



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	模型プロペラの着氷
Author(s)	黒岩, 大助; KUROIWA, Daisuke
Citation	低温科学, 6, 1-9
Issue Date	1951-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17479
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_p1-9.pdf



模型プロペラの着氷*

黒 岩 大 助

(低温科学研究所 応用物理学部門)

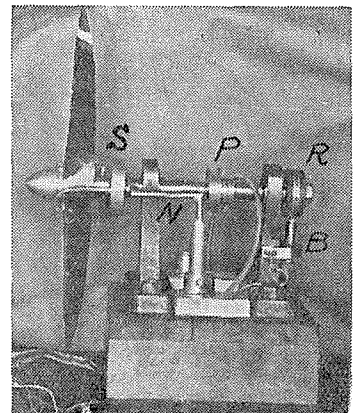
(昭和25年7月受理)

I. 緒 言

北海道後志国虻田郡のニセコアン・ヌプリ山頂(海拔1300m)で、昭和18,19年の冬飛行機の模型プロペラにおこる着氷の研究をした。冬、この山頂にはしばしば霧がかゝり、 0°C 以下に過冷却した霧粒が地物に凍りついて所謂“樹氷”となる。それで観測所の一室の壁から壁を貫いて風洞をつくり、そのなかにプロペラを据えつけて廻転した。風洞には屋外の霧が入ってくるのでプロペラに着氷がおこる。着氷が進んでゆくありさま、また着氷がプロペラから剝離して飛び散るありさまを、ストロボスコープ法によつて廻転を止めずに観察し、また写真をとつた。

II. 実験装置

第1図が実験につかつた模型プロペラである。プロペラは木製ラツカー仕上げで、廻転直径30cm、クラークY型である。Sは防水液噴射用のスリンガーリング(スリンガーリングの説明は第5節にある)。Nは防水液の給液管で、プーレーPにベルトをかけて電動機でまわす。Rは廻転軸と電氣的に絶縁したスリツプリング、Bはブラツシュである。プロペラが一定位置にくると、RとBとのあいだに電氣的接觸が起り、ストロボ装置のランプがつく。それでプロペラは廻転中、一定位置に来た瞬間にだけストロボスコープによつて照明され、あたかもその位置に静止しているように見える。こうして着氷の成長過程、飛散する状況、防水液が翼翼面上を流動するありさまなどをプロペラを廻転したまゝで観察し、またそれを映画にもとつた。



第1図 実験用プロペラ

プロペラをおいた風洞は断面36cm角の木の風洞である。これとは別に送風機をつけて外氣を最高100m/sの速

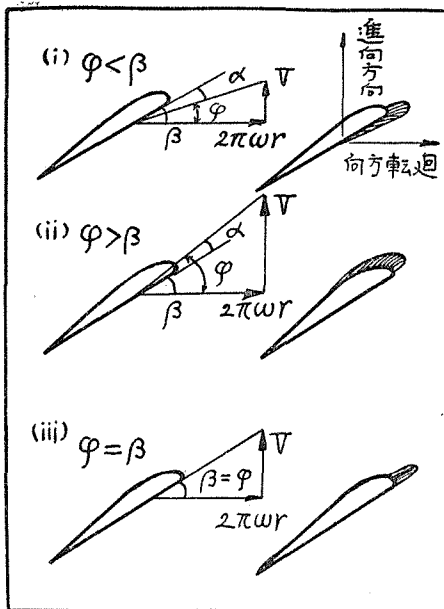
* 北海道大学低温科学研究所業績 第104号

度で吸込む風洞をつかつて実験した。この場合には風速が大きいため給液管、プーラー、ブラツシュ等は全部翼型の枠の中におさめ、プロペラだけが枠のそとで廻転するようにした。

これらの模型のブラツシュBも、スリツプリングRも黄銅で作つた。軸受にはボールベアリングをつかい耐寒グリスをさしてある。プーラーにはベルトのスリツプを防ぐためローレットを切つた。プロペラは容易に交換できるようにして、クラークY型の他にゲツチンゲン型、その他二三のものも実験した。ストロボスコープ装置はマツダの写真撮影用のものである。

III. 着氷分布

プロペラが廻転しているとき、着氷がプロペラのどの部分に起るかが第一の問題である。着氷は過冷却した霧の粒がプロペラに衝突して凍りつくためにおこるのであるから、プロペラの翼素にあたる氣流の方向によつてその場所が決まるはずである。第2図は、プロペラの



第2圖 迎角と着氷との関係

廻転中心から距離 r にある翼素の断面を表わす。プロペラの廻転速度を ω とすると、翼素の廻転による速度は $2\pi\omega r$ となる。風速（飛行中の飛行機ならばこれは対地速度となる）を V 、翼素の翹角を β 、有効ピッチを φ とすれば、翼素の迎角 α は、

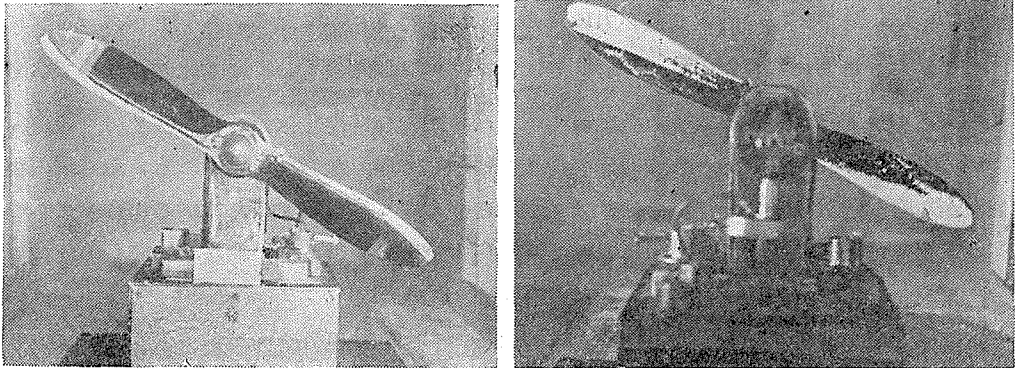
$$\alpha = \beta - \varphi$$

となる。 φ が β より大であるか小であるかによつて α の正負が決まり、翼素にあたる氣流の方向が決まる。図の (i) は $\varphi < \beta$ なる場合で、 $\alpha > 0$ となりプロペラは推進力をあらわしている。このときは着氷は図の如くプロペラの前縁 (Leading edge) から後面 (Pressure Side) に生ずる。(ii) は $\varphi > \beta$ なる場合で $\alpha < 0$ となり、プロペラは推進力をもたず、風によつて廻転せしめられ風車状態になつてゐる。このときは着氷はプロペラの前面 (Suction Side) に着く。(iii) は $\varphi = \beta$ 、即ち迎角 $\alpha = 0$ でプロペラの前縁部のみに着氷する。実際のプロペラでは迎角 α が $0^\circ \sim 3^\circ$ 位⁽ⁱ⁾ であるから着氷は主として前縁部に多く生ずるとみて差支えない。

$\varphi = \tan^{-1}(V/2\pi\omega r)$ であるから、風洞内の風速 V がわかれば、廻転速度 ω を調節して (i), (ii), (iii), の状態を観測することができる。第3図は (i) $\varphi < \beta$, $\alpha > 0$ のときの着氷の写真で (a) はプロペラの前縁部、(b) は後面で、前縁部には着氷はなく後面に多い。第4図は (ii)

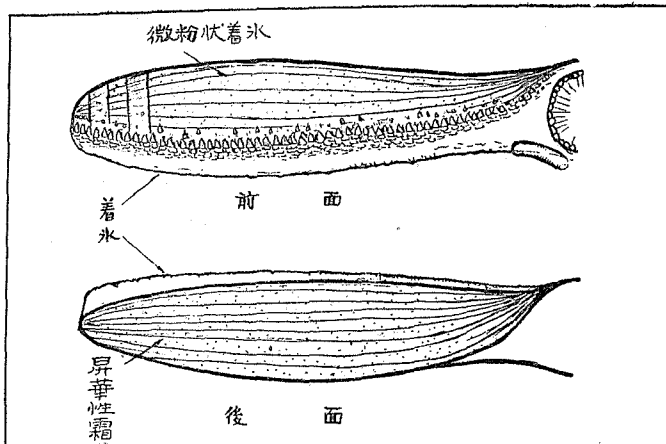
(a)

(b)



第3圖 迎角 $\alpha > 0$ の場合の着氷 (a) は前面, (b) は後面 (クラークY型)

$\varphi > \beta$, $d < 0$ のとき, すなわち, 風車状態のときの見取図で, 逆に着氷はプロペラの前面に多く後面に少ない。



第4圖 迎角 $\alpha < 0$ の場合の着氷

ストロボスコープで見ていると, プロペラの翅翼の全長にわたって着氷は同時にはじまる。翼端にゆくほど円周速度が大きいので, 着氷の成長も翼端に近づくほどはやく, 第3図, 第4図にもそれがはつきりあらわれている。着氷がある程度すゝむと, 突然に片翼の氷が全部見えなくなり, プロ

ペラは激しい振動を起す。着氷の量が大きくなるとおこり, しかも氷の全部が同時に飛び散ってしまうのであるから, これは遠心力によるもので, 氷がいちどに剝がされて飛ばされるものと考えなければならない。

IV. 着氷と氣象條件

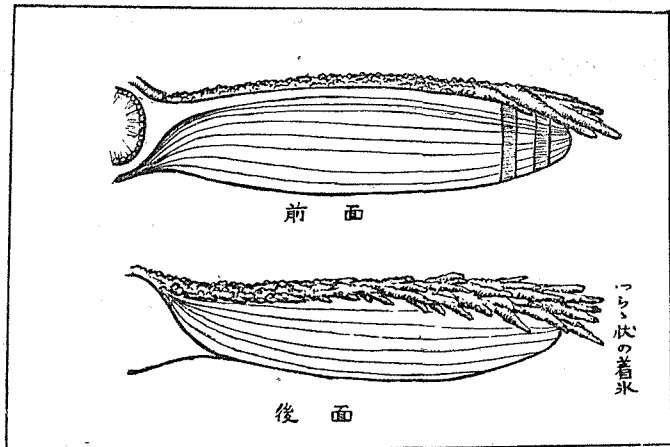
プロペラの着氷には, いまのべたような除去作用もはたらくが, 温度が比較的高い時にはまた別な除去作用がはたらく。0°C以下でも温度が高いと衝突した霧粒はすぐには凍らない。そのために遠心力によつて飛ばされてしまうのである。

過冷却した霧粒が衝突してから氷結するまでの氷結時間 τ と, 一つの霧粒が衝突した上に更に別の霧粒が衝突する迄の衝突時間 ϵ とを考える。気温が高くて0°Cに近いと氷結時間 τ は長く, プロペラの円周速度 V が大きいために ϵ は短くなり, $\tau > \epsilon$ となることが多い。それ

故一つの霧粒が氷結しないうちに次の霧粒がそれに重なり、衝突した霧粒はその一部分しか氷結しない。そして残りの水は遠心力によつて飛ばされることになる。ストロボスコープによつて観察すると、気温が $0^{\circ}\text{C}\sim-1.5^{\circ}\text{C}$ では、プロペラ以外のものには着氷がおこつているにもかゝらず、プロペラには殆んど着氷せず、翼端からどんどん水のしたゝりが飛び散つているのが見られた。やつと翼の前縁に着氷が蓄積して白くなつたと思つても、忽ち翼の根もとから全部飛散してしまふ。それでプロペラを停めてみるとたゞぬれている場合が多かつた。ただ僅かにスピナーや翼の根もとに透明な水が着いていたが、廻転中心近くでは円周速度 V が小さいので、 ε が大きく $\tau < \varepsilon$ となるからである。

第5図は気温が -3°C 以下で霧粒直径が 24μ 、霧水量 $0.68\text{g}/\text{m}^3$ の濃霧のとき、プロペラを15分間廻したのちの着氷

見取図である。このときも水のしたゝりを生じながら氷結したのである。プロペラを停めてみたら、翼端には長さ15mm位のつらゝがついていて、氷のこの部分の厚さは8mmもあつた。氷は附着力の強い青氷で、これほど氷がついても遠心力で飛ばされない。気温が -3°C 以下の場合には第3図



第5図 気温 -2.3°C 、霧粒直径 24μ 、霧水量 $0.68\text{g}/\text{m}^3$ のときの着氷

の如き白色不透明な固い着氷となり、つらら状にはならず翼端程成長量が多くなる。この場合は気温が低いために $\tau < \varepsilon$ となり、衝突した霧粒が全部氷結するものと解される。

氷結時間 τ を計算するにはプロペラ翼面からの熱の逸散に関する常数が要るが、それらの常数の値はあまり正確には知られていない。しかし適当な推定値を用いて太田の式⁽³⁾によつて計算すると、気温 -3°C 、霧のなかの視程50mのとき、模型プロペラの翼端部分で $\varepsilon=0.083\text{sec}$ 、 $\tau=0.089\text{sec}$ となつて ε と τ とは大体等しくなる。この計算で、衝突時間 ε をもとめるには単位体積のなかにある霧粒の数 n が必要であるが、視程は n と霧粒の半径 a との函数で、その函数の形もわかっている。それで、 $a=10\mu$ 、視程=50mとして n をもとめた。⁽⁵⁾霧の濃淡によつて事情はちがうわけであるが、うえの計算の結果から判断して、だいたい気温 -3°C を境として $\varepsilon > \tau$ から $\varepsilon < \tau$ にうつるとみてよい。そして、これはさききのべた実際の観察の結果とよく一致している。

気温が低くなると前縁部の着氷の他に、第4図に微粉状着氷又は昇華性の霜として示した極めて微細な着氷がプロペラの背腹両面にわたつて一面につく。風速 $100\text{m}/\text{s}$ の風洞に静止

した翼型をおくと、前縁部にうすく氷が着き始める頃から、翼型の表面に廣く微細な粉狀の着氷が着き始める。これと第4図のプロペラについた微粉狀着氷とは非常によく似ているので全く同一性質のものと解される。翼型の前縁部が着氷によつて凹凸が生じ、氣流は亂流となり、その流れの中の振動によつて霧粒の一部が翼面に附着するか、又は前縁部の着氷の一部が蒸発して翼面に沿つた亂流境界層内の水蒸氣圧がたかまり、翼面に水蒸氣が凝結するのではないかと想像される。もし前者ならば微粉狀着氷となり、後者ならば昇華性の霜となる。またこの兩方が混合したものもありうるわけである。

V. プロペラ着氷の防除

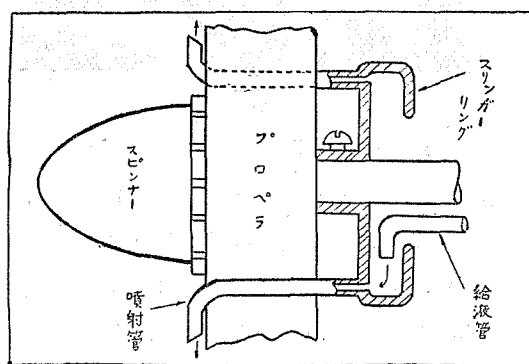
プロペラには主翼とちがつて常に着氷を除去しようとする遠心力が働いている。それ故着氷の防除には何等かの方法によつて、衝突する過冷却した霧粒を凍らせないようにするか、又は着氷の附着力を弱めるようにすればよい。従来試みられて来た防除法の主なものは、

- (1) スリンガーリングによつて防水液を翼面に流す方法
- (2) 防水剤を翼面に塗布する方法
- (3) 翼面を加熱する方法

の三種類である。模型プロペラにこの三つの方法を施して、その効果をしらべてみた。

(1) スリンガーリングによる方法

この方法は古くからプロペラの着氷防除法としてつかわれて来た⁽⁴⁾。第6図に実験につかつたスリンガーリングを示す。スリンガーリングは内側に向つて溝を掘つた金属環で、プロペラ



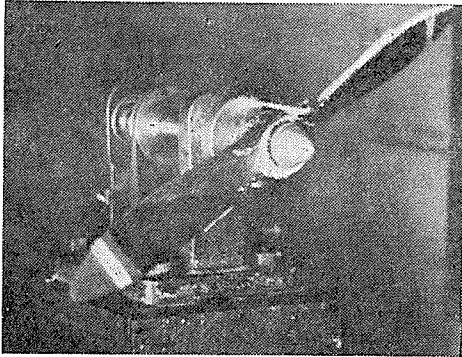
第6図 スリンガーリング

ラ軸に固定され、プロペラと共に廻轉する。防水液は給液管からスリンガーリングの溝の中に流し込まれ、遠心力によつて溝の中に溜り、噴射管によつてプロペラ翼面に噴射される。防水液としてはエチレングリコール50%、水50%の混合液を使った。

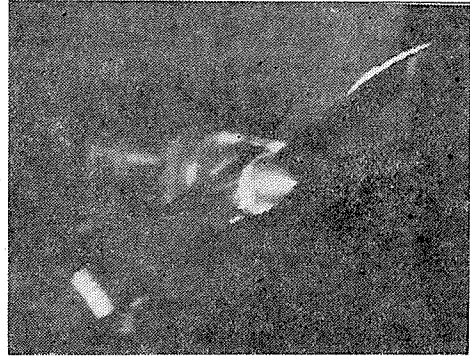
プロペラ翼の前縁にいちばん多く着氷するので、防水液は前縁にそつて翼端まで流れるようにしたい。それで防水液の

噴射孔は翼の根元の前縁部につけるが、その位置をうまく擇ぶ必要がある。しかし、たとえ前縁部を流れて行つたとしても、大部分は途中で左右にわかれ翼面にそつて後縁の方に流されて翼端には達しない⁽⁵⁾。翼面の上で液に働く力は、磨擦力の他に、翼端に向つて流そうとする遠心力と、液を翹翼の後縁の方に押流そうとする氣流による力との二つがある⁽⁶⁾。そして液は翼面上ではこの二つの力の合成した方向に流れることになる。

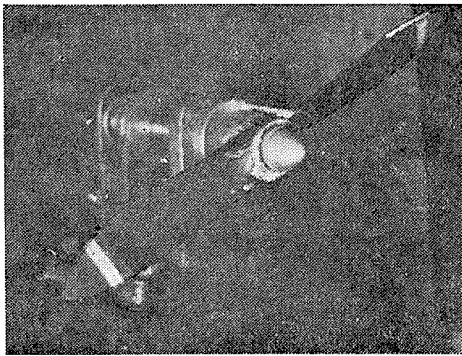
噴射管の位置をいろいろ変えて実験を行つた。ストロボスコープで観察すると、殆んど大部分の液は噴射されると同時にプロペラ翼から離れて飛散してしまう場合が多かつた。写真の第7図にプロペラを廻転 (2000 r. p. m) させたまゝで除氷の効果をストロボ写真にとつた一例を示す。プロペラに着氷させておいて、エチレングリコールを噴射させたら、まず片



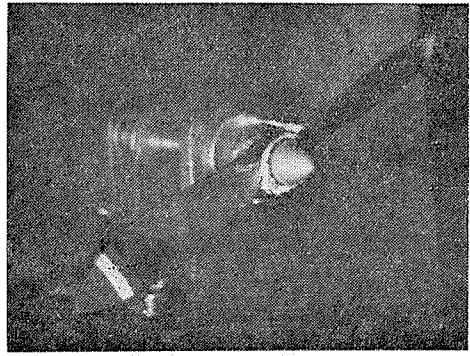
(a)



(b)



(c)



(d)

第7圖 除氷液による廻轉中の除氷過程のストロボ寫眞 (2000r p m) (クラークY型)

方の翼の着氷がとれて写真 (a) のようになった。左側の翼の着氷は既に除氷されており、防水液の流跡も見える。噴射孔のところから翼面を斜めに横ぎる線から翼端までが黒く見えるがこの部分全体が流跡である。写真 (a) から (b), (c), (d) の順に時間がたつにつれ、右の翅翼の着氷は翼根のところから順々に除氷されてゆく。この場合も大部分の液は翅翼にはほとんどかゝっていない。

液を前縁に沿つて翼端まで有効に流すために、縦に溝をつけたゴムの Shoe がグツドリツチ会社によつて試みられた⁽⁷⁾。これを、プロペラ翼の前縁にはりつけて防水液を翼端にまで導くのである。筆者も模型プロペラの前縁に沿つて、小刀で中心から翼長の60%位の所まで溝を掘つてみた。ストロボスコープ法で観察すると、こうすれば液は殆んど翼端まで流れることが確められた。併し、溝のためにプロペラの空気力学的能率が低下することは避けられないであろう。

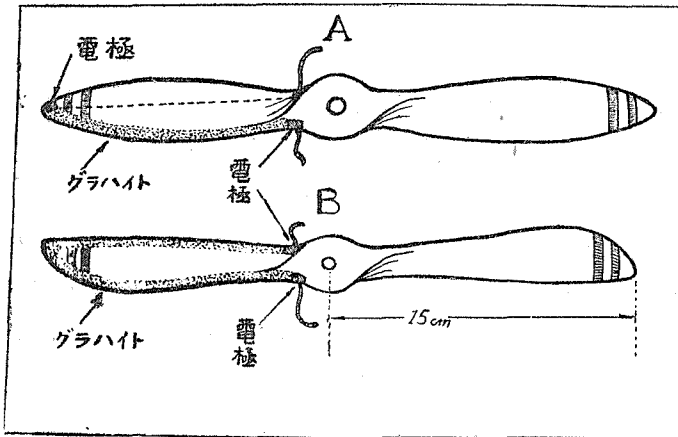
(2) 防水剤を塗布する方法

飛行機の主翼に塗布するための防水剤二三種を模型プロペラに塗つてみた、この防水剤は気温が低いと固まるので温湯であたためてから塗つた。防水効果はあまり認められないで、どんどん着氷したが、附着力は弱くなるらしく着氷が2~3mmの厚さに達すると飛散した。防水効果はあまりないが、除氷効果があるわけである。

(3) 加熱による方法

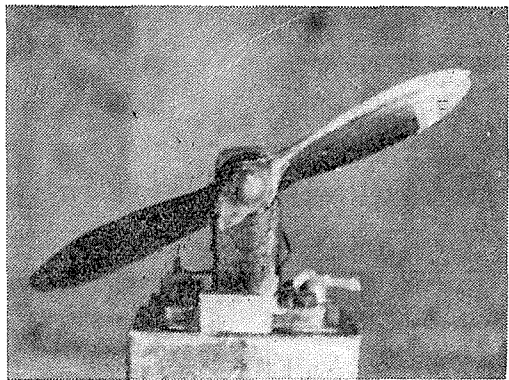
飛行機の主翼の防水のために、主翼の前縁に或種の抵抗塗料や金属抵抗板、又は電熱線入りのゴム板等を貼りつけて電流を通じて加熱し、防除を行う方法がある。プロペラにも細い電熱線を密に巻いて電流を通じて翼の全面を加熱する方法が試みられている。

筆者は模型プロペラの前縁に電子管に使う膠状グラハイト液(日立製作所製)を塗つて炭素のうすい膜をつくり、電流を通じて加熱面とした。グラハイトはプロペラの前縁を紙ヤスリでよく磨いてから筆で塗り、良く乾かしてから再び塗つて適当な厚さにする。電極として



第8圖 グラハイトによる加熱 (ゲンチンゲン型)

は薄い銅板を膜面に貼付けた。グラハイト面は水にぬれるととけるので、その上にエナメル又はベークライトワニスを塗つて保護することにした。第8図は試作した加熱プロペラの見取図である。Aでは翼の前縁にグラハイトを塗り、翼端の電極と翼の根元とのあいだは翼の後面に埋めた針金で連絡して帰線とした。電流は翼根の電極からグラハイト層を通り翼端の電極を経て翼根に戻る。Bでは翼の後縁にもグラハイトを厚く塗つて帰線の代りにした。Aは加熱面積が24cm²、抵抗380Ω、Bは加熱面積45cm²、抵抗1300Ωであつた。何れも比較のため片翼のみを加熱した。電力には交流を使用し、プロペラの根元につけたスリツプリングとブラツシュとを通じて供給した。第9図は防水効果を示す。写真で左の翼が加熱翼で、右翼は加熱していない翼である。加熱翼には全然着氷が認められない。図は氣



第9圖 加熱の除氷効果左の翼だけ加熱

温が -3°C の時電力は約4 Wattを必要とした。ストロボスコープで観察してみると一方の翼はどんどん着氷してゆくが、加熱翼は全く着氷しない。注意して見ていると翼端の部分に小さな“つらら”ができて4~5 mm位に成長すると、ぱつと飛散して再び小さなつららができ始めるという状態が繰返えされた。このことは前縁に衝突した過冷却霧が加熱によつて氷結せず、遠心力で翼端からしたゝりながら飛散していることを示している。加熱していない方の翼の着氷がだんだん推積してくると、プロペラは平衡を失つて激烈な振動を始めるのが観察された。

以上は防水の実験である。次に加熱翼に電流を流さないでどんどん着氷させておく。そして水の厚さが4 mm位になつたとき、スイッチを入れて加熱翼に電流を流してみた。ところが30秒もたゝないうちに着氷は翼根から全部飛散してしまつて除氷も簡単に出来ることがわかつた。すなわち除氷の場合は防水の場合に比べて、はるかに少ない電力でたりるのである。

VI. 要 約

飛行機の模型プロペラを使つて着氷状況、及び其の防水法の研究を行つた。プロペラが推進状態にあるときは着氷はプロペラ翅翼の前縁から後縁に多く、風車状態で廻転しているときは、前縁から前面に多く着く。すなわち、着氷の分布を決める因子は、翼素にあたる氣流の方向、換言すれば迎角の正負によつて決まることがわかつた。ストロボスコープ法によつてプロペラを廻転したまゝ着氷の進むありさまを観察した。氣温が零度以下でも、 0°C に近い場合には、静止している物体には着氷しても、プロペラには着氷しない。過冷却した霧粒が衝突しても凍りきらないうちに遠心力で飛ばされるからである。實際ストロボスコープによつてプロペラの翼端から水滴がとばされるのが見えた。氣温が -1.5°C 以下になると、着氷がおこり始めるが、 -3°C あたりまでは、殊に霧水量の多いようなときには凍りきらないうちで遠心力でとばされる水もある。このような場合には着氷は青氷となり附着力もかなり強い。 -3°C 以下に温度が下れば白い着氷となり、ある限界の厚さになると遠心力で切断して飛散してしまう。

プロペラ着氷の防除法としては(1)スリッガーリングによる方法、(2)防水剤を塗布する方法、(3)加熱法、の三つについて実験した。(1)の方法ではあまり良い結果は得られなかつたが、改良によつて幾分良くなる可能性がある。(2)の方法には、主翼を防水するために製作された防水剤をつかつた。着氷がおこることに対しては殆んど効果が認められなかつたけれども、着氷しても着氷の附着力が弱いので遠心力によつて着氷が飛ばされやすくなることが知られた。すなわち、防水にはあまり役立たないが、除氷のためには効果がある。(3)の加熱法としては、膠狀グラハイトをプロペラの前縁に塗つて、これに電流を通じて加熱する方法をとつた。この方法では防水、除氷共に好結果を得た。

この研究は申谷教授、吉田教授の指導のもとに行つた。また花島助教授より有益な御教示を賜つた。厚く感謝の意を表す次第である。

文 献

- 1) Falk, Karl H. 1943. Aircraft Propeller Hand-Book.
- 2) 黒岩大助, プロペラの着氷: 低温科學, 6, 11, 1951.
- 3) 太田正次, 着氷の熱學的考察: 氣象集誌 第2輯 19, 226.
- 4) Lockspeiser, B. 1935 The prevention of ice accretion. Roy. Aeronaut. Soc., October.
- 5) McBrien, R. L. 1941 Icing problem in operation of transport aircraft. S. A. E. Journ. (transaction), 49, No. 3.
- 6) 守田: 1933, 廻轉する圓及びプロペラの表面に得られる圖形について, 航研報, 5月 106.
- 7) Bein, J. T. 1941. Speed, October.

R é s u m é

A model propeller (length: 30 cm.) of aeroplane was put in the interior of an wooden tunnel which was so placed that the natural wind blew through it. In winter, when wind blew accompanied by fog supercooled below 0°C , ice was deposited on the rotating propeller. Process of icing on the propeller was observed stroboscopically without stopping the rotation of the propeller.

It was observed that the propeller was not iced when the temperature was above about -1.5°C , although icing occurred on things which stood still. Stroboscopical observation showed that the fog particles impringed on the propeller blades had not time enough to freeze before they were thrown off from the blades by centrifugal force. At the temperatures from -1.5°C to -3.0°C , some of the fog particles froze without being thrown off and stuck firmly along the leading edges of the propeller blades in form of translucent ice. The fog particles all froze and formed white and opaque ice when the temperature was lowered below -3°C . In this case, however, the ice was suddenly thrown off from one of the blades by centrifugal force when it grew to a critical mass and the propeller began to vibrate violently owing to the unbalance between the weights of the two blades.

Three methods of de-icing, that is, (a) spraying the propeller with de-icing liquid, (b) covering the propeller with de-icing paste, (c) heating the propeller electrically, were tried on the model propeller. The last method (c) was found to be the most effective.