



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	風洞による着氷の研究 : V. 着氷の寸法効果について
Author(s)	高野, 玉吉; TAKANO, Tamakichi
Citation	低温科学, 5, 51-60
Issue Date	1950-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17471
Type	departmental bulletin paper
File Information	5_p51-60.pdf



風洞による着氷の研究 V.* 着氷の寸法効果について

高野 王 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

着氷の寸法効果に関しては、Albrecht⁽¹⁾により捕捉率の問題として取上げられ、その理論はほぼ出来上つている。今井氏は之を厳密に計算し直して、實驗値と比較検討して改良を加へた。然しこれ等の理論の根本となるべき點に、二つの重要な假定を含んでいる。即ち

- 1) 圓柱周りの流線は完全層流をしている。
- 2) 着氷によつて圓柱の形狀は變らない。

と云うことである。實際の着氷はこの假定が完全にはあてはまらないために、捕捉率曲線は理論値と一致しないことが指摘されている。今井氏の實驗は自然風で比較的風速の弱い場合の着氷を取扱つたものである。著者は着氷風洞によつて高風速の場合の着氷寸法効果について檢べたので、その結果について述べる。

II. 測 定 法

長さ30cm、直径 0.5cm~5.1cm、肉厚 0.1cm~0.3cm の9本の眞鍮製の圓柱を適當な間隔をおいて並べ、これを2本の支持板で風洞内に固定し、5分~10分間着氷させて着氷量及其他の量を測定した。

圓柱は同時に全部を風洞内に入れることが出来ないので3本の太い組(a)と6本の細い組(b)に分けて實驗した。最初太い組を着氷させてから、すぐ次に細い組を入れかへる。この場合は出来るだけ時間を縮めて氣象條件の變らない中に(a)(b)の圓柱の實驗を終る様に注意した。然し10分位の間でも氣象條件の變化したために、二組の圓柱の着氷が、全然異つたこともあつた。(3月25日の實驗)それで圓柱は同時に全部を風洞内に入れて同一條件の下で着氷させることが理想的である。しかし圓柱間隔を或る程度に保たないと相互の圓柱によつて氣流が擾亂され、各々の圓柱の着氷に影響を及ぼす憂があるので、茲では二回に分けて

* 北海道大學低溫科學業績 第97號

實驗したものである。この考へから出來得る限りその防害を尠くし、しかも二組の實驗度毎に風速が變らない様に圓柱の配列を決めたつもりであるが理論的にはこの相互干涉は必ず存在することは勿論である。然も霧粒の運動は慣性の力よりも摩擦力による方が重要で實際問題として Reynold's No.の小さいこの種の實驗に於ける着氷問題には左程その影響を恐れる必要はない。

圓柱の表面は出來るだけ同一の状態にしておくことが必要なので、前述 III の場合（各種材質の着氷研究）と同様な注意をもつて行い、着氷量の測定に關しても前述同様に着氷の伸び及び範圍を氷が圓柱についた儘で測つた。最後に氷を圓柱から剥がしパラフィン紙上にのせて調剤天秤によりその重量を測定した。重量の測定には出來るだけ測定誤差を尠くする意味から、多くの氷について先づ氷の長さを測り、その後で氷を剥がす様にした。この際に着氷の性質、着氷の固さ及び附着の様子などを觀察し又寫眞に撮影した。

霧粒の大きさの測定は、風洞で着氷させている時間中に油膜法によつて測り、霧水量は霧粒の大きさ及び密度個數（個/cm³）から算出したものである。

III. 測定結果

實驗結果を第 1 表に纏めて掲げる。表中の捕捉率 α_{ob} は測定値で α_{na} はそれぞれ今井氏及 Albrecht の曲線からの讀取値を示す。

五回行つた實驗で着氷は粗氷、粗氷～雨氷、及び雨氷型となつた爲に各々その特徴が現われている。即ち 3 月 3 日の粗氷の時は圓柱の裏面に殆んど昇華性着氷をみなかつたが、3 月 25 日の表面粗氷の時にはその裏面全般に昇華性着氷を生じた。これは前述 III で論じた澱粉狀の着氷と同じようにして出來たものである。

3 月 25 日の最初行つた太い方 3 本の着氷は粗氷であるが、圓柱の側面の着氷は密霧氷の構造をなしている。これは側面の方が正面よりも霧粒の捕捉率が小さいことによるものと思われる。それで着氷は正面ほど黒味をおび透明に近づいてくる。これと同じことは 3 月 3 日の粗氷型でも見受けられた。又太い圓柱ほどこの様な着氷の寸法効果が顯著である。3 月 29 日の最初の實驗（太い組 3 本）に於ては、風洞を運轉しても最初の 1 分 30 秒位は全然着氷がなく、圓柱に衝突した霧粒は圓柱表面に沿うて流れた。圓柱が太くなるとこの傾向が著しかつた。即ち氣温が -1.2°C で風速が 50m/sec 位でも圓柱直徑が太くなれば最初は仲々着氷し難いと云うことを知つた。次に行つた細い組 6 本の時には、氣温が却つて昇り -0.5°C となつたが、風洞運轉と共に最初から着氷は始まつた。茲で捕捉率の問題から考へれば一般に捕捉率 $\alpha = f\left(\frac{va^2}{r}\right)$ であるから同じ直徑の圓柱では霧粒の直徑が倍になると α はその二乗で効いてくる理である。

そこでこの日の實驗を第 1 表より比較すると霧粒の大きさから前の實驗の方がざつと 4 倍の着氷量となる筈である。然るに實際には却つて逆の傾向になつたことは、着氷は物體の大

第 1 表

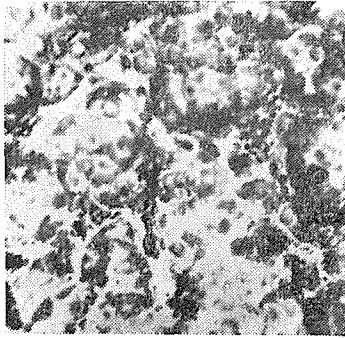
月日	時刻	一般氣象			風洞 風速 (m/s)	着氷 時間 (min)	着氷型	直徑 (Dcm)	着 氷 量			霧粒 半徑 (μ)	霧水量 (gr/cm ²)	捕 捉 率			V _a ² /r ($\times 10^{-3}$)	備 考
		温度 (C°)	風向	風速 (m/s)					重量 (Wgr)	伸ビ (Lcm)	範圍 (Rcm)			α ob	α ca	Albrecht α ca		
3.3	15.46	-10.5	NNE	5.7	47	8	粗 氷 (乳白色)	0.5	0.132	0.30	0.5	7(7)	0.11	1.10	0.82	0.85	4.8	1. 圓柱裏面ノ着氷殆ドナシ 2. 着氷兩側面尾鱗狀岐點黒味ヲ帯ビル
								0.95	0.182	0.28	0.95			0.80	0.68	0.75	2.4	
								1.6	0.219	0.27	1.48			0.56	0.52	0.62	1.5	
								1.9	0.246	0.27	1.65			0.53	0.47	0.57	1.2	
3.25	13.47	-9.8	WSW	9.0	51	10	軟粗氷	0.5	0.12	0.31	0.7	6(6)	0.07	1.14	0.88	0.92	7.4	1. 實際ハ2回=分ケテ行フ 2. 全部裏面=昇華性着氷アリ
								0.95	0.18	0.30	1.2			0.90	0.78	0.84	3.8	
								1.6	0.26	0.19	1.6			0.78	0.68	0.74	2.3	
								1.9	0.24	0.18	1.9			0.65	0.62	0.68	1.9	
	13.57	-9.5	WSW	9.0	51	10	密霧氷	2.5	0.29	0.16	2.2	6(5)	0.14	0.51	0.54	0.62	1.5	
								3.2	0.21	0.14	2.4			0.31	0.45	0.58	1.2	
	13.25	-9.5	WSW	9.0	51	10	密霧氷	4.5	0.10	0.11	2.9	6(5)	0.14	0.23	0.32	0.49	0.8	
								5.1	0.13	0.10	3.2			0.20	0.29	0.46	0.7	
3.29	12.48	-0.5	S	10.0	48	5	粗 氷 雨 氷	0.5	0.23	0.30	0.4	6(4)	0.22	1.70	0.92	1.00	7.0	1. 實際2回=分ケテ行フ 2. 最初太イ組3本共水滴トチツテ流レタガ1分30秒後着氷始マル 第二回目ノ實驗水滴流レズ 3. 着氷ノ顯微鏡寫眞撮影セルモノ直徑0.5cm, 1.9cm, 3.2cmノ3種
								0.95	0.22	0.30	0.7			0.90	0.77	0.53	3.7	
								1.6	0.22	0.29	1.1			0.52	0.68	0.30	2.2	
								1.9	0.25	0.27	1.2			0.50	0.55	0.29	1.8	
								2.5	0.24	0.25	1.3			0.36	0.48	0.21	1.4	
								3.2	0.25	0.23	2.3			0.29	0.38	0.17	1.1	
11.28	-1.2	W	9.2	49	5	雨 氷	3.8	0.44	0.20	2.7	12(8)	0.59	0.14	0.36	0.08	0.8		
							4.5	0.43	0.20	3.0			0.10	0.31	0.06	0.7		
							5.1	0.42	0.20	3.7			0.07	0.25	0.05	0.6		

着氷の寸法効果について

No. 1

D=3.2cm

表面

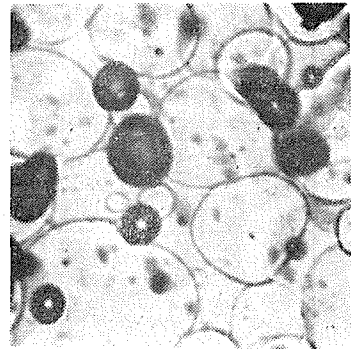


×30

No. 4

D=1.9cm

内部

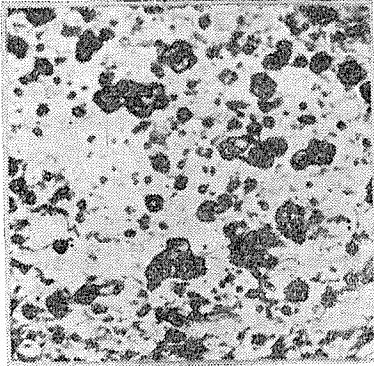


×30

No. 2

D=3.2cm

内部

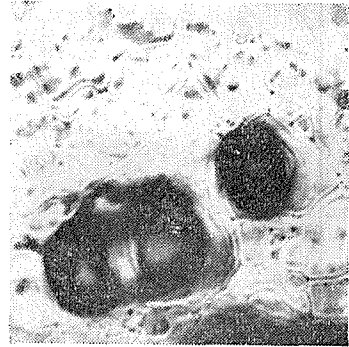


×30

No. 5

D=0.5cm

表面



×30

No. 3

D=1.9cm

表面

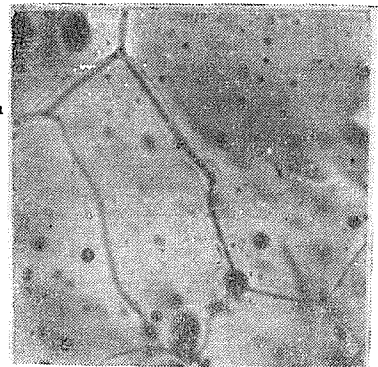


×30

No. 6

D=0.5cm

内部



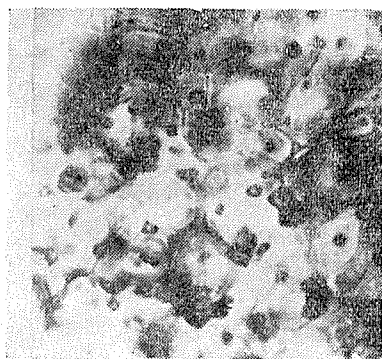
×30

いさの相異によるもののみではなく、その捕捉量は着氷の性質によつて異なると云ふことを考へに入れるべきである。

この時の着氷の表面と内部を、顕微鏡で観察し寫眞を撮つた。これを第1圖 No. 1~No. 6に示す。No. 1及びNo. 2は直徑3.2cmの圓柱の着氷で、No. 3及びNo. 4は直徑1.9cm、No. 5及びNo. 6は0.5cmのものである。何れも着氷條件は同一で風速48m/sec、氣温 -0.5°C の時の粗氷~雨水の型である。寫眞によれば着氷の表面及び内部組織は、圓柱の太さによつて著るしい相異が認められる。即ち圓柱が太くなると霧粒の衝突時間が長いから捕捉率が悪くなり、着氷は氣泡を含み易くなる。従つて着氷は不透明になる。直徑3.2cmの圓柱の岐點部分はいさより細い他の圓柱に比べて、肉眼觀察でも不透明であつたが、寫眞でもみられる様に太い圓柱ほど表面、内部共に氣泡を多く含み、表面は凸凹が多くなつてゐる。これに比べて直徑0.5cmの圓柱では氷の組織に氣泡の含有も少く、その表面は平滑となり、内部組織は龜甲狀の氷板となつた。これは圓柱が細いために捕捉率が大きで従つて霧粒の衝突時間が短いから、氣泡の含有が少くなつたものである。直徑1.9cmの圓柱の着氷は丁度その中間の型を示している。

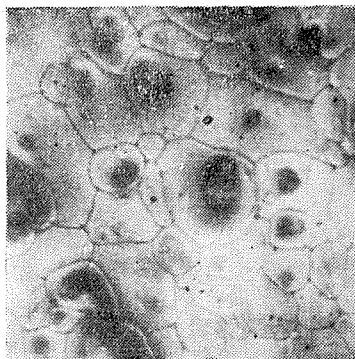
No. 7

$V=24\text{m/s}$



No. 8

$V=39\text{m/s}$



No. 9

$V=58\text{m/s}$

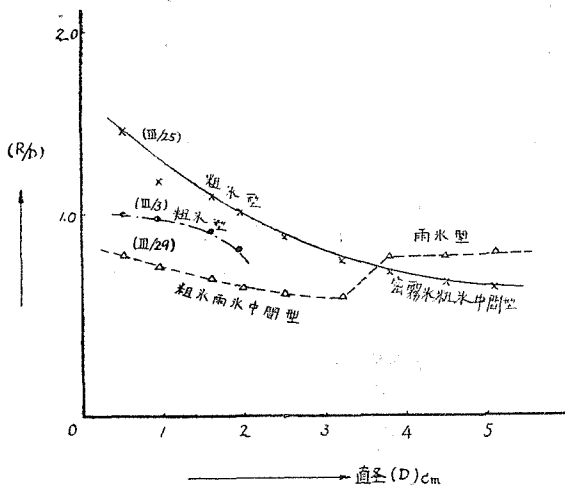


第 2 圖

霧粒が物體へ衝突するときの衝突時間の長短と凍結速度との関係によつて着氷性質が變ると云ふことは第2圖 No.7~No.9 によつてもみられる。即ちこの3枚の寫眞は同一材質（眞鍮棒直徑 1.0cm）で風速を變えた時の材質への着氷の附着面の顯微鏡寫眞で何れも雨水型の着氷である。寫眞 No.7は風速 24m/secで No.9の風速 58m/secに比較して氣泡の含み方が斷然多くその着氷組織は不透明である。No.8は兩者の中間の型で風速の大なるほど龜甲狀の大きさが増している。

IV. 着氷量と圓柱直徑

1) 着氷範圍、圓柱の周りに沿ふて測つた着氷範圍 R と、圓柱直徑との比 (R/D) を縦軸に

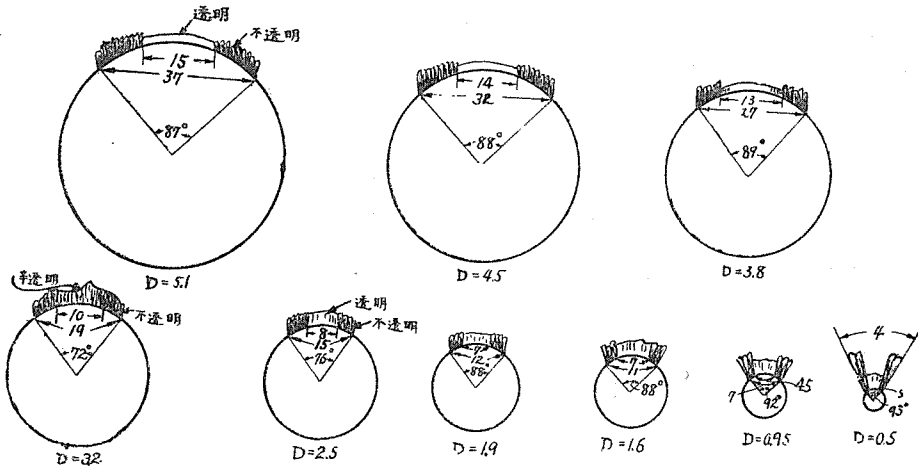


第 3 圖

とり、これと直徑 D との關係をみると、第3圖に示す如くなつた。何れの場合も、直徑が大きくなると (R/D) は減少してゐる、尤も着氷の種類によつて著しく異なつてくることがある。即ち3月25日の實驗では太い組は密霧氷を含んだ粗氷で、細い組は粗氷になつたが、兩者の (R/D) と (D) との關係は直徑が大きくなるほど減少した1本の曲線の上に乗つた。これに對して3月29日の測定では最初に測定した太い組では雨水であり、次の細い組では粗氷

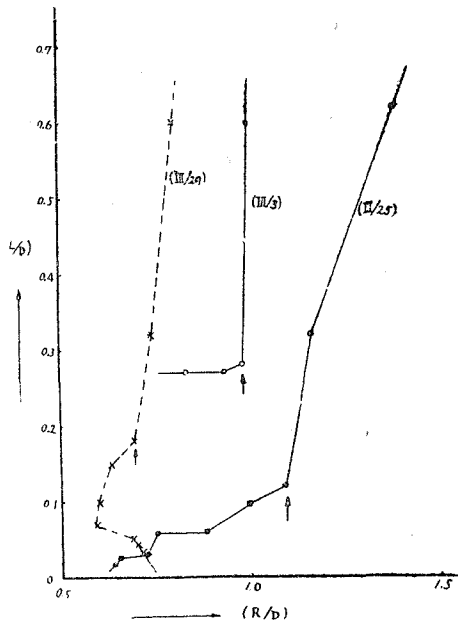
と雨水の中間の型に變つていたが、この時の着氷範圍は細い組ではちがつた傾向を示した。即ち雨水の場合の方が比較的廣範圍に附着し、しかも直徑に左程影響されていない。このことは前に述べた如く圓柱の岐點に衝突した霧粒は、殆んど凍りきれないで圓柱の周圍に沿ふて側方に流れ、側面で凍結したからである。従つてこの着氷は粗氷の如く衝突した水滴が全部凍結する場合はちがつている。細い組でもこれと似た現象の着氷となり、着氷結果に於ては余り太い組と變らないが、霧粒が前の $1/2$ 位の大きさであつたためか、着氷範圍は比較的少なかつた。それで次の第4圖に示す如く着氷範圍についてその透明部分のみをとつたものと圓柱兩側のザグザグの部分をとつた場合との比をとり、 $R_0 = \frac{R'}{R}$ として、最大圓柱の R_0 に對して、各圓柱の比をとつて $\left(\frac{R_0}{R_M}\right)$ 、これと直徑との關係を検べてみると雨水では直徑に反比例した直線的な變化となり粗氷では拋物曲線的な變化を示す。それで透明部分とザグザグの部分の出来る割合は、圓柱の直徑によつてほぼ決まつてくるものとみることが出来る。

Ⅲ/29. 着氷範囲



第 4 圖

2) 着氷の伸び 着氷の伸びの平均値を、一番太い圆柱に對する各圆柱の比 (L/L_0) をとり、直径との關係をみると何れも直径が大きくなるほど伸びは減少しているが、雨水ではその傾向は全然認められない。又着氷範囲と伸びの關係を調べてみると、何れの着氷の場合に於ても、着氷範囲が増せば伸びは減少してくるが必ずしも直線的ではない。そして直径が大きくなるほどこの傾向は強い。第5圖は (L/D) と (R/D) の關係を示したものである。即ち前



第 5 圖

述の如く着氷範囲も伸びも共に圆柱の直径が大きくなるほど減少して行くが、直径が或る太さ以下となると(圖で矢印を以つて示す箇所)着氷の伸びは範囲に比して急に増加してくる。この増加點(3月25日, 3月29日では $D=1.6\text{cm}$, 3月3日では $D=0.95\text{cm}$)は着氷の種類によつて異なつてはいるが大體直径1cm内外の點をとつてはいることは注目すべき事柄である。圖では3月29日の雨水部分に於て、(L/D)と(R/D)とは圆柱直径との關係が逆になつてはいるが、これは着氷の伸びも範囲も殆んど直径に對して變化しなかつた事を示すもので、雨水型の特徴を表わしている。

茲で伸びの増加は、風速が一定なる場合には霧粒の大きさ(霧水量)に左右されるものであるが、雨水型の場合にはこのことは適用出

来ない。衝突した霧粒の一部が流體のまま流れ落ちるからである。

3) 着氷重量, 圓柱の末端の着氷を除いて出来るだけ多くの氷を剥がし, その重さを測定し, 單位長さ當りの重量 W をとり, その直徑に對する比 (W/D) を求め, これと直徑との關係を検べてみると伸びや範圍と同様に直徑 D が増すと W/D は減少する傾向を示す。然も着氷の種類により著るしい相異は認められない。

V. 捕捉率の測定値について

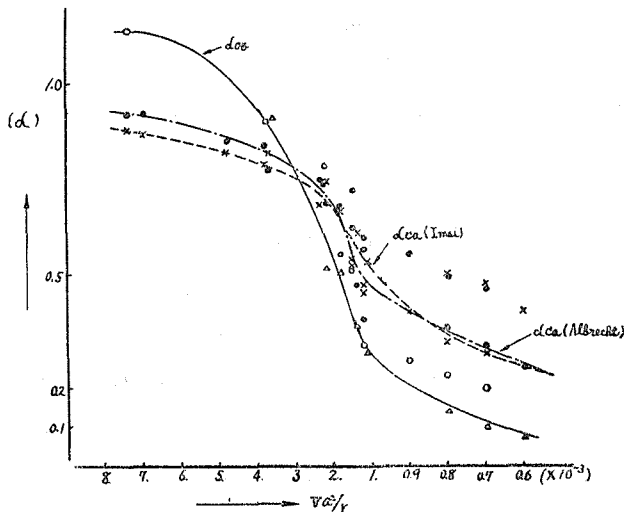
任意の時間内の着氷量から, 實驗的に圓柱の捕捉率を求めてみる。

今圓柱の直徑を D とすれば, 實際の捕捉率 d は次の式の如くおける。即ち

$$d = \frac{M}{\rho \cdot V \cdot t \cdot D}$$

式中 M : 着氷量 (gr)
 ρ : 霧水量 (gr/cm³)
 V : 風速 (cm/sec)
 t : 着氷時間 (sec)

故に M , ρ , V 及び t を實測すれば, 種々の直徑についての d の價が計算される。一方理論的には $d = f\left(\frac{va^2}{r}\right)$ で決るから, これから求めた d を va^2/r の價に對し圖示すると, 第6圖の如くなる。圖の d_{ob} がこの實測値で, d_{ca} は Albrecht 及今井氏の圖から讀取つた値



第 6 圖

を同時に示したものである。 d_{ob} と d_{ca} とは $Va^2/r = 1 \times 10^{-3}$ 附近で略近接するが, $Va^2/r > 10^{-3}$ では d_{ob} の價が大きくなり, $Va^2/r < 10^{-3}$ では d_{ob} は小さな價となっている。この事は着氷が細い圓柱では先擴がりとなつて成長し, 太い圓柱では先が狹まるからで, 今井氏もこのことについては同様に論じている。然して d_{ob} と d_{ca} との曲線の形は, 同様の傾向を示しているが, 著しく異つてくることは, 上式の右邊

の實驗値の誤差によるものか, 理論の假定が實際の着氷には當筈まらないかによるものである。

今之等捕捉率を任意の圓柱 (圓柱は一番細いものをとる) に對する比をとり, 之等と直徑

との関係をみると、Albrecht 及今井氏の値に比して、實測値は直径に對する減少率が急激である。茲で d_{ob} と d_{en} とのちがひについて、まづ考へられることは、前述の如き假定の矛盾であり、又理論的な捕捉率の測定のためには、着氷の極めて初期の状態を測定しなければ求められないと云うことである。實驗的に捕捉率を求める場合には着氷が或程度伸びたものについての平均値で、これが理論値と異つてくることは當然である。このことについては更に嚴密な實驗をする必要がある。

捕捉率は氷の性質によつて異なることは勿論である。今この関係を檢べる手段として、着氷量の實測値(伸びと範圍の相乗積)をとり、之と捕捉率 d との関係を檢べてみればわかる。この結果着氷量 0.1 以下では d は急激なる増加をみせている。即ち直径 1cm 附近を境として d の増減は著るしいものと思はれる。

VI. 結 言

以上は眞鍮の同じ材質の圓柱を用いて、着氷現象を檢べたものであるが、風洞實驗の爲に圓柱の直径は或る限度に限られ、又實驗上の困難から、風速は最大 5m/sec を超えることが出来なかつた。又實驗回数よりみて余り結論的なことは論ぜられないが、實際の捕捉率を求める方法の一つの試みとして行つたものである。以下結果を要約すると、

1) 着氷の透明度は内部の氣泡含有の如何によるが、これは霧粒の大きさと衝突時間及び凍結速度により結定される。そして同一條件でも、太い圓柱ほど内部の氣泡の含有率は大となる。

2) 着氷性質は圓柱直径によつて相異してくる。即ち圓柱の兩側面より着氷が發達する様な場合は、直径の太い圓柱ほど發達の傾向が著しい。

3) 着氷範圍は圓柱の大きくなるほど減少するが、着氷性質によりこの関係は著るしく異なる。

4) 雨氷型では着氷範圍及伸びは、一般に圓柱直径によつて左程左右されない。

5) 着氷の透明部分と着氷範圍全部との比は、圓柱直径によつて大略決定される。

6) 着氷の伸びと範圍は直径に對して相反する關係にある。又 L/D と R/D とは直径 1.0cm ~ 1.5cm の範圍内で急激な變化を示す。

7) 着氷重量は直径が増加すると減少する關係にあるが、着氷性質により著るしく變化する。

8) 捕捉率 d は $d = \frac{M}{\rho \cdot V \cdot t \cdot D}$ より實測されるが、固定圓柱の場合に於ては理論値と余り一致しない。即ち、

$Va^2/r = 10^{-3}$ 附近は略一致し、

$Va^2/r > 10^{-3}$ では理論値より大となり、

$Va^2/r < 10^{-3}$ では理論値より小となる。

9) $(L/D \times R/D)$ と α_{01} とは比例関係にあるが、直径 1cm 以下では α は急激に増加する。以上着氷の寸法効果について同一の材料、同一形状の物によつて調べた結果を述べたが、形状の相異による着氷現象は未だ今後に残された問題である。本実験中霧粒の測定竝に顕微鏡寫眞撮影には小口八郎氏の手を煩はした。

文 献

- 1) Albrecht, F. 1931 Theoretische untersuchungen über die Ablagerung von staub aus strömender Luft und ihr Anwendung auf die Theorie der staubfilter 32, 48.
- 2) 今井一郎 1941 物體による氣流中の微粒子の捕捉, 氣象集誌 19 (6), 217.
- 3) 今井一郎 1944. 着氷の寸法効果: 雪氷, 6, 第10號

Résumé

The arresting factor of fog particles was studied as the function of the dimension of the body on which ice formation takes place. Albrecht's theory was compared with the experimental results, and it was found that it holds only in a narrow range of meteorological conditions.