

# 沸騰流動系の限界熱流束

# 年内の講義の予定

平成13年11月27日(火) 4時限

平成13年12月3日(月) 1時限

平成13年12月4日(火) 4時限

平成13年12月11日(火) 休講

平成13年12月18日(火) 4時限

は12月17日(月) 4時限に変更

これに伴い花崎先生の機械加工学応用の講義は12月18日(火) 4時限に変更

# 限界熱流束の実験パラメータ

流動沸騰系の限界熱流束 $q_{\text{crit}}$ に影響を及ぼす  
パラメータ

管路の径と長さ  $D, L$

質量速度と圧力  $G, P$

入口及び出口エンタルピー  $H_{\text{in}}, H_{\text{ex}}$

$$H_{\text{ex}} - H_{\text{in}} = \frac{4q_w L}{DG}$$

より $H_{\text{in}}$ と $H_{\text{ex}}$ のどちらかを与えればよい

$$q_{\text{crit}} = f(G, H_{\text{in}} \text{ または } \Delta H_{\text{sub}}, p, D, L)$$

$$\Delta H_{\text{sub}} = H_{\text{ls}} - H_{\text{in}}$$

# 限界熱流束の実験パラメータ

熱流束一定の場合には限界熱流束は流路出口で起こるので、出口の熱平衡クォリティーを用いてもよい

$$x_{\text{ex}} = \frac{H_{\text{ex}} - H_{\text{ls}}}{H_{\text{fg}}} = (H_{\text{in}} + \frac{4q_w L}{DG} - H_{\text{ls}}) / H_{\text{fg}}$$

$$q_{\text{crit}} = f(G, x_{\text{ex}}, p, D, L)$$

限界熱流束：上流の履歴の影響を受ける

長さLに影響を受ける System Parameters Concept

限界熱流束：局所的な条件で決まり上流の履歴の影響を受けない Local Conditions Concept

$$q_{\text{crit}} = f(G, x_{\text{ex}}, p, D)$$

# 限界熱流束の実験パラメータの影響

## 質量速度

G増加と共にCHFも増加、出口クオリティーは減少

## 入口サブクール度

$\Delta H_{\text{sub}}$  減少と共に直線的に減少 ( $L/D > 75 \sim 100$ )

## 出口クオリティー

$x_{\text{ex}}$  増加と共に直線的に減少、Gと共に増える ( $x_{\text{ex}} < 0$  の領域)

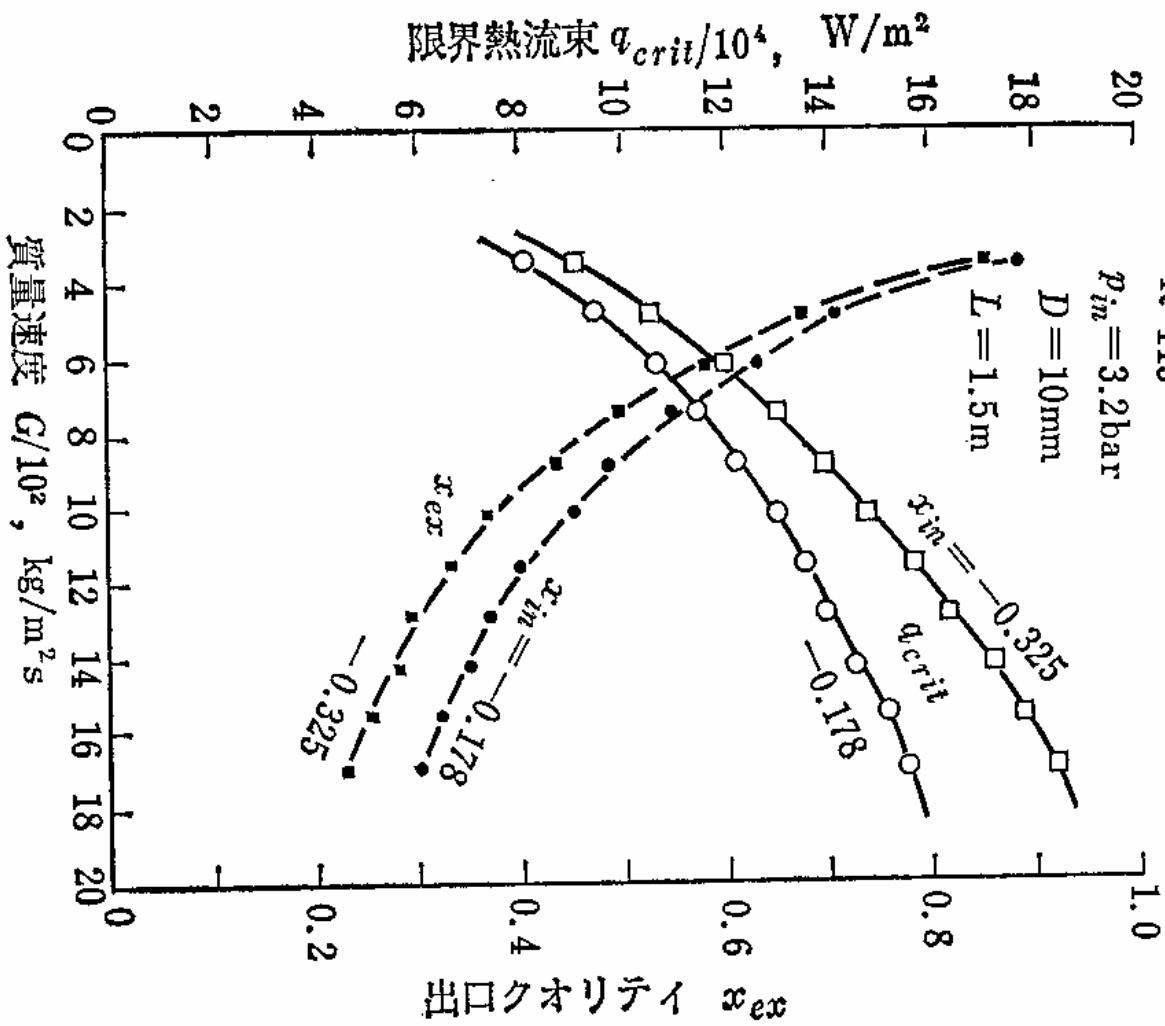
$x_{\text{ex}}$  減少と共に直線的に減少、Gと共に減少 ( $x_{\text{ex}} > 0$  の領域)

R-113

$p_m = 3.2 \text{ bar}$

$D = 10 \text{ mm}$

$L = 1.5 \text{ m}$



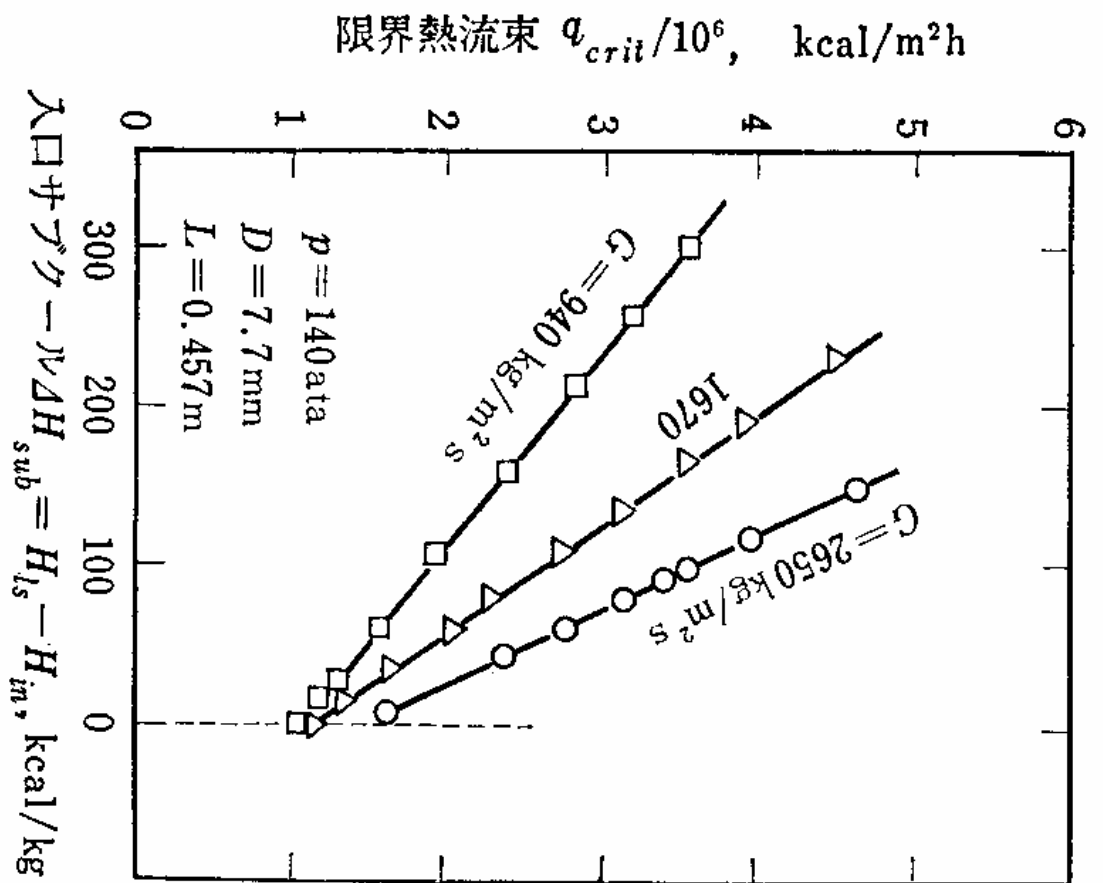
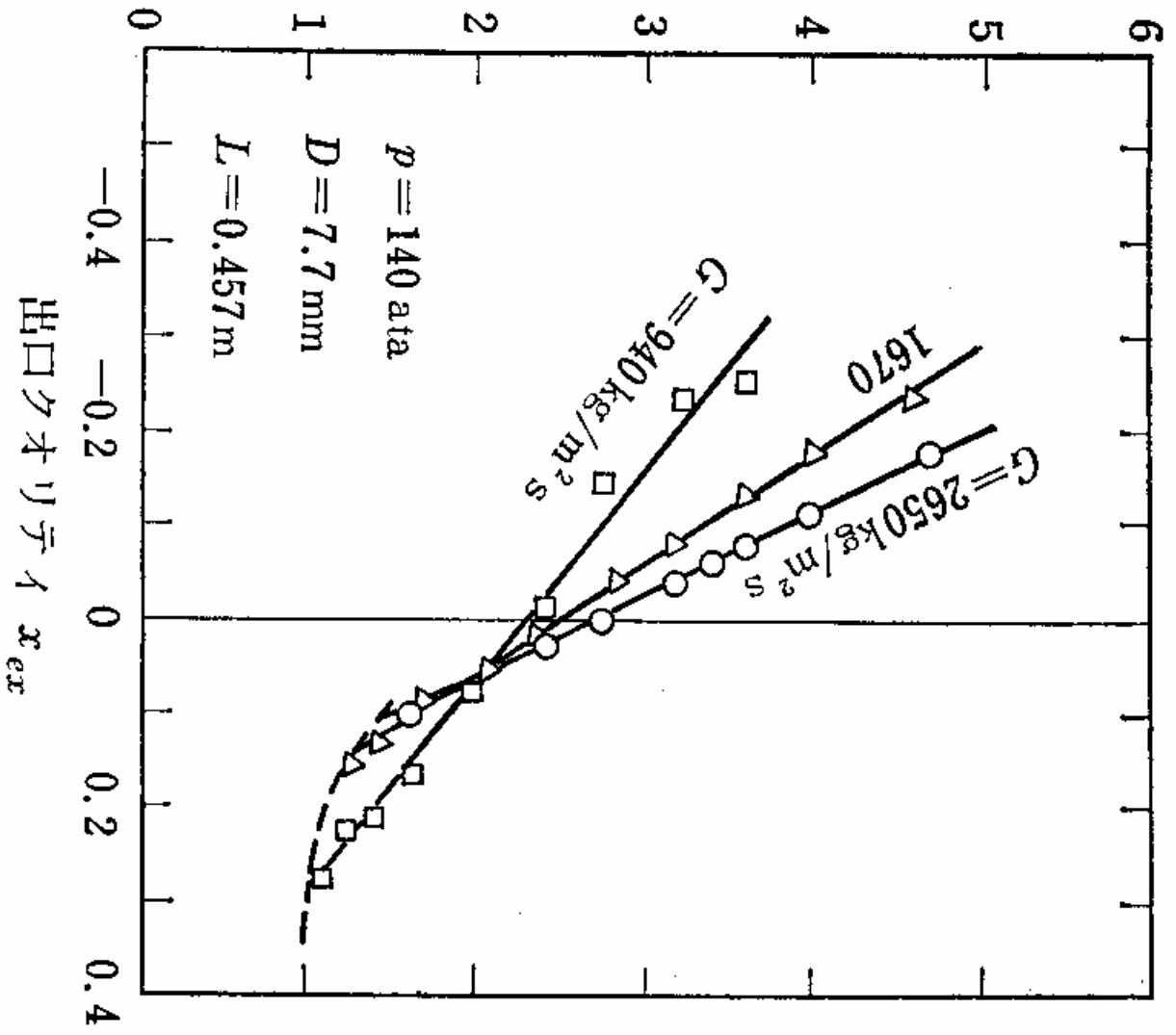


図 17.2 質量速度の影響 ( $q_{crit} - \Delta H_{sub}$ )  
(WEATHERHEAD)

限界熱流束  $q_{crit}/10^6, \text{kcal/m}^2\text{h}$





# 限界熱流束の実験パラメータの影響

## 圧力

15～30barで最大値以後は緩やかに減少

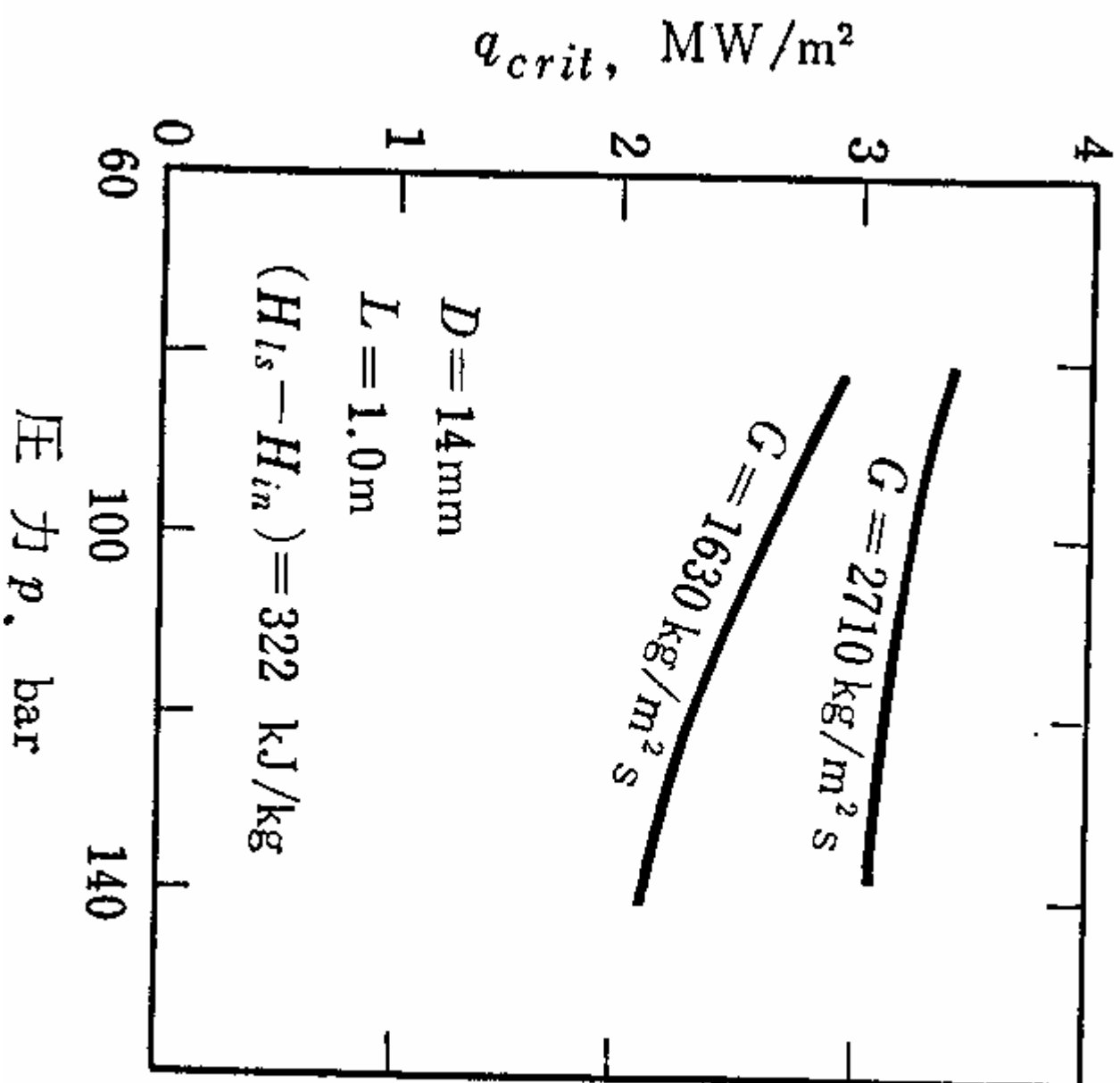
## 管長

管長の増加と共に減少

管長の長いとき: 入口サブクール度と共に直線的に減少

管長の短いとき: 入口サブクール度と共に非直線的に減少

$L/D > 100$ ではLocal Conditions Concept成立



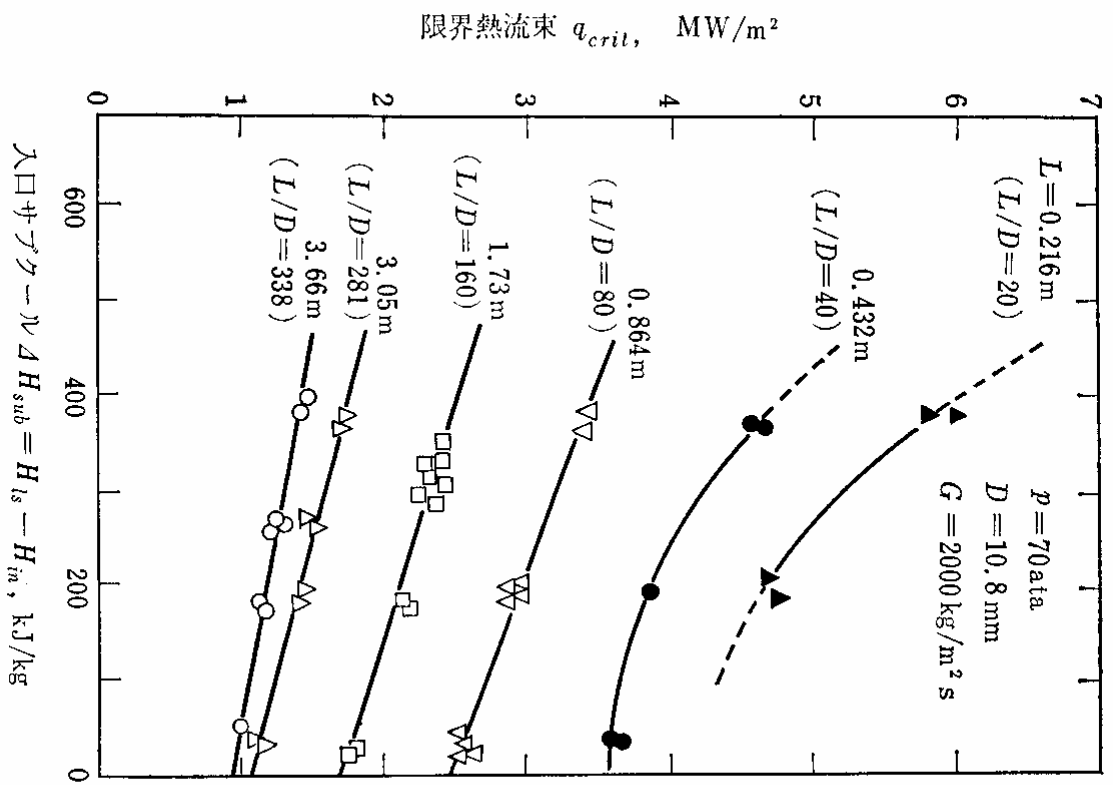


図 17.5 管長の影響 ( $q_{crit} - \Delta H_{sub}$ ), (LEE ら)

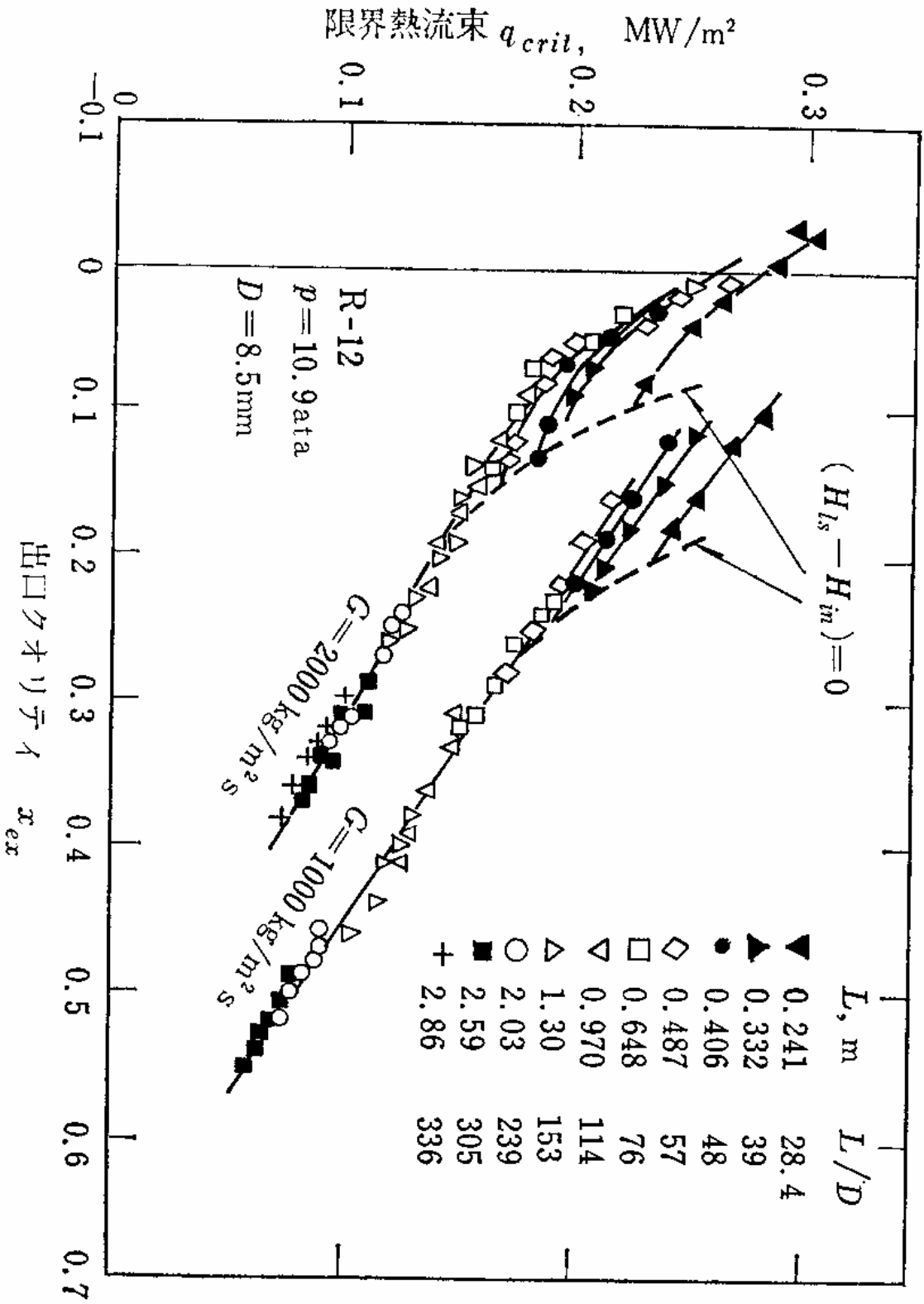


図 17.6 管長の影響 ( $q_{crit}-x_{ex}$ ), (STEVENS 5)

# MacBethの相関

Local Conditions Conceptに基づく最初の相

関式

$$q_{\text{crit}} = f_1(G, p, D) - f_2(G, p, D)x_{\text{ex}}$$

の形で与える。

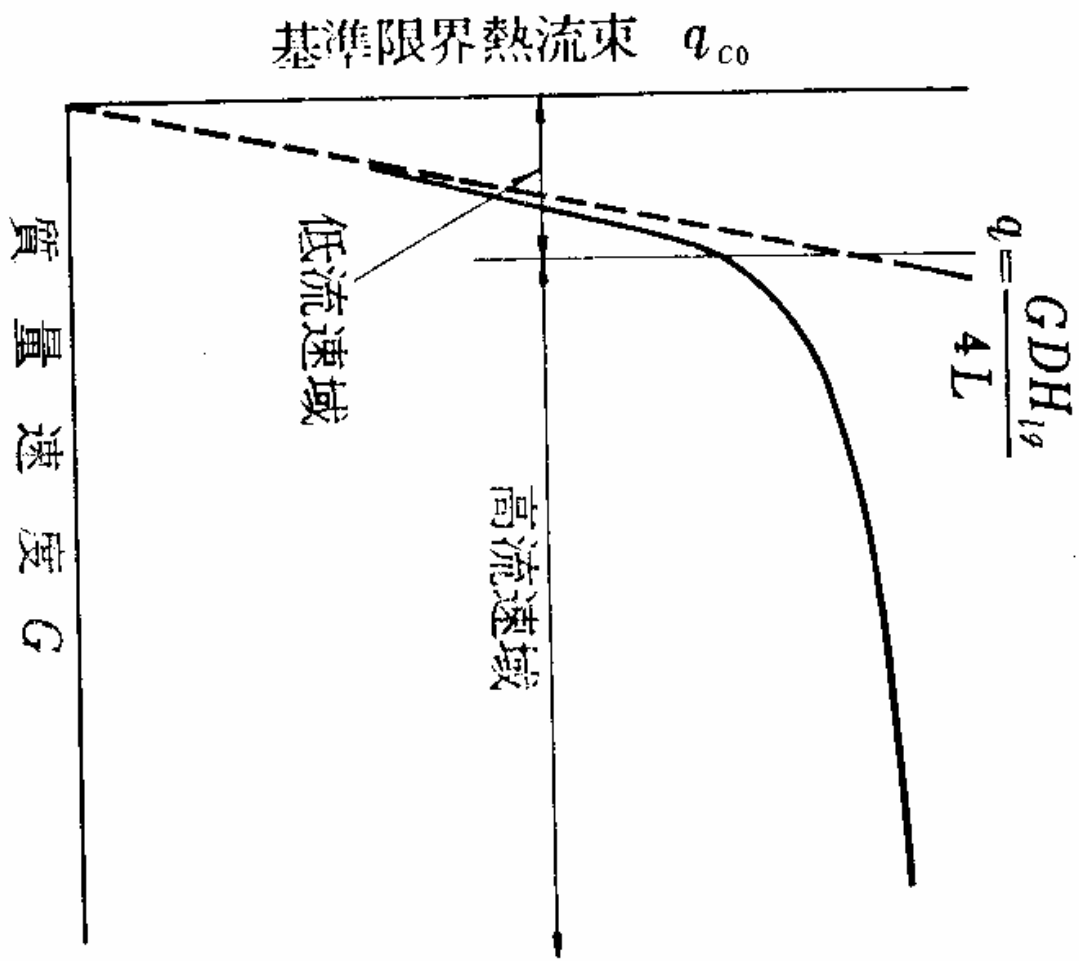
$$x_{\text{ex}} = \left( \frac{4L}{DG} q_{\text{crit}} - (H_{\text{ls}} - H_{\text{in}}) \right) / H_{\text{fg}}$$

に入れて

$$q_{\text{crit}} = \frac{A_1 + DG(H_{\text{ls}} - H_{\text{in}}) / 4}{C_1 + L}$$

$$A_1 = \frac{f_1}{f_2} \frac{DGH_{\text{fg}}}{4} \quad C_1 = \frac{1}{f_2} \frac{DGH_{\text{fg}}}{4}$$

低流速域 (DNB) と高流速域 (ドライアウト) に  
分ける



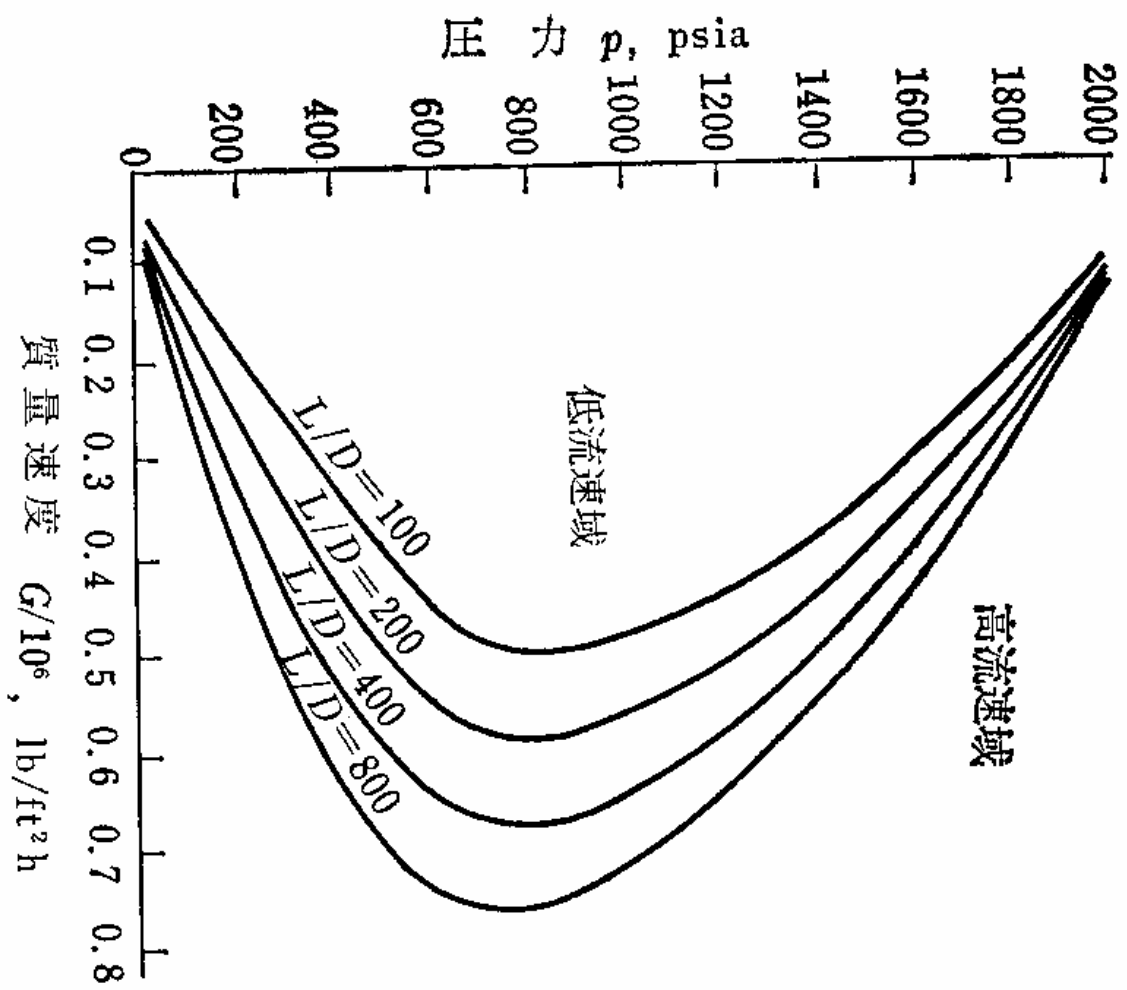


図 17.8 低流速域と高流速域の境界  
(MACBETH)

8) に基づいて次の相関式

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = \frac{(G/10^6)[H_{lg} + (H_{ls} - H_{in})]}{158D^{0.1}(G/10^6)^{0.49} + 4L/D} \quad (17.9)$$

を与えている。この式は、式(17.7)を用いると、次のように書きなおせる。

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = 0.00633D^{-0.1} \left( \frac{G}{10^6} \right)^{0.51} H_{lg} (1 - x_{ex}) \quad (17.9')$$

また、矩形断面流路に対しては次式を与えている。

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = \frac{(G/10^6)[H_{lg} + (H_{ls} - H_{in})]}{3.78S^{-1.73}(G/10^6)^{1.1} + 1.8L/S} \quad (17.10)$$

ただし、 $S$ は矩形流路における加熱面間の流路幅 in である。

**高流速域** この領域では圧力が複雑な影響をもつので、MACBETH<sup>11)</sup> は  
円管流路の限界熱流束を次のように表示し、

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = \frac{A_1 + D(G/10^6)(H_{ls} - H_{in})/4}{C_1 + L} \quad (17.11)$$



$$\left. \begin{aligned} A_1 &= y_0 D^{y_1} (G/10^6)^{y_2} [1 + y_3 D + y_4 (G/10^6) + y_5 D(G/10^6)] \\ C_1 &= y_6 D^{y_7} (G/10^6)^{y_8} [1 + y_9 D + y_{10} (G/10^6) + y_{11} D(G/10^6)] \end{aligned} \right\} \quad (17.12)$$

とおき， $y_0 \sim y_{11}$  の値を各圧力ごとにデータに基づいて決定する方法で，相関関係を導いている．表 17.1 はこのようにして最適化した  $y$  の値と，相関式の自乗平均誤差である．また矩形断面流路に対しては<sup>10)</sup>，

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = \frac{A' + 0.555 S (G/10^6) (H_{ls} - H_{in})}{C' + L} \quad (17.13)$$

$$\left. \begin{aligned} A' &= y_0 S^{y_1} (G/10^6)^{y_2} \\ C' &= y_3 S^{y_4} (G/10^6)^{y_5} \end{aligned} \right\} \quad (17.14)$$

$$10^6 \frac{q_{crit}}{C_1 + L} = \frac{A_1 + D(G/10^6)(H_{ls} - H_{ln})/4}{C_1 + L} \quad (17.11)$$

表 17.1 一様加熱円管の MACBETH 相関における常数——式 (17.12)

圧力 (psia)	250	560	1000	1250	1550	1800	2000
$y_0$	106	237	114	93.3	58.0	194	65.5
$y_1$	0.847	1.20	0.811	1.10	0.834	2.09	1.19
$y_2$	0.677	0.425	0.221	0.575	0.224	0.593	0.376
$y_3$	0	-0.940	-0.128	0	-0.0336	-0.597	-0.577
$y_4$	0	-0.0324	0.0274	0	0.0755	-0.131	0.220
$y_5$	0	0.111	-0.0667	0	-0.296	-0.0482	-0.373
$y_6$	60.3	19.3	127	88.5	48.3	231	17.1
$y_7$	1.4	0.959	1.32	1.46	0.823	1.93	1.18
$y_8$	0.937	0.831	0.411	1.00	0.121	0.612	-0.456
$y_9$	0	2.61	-0.274	0	0	-0.575	1.53
$y_{10}$	0	-0.0578	-0.0397	0	0	-0.255	2.75
$y_{11}$	0	0.124	-0.0221	0	0	0.110	2.24
自乗平均誤差 (%)	4.7	7.27	6.48	5.12	6.02	3.93	7.56
データ数	237	225	802	100	527	195	615

表 17.2 矩形断面流路に対する MACBETH 相関の常数——式 (17.14)

圧力 (psia)	$y_0$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	自乗平均誤差 (%)	データ数
600	190	0.928	0.640	8.1	1.4	3.93	6.1	22
800	46.5	0.390	0.391	104	1.4	0.007	12.9	28
1200	537	1.32	0.764	286	1.4	1.29	4.9	42
2000	202	1.08	0.669	370	1.4	0.725	9.4	359

# 甲藤の相関式

次元解析による相関式  
多くの領域に分ける

$$q_{\text{crit}} = q_{\text{C0}} (1 + K\Delta H_{\text{sub}} / H_{\text{fg}})$$

$$\frac{q_{\text{C0}}}{GH_{\text{fg}}} = f\left(\frac{\rho_{\text{g}}}{\rho_{\text{l}}}, \frac{\sigma\rho_{\text{l}}}{G^2L}, \frac{L}{D}\right)$$

## L 領域

$$\frac{q_{c0}}{GH_{lg}} = C \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{0.043} \cdot \frac{1}{L/D} \quad (17.17)$$

ただし,  $C=0.25 : L/D < 50$ ,  $C=0.34 : L/D > 150$ , 上式 (17.15) における  $K$  の値は概略 1.0 であって, 次式で与えられている.

$$K = \frac{1.043}{4C \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{0.043}} \quad (17.17')$$

## II 領域

$$\frac{q_{c0}}{GH_{lg}} = 0.10 \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{1 + 0.0031 L/D} \quad (17.18)$$

$$K = \frac{5}{6} \cdot \frac{0.0124 + D/L}{\left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{1/3}} \quad (17.18')$$

および

$$\frac{q_{c0}}{GH_{lg}} = 0.098 \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{0.433} \cdot \frac{(L/D)^{0.27}}{1 + 0.0031 L/D} \quad (17.19)$$

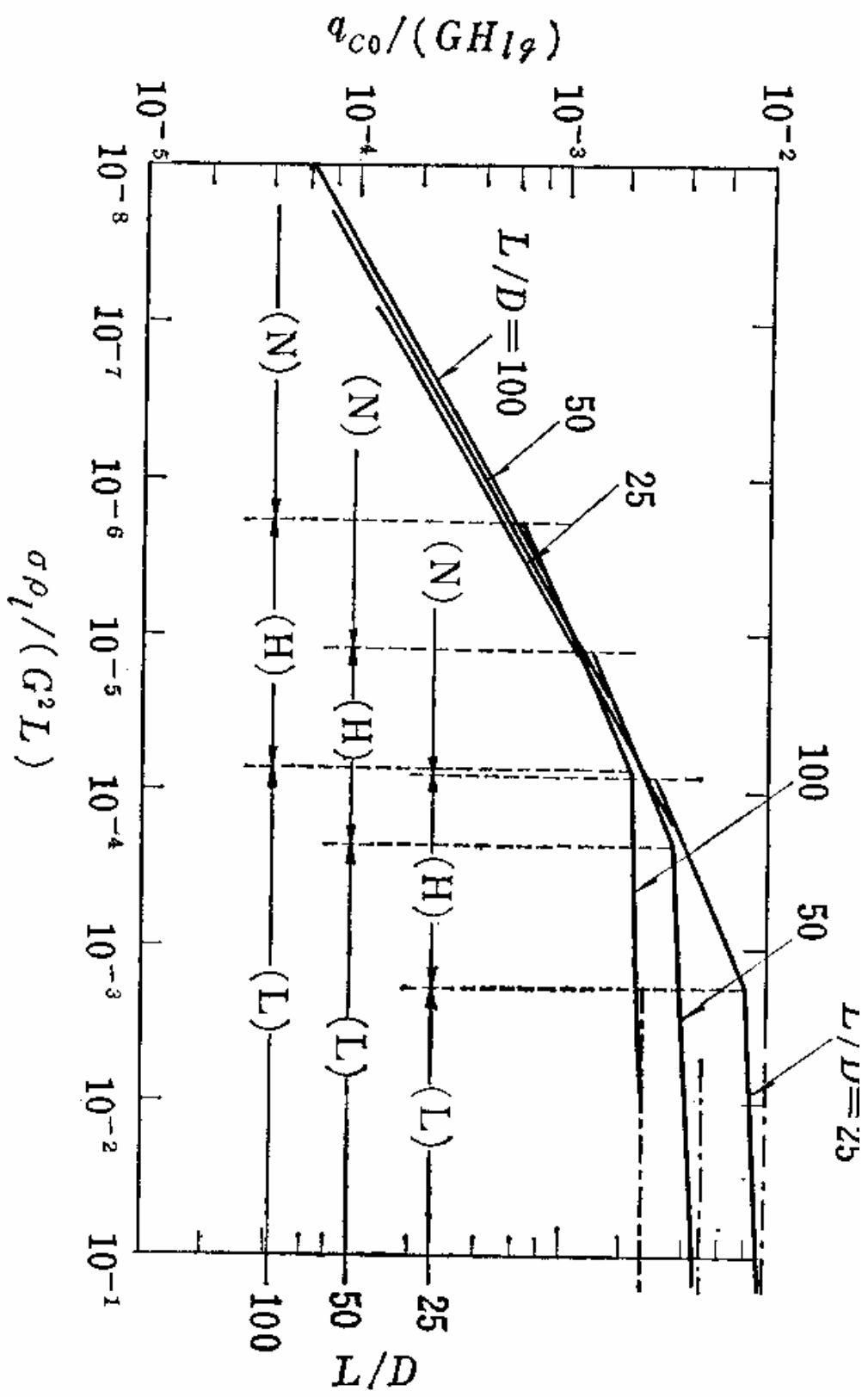
$$K = 0.416 \frac{(0.0221 + D/L) (D/L)^{0.27}}{\left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.113} \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{0.433}} \quad (17.19')$$

**N 領域**  $q_{crit} - \Delta H_{sub}$  の関係が非直線の——図 17.5 で  $L/D$  の小さい場合のように——な特性をもつ領域で、 $L/D$  が比較的小さいときに現われるものである。これに対しては次式を与えている。

$$\frac{q_{c0}}{GH_{lg}} = 0.098 \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{0.433} \cdot \frac{(L/D)^{0.27}}{1 + 0.0031 L/D} \quad (17.19)$$

区別し、実験的に次式を与えている。

$$\frac{L}{D} = 0.77 / \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{0.37} \quad (17.20)$$



(a)  $L/D=25, 50, 100$



**HP 領域** 水で高圧すなわち  $\rho_g/\rho_l$  が大きく，かつ  $L/D$  が比較的大きい場合に生ずる領域である．H 領域より  $\sigma\rho_l/(G^2L)$  の値が小さいにもかかわらず， $q_{crit}-\Delta H_{sub}$  に直線の関係が成立し，次式で整理されている．

$$\frac{q_{c0}}{GH_{ig}} = 0.0384 \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.60} \left( \frac{\sigma\rho_l}{G^2L} \right)^{0.173} \frac{1}{1 + 0.280 \left( \frac{\sigma\rho_l}{G^2L} \right)^{0.233}} \cdot \frac{L}{D} \quad (17.21)$$

この領域の  $K$  の値は

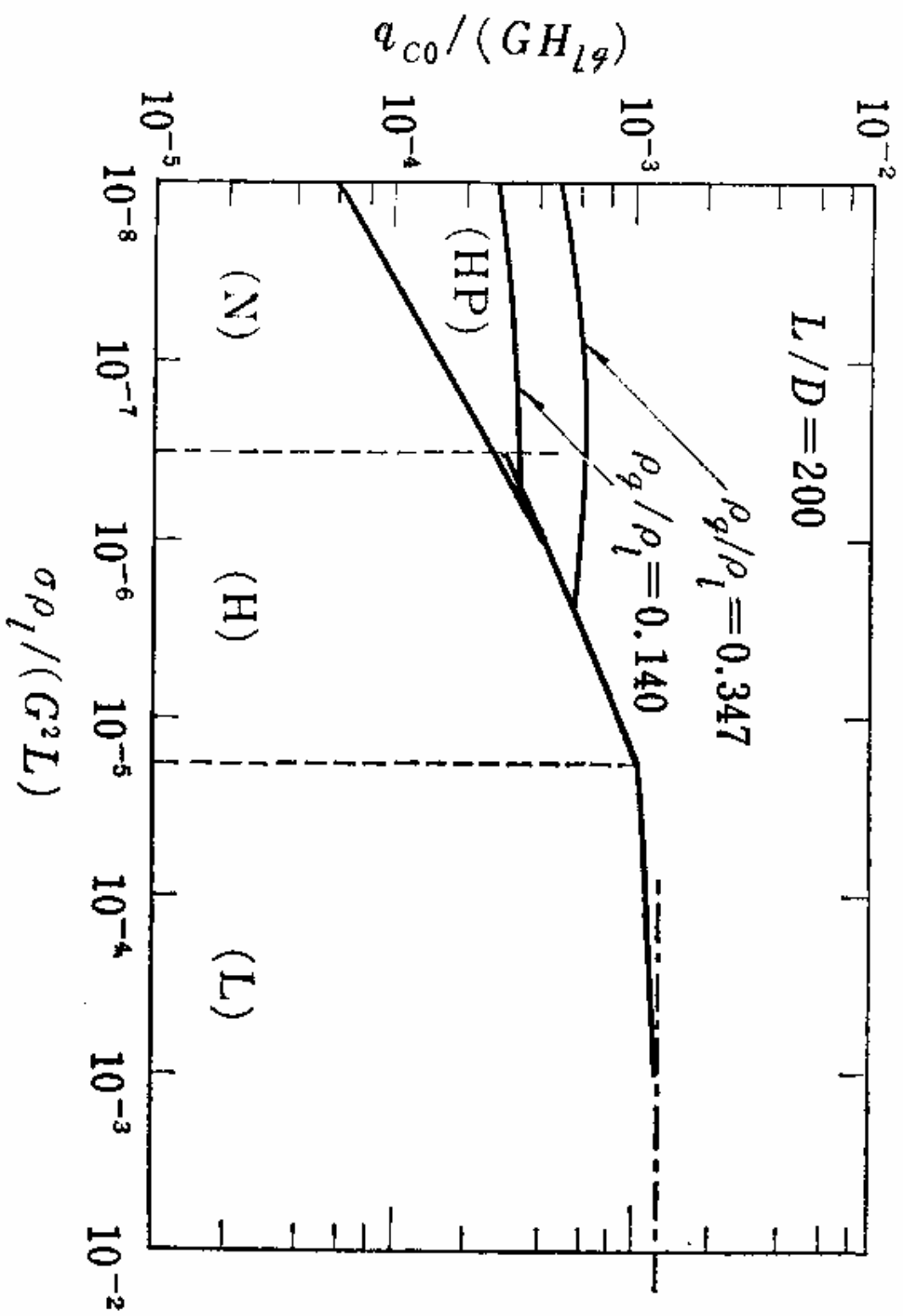
$$K = 1.12 \frac{1.52 \left( \frac{\sigma\rho_l}{G^2L} \right)^{0.233} + \frac{D}{L}}{\left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.60} \left( \frac{\sigma\rho_l}{G^2L} \right)^{0.173}} \quad (17.21')$$

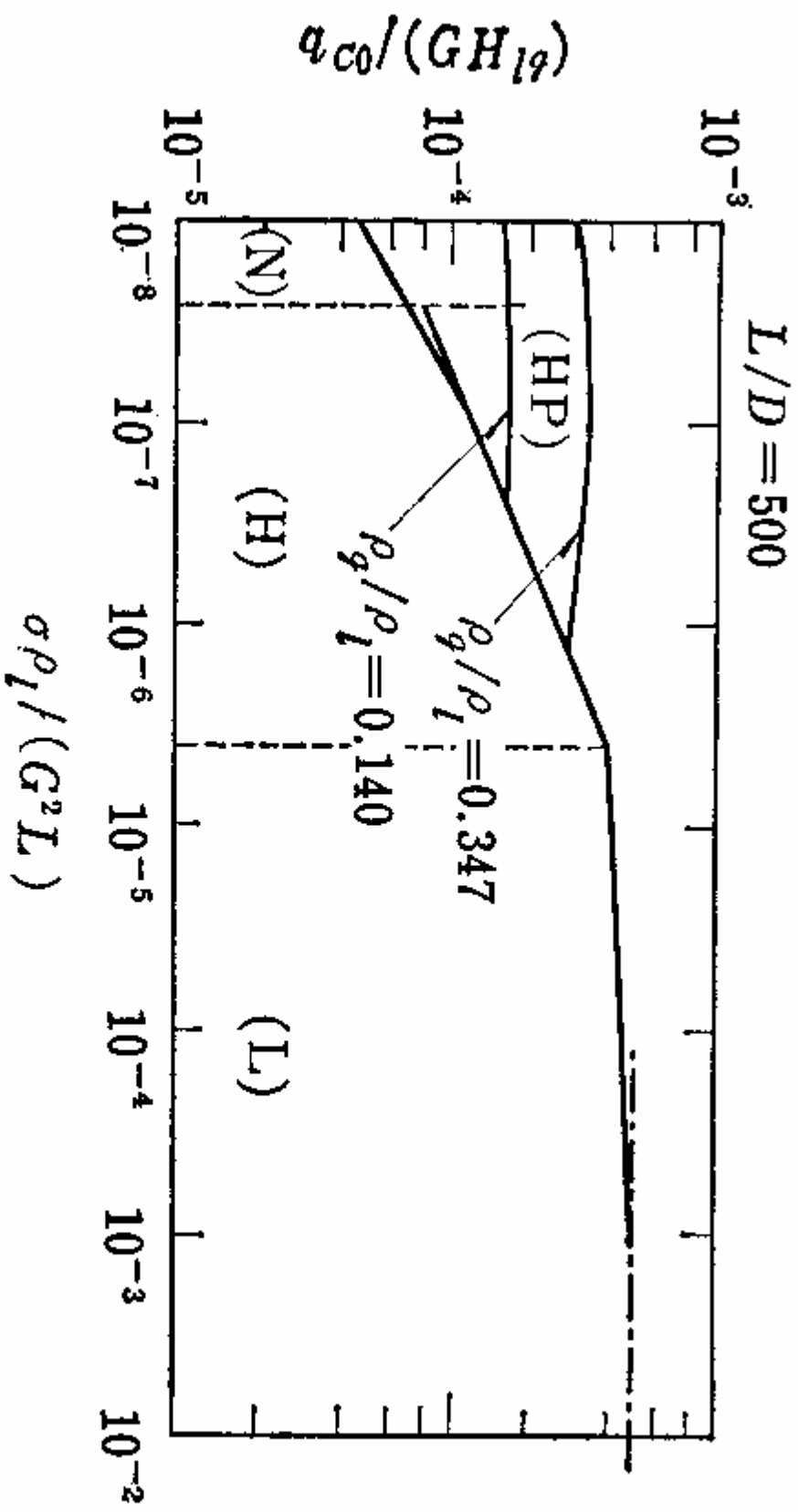
そして，これら各領域の境界式として，L-H 境界には式 (17.17) と式 (17.18) の交点として

$$\frac{L}{D} = 1 \left[ \frac{0.10}{C} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma\rho_l}{G^2L} \right)^{0.29} - 0.0031 \right] \quad (17.22)$$

H-HP 境界には式 (17.18) と式 (17.21) の交点として

$$\frac{L}{D} = \frac{0.384 \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.467} - \left( \frac{\sigma\rho_l}{G^2L} \right)^{0.160}}{0.280 \left( \frac{\sigma\rho_l}{G^2L} \right)^{0.393} - 0.00119 \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.467}} \quad (17.23)$$





(b)  $L/D=200, 500$

図 17.9 基準限界熱流束  $q_{c0}$  の無次元表示 (甲藤)

# 管群の限界熱流束相関式

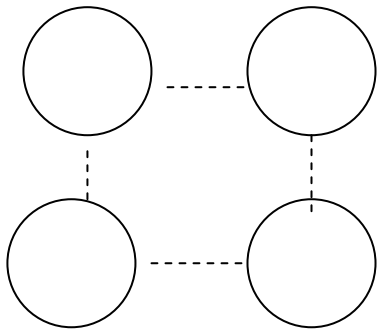
実験データに基づく

次元を持った形

流路断面積に様々な代表長さを用いる

加熱相当直径

$4 \times \text{流路断面積} / \text{加熱長さ}$



## Macbethの式

ける。

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = \frac{67.6 D_h^{0.83} (G/10^6)^{0.57} + D_h (G/10^6) (H_{ts} - H_{tn})/4}{47.3 D_h^{0.57} (G/10^6)^{0.27} + L} \quad (17.25)$$

ただし、 $D_h = 4A/P_h$  は加熱面相当直径 in で、 $A$  は流路断面積、 $P_h$  は加熱部の周囲長さである。

JANSSEN ら<sup>19)</sup>は内管加熱の環状流路について、広い出口オリテ<sub>イ</sub>範囲に適用できる次式を提案している。

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = \frac{1 + 0.16 \left( \frac{1000 - p}{400} \right) - 0.04 \left( \frac{1000 - p}{400} \right)^2}{1 - 0.008 E (G/10^6)^{0.8}}$$

$$\times \{0.0172 E (G/10^6)^{0.8} - [0.3175 (G/10^6)^{-2} - 1.8534 (G/10^6)^{-1}]$$

$$- [2.4 + 3.2 D_e + 0.83 D_e (G/10^6)] [x - 0.0629 (G/10^6)^{-2}$$

$$+ 0.3429 (G/10^6)^{-1} - 0.2494 + 0.0020 (G/10^6)^2]\} \quad (17.26)$$

ただし、外管内径を  $D_o$ 、内管外径を  $D_i$  とすると、

$$E = \left( \frac{D_o}{D_i} \right)^{0.5} \left( \frac{D_o - D_i}{12} \right)^{-0.2}, \quad D_e = D_o - D_i$$

$$p = 600 \sim 1450 \text{ psia}, \quad G/10^6 = 0.2 \sim 6.21 \text{ b/ft}^2 \text{ h}, \quad x_{ex} = -0.12 \sim 0.44,$$

$$D_e = 0.25 \sim 0.875 \text{ in}, \quad L \leq 108 \text{ in}$$

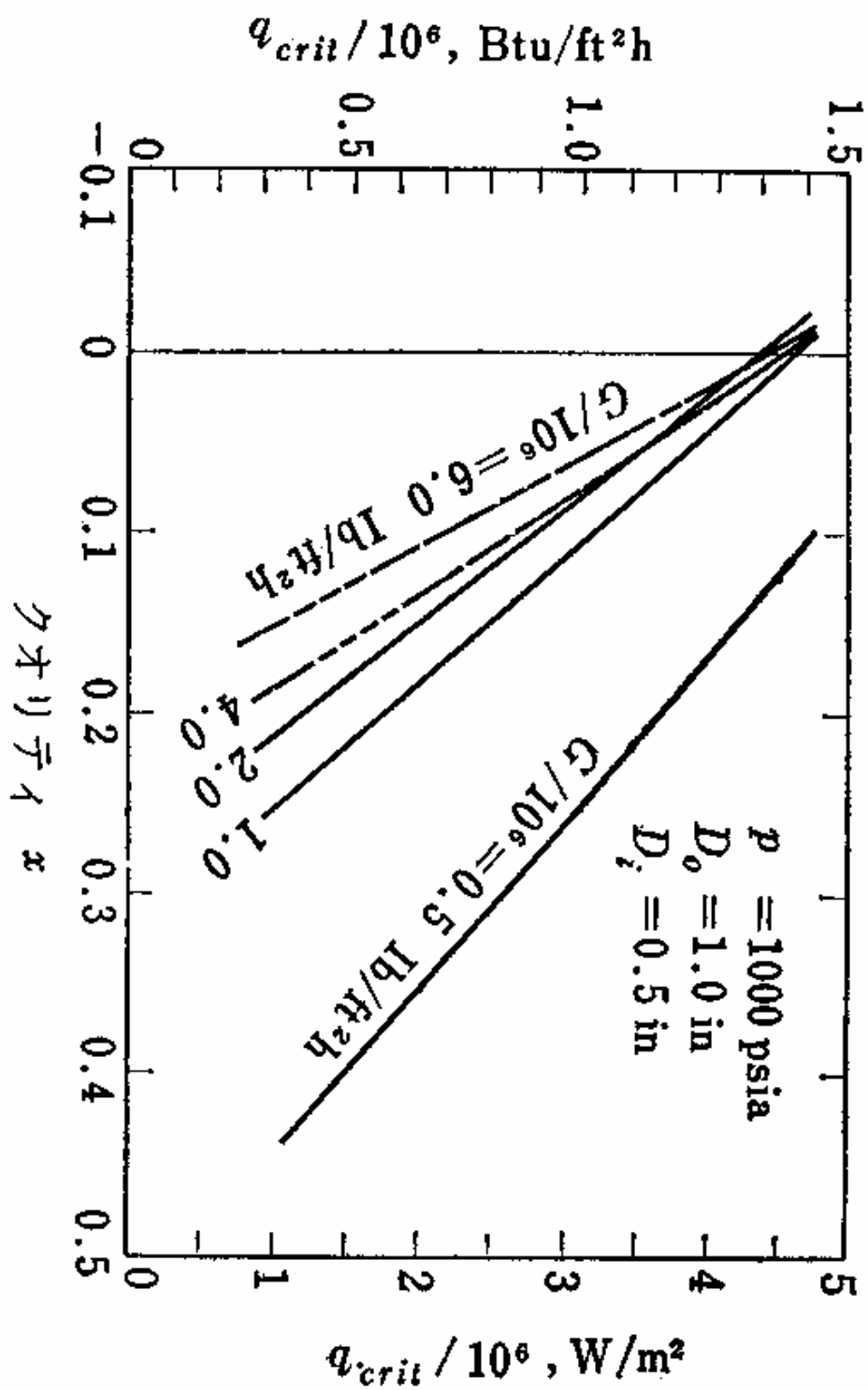


図 17.10 限界熱流束の値——式 (17.26)

## Tongの式

$$\begin{aligned} \frac{q_{\text{DNB, EU}}}{10^6} = & [(2.022 - 0.4302p/10^3) + (0.1722 - 0.0984p/10^3)] \\ & \times \exp(18.177x - 4.129xp/10^3) [1.157 - 0.869x] \\ & \times [(0.1484 - 1.596x + 0.1729x|x|)G/10^6 + 1.037] \\ & \times [0.2664 + 0.8357 \exp(-3.151D_e)] \\ & \times [0.8258 + 0.000794(H_{ls} - H_{in})] \end{aligned} \quad (17.27)$$

中圧軽水炉を対象としたもので、この式の適用範囲は

$$p = 1000 \sim 2300 \text{ psia}, \quad G/10^6 = 1 \sim 5 \text{ lb/ft}^2\text{h}, \quad H_{in} \geq 400 \text{ Btu/lb},$$

$$D_e = 0.2 \sim 0.7 \text{ in}, \quad L = 10 \sim 144 \text{ in}$$

$$\text{加熱周長} / \text{濡れ縁長さ} = 0.88 \sim 1.0$$



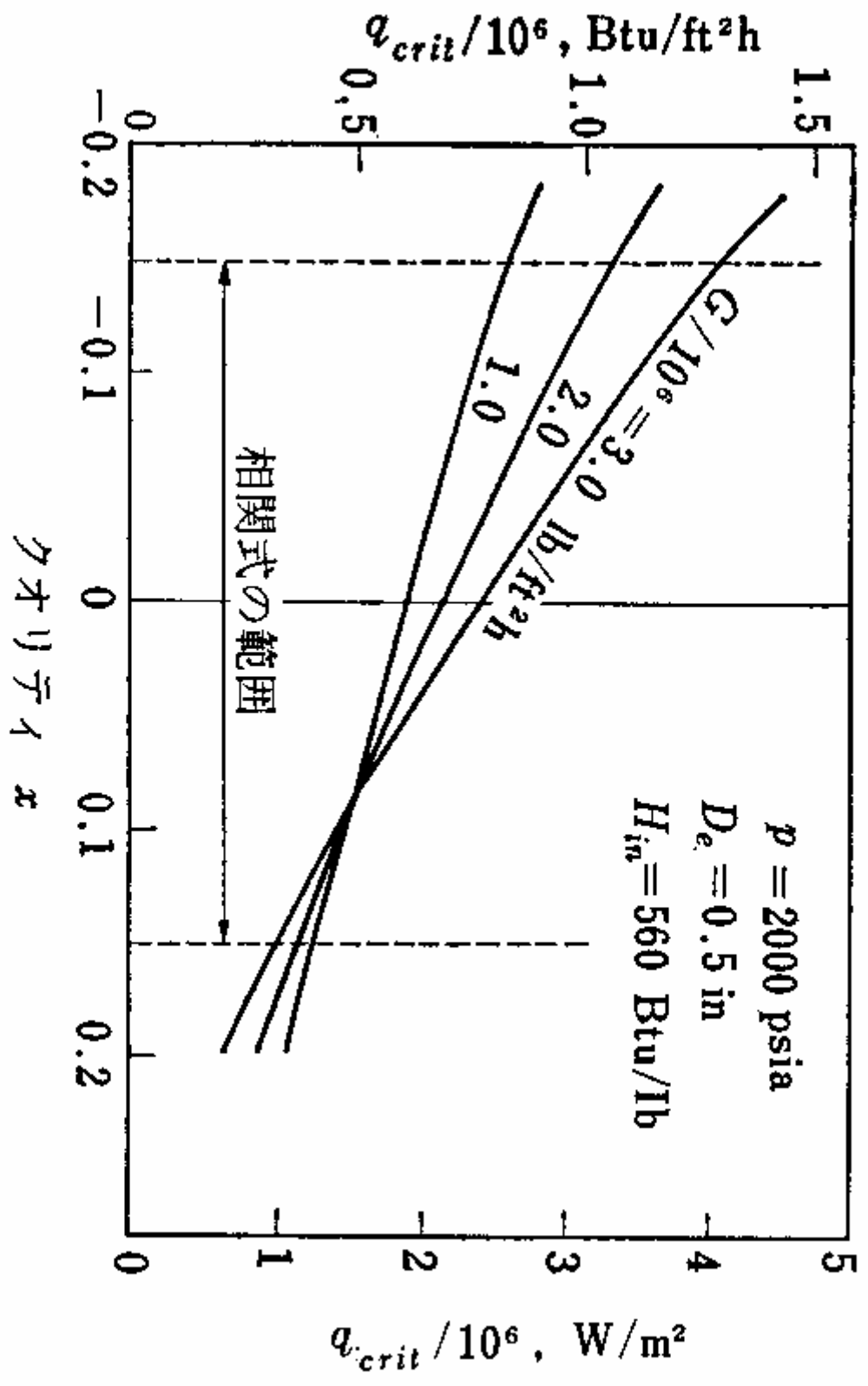


図 17.11 限界熱流束の値——式 (17.27)

# 熱流束分布がある場合の限界 熱流束

熱流束に分布がある場合、CHFは出口で起こるとは限らない。

例、原子炉: sin状の分布  $q(z) = q_{\max} \sin\left(\pi \frac{z + \delta_1}{L + \delta_1 + \delta_2}\right)$

一般には  $q(z) = q_{\max} f(z)$

Local Conditions Conceptを用いて予測

$$H(z) = H_{\text{in}} + \frac{4q_{\max}}{DG} \int_b^z f(z) dz$$
$$x(z) = \frac{H(z) - H_{\text{ls}}}{H_{\text{fg}}} = \frac{1}{H_{\text{fg}}} \left( \frac{4q_{\max}}{DG} \int_b^z f(z) dz - \Delta H_{\text{sub}} \right)$$

これと  $q_{\text{crit}} = f(G, x, p, D)$  の接点

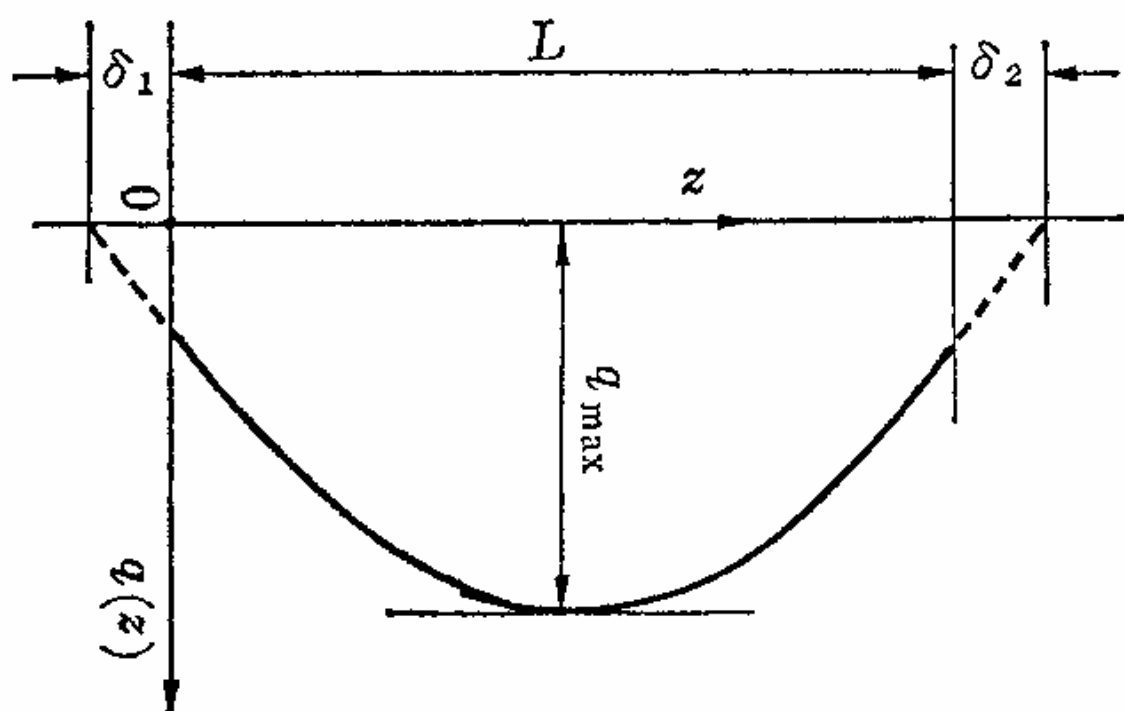


圖 17.12 熱流束分布

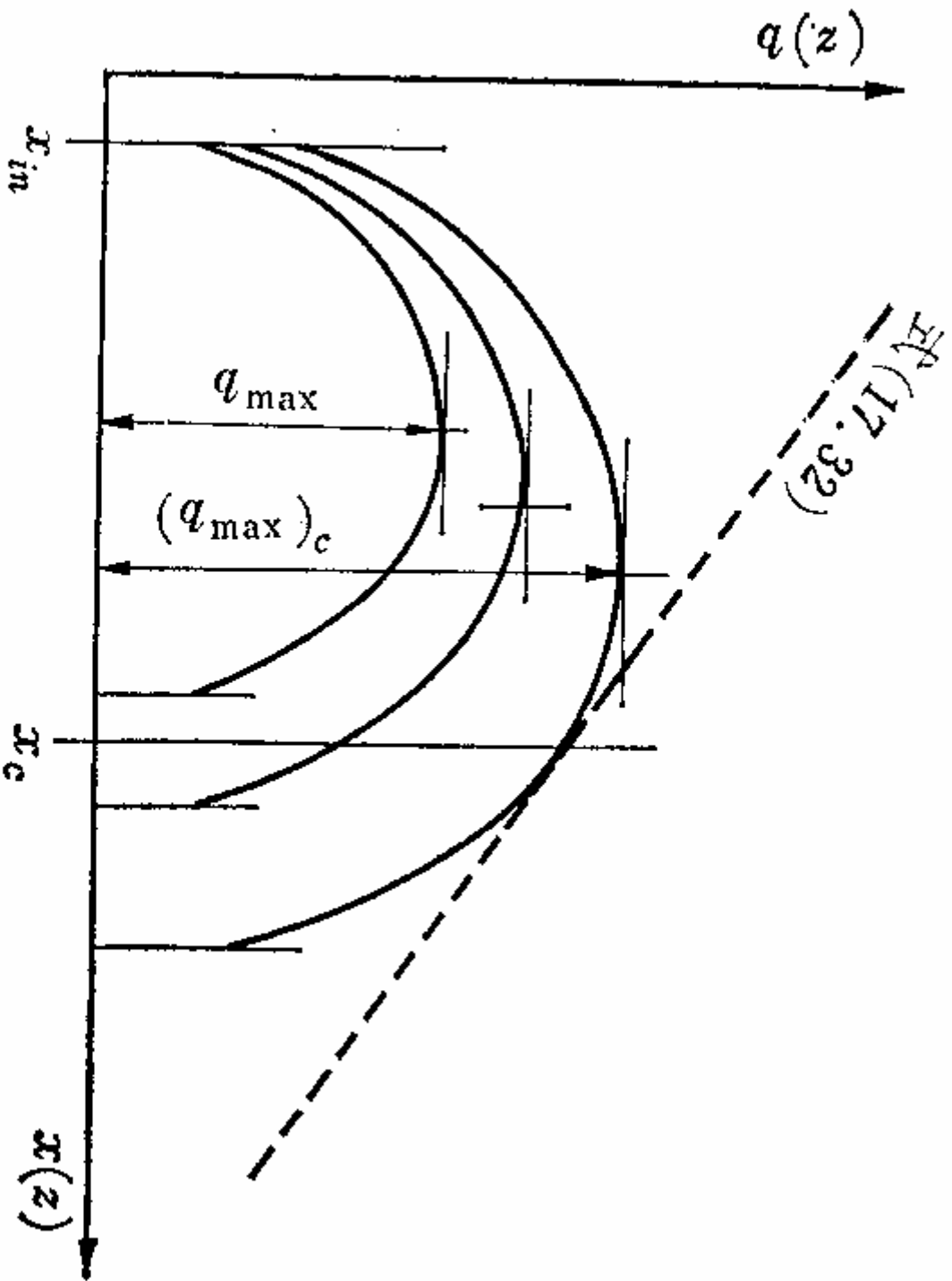


図 17.13 限界熱流束状態の推定

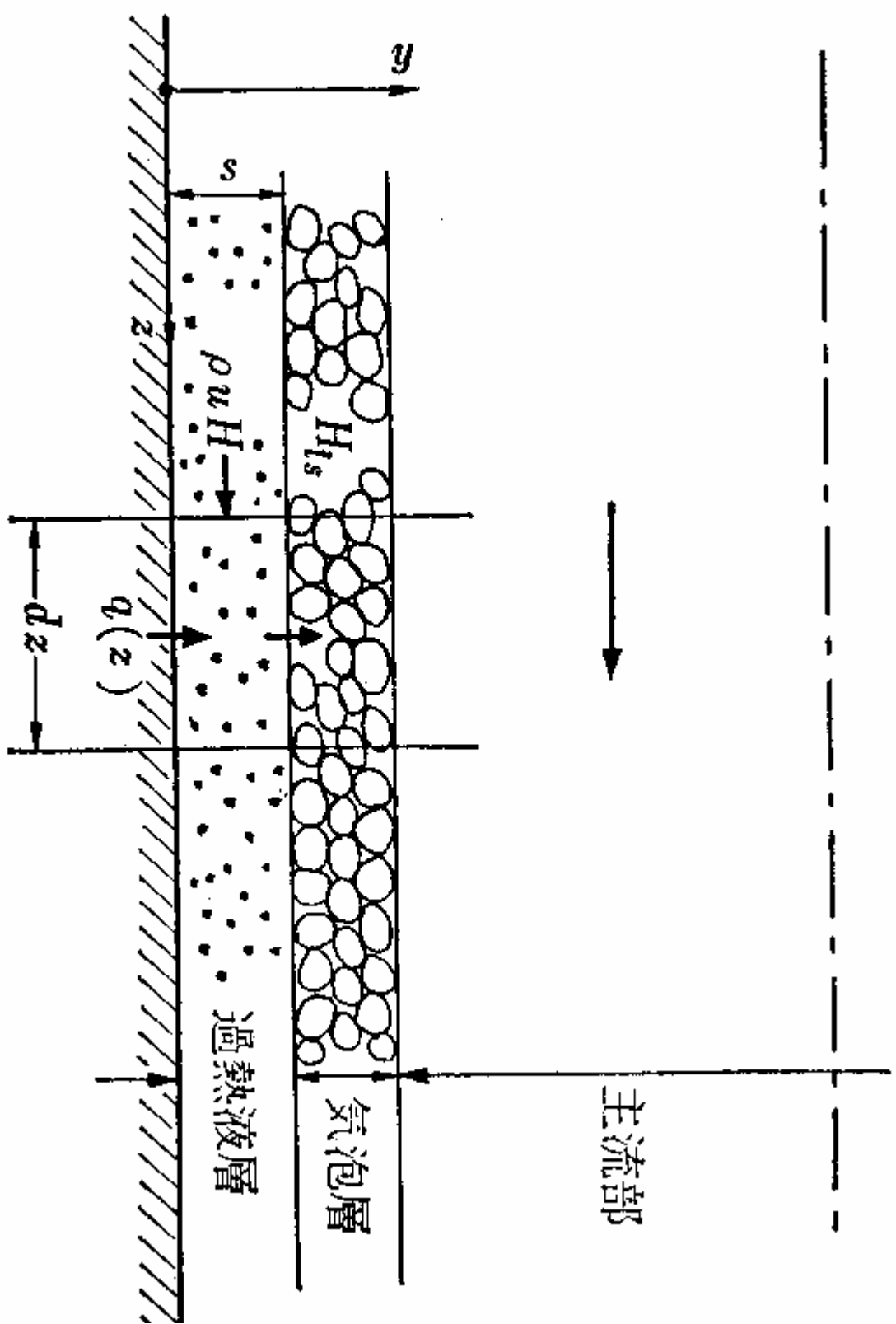


図 17.14 加熱面に沿う過熱液層モデル (TONG)