

## 1319 高粘性液体中の気泡と衝撃波の干渉

## Interaction of a Shock Wave with a Gas Bubble in Highly Viscous Liquid

○正 大谷 清伸 (東北大・流体研)  
正 齋藤 務 (室蘭工大)

山本 裕朗 (東北大・流体研)  
正 高山 和喜 (東北大・先進医工学研究機構)

Kiyonobu Ohtani, Hiroaki Yamamoto, IFS, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba, Sendai, 980-8577

Tsutomu Saito, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran, 050-8585

Kazuyoshi Takayama, TUBERO, 2-1 Seiryu, Aoba, Sendai, 980-8575

This paper reports the results of experimental results of shock wave/ bubble interaction in a highly viscous liquid. In the medical applications of the shock waves, it is necessary to consider the viscous effect of water. The magma fragmentation is considered to be one of the major mechanisms of the explosive-type volcano eruptions. The dynamic motion of magma should be experimentally investigated from the view point of shock wave dynamics. Silver azide pellet was exploded in silicone oil and starch syrup with various viscosity was visualized by shadowgraph using high speed video camera.

**Key Words:** Highly Viscous Liquid, Shock Wave, Bubble, High Speed Photography, Volcanology

## 1. 緒言

水中衝撃波現象の研究は、衝撃波学際応用(衝撃波医療、火山噴火の解明等)の重要な基礎課題である。特に、医療分野においては、ESWL(体外衝撃波結石破碎術)の多くの基礎研究が行われている。しかし、これまでの水中衝撃波の研究は、水を非粘性流体としたものが多く、ESWLの研究でも生体組織の音響特性を非粘性流体として扱っているものが多い<sup>(1)</sup>。

また、爆発的火山噴火の発生は火道もしくはマグマ溜まり内のマグマに含まれている揮発成分が局所的な地殻変動により急激に減圧されることで、気化・膨張することにあると考えられている<sup>(2)</sup>。しかし、この現象を実験的に解明する場合、実際の発生条件で解析することが困難であり、何らかのモデル化が必要であるが、現在のところ媒体を水に置き換えて模擬したものが多い。

そのため、水以外の媒体を用いて、液体の様々な物理特性の影響を考慮した波動現象についての研究は十分に行われておらず、粘性の影響等を工学的に可視化する研究を中心的な手段として理解を深めることは重要である<sup>(3)</sup>。

本研究では、水の100倍から1000倍以上の動粘度を持つシリコンオイルあるいは水飴の高粘度液体中の単一気泡と微小爆薬の起爆による球状衝撃波との干渉現象を解明するため、可視化実験を行った結果を報告する。

## 2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置を示す。実験装置は、内径100mm、長さ100mmの円筒管に、両端に可視化用窓が取り付けられている。水中衝撃波の発生には、従来より用いられてきた微小爆薬の爆発を用いる<sup>(4)</sup>。アジ化銀( $\text{AgN}_3$ )ペレット10mgを光ファイバの先端に接着し、装置観測部の中心より20mmの位置に配置する。気泡(空気)は、装置下部より封入し、自然浮上させる。気泡が実験装置の中心に到達した時、光ファイバの他端からNd:YAG Laser(25mJ/pulse)を照射、起爆させ、球状衝撃波を発生させる。球状衝撃波が干渉する際の単一気泡の挙動を高速度ビデオカメラ(IRIS Shimadzu Co. 312pixel×260pixel, 1,000,000 frames/s, total frame number 100)を用いてシャドウグラフ法で時系列的に可視化した。

本研究では、試験媒体として、2種類の動粘度のシリコンオイル(Silicone oil)および、低糖化還元水飴(以下水飴と略す)を高粘度媒体として用いる。表1に本研究で

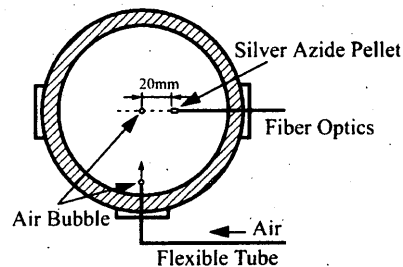


Fig.1 Experimental apparatus.

Tab.1 Physical property of experimental liquid.

	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Kinetic viscosity $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
Silicone oil-1 (100cSt)	963.3	0.0001
Silicone oil-2 (1000cSt)	968.3	0.001
Starch syrup (70%)	1365	0.00543

使用した高粘度媒体の物性値を示す。水の100、1000、5430倍の動粘度を持つ液体を使用する。水飴は、媒体中に含まれる水分量を変えることで粘性を調整する。

## 3. 実験結果および考察

図2(a)~(c)に、高粘度液体中の気泡と水中衝撃波の干渉現象の高速度ビデオカメラによる可視化結果を示す。各図は1,000,000 frames/sで撮影した画像を、アジ化銀起爆約1 $\mu$ s前を起点に5 $\mu$ s間隔で表示してある。初期気泡径は1.60~1.95mmである。

図(a)のシリコンオイル1(動粘性係数 $\nu=1\times 10^{-4}$  (m<sup>2</sup>/s) (100cSt)の場合、アジ化銀爆発後、爆発生成気体が球状に膨張していくとともに、球状衝撃波が発生する。衝撃波が気泡に干渉すると、気泡界面で反射し膨張波(expansion wave)が発生する。気泡周囲に高圧領域が生じ気泡は収縮する、その後再膨張に転ずるとともにリバウンド衝撃波(rebound shock wave)を誘起する。リバウンド衝撃波が生じた後、衝撃波を受けた側の界面から反対側の界面に向かって液体マイクロジェット(micro jet)が形成され、ジェットが

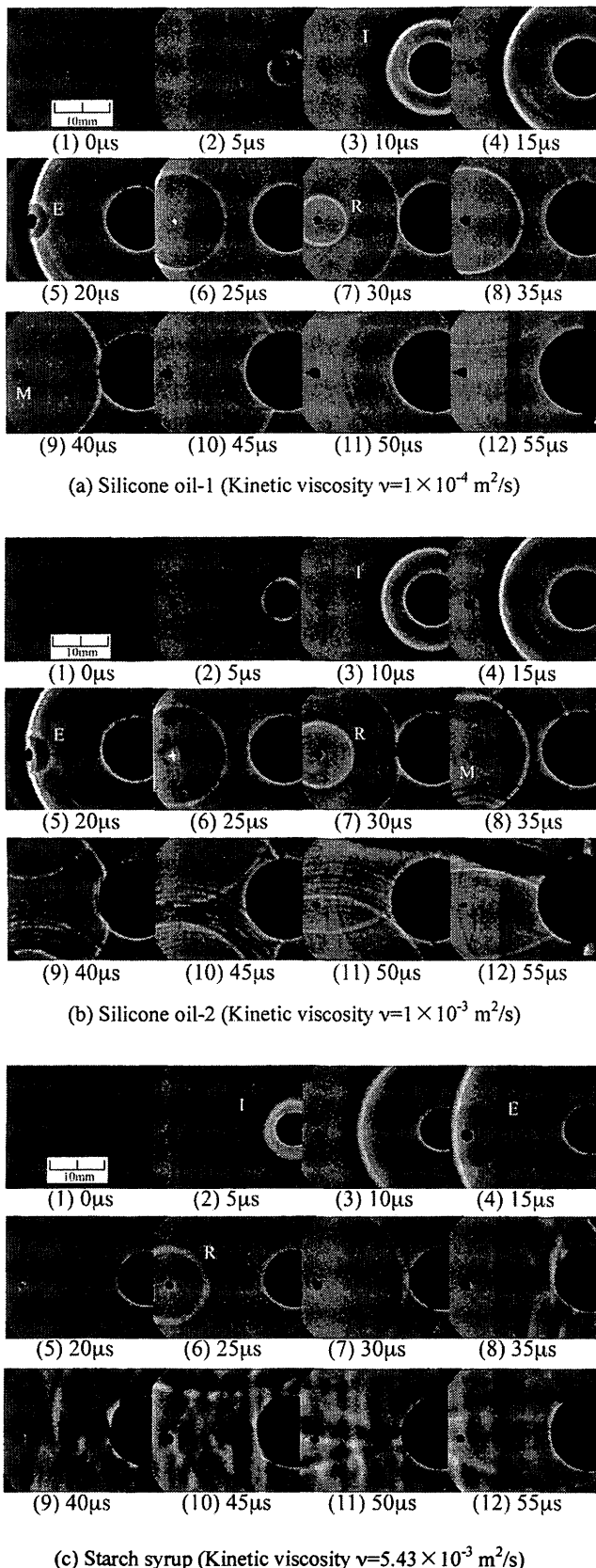


Fig.2 Sequential photographs of interaction of a shock wave with an air bubble in highly viscous liquid. (I: Incident shock wave, E: Expansion wave, R: Rebound shock wave, M: Micro jet)

反対側の界面を貫く。その後、装置内壁で反射した圧力波が可視化領域に到達する。

図(b)のシリコンオイル 2 (動粘性係数 $\nu=1 \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$  (1000cSt)) の場合、アジ化銀爆発後、球状衝撃波が発生、高粘度液体中を伝播し、図(a)のシリコンオイルの場合とほぼ同じ時刻に気泡に衝撃波が干渉している。干渉後、気泡は収縮し、その後再膨張際に、リバウンド衝撃波を誘起している。そして気泡は横長に変形、収縮しながら液体ジェットを発生する。

図(c)の水飴 (動粘性係数 $\nu=5.43 \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$  (5430cSt)) の場合、アジ化銀爆発後、球状衝撃波が発生し高粘度液体中を伝播し、図(a)(b)のシリコンオイルの場合より早い時刻で気泡は衝撃波と干渉している。

気泡は衝撃波と干渉後、シリコンオイルの場合と同様に、収縮、再膨張し、リバウンド衝撃波を誘起している。リバウンド衝撃波誘起後、気泡はほぼ初期気泡径まで膨張するが、液体ジェットは発生せず、装置内壁で反射した圧力波と干渉し収縮、膨張を繰り返している。

液体ジェットの速度は、図(a)のシリコンオイルの場合、平均速度  $74.7\text{m/s}$  であり、図(b)のシリコンオイルの場合、平均速度  $68.1\text{m/s}$  である。動粘性係数が大きくなるにこと液体ジェットの速度が遅くなっていることがわかる。これは、圧力、密度に大きな違いがない場合には、粘性が大きい液体ほど、液体ジェット速度が遅くなるという、Nakajima ら<sup>(5)</sup>の解析結果と傾向が一致する。

#### 4. 結言

本研究では、シリコンオイルあるいは水飴の高粘度液体中の単一気泡とアジ化銀 10mg の起爆によって発生させた球状衝撃波との干渉現象に関して、高速度ビデオカメラを用いて可視化実験を行った。結果を要約すると以下のようになる。

高粘性液体中の気泡の衝撃波が干渉した際に発生する液体ジェットは、粘性の違いによって発生が異なること、液体ジェット速度は、粘性が大きい場合の方が、遅くなることわかった。

今後、更に動粘度の範囲を広げた液体の実験を行うとともに、二重露光ホログラフィー干渉計法を用いた可視化を行い、高粘度液体中の気泡と衝撃波の干渉現象に関して定量的な測定を行う。

#### 5. 謝辞

本研究における撮影は(株)島津製作所で開発中の高速度ビデオカメラを使用して行った。撮影実験にあたり(株)島津製作所・草野氏のご協力を賜りましたことに謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) 高山和喜編, 衝撃波ハンドブック, シュプリンガー・フェアラーク東京, (1995).
- (2) 谷口宏允, マグマ科学への招待, 掌華房, (2001).
- (3) 早川ら, 平成 8 粘度衝撃波シンポジウム講演論文集, 193-196(1997).
- (4) Takayama, K. et al., Proc. 14th Int. Symp. on Shock Tubes and Waves, 533(1994).
- (5) Nakajima, H. and Shima, A., Ingenieur-Archiv, 46, 21-34(1977).