論文

大型野外シュートを用いた雪崩実験, その3

——低密度雪塊の衝撃波形予測——

阿 部 修¹⁾, 小 林 俊 一²⁾, 佐 藤 篤 司¹⁾,
中 村 秀 臣³⁾, 中 村 勉⁴⁾

要 旨

これまで雪崩実験シュートを用いて測定された, 雪塊の壁, 杭および小円板に対する衝撃波形は, いずれも衝突直後に最大値が出現して, その後しだいに減衰するというものであった. 本報告では, 初期密度 380 kg/m^3 までの低密度の雪塊の衝撃現象に塑性圧縮理論を適用させ, かつ破碎された雪粒子がその後に及ぼされた衝撃力積により圧密されるという新しい観点を導入することにより, 初期密度および衝突速度から衝撃波形を簡便に予測する手法を提案した. またこの際, 実測された衝突速度, 初期密度および最大衝撃圧から塑性波前面での破碎雪の密度を推定したところ, それは初期密度の1.45倍という直線関係で表されることが判明した.

キーワード: 雪崩, 衝撃圧, 塑性波

Key words: avalanche, impact pressure, plastic wave

1. はじめに

雪崩衝突時における防護施設の動的解析を可能とするには, 特に雪塊に起因する高周波成分の衝撃波形を知る必要がある. 前報では, 雪崩実験シュートを用いて行った雪塊の壁, 杭および小円板に対する衝撃実験から, その衝撃特性を明らかにした(阿部ほか, 1997). しかし, 衝撃波形を推定するまでには至らなかった. 典型的な衝撃波形は, 衝突直後に最大値が発生して, その後しだいに減衰するというものであった. 衝撃波形を予測するには, 高速圧縮時の積雪の破壊のメカニズムを知る必要がある. 積雪の塑性波速度を初めて測定したのはNapadensky (1964)である. ただし

用いた試料は高密度のフィルムであった. Abele and Gow (1975, 1976)は, 最大7.5 MPaという高圧下での積雪の密度と圧力を測定し, 両者の関係を明らかにした. しかし, この場合の圧縮速度は最大でも0.40 m/sであり, 雪崩衝突時に比べて著しく小さいものであった. 佐藤・若浜 (1976)は, 初めて高速度領域における積雪の塑性波速度および圧力を測定し, 測定値が理論値とほぼ一致することを確かめた. Brown (1980)は, 積雪粒子の微視的構造から低密度雪の塑性圧縮理論を展開し, さらにその後の研究により, 精巧な理論式を導いて, 積雪内部の圧力や密度分布を解明した(Brown, 1981; Brown, 1983). Shurova (1984)は, 積雪中の空気が断熱圧縮および等温圧縮すると仮定した場合の最大衝撃力を理論的に解明し, 実測値と比較し良好な結果を得た. 一方, Sato (1987a, 1987b)は, 高速圧縮時の積雪の塑性波速度を測定し, その際, 衝撃圧縮された雪の密度が衝突面の近くでより大きくなっていることを明らかにした. そこで, 本研究では, 衝撃によって

- 1) 防災科学技術研究所雪氷防災研究部門
〒996-0091 新庄市十日町高壇 1400
- 2) 新潟大学積雪地域災害研究センター
〒950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050
- 3) 元防災科学技術研究所
〒781-0302 高知県春野町弘岡中 1704-1
- 4) 元防災科学技術研究所
〒020-0104 盛岡市小島沢 2-23-13

生成された破碎雪がその後の衝撃力積によって圧密されるという観点を導入することにより衝撃波形を推定する手法を考案した。

2. 塑性圧縮理論

高速圧縮時の積雪は一種の塑性体とみなすことができる (吉田, 1974)。そこで、雪塊の衝撃圧に塑性圧縮理論を適用する。ランキン・ユゴニオの関係式から一次元的に圧縮される物体の運動量保存則は次のように表される (Mcqueen R. G. *et al.*, 1970 ; 佐藤・若浜, 1976 ; 庄野, 1988)。すなわち、

$$P_1 - P_0 = \rho_0 (U - u_0) (u_1 - u_0) \quad (1)$$

ここで、 P 、 ρ 、 u はそれぞれ圧力、密度、粒子速度で、添字 0、1 は衝撃圧縮の前および後の状態を表す。また、 U は塑性波速度である。静止している積雪に剛体が衝突する場合、 u_0 は 0 となり、また u_1 は衝突速度 V と等しくなる (図 1)。さらに衝突前の圧力 P_0 を 0 とおくと、圧縮後の圧力 P_1 は次式で表される。

$$P_1 = \rho_0 UV \quad (2)$$

また質量フラックス保存則から、

$$U = \left(1 + \frac{\rho_0}{\rho_1 - \rho_0}\right) V \quad (3)$$

が導かれ、これを (2) 式に代入して、

図 1 積雪中の塑性領域の伝播。

Fig. 1 Plastic wave propagation in snow.

$$P_1 = \rho_0 \left(1 + \frac{\rho_0}{\rho_1 - \rho_0}\right) V^2 \quad (4)$$

が得られる。(3)、(4) 式は、圧密されにくい雪ほど、大きな U となり、したがって大きな衝撃圧が発生することを意味する。なお、ここでは静止した積雪に剛体が衝突すると設定したが、両者を入れ替えて、静止した剛体に積雪が衝突する場合でもその衝撃圧は等しい。

3. 破碎雪の圧密過程

3.1 雪塊の衝撃波形

雪塊の衝撃現象に塑性圧縮理論を応用する前に、これまでの雪崩実験シュートを用いた衝撃実験によって測定された雪塊の衝撃波形について整理しておく。平らな面をもつ雪塊の平板に対する衝撃波形は、衝突直後に急速に立ち上がり、最大値に達した後はしだいに減衰するというものであった。また、このときの最大衝撃圧は、衝突速度と密度が同じであれば、壁、杭および小円板という寸法や形状の異なる受圧板でもほぼ同一であった (阿部ほか, 1991 ; 阿部ほか, 1997)。このことは、最大衝撃圧が圧縮破壊のみに起因することを裏付けるものである。木下 (1956) は、円板貫入中の積雪の反抗力のほとんどが圧縮力により生じ、周囲の剪断力の寄与は少ないことを報告している。そこで、ここでは前項の一次元の塑性圧縮理論を用いて、最大衝撃圧出現時以降の衝撃波形を再現することを試みる。

3.2 破碎雪の密度変化

(4) 式から衝撃圧を予測するには、衝突速度 V と初期密度 ρ_0 のほかに、衝撃圧縮後の密度 ρ_1 を知る必要がある。Sato (1987a, 1987b) によれば、衝撃圧縮された雪の密度は一様ではなく、衝突面の近くにある雪 (最初の衝撃で破碎された雪) でより大きくなっている。これは、3.1 で述べた衝突初期に大きな衝撃圧が生じる事実と矛盾する。なぜなら、(4) 式によれば、衝突直後に大きな衝撃圧が発生するためには、分母の密度増加量 $(\rho_1 - \rho_0)$ が小さくなくてはならず、したがって ρ_1 もさほど大きくならないはずなのに、破碎雪の密度の測定結果では衝突面の近くで逆に大きくなっているのである。そこで、次のような仮説が

立てられる. すなわち, 衝突初期に粉碎された雪粒子はその後の衝撃圧でしだいに圧密される, というものである.

衝突によっていったん破碎された雪粒子は, 粉体として取り扱うことができよう. Abele and Gow (1975, 1976) および Wakahama and Sato (1977) は, 圧縮破壊された雪 (以後破碎雪と呼ぶ) が圧縮される前の雪粒子どうしの結合が断ち切られて, 粉々になって詰まっていることを見いだした.

Kuroiwa *et al.* (1967) は, はじめて雪粒子を粉体として取り扱い, 雪粒子のタッピング実験における圧密過程を次式で表した. すなわち,

$$\rho_n = \rho_\infty - (\rho_\infty - \rho_0) e^{-a \cdot N} \quad (5)$$

ここで, ρ_0 , ρ_n および ρ_∞ は, それぞれ初期密度, タッピング回数 N 後の密度および最終密度で, a は定数である.

本報告では, 衝撃時の破碎雪の圧密過程について議論するので, 上式の N の代わりに衝撃力積 I を用いて, 衝撃圧が大きいほど, またそれが長く続くほど, 破碎雪の圧密の程度が大きくなると考える. すなわち,

$$\rho_i = \rho_\infty - (\rho_\infty - \rho_1) e^{-b \cdot I} \quad (6)$$

と表す. ただし ρ_1 , ρ_i および ρ_∞ は, それぞれ塑性波前面での破碎雪, 衝撃力積が加わった後の破碎雪, および氷の密度である. また, b は定数である.

一般に, 粉体の圧密機構には, 粒子の再配列, 破壊および塑性流動があるが, 後者2つは高压下で顕著になるのに対して, 前者は低压下でも早い段階から大きな効果を表すことが知られている (三輪, 1986; 前野, 1986). 衝撃圧縮の場合は, 瞬間的な外力であることから, 雪粒子の再配列による効果が最も大きいものと思われる. Brown (1980, 1981, 1983) は, 一連の研究により, 積雪粒子の微視的構造から低密度雪の塑性圧縮理論を展開した. しかし, 用いるパラメータが多く衝撃波形を簡便に求めるには適さなかった. ここでは, 低密度雪の圧密過程に限定しており, この場合,

衝撃力積だけを用いた方が実際の衝撃波形を表現できると考えたのである.

3.3 塑性波前面での破碎雪の密度

次に, 塑性波前面での破碎雪の密度 ρ_1 について考える. ρ_1 は破碎されたばかりの雪の密度であるから, ここでは衝突直後に出現した最大衝撃圧 $P_{\max}$ から (4) 式を用いて逆算する. なぜなら, 衝突直後に出現する最大衝撃圧は破碎されたばかりの雪の密度に依存するからである. このとき, 破碎雪の密度は最も小さい. (4) 式を変換すると,

$$\rho_1 = 1 / \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{V^2}{P_{\max}} \right) \quad (7)$$

となる. 図2は, (7) 式に, 川田 (1983) および阿部ほか (1991, 1997) によって得られた壁, 杭および小円板の $P_{\max}$, ρ_0 および V を代入して算出された ρ_1 を ρ_0 と比較したものである. ただし, 本図では ρ_0 , ρ_1 共に 550 kg/m^3 以下に限定した. なぜなら, 雪粒子が球形と仮定した場合の機械的最密充填密度が 550 kg/m^3 であり, これより高密度領域では圧密過程が異なるためである (前野,

図2 衝突速度, 初期密度および最大衝撃圧から求めた塑性波前面での破碎雪の密度 ρ_1 と初期密度 ρ_0 との関係.

Fig. 2 Relationship between the initial snow density ρ_0 and the density of pulverized snow ρ_1 calculated from the impact velocity, the initial snow density and the maximum impact pressure.

1986). 図 2 から ρ_1 と ρ_0 はほぼ直線関係にあることがわかる. すなわち,

$$\rho_1 = C\rho_0, \quad (100 \text{ kg/m}^3 < \rho_0 < 380 \text{ kg/m}^3) \quad (8)$$

と表せる. ここで, C は定数で最小 2 乗法により 1.45 と求められた. C の衝突速度依存性は 4.3 ~ 14.3 m/s の範囲では見られなかった. また, 図の中で湿雪には黒丸を付してあるが, 乾雪と湿雪の相違についても明確な傾向は見られなかった. Sato and Brown (1983) によれば, 湿雪では乾雪よりも圧密しやすいことが知られている. $\rho_0 > 380 \text{ kg/m}^3$ でこの関係からはずれるのは, 上記のように ρ_1 が機械的最密充填密度に近づいたためである. 従って, (8) 式の適用範囲は $100 \text{ kg/m}^3 < \rho_0 < 380 \text{ kg/m}^3$ とする. 木下 (1960) は, 水平な雪面にのせた円板に上から重りを落下させ, 積雪の硬度 H (Pa) を求める方法を考案し, これと密度 ρ (kg/m^3) の間に, $H = 9.81 \times 10^{-6} \rho^4$ という関係があることを報告している. この場合も積雪の密度が 380 kg/m^3 以上になると, 実測硬度は上の関係式からはずれて大きくなる傾向が見られる.

なお, 最大衝撃圧は, $k\rho_0 V^2$ の形で表されることが多いが, (4) 式の右辺の ρ_1 に (8) 式の $1.45 \rho_0$ を代入すれば, 定数 k は 3.2 となる. 阿部ほか (1997) は, 定数 k が受圧板の寸法や形状によらず定数 k が 3 ~ 3.5 となることを報告していることから, これらは, 表記が異なるだけで, 同じことを意味しているのである.

4. 衝撃波形の予測

前項では, 雪塊衝突後の衝撃力積から破碎後の雪の密度を推定する実用式, (8) 式を提案し, 塑性波前面での破碎雪の密度が初期密度の 1.45 倍となることを明らかにした. ここでは, (2), (3) 式および (6) 式を用いて衝撃圧の時間変化を推定する. このとき, 1) 塑性波前面の破碎雪の密度は常に (8) 式で表される, 2) 塑性波前面と受圧面の間の衝撃圧は均等である, と仮定する. 図 3 に計算のフローチャートを示した. 図中右は使用した計算式である.

図 4 (b) は, 壁の衝撃実験 # W-10 (衝突速度

図 3 衝撃波形を求めるためのフローチャート.
Fig. 3 Flow chart for calculating a pressure wave.

8.5 m/s, 初期密度 252 kg/m^3) について, 上記の方法で求めた塑性波速度 U , 圧縮前面での粒子速度 u_1 , 衝撃圧 P の時間変化である. また, 同図 (c) は, 塑性領域の厚さ L および密度 ρ の空間分布の時間変化である. ただし, C は 1.45 とし, 壁面全体に及ぼされた実測衝撃圧の時間変化, すなわち同図 (a) に最もよく対応するように, b を 0.0005 (無次元数) に設定した. (b) の P の始点を (a) の最大衝撃圧発生時に移動させると, 衝撃圧の減衰の様子をほぼ正確に再現していることがわかる. (c) の細い横線は, 塑性波前面で 2.5 ms ごとに生成される塑性領域の厚さの経過を表すが, 衝突初期に形成された破碎雪の厚さは圧密によりしだいに減少している. また, 5 ms ごと

$V_0 = 8.5 \text{ (m/s)}$ $\rho_0 = 252 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ $\rho_1 = 365 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

$b = 0.0005$ $DT = 0.50 \text{ (ms)}$ $TT = 25.0 \text{ (ms)}$

とに示した ρ の垂直分布からは, はじめに破碎された雪 (衝突面に近い雪, $L = 0 \text{ m}$ 付近) ほど, ρ がしだいに増加する様子がわかる. このため, U はしだいに遅くなり, それにつれて P も低下する.

図 5 は, 上と同様に $C = 1.45$, $b = 0.0005$ を用いて, 小円板の衝撃実験 # D-5 (衝突速度 12.8 m/s , 初期密度 184 kg/m^3) について計算した結果である. この場合は実測衝撃波形が大きく振動しているが, 推定衝撃波形は減衰の様子をほぼ再現している. これ以外の波形についても, 同じパラメータを用いて計算してみたが, 結果はほ

図 4 計算衝撃波形と実測衝撃波形の比較 (壁の場合).

(a) 実測衝撃波形に計算衝撃波形 ((b) の P) を重ね合わせたもの. V_0 : 衝突速度, ρ_0 : 初期密度, ρ_1 : 破碎雪密度, b : 定数, DT : 時間間隔, TT : 計算時間.

(b) 計算衝撃波形 P を求める際の塑性波速度 U および塑性波先端での粒子速度 u_1 の時間変化.

(c) 破碎雪全層の厚さ L および 5 ms 毎の破碎雪の密度 ρ の鉛直分布の時間変化 (スケールは右上). 沈降線は 2.5 ms 毎に形成される破碎雪の層厚の時間変化.

Fig. 4 Comparison between the calculated impact pressure wave and the measured impact pressure wave (in case of a wall).

(a) Calculated pressure wave (P in (b)) and measured pressure wave. V_0 : impact velocity, ρ_0 : initial snow density, ρ_1 : density of pulverized snow, b : constant, DT : time interval, TT : total period of calculation.

(b) Time histories of impact pressure P , plastic wave velocity U and particle velocity u_1 at the front.

(c) Time histories of total depth of the pulverized snow L , density profile of the pulverized snow ρ every 5 ms (refer to scale in upper right) and depth of each pulverized snow layer formed every 2.5 ms .

ば良好であった. なお, 実測衝撃波形のピーク出現時までの立ち上がり部分は, 試料衝突面の傾きや機械的, 電氣的な遅れが生じたためと考えられる. また, 実測衝撃波形が振動するのは, 木下 (1957) が指摘しているように, 積雪の破壊が間歇的に起こるためであり, 計算にはこれを考慮しなかったために再現できなかったものと考えられる.

以上のことから, 本方式を用いることにより, 低密度雪の塑性圧縮時の衝撃波形がほぼ予測できると考えられる. 実際の衝突では, 途中で塑性領域の流動が起こり, 上方および左右に飛散するので, この計算結果のように一次元的に発達することはないが, 少なくとも流動化が起こるまでは, ここに示した現象が起こっているものと見られる. ただし, ここで対象としたのは低密度雪であって, 高密度雪にあつては, これをそのまま当てはめることは困難である. 高密度雪については, 圧密しにくいので衝突直後から三次元的な破壊が生じているものと考えられる.

5. まとめ

塑性圧縮理論を雪塊の衝撃現象に応用し, その上で粉碎された雪粒子がその後及ぼされた衝撃

図5 計算衝撃波形と実測衝撃波形の比較 (小円板の場合).

Fig. 5 Comparison between the calculated impact pressure wave and the measured impact pressure wave (in case of a disk).

力積により圧密されるという観点の導入を図り、低密度雪の衝撃圧の時間変化の説明を試みた。今回は1次元の現象を扱ったが、今後は、これを2次元、3次元に拡張する必要がある。また、高速圧縮時の積雪中の空気が衝撃力にどのように関わっているかを明らかにする必要がある。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、当研究所の佐藤威および小杉健二両博士から貴重なご意見を賜った。本研究は、防災科学技術研究所の特別研究で実施されたものである。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 阿部 修・中村秀臣・中村 勉・佐藤篤司・沼野夏生, 1991: 大型野外シュートを用いた雪崩実験, その1—雪塊と杭の衝撃現象—. 雪氷, **53**, 11-20.
- 阿部 修・中村秀臣・佐藤篤司・中村 勉, 1997: 大型野外シュートを用いた雪崩実験, その2—雪塊の衝撃特性—. 雪氷, **59**, 189-199.
- Abele G. and Gow A.J., 1975: Compressibility Characteristics of Undisturbed Snow. U.S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report, **336**, 57pp.
- Abele G. and Gow A.J., 1976: Compressibility Characteristics of Compacted Snow. U.S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Report, 76-21, 47pp.
- Brown R.L., 1980: Pressure Waves in Snow. Journal of Glaciology, **25**, 99-107.
- Brown R.L., 1981: A Method for Evaluating Shockwave Propagation in Snow. Cold Regions Science and Technology, **5**, 151-156.
- Brown R.L., 1983: A Comparison of Unsteady Wave Propagation for Various Snowpack Properties, Annals of Glaciology, **4**, 30-36.
- 川田邦夫, 1983: 小さな円形受圧板に対する雪塊の衝撃力. 雪氷, **45**, 65-72.
- 木下誠一, 1956: 衝撃による積雪の破壊II. 低温科学, 物理篇, **15**, 149-169.
- 木下誠一, 1957: 積雪に於ける変形速度と二つの変形形式 (塑性変形, 破壊変形). 低温科学, 物理篇, **16**, 139-166.
- 木下誠一, 1960: 積雪の硬度. 低温科学, 物理篇, **19**, 119-134.
- Kuroiwa D., Mizuno Y. and Takeuchi M., 1967: Micromeritical Properties of Snow. Physics of Snow and Ice, Hokkaido Univ., vol. I, part 2, 751-772.
- 前野紀一, 1986: 雪の構造と圧密機構. 雪氷の構造と物性, 前野紀一・福田正己編, 東京, 古今書院, 131-155.
- Mcqueen R.G., Marsh S.P., Tylor J.W., Fritz J. N. and Carter W.J., 1970: High-Velocity Impact Phenomena. New York, Academic Press, 293-417.
- 三輪茂雄, 1986: 粉体工学通論. 東京, 日刊工業新聞社, 144-147.
- Napadensky H., 1964: Dynamic Response of Snow to High Rates of Loading. Armour Research Foundation of Illinois Institute of Technology, ARF-4246, Final

- Report, 1-41.
- 佐藤篤司・若浜五郎, 1976: 積雪の塑性波. 低温科学, 物理篇, **34**, 59-69.
- Sato A. and Brown R.L., 1983: An Evaluation of Shock Waves in Unsaturated Wet Snow. *Annals of Glaciology*, **4**, 241-245.
- Sato A., 1987a: Experimental Study of Plastic Wave Velocity in Snow. Report of the National Research Center for Disaster Prevention, **39**, 183-196.
- Sato A., 1987b: Velocity of Plastic Waves in Snow. *IAHS Publ.*, **162**, 119-128.
- Shurova I. E., 1984: A Mechanism of the Interaction of a Moving Snow Mass with a Fixed Obstacle (Translation). *Soviet Avalanche Research - Avalanche Bibliography Update: 1977-1983, Glaciological Data, Report GD-16, World Data Center for Glaciology (Snow and Ice)*, 129-152.
- 庄野安彦, 1988: 超高速衝撃. 衝撃工学, 林卓夫・田中吉之助編著, 東京, 日刊工業新聞社, 204-205.
- Wakahama G. and Sato A., 1977: Propagation of a Plastic Wave in Snow. *Journal of Glaciology*, **19**, 175-183.
- 吉田順五, 1974: プラウ除雪の理論 I. 低温科学, 物理篇, **32**, 39-53.

Snow avalanche chute experiments III: Prediction of impact pressure waves for snow blocks with low density

Osamu ABE¹⁾, Shun'ichi KOBAYASHI²⁾, Atsushi SATO¹⁾,
Hideomi NAKAMURA³⁾ and Tsutomu NAKAMURA⁴⁾

1) *Snow and Ice Research Group, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Shinjo, 996-0091*

2) *The Research Institute for Hazards in Snowy Areas, Niigata University, Niigata, 950-2181*

3) *Hirooka-naka, Harunomachi, 781-0302*

4) *Kotorizawa, Morioka, 020-0104*

Abstract: A previous paper investigated the impact of snow blocks against walls, posts and disks. However, impact pressure waves remain to be elucidated. In this paper, the impact pressure waves of snow blocks against a wall and a disk are simulated using Rankine-Hugoniot's relation with a new aspect. The new aspect is in the densification of pulverized snow in a plastic region, i.e., pulverized snow is compressed by the impulse after impact. Using this method, an impact pressure wave can be calculated from the impact velocity and the initial snow density up to 380 kg/m³. In this case, the density of pulverized snow at the front of the plastic wave is estimated from the impact velocity, the initial snow density and the maximum impact pressure. The results show that the density of pulverized snow at the front jumps to 1.45 times the initial snow density.

(2001年8月1日受付, 2001年12月13日改稿受付, 2001年12月14日受理, 討論期限2002年7月15日)