

## 第4章

# 飛行の原理

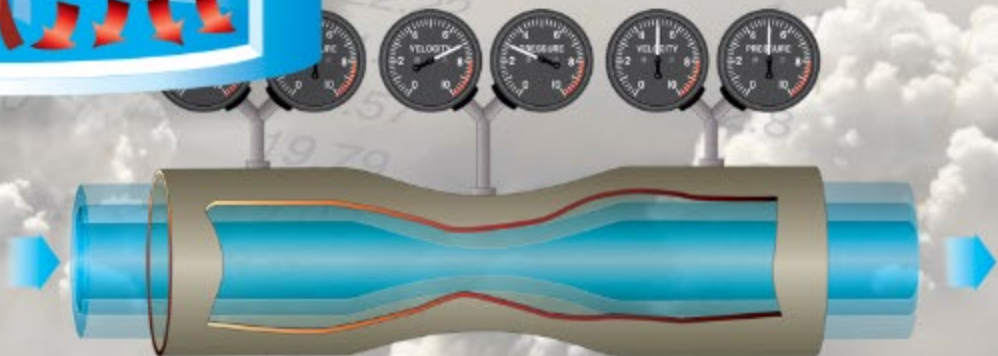
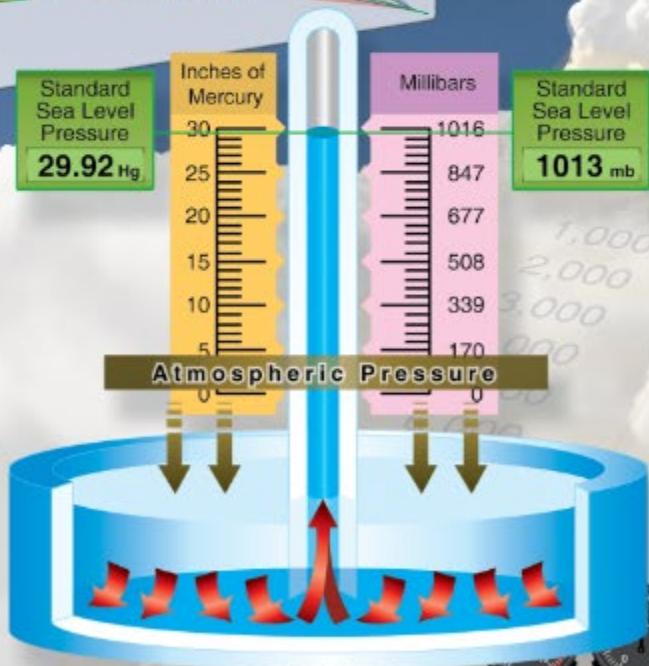
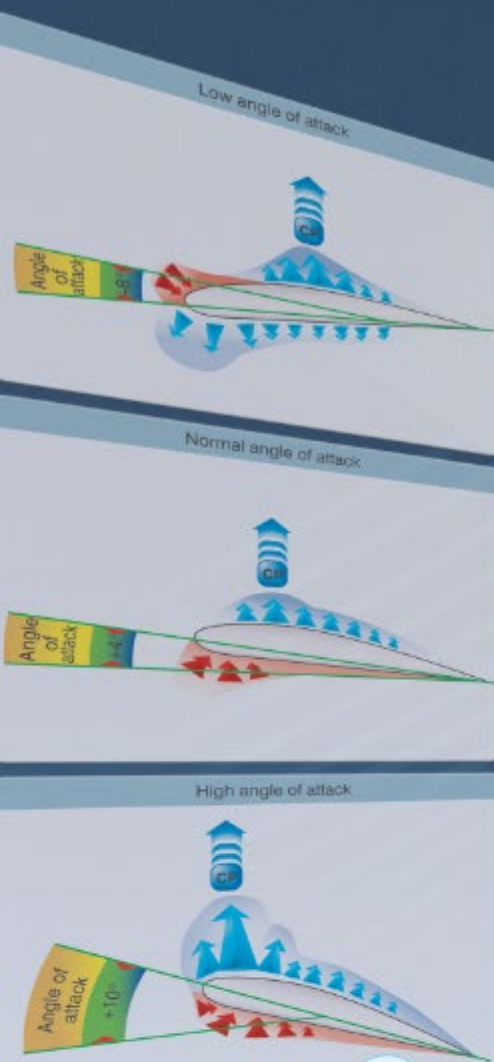
### 序論

この章では、飛行中の航空機に作用する力を支配する基本的な物理法則と、これらの自然法則と力が航空機の性能特性に与える影響について調べる。飛行機、ヘリコプター、グライダー、気球などの航空機を制御するには、パイロットは関係する原則を理解し、これらの自然の力を使用または相殺することを学ばなければならない。

### 大気の構造

大気とは、地球を取り囲み、その表面にある空気の膜である。大気は海や土地と同じように地球の一部だが、空気はガスの混合物であるため、土地や水とは異なる。質量、重量を持ち、不定形である。

大気は、窒素78パーセント、酸素21パーセント、およびアルゴンやヘリウムなどの他のガス1パーセントで構成されている。これらの要素の中には、他の要素よりも重いものがある。酸素などの重い元素は地球の表面に落ち着き、軽い元素はより高い高度の地域まで持ち上げられる。大気の酸素のほとんどは、高度35,000フィート未満にある。



## 空気は流体である

「流体」という言葉を聞くと、ほとんどの人は通常、液体について考える。しかし、空気などの気体も流体だ。流体は収まっている容器の形を取る。流体は通常、最小の応力が加えられても変形に抵抗しないか、わずかにしか抵抗しない。これをわずかな抵抗粘度と呼ぶ。流体には流れる能力もある。液体が流れて容器を満たすと、空気が膨張して容器の利用可能な容積を満たす。液体と気体は、密度が大きく異なっている、これらのユニークな流体特性を示す。飛行の原理を理解するには、空気の流動特性を理解することが不可欠である。

## 粘度

粘度は、流動に抵抗する流体の特性である。流体の個々の分子が互いに付着または固着する傾向により、流体がどれだけ流れに抵抗するかが決まる。高粘度の流体は「濃厚」で流れに抵抗する。低粘度の流体は「薄く」、簡単に流れる。空気は粘性が低く、簡単に流れる。

例えば2つの液体を使用した場合、2つの同一の傾斜に注がれた同量の油と水は、粘度が異なるため、異なる速度で流れる。水は自由に流れるように見えるが、油はもっとゆっくり流れる。

別の例を挙げると、異なる種類の類似する液体の場合、粘度が異なるため異なる動作を示す。グリースは非常に粘性がある。時間があれば、たとえ流量が遅くても、グリースは流れる。モーターオイルは、グリースよりも粘性が低く、流動しやすくなっているが、ガソリンよりも粘性が高く、ゆっくりと流れる。

すべての流体は粘性があり、この抵抗を観測するかどうかに関係なく、流れに対する抵抗がある。空気の粘

度を簡単に観察することはできない。しかし、空気は流体であり、粘性特性を持っているため、あらゆる物体の周囲の流れにある程度抵抗する。

## 摩擦

流体が物体の上または周囲を流れるときに動作する別の要因は、摩擦と呼ばれる。摩擦は、ある表面または物体が別の表面または物体の上を移動するときに遭遇する抵抗である。互いに接触する2つの材料間に摩擦が存在する。

摩擦の効果は、前述と同様の例を使用して実証できる。同一の液体が2つの同一の傾斜に注がれる場合、それらは同じ方法で同じ速度で流れる。1つの傾斜の表面が粗く、もう1つの傾斜の表面が滑らかな場合、2つの傾斜の流れは大きく異なる。粗い表面の傾斜は、表面からの抵抗（摩擦）のために流体の流れを妨げる。すべての表面は、どんなに滑らかに見えても、顕微鏡レベルでは滑らかではなく、流体の流れを妨げることを覚えておくことが重要である。

翼の表面は、他の表面と同様に、顕微鏡レベルで一定の粗さを持っている。表面の粗さは抵抗を引き起こし、翼の上を流れる空気の速度を遅くする。[図4-1]

空気の分子は翼の表面を通過し、摩擦のために実際に表面に付着する（吸い付く、または取り付く）。翼の表面近くの空気分子は動きに抵抗し、ゼロに近い相対速度を持つ。表面の粗さは、その動きを妨げる。翼の表面に付着する分子の層は、境界層と呼ばれる。

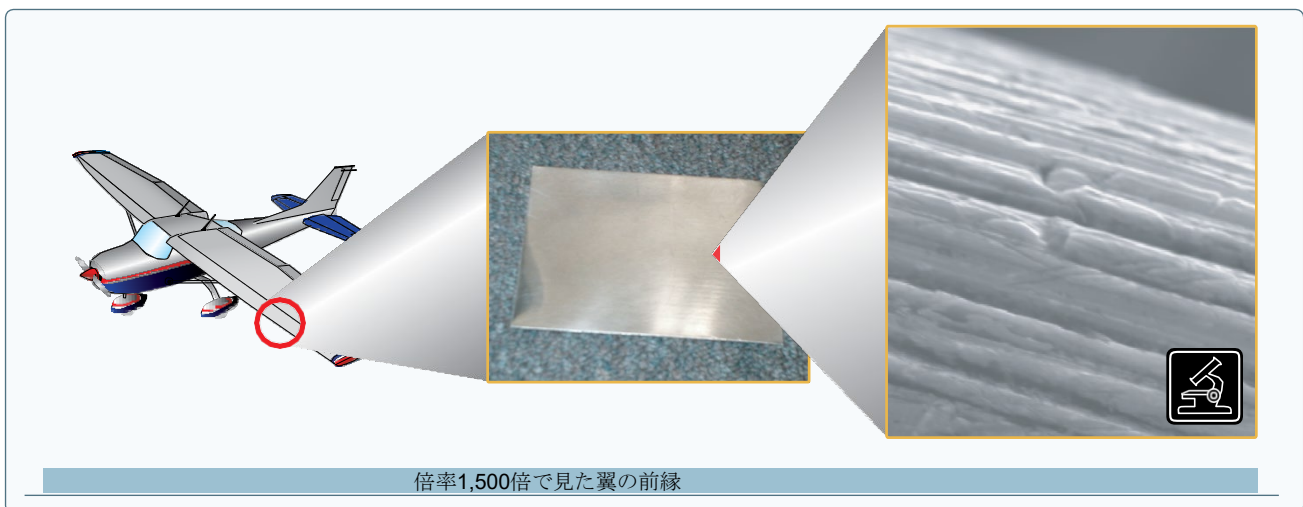


図4-1. 翼の微視的表面

空気の境界層が摩擦によって翼に付着すると、空気流がそれ自体に付着する傾向をもたらす粘度によって、空気流に対するさらなる抵抗が生じる。これらの2つの力が一緒に作用して翼上の気流に抵抗するとき、それは抗力と呼ばれる。

### 圧力

圧力は、物体の表面に対して垂直方向に適用される力である。多くの場合、圧力は、物体の平方インチあたりのポンドの力、またはPSIで測定される。流体に完全に浸された物体は、物体の表面全体に均一に圧力を感じる。物体の一方の表面にかかる圧力が、他の表面にかかる圧力より小さくなると、物体はより低い圧力の方向に移動する。

### 大気圧

圧力にはさまざまな種類があるが、パイロットは主に大気圧に関心を向ける。これは、気象の変化における基本的な要因の1つであり、航空機を上昇させるのに役立ち、いくつかの重要な飛行計器を作動させる。その計器とは、高度計、対気速度計、垂直速度計、およびマニホールド圧力計である。

空気は非常に軽い、質量があり、重力の引力の影響を受ける。したがって、他の物質と同様に、重量があり、その重量のために力がある。空気は流動性物質であるため、この力はすべての方向に均等に作用する。空気中の身体への影響は圧力と呼ばれる。海面での標準的な条件下では、大気の重量によって加えられる平均圧力は、表面の平方インチ (psi) あたり約14.70ポンド、または1,013.2ミリバル (mb) である。大気の厚さは限られている。したがって、高度が高いほど、上空の空気が少なくなる。このため、18,000フィートでの大気の重量は海面での半分になる。

大気の圧力は、時間と場所によって異なる。大気圧の変化により、標準的な基準が策定された。海面の標準大気は、表面温度が59°Fまたは15°C、表面圧力が29.92水銀柱インチ (「Hg」) または1,013.2 mbである。[図4-2]

標準的な温度経過率は、1,000フィートから36,000フィートまで上がるごとに、温度が約3.5°Fまたは2°Cの割合で低下する。36,000フィートでは約-65°Fまたは-55°Cに達する。この点を超えると、温度は80,000フィートまで一定と見なされる。標準的な圧力低下率は、高度が1,000フィート上昇して10,000フィートになると約1 inHgの割合で圧力が低下する場合である。[図4-3] 国際民間航空機関 (ICAO) はこれを世界標準として規定しており、多くの場合、国際標準大気 (ISA) またはICAO標準大気と呼ばれている。標準の低減率と異なる温度または圧力は、非標準の温度および圧力とみなされる。

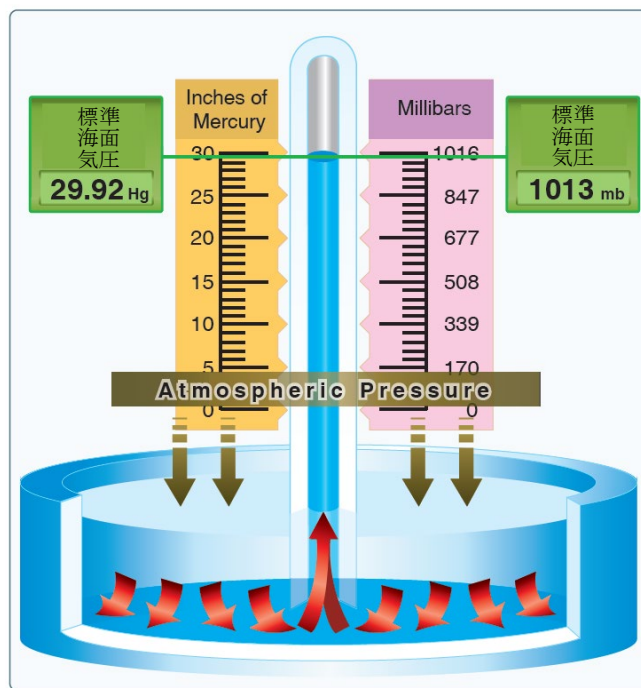


図4-2. 標準的な海面気圧

標準大気			
高度 (ft)	圧力 (Hg)	温度	
		(°C)	(°F)
0	29.92	15.0	59.0
1,000	28.86	13.0	55.4
2,000	27.82	11.0	51.9
3,000	26.82	9.1	48.3
4,000	25.84	7.1	44.7
5,000	24.89	5.1	41.2
6,000	23.98	3.1	37.6
7,000	23.09	1.1	34.0
8,000	22.22	-0.9	30.5
9,000	21.38	-2.8	26.9
10,000	20.57	-4.8	23.3
11,000	19.79	-6.8	19.8
12,000	19.02	-8.8	16.2
13,000	18.29	-10.8	12.6
14,000	17.57	-12.7	9.1
15,000	16.88	-14.7	5.5
16,000	16.21	-16.7	1.9
17,000	15.56	-18.7	-1.6
18,000	14.94	-20.7	-5.2
19,000	14.33	-22.6	-8.8
20,000	13.74	-24.6	-12.3

図4-3. 標準大気の特徴

航空機の性能は標準大気に対して比較および評価されるため、すべての航空機計器は標準大気に対して較正される。非標準の大気を適切に説明するために、特定の関連用語を定義しなければならない。

### 気圧高度

気圧高度は、標準基準面（SDP）以上の高さである。これは、気圧の測定値として大気の重量が29.92 inHg（1,013.2 mb）である理論レベルである。高度計は、本質的に、標高計が29.92 inHg SDPに設定されている場合、表示される高度は気圧高度である。大気圧が変化すると、SDPは海面下、海面、または海面上になる。気圧高度は、飛行機の性能を判断する基準として、また18,000フィート【訳注：日本では14,000フィート】以上で動作する飛行機に飛行レベルを割り当てるための基礎として重要である。

圧力高度は、次のいずれかの方法で決定できる：

1. 高度計の気圧の目盛りを29.92に設定し、示された高度を読み取る
2. 報告された高度計設定に従って、示された高度に補正係数を適用する

### 密度高度

SDPは理論上の気圧高度だが、航空機は非標準大気で運航し、密度高度という用語は非標準大気の空力性能を相関させるために使用される。密度高度とは、特定の密度が検出される標準大気海面からの垂直距離である。空気の密度は、空気の密度が低くなるにつれて航空機の性能に大きな影響を及ぼし、次の力を低下させる：

- 出力、エンジンが取り込む空気が少なくなるため
- 推力、プロペラは薄い空気では効率が低い
- 揚力、薄い空気が翼型に及ぼす力が少ない

密度高度とは、非標準の温度に対して補正された圧力高度である。空気の密度が高くなると（より低い密度高度）、航空機の性能が向上する。逆に、空気密度が低下すると（より高い密度高度）、航空機の性能が低下する。空気密度の減少は、密度高度が高いことを意味し、空気密度の増加は、密度高度が低いことを意味する。標準的な大気条件下では、大気各レベルの空気は特定の密度を持つだけでなく、その圧力高度と密度高度が同じレベルを識別するため、密度高度は航空機の性能の計算に使用される。

密度高度の計算には、圧力（圧力高度）と温度の考慮が含まれる。あらゆるレベルの航空機の性能データは、標準的な日の条件下での空気密度に基づいているため、このような性能データは、高度計の表示とは異なる可能性のある空気密度レベルに適用される。標準より高いまたは低い条件下では、これらのレベルは高度計から直接決定することはできない。

密度高度は、最初に圧力高度を捕捉してから、非標準の温度変動に対してこの高度を修正することによって決定される。密度は圧力に比例して変化し、温度とは逆に変化するため、密度を変化させることにより、広範囲の温度で特定の圧力高度が存在する場合がある。ただし、既知の密度は、いずれかの温度と圧力の高度に対して発生する。空気の密度は、航空機とエンジンの性能に顕著な影響を及ぼす。航空機の実際の高度に関係なく、既存の密度高度に等しい高度で動作しているかのように動作する。

空気密度は、高度、温度、湿度の変化の影響を受ける。高い密度高度は薄い空気を指し、低い密度高度は濃い空気を指す。高い密度高度をもたらす条件は、高高度、低気圧、高温、高湿度、またはこれらの要因の組み合わせである。標高が低い、大気圧が高い、温度が低い、湿度が低いほど、密度高度は低くなる。

### 密度に対する圧力の影響

空気は気体であるため、圧縮または膨張することがある。空気が圧縮されると、より多くの空気が所定の容積を占める可能性がある。逆に、空気の所定の体積に対する圧力が減少すると、空気は膨張し、より大きな空間を占有する。より低い圧力では、元の空気柱に含まれる空気の量が少なくなる。密度は圧力に直接比例するため、密度は低下する。圧力が2倍になると、密度は2倍になる。圧力が低下すると、密度が低下する。この説明は、一定の温度でのみ当てはまる。

### 密度に対する温度の影響

物質の温度を上げると、密度が下がる。逆に、温度を下げると密度が上がる。したがって、空気の密度は温度に反比例して変化する。この説明は一定の圧力でのみ当てはまる。

大気中では、温度と気圧の両方が高度とともに低下し、密度に矛盾する影響を及ぼす。しかし、通常、高度の上昇に伴う圧力のかなり急激な低下は、大きな影響をもたらす。したがって、パイロットは、高度に応じて密度が減少することを予期できる。

## 密度に対する湿度（水分）の影響

前の段落は、完全に乾燥した空気について言及している。実際には、完全に乾燥することはない。大気中に浮遊する少量の水蒸気は、特定の条件下ではほとんど無視できるかもしれないが、他の条件下では湿度が航空機の性能の重要な要因になる場合がある。水蒸気は空気よりも軽い。よって、湿った空気は乾燥した空気よりも軽い。したがって、空気の含水量が増加すると、空気の密度が低くなり、密度高度が高くなって性能が低下する。与えられた一連の条件で、最大量の水蒸気が含まれている場合、密度は最も軽いか、最も低くなる。

相対湿度とも呼ばれる湿度は、大気に含まれる水蒸気の量を指し、空気が保持できる水蒸気の大最量の割合として表される。この量は温度によって異なる。暖かい空気はより多くの水蒸気を保持し、冷たい空気はより少なく保持する。水蒸気を含まない完全に乾燥した空気の相対湿度は0パーセントであり、水蒸気を保持できない飽和空気の相対湿度は100パーセントである。湿度だけでは、通常、密度高度と航空機の性能を計算する上で重要な要素とは見なされないが、これは寄与要素である。

温度が上昇すると、空気はより多くの水蒸気を保持できる。2つの別々の気団を比較した場合、1番目の暖かく湿った気団（両方の質が空気を軽くする傾向がある）と2番目の冷たくて乾いた（両方の質が重くなる）気団では、1番目は2番目よりも密度が低いはずである。圧力、温度、湿度は、密度に影響するため、航空機の性能に大きな影響を及ぼす。簡単に適用できる経験則はないが、湿度の影響はいくつかのオンラインツールを使用して決定できる。最初の例では、密度高度が求められている高度で圧力が必要である。図4-2を使用して、関連する高度に最も近い気圧を選択する。例として、8,000フィートの圧力は22.22 "Hgである。米国立海洋大気庁（NOAA）のWebサイト（[www.srh.noaa.gov/epz/?n=wxcalc\\_densityaltitude](http://www.srh.noaa.gov/epz/?n=wxcalc_densityaltitude)）を使用して、密度の高度を22.22と入力する。温度を80°に、露点を75°に入力すると、密度の高度は11,564フィートになり、湿度がない場合、密度の高度はほぼ500フィート低くなる。

別のWebサイト（[www.wahiduddin.net/calc/density\\_titude.htm](http://www.wahiduddin.net/calc/density_titude.htm)）では、追加の解釈チャートを使用せずに、湿度が密度高度に及ぼす影響を判断するより簡単な方法を提供している。いずれにせよ、湿度が密度高度に及ぼす影響には、高湿度条件での全体的な性能の低下が含まれる。

## 揚力生成の理論

空気より重い機械で飛行を行うためには、克服しなければならないいくつかの障害がある。その障害の1つは、抗力と呼ばれる動きへの抵抗である。しかし、航空で克服する最も困難な障害は重力だ。空気中を移動する翼は、前述の揚力と呼ばれる力を生成する。重力の方向とは反対の方向に向けられた重力よりも大きな翼からの揚力により、航空機は飛行できる。揚力と呼ばれるこの力の生成は、いくつかの重要な原理、ニュートンの運動の基本法則、およびベルヌーイの差圧の定理に基づいている。

### ニュートンの運動の基本法則

揚力の形成は、過去数世紀にわたって基本的な物理法則に適合してきている。これらの法則は、揚力のすべての側面に適用されるように見えるが、揚力の形成については説明していない。つまり、対称的でありながら大きな揚力を生み出す多くの翼型を考えなければならない。

飛行中の航空機に作用する力を決める基本的な物理法則は、人間が航空機の飛行を成功させる前に開発された仮定理論から採用された。これらの物理法則の使用は、1600年代にヨーロッパで始まった科学革命から生まれた。宇宙は人間の理解に開かれた予測可能な方法で動作するという信念に基づいて、多くの哲学者、数学者、自然科学者、および発明者は、宇宙の秘密を解き明かすためにその一生をささげた。最も有名なのはサー・アイザック・ニュートンであり、彼は普遍的な重力の法則を定式化しただけでなく、運動の3つの基本的な法則も説明した。

ニュートンの第一法則：「すべての物体は、押された力によってその状態を変更せざるを得ない限り、静止状態または直線的な均一な動きの状態を維持する。」

これは、何らかの外力がそれを引き起こすまで、何も動きを開始または停止しないことを意味する。傾斜路上で静止している航空機は、慣性に打ち勝つのに十分な力が加えられない限り、静止したままである。いったん移動すると、その慣性が動き続け、それに作用する他のさまざまな力の影響を受ける。これらの力は、動きを増したり、減速したり、方向を変えたりする。

ニュートンの第二法則：「力は時間の変化ごとの運動量の変化に等しい。一定の質量の場合、力は質量と加速度の積に等しくなる。」

体に一定の力が作用すると、その結果生じる加速度は体の質量に反比例し、加えられた力に直接比例する。これには、ニュートンの第一法則の克服に関与する要因が考慮される。静止状態からの起動（正の加速）と停止への到達（負の加速または減速）を含む、方向と速度の両方の変化をカバーする。

ニュートンの第三法則：「すべての作用には、対等な反作用がある。」

飛行機では、プロペラが動き、空気を押し戻す。その結果、空気はプロペラ（したがって飛行機）を反対方向、つまり前方に押す。ジェット機では、エンジンが熱いガスの爆発を後方に押す。等しい反作用の力がエンジンを押し、飛行機を前進させる。

### ベルヌーイの差圧の原理

ニュートンが法則を確立してから半世紀後、スイスの数学者ダニエル・ベルヌーイは、動く流体（液体または気体）の圧力がその運動速度によってどのように変化するかを説明した。ベルヌーイの原理は、動く流体（液体または気体）の速度が増加すると、流体内の圧力が減少すると述べている。この原理は、飛行機の翼の湾曲した上部を通過する空気に何が起こるかを説明している。

ベルヌーイの定理の実用的な応用はベンチュリ管である。ベンチュリ管には、スロート（くびれたポイント）まで狭くなる空気入口と、後方に向かって直径が大きくなる出口セクションがある。出口の直径は、入口の直径と同じである。チューブに入る空気の質量は、チューブを出る質量と正確に等しくなければならない。くびれでは、チューブの他のすべての部分と同じ時間で同じ量の空気が通過できるように速度を上げなければならない。空気が加速すると、圧力も低下する。くびれを過ぎると、空気の流れが遅くなり、圧力が上がる。[図4-4]

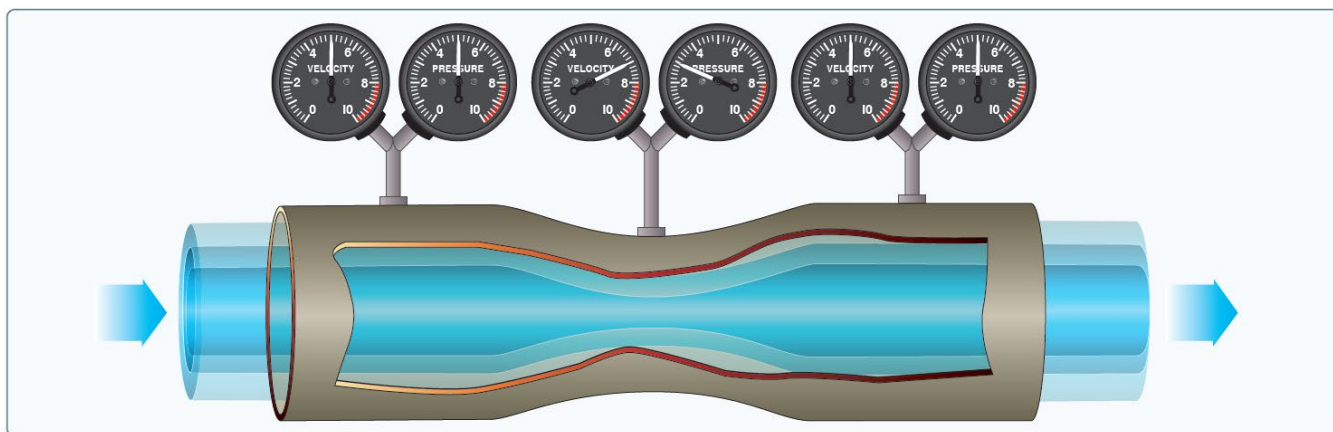


図4-4. ベンチュリ管内の空気圧が低下する

空気は塊として認識され、空気は上記の法則に従うことが理解されているため、飛行機の翼が揚力を発達させる方法と理由を理解できる。翼が空気中を移動すると、湾曲した上面を横切る空気の流れの速度が増加し、低圧領域が生成される。

ニュートン、ベルヌーイ、および宇宙の物理法則を研究した他の何百人もの初期の科学者は、今日の洗練された実験室を利用できなかったが、揚力がどのように作られるかについて、現代の視点に大きな洞察を提供した。

## 翼設計

翼型は、その表面を通過する空気またはそのような構造を通過する空気から表面に反応を得るように設計された構造である。空気は、さまざまな圧力と速度にさらされると、さまざまな方法で機能する。ただし、この説明は、パイロットが飛行中に最も懸念する航空機の部分、つまり揚力を発生させるように設計された翼に限定される。翼型の断面など、典型的な翼のプロファイルを見ると、設計のいくつかの明らかな特性を見ることができる。[図4-5] 翼型の上面と下面の曲率（キャンパーと呼ばれる）に違いがあることに注意する。上面の反りは、通常はやや平坦な下面の反りよりも顕著である。

注：翼型プロファイルの2つの端も外観が異なる。飛行中に前方を向く丸い端は前縁と呼ばれる。後端であるもう一方の端は非常に狭く、先細になっている。

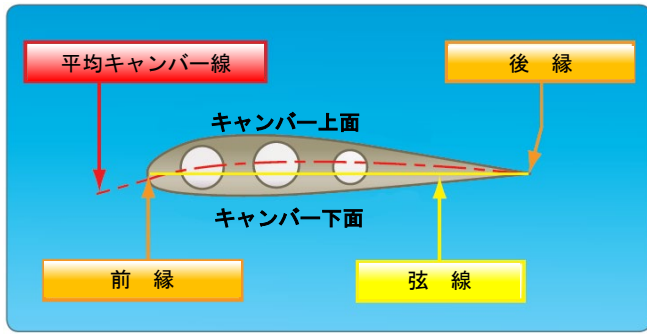


図4-5. 典型的な翼型セクション

翼型の説明によく使用される基準線は、弦線である。これは、前縁と後縁の端を結ぶプロファイルを通る直線だ。この弦から翼の上面と下面までの距離は、任意の点での上下のキャンパーの大きさを示している。前縁から後縁に引かれた別の参照線は、平均キャンパー線である。この平均線は、上面と下面からすべての点で等距離にある。

翼型は、その形状が特定の物理法則に対する空気の反応を利用するように構築される。これにより、空気塊から2つの作用が発生する。翼の下の空気塊からの正圧揚力作用と、翼の上の圧力低下からの負圧揚力作用である。

空気の流れが翼またはローターブレードの比較的平らな下面にぶつかると、その動きの方向に対して小さな角度で傾くとき、空気は下向きに跳ね返され、正の揚力で上向きの反応を引き起こす。同時に、前縁の上部の曲線部分に当たる空気流は上向きに偏向される。翼型は、空気に作用するように形作られており、空気を下向きに強制する。これにより、空気から同等の反応が得られ、翼型が上向きになる。翼が航空機の重量よりも大きな揚力を引き起こすような形で構成されている場合に、航空機は飛行する。

必要な揚力がすべて、翼の下面による空気の偏向だけで得られた場合、航空機は凧のような平らな翼のみを必要とする。しかし、航空機を支えるために必要な揚力のバランスは、翼の上の空気の流れから生じる。ここに飛行の鍵がある。

翼型の上面で生成される揚力と下面で生成される揚力の割合に特定の値を割り当てることは、正確でも有用でもない。これらは定数値ではない。飛行条件だけでなく、異なる翼の設計によっても変わる。

翼型が異なれば飛行特性も異なる。何千もの翼型が風洞と実際の飛行でテストされたが、すべての飛行要件を満たす翼型は見つからなかった。各航空機の重量、速度、および目的により、その翼型の形状が決まる。最大の揚力を生み出すための最も効率的な翼型は、凹

面または「すくい上げられた」下面を持つものである。固定設計として、このタイプの翼型は、揚力を生み出しながら速度を犠牲にしすぎており、高速飛行には適していない。工学の進歩により一方、完全に簡素化された風抵抗の少ない翼型は、飛行機を地面から離すのに十分な揚力がない場合がある。このように、現代の飛行機には、両極端な設計において妥協点を見つけられた翼型がある。形状は、設計対象の飛行機のニーズに応じて異なる。図4-6は、より一般的な翼型の設計の一部を示している。

### 上方の低圧

風洞内または飛行中、翼型は移動する空気の流れに挿入された単純な物体である。翼型の輪郭が涙滴の形状である場合、上部と下部を通過する空気の速度と圧力の変化は両側で同じになる。しかし、涙滴型の翼が縦方向に半分に切断された場合、基本的な翼型（翼）セクションに似た形状が得られる。その後、翼型が傾斜して気体の流れが斜めに当たると、上面を移動する空気は、翼型の底部に沿って移動する空気よりも速く移動するように強制される。この速度の増加により、翼型上方の圧力が低下する。

ベルヌーイの圧力の定理を適用すると、翼型の上部の空気の速度が増加すると圧力が低下する。この低下した圧力は、総揚力の要素である。翼の上面と下面だけの圧力差は、生成される総揚力を考慮していない。

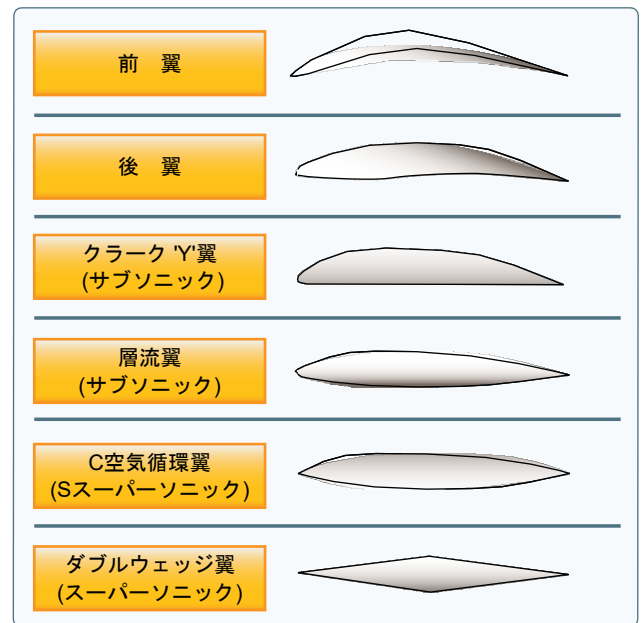


図4-6. 翼型の設計

翼型の上面から下向きの逆流により、後流が発生する。この後流は、後縁で翼型部の底部からの流れに出会う。ニュートンの第三法則を適用すると、この下向きの逆流の反応により、翼型に上向きの前向きの力がかかる。

### 下方の高圧

一定の揚力は、翼型の下の圧力条件によって生成される。翼型の下を空気が流れる方法により、特に高い迎え角では正の圧力が生じる。ただし、この気体の流れには別の側面を考慮しなければならない。前縁に近い点では、空気の流れが実質的に停止し（停滞ポイント）、その後徐々に速度が上がる。後縁近くのある点で、上面の速度と同じ速度に再び達する。翼型の下で気流が遅くなるベルヌーイの定理に従い、正の上方圧力が発生する（つまり、流体の速度が低下するにつれて、圧力を上げなければならない）。翼型の上面と下面の間の圧力差が大きくなるため、総揚力が増加する。ベルヌーイの定理とニュートンの法則の両方は、翼型によって揚力が生成されるときは常に作用する。

### 圧力分布

風洞模型とフルサイズの飛行機で行われた実験から、さまざまな迎え角（AOA）で翼の表面に沿って空気が流れると、表面に沿って圧力が負または大気より低い領域と、圧力が正または大気より大きい領域があることが確認されている。上面にかかるこの負圧は、下翼面に衝突する空気から生じる正圧によって引き起こされるよりも、翼に比較的大きな力を作り出す。図4-7は、3つの異なる迎え角での翼に沿った圧力分布を示している。特定のAOAの圧力変動の平均は、圧力中心（CP）と呼ばれる。このCPを通して空力が作用する。高迎え角ではCPは前方に移動し、低迎え角ではCPは後方に移動する。翼構造の設計では、このCPの移動は非常に重要である。これは、低AOA条件と高AOA条件の両方で翼構造にかかる空気負荷の位置に影響するためである。飛行機の空力バランスと操縦性は、CPの変更によって決まる。

### 翼型の挙動

各原則が揚力の形成を予測し、貢献する特定の例を挙げることができるが、揚力は複雑なテーマである。

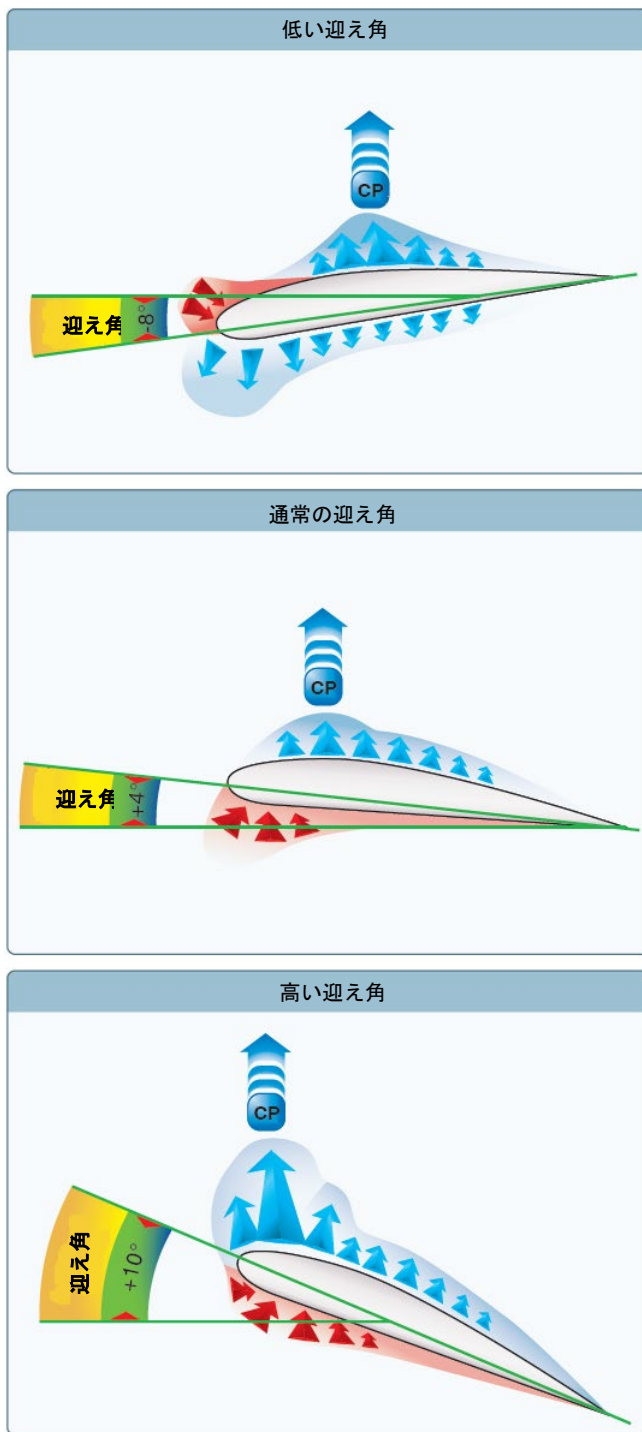


図4-7. 翼型の圧力分布とCPはAOAによって変化する



揚力の生成は、翼の上面と下面の単純な差圧よりもはるかに複雑である。実際、多くの揚力を生成する翼は、対称翼の場合のように、上面が下面より長くなっていることはない。これらは、翼が対称的な高速航空機、または上面と下面が同じである多くのヘリコプターの対称的なローターブレードで見られる。どちらの例でも、唯一の違いは、翼型と対向する気流（角度）との関係である。単純な平板である紙飛行機は、底部と上部の形状と長さがまったく同じだ。それでも、これらの翼型は揚力を生み出し、「気流の方向転換」が揚力の生成に部分的に（または完全に）関与している。

翼型が空気中を移動すると、翼型は気流に対して傾斜し、翼型と対向する空気との関係によって異なる流れを生成する。高速で走る車の窓から手を出しているとしよう、手がいずれかの方向に傾いている場合、手は上または下に移動する。これは、偏向が原因で発生する。偏向とは進む向きが変わることであって、気流内に物体があると空気はその周りで順に向きを変えることになる。この変化の結果として、物体の速度は大きさと方向の両方で変化し、測定可能な速度の力と方向が生じる。

### 三次元

ここまでは主に、翼型の上面と下面の流れについて議論してきた。3次元空間で生じている揚力を2次元的に簡略化し説明してきたが、翼先端の気流の流れも無視することはできない。翼型の下部の高圧空気は、先端を周り翼上部の低圧領域に流れ込む。[図 4-8] この作用により、翼端渦と呼ばれる回転流が翼端に生成される。渦は翼端付近の後縁で下向きの空気の流れを生じ、結果この流れにより、翼端付近では翼が発生する揚力の一部が減少してしまう。この現象に対処するため、メーカーはさまざまな方法を考案した。例えば、翼端の上部または下部にウィングレットを配置して渦の発生を防ぐダムとして機能させ、後流の影響の減少を狙った。

翼端渦への対抗策としての別の方法は、翼端の先端を先細にし、翼の上面と下面に生じる圧力差を減少させ、かつ翼端周辺の気流を滑らかにすることで後流の影響の減少を狙った。

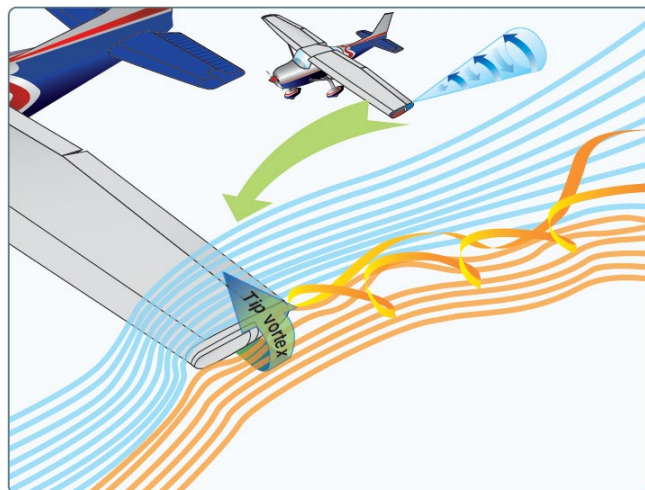


図 4-8. 先端渦

### 章のまとめ

現代の一般的な航空機には、高性能特性と見なされるものがある。したがって、パイロットが飛行技術の基礎となる原則を認識および理解することがますます必要になっている。この章で説明する原則の詳細については、[www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bga.html](http://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bga.html)にある米国航空宇宙局（NASA）の航空力学初心者ガイドを参照のこと。

