

8

10. 衝撃波

10.1 垂直衝撃波

10.2 斜め衝撃波, 離れ衝撃波

弓形離れ衝撃波

11. 圧縮波 膨張波

プラントル・マイヤー流れ

10. 衝撃波

衝撃波 (shock wave) :

ラバルノズル内流れ, 超音速流れ, 超音速流れ中に置かれた物体まわりの流れ, 爆発現象などのように, 流体中のエネルギー変化が急激に変化するときに生じる。



- ・ 衝撃波の厚さ ⇒ 非常に薄い
- ・ 衝撃波の層の中では, 圧力, 温度, 密度などの状態量が不連続的に急激に変化!
- ・ 不可逆変化となる!
- ・ 衝撃波後方では, 密度は増加する! (連続の式)
- ・ 衝撃波前後の流れの状態が重要! (衝撃波内の状態は, 重要ではない。)

衝撃波 (shock wave) は, ラバルノズル内や超音速流中におかれた物体まわり, さらに爆発現象などのように, 流体中のエネルギー変化が急激に変化した場合に生じる。衝撃波の厚さは非常に薄く, この層の中では, 圧力, 温度, 密度などの状態量が不連続的に急激に変化し, 不可逆変化となる。工学的には, 衝撃波内部の詳細な構造よりも, 衝撃波前後での流れの圧力, 速度, 密度や温度などの状態量の関係が重要であるので, これらの関係を調べてみよう。

10.1 垂直衝撃波

垂直衝撃波 (normal shock wave) :

衝撃波の波面が流線に対して垂直な衝撃波。

垂直衝撃波の基礎式

$$\text{連続の式: } \rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad (9.36)$$

$$\text{運動量の式: } p_1 + \rho_1 V_1^2 = p_2 + \rho_2 V_2^2 \quad (9.37)$$

$$\text{エネルギーの式: } \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} V_1^2 = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{1}{2} V_2^2 = \frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)} a^{*2} \quad (9.38)$$

プラントルの式

$$V_1 V_2 = a^{*2} \quad (9.39)$$

⇒ 垂直衝撃波前後の速度の積は一定であり、臨界音速の2乗に等しい！
臨界状態の臨界マッハ数を M^* 、音速を a^* とすると

$$M^* = \frac{V}{a^*} \quad (9.40)$$

臨界マッハ数を用いると

$$M_1^* M_2^* = 1 \quad (9.41)$$

⇒ 垂直衝撃波の上流が亜音速のときには、下流は超音速！
上流が超音速のときは、下流は亜音速となることを意味する！

臨界マッハ数 M^* と M との関係は

$$M^{*2} = \frac{(\kappa+1)M^2}{2 + (\kappa-1)M^2}$$

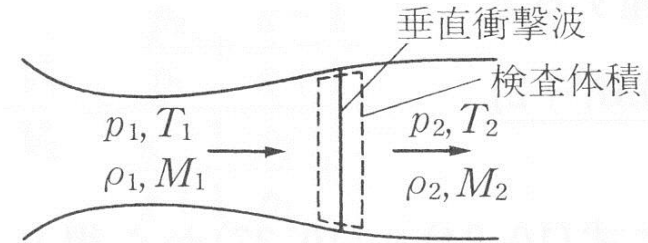


図10.1 垂直衝撃波の検査体積

10.2 斜め衝撃波, 離れ衝撃波

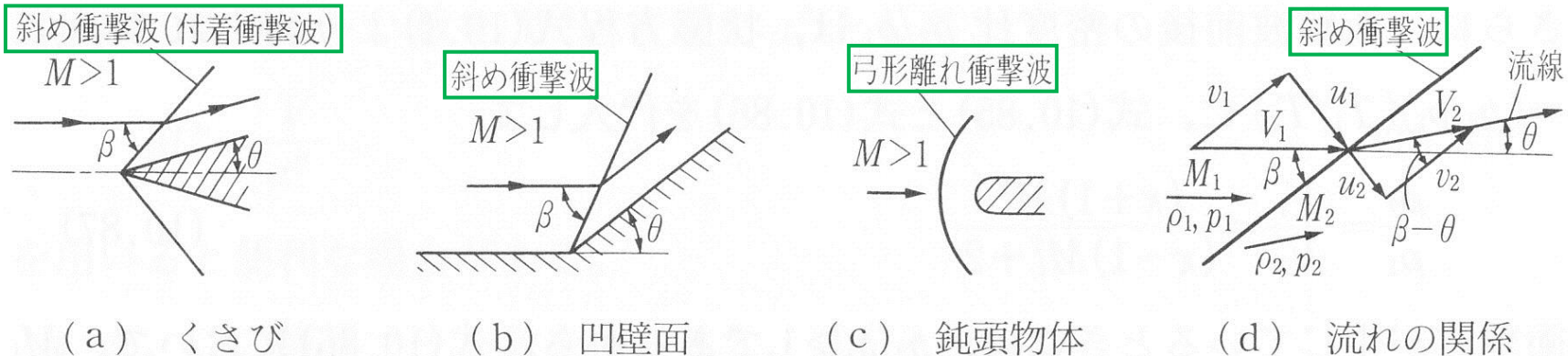
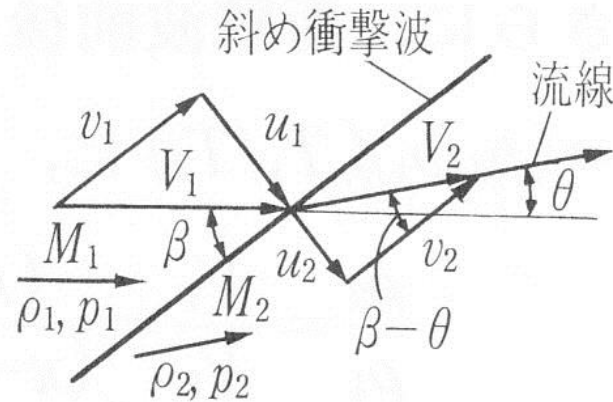


図10.2 斜め衝撃波と衝撃波前後の流れの関係

図10.2(a)～(c)に示すように, 超音速流の中にくさび形状や鈍頭形状の物体が置かれたり, あるいは超音速流が凹壁面を通過するときには, 流れに傾斜した衝撃波が発生する。このような衝撃波を**斜め衝撃波** (oblique shock wave) という。特に, くさびの半頂角 θ が小さいときには, 先端に付着した**弱い衝撃波** (weak shock wave) が生じる。このような衝撃波を**付着衝撃波** (attached shock wave) という。半頂角 θ が大きくなり, 図(c)のような鈍頭物体では, 先端から離れた**強い衝撃波** (strong shock wave) の**離脱衝撃波** (detached shock wave) が発生する。弓形の形状をしている場合には, **弓形離れ衝撃波** (detached bow shock wave) あるいは**わん曲衝撃波** (bow shock wave) という。



(d) 流れの関係

<斜め衝撃波前後の流れ>

斜め衝撃波前後の状態量の間係を調べてみよう。それぞれの速度および角度は、図10.2 (d)の流の係に示すとおりである。

図(d)において

See 詳細は既配布資料

$$\text{波面に垂直な連続の式：} \rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (9.42)$$

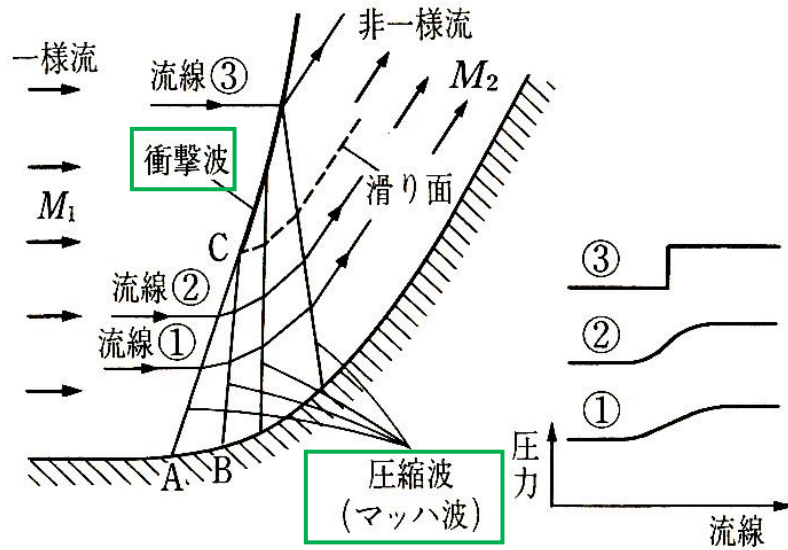
$$\text{波面に平行な速度：} v_1 = v_2 \quad (9.43)$$

$$u_1 = V_1 \sin \beta, u_2 = V_2 \sin(\beta - \theta) \quad (9.44)$$

斜め衝撃波の波面に平行な速度は変わらない。

11. 圧縮波 膨張波

< 圧縮波 >

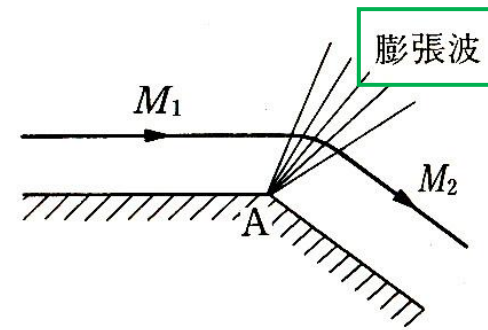


(a) 凹壁面 (b) 圧力分布

11.1 緩やかに曲がる凹壁面を過ぎる超音速流

< 膨張波 >

プラントル・マイヤー流れ
プラントル・マイヤー膨張扇



11.2 凸壁面を過ぎる超音速流