

雪中への音の伝搬特性

Sound propagation characteristics of snow packs

榊原 健一（北海道医療大学）、牧 勝弘（愛知淑徳大学）、
山川 仁子（愛知淑徳大学）、天野 成昭（愛知淑徳大学）

Ken-Ichi Sakakibara, Katuhiro Maki, Kimiko Yamakawa, Shigeaki Amano

1. はじめに

雪崩のレスキューにおいて、埋没者の探索にはビーコンが用いられることが通常である。山岳ユーザは、山行には必ずビーコンを携帯し、雪崩事故遭遇時は、コンパニオンレスキューにおいて、ビーコンを用い、埋没者の埋没位置を迅速に特定することが、埋没者の救命には不可欠である。しかしながら、ビーコン不携帯の雪崩事故も、依然として存在する（例：2014年4月18日に発生したエベレストでの雪崩事故。13名死亡、3名行方不明）。

ビーコン不携帯時の雪崩レスキューの方法として、日本では、1970年代に始められたスカッフ・アンド・コールという音を用いる搜索方法がある¹⁾。スカッフ・アンド・コールは、雪面にある柔らかい雪を手ではらい、雪面直上から埋没者に大きな声で呼びかけ、その後に、雪面に耳を近づけて雪中からの音を聴き、埋没者の埋没位置を探索しようとする方法で、国内の様々な雪崩講習会で、これまで長きにわたって、講習されてきた方法である。また、カナダの1984—1996年の雪崩事故データでは、完全埋没者を、埋没者の発する音を手がかりに救出をおこなったという事例が8件報告されている²⁾。

しかしながら、空気と積雪とは、音響インピーダンスは大きく異なり³⁾、細かい雪による空隙率の低いデブリでは、積雪の表面から埋没者、または、埋没者から積雪表面への音の伝搬は、積雪の上下で、反射、吸収が生じ³⁻⁸⁾、搜索者と埋没者の間の音によるコミュニケーションは、容易ではない。

本稿では、(1)自然積雪；(2)踏み固めることによって密度を高めた積雪（細かい雪によるデブリの模擬）；の2種類の異なる積雪について、雪面と雪中の間の音の伝搬特性を明らかにし、また、様々な音源を用いて、埋没者の聴取の可能性を分析し、ビーコンを持たない埋没者に対する、音による有効な搜索方法の検討を行う。

2. 実験

積雪の音響特性の計測は、2012年2月22日、23日に、北海道石狩郡当別町青山地区の開かれた平地で実施した。2月22日の積雪深は、270 cm、両日も降雪は無かった。音響計測用に、幅1.5 m、奥行き2.5 m、深さ1.3 mのピットを掘った。

音響計測には、TSP（time-stretched pulse）⁹⁾を用い、信号再生には、フルレンジのアクティブスピーカ（BEHRINGER C50A）を用い、振動面を下向

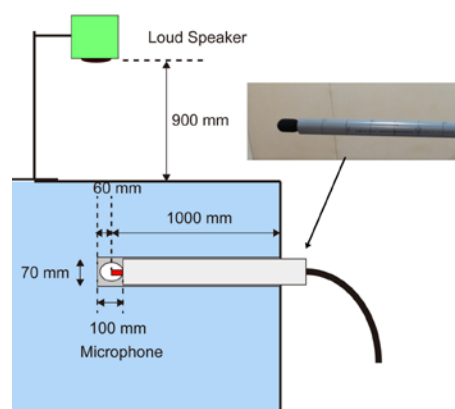


図1 計測方法の概略図。ウレタンで充填した塩ビ管の先端にマイクを取り付け雪中に挿入。

きに、雪面から 90 cm 上方に設置し、録音には雪中にマイクロホン (DPA4006C, 圧力コンデンサ型) を、雪中にピットの側面から 100 cm 内部の地点に留置し、リニア PCM レコーダ (TASCAM DR-100MKII 等) を用い、サンプリング周波数 48 kHz, 量子化ビット数 16 bit で収録した (図 1)。

3. 結果

3.1 自然積雪

自然積雪状態の積雪構造は、雪面より、0～-20 cm は、新雪、粒径 0.3 mm、ハンドハードネステストによる硬度 F、-20～-50 cm は、こしまり雪、粒径 0.5～0.7 mm、硬度 4F、-50～-85 cm は、こしまり雪、粒径 0.5～1.0 mm、硬度 1F、-85～-90 cm は、こしまり雪、粒径 0.5 mm、硬度 4F、-90～-110 cm は、しまり雪、粒径 1.0 mm、硬度 1F であった。プッシュプルゲージを用いた硬度測定、および密度、温度測定の結果を図 2 に示す。なお、当日の気温は、-1.4～0.3℃であった。

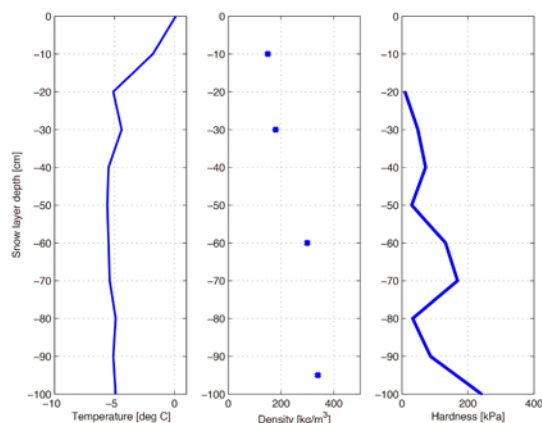


図 2 自然積雪条件での積雪データ

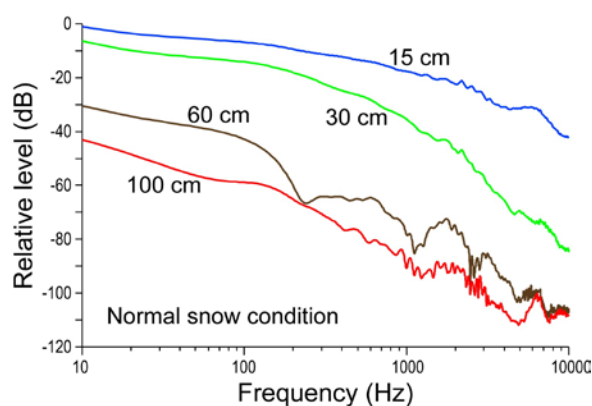


図 3 自然積雪条件での音の減衰特性

図 3 に、雪面 (正確には 4 cm 上方) を基準とした音の減衰特性を示す。雪面から深い場所の方が、音の減衰量は大きくなっている。例えば、1 kHz では、-15 cm で、18 dB、-30 cm で 35 dB、-60 cm で、78 dB、-100 cm で 90 dB となっている。

また周波数が高い方が、減衰量は大きくなっている。例えば、-60 cm では、10 Hz は 30 dB であるが、10 kHz では 100 dB となっている。

3.2 デブリ模擬条件

自然積雪条件での測定終了後、雪面を強く踏み固め、翌日に計測を行った。当日のアメダス石狩データでは、夜中は -5.4℃ (0300) まで下がった。計測時の日中の気温は、1.5～5.0℃であった。

圧密焼結により、雪は全体的にこしまり雪、しまり雪へと変わった。0～-10 cm は、硬度 1F、-10～-18 cm では、硬度 4F、-18～-58 cm では硬度 1F、-58～-62 cm では硬度 4F、-62～-70 cm では硬度 1F、-70～-80 cm では硬度 P であった。

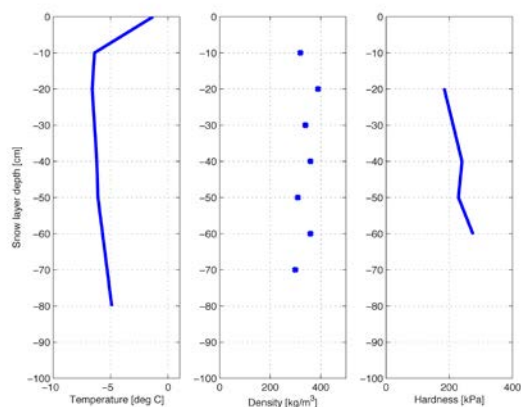


図 4 デブリ模擬条件での積雪データ

プッシュプルゲージを用いた硬度測定、および密度、温度測定の結果を図4に示す。硬度に関しては、雪面から地面に向かって硬度が増し、雪面から-100 cmの積雪の密度は、 $300 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ で、デブリの平均密度と比較すると、下限に近い条件であった¹⁰⁾。なお空隙率は、測定していない。

図5に、デブリ模擬条件の積雪の減衰特性を示す。自然積雪と異なり、減衰量の周波数依存性が低く、特に100 Hz以上では、60 dB程度の減衰率となっている。

また、雪面からの深さに関しては、-30 cmと-60 cmでは、5 dB程度しか差がなく、深さに依存して減衰量の大きくなる自然積雪とは異なる特性を示している。

デブリ模擬条件において、異なる音源を用いて、積雪内での周波数特性を測定した。用いた音源は、(i)足踏み；(ii)スキーストックで雪面を突き刺す；(iii)ホイッスル；である。足踏みは、男女各1名によるデータを記録した。

図6に足踏みと、スキーストックで突き刺したときの雪面から-30 cmでの周波数特性を示す。どちらの音源の場合も、高域に向かって単調に減衰している。3 kHz以上では、ストックで突いた方が、足踏みよりも大きくなっている。また、点線で示される最小可聴閾値よりも、広い周波数範囲において、40 dB以上上回っている。

図7に、足踏みの位置を、マイクの直上から水平に動かした場合の周波数特性を示す（マイクは雪面より-30 cm 足踏みは男性）。180 cm離れていても、1000 Hz以下の周波数帯域では、最小可聴閾値よりも20～30 dB大きい。

図8に、2つの異なる種類のホイッスルを雪面より90 cm上方で吹き、-30 cmで計測した音の周波数特性を示す。Type Aのホイッスル(ACME社製 Tornado No 636)は、4000 Hzで、30 dB以上、最小可聴閾値を上回っている。Type Bのホイッスルは筒型の小型のホイッスルで、10 dB程度最小可聴閾値を上回るに留まった。

4. 考察

音響インピーダンスの異なる、空気と積雪、特にデブリとして堆積した高密度の積雪との

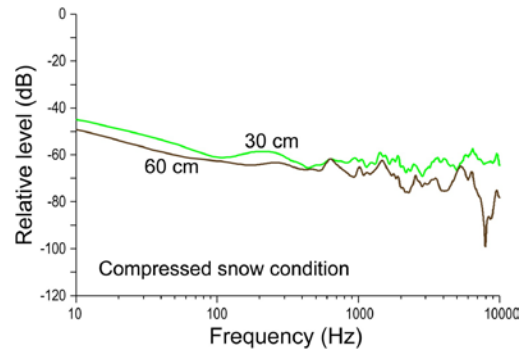


図5 デブリ模擬条件での音の減衰特性

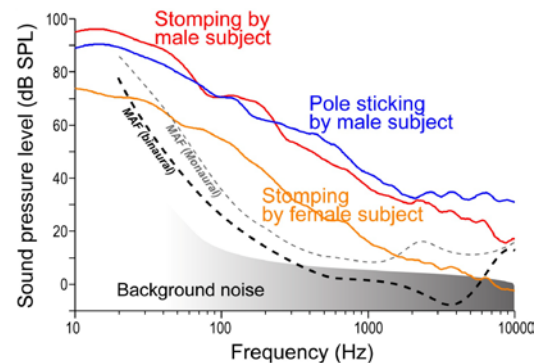


図6 デブリ模擬条件での、-30 cmでの各種音源の周波数特性。点線は最小可聴閾値(MAF)を示す。背景雑音は、環境雑音、電気雑音すべてを含む。

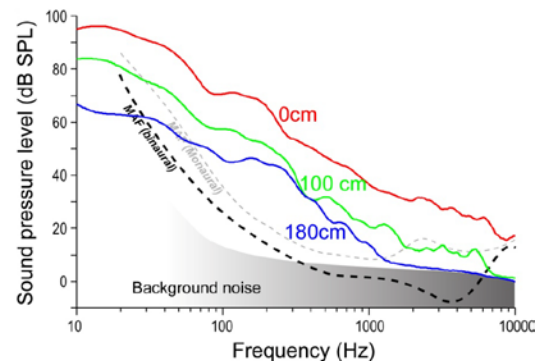


図7 デブリ模擬条件で、水平方向に異なる位置で男性が足踏みした場合の雪面から-30cmでの音の周波数特性

間を伝搬する場合、これまでの研究でも指摘されているように、音声などの気導音は、反射や吸収によって、大きく減衰する。本研究では、デブリを模擬した高密度の積雪の場合、減衰は周波数によらず大きい。搜索時に強い風による雑音加わった場合、埋没者は、搜索者の音声を聴取することは困難であるといえる。しかしながら、雪面を直接振動させる足踏みや、スキーストックでの突き刺しの音は、埋没者は、十分に聴き取ることが可能であることが示された。特にスキーストックによる突き刺しは、搜索側の労力も小さく、リズムカルに突くなどすることにより、搜索者の接近を埋没者に示す有効な方法であると考えられる。足踏みも、男性搜索者であれば、-100 cm より上の埋没であれば、2 m 水平に離れた地点でも、埋没者は聴取可能であると考えられる。救難用のホイッスルは通常、人間の聴力の感度が最も高い周波数の 4000 Hz にピッチを合わせてあるが、十分に聴取可能な音圧レベルであるといえる。

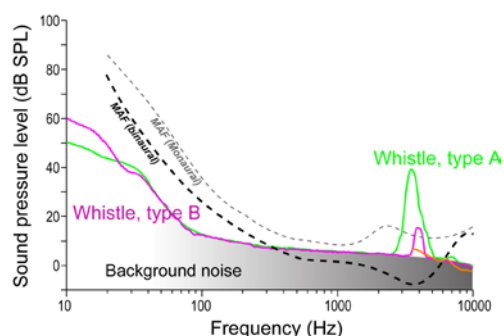


図 8: デブリ模擬条件におけるホイッスルを音源とした場合の、-30 cm での周波数特性

5. おわりに

雪中の音の伝搬特性を自然積雪、デブリ模擬の 2 条件で計測し、雪崩埋没者に雪面からの音がどのように聴こえるかについて、検討をおこなった。スキーストックによる突き刺し、足踏み、ホイッスルなどは、埋没者にも十分に聴こえることが示唆された。

【参考文献】

- 1) 新田 隆三, 1986: 雪崩の世界から, 改訂増補版, 古今書房.
- 2) B. Jamieson and T. Geldsetzer, 1996: *Avalanche accidents in Canada*, Vol. 4
- 3) T. Ishida, 1965: Acoustic properties of snow, *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, **A20**, 23-63.
- 4) 大浦 浩文, 1952: 積雪中の音速, *低温科学*, **9**, 171-178.
- 5) 石田 完, 小野寺 重男, 1954: 積雪の吸音率について, *低温科学, 物理編*, **12**, 15-24.
- 6) 高田 実, 大河内 重信, 那須 伝夫, 1954: 雪の吸音率と雪面上の音の伝播について, *日本音響学会誌*, **10**, 23-27.
- 7) 大垣 正勝, 竹村 英夫, 1990: 積雪中の音速と垂直入射吸音率の測定, *日本音響学会誌*, **48(9)**, 723-727.
- 8) T. Iwase, Y. Murotuka, K. Ishikawa, and K. Yoshihisa, 2008: Measurement of acoustic impedance and their data application to calculation and audible simulation of sound propagation, *Acoust. Sci. & Tech.*, **29(1)**, 21-35.
- 9) Y. Suzuki, F. Asano, H.-Y. Kim, and T. Sone, 1995: An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses, *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**, 1119-1123.
- 10) 前野 紀一, 黒田 登志雄, 1986: 雪氷の構造と物性, 基礎雪氷学講座 1, 古今書院.