



Title	雪崩衝撃力の周波数解析による大規模雪崩の内部構造
Author(s)	西村, 浩一; NISHIMURA, Kouichi; 前野, 紀一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 46, 91-98
Issue Date	1988-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18550
Type	departmental bulletin paper
File Information	46_p91-98.pdf



雪崩衝撃力の周波数解析による大規模雪崩の内部構造*

西村 浩一・前野 紀一

(低温科学研究所)

川 田 邦 夫

(富山大学理学部)

(昭和62年10月受理)

1. はじめに

雪崩の先端部分の速度が、走路を滑走するにもなつて変化する状況は、これまでも映像記録等をもとに、しばしば解析が行われてきた。しかし、雪崩の内部構造は極めて複雑であるから、内部速度も先端部から末端部に至る間で大きく変動していると考えられる。雪崩内部の速度変化を直接観測した例としては、混合型の雪崩を対象に、ドップラーレーダを用いて行われた測定結果が Salm and Gubler¹⁾ により報告されているにすぎない。一方、内部速度を間接的に求める試みは、Schaerer *et al.*²⁾, Shimizu *et al.*³⁾ らによって行われた。彼らは、同一の雪崩に対して複数の地点で記録された衝撃力または地震動の記録をもとに、対応する波形のピークを検出するという方法を用いた。しかし対応する波形のピークを選択する際に任意性を回避することが難しいこと、また時間的・空間的に連続した速度情報を得られない等の問題があり系統的な解析は進んでいないのが現状である。

雪崩の密度に関するデータはさらに少ない。わずかにデブリの観測結果と雪崩の厚さから求められた値が、Schaerer⁴⁾ により報告されているにすぎない。

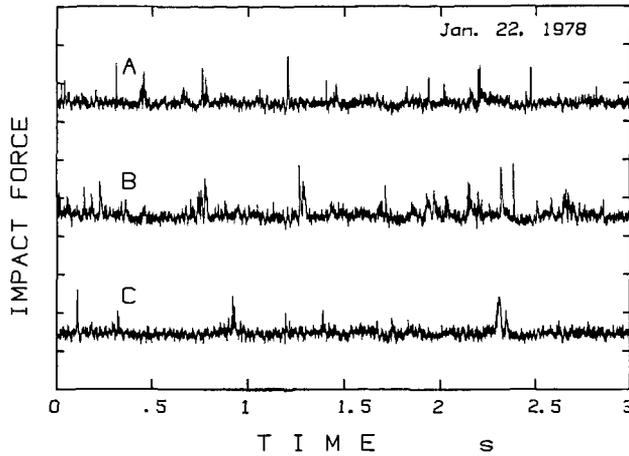
本論文では、雪崩内部の構造を知る上で極めて重要な手がかりとなる内部速度・密度に関する情報を、雪崩衝撃力のデータから客観的に算出する方法と結果を報告する。解析には、1971年から10年間、富山大学と北海道大学により実施された、「高速雪崩の破壊力の研究(研究代表者:中川正之⁵⁾)」で収録された黒部峡谷志合谷の雪崩衝撃力データを用いた。

2. 解析方法

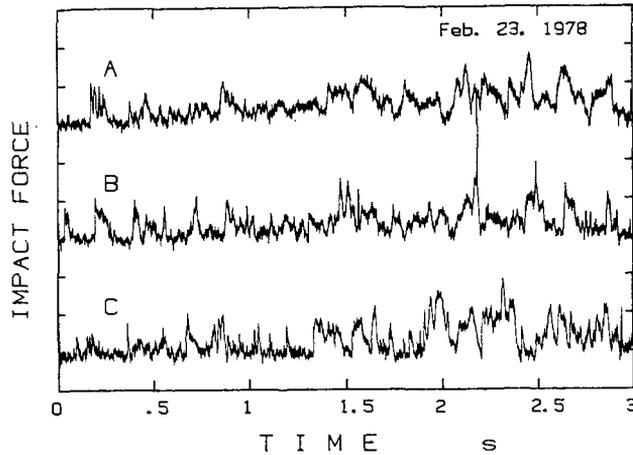
2.1 内部速度

雪崩衝撃力の測定は、直径10 cm、厚さ1 cmの鋼性の円形受圧板を付した3台の荷重変換器を用いて行われた。データは温度、圧力などと共に磁気テープに自動的に記録、保存された。3台の荷重変換器を、それぞれA、B、Cとすると、雪崩の平均的進行方向に沿う測定点間の距離はA-B間が45 cm、A-C間は485 cmであった。使用機器、設置場所など測定方法に関する

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3097号



第1図 黒部峡谷志合谷における雪崩衝撃力の記録例(1)



第2図 黒部峡谷志合谷における雪崩衝撃力の記録例(2)

詳細は、中川⁵⁾を参照されたい。

第1図と第2図は、それぞれ1978年1月22日と2月23日に得られた、A, B, C, 3点での雪崩衝撃力の記録例である。いずれも、後述する方法でA-D変換した値を1ms毎に図示したものである。2例とも衝撃力は約10秒間継続して観測されたが、図上にはこのうち前半の3秒分のデータを示した。第1図の波形は急激に立ち上がった後、急速に零点付近まで復帰するスパイク状の波形の集合により構成されている。これに対し、後者は急激な立ち上がりを示した後は比較的長周期の成分を伴った変動を繰り返している。本論文の著者の一人である川田⁶⁾は、これらの波形をそれぞれタイプ1とタイプ2に分類し、室内および野外実験の結果と比較検討した上で、前者は直径20~50cm程度の雪塊が個々に衝突した場合、後者は雪塊の密な集団と流動状態の雪が衝突した場合であろうと推測した。今回は、このタイプ1とタイプ2を代表する2日間の雪崩衝撃力データを用いて以下に述べる解析を行った。

雪崩衝撃力波形から、雪崩の内部速度を算出するフローチャートを第3図に示す。磁気テープに記録された3点の衝撃力データは、まずA-D変換器(マイクロサイエンス, DAS-1898

BPC) により 1 ms 毎にデジタル値に変換される。続いてローパスフィルタ (0~300 Hz) を用いて高周波ノイズ成分を除去した上で、FFT 法により周波数解析を行う。

約 1 秒間 (厳密には 1.024 秒) のデータについて求めた A 点と B 点間および A 点と C 点間の相互相関関数の計算例を、第 4 図に示す。A 点と B 点あるいは A 点と C 点における雪崩衝撃力の時系列波形をそれぞれ $x(t)$ と $y(t)$ とすると、 $x(t)$ と $y(t)$ の間の相互相関関数 $C_{xy}(\tau)$ は、

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)}$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt$$

と定義される⁷⁾。ここで t は時間、 T は観測時間、 τ はずらし時間である。実際には、まず信号 $x(t)$ と $y(t)$ のフーリエ変換を 1024 個のデータについて FFT アルゴリズムを用いて実施し、得られたクロス・スペクトルを逆フーリエ変換することによって相互相関関数を求めた。計算はすべて小型のコンピューター (NEC PC-9801) で行われた。

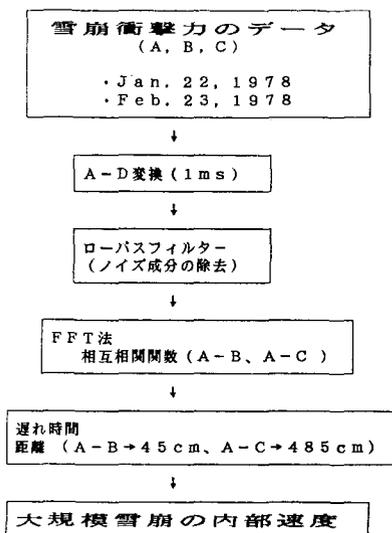
第 4 図において雪崩が A 点から B 点または A 点から C 点までほぼ同じ状態を保持して流れていたと仮定すると、計算された相互相関関数が極大になる時の遅れ時間 (ずらし時間) と 2 地点間の距離から、波形の平均的な進行速度、すなわち雪崩内部の流速を算出することができる。第 4 図に示すように、A-B 間 (実線) の場合強い相関を示すピークは単一であるが、点線 (A-C 間) で示した例

のようにピークが複数現れるケースが、実際の解析の際にも数例出現した。各々のピークが有意な速度情報反映しをしていると考えることもできるが、今回は、機械的に相互相関の値が最大となる遅れ時間を用いて速度を求めた。

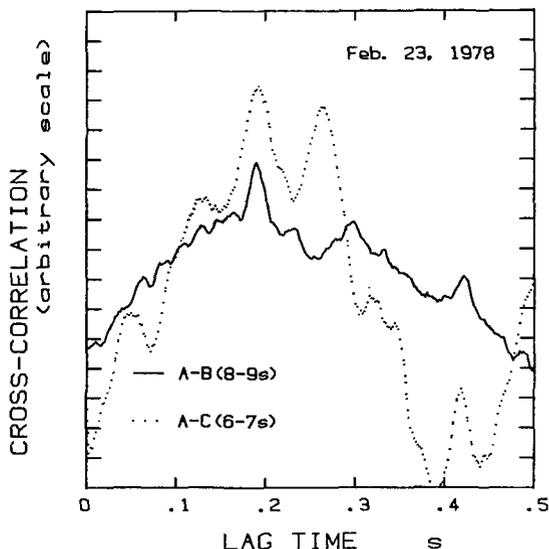
2.2 内部密度

雪崩衝撃力の大きさ (P) は、一般に次の形で表現される。

$$P = k\rho v^2 \tag{1}$$



第 3 図 雪崩衝撃力データから内部速度を算出するためのフローチャート



第 4 図 A, B 点の衝撃力波形から求めた相互相関関数の例

ここで ρ と u は雪崩の密度と速度であり、 k は無次元の定数である。もし雪崩が非圧縮性の流体であると仮定すれば、 k は $1/2$ である。また運動量の保存だけを考慮した場合は $k=1$ となる。一方雪崩が測定部に衝突した瞬間より、測定部の前面で雪の圧縮が開始され、上流方向に塑性波が伝播すると考えると、塑性波面前後における質量保存と運動量保存の条件から、衝撃力と流速の関係は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P &= \rho_1 \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \right) u^2 \\ &= \rho_1 u^2 \left(1 - \frac{U}{u} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $\rho_1 (= \rho)$ と ρ_2 は、それぞれ塑性波通過前後の雪の密度、 U は塑性波の伝播速度である。但し、塑性波の通過後、つまり受圧板前面では雪の速度は零と仮定した。

雪崩を想定した雪氷混相流実験の結果^{8,9)}によると、流動状態にある雪の流れが及ぼす衝撃力は、おおよそ $k=1$ を代入した(1)式で近似される。一方、雪塊を用いた衝撃力実験では k は1より大きくなるという報告がある⁹⁾。

そこで、衝撃力波形の示す様相から、雪塊の密な集団と流動状態の雪が衝突していると考えられる2月23日の例について約1秒毎に衝撃力の平均値を求めた。そしてこの値と先に述べた方法により算出された平均速度を、 $k=1$ とおいた(1)式および(2)式に代入し、雪崩内部の密度構造を求めることを試みた。

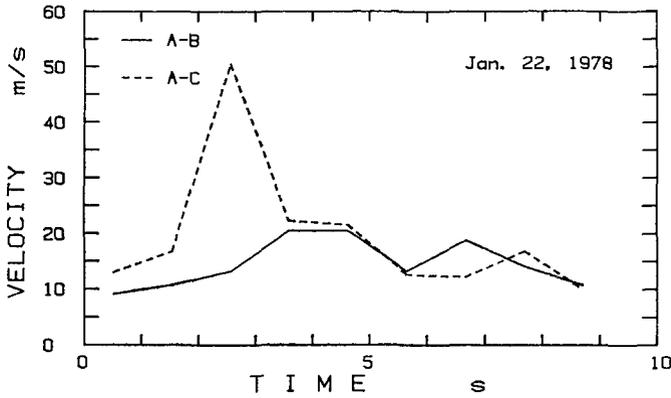
3. 解析結果と考察

3.1 内部速度

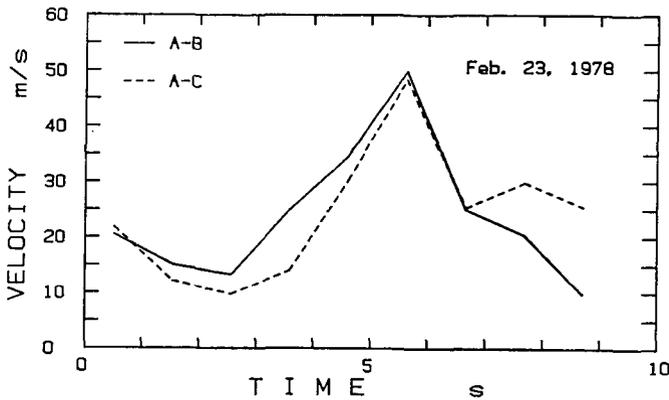
1978年1月22日と2月23日の衝撃力の記録を用いて、約1秒毎にA-BならびA-Cに間の相互相関関数を計算し、雪崩内部の速度変化を求めた結果を第5図と第6図に示す。いずれも大規模雪崩の複雑な内部構造を反映して速度が時間と共に大きく変動している。この時間変動は、固定された観測点から雪崩を眺めるというオイラー的視点に立った場合には雪崩内部構造の空間的変動に対応する。

第5図では、A-B間のデータからは、先端から2~3秒後に50 m/sを越える速度が算出されるのに対し、A-Cから導かれた速度は10 m/s程度で両者の差が大きい。この原因は、B、Cの測定点に同じ状態の雪崩が衝突しなかったためと考えられる。つまり、雪崩の構造が不均一であったことを示しており、このときの衝撃力の波形が雪塊の個々の衝突により形成されたという川田⁹⁾の推論を支持する。ただし、この時刻以外では、A-B、A-Cから求めた内部速度の差は10 m/s以下であった。

一方、第6図に示した2月23日の雪崩は、先端付近で約20 m/sの速度を持ち、その後10 m/s程度までやや減速している。そして5~6秒後、つまり雪崩の中央付近に最も高速な部分が存在したことがわかる。また後半、つまり雪崩の末端部分を除いては、A-B、A-Cの結果に大きな差異がなく、内部構造が比較的均一であったことが推測される。この結果もまた雪塊の密な集団と流動状態の雪が衝突しているという川田の推論に矛盾しない。



第5図 大規模雪崩の内部速度 (1)

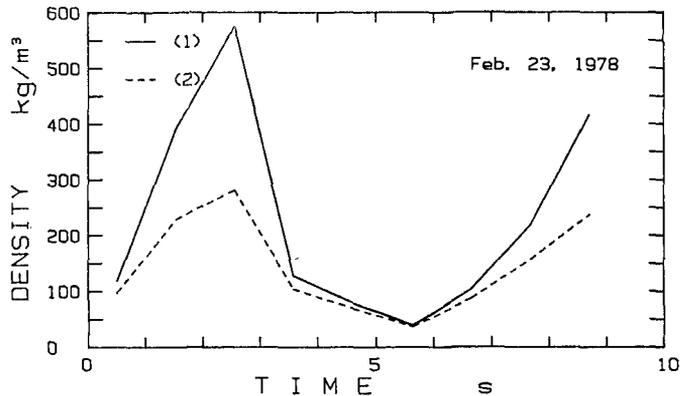


第6図 大規模雪崩の内部速度 (2)

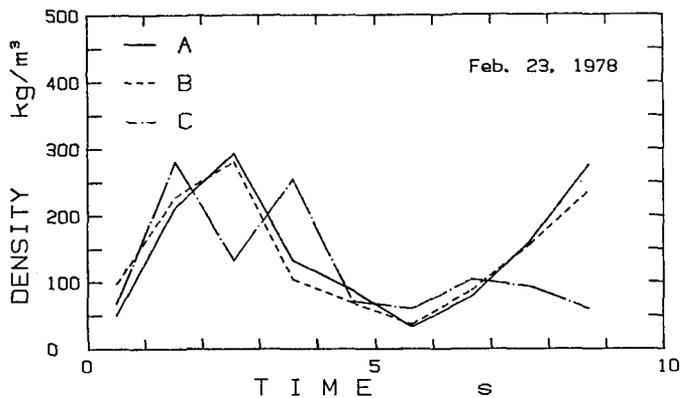
3.2 内部密度

1978年2月23日の衝撃力と速度から雪崩の内部密度の変動を求めた結果を第7図に示す。全体に(2)式を用いた場合に比べ(1)式の方が密度が大きく算出される傾向がある。特に先端部から約2~3秒の時点では、(1)式から導かれた密度が雪の機械的充填の極限 (550 kg/m^3) を上回る。これは物理的に考えにくいため、以下では(2)式を用いて計算を行う。

A, B, Cの各測定点で得られた衝撃力の値について、(2)式を用いて雪崩内部の密度を求めた結果が第8図である。各点から算出された値にはややバラツキはみられるものの、この大規模雪崩の内部密度が約 $50 \sim 300 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあったこと、さらにその値が時間と共に、つまり雪崩内部で大きく変動していることがわかる。また、第6図に示した内部速度の変化の様子と合わせて検討すると、 $10 \text{ m/s} \sim 20 \text{ m/s}$ という比較的低い速度の領域では密度が高いのに対し、速度が大きくなるとしだいに密度が低くなることがわかる。これは測定された衝撃力の大きさが内部速度の変化に比べて大きく変化してしないという測定結果を反映している。第8図の結果を Schaefer⁴⁾ がデブリ観測と雪崩の厚さから求めた乾燥雪崩の密度の値 ($60 \sim 90 \text{ kg/m}^3$) と比較すると、低速の部分では前者の方が大きいですが、内部速度の大きい範囲ではほぼ一致する。



第7図 大規模雪崩の内部密度
(1)式と(2)式から求めた値の比較



第8図 大規模雪崩の内部密度

4. おわりに

1978年に黒部峡谷志合谷で記録された雪崩衝撃力データの波形解析を行った結果、大規模雪崩の内部構造に関する以下のような知見が得られた。

(1) 3地点で得られた衝撃力の連続記録について、相互相関関数を求め、相関が極大となる時の遅れ時間と測定点間の距離から計算を行った結果、このときの大規模雪崩内部の速度変化が明らかになった。

(2) A-B, A-Cから求められた雪崩の内部速度を比較検討することで、雪崩内部の空間的な不均一性の知見が得られた。その結果は、大規模雪崩の内部構造に関する川田⁶⁾の推論を支持する。

(3) 内部速度と衝撃力の値を用いて雪崩の密度を算出した。その結果、大規模雪崩の密度は50~300 kg/m³の範囲で空間的に大きく変動していること、また内部速度の大きい部分では低速部に比べ密度が低いことがわかった。

Schaerer and Salway²⁾によれば、雪崩は、高密度で雪崩の主要部を形成する雪面に近い部分、その上方で粉雪と雪塊が混合している部分、さらに雪煙という3領域から構成されてい

る。一方、雪崩衝撃力の波形の違いは、高さの違いに基づいた内部構造の情報を反映した結果であることが、模型雪崩実験⁹⁾から推察されている。本論文では、解析にあたってタイプ1とタイプ2の波形を選択したが、速度変化等の違いに基づいて内部構造を深く議論するまでには至らなかった。黒部峡谷志合谷においては、今回解析に使用した2例のほかにも多くの雪崩衝撃力のデータが収録されている。今後は、解析手法にさらに改良を加えた上で、これらのデータを用いてより詳細な解析を行い、大規模雪崩の内部構造を明確にしていく予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたっては、黒部峡谷志合谷で実施された「高速雪崩の破壊力の研究」⁵⁾で得られた貴重なデータを利用させていただきました。この場をお借りして、関係者の方々に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Salm, B. and Gubler, H. 1985 Measurement and analysis of the motion of dense flow avalanches. *Annals of Glaciol.*, **6**, 26-34.
- 2) Schaerer, P. A. and Salway, A. 1980 Seismic and impact monitoring of flowing avalanches. *J. Glaciol.* Vol. **26**, No. **94**, 141-151.
- 3) Shimizu, H. and others 1980 A study on high-speed avalanches in the Kurobe canyon Japan. *J. Glaciol.* Vol. **26**, No. **94**, 179-189.
- 4) Schaerer, P. A. 1975 Friction coefficients and speed of flowing avalanches. *IAHS-AISH Publ.* No. **114**. 425-432.
- 5) 中川正之 1979 高速雪崩の破壊力の研究. 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No. **A-53-2**, 62 pp.
- 6) Kawada, K. 1986 Studies on the dynamic characteristics of large-scale avalanches observed at Kurobe canyon, Japan. 北海道大学審査学位論文.
- 7) 日野幹雄 1977 スペクトル解析. 朝倉書店, 300 pp.
- 8) 西村浩一・成瀬謙二・前野紀一 1987 模型雪崩実験装置による衝撃力の測定. *自然災害科学*, **6-2**, 30-36.
- 9) Nishimura, K. and Maeno, N. 1987 Experiments of snow-avalanche dynamics. Avalanche formation, movement and effects, (Proc. Davos Symp. Sept. 1986), IAHS Publ. No. **162**, 印刷中.

Summary

Internal structures of large-scale avalanches were investigated from frequency analyses of the data of impact force data, which were obtained at the Kurobe canyon in 1978. Two wave records were analyzed using new techniques. One record may correspond to the collision of snow blocks and the other to the collision of fluidized snow and many snow blocks.

The results are as follows:

(1) The cross-correlation function was calculated from some series of impact force data observed at three points: A, B, C. The internal velocities of large-scale avalanches were calculated every second from the lag time, that gave the highest correlation, and the

distance between two measuring points. It was revealed quantitatively that the internal velocities changed from 10 m/s to 50 m/s, varying with time in these avalanches.

(2) Comparisons of internal velocities obtained from two types of waves implied that the latter has more uniform internal structures than the former.

(3) The internal densities of large-scale avalanches were calculated every second from the magnitude of impact forces and the mean internal velocities. The results showed that the density ranged from 50 to 300 kg/m³ and changed with time in the same manner as the internal velocities. Furthermore it was suggested that the bulk density is lower in high velocity regions than in low velocity regions.