



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	風洞による着氷の研究 : III. 各種材質への着氷の研究
Author(s)	高野, 玉吉; TAKANO, Tamakichi
Citation	低温科学, 5, 21-36
Issue Date	1950-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17469
Type	departmental bulletin paper
File Information	5_p21-36.pdf



風洞による着氷の研究 III.* 各種材質への着氷の研究

高野 玉 吉

(北海道大學理學部 物理學教室)
(低溫科學研究所 純正物理學部門)

(昭和 23 年 5 月 受理)

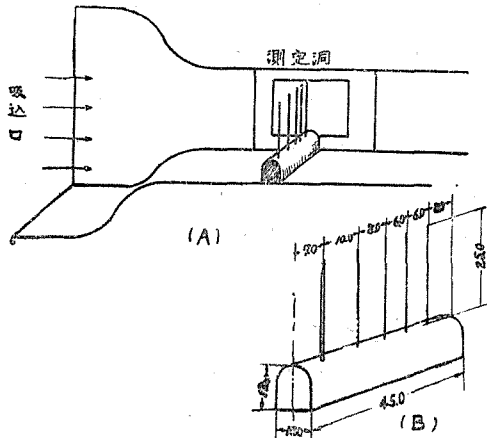
I. 緒 言

翼型着氷の研究⁽¹⁾を行つた際、翼型の表面が木の部分とアルミニュームの部分では着氷の機構や着氷量等が多少異なることに氣づいた。着氷の際同一の状態におかれた物質でもその材質によつて、着氷はいろいろに變化してくることを豫想し、防氷の基礎的段階としてこの研究を始めたものである。

茲で材質としては比較的入手容易なもの(棒又はパイプ)の中から、出来るだけ熱傳導率の異なるものを選んで、これを着氷風洞内に挿入して着氷させ、その機構、着氷量、氷の比重剪斷力、等の測定を行つた。

一般に材質の相違による着氷の變化は材質そのものの表面が問題で、風洞のプロペラを廻した最初の1~2分間が最も影響が大きく物質による着氷のいろいろの相違はこの時に生ずるものと考えられる。従つて着氷させる材質の表面は出来る限り同一の状態にしておくことが肝要である。

今回の研究では表面を同一の粗土の紙鐘で擦つた程度で別に特別の處理は施さずに實驗を行つたが、表面の問題に關してはもつと深く探る必要がある。この種の研究に關しては Rothrock 等の研究⁽²⁾もあるが、單に着氷の引張力を檢した實驗であり、着氷全般に關する嚴密な測定ではない。この問題については顯微鏡的觀察を行うことが望ましい。



第 1 圖

II. 着 氷 量

1) 材質及び太さの異なる場合

* 北海道大學低溫科學研究所業績 第95號

普通に求められる材料の中から銅、鐵、デュラルミン、エボナイト、の四種類をとり、何れも長さ 30cm の棒又はパイプにして、これを表面溝鋸型に仕上げられた木枠の上にさし込

第 1 表

No.	材 質	形 状	直徑(cm)	組 成	熱傳導率(cal/cm/sec/20°)
I	銅	丸 棒	0.3	軟 銅	0.923
II	鐵	〃	0.5	鍛 鐵	0.147
III	銅	丸パイプ	0.8	軟 銅	0.923
IV	エボナイト	〃	1.0	市 販 (表面滑ラカ)	0.0038
V	デュラルミン	〃	1.2	95Al 4.5Cu 0.5Mg	0.395

み、風洞測定洞の中に入れ固定する。第 1 圖はその様子を示したもので圖の中の寸法は厘單位である。着氷棒（一般にパイプのものも含めて云う、以下同じ）は測定洞の中央で、着氷部分約 25cm を露はし風向に對し垂直に立っている。この時棒の直徑が各々異なるから同圖 (B) に示す様に太い棒ほど隣同志の間隔を廣くとり、棒相互によつて流線が亂れることのない様に配置する。各々の着氷棒は風洞内では一定の場所に固定されている。これ等着氷棒の太さ、熱傳導率等を第 1 表に示す。茲で銅は太さの異なる丸棒とパイプの二種を用い、丸棒の場合と中が空になつているパイプの場合とで着氷に差異があるかどうかをみることにした。

棒を風洞内に挿入する前に紙やすりで一樣に表面を擦り、豫め冷してから固定する。次にプロペラを廻すと着氷を始めるが、風速が大なるとき (約 40m/sec 以上) には一番細い銅の丸棒 (No. I) とエボナイトパイプ (No. IV) は風壓のため先の方 1/3 位は振動する。しかしこの爲に他の棒に比べて着氷しがたいと云うことは認められなかつた。着氷は出来るだけ棒の表面に薄く生ぜしめることが望ましいのであるが、いろいろの測定が面倒になるために、或る程度成長させなければならなかつた。それで肉眼で着氷を観察し乍ら適當な時間だけプロペラを廻し、適當に氷が成長したなら (2~5m.m) プロペラを止め風洞内より取出し着氷の性質、附着状態等を檢べた。そのために先ず氷の断面を作り薄い鋼製の物指をまらめて棒の圓周に沿うて着氷範圍を測つた。この場合には出来るだけ氷のつけ根を棒の表面上で測らなければならない。次に氷の伸びはその断面で平均値を求めた。最後に着氷重量は棒の兩末端の氷を取除いた残りを、棒より剥がし天秤により之を測定した。之等の測定は何れも氣温が外氣に等しい位の冷たい所で、成るべく短時間に行わなければならない。之等の測定結果を第 2 表に示す。表中の着氷率は氷の重さ (Wgr/cm) と棒の直徑 (Dcm) との比を表はし、成長率は氷の伸び (Lcm) と直徑、附着率は着氷範圍 (Rcm) と直徑との比を表はしたものである。

第 2 表

日 日	時刻	実験 NO	温度 (°C)	風速 (M/S)	着氷時間 (分)	着氷型	着 氷 量						材 質
							重率W(%)	厚PL(cm)	径回径(cm)	着氷率(%)	成長率(%)	附着率(%)	
12.2	16.50	I	-14.6	39	30	粗氷~霧氷 (不透明)		0.14	1.15		3.117	0.96	デュラルミン エポナイト 銅 鉄 鋼
								0.15	0.94		0.150	0.94	
								0.16	0.76		0.195	0.93	
								0.17	0.46		0.340	0.92	
								0.17	0.32		0.570	1.06	
12.2	16.40	II	-14.6	59	15	粗氷~霧氷 (粉雪混)	0.002	0.09	1.14	0.068	0.658	0.95	全 上
							0.084	0.09	0.91	0.084	0.090	0.92	
							0.064	0.10	0.81	0.073	0.120	0.99	
							0.047	0.11	0.45	0.074	0.220	0.90	
							0.039	0.11	0.29	0.150	0.370	0.97	
12.8	08.30	III	-11.0	60	12	霧氷 (粉雪混)		0.11	1.20		0.092	1.00	全 上
								0.13	1.01		0.125	1.01	
								0.13	0.80		0.152	0.98	
								0.15	0.48		0.300	0.96	
								0.15	0.30		0.500	1.00	
3.3	16.52	IV	-10.0	41	8	粗氷	0.247	0.30	1.30	0.202	0.230	1.08	全 上
							0.209	0.30	1.10	0.209	0.300	1.10	
							0.168	0.31	0.90	0.205	0.380	1.09	
							0.139	0.38	0.50	0.207	0.760	1.00	
							0.102	0.40	0.35	0.340	1.240	1.17	

四回の実験に於ては粗氷~霧氷、^④霧氷、粗氷型と三種類の着氷があつたが、その中で無定形粉雪が混つて着氷したことが2回あり、又実験 No. II, No. IV の如く着氷棒全体の裏面に澱粉状の着氷を生じたことがある。この着氷は昇華によつて生ずることが知られているが^{(4) (5)} 氣象條件によつてはこの種の着氷が附着する材質と全然附着しないものが出る。(後述)

測定結果より着氷率と材質の太さとの關係を検べると、細い棒ほど着氷率は大である。このことは既に捕捉率の問題として知られている所であるが、二つの実験では金属に比べて非金属のエポナイトは捕捉率が稍々大きくなる傾向を示している。即ちエポナイトの方は物體の太さと着氷率との關係曲線から豫想されるものより、少しはずれて大きくなつている。同様な關係を成長率について検べると、材質の異ひなどは殆んど無視されて、太さによる捕捉率の影響がはつきりと現はれている。又附着率については鐵はエポナイトや銅に比べて稍々附着面積が少い結果を示した。

2) 異なる材質で太さが一樣なる場合

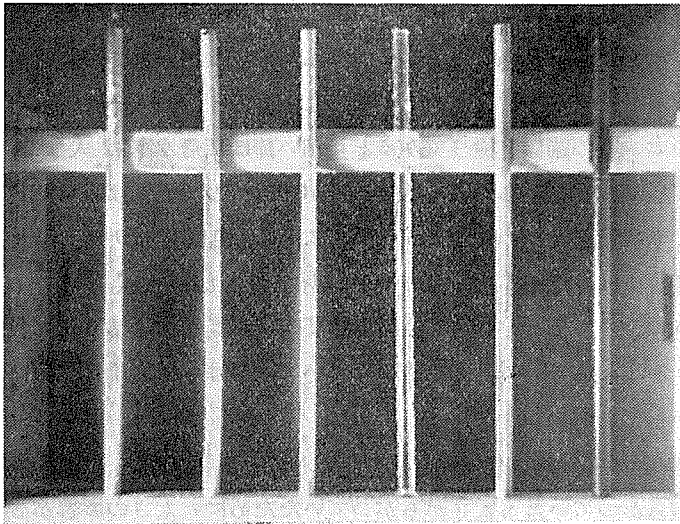
前述 1) の場合では、材質がちがつていても太さがちがつていたために、太さの影響が著しくきて來て材質による着氷の變化がよく分らなかつた。それで今度は棒の太さを同一にして實驗をしてみた。材質としては 1) の場合と同様に銅、眞鍮、デュラルミン、エポナイト、その他に硝子、木材等種類を多くした。之等は何れも直徑10mm内外、肉厚 2~3mm 長さ 30cm のパイプである。之等材質の諸條件を第 3 表に掲げた。表中熱傳導率比とは、熱傳導率の一番小さい木材の値を 1 とみてこれと各材との比を求めたものである。着氷棒の直徑に 1/10~2/10mm 程度の差はあるが、これ位の差は殆んど無視出来るものとみてよい。これ等の棒を等間隔に配置し前述第 1 圖に示したと同じ様に着氷させた。この場合に棒を支えるには前述の様な方法では、風速が大なるときは風壓のため不安定になるおそれがあるので、實驗 No. 14 からは棒の上端に支持板を用いる方法に取かえた。第 2 圖はこの方法で着氷棒を風

第 3 表

No	材 質	組 成	直 徑 (cm)	熱傳導率(λ) (cal/cm/sec/20)°C	熱傳導率比
I	銅	市 販	1.01	0.923	2637
II	デュラルミン	95Al 4.5Cu 0.5Mg	1.01	0.395	1130
III	眞 鍮	67Cu 33Zn	0.97	0.258	737
IV	硝 子	ソ ー ダ	1.01	0.0172	49.2
V	エポナイト	市 販 (表面滑ラカ)	1.00	0.0038	10.9
VI	木	白 樺 (乾木理=垂直)	1.02	0.0035	1

洞内測定洞に取付け着氷させた所を示すもので、銅棒の上端の輪型針金は剪断力試験の際に用いるためのものである。

着氷はその範圍、伸び、重さ等を測り最後に氷の比重並に剪断力の測定を行つた。着氷



銅 デュラルミン 眞鍮 硝子 木 エポナイト

第 2 圖

量、着氷型、附着状況等の結果を第4表に纏めて示す。着氷範圍及び成長速度の測定は前と同じ方法で行い、重さの測定には氷の一部分を棒より剥がし、パラフィン紙上にのせ天秤で測る方法と、棒を着氷の儘天秤上にのせ全體の重さを測り棒の重さを差引く方法とを用いた。そして銅の如く棒そのものが氷の重さに比較して著しく重いもので

は常に氷を剥がす方法をとつた。實驗 No. 5, No. 6 は氷のみを 100gr の調剤天秤によつて測り、實驗 No. 7~No. 13 は着氷棒毎に 100gr の絹天秤により測定したものである。

前述 1) に於て棒の裏面に澱粉狀の着氷が生じたことを述べたが、實驗 No. 5 No. 6 No. 16 の場合にも同様な着氷があつた。特に實驗 No. 5 では木、エポナイト、硝子には着氷したが他の金屬類には全然着氷がなく、實驗 No. 6 では木、エポナイト、硝子、デュラルミン、眞鍮、銅と云う順にこの種の着氷が減つていた。然しこの種の着氷は非常に少量であるため天秤による着氷量測定は行はず肉眼での觀察によるもので、何れの場合にも氣温 -10°C 以下

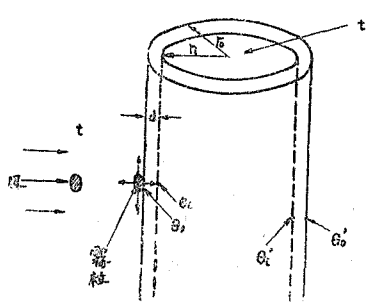
第 4 表

月日	時刻	実験 NO	温度 (C°)	風速 (m/s)	着氷型 (附着状況)	着氷量			検査直径 (cm)	備考	
						着氷率 (%)	成長率 (L/g)	附着率 (%)			
3 3	19 25	5	-10.0	58	5	粗氷 (半透明・管状)	0.29 0.28 0.28 0.27 0.29 0.31	0.45 0.40 0.38 0.38 0.38 0.45	1.40 1.70 1.18 1.10 1.10 1.14	銅 1.01 ステン 1.01 木(白樺) 0.02 硝子 1.01 工材付 1.00 真鍮 0.97	木工材付硝子検査-表面 凝粉状着氷アリ 金属類附着セズ 重量測定-鋼鉄硝子着氷 ニ測ル
3 3	20 25	6	-10.7	26	10	粗氷 (半透明)	0.13 0.13 0.15 0.14 0.15 0.15	0.26 0.23 0.24 0.23 0.23 0.26	1.04 1.14 1.18 1.04 1.12 1.08	全上	表面-凝粉状着氷生シ木 工材付硝子-着氷ニ着氷 鋼ハ膜ニ着氷 重量測定-硝子別ニ測ル
3.20	20.00	7	-6.3	38	10	粗氷~雨氷 (半透明)	0.20 0.19 0.21 0.18 0.18 0.18	0.28 0.30 0.28 0.28 0.23 0.22	0.89 0.97 0.99 0.92 0.98 0.91	全上	検査表面-凝粉状着氷生シ 處理スル 硝子ニ着氷ニ着氷途中風 圧1.7半方位測ル 重量測定-鋼鉄硝子(検査)
3.22	11.16	8	-3.0	24	10	雨氷 (透明)	0.185 0.188 0.149 0.136 0.157 0.157	0.32 0.27 0.29 0.30 0.31 0.34		全上	検査表面-凝粉状着氷生シ 處理スル 硝子ニ着氷ニ着氷途中風 圧1.7半方位測ル 重量測定-鋼鉄硝子(検査)
3.22	11.48	9	-2.0	58	5	面 氷		0.42 真鍮		全上	木工材付硝子-着氷- 着氷セズ
3.22	13.05	10	-20	39	8	雨氷	0.46 0.37 0.12 0.17 0.08 0.32	(0.30 0.64)		全上	木工材付硝子着氷途中 -着氷セズ 重量測定-鋼鉄硝子(検査)
3.23	04 25	11	-5.0	16	10	粗氷~雨氷 (透明)	0.18 0.21 0.24 0.22 0.25 0.27	0.32 0.47 0.39 0.48 0.33 0.37		全上	透明-凝粉状着氷生シ 重量測定-鋼鉄硝子(検査)
3.23	05 40	12	-5.3	35	6	粗氷~雨氷 (透明)	0.27 0.37 0.40 0.40 0.31 0.48	0.40 0.42 0.44 0.51 0.50 0.55	0.9 1.1 1.2 1.1 1.0 1.2	全上	重量測定-鋼鉄硝子(検査)
3.23	07 21	13	-5.3	45	6	粗氷~雨氷 (半透明)	0.20 0.28 0.31 0.32 0.33 0.26	0.31 0.40 0.45 0.41 0.42 0.41		全上	重量測定-鋼鉄硝子(検査)
3.25	08 28	14	-10.0	65	10	粗氷 (管状)	0.10 0.07 0.032 0.063 0.060 0.072	1.3		銅 1.00 ステン 1.00 木(白樺) 0.95 硝子 0.95 工材付 1.00 真鍮 0.95	着氷検査-支持法製ヘル 木枝ハ検査ニ乗ヘル 検査/位置-硝子ニ乗ヘル 重量測定-鋼鉄硝子(検査) 鋼ハ氷/ニ他ハ検査ニ乗ル
3.25	09 14	15	-8.5	64	10	粗氷	0.17 0.19 0.19 0.17 0.15 0.22	0.27 0.28 0.32 0.32 0.28 0.37		全上	検査/位置-硝子ニ乗ヘル 重量測定-鋼鉄硝子(検査) 鋼ハ氷/ニ他ハ検査ニ乗ル
3.25	10 20	16	-10.0	60	10	粗氷	0.17 0.20 0.21 0.18 0.19 0.20	0.28 0.30 0.27 0.24 0.27 0.32		全上	表面全部-凝粉状着氷アリ 検査/位置-硝子ニ乗ヘル 重量測定-鋼鉄硝子(検査) 鋼ハ氷/ニ他ハ検査ニ乗ル
3.31	19 18	17	+0.2 0.0	24	6	雨氷型 薄シム状				全上	検査/位置-硝子ニ乗ヘル 硝子-検査/位置-硝子ニ乗ヘル 木ハ氷ニ着氷ニ着氷セズ 木ハ氷ニ着氷ニ着氷セズ 金属類-薄シム状ニ着氷 ニ出スル
3.31	19 33	18	0.0	48	6	雨氷型 薄シム状				全上	全部着氷スル(雪型) 硝子工材付木ニ着氷 結晶出スル 金属類-何れニ着氷スル 何れニ着氷スル(鋼ハ氷/ニ他ハ 検査ニ乗ル)
3 31	19 46	19	-0.1 -0.4	58	6	雨氷型 薄シム状	0.54 0.50 0.46 0.46 0.58 0.40	硝子測定		全上	硝子-検査/位置-硝子ニ乗ヘル 中心-着氷スル(鋼ハ氷/ニ他ハ 検査ニ乗ル) 着氷/イカニ着氷(鋼ハ氷/ニ他ハ 検査ニ乗ル)
4 1	06 15	20	0.0	61	5	雨氷型	0.22 0.25 0.25 0.27 0.23 0.28			全上	重量測定-鋼鉄硝子(検査)

の場合で棒の前面に粗氷型の着氷が生じた時のことである。そしてその着氷量は材質の熱伝導率に反比例していることが判つた。

一般に流體が棒の軸に對して垂直な方向に流れるときには、その背面の流れは二つの對稱的渦流になる。そして棒の前面と背面とでは全く異なる流線状態であり、棒の表面温度は Reynold's Number が大なるときは熱伝導率の關係より背面が最低となる⁽⁷⁾。

今この澱粉状の着氷が昇華によつて生ずるものとすれば、その原因としては水の飽和張力が水の飽和張力より小さく、従つて水に對して飽和しており氷に對しては過飽和の状態にあると云うことが考えられる。そして水と氷の飽和張力の差は温度 -12°C の時最大 0.20mm となつており、氷に對しては過飽和の状態にあり氷の結晶が出来やすいことがわかつている。⁽⁸⁾ 今回の實驗で昇華性の着氷が生じたのは、何れも気温 $-10^{\circ}\text{C}\sim 14^{\circ}\text{C}$ の時で上の理論が當て嵌まるものとみることが出来る。そこで棒に霧粒が打ち當つて着氷する時の初期の状態を考へてみる。霧粒が棒に打ちあつた時、第3圖の様に温度分布が成つてゐるものとする。茲で空氣の温度を t (棒の中の温度も矢張 t である。)霧粒が衝突した點の棒の表面の温度を θ_0 。その點の棒の内側の温度をそれぞれ θ_0' 、 θ_1' として棒の肉厚を d 、半径を r_0 及び r_1 とする。棒に與えられる熱は棒の極く近くの前面に於ける空氣の斷熱壓縮によるもの、及び霧粒の凍結による融解潜熱とである。そして前者は風速に比例し後者は着氷量(即ち捕捉率)によつて決まる。* 又棒の失う熱は棒の周圍に生ずる空氣の斷熱膨脹によるものの他に、



第 3 圖

第3圖の様に温度分布が成つてゐるものとする。茲で空氣の温度を t (棒の中の温度も矢張 t である。)霧粒が衝突した點の棒の表面の温度を θ_0 。その點の棒の内側の温度をそれぞれ θ_0' 、 θ_1' として棒の肉厚を d 、半径を r_0 及び r_1 とする。棒に與えられる熱は棒の極く近くの前面に於ける空氣の斷熱壓縮によるもの、及び霧粒の凍結による融解潜熱とである。そして

前者は風速に比例し後者は着氷量(即ち捕捉率)によつて決まる。* 又棒の失う熱は棒の周圍に生ずる空氣の斷熱膨脹によるものの他に、

- (i) 氷結面から傳導により材質の内部へ擴散する傳導熱
- (ii) 空氣の強制對流により氷結面からの蒸發、對流による熱

である。これは氷結しつつある面のみを考へたが既に氷結した面からの蒸發、對流、傳導等もある譯である。然し後の二つの場合はどの材質でも同様に起るから茲では考へる必要はない。それで(i)の場合に失われる熱量は

$$Q = \frac{(\theta_0 - \theta_0')}{\frac{1}{\lambda} \log \frac{r_0}{r_1}} F \text{ [K. cal/h]} \dots\dots\dots (1)$$

であり (ii) の場合は

$$Q = \alpha \cdot F (\theta_0 - t) \text{ [K. cal/h]} \dots\dots\dots (2)$$

にて與えられる。式中

λ : 物體の熱傳導率

* 今 Hg の水滴が -10°C 迄渦冷却してゐてその Xg が氷結し残りが 0°C となつたとすると融解熱を 80 Cal/g とすれば $\frac{X}{M} = \frac{10}{80}$ 、即ち當つた水滴の 12.5% は氷結することになる。

F : 單位面積 (棒の場合には長さ L とすれば $2\pi L$)

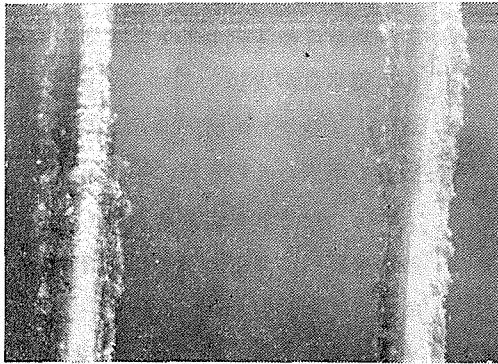
d : 熱傳達率 (空氣の場合強制對流であれば $10\sim 500$)

である。今各材質について検討してみる。棒の周囲の流線は棒が同じ大きさのものであればすべて同じ型となるから、風による斷熱壓縮で表面に與えられる熱量及び斷熱膨脹により失はれる熱量は皆同一である。即ち表面上に於ける空氣への對流、及び傳導による影響は各材質についてすべて相等しいものと考えて差支えない。依つて上式 (2) の熱傳達率 d は各材共等しく、失われる熱量は $(\theta_0 - t)$ で決まつてくる。従つて棒に與えられる熱量は霧粒の凍結の際に於ける融解潛熱だけを問題にすればよい。この熱は衝突箇所に供給され、材質の内部へ傳導により逸散されるもので、背面着氷の生ずる箇所の温度は (1) 式の熱傳達率 λ によつて決まり、材質内部の温度勾配 $\left(\frac{Q_i - \theta_0}{d}\right)$ は λ と逆比の関係にある譯である。今若し前面の着氷量はどの棒にも差がないものとするれば、供給熱量は大體同一であるから、材質の對稱的な任意の點の温度を比較してみれば、銅の熱傳達率は木の 2637 倍になつて居るから、それだけ温度が高くなつて居る筈である。従つて過冷却水滴が存在する場合の昇華性着氷は λ の大きいものほど生じ難いと云へる。この様に考へれば、一應は納得出来るが、その實驗的な結論は未だ一部分しか確められていない理である。

棒の背面では熱傳達率 λ によつて材質に温度差を生ずるが、表面霧粒の打ち當る點を考えれば λ の大きいものほど餘計外氣に冷されるわけである。かく考えれば霧粒が棒に打當つて着氷が生ずるかどうかと云う際どの時の氣温では、 λ の大きいものほど着氷は生じやすいこととなる。この事は次の五回にわたる實驗で確められた。即ち實驗 No. 9, No. 10, No. 17 ~ No. 19 がそれである。實驗 No. 9 No. 10 は氣温 -2°C でこの時の着氷は何れも雨水型で、木、エボナイト、硝子等とともに風をうける表面では、霧粒は衝突しても凍りきれないで棒の表面を圓周に沿うて兩側へ分れて流れ、着氷は兩側面から發達して來て前面は空虚になつて居る。即ちこの部分では打ち當つた霧粒はその潛熱のために充分冷されるまで凍結出來ないのである。この時他の金屬類は全面一樣に着氷を生じ溝などは出來ない。即ち金屬類では融解熱は傳導のため、早く 0°C 以下となるからである。非金屬類で溝の幅を検べみるとエボナイトが最も廣く、木、硝子がこれに次ぐ。實驗 No. 17 は氣温 $+0.2^\circ\text{C}\sim 0.0^\circ\text{C}$ 風速 24 m/s の時でエボナイトは全然着氷せず、木は他の材質と同じ様に微かに薄いフィルム状の水が出來、硝子には針狀結晶がボツボツとみえていた。次に風速を増して 48 m/s とすると、(實驗 No. 18) 氣温は同じでも全部の材質に着氷を生じ、エボナイト、硝子、木は何れも針狀結晶が出來た。茲で言う針狀結晶は水分の多い薄氷の中に出來るもので柱狀の組合つた型である。これ等結晶の出來る時の氣象條件としては氣温が高く ($0^\circ\text{C}\sim -3^\circ\text{C}$) 而も湿度の高い時と云われている⁽⁹⁾。これより少し氣温が下つた ($-0.1^\circ\text{C}\sim -0.4^\circ\text{C}$) 實驗 No. 19 では前回同様全部に着氷を生じたが針狀結晶は出來ず全面透明な氷のフィルム状となりその兩側はザクザクの雲型着氷が發達した。この時前面中央部の溝の幅を測つてみると、エボナイトが最

も廣い。第4圖 No. 10~No. 12 はその着氷の一部分を各材質についてライカの接寫装置により大うつしに撮つたもので、各々材質による着氷の様子がよく現はれている。

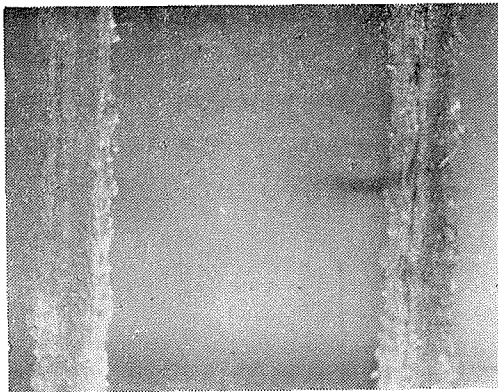
No. 10



真鍮

ジルコニウム

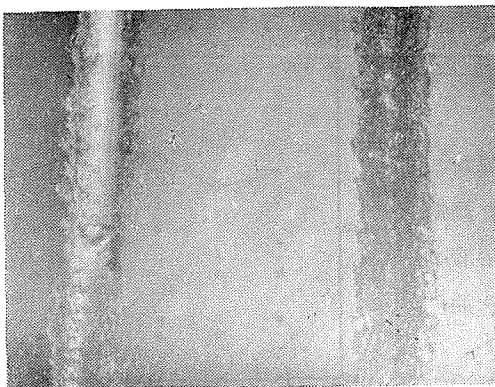
No. 11



ジルコニウム

木

No. 12



銅

エポキシ

第 4 圖

以上の實驗結果より試みた材質の中でエポキシは最も着氷し難く木、硝子が之に次いでいることがわかつた。

着氷棒を紙鑑で擦る際、荒い目のもの（理研B-9, B-10）と細かい目のもの（理研B-0）

$\times \frac{8}{10}$

を用いて試みてみたが表面の着氷には余り差は認められなかつた。又風洞内着氷棒の位置によつて着氷に差異があり

はしないかを確かめたが、これも何等の差異は認められなかつた。（實驗 No. 14~No. 16 参照）

このことは風洞の性能を検べた際、測定洞の側壁と中心附近では殆んど着氷に差

$\times \frac{8}{10}$

がなかつたと云ふことと一致している。

次に着氷型を一應無視して材質のみについて着氷量を検

べてみる。各材質を熱傳導率 λ の小さい順から順に横軸にとり、縦軸に着氷率をとつて

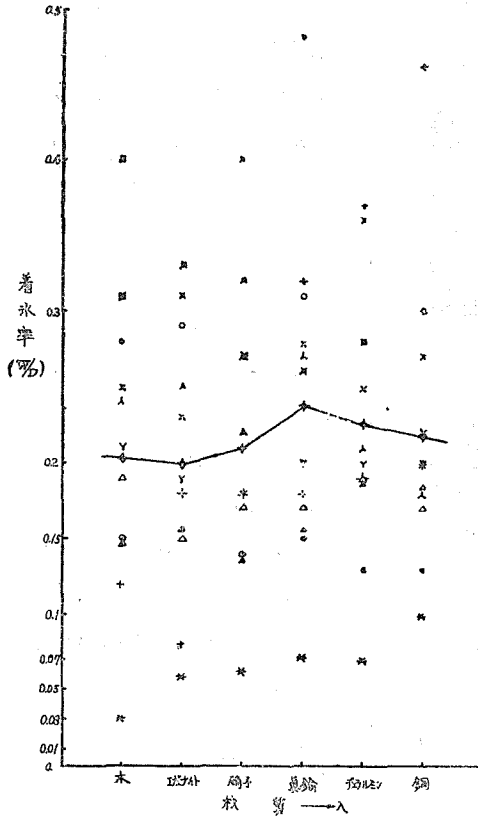
みれば第5圖に示す如くなる。個々の實驗についてみると、圖の様な平均値曲線が得

られた。同様に成長率の關係は第6圖の如くなり、附着率は第4表に示した如くになつた。

$\times \frac{8}{10}$

茲で着目すべき點は着氷率と成長率の平均値曲線が大

體似た形になつたことである。兩者とも眞鍮に最大値があり、エボナイトに最小値をとつている。そして金属類では共に眞鍮、デユラルミン、銅と云う様にλに逆比例して減少し、非金属類ではエボナイト・木、硝子と云う順に減少して必ずしもλには關係しない。この兩曲線



第 5 圖

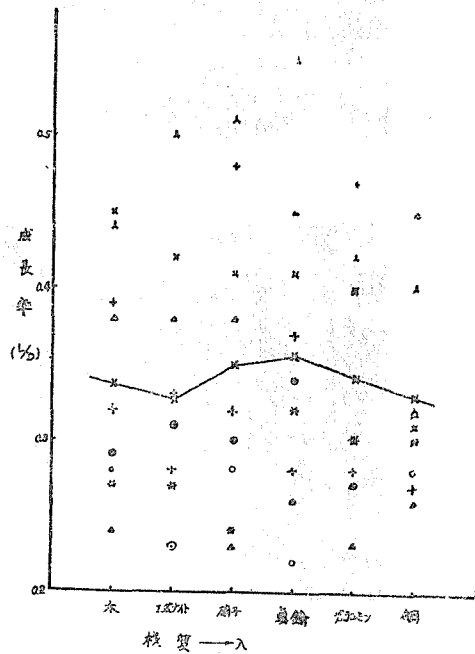
III. 比重

着氷の性質が材質によつてどの様に異なるかを検べる方法の一つとして氷の比重を測定した。その方法としては液浸法を用い溶液は手近のものを撰び、試験的にカストール油、石油、白綾油、四鹽化炭素を用いてみた。

100ccのメートルグラスの中に溶液を入れ、豫め冷やしておき液量をよみとつておく。着氷棒より氷を剝しその重量を測定し之

から知ることはエボナイトは他の材質に比較して着氷量が少なくなつていと云うことである。このことは前述の着氷実験で棒の前面に溝の出来た時着氷溝の幅はエボナイトが最大であつたことを裏書きするものである。全般に金属類は非金属類よりも着氷率が大きく、成長率は稍や似た關係にある。附着率は4回の測定値からみると、木及眞鍮が稍々多く他は大體似た價をとつている。

次に第4表により着氷量(着氷率と成長率)を着氷の型によつて分類してみると相當まちなちの結果を得た。このことは各材質の着氷量は着氷型によつてその量的關係は決定的なものではないと云うことを示すものである。



第 6 圖

* 着氷の比重測定法については、別に小口八郎氏の報告がある。

をその中に入れる。この時氷の組織を毀さない様に注意する。氷は浮いて液より出る部分は針の先で静かにおし沈め、その時の液量をよみとるのである。溶液は約 80CC を用い氷は 3~5gr 程度をとつた。茲で注意すべき點は、氷を押し沈める場合メートルガラスの内壁に觸させない様にしないと毛管作用によりメニスカスが崩れて測定に誤差を生ずる慮がある。四種類の溶液中四鹽化炭素が最も良好なる結果を得た。石油は測定中蒸發しやすい點、及び氷の内部への浸み込み量が多すぎる事に缺點があり、カストール油及白絞油は共に氣温が低いために粘調性を増し内部空隙への浸み込みが悪く、その上取扱が非常に患ららしい。これ等に比べて四鹽化炭素は低温度に於ても密度變化は比較的少く、うすい橙色に着色して用うれば氷の空隙への浸み込みもよく判り、氷を液より取出してみれば表面には殆んど液は附いていない。却つて氷の表面はさらさらとした感覺が與へられる。

四鹽化炭素を用いて比重測定途中、氷を液に浸す前と浸した後における氷の重さを測つてみると第 5 表の如き結果を得た。即ちこの表より知るとは液を浸した後の方が、常に比重を増している。氷の表面にくつついた液は氷を液より取出すと間もなく蒸發してうから、

第 5 表

月 日	實驗No.	氷ノ型	液浸前重量 (gr)	液浸後重量 (gr)	重量増加量 (gr)	重量増加率	附着材
3.23	12	雨 氷	0.70	0.72	0.02	0.029	支持板 (松材)
3.23	13	粗 氷	3.30	3.40	0.10	0.033	眞 鍮
3.23	13	雨 氷	1.93	1.97	0.04	0.021	銅

重さの増した分は氷の内部の結晶と結晶の間に浸みこんだ液の量である。表中重量増加率として、増した氷の重量と液浸前の氷の重さとの比をとつてみると 2/100~3/100 となつた。これは氷の内部にあつた空氣の容積と考えられ、空隙容積 V は次の如くおける。

$$V = \frac{\text{空氣の比重}}{\text{四鹽化炭素の比重}} \times \text{重量増加量}$$

これで計算してみると氷の大小に拘らず大體 V は一定の價を示している。従つてこの様な方法を用うれば氷の内部の空隙の容積を知ることにより、着氷の分類を行うことが出来る。又この方法により着氷機構の相異を知ることにも出来る。第 5 表中 No. 13 の實驗で同時に行つた眞鍮と銅の着氷についてそれぞれ重量増加を検べてみると、眞鍮の方が銅より重く、その増加率は 12/1000 である。即ちこの時の氷では眞鍮の着氷は銅の着氷より余計空隙をもつてゐることになる。

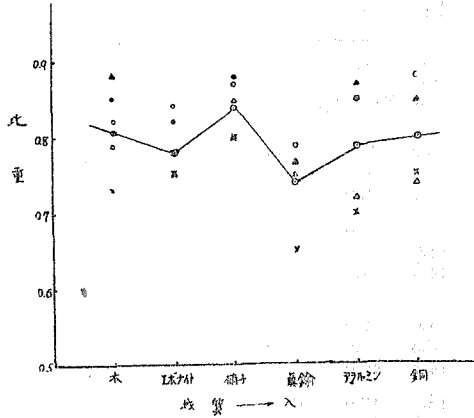
尙比重を直接求める方法の他に着氷範圍、氷の伸びの測定から近似的に氷の體積を計算して、重量測定値により比重を算出することを試みてみた。⁽¹⁾ (第 6 表参照)

この方法によると、氷の着き方は同一實驗では各々の材質で皆同じ形になるから、相對的

* この方法は既に試みられている。

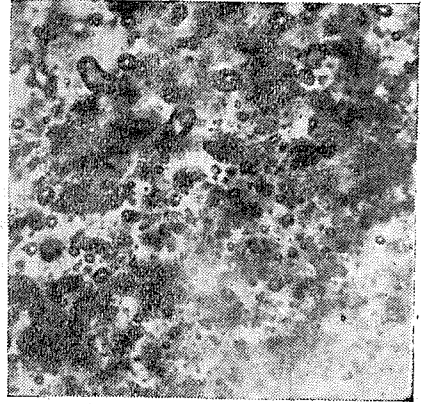
第6表 比重

月日	實驗 No.	氣溫 (C°)	着氷型	測定法	比 重	材 質	備 考
3.3	5.	-10.0	粗 氷	計算法	0.57 0.52 0.61 0.66 0.61 0.67	銅 デュラルミン 眞 鍮 硝 子 木 エボナイト	
3.3	6.	-10.7	粗 氷	計算法	0.59 0.55 0.52 0.56 0.52 0.57	同 上	
3.20	7.	-6.3	粗 氷 雨 氷	計算法	0.78 0.75 0.72 0.73 0.75 0.79	同 上	
3.23	11.	-5.0	粗 氷 雨 氷	液浸法 (白綫油)	0.75 0.70 0.65 0.80 0.73 0.75	同 上	○油量86CC. ○水重量1.0~4.5gr. ○液増量2~5CC.
3.23	12.	-5.3	粗 氷 雨 氷	液浸法 C.Cl ₄ (計算法)	0.88 (0.75) 0.85 (0.76) 0.79 (0.72) 0.87 (0.75) 0.82 (0.70) 0.84 (0.72)	同 上	○油量84CC. ○水重量3~4gr ○液増量3~5CC. ○()内ハ計算法
3.23	13	-5.3	粗 氷 雨 氷	液浸法 C.Cl ₄	0.74 0.72 0.77 0.85 0.79 0.75	同 上	○油量82CC. ○水重量3~5gr ○液増量3~5CC.
3.25	15.	-8.5	粗 氷	同 上	0.80 0.85 0.77 0.88 0.85 0.82	同 上	○液量78CC. ○水重量4~5gr ○液増量4~6CC.
3.25	16.	-10.0	粗 氷	同 上	0.85 0.87 0.75 0.80 0.88 0.78	同 上	○液量76CC. ○水重量3~5gr ○液増量2~5CC.

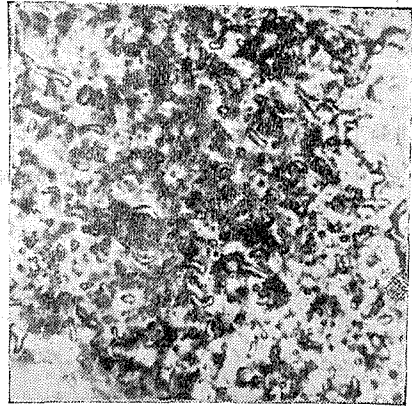


第 7 圖

に材質の比重を比較する分に於ては差支へない。然しこの測定法では着氷の内部に気泡を含まない時の粗氷又は雨水型の氷でなければならない。第6表はこれ等の結果を纏めたもので、この表の實驗値より第7圖の様な曲線が得られた。これ等の値を各材質毎にその平均値をとつてみると圖の太線で示した様になる。即ち真鍮が0.74で最も小さく、硝子が0.79で最も大きい。又金属類ではλの大きいものほど比量は大きく非金属ではλと比重との一義的な関係は見出されない。金属類で比量がλの大きさに比例すると云ふことは着氷機構から考へれば肯定しがたい事である。即ちλの大きいものほど表面冷却が早く、表面の冷却が早いほど着氷には多く気泡を含むことになる。これは霧粒の衝突時間は材質に関係なく皆同じであるが、着氷の表面が材質によつて温度を異にする結果、霧粒が凍結するに要する時間がちがってくる。そして早く凍結するものほど気泡を多く含むことになる理である。

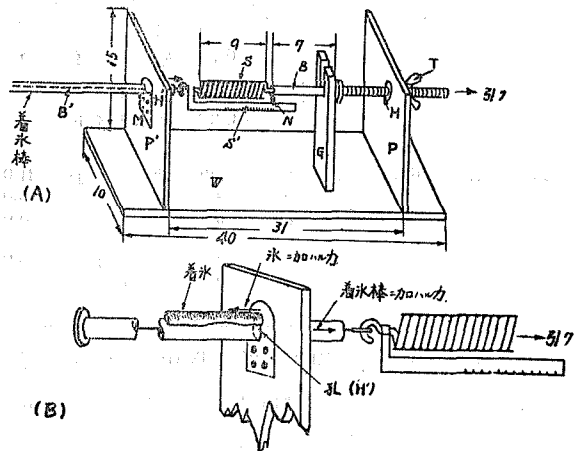


No. 13 真 鍮 ×37



No. 14 硝 子 ×37

第 8 圖



第 9 圖

第7表 剪断力

月日	実験 No.	気温 (C°)	風速 (m/s)	氷ノ型	氷ノ伸ビ (Cm)	材 質	試験氷ノ長サ (Cm)	剪断力		備 考		
								張力 (kg)	歪力 (kg/Cm ²)			
3.3.	S.1.	-6.1	58.	粗氷	0.45	銅	13.9	28.0	2.02	○エポナイト振動シテ 下方=筋入ル		
					0.40	デュラルミン	14.0	6.0	1.14			
					0.44	眞 鍮	13.7	28.0	2.04			
					0.38	硝 子	14.0	14.0	1.02			
					0.39	木	14.0	22.0	1.58			
					0.38	エポナイト	14.8	24.0	1.62			
3.3.	S.2.	-8.5	26.	粗氷	0.26	同	14.0	32.0	2.28			
					0.23		13.3	16.0	1.20			
					0.25		14.8	40.0	2.70			
					0.23	上	14.1	12.0	0.86			
					0.25		14.5	60.0	2.14			
					0.23		14.2	18.0	1.62			
3.3.	S.3.	-8.9	37.	粗氷	0.24	エポナイト	3.2	54.0	1.68	○エポナイト硝子各々 1本宛振動スル、エ ポナイト下方横筋入 ル		
					〃	〃	〃	〃	〃			
					〃	硝 子	10.0	42.0	4.20			
					〃	〃	5.0	42.0	8.40			
3.4.	S.4.	-9.3	47.	粗氷	0.32	エポナイト	4.0	30.0以上	7.60	○エポナイト輕振動アリ ○飛雪少々混ル ○霧粒小サイ		
					〃	〃	12.2	〃	〃			
					0.28	硝 子	16.0	34.0	2.12			
					〃	〃	8.0	10.4	1.30			
					〃	〃	12.2	28.0	2.33			
					〃	〃	2.5	10.0	5.00			
3.4.	S.5.	-5.0	49.	粗氷 ? 雨氷	0.08	エポナイト	2.0	2.2	1.10	○飛雪多シ ○Sandpaper デ実験前 擦ル ○一様=氷ヲ剥シ10分 後試験		
					〃	〃	4.0	〃	0.56			
					〃	〃	6.0	〃	0.36			
					〃	〃	8.0	〃	0.28			
3.20	S.6	-6.3	38.	粗氷 ? 雨氷	0.28	銅	21.0	22.0	1.04	○エポナイト着氷長サ 15cmガ黒色ニナツタ モノ試験ス ○硝子復氷現象ヲ再ビ クツク		
					0.30	デュラルミン			〃		〃	
					0.22	眞 鍮			〃		〃	
					0.28	硝 子			〃		30.0	1.42
					0.28	木			〃		24.0	1.14
					0.23	エポナイト			〃		34.0	1.62
3.20	S.7	-6.3	37.	粗氷 ? 雨氷	0.39	硝 子	21.0	4.0	1.92	○室内温度高イ爲着氷 性質變ル		
					〃	〃	10.0	2.0	0.20			
					〃	〃	5.0	〃	0.40			
					〃	エポナイト	5.0	8.0	1.60			
					〃	〃	〃	〃	〃			
					〃	〃	〃	〃	〃			

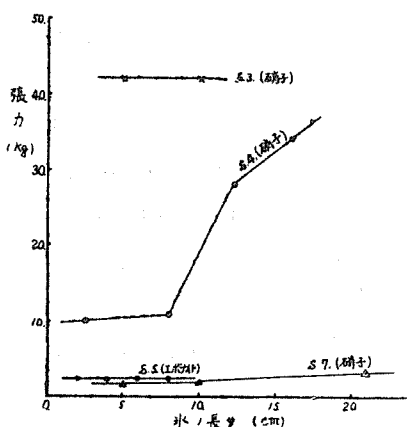
実験 No. 14 の気温 -10°C, 風速 65m/s で粗氷の着氷があつた時眞鍮と硝子の氷の附着部分を顕微鏡で調べてみると No. 13, No. 14 にみる如く, 眞鍮の附着部分では着氷の内部に小さな気泡が含まれ然も水滴の如きものはみられないが, 硝子の着氷内部には多くの水滴があり, 着氷は眞鍮ほどの凝固さはみえない。このことは次の剪断力試験の際, 硝子は特殊な

性質を現はす原因の主なるものであると考へられる。

IV. 剪 断 力

水を着氷棒より剥す場合同じ様な操作をしても、材質により仲々剥がれがたいものと、容易に剥れるものがある。そこで着氷の性質を検べる方法の一つとして剪断歪力を測定した。第9圖はその測定装置を示す。この装置の主なる部分は頑丈な木で出来ていて、それに必要な金具を取付けたもので、木の板 W の両側に P, P' を立てて、P には孔 H を開けこれに金属棒 B を通す、P' には可成厚い金属板 M に孔 H' を開けたものを取付け、孔 H' は P' の板をも通じ着氷棒はこの孔とすれすれに通る様にしておく。B は補導板 G を通り、その一端には蝶ネヂ T を締め、他端には指針 N を介してスプリング S に取付けられている。スプリングは他端にスケール板 S' を取付け棒 B' に引掛けられる様になつている。この棒 B' は着氷棒の中空を利用してこの中を通し孔 H' に締め込んである。そこで先づ試験すべき着氷の長さを決め棒に氷のついた儘 B' を通してスプリングを程よく張ると、氷は孔 H' に軽く觸れるからその所でスケール S' をよみとり零點とする。次に T を除々に締めて行くと圖の (B) に示す様にスプリングの張力が氷に働く。即ち孔 H' の所で氷はしごかれ剪断歪力を受けることになる。この様に氷の破壊する (或は滑り動く)迄スプリングを張り、その極限の點をスケールで読みとるのである。

かくして測つた剪断歪力の結果を第7表に示す。二種類の着氷につき材質は六種類について三回、エポナイト及び硝子について四回調べてみた。大抵の場合は風壓のためにエポナイトはその上部が振動し時にはそのため着氷の下方 2/3 位迄繊維が入つたこともあるが、この様な部分は試験には取除いた。力を非常に除々に加へて行くと、硝子以外の材質では破壊の極限、即ち破断歪力で一度に氷が粉々になつて碎かれる。即ち氷の内部凝集力よりも大きな力



第 10 圖

で着氷は物體に附着していると云へる。硝子の着氷は凝集力の方が破断歪力よりも強いためか、破壊の極限に於て、附着した氷はその形の儘で硝子の表面上を滑り動くだけで碎けることはない。従つて硝子では剪断歪力と云うよりもむしろ附着力の試験の様にもとれる。滑り動いたこの氷を材質の表面から指先で引剥がそうとしても仲々剥がれない。Rothroch 等の實驗⁽¹²⁾では附着力は剪断歪力の約 2 倍の値となつている。硝子はこの様な特殊な性質を有していることは着目すべき事項で、原因は硝子の表面と着氷面との間に液状境界面を作りこれが潤滑作用をなすものと思はれる。

各々の材質についての實驗回数が少いために結論的なことは決定しがたく、又極めて嚴密に實驗しなければ測定の度毎に結果がまちまちになるおそれが充分ある。今回の測定によりエポナイトの剪斷力として常に一定値 1.62kg/cm^2 を得た。大體木はこれと略々同一の値となり、硝子、デュラルミンは稍々同量の 1.10kg/cm^2 となつた。銅は最も大きな値となり 2.14kg/cm^2 で眞鍮はこの値に近い*。

即ち剪斷力よりみれば着氷による材質は木、エポナイトの 1.62kg/cm^2 、硝子、デュラルミンの 1.10kg/cm^2 、銅、眞鍮の 2.14kg/cm^2 の3組に分けることが出来る。硝子、エポナイトのみについて行つた結果を第10圖に示す。この圖ではスプリングの張力を縦軸にとり横軸に氷の長さをとつてある。圖中 S.3, S.4, S.7, は同じ性質の硝子を同時に試験したもので、S.5 はエポナイトの試験結果である。この圖から判る様に硝子の着氷で張力は氷の長さには無關係に常に一定値をとつてゐる。(S.3 S.7) S.4 は實驗途中に雪が混つた場合の例であるが、この場合には張力は例外の値を示した。一般的な傾向から云へば硝子の着氷に於ては剪斷歪力は氷の附着面積に無關係の如く思はれる。S.5 はエポナイトの着氷のもので、張力は氷の長さとも無關係になつてゐるが、これは着氷してから氷の長さを數段にかへてとり、10分間氣温 -3.0°C の所に放置し後で一齊に試験したものの結果である。着氷後時間を經たので氷の結晶組織が變り材質との接觸面では同じ様な變化を來したものと思はれる。この意味で先の 1.62kg/cm^2 と比較して興味がある。

V. 結 語

今回の研究は着氷に及ぼす材質の影響としては、材質の熱傳導率を主として取扱つたが、着氷は材質の表面の状態が問題になることは緒論でも述べた通りで表面に物理的、化學的、或は機械的の處理を施すことによつて着氷量や氷の性質迄も變化させ得ることが可能であると考へられる。この意味に於てこの種の基礎的な研究である。

以上の實驗では氣象條件としては着氷に最も影響が大きい氣温及び風速だけを測定した。茲で氣温のみをとつて考へてみれば氣温 0°C 附近より -14°C 附近の範圍に亘る着氷の中で材質の相異として特筆すべき點は氣温 -10°C ~ -14°C で昇華性着氷の生ずるものと生じないもののあること、及び 0°C 附近の着氷が出来るかどうかと云ふ着氷の限界條件に近い時には金屬類が着氷しやすいことである。又これ等中間の氣温、即ち -3°C ~ -9°C 位の時には着氷の差異は材質によつてそう問題にならないと云ふことである。以下之等の細部を項目的に結論づける。

1) 異なる材質でも大きさが異つてゐる場合には着氷量は殆んど物體の大きさに決定される。

* Rothrock 等の價では固體表面の剪斷力として $4.6\sim 6.0\text{kg/cm}^2$ であり、筆者の値より約2倍大である。これは實驗室内での着氷であり、着氷の性質の相異と思はれる。

2) 一般に着氷型を無視して材質のみについての着氷量は、金属類では熱伝導率 λ に反比例し、非金属類ではエボナイト、木、硝子の順で變はり、全體を通じて眞鍮が最大であり、エボナイトは最小の價をとる。

3) 氣温 0°C 附近に於ける雨水型では、金属類は非金属類より着氷し易く、非金属類では着氷は硝子、木、エボナイトの順になる。

4) 氣温 -10°C 附近に於て材質の前面に粗氷型着氷を生ずる時、その背面には昇華性の着氷を生ずる。これは金属類よりも非金属に生じ易く、その着氷量は熱伝導率 λ と逆比の関係にある。

5) 液浸法による水の比重測定としての溶液は四鹽化炭素が最良である。

6) 液浸法により氷と氷の空隙體積を測ることにより着氷型を分類出来る。

7) 材質中眞鍮の着氷比重が最大であり、硝子の着氷は最小である。金属類では λ に比例する。

8) エボナイトの着氷は金属の着氷に似た性質を有す。

9) 硝子の附着氷は氷の破斷歪力よりも凝集力が大で、剪斷歪力は氷の附着面積に無關係でその價は 1.10kg/cm である。

10) エボナイトの氷の剪斷力は 1.62kg/cm である。

11) 材質中着氷剪斷力の最大は銅でその價は 2.14kg/cm^2 である。

以上主として金属類と非金属類とに分けて結論したが、熱伝導率 λ はこの兩者に判つきりと階段がある理ではなく、硝子と眞鍮では λ の比は約 $1/15$ であり、これは又デユラルミンと眞鍮との比に等しい。従つて λ を兩者の中間の價の物質、例へば磁器の如き物質を用ひたとしたら着氷量の最大を得たかも知れない。しかしこれがため λ の價による劃期的な變化は考へられない。

本報告の脱稿に當り終始この實驗に協力を惜まれなかつた日本映畫社、湯川、吉田、兩氏に對し厚く感謝の意を表するものである。

文 献

- 1) 高野玉吉 1950 風洞による翼型への着氷の研究(1) 低温科學 5, 9.
- 2) 高野玉吉 1950 着氷風洞の性能について 低温科學 5, 1.
- 3) Rothrock, A. M. and R. F. Selden. 1939 Adhesion of ice in its relation to the de-icing of airplanes: N. A. C. A. Technical Note. No. 723.
- 4) 吉田順五, 黒岩大助 1945 航空機着氷防除の研究: 研究實驗成績報告, 一技報 No. 0586
- 5) 小口八郎, 未發表 着氷の顯微鏡組織
- 6) 今井一郎 1944 着氷の寸法効果, 雪氷, 6 第10號
- 7) 大賀憲二 “熱傳導論,”
- 8) 岡田武松 “理論氣象學,” 上卷 P. 188
- 9) Nakaya, U. and I. Sato. 1935 On the artificial production of frost crystals.
With reference to the mechanism of formation of snow crystals.

Jour. Fac. Sci. Hokkaido Imp. Univ. Ser. II, 1.

Nakaya, U. and Y. Sekido. 1936 General classification of snow crystals and their frequency of occurrence. Jour. Fac. Sci. Hokkaido, Imp. Univ. Ser. II. 1,

- 10) 高野玉吉 1950 着氷風洞の性能について 低温科学 5, 1
- 11) 今井一郎 1944 着氷の寸法効果, 雪氷 6 第10號

R é s u m é

Difference of nature of ice formation formed on various materials were studied. Thermal conductivity of the material was found to play an important rôle. The materials examined are copper, iron, brass, duralmin, wood, glass and ebonite. The effect of the dimension was also studied.