



Title	着氷の物理的研究 V. : 着氷の顕微鏡的構造と凍結の機巧
Author(s)	小口, 八郎; OGUCHI, Hachiro
Citation	低温科学, 6, 131-146
Issue Date	1951-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17490
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_p131-146.pdf



着氷の顯微鏡的構造と凍結の機巧* (着氷の物理的研究、V、)

小 口 八 郎

(北海道大学理学部物理学教室)

(昭和26年11月受理)

I. 着氷の顯微鏡的構造

着氷の顯微鏡的構造は着氷の条件によつて変り、又着氷の物理的性質は着氷の微視的構造と密接に結びついている。これ等のことについては既に述べたところである。着氷の条件に相応して、着氷の構造及び組織がちがつてくることは、着氷の凍結の機巧について種々の理解と示唆とを與える。筆者は着氷の微視的構造に着目して、出来るだけ多くの例について着氷の条件と構造とを対照して調べた結果、着氷の凍結機巧についてかなりはつきりした結論を得たのでこれについて述べる。

着氷の構造及びその巨視的性質は着氷の条件によつて特徴付けられる。着氷の巨視的性質、例えば着氷の種類は構造の特徴によつて三つの型に分けることが出来る。その第一は、自然の着氷に多い霧氷の如く着氷の構造が氷粒の結合から出来ているものである。これを粒状構造型と名付ける。第二は風速の大きい条件の下で成長する粗氷で、その内部は氣泡を多数封入した半透明又は乳白硝子状の構造をなすものである。これを氣泡構造型とする。第三は雨氷で、その構造は透明氷の構造をなす。これを透明構造型とする。

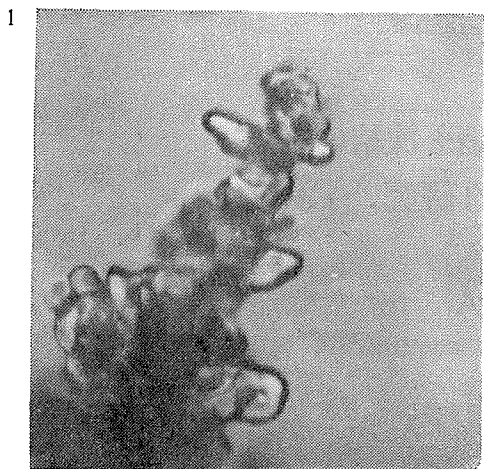
以上の三つの構造は着氷の基本的な構造であり、着氷の条件に相応して相互に密接な関連をもっている。そして着氷の構造の遷移或いは変化は凍結の機巧によつて左右されるものとみられる。

II. 着氷の條件と構造の變化

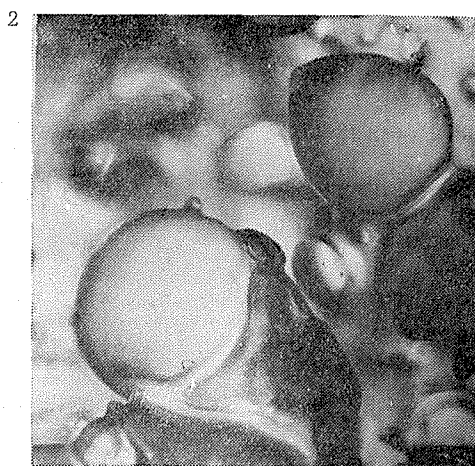
着氷を支配する主な因子は氣温、風速、雲粒、物体の大きさ及び形状、物体表面の粗度及び材質等である。着氷の巨視的な性質は全てこれ等の着氷の条件によつてきまつてくるが、それ等の性質は着氷の微視的構造と密接に結び付いているので、次に微視的構造に及ぼす着

* 北海道大学低温科学研究所業績 第117號

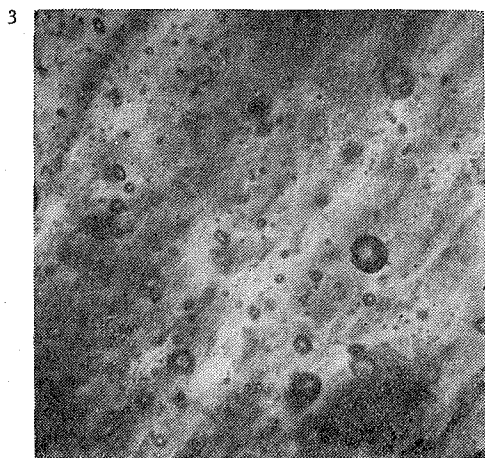
着氷の顯微鏡的構造と凍結の機巧 (附寫眞 1—5)



×100



× 27



×100



× 27



×100

氷条件の影響を調べておく。

1) 気温の影響

気温及び風速は着氷に最も著しい影響を及ぼす。それで気温だけによる影響をみるためには、風速の影響が一様であるような場合について、気温のちがいでだけによる構造の変化を比較してみる必要がある。

写真1及び2は何れも風速が2~3 m/s. の弱い自然風で成長した着氷の成長先端附近の顕微鏡写真である。気温の方はそれぞれ、1が -10.5°C で2は -1.2°C の条件で成長した。この2種の着氷を比較してみると、気温による着氷の構造のちがいが分る。即ち、気温が低い場合は(-4°C 以下)、風速が小さければ着氷は粗霧氷となり、その構造は細かい粒状構造をなす。しかし気温が高く -2°C 以上くらいになると、着氷は完全に透明な雨水となり、粒状構造をなさなくなる。気温が $-4\sim-2^{\circ}\text{C}$ のところでは、着氷は外部が粒状構造で内部に透明な部分を有つ二重構造から成る軟粗氷となる。

写真3及び4は人工高速風洞内で風速を40~50m/sにして着氷させたときの例である。3は気温が -11.0°C の条件で成長した粗氷の内部の気泡構造を示す。4は気温 -1.2°C の条件で成長した風洞雨水の構造である。風速の大きい場合の雨水には4に示す如き亀甲状模様が現われることが多い。この他の諸例でも、高速度着氷では、気温が低い場合は気泡構造をもつ粗氷となり。気温が高くなるに従つて着氷内部に含まれる気泡の密度は減じ、 -5°C 以上になると透明な氷となる。この場合の気温の影響は、着氷内部の気泡の大きさ及び数を変化させ、透明構造へ移行するように作用する。

以上の例は風速が極めて小さい場合と、極めて大きい場合との両極端の場合であるが、この中間の風速の場合に於ても、気温の影響は着氷の構造が透明に向うように働く。風速別にして気温の影響を構造の変化によつて表わすと、

i) 風速が小さい (20m/s 以下) 場合は、

$T_a \rightarrow$ 大に従つて

粒状 (霧氷) \rightarrow 粒状+透明 (軟粗氷) \rightarrow 透明 (雨水)

ii) 風速が大きい (20m/s 以上) 場合は

$T_a \rightarrow$ 大に従つて

気泡 (粗氷) \rightarrow 透明 (雨水)

2) 風速の影響

着氷の構造に及ぼす風速の影響は、気温の影響をしらべた前例によつても知ることが出来る。即ち、写真1及び3は兩者ともに気温が -11°C くらいで殆んど等しく、ただ風速だけが著しくちがった条件で成長したものである。この2種の着氷を比較することによつて、気温の低い場合の風速の影響が分る。気温が低い場合には、風速が小さい条件で成長する着氷は粒状構造を示す霧氷となり、風速が大きい条件では気泡構造をもつ粗氷となる。写真2及

び4は共に気温が高い場合の例である。気温が -1.2°C 程度になると風速には無関係に着氷は全て透明な雨水となる。しかし着氷面の模様は異り、風速が小さいと着氷の成長面は凹凸が著しくなる。

着氷の構造に及ぼす風速の影響を、多数の例から調べその結果を取り纏めると次の如くなる。

i) 気温の低い場合 (-5°C 以下) には、構造の変化は、

風速 \rightarrow 大

粒状 (霧氷) \rightarrow 気泡 (粗氷)

この構造変化は風速 $20\sim 30\text{m/s}$ を境にして不連続に起こる。

ii) 気温が低くなく又あまりに高くない場合には (-2°C 以下 -5°C 以上),

風速 \rightarrow 大

粒状 \rightarrow 気状+透明 \rightarrow 透明

iii) 気温が高い場合 (-2° 以上) には、風速の如何に拘らず着氷は透明な雨水になる。

3) 雲粒の影響

着氷の構造に及ぼす雲粒の影響は、気温及び風速ほどに著しくはないが、無視することは出来ない。雲粒の影響には雲粒の大きさによるものと、雲水量によるものがあるが、自然の雲では雲粒が大きい場合には雲水量も大きくなる傾向があるので、ここでは主に雲粒の大きさを問題とした。

気温及び風速の条件が大体同じ場合に、雲粒の条件がちがっている場合の多数の例について、着氷の構造に及ぼす影響を調べてみた結果によると、雲粒の影響は大体気温の場合に似ていることが分つた。即ち、

i) 風速の小さい場合には、構造の変化は、

雲粒 \rightarrow 大

粒状 \rightarrow 粒状+透明 \rightarrow 透明

ii) 風速が大きい場合には

気泡 \rightarrow 透明

但し雲粒の影響は気温に較べると著しく小さい。

4) 物体の大きさの影響

着氷する物体の大きさがちがうと、着氷の模様がちがってくる。これは巨視的には着氷の寸法効果として現われてくる。ここでは着氷の構造に現われる寸法効果を問題にするのであるが、結局は物体の雲粒の捕捉率が関係してくる。雲粒の捕捉率が大きいということは、言い換えれば着氷面に衝突する雲粒の頻度が大きいということで、雲粒の空間密度が相対的に大きい場合と同じ影響を與えるものとみることが出来る。同一の氣象条件の下で、太さのちがつた円柱に着氷させて調べた結果によると、着氷の構造に及ぼす捕捉率の影響は、雲粒の場

合と大体同じであることが分つた。

5) 物体の材質の影響

着氷の構造は物体に衝突した雲粒の凍結の機巧によつてきまつてくることは、これまで述べてきたことから分るであろう。外部から冷却される凍結の機巧に於ては、着氷する物体の熱学的性質も一応問題となり、着氷する物体の材質の影響を調べてみる必要がある。これまでに物体の材質の影響を調べた例は極めて少ない。高野玉吉氏は⁽¹⁾着氷に及ぼす材質の影響を着氷の巨視的性質について調べている。筆者は材質の影響を着氷の構造の面から問題にしてみた。即ち、各種の金属、エポナイト、硝子及び木質部等を用いて実験を行つてみた。その結果によると、材質によつては着氷の構造は殆んど変化しないことが分つた。これは、着氷の構造に及ぼす材質の影響が非常に小さいために、その効果は、他の条件、即ち気温及び風速の著しい影響のために打ち消されてしまつた結果であると見られる。従つて材質の影響は他に較べてあまり問題にする必要はない。

III. 雲粒の衝突について

これまでに述べた着氷の条件と構造の変化についての説明では、各々の条件を独立的に取扱つて来たが、実際の着氷が出来上るのには、全ての条件が有機的に作用し合つた結果である。従つて、着氷の構造は着氷の全ての条件の統一的な作用を考慮に入れた凍結の機巧によつて明かにされ得べきものである。ところで総合的な見方に立つ凍結の機巧に立入る前に、ここでも一つ調べておかなければならない大切な問題がある。即ち雲粒が物体面に衝突する場合の変形及びそれに関連した問題である。

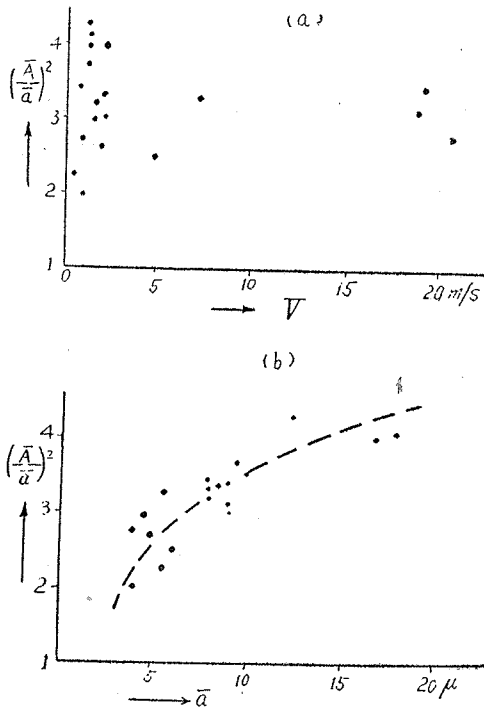
大氣中に含まれている雲粒の密度は、普通の雲では $100\sim 500$ 個/cm³の程度でかなり多い。従つて風速がある場合の着氷を巨視的に考えると、雲粒は物体面に連続的に衝突し、着氷は物体面上に一樣に成長するものと思われる。しかし雲粒が物体の面に衝突する模様を微視的に観察してみると、雲粒は物体の面上に一樣に附着しない。例えば硝子面に雲粒が衝突する模様を硝子面の裏から顯微鏡で観察してみると、着氷の初期には硝子面に一樣に雲粒が附着してゆくのではなくて、かなりの隙間を残しながら成長してゆくことが分る。

写真5に示すものは、気温 -2.4 、風速 14.2 m/s の大氣流の中に硝子面を風向に垂角に向けて、約 2 秒間雲粒に露出したとき、硝子面に衝突附着した雲粒の模様である。硝子面の如く滑らかな面に雲粒が衝突すると、雲粒はつぶれて扁平となるが、その形は大体、円形になることが知れる(中央)。着氷のごく初期の状態を示す写真5から、硝子面にはまだかなりの隙間があり、着氷の成長はかなりの fluctuation を示していることが分る。

雲粒が物体の面に衝突する場合に、附着の fluctuation の他に問題となる点は、雲粒が物体の面に衝突することによつて如何ようにつぶれるかという点である。雲粒が平滑な固体の面に衝突すると、球形がつぶれて扁平となり、その形はほぼ円形になることは前掲写真の例

からも明かである。そこで問題は雲粒がつぶれるとどのくらいの扁平な円盤になるかということである。嘗つて Bleeker⁽³⁾ は、雲粒が物体面に衝突した後のつぶれた円盤の面積は、元の雲粒の断面積の2倍以上になることはないとして、着氷の凍結の機巧を説明した。この考え方はそのまま採用されて着氷の説明に利用されている。しかし実際の着氷の場合には、風速の大小、雲粒等によつて、必ずしも2倍以上にならないと断定することは出来ないので、筆者はこの問題を実験的に調べてみた。

筆者の行つた実験はごく簡単なものである。即ち、デツキ硝子(幅1cm)の1部に雲粒を懸濁させるために Zöhder 油を塗り、この硝子面を出来るだけ短時間雲粒中に露出した後、附着粒子と油中に懸濁した粒子とを顕微鏡写真に撮影しておき、後でこの2種の粒子の大きさを測つて比較した。この実験で注意しなければならない点は、雲粒中に露出する時間は出来るだけ短時間にすることである。さもないと1個以上の雲粒が重なり合つて附着する危険がある。写真の撮影もごく短時間の内に完了しなければならない。附着した粒子は蒸発し易いからである。



第 1 圖

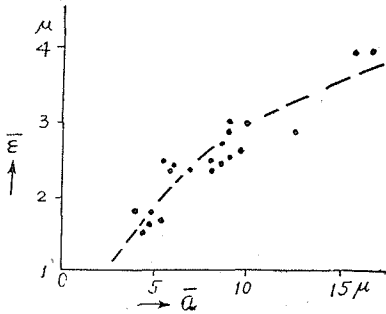
の円盤の面積は Bleeker の考えた値よりずつと大きくなるのが $(A/a)^2$ の値から分る。

衝突後の雲粒を円盤とみなしたときの円盤の厚さを次に求めてみよう。円盤の平均の厚さを $\bar{\epsilon}$ とすると、*

* 雲粒が実際に物體面に衝突すると、まわりが少し厚い円板になり、 ϵ は厳密には一定にはならない。

雲粒の元の球形の断面積と、附着後の円盤の断面積との比較は次の如くした。雲粒の球の半径を a 、附着円盤のそれを A とすると、 A/a が個々の雲粒についてのつぶれの度合を示すことになる。しかし雲粒個々についての A/a は分らない。そこで a 及び A の多数の平均 \bar{a} 及び \bar{A} を求めて、 \bar{A}/\bar{a} の値を以つてその着氷条件の時のつぶれの度合とした。 \bar{a} 及び \bar{A} は 100~200 個の粒子につき平均して求めた。

$(\bar{A}/\bar{a})^2$ と風速 V との関係を図 1(a) に示す。 V が増すと $(\bar{A}/\bar{a})^2$ は少し大きくなる傾向を示すが、その関係ははつきりしたものではない。 $(\bar{A}/\bar{a})^2$ と \bar{a} との関係を第 1 図 (b) に示す。風速がかなりちがっているにも拘らず、 $(\bar{A}/\bar{a})^2$ は殆んど \bar{a} だけによつて決つてくることが第 1 図 (b) から分る。又衝突後



第 2 圖

$$\frac{4}{3} \pi \bar{a}^3 = \pi \bar{A}^2 \bar{\epsilon}$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{4}{3} \left(\frac{\bar{a}}{\bar{A}} \right)^2 \bar{a}$$

個々の \bar{a} 及び \bar{A} から $\bar{\epsilon}$ を求めて、 \bar{a} と比較してみると第 2 図の如くなる。自然に実在した雲粒については、 $\bar{\epsilon} = 1.5 \sim 3.5 \times 10^{-4} \text{cm} (\mu)$ となり、雲粒の半径の大体 1/3 程度になる。

IV. 着氷の凍結の機巧

着氷の現象は簡単にいうと、過冷却した水滴が物体の面に衝突凍結して accumulate するということである。物体面に衝突した過冷却水滴は、衝突した瞬間に 0°C になつて後外部から冷却されて凍結が進行する。このような凍結が多数の粒子によつてつぎつぎに起こり、着氷が成長する。このような衝突凍結を問題とする場合に大切な点は、或る粒子が物体の面に衝突附着した後に、次の粒子が前の附着粒子に衝突するまでに、前の粒子が完全に凍結しきつているか、凍結しきれないで水の部分が残っているかどうかと言う点である。衝突粒子の凍結が 1 個 1 個独立的に凍結する場合には、前と後の兩粒子の凍結は全く同等である。第二の粒子が衝突する時に前の粒子が凍結しきれないで居る場合には、着氷の成長面に Liquid water があり、着氷は水膜の凍結によつて成長することになる。この二つの凍結の様式のうちの何れの case になるかによつて、着氷の構造が決つてくるものと思われる。一方凍結の様式は雲粒の衝突頻度及び衝突後の凍結速度によつて決つてくるので、次にこれ等について考察してみよう。

1) 衝突時間

物体の面に衝突する雲粒の時間的頻度は、初めの雲粒が衝突した後に次の雲粒が前の雲粒に衝突するまでに要する時間即ち衝突時間によつて置き換えることが出来る。この場合衝突時間が短いほど雲粒の時間的衝突頻度は大きくなる。しかし実際の着氷に於ては、個々の雲粒の衝突時間を知ることは不可能である。ここで問題として探り上げることの出来るのは、或る着氷の条件が與えられたときに、その条件に於ける雲粒の平均的な衝突時間がどの位になるかということである。一般に雲を構成する雲粒はいろいろな大きさの水滴から成つて居り、衝突する順序も全くばらばらである。これ等の雲粒の衝突時間を考える場合には、雲粒の大きさの代表としては結局平均値を用いるほかはないが、その大きさの規準としては最大雲水量を與える雲粒の大きさをとることにした。

一つの着氷の条件が與えられたとき、雲粒の条件は半径 \bar{a} の粒子だけから成つて居るもの

とする。この時の雲粒の密度個数を n とする。風速が V なる場合に、1 個の静止している粒子に衝突する粒子の個数は単位時間中に、

$$\pi (2\bar{a})^2 nV$$

で與えられる。着氷の場合には静止している物体の面に雲粒が衝突するので、上に述べたような考え方をそのまま適用することは出来ない。雲粒は物体面に衝突すると、扁平な円盤となり断面積は大きくなる。即ち \bar{a} は衝突後には \bar{A} となるから、上式の \bar{a} の代りに \bar{A} を用うべきである。又物体の大きさに依つて雲粒捕捉率がちがうから、 nV 個の雲粒が衝突とする代りに一般に αnV 個衝突するとすべきである。 α は捕捉率で $1 \geq \alpha \geq 0$ である。これ等の補正を加えて上式を書き変えると、単位時間に衝突する粒子数は、

$$\alpha \pi (2\bar{A})^2 nV$$

従つて平均衝突時間は、

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{\alpha \pi (2\bar{A})^2 nV}$$

なお第 3 節で述べた $\bar{\varepsilon}$ を用いると、

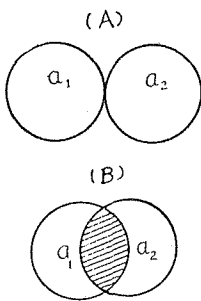
$$\bar{\varepsilon} = \frac{4}{3} \left(\frac{\bar{a}}{A} \right)^2 \cdot \bar{a}$$

$$\frac{3}{4} \pi \bar{a}^3 \cdot n \cdot \rho_w = w \quad (w = \text{雲水量}, \rho_w = \text{密度} (= 1\text{g/cm}^3))$$

であるから、

$$\overline{\Delta t} = \frac{\bar{\varepsilon}}{4\alpha wV} \dots\dots\dots(1)$$

この式は、衝突粒子が前に衝突附着した粒子に少しでも觸れればそれで衝突と見なすという仮定から導いたものである。しかし着氷の成長の場合には、常に衝突粒子間の若干の重なりをみとめた衝突時間が意味がある。そこでどのくらいの重なり合いを規準にとるかということが問題になつてくる。ここでは仮りに、前後の衝突粒子の衝突有効面積を上式の場合の $\frac{1}{4}$ にとつてみる。即ち $\pi (2\bar{A})^2$ の代りに $\pi \bar{A}^2$ とすると、この場合の最少の重なりは第 3 面に示す如くなる。図中 (A) が $\pi (2\bar{A})^2$ を衝突有効面積とした場合で、(B) の方が $\pi \bar{A}^2$ をとつた場合である。(B) の場合の $\overline{\Delta t}$ は $\pi (2\bar{A})^2$ の代りに $\pi \bar{A}^2$ を用いて、



$$\overline{\Delta t} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\alpha wV} \dots\dots\dots(2)$$

即ち前の場合に較べると $\overline{\Delta t}$ は 4 倍となる。

$\overline{\Delta t}$ は $\bar{\varepsilon}$ を用いると、成長量 L と成長に要した時間 t からも求めることが出来る。 $\bar{\varepsilon}$ は雲粒の大きさによつて少し変るが、或る雲粒について粒子が 1 回衝突する毎に着氷が $\bar{\varepsilon}$ づつ成長するものとする、

$$L = \frac{t}{\overline{\Delta t}} \bar{\varepsilon} \quad \overline{\Delta t} = \frac{t}{L} \bar{\varepsilon}$$

となる。一方 t 及び L については、その時間中の円柱の単位長さあたりの着氷量を M とすると、大体

$$M = 2R \cdot L \cdot \rho = 2R \alpha V t w$$

が成立つ、ここで R は円柱半径、 ρ は着氷密度、 α は捕捉率、 V は風速で、 w は雲水量を表わす。従つて、

$$\frac{t}{L} = \frac{\rho}{\alpha w V}, \quad \Delta t = \frac{\rho \varepsilon}{\alpha w V} = \frac{t}{L} \varepsilon \quad \dots\dots\dots(3)$$

従つて $\rho = 1\text{g/cm}^3$ とすると、(3) 式は前に導いた (2) 式と一致する。

2) 凍結時間

過冷却した水滴が物体に衝突した後どのくらいの時間で凍結が完了するかという問題である。この問題は既に 2, 3 の人々によつて取上げられた。Bleeker⁽³⁾ は着氷の問題を熱学的に考察し、凍結時間なる概念を初めて導入した。Bleeker は雲粒が物体面に衝突附着する際に、衝突後の雲粒の円盤の面積は元の雲粒の断面積の 2 倍以上になることはないとし、外部から奪われる熱量は、主に雲粒の円盤面よりの蒸発によるものとして凍結時間を求めた。其の後 Stickley⁽⁴⁾ は Schumann⁽⁵⁾ の雹の理論を適用し、着氷の凍結時間は蒸発熱の他に着氷の周りの氣流によつて失われる対流熱を考慮に入れなければならないことを論じた。Stickley⁽⁶⁾ によれば、対流による熱損失の方が蒸発によるものよりもずっと大きい。大田氏は蒸発及び対流による熱損失の他に更に物体表面から傳導によつて失われる熱をも考慮して凍結時間を論じた。大田氏によれば着氷面から傳導によつて失われる熱量は、蒸発及び対流によつて失われる熱量に較べてかなり大きい。殊に雨水又は粗水の如く氷盤面上に着氷が成長する場合には、傳導による方が桁ちがいに大きくなる。傳導熱を考慮に入れて凍結時間を求めることはかなり面倒なので、筆者はまず Stickley の考え方を利用して凍結時間を求め、後で傳導による熱の損失について考慮することにした。

今 $- \theta^\circ\text{C}$ に過冷却している質量 m なる雲粒 1 個についての凍結を考えてみる。衝突した瞬間からこの粒子は凍結し始めるが、この場合潜熱 γ を出すので、衝突した瞬間には $m(\gamma - \theta)$ だけの量は 0°C 氷となる。この水の部分が外界から冷却されて凍結が進行するわけである。外界へ逃げる熱量としては、対流による熱量 Q_1 と蒸発による Q_2 とを問題にすると、衝突後凝結完了までの時間即ち凝結時間 $\Delta\tau$ 中に失はれる熱量は

$$m(\gamma - \theta) = S(Q_1 + Q_2) \Delta\tau$$

ここで S は附着粒子の表面積である。 Q_1 及び Q_2 は、 θ 及び風速 V によつて同じ形に表わされる。⁽⁶⁾ 即ち、

$$Q_1 + Q_2 = k\theta \left(1 + \frac{1}{x}\right), \quad (x = Q_1/Q_2)$$

k は熱傳達率で風速 V によつて変わる。円柱着氷の場合の k としては、平面壁の場合の k よりむしろ円柱又は線条の場合の k をとつた方がよい。今の場合 Russel⁽⁷⁾ の値を用いるこ

とにすると、半径Rなる円柱に対して、

$$k = 4 \times 10^{-4} \sqrt{RV} \quad (\text{cal./cm. sec. } ^\circ\text{C}), \quad (0.01 < 2R < 2\text{cm})$$

円柱外表面に於ける熱傳達率の分布は、風に対する前面と後面で殆んど対称になるの⁽⁸⁾で、單位面積あたりのkは、

$$k' = \frac{k}{2\pi R} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{V}{R}} \times 10^{-4} \quad (\text{cal./cm}^2 \cdot \text{sec. } ^\circ\text{C})$$

又 Stickley によるとxの値は各₂の θ について大体似た値となり、大体1.85であるから、 $1 + \frac{1}{x} = 1.54$ となる。これらを用いて $\Delta\tau$ を出すと、

$$\Delta\tau = 1.05 \times 10^4 \frac{m}{S} \frac{r-\theta}{\theta} \sqrt{\frac{V}{R}}$$

$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{m}}{S}$ であるから結局、

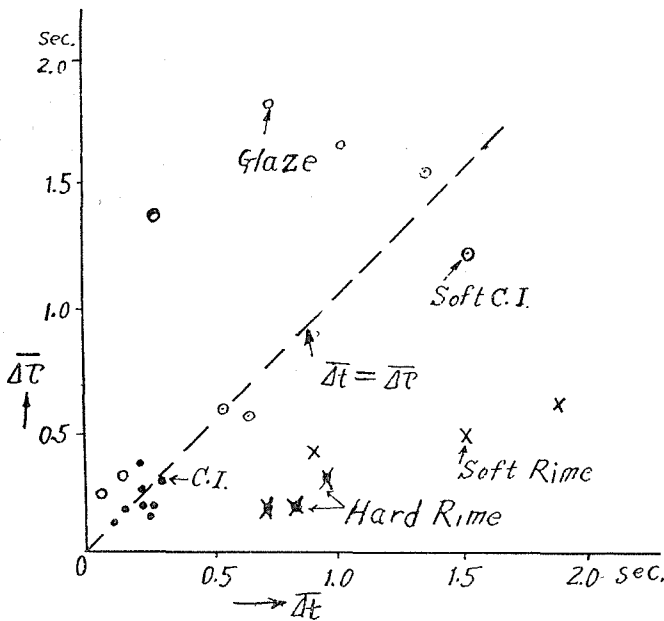
$$\bar{\Delta\tau} = 1.05 \times 10^4 \frac{\bar{\varepsilon}(r-\theta)}{\theta} \sqrt{\frac{V}{R}} \quad (\text{sec.})$$

第 1 表

気温 °C	風速 m/s	粒半径 μ	雲水量g/m ³	$\Delta t(2)\text{sec.}$	$\Delta t(3)\text{sec.}$	$\bar{\Delta\tau}$ sec.	種 類
- 7.3	6.0	6	0.06	4.0	1.9	0.6	粗 霧 氷
- 10.2	5.0	5	0.15	2.2	0.9	0.4	"
- 10.5	5.4	7	0.11	2.7	1.6	0.5	"
- 12.0	17.0	5	0.08	1.3	0.7	0.2	密 霧 氷
- 8.0	15.1	5	0.07	1.6	1.0	0.3	"
- 11.5	16.0	5	0.08	1.3	0.8	0.2	"
- 6.0	14.5	8	0.22	0.8	0.7	0.6	軟 粗 氷
- 5.3	18.0	8	0.23	0.7	0.6	0.6	"
- 2.5	11.8	6	0.11	1.3	1.5	1.4	"
- 2.0	6.5	4	0.16	1.6	1.2	1.5	"
- 11.0	20.	5	0.38	0.2	0.2	0.2	粗 氷
- 10.5	47.	7	0.22	0.3	0.2	0.2	"
- 8.2	42.	9	0.18	0.4	0.3	0.3	"
- 5.5	27.	7	0.36	0.3	0.2	0.4	"
- 9.8	51.	6	0.14	0.3	0.3	0.2	"
- 11.1	20.	7	0.37	0.2	0.2	0.2	"
- 9.0	130.	7	0.11	0.1	0.1	0.1	"
- 5.4	57.	7	0.26	0.2	—	0.3	"
- 3.0	10.0	10	0.33	0.9	1.0	1.7	雨 氷
- 1.2	48.	6	0.22	0.2	0.3	1.4	"
- 2.0	5.5	10	0.68	0.8	0.9	3.5	"
- 1.0	8.8	8	0.19	2.1	—	4.2	"
- 6.0	74.	7	0.48	0.1	—	0.2	雨+粗氷
- 3.3	10.0	12	0.46	8.8	—	1.8	雨 氷
- 5.6	57.	7	0.26	0.2	—	0.3	雨+粗氷

以上 $\overline{\Delta t}$ 及び $\overline{\Delta \tau}$ を求めるためには、かなり無理な假定を使っているが、着氷条件が與えられると、とも角も $\overline{\Delta t}$ 及び $\overline{\Delta \tau}$ の値を求めることが来る。それば実際の着氷の場合には $\overline{\Delta t}$ 及び $\overline{\Delta \tau}$ がどのくらいになるかを求めてみる。第1表に着氷条件及び $\overline{\Delta t}$ 、 $\overline{\Delta \tau}$ を示した。表の中で $\overline{\Delta t}$ (2) は前出 (2) 式によるもので $\overline{\Delta t}$ (3) は L 、 t 及び $\bar{\epsilon}$ から求めたものである。 $\overline{\Delta t}$ (2) と $\overline{\Delta t}$ (3) とを比較してみると、霧氷については $\overline{\Delta t}$ (2) は $\overline{\Delta t}$ (3) よりもずつと大きくなつた。これは前述の如く着氷の構造のちがいに基くものと思われる。 $\overline{\Delta t}$ (2) にその時の着氷の密度を掛けると両者は大体等しくなる。即ち $\rho \overline{\Delta t}$ (2) = $\overline{\Delta t}$ (3) となり、 $\overline{\Delta t}$ (3) の方が $\overline{\Delta t}$ をよく表わしているとみることが出来る。粗氷及び雨氷の如き氷盤着氷の場合には $\overline{\Delta t}$ (2) は $\overline{\Delta t}$ (3) とほぼ等しくなつた。

次に $\overline{\Delta t}$ と $\overline{\Delta \tau}$ とを比較してみよう。第1表の結果の $\overline{\Delta t}$ (3) と $\overline{\Delta \tau}$ とを第4図に示す。第1表及び第4図から、霧氷の場合には $\overline{\Delta t} > \overline{\Delta \tau}$ で、雨氷の場合には $\overline{\Delta t} < \overline{\Delta \tau}$ であることが分る。又粗氷及び軟粗氷では $\overline{\Delta t} \approx \overline{\Delta \tau}$ となつた。又粗氷の場合の $\overline{\Delta t}$ と $\overline{\Delta \tau}$ は共に小さい。これは V が大きいこと



第 4 圖

によるものである。

$\overline{\Delta \tau}$ は着氷面より傳導によつて失われる熱量を見無視して求めた値である。そこで傳導により失はれる熱量の方を調べて見よう。假りに傳導によつて失われる熱損失だけによつて失われる熱損失だけによつて凍結が起るものとして、凍結時間 $\overline{\Delta \tau}$ を求めてみた。第1表の $\theta = 1^\circ\text{C}$ の場合の雨氷は、水がたれ乍ら着氷が成長したものである。この場合の $\overline{\Delta \tau}$ を求めてみると、 $\overline{\Delta \tau} \div 0.3\text{sec}$ 、 $\overline{\Delta t} \div 2\text{sec}$ と

なるから、 $\overline{\Delta \tau} < \overline{\Delta t}$ であり、水がたれる着氷の成長の場合には考えられない結果となる。従つて着氷面を通して傳導で失われる熱量は大田氏の言う如く大きな量とはならないものと思われる。一般の着氷の条件では、傳導熱を含めるとその $\overline{\Delta \tau}$ は第1表の値の約 $\frac{1}{10}$ くらいになり、過小に過ぎるように思われる。着氷物質の熱的ちがいが着氷の構造に殆んど影響を與えず、銅の円柱とエボナイトの円柱の着氷に於ても、氣象条件が同じであれば、着氷の構造は兩者殆んど同じになる点などからみても、傳導によつて失われる熱量が他より桁ちが

いに大きいものと思われぬ。一方着氷の構造に及ぼす風速の影響が著しい点に注目すれば、対流による熱損失はかなり著しいものと思われる。何れにしても、第1表に示した $\overline{\Delta\tau}$ と $\overline{\Delta t}$ との関係は、着氷の凍結機巧を考える上に重要なものと思われる。即ち、 Δt 及び $\Delta\tau$ の相対的な関係によつて、着氷の構造の示す特徴が説明出来ることは、着氷の凍結の機巧を Δt 及び $\Delta\tau$ によつて統一的に考察することが出来ることを示している。次に Δt 及び $\Delta\tau$ の相対的な関係を用いて、着氷の構造を凍結の機巧上からしらべてみる。

V. 着氷の構造と凍結の機巧

着氷の構造には粒状、氣泡及び透明の三つの基本構造があり、これ等は着氷の条件によつて特徴付けられる。これ等の着氷の構造の出来る機巧を、 $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の相互関係から考察してみる。

1) 粒状構造

粒状構造の出来る条件を大まかに氣象条件によつて定めると、氣温 $T_a < -4^\circ\text{C}$ 、風速 $V < 20\text{m/s}$. となる。この場合の $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ は第1表から分る如く、個々の霧氷についての $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の値には特別の著しい差はない。しかし $\overline{\Delta\tau}$ と $\overline{\Delta t}$ の相対的値には定つた制限があり、何れの場合も $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ となつて居る。即ち霧氷が成長する場合の雲粒の凍結は、雲粒が着氷面に衝突する前に、それ以前の衝突粒子は完全に凍結が完了して居り、雲粒は各々独立的に凍結するという過程をとるものとみることが出来る。霧氷の粒状構造が発達する機巧は、この凍結様式と衝突附着の fluctuation から次の如く説明することが出来る。

風速が小さい場合又は乱流の場合には、物体面に衝突附着する雲粒の分布はかなりばらばらである。而も凍結の様式は各々の雲粒が独立的に凍結するので、着氷初期に生じた成長の fluctuation が成長が進行するに従つて益々助成され、着氷面の凸部は雲粒の捕捉率がよくなり、着氷は氷粒の重り合つた形をとつて発達する。霧氷が粒状構造となる最も重要な原因は、 $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ であるために成長面に水膜が出来ないことにあるものとみることが出来る。

2) 氣泡構造

氣泡構造の成長する条件は、 $T_a < -6^\circ\text{C}$ 、 $V > 20\text{m/s}$. である。この場合の $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ は第1表の例でも分る如く、 $\overline{\Delta\tau}$ 、 $\overline{\Delta t}$ 共にその値が非常に小さいことが特徴である。 $\overline{\Delta\tau}$ と $\overline{\Delta t}$ の相対的な値を調べてみると、 T_a が低い所では $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ となり、 T_a が高い方では $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ となつて居る。しかし $\overline{\Delta\tau}$ と $\overline{\Delta t}$ との差は極めて小さく、大体 $\overline{\Delta\tau} \approx \overline{\Delta t}$ と見てよい。そして $\overline{\Delta\tau}$ と $\overline{\Delta t}$ の値が共に極めて小さく 0.2sec. 以下であることから、雲粒個々の凍結過程を考えると、雲粒が成長面に衝突した瞬間には、その前の雲粒の凍結が完了して居る場合と、凍結しきれないで水の部分が残つて居る場合とある。 $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ である機会が多い場合には全体として $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ となり、 $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ である機会が多い場合には $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ となつたので、氣泡構造の成長する時の凍結過程は雲粒の半独立的な凍結様式をとるものとみることが

出来る。即ち、或る粒子が成長面に衝突する時には、その前の雲粒が未だ凍結しきれず、水の部分を残している場合がかなりあるような凍結過程をとるものと考えられる。

気泡構造を特徴付けるものは、着氷の内部に細かい気泡を多数含んで居ることである。この気泡構造が出来る機巧は $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の相互関係から次の如く説明することが出来る。第一に、 $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の値が共に小さく且つその差が極めて小さいことから、着氷の成長面には常に液体の部分があり、そこに高速度で雲粒が衝突する際に、その液体の中に空気の泡が混入し、その気泡が液体の急速な凍結によつてそのまま封入されることである。液体の面に高速度粒子を衝突させると、液体の中に細かい気泡が混入されることはよく知られた現象である。第二は、 $\overline{\Delta\tau}$ が極めて小さいことによるもので、雲粒が衝突後急激に凍結するために、雲粒中に溶解して居る気体（主に酸素）が出て来て細かい気泡となつて氷の中に封じ込められることである。このような現象は水の凍結が急激に進行する場合に起る現象である。気温が低く且つ風速が大きい場合には、 $\overline{\Delta\tau}$ は非常に小さくなるが、この場合に出来る気泡構造は、極微小の気泡が多数封入されて出来ている。この場合の極微小の気泡は、水膜に粒子が衝突して出来るものとは思われない。

気泡構造を有する粗氷は気泡を封入していることその他に、着氷の組織が極めて固く密になつて居る。粗氷がこのような固い氷となるのは、着氷の成長面が液体の部分で濡れ乍ら急速に凍結してゆく結果、衝突雲粒の結合が強くなつたものと思われる。又 $\overline{\Delta t}$ も小さいので、成長面に於ける衝突頻度も大きく、成長はほぼ均等に進行するので、着氷の成長の fluctuation は小さい。

3) 透明構造

透明構造の出来る条件は気温が高いことである。V が大きい時には $T_a = -5^\circ\text{C}$ くらいでも透明構造になるが、V が小さい場合には $T_a > -2^\circ\text{C}$ で透明構造になる。透明構造の出来る場合の $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ を比較してみると、何れの場合にも $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ となつて居る。即ち透明構造の成長する場合の凍結様式は、成長面が常に水膜で覆われ乍ら凍結が進行するという課程をとる。そしてこの場合 $\overline{\Delta\tau}$ は大きいから凍結の速度は遅く、雲粒衝突による気泡の封入は少くなり、透明な氷が成長する。

4) 構造の変化

着氷の基本的な構造即ち粒状、気泡透明の構造は、着氷の条件の相違によつて相互に変化する。この着氷の構造の変化を $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の相対係から調べてみる。

(A) 粒状—透明

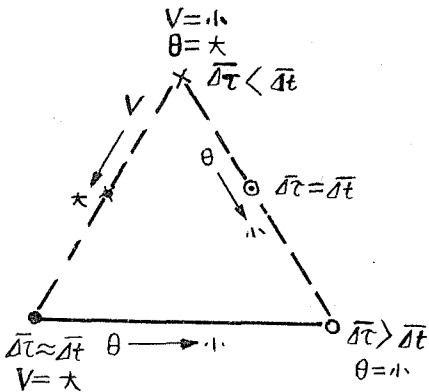
粒状構造から透明構造への、又はその逆過程の変化は、風速が小なる場合に主に気温の変化によつて起る。例えば気温が高くなるに従つて起る構造の変化は、(粒状) → (粒状+透明) → (透明) となる。これに相応する着氷は、霧氷 → 軟粗氷 → 雨水である。この場合の $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の相互関係の変化とは、粒状のとき $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ で雨水のとき $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ で

あるから、これは $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t} \rightarrow \overline{\Delta\tau} = \overline{\Delta t} \rightarrow \overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ となる筈である。ここで問題となる点は $\overline{\Delta\tau} = \overline{\Delta t}$ となるときの構造である。これは実際には軟粗氷となる。軟粗氷の構造は粒状(外部) + 透明(内部)の複合構造であり、粒状構造と構造以外の中間構造とはならない。これを凍結の機巧からみると次の如くなる。既に前にも述べた如く、同一の着氷物体面に於ても場所によつて雲粒の捕捉率がちがひ、成長の中心では捕捉率が大きく、外側では小さい。従つて $\overline{\Delta\tau}$ は成長の中心附近で小さく、外側では大きくなる。 $\overline{\Delta\tau}$ が場所によつてあまり変わらないとすると、中心附近では $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ で、外側では $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ になる確率が大きくなる。その平均的な値としては、 $\overline{\Delta\tau} = \overline{\Delta t}$ となると考えると、軟粗氷の複合構造の出来る機巧が説明される。即ち、成長の中心附近では $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ となり、成長面は常に水膜に覆われ乍ら凍結が進行し、透明な構造となる。一方外側では $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ となり、凍結の様式は雲粒の独立的凍結となり粒状構造となる。内部と外側との中間には $\overline{\Delta\tau} = \overline{\Delta t}$ なる場所もある筈である。軟粒氷を縦断してみると、透明構造の部分と粒状構造の部分との境界は大きな気泡の列となつてゐるが、この部分が大体 $\overline{\Delta\tau} = \overline{\Delta t}$ に近い条件にあるものと思われる。しかしこの部分は全体に較べるとごく小さく、両構造の境界をなすに過ぎない。従つて粒状→透明の構造変化は $\overline{\Delta\tau} = \overline{\Delta t}$ を境にして不連続に起こるものとみることが出来る。

捕捉率、風速及び雲水量のちがひによつて、粒状→透明えの変化が起きるが、これは $\overline{\Delta\tau}$ と $\overline{\Delta t}$ との相互関係の変化が $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t} \rightarrow \overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ になつたとして理解することが出来る。

(B) 粒状—気泡

この変化は気温の低い場合に、風速の変化によつて起こる。風速が大きくなる場合の構造の変化は、粒状→気泡の如くなる。この場合の $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の変化は、夫々の値が共に小となり、相互関係は $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t} \rightarrow \overline{\Delta\tau} \approx \overline{\Delta t}$ となる。粒状→気泡の境は風速えの方からみると 20~30m/s. のところにあり、構造の変化は不連続である。そしてこの境附近以上の風速では $\overline{\Delta\tau} \approx \overline{\Delta t}$ となる。これ等のことは凍結の機巧からみて、次の如く解釈することが出来る。即ち、 $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ 換言すると $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ なる雲粒の独立的凍結が大部分を占めている間は、風速が増加してもその影響は成長の fluctuation を小さくし、着氷を構成する氷粒の結合を強くするが、構造の変化は起らない。この状態が粗霧氷→密霧氷の連続的移行である。しかし $\overline{\Delta\tau} \approx \overline{\Delta t}$ になり、個々の雲粒の凍結が $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ となるような部分が多くなると、凍結は半独立的な凍結となり、構造は気泡構造となる。粒状→気泡の構造の変化は、高速度粒子による $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ の凍結様式即ち水膜凍結を含むこと



第 5 圖

によるものとみることが出来る。

(C) 気泡——透明

この構造の変化は高速度雲粒の衝突による着氷に於て、気温が変化する場合に起こる。着氷の変化は粗氷→雨氷である。この場合の $\overline{\Delta\tau}$ 及び $\overline{\Delta t}$ の相互関係の変化は、 $\overline{\Delta\tau} \approx \Delta t \rightarrow \overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ この構造の変化は気温の変化に従つて連続的に起こる。即ち、着氷の内部に封入される気泡は $\overline{\Delta\tau}$ の増大につれて連続的に変わり、着氷は半透明から透明へ連続的に変わる。従つて気温構造と透明構造の境界は明瞭でない。大体 $T_a = -4 \sim -6^\circ\text{C}$ が境となる。

以上 (A)、(B) 及び (C) の構造の変化を図示すると第5図の如くなる。図中実線で示したのは、構造の変化が連続的に起こることを示し、破線で示したのが不連続に起こることを示す。

摘 要

本報告では着氷の構造が着氷の条件によつてきまってくることに著目し、まず着氷の構造が条件によつてどのように変化するかを多数の実例によつて説明した。次に雲粒の物体に衝突することについて実験的にしらべた。以上のことから、着氷の構造は成長の凍結機巧によつて特徴付けられるものとみて、凍結時間 $\overline{\Delta\tau}$ 及び衝突時間 $\overline{\Delta t}$ を導入し、これを実験的に求めてその相互関係を調べた。その結果、着氷の構造は $\overline{\Delta\tau}$ と $\overline{\Delta t}$ の相互関係によつて説明出来ることを述べた。即ち、着氷の構造は $\overline{\Delta\tau} > \overline{\Delta t}$ 、 $\overline{\Delta\tau} = \overline{\Delta t}$ 、 $\overline{\Delta\tau} < \overline{\Delta t}$ によつて透明、気泡、粒状の構造に分類される。

最後に着氷の巨視的性質と $\overline{\Delta t}$ との相互関係につき考察した。

着氷の物理的研究總括

本研究では着氷の物理的性質と着氷の条件との関係を明かにして、着氷の凍結の機巧につき説明した。第一に、着氷の微視的構造に著目して、着氷の一般分類を行い、着氷の条件によつて特徴付けられる着氷の型をきめた。第二に、着氷の氣象条件を多数の例について測定し、着氷と氣象条件との関係を統計的に明かにした。第三に、着氷の密度を新しい方法で測定し、着氷の構造と密度との関係について考察した。第四に、着氷の寸法効果を実測し、理論から期待される結果と比較した。最後に以上の着氷の巨視的な性質に関する結果と、微視的な構造の特徴から、着氷の構造は成長の時の凍結の機巧によつて支配されることを実験的に結論した。即ち着氷の構造、ひいては着氷の巨視的性質は、凍結時間 $\overline{\Delta\tau}$ と衝突時間 $\overline{\Delta t}$ との相互関係によつてきまってくる事につき考察した。

本研究遂行に當つて直接指導を賜つた中谷宇吉郎教授に対し厚く感謝の意を表わす次第である。又測定の資料を載いた高野玉吉及び黒岩大助の兩氏に対しても深く感謝する次第である。

文 献

- 1) 高野玉吉 1950 風洞による着氷の研究, 低温科学, 6, 1.
- 2) 3) Bleeker, W. 1932 Einige Bemerkungen Über Eisanzatz an Flugzeugen. Met. Zeit. 49, 349.
- 4) Stickley, A. R. 1938 Some Remarks on the Physical Aspects of the Aircraft Icing Problem. Jour. Aeron. Soc. 5, 442.
- 5) Shumann, T. E. W. 1938 The Theory of Hailstone Formation. Quart. Jour. Roy. Soc. London, 64, 11.
- 6) 大田正次 1942 着氷の熱學的考察, 中央氣象台彙報 第20册 (昭和17年), 76.
- 7) Eason, A. B. 1930, Flow and Measurement of Air and Gases p. 185.
- 8) 大賀眞二 1942 傳熱諸論と其應用, (岩波刊) 231頁

R é s u m é

In this paper the author discusses the freezing mechanism of icing according to the correspondency between the microscopic character and condition of icing, and then come to the conclusion that the character of ice formation is settled by the corelation between the colliding time (Δt) and freezing time ($\overline{\Delta \tau}$) of supercooled droplets. Applied the theoretical results by Stickley and Ota, the author introduced the equations of $\overline{\Delta t}$ and $\overline{\nabla \tau}$, and calculated the numerical values of them from the measurements of icing conditions. When $\overline{\Delta \tau}$ is smaller than Δt , ice grows in granular ice structure (rime type), $\overline{\Delta \tau}$ is larger than Δt in transparent ice structure (glaze type), both is nearly same in semitransparent ice structure (clear ice type) or in complex structure consisted of granular and transparent ice structure (soft clear ice type). The semitransparent ice structure owing to the small air bubbles enclosed in appears only in the condition that wind velocity is larger than as 20 to 30 meters per sec., or that $\overline{\Delta \tau}$ and Δt are both smaller than 0.2 sec.