HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	融点以下での着雪に関する実験的研究
Author(s)	水野, 悠紀子; 若浜, 五郎
Citation	低温科學. 物理篇, 38, 17-32
Issue Date	1980-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18387
Type	departmental bulletin paper
File Information	38_p17-32.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Yukiko MIZUNO and Gorow WAKAHAMA 1979 Experimental Studies on Snow Accretion at Subzero Temperatures. *Low Temperature Science, Ser. A, 38.* (With English Summary p. 31)

融点以下での着雪に関する実験的研究*

水野悠紀子・若浜五郎
(低温科学研究所)

(昭和54年10月受理)

I. まえがき

雪はいろいろな物体に容易に付着してわれわれの生活に種々の障害を起す。気温がわずかにプラスのときに起こる雪線着雪や通信線着雪による送電障害，通信障害，また，自動車や列車の車体着雪による走行障害，列車の遅延，運休などがその典型である。このようなプラスの温度下での着雪が主に雪に含まれる水の毛管負圧によってひき起こされることは，よく知られている通りである[1)~3)]。

しかし着雪は気温がプラスのときだけでなく，$-5°C$，$-10°C$ といった氷点下の温度でも起こる。気温が $-10°C$ ていどのときでも，走行する列車や自動車によって舞い上げられた雪が車体や窓，さらに道路わきの構造物，標識板等に付着することは雪国では普通に経験することである。このような低温度では雪が水を含むことはないから，付着の原因を水の毛管負圧に求めることはできない。雪(氷)の粒が物体表面の凹凸部に単に機械的にひっかかって付着することもあるが，付着の原因がそれだけではないことは明らかである。例えば，$-10°C$ のもとでガラス板上に雪をばらまき，直ちにガラス板を裏返しても大部分の雪粒はガラス面に付着して脱落することがない。このような付着が，雪(氷)の結晶を構成する水分子とガラスの間の分子間力によることは明らかであろう。

従来，氷の他物体への付着については，雪や氷の付着の除去や難付着性材質の開発[4)]と関連して多くの基礎的な実験研究がなされてきた。Jellinek[5)]の総合報告によると，物質の物理化学的性質と付着との関係[6)~10)]，物体の表面粗度や温度が付着に及ぼす効果[11)]，あるいは，付着した氷の内部構造(欠陥)と付着力との関係を調べることによって氷と種々の物質との付着機構を明らかにしようとするもの[12)]などである。ところでこれらの研究は物体表面に水を付着・凍結させて作った付着面，換言すれば，物体に水を凍着させて作った氷の付着面を実験の対象としている。

一方，われわれが今ここで取り扱おうとしている氷点下での着雪では，水の凍着によって雪(氷)が付着することはあり得ない。雪(氷の粒)という固体粒子が直接，他の固体に付着するわけである。このような固体同士の直接付着に関する研究は，二三の実用的研究[13)]を除いて，従来ほとんどなされていないようである。そこでわれわれは，$-5°C$，$-10°C$ といった温度下で，雪が他物体に付着するいわゆる「乾き着雪」についての基礎実験を試みた。本研究では先

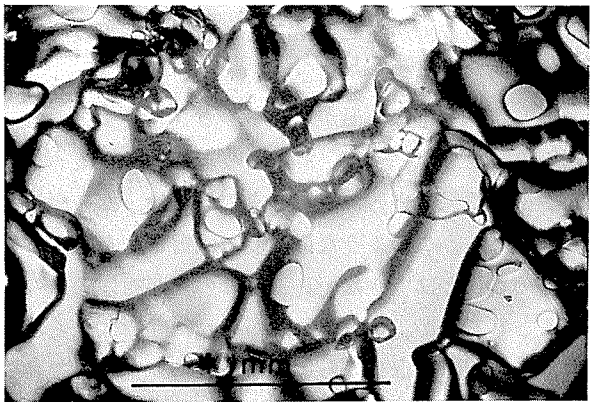
* 北海道大学低温科学研究所業績 第2174号

ず，ガラス，アクリル(PMMA)，氷の板などの透明な物質を通して雪粒との接触界面を顕微鏡下で直接観察することによって乾き雪が物体に付着する過程を調べた。接触面は時間と共に鏡面状の付着面に成長するのがみられた。付着面の成長速度と相手物体の物理化学的な性質，雰囲気温度などとの関係を求め，それに基づいて付着機構を論じた。一方，雪のブロックと種々の親水性物質，疎水性物質との間の引張付着強度を測定で求めると共に，破壊分離面の観察を行なった。これらについて以下に述べる。

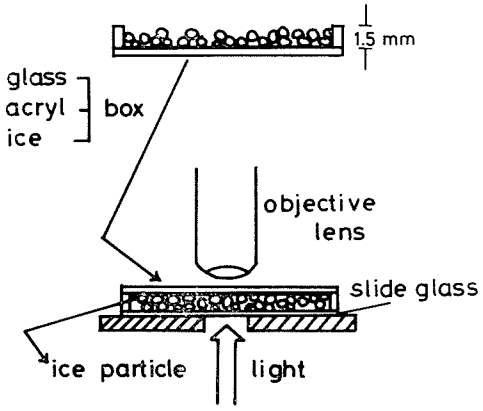
II. 実　　験

a. 付着過程の顕微鏡観察

−10°C の低温実験室でガラス板の上に雪粒を置くと付着は瞬間的に起こり，その直後にガラス板を逆にしても雪粒は落ちない。雪粒とガラスの接触点を顕微鏡で観察していると第1図に示すような鏡面状の付着面が認められる。それは時間と共に次第に大きく成長する。このような付着面の形成過程とその後の成長過程を調べるために，透明な物質であるガラス，アクリル，氷板に人工的に作った球形の氷の粒を接触させ時間の経過と共に付着面がどのように変化するかを顕微鏡の下で観察した。ここで雪粒の代りに球形の氷の粒を用いたのは単純な対称形をもつ試料を用いた方が後の定量的な解析に好都合だからである。球形の氷の粒は液体窒素に水滴を落して作ったが，急速凍結によって生ずる歪を十分除去するために −5°C で2週間以上焼鈍したのち実験に用いた。粒の大きさは直径100μm～400μm である。氷の粒が昇華蒸発するのを防ぐために，先に述べた透明な物質で第2図上部に示したような，75 mm×25 mm×1.5 mm の浅い容器を作りその中に氷の粒を1～2層の厚さに均一に分布するように入れた。この容器を逆にして，顕微鏡のステージ上にあらかじめ用意されているスライドガラスの上に置き，容器の底面と氷の粒の接触部分を観察した(第2図)。−10°C の温度下でもガラスの場合には氷の粒を



第1図　雪粒とガラス板との間にできた鏡面状の付着面（−5°C のもとで雪粒をガラス板に散布してから18時間経過）



第2図　ガラス，アクリル，氷で作った容器に氷球を入れ，その底面と氷球の接触界面を観察した

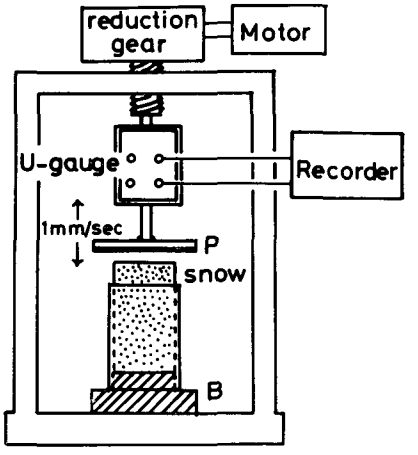
接触させた後2～3分もすれば氷球は付着して容器を逆にしても落ちない。又，アクリルに対しては10分もたつと，氷球は付着して落下することがない。

ところで氷の付着力は周囲の雰囲気の湿度によって変わることが知られている (Jensen-Hosler[14]) ので付着実験では周囲の湿度を例えば氷飽和の状態に統一しておくことが望ましい。そこで容器内の空気を氷飽和に保つために小筆を用いてスライドガラスと容器との間に0°Cの水をつけ凍着して密封しようとしたところ容器とスライドガラスの隙間から水蒸気が侵入して容器の内壁で凝結するばかりか，氷の接触部分が異常に急速に成長することがわかった。そこで水をぬりつけてスライドガラスと容器とを完全に氷で密封することはさけ，逆にした容器を単にスライドガラス上に置いて観察することにした。しかしこうするだけでも数日間の観察期間中に氷球が昇華変形する様子はほとんど認められなかったので，容器内部はほぼ飽和蒸気で満たされていたと考えてよかろう。

接触点に顕微鏡の焦点を合わせて観察していると，数分後に直径がおよそ10～20 μm に成長した円形の接触面が明瞭な輪郭をともなって鏡面として認められる (第4-A, B図)。透明な物質との付着はこのように材質を通して氷球との界面を直接観察することができるが，金属や不透明なプラスチック，又はゴムなどの付着面の様子は第2図の方法ではそれが不可能である。そこで不透明な物質の場合には細い棒の側面に雪粒を接触させ，接触点のくびれ (neck) の成長を側方から観察した (第8図)。

b. 付着力の測定

付着面を直接観察したのは，ガラス，アクリル，氷板の三種類の透明な材質についてである。これら親水性の材質には −10°C の温度下に於ても雪は容易に付着し，付着面積は時間と共に増大した。このように，乾き雪の付着は水膜を介して固体表面に接するぬれ雪の付着とは本質的に異なる。現実的な問題として，乾き雪がどの程度の力で固体表面に付着するかを知ることはその排除方法を考える上にも重要である。そこで，ガラス，アルミニウム，各種プラスチック，ゴムなど，さまざまな実用目的のために自然界にさらされて使用されている材質に対する乾き雪の引張り付着強度を −5°C と −10°C で測定した。第3図に測定装置の模式図を示した。これは先に行なった湿雪の付着力測定[2] に用いたものと同じである。ただし，今回の実験では円柱状に成形した雪の上面が付着板に接するようにした。



第3図　付着力測定装置の模式図
P; 付着板，*U*-Gauge; ストレンゲージ。円柱状の雪試料の上面を付着板 *P* に所定の時間付着させたのち，*P* を 1 mm/min で引き離すときの力を測定した

断面積 10 cm^2，高さ 5 cm の真鍮製の円筒内に篩でほぐした雪を堆積させる。円筒面上に積り過ぎた余分な雪は全体を圧縮しないように注意しつつ雪べらで切り落して平らな表面を作る。これを第3図のBと記した真鍮の台の上に載せ，円筒だけを下方に引き下げると，筒の上方に1 cm だけ雪が頭を出

すようになっている。こうすることにより，断面積が 10 cm² で側面が束縛されていない雪のブロックが付着板に接するようになる。開口径 1.6 mm の篩を通して堆積させた雪の密度は −5°C と −10°C のいずれの温度に於ても 0.44 g/cm³ という一定値を示した。

付着力の測定に於ては付着面の接触の良否が重要である。そこで付着板と雪の密着を良くするために付着板 P を 1 mm/min で降下させ，80 g/cm² の圧力が生じるまで圧縮した。付着板が雪のブロックに接触し始めてから上記の圧力に達するまでの時間はおよそ 0.5 分であり，この間に付着板は 0.5 mm 降下する。この状態でモーターの回転を止め，所定の時間付着させる。この間力は急速に緩和して約 10 分後には 2〜3 g/cm² になる。次に付着板 P を 1 mm/min の速度で引き上げ，付着板と雪のブロックが離れる時の張力をストレンゲージ U で測定した。付着板と雪が接触してから離れるまでの力と時間の関係はペン書きレコーダーに記録された。引張付着強度を S とすれば $S=F/A$ で定義される。ここで F は測定された付着力，A は見掛けの付着面積つまり雪の円柱の上面の面積で $A=10\,\mathrm{cm}^2$ である。

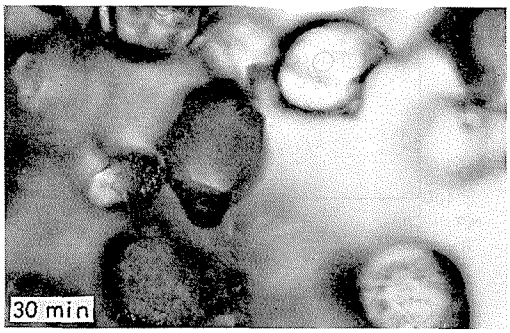
III. 実験結果

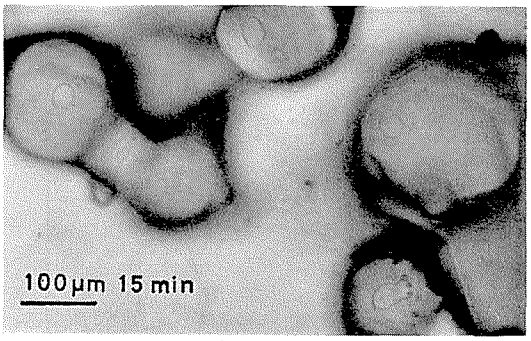
a. 付着面成長の物質依存性

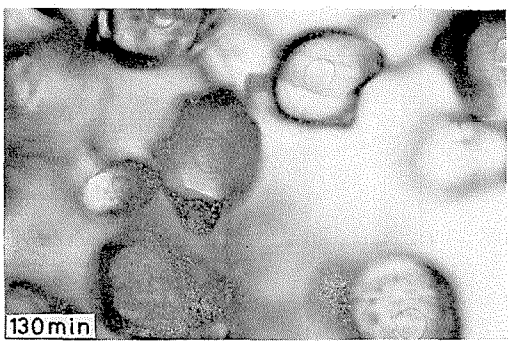
第 4-A, B 図はそれぞれガラス板と氷板に付着した氷の粒がそれぞれの物質との界面に形成した付着面の成長の様子を示す顕微鏡写真である。氷の粒の凹凸により付着面は完全な円にならないことが多いがその中から円に近いものだけを選び出し，その直径 $2x$ と付着開始からの経過時間 t との関係を求めた。氷球の半径を R とし，x/R と時間 t との関係を示したのが第 5 図である。この図は直径約 200 μm の氷球がガラス，アクリル，氷板に付着したばあいを示したが，いずれの物質に於ても $\log x/R$ と $\log t$ との間には直線関係がなり立っている。氷球と氷板との付着は焼結によって進行するが他の 2 種類の物質との間でも同様な過程で付着面が形成されると考えられる。Kuczynski[15] の理論によると，焼結は一般に次式によって表わされる。

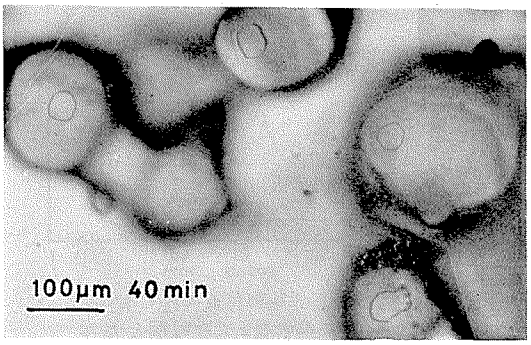
$$\left(\frac{x}{R}\right)^n = \frac{B(T)}{R^m}t \qquad (1)$$

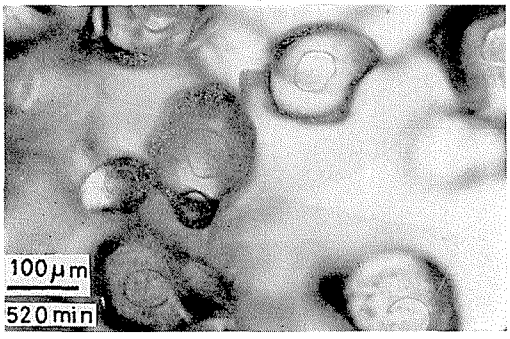
ここで x, R はそれぞれ付着面及び氷球の半径であり，t は接触後の時間，$B(T)$ は温度に依存する係数である。ここで n は付着面の成長速度の目安になる係数である。測定結果から，アクリル，ガラス，氷板に対する n の値を求めると，氷板とガラスに対しては $n\fallingdotseq 5$, アクリルでは $n\fallingdotseq 7$ である。また第 1 式の m の値は (x/R) が一定値になるまでに要する時間 t が氷球の大きさによってどのように変わるかを示すものである。これを求めるために，$x/R=0.2$ になるまでに要する時間 t と氷球の半径 R の関係を氷板とガラス板のばあいについてそれぞれ第 6 図と第 7 図に示した。第 6 図から氷球と氷板との付着に於ける m の値を求めると $m\fallingdotseq 3$ となり，Kuroiwa[16] 及び Hobbs と Mason[17] が氷球の焼結実験から求めた値と一致した。同様に第 7 図から氷球がガラス板に付着するばあいにも $m=3$ の直線の近傍に測定点が点在することがわかる。アクリル板と氷球の付着では氷球の大きさを変えた観察は行なわなかったので m の値を求めることはできなかった。

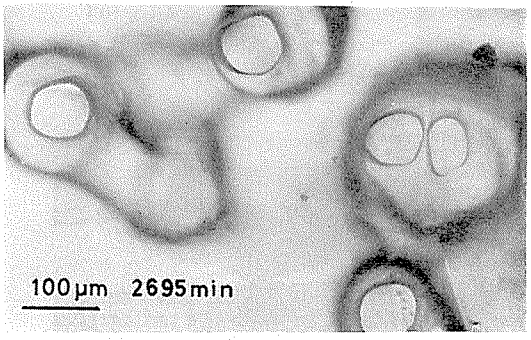






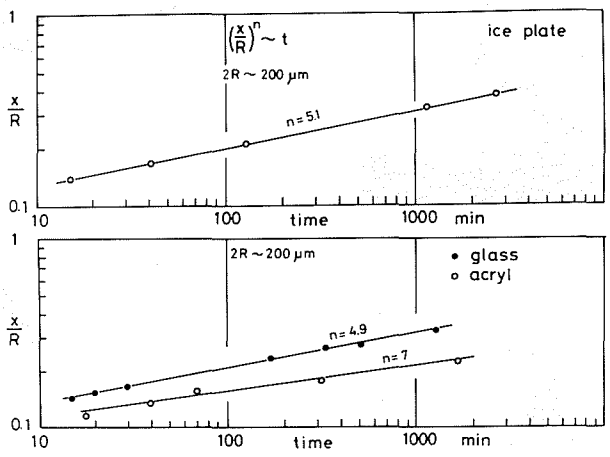




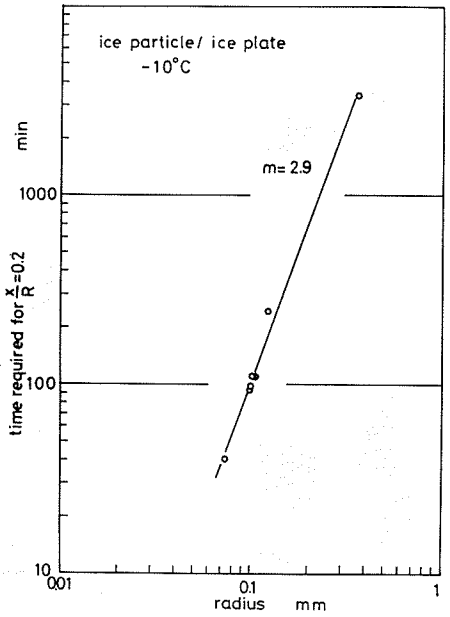


第4-A図　ガラス板と氷球との付着面の成長過程を示す顕微鏡写真

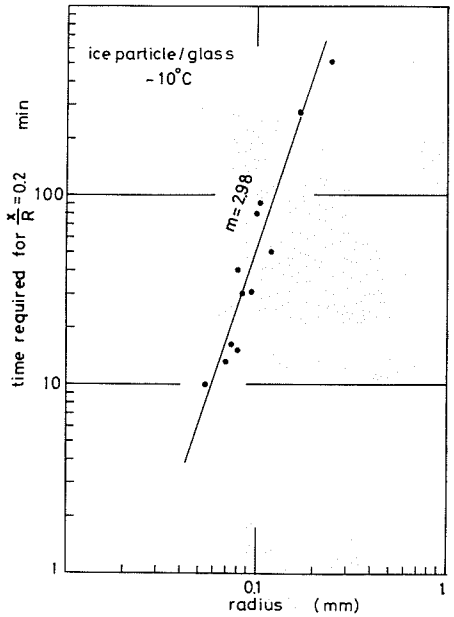
第4-B図　氷球と氷板との付着面



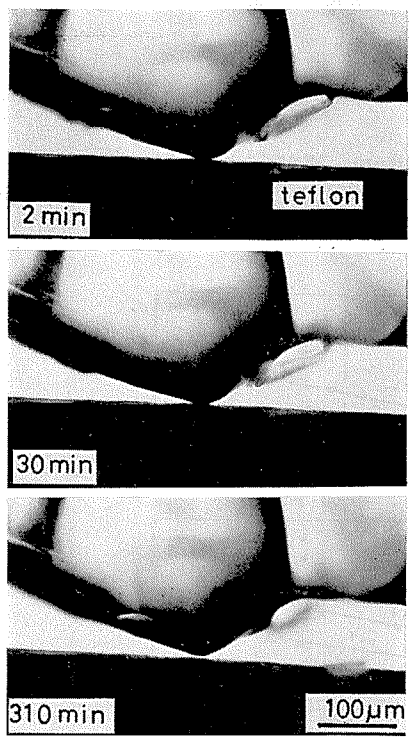
第5図　直径200 μmの氷球と，ガラス，アクリル，氷板の付着に於ける x/R と付着時間 t との関係。x は付着面の半径，R は氷球の半径



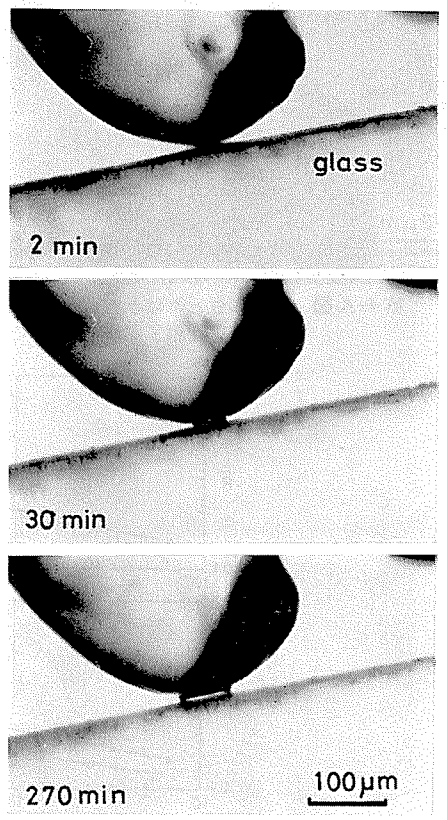
第6図 氷球と氷板の付着に於て $x/R=0.2$ に達するまでの時間と氷球の大きさの関係。温度；−10°C



第7図 ガラスと氷球の付着に於て $x/R=0.2$ に達する時間と氷球の半径の関係。温度；−10°C



第8図 テフロン棒と雪粒の接触。長時間接触してもテフロンとの間に ice-bond を作らない



第9図 ガラス棒と雪粒の付着。接触点に ice-bond を作り時間と共に肥大する

今回の付着実験で，氷点下の温度でも氷が異物質に接触するだけで氷球同士の焼結と同じように接触部分の肥大が起こることが明らかになった。氷球はアクリル板に対しても，ガラスや氷板への付着と同様に界面に付着面を作るがその成長速度はかなり小さい。このことはとりもなおさず材質による付着の難易を示している。

テフロンは典型的な疎水性物質として知られているが，このような物質との間にも先に述べたような付着面の形成があるかどうかを調べた。テフロンは不透明であるから第2図に示したような方法で界面を直接観察することはできない。そこでテフロン棒の側面に雪粒を接触させ，その接点を観察した。第8図の顕微鏡写真は雪粒を接触させてから2分，30分，310分後の状態を示している。比較のために第9図には全く同様の条件でガラス棒に雪粒を接触させた時の接触部分の肥大の様子を示した。テフロン棒と雪粒の付着では，ガラス棒と雪粒のばあいにみられる結合組織の成長は全く見られず，時間が経つにつれてむしろ接点が離れるという傾向さえ示した。このことからテフロンには乾き雪が付着することはないということができる。

b. 付着力と材質，付着時間の関係

種々の材質に対する乾き雪の付着強度の測定結果を第1表に示した。付着強度は張力の測定値を見掛断面積で割って求めた値であるが各々の測定条件で行なった3回の測定値の平均である。測定値のばらつきはどの材質についても10%以内であった。付着面の顕微鏡観察に

Table 1. Tensile adhesive strength of dry snow onto various kinds of materials (for different adhesion and sintering time)

Material	−10°C			−5°C		
	t_a	t_s	Tensile adhesive strength	t_a	t_s	Tensile adhesive strength
glass	10 min	20 min	22.5 gw/cm²	10 min	10 min	40.0 gw/cm²
	10	10	16.0			
	5	10	8.2			
	30	30	~80.0			
cellulose acetate	5	20	12.2	10	10	29.0
	30	30	23.8			
aluminum	10	20	23.0	10	10	5.5
	30	30	26.0			
acryl (PMMA)	10	20	9.5	10	10	23.0
	5	20	6.1			
	16 hours		57.0			
silicone rubber	30	30	5.4	10	10	5.0
	10	20	5.0			
teflon	30	30	0	30	30	0
vinyl	30	30	0	30	30	0

t_a: Adhesion time t_s: Sintering time

よると乾き雪の付着力は付着時間と共に増大すると考えられる。このため−10°C では付着時間を5分，10分，30分として付着時間の効果を調べた。−5°C では付着時間は実験の都合上10分間とした。ただし10分間の付着で張力を示さなかったテフロンとビニールに対しては常に30分間の付着を試みた。第1表の t_a，t_s はそれぞれ付着時間と焼結時間を表わしている。焼結時間 t_s とは篩にかけられた雪粒が真鍮の円筒容器に詰められ，さらに付着板との所定時間の接触の後付着板が雪試料から離れるまでに要した全時間であり雪粒子間の焼結が進行すると考えられる時間である。たとえば第1表に於て，−10°C でのガラスとの付着で $t_a=10$ min，$t_s=20$ min と記されているのは，雪と付着板を接触させる10分前に円筒容器内に雪が詰められていたことを示す。−5°C では t_a と t_s とを等しくするために試料を作った直後に付着実験を開始した。

第1表から明らかなように，付着強度は付着時間が長くなれば大きくなる。このことは付着面の顕微鏡観察の結果からも明らかなように真実付着面積が時間の関数であることに基づいている。実験材質の中で，ガラス，アルミニウム，セルローズアセテートなどが大きな値を示したが最も付着性の強いのがガラスであるといえる。−10°C でガラスに30分間付着した時の強度は80 g/cm^2 に達した。自然降雪によって今回の実験に用いたような0.44 g/cm^3 という高い密度の雪が固体表面に直接付着するとは考えられないが，列車の走行中に舞い上げられて車輛の床下や車体の外壁に付着する雪はかなり高密度になっていると考えてよいだろう。付着力を示した材質の中でアルミニウム，シリコンゴムなどについては付着面の直接観察は行なっていない。しかし，これらの材質と雪粒の接触界面でもガラスやアクリルに見られたと同様に付着面が形成されていると考えてよいだろう。

第1表の7種類の材質の中でテフロンとビニールに対しては −5°C と −10°C のいずれの温度に於ても付着時間を30分間としたが測定可能な付着力を示さなかった。

雪のブロックから分離した後の付着板にはかなり多くの雪粒が付着したままになっていた。付着板に残った雪粒の数と付着力の大きさとは定性的に良い相関を示した。このことは雪のブロックと付着板の分離が厳密にはその界面での破壊のみならず，雪粒子間の結合組織の破壊にもよることを示している。この事実は付着強度が付着した積雪自身の強度と密接な関係にあることを示唆するものである。今回の実験に於ける雪試料の強度は，密度や粒径が一定であることから主として焼結時間に依存すると考えてよい。この効果を確めるために焼結時間 t_s が15分と20分の試料をそれぞれ10分間ガラス板に付着させた時の強度を測定し，それぞれ16 g/cm^2 と 22.5 g/cm^2 という値を得た。このように，たとえ付着時間が同じであっても付着強度は雪自体の強度に支配される。一般に破壊は最も組織の弱いところで起こると考えられる。従って付着強度を示した材質に対しては雪と異物質間の付着強度の方が雪粒子間の焼結による結合強度よりも強固であるといえよう。

IV. 考　　察

a. 乾き雪の付着の機構について

乾いた雪が異物質に接触すると雪はその物質との間に氷の結合組織，すなわち付着面を形

成する。親水性物質との接触点では雪が乾いていても，付着面を成長する。付着面が成長する過程は金属や氷の微粒子を融点近くで互いに接触させておくと接触部分が肥大するいわゆる焼結と類似のものと考えてよいだろう。

氷の焼結については，Kingery[18], Kuroiwa[16], Hobbs と Mason[17] 及び Jellinek[19] の研究がある。しかし，導き出された結論は研究者によってそれぞれ異なっている。Kingery[17] は $-2°C$～$-25°C$ の温度範囲で 0.2 mm～6 mm の氷球を使って観察した結果，くびれの部分への物質輸送の機構として表面拡散を提唱した。これに対して黒岩は $0°C$～$-10°C$ の間では体積拡散が，又 $-15°C$ 以下では表面拡散が支配的になると述べている。これらはいずれも Kuczynski[14] の導き出した焼結の理論式（第1式）の n, m の値を実験的に決定して得た結論である。しかしながらその後 Hobbs と Mason は Kuczynski の焼結の理論を氷のように蒸気圧の高い物質にそのまま適応することはできないと考え，水分子が周囲の蒸気相を通って拡散することによって輸送されるばあいの蒸発凝固の式を導き出した。これによると時間 t でのくびれの幅 $2x$ と粒子の半径 R との間の関係は次のようになる。

$$\left(\frac{x}{R}\right)^5 = \frac{B(T)}{R^3}t \qquad (2)$$

これより先，Cabrera[20] は Kuczynski の理論の中で表面拡散に関して修正すべき点を指摘し，表面拡散の場合にも第2式が成り立つことを示した。ただし $B(T)$ の値は各々の機構で異なる。従って，Hobbs と Mason[17] 及び Cabrera[20] の結論を考慮すると蒸発凝固，体積拡散，表面拡散のいずれの場合にも氷の焼結に於ては第2式がなり立つことになる。言いかえれば，氷のばあいには，Kuczynski の提案した焼結の一般式に於て，$n=5$, $m=3$ は上記の3つの機構のどれを考えても満たされることになる。このことから Hobbs と Mason[16] は氷の焼結を最も強く支配する機構を決定するには，焼結速度を実験的に求め(1)式の n, m の値を決めるのは勿論のこと，$B(T)$ の値を見積らなければならないことを強調した。ここで $B(T)$ の項とは各々の機構に於ける輸送係数といわれるもので次のような形で表わされる。

$$\left[\frac{kT\beta}{P_0 m D_G} + \frac{L_s^2 m\beta}{KkT^2}\right]^{-1} \qquad \text{蒸発凝固 (Hobbs and Mason[17])}$$

$$D_v \qquad \text{体積拡散 (Kuczynski[15])}$$

$$\frac{4\delta^3}{y_s}\nu \exp -(W_s+U_s)/kT \qquad \text{表面拡散 (Cabrera[20])}$$

さらにどの機構に於ても輸送係数が全て $\left(\frac{x}{R}\right)^5 \cdot \frac{kT}{20\gamma\delta^3} \cdot \frac{R^3}{t}$ になることは容易に導かれる。ここで記号はそれぞれ次の通りである。

k; Boltzman 定数，β; 氷の密度，P_0; 平板状の氷の表面に対する平衡蒸気圧，δ; 分子間距離，m; 分子の質量，K; 水蒸気の熱伝導度，D_G; 平衡蒸気圧中での水分子の拡散定数，L_s; 蒸発の潜熱，y_s; 吸着分子の平均移動距離，D_v; 氷の結晶の体積拡散定数，ν; 表面分子の振動周波数，W_s; 結晶表面上の孤立分子の蒸発のエネルギー，U_s; 拡散のための活性化エネルギー。

我々の実験に於て氷球と氷板の付着のばあいの輸送係数，$\left(\frac{x}{R}\right)^5 \cdot \frac{kT}{20\gamma\delta^3} \cdot \frac{R^3}{t}$ を $-10°C$,

$R=100\ \mu$m, $\left(\frac{x}{R}\right)=0.2$ に達するまでの時間 t を入れて計算すると，1.5～2×10^{-8} cm^2/sec となった。これは Hobbs らがほぼ等しい実験条件のもとで行なった氷球の焼結実験から求めた値の約1/4の大きさであるがオーダーとして比的的良い一致とみてよいだろう。なぜならば，n, m をそれぞれ5及び3とし，表面拡散，又は体積拡散のいずれのばあいの理論的輸送係数を求めても，その値は 10^{-12}～10^{-11} cm^2/sec のオーダーで，われわれや Hobbs らが得た実験値よりは，はるかに小さい値を示すからである。すなわち我々の付着実験の結果から求めた輸送係数は，Hobbs と Mason[17] の蒸発凝固機構に基づいて求めた理論的輸送係数に最も近い値であるといえる。

又，ガラス板と氷球の付着実験で得られた n, m の値はそれぞれ $n=5$, $m=3$ で氷球と氷板の付着と同じであった。しかし $x/R=0.2$ に達するまでの時間は第7図に示したように約70分で，氷と氷球の焼結のばあいよりも小さな値を示した。このことはガラスと氷球の界面に於ける付着面の形成速度が氷の焼結速度よりも大きいことにほかならない。言いかえれば，ガラスに対しては雪や氷は氷同士の焼結よりも容易に付着するということになる。

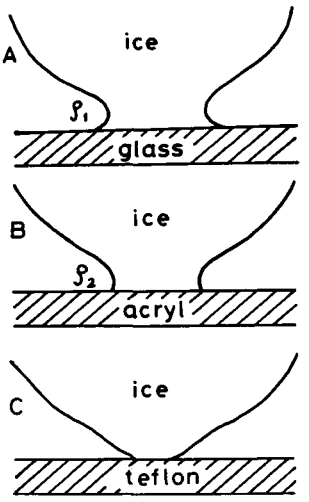
ガラスと水蒸気の界面張力，及びガラス面上に吸着した水分子相互の分子間距離が未知であるためにガラスと氷球との付着に於ける輸送係数を求めることはできない。しかし，ガラスが極めて親水性に豊む物質であることを考えると，ガラスと水蒸気の界面張力は氷の面に対するそれとほぼ等しいと考えてよいだろう。又ガラス表面に吸着された水分子相互の分子間距離 δ も氷の結晶表面のそれと同程度であるとすれば実験結果を定性的に説明することができる。すなわち，付着物質が，ガラスのような親水性の高い物質に対する乾き雪の付着は，飽和蒸気圧のもとでは事実上氷板への付着と同程度の速度で進行すると考えることができる。

さて，これに対してアクリルと氷球の付着はどうであろうか。先に述べたようにアクリルと氷球の界面でもガラス板や氷板への付着と同様に付着面が形成されるのが観察された。アクリルと氷球の付着のばあい第(1)式の n の値は $n\fallingdotseq7$ であった。また $R=100\ \mu$m の氷球を付着させたとき $x/R=0.2$ になるまでに，-10°C で約600分を要した。さらにテフロンと氷球の付着では第8図の顕微鏡写真で示したように付着面の形成は全く見られず，あらかじめ接触させておいても約5時間後には接点が離れてしまう傾向を示した。

もしも氷球を異物質に接触させるばあい，異物質との接点で最初に作られるくびれ部分の曲率半径 ρ が物質によらず一定であると仮定すればその部分への水分子の供給は付着物質にはよらないと考えることができる。しかしながら付着面の形成速度が物質によって異なることは実験結果から明らかであった。実験に於て容器内の平均水蒸気圧は付着材質によらず一定であると考えてよい。従って付着面成長速度の物質による違いは初期の接触時に形成されるくびれ部分の曲率半径 ρ が異なるために起こると考えるのが妥当であろう。曲率半径 ρ は固体の表面エネルギーと密接な関係にあるが，これを直接測定することはできない。水滴法で求めた接触角の値から，観察に用いた材質の上に作られる接合部分の形を模式的に示したのが第10図である。ガラスや，アクリルのように接触角が90°よりも小さいばあいには外側に対して凹面をもつ負の曲率をもった接合部分を形成するがテフロンのように90°より大きな接触角をもつ物質との間には負の曲率を持つくびれを作ることはない。従ってテフロンのばあいには負の曲率

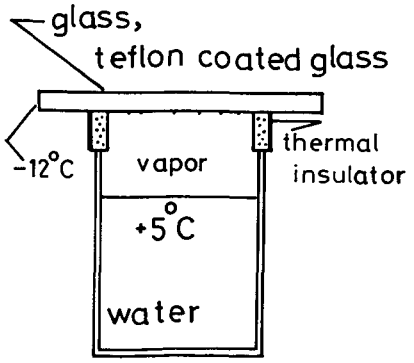
によって生じるくびれの部分へ分子を移動させるべき起動力は生じない。

Itagaki[21] は氷飽和のもとで氷の板と氷球とを約 10 μm だけ離しておいたばあいにもその隙き間は氷で満たされて相互に結合することを観察した。すなわちこれは負の曲率をもつくびれ部分があらかじめ存在しなくても分子の輸送が起こることを示したものといえる。これは正の曲率による過剰な蒸気圧が球面に近接している平面に対して分子を輸送させるためであると説明される。同様のことが第 8 図に示したテフロンと雪粒のばあいにも考えられる。すなわち，正の曲率をもつ雪粒子からテフロン表面への水分子の輸送があるはずである。しかしながらテフロンの低い表面エネルギーのためにテフロン表面に供給された水分子が安定して存在することができずその結果として雪粒とテフロンの間には氷の結合部分すなわち付着面を成長することはないと考えることができる。



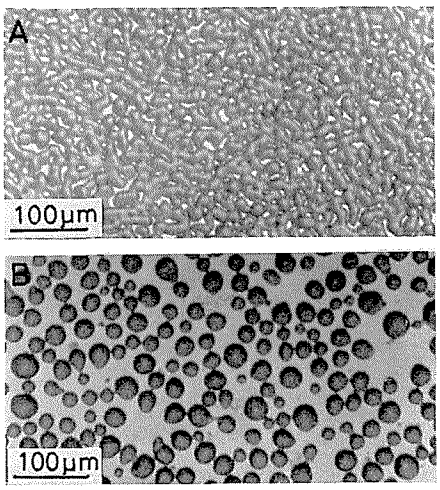
第 10 図　ガラス，アクリル，テフロンに氷球が接触した場合にそれぞれの界面に作る ice-bond の曲率半径の相対的な大きさを水との接触角から類推して表わした。$\rho_1 < \rho_2$

供給された水分子が固体表面に吸着，又は凝結する割合はその物質の物理化学的性質の中でも主に接触角と熱伝導率に支配されると考えられる。たとえばガラスとアルミニウムを比較すると，接触角に関してはガラスはアルミニウムの 1/4～1/3 であるにもかかわらず，両者が隣接しているばあいアルミニウム表面での水蒸気の凝結量がはるかに多い。このことは冬期間よく経験することである。これは接触角の効果より，3 オーダー大きいアルミニウムの熱伝導率の影響と考えるべきである。これに対して，ガラスとテフロンの熱伝導率はそれぞれおよそ 6×10^{-3} J/cm·s·K と 2×10^{-3} J/cm·s·K でそれ程大きな差はない。しかしながら接触角に関しては理想的に洗浄されたガラスはテフロンの約 1/10 である。接触角の違いが水蒸気の凝結量にどのような効果を示すかを簡単な観察によって比較してみた。第 11 図に示したように −12°C に冷却したガラス板及びテフロンを塗布したガラス板を +5°C の水面から 3 cm 上方に 5 分間置き，この間に各々の材質の表面に凝結した氷の量を観察した。第 12 図の A，B はそれぞれガラス及びテフロン塗布のガラス面上に凝結した氷の顕微鏡写真である。ガラス面はほぼ全面が氷に覆われているのに対し，テフロンを塗布したガラス面上での氷の占める割合は明らかに少ない。このばあい，+5°C の水の入った容器の上部に置かれた材質の表面は +5°C の水に対する平衡蒸気圧のもとにさらされていると考えられる。このため −10°C の氷飽



第 11 図　水蒸気の凝結実験
ガラスとテフロンを塗布したガラスを +5°C の水面から 3 cm の位置に置き表面に凝結した氷を観察した

和蒸気圧中で且つ全体が均一な温度場のもとで行なわれた付着実験のばあいと凝結する水蒸気の絶対量は明らかに異なる。従って第12図Bのようにテフロンを塗布したガラス面にもかなり多くの水蒸気が凝結しているがガラスとの比較に於て物質の接触角の違いによる凝結のし方及び凝結量の差を定性的に知ることができる。



第12図 ガラス(A)及びテフロン塗布のガラス面(B)に凝結した氷

b. 付着力について

測定可能な大きさの付着力を示した物質の表面には雪のブロックを引き離したあと常にいくつかの雪粒が付着したまま残っていた。このことは付着板と雪のブロックの分離が雪の内部破壊か又は界面破壊と内部破壊の混合したものであることを示している。

いま円柱状の雪のブロックの表面の中で，付着板と接する雪粒の数をNとする。雪粒の大きさは各々異なるからN個の雪粒が所定の付着時間内に付着板との間に作る付着面積の総和は $\sum_{i=1}^{N} S_i$ で表わされる。ここで S_i は i 番目の雪粒と付着板の界面で作られる付着面の面積である。さらに界面での引張付着強度を T_{ad} とし界面での付着力を F_{ad} とすれば $F_{ad}=\sum_{i=1}^{N} S_i T_{ad}$ となる。一方接触面から d の位置の雪のブロック内に水平断面を考え，ここでの雪粒同士の結合手の数を n とし，i 番目の結合手の断面積を B_i とすると結合手の作る総面積は，$\sum_{i=1}^{n} B_i$ で表わされる。氷の引張強度を T_{ice} としこの面での固着力を F_{c0} とすれば $F_{c0}=\sum_{i=1}^{n} B_i T_{ice}$ となる。

付着物質が雪と離れる時の破壊様式は界面での付着力 F_{ad} と雪のブロック内での固着力 F_{c0} とのかねあいで決まる。破壊は組織の弱いところで起こるので，$F_{ad}>F_{c0}$ のばあい，測定された付着力 F は F_{c0} と等しく，このばあいには純粋な固体内破壊 (cohesive break) により付着板が離れることになる。しかし，破壊は一般的に固体内破壊と界面破壊の混合した様式で起こるので，測定された付着力 F は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} F &= fF_{c0}+(1-f)F_{ad} \\ &= f\sum_{i=1}^{n} B_i T_{ice}+(1-f)\sum_{i=1}^{N} S_i T_{ad} \end{aligned} \qquad (3)$$

ここで f は固体内破壊の占める割合である。従って純粋な固体内破壊のばあいは $f=1$ で混合破壊では $0<f<1$ となり，$f=0$ は純粋な界面破壊に相当する。f は定性的には付着材質，付着時間に依存する。さて，第3式の関係が付着力の実測値に対してどの程度の妥当性があるかを検討してみよう。密度 0.44 g/cm^3 の雪を -10°C の温度のもとで30分間ガラス板に付着した時の引張付着強度は約 80 gw/cm^2 であった (第1表)。この時見掛付着面積 1 cm^2 中の真実付着面積を顕微鏡写真から求めると，1.02×10^{-2} cm^2 で見掛付着面積のおよそ1/100であった。ガラスと氷の引張付着強度の測定例はないが，界面破壊の大きさ $\sum_{i=1}^{N} S_i T_{ad}$ を見積るために近似的にステンレスと氷の付着強度 35 kg/cm^2 を用い，顕微鏡写真から求めた真実付着面積を考慮す

ると $\sum_{i=1}^{N} S_i T_{ad}=3.5$ kg となる。しかしガラス面に残った雪粒の数から，ガラスと雪試料の分離はガラス板近傍の積雪内部の破壊がそのほとんどを占めていたと考えることができた。すなわちガラスのばあいには $f=1$ と考えてもさしつかえなく第3式の第2項は考えなくてもよいだろう。従って測定された付着力は付着した雪試料の内部破壊 $\sum_{i=1}^{n} B_i T_{ice}$ の大きさで決まる。実際に破壊を起こした面に於ける $\sum_{i=1}^{n} B_i$ の値は分らないが，一般に試料の表面で平板と接している雪粒と積雪内部の雪粒とでは後者の方が結合手の数が多いと考えてよい。従って通常は n＞N である。しかしながら，付着板を引き離す時の破壊の様子をみていると，たとえ固体内破壊であっても，付着板に極めて近い位置での雪試料内部の破壊であった。このことはガラス板に付着した雪粒だけがその下端の雪粒同士の結合点で破壊されたということができる。すなわち近似的に n≈N とみなすことができる。ガラスと雪粒との間の付着面形成速度が氷の焼結速度とほぼ等しいことから $\sum_{i=1}^{n} B_i \approx \sum_{i=1}^{N} S_i$ と考えてよいだろう。ここで氷の引張破壊強度として，Hawkes と Mellor[22] による値 20 kg/cm² を用いると，見掛付着面積 10 cm² あたり $\sum_{i=1}^{n} B_i T_{ice}=2$ kg となる。この値は付着力の実測値 0.8 kg の 2.5 倍の大きさである。この原因として T_{ice} として純氷の値をそのまま用いたことが考えられる。すなわち破壊の総面積として $\sum_{i=1}^{n} B_i$ で与えられた雪粒子間の結合手が同時に破壊されなかったために生じた差であると考えられる。

今回の実験に於て純粋な界面破壊を示したのはテフロンとビニールだけであり，各々の物質に対する付着力の測定値は $F=0$ であった。このことは第8図の顕微鏡写真で明らかなようにテフロンと雪粒との間には全く付着面が形成されないこと，すなわち，$\sum_{i=1}^{N} S_i=0$ であること，及び破壊様式が純粋な界面破壊であることから $f=0$ に相当する。

V. ま と め

乾き雪が異物質に付着する過程を明らかにするために，透明な材質を使って氷球(雪粒)との接触界面を直接観察した。その結果，界面における融解，再凍結という過程を経ることなく，異物質との接点に付着面を形成し，さらにそれが時間と共に成長することにより直接異物質に付着することが明らかになった。

付着面の成長速度は親水性の材質では大きく，特にガラス面への付着は氷板への付着と同程度かそれ以上の速度で進行した。これに対し，典型的な疎水性物質であるテフロンとの間には付着面そのものを形成することがない。ガラス面や氷板上での付着面の成長速度の測定結果は Hobbs と Mason[17] による蒸気圧の高い状態での蒸発凝固機構による成長を考えたばあいの結果とよく一致した。このことは飽和蒸気圧のもとでは吸着された水分子のためにガラスの表面は事実上氷の表面とほとんど同じ構造になっていることを予測させる。

材質による付着面形成の有無，又は成長速度の差は材質表面上での水分子の吸着の度合で考えることができる。これに関しては固体の表面エネルギーを用いて比較しなければならないが，ここでは間接的に水との接触角で議論した。材質の種類によらず雪粒で満たされた容器内は飽和蒸気で満たされている。この蒸気の濃度はガラスのように接触角の小さい物質の表面では保たれているが，疎水性材質の表面では水蒸気密度は急激に減少するだろう。飽和蒸気で満たされた容器内に種々の物質を置くばあいその物質の表面と容器内の水蒸気の濃度勾配は定性

的には水との接触角の大きさと相関がある。すなわち接触角の大きいものほどその表面での水蒸気濃度は小さく従って周囲との水蒸気の濃度勾配は大きくなるだろう。

一定の密度の雪のブロックを種々の実用材料に一定時間付着させたばあいの引張付着強度を測定した。乾き雪の付着力は時間と共に増大した。これは真実の付着面積が時間と共に成長することに基づくもので，ぬれ雪や凍着氷との付着と異なる点である。

付着板と雪の分離は一般的に界面破壊と雪試料の内部破壊との混合様式を示した。純粋な界面破壊はテフロンとビニールのばあいにみられたが，これはこれらの材料に対して雪が付着面を作らなかったためで付着性材料との破壊はいずれも界面と内部破壊の混合であった。ただしガラスのように特に付着性のつよい材料との破壊は固体内破壊が大きな割合を占めた。界面破壊と雪試料内部の破壊の割合は界面で成長した付着面と雪粒同士の結合組織との強度のかね合いで決まる。付着性の強い物質ほど付着力の測定値は付着した雪自身の引張破壊強度に近づくということができる。

本研究は，文部省科学研究費，自然災害特別研究 (I)，着雪・着氷災害対策の基礎的研究(代表者　若浜五郎) のもとに行なわれた。

文　献

1) 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.
2) 水野悠紀子・若浜五郎 1977　湿雪の付着強度，低温科学，物理篇，**35**，131–145.
Wakahama, G. and Mizuno, Y. 1979 Studies on tensile strength of wet snow. Proceedings of Second International Symposium on Snow Removal and Ice Control Research, May 15–19, 1978, 18–22.
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) Wakahama, G., Kuroiwa, D. and Goto, K. 1977 Snow accretion on electric wires and its prevention. *J. Glaciol.* **19**, 479–487.
5) Jellinek, H. H. G. 1970 Ice adhesion and abhesion; a survey. Proceedings of the International Symposium on Snow Removal and Ice Control Research, April 8–10, 1970, *CRREL Special Rept.* **115**, 46–77.
6) Raraty, L. E. and Tabor, D. 1958 The adhesion and strength properties of ice. *Proc. Roy. Soc. London A*, **245**, 184–201.
7) Landy, M. and Freiberger, A. 1967 Studies of ice adhesion I. Adhesion of ice to plastics. *J. Colloid and Interface Sci.* **25**, 231–244.
8) Bascom, W. D., Cottington, R. L. and Singleterry, C. R. 1969 Ice adhesion to hydrophilic and hydrophobic surfaces. *J. Adhesion*, **1**, 246–263.
9) Baker, H. R., Bascom, W. D. and Singleterry, C. R. 1962 The adhesion of ice to lubricated surfaces. *J. Colloid Sci.* **17**, 477–491.
10) Jellinek, H. H. G. 1962 Ice adhesion. *Can. J. Phys.* **40**, 1294–1309.
11) Jellinek, H. H. G. 1959 Adhesive properties of ice. *J. Colloid Sci.* **14**, 268–280.
12) Ackley, S. F. and Itagaki, K. 1970 Ice adhesion studies; Properties of defect in the interfacial region. Proceedings of International Symposium on Snow Removal and Ice Control Research, 87–96.
13) 竹内政夫 1978　道路標識への着雪とその防止．雪氷，**40**，3，15–25.
14) Hosler, C. L., Jensen, D. C. and Goldshalk, L. 1957 On the aggregation of ice crystals to form snow. *J. Meteor.* **14**, 5, 415–420.

15) Kuczynski, G. C. 1949 Self-diffusion in sintering of metallic particles. *Trans. AIME.* **185**, 169–178.
16) Kuroiwa, D. 1961 A study of ice sintering. *Tellus* **13**, 252–259.
17) Hobbs, P. V. and Mason, B. J. 1967 The sintering and adhesion of ice. *Phil. Mag.* **9**, 181–197.
18) Kingery, W. D. 1960 Regelation, surface diffusion, and ice sintering. *J. Appl. Phys.* **31**, 833–838.
19) Jellinek, H. H. G. and Ibrahim, S. H. 1967 Sintering of powdered ice. *J. Colloid and Interface Sci.* **25**, 245–254.
20) Cabrera, N. 1950 Note on surface diffusion in sintering of metallic particles. *Trans. AIME.* **188**, 667–668.
21) Itagaki, K. 1967 Some surface phenomena of ice. *J. Colloid and Interface Sci.* **25**, 218–227.
22) Hawkes, I. and Mellor, M. 1972 Deformation and fracture of ice under uniaxial stresses. *J. Glaciol.* **11**, 61, 103–131.

Summary

With a view to snow accretion onto electric wires, running trains and automobiles, parabolic antennas and other structures, experimental studies were conducted on the microscopic process of snow or ice adhesion as well as on the tensile adhesive strength of snow onto various kinds of both hydrophilic and hydrophobic materials at temperatures below the melting point of ice.

(1) Direct observation of ice bonds formed at the interface between ice particles and various kinds of materials.

A number of ice particles were placed on the bottom of a shallow chamber, 75 mm × 25 mm × 1.5 mm in dimension, made of a transparent material such as glass, acryl (PMMA) or ice. The chamber was then put upside down on a slide glass, which was placed on the mechanical stage of a microscope as shown in Fig. 2. Focusing of the image at the interface between the bottom surface of the chamber and the ice particles allowed real contact areas between them to be easily observed throughout the experiment. Only several minutes after the start of the experiment, mirror-like real contact areas appeared at some places in the interface between the ice particles and the glass (or acryl or ice) plate and they grew with time as illustrated in Figs. 4-A (ice-glass) and 4-B (ice-ice plate).

The mean diameter of each contact area, $2x$, was measured for particles approximately 200 μm in diameter and plotted against time, t, as shown in Fig. 5, where R is the radius of an ice particle. A linear relationship between $\log\left(\frac{x}{R}\right)$ and $\log t$ was found as seen in the figure.

Since it was impossible to observe directly the real contact areas between ice particles and opaque materials such as rubber, teflon, metals and some kinds of plastics, ice bonds at the interface were laterally observed under a microscope.

Microphotographs taken successively of a contact region between snow particles and teflon shown in Fig. 8 reveal that the ice bond has never grown at the interface between them even though they were kept in contact for a long time. In contrast with teflon, a distinguished growth of an ice bond was observed between snow particles and glass as seen in Fig. 9.

It was found that the growth rate of an ice bond formed on the interface between an ice particle and a hydrophilic material such as glass was slightly larger than that found in

case of ice sintering (Fig. 5), and that an ice bond never developed between an ice particle and a hydrophobic material such as teflon.

(2) Tensile adhesive strengths of snow onto various kinds of materials.

Tensile adhesive strengths of dry snow onto various kinds of hydrophilic and hydrophobic materials including aluminum, glass, cellulose acetate, acryl, silicone rubber, teflon, vinyl were measured at the temperatures of $-5°C$ and $-10°C$. The experimental apparatus is schematically shown in Fig. 3.

The results obtained in the present experiment are tabulated in Table 1 for different times of adhesion, and sintering, respectively denoted by t_a and t_s, the latter representing the aging time of a snow sample; i. e. the time from preparation of a snow column to the end of an adhesion experiment. It should be noted that an adhesive strength of dry snow to a specific material depends greatly not only on the ambient temperature and the time duration t_a in contact with each other, but also on the sintering time t_s of the snow sample.

Examinations of fracture planes revealed that a pure adhesive break never took place in our experiments with the exceptions of teflon and vinyl; a cohesive break or a mixture of cohesive and adhesive breaks occurred at or near the interface. It suggests that abhesion or separation of a snow column from some other materials mainly occurs within the snow sample, and that value of adhesive strength is a direct reflection of the tensile strength of adherent snow itself when snow accreated onto hydrophilic materials such as glass.