HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	風洞による着氷の研究 : II. 風洞による翼型への着氷研究（1）
Author(s)	高野, 玉吉; TAKANO, Tamakichi
Citation	低温科學, 5, 9-20
Issue Date	1950-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17468
Type	departmental bulletin paper
File Information	5_p9-20.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Tamakichi TAKANO 1950 Studies on Ice Formation with a wind Channel. II. Ice Formation on Wing Models in the Wind Channel. *Low Temperature Science*, **5** (with English résumé p. 20)

風洞による着氷の研究 II*
風洞による翼型への着氷の研究 (1)

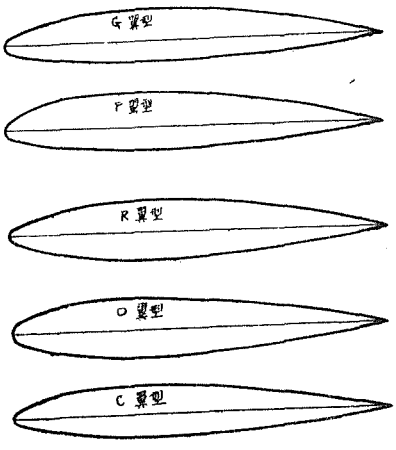
高野玉吉
(北海道大學理學部 物理學教室
低溫科學研究所 純正物理學部門)

(昭和23年5月受理)

I. 緒言

飛行機の翼やプロペラの着氷の問題は，航空界に殘された一つの重要な課題であつて，學術的にも又實際體驗者からもいろいろ澤山報告されてゐる。[1),2),3),4)] しかし問題が複雜で，特に實際飛行中に着氷があつた場合は生命の危險が濃厚なために正確な觀測は望まれない。又實驗的に研究するには着氷風洞の設備が從來どの國にも殆んど無かつたので，その方も進歩してゐない。それで例へば翼前緣から後方どれ位の範圍にまで着氷するかといふやうなことに對してすらも，はつきりした事がわかつてゐない現狀であつた。觀測者によつて，その結果が區々である。まして，着氷の性質成長過程などに關しては不明の點が頗る多く，實驗的には殆んど未開拓の領域であると云つてよい。

着氷を豫防又は除去する爲には・先づ實際に生ずる着氷の性質をくはしく知ることが必要である。しかし以上に述べた様に現在實際の着氷についてそれを望むことは出來ない。それで模型翼を用ひて，前報告で說明した着氷風洞により着氷の機構を研究した。



第 1 圖

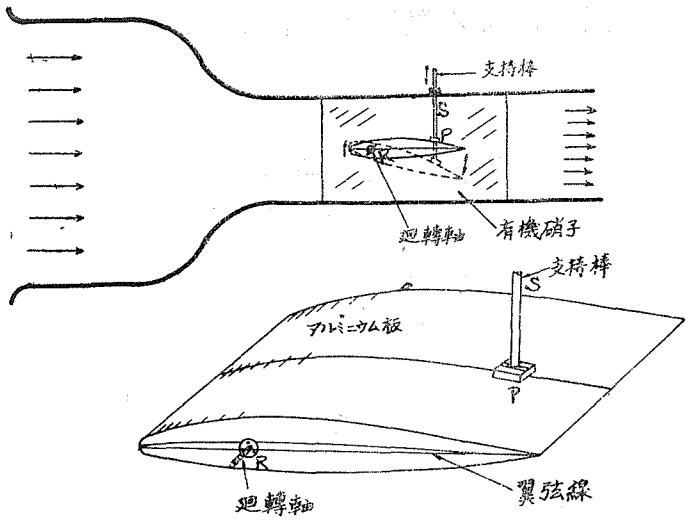
冬季山頂に於て過冷却水滴よりなる霧が襲來したとき，その大氣をそのままこの風洞に吸込み，模型翼をとりつけて着氷を生ぜしめたのであるが，實際の飛行機に着氷が生ずる條件と最も似た條件が之によつて得られるものと考へられる。

II. 模型翼型

本研究に用ひた翼型は5種であつて，G. P. R. D. C. と名付け，その斷面の形を第1圖に示す。全部木製で表面を出來るだけ良く仕上げ，エナメルを塗布した。

* 北海道大學、低溫科學研究所業績 第94號

翼幅 450mm, 翼弦長 500mm, である。 翼型を風洞に取付ける方法を第2圖に示した。翼型の兩側に螺子を刻んだ短い金属棒Rを取りつけ，これを測定洞の有機硝子窓にあけた孔にはめ，蝶捻子で外から締めつける。後緣近くに坐金Pを固定し，これに風洞の天井を貫く



第 2 圖

支持棒Sの下端をはめておく。Sを上げれば後緣が上つて翼の迎角αが負となり，下げればαが正となる。風洞の天井につけた坐金によつてSは任意の位置に固定する事が出來る。

5種の翼型のうち，R, D, C の3種は，その片側半分にアルミニウムの板を張つた。翼面の物質によつて着氷の樣子が違ふかも知れないので，それを調べるためである。

III. 實 驗 方 法

翼型を風洞に取付けてから，翼型の溫度が外氣溫と等しくなる迄暫く待つてプロペラを回轉する。着氷の成長する樣子を觀察しつつ，適當な厚さに成長したときにプロペラを止め，翼型を取出し，いろいろ調査をする。實驗中，同時に外氣の溫度を測定すると共に，外氣中の霧水量，霧粒の大きさの測定をも行つた。霧水量は五酸化燐を用ひた吸收法によつて空氣 $1m^3$ 中の全含水量を決定し，その値から氣溫に對する飽和水蒸氣量を差引いて求めた。霧粒の大きさは，霧粒を油膜に捕捉し顯微鏡によつて測定した。霧水量の測定は花島助教授，霧粒の測定は小口八郎氏が行つた。測定法，測定結果の詳細に就いては兩氏の報告[5]を參照されたい。

風洞に模型翼を取り付ければ，プロペラの回轉數は同じでも風速はかなり小さくなる。それのみならず模型翼や屈曲胴の偏流器に着氷が發達すると，風速は益々落ちて行く。

從つて實驗中數回に亘つて風速を測定し，その平均値をとる必要がある。風速は，吸込口

と測定洞との壓力差をu字管水銀壓力計やゲツチンゲン型壓力計で測つて決定した。

屈曲洞の偏流器に着いた着氷が風速低下に及ぼす影響は非常に著るしいので，1回の實驗が終る毎にこの着氷を取り除かなければならなかつた。この着氷の中央が凹んでいるのは，その高さが丁度，翼型を取りつけた高さと一致し，翼型のかげに當る所である。翼型の後緣から偏流器までは約50cmの距離がある。これでみると翼型の後流は，かなりの距離迄過冷却水滴が乏しくなつてゐる事が分る。これは注目すべき現象である。

第　1　表

翼型	迎角（度）	温度（C°）	風速（m/s）	霧水量（gr/m³）	霧粒直徑（μ）	成長速度（mm/min）	備考
G	0	− 9.5	68			1.2	
〃	+ 15	− 9.6	63			1.0	
〃	+ 8	− 9.7	58			1.0	
〃	+ 5	− 9.8	53			0.7	
〃	− 5	− 9.9	62			0.8	
〃	− 8	− 9.5	65			1.3	
P	0	− 9.2	53			0.65	
〃	+ 4	− 9.0	52			0.55	
〃	+ 8	− 9.0	50			0.50	
〃	0	− 8.4	48			0.30	HB. 劑塗布
R	0	− 2.1	70	0.34	7	1.30	全着氷量 53gr
〃	+ 4	− 2.1	60		8	1.20	〃 40
〃	+ 8	− 2.3	58	0.23	13	0.85	〃 42
D	0	− 4.1	53		15	0.80	〃 82
〃	+ 4	− 4.5	51		12	0.70	〃 75
〃	+ 8	− 4.7	47	1.11	10	0.60	〃 45
C	0	− 4.2	46	(3.05)	12	0.60	
〃	+ 4		58		12	0.70	
〃	+ 8		52			0.50	
〃	0	− 0.8	52	0.10	12	0.60	着氷時間 15分
〃	0	− 1.3	42	0.09		0.30	〃 20分

摘要

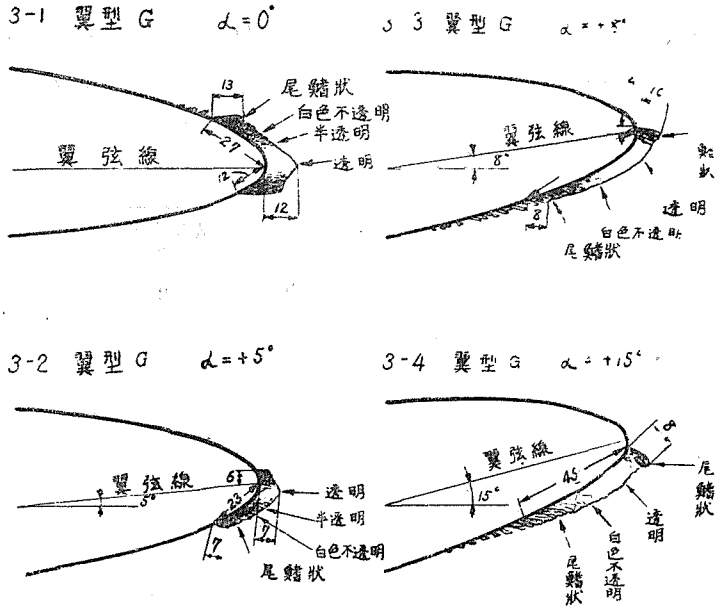
1. 着氷時間ハ何レモ10分間デアル。
2. 成長速度ハ岐點部デ測ツタモノデアル。
3. 霧氷量（3.05）ハ全含水量デアル。

5種類の翼型全部について調べると共に各々の翼型について，迎角を變へて數回觀測した。第1表は實際に行つた實驗の一覽表である。表中“成長速度，，とあるのは，翼の最前端に於ける着氷の成長速度で，定驗終了の時の着氷の厚さを送風時間で割つて求めた。又備考欄の“全着氷量，，は，翼幅450mm全體に亘つて附いてゐた着氷の重量である。これは着氷を引剝して秤ではかつて決めた。“HB劑塗布，，とは海軍で試作した防氷塗料HB劑を翼前緣に塗つて着氷させたことを意味する。

IV，着氷の構造並びに着氷の範圍

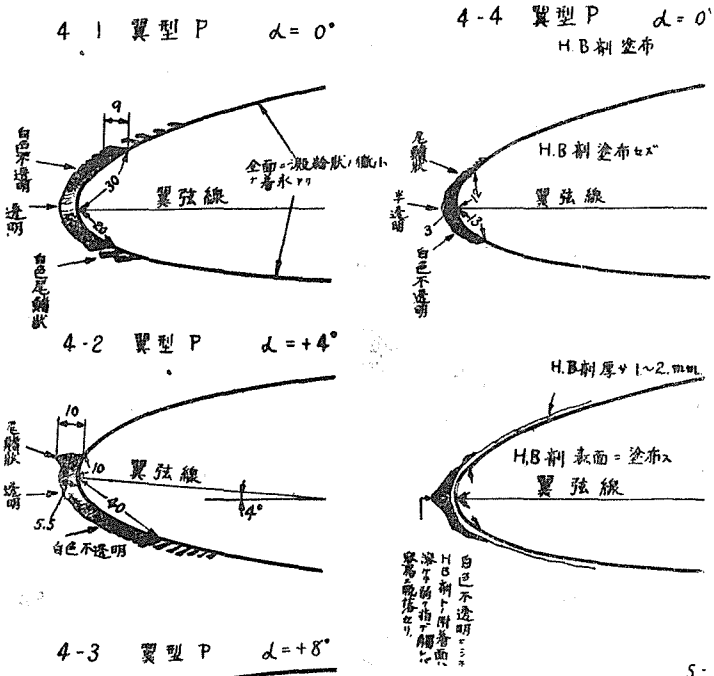
着氷は翼の前緣附近に主として生ずる。第一に注目すべきことは，その構造が一樣ではな

いことである。例へばG翼についての着氷狀態は第3圖に示してあるが，迎角αが0の場合について見るに，風をまともに受ける翼の最前端は透明な氷である。透明氷の幅は大體2cm

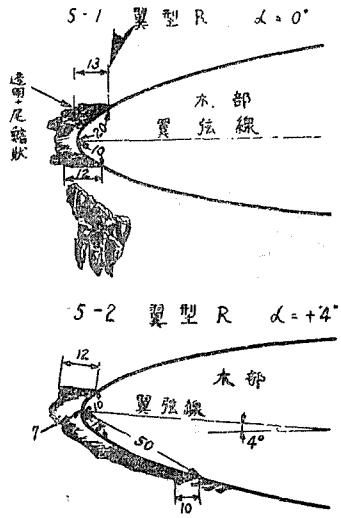


第　3　圖

ぐらゐでその上下兩側に半透明の氷の帶がある。そしてその外には白色不透明の尾鰭狀の氷が群りついてゐる。尾鰭狀の着氷は長さ1cmほどの霧氷性の氷である。その平面圖のスケツチを第5圖 5—1 の左下に示してある。不規則な粒狀の氷が各々獨立して，翼面に附着してゐる。この尾鰭狀の着氷は次第に疎になつて翼の後緣の方に進むにつれて，遂に全く見えなくなる。この尾鰭狀の着氷が無くなる邊りに，細かい粒狀の氷が粉を撒いたやうに附着し



第　4　圖



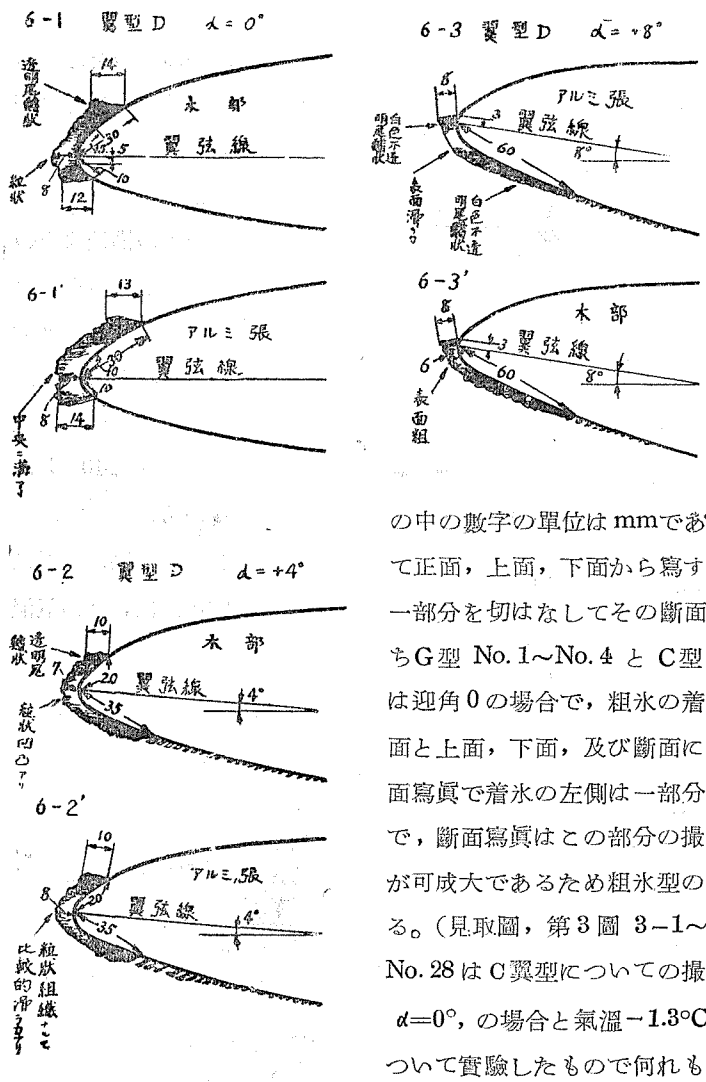
第　5　圖

てゐる事がある。その粉の一つをとつて顯微鏡で見ると昇華で出來た氷の形をしてゐる。

着氷の構造はそのときの氣象條件によつて變ることは勿論である。上に述べたやうな構造は氣溫 −8°C～−10°C の時のものである。そして，今回の觀測期間中には，この氣溫範圍での着氷が一番多かつた。氣溫がもつと高くなつて 3°C～5°C になると，着氷帶の中央の透明氷及びその兩側の半明氷の透明度が增し，尾鰭狀の氷も白色不透明であつたものが，半透明になる。氣溫の變化による着氷の變化については次節に詳しく說明する。

V. 着氷見取圖並びに寫眞版の說明

今回の觀測期間中に行つた實際の回數は21回で，その內容は前述第1表に示してある。5種類の翼型の各々について，迎角を變へて着氷させ，その全部について寫眞をとると共に見取圖をもとつた。着氷



第　6　圖

見取圖は5種類の翼型についての實驗結果を全部纏めて，第3圖及至第7圖に示した。

寫眞は紙面の都合上殆んど割愛しその一部だけを別刷とした。

着氷見取圖は着氷の厚さ附着範圍の廣さなどを物指を當てて測定しながら書いたものである。圖の中の數字の單位はmmである。寫眞は着氷部分について正面，上面，下面から寫すと共に，鋭い刃物で着氷の一部分を切はなしてその斷面を現はしそれも寫した。即ちG型 No. 1～No. 4 と C型 No. 25～No. 28で，G型では迎角0の場合で，粗氷の着氷を一つの翼型について正面と上面，下面，及び斷面について撮影したもので，正面寫眞で着氷の左側は一部分を刃物で切り取つたもので，斷面寫眞はこの部分の撮影である。氣溫が低く風速が可成大であるため粗氷型の強固さがよく現はれてゐる。(見取圖，第3圖 3－1～3－6 參照)，寫眞 No.25～No. 28 は C翼型についての撮影で氣溫－4.2°C のときに α=0°，の場合と氣溫－1.3°C のときに α=0° の場合について實驗したもので何れも雨氷型である。

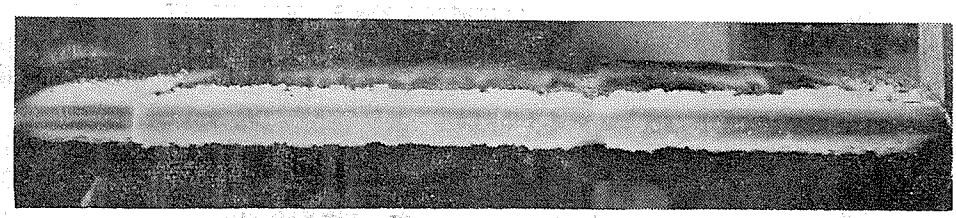
1)　G翼型（第3圖，3－1～3－6）

迎角 α=0°，+8°，+15°，−5°，−8° の五つの場合について實驗した。

氣溫は−9.5°C～−10°C，風洞內風速 53m/s～68m/s で尾鰭狀の氷がよく群りついたものである。翼最前緣の透明氷は余りよくない。第3圖 3－1～3－6 にはつきり示されている通り迎角 α が0から增すと，着氷帶は翼下面を翼後緣の方へずれて行く。着氷の構造には變化はないが，透明氷の部分は最前端ではなく，最前端から翼の下面を少しまはつた，丁度氣流の流岐點のある場所を中心として擴がつている。流岐點に於ては，過冷却水滴が最も頻繁に衝突するからである。

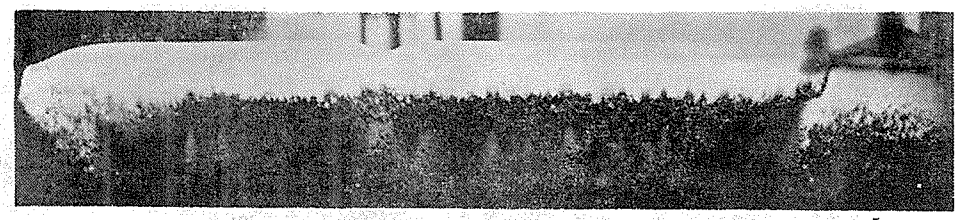
尾鰭狀の氷は下面では，後方に向つて次第に疎になり乍ら消えているが，上面では一線を畫いて消える。そしてそこから後緣にかけて粉狀の小結晶が散布されている。α を負にした

No. 1
G. $\alpha=0$
正　面



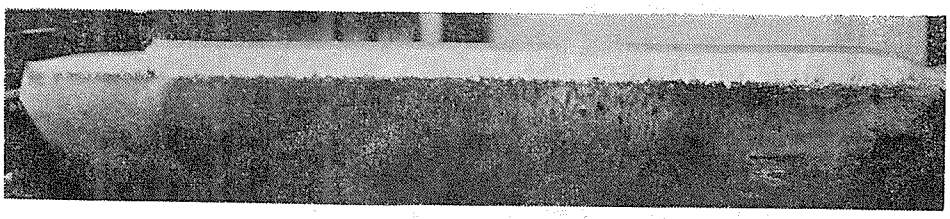
T＝−9.5°C　V＝68m/s　×$\frac{5}{18}$

No. 2
G. $\alpha=0$
上　面



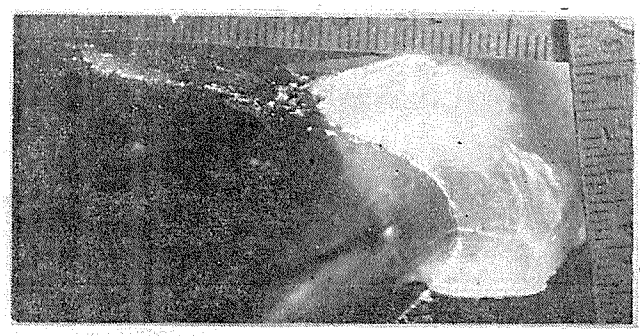
T＝−9.5°C　V＝68m/s　×$\frac{5}{18}$

No. 3
G. $\alpha=0$
下　面



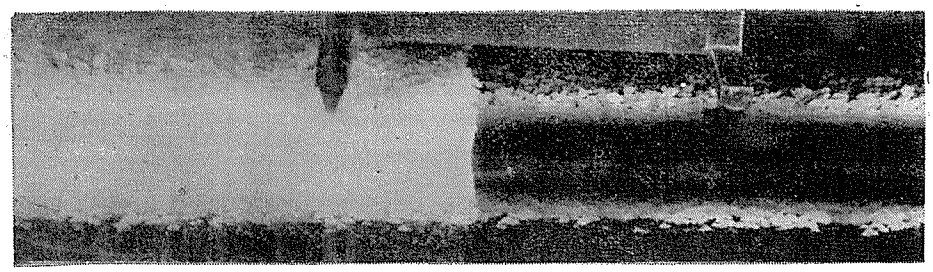
T＝−9.5°C　V＝68m/s　×$\frac{5}{18}$

No. 4
G. $\alpha=0$
斷　面



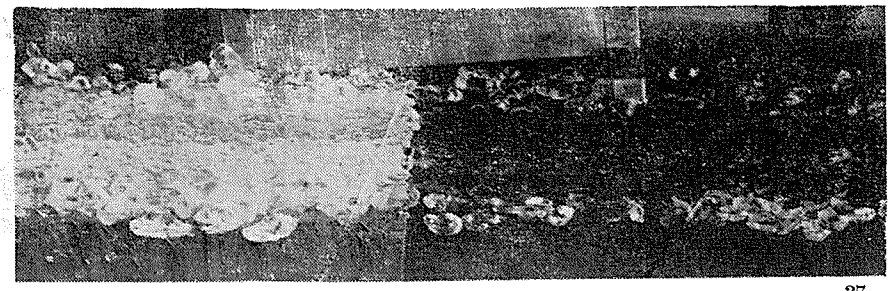
T°＝−9.5°C　V＝68m/s　×$\frac{6}{5}$

No. 25
C. $\alpha=0$
正 面



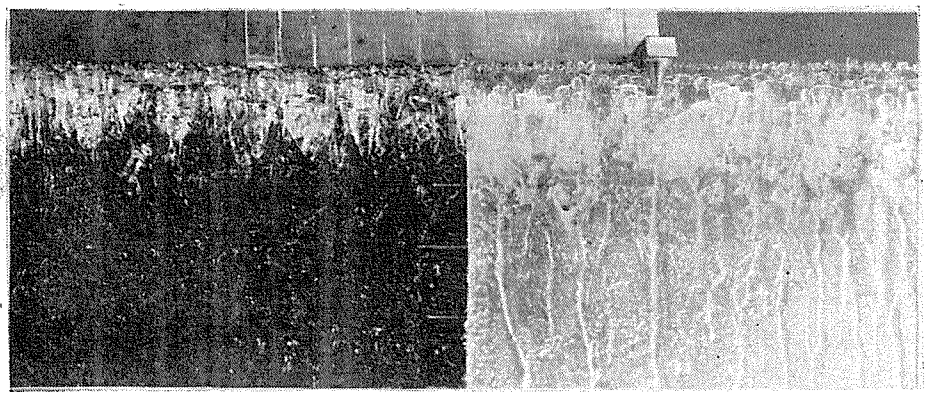
T = −4.2°C V = 46m/s $\times\frac{14}{15}$

No. 26
C. $\alpha=0$
正 面



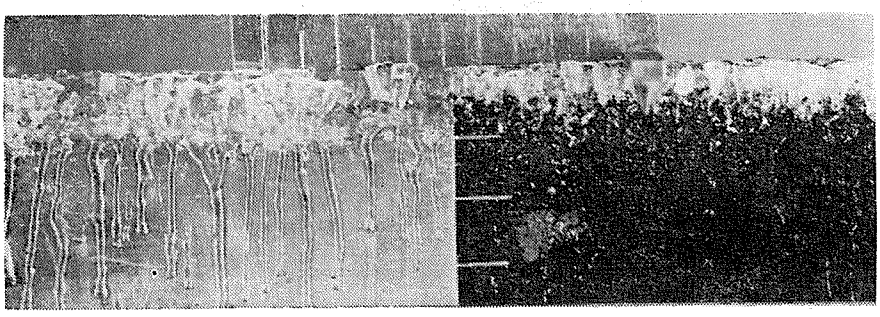
T = −1.3°C V = 42m/s $\times\frac{37}{40}$

No. 27
C. $\alpha=0$
上 面

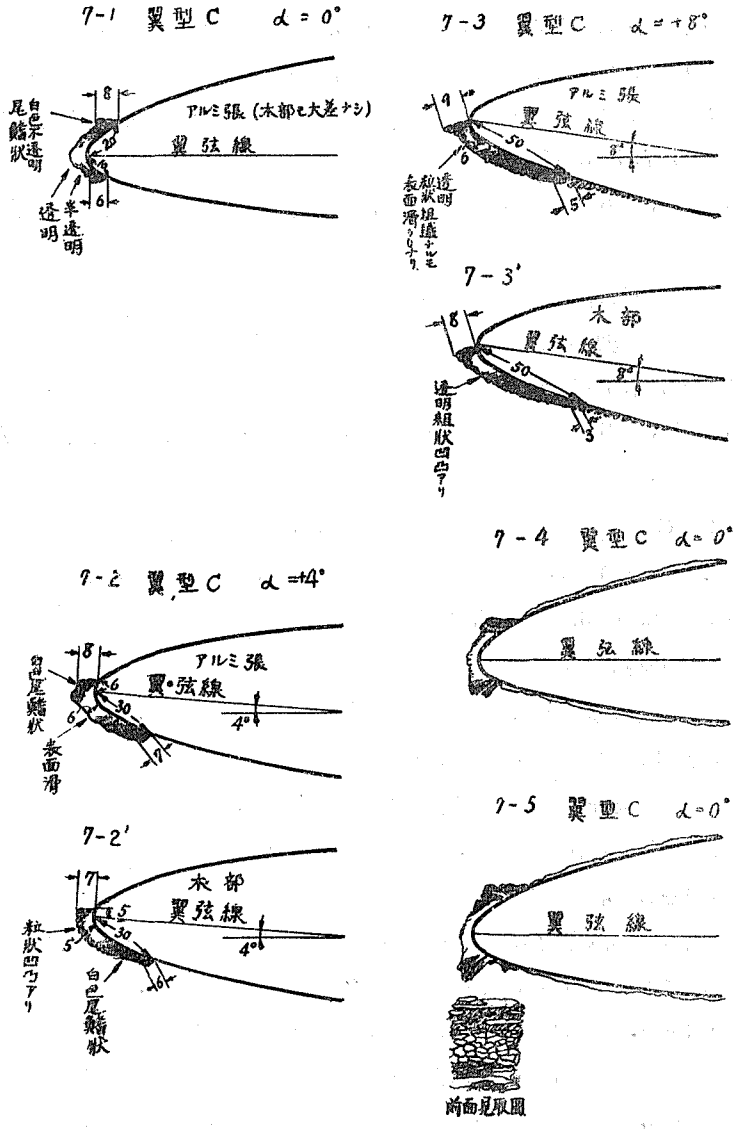


T = −1.3°C. V = 42m/s $\times\frac{37}{40}$

No. 28
C. $\alpha=0$
下 面



T = −1.3°C V = 42m/s $\times\frac{24}{25}$



第　7　圖

ときは，正にしたときと逆になるだけである。只下面に粉状の小結晶が附着していない。3−3 は迎角 $\alpha=+8°$ のときの上面で粉状の霜が見えたが，3−5 の $\alpha=-5°$ の裏面には全くみえない。

2）P翼型（第4圖，4−1～4−4）

迎角 $\alpha=0°$，$+4°$，$+8°$ の三つの場合の他，海軍航空技術廠製作の防氷塗料 H.B 劑を塗布して着氷試験を行つた。その時の氣温は $-9°C$ である。

P翼型は試験した翼型のうち最も厚いもので，着氷見取圖は第4圖に示してある。G翼型

の場合と余り變らない。

H.B劑は翼の片側半分に 2mmの厚さに塗つた。第4圖 4−4 にはH.B劑塗布の部分と塗布しない部分との着氷斷面を比較して示してある。H.B劑を塗つておいても，塗らない時と同種類の着氷がおきる。しかし着氷の附着力は極めて弱く指で少し押せば容易に脫落する。

3) R翼型（第5圖, 5−3～5−6）

迎角 $\alpha=0°$, $+4°$, $+8°$ について實驗した。氣溫 −2°C，風洞內風速 60m/s～70m/s である。

氣溫が可成高いので翼前緣に衝突した過冷却霧粒の一部は凍結せずに風に送られて少々後方に流れる。透明氷の透明度は非常によく尾鰭狀も殆んど透明でよく發達している。

4). D翼型（第6圖, 6−1～6−3′）

迎角 $\alpha=0°$, $+4°$, $+8°$ の三つの場合につき，氣溫 −4.5°C 風洞內風速 50m/s で實驗した。

氣溫 −4.5°C はG翼型とR翼型との中間の場合で，着氷の性質もこの兩翼型の中間の性質を示している。翼の片側半分にアルミニユームを張り，張らない半分の木部との比較をした。第6圖 6—1, 6−2, 6−3, と6−1′, 6−2′, 6−3′, にこの兩部分の着氷斷面を並べて比較表示してある。風洞の運轉を始めると直ちに着氷し始めるが，風洞の窓の外から觀察していると着氷がある厚さになる迄は氷が附いているかどうかよく判らない。ところで，その氷が附いたことが判る時期はアルミニユーム部分の方が木部よりも 1～2 分間早い。卽ち着氷の初期ではアルミニユーム部分の方が成長速度が速いのである。併し，着氷を充分に成長させると，厚さの差は殆んど見られなくなる。それ故成長速度に差があるのは着氷初期の未だ氷がうすい時だけの樣である。*

金屬は木材に比べて熱傳導度が大きいから，過冷却霧粒が衝突して凝固が始まつても，その凝固熱は速かにアルミニユーム板の表面を傳はつて導き去られる。したがつて凝固が起りやすく成長速度が早い。しかし着氷の厚さがある程度達すれば，凝固熱はこの着氷の層を通つて失はれることになるから，最早着氷附着面の熱傳導の差異はほとんど影響を及ぼさなくなるものと考へられる。かくして，着氷の厚さが 2～3mm を超えれば，アルミニユームの部分でも木部でも成長速度に差が認められなくなる。

5) C翼型（第7圖, 7—1～7—5）見取圖 第7圖 7−1～7−3′ は氣溫 −4.2°C のとき，7−4, 7−5 は氣溫 −1.3°C のときの着氷斷面圖である。又寫眞 No. 25 は氣溫 −4.2°C，寫眞 No. 26～No. 28 は −1.3°C のときである。No. 25 と No. 26 とを比較してみれば氣溫が異るだけで他の條件は殆んど同じであるが，着氷の性質は著るしく異なつていることがわかる。卽ち氣溫が −1°C 附近か或はそれより少し高めになると，衝突した霧粒のうち不

* 詳細は論文皿 “各種材質への着氷の研究,, を參照されたい。

凍結部分が多く，液状のまま盛んに翼面に沿ふて後方へ流れる。そして6～7cmほど流れては凍り寫眞 No. 27 No. 28 に見られる通り臙涙の様な形になる。翼前端の氷は全く透明であるが，表面は平滑でなく皺がよつてゐる。氷が透明になるのは結晶の中に氣泡を抱藏していないためである。氣溫が高いため，衝突した霧粒は直ぐには凍らず一度水の膜を作つてから凍るので氣泡を含まないものと思はれる。

VI. 風速と成長速度との關係

着氷の成長速度は氣象條件によつて變るが，同じ氣象條件でも風洞内風速によつて變化する。今回の實驗に於て氣溫の異なる場合のR翼型とD翼型について，風速と翼面についた全着氷量との關係を見れば同一翼型では全着氷量は風速に比例して增大する。しかし翼型の迎角とは，逆比例の關係となる。これは翼の迎角を增すことにより風洞内風速が低下するためで，迎角を增すと氷の附着範圍は擴がるが，全體の着氷量は却つて減少する。

R型とD型とで異なつた曲線の傾斜を得たが，その時の氣象條件や翼型の形狀の相異によるものと思はれる。又前述第1表の資料により風速と成長速度との關係を求めてみた。

各々の翼型について風速と成長速度（mm/min）との關係を檢べてみると各翼型とは氣象條件により，その結果にばらつきを生ずるが大體風速 60m/sec では着氷は1分間約1mm伸びるとみてよい。又一方成長速度は迎角に余り影響ないやうに思はれる。尙これらの詳細なる檢討は次の研究に待たなければならない。

C翼型で，殆んど同一氣象條件の下に，風速52m/sec, 42m/sec, の二つの場合について比較すると，この場合については，風速以外の條件は略同一である。（第1表參照）そして風速42m/sec, に於ては成長速度 0.3mm/min, 風速 52m/sec, では 0.6mm/min, となつて，風速增加による成長速度の增加は比例關係より遙かに著るしい様に思はれる。

VII. 摘　　要

ニセコアンヌプリ山頂（北海道虻田郡狩太村）に於て昭和18年から19年にかけての冬に行つた風洞による翼型への着氷の實驗報告である。

風洞内に模型翼型を設置し，過冷却水滴を含む外氣を吸込み，最高 70m/sec, の風速で翼型にあてて着氷せしめた。

氣溫の高低により着氷の性質，構造は異る。氣溫が低いときは白色の霧氷に近い性質を示し，氣溫が高い時は透明な氷となる。しかし，着氷の生ずる範圍は氣溫の高低によつては殆んど變らないが，多量に着氷させていると，翼型により相異の著るしいことがわかる。

翼面の材料としては木材，アルミニユームの二つを用いたが，着氷の極く初期に於てはアルミニユームの方が稍々成長速度が大きい。しかし，何れの翼型に於ても成長速度は風速に

比例し，風速 60m/sec，では 1 分間に 1mm 位着氷は伸びる。

防氷塗料 H. B 劑を塗布しても，塗布しない場合と 同様に着氷する。しかし塗布すれば着氷の附着強度は極めて弱くなる。

本報告中に入れた着氷の見取回及び寫眞は夫々低溫科學研究所，黑岩助手，日本映畫社，湯川氏の手になつたものである。茲に記して深謝する次第である。

文 献

1) Scott, M. 1930. Ice formation on aircraft. J. Frank. Inst, No. 210. P. 537
2) Dantan, J. 1939. 航空機の凍結 I. II.： 航空記事 No. 199 No. 202.
3) Livista, T. 1939 飛行中に於ける凍結を論ず，航空記事 No. 208
4) 小平，松本譯編 1943. 雲中飛行と着氷： 航空科學技術蒐錄 9, 1 No. 8
5) 花島政人，1949 全含水量の測定について，低溫科學 2, 169
小口八郎，1949 霧粒の大さ及數の測定法について，低溫科學 2, 105

Résumé

Five samples or wing model were used. The structure of ice and its distribution on the model surface were studied as the function of temperature, fog density, wind velocity and the inclination of the using model. Especially the speed of ice formation was investigated as the function of wind velocity.