



Title	電気容量法による雪氷混相流密度の時間変動の測定
Author(s)	前野, 紀一; MAENO, Norikazu
Citation	低温科学. 物理篇, 45, 19-26
Issue Date	1987-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18533
Type	departmental bulletin paper
File Information	45_p19-26.pdf



電気容量法による雪氷混相流密度の 時間変動の測定*

前野 紀一

(低温科学研究所)

(昭和61年8月受理)

1. はじめに

雪崩、吹雪、等のように運動しつつある雪は、一括して「雪氷混相流」とみなされる¹⁾。雪氷混相流の最も重要な特徴は、雪氷粒子と流体(空気)が相互に運動し、作用しあう点にある。通常、これらの運動と相互作用は、雪氷粒子と流体の運動をそれぞれ別個に測定して調べられる。

一方、粒子間および粒子・流体間相互作用は、雪氷混相流の密度に強く依存する。もしも、密度が大きいならば、任意の粒子の囲りに存在する粒子の数は平均的に多く、距離は短かいから、粒子間相互作用が卓越した特徴的な粒子流となるであろう。逆に、密度が小さいならば、粒子と流体間の相互作用の方が重要となる。

雪氷混相流の密度は、その動的挙動を反映して、時間的にも空間的にも激しい変動を示す。このため、密度測定に、一定体積を切り出してその質量を測定するという従来の方法を使うことはできない。雪氷混相流の密度を測定するためには、1)流れを乱さない(非接触)、2)時間変動に追従する(高応答性)、の少なくとも2つの条件を満たした方法を用いなければならない。

著者等は、上記の2つの条件を満たす密度測定方法として、光透過法と電気容量法の適用を試みた²⁾。光透過法も電気容量法も、測定は比較的簡単で、時間応答性も高い。ただし、光透過法は高密度になって光の透過量が少なくなると測定ができなくなる欠点がある。

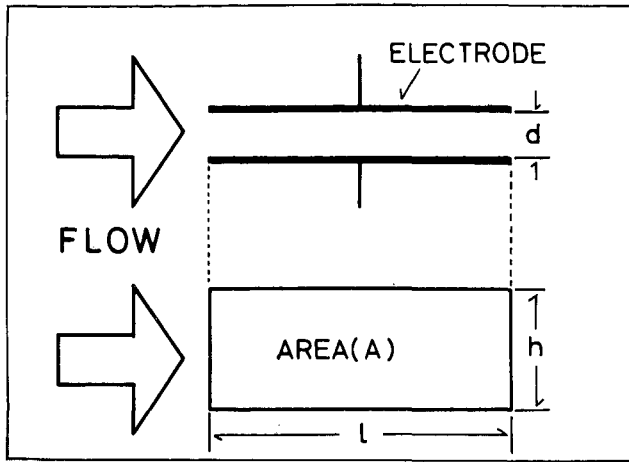
電気容量法には、原理的に測定密度範囲の制限はない。また、雪氷混相流の電気物性(誘電率)を直接測定しているため、必要ならば流れの構造や物性の解析にも使えるという利点がある。

2. 電気容量法による空間密度測定

2.1. 測定の原理

電気容量法による雪密度の測定は、原理的には、雪のキャパシタンス(電気容量, electric capacitance)すなわち誘電率(dielectric constant)の測定である。第1図に示したように、雪氷混相流が、平行に置かれた2枚の平板電極の間を流れているとき、電極間のキャパシタンス C は

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2899号



第1図 電極の概略図
 平面図(上)と側面図(下) 面積 $A=hl$, 間隔 d

$$C = \kappa C_0$$

である。ここで、 κ は雪氷混相流の誘電率、 C_0 は電極の幾何学的キャパシタンス (電極間が真空のときのキャパシタンス) である。 C_0 は、電極の面積 A 、距離 d 、真空の誘電率 $\epsilon_0=8.854$ pF/m として

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \tag{2}$$

と書き表わされる。

雪氷混相流は氷粒子と空気の二相混合誘電体とみなすことができる。したがって、水分子双極子の回転による氷の誘電分散がほとんど無視できる高周波領域において、雪氷混相流の誘電率 κ は、ウィーナーの混合則³⁾ から

$$\frac{\kappa - 1}{\kappa + F} = \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{氷}}} \right) \left(\frac{\kappa_{\text{氷}} - 1}{\kappa_{\text{氷}} + F} \right) + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{氷}}} \right) \left(\frac{\kappa_{\text{空気}} - 1}{\kappa_{\text{空気}} + F} \right) \tag{3}$$

と書ける。ここで、 ρ と $\rho_{\text{氷}}$ は、雪氷混相流と氷の密度、 $\kappa_{\text{氷}}$ と $\kappa_{\text{空気}}$ は、氷と空気の誘電率、 F は形数 (Formzahl) で粒子の配列や結合等の構造をあらわす無次元量である。 $\rho_{\text{氷}}=917$ kg/m³、 $\kappa_{\text{氷}}=3.2$ 、 $\kappa_{\text{空気}}=1$ の値を用いると、式(3)は、

$$\kappa = 1 + \frac{\rho(F+1)}{417(3.2+F) - \rho} \tag{4}$$

となる。

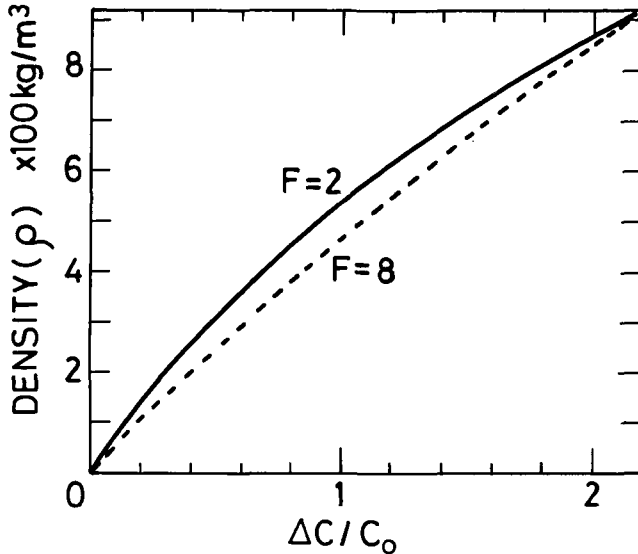
結局、雪氷混相流の存在によるキャパシタンスの変化量 ΔC は、式(1)、式(2)、式(4)から

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \kappa - 1 = \frac{R\rho}{S - \rho} \tag{5}$$

あるいは

$$\rho = \frac{S}{1 + R/(\Delta C/C_0)} \tag{6}$$

と表わされる。ここで $R(=F+1)$ と $S(=417(3.2+F)=1334.4+417F)$ は、雪氷混相流の形数 F で決る定数である。通常の積雪の構造は $F=8$ で近似されるから⁴⁾、 $R=9$ 、 $S=4670 \text{ kg/m}^3$ であるが、雪氷混相流の場合粒子は孤立した球と近似できると考えられるから、 $F=2$ で、 $R=3$ 、 $S=2168 \text{ kg/m}^3$ となる。したがって、なんらかの方法で ΔC を測定すれば、式 (6) を使って密度が求められることになる。第2図に ρ と $\Delta C/C_0$ の関係を示した。



第2図 雪密度とキャパシタンス変化の関係。実線は孤立球粒子の場合 (式 (6) で $F=2$, $R=3$, $S=2168 \text{ kg/m}^3$)、破線は通常の積雪の場合 (式 (6) で $F=8$, $R=9$, $S=4670 \text{ kg/m}^3$) である。

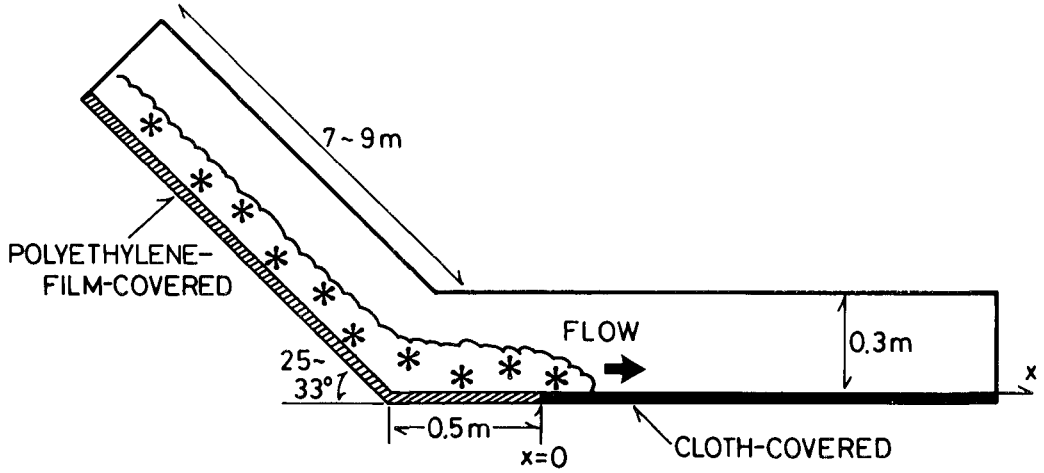
2.2. 測定方法

雪氷混相流によるキャパシタンスの変化量 ΔC の測定には、電気容量式変位計 (岩崎通信, ST-3501) を用いた。この測定器の主要部であるブリッジ回路と変調回路は、被測定物のキャパシタンスが平衡時の C_0 から ΔC だけ変化すると、 ΔC に比例した非平衡出力を発生する。搬送波の周波数は 3.5 MHz なので、周波数帯幅は DC から 10 kHz と広く、雪氷混相流のような速い密度変動にも追従する。出力信号は、データレコーダによって磁気テープに記録された。

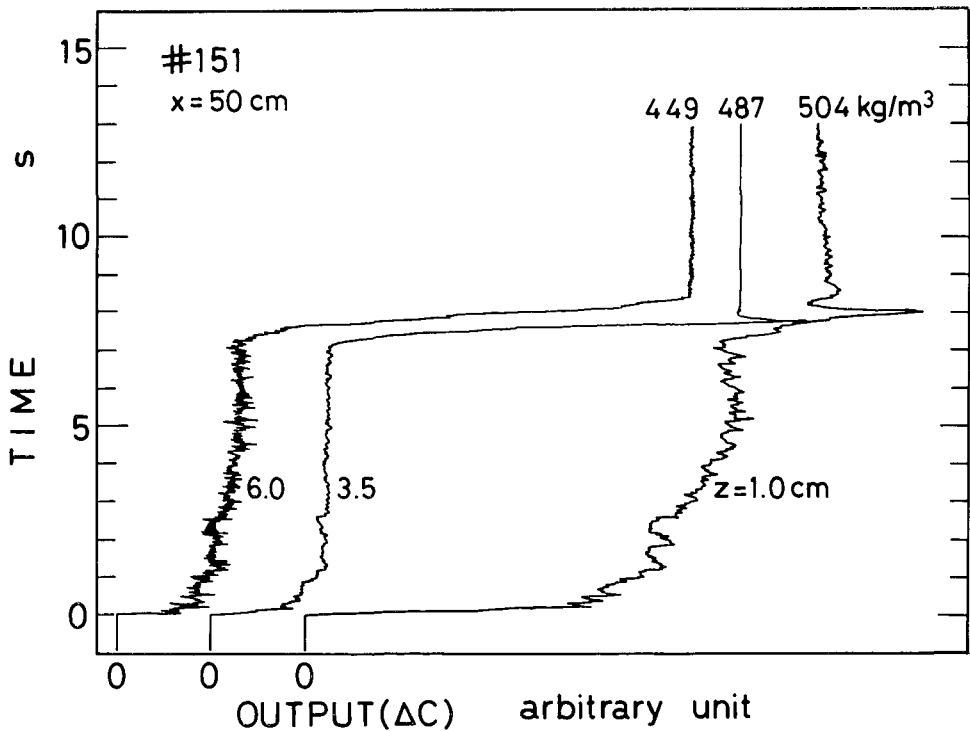
電極は任意の面積 ($A=hl$, h : 高さ, l : 長さ) と距離 (d) のものが使えるが、以下に述べるのは、 $A=0.001 \text{ m}^2$, $d=8 \text{ mm}$ の場合である。この電極は、第1図に示したように、長さ $l=5 \text{ cm}$, 高さ $h=2 \text{ cm}$ の平板電極で、流れの方向に沿って間隔 $d=8 \text{ mm}$ で設置される。この電極の幾何学的キャパシタンスは式 (2) より $C_0=1.11 \text{ pF}$ であるが、実際の値 (実効値) はこれより大きい。これは、雪氷混相流装置の制約のため、電気力線のふくらみをガード電極によって除去することができなかったためである。なお、実効値は電極の設置状況によって異なるから、その都度測定する必要がある。

C_0 の実効値を求める困難は、別の密度測定により、最低1組の密度 (ρ) とキャパシタンス変化 (ΔC) の数値関係を得ることによって解決された。雪氷混相流の実験の場合、所定の位置

に設置された電極は、1回の混相流実験の終了時、雪(デブリ)に完全に埋没する。この時の雪密度を通常の質量・体積法で測定すれば、式(5)から C_0 の実効値が求められる。この際、密度測定はデブリ形成直後に行なわれたので、粒子間の結合は少なく、構造模型としては、 $F=2$ を仮定した。

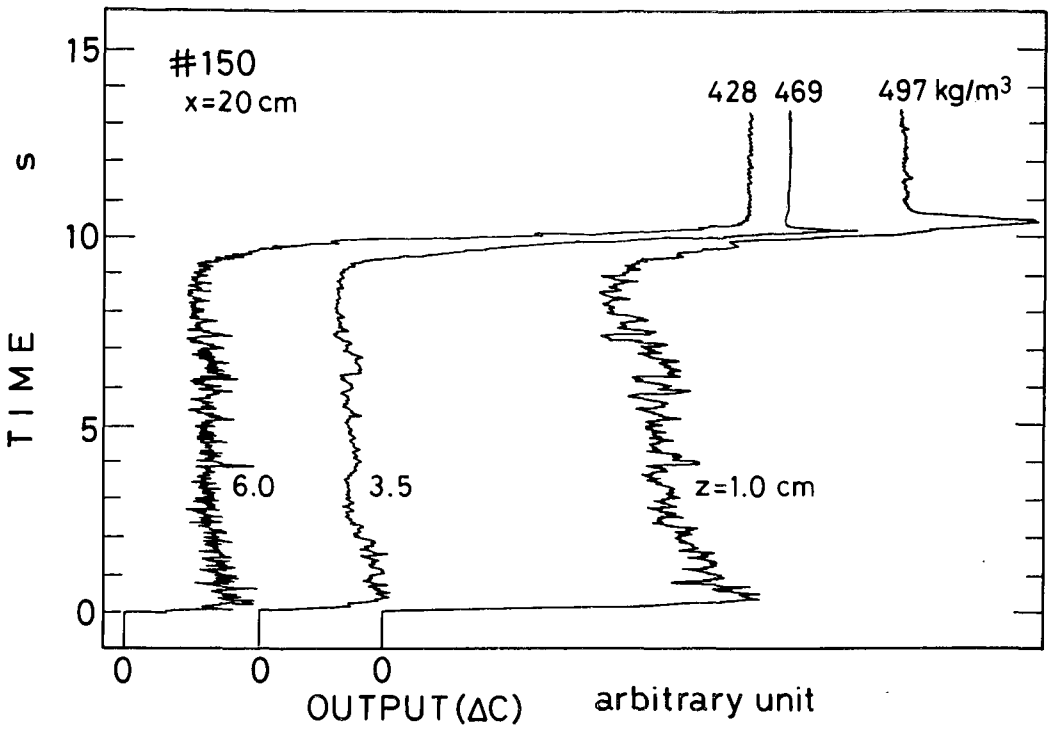


第3図 雪氷混相流実験装置

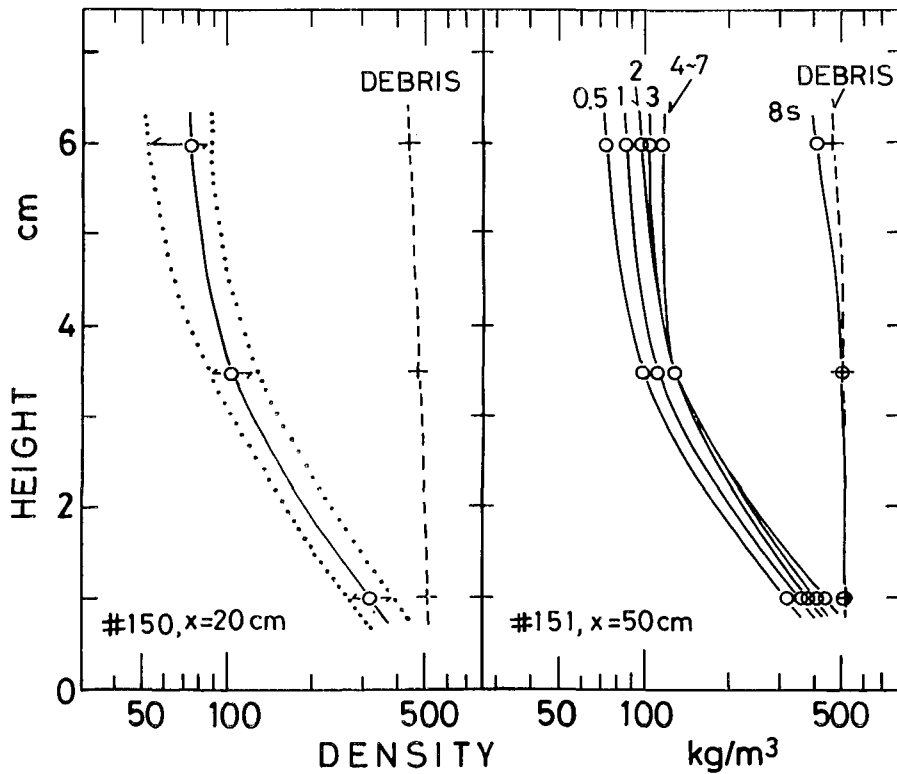


第4図 密度の時間変化 ($x=50$ cm)

ただし、出力は ΔC に比例した電圧。電極が雪に埋没した後の密度値は、直接測定したものである



第5図 密度の時間変化 ($x=20$ cm)。ただし、出力は ΔC に比例した電圧。
電極が雪に埋没した後の密度値は、直接測定したものである



第6図 密度分布の時間変化。左図 ($x=20$ cm) において、点線と矢印は変動幅を示す。数字は時間、破線は電極埋没後のデブリの密度を示す

3. 測定結果

今回の実験では、独立な3個の電極を高さ方向に間隔5 mmで並べ、雪氷混相流の密度の高度分布を測定した(雪面より $x=1\text{ cm}$, 3.5 cm , 6 cm)。雪氷混相流は、傾斜 27° の樋を流下したあと、水平樋に流れ込む(第3図)。水平樋の底には $x=0$ 以降粗い布がしいてあるので、その表面は混相流の通過とともに雪でおおわれノン・スリップの状態となる。1回の混相流は10~30秒間流れ、 $x=0$ での速度は約 6 m/s である。

第4図に $x=50\text{ cm}$ における測定記録の1例を示す。ただし、記録は密度そのものではなく、 ΔC に比例した出力電圧である。各高度の出力電圧は、混相流の到着と同時に増加し、1~

第1表 雪氷混相流の空間密度

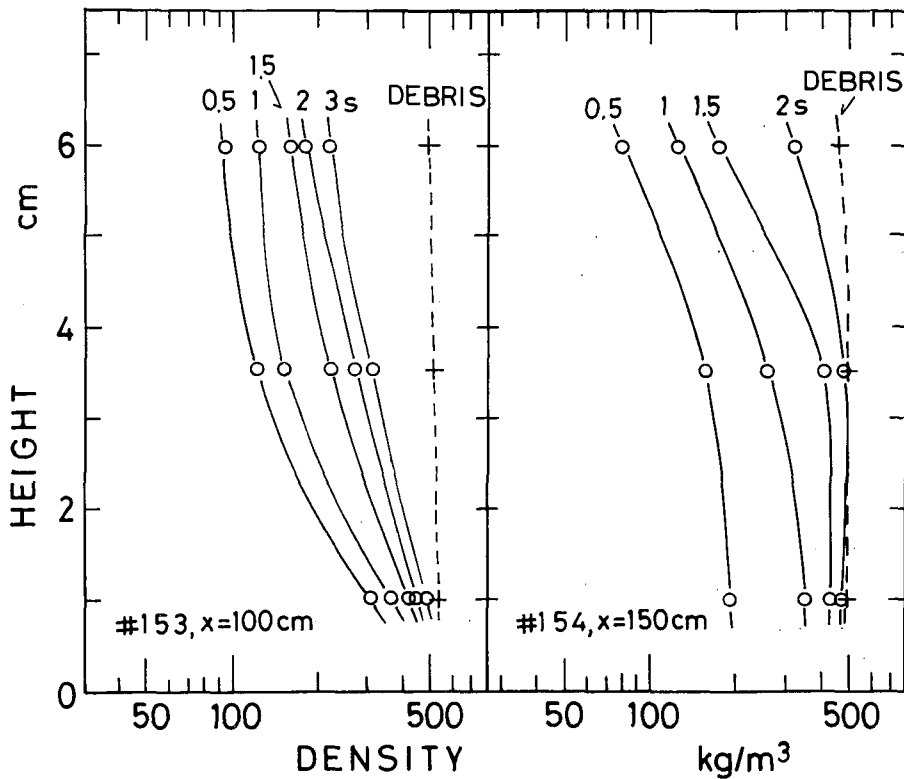
測定されたキャンパンス変化 ΔC は式(6)を用いて密度(ρ)に変換された。この時、 $R=3$, $S=2168\text{ kg/m}^3$ と置き、 C_0 の実効値は、 ΔC と ρ の1組の測定値から求められた。時間の原点は、雪氷混相流が電極に到達した瞬間である

実験番号	# 150			# 151			# 153			# 154		
	$x=20\text{ cm}$			$x=50\text{ cm}$			$x=100\text{ cm}$			$x=150\text{ cm}$		
位置												
高さ (cm)	1.0	3.5	6.0	1.0	3.5	6.0	1.0	3.5	6.0	1.0	3.5	6.0
時間 (秒)	密度 (kg/m^3)			密度 (kg/m^3)			密度 (kg/m^3)			密度 (kg/m^3)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	374	125	87	317	99	72	320	127	90	190	155	79
1.0	345	122	84	351	111	86	366	150	122	351	257	123
1.5	338	118	81	364	123	93	428	222	160	430	415	176
2.0	321	110	75	371	127	96	450	274	177	469	485	318
2.5	307	95	72	384	127	96	475	298	197	482	485	463
3.0	304	95	72	397	127	103	496	311	216	484	485	463
3.5	—	—	—	—	—	—	500	350	225	484	485	463
4.0	304	103	70	418	127	110	502	384	232	484	485	463
4.5	—	—	—	—	—	—	520	508	361			
5.0	297	95	72	434	127	116	520	511	502			
5.5	—	—	—	—	—	—	520	511	499			
6.0	300	92	72	434	127	116	520	511	497			
7.0	293	88	69	431	127	116	521	511	497			
8.0	261	82	61	504	486	403						
9.0	272	84	63	504	—	449						
10.0	466	469	305	501	487	449						
11.0	497	469	428									
12.0	497	469	428									
備考	0~9秒間の平均			電極は約7.5秒で雪に埋没			電極は約4.5秒で雪に埋没			電極は約2.5秒で雪に埋没		
	309 100 73											
	電極は約9.5秒で雪に埋没											

4秒で定常値になっている。混相流の停止と堆積は、 $x=200\text{ cm}$ 付近から始まり、次第に上流に及ぶ。第4図の場合、電極は約7.5秒で完全に雪に埋没している。埋没直前、 $z=1\text{ cm}$ と3.5 cmの記録に現われている鋭いピークは、埋没時電極に加わる機械的衝撃によるものと考えられるが詳しい原因は明らかでない。

$x=20\text{ cm}$ の位置における同様な記録例を第5図に示す。この場合、混相流は、到着後約9秒間ほとんど定常値を保ちながら流れている。第4図と第5図の記録から式(6)を使って求めた各時刻における密度を第6図に示した。流れの密度は $\pm 20\text{ kg/m}^3$ の範囲で変動するので、図に示したのはその平均値である。数値はまとめて第1表に示した。

第6図左($x=20\text{ cm}$)の結果から、雪氷混相流の「流れ層(下層2~3 cm)の密度が $100\sim 300\text{ kg/m}^3$ の範囲にあることがわかる。その上方の「雪煙り層」の密度は 70 kg/m^3 かそれ以下である。一方、第6図右($x=50\text{ cm}$)の場合、滑走面での雪の堆積は混相流の到着直後から始まり、約7.5秒で完全に電極を埋没している。



第7図 密度分布の時間変化
 数字は時間、破線は電極埋没後のデブリの密度を示す

第7図は、 $x=100\text{ cm}$ と $x=150\text{ cm}$ における密度分布の時間変化である。いずれの場合も、雪の堆積は混相流の到着直後から始まり、電極は約4.5秒($x=100\text{ cm}$) および約2.5秒($x=150\text{ cm}$) で雪に埋没している。

4. おわりに

雪氷混相流の空間密度の測定法として、電気容量法を試みた結果、非接触と高速応答の点で利用価値の高いことが示された。この方法では、密度変化は、キャパシタンスの変化(出力信号は電圧)としてあらわれる。したがって、これを実際の密度に換算するには、混合誘電体のモデルを仮定することと最低1個の密度の実測値が必要となる。しかし、これはそれほど困難な作業ではない。

電気容量法による雪密度測定は、降雪、吹雪、雪崩等のほとんどすべての雪氷混相流に使用可能であり、特に時間変動を伴なう現象に有効である。

謝 辞 電気容量式変位計の利用については、北海道大学低温科学研究所の成田英器氏と福田正己氏、また論文の推稿に関しては成瀬廉二氏と西村浩一氏のお世話になった。ここに記して感謝の意を表わします。この研究に使用された経費の一部は、文部省科学研究費補助金から支弁された。

文 献

- 1) 前野紀一・成瀬廉二・西村浩一・竹井 巖・海老沼孝郎・村上茂樹・小林俊一・佐藤篤司 1985 雪氷混相流の研究 I. 一雪氷混相流の定義と分類一, 低温科学, 物理篇, **44**, 131-137.
- 2) 西村浩一・海老沼孝郎・小林俊一・佐藤篤司・成瀬廉二・前野紀一 1985 雪氷混流の研究 II. 一気相雪氷混相流の実験装置と内部構造一, 低温科学, 物理篇, **44**, 139-155.
- 3) van Beek, L. K. H. 1967 Dielectric behavior of heterogeneous systems. *In Progress in Dielectrics* (ed. J. B. Birks and others). London Heywood Books, London, **7**, 71-114.
- 4) 前野紀一・福田正己編 1986 雪氷の構造と物性, 基礎雪氷学講座, 第I巻, 古今書院, pp. 203.

Summary

An electric method was developed to measure the density of snow particles in motion; the dielectric constant or capacitance of a volume containing snow particles was measured with an electric capacitometer (Iwatsu ST3501), which works at a frequency of 3.5 MHz and measures the deviation from a balanced capacitance.

The density of snow in a snow flow was obtained continuously at three heights (1, 3.5 and 6 cm) by using three sets of electrodes (area: 2 cm × 5 cm, spacing: 8 mm), after measured values of electric capacitance were converted to densities by assuming that the snow flow is a mixture of individual snow particles.