

# 熱流動工学

## 流体の流れと伝熱

多くの工学的な機器の熱設計に極めて重要

単相流、二相流

単相流の伝熱、伝熱の基礎

学部における伝熱学

二つ以上の相からなる流体(混相流の伝熱)

実際の機器に応用されている場合が多い

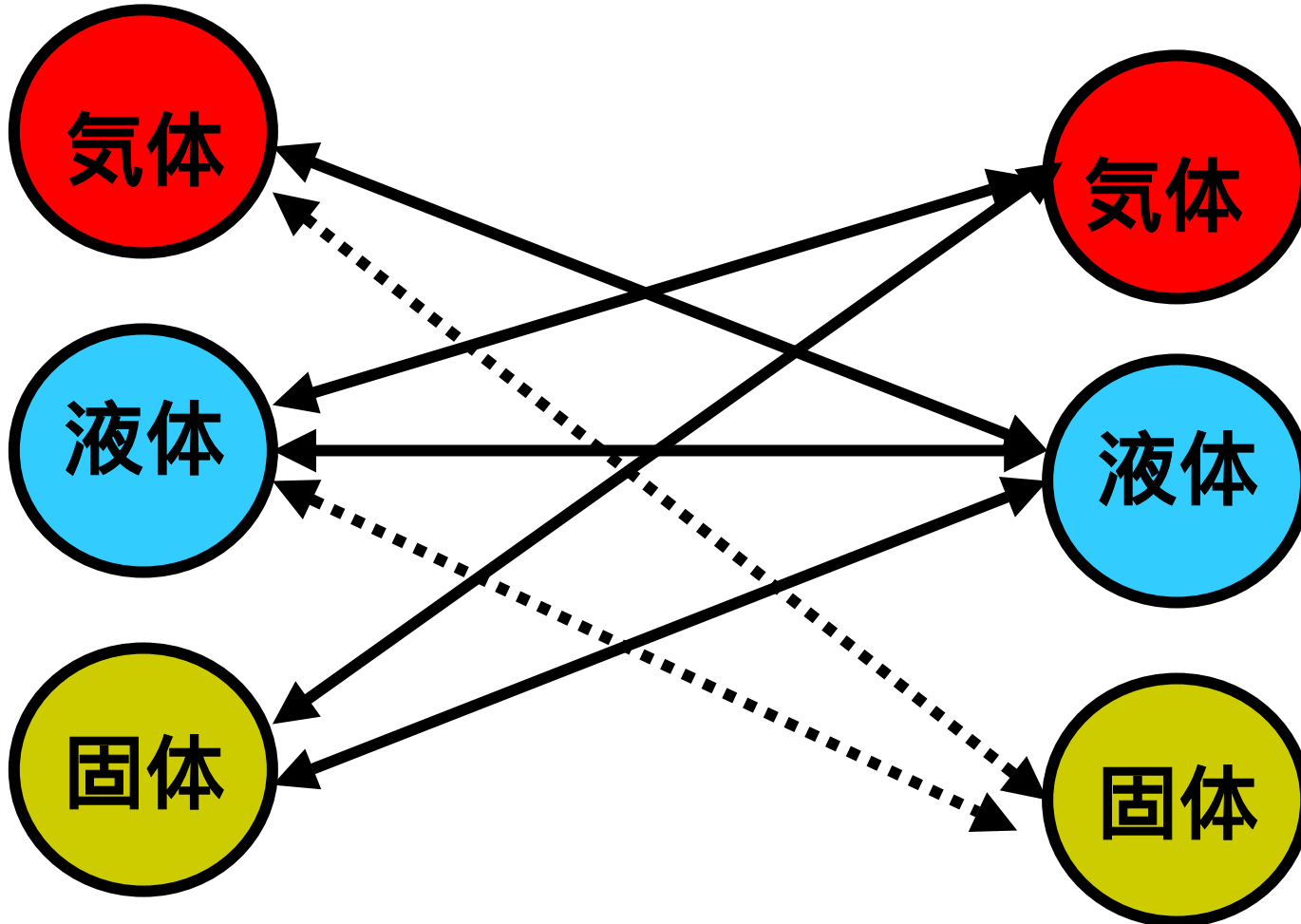
ボイラー、エアコン、電子機器の冷却

環境伝熱、ロケット等、

# 混相流

分散相

連続相



# 気液二相流

気体と液体の混在する流れ

沸騰、凝縮等、伝熱機器に最も多く現れる混相流

单相流に比べて複雑な流動伝熱特性

界面を伴う流れ、相変化を伴う流れ

伝熱機器の高度化にその正確な現象の把握と予測手法の確立が求められている

本講義での講義内容

# テキスト及び試験

テキスト: 植田辰洋著「気液二相流」(養賢堂)

毎回講義の章をコピーして配布

そのほかに適宜補足の資料を配付

試験 7 / 23 ~ 8 / 5 の試験期間中に

筆記試験として行う

各自の自筆のメモ1、2枚持ち込み可

各講義項目内容を纏めたものを書く(ベース)

応用問題(+ )

# 平成20年度講義の予定

4 / 9 流動様式 4 / 16 流れの基礎式

4 / 23 圧力損失 4 / 30 ボイド率

5 / 7 界面波動 5 / 14 液膜流の流動

5 / 21 休講 5 / 28 液膜流の熱伝達

6 / 4、6 / 11、6 / 18、6 / 25、

7 / 2、7 / 9

大川准教授

限界熱流束、液滴流、気液二相流の数値解法等

# 気液二相流の基本パラメーター

二つの相が流れるのでそれぞれの相について流動パラメータを定義

気相 $g$ 、液相 $l$ の添え字 $k$ で定義( $k=g,l$ )

添え字のないものは両方の相の和

質量流量 $W$ (Kg/s), 体積流量 $Q$ ( $m^3/s$ )

$$W=W_g+W_l, \quad Q=Q_g+Q_l,$$

質量速度 $G$ (Kg/( $m^2s$ ))  $G=W/A$ , 流路断面積 $A$ ( $m^2$ )

$$G_g=W_g/A, \quad G_l=W_l/A, \quad G=G_g+G_l,$$

クオリティ (乾き度)  $x$ ,  $x=G_g/(G_g+G_l)$

# 気液二相流の基本パラメーター

気液の密度  $\rho_g, \rho_l$ , 気液の比容積  $v_g, v_l$

$$W_g = \rho_g Q_g, W_l = \rho_l Q_l,$$

見かけ速度  $U$  (m/s)  $U = Q/A$ ,

$$U_g = Q_g / A = G_g v_g = G_g / \rho_g = Gx / \rho_g,$$

$$U_l = Q_l / A = G_l v_l = G_l / \rho_l = G(1-x) / \rho_l,$$

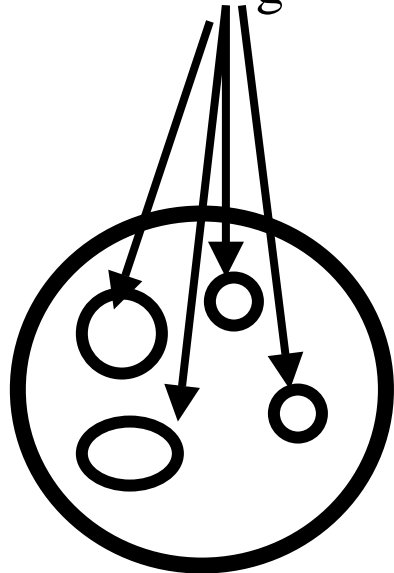
$$U = U_g + U_l,$$

$$\text{容積流量比} = U_g / (U_g + U_l)$$

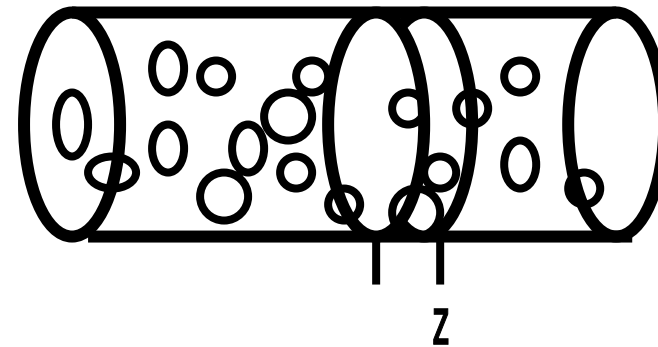
# 気液二相流の基本パラメーター

気相体積率 (ボイド率)

気液二相流のある体積での気相の占める割合  
流路の微少の区間では流路断面積 $A$ のうち気相  
の断面積 $A_g$ の割合  $= A_g / A$



液相の断面積は $A_l$



# 気液二相流の基本パラメーター

各相の平均速度 $u_k$ ,

$$u_g = Q_g / A_g = Q_g / (A \cdot x) = U_g / x = Gx / (\rho_g \cdot x)$$

$$u_l = Q_l / A_l = Q_l / \{ A(1-x) \} = U_l / (1-x) \\ = G(1-x) / \{ \rho_l (1-x) \}$$

気液二相流の平均密度  $\rho_m$

$$\rho_m = \rho_g x + (1-x) \rho_l$$

# 気相と液相の速度が等しい場合

$$u = u_g = u_l$$

$$U = U_g + U_l = u_g + (1 - x) u_l = u + (1 - x) u = u$$

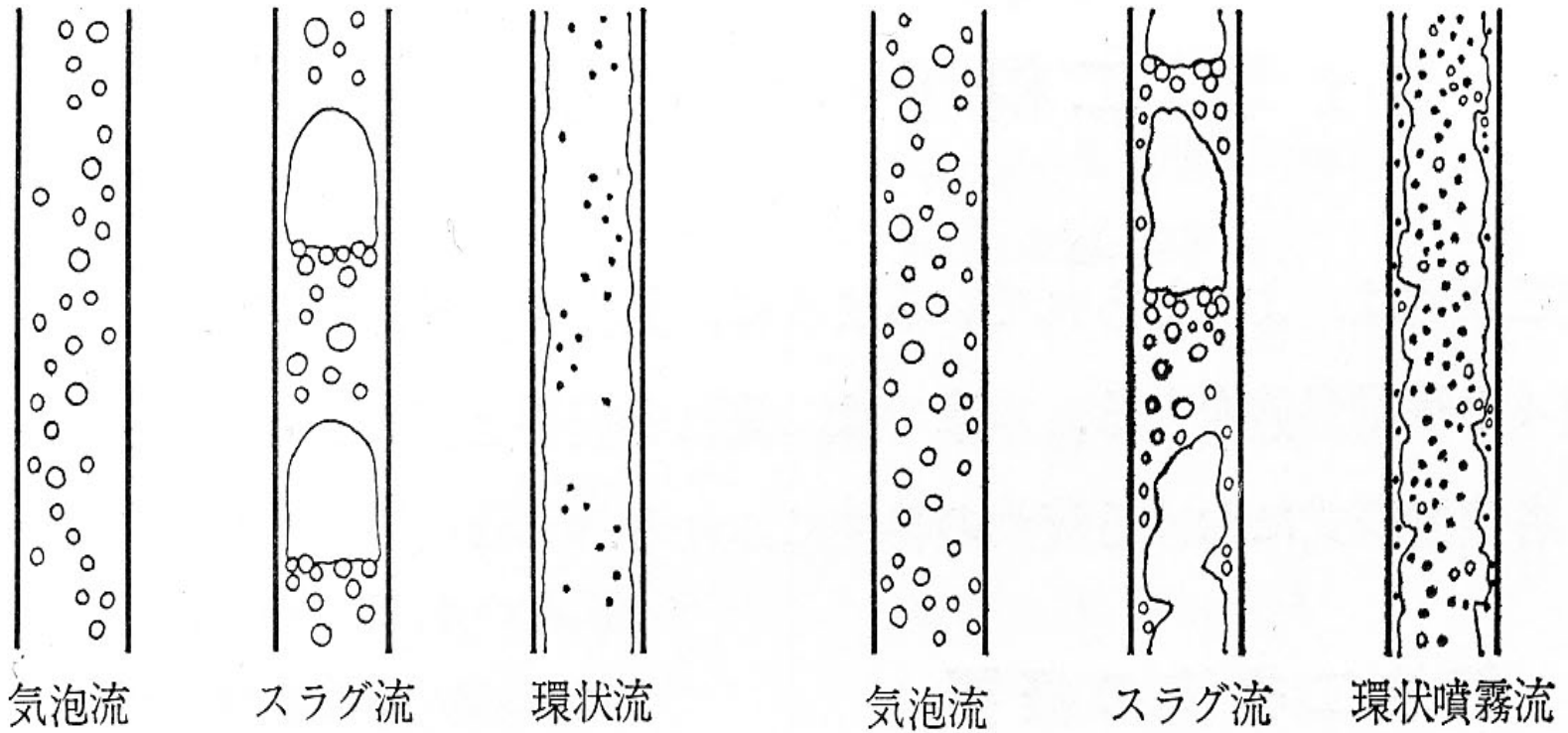
$$= U_g / U = u_g / u = u_g / u_g = 1$$

$$G = G_g + G_l = u_g v_g + (1 - x) u_l v_l$$

$$= \{ u_g v_g + (1 - x) v_l \} u = v_m u$$

$$u = U_g + U_l = Gx / v_g + G(1 - x) / v_l = G \{ x / v_g + (1 - x) / v_l \}$$

$$1 / v_m = x / v_g + (1 - x) / v_l = xv_g + (1 - x)v_l$$



(a) 液相流量の小さい場合

(b) 液相流量の大きい場合

図 1.1 垂直管内二相流の流動様式

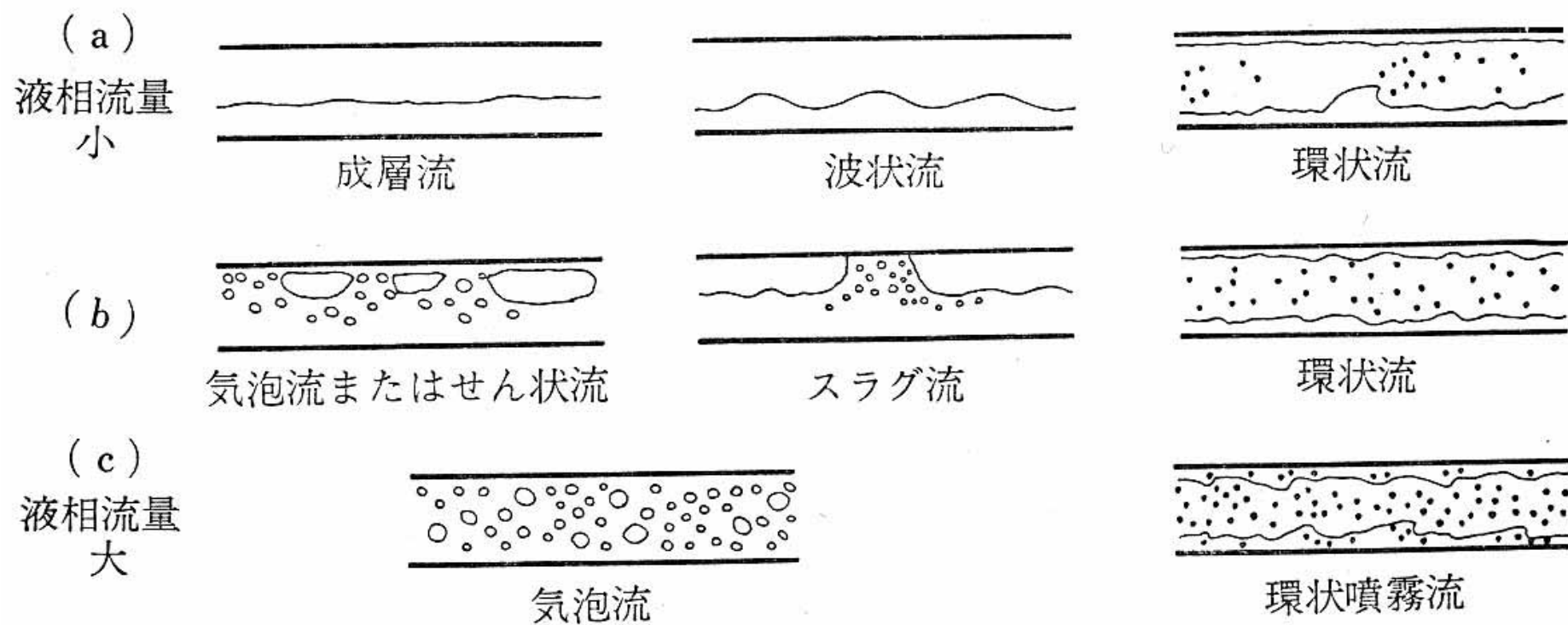


図 1.2 水平管内二相流の流動様式

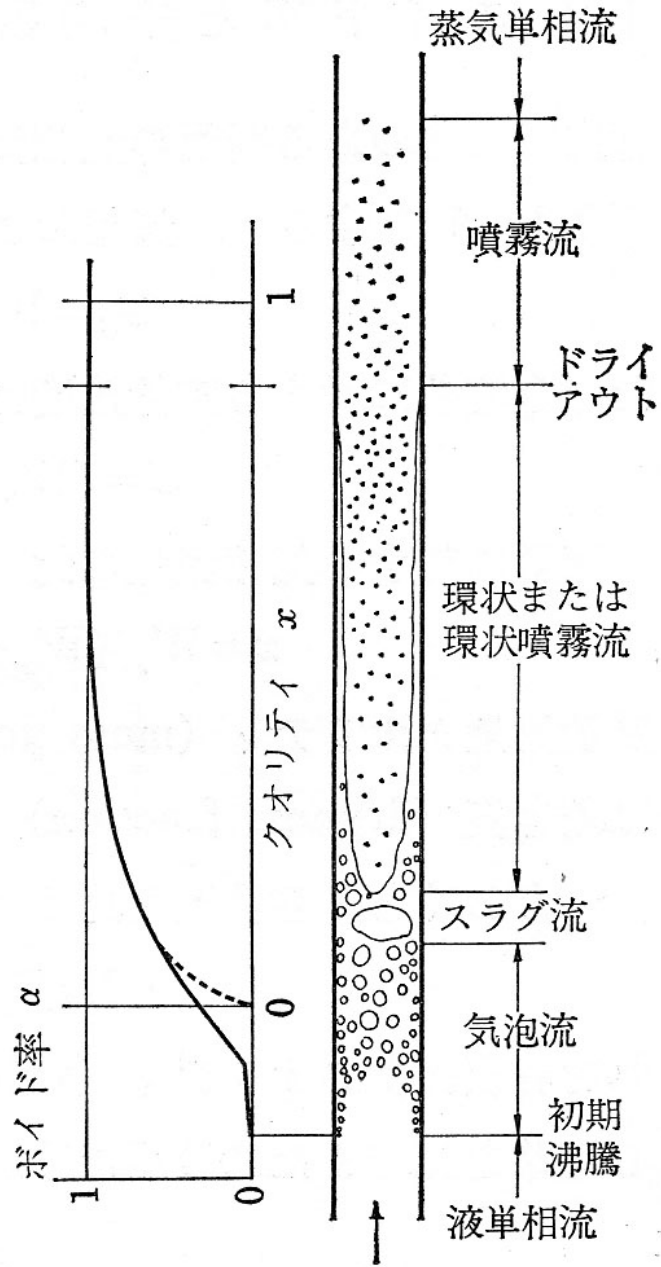


図 1.3 蒸発管内の流動様式の変化

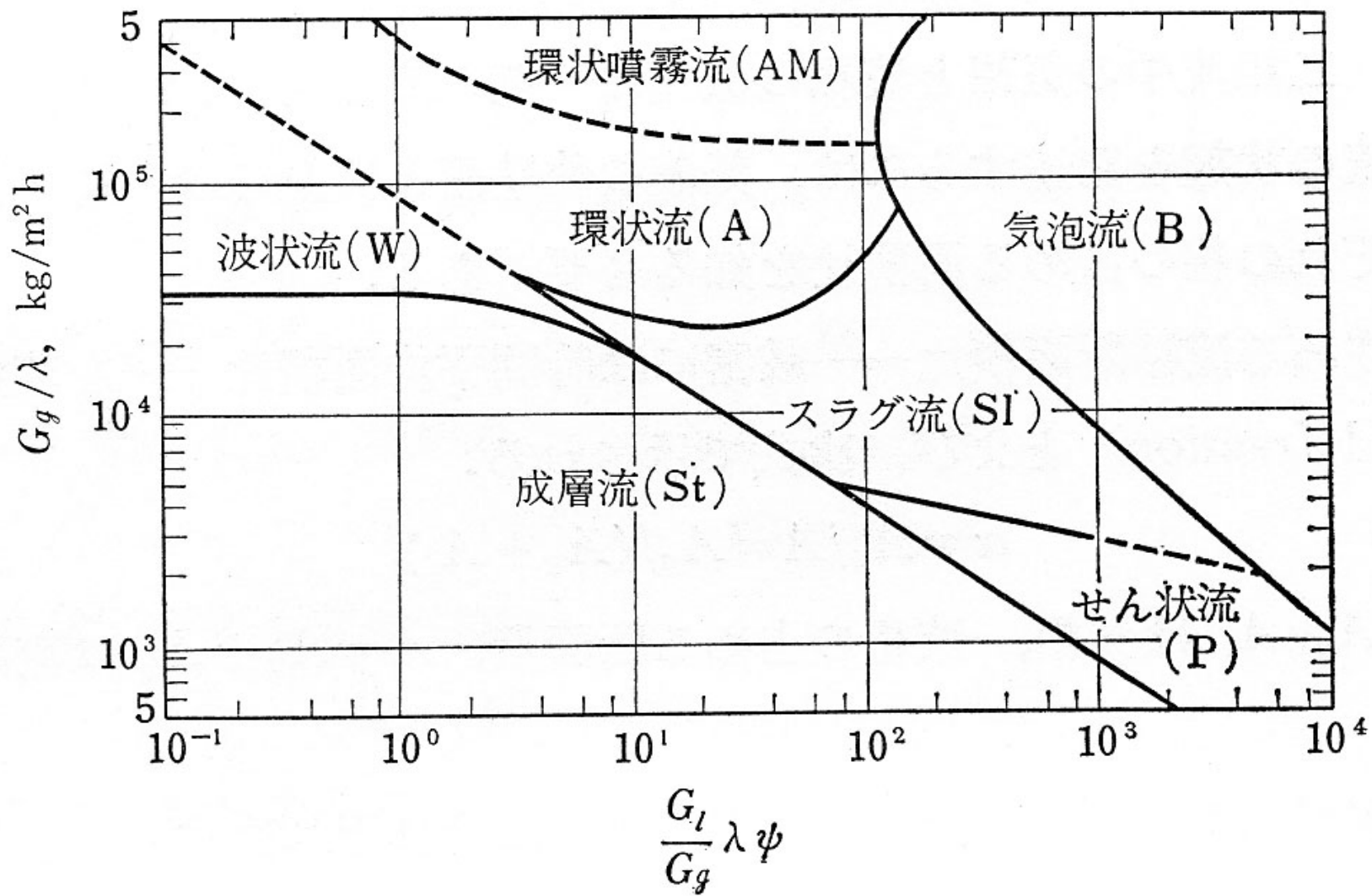


図 1.4 Baker の流動様式線図

# Baker 線図のパラメータ

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_A} \right) \left( \frac{\rho_1}{\rho_w} \right) \right]^{1/2}$$

$$\psi = \frac{\sigma_w}{\sigma} \left[ \frac{\mu_1}{\mu_w} \left( \frac{\rho_w}{\rho_1} \right)^2 \right]^{1/2}$$

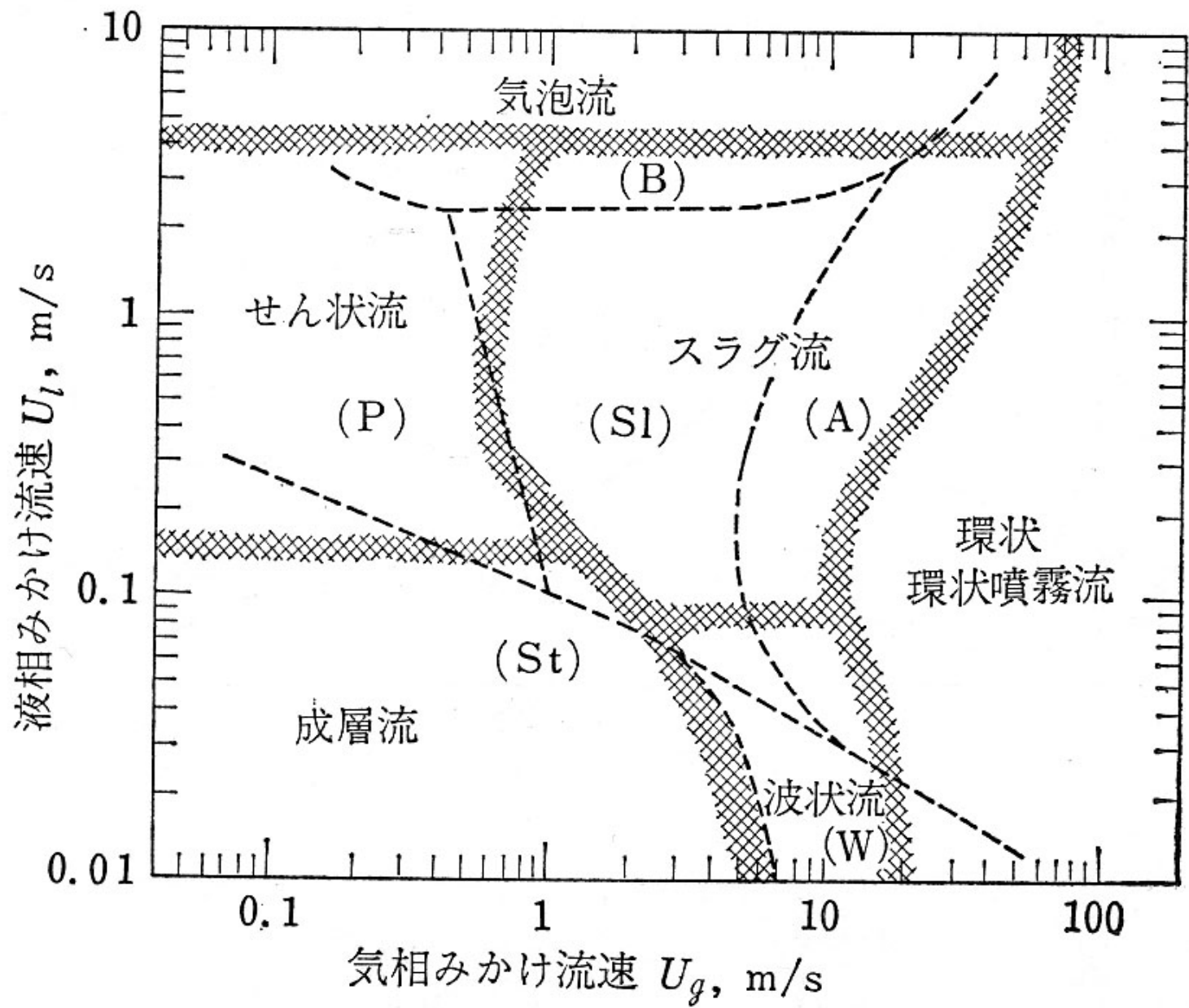
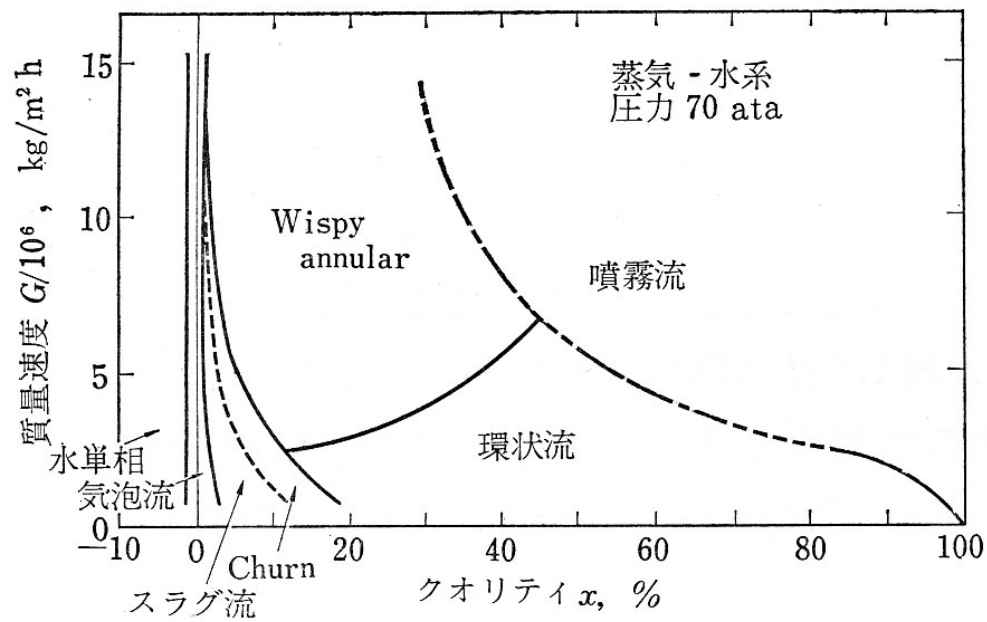
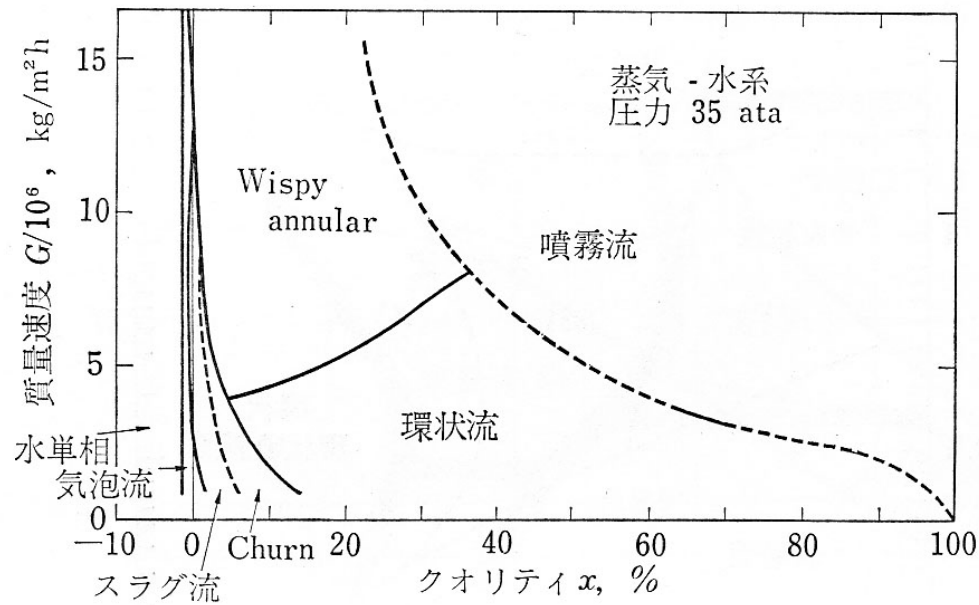


図 1.5 MANDHANE らの流動様式線図



## Wispy Annular

環状噴霧流の気相中に多量の液滴、液塊を伴う流れ

図 1.6 垂直上昇加熱管内の流動様式 (BENNETT ら)

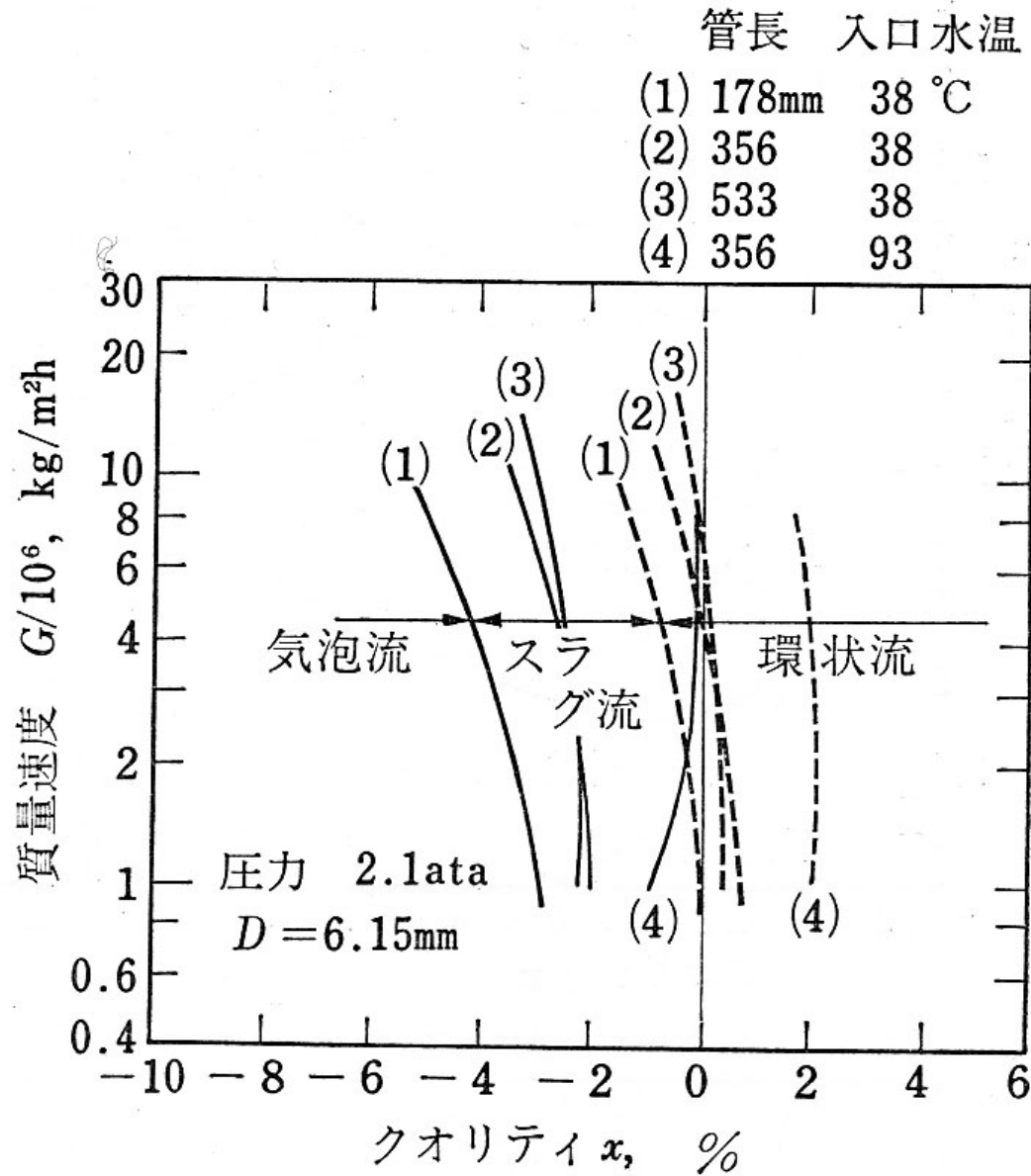


図 1.7 水平加熱管内の流動様式 (BERGLES ら)

# 熱平衡クオリティについて

図1.7ではクオリティーが負の値の領域がある  
蒸気、水のエンタルピー $H_g$ (J/Kg)、 $H_l$ (J/Kg)

蒸気 - 水二相流の全体のエンタルピー $H$

$$HW = H_g W_g + H_l W_l, = H_{in} W + LP_h q_w$$

$H_{in}$  入口エンタルピー、 $L$ 流路長さ、 $P_h$ 流路外周長さ、  
 $q_w$ 熱流束

$$H = (H_g W_g + H_l W_l) / W = H_g x + H_l (1-x)$$

蒸気と液体が熱平衡状態にあれば蒸発潜熱

$$H_{lg} (=H_g - H_s) \text{を用いて } x = (H - H_l) / H_{lg}$$

この式で定義されるクオリティーを熱平衡クオリティーとよぶ。沸点以下の水単相流では負となる。

実際には熱的に非平衡となり気泡が発生している。

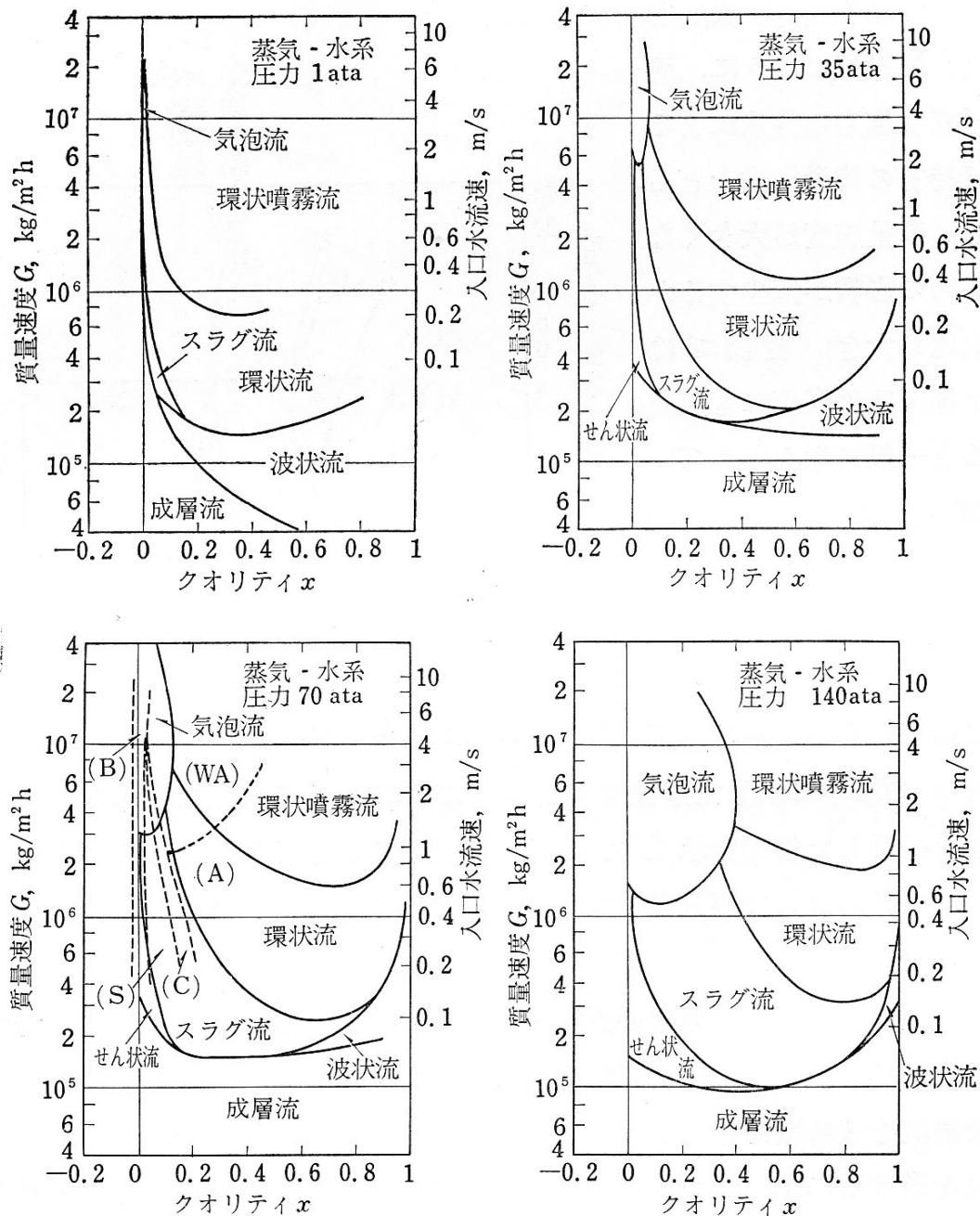


図 1.8 蒸気-水系の流動様式 (Baker 線図による)

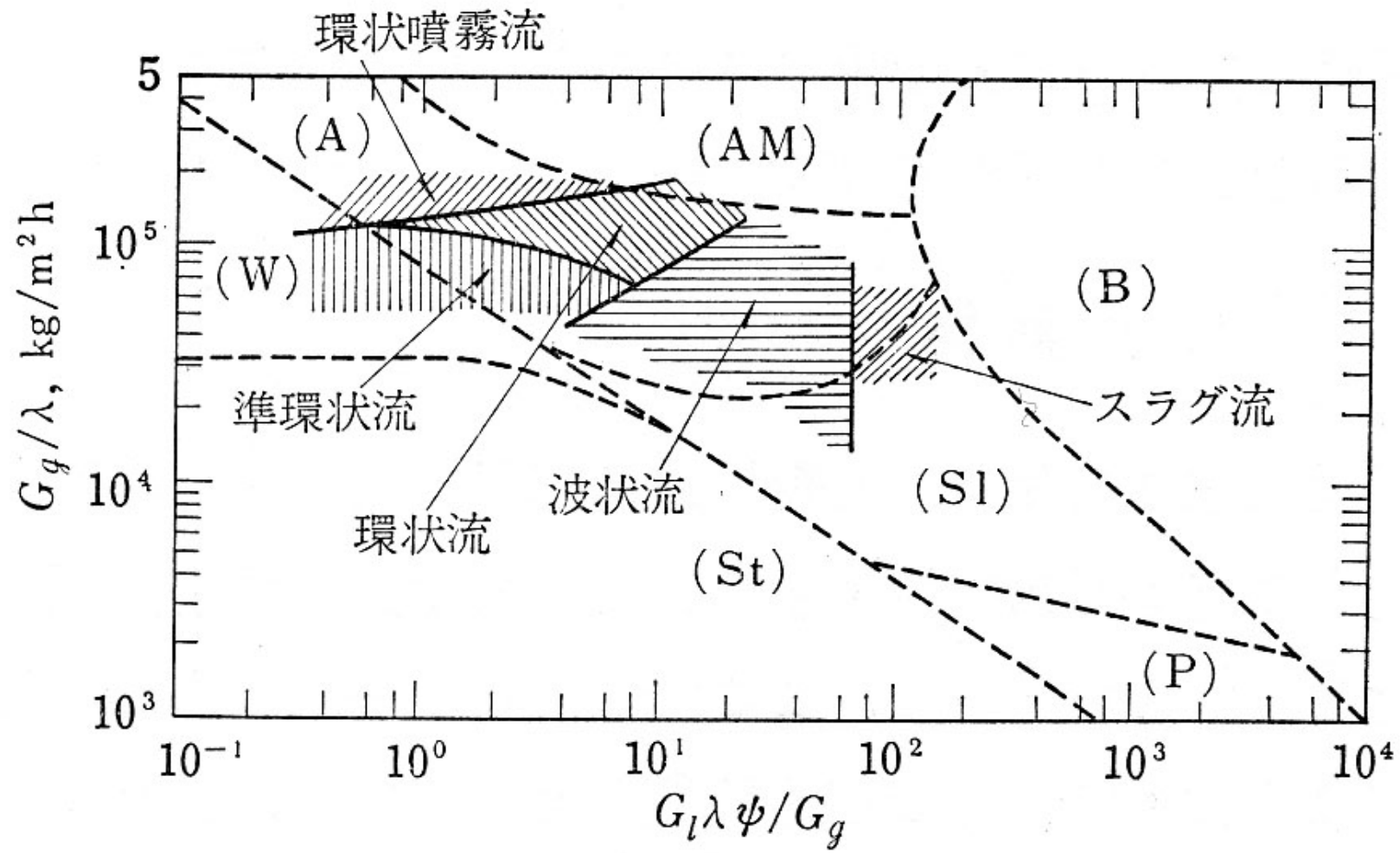


図 1.9 水平蒸発管内の流動様式 (R-22) (ZAHN)

準環状流: 水平管の環状流で管頂部がぬれていないもの

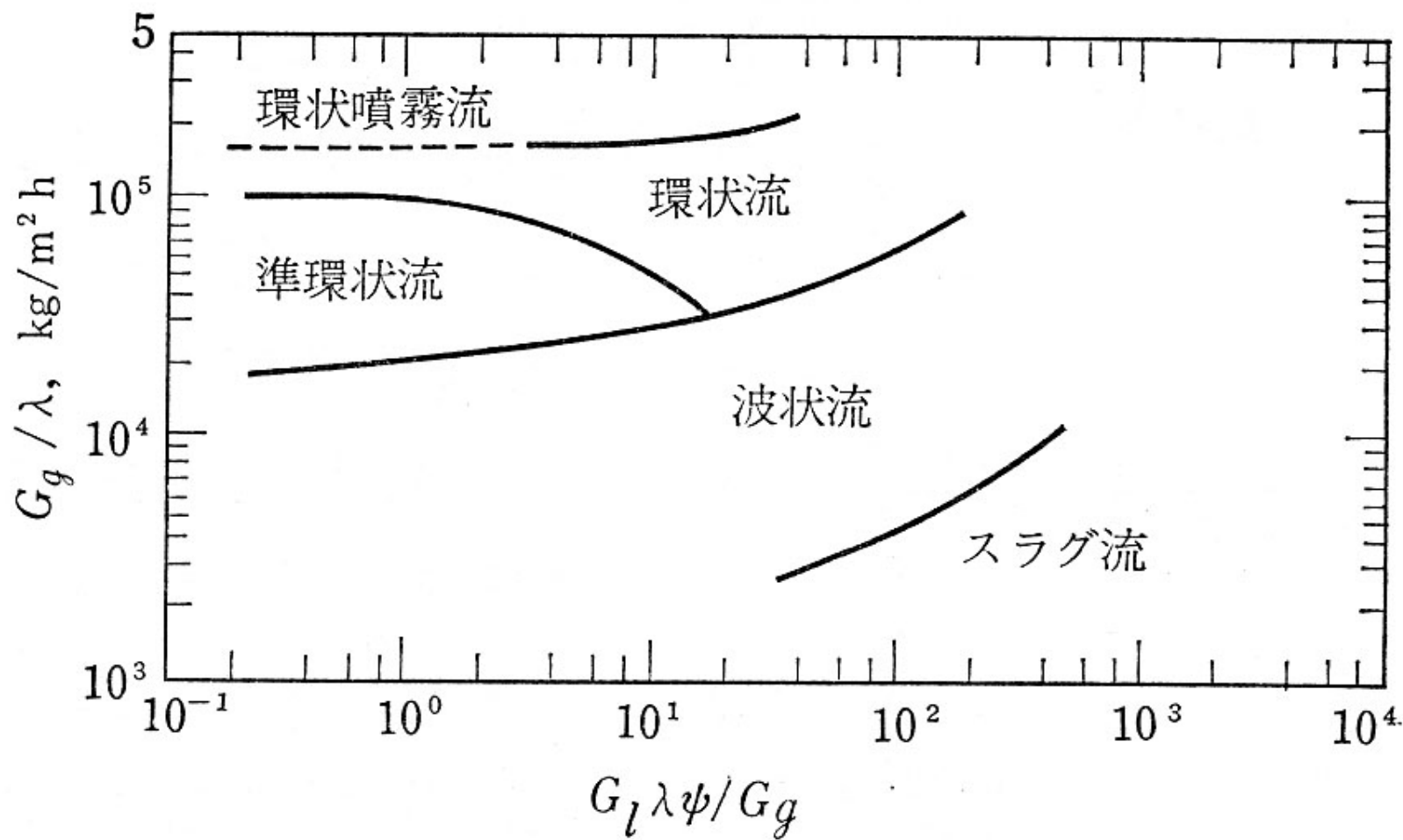


図 1.10 水平凝縮管内の流動様式 (SOLIMAN ら)

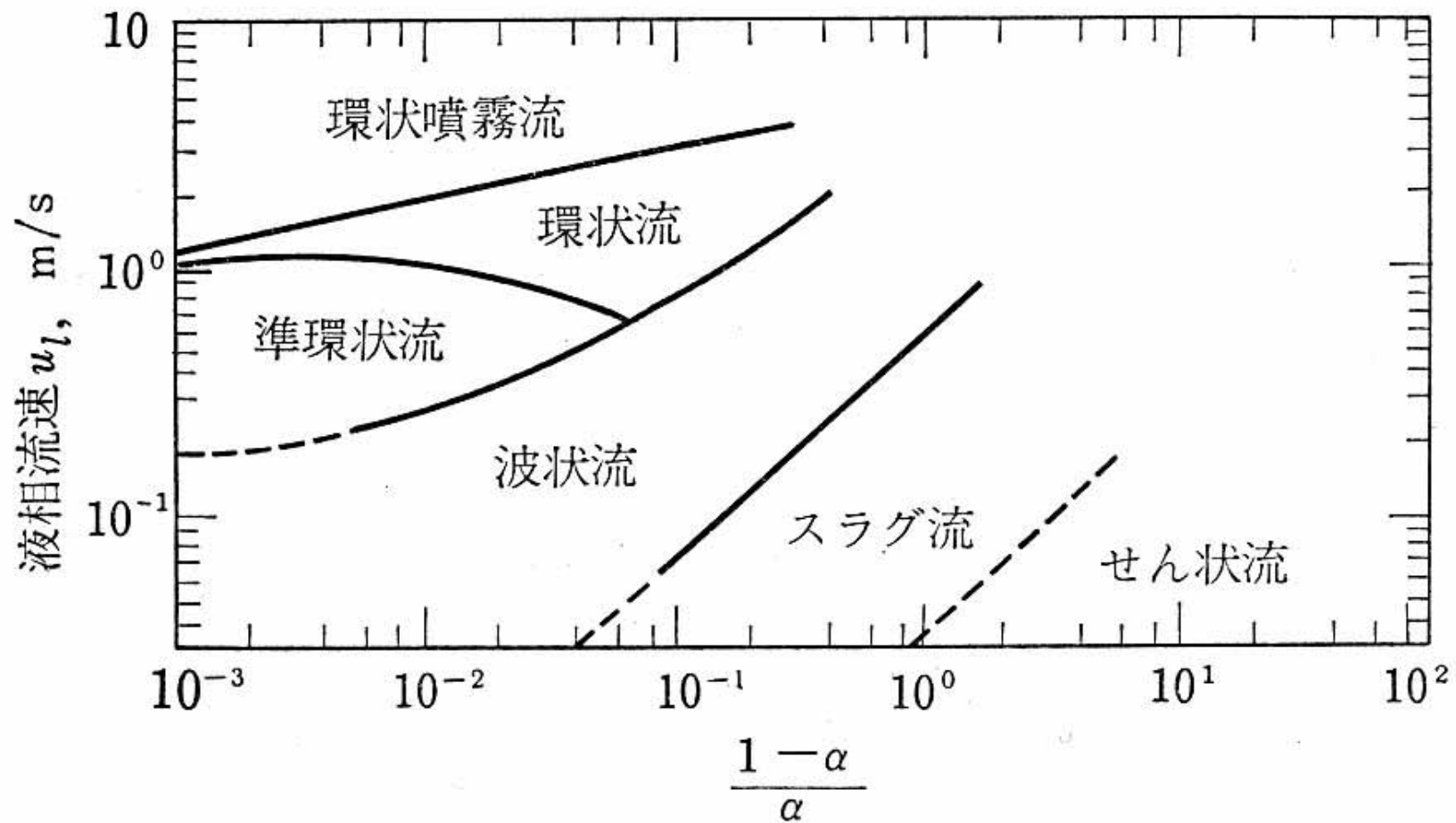


図 1.11 水平凝縮管内の流動様式 (SOLIMAN ら)

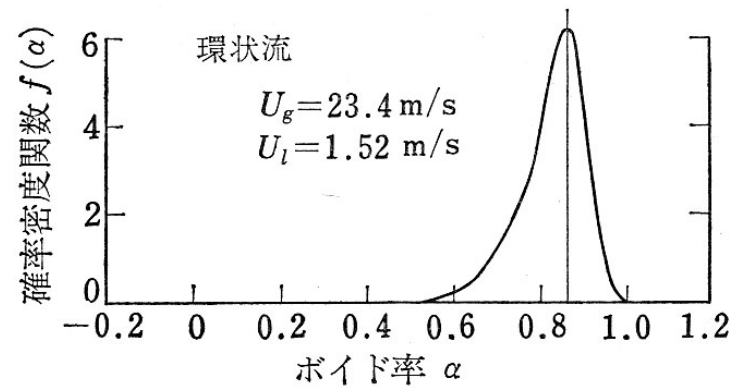
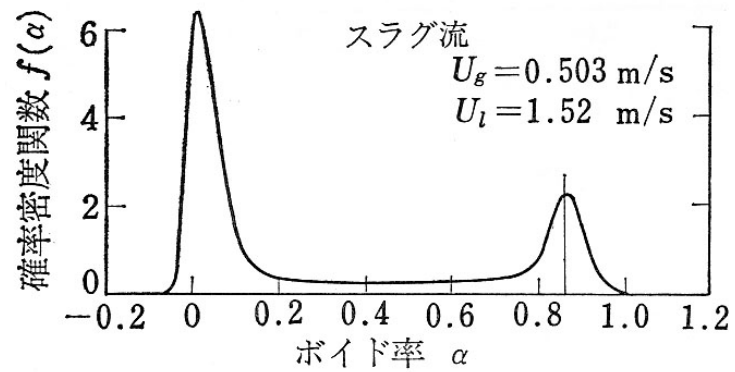
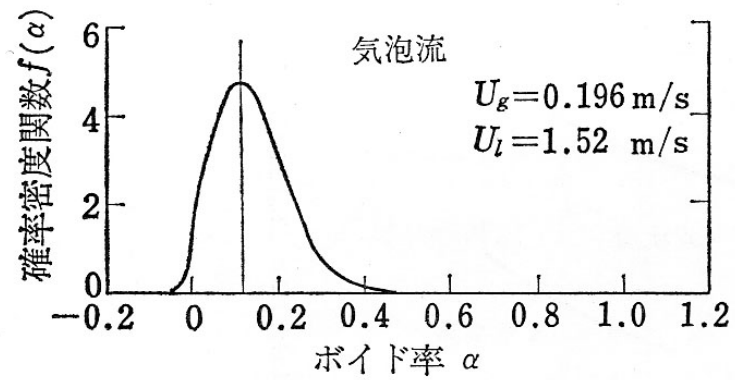


図 1.12 流動様式とボイド率の度数分布 (JONES ら)

# 気液二相流に働く力

圧力差 (摩擦及び静圧)

$$F_p = \frac{\lambda \rho_m U^2}{D} + \rho_m g$$

液中による静圧

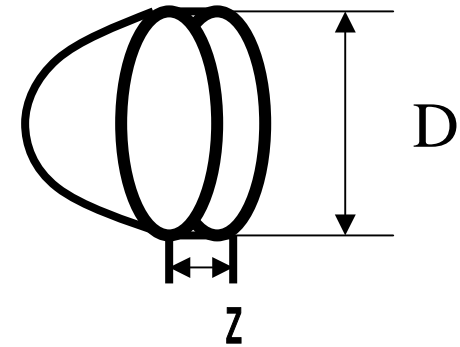
$$F_g = \rho_l g$$

表面張力による力

$$F_\sigma = \frac{2\sigma}{D/2} \pi D / \frac{\pi}{4} D^2 = 16 \frac{\sigma}{D^2}$$

# 表面張力による力

- 表面張力  $\frac{2\sigma}{D/2}$



- これが管壁に加わる  $\pi D \Delta z$

- これによる力  $\frac{2\sigma}{D/2} \pi D \Delta z$

- これを単位体積あたりの力に換算

$$\frac{2\sigma}{D/2} \pi D \Delta z / \left( \frac{\pi}{4} D^2 \Delta z \right) = \frac{2\sigma}{D/2} \pi D / \left( \frac{\pi}{4} D^2 \right)$$

# 重要な無次元数

フラウド数  $Fr$

$$Fr = \frac{U^2}{gD}$$

ウェーバー数  $We$

$$We = \frac{\rho U^2 D}{\sigma}$$

重力支配

$$F_g > F_p, \quad F_g > F_\sigma$$

$$Fr < \frac{2}{\lambda} \left( \frac{\rho_l}{\rho_m} - 1 \right), \quad (1.16) \quad \frac{We}{Fr} > 16 \left( \frac{\rho_m}{\rho_l} \right)$$

環状流と環状噴霧流の限界

# 重力支配の流れ

液流による重力 $F_g >$  摩擦力 $F_f$

スラグ流の存在限界

$$F_f = \frac{\lambda \rho_1 U^2}{D \cdot 2}$$

$$F_g > F_f$$

$$Fr \leq \frac{2}{\lambda} \quad (1.17)$$

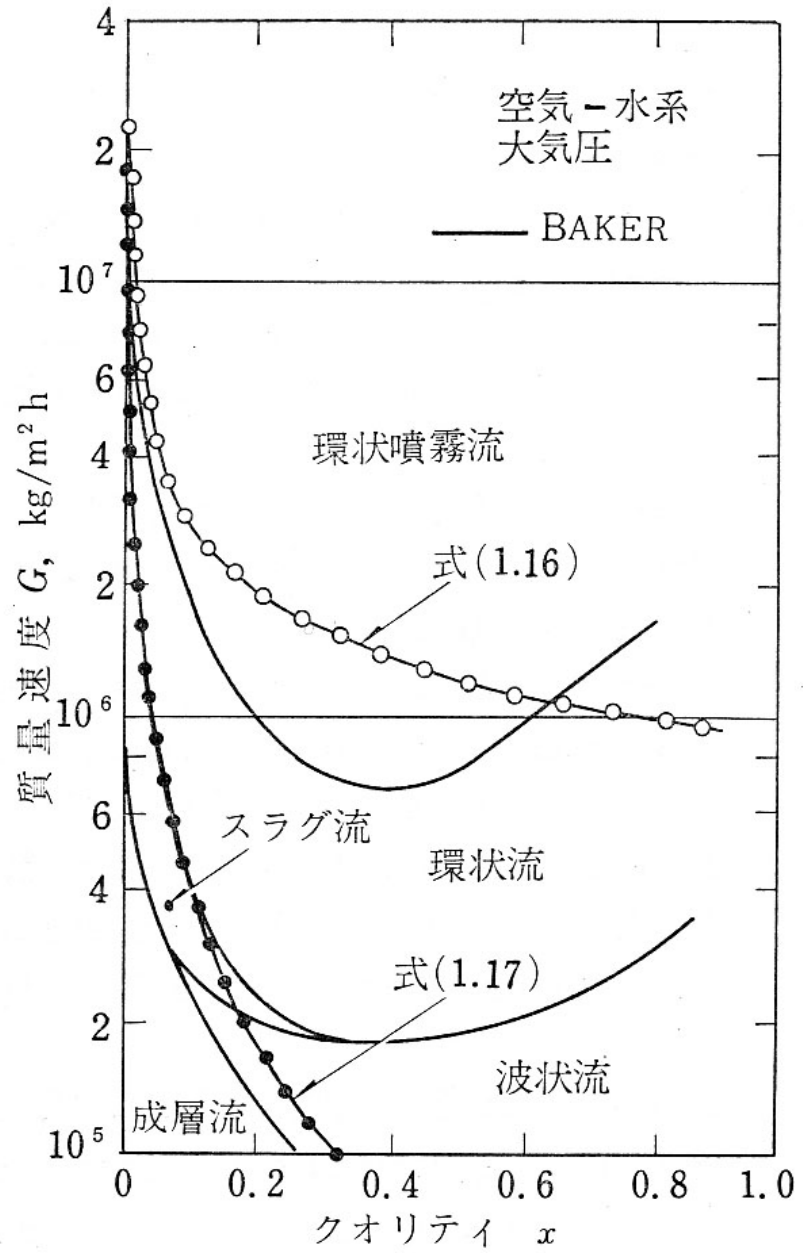


図 1.13 流動様式の遷移 (QUANDT)