

# 飛機力學「超」入門

讓飛機飛上天的航空基礎工程學

中村寬治◎著

魏俊崎◎譯



第2章

# 空氣力學

空氣的狀態對於飛機來說有著非常大的影響力。因此，必須要知道空氣的性質。在本章會解說溫度、密度和氣壓在各種高度時如何變化，以及與飛機的速度有何關係。

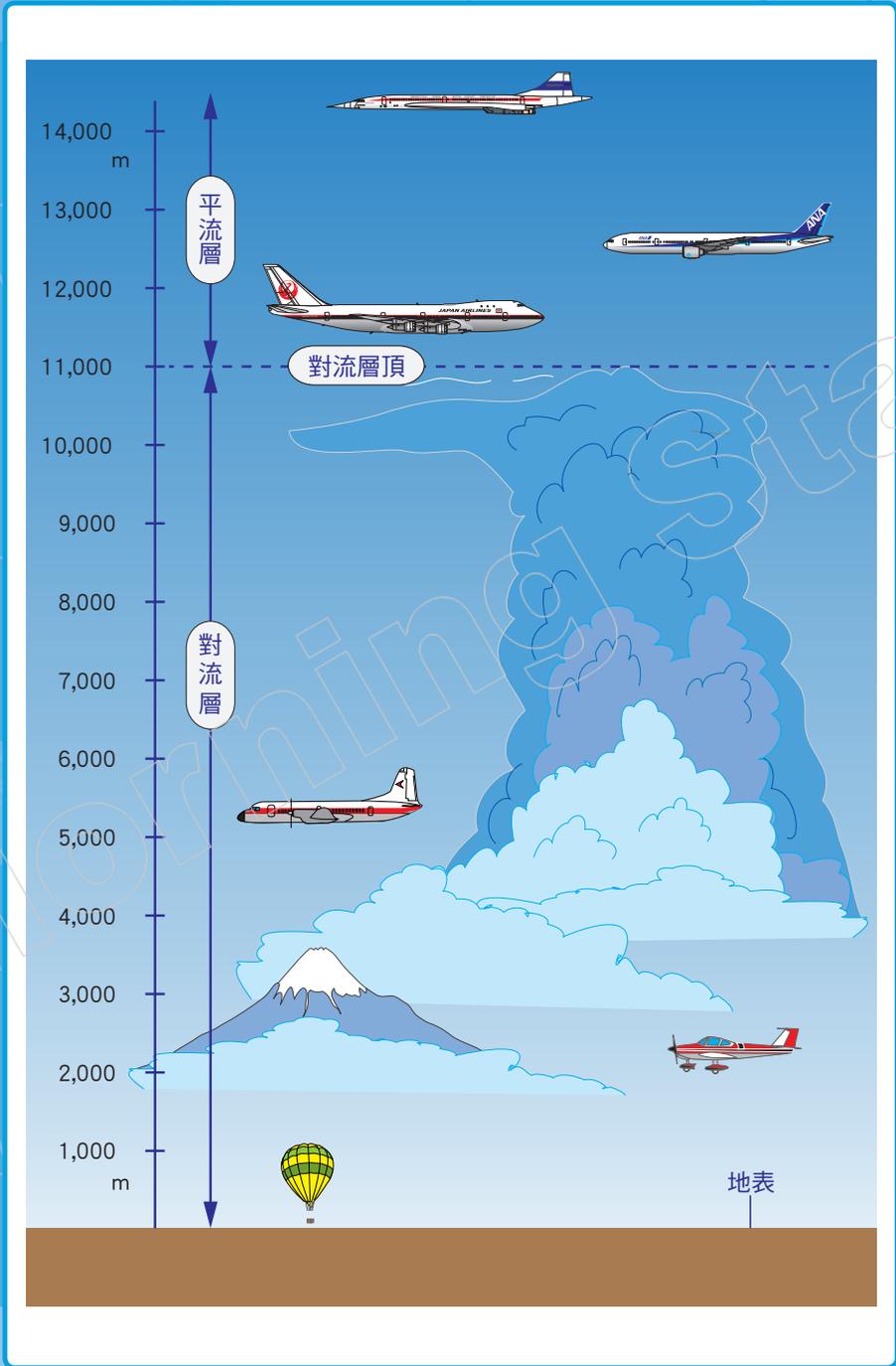


大氣的狀態（溫度、密度、氣壓）對飛機有非常大的影響。比如說，支撐飛機的升力與空氣密度成比例，飛機飛得愈高，升力就愈小。另外，噴射引擎的性能也會隨著空氣密度和溫度的變化而改變。因此，必須要理解大氣層的狀態和飛行高度的關係。所以先來確認大氣層的構造吧。

首先，太陽光傳來的能量加熱地表，接著與地表接觸的空氣也會跟著加熱，產生上升氣流。隨著空氣上升，空氣就會膨脹，接著溫度、密度和氣壓就會下降。到19世紀後半為止，對於大氣層的知識僅止於此。但是到了20世紀，藉由觀察氣球，發現了只要在一定的高度以上，空氣就會保持一定的溫度。這個溫度變化的界線稱為**對流層頂**。地表到對流層頂之間的空間稱為**對流層**，這一個區間中的空氣，會因為溫度變化產生對流，也只有在這一個區間會有雲和下雨等等的氣象現象。對流層頂以上稱為**平流層**，溫度保持一定，氣流也相對比較穩定。

另外，溫度保持不變的只到高度20,000公尺為止，更高的地方因為臭氧層吸收收了紫外線，所以溫度比較高。不過一般民航機飛行的高度不會超過20,000公尺，在本書中提到的平流層指的是氣溫固定的區間。附帶一提，平流層最高到50,000公尺，50,000~85,000公尺的高空稱為**中間層**，85,000公尺以上稱為**熱層**。

# ● 大氣層的組成



製造和設計新飛機的時候，會收集且分析試飛時的資料。但是這一份資料只代表著，在當下的大氣狀況中飛機的試飛資料。即使在同一個地方，大氣的狀態也一直都在改變。因此，在不同的時間或是不同的場所試飛時，都無法直接參考之前收集到的試飛資料。

所以首先要將試飛時的大氣資料，轉換成標準大氣狀態。從這邊就可以計算出試飛時的大氣資料與標準的不同之處，再比對各個資料。藉由這個方法，就可以確認試飛時的大氣狀態與標準大氣狀態差距多少，這時，此試飛資料就具有參考性。另外，也要在同一種大氣狀態下比較不同機種的飛機的性能資料才公平。

聯合國中負責航空的專門機構**國際民航組織（ICAO）**，基於上述的理由，設定了**國際標準大氣（ISA）**。國際標準大氣是以北半球中緯度大氣狀態為模型，標高0m，溫度15°C時，密度為 $0.12492 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ，氣壓為 $10332.3 \text{ kg}/\text{m}^2$ ，並制定每個數值在不同高度下的變化，這些數值就構成了國際標準大氣。這邊提個題外話，ICAO是根據國際民航條約在1947年組成，日本在1953年加入。

另外，這邊指的因高度而改變的溫度、密度和氣壓數值並不是由觀測氣球所觀察出來的數值，而是根據理論所得的公式計算出來的數值。（可以參考**專欄—01**的計算公式）。

## ● 國際標準大氣 (ISA)

在航空界所使用的單位目前尚未統一。本書所使用的單位為日本航空界的設計標準（以耐空性為基準）的工學單位。

高度(m)	溫度(°C)	密度(kg · s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> )	密度比	氣壓(kg/m <sup>2</sup> )	氣壓比
0	15.0	0.12492	1.0000	10332.3	1.0000
1000	8.5	0.11336	0.9075	9164.7	0.8870
2000	2.0	0.10264	0.8216	8106.3	0.7846
3000	-4.5	0.09271	0.7421	7149.1	0.6919
4000	-11.0	0.08353	0.6687	6285.5	0.6083
5000	-17.5	0.07507	0.6009	5508.5	0.5331
6000	-24.0	0.06727	0.5385	4811.1	0.4656
7000	-30.5	0.06011	0.4812	4187.0	0.4052
8000	-37.0	0.05355	0.4287	3630.1	0.3513
9000	-43.5	0.04756	0.3807	3134.8	0.3034
10000	-50.0	0.04209	0.3369	2695.7	0.2609
11000	-56.5	0.03711	0.2971	2307.8	0.2234
12000	-56.5	0.03170	0.2537	1971.1	0.1908
13000	-56.5	0.02707	0.2167	1683.6	0.1629
14000	-56.5	0.02312	0.1851	1438.0	0.1392
15000	-56.5	0.01975	0.1581	1228.2	0.1189

ft · lbs (英呎 · 磅) 的數值為

$$1 \text{ 氣壓} = 29.92126 \text{ inHg} = 2116.2167 \text{ lbs/ft}^2$$

$$15^\circ\text{C時的空氣密度} = 0.002377 \text{ slug/ft}^3 \quad * \text{ slug} = \text{lbs} / (\text{ft/s}^2)$$



## 大氣溫度 溫度與高度

在航空界所使用的單位有三種，首先是相對溫度的攝氏（ $^{\circ}\text{C}$ ）與華氏（ $^{\circ}\text{F}$ ），以及絕對溫度克耳文（ $\text{K}$ ，沒有 $^{\circ}$ ）。

以華氏來說，冰點與沸點之間分成180等分，水的冰點是32度，沸點212度。攝氏的話，冰點與沸點之間分為100等分，冰點為0度，沸點100度。剩下的就是絕對溫度克耳文。絕對溫度就是不依靠水等物質特性的溫度顯示方式，以熱力學來說，最低的絕對溫度就是0K。因此絕對溫度沒有負數。

絕對溫度對於理解氣體分子的動能非常的重要。比如說，聲音是藉著氣體分子運動所傳播的，而絕對溫度會給予氣體分子動能，所以其傳播速度非常仰賴絕對溫度。另外，絕對溫度與攝氏的度與度之間的距離相同，所以：

$$(\text{絕對溫度}) = (\text{攝氏}) + 273.15$$

也就是說，0K就等於 $-273.15^{\circ}\text{C}$ 。

國際標準大氣的定義為標高0公尺時，溫度為 $15^{\circ}\text{C}$ ，每升高1000公尺時溫度會降低 $6.5^{\circ}\text{C}$ 。舉例來說，富士山頂標高3,776公尺，那麼溫度是

$$15 - 3776 \times 6.5 / 1000 \approx -9.5^{\circ}\text{C}$$

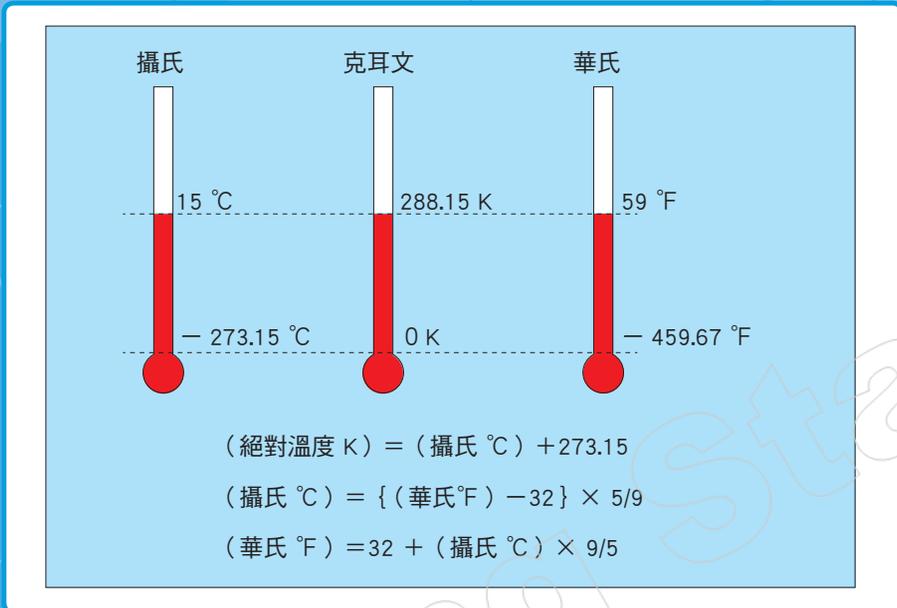
當10,000公尺時，溫度為

$$15 - 10000 \times 6.5 / 1000 = -50^{\circ}\text{C}$$

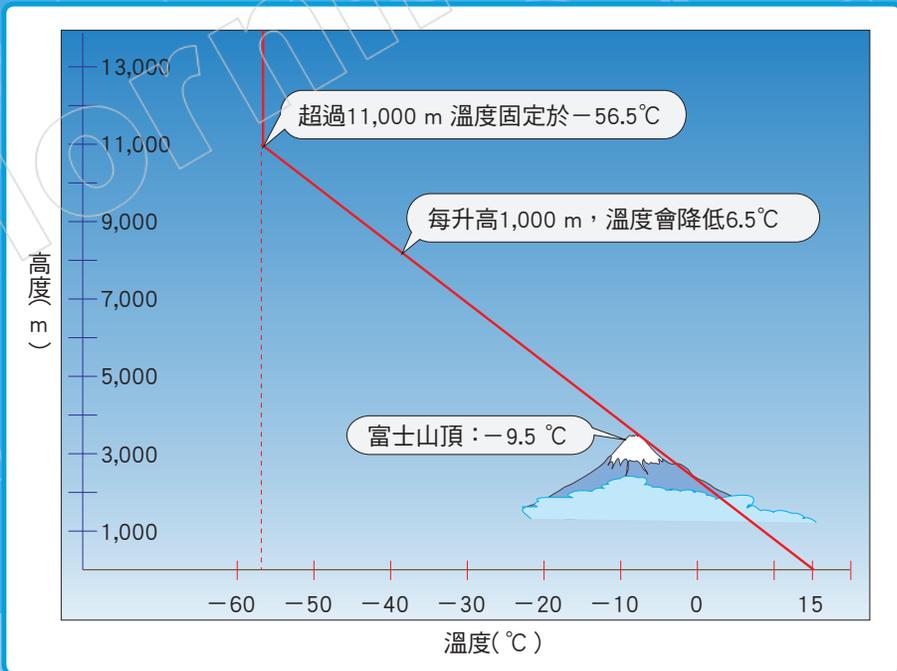
進入11,000公尺以上的平流層時，溫度就會固定下來。

$$15 - 11000 \times 6.5 / 1000 = -56.5^{\circ}\text{C}$$

## ● 三種溫度單位



## ● 溫度與高度



大氣中的空氣密度為每單位體積的質量，公式為：

$$(\text{密度}) = (\text{空氣質量}) / \text{m}^3$$

簡單的說，就跟計算人口密度時的思考方式一樣，每單位體積所含的空氣分子愈多，密度就愈大。因為重力影響的關係，愈接近地表空氣分子就愈多，空氣密度也就愈大，反之愈高空，空氣分子就愈少，密度就愈小。比如說在10,000公尺時，空氣密度約為地表的三分之一。

另外，在航空界所使用的密度單位並不是平常使用的 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。航空界使用的作用力單位也是公斤及噸，比如說支撐重量300噸的飛機的升力為300噸。也就是將「重量」視為「作用力」，可得公式：

$$(\text{重量}) = (\text{質量}) \times (\text{重力加速度}) \quad \text{單位：公斤}$$

從這邊可以推得公式：

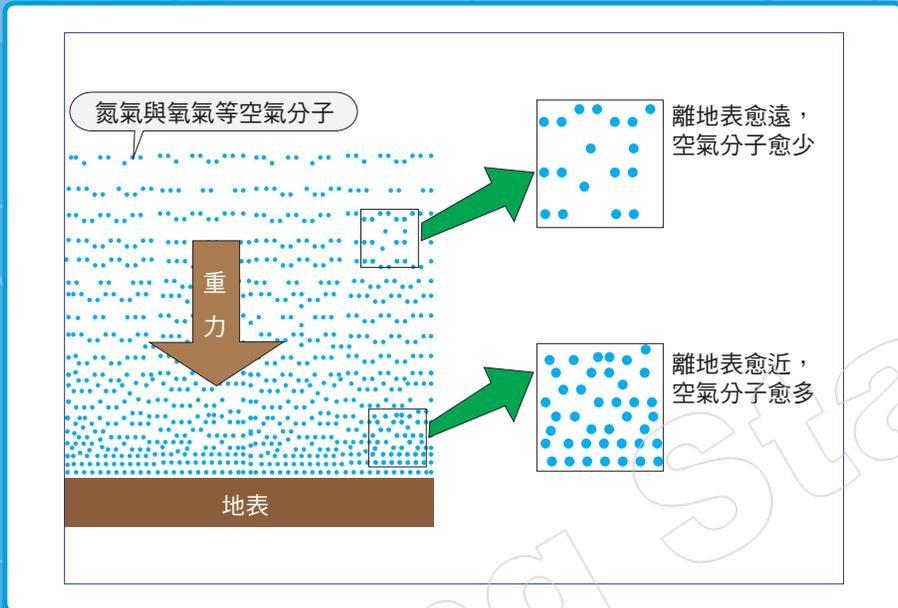
$$(\text{質量}) = (\text{重量}) / (\text{重力加速度}) \quad \text{單位：kg} / (\text{m}/\text{s}^2)$$

這個公式決定了航空界中的質量大小，換句話說決定重力的大小，以及物體所固定擁有的力學基本量，質量的單位定為 $\text{kg} / (\text{m}/\text{s}^2)$ 。這邊再將質量的單位代入計算密度的計算公式 $(\text{密度}) = (\text{質量}) / \text{m}^3$ ，可以推得：

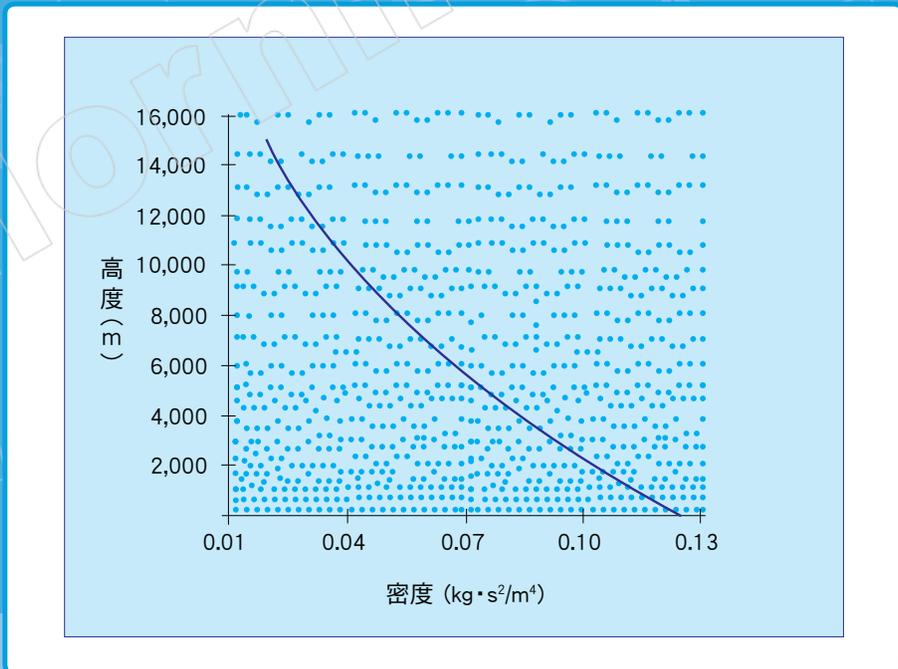
$$(\text{密度}) = \{ \text{kg} / (\text{m}/\text{s}^2) \} / \text{m}^3 = \text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^2$$

另外，英制的計算方式為將質量 $\text{lbs} / (\text{ft}/\text{s}^2)$ 定義為slug，密度單位為 $\text{slug}/\text{ft}^3$ 。

## ● 密度與重力



## ● 密度與高度



大氣壓力指的是每單位面積的空氣作用力，比如說高度100公里高的空氣在底面積 $1\text{m}^2$ 的地方實際上有多少重量呢，此時的重量單位為 $\text{kg}/\text{m}^2$ 。接著就來確認實際上重量的大小。

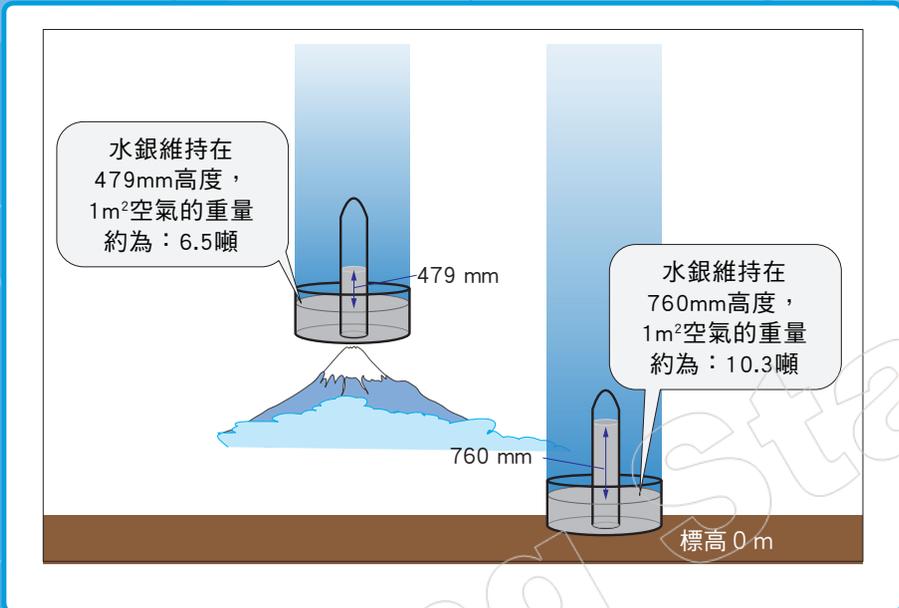
從前有一個說法：「水井的深度超過10公尺時，沒有辦法用手動幫浦把水打上來」。那是因為當水管超過10公尺時，井中水面上的空氣柱體往水面壓的作用力沒辦法維持水管中水的重量。同樣的道理，**高度100公里的空氣柱體重量最多只能支撐10公尺的水柱重量**。10立方公尺的水約為10噸，從這邊可以知道1大氣壓大約等於 $10\text{噸}/\text{m}^2$ 。這邊提一個題外話，在海中，深度每增加10公尺就會增加1大氣壓，是因為深度10公尺時，海水的重量為每1平方公尺10噸。

17世紀，義大利物理學者托里切利使用了比水重14倍的水銀計算出了1大氣壓的大小。如圖所示，將灌滿水銀的試管垂直立起來的時候，水銀並不會全部流出來，而是停在760公釐。那是因為100公里空氣柱體重量平衡了試管內的水銀重量。這就是1大氣壓，可以求得：

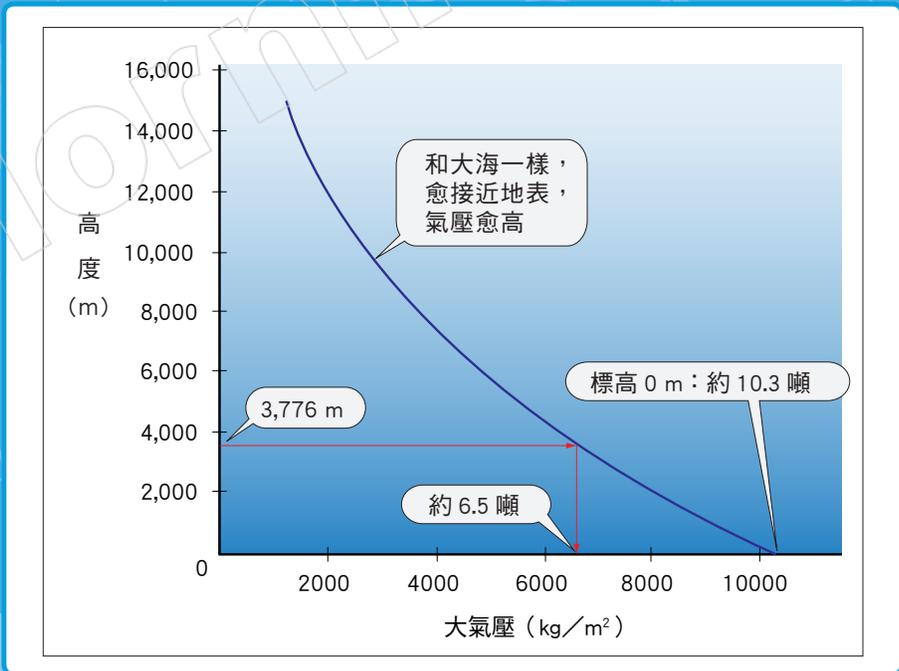
$$\left( \text{水銀的密度} : 13.8632 \times 10^3 \right) \times \left( \text{重力加速度} : 9.80665 \right) \times 0.76 = 10332.3 \text{ kg}/\text{m}^2$$

順帶一提，在試管中放水時，水柱的高度為10.3323公尺。另外，標高0公尺的時候，水銀的高度為760公釐，在富士山山頂時，大氣壓較平地小，為 $6.47\text{噸}/\text{m}^2$ ，水銀的高度也降低成479公釐。

● 空氣的重量



● 大氣壓與高度



## 動壓是什麼？

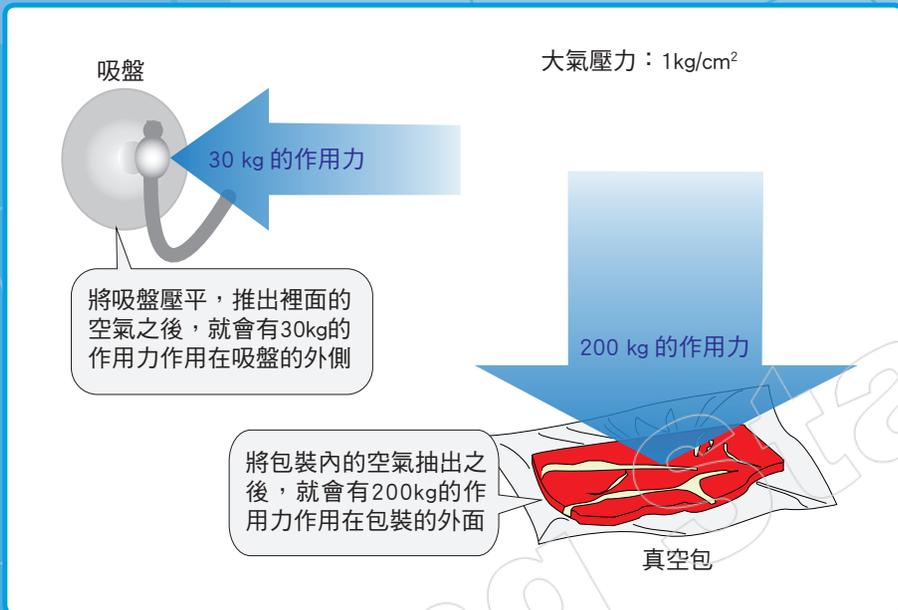
### 因空氣流動所產生的壓力

現行有很多物品使用空氣的力量，例如吸附在無法使用釘子的磁磚上的吸盤或是保存食物專用的真空包。假設吸盤的表面積為30平方公分，因為大氣壓力大約為每平方公分1公斤，那麼作用在整個**吸盤上的大氣壓力就會有約30公斤**。因為有這個作用力，掛在吸盤上的東西只要小於30公斤，吸盤都不會脫落。另外，把長10公分、寬20公分的真空包中的空氣全部抽出來的話，那麼作用在真空包上面的壓力約會有200公斤。

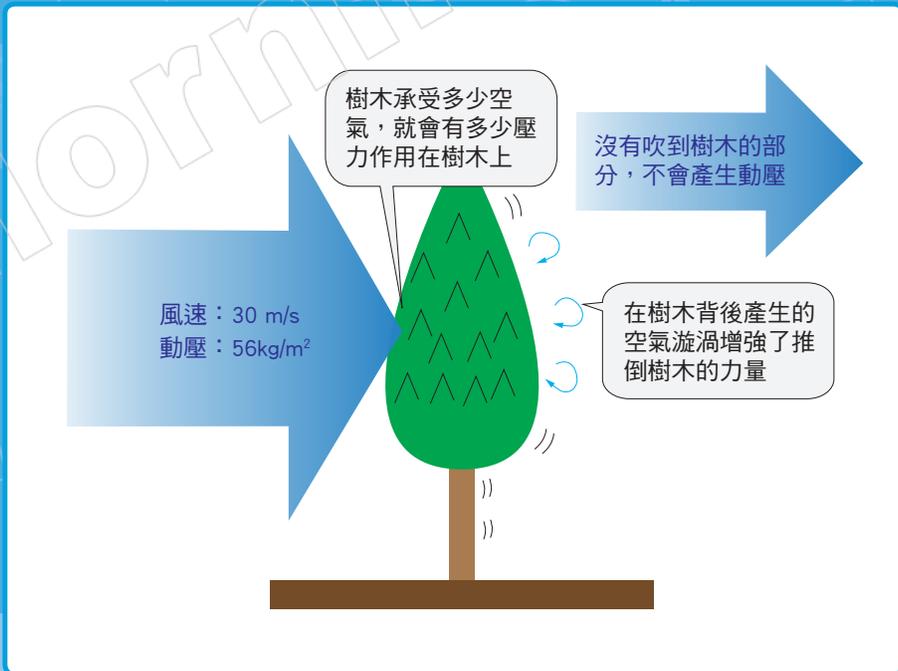
接著來看看空氣移動的狀況，例如一股強風吹來時，空氣的作用力如何變化。如同「柳葉隨風搖曳」，柳樹的葉子完全不抵抗風吹，巧妙的把空氣的作用力卸除掉。另一方面，風吹向茂盛、粗壯的樹木，因為粗壯的樹幹不像柳樹般搖曳，而把所有的風都擋了下來，樹枝就被吹斷，甚至是整棵樹被風吹倒。把強風帶來的空氣全部擋下來的話，空氣中的運動能量就會轉換成壓力，因此作用在樹木上面的壓力就會變大。另外，風吹過之後，空氣穿越樹木，在樹木後方旋轉的空氣會形成漩渦，而這漩渦拉著樹木產生**抗力**，使得下風處拉扯樹木的力量變得更大。

空氣流動時產生的作用力，或是在天空中飛行時產生的壓力，就是所謂的**動壓**。不能忘記還有另一個壓力的存在，無關飛行，無論風吹與否，都會作用在吸盤或是真空包上的壓力。這種壓力稱為**靜壓**，也可以說是航空界中所講的，作用在飛機上的大氣壓力。用不同方式來解釋的話，將手放在河川中時，因水深而感受到的壓力就是靜壓，而動壓就是水流動所傳來的壓力。

● 靜壓



● 動壓



## 白努利的公式

### 流動愈快，壓力愈低？

大家都知道動壓是因空氣流動所產生的壓力，此壓力會隨著空氣流動速度加快而增強。18世紀的物理學者丹尼爾·白努利用數學公式計算，發現了動壓的大小與空氣的速度成兩倍的比例，比如說空氣速度兩倍時，動壓為四倍。航空力學也不例外，所以在這邊我們來看看**白努利公式**。

首先，有一點很重要，動壓在空氣速度為0的時候也能發揮所有的作用力，意思就是此時的動壓為靜壓。同時物理上實際作用的壓力只有靜壓，而動壓的大小，也就是空氣流動的速度會改變靜壓的大小。此時的動壓與其說是物理上的壓力，倒不如說是一個數學的變數，而且是讓靜壓變化的主要原因。

從能量的觀點來解釋的話，空氣有著位能，加上動能就會變成壓力能。從能量守恆的原則來看，空氣流動變快時，壓力能轉變成動能，空氣整體的能量並不會變化。

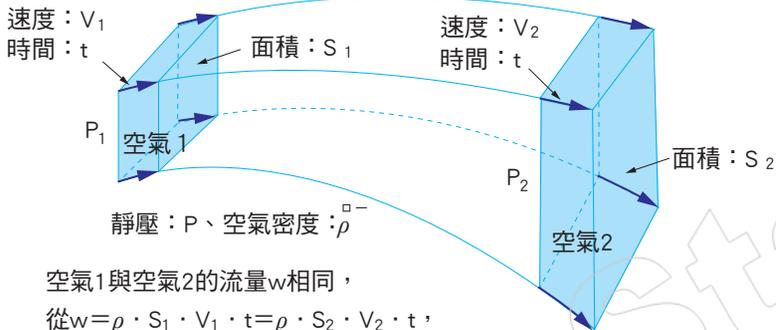
也就是說，**（靜壓）+（動壓）的總和是一定的**，空氣流速增加時，靜壓就會減少，相反流速降低時，靜壓就會增加。此外，擁有動能的「動壓」，與「空氣密度」及「空氣速度的平方」為固定比例，可以表示為：

$$\text{（動壓）} = \left(1/2\right) \times \text{（空氣密度）} \times \text{（空氣速度）}^2$$

這是在航空力學中一定會使用到的公式。

## ● 白努利的公式

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$



空氣1與空氣2的流量 $w$ 相同，

從 $w = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot t = \rho \cdot S_2 \cdot V_2 \cdot t$ ，

可以知道能量守恆定律 $S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2$ 成立。

接著可以繼續推得：

(壓力能) = (壓力) × (體積)

$$= P \cdot S \cdot V \cdot t$$

(動能) =  $\frac{1}{2}$  × (質量) × (速度)<sup>2</sup>

$$= \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot S \cdot V \cdot t) \cdot V^2$$

因為 (壓力能) + (動能) = (固定值)，推得

$$\begin{aligned} P_1 \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot t) \cdot V_1^2 \\ = P_2 \cdot S_2 \cdot V_2 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot S_2 \cdot V_2 \cdot t) \cdot V_2^2 \end{aligned}$$

從能量守恆定律 $S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2$ ，可以推得

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

(靜壓)<sub>1</sub> + (動壓)<sub>1</sub> = (靜壓)<sub>2</sub> + (動壓)<sub>2</sub>

從這邊就可以知道靜壓和動壓的總和是固定值，這就是白努利定律。

速度儀就是利用動壓最明顯的例子。以前的速度儀，是利用儀表內的空盒（非常薄的金屬製容器），隨著動壓大小膨脹縮小來表示動壓的大小。現在則是由電腦進行數位化處理之後，顯示在儀表上。說是這樣說，不論是以前的舊式飛機還是現在的高科技飛機，所使用的速度儀都不是一般所使用的每小時前進多少距離的時速表，而是以動壓為基準的速度儀。

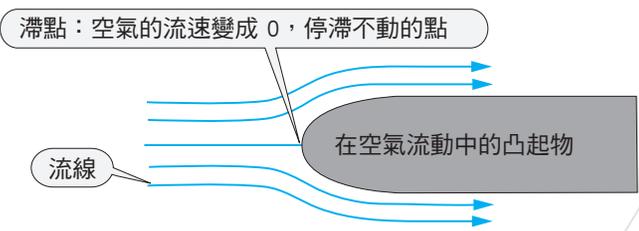
那是因為升力和阻力都是與動壓成固定比例。為了知道在不失速的前提之下，飛機的最小速度，以及在不破壞機體的前提之下，飛機的最大速度是多少，使用以動壓為基準的速度儀對駕駛來說剛剛好。以動壓為基準的速度儀稱作**空速計**，空速計所指示的速度稱為**空速（IAS）**。

顯示動壓的裝置是由18世紀的發明家亨利·皮托所發明的。現今也被稱為**皮托管**。將一個凸起物放置在空氣的流動中時，空氣會在最尖端的部分停止流動，這一個點稱為**滯點**，而皮托管就是利用滯點來測量動壓。在滯點，因為空氣的速度變成0，因此壓力會變成最大，這一個壓力稱為**全壓**或是**總壓力**。在皮托管上的滯點設置一個全壓孔來測量動壓，左右設置靜壓孔測量靜壓，而（全壓）=（靜壓）+（動壓），因此藉由以下公式可以知道動壓的大小。

$$\text{（動壓）} = \text{（全壓）} - \text{（靜壓）}$$

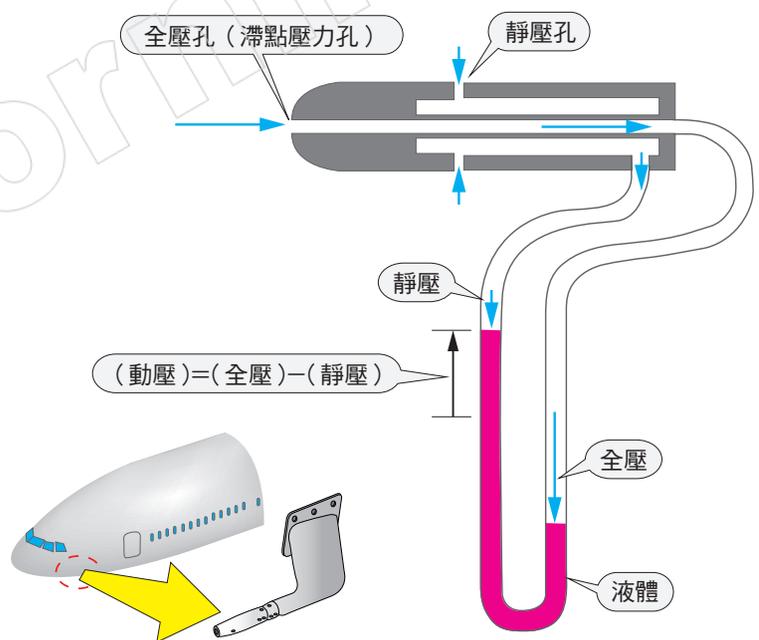
● 滯點

在滯點產生高溫跟高壓的現象稱為衝壓效應，壓力稱為全壓，溫度稱為全溫（TAT）



● 皮托管

由滯點的壓力：（全壓）=（靜壓）+（動壓）推得  
（動壓）=（全壓）-（靜壓）





## 空速計的刻度 動壓的大小與刻度

首先，先來看利用動壓測量速度的空速計。另外，在航空界所使用代表速度的單位，和海運界一樣，為1小時前進1海里（1.852公里），也就是節。

在空速計上的刻度顯示著空氣是以多快的速度撞上皮托管。比如說，飛機在跑道上滑行時，空氣速度為100節（每小時185公里），那麼空速計就會顯示100節。如此一來，在**標準大氣狀態**時，空速會與飛機和跑道的相對速度（對地速度）相同，以方便進行起飛距離的各種計算。

問題就在於飛機起飛之後。因為小型飛機以低速在低空飛行，空氣的速度和空速計之間的差異非常的微小。為了讓差異更明顯，提高高度來看看。

比如說，維持在指示空速250 IAS往上爬升。隨著高度爬升，空氣密度也會減少，如果要維持250 IAS的速度，換句話說，為了維持相同大小的動壓，必須要增加空氣的速度。如圖所示，如果要維持與在地上速度相同的動壓，在10,000公尺的高空時就必須額外將速度增加162節（每小時300公里）。但是駕駛不需要在意隨著高度升高而改變的空氣速度，因為**只要維持一定的指示空速，就可以產生足以支撐飛機的升力**。

只要維持相同指示空速，不論在什麼高度都可以獲得相同的空氣作用力，也就是說「不論在什麼高速，在駕駛艙都會聽到相同大小的風切聲」。

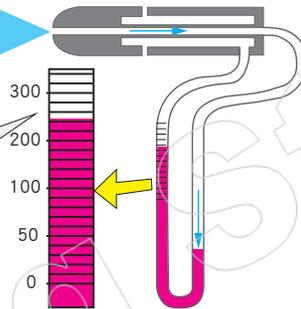
● 空速計的刻度

因為在地上飛機的速度和空氣的速度相同，空氣速度為250節（463 km/h）時，空速計也顯示250 IAS。

$$(\text{動壓}) = \frac{1}{2} (\text{空氣密度}) \times (\text{空氣速度})^2$$

空氣速度：250節

原本是表示動壓大小，加上了速度以顯示目前空速。目前的例子顯示為250 IAS。

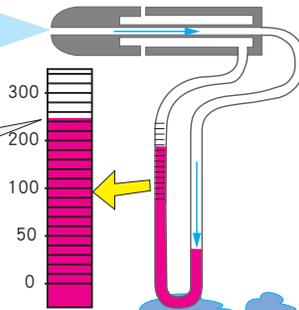


地上

在高度10,000m時，空氣密度為地上的1/3，為了獲得同樣的250 IAS，因為空氣密度減少，而必須將空氣的速度增加162節（300km/h），提升至412節（763km/h）

空氣速度：412節

指示空速250 IAS  
與地表相同動壓



高度10000m