



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪中の音速
Author(s)	大浦, 浩文; OURA, Hirobumi
Citation	低温科学, 9, 171-178
Issue Date	1952-12-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17533
Type	departmental bulletin paper
File Information	9_p171-178.pdf



積雪中の音速*

大浦浩文

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和27年9月受理)

I. まえおき

積雪中を音波がどんな方法でつたわつてゆくかは未だ明らかでない。積雪中に含まれる空気中をつたわるのであるか、或は空気と氷の粒子との集りである積雪が一つの弾性体として音波をつたえるのであるかはよくわかつていない。若し積雪粒子間の空気中をつたわるものとするれば、密度の同じ雪であつても、粒子の大きさにしたがつて空間の細分され方が異なるから、空気がそのすきまを通るとき粘性によるまさつが異り、音の速さに違いを興えようと考えられる。又積雪が一つの弾性体として縦波を伝えるものであれば、温度や含水量によつて弾性的性質が変るにしたがつて音の速さも変つてくるはずである。しかし何れにしても音速、音のエネルギーの減衰、積雪表面での音の反射、吸収等が積雪の性質に違いを興えようされることが予想される。そしてこのことは逆に、音速、其他音に対する性質のちがひによつて、積雪を分るいすることの可能性を予想させる。そうゆうわけで、積雪中の音波をとりあげてその性質をしらべ、積雪の力学的性質の一面を明かにしようと思つた。先づ最初は音速をしらべた。

II. 測定方法及び装置

音速測定方法として次の2つを用いた。

- (i) 野外実験 音源として爆発音を用い、その音の最初の尖端が、積雪中に置かれた2つのマイクロフォン M_1, M_2 のうち近い方 M_1 に達してから遠い方 M_2 に達するまでの時間を電磁オシログラフによつて測定し、音速を求めた。
- (ii) 実験室内での実験 積雪を切り取つて細長い管に入れ、正弦波の連続音を管の開口から入れる。管中に埋めた2つのマイクロフォンの間を音が通過するに要する時間から音速を求めた。こ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第175号

の時間は、2つのマイクロフォンの振動電圧をブラウン管オシログラフにかけて、リサジューの図形をかかせ、それから位相差を求めてきめた。

(4)の方法では、先づ積雪に穴を掘つて鉛直断面を作り、その断面のそばに音源の装置を置く。音源としては、水の電気分解によつて得られた爆鳴ガスを石鹼水中にみちびき、ぶくぶくと泡を作り、この泡に電気火花で点火して爆発させた。この断面から約1mの所にマイクロフォン M_1 を、約3mの所にマイクロフォン M_2 を埋めた。マイクロフォンはロツシエル塩の結晶マイクロフォンである。このマイクロフォンで受けた音波は、真空管UZ57で2段増幅、UY38で電力増幅して、電磁オシログラフに導いた。オシログラフの振動子にはH型を用いた。オシログラム上の時刻表示点は100分の1秒毎に印されているが、その間隔は約10~20mmになる様にした。音速が200~300m/secの場合には音源に近いマイクロフォン M_1 に衝撃波の先端が達して振動子を振らせた時刻と、遠い方のマイクロフォン M_2 に波が達して振動子を振らせた時刻との時間の間隔はオシログラム上では5~15mmの長さの間隔になる。この長さはコムパレーターによつて読みとつた。この長さの誤差は記録紙を巻きつけるマガジンの軸の傾き等の爲に0.1mm程度以下の誤差はあるとしても、一番大きな誤差は、オシログラムの線が光滲でぼけているため、何処を振動のはじまりとして取るかにかかっている。しかし、これも0.1mm程度で、結局2~3%以下の誤差と考えられる。

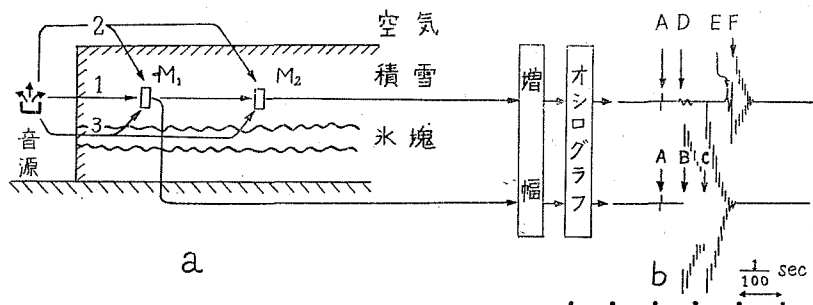
(4)の實驗に用いた管は木製で、長さは100cm、断面は10cm×10cmである。管の一方は閉ぢている。長さ50~80cmに切取つた積雪を管の奥に入れ、開口の方は20cm以上空気の部分を残した。そのわけは、管の開口附近では、波を一次元の現象として取扱えないから、それをさけたのである。管の開き口の所にスピーカーを置き正弦波の連続音を出した。用いた周波数は50~6000サイクル/秒である。マイクロフォンは直径3.8cm厚さ1.5cmで、音源に近い第1マイクロフォンは積雪の端から5cm位奥に埋めた。第2のものは第1のものから20cm奥に埋めた。第1のマイクロフォンで受けた波はブラウン管オシログラの水平軸に、第2のマイクロフォンで受けた波は垂直軸に入れて、リサジューの図形を画かせる。ここで注意すべきことは、ここで観測している波は、進行波だけであつて、反射波を含んでいないことである。これは次の實驗でたしかめられた。即ち深さ5cmの所ではブラウン管上で20~30mmの振幅を持つていた音波も、深さ60cm位の所では振幅はほとんど零であつた。このように音波の減衰が大きいから、管の奥の端で反射してかえつてくる波はないと考えてよい。

さて、音の速さを測るには2つのマイクロフォンの間に既知の周波数の波がいくつ乗つているかを知ればよい。20cmの間に n サイクル/秒の波が k 個乗つているとすれば、音の速さ v は $v = 20 \times n / k$.cm/sec であらわされる。20cmの間に波がいくつ乗つているかは、リサジューの図形の変化でわかる。先づリサジューの図形が斜めな直線になるときだけに注目する。このとき

2つのマイクロフォンで受けた波の位相差は、 π の奇数倍か、偶数倍か、何れかになっている。奇数倍の時の直線が例えば右上りとすれば、偶数倍の時の直線は右下りとなる。最初スピーカーの振動周波数を充分小さく取れば、周長は20cmよりもずつと長い。そのときリサージュの図形は楕円である。だんだん周波数をふやして、20cmに半波長が乗るようになってはじめて直線になり、そのときは右上りである。更に周波数をふやすと、波長がみちかくなり、20cmに1波長が乗るようになり、リサージュの図形は右下りの直線になる。このようにして周波数をふやしてゆくと、右下り右上りの直線図形が交互にあらわれる。そして最初の右上りの直線になつた時から順々に0.5, 1, 1.5, 2,個の波が乗っている事がわかる。これから上に挙げた式を用いて音の速さを計算出来る。

III. 測定結果及び吟味

(4)の方法を用いたとき、音波が音源から第1, 第2のマイクロフォン M_1, M_2 に達する路として次の3つが考えられる。(第1図a参照)第1は断面から積雪に入り、積雪中を迂つて M_1, M_2



第1圖 積雪中の音速

に達するもの。第2は積雪上の空気層を進み、マイクロフォンの埋めてある附近から積雪中に入る。この場合には、 M_1 に達した波が M_2 に達するのではない。第3は積雪下層にある氷塊の層を迂つて途中から積雪層に出てマイクロフォンに達するものである。これ等はオシログラムを見ればわかる。第1図bはオシログラムの1例である。 M_1 の記録線には先づ爆発させる爲の電気火花の電気振動が、電磁誘導で入つて来てAなるふれを起す。電磁誘導の伝播は非常に速いから、Aは爆発の時刻そのものの記録とみてよい。Aから約 5×10^{-3} 秒後に積雪の中を迂つたと思われる振動Bが始まり、その後約 2×10^{-3} 秒して空気中を迂つたと思われる振幅の大きな振動Cが始まり、約 5×10^{-3} 秒位で消える。 M_2 の記録線にもまず爆発の時刻をあらわす電磁誘導振動Aがはいり、それから約 4×10^{-3} 秒後に振幅の小さな振動Dが3回位ふれて静まる。それから約 10^{-2} 秒後に小さい振幅の振動Eと大きな振幅の振動Fとがある。

振動Dの伝わる速さを計算してもとめると700~1000m/secとゆう大きな値で、しかもこの振動は日によつて現れたり現れなかつたりする。これから考えて、Dは積雪中の氷塊や氷層になつ

ている部分、すなわち第3路を通つて来た音波と考えられる。振幅が小さいのは初めに空気から氷塊に音波が入るとき多くは反射されるからである。Eは第1路即ち積雪中を通つた音波が M_2 に達した時刻を示し、Fは第2路即ち空気中を通つた音波が M_2 に達した時刻を示す。前の項でのべた様に、積雪のなかでの音波の減衰は相当に大きい。それにくらべて空気中の減衰は零と考えてよい。これによつて、振幅の小さいB、Eは積雪中を伝わつた音波によるもの、振幅の大きいC、Fは空気中を伝わつた音波によるものと解釋するわけである。

第2路を通つてマイクロフォンに達する音波のつたわり方についてしらべてみよう。この路の最短路は、積雪の鉛直断面に沿うて上進し、積雪表面に達して廻折を起して直角に曲り、積雪表面に沿うて進みマイクロフオンの前方の適当な所から積雪中に入り、マイクロフォンに達する。今積雪中の音速を空気中の音速の $2/3$ とすれば、深さ h に置かれたマイクロフォンに達する音は、マイクロフォン直上から約 $2h/\sqrt{5} \approx h$ 位前方で空気中から積雪中に入ることになる。しかしはじめの廻折は起りそうにない。オシログラムによつてみると、爆発音の基本振動数は毎秒約1300で（オシログラムの振動子として固有振動数の大きいA型振動子を用いれば更に毎秒4000程度の高調波が乗つている事がわかるが、振幅は小さいし、廻折はより一層起りにくいものであるから、今の議論では考慮しない。）空気中での波長は約25cmである。この様な波長のみちかい波が、直角に廻折する事は考えられない。故に第2路を通る波は少くとも一度はどこかで反射した後廻折して積雪表面に沿うて進み、マイクロフォンに達するものとおもわれる。實際の例を挙げると、最短路（空気中の長さに換算して1.8m位の路程）を通れば 5.5×10^{-3} 秒かかる所を實際は 10^{-2} 秒（空気中3.3mを通過するに要する時間）かかる事がオシログラムのA-Cの間隔からわかつた。

M_1 、 M_2 の位置が前に書いた様な距離にあるとEとFとがほとんど同時に始まるので、後には M_1 は音源から50cm M_2 は更に1m遠くに置いてEがFより先に始まる様にした。

この様にして得られた積雪中の音速には、100-250m/sec 程度のものと、みかけの速さが700-100m/sec 位のものがあることがわかつた。まえの速度が小さいものは第1路即ち雪のなかだけを伝わつたもので、あとの速度の大きいものは第3路即ち積雪中の氷塊や氷層をつたつた

ものである。

雪のなかだけを伝える音波の速度と雪の密度とを第1表にかかげる。6つの測定で、積雪の温度も密度もほぼ一定しているので、測定値もほとんど同じ値で、積雪の種るいによる音速の差異をはつきり知る事は出来なかつた。この表にある空気中の音速には、2つのマイクロフォン

第1表 野外積雪中の音速。
爆発音による測定、積雪の深さは約50cm

1949 月日	密度	気温 °c	雪温	雪中の速さ m/sec	空気中の速さ m/sec
II 7	0.34	-0.2	0.0	240	323
10	0.30	-1.2	0.0	225	346
15	0.29		0.0	187	334
III 1	0.37	-2.8		222	
11				233	340
12				214	

を空気中に出して測定したものもあるし、積雪中に入れたままで、オシログラムのCEの間隔から出したものもある。この値と、0°Cでの音速として知られている330m/secとを較べて測定の実差の程度を知る事が出来る。

この方法は、少量の積雪でまにあうので、雪質による音の速さのちがいをしらべるのに適している。結果は第2表にある。これから密度によるちがい、温度によるちがい、積雪粒子の形、大

第2表 管のなかに入れた雪のなかの音速

1949 月日	密度	雪質	室温	雪温	音の速さ m/sec	ヤング率 10 ⁷ dyn/cm ²
17	0.115		0.27	0.0	258	6.6
18	0.21		6.0	0.0	256	13.7
20	0.125	ふりたて			277	9.6
	0.28	上記のゆきをおしかためる			207	12.0
23	0.25	ざらめゆき	4.0	0.0	245	15.0
26	0.18	上記のゆきに水をそそぐ			237	14.0
		低温室から出したしまりゆき	3.0	-23.0	230	9.5
		1時間後		-9.0	240*	11.7
		2 "		-1.0	244*	
		4 "		0.0	255*	
		8 "		"	247*	
27	0.40	低温室から出したざらめゆき	4.5	-17.0 } 0.0	180	13.0

きさによるちがいがわかる。

a: 密度が大きくなると音の速さはおそくなる。

3月20日のふりたての雪は、密度0.125で音速は約280m/secであつたがこれをおしつけて約2倍の密度の雪にしたら音速が約210m/secに減つた。積雪粒子の形、大きさは変化が無いわけだから、この音速の変化はただ密度の変化だけでおこ

つたのである。このときの雪の結晶は針状、棒状であつた。3月26日の雪も似た様な形状であつたが密度は前二者の間にあつて、速さも中間にある。

b: 粒子が大きくなると速くなる。

3月20日の密度0.28の積雪と3月23日の密度0.25の積雪とは密度はほぼおなじである。しかし前者は針状、棒状の結晶の新雪で雪の粒は小さく、後者は小粒のざらめゆきで、雪の粒は前者より大きい。そして粒の大きい前者が音速は大きい。

c: 温度が上り、積雪が少しとけて、含水率がふえると、しまりゆきでは音速が大きくなるが、ざらめゆきではほとんど変らない。

3月26日の実験に用いた雪は、降つて1晝夜位した未だ結晶の原形をとどめている雪を管に入れ、低温室に1晩入れておいたものである。これを室温約3°Cの実験室に移し約10時間程かけて自然に温度が上り、しめつてゆくあいだ測定をつづけた。第2表に出ている値は600~3500サイクル/秒の音波を使つて測定した値の平均である。電源電圧が変動したため、周波数が変つたので、測定値のばらつきの幅は約15/msec位あるが、平均値は相当に信用を置けると思う。又周波数がふえるほど、すなわち波長がみちかくなるほど、2つのマイクロフオンの間隔20cmの間

に乗る波の教がふえるので測定値の精度はあがる、*印のあるものは特に2500-3500サイクル/秒の音波を使つて測定した値の平均である。-23°C では230m/sec であつたものが-9°C、-1°C の平均では240m/sec、0°C では 250m/sec となり、明らかに温度がのぼるとともに系統的に音速も大きくなつてゐる。3月27日にはざらめゆきを取つて、やはり低温室に1晩入れておいたものについて、うえとおなじ測定を行つた。しかしこの場合は-17°Cから0°Cまでの温度範囲にわたつての測定であるが、温度による音速の変化はほとんどみられない。

第2表にはヤング率 E が併記してあるが、これは積雪の伸縮によつて音波が伝わりと考へて音速 v と密度 ρ との間に $E = v^2 \rho$ なる関係があるものとして計算したものである。積雪中を音が伝わる機構が全く別のものであれば、ここに得られた E の値は意味のないものである。

IV. あ と が き

積雪の断面 A 点で発せられた音が、他の点 B に達するには3つの経路がある。第1は積雪中を通るもので約190~340m/secの速さであり、第2は、はじめ空気中を通つて B 点近くで積雪中に入るもので330~340m/sec ですすむ。但し、少くも1度は反射したものであるから、みちのりは長くなる。第3は積雪中の氷塊中をすすむものと思われるものでみかけの速さは、700~1000 m/sec 程度であるが、振幅は小さい。

積雪の種るいによつて、音の速さがどう変るかをしらべた結果次の様な事がわかつた。

- 1, 密度が大きい程、音の速さは小さくなる。
- 2, 密度は同じでも粒子が大きい程速い。
- 3, しまりゆきは温度が上つてしめつてくると(含水率が大きくなると) わづかに速くなる。
ざらめゆきにはこの変化はみとめられない。

この報告に当りいろいろと御指導下さつた吉田順五教授に感謝の意をあらわす。

R é s u m é

Snow cover deposited on an open field changes its properties. There are many kinds of snow with different natures. It is of great importance to find a way of classifying the type of snow of different natures. Many attempts have been made to find out quantities suitable for snow classification, but no other quantities than density and temperature have been used in practice, which is insufficient for this purpose. The present author made measurements on the propagation of sound wave in snow with a hope that it may be useful for snow classification and for the solution of many other snow problems.

In the first place the velocities of sound were measured. Measurements were made directly on the snow cover deposited on the open field. Two microphones were buried

some distance apart in the snow cover and an explosive sound was produced in a hole made in it near by them. (cf. Fig.1a) The time of propagation of the sound wave from one microphone to the other was measured by an electromagnetic oscillograph and the velocity was given by the ratio of the distance between the microphones and the time of propagation.

We found that there were three paths of sound from a sound source to a microphone (cf. Fig. 1a). The first path was in the snow layer only. In this case the velocities of sound were in the range from 190 to 240 m/s in accord with the values obtained by other methods. The second path was in the air at first and then in the snow layer near the microphone.

The path in the air had at least one reflection, so that the apparent time of propagation was longer than that of the minimum path which was assumed to have no reflection. The third path was considered to be in the layer of ice crust under the snow layer and the apparent velocities were about 700–1000 m/s.

Another experiment was performed in a room of the laboratory. A long wooden pipe ($10 \times 10 \times 100$ cm³) was filled with snow and a sound source of variable frequency ν was placed in front of one of its ends. Two microphones were buried in the snow at a distance of L apart from each other. The electromotive force produced by one of them was used to move the light spot of a cathode-ray oscillograph horizontally and that produced by the other was used to move it vertically. The light spot generally runs along an elliptic path but the path is straight if the condition $L = nV/\nu$ is fulfilled, where V is the sound velocity in snow and n is an integer. By continuous variation of frequency of the sound source we can obtain the ν satisfying this condition and this value of ν gives the value of V .

One and the same sample of snow has a constant V for the range of frequency from 0.5 to 6 kc/s but different samples give very different values of V extending from 150 to 300 m/s. V is so sensibly affected by the structure of snow that no definite relation between them has yet been found. But it can be said that snow has the following qualitative properties.

(a) The larger the snow density ρ the smaller is the velocity V for the same kind of snow. For example, two samples of compact snow taken out at the same spot of snow cover, one of them being more compressed than the other, gave: $V = 277$ m/s, $\rho = 0.125$ g/cc and $V = 207$ m/s, $\rho = 0.28$ g/cc.

(b) The larger the ice crystals composing snow, the larger is the velocity for snows of the same density, For example, a sample of granular snow composed of comparatively large ice crystals gave $V = 245$ m/s, $\rho = 0.25$ g/cc and a sample of compact snow composed of comparatively small ice crystals gave $V = 207$ m/s, $\rho = 0.28$ g/cc.

(c) The velocity in compact snow is increased as its temperature is increased. The same sample of compact snow had a velocity of 230 m/s at -23.0°C , while a velocity

of 247m/s at 0°C when it was slightly wet. The velocity in granular snow shows scarcely any change with temperature. A sample of granular snow had the same velocity at 0 °C and -17.0°C.