



Title	着氷の物理的研究 III. : 着氷の密度に就いて
Author(s)	小口, 八郎; OGUCHI, Hachiro
Citation	低温科学, 6, 117-123
Issue Date	1951-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17488
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_p117-123.pdf



着氷の密度に就いて* (着氷の物理的研究、Ⅲ、)

小 口 八 郎

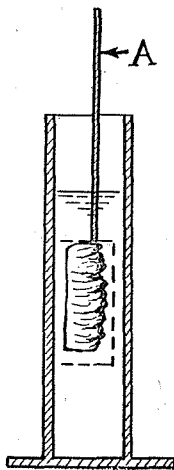
(北海道大学理学部物理学教室)

(昭和23年11月受理)

I. 着氷の密度の測定法

着氷の密度は着氷の硬度及び附着力と共に、着氷の物理的性質を表わす上に大切な量である。従来行われて来た着氷の密度の測定法は、着氷から一定の体積を切り取つて、その体積と重量から密度を求めるか、着氷の断面積と長さから着氷の体積を求め、その重量を測つて密度を求める方法である。⁽¹⁾ 原理的には至つて簡単であるが、こういう方法で実際の着氷の密度を正確に出すことはかなりむづかしい。そのむづかしさは結局氷の体積の求め方にある。特に霧氷の如く粗い粒状構造をなしていて、形が崩れ易い着氷に於ては、体積を正確に測定することはかなり厄介である。

筆者は着氷の本来の形を変えないでその着氷の体積を正確に求める方法を試みてみた。こ



第1圖

の方法は、水に不溶性で且つ低温度でも凍らない液体の中に任意の形の着氷を入れて、その液体の体積の変化又は着氷の重量の変化から着氷の体積を求める方法である。この方法にも実際上色々便利な方法が考えられるが、ここでは簡単な操作で出来る二つの方法について述べる。

1) 液面測定法

この方法は一定容積を占むる液体の中に着氷を入れて、その時の液面の变化から着氷の体積を求める方法である。体積測定用の容器には、第1図に示す如く、目盛の付いている硝子製のシリンダーを用いた。着氷の体積の測り方は次の如くする。まず シリンダーに適量の液体を入れて、その時の液面の高さを読んでおく。次に、密度を求めようとする着氷を液体の中に入れる。着氷が液面上に浮く場合は押し入れ液中に止める。すると着氷の占むる体積だけ増し液面が上昇するからこの時の液面の高さを読む。次に着氷を液体の中から取出してその時の液面の降下を読む。この三つの液面の変化か

* 北海道大学低温科学研究所業績 第115號

ら、問題とする着氷の体積を求めることが出来る。最後の液面の高さや着氷を入れない最初の液面の高さは、一般にちがってくるが、これは着氷の構造によるものである。なお着氷を入れたり上げたりするために、第1図に示す如き網目のついた細い棒Aを作つて用いた。

最初に液体だけによつて占められる体積を V_0 、着氷を入れた時液体と着氷とによつて占められる体積を V_1 、更に着氷を液体から引上げた後液体だけによつて占められる体積を V_2 とする。一般に $V_1 \geq V_2$ となる。一方着氷の体積を v とすると、 v は外界から境された氷の部分の占むる体積（水中に封入された気泡を含む） v_0 と、外界に連絡している着氷内部の空隙 Δv との二つの部分から成つている。従つて、

$$v = v_0 + \Delta v$$

$$v_0 = V_1 - V_0$$

$$\Delta v = V_0 - V_2$$

故に、

$$v = V_1 - V_2$$

着氷の体積として従来採り上げられて来た量は v だけである。着氷の重量を m とすると、求むる密度 ρ は、

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{V_1 - V_2}$$

$$\rho_0 = \frac{m}{v_0} = \frac{m}{V_1 - V_0}$$

m 、 V_0 、 V_1 及び V_2 を測つて ρ 及び ρ_0 を求むることがこの方法の主眼である。この場合 ρ は着氷の全空隙を含めた時の密度で、 ρ_0 は外界から遮断された氷の部分の密度である。霧氷はその構造が粒状構造をなしているので、外界と連絡した空隙が多く、液に浸けるとその空隙内に液が侵入し、液中から引上げた後も液は空隙内に残る。故に一般的には $V_0 \geq V_2$ で $\rho_0 \geq \rho$ となる。いま気泡を含まない氷の密度を ρ_i とすると、着氷内に封入されている気泡の重量は着氷の重量に較べて無視出来るから、

$$\beta = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_i}$$

なる β は着氷の内部に封入された気泡の含有の割合を表わすことになる。一方空隙の割合は

$$\delta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}$$

で表わされる。両者は、 $\beta \geq 0$ 、 $\delta \geq 0$ なることが予想される。

着氷の重量 m は上皿天秤で測つた。測定の精度としては重量の方は上皿天秤の精度で充分である。

以上の方法で着氷の密度を求める場合に、むつかしいところはやはり着氷の体積を正確に測ることである。シリンダーが太過ぎると着氷を投入した前後の液面の変わり方が少く、測定の誤差は大きくなる。ここでは直径約 2.5cm の 100cc の目盛りが入つているメスシリンダーを用いた。液体の中に投入する着氷量は、液面の変化をなるべく大きくするために、

$V_1 - V_2$ が大体 20~30cc くらいになるようにした。このくらいの体積の変化があれば液面の測定の誤差はかなり小さくすることが出来る。

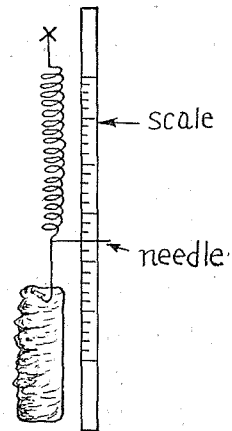
次に測定に用いる液体であるが、測定に必要な条件は、水に対して不溶性で且つ低温度でも凍らないことが必要である。石油、四塩化炭素及び二硫化炭素が手元にあつたので、この3種の液体について試みた。そのうちで四塩化炭素は取扱いが一番便利であつたので、主にこの液体を用いた。液の性質として上に述べた必要条件の外にも一つ大切なことは、着氷を液中に浸したとき液が着氷の空隙内によく浸けてゆき、液から引き上げた後まで空隙内に残留することである。しかし引き上げの際液が空隙内に残る以上に、着氷の表面に多量の液が附着して来ては困るのである。そこで空隙内に液を侵入させた後に、着氷を液から引上げて液が空隙内に残留しているかどうかを調べた。粒状構造をもつ霧氷を着色した四塩化炭素の液中に浸し、後これを引上げて着氷の内部を顕微鏡で観察してみると、粒状組織の内部にまで着色液が浸み込んで残つていることが分つた。石油の場合にも同様であつた。

次に着氷の表面に液が附着してくる点であるが、この附着量が実際にどのくらいになるかということをはかめる方法は一寸ない。それで大体の目安をつけるために、透明な氷を用いて液が表面に附着する量を調べてみた。その結果によると、氷の表面に附着する液の量は液全体の量又は氷の量に較べて問題にならぬくらいに小さいことが分つた。従つて実際の着氷の場合にも表面に附着する液の量は無視しても差支えないであろう。

いままでは着氷の内部にまでつづいた空隙を暗黙の裡に着氷の体積の1部分であるとみなして来た。どの程度の空隙までを着氷の体積の部分と見るかということは、実際上はかなり問題となる点である。ここでは一度液に浸してから引き上げた時、なお液が残留しているような空隙は着氷内部のもので、着氷の体積の1部分 (Δv) であると見なした。

2) スプリング法

この方法は着氷の体積を直接測つて密度を求める 1) の方法とはちがつて、着氷の初めの重量と、液の中に入れたときの重量及び液から引き上げたときの空隙に液を含んだ着氷の重量の三つの量から、その着氷の密度を求める方法である。ゆえにこの方法の目的に合う液体は氷より比重が小さいことが必要である。ここでは石油を用いた。着氷の重量を測るには第2図に示す如き感度のよいスプリングを使用した。重量の測り方は、まず密度を求めようとする着氷をスプリングに釣り下げる。このときの重量を m_0 とする。次に液の入つた容器を手で持ち上げて、スプリングに釣り下げられている着氷を液の中に浸す。この時の着氷の重量 (液の浮力の働いている時) を m_1 とする。即ち m_1 は石油の中で測つた着氷の目方である。更に容器を徐々に下げて氷と液とはなす。この時の重量を m_2 とする。 m_2 は空隙に油を含んだ着氷の目方とな



第2圖

る。 m_0 , m_1 及び m_2 から、この着氷の密度が求められる。

1) に述べた場合と同じく、外界と連絡のある空隙を含めた着氷の体積を v 、空隙全体の占むる体積を Δv 、液の入り込まない部分即ち外界と境されている着氷の占むる体積を v_0 とする。石油の密度を ρ_1^* とすると。

$$m_0 = \rho v = \rho_0 v_0 = \rho_0 (v - \Delta v)$$

$$m_1 = m_0 - v_0 \rho_1 = m_0 - (v - \Delta v) \rho_1$$

$$m_2 = m_0 + \Delta v \rho_1$$

故に
$$v = \frac{m_2 - m_1}{\rho_1}$$

従つて、

$$\rho = \frac{m_0}{v} = \frac{m_0}{m_2 - m_1} \rho_1, \quad \rho_0 = \frac{m_0}{v_0} = \frac{m_0}{m_0 - m_1} \rho_1$$

上式によつて ρ 及び ρ_0 を求めるには、 m_0 , m_1 及び m_2 を相対的に測ればよい。実際にはスプリングに指針をつけておいて、重量の変化による指針の読みちがいを、スプリングの横に固定した目盛によつて測り、 m_0 , m_1 及び m_2 の相対的値を求めた。

ここで 1) 及び 2) の測定法を比較してみる。1) の方法は液面の変化を測るので測定の見みの誤差はどうしても大きくなり、同じ着氷について ρ を入念に測定してみても、兩者のちがいは約 10% になる。即ち 1) の測定法では測定の見みの誤差を 10% 以下にすることはむづかしい。2) の方法は 1) に較べると見みの誤差は少い。同じ着氷についてくり返し測定してみた結果を比較してみると、各々の ρ の差は約 5% である。従つて 2) の測定法は測定の見みの精度がかなり高いとみてよい。又実際の測定の見みの操作に於ても 2) の方がずつと測り易いので、2) の方が 1) に較べてよい方法である。1) 及び 2) の両方法で同一の着氷の密度 ρ を測つてみると、兩者のちがいは平均して 10% くらいになつた。しかしここでは 1) 及び 2) の測定結果は大體正しいものと見なして、これ等の結果につき二三考察してみる。

II. 着氷の構造と密度との關係

着氷の構造を微視的に調べてみると、樹霜の如き特殊な着氷を除いた一般の着氷には、霧氷の如く粒狀構造を有するものと、粗氷の如く氣泡構造をもつもの及び透明構造をなす雨水があることについては既に前報告に述べた。これ等の着氷の種類に特有の構造と最も關係が深いものは密度であろう。着氷の密度はその着氷の内部組織によつてきまるが、この粗密は着氷内に含まれている空氣の量によつて決まる。着氷の内部に含まれている空氣の含まれ方は、 ρ 及び ρ_0 を調べることによつてかなり明かにすることが出来る。

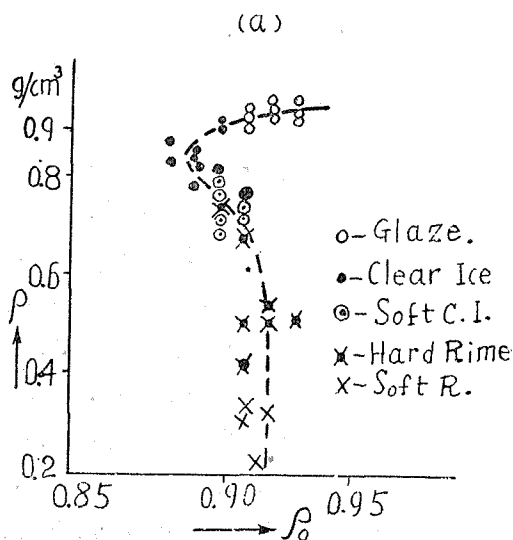
まず粒狀構造をもつ着氷について、着氷内部の空氣の含まれ方を調べてみる。霧氷は白色

* $\rho_1 = 0.8 \text{g/cm}^3$

** 本書所載，“顯微鏡的構造による着氷の分類” 参照。

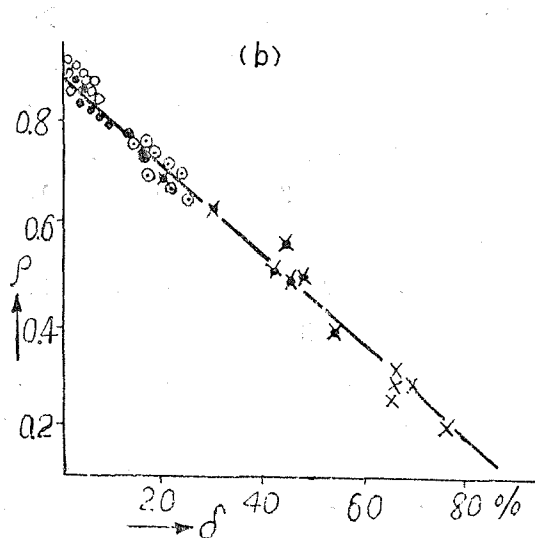
不透明で、その内部構造は小さい氷粒の集合から成つて居る。従つて着氷の内部にまで多量の空気が入つているものとみられる。そこで霧氷についての ρ 、即ち外界と連絡している空隙を含めた着氷についての密度をみると、 $\rho=0.2\sim0.6\text{g/cm}^3$ となつた。一方外界と連絡のない氷部分（氷粒）についての密度 $\rho_0=0.91\sim0.93\text{g/cm}^3$ となつた。 ρ_0 の方は ρ の値とは殆んど無關係に純水の氷の密度 0.92g/cm^3 に近い値を示した。このことからみると、霧氷の内部の含まれている空気は、その大部分が外部の空気と連絡した空隙によつて占められたものであり、氷粒の内部に封じ込められたものではないと決論することが出来る。

次に粒状構造と透明構造とを併せ有する軟粗氷について、 ρ 及び ρ_0 を調べてみると、 ρ の



方は $0.6\sim0.8\text{g/cm}^3$ で ρ_0 は $0.90\sim0.92\text{g/cm}^3$ となつた。軟粗氷は内部に透明な氷の部分をもつるので、霧氷に較べると ρ の値が大きくなつて居る。しかし ρ_0 については殆んどちがわぬ。

風速が非常に大きい場合に成長した粗氷の密度は、 ρ の方は $0.8\sim0.9\text{g/cm}^3$ で ρ_0 の方は $0.88\sim0.90\text{g/cm}^3$ であつた。即ち粗氷の ρ と ρ_0 とは大体等しい値を示した。このことは、粗氷内部に含まれた空気は主に氷の内部に封入された気泡によるもので、外部と連絡ある空隙によるものではないことを示している。粗氷の内部を顕微鏡でみると、多数の気泡が封じ込められて居ることが分る。一方粗氷を液に浸した後引き上げて内部を観察してみると、粗氷の内部には液が浸入していない。これ等の点からみて、粗氷内部の気泡は外界から遮断されていることが分る。又粗氷内部に含まれている気泡の量は、 ρ_0 と氷の密度 ρ_i とを比較してみれば分る。



透明な構造をもつ雨水の密度は、 ρ 、 ρ_0 共に $0.91\sim0.93\text{g/cm}^3$ となつた。雨水は透明な氷であるから、純水の氷と

第 3 圖

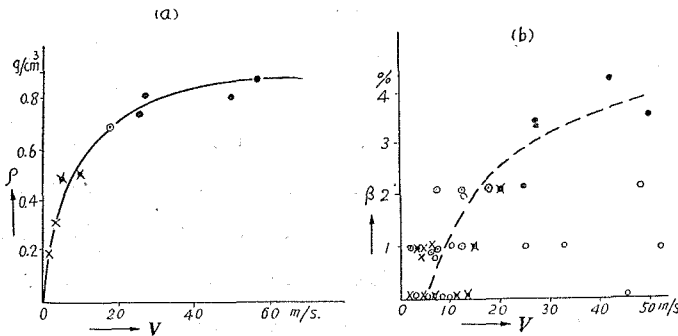
大体等しくなることは当然である。

霧氷、軟粗氷、粗氷及び雨水の各型の着氷について、その ρ と ρ_0 との関係を図 3 (a) に示す。又空隙の割合 δ と ρ との関係を図 3 (b) に示す。図 3 (a) から粗氷が一番多く気泡を封入していることが分り、図 3 (b) から ρ は空隙率 δ によつてきまり、 δ が小さい程 ρ は直線的に大きくなることが分る。

III. 風速と密度との関係

着氷の構造と密度とは密接に結び付いていることは前節で明かである。そして着氷の構造は着氷の成長する時の条件、殊に風速及び気温によつて決定される。それで次にこれ等着氷の成長を支配する風速及び気温と密度との関係を調べておく。

まず風速 V (m/s.) と ρ との関係をみる。気温の影響を除くために、気温が大体同じ時即ち $-5 \sim -6^\circ\text{C}$ の気温で成長した着氷につき、 ρ と V との関係をみてみた。図 4 (A) に示



第 4 圖

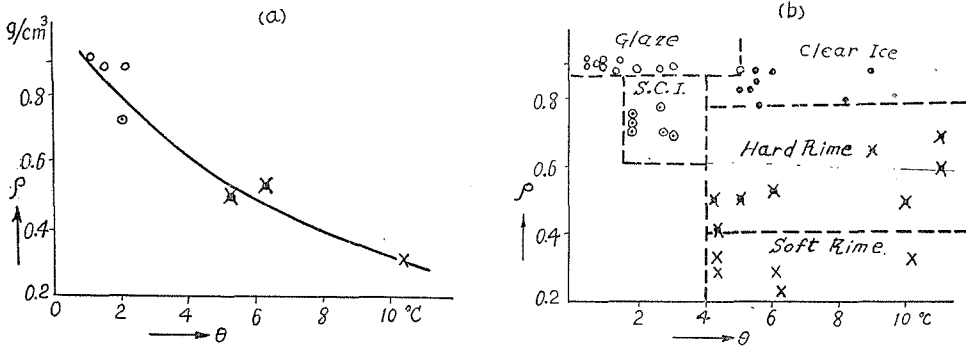
す。図 4 (A) の結果からみると、 V の増大につれて ρ は急激に増す。そして V が $20 \sim 30 \text{ m/s.}$ くらい以上になると ρ の増加は小となり、 ρ の最大値に漸時近づく、この変化を構造上からみると、

V が $0 \sim 5 \text{ m/s.}$ では着氷は粗霧氷で ρ は極めて小さい。 $V = 5 \sim 20 \text{ m/s.}$ では着氷は密霧氷又は軟粗氷となる。 $V > 20 \text{ m/s.}$ では着氷は粗氷となり ρ の値は大体一定となる。 V が非常に大きくなると着氷は透明になり雨水に近くなる。このような条件で成長する着氷の ρ は最大値に近いことは勿論である。図 4 (A) の例は気温が $-5 \sim -6^\circ\text{C}$ の時の 1 例である。気温がちがえば、その気温に応じて着氷の構造及び密度はちがつた変化をする。しかし風速の ρ に対するきま方は図 4 (A) に示す如き関係で示されるものとみてよい。

前掲図 3 の ρ と ρ_0 との関係から、粗氷が一番多く気泡を含むことが分る。このことは気温が餘り高くないときには、風速が大きい程気泡が多く封入されることを示す。図 4 (B) に気泡含有率 β と V との関係を示す。図 4 (B) には色々な気温の場合の例を示したので、点はかなりばらついているが、気温が -10°C 以下の場合の着氷については、大体破線で示した如くなる。 β の最大値は大体 5% くらいになることが、図 4 (B) から分る。以上のことから、着氷に及ぼす風速の影響は、霧氷領域では組織を密にするように、低温領域では気泡を増すように作用すると云うことが出来る。

IV. 気温と密度との関係

気温は風速と共に着氷を決定する大切な条件である。気温と密度との関係を見るために、風速が殆んど等しく気温だけがちがっているときに成長した着氷の例について、気温と ρ と



第 5 圖

の関係を調べた。第5図(A)に示す。この例は $V=5\sim 6m/s.$ の条件下に成長した例である。なお第5図(A)では気温 T_n の代わりに、 $\theta = T_0 - T_n$ ($T_0 = 0^\circ C$) なる θ と ρ との関係を示した。気温が高い程密度は大きくなる。しかし気温のきき方は風速に較べると急激ではない。第6図(A)の例は V が小さいときの例であるが、 V が非常に大きい時には、 V の影響が著しくなり、気温だけによる影響は分り難くなる。

θ と ρ との関係を風速を無視して描いてみると、第5図(B)の如くなる。第5図(B)から、各種の型の着氷はどのような温度の範囲内で成長するかが分る。

この測定は元吉良治及び鈴木秀次の兩理学士から多大の御援助を受けた。記して深く感謝する次第である。

文 献

- 1) Pagliuca, S. 1944 Icing Measurement of Mt. Washigton. J. A. S. 4, No.2, 10.

R é s u m é

This paper discusses experimental methods for the measurement of density of rime deposition and their possible explanation to the connection between the macroscopic feature and microscopic character of ice formation. The author adopted new methods for the measurement of the density of rime and obtained some interesting results: the greater part of the air content in rime consists of the air which is connected with open side, and the one of it in clear ice or glaze consists of the air bubbles inclosed in. The latter is negligible small compared with the former.