下降-上昇傾斜管のV字部において発生する液体スラグの特性*

細川 茂雄^{*1}, 富山 明男^{*1}Characteristics of Liquid Slug Generated at a V-Shaped Elbow
between Inclined PipesShigeo HOSOKAWA^{*2} and Akio TOMIYAMA^{*2} Graduate School of Science and Technology, Kobe University,
1-1 Rokkodai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

Liquid slugs in petroleum pipelines in hilly terrain are mainly generated at V-shaped elbows and induce high pressure fluctuation. The slug characteristics generated at elbows such as slug frequency, slug velocity and length are therefore required for the design of pipelines. In this study, we measured the velocity, length and frequency of liquid slug generated at V-shaped elbows. The effects of pipe diameter and inclination angle on the slug characteristics were experimentally examined by using three different pipe diameters and three inclination angles. As a result, it was confirmed that (1) the slug velocity is proportional to the total volume flux, and thereby it is well estimated by a drift flux correlation, (2) the length of a slug unit is well correlated with the ratio of the liquid volume flux to the total volume flux and (3) the slug length can be expressed as a function of the gas volume flux, the slug velocity and the void fraction in a gas bubble region.

Key Words: Multi-phase Flow, Pipe Flow, Pipe Line, Slug Flow, V-shaped Elbow, Hilly Terrain

1. 緒 言

丘谷における石油輸送配管は、上昇・下降傾斜管およびこれらの配管を接続するV字部から構成されており、液体スラグの多くは、配管の谷部、つまり下降管から上昇管に変化するV字部において発生する。傾斜管路内の二相流動特性については、Zukoski⁽¹⁾, Bendiksen⁽²⁾, Carew⁽³⁾によるスラグ気泡速度の研究、Grolman & Fortuin⁽⁴⁾による上昇傾斜配管内におけるホールドアップ、圧力勾配、流動様式変化に関する研究、Taitel et al.⁽⁵⁾による下降傾斜管におけるスラグの消散に関する研究、Cook & Behnia⁽⁶⁾による圧力損失評価に関する研究など多くの研究が存在する。V字屈曲部を含む管路に対しても、De Henau & Raithby⁽⁷⁾による圧力、流量変動の測定などいくつかの研究があり、石油輸送配管設計上重要な情報を与えている。

しかしながら、配管設計において問題となる圧力変動を引き起こす液体スラグの多くがV字部で発生するにもかかわらず、V字部において発生する液体スラグの特性に関してはほとんど研究されていない。

Zheng ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾は、丘谷形状配管におけるスラグ流を対象として、スラグ追跡法により管路屈曲部におけるスラグの生成と消滅を予測しているが、予測精度向上のためには、適用範囲の広いスラグ生成・消滅モデルが不可欠であり、V字接合部において発生するスラグの特性に関する知見は、それ自体、石油輸送配管設計指針としても重要である。

本研究では、V字接合部において発生する液体スラグの速度、長さおよび周波数を測定するとともに、管径および傾斜角を変化させて液体スラグ特性に及ぼす影響を調べた。この際、気液各相の体積流束が、実際の石油輸送配管の典型的な流束範囲を網羅するようにした。また、各条件下における500個のスラグ特性値から平均スラグ特性値を算出し、平均スラグ特性に関する実験相関式を作成した。

2. 実験装置および条件

実験装置の概略を図1に示す。流体には、常温・常圧の水道水および空気をを用い、水はモノポンプ、空気はコンプレッサを用いて供給した。水と空気は、波が形成されないように工夫した混合部より層状流として試験部に流入する。アクリル樹脂製試験部は、V字

* 原稿受付 2003年1月17日。

^{*1} 正員, 神戸大学大学院自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)。

E-mail: hosokawa@mech.kobe-u.ac.jp

形に連結された傾斜角の同じ下降管および上昇管からなる。流れが V 字部までに十分発達するように、下降管の長さは $100D$ (D :管径) 以上とした。管径および傾斜角がスラグ特性に与える影響を調べるために、管径を $D = 20, 30, 40\text{mm}$, 傾斜角 θ を $3, 5, 7\text{deg}$ に変化させて実験した。

本実験装置において V 字部でスラグが発生する条件を調べるために、スラグ特性の測定に先立ち流動様式を観測した。観測結果に基づく流動様式線図の一例を図 2 に示す。図中の $\langle J_G \rangle, \langle J_L \rangle$ は、各々気相体積流束、液相体積流束を意味する。下降管と上昇管における流動様式は異なるため、下降管における流動様式と上昇管における流動様式を組み合わせる流動様式を整理した。例えば、"Stratified-Slug" は、下降管で層状流、上昇管でスラグ流であることを意味する。また、"Semislug" は液体スラグ上部が気泡の密集により崩壊し、上部管壁に液体が接触していない流動状態を示す。液相体積流束が高い場合、下降管部でも液体スラグが生成した。低液相体積流束条件では、下降部では層状流であり、主に V 字部で液体スラグが発生した。

Fig. 2 An example of flow pattern map ($D = 20\text{mm}, \theta = 5\text{deg}$)

Table 1 Experimental conditions

D (mm)	θ (deg)	$\langle J_L \rangle$ (m/s)	$\langle J_G \rangle$ (m/s)	Number of test conditions
20	3	0.117-1.034	0.098-0.590	40
20	5	0.113-0.791	0.100-0.606	40
20	7	0.114-1.029	0.113-0.868	40
30	5	0.087-0.994	0.095-1.041	40
40	5	0.098-1.009	0.097-0.586	37

Fig. 1 Experimental apparatus

本研究では、液体スラグが V 字部で発生する "Stratified-Slug" および "Stratified-Plug" の条件でスラグ特性を測定した。すなわち、V 字部で発生する液体スラグのみを対象とした。各管径、傾斜角における各相体積流束の範囲を表 1 に示す。 $\langle J_L \rangle$ は $0.087 \sim 1.034 \text{ m/s}$, $\langle J_G \rangle$ は $0.095 \sim 1.041 \text{ m/s}$ の範囲で変化させた。この流束範囲は、実際の石油輸送配管における典型的体積流束条件をカバーしている。実験条件の総数は 197 条件である。

管底部からの液相の液位 h を、図 3 に示すように V 字部からの距離 x が $x = 400, 800, 1200\text{mm}$ の 3 地点に設置したリング型プローブ⁽¹⁰⁾で測定した。リン

Fig. 3 Ring type conductance probe

グ型プローブは、直径 D の穴を有する厚み 1mm のリング型アルミ電極 2 個を 3mm 間隔で配置した構造をしている。各計測地点での液体スラグ速度を測定するため、2 組のリング型プローブを 50mm 間隔で設置した。プローブからの液位信号は、デジタルレコーダ (Yokogawa, WE-7000) を用いて、 1kHz のサンプリング周波数で記録した。

液位計測誤差を評価するため、リング型プローブによる液位測定値と高速度カメラ (Photoron Rabbit, Sutter speed: $1/500 \text{ sec.}$, Frame rate: 500 frame/sec.) の画像を用いて求めた値を比較した。結果を図 4 に示す。両者の差は 1mm 程度であり、リング型プローブにより液体スラグを十分検知できることを確認できた。

隣接する 2 組のプローブにより測定した液位計測信号の例を図 5 に示す。スラグ速度は、2 つの液位信号の時間遅れから算出し、スラグ長さは、スラグ速度とスラグ通過時間の積で評価した。3 地点における測定

Fig. 4 Comparison of liquid level measured by conductance probe and image processing

Fig. 5 An example of measured liquid level

から、V字部で発生した液体スラグは急速に発達し、その後、安定状態になることを確認した。本報では、安定した液体スラグが観測された $x = 800\text{mm}$ における計測結果について議論する。 $\langle J_L \rangle, \langle J_G \rangle$ 一定の条件下でも、各液体スラグのスラグ速度、スラグ長さは異なる。そこで、各流動条件において、500個の液体スラグから得たスラグ速度、スラグ長さを算術平均して、平均スラグ速度、平均スラグ長さを求めた。また、スラグ周波数を求めるため、各測定点を一定時間内に通過するスラグ個数も測定した。以下の節で示す各種の計測値は全て平均量であることを注意しておく。

3. 実験結果および考察

3.1 スラグ速度 液体スラグの速度 V_S を定義するために、液体スラグの先端速度 V_F と後端速度 V_R を比較した結果の一例を図6に示す。本実験条件の範囲では、 V_F と V_R の差は殆どなかったため、液体スラグ速度 V_S を V_F と V_R の平均値で定義した。近似

Fig. 6 Correlation between V_F and V_R

Fig. 7 Model of slug unit

的に $V_S = V_F = V_R$ が成り立つことから、図7に示すように大気泡速度 V_G と液体スラグ速度 V_S は等しいとみなせる。

従って、ドリフトフラックスモデル⁽¹¹⁾

$$V_G = C_0 (\langle J_G \rangle + \langle J_L \rangle) + V_{GJ} \quad (1)$$

を用いて V_S を整理できる可能性がある。ここで、 C_0 は分布定数、 V_{GJ} はドリフト速度である。図8に V_S と全体積流束 $\langle J_T \rangle (= \langle J_L \rangle + \langle J_G \rangle)$ の相関を示す。 V_S の測定値は、実験を行った全ての流動条件において $\langle J_T \rangle$ に比例しており、式(1)において V_G を V_S にした式が適用できることがわかる。なお、図中の直線は各条件毎に実験値を最小二乗法により直線補間したものであり、直線の勾配が C_0 に切片が V_{GJ} に対応する。図より C_0 は傾斜角に依存しないが、良く知られているように、ドリフト速度 V_{GJ} は管の傾斜角に依存する^{(1)~(3),(12)}ことが確認できる。そこで、傾斜管内静止液体中を上昇するテイラー気泡の速度測定用実験装置を作成し、 V_{GJ} 相関式の導出を試みた。実験結果を図9に示す。Bendiksen⁽²⁾ と Carew et al.⁽³⁾ は、傾斜管中を上昇するテイラー気泡の速度の相関式を提

Fig. 8 Correlation between V_S and $\langle J_T \rangle$

Fig. 10 Correlation between Fr_h and Eo

Fig. 9 Bubble velocity in inclined pipes

案している。Carewの相関式は、本実験結果と同じ傾向を示しているが、定量的には一致していない。そこで、以下の Bendiksen モデル⁽²⁾を基に V_{GJ} の相関式を作成した。

$$V_{GJ} = \sqrt{\frac{\Delta \rho g D}{\rho_L}} (Fr_h \cos \theta + Fr_v \sin \theta) \quad (2)$$

ここで、 ρ_L は液相密度、 $\Delta \rho$ は液相と気相の密度の差、 Fr_h と Fr_v は各々水平管および鉛直管におけるフルード数であり、水平、鉛直管内の大気泡速度 V_{Gh}, V_{Gv} を用いて $V_{Gh} \sqrt{\rho_L / \Delta \rho g D}, V_{Gv} \sqrt{\rho_L / \Delta \rho g D}$ で表される。式(2)において $Fr_v = 0.35$ とし⁽¹³⁾、気泡速度測定値を式(2)の V_{GJ} に代入して Fr_h を求めた。図9に各管径において最小二乗近似した直線と Fr_h の値を示す。図10に示すように、算出した Fr_h は Zukoski⁽¹⁾ のデータと良く相関しており、その妥当性が確認でき

Fig. 11 Comparison between measured and estimated V_S

る。また、 Fr_h は次式で定義されるエトベス数 Eo と良く相関している。

$$Eo = \frac{g \Delta \rho D^2}{\sigma} \quad (3)$$

ここで、 σ は表面張力である。本結果より Fr_h に関する以下の相関式を得た。

$$Fr_h = 0.135 \log_{10} Eo + 0.056 \quad (4)$$

式(2)-(4)から算出した V_{GJ} と V_S 測定値を用いて、ドリフトフラックスモデルの分布定数 C_0 を評価した。その結果、V字部で発生する液体スラグ速度に関する以下の実験相関式を得た。

$$V_S = 1.07 \langle J_T \rangle + \sqrt{\frac{\Delta \rho g D}{\rho_L}} \{0.35 \sin \theta + (0.135 \log_{10} Eo + 0.056) \cos \theta\} \quad (5)$$

図 11 に示すように、式 (5) により V_S を $\pm 15\%$ 以内の誤差で評価できる。

3.2 スラグユニット長さおよびスラグ周波数 液体スラグと大気泡は同一速度 V_S で流動しているため、スラグ周波数 f_S は次式で評価できる。

$$f_S = \frac{V_S}{L_U} \quad (6)$$

ここで、 L_U はスラグユニット長さ (図 7 参照) である。 f_S 及び L_U は液相体積流束と強い相関があると考えられる。そこで、 L_U を D で無次元化し、無次元液相体積流束 $\langle J_L \rangle / \langle J_T \rangle$ との関係調べた。結果を図 12 に示す。図中の実線は以下の実験相関式である。

$$\frac{L_U}{D} = \exp \left(-3.2 \frac{\langle J_L \rangle}{\langle J_T \rangle} + 3.94 \right) \quad (7)$$

図 13 に示すように、式 (6), (7) により V 字部におけるスラグ発生周波数 f_S を $\pm 20\%$ 程度の誤差で評価できる。

3.3 スラグ長さ 質量保存式と図 7 に示した半円柱状大気泡形状の仮定より、気相体積流束を以下のように表せる。

$$\langle J_G \rangle = \alpha_G \left(1 - \frac{L_S}{L_U} \right) V_S = \alpha_G \frac{L_G}{L_U} V_S \quad (8)$$

ここで、 α_G は大気泡部におけるボイド率、 L_G は大気泡部長さである。上式より、

$$\frac{L_G}{L_U} = 1 - \frac{L_S}{L_U} = \frac{1}{\alpha_G} \frac{\langle J_G \rangle}{V_S} \quad (9)$$

を得る。上式がスラグ長さに関する相関式として有効であるか否かを調べるため、 L_G/L_U 測定値と $\langle J_G \rangle / V_S$ の関係を図 14 に示す。本図より、 L_G/L_U と $\langle J_G \rangle / V_S$ の間に強い相関があることがわかる。また、両者が比例関係にないことから、式 (9) 右辺の α_G が一定値ではないこともわかる。そこで、式 (9) より得られる次式の右辺に計測値を代入して α_G を求め、その特性を調べた。

$$\alpha_G = \frac{L_U \langle J_G \rangle}{L_G V_S} \quad (10)$$

その結果、図 15 に示すように α_G は $\langle J_G \rangle / \langle J_T \rangle$ とほぼ直線関係にあり、以下の相関式で整理できた。

$$\alpha_G = 0.625 \frac{\langle J_G \rangle}{\langle J_T \rangle} + 0.227 \quad (11)$$

以上の相関式 (式 (5), (9), (11)) から無次元液体スラグ長さ L_S/L_U を算出し、測定値と比較した結果を図 16 に示す。 L_S/L_U の推算値は測定値と $\pm 20\%$ 程度の誤差で一致している。

Fig. 12 Correlation between L_u/D and $\langle J_L \rangle / \langle J_T \rangle$

Fig. 13 Comparison between estimated and measured f_s

Fig. 14 Correlation between $\langle J_G \rangle / V_S$ and L_G/L_U

Fig. 15 Correlation between α_G and $\langle J_G \rangle / \langle J_T \rangle$

4. 結 言

上昇-下降傾斜管のV字接続部で発生する液体スラグの速度、長さ、周波数の特性を調べるため、管径および傾斜角をパラメータとして実験した。気液各相の体積流束は、実際の石油配管の典型的流束範囲をカバーする範囲とした。また、各条件において500個のスラグに対してスラグ速度、スラグ長さを計測し、これらの算術平均値から本実験条件範囲に適用できる実験相関式を作成した。その結果、以下の結論を得た。

1. 平均スラグ速度は全体積流束に比例しており、ドリフトフラックスモデルに基づく実験式(5)により $\pm 15\%$ 程度の誤差で評価できる。
2. スラグ周波数は、スラグ速度とスラグユニット長さの比で与えられる。また、スラグユニット長さは全体積流束に対する液相体積流束の比と強い相関があり、実験式(7)により $\pm 20\%$ 程度の誤差で評価できる。
3. 平均スラグ長さは、気相体積流束とスラグ速度の比と強い相関があり、大気泡部ボイド率に関する実験式(11)を用いて $\pm 20\%$ 程度の誤差で評価できる。

謝 辞

本実験の実施に際して、多大なご尽力を頂いた鳥居剛志氏(現 川崎重工工業株)に深く感謝いたします。また、本研究の遂行に当たりご協力いただいた石油公団に深く感謝いたします。

文 献

- (1) Zukoski, E.E., Influence of viscosity, surface tension and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes, *J. Fluid Mech.*, **25** (1966), 821-837.
- (2) Bendiksen, K.H., An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes, *Int. J. Multiphase Flow*, **10-4** (1984), 467-483.

Fig. 16 Comparison between estimated and measured L_S/L_U

- (3) Carew, P.S., Thomas, N.H. and Johnson, A.B., A physically based correlation for the effects of power law rheology and inclination on slug bubble rise velocity, *Int. J. Multiphase Flow*, **21-6** (1995), 1091-1106.
- (4) Grolman, E. and Fortuin, J.M.H., Liquid hold-up, pressure gradient, and flow patterns in inclined gas-liquid pipe flow, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, **15** (1997), 174-182.
- (5) Taitel, Y., Sarica, C. and Brill, J.P., Slug flow modeling for downward inclined pipe flow: Theoretical Considerations, *Int. J. Multiphase Flow*, **26** (2000), 833-844.
- (6) Cook, M. and Behnia, M., Slug length prediction in near horizontal gas-liquid intermittent flow, *Chem. Eng. Sci.*, **55** (2000), 2009-2018.
- (7) De Henau, V. and Raithby, G.D., A study of terrain-inclined slugging in two-phase flow pipelines, *Int. J. Multiphase Flow*, **21-3** (1995), 365-379.
- (8) Zheng, G., Hilly terrain effects on slug flow characteristics, *68th Annual Technical Conf. and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*, (1993), SPE-26566.
- (9) Zheng, G., Brill, J.P. and Taitel, Y., Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline, *Int. J. Multiphase Flow*, **20-1** (1994), 63-79.
- (10) Hewitt, G.F., *Measurement of Two Phase Flow Parameters*, (1978), 112, Academic Press.
- (11) Zuber, N. and Findlay, J.A., Average volumetric concentration in two-phase flow systems, *J. Heat Transfer*, **87**, Ser. C (1965), 453-469.
- (12) Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E., *Bubbles, Drops and Particles*, (1978), 239, Academic Press.
- (13) White, E.T. and Beardmore, R.H., The velocity of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes, *Chem. Eng. Sci.*, **17** (1962), 351-361.