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4 定圧弁背圧下での水平管内の流動解析—*

山口勝治**・綾 威雄***
山根健次**・波江貞弘**

Minimization of Cargo Residual in Piping for Chemical Tankers

— Part 4 Analysis of Flow Characteristics under Constant Back Pressure Valve in Horizontal Pipes —

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

To reduce the quantity of remaining noxious liquid substances in piping arrangement after the unloading, the effectiveness of gas blowing which is commonly applied to the chemical tankers is examined analytically. Two different test arrangements are considered for the means to maintain back pressure at the end of horizontal pipe. Back pressure is maintained by 10m. long vertical riser pipe (10mP) or constant pressure valve (CPV). Model for predicting the quantity of remaining water and pressure in horizontal pipe during the process of air blowing for the test arrangement of CPV is developed, based on physical mechanism presented in previous paper for the test arrangement of 10mP. Results predicted by the present analysis are both compared with experimental data for 4-inch and 6-inch diameter horizontal pipe lines and with the predicted results for the test arrangement of 10mP. Good coincidence with experimental data is obtained and two predictions are in satisfactory coincidence. This suggests that constant pressure valve has an equivalent function to the 10m. long vertical riser pipe.

1. はじめに

有害液体物質をばら積み輸送するケミカルタンカーの荷揚げポンプによる荷揚げ後、船内に残留した貨物液がタンク洗浄水等に混入して海洋に排出されることによる海洋汚染を少なくするためには、残留貨物液量を大幅に低減させることが有効であり、低減のための技術開発を行うことが必要である。法的には船舶から海中に排出される有害液体物質の量に関するMARPOL 73/78 条約付属書ⅡおよびP & Aの規制があり、タンクの吸引点近傍およびタンクの関連管系内に荷揚げ最終的に残留するBおよびC類貨物液量の要求値が規定されているとともに、この値を確認するための実船水試験が義務づけられている。試験は水を用いて揚荷関連配管系の残留貨物液量を評価するもので、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において1バール以上の背圧を与えるため、高さ10mの垂直管または最低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。

これまで揚荷配管系に残留する貨物液を気流によって減少させる方法であるエアパージまたはラインブローイングについて、実船水試験を対象としたいろいろな配管系を用いて実験的に検討し、その有効性および残留貨物液量を評価する方法について報告してきた。^{1)~3)} 本報告では10m垂直管と実験的には等価な機能を有し、構造が簡単で実船水試験に容易に使用可能と考えられる定圧弁²⁾によって背圧を維持した時の水平管内の流動解析の結果について述べる。解析は10m垂直管によって背圧を維持する場合の解析³⁾を一部修正した方法により行った。口径4インチおよび6インチ管系に対する流動解析の結果はラインブローイング全体の過渡変化をよく再現しており、定圧弁は10m垂直管と等価な機能を有していることが解析からも確認できたのでそれらについて報告する。

2. 実 験

実験装置の主要部である配管系はそれぞれ同一口径の水平管、操作弁（マニホールド弁）、背圧1 kgf/cm²(G)を与えるためのバネ式定圧弁で構成される。水平管、操作弁、定圧弁の口径は4インチまたは6インチである。試験部である水平管の長さは11.5 mであり、トリムは

* 原稿受付 平成元年1月27日

昭和63年秋期学術講演（昭和63年11月18日）

** 正会員 船舶技術研究所（三鷹市新川6-38-1）

*** 正会員 船舶技術研究所大阪支所（交野市天野原町3-5-10）

±2° の範囲で変えられる。水平管は透明であり、管内流動の様子が観察できる。操作弁には一定速度で開閉する電動バラフライ弁を用いている。水平管内水の排出は、空気タンクから空気供給ホースを経て送られる加圧空気によって行う。空気供給ホースの直径は4インチ管系では1インチ、6インチ管系では2インチ、長さはそれぞれ10mである。6インチ管系ではホース上流部にオリフィスを挿入した実験も行った。エアブロー開始前は水平管は満水で、操作弁は閉じられており、水平管と空気供給系は初期圧力 p_{10} に保たれている。操作弁が一定速度で開かれるとともにエアブローは開始し、管内への空気の流入が起こり、管内水は定圧弁出口より大気中に排出される。この時、単一の大気泡が水の一部を残しつつ下流側に成長を続けるという、10m垂直管によって背圧を維持した場合と同じような管内流動が観察される。終了時期の選択は気泡先端の位置から行い、操作弁を閉じるか、空気供給ホース入り口に設けたボール弁を急閉することによってエアブローを終了させている。水平管中央および操作弁と定圧弁の間（背圧）での過渡的な圧力変化とエアブロー終了後の水平管残水量を計測し、実験データとする。実験装置、実験方法及び実験結果の詳細は前報^{1),2)}で述べられている。解析対象は以上のような実験装置、実験方法および観察された管内流動に対応したものであり、図-1に示す。

現象のモデル化は、観察に基づき気泡先端位置により

図-2に示すような2つのステージに別けて行う。各ステージの左右の図は現象のスケッチとそのモデル化を示している。

- (i) ステージ1：一部の水を残しつつ単一気泡が水平管内を押し進む。出口端では水のみが流出する。出口端から測った気液界面位置 z は $0 < z \leq l$ である。
- (ii) ステージ3：気液界面先端が出口端に達した後で、激しい気流に伴って、附着水の一部が液膜流または水滴となって下流へと移動する。（ $z \leq 0$ ）

従って定圧弁によって背圧を与える場合には、10m垂直管によって背圧を維持する場合のエアブローのモデル化においては存在した垂直管内の流動、つまりステージ2が見られない。

3. 解析方法

解析は前報³⁾の方法に従って行った。ただしステージ2は無く、垂直管高さ $h \rightarrow 0$ 、管の曲がり損失 $\rightarrow 0$ とし、 $r_L h$ の代わりに背圧 p_B を用いる。

管軸方向の一次元現象として扱い、水平管のトリムは0°とする。ステージ1においては初期満水の水平管への流入空気量、気泡中央と出口端の間で形成される二相流部および水柱部に働く力の釣り合いより気泡先端の運動を解析し、管内よりの排水量を計算して残水量を求める。

図-1 実験系および解析系

Sketch of Flow

Flow Model

(a) Stage 1

(b) Stage 3

図-2 観察による現象の2ステージモデル化

ステージ3では気流により生じる液膜流と液滴により運び去られる体積流量を計算し、残水量を求める。空気タンク（空気供給管を含む）及び水平管をそれぞれ一つのコントロール容積とし、空気供給管をジャンクションとして容積間を継ぐ。各 volume 内の圧力、温度等の変数は軸方向の分布が重要なもの（例えば、気流先端位置 z ）以外は各 volume 内で一様とみなし、水や空気の流動は junction でステージごとに評価される。開弁時刻から微小な時間ステップごとに逐次各変数を陽的に数値積分する方法で計算する。定圧弁による背圧の値は $1.0 \text{ kgf/cm}^2(\text{G})$ としたが、背圧値の残水率に及ぼす影響をみるため $1.2 \text{ kgf/cm}^2(\text{G})$ の時の計算も行った。各 volume 内

での変数及び寸法等の記号を図-1に示す。計算は図-3に示すフローに従って行う。

図-3 解析のフロー

4. 解析結果と実験データの比較

解析値と実験データとの比較を行い、本解析法の妥当性を調べる。図-4、-5は、ステージ3まで達する代表的な実験例（図-4は4インチ管系、空気タンク初期圧力 $5 \text{ kgf/cm}^2(\text{G})$ 、容積 0.083 m^3 、図-5は6インチ管系、空気タンク初期圧力 $5 \text{ kgf/cm}^2(\text{G})$ 、容積 1.09 m^3 ）における、解析とデータの過渡変化中での比較を圧力について行ったものである。図-4の4インチ管系における各ステージでの空気タンク圧力、水平管圧力および背圧の過渡変化が解析と実験で極めてよく対応しており、本解析法はラインブローイングにおける管内流動をよく模擬していることが分かる。図-5の6インチ管系の場合、ステージ3で背圧に約10Hzの激しい振動がみられるのは、空気が弁を通過する際に現れるチャタリング現象によるものである。また、気泡スラグ先端が水平管を通過した後、つまり背圧に鋭いピークが見られた後、水平管圧力と背圧にやや大きな振動が現れるのは、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ものである。これらの現象は本解析では模擬出来ていないが、その他の変化はデータと良く一致している。

次に水平管残水率 R_H ($=$ 水平管残水量 / 水平管満水量)

図-4 4インチ管系での実験と解析の圧力変化の比較

図-5 6インチ管系での実験と解析の圧力変化の比較

についてデータと解析値の比較を行う。図-6はトリム 2° 、操作弁の開弁時間が5.9秒、エアブローが終了するまで何の操作弁操作を行わない（操作弁開弁モードⅠ）口径4インチ管系での両者の比較を示したものである。空気タンクの初期圧力、容積に対し、かなり良く一致しているのが分かる。ステージ1の終了時点での残水率を比較したのが図-7である。解析条件は6インチ管系、操作弁全開時間は20秒、空気供給ホースのオリフィス直

図-6 解析値とデータの比較 (4インチ管系, モード1の水平管残水率)

図-7 解析値とデータの比較 (6インチ管系, ステージ1終了時の水平管残水率)

径20 mmである。実験条件は(a)はトリム 2° , (b), (c)はトリム $+0.5^\circ$ である。図から、タンクの初期圧力と容積の広い範囲に亘って解析値と実験データとの一致はよいことがわかる。定圧弁締め切り圧力を1.0または1.2 $\text{kgf/cm}^2(\text{G})$ として4インチ管系での定圧弁背圧値の影響についてみたものを図-8に、6インチ管系での影響の大きさを図-9に示す。各空気容積、圧力に対し、背圧を0.2 kgf/cm^2 だけ上げた解析結果は残水率がやや増加するものの、定圧弁の背圧は残水率に大きな影響をもたらさないことが解析面から確認出来る。

図-8 定圧弁締め切り圧力の水平管残水率に及ぼす影響（4インチ管系，ステージ1終了時）

図-9 定圧弁締め切り圧力の水平管残水率に及ぼす影響（6インチ管系，ステージ1終了時）

5. 定圧弁解析と10m垂直管解析の比較

図-10は4インチ管系（操作弁全開時間5.9秒），図-11は6インチ管系（操作弁全開時間20秒）に対し，ステ

図-10 水平管残水率に及ぼす背圧維持方法の影響（4インチ管系，ステージ1終了時）

図-11 水平管残水率に及ぼす背圧維持方法の影響（6インチ管系，ステージ1終了時）

ージ1終了時における10m垂直管解析²⁾と定圧弁解析結果の比較をしたものである。10m垂直管の水平管残水率は定圧弁の水平管残水率よりやや高くなっている。これは、定圧弁と10m垂直管とは静的には同じ効果を有するが、動的には10m垂直管の方が水柱が長く、過渡変化中に作用する慣性力が大きくなるためである。しかし両者はかなり良く一致しており、背圧維持方法の水平管残水率に及ぼす影響はあまり大きくないことがわかる。図中 $R_H + \eta = 1$ の関係を表す曲線^{1), 2)}は、空気タンクより管内に流入した空気が膨張した容積分だけ水平管内の水を排出するという効率上理想的なエアブローの限界線を示している。残水率はこの線以下には下らない。

6. ま と め

定圧弁によって背圧を維持した実験系に対し、ラインブローイング中の流動解析を行った。解析結果は、ラインブローイング全体の過渡変化をよく再現しており、水平管残水率は実験データとよく一致した。定圧弁の背圧値は残水率に大きく影響しないことを確認した。また定圧弁と10m垂直管解析結果の比較から、背圧維持方法によって水平管残水率に違いは出るものの、その違いは僅かであることが明らかとなり、定圧弁は10m垂直管と等価な機能を有していることが解析からも裏付けられた。

7. 記 号

d : 直径 (m)	h : 垂直管高さ (m)
j : 見掛けの流速 (m/s)	l : 水平管長さ (m)
p : 圧力 (kgf/cm ² (G))	q : 容積 (m ³)
Q : 体積流量 (m ³ /s)	
R : 残水率 (= 残水量 / 満水量) (-)	
R' : 局所残水率 (-)	T : 絶対温度 (K)
t : 時間 (s)	V : 流速 (m/s)
v : 比容積 (m ³ /kgf)	W : 重量 (kgf)
z : 界面先端位置 (m)	α : ボイド率 (-)
η : $q_1 / q_H (p_{10} + 1) / (p_B + 1) - 1$	
γ : 比重 (kgf/m ³)	κ : 断熱係数 (-)
サフィックス	1 : 空気タンク
0 : 大気圧または初期条件	B : 背圧
2 : 供給ホース	H : 水平管
g : 気体	ℓ : 液体
e : エントレインメント	
IN : 水平部入り口	

8. 文 献

- 1) 山口, 山根, 綾, 波江, 船機誌23-8 (昭63-8), 22.
- 2) 山口, 山根, 綾, 波江, 船機誌24-3 (平1-3), 219.
- 3) 綾, 山口, 山根, 波江, 船機誌24-4 (平1-4), 71.