

ISSN 0389-4010

UDC 534.13

532.61

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1143

落下塔を用いた液滴の大振幅振動実験

吉原正一・東久雄

1992年3月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

落下塔を用いた液滴の大振幅振動実験*

吉原正一*¹ 東久雄*¹

Large Amplitude Shape Oscillations in a Mercury Drop Using a Drop Tower

Shoichi YOSHIHARA, Hisao AZUMA

ABSTRACT

The application of an AC electric field to a mercury drop resulted in large-amplitude shape oscillations due to variations in its surface tension. Quasi two-dimensional (2-D) oscillation patterns were identified from the 2nd-16th modes for flattened drops under a pressure of 1G. In addition, three-dimensional oscillations were observed in low-gravity using a drop tower, with several polyhedra patterns being clearly identified, e.g., a tetrahedron, hexahedron, octahedron and dodecahedron.

Keywords: Drop dynamics, Low gravity, Drop tower, Surface tension, Mercury

概 要

水銀液滴の大振幅振動を、電気的な方法を用いて水銀液滴の表面張力を周期的に変化させることにより励起した。1G 下において平になった水銀液滴で、2次モードから16次モードまでの準2次元的な振動パターンが得られた。落下塔を用いた低重力環境下において3次元振動を実現した。その中で、準2次元的な振動パターン ($m=0$ モード) と共に多面体 (正4面体-正4面体, 正6面体-正8面体, 正12面体-正20面体) の振動パターンが得られた。

1. はじめに

近年、低重力環境下における各種材料実験も数多く行われている。低重力環境下での材料製造の利点の一つは、無接触で物質を容易に炉壁から離れた状態で保持できることである。この場合、液体あるいは熔融物質はほぼ球状をしているが、まわりの圧力変動、表面の温度変化、あるいは無接触保持する際の微小な重力変動などにより、球状の液体は振動する。この振動について明らかにすることは、純科学的な興味だけでなく、宇宙空間

における音波浮遊や静電浮遊などによる、新材料の製造などの実用的な見地からも重要となっている。

液滴の振動については19世紀後半に行われたレイリー¹⁾の解析以来、多くの研究者に興味を持たれてきた。液滴の大振幅振動実験もこれまでいくつか試みられている。Trinh と Wang²⁾ は地上において混合しにくい液体の中で、液滴に音響振動を与えて大振幅振動を励起して実験を行った。同様に、Rodot³⁾ らは宇宙において混合しにくい液体の中で、液滴に機械的な振動を与えて、大振幅

* 平成4年2月4日受付 (Received 4 February 1992)

*¹宇宙研究グループ (Space Technology Research Group)

振動を励起した実験を行った。これら両方の実験とも軸対称の振動パターンを実現したものである。我が国では大振幅振動の例が、宝谷⁴⁾によるリボソームの形態変化パスウェイに、また、高木、安達⁵⁾によって室温で平板の上に置いた液体窒素、液体酸素の液滴が蒸発するときに観測されている。

我々は、低重力環境下においてしばしば発生すると予想される液滴の3次元振動パターンに興味を持ち、電氣的に水銀液滴を振動させる方法を考案して実験を行った。この方法は、水銀液滴表面の電荷を電氣的な方法で外部から強制的に変えることにより表面張力を変化させ、液滴を振動させるものである。この方法を用いることによって、任意の大きさの水銀液滴及び振動数での実験を行うことが可能となり、任意の大きさの水銀液滴に対して多モードの大振幅振動を励起できるようになった。実験は1G下における2次元振動実験と、落下塔を用いた低重力環境下における3次元振動実験を行った。

2. 実験方法

2-1 1G下実験(2次元振動実験)

1G下における液滴振動実験に用いた装置の概略図を図1に示す。液滴には水銀液滴を用い、それを底の平らなガラス容器に満たした0.1規定硫酸溶液の中に浸した。水銀球と硫酸溶液の間に電

位差を与えるための電極には銅線を用いた。電極の一方はガラス容器中央で水銀球と接触させ、他方の電極は容器内で電荷が片寄らないように、等間隔に4本ガラス容器の内側壁面に配置した。水銀球と接触している電極の直径は0.3mmで、電極表面はアマルガム化し水銀と良く濡れた状態になっている。外部から発振器、増幅器によって電解液と水銀液滴の間に任意の周波数と大きさの交流電圧を与えた。水銀液滴と電解液の間の電圧が変化すると、液滴の表面へ運ばれる電解液中にある電荷が変化する。水銀液滴のみかけの表面張力は表面の電荷の量に従って変化するので、加える電圧、周波数を変えることにより、液滴に任意の振動数の振動を与えることができる。

実験には3種類の大きさの水銀液滴($R_0=0.72$ cm, 1.05cm, 1.3cm)を用いて行い、液滴に加えた交流電圧はそれぞれ ± 5 V, ± 10 V, ± 20 V, ± 30 Vである。ただし、この場合の R_0 は重力によって平につぶれた状態での液滴の半径である。実験は加える電圧を一定に保ち、周波数を1Hzから45Hzの間を0.2Hzずつ増加させ、液滴の振動が定常状態に達した後に次の周波数へ移して行った。振動パターンの観測は、電子シャッター付CCDテレビカメラを用いて行い、その中で特徴的な振動パターンについては、高速度テレビ撮影装置(1000コマ/秒)を用いて、詳しく振動を観

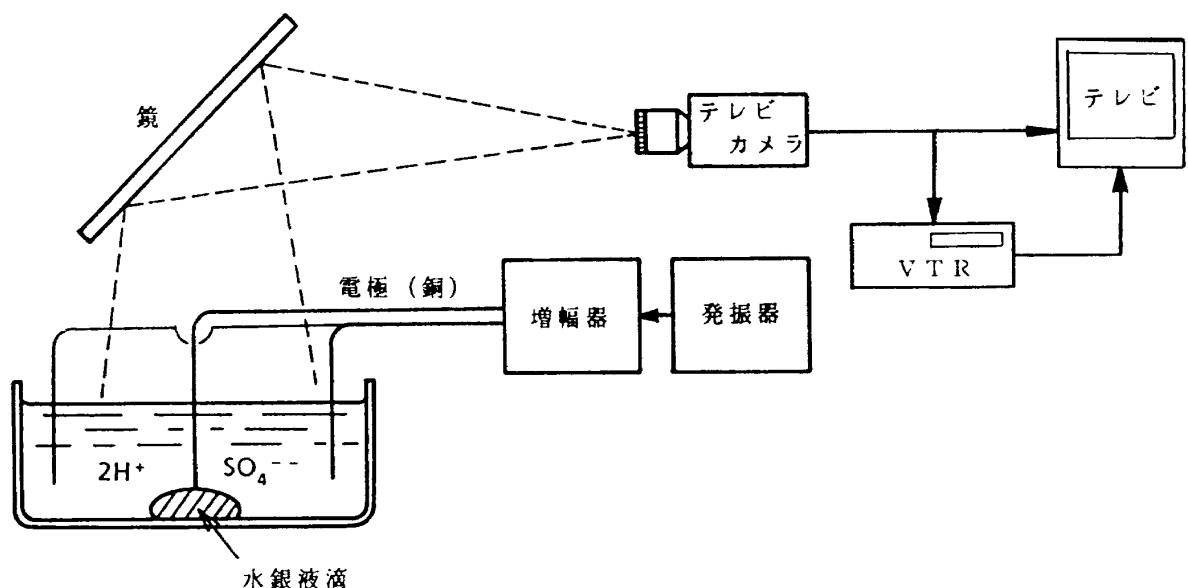


図1 地上実験装置概略図

測した。

2-2 低重力下実験 (3次元振動実験)

水銀液滴の3次元振動実験は、当研究所にある10m落下塔を用いて行った。表1に今回用いた落下塔の概略仕様を示す。図2に落下塔の上部切り離し装置に吊り下げた状態の落下カプセルの写真を示す。図3に落下実験に用いた実験装置の概略

表1 落下塔仕様概略

落下高さ	10m
落下時間	1.4秒
重力環境	$10^{-3}G$
着地衝撃	30G以下
抗力補償	ドラッグ・シールド
制動方式	サンド・ピット
着脱方式	シャープピン切断
映像機器	ビデオカメラ (1/30コマ/sec)
データ集録	有線

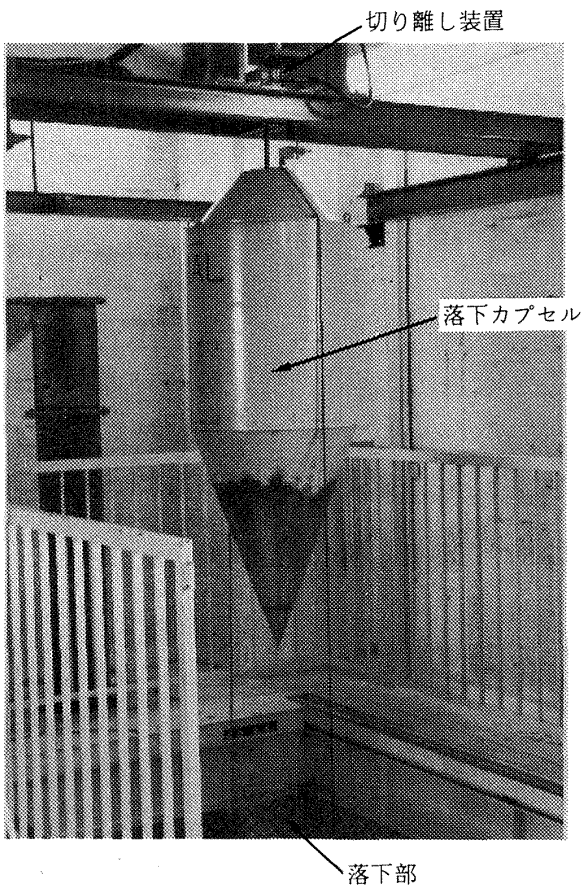


図2 落下カプセル

図を示す。加速度環境は内側落下ケース内で $1 \times 10^{-3}G$ 以下であり⁶⁾、着地衝撃加速度は約30G程度である。着地衝撃から塔載機器を守るために、その一部分を補強し、また、ゴム板を間に入れて固定するなどの対策をほどこした。

図4に落下実験に用いた円筒ガラス容器の写真の水銀液滴の入った状態を示す。水銀液滴の大きさは、球の状態に換算して半径 $R_0=0.5cm$ のものを用いた。円筒ガラス容器は周囲をパイレックスガラス、上下の蓋はアクリルライトで出来ており、

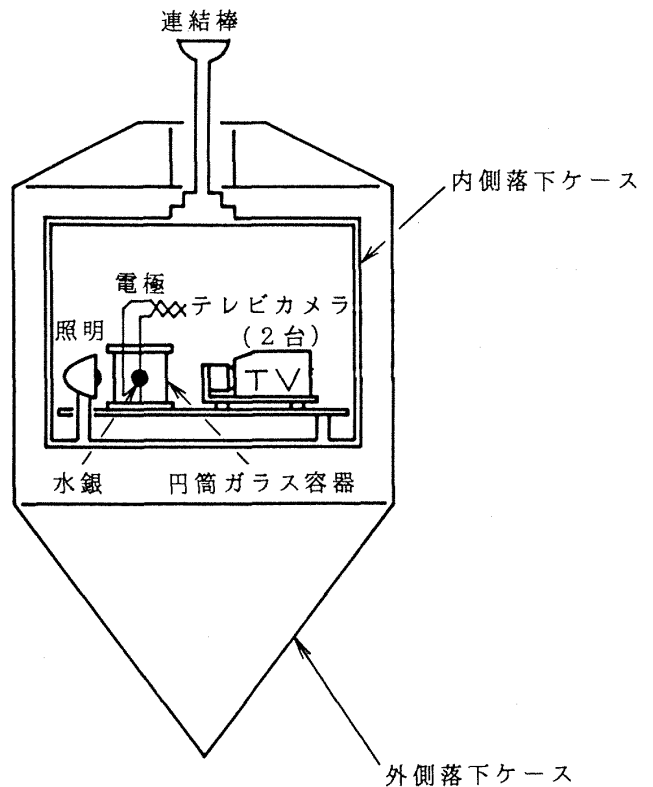


図3 落下実験装置概略図

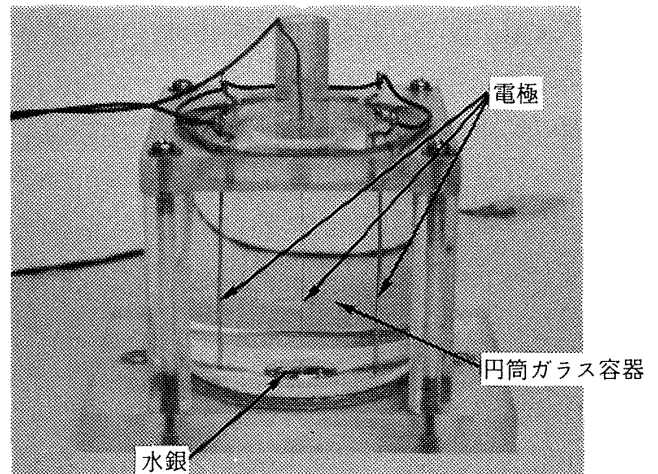


図4 落下実験用円筒ガラス容器

その大きさは内径50mm，高さ50mmである。電極には銅線を用い，2次元振動実験装置と同じように配置した。円筒ガラス容器の底の形状は，水銀液滴が落下開始直前まで容器の底の中央で電極と接触し，そこに留まっているように中央がわずかにへこんだ円錐形にしてある。

水銀液滴は落下カプセルの切り離し前のつぶれた状態から，切り離し直後に球になろうとする作用によって，容器中央の電極を伝わって，容器の底を離れ容器中心へ移動する。水銀液滴の振動励起は，液滴と電解液との間にあらかじめ設定した一定の電圧，周波数を落下カプセルの切り離し直後から加えて液滴を振動させる。周波数が2Hzから30Hzでは±20V，30Hzから60Hzでは±30Vの電圧を加えて実験を行った。

落下カプセルの落下時間は約1.4秒で，水銀液滴の振動が定常状態まで達するのに約1秒間程度必要としたため，定常状態の液滴振動は約0.4秒であった。液滴の様子は2台の電子シャッター付CCDテレビカメラ（1/250secのシャッタースピードで撮影）を，90°ずらした位置にそれぞれ配置し二方向から撮影した。撮影には一般的なテレビ撮影システムを用いたため，撮影コマ数が30フレーム/秒と少なく，高い振動数の液滴振動ではコマ数が不足し，液滴の詳細な振動の様子まで観測することは出来なかった。

3. 実験結果及び考察

3-1 表面張力測定

図5に水銀と0.1規定硫酸溶液間に交流電圧を加え，水銀の表面張力変化の測定に用いた実験装置の概略図を示す。

水銀の表面張力は，銅プレートを水銀表面に接触させると良く濡れ，水銀液中に引き込もうとする力が銅プレートに働く，この力を荷重計で測定し，その値から水銀の表面張力を求めた。電圧変化による水銀の表面張力変化は，銅プレートを通して水銀と電解液との間に交流電圧を加え表面張力変化を測定した。ただし，水銀と電解液間に電圧を加えたとき水銀の表面に電気分解によるガスが発生し，水銀と銅プレート表面に付着したまま

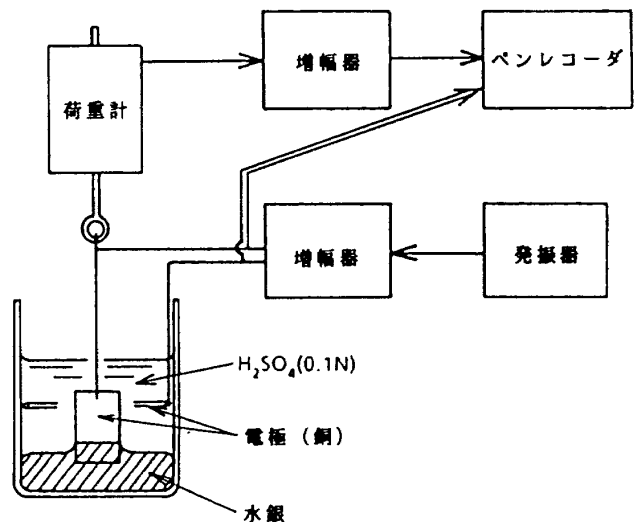


図5 表面張力測定装置概略図

表2 交流電圧による表面張力の変化量と平均値との比

V_{AC} (volt)	$\Delta\sigma$ (dyn/cm)	$\Delta\sigma/\Delta\sigma_{av}$
± 5	27	0.08
± 10	36	0.11
± 20	42	0.14

の状態になった。また，水銀の表面には表面張力変化による振動のために波が生じ，正確な表面張力の測定は妨げられた。しかし，水銀の表面張力は供給した電圧に従って変化することを確認した。

実験結果から，加えた電圧変化（±5V，±10V，±20V）による表面張力の変化分 $\Delta\sigma$ と表面張力の平均 σ_{av} との比 $\Delta\sigma/\sigma_{av}$ を表2に示す。測定値には水銀表面の汚れなどによる多少の誤差が含まれているが，電圧変化による水銀の表面張力変化のおおよその値を得ることができた。ただし，±30Vの電圧を加えた場合は，水銀表面から多量のガスが発生し表面張力の測定は不可能であった。

3-2 1G下実験（2次元振動実験）

水銀液滴は1G下の地上では重力により自分自身の重さから平らにつぶれてしまい，ほぼ2次元的な運動を行う。図6-1から図6-6に2次モードから7次モードまでの振動パターンについて，高速度テレビ撮影装置で撮影した約1サイクル分の連続写真をそれぞれ示す。

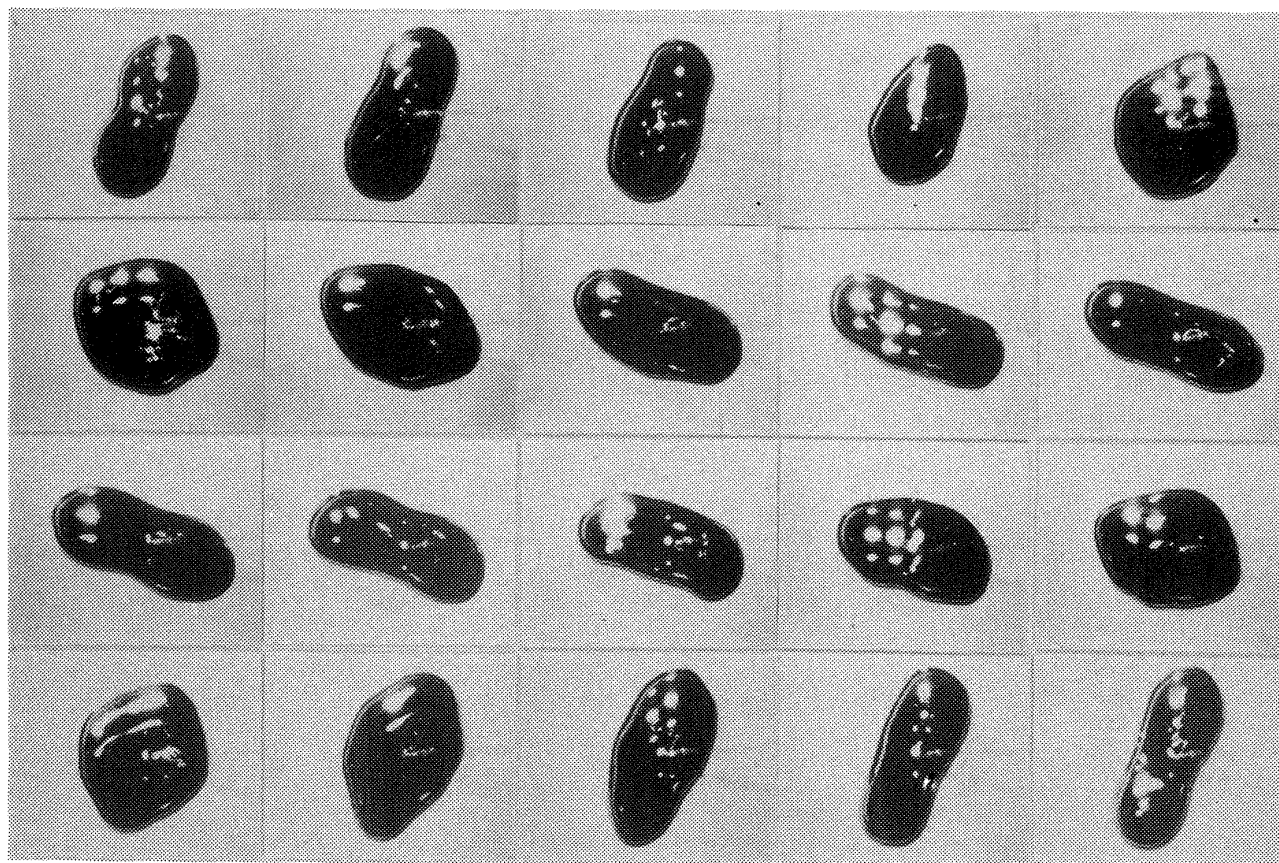


図6-1 水銀液滴の2次振動パターン
 ($R_0 = 1.05\text{cm}$, $\pm 10\text{V}$, 1.7Hz , 0.03秒每)

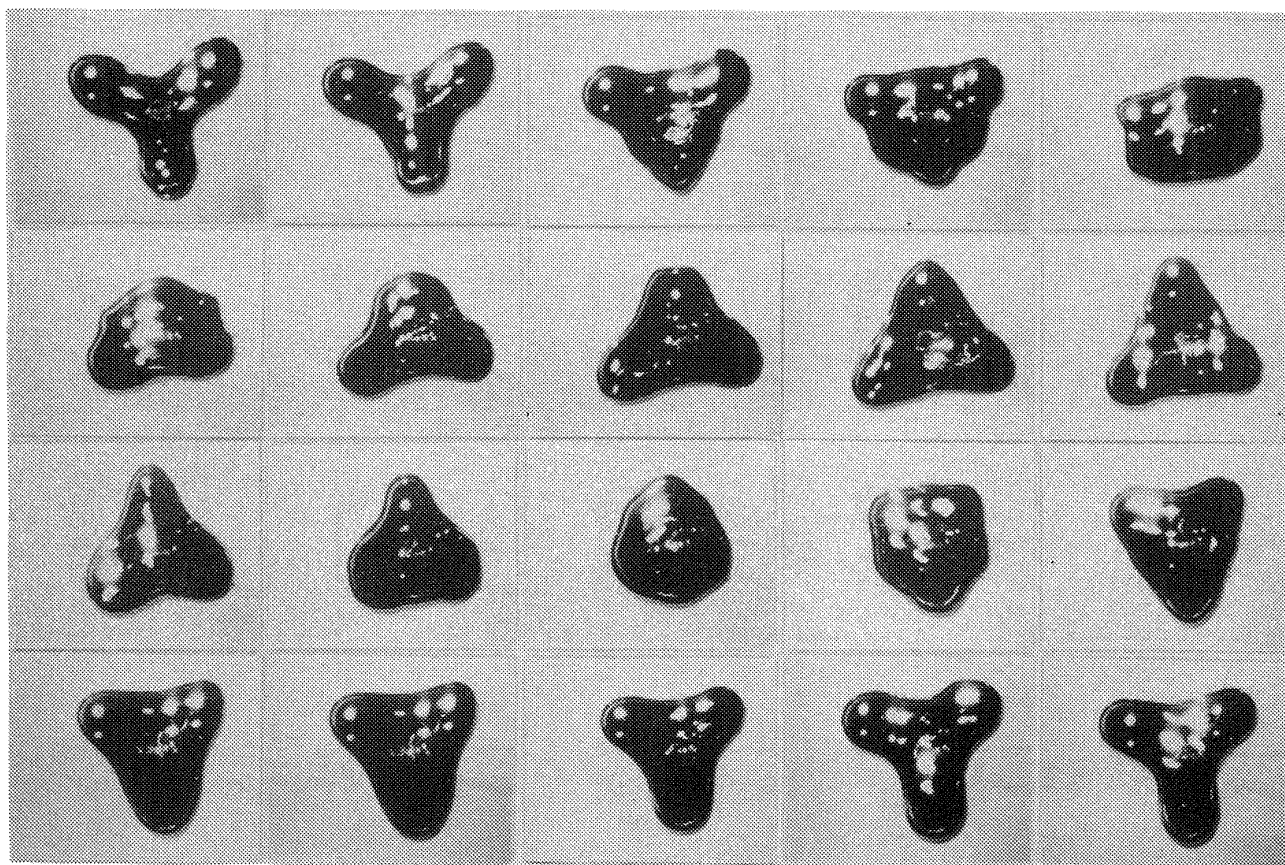


図6-2 水銀液滴の3次振動パターン
 ($R_0 = 1.05\text{cm}$, $\pm 10\text{V}$, 2.3Hz , 0.025秒每)

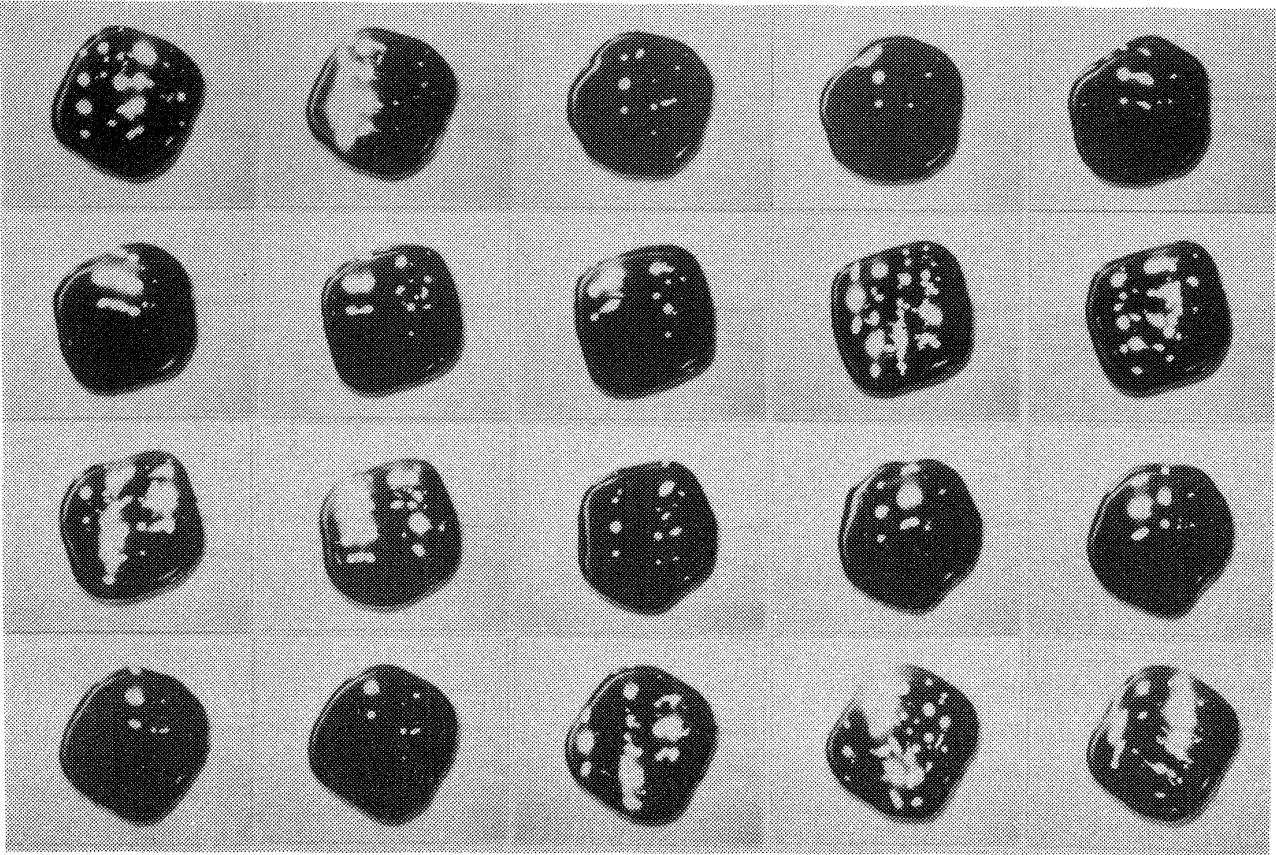


図 6-3 水銀液滴の 4 次振動パターン
($R_0 = 1.05 \text{ cm}$, $\pm 10 \text{ V}$, 5.1 Hz , 0.01 秒毎)

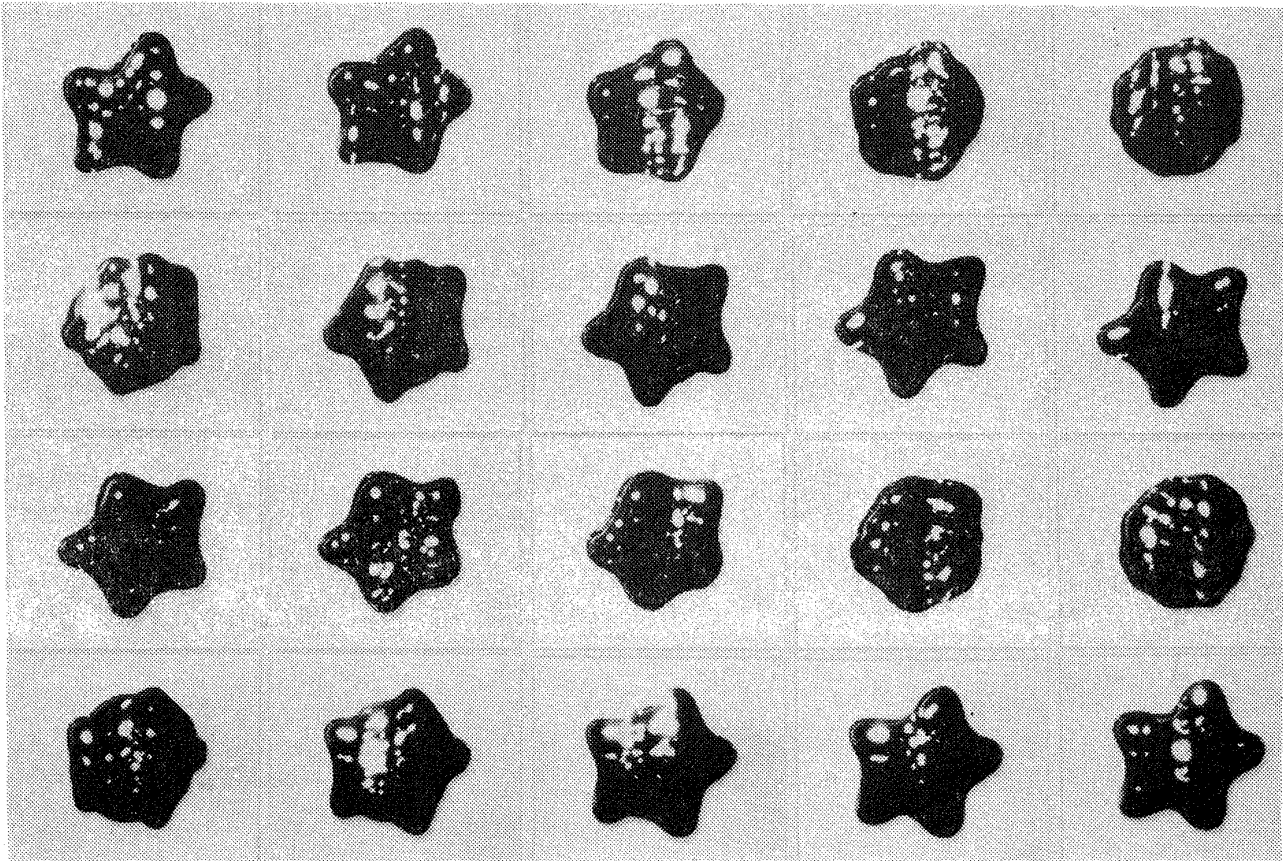


図 6-4 水銀液滴の 5 次振動パターン
($R_0 = 1.05 \text{ cm}$, $\pm 20 \text{ V}$, 6.3 Hz , 0.008 秒毎)

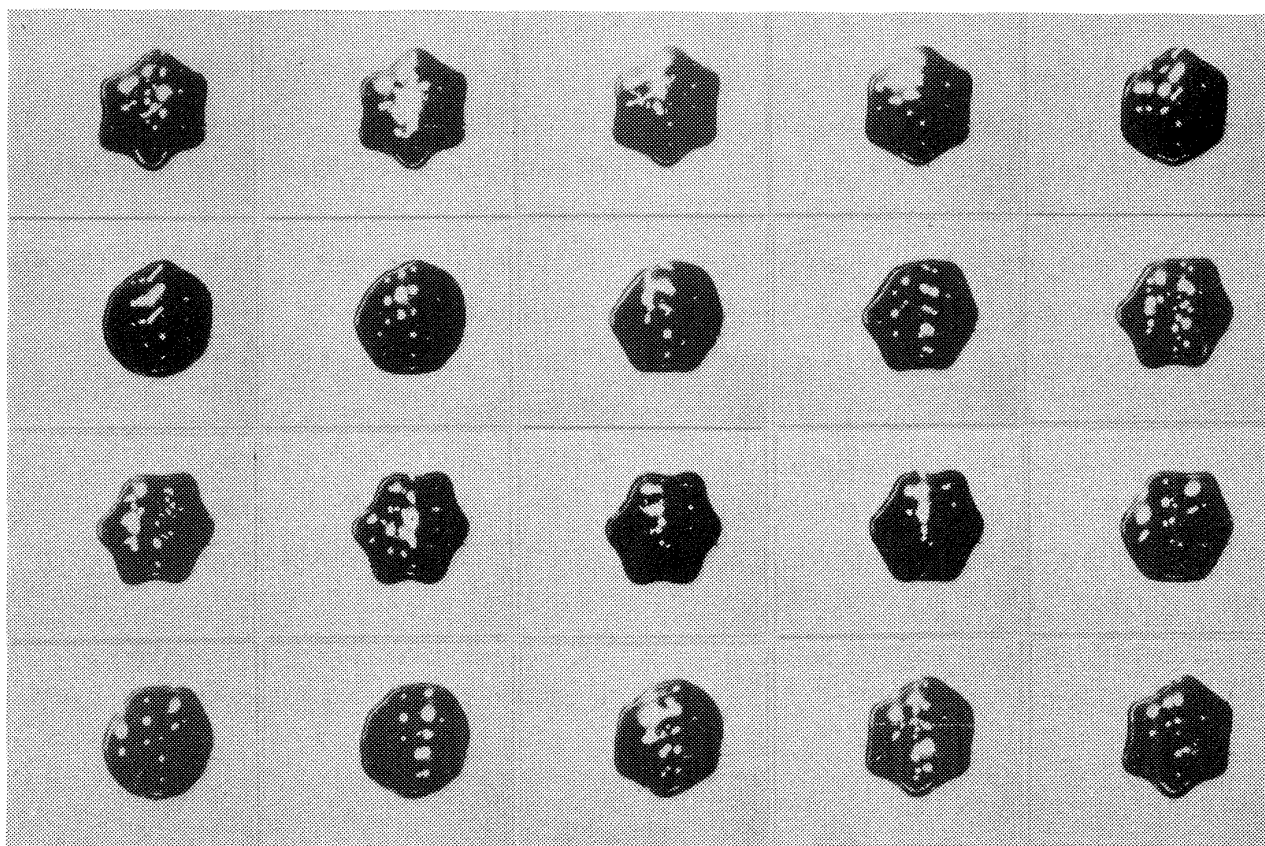


図 6-5 水銀液滴の 6 次振動パターン
 ($R_0 = 1.05\text{cm}$, $\pm 20\text{V}$, 10.2Hz , 0.005 秒毎)

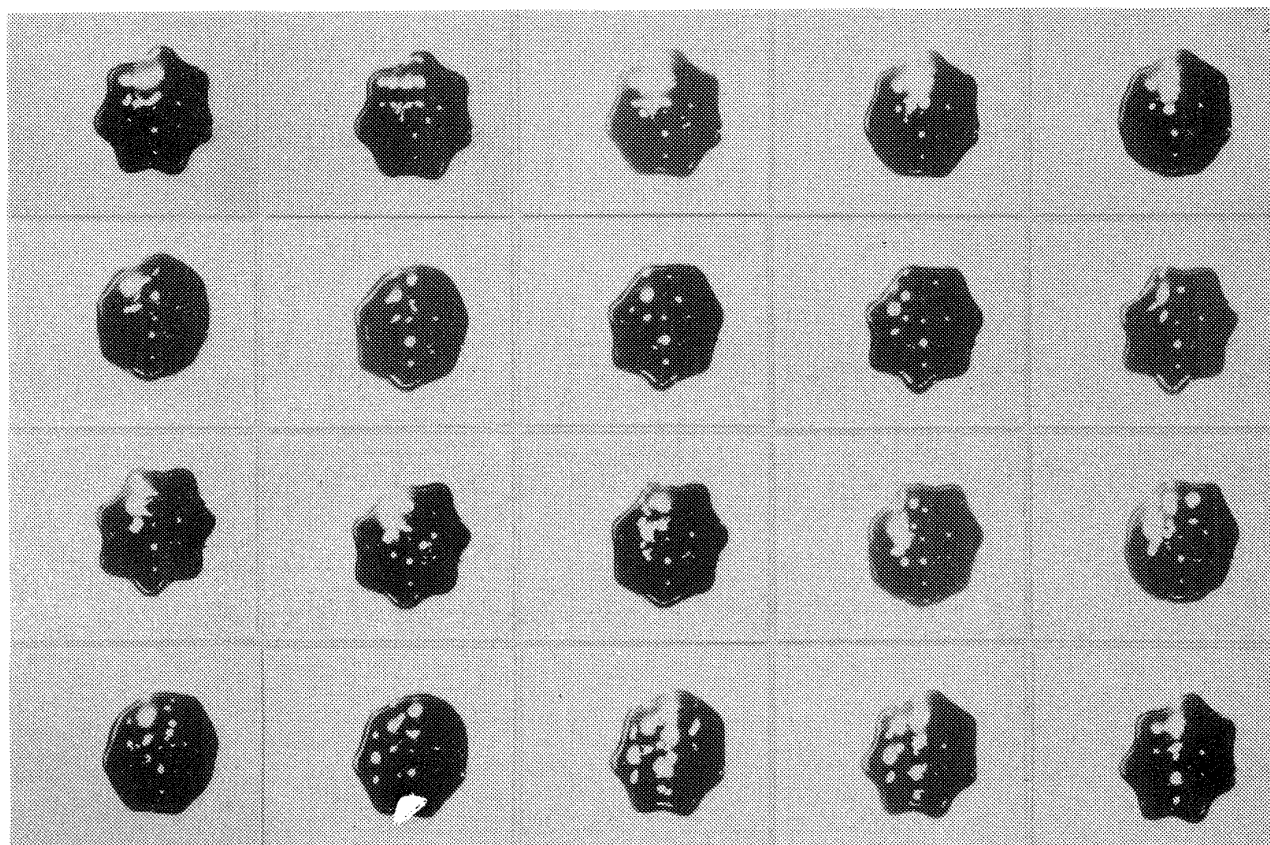


図 6-6 水銀液滴の 7 次振動パターン
 ($R_0 = 1.05\text{cm}$, $\pm 20\text{V}$, 12.8Hz , 0.004 秒毎)

水銀液滴が3次モードで振動するとき、液滴に加えた交流電圧と液滴の振幅変動と表面張力変動の関係を図7に示す。水銀液滴の振幅変動は、振動する液滴が内接する円の半径を R_{max} とし、電圧を加えない状態の水銀液滴の半径を R_0 としてその比 R_{max}/R_0 によって示した。水銀の表面張力は加えた電圧が最小のとき最大値を取り、電圧が最大のとき最小値を取る。表面張力が最大のとき水銀液滴の形状は、ロブが伸びた①の状態になり振幅は最大になる。次に、表面張力が最小になったとき水銀液滴は②で示すように丸くなり、振幅は最小になる。次に、表面張力が最大になったとき水銀液滴の形状は①のときとは異なり、逆の方向にロブが伸びた③の状態となり、振幅は最大になる。次に、表面張力が最小になったとき水銀

液滴は④で示すように丸くなり、振幅は最小になる。この結果から、水銀液滴の振動数は加えた交流電圧の周波数の半分になることが分る。このことは大きさの異なる水銀液滴、振動モードの場合も同様な関係を示す。

液滴振動の線形解析¹⁾では球状の液滴のn次モードの振動数fは、

$$2\pi f = \{(n-1)n(n+2)\sigma/\rho R_0^3\}^{1/2}$$

で表される。ただし

R_0 : 液滴の半径 (cm)

ρ : 液滴の密度 (g/cm^3)

σ : 液滴の表面張力 (dyne/cm)

である。

図8に水銀液滴の大きさが $R_0=1.05cm$ のときの、液滴の振動数fと振幅変動 R_{max}/R_0 の関係と

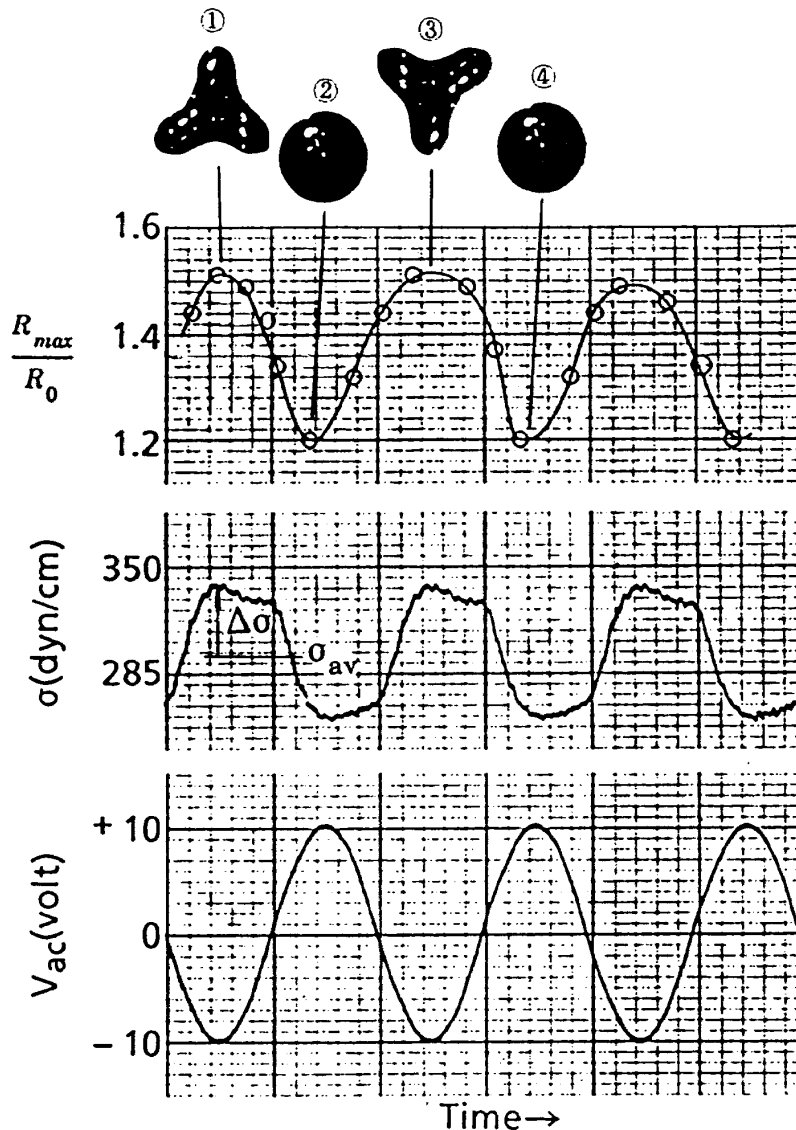


図7 交流電圧による水銀液滴の振幅変動及び表面張力変化 ($l=3$)

共に、この実験で得られた特徴的な振動パターンの写真を合せて示す。横軸上に線形理論式より求めた各振動モードの値 f_n を示す。この図で黒く塗りつぶした●▲◆★などの印は、それぞれの振動モードがはっきりと現れた所を示し、○印の所では液滴は振動しているが形状が歪んでいること

を示す。2次、3次、5次、6次のモードでは、広い振動数の範囲でそれぞれの振動モードが現れた。しかし、4次、7次、8次、10次、11次、16次のモードは狭い振動数の範囲でしか振動モードが現れなかった。7次、11次、16次のモードは線形理論から予想される振動数の約 1/2 で起きてお

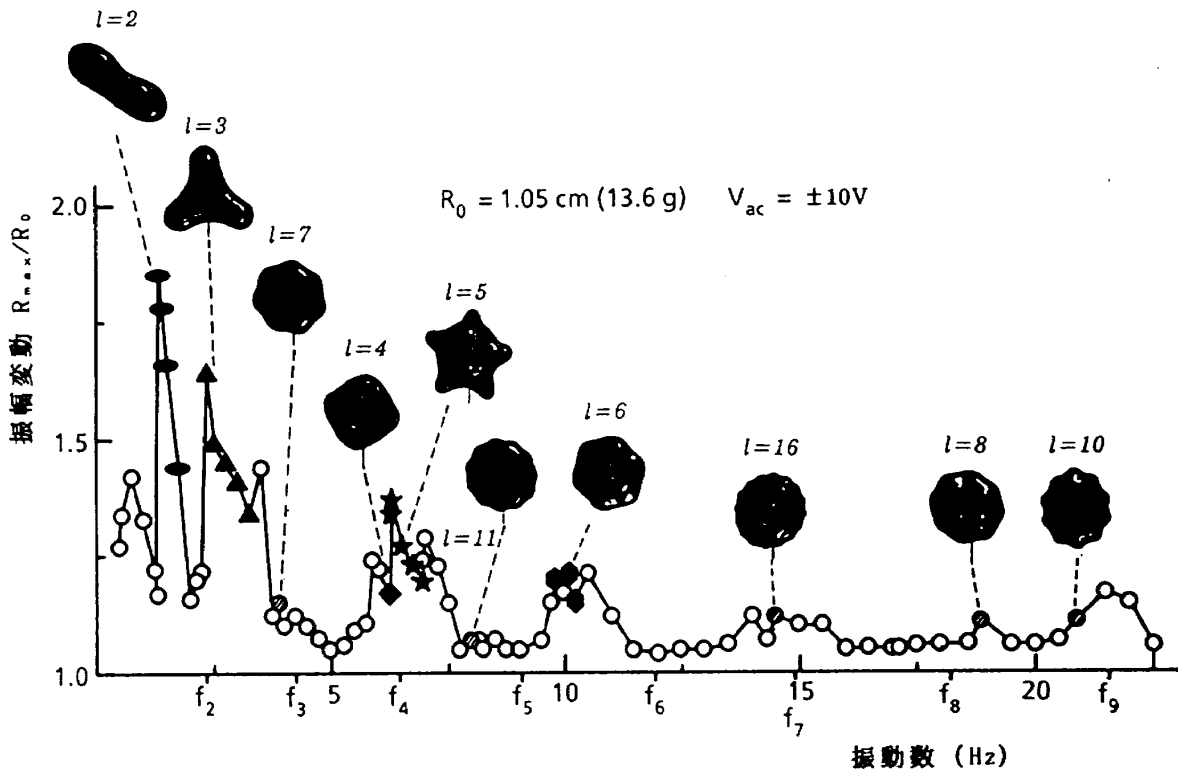


図8 水銀液滴の振動数と振幅変動

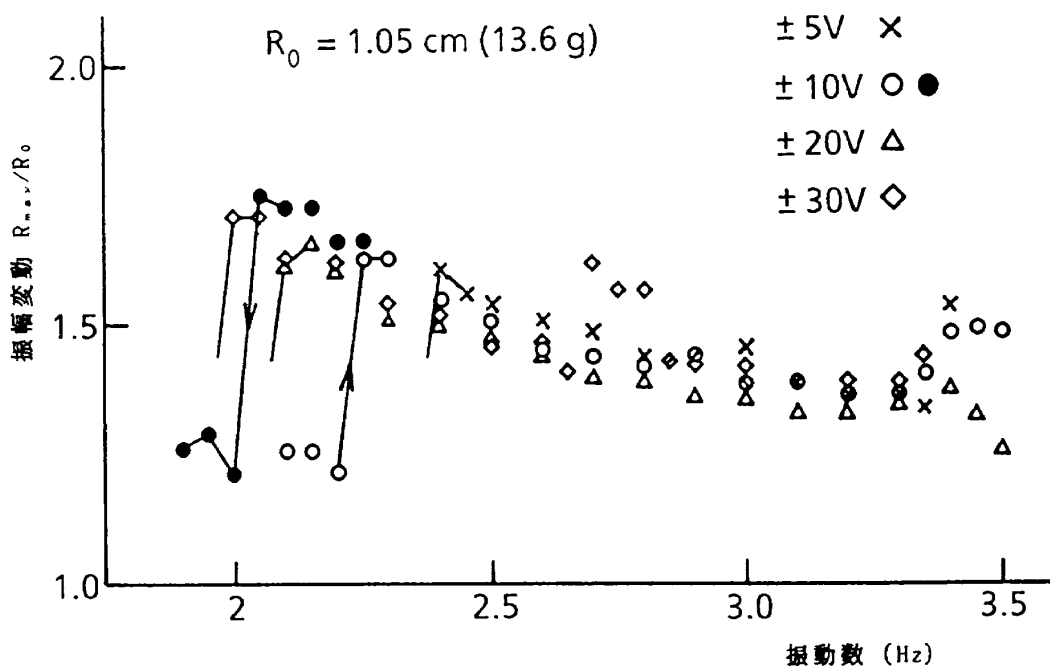


図9 水銀液滴の3次振動モードにおける電圧と振幅変動及びヒステリシス

り、Subharmonics が現れていると思われる。

水銀液滴の大きさが $R_0 = 1.05\text{cm}$ で、3次モードの振動パターンで振動する場合、液滴に加える電圧をパラメータ ($\pm 5\text{V}$, $\pm 10\text{V}$, $\pm 20\text{V}$, $\pm 30\text{V}$) として、周波数を 0.1Hz ステップで15秒間保持しつつ増加、減少させたときの液滴の振動数と振幅変動の関係を図9に示す。低い周波数から徐々に周波数を増加させたとき、3次モードの振動パターンはある周波数の所から大きな振幅で急に始まり、そして周波数が増加していくに従って振幅は徐々に減少して行く。電圧を上げて表面張力の変動幅 $\Delta\sigma$ を大きくすると、より低い周波数から大きな振幅で3次モードの振動を開始する。同様な方法で周波数を減少させたときは、さらに低い周波数まで大きな振幅で振動が続くヒステリシス特性が観測された。

図10に3種類の大きさの水銀液滴 ($R_0 = 0.72\text{cm}$, 1.05cm , 1.3cm) について、各振動モードにおける液滴の振動数を線形理論式より求めた値と共に示す。小さい液滴については、線形理論による振動数とほぼ一致する実験結果を得た。しかし、大きい液滴については、実験値が理論値よりも小さい方にずれている。この理由の一つとして液滴径が大きくなるほど水銀液滴の完全球からのずれが大きくなることが考えられるが、後述する低重力下での大振幅振動実験ではほぼ完全な球状の水銀液滴を用いたにもかかわらず線形理論値からの同様なずれが得られていることから、この実験においても液滴径が大きくなるほど大振幅振動による効果が現れていると考えられる。

3-3 低重力下実験 (3次元振動実験)

図11に水銀液滴に何も信号を加えない状態で落下試験を行ったときの、液滴の挙動を連続写真で示す。この連続写真は、2台の直角に配置したテレビカメラで落下カプセルの落下開始約0.2秒後から、着地直前までの約1.2秒間を1/6秒間隔で撮影したものである。落下前の水銀液滴は容器の底に平らにつぶれているが、落下開始と共に液滴は重力から開放され速やかに球形に形を変え、反動で上の方へ移動するのが分る。

水銀液滴の振動数が 2Hz から 30Hz の中で観測した、特徴的な3次元大振幅振動を図12-1から図12-4に連続写真で示す。この連続写真の時間

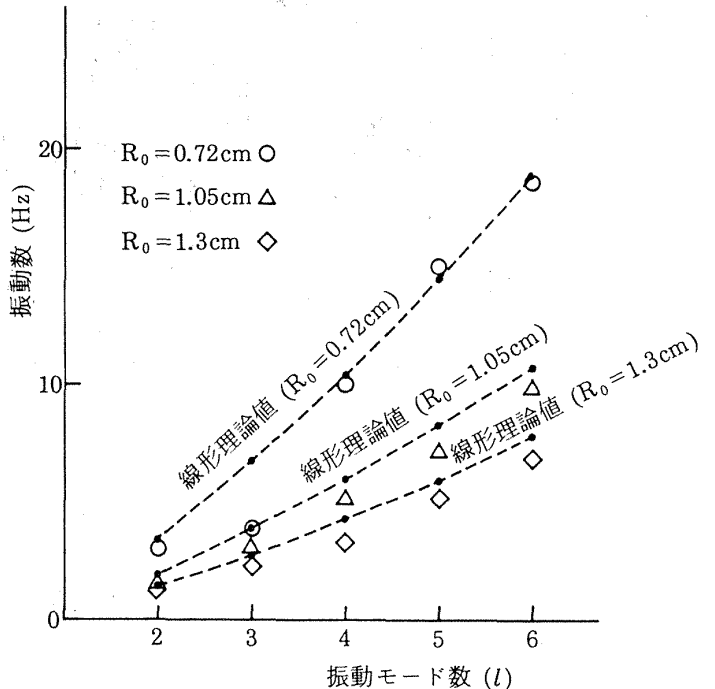


図10 2次元振動水銀液滴の各振動モードにおける振動数と線形理論値との比較

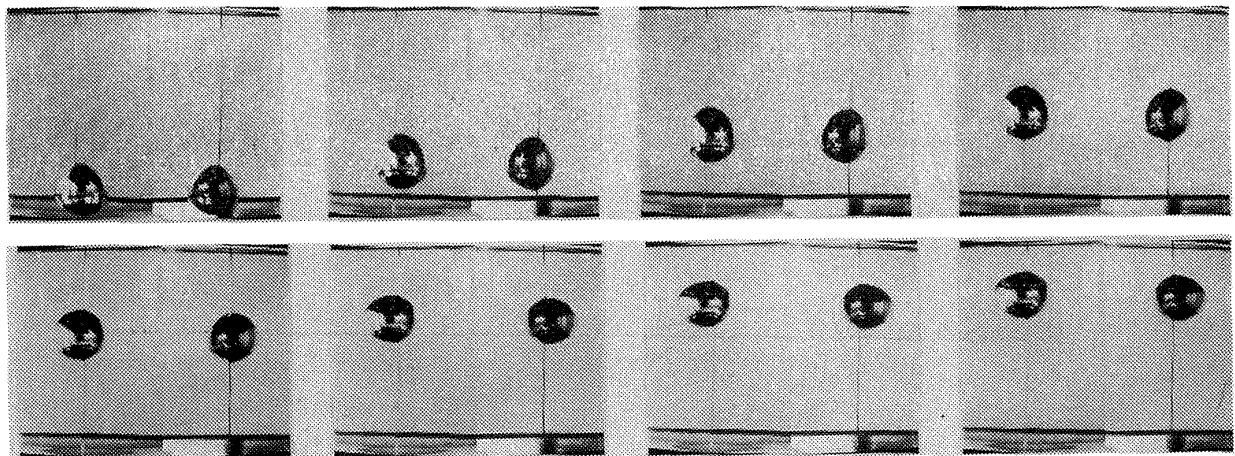
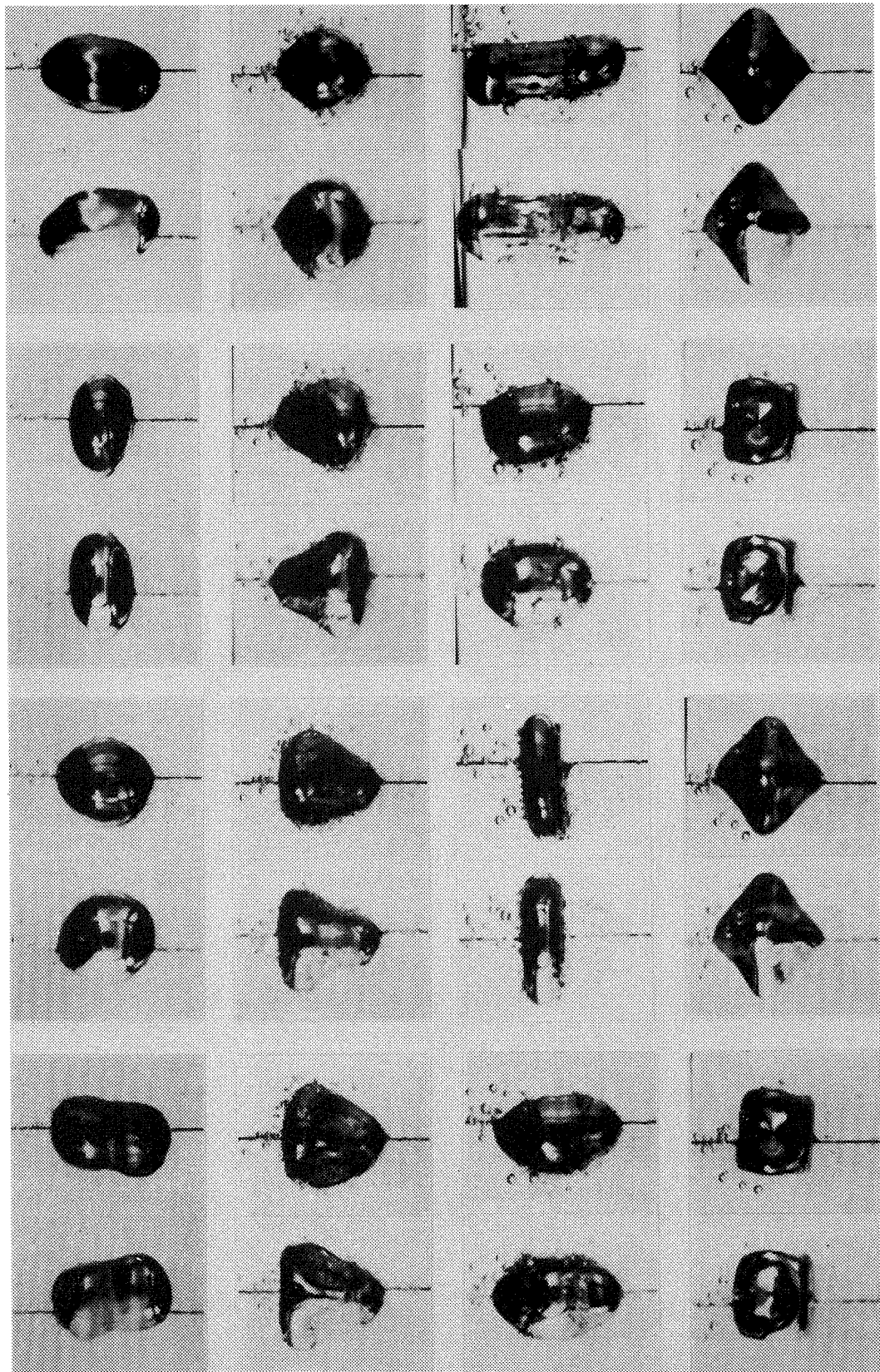


図11 3次元振動実験結果 ($R_0 = 0.5\text{cm}$, $V_{ac} = \pm 0\text{V}$, 液滴の振動数 $f = 0\text{Hz}$)



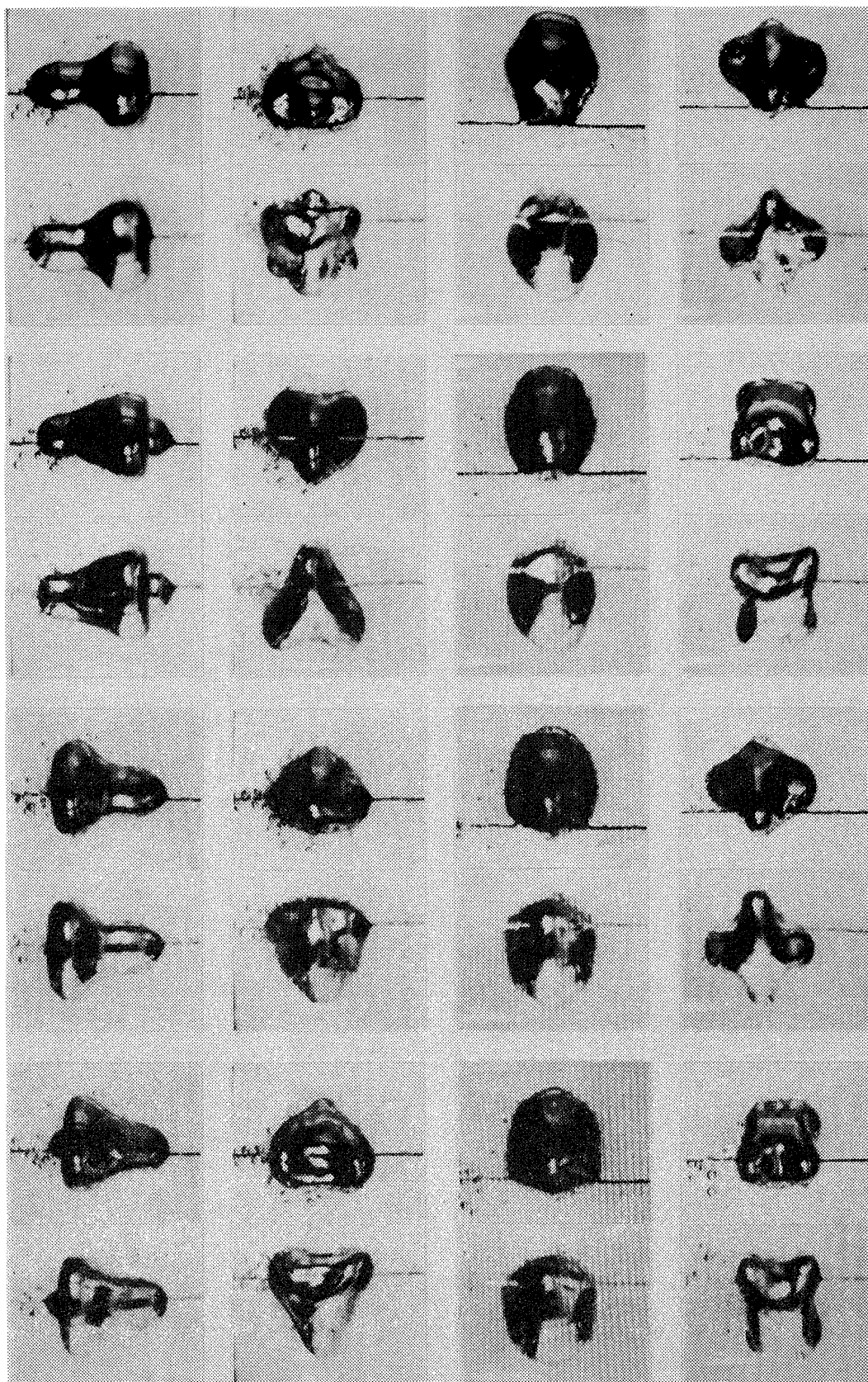
2 Hz
偏円 - 平板
 $l = 2, m = 0$

3 Hz
正 4 面体 - 正 4 面体

3.5 Hz
偏円 - 平板
 $l = 2, m = 0$

7 Hz
正 6 面体 - 正 8 面体

図12-1 3次元振動実験結果 ($R_0 = 0.5\text{cm}, V_{ac} = \pm 20\text{V}$)



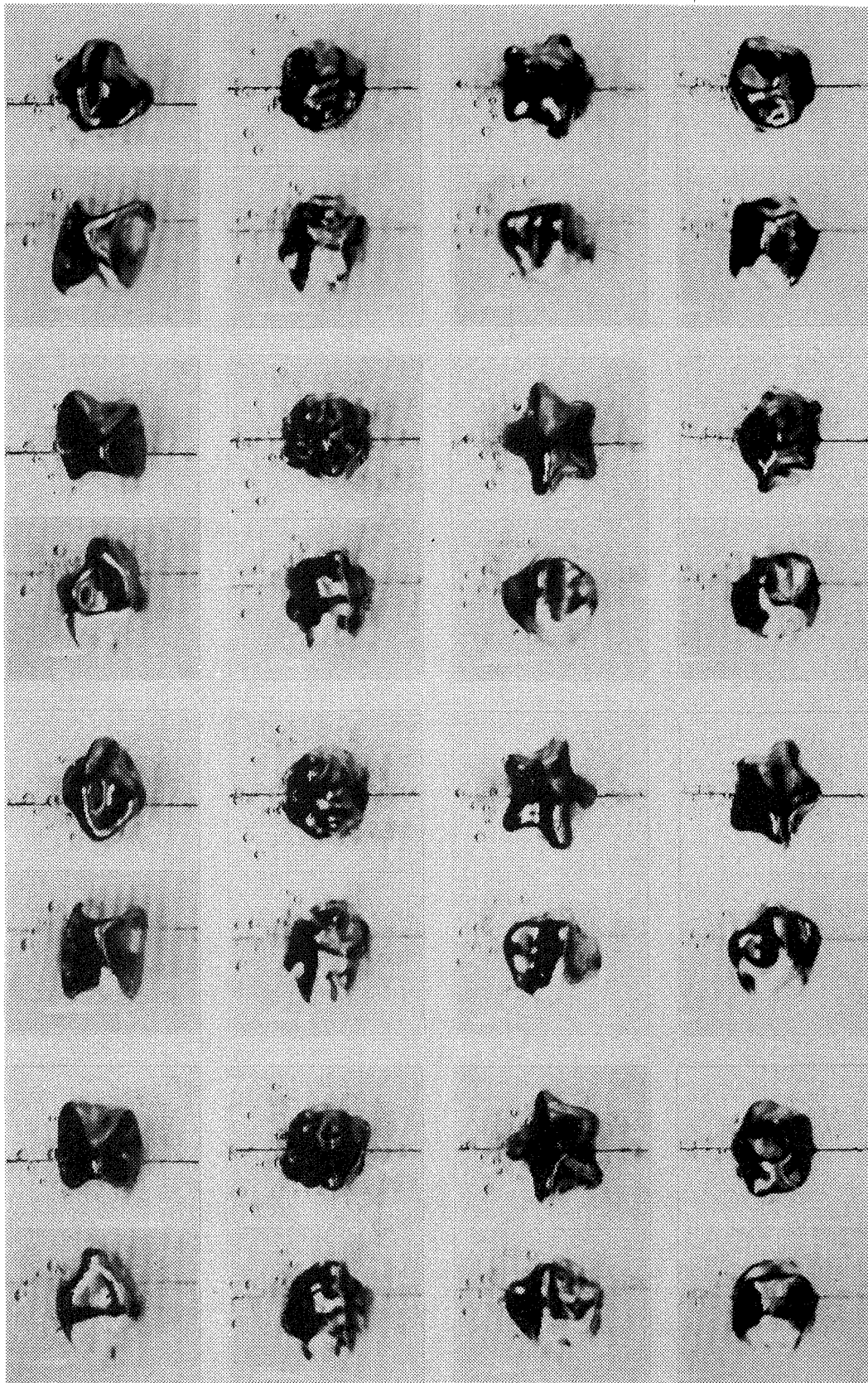
8 H z

9. 5 H z
 $l = 3, m = 0$

1 3 H z

1 4 H z
 $l = 4, m = 0$

図12-2 3次元振動実験結果 ($R_0 = 0.5\text{cm}, V_{ac} = \pm 20\text{V}$)



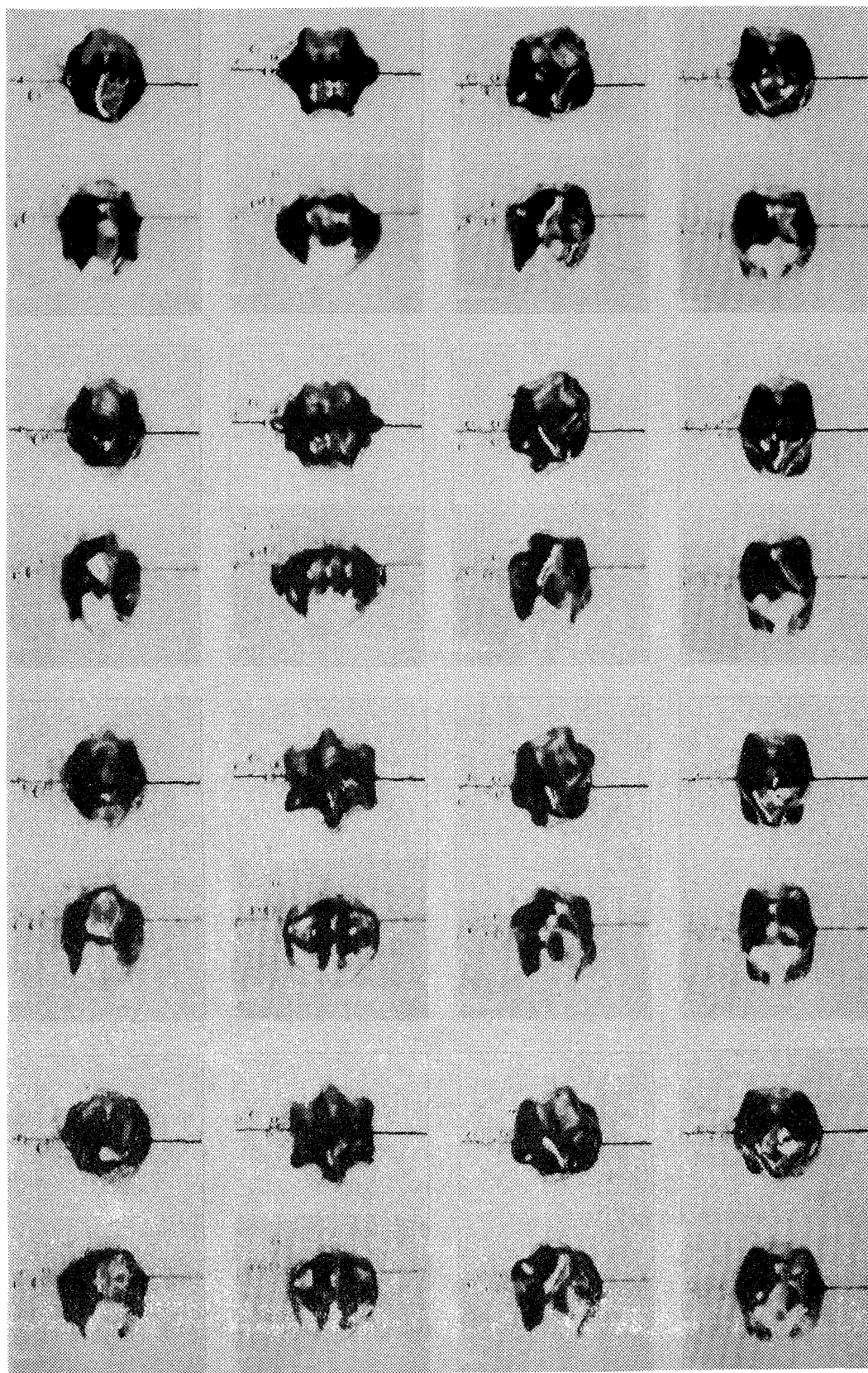
1.4 Hz

1.5 Hz

1.8 Hz
 $l = 5, m = 0$

2.2 Hz

図12-3 3次元振動実験結果 ($R_0 = 0.5 \text{ cm}, V_{ac} = \pm 30 \text{ V}$)



2 5 H z
正 12 面 体

2 6 H z
 $l = 6, m = 0$

2 9 H z

3 0 H z
正 12 面 体

図 12-4 3 次元振動実験結果 ($R_0 = 0.5 \text{ cm}, V_{ac} = \pm 30 \text{ V}$)

間隔は1/30毎(ただし, 2Hz, 3.5Hzは2/30秒毎)である。

水銀液滴に加える周波数を増加させて行くに従い表面の球からの変位を球面調和関数,

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = P_l^m(\cos\theta) e^{im\phi}$$

で表すと, $m=0$ 次モードの振動パターンで $l=2, 3, 4, 5, 6$ 次モードの準2次元的振動パターンが, $l=2$ 次モードから順に $l=6$ 次モードまで観測された。また, $m=0$ 次以外のモードの振動パターンも観測され, その中で正多面体の振動を繰返す振動パターンが観測された。正4面体と正4面体の振動を繰返す振動パターンは, 加えた周波数が6Hz, 液滴の振動数で3Hzにおいて扁円と平板の振動を繰返す振動パターンの中で観測された。正6面体と正8面体の振動を繰返す振動パターンは, 加えた周波数が14Hz, 液滴の振動数で7Hzで観測された。正12面体と正20面体の振動を繰返す振動パターンは, $m=0, l=6$ 次モードの振動パターンが起きる振動数の近傍で観測された。

正多面体についてはプラトンの正多面体として正4面体, 正6面体, 正8面体, 正12面体, 正20面体の5つが知られている。一般に, 正多面体の各面の中心を結ぶとその点を頂点とする多面体が

現れる。これをはじめの正多面体の双対多面体といい, 正4面体は自分自身と双対であり, 正6面体と正8面体, 正12面体と正20面体とは互に双対である。図13に3種類の双対関係にある正多面体を示す。

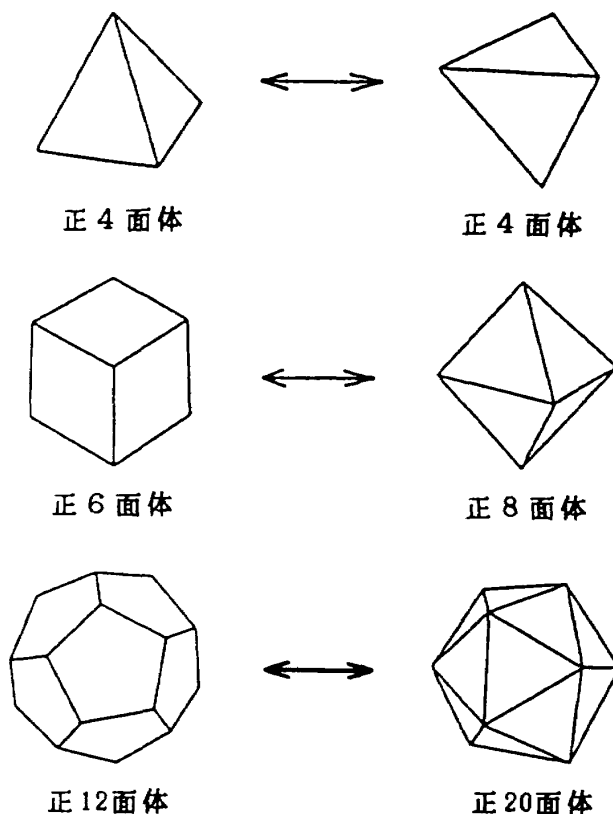


図13 双対の関係にある正多面体

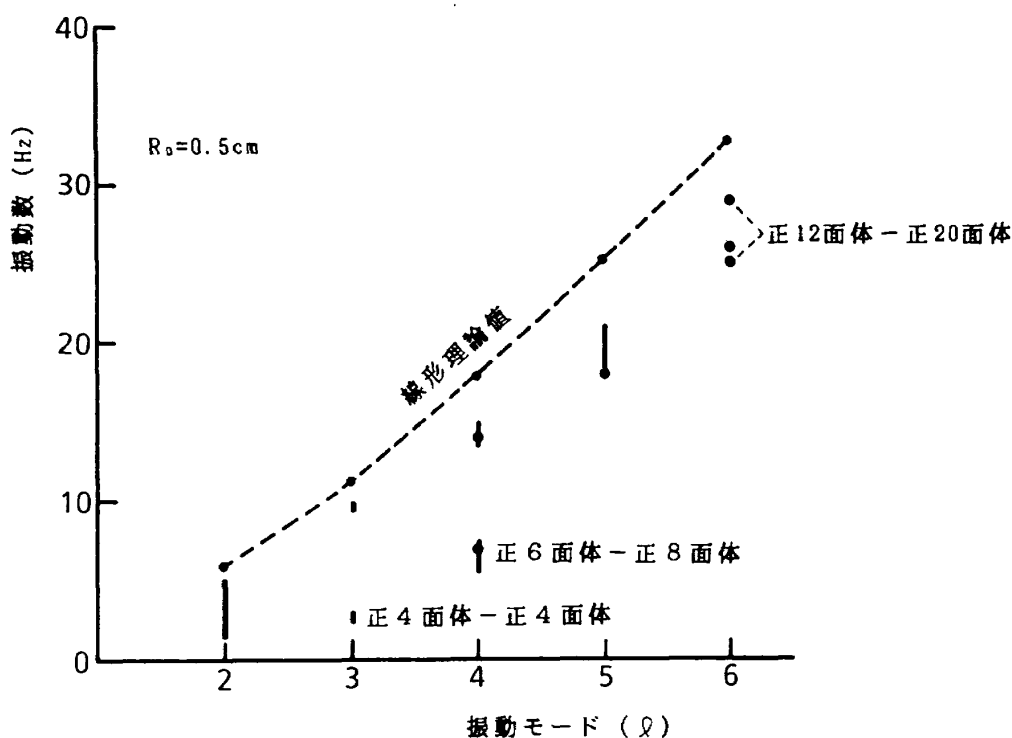


図14 3次元振動水銀液滴の各振動モードにおける振動数と線形解析との比較

図14に水銀液滴の各モードの振動パターンにおける振動数を線形理論式より求めた値と共に示す。この図で示すように双対関係にある各多面体の振動数の実験値は全て線形理論値からずれている。このことは水銀液滴の大振幅振動による効果が現れているものと考えられる。なお、正4面体は $l=3$ 次に正6面体は $l=4$ 次にそして正12面体は $l=6$ 次の振動モードに分類した。

また、以下のことがこの低重力下実験結果から言える。

- (a) 正4面体—正4面体 ($l=3$) の振動数は、3次 ($m=0$, $l=3$) の振動モードの振動数の1/3で現れた。
- (b) 正6面体—正8面体の振動は、4次 ($m=0$, $l=4$) の振動モードの振動数の1/2で現れた。
- (c) 正12面体—正20面体の振動数は、6次 ($m=0$, $l=4$) の振動モード近傍で現れ、また、その1/2の振動数でも現れた。

4. ま と め

電氣的に水銀液滴を振動させる方法を用いることによって、容易に大振幅の振動試験が行えるようになり、1G下における2次元的な振動実験と落下塔を用いた低重力下での3次元振動実験を行い次の結果を得た。

- (1) 水銀液滴の振動数は、加えた交流電圧の周波数の半分の振動数で振動することが確認できた。
- (2) 2次元振動実験では2次モードから7次モードの振動パターンまで観測し、それらの正確な振動数を求めることができた。

- (3) 3次元振動実験では2次モードから6次モードの振動パターン ($m=0$ 次振動モード) まで観測することができた。
- (4) 双対関係にある正多面体の振動パターンを観測し、それらの正確な振動数を求めることができた。

5. 参 考 文 献

- 1) Lamb, H. 1932, Hydrodynamics, 6th ed. Camdrige University Press.
- 2) Trinh, E. and Wang, T. G. ; "Large-amplitude free and driven drop-shape oscillations : experi-mental observations", J. Fluid Mech. (1982). Vol.122, pp.315-338.
- 3) Rodot, H. A. and Bisch, C. ; "Oscillations de vnlumes liquides semi-libres en microgravite-Experience ES326 dans Spaselab 1-", (1984), 5th European Symposium on Material Sciences under Microgravity, ESA SP-222, pp.23-29.
- 4) 宝谷紘一 ; "リボソームの動的構造を見る", 第47回膜研究会講演録, 昭和61年6月, MEMBRANE Vol.12 : No.5.
- 5) K. Adachi and R. Takaki ; "Vibration of a flattened drop. I. Observation", Journal of the Physical Society of Japan, (1985), Vol.53, pp.4184-4191.
- 6) 荻原装千男, 吉原正一, 東久雄 ; "落下塔による低重力環境試験の改善", 1988, 航空宇宙技術研究所報告書 TR-991.

航空宇宙技術研究所報告1143号

平成4年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18
