ケミカルタンカーの荷揚げ後の管内残留貨物量の低減に関する研究 — その2 背圧維持特性 —*

山口 勝治**・ 山根 健次***
綾 威雄*** 波江 貞弘**
小野 正夫****

Minimization of Cargo Residue in Piping for Chemical Tankers
— Part 2 Maintaining Characteristics of Back Pressure —

By Katsuji Yamaguchi, Kenji Yamane, Izuo Aya, Sadahiro Namie, Masao Ono

Drainage of residue quantity from the piping system in chemical tanker during the process of air blowing is examined. The quantity of water remaining in horizontal pipe and pressure are measured under various conditions of initial pressure and volume of air tank, trim, and method to maintain back pressure for each test arrangement of piping of 4-inch and 6-inch bore. A back pressure is maintained by constant pressure valve set at 1 bar and pipe rise to a height of 10 meters at the end of horizontal pipe. It is suggested that the developed constant pressure valve have an equivalent function for practical usage to the 10 meters height pipe. It is also discussed the measures to operate efficiently the stripping system.

Simple model presented for determining the quantity of remaining water in horizontal pipe are compared with experimental data for test arrangement of constant pressure valve, and satisfactory agreements are obtained at higher quantity.

1. はじめに

有害液体物質を輸送するケミカルタンカーでは荷揚げポンプによる荷揚げ後も、荷揚げしきれない貨物が船内に残留する。これらの貨物が洗浄水等に混入して海中に排出されれば、海洋を汚染することになる。

船舶から海中に排出される有害液体物質の量を規制するMARPOL 73/78 条約付属書ⅡおよびP & Aには、海洋汚染防止の面から、タンクの吸引点近傍およびタンクの関連管系内の荷揚げ後の貨物残留量の要求値が規定されている。B類（例えばクロロホルム、二塩化エチレン）、C類（例えばクレオソート、トルエン）有害液体物質をばら積み運送する船舶は、その要件に適合するストリッピング装置（残留貨物液を浚えるための装置）を備え、装置の適合性は実際の貨物を用いるのではなく、水を使

用した実船試験により確認することになった。このための試験方法として、カーゴラインの荷揚げ最終位置にある貨物管マニホールドで、陸上の貨物貯蔵施設における貨物液によるヘッドやそれらの施設と貨物管を接続する流路の抵抗等によって発生する圧力を模擬した背圧を維持するため、高さ10mの垂直吐出管または1バールに設定された定圧弁をマニホールドに装着することが要求されている。これらの内容をもつ条約は我が国においては昭和62年4月より施行されており、既に多くのケミカルタンカーのストリッピング装置に対して10m垂直吐出管を用いた背圧維持方法による実船水試験が実施されている。しかしこの方法は試験準備等が相当繁雑となるため、これに代わり、実船水試験に適した、構造が簡単で、容易に使用可能な定圧弁の開発が必要とされている。本研究では実船規模に近い試作した口径4インチおよび6インチの定圧弁を供試弁とし、4インチ管系及び6インチ管系それぞれに対し、2つの背圧維持試験装置を用いて、エアバージ操作による陸上試験を行った時の、管内流動特性と水平管残水量特性を明らかにした。そして試作定圧弁は10m垂直吐出管と等価な機能を有しているとの結果を得たので報告する。

* 原稿受付 昭和63年 7月25日

昭和63年度春期学術講演（昭和63年 5月18日）

** 正会員 船舶技術研究所（三鷹市新川 6-38-1）

*** 正会員 船舶技術研究所（交野市天野原町 3-5-10）

**** 船舶技術研究所（交野市天野原町 3-5-10）

2. 定圧弁の試作

次の点を考慮してバネ圧縮荷重によって背圧を維持するバネ式定圧弁を試作した。試作に当って注目した点は、

- 1) 管内水の排出が行われている間、簡易に背圧を1 Kg_f/cm² (G) 以上に維持できること、
 - 2) 垂直吐出管によって背圧を維持する場合と、試作定圧弁によって背圧を維持する方法とで、水平管残水量の差異が許容範囲内にあること、
 - 3) 在来弁の JIS 10K 船用 鋳鋼 アングル 弁の構造、寸法を基本とした、
- ことである。

図1に試作弁の断面構造および弁体断面形状を、表1に背圧を与えるためのバネ要目を示す。管内流体は弁体と弁座間で、バネ圧縮荷重によって維持された背圧に打

ち勝って、水平管側から大気圧側に放出される。弁本体で流れの向きは直角方向に変化する。定圧弁の口径寸法は実船規模の4インチと6インチとした。バネ定数、弁体リフトおよび弁体形状による弁作動中の定圧性と水平管残水量に及ぼす影響を調べるため口径4インチ弁を、試1弁、試2弁の2種類製作し、供試弁とした。試2弁は試1弁より弁体リフトが大きく、弁体形状を流線形化して、バルブ開放中の過渡的圧力上昇を小さくなるようにしたものである。

背圧の初期設定値は試験に先立ち求めておいたバネ長、バネ圧縮荷重、背圧との関係より定めた。口径6インチ試作弁の弁体は試2弁の形状とした。

3. 実験装置および実験方法

定圧弁によって背圧を維持する場合の試験装置の概要

図1 試作定圧弁の概要

表1 バネの要目

		口径4インチ弁				口径6インチ弁	
		試2弁		試1弁		試2弁	
材質		SUP 6		SUP 6		SUP 6	
線径		11 mm		12 mm		14 mm	
平均径		95 mm		90 mm		120 mm	
有効巻数		10		8		13	
自由長		281 mm		194 mm		467 mm	
バネ定数		1.71 Kg/mm		3.55 Kg/mm		1.71 Kg/mm	
取付時		全閉	全開	全閉	全開	全閉	全開
	たわみ	55 mm	110 mm	26 mm	60 mm	116 mm	196 mm
	長さ	226 mm	171 mm	168 mm	134 mm	351 mm	271 mm
	荷重	94 Kg	188 Kg	93 Kg	213 Kg	199 Kg	335 Kg

を図2に示す。(a)は4インチ管系、(b)は6インチ管系である。試験部は水平から $\pm 2^\circ$ までトリムを変えられる長さ11mの透明水平管、水平管に背圧 $1 \text{ Kg f/cm}^2 \text{ (G)}$ の初期設定値を与えるための試作バネ弁より構成される。垂直吐出管によって背圧を維持する場合には試作バネ弁の代わりに高さ10mの垂直管を接続するのを除けば、6インチ管系の試験装置の概要を図3に示すように図2とほぼ同じである。ただし水平管は不透明硬質塩化ビニール管である。4インチ管系の試験装置は前報¹⁾で述べたものである。加圧空気はコンプレッサよりエアフィルタを通して空気タンク(口径4インチ管系の場合はボン

ベの接続によって容積を変える, $0.013 \sim 0.643 \text{ m}^3$, 口径6インチ管系の場合はタンクの大きさ 1.09 m^3 のタンク内に張る水位によってタンク容積を変える, $0.2 \sim 1.09 \text{ m}^3$)に圧力 $1.5 \sim 9 \text{ Kg f/cm}^2 \text{ (G)}$ (6インチ管系の場合は $7 \text{ Kg f/cm}^2 \text{ (G)}$ まで)の範囲で貯えられ, 送気管(4インチ系の場合は直径1", 全容積 13ℓ , 6インチ系の場合は直径2", 長さ10mのフレキシブルホース), 逆止弁, 送気口を経て水平管に送られる。水平管と試作バネ弁または垂直吐出管との間に設けられた操作弁(電動バタフライ弁)を一定速度で開弁(4インチ系の場合開弁時間, 閉弁時間はそれぞれ5.9秒, 6インチ

図2 定圧弁によるエアバージ試験装置の概要

表2 実験パラメータの組み合わせ

管 径	4 インチ	6 インチ
背圧維持方法 (1.0 Kg f/cm ² (G))	10 m 垂直吐出管, 定圧弁	
トリム (°)	+2 ~ -2	
空気タンク容積(m ³)	0.013 ~ 0.643	0.2 ~ 1.09
空気タンク初期圧力 (Kg f/cm ² (G))	1.5 ~ 9	1.5 ~ 7
エアパージ終了方法	モード I, モード II	ステージ 1, ステージ 3

図4 圧力波形の変化(4インチ管系)

されているため弁は開き初め、管内への空気の流入が起こる。流入した空気は先端が半円形で管上面に片寄った、連続した気泡スラグ状となり、膨張を続ける。これによって水は大気側に押され、試作バネ弁出口より水のみが押し出される。この間を図では“気泡スラグ水平管内”

と表示されている。気体塊が管内を通過し、大気に達すると、②③は急激に低下する。管断面の大半は気体で占められ、水は膜状となって残留する。試作弁出口では空気と水の混合した、激しい勢いの気水混合体が噴出する。①②③の圧力が1 Kg f/cm² (G)になった時、バネ弁は閉鎖し、管内水の排出は終了する。この間を図では“ブロー”と表示されている。バネ弁が開き始めてから閉鎖するまでの間、バルブを通過する流体の運動に伴う各種の損失は背圧の初期設定値1 Kg f/cm² (G)からのドリフト値に影響を与え、弁開度が大きいほど大きくなる。そしてかなり激しい圧力振動を含んだ波形が計測される。従って管内水排出中は完全な定圧弁ではないがエアパージ開始と終了時点での定圧性は確保されている。なお、(a)図と(c)図の比較から明らかなように試1弁と試2弁の背圧波形に顕著な違いはみられない。(b)図は10 m 垂直吐出管の場合で背圧波形は気泡スラグ先端が水平管内を移動する間、(a)図とはほぼ同じであるが吐出管内を通過する間にその排水が行われるため、背圧を維持できなくなり、大気圧近くまで低下してしまう。このように気泡スラグが吐出管に達してから以降の背圧に(a)図と大きな違いが見られる。操作弁の開弁初期、背圧にかなり大きい振動が見られるのは、実験に先立ち水平管を満水にした際、僅かに混入した空気によって発生したもので完全に満水にすれば消える。水平管内の流動に関しては背圧維持方法の違いによって基本の流動パターンに違いは観察されなかった。

6インチ管系での圧力波形の例を図5に示す。(a)図は定圧弁、(b)図は10 m 垂直吐出管によって背圧を維持した時のものである。基本的には4インチ系と同様な特徴を示しているが、気泡スラグ先端が水平管を通過した後の水平管圧力と背圧に違いが見られる。気泡スラグ後方の残水が部分的に水平管頂部に達することによって形成される水スラグに起因する、つまりスラッシング現象による大きな振動が現れている。(a)図の場合、2個のスラグに対応する2回の振動、(b)図では3回の振動が生じている。水スラグが発生すると残水は減少する。また、定圧弁試験での背圧に10 Hz 程度の激しい振動が見られる。これは空気が弁を通過する際に現れるチャタリング現象で、定圧性能への影響は少ないが、定圧弁の耐久性

図5 圧力波形の変化(6インチ管系)

に悪影響を及ぼすものと考えられる。

写真1は6インチ系の定圧弁試験のものである。管内に流入した空気は単一の気泡スラグとなって成長し続け、管内水を排出する時の様子を示しており、図5の“気泡スラグ水平管内”に相当する時期での流動様相である。写真2は定圧弁からの吐出状況を示している。写真(a)、(b)は定圧弁直前の管内が透明であることから、気泡先端が写真より右側の上方部分にあり、水のみが排出されている期間で、気泡の成長とともに水のみが排出が次第に激しくなることが分かる。これは、気泡の成長とともに気泡先端速度が加速されることに対応している。写真(c)では、管内が不透明、即ち、液滴が発生する高速空気-水二相流となっており、気泡先端が定圧弁を通過した後の“ブロー”にはいつていることがわかる。この時、高速空気流が弁通過後に急膨張するため、空気-水混合物が激しく排出され、定圧弁に大きな反力がかかる。写真(d)は、弁から水の排出がほとんどなく管内も再び透明であることから、管内の流れはほとんど空気のための“ブロー”末期であることを示している。

4.2 水平管残水量特性

1) 水平管が初期満水の場合

図6～9は4インチ管系において、水平管内水を満水の状態から排出した時のエアパージ終了後の水平管残水量率 R_H ($=$ 水平管残水量/水平管満水量)のデータをプロットしたものである。図6はトリム 2° 、図7はトリム 0° 、図8はトリム -2° における R_H の変化を示す。

(a)

(b)

(a) から (b) へと成長する

写真1 エアパージ開始とともに水平管内を移動しながら排水する単一の気泡スラグの様子

(a) エアブージ開始直後、気泡スラグ下流は水で満たされている

(c) 空気と水が混相状態で激しく噴出、管内の空気部は高速噴霧二相流

(b) 水のみが盛んに噴出

(d) 水はほとんど噴出せず、液滴を含んだ気流となる

写真2 定圧弁からの空気と水の吐出状況

図6 弁体形状、弁体リフトの水平管残水率に及ぼす影響

横軸は空気タンクの初期圧力、縦軸にはログ目盛りで R_H をとっている。これらの図からみられるように、空気タンク容積によって圧力の効果に若干の違いはあるものの、圧力が高くなるほど、また空気タンク容積が増加するほど残水率は減少し、大幅な残水率の低下がみられる。そして空気タンク容積が増加すると、 R_H は始めは急激に減少するが、その後はタンク容積が増加しても R_H の減少傾向は小さくなる。空気タンク容積、圧力とも、 R_H を減少させるうえで有効な傾向を示す範囲と、そうでない範囲の存在することがわかる。また図6でみられるように試1弁、試2弁ともほとんど同じ残水率となっており、バネ定数、弁体リフトや弁体形状を変えても、残水率の違いは少ないことがわかる。 R_H が大きければ背圧維持方法の影響はほとんどみられないが、小さい値になると現れるようになる。トリムの影響を図9に示す。どのトリムに対しても、空気タンクの容積、圧力が増加すると R_H は減少するとともに、トリムがプラスからマイナスに移るに伴い、 R_H はより低下する傾向を示している。

図10、11は6インチ管系におけるステージ3終了時点の水平管残水率 R_H と空気タンク初期圧力の関係を、

図7 トリム 0° における空気タンク初期圧力と水平管残水率との関係

図8 トリム -2° における空気タンク初期圧力と水平管残水率との関係

空気タンク容積 V_c 、背圧維持方法、トリムをパラメータとして示したものである。タンク容積とタンク初期圧力の R_H に及ぼす効果の傾向は4インチ系とほぼ同じであるが、トリムの影響、背圧維持方法の違いの影響は6インチ系では4インチ系ほど顕著ではない。定圧弁と10m吐出管による背圧維持方法とは、静的には水平管に対し同じ効果を有するが、動的には10m吐出管の場合の方が過渡変化中に作用する水柱による慣性力は大きく、長時間となる。このため定圧弁の R_H の方が小さくなる傾向を示すことになる。またエアパージ後半においては、10m吐出管では 1.0 Kg f/cm^2 の背圧を維持出来ず、このことが R_H を低くするように作用する。このような理由により、背圧維持方法による R_H の違いが生ずるものと思われる。一方水平管からみたエアパージ終了時期の違いは管内残水率に影響し、遅いほど、つまり長時間エアパージを持続するほど R_H は小さくなる。4インチ管系と6インチ管系では背圧維持方法によって同一のエアパージ終了時期となっておらず、従って影響の傾向がやや異なるものと考えられる。

2) 水平管が満水でない場合

定圧弁によって背圧を維持した4インチ管系において、水平管に初期水量として水平管満水量の100、75、50、25%及び10%を供給した時のエアパージ操作後の水平

管残水率の比較を図12、図13に示す。初期水量が少ないほど、タンク圧力が低い範囲で満水との R_H の違いは大きい。タンク圧力が高くなるにしたがい、初期水量の影響は小さくなる。初期水量を少なくしても残水率はそれほど改善されないことが分かる。そして初期水量を変えても100%の場合より低い R_H となっており、最大の R_H を与えるのは初期満水の場合であることを示している。

満水でない場合ではエアパージ中満水の場合に比べ、図14に示すように(実験条件は図12と同じ)、過渡的な空気と水の運動によって水平管圧力②と背圧③は複雑に変化する。気流によって水スラグが発生し、この水スラグが高速で出口に向かって移動し、弁体に激しく衝突する。この時初期水量 $3/4$ の圧力波形の変化から見られるように大きな圧力振動が観測され、配管系の健全性を損なう事があるので、この条件で排水を行う時には注意が必要である。

4.3 定圧弁の場合と吐出管の場合との水平管残水率の比較 図15、16はそれぞれの背圧維持方法での R_H を直接比較したものである。6インチ管系では2つの背圧維持方法での R_H は空気タンクの容積、圧力、トリム、ブロー終了時期の違いに関係なくよく一致している。しかし4インチ管系では R_H が0.1程度以上

図9 水平管残水率に及ぼすトリムの影響

図10 6インチ管系での水平管残水率と空気タンク初期圧力の関係

図11 6インチ管系での水平管残水率に及ぼすトリムの影響

図12 満水でない状態でエアパージした時の初期水量と水平管残水率の関係

図 13 満水でない状態でエアパージした時の空気タンク初期圧力と水平管残水率の関係

では実験誤差範囲でよく一致しているものの、0.1 程度以下では定圧弁を用いた方が R_H は大きな値となる。これは、定圧弁の場合にはもともと吐出管が接続されていないので、吐出管内を気泡スラグが移動し、加速される時間帯を持たないため、十分水平管内の気流速度が上昇しないうちに操作弁の開弁が行われることになる。4 インチ管系の閉弁モードでは吐出管 10 m 場合に比べて定圧弁の方の操作弁開弁開始時期が早く、開始時の水平管内気流速度が低いことによるため、両者の対応が本質的に悪いためではない。 R_H の違いは操作弁の開弁操作、つまり、水平管からみたエアパージ終了時期の違いによるものと考えられる。これに対し 6 インチ管系ではエアパージ終了時期が同一であるため、 R_H は全範囲において実験精度内でよく一致している。4 インチ管系のように実船で行われると予想されるエアパージ終了時期を選択した場合でも、 $R_H \geq 0.1$ ではデータは $\pm 20\%$ 以内に入っており、10 m 垂直吐出管によって背圧を維持しても、試作バネ弁によって背圧を維持しても、水平管残水率は満足できる程度に一致しており、両者は等価性を有していると言えよう。

5. 高残水率域での水平管残水率の予測

圧力 P_C 、容積 V_C の空気タンクより容積 V_H の水平

図 14 満水でない状態でエアパージした時の圧力波形の変化 (4 インチ管系)

管に供給された完全ガスの空気が背圧 P_B にバランスするまで等温膨張し、水平管に流入した空気容積だけ管内水を排除したとすると、水平管残水率は

$$R_H = 1 - \eta \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。

ここで $\eta = V_C (P_C / P_B - 1) / V_H$ であり、圧力の単位には絶対圧を用いる。

この関係は水平管に流入した空気が静的に完全に管内

水を排除し、空気が最も有効に利用される理想的な状態を表している。図 17 は式 (1) と 4 インチ管系、図 18 は 6 インチ管系でのデータとの比較を示す。吐出管 10 m によって背圧を維持した場合¹⁾と同様、 $R_H \geq 0.45$ の領域でよく一致しており、空気タンクの容積、圧力、背圧を 1 つの無次元数 η であらわした上式による簡単な関係から R_H を予測できることがわかる。 R_H が低くなるに伴い η に含まれていない流動の動的な影響が無視でき

図 15 異なった背圧維持方法での水平管残水率の比較 (4 インチ管系)

(a) ステージ 1 終了時点の残水率の比較

(b) ステージ 3 終了時点の残水率の比較

図 16 6 インチ管系での水平管残水率の比較

図 17 η による水平管残水率の整理 (4 インチ管系) 図 18 η による水平管残水率の整理 (6 インチ管系)

なくなり, 流れの様相も変化する, 一致度は悪く, η の増加による R_H の減少率は小さくなる。しかし η によって R_H を整理した場合には, 図 6~9 や図 10, 11 に比較して空気タンク容積の影響はかなり圧縮されており, データのまとまりは良くなっている。しかしながら詳しく比較すると空気タンク容積が小さいほど僅かではあるが R_H が小さくなる傾向を示している。これは η が同じであれば空気タンク容積の小さいほど空気タンク圧

力が高いことに相当し, 水を排出できる動的な力が大きくなるためである。

6. 定圧弁のチャタリング防止

定圧弁を通過する流体中に空気が混入すると図 5(a) でみられたような大きな圧力振動が起り, チャタリングが生じる。この現象が起こっても定圧弁としての定圧性能には支障はないが, 弁の耐久性に悪影響を及ぼすものと

考えられる。チャタリングを防止するため本試験で使用した6インチ試作定圧弁の弁体と弁座によるシール点周辺の改造の概念を図19に示す。一旦開いた弁が急激な圧力変動などにより閉じる際、弁のシール点の外側に設けられた一種の圧力室で生じるダンピング作用によって、金属どうしが直接衝突するのを防止しようとしたものである。図20は改造後の定圧弁試験における圧力波形の例である。チャタリングは消えており、改造によって定圧性能は影響されないことがわかる。また、二相流が噴出する際のメタルタッチ音も全く聞かれなくなった。

7. ま と め

(1) 4インチ管系及び6インチ管系で、水平管残水率に及ぼす空気タンクの容積、圧力、トリム、背圧維持方法の影響の大きさを明らかにした。

図19 チャタリングを防止に行った定圧弁シール点近傍の改造

(2) 背圧 $1.0 \text{ Kg/cm}^2 (\text{G})$ 以上を維持するため、口径4インチおよび6インチの簡易なバネ式定圧弁を試作し、空気タンクの容積、圧力、トリム等を変えて垂直吐出管10mによる背圧維持方法との等価性を調べた。試作定圧弁は10m垂直吐出管とエアバージ後半の背圧の大きさや、過渡時での水柱による慣性力の大きさが必ずしも同じでないという物理的違いは有るものの、水平管残水率に及ぼす効果は少なく、両者は等価な機能を有していることがわかった。

(3) 定圧弁の弁シール点の外側に圧力室を設ける改造により、定圧性能に悪影響を与えることなく空気が混入した際発生するチャタリングを防止出来ることを確認した。

(4) 水平管の初期水量を減少したエアバージ操作では、初期満水の場合より水平管残水率は小さくなる。しかし配管系の健全性に影響を及ぼす大きな圧力振動を伴うことがある。

(5) 水平管残水率が大きい領域では、水平管に流入した空気は完全に管内水を排除するというモデルによって水平管残水率を予測できることを示した。

8. 謝 辞

本研究の一部は日本造船研究協会よりの依頼により、受託試験として実施したものである。委員会の方々と、試作定圧弁の製作にあたられた㈱三元バルブ製造 三輪英雄氏から貴重な御意見をいただいた。謝意を表します。

文 献

- 1) 山口・山根・綾・渡江, 舶機誌, 23-8 (昭63-8) 480

図20 定圧弁改造後の圧力波形例