



Title	着氷の物理的研究 Ⅰ. : 顕微鏡的構造による着氷の分類
Author(s)	小口, 八郎; OGUCHI, Hachiro
Citation	低温科学, 6, 95-101
Issue Date	1951-03-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17486">https://hdl.handle.net/2115/17486</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_p95-101.pdf



## 顯微鏡的構造による着氷の分類\* (着氷の物理的研究 I、)

小 口 八 郎

(北海道大学理学部物理学教室)

(昭和25年11月受理)

### I. 着 氷 の 分 類

冬期間に高山等で出来る着氷を少し注意深く観察してみると、着氷の外観、硬さ及びその他のいろいろな物理的性質は、それ等の着氷が出来た時の氣象條件と密接に結びついていることが容易に分る。氣象條件のちがいによつていろいろな出来る着氷を、その外観、成因及びその他の物理的性質によつて幾つかの型に分類しておけば便利である。このような分類のし方は古くからあり、英国の Seligman<sup>(1)</sup> の分類及び独国の Wegener<sup>(2)</sup> の分類等はその代表的なものである。我が国では中央氣象台で決めた分類法<sup>(3)</sup>がある。この方は諸外国のよい所も採り入れてあり、この種の分類法では一番よい。

上に挙げたような分類法は、着氷の凍結の機巧をも幾分考慮に入れて作つたものであるが、主に着氷の外観、透明度、附着力及び硬度等のいわば着氷の巨視的な性質によつたものである。筆者は着氷の研究に従事してからしばらくの間、中央氣象台の分類法を利用したが、この分類法は着氷の巨視的な性質を問題とする場合には、かなり有益であることが分つた。しかし着氷の機巧を問題とする場合には、着氷を微視的にしらべてみる必要がある。着氷の巨視的な性質をしらべるのと併行して、着氷の出来る機巧をはつきりさせる目的で、着氷の出来る毎に着氷の構造を顯微鏡で調べてみた結果、着氷の顯微鏡的構造は、着氷の外観及び他の巨視的性質にも密接に結び付いていることが分つた。それで筆者は顯微鏡的構造によつて着氷の種類を分類することを試みた。筆者の分類法によると、着氷の凍結の機巧を説明する上に便利である。なおこの分類法の概略に就いては既に報告したところであるが、ここでは前報告を補足して、着氷の諸問題を説明する上の便に供する。

### II. 着氷の種類と氣象條件

着氷を顯微鏡的構造の特徴によつて分類すると、次の8種類の型に分けておくのが適當

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第113號

である。この8種類の着氷について、以下にそれ等の特徴及び氣象條件を述べる。

### 1) 樹霜 (Air Hoar)

着氷の顯微鏡的構造が結晶形をなすものを樹霜と名付けた。この樹霜と言う名称は古くからあり、水蒸氣の昇華凝固によつて出来るものとされている。花島博士は人工雪の研究で、雪の結晶は極微小の過冷却水滴によつても成長することを確めている。それで着氷の場合にも、微小過冷却水滴によつて樹霜が発生する場合もあるものと思われる。

樹霜の結晶形は氣象條件のちがいにより針狀、六角柱狀、コップ狀、樹枝狀及び扇形等いろいろの形に発達する。このような樹霜がどんな場合に出来るかということ調べてみたところ、過冷却水滴によつて普通の着氷が物体の面上に発達している場合に、その物体の風に当らない面に出来た場合が多かつた。従来樹霜といへば、霧のない場合に、水蒸氣の昇華凝縮によつて出来る着氷だけを指しているが、実際には霧がある場合でも樹霜の発生するのを度々認めた。

雲粒が全くない時にも勿論樹霜は発生する。この種の樹霜は弱い風に面した物体の面上に発達する。所謂 wind-orientated air hoar である。樹霜には多数の小さい氷粒が附着しているが、これ等の氷粒をよく見ると、幾分か結晶形をなしている如く見えるから、或いは初期の結晶であるかも知れない。しかし普通の霜でも結晶形をなさないものがあり、Assmann<sup>(4)</sup>によると、結晶形をなさない霜は水蒸氣が物体の面で一たん水滴となつてからその後で凍つて出来たものである。樹霜の場合にもこのような凍結は充分あり得る。

樹霜は静かな空気にだけ発生するとは限らない。例えば高速人工風洞内で物体に着氷させた場合に、針狀結晶が出来たことがある。大氣流速約 60m/sec. の風洞内で、模型翼の後縁に発生したものである。この樹霜が出来た時には小さい雲粒が存在していたが、雲粒による翼前縁の着氷は殆んどなく、却つて後縁に樹霜が発生した。針狀結晶のつけ根に近い部分に氷粒の附着しているのが認められたが、この氷粒は雲粒がついてそのまま凍結したものではない。この時の雲粒の大きさはこれ等の氷粒の約 $\frac{1}{2}$ くらいのものであつた。

樹霜が発生した時の氣象條件を統計的にしらべてみると、結晶形は雲粒のあるなしに拘らず、樹霜が発生する時の氣温によつてほぼ決つてくることが分つた。即ち、樹枝狀結晶は $-13^{\circ}\text{C}$  乃至 $-18^{\circ}\text{C}$ 、扇形が $-10^{\circ}\text{C}$  乃至 $-12^{\circ}\text{C}$ 、柱狀及びコップ狀が $-7^{\circ}\text{C}$  前後で針狀が $-5^{\circ}\text{C}$  前後の氣温濕の時に発生した。樹霜の結晶形の成長する氣温條件は雪の結晶の成長の場合と大体似ているものと言へる。

### 2) 樹氷 (Fog Deposit)

雲粒と雪片が混つて大氣中に存在している場合には、物体の面上に雪片と雲粒が混合して附着して着氷を成長させる。この場合に、雪片の附着する量が雲粒の附着量に較べて問題にならぬくらいに少なければ、雪片が附着したかどうか分からない。樹氷と名付けるものは、相当たくさん雪片が雲粒と共に附着凍結して出来た着氷である。風が強いと雪片は物体に

衝突してち切れて飛散する場合も多く、雪だけで雲粒が全然ない時には着氷は全然成長しないから、樹氷が出来るのは、雪片と雲粒が共存して居り、且つ風が比較的弱い場合である。樹氷は一般に物体を円く軟かく包むように成長する。冬期に高山の樹木等に着氷して、Monster\*と呼ばれているのがこれである。

樹氷が成長しつつあるところを水平顯微鏡で観察してみると、雪片は着氷の先端に附着するが、間もなく後から雲粒が衝突附着して凍結し雪片を固着させることが分る。着氷の外側からではこの雪片は一寸見えないが、着氷を毀してみると、その内部に小さい氷粒の附着した雪片が現われる。着氷の内部に固着させられたこれ等の雪片は、時間の経過と共に変化して、漸時結晶形が失われ最後は粒状だけの構造になる。樹氷内部の雪片の結晶形が失われて行く現象は、降雪後の積雪層内部の雪片の結晶が粒状に変化してゆく場合と同じ過程をとるものと思われる。

樹氷型の成長する条件は、気温が $-5^{\circ}\text{C}$ 以上で湿雪が降つているとき雲粒が共存し、風速が $5\text{m/sec.}$ 以下である。実際には氣象条件が時間的に変わり易いので、樹氷はすぐ霧氷に変る場合も多い。樹氷の比重は $0.2\sim 0.3$ で小さい。

### 3) 粗霧氷 (Soft Rime)

過冷却水滴が物体に衝突して出来る着氷のうちで、その顯微鏡的構造が氷粒の結合から成つているものを霧氷と名付ける。従つて霧氷の特徴は粒状構造をなしていることである。樹霜の如き結晶形をなさず、又樹氷の如く内部に雪片を混入することもない。

過冷却水滴が物体の面上に附着する方向は風向によつてきまる。即ち、着氷は風に向いた物体の面上に、風に向つて成長する。風が弱いときには、着氷は氷粒の軟かい結合となつて成長するが、風が強いときには、雲粒は物体面に強く衝突する結果、氷粒の結合は密に且つ固くなる。氷粒の結合構造をもつ霧氷でも、このように風速の大小によつて着氷の内部構造を異にする。着氷内部の組織が軟かいか固いかにより、氷の物理的性質もちがつてくるのでここでは霧氷を更に粗及び密霧氷の二種類に分けた。

粗霧氷の外観は羽毛状をなしていて白色不透明である。この着氷の内部結合は粗く弱いので、軽く叩く程度で容易に物体から脱落する。顯微鏡でみると、着氷の先端は連珠状をなして居り、小さい氷粒が結合して出来た構造を示す。写真1に示す。着氷の内部は氷粒の凍結結合による粒状構造をなして居る。結合力は小さい。

粗霧氷が出来る条件は、雲粒があり、風速が $5\text{m/sec.}$ 以下で、気温は大體 $-4^{\circ}\text{C}$ 以下である。比重は $0.2\sim 0.3$ で樹氷のそれとほぼ等しい。

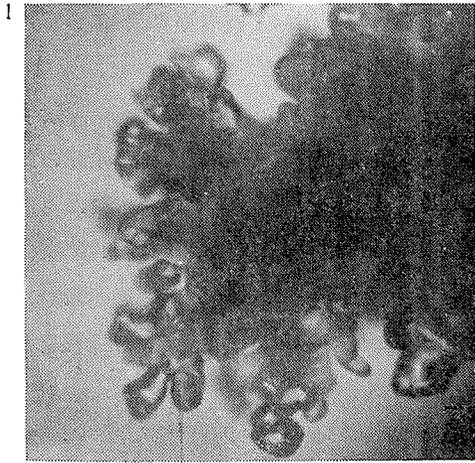
### 4) 密霧氷 (Hard Rime)

雲粒が存在していて風が強く吹いて居る場合には、雲粒は物体の面に強く衝突して氷粒の結合を密に且つ固くする。しかし風速が $20\text{m/sec.}$ 以上にもなると、着氷の構造が変わり、最

\* スイス地方では Anraum と呼んでいる。

顯微鏡的構造による着氷の分類

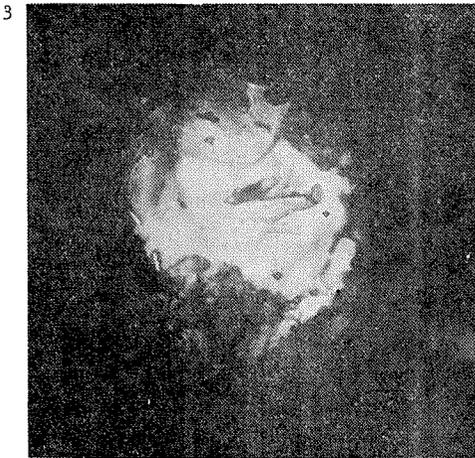
附 寫 眞 1—5



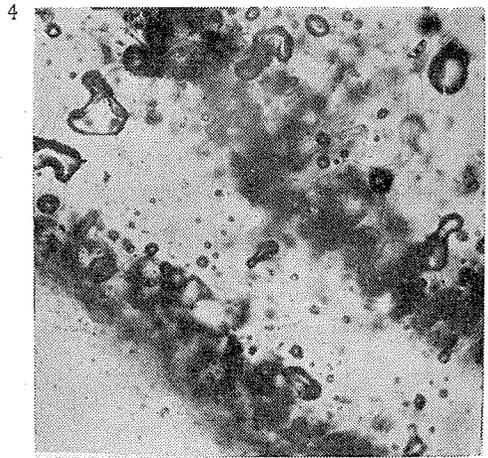
×100



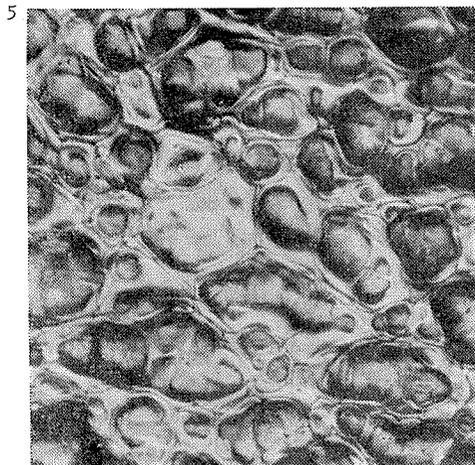
×100



×27



×40



×27

早粒状構造を示さなくなる。ここで密霧氷と名付けるものは、粗霧氷の出来る場合よりも風速は大きい、その構造は粒状構造をもつ着氷を指す。故に粗霧氷と密霧氷とでは構造上に本質的なちがいがあるわけではない。密霧氷では粒状構造が密に固くなつた結果、比重が増し、硬度及び附着力等が強大になつたものである。しかし粗霧氷と密霧氷とのちがいは、単に風速の影響によるものであるから、兩者の間に明瞭な区別をつけることはむずかしい。ここでは顯微鏡的な構造のちがいに著目して兩者を区別した。即ち着氷の先端が連珠状をなさず、盛玉状をなして居るものを密霧氷とした。

密霧氷の外観は尾鰭状又は円錐状をなし、色は白色不透明である。密霧氷の成長先端附近の構造を見た場合の顯微鏡写真を写真2に示す。着氷内部の粒子は着氷先端の水粒より大きい。

高山等で出来る自然着氷では霧氷が一番多い。自然風は始終風速や風向が変るので、実際に出来る着氷は粗密の混合した霧氷となつている場合が多い。

密霧氷の出来る条件は風速5~20m/sec.で、その他の条件は粗霧氷の場合と同じである。比重は大体0.4~0.6である。

#### 5) 軟粗氷 (Soft Clear Ice)

霧氷が出来る場合に較べて気温が高いか又は風速が大きい場合の、着氷の構造は、霧氷の構造とはちがつたものとなる。まず気温が高い場合の着氷について述べる。

気温が $-6^{\circ}\text{C}$ より高く、風速が20m/sec.以下のような条件の下で成長する着氷には、外観は霧氷に似ているが内部の構造がちがつているものが多い。即ち着氷の外側は霧氷の如く粒状構造をなし、その内部は透明な氷となつて居る着氷が成長する。このような着氷についてはこれまで問題にされて居らず、霧氷の一部として取扱われて来たが、着氷の凍結の機巧<sup>\*</sup>の上からみて他と区別することにした。軟粗氷と名付ける。それは、次に述べる風速の極めて大きい場合の着氷即ち粗氷に較べると、着氷の比重は餘り著しくはちがつていないが、氷の組織がずつと軟かいからである。

軟粗氷の外観は円錐状を示し、白色不透明で、外側は大形の粒状構造を示す。軟粗氷の内部の透明な氷の部分を書眞3に示す。写真3は着氷の成長方向に対して直角な面で切つてみた場合の、軟粗氷の横断面の模様である。中央に近い白い部分が透明な氷の部分で、黒い部分が粒状組織の部分である。この写真でも分るように、着氷の外側の粒状部分は、内部の透明な氷の部分とは明瞭に分れている。このように、軟粗氷の外部と内部とで構造を異にするのは、物体面に沿うての雲粒の捕捉率がちがうことによるものと思われる。

軟粗氷の成長する条件は、気温 $-2\sim-6^{\circ}\text{C}$ 、風速20m/sec.以下である。勿論雲粒によつて出来る。比重は0.6~0.8である。

#### 6) 粗氷 (Clear Ice)

霧氷が出来る場合よりも風速の大きい場合の着氷は、粒状構造を示さず、一様に氣泡が混

\* 凍結の機巧については別報告参照。

入した乳白硝子状又は半透明の構造となる。このような気泡構造を示す着氷を従来の慣習に従つて粗氷と名付けた。この着氷は風に向いた物体の面に沿うて滑らかに成長し、組織は稠密で附着力は著しく大きい。

粗氷の内部の気泡構造を写真4に示した。4は着氷の成長方向に対して平行な面で切つてみた場合である。写真4は成長時の氣象條件がちがうと気泡の含まれた方がちがつてくることをはつきりと示している。

粗氷の出来る條件は、氣温  $-4^{\circ}\text{C}$  以下で風速が  $20\text{m/sec.}$  以上である。比重は  $0.8\sim 0.9$  で大きい。

#### 7) 雨 氷 (Glaze)

軟粗氷、粗氷の出来る場合よりも更に氣温が高くなると、着氷は透明な氷になる。これを雨水と名付ける。雨水でも氷の内部に気泡を含んでいる場合もあるが、粗氷の気泡に較べると非常に少ない。しかし、粗氷と雨水との差は霜氷と粗氷との差程にはつきりしてはいない。

風速が大きい時に出来る雨水は、物体面に沿うて滑らかに成長し、着氷面は平になることが多い。写真5に示したのは、風速  $30\sim 40\text{m/sec.}$  で氣温  $-1.0^{\circ}\text{C}$  で出来た雨水の成長面である。風速の大きい場合の雨水には、5に見る如き亀甲状模様が現われてくる。

雨水の出来る条件は氣温  $-4^{\circ}\text{C}$  以上である。比重は  $0.9$  前後で普通の氷の比重にほぼ等しい。

#### 8) 霰 氷 (Soft Glaze)

雨水が出来る条件よりも更に氣温が高くなり  $0^{\circ}\text{C}$  近くになると、雲粒が物体面に衝突した後も大部分は液体となつて残り、わずかの部分が氷結して着氷はゆつくり成長するようになる。もし風速が大きいと、凍結しない水の部分は物体面に沿うて流失し、氷の内部に液体として残ることはないが、風速が弱いと水の内部に、未だ凍結し切れない水の部分を残すことがある。この種の着氷を雨水と区別して霰氷とした。

物体に衝突した水滴が全部凍結しきれないで着氷が進行してゆく場合には、その凍結の速さはかなり遅いものと思われる。水を徐々に冷却してゆくと、凍結の際に氷の結晶の骨が出来るが、霰氷の出来る場合にも結晶性の氷の骨が出来る場合がある。高速人工風洞内で着氷させる場合、水滴が凍結しきれないで水が流れ乍ら着氷が成長してゆくときでも、着氷面に著しい突起が出来ることがる。この突起は結晶性の氷の骨が基になつて来たものである。

霰氷の出来る條件は氣温が  $-1.0^{\circ}\text{C}$  以上である。比重の測定は出来なかつたが恐らく氷と水の間であらう。

### III. 着氷の種類のご括

以上に述べたことを、最後に一括しておく。着氷の各型の成長する氣象條件及び各々の物理的性質を一括して第1表に示す。

第 1 表

着氷型	(氣温 $T_a$ °C)	風速(Vm/s.)	比重	附着力	構造	外觀
1 樹霜	不 定	不 定	—	極小	結晶	—
2 樹氷	$T_a > -5$	$V < 5$	0.2	小	粒狀	—
3 粗霧氷	$T_a < -4$	$V < 5$	0.2~0.6	小	粒狀	羽毛狀
4 密霧氷	$T_a < -4$	$5 < V < 20$	0.4~0.6	大	粒狀	尾鱗狀
5 軟粗氷	$-6 < T_a < -2$	$5 < V < 20$	0.6~0.8	中	粒透	圓錐狀
6 粗氷	$T_a < -6$	$V < 20$	0.8~0.9	極大	氣泡	不 定
7 雨氷	$T_a > -5$	不 定	0.9	大	透明	不 定
8. 霰氷	$T_a > -1$	$V < 5$	—	小	透明	不 定

以上の着氷の分類は、初め中谷教授によつて示唆され、後着氷の凍結機巧をも考慮に入れ出来上つたものである。

## 文 献

- 1) Seligman, G. 1936. Snow Structure and Ski Fields. Macmilan Ed. 46.
- 2) Wegener, A. 1928. Thermodynamik der Atmosphäre. Leipzig. Aufl. 292.
- 3) 中央气象台編, 1944. 霧氷観測法.
- 4) 中谷宇吉郎, 小口八郎, 1949. 電線の着氷防止に関する研究 第2報. 低温科學 2, 85.
- 5) 花島政人, 1944. 人工雪の生成過程—補遺. 気象集誌, 第2輯. 22, 121.
- 6) Assmann, R. 1889. Struktur des Reifs, Raureifs und Schnees. Met. Zeitt. 6, 339.

## R é s u m é

Preparatory to initiating an investigation with regard to the matter of ice formation, several works have been reported. The present papers deal with some of more important experimental results obtained on Mt. Nisekoannupri as revealed by the survey.

In this paper the author classified ice forms by the character of their microscopic structures including all types observed in natural and artificial icing. These types consist of eight types, namely, air hoar, fog deposit, soft and hard rime, soft clear ice, clear ice, glaze and soft glaze.

As the microscopic structure of ice form is characterized in compliance with icing condition, it seems that the classification is expressive of the mode of icing in one side, and not contrary to the macroscopic feature and physical property of ice in the other.