

微小重力空間における液状物質による造形の創作研究

16602010

平成 16 年度 – 平成 17 年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (C)) 研究成果報告書

平成 18 年 3 月  
研究代表者 野村 仁 (京都市立芸術大学美術学部教授)

## ■ はしがき

本報告書は、科学研究費補助金（基盤研究（C））による「微小重力空間における液状物質による造形の創作研究」（平成16年度～平成17年度、課題番号16602010、研究代表者 野村 仁）の研究成果をまとめたものである。

## ■ 研究組織

研究代表者：野村 仁

京都市立芸術大学美術学部教授

研究分担者：藤原隆男

京都市立芸術大学美術学部教授

研究分担者：砥綿正之

京都市立芸術大学美術学部助教授

## ■ 研究発表

### ● 口頭発表

野村仁・藤原隆男・砥綿正之

「微小重力下における液状物質の造形実験」京都市立芸術大学＋JAXA 共同研究報告会「宇宙のこころ、地球のこころ」2004年11月22日

藤原隆男 "Artistic Approaches to Space:

A Joint Research with JAXA "9th Workshop and Symposium on Space and the Arts (Yverdon-les-Bains, Switzerland) 2005年5月21日

### ● 出版物

福嶋敬恭・野村仁・松井紫朗・中原浩大・砥綿正之・池上俊郎・藤原隆男・井上明彦

「宇宙への芸術的アプローチ 共同研究成果報告書」(CD-ROM)、宇宙航空研究開発機構、2004年11月

福嶋敬恭・野村仁・松井紫朗・中原浩大・砥綿正之・池上俊郎・藤原隆男・井上明彦、「宇宙への芸術的アプローチ 共同研究最終成果報告書」(2分冊)、宇宙航空研究開発機構、2005年3月

## ■ 交付決定額 (配布額)

金額単位(円)

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	2,100,000	0	2,100,000
平成17年度	1,600,000	0	1,600,000
総計	3,700,000	0	3,700,000

## 目次

1. 概要
  2. 微小重力空間における液体の特性 - なぜ液状物質か？
  3. 液体を使ったこれまでの実験
  4. 実験
    - 4.1 Kundt の実験
    - 4.2 ループに保持した液滴
    - 4.3 水平な面上の液滴
    - 4.4 水中の液滴
  5. 創作
  6. まとめ
- 文献
- 付録
- A.1 円形膜の振動
  - A.2 球の振動

## 1. はじめに

国際宇宙ステーションの日本実験モジュール「きぼう」の打ち上げが目前に迫った。その「きぼう」について、宇宙航空研究開発機構が人文科学分野の利用への道を開いていることから、いよいよ微小重力環境において芸術的実験を行うことが可能になりつつある。微小重力空間における系統的な芸術実験は日本が世界的にみても最初であると思われるが、そのような状況にある現在、本研究で考案された実験が国際宇宙ステーションの正式プログラムとして実現する可能性が十分にある。また、本研究を通じて、美術に宇宙あるいは微小重力という新しい観点が導入され、研究者・造形作家の創作活動に影響をもたらすことが期待される。さらに、研究成果を公開することで、一般の人々に対して宇宙の直観的理解を促すことができると思うものである。

現在のところ、宇宙に長期滞在できるのは、訓練を受けた宇宙飛行士に限られ、一般の人々は、宇宙飛行士の言葉や映像などの記録を通じて、宇宙という新しい生活環境や宇宙からの視点について想像するほかなかった。ここにきて、国際宇宙ステーションのモジュール建設をさらに一段進めるために、日本人宇宙飛行士が宇宙空間で活躍し、その後も滞在するというミッション・スケジュールがあらたに組まれるようになった。このような時期を迎え、宇宙から世界を見る視点が今まで以上に身近なものとなり、多くの人々に共有されることは、最近の不透明な世界にとっても、極めて重要なことである。

現況を以上のように認識し、我々は本研究の目的のひとつとして、誰もが直接体験することの困難な宇宙について、人々に受け入れやすい形で提示する方法の検証をとりあげた所以である。宇宙を目に見える形で示し、人々の宇宙に対する直観的理解を助け促すことは、表現者である芸術家にとっても大切なことである。芸術家が直接宇宙へ行くことの難しい現状においては、宇宙飛行士との交流を通じて、宇宙環境の特質を理解しつつ、彼らに代わって「宇宙」を提示しようとするものである。

我々は、重力の有無によって大きな影響を受ける液状物質を使って上記の目的を実現するために、すでに本研究の以前から数年間にわたって、宇宙開発事業団（現宇宙航空開発研究機構）の委託研究および共同研究として、内外の宇宙関連諸施設の視察、文献などを通じて、宇宙環境の理解を深めてきた。また航空機でのパラボリックフライトによる短時間の低重力環境を利用して予備的な実験を行ってきた。その過程で、液状物質を用いた造形が宇宙の直観的理解にふさわしいものである、との認識を得るに至った。この予備的研究を発展させて本研究を推進する契機となったのは、宇宙飛行士との面談において、刻々変化する液状物質の観察と、それに基づいた美術的創作に意義があり、新しい環境である宇宙を直観的に理解できる「モノ」を提示することが重要であるとの認識で一致し、その実現に向けて展望が開かれたことであった。

宇宙で得られる微小重力の環境は、芸術の分野にとっても重要である。本研究のもうひとつの目的は、宇宙空間特有の微小重力を利用した、地上ではできない新しい造形表現を見つけることである。その実現は重力に縛られた地上環境での表現にもさまざまな影響をもたらすと思われるが、同時に、地球こそ、重力の存在する生命に満ちた特別な環境であることを今一度人々に喚起することをあわせて期待している。

## 2. 微小重力空間における液体の特性

### － なぜ液状物質か？ －

液体、あるいは液状物質は、これまで芸術の分野でも美術表現にしばしば取り入れられてきた。しかし、地上では液体は重力によって押しつけられるので、その保持には容器が必要であり、静止している液体の表面は、基本的には重力のために水平になる。その強い重力場の中で、液体を変形させコントロールして表現に利用するためには、つぎのようないくつかの方法があるが、それぞれに問題点がある。

#### ●小さい液滴を用いる方法

地上では、表面張力が重力に打ち勝つのは、液体のスケールがきわめて小さい場合（たとえば1cm以下）に限られる。この場合、たとえば水の王冠のような表面張力による現象を利用した表現をしようとすると、対象は必然的にミリメートルのサイズのものになる。また、このスケールでは液体の運動がきわめて速くなるので、高速度撮影による映像や近接写真でしか見ることのできない世界になってしまう。

#### ●落下する液滴を用いる方法

たとえば噴水のように空中に放出された水は、落下するまでのしばらくのあいだ、空気による抵抗があるものの、ほとんど無重力状態になるため、球状になる。また、ノズルから出たばかりの水は柱状になっており、不安定のため分裂して水滴になるまでの短い時間であれば、水柱として運動する。水のこのような性質を利用した噴水は、水による造形表現のひとつである。ただ、個々の水滴の継続時間は、落下するまでの短時間に限られる。また、大きい水滴は、落下中に風で分裂してしまうので、小さい水滴しか実現しない。水柱はさらに不安定で、すぐに水滴に分裂してしまうので、小規模なものに限られてしまう。このように、個々の液滴の継続時間が短く、また液滴が動いているので風の影響を受けやすいなど、落下する液滴を使う表現には多くの制約がある。

#### ●浮力を利用して重力を擬似的に消す方法

液体を、密度がほとんど等しい別の液体の中に液滴として浮遊させることで、重力の影響を消すことができる。もちろん、液体が混ざり合わない、浮遊する液滴が容器に付着しない、などの条件を満たす物質でなければならない。このばあい、擬似的に無重力が実現しているので、液体が表面張力によってゆっくりと振動する様子を見ることが可能であるが、現実には液体を容器に収める必要があるため、内部の液体を自由にコントロールすることはむずかしい。

#### ●強い磁場と磁性流体を用いる方法

磁場に反応して形を変える磁性流体は、美術表現にしばしば使われる。しかし、重力に打ち勝つような強い磁場で液体を押しさえ込むため、液体の表面張力を活かした造形や液体の振動を使った表現には向かない。特殊な形の磁場を使って磁性流体の液滴を空中に保持することもできるが、磁性体が磁場の影響を強く受けるため、液体特有の表面張力による動きを引き出すことはやはりむずかしい。

以上のように、地上での液体を用いた造形には、重力に起因するさまざまな制約が付きまとうのが現実である。いっぽう、微小重力環境では、重力が事実上ないため、液体をコントロールし変形させることが容易になる。また、液体を空中に保持することが可能であるため、基本的に容器を用いない表現ができる。地上では見られないような、液体による造形表現が可能となるわけである。他方で、重力がないことに起因する問題も発生する。以下では、微小重力環境での液体の特徴について整理してみよう。

### (1) 表面張力

微小重力環境では、液体の形状を決める力として表面張力が支配的になる。たとえば、宙に浮いている液体は表面積を最小にしようとする結果、球状になる。また、容器に入れられた水では、水が容器の壁面を覆う結果、中央に気泡が現れるが、気泡の形もまた球形である。

微小重力環境と地上での表面張力の違いを知るためには、液体の表面に起こる波を調べると分かりやすい。地上では、液体の表面に波を起こす復元力は、重力と表面張力である。この2つの復元力の大小関係を水について調べてみると、室温の水の場合、波長がきわめて短いときには表面張力が支配的になり、表面張力波（いわゆるさざ波）が見られる。しかし、波長が約1.7cmを超えると、重力による復元力が勝るため波は重力による表面波になってしまう。表面張力が支配的になるのは、波長がきわめて短い、細かい波に限られるのである（図2-1参照）。このように、地上の水では、表面張力が重要や役割を果たすのは1cm程度よりも小さいスケールに限られ、それよりも大きいスケールでは重力が表面張力の影響をかき消してしまうことになる。水滴を撥水性の面に置いたとき、水滴の大きさが1cm程度を超えると水滴が重力のために扁平になってしまうのも、同じ事情による。

ところが、微小重力空間では、重力が存在しないので、波長が長くなっても表面張力波が支配的なままである。また、波長が長いとき、表面張力波は周波数が低く速度も小さいので、ゆっくりと液体の表面を揺らす波になる。例えば、波長10cmの波では、周波数は約0.7Hzになる。これは、心臓の鼓動よりも遅い、のたりのたりと振動する波である。このように、微小重力環境では、水の表面を伝わる波は基本的に表面張力波であり、その周波数は、波長が長いときはきわめて低く、人間の動作の時間スケールになる。また、液体のサイズを大きくすることで、粘性による減衰の効果を相対的に弱くすることができるため、いくつもの振動数が混じり合った振動が長時間持続することになる。

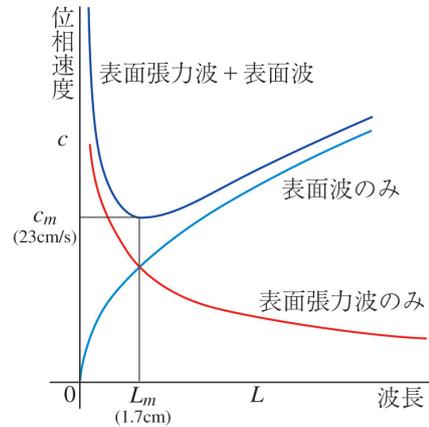


図2-1: 地上の水に発生する波の速度

## (2) 泡の発生

微小重力環境では、静水圧がなく重力による成分の分離が起こらない。そのため、液体中に発生した泡が表面に出てこないで、泡は容易には消えない。したがって、液体を使った実験やパフォーマンスを行うときは、泡ができないよう留意する必要がある。

## (3) 液体の保持の方法

微小重力環境では、容器を用いず、液体を空中に浮かべることができる。たとえば、宇宙には飲料用の水があるので、水は宇宙で最も簡単に手に入る液体である。ただし、宇宙船内で水を扱うときは、大量の水が室内に出て機器に侵入するとトラブルを起こすので、何らかの方法で液体を保持して飛散や流出を防がなければならない。

宇宙での材料実験においては、静電気・磁場・気流・超音波など、さまざまな方法が材料の保持に利用されているが、これらは機材を必要とするので、液体による造形実験にはあまり適さない。宇宙で液体を保持する方法としては、簡単な道具を液体に直接接触させる方法が宇宙飛行士たちによって試みられている。面積があると水が付着してしまうので、保持に使う道具としては、面積の小さい線状のものに限られる。水球の中に糸を通して保持する、水球の両端に紐状のものや細い棒を差し込んで保持する、水球を針金のループにくっつけて保持する、などの方法が実際に使われた。とくに、ループで保持する方法は、水を球状にするときだけでなく、薄い膜やレンズ状にするときにも使えるという点で優れていると思われる。

## (4) 表面張力対流（マランゴニ対流）

一般に表面張力は温度が高いと小さくなるので、液体の表面の一部が高温になると、そこから周囲に向かって表面が広がることにより対流が生じる。対流が激しいときは波が発生する。表面張力対流は地上でも見られるが、微小重力環境では、重力による波がなくなるため、より顕著にみられる。宇宙船内で実験を行うとき、たとえば懐中電灯で照明を当てただけでも、液体の表面が暖まって対流が起こったりするので、注意しなければならない。

以上で見てきたように、微小重力環境でもっとも顕著になるのは、液体の表面張力の働きであると思われる。微小重力環境では、液体は何も力を加えないと球になる。また、液体の球や膜に振動を加えると、液体には表面張力波が立つ。その波は周波数の低いゆっくりとした波であり、しかも長時間持続する。静止した液体の球も振動する液体の球も地上では見られないものであり、宇宙の微小重力環境を印象的に表現する方法として検討に値するものであると、われわれは考えたわけである。

### 3. これまでの液体を使った実験

宇宙飛行士にとって微小重力空間での水を使ったパフォーマンスはたいへんおもしろいようである。実際、多くの宇宙飛行士がフライトの中で水を宙に浮かせている。たとえば、毛利宇宙飛行士は、STS-47 ミッション(1992)で、食料として持ち込んだ塩漬けの桜を水球に入れて、水中花を作って見せた(図3-1)。また、土井氏も、水球を浮かせるパフォーマンスを行っている(図3-2)。

微小重力環境での、液体(主として水)を使った系統的な実験は、NASAのSkylab(1973-1974)で実施された一連の理科実験の中で行われたもの(SP-401, Skylab Classroom in Space)が挙げられる。これらの実験は、公募で集まった子供たちの提案から選ばれたものであった。また、国際宇宙ステーションで2002年から2003年にかけて長期滞在したD. Pettit宇宙飛行士が、余暇を利用して多数の理科実験を行ったが、その中には水や液体を使った興味深い実験やパフォーマンスがいくつも含まれていた。以下では、宇宙で行われた、主要な液体を用いた実験についてレビューする。

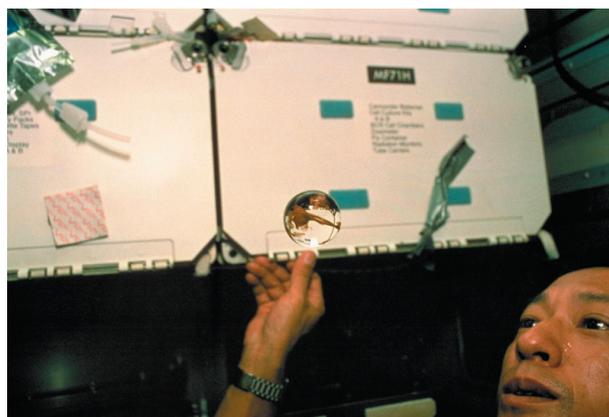


図3-1: STS-47 ミッション(1992)で  
水中花を作る毛利宇宙飛行士(写真: NASA/JAXA)

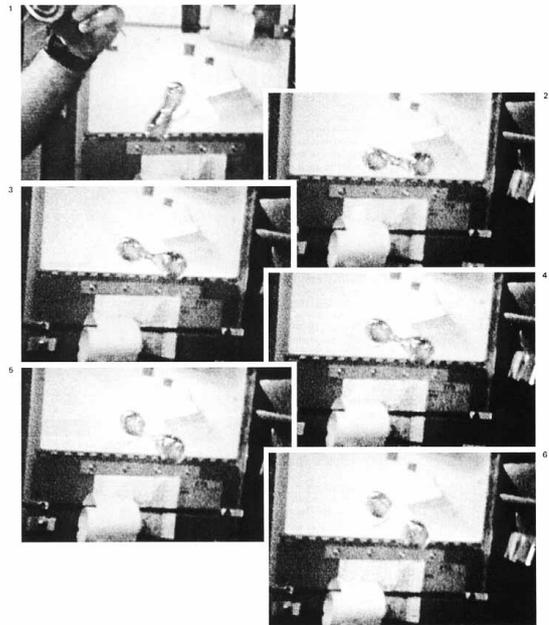


図3-2: ミッション(1997)で  
水で遊ぶ土井宇宙飛行士(写真: NASA/JAXA)

## 2-1 Skylab Classroom in Space

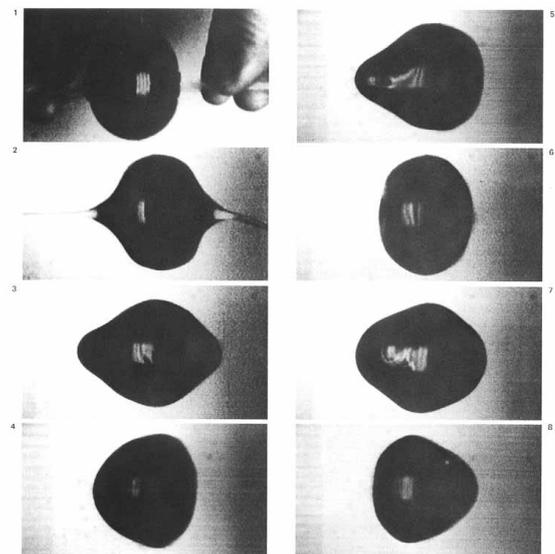
### ●浮遊した水球の回転による分裂 (図3-3)

宙に浮いた水の球に糸を通し、水の球を回転させる。球ははじめ扁平な回転楕円体になるが、回転速度を上げるピーナツ状に変形し、さらに速度を上げると不安定になってほぼ等しい2つの球に分裂する。



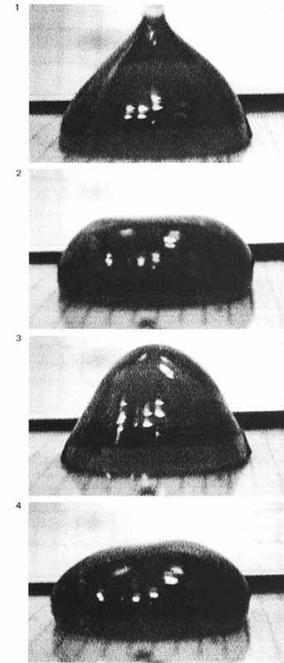
### ●液体の振動 (図3-4)

宙に浮かせた液体の球の両端に紐を差し込み、球を押ししたり引いたりして振動させる。球は、表面張力によって長時間伸縮を繰り返す。振動は粘性のためゆっくりと減衰し、30分ほどしてようやく静止する。



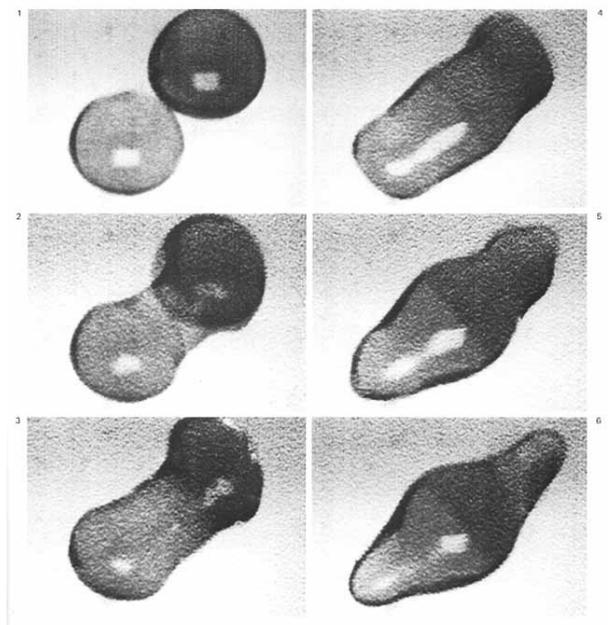
●壁面に付いた液体の振動 (図3-5)

面に付着させた半球状の液体に、面と垂直な方向に振動を与えると、球の場合と同様に伸びたり平たくなったりという振動を繰り返す。



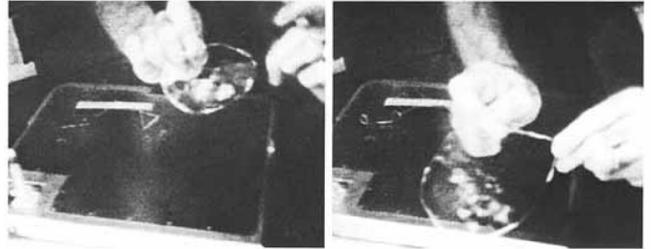
●液体の合体 (図3-6)

宙に浮いた液体の球どうしをぶつけて合体させる。相対速度が小さいときは、二つの球は合体してしばらく振動を続ける。相対速度が大きくなると、衝突のあとの運動を表面張力では引き止めることができず、また二つに分離してしまう。



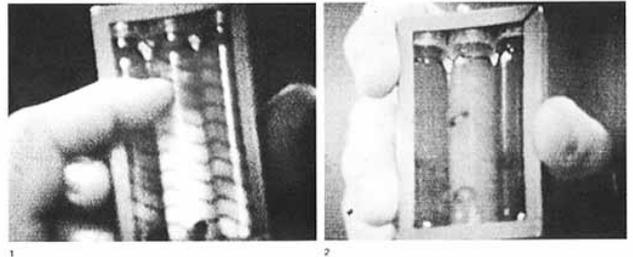
●水の膜 (図3-7)

サイズを変えられる投げ縄状のループ、一辺がスライドする長方形のループなどに水の膜を作る実験では、直径3インチもの大きな水の膜を作ることができた。このようなサイズの水の膜は、地上では重力のため実現不可能である。石鹼水を使うと、さらに薄い膜を作ることができる。石鹼水の膜は、地上でも大きいものを作ることができるが、宇宙の方がずっと長持ちする。



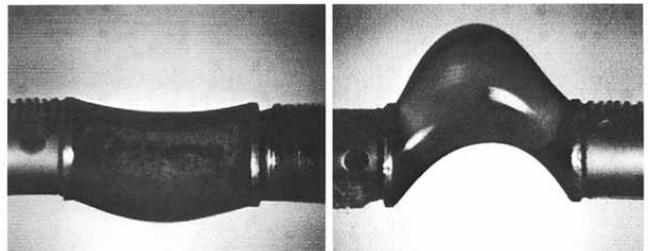
●懸濁液 (図3-8)

3本の試験管に入れた水と油の混合物（混合比が異なる）を勢いよく揺すったあと放置する。地上ではすぐに成分が分離するが、宇宙では10時間経ってもほとんど変化がなかった。



●浮遊帯法 (図3-9)

容器を用いずに結晶を成長させる方法である Floating Zone 法（浮遊帯法）のデモンストレーションのため、金属棒で挟まれた領域に水を保持して回転させたところ、写真のような縄跳び運動が起こり、回転を上げると中央で切れてしまった。石鹼を加えて表面張力を下げる、液体の粘度を上げる、などの方法で浮遊帯を安定させることができた。

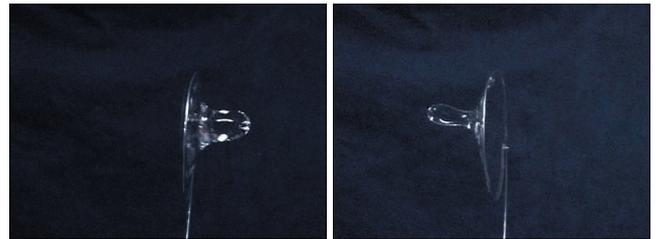


## 2-2 Don Pettit Space Chronicles

NASA のミッションスペシャリストで、科学者でもある Donald Roy Pettit 博士は、国際宇宙ステーションでの 2002 年 11 月から 2003 年 5 月までの滞在の間に、余暇を利用して、自ら考案した多くの理科実験を行った。そのうちのいくつかは、液体を使った造形的にも興味深い実験であった。

### ●水の膜としずく (図3-10)

針金のループに水の膜を作り、面に垂直な方向にゆっくりと揺らすと、膜は表面張力で振動する。膜の振動数に合わせてループを揺らすと、膜は共鳴して激しく振動し、膜の中央から水滴が飛び出す現象が見られた。



### ●水の膜とトレーサー、表面張力対流、色素の拡散 (図 3-11, 3-12)

針金のループに作った水の膜に雲母の粉末をトレーサーとして入れ、膜を面内で回転させると、いわゆる墨流しのような渦巻が見られるようになる。この回転は長時間持続する。さらに、この膜の縁に半田ごてを近づけて加熱すると、表面張力の温度変化によって表面張力対流 (マランゴニ対流) が発生する。対流の方向は、膜の中央から半田ごてに向かうものであった。この向きが、シャーレに張った水による地上の同様の実験と逆であったため、関係者のあいだで話題になった。微小重力環境で作った水の膜は、厚みが場所によって変わるなど、3次元的な構造が地上のシャーレの水と異なることが原因であると思われる。表面張力対流は、水の膜を懐中電灯で照らしただけでも起こった (図 3-11)。



Pettit 宇宙飛行士は、粉末のトレーサーの代わりに着色料を使った実験も行っている。膜の中でゆっくりと色素が拡散していくようすが見られた。ループではなく直方体状の枠に水膜を作る実験も行っている (図 3-12)。



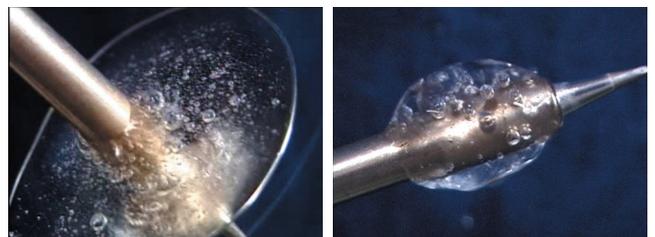
●水膜中の薄い結晶 (図 3-13)

食塩水を薄い膜状にしてループに保持し数日間放置すると、薄い食塩の結晶が析出する。微小重力環境では、地上と違って水の膜が長時間保つので、このような実験が可能になる。



●沸騰する水 (図 3-14)

コテを使って水を沸騰させる実験では、発生した水蒸気の泡がなかなか消えないで長いあいだ沸騰水の中に残っている。気泡がじゅうぶんの大きくなって表面に出てくると、ようやく割れてはじける。また、コテの周辺では激しい表面張力対流が発生する。



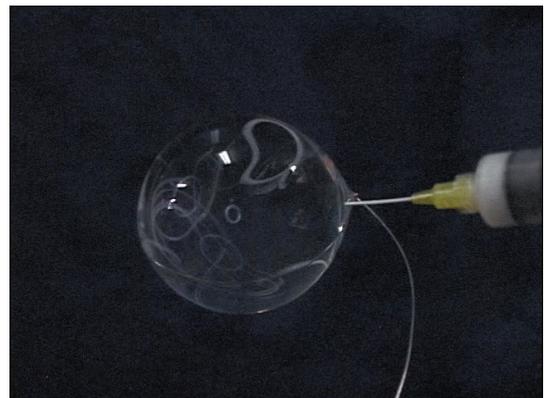
●紅茶 (図 3-15)

チューブから出てきた紅茶を箸で「つまんで」食べることができる。重力がないので、紅茶はかなり大きい液滴にすることができる。また、紅茶の球が濡れ性のため箸に吸い寄せられるので、あたかも紅茶をつまむようにして口まで運ぶことができるわけである。



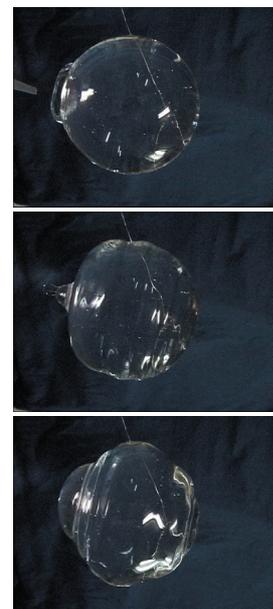
●渦輪 (図 3-16)

スポイトの先に作った白濁液の小さい球を大きい水球に近づけると、接触したとたんに小さい球が大きい水球に吸い込まれて、きれいな渦輪が自然にできる。スポイトを大きい水球に差し込み、白濁液を押し出して渦輪を作ったわけではない。Pettit 氏によれば、水滴が大きい球に吸い込まれて渦輪ができることは予想していなかったそうである。想像力が及ばなかった例として挙げている。



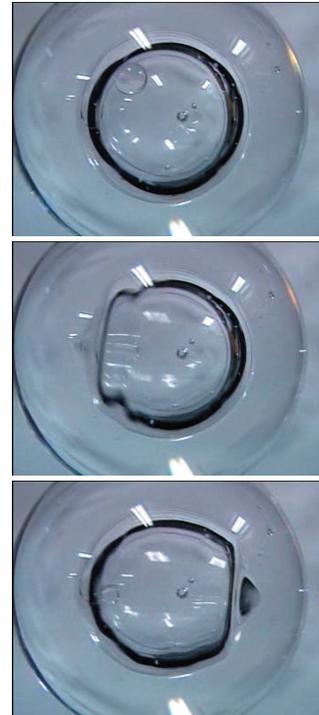
●水球の振動 (図 3-17)

空中に保持した水球に風を吹き付けて波(表面張力波)を起こすと、波が水球全体に伝わり、反対側に達するとまた戻ってくる。波は何度も水球を往復し、水球は長時間にわたって振動を続ける。球が大きいと、粘性による減衰が相対的に弱くなるので、このような長時間の水の動きが楽しめるわけである。



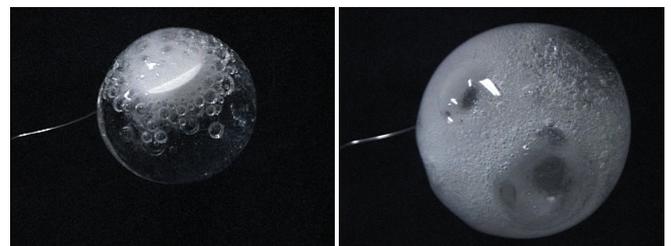
●水球のシンフォニー (図 3-18)

水球の内部に大きな気泡を作り、その中に水滴をたくさん注入する。すると、水滴は予想に反して、周囲の水と接触してもなかなか吸い込まれず、何度も弾む。そして、数回弾んでようやく水に吸い込まれていく。そのとき、合体に伴って発生した波によって、より小さい水滴がまた飛び出してくる。このようにして、内部の中空に入れた水滴は、徐々に小さくなりながら姿を消していくが、それまでのあいだ、長時間にわたって「シンフォニー」を楽しむことができる。また、水の動きの速度がスケールによって全く異なることも印象的であった。小さい水滴が水球に吸い込まれるときは目で見えないほど速いが、大きい気泡、あるいは水球全体の振動はきわめてゆっくりとしたものである（液体の球の振動数については付録 A.2 参照）。速い運動と遅い運動が共存していることも、水球の饗宴を「シンフォニー」と呼んだ理由であろう。水滴が水面で弾む現象を含めて、水球と気泡の振る舞いは、おおかたの予想に反した複雑なものであった。この水球のシンフォニーは、宇宙関係者のあいだでも話題になったようである。水滴が水面に接触してもすぐには吸い込まれず表面で弾むことは、地上でも水面の上の小さい水滴で見られることがあるが、原因は不明とのことである。



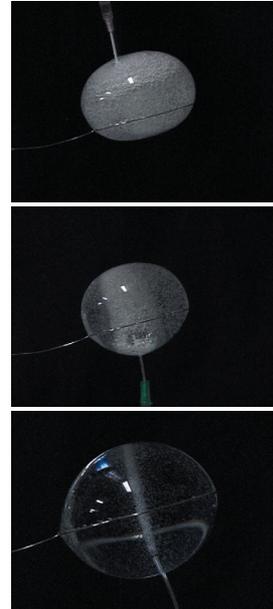
●発泡剤 (図 3-19)

水の球に発泡剤を入れると、泡はなかなか消えず、水球全体をふくらませることになる。泡が合体して大きくなり水面まで押し出されるとようやく割れるが、小さい泡はいつまで経っても消えないで残る。



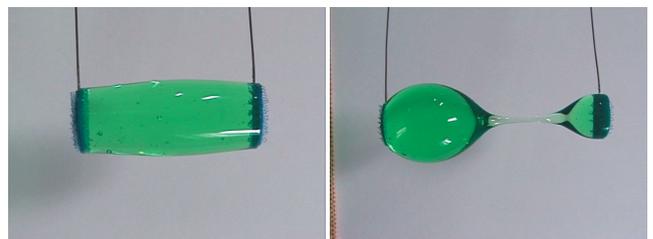
●泡の除去 (図 3-20)

小さい気泡は、そのままではなかなか消えないが、水の球を回転させると、外向きに見かけの重力である遠心力が発生するため、泡は回転軸の付近に「浮いて」来る。これを吸い取れば、泡をきれいに除去することができる。容器に入れた液体の場合、手に持って振り回すなどの方法で泡を「浮かせる」ことができるが、水球を回転させて泡を浮かせる方法は、容器を用いずに泡を除去する方法として注目できる。



・液柱の分裂 (図 3-21)

円柱の間に粘度の高い液体を保持した実験では、円柱の間隔が短いときは液柱が安定して存在できるが、液柱の長さがある限界を超えると不安定になってゆっくりと分裂する。地上で長い水柱 (たとえばノズルから放出された水の柱) が分裂するときは、くびれた部分が慣性のため取り残されて小さい水滴になるため、大きい水滴と小さい水滴が交互に並ぶ現象が観察されるが、粘度の高い液体を使ったためかそのような現象は見られなかったようである。



### 3.3 まとめ

微小重力環境では、表面張力が液体の振る舞いに重要な役割を果たすことが、これまでの宇宙での実験ではつきりしたと言っていいだろう。とくに、地上と違って大きい水球を作ることができるので、(1) ゆっくりとした動きが実現する、(2) 動きの時間スケールが液滴のサイズによって大きく異なる、(3) 粘性による減衰があまりないので水の動きが長時間持続する、ことを特徴として挙げることができる。気泡の除去がむずかしいので、実験では泡を発生させないよう気をつけなければならない。表面張力対流が簡単に起きるので、温度変化にも気をつけなければならない。また、水滴と水球の合体などにおいて、予想できなかったような複雑な現象が見られたことも注目するべきであろう。液体を使った造形実験では、微小重力環境での液体のこのような特徴をよく把握し、予想外の振る舞いが起き得ることも念頭に置いて、液体の特質を生かした実験を想像力たくましく構想しなければならない。

## 4 実験

地上ではできないような造形を宇宙で実現すること、宇宙を一般の人が直感的に理解するのを促すことを目標に、地上での予備的な実験をいくつか行った。宇宙での造形実験の実現に向けて留意したのはつぎの点である。

### (1) 現物を地上へ持ち帰ること

宇宙へ持って行くことができる材料への制約から、これまで宇宙で行われた液体による実験では、結果がもっぱら映像や画像として記録されるにとどまり、モノとして地上へ持ち帰ることが困難であった。映像も印象的ではあるが、現物として地上へ持ち帰りそれを手にすることができるに超したことはない。現物は映像よりもはるかにリアリティがあり、それを手に取ることによって宇宙をより身近に感じることができるからである。

もちろん、液体のまま地上へ届けることは不可能なので、適切な液状の物質を使って微小重力環境で造られたカタチをそのまま固化する必要がある。このとき、たとえば振動している液体を瞬時に固化することは難しいので、液体によって造った形を、固化に必要な時間だけ維持する方法を考える必要がある。このとき、材料には、すでにシャトルや国際宇宙ステーションの搭載されているものか、材料試験をパスするものでなければならない。また、実験は、できるだけ装置を必要としない簡便な方法でできるものが望ましい。

具体的には、固化する液状物質としてたとえば比較的低温で液化する金属（ハンダ、ガリウム）、時間が経つと固化するゲル状物質、ガラスなどが考えられる。このうち、ガリウムは融点が約30°Cと低く体温でも液化する点で興味深いのが、そのままでは材料試験にパスすることが難しく、装置に閉じこめる必要があるので、簡便な実験に向かないであろう。ガラスも、液化に高温を必要とするので、炉や空中に保持するための装置が必要である（文献3）。機器修理用のハンダを転用するか、無害なゲル状物質を捜す必要がある。

液状物質を固化する方法としては、空中に浮かべた液体に音波を当てて音圧で静的に変形させたまま固化する方法、漏斗状の空気吹き出し口に液体の球を保持し、気流で表面を静的に変形させたまま固化する方法などが考えられる。

### (2) 微小重力環境でしかできない造形を行うこと

宇宙での理科実験の一環として、これまでも液体がしばしば取り上げられたように、液体は微小重力環境では地上では見られない興味ある振る舞いを示す。これは、重力がなくなると、液体の表面張力が前面に出てくるためである。液体による実験を単なる理科実験にとどめず、微小重力をより印象づける実験、造形としてのおもしろさを引き出す実験として宇宙で実現に移すために、どのような造形実験が可能か、どのような現象が期待できるか、具体的にどのような点に気をつけるべきか（材料、器具、液体のサイズなど）という点について、これまでの実験を参考にしながら、地上の予備実験で十分検討しておく必要がある。

以上の点を考慮し、実験の宇宙での実現を念頭に置いて、われわれは地上でできるいくつかの実験を行った。具体的には、音波による気柱の共鳴実験（4.1）、ループに保持した液滴の共鳴実験（4.2）、撥水性の面に置いた液滴の共鳴実験（4.3）、水中に浮かべて擬似的に無重力にした油性液体の共鳴実験（4.4）である。

## 4.1 Kundt の実験

液体を固化して地上へ持ち帰るためには、液体を静的に変形させ、固化に必要な時間だけ変形を維持する必要がある。液体を空中に保持し同時に変形させるためには、音波による保持と加圧、ベルヌーイの定理を利用した気流吹き出し口への保持と気流による変形などが考えられる。このうち、音波による方法は、変形した液滴をそのまま静止させることができるので有望である。ただ、地上では、重力があるため、超音波装置を用いて小さい液滴を空中に浮遊させ変形させることはできるが（文献4参照）、大きい液滴を用いた実験は困難である。そこで、物体が音波によって受ける影響を見るために、オーディオ装置による可聴域の音波を用い、物質も水などの液体ではなく軽い発泡スチロールのビーズを用いた簡単な実験を行った。

実験に使用した装置は、図4-1のような、アクリル製の円柱を加工し、オーディオスピーカを取り付けたものである。一本の円柱の場合は、クント (Kundt) の実験、あるいはクント管としてよく知られている実験である。ここでは、複数の方向から音波を当てた影響を見るために、2本の円柱を中央で交差させた装置を作って、交差部分での物体の動きを調べることにした。音の周波数や位相を自由にコントロールするために、音の発生にはコンピュータを用いた。その出力はアンプで増幅してスピーカから音として出した。波形には、もっとも単純な正弦波を用いた。スピーカは、周りを箱で覆い、交差する2本の円柱それぞれの一方の端に取り付けた。円柱の反対側の端はアクリル板で塞いで固定端とした。

気柱を音で共鳴させると、円柱の管の内部に激しい気流が起こり、管の中央と壁面との速度差から、管の直径の数分の一の間隔で渦が発生し、発泡スチロールのビーズが多数の平板となって立ち上がる。これは、通常のクントの実験と同様である。気柱の振動の腹（振幅が大きい部分）では、空気の流速が大きくベルヌーイの定理で圧力が減少するためか、ビーズが集まってくる傾向が見られた。また、振動の節付近にはビーズが停留して小さい塊ができる傾向が見られた。

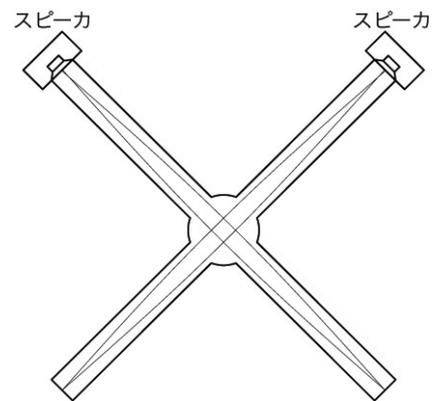


図4-1: 気柱共鳴実験の概念図。低周波数の場合。

図4-1は、円柱に波長の半分がちょうど収まるように共鳴させたときの概念図である。スピーカ側も、固定端と同じように振動の節になっている。図4-2は、装置のほぼ全体と、2本の円柱が交差する付近の拡大写真である。2つのスピーカから出る音の位相は同じになっている。写真からわかるように、中央の交差部分での空気の振動方向は、2つのスピーカがある側とその反対側を結ぶ方向（写真の上下方向）になっている。スピーカ側の2本の気柱の振動が交差部分で重なり、そのまま2本の固定端側（写真の下側）の振動につながっていることがわかる。

つぎの図4-3は、2つのスピーカから出る音の位相を逆にした場合の写真である。このとき、写真からわかるように、交差部分での空気の振動方向は、写真の左右の方向になっている。スピーカを取り付けた2本の円柱がちょうど1本の気柱のように振動していることがわかる。空気の振動の一部は円柱の固定端側（写真の下側）にも伝わっているが、その円柱内のビーズの運動はスピーカ側に比べてずっと小さい。

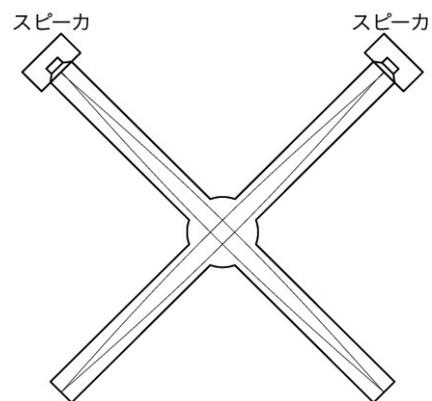


図4-1: 気柱共鳴実験の概念図。低周波数の場合。

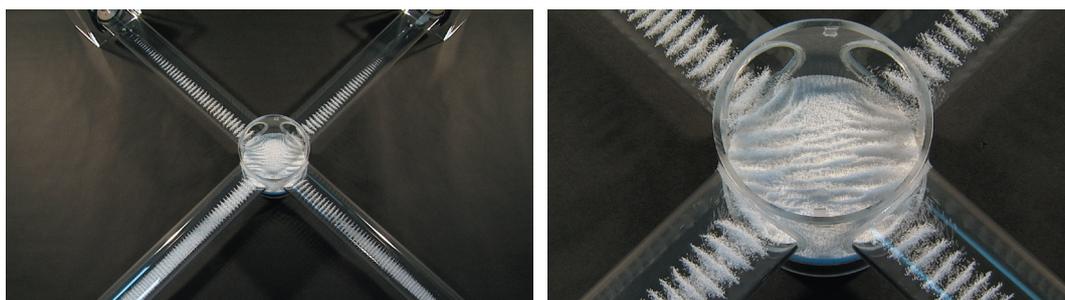


図4-2: 2つの振動の位相が同じ場合。全体（左）と拡大（右）。

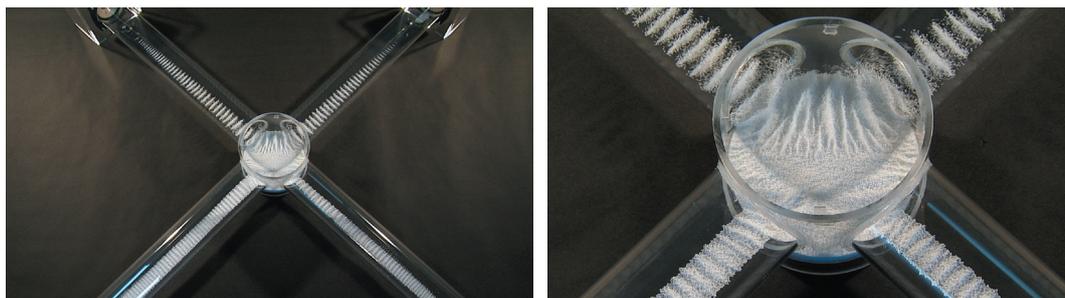


図4-3: 2つの振動の位相が逆の場合。全体（左）と拡大（右）。

図4-4は、周波数を5倍に上げて、2.5波長が円柱にちょうど収まるように共鳴させたときの概念図である。このときも、スピーカ側の端は、固定端と同様に振動の節になっている。また、2本の円柱はちょうど振動の腹の部分で交差するようになっている。

図4-5は、2つのスピーカから出る音の位相を同じにした場合の写真である。低周波数の場合と同様に、スピーカ側の気柱の振動が交差部分重なり、固定端側の気柱の振動へとつながっている。低周波（長波長）の場合に比べて、中央の交差部分でのビーズの振動が（写真での）左右に分かれているように見え、写真の右半分と左半分がそれぞれ1本の気柱として振動しているような印象を受ける。

図4-6は、2つのスピーカから出る音の位相を逆にした場合である。低周波数の場合と同様に、スピーカ側の2本の円柱がつながって1本の気柱のように振動していることがわかる。振動の一部は円柱の固定端側の（写真の下側）にも伝わっているが、振幅は小さい。

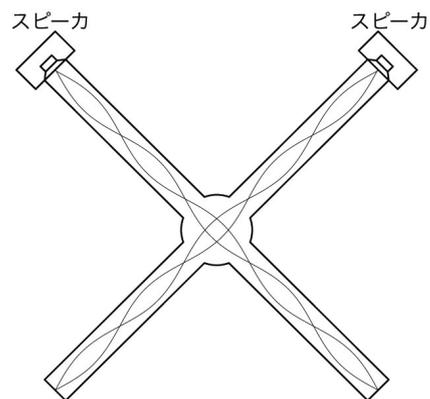


図4-4: 気柱共鳴実験の概念図。高周波数の場合。

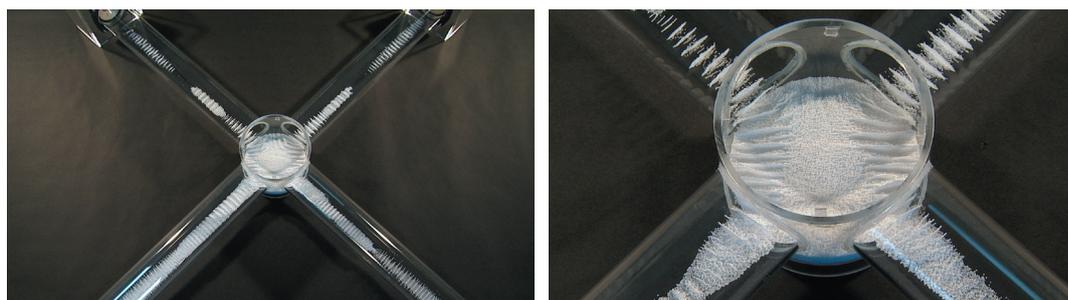


図4-5: 2つの振動の位相が同じ場合。全体（左）と拡大（右）。

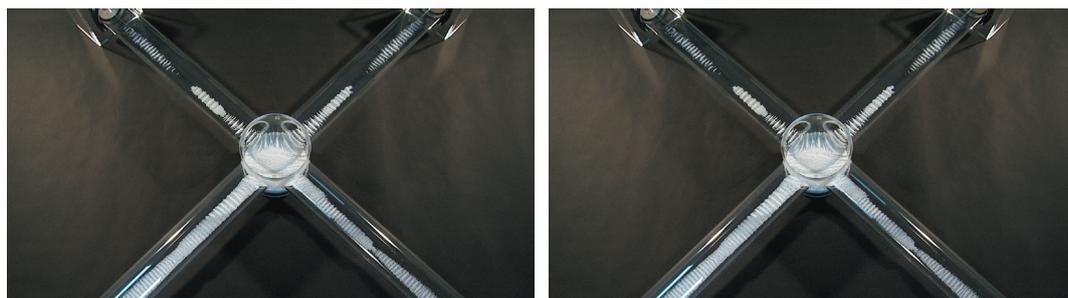


図4-6: 2つの振動の位相が逆の場合。全体（左）と拡大（右）。

以上の写真に挙げたのは、低周波数の場合も、高周波数の場合も、中央の交差部分がちょうど振動の腹に当たる場合である。写真に挙げた波長以外の音でも実験をしたが、中央の交差部分が振動の節に当たる場合は、ビーズはほとんど振動しなかった。全般に、振動の節に、振動しないビーズが小さい塊を作る傾向は見られたが、振動の腹ほど激しい運動は見られなかった。これは、ビーズが重力のために振動の弱い円柱の壁付近に集まってしまうので、やむを得ないことであろう。円柱の中央付近でのビーズの動きを見るためには、何かの方法で（たとえば網を使って）ビーズを宙に浮かせるなどの工夫が必要であたかもしれない。

今回の実験では、水ではなく、軽い発泡スチロールのビーズを用いたが、ものが振動の節に集まる傾向は見られた。宇宙での材料実験でも、資料の保持やコントロールのために超音波を使うことが試みられている（文献4）。このばあいも、資料は超音波の振動の節に集められる。資料が液体である場合、地上でも、超音波を強くすれば小さい液滴の浮遊が可能である。また、液滴を平らに変形したりすることもできる。これが造形に使えないかと考えたわけであるが、超音波は波長が数 cm 以下と短いので、対象の液滴もミリメートル程度の大きさに限られてしまう。また、装置を必要とする。目で見て面白い直径数 cm 以上の液滴を変形させるとなると、超音波よりも波長の長い可聴域の音を利用しなければならない。今回の実験ではかなり大きい音を使ったが、発泡スチロールの動きでわかるように、軽い発泡スチロールでもそれを音で動かすことはたいへんむずかしかった。実際、数値で見積もってみると、表面張力に対抗して液体を変形させるには、耳が耐えられないほどの大きな音を使わなければならないと思われる。音が漏れないように密閉した環境であればともかく、残念ながら大きい液滴を音で静的に変形させることは容易ではないというべきであろう。

今回は実験できなかったが、板や膜の振動の節に微粒子が集まってできる、いわゆるクラドニ (Chladni) 図形の応用として、液体全体を振動させたとき、液体の中に混ぜた微粒子が液体内部に発生した振動の節に集まるといふ 3次元クラドニ図形が知られている（文献5）。微小重力環境では、浮遊する水の球が容易に実現できるので、その中にデンプンなどの微粒子を混ぜて水球全体を音波で共鳴させると、その中で微粒子が多面体のような図形を作ることが期待できる。これは、宇宙で実験する

価値が十分あると思われる。さらに、水の代わりに時間が経つと固化するようなゲル状の透明な物質を使えば、そのパターンを地上へ持ち帰ることも可能であろう。

これも実験できなかったが、液体を変形させる方法として、気流の利用がある。空気の吹き出し口に液体の球を吸い寄せて、気流でその表面に表面張力波（さざ波）の静止した波を作るといふ方法である。地上に巨大隕石がぶつかった際に溶けて飛散した岩石が大気中で固化したと思われる、テクタイトと呼ばれる石がある。その中には、落下中に気流で変形し薄いボタン状になった、興味深い形状のものもある。固化する材料を用いれば、宇宙でこのような形を造って地上へ持ち帰ることも可能ではないかと思われる。

## 4.2 ループに保持した液滴

つぎに、微小重力環境で液体の表面張力が前面に現れることを利用して、液体の膜や球をゆっくりと振動させることを考える。この場合、液体を固化して液体を地上へ持ち帰ることはできなくなるので、実験を映像として記録したり、宇宙飛行士がパフォーマンスする様子を映像として見たりすることになる。

微小重力環境では、大きい液体の球を作り振動させることが可能であるが、地上では液体が大きくなると重力で変形してしまうため、実験ができるのは直径が1cmに満たないような小さい液滴に限られる。Pettit 宇宙飛行士が、国際宇宙ステーションにおける実験で針金のループで水を保持していたことから、われわれも、直径1cm 弱の小さい針金のループに含ませた水に振動を与えて共鳴させる実験を行うことにした。振動を与える方法には、針金を直接機械的に振動させる方法もあるが、ここでは周波数のコントロールが容易なように、スピーカーを使った。スピーカーの音だけでは振動が弱いので、図4-7のようにスピーカーにフードを取り付けて音を集中させ、水滴に当てた。音を当てるといよりも、周期的に変動する気流を当てたと表現する方が適切かもしれない。スピーカーへは、コンピュータで発生させた音を、アンプで増幅して送った。

水滴の振動は、ハイビジョンカメラで撮影し解析した。撮影速度は、通常の 60i (60 フレーム/秒、インターレース) である。水滴が小さいことから、水の厚みや振動のパターンにもよるが、共鳴する周波数は数十 Hz にもなる。したがって、ビデオカメラのコマ数は、水滴の振動の様子が撮影できるぎりぎりのところである。水滴を薄い膜状にすると、地上ではたいへん不安定で、振動させるとすぐに割れてしまう。したがって、実験でループに保持した水は、厚さが3mm 程度の、膜というよりは水滴に近いものとなった。水滴の振動が速いので、眼視では激しく振動していることはわかっても、残像のために振動している最中の水滴の形は全くわからなかった。

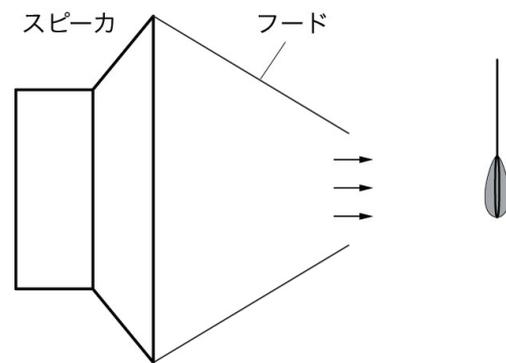


図4-7: ループに保持した水滴の共鳴実験

図4-8は、垂直に立てたループに保持した水滴に、振動する空気を当てて共鳴させた場合の半周期ごとの写真である。水はビデオに写りやすいように白濁させてある。眼視ではよくわからなかったが、ビデオで撮影した映像を見ると、水滴がかなり激しく振動している様子がわかる。この振動は、円形膜の振動とよく似ている。付録A.1で述べたように、一般に一様な円形膜の振動はベッセル関数で表すことができる。この実験では、膜の厚さが一定ではないし、重力のために全体に水滴が垂れ下がっていて上下にも非対称であるが、それでも円形膜の振動と対応づけることができると思われる。図4-8は、円形膜の振動での回転方向の節の個数=1、半径方向の節の個数(円周を含む)=1の場合に相当するモードであると思われる。すなわち、振動の節が水平方向で、上下がそれぞれ逆の位相で振動しているパターンである。振動の周波数は、付録A.1の式で見積もったもの(厚みは平均する)とほぼ一致した。撮影した映像で見ると、眼視で見たイメージよりもかなり激しく水滴が振動していたことがわかった。それにもかかわらず水滴はループに保持されていて、表面張力の強さを改めて認識する映像であった。

別の周波数でも実験したが、水全体が同じ位相でループに垂直に振動するという基本的なモードの振動は、水滴がすぐに飛んで落ちてしまうため観察できなかった。

また周波数を上げた実験では、撮影が困難という事情もあるが、粘性による減衰が強いためか、水滴が細かく振動する程度で、図4-8のような激しい振動は見られなかった。

図4-9は、水滴が落ちにくいようにループを2重にした場合である。ループが1重のときよりも厚い水滴が保持できている。1重の場合と同じく、中央が振動の節になって上下が逆位相で振動するパターンが顕著に見られた。

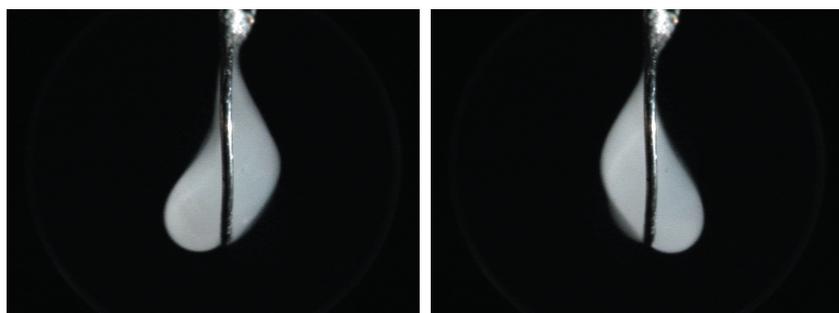


図4-8:  
垂直なループに保持した水滴の振動

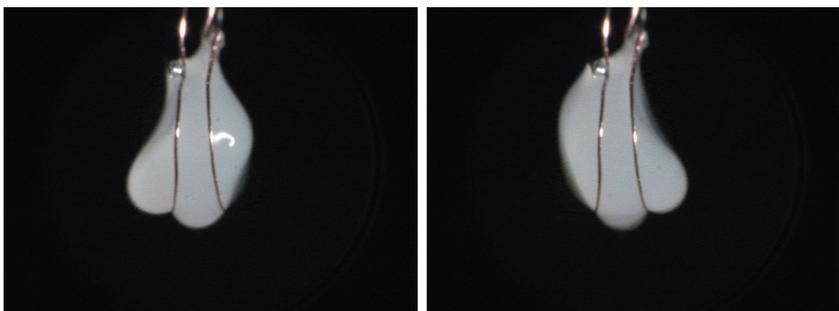


図4-9:  
垂直な2重のループに保持した水滴の振動

つぎに、ループを水平に固定して同様の実験を行った。図4-10は、振動パターンのひとつである。膜と呼ぶには厚みがありすぎるが、付録A.1の円形膜の振動に対応づけると、回転方向の節の個数=0、半径方向の節の個数(円周を含む)=2のパターンに相当すると思われる。すなわち、中央と周囲が交互に逆の位相で振動する、同心円状の振動パターンである。共鳴周波数も付録A.1の式で見積もったものとほぼ一致した。付録A.2には球の振動のパターンも示したが、図4-10の振動は、球面の振動のうち、 $l=3, m=0$ のパターン(下半分)にも対応づけることができる。付録A.2の式で見積もった周波数とも概ね一致した。

周波数を少し上げると、図4-11のようなパターンが現れた。これは、付録A.1の円形膜の振動に対応づけると、回転方向の節の個数=1、半径方向の節の個数(円周を含む)=2のパターンにあたると思われる。周波数も計算とほぼ一致した。また、球の振動でいうと、 $l=4, m=1$ のパターンの下半分に相当すると思われる。これよりも高い周波数では、粘性による減衰のためか目立った共鳴は見られなかった。

以上で見てきたように、ループに保持した水の振動では、円形膜の振動として知られたモードと同様の振動パターンがいくつか見られた。地上での実験では、重力のため小さいループにしか水が保持できないので、共鳴す

る周波数は数十Hzにもなる。また、液滴が小さいため粘性が相対的に強くて、細かい振動は消えてしまうようである。微小重力環境になると、サイズの問題は一挙に解決し、大きな直径のループに水の膜を張ることができる。また、微小重力では水の膜が安定しているため長時間の保持も可能である。粘性による減衰も相対的に小さくなる。これらの理由で、ゆっくりとした見ごたえのある振動を長時間にわたって持続させることができるようになる。Pettit 宇宙飛行士の実験では、ループに張った水の膜を、ループ全体を膜と垂直な方向にゆっくりと揺すって、発生した同心円状の表面張力波を増幅させて水滴を飛び出させただけであった。これは、円形膜の振動でいうと、最も基本的な振動モードすなわち、膜全体が同じ位相で振動するパターンの振動を起こすだけに過ぎない。ループに捻る運動を与えると、直径方向に節をもつ振動が起きたはずである。また、水の膜の一部に周期的に風を当てるなどして振動させると、さらに複雑な振動パターンが見られたはずである。水の膜が長時間安定して存在することだけでも、微小重力環境を十分に印象づけることはできるが、これにいろいろなパターンの振動を与えることで、微小重力のおもしろさをもっと人々に伝えることができるに違いない。ゆっくりと振動する水の膜は、造形的にもたいへん興味深いものである。国際宇宙ステーションでの水膜を使ったパフォーマンスを提案したい。

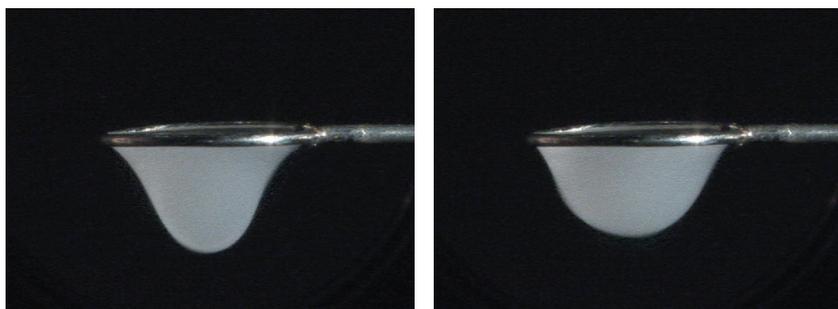


図4-10: 水平なループに保持した水滴の振動(その1)

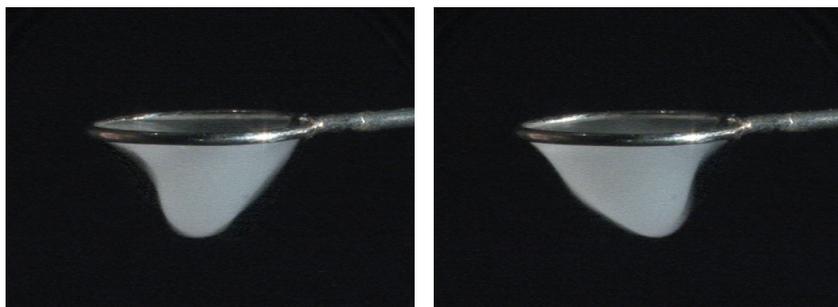


図4-11: 水平なループに保持した水滴の振動(その2)

### 4.3 水平な面上の液滴

ループに保持した水滴の実験では、周囲のループが振動の節となるため液体の運動が制約を受けた。ここでは、液滴を撥水性の面上に置くことによって、より自由な運動ができるようにする。この場合も、液滴を大きくすると、表面張力で丸くなった液滴が重力によって扁平になってしまうので、液滴の大きさは1cm程度よりも小さいものに限られる。その結果、ループのときと同様に、共鳴する周波数は数十 Hz となり、液体の動きは眼視では変形のようなすがわらないほど速いものになる。

実験では、ループに保持した水滴の場合と同様に、フードで音を集中させたスピーカからの周期的な気流を図4-12のように液滴の斜め上方から当てて共鳴させた。全く平らな面だとスピーカからの気流のため液滴が動いてしまうので、中央がややくぼんだ面を用いた。撮影は、液滴の上方から通常のコマ数（60 フレーム／秒、インターレース）のハイビジョンカメラで行い、結果は動画として記録し解析した。

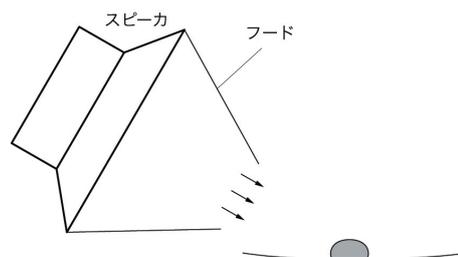


図4-12: 面上に置いた液滴の共鳴実験

図 4-13 は、面の上に置いた直径約 7mm の水滴の共鳴実験を示す。撥水性の面としては蓮の葉を用いた。また、写りやすいように白濁させた水を用いた。2 枚の写真は、振動の半周期ごとの写真で、水滴はこの形状の間で振動する。この例のように、水平な面の上に液滴を置いた場合、上下方向の振動が面で制約を受けるので、水平方向の振動が現れやすいようである。実験で用いた液滴は重力のためにやや扁平になっているが、その振動のようすは球面の振動と対応づけることができると思われる。球面の振動は、付録 A.2 で述べたように一般に球面調和関数で表すことができる。図 4-13 の振動は、節の個数が  $l=3$ 、経度方向の節の個数が  $m=3$  の、経度方向のみの振動モードに対応すると思われる。共鳴振動数は、付録 A.2 の式で計算した値とほぼ一致する。眼視では共鳴して振動していることはわかって、水滴の形状まではわからなかったが、映像で確認すると思ったよりもずっと激しく変形していた。

図 4-14 は、周波数を上げて共鳴させた場合である。この振動は、球面の振動での、節の個数が  $l=4$ 、経度方向の節の個数が  $m=4$  のモードに対応すると思われる。 $m=3$  のモードに比べて変形の度合いがやや小さくなっている。さらに周波数を上げてみたが、粘性による減衰のためか、あるいは撮影のフレーム数不足のためか、はっきり共鳴していると思えるところは見あたらなかった。



図4-13:  
面の上に置いた水滴の振動（その1）



図4-14:  
面の上に置いた水滴の振動（その2）

表面張力が大きい液体として、水のほかに水銀を挙げる事ができる。表面張力は、水の7倍近くもある。密度は水の13.6倍と大きい、面の上に置いた場合、その表面張力のために水と同じようになり丸くなる。図4-15は、直径約7mmの水銀による同様の実験の結果である。面としては陶製のるつぼを用いた。水銀は密度が大きいので、サイズが同じとき、共鳴周波数は水よりもやや低くなるが、傾向は水の場合とほとんど同じであった。図4-15は、球面の $m=3$ モードに対応する振動であると思われる。眼視ではほとんどわからなかったが、映像で見たときの、重い水銀が激しく振動するようすはたいへん印象的であった。水銀を宇宙へ大量に持って行くことは、安全の面からかなりむずかしいと思われるが、もしそれが可能であれば、大きい水銀の球が存在感があるので、それが振動するようすは、人々に訴えるものがあるであろう。

図4-16は、周波数を上げた場合である。こんどは $m=4$ モードに対応する振動パターンが現れている。これ以上周波数を上げても、粘性による減衰のためか、目立った共鳴は見られなかった。

これらの一連の実験では、面の上に置いたやや扁平な液滴に振動を与えて共鳴させる実験であった。扁平な液滴の同様な振動が、ホットプレート上の水滴や、常温の金属面に置かれた液体窒素や液体酸素の液滴が沸騰するときに見られることが知られている（たとえば文献6、7）。沸騰液滴の場合、振動は外からの強制ではなく、液滴を置いた面とのあいだに発生するマランゴニ対流などによる自励振動である点が異なるが、現れるパターンはよく似ている。今回の実験のように、地上では、液滴のサイズは重力によって扁平になることを避けるため小さいものに限られた。そのため、共鳴は眼視では振動の様子がわからないほど速いものになった。また、液体の粘性のため細かい振動が消えてしまうので、液滴の形は滑らかで単純なものであった。微小重力環境ではサイズの問題が解決するので、振動はゆっくりとしたものになり、多数の細かい波を含む複雑な振動パターンが現れることが期待できる。

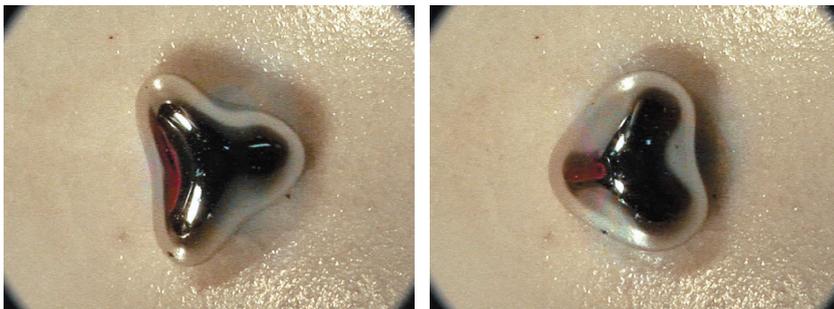


図4-15:  
面の上に置いた水銀の振動（その1）



図4-16:  
面の上に置いた水銀の振動（その2）

#### 4.4 水中の液滴

地上の重力場の中で液滴を保持しようとする、ループを用いたり、面の上に置いたりすることになる。このとき、液滴を球に近い形に保とうとすると、重力の影響を避けるため、液滴のサイズは必然的に1cmよりも小さいものになってしまう。そこで、地上で重力を擬似的になくする方法が、液滴を密度が等しく混じり合わない別の液体（たとえば水）の中で浮遊させるというものがある。液滴が空気ではなく別の液体で囲まれてしまう、容器の中でしか実現できないので液滴の操作がやや不自由になる、などの問題があるが、擬似的に重力を消すことで、直径数 cm の液滴を球状のまま保持することができるようになる。油性の液滴を水中に浮遊させて振動を与えるという実験は、すでに高木ら（文献 6、8）によって行われている。今回われわれは、(1) 振動パターンを解析することによって宇宙空間での水球の動きを予測する、(2) 同様の実験を宇宙空間でのパフォーマンスの地上用リハーサルに利用する可能性を評価する、という目的のため、高木らの実験をより簡便な方法で行ってみた。

高木らの実験では、水中で浮遊させる液体として、オルソ・トルイジンという、水とほとんど同じ密度を持った、水に溶けにくい有機溶剤が使われた。しかし、オルソ・トルイジンは毒性が強く、取り扱いが困難な物質である。また、入手するのもあまり容易ではない。今回の実験では、われわれは安全で入手が容易な液体を検討した結果、磁性流体を用いることにした。磁性流体は、表面を界面活性剤で保護した直径 10nm 程度の微細な強磁性体粒子を油性の媒体や水に均一に分散させたコロイド溶液である。もともと、NASA が宇宙服可動部のシールのために開発したもので、磁場で保持したり粘度をコントロールしたりできることから、いまでは回転軸のシールやスピーカのダンパーなど様々な用途に使われている。われわれが使用した磁性流体は、媒体として流動性イソパラフィンを用いたものである。磁性流体そのものは、強磁性体微粒子が高濃度で含まれているので、密度は水よりも大きい。いっぽう、媒体のイソパラフィンの密度は、イソパラフィンが混合物質なので一定していないが、水よりも小さい。したがって、磁性流体を媒体のイソパラフィンで薄めることによって密度を調整することができ、密度を水と一致させることも容易である。

実験は、イソパラフィンで薄めて水と密度を一致させた磁性流体を、水槽に入れた水の中で球状にして行った。イソパラフィンは水と比べて表面張力が小さいので、水面に落とすと油膜のように広がってしまう。したがって、磁性流体の液滴を作るときは、注射器などを使って水中で徐々に大きくする必要がある。また、水槽の材料と親和性が高い場合、磁性流体が水槽の壁面に触れると壁面を油膜のように覆うので注意しなければならない。高木らは、液滴と水の密度差を調整するために、底へ行くほど濃度を高くした砂糖水を使ったようであるが、われわれはとくにそのような配慮は行わず、磁性流体の液滴を水中で大きくしながら、その場で液滴の密度を調整した。

図 4-17 は、実験の概要を示したものである。水中で直径約 18mm の大きさにした磁性流体の液滴を、図のように 2 本のアルミニウムの針金で保持した。磁性流体の密度を水と全く同じにすると、針金が液滴を界面張力で引っ張るので、液滴が針金との接点のちょうど中央に来るようになる。そこで、磁性流体の密度を水よりもわずかに大きくし、磁性流体の中心が、約 110° の角度をなすように置いた針金の延長線の交点付近に来るようにした。液滴は、針金を振動させて、針金と磁性流体の間の粘性で磁性流体を押したり引いたりすることで共鳴させた。針金の振動には、機械的な動力ではなく、コントロールが容易な音響システムを用いた。2 本の針金は、

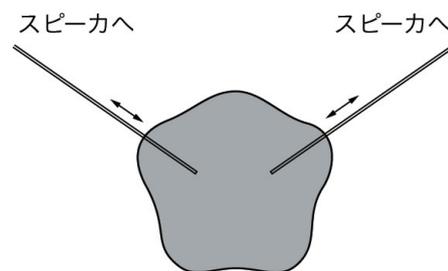


図4-17: 水中の液滴の共鳴実験（概念図）

それぞれスピーカコーンの中央に接着してあり、スピーカの振動によって軸の方向に振動する。そのとき針金が横方向に振れないよう、針金の途中に針金を通す小さい穴を置いた。針金の材質は、スピーカの磁石が強磁性体である磁性流体に影響しないよう、アルミニウムにした。液滴が共鳴する周波数は、液滴の直径が2cm程度だと10Hz前後になる。この周波数は可聴域（約20Hz以上）よりも低いので、コンピュータで音として発生することがむずかしい。そこで、スピーカに送る信号の発生には、周波数ジェネレータを用いた。2本の針金に与える振動の位相は同じにした。

実験の結果はハイビジョンカメラで記録し解析した。コマ数は通常の60フレーム/秒、インターレースである。水の中では液滴を大きくすることができるので、共鳴周波数は空気中の小さい液滴に比べてずっと低くなる。実際、振動する液滴の形は眼視でもよくわかった。もちろん、ビデオカメラの撮影速度は、通常のコマ数で十分であった。

図4-18から図4-21は、周波数を徐々に上げていったときに典型的に現れた共鳴パターンである。図4-18は周波数が約5Hzのときに現れた共鳴で、正面から見ると、上下逆の3角形が交互に現れるように見える。

図4-19は周波数が約7Hzのときの共鳴である。わかりにくいのが、正面からは4角形を基本とする振動のように見える。実験では、液滴をまわりの水よりもやや重くすることで液滴の上下の位置を調整したが、液滴が針金に界面張力で引かれて、液滴の中心が針金の延長線の交点よりも上に来る傾向があった。そのため、液滴の中心から見た振動印加点の間の角度は実質的には約120度であった。この角度をもう少し小さくして90度に近づけていたら、4角形がより顕著になったと思われる。

図4-20は、周波数が約10Hzのときに現れた共鳴パターンである。5角形を基本とする形がはっきりと現れている。周波数がこの程度になると、眼視では動きが速く残像のため見にくくなるが、変形が最も大きくなる位相のときの形ははっきりとわかった。

図4-21の共鳴パターンは、周波数が約13Hzのときのものである。やや不鮮明ではあるが、6角形と思われるパターンが見られる。周波数をこれ以上高くしても、粘性による減衰のためか目立った共鳴は見られなかった。

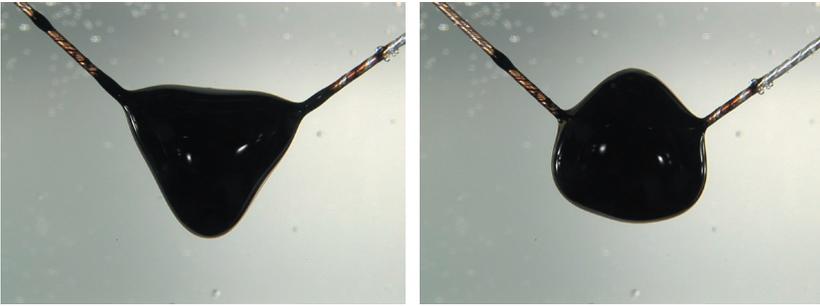


図4-18: 水中の液滴の振動 (その1)

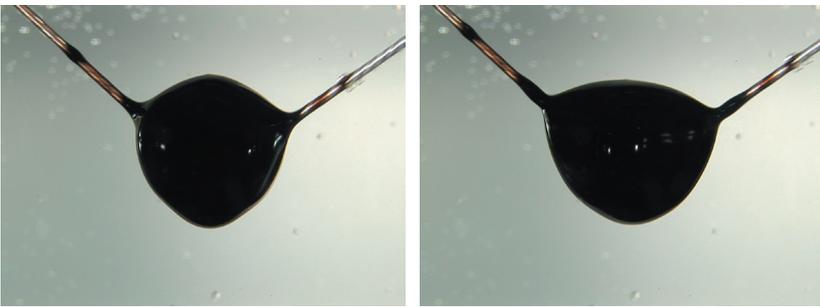


図4-19: 水中の液滴の振動 (その2)

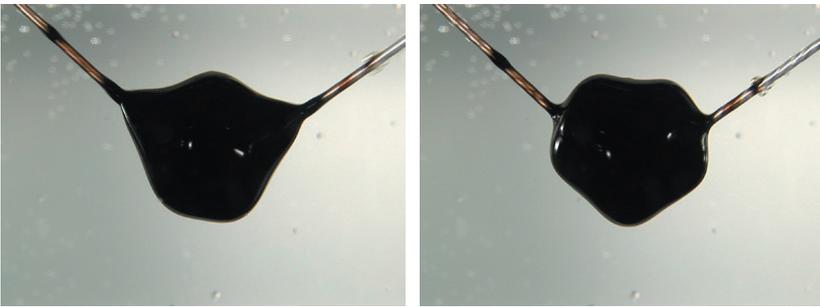


図4-20: 水中の液滴の振動 (その3)

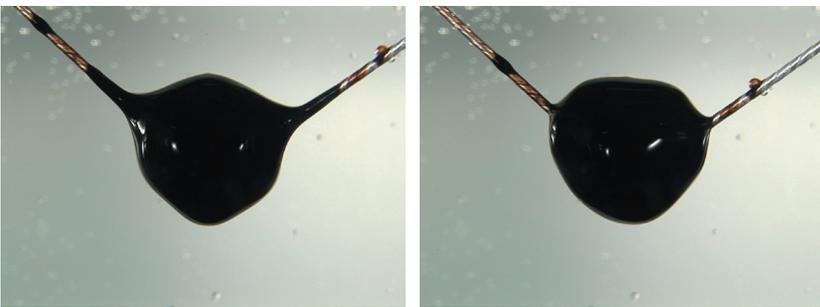


図4-21: 水中の液滴の振動 (その4)

今回の実験は、水中に浮いた液滴の表面2か所に同じ位相の与えて表面張力波を発生させるものであった。周波数が液滴の球の振動数と合うと、球全体が共鳴して激しく振動するようになる。かつてスペースラブで行われた実験では、空中に浮遊させた液滴の両側に紐を入れ、両側の紐を同時に押ししたり引いたりして球全体を振動させるものであった。そのときの振動は、軸対象の波が両端を往復し、周波数が合ったときには定在波として周期的な振動を続けるというものであった。今回の実験も、表面の2点に振動を与えるという点は同じであるが、互いに180度離れた液滴の両端ではなく、ある角度をもたせて振動を与えたところが異なる。そのため、表面張力波の干渉が起こって、液滴の振動パターンはたいへん興味ある形になった。

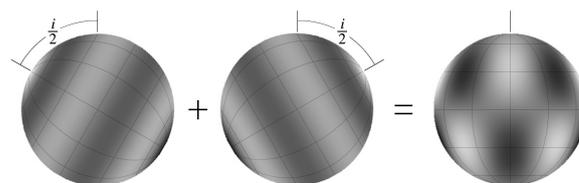


図4-22: 2つの軸対象な球面調和関数の重ね合わせ ( $l=5$ ,  $i=120^\circ$ )

球面の振動は、振幅が小さい場合、付録 A.2 で述べたように球面調和関数で記述できる。液滴の一点に振動を与えた場合、同心円状の波が発生し、それが定在波になれば軸対象のモード（球面調和関数でいうと  $m=0$  のモード）になる。高木ら（文献8）も主張するように、今回の実験で見られた液滴の共鳴パターンは、このような軸対象の球面調和関数を2つ重ね合わせた干渉模様と考えることができる。球面調和関数の節の個数を1とすると、軸対象の球面調和関数では節がすべて軸に主直な方向（経度線の方向）に現れるので、1はちょうど経度方向の節の個数になる。図4-22は、 $l=5$ の軸対象な球面調和関数を、角*i*だけ離して同じ位相で重ね合わせたときに現れる干渉模様のご概念図である。色の濃淡は振幅を表わす。明るい部分と暗い部分が振幅の大きいところで、明るい部分と暗い部分は逆位相になる（明るい部分が凸であれば暗い部分は凹）。そのちょうど中間の灰色が振動の節にあたる。

節の個数*l*と角度*i*を変えたいくつかの場合について、球面調和関数の干渉パターンを計算した結果を図4-23に示した。それぞれ、左の図は正面斜め上から、右の図は側面斜め上から見た振幅の様子である。条件は、図4-18から図4-21の実験とほぼ同じである（ $l=4$ の場合だけ、角度を  $i=90^\circ$ として図を描いた）。実験の結果は、軸対象の球面調和関数を重ね合わせたものとよく合っている。また、共鳴周波数も、付録 A.2 の式で計算したものとよく一致した（水とイソパラフィンの界面張力は  $50 \times 10^{-3}$  N/mとして計算した）。このことは、実験で見られた共鳴パターンが球面調和関数の重ね合わせであるという描像が正しいことを支持する。図4-23に示したように、単

に2つの軸対象な球面調和関数を重ね合わせただけでも、得られる干渉パターンはかなり規則的で美しく見える。人によっては正多面体に見えるかもしれないが、高木ら(文献8)が主張するように、これは誤解である。人には、自然界に対称性を求める性癖があるらしく、医師で振動の研究者でもあった H. Jenny (文献5) も球の振動を正多面体と関連づけようとしているが、この性癖には注意しなければならない。しかし、液滴の共鳴パターンは、正多面体ではなくても、十分に興味深い形であることはたしかである。

液滴を水中に浮遊させることで、ある程度の大きさの、しかも球形の液滴を地上でも実現できることがわかった。また、わずか2点に振動を与えるだけで、かなり規則的な興味ある共鳴パターンが現れることが確認できた。微小重力空間では、2種類の液体を使わなくても、容易に大きな液体の球を作ることができる。たとえば、直径が10cm程度の水を作ることができたら、共鳴する周波数は1Hzのオーダーになるので、機械を使わなくても手で動かすことで水球に振動を与えることが可能である。大きな水球が、多面体のような形を作りながらのりくらしと振動する様子は、人々に微小重力を印象づけるパフォーマンスとなるに違いない。この程度の大きさになると粘性も相対的に弱くなるので、手を離れたあとも振動が何分何十分も続くと思われる。また、粘性があまり効かないことから、図4-23に示したような規則的な形だけでなく、不規則な振動によって何種類ものパターンが重なった複雑な形が現れやすくなり、思いがけない形が現れるかもしれない。手を素早く動かすか、音の振動や機械的な振動を使って表面に細かい波を立てると、多数の凹凸をもつ金平糖のような干渉パターンが生じることが予想され、やはり興味深い。とくに、機械振動のような規則的な振動を与えた場合、共鳴が激しくなると、中国に古くから伝わる魚洗(噴水魚洗)のように、表面から水しぶきが飛び出すかもしれない。

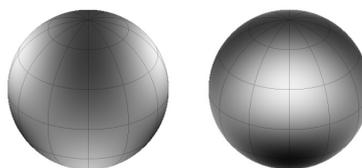


図4-23(a):  $l=3$ 、 $i=120^\circ$  の場合

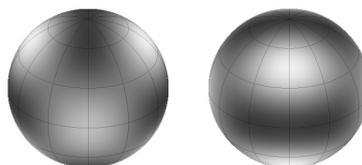


図4-23(b):  $l=4$ 、 $i=90^\circ$  の場合

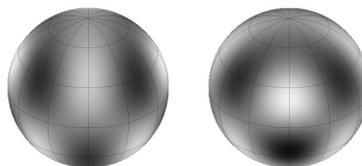


図4-23(c):  $l=5$ 、 $i=120^\circ$  の場合

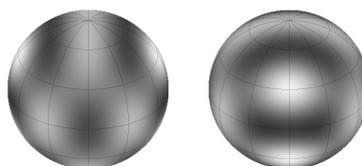


図4-23(d):  $l=6$ 、 $i=120^\circ$  の場合

宇宙で実際に振動実験を行うとき、水は飲料用のものが使える。実行に移すためには、水が飛び散っても問題にならない場所を選ぶ（例えばシャワー室）か、大きな容器の中で行うなどの工夫が必要であろう。水球に振動を与えるには、先端に綿糸をつけた針金が適当であると思われる。また、水球が動き回らないよう、水球に針金のループを浸しておく必要があると思われる（図4-24参照）。このように、簡単な道具で行えるパフォーマンスなので、ぜひとも宇宙で実施してもらいたいものである。

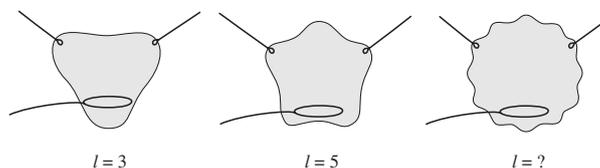


図4-24 宇宙での水球の振動実験（概念図）

図4-25から図4-27は、国際宇宙ステーションの「きぼう」船内実験室の室内を想定して、そこに浮かぶ水球をCGで描いたものである。図4-25は $l=3$ 、図4-26は $l=4$ 、図4-27は $l=5$ のパターンにそれぞれ相当する。このような造形実験が実現したら素晴らしいことである。

最後に、地上でのリハーサルの可能性に触れておこう。今回われわれが使用した流動性イソパラフィンをベースにした磁性流体は、安全で入手しやすく、取扱いも容易なので、宇宙に上がる前に地上で液滴の動きの特徴を把握しておくのに適した材料であると考えられる。大きな水槽を用い、水槽の底を濃い砂糖水にして液滴の「落下」を防ぐなどの工夫をすれば、直径数cmの液滴を作ることでも可能ではないかと思われる。この程度の大きさになると、振動の周波数がかかなり低くなるので、周波数ジェネレータのような機械を使わなくても、人の手や、身近な機械類（たとえばポータブルCDプレイヤー）の振動を利用して液滴に振動を与えることができる。宇宙での実験が実現する場合、実験を行う宇宙飛行士自身が事前に液滴の動きを経験しておくことは重要なことであろう。



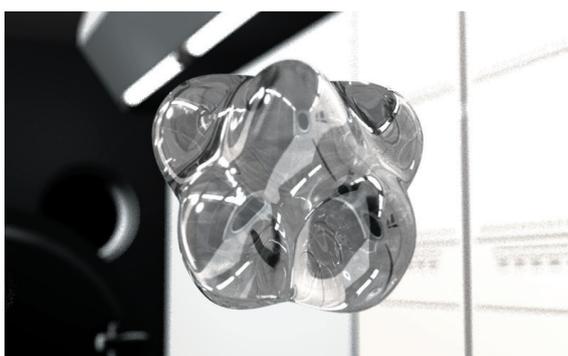
図4-25: きぼう船内実験室に浮かぶ水球のCG (その1)



図4-27: きぼう船内実験室に浮かぶ水球のCG (その2)



図4-28: きぼう船内実験室に浮かぶ水球のCG (その3)



## 5. 創作

今回の研究の過程で、液状物質をモチーフにした作品を制作した。図5-1は、研究代表者の野村による作品である。かつて巨大隕石の地上への衝突で飛散した岩石が、大気中を落下する際に急冷してできたと思われる、テクタイトと呼ばれる岩石がある。その中には、大気との相互作用で表面に波状の模様をもったまま固化したボタン状のものが存在する。作品には、宇宙の微小重力環境で、気流の中に浮かべた液滴を固化して地上へ持ち帰りたいという願望が込められている。

図5-1: テクタイトをモチーフにした作品



## 6. まとめ

この研究では、国際宇宙ステーションの微小重力環境を利用した液状物質による造形実験の可能性を、地上での実験を通じて検討した。そのさい、材料は宇宙にあらかじめあるものや宇宙船に搭載が可能なものであることに留意した。また、大げさな機器を使わなくてもできる造形実験を考案するよう心がけた。その結果はつぎのようにまとめることができる。

### (1) 液状物質を固化して持ち帰ることについて

宇宙でしか作れないカタチを作ってそのまま地上へ持ち帰ることは、地上の人々が宇宙を身近に感じる上で重要である。音波によって液体の球を静的に変形させたまま固化することを検討したが、超音波を用いると液滴のサイズがきわめて小さいものに限られること、可聴域の音波にすると大音響になってしまうという点で、実現は容易でないと思われる。別の方法として、液体の球を気流の中に置いて、気流によって変形させたまま固化することが考えられる。また、液体の球を振動させ、液体に混ぜた微粒子が液体内部の振動の節に集まるという3次元クラドニ図形も、それ自体興味深い造形が期待できるし、液体ごと固化して持ち帰るという可能性もある。これらの実験については、十分には検討できなかった。

### (2) 液体の振動実験について

微小重力環境では液体の表面張力が前面に出てくるため、地上では見られない液体の挙動を経験することができる。とくに、微小重力環境では、大きな液体の膜や球を作ることができるので、表面張力による液体表面の振動は、ゆっくりとした見ごたえのあるものになる。ループに張った水膜の地上実験では、膜に振動を与えることによって、さまざまな振動パターンが現れることがわかった。また、激しく振動しても水膜は簡単には壊れないことを予感させる結果であった。宇宙で水膜を作る実験はすでに行われているが、その水膜に気流を当てるなどして振動させることで、迫力ある水膜の運動が見られると思われる。

水中に磁性流体を浮遊させて球を作り、それに振動を与える実験では、液体の2点に振動を与えることで、表面張力波が重なり合ってきたきれいな干渉パターンが現れることを確認した。地上の小さな液滴による実験でも、液体の球が規則的な変形を交互に繰り返す様子は十分興味

深いものであった。微小重力環境では、水を使って大きな球を作ることができるので、ゆっくりとした振動が長時間続くことが予想される。周波数が低いことから、手で棒を使って振動を与えることもできる。宇宙で水球に単純な振動を与える実験はすでに行われているが、表面の複数の点に振動を与えて干渉させた実験はまだない。簡単な造形実験なので、ぜひ実現してもらいたい。うまく共鳴させると、規則的な形を作りながらゆっくりと振動を続ける、たいへん興味深い動きが見られるはずである。

宇宙での液体を用いた実験や水によるパフォーマンスは、まだあまり多く試みられていないのが現状である。今後、国際宇宙ステーションの運用が本格化する中で、この研究でわれわれが提案したものを含めて、あらゆる可能な実験が試みられることを希望する。たとえば、大きな水の球が宇宙ステーションのどこかに常時置いてあり、宇宙飛行士の気が向くとそれを動かして遊ぶほどに、液体の存在が宇宙で日常化したとき、ひとつの宇宙文化が生まれたと言えるのではないだろうか。

## 謝辞

実験を実施するに当たっては、京都市立芸術大学出身で音響彫刻家・サウンドデザイナーである吹田哲二郎氏に、機材の提供、設定、操作などで全面的にお世話になった。深くお礼を申し上げたい。宇宙航空研究開発機構宇宙環境利用センターの松尾尚子さんには、NASAの映像など多くの資料を提供していただいた。同志社大学工学部電子工学科の渡辺好章教授には、超音波エレクトロニクスや非線形音響学の研究の概要を解説していただいたうえ、研究室の紹介もしていただいた。神戸芸術工科大学の高木隆司特任教授には、液滴振動についての氏の研究を紹介していただき、貴重な意見を頂戴した。京都市立芸術大学非常勤講師の今西啓介氏には、CG制作をお願いした。また、(株)シグマハイケミカルの大野日出男氏には、同社の磁性流体の媒体であるイソパラフィンを提供していただいた。皆さんにお礼を申し上げたい。

## 文献

- (1) Lee B. Summerlin (ed.),“SKYLAB, Classroom in Space”(1977)  
<http://history.nasa.gov/SP-401/sp401.htm>
- (2) D.R.Pettit,“Don Pettit Space Chronicles” (2003)  
<http://spaceflight.nasa.gov/station/crew/exp6/spacechronicles.html>
- (3) 早川 惇二 ほか、「非可視域用光学材料の研究」(FMPT M-17, 1992),  
<http://idb.exst.jaxa.jp/jdata/03032/199906J03032000/199906J03032000.html>
- (4) 阿部 豊 ほか、「浮遊液滴非線形ダイナミクスワーキンググループ活動報告」、  
*Space Utilization Research* vol. 22 (第22回宇宙利用シンポジウム プロシーディング),  
ISAS/JAXA (2006), pp59-62.
- (5) H. Jenny, “Cymatics: A Study of Wave Phenomena & Vibration,”Macromedia (2001).
- (6) かたちの事典、高木隆司編、丸善 (2003)、pp425-426.
- (7) R. Takaki, N. Yoshiyasu, Y. Arai, and K. Adachi,“Self-Induced Vibration of  
an Evaporating Drop,”*Research of Pattern Formation*, ed. R. Takaki, KTK Scientific  
Publishers (1994), pp363-375.
- (8) R. Takaki, M. Kashiwabara, and Y. Arai,“Mode Selection of a Vibration Group —  
Physics and Psychology,”in *Proc. Symmetry Festival 2003, Budapest, Hungary* (2003).



# 付録

## A.1 円形膜の振動

周囲が固定された一様な円形膜の振動については、各点における振幅がベッセル (Bessel) 関数で記述されることが古くから知られている。図 A-1 はベッセル関数の振幅を濃淡で表したものである。色が明るい部分と暗い部分は振動の位相が逆である (たとえば明るい部分が凸のときは暗い部分が凹、明るい部分が凹のときは暗い部分が凸)。線は振動の「節」を表す。図 A-1 の中で、 $m$  は回転方向の節の個数を表している。また  $n$  は半径方向の節の個数 (円周を含む) である。

また、それぞれのパターンの振動数を  $\nu$  (単位 Hz) とすると、 $\nu$  は角振動数  $\omega$  とつぎのような関係にある。

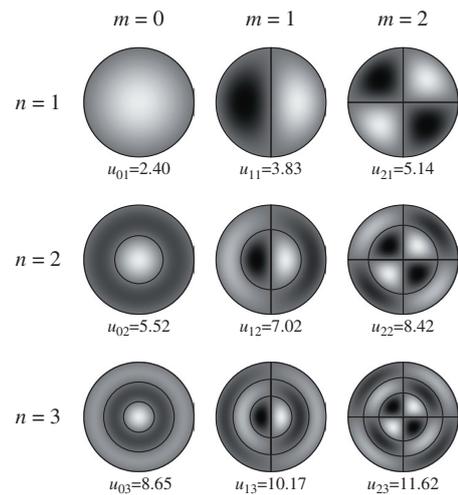
$$\nu = \omega / (2\pi)$$

円形膜の振動では、角振動数  $\omega$  はつぎのように表すことができる。

$$\omega^2 = (u_{mn}/a)^2 (T/\sigma)$$

ただし、 $a$  は円の半径、 $T$  は膜にはたらく張力、 $\sigma$  は膜の面密度である。また、 $u_{mn}$  はパターンごとに異なる数字で  $m$  次ベッセル関数の  $n$  番目の零点にあたる。それぞれの数値は図 A-1 の中に示したとおりである。以上の理論は、振動の振幅が十分小さいという近似のもとで成り立つが、振幅が大きくなってもこの理論から大きく外れることはないと考えられる。ただし、振幅がきわめて大きくなると、その振幅に応じて振動数が数%から十数%小さくなることが知られている。

水の膜のばあい、もし厚みが一定であれば円形膜の振動の式がそのまま使える。ただし、水の表面張力が膜の表と裏の両方ではたらくことから、張力  $T$  は水の表面張力の 2 倍になる。水の表面張力は、20°C で  $72.75 \times 10^{-3}$  N/m である。



図A-1: 円形膜の振動モード。数値は振動数の比を表す。

## A.2 球の振動

球の振動については、一般に表面の振幅が球面調和関数で記述できることが知られている。図 A-2 に球面調和関数の振幅を濃淡で表した。色が明るい部分と暗い部分は振動の位相が逆である（たとえば明るい部分が凸のときは暗い部分が凹）。そのちょうど中間の灰色が振動の「節」にあたる。図 A-2 の中で  $m$  は経度方向の節の数を表している。また  $l$  は緯度方向と経度方向の節の個数を合わせたものにあたる。したがって、 $l-m$  が緯度方向の節の個数になる。

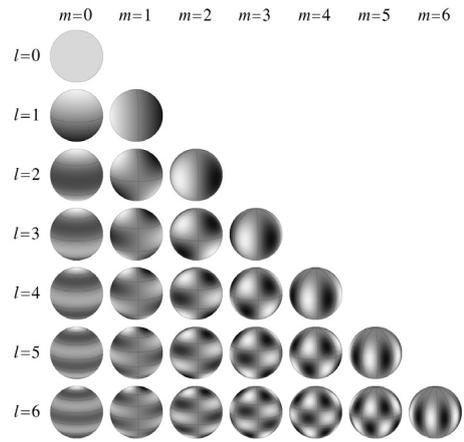
それぞれのパターンの振動数を  $\nu$ （単位 Hz）とすると、 $\nu$  は角振動数  $\omega$  とつぎのような関係にある。

$$\nu = \omega / (2\pi)$$

角振動数  $\omega$  はつぎのように表すことができる。

$$\omega^2 = [l(l-1)(l+2)] [\gamma / (\rho r^3)]$$

ここで、 $\gamma$  は表面張力、 $\rho$  は密度、 $r$  は球の半径である。振動数は、 $l$  だけで決まり、 $m$  の値によらないことがわかる。20°Cの水の場合、 $\gamma$  の値は  $72.75 \times 10^{-3}$  N/m、密度  $\rho$  は  $1.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> である。また、20°Cの水銀では、表面張力  $\gamma$  は  $476 \times 10^{-3}$  N/m、密度  $\rho$  は  $13.6 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> である。以上は、振動の振幅が十分小さいという近似のもとでの理論であるが、振幅が大きくなっても理論から大きくずれることはないと考えられる。ただし、振幅がきわめて大きくなると、振動数が小さくなる傾向があることが知られている。



図A-2: 球の振動モード。明るい部分と暗い部分は位相が逆で、その中間が振動の節にあたる。

図 A-3 には、水球の空中における振動数  $\nu$  (単位 Hz) を示した。わかりやすくするため、半径ではなく直径 (単位 cm) の関数として表しているので注意してほしい。図から、直径が 1cm 程度の小さい水滴では振動数が数十 Hz の速い振動になることがわかる。いっぽう、直径が 10cm 程度になると、振動数が数 Hz 以下のきわめてゆっくりとした振動になることもわかる。なお、 $l=0$  (球全体の膨張収縮) や  $l=1$  (全体が上下または左右に動く振動) は存在しない。

以上は、液体の球が空中に浮いているときの振動について述べたものである。液体の球を、別の液体の中に浮かべたときは、若干の修正を要する。この場合の角振動数は、球の密度を  $\rho$ 、周囲の液体の密度を  $\rho'$  とするとき、つぎのような式で表されることが知られている (文献 8)。

$$\omega^2 = \{[l(l-1)(l+1)(l+2)] / [(1+\rho'/\rho)l+1]\} [\gamma / (\rho r^3)]$$

とくに、擬似的に重力を消すため、球の密度と周囲の液体の密度を等しくしたときの角振動数は

$$\omega^2 = [l(l-1)(l+1)(l+2) / (2l+1)] [\gamma / (\rho r^3)]$$

のようになる。この場合、 $\gamma$  は 2 種類の液体のあいだの界面張力である。水中での、水と同じ密度をもつ液滴の振動数を図 4-4 に示す。界面張力は  $50 \times 10^{-3} \text{ N/m}$  とした。

今回は実験を行っていないが、密度  $\rho'$  の液体の中で気泡など中空の球が振動する場合も興味深い。このとき、気泡の角振動数は

$$\omega^2 = [(l-1)(l+1)(l+2)] [\gamma / (\rho' r^3)]$$

のように表される。この場合、 $\gamma$  は外側の液体の表面張力である。

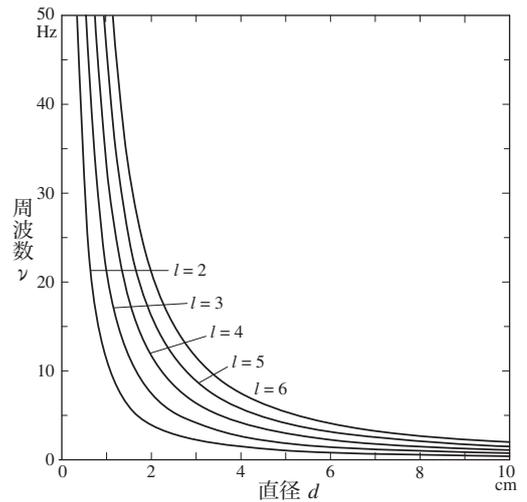


図 A-3 水の球の振動数を直径の関数として表したもの。  
 $l$  は振動の節の個数。

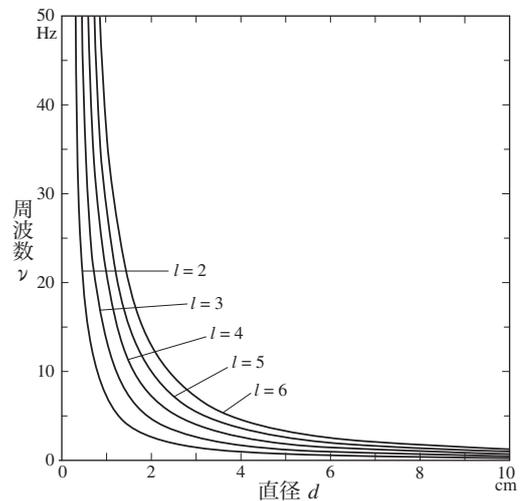


図 A-4 水中に置いた、水と同じ密度をもつ液滴の振動数。  
 $l$  は振動の節の個数。



