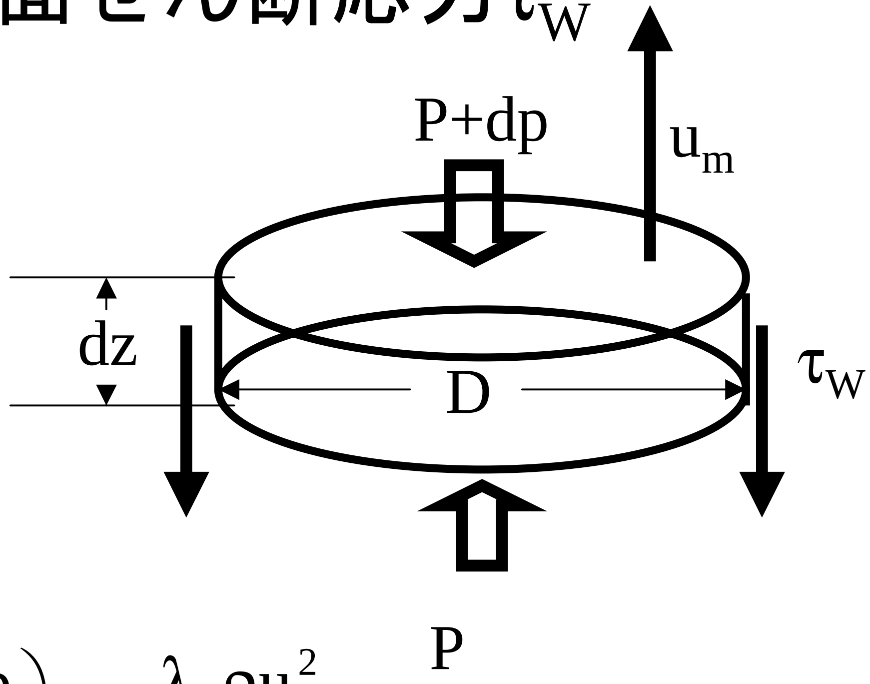
第3章　二相流の圧力損失

単相流の圧力損失

圧力損失(dp/dz) 壁面せん断応力τ_W

力のバランス



$$-dp\frac{\pi D^2}{4}=\tau_w 2\pi D dz$$

$$-\frac{dp}{dz}=\frac{4}{D}\tau_w=\left(\frac{dp}{dz}\right)_F$$

$$\tau_w=f\frac{\rho u_m^2}{2} \qquad \left(\frac{dp}{dz}\right)_F=\frac{\lambda}{D}\frac{\rho u_m^2}{2}$$

f:摩擦係数 λ:円管の摩擦係数

摩擦係数

層流　$f=16/Re$

乱流　$f=0.079\,Re^{-1/4}$　$f=0.046\,Re^{-0.20}$

(Blasius)　(Colburn)

大まかには　$f=0.005$

二相流の圧力損失

液相のみが流れた場合の単相流の圧力損失

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_L = \frac{4}{D} f_L \frac{\rho_L U_L^2}{2} \qquad f_L = C\left(\frac{DU_L}{\nu_L}\right)^{-n}$$

二相流の摩擦圧力損失

摩擦損失比　$\left(\dfrac{dp}{dz}\right)_F / \left(\dfrac{dp}{dz}\right)_L$ 又は $\left(\dfrac{dp}{dz}\right)_F / \left(\dfrac{dp}{dz}\right)_{L0}$

気相と液相が全量液相として流れた場合の
単相圧力損失

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = \frac{4}{D} f_L \frac{\rho_L U_{L0}^2}{2} \qquad U_{L0} = \frac{\rho_L U_L + \rho_g U_g}{\rho_L}$$

低流量の場合には、気液流速、流動様式に
より複雑に変化

二相流の圧力損失

ボイド率　α　液相の平均速度　$u_L = \dfrac{U_L}{1-\alpha}$

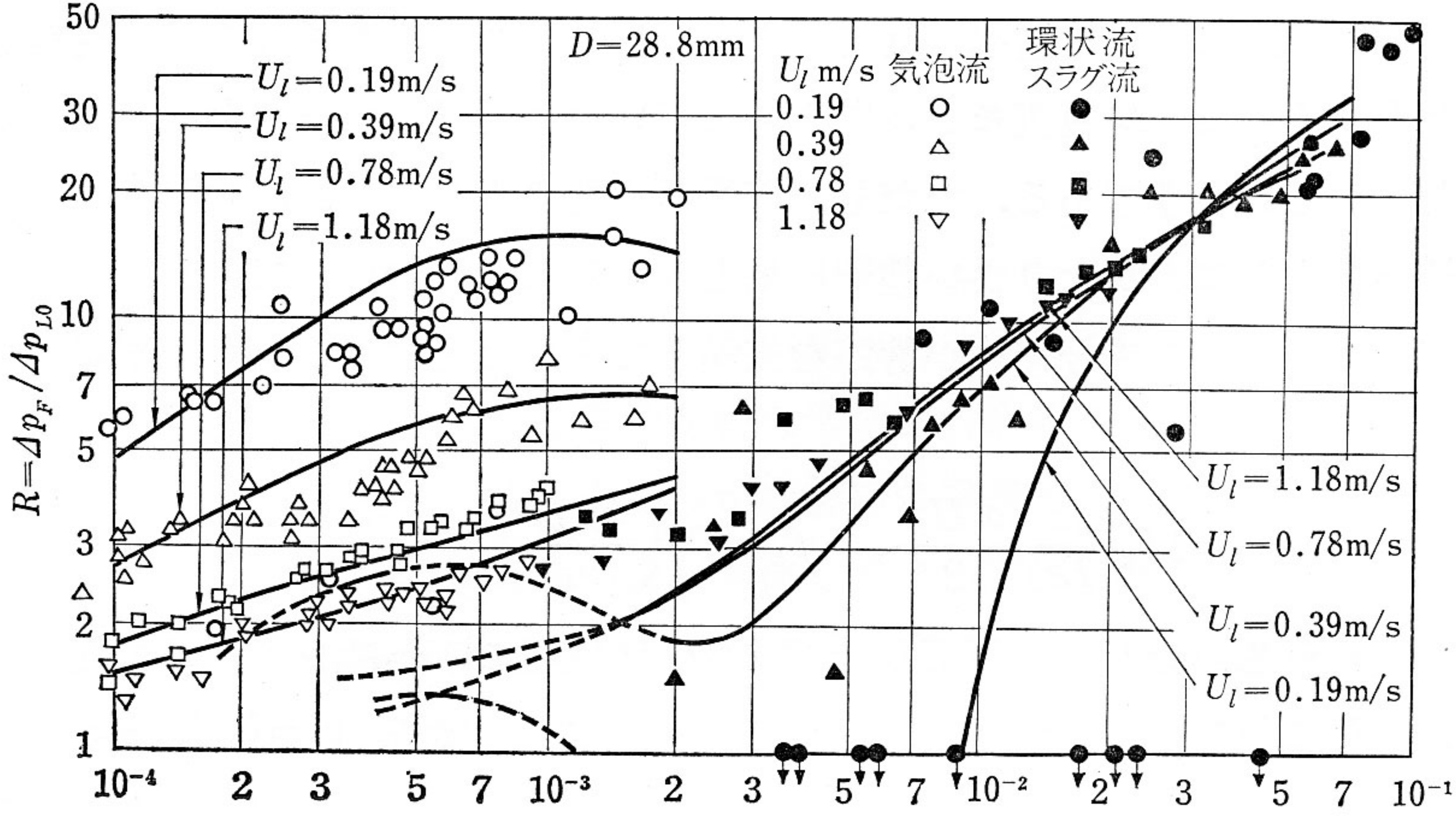
気相による液相の加速　$\Rightarrow$　圧力損失の増加

二相流と単相流の圧力損失の比は(1ーα)の関数

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F \Big/ \left(\frac{dp}{dz}\right)_L = (1-\alpha)^{-m} \quad m = 2 \ (1.4\sim 2.25)$$

摩擦係数：Blasius の単相の式のU_Lに液相のu_Lを入れる

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F \Big/ \left(\frac{dp}{dz}\right)_L = (1-\alpha)^{-1.75}$$



気相流量比 $x = \dfrac{W_g}{W_g + W_l}$

図 3.1 摩擦損失比

Lockhart-Mrtinelli 相関

摩擦損失比$\Phi_L{}^2$, $\Phi_g{}^2$ $\Phi_L^2 = \left(\frac{dp}{dz}\right)_F / \left(\frac{dp}{dz}\right)_L$ $\Phi_g^2 = \left(\frac{dp}{dz}\right)_F / \left(\frac{dp}{dz}\right)_g$

Lockhart-Mrtinelli パラメータ X

液相のみが流れた場合の単相圧力損失と気
　相のみが流れた場合の単相圧力損失の比

$$X = \sqrt{\left(\frac{dp}{dz}\right)_F / \left(\frac{dp}{dz}\right)_g}$$

摩擦損失比はXのみの関数として与えられる。

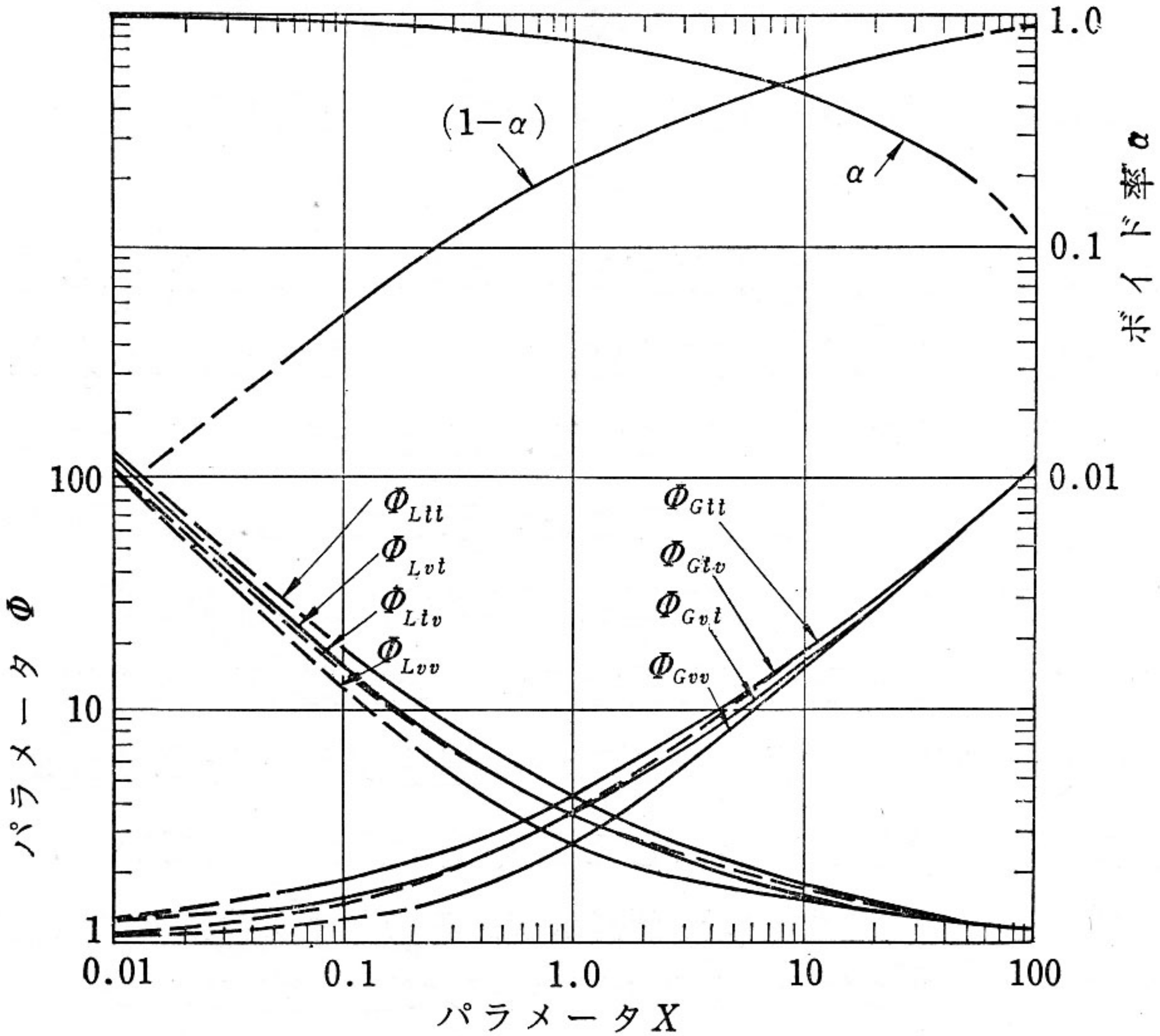


図 3.4 Lockhart–Martinelli 相関

Lockhart-Martinelli 相関

気相、液相が層流か乱流かによって４つの場合に分かれる

見かけレイノルズ数 $\dfrac{DU_L}{\nu_L}, \dfrac{DU_g}{\nu_g}$ が1000以上で乱流とする

$\Phi_{Lvv}{}^2, \Phi_{gvv}{}^2, X_{vv}$: 液相気相共に層流

$\Phi_{Lvt}{}^2, \Phi_{gvt}{}^2, X_{vt}$: 液相層流、気相乱流

$\Phi_{Ltv}{}^2, \Phi_{gtv}{}^2, X_{tv}$: 液相乱流、気相層流

$\Phi_{Ltt}{}^2, \Phi_{gtt}{}^2, X_{tt}$: 気相液相共に乱流

実験データをXによって整理することが可能

Lockhart-Martinelli パラメータ

気相液相の流動条件で一義的に定義可能

層流　　$f=16/Re$

乱流　　$f = 0.079\ Re^{-1/4}$　　$f = 0.046\ Re^{-0.20}$

を用いて計算できる。

両相とも乱流の場合

$$X_{tt}^2 = \frac{C\dfrac{\rho_L U_L^2}{2}\left(\dfrac{D\rho_L U_L}{\mu_L}\right)^{-n}}{C\dfrac{\rho_g U_g^2}{2}\left(\dfrac{D\rho_g U_g}{\mu_g}\right)^{-n}} = \left(\frac{G_L}{G_g}\right)^{2-n}\left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)\left(\frac{\mu_L}{\mu_g}\right)^{n} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{2-n}\left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)\left(\frac{\mu_L}{\mu_g}\right)^{n}$$

Lockhart-Martinelli パラメータ

Colburnの式を用いれば

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_g}\right)^{0.1}$$

気液二相流の場合気相液相とも乱流の場合が多いのでX_{tt}が一般的に用いられる　Xで表す。

ボイド率もXのみの関数として表される

Lockhart-Martinelli 相関の近似式

Chisholm-Lairdの式（平滑管）（乱流）

$$\Phi_L^2 (\equiv \Phi_{Ltt}^2) = 1 + \frac{21}{X} + \frac{1}{X^2} \qquad \Phi_g^2 = \Phi_L^2 X^2 = 1 + 21X + + X^2$$

粗面管の式

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{A}{X^m}$$

Aとmは壁面粗さと液相レイノルズ数の関数

無次元関係式

バッキンガムのπ定理:

n個の物理量が関係する現象があり物理量間に一つの式が成り立っており、関係する次元の数がm個であるとき、この関係式は(n－m)個の無次元数の関係として表される。すなわち独立な無次元数は(n－m－1)個である。

無次元関係式

単相流の圧力損失

関係する物理量

(dp/dz), D, u_m, ρ, μの５つ

次元は,Kg, m, sの３つ

５－３＝２個の無次元数の間の関係式が一つ

独立な無次元数は５－３－１＝１個

λ=func(Re)

$$\lambda = \left(\frac{dp}{dz}\right)_F D \Big/ \frac{\rho u_m^2}{2}$$

Lockhart-Martinelli パラメータの意味

気液二相流の圧力損失の無次元相関式

気相と液相の物理量があるので

(dp/dz), D, u_L, ρ_L, μ_L , u_g, ρ_g, μ_gの８つ

次元は,Kg, m, sの３つ

８－３＝５個の無次元数の間の関係式が一つ

独立な無次元数は８－３－１＝４個

これを減らしてただ一つの独立な無次元数Xを
見いだした。

沸騰二相流の摩擦圧力損失

全流量が液体として流れた場合の圧力損失と二相流としての圧力損失の比$\Phi_{L0}{}^2$をとるのが便利。

$$\Phi_{L0}^2 \equiv \left(\frac{dp}{dz}\right)_F \Big/ \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0}$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = \frac{4}{D} f_{L0} \frac{\rho_L U_{L0}^2}{2} \qquad \left(\frac{dp}{dz}\right)_L = \frac{4}{D} f_L \frac{\rho_L U_L^2}{2}$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_L \Big/ \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = \frac{f_L}{f_{L0}} \frac{U_L^2}{U_{L0}^2} = \frac{(DU_L/\nu_L)^{-n}}{(DU_{L0}/\nu_L)^{-n}} \frac{U_L^2}{U_{L0}^2} = \left(\frac{U_L}{U_{L0}}\right)^{2-n}$$

$$= \left(\frac{G_L}{G}\right)^{2-n} = (1-x)^{2-n}$$

$$U_{L0} = \frac{\rho_L U_L + \rho_g U_g}{\rho_L} = \frac{G}{\rho_L}$$

沸騰二相流の摩擦圧力損失

$\Phi_{L0}{}^2$は$\Phi_{Ltt}{}^2$を用いて表される

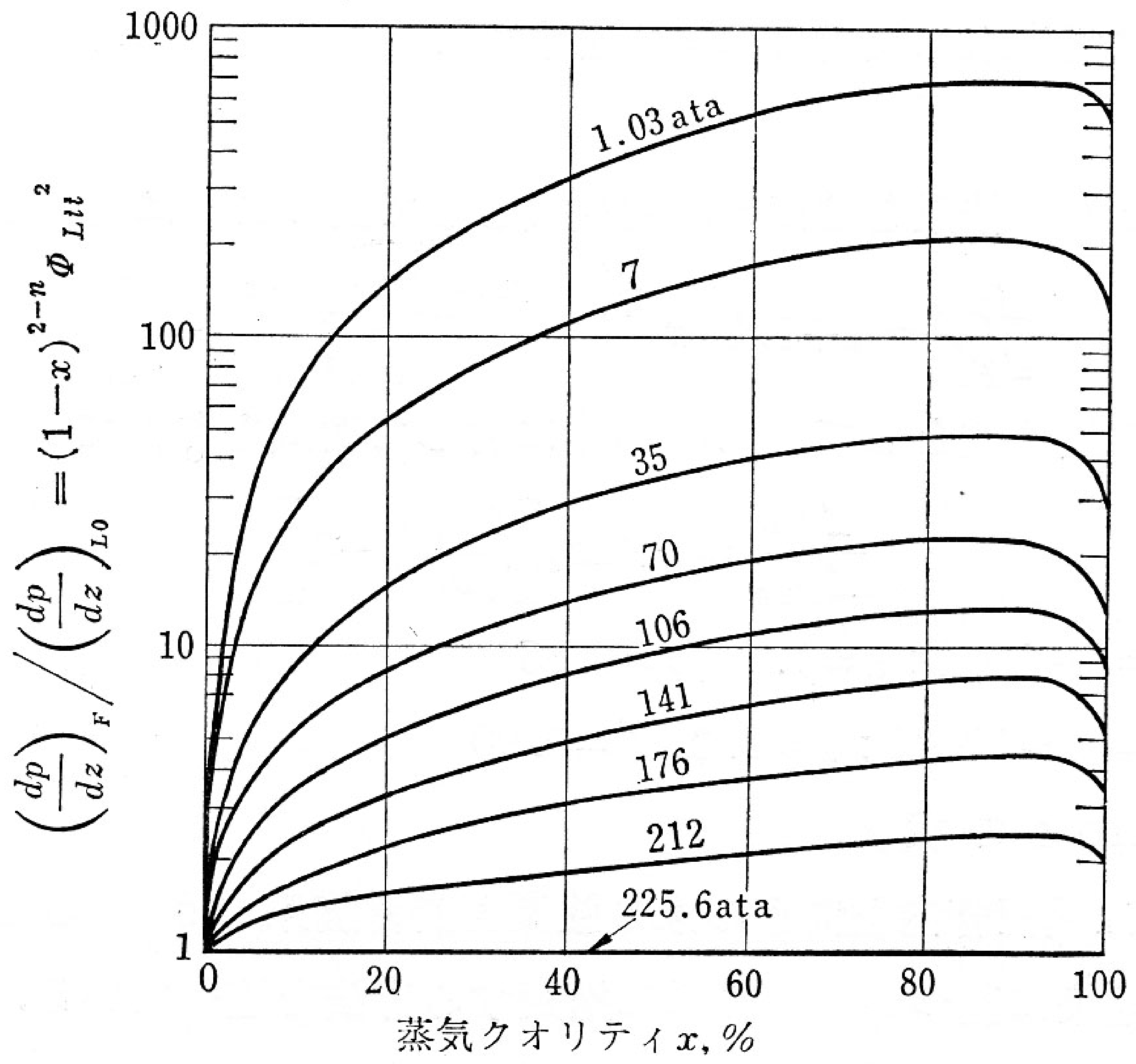
$$\Phi_{L0}^2 \equiv \left(\frac{dp}{dz}\right)_F / \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_F}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_L} \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_L}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0}} = \Phi_{Ltt}^2 (1-x)^{2-n}$$

クォリティーxと$\Phi_{Ltt}{}^2$を用いて圧力損失を計算できる

ただしLockhart-Martinelii相関は大気圧のデータ中心。
高圧の蒸気ー水のデータを用いて修正

臨界圧では$\Phi_{L0}{}^2 = 1$ $X_{tt}^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{2-n}$ $\Phi_{Ltt}^2 = \frac{1}{X_{tt}}\left(X_{tt}^{\frac{2}{2-n}} + 1\right)^{\frac{2-n}{2}}$

Marinelli-Nelsonの相関 $\Phi_{L0}{}^2$とクオリティーx



$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F \Big/ \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = (1-x)^{2-n}\Phi_{Ltt}^{\ 2}$
1000
100
10
1
1.03 ata
7
35
70
106
141
176
212
225.6ata
0
20
40
60
80
100
蒸気クオリティ x, %

図 3.5 摩擦損失勾配比

流路全体での摩擦圧力損失

入口で飽和水。長さL　出口クオリティーxe

$$\frac{\Delta P_F}{\Delta P_{L0}} = \frac{1}{L}\int_0^L \left(\frac{dp}{dz}\right)_F \Big/ \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} dz = \frac{1}{x_e}\int_0^{x_e} \Phi_{L0}^2 dx$$

$$dx = dW_g / W = 2\pi r_w q_w dz / (H_{lg} W)$$

$\Phi_{L0}{}^2$とクオリティーxの相関を数値積分。

近似式

$$\frac{\Delta P_F}{\Delta P_{L0}} = 1 + 1.20 x_e^{\frac{3}{4}\left(1+0.01\sqrt{\frac{v_g}{v_L}}\right)} \left\{\left(\frac{v_g}{v_L}\right)^{0.8} - 1\right\}$$

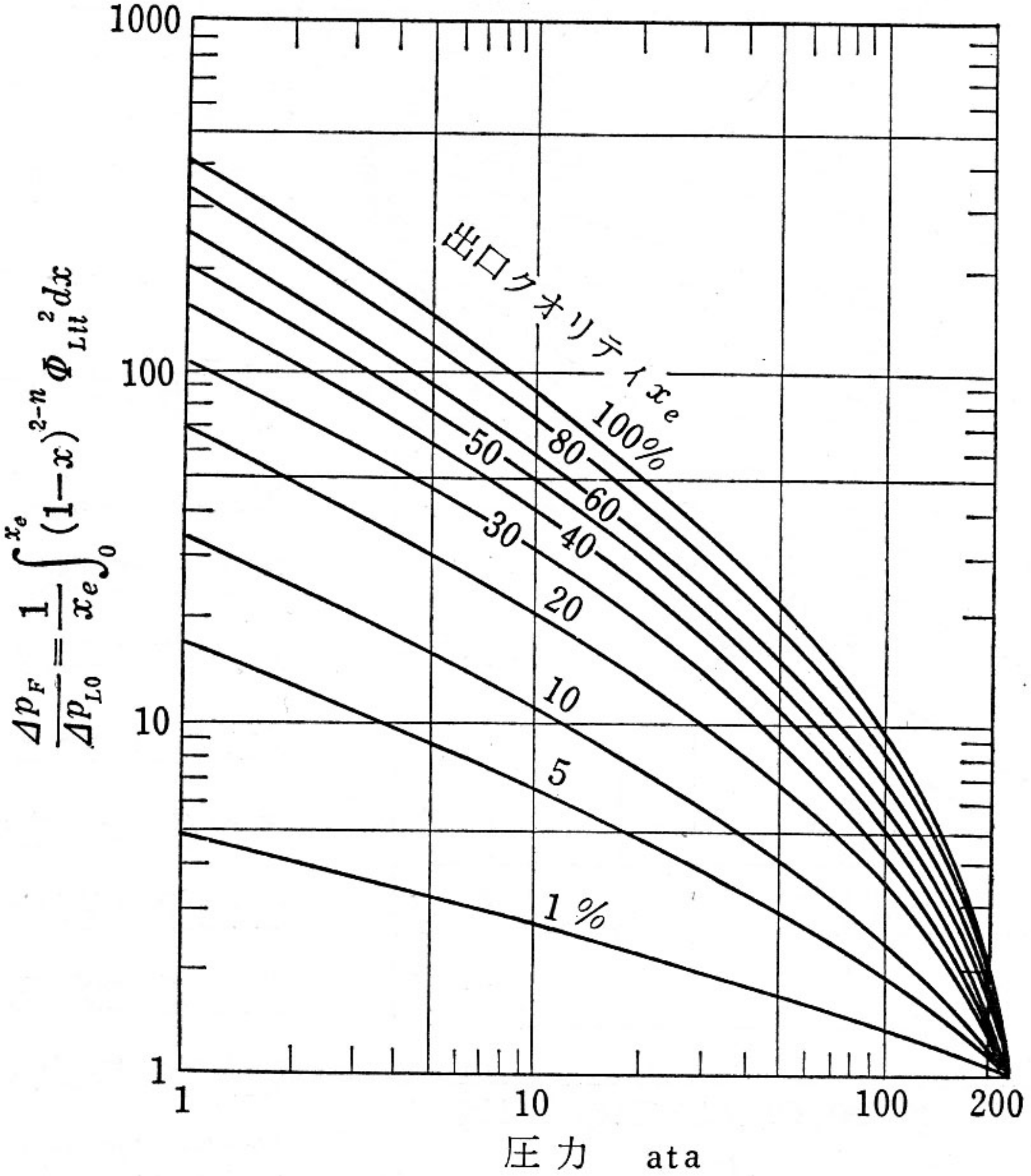


図 3.6 MARTINELLI-NELSON の摩擦損失倍数

Thomの相関

垂直上向き沸騰二相流の全圧力損失(静圧、摩擦損失、加速損失)を与える相関

$$\Delta p = \int_0^L [\{\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_L\}g + \left(\frac{dp}{dz}\right)_F]dz + \frac{G^2}{\rho_L}\{\frac{x_e^2\rho_L}{\alpha_e\rho_g} + \frac{(1-x_e)^2}{(1-\alpha_e)} - 1\}$$

$$= (r_g)\rho_L gL + (r_f)\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} L + (r_a)\frac{G^2}{\rho_L}$$

$$r_g = \int_0^L \{\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_L\}gdz/(\rho_L gL) \qquad r_f = \int_0^{x_e} \Phi_{L0}^2 dx$$

$$r_a = \{\frac{x_e^2\rho_L}{\alpha_e\rho_g} + \frac{(1-x_e)^2}{(1-\alpha_e)} - 1\}$$

r_g, r_f, r_aを出口クォリティーの関数として与える。

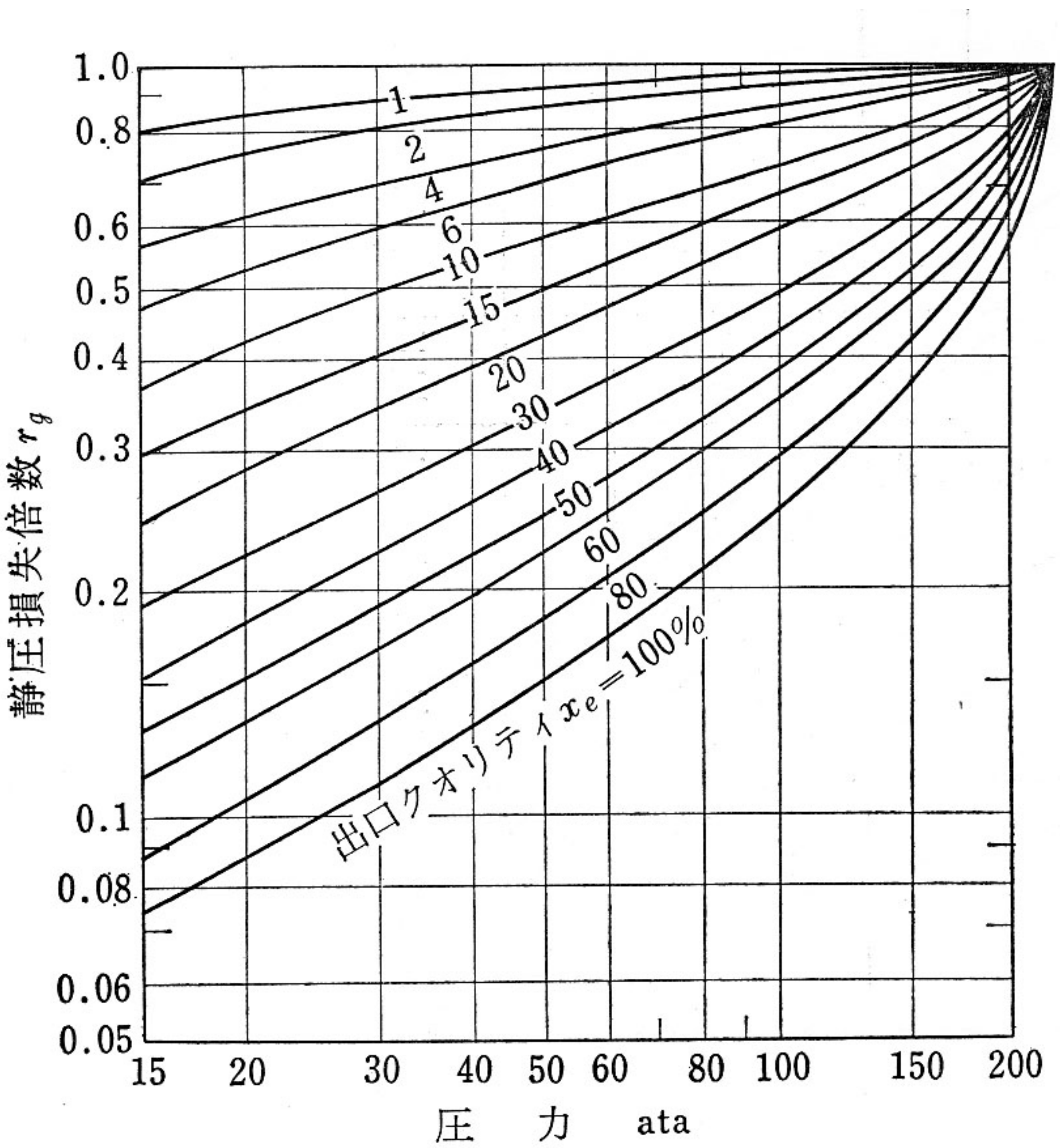


図 3.7 静圧損失倍数 r_g (THOM)

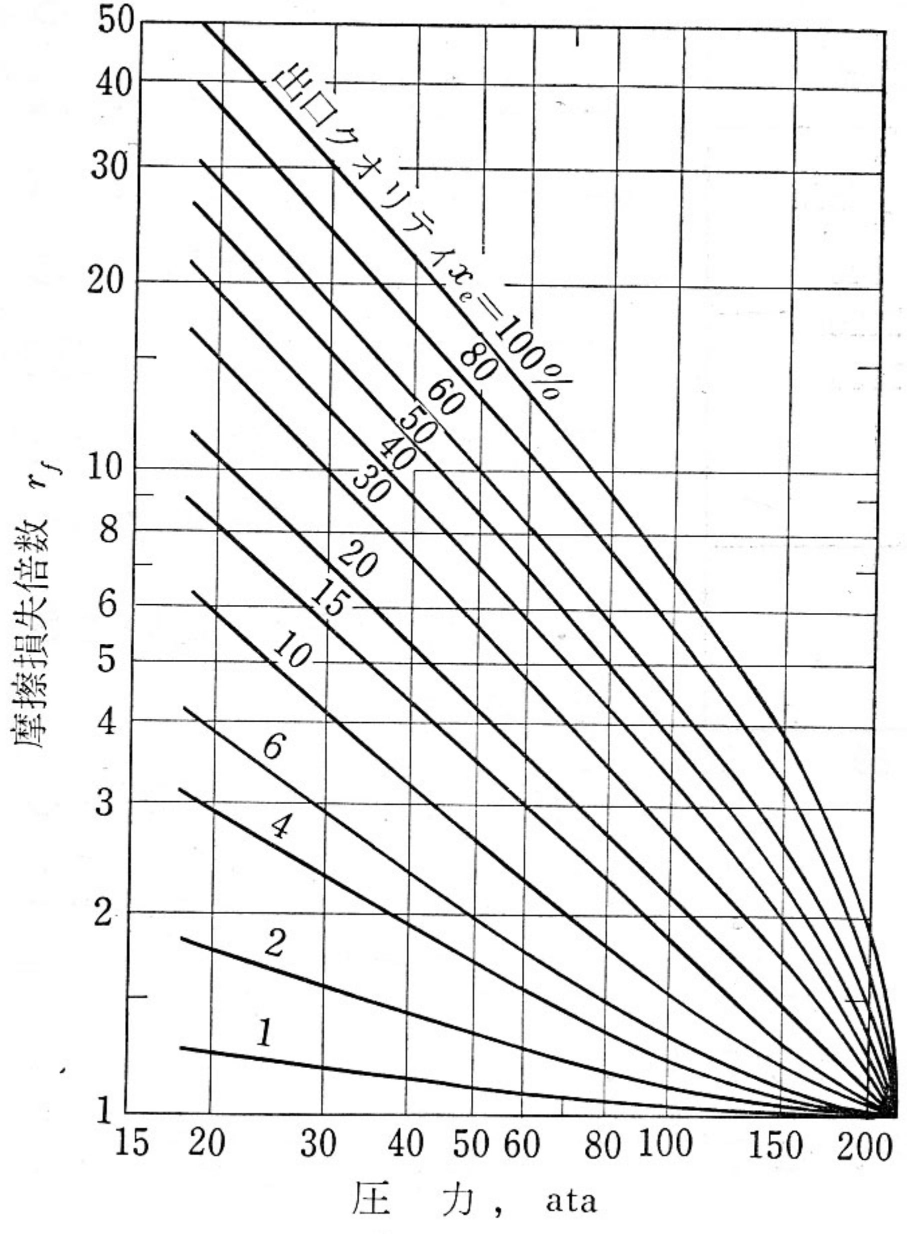


図 3.8 Thom の摩擦損失倍数 r_f

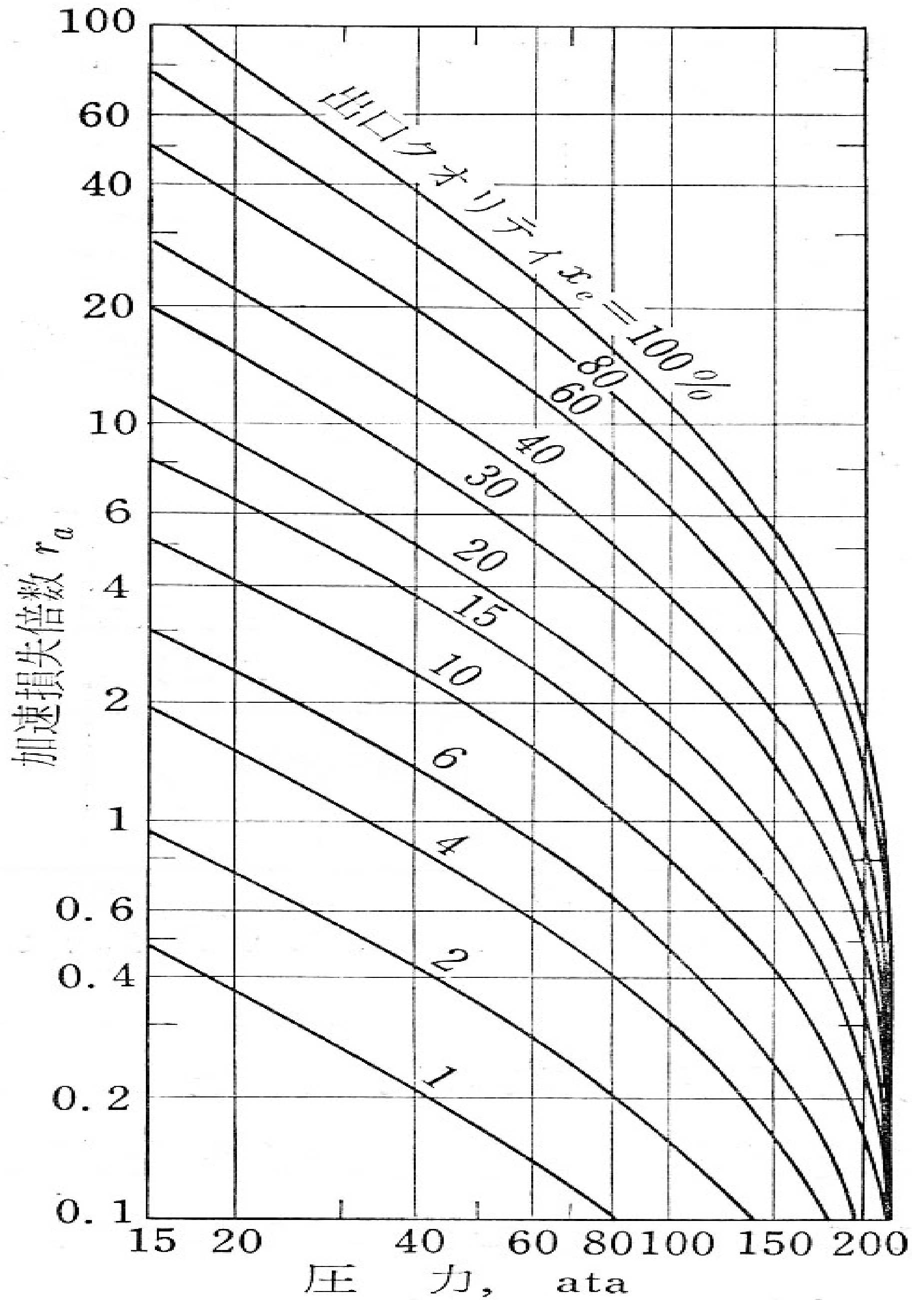


図 3.9 加速損失倍数 r_a (Thom)

摩擦圧力損失に対する質量速度影響

- Lockhart-Martinelli相関、Martinelli-Nelson相関は圧力損失をX又はクォリティーxのみの関数として与える。
- 実際は、質量速度Gの影響をうける。
- 沸騰二相流の摩擦圧力損失
- 質量速度が小さいときMartinelli-Nelson相関と良く合う
- 質量速度が大きいとき、均質流モデルと良く合う。

均質流モデルによる摩擦圧力損失

均質流モデル、気相と液相の速度が等しい

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{4}{D} f_F \frac{\rho_m u^2}{2} = \frac{2}{D} f_F G^2 (v_L + x v_{Lg})$$

$$v_m = v_l + x v_{lg} \quad , u = G/\rho_m = G\, v_m$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = \frac{4}{D} f_{L0} \frac{\rho_L U_{L0}^2}{2} = \frac{2}{D} f_{L0} G^2 v_L$$

$$\Phi_{L0}^2 \equiv \left(\frac{dp}{dz}\right)_F \Big/ \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = \frac{f_F}{f_{L0}} \left\{ 1 + x \left(\frac{v_{Lg}}{v_L} \right) \right\}$$

均質流モデルによる摩擦圧力損失

摩擦係数としてBlasiusの式

$$f_F = 0.079\left(\frac{D\rho_m u}{\bar{\mu}}\right)^{-0.25} = 0.079\left(\frac{DG}{\bar{\mu}}\right)^{-0.25}$$

$$f_{L0} = 0.079\left(\frac{D\rho_L U_{L0}}{\mu_L}\right)^{-0.25} = 0.079\left(\frac{DG}{\mu_L}\right)^{-0.25}$$

二相流の平均の粘性係数 $\bar{\mu}$

$$\bar{\mu} = \mu_L$$

$$\bar{\mu} = x\mu_g + (1-x)\mu_L$$

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_L}$$

均質流モデルによる摩擦圧力損失

それぞれの粘性係数による摩擦損失比

$$\Phi_{L0}^2 = \left\{1 + x\left(\frac{v_{Lg}}{v_L}\right)\right\}$$

$$\Phi_{L0}^2 = \left\{1 + x\left(\frac{v_{Lg}}{v_L}\right)\right\}\left\{1 + x\left(\frac{\mu_g}{\mu_L} - 1\right)\right\}^{0.25}$$

$$\Phi_{L0}^2 = \left\{1 + x\left(\frac{v_{Lg}}{v_L}\right)\right\}\left\{1 + x\left(\frac{\mu_g}{\mu_L} - 1\right)\right\}^{-0.25}$$

高質量速度では3番目の式が良くあう。

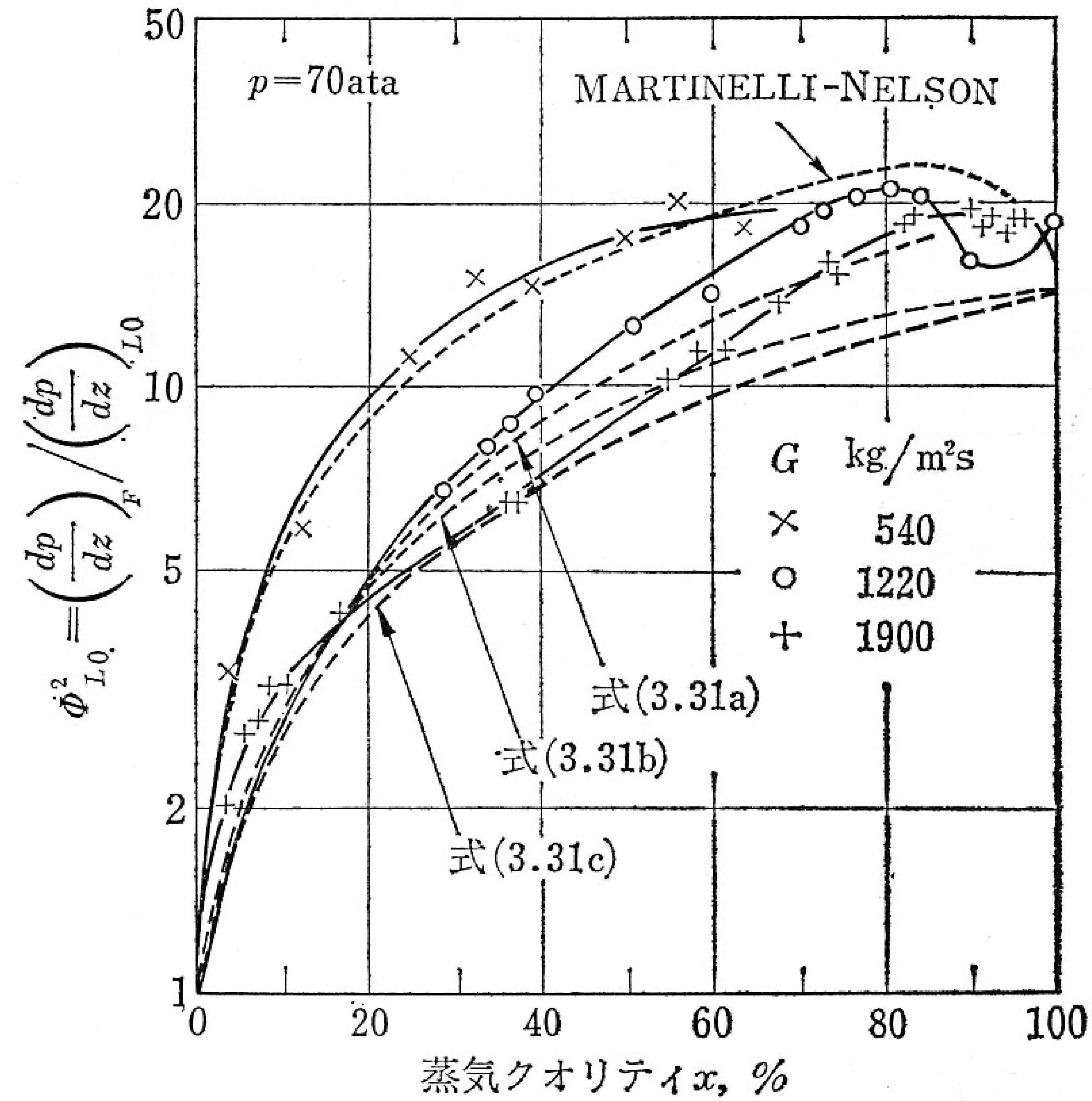


図 3.10　摩擦損失勾配比

質量速度の影響を考慮した二相摩擦圧力損失

Lockhart-Martinlli 相関を精密化

質量速度の影響、種々の物性値の影響を考慮

$$\Phi_L^2 (\equiv \Phi_{Ltt}^2) = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

Cを質量速度と物性値 $\Gamma_0 = \left(\frac{\rho_L}{\rho_g}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_L}\right)^{0.1}$ の関数として与える。

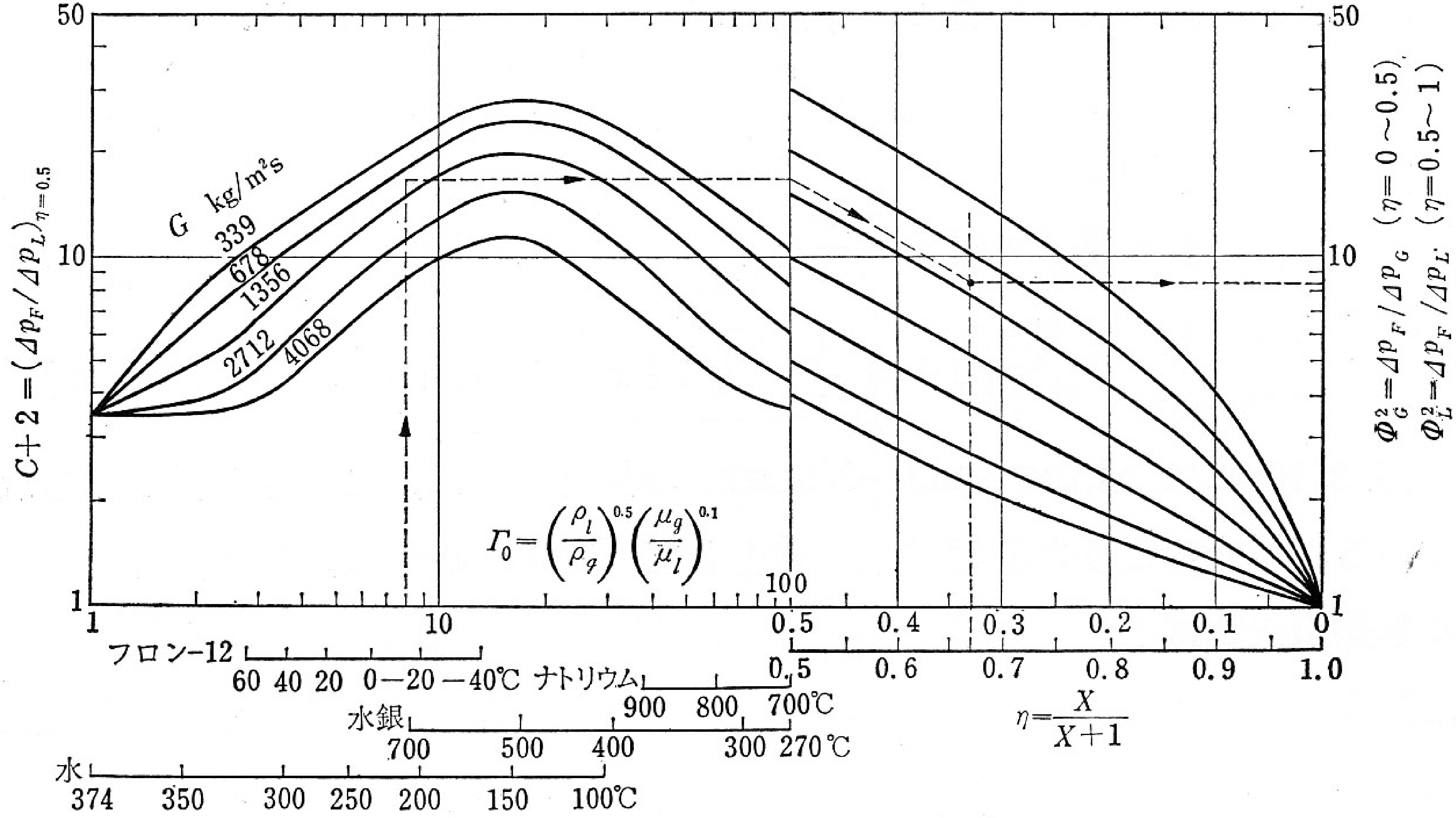


図 3.11 摩擦損失比の計算図表（Chisholm ら）