HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪の音響特性
Author(s)	石田, 完
Citation	低温科學. 物理篇, 22, 59-72
Issue Date	1964-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18007
Type	bulletin (article)
File Information	22_p59-72.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Tamotsu ISHIDA 1964 Acoustic Characteristics of Snow Layer. *Low Temperature Science, Ser. A, 22.* (With English Summary p. 72)

積　雪　の　音　響　特　性*

石　田　　完
(低温科学研究所　気象学部門)

(昭和 38 年 12 月受理)

I. ま え が き

積雪の音波に対する性質で先ず気のつくことは吸音性のよいことである。これは普通の積雪が，しんせつからしまりゆきまで密度が 0.1 から 0.5 程度であること，云いかえると積雪の単位体積中に含まれる空気の体積，すなわち多孔度が 89% から 44% であると云う積雪の多孔性によるものである。積雪の吸音率については今までもいくつかの報告[1)-5)]があるが，投射された音のエネルギーが大部分積雪内に透入した後，どのように減衰するかと云うことについて今回測定を行なった。積雪と一般の音響材料との違いは，その物質が氷と云う単一のものでありながら構造的には非常に多様性のあることである。例えば同じ密度の雪でも，雪粒の大きさ形の違い，あるいは雪粒をつなぎ合わせている氷橋の構造的な違いによって音響特性は大きく異なってくる。しかし積雪内の音波の減衰は氷自体の振動によるより，主として積雪内の空気の熱伝導や粘性によって支配されるので，温度の影響は少ない。温度変化によって減衰特性が変るとすれば，温度変化によって積雪内の構造が昇華変形等で変化する二次的な影響によるものである。それで測定は −5〜−15°C の戸外温度で行ない，雪質の違い，特に密度による分類より通気抵抗の違いに注目して実験を行なった。

II. 積雪層の透過損失

材料の遮音の程度を数量的に表わすのに透過損失 (transmission loss, 普通 TL と略称する) が用いられる。この定義は

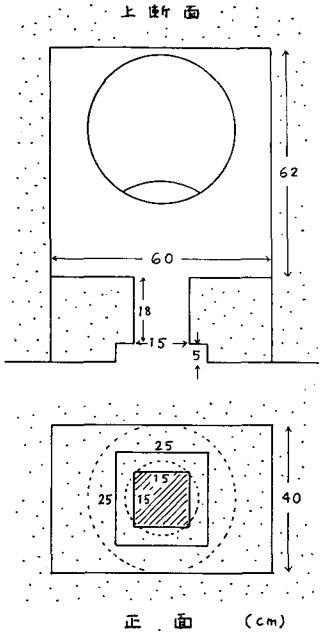
$$TL = 10 \log_{10} \frac{\text{投射音の強さ}}{\text{透過音の強さ}} \text{ (db)} \qquad (1)$$

であるが，投射音の強さと透過音の強さを直接測定することはむずかしい。積雪層の TL を測定するには次のような方法を用いた。

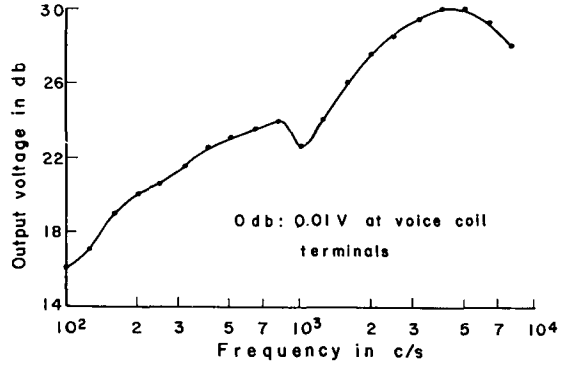
深さ約 1.5 m の積雪に幅 1 m の溝を地面まで掘り，その積雪の垂直断面壁のほぼ中央に四角な穴をあける。穴の奥行は 85 cm，幅と高さは夫々 60 cm，40 cm である。この横穴の前面に厚さ 23 cm の積雪ブロックで蓋をし，結極，積雪内に 62×60×40 cm の空洞を作ってこれを音源室とする。音源は直径 20 cm の可動線輪型拡声器で，直径 40 cm の球形の密閉箱に取りつ

* 北海道大学低温科学研究所業績　第 660 号

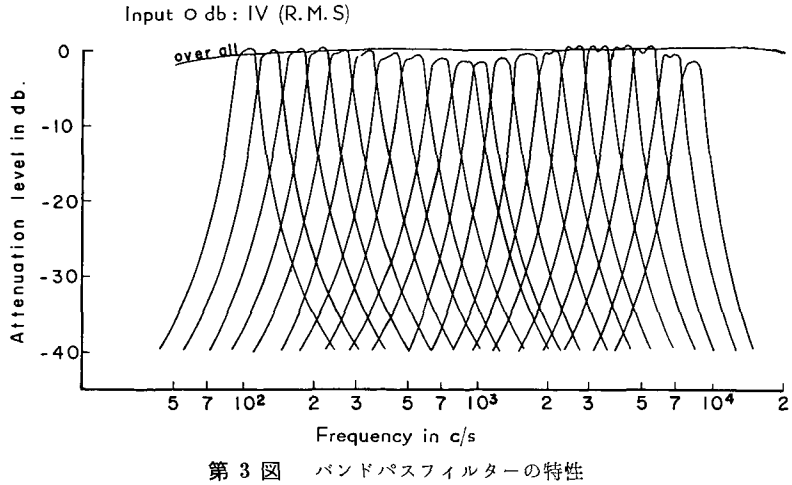
けてある。これを音源室におさめて音を出し，殆んど音の漏れがないことを確かめた後，音源室前面の積雪ブロックの蓋の中央に 15×15 cm の四角な穴をあけて音の通路とする。この正面に試料の積雪層を取りつけるため，蓋には更に深さ 5 cm，縦，横 25 cm の四角な窪みをつける。この音源室を上から見た断面図は第 1 図のようになる。ここの積雪の状態は表面から 20 cm 以下では密度 0.3～0.4 の殆んど一様なしまりゆきであった。25×25 cm の板状の試料はなるべく一様な構造となるように積雪の水平層を用い，厚さは 2 cm から 10 cm まで変えた。従って，ここで得られた積雪の TL はすべて積雪の上下方向に音が透過する場合であり，また音源室の構造から音は試料に殆んど垂直に投射する場合である。測定中の温度は外気温で −7°C であった。音の強さは小型クリスタル・マイクロホンにより，騒音計の C 特性で測定した。投射音の強さは音源室側の試料表面で，また透過音の強さは試料の外側の表面で測った。試料の外側は 1 m へだてて積雪壁があるが，上は外気に開いているので殆



第 1 図　積雪試料の透過損失測定装置



第 2 図　音源に用いた白色雑音の周波数特性



第 3 図　バンドパスフィルターの特性

んど無反響の状態であった。投射側の音の強さのレベルを L_1, 透過側の音の強さのレベルを L_2 とすると,

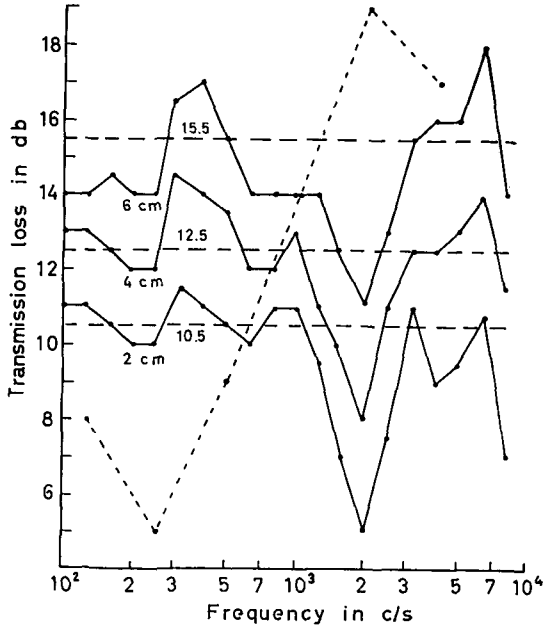
$$TL = L_1 - L_2 \qquad (2)$$

によって TL を求めた。音源には第2図に示すような周波数特性を持った白色雑音を用い，音の強さのレベルは第3図の特性の 1/3 オクターブ・バンドパスフィルターを通して全域，あるいは 100～8000 c/s を 20 の周波数帯に分け指示騒音計で測った。

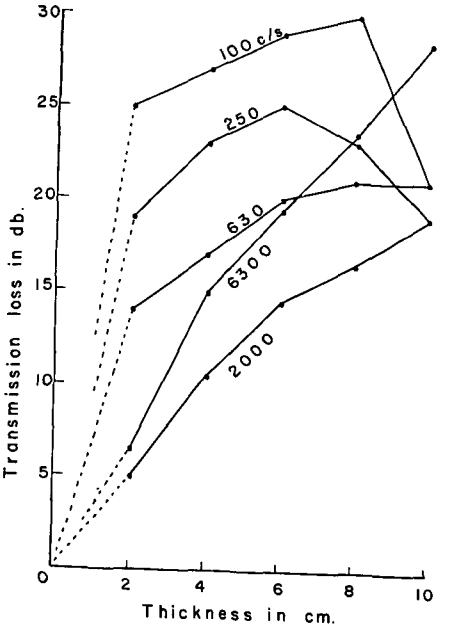
第4図に密度 0.35，通気抵抗 14.0 g/s·cm³ のしまりゆきの TL 周波数特性を示す。図で 2000 c/s 附近の TL が急に小さくなっているが，この傾向は他の雪質の試料についても見られたので，これは積雪の特性を示すものではなく，測定装置による誤差と考えられる。白色雑音全域の TL はこのしまりゆきで厚さ 2 cm のとき 10.5 db, 厚さ 4 cm のとき 12.5 db, 厚さ 6 cm のとき 15.5 db であった。比較のために図には中空二孔軽石ブロック 10.2 cm 厚みの TL[5] を点線で示してある。純毛フェルト 10 cm 厚みの多孔質材料の場合も似た傾向にあり，TL は周波数が高くなると大きくなる。これに対し積雪の TL 周波数特性は，むしろ平坦と考えてよいが各周波数でかなり凹凸があるのが特徴である。第5図には密度 0.35，通気抵抗 19.8 g/s·cm³ のしまりゆきの TL の厚さに対する変化を各周波数別に示した。もし積雪内で音の強さが透過距離と共に対数的に減少するとすれば，表面で p_0 の音圧は表面から x cm の透過距離に於いて

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \qquad (3)$$

である。TL を測定した場合の投射音と透過音の強さのレベルが夫々



第4図　しまりゆき (密度 0.35, 通気抵抗 14.0 g/s·cm³) の透過損失。水平の破線は白色雑音全域特性，点線は中空二孔軽石ブロック 10.2 cm 厚の透過損失



第5図　しまりゆき (密度 0.35, 通気抵抗 19.8 g/s·cm³) の透過損失

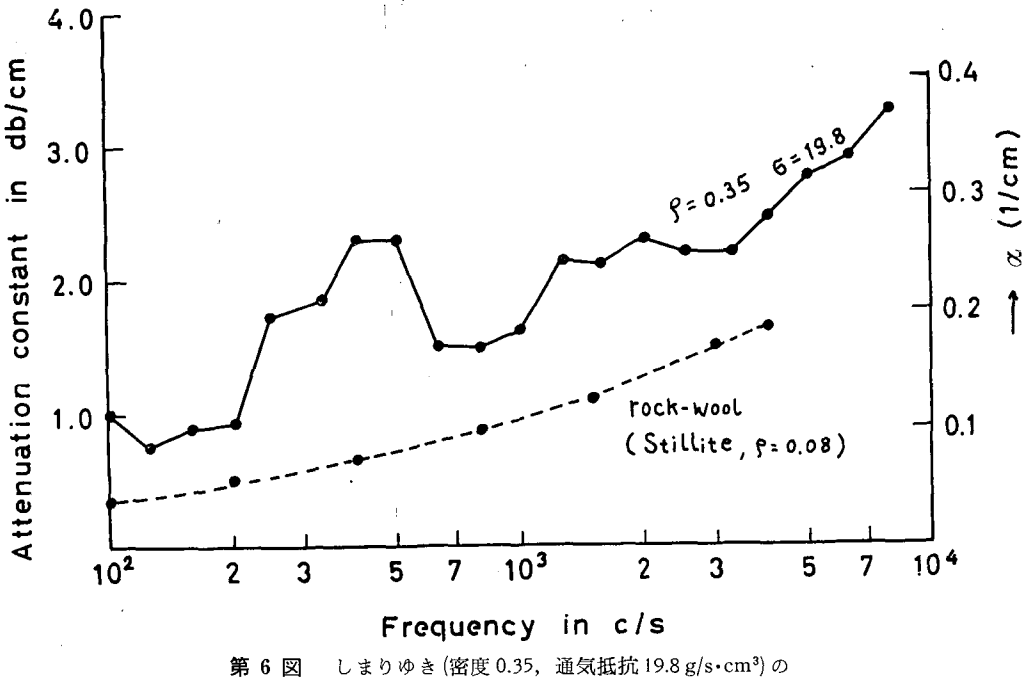
$$L_1 = 20 \log_{10} p_0 \qquad (4)$$
$$L_2 = 20 \log_{10} p$$

であるとすると，これを(2)式に代入して

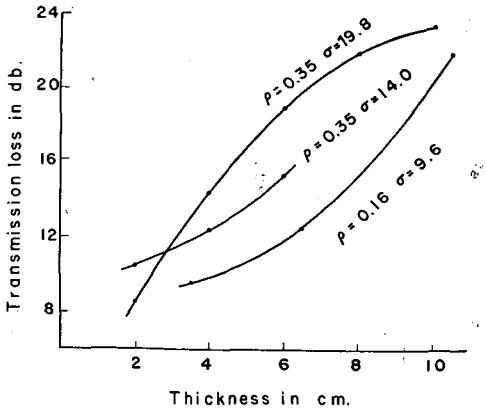
$$TL = 20 \log_{10} \frac{p_0}{p} = (20 \alpha \log_{10} e)\, x \qquad (5)$$

となり，TL は x に比例する。しかし第5図に見られるように TL は厚さに対して直線的ではない。特に周波数の低い所では，ある厚さの所で TL の最大がある。これは厚い試料の場合，その内で共振を起して TL が下ってくるためであろう。第5図で厚さ2～6 cm までは TL が大体直線的に変化するので，その傾斜から積雪内の減衰係数 α を計算して見ると第6図のようになる。Scott[7] は多孔質材料の rock-wool (Stillite, bulk density 0.080 g/cm^3) について，試料の中に probe-tube マイクロホンを挿入し，直接その減衰係数を測定した。その値を第6図に点線で示してある。積雪の場合は probe-tube 等を挿入すると，その組織をこわしてしまうので減衰係数の直接測定は困難である。第6図は間接的な測定の結果であるが，しまりゆきが多孔質吸音材料と同じような減衰係数の周波数特性を持っていることを示している。

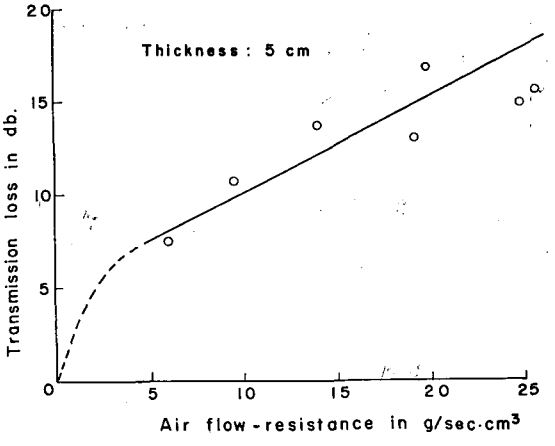
雪質の違いによって TL はどのように変るか。第7図は3種類の積雪について白色雑音全域の TL を試料の厚さに対してプロットした。密度 0.16 のしんせつは TL の厚さに対する傾斜，すなわち減衰係数が最も小さく，密度の大きいしまりゆきでは減衰係数が大きくなる。しかし密度 0.35 の同じしまりゆきでも通気抵抗が大きい程，減衰係数が大きくなる。これは，積



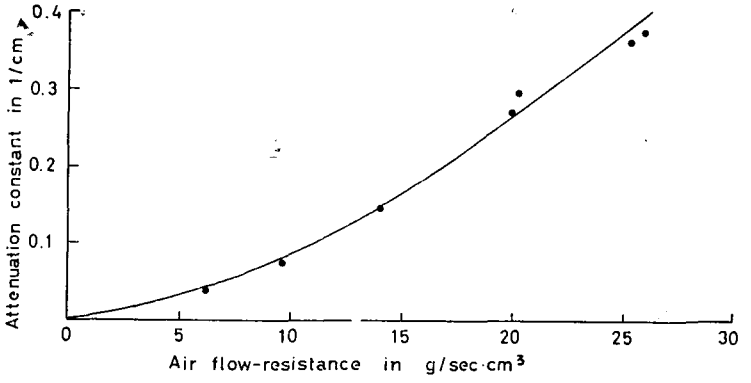
第 6 図 しまりゆき (密度 0.35，通気抵抗 19.8 g/s·cm^3) の減衰係数。点線は rock-wool (Stillite)



第7図　3種類の積雪試料に対する白色雑音全域の透過損失



第8図　厚さ5cmの積雪試料の通気抵抗と透過損失との関係



第9図　積雪の通気抵抗と減衰係数との関係

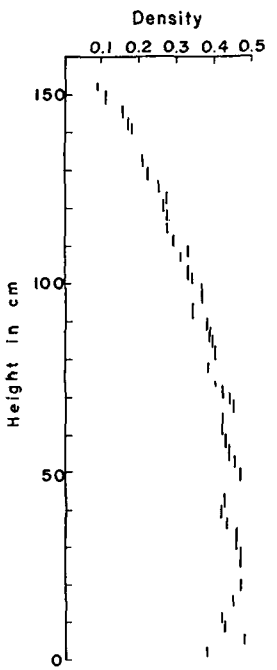
雪内の音圧の減衰が主として積雪内細孔の空気の粘性抵抗によるものであれば当然である。すなわち，減衰係数に関しては，雪質の分類は密度によるよりも通気抵抗による方が適切である。積雪試料の通気抵抗は筆者等の方法[8]により容易に測定できる。そこで，厚さ5cmの色々な通気抵抗をもった積雪試料について，白色雑音全域の TL をプロットして見ると第8図のようになる。通気抵抗0では TL も0となる筈であるから，測定のない通気抵抗5 g/s·cm³ 以下の所は原点まで点線で示した。またこれらの試料について減衰係数を計算すると第9図のようになり，減衰係数と通気抵抗との間には

$$\alpha\,(1/\mathrm{cm}) = 0.003\,\sigma + 0.00052\,\sigma^2 \qquad (6)$$

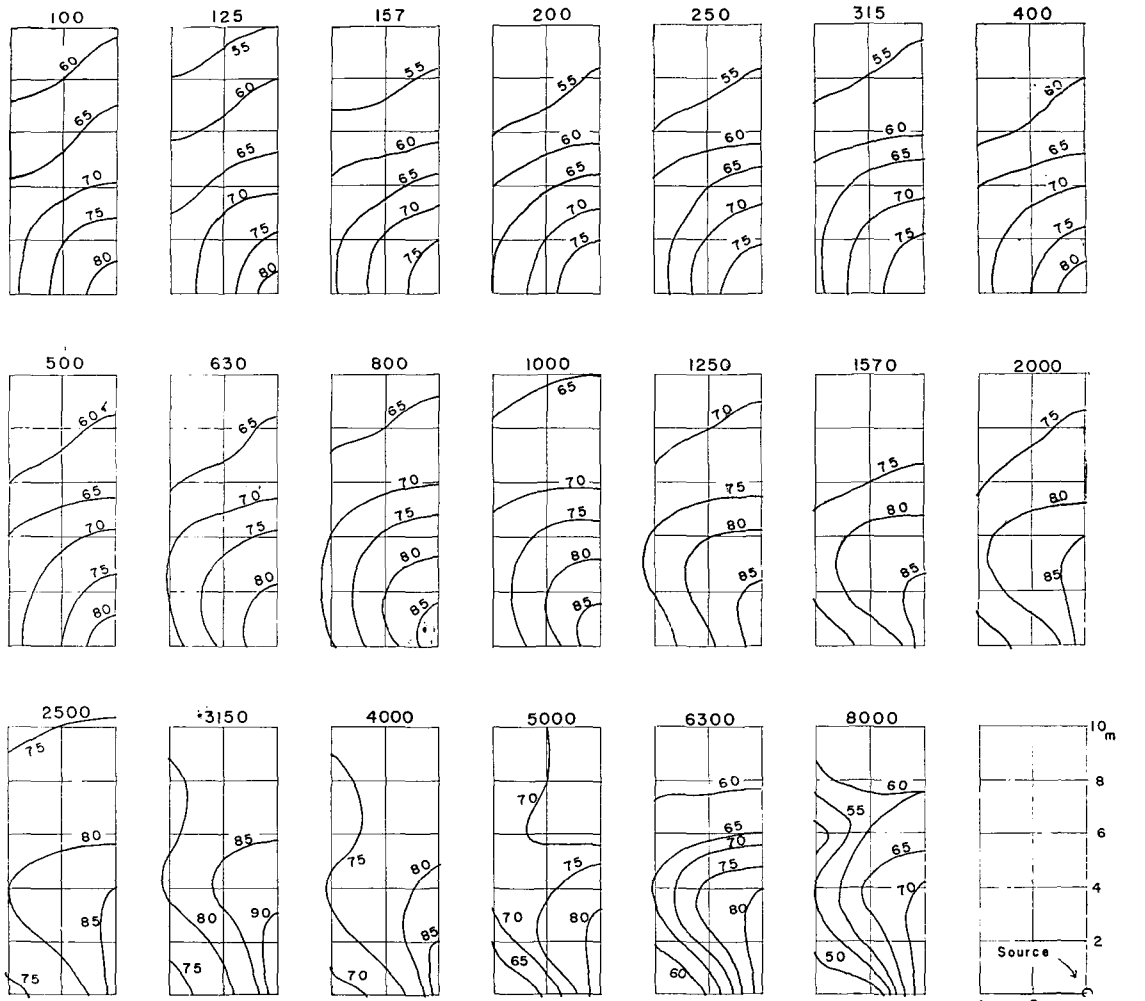
の関係が得られた。

III. 積雪面上の音場

これまで積雪試料についてその音響特性を調べてきたが，次に自然の積雪面上で音場がど



第10図 実験した積雪の垂直密度分布

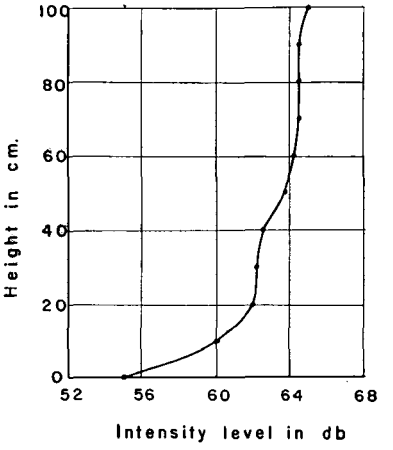


第11図 雪面上の音場，各ブロックの上に示した数字は周波数。
等高線上の数字は音の強さのレベル

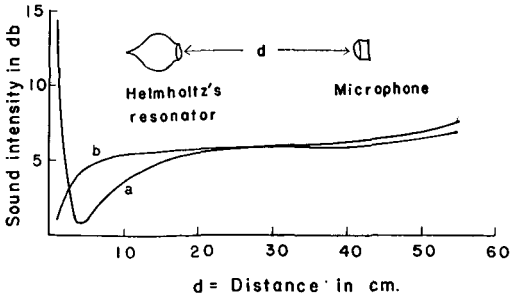
のようになるかを述べる。実験した雪原は北海道雨竜郡母子里にある北海道大学演習林看守所の畑地で，約100×300 m の区域である。実験を行なった2月下旬には積雪深 1.5 m の平坦な積雪があり，第10図に示すような垂直密度分布を持っていた。表面から 15 cm までは密度 0.09～0.15 のしんせつで，以下は次第に密度を増し地面まで一様なしまりゆきとなっていた。実験場の周囲はまばらな林と 2, 3 の建物であり，1日中殆んど風はなく，雑音としては1時間毎に近くを走るディーゼルカーの警笛位で，音響の実験には先ず絶好の状態であった。

音源には透過損失の所で述べた球形の密閉箱におさめたスピーカーにより，白色雑音を用いた。音の強さは小型クリスタルマイクロホンにより TL 測定の時と同様の 1/3 オクターブ・バンドパスフィルターを通して，各周波数帯に分けて指示騒音計で測った。

第11図は音源の前面 8×10 m 内の雪面上の音場を各周波地帯に分けて示した。音源はスピーカーの軸に直角な面内では無指向性であるが，軸を含む面内では多少の指向性がある。測定の際はスピーカーの軸を雪面と平行に雪面上 35 cm の位置に設置した。音源を中心として上から見た場合，第1象限と第2象限の音場は全く対象であったので，図には第2象限の音場のみを記してある。1000 c/s 以下の低音域では音場は殆んど音源を中心とする同心円になっているが，1250 c/s 以上の中音域になると音源の左右方向で音場が急に弱ってくる。これは音源の指向性が表われてきたのであるが更に 3150 c/s 以上の高音域になると音源の前方，スピーカーの軸から左右に約 27° の方向に音場の乱れがでてくる。測定に当って，測定者は実験場から離れた溝の中に身体をかくす等，充分注意をはらっているので，これは障害物などによる影響とは考えられない。やはり音源の特性であろう。スピーカー軸上の前方ではそのような乱れはなく一様に音の強さが減少しているので，以後はスピーカーの軸に沿ってのみ音場の測定を行なった。

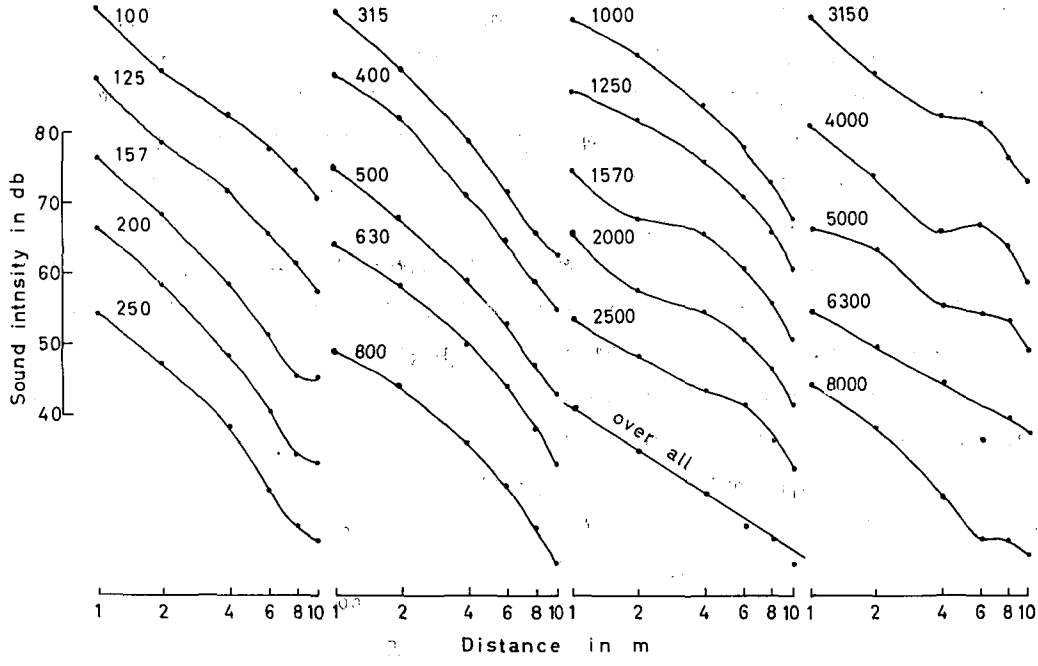


第12図　雪面上方に於ける音の強さの垂直分布。音源からの距離 6 m



第13図　音源に向って置かれた共鳴器の口の附近に於ける音の強さ。曲線 a は共鳴器が 250 c/s の音源の音に共鳴している場合。曲線 b は共鳴していない場合（佐藤孝二）

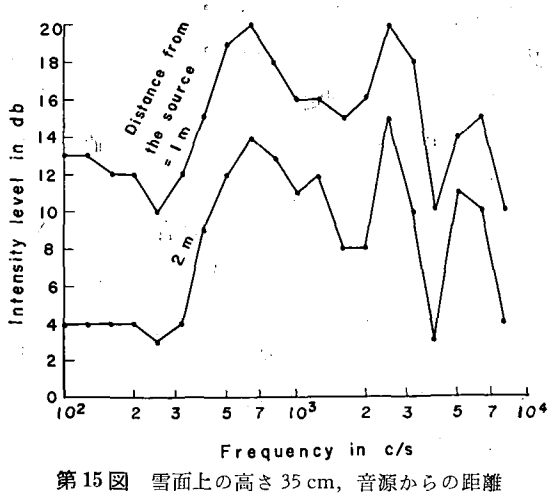
雪面上方に於ける音の強さの垂直分布は第12図に示すようになる。これは音源の正面 6 m の距離に於ける白色雑音全域の強さを雪面から 1 m の高さまで 10 cm 毎に測定した例である。20 cm 以下では急激に音の強さが減じ，積雪面附近で積雪の影響が強く現われていることが判る。第13図は音源に向って置かれた共鳴器の口の附近に於ける音の強さを測定した図[9]である。共鳴器の口に近づくに従い急激に音の強さが減少している曲線は



第 14 図 雪面上 35 cm の高さでスピーカーの軸線上に於ける音の強さと音源からの距離との関係

第 12 図の雪面上の音場の垂直分布曲線とよく似ている。積雪試料の音響インピーダンスの測定からしんせつに対する音響模型が多くの共鳴器の集りと考えられることを既に指摘したが[4]，しんせつ面上の音場の垂直分布からもこのことが裏づけられた。

音場の垂直分布から雪面上 20 cm 以上では積雪面の影響を殆んど受けないように見えるがスピーカーの軸上，すなわち雪面上 35 cm の高さで音源から遠ざかるに従い音の減衰はどのようになるか。第 14 図にその結果を示す。自由大気中や完全な無響室内では音源からの距離の 2 乗に反比例して音の強さは減ずる，いわゆる逆 2 乗則が成立つ筈である。第 14 図で白色雑音の全域特性は逆 2 乗則の直線に乗っており，各周波数帯でも殆んど逆 2 乗則と同じ傾斜で減衰している。これからしんせつ面上数 10 cm 以上では殆んど自由大気の状態と考えられる。第 15 図は雪面上の高さ 35 cm で音源からの距離 1 m 及び 2 m に於ける音の強さを周波数に対してプロットした。これで見ると音の強さは各周波数でかなり



第 15 図 雪面上の高さ 35 cm，音源からの距離 1 m 及び 2 m に於ける音の強さ

凹凸があるが，音源の特性として示した第2図はスピーカーのボイスコイルで測った白色雑音の電圧で，比較的周波数に対し一様になっている。従って第15図の方が音源の特性そのものを表わしていると考えられる。音源の周波数特性は図のように複雑なので，ある測点での周波数特性は意味がなく，他の測点との音の強さの差に意味がある。

次に雪面の影響の最も強い雪面上の音の強さの減衰を音源の正面の線上で測って見ると第16図のようになる。すべての周波数帯で減衰特性は逆2乗則より大きな傾斜を持っている。第11図からも判るように音波は音源から殆んど球面波で拡がっているので，今音源の正面1mの雪面に於ける音圧を p_1 とすれば，音源の正面 x m の雪面に於ける音圧 p_x は

$$p_x = p_1 e^{-\alpha x}/x \tag{7}$$

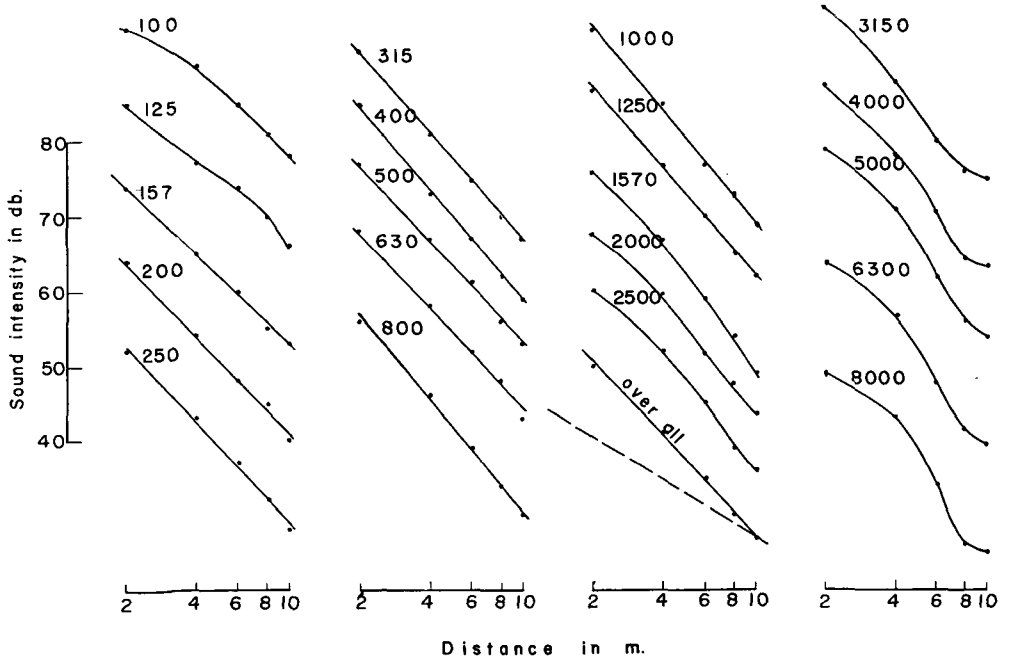
と表わせる。p_1, p_x に対して測定される音の強さのレベルを夫々

$$L_1 = 20 \log_{10} p_1 \tag{8}$$
$$L_x = 20 \log_{10} p_x$$

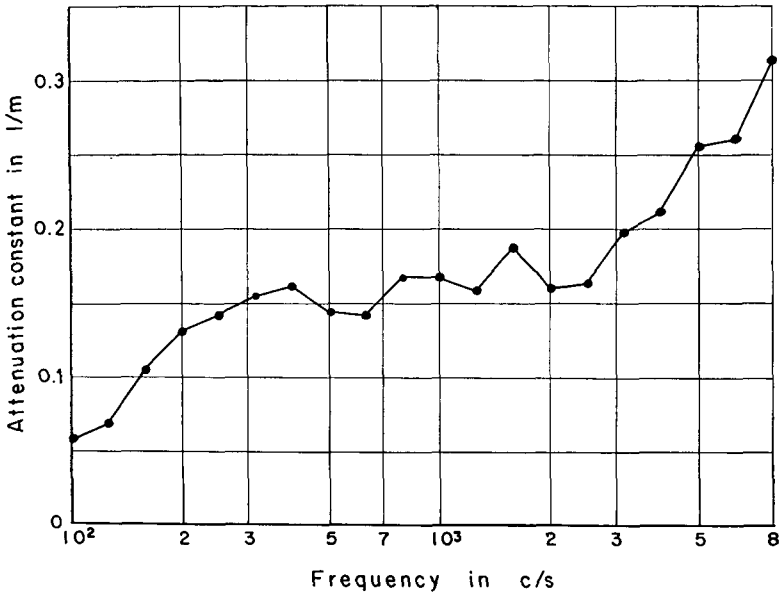
とすると，減衰係数 α は(8)式から

$$\alpha = \frac{L_1 - L_x - 20 \log_{10} x}{20\, x \log_{10} e} \tag{9}$$

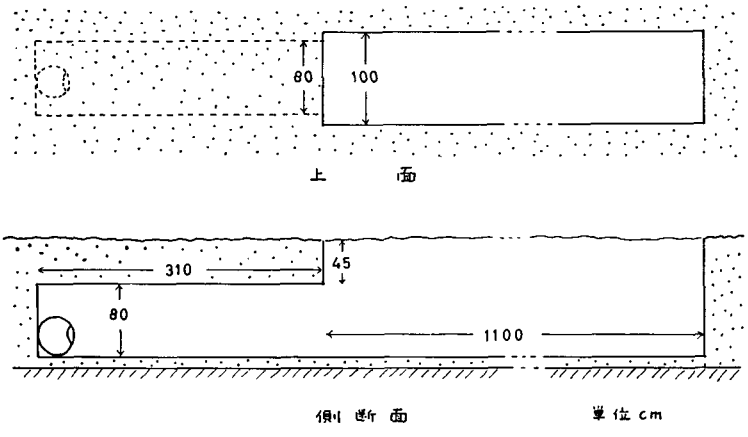
によって求めることができる。第16図から計算した減衰係数の周波数特性は第17図のようになる。これはしまりゆきの中での減衰特性第6図とよく似ているが，その値の大きさは第6図



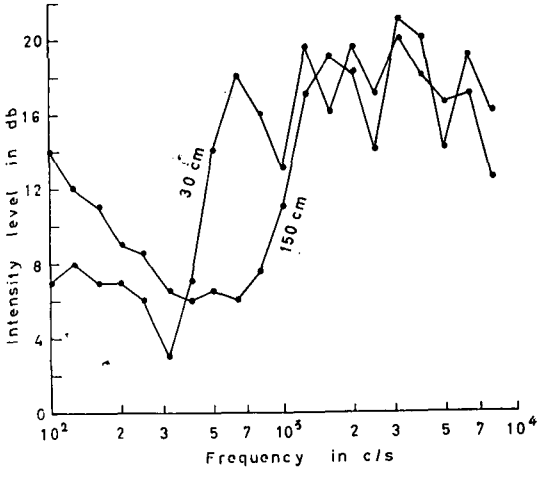
第16図　音源の正面の雪面に於ける音の強さと音源からの距離との関係。破線は逆2乗則



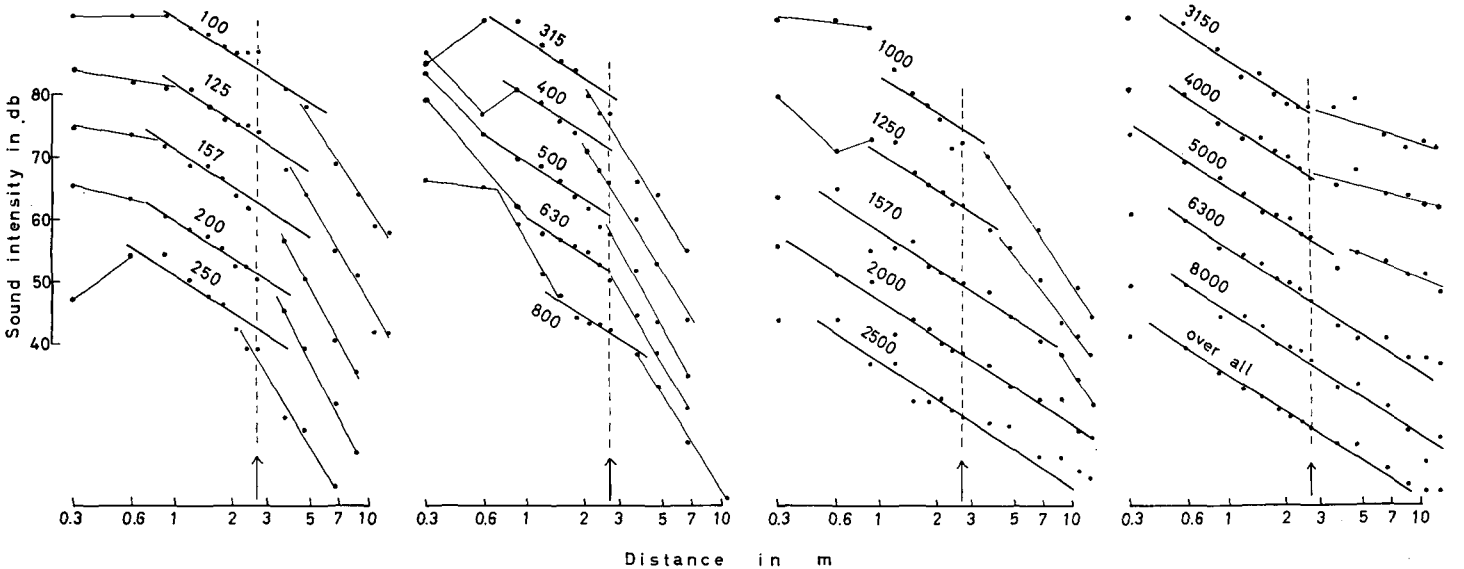
第17図 しんせつ面に於ける減衰係数の周波数特性



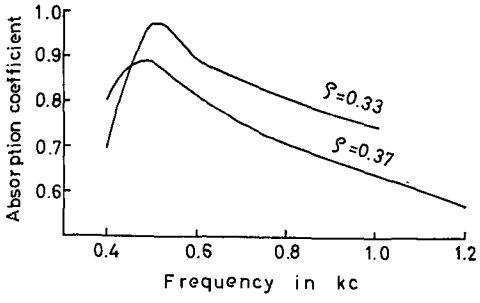
第18図 雪洞と雪溝の見取り図



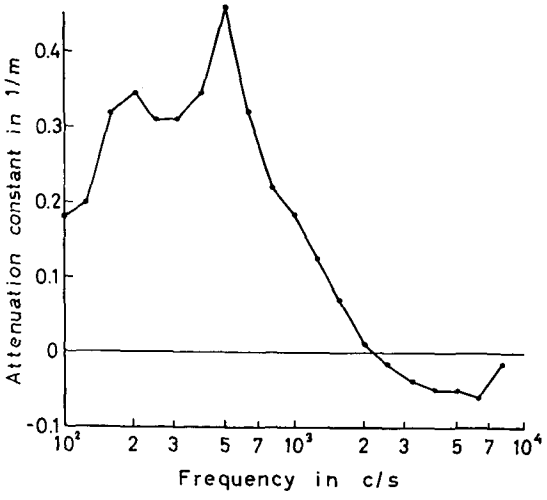
第19図 雪洞内に於ける白色雑音の周波数特性



第20図　雪洞及び雪溝内に於ける減衰特性。矢印は雪洞の口の位置を示し，これより左側が雪洞，右側が雪溝である。各周波数帯で引かれた太い線は逆2乗則を示す



第21図 密度0.33と0.37のしまりゆきの吸音特性



第22図 雪溝内の減衰係数の周波特性

が1/cmの単位で表わしているのに対し，第17図は1/mの単位で表わしているので，雪面上の減衰の方がしまりゆきの中の減衰より約1/100小さくなっている。すなわち一例として1000 c/sの音の強さが1/100に減衰するのに要する距離は，しまりゆきの中では12.5 cmであるのに対し，しんせつ面では13.5 mである。

平らな雪面上での音場が判ったので，次に雪洞や雪溝内の音場を調べた。すなわち第18図に示すように，先ず積雪の中に幅1 m，長さ約11 mの溝を掘った。積雪深は1.5 mであったので溝の深さは1.4 mとし，地面の上に約10 cmの雪を残した。次にこの溝の一端の壁に，上に厚さ45 cmの雪の天井を残し，幅80 cm，高さ80 cm，奥行310 cmの雪洞を水平に掘った。この雪洞の一番奥に前から用いている球形スピーカーを置き白色雑音の音源とした。雪洞や雪溝の壁は密度0.30～0.45のしまりゆきであったが，雪溝の底は踏み固められて固い雪となっていた。音の強さはスピーカーの軸上，すなわち左右の雪壁からの中心で底から35 cmの高さの線上で測定した。

第19図は音源の前面30 cmと150 cmに於ける音の強さの周波数特性であって，第15図と比較して見ると高音域に於ける凹凸が遙かにならされている。これは音源が雪洞内に置かれたので，雪洞内の反響により音の強弱が平均化されたものと思われる。第20図は各周波数帯に於ける減衰特性で，矢印の位置から左側が雪洞内，右側が雪溝内を表わしている。白色雑音の全域特性は大体逆2乗則になっているが，音源に近い所と遠い位置では逆2乗則よりゆるい傾斜になっている。これは音源に近い所では雪洞内の反響，また遠い所は雪溝の，音源と相対する雪壁の反響があることを示している。密度0.33～0.37のしまりゆきで厚さ10 cmの試料の吸音率は0.8～0.6[5]であるから，この雪洞や雪溝の壁からは大体投射音のエネルギーの20～40%が反射されていることになる。各周波数帯での減衰特性は3つの領域に分けることができる。すなわち音源からの距離1 mまでの雪洞内，1～2.7 mの雪洞の出口まで，及びそれ以遠の雪溝

内である。第1の音源に近い雪洞内では低周波域で減衰は極めて少なく，周波数が増すと共に次第に減衰が増して500 c/s では殆んど逆2乗特性となる。これは500 c/s で完全無響となっていることを示すが，それは第21図のしまりゆきの吸音特性に於いても500 c/s で吸音率が0.9～1.0であることと一致している。500 c/s より高くなると減衰は再び次第に減少し，これも第21図の吸音特性と一致する。第2の雪洞内の出口に近い領域では各周波数帯とも，ほぼ逆2乗則に従って減衰する。この領域では雪洞の奥の壁の影響がなくなり，また開口部での反射も殆んどないので，ほぼ無響室の状態になったものと思われる。第3の雪溝内では雪洞を出た所から急に減衰が大きくなる。そこで，雪洞と雪溝では音の減衰の機構が異なると考えて，雪溝に投射する仮想音源の位置を雪洞の出口とした。従って音源の大きさは一応雪洞の出口 80×80 cm と考えられるので，点音源の自由大気に於ける逆2乗則と比較することには問題があるが，前に行なってきたものと同じ方法で各周波数帯に対する減衰係数を計算して見ると第22図のようになる。この傾向は再び第21図の吸音特性に見られるものである。2 KC 以上の高音域で減衰係数が負となっているのは減衰係数特性が逆2乗則より小さな傾斜であることを示し，高音域では吸音率が小さいために雪溝の端の壁からの反射の影響があることを表わしている。

IV. むすび

白色雑音を使って積雪試料の透過損失を測定し，これから積雪内の音の減衰係数を計算した。また平らなしんせつ面としまりゆきの雪洞や雪溝内の音場を調べて，これらの雪面に於ける減衰係数を求めた。積雪試料や雪面での減衰係数の周波数特性は，いずれもその試料の吸音特性と同じ傾向があり，又しんせつ面上での減衰はしまゆき試料中の減衰の 1/100 程度であることが判った。これらの資料は積雪地に於ける音響設計の上で参考になると思われるが，積雪試料の TL 特性は，その構造と密接な関係があり，積雪構造を表わす一つの指標となることが期待される。

文　献

1) 安藤一弥野・細貝松夫 1952 積雪時に於ける音響の減衰について．積雪研究，***4***，67–74.
2) 大浦浩文 1953 積雪表面に於ける音の反射．低温科学，***9***，179–186.
3) 石田完・小野寺重男 1954 積雪の吸音率について．低温科学，物理篇，***12***，17–24.
4) 石田　完 1956 積雪の音響インピーダンス．低温科学，物理篇，***15***，81–91.
5) 石田　完 1957 積雪の音響インピーダンス．II．低温科学，物理篇，***16***，241–248.
6) 日本建築学会設計計画規準委員会 1963 騒音防止設計 2．No. 15，20.
7) Scott, R, A. 1946 The absorption of sound in a homogeneous porous medium. Proc. Phys. Soc., ***58***, 165–183.
8) 石田完・清水弘 1956 積雪の通気抵抗．低温科学，物理篇，***15***，63–71.
9) 佐藤孝二・久保啓一 1938 共鳴器の音場に及ぼす影響に就て．航空研究所報告，***8***，239–244.

Summary

The sound transmission loss of a snow layer was measured using white noise. The attenuation constant through the snow layer was calculated from the variation of the transmission loss with the thickness of the sample. The attenuation constant α in units of 1/cm is represented by $\alpha=0.003\,\sigma+0.00052\,\sigma^2$, where σ is the flow resistance of the sample in $g/s\cdot cm^3$.

The propagation of white noise was investigated on the surface of a snow cover, in a snow tunnel, and in a snow trench. Frequency-response curves of the attenuation constant through a snow sample and on a snow surface showed the same tendency to the absorption characteristics. The attenuation constant through a snow sample is 100 times that of the surface.