第 15 図

る。この曲面を知ることによって最も微粒化のよい点を気化器設計に取入れられるであろう。

おわりに本研究にあたり種々の御教示を賜った東京大学八田桂三教授に感謝の意を表し、また本学学生赤崎益美、川上武夫の諸君の努力のあったことを付記します。

文 献

- (1) 石神, 鹿児島県立大学工学部紀要, 4 号, 1 ページ (昭 30).
- (2) 熊谷・酒井, 内燃機関測定法, 40 ページ.
- (3) 棚沢, 機械学会論文集, 5 巻 18 号, 68 ページ (昭 14).
- (4) 植松・狩野, 日本繊維機械学会誌, 6 巻 4 号, 1 ページ (昭 27).
- (5) 内燃機関邦訳文献集, 5 巻 6 号, 356 ページ (昭 14).
- (6) 山下, 機械学会誌, 36 巻 191 号, 159 ページ (昭 8).
- (7) L. G. Alexander and C. L. Coldren, *Ind. and Engg. Chem.*, Vol. 43, No. 6, p. 1325 (1951).
- (8) 棚沢, 熱機関体系 6, 62 ページ (昭 31-3).
- (9) Sauter, *Forschung*, No. 279 (1926).
- (10) 山下氏は 噴出口を気流に平行に向けた際の分布を調べている。文献 (6)。
- (11) E. Giffen & A. Muraszew., *The Atomization of Liquid fuel*, (1953).
- (12) Lloyd, *Mech. Engrs., Proc. Inst.*, Vol. 153, No. 12 (1945).
- (13) Probert, *Phil. Mag.*, Vol. 37, No. 265 (1946).

532.529.5

気 水 混 合 物 の 流 動*

第 2 報 水平管および傾斜管上向流における相対速度

赤 川 浩 爾**

The Flow of the Mixture of Air and Water

II. The Relative Velocity in Horizontal, Inclined and Vertical Tubes

by Kōji AKAGAWA

In this paper are discussed the results of an experiment on the relative velocity between air and water flowing in a tube 5575 mm long and 27.6 mm in inside diameter placed at angles 0° , 30° , 60° and 90° to the horizontal surface. The flowing rate was from 0.2 to 2.64 m/s for water and from 0.1 to 1.6 m/s for air in single phase flow. The results may be summarized as follows:

- 1) When the tube is at angles 0° , 30° and 60° to the horizontal, the relative velocity w_r increases in direct proportion to the air flow rate and in inverse proportion to the water rate. In some cases the relative velocity obtains negative values.
- 2) When the tube is vertical, w_r increases with the air flow rate, the rate of increase being smaller for larger water flow rate.
- 3) w_r is influenced not only by the tube-inclination and the specific density of the mixture, but also by the water flow rate.

* 昭和 31 年 3 月 20 日 関西支部第 31 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 31 年 10 月 24 日.

** 正員, 神戸大学工学部.

1. 緒 言

ボイラ水の自然循環を計算する場合には蒸発管中の

飽和蒸気と飽和水の混合物の平均比重量を正確に求めることが必要である。この比重量を算出するためには蒸気と水との間の相対速度の値を知らねばならない。ところで従来この値については次に述べるように、特定の条件における実験結果が報告されているのみで、気液間の相対速度の一般的性質については知られていない。

従来、ボイラ水循環計算には Behringer による測定値⁽¹⁾を採用するものが多かった。これは水が流動しない場合の値であって、これとともに発表されている Schurig の論文⁽²⁾中で水が流動している場合には相対速度の値が変ることを指摘しているが、それについて詳しいことは述べられていない。また Mumford らによる実物ボイラでの測定⁽³⁾、K. Schwarz による模型ボイラでの測定⁽⁴⁾があるが、水の流速はいずれもほぼ一定値であって、特定の循環状態に対する値しか知られていない。これらの値については著者らは既に述べたことがある⁽⁵⁾。また第1報⁽⁶⁾でも垂直管での相対速度について報告したが、その数値については十分明らかにすることができなかった。

そこで本報では気液間の相対速度の一般的性質を知るために、常温の空気-水2相流で実験を行い、両相の流量、管傾き角の影響を詳細に調べた。また流動状況をもあわせて観察し相対速度との関係についても考察した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を第1図に示す。ポンプ①から出た水はオリフィス②を通り③で空気を吹き込まれ混合流となり、管傾き角変更用のゴムホース④を経て測定管⑤中に流入する。この混合流は管⑥を経て水ドラム⑦中に流出する。この中で気水は分離されて空気は大気中に放出され、水は連絡管⑧、水ドラム⑨、管⑩を経て元の水ドラム⑪に帰り循環する。空気は圧縮機⑫の空気そうから弁⑬で流量を調節されガラスノズル⑭を経て内径約5mmの噴出孔⑮から約60°の角度で水管中に噴出される。噴出口から測定管までの長さは約1.5mでこの間に混合流の流動状況は一定になる。空気ノズルはガス会社で検定直後のガスメータにより検定を行い使用した。測定管の両

端には三方コック⑯、⑰を取り付け、この開閉は連結棒⑱により同時に行わせることができる。測定管は長さ5.49m、内径27.6mmの1"ガス管である。角度を水平(0°と名付ける)、30°、60°、垂直(90°と名付ける)に変えた。

両相流量を一定にし、定常状態にした後、連結棒⑱により三方コックを急閉し、測定管中に残存した水量を管根元の穴⑲より取り出し重量を測定し、これより混合物中の水容積比 f_w を算出した。なお水平管の場合には管を前方に傾け、三方コック⑰から水を取り出した。

相対速度はこの f_w を用いて次式で求める。

$$w_r = \{w_{d0}/(1-f_w)\} - \{w_{w0}/f_w\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし w_{w0} 、 w_{d0} はそれぞれが単独で管断面を満たして流れたと仮想した場合の水、空気流速である。また w_{d0} は管中心の圧力における空気容積より算出したものである。管中で圧力降下があるために空気容積も管中で流動中に変わるので、ここで求められた相対速度は全管長についての平均の値を示している。水流量 w_{w0} は0.2~2.64 m/s間の9種で一定値に保ち、空気流量 w_{d0} を0.1~1.6 m/sに変化し f_w を測定した。ただし混合流の性質上、空気の吹込みに際してノズル差圧はほぼ一定値を保っても絶対圧は脈動するがその平均値を読み取り空気量を算出した。

なお流動現象をガス管の代りにガラス管を用いて観察すると同時に写真撮影を行った。

3. 流動状況

3.1 水平管の流動状況 水平管における流動様式の分類は Bergelin と Gazley⁽⁷⁾、Johnson と Abou-Sabe⁽⁸⁾、Alves⁽⁹⁾によるものがあり、その他 Kosterlin⁽¹⁰⁾が1"~4"管に対して行ったものがあるようである。これらの分類は研究者により必ずしも同一ではなく、また流量区分もあまり明りょうではない。本報では相対速度との関連においてのみ流動現象を取り扱うので、特に流動様式を分類することなく、両相の流量による流動状況の変化を、簡単に説明することにする。第2図は撮影した多数の写真の一部を忠実に模写したものであり、これによって説明する。

第2図I(a)~(e)は $w_{w0}=0.5$ m/sで空気量を漸次増加させた場合である。(a)は空気量の少ない場合であり、噴口を出た気ほうはきわめて早く合体して図で見られるような水上機のフロート状の大きな気ほうとなり、管上部に片寄って流れる(気ほう流)。空気量が増加すると(b)のように気ほうは長く、太くなり(せん状流)、終りには(c)のように空気ピストンと水ピストンに分かれるが、空気部の下にはなお水層が存在する(ピストン流)。さらに空気量

第1図 実験装置概略図

I ~ IV	w_{d0} m/s	w_{w0} m/s
(a)	0.11	0.5
(b)	0.15	〃
(c)	0.35	〃
(d)	1.45	〃
(e)	6.0	〃

	w_{d0} m/s	w_{w0} m/s
I (f)	0.11	0.2
I (g)	〃	2.3
IV (f)	〃	1.0

第 2 図 流 動 状 況

が増加すると (d) のように水ピストンが短くなり、終りには管下部に水、上部に空気と分離して両相の境界は乱れた波状を呈する (波状流). 空気量が非常に多くなると、水は管壁におしつけられてしま状をなし内部を空気流が噴霧を伴って流れるが、(e) のように w_{d0} が 6 m/s 程度ではまだ水は下端に多い (環状流).

空気量が (a) と同一でも水流量が少く $w_{w0}=0.2$ m/s では (f) のように両相が上下に分離しやすく、空気は管上部に平たい層となって流れる (層状気ほう流). 水量が多くて $w_{w0}=2.3$ m/s では (g) のように小さい気ほうのままで合体することなく水中に分布して流れる. しかしこの場合にも気ほう密度は上部ほど大きい (小気ほう流, 一様流).

両相の流量が多く、流速が速い場合にはだいたい上述のような過程をとるが、乱れがはげしいために水部にも小気ほうを多数に含み、気ほう密度の異なる部分が継続的に流れるように見られ、その流動様式の分類は困難である.

3.2 垂直管の流動状況 垂直管の流動現象については第 1 報⁽⁶⁾で詳しく述べた. また山県, 西川氏ら⁽¹¹⁾によっても示されているのでここでは次節の傾斜管との比較のためにきわめて簡単に述べておく. 第 2 図 IV (a)~(e) は $w_{w0}=0.5$ m/s の場合である. 水量に比して空気量の少い (f) の場合には水中に小

気ほうが一様に分布して流れる (一様流), 空気量が増加してゆくとともに (a) のように管断面を満たした気ほうができ、次第に気ほうの長さが長く (b), (c) のようなピストン流になる. 空気量がさらに増加すると (d) のように水ピストン部が短くなりその中に小気ほうを含むために気ほう密度の異なった混合流ができて (ほう塊流) て、終りには (e) の環状流となる.

3.3 傾斜管の流動状況 第 2 図 II, III にそれぞれ 30°, 60° 傾斜管の流動状況を示す. これらの傾斜管では流動状況の変化は垂直管の場合とほぼ同様である. ただ気ほうの形が変り、空気ピストンでも先端がややとがり、管上面に片寄り、下側の水膜が厚くなる. したがって空気ピストンの下側の側面は管壁の抵抗を受けずに水中をすりぬけてゆくことになり空気相の受ける抵抗は垂直管の場合より小さい. また (e) のように環状流に移行する途中でも下側の水膜が厚く、水平管に近い状況である.

3.4 流動状況に及ぼす管傾き角の影響 第 2 図 I ~ IV の (a)~(d) はそれぞれ同一流量の場合であるのでこれらによって傾き角の影響が明りょうに認められる. すなわち管が垂直の場合には空気ピストンはほとんど管断面を満たしているが、管の傾斜が小さくなるにつれて気ほうは管上面に片寄り先端がややとがり下側の水層が厚くなり、終りには水平管では管上面

に付着しつつ流れ、空気量の多い所では上下2相に分離する。

4. 実験結果とその考察

4.1 水容積比の測定

値 測定された f_w の値を第3図(a)~(d)に示す。各点は2ないし3回の測定値の平均値である。前章で見られたように、流動状況はかなり変わり、また脈動があるにもかかわらず、各曲線はきわめてなめらかな傾向を示した。水流量 w_{w0} 一定の曲線は管傾き角に関係なく同様な傾向を示しているが、 f_w の値が水平、 30° 、 60° の順に増加し、垂直管では再び減少して水平管に近い値を取っている。

f_w に及ぼす水、空気量の影響を数値的に知るために次のように実験式で表わしてみる。 $w_{w0} \rightarrow 0$ あるいは $w_{d0} \rightarrow \infty$ で $f_w \rightarrow 0$ となり、 $w_{w0} \rightarrow \infty$ あるいは $w_{d0} \rightarrow 0$ で $f_w \rightarrow 1$ となるはずであるから、 f_w は一般に次式で表わされるものと思われる。

第3図 水容積比の測定値

第4図 f_d/f_w と w_{d0} との関係

第5図 f_d/f_w と w_{w0} との関係

$$\frac{1-f_w}{f_w} = A \frac{w_{d0}^n}{w_{w0}^m} \quad (2)$$

(2) 式の A は両相の比重, 粘性, 表面張力などにより定まる定数である. また空気容積比を $f_d \equiv (1-f_w)$ とする. (2) 式が成立するものとすれば w_{w0} が一定の場合の f_d/f_w と w_{d0} との関係, および w_{d0} が一定の場合の f_d/f_w と w_{w0} との関係は両対数グラフで直線となるはずで, その傾き角がそれぞれ n, m となる. そのような図の一部を第 4 図, 第 5 図に示す. 第 4 図で水平管, 垂直管に対しては $w_{d0}=0.5 \text{ m/s}$ で屈折した 2 直線で表わされ, $30^\circ, 60^\circ$ 管では 1 本の直線で表わされ, $w_{w0}=(\text{一定})$

の線はいずれも平行である. また第 5 図では w_{d0} に対してすべて直線で表わされる. これより (2) 式の関係式が成立することが明らかである. これらの定数値を第 1 表に示す. この実験式と実験値を比較するときわめてよく一致し (省略) f_w の相対誤差はだいたい 4% 以内であった.

4・2 相対速度と空気流量 w_{d0} との関係

第 3 図の f_w の値から (1) 式を用いて相対速度 w_r を求めた. これを w_{w0} をパラメータとして w_{d0} に対して第 6 図 (a)~(d) に示した. (ただし w_{d0} は各測定曲線で少し差があるので w_{d0} の一定値に対して曲線の値を用いた. 実験点と曲線がきわめてよく一致しているのでこれによって特別の影響は出ない).

(a) 図の水平管では水流量のいかにかわらず相対速度は空気量 w_{d0} に正比例して増加しており, w_{w0} が一定の線は平行で, w_{w0} が大きいほど相対速度は小さくなっている. 特に w_{w0} が 1.3 m/s 以上で空気量の少ない場合

第 1 表

管 種 別	適 用 範 囲	A	n	m
水 平 管	$w_{d0} < 0.5 \text{ m/s}$	0.73	0.91	0.62
	$w_{d0} > 0.5 \text{ m/s}$	0.72	0.79	0.62
30° 傾斜管	全 実 験 域	0.60	0.85	0.65
60° 傾斜管	全 実 験 域	0.55	0.90	0.65
垂 直 管	$w_{d0} < 0.5 \text{ m/s}$	0.82	0.96	0.69
	$w_{d0} > 0.5 \text{ m/s}$	0.67	0.78	0.69

第 6 図 相対速度と空気流量との関係

には負の値が得られている。すなわち水が空気より速く流れているのである。従来は水平管では気ほうの浮力が作用しないために相対速度は0とみなされていた。しかし前章の流動状況でみられたように気ほうが管上部に付着して水流速の小さい部分を管壁の摩擦を受けつつ流れることからみても水の平均速度の方が速くなり負の相対速度が得られることも理解できる。また水量に比して空気量の多い場合には、逆の理由によって正の相対速度が出るわけである。

(b), (c) 図の 30° , 60° 傾斜管でも w_{w0} , w_{d0} による影響は水平管の場合と同様であるが、傾き角の大きいほど浮力の作用が大きいために相対速度も大きくなる。しかし 60° 管でも w_{w0} が 2 m/s 程度で負の相対速度がでる場合がある。

(d) 図の垂直管では相対速度はほぼ w_{d0} に比例して増加しているが、 w_{w0} の大きいほどその傾き角が小になり、 w_{w0} が 2.3 m/s 以上では空気量に関係なくほぼ一定値をとる。これは流動状況が一樣流になり単独気ほうの上昇速度の値をとることによるものと思われる。また空気量の少い所では w_{w0} に関係なく相対速度は約 0.2 m/s の単独気ほうの上昇速度に近い値になり負の相対速度はみられない。しかし空気量の多い所では相対速度は 30° , 60° 管の場合より小さい。これは流動状況で述べたように、垂直管では気ほうが管断面を満たしてピストン流となり流動抵抗が大きいことによるのである。したがってこの場合には相対速度は水平管, 30° , 60° 管の順に大きくなり垂直管ではかえって減少し、水平管に近い値になる。

ここで、相対速度の測定値の誤差範囲を考察してみる。 w_{d0} , w_{w0} は平均値を用いているから誤差は平均化されているものとして無視し、 f_w のみに誤差があるものとする。測定値の分散および w_{w0} , w_{d0} の誤差無視を考慮しても f_w の誤差 Δf_w の最大値は $\pm 1\%$ と推定される。したがってこれによって求めた誤差範囲を第5図(a)(d)中に点線で示した(ただし $w_{w0} = 0.19$, 2.64 m/s に対してのみ)。これによると w_{w0} の小さい場合には測定誤差は問題とならず、 w_{w0} の大きい場合にはかなり大きく 0.4 m/s 程度にはなるが、全実験値の傾向からみて図に示した値は信用できるものと思われる。

(1), (2) 式より相対速度の一般式を求めると (3) 式が得られる。

$$w_r = \left(1 + \frac{1}{A} \frac{w_{w0}^m}{w_{d0}^n}\right) w_{d0} - \left(1 + A \frac{w_{d0}^n}{w_{w0}^m}\right) w_{w0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式の A, m, n に第1表の値を代入すれば各傾斜管における相対速度の値が求まる。また近似的に $n \doteq 1$ とみなすと (3) 式より

$$w_r = (1 - A w_{w0}^{m-1}) w_{d0} - \left(w_{w0} - \frac{1}{A} w_{w0}^m\right) \quad \dots (4)$$

となり、相対速度は w_{d0} に正比例することになる。こ

れらの関係式はボイラ水循環の計算をする場合に有用である*。

また K. Schwarz⁽⁴⁾ により求められた $20 \sim 80 \text{ ata}$ の飽和蒸気と飽和水間の相対速度を平均蒸気流速 w_{d0} に対して求めてみると第7図が得られた。これによる

第7図 相対速度と蒸気流量との関係

と本研究の場合と同様に w_{d0} に対してはほぼ直線関係が得られる。また従来述べられていたように圧力の高いほど相対速度の値が小さくなる傾向も認められず、原文で述べられた誤差範囲を考慮すると圧力の影響は小さいようである。図中に本実験で w_{w0} の同程度の場合の値を記入したが非常に似た傾向が得られている**。

4.3 相対速度と空気容積比との関係 従来の研究では相対速度は気液混合物の平均比重量に対して示されていた⁽¹²⁾。そこで本節では比較のためにこれについて簡単に示すことにする。平均比重量 γ_m は $\gamma_m = \gamma_w - f_d(\gamma_w - \gamma_d)$ によって与えられるから、相対速度を γ_m に対して示すことは f_d に対して示すことと同一である。したがって w_{w0} をパラメータとして w_r と f_d との関係を示すと第8図(a)~(d)が得られた。(a) 図の水平管では f_d が 0.32 付近で水流速に無関係に w_r の値は 0.35 m/s であり、 $f_d < 0.32$ では w_{w0} の大きいほど w_r は小さく、 $f_d > 0.32$ では w_{w0} の大きいほど w_r が大になっている。(b) 図の 30° 管では水平管の傾向とよく似ているが、 $f_d \doteq 0.25$ で $w_r \doteq 0.4 \text{ m/s}$ になる。(c) 図の 60° 管では w_r が一定になる点はないようであるがほぼ同様な傾向を持ち、全般的に 0° , 30° , 60° の順に w_r の値が大になっている。(d) 図の垂直管では w_{w0} の大きいほど w_r が大きい。以上のことから従来 w_r を γ_m (すなわち f_d) のみから定めているのは正しくなく w_{w0} の影響が大きいことは明らかである。

5. 結 言

常温の空気-水2相流の相対速度を1"ガス管で傾き角を水平, 30° , 60° , 垂直に変えて測定した。それとともにガラス管で流動状況を観察して次の結果を得た。

* この関係を用いたボイラ水計算法は別に発表する予定である。

** これに管径の影響が加わるが、この差は比較的小さい。これについては別報で報告する。

(1) 水平管、傾斜管で相対速度は空気量に比例して増加し、水流量の多いほど小さくなり、負の相対速度の場合もある。

(2) 垂直管では相対速度は空気量に比例して増加する。その傾き角は水流量の多いほど小さくなる。

(3) 高压の飽和蒸気の相対速度も上の空気の場合と同様な傾向で同程度の大きさである。

(4) 相対速度を空気容積比 f_d に対して示すと、水流量によって差がある。

(5) 上の相対速度の性質を流動状況から、ほぼ説明することができた。

なお管径の影響についてはふれなかったが別報で述べる予定である。

最後に本研究に対して御教示をいただいた大阪大学石谷清幹博士、また実験に協力された当時神戸大学学生、小沢明、児島康夫、柴田典雄、

山本武彦、十河正昭の諸君に深く感謝の意を表する次第である。

第 8 図 相対速度と空気容積比との関係

文 献

- (1) Behringer, *Forsch-heft* 365 (1934).
- (2) Schurig, *Forsch-heft* 365 (1934).
- (3) Mumford, Humphreys, *Trans. ASME.*, Vol. 70, p. 587 (1948).
- (4) Schwarz, *Forsch-heft* 445 (1954).
- (5) 石谷・赤川, “ボイラの水循環” (コロナ社) (1953).
- (6) 石谷・赤川・武田・永田, 機械学会論文集, 18 巻 72 号, 31

- ページ (昭 27).
- (7), (8) Johnson, Abou-Sabe, *Trans. ASME.*, Vol. 74, No. 6, p. 977 (1952), 第 3 図参照.
  - (9) Alves, *Chem. Engg. Prog.*, Vol. 50, No. 9, p. 449 (1954).
  - (10) 原文はソ連のものであるが下記論文に一部紹介されている. Hughes, Erans, Sterling, *Chem. Engg. Prog.*, Vol. 49, p. 48 (1953), 第 3 図.
  - (11) 山県・西川・川江, 九大工学集報, 28 巻 4 号, 221 ページ (昭 31).
  - (12) 文献 (1)~(4).