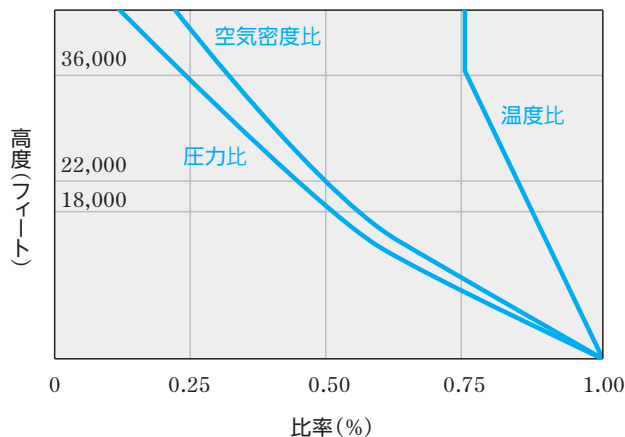


この標準大気の場合で空気密度・気圧・温度は高度が上がるとともに下がっていきます。空気密度は約6700m（2万2000フィート）で2分の1になり、気圧は約5500m（1万8000フィート）で2分の1になります。温度は、1mにつき0.0065℃下がりますから100m上昇すると0.65℃下がります。-56.5℃になる高度は約1万1000m（3万6000フィート）。ジェット旅客機はだいたいこれくらいの高度を飛行しています。この高度では空気密度は地上の約3分の1、気圧は地上の4分の1ほどしかありません。

このように大気は鉛直方向に大きく変化していきます。ここに示した数字は、標準大気として定めたモデル的な数字であり、実際の大気は、さまざまに変化します。高気圧があり低気圧があり、温度の高度変化による遞減率も水蒸気量によっても変わります。また、高度上昇の途中で温度が高くなっている逆転層もあり、これらが気象の変化に大きな影響を与えています。

図 2-1-2 ● 標準大気における空気密度・気圧・温度の高度変化



## 2-2

### ☁️ 高原はなぜ涼しいのか

#### —— 気温の高度変化

夏の猛暑を避けて高原に旅行に行く人が大勢います。なぜ高原は涼しいのでしょうか。それは高度が100m上がるごとに気温が約0.65℃ずつ下がっていくからです。ではなぜ下がるのでしょうか。それは、上空に上るほど気圧が低くなり空気が膨張するからです。膨張すると密度が小さくなるため温度が下がります。

物質の温度は分子の運動によって生まれています。密度が下がると一定体積あたりの分子の数が少なくなるために気温が下がります。これを**断熱膨張**といいます。逆に圧力が高くなると温度が上がります。これを**断熱圧縮**といいます。気塊が上昇・下降するときは周囲の空気との熱の交換をほとんど行なわないと考えていいのです。

天気予報で、「空気が上昇して周囲の空気に冷やされて大気の状態が不安定になる」という解説が行なわれることがありますが、これは正確に言えば間違いです。冷やされるのではなく空気が上昇することで自らの温度が下がっていくのです。

断熱圧縮・断熱膨張はさまざまな分野で工業利用されています。例えばエアコンがあります。これは、フロンガスなどの冷媒をコンプレッサーで圧縮して温度を上げ、続いて一気に膨張させるといっ



た工程を連続して行なうことで冷暖房を行なっています。自転車のタイヤに空気入れで空気を入れるとき、空気入れが熱くなります。これは断熱圧縮による昇温です。またスプレー缶からスプレーを放射すると冷たくなりますが、これは圧縮して詰まっていたガスが外に出ることで一気に膨張したためです。

断熱膨張による温度低下が可視化されるいい例があります。それは、飛行機の翼の周囲に発生する水蒸気の流れです。湿度の高い日に飛行機の離着陸を見ていると主翼の上から後ろに向けて霧のような白い水蒸気の筋（**ベイパー**または**コントレイル**と呼ぶ）が見えることがあります。これは、翼の一部に負圧（他の場所と比べて気圧の低い部分）が発生した場合に見ることができます。水平飛行状態でも、主翼の上面は気流の流れが速く、下面は遅くなっています。主翼の上面ではベルヌーイの定理により圧力が小さくなっているため、湿度が高いときにはベイパーを見ることができます。

飛行機が急激なマニューバー（機動）を行なっているときは、特に明瞭に見ることができます。**急激に機首を引き起こす操作や急旋回をすると、翼上面や翼端部分の圧力が小さくなり、結露した水蒸気の流れがはっきりと見える**ことがあります。

断熱圧縮の方は低速で飛ぶプロペラ機ではあまり関係がありませんが、空気の圧縮性の効果が出てくる遷音速（マッハ0.75～1.2）以上の高速で飛行するジェット機では効果が表れてきます。

高速で飛ぶと機体が空気と摩擦することで温度が上がると言われることがよくありますが、これは摩擦ではなく、機体表面の空気が圧縮されることで断熱圧縮によって温度が上がっているのです。

飛行機の機体には外気温を計るセンサーが付いています。小型の



飛行機の主翼端の水蒸気の帯

プロペラ機などは圧縮性は無視できるので、**外気温度計（OAT：Outer Air Temperature）**で外気の温度を測りますが、ジェット旅客機には、**SAT（Static Air Temperature）**と**TAT（Total Air Temperature）**という温度センサーが付いています。前者は、機体周囲の空気の温度を計る外気温度計、後者は機体表面の温度を測るものです。例えば、3万フィート以上の高高度では外気温はマイナス50℃近くになりますが、機体表面はマイナス10数℃にとどまります。これは、遷音速により空気が圧縮されて断熱圧縮で機体表面の温度が上がっているためです。

飛行機の燃料タンクは胴体中央と主翼の中にあり、もともとジェット燃料はマイナス50℃近くまでは凍らないのですが、それに加えて断熱圧縮によって温められるので高空に上がっても燃料が凍結することはないのです。



## 3-6

# 空気の力で滑空

## — 地面効果と抗力

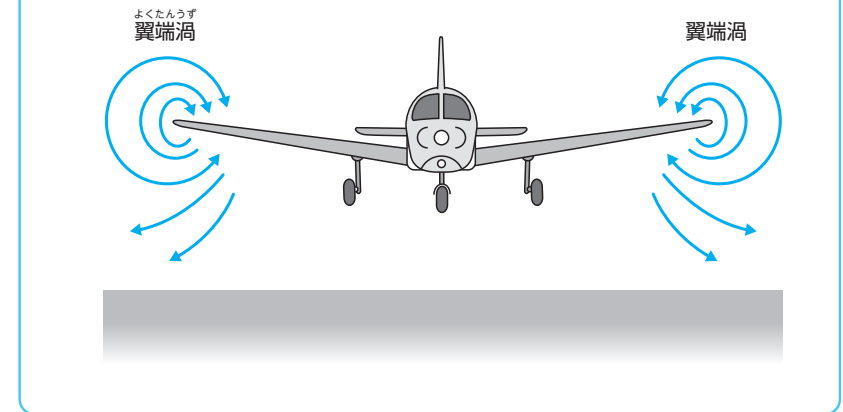
アホウドリなどの、翼を上げると2mを超えるような大型の鳥は、海面すれすれをはばたかずに滑空して海中の魚を狙います。飛行機も着陸時の接地直前は**地面効果**によって滑空距離が少し伸びてその分ソフトにランディングできます。

着陸のために飛行機が滑走路の上空に達し、高度が主翼の幅（左端から右端までの長さ）の半分くらいの高度になったときに地面効果が効き始め、地面に近づいて行くと空気のクッションの上を滑るような感じで進んでいきます。これは、翼端で発生する誘導抗力が減少することによるものです。高い高度では、翼端下面の気流が上面に回り込んで誘導抗力となっています。しかし、**地面が近づいてくると、翼端から上面に回り込む空気が、地面にぶつかって回り込めなくなってしまう**のです。

### ● 飛行機の抗力

抗力とは空気による抵抗のことです。翼に働く力は、下向きに働く重力・上向きに働く揚力・前方に向けて働く推力・後方に向けて働く抗力に分解できます。

図 3-6-1 ● 地面効果と誘導抗力



飛行機の翼に働く抗力には、**摩擦抗力・圧力抗力・誘導抗力**があります。摩擦抗力は、翼表面と気流の摩擦によるもの、圧力抗力は境界層によって生じるもので、この2つを**形状抗力**ともいいます。誘導抗力は翼端から翼上面に回り込む空気による抗力です。飛行中は翼上面の方が下面よりも圧力が小さくなっているため、翼端で下面の空気が上面に回り込んでいきます。飛行機は速度を持っていますから、前方からの気流に押されて回り込んだ空気は後ろに押しやられます。その結果、左翼端では、後ろから見て右回りの渦、右翼端では左回りの渦ができています。この渦によって生ずるのが誘導抗力です。

地面効果は、主翼が胴体の上についている高翼機よりも胴体の下についている低翼機の方が大きく表れます。

## 操縦桿を激しく大きく動かすとき

飛行機の操縦桿はどれくらいの量を動かすのか、疑問に思ったことはありませんか。最近、操縦桿と動翼の電気信号で結んだフライ・バイ・ワイヤーという方式が増えてきました。例えばエアバス社の旅客機は、操縦桿の代わりにゲームで使うジョイスティックのような操縦桿がついていて、普通の操縦桿ほどは大きく動かせません。最初の頃は、感圧式で引く・押すといった圧力で操縦桿を「動かして」いたそうですが、さすがにそれでは感覚的に違和感があるので、動くものにしたのだそうです。

ボーイング737のようなやや古い設計の飛行機の操縦桿は、床から棒状のものが出ていて、その先に舵輪のようなものがついた操縦桿です。セスナ172型機のような軽飛行機も同じような舵輪型です。こちらは、ワイヤーで動翼が直接つながっています。

操縦桿はどれだけ動かすかということですが、通常はごくわずかです。気流がよくて安定した飛行をしていれば、1mm引く、1度傾けるくらいの操作で飛行姿勢を維持します。気流が悪い時は、もっと大きな操作をして姿勢を維持します。

YouTubeなどでジェット旅客機が着陸しているときの操縦席の動画を見ていると、パイロットが大きく操縦桿を動かしているのを見て驚く人もいることでしょう。着陸進入のときのように速度が遅いときは、動圧が小さいため大きく舵を切らないと機体が動いてくれないので、速度が遅くなるほど大きく舵を切る必要があるのです。

## 3-7

## 鳥の飛行に学んだ

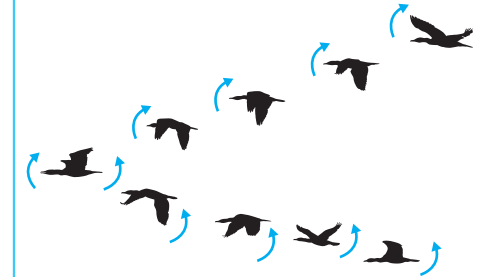
## — ウィングレット

渡り鳥の群れがV字型の隊形を保って飛んでいるのを見たことがあると思います。これは、前方の鳥が作り出す翼端渦を利用して飛んでいるのです。後方から見て、左翼端で右回り、右翼端では左回りに気流が回り、その渦が後方まで流れています。この渦の上向きの流れに当たる側、つまり、直前にいる鳥よりも少し左（左端の場合）か少し右（右端の場合）に位置すれば上昇気流の中に入ることができるため、より少ないエネルギーで飛行することができる

のです。編隊の形がV字型になるのは、各自が前方の鳥よりも少し外側に位置するからです。

しかし、先頭にいる鳥は、渦の中に入れないので疲れます。そのため、ときどき順番を入れ替えて飛んでいる

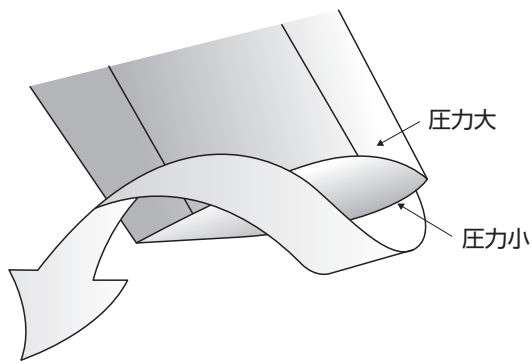
図 3-7-1 ● V字編隊



そうです。

航空機の場合、この翼端渦が後ろに流れていってできるものが、ウェイク・タービュランスです (p.183参照)。これは、機体よりやや下方に向かい、後方にかかなりの距離まで残ります。この中に後続の飛行機が入ると、操縦できないくらいの強さで機体が右あるいは左に大きく傾きます。離着陸のときなど地面に近いところでウェイク・タービュランスに入ると墜落する場合があります。

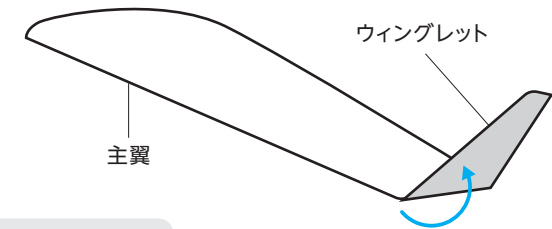
図3-7-2 ● 翼端渦のしくみ



このように翼端渦は、誘導抗力という抵抗を発生させるため、その分余計な推力が必要になるので、燃費が悪くなります。そこで、その原因となる翼端渦を軽減させて抗力を減らそうというのが、主翼端についている**ウイングレット**です。翼端にピンと跳ね上がったようにしている小さな翼です。アメリカのボーイングなどはウイングレットと呼んでいますが、欧州のエアバスはシャークレットと呼んでいます。どちらも機能は同じです。

ウイングレットは、翼下面から上面に向かう空気の流れをうまく制御して抗力を減らし、空気の力をより効率よく揚力に変換しています。

図3-7-3 ● ウイングレットの効果



下面から回り込んだ気流がウイングレットで遮られ翼端渦が小さくなり抗力を軽減する

## 究極のウィングレットとは？

ウィングレットは、翼端の気流が主翼上面に回り込んで抵抗となるのを避けるためのものですが、これと同じ働きをする方法があります。

一つは、翼端を点になるまで細く絞ったり、丸く整形する方法です。ボーイング787型機は、他の飛行機に比べて翼端が細く絞られています。また、第2次世界大戦時のスーパーマリン・スピットファイアはシリーズの多くが翼端を丸くしています。こうすることで、翼端渦を軽減しているのです。

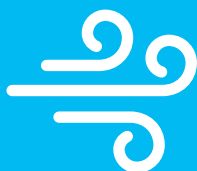
また、1970年頃までのジェット戦闘機には翼端に燃料タンクを付けたものがありました。この燃料タンクも誘導抗力を少なくしてくれます。もっとも、全体の抗力も大きくなりますから効果は相殺されてしまうかもしれません。

単発プロペラ機セスナ172型機なども、翼端渦を軽減する構造を持っています。翼端部分をよく見ると、少し下方向にねじってあるのです。この部分で、下面の気流が上面に回り込むのを防いでいます。

実は究極の翼端渦軽減メカニズムを持ったものもあります。それは鳥です。鳥の羽は翼が人間の指のような構造になっていますから、必要に応じて、翼端を開いて下方の空気を上に逃がすことができます。これが最も効率のいい翼端渦の減らし方なのですが、いまだアルミ合金製の現在の飛行機ではこのメカニズムは実現できていません。しかしNASAは飛行中に形を変えるモーフィング翼の研究をしていますから、いつかは実現することでしょう。

## 第4章

# 「風」のしくみ



空気は日射によって温められると上昇し、上空に上がって冷たくなると下降します。また、空気は高圧部から低圧部に向かって流れていきます。この流れは地球の自転による力も加わって独特の流れを作り出します。この章では風を中心としたさまざまな気象現象について説明します。