



Title	湿雪の付着強度
Author(s)	水野, 悠紀子; MIZUNO, Yukiko; 若浜, 五郎 他
Citation	低温科学. 物理篇, 35, 133-145
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18332">https://hdl.handle.net/2115/18332</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p133-145.pdf



## 湿雪の付着強度\*

水野悠紀子・若浜五郎

(低温科学研究所)

(昭和52年10月受理)

### I. ま え が き

湿雪は雪粒子間の固着力が強いばかりでなく金属, その他の固体の表面にも容易に付着する。電線着雪をはじめ, 湿雪の付着が原因で引き起こされる災害は極めて多い。近年着雪防止に関する研究<sup>1),2)</sup>が行なわれてきたが, 湿雪と各種固体表面との付着力を実測した例は2~3に過ぎない<sup>3),4)</sup>。

湿雪の付着強度は湿雪と固体表面間の水膜による毛管負圧  $\left(-\frac{\sigma}{r}\right)$  が主因であると考えられている。ここで  $\sigma$  は水の表面張力,  $r$  は水膜の曲率半径である。このため付着強度は表面の性質, 表面状態, 粗度, 雪質(密度, 粒度), 含水率などによって変化するのであろう。

この論文はガラス, アルミニウム, テフロンなど電線材料, 被覆材料その他自然界にさらされて使用されることの多い9種類の材質に湿雪を付着させ, 付着板と湿雪を一定速度(1 mm/min)で引き離す時の張力を測定し, それが湿雪の含水率, 密度, 付着材質の性質とどのような関係にあるかを調べたものである。我々の測定条件の下では含水率10%以下では, 含水率の増加と共に付着強度も増し, 10~15%の湿雪に対して, ほとんどの材質で最大値を示したが, 20%から30%の間ではむしろ減少傾向にあるものが多かった。

付着強度は単位面積あたりの力で表わされるため, 接触面の状態, 特に見掛け接触面積と真実接触面積の違いを考慮しなければならない。同一の見掛け接触面積でも真実接触面積は含水率, 密度によって変化する。また雪の含水率と密度とは相互に密接な関係があるため付着強度を含水率だけの関数として表わすことは出来ない。今回の実験結果では10%以上の含水率の雪に対しては含水率よりも密度の方が付着強度に効果を及ぼしていると考えられる。

固体表面の濡れの性質は, 湿雪との付着を考える場合最も重要なものである。水滴法で水との接触角を測定し, 表面の濡れと付着力の大きさとの関係を検討した。付着強度は, 接触角の他に材質の柔軟性, 弾性などにも依存することが明らかになった。

### II. 試料及び測定方法

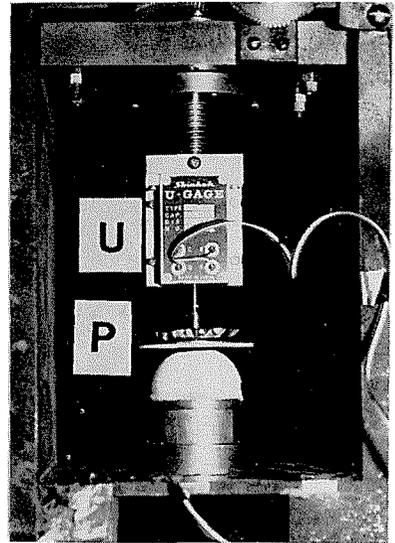
+1°Cの実験室に積雪のブロックを置くと表面から徐々に融解が始まり時間と共に含水率を増す。湿雪としてはこのように自然に融けて含水率をもったものを使い, 0°Cの雪と水とを混合して人工的に湿雪を作ることにはしなかった。このため積雪のブロックの含水率分布は時間

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1858号

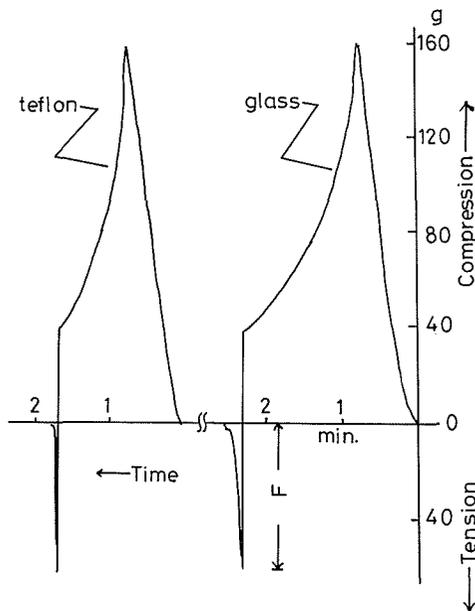
と場所によって変化していくが、実験試料を採取すると同時にその場所の雪の含水率を測定した。付着強度の測定は含水率4%から30%の湿雪についておこない、その間およそ5%間隔でおこなった。第1図に測定装置の写真を示す。ストレンゲージUを介して付着板Pが1mm/minの速度で上下に動き、種々の材質で作られた付着板は容易にストレンゲージの端に取り付けることができる。直径5cmの半球状の雪の塊を付着板の下におき1mm/minの速度で付着板を降下させ接触させる。

さらに付着板を降下させると雪と付着板は点接触から円形の面で接触するようになる。今回の実験では一定の圧縮力(160g)になるまで圧縮した。160gになった時付着板の降下を止め応力が緩和して40gになった時付着板を1mm/minで引き上げると力は圧力から張力に変わり、雪と付着板が完全に離れると零にもどる。第

図2は測定時の力-時間曲線の記録の例で、付着板がテフロンとガラスの場合である。ここで湿雪と付着板が離れる瞬間の最大張力 $F$ を測定し、その時の接触面積で割って付着強度を求めた。この記録から明らかなように、試料の採取のし方によって一定圧縮力に達するまでの時間が異なる。このことは半球状の雪の密度や含水率により接触面積が異なる事を示している。接触面積は一定圧縮力になるまでの付着板の降下量から計算によって求める方法と、半球の雪の



第1図 測定装置 U: ストレンゲージ, P: 付着板



第2図 力-時間曲線の記録の1例 付着板はテフロンとガラス

上面に作られた円形の直径をノギスで実測する方法をとったが両方法の間にほとんど差はなかった。

今回の実験に用いた付着材料は実用的に広く用いられている、ガラス、アルミニウム、セルローズアセテート、テフロン、ビニール、ポリエチレン、エチレンプロピレンゴム、ブチルゴム、シリコンゴムの9種類である。いずれも2~3mmの厚さの板状材料である。付着強度と固体表面の濡れの関係はよく知られているが、測定に使用した材料の水に対する接触角を水滴法で測定し、その結果を第1表の最下段に示した。この場合水滴の温度は+1°Cである。清浄なガラスに対する水の接触角は10°前後と報告されている<sup>5)</sup>が、我々の使用したものは35°~40°であった。実験材料はすべて工業用のものばかりで特別に表面処理はおこなわなかった。

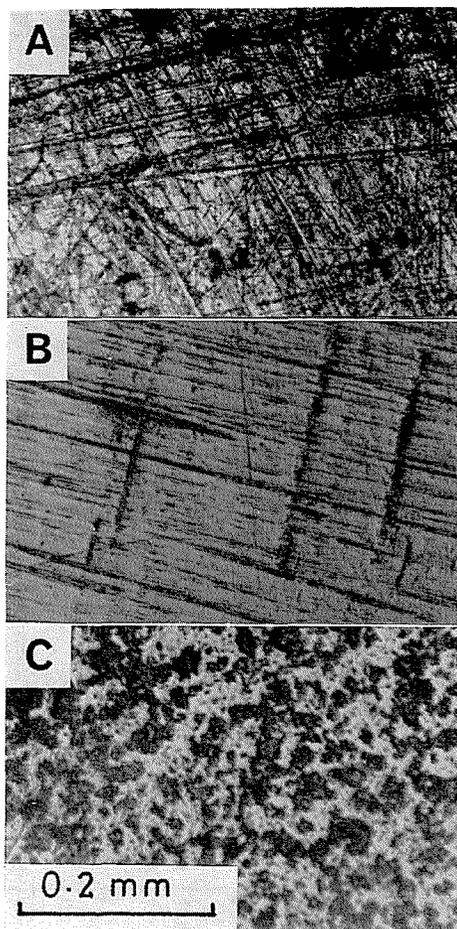
第3図にアルミニウム、ビニール、ブチルゴムの表面の顕微鏡写真を示した。Cのブチルゴムには他の2種類に見られた細長い条痕は観察されないが、白黒の斑点があり、このような表面状態はシリコンゴムでも同様であった。

### III. 測定結果

#### 1. 付着強度と含水率、接触面積の関係

前節の測定方法に従って求めた付着強度と含水率の関係をまとめて第1表に示した。それぞれの値は同じ含水率について3~4回の測定値の平均である。この中から水との接触角が小さいガラス、セルローズアセテート、アルミニウムについて、付着強度と含水率の関係を示したのが第4図である。第1表及び第4図からわかるように付着強度は含水率が10%以下の湿雪の場合には含水率の増加と共に増大し、15%前後で最大の値を示すが、20%から30%の範囲ではほとんど含水率による変化は見られなかった。

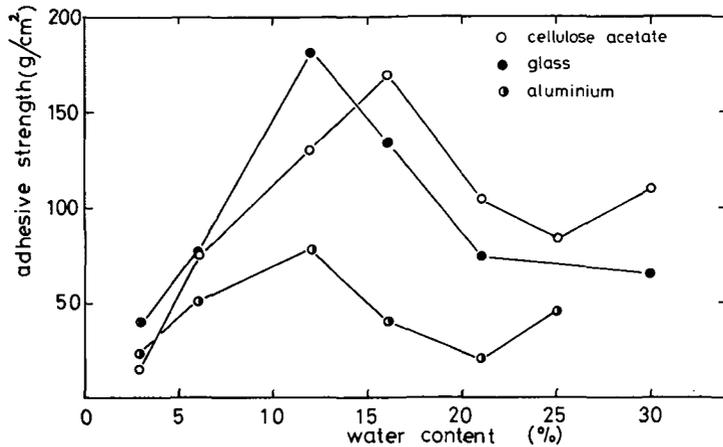
半球状の試料を使った主な理由は、接触面積を正確に見積るためである。一定圧縮力になるまで圧縮することによって、半球状の雪塊が押しつぶされて作られる接触面積は、含水率と密度によって試料ごとに異なる。試料の密度は、



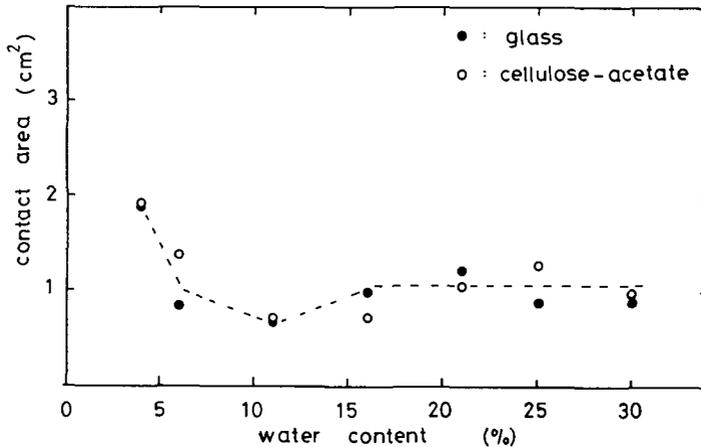
第3図 付着材料の表面の顕微鏡写真  
A: アルミニウム, B: ビニール,  
C: ブチルゴム

第1表

Water content (%)	glass (gw/cm <sup>2</sup> )	cellulose-acetate (gw/cm <sup>2</sup> )	aluminum (gw/cm <sup>2</sup> )	polyethylene (gw/cm <sup>2</sup> )	teflon (gw/cm <sup>2</sup> )	vinyl (gw/cm <sup>2</sup> )	ethylene-propylene rubber (gw/cm <sup>2</sup> )	butyl rubber (gw/cm <sup>2</sup> )	silicone-rubber (gw/cm <sup>2</sup> )
4	40	16	24	36	52	20	0	5	5
6	78	77	52	44	34	30	9	—	4
12	182	129	78	80	80	133	22	14	—
16	134	169	40	83	86	57	16	14	5
21	74	104	22	—	—	—	10	—	—
25	—	84	47	69	—	48	—	—	2
30	65	114	—	55	100	—	3	—	3
contact-angle	35°~45°	65°	58.5°	85.5°	90°	89°	77.5°	85°	90°



第4図 付着強度と含水率の関係, 15%付近で付着強度は最大を示す



第5図 一定の圧縮力を加えた時半球状の湿雪の表面に作られる円形の面積と含水率の関係

たとえ含水率の等しい雪を使っても、半球状の鑄型に入れて成形する場合の詰め具合により多少異なる。しかしその方法を統一することによって同一含水率の雪に対してほぼ一定の密度の試料を得ることができた。

さて、一定の力 160 g になるまで圧縮した際に半球状の雪塊がおしつぶされて作られる円形の接触面積が密度に依存することはいうまでもないが、密度がまた一方で含水率と密接な関係があることがわかった。

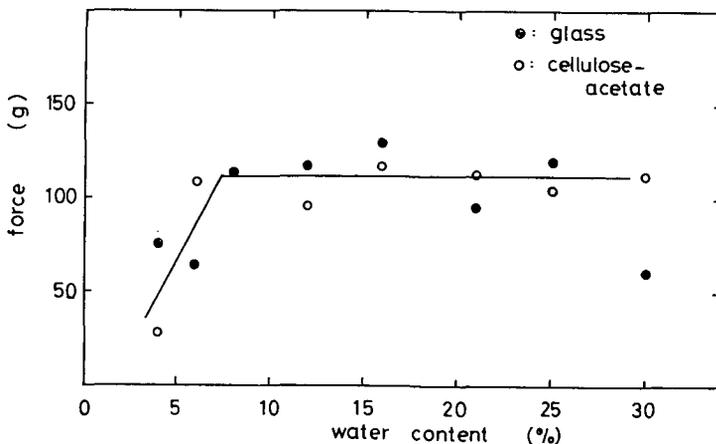
第5図は見掛けの接触面積と含水率の関係を示したものである。ここで接触面積は定性的に密度の逆数と比例関係にあると考えてよいだろう。図には付着材料がガラスとセルローズアセテートの場合だけを示したが、この関係は付着材料によらず同じ傾向を示した。すなわち、付着強度測定の含水率の範囲内では4%でみかけ接触面積が最大で、5%を越えると含水率と共に急激に接触面積は減少するが、10~15%で最小を示し、それ以後はほぼ一定である。

含水率と付着強度の関係を示した第4図に於て12%, 又は16%の含水率の雪に対する付

着強度が最大値を示していることは、この領域で接触面積が最小を示すことと密接な関係がある。このように一定の圧縮力に達した時の接触面積、いいかえれば、密度が含水率によって変化するために、付着強度が含水率だけの関数と考えることはできない。さて今回の実験に於て、付着強度は先に述べたように付着板が湿雪から離れる時の張力  $F$  の単位面積あたりの力としたが、張力  $F$  の絶対値、すなわち付着の力と雪の含水率の関係を求め、ガラスとセルローズアセテートについて示したのが第6図である。この図からわかるように10%から30%まで  $F$  の絶対値は含水率によらずほぼ一定値を示した。これはみかけの接触面積によらず、一定の圧縮力を生じるまで圧縮した際に付着板に接している雪粒の数が含水率によらずほぼ等しいということになる。160 g の力を生じるまで圧縮した時の接触面積と含水率の関係は第4図に示したが、これによると含水率4%で約  $2 \text{ cm}^2$ 、12~16%で  $0.7\sim 0.8 \text{ cm}^2$ 、20%以上ではおよそ  $1 \text{ cm}^2$  である。この関係は付着材料によらなかった。このことから多くの材質に於て12%又は16%の雪で最大の付着強度を示したのは、みかけの接触面積がこの含水率のときに最小であることに起因する。このことは12%又は16%の含水率の湿雪が、試料を成形する時に最も密に詰まるといことができる。このことから付着強度が含水率はもとより、付着する雪の密度に依存することも考慮しなければならない。

接触面積が含水率と密度によって異なるために単位面積あたりの圧縮力も異なる。たとえば接触面積が約  $2 \text{ cm}^2$  の場合に約  $80 \text{ g/cm}^2$  の圧縮力であるのに対し  $0.8 \text{ cm}^2$  では  $197.5 \text{ g/cm}^2$  になる。木下<sup>6)</sup> は水に浸した雪、 $0^\circ\text{C}$  の乾いた雪、湿った雪について圧縮力と密度との関係を求めた。これによると湿雪の場合は密度によって異なるが、今回の実験の含水率、及び圧縮速度の範囲内では密度が  $0.35 \text{ g/cm}^3\sim 0.45 \text{ g/cm}^3$  と考えることができる。

それでは初期の圧縮力がもっと小さい場合に付着強度がどのようになるかを円柱状に成形した湿雪を使って測定した。円柱の断面積は  $10 \text{ cm}^2$  である。初期の圧縮力を  $16 \text{ g/cm}^2$ 、および  $47.5 \text{ g/cm}^2$  とした場合に先の測定と同様に付着板を  $1 \text{ mm/min}$  の速度で引き離すときの付着強度の測定結果を第2表に示した。初期圧縮力が  $16 \text{ g/cm}^2$  の場合には含水率が4%、8%、

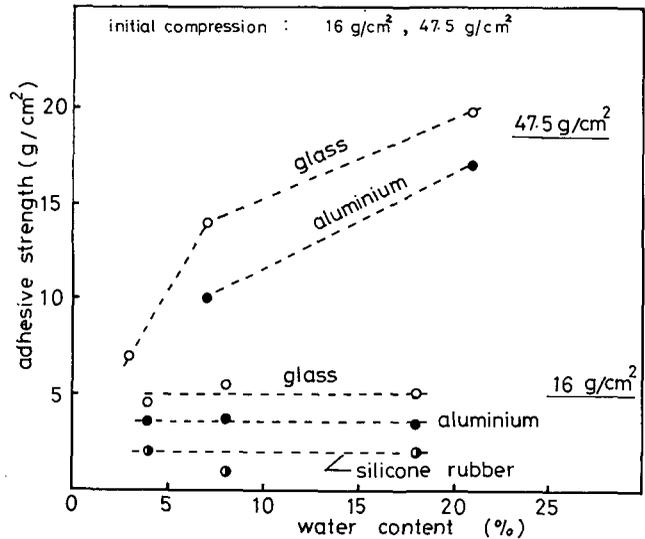


第6図 付着力の実測値と含水率の関係10%から30%の間でほとんど一定

第 2 表

initial compression		16 g/cm <sup>2</sup>			47.5 g/cm <sup>2</sup>	
water content		4%	8%	20%	7%	20%
glass	(gw/cm <sup>2</sup> )	4~5	5	4~5	15	20
cellulose-acetate	(gw/cm <sup>2</sup> )	5	5	5	10	9
aluminium	(gw/cm <sup>2</sup> )	3~4	3~4	3~4	10	17
polyethylene	(gw/cm <sup>2</sup> )	2	2	2	7	7
teflon	(gw/cm <sup>2</sup> )	2	2	2~3	—	—
vinyl	(gw/cm <sup>2</sup> )	1~2	1~2	2	—	—
butyl-rubber	(gw/cm <sup>2</sup> )	2	1	2	2~3	2~3
silicone-rubber	(gw/cm <sup>2</sup> )	0	1~2	1~2	2	2~3

20%の湿雪との付着強度を、また初期圧縮力 47.5 g/cm<sup>2</sup> の場合には含水率 7%と 20%の湿雪との付着強度を測定した。さて、圧縮力 16 g/cm<sup>2</sup> のばあい、ガラス、セルローズアセテート、アルミニウムの順に大きな付着強度を示しているが、どの材質に於ても含水率による変化はほとんどみられない。またこの場合材質によってもあまり大きな差は生じていない。初期圧縮力を 47.5 g/cm<sup>2</sup> とした場合、含水率によって付着強度が変化したのは、ガラスとアルミニウムだけであり、他の材質では含水率による差異はみられなかった。

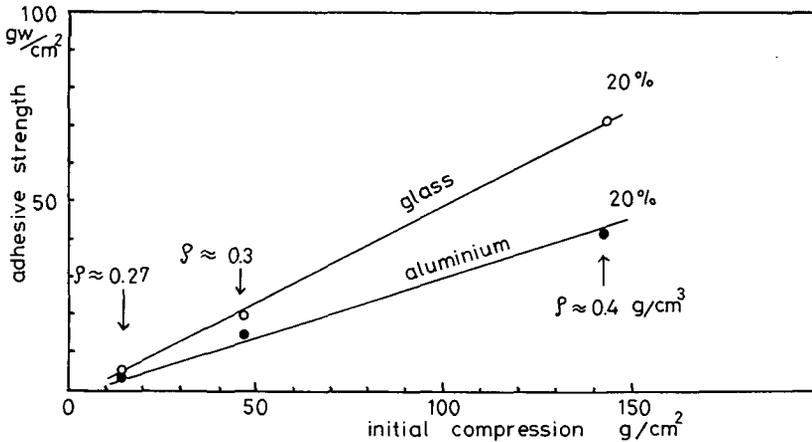


第 7 図 初期圧力を 16 g/cm<sup>2</sup>、及び 45.7 g/cm<sup>2</sup> とした場合の付着強度と含水率、圧力が小さい場合、付着強度は含水率に依存しない

含水率 20% の湿雪との付着について初期応力 16 g/cm<sup>2</sup>、と 47.5 g/cm<sup>2</sup> の場合の付着強度を比較すると、ガラス、セルローズアセテート、アルミニウム、ポリエチレンでは初期応力の増大にともない付着強度も増しているが、ブチルゴムシリコンゴムでは初期の圧縮力による変化はほとんどみられなかった。この関係を初期圧縮力 16 g/cm<sup>2</sup> の場合にはガラス、アルミニウム、シリコンゴムについて、また 47.5 g/cm<sup>2</sup> の場合にはガラス、アルミニウムについて、それぞれ付着強度と含水率の関係を示したのが第 7 図である。初期圧縮力が 16 g/cm<sup>2</sup> ではどの材質でも付着強度は含水率によらず一定であり、付着強度もガラスが最大で 5 gw/cm<sup>2</sup> 程度であった。初期の圧縮力を 47.5 g/cm<sup>2</sup> にした場合、同一の付着材質について、含水率のほぼ等しい雪で付着強度を比較してみると約 2~3 倍になっている。

## 2. 初期圧縮力と付着強度

半球状の湿雪を一定の圧力になるまで圧縮した後付着板を引き離す場合、及び円柱状湿雪との付着について前節で述べたがその結果、付着強度は含水率が同じでも初期の圧縮力によって変化することが明らかになった。半球状の雪を圧縮する場合、含水率によって接触面積が異なる事を先に述べたが、20%の湿雪では平均して1.1 cm<sup>2</sup>である。一方、円柱の湿雪の場合、断面積は10 cm<sup>2</sup>であるから測定ごとの初期の圧縮力は容易に知ることができる。含水率20%の湿雪の場合に、初期圧縮力によって付着強度がどのように変化するかを示したのが第8図である。縦軸が付着強度、横軸が初期圧縮力である。初期の圧縮力が16 g/cm<sup>2</sup>、および47.5 g/cm<sup>2</sup>の測定点は湿雪円柱断面との付着強度から求めたものであり、初期圧縮力が145 g/cm<sup>2</sup>の値は半球状の湿雪との付着から求めたものである。図には付着材がガラスとアルミニウムの場合について示してある。このように同一の含水率の湿雪でも初期の圧縮力によって付着強度が大きく異なる。特にこの変化のし方は、水に濡れやすい材質について著しい。初期の圧縮力と付着強度はこの場合比例関係にあるがグラフの勾配は材質と含水率によっても変化する。なお図中に矢印でおよその密度の値を $\rho$ で示したが、これは木下<sup>6)</sup>による圧縮力と密度の関係から推算したものである。



第8図 付着強度と初期圧力の関係。付着材質はガラスとアルミニウム、含水率20%の湿雪との付着強度

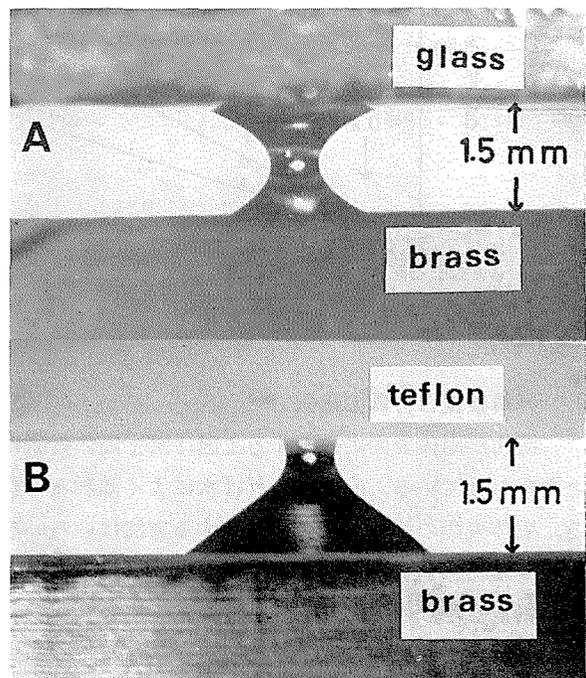
## 3. 付着強度と材質の関係

湿雪が固体表面に付着する主因は雪と固体表面の水膜によって生じる毛管負圧であると考えられている。そうであれば水によく濡れる材質では付着強度が大きいことが予測される。固体表面の濡れの度合を測定する方法はいろいろあるが、我々は実験に使用した材質の水に対する接触角を水滴法で測定した。その結果は第1表の最下段に示した通りである。接触角の結果だけをみると、ガラス、アルミニウム、セルローズアセテートなどが今回の実験材料の中では濡れやすい物質、テフロン、ビニール、シリコンゴムなどは濡れにくい物質といえることができる。しかし第1表の付着強度の結果をみるとテフロン、ビニールなど接触角の大きな材質との付着強度が非常に大きいことがわかる。第2節の測定方法で述べたように付着強度は付

着板が離れる瞬間に示す最大張力の単位面積あたりの値で表わしている。第2図は含水率16%の場合にテフロンとガラスをそれぞれ付着材料としたときの力—時間曲線の記録の一例であるが、この図に於ては、張力の絶対値  $F$  がテフロンとガラスの場合でほとんど差がない。したがって見掛けの接触面積が同じであれば付着強度は水に濡れにくいテフロンも水との接触角の小さいガラスも同じ値を示すことになる。この結果が第1表に示されている。しかし力—時間曲線の形は付着力を表わす張力側でガラスとテフロンとでは非常に異なる。すなわち、テフロンでは最大張力  $F$  は瞬間的に働らき、力はすぐ零にもどる。これに対してガラスでは徐々に力が減少する形を示している。このように疎水性材質のあるものは付着強度がその絶対値に於て親水性材質のそれと同程度に大きい値を示すものがあるが作用する時間は極めて短い。

この違いは第9図に示したように2枚の水平な板の間におかれた水滴が疎水性材質の表面、及び親水性材質の表面とどのような状態で付着しているかを観察することによってわかる。第9図 A, B はそれぞれガラス—真鍮、テフロン—真鍮の平板の間に約0.02 cc の水滴をおき2枚の板を上下に引き離す時の接触の様子を示している。この図は約1.5 mm 引き離れた時の状態で、勿論この時はすでに測定し得る大きさの力は働らいていない。A の場合水滴は中央のネックの部分で切断されるが B ではテフロンと水滴の界面で離れ、テフロン側に水滴は残らない。湿雪との付着に於ては下の面は水を含んだ雪であるため、水との接触角はこの写真の真鍮の場合とは異なりさらに小さいと考えなければならぬ。従って、付着板を上方に引き離す時、界面にあった水の大部分は付着板との界面で離れて湿雪側に残り、付着板の方にはほとんど水滴は残らないだろう。事実今回の実験に於て付着板の表面に微水滴が残っているのを認めたのは、ガラス、アルミニウム、セルローズ、アセテートなど水との接触角が小さいものだけであった。

ガラスなど水に濡れやすい親水性の材質はテフロン、ビニールなどの水に濡れない疎水性の材質よりも水膜と長時間接していることが可能になる。すなわち、水膜が完全に付着板から離れた時、湿雪と付着板の間隔はガラスの方がテフロンよりも大きい。この結果が第2図の力—時間曲線に表われていると考えることができる。さらに最大張力  $F$  を示した時の付着板と雪面の間隔を時間—力曲線から求めた。これは含水率、接触面積などによって変化することが予想されるが、テフロンに代表されるように疎水性材質では含水率、接触面積などに関係なく常に



第9図 2枚の固体面に挟まれた水滴の付着状態  
A: ガラス—真鍮, B: テフロン—真鍮

30~35  $\mu\text{m}$  であった。これに対し、ガラス、セルローズアセテートなどは平均して 50~70  $\mu\text{m}$  という大きな値を示した。水に濡れやすい親水性材質は含水率、接触面積などの他に表面粗度などが敏感に作用すると考えられ、濡れにくい疎水性材質の場合よりもばらつきが大きかった。シリコンゴムは今回の実験材料中、含水率、初期圧縮力などによらず数  $\text{gw}/\text{cm}^2$  という小さな付着強度しか示さなかったがこの場合には最大張力を示す時の付着板と雪面の間隔は約 20~25  $\mu\text{m}$  という値である。

第1表によると、テフロン、ビニール、シリコンゴムの接触角は約  $90^\circ$  である。この中でテフロン、ビニールは同程度の付着強度を示しているのに対し、シリコンゴムは桁違いに小さな付着強度を示した。またエチレンプロピレンゴム、ブチルゴムも、ほぼ等しい接触角を有するポリエチレンに比べれば付着強度はかなり小さい。すなわち、ゴム類に対する湿雪の付着強度は同じ接触角の他の物質よりも小さな値を示すということがわかった。

実験に使用した付着材質はいずれも 2~3 mm の厚さの板であるが、この場合ゴム類は付着材全体が柔軟性及び弾性に富んでいる。我々の実験に於てはあらかじめ外力を加えて湿雪に付着させたが、ゴムの場合には与えただけの外力が付着材であるゴムを変形させる可能性があること、また材質の柔軟性のため付着面で均質な厚さの水膜が安定した形で存在し得ないなどのために付着強度が小さいものと考えられる。

#### IV. 考 察

湿雪が固体表面に付着する場合、付着の主因は雪と付着材の界面に存在する水膜によって生じる負圧  $\left(-\frac{\sigma}{r}\right)$  であると考えられている。ここで  $r$  は水膜の曲率半径、 $\sigma$  は水の表面張力である。いま含水率 15%、ぬれ密度  $0.4 \text{ g}/\text{cm}^3$  のぬれ新雪の場合の比表面積を約  $10^2 \text{ cm}^2/\text{g}^7$  とすると雪粒子は約 10  $\mu\text{m}$  の厚さの水膜で覆われていると考えることができる。水膜の曲率半径を約 10  $\mu\text{m}$  とすると付着体と湿雪の間に約  $770 \text{ gw}/\text{cm}^2$  の付着強度が示されるはずである。しかし、この値は接触面全体が含水率によって決まる厚さの水膜を介して接している場合で、実際には、雪粒子が水膜を介して点接触している場合が多いと考えられる。したがって、自然界で経験する湿雪の付着強度の大きさは、含水率のもとより、湿雪の密度、あるいは初期圧縮力などによって変化し、一義的には定まらない。今回の実験は見かけの接触面積をできる限り正確に知るために、付着面をあらかじめ圧縮し、その後一定の応力まで緩和した時付着板を引き離す方法をとった。その結果初期の圧縮力により付着強度が変化することは前節で述べた。初期の圧縮力は付着板に接する雪の密度、すなわち真実接触面と相関がある。

たとえば第8図には含水率が 20% で初期圧縮力が  $16 \text{ g}/\text{cm}^2$ 、 $47.5 \text{ g}/\text{cm}^2$ 、及び  $145 \text{ g}/\text{cm}^2$  の時の付着強度をガラスとアルミニウムについて示してあるが、そのうち  $16 \text{ g}/\text{cm}^2$ 、及び  $47.5 \text{ g}/\text{cm}^2$  の初期圧縮力はいずれも見かけ接触面積が  $10 \text{ cm}^2$  であるような円柱の断面を介して与えられたものでこの時の付着強度の違いは、まず圧縮力の増大とともに湿雪の塑性変形が起こり、真実接触面が増大したためと考えることができる。第1表、及び第2表の付着強度の違いは主に初期圧縮力の違いによる真実接触面の違いに基くものである。

ガラス、セルローズアセテート、アルミニウムなど比較的濡れやすい材質と、テフロン、

ビニールなど水に濡れにくい材質について付着強度の絶対値に大きな差を生じないことが今回の実験でわかった。しかし、付着板を引き上げ始めてから最大付着強度を示すまでの時間はガラスなど親水性材質ではテフロンなどの約2倍になっている。最大の付着強度を示す時に付着体と湿雪の間に存在する水膜の厚さを力-時間曲線の記録から求めるとテフロン、ポリエチレン、ビニールでは約30~35  $\mu\text{m}$  で含水率や接触面積によらずほとんど一定である。一方、ガラス、セルローズアセテート、アルミニウムなどはいずれも50~70  $\mu\text{m}$  とかなりばらつきも大きく、含水率や接触面積に対して系統的に依存する傾向も認められなかった。湿雪表面に対する水の接触角は $0^\circ$ に極めて近く、一方テフロンでは $90^\circ$ であるが曲率半径が15~17  $\mu\text{m}$ までは界面の水膜は外力とつり合いながら安定な形をとり得る。しかしそれ以上の曲率半径の水膜を付着させることはできない。付着材料がガラスなどの場合には、しかしながら、約2倍の曲率半径の水膜まで付着させることが出来るものと考えられる。したがって最大付着強度を与える水膜の曲率半径は濡れやすい材質と濡れにくい材質とでは異なってくると考えてよいだろう。テフロンに代表されるように接触角の大きな材質による時間-力曲線が鋭いピークを示すのは、一定の間隔だけ付着板が引き上げられた時、付着板と湿雪の界面が瞬間的に離れることを示しているこれに対して、ガラスなど接触角の小さい材質については最大付着強度を示した後も付着板の上昇に伴ない徐々に水膜の曲率半径を大きくしながら、力は徐々に減少し零に近づく傾向を示し、時には界面で水膜が離れず、付着材の表面に水滴となって付着する場合がある。

Jellinek<sup>9)</sup>は2枚の清浄なガラス板の間に水滴をおき、ガラスと水膜の剪断強度を測定したが、その結果は大きな速度依存性を示した。この点からも付着板の引き上げる速度を変えると付着強度は異った値を示すものと考えられる。

## V. ま と め

湿雪と固体表面の付着強度を湿雪の含水率、初期圧縮力、及び材質の性質、とくに水との接触角を考慮して測定した。一定の初期圧縮力を与えて湿雪面と付着材との密着を良好にした後に1 mm/minの定速度で付着板を引き上げ、湿雪と付着板が離れる時の張力を測定した。湿雪の含水率は約4%から30%までを5%間隔に、また初期圧縮力は16 g/cm<sup>2</sup>、47.5 g/cm<sup>2</sup>、及び80~200 g/cm<sup>2</sup>である。この結果、付着強度は同一の含水率の雪でも、初期の圧縮力により大幅に異なる事が明らかになった。即ち、付着強度は実際に付着している雪粒の数密度に依存する。

初期圧縮力が16 g/cm<sup>2</sup>の場合にはいずれの付着材に対しても数 gw/cm<sup>2</sup>の付着強度で、含水率による変化もみられなかった。また47.5 g/cm<sup>2</sup>の初期圧縮力の下では、ガラス、アルミニウムなど親水性の材質との付着強度には含水率依存性が見られたが、他の材質、特に疎水性のものに対しては含水率による違いはみられなかった。初期圧縮力を80~200 g/cm<sup>2</sup>にした場合の測定ではガラスが最も大きな付着強度を示し、約180 gw/cm<sup>2</sup>であった。10%から30%の範囲の含水率の雪では付着力の絶対値に含水率依存性は見出せなかった。12%又は16%の含水率の湿雪の付着強度が最大値を示す原因は、この領域の湿雪が試料採取時に最も密度が大きくなっているためと考えられる。

付着は界面の現象であるから、測定不能な諸条件が付着強度の測定結果に大きな影響を与える。特に親水性の材質ではそれが敏感に表われた。一般に接触角が大きいテフロンやビニールなども今回の実験のように外力を与えて付着させる場合には予想外に大きな付着強度を示した。しかし接触角がこれらと同程度のシリコンゴム、ブチルゴムなどは初期の圧縮力及び含水率には依存せず、付着力は常に  $\text{gw/cm}^2$  数であった。この原因としてはゴムの弾性、及び柔軟性が考えられる。

今回の一連の測定は初期圧縮力、及び含水率は、変化させたが、付着板を引き離す速度は、装置の都合上  $1\text{ mm/min}$  の一種類しかおこなっていない。自然界の着雪現象での雪の密度は、風速や降雪強度で異なる。測定に使用した雪は乾き密度が  $0.27\text{ g/cm}^3 \sim 0.4\text{ g/cm}^3$  と、かなり高い密度であるために測定値がそのまま自然着雪の場合に適用されるのは難かしいが、ある程度の目安にはなるであろう一般に付着強度には含水率の効果が大きいと考えられているが、実際には密度が最も付着強度に影響を与えているのではないかと考えられる。付着面の直接観察や測定条件を変えた幅広い実験が今後の課題である。

終に測定装置の改良に御助力下さった秋田谷英次氏ならびに有益な助言と討論をして下さった遠藤八十一氏に心から感謝します。実験に使用した各種材料は古河電気工業株式会社からいただいたものである。

なお、本研究に要した費用の一部は、文部省科学研究費（自然災害，特別災害(1)代表者若浜五郎）から支出された。

## 文 献

- 1) 五藤員雄・黒岩大助 1975 北海道における電線着雪とその発達抑止に関する研究. 雪氷, **37**, 182-191.
- 2) 竹内政夫・野原他喜男・石本敬志 1976 標識板着雪とその防止. 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集 164.
- 3) 井上力太・本多 正 1955 固体面と積雪の付着力の実験. 雪氷, **17**, 18-20.
- 4) 佐藤篤司・若浜五郎 1974 ぬれ雪の付着力. 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集 111.
- 5) 例えば, 粉体(理論と応用) 九善株式会社 p. 348.
- 6) 木下誠一 1963  $0^\circ\text{C}$  の水に浸した雪の圧縮 I. 低温科学, 物理篇, **21**, 13-22.
- 7) 成田英器 1971 積雪の比表面積の測定 II. 低温科学, 物理篇, **29**, 69-79.
- 8) Jellinek, H. H. G. 1960 Some Frictional Properties of thin Water Films. *SIPRE Special Rept.* **37**, pp. 12.

## Summary

Wet snowflakes containing free water easily accrete on electric wires, which often causes serious damage such as breakage of power lines. It may be assumed that the negative pressure induced in water existing at the interface between the wet snow and the wire allows the snow to adhere to the wire. The pressure,  $p$ , is given by the formula  $p = -(\sigma/r)$ , where  $\sigma$  is the surface tension of water and  $r$  is the radius of curvature of the concave water surface at the interface. The value of  $r$  may depend on the free water content, the grain size and density of snow, the contact angle between water and the material composing or covering the wire, and so on. The adhesive force between wet snow and the wire or various kinds of covering materials is, therefore, very important in the study of practical problems. In conjunction with

snow accretion on electric wires, a series of experiments were carried out on the adhesive strength of wet snow to aluminium, glass and several kinds of plastics and rubbers including cellulose acetate, vinyl, teflon, polyethylene, silicone-rubber, ethylene-propylene rubber and butylrubber.

The adhesive strength,  $S$ , is defined as a value of  $F/A$ , where  $F$  is the tensile adhesive force and  $A$  is the apparent contact area between two contact materials. In case of wet snow in contact with another material, it is not very easy to measure accurately the apparent contact area,  $A$ . If adhesive force is measured between flat surfaces of wet snow and the other material, the apparent contact area is apt to be over-estimated; hence the adhesive strength is underestimated. A semi-spherically shaped snow sample was used in the present experiment, because it was confirmed after careful calibrations that the apparent contact area could be obtained very accurately.

Thin plates of 3 mm in thickness were cut from those materials described above. A semi-spherically shaped snow sample was slowly compressed from above by the plate which was moved downward at a constant speed of 1mm/min by a motor through reduction gears, under which a strain-gauge type force-measuring device was placed as shown in Fig. 1. The compressive force increased with time, and at the moment when the force reached 160 g-wt, the motor was stopped. Relaxation of stress took place. When the force reduced to 40 g-wt, the pulling up of the plate was started by the motor at the same speed as in case of initial compression. The sign of the force soon changed from compressive to tensile, and the tensile force linearly increased with time until the plate and the wet snow were separated from each other as shown in Fig. 2. The apparent contact area was obtained both by measuring directly the diameter of the contact plane and by using the time duration of initial compression, the compression speed and the geometry of the semi-spherical snow sample. The values obtained from these two methods agreed very well.

The adhesive strength was obtained by dividing the adhesive force by the apparent contact area. The adhesive strength of wet snow to various materials obtained in the present experiments were tabulated in Table 1 for different free water contents which ranged from 4 to 30%. The contact angle between water and each material was measured, as listed in the bottom of the table.

It should be noted that the adhesive strength becomes larger for each material when the snow contains free water from 12 to 16%, as seen in Table 1 and in Fig. 4. Such large values may be due to a smaller contact area of snow having free water of 12-16%, because the adhesive force remains constant for each material when the free water content of snow is larger than 7-8% as illustrated in Fig. 6. In fact, a smaller contact area was observed for the snow containing free water of 12-16% as shown in Fig. 5. It may be probable that the snow near the interface is locally compressed by the initial compression, and that an increase in the local snow density is largest for the snow containing free water of 12-16%. This suggests that the adhesive strength is dependent on the initially given compressive stress.

In order to clarify the dependence, measurements were done of the adhesive strength of snow as a function of initial compressive stress. For a small initial stress such as 16 g/cm<sup>2</sup>, the adhesive strength was smaller than 5 g/cm<sup>2</sup> and it remained constant for each material regardless of free water contents of snow, as seen in both Fig. 7 and Table 2. For a larger initial stress such as 47.5 g/cm<sup>2</sup>, the larger adhesive strength was observed and it increased

with the increase in free water contents of snow as shown in Fig. 7. For a heavily wet snow (free water content: 20%), a linear relationship was obtained between the adhesive strength and the initial compressive stress as illustrated in Fig. 8. This dependence of the adhesive strength on the initial stress may be explained as follows: the number of snow particles in contact with the plate increases by the initial compression, and the snow density at the interface, hence, the real contact area increases with the increase in the initial compressive stress.

It should be noteworthy that when a large initial compressive stress was applied to the snow by a hydrophobic material such as teflon, vinyl and polyethylene, an unexpected large adhesive strength of the same order of magnitude as those observed for hydrophilic materials such as glass or aluminum was observed as seen in Table 1. The adhesive strength of snow to rubber materials such as silicon rubber was, on the other hand, always small regardless of initial compression and free water content. This strongly suggests that the adhesive strength of wet snow depends not only on the wettability of contact material, but also on its flexibility.

The behaviour of water existing at the interface was observed at the moment of separation of the contact surfaces. Two photographs in Fig. 9 show the shape of water at the interface immediately before complete separation. At the moment of separation, the distance between the surfaces of snow and contact plate was 30-35  $\mu\text{m}$  for hydrophobic materials, while it was 50-70  $\mu\text{m}$  for hydrophilic materials. The difference in separation distances is a reflection of the difference in the contact angles of materials in contact with each other as seen in Fig. 9.