

第一章 流體基本性質



國立中央大學土木系
朱佳仁 教授

1-1

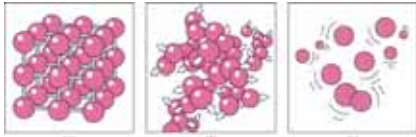
本章重點

- 流體的定義
 - 定性的描述
 - 定量的描述
- 流體的基本性質
 - 密度、黏滯係數、表面張力……等
- 流體力學的分類
- 研究方法

1-2

定性的描述

- 固體(Solid) --- 有固定形狀，有固定體積
- 液體(Liquid) --- 無固定形狀，有固定體積
- 氣體(Gas) --- 無固定形狀，無固定體積



固體(Solid) 液體(Liquid) 氣體(Gas)

1-3

流體(Fluid)、流場(Flow)

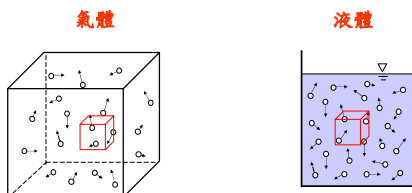
液體和氣體合稱為流體(Fluid)

流體流動所產生的現象稱為流場(Flow)

流體(Fluid)是一種物質，流場(Flow)是一種現象。譬如空氣為流體，風為流場。

1-4

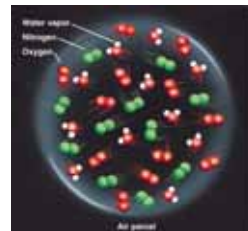
液體和氣體皆是由許多分子鬆散地組合而成，若想藉由計算每一個分子的碰撞和受力來瞭解整塊流體的力學行為，則十分困難。因此可將流場中一個小區間範圍內所有的流體分子視為一個流體單元(Fluid element)。



氣體和液體分子運動之示意圖

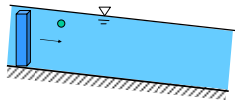
1-5

一大氣壓，溫度20°C狀態下，1 cm³的空氣中大約有2.5x10¹⁹個分子，每個分子運動的尺度約為10⁻⁶ cm。工程應用上可將流場中一個小區間（譬如1 cm x 1 cm x 1 cm）範圍內所有的流體分子視為一個流體單元(Fluid element)，此流體單元的尺度（1 cm）遠大於流體分子運動的尺度。



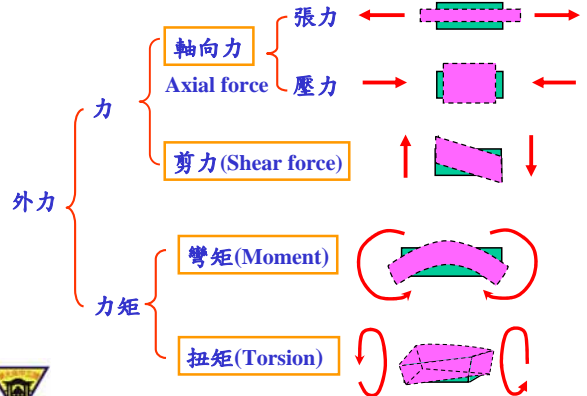
1-6

連續體假設(Continuum Hypothesis)



工程上研究流體力學時，不需看每一個流體分子的行為，僅研究**整塊流體單元**的受力後的現象。譬如河川中水流受重力，向下流動的流速為**整塊水體**移動的速度，並非**單一水分子**移動的速度。

換言之，**流體單元**可視為**連續體(Continuum)**。



定量的描述

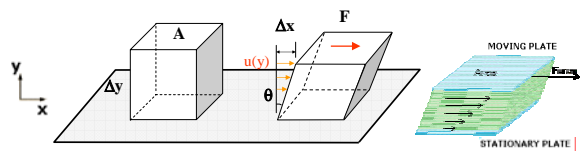
剪力 (Shear force) 的定義為平行於受力面積的力，**剪應力 (Shear stress)** 則為單位面積所受之剪力：

$$\tau = \frac{F}{A}$$



式中 F 為剪力， A 為受力面積。固體及流體在受剪應力後，皆會做連續的變形。

流體受剪力後變形之示意圖

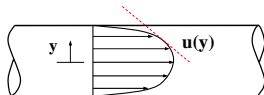


應變 (Strain) $\theta = \frac{\Delta x}{\Delta y}$ 變形量

應變率 (rate of strain) $\frac{\theta}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{1}{\Delta y} = \frac{\Delta u}{\Delta y} = \text{速度梯度}$
單位時間的變形量 速度的變化率

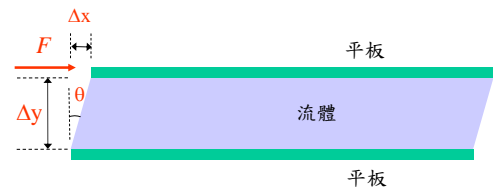
速度梯度 (Velocity gradient)

管流



$\frac{du}{dy}$ 流速 u 在 y 方向的變化率 (斜率)

流體和固體受剪應力



固體：應變與應力成正比關係

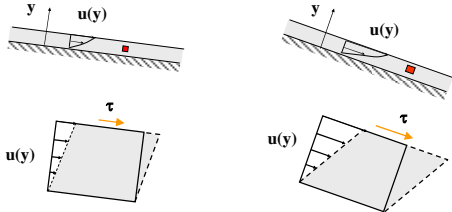
$$\tau \propto \theta = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

流體：應變率(速度梯度)與剪應力成正比關係

$$\tau \propto \frac{\theta}{\Delta t} = \frac{du}{dy} \quad \text{牛頓黏滯定律}$$

流體速度梯度與剪應力之關係

譬如液體在斜坡上流動



流體所受的剪應力愈大，應變率愈大，
速度梯度 du/dy 愈大。

1 - 13

因次(Dimension)與單位(Unit)

所有的物理量(譬如速度、密度、應力等)皆有因次，譬如速度的因次為 $[L/T]$ ，單位為 $[m/s]$ 或 $[km/hr]$ 或 $[mile/hr]$

■ 基本因次(Dimension)：

- 長度 $[L]$
 - 時間 $[T]$
 - 質量 $[M]$
 - 力(重量) $[F]$
 - 溫度 $[Θ]$
- $F = m a \longrightarrow [F] = [MLT^{-2}]$

1 - 14

常用之基本因次與單位

基本單位	符號	國際單位制	英制
質量	[M]	Kg, g	Slug, lbm
長度	[L]	m, cm	ft, in
時間	[T]	hr, sec	sec
重量,力	[F]	N, Kgf	lbf
溫度	[Θ]	°C, °K	°F

1 - 15

因次一致性(Dimension uniformity)

描述物理現象的方程式必須遵守**因次的一致性**，亦即方程式中的各項應具有相同的因次。譬如物體的運動方程式

$$x(t) = x_0 + vt + 0.5 a t^2$$

$$[L] = [L] + \left[\frac{L}{T}\right] \cdot [T] + \left[\frac{L}{T^2}\right] \cdot [T^2]$$

方程式中的各項因次必須一致！

1 - 16

流體的物理性質

流體的物理性質會隨外在環境(譬如壓力、溫度等)的改變而變化，流體性質又可分為：

1. **總體性質(Extensive property)**：或稱為外延性質，與流體總量有關的物理量，如質量、重量、體積、總力、總能量等。
2. **內涵性質(Intensive property)**：與總量無關但與流體內在性質有關的物理量，如密度、單位重、比重、濃度、黏滯係數、蒸氣壓、比熱、溫度、表面張力等。

1 - 17

流體的基本物理性質

- ➔ 壓力(Pressure)
- ➔ 密度(Density)
- ➔ 單位重(Specific Weight)
- ➔ 比重(Specific Gravity)
- ➔ 黏滯係數(Viscosity)
- ➔ 表面張力(Surface Tension)
- ➔ 比熱(Specific Heat)
- ➔ 容積模數(Bulk modulus)
- ➔ 蒸氣壓(Vapor pressure)

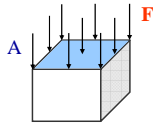
1 - 18

1. 壓力(Pressure)

壓力的定義為單位面積之所受之正向力(Normal force)

$$P = \frac{F}{A}$$

F為正向力，A為受力面積，壓力又可稱為壓應力(Compressive stress)，因次為[F / L²]。



物體受壓力之示意圖

常見的壓力單位

國際單位制(SI)：

$$\begin{aligned} 1.0 \text{ N/m}^2 &= 1.0 \text{ Pa (Pascal 帕斯卡)} \\ &= 0.01 \text{ mbar (毫巴, millibar, mb)} \\ &= 0.01 \text{ hPa (百帕)} \\ 1.0 \text{ kPa} &= 1000 \text{ Pa} \\ &= 1000 \text{ N/m}^2 \text{ (千帕)} \end{aligned}$$



Blaise Pascal (1623-1662)

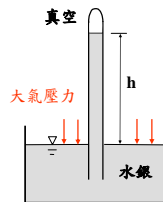
英制：

$$\begin{aligned} 1.0 \text{ psi} &= 1.0 \text{ lbf/in}^2 \text{ (pound per square inch)} \\ &= 144 \text{ psf (pound per square ft, lbf/ft}^2\text{)} \end{aligned}$$

常見的壓力單位

於海平面的1 標準大氣壓力

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ &= 101.3 \text{ kPa} \\ &= 1013 \text{ mbar (毫巴)} \\ &= 760 \text{ mm-Hg (水銀柱高)} \\ &= 14.6 \text{ psi} \end{aligned}$$



實際的大氣壓力會因氣候狀況，有高有低，譬如颶風中心便是低氣壓。

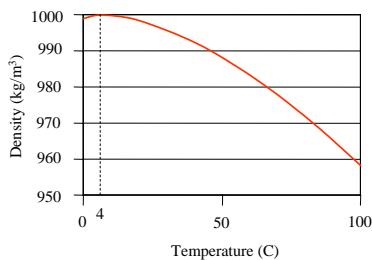
2. 密度(Density)

密度的定義為單位體積之流體質量

$$\rho = \frac{\text{流體質量}}{\text{流體體積}}$$

密度的因次為[M/L³]，流體的密度會受溫度及壓力的影響而改變。

純水的密度



在標準溫度與壓力(一個標準大氣壓，溫度為4°C)的狀況下，純水的密度1000 kg/m³。

2. 密度(Density)

氣體的密度必須遵守狀態方程式：

$$PV = nR_u T$$

p為壓力，T為絕對溫度(°K = °C + 273)，n為莫爾數， $R_u = 82.05 \text{ cm}^3\text{-atm-g}^\circ\text{K/mol} = 8.314 \text{ J}^\circ\text{K/mol}$ 為氣體常數。

狀態方程式可改寫為：

$$P = \frac{nM}{V} \frac{R_u T}{M}$$

其中M為氣體之分子量，而氣體密度等於：

$$\frac{nM}{V} = \rho$$

2. 密度(Density)

因此，狀態方程式可表示為：

$$P = \rho RT$$

此處之氣體常數 $R = R_u/M$ ，會因為氣體種類不同而有不同的值，譬如乾燥空氣之氣體常數 $R = 287 \text{ J}^\circ\text{K}/\text{kg}$ ，水汽的氣體常數 $R = 461 \text{ J}^\circ\text{K}/\text{kg}$ ，不同於氣體常數 $R_u = 82.05 \text{ cm}^3\text{-atm-g}^\circ\text{K}/\text{mol} = 8.314 \text{ J}^\circ\text{K}/\text{mol}$ 。

溫度愈高，氣體的密度會愈小；而壓力愈大，密度會愈大。

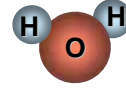


Gas Constant of Water Vapor

$$R = \frac{R_u}{M_w}$$

$$R = \frac{8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}}{18 \text{ g mol}^{-1}}$$

$$R = 461 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$$



Molecular Weight (M_w)

Hydrogen = 1.0 g mol^{-1}

Oxygen = 16 g mol^{-1}

Water = 18 g mol^{-1}



密度(Density)

Densities of Some Common Substances at Standard Temperature (0°C) and Pressure (Atmospheric)

Substance	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Substance	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Air	1.29	Ice	0.917×10^3
Aluminum	2.70×10^3	Iron	7.86×10^3
Benzene	0.879×10^3	Lead	11.3×10^3
Copper	8.92×10^3	Mercury	13.6×10^3
Ethyl alcohol	0.806×10^3	Oak	0.710×10^3
Fresh water	1.00×10^3	Oxygen gas	1.43
Glycerin	1.26×10^3	Pine	0.373×10^3
Gold	19.3×10^3	Platinum	21.4×10^3
Helium gas	1.79×10^{-1}	Seawater	1.03×10^3
Hydrogen gas	8.99×10^{-2}	Silver	10.5×10^3



3. 單位重(Specific weight)

- 單位重的定義為單位體積之流體重量

$$\gamma = \frac{\text{流體重量}}{\text{流體體積}}$$

單位重的因次為 $[\text{F} / \text{L}^3]$ 。

- 因為重量等於質量乘以重力加速度 $g (= 9.81 \text{ m/s}^2)$ ，故單位重

$$\gamma = \rho g$$

純水的單位重 $\gamma_{\text{water}} = 9810 \text{ N/m}^3$ 。



4. 比重(Specific gravity)

流體的密度（或單位重）也常以比重表示

$$S = \frac{\gamma_A}{\gamma_{\text{water}}} = \frac{\rho_A}{\rho_{\text{water}}}$$

其中 γ_A 為流體A的單位重， $\gamma_{\text{water}} = 9810 \text{ N/m}^3$ 為標準溫度與壓力（一個標準大氣壓，溫度為 4°C ）的狀況下，純水的單位重。

- 比重為無因次參數，譬如水銀的比重 $S = 13.6$ 。
- 密度(Density)、單位重(Specific weight)、比重(Specific gravity)三者可以互換。



例題：在一個標準大氣壓及室溫(20°C)下，空氣的密度、單位重、比重為何？

解：一個標準大氣壓 $P_{\text{atm}} = 101.3 \times 10^3 \text{ N/m}^2$

溫度 $T = 20^\circ\text{C} + 273.15 = 293.15^\circ\text{K}$ ，密度

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{101,300 \text{ N/m}^2}{287 \text{ J}^\circ\text{K} / \text{kg} \cdot 293.15^\circ\text{K}} = 1.20 \text{ kg/m}^3$$

單位重 $\gamma = \rho g = 1.20 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 11.77 \text{ N/m}^3$

$$\text{比重 } S = \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{water}}} = \frac{\gamma_{\text{air}}}{\gamma_{\text{water}}} = \frac{11.77 \text{ N/m}^3}{9810 \text{ N/m}^3} = 0.0012$$



5. 濃度(Concentration)

濃度的定義為單位體積之流體中的溶質質量：

$$\text{Conc.} = \frac{\text{物質之質量}}{\text{流體體積}}$$

此種濃度的因次為 $[M/L^3]$ 。譬如1.0g的鹽溶解於1.0公升的純水中，若鹽的體積予以忽略，鹽的濃度為 $1.0 \text{ g/liter} = 1.0 \text{ kg/m}^3$ 。



1 - 31

5. 濃度(Concentration)

濃度亦可表示為單位質量的溶液中溶質之質量

$$\text{Conc.} = \frac{\text{物質之質量}}{\text{流體質量}}$$

此種濃度是無因次的，常用於液體中物質。譬如1.0 mg的鹽溶解於1公升(=1.0 kg)的純水中，其質量分數為1.0 ppm (= part per million = 10^{-6} ，百萬分之一)。在濃度極為稀薄的水溶液中，1.0 ppm = 1.0 mg/kg = 1.0 mg/liter；而1.0 ppb (= part per billion = 10^{-9} ，十億分之一) = 1.0 $\mu\text{g/kg}$ = 1.0 $\mu\text{g/liter}$ 。



1 - 32

5. 濃度(Concentration)

氣體中某物質的濃度常以體積分數表示，定義為單位體積中該物質的體積：

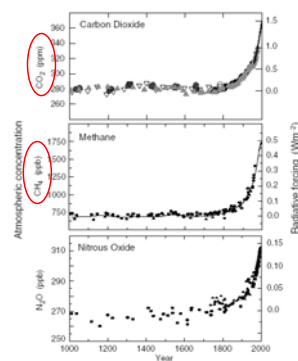
$$\text{Conc.} = \frac{\text{物質之體積}}{\text{流體體積}}$$

此種濃度是無因次，譬如一般的空氣中二氧化碳的濃度為360 ppm，一氧化碳的濃度為0.19 ppm (= 190 ppb)。



1 - 33

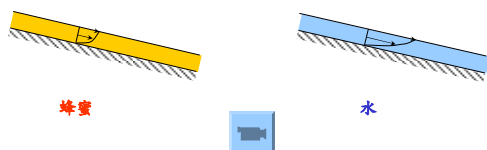
溫室氣體(Greenhouse Gases)



1 - 34

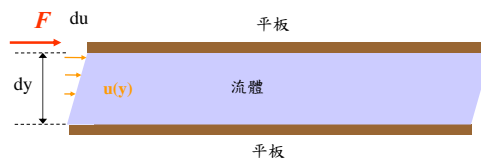
6. 黏滯係數(Viscosity)

黏滯係數代表流體在受到剪應力後變形(流動)的難易程度，譬如蜂蜜與水在相同的斜坡上流動，蜂蜜的黏滯係數較大，單位時間內的變形量會較小，亦即較難流動；水的黏滯係數較小，單位時間內的變形量則較大，亦即流動較容易。



1 - 35

介於兩平行平板之間的流體



流體：應變率(速度梯度)與剪應力成正比關係

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \begin{array}{l} \text{牛頓黏滯定律} \\ \text{牛頓內摩擦定律} \end{array}$$

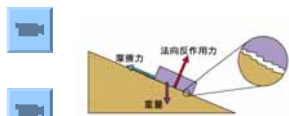
μ 為流體的動力黏滯係數，因次為 $[F \cdot T/L^2]$ 。



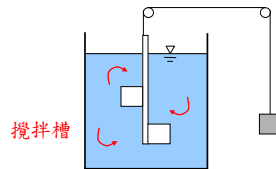
1 - 36

黏滯係數(Viscosity)

黏滯係數亦代表流體流動時內阻力的**大小**，譬如**蜂蜜**和**水**在被攪動後，**蜂蜜**很快地就會停止流動，而**水**在一段時間之後才會停止流動。這是因為蜂蜜的黏滯係數較大，蜂蜜流動時的內阻力會很快地消耗掉流體的動能；而水的黏滯係數較小，內阻力亦小，因此需要較長的時間才會將流體的動能消耗掉。



Joule's experiment



位能 → 流體的動能 → 熱能



黏滯係數(Viscosity)

- 動力黏滯係數(Dynamic viscosity) :

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad \left[\frac{F}{L^2} \right] = \left[\frac{F \cdot T}{L^2} \right] \cdot \left[\frac{L/T}{L} \right]$$

此式稱為**牛頓黏滯定律(Newton's viscosity law)**，其中 μ 為流體的動力黏滯係數，因次為 $[F \cdot T/L^2]$ 。

- 運動黏滯係數(Kinematic viscosity) :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \mu = \rho \cdot \nu$$

運動黏滯係數的因次為 $[L^2/T]$ 。



Greek Symbols

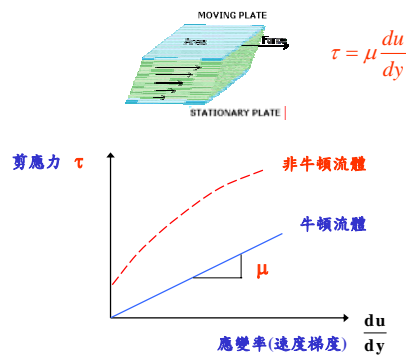
TABLE 18.2 The Greek Alphabet

A	α	Alpha	N	ν	Nu
B	β	Beta	Ξ	ξ	Xi
Γ	γ	Gamma	O	o	Omicron
Δ	δ	Delta	Π	π	Pi
E	ϵ	Epsilon	P	ρ	Rho
Z	ζ	Zeta	Σ	σ	Sigma
H	η	Eta	T	τ	Tau
Θ	θ	Theta	Y	υ	Upsilon
I	ι	Iota	Φ	ϕ	Phi
K	κ	Kappa	X	χ	Chi or khi
Λ	λ	Lambda	Ψ	ψ	Psi
M	μ	Mu	Ω	ω	Omega



黏滯係數(Viscosity)

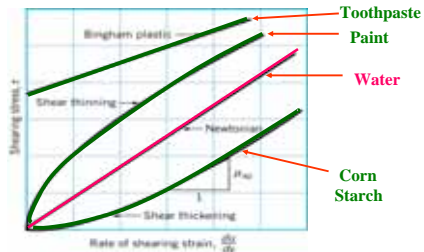
- 牛頓流體(Newtonian fluid)**：流體之應變率(速度梯度)與所受之剪應力成線性關係，**黏滯係數可以視為常數**。一般常見的流體大多為牛頓流體，譬如**空氣、水、汽油**等，本課程所討論之流體大多為牛頓流體。
- 非牛頓流體(Non-Newtonian fluid)**：流體之黏滯係數為剪應力之函數，亦即流體之應變率與剪應力成非線性關係，譬如**牙膏、糖漿、美乃滋醬**等。



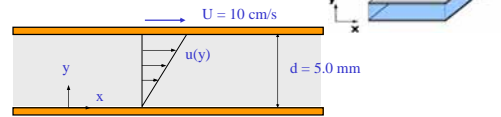
牛頓流體與非牛頓流體剪應力與應變率之關係



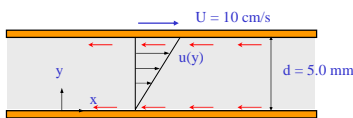
Newtonian vs. Non-Newtonian



例題：機械工程中，經常在機械的軸承中加入潤滑油，以減少機械運轉時的磨損與摩擦阻力，此問題可視為在兩塊平板之間充滿某種黏性流體。若下平板固定不動，上平板以等速U移動，潤滑油的動力黏滯係數為0.036 N·s/m²，問上平板處之剪應力？



解：在貼近平板處之流體會因流體的黏滯性而與平板有相同的速度，此現象稱之為不滑動（No slip）邊界條件。



在y=0 處，流體速度u=0

在y=d 處，流體速度u=U

流速成線性分佈 $u(y) = \frac{y}{d} U$

上平板處之剪應力 $\tau = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=d} = \mu \frac{U}{d}$

下平板處之剪應力 $\tau = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} = \mu \frac{U}{d}$

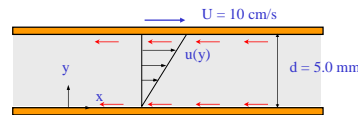


$$\tau = 0.036 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \frac{0.1 \text{ m} / \text{s}}{0.005 \text{ m}} = 0.72 \text{ N} / \text{m}^2$$

而平板所受之黏滯阻力為

$$F_D = \tau \cdot A$$

其中A為平板與流體接觸的面積。不僅在平板處流體受到剪應力，在流體內部亦會有剪應力，這也就是流體在流動或變形時所遇到的內阻力。

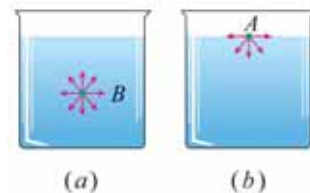


7. 表面張力(Surface Tension)

在液體與氣體接觸之界面，相同流體分子之間的**內聚力**會使得界面的面積趨於最小，譬如小水滴或浮於水面的油膜。單位長度的**內聚力**即為**表面張力**，因次為[F/L]。表面張力與流體種類、接觸界面和溫度有關。



表面張力(Surface Tension)



液體分子的內聚力會吸引相鄰的分子而凝聚在一起，在液面下的液體分子受到360度各方向的引力，合力=0。但在液面的分子受到的引力並不相等，結果形成一個往液體內拉的表面張力。



7. 表面張力(Surface Tension)

表面張力與小尺度的問題有關，大尺度的問題通常可以忽略表面張力的效應。



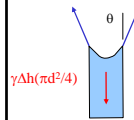
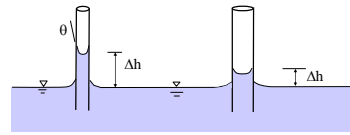
刀片浮在水面上



水黽(Water Strider)



毛細管現象(Capillary Tube)



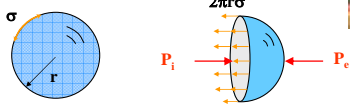
表面張力將毛細管中的液體拉起

$$(\sigma \pi d) \cos \theta = \left(\frac{\pi d^2}{4} \Delta h \right) \gamma \quad \Delta h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\gamma d}$$

管徑d愈小，液面昇高的高度愈大。



球形氣泡(Bubble)



氣泡內的壓力為 P_i ，氣泡外的壓力 P_e ，作用於氣泡截面的表面張力為：

$$2\pi r \sigma = (P_i - P_e) \pi r^2$$

式中 r 為氣泡之半徑，內外壓差與表面張力的關係為：

$$(P_i - P_e) = \frac{2\sigma}{r}$$



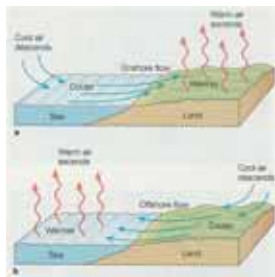
8. 比熱(Specific Heat)

- 比熱的定義為：將1.0 kg的物體加溫1.0 °C (1.0 °K)所需之熱量，而熱量常用的單位為**焦耳(Joule)**、**卡(cal)**或**大卡(Kcal)**。
- 比熱大的物質溫度不易改變；反之，比熱小的物質溫度較容易改變。
- 在溫度為15°C時，純水的比熱為1000 cal/kg/°C = 4184 J/kg/°C，土壤的比熱約為880 J/kg/°C。



海陸風(Land/Sea Breeze)

白天



海風

夜晚

陸風

- 白天，陸地接受太陽輻射，溫度會高於水面溫度；夜晚，地面熱量散去，溫度低於水面溫度。

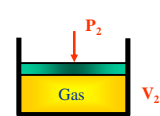
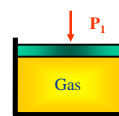


9. 容積模數(Bulk modulus)

流體的可壓縮性(Compressibility)可以容積模數表示

$$E_v = \frac{-\Delta P}{\Delta V/V}$$

其中 ΔP 為流體所受之壓力變化量， $\Delta V/V$ 為流體體積的變化量， $\Delta V/V$ 為體積的變形率，容積模數的因次為 $[F/L^2]$ ，與壓力的因次相同。



9. 容積模數(Bulk modulus)

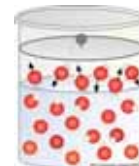
- 容積模數愈大，表示壓縮流體所需之壓力必須更大，亦即流體愈不易壓縮。
- 水的容積模數 $E_v = 2.19 \times 10^9$ Pa，表示要讓水的體積變化1.0%，需施壓力相當於216倍的大氣壓力，亦即水的可壓縮性極小，故水可視為**不可壓縮流體 (Incompressible Fluid)**。
- 在定溫狀況下，空氣的容積模數 $E_v = 1.013 \times 10^5$ Pa，要讓空氣體積改變1.0%，壓力變化需0.01倍大氣壓力，亦即較容易壓縮，故空氣可視為**可壓縮流體 (Compressible Fluid)**。



1 - 55

10. 蒸氣壓(Vapor pressure)

所有的液體分子，若具有足夠的能量，皆會汽化(vaporize)成氣體。在一密閉的容器中，若液面之上為真空，液體分子會逐漸脫離液面汽化成蒸氣而產生蒸氣壓，當液面之壓力不再增加時，汽化便達到一個平衡狀態，此時液面之上的壓力便為**飽和蒸氣壓 (Saturation Vapor Pressure)**。



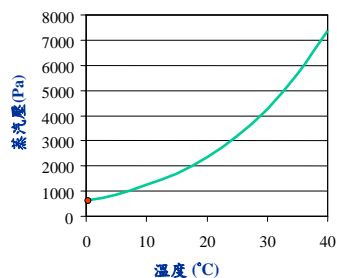
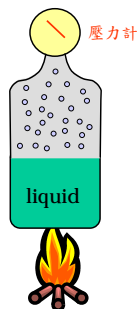
Dynamic equilibrium

溫度愈高，液體分子擁有的能量愈大，汽化愈容易，亦即飽和蒸氣壓隨溫度升高而增加。



1 - 56

10. 蒸氣壓(Vapor pressure)



當溫度在100°C時，水的蒸汽壓為多少？**101 kPa = 大氣壓力**



1 - 57

10. 蒸氣壓(Vapor pressure)

- 水蒸發之後，便形成空氣中的水汽(Water Vapor)。水汽含量愈多，水汽蒸氣壓愈高，濕度愈高。蒸氣壓等於飽和蒸氣壓時，相對濕度為100%。
- 在1個標準大氣壓力下，水溫升至100°C時，水會持續汽化直到所有的水皆變成水汽為止，故溫度100°C時，水的飽和蒸氣壓為101.3 kPa。
- 高山上的大氣壓力較海平面低，故蒸氣壓亦較低，因此水不需要加溫到100°C，水就開始汽化。



1 - 58

穴蝕現象(Cavitation)



當水流中的壓力低於蒸氣壓時，水也會開始汽化，水中會產生許多的小氣泡，高速流動的小氣泡會磨蝕水管管壁或渦輪機的扇葉，此現象稱為**穴蝕現象**。



1 - 59

流體力學的分類

- **流體靜力學(Hydrostatics)**
研究流體在靜止狀態下的現象和其力學行為
- **流體動力學(Hydrodynamics)**
研究流體運動時所發生的現象和其力學行為
- **水力學(Hydraulics)**
研究水流在運動時的現象及相關的力學行為
- **水文學(Hydrology)**
研究水在自然界中循環的現象與水被利用時所遇到的工程問題



1 - 60

流體力學的分類

- **空氣動力學(Aerodynamics)**
研究氣體高速運動時所發生的現象和其力學行為
- **環境流體力學(Environmental Fluid Mechanics)**
研究自然環境中的流體現象和其力學行為
- **地球流體力學(Geophysical Fluid Dynamics)**
研究大氣與海洋中的流體現象和其力學行為



1 - 61

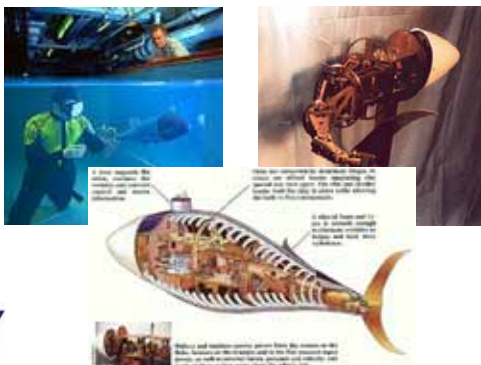
流體力學的分類

- **電磁流體力學(Magneto-hydrodynamics)**：
研究電磁場作用下流體的現象及相關的力學行為，譬如
液晶(Liquid Crystal)和電漿(Plasma)
- **生物流體力學(Bio-Fluid Mechanics)**：
研究與生物相關的流體力學



1 - 62

生物流體力學(Bio-Fluid Mechanics)



1 - 63

生醫工程



心臟和血管



人工心臟



1 - 64

研究方法

- 1. 理論解析(Analytic Solution)** - 由理論推导出流場的控制方程式，再以解析的方式求得理論解。

譬如伯努利方程式

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$



1 - 65

研究方法

- 2. 現場觀測(Field Measurement)** - 用儀器在現場量測，譬如氣象局在現場量風速、雨量等。

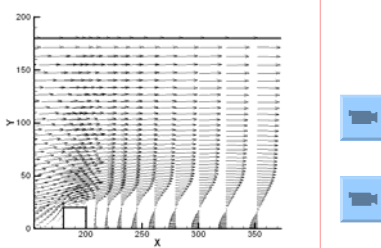


1 - 66

C.R. Chu

研究方法

3. 數值模擬(Numerical Simulation) – 以數值模式
計算流場的控制方程式，預測可能發生的流況。



1 - 67

C.R. Chu

研究方法

4. 實驗室實驗(Laboratory Experiment) – 在實驗室以儀器設備模擬流況，並加以研究之。



風洞實驗

1 - 68

C.R. Chu

第一章結束，
Any Questions ?

Suggested exercises:
1.5, 1.7, 1.11, 1.18



1 - 69