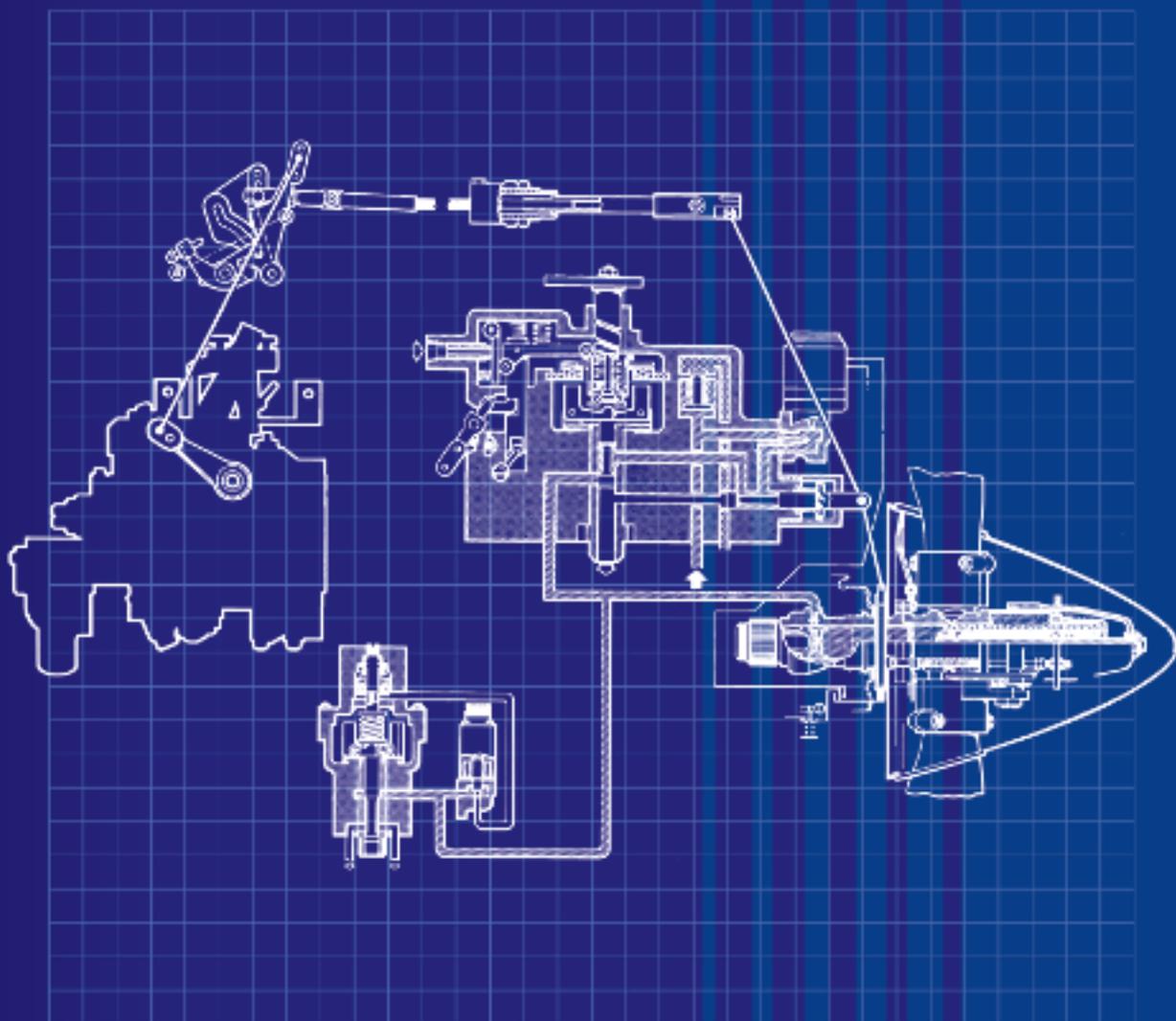


プロペラ

Propeller



目 次

第1章 プロペラの基礎	1
概 要	1
1-1 プロペラの推力	1
1-2 プロペラのブレードと作動状態	3
1-3 いろいろな飛行状態における前進角	7
1-4 プロペラの迎え角とエンジン出力	8
1-5 プロペラのピッチ	8
1-6 風車ブレーキと動力ブレーキ	10
1-7 プロペラの効率	11
1-8 すべり	12
1-9 プロペラの翼型	12
1-10 ブレードに発生する推力	13
1-11 ラセン先端速度	14
1-12 静止推力	14
1-13 剛 率	15
1-14 トラック	15
1-15 進行率	16
1-16 プロペラの係数	16
1-17 飛行機とプロペラの相互作用	17
第2章 プロペラに働く力と振動	21
概 要	21
2-1 定常応力	21
2-2 プロペラの振動	24
2-3 プロペラの疲れ現象	26
第3章 プロペラの種類	28
概 要	28
3-1 材料による種類	28
3-2 ピッチによる種類	30
3-3 自動プロペラの種類	31
3-4 推力の型によるプロペラの種類	35

3-5	構造によるプロペラの種類	36
3-6	動力装置によるプロペラの種類	37
第4章	プロペラ制御装置	40
	概 要	40
4-1	一 般	40
第5章	実用プロペラ	45
	概 要	45
5-1	プロペラの取付法	46
5-2	固定ピッチ・プロペラ	47
5-3	調整ピッチ・プロペラ	47
5-4	定速プロペラ	48
5-5	プロペラ型式の指定法 (参考)	77
5-6	プロペラ・ピッチ変更方法 (参考)	78
第6章	プロペラの付属品および指示系統	79
	概 要	79
6-1	無線雑音抑圧器	79
6-2	スピナ	80
6-3	カフス	81
6-4	プロペラの防除氷	82
6-5	プロペラ同調系統	87
6-6	プロペラ指示系統	88
第7章	プロペラの整備	90
	概 要	90
7-1	プロペラの検査	90
7-2	プロペラの保守	91
7-3	プロペラの修理	92
7-4	プロペラの故障例	95
7-5	プロペラのオーバホール	97
	索 引	106

第1章 プロペラの基礎

概 要

プロペラは、航空機や船に用いられ、エンジンの出力をプロペラの回転による推進力によって前進または後退させるための装置である。

航空機に用いられるプロペラは一般的に2枚から6枚のブレードと呼ばれる羽根により構成されており、ブレードを回転させることで空気に加速度を与えて推進力を得ている。

ブレードの断面形は飛行機の主翼と同様の形状をしており、主翼の翼型理論と合致するが、回転中のプロペラは先端へ行くほど流入する空気速度が大きくなるため、プロペラの付根付近はブレード角が大きく、先端へ行くほどブレード角が小さくなるよう、ねじりが付けられている。

飛行機が静止状態において、理論上、プロペラが1回転で進む距離を幾何学ピッチ（幾何ピッチ）という。また、飛行状態においてプロペラが1回転に進む距離を有効ピッチという。幾何ピッチと有効ピッチの差をすべり（Slip）という。

プロペラには固定ピッチ・プロペラと可変ピッチ・プロペラがあり、前者はピッチが固定のためエンジンの回転数の増減で推進力を変化させているが、後者は飛行状態に応じてピッチを変換することにより、プロペラ回転数を任意に設定し、プロペラ推進の効率を高めることができる。

また、多発機の場合は回転数を同調させることで騒音の低減を図るなど、快適な飛行を可能にしている。

1-1 プロペラの推力

回転中のプロペラのブレードは周囲の空気に作用を与え、これを加速し続ける。作用を受けた空気はプロペラに、その反作用を返す。これがプロペラの推力である。プロペラが周囲の空気に及ぼす作用の大きさは、ニュートンの第2法則により、運動量から求めることができる。第2法則によれば「任意方向の運動量の変化の割合は、その方向の外力に等しい」としている。この表現をプロペラの推力に適用すれば、「**空気に与えられた運動量の推力方向の変化の割合は、与えられた推力に等しい**」と言い換えることができる。

いま、プロペラにより単位時間に作用を受けた空気の質量を m 、空気が得た速度を u とすれば空気に与えられた運動量は mu となり、これが推力 T に等しい。

$$T = mu \dots\dots\dots(1-1)$$

プロペラ推進では、この推力を得るのに比較的多量の空気に小さな速度を与える。一方、ジェット推進やロケット推進では、少量の空気に大きな速度を与えて推力を得る。

さて、(1-1) 式で表される運動量を空気に与え、空気を加速するためには、空気にエネルギーを与えなければならない。このエネルギーの大きさは、空気の運動エネルギーの増加 Ke から求めることができる。

$$Ke = \frac{1}{2} mu^2 \dots\dots\dots(1-2)$$

ここで、飛行機が速度 V で前進しているときには、空気にさらに余分の運動量 mV を与えなければならない。図 1-1 はプロペラ面の空気の流れの状態を示す。

飛行機が空気に与えた運動量は、 $m(V+u) - mV = mu$ 、飛行機の行う有効仕事率は、 $T \times V = muV$ となる。

一方、飛行機が空気に運動量 mu を与えるために費やしたエネルギーは、空気が得た運動エネルギーの増加に等しいから

$$\frac{1}{2} m \{ (V+u)^2 - V^2 \} = muV \left(1 + \frac{u}{2V} \right) \text{ である。}$$

従って、プロペラの推進効率 η は

$$\eta = \frac{T \times V}{\frac{1}{2} m \{ (V+u)^2 - V^2 \}} = \frac{1}{1 + \frac{u}{2V}} \dots\dots\dots(1-3)$$

すなわち、高い効率を得るためには、 (u/V) の値が小さいほど良い。

従って、推力を得る場合にエネルギーを少なくするためには、**大きな m に小さな u を与えた方が良い**ことになる。この点から、プロペラ推進の方がジェット推進やロケット推進より効率が良いことがわかる。また、プロペラはできるだけ大直径のものを使い、後流の速度を落とそうしていることがわかる。ピストン機では通常

$$V = 300\text{mph (440ft/sec)}, u = 800\text{ft/sec}$$

ジェット機では

$$V = 600\text{mph (880ft/sec)}, u = 2,000\text{ft/sec}$$

ロケット機では

$$V = 1,000\text{mph (1,467ft/sec)}, u = 7,000\text{ft/sec}$$

くらいであるから (u/V) の値は、それぞれ 1.8、2.3 および 4.8 くらいとなり、ロケット機は、とて

1-2 プロペラのブレードと作動状態

も商業機として使用できないほど効率の悪いことがわかる。

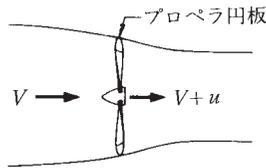


図 1-1

1-2 プロペラのブレードと作動状態

飛行機のプロペラは、普通 2～6 枚のブレード (Blade) と、中心にある 1 個のハブ (Hub) で構成されている。ハブはブレードを保持する役目と、エンジンによって駆動されるプロペラ軸またはクランク軸へプロペラを取り付ける役目をもつ。

プロペラのブレードは、図 1-2 に示すように、その断面の形が飛行機の主翼と同じである。ただし、回転する点が主翼と異なり、回転のため高い遠心力を受けるので、ブレードの付根は円形断面の形状にして強度を増している。このブレードの付根をシャंक (Shank) と呼んでいる。推力を発生するというプロペラ本来の役目をつかさどるブレードの中央部は飛行機の主翼と全く同様の断面をもち同様に作用する。

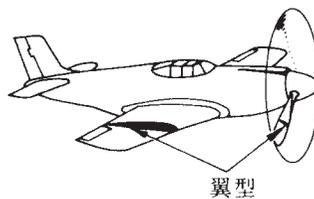
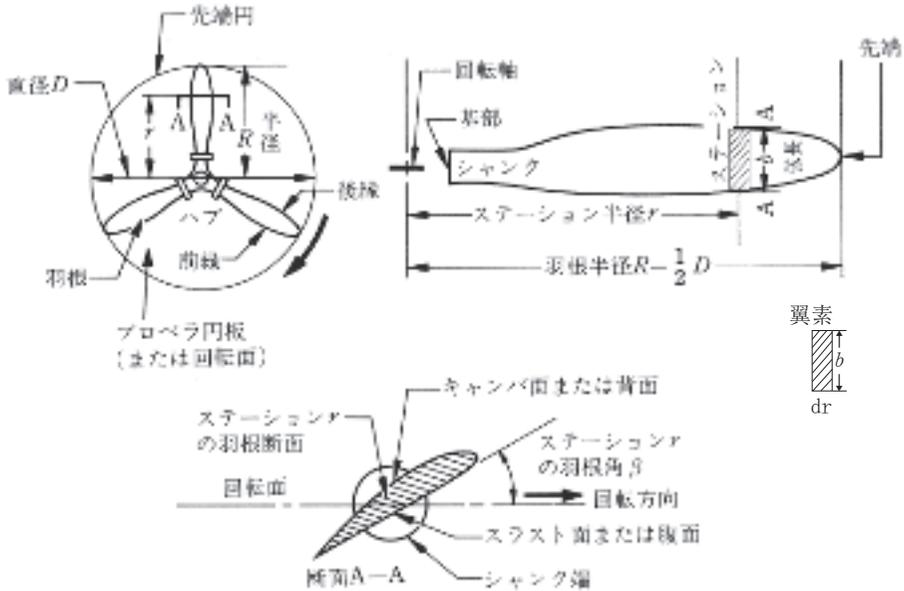


図 1-2



用語の説明

- (1) プロペラ円盤 (Disk) ……プロペラ回転面
- (2) 羽根角 β (Blade Angle) ……プロペラ回転面と翼弦とのなす角
- (3) 翼素 (Blade Element) ……ブレードの任意の半径 r における $r + dr$ に囲まれた微小部分。なお、 dr は無限に小さな部分であり、ブレードは翼素の集合体
- (4) 前進角 ϕ (ラセン角) ……プロペラ回転面と V_r (プロペラ回転速度と航空機の前進速度との合成ベクトル) とのなす角
プロペラ前進速度と航空機の前進速度は等しく、 V_r はブレード断面への空気流の方向と一致
- (5) 迎角 α …… V_r と翼弦とのなす角
- (6) プロペラ・ピッチ ……プロペラが1回転する間に進む距離 (m又はin)

図 1-3 プロペラ各部の名称と記号

ブレード・ステーション (Blade Station : STA) とは、ハブの中心から指定された距離のところにあるブレード上の参考位置である。

プロペラのブレードが推力を発生するためには、ブレード断面はプロペラ回転面に対してある角度をもっていなければならない。飛行中のプロペラが回転しているときには、ブレードの各断面は飛行機の前進運動と、その断面の回転運動とを合成した運動を行う。従って、各断面は図 1-4 に示すような、ラセンを描いて進むことになる。

ブレードが回転すると図 1-5 に示すように円周移動距離は、ハブに近い断面よりも先端近くの断面の方が長い距離を動くことになる。幾何ピッチ (1-5 プロペラのピッチ参照) は、円周移動距離に直角な線とブレード角 (β) の延長線との交点となることから、ブレードが1回転したとき各断面における幾何ピッチが等しくなるようにブレード角 (β) は、ハブに近い断面では大きく、先端近くの断面になるほど小さくなるようにねじりが付けられている。このねじりのため、ブレード角は半径

1-2 プロペラのブレードと作動状態

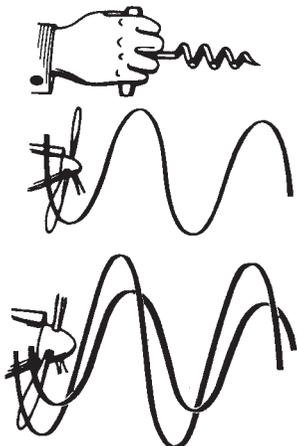


図 1-4

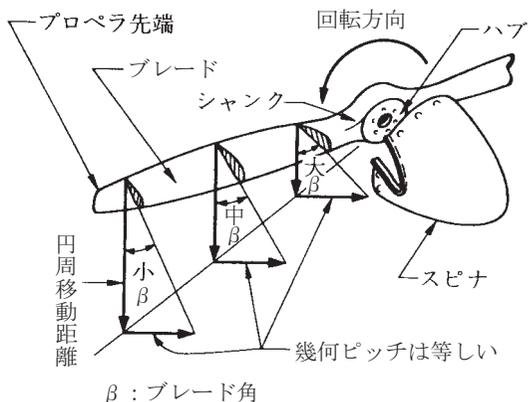


図 1-5

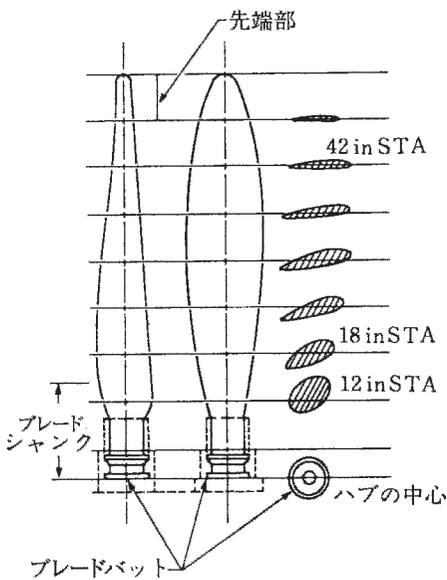


図 (a)

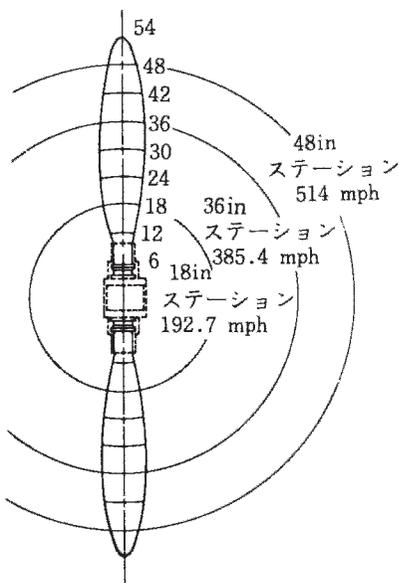
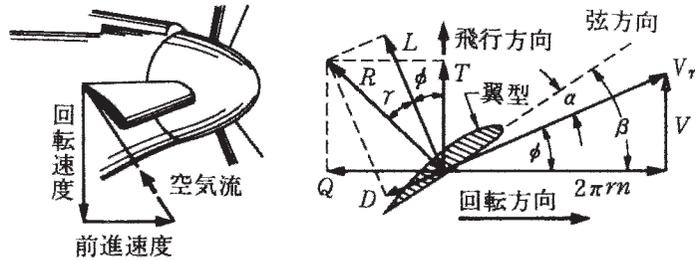


図 (b)

図 1-6 1,800 rpm 時のステーションの速度とピッチ分布

によって異なるので、通常、これを指定するには $2/3 R$ 、 $0.7 R$ または $3/4 R$ のところの値で代表させる。図 1-6 は代表的なプロペラのピッチ分布の一例である。

いま、プロペラ回転数を n とすれば、前述のように半径 r のところのブレード断面はプロペラ軸のまわりに $2\pi nr$ の速度で回転し、一方、回転面と直角な飛行方向へ飛行の前進速度に等しい速度 V で進む。図 1-7 は、この状態におけるプロペラ・ブレード断面の作動状態を示す。ベクトル (V_r) は前進速度ベクトル (V) と回転速度ベクトル ($2\pi nr$) を合成したもので、このベクトルの方向と向きはブレード断面の進むラセン路の方向と向きを表している。言い換えれば、空気流は、この方向からブ

図1-7 プロペラ断面(半径 r)のベクトル

レード断面へ流入する。

合成ベクトル (V_r) とプロペラ回転面のなす角 (ϕ) は**前進角** (Angle of Advance)、または**ラセン角** (Helix Angle) と呼ばれる。断面の**弦**はこのラセン路方向から、さらに迎え角 α だけ傾斜しており、結局、ブレード断面は空気に対し、ラセン速度 (V_r)、迎え角 α で運動し、空力反力 (R) を受けることになる。

これらの値の関係を数式にまとめれば

$$\beta = \alpha + \phi \dots\dots\dots(1-4)$$

$$V_r = \sqrt{V^2 + (2\pi rn)^2} \dots\dots\dots(1-5)$$

$$\tan\phi = \frac{V}{2\pi rn} \dots\dots\dots(1-6)$$

空力反力 (R) は重要な意味をもつ2組の座標系に分解することができる。1組は (V_r) に直角な成分と、平行な成分に分解したもので、これらはそれぞれ、このブレード断面の揚力 (L) と抗力 (D) を表す。もう1組はプロペラの性能を問題にする場合の分け方で、プロペラ軸に平行な成分と、回転面に平行な成分に分解したものである。これらの成分は、それぞれ推力 (T) と、トルク (Q) である。

推力はプロペラ軸に沿って働き、飛行機を前進させようとする成分である。トルクはプロペラ回転面に平行に働き、プロペラの回転を阻止しようとする成分であり、プロペラを回転するためには、これに打ち勝つだけのトルクをエンジンからプロペラへ供給しなければならない。

ブレードの形状は、普通、プロペラ径・基本設計揚力係数 (Basic Design Lift Coefficient) または反り・厚さ比・剛率によって与えられる。たとえば、最近の NACA のブレード表示 NACA10-(3)(08)-03 では、最初の数字はプロペラ径 (ft) を表し、次のカッコ内の数字は $0.7R$ (半径) のところの基本設計揚力係数の10倍、第2カッコ内の数字は $0.7R$ のところの厚さ比の100倍、最後の数字群は $0.7R$ のところの弦長を、その半径における円周で割った比、すなわち剛率 (2字は100倍、3字は1,000倍) を表している。

1-3 いろいろな飛行状態における前進角

地上滑走時には、図 1-8 (a)に示すように、プロペラ回転速度 n_1 に対し前進速度 V_1 が特に小さいので、これらの成分からできる前進角 ϕ_1 は小さく、普通、 $0 \sim 10^\circ$ くらいである。

離陸に入ると、最大回転数を用いるので n_2 は最大となるが、前進速度はまだ比較的小さくて、図 1-8 (b) のようになる。普通 ϕ_2 は $10 \sim 25^\circ$ くらいである。上昇に入ると、離陸回転数を少し絞って上昇回転数にセットするので、回転数は少し減るが、前進速度はさらに増し、図 1-8 (c) のような作動状態となる。

巡航時には、前進速度がさらに増して図 1-8 (d) のようになり、普通 ϕ_4 は $25 \sim 45^\circ$ くらいとなる。降下時には、回転数・前進速度とも減り図 1-8 (e) の状態となる。

以上のように、前進角 ϕ は飛行状態によって大きく変わる。ところで、プロペラのブレードの迎え角 α は、主翼の場合と同様に、ある特定の値にあるときに推力が最大となり、常にこの値を保つのが望ましい。しかし、固定ピッチ・プロペラのように飛行中にブレード角を変えることができないプロペラでは、飛行状態に応じて ϕ が大きく変わると、 β (一定) = $\phi + \alpha$ の関係から、迎え角が大きくなることになり、 α が適当でない状態では非常に効率が悪くなる。

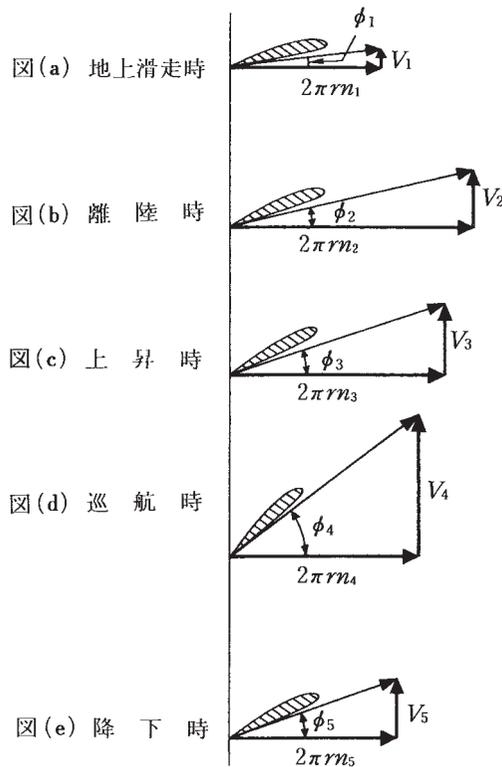


図 1-8 いろいろな飛行状態における前進角

そこで、飛行状態が変わり、 ϕ が変わっても、常に迎え角を最良の一定値（普通 $1 \sim 2^\circ$ くらい）を保つよう ϕ の変化に応じてブレード角 β を変化させ、効率を良くしているのが可変ピッチ・プロペラである。

1-4 プロペラの迎え角とエンジン出力

いま、機速 V 、プロペラ回転数およびエンジン出力一定の定常飛行状態を考えよう。この場合のベクトル図は、図1-9(a)のようになる。この状態でプロペラのブレード角を減らせば、迎え角が減って図1-9(b)の状態となり、ブレードに働く空気反力（エンジン側から見れば、エンジン負荷）が小さくなるため、エンジン出力に余裕ができ、速い回転数でプロペラが回転するようになるか、または、エンジン出力を減らすことができる。

反対に、図1-9(c)のように迎え角を増せば、空気反力が大きくなり、プロペラ回転数が減少するか、または、一定回転を保つためにはエンジン出力を増加してやらなければならない。

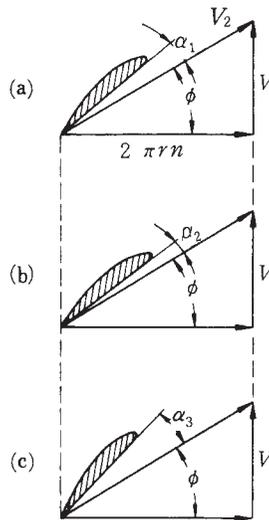


図 1-9

1-5 プロペラのピッチ (Pitch)

プロペラのピッチとは、ねじのピッチと同じように、プロペラが1回転する間に進む前進距離（mまたはin）である。

プロペラが1回転する間にブレード断面は図1-10(b)に示すように、機の前進方向に $p' = 2\pi r \tan \beta$ だけ進む。この p' は幾何ピッチ (Geometric Pitch) と呼ばれ、ブレードの形状のみによって

1-5 プロペラのピッチ

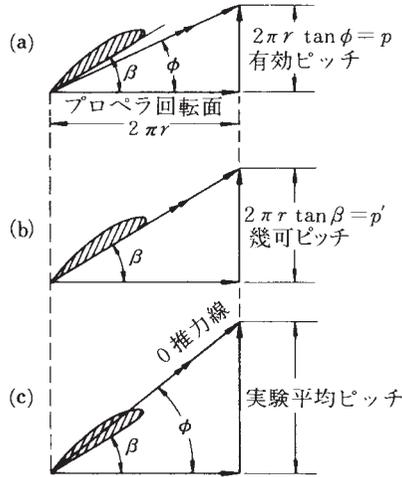


図 1-10

決まる量である。

通常、幾何ピッチは半径によってあまり変わらない。理由は、半径が小さくなるほど β を大きくし、半径が大きくなるほど β を小さくすることで、ピッチを一定するよう設計されている。

しかし、ときには幾何ピッチが全ブレードにわたり一定でないことがある。その場合には、 $r = \frac{2}{3}R$ 、 $0.7R$ または $\frac{3}{4}R$ のところの値で代表させ、幾何平均ピッチ (Geometric Mean Pitch) として表わす。

固定ピッチ・プロペラの幾何ピッチの値は、低速機で 2 ~ 3 ft くらい、中速機で 5 ~ 9 ft くらいである。

各翼素のピッチがすべてが等しいブレードは、等ピッチ分布ブレードと呼ばれている。

飛行中のプロペラは、前述のように、プロペラ回転面と角 ϕ を成すラセン路に沿って進む。半径 r のところのブレード断面が、このラセン路に沿って 1 回転すると、図 1-10 (a) に示すようにブレード断面は回転方向には $2\pi r$ だけ回り、前進方向には $2\pi r \tan \phi$ の距離だけ進む。この「進み」を有効ピッチ (Effective Pitch) といい、 p で表す。

$$p = 2\pi r \tan \phi \dots\dots\dots(1-7)$$

この式に (1-6) 式を代入すれば

$$p = \frac{V}{n} \dots\dots\dots(1-8)$$

上式から、有効ピッチは機速とプロペラ回転数の関数であり、飛行状態で瞬時に変化し、何らプロペラ固有の性質を表すものでないことが分かる。

以上、述べたピッチとは全く異なった考え方から出発したピッチがある。図 1-10 (c) のように、プロペラ 1 回転当たりの進みが、ある値に達するとブレードの各部の迎え角が非常に小さくな

り、ブレードの断面がもはや推力を発生しないようになる。このときのピッチを**実験平均ピッチ** (Experimental Mean Pitch) または、**ゼロ推力ピッチ** (Zero-thrust Pitch) という。これはプロペラの実験から決定される値である。

なお、幾何ピッチをプロペラ直径で割ったものを**ピッチ比** (Pitch Ratio) という。

$$\text{ピッチ比} = p' / D \dots\dots\dots (1-9)$$

注：ピッチという用語はブレード角とよく似た意味に使われる。両者は実際には全く別のものであるが、密接な関係がある。ブレード角が小さいときには回転中に進む距離も小さく、**低ピッチ**であるという。反対にブレード角が大きときには**高ピッチ**であるという。ただし、ピッチ角 (Pitch Angle) はブレード角と全く同意語である。

1-6 風車ブレーキと動力ブレーキ

通常の水平飛行時のブレード断面と気流の関係は図 1-7 のとおりである。しかし、通常のブレード角であっても飛行速度が極端に大きくなると前進角 ϕ がブレード角 β を超えるようになり、気流は図 1-11 のようにブレードの背面から当たるようになる。この状態では合成空気反力の進行方向の分力として負の推力 (すなわち抗力) と回転方向の分力として負のトルク (プロペラの回転を助長するトルク) を発生する。この状態を**風車ブレーキ状態** (Wind-milling Brake) と呼ぶ。急降下時には機速が極端に大きくなってこのような状態となり、負のトルクによりプロペラは著しく高い危険な回転速度に達すると同時に、著しく高い抗力 (負の推力) を発生する。

また、ブレード角 β を減らしてさらに負の迎角を増加するようプロペラのブレード角を操作すると、気流は図 1-12 のようにブレード断面の背面を打つようになる。この状態では風車ブレーキの場合と同様、合成空気反力の進行方向の分力は負の推力となるが、回転方向の分力であるトルクは図 1-7 の通常水平飛行の場合と同様、正のトルク (プロペラ回転方向に抵抗するトルク) を発生し、この状態のプロペラブレードを回転させるためには動力を要する。この状態を**動力ブレーキ状態** (Power-on Brake) または**リバース** (Reverse) と呼び、着陸後に飛行機を減速するための有効なブレーキとして利用される。

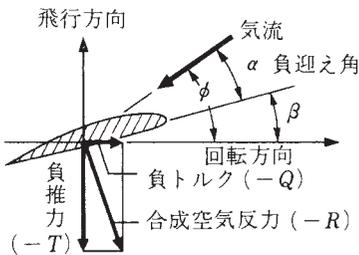


図 1-11 風車ブレーキ状態

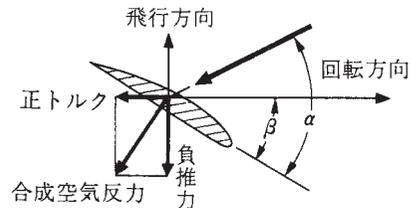


図 1-12 動力ブレーキ状態