

## [ 2/2 分冊 ]

### 4. 簡易安定判別法

厳密な安定性解析による密度波振動の可否の判定は非常に煩雑のものでいざれコンピュータソフトによらざるを得ない。しかし通常のプラント設備であれば、簡易判別法で評価を行い、設計的に十分不安定化が回避できるのであれば厳密解析は割愛できる。簡易判別法にはいろんな提案があるようであるが、一般には次のようなものが知られている。以下これらの方法を紹介する。

沸騰蒸発管系 → Ishii (Zuber) の方法、

沸騰過熱蒸発管系 → 中西の方法、滝沢らの方法

自然循環系 → テキスト(4)による方法、Friedly の方法

#### 4.1 Ishii (Zuber) の方法について<sup>(5)(4)</sup>

(1) Ishii の安定性判別法は、下図のような蒸発管モデルで表わされる設備、即ち単相流の予熱区間と2相流の沸騰区間から構成され、系の出入口に弁/オリフィスのような絞り抵抗をもち全区間一定の差圧で保持されたシステムに適用できる。

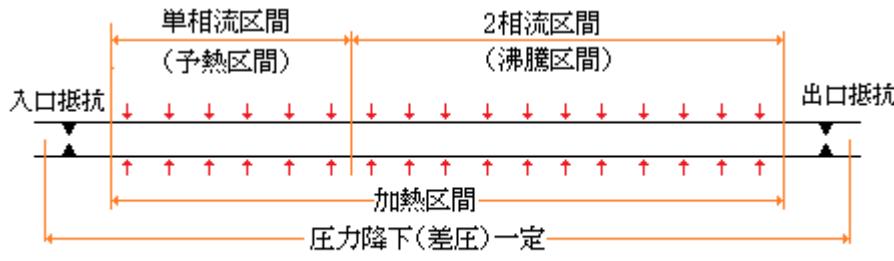


図9 沸騰蒸発管モデル

(2) Ishii の判別法は分布定数系の安定性解析に関するスタディ(添付 B 参照)から得られたもので、次の単純化された安定化条件(以下、簡易判別式)を用いる。

$$N_{pch} - N_{sub} = X_e (\Delta \rho / \rho_g) \leq 2 \{ k_i + f_m L / (2D) + k_e \} / [1 + (1/2) \{ f_m L / (2D) + 2k_e \}] \rightarrow \text{安定}$$

$$N_{sub} = (\Delta i_{sub} / \Delta i_{fg}) (\Delta \rho / \rho_g), \quad N_{pch} = \{ (q_w'' \xi \ell) / (\rho_f A_c v_{in} \Delta i_{fg}) \} (\Delta \rho / \rho_g)$$

ここで  $N_{sub}$ =サブクーリング数(-)、 $N_{pch}$ =相変化数(-)、 $X_e$ =出口クオリティ(-)( $0 \leq X_e \leq 1$ )、

$\Delta \rho$ =密度差( $\text{kg}/\text{m}^3$ )( $= \rho_f - \rho_g$ )、 $\rho_g$ =気体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\rho_f$ =液体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、

$k_i$ =入口圧損係数(-)、 $k_e$ =出口圧損係数(-)、 $f_s$ =単相摩擦損失係数(-)、

$f_m$ =2相管摩擦損失係数(注)、 $\Delta i_{fg}$ =蒸発潜熱( $\text{kcal}/\text{kg}$ )、

$q_w''$ =単位長さ単位時間当たりの加熱量( $\text{kcal}/\text{ms}$ )、 $D$ =管内径( $\text{m}$ )、 $L$ =沸騰区間( $\text{m}$ )

$\Delta i_{sub}$ =サブクールエンタルピ( $\text{kcal}/\text{kg}$ )(=飽和液エンタルピ  $i_s$  - 入口液エンタルピ  $i_o$ )、

$\xi \ell$ =有効加熱長さ( $\text{m}$ )、 $A_c$ =管流れ断面積( $\text{m}^2$ )、 $v_{in}$ =入口流速( $\text{m}/\text{s}$ )、

(注) 実際計算では実験結果とマッチさせるため単相管摩擦係数の2倍の値( $\rightarrow 2f_s$ )を使用。

この場合、 $N_{sub}$  と  $N_{pch}$  はともに重要な無次元パラメータである。 $N_{sub}$  はサブクーリングの度合をカウントするもので、サブクールエンタルピ  $\Delta i_{sub}$  (即ち飽和液のエンタルピから入口液エンタルピを差し引いた分)を蒸発潜熱  $\Delta i_{fg}$  ( $= r$ ) で除し密度補正したもの。入口の液温が低いほど、 $\Delta i_{sub}$  即ち  $N_{sub}$  は大きくなる。一方  $N_{pch}$  は相変化の度合を入熱量の多寡で表わすもの。上記の  $N_{pch}$  の定義式は

$$N_{pch} = \{ (q_w'' \xi \ell) / (\rho_f A_c v_{in} \Delta i_{fg}) \} (\Delta \rho / \rho_g) = \{ Q / (mr) \} (\Delta \rho / \rho_g)$$

ここで  $Q$ =単位時間当たりの入熱量( $=q_w \cdot \ell$ )(kcal/s)、 $m$ =質量流量(kg/s)、 $r$ =蒸発潜熱( $=\Delta i_{fg}$ )に変形できる。入熱量  $Q$  が多いと当然的に蒸気量が増加して相変化が進行する。

なお簡易判別式の左辺  $[N_{pch} - N_{sub} = X_e(\Delta \rho / \rho_g)]$  は、次のように導かれている。

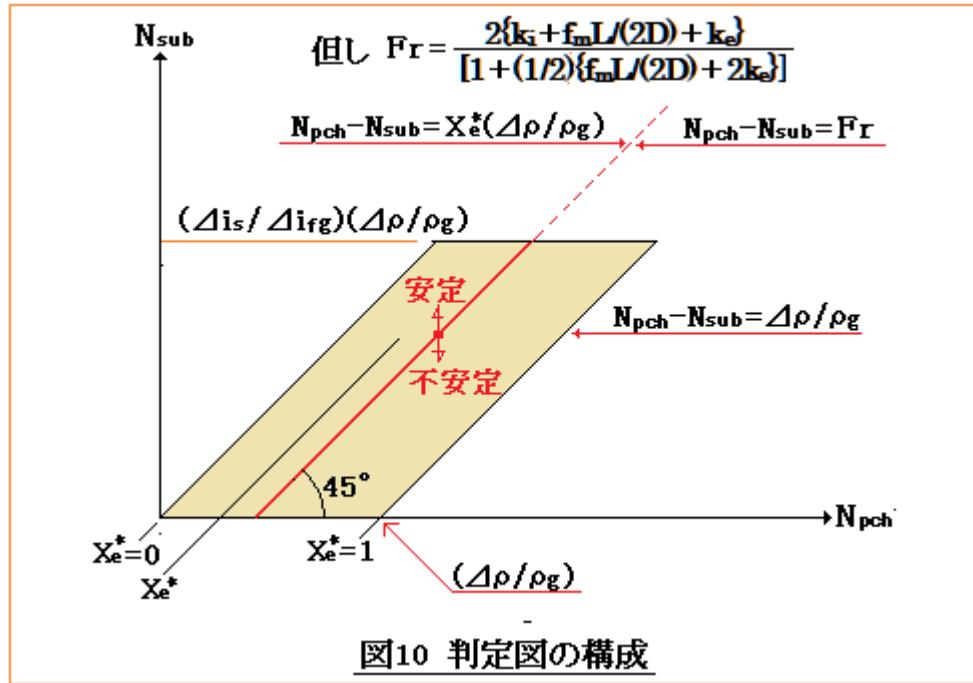
$$\begin{aligned} N_{pch} - N_{sub} &= \{Q/(mr)\} (\Delta \rho / \rho_g) - (\Delta i_{sub} / \Delta i_{fg}) (\Delta \rho / \rho_g) \\ &= (1/r) (Q/m - \Delta i_{sub}) (\Delta \rho / \rho_g) \quad (\because \Delta i_{fg} = r) \end{aligned}$$

$Q/m = \{(i - i_o)m/m\} = (i - i_o)$ 、 $\Delta i_{sub} = i' - i_o$  なので、上式は

$$N_{pch} - N_{sub} = (1/r) \{ (i - i_o) - (i' - i_o) \} (\Delta \rho / \rho_g) = \{(i - i')/r\} (\Delta \rho / \rho_g)$$

( 但し  $i_o$ 、 $i$  はそれぞれ初期位置と到達位置のエンタルピ、 $i'$  は飽和液エンタルピである。 )

クオリティ  $X_e$  は  $X_e = (i - i')/r$  で定義されるから、上式は  $N_{pch} - N_{sub} = X_e(\Delta \rho / \rho_g)$  になる。



(3) 試行錯誤の多い設計段階では簡易判別式を安定性判定図にしておけば便利である。安定-不安定の境界線は次の式で与えられる。

$$\textcircled{1} \quad N_{sub} = N_{pch} - F_r \quad \text{但し } F_r = 2\{k_i + f_m L/(2D) + k_e\} / [1 + (1/2)\{f_m L/(2D) + 2k_e\}]$$

$N_{pch} - N_{sub}$  座標では、この安定境界線は傾き 1 で 45 度の傾斜を持つ。

一方、簡易判別式の右辺は  $X_e(\Delta \rho / \rho_g)$  でもあるから、

$$X_e = X_e^* \quad \text{但し } X_e^* = F_r / (\Delta \rho / \rho_g)$$

この限界クオリティ  $X_e^*$  を  $N_{pch} - N_{sub}$  座標上で用いると ①とは違った表現が得られる。

$$\textcircled{2} \quad N_{sub} = N_{pch} - X_e^* (\Delta \rho / \rho_g)$$

①②式は全く同一の式で、グラフでは  $X_e^*$  は①の境界線に並行し、評価対象のクオリティ  $X$  も境界線に対して並行する形で表わすことができる(→図 3.18\*参照)。

また判別式  $N_{pch} - N_{sub} \leq F_r$  の右辺は常に正なので、常に  $N_{pch} - N_{sub} > 0 \rightarrow N_{pch} > N_{sub}$  の領域が安定域になる。すなわち境界線の左上側で安定、右下側で不安定になる。

なお、縦軸の変数  $N_{sub}$  は上限を持っている。前述のように

$$N_{pch} = \{Q/(mr)\} (\Delta \rho / \rho_g) = \{(i - i_0)/r\} (\Delta \rho / \rho_g)$$

なので  $N_{sub} = N_{pch} - X_e (\Delta \rho / \rho_g)$  は、

$$N_{sub} = \{(i - i_0)/r - (i - i')/r\} (\Delta \rho / \rho_g) = \{(i' - i_0)/r\} (\Delta \rho / \rho_g) = (\Delta i_{sub} / \Delta i_{fg}) (\Delta \rho / \rho_g)$$

になるが  $\Delta i_{sub} = i' - i_0$  において  $i_0 = 0$  で 最大値  $i' (= i_s)$  になるため 縦軸上の限界値が得られる。

$$[N_{sub}] = (\Delta i_s / \Delta i_{fg}) (\Delta \rho / \rho_g) \quad \text{ここで } i_s = \text{飽和液エンタルピ}$$

また横軸  $N_{pch}$  と安定性境界ラインの交点にも限界がある。ここでは過熱蒸気の発生は認められないため  $X_e$  は最大 1 であるから、横軸との交点としては  $N_{pch} = (\Delta \rho / \rho_g)$  がその限界になる。

以上の検討から。安定性判定図は図 10 のように表現できる。着色部分は適用範囲を示している。

(4) 判定図は次のパラメータで構成されている。これらパラメータについてその効果を考えてみる。

$$N_{sub} (\Delta i_{sub}, r, \Delta \rho / \rho_g), N_{pch} (Q, m, r, \Delta \rho / \rho_g), F_r (k_i, k_e, f_m L / (2D))$$

前項でも述べたように境界線の左上側に安定域、右上側に不安定域があるので、 $N_{sub}$  が大きい場合ないし  $N_{pch}$  が小さい場合に安定する。従って、

サブクーリング量  $\Delta i_{sub}$  が大きい程、蒸発潜熱  $r$  が小さい程、密度比  $\Delta \rho / \rho_g$  が大きい程

あるいは

単位加熱量  $Q$  が小さい程、質量流量  $m$  (入口流速  $u_{in}$ ) が大きい程、蒸発潜熱  $r$  が大きい程、

密度比  $\Delta \rho / \rho_g$  が小さい程

安定化する。ただ蒸発潜熱  $r$  および密度比  $\Delta \rho / \rho_g$  の効果は上記の  $N_{sub}$  ケースと相殺されるのでその影響は不定である。

次に判別式の右辺の  $F_r$  について。図 10 の判定図から判るように  $F_r (X_e^*)$  が大きくなると境界線は右側に移って安定域が拡がる。 $F_r$  は  $F_r = 2\{k_i + f_m L / (2D) + k_e\} / [1 + (1/2)\{f_m L / (2D) + 2k_e\}]$  で与えられるが、この式から読み取れるのは

$K_i$  の増加、 $K_e$  の減少、 $f_m L / (2D)$  の減少  $\rightarrow$  安定化

$K_i$  の減少、 $K_e$  の増加、 $f_m L / (2D)$  の増加  $\rightarrow$  不安定化

入口圧損係数  $K_i$  の場合は、右辺の分子にあるのでその増加は顕著な  $F_r$  の増加に引き起こす。一方出口圧損係数  $K_e$  と 2 相管摩擦圧損係数  $f_m L / (2D)$  は右辺の分子と分母に含まれ判りにくいが、分母が効いて  $K_i$  と逆の影響を与える。ただ  $K_i$  に較べれば小さい。これら抵抗パラメータの影響については添付 B の Fig.11,12,13 のデータがある。ただ  $K_i$  の効果は劇的と云われる。不安定現象が肥大化してバーンアウトのようなトラブルが起きた時は入口にオリフィスを設け出口弁を開けるといった対応になると思われる。

(5) 安定性判別は簡易判別式を用いて容易に実施できる。しかし前にも述べたように設計では安定性判別図を作つておけば視覚的にも便利である。作図例を図 3.18\* に示す。図には 2 間隔で境界ラインがプロットされているので容易に当該ラインを中間挿入できる。図では  $N_{sub}$  の上限が割愛されているがこれも記入しておけば目安に与える。なお図では  $X_e^*$  は  $X_e$  としてライン表示されている。ただこの図で示される  $X_e$  ライン(点線)は、系の圧力が 7Mpa で引かれているので注意のこと。

図 3.18\* では、例えば  $F_r = 4.28$  のケースで  $N_{sub} = 4.2$  に対して境界点(n)では  $N_{pch}^* = 8.48$  になるが設計上の運転点(m)では  $N_{pch} = 10.2$  で  $N_{pch} > N_{pch}^*$  であるから不安定化の恐れがあり設計変更が必要

であることがわかる。

なお図 3.18\* の  $N_{sub}$  の低い部分に朱線が引いてあるが、解析的には朱線より下の部分で安定化する傾向がある。添付 B の Fig.8~13 は安定性解析結果を示しているが、この傾向が大なり小なり現れている。ただ判定が難しいので、この低い  $N_{sub}$  領域(<3)での安定化傾向は安全側に無視すればよいと思う。

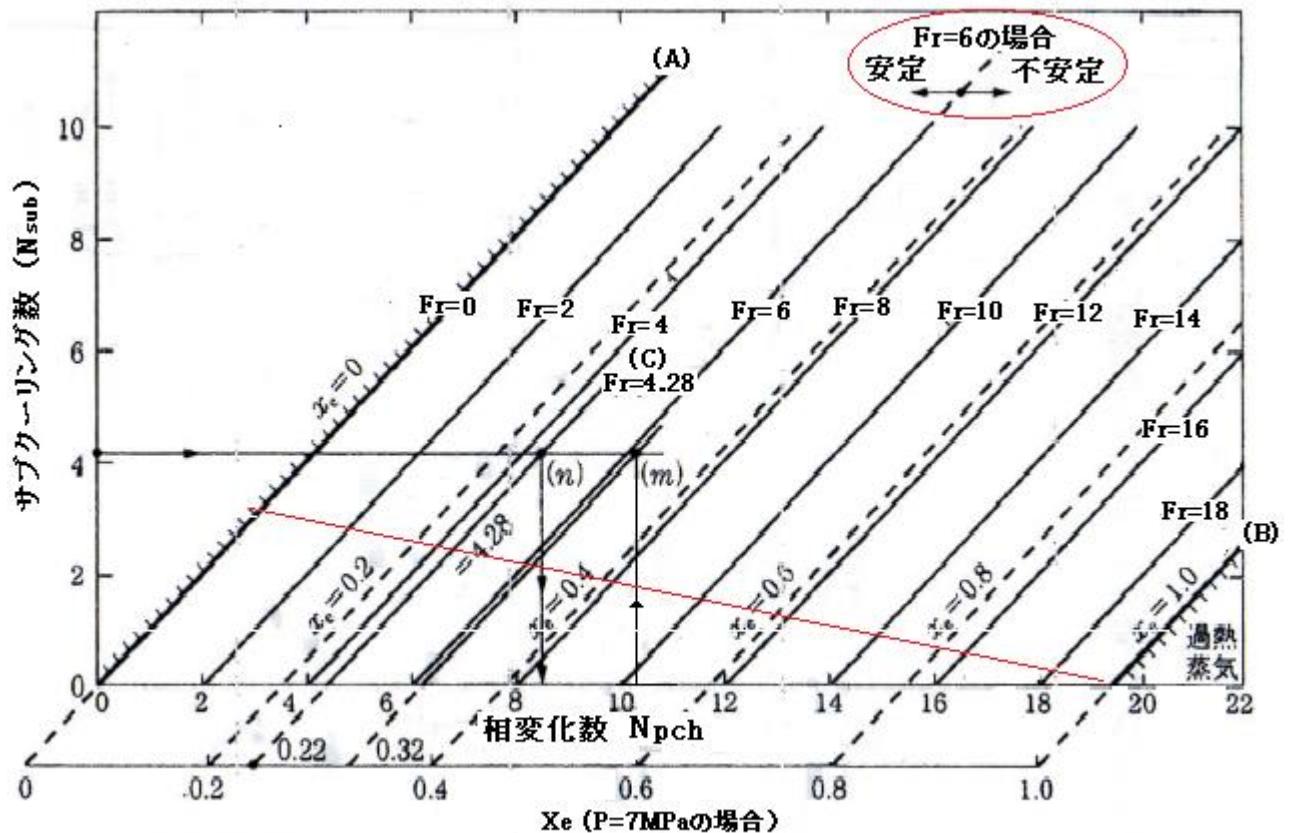


図3.18\* 流動の安定性判別線図[テキスト(4)より引用]

#### 4.2 中西の方法について<sup>(4)(8)</sup>

(1) 中西の安定判別法は、下図のような蒸発管モデルで表わされる設備、即ち液単相流の予熱区間、2相流の沸騰および気相流の過熱区間から構成され、全区間を一定差圧で保持されたシステムに適用できる。ただ、出入口の絞り圧損は考慮されていない。

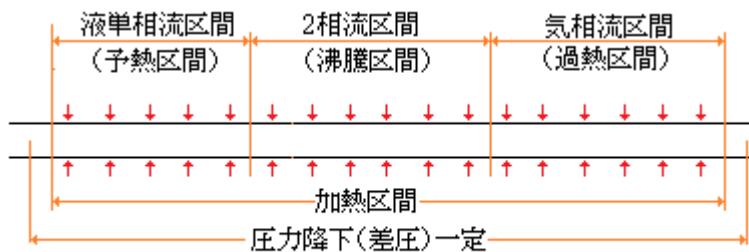


図10 過熱蒸発管モデル

(2) 簡易判別式として次の単純化された安定化条件を用いる。

$$\rho_g N_{pch} / \Delta \rho \leq (0.75 + 1.4 N_{sub} \rho_g / \Delta \rho) / \{1 - (1/F_m')\} \rightarrow \text{安定}$$

但し、 $F_m' = f_m L / (2D)$ 、記号定義は Ishii の判別式に同じ

この式はサブクーリング度( $i_{sub}/r$ )>0.2 および密度比( $\rho_u / \rho_g$ )>30 の場合に適用される。

なお  $N_{sub}$  と  $N_{pch}$  の定義式を用いて上式を変形すると次のようになる。

$$\Delta i_{sub}/r \geq \{(F_m' - 1)/(1.4F_m')\}Q/(rm) - 0.536$$

ここで  $r$  = 蒸発潜熱(kcal/kg)、 $Q$  = 単位時間当たりの加熱量(kcal/s)、 $m$  = 質量流量(kg/s)、 $\Delta i_{sub}$  = サブクールエンタルピ(kcal/kg)(=飽和液エンタルピー - 入口液エンタルピー)、

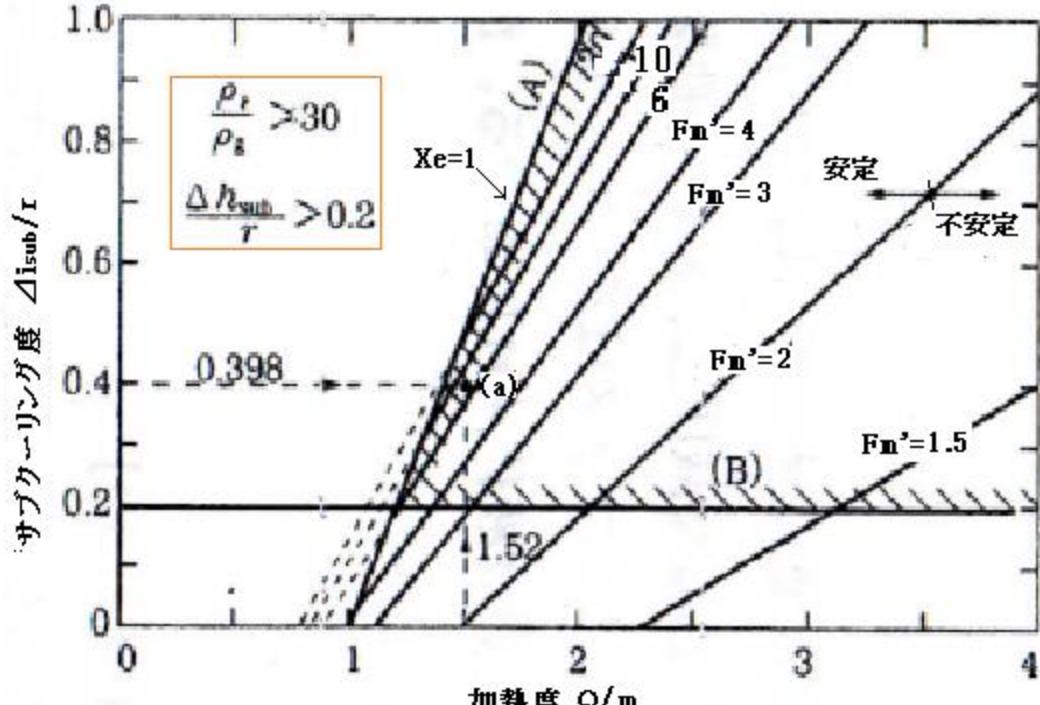


図3.25\* 中西らの安定性判別図 (テキスト(4)より引用)

(3) 上式を  $Q/(rm) - \Delta i_{sub}/r$  座標上にプロットすると図 3.25\* のようになる。境界ラインは(A)(B)に囲われた範囲で有効である。(A)は出口クオリティ  $\geq 1$  を満たす領域の境界ラインを示すもの。即ち熱とエンタルピ増加のバランスを考えると

$$(1/r)(Q/m) = (i - i_o)/r = [(i - i_f) + (i_f - i_o)]/r = (i - i_f)/r + \Delta i_{sub}/r$$

$X_e = 1$  では  $i = i_g$  (飽和蒸気エンタルピ) で、かつ  $i_g - i_f = r$  なので 右辺第1項は 1 になり、 $(i_{sub}/r) = Q/(rm) + 1$  の関係 (→境界ライン(A)) が成立する。また境界ライン(B)は、前述のサブクーリング度の制限( $i_{sub}/r > 0.2$ )を表わすもの。

図 3.25\* では、例えば  $Fm'$  が 10 のとき 運転点が  $[i_{sub}/r, Q/(rm)] = [0.398, 1.52]$  即ちポイント(a)であれば、 $Fm' = 10$  のときの境界ラインのわずかに右側になって不安定になることが予想される。

#### 4.3 滝谷らの方法について(7)(8)(4)

(1) 滝谷らの安定判別法は、図 11 のような蒸発管モデルで表わされる設備、即ち液単相流の予熱区間、2 相流の沸騰および気相流の過熱区間から構成され、出入口に絞り圧損は設け全区間を一定差圧で保持されたシステムに適用できる。

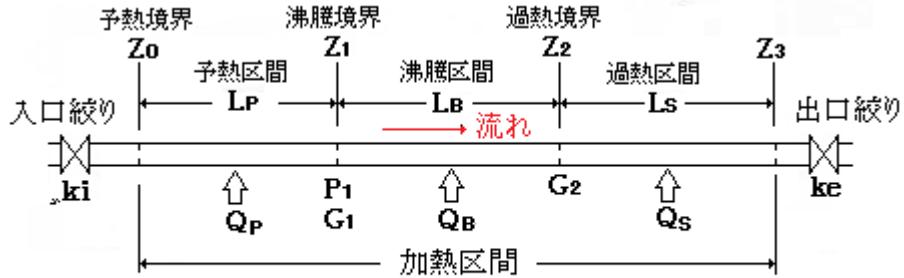


図11 過熱蒸発管モデル(出入口絞り付き)

(2) 滝谷らの判別法は分布定数系の安定性解析に関するスタディ(添付 C 参照)から得られたもので、次の単純化された安定化条件(以下、簡易判別式)を用いる。

$$\{1/(1-\gamma''/\gamma')\}\{1/(1-\textcolor{red}{y})\} - \{(1+b\tau_p/\tau_B)/(1+\tau_p/(2\tau_B))\} > 0 \rightarrow \text{安定}$$

$$y = \{K_i + C_{fp}L_{i1}/D\}\{G_1^{*2}/(2g\gamma_0F^2)\} / [\{K_i + C_{fp}L_{i1}/D\}\{G_1^{*2}/(2g\gamma_0F^2)\} + \{K_e + C_{fBS}L_{1e}/D\}\{G_2^{*2}/(2g\gamma_0F^2)\}]$$

$$\tau_p = F\gamma_0L_p/G_1^*, \quad \tau_B = F\gamma'(1-\alpha)L_B/G_2^*,$$

$$\alpha = \{1 - \gamma''/\gamma' + (\gamma''/\gamma')\ln(\gamma''/\gamma')\}/(1 - \gamma''/\gamma')^2$$

ここで  $y$ =全圧損に対する液単相区間圧損の割合(-)、 $b$ =質量流量に対する入熱量の依存度(-)、

$\alpha$ =ボイド率(-)、 $\tau_p$ =予熱区間滞留時間(s)、 $\tau_B$ =沸騰区間滞留時間(s)、

$\gamma'$ =飽和液比重量(kg/m<sup>3</sup>)、 $\gamma''$ =飽和蒸気比重量(kg/m<sup>3</sup>)、 $\gamma_0$ =液比重量(kg/m<sup>3</sup>)( $\doteq \gamma'$ )

$K_i$ =入口圧損係数(-)、 $K_e$ =出口圧損係数(-)、 $g$ =重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $D$ =管内径(m)、

$C_{fp}$ =予熱区間の管摩擦損失係数(-)、 $C_{fBS}$ =沸騰-過熱区間の管摩擦損失係数(-)、

$G_1^*$ =沸騰境界の質量流量(定常値)(kg/s)、 $G_2^*$ =過熱境界の質量流量(定常値)(kg/s)、

$L_{i1}$ =入口絞り～沸騰境界までの距離(定常値)(m)、 $L_p$ =予熱区間距離(定常値)(m)

$L_{1e}$ =沸騰境界～出口絞りまでの距離(定常値)(m)、 $L_B$ =沸騰区間距離(定常値)(m)

パラメータ  $b$  は次式で定義される(特異であるが実験値と考えていいと思う)。

$$Q_p/Q_p^* = b + (1-b)(G_1/G_1^*)$$

ここで  $Q_p$ =予熱区間の加熱量、 $G_1$ =沸騰境界の質量流量 (\*マークは定常値を示す)

加熱量が流量に依存せず一定であるときは  $b=1$ 、加熱量が完全に比例するときは  $b=0$  になる。

このパラメータの定義式は解析ないし実験ベースで設計的でないが、実際のシステムでは 1 に近いとされる。判別式から判るように  $b$  を大きくとれば左辺が小さくなって安全側の評価が可能であるから設計的には  $b=1$  を採ればよいと思われる。

摩擦係数  $C_{fBS}$  は 2 相摩擦損失係数で適宜設定が必要(小さい程  $y$  値が大きくなり安全側になる)。また流量  $G$  や区間距離  $L$  は流量変動で変化するが、判別式ではプロセス計算における定常値(初期値)を採用する。また  $L_p, L_B \rightarrow \tau_p, \tau_B$  は加熱量によって決まるので必然的にプロセス計算に依存することになる。

なお上記の簡易判別式を単純に変形すれば次のように  $y$  の評価式が得られる。

$$1 - \{1/(1-\gamma''/\gamma')\}\{(1+0.5\tau_p/\tau_B)/(1+b\tau_p/\tau_B)\} < y \rightarrow \text{安定}$$

(3) 簡易判別式から以下の傾向が読み取れる。

- ① 予熱区間の圧損が大きいほど、特に入口絞り  $K_i$  が大きいほど安定化する。
- ② 沸騰-過熱区間の圧損が大きいほど、特に出口絞りが大きいほど不安定化する。

- ③ サブクーリング量が大きく予熱区間が長いほど不安定化する(注意!)。
- ④ 流体は蒸発してしまうので相変化のパラメータではなく加熱量の多寡は影響が希薄と思われる。
- ⑤ システム圧力が高く密度比( $\gamma'/\gamma''$ )が小さいほど安定化する。
- ⑥ 過熱区間は摩擦圧損の形でも影響を与える(区間長が長いとやや不安定化に向かう)。
- ③によれば  $N_{sub}$  が大きいほど不安定化することになり 過熱区間を持たない(予熱+沸騰)区間モデル と逆傾向になっている。また④も (予熱+沸騰)区間モデル と違っている。注目すべき。

- (4) 簡易判別式に基づく簡易判定図を Fig.7\* に示す。この図はパラメータ  $b$  を 1 即ち加熱量一定にとっている。

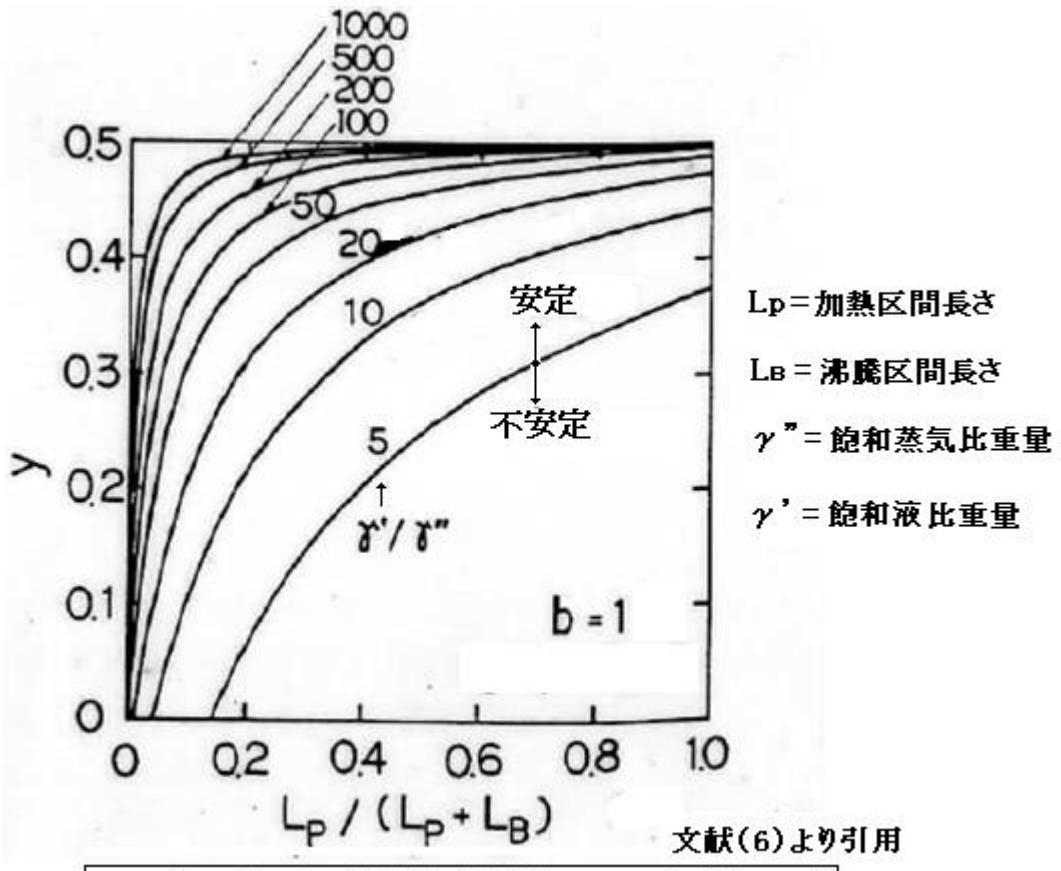


Fig.7\* 入熱一定で慣性効果無視のときの安定性マップ

#### 4.3 テキスト(4)による方法

テキスト(3)は自然循環沸騰流について次の 3 つの簡易判別法を紹介している。

蒸気管出口ボイド率  $\alpha_e$  による判別、特性数  $Ye$  による判別、限界加熱量による判別

##### (1) 蒸気管出口ボイド率による判別<sup>(4)</sup>

不安定現象は加熱量即ち相変化の度合いが大きくなるほど不安定化しやすい。そこで蒸気管出口ボイド率  $\alpha_e$  が安定性評価の指標になりうる。この場合

$$\alpha_e \leq \alpha_c \rightarrow \text{安定}$$

限界ボイド率  $\alpha_c$  については、図 3-33\*、図 3-34\* のようなデータがある。フレオン R113 の場合、殆どサブクーリング度合いや圧力への依存性がなく 0.85 程度になる。水の場合は、多少サブクーリングや圧力によって変わるが、だいたい 0.6~0.7 程度(ただ低压では 0.5 を割り込む)。図 3-33\* は入口絞りが余り大きくなかった時のデータと思われるが、やはり絞りが大きくなると図 3-34\* のように

$\alpha_c$  はアップする(安定化傾向になる)。ただ強制循環の場合に較べ緩慢である。

循環系の設計規準では  $\alpha_e$  は 0.7 以下に採られるいるようであるが、低圧(低密度比)の場合は注意すべきではないかと思われる。

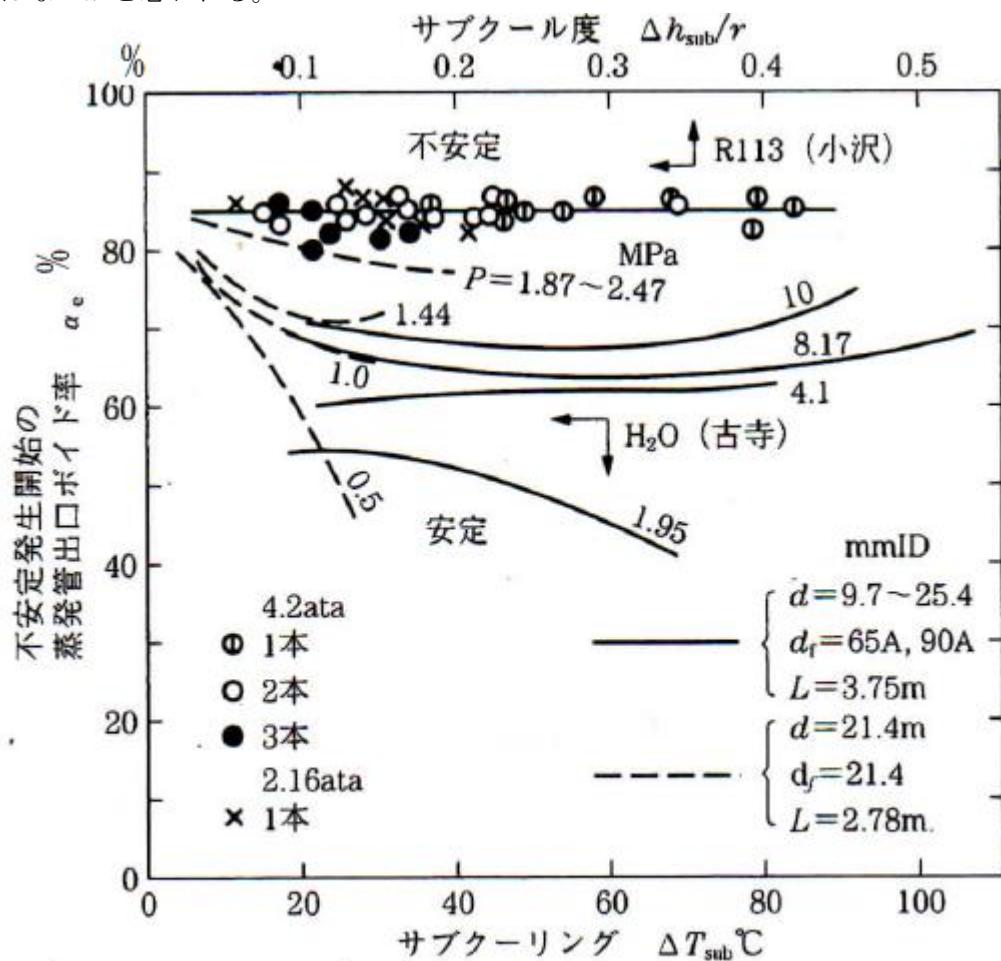


図 3.33\* 自然循環における密度波振動発生の限界の出口ボイド率  
(小沢<sup>25)</sup>, 古寺ら<sup>13)16)</sup>の実験による) [テキスト(4)より引用]

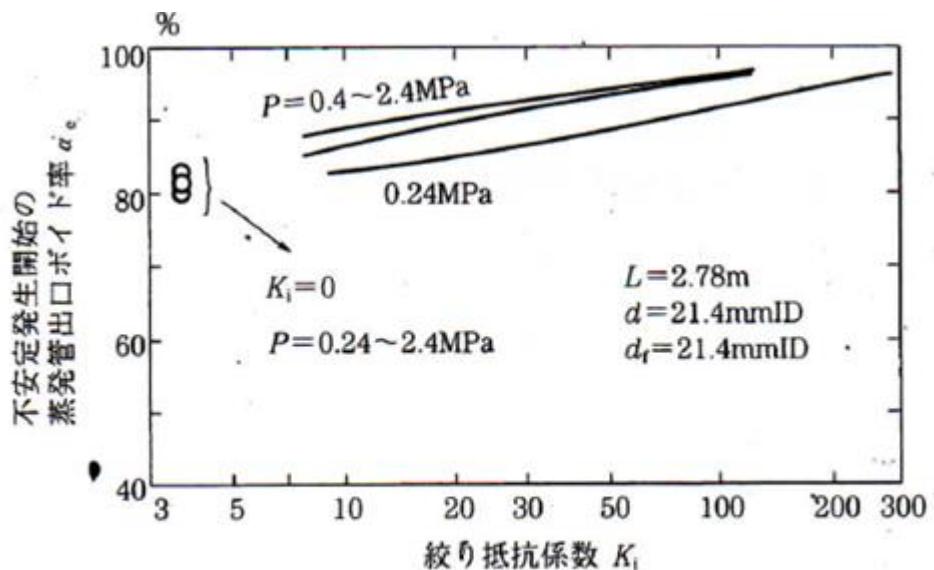


図 3.34\* 自然循環における密度波振動発生限界に及ぼす入口抵抗の  
影響 (古寺らの実験値による<sup>13)16)</sup>) [テキスト(4)より引用]

## (2) 特性数 $Y_e$ による判別<sup>(3)(4)</sup>

自然循環流の安定性解析によれば不安定の発生限界は図 3.35\* のように与えられる。この図から安全側に次の判別式が設定できる。

$$(Y_e = 1 + \alpha X_e = 1 + \alpha / R) \leq 11 C_{ri} C_{re} C_{sub} \rightarrow \text{安定}$$

ここで  $Y_e$  = 特性数、 $X_e$  = 出口クオリティ(-)、 $\alpha$  = 密度比(-) [ $= (v_o'')/v_o' - 1$ ]、

$v_o''$  = 鮫和蒸気の比容積(m<sup>3</sup>/kg)、 $v_o'$  = 鮫和液の比容積(m<sup>3</sup>/kg)、 $R$  = 循環比(-) ( $= 1/X_e$ )

$C_{ri}$  = 入口圧損係数による補正係数(入口絞り無しの場合 1)

$C_{re}$  = 出口圧損係数による補正係数(出口絞りなしのとき 1)

$C_{sub}$  = 過冷度  $\Delta T_{sub}$  (= 鮫和液温 - 液温) による補正係数( $\Delta T_{sub} = 0$  の場合 1)

上記の判別式は、サブクーリング零、入口/出口摩擦無しという条件では  $Y_e \leq 11$  になる。補正係数  $C_{ri}$  と  $C_{sub}$  は図 3.35\* と図 3.36\* から設定する。図 3.35\* のフリクション数の定義は不明(2 相摩擦圧損係数か?)。入口絞りによる影響は大きく強制循環のときと同様に抵抗係数  $K_i$  がおおきくなるとかなり安定化する。入口に較べ出口絞りの影響は小さいようである(せいぜい 0.5?)。またサブクーリングが大きくなると判別式の右辺は 4 度まで下がる。これは前項の傾向と合う。図 3.36\* からはシステム圧力の影響もうかがえるが特定できない。

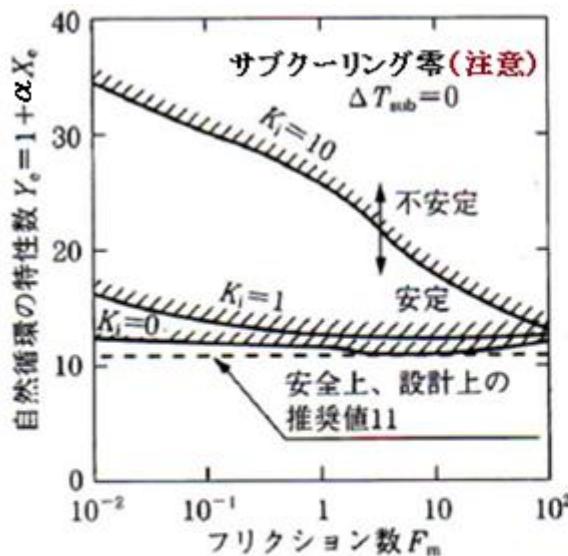


図 3.35\* 自然循環における密度波振動の発生限界  $Y_e$  の値 (古寺の解析値による)

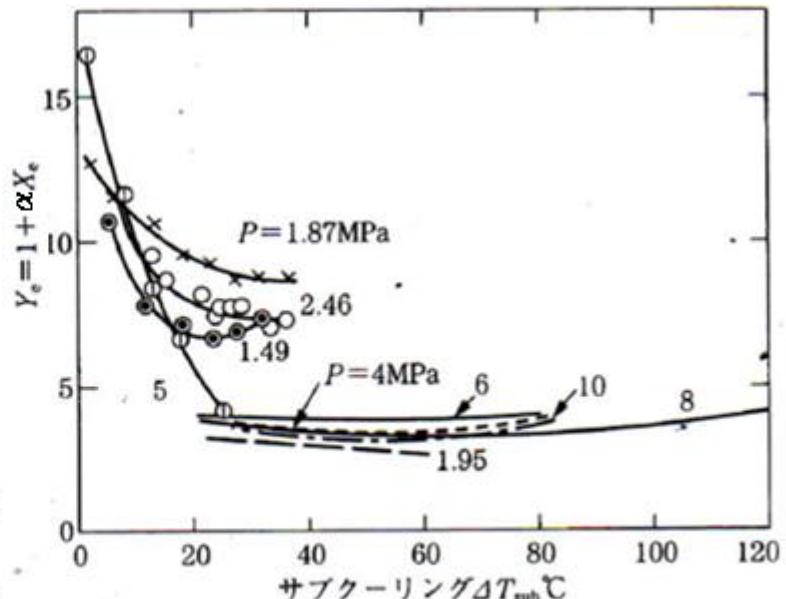


図 3.36\* 自然循環における密度波振動の発生限界  $Y_e$  に及ぼすサブクーリングの影響 (古寺らの実験値による)

## (3) 限界加熱量による判別<sup>(4)</sup>

Mathisen らのスタディによれば、密度波発生の限界加熱量  $Q_{cr}$  は次式で表わされる。

$$Q_{cr} = \sigma_k \sigma_p \sigma_s Q_{TRH} \quad (\text{実験式})$$

但し  $\sigma_k = \exp [ \ln K_i / 10.33 - (K_i + K_f) / \{ 68.2 \exp(0.157 K_i) \} ]$

$\sigma_p = (P/50)^{0.55}$

$$\sigma_s = \Delta T_{sub} \exp \{ -P / (25 K_i^{0.1}) \} / (22.22 K_i^{0.34}) + 4.1 \exp [ -\Delta T_{sub} / 4 \exp(P/40) ] / P^{0.57} + \{ 12.65 K_i \exp(P/250) \exp(K_i/250) + \ln(P/40) \exp(\Delta T_{sub}/235) \} / (24 K_i)$$

ここで  $\sigma_k$  = 絞り抵抗影響係数、 $\sigma_p$  = 壓力影響係数、 $\sigma_s$  = 入口サブクーリング係数、

$Q_{TRH}$  = 標準状態の加熱量 (= 134.5 k W/m)、 $P$  = システム圧力(atg)、

$\angle T_{sub}$ =過冷度(°C)、 $K_i$ =蒸発管入口圧損係数(-)、 $K_f$ =降水管の絞り圧損係数(-)、

加熱量  $Q$  が  $Q_{cr}$  以下のとき安定化する 即ち  $Q \leq Q_{cr} \rightarrow$  安定化

なお、この判別式は下記の範囲で適用できる。

$$1.6 < K_i < 11.6, \quad 0 < K_f < 70, \quad 10 < P < 60 \text{ atg}, \quad 4 < \angle T_{sub} < 60 \text{ °C}$$

図 3.37\*に示すように  $K_i$  を大きくすると  $\sigma_k \rightarrow Q_{cr}$  が大きくなりより安定化するが、 $K_f$  が大きくなると逆に小さくなつて不安定化する。

圧力については圧力の 0.55 乗に比例して  $\sigma_p \rightarrow Q_{cr}$  が増加する(圧力が増加すると安定化する)。入口サブクーリングの影響は  $\sigma_s$  に表わされるが、図 3.38\*に示すように放物線状に変化する。即ち  $\angle T_{sub}$  の増加につれて  $\sigma_s \rightarrow Q_{cr}$  は低下して底をつきそれから上昇に転じる。

これらの傾向は前(1)(2)項と符合する。

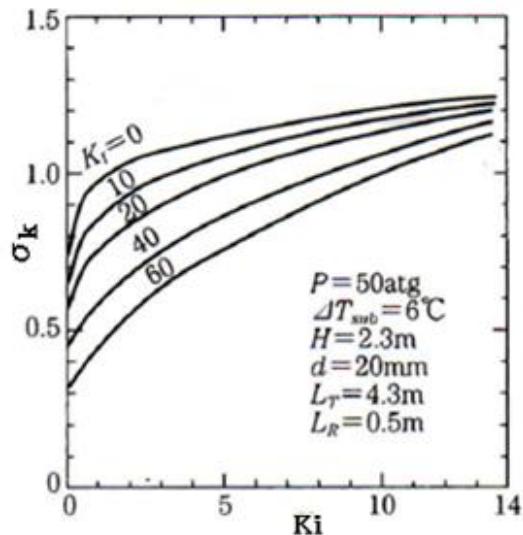


図3.37\* 自然循環による密度波振動の発生限界に対する  $\sigma_k$  の値(Mathisenによる)  
(テキスト(4)より引用)

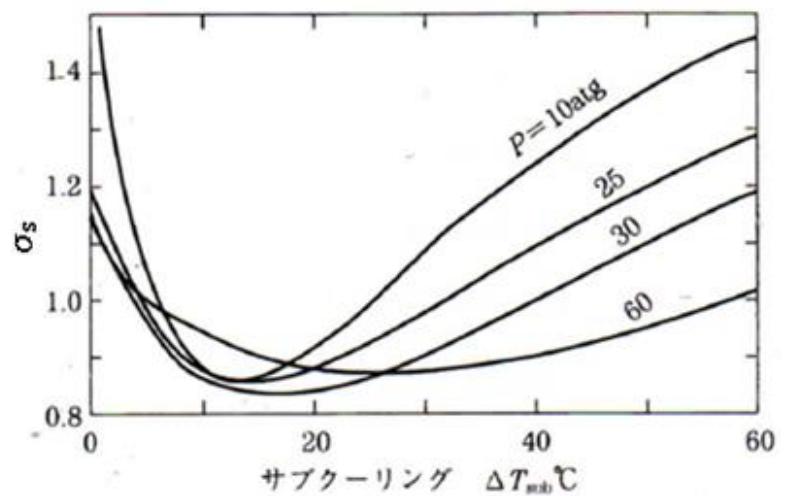
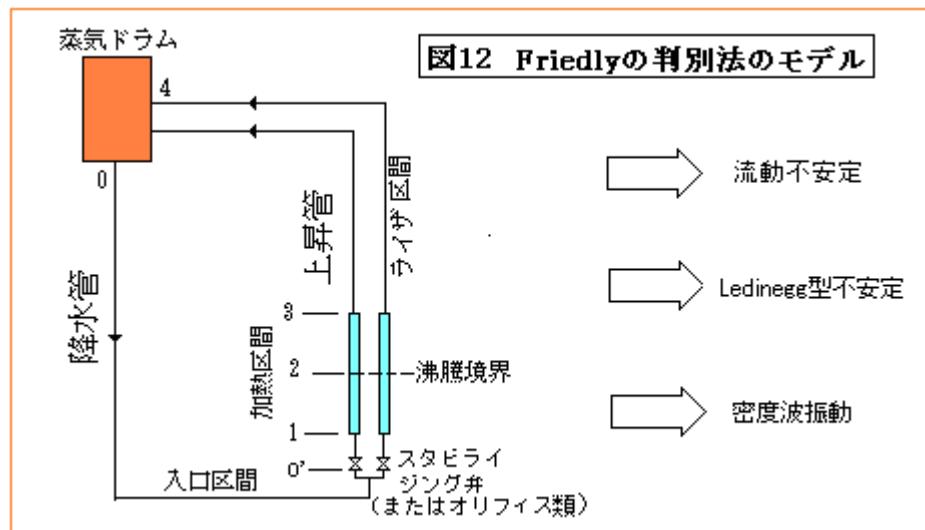


図3.38\* 自然循環による密度波振動の発生限界に対する  $\sigma_s$  の値  
(Mathisenによる<sup>15)</sup>) (テキスト(4)より引用)



#### 4.4 Friedly の方法<sup>(12)</sup>

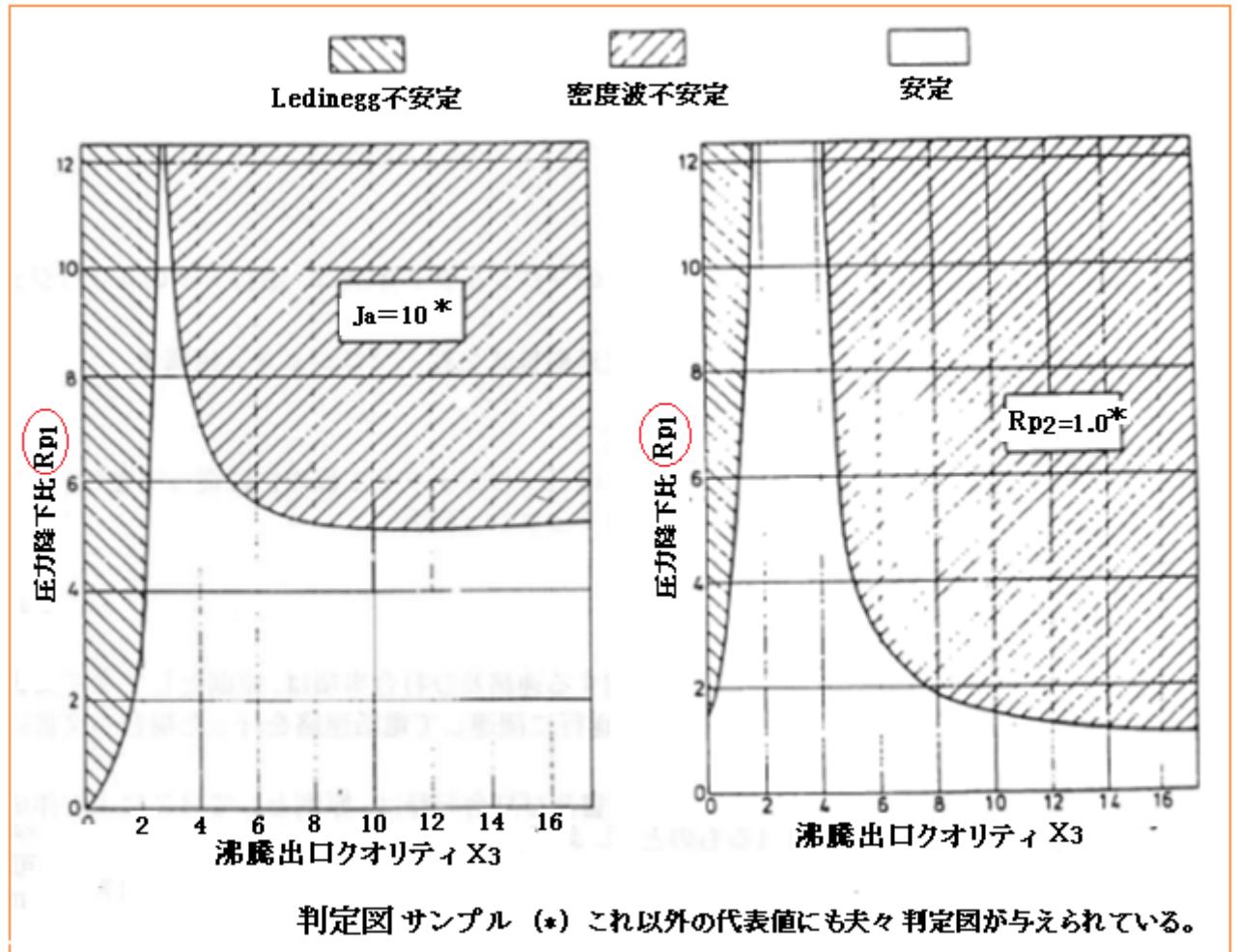
Friedly は自然循環沸騰 2 相流について不安定流動(Ledinegg 型不安定/密度波不安定/その他不安定)の簡易判定法を提案している。ユニークなのでそのプロフィールを紹介しておく。

判定対象モデルは上図の通り。蒸気ドラムー降水区間ー上昇区間よりなり、上昇管は加熱区間とライザ区間からなる。降水管出口に絞り抵抗が配置されている。自然循環ボイラを想定したものであるがサーモサイフォンリボイラにも適用できる。

判定手順はやや複雑になるが粗々には次のようなになる。

- ステップ 1) 各区間(降水/加熱/上昇)の摩擦/加速/ヘッド損失及び加熱区間出口クオリティ  $X_3$  を計算
- ステップ 2) 全圧力比/サブクールヤコブ数  $J_a$  から Ledinegg 型不安定/その他不安定の可能性抽出
- ステップ 3) 各圧損項を較べ最大圧損項  $\Delta P_{dom}$ 、ネクスト最大圧損項  $\Delta P_{sec}$  を策定
- ステップ 4) 圧力比  $R_{p1} = \Delta P_{dom} / \Delta P_{01FA}$ (降水管圧損および  $R_{p2} = \Delta P_{sec} / \Delta P_{dom}$  の計算
- ステップ 5) 判定図( $X_3, R_{p1}, R_{p2}$ )から安定性を判別。更に判定図( $R_{p1}, X_3, J_a$ )で判定追加。

サブクールヤコブ数は Ishii の簡易判定図の  $N_{sub}$  に相当する。判定図は 31 枚用意されている。サンプルを下図に示す。



引用テキスト・文献)

- (1) 日本機械学会編「気液 2 相流技術ハンドブック」第 6 章流動の安定性
- (2) 植田「気液 2 相流—流れと熱伝達」(養賢堂)
- (3) 石谷,赤川,中西,小沢ら「機械工学体系-蒸気動力第 5 章蒸発管系の流動の安定性(コロナ社)
- (4) 藤井,赤川,伊藤「気液 2 相流の動的配管計画」第 3 章 (日刊工業新聞社)
- (5) ANL-76-23 Study on Flow Instabilities in Two-phase Mixtures M.Ishii (1976)
- (6) "Density Wave Instability in Once-through Boiling Flow System ( I )"  
By Takitani,takemura (Journal of Nuclear Science and Technology. Vol.15 No.5
- (7) "Density Wave Instability in Once-through Boiling Flow System ( II )"  
By Takitani,(Journal of Nuclear Science and Technology. Vol.15 No.6
- (8) "自然循環沸騰 2 相流の不安定流動(第 5 報簡易判別法) "古寺 (JSME 論文 B 編 54-497)
- (9) "気液 2 相流における流動不安定現象について" 福田(配管技術 '90.12)
- (10) "LN2 自然循環ループにおける循環特性と密度波振動" 浅尾、小澤ほか  
(混相流 Vol. 6 No.2 P159-172)
- (11) 気液 2 相流の流体関連振動の解明 (講習会テキスト) 経営開発センタ
- (12) Stability Assessment of Boiling Two-phase System (逸文 )

添付 A→文献(3)、添付 B→文献(5)、添付 C→文献(7)、添付 D→文献(3)、添付 E→文献(10)