

# 2

- 7. 音速、マッハ数
- 8. 音の伝ばと圧縮性流れの分類

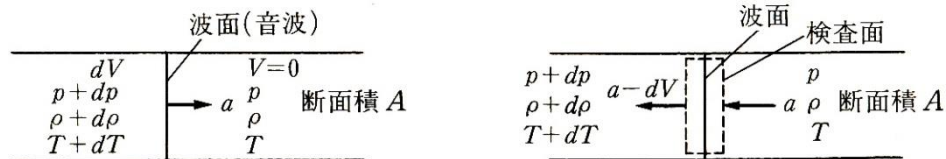
# 7. 音速、マッハ数

- $R$ : ガス定数 ( $R = 287.03 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  (温度293.15K (20°C)の乾き空気))
- $a$ : 音速
- $T$ : 温度
- $\kappa$ : 比熱比 = 1.4 (温度293.15Kの乾燥空気)、(水:1.01)
- $\rho$ : 密度
- $T = 293.15\text{K}$ の乾燥空気  $\Rightarrow$  **音速  $a = 343 \text{ m/s}$  (水:1460 m/s)**
- $M$ : マッハ数

**音** or **音波** sound wave  $\Rightarrow$  空気中を縦波として伝わる。  
 音波の通過による圧力変動は十分に小さく、大気圧に比べても極めて小さい。  
 このような十分に小さい音波の圧力変動  $\Rightarrow$  **微小じょう乱** infinitesimal disturbance (十分に小さい) という。  
 微小じょう乱の伝わる速度  $\Rightarrow$  **音速** sonic velocity という。

図7.1(a)に示すように、一定断面積 $A$ の管内の静止流体中を、微小な圧力変動(微小じょう乱)が伝わる場合を考える。  
 波面通過直前の流体の 圧力: $p$ , 密度: $\rho$ , 温度: $T$ とする。波面通過後は  $\Rightarrow$  速度: $dV$ , 圧力: $dp$ , 密度: $d\rho$ , 温度: $dT$  だけ変化すると考える。  
 流れは波面の通過によってその状態が変化し、時間の変化とともに変わる流れ、すなわち**非定常流れ**となる。

そこで、問題を容易にするために、波面に固定した座標系を考える。つまり、波面と同じ速度音速 $a$ で移動する観測者から見ると、図(b)に示すように、波面は静止し、流れは時間的に変化しない流れ、すなわち**定常流**とみなすことができる。



(a) 管路に固定した座標系から見た流れ  $\Rightarrow$  **非定常流れ**

(b) 波面に固定した座標系から見た流れ  $\Rightarrow$  **定常流れ**

図7.1 音の伝ば

音圧レベル SPL (sound pressure level):  $L_p$  [dB]

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p_e}{p_{er}} \right) \text{ [dB]}$$

$p_{er}$ : 最小可聴圧 =  $2 \times 10^{-15} \text{ Pa}$

耳に傷害を起こす最大可聴圧 = 130~150 dB

(例)  $L_p = 140\text{dB}$  の音圧 $p_e$ は、上式より

$p_e = 200\text{Pa} \Rightarrow$  大気圧に比べて極めて小さい!  
 $\Rightarrow$  音波の通過による圧力変動

## <音速 $a$ は>

音速 $a$  (sonic velocity) は

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa RT} \quad (7.1)$$

音速 $a$ は温度 $T$ の関数で、その平方根に比例して増加し、また、温度は場所によって異なるから、音速も場所によって変化することがわかる。温度293.15Kの乾き空気の音速は、おおよそ $a=343 \text{ m/s}$ である。

液体の音速 $a$ は(演習問題編【問題10.5】参照)  $a=1460 \text{ m/s}$  (20°C)

なお、等エントロピー変化における音速 $a$ は、一般的に次のように表される。

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} \quad \Rightarrow \quad \text{この式の添え} s \text{ は等エントロピーであることを示す。つまり、この微分は、熱の出入りがなかった断熱状態を意味する。}$$

なお、等エントロピー圧縮率 $\beta_s$ および等エントロピー体積弾性係数 $K_s$ を用いると、音速 $a$ は

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta_s}} = \sqrt{\frac{K_s}{\rho}} \quad (7.2)$$

## <マッハ数 $M$ は>

マッハ数 (Mach number) は、圧縮性流体における重要な無次元量である。流れのある点における速度を $V$ 、その点における音速を $a$ とすると、マッハ数 $M$ は、次式で定義される。

マッハ数 $M$  は (Mach number)

$$M = \frac{V}{a} = \frac{\text{気流の速度}}{\text{音速}} \quad (7.3)$$

# 8. 音の伝ばと圧縮性流れの分類

飛行機などの音源が一定速度  $V$  で移動しているとする。

音源は時間の経過とともに移動した位置を中心として、音速  $a$  で球状に広がりながら伝ばする。

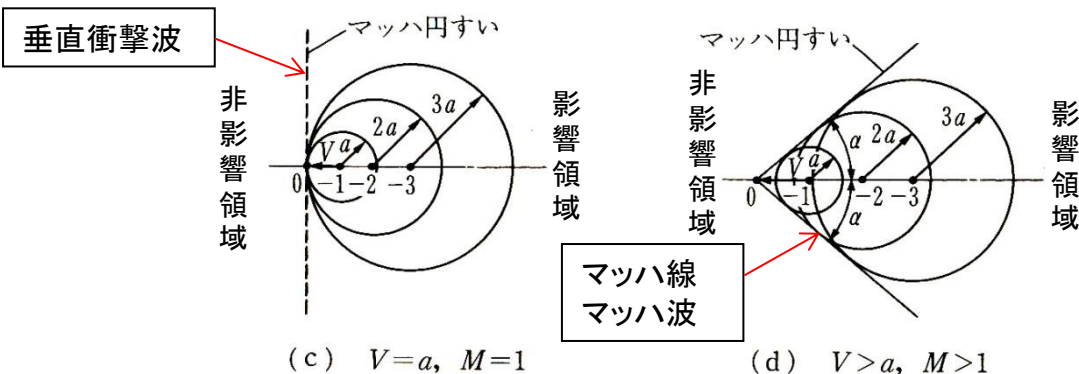
図8.1に示すように、音源の速度  $V$  と音速  $a$  の違い、すなわちマッハ数  $M$  の大きさによって音の伝ばの状態が大きく異なる。

## 8.1 音の伝ば



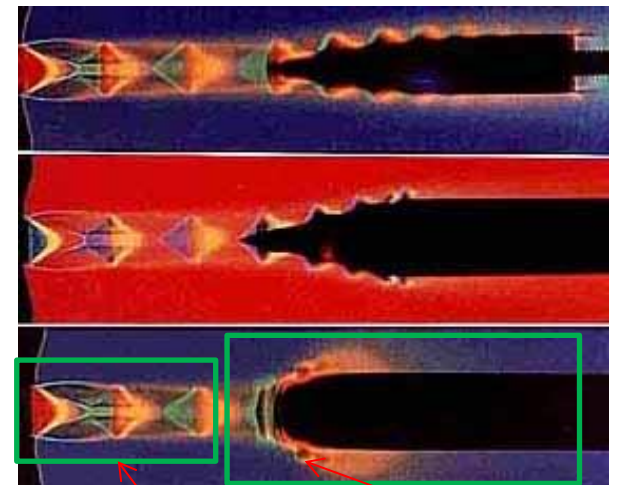
(a)  $V=0, M=0$

(b)  $V < a, M < 1$



(c)  $V=a, M=1$

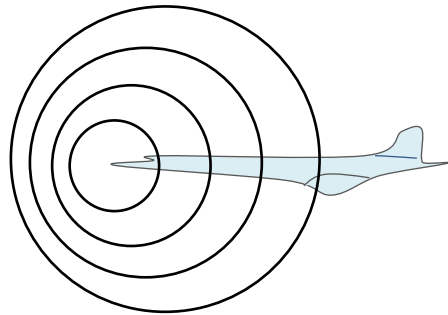
(d)  $V > a, M > 1$



上流側: 非影響領域      下流側: 影響領域

図8.1 音の伝ば状態

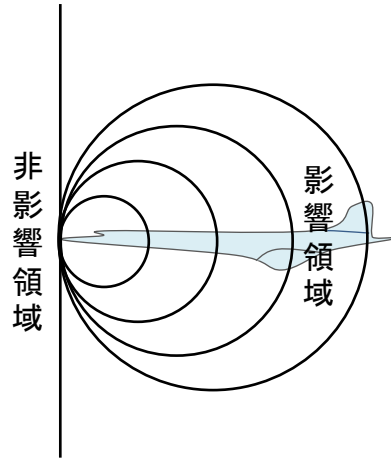
# <飛行機の音源 音の伝ば>



①

亜音速流れ

$V < a, M < 1$

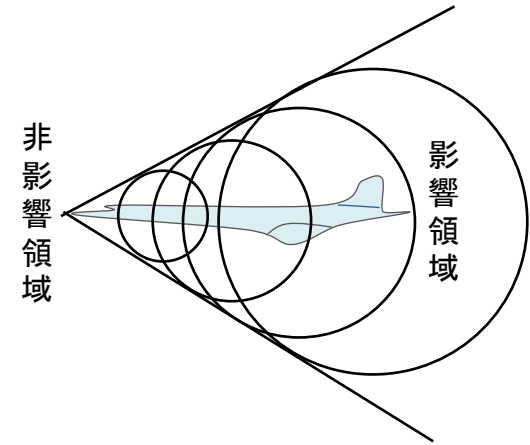


②

遷音速流れ

$V = a, M = 1$

音速流れ



③

超音速流れ

$V > a, M > 1$

# 8.2 圧縮性流れの分類

(1) **音源静止** ( $M=0$ ) 図8.1(a)

音源静止。  
音波は、音速 $a$ で音源を中心として、同心球面状に広がる。



(2) **亜音速流れ** subsonic flow ( $M < 1$ ) 図8.1(b)

気流の速度が音速よりも遅い流れ(上限  $M < 0.8$  程度の流れ)。  
音源は、過去に放射された音波を追い越すことはできない！  
**ドップラー効果** (Doppler effect)  $\Rightarrow$  音源に近づく時 振動数高い。遠ざかる時 振動数低い。

(3) **遷音速流れ** transonic flow ( $M \approx 1$ ) 図8.1(c)

マッハ数1付近の流れ ( $0.8 < M < 1.2$ )。  
亜音速流れと超音速流れの混在する不安定な流れ！  
音源が音速と等しい速度 ( $V=1, M=1$ ) で移動している場合、音源前方に垂直な衝撃波が発生。  
音波は、この垂直衝撃波の上流側へ伝わることはできない！  
 $M=1$ の流れ  $\Rightarrow$  **音速流れ** (sonic flow) という。

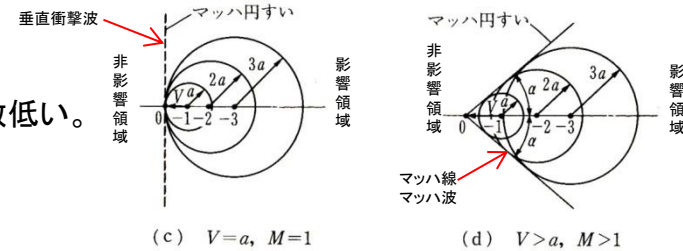


図8.1 音の伝ば状態

(4) **超音速流れ** subsonic flow ( $M > 1$ ) 図8.1(d)

マッハ数が1よりも大きい流れ ( $1.2 < M < 5$ )。  
気流の速度が音速より速い。衝撃波が発生する。  
温度、密度などの物理量が著しく変化。  
音源が、音速よりも速い速度で移動  $\Rightarrow$  音源は、過去に放射された音波を追い越すことになる！  
音波は、円すい状の包絡面を形成  $\Rightarrow$  **マッハ円すい** (Mach cone) と呼ぶ。

$$M = \frac{V}{a} = \frac{\text{気流の速度}}{\text{音速}}$$

$$\sin \alpha = a/V = 1/M$$

$\alpha$ : マッハ角、マッハ線 or マッハ波

$\alpha$ : 半頂角、マッハ数が増加すると、マッハ角は減少する。 $M=1$ で $\alpha=90^\circ$ となる。

ピトー管での速度測定:  
 $\Rightarrow$  亜音速流れ 先端上流の流れの乱れ 影響大  
 $\Rightarrow$  超音速流れ 先端上流の流れの乱れ 影響小

(5) **極超音速流れ** hypersonic flow ( $M > 5$ )

$M > 5$ の流れ。  
運動エネルギーや状態量の変化が極めて顕著。  
物体の先端には、極めて強い衝撃波が生じる。



ロシア:ソユーズ 宇宙船  
大気圏突入時  
**空力的加熱**  
(インターネットより)