

垂直長方形管内の気泡流の見かけの 粘度と流れ模様

岩 永 正 裕・山 岸 陽 一

Apparent Viscosity and Flow-pattern of Bubble-Flow
through Vertical Rectangular Pipes

Masahiro IWANAGA and Yōichi YAMAGISHI

Abstract

In our previous report, we reported that the apparent viscosity of bubble-flow through a vertical rectangular pipe is almost equal to the viscosity of liquid-phase and that it differs from the theoretical results by G.I. Taylor and others. But it became clear that there exists a problem in the method of producing bubbles, that is, we produced bubbles by aeration phenomena with an orifice and the aeration phenomena seemed to occur in the test pipe.

In this paper we produced uniform small bubbles by putting air into turbine-oil through a capillary and further by tearing them off with concentric rotating cylinders. And we studied the relations between the apparent viscosity of bubble-flow and the distribution of bubbles.

As a result the higher value of apparent viscosity was obtained than that of the theories in the case of low Taylor number which means the degree of bubble deformation. It decreases as Taylor number increases. And we showed that the experimental results do not contradict the theoretical ones considering the change of distribution of bubbles.

1. ま え が き

近年、油圧機器が高圧化、小型化することに伴い、エアレーションやキャピテーションを起こした流れの特性を明らかにする必要が生じ、比較的低いレイノルズ数における気液二相流の性質を知る必要がある。

一方、気泡流の見掛けの粘度に関する理論的な研究はG.I. TAYLOR¹⁾をはじめとして幾つか報告²⁾されている。それらを実験的に検証することも本研究の目的の一つである。

前報告³⁾において垂直長方形管に気泡流を流して見掛けの粘度を計測したが、理論的研究の結果と異なり気泡を混入することによって見掛けの粘度が減少する結果となったことを報告した。そこで実験方法の検討を行った結果、気泡発生方法に問題があることが明らかとなった。即ち空気を十分溶解させたタービン油を用いて供試流路上流にオリフィスを設置してエアレー

ションにより気泡を発生させたが、エアレーションは供試流路中でも発生して見掛けの粘度の値が減少するように計測された可能性が大きい。

そこで本研究ではタービン油中に気泡を細管を通して混入して、その後更に回転二重円筒の隙間にこの気泡流を流してせん断力で気泡を引きちぎり気泡径を小さくして均一な径の気泡を含む気泡流を作成して実験に使用する。

記 号

C_1 : モデル計算の積分で求めた定数

$E: (\bar{\mu}/\mu - 1)/\bar{a}$

l : モデル計算の検査体の長さ

p_1 : モデル計算の検査体入口の圧力

p_2 : モデル計算の検査体出口の圧力

Q : モデル計算の単相流の流量

Q_{air} : 流路各断面の気相の流量

Q_{all} : 流路各断面における気泡流の全流量

R : モデル計算の円管の半径
 r : モデル計算の検査体の半径
 Taylor 数 : 気泡の変形を表す無次元量
 u : モデル計算の各点の速度
 α : モデル計算の局所的体積濃度
 $\bar{\alpha}$: 気泡体積濃度
 δ : モデル計算の局所的体積濃度の最大点と壁面の距離
 ε : モデル計算の圧力勾配
 μ : 液相の粘度
 $\bar{\mu}$: 見掛けの粘度
 $\bar{\mu}_0$: 局所的な見掛けの粘度
 τ : モデル計算のせん断応力

2. 実験装置及び方法

Fig. 1 に実験装置概略図を示す。ISO VG68 のタービン油を容積 250 リットルの圧力容器に入れ、コンプレッサーで加圧する。このタービン油を流路に導き、圧

力容器上部の空気を細管を通してタービン油中に混入する (Fig. 2 参照)。この気液二相流を Fig. 3 に示す回転二重円筒の隙間に流して、せん断力で気泡を引きちぎり細かな気泡を含む気泡流とする。これを分岐に導くと、大きな気泡は除去されて細かな気泡だけが供試

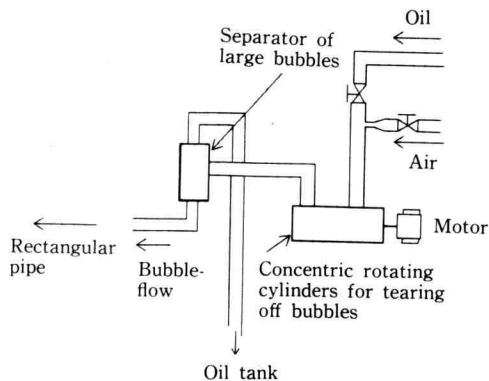


Fig. 2. Bubble generator.

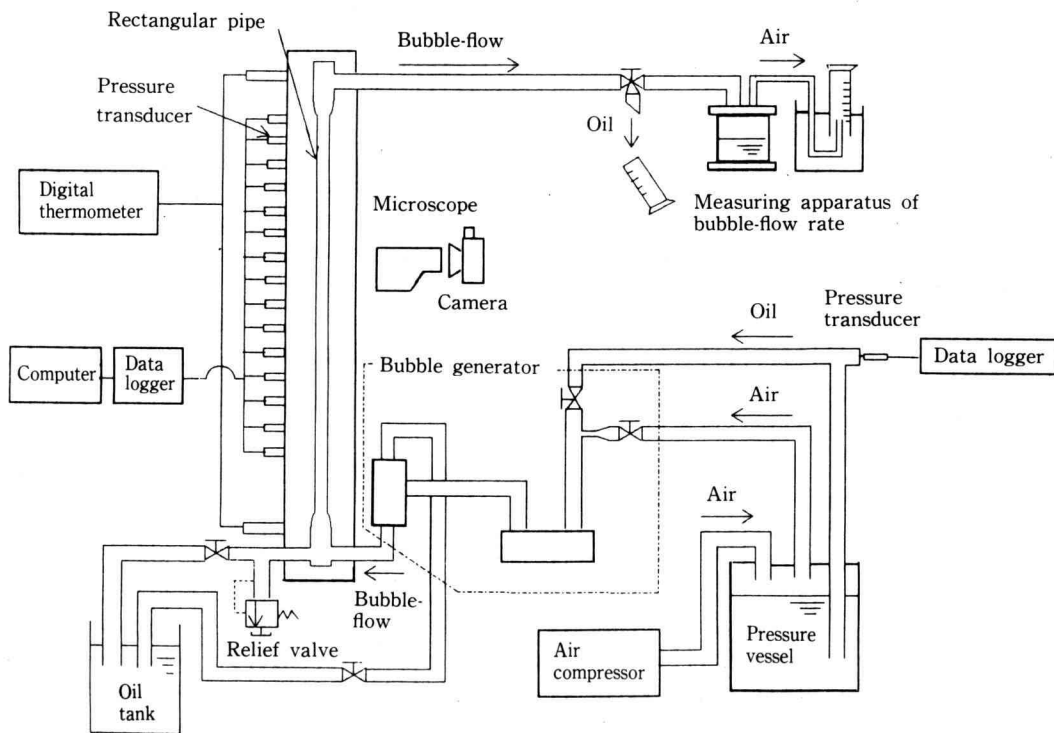


Fig. 1. Experimental apparatus.

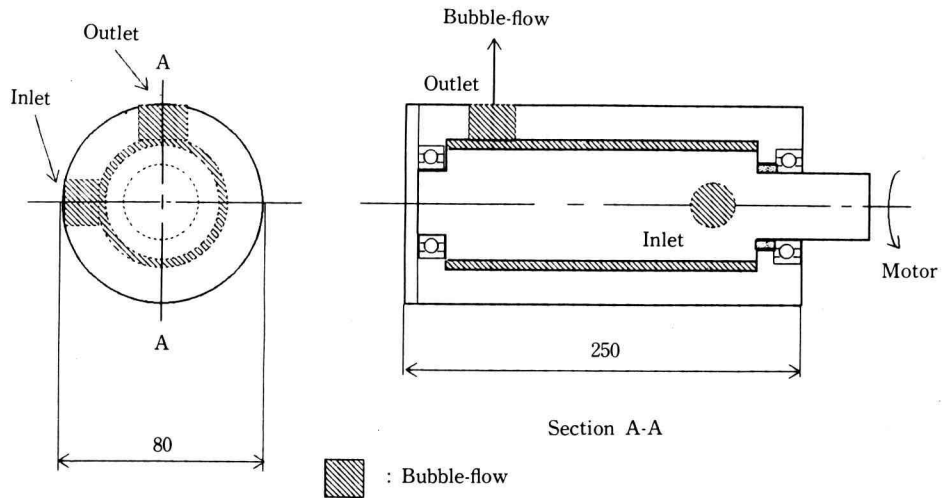


Fig. 3. Concentric rotating cylinders for tearing off bubbles.

流路に流れることになる。

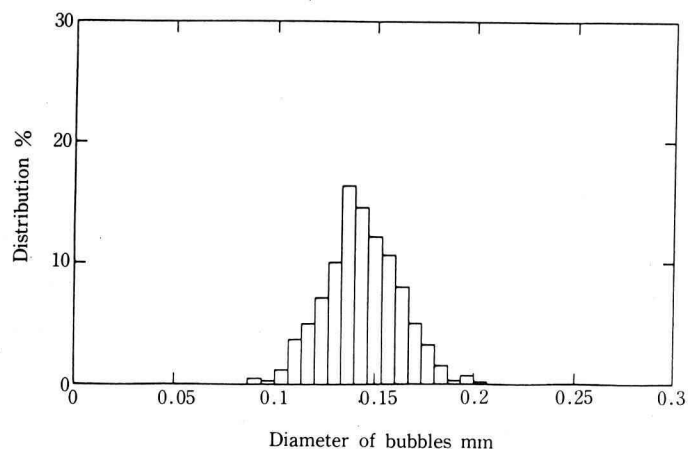
これを供試流路に流して、15本の圧力ピックアップで供試流路各点の圧力を計測して圧力損失を知り、気泡流に含まれる油だけの流量と大気圧下の気泡流全体の流量を計測して気泡の体積濃度を知る。更に瞬間顕微鏡写真を撮影してその写真をタブレットを用いてコンピュータに入力して気泡径や気泡分布等の流れ模様を知る。

Fig. 4に気泡発生方法による気泡径分布の比較を示す。(a)は前報告³⁾で使用したエアレーションによる

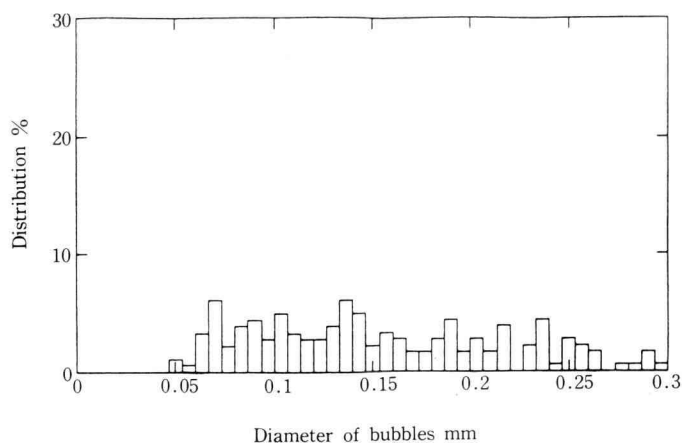
もの、(b)は細管で空気をタービン油に混入した場合のもの、(c)は回転二重円筒中を流し更に細かな気泡を分離抽出した場合のものである。これにより本研究で使用した気泡発生方法による気泡径分布(c)は気泡径が0.05 mmを中心にした狭い範囲に集中しておりほぼ理想的な気泡流が得られていることが分かる。

3. 実験結果

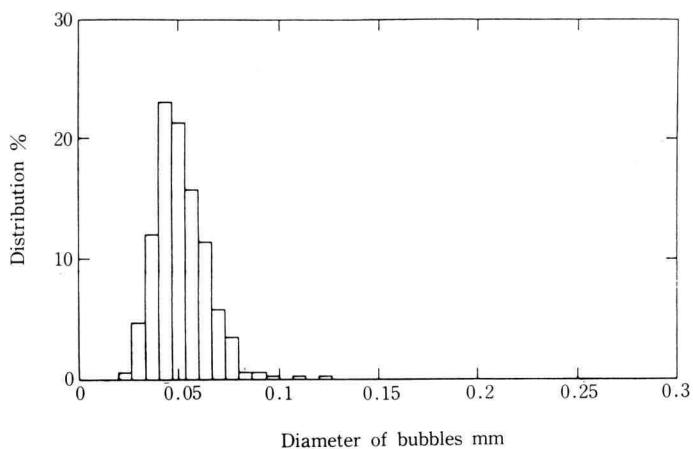
大気圧下の気泡流量をもとにボイル・シャルルの法



(a) Bubbles produced by aeration.



(b) Bubbles mixed through a capillary.



(c) Bubbles after passing through the concentric rotating cylinders and the separator.

Fig. 4. Distribution of diameter of bubbles.

則を適用して供試流路各断面の気泡流量を算出し、これと気泡流全流量との比を体積濃度 $\bar{\alpha}$ と定義する。計測圧力損失と気泡流と同流量の油が流れたときの圧力損失との比を見掛けの粘度比 $\bar{\mu}/\mu$ と定義する。せん断による気泡の変形を表す無次元パラメータとして Taylor 数を次式のように定義する。

$$\text{Taylor 数} = \frac{\text{気泡径} \times \text{壁面せん断応力の平均値}}{\text{表面張力}}$$

ここに壁面せん断応力の平均値は圧力損失を用いて算

出した。

G.I. TAYLOR の理論的研究によれば見掛けの粘度 $\bar{\mu}$ は

$$\bar{\mu} = \mu(1 + \bar{\alpha})$$

で与えられる。ここで $\bar{\alpha}$ の係数を E と置く。

$$\bar{\mu} = \mu(1 + E\bar{\alpha})$$

E について解けば

$$E = (\bar{\mu}/\mu - 1)/\bar{\alpha}$$

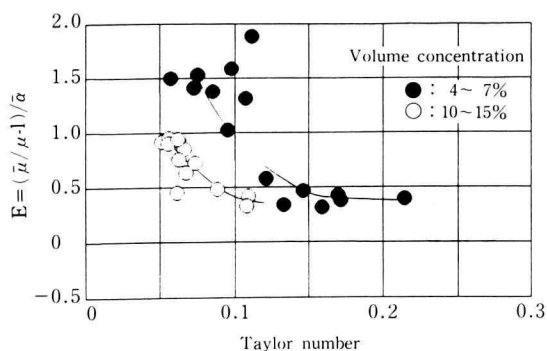


Fig. 5. Effect of Taylor number on apparent viscosity.

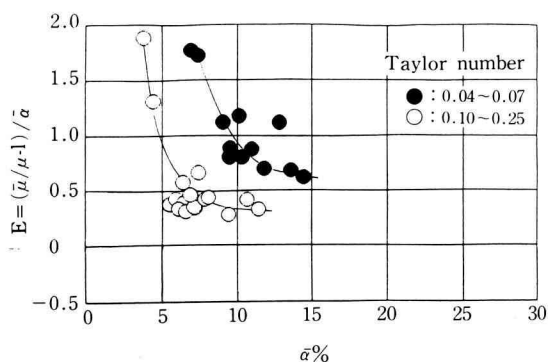


Fig. 6. Effect of volume concentration on apparent viscosity.

となり, G.I. TAYLOR の理論が成立するならば E の値は 1 となるはずである。Fig. 5 に E の値を縦軸に, Taylor 数を横軸に取って実験結果を示す。 E の値は Taylor 数が大きくなるにつれて小さくなるのが分かる。Fig. 6 に E と体積濃度 $\bar{\alpha}$ の関係を示す。 E の値は $\bar{\alpha}$ が小さくなるほど増加することが分かる。

以上のことから E の値は Taylor 数が小さくなるほど, また気泡体積濃度が小さくなるほど大きくなり, G.I. TAYLOR の理論値 1 を越えることが分かる。

4. 考 察

一見 Taylor の理論と矛盾する実験結果を得たが, G.I. TAYLOR の理論を適用して上記の実験結果を説明できるかどうかを考察する。

簡単のために Fig. 7 のような半径 R の円管を考え

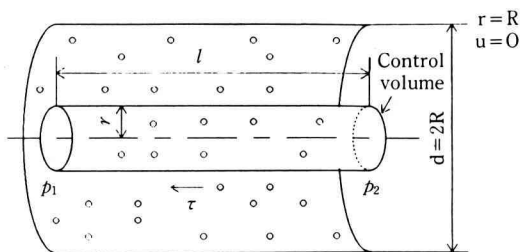


Fig. 7. Model of bubble-flow in a circular tube.

る。運動量保存則より次式が成り立つ。

$$p_1 \pi r^2 - p_2 \pi r^2 + 2 \pi r l \tau = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

せん断応力 τ を

$$\tau = \bar{\mu}_0 du/dr \quad \dots\dots\dots (2)$$

とし, ここに $\bar{\mu}_0$ は局所的な見掛けの粘度で G.I. TAYLOR の理論を適用して

$$\bar{\mu}_0 = \mu(1 + \alpha(r)) \quad \dots\dots\dots (3)$$

と置く。 $\alpha(r)$ は局所的な体積濃度分布を表す。

圧力勾配 $(p_1 - p_2)/l$ を ε とおくと

式 (1)~(3) より次式が導かれる。

$$\frac{du}{dr} = -\frac{\varepsilon}{2\mu} \frac{r}{1 + \alpha(r)}$$

上式を r について管壁から任意の半径 r まで定積分すると各点の流速が求められる。

$$u(r) = \int_R^r -\frac{\varepsilon}{2\mu} \frac{r}{1 + \alpha(r)} dr$$

上式をさらに r に付いて積分すると気泡流の全流量を求めることができる。

$$Q_{all} = \int_0^R 2\pi r u dr = \frac{\pi \varepsilon R^4}{\mu} \times C_1$$

ここに C_1 は積分より求めた定数である。

気泡の流量は次式で与えられる。

$$Q_{air} = \int_0^R 2\pi r u_{air} dr$$

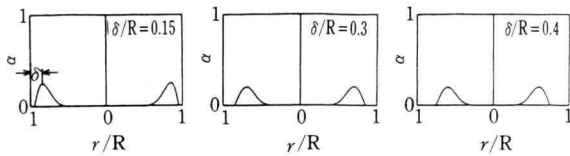
実験整理方法と同定義の体積濃度 $\bar{\alpha}$ は

$$\bar{\alpha} = Q_{air} / Q_{all}$$

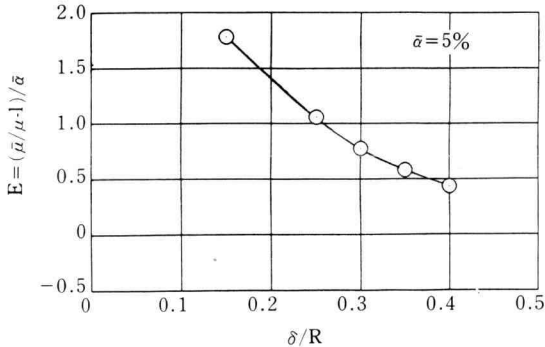
で与えられる。

単相流の場合流量 Q は次式で与えられる。

$$Q = \pi \varepsilon R^4 / 8\mu$$

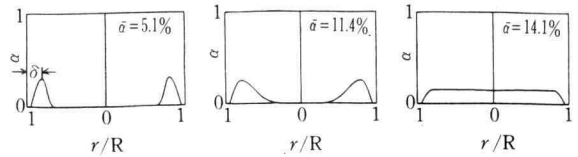


(a) Computation models of distribution of bubbles.

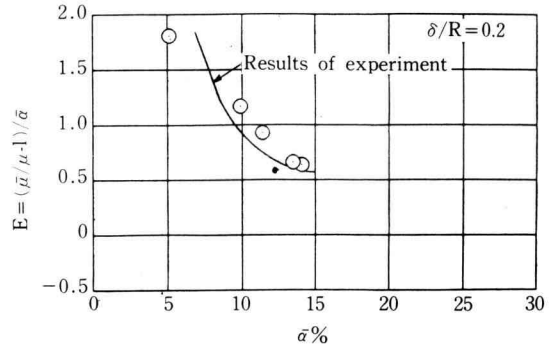


(b) Results of calculation.

Fig. 8. Effect of distribution of bubbles on apparent viscosity by the computation model.



(a) Computation models of distribution of bubbles.



(b) Results of calculation.

Fig. 9. Effect of volume concentration on apparent viscosity by the computation model.

したがって実験結果の整理方法と同定義の見掛けの粘度比は次式となる。

$$\bar{\mu}/\mu = 1/8 C_1$$

局所的な体積濃度分布 $\alpha(r)$ は前報告³⁾ で調べたように、流路壁と流路中心の中間点に最大値を持ち一様ではない。そこで局所的粒子体積濃度の最大点と管壁との距離 δ を Fig. 8(a) のように変化させて上記計算により $E = (\bar{\mu}/\mu - 1)/\bar{\alpha}$ の変化を調べた (Fig. 8(b) 参照)。 $\bar{\alpha}$ は約 5% で一定である。Taylor 数が大きくなるに従って体積濃度分布の最大点が流路中心方向に移動すると考えれば、Fig. 5 の結果を説明することができる。次に体積濃度の最大点を固定しその点より内側の体積濃度の値を Fig. 9(a) のように増加させて E と $\bar{\alpha}$ の関係を調べた (Fig. 9(b) 参照)。図中の実線は Taylor 数が 0.04~0.07 の場合の Fig. 6 の実験線である。

以上のように体積濃度分布は Taylor 数が増加するとその最大点が管中心方向に移動し、 $\bar{\alpha}$ が大きくなると管中央部の気泡体積が増加すると考えると、本研究の実験結果は Taylor の理論結果と矛盾せず説明でき

ることが分かった。

5. む す び

気泡の混入方法に改良を加えて均一な小さな気泡を含む気泡流を作り実験を行った。その結果以下のことが分かった。

(1) 見掛けの粘度比 $\bar{\mu}/\mu$ と気泡体積濃度 $\bar{\alpha}$ の係数 $E = (\bar{\mu}/\mu - 1)/\bar{\alpha}$ は Taylor 数が小さなときには Taylor の理論値の 1 よりも大きな値をとり、Taylor 数が大きくなるに従って減少する。

(2) 係数 E は気泡体積濃度により変化し、体積濃度が小さくなるほど増加する。

(3) 以上の実験結果は気泡体積濃度の管断面の分布が一様ではなく Taylor 数と体積濃度により分布形状が変化すると考えると従来の理論結果と矛盾することなく説明できる。

6. 謝 辞

本研究は本学 4 年次卒業研究として行われたもので

あり、下記の諸君の協力を得た。ここに謝意を表します。

清水信二郎, 関口 俊彦, 園田 誠
三島 圭太, 山下 好徳, 横地 勝美
百済 和弘, 西野 広光,
川島 功, 白川 義広, 杉本 伸,
鈴木 隆巳, 藺辺 則夫, 戸田 勝仁,
仁平 真治, 福沢 昌彦,
田中 徹, 鈴木 征和

文 献

- 1) Taylor, G.I., Proc. Soc. London., Ser. A, 138-834 (1932-10), 41.
- 2) 岩永正裕・石原智男, 日本機械学会論文集 45 巻 399 号 (1979-11), 1622.
- 3) 岩永正裕, 幾徳工業大学研究報告 B 理工学編 7 号 (1982), 119.