# TECHNICAL NOTE



# 気液二相流の水撃現象の概要

伊藤裕

技術開発本部 開発企画室 室長 工学博士

# まえがき

気体と液体とが同時に流れる系を気液二相流と呼 ぶ。当社の製品の中でも曝気槽内に空気を吹込む散 気装置等で日常的に気液二相流を取扱っている。と ころで配管中で気液二相流になった場合には,液単 独で流れる場合に対して多くの異なった現象が見ら れる。当社は水処理以外にも有機性固体廃棄物のメ タン発酵にともなう電気・熱回収プラントなど,各 種の気液二相流を扱う事例が今後,増えてくると思 われる。ここでは,配管系の気液二相流についての 概要を示した後,プラントでしばしば見られ,かつ 配管系に破損を与える可能性がある気液二相流の水 撃現象について示すことにする。

# 1. 気液二相流の概要

液が単相で流れる場合,その流動様式は1種類し かないが,気液二相流になれば,図1に示すように 多様な流動様式が生じる。一般に気液二相流では気 体流量が増加するにしたがって,次の流動様式とな る。

- (a)気 泡 流:連続した液体中に気泡の分散した流れで、比較的均一な液体として扱える。
- (b) スラグ流:流路断面を大きな気泡塊と、小 さな小気泡を含む液体とが交互 に流れるもの。
- (c)環状噴霧流:連続相は気体で、分散相は液体で、気体流中に微少液滴を含む流れ。

(d) 噴 霧 流:液滴が気相に飛散している流れ。 なお配管が水平,垂直のいずれかによって,上記に

Vol. 47 No. 1 (2003/8)

0 0 0 000 0 °°°° 00 000 Mist Flow 0 Flow 0 20000 Flow Mist Flow Annular Bubbly 0 Slug • 0 0 a) 9 Ð 図 1 流動様式(垂直管の場合) Fig. 1 Flow pattern (vertical flow)

加えてさらに層状流,波状流,プラグ流(水平管), フロス流,環状噴霧流(垂直管)を追加する場合も ある。

図2にWeismanによる気液二相流の流動様式線 図を示す。ここで気体,液体の見かけの流速 jg と jl は気体,液体の次式のように定義され,これらの 値を図2に適用することで,気液二相流の流動様式 が大まかに予測できると言われている。

$$Qg/A = jg = u_{go}$$
 (m/s)  
 $Ql/A = jl = u_{lo}$  (m/s)  
 $\phi_1, \phi_2$  は補正係数<sup>(1)</sup>
(1)

# 2. 水撃現象の基本

流体が流れている配管系において弁を急閉鎖すれ ば水撃現象が発生し、急激な圧力上昇とそれに続く 流体振動が発生する。この水撃現象は弁の急閉鎖以 外にも、ポンプトリップで流体が急激に停止した場 合にも発生するので、プラントの設計に注意を要す る問題である。ここでは単相流における水撃現象を 示した上で、気液二相流で生じる水撃現象を示す。 1)過渡圧力の基本的特性

単相水撃現象を図3左図のような下流端に急閉鎖 弁と管路上流端に大容量で圧力一定の貯圧タンクか ら構成されている管路で考察する。

弁を急閉鎖すれば水撃現象によって圧縮波が発生 し,図3中の線(a)のように管路上流に向かって伝 播する。上流端に進行波が到達すれば,負の膨張波



図 2 管流動様式線図(垂直管の場合) Fig.2 Flow pattern diagram



に転じて再び管路下流に向かって伝播し,図3中の 線(b)のように圧力はいったん元の圧力に下がる。 この後退波が下流端に達すれば,固定端に相当する 弁で負の圧力波のままで反射され,上流に向かって 再度伝播するので,結果的に各管路の軸方向の圧力 はさらに低下していく(図3中の(c))。またこの負 の圧力波が上流端に達すれば,圧力波の振幅の向き が変わり,正の圧縮波となって下流端に戻る(図3 中の(d))。このように振幅の向きをそれぞれ変化さ せながら圧力波が管路を往復するので,結果的に実 験結果の図4のように各軸方向の位置の圧力は正弦 波的な周期波動を生じることになる。

2) 液単相水撃現象の音速とポテンシャルサージ

水撃現象が生じて圧力波が管路中を往復する際, その圧力波の伝播速度は液中の音速であり,その値 は式(2)で与えられる。

$$a_s = \sqrt{\frac{K/\rho l}{1 + (K/E)(D/e)}} \tag{2}$$

水撃現象による圧力上昇値はポテンシャルサージ  $\Delta P_{ps} = P_2 - P_1$  ( $P_1$ :上昇前の圧力, $P_2$ :上昇後の 圧力)と呼ばれ,単相水撃現象時には次式で示され る。

$$\Delta P_{ps} = P_2 - P_1 = \rho l \times a_s \times u_{lo} \tag{3}$$

上式は Joukowsky の式と呼ばれ、単相水撃現象での 圧力上昇値を与えるものである。



神鋼パンテツク技報

Vol. 47 No. 1 (2003/8)



図 5 水撃現象の生じる流動様式





Fig.6 Water hammer phenomena in two phase flow (bubbly flow)

# 3. 気液二相流の水撃現象

# 3.1 気液二相流の流動と水撃現象の特長

二相流においては単相流の場合と異なり,図5の ように流動状況によってそれぞれ水撃現象の特性が 異なる。スラグ流,環状流でも水撃現象は生じるが, 圧力上昇が顕著であるのは気泡流であるため,ここ では主に気泡流についての水撃現象について述べる。

図5でボイド率分布一定の気泡流とは、管路全長 にわたって管路断面積の空隙率(ボイド率)が一定 の場合を言い、またボイド率変化する系とは、液単 相の流路の途中に気相注入部があって、その地点よ り下流側が二相流になっている管路をいう。

#### 3.2 ボイド率分布一定の気泡流

軸方向ボイド率分布が一様であり、上流側の大容 量サージタンクと下流端の急閉鎖弁で構成される図 6の流路系を例にとって気液二相流の水撃現象を説 明する。

管路下流端の弁急閉鎖によって図6の圧力応答波 形のような水撃現象が生じる。弁急閉鎖によって閉 鎖点近傍で急激な圧力上昇が生じ,この圧力波は単 相流の場合と同じように伝わって,全体として正弦 波的に近い圧力応答となる。第1波目の圧縮波の波 面はステップ状であり,衝撃波的形状を呈している



図 7 圧力波伝播速度 Fig.7 Velocity of pressure wave

のに対して,第2波以降はなだらかな形状となるこ とが特徴である。ここでは気液二相流の水撃現象で 最初に生じた衝撃波的な圧縮波の伝播速度を*C*<sub>0</sub> と し,膨脹波および第2波以降の圧縮波のなだらかな 圧力波の伝播速度を*D*<sub>0</sub> として両者を区別する。 3)衝撃波的圧縮波の伝播速度

均質気泡流中の衝撃波の伝播速度  $C_{\psi}$  は Campbell らの静止衝撃波の等温モデルを対象に、次式のよう に表されている。

$$C_{lp} = \sqrt{\frac{P_2}{\alpha_1(1-\alpha_1)\rho_l}} \tag{4}$$

図7に衝撃波的圧縮波の伝播速度の実験値 $C_{\mu}$ と、 ボイド率 $\alpha_1$ との関係が示されている。この図のように気泡流における圧縮波の伝播速度 $C_{\mu}$ はボイド率に対してほぼ1つの曲線上で表される。

4) なだらかな圧力波の伝播速度

膨張波の伝播速度は,Henry らによる微小振幅圧 力波の伝播速度は等温および断熱均質流モデルによっ て次式で与えられる。膨脹波などなだらかな圧力波

Vol. 47 No. 1 (2003/8)

の伝播速度は式(5)の微小振幅圧力波の音速式で表 される。

$$D_{lp} = \sqrt{\frac{P_1}{\alpha_1(1-\alpha_1)\rho_l}} \tag{5}$$

5)ポテンシャルサージ

弁急閉鎖によって生じる圧力上昇,すなわちポテ ンシャルサージの値は水撃現象での安全解析上,重 要な因子のひとつである。気泡流のポテンシャルサー ジについては単相水撃現象と同様に以下の式で求め られる。

$$\Delta P_{ps} = [液中の圧力波の伝播速度] × [液密度] × [液流速] = C_{lp}(1-\alpha_1)\rho_l u_{lp}/(1-\alpha_1) = C_{lp}\rho_l u_{lo}$$
(6)

で表される。上式のポテンシャルサージと実験結果 とを図8に示す。このようにボイド率が大きい範囲 (スラグ流領域)では偏差が生じるが,気泡流領域 ではポテンシャルサージ Δ*P*<sub>ps</sub> は単相流と同形式で ある式(6)で表される。

6) 水撃現象の防止

弁をゆっくりと閉鎖すれば水撃現象は生じないこ とは感覚的に理解できる。これを以下の圧力波の伝 播で説明する。弁閉鎖を開始すれば水撃作用によっ て系内圧力が上昇を始めるが,弁を閉鎖しきるまで に圧力波が管路を往復し,膨張波となって帰還すれ



ば, 圧力はポテンシャルサージ Δ*P*<sub>ps</sub> の値までに至ることなく低下する。管路長さを*L*とすれば, 圧力波が往復するまでの時間は以下のように示される。

$$\tau < \frac{L}{C_{\iota p}} + \frac{L}{D_{\iota p}} \tag{7}$$

すなわち,式(7)で示される時間τ以上に弁をゆっ くりと締切れば,圧力上昇はポテンシャルサージ ΔP<sub>ps</sub>の値まで圧力上昇が生じることなく,また水 撃現象を防止することができる。

### 3.3 不連続なボイド率変化のある場合

前節では軸方向のボイド率が一定の気泡流で発生 する水撃現象を解説したが,実際の配管系ではボイ ド率が一定でない場合が多く,例えば配管中に気体 を注入している場合などはボイド率分布が流れの途 中から急激に変化している。ここでは「上流側は単 相流部,下流側は二相流」という不連続なボイド率 変化のある管路系を対象に水撃現象を述べる。

1) 不連続ボイド率管路の圧力応答波形

図9に対象とする管路モデルと実験結果(実線(a)) を示す。また比較のため、前述のように管全長にわ たってボイド率が一定である気泡流での実験例を同 図中(b)で示す。上流側に単相流部がある管路(a)で は第1波内の圧力波の形状は(b)と大きく異なって いる。弁急閉鎖により木端弁近傍の圧力は、ポテン シャルサージ ΔP<sub>ps</sub>の値まで上昇するが(この値を 初期ポテンシャルサージと呼び、その後の圧力上昇 と区別する)、その後さらにステップ状の圧力上昇 *m*が生じて最大圧力上昇値 Δ*P* max に達する。ま た管路の中間点近傍での圧力は *p' m' n* のように



Fig. 9 Water hammer phenomena in pipeline which pours in air bubbles

神鋼パンテツク技報





Fig. 10 Water hammer phenomena with two or more steps of pressure rises



図 11 複数段の圧力上昇のモデル図

複数段の圧力上昇が見られる。

2) 複数圧力上昇が生じる理由

一般に弾性力学の問題として,密度の異なる材質 の境界面に圧力波が到達した場合,その境界面で圧 力波の反射と通過が生じることが知られている。二 相流と単相流の界面でも両者の密度が異なるために, その界面で反射,通過が生じる。

- ① 二相流から単相流のように、疎から密な相に 圧力波が進行すると、圧力波は境界で一部反射 波となるが圧力波の振幅の向きは変わらない。
- ② 単相流から二相流のように、密から疎な相に 圧力波が進行すると、境界で反射が生じ、反射 された圧力波の振幅は逆転する。

この概念をもとに圧力応答波形と,その圧力応答波 形が進行するダイヤグラムとを対応させたものを図

Vol. 47 No. 1 (2003/8)

10に示す。この図は圧力波の挙動を明確にするため に圧力波を矩形にして図式化したもので,実線は圧 縮波,破線は膨脹波を表す。この図で説明できるよ うに複数圧力上昇は二相-単相界面での圧力の反射 で生じているのである。

3) 圧力上昇段数

系の設計に際し,最大圧力上昇値を求めるために は,圧力上昇段数を予測する必要がある。

不連続なボイド率変化のある流路で生じる圧力上 昇の段数は下記の式で表される。

$$n-2 < \frac{C_{tb}}{a_s} \frac{Ls}{L_{tb}} < n-1 \tag{8}$$

# 4) 反射率と透過率

図11に示されるような気液二相流界面 ( $Z = L_{ip}$ ) に圧力波  $\Delta P_i$ が到達すれば,この反射波  $\Delta P_r$  と通 過波  $\Delta P_p$  とが生じる。反射率と通過率を  $\alpha r$  と  $\beta r$ とすれば,これらは次式で示される。

$$\alpha r = \frac{\Delta P_r}{\Delta P_i} = \frac{\rho L a_s - \rho_{rp} C_{rp}}{\rho L a_s + \rho_{rp} C_{rp}}$$

$$= \frac{a_s - (1 - \alpha_1) C_{lp}}{a_s + (1 - \alpha_1) C_{lp}}$$
(9)

$$\beta r = \frac{\Delta P_p}{\Delta P_i} = \frac{2\rho_l a_s}{\rho_l a_s + \rho_{lp} C_{lp}}$$

$$= \frac{2a_s}{a_s + (1 - \alpha_1) C_{lp}}$$
(10)

Fig.11 Schematic drawing of multi pressure rises

# 5) 最大圧力上界值

図11に複数段の圧力上昇のモデル図が示されている。弁急閉鎖により生じた  $\Delta P_{ps}$ の大きさの圧縮波は図中の点 A1→D1に進み,点 D1で反射されて以下 D1→A2→D2→A3と反射を繰り返して未端弁近傍の圧力上昇を順次増加させていく。一方境界点D1を通過した圧縮波は B1で反射されて負圧波となり B1→C1に沿って末端弁に戻り,圧力上昇を低下させる。その間,末端弁近傍の圧力は A1, A2,••Anまで n 段の圧力上昇を生じているので,An での最大圧力上昇値をとることになる。n 段上昇した場合の最大圧力上昇値  $\Delta P_n$ は次式で表される。

$$\frac{\Delta P_n}{\Delta P_s} = 1 - \left(\frac{1-\phi}{1+\phi}\right)^n (1+\phi)$$

$$\phi = (1-\alpha_1) C_{tb}/a_s$$
(11)

以上のようにボイド率,二相流長さ,流速の初期 条件を与えてやれば,式(8)によって圧力上昇段数 nが求まり,さらにこのnと式(11)をもちいて最大 圧力上昇値  $\Delta P_n$ が求まる。図12に未端での初期ボ イド率 $\alpha_1$ と最大圧力上昇値の比  $\Delta P_n/\Delta P_s$ の関係が 示されている。この図のように  $\Delta P_n/\Delta P_s$ の値はボ イド率とともに減少する傾向があり,同図中の式 (11)による解析値で予測することができる。

#### 3.4 その他の流動様式

ここでは典型的な二相流の水撃現象として,気泡 流を取り上げ,その特異な特性を示した。

なお流動様式がスラグ流の場合や,蒸気一水系の ように水撃の途中で気液相の間で凝縮・蒸発が生じ る場合はさらに別の現象が生じるが,基本的にここ で示した空気一水系の気泡流の場合よりも圧力上昇 値(ポテンシャルサージ)は低い方向となる。系の 安全設計という面では本報で示した気泡流を考慮し ておけば十分と思われ,その他の流動様式の場合の 記述を割愛した。気泡流以外の流動様式に対する水 撃現象および,気液二相流で生じる各種の動的な現 象は参考文献の図書''に示されている。

# むすび

気液二相流の水撃現象の典型的な特性を紹介した。 当社は、(株)神戸製鋼所都市環境・エンジニアリン グカンパニーの一部と2003年10月1日付けで統合す ることが予定されており、技術範囲も今後さらに拡 大していくものと思われる。とくに気液二相流は水 撃現象のほかにも単相流と違った固有の流動特性が 多くある。本件がこれらの技術的一助になれば幸い



図 12 最大圧力上昇比 Fig.12 Ratio of maximum pressure rises

である。

- [参考文献]
- 1)藤井照重,赤川浩爾,伊藤裕:気液二相流の動的配 管計画,(1999),日刊工業新聞社
- [使用記号]
  - $Q_{g}, Q_{l}$ :気体,液体の体積流量
  - $u_g$ ,  $u_l$ : 気体,液体のみかけの流速
  - A :管路断面積
  - K :液体の弾性係数
  - E:管材質の弾性係数
  - D : 管の内径
  - e : 管肉厚
  - *L* : 管路長さ
  - $\rho_g$ ,  $\rho_l$ : 気体, 液体の密度
  - *a*<sub>s</sub>:単相の流速
  - *u* : 流速
  - *u*<sub>lo</sub>:液のみかけの流速
  - α :ボイド率
  - P : 圧力
  - 添字
  - g : 気体
  - 1:液体
  - · ixii 1 : 初期状態
  - 2 : 水撃後
  - 2:小学(
  - ゆ:二相流
     か:ポテンシャルサージ