

高速度プロペラと空気流動の状況

所 員 栖 原 豊 太 郎
 技 師 佐 藤 直 藏
 技 手 龜 井 靜 武
 佐 藤 武 三 郎

1. 緒 言

近年飛行機の速度が著しく増加して来たために、其プロペラも翼端速度の甚だ大なるものが段々使はれる様になつて来た。然るに一般にプロペラでは翼端速度が或る程度以上に大きくなると其効率が著しく減ずると云ふ既知の事實がある。即ちこの効率變化の前後に於ける空気流動の實況を視ることは、プロペラの研究上興味あることと思はれるので著者等は一二の方法により其撮影を試みた次第である。

著者等が試みた最高の翼端速度は毎秒 523.6 m であるが、これは多分嘗て記録された最高のものであらう。以下は此の研究の一部であつて上記の高速度に至るまで種々の速度に於てプロペラを通る空気流動を撮影した結果の記述である。

プロペラと空気流動の寫眞的研究は今から二十數年前に田中館博士によりて試みられて居る。又高速度プロペラに關しては近年數種の研究が發表されて居る。DOUGLAS⁽²⁾等の實驗結果によると、翼端速度が空氣中の音波の速度の約七割になるとプロペラの効率は低下し始め、約八割程度から甚だしく低くなると云ふのである。又 JENNINGS⁽³⁾, HARTSHORN⁽⁴⁾等の結果によればプロペラの翼端速度が音波の速度に達すると効率が著しく下ると云ふのであるが、此等の事柄が空気流動の如何なる變化に基くかは本實驗の寫眞から觀察することが出来る筈である。

2. 目 的

實際空氣中で廻轉して居るプロペラの寫眞を撮つて見たところが、其翼端から細い螺旋

(1) TANAKADATE-A; Comptes Rendus, 18 juillet 1910.

(2) G. P. DOUGLAS and W. G. A. PERRING; A. R. C., R and M, Nos. 1083, 1091, 1123, 1124, 1134, 1173, 1174, 1198.

(3) W. G. JENNINGS and A. ORMEROD; A. R. C., R and M, No. 1339.

(4) A. S. HARTSHORN and G. P. DOUGLAS; A. R. C., R and M, No. 1438.

状の線が風下に流れて居ることが顕れた。これは明に翼端渦の心である。本実験に於ては此の心の線及心線の周囲の状況並に之等の變化する状況を撮影し、それによつてプロペラを通る空気流動の状態を観察しようとするのであつて、更に之を分けると

- (1) 普通の「渦動論によるプロペラ理論」が成り立つ範囲内で実際に生ずる空気流動の状態、
 - (2) 渦動論が適用出来ない場合の空気流動の状態、
 - (3) 上記二種の場合の中間に於ける空気流動の状態、
- 等を観察しようとするのが目的である。

3. 実験の装置と方法

本実験に使つたプロペラはデュラルミン製二翼のもので直径 40 cm, 第一圖に其略圖を示した。固定臺上で運轉するため其ピッチは特に小さくしたのである。尙高速廻轉の際は翼に多少の弾性變形を起すこと勿論である。此のプロペラを廻すには特に製作した増速嚙合装置を用ひ、低速から最高毎分 25000 廻轉即ち翼端速度毎秒 523.6 m 迄廻して実験を試みた。

本実験に於ては、プロペラを室内の固定位置に於て廻した。且つ何れの方角からも特に風を送らなかつた。即ちプロペラ周囲に於ける空氣の運動はプロペラ自身が引き起したのみである。氣流撮影には總て電氣火花を光源とし軽く Schlieren を用ひた。第三圖以下に列擧した寫眞は皆此の装置で撮影したのであるが、撮影は二つの方向から行つた。何れもプロペラ軸を含む水平面内からであるが、其一はプロペラの廻轉面に對し風下に約 3° の方向であつて略々側面寫眞である。其二是同じく 57° の方向であつて斜正面寫眞である。プロペラとカメラとの距離は約 10 m であつた。第二圖はプロペラ及増速装置の寫眞である。プロペラは増速装置の側から見て牽引型左廻りのものである。

列擧した寫眞の中で第三圖より第二十六圖迄は單に空氣中に於てプロペラを廻した場合の寫眞であつて、第二十七圖より第三十八圖迄は熱空氣を風上から自然に吸込ませめた場合の寫眞である。

4. 第一種流型

第三圖に示したのは斜正面の寫眞であつてプロペラの速さは毎分 7230 廻轉、翼端速度毎秒 151.4 m である。翼端から流れ出る螺旋狀の細い線は翼端渦の心線である。此の畫面で翼は時計と反對の方向に廻つて居る。以下斜正面の寫眞では何れも同様である。

第四圖に示したのは側面寫眞であつてプロペラの速さは毎分 8100 廻轉、翼端速度毎秒 169.6 m である。圖に於てプロペラ軸の上側に來て居る翼は紙面の裏から紙面を突き抜きて手

前の方に來る様に廻つて居るのである。以下の側面寫眞は何れも同様である。翼端の渦の心線は稍明かに出て來た。右方に於て渦の心線が變形して居るのは、風下に流れるに従ひ渦が自然に破壊するのと増速装置や其臺などの影響を受けるためである。

第五圖及第六圖の場合は何れも毎分 9560 廻轉，翼端速度毎秒 200.2 m である。渦の心線は明瞭に且つ規則正しく顯はれて居る。實際のプロペラに於ても此の程度の速度になると、翼端から青味を帯びた焰の様なものが見えるのが見えるが、これは全くこの心線に外ならないのである。而して此の渦は風下に吹き送られ螺旋狀をなして居るのであるが渦は極めて強いものであることがよく解る。

第七圖及第八圖は何れも毎分 10450 廻轉，翼端速度毎秒 218.9 m の場合の斜正面及側面寫眞である。渦の心線は速度の増加とともに一層強く顯はれて居る。

第九圖及第十圖の場合は何れも毎分 11350 廻轉，翼端速度毎秒 237.7 m である。⁽⁵⁾ DOUGLAS 等の實驗によれば此の程度の翼端速度からプロペラの推力が減少し抗力が増加し効率が低下し始めることが報告されて居るが、此の寫眞に顯はれて居る渦の状況にはまだ異狀が認められない。然し翼端渦が正しく螺旋狀をなして兎も角も安定らしく存在するのは大體此の程度の速度迄であつて、之れ以上になると漸次渦は崩れ始める。或は正しい渦が出來難くなると云ふ方が適當であらう。次の第十二圖では明に渦が壞れ始めて居ることが知られる。

勿論著者等が使用したプロペラは上記 DOUGLAS 等の使用したものと形に於て異なり且つ實驗方法に於て全く異なつて居ることは、此の限界速度に相異を生ぜしむる原因となるから更に詳細なる數量的實驗を試みたいと思つて居る。

以上低速より翼端速度毎秒約 250 m 程度に至る間は翼端渦流は比較的正しく誘成されて居ることは事實である。即ち翼に對する渦動論の適用が妥當なる範圍であつて、此の範圍の流動状況をこゝでは第一種流型と呼ぶこととする。

5. 第二種流型

プロペラの翼端速度を更に増加すると翼端渦の第一種流型が漸々に崩れて來る。第十一圖及第十二圖に示したのは何れも毎分 13600 廻轉，翼端速度毎秒 284.8 m の場合の斜正面及側面寫眞である。第十二圖に於て明かなる通り、翼の一廻轉後には渦流の心線は既に崩れかけて居る。翼端速度を更に増加すると此の螺旋渦は益々壞れ僅に翼端直後に少しく存する状態となる。此の如くして翼端速度が音波の速度に達すると又別に壓縮波が顯れる。此の様に翼端渦流が崩れ始める程度から翼端速度が音波の速度になるまでの流動状況をこゝでは第

(5) 前出

二種流型と呼ぶこととする。

第十三圖及第十四圖は同じく第二種流型であつて、毎分 15000 廻轉、翼端速度毎秒 314.2 m である。渦の心線は第十一圖及第十二圖の場合に比し一層速かに解消して居る。

上の圖で明なる通り流動が第二種流型に入ると翼端渦は漸々不完全になり、同時に不連続流動の様な性質が増して来る。空気壓縮の影響が著しくなり、普通の翼の渦動論の適用が困しくなる。此の状態に於てプロペラの効率は甚だしく低下するのは當然である。

6. 第三種流型

プロペラの翼端速度が音波の速度に達すると翼端より別に壓縮波を發生する。此の速度より以上の高速度の場合の流動をこゝでは第三種流型と呼ぶこととする。

第十五圖及第十六圖は第三種流型の始まりの寫眞であつてプロペラは毎分 15800 廻轉、其翼端速度毎秒 330.9 m である。第二種流型に引續き僅かに残つて居る翼端軌痕の外に、翼端から壓縮波が出て居ることが兩圖に於て明かに解かる。

第十七圖及第十八圖は同様第三種流型の流動であつて毎分 16000 廻轉、翼端速度毎秒 335.1 m である。兩圖に於て翼端の壓縮波は一層明かに顯れて居る。翼端の通過した痕跡はなほ残つて居るがこれは完全なる翼端渦の心線とは考へられない。此の事は後に示す第三十六圖を見れば解かるであらう。

第十九圖及第二十圖は更に廻轉速度を増した場合の寫眞であつて、何れもプロペラは毎分 16550 廻轉、其翼端速度は毎秒 346.6 m である。

第二十一圖及第二十二圖は何れも毎分 18000 廻轉、翼端速度毎秒 377.1 m である。此の程度の速さになると翼端の壓縮波は著しく強く顯はれて来る。第二十二圖に於てプロペラと約 80° の角をなせる半徑の大なる波は翼端の波が床面から反射して來たものである。

第二十三圖は更に高速廻轉の場合であつて、毎分 22500 廻轉、翼端速度毎秒 471.2 m である。此の程度になるとプロペラより發する音は極めて強大であつて附近に居る人の耳を強く襲ひ、十分に耳栓をして居ないと到底耐えることが出来ない程である。第二十三圖に於て強い壓縮波は翼端前縁からと翼の後縁からと出て居る。後縁から出て居る波は翼端からでなく、かなり半徑の小さい所から出發して居る。此の出發點附近の翼素が丁度音波の速度になつて居るのである。此の寫眞にも壁や床からの反射波が出て居る。

第二十四圖は第二十三圖と略々同様の速さでプロペラが廻轉せる場合の側面寫眞である。即ち何れも毎分 23000 廻轉、翼端速度毎分 481.7 m である。

第二十五圖及第二十六圖は本實驗に於ける最高速即ち何れも毎分丁度 25000 廻轉、翼端速度毎秒 523.6 m に於ける側面寫眞である。翼の後縁から出て居る鋭き波は第二十三圖

の場合と同様、音波の速度に達した翼素から出發して居る様である。此の程度の速さでは壓縮波の強さは非常なものであつて、近距離に居ると目に強い振撃を感じ到底正視することが出來ない程であつた。又動力の吸収も甚だしく、此の僅かに直徑 40 cm のプロペラで約 150 馬力を要した。

7. 翼端渦の心線の周圍に於ける流動及翼端波

以上三種の流動状態に於ける渦の現況を一層明かにするため、プロペラを通過して熱空気を吸込ませ種々の速さに於て其運動を撮影した。第二十七圖以下に示したのは此等の寫眞である。

第二十七圖より第三十二圖までは第一種状態の流動であつて、プロペラの廻轉面に種々の方向から熱空気の流れを吸込ませたものである。何れもプロペラは毎分 8500 廻轉、翼端速度毎秒 178 m である。此の中で第二十七圖は廻轉面の中心に近く、プロペラ軸に略々平行に熱空気を吸込ませた場合であつて、廻轉面の直前に於ては氣流はプロペラの廻轉と同方向に正しく捩られながら吸込まれて居ることが明かに解かる。第二十八圖は軸に對し約 18° に熱空気を流した場合で、第二十九圖は同じく約 20° に流した場合である。熱空気が翼で剪斷された痕が明に顯はれて居る。

第三十圖は廻轉面に對し約 45° に熱空気を吸込ませた場合であつて前圖と同様熱空気の剪斷面が明かに出て居る。これは翼にて切られた部分は氣流中に著しき不連續面を作ること示すものであつて、且つ其面より風上の部分の流れは可なり恒常性を有して居るが、風下の部分即ち翼のために強く蹴られた部分は大分亂れて流れて居ることをよく示して居る。

第三十一圖は廻轉面の周圍に近く、軸に對し約 60° の方向から熱空気を流した場合である。熱空気はプロペラの風下で最初の渦の心線のアーチを潜り第二の心線の周圍に美事に巻き付いて居る。

第三十二圖はプロペラ軸に略々直角をなせる流入線に沿いて熱空気を流したものであつて、前圖と同様渦の心線に強く巻き付いて居ることがよく解る。

以上の寫眞より觀ると、前進せざるプロペラの吸込側に於ては、空氣はプロペラの廻轉面に入る前から全體としてプロペラと同方向に捩られつゝあることが明かである。此の現象は前進するプロペラに於ても多少存在することは容易に推定されるであらう。

第三十三圖及第三十四圖は何れも毎分 13000 廻轉、翼端速度毎秒 272.3 m、即ち第二種流型の初期の場合である。熱空気の吸込は前の第三十一圖に示した場合と同様であるが同圖に比較して見ると渦の心線の様子が稍變つて居る。即ち第三十三圖及第三十四圖では心線は不規則な屈曲をなして居る。これは明かに翼端渦は其生成の始めから或る變調を受けて居る

ことを示すものである。且つプロペラの廻轉速度が増加すればする程此の心線の破壊が著しく顯れて來ること前述の通りである。而して圖に於て明かなる通り心線に屈曲が起ると共に心線周圍に於ける廻轉流動が著しく衰えて居ることが解るであらう。

第三十五圖及第三十六圖は何れもプロペラの速さ毎分 16000 廻轉、翼端速度毎秒 335.1 m、即ち音波の速度の場合であつて第三種流型の始まりである。之等を前の第一種流型の第三十一圖、第二種流型の第三十三圖及第三十四圖に比較すると、渦の心線は翼端の直後に少しく存在するだけで後流中に解消してしまふ。此の熱空氣の破壊状況を見ても第一種流型の渦は出來ないと云ふことが明かに解かる。

第三十七圖及第三十八圖は毎分 18400 廻轉、翼端速度毎秒 385.4 m であつて前の第二十一圖及第二十二圖と略同様の速度である。第三十五圖及第三十六圖に對して翼端波が一層著しく出て居る。

8. 結 論

本研究に於ては前に述べた通り列擧した寫眞其物が目的であり結論となるのであるが更に補足して再言すると、此實驗の装置では

(1) 前進せざるプロペラに於ては其翼端速度毎秒 250 m 程度迄は強い翼端渦が成立する。此の渦は發生直後に於ては極めて規則正しい形を保つて居るがプロペラの數廻轉後には破壊し減衰を始める。而して上記以下の範圍が渦動論を適用し得る状態である。但し此の限界の速度はプロペラの形狀其他の條件によりて多少の變化をなすであらう。

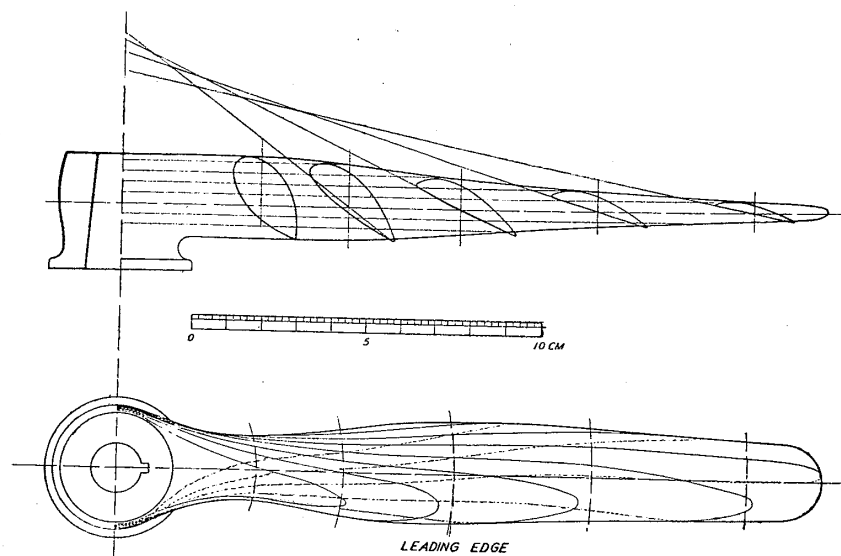
(2) 翼端速度が空氣中の音波の速度以上になると翼端渦は成立しないで、寧ろ不連続流動の状態となり、渦動論の適用範圍外となることが明に觀察される。其上翼端に強い壓縮波を發生する。其等の結果としてプロペラの効率に著しき低下を起す。而して此の限界速度は勿論音波の速度である。

(3) 翼端速度が毎秒 250 m 程度から音波の速度に達する迄の間では、速度が増すに従ひ翼端渦は段々破壊され不連続性が増し且つ空氣壓縮の影響が著しくなつて來る。其等の結果で効率の低下を生ずる。此の範圍でも普通の渦動論は直に適用出來ない。

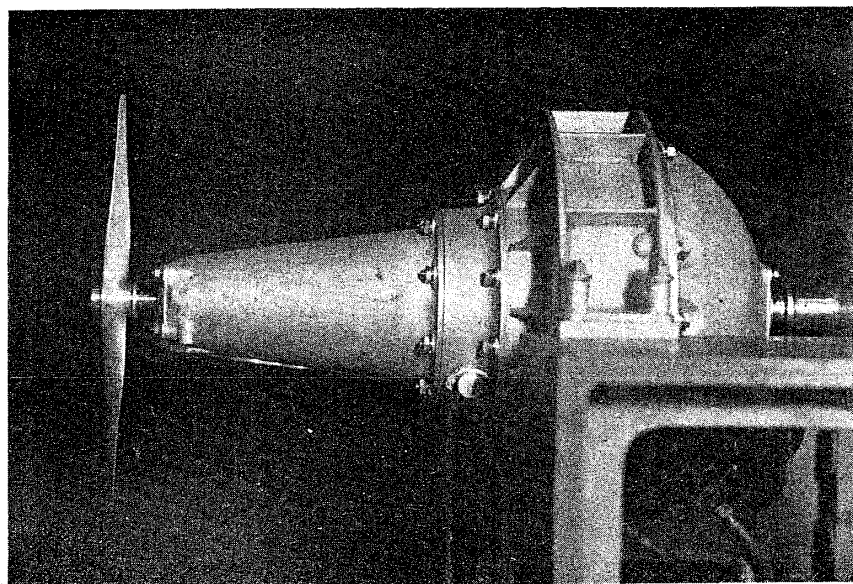
此の實驗は主として昭和六年春に行つたものであるが其後著者等は上記の渦の運動を高速度活動寫眞に撮影して見た。又此等の渦流がエーロフォイルを流過する種々の現象を撮影して見た。其結果は近く報告出來る積りである。

此の實驗を行ふに當り柳澤柳吉君は此の高速度用プロペラ及増速装置の設計製作に就て我々を助けられた事に對し茲に厚く感謝の意を表する次第である。

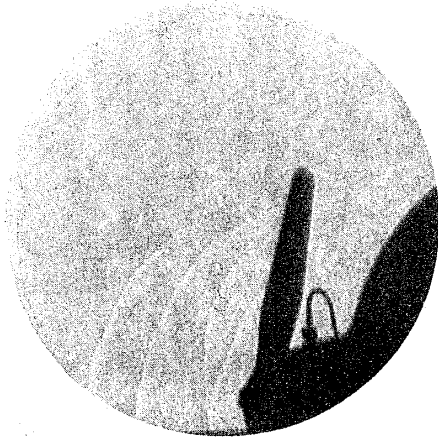
昭和九年二月



第 1 圖 實驗に使用したプロペラ



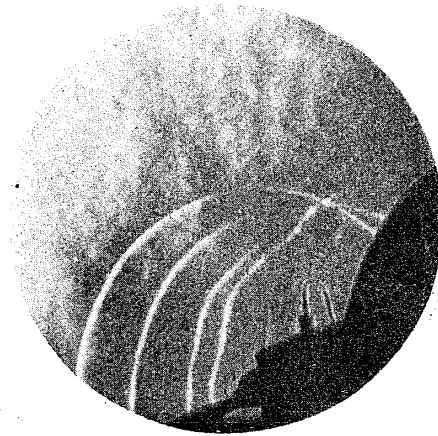
第 2 圖 プロペラ及増速装置



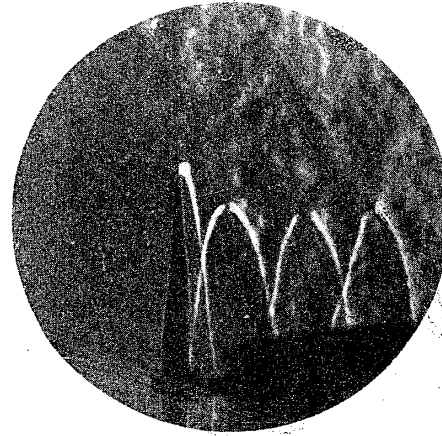
第 3 圖 翼端速度 151.4 m/s



第 4 圖 翼端速度 169.6 m/s



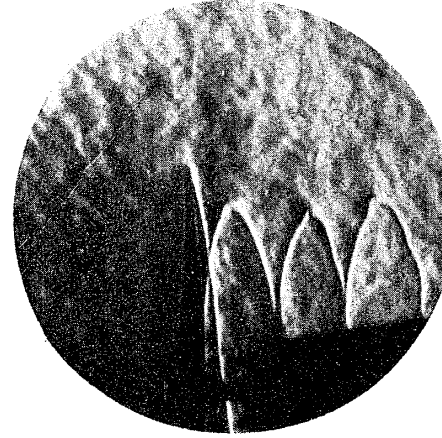
第 5 圖 翼端速度 200.2 m/s



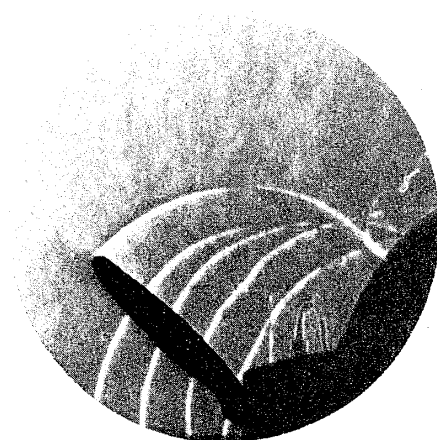
第 6 圖 翼端速度 200.2 m/s



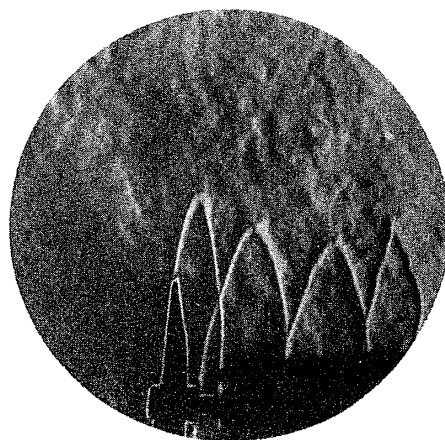
第 7 圖 翼端速度 218.9 m/s



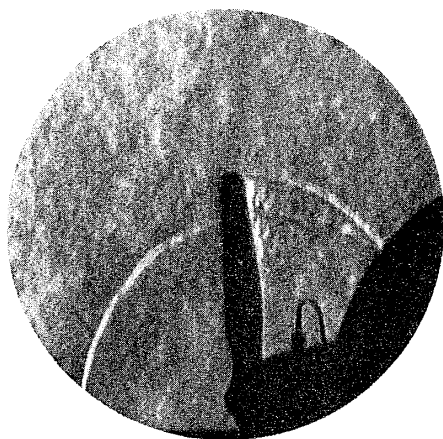
第 8 圖 翼端速度 218.9 m/s



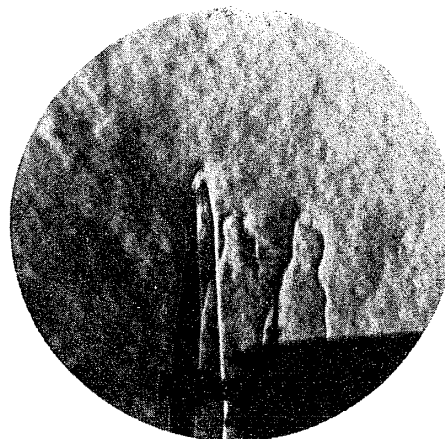
第 9 圖 翼端速度 237.7 m/s



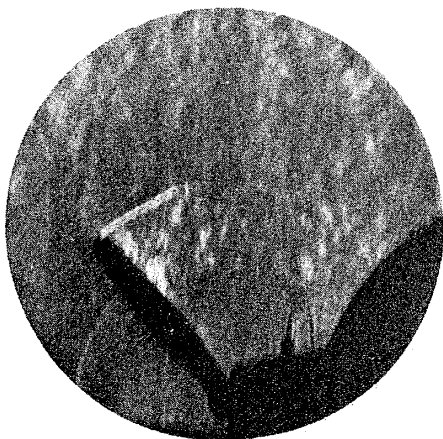
第 10 圖 翼端速度 237.7 m/s



第 11 圖 翼端速度 284.8 m/s



第 12 圖 翼端速度 284.8 m/s



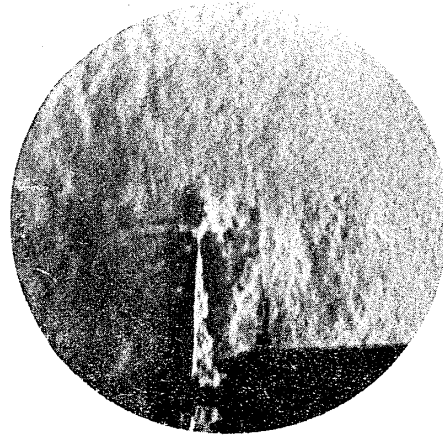
第 13 圖 翼端速度 314.2 m/s



第 14 圖 翼端速度 314.2 m/s



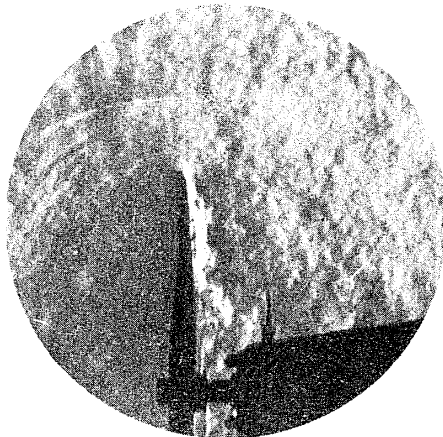
第 15 圖 翼端速度 330.9 m/s



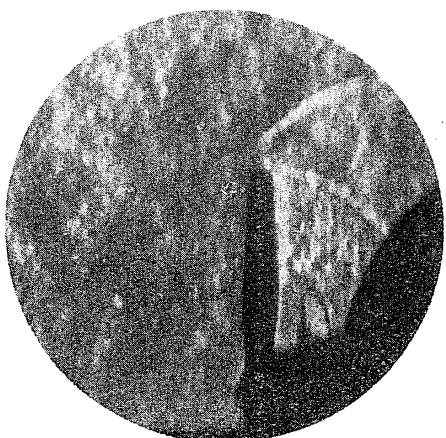
第 16 圖 翼端速度 330.9 m/s



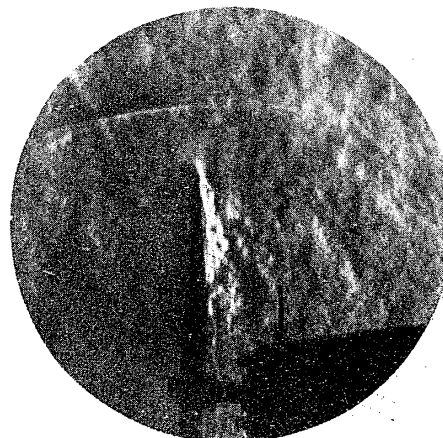
第 17 圖 翼端速度 335.1 m/s



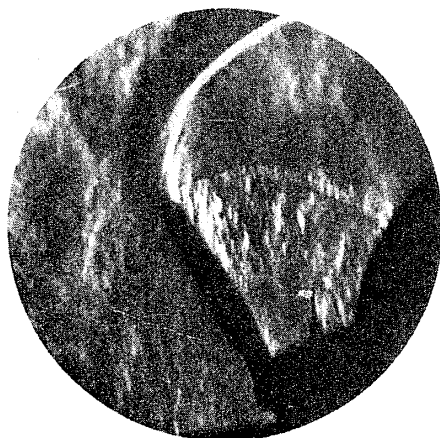
第 18 圖 翼端速度 335.1 m/s



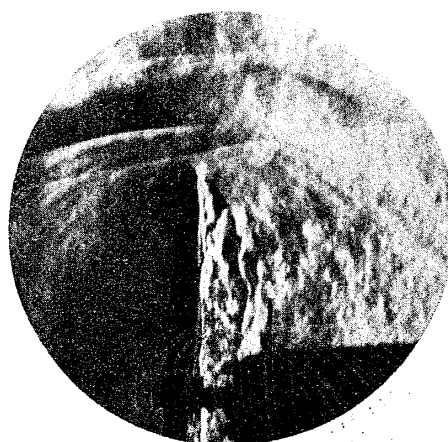
第 19 圖 翼端速度 346.6 m/s



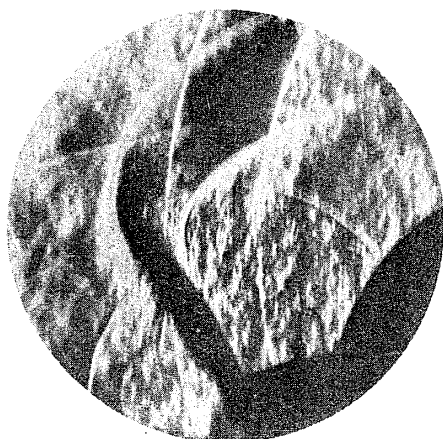
第 20 圖 翼端速度 346.6 m/s



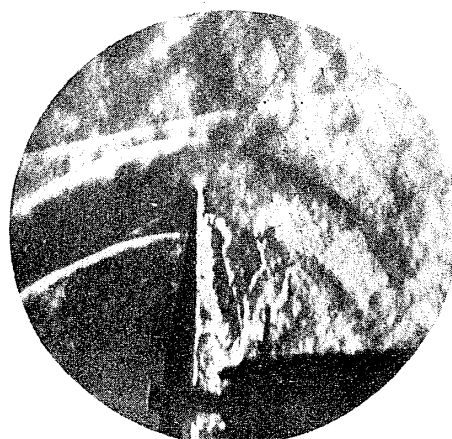
第 21 圖 翼端速度 377.1 m/s



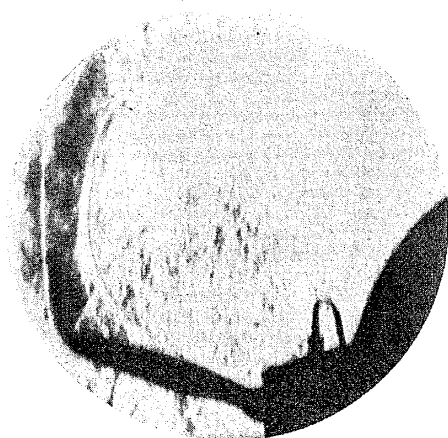
第 22 圖 翼端速度 377.1 m/s



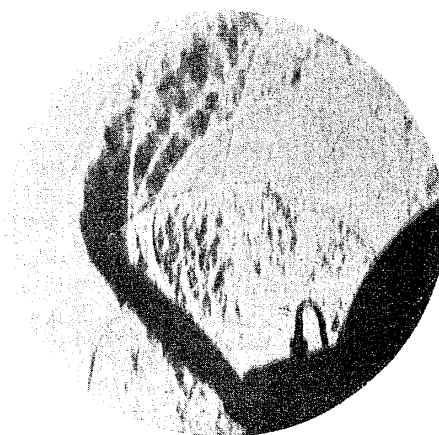
第 23 圖 翼端速度 471.2 m/s



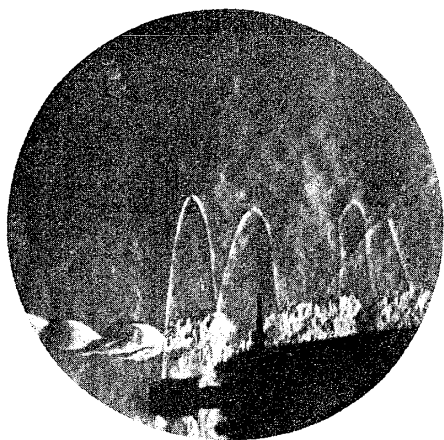
第 24 圖 翼端速度 481.7 m/s



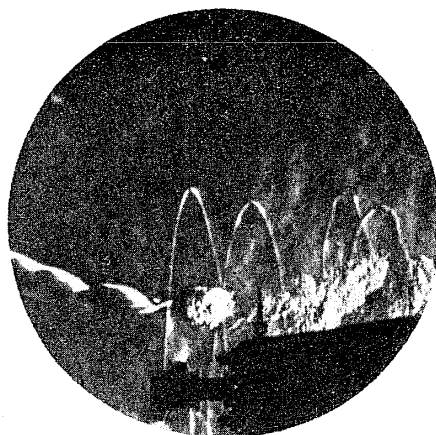
第 25 圖 翼端速度 523.6 m/s



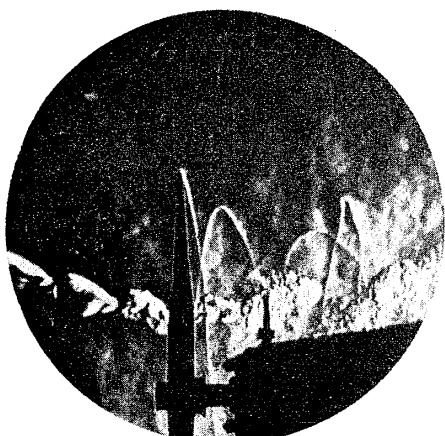
第 26 圖 翼端速度 523.6 m/s



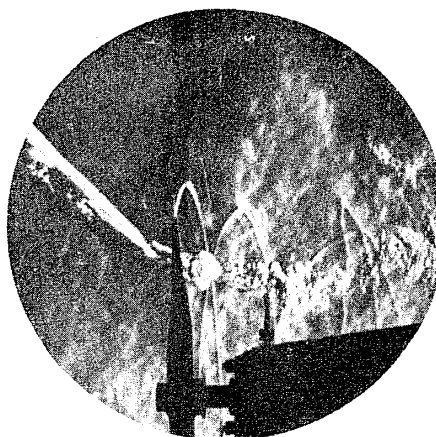
第 27 圖 翼端速度 178.0 m/s



第 28 圖 翼端速度 178.0 m/s



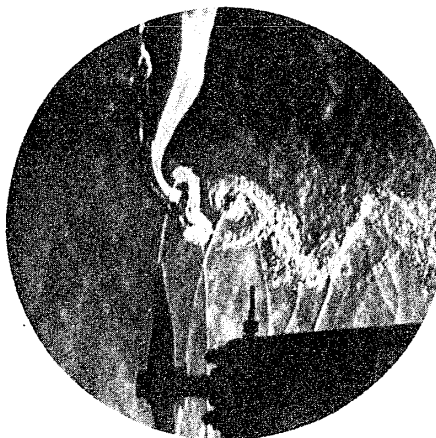
第 29 圖 翼端速度 178.0 m/s



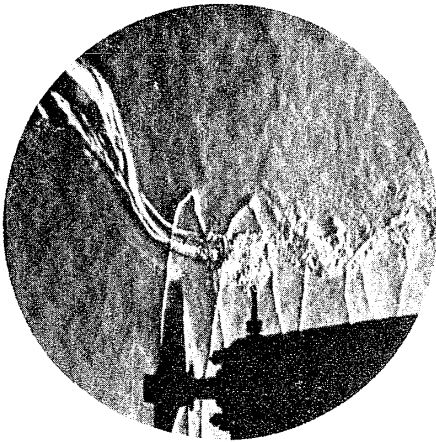
第 30 圖 翼端速度 178.0 m/s



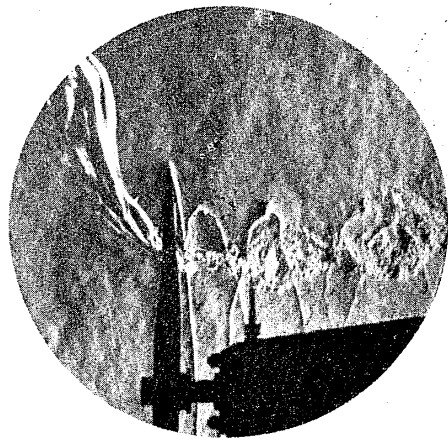
第 31 圖 翼端速度 178.0 m/s



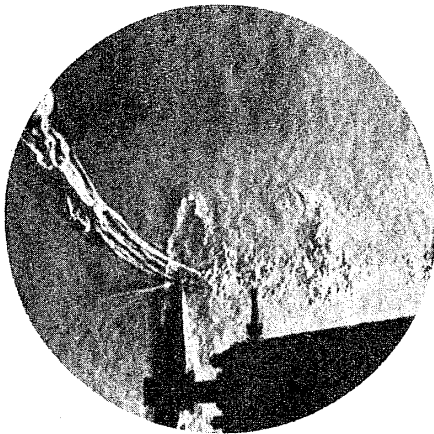
第 32 圖 翼端速度 178.0 m/s



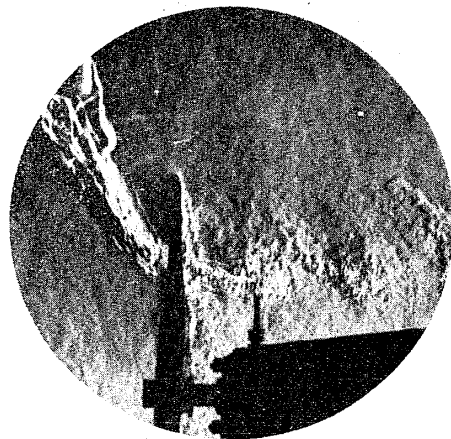
第 33 圖 翼端速度 272.3 m/s



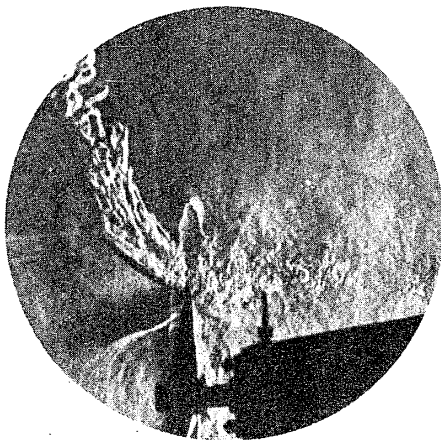
第 34 圖 翼端速度 272.3 m/s



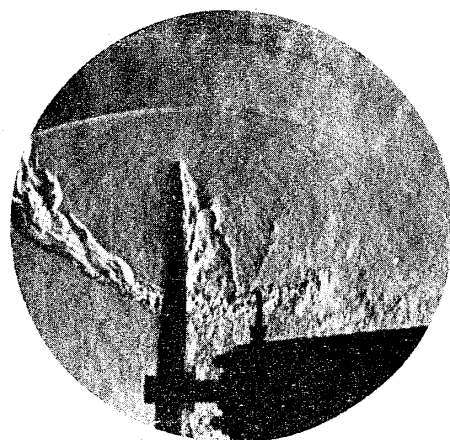
第 35 圖 翼端速度 335.1 m/s



第 36 圖 翼端速度 335.1 m/s



第 37 圖 翼端速度 385.4 m/s



第 38 圖 翼端速度 385.4 m/s