

# 第18章 限界熱流束の発生機構

# 限界熱流束

## 沸騰蒸発による除熱の限界

熱流動機器の設計において極めて重要なパラメータ

実験と解析による研究が行われている

気液二相流の流動伝熱現象

## プール沸騰の限界熱流束

核沸騰から膜沸騰への遷移

気液界面の不安定性から説明可能

# 極大熱流束

各沸騰から膜沸騰への遷移

蒸気-水界面の不安定性

$$(u_{gm} + u_{lm})^2 \leq \frac{\rho_l I_l + \rho_g I_g}{\rho_l I_l \cdot \rho_g I_g} \left[ \frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right] \quad u_{gm} + u_{lm} = \left[ \frac{2\pi\sigma}{\lambda} \frac{\rho_l + \rho_g}{\rho_l \rho_g} \right]^{1/2}$$

蒸気膜の波長  $\lambda_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_L - \rho_g)g}}$

蒸気柱の直径  $\lambda_0/2$   $A_g = \pi \left( \frac{\lambda_0}{2} \right)^2$   $A_g \rho_g u_{gm} = (A - A_g) \rho_L u_{lm}$

Rayleighの不安定性  $\lambda = \pi \frac{\lambda_0}{2}$

$$q_{crit} = \frac{\rho_g u_{gm} A_g H_{fg}}{A} = 0.157 \left[ \frac{\sigma(\rho_L - \rho_g)g}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \left[ \frac{\rho_L}{\rho_l + \rho_g} \right]^{1/2}$$

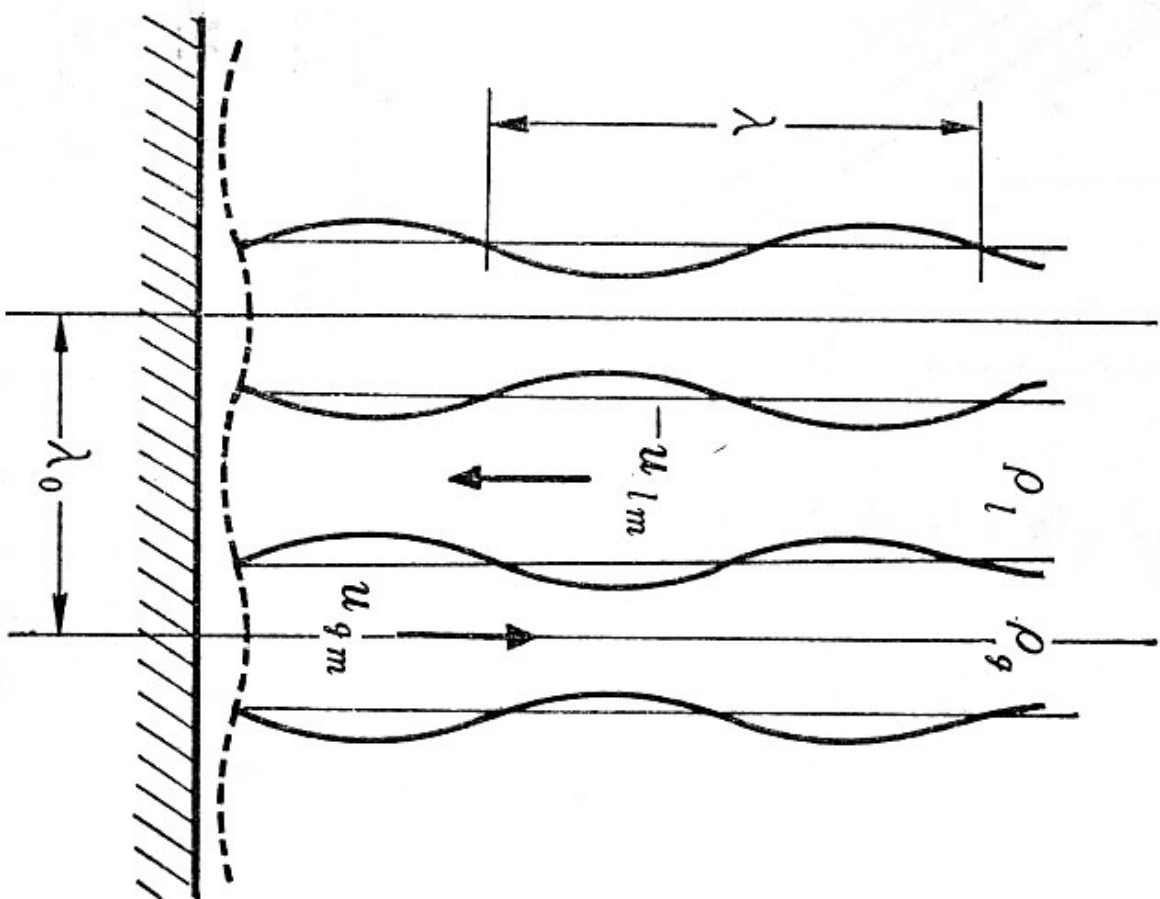


図 5.21 ナール沸騰の遷移

# 強制流動系の限界熱流束

圧力、管径、管長、流速、サブクール度に複雑に依存する

限界熱流束のメカニズムも異なる。

低流速——液膜ドライアウト

高クオリティー、環状流、環状噴霧流

限界熱流束は入口流量にほぼ比例

高流速——DNB（核沸騰から膜沸騰への遷移）

低クオリティー、気泡流スラグ流

限界熱流束は入口流量の0.2～0.4乗程度に比例

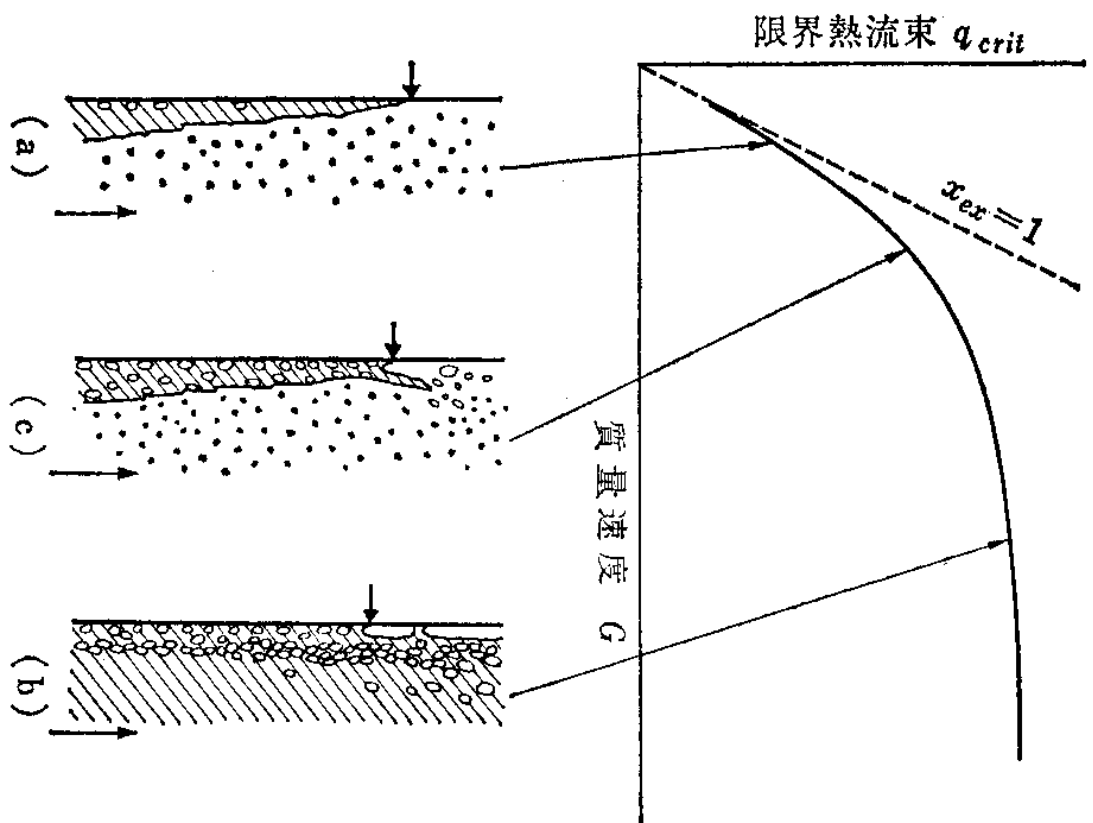


図 18.1 限界熱流束状態の概要

# 低流速でのドライアウト

実験的に液膜が蒸発して、壁面の液膜が消失する点で起きることが確認されている。

もし総て液が蒸発するとすると  $x=1$

$$\frac{q_c}{GH_{fg}} = \frac{1}{4} \frac{D}{L}$$

実際には液膜から液滴が発生するのでドライアウト時にも液滴は残っている  $x < 1$

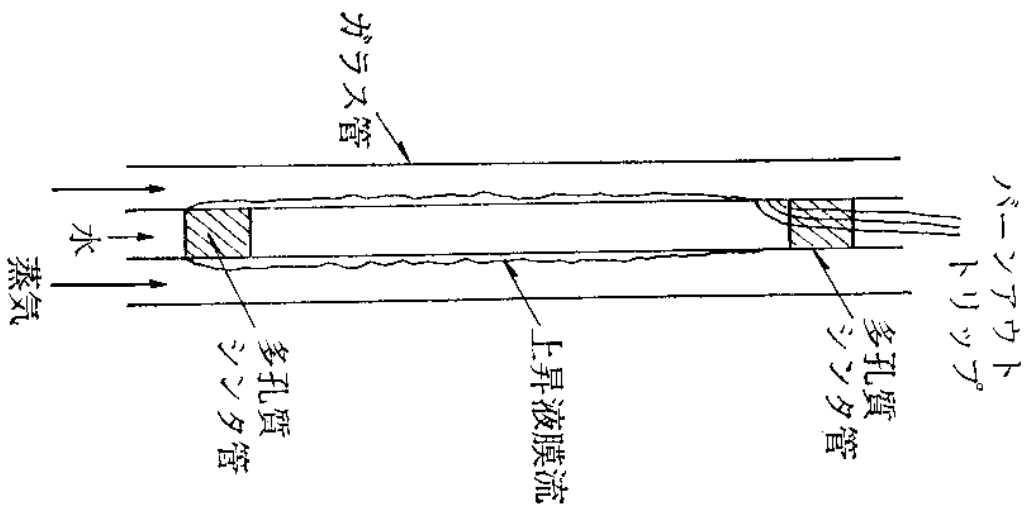


図 18.2 限界熱流束状態の観察  
(HEWITT ら)

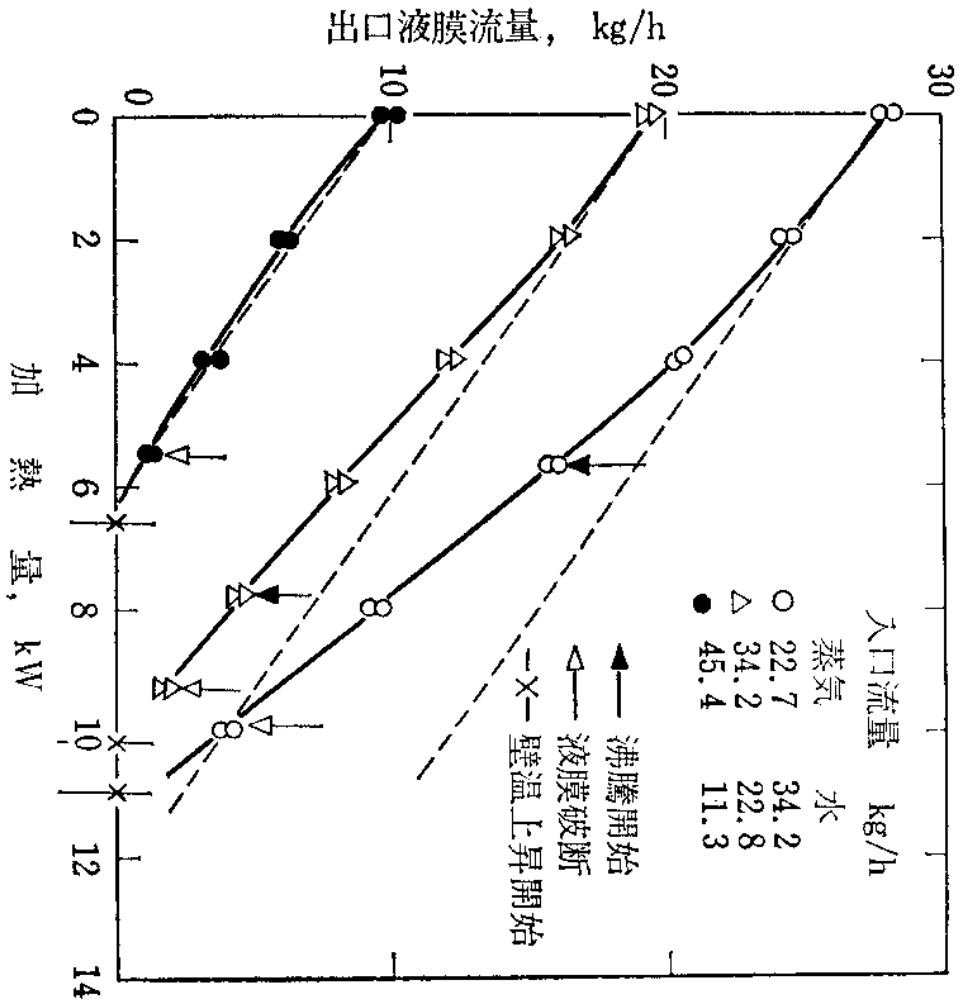


図 18.3 加熱部出口液膜流量と加熱量の関係  
(HEWITT ら)

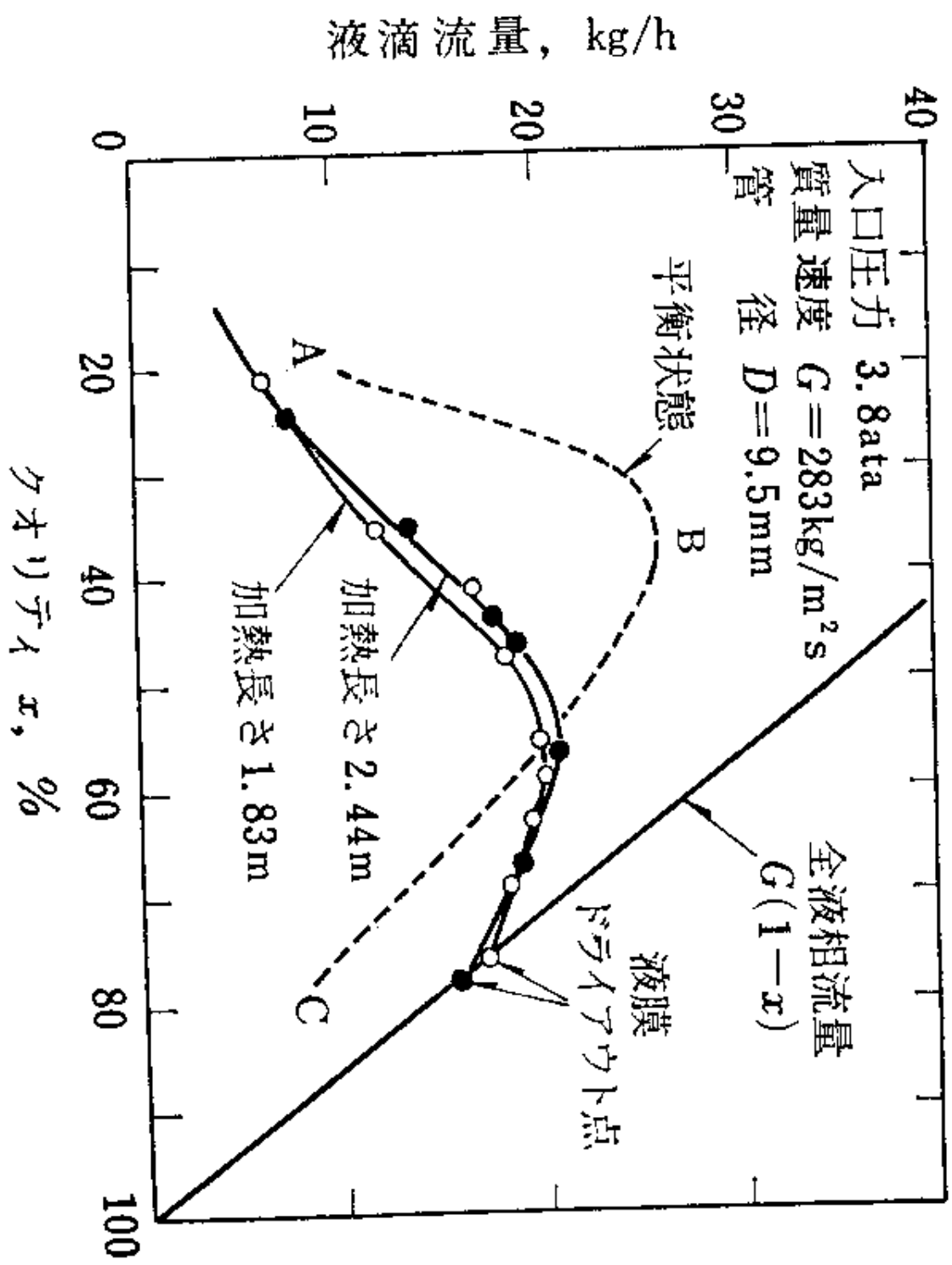


図 19 A 液滴流量の変化 (BENNETT 氏)

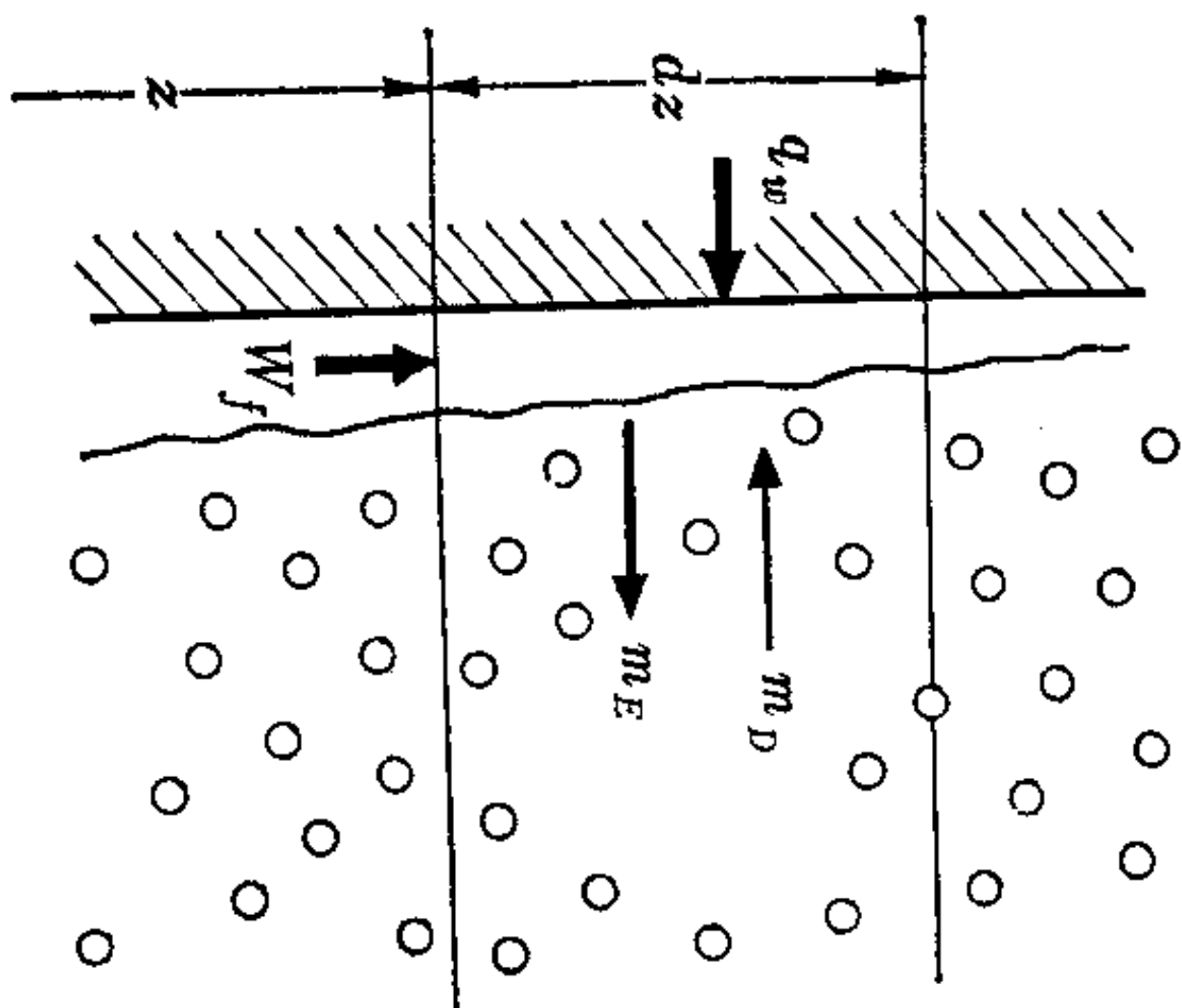


図 18.5 液膜流量の変化

# ドライアウトの予測

液滴の発生、付着のメカニズムがわかれば  
ドライアウトは予測できる

$$\frac{dW_f}{dz} = \pi D \left( m_D - m_E - \frac{q_w}{H_{fg}} \right)$$

$m_D$  : 液滴の液膜への付着率

$m_E$  : 液膜からの液滴発生率

この微分方程式を適当な所期条件の下で解き、流路出口で $W_f=0$ となる熱流束を求めればよい。

# ドライアウトの予測

液滴の液膜への付着  $m_D$  液滴付着係数

$K$ (m/s)と気相中の液滴濃度 $C$ (Kg/m<sup>3</sup>)により与えられる。

$$m_D = KC \quad \begin{array}{ll} K = 0.405 \sigma^{0.915} & \sigma < 0.0383(\text{N/m}) \\ K = 9.48 \times 10^{-4} \sigma^{4.7} & \sigma > 0.00383(\text{N/m}) \end{array}$$

$K$ は0.1m/s～0.01m/s程度の値

$C$ は液滴の質量流量より計算できる

$$W_d = A \alpha_d \rho_L u_d \quad W_g = A \alpha \rho_g u_g \quad E_d = W_d / W_1$$

$$C = \frac{\rho_L \alpha_d}{\alpha_d + \alpha} = \frac{\rho_L W_d / (\rho_L u_d)}{W_d / (\rho_L u_d) + W_g / (\rho_g u_g)} \cong \rho_g \frac{W_d}{W_g} = \rho_g \frac{(1-x)E_d}{x}$$

# ドライアウトの予測

液膜からの液滴発生率  $m_E$

様々な実験相関式があるが平衡状態では液滴付着率と等しくなるとの仮定から

$$m_E = KC_E$$

で与える。 $C_E$ は平衡状態の液滴伝達係数で液膜厚さと、界面せん断力、表面張力の無次元パラメータ $\tau_i y_i / \sigma$ の関数として与えられる。

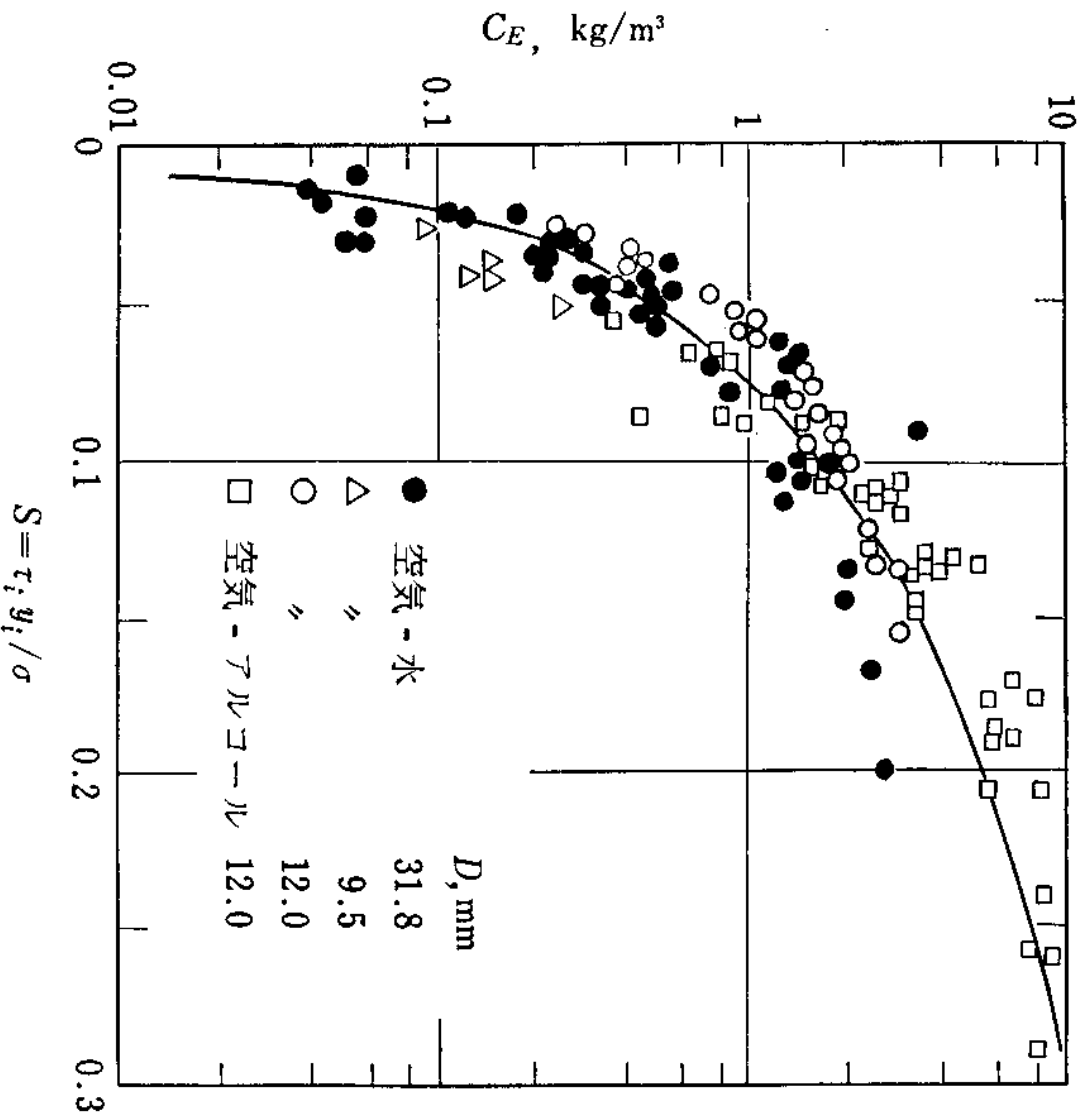


図 8.10 平衡状態の液滴濃度 (HUTCHINSON ら)

# 平衡液滴濃度の近似式

## 実験相関式を近似

$$\begin{aligned} C_E &= 186.349 \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right)^2 + 0.185919 \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right) - 0.0171915 && \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right) \leq 0.047 \\ &= 92.6903 \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right)^2 + 10.5584 \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right) - 0.39705 && 0.047 < \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right) \leq 0.1 \\ &= 51.6429 \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right)^2 + 27.1302 \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right) - 1.65863 && 0.1 < \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right) \leq 0.3 \\ &= 145.8329 \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right)^{2.13707} && \left( \frac{\tau_i y_i}{\sigma} \right) > 0.3 \end{aligned}$$

# ドライアウトの近似式

## 甲藤の式

$$\frac{q_c}{GH_{fg}} = C \left( \frac{\sigma \rho_L}{G^2 L} \right)^{0.043} \frac{D}{L}$$

$$C = 0.25 \quad \frac{L}{D} < 50$$

$$= 0.25 + 0.0009[(L/D) - 50] \quad 50 \leq \frac{L}{D} < 150$$

$$= 0.34 \quad \frac{L}{D} \geq 150$$

## 完全蒸発の式

$$\frac{q_c}{GH_{fg}} = \frac{1}{4} \frac{D}{L}$$

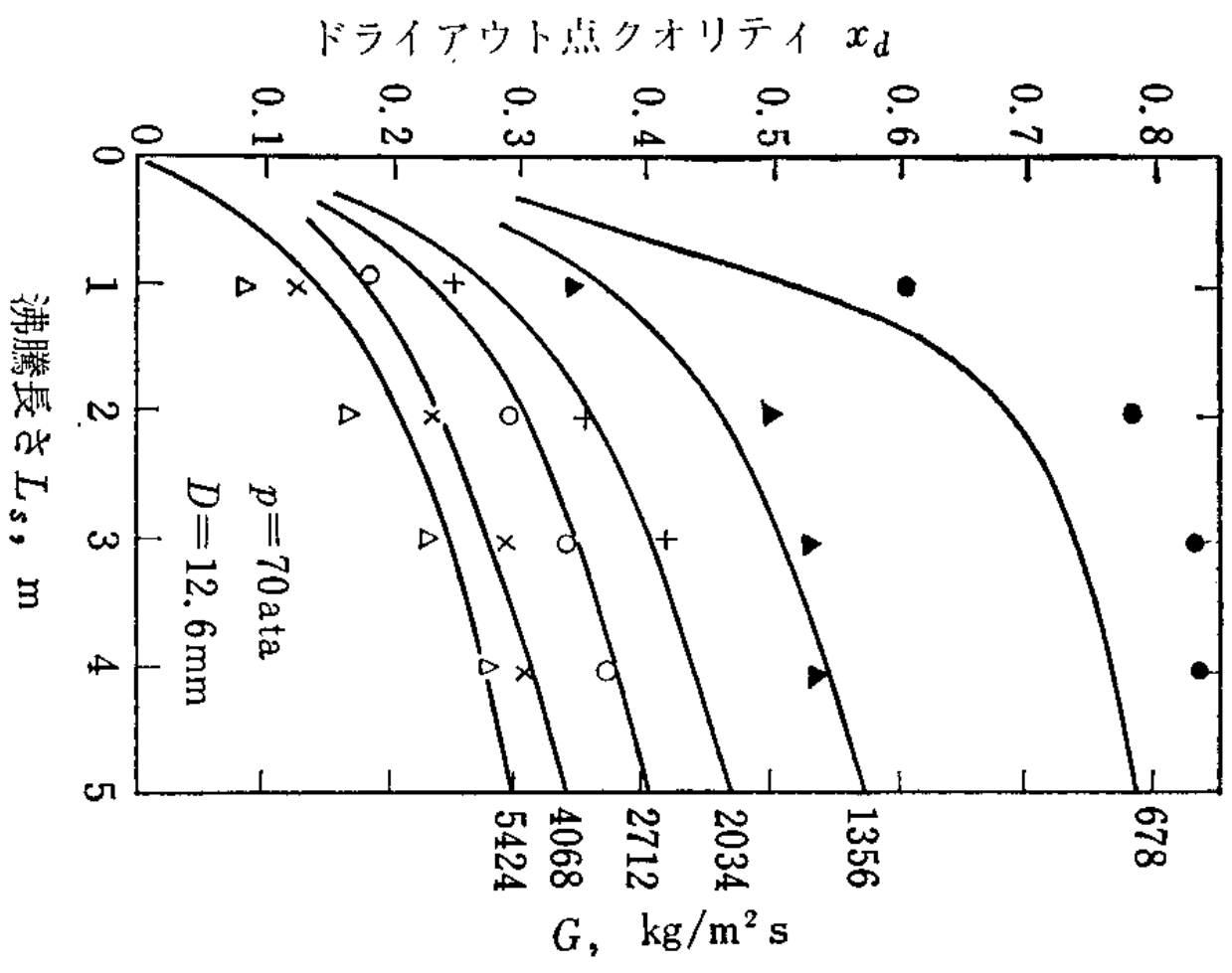


図 18.6 ドライアウト点クオリティと沸騰長さの関係 (WHALLEY ら)

加熱部 R-113  $x_{in} = 0.614$   
 入口  $G = 637 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$   $q_w = 2.52 \times 10^4 \text{ W/m}^2$

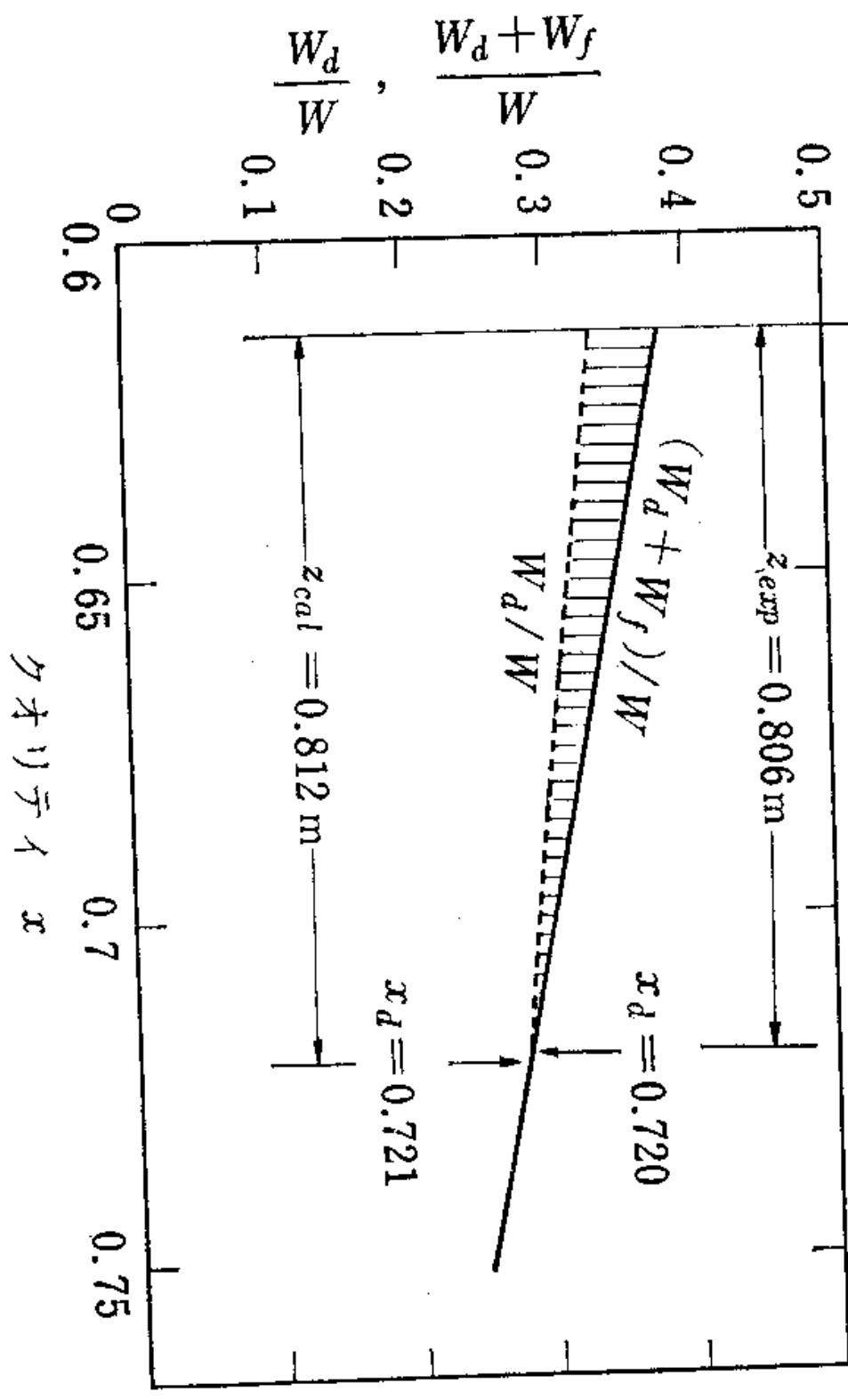


図 18.7 液膜流量変化の計算

... 位置  $z_{0.999}$  は測定による壁温

# DNBの予測

ドライアウトに比べてメカニズムが難しい

完全な予測手法はできていない

物理的なモデルに基づく実験相関式

单相流の流体吹き出しによる境界層の剥離

沸騰系に適用

Tongの相関式

# DNBの予測

单相流の流体吹き出しによる境界層の剥離

$$(\rho_{inj} u_{inj}) = 2f\rho_0 U_0$$

f: 摩擦係数。沸騰を蒸気の吹き出しと考えれば

$$(\rho_g u_g) = C_0 f_{TP} \rho_L U_L \quad q_w = H_{fg} (\rho_g u_g) \quad f_{TP} = Re_L^{-0.6} = \left( \frac{\rho_L U_L D}{\mu_L} \right)^{-0.6}$$

剥離が起こるときに限界熱流束となると仮定

$$\frac{q_c}{\rho_L U_L H_{fg}} = C_1 \left( \frac{\rho_L U_L D}{\mu_L} \right)^{-0.6}$$

実験値より 
$$\frac{q_c}{\rho_L U_L H_{fg}} = (1.76 - 7.43x + 12.22x^2) \left( \frac{\rho_L U_L D}{\mu_L} \right)^{-0.6}$$

# DNBの相関式

## 甲藤の式

$$\frac{q_{c0}}{GH_{fg}} = 0.10 \left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma \rho_L}{G^2 L} \right)^{1/3} \frac{1}{1 + 0.0031L/D}$$

$$q_c = q_{c0} (1 + K \rho_L C_p (T_s - T_{Lin}) / H_{fg})$$

$$K = \frac{5}{6} \frac{0.0124 + D/L}{\left( \frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma \rho_L}{G^2 L} \right)^{1/3}}$$

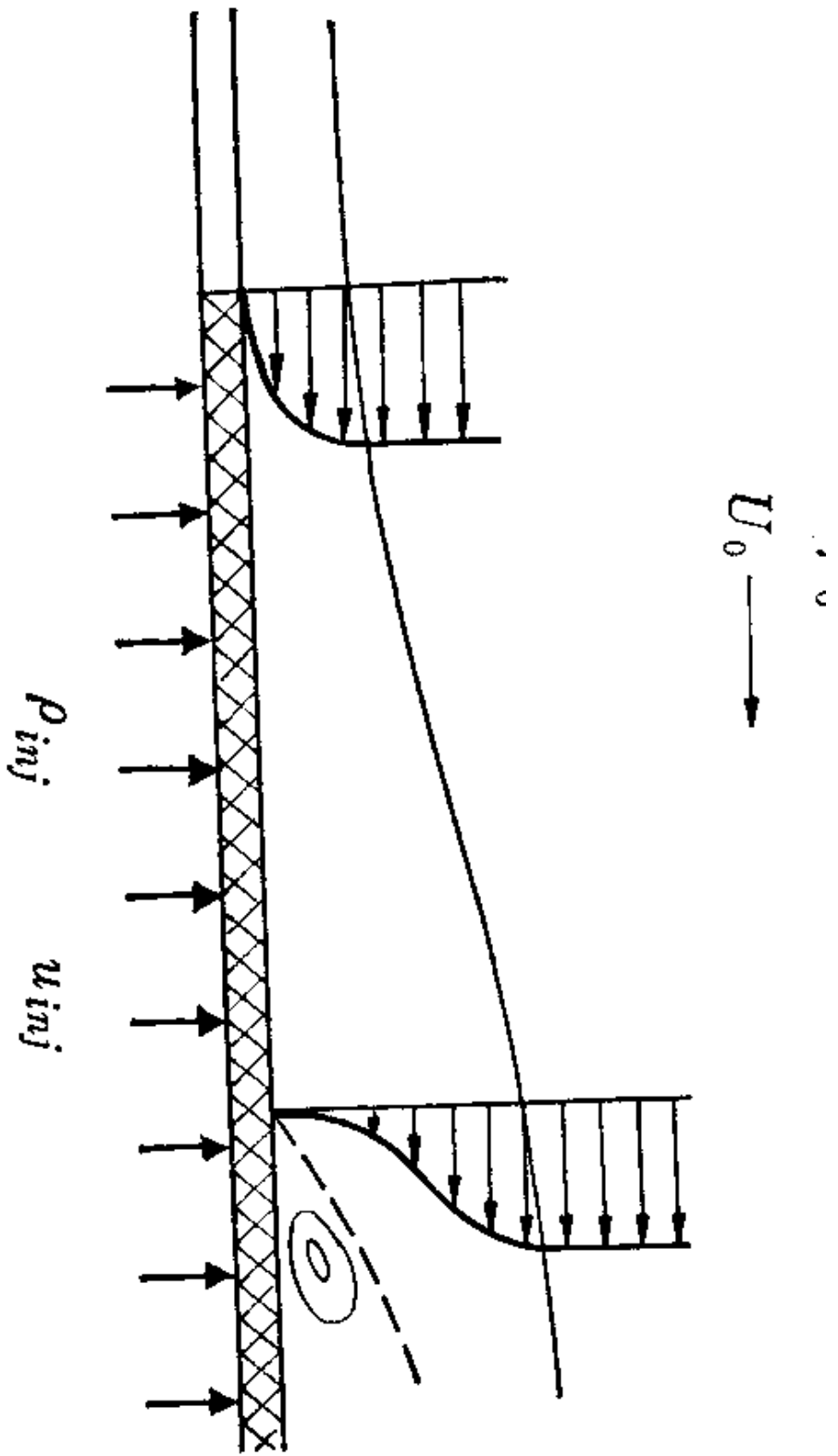


図 18.8 吹出しによる境界層剥離

# 中間領域の限界熱流束

環状噴霧流で起こる

液膜が完全には消失しない

出口のクオリティーは0.5以下

実験的にはDNBによる相関式により予測できる。

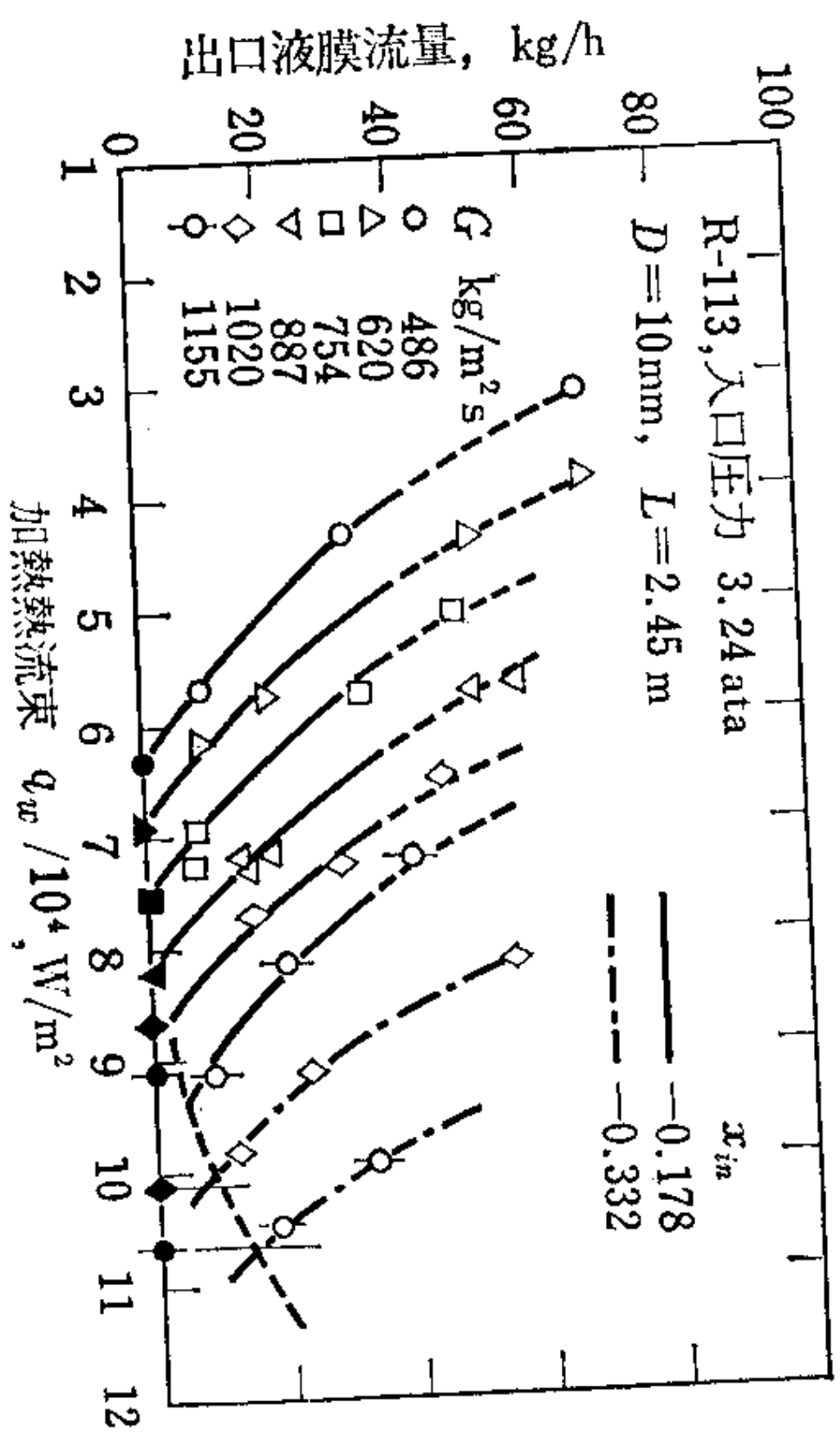


図 18.10 加熱熱流束と出口液膜流量

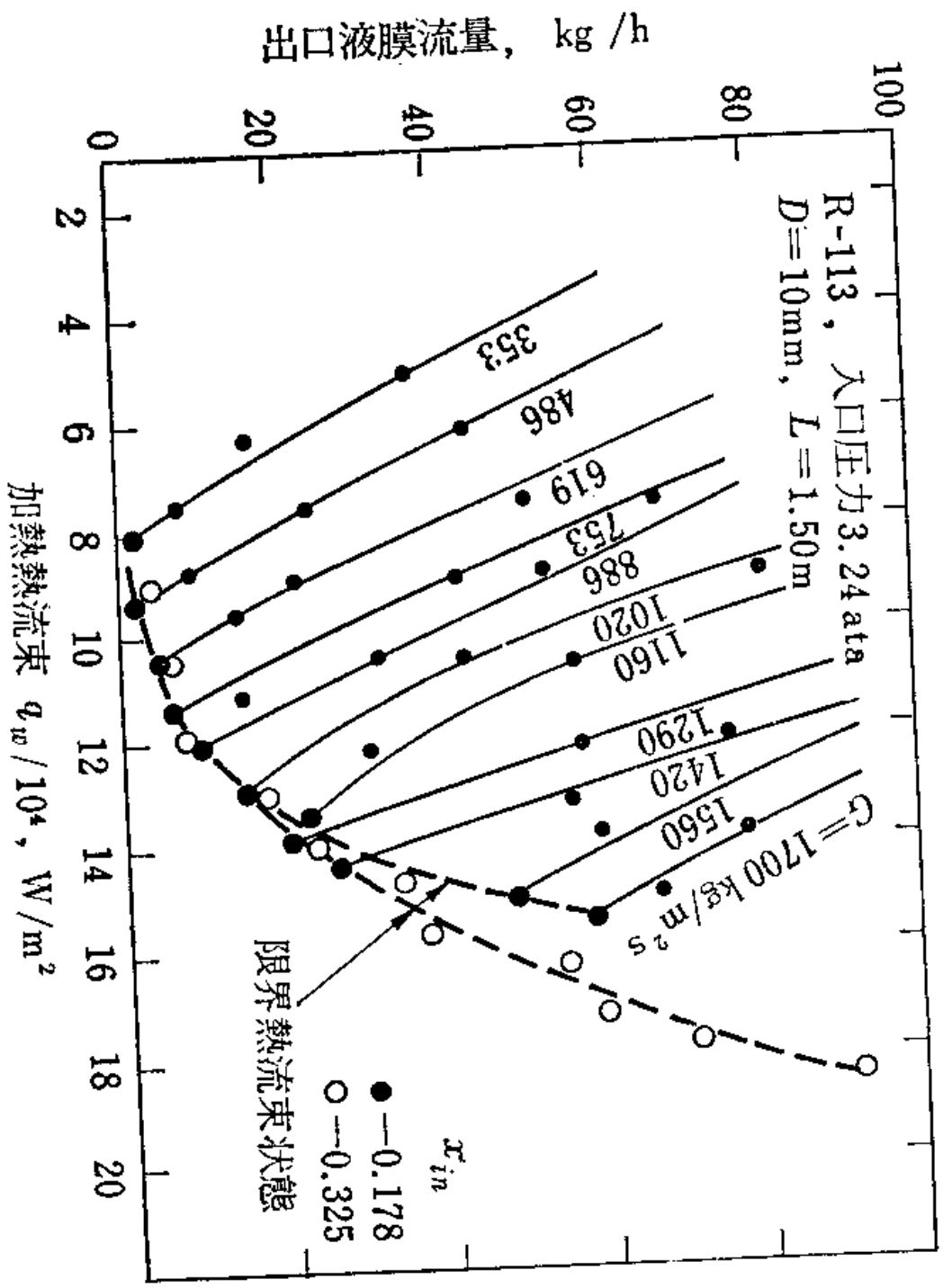


图 18.11 加熱熱流束と出口液膜流量

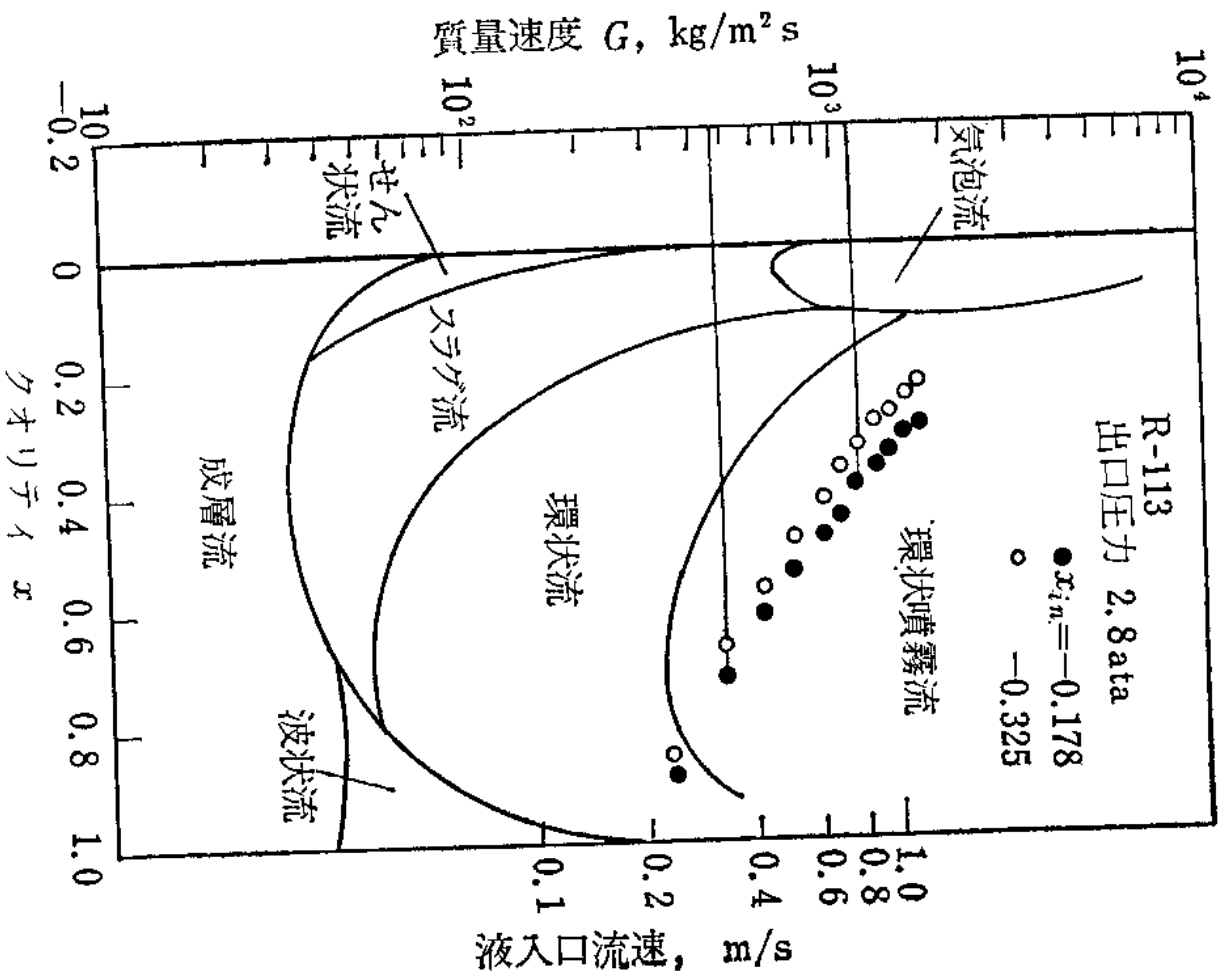


図 18.12 限界熱流束時の出口流動様式

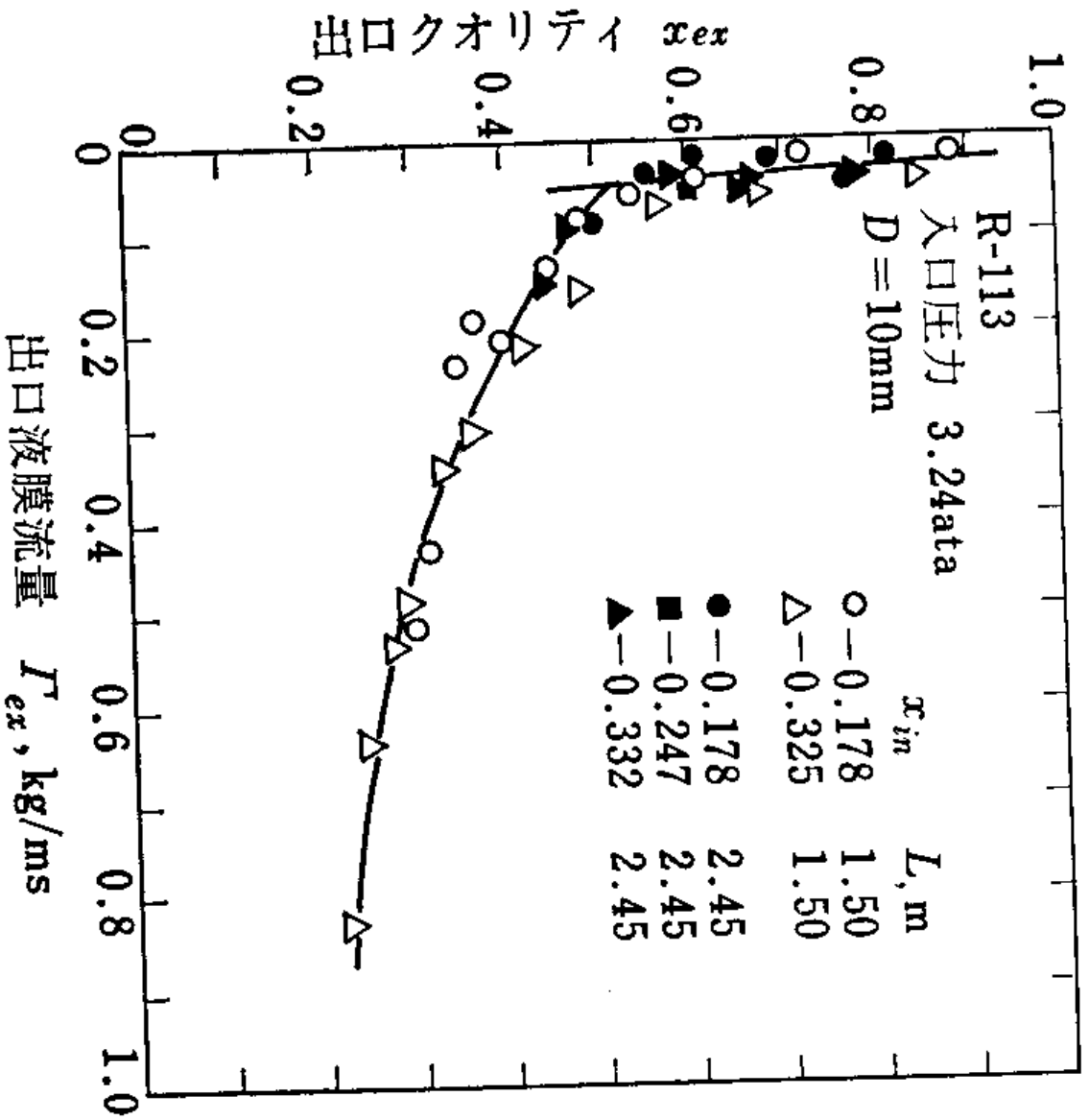


図 18.13 限界熱流束時の出口クオリティと液膜流量

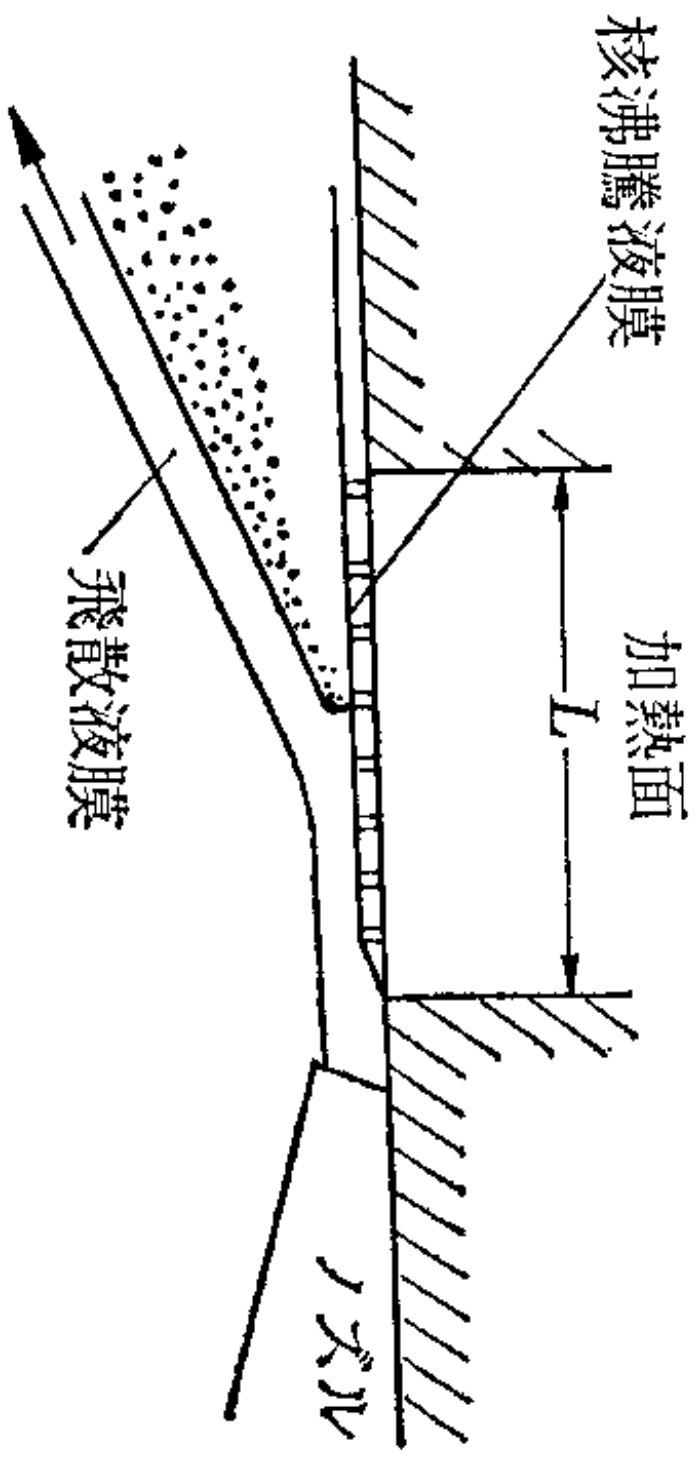
# 強制流動系の限界熱流束

流路条件、入り口条件、を与える

ドライアウトによる熱流束

DNBによる熱流束をそれぞれ求める

求める限界熱流束はその小さい方として与えられる。



核沸騰液膜  
加熱面  
飛散液膜  
ノズル

図 18.14 加熱面からの液膜剥離 (甲藤ら)

流路の主流が加熱面

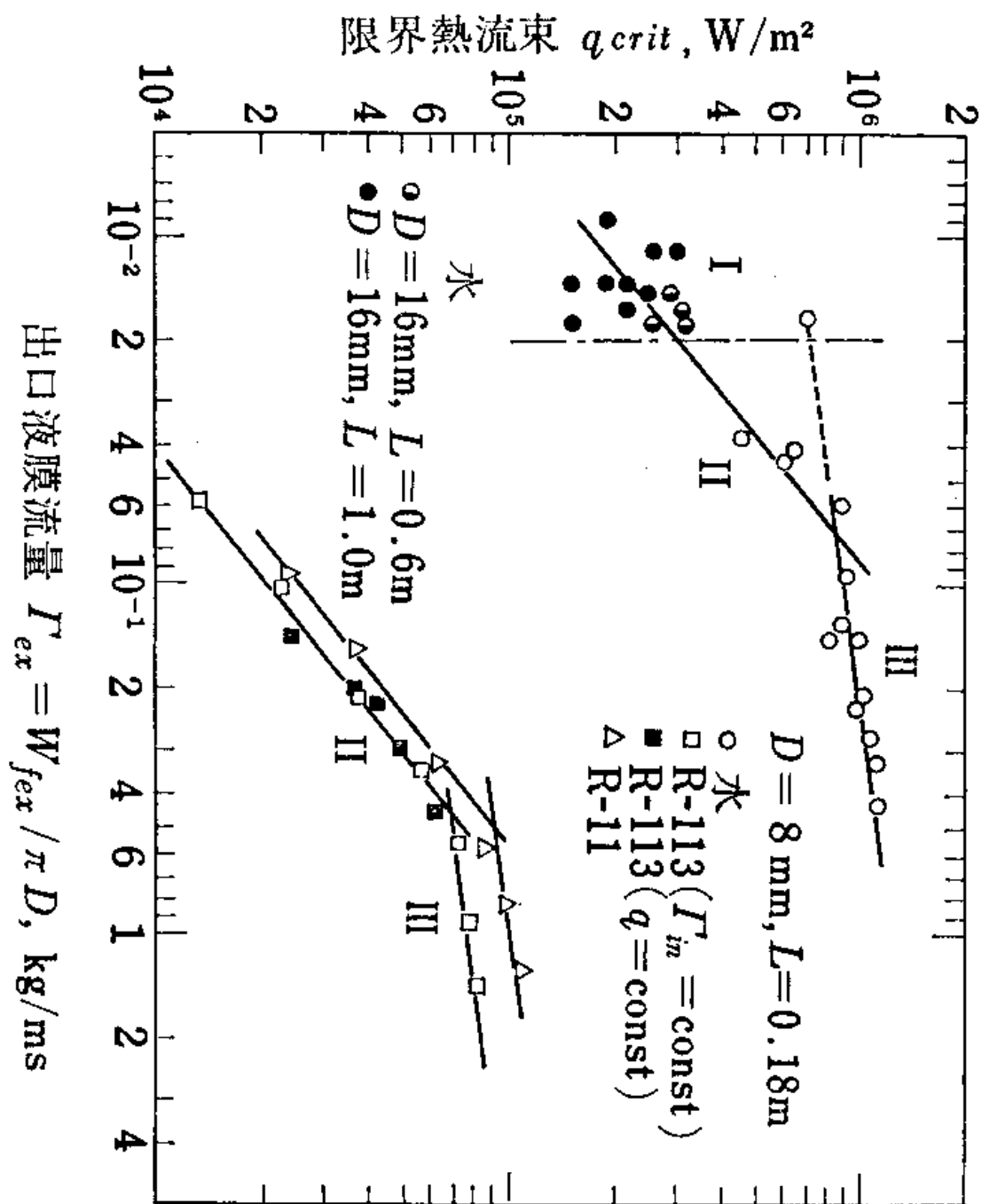


図 18.15 沸騰流下液膜の限界熱流束と出口液膜流量

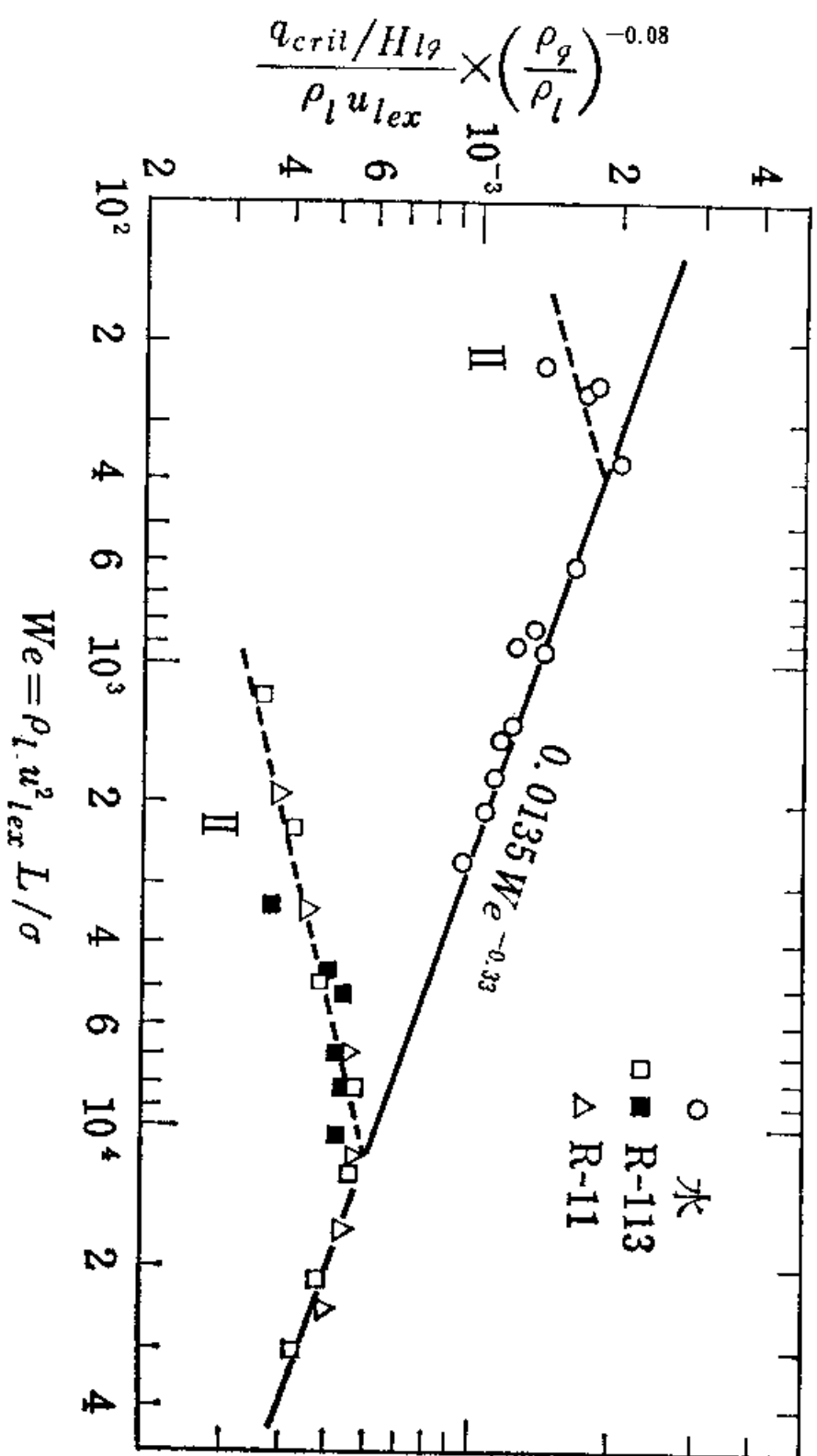


図 18.16 流下液膜の限界熱流束 (第三領域) の整理

$$\Gamma_{ex} = \rho_l y_i u_{lex}$$

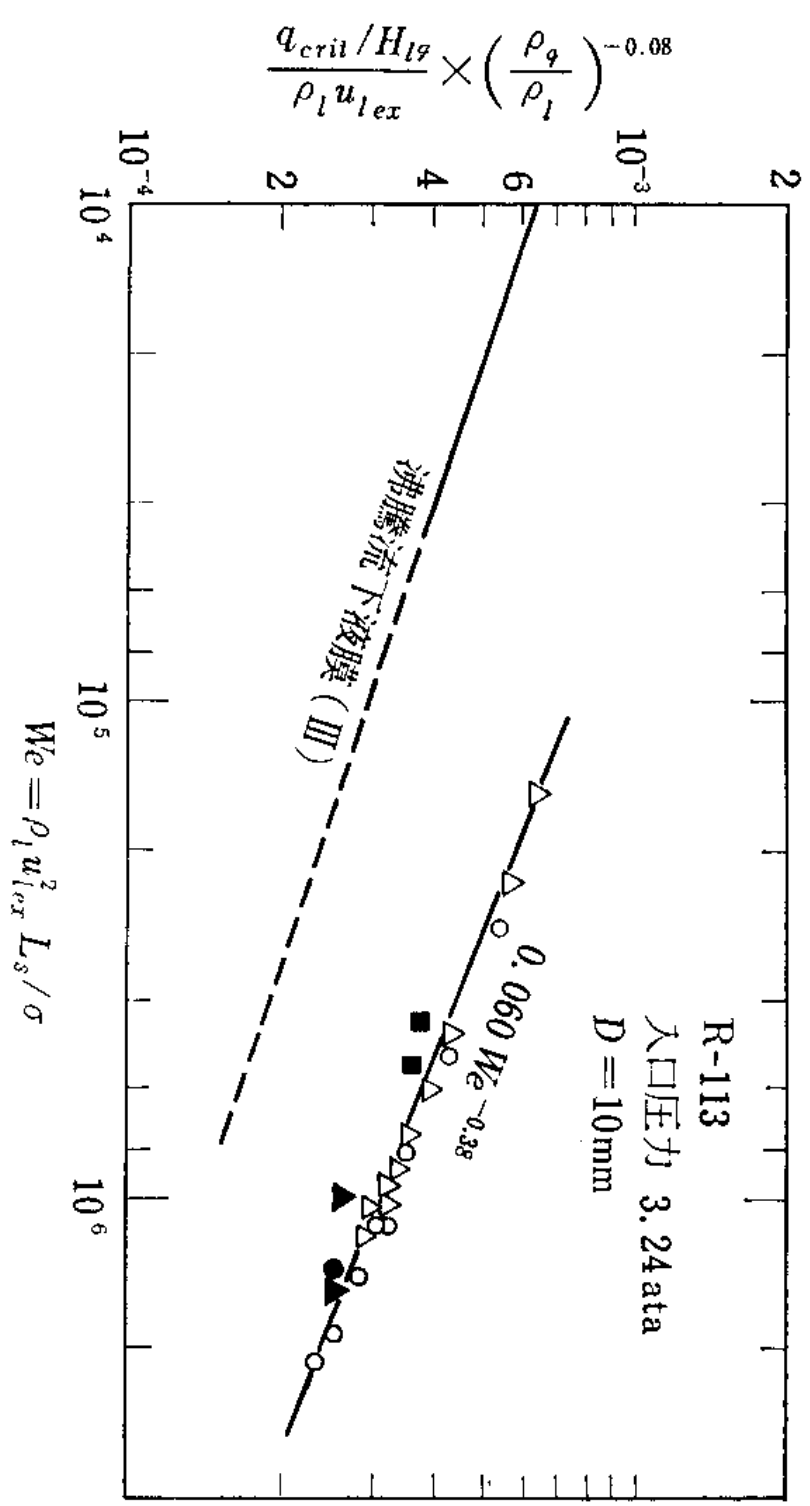


図 18.17 限界熱流束状態の相関