

# 水表面の気泡の破裂現象に対する 表面張力と粘性の影響の個別評価の試み

鍋坂誠志<sup>1</sup>・江藤剛治<sup>2</sup>・竹原幸生<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 修(工) 水資源開発公団 草木ダム管理所 (〒376-0303 群馬県勢多郡東村大字座間 564-6)

<sup>2</sup>正会員 工博 近畿大学教授 理工学部 社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 近畿大学助教授 理工学部 社会環境工学科 (同上)

水表面での気泡の破裂現象について高速ビデオカメラで可視化し、観察した結果を報告する。特にエタノール水溶液のもつ特殊な性質を利用して、水に近い性質をもつ液体の表面張力と粘性を操作し、水表面における気泡の破裂現象に対する表面張力と粘性のそれぞれの影響を調べるための実験手法を考案した。この手法を用いて直径が2mmと20mmの気泡の水表面での破裂現象に対する表面張力と粘性の影響を調べた。観察により、次のような結果を得た。(1)2mmの気泡破裂で、表面張力がjet dropのサイズ、初期速度に影響を及ぼしている、(2)2mmの気泡破裂で、粘性はjet dropの形成に影響を与える、(3)20mmの気泡破裂では、表面張力もしくは粘性の変化により、film dropのサイズ、速度、方向が大きく変化する。

*Key Words* : bubble, ethanol-water solution, surface tension, viscosity, high-speed video camera

## 1. はじめに

### (1)目的

本論文では、水表面での気泡の破裂現象に及ぼす表面張力と粘性の影響を個別に評価するため、エタノール水溶液の特殊な性質を利用した新しい実験手法を提案する。

水表面での物質輸送現象は、海洋、河川、湖沼などの水域の環境を規定する重要な因子の一つであり、広範な分野で研究が進められてきた。特に最近では、地球規模での二酸化炭素等の温暖化ガスの増加に伴う海洋-大気間のガス交換に関する研究の一環として、活発に研究が進められている。

水表面の物質輸送現象は水表面に乱れが起こったときに大きく促進される。すなわち、水表面付近における乱れが小さい場合、水表面は水の表面張力によって安定しており、水表面直下に0.04~4秒程度で20~200 $\mu$ mの濃度境界層が形成され<sup>1)</sup>、平衡状態に達する。濃度境界層を通しての物質輸送は分子拡散によるため、輸送速度は極めて小さい。この濃度境界層が水表面付近の種々の乱れによって破壊され、主水部(bulk water)が水表面に現れると、

また新たな濃度境界層が生じる。この現象が水表面更新である。

この水表面更新を起こす素過程として、水表面を乱す以下の4つの自然現象が考えられる(補遺1)。

- ①風波による水表面付近の乱れ
- ②水滴や水塊の水表面への衝突
- ③水中の渦や乱れの水表面衝突
- ④水表面での気泡の破裂

本研究は上記④を研究対象とし、気泡の破裂による物質輸送現象を解明し、塩害、雲の形成、温室効果ガス問題等の解明に寄与することを目的とする。

気泡が水表面で破裂すると微小な水滴が放出される。この水滴が乾燥すると、エアロゾルとなり、雲核になること等が古くから指摘されている<sup>2)</sup>。またその過程で、水中溶存成分が大気中に放出されるはずである。この過程によって気泡の破裂は、水域-大気間の物質輸送に大きく影響を及ぼすものと考えられている。

気泡の破裂現象は、水域の環境問題のみならず、他の工学分野でも重要な役割を演じる。たとえば、

製鉄業では、炉に空気を送り込むため、溶融した鉄の表面で気泡が破裂する。この影響で、溶融した鉄の表面付近の性状が内部と異なったものになる。また、酒造業では、発酵の段階において気泡の破裂が品質の安定性に影響を及ぼす。

この気泡の破裂によって生じる水表面の乱れ、および微小水滴生成過程の解明のため、気泡の破裂現象を可視化し、観察を行った。

可視化装置には、第2、第3著者が開発した高速ビデオカメラを用いた<sup>3),4)</sup>。

## (2)物性による現象の整理

本研究では、液体のもつ表面張力や粘性のような物性が気泡の破裂現象にどのように影響しているのかという観点から調べる。

これまで、種々の液体を用いた液体表面の気泡破裂に関する実験が行われている。これらの実験結果を統一的に解釈するためには、客観的な物性により結果を整理する必要がある。

Day<sup>5)</sup>は、蒸留水、海水、3%NaCl水溶液で気泡の破裂による水滴生成過程の可視化実験を行い、液体によって生成される水滴の性質や個数に大きな違いがあることを報告している。Dayはすでに、この報告の最後に、今後の展望として、影響の大きい表面張力や粘性を指標として現象を整理して理解することの重要性を指摘している。以下にDayの文章を抜粋した。

Interesting information about the mode of film-cap rupture should be revealed by doing the same experiment with bubbles bursting in liquids of different viscosities and surface tensions.

## (3)水の表面張力と粘性の操作手法

蒸留水、海水、3%NaCl水溶液で気泡の破裂現象が大きく異なることは知られているが、その相違が溶液のどの物性によるものか、未だ不明な点が多い。気泡破裂に最も影響を及ぼすと考えられる表面張力、粘性等の個々の影響について系統的に検討した既往の研究はない。理由として、水の表面張力と粘性を個々に操作することが困難であることが挙げられる。たとえば、水の温度を上げると分子の熱運動が活性化し、表面張力、粘性ともに低下する。従って一方だけを変えることが難しい。

著者らは、この点に特に着目し、表面張力と粘性の影響を個々独立に評価できる実験手法を考案した。すなわち、エタノール水溶液の特殊な性質を利

用して、以下2つのことを可能にした。

①粘性は等しい値で、表面張力は異なる値をもつ2種の水溶液を作る。

②表面張力は近い値で、粘性は大きく異なる値をもつ2種の水溶液を作る。

エタノール水溶液は水ではないが、水に近い物性を持っている。

## (4)本研究の概要

以下のことについて報告する。

①著者らの提案したエタノール水溶液を用いる実験が、水表面の気泡破裂現象に対する表面張力と粘性の影響を調べる実験手法として有効であることを示す。

②撮影対象として、気泡破裂現象が大きく異なる直径が約2mmと約20mmの気泡を選び、その破裂現象に対して、液体の表面張力と粘性がどのように影響しているかについての観察結果を述べる。2.で述べるように気泡破裂による微小水滴の発生にはいくつかの違った過程がある。直径2mmの気泡では、jet dropの発生過程を、直径20mmの気泡では、film dropの発生過程を対象に観察する。

## 2. 気泡の破裂に関する定義

気泡の破裂による水滴の生成についてはいくつかの異なる機構がある。過去の研究報告においては、報告ごとに表現がまちまちであるため、便宜上、以下のような用語分類をすることにした。

### a) small film drop

Newittら<sup>6)</sup>は、気泡の膜に穴の開き始めた瞬間に中の気体が吹出し、膜の分裂した一部分を吹上げ直径約60 $\mu$ mの微水滴を生成すると報告している。

気泡内部の空気の吹き上げによって、膜の一部分の水分が蒸発し、電価をもった海塩粒子となって生成される。Day<sup>5)</sup>は、これをdiffusion cloud chamberを用いて、過飽和気体中に放出すると水滴となって可視化できると報告している。彼は、蒸留水、海水、3%NaCl水溶液を用いて気泡の破裂現象を可視化した。この3種の液体で生成する水滴の数に違いがあることを示し、上記の液体の中では3%NaCl水溶液が最も多くの水滴を生成する、と報告している。

このように、膜に穴が開き始める瞬間に膜の一部分が吹き上げられて生成される水滴、および粒子をsmall film dropと定義する(図-1(a)参照)。

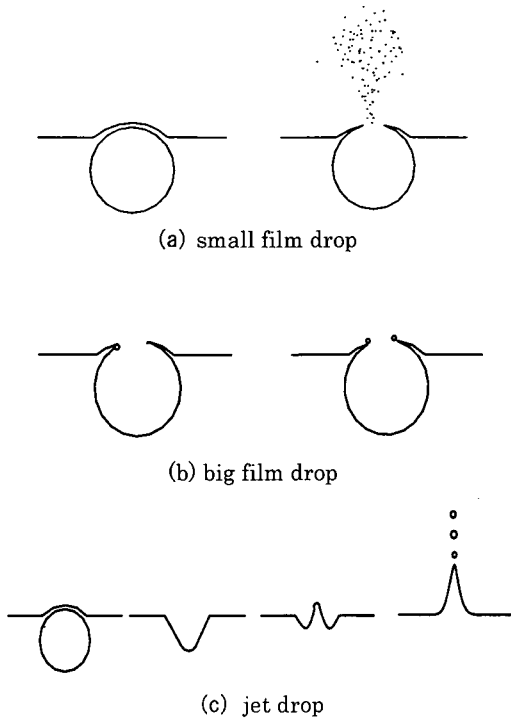


図-1 水表面での気泡破裂によって生じる水滴の分類

#### b) big film drop

気泡の膜に穴が開き、水膜が水表面に引き戻される過程で、膜の穴が同心円状に広がるにつれて膜の端部が球状になり、端部から分離して生成される水滴を big film drop と定義する (図-1 (b) 参照)。

#### c) jet drop

水表面で気泡が形成されると気泡は球状であるため、水表面には空孔が形成される。気泡の膜が破裂すると、空孔が復元する過程で水が急激に空孔の中央部に集中する。急激な水の集中によって水表面が盛り上がり、その先端が分裂し水滴を生成する。この空孔への水の集中によって生成される水滴を jet drop と定義する (図-1 (c) 参照)。

鳥羽<sup>7)</sup>の気泡直径と形状の理論によると、水の場合、この機構によって生成される水滴は、直径 4mm 以下の小さな気泡に限られると報告している。

### 3. 観察および計測手法

#### (1) 実験装置

##### a) 高速ビデオカメラ

本研究の撮影対象である気泡の破裂現象は、msec $\sim$  $\mu$  sec オーダーの現象であるため、近畿大学共同利用センターで開発された高速ビデオカメラ

FASTCAM (フォトロン製) を用いて可視化した<sup>3),4)</sup>。以下に高速ビデオカメラの特徴を示す。

- ① 256 $\times$ 256 の画素数で、4,500 pps (pictures per second) のフレームレートをもつ。画素数を減らすことで、より高速で撮影することができる。
- ② 画像データは、8bit のデジタル信号で輝度情報を IC メモリに記録するため、映像の劣化が少ない。
- ③ 高速撮影では、シャッタースピードが速くなるため、光量不足の問題が生じる。FASTCAM には光増強装置であるマイクロチャンネルプレート型イメージンテンシファイヤが内蔵されているため、微光量下 (100 mlux) での高速撮影が可能である。

##### b) CCD ビデオカメラ

気泡の直径が小さいほど、水表面上に突出する領域が小さくなる。気泡の直径を計測するためには、破裂現象を撮影するカメラとは別に、水中に焦点を合わせたカメラを用いて気泡を撮影する必要がある。水表面に気泡が生成されてから、破裂するまでに気泡の直径が大きく変化することはないため、現象撮影用の高速ビデオカメラと同期を取る必要はない。このことから、現象撮影用の高速ビデオカメラの光軸に対し、水平角 90 $^{\circ}$  の方向から CCD ビデオカメラ (TOSHIBA CCD IK-M32) を用い、水中に焦点を合わせて気泡を撮影した。

##### c) 直径約 2mm の気泡発生装置

岸田<sup>8)</sup>が、設計、制作した直径約 2mm の気泡を発生させる装置を改良して用いた (図-2 (a), (b) 参照)。これは、ノズルに一定量の空気を溜め、2つの水槽の水頭差によって一定の力を加えることにより、毎回、ほぼ同じ直径の気泡を発生することができるしくみとなっている。

装置は水槽部、ノズル部、制御部、パイプ部、空気導入部 (注射器)、水槽設置台によって構成されている。

ノズルは気泡を発生させる部分であり、気泡発生水槽に設けている。電磁弁の開閉によって 2つの水槽の水頭差により圧力をかける。電磁弁は通電時間制御スイッチにより制御する。

##### d) 直径約 20mm の気泡発生装置

第一著者が設計、制作した気泡発生装置を用いた (図-3 (a), (b) 参照)。

1/4 円筒形の容器を 2つあわせた気泡発生部に一定量の空気をため、駆動部 B から与えられる回転によって、気泡発生部 A-A 部が開き、間隙から空気が漏れて気泡が発生する構造とした。

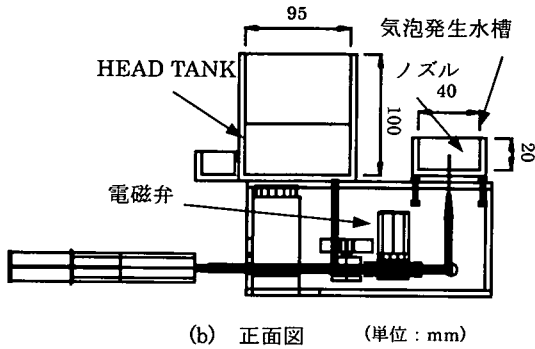
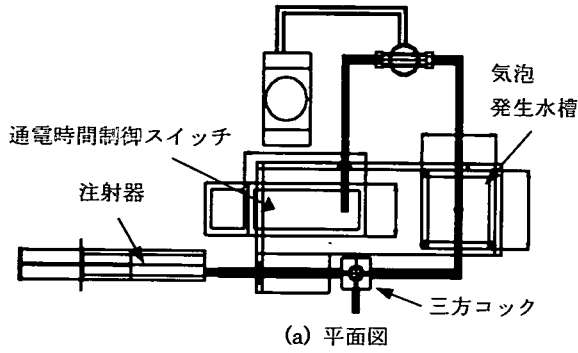


図-2 直径約 2mm の気泡発生装置

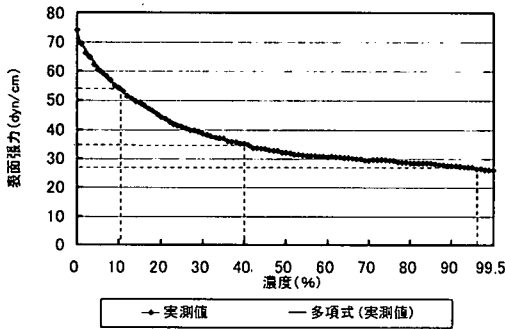


図-4 エタノール水溶液の濃度と表面張力  
(著者らの計測)

(2) エタノール水溶液の表面張力と粘性

a) エタノール水溶液の物性の特徴

液体のもつ物性の影響をみるためには、他の条件は同じで、ある物性のみが異なる 2 種の液体を用いて結果を比較すればよい。

エタノール水溶液の表面張力、粘性、密度等は水に比較的近い。しかしながら、エタノールの割合が約 40% のとき、粘性が最大になり、それ以下でも、それ以上でも小さくなるという特異な性質をもっている。この特異な性質を利用すれば、粘性は等しく、表面張力は異なる 2 種の液体、逆に粘性は大きく異なり、表面張力は近い値をもつ 2 種の液体を作

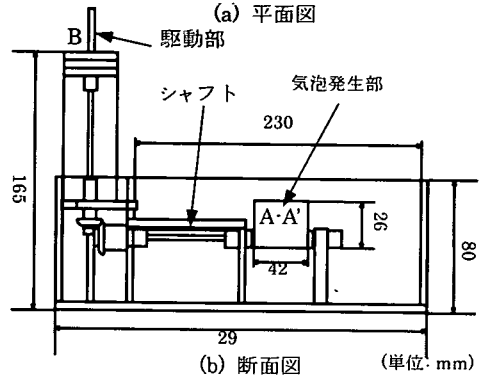
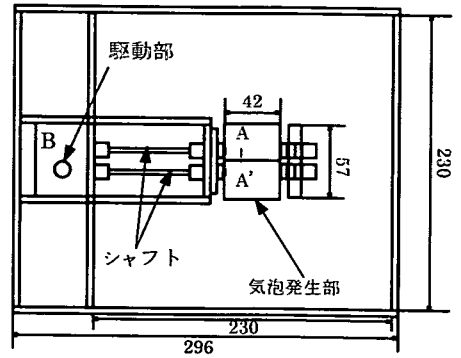


図-3 直径約 20mm の気泡発生装置

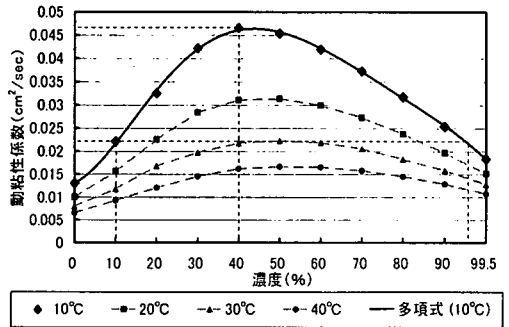


図-5 エタノール水溶液の濃度と動粘性係数  
(化学便覧から算出)

ることができる。

b) 表面張力

図-4 は著者らがデュヌーイ表面張力試験器でエタノール水溶液の表面張力を計測したものである。

図より、エタノール水溶液の表面張力の値は、エタノールの濃度が高くなるにつれて小さくなっていくが、40%濃度付近から濃度増加に対する表面張力の低下割合は緩やかになる (補遺 2)。

c) 動粘性係数

図-5 は、化学便覧<sup>9)</sup>よりエタノールの粘性率の値を抜粋し、動粘性係数に換算してプロットしたものである。図からみると、エタノール水溶液の粘性は

表-1 各濃度におけるエタノール水溶液および蒸留水の物性値(10℃)

物性値	表面張力		動粘性係数		密度	
	値 (dyn/cm)	相対差* (%)	値 (cm <sup>2</sup> /sec)	相対差* (%)	値 (g/cm <sup>3</sup> )	相対差* (%)
10%	56.33	-22.61	0.0221	112.50	0.984	-1.40
40%	37.10	-49.03	0.0466	328.85	0.942	-5.61
95.7%	28.46	-60.90	0.0221	112.50	0.812	-18.64
蒸留水	72.79	0	0.0104	0	0.998	0

\*相対差は蒸留水の値を基準とした。

表-2 実験条件 (光学系)

撮影条件	気泡直径 2mm	気泡直径 20mm
撮影レート	13500pps	9000pps
Extension Tube	40mm	10mm
Lens	50mm	50mm
光源	メタルハライドランプ	

表-3 直径約 2mm の気泡発生条件

実験に用いた液体	水頭差	電磁弁通電 時間
10%Ethanol	20mm	0.3 sec
40% Ethanol	10mm	0.2 sec
95.7% Ethanol	5mm	0.15 sec
エタノール水溶液液温	10℃	

40%濃度付近で最も大きくなり、それ以上濃度を高くすると小さくなる(補遺3)。

#### d) 実験手法の提案

図の粘性のデータに近似曲線をあてはめ、液温10℃で10%濃度の動粘性係数を求めた。次に高濃度側で、この値と等しい動粘性係数をもつ濃度を算出した(補遺3)。計算の結果、95.7%濃度と10%濃度の動粘性係数が0.0221 cm<sup>2</sup>/secで等しくなった。

このときの、表面張力は56.325 dyn/cmと28.464 dyn/cmで、相対差(蒸留水の値を基準とした差)で約38%の差がある。密度は0.98393 g/cm<sup>3</sup>と0.81155 g/cm<sup>3</sup>であり、相対差で約17%の差である。このことから、10%濃度と95.7%濃度では、現象に対する表面張力の影響が支配的であると考えられる(表-1, 図-4 参照)。

一方40%濃度付近から表面張力と濃度の勾配は緩やかになることから、40%濃度と95.7%濃度で表面張力は、37.10 dyn/cmと28.464 dyn/cmで、相対差で約12%の差である。密度は、0.94238 g/cm<sup>3</sup>と0.81155 g/cm<sup>3</sup>で約13%の差がある。粘性は、0.0466

cm<sup>2</sup>/secと0.0221 cm<sup>2</sup>/secで、相対差で約211%の差がある。このことから40%濃度と95.7%濃度の液体では、現象に対する粘性の影響が支配的であると考えられる(表-1, 図-5 参照)。このことから以下2種の方法で表面張力と粘性の影響を個別に調べる。

- ①10%, 95.7%濃度エタノール水溶液における、気泡破裂現象の可視化映像の比較により、気泡の破裂現象に対する表面張力の影響を調べる。
- ②40%, 95.7%濃度エタノール水溶液における、気泡破裂現象の可視化映像の比較により、気泡破裂現象に対する粘性の影響を調べる。

表-2, 表-3に実験条件を記した。

#### (3) 画像計測の概要

異なる物性をもった液体における気泡破裂現象の可視化映像では明らかな違いがみられるが、基本的な崩壊過程はよく似た現象である。現象を数値化して明確に違いを示すことが望ましい。

得られた可視化映像のうち、直径約2mmの可視化映像からはjet dropの粒径、初期速度を算出する。

## 4. 気泡の破裂現象の実験結果

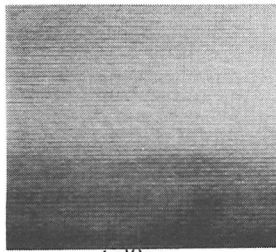
### (1) 可視化観察結果

#### ①直径2mmの場合

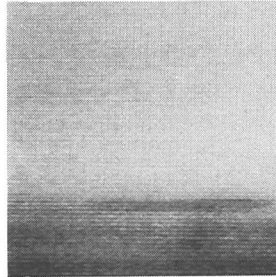
図-6は、10%, 40%, 95.7%濃度エタノール水溶液の直径約2mmの小さな気泡の破裂現象を可視化した映像である。気泡の膜が破裂する直前の映像を0secとし、フレームナンバーから経過時間ごとの映像を示した。可視化映像を観察すると、明らかに現象は違っている。

各溶液での現象は以下のような特徴がみられた。

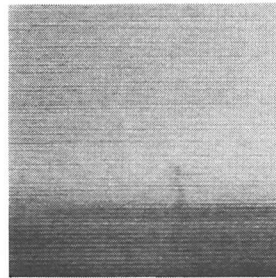
- ・10%濃度エタノール水溶液では、jet dropが生成される。
- ・95.7%濃度エタノール水溶液でもjet dropが生成されるが、粒径が小さく、初期速度の速いことが特徴である。



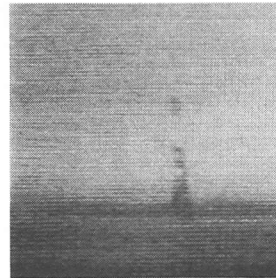
(a)0sec



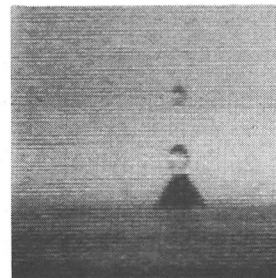
(b)0.00156sec



(c)0.00304sec

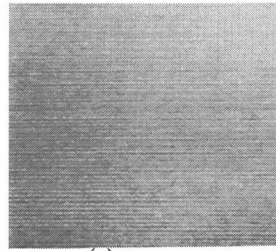


(d)0.00370sec

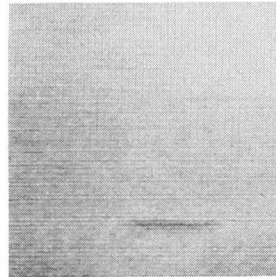


(e)0.00630sec

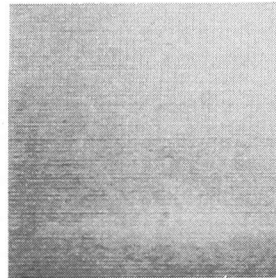
A. 10%エタノール水溶液



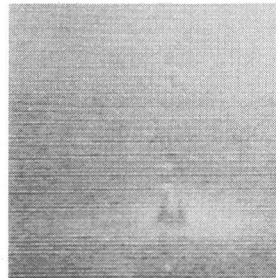
(a)0sec



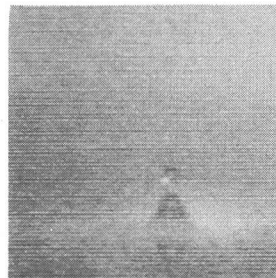
(b)0.00111sec



(c)0.00392sec

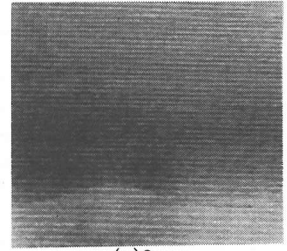


(d)0.00540sec

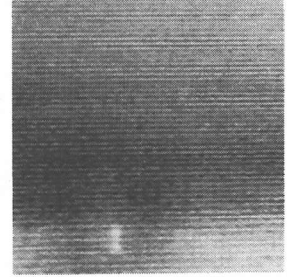


(e)0.00659sec

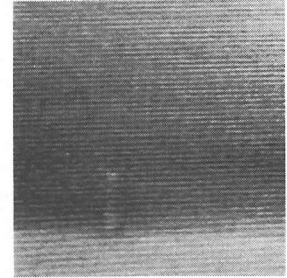
B. 95.7%エタノール水溶液



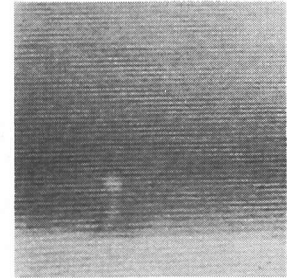
(a)0sec



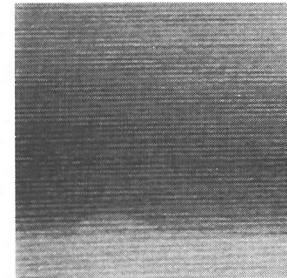
(b)0.00156sec



(c)0.00304sec



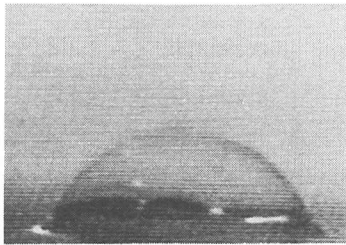
(d)0.00370sec



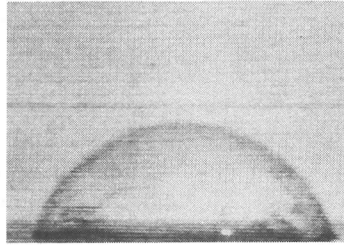
(e)0.006296sec

C. 40%エタノール水溶液

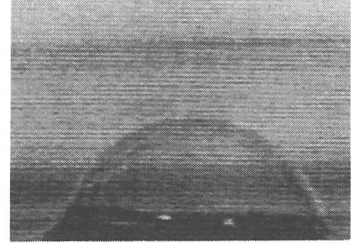
図-6 直径約 2mm の気泡崩壊現象



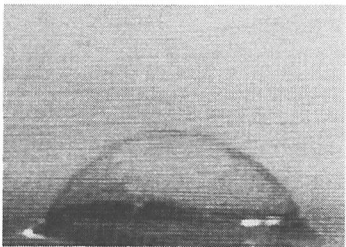
(a)0sec



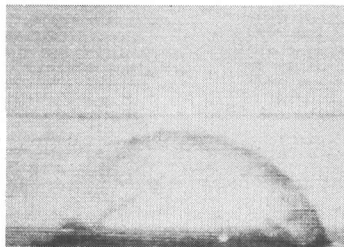
(a)0sec



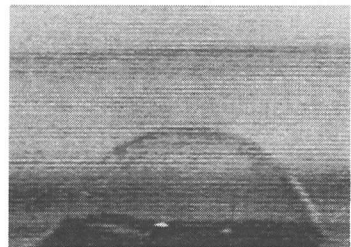
(a)0sec



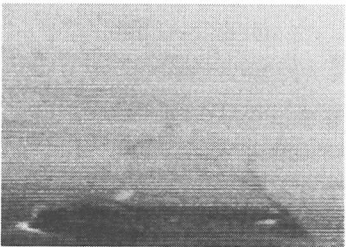
(b)0.00111sec



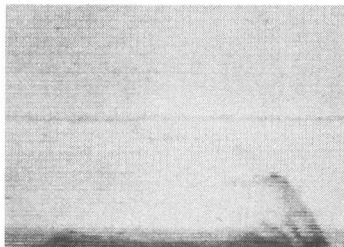
(b)0.000519sec



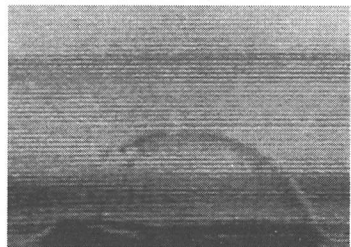
(b)0.000519



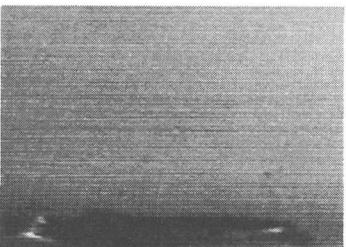
(c)0.002sec



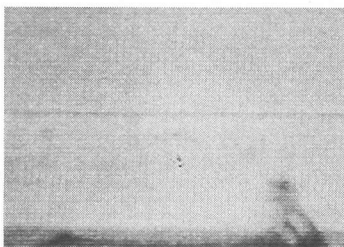
(c)0.000815sec



(c)0.000815sec



(d)0.00244sec



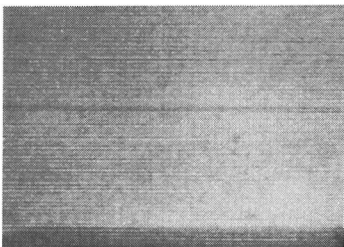
(d)0.000170ec



(d)0.00111sec



(e)0.00326sec



(e)0.00385sec



(e)0.00407sec

A.10%エタノール水溶液

B.95.7%エタノール水溶液

C.40%エタノール水溶液

図-7 直径約20mmの気泡の破裂現象

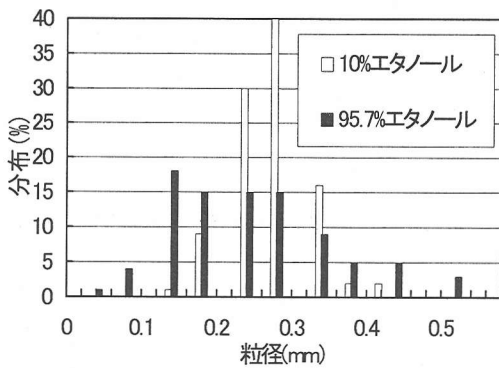


図-8 jet drop の粒径

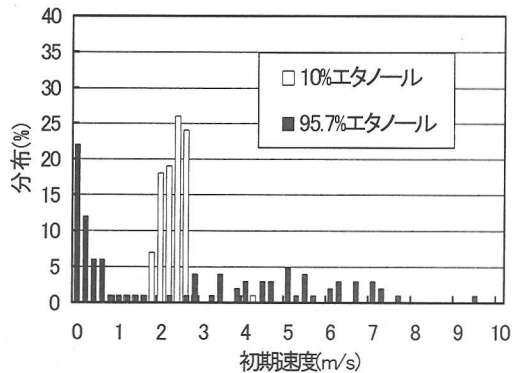


図-9 jet drop の初期速度

・40%濃度エタノール水溶液では、水滴は全く確認できなかった。

10%, 40%, 95.7%濃度いずれも, small film drop, big film drop は確認できなかった。

## ②直径 20mm の場合

図-7 は, 10%, 40%, 95.7%濃度エタノール水溶液の直径約 20mm の大きな気泡の破裂現象を可視化した映像である。現象に大きな違いがあるため, 以下の項目ごとに現象の違いを示した。

### 気泡の形成, 維持

- ・10%濃度エタノール水溶液は, 気泡の形成は容易で, 水表面で浮遊する時間も長い。
- ・95.7%濃度エタノール水溶液は, 気泡が水表面に到達した後に, 気泡の上昇する勢いで水塊が水表面上に盛り上がり, 水表面を大きく乱したりする。また, 気泡が水表面に現れる前に, 盛り上がった水塊より分裂してできる水滴が, 水表面に現れた気泡の膜に落下し, つぶしてしまうため, 大きな気泡の形成が困難になる。
- ・40%濃度エタノール水溶液も, 95.7%濃度エタノール水溶液同様, 大きな気泡の形成は困難である。

### 気泡破裂によって生成される微水滴の飛翔形態

- ・10%濃度エタノール水溶液から生成される big film drop は, 気泡の膜の外側へ, 膜の端が線状に伸び, 引きちぎられるようにして, ハンマー投げの球が放り出されるような形態で生成される。
- ・95.7%濃度エタノール水溶液から生成される微水滴は, 膜の破裂に遅れて, 膜の端から取り残されるようにして生成される。
- ・40%濃度エタノール水溶液から生成される微水滴は, 膜の厚い部分が取り残されるようにしてさまざまな方向へ飛翔する。

### 気泡膜破裂挙動

- ・10%濃度エタノール水溶液では, 気泡の膜の1点より同心円状に穴が広がり, 膜が反り返るように

破裂する。

- ・95.7%濃度エタノール水溶液では, 気泡の膜が形成していた位置を保って, 膜に沿って破裂する。
- ・40%濃度エタノール水溶液では, 膜に穴が開き始めると膜が様々な方向に破裂する。

## (2)画像計測結果

### ①jet drop の粒径

図-8はエタノール水溶液の直径約2mmの気泡から生成される jet drop の粒径について統計的に整理したものである。

各溶液での現象は以下のような特徴がみられた。

- ・10%濃度エタノール水溶液の場合, 平均0.27mm, 標準偏差0.06mmであり, 95.7%濃度エタノール水溶液の場合, 平均0.23mm, 標準偏差0.13mmであった。
- ・10%濃度エタノール水溶液の気泡から生成される jet drop は, 0.25~0.3mm に最も多く分布している。
- ・95.7%濃度エタノール水溶液は, ばらつきが非常に大きい, 直径が数十 $\mu$ mの小さい jet drop も生成する。

### ②初期速度

図-9は, エタノール水溶液の直径約2mmの気泡から生成される jet drop の初期速度について統計的に整理したものである。

各溶液での現象は以下のような特徴がみられた。

- ・10%濃度エタノール水溶液の場合, 平均2.39m/sec, 標準偏差0.38m/secであり, 95.7%濃度エタノール水溶液の場合, 平均2.80m/sec, 標準偏差3.02m/secであった。
- ・10%濃度エタノール水溶液の jet drop は, 2~3 m/sec に最も多く分布している。
- ・95.7%濃度エタノール水溶液は, 初期速度もばらつきが大きい。粒径の小さい jet drop は, 4~



8m/secの初期速度をもっている。

このデータは、一番最初の jet drop を計測したものである。初期速度の小さい水滴が分布しているが、これは画像中の jet drop が小さく、画像として認識出来ず、2つめの粒子を計測していたケースがあるためと考えられる。

## 5. 考察

### (1) 既往の研究結果との比較

これまでの研究では、蒸留水、海水、3%NaCl 水溶液を用いて、数百ミクロンから数ミリの気泡の破裂に関する実験を行っている。本報告で用いた表面張力と粘性を個別に評価する手法での実験はこれまでなく、結果を直接比較するのは困難である。しかし、蒸留水、海水、3%NaCl 水溶液の物性値と最も近いと考えられるのは、図-4および図-5より、10%濃度エタノール水溶液と考えられる。以下では10%濃度エタノール水溶液を用いた2mmの気泡の観察結果と既往の研究結果とを比較する。

図-8の結果より、10%濃度エタノール水溶液で直径約2mmの気泡から生じる jet drop の平均サイズが0.23mmである。鳥羽<sup>2)</sup>がまとめた海水における実験結果から予測される jet drop の平均直径が約0.3mmであり、今回の計測結果と良い一致を示している。

Kientzler ら<sup>10)</sup>は、直径0.2~1.8mmの気泡が水表面で破裂する現象を高速フィルムカメラを用いて観察している。特に、蒸留水での1.0mmの気泡破裂現象を3340枚/秒の高速フィルムカメラで撮影した画像を示している。この現象は、今回の10%濃度エタノール水溶液における結果とほぼ一致している。

film drop に関しては、Day<sup>9)</sup>らの霧箱を用いた結果があるが、今回の通常大気中での高速ビデオカメラでは観察されなかった。

### (2) 表面張力の影響

表面張力は、液体表面を小さくしようとする力である。液体分離の際には引き合う力となる。

図-8および図-9の結果より、直径約2mmの気泡において表面張力の小さい液体(95.7%濃度)は粒径が小さく、初期速度が速い水滴を生成することから、表面張力があまり働かない場合には、大きな水滴を形成できず、粒径が小さく、初期速度の大きい水滴を生成すると考えられる。

直径約20mmの気泡において、引き合う力が強

ければ、水滴分離の際に、膜の面積を小さくしようとする力が強く働くことから、膜の端部が伸びて、ハンマー投げの球のようにして水滴が生成されるものと考えられる。

### (3) 粘性の影響

液体の粘性は、運動流体内部に働くせん断抵抗力である。

直径約2mmの気泡の場合、粘性の大きい液体では、粘性が抵抗力として作用するため、気泡破裂後の空孔への水の集中が、jet drop を生成するほどのエネルギーをもたないため、jet drop が生成されなかったと考えられる。

粘性の大きい液体の気泡膜の崩壊は、表面張力より、粘性が支配的に作用すると考えられるため、破裂過程で、膜の厚い部分等でばらばらに破裂すると考えられる。

## 6. 結論

水表面での気泡破裂は、水域一大気間の物質輸送現象に大きく影響を及ぼす。既往の研究により、蒸留水、海水、3%NaCl 水溶液で気泡破壊現象が大きく異なることが報告されている。しかし、その違いが溶液のどの物性によるものであるか未だ明らかになされていない。本研究では、エタノール水溶液の特殊な性質を利用して、表面張力と粘性を個別に評価する手法を提案した。また、この手法を用いて直径が2mmと20mmの気泡が水表面で崩壊する現象を高速ビデオカメラにより可視化した。

以下に本研究で得られた結果を示す。

### (1) エタノール水溶液を用いた実験手法の提案

エタノール水溶液を用いて、気泡破裂に対する表面張力と粘性の影響を個別に評価する実験手法を提案した。

エタノール水溶液の濃度に対する表面張力と粘性を表した図-4、5により、次の2ケースで表面張力と粘性の影響を個別に評価できる。

- ・表面張力の影響評価のケースでは、10%と95.7%エタノール水溶液を用いる。
- ・粘性の影響評価のケースでは、40%と95.7%エタノール水溶液を用いる。

表面張力、粘性の影響が、可視化映像の観察のみでも顕著に現れることから、表面張力と粘性の影響をみるのに適した実験手法であるといえる。

## (2)気泡の破裂現象に対する液体の物性の影響

表面張力と粘性の影響を個別に観察したのは本研究がはじめてである。したがって以下では、観察結果をまとめて箇条書きで記す。

### ① 直径 2mm の気泡破裂現象

[jet drop]

10%および 95.7%濃度エタノール水溶液では jet drop が形成された。10%濃度エタノール水溶液に比べ、95.7%濃度エタノール水溶液では、粒径が小さく、初期速度の速い jet drop が形成された。40%濃度エタノール水溶液では、水滴は全く確認されなかった。

生成される jet drop の粒径は、10%濃度エタノール水溶液の場合、平均 0.27mm、標準偏差 0.06mm であり、95.7%濃度エタノール水溶液の場合、平均 0.23mm、標準偏差 0.13mm であった。

生成される jet drop の初期速度は、10%エタノール水溶液の場合、平均 2.39m/sec、標準偏差 0.38m/sec であり、95.7%濃度エタノール水溶液の場合、平均 2.80m/sec、標準偏差 3.02m/sec であった。

[film drop]

いずれの濃度においても確認できなかった。

### ② 直径 20mm の気泡破裂現象

[安定性]

10%濃度エタノール水溶液中での気泡形成は容易で安定しており、水表面で浮遊する時間も長い。95.7%および 40%濃度エタノール水溶液は大きな気泡の形成は困難である。

[Big film drop]

10%濃度エタノール水溶液では、気泡の膜の外側へ、膜の端が線状に伸び、引きちぎられるようにして、ハンマー投げの球が放り出されるようにして生成される。95.7%濃度エタノール水溶液では、膜の破裂に遅れて、膜の端から取り残されるようにして生成される。40%濃度エタノール水溶液では、膜の厚い部分を取り残されるようにして水滴が生成され、さまざまな方向へ飛翔する。

[気泡崩壊の様子]

10%濃度エタノール水溶液では、気泡の膜の 1 点より同心円状に穴が広がり、果実の皮が捲れるように破裂する。95.7%濃度エタノール水溶液では、気泡の膜が形成していた気泡の球面上をたどって破裂する。40%濃度エタノール水溶液では、膜に穴が開き始めると膜が様々な方向に破裂する。

### ③ 表面張力および粘性による気泡破裂への影響

得られた実験結果より、水表面における気泡破裂

過程に及ぼす表面張力および粘性の影響を以下にまとめる。

・表面張力は、液体表面を小さくしようとする力である。これは水滴の分離・形成・粒径等に影響することがわかった(5.(2)参照)。

・粘性は、液体の運動に対する抵抗である。これは空孔への水の集中の抑制、水滴の分離、膜の崩壊挙動に影響する(5.(3)参照)。

本研究で提案した実験手法が数値シミュレーション等を用いた水表面での気泡の破裂現象の研究等に役立てば幸いである。

### 補遺 1

これら 4 つの過程は独立に生起するわけではなく、連鎖過程をなす<sup>10)</sup>。例えば、風波により波頂が局部砕波すると、水滴も飛び散るとともに、気泡が水中に取り込まれる。取り込まれた気泡のほとんどは、浮力により水面に達し、破裂して水滴を生じる。水滴の多くは、再び水面に落下し、小水滴を生成するとともに、水中に微小な気泡を連行する。この過程でまた様々の乱れを生成する。雨滴が水表面に衝突する場合や、水底から強い渦が衝突する場合も同様である。

### 補遺 2

図-4 のデータは、著者らがデュヌーイ表面張力試験器を用いて測定したものである。この計測は実験室の大気中で行った。常圧で、気温を 20℃に保ち、液温を 10℃に調整した。誤差は 0.0788~0.319%であった。

図-4 に当てはめた近似曲線の式を以下に示す。

$$\gamma = 9.0 \times 10^{-10} x^6 - 3.0 \times 10^{-7} x^5 + 4.0 \times 10^{-5} x^4 - 3.0 \times 10^{-3} x^3 + 0.1173 x^2 + 3.0069 x + 76.171$$

ここで、 $\gamma$  は表面張力 (dyn/cm)、 $x$  はエタノール濃度 (%) である。

### 補遺 3

これについては、上平の一般向け解説書「水とは何か<sup>11)</sup>」に次のように説明されている。

水分子の分子構造の空孔部分に、エタノール水溶液の親水基が入り込んで水素結合し、粘性が高くなる。40%濃度付近で、水分子の空孔がエタノール分子の親水基でうめ尽くされ、空孔部分に入りきらないエタノール分子の疎水基と水分子が反発しあい、分子拡散係数が大きくなって粘性が低くなる。

図-5 に当てはめた近似曲線の式を以下に示す。

$$\nu = 0.3321x^6 - 1.6567x^5 + 2.9572x^4 - 2.3289x^3 + 0.6614x^2 + 0.0401x + 0.0132$$

ここで、 $\nu$ は動粘性係数(cm<sup>2</sup>/sec),  $x$ はエタノール濃度(%)である。

#### 参考文献

- 1) Jähne, B., Haußecker, H.: Air-Water Gas Exchange, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.30, pp443-468, 1998.
- 2) 鳥羽良明: 海塩粒子, 海と空, 第41巻, 第3・4合併号, pp.71-117, 1966.
- 3) 江藤剛治: 土木技術者が作る高速ビデオカメラ, 土木学会誌2月号, pp12-14, 1999.
- 4) 竹原幸生: 高精度可視化計測のための基礎技術の開発に関する研究, 1996.
- 5) Day, J.A.: Production of droplets and salt nuclei by the bursting of air-bubble film, *Quant. J. Ray. Met. Soc.*, Vol.90, pp.72-78, 1964.
- 6) Newitt, D.M., Dombrowski, N., Knelman, F.H.: Liquid entrainment 1. The mechanism of drop formation from gas vapour bubbles, *Trans. Instn. Chem. Engrs*, Vol.32, pp.244-261, 1954.
- 7) 鳥羽良明: 海面における物理過程に関する研究, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol.45, pp.350-359, 1989.
- 8) 岸田憲一: 水表面での一素過程としての気泡崩壊現象, 平成7年度 近畿大学 修士論文, 1996
- 9) 日本化学会編: 化学便覧基礎編II改定3版, pp.3-84, 1984.
- 10) Kientzler, C.F., Arons, A.B., Blancahrd, D.C. and Woodcock, A.H.: Photographic Investigation of the Projection of Droplets by Bubbles Bursting at a Water Surface, *Tellus*, Vol.VI, Num. I, pp.1-7, 1954.
- 11) 上平恒: 水溶液の構造, 水とは何か ミクロに見たそのふるまい, pp.66-93, 1977.

(2001. 1. 17 受付)

## A NEW TECHNIQUE TO SEPARATELY EVALUATE THE EFFECTS OF SURFACE TENSION AND VISCOSITY ON RUPTURE OF A BUBBLE AT WATER SURFACE

Seishi NABESAKA, T. Goji ETOH and Kohsei TAKEHARA

The rupture of single bubble at water surface was visualized by using a high-speed video camera. Surface tension and viscosity of water are changed by adding ethanol which dissolves into water. A technique is proposed in order to separately evaluate effects of viscosity and surface tension on the droplets generation from bubble eruptions by utilizing the peculiar characteristics of the solution. In the observation of a bursting bubble at water surface, two kinds of bubbles, of which diameters are 2 mm and 20 mm respectively, are tested. Observation results support the following conclusion: (1) surface tension changes the size and speed of the jet drops of a 2 mm bubble bursting, (2) viscosity affects the generation of jet drops of a 2 mm bubble bursting, (3) the size, speed and direction of film drops generated from a 20 mm bubble are changed by surface tension or viscosity.