自然循環ボイラの逆流現象に関する解析^{*}

Analysis of the Flow Reversal in Natural-Circulation Boiler

山内庄司^{**}
YAMAUCHI Shoji

澤井徹^{**}
SAWAI Tohru

中西重康^{***}
NAKANISHI Shigeyasu

Abstract Flow reversal phenomena in natural-circulation boilers are studied analytically according to both the homogeneous-flow model and the slip-flow model. In the latter model Thom's pressure drop correlation is used. The pressure drop between the upper steam-water drum and the lower header is assumed not to be affected by inception of reverse flow in an evaporator tube which will be analyzed later.

The mechanism of flow reversal is examined through analysis of the static flow characteristics of the evaporator tube in the non-dimensional form. Some important dimensionless parameters are introduced and their effects on inception of reverse flow are studied.

It was found that the criterion of flow reversal is correlated practically with only three dimensionless parameters. Finally, an approximate method to predict flow reversal is put forward

Keywords: Flow reversal, Natural circulation, Evaporator tube, Slip-flow model, Homogeneous-flow model, Non-dimensional analysis

1. 緒言

自然循環ボイラの起動時等において、並列蒸発管の熱負荷アンバランスに起因して、一部の蒸発管特に煙道に近い低熱負荷の蒸発管で逆流が生じることがある。逆流それ自体避けべき状態であるのはもちろんであるが、さらに熱負荷が上昇し順流状態へ移行する際急激な流れ逸走や激しい脈動を伴うことが予想され、制御系に極度の混乱を引き起こしたり、蒸発管を焼損に至らしめる等の点で極めて危険な流動状態であると考えねばならない。この逆流現象についてはこれまで系統的な調査研究が見あらず、一般的に起動時等の極端な熱負荷アンバランスは避けるべきものとして経験的に処理されているようである。

著者らは自然環境ボイラの流動を支配する諸特性値につき報告し¹⁾、それをもとに不安定流動につき検討を進めているが、本報ではその一環として、この逆流現象について簡単なモデルを用いて解析した結果を報告する。

* 1988.3.3 受付

** 高松高専 〒761 高松市勅使町355 TEL 0878-67-0276

*** 姫路工大

主な記号

D	無次元熱負荷
G_s	ある蒸発管の蒸発量
G_F	一本の降水管の受け持つ蒸発管の蒸発量
H	ドラムと下部ヘッダの水頭差
K	集中絞り係数
K_s, K_F	石谷、赤川 ³⁾ の蒸発管および降水管特性値

$$K_s = \frac{G_s}{d_v^2 \rho_g} \sqrt{\frac{2\lambda + K_{in} + K_{ex}}{gH}}$$

$$K_F = \frac{G_F}{d_D^2 \rho_g} \sqrt{\frac{2\lambda_D + K_H + K_D}{gH}}$$

L	管長
M	降水管パラメータ

P	系圧力
ΔP	ヘッダードラム間差圧
S	スリップ比
U	無次元循環速度
X	無次元乾き度
d	管内径
f	管摩擦係数
g	重力の加速度
h_{fg}	蒸発潜熱
q'''	蒸発管内単位体積当りの加熱量
u_{v0}	蒸発管入口流速
x	乾き度
λ	無次元管摩擦
β	$\gamma_a/(\gamma_f - 1)$
γ	二相圧損倍数
ρ	密度
ϕ	蒸発管傾斜角

添字等

f, g	飽和液、飽和蒸気
H, D	降水管のヘッダ側、ドラム側
in, ex	蒸発管入口、出口
V, D	蒸発管、降水管
—	平均的蒸発管の値
1, 2	順流時、逆流時

2. 定式化

対象とした系は既報¹⁾と同様でありFig.1に示す。系は気水分離ドラムと蒸発管入口ヘッダおよびその間を結ぶ1本または複数本の降水管および多数並列の蒸発管より構成される。降水管

Fig.1 Schematic diagram of analytical model

および蒸発管の入口、出口には絞り係数 K_H, K_D, K_{in}, K_{ex} の集中絞りがあり、管路の水単相に対する管摩擦係数は f_D, f_V である。

並列蒸発管の $K_{in}, K_{ex}, f_V, L, d$ 等の水力学的特性は全ての管で同一であり、熱負荷のみが相違するものとする。また、順流から逆流およびその逆の遷移現象自体は動的現象であるが、ここでは逆流が存在し得る条件を見いだすことに主眼を置き、時間依存の慣性項を無視して管路の静特性に基づいた解析を行う

主な仮定は以下のとおりである。

- (1) 降水管内は飽和水単相流である。
- (2) 逆流時も含め蒸発管には飽和水が流入し、管内で均一加熱される。
- (3) 圧力降下による物性値変化は無視できる。
- (4) ライザー部はなく、ドラム入口出口間の高さの差は無視できる。
- (5) 任意の一本の蒸発管で生じた逆流によりヘッダードラム間差圧は変化しない。
- (6) 蒸発管内の流れは(a)スリップのない均質二相流(均質流モデル)、または(b)圧力降下がThomの相関式²⁾で表されるスリップ流(スリップ流モデル)で表すことができる。

並列蒸発管がある熱負荷で加熱され流動が生じ、ヘッダードラム間差圧がある一定の値になる。このもとである一本の蒸発管に注目して考えると、注目する管以外の蒸発管内の加熱流動状態は、同一の合計流量と差圧を与える均一条件の並列蒸発管(以下平均的蒸発管と称す)で代表させることができる。注目する蒸発管で逆流が発生しても、仮定(5)によりこの平均的蒸発管内の加熱流動状態は影響を受けない。このため、降水管と平均的蒸発管よりなる循環ループからヘッダードラム間差圧が定まり、これが今注目している特定の蒸発管に対してポンプ特性として作用する。このポンプ特性と特定蒸発管の熱負荷に応じた管路特性曲線の交点から、その流動状態が定まる。

降水管内流れ、および平均的蒸発管内の流れに対する運動量収支は、

$$\Delta P = \rho_f g H - \left(\frac{f_D L_D}{d_D} + K_D + K_H \right) \frac{1}{2} \rho_f u_D^2$$

$$\begin{aligned} \Delta P = & \bar{\gamma}_g \rho_f g H + \bar{\gamma}_a \rho_f \bar{u}_{v0}^2 + \bar{\gamma}_f \frac{f_V L_V}{2 d_V} \rho_f \bar{u}_{v0}^2 \\ & + \left\{ K_{in} + (\bar{\gamma}_a + 1) K_{ex} \right\} \frac{1}{2} \rho_f \bar{u}_{v0}^2 \end{aligned}$$

またエネルギー収支より次式が成立する。

$$\bar{x}_{ex} = \frac{\bar{q}''' L_V}{h_{fg} \rho_f \bar{u}_{v0}}$$

ここで上付き $\bar{\quad}$ は平均的蒸発管に対する値であることを表す。また、 $\bar{\gamma}_g, \bar{\gamma}_a, \bar{\gamma}_f$ はそれぞれ重力、加速、管まさつによる二相流損倍数であり、系圧力 P および、出口かわき度 x_{ex} の関数である。また K_{in}, K_{ex} はエネルギー損失でなく、圧力降下をもとに定めている。このため、管入口部で損失がなければ $K_{in} = 1$ 、出口で速度水頭のみが損失となる場合は $K_{ex} = 0$ となる。上式を無次元化して示すと

$$\frac{\Delta P}{\rho_f g H} = 1 - \frac{U_D^2}{2} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho_f g H} = \bar{\gamma}_g + \left[1 + (\bar{\gamma}_f - 1) \frac{2A + \bar{\beta}(K_{ex} + 2)}{2A + K_{in} + K_{ex}} \right] \frac{\bar{U}^2}{2} \quad (2)$$

$$\bar{D} = (\pi/4) \bar{X} \cdot \bar{U} \quad (3)$$

ただし、

$$A_D = f_D L_D / (2 d_D) \quad (4)$$

$$A = f_V L_V / (2 d_V) \quad (5)$$

$$U_D^2 = (2A_D + K_D + K_H) \frac{u_D^2}{gH} \quad (6)$$

$$U^2 = (2A + K_{in} + K_{ex}) \frac{u_{V0}^2}{gH} \quad (7)$$

$$\beta = \gamma_a / (\gamma_f - 1) \quad (8)$$

$$X = (\rho_f / \rho_g - 1) x_{ex} \quad (9)$$

$$D = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \frac{q''' L_V}{h_{fg} \rho_f} \times \sqrt{\frac{2A + K_{in} + K_{ex}}{gH}} \quad (10)$$

U 、 X 、 D は既報¹⁾の循環速度、乾き度、熱負荷の無次元数であり、 D と石谷、赤川³⁾の蒸発管特性値 K_S の間には次の関係がある。

$$D = (1 - \rho_g / \rho_f) K_S$$

または u_D と $\bar{u}_{V0}$ との比は降水管と蒸発管の全流路断面積比より定まるある値となり、次式の M を用いて表すこととする。

$$M = 1 + \frac{2A_D + K_D + K_H}{2A + K_{in} + K_{ex}} \frac{u_D^2}{\bar{u}_{V0}^2} = 1 + \frac{U_D^2}{U^2} \quad (11)$$

この M は降水管蒸発管一巡ループと蒸発管のみとの水単相まさつ圧力降下の比であり、石谷、赤川の K_S 、 K_F との間には次式¹⁾の関係がある。

$$M = 1 + (K_F / K_S)^2$$

蒸発管、降水管の流路形状に加え、平均的蒸発管の加熱量 $\bar{D}$ が与えられると式(1)、(2)、(9)および(11)を満たす $\bar{U}$ 、 U_D 、 X および ΔP が求まる。この ΔP を用いるとある特定の蒸発管に対する運動量式は次式となる。

$$\frac{\Delta P}{\rho_f g H} = \gamma_g \pm \left[1 + (\gamma_f - 1) \frac{2A + \beta(K_{ex}' + 2)}{2A + K_{in} + K_{ex}} \right] \frac{U^2}{2} \quad (12)$$

±の符号は+は順流に、-は逆流に対応しており、逆流時には蒸発管出入口が逆転することより、 K_{ex}' には順流時には K_{ex} を、また逆流時には $K_{in}-1$ の値を用いる。この特定蒸発管の水力学的特性 K_{in} 、 K_{ex} 、 A は平均的蒸発管の値と同一であり、熱負荷 q''' (またはその無次元数 D)のみが相違している。 D についてはエネルギー収支より次式を得る。

$$D = (\pi/4) X |U| \quad (13)$$

逆流時は負の U で表すこととし、この時は蒸発管上端から飽和水が流入し、蒸発管の下端における乾き度が x_{ex} となる。この特定管の加熱量 D が与えられると、 U および x_{ex} (または X)は式(12)および(13)を満たすように決定される。

γ_g 、 γ_f 、 γ_a ($\bar{\gamma}_g$ 、 $\bar{\gamma}_f$ 、 $\bar{\gamma}_a$ も同様)は均質流モデルでは次式で表される¹⁾。

$$\gamma_g = \log_e(X+1)/X \quad (14)$$

$$\gamma_f = (1/2)X + 1 \quad (15)$$

$$\gamma_a = X \quad (16)$$

$$\beta = 2 \quad (17)$$

スリップ流モデルの場合、これらの値は、文献²⁾の表を P 、 x_{ex} の3次式で補間することにより求めている。

3. 流路特性と逆流発生機構

式(12)、(13)より求めた特定蒸発管の特性曲線をFig.2(a)、(b)に示す。

熱負荷 $D=0$ の場合は、 $\gamma_a=0$ 、 $\gamma_g=\gamma_f=1$ であり、式(12)は次式となり、図中の破線で示す。

$$\frac{\Delta P}{\rho_f g H} = 1 \pm \frac{U^2}{2} \quad (18)$$

D が大きくなるにつれ蒸発管内ボイド率が増加し、特に $|U| \rightarrow 0$ 付近では x_{ex} の値が大きくなり、 ΔP が減少する。スリップ流モデルでは x_{ex} が1を越える場合の過熱蒸気単相流部を考慮しているが、過熱蒸気単相流部の存在は $|U|$ の値が小さくなる比較的狭い範囲に限定されるため、これを無視しても後述の逆流発生限界には影響しない。また均質流の場合は圧力 P を特定しない限り x_{ex} が定まらないため、式(14)～(17)の値をそのまま用いている。

一方、所定の $\bar{D}$ に対し定まる $\Delta P/(\rho_f g H)$ の値から水平線 (Fig.2(a)のA-B-C線) が得られ、これがポンプ特性曲線に相当する。両特性曲線の交点を実現しうる流動状態となる。式(1)よりポンプ特性曲線は縦軸の値が0～1の範囲にあり、パラメータの組合せによりFig.2(a)で $D=0.5$ の場合のように1個の交点($U>0$)のみを持つ場合と $D=0.1$ の場合のように3個の交点($U<0$ で2根AとB、 $U>0$ で1根C)をもつ場合とが生じる。後者の場合に逆流が可能となるが、B点は水力学的に不安定であり、A点(逆流)およびC点(順流)のみが実現しうる。どちらの流動状態が実現するかはこの状態に至るまでの履歴に依存するため本解析では決定できないが、このような逆流の発生し得る条件での運転は避けるべきであり、安全側に評価して $U<0$ で両特性曲線が接する条件を逆流発生限界と考える事ができよう。またこれは、逆

(a) homogeneous-flow model

(b) slip-flow model

Fig.2 Flow-pressure drop characteristics

流状態のもとで熱負荷 D を上昇させた場合、逆流(A点)から順流(C点)へ流れ逸走が生じる限界でもある。

Fig.2(a)と(b)を比較すると、逆流域での無次元圧力降下は(a)の方が低く、均質流モデルの方がスリップ流モデルより逆流範囲を狭く予測することが推測される。均質流モデルでは系圧力 P 、管径 d 、管長 L (または管傾斜角 ϕ)等、図中に明示していないパラメータの影響は、

U 、 D 、 Λ 等の中に完全に含まれている。スリップ流の場合も、 d 、 L はこれらの無次元数の中に含まれているが、相関式が圧力 P を直接用いているため、 P の影響は残る。Fig.3にスリップ流モデルにおける圧力の影響を示す。 P が大きくなると無次元圧力降下はやや低下するが微少である。

Fig.3 Flow-pressure drop characteristics(effect of pressure)

下降流におけるスリップ比 $S = u_s / u_f$ の影響を調べるために、本報のスリップ流モデルを修正し、 S が乾き度、流速等によらず一定としたモデルにより計算し直した結果をFig.4に示す（順流時は $S = S_1 = 1.5$ 、逆流時は $S = S_2 = 0.5 \sim 1.5$ とした）。低流速の下降流ではスリップ比が上昇流の値よりかなり小さくなる事も考えられるが、安定な逆流時(Fig.2(a)のA点)は比較的高流速であり(Fig.2(b)で $d = 50\text{mm}$ の管で $U = -0.5$ は $u_{v0} \approx -2.2\text{m/s}$ に対応する)、上昇流に対する相関式が使用可能と考えられる。さらにまたこれはFig.4のように安全側の予測値を与えている。

4. 無次元特性値の効果について

M 、 Λ 、 K_{in} 、 K_{ex} および $\overline{D}$ を変えて逆流発生限界を求めた結果をFig.5～7に示す。図中の曲線より下方の条件で逆流が発生する可能性がある。（圧力の影響は後述のように無視できるが、スリップ流モデルでの計算においては以下特に断わらない限り $P = 5\text{MPa}$ としている。）

破線で示す均質流モデルはスリップ流モデルに比べて常に逆流発生範囲を狭く予測しており、この現象について均質流モデルをそのまま用いることは危険である。またいずれの図においても平均的蒸発管の熱負荷 $\overline{D}$ が大きくなると $D_{cr} / \overline{D}$ は小さくなっており、逆流は低熱負荷時に発生しやすいとの経験的事実に一致している。この時 D_{cr} の値自体は $\overline{D}$ の増加と共に増加し逆流範囲は広がっている。これは $\overline{D}$ の増加による U の増加、さらには降水管流速 U_d の増加のため式(1)より ΔP が減少し、Fig.2に示したように逆流がより発生しやすくなるためであると解釈される。

Fig.4 Flow-pressure drop characteristics(effect of slip ratio)

Fig.5 Reverse flow criteria(effect of M)

Fig.5に示すように M が増加すると逆流発生範囲は拡大する。 M の増加は降水管抵抗（または U_D ）の増加に対応し、これはやはり ΔP が減少すること起因する。特に M が著しく大きい系では $\bar{D}$ の小さい範囲で $D_{cr}/\bar{D}$ が1を越えるため、各蒸発管を均等に加熱していても逆流が生じる可能性がある事が分かる。

Fig.6、Fig.7に Λ 、 K_{in} 、 K_{ex} の効果を示す。これらの値は注目する特定蒸発管を含めた全ての蒸発管で同一に変化させており（このため同時にヘッダードラム間差圧 ΔP も同時に変化

する)、これらの図は系全体の管路抵抗の影響を示している(特定蒸発管の λ ; K_{in} , K_{ex} のみの影響については、 ΔP が不変となるため蒸発管特性曲線、式(12)の $U < 0$ における極大値を調べることにより、容易に評価することができる。)

Fig. 6、Fig. 7に示すように K_{in} の増加は逆流範囲を広げるが、 λ の影響は比較的小さい。

K_{ex} の影響はほとんど無視できる。 M を一定に保って λ , K_{in} , K_{ex} を増加させると、式(11)より降水管抵抗も合わせて増加させることになっている。降水管抵抗(λ_D , K_D , K_H)を一定に保ち λ 等を増加させると、 M が減少するためFig. 5のように逆流範囲は狭まる。

Fig. 6 Reverse flow criteria(effect of λ)

Fig. 7 Reverse flow criteria(effect of K_{in} , K_{ex})

逆流時には出口絞り(K_{ex})部は飽和水単相流であり、 K_{ex} の効果は単相流圧力降下をもとにした M では十分に考慮し得ているものと判断できる。逆流時に二相流となる入口絞り(K_{in})の影響は M に含めることはできない。

A の効果は両者の中間的な性格を持つが、結果的にはその影響は小さい。

スリップ流モデルでの計算における系圧力 P の影響をFig.8に示す。 P の変化により逆流範囲は若干変化するが、きわだった傾向は認められず、またこの程度の偏差は無視できるであろう。

Fig.8 Reverse flow criteria(effect of pressure)

以上より蒸発管入口に特別の絞りを設けなければ($K_{in}=1$)逆流発生限界 $D_{cr}/\bar{D}$ は M と $\bar{D}$ のみの関数で近似できる。計算値より M の関数形を求めると、 $K_{in}=1$ 、 $K_{ex}=0\sim10$ 、 $A=1\sim10$ 、 $M=1.5\sim10$ 、 $P=1\sim10$ MPaの範囲で次の近似式を得る。この時 $F(\bar{D})$ はFig.9の傾斜の範囲内の値をとる。

$$\frac{D_{cr}}{\bar{D}} = (M-1)^{0.75} F(\bar{D}) - 0.02 \quad (19)$$

5. 結論

自然循環ボイラ並列蒸発管において、起動時等の比較的低熱負荷時に熱負荷アンバランスに起因して発生する逆流現象につき、均質流モデルおよびThomの相関を用いたスリップ流モデルをもとに解析することにより、以下の結論を得た。

(1) 逆流時も含めた蒸発管の流量差圧静特性を解析することにより、逆流現象のメカニズムと現象を支配する因子を明らかにした。

(2) 逆流現象は蒸発管特性値 D および $\bar{D}$ 、降水管特性値 M に強く左右され、 K_{in} の影響も認められる。 K_{ex} 、 A および系圧力の影響はわずかである。

Fig.9 $F(\bar{D})$ of equation(19)

- (3) M の極めて大きい系では各蒸発管が均等加熱される場合でも逆流発生の可能性がある。
- (4) 均質流モデルは上昇流のスリップ流モデルより逆流範囲を狭く見積る。上昇流のスリップ流モデルにより、逆流発生限界を安全側に予測することができる。
- (5) 逆流発生限界に対する簡易計算式(19)を求めた。

参考文献

- 1) 中西重康：自然循環ボイラの簡略流動計算法、日本機械学会論文集、B, Vol.52, No.479, 2682-2688(1986)。
- 2) Thom, J.R.S.: Prediction of Pressure Drop During Forced Circulation Boiling of Water, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.7, 709-724(1964)。
- 3) 石谷清幹、赤川浩爾：蒸気工学、コロナ社 (1962)。