

エチルアルコール液中の気ほうの様相*

(第3報, 液体の物性値が変化した場合)

玉 利 賢 一

(受理 昭和48年5月30日)

MOVEMENTS OF AIR-BUBBLES IN THE ETHYL ALCOHOL

(3rd Report—The Case when Change of the Property Values of Liquid)

Masakazu TAMARI

The author performed his experimental studies, as one way of explanation of the heat transfer in the case where air bubbles exist in the liquid, on how the movements and various properties of air bubbles in the liquid were influenced by the change of the property value of liquid.

The present experiment was done with one nozzle and with two nozzles of single hole each respectively to inject air bubbles into an ethyl alcohol(C_2H_5OH). In that occasion, the movements of air bubbles inclusive of the production frequencies of air bubbles, the radius of each bubble, the ascending velocity of the air bubbles, etc. were analysed, and simultaneously experimental studies on the flow around the air bubbles and on the interference between each air bubble, and between the bubble and the liquid were performed, where the purity of ethyl alcohol was 99.5 volume %, constant temperature of the liquid: $18^\circ C$, and the injection quantity of air: the same quantity of air was injected into liquid at the same time through each nozzle when two air injection nozzles were used.

1. ま え が き

水中に吹き込まれた気ほうの液体かくはんの様相に着目し, 以前に気ほうの混在する水と壁との間の熱伝達を研究するための¹⁾²⁾基礎実験として, 水中に壁面のない場合と垂直に支持された平板伝熱面に相当する壁面のある場合について, 1個の上向き単口の円形ノズルから水中に空気ほうを吹き込んだ場合³⁾と同形の単口ノズルを2個同時に使用し, 各ノズルとも同時に等量の空気ほうを水中に吹き込んだ場合⁴⁾について, これら吹き込まれた気ほうが液体をかくはんする場合気ほう相互間の干渉が熱伝達にいかに関与をおよぼすかの基礎資料をうるために, 水中気ほうの挙動と水中気ほう相互間の干渉関係など気ほうの液体かくはんの様相⁵⁾⁶⁾の詳細を空気吹込位置, ノズル間距離, 空気吹込量を変化させて実験を行ない検討整理した³⁾⁴⁾.

本報告は液体の物性値の相違が気ほうの様相にいかに関与をおよぼすかについて明らかにせんとするもの

である. 実験用液体にエチルアルコールを使用し, 1個の単口ノズル, 2個の単口ノズルの各場合についてそれぞれ実験を行ない検討整理したものである. なお実験は壁面なし, 1壁面の各場合にわたって行なった.

2. 実験装置および測定法

実験装置全体の概略図を図1に示す. 図において, ④試験そう(内そう), ⑤恒温そう(外そう)で, それぞれ角形水平断面で四方に観測窓をもち, これらの内部に試験用液体として大気圧の純度99.5%(容積)のエチルアルコール(C_2H_5OH)を満し, 液温 $18^\circ C$ 一定のもとで使用した. 一方恒温そう用液体としては水を使用した. また防爆のために②ラボスター(かくはん機), ③換気用ダクトを配置した以外はすべて実験装置, 実験方法は前報³⁾⁴⁾の通りである. ②は空気吹込用ノズル, ③空気吹込用ガラス導管である. ノズルは単一単口で口径 $0.9mm$ で⁷⁾ある. 本実験はノズル1本, ノズル2本の各場合について, 伝熱面に相当す

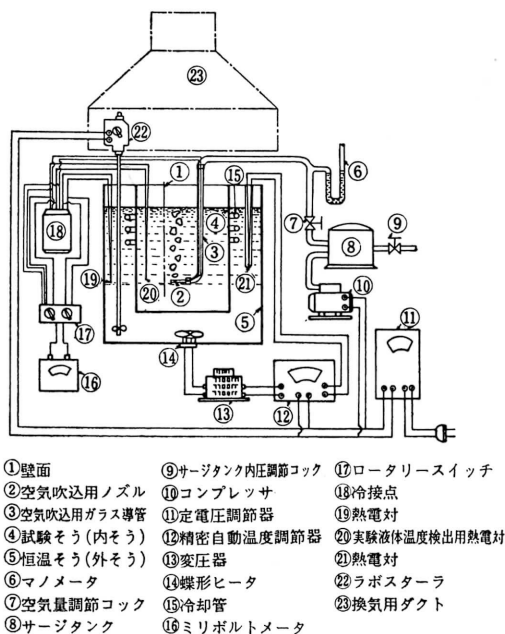


図1 実験装置系統図

る伝熱壁面³⁾の有無で行なわれた。図2に空気吹込用ノズルと壁面の配置を示す。ノズル位置は水面下262mmとし、この深さで壁面中央点を原点0として図のように座標軸 xyz をとった。ノズルと壁面との距離(x 軸上での位置の変化)を ξ とする、ノズル間距離を ζ とする、2本のノズルを同時に使用する場合はノズルの z 方向の配置は原点0から互に反対方向に各ノズルまでの距離が $\zeta/2$ に等しくなるように設置した。なお吹き出し口を出る気ほうの大きさおよび気ほう発生頻度は気ほう発生様相の撮影装置³⁾により吹き出し口より上方4.5mmのところを気ほうの上昇方向に垂直なスリットを通る光束で切り、その影絵を回転ドラム上のオシロ紙にうつして調べた。

2.1 実験条件

液体はエチルアルコール(C_2H_5OH): 純度99.5%(容積)を使用した。

液体の温度は $18^\circ C$ 一定であった。

ノズル(空気吹込口)数 $z_n=1, 2$ 個

ノズル1個の吹込空気量 $Q_0=0.21, 0.96, 1.87, 5.00, 9.44, 20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の範囲で行なった。

伝熱面からノズル中心までの垂直距離

$\xi=\infty, 50, 20, 10, 5, 2.5 \text{ mm}$

ノズル間の間隔 $\zeta=0:(z_n=1),$

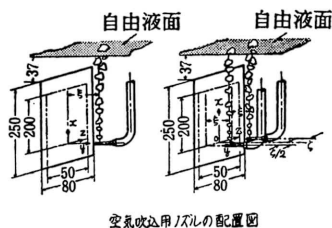


図2 空気吹込用ノズルの配置図

$\zeta=50, 30, 15, 10, 5 \text{ mm}:(z_n=2)$

ノズルの位置はすべて自由液面下262mmとした。

空気の吹込には口径 $d_n=0.9 \text{ mm}$ の上向き単口ノズル⁷⁾を使用した。各吹込用ノズルからは同時に等量の空気を吹込んだ。

空気の温度はすべて $18^\circ C$ 一定のもので吹込まれた。但し、 $\xi=\infty$ は壁面なしの場合を示す。

気ほうの発生頻度 f 個/sは、すでに報告のごとくオシログラフの光学箱を改良して、オシロペーパーに気ほうの流し写真としてとらえこれを解析した。同時にストロボスコープにより観測確認した。気ほう径 d は f と Q_0 から理想球形として算出した。気ほうの上昇速度 U は8mmシネで気ほうのノズル離脱時から自由液面までの上昇の全過程を撮影し気ほうの移動距離と時間から解析した。合流点、合流点距離は前報³⁾での仮称にもとずいて決定した。気ほう上昇時のふれ⁹⁾、および合流点は2分間の気ほうのふれの最大値を包絡線として求め解析した。同時にカメラにおさめて気ほうの移動の軌跡からも判定した。

3. 実験結果とその検討

(i) 気ほう発生頻度と気ほう径 空気吹出し口近傍におけるエチルアルコール(以下 C_2H_5OH と記す)液中の気ほうの写真を気ほう発生様相の撮影装置によって空気吹込量 Q_0 を変えて撮影した一部($z_n=1, \xi=\infty$)を図3に示す。壁面なしの場合の気ほうの発生頻度 f 空気吹込量 Q_0 との関係を図4に示す。図中の実線は C_2H_5OH の $z_n=1, z_n=2$ の場合、破線が水の $z_n=1$ の場合を示したものである。図において水の場合、空気吹込量 Q_0 の増加とともに気ほう発生頻度 f は、 $Q_0=5.00 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ 近傍まではなめらかな曲線をえがいて増加する傾向を示した³⁾⁴⁾、一方エチルアルコールの場合は $z_n=1, z_n=2$ の各場合ともに、 $Q_0 \leq 5.00 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の領域では気ほう発生頻度 f は水に比較して急激な増加傾向を示す。この場合 $Q_0 \geq 5.00 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の

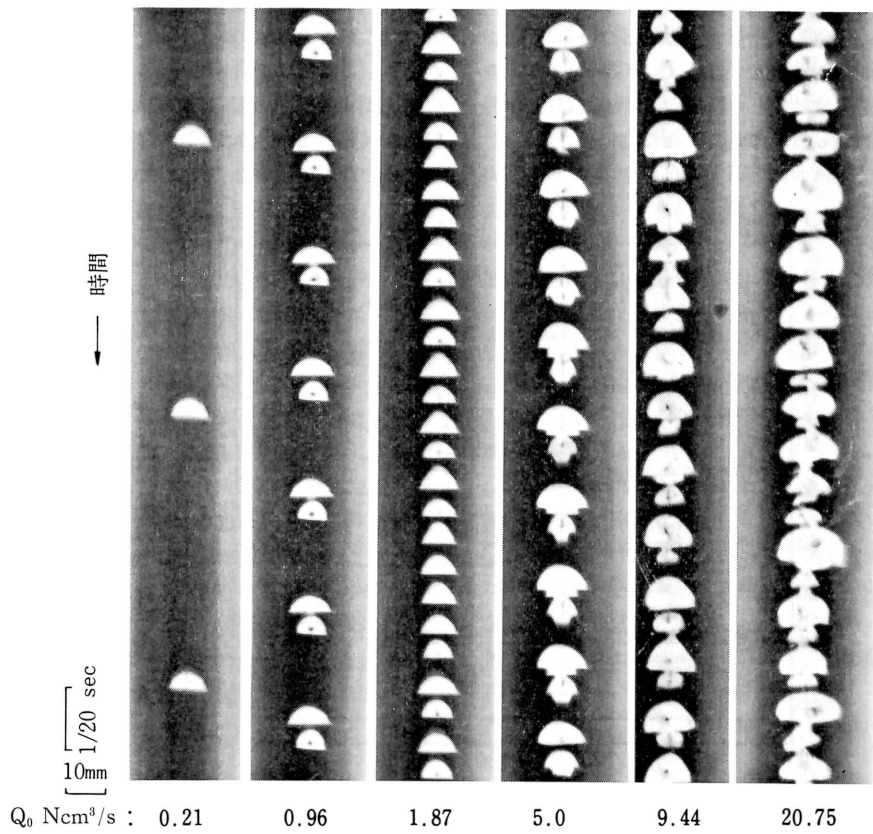


図3 空気吹出し近傍における C_2H_5OH 液中の気ほうの写真 ($Z_n=1$, $\xi=\infty$)

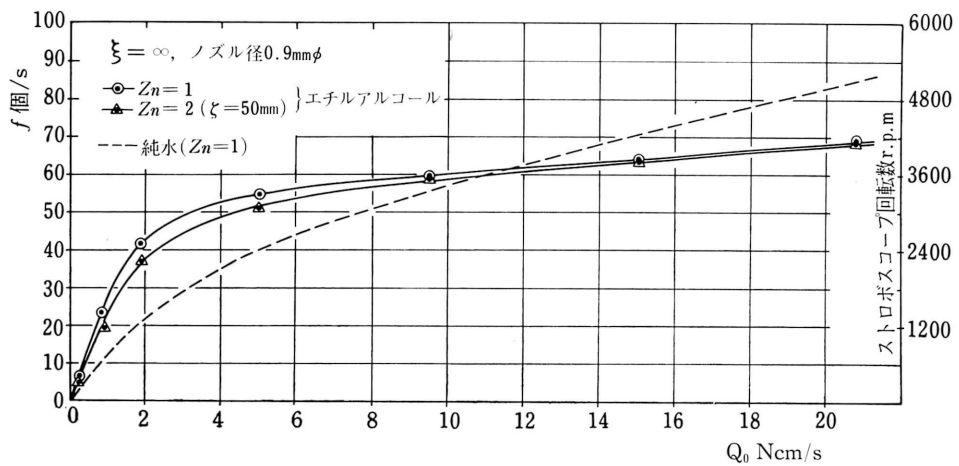


図4 f と Q_0 との関係

領域では f の増加率は水の場合に比較してかなり小さく、次第に一定値に近づく傾向を示した。しかし水、 C_2H_5OH いずれの場合においても $Q_0 \geq 5 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の領域においては f の値は Q_0 の増加とともに直線的に増加することが判かった。図5に壁面なしの場合の気ほう発生頻度 f とノズル間距離 ζ の関係を示す。 Q_0 の

小さい領域では f に対する ζ の影響は顕著にあらわれない、このことは水の場合³⁾⁴⁾と同傾向であった。しかし Q_0 の増加にともなって f は $\zeta=30\text{mm}$ 近傍において低下する傾向を示した。1壁面の場合の f と ζ の関係を図6に示す。水の場合においては、壁面なしおよび1壁面の各場合ともにほぼ同傾向を示すことは前

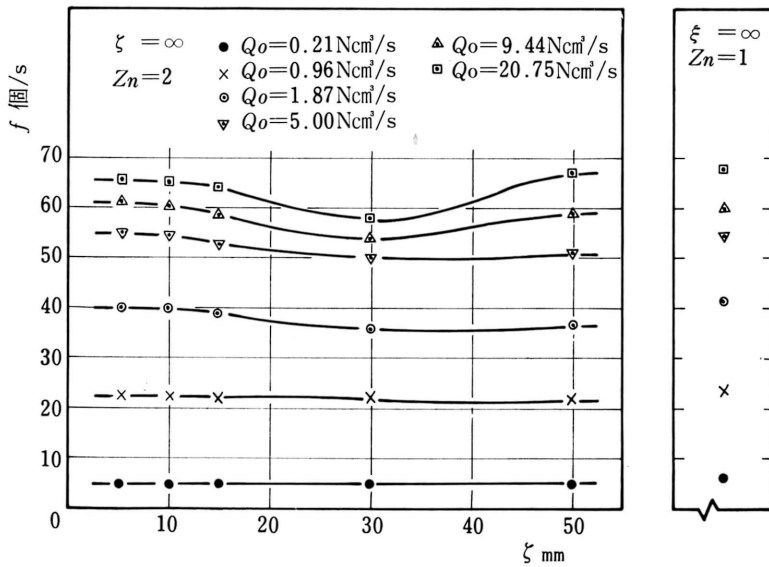


図5 f と ζ の関係

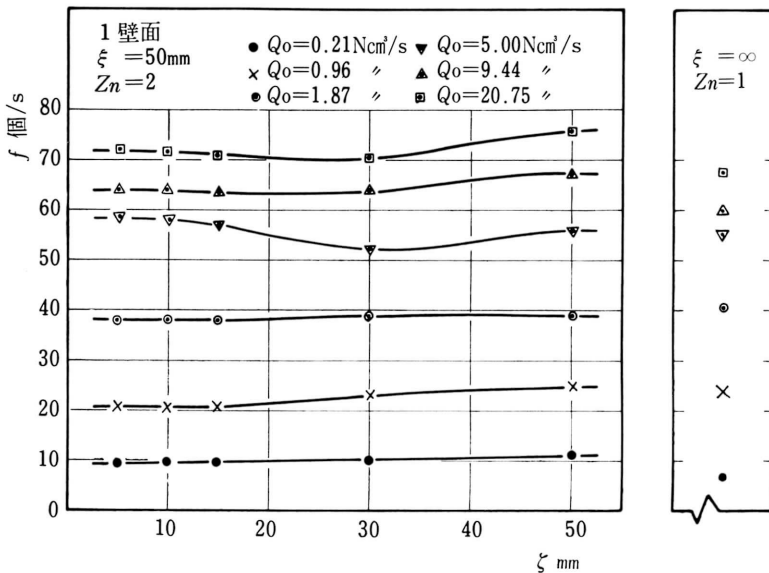


図6 f と ζ の関係

報³⁾⁴⁾で報告すみのとおりであるが、 C_2H_5OH の場合においては $\xi \geq 30\text{mm}$ 領域では ξ の増加とともに f はやや増加の傾向がみられる。次に1壁面の場合の f と壁面からノズル中心までの垂直距離 ξ の関係を図7に示す。 Q_0 一定のもとで壁面からノズル中心までの距離 ξ を次第に小さくするとき、すなわちノズル位置を壁面に近かつけるときは $Q_0 \geq 1.87$ の場合は f の値はわずかながら増加の傾向を示し、 $\xi = 10\text{mm}$ 近傍で最大値を示す一方 $\xi < 10\text{mm}$ において f は減少の傾向を示し、 $\xi = 5\text{mm}$ 近傍において最小値をとることが判明した。さらにノズル位置を壁面に近かつけるときは f は再度増加の傾向を示す。これはノズルが壁面に近づくと $10 \leq \xi \leq 50$ の領域においては壁面と気ほうとの間には x 方向の流れの整流作用に加えて、図のごとく $z_n = 2$ の場合は各ノズルからの発生気ほう同志の気ほう間の干渉 (z 方向の流れの干渉) が加算されるために空気吹込が液体循環助成側に作用することによって $\xi = 10\text{mm}$ 近傍までは f が増加の傾向をとるものと考えられる。すなわちこの領域の流れは2次元であるが x 方向の流れとして極めてよく整流され

るものと考えられる。一方ノズル位置が $\xi = 5\text{mm}$ 近傍になると壁面が気ほうに対して整流板の作用をなすのみならずかえって y 方向の反ばつ力を作り、前述の x, z 方向の流れに加えて y 方向の流れをかもし出しこれが液体循環抑止作用をなしノズル近傍の流れは3次元流となりこのため f の急げきな低下をきたすものと考えられる。さらに C_2H_5OH 中の気ほうは y 方向の流れが作られる時は気ほうの分裂作用がはげしくおこりミリ以下の分裂ほうを無数に作るなどにより流れの循環抑止側に働かしそうこの傾向を強めるものと考えられる。表1に気ほう径 d とノズル間距離 ζ (壁面なしの場合) との値を例示する。図8は d と Q_0 の関係を片対数グラフにとったものである。 Q_0 の増加とともに d は増加の傾向を示す $z_n = 1, z_n = 2$ とほとんど同傾向でその絶対値は表1のごとくわずかの違いである。水と比較すると Q_0 の小さい領域では C_2H_5OH の方が d は小さく Q_0 が大きくなる時は図のごとくほとんど同じ値を示す $Q_0 = 9.44\text{Ncm}^3/\text{s}$ のごとし。図9は壁面なしで $z_n = 2$ の場合の d と ζ の関係を示す図において各流量ともに d は ζ にほとんど

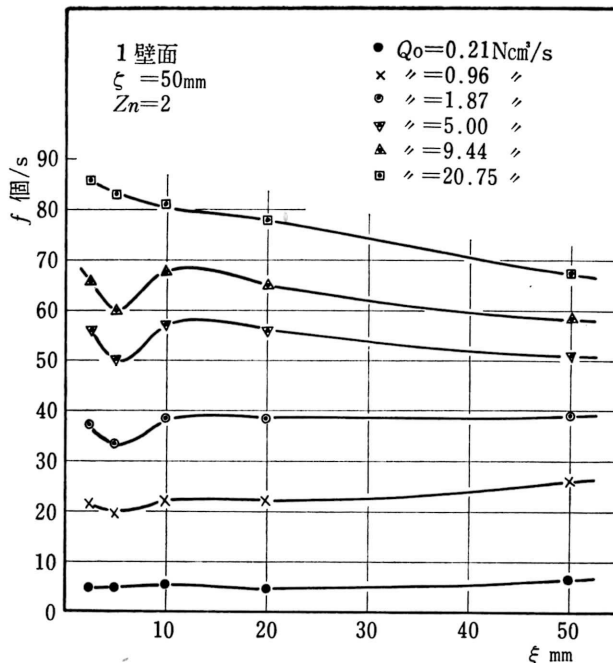
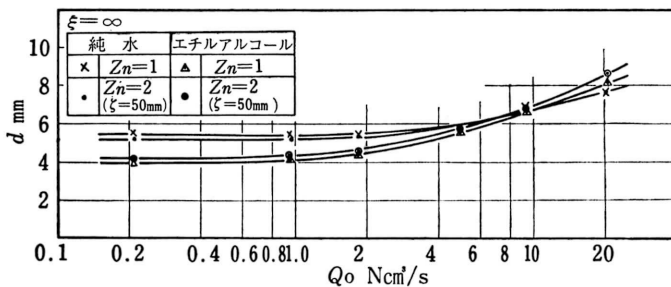
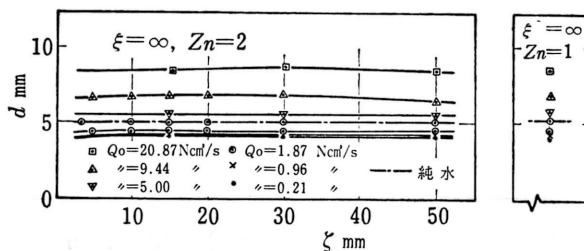
図7 f と ξ との関係

表 1 ($\xi = \infty$)

ζ (mm)	d (mm)									
	0.21 Ncm ³ /S		0.96 Ncm ³ /S		1.87 Ncm ³ /S		9.44 Ncm ³ /S		20.75 Ncm ³ /S	
	$Z_n=1$	$Z_n=2$	$Z_n=1$	$Z_n=2$	$Z_n=1$	$Z_n=2$	$Z_n=1$	$Z_n=2$	$Z_n=1$	$Z_n=2$
50		4.20		4.40		4.60		6.80		8.60
30	4.0	4.00	4.2	4.20	4.4	4.60	6.6	6.90	8.2	8.85
15		4.20		4.25		4.43		6.60		8.50

図 8 d と Q_0 の関係図 9 d と ζ の関係

関係なく一定値を示す。

(ii) 気ほうのふれ 図10(a), (b) 1 壁面および $\xi = \infty$ の場合の気ほうのふれと ξ の関係の一例を示す。ふれは $z_n=1, z_n=2$ の各場合とも y 方向, z 方向いづれも水の場合と同傾向を示した。しかし y 方向のふれは C_2H_5OH の場合が水の場合に比較してやや小さいことがわかる。 z 方向ふれはほぼ同値である。図11 (a), (b) は $z_n=2$ で 1 壁面, $\xi=50\text{mm}$ の y 方向, z 方向の最大ふれを高さ方向位置 x とノズル間距離 ζ の関係で示したものである。図において y 方向ふれとの関係をみると x の小さい部分すなわちノズル近傍では Q_0 にほとんど関係なく, x が大きくなるとふれは大きくなる傾向を示している。ふれはノズル離脱後に液中上昇の過程で気ほう相互間の干渉のために水中の気ほう同様 $\zeta=30\text{mm}$ 近傍において最小値を示し, この前後ではふれは最大の傾向を示している。 z 方向ふれと ζ の関係は y 方向ふれとは逆に $\zeta=30\text{mm}$ 近傍

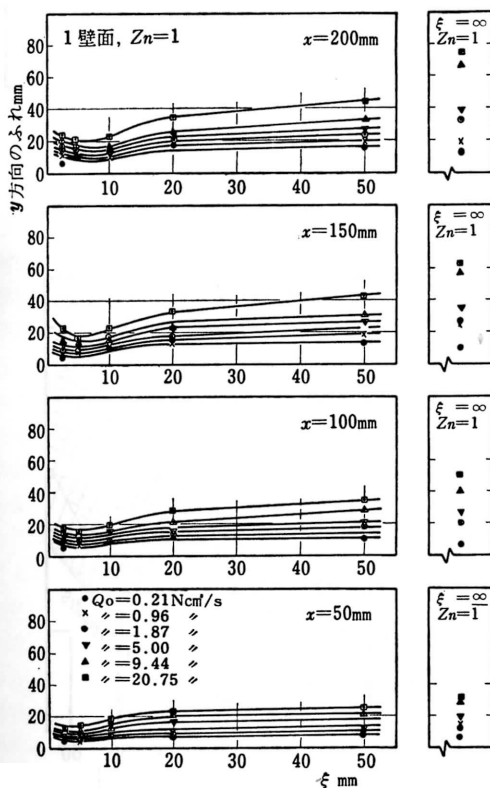
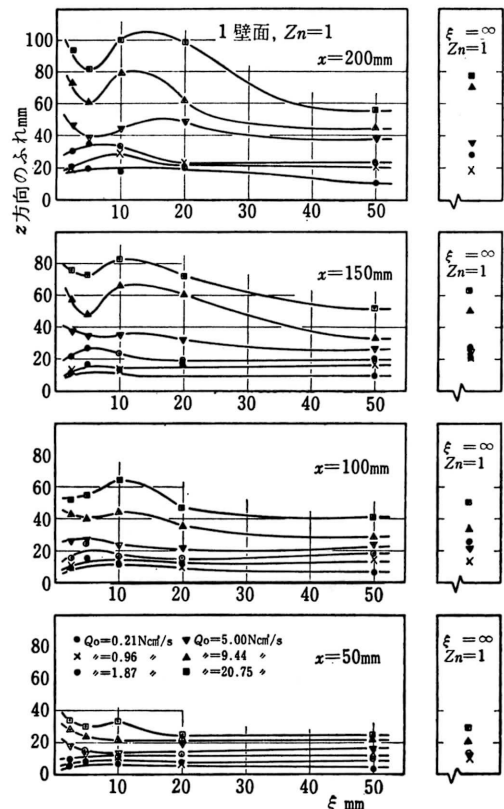
で最大値を示し, この前後ではふれは図のごとく減少の傾向にあることがわかる。 $z_n=1$ ではふれは水の場合と同様 y 方向, z 方向ともに同じで, ふれ領域断面はふれ幅を直径とする円形となる。しかし水の場合ふれは x がある高さに達するとほとんど増加しないのに対して C_2H_5OH では x が大きくなるにつれてほぼ直線的に増大する傾向を示す。特に水の場合と異なり Q_0 および x の大きい領域では気ほうは容易に分裂して無数の 1 ミリ以下の極小気ほうが生成されるが¹⁰⁾, ここで示したふれは極小気ほうも考慮した値である。以上 C_2H_5OH 中の気ほうのふれは液体の物性, 主として表面張力と粘性に影響があるものと考えられる。

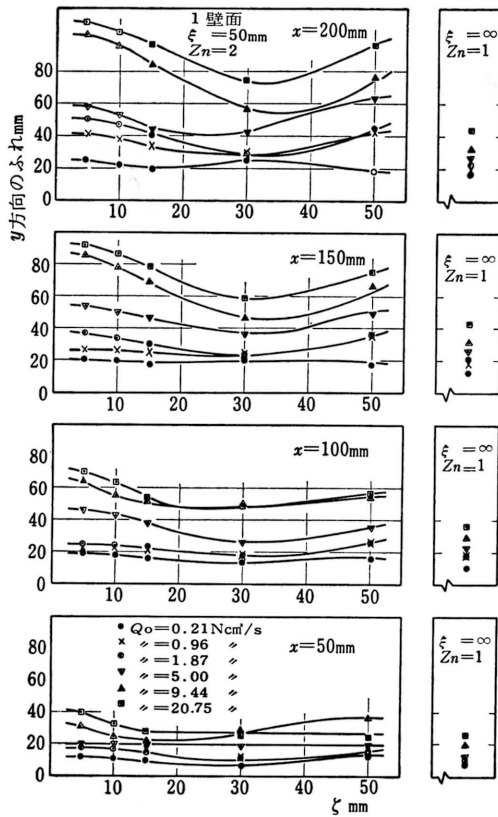
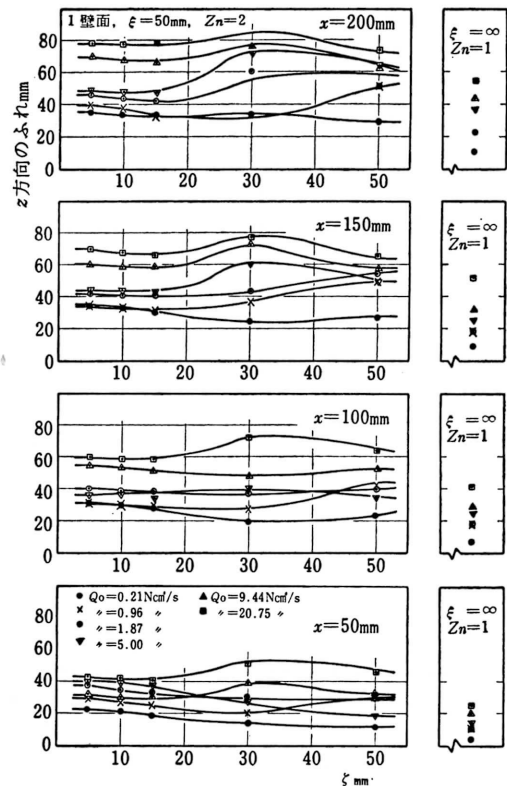
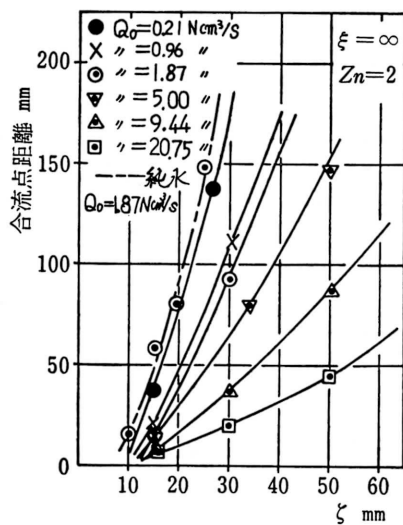
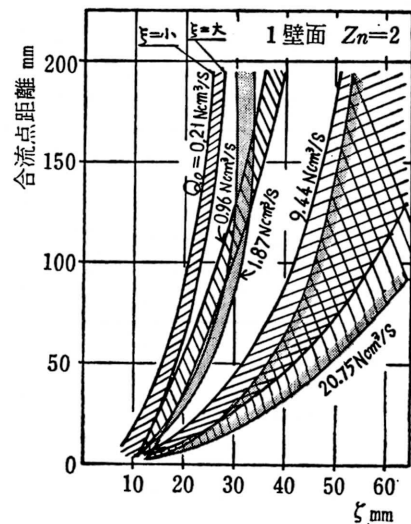
(iii) 合流点と合流点距離 前報⁴⁾ において二本のノズルから液体中に空気を吹き込んだ場合, 気ほうはその上昇過程において相互間の干渉によりしだいに接近し, ついに浮動上昇過程のある高さの位置において合流し合体する。この点を合流点と称し, 合流点まで

の気ほうの移動高さを合流点距離と称した。図12に $\xi = \infty$ の場合の合流点距離と Q_0 の関係を示す。図において Q_0 が小さい領域では最初の合流点は比較的小さい合流点距離で実現し、 Q_0 の大きい領域においては Q_0 の大きい場合から Q_0 の小さい場合までかなり広範囲にまでおよぶことがわかる。気ほうの合流は Q_0 の大きいほど Q_0 の大きい値で容易に行なわれるが、このことは水の場合と同傾向であった⁴⁾。しかし C_2H_5OH の場合は水の場合と比較して各 Q_0 とも Q_0 の比較的大きい領域で合流する傾向を示す。1壁面の場合で $z_n=2$ について合流点距離と Q_0 の関係を Q_0 一定で $\xi=5\sim 50$ mm の範囲で ξ を変化した場合の合流点距離の変化を図13に示す。図において ξ が小さくなるにつれて合流点距離は大きくなることわかる。一般に C_2H_5OH 液中では水の場合に比較してかなり早い時期に合流し合体することがわかった。合流した気ほうは極く微細な1ミリ以下に分裂分散し自由液面で消滅することが肉視観察、ならびに写真観測の結果から判明した。図

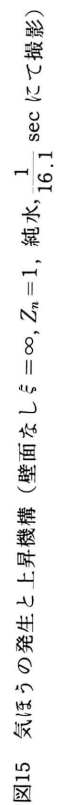
14に $\xi = \infty$ で $z_n=2, \zeta=15$ mm における水と C_2H_5OH の気ほうの液中上昇過程の写真を $Q_0=9.44$ および $20.75 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ の各場合について例示した。

(iv) 気ほう発生と上昇機構 水中に吹き込まれた気ほうは発生後生長しノズル離脱直後から浮動運動しながら上昇するが、たとえ $z_n=2$ の場合であっても Q_0 がある値になるとついには1本の気ほう柱を作りやはり浮動運動を実現することはすでに前報⁴⁾でのべた通りである。いま水中気ほうの上昇過程をノズル数 $z_n=1$ を使用した場合について、発生気ほうのノズル離脱直後における1個の気ほうの推移のあり方を8ミリシネにより各空気吹込量 Q_0 にたいして追跡撮影し、その気ほうの全上昇過程にわたって解析記録したものが図15である。図において空気吹込量の比較的小さい $0.21 \leq Q_0 \leq 1.87$ の領域では気ほうはその上昇過程においてさほどの大きな干渉関係はもたないことがわかる。このことは水、 C_2H_5OH ともに同じ傾向であった。ところが $9.44 \leq Q_0 \leq 20.75$ のように比較的 Q_0 の多い

図10(a) それと ξ の関係図10(b) ふれと ξ の関係

図11(a) ふれと ξ の関係図11(b) ふれと ξ の関係図12 合流点距離と ξ の関係図13 合流点距離と ξ の関係





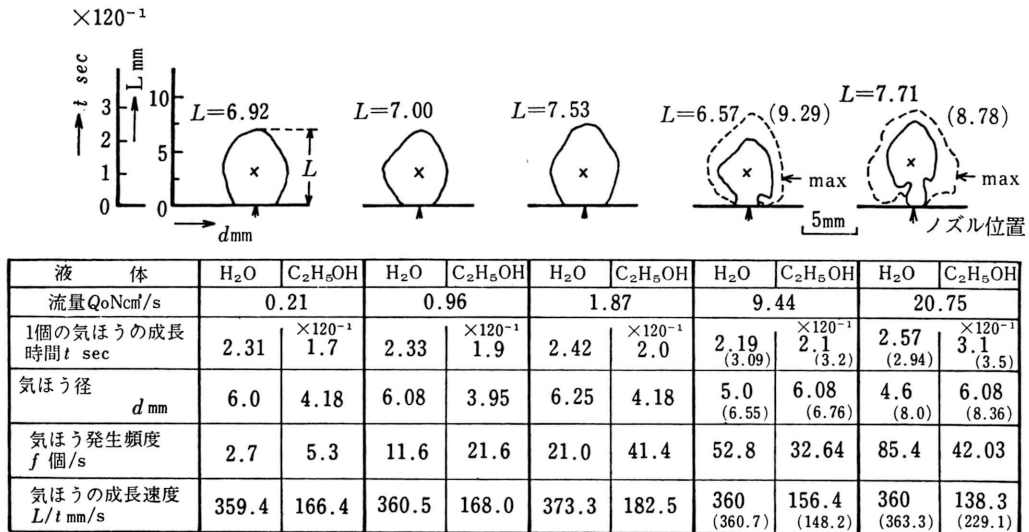


図16 空気吹込量に対する気ほうのノズル離脱直後の形状 (H₂O), および気ほう形成時の諸値
 [注] max, (): は気ほうの最大値を示す. 液温: H₂O=28°C, C₂H₅OH=18°C

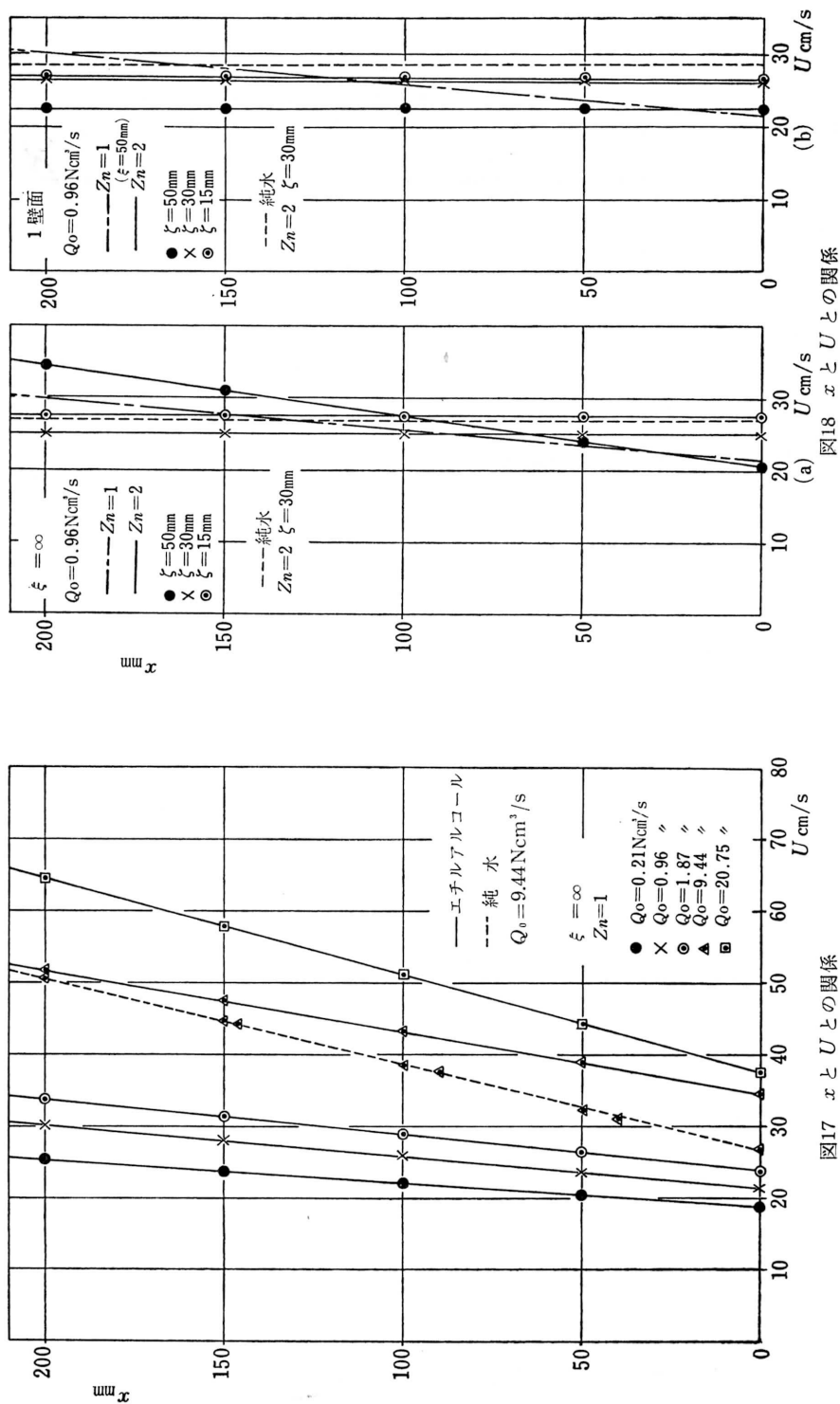
領域においては図からかなりの干渉関係がもたれるであろうことを知る。C₂H₅OH において気ほうの肉視観測、写真観測の結果から検討する時図のごとくノズル位置 $x=74\text{mm}$ の点以上の領域においては水に比較してより一層その傾向は大きく、すなわちこの領域においては気ほうは干渉（気ほう間の干渉、気ほうと液体との干渉等）によって1ミリ以下の分散気ほうとなり広い領域にわたって影響しあうことがわかった。次に図16に空気吹込量に対する気ほうのノズル離脱直後の形状 (H₂O), および気ほう形成速度等諸値 (H₂O, C₂H₅OH) を示す。C₂H₅OH 液中における気ほうは気ほう径は別としてノズル離脱時の形状に関しては H₂O 中の気ほうと類似することがわかった。

(v) 気ほうの上昇速度 図17は壁面なしで $z_n=1$ の場合の気ほう移動高さ x と気ほうの局所上昇速度 U の関係を示したものである。吹込空気はノズル出口をある速度で流出し、 U は上昇高さに比例して各 Q_0 ごとに直線的に増大する、その増加の割合は $Q_0 \leq 1.87\text{Ncm}^3/\text{s}$ の領域で小さく、 $Q_0 > 1.87\text{Ncm}^3/\text{s}$ の領域においては比較的に各空気吹込量の大きさにしたがって順次大きい値を取ることが判明した。この傾向は水の場合にも適用され³⁾ たことがらでもあるが、全般的に C₂H₅OH 液中の U が水中での U よりもやや大きい傾向となる。またこの領域においては気ほうの上昇度 U の増加率は水に比較して C₂H₅OH では小さいことが

判明した。これらのことは吹込空気ほうが C₂H₅OH 液中において分散ほう化してもなお正常な形を保っている気ほうが存在し、これらの気ほうは吹込空気量 Q_0 の全領域にわたって水の場合と比較して気ほうの分散もてだって大幅にはふれることなく液中を比較的に真直に上昇するために U の絶対値は C₂H₅OH の場合が大きくなるものと考えられる。また C₂H₅OH では気ほうはかなり早い時期において数多くの1ミリ以下の分散ほうに分裂して浮動上昇運動を行なうことなどから U の増加率はある程度にとどまるものであろうと考えられる。図18に $z_n=2$, $Q_0=0.96\text{Ncm}^3/\text{s}$ の場合について $\xi=\infty$ と1壁面の x と U の関係を例示する。 $z_n=2$ の場合は水の場合と同様 $\xi=50\text{mm}$ を除いて、上昇速度は気ほう相互間の干渉によりノズル離脱直後から常に一定速度を保つ。図において同じ ξ についてみると水の場合の速度が大きいのは、水中気ほうのふれが気ほう間の干渉により抑制されること、 $Q_0=0.96\text{Ncm}^3/\text{s}$ で C₂H₅OH に比べて前述の図17でわかるごとく気ほうが大きいことによるものと考えられる。

4. む す び

実験用液体としてエチルアルコールを使用し、空気吹込口数（ノズル数） $z_n=1$, $z_n=2$ の各場合について液中気ほうの挙動について実験を行なった結果、水

図18 x と U との関係図17 x と U との関係

の場合と比較して、次のような相違が認められた。すなわち、

(1) 気ほう発生頻度 f は水の場合において吹込空気流量 Q_0 の増加とともにほとんど直線的に増加するのに対してエチルアルコールの場合においては最初からある程度まで急激な増加が見うけられるが、更に Q_0 の増加にしたがって次第に一定値に近づく傾向で増加することがわかった。

(2) 気ほう発生頻度 f とノズル間距離 ζ の関係では水が $\zeta = 20 \sim 30 \text{ mm}$ の範囲で増加の傾向を示すのに対して、エチルアルコールにおいては $\zeta = 30 \text{ mm}$ 近傍で最低値を示すことがわかる。

(3) 気ほうのふれはエチルアルコールの場合、気ほうの移動距離 x が大きくなるとともにほぼ直線的に増加の傾向を示す。水において気ほうはある高さに達するとほとんど増加しない、しかし ζ との関係においてはエチルアルコール、水ともに $\zeta = 30 \text{ mm}$ 近傍でふれの最小値を示す。

(4) 合流点距離は水の場合に比較してエチルアルコールの方が各 Q_0 とも、 ζ の比較的大きい領域で早い時期に合流し合体する。

(5) 上昇速度 U は、エチルアルコールにおいて水に比較してやや大きい値を示す。また気ほうのノズル離脱後の速度は $\zeta = 50 \text{ mm}$ を除いて一定値を示すことがわかった。

5. あ と が き

最後に本研究に種々御指導と御援助を賜った九州大学工学部西川兼康教授に対して厚く御礼を申し上げます。また終始実験に協力した塚崎正温、上加世田司郎（当時 蒸気工学研究室助手、および技官）君、データの整理の一部をわずらわせた加治屋厚廣技官に感謝の意を表す。また実験の一部を担当した河野信、藺田輝雄、明石清夫、梶原宣洋の各工学士に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 玉利・石神・西川：日本機械学会論文集, 33-245 (昭42-1), 87.
 - 2) 玉利・西川：日本機械学会九州支部講演論文集, No. 67-2 (昭42-5-26), 25.
 - 3) 石神・玉利：鹿児島大学工学部研究報告, 5 (昭40-5), 17.
 - 4) 玉利・塚崎：鹿児島大学工学部研究報告, 8 (昭42-5), 47.
 - 5) P. F. wace and S. J. Burnett: Trans. Inst. Chem. Engr., 39 (1961), 168.
 - 6) Dr. J. F. Davidoson: Trans. Inst. Chem. Engr., 39 (1961), 230.
 - 7) 文献4), 第2図空気吹込用ノズルの顕微鏡写真を参照 (倍率20), (注 倍率30は誤印刷である). 図のごとく単一単口の円形ノズルであらかじめ十分真円に近いものを万能投影機で選別して採用した。
 - 8) 本実験では図2のごとく厚さ 2.5mm のガラス壁面を使用し熱負荷は与えなかったので単なる壁面と考えてよい。
 - 9) 上昇過程の気ほうは x 軸からある程度それて、 y, z 方向に動揺しながら上昇するが、この浮動運動領域の限界は気ほうの上昇の全過程を y 方向、 z 方向の両方から平行光線で照らし、気ほうの影を紙上に投影し、これを目視観測しておよそ2分間の気ほうのふれの最大値を包絡線とし、ふれとして求められた。
 - 10) 文献4), 第13図の説明で $\xi = \infty$ の場合, $Q_0 = 0.21 \text{ Ncm}^3/\text{s}$ で $\zeta = 10 \text{ mm}$ とあるのは $\zeta = 16 \text{ mm}$ の誤印刷である。
 - 11) 大山：理研彙報, 21 (昭17), 916.
- * 本報告は以前に報告しておいた“水中の気ほうの様相, 第1報³⁾ 第2報⁴⁾”との関連論文であり、第3報に相当する。