

火山噴火を解き明かす*
~室内実験の試み~

市原 美恵**・亀田 正治***

Analogous experiments of volcanic eruption in laboratory scale

Mie ICHIHARA and Masaharu KAMEDA

1. はじめに

日本人にとって、火山の噴火は、大変馴染み深いものである。なぜなら、日本には約 100 もの活火山がある^{1),2)}。これは、世界全体にある活火山総数の約 7%にあたる。日本の国土面積(約 38 万 km²)が地球上陸地全面積(約 1 億 5 千万 km²)の 0.25%であることを考えると、日本の活火山数密度は際立っている。

噴火はスペクタクルであるが災害ももたらす。2000 年には有珠山、三宅島の噴火があった。これらの噴火にともなう災害は、日本に暮らす多くの住民が、火山噴火の影響を受ける場所にいることを、あらためて認識させた。

現状では、噴火そのものを人為的にコントロールすることはできない。そのため、次善の策として、来るべき噴火時に起こるであろう現象を予測し、防災に役立てるための取り組みが必要である。

予測するには、原因を知らねばならない。そもそも、火山噴火の原因は何か? 大まかには、マグマに含まれる、ないし、マグマの周りにおける揮発成分(水など)が、何らかのきっかけで気化・膨張することにある、と考えられている(Fig. 1)。しかし、マグマや水の流動を引き起こすメカニズムについては、まだまだわからないことが多い。

わからない現象を理解するためには、現象をよく観察することが重要である。最近の観測は、計測機器その他の発達も手伝って、非常に精密に行われている。だが、噴火にいたるプロセスは地下で進行するものであり、また、実際に噴火が起きているときには、危険のために火山に近づくことができない。したがって、観測によって得られる情報には限界がある。

そこで、観測と並行して、アナログ実験によって、噴火に本質的な役割を果たすと考えられる物理過程を再現することが重要になってくる。筆者らは、5 年ほど前から、噴火時のマグマ流動を特徴づけている気泡の存在に焦点を当て、基礎的なモデル実験に取り組んでいる。実験を通して、マグマのレオロジー特性が、マグマの挙動に大きな影響をおよぼすことがわかってきた。火山内部の現象を「可視化」する試みとして、これらの実験を紹介していきたい。

2. 急減圧による粘弾性流体の破砕

2.1 火山学的背景

火山爆発には、水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発、マグマ爆発の 3 つのパターンがある^{1),2)}。水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発は、それ

ぞれ、火山体内部にある帯水層とマグマとの間接的、直接的な相互作用によって生じる。ここでは、マグマ爆発に着目する。

マグマ爆発は、マグマ内にとけ込んでいた水を中心とする揮発性成分が減圧・冷却により析出し、急激に大気に放出される過程である。開放寸前の気泡内圧力が、周囲に比べて著しく高ければ高いほど、開放が急激であればあるほど、爆発は激しくなるであろう。

火山の噴火は、しばしば、コーラの栓抜きにたとえられる。よく振って、気泡をため込んだ状態で急に栓を抜くと、激しく吹き出す。また、ゆっくり泡を逃がしながら栓を抜くとこぼれ出す程度だろう。確かに、それらを連想させる噴火(溶岩噴泉、溶岩流)がある。しかし、瓶ごと破裂するような火山噴火もある。そして、当然ながら、そのような噴火が最も怖い。これは、内圧が高いだけでなく、固体であるガラスの破壊が、気泡の膨張・破裂よりも急激に起こるためである。

このように、マグマ噴火の形態が爆発的(explosive)になるか、おだやか(effusive)になるかを見定める上で、マグマの減圧、流動、破壊の 3 つの速度が重要なパラメータとなる。マグマは粘弾性流体であり、力の働き方によって、固体的にも流体的にも振る舞う。では、減圧速度の違いが、マグマ内気体の開放形態にどのような影響をおよぼすのか? ここでは、その問いに答えるためのモデル実験を行った³⁾。

2.2 モデル材料・実験方法

Fig. 2 に実験に用いたモデルを、Fig. 3 に実験装置の概略を、そ

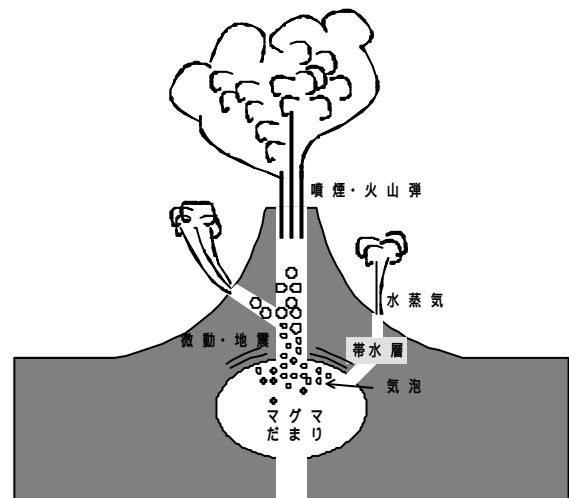


Fig. 1 Schematic of volcanic eruption

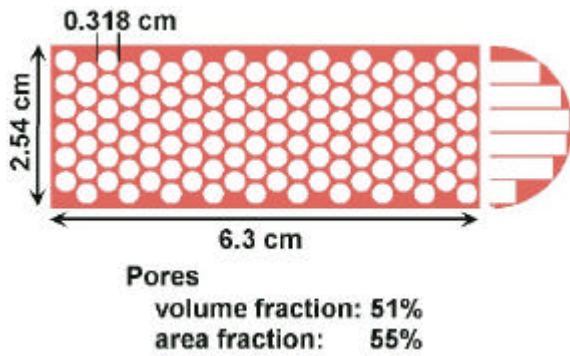


Fig. 2 Porous specimen (cross-sectional view)

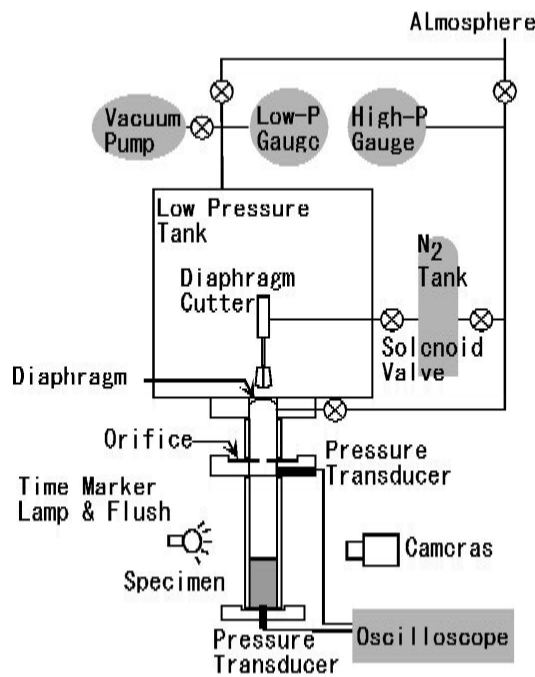


Fig. 3 Experimental setup for fragmentation tests

それぞれ示す。材質は Dow Corning 社製の粘弾性体 (3179) である。この材料は、ゆっくり引っ張ると伸び、急に引っ張るとちぎれる。アメリカでは、Silly Putty という玩具名で知られている。

この粘弾性体を使って2つの半円柱体を作り、多数のくぼみをつけ、ドライアイスを使って固化させる。固化したくぼみの中にドライアイス片を詰め、2つの半円柱体を合わせて一つの円柱体にまとめた後に、衝撃波管を逆用した急減圧装置の観測部に封入する (Fig. 3, Specimen)。

室温になじませた多孔質粘弾性体を急減圧する。減圧には、粘弾性体を詰めたガラス管 (内径 25.4 mm) の上部に設置した低圧チャンバーを用いる。ガラス管とチャンバーを隔てる金属薄膜をカッターによって破断し、ガラス管内の気体をチャンバーに吸い込む。減圧 (吸い込み) 速度は、ガラス管途中に設けたオリフィスの開口径を変えることで制御する。

減圧過程における粘弾性体の様子を、デジタルビデオカメラ (Sony DXC-107A) を使ってとらえる。また、気体部およびガラス管底部に圧力センサー (PCB 113A26) を設け、それぞれの位置における圧力の時間変化をとらえる。

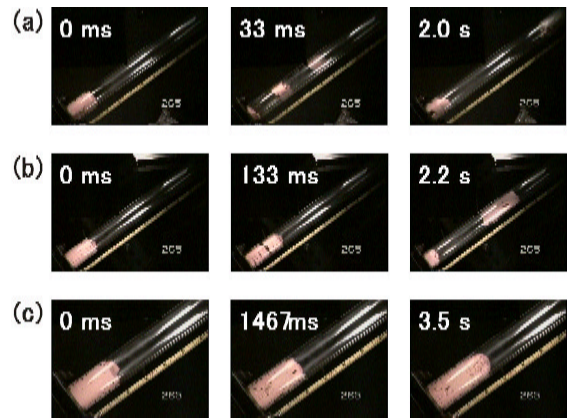


Fig. 4 Video images of the response of specimen after decompression Initial decompression rates are (a) 51.4 MPa/s, (b) 2.72 MPa/s, and (c) 2.64 MPa/s.

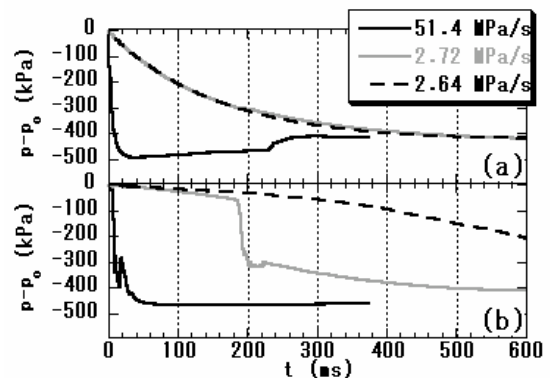


Fig. 5 Pressure data measured above the specimen (a) and at the base of the specimen (b).

2.3 実験結果

Fig. 4 に、デジタルビデオカメラでとらえた、多孔質粘弾性体の減圧による変形挙動を示す。図は3つのシリーズに分かれており、(a)、(b)、(c)の順で、減圧速度 (dp/dt) が小さくなる。減圧開始直後の減圧速度を $|\dot{p}|_0$ と定義すると、それぞれ、(a) 51.4 MPa/s、(b)

2.72 MPa/s、(c) 2.64 MPa/s である。

減圧速度が大きい(a)の場合、多孔質粘弾性体は層状に破碎し、いくつかの破片に分かれて、上方に飛んでいく。破碎過程に要する時間は数 10 ms 程度であり、その時点では、粘弾性体自体の体積に変化はない。減圧速度を小さくしていくと、(b) に示すように、破碎過程に要する時間が長くなり、わずかながら粘弾性体体積の膨張が認められるようになる。さらに減圧速度を小さくすると、(c) に示した通り、破碎することはなくなり、体積だけが膨張する。

撮影と同時にとらえた圧力の時間変化を Fig. 5 に示す。上図(a)が気体中の圧力、下図(b)がガラス管底部の圧力である。底部の圧力変化に着目すると、破碎が起こらない(c)の場合のみ、緩やかな圧力低下に終始している。これは、気泡内外の圧力差によって生じる粘弾性体の応力非平衡が粘性流動と気体の流出によって徐々に緩和されている過程を表している。これに対して、(a)、(b)では、ある時点で、圧力の急低下がみられる。これは、粘弾性体が固体として変形、破壊する過程で、底部の気体が急激に抜けることを示している。

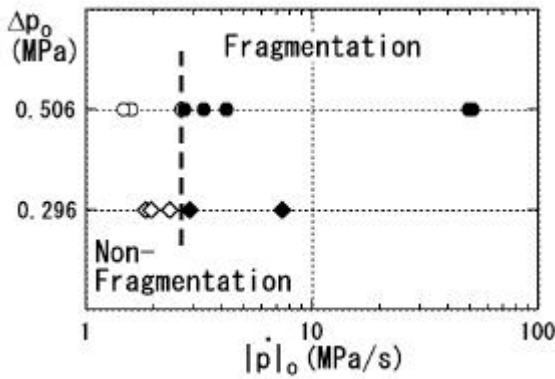


Fig. 6 Criteria for fragmentation

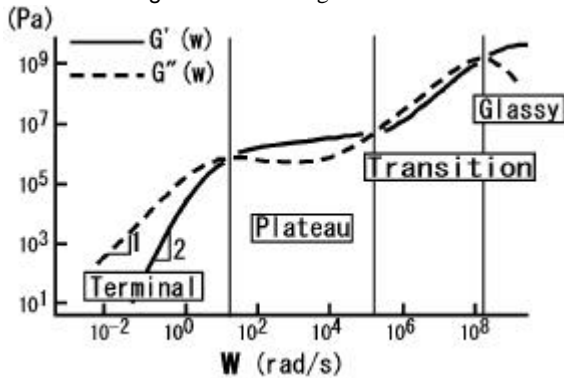


Fig. 7 Dynamic viscoelasticity of a typical polymer melt

Fig. 6 は、破碎の有無を、減圧速度および、初期に与えた圧力差によって整理したものである。この図を見ると、破碎現象の発生は、減圧速度によって決まることがわかる。

本現象は、粘弾性体の動的性質と密接な関係がある。Fig. 7 は、ポリマー溶融体を示す動的粘弾性物性の典型的なパターンである⁴⁾。動的剛性率 G' と損失剛性率 G'' はいずれも角周波数 ω によって変化するが、 G' が横ばいになり、 G'' が減少する周波数領域がある。この領域の変動を受けた粘弾性体は、弾性的に振る舞い、固体として破壊し得る。この実験で用いた粘弾性体では、約 3 Hz を超えると、 G'' が急激に落ち込む。すなわち、0.3s 以下で生じる変動に対しては、固体的な破壊を起こす可能性がある。

さらに、粘弾性体を固体と考えれば、破碎を引き起こすには、与える応力の大きさ自体がある値を超える必要がある。

以上の考察から、多孔質粘弾性体の破碎現象は、応力変化の大きさと、それを与える時間の 2 つのファクターによって支配されているものと考えられる。

3. 気泡を含む高粘度流体中の圧力伝播

3.1 火山学的背景

いまの人間の力では、噴火時の火山体内部はもとより、静かにしている火山の内部ですら、直接観測することは難しい。そこで、限られた観測データから、火山体内部の様子をつかむ方法についての研究が進められている。そのひとつに、マグマの発泡状況を、地震波によってとらえる試みがある⁵⁾。

水-空気系の気泡流では、わずかな気泡の混入により、音速が大きく低下することが知られている⁶⁾。これは、気相部分の体積変化が大きいために、小さな圧力変化でも、気泡流全体の密度が大きく

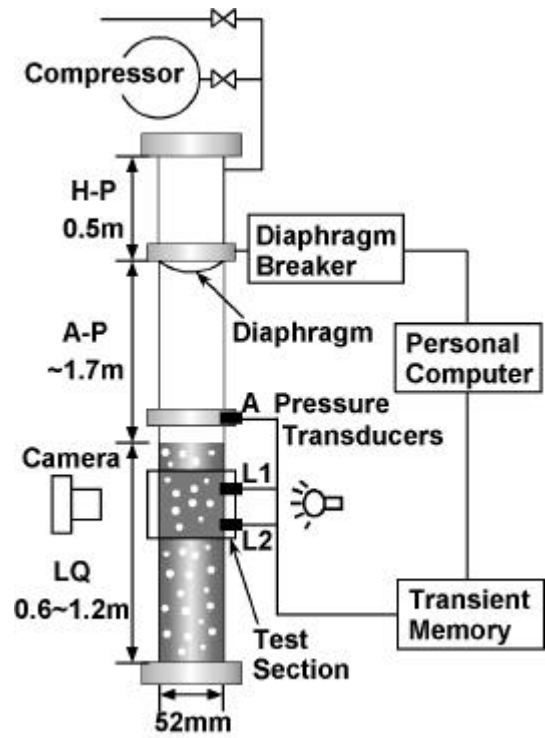


Fig. 8 Experimental setup for shock tube test

変わることが原因である。

発泡した領域だけ音速が低下すれば、その部分は気柱の共鳴と同様に、固有周波数を持つであろう。噴火直前の火山性地震には、このことを示唆する周期的な低周波振動が見られるものがある。

また、水-空気系の気泡流は、音波に関して分散性 (dispersion) と散逸性 (dissipation) をあわせ持つことも知られている^{6),7)}。すなわち、音速や減衰率は、周波数によって大きく変化する。

以上のことを使えば、火山周囲のいろいろな地点に置かれた地震計データから発泡領域を特定することができそうである。

しかし、これまでの多くの解析は、マグマ-ガス系の気泡流でも、水-空気系と同様の音響特性を有する、ということ为前提として行われて来た。果たしてそれはどうか？ マグマは、少なくとも水の 1000 倍以上の粘度を持つ。中には、10 億倍もの粘度を示すものもある。このような高粘度流体中でも、水-空気系と同じ議論が成り立つのであろうか。

そこで、筆者らは、マグマレベルの高粘度流体に気泡を含ませた系を作り、その媒体中における弱い衝撃波の伝播挙動を実験的に調べてみることにした^{8),9),10)}。高粘度流体としては、シリコンオイル (信越化学 KF96H-1M, 密度 978 kg/m³)、水あめ (密度 1400 kg/m³) を用いた。この二つの流体の静的な粘度は、約 1000 Pa·s とほぼ同じである。

3.2 実験装置

Fig. 8 は、実験に使った縦型衝撃波管の概略である。直径 52 mm、全長 2.8-3.4 m のパイレックスガラス製である。下部に気泡を含む高粘度液体 (LQ) を入れ、気体部を、プラスチック製の隔膜にて仕切る。気体上部 (H-P) を加圧し、隔膜上に貼り付けたニクロム線を加熱して、隔膜を破断すると、下方に向かって衝撃波が伝播する。この衝撃波は、液体部にも伝わる。側壁に取り付けた圧力センサー (A, L1, L2, いずれも Kistler 603B) を使って、圧力の時間変化

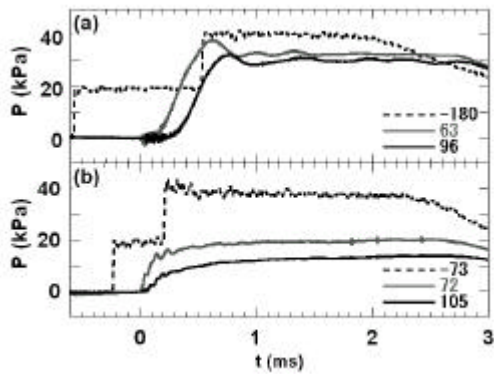


Fig. 9 Pressure signals (a) Silicone oil, (b) Syrup

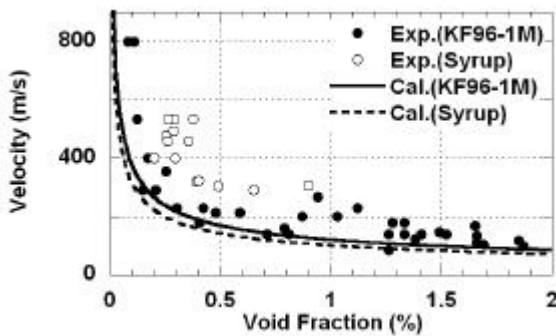


Fig. 10 Propagation velocity of pressure waves

をとらえる．同時に，一眼レフカメラ，高速度ビデオカメラ（フォトロン FASTCAM-Ultima-UV）を用いて，気泡の分布状況，形状の時間変化を調べる．

3.3 圧力波の挙動

Fig. 9 に，衝撃波管側壁でとらえた圧力の時間変化を示す．(a) はシリコンオイル，(b) は水あめを用いた結果である．初期ボイド率はいずれも約 0.9% である．それぞれの図には 3 本の線がある．点線は，気体中のセンサー（Fig. 8 A の位置），実線は液体中のそれ（L1, L2）である．線に添えた数字は，下向きを +z 方向とし，液面位置を $z=0$ としたときの，センサー位置の座標（単位 mm）を表す．

点線の波形は 2 段のステップ上昇を示す．これは，隔膜の破断により発生した衝撃波は，まず下方に伝播し，液面で反射した後は上方に伝播する，という過程を表している．

実線を見ると，シリコンオイルと水あめとは，圧力波形が大きく異なる．圧力の立ち上がりに着目すると，シリコンオイルでは下に凸（徐々に上昇），水あめでは上に凸（急激な上昇）形をしていることがわかる．シリコンオイルに見られる緩やかな圧力上昇とその後の大きな振動は，水-空気系気泡流中の衝撃波でよく見られるものである^{6),11)}．

Fig. 10 は，圧力立ち上がり位置の伝播速度を，ボイド率で整理したものである．黒丸がシリコンオイル，白丸が水あめ，実線，点線は，低粘度流体における気泡流中の定常衝撃波伝播速度，

$$V = \sqrt{\frac{p_0 + \Delta p}{\rho_0 a(1-a)}} \quad (1)$$

を表す^{11),12)}．ただし， p_0 ， Δp ， ρ_0 ， a はそれぞれ，初期圧力，衝撃波による圧力上昇量，液体密度，ボイド率を表す．

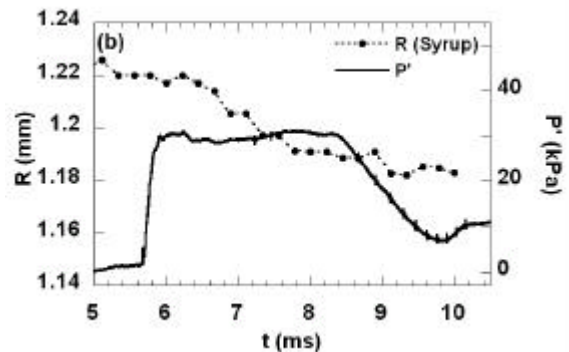
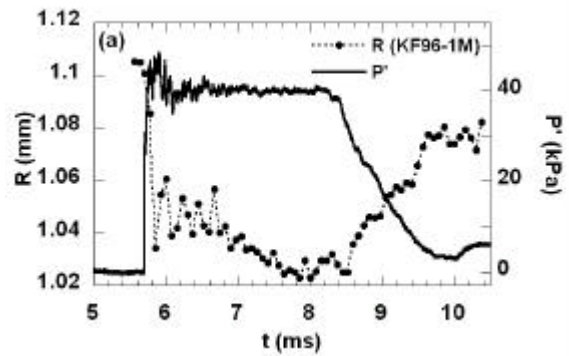


Fig. 11 Radius-time curves with pressure signals

実験データにばらつきは見られるものの，水あめ中の伝播速度は，シリコンオイルや式(1)で見積もった速度に比べて，明らかに大きい．この伝播速度の差は，これらの流体が異なる粘弾性物性を有することに起因している．

3.4 粘弾性流体中における気泡の膨張・収縮挙動

気泡を含む液体の音響特性を知るには，圧力変動に対する気泡の膨張・収縮特性を把握しなければならない．そこで，前節の実験に引き続いて，単一気泡の膨張・収縮特性を調べる実験を行った．

Fig. 8 の衝撃波管を用いる．カメラ撮影部側壁から挿入した注射器を用いて，観測部近傍に単一気泡を作る．この気泡に対して，圧力変化を与え，その際の気泡半径変化を，高速度ビデオカメラを用いたバックライト撮影結果から求める．

Fig. 11 は，シリコンオイル，水あめに対する気泡半径時間変化である．プロットが実験から得られた気泡半径を，太い実線が圧力の時間変化を示す．シリコンオイルは，圧力の急激な上昇に追従して，気泡半径が減少する．水あめにはそのような急激な半径変化が見られない．

Table 1 Fitting Parameter for Oldroyd model

	シリコンオイル	水あめ
μ	120 kPa	700 MPa
	84 Pa s	600 Pa s
	1.7 Pa s	0 Pa s

両者の間の際立った違いは，粘弾性を使って説明できる．粘弾性流体の応力-ひずみ関係を Fig. 12 に示す線形 Oldroyd モデル，

$$s + \frac{h}{m} \frac{ds}{dt} = (h+x) \frac{de}{dt} + \frac{hx}{m} \frac{d^2e}{dt^2} \quad (2)$$

で表し，気泡半径の時間変化を数値計算によって求めたものを Fig.

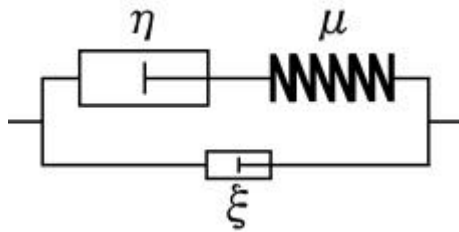


Fig. 12 Linear Oldroyd model

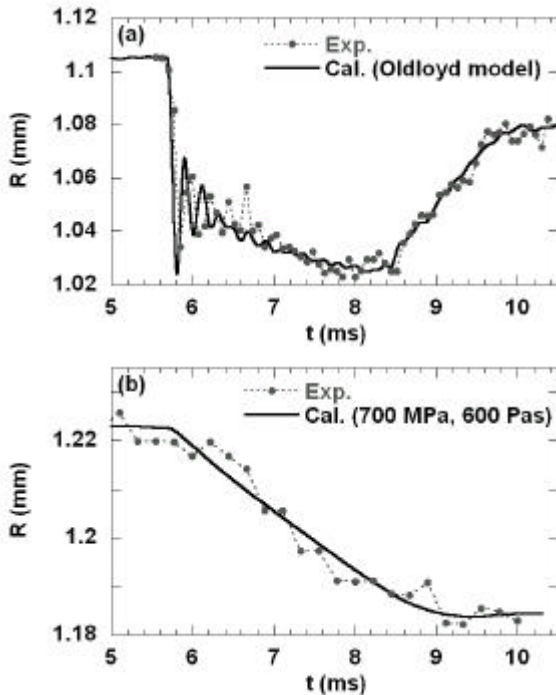


Fig. 13 Comparison of experimental data with numerical predictions (a) silicone oil, (b) syrup

13 に示した．シリコンオイル，水あめとも，実験結果によく一致することがわかる．

Oldroyd モデルに入力したパラメータを Table 1 にまとめた．両者の間には，弾性変形の緩和時間，

$$t = \frac{h}{m}, \tag{3}$$

に大きな違いがあることがわかる．式(3)によれば，シリコンオイルは $t = 0.7 \text{ ms}$ ，水あめは $t = 0.9 \text{ } \mu\text{s}$ となる．

Fig. 11 で示した実験において，気泡に与えたステップ圧力変化は，0.1 ms 以下の立ち上がり時間であり，シリコンオイルの緩和時間より短い．したがって，シリコンオイル中の気泡は，シリコンオイルの弾性変形によって収縮することができる．これに対して，水あめの場合は，弾性変形はまったくみられず，粘性によりダンブされた緩やかな収縮挙動のみが生じる．

水 空気系気泡流において，音速が著しく低下したり，圧力の立ち上がりがなまったりする現象が見られるのは，すべて，気泡体積と圧力変化との間に相関があることに原因がある．水あめのように，圧力変化と気泡半径変化との間の相関が弱いと，水 空気系気泡流とは異なる圧力波伝播挙動を示すはずである．このことが，Fig. 9, 10 にみられた圧力波形や伝播速度の違いに現れている．

4. 気泡振動を利用した動的粘弾性パラメータ計測

4.1 はじめに

前章までの実験結果から，マグマのような高粘度流体では，粘弾性物性とその動的挙動に対して大きな影響を持つ．特に，音響特性を知るには，広い周波数帯域における動的粘弾性物性が必要である．

このような動的粘弾性物性を調べるために，さまざまな方法が提案され，実用化されている．ところが，通常良く用いられるストレスレオメータの測定可能周波数範囲は 100 Hz 以下であり，超音波を使った計測の周波数範囲は，通常 MHz オーダーである．中間周波数帯域の動的粘弾性を測る手法は，いまだ確立されていない．

そこで，筆者らは，中間領域の動的粘弾性パラメータを調べるために，圧力変動に対する気泡の膨張・収縮挙動を用いた計測法の開発に取り組んでいる^{13),14)}．

4.2 原理

正弦波圧力変動に対する気泡の膨張・収縮運動を考える．粘弾性体を非圧縮とすると，半径 R の時間変化は，

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{r_l} \left(p_g - \int_{-\infty}^R \frac{3t_{rr}}{r} dr - \frac{2s}{R} - p_l \right), \tag{4}$$

で表される¹⁵⁾．ただし， p_g, p_l は気泡内外の圧力， s は表面張力係数を表す． δ_{rr} はずれ応力の半径方向成分であり，変位 u_r を使って，

$$t_{rr} = \frac{4}{3} m \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r} \right). \tag{5}$$

式(4)，(5)をもとに，剛性率を $\dot{\epsilon} = G' + (G''\dot{\epsilon})/dt$ として，圧力の周期的変化(角周波数 $\dot{\epsilon}$) に対する半径の時間変化を解くと，次式を得る：

$$G' = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta p}{\Delta R/R_0} \cos d - p_{g0} \text{Re } F + \frac{2s}{R_0} + r_l R_0^2 w^2 \right), \tag{6}$$

$$G'' = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta p}{\Delta R/R_0} \sin d - p_{g0} \text{Im } F \right). \tag{7}$$

ただし， F は，ポリトロブ指数を意味する角周波数の複素数関数である¹⁶⁾．したがって，初期気泡内圧力 p_{g0} ，初期気泡半径 R_0 ，半径と圧力時間変化の振幅 $\dot{\Delta R}$ ， $\dot{\Delta p}$ ，および両者の位相差 $\dot{\epsilon}$ を知ることができれば，式(6)，(7)を用いて， G' ， G'' を求めることができる．

4.3 測定例

Fig. 14 は，以上の原理を利用した粘弾性パラメータ測定装置の概略である．円筒容器に供試粘弾性体を満たし，上部のダイヤフラムを加振することで変動圧力場を得る．その際の気泡形状変化を高速度ビデオカメラ (Nac Hi-Dcam, フォトロン FASTCAM-Ultima-UV) を用いてとらえる．撮影と同時に，圧力センサー (Kulite XTM-190) を用いて変動圧力をとらえる．撮影画像をもとに，気泡半径の時間変化を算出し，圧力変化と合わせることで， G' ， G'' を得る．

Fig. 15 に，測定結果の例を示す．ここでは，3章の実験で用いたシリコンオイル (信越化学 KF96H-1M) を供試液体とした．比較のために，ストレスレオメータ (Rheometric Scientific, SR-200) による計測結果を合わせて示した．

グラフより，本手法を用いることで，ストレスレオメータの測定範囲を越える，100 Hz オーダーの周波数応答特性が得られることがわかる．また，10 Hz までの範囲では，今回の計測とストレスレオメータによる値はよく一致している．測定精度など，まだ，詰め

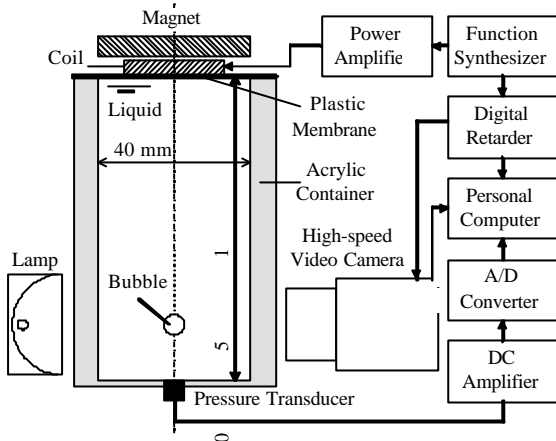


Fig. 14 Experimental setup for dynamic viscoelasticity measurement by using bubble oscillation

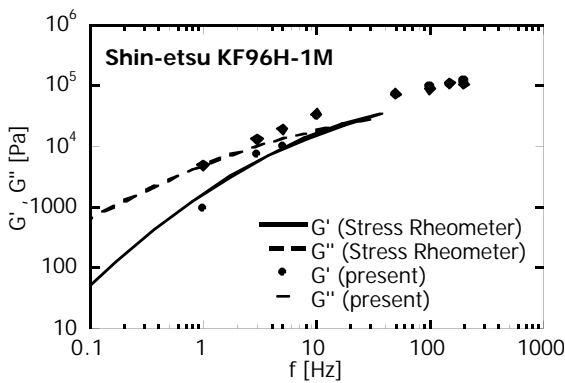


Fig. 15 Comparison of measured dynamic viscoelasticity between present method and a rotating rheometer

るべき点はあるが、中間周波数領域の動的粘弾性物性の計測に対する、本手法の可能性は十分示すことができた。

5. おわりに

噴火現象を物理的に把握するための室内実験の中から、気泡を含む粘弾性体に関する実験（破碎、音響）の話題を二つ取り上げた。いずれの実験からも、粘弾性体ならではの興味深い性質が明らかになった。実際の火山現象は、はるかに複雑であり、実験結果がそのまま適用できるわけではない。しかし、実験室内の現象をじっくりと観察し、理論的考察を行う作業の積み重ねは、複雑な実現象の中にある物理的本質を見極め、現象を的確に表すモデルを構築する上で、必ず役に立つものである、と筆者らは考えている。

謝 辞

2章の破碎実験は、カリフォルニア工科大学にて、B. Sturtevant 教授（故）の協力を受けて行った。ストレスレオメータによる粘弾性測定は、レオメトリックス=サイエンティフィック F.E.社にお願いした。3章、4章の実験は、それぞれ、大國谷宏氏、梶谷史人、亀水拓哉両氏が主に行った。本研究は、日本学術振興会特別研究員研究奨励費の補助によるものである。

参 考 文 献

- 1) 下鶴大輔, 荒牧重雄, 井田喜明編: 火山の辞典, 朝倉書店 (1995).
- 2) 日本火山学会編: Q&A 火山噴火, 講談社ブルーバックス (2001).
- 3) Ichihara, M., Rittel, D. and Sturtevant, B.: Fragmentation of a porous viscoelastic material: implications to magma fragmentation, *Journal of Geophysical Research* (2002) (in press).
- 4) Glaessley, W.W.: Viscoelasticity and flow in polymer melts and concentrated solutions. In: *Physical properties of polymers* (2nd ed.) (1993) pp. 97-143. American Chemical Society.
- 5) Chouet, B.A.: New methods and future trends in seismological volcano monitoring. In: *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards* (1997) pp. 23-97. Springer.
- 6) 日本流体力学会編: 流体における波動 (1991) 朝倉書店.
- 7) Commander, K.W. and Prosperetti, A.: Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 85 (1989) pp. 732-746.
- 8) 大國谷宏: 気泡を含む高粘度流体中における圧力波の伝播, 東京農工大学大学院工学研究科修士学位論文 (1998).
- 9) 市原美恵: 発泡するマグマの振動を聴く, *科学* Vol. 68, No. 11 (1998) pp. 879-884.
- 10) Ichihara, Okunitani, H., Ida, Y. and Kameda, M.: Dynamics of bubble oscillation in viscoelastic liquids, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2002) (submitted).
- 11) Kameda, M. and Matsumoto, Y.: Shock waves in a liquid containing small gas bubbles, *Physics of Fluids*, Vol. 8, No. 2 (1996) pp. 322-335.
- 12) Campbell, I.J. and Pitcher, A.S.: Shock waves in a liquid containing gas bubbles, *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 243 (1958) pp. 534-545.
- 13) 梶谷史人: 粘弾性流体中の気泡振動, 東京農工大学大学院工学研究科修士学位論文 (2002).
- 14) 梶谷史人, 亀水拓哉, 亀田正治, 市原美恵, 西澤宇一: 気泡振動を利用した動的粘弾性パラメータ計測, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集 (2002) (印刷中).
- 15) Fogler, H.S. and Goddard, J.D.: Collapse of spherical cavities in viscoelastic fluids, *Physics of Fluids*, Vol. 13 (1970), pp. 1135-1141.
- 16) Prosperetti, A.: The thermal behaviour of oscillating gas bubbles, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 222 (1991) pp. 587-616.

* 原稿受付 2002年7月1日

** 東京農工大学 PD (現: 科学技術振興事業団計算科学技術研究員)

*** 正会員, 東京農工大学工学部