自然循環沸騰二相流の不安定流動*
(第4報, 圧力損失成分の効果)

古 寺 雅 晴**

Flow Instabilities in a Natural Circulation Boiling Channel
(4th Report, Effect of Each Pressure Loss)

Masaharu FURUTERA

The frequency responses of the transfer function with respect to each pressure loss are studied to clarify the cause of the density-wave oscillation in a natural circulation boiling channel. In this work, the various parameters in the transfer function are classified into two groups: the common variable and the coefficient of the transfer function. The effects of each pressure loss on the stability are shown in the modified Nyquist diagrams with regard to those parameters. As a result, it was made clear that the inertia loss and the friction loss become the cause of the unstable flow as the parameter Y_e becomes large, while the potential head loss does not cause the unstable flow. The acceleration loss always cause the unstable flow regardless of Y_e .

Key Words: Multiphase Flow, Unsteady Flow, Fluid Vibration

1. 緒 言

自然循環沸騰二相流における密度波振動の発生条件について、パラメトリックな研究⁽¹⁾⁽²⁾や分類法的研究⁽³⁾があるが、各圧力損失成分の不安定流動発生条件に寄与する効果について、総合的に論じたものがない。

そこで、これらの各効果について、理論的解析を試み、不安定流動の発生について、よりいっそう理解を深めることにした。理論は、前報⁽⁴⁾に述べた均質二相流モデルを用い、まず、パラメータの整理を試みた。そして、蒸発管内の各圧力損失成分の伝達関数について、その周波数応答を、これらパラメータについて計算し、修正ナイキスト線図上に示して、安定性に与える影響を明らかにした。そして、蒸発管に関する圧力損失全体へのこれらの影響を図示して評価した。

2. 記 号

A : 管路内断面積

$B(\bar{S})$: 定常の蒸発開始点位置における乾き度の入口流量に関する伝達関数で、表1に示す

$C_e = 1 - 1/Y_e$

$C(\bar{S})$: 蒸発管出口流量の入口流量に関する伝達関数で、表1に示す

D : 管路内径

$E(\bar{S})$: 蒸発管出口乾き度の入口流量に関する伝達関数で、表1に示す

f : 摩擦損失係数

g : 重力の加速度

H_{fg} : 蒸発潜熱

$j = \sqrt{-1}$

L : 管軸方向の長さ

$L^* = Q_0 H_{fg} / R_{10}$

$\Delta(\Delta P)$: 圧力損失の変動分

Q_0 : 定常時の質量流量

q_i : Q_0 で無次元化した蒸発管入口の質量流量変動分

R_{10} : 加熱管の単位長当たりの加熱量

r : 式(3)で定義されるベクトル

s : ラプラス演算子

$\bar{s}$: 式(2)に示す無次元化したラプラス演算子

* 昭和61年11月24日 関西支部第246回講演会において講演、原稿受付 昭和61年5月26日。

** 正員、日立造船(株) (〒554 大阪市此花区桜島1-3-22)。

- T_a : 非加熱二相流部の流動時間
 T_B : サブクール沸騰開始点から、飽和沸騰開始点までの通過時間
 T_e : 時定数 $= (A_T L^*) / (\alpha Q_0 V_0)$
 T_h : 非加熱二相流垂直部の流動時間
 T_{SB} : 加熱開始点からサブクール沸騰開始点までの通過時間
 U : 蒸発管入口流速
 V_0 : 飽和液の比容積
 V_0'' : 飽和蒸気の比容積
 X_e : 蒸発管出口乾き度
 $Y_e = 1 + \alpha X_e$
 $Z_e = Y_e - 1$
 $\alpha = V_0'' / V_0 - 1$
 ξ : 絞りや曲がり部における圧力損失の抵抗係数
 θ : 式(4)で定義される位相角
 ω : 周波数応答を計算するときの周波数

添 字

- a : 非加熱二相流部
 acc : 加速損失
 CD : 下部連絡管
 D : 降水管
 e : 出口部
 f : 加熱単相流
 fr : 摩擦損失
 h : 位置水頭
 i : 入口部
 $iner$: 慣性損失
 T : 加熱管
 TP : 加熱二相流
 to : 蒸発管全体
 * 圧力損失に $(gA^2)/(Q_0^2 V_0)$ を乗じて無次元化したものおよびそれに関係するもの

3. パラメータの整理

圧力損失の非定常変化式 $\{\Delta(P)^*\}$ の各成分式⁽⁵⁾のうち、慣性損失項は、ラプラス演算子 s の最大一次の項を持っているため、このままでは、周波数を零から ∞ まで与えて、周波数応答を計算すると、ナイキスト線図上で、無限遠へ発散していく。そこで、これを防ぐために、次の形に変形した G^* を伝達関数として、以下に検討する。

$$G^* = \frac{-\Delta(P)^*}{s} \cdot \frac{1}{q_i} \dots \dots \dots (1)$$

ここで

$$\bar{s} = T_e S \dots \dots \dots (2)$$

この変形は、安定性について、影響を与えないので、安定性を検討する範囲内では許容される。表1は、この変形後の伝達関数を示す。本表より、各伝達関数は、管路流域に対応して、各圧力損失成分のどれにも影響する変数と、各圧力損失成分の個々の大きさを左右する係数とから成っていることがわかる。

本報では、前者を共通パラメータ、後者を係数パラメータと称し、それらを表2にまとめている。

表3には、蒸発管を例として、本論文のパラメータと、他の研究者によるそれとの比較を示す。本論文では蒸発管だけに限ると、6個のパラメータに整理される。ここでは、とりあえず蒸発管だけに着目している

表1 圧力損失の伝達関数

Unheated subcooling region	Heated subcooling region
$(G_0)_{iner}^* = K_{iner} \cdot Z_e$ $(G_0)_{fr}^* = K_{fr} / \bar{s}$	$(G_1)_{iner}^* = T_0 / T_e$ $(G_1)_{fr}^* = \frac{F_{fr} \cdot (T_0 / T_e)}{Z_e \cdot (T_0 / T_e)} \cdot \frac{1}{\bar{s}}$
flow region	$(G_T)_h^* = \frac{H_h}{Z_e} \cdot \frac{1}{\bar{s}} \left\{ \frac{1}{\bar{s}-1} \left[C_e + \frac{e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} - 1}{\bar{s}} \right] - \frac{1/Y_e - e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}}}{\bar{s}-1} B(\bar{s}) \right\}$ $(G_T)_{iner}^* = \ln Y_e + \frac{1}{\bar{s}-1} \left(\ln Y_e + \frac{Y_e e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} - 1}{\bar{s}-1} \right)$ $- \frac{1 - e^{-(T_0/T_e) \cdot \bar{s}}}{\bar{s}-1} \left(\ln Y_e + \frac{Y_e e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} - 1}{\bar{s}-1} \right)$ $(G_T)_{acc}^* = [2(Y_e \cdot C(\bar{s}) - 1) + E(\bar{s})] / \bar{s}$ $(G_T)_{fr}^* = \frac{H_{fr}}{Z_e} \cdot \frac{1}{\bar{s}} \left\{ Y_e^2 - 1 - \frac{1}{\bar{s}-1} \left\{ Z_e^2 \bar{s} - Y_e Z_e - \frac{Y_e^2 e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} - 1}{\bar{s}-2} \right\} + \left[Z_e + \frac{\bar{s}}{\bar{s}-1} \left\{ Z_e + \frac{Y_e^2 e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} - 1}{\bar{s}-2} \right\} \right] B(\bar{s}) \right\}$ $(G_T)_{et}^* = Z_e \cdot \frac{Y_e}{\bar{s}} \left\{ C(\bar{s}) + \frac{E(\bar{s})}{2 Y_e} \right\}$
two-phase	
Boiling	
Unheated two-phase flow region	$(G_0)_h^* = R_h \cdot \frac{1}{Y_e} \cdot \frac{E(\bar{s})}{\bar{s}^2} \left\{ e^{-(T_h/T_e) \cdot \bar{s}} - 1 \right\}$ $(G_0)_{iner}^* = R_{iner} \left\{ C(\bar{s}) + \frac{E(\bar{s})}{Y_e} \left\{ 1 + \frac{e^{-(T_0/T_e) \cdot \bar{s}} - 1}{(T_0/T_e) \cdot \bar{s}} \right\} \right\} \cdot Z_e$ $(G_0)_{acc}^* = R_{acc} \frac{1 - e^{-(T_0/T_e) \cdot \bar{s}}}{\bar{s}} \cdot E(\bar{s})$ $(G_0)_{fr}^* = R_{fr} \frac{1}{\bar{s}} \left\{ 2 Y_e \left\{ C(\bar{s}) + \frac{E(\bar{s})}{Y_e} \left\{ 1 + \frac{e^{-(T_0/T_e) \cdot \bar{s}} - 1}{(T_0/T_e) \cdot \bar{s}} \right\} \right\} + E(\bar{s}) \cdot \frac{1 - e^{-(T_0/T_e) \cdot \bar{s}}}{(T_0/T_e) \cdot \bar{s}} \right\}$ $(G_0)_{et}^* = R_{et} \cdot \frac{Y_e}{\bar{s}} \left\{ C(\bar{s}) + \frac{E(\bar{s})}{2 Y_e} \left\{ 2 - e^{-(T_0/T_e) \cdot \bar{s}} \right\} \right\}$
where	
$B(\bar{s}) = - \frac{1 - e^{-(T_0/T_e) \cdot \bar{s}}}{\bar{s}}$ $C(\bar{s}) = 1 - \frac{C_e \bar{s} + e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} - 1}{\bar{s}-1} + \frac{\bar{s}}{\bar{s}-1} \left\{ \frac{1}{Y_e} - e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} \right\} B(\bar{s})$ $E(\bar{s}) = - \frac{1 - Y_e e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}}}{\bar{s}-1} + \frac{Y_e e^{-(\ln Y_e) \cdot \bar{s}} - 1}{\bar{s}-1} \cdot B(\bar{s})$	

が、このことは、蒸発管上下の差圧が一定であるという条件(並列蒸発管構造)に相当する。共通パラメータ (T_B/T_e) ならびに加熱による相変化に関する蒸発管出入口の比容積比を意味する Y_e は、それぞれ Saha ら⁽⁶⁾ の Subcooling Number および Phase Change Number に一致する。一方、係数パラメータ ζ_e , ζ_i は、出入口の絞り係数、 H_h はフルード数の逆数であり、 H_{fr} は修正摩擦係数とも称すべきものである。慣性損失と加速損失には係数パラメータは存在しない。

表 2 パラメーター一覧

	Common parameter	Pressure Term	Coefficient
Unheated Subcooling region	Y_e	Inertia	$K_{iner} = \frac{1}{L_T} \left(\frac{A_T}{Q_T} \right) \times \left(\frac{Q_a}{A_a} L_a + \frac{Q_{co}}{A_{co}} L_{co} \right)$
		Friction & inlet throttling	$K_{fr} = f_D \left(\frac{A_T}{A_a} \right) \left(\frac{Q_a}{Q_T} \right)^2 \frac{L_a}{D_a} + f_{co} \left(\frac{A_T}{A_{co}} \right) \left(\frac{Q_{co}}{Q_T} \right)^2 \left(\frac{L_{co}}{D_{co}} \right) + \left(\frac{A_T}{A_{co}} \right)^2 \left(\frac{Q_{co}}{Q_T} \right)^2 \sum \zeta_i$
Heated subcooling region	Y_e T_B/T_e	Inertia	—
		Friction	$F_{fr} = f_T (L_T/D_T)$
Boiling two-phase flow region	Y_e T_B/T_e (T_{SB}/T_e)	Head	$H_h = 9L_T/U^2$
		Inertia	1.0
		Acceleration	1.0
		Friction	$H_{fr} = \left(\frac{f_{Te}}{2} \right) \left(\frac{L_T}{D_T} \right)$
		Outlet throttling	ζ_e
Unheated two-phase flow region	Y_e T_B/T_e (T_{SB}/T_e) T_h/T_e T_a/T_e	Head	$R_h = H_h \left(\frac{Q_a}{A_a} \right) \left(\frac{A_T}{Q_T} \right)$
		Inertia	$R_{iner} = \left(\frac{Q_a}{A_a} \right) \left(\frac{A_T}{Q_T} \right) \left(\frac{L_a}{L_T} \right)$
		Acceleration	$R_{acc} = \left(\frac{A_T}{A_a} \right)^2 \left(\frac{Q_a}{Q_T} \right)^2$
		Friction	$R_{fr} = \frac{f_a}{2} \left(\frac{Q_a}{Q_T} \right)^2 \left(\frac{A_T}{A_a} \right)^2 \frac{L_a}{D_a}$
		Outlet throttling etc	$R_{et} = (\zeta_a)_e \left(\frac{Q_a}{Q_T} \right)^2 \left(\frac{A_T}{A_a} \right)^2$

表 3 パラメータ比較

Present work	Yamauchi ⁽¹⁾ et al	P.Saha ⁽⁶⁾ et al	Fukuda ⁽³⁾ et al
T_B/T_e	E	N_{sub}	Υ
Y_e	$L+1$	$N_{pch}+1$	ν
$\zeta_i(\zeta_{co})$	K_i	K_i	K
ζ_e	K_2	K_e	—
H_h	$G \cdot Z_e$	—	—
H_{fr}	$F \cdot Z_e$	—	—

4. 解析と考察

4.1 修正ナイキスト線図 伝達係数 G^* の周波数応答を図示するのに、いわゆるナイキスト線図が用いられる。本報では、表 1 に示す伝達関数の s に $j\omega$ を代入して、 ω を 0.01 から 100 まで変化させ、周波数応答を計算したが、その結果ゲイン $|G^*|$ は数オーダ以上の範囲で変化した。そこで $|G^*|$ は対数目盛で表示した。また $|G^*|$ の最小値のオーダを原点とした。すなわち、式(3)と式(4)に定義した r および位相角 θ を、図 1 に示すように描いた。したがって、本図の横軸は実軸、縦軸は虚軸である。

$$|r| = |G^*| - 0[\text{Min}|G^*|] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(G^*)}{\text{Re}(G^*)} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、原点の値は、 ω が 100 ぐらいのときのゲインのオーダに対応しており、後で、図に示すように、安定判別に支障ない程度に十分小さい。以上のようにして求めた安定判別図を、本報では、修正ナイキスト線図と呼ぶ。

この方法によれば、後述の式(5)に示す安定判別の特性方程式を、既報⁽⁵⁾で示したような変形を実施せず、そのままの形で周波数応答曲線が原点を囲むか否かによって、安定判別をすることもできる。これは、通常よく行われる実軸上の (-1) 点を、囲むか否かの判別を、原点に移して行うものである。以下には、表 1 に示した各圧力損失成分に対応する伝達関数の周波数応答曲線を、図 1 に示すような修正ナイキスト線図にて示し、安定判別する。計算は、サブクールがない状態 ($T_B/T_e = 0$) で、共通パラメータ Y_e を、種々与えた結果を示している。

図 1 修正ナイキスト線図

4.2 各圧力成分の極座標図 図2は、加熱二相流部の位置水頭に関する伝達関数 $(G_T)_h^*$ を、係数パラメータ H_h によって除したもののについての極座標図を示す。 ω を次第に大きくすると、曲線は位相角 (-90°) から (-180°) へ動き、 (-180°) の方向から限りなく原点に近づくが、原点を囲むことはない。したがって、 $(G_T)_h^*$ は安定である。

図3は、同じく慣性損失に関する伝達関数 $(G_T)_{iner}^*$ の極座標図を示す。ここで、表1に示す式より、 ω が零および ∞ のとき、 $(G_T)_{iner}^*$ は、それぞれ Z_e および $\ln Y_e$ となる。したがって、曲線は、実軸上の正の値 Z_e から出発し、最後は、実軸上の正の値 $\ln Y_e$ に近づいていく。また、本図より、安定から不安定になる Y_e の限界値が、10と20の間に存在することがわかる。

図4は、加熱損失に関する伝達関数 $(G_T)_{acc}^*$ の極座標図を示す。 Y_e の値が1.5から200までの範囲で、すべての曲線は原点を囲んでおり、不安定である。したがって、加速損失は、不安定な効果のみを持つことがわかる。

図5は、摩擦損失に関する伝達関数 $(G_T)_f^*$ を係数パラメータ H_{fr} で除したもののについての極座標図を示す。図5より、 Y_e の限界値が10と20の間に存在することがわかる。すべての曲線は、位相角 (-90°) から出発し、最後は原点に近づいていく。

図6は、蒸発管出口損失に関する $(G_T)_{ex}^*$ を、係数パ

ラメータ ξ_e によって除したものの極座標図を示す。図6は、図5に示した $(G_T)_f^*/H_{fr}$ と形がよく似ているが、これは二相流摩擦損失係数を一定とした取扱い方⁽⁴⁾と、出口損失に関する取扱い方の類似性によって予想されることでもある。ところで、蒸発管出口に絞りをつけることは、一般に不安定流動の発生を促進するといわれているが、図6より Y_e が約5以下ならば、安定性を保つ効果を有することがわかる。

4.3 蒸発管全体の流れに対する極座標図 4.2節に示したとおり各々の圧力損失成分の効果は明らかになったが、蒸発管全体の流れに対しては、次式で示す蒸発管に関する特性方程式から算定して合成された極座標図となる。

$$(G_T)_{to}^* = (G_T)_h^* + (G_T)_{iner}^* + (G_T)_{acc}^*$$

図3 慣性損失: $(G_T)_{iner}^*$

図4 加速損失: $(G_T)_{acc}^*$

図2 位置水頭: $(G_T)_h^*$

$$+(G_T)_{fr}^* + (G_T)_{et}^* \dots\dots\dots (5)$$

自然循環の場合は、系の安定性に対して係数パラメータ H_h が最大の影響力を持つと考えられるので、 $(G_T)_{et}^*/H_h$ を図示することにする。したがって、式(5)の右辺第2、第3の係数パラメータは $(1/H_h)$ 、第4項のそれは (H_{fr}/H_h) 、第5項のそれは (ζ_e/H_h) と見なすことになる。いま、出口絞りはないものとすれば、係数パラメータは $(1/H_h)$ と (H_{fr}/H_h) の二つになる。したがって以下では、蒸発管の極座標図は、 H_h と (H_{fr}/H_h) をパラメータとして示す。

図7と図8は、 (H_{fr}/H_h) が 10^{-3} で、各々 H_h の値が 10 、 10^3 の場合を示す。図7では Y_e の限界値が、 $10 \sim 20$ に、図8では、 $20 \sim 50$ に存在する。これは H_h の大きいほうが安定であることを意味する。また、図

2～5を参照すると、 H_h が 10 のときは、慣性損失と加速損失の影響が大きく、 H_h が 10^3 のときは、位置水頭の影響が、大きくなることわかる。

図9と図10は、 (H_{fr}/H_h) が 10^{-1} で、 H_h が 10 と 10^4 の場合を示す。 (H_{fr}/H_h) が 10^{-1} 以上になると、曲線形状は H_h によってあまり変わらず、 Y_e の限界値も、 $10 \sim 20$ の範囲にあり、ほぼ同じくらいの値になることが予想される。

5. 結 言

蒸発管内沸騰二相流の流動安定性に及ぼす各圧力損失成分の影響を調べるため、各パラメータを整理して、

図5 摩擦損失: $(G_T)_{fr}^*/H_{fr}$

図6 出口絞り損失: $(G_T)_{et}^*/\zeta_e$

図7 蒸発管の $(G_T)_{to}^*/H_h$ ($H_h=10$, $H_{fr}/H_h=10^{-3}$)

図8 蒸発管の $(G_T)_{to}^*/H_h$ ($H_h=10^3$, $H_{fr}/H_h=10^{-3}$)

図9 蒸発管の $(Gr)_{ho}^*$, ($H_h=10$, $H_{fr}/H_h=10^{-1}$) 図10 蒸発管の $(Gr)_{ho}^* / H_h$ ($H_h=10^4$, $H_{fr}/H_h=10^{-1}$)

共通パラメータと係数パラメータに分類し、周波数応答の計算を行って修正ナイキスト線図を示した。その結果、次のようなことがわかった。

- (1) 位置水頭は、常に安定化の効果を持つ。
- (2) 慣性損失、摩擦損失および出口損失は、パラメータ Y_e が大になると不安定効果を有し、小のときは安定効果を有する。
- (3) 加速損失は、常に不安定効果を持つ。
- (4) 蒸発管に対しては、 H_h および (H_{fr}/H_h) の二つの係数パラメータについて、その安定性への効果が明らかになった。

最後に九州大学 深野教授、神戸大学 赤川教授を

はじめとする二相流懇話会委員各位の、日ごろのご助言に対して、心から謝意を表す。

文 献

- (1) 山内・ほか2名, 機論, 47-416, B (昭56), 693.
- (2) 山内・ほか2名, 文献(1)の703ページ.
- (3) Fukuda, K., ほか1名, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 16-2 (1979), 95.
- (4) 古寺, 本論文集1079ページ.
- (5) 古寺・ほか2名, 機論, 48-426 (昭57), 333.