している。衝突点から遠方の領域では radial crack といわれる放射状の割れ目が卓越して見える。この radial crack が卓越する破壊領域での破壊の伝播速度は 1～2 km/s と shear fracture zone よりもかなり遅くなっている。特に図4の13コマ目以降にコマの中央部で鉛直方向に成長を続ける一本のクラックは，1 km/s 以下の速度で変動しながら成長している。この様な低速度のクラックの成長は，我々がハンマーを用いて行った低速度の衝突破壊実験で見られる破断面の成長と酷似しており，その発生と成長のメカニズムが同じであることを示唆している。低速度での衝突破壊の場合，その速度が音速に比べて十分に遅ければ，静的な indentation test の一種と考えることができる。氷の indentation test との比較や静的な応力場の計算などから，破壊は衝突点近傍に発生する引っ張り応力によって発生する tensile crack により起こることが予測される [6]。図4に見られる縦割れクラックの成長は，この tensile crack が高速度の衝突破壊の場合に衝突点から離れた所で実現していることを示唆している。この縦割れクラックは弾丸の衝突後，40 μ s 以降に成長し始めている。この時間は，氷標的中を塑性波や弾性波が何度か反射して相互作用を起こし，引っ張りの応力場を形成するのに十分な時間である。

以上の様に破壊過程の解析には応力場の情報が不可欠である。そのためには計算機シミュレーションが特に有効である。実験的にも試料内部の応力を測定することは可能ではあるが，3次元的な空間分布となると現在の我々の技術レベルでは難し



図5. 図3の実験から回収した氷試料の薄片写真. 白く見えるところがクラック. スケールは試料の一边が6 cm.

い. 特に衝突破壊後期の, 波の相互作用が起こるような複雑な応力場の解析には計算機シミュレーションは最も有効な手段である. 最近, 破壊のクライテリオンを入れた惑星衝突の計算が行われるようになってきたが, その用いているクライテリオンや種々の近似の正しさを評価したり, また実験との比較により破壊のクライテリオンを確立するためにも相互補間的な研究が今後は是非とも必要である [7].

3. 雪中の衝撃波伝播と衝撃圧縮過程

水の多孔質体である雪は, 外惑星領域の微惑星の模擬物質として有効である. 衝突実験から氷惑星の初期集積を調べるとするなら, まず第一に雪のユゴニオを計測するべきである. 一般に多孔質体を衝撃圧縮するとその衝突エネルギーのほとんどは熱に変換され, 温度上昇や融解などによって消費されることが知られている. 雪の場合にも同様な熱的作用が期待され, その熱は雪の焼結もしくは圧密を促進して表層を堅く進化させていくと思われる. 我々は, この様な氷微惑星の初期進化を考慮して, 雪のユゴニオ測定と雪中を伝播する

塑性波の特性について調べている. この研究は大学院生の比嘉君らを中心として行っており, 現在のところ空隙率が15%, 30%の雪について自由表面速度を計測して, 粒子速度の伝播距離依存性が明らかになっている [8]. 彼らの研究は氷の弾丸を様々な厚さの雪の板 (3 mm から3 cm) に衝突させて, その時飛び出してくる雪の速度を超高速度カメラで計測するというものである. この実験から, 自由表面近似を使うことにより雪中の粒子速度を見積もることができる. 粒子速度は衝撃波の伝播と共に減衰していくことが知られているが, その時の減衰率は, 距離の2乗から3乗と言われている. 雪の場合この減衰率が氷の場合より大きいのではないかという考えがこれまでであったが, 彼らの結果から雪と氷ではその減衰率にほとんどかわりがないことがわかった. 空隙率に関係なく減衰率は, 衝突点近傍では距離の1乗程度であり, 遠くなると3乗に近い値を取るようである. この様な減衰率の場所による変化は以前から数値シミュレーションにより予測されていたが, それを氷と雪について確認することができた [9]. 今のところ衝撃波の伝播速度を計測することには成功していないので, 残念ながらユゴニオの決定にまでは至っていない. 今後, 圧力ゲージを用いた圧力のその場観察を行い正確なユゴニオ測定と衝撃圧の減衰係数の決定を行っていきたいと考えている.

4. 氷球-氷球の衝突と破片の速度分布

衝突における破片の速度分布の研究は, 宇宙研の中村らの紹介にもあるようにこれまで彼らを中心としたグループにより実験が行われてきた. 我々は氷の衝突破片についても同様の研究を行うべきと考え, 氷球どうしの衝突実験を行っている. 特にこれまでの実験では計測が難しかった高速度で飛び出す jetting の速度を正確に求め, その性質を明らかにすることを実験の主眼に置いている.

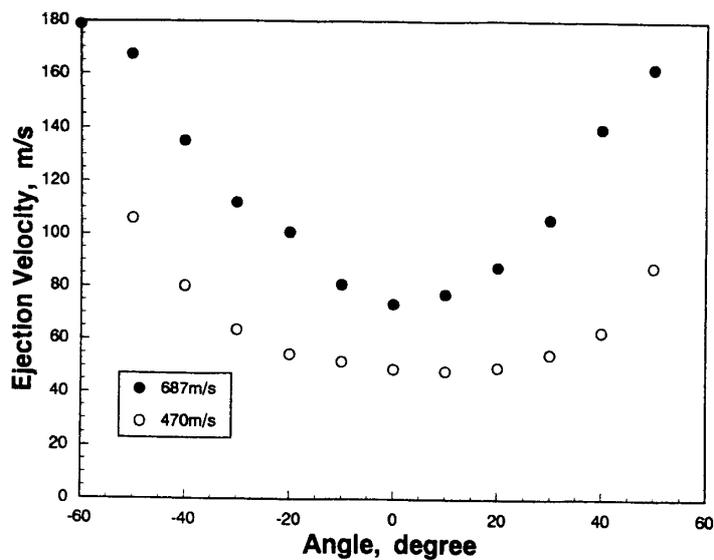


図6. 氷球外縁の膨張速度の初期位置依存性. 0度は antipodal point を表す.

jetting については宇宙研の門野らにより我々と同じイメージコンバーターカメラを用いた研究が始められており、今後さらに発展して行くものと思われる。我々の実験では特に弾丸と標的の質量比が1に近い所での衝突を行っている。これには装置自体の制約というのもあるが、それよりは惑星の初期集積に研究の主眼を置いているので、サイズスケールが同程度のものの衝突が大事だからである。今のところ質量比が1対10から1対1の衝突実験を行い、その結果衝突点から吹き出す jetting の速度が、衝突速度の2倍から3倍に達することがわかっている。衝突速度は150から680 m/s であるので、最高の吹き出し速度は1.5 km/s 以上になっている。衝突の際のエネルギー分配を考える上では、この様な高速度で飛び出す破片が最も重要である。これまでの研究では、衝突のエネルギーのほとんどは jetting のような高速で飛び出す破片によって消費されていると考えられてきたからである。今のところ jetting で飛び出す破片の総量の見積もりができていないので、エネルギー分配を決定することはできないが、少なくとも jetting で飛び出す質量の最大値は、弾丸質量の1/4から1/9であることは言える。この球どうしの衝突

実験では jetting の他に球面の各点から飛び出す破片粒子の速度分布も計測することができる。正確には、個々の破片を追いかけているわけではないので破片の作る envelope の膨張速度を計測していると言った方が良くかもしれない。図6に衝突点を膨張の中心として計測した速度分布を示す。角度0度は衝突点と氷球の中心を通る測線を表し、角度は衝突点を中心にしてその測線から右回りを+にとっている。2つの衝突速度の例を示してあるが、各々の場合ではほぼ角度0に対して対象な速度分布を示す。最も遅い

Antipodal point での膨張速度は、衝突速度の約1/8となっており、これは弾丸と標的の質量比のファクター分だけ膨張速度が衝突速度より遅くなっていることを表している。また角度方向の膨張速度の変化は、衝突速度が大きい方が急激であることがわかる。

5. その他の衝突に関する研究について

低温研ではガス銃を用いた実験以外にも衝突現象に関する様々な実験を行っている。その一つは、質量分析計を用いた衝突蒸発のその場観察である。氷は比較的低速度で衝突蒸発を起こすので、氷惑星が集積する時にシリケート物質と分別を起こした可能性がある。また氷微惑星は有機物や様々な種類の氷で構成されていたと思われるので、衝突時の高温高圧により化学反応や相転移を起こし、その後の惑星の物質進化に影響を及ぼしたと思われる。質量分析計を作動させるためには高真空に試料室を保つ必要があるため、軽ガス銃に代わって静磁場を利用したレーガン銃を製作した。このレーガン銃により100～200 m/s の速度で氷への衝突実験を行い蒸発現象の観察を始めている。

また、土星などのあるリングの成因とその運

動状態の進化を知るために、1 m/s 以下の低速度及び 150 K までの低温度における氷粒子の衝突反発係数の測定を行ってきた。これまでの実験では、数 cm/s 以下の低速度の衝突では氷表面にできる薄い霜の層や表面の粗さが大きく反発係数に影響を及ぼすことが指摘されていた。比嘉らの研究によると、その影響は速度が増すにしたがって相対的に減少して反発係数は 1 に近くなって行くことがわかった。さらに速度が上昇した場合に起こる反発係数の減少は、氷粒子の衝突点における局所的な破壊や塑性変形により起こり、粒子サイズや温度に大きく依存していることがわかった [10]。

これまで低温研では低温室に設置したガス銃と超高速カメラを中心に氷の力学的性質に関する実験を行ってきた。今後はこの手法に加えてレーザーガンや質量分析器を用いた化学的な実験、そして計算機シミュレーションとの対応がつくような、より精密で確度の高い計測実験を行っていくつもりである。

参考文献

- [1] Chaudhri, M.M., and S. M. Walley, 1978: Damage to glass surfaces by the impacting small glass and steel spheres, *Phil. Mag. A*, **37**, 153-165.
- [2] Glenn, L. A., 1976: The fracture of a glass half-space by projectile impact, *J. Mech. Solids*, **24**, 93-106.
- [3] Sato, A., and G. Wakahama, 1992: Measurements of the velocity of crack propagation in ice, in *Physics and Chemistry of Ice*, edited by N. Maeno and T. Hondoh, pp. 464-469, Hokkaido University Press, Sapporo.
- [4] Gaffney, E. S., 1985: Hugoniot of water ice. in *Ices in the solar system*, edited by J. Klinger, D. Benest, A. Dollfus, and R. Smoluchowski, pp. 119-148, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- [5] Larson, D. B., 1984: Shock -wave studies of ice under uniaxial strain conditions, *Journal of Glaciology*, **30**, 235-240.
- [6] Michel, B., and N. Toussaint, 1977: Mechanism and theory of indentation of ice plates, *Journal of Glaciology*, **19**, 285-300.
- [7] Benz, W., and E. Asphaug, 1994: Impact simulations with fracture. 1. Method and tests, *Icarus*, **107**, 98-116.
- [8] Higa, M., M. Arakawa, and N. Maeno, 1994: Measurements of particle velocities in the shock compressed snow plates, *Proc. 27 th ISAS Lunar and Planetary Symp.*, 174-177.
- [9] Melosh, H. J., 1984: *Impact Cratering*, Oxford University Press, New York.
- [10] Higa, M., M. Arakawa, and N. Maeno, 1993: Impact experiment of ice spheres on an ice block: First report, *Proc. 26 th ISAS Lunar and Planetary Symp.*, 141-144.