

第7章環状流の液膜流れ

環状流の液膜流れ

上昇流---気相の剪断力による流れ

下降流、対向流

気相流速小---流下液膜(気相流量に依存せず)

気相流速大---気相の剪断力による流れ

連続層(基底液膜) δ_B

擾乱波---最大厚さ δ_C

平均液膜厚さ y_i

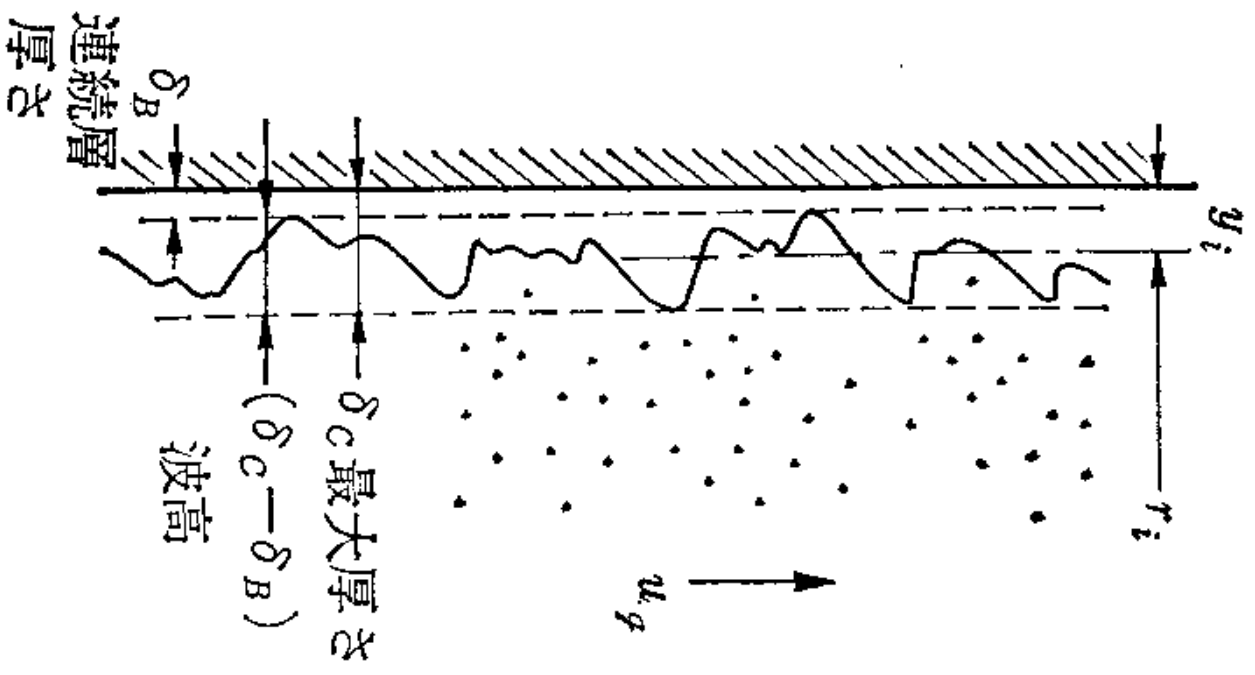


図 7.1 湍流境界層

液膜流に関する無次元数

無次元液膜厚さ $\delta_B (g/v_L^2)^{1/3}, \delta_C (g/v_L^2)^{1/3}, y_i (g/v_L^2)^{1/3}$

液膜レイノルズ数 $Re_f = 4\Gamma/\mu_L \quad \Gamma = \rho_L u_L y_i$

Γ は壁面単位幅あたりの液膜質量流量

液膜厚さが流路Dに比べ小さく液滴がない場合

$$\pi D\Gamma = (\pi/4)D^2\rho_L U_L \quad 4\Gamma = D\rho_L U_L$$

液膜レイノルズ数は見かけ流速のレイノルズ数

$$Re_f = 4\Gamma/\mu_L = D\rho_L U_L/\mu_L = DU_L/v_L$$

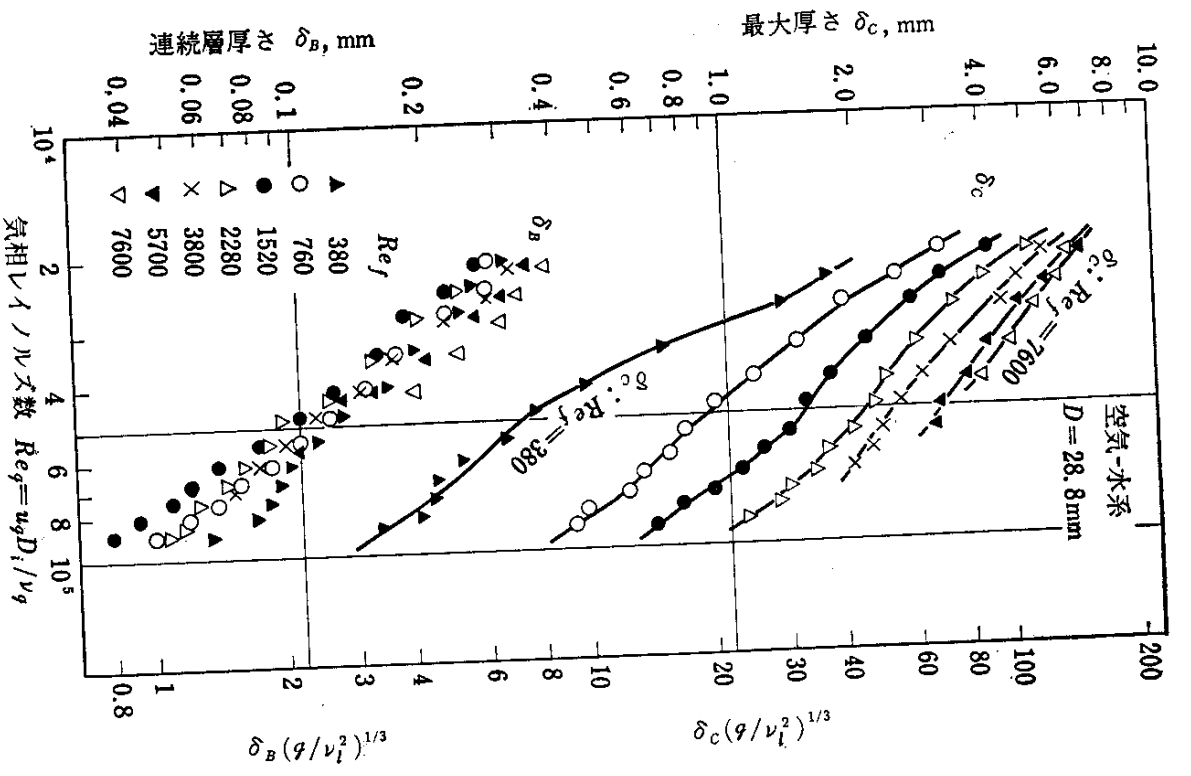


図 7.2 上昇流液膜の連続層厚さと最大厚さ

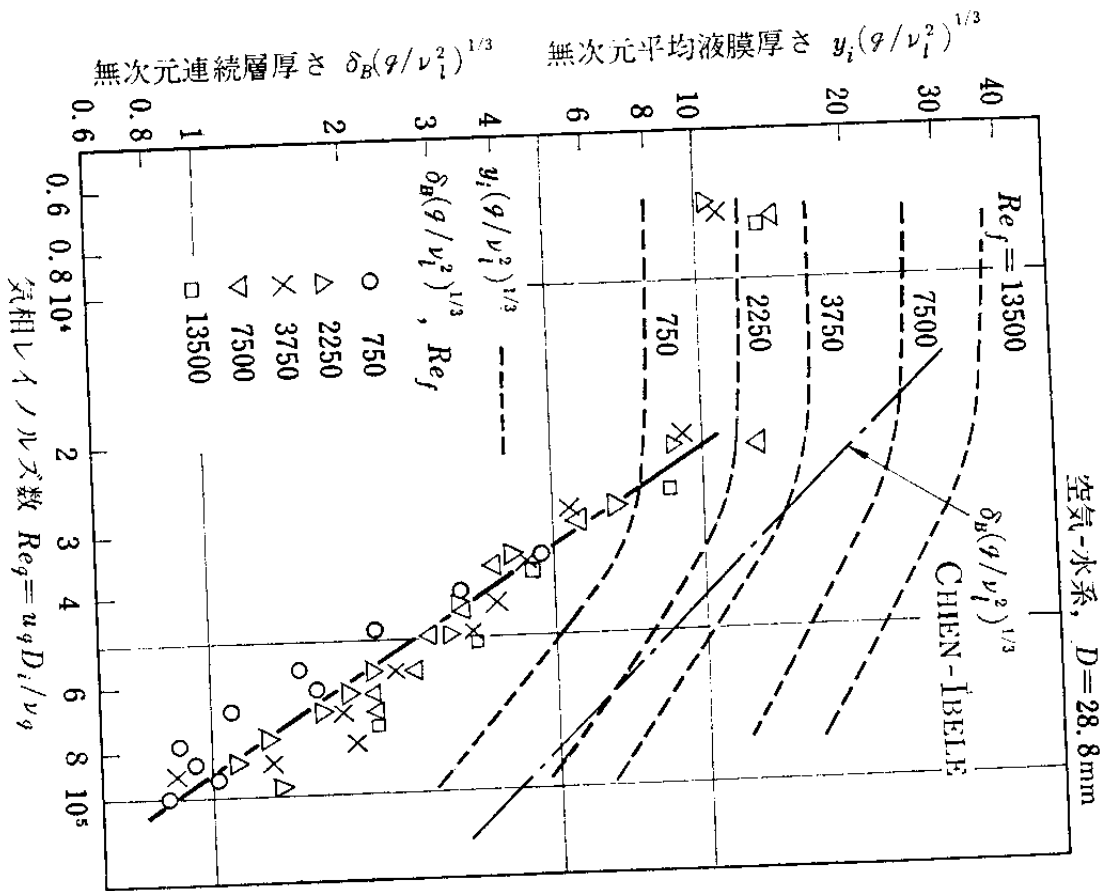


図 7.3 下降流液膜の連続層厚さと平均厚さ

気液界面剪断力

蒸気流の力のバランス

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right) = \pm \rho_g g + 2 \frac{\tau_i}{r_i} \quad \text{+は上昇流、-は下降流}$$

摩擦圧力損失を $(dp/dz)_F$ と置く

$$\tau_i = \frac{r_i}{2} \left(\frac{dp}{dz}\right)_F \quad \tau_i = f_g \frac{\rho_g}{2} (u_g - c)^2 \quad \left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{\lambda_g}{D_i} \frac{\rho_g}{2} (u_g - c)^2 \quad \lambda_g = 4f_g$$

下降流で気相流速が小さい場合

平滑管に近い

$$\lambda_g = 0.3164 \text{Re}_g^{-1/4} \quad \text{Re}_g = D_i(u_g - c)/\nu_g \quad \text{or} \quad \text{Re}_g = DU_g/\nu_g$$

上昇流、下降流で気相流速が大、大きく増える

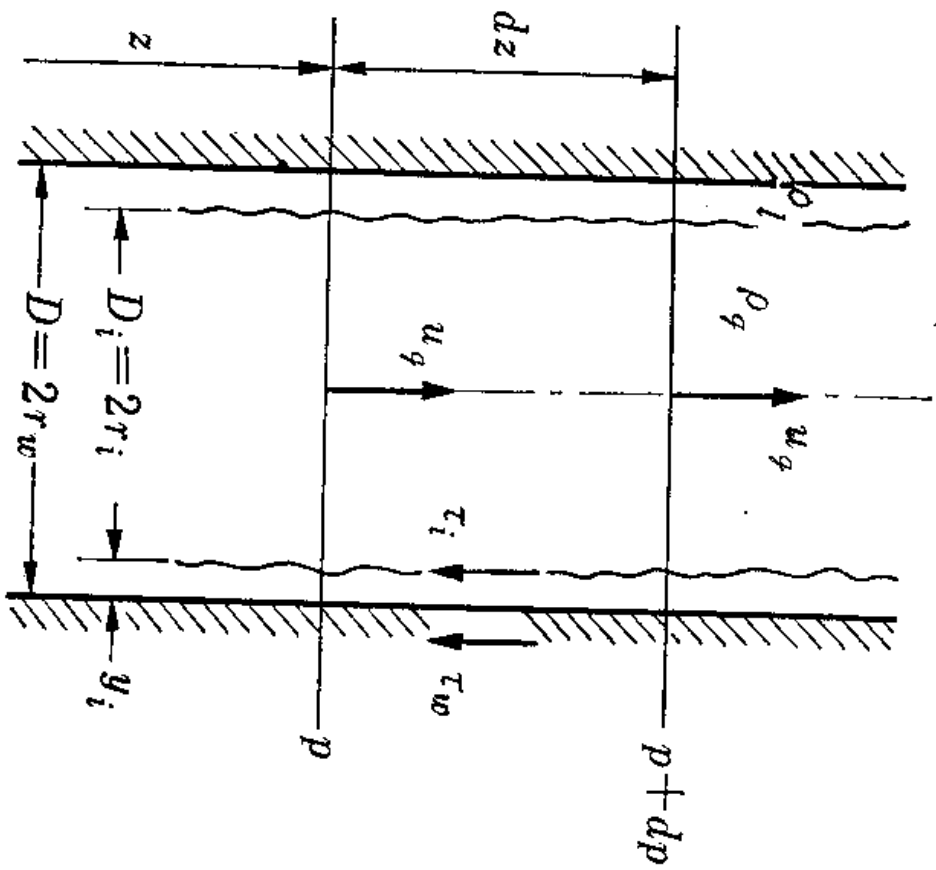


图 7.4 定常な環状流

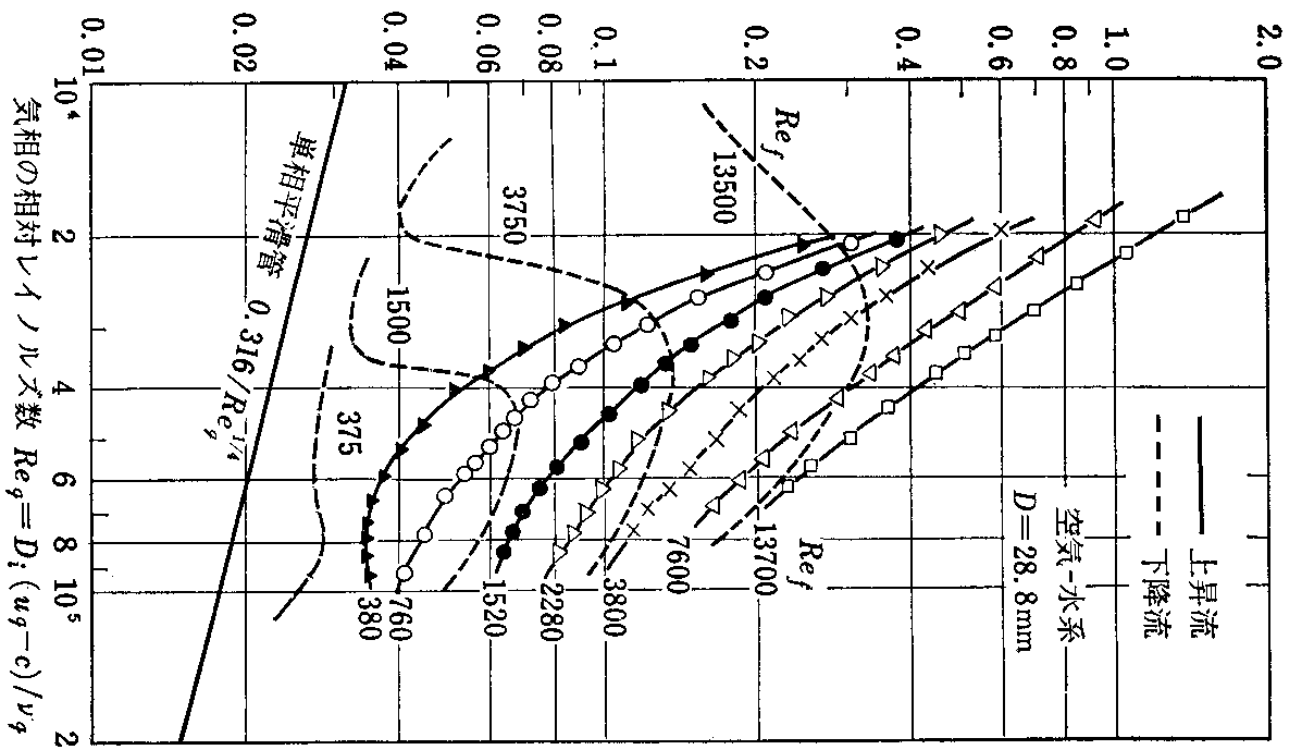


図 7.5 気相流の管摩擦係数 λ .

空気-水系下降流

— CHIEN - IRELE: 2 in 管

- - - DUKLER : 1 in 管

- · - · - BERGELIN et al. : 1 in 管

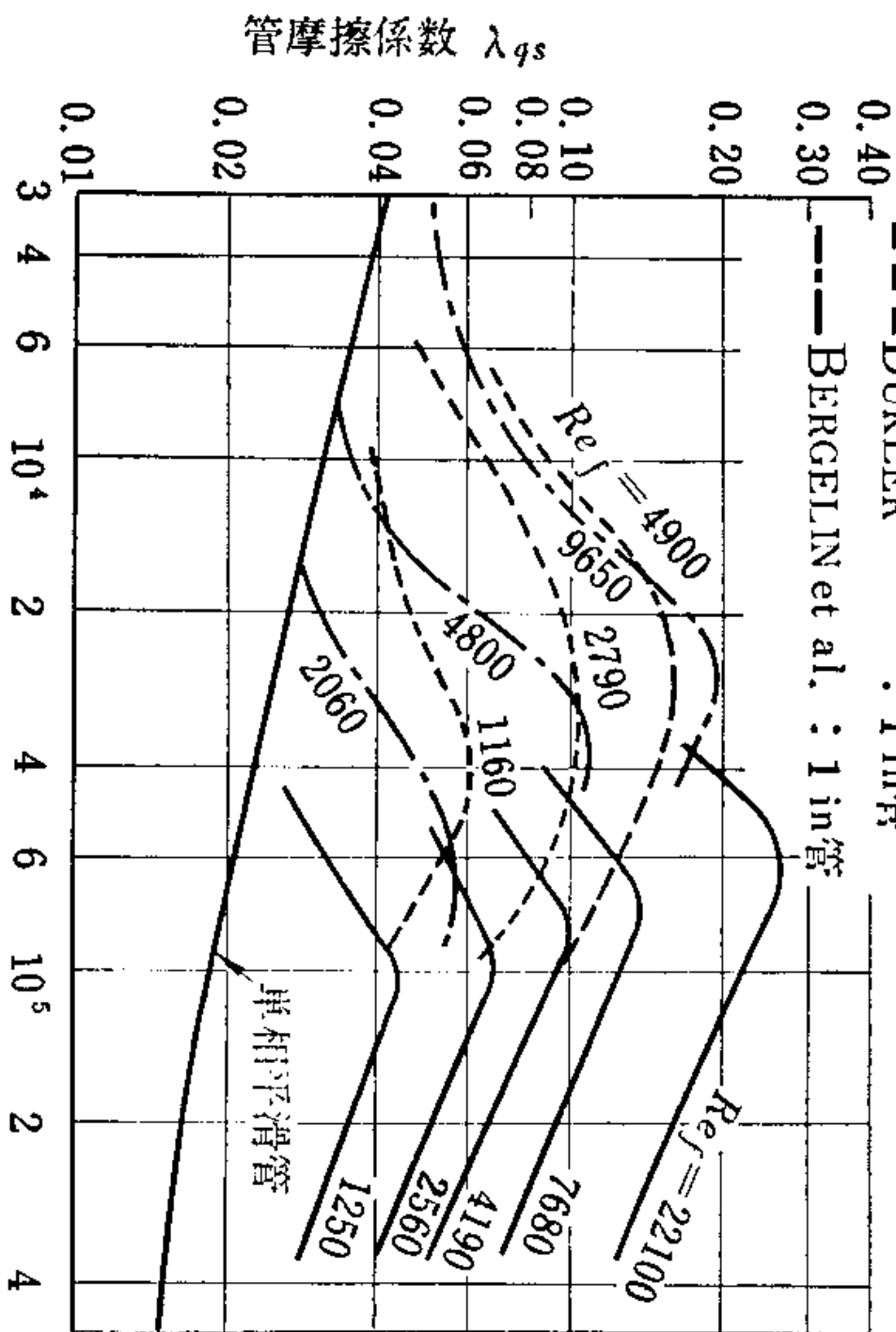


図 7.6 下降流の気相管摩擦係数 λ_{qs} (CHIEN ら)

界面剪断力の相関式

Wallisの式

液膜を表面荒さと見なす

$$\tau_i = f_g \frac{\rho_g}{2} (u_g - c)^2 \cong f_g \frac{\rho_g}{2} u_g^2 \quad f_g = 0.005(1 + 300y_i / D) = 0.005\{1 + 75(1 - \alpha)\}$$

ボイド率と平均液膜厚さの関係

$$1 - \alpha = \frac{\pi D y_i}{(\pi/4)D^2} = \frac{4y_i}{D}$$

$$u_g = \frac{U_g}{\alpha} = \frac{U_g}{1 - (4y_i / D)}$$

壁面近傍の流れ(单相流)

剪断力分布 $2\pi r_w \tau_w = -\left(\frac{dp}{dz}\right)\pi r_w^2$ $2\pi(r_w - y)\tau = -\left(\frac{dp}{dz}\right)\pi(r_w - y)^2$
 $\tau = \tau_w(1 - y/r_w) \cong \tau_w$

層流 $\tau = \mu du/dy = \rho\nu du/dy = \tau_w(1 - y/r_w)$

$$u = \frac{\tau_w}{\rho\nu} \left(y - \frac{y^2}{2r_w}\right) \cong \frac{\tau_w}{\rho\nu} y$$

$$u^+ = y^+ \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad u^+ = u/u^* \quad y^+ = \frac{u^* y}{\nu}$$

乱流応力

渦による運動量のやりとり

$$\tau = -\overline{\rho uv} = -\overline{\rho(\bar{u} + u')(\bar{v} + v')} = -\overline{\rho u'v'} \quad \bar{v} = 0, \bar{u}' = 0, \bar{v}' = 0$$

$$\sqrt{v'^2} = \ell \frac{du}{dy} \quad \sqrt{u'^2} = \ell \frac{du}{dy} \quad -\overline{u'v'} \cong \sqrt{u'^2} \sqrt{v'^2} = \ell^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

ℓ : 混合距離 (渦の大きさ) $\ell = ky$

$$\tau \cong \tau_w = \rho \ell^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \frac{du}{dy} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \frac{1}{ky} = \frac{u^*}{ky}$$

$$u^+ = C + \frac{1}{k} \ln y^+ = 5.5 + 2.5 \ln y^+$$

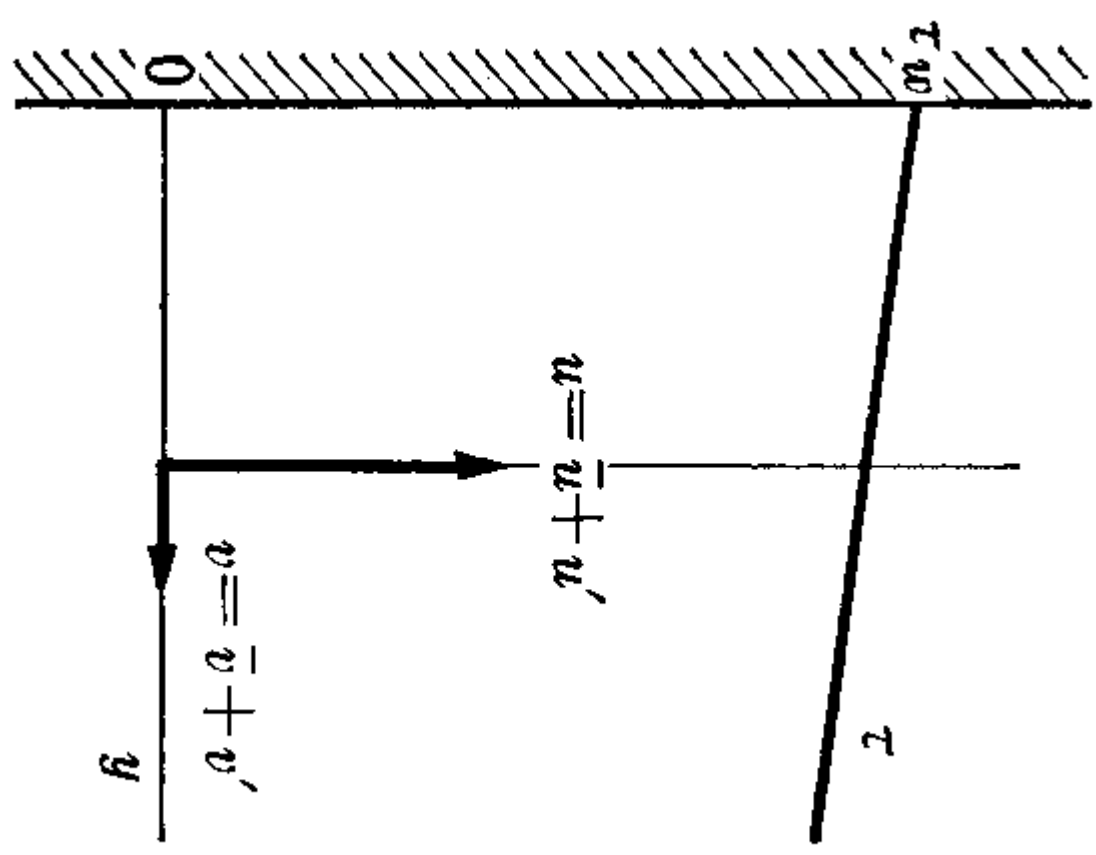


図 7.7 乱流の運動量伝達

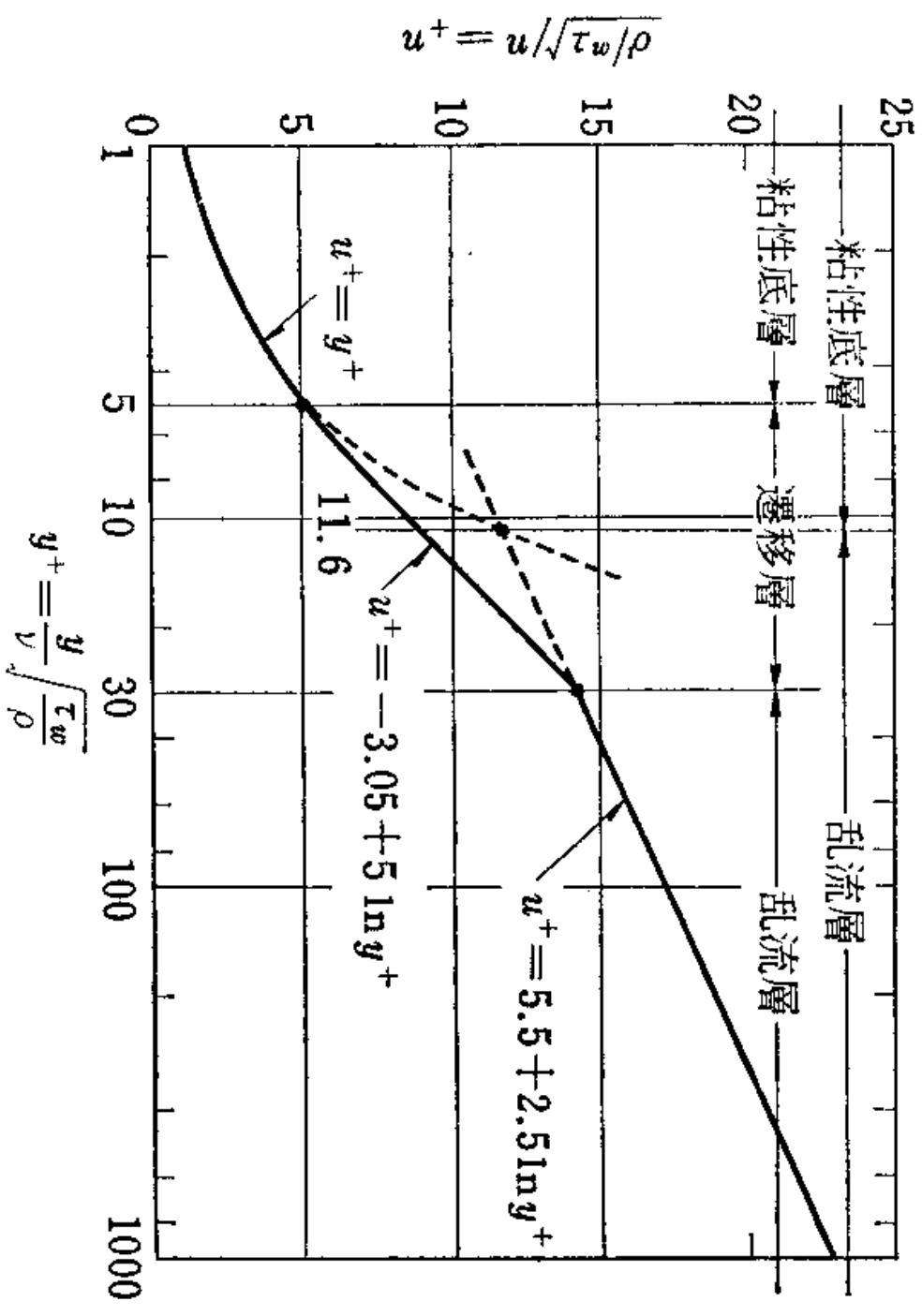


図 7.8 乱流境界層の速度分布

乱流の速度分布

二層モデル $u^+ = y^+ \quad (y^+ \leq 11.6)$
 $= 5.5 + 2.5 \ln y^+ \quad (y^+ \geq 11.6)$

三層モデル $u^+ = y^+ \quad (y^+ \leq 5)$
 $= -3.05 + 5 \ln y^+ \quad (5 < y^+ \leq 30)$
 $= 5.5 + 2.5 \ln y^+ \quad (y^+ > 30)$

渦拡散係数

渦拡散係数の定義

$$\tau = \rho \varepsilon \frac{du}{dy} = \rho \ell^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \varepsilon = \ell^2 \frac{du}{dy}$$

分子拡散も考慮した一般的な式

$$\tau = \rho(\nu + \varepsilon) \frac{du}{dy} \quad \frac{\tau}{\tau_w} = \left(1 + \frac{\varepsilon}{\nu}\right) \frac{du^+}{dy^+}$$

壁近くでは($\tau \doteq \tau_w$)

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = \frac{1}{du^+ / dy^+} - 1$$

速度分布からが ε が求まる。

乱流拡散係数

三層モデル $\frac{\varepsilon}{\nu} = 0$ ($y^+ \leq 5$)
 $= y^+ / 5 - 1$ ($5 < y^+ \leq 30$)
 $= y^+ / 2.5 - 1 = y^+ / 2.5$ ($y^+ > 30$)

層流底層でも渦拡散係数を考える必要がある。

Lin $\frac{\varepsilon}{\nu} = (y^+ / 14.5)^2$ Sleicher $\frac{\varepsilon}{\nu} = (0.091)^2 (y^+)^2$

Deissler $\frac{\varepsilon}{\nu} = (0.109)^2 u^+ y^+ [1 - \exp\{(0.109)^2 u^+ y^+\}]$ ($y^+ \leq 26$)
 $= (0.36)^2 \left(\frac{du^+}{dy^+}\right)^3 / \left(\frac{d^2u^+}{dy^{+2}}\right)^2$ ($y^+ > 26$)

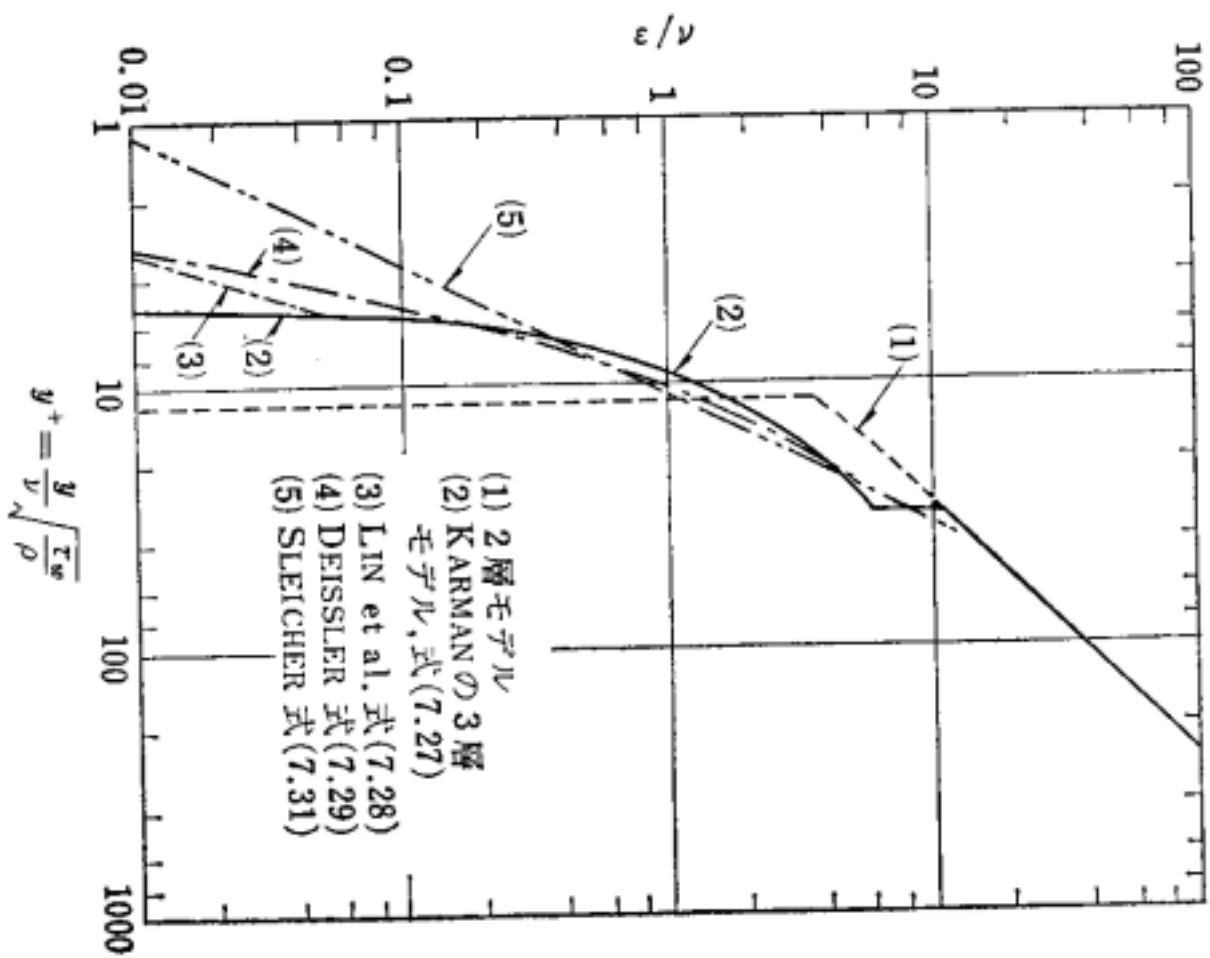


図 7.9 单相流の y^+ で動粘性係数 (SHERWOOD ら)

液膜流量と液膜厚さ

以上の壁面近くの速度場の関係を用いて液膜厚さと液膜流量を求める

$$\text{Re}_f = 4\Gamma / \mu_L = \frac{4\rho_L}{\mu_L} \int_0^{y_i} u_L dy = 4 \int_0^{y_i^+} u_L^+ dy^+$$

液膜内の応力分布

$$\tau = \tau_w \pm \left[\alpha \rho_L g \mp \frac{\tau_w}{r_w} \right] y \cong \tau_w \pm \rho_L g y \quad \tau_i = \tau_w \pm \rho_L g y_i$$

$$\frac{\tau}{\tau_w} = 1 \pm \left(\frac{y_i^*}{y_i^+} \right)^3 y^+ \quad y_i^* = y_i \left(\frac{g}{v^2} \right)^{1/3} \quad \tau_i^* = \frac{\tau_i}{\rho g} \left(\frac{g}{v^2} \right)^{1/3}$$

$$\frac{\tau_i}{\tau_w} = 1 \pm \left(\frac{y_i^*}{y_i^+} \right)^3 y_i^+ \quad (y_i^+)^2 = \tau_i^* (y_i^*)^2 \mp (y_i^*)^3$$

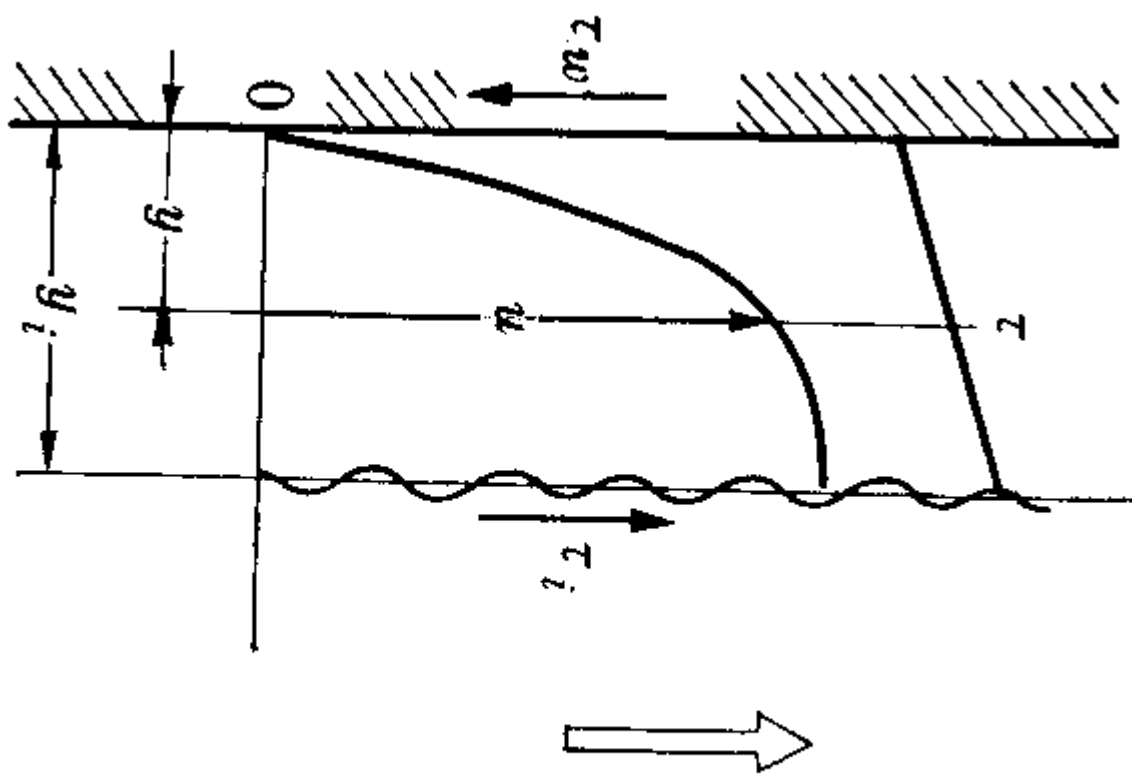


図 7.10 液膜の速度分布

層流液膜

液膜内が層流の場合 $\frac{\tau}{\tau_w} = 1 \pm \left(\frac{y_i^*}{y_i^+} \right)^3 y^+ = \frac{du^+}{dy^+}$

$$u^+ = y^+ \pm \frac{1}{2} \left(\frac{y_i^*}{y_i^+} \right)^3 y^{+2}$$

$$\text{Re}_f = 4 \int_0^{y_i^+} u_L^+ dy^+ = 2(y_i^+)^2 \pm \frac{2}{3} (y_i^*)^3 = 2\tau_i^* (y_i^*)^2 \mp \frac{4}{3} (y_i^*)^3$$

$\text{Re}_f \equiv \frac{U_L D}{\nu_L}$, τ_i^* , y_i^* の関係が与えられる。

入り口液流束から Re_f が入り口気相流束から

τ_i がわかるので液膜厚さ y_i が求められる。

ただし求められた y_i が層流条件を満たす必要

乱流液膜

最も簡単な方法---单相流の速度分布をそのまま液膜に適用する。

三層モデル

$$\begin{aligned} \text{Re}_f &= 2(y_i^+)^2 & (y^+ \leq 5) \\ &= 50 - 33.2y_i^+ + 20y_i^+ \ln y_i^+ & (5 < y^+ \leq 30) \\ &= -256 + 12y_i^+ + 100y_i^+ \ln y_i^+ & (y^+ > 30) \end{aligned}$$

$$(y_i^+)^2 = \tau_i^* (y_i^*)^2 \mp (y_i^*)^3$$

より

$$\text{Re}_f \equiv \frac{U_L D}{\nu_L}, \quad \tau_i^*, \quad y_i^*$$

の間関係が得られる

界面剪断力の相関式

Wallisの式

液膜を表面荒さと見なす

$$\tau_i = f_g \frac{\rho_g}{2} (u_g - c)^2 \cong f_g \frac{\rho_g}{2} u_g^2 \quad f_g = 0.005(1 + 300y_i / D) = 0.005\{1 + 75(1 - \alpha)\}$$

ボイド率と平均液膜厚さの関係

$$1 - \alpha = \frac{\pi D y_i}{(\pi/4)D^2} = \frac{4y_i}{D}$$

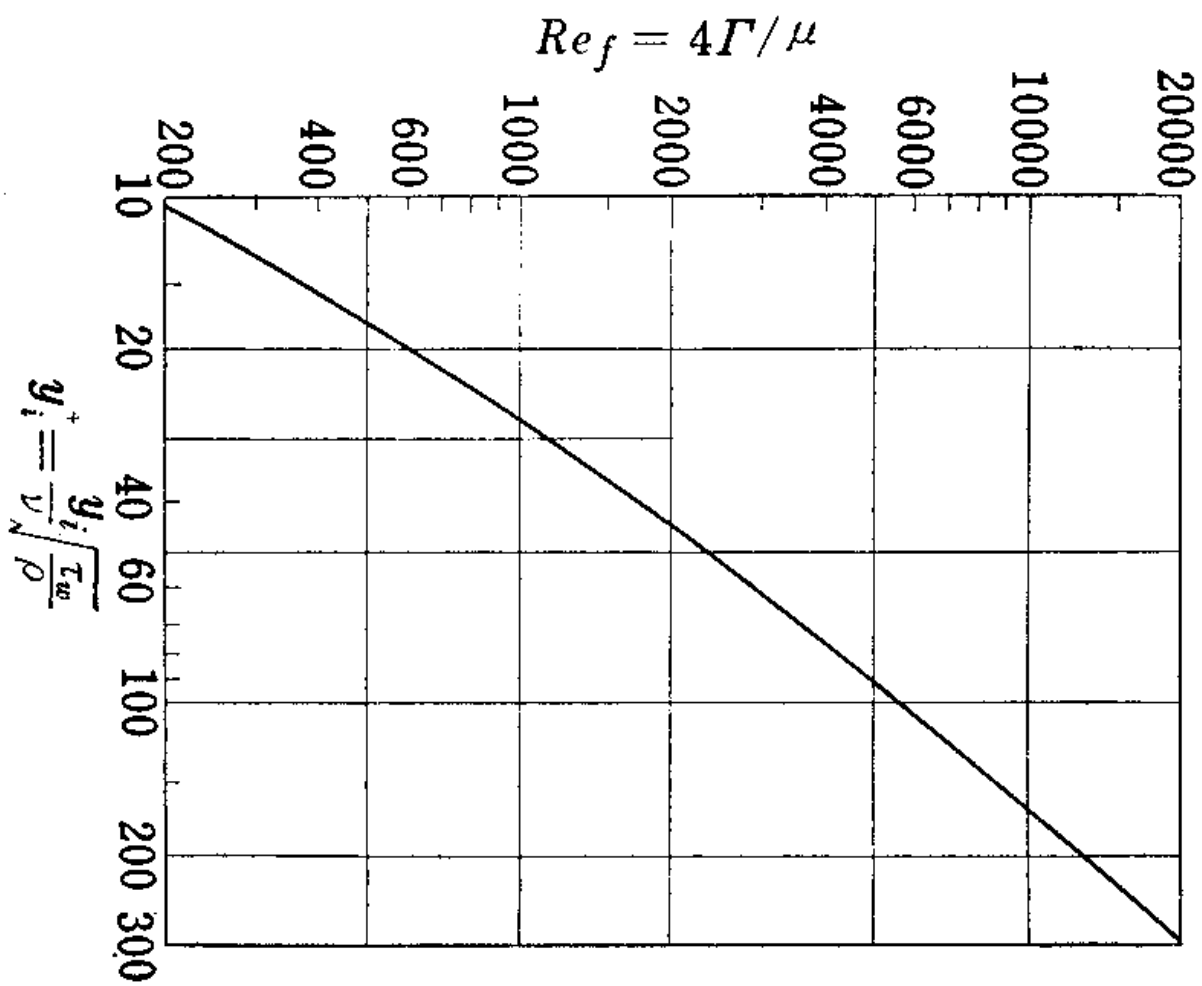


图 7.11 $Re_f - y_i^+$ (一般速度分布)

乱流液膜

渦拡散係数を用いて液膜内速度分布を求める

$$\frac{\tau}{\tau_w} = \left(1 + \frac{\varepsilon}{\nu}\right) \frac{du^+}{dy^+} \quad \frac{\tau}{\tau_w} = 1 \pm \left(\frac{y_i^*}{y_i^+}\right)^3 y^+$$

渦拡散係数としてはDeisslerの式を用いる場合が多い

$$1 \pm \left(\frac{y_i^*}{y_i^+}\right)^3 y^+ = \left\{ 1 + (0.109)^2 u^+ y^+ [1 - \exp\{(0.109)^2 u^+ y^+\}] \right\} \frac{du^+}{dy^+} \quad (0 \leq y^+ \leq 26)$$
$$= (0.36)^2 \left(\frac{du^+}{dy^+}\right)^4 / \left(\frac{d^2u^+}{dy^{+2}}\right)^2 \quad (y^+ > 26)$$

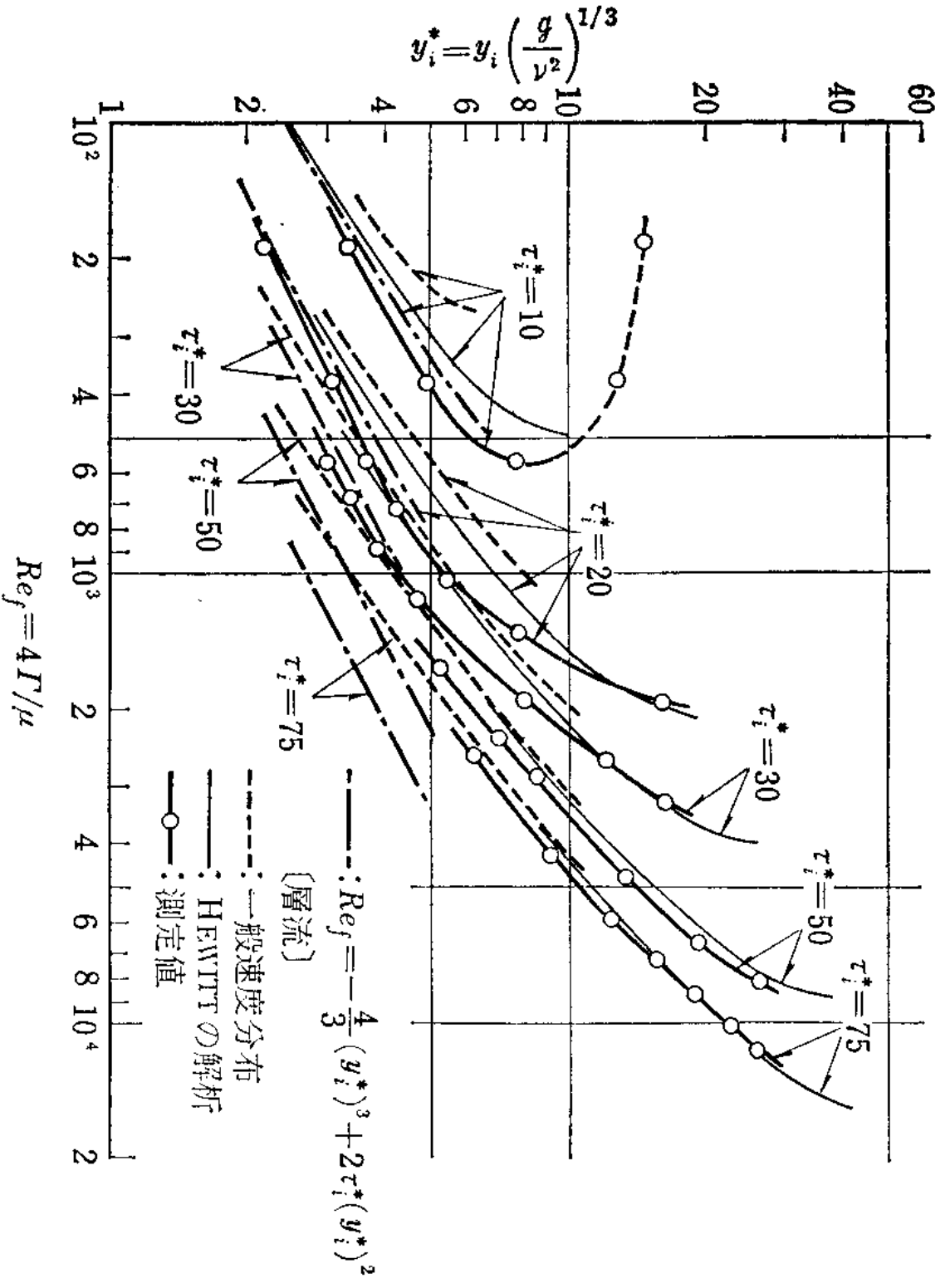


図 7.12 上向き環状流の平均液膜厚さ

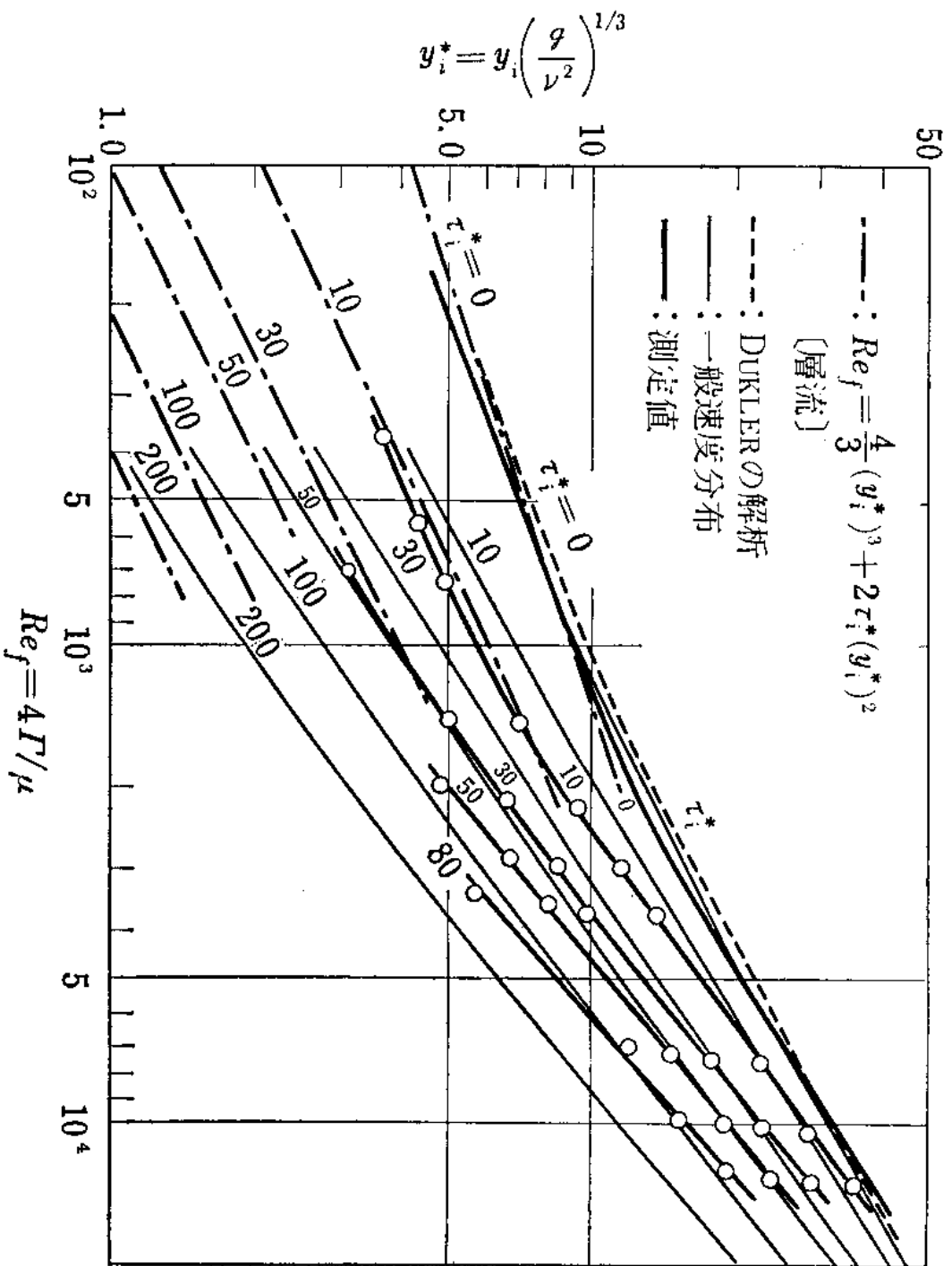


図 7.13 下向き環状流の平均液膜厚さ

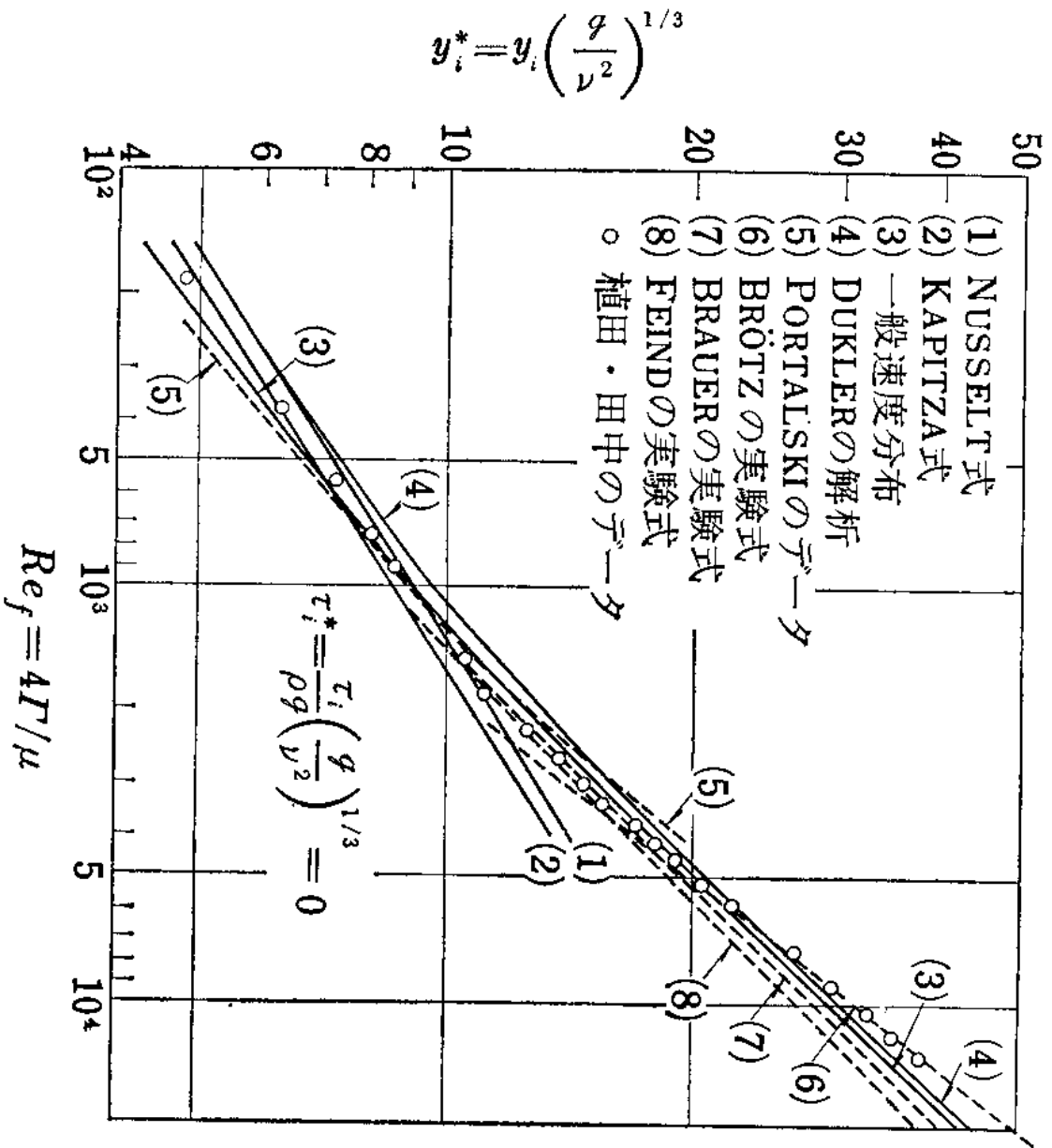


図 7.14 流下液膜 ($\tau_i=0$) の平均液膜厚さ

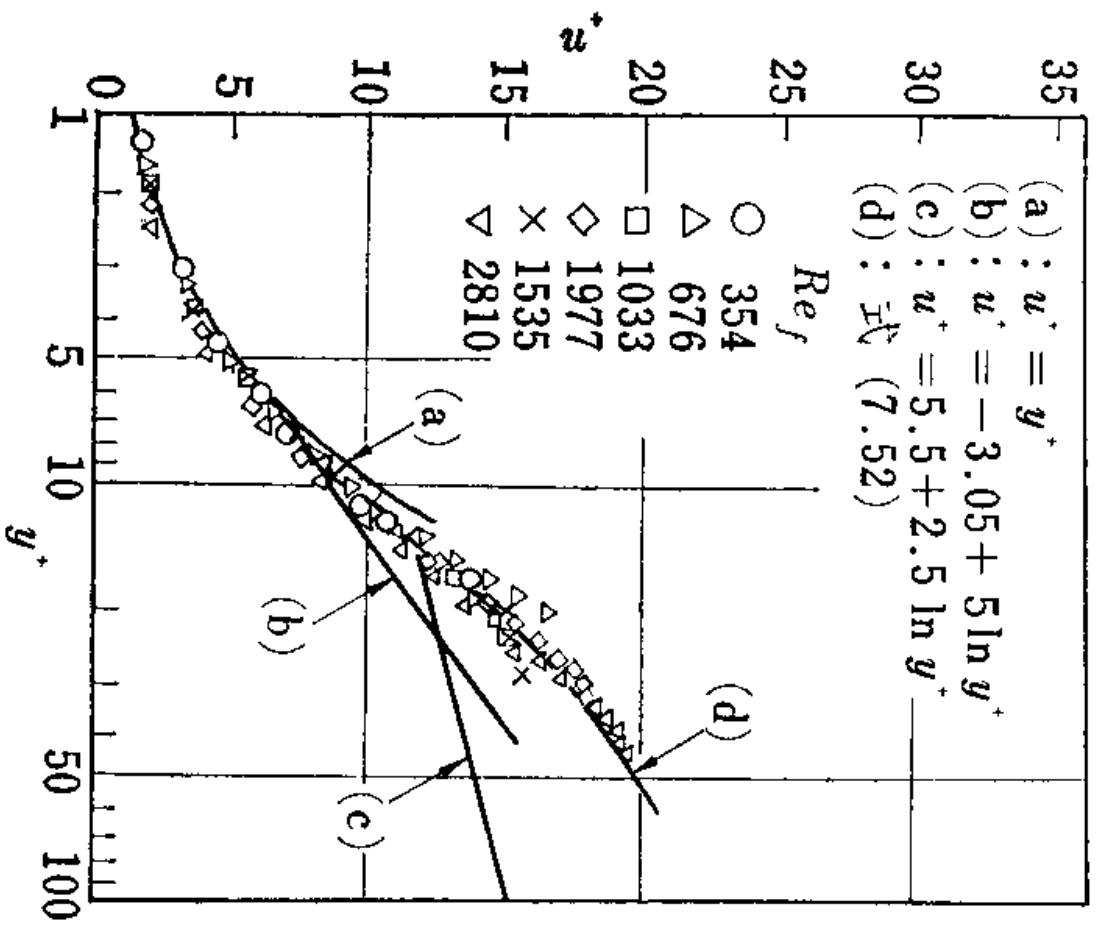


図 7.15 流下液膜内の速度分布 (Hōら)

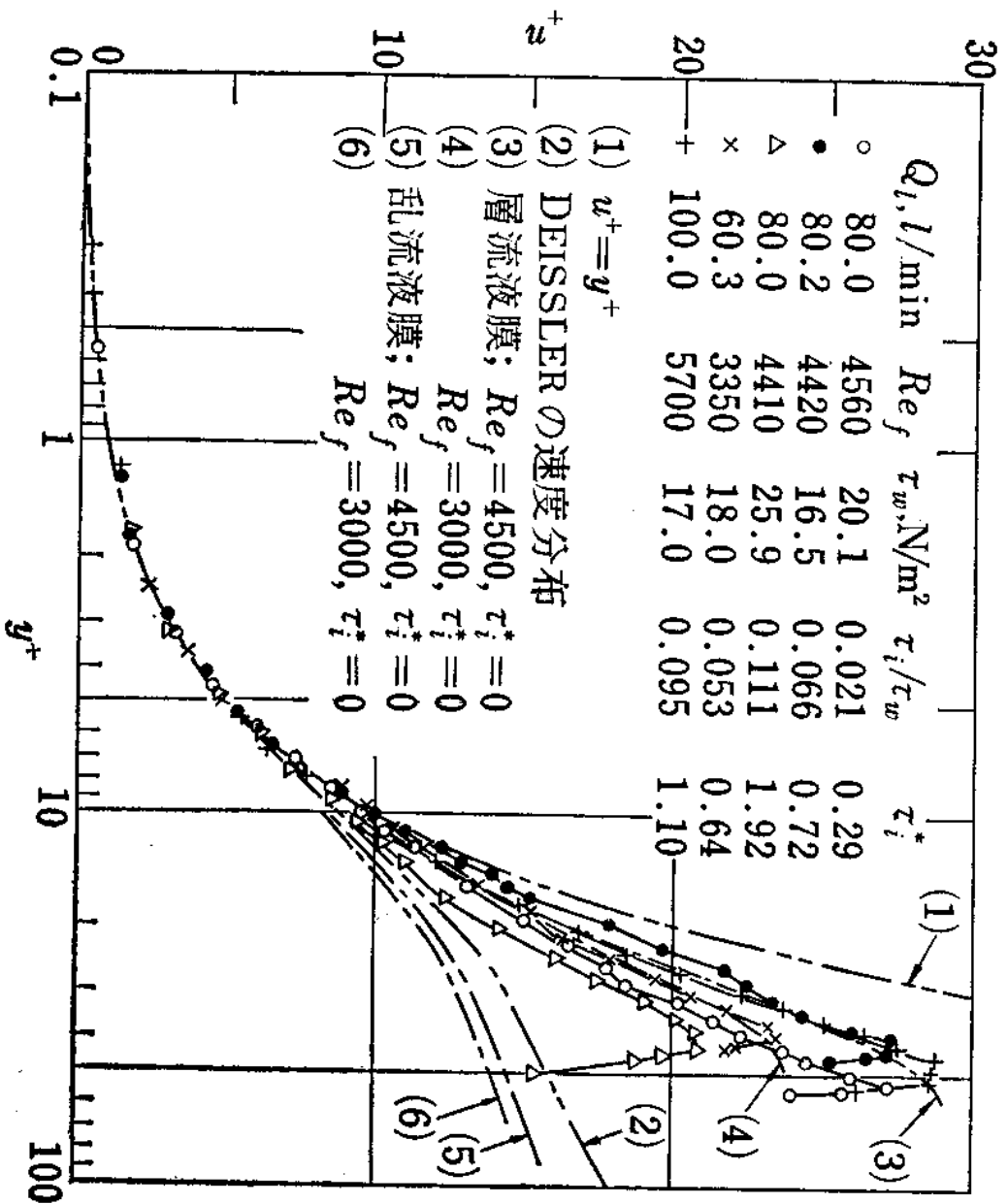


図 7.16 流下液膜内の速度分布