



Title	積雪の音響インピーダンス II
Author(s)	石田, 完; ISHIDA, Tamotsu
Citation	低温科学. 物理篇, 16, 241-248
Issue Date	1957-12-13
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17938
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p241-248.pdf



積雪の音響インピーダンス II*

石 田 完
(低温科学研究所 気象学部門)
(昭和 32 年 7 月受理)

I. ま え が き

昨年度にひきつづき tube method によつて積雪の垂直音響インピーダンスの測定を行なつた。測定の方法と装置は昨年の場合¹⁾と同じであるが、試料をセットする音響管を昨年は戸外に置いたのに対し、今回は周囲の温度と湿度を出来るだけ一定にし、長時間安定な測定が出来るように、音響管と、試料を管内で前後に動かすピストンの送りねちの装置だけは低温実験室内に入れた。そのために、ピストンの送りねちの廻転と常温実験室に置かれた記録装置の廻転とを同期させるのにセルシンモーターを用いた。ピストンの位置を精確に記録紙上に記すために、ピストンの送りねちのピッチが 5 mm であることを利用し、ねちの軸に電気接点を設けて記録紙上に 5 mm 間隔のマークが記されるようにした。

今回は大体しまりゆき (密度 0.3~0.4) の垂直音響インピーダンスを求め、これから垂直吸音率を計算した。試料の厚さが測定音波長の 1/4 になつた時に共鳴がおこるが、その共鳴周波数と試料中の音波長とから求めた試料中の音速度は、音の振動数が高くなると共に増加すると云う結果が得られた。

II. 測 定 結 果

剛体壁に接して置かれた試料の表面から見た垂直音響インピーダンス Z は、空気の密度と音速度を ρ_0, c_0 とすると近似的に

$$Z/\rho_0 c_0 = \coth(C-jD) \quad (1)$$

で与えられ、ここで C と D は音響管の長さを変えて得られる音圧最大附近の音圧曲線の幅と試料表面からの管の長さから計算される。更に(1)式の右辺を実数部分と虚数部分とに分けて

$$Z/\rho_0 c_0 = R+jX \quad (2)$$

と表わし、この抵抗 R とリアクタンス X を自由空気の音響インピーダンス $\rho_0 c_0$ を単位にとつて、周波数による変化を第 1, 2, 3, 4 図に示した。また音波が試料に垂直に入射する時の垂直吸音率 a_0 は R と X から

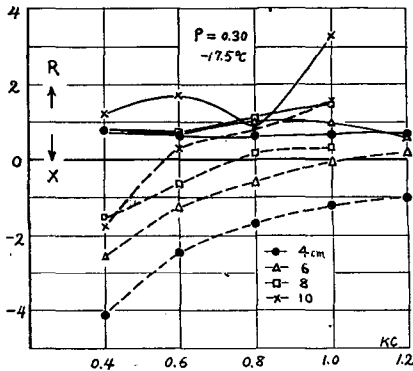
$$a_0 = \frac{4R}{(R+1)^2 + X^2} \quad (3)$$

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 383 号

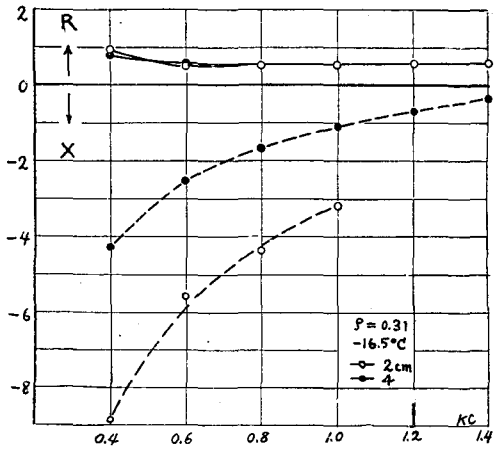
によつて計算し、第5, 6, 7, 8図に示した。夫々の曲線は試料の厚さをパラメーターにとつてある。吸音率曲線の最大値附近は後に試料中の音速度を求めるために、インピーダンスの周波数特性曲線をなめらかに描き、その曲線上の点によつて測定値を補間して山の位置を詳しく求めた。

各試料は3月中旬に低温科学研究所の中庭の積雪で表面から40 cm以下の所から取つたものであつて、大体前年の12月下旬から今年の1月上旬に降つた雪である。試料の厚さの方向はすべて積雪の鉛直方向にとつたので、厚さ10 cmの様な試料を得るといふことは仲々むずかしく、第2図のように4 cmの厚さしか得られなかつたものもある。

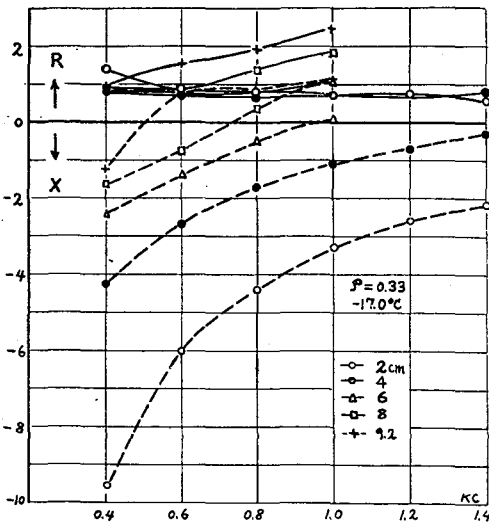
(1) 構造の似かよつた雪のインピーダンス。第1図ないし第4図のインピーダンス周波数



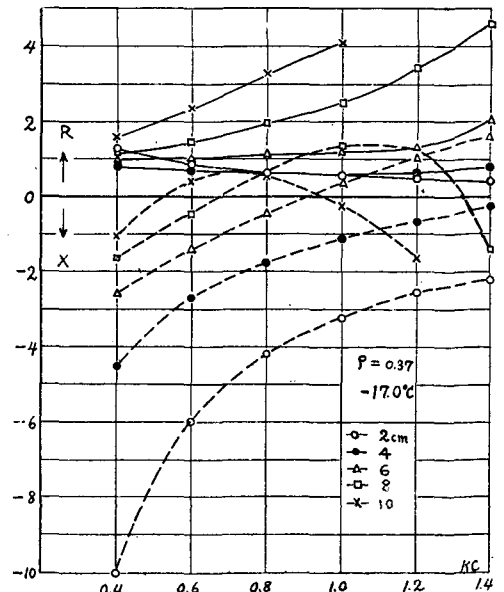
第1図 しまりゆきの垂直音響インピーダンス



第2図 しまりゆきの垂直音響インピーダンス



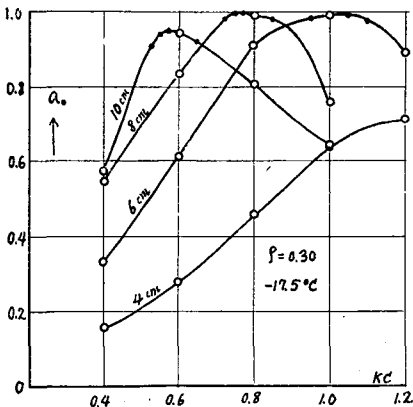
第3図 しまりゆきの垂直音響インピーダンス



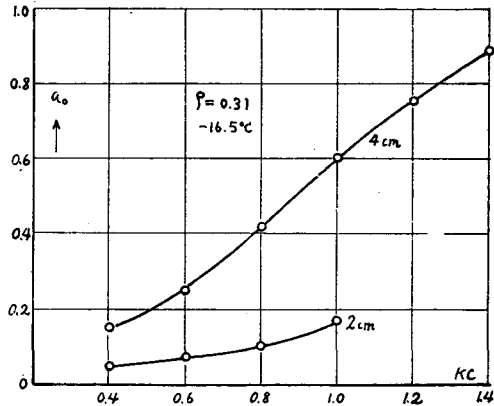
第4図 しまりゆきの垂直音響インピーダンス

特性曲線を全部重ね合わせて見ると、リアクタンス曲線は試料の厚さの同じものは大体かさなる。これに対し抵抗曲線は試料の密度が大きくなる程大きい値の方へずれている。これらの試料は密度が0.30から0.37のしまりゆきであつて、内部の空孔や細隙の構造が大体似かよつていと考えられる。それでインピーダンス周波数特性に大きな違いはない。しかし密度が大きいもの程、下の層の、つまり古い雪なので結晶は変形してゆくのであるが、圧縮によつて空孔が小さくなることより、結晶粒同志を結びつけている氷の橋の成長の影響が大きく、空孔と空孔をつなぐ細隙が、密度の大きい古い雪ほどせまくなる割合がはげしい。前の報告¹⁾に述べたようにリアクタンスは空孔内の空気のスチフネス要素であり、抵抗は空孔と空孔を結ぶ細隙内の空気の粘性抵抗である。従つて空孔の変化によるリアクタンス変化は密度が變つても小さく、抵抗は密度と共に大きくなるものと思われる。更に密度が増せば空孔の体積も小さくなり、それによつて空孔のスチフネスが増すからリアクタンスもふえる筈であつて、第1図から第4図の例でも徐々にその傾向が見られる。

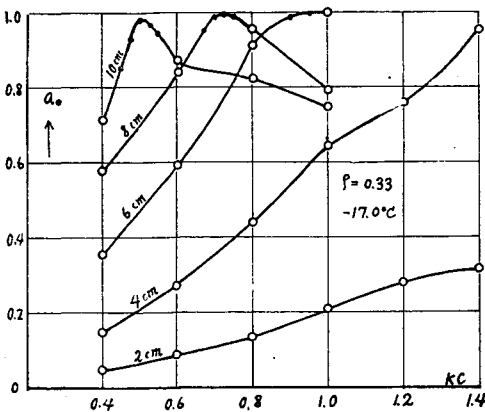
第5, 6, 7, 8図の垂直吸音率では抵抗とリアクタンスの変化の影響が重なつて、密度の違いによる変化が一層明瞭になる。すなわち吸音率最大の周波数が密度が増すと共に低い方へ移



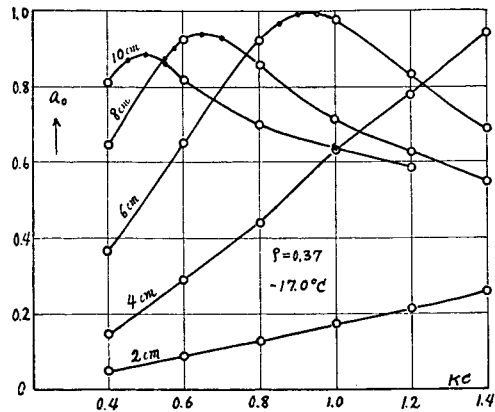
第5図 しまりゆきの垂直吸音率



第6図 しまりゆきの垂直吸音率



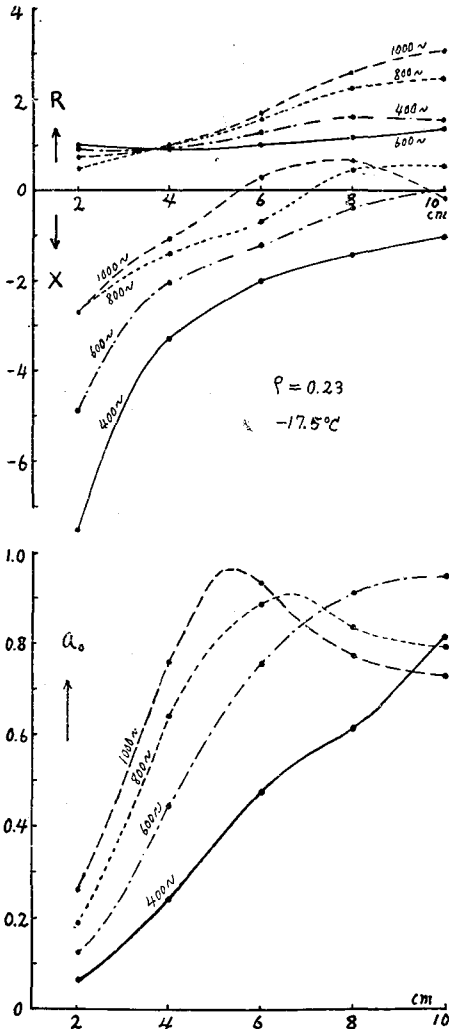
第7図 しまりゆきの垂直吸音率



第8図 しまりゆきの垂直吸音率

つてゆく。このことは試料中の音速度を計算して見ると更にはつきりする。

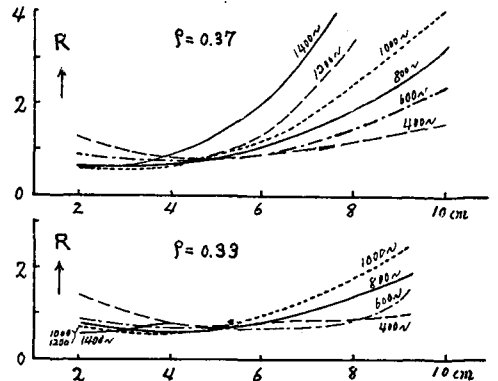
(2) 構造の違う雪のインピーダンス. 第9図は密度0.23の雪の音響インピーダンスと垂直吸音率であるが、測定した周波数が400, 600, 800, 1000サイクルの4点しかないので周波数をパラメーターにとり、試料の厚さの変化による傾向を示してある。この資料は3月24日に降つた新雪を直ちに室温約 -17°C の低温実験室内に入れて(低温室へ入れる操作の間に多少圧縮された), そのまま15日間放置した後測定した。多孔度は0.75でかなり大きく新雪に近いが、結晶は昇華変形をうけ氷の橋が発達している場合であつて、前に報告した新雪のインピーダンスと比較して見ると、リアクタンスはほぼ新雪に一致するが抵抗はむしろしまり雪のものに近い。これから見ると多孔度は音響インピーダンスのリアクタンスに影響し、結晶粒をむすびつける氷の橋の状態は主に抵抗に関係するものと思われる。



第9図 15日間、 -17°C の低温室に保存した新雪の垂直音響インピーダンスと垂直吸音率

第9図の試料の厚さに対する抵抗の変化を見ると、抵抗は試料の厚さが約4 cmの所で音の周波数に殆んど無関係に一定値になつている。このことはしまり雪の場合にも見られるのであつて、第3図、第4図のインピーダンス周波数特性から試料の厚さに対するRの変化を描いて見ると、第10図のように試料の厚さ約5 cmの所で音の周波数に無関係に一定値を示す。これが新雪では厚さ約6 cmの所にあらわれた。このことはやはり積雪の構造に関係した現象と考えられるが、今の所でははつきりした意味づけをすることは出来ない。

(3) 音速度の分散. 第5, 7, 8図を見ると或る周波数の所で垂直吸音率が最大になつている。これは試料の中で音波の共鳴が起つている場合であつて、その時の音の周波数と試料の厚



第10図 しまりゆきの垂直音響インピーダンス実数部分の試料の厚さに対する変化

さから試料中の音速度を計算することが出来る。剛体壁に接して置かれた厚さ l の試料の表面から見た音響インピーダンス Z は、試料の波動インピーダンスを W 、伝播定数を γ とすると

$$Z = W \coth \gamma l \tag{4}$$

と書かれる²⁾。試料の中で共鳴が起るのは $\coth \gamma l$ が実数になる周波数の近傍である。伝播定数 γ を減衰定数 a 、波長定数 β によつて表わすと

$$\gamma = a + j\beta \tag{5}$$

$$\coth \gamma l = \frac{\sinh 2al - j \sin 2\beta l}{\cosh 2al - \cos 2\beta l} \tag{6}$$

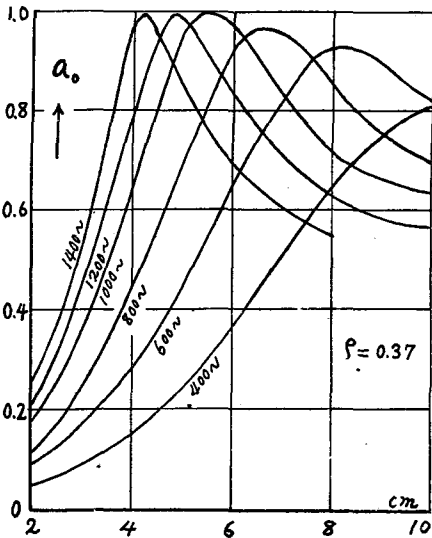
従つて(6)式が実数になるためには

$$\sin 2\beta l = 0 \quad \text{即ち} \quad 2\beta l = n\pi \tag{7}$$

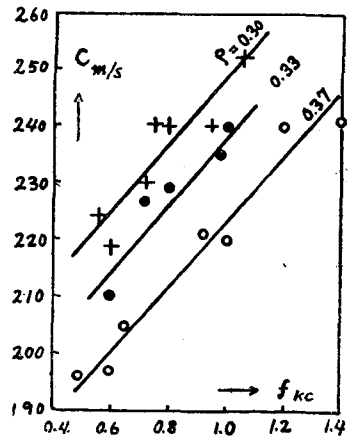
であつて、 n が奇数のとき共振、偶数のとき反共振が起る。試料中の音速度を c とすると波長定数は $\beta = \omega/c$ であるから、(7)から最初の共振周波数 ($n=1$) を f とすれば試料中の音速度は

$$c = 4l \cdot f \tag{8}$$

となる。(8)式によつて第5, 7, 8 図の垂直吸音率最大の周波数から音速度を計算したが、周波数をパラメーターにした試料の厚さに対するインピーダンス曲線から、周波数をパラメーターにした試料の厚さに対する垂直吸音率のグラフも描けるので、例えば第9 図に相当する第11 図からも垂直吸音率が最大値をとる試料の厚さによつて音速度を求めた。これらを図示したのが第12 図である。これによると音速度は周波数が400 から1400 サイクルの間では周波数の増加と共にほぼ直線的に増加し、試料の密度が小さい程音速度は増している。周波数1000 サイクルに於ける音速度を試料の多孔度に対して図示したのが第13 図であるが、これには第12 図のしまり雪の他に第9 図の雪と前に報告した新雪の値も記入してある。もつとも新雪の音速

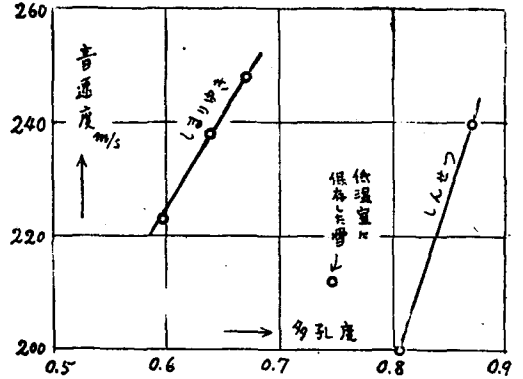


第11 図 密度0.37のしまりゆきの厚さと垂直吸音率との関係



第12 図 しまりゆきの中の音速度と周波数との関係

度は丁度 1000 サイクルに於ける値ではないので、第 13 図を同一周波数に於ける試料の多孔度と音速度との関係と見るわけにはゆかないが、音速度は単に多孔度と共に増加するという簡単な関係でないことは判る。構造の似かよつた雪ではその多孔度と共に音速度は増加するが、構造の違う雪の間では音速度の間には関係がないらしい。しかしどのような雪でも、周波数 0 では一定の音速度に、周波数 ∞ では自由空気の音速度に近づくことが想像される。



第 13 図 積雪中の周波数 1000 c/s の音速度と多孔度との関係

(4) 分布定数電気回路との類似. 第 4 図の音響インピーダンス周波数特性を抵抗 R とリアクタンス X とを直交軸にとつて図示すると第 14 図のようになるが、試料の厚さが一定で周波数が変わつた場合と、周波数が一定で試料の厚さが変わつた場合にインピーダンスの絶対値と位相角が変化する有様は、電気の 2 線式一様線路の送電端インピーダンスとよく似ている。そこで線路上の位相速度の周波数特性を求めて見る。

2 線式一様線路に於いて、その線路往復単位毎の分布定数、すなわち抵抗、自己インダク

タンス、線間キャパシタンス、線間コンダクタンスを夫々 R, L, C, G とすると、線路の往復単位毎のインピーダンス Z 及びアドミッタンス Y は

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L \\ Y &= G + j\omega C \end{aligned} \quad (9)$$

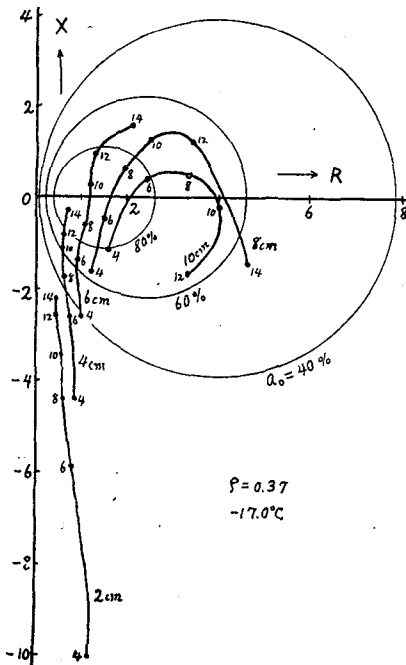
であつて、この線路の長さ l に於る受電端を開放して送電端から測定したインピーダンスを Z_0 とすると

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \coth \sqrt{ZY} l \quad (10)$$

であるから減衰定数、波長定数を夫々 α, β とすれば、 $\alpha + j\beta = \sqrt{ZY}$ から

$$\left. \begin{aligned} \alpha^2 &= \frac{1}{2} \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} \\ &\quad + \frac{1}{2} (RG - \omega^2 LC) \\ \beta^2 &= \frac{1}{2} \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} \\ &\quad - \frac{1}{2} (RG - \omega^2 LC) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

となる。 $\beta = \omega/c$ であるから位相速度は



第 14 図 密度 0.37 のしまりゆきの垂直音響インピーダンス図形。曲線上の各点の数字を 100 倍したものが測定周波数

$$c = \sqrt{2} c_0 \left\{ 1 - \frac{1}{x^2} + \sqrt{1 + (4m^2 - 2) \frac{1}{x^2} + \frac{1}{x^4}} \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

のように求められる。ここで $c_0 = 1/\sqrt{LC}$ は空気を誘電体とする線路では光速度に等しく、音の場合では自由空気中の音速度に相当する。また

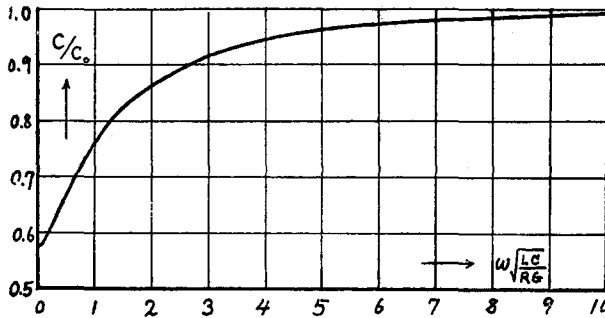
$$m = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{RC}{GL}} + \sqrt{\frac{GL}{RC}} \right), \quad x = \omega \sqrt{\frac{LC}{RG}}$$

であつて、(12)は

$$\omega = 0 \text{ に於いて } c = c_0/m$$

$$\omega = \infty \text{ に於いて } c = c_0$$

となる。今 $m = \sqrt{3}$ として c/c_0 と x との関係を描いて見ると第15図のようになる。これによつて積雪中の音速度が音の振動数と共に増加する傾向が一応は説明されるけれども、剛体壁に接して置かれた試料の垂直音響インピーダンスの測定値からだけでは、模型線路に於けるインピーダンスとアドミッタンスの各素子、 R, L, G, C のすべてを定めることは出来ないので定量的なことは云えない。



第15図 分布定数回路に於ける位相速度の周波数特性

III. む す び

新雪としまり雪の垂直音響インピーダンスのリアクタンスは、主に雪の多孔度に関係しており、多孔度が小さくなるほど負の大きな値になる。またインピーダンスのうちの抵抗は積雪中の結晶を結びつけている氷の橋の状態に関係していて、氷の橋が発達している雪ほど抵抗が大きくなることが判つた。垂直音響インピーダンスの周波数特性から計算される積雪中の音速度は、しまり雪では音の周波数と共に増大し、一定の周波数の音に於いては雪の密度が増すと減少する傾向が見られた。しかしこの密度と音速度との関係は同じ雪質の間にだけ成り立ち、密度の広い範囲に対する音速度の変化は簡単ではない。音速度の分散については分布定数電気回路と対応させて定性的には説明出来たが、剛体壁に接しておかれた試料の表面から見た音響インピーダンスの測定からだけでは完全な模型を作ることが出来ない。完全な模型を考えるためには、更に電気回路に於ける受電端短絡の場合の送電端インピーダンスに相当する音響イン

ピーダンスを求めなければならない。今後そのような測定も行いたいと考えている。

文 献

- 1) 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.
- 2) 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.

Résumé

The specific normal acoustic impedance of snow layers was measured by a tube method. At one end of the tube a high impedance sound source and point pressure detector were set. The other end of the tube was terminated in a snow sample with rigid wall backing. The snow sample was held in a thin cylindrical shell which, in turn, was attached to a movable brass piston. The specific normal acoustic impedance was derived from sound pressure curve width and length of the tube in the vicinity of maximum sound pressure, when the tube length varied. The normal sound absorption coefficient of snow layers was calculated by using the resistance and reactance values of the impedance. In the frequency characteristic of the normal absorption coefficients there were maximum values which occurred. These absorption peaks appeared in the neighbourhood of those frequencies for which the acoustic impedance was real. By using the conditions mentioned above the sound velocity in snow layers was calculated. From the results it was found that the sound velocity in settled snow is increased as the sound frequency and the porosity of snow are increased. That conclusion was qualitatively illustrated by analogy of transmission lines, which are recurrent structures having continuously distributed impedances and admittances.