



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	プロペラの着氷
Author(s)	黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke
Citation	低温科学, 6, 11-22
Issue Date	1951-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17480
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_p11-22.pdf



プロペラの着氷*

黒岩大助

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和28年7月受理)

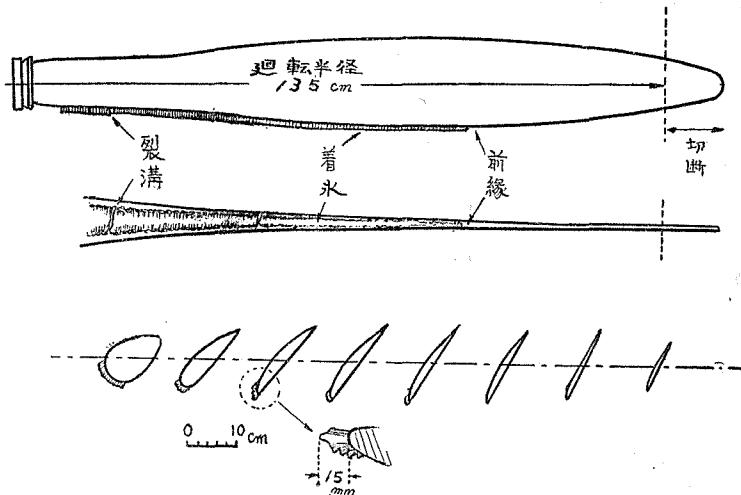
I. 緒言

北海道後志国虻田郡ニセコアンヌプリの山頂観測所で、昭和18年、19年の冬、実物の航空機プロペラの着氷実験を行つた。同時に模型プロペラによつても実験したがそれは別に報告を出した。⁽¹⁾ 実験に使つた実物プロペラは廻転直径約3mの三翼全金属製のプロペラで、電動機にとりつけ、山に霧がかゝつたときまわして着氷させた。電動機は100馬力でそのまゝではプロペラをまわすのには馬力がたりない。それでプロペラの翼の先端を切りとつて、廻転直径を2m70cmにし、また翼のピッチを零にして使つた。廻転数は毎分1800回である。

II. 観測結果

過冷却した霧がかゝつて来たとき、プロペラを数分間から十数分間まわし、それから廻転を止めて着氷を観察した。プロペラのピッチが殆んど零で空気流の方向が翼弦線の方とほとんど一致しているから、着氷はだいたい翼の前縁に沿つて成長する(もしピッチがついておれば着氷は前縁から内側の部分にもおこる。一文献1参照)。着氷はいつぱんに翼の根元からなかほどのところ

ろが厚く、なかほどから先ではうすい。そして第1図のように数カ所で不連続的に厚さが変化して段をなし、段のところには巾1.5~2mmの裂溝があつてプロペラの地肌がみえる(第2図参照)。段の高さ、その位置などはその時の氣象条件、着氷の性質、プロペラの



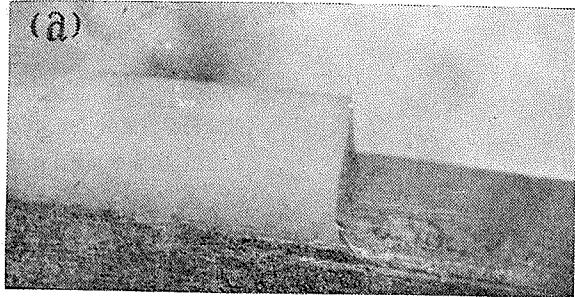
第1図 プロペラの着氷の概観

* 北海道大学低温科学研究所業績 第105号

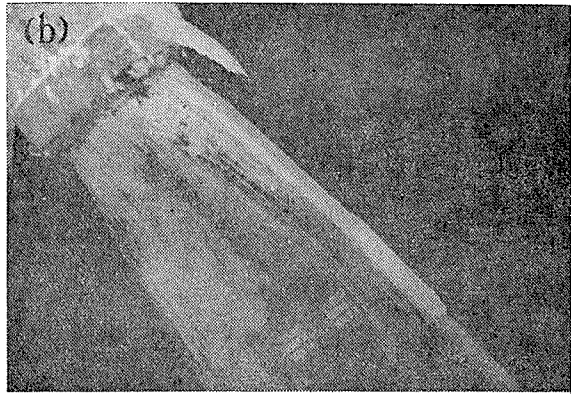
廻転時間などによつてちがうが、このような段が見られないことは稀であつた。

模型プロペラによる実験で、廻転中に遠心力のため着氷がプロペラから剥がれて飛び散ることをみた。実物のプロペラでは遠心力が非常に大きいので、ますます着氷が飛ばされる機会は多くなる筈である。うゑに述べたような着氷の段は、段から先の部分が遠心力によつて飛ばされたために出来たものと考えられる。

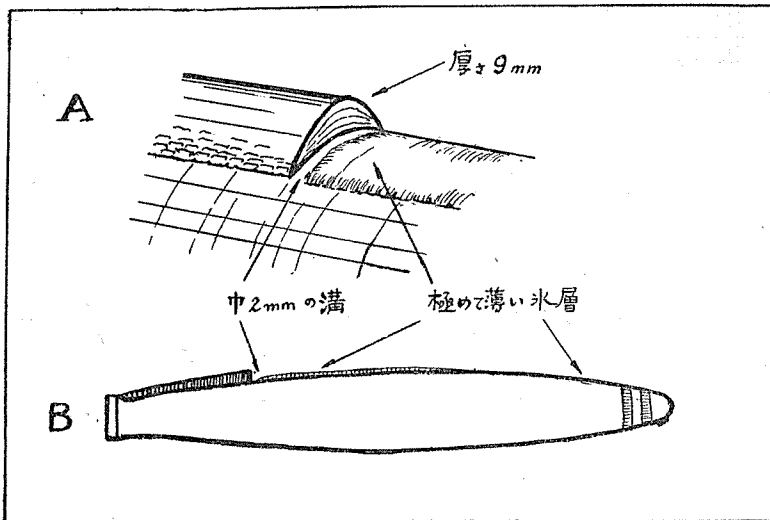
翼のなかほどのところの着氷の断面をしらべてみると、のちに述べるように氣象条件によつて異なるが、第1図のいちばん下の図に示してあるように、氣温が低いといつぱんに銚型で、氷質は岐点部が半透明の硬い氷で、左右兩側は魚の尾鳍状の形をした白色不透明な霧氷となつている(第4図参照)。着氷が不透明なのは過冷却霧が衝突して氷結し、推積してゆく際に空氣も同時に閉じこめてゆくからであつて、氣温が比較的高くなつて、氷結に長い時間がかゝると、青氷



第2圖 (a) 氣温 -10.6°C , 霧水量 $0.06\text{g}/\text{m}^3$,
霧粒直径 12μ 視程 50m



第2圖 (b) 氣温 -4°C , 霧水量 $0.3\text{g}/\text{m}^3$,
霧粒直径 18μ , 視程 40m



第3圖 氣象条件は第2圖(a)とおなじ

に變つてゆく。岐点部では水滴は慣性のため殆んど全部衝突するが、岐点部をはずれると氣流に乗つて流される数が多くなるから、密度の小さい白色不透明な霧氷に移行する。このようにプロペラの着氷のようすは、風洞で模型の

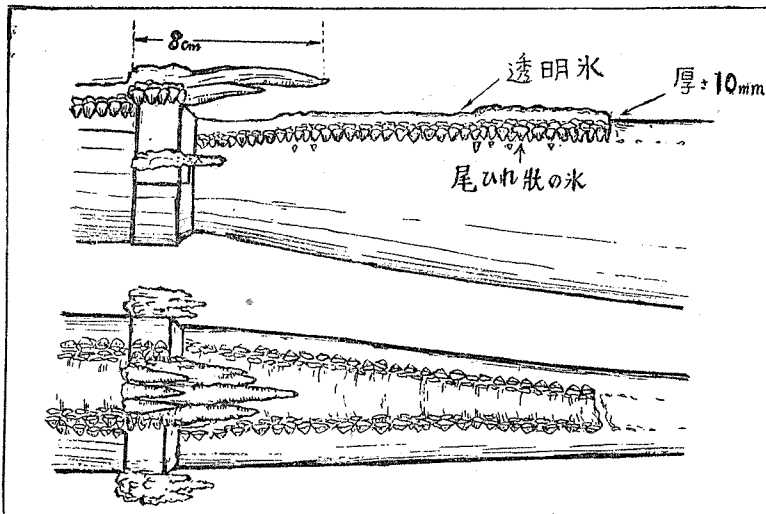
(2)
翼形に着氷させた場合と本質的には変りはない。そしてプロペラのなかほどから翼端にかけては著じるしい着氷はなく、何時でも極めてうすい透明な氷がついているのである。

実物プロペラの着氷はあらましようえの通りであるが、氣象條件が異なるにつれていろいろな変化がみられる。つぎに氣象條件と着氷との関係を少しくわしく説明する。

(a) 氣温が低くて霧水量の少ない場合

第2図(a)及び第3図は温度が低く、降雪や飛雪が多くて霧が少なきとき、プロペラを15分間まわしてとめたときの着氷の写眞と見取図とを示す。着氷は翼根から30cm先では飛散して、30cm以内にしか残つていない。第2図(a)と第3図Aとはこの着氷限界附近の図である。この時の氣象條件は氣温 -10.6°C 、霧水量 $-0.06\text{g}/\text{m}^3$ 、霧粒直径 12μ 、視程50mであつた。これと同時に、風洞に飛行機主翼の模型翼をとりつけ、風洞内に霧を吸込んで着氷を研究する実験も行つていたが、模型翼には殆んど着氷しなかつた。通常視程が50m位ならば風洞の模型翼には盛に着氷する。それ故この場合視程が悪かつたのは主に飛雪によるので、霧自体は薄かつたのである。それにもかゝらず、プロペラにはかなり着氷がおこつたのであつて、プロペラのように速度の大きいものでは、すでに氷となつてゐる雪片でも凍りつくのではないかと思われる。しかし雪だけが降つてゐるときには、プロペラをまわしても着氷しないから、雪が凍りつくためには過冷却した霧粒が混じつてゐることが必要であらう。

着氷はプロペラ翼の前縁に沿つてできるが第3図、Bに示したように、翼根から30cm先が切断飛散してゐる。切断面はAのように半月形で厚さは9mmであつた。霧の多い時によくできる着氷の両側の尾鰭状着氷の発達は見られない。氷質は白色不透明で硬く、附着力も強くて捻子廻しの頭でたゞいたぐらいではとれないほどであつた。断面には比較的明瞭な層状組織がみられた。



第4圖 氣象條件は第2圖(b)とおなじ

これは廻転中に霧の濃度にむらがあるためにできたものである。第2図の写眞ではあまり明瞭にわからないが、第3図の見取図に示したように、遠心力で着氷が飛散した跡には極めてうすい透明な氷の層が見られ

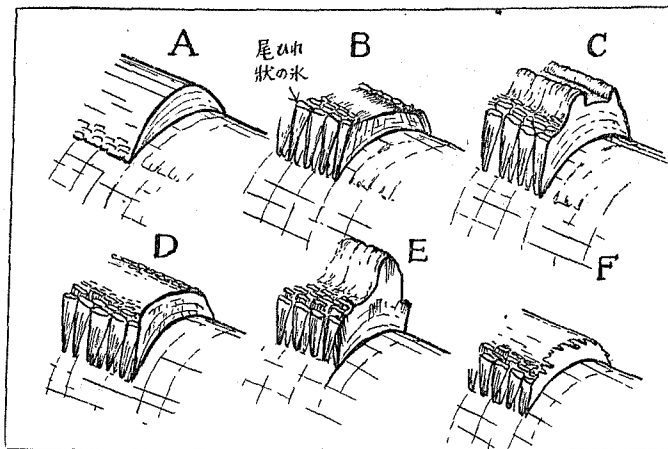
る。これは恐らく遠心力で着氷が切断飛散してからプロペラが停るまでの短かい間に蓄積し

たものであろう。この氷層が飛ばされずに残された着氷に接するところには、第3図に示したように巾2mm位の溝があつて、そこではプロペラの地肌が見える。氷層の端がなだらかに次第に薄くなつていくことから想像して、この溝は残された着氷の鋭い端が空気の流れに陰を作つたためにできたものと考えられる。

(b) 気温が高く、霧水量の多い場合、

第2図(b)は気温が -4°C 、霧水量 $0.3\text{g}/\text{m}^3$ 、霧粒の直径 18μ 、視程40mの時、プロペラを15分間廻して停めたときの写真である。第4図はその見取図を示す。この場合は霧水量も霧粒の直径も共に(a)の場合より大きく、しかも気温が高いため着氷の性質は著しい差違を示している。着氷は翼根から25cmのところまで、そこから先の部分が飛散して、その跡には厚さ1mm程度の薄い透明な氷の層が翼端まで密着している。しかもこの氷層は先端にゆく程うすくなつていく。飛散しないで残つた着氷の氷質は透明な氷で硬くて附着力が強く、切断箇所約10mmの厚さである。(a)の場合と異なり尾鰭状着氷の発達が見られるほか、殊に著しいのは翼根附近の締具に長さ約8cmの透明な“つらら”ができていくことである。これは霧粒が衝突しても直ぐには氷結せず、遠心力で先端の方に流されながら凍つて出来たものと解される。

模型プロペラのときは、 -3°C あたりでこのような着氷がみられたが、いまの場合は温度



第5圖 気象条件と着氷の形

A. 気温低く霧のうすい場合；C, F
気温高く霧のこい場合；B, D, Eはその中間

が -4°C である。実物プロペラではプロペラ翼の翼素の速度が大きいため、模型の場合に比べて霧粒の衝突時間（前論文参照）は短かい。このために、いつばにおなじ型の着氷のあらわれる温度も実物プロペラでは模型プロペラの場合に比べて低くなるものと考えられる。

(c) 気象条件と着氷形状の差異

(a) 及び (b) には気温が低くて霧の薄い場合と、気温が高く霧の濃い場合との極端な例を説明した。第5図にこれ迄に観測された着氷断面の形状をいろいろな気象条件についてとりまとめて示してある。(A)は(a)に述べたもので、気温が低く、霧水量が少なく尾鰭状着氷の発達が見られないのが特徴である。(B), (D), (E)は、着氷がおこる気象条件としては最も普通の気温 -4°C 〜 -7°C ぐらいの場合に観測されるもので、中央が透明氷、両側にゆくに従つて白色不透明となり尾鰭状着氷に移行する。之等は風洞のなかにおいた飛行機主

翼の模型翼にできる着氷によく似ている。(C)及び(F)は気温が比較的高く、霧水量、霧粒直径共に大きい時に見られるもので、(C)のように翼の長さにそつて走る明瞭な溝を生じたり、(F)のように遠心力による切断面の周りに小さいつらゝができたりする。(C)のような溝は、霧水量が多く、かつ温度が比較的高いため、衝突した霧粒が凍りきらないうち前縁部の強い風圧によつて両側に押し上げられながら氷結してゆくためにできたものと思われる。(F)のつらゝは着氷が切断飛散してから、プロペラが停るまでの間に衝突した霧粒が直ぐには氷結せず、遠心力で流されながら凍つて、できたものと考えられる。従つてこのような場合には氷質は粗氷か、または青氷である。如何なる氣象條件の時にどのような形になるかは興味ある問題である。しかし尾鰭状着氷の成因にさへまだ充分な説明が與えられていないから、今のところ定性的にもこれを決めることは困難である。このような着氷の形を決める因子は氣象条件だけでなく、プロペラの廻転状況、翅翼の振動、着氷初期の流体力学的条件等に左右されるものと思われる。

III. 着氷分布に関する二三の考察

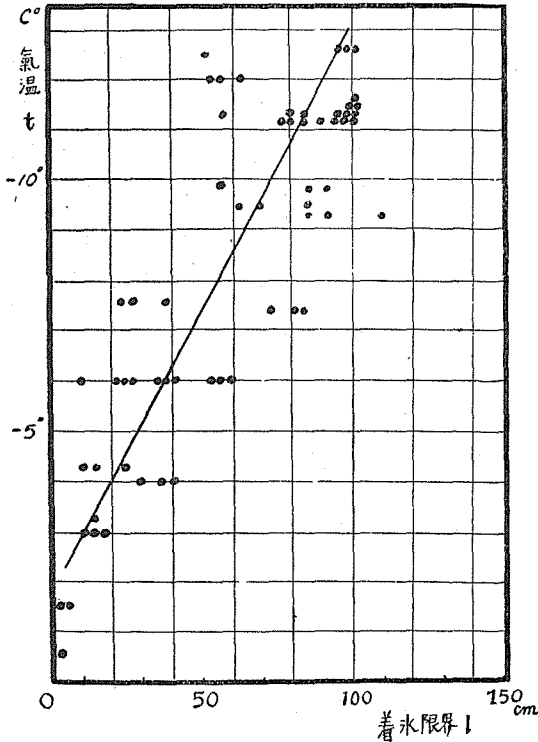
プロペラの着氷では、主翼の場合と異なり、次のような着氷を除去し、或は妨げようとする作用がある。即ち

- (a) 遠心力
- (b) プロペラ翼の振動
- (c) 空気の内部磨擦及び断熱圧縮による着氷面の温度上昇
- (d) プロペラ翼面上での霧粒の衝突時間と氷結時間の大小の関係

である。着氷の成長速度はプロペラの先端に近づくほど大きくなることは、模型プロペラの実験でみたところである。また、実物プロペラでも、電動機をかけないで、風でゆつくりまわされるのにまかせておくと、先端の方に厚く着氷がおこる。しかし電動機をかけて高速度で廻せば、さきに説明したように、先端にゆくほどかえつて着氷は少くなる。これはいま、うえにあげた着氷除去作用がはたらき、この作用はプロペラの先端に近づくほど強くなるからである。プロペラの着氷の分布をきめる因子として、(a)、(b)、(c)の三つの作用は従来よく論ぜられたが、(d)に関してはあまり注意されていないようである。しかし(d)はプロペラの着氷をきめるうえに、かなり大きな因子をなすと思われるので、これについて少しくわしく考察することにする。

まず、(a)の遠心力の作用を考えてみる。着氷がある一定の限界の厚さに達すると、之に働く遠心力と翼面への附着力との平衡が破れて氷は翼根からある一定のところで飛散する。着氷とプロペラの地肌との附着面積は氷が厚くなつてもほとんど変わらないので附着力には変化がおこらない。しかし、遠心力は氷の質量に比例して増すので、ある限界の厚さになると附着力より遠心力が大きくなつて氷が飛ばされるのである。

プロペラの廻転中心から遠心力で飛ばされずに残つた着氷の先端、即ち着氷限界までの長さ l と、その時の気温 t との関係を第6図に表した、横軸が l 、縦軸が t である。これには今迄に観測したすべての場合がふくまれている。各々の観測にわたつて、霧水量や霧粒直径等が



第6図 着氷限界 l と気温 t との関係

知られていないうゑに、廻転時間もまちまちであるので、同一温度でも l の値はかなりばらつている。しかし一般的な傾向として気温が低くなるに従つて着氷限界の位置が翼端の方へ移動し l が長くなることが明瞭に示されている。これは温度が低いほど氷の附着力が強くなるためである。しかし、気温が -10°C 以下になつても、 l が1m以上になることはほとんどない。また気温が $0^{\circ}\text{C}\sim-2^{\circ}\text{C}$ の範囲では地物や、静止した飛行機の翼型にはどんどん着氷するが、プロペラには翼根附近につらら状の氷が着くだけで、翹翼面はたゞぬれているだけで着氷していない場合が多い。

廻転しているプロペラの翹翼は不規則な振動を行つている。この振動はピツチがついてくると大きくなる。それ故プロ

ペラの振動のために氷に割れ目がいり、そこから先が飛びちることになるのではないかと思われる。そうとすれば、切断カ所はプロペラ翼の振動の腹、または節の位置に関係することになるであろう。けれども、プロペラ翼の振動についてはしらべることができなかつたから、(b)の効果については精しいことはわからない。

次に、空気の内摩擦、及び断熱圧縮による着氷面の温度上昇について考察してみよう。気温が低くなるに従つて、だんだん翼端の方まで着氷するようになるが、 -10°C 附近でも翼端近くには著しい着氷は無く、常に透明な極めて薄い氷層が密着している。 -5°C 附近では翼根から半分より先は常にこの薄い氷層で蔽われている。遠心力のため、着氷が除去されることはうゑにのべたが、その他に空気の摩擦と断熱圧縮のために、翼端ちかくでは、温度がのぼり、着氷が妨げられることが考えられる。温度が上れば過冷却した霧粒が衝突しても、それが凍りきらないうちに遠心力でとばされるので着氷の成長速度は小さくなる。実際に、いつプロペラをとめてみても、翼端に近いところでは厚い氷がみられず、ほゞ一定の厚さの氷の層がついているにすぎないことは、氷が厚くなつて遠心力で飛ばされるということより

も、もともと厚い氷に成長することができないのではないかと想像される。

W. Findeisen⁽³⁾によれば空気の内部磨擦と断熱圧縮とによる温度上昇をそれぞれ $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ としたとき、気流中においた物体の温度上昇は $\Delta\theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2$ で、

$$\Delta\theta_1 = 3.43 \cdot 10^{-5} U^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_2 = 3.87 \cdot 10^{-5} U^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

で與えられる。U は風速で [Km/hour] であらわす。 $\Delta\theta_1$ は空気の流れに平行においた平板に就いて E. Pohlhausen⁽⁴⁾ が理論的に導いたものである。層流境界層内で磨擦によつて発生する熱は、空気流によつて運びされると同時に、板にも傳達される。板に傳達された熱は板の温度を高めるが板の温度がある値に達すれば、板にはそれ以上熱が流込まないようになり、板の温度は一定になる。このときの板の温度上昇が $\Delta\theta_1$ である。また空気流が物体にあたつて分流するとき、その岐点で圧力が昇る。 $\Delta\theta_2$ はこの圧力上昇に対応する断熱温度上昇である。物体の温度が $\Delta\theta_2$ だけ上昇すればそれ以上熱は物体に傳わらず、物体はその温度を保つ、しかし物体の熱傳導度が大きく、物体の他の部分へ速かに熱が移動するならば、物体表面の温度はこの理論値だけの上昇は示さないであろう。

$\Delta\theta_1$ は層流境界層のなかで粘性のために空気自身の温度が上昇しておこるものである。それ故流れが亂流になつて境界層の剝離がおこれば、この温度上昇は期待出来ない。Eckert⁽⁵⁾ は、熱の絶縁物で作つた 20 mm の円柱を風速 $u = 227\text{m/s}$ の空気流のなかにおいて、表面の温度を測定した。それによると岐点では断熱圧縮による温度上昇を示したが、境界層が剝離している後縁では逆に温度降下さへ示している。

プロペラの場合は流れの機構が充分知られていないからの確な事は云えないが、たゞプロペラはその性質上空気の圧縮を出来るだけ少くするように、換言すれば出来るだけよく風を切るように設計されている。しかしながら翼前縁の空気流の岐点における圧縮だけは避けられない。またピッチがついて廻つてゐるときは境界層の剝離が起つてゐると想像される。それで温度上昇 $\Delta\theta$ には磨擦による温度上昇 $\Delta\theta_1$ よりも前縁部の空気の圧縮による温度上昇 $\Delta\theta_2$ が大きいものと考えられる。この実験に使つたプロペラは半径 135cm、廻転数 1800 r. p. m であつたから翼端速度は $u = 920\text{km/h}$ である。従つて翼端岐点部の温度上昇は $\Delta\theta = \Delta\theta_1 = 31.5^\circ\text{C}$ となり気温が -10°C のときでも翼端の温度は 21.5°C となる。英国の Royal Aircraft Establishment⁽⁵⁾ で Fairey Reed 式プロペラをつかつて行つた実験では、廻転数 1100 r. p. m で廻したとき、翼端では 14°C 、翼端と翼根とのなかほどで 8°C の温度上昇を示したといわれている。しかし、発生した熱は金属の大きな熱傳導のため速かに翼全体に傳わつて、その表面から空気中に逸散してしまうから、この計算値が示すほどの温度上昇はおこらないであろう。けれども一度着氷して金属面に薄い氷層が形成されると、もはや熱の絶縁物で覆われたことになる。従つて傳導による熱の逸散が少なくなり、自後の着氷はこの影響をうけ、成長が非常に妨げられると考えられる。

次に (d) の効果を考えてみる。一個の過冷却した霧粒が物体に衝突して、それが完全に氷結するまでに、ある時間がかかる。この時間を氷結時間といい τ であらわす。又一つの霧粒が衝突したところへ重なって次の霧粒が衝突するまでの時間を衝突時間といい、 ε であらわす。 τ も ε も物体と空気との相対速度によつて異なり、何れも速度が大きくなるほど小さくなるが、速度による ε の変化が τ の変化よりも著しい。

プロペラが廻転しているときは、廻転中心から翼端にむかつて、空気に対する相対速度が連続的に変つている。それで翼端と翼根との間のある所で $\varepsilon = \tau$ なる場所があり、それから先は $\varepsilon < \tau$ となり、衝突した粒子は氷結しないうちに遠心力で飛散されてしまう。このために氷層の成長は妨げられ、プロペラをとめてみると、前節でのべたように何時でも、極めてうすい氷の層が密着していることになる。又 $\varepsilon = \tau$ の点より翼根の方では $\varepsilon > \tau$ となり、衝突する霧粒は全部氷結して蓄積し、厚い着氷となつて或る限界の厚さに達すれば遠心力で飛ばされることになると考えられる。それで ε 及び τ を計算して、如何なる氣象条件のときにプロペラの何%から先が着氷しないかを求めてみよう。

過冷却した霧粒が物体に衝突して氷結する現象を、熱学的に取扱うことは Bleeker⁽⁷⁾、Stickley⁽⁸⁾ 等によつて行われた。また太田⁽⁹⁾ は過冷却水滴が物体表面に衝突すると、つぶれてある面積 A に拡がる。そして直に接觸面より氷結が始まるが、その際出る融解熱の一部は粒自身を暖め、残りは面積 A を通じて物体への傳導、空気の流れによる強制対流、粒自身の蒸発の三つの熱移動によつて失われて、 τ 時間の後に氷結するとして、

$$\tau = \frac{(-E + \sqrt{E^2 + 4FG})^2}{4F^2} \text{ sec}$$

という式を求めた。ここに

$$E = 2 \sqrt{\frac{\kappa c \rho}{\pi}} \quad F = \alpha + \frac{\alpha}{x} \quad G = \frac{m\gamma - m(T_0 - T_a)}{A(T_0 - T_a)}$$

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| κ …………… 物体の熱傳導度 | γ …………… 融 解 熱 (80cal/g) |
| $c\rho$ …………… 物体の單位体積の
熱 容 量 | m …………… 霧粒質量 |
| α …………… 対流による熱傳達率 | T_a …………… 氣 温 |
| $A = 2\pi r^2$ (霧粒の衝突後の面積) | T_0 …………… 0°C |
| r = 霧粒半径 | x …………… 対流と蒸発の失熱比 |

である。

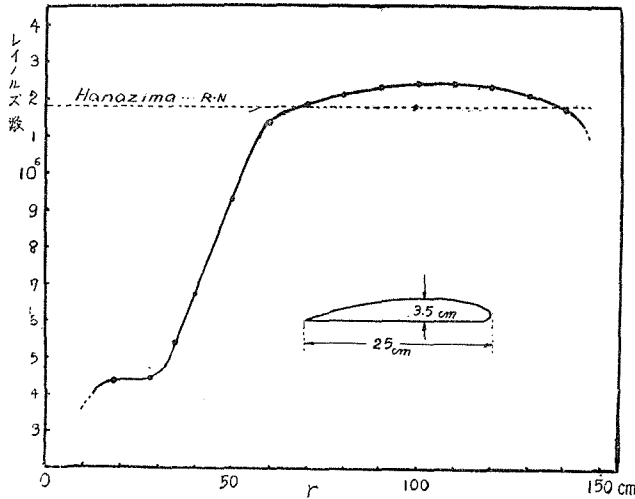
ここで問題となるのは、 α 、 A 、 x の値をどのように決めるかということである。太田の計算では α の値として、空気の流れと平行に置いた加熱平板からの熱傳達率として Jürges の値 ($\alpha = 1.71 \times 10^{-4} V^{0.78} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{deg}$) を使用している。ところがプロペラでは着氷は主に前縁部におこるから、 α の値としてはプロペラの前縁部からの熱傳達率を求めなければならない。

⁽¹⁰⁾ 花島は主翼の前縁部を加熱して、着氷の防除を行うための予備実験として、第7図のような翼弦線が25cm、翼厚3.5cmの模型翼の前縁部を電氣的に加熱して、前縁部より強制対流によつて失われる熱量を求めた。それによると

$$\alpha = 1.07 \cdot 10^{-3} V^{0.5} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec} \cdot \text{deg}$$

V : 風速 m/s

である。この実験はニセコ観測所の風洞で、風速が数十米毎秒から、100m/sの範囲で行わ



第7図 プロペラ翼上に於けるレイノルズ数の變化

れた。そして上式は風速が大き
い方でよくなりたつことがわか
つた。第7図はプロペラの翼弦
線を長さのデメンションにと
り、円周速度を風速とみなし、
空気の動粘性係数を $0.15 \text{ cm}^2/\text{sec}$
として計算した翅翼のレイノ
ルズ数の変化を示す。横軸は廻
転中心から翼端までの長さ r であ
る。図からわかるとおり、プロ
ペラの廻転中心から50cmぐら
いのところから翼端までは、レ
イノルズ数は 2×10^6 程度で大体

一様である。また花島翼のレイノルズ数を計算すると点線で示すように 1.75×10^6 程度であつて、実物プロペラのそれと大差がないことがわかる。それでプロペラの前縁部からの熱傳達係数 α は、平板からの値よりも花島の得た値をそのまま採用することにする。

次にAの値であるが、太田は衝突後の面積は衝突前の面積の2倍以上になることはないといふBleekerの説に従つて $A = 2\pi r^2$ とした。実際に過冷却した半径rの水滴が物体表面に衝突したときに、衝突後の面積Aが $2\pi r^2$ 以上になるかどうかは、傳導、対流、蒸発、の三つの熱移動の過程がこの面積Aを通じて行われるのであるから、氷結時間の決定には重要な因子をなすものである。Aの大きさは衝突する物体の種類、表面の條件、水滴の大きさ、温度及び衝突速度、物体の附着力と凝集力との關係等によつてきまると考えられる。着氷の場合には、氷の表面に過冷却水滴が衝突する場合のAの値を求めなければならないが、正確にはわかつていないので仮りに $A = 2\pi r^2$ として計算する。

次に蒸発によつて失われる熱量であるが、水平面からの蒸発に関しては古くから millar ⁽¹¹⁾ 其他の人々により、又最近では荻原によつて境界層理論を取入れて嚴密に論ぜられた。しかし水平面以外の一般曲面からの蒸発については、山本其他の研究があるが、レイノルズ数 ⁽¹²⁾ が大きい場合の曲面からの蒸発についてはあまり知られていない。熱傳導と拡散が相似であ

る如く、蒸発も熱傳達と相似であるとして取扱えるようであるが、プロペラのようにレイノルズ数やマッハ数が大きい場合に、熱傳達と同様に取扱つてよいか否かは問題である。太田は気温が $-1^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ の範囲では、水平面からの蒸発による失熱は対流による失熱量の78%~62%であるとしている。筆者は便宜上、前縁部からの蒸発による失熱は対流による失熱と等しい場合($x=1$)と、前者が後者の67%である場合($x=1.5$)とについて計算を行つた。

衝突時間 ε はやはり同氏の定義に従つて

$$\varepsilon = 0.55 \frac{S}{V} \text{ sec}$$

とした。ここで S は霧の濃度を視程(単位は米)で表したもので、霧粒の大きさと数とから、Trabertの式によつて導びくことが出来る。 V は風速で m/s であらばし、プロペラの円周速度を風速とみなすことにする。この ε は半径 r の水滴が接觸、または重なる時間間隔であるが、衝突した霧粒の面積は2倍に拡つているので、 ε は若干の重なりを認めたことになる。なお、こまかくいえばプロペラの霧粒に対する捕捉率を考慮に入れねばならない。すなわちプロペラの前縁部に衝突する霧粒は、岐点からはずれたところでは、一部は氣流に乗つて流されるので、衝突する数は岐点部よりは小さくなる筈である。換言すれば衝突時間は岐点部に比して兩側がのびるわけである。それで上の ε は近似的な衝突時間を示すものと考えてよい。

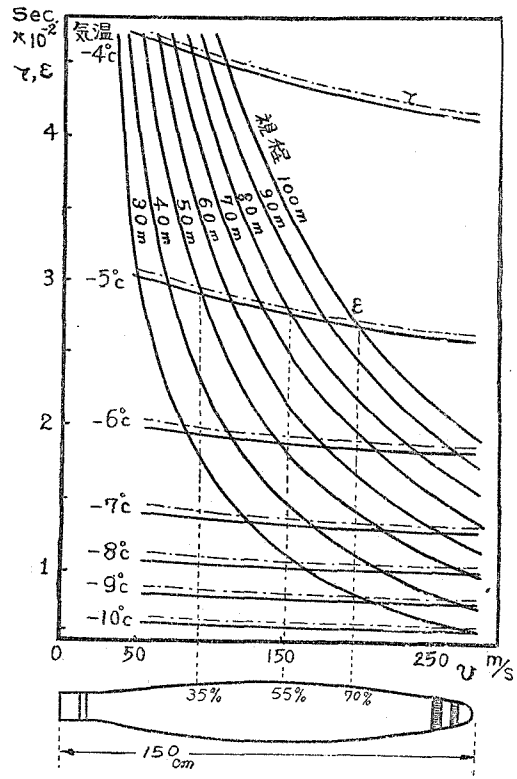
気温 T_a と同温度にあるプロペラに最初に衝突する霧粒は、金属表面の熱傳導度が大きいために、直に氷結してしまふが、しかし一度うすい氷層が形成されてしまえば、もはや T_a 度の金属面ではなしに、次には同温度の氷面に衝突して氷結することになる。嚴密にいえば、衝突して τ 時間かゝつて 0°C の氷になつて、しかる後に、また、上述のような三つの熱移動により物体又は気温と同温度にまで冷却されるのである。しかし、この冷却に要する時間は、うへの τ の式をつかつて計算できるがこの場合には、分子の $4FG$ の項が、 E^2 に比べて極めて小さくなり、従つて冷却に要する時間は氷結時間に比べて無視して差支えない。すなわち、過冷却した水滴は衝突して τ 時間後には、その物体と同温度の氷になるのである。それ故上記の E の値は、氷に関する κ 、 c^p の値を用い、また霧粒の半径は $r=10$ ミクロンとして計算した。

第8図は横軸にプロペラの廻転中心から、長さに沿つての円周速度 $V \text{ m/s}=(\text{風速})$ をとり、縦軸には衝突時間 ε と氷結時間 τ をとつてある。衝突時間 ε は霧の視程が $30\text{m}\sim 100\text{m}$ の間に亘り、又氷結時間 τ は気温が $-4^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ の範囲に亘つて図示してある。二つの曲線の交点は $\varepsilon=\tau$ なる点で、気温が -5°C の時を例にとると、視程 50m の時は、プロペラの廻転中心からはかつて35%、視程 80m の時は55%、視程 100m のときは70%の位置となる。それから先の部分は $\varepsilon<\tau$ で衝突と同時に霧粒はどんどん飛散されるから、プロペラを停めてみると、翼端にゆくほどうすい透明な氷層が附着しているだけで、殆んど着氷は

みられないことになる。これに反して、 $\epsilon = \tau$ なる点より翼根に近い部分では、 $\epsilon > \tau$ なるために衝突する霧粒はどんどん氷結して蓄積し、限界の厚さに達すれば遠心力によつて飛散されることになる。この観測の行われたニセコアンヌプリの山頂では霧の濃度は濃くて、通常視程は50m以下のことが多い。第6図でみると -5°C 附近では着氷限界 ℓ は50cm以下であり、 $0^{\circ}\sim -3^{\circ}\text{C}$ 附近では殆んど着氷せず、また -10°C 附近でも着氷限界が廻転中心から1m以上になることがないという事実も、よく了解されるのであろう。なお第8図の鎖線で示す曲線は、蒸発による失熱が対流による失熱の67%、即 $x=1.5$ の場合の氷結時間を示している。

この計算ではいろいろな常数值に推定値を用いているから、もとより正確な結果は予期出来ない。たとえば気温が高く、霧の濃い場合には、かなり翼根の附近まで $\epsilon < \tau$ となる。しかし翼根に近いほど遠心力は弱いから、衝突する霧粒は全部飛ばされずに翼端の方に押流されながら氷結する。従つて実際には、着氷の限界は若干先の方にずれるであらう。しかし、大体において観測された事実と一致するといふことができる。

以上 (a), (b), (c), (d) の四つの現象について個々に論じたが、これらは何れも同時に作用しあつてプロペラの実際の着氷分布をきめるのである。その各々の重要さの程度は今後の研究にまたねばならないであらう。しかし何れにしても気温が零下数度で、視程が数十米の雲中を飛行する場合には、プロペラの着氷は主に廻転中心から60~70%の範囲におこると考へてよいであらう。



第8圖 衝突時間 ϵ 、氷結時間 τ と速度 V との関係 (霧粒半径を 10μ とす)

IV. 摘 要

前論文の模型プロペラの着氷の研究と平行して、実物プロペラの着氷の観測を行つた。三翼全金属製プロペラを100馬力の電動機にとりつけ、北海道ニセコアンヌプリの山頂で冬霧がかつたとき廻転して着氷させた。電動機の馬力が足りなかつたから、実験は全部零ピッチで行つた。従つて着氷はプロペラの前縁部にのみおこり、翼の根もとからなかつた。

にかけて厚く、それから先はうすい水の層がついているだけであつた。翼のなかほどから先では、遠心力、空気の断熱圧縮による温度上昇の他に、衝突した霧粒が氷結に要する時間よりも、次の霧粒が衝突してくる時間が短かいたために水滴はどんどん飛ばされる。このような作用が同時におこるためにプロペラの着氷は気温が -10°C 以内では大体根もとから 60~70% の範囲内におこることがわかつた。

この研究は中谷教授、吉田教授の指導のもとに、他の多くの研究員の協力をえてなされたものである。ここに感謝の意を表わす。

文 献

- 1) 黒岩大助 模型プロペラの着氷 低温科学 6. 1. 1951
- 2) 高野王吉 低温科学, 5. 1. 1950
- 3) Von Findeisen. 1938 Temperaturhöhung an schnell bewegten Thermometern. Ann. der. Hydrographie und Maritimen Meteo. Dezenber., 571.
- 4) Pohlhausen Von. E. 1921 Der Wärmeaustausch zwischen festen Körpern und Flüssigkeiten mit kleinen Reibung und kleinen Wärmeleitung. zeit. für angew. Math. und Mech. 1, 115.
- 5) Eckert, E. 1940 Temperaturmessung in schnell strömenden Gasen V. D. I., 84, 813.
- 6) Lockspeiser, B. 1935 The prevention of ice accretion The Royal Aeronatical Soc., October. 3.
- 7) Bleeker, W. 1932 Einige Bemerkungen über Eisanzatz an Flugzeugen Meteo. Zeit 49, 349.
- 8) Stickley A. R. 1938 Some Remarks on the physical Aspects of the Aircraft Icing Problem Jour. Aero Soc., 5, 442.
- 9) 太田正次 着氷の熱学的考察 気象集誌 第2輯 19, 第6號 226.
- 10) 花島政人 熱式による着氷防除の研究 未発表
- 11) 荻原晰二 1944 蒸発の研究 気象集誌 第2輯 22, 127.
- 12) 山本義一 乾濕計の公式に関する研究 気象集誌 第2輯 15, 第10號 411.

R é s u m é

A metal propeller of real size was rotated by an electric motor (100 horse powers) on the summit of Mt. Nisekoan (altitude = 1300 m, Hokkaido) in winter. Supercooled fog ran frequently over the summit and the propeller was iced. The leading edge of the propeller blades were covered with thick ice from their roots to their middle portions, while very thin layers of ice were deposited from their middle portions to their ends. The length of the part which was covered with thick ice was increased as the temperature was lowered. The lack of icing on the outer part of the blades was due to anti- or de-icing actions as following; ice-detaching action of centrifugal force and the temperature rise caused by adiabatic compression of air, and freezing time of collid particles on blades which less than the time interval of those collisions.