

ISSN 1347-460X
UDC 532.52
532.61

NAL TM-770

独立行政法人
航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-770

落下塔を用いた液柱形成実験

吉原正一 ・ 大西 充 ・ 東 久雄

2003年5月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

落下塔を用いた液柱形成実験*

吉原正一*¹、大西 充*¹、東 久雄*²

Liquid Column Formation Using Drop Tower*

Shoichi YOSHIHARA*¹, Mitsuru OHNISHI*¹, Hisao AZUMA*²

ABSTRACT

Experiments to investigate the conditions for stable and unstable liquid bridge formation were carried out in microgravity conditions using a drop shaft for 1.4s. A liquid bridge was formed easily even in a short period of microgravity. The experiments demonstrated that formation of liquid bridges could be predicted by Reynolds number and nondimensional surface tension.

Keywords: Liquid column, stability, microgravity, drop tower, Marangone convection

概 要

微小重力場における液柱の形成、不形成の条件を求める実験を自由落下時間約1.4秒の落下塔を用いて行った。実験の結果、短時間の微小重力場においても比較的容易に液柱を形成することが可能であることがわかった。液柱の形成条件をレイノルズ数と無次元表面張力でまとめることで、液柱の形成、不形成が予測できることが明らかになった。

記号

D : ディスクの径 (cm)
 d : 液吐出孔径 (cm)
 L : 液柱の長さ (cm)
 V : ディスク移動速度 (cm/s)
 U : 液吐出速度 (cm/s)
 σ : 表面張力 (dyn/cm)
 γ : 無次元表面張力
 η : 動粘度 (cSt)
 μ : 粘度 (cP)
 ρ : 密度 (g/cm³)
 Re : レイノルズ数
 We : ウェーバ数

1. はじめに

落下塔、航空機、ロケット等を用いて実現できる微小重力時間は、数秒から数分程度である。このような短時間の微小重力場を用いて、流体の自由表面に沿って生じる表面張力の勾配によって引き起こされるマランゴニ対流について、多くの実験が計画され実行されてきた。^{1, 2)} これらの実験を行う上で重要な技術課題は短時間に確実に液柱を形成し、保持することである。また、液柱の形成条件は、近年注目を集めている宇宙空間における液滴ラジエータの液滴形成条件にも関係が深い。³⁾

液柱の形成方法として我々は、ディスクを引き離しながら、そのディスク間に空いた量と同量の液を充填することで、ディスク間に液柱を形成する方法を用いた。

微小重力場における液柱の形成、不形成の条件を求める実験を自由落下時間約1.4秒の落下塔を用いて行った。実験の結果、このような短時間の微小重力場でも比較的容易に液柱を形成することが可能である。液柱の形成条件をレイノルズ数と無次元表面張力でまとめることで、液柱の形成、不形成が予測できることが明らかになった。

* 平成15年3月11日 受付 (Received 11 March 2003)

*¹ 宇宙システム研究センター

*² 大阪府立大学

2. 実験装置および実験方法

液柱の形成実験は、航空宇宙技術研究所にある10mの落下塔を用いて行った。表1に落下塔の概略仕様を示す。図1に落下塔上部切り離し装置に取り付けた状態の落下カプセルを示す。図2に落下カプセルの概略図を示す。落下カプセルは二重構造になっている。落下塔上部の切り離し装置への取り付けは、内側落下カプセルに固定した吊り下げ棒を介して取り付け、外側落下カプセルは内側落下カプセルの上部で接触した状態で吊り下げる構造になっている。実験シーケンスに従い落下カプセルが切り離し装置から切り離され自由落下を始めると、外側落下カプセルは空気抵抗による力を受け、内側落下カプセルと離れそれぞれ独立した状態になる。空気抵抗は外側落下カプセルで受け、実験装置が搭載されている内側落下カプセルは空気抵抗を受けにくい構造になっている。この機構によって微小重力環境の改善を図っている。着地は外側落下カプセルが最初に砂場に着き、次に内側落下カプセルが外側落下カプセル下部内側に置かれた数本の円柱状粘土の上に着き、粘土を押し潰しながら一体の状態ですら中に突き刺さって着地衝撃を緩和している。外側落下カプセルと内側落下カプセル間で塑性変形した粘土は、その粘着力によって内側落下カプセルが外側落下カプセルの中で飛び跳ねるのを防ぎ、搭載実験機器の破損を防止している。この様にして得られた自由落下中の加速度環境は $10^{-3}G$ 以下であり、着地衝撃加速度は約30G程度である。⁴⁾

図3に内側落下カプセル内に搭載した液柱形成装置の様子を示す。液柱形成駆動信号およびCCDTVカメラからの映像信号等の伝達は全て有線で行った。落下距離が10m程度の落下塔の場合、テレメータ等を用いなくとも有線による落下実験でも重力加速度は $10^{-3}G$ 以下の値が得られている。有線を用いた信号伝達による落下実験の場合、実験装置および実験操作がテレメータ等を用いたときと比較して簡単確実である。

液柱形成装置概略図を図4に示す。装置は液柱を形成

表1. 落下塔の概略仕様

落下距離	10m
落下時間	～1.4秒
重力環境	$10^{-3}G$ 以下
着地衝撃加速度	30G以下
抗力補償方式	ドラッグ・シールド
制動方式	サンド・ビット
着脱方式	シャープピン切断
映像機器	CCDTVカメラ (1/3017/s)
シーケンス・計測信号伝達方式	有線

するディスク、液リザーブタンク、ディスク駆動リニアヘッドとモータ、液柱の長さ設定用マイクロスイッチ、および架台で構成されている。実験開始前は両ディスクを密着した状態にし、この状態で試料液体をリザーブタンクに注入する。ピストンをリザーブタンク内の所定の位置(形成予定の液柱の長さより長い位置)に固定する。このとき気泡がリザーブタンク内に残らないようにする。微小重力環境になった所でモータを駆動し、リニアヘッドに取り付けられたリザーブタンクと一体のディスクを直線移動させることで、リザーブタンク内のピストンが液を押し出してディスク間に液柱を形成する。今回用いた装置では、ディスク径とリザーブタンクの内径を同じにした。この機構は、一体のリザーブタンクとディスクを液柱形成時とは逆に動かすことで、形成した液柱の液をリザーブタンク内に戻すことができ、液の補充なしで液柱の再形成が可能である。宇宙ステーション等による、将来の長時間実験に備え、このような構造にした。

今回実験に用いたディスク形状を図5に示す。ディスクはステンレス製で45°のエッジ付きの形状を採用した。この形状を採用することで濡れによるディスク端面からの液が漏れ出ないようにした。

液柱形成の様子はCCDTVカメラで観測し、映像信号は有線で外部に伝送され、時間信号と合成された後、VTRに記録した。落下実験終了後、この記録した映像データから液柱の形成、不形成、ディスクからの液漏れ出しの有無の確認、ディスクの移動速度、およびその移動距離を計測した。リザーブタンク内の試料液体の中に

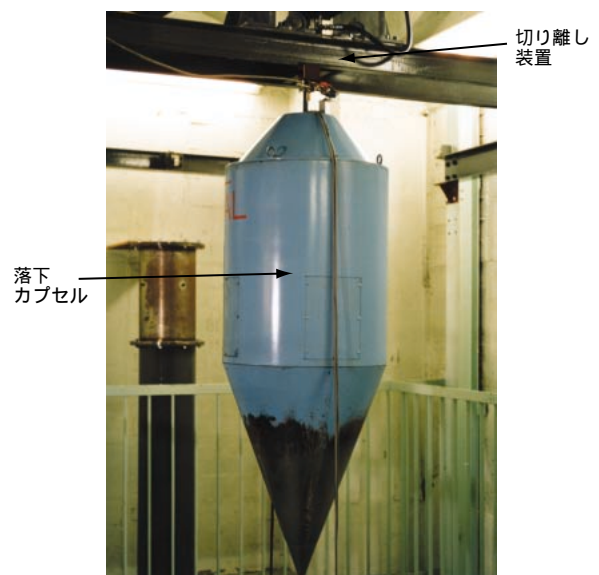


図1. 落下カプセルおよび切り離し部取付け状態

アルミニウム粉末をあらかじめ混入し、液柱形成時に液が移動ディスク端面に開いた穴から吐出する様子、液柱内での流れの様子をスリット光と一般照明を合わせて用いることで可視化し、観測した。

試料液体にはシリコンオイル（信越化学製KF96）を

用いた。シリコンオイルは各種物性値が明らかにされている。⁵⁾シリコンオイルは化学的に安定であり、水などに比較して汚れによる表面張力の変化が少ない。また、粘性が約 $0.65 \text{ cSt} \sim 1 \times 10^6 \text{ cSt}$ という広い範囲から選択できる特徴を持っている。

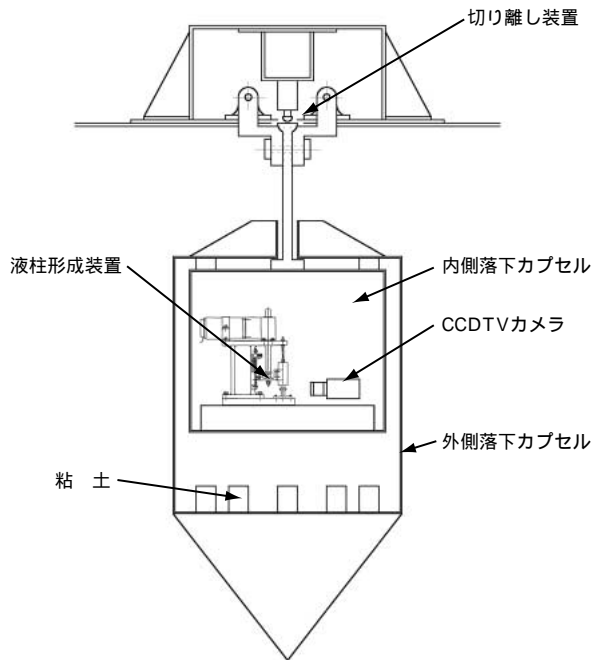


図2．落下カプセル概略図

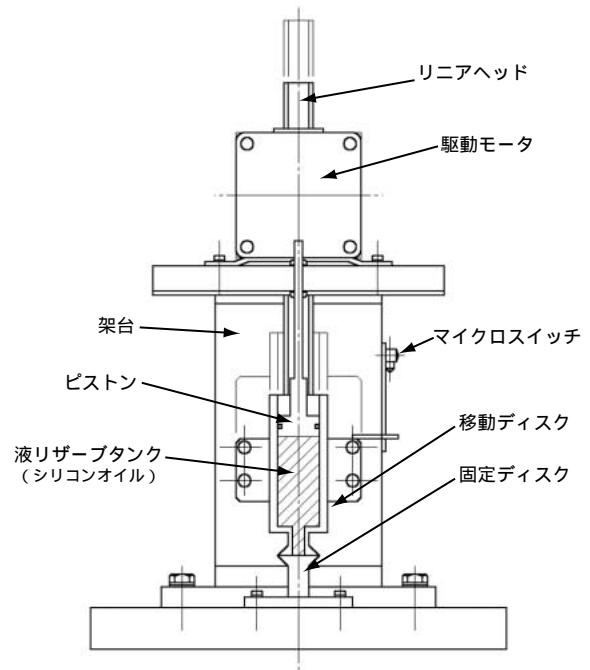


図4．液柱形成装置概略図

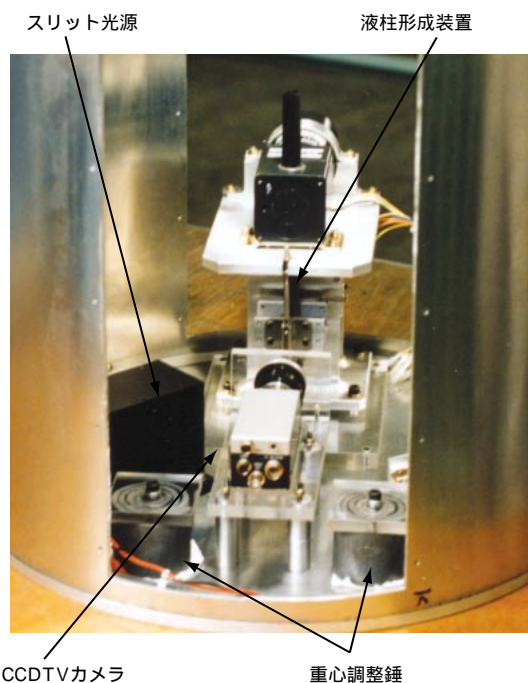


図3．内側落下カプセル内への液柱形成装置取付状態

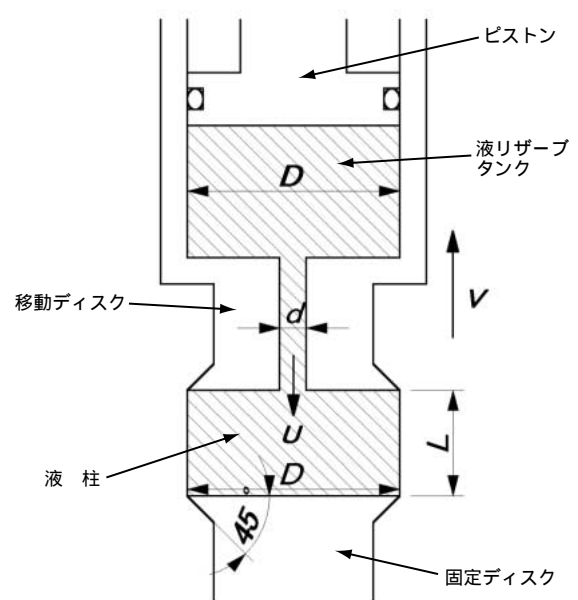


図5．ディスク形状および液柱形成モデル

3. 実験結果および考察

実験はシリコンオイルの粘性、ディスクの径、液吐出穴径、液柱の長さ、ディスク移動速度をそれぞれ変えて液柱形成実験を行った。実験パラメータを表2に示す。

実験結果から液柱の形成状況は、図6に示す5つの代表的形態に分類した。図6の の場合、液柱がディスク間に安定に形成される状態を示す。 の場合、液柱形成途中から液が固定ディスクエッジで持ち堪えられなくなり固定ディスクエッジから漏れ続け、液柱の一部が徐々に細くなり途中で切れてしまう。このような現象はシリコンオイルの粘性が低い5, 10cStのときに観測された。 の場合、移動ディスクの移動速度が速いためシリコンオイルの吐出速度も速いが、シリコンオイルは固定ディスクエッジから漏れることもなくそのままディスク上に留まっている。しかし、移動ディスクが停止し、シリコンオイルの吐出が止まると液柱は切れてしまい、固定ディスク上に球状の状態で留まっている。このような現象はシリコンオイルの粘性が高い20, 50cStのときに観測された。 の場合、移動ディスクからのシリコンオイルの吐出速度が速いため、移動ディスクの移動開始初期の段階で固定ディスクエッジから飛び散るようにこぼれてしまい、最終的にシリコンオイルは固定ディスクに留まらなかった。このような現象は と同様にシリコンオイルの粘性の低い5cStのときに観測された。 の場合、 と同じようにディスク間に液柱が形成されるが、時間の経過とともに液柱の一部が細くなり続け最終的に液柱は切断し

てしまう。切断した液柱のシリコンオイルは、2つのディスクからこぼれることもなく球状の状態で留まっている。

以上、5つの液柱形成状況の様子を落下開始から着地までの間を連続写真で図7-1から図7-5に示す。この図で左上（落下直前）から右下（着地直後）へと時間が経過している。

実験結果から微小重力場における液柱の形成、不形成について整理するため、次の無次元数で検討を行った。表面張力と粘性との比（ D/μ ）。慣性力と粘性との比（ $Re=Ud/\mu$ ）。液柱長さとディスク径との比（ L/D ）。液吐出穴径とディスク径との比（ d/D ）。ここで、表面張力と粘性との比は、液柱の表面張力を粘性で無次元化する目的で求めたもので、これを無次元表面張力（ Γ ）とする。次に、液柱の形成においてレイノルズ数を考えたときパラメータが幾つかあるためレイノルズ数も数個定義することができる。パラメータとして代表速度は液の吐出速度（ U ）、ディスク移動速度（ V ）、代表長さとしてディスクの径（ D ）、液吐出穴径（ d ）、液柱の長さ（ L ）がある。しかし、今回の液柱形成実験では微小重力時間が約1.4秒と短く、液柱の長さに関係すると考えられる液柱の不安定性について考察できる十分な実験結果を得ることができなかった。したがって、代表長さから液柱の長さ（ L ）を考慮に入れないで定義し得るレイノルズ数を次に示す。なお、液吐出速度は $U=(D^2/d^2)V$ で表される。

$$Re_d = Ud/\mu \quad (1)$$

$$Re_D = VD/\mu \quad (2)$$

$$Re_L = UL/\mu \quad (3)$$

(1) (2) (3) 式それぞれのレイノルズ数と無次元表面張力で実験結果を整理し、その結果を図8-1、図8-2、図8-3に示す。これらの図の中で液柱の形成、不形成について一番境界線が良く示されているのは図8-1である。したがって、液柱の形成、不形成を吟味するときに用いるレイノルズ数としては(1)式が最適と考える。

表2. 実験パラメータ

シリコンオイル粘度 (cSt)	5, 10, 20, 50
ディスク径 D (cm)	0.5, 1, 2
液吐出穴径 d (cm)	0.12, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6
液柱長さ (液柱長さ L/D 、 L/d)	1, 2, 3
ディスク移動速度 V (cm/s)	0.5 ~ 5

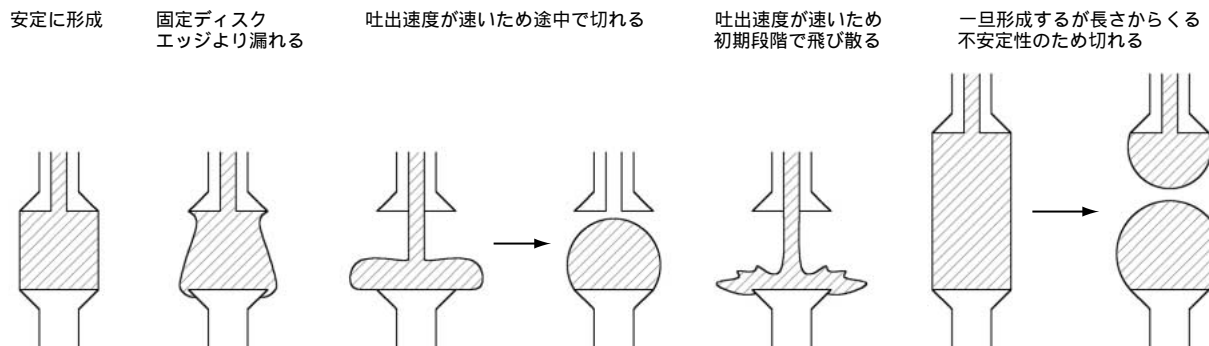


図6. 液柱形成の代表的形態

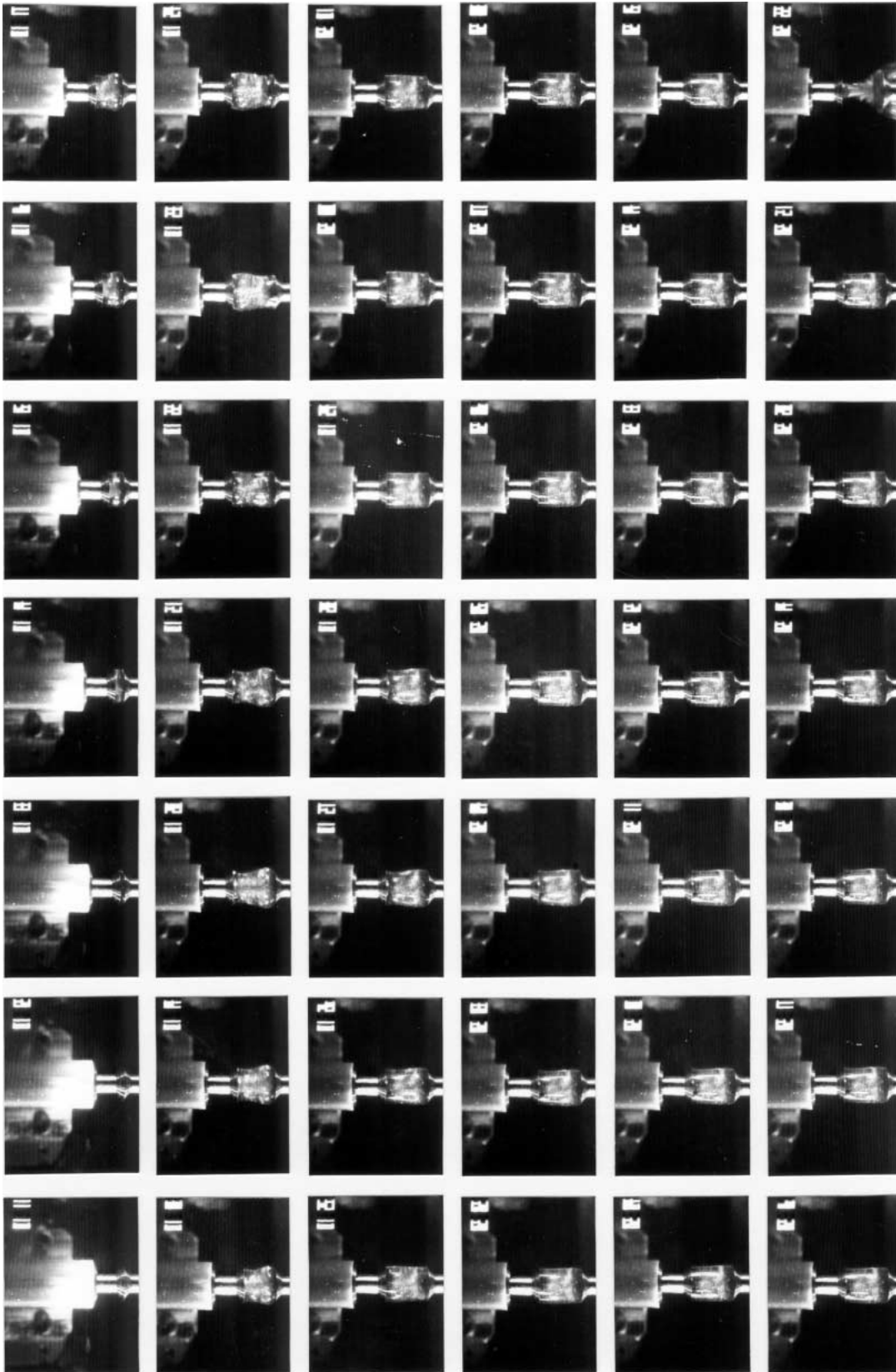


図 7-1 . 液柱形成形態 (安定に形成)

シリコンオイル $\nu = 5cSt$ ディスク径 $D = 1cm$ 液吐出穴径 $d = 0.4cm$

液柱長さ $L = 1.12cm$ 液吐出速度 $V = 3.73cm/s$

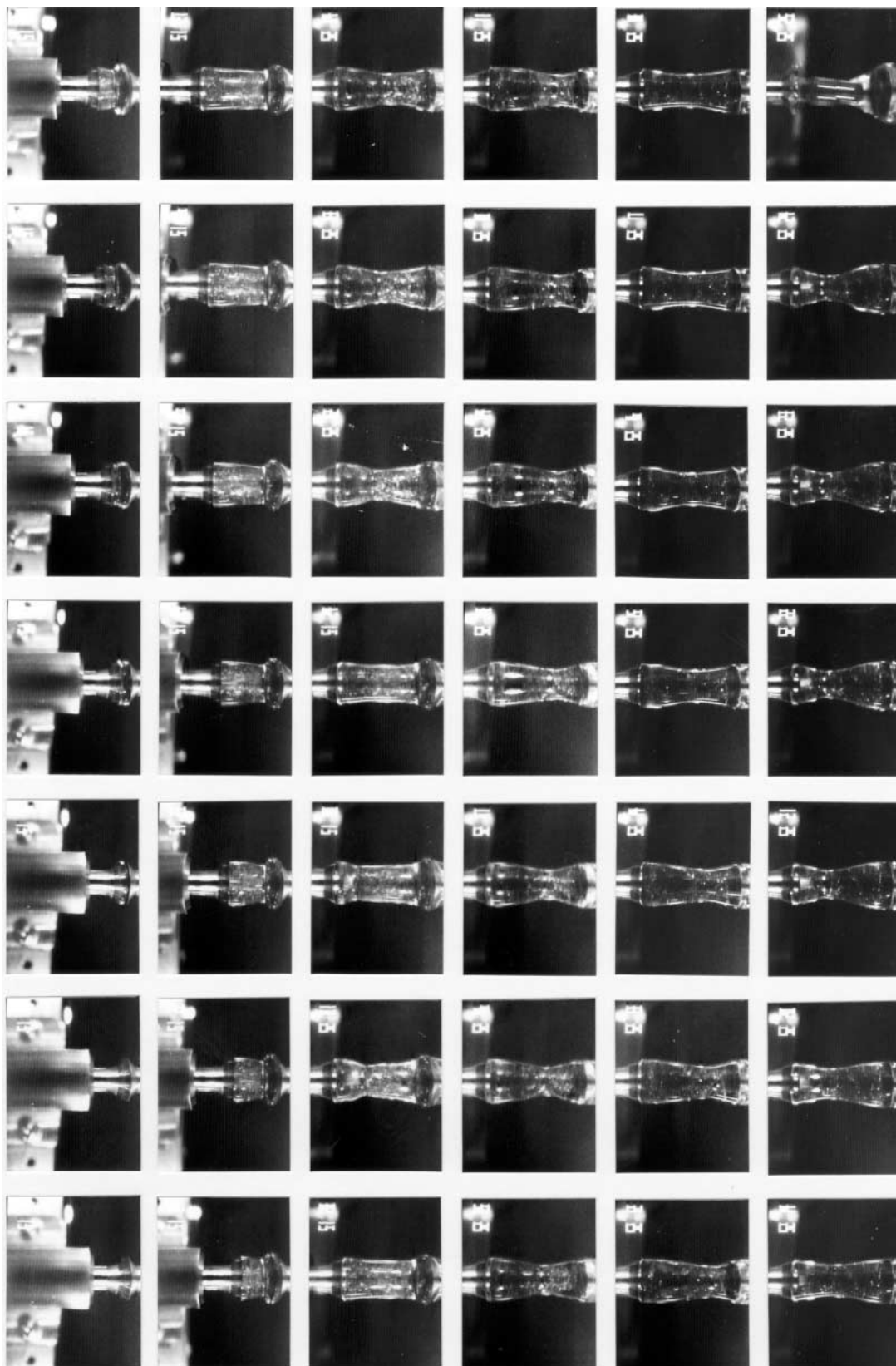


図 7-2 . 液柱形成形態 (固定ディスクエッジより漏れる)
 シリコンオイル $\eta = 5 \text{ cSt}$ ディスク径 $D = 1 \text{ cm}$ 液吐出穴径 $d = 0.4 \text{ cm}$
 液柱長さ $L = 1 \text{ cm}$ 液吐出速度 $V = 4.29 \text{ cm/s}$



図 7-3 . 液柱形成形態 (吐出速度が速いため途中で切れる)
 シリコンオイル $\nu = 50 \text{ cSt}$ ディスク径 $D = 0.5 \text{ cm}$ 液吐出穴径 $d = 0.1 \text{ cm}$
 液柱長さ $L = 1.01 \text{ cm}$ 液吐出速度 $V = 3.79 \text{ cm/s}$



図 7-4 . 液柱形成形態 (吐出速度が速いため初期段階で飛び散る)
 シリコンオイル $5cSt$ ディスク径 $D = 2cm$ 液吐出穴径 $d = 0.6cm$
 液柱長さ $L = 4.05cm$ 液吐出速度 $V = 4.19cm/s$



図 7-5 . 液柱形成形態 (一旦形成するが長さからくる不安定性のため切れる)

シリコンオイル $\rho = 50 \text{ cSt}$ ディスク径 $D = 0.5 \text{ cm}$ 液吐出穴径 $d = 0.1 \text{ cm}$

液柱長さ $L = 1.52 \text{ cm}$ 液吐出速度 $V = 2.4 \text{ cm/s}$

図 8-1 で液柱の形成、不形成に対して境界線が求まり、その傾きは1/2となった。ここで境界線の式をグラフから求めると、

$$\log(\text{Re}_d) = \frac{1}{2} \log(d/\mu) + \log(\quad)$$

グラフから座標を読み取り係数を求めると $\quad = 2.34$ になる。

したがって、液柱の形成、不形成の境界線の式は、

$$\text{Re}_d = 2.34 \left(\frac{d}{\mu} \right)^{1/2} \quad (4)$$

と求まる。

関係式 (4) から求まるレイノルズ数よりも小さい値のレイノルズ数ならば液柱の形成は可能である。逆に大きな値のレイノルズ数ならば液柱の形成は不可能ということが予想される。

図 8-1 より求めた関係式 (4) の妥当性を確かめる目的でさらに 3 回の実験を行った。図 8-1 に実験位置を、の印で示す。実験の結果は液柱形成、は液柱不形成であった。したがって、図 8-1 のグラフおよび (4) 式は正当性のあるものとして液柱の形成、不形成の吟味に用いることができる。

図 8-1 のグラフ上の直線、 $(Ud/\mu)^2/(d/\mu)$ が表す

無次元数を次のように式を書き換えることができる。

$$\frac{\text{Re}^2}{\left(\frac{d}{\mu}\right)} = \frac{(Ud/\mu)^2}{\frac{d}{\mu}} = \frac{U^2 d^2 \mu}{d} = \frac{U^2 d^2}{D} = \frac{U^2 D}{D^2} \cdot \frac{d^2}{D^2} \quad (5)$$

(5) 式はウェーバ数 (We =慣性力/表面張力) と (液吐出穴径/ディスク径) を掛けた式で表されている。

したがって、液柱形成ではウェーバ数と d/D の比が支配的な値となる。このことは、ある値のウェーバ数が臨界値として存在し、この値より小さな値であれば液柱の形成は可能であり、大きな値の場合は液柱の形成は不可能であるといえる。

以上のことを、図 5 に示す液柱形成モデルでウェーバ数が液柱の形成に関係することを考察する。移動ディスクが速度 V で移動するとき、液吐出穴から流出する液体の運動エネルギー $E_{kin}[\text{erg}]$ は微小時間 t では

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot U \cdot t \cdot U^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot D^2 \cdot V \cdot t \cdot U^2 \end{aligned} \quad (6)$$

と表せる。

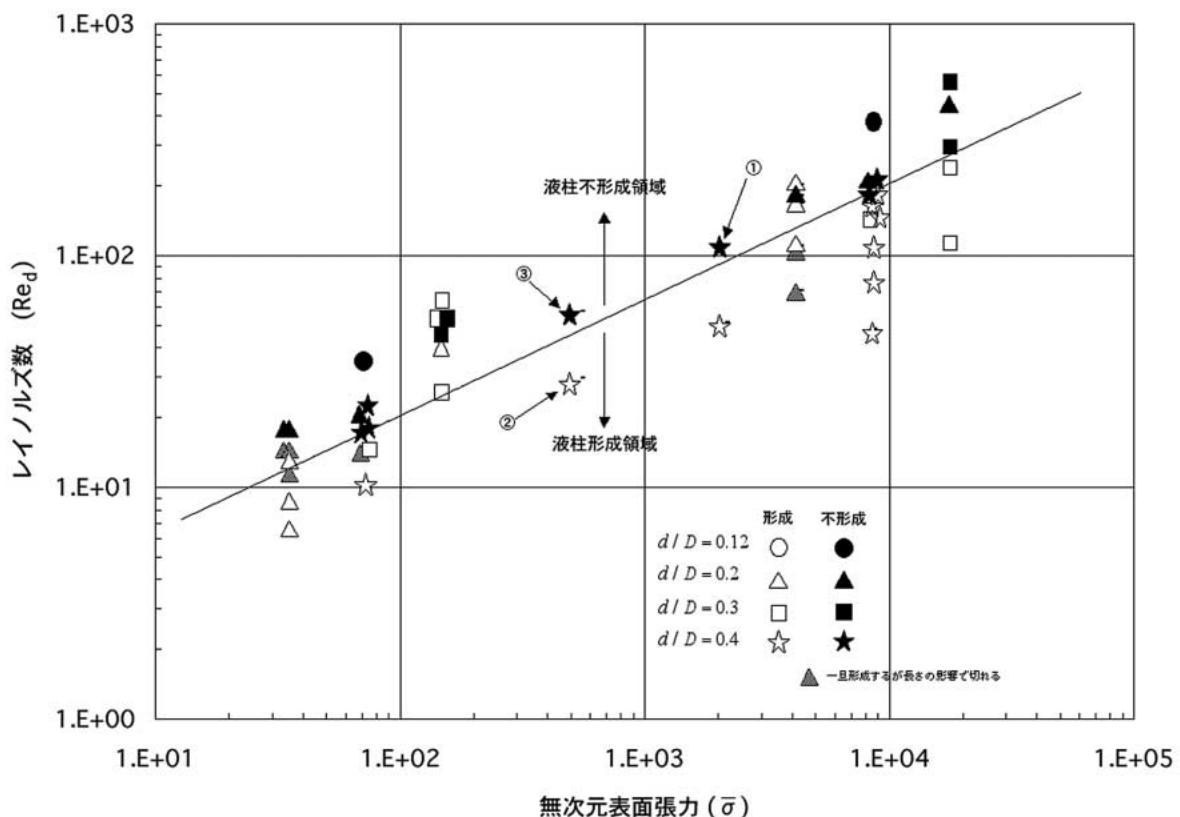


図 8-1 . 無次元表面張力(d/μ)とレイノルズ数(Ud/μ)

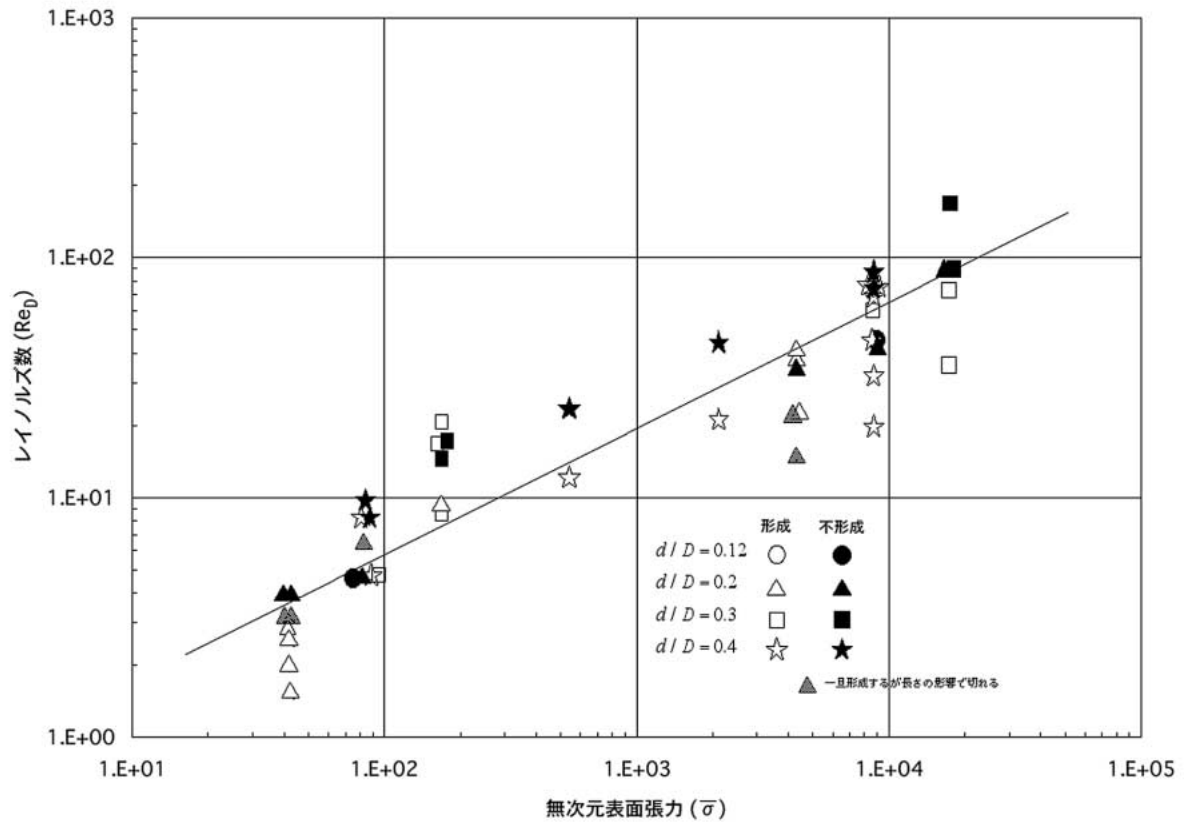


図 8-2 . 無次元表面張力(D/μ)とレイルズ数($VD/$)

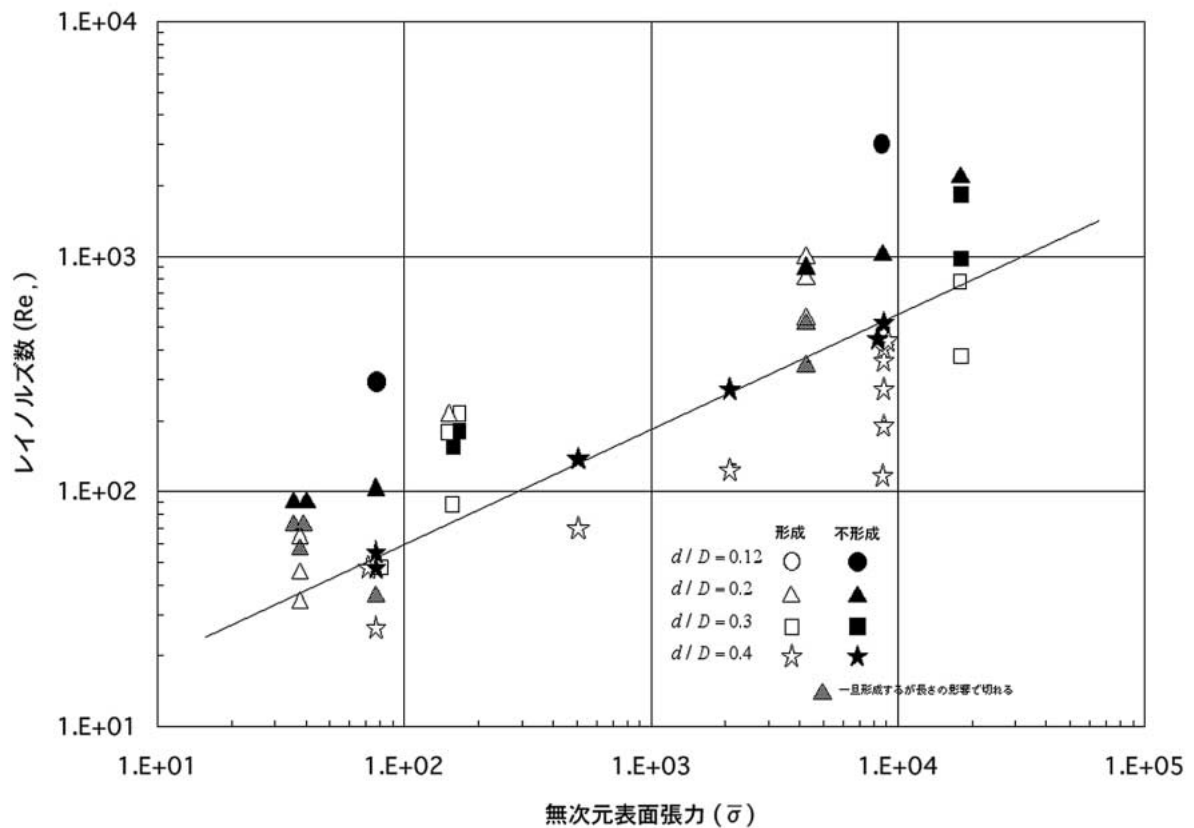


図 8-3 . 無次元表面張力(D/μ)とレイルズ数($UD/$)

流出した液体がディスク上にある場合の表面張力エネルギー $E_{surf}[\text{erg}]$ は

$$E_{surf} = \pi D \cdot L = \pi D \cdot V \cdot t \quad (7)$$

と表せる。

ディスクの液吐出穴から流出した液体がディスク上で液柱として持ち堪えられなくなり、液がディスクから漏れるときの条件を以下のようにする。

$$E_{kin} - \pi E_{surf} \geq 0 \quad (8)$$

(π : 係数)

(8) 式に、(6) (7) 式を代入すると、

$$\frac{1}{8} \pi D^2 V \cdot t \cdot U^2 - \pi \cdot D \cdot V \cdot t \geq 0$$

$$\frac{DU^2}{8} \geq 8 \quad (9)$$

となり、ウェーバ数が8 (π は未定係数) 以上の値をとれば液柱は形成されずディスクから液が漏れると予想される。

4. まとめ

航空宇宙技術研究所の落下塔を用いて実現した1.4秒間という短時間の微小重力場において、ディスク間に液柱を形成する実験を行い、移動するディスクに開いた穴から吐出するシリコンオイルの吐出速度に対して液柱の形成、不形成について以下のことが判明した。

- 1) 図8-1に示す境界線よりも下ならば液柱は形成でき、上ならば液柱は不形成となることが明らかになった。
- 2) 図8-1に示す境界線が明らかになったことにより液柱形成装置設計の際に必要なディスク移動速度、液吐出穴径等の値を決めるのに用いることができる。
- 3) 今回の液柱形成実験に用いたディスクエッジ形状 (角度45°) では、液柱が安定に形成される条件範囲においてディスクエッジからシリコンオイルの漏れは観測されなかった。
- 4) 液柱形成においてウェーバ数が液柱の形成、不形成に関する重要な無次元数である。ただし、現象と一致させるまでには至らなかった。

液柱の形成、不形成の形態を5つのパターンに分類して実験結果を整理したが、液がディスクから漏れる、液がディスクから飛び散る、吐出速度が速いために切れる等の現象を支配している無次元数、その臨界値については今後の課題である。

5. 参考文献

- 1) C.Y.SHEIH and WEN-JEI YANG ; “ Transient thermocapillary flow in rectangular tanks with phase change ”, Int. J. Heat Mass Transfer , Vol.30 , No.5 , PP.843-854, 1987
- 2) Mituru Ohnishi, Shoichi Yoshihara, Hisao Azuma, Shinichi Yoda, Kazunori Kawasaki ; “ Marangoni Convection in a Liquid Column under Microgravity – Experiment Using TR-1A Sounding Rocket and Computer Simulation – ”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 10(1) (1993) 8
- 3) Mituru Ohnishi, Shoichi Yoshihara ; “ Secondary Droplet Creation from a Long Liquid Jet ”, Proc. IAF-99-J.1.07(1999)
- 4) 荻原稔千夫、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TR - 991 ,
- 5) 信越化学工業 (株) , 技術資料 (シリコンオイル KF96 性能試験結果) 1995

独立行政法人 航空宇宙技術研究所資料 TM-770 号

平成15年5月発行

発行所 独立行政法人 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7-4 4-1
電話 (0422) 40-3935 〒182-8522

印刷所 弘久写真工業株式会社
東京都立川市上砂町 5-1-1

© 2003 独立行政法人 航空宇宙技術研究所

本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、情報技術課資料係にご連絡下さい。

本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。