

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

横方向メニスカス力の接触角依存性

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2009-05-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小杉, 康太 メールアドレス: 所属: |
| URL | https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/783 |

修士学位論文
横方向メニスカス力の接触角依存性

平成 20 年度
(2009 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻
小杉 康太

目次

| | |
|--|----|
| 第1章 序論 | 4 |
| 1.1 研究背景 | 5 |
| 1.2 メニスカスの研究と表面張力 | 6 |
| 1.3 研究目的 | 7 |
| 1.4 本論文の構成 | 8 |
| 第2章 実験 | 9 |
| 2.1 実験の目的 | 10 |
| 2.2 実験装置1（ひずみゲージを用いた横方向メニスカス力の測定） | 11 |
| 2.2.1 全体構成 | 12 |
| 2.2.2 測定系の構成 | 13 |
| 2.2.3 データの取り込み | 14 |
| 2.2.4 ひずみゲージ式平行板ばね | 15 |
| 2.2.5 撮影カメラ | 17 |
| 2.2.6 キャリブレーション | 18 |
| 2.2.7 実験装置1の問題点 | 20 |
| 2.3 実験装置2（静電容量型非接触センサを用いた横方向メニスカス力の測定） | 21 |
| 2.3.1 全体構成 | 21 |
| 2.3.2 測定系の構成 | 23 |
| 2.3.3 データの取り込み | 24 |
| 2.3.4 静電容量型非接触センサ | 25 |
| 2.3.5 キャリブレーション | 26 |
| 2.3.6 実験装置の改良点 | 30 |
| 2.4 使用機器および試料 | 31 |
| 2.5 実験方法 | 32 |
| 2.5.1 メニスカス形成後の横方向メニスカス力の測定 | 32 |
| 2.5.2 メニスカスの形成を伴う横方向メニスカス力の測定 | 33 |
| 2.5.3 実験器具操作 | 34 |
| 2.6 実験条件 | 35 |
| 第3章 結果と考察 | 36 |
| 3.1 実験結果 | 37 |
| 3.2 すべり現象について | 55 |
| 3.3 実験の再現性について | 58 |
| 第4章 横方向メニスカス力の起因 | 59 |
| 4.1 液滴周囲での力学的な釣り合い | 60 |
| 4.2 実験での接触角差 | 62 |
| 4.3 接触角差による横方向メニスカス力の変化 | 64 |
| 第5章 結論 | 65 |
| 参考文献 | 67 |

付録 68
謝辞 75

第 1 章 序論

1. 1 研究背景

近年、機械技術の発展により機械要素の小型化が急速に進んでいる。例えば、掌に入る大きさの携帯電話には、数年前までは考えられなかった程の莫大な情報と機能が入っている。デジタルカメラや薄型テレビなど、身の回りの機械製品も小型化、高性能化への発展が著しい。また、医療分野において血管内を自由に動き回るマイクロマシンの開発も行われており、医学、工学、化学など様々な分野で機械要素の小型化に向け様々な研究が活発に行われている。またハードディスクドライブのヘッドスライダの設計など、微小化に向けた開発は今後も続くと思われる。

しかし、これらの小型機械や情報機器などの微小な機械要素のしゅう動面の設計・開発には、通常の機械では無視されてきた表面力の影響を考慮する必要がある。通常の機械では、機械自身の持つ自重や外部からの負荷に対し、表面張力や粘性力といった表面に作用する力は小さく無視できる程度である。ところが、このような面積に作用する表面力がマイクロマシンなどの微小な領域で活動する機械に与える影響は、体積力である重力や慣性力に対して、スケールの縮小に伴って相対的に大きくなる。このことからマイクロマシンが動く世界では、周囲に存在する液体が機械表面に与える力が支配的となる。

表面力の支配的となる領域での機械の開発は、これまでのマクロの領域での設計技術とは違った凝着や摩擦などトライボロジーに関する種々の問題が発生する。これは当初、微小領域で動き回るマイクロマシンの開発が始められた頃に予想されていたよりもはるかに複雑で難しく、未だ解決されていない問題が多い⁽¹⁾。

しかし、機械の小型化が進む今、微小領域でのトライボロジーに関する問題を解決することは、今後マイクロの世界における機械技術発展には欠かせない。それぞれのスケールや環境において、表面張力による摩擦や凝着の問題を明らかにすることが重要となる。



Fig. 1 細管郡外部検査試作システム

三菱電機(株) 松下技研(株) 住友電気工業(株) <http://ascii24.com/news/>より

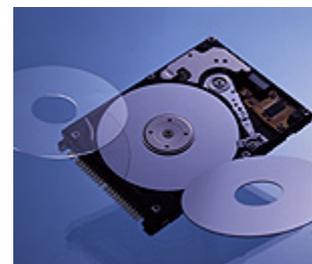


Fig 2. ハードディスクドライブ

HOYA 株式会社 <http://www.hoya.co.jp/>より転載

1. 2 メニスカス研究と表面張力

液体を管の中に入れ立てると、液体は管内を上昇して外部の液面より高くなったり、低くなったりする。これを毛管現象と呼び、交じり合わない2つの液体の境界、あるいは液体と空気の境界に見られる化学現象である。これらの境界は移動し、その境界面のエネルギーが最小となるように変形するが、この毛管現象によって、固体面間に液体が存在するとき、変形した液体はメニスカスと呼ばれる液体架橋を形成する。この時の液体と気体の境界面は曲線になり、その形状は固体の表面性状や、液体の粘性や量、周囲の湿度や温度などによって様々な形状に変化する⁽³⁾。メニスカスの研究とは液体の毛管現象に密接な関係がある。

メニスカス力を考慮することが重要となる小型機械が活動する領域と言っても、そのスケールは目で見ることのできるミリスケールから、周囲の湿度や材料の分子レベルの影響を受けるナノスケールまで様々である。本研究ではメニスカスの表面張力が支配的となるミリスケールの領域における研究を行う。この領域でのメニスカスによる表面張力は Zisman が時計のゼンマイ仕掛けの潤滑に関する研究を行ったように、身近に感じることのできる機械にも応用される。しかし、この領域において液体のメニスカスが及ぼす表面張力については明らかになっていない事が多く、未だ進行中の分野でもある⁽²⁾。

ミリスケールの領域におけるメニスカス力の影響について、大部分は表面張力によると考えられる。表面張力は液体の単位長さに作用する力である。そのため、表面張力は液体と固体の接触線上に沿って働く。この力は液体と固体の表面性状や形状、液量などによって接触線が変形し、様々な方向へと働く。このことから、ミリスケールにおけるメニスカス力を考える上で、液体と固体の表面がなす角（接触角）を無視することはできない。本実験のようにミリスケールの領域におけるメニスカスの研究では、試料表面の撥水性や粗さ、液体の持つ表面張力、さらには接触角の大きさが重要な鍵となる。



Fig.3 身近に見ることのできる毛管現象
化学実験資料集 digest より転載

1. 3 研究目的

本研究ではメニスカス力の特徴を明らかにするために、固体面間に形成されたメニスカスをせん断させた場合に発生する、横方向のメニスカス力を測定する。

これまでに、固体面に形成されたメニスカスに関する研究は、メニスカスの吸着力や反発力についての研究が活発に行われてきた。本研究室でも 2007 年に小泉らによる「メニスカスの形成を伴う運動についての研究」で、実験と粒子法を用いた解析からメニスカス形成による物体に与える影響を明らかにした⁽⁴⁾。また、松岡・福井らは液体メニスカス架橋の形成から破断までのフォースカーブを得ることに成功している⁽⁵⁾。

メニスカスに“ずり”を加えた場合にも吸着方向に対し横方向にメニスカス力が発生することが知られている。しかしながら、この横方向のメニスカス力を扱った研究はまだ少ない。その理由として、メニスカスの縦方向の吸着力、反発力に対し横方向のメニスカス力は非常に小さいことがある。このことから本研究では高精度な実験装置を作成し横方向のメニスカス力の測定を行う。

また、著者は周囲の環境がメニスカス力に影響を与える直接的な原因は接触角の変化によると考えた。接触角とは液滴を固体表面に置いたときに、液体・固体・気体の 3 つの境界線（三重線）を結んだ交点に現れる液体と固体がなす角度のことである。詳しくは第 3 章で述べる。メニスカスの持つ縦方向の力成分については、親水性の接触角（90 度以下）であれば、固体面を引き寄せる吸着力となり、撥水性の接触角（90 度以上）であれば、固体面を引き離す反発力となることがこれまでの研究により知られている。本研究の目的として、横方向のメニスカス力について、固体面を移動させることで、接触角の変化を観察し、メニスカス力との関係性を調べる。



Fig.4 ずりを加えたメニスカス

1. 4 論文の構成

本論文では固体面間に形成された液体架橋（メニスカス）について一方の固体面を移動することで、メニスカスにずりを加えた時のメニスカス形状の変化及び横方向に働くメニスカス力の大きさを測定し、横方向メニスカス力の働くメカニズムを明らかにする。

まず第1章「序論」では、小型機械の発展動向、微小世界におけるメニスカス力の重要性や機械設計の問題点を挙げ、本研究の必要性、目的について述べた。

第2章「実験」では、本研究のために設計製作した実験装置の性能、構成について述べ、さらに実験の条件について述べる。

第3章「結果と考察」では、上の装置を用いた実験の結果と、その結果についての考察を述べる。

第4章「横方向メニスカス力の起因」では、横方向メニスカス力が発生するメカニズムについて接触角に注目し明らかにする。

第5章「結論」では、以上の実験結果およびメニスカス力のメカニズムをまとめる。

第2章 実験

2. 1 実験の目的

本実験では固体面間にメニスカスを形成し、一方の固体面を吸着方向に対し横方向に移動させる。この時の横方向のメニスカス力の測定を行う。また、濡れ性を変えたガラスを使用し、その影響についても調べる。これらのメニスカス力測定時のメニスカスの変形の過程を、顕微鏡に接続されたカメラで撮影する。また、メニスカス力測定結果とカメラで取得した映像から、メニスカスの形状の変化とメニスカス力との関係性について明らかにする。

2. 2 実験装置 1 (ひずみゲージを用いた横方向メニスカスの測定)

2. 2. 1 全体構成

本実験では、微小な力の測定と微小領域の撮影を行う。そのために実験装置に要求される諸条件を述べる。

- 1) 微小な力の測定
- 2) 固体面の高精度な移動
- 3) 防塵
- 4) 防振
- 5) 理論的に評価のしやすい実験条件

以上の条件を満たすように実験装置を作成した。各々の詳細については以下に示す。

1) 微小な力の測定

本実験の目的は、メニスカスの横方向の測定である。同じ条件での縦方向の吸着力、反発力に対してごく僅かな力しか発生しない。そのために縦方向の力（吸着力・反発力）の影響がなるべく少ない測定装置を作成する必要がある。このため平行板ばねを縦に使用することで、縦方向のひずみと固体面の移動によるねじれを少なくした。また、振動を小さくするためにばね定数を出来るだけ高く設定し、板ばねにひずみゲージ4枚を貼り付け、これらのひずみゲージをホイートストーンブリッジ式に組んだ。

2) 固体面の高精度な移動

実験はメニスカスを形成した後、固体面を移動させる。固体面はステージに固定されているが、振動の影響を少なくし正確なメニスカスを測定するために、本実験では自動マイクロステージにより固体面を移動し、 $5\mu\text{m}$ の精度で移動量を制御できるようにした。

3) 防塵

埃や塵は実験で使用する液体の性質や、ガラス基板の表面性状に重大な影響を与える恐れがある。そのため、実験は実験装置全体をビニールシートで囲ったクリーンルーム内で行った。また実験で使用するガラス板は1回の計測ごとにレンズクリーナーで洗浄し、試料液体を吸い上げるマイクロピペットのチップは毎回新しいものに交換して使用した。

4) 防振

実験は微小な力を板ばねによって計測するため、周囲の振動は実験結果に大きな影響を与える。これら外部からの振動を排除するため、実験装置を空気浮上式の除振台の上に載せた。

5) 理論的に評価のしやすい実験条件

実際のメニスカスの形状変化による力の変化を比較するには、平行な固体面間に形成されたメニスカスが望ましい。しかし、固体面の完全な平行状態を維持したままメニスカスを形成するのは非常に困難である。そこで実験では、上部の固体面を曲率の大きな球面ガラスを使用することで、メニスカスとの接触面の傾きの不均一を小さくした。また、撮影に使用するカメラは、液滴の正面より下から球面ガラスと液体の接触面を撮影することで、接触角を測定し易くした。

実験装置の全体図を Fig. 5, 写真を Fig. 6 に示す.

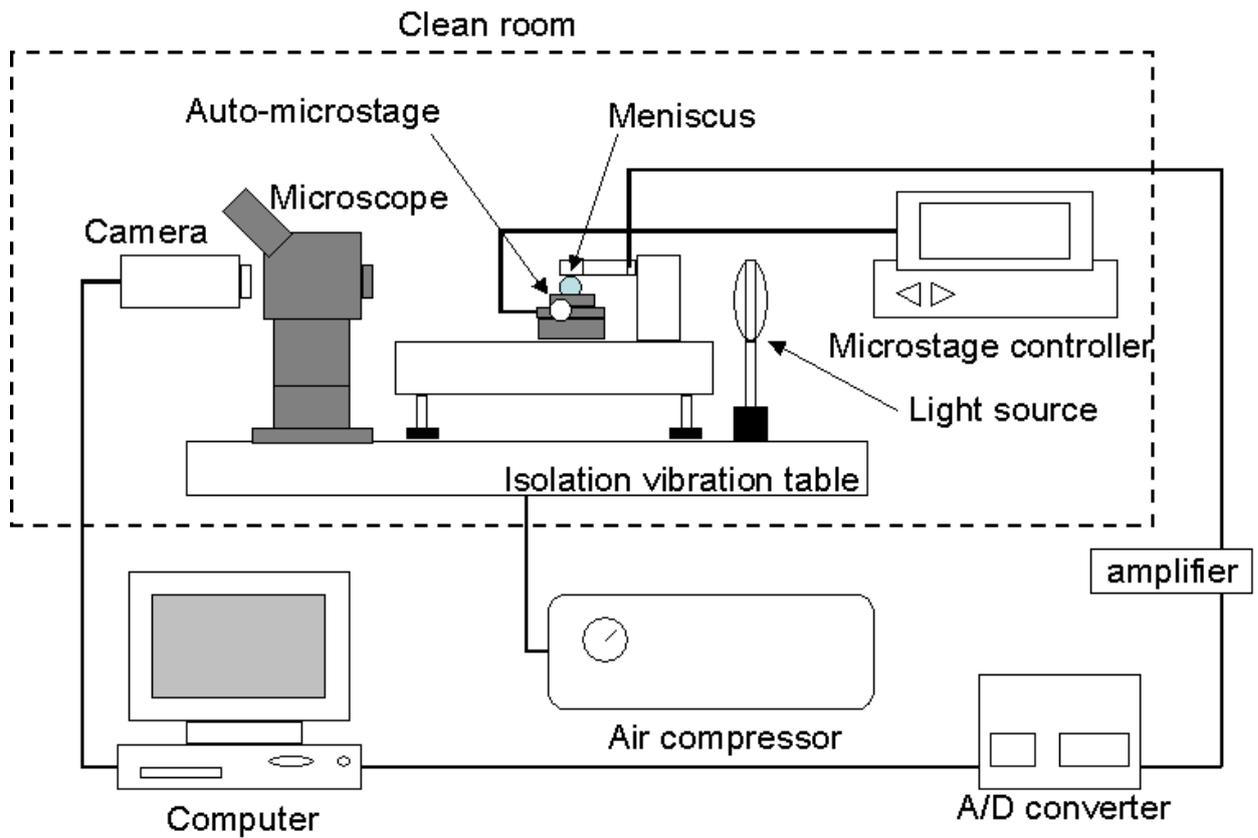


Fig. 5 実験装置全体図



Fig. 6 クリーンルーム

2. 2. 2 測定系の構成

測定系の構成について詳しく述べる.

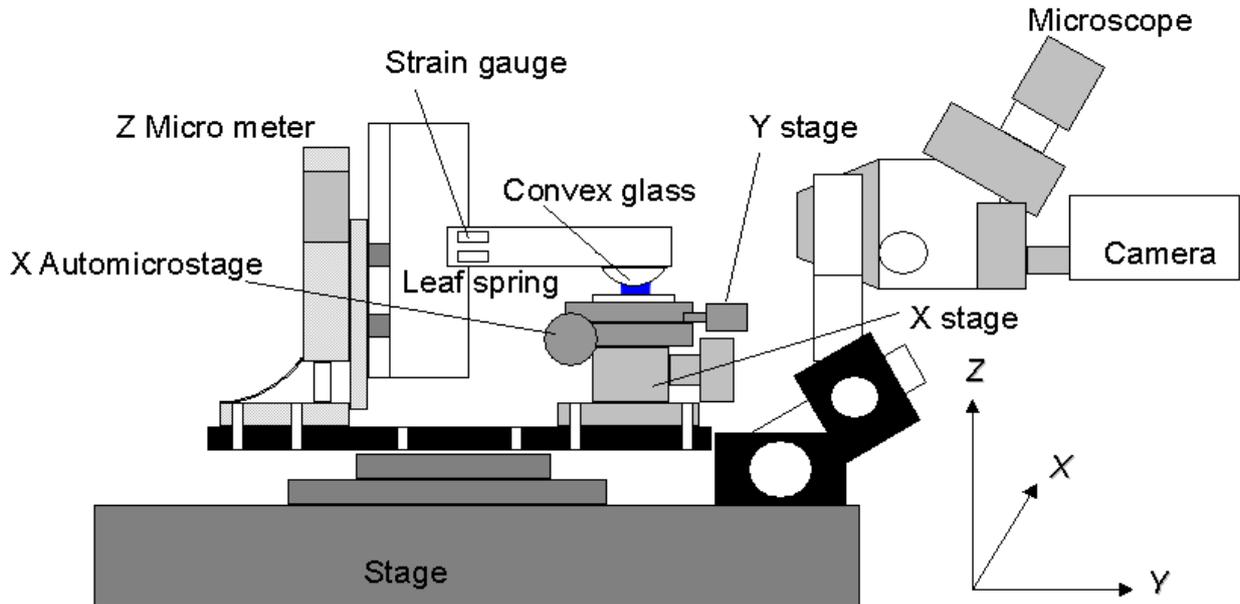


Fig. 7 測定系の構成

実験では板ばね先端に取り付けた球面ガラスに働く力を高精度に測定することが重要である. 手順について詳しくは後述するが, ガラス板と球面ガラスの間に液滴を置き, 球面ガラスを近づけてメニスカスを形成する. 顕微鏡の焦点距離や球面ガラスの中心に液滴が接触するように, Y 軸方向と X 軸方向に Y ステージと X ステージで微調整し位置決めできるように製作した. 球面ガラスとガラス板との間の距離は, メニスカスの高さを決定するため, より高い精度の調整が必要となる. そのため, Z 軸方向の調整は $1 \mu\text{m}$ で調整が可能なマイクロステージを使用した.

実験では下部のガラス板を移動させる. ガラス板が移動する X 方向へも $5 \mu\text{m}$ の精度を持つ自動マイクロステージを使う. また, 振動の影響が少ないようにこの自動マイクロステージは専用のコントローラにより実験装置外部より制御する.

2. 2. 3 データの取り込み

データの取り込みについて詳しく述べる。板ばねに取り付けた球面ガラスと自動マイクロステージに設置したガラス板との間に、液滴を置きメニスカスを形成する。ガラス板の移動に伴う横方向メニスカスカの大きさを、板ばねのひずみの大きさにより計測する(2. 2. 3 平行板ばね参照)。板ばねに貼り付けられたひずみゲージにより板ばねの変位は比例した電圧に変換され、さらにアンプを介することで、±10V の電圧に増幅される。この電圧は 16bit A/D ボードによりコンピュータに取り込まれ、LabVIEW によりデータ処理を行う。本実験は 1～2 分間のメニスカスカを測定する。ステージは $2.4 \times 10^{-2} \text{mm/s}$ で移動させる。サンプリング速度 100Hz で記録した。また、撮影するカメラは 50frame/s で撮影し、ひずみゲージでの測定開始時にトリガを設定することで、映像とメニスカスカの測定データを同期させた。

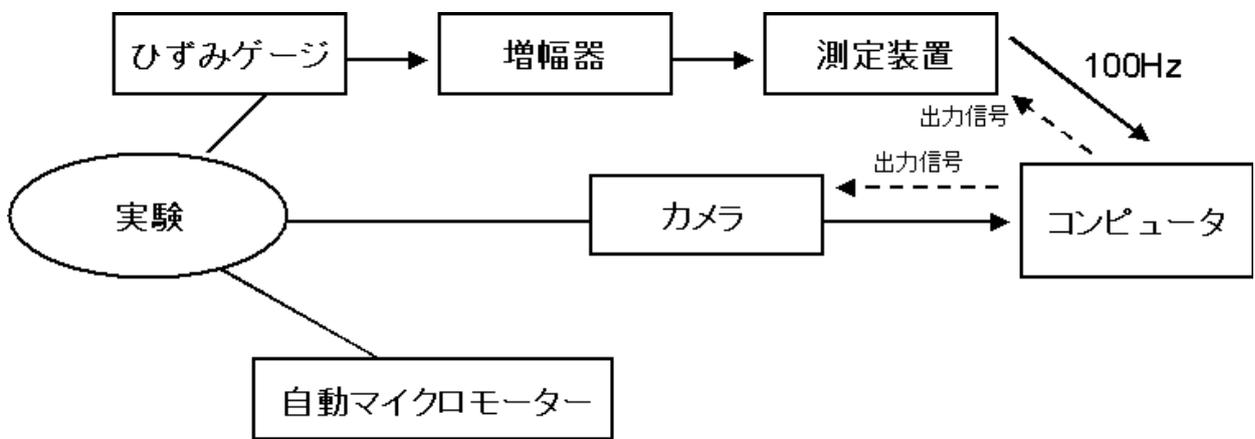


Fig. 8 測定系全体構成



| | |
|--------|-----------------------|
| ひずみゲージ | 共和電業製 |
| 名称 | KFG5-120-C-1-16-L1M2R |
| 抵抗値 | 120Ω |
| ゲージ率 | 2.1 |

Fig. 9 ひずみゲージ



| | |
|-----|---------|
| アンプ | NEC 三栄製 |
| 名称 | AS1302 |

Fig. 10 ひずみゲージ用アンプ

2. 2. 4 ひずみゲージ式平行板ばね

ひずみゲージ性能を表 1 に示し、Fig. 11 にひずみゲージを使用した平行板ばねの図を示す。本実験では、横方向のメニスカス力を高精度に測定する必要がある。凸型の球面ガラスを板ばねの先端に取り付ける。球面ガラスにメニスカス力が働くと板ばねがたわむ。このたわみを、板ばねに貼り付けた 4 枚のひずみゲージが測定し、これにばね定数を乗じて球面ガラスに働くメニスカス力を測定する。平行板ばね方式とすることで、一枚の板ばねよりもねじれによる影響が小さくなる。また、上部の固体面を曲率を持った凸型とした理由は、メニスカスを形成する際に、固体面に曲率をもたせることで、液体との接触面が傾き固体面間距離の不均一となることをなくすためである。

表 1. ひずみゲージ仕様

| | |
|--------|-----------------------|
| 機種名 | KFG-5-120-C-1-16L1M2R |
| 抵抗値 | 120 Ω |
| ゲージ率 | 2.1 |
| ゲージ長 | 5mm |
| 使用温度範囲 | -196～120℃ |
| ケーブル長 | 1.5m |
| 熱変形 | 16.2PPM/℃ |
| 温度係数 | +0.008%/℃ |

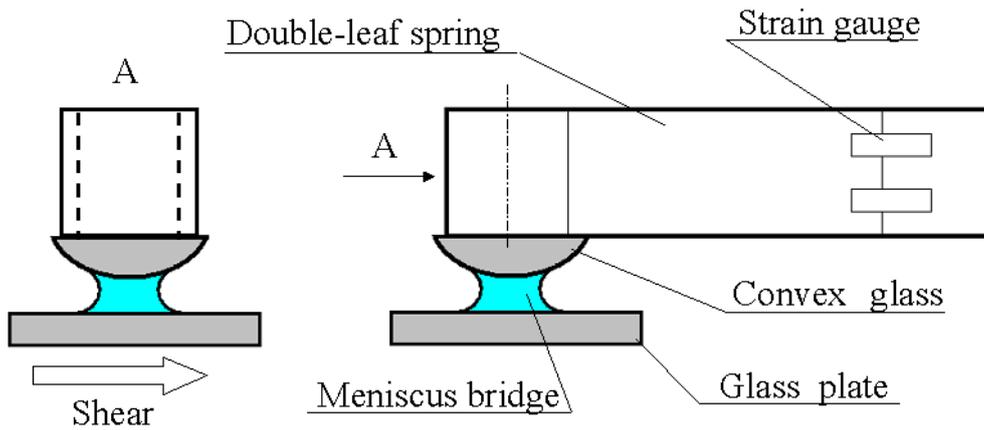


Fig. 11 ひずみゲージ式平行板ばね

板ばねの長さは 100mm で板厚は 0.07mm, 板幅は 12.7mm, ばねとなる部分の材質はステンレスで, その他の部分はアルミを使用して作成した. ひずみゲージ式の板ばねの作成にあたり, 下式によりばね定数を決めた.

$$\text{ひずみ } \varepsilon = \frac{3 F L}{2 E b t^2}$$

$$\text{変位 } \delta = \frac{F L^3}{2 E b t^3} \quad (\text{mm})$$

$$\text{ばね定数 } k = \frac{F}{\delta} \quad (\text{N/mm})$$

k : ばね定数 E : ヤング率 b : 板幅 t : 板厚 F : 力

2. 2. 5 撮影用カメラ

メニスカスの形状の変化を観察するため、顕微鏡に接続したカメラで撮影した。使用したカメラは DITECT 製の HAS-220 で、撮影スピードはフルフレームで 200frame/s、最大 1000frame/s、内部 12bitA/D でデジタル転送により高画質、高感度での撮影が可能である。

本実験では、100frame/s で撮影し、動画と画像を記録した。また、実験では顕微鏡を介し、非常に狭いエリアを撮影するため、光源が必要となる。LED ランプを光源として明るさを確保した。

実験で測定したメニスカス力と撮影された画像を比較するため、コンピュータ内のソフト LabVIEW によりカメラの撮影開始トリガを測定記録開始と同期させた。



Fig. 12 撮影用カメラ

表 2. 撮影用カメラ仕様

| カメラヘッド | | キャプチャーボード | |
|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| カメラタイプ | モノクロ | インターフェイス | PCI パス |
| センサ | CCD | 転送方式 | バスマスター |
| 有効画素数 | 640×480 | 転送速度 | 133MB/sec |
| センターサイズ | 1/3 インチ | 入力信号 | カメラリンク |
| レンズマウント | C マウント | カメラ接続 | リンクケーブル |
| データ出力 | ベースコンフィグレーション | サイズ | 120×64 mm |
| シャッタースピード | 最高 1/5 万秒 | 外部同期 | カメラ間で同期 |
| 最低被写体照明度 | 10luxF1.4 時 | 外部トリガー入力 | LabVIEW |
| カメラ電源 | ボードから供給 | 録画用メモリ | PC メモリ |
| サイズ | 44.2×44×82.6 mm | | |
| 重量 | 290g | | |

2. 2. 6 キャリブレーション (ひずみゲージ)

板ばねに取り付けた球面ガラスに働く、横方向のメニスカスを板ばねのたわみとして測定する。たわみは板ばねに貼り付けた4枚のひずみゲージの変位として出力される。このひずみゲージの校正を行うために Fig. 13 に示すような装置を製作した。変位を測定できるマイクロメータにより測定対象に荷重を与え、電子天秤により荷重を計測することで、変位と荷重のキャリブレーションを行い、ばね定数を求める。また、変位はひずみゲージより電圧として出力されるため、電圧に対する荷重のキャリブレーションも同時に行った。

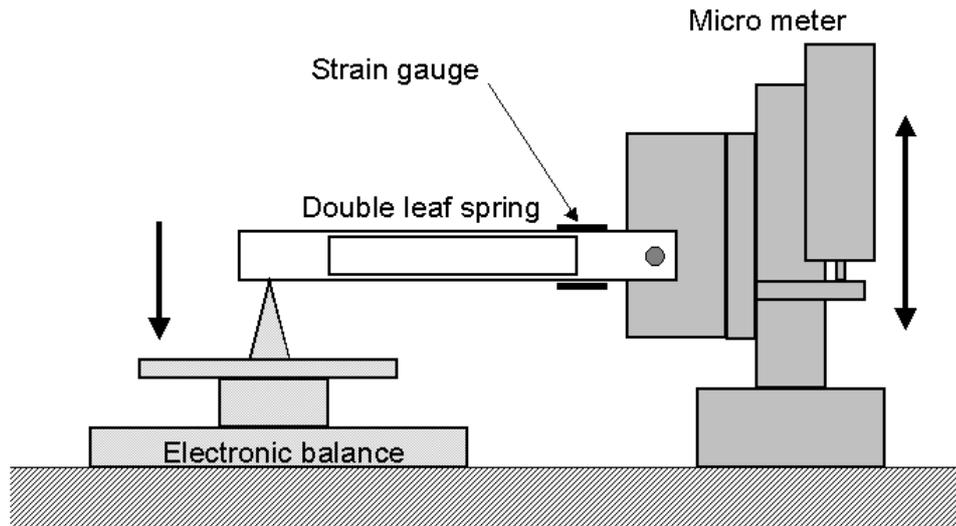


Fig. 13 ひずみゲージキャリブレーション

板ばねに荷重を加えて行った時の、変位に対する荷重のキャリブレーション結果を Fig.14 に示す。

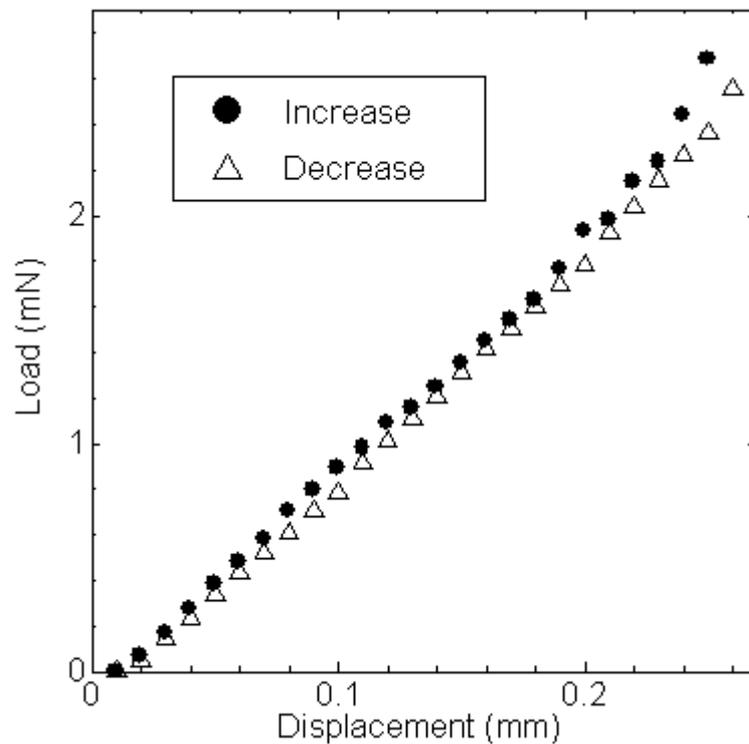


Fig. 14 実験装置1キャリブレーション, 変位と荷重の関係

変位に対する荷重のキャリブレーションの結果、ばね定数は荷重増加時で 10.214N/m、減少時は 10.064N/mとなった。荷重増加時と減少時とで多少ずれがあるが、その差は 2%以内であるので、荷重時と減少時の平均値 10.139N/m をばね定数とした。また、(2.2.2)項で説明した設計値とばね定数、物性との関係式である下式に決定したばね定数を代入して板厚を求めると、0.06999mm となる。設計値が 0.07mm であるので、工作精度や計測器の精度を考慮すれば設計通りのばね定数が得られた。

$$k = \frac{2Eb^3}{l^3}$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{l^3 k}{2Eb}}$$

k : ばね定数, E : ヤング率, b : 板幅, l : 板長さ, h : 板厚

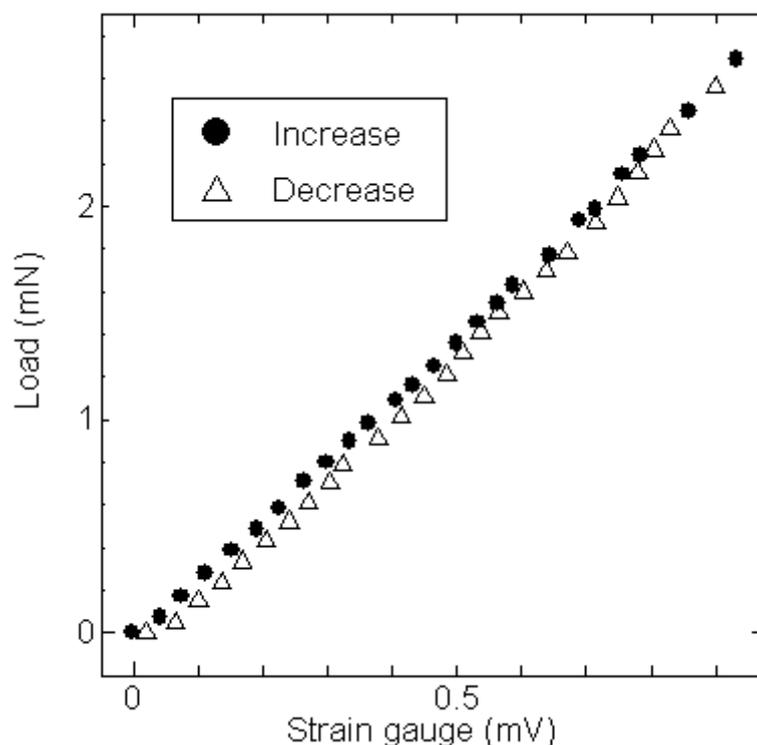


Fig. 15 実験装置 1 キャリブレーション, 荷重と電圧の関係

次にひずみゲージの出力電圧と荷重の関係をグラフ化したものを Fig. 15 に示す。荷重増加時、減少時の電圧に対する荷重は多少のずれが生じたものの、誤差の割合は小さく概ね一致している。傾きを平均した値 2.932mN/V を出力電圧に乗ずることで発生する力を計測する。

2. 2. 7 実験装置 1 の問題点

ひずみゲージを用いた実験装置 1 ではいくつかの問題点があった。ひとつは周囲の振動の影響を大きく受けてしまうことである。横方向のメニスカス力は非常に微小な力であるため、ひずみゲージにより十分な変位を検出するためには、ばね定数を小さくする必要があった。ばね定数が小さいために、ばね部先端の球面ガラスが振れてしまい、周囲の影響を受け易くなってしまったと考えられる。

次に、出力電圧のゼロ点がずれてしまうという大きな問題があった。下の Fig. 16 に示されるように出力電圧に振動とは別のずれが生じている。このずれについて、計測する横方向メニスカス力は最大で 0.2mN 前後である。ひずみゲージの出力電圧に換算すると約 0.07V の出力を得ることとなる。このゼロ点のずれは時に、 0.01V 前後のずれを生じてしまうことがある。原因として、ひずみゲージ貼り付け部や配線途中での接触不良や、 $\pm 10\text{V}$ のひずみゲージの出力電圧に対し、計測する値が小さすぎることなどが考えられる。

実験ではこのずれが生じていないとみなせる結果のみを採用した。このため信頼性の高いデータを取得するために、繰り返し同じ実験を行う必要があった。

また実験では液滴形状が急激に変化するすべり現象が生じた。ゼロ点のずれの問題を解決すると同時に、小さな変位でこのすべり現象について詳細に計測するにはより高速度・高分解能の装置が必要となる。そこで静電容量型の非接触センサを用いた測定形も製作することにした。

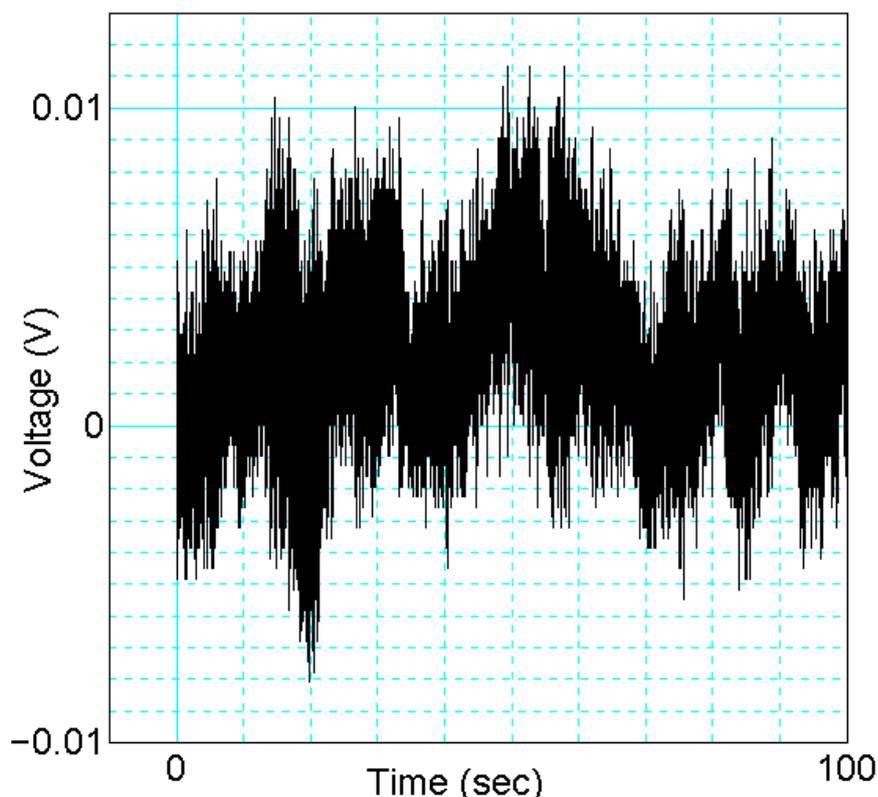


Fig. 16 実験装置 1 の問題点

2. 3 実験装置 2 (静電容量型非接触センサを用いた横方向メニスカスの測定)

2. 3. 1 全体構成

ひずみゲージを用いた実験を行った後、メニスカスの値のゼロ点がずれてしまう問題や、ばね定数が小さいために周囲の振動を拾いやすいといった問題が生じた。更に液滴のすべり現象も精密に測定できる装置が必要となった。そこで従来の実験装置に改良を加え、静電容量型非接触センサを用いた装置を製作した。以下に装置の改良点を述べる。

- 1) ばね定数の変更
- 2) 測定装置周辺器具
- 3) 球面ガラス取付部
- 4) 接触角の撮影

1) ばね定数の変更

ひずみゲージを用いた実験を行った結果、横方向のメニスカスは当初予想していたよりも小さく、そのため、板ばねの変位も小さくなり十分な出力電圧が得られていないことが分かった。しかし、板ばね先端に球面ガラスを取り付ける必要があるため、ばね定数をこれ以上小さくすると、ばね部が球面ガラスの自重でたわんでしまう恐れがある。そこで、より小さい変位(変位分解能 5 nm)の測定が可能な静電容量型の非接触センサを用いることで、ばね定数を大きくとることにより、急激な液滴のすべり現象についても詳しく測定することを可能とした。

2) 測定装置周辺器具

非接触センサを取り付けるために、センサを固定する器具を製作した。センサは測定範囲が $\pm 10 \mu\text{m}$ と小さく、測定対象物との距離を高精度に位置決めする必要がある。測定対象となるばねとの距離をマイクロメータで調整し、ばねとセンサを一体型の構造とすることで、一度位置決めすれば実験の度に調整する必要のないような装置を設計・製作した。

3) 球面ガラス取付部

ひずみゲージを使用した実験装置では、板ばねに直接球面ガラスを接着していた。そのため、濡れ性の違う球面ガラスを使用する場合は、ひずみゲージを貼り付けたばね部から製作し直す必要があった。球面ガラス取付部をばねから着脱式とすることで、球面ガラスの交換・洗浄を容易にした。

4) 接触角の撮影

撮影用カメラに接続された顕微鏡に可動式のステージを取り付け、焦点距離を合わせ易くした。また、顕微鏡と土台の接続部にゴニオステージを取り付けることで、メニスカスを水平方向から僅かに見上げるように撮影し、接触点を撮影し易くした。

改良を加えた実験装置 2 の全体図を以下の Fig. 17 に示す.

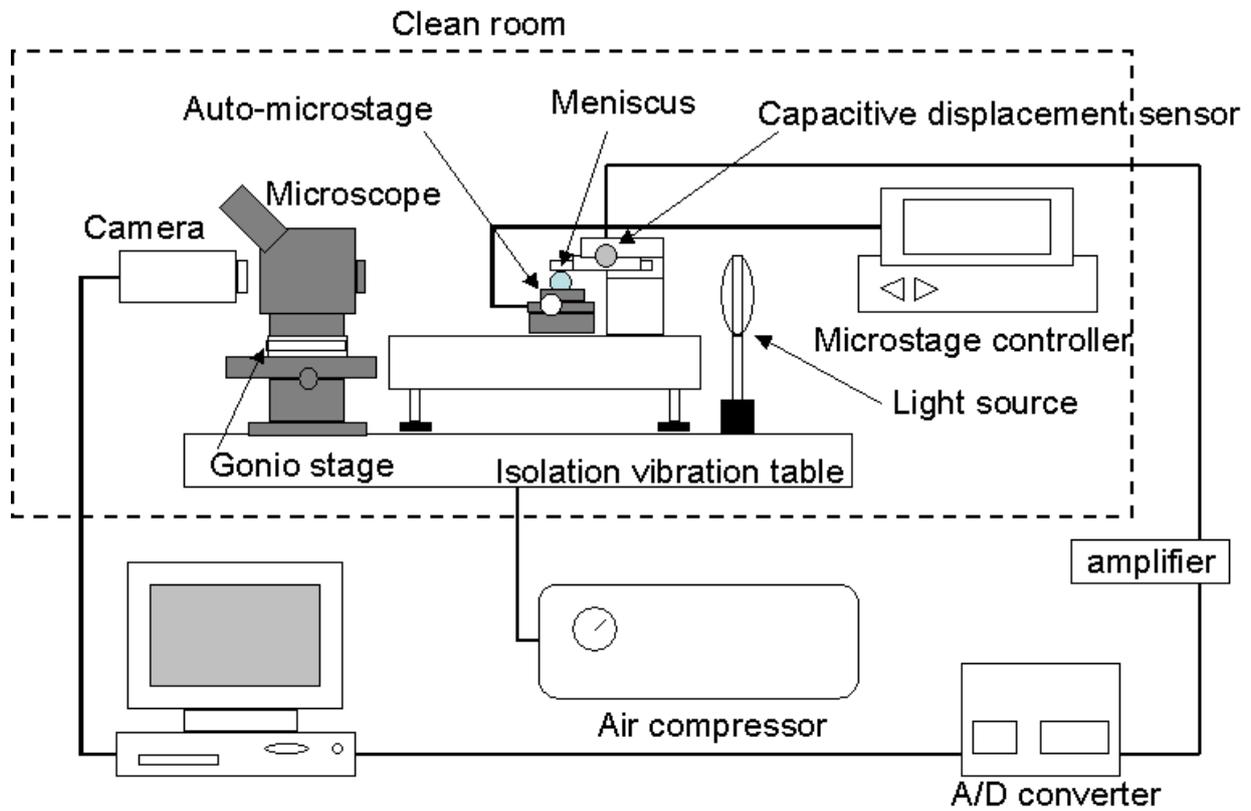


Fig. 17 実験装置全体図 2

2. 3. 2 測定系の構成

非接触センサを用いた測定系について詳しく述べる．測定系の概略図を Fig.18 に示す．

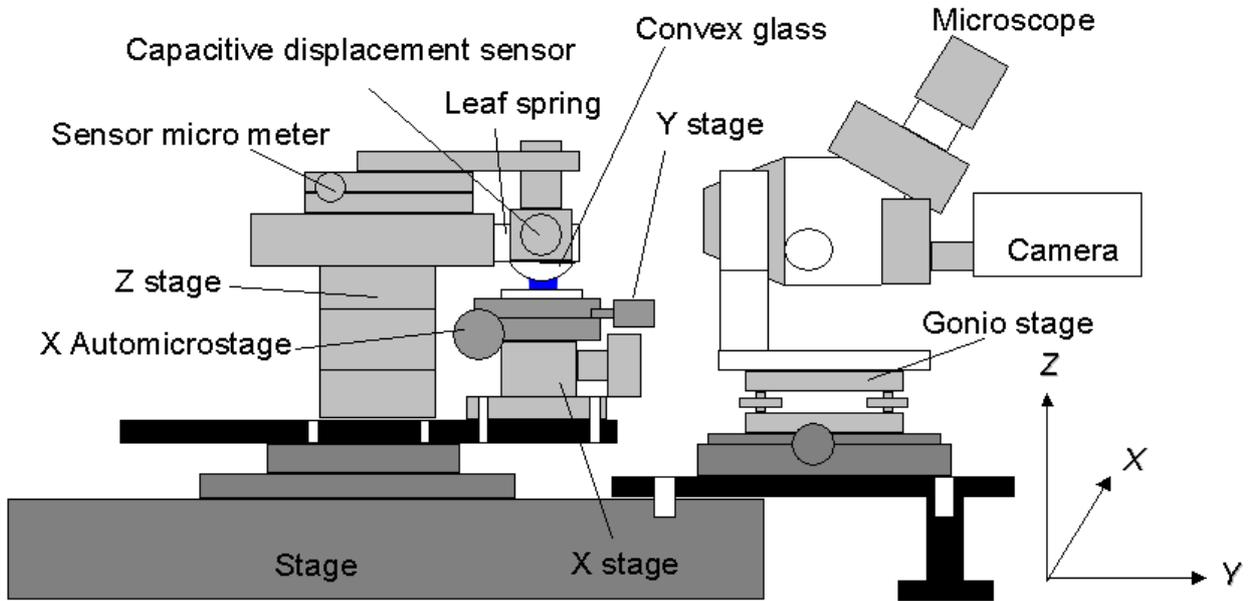


Fig. 18 測定系の構成

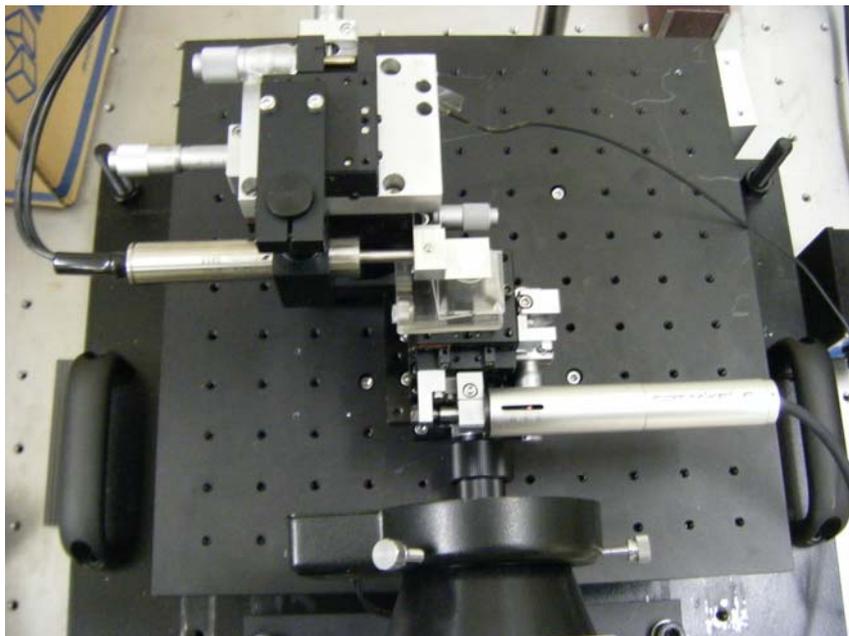


Fig. 19 測定系の構成

非接触センサを用いた測定系の構成について，同様に下部ガラス板の移動は自動マイクロステージを用いた．ばねとセンサを一体型とした装置は，Z方向に高さ調整が可能で，ガラス板を設置する側のステージでX方向，Y方向の位置決めを行う．

カメラ側にY軸方向の移動ステージと，ゴニオステージを取り付けたことでより接触点を撮影し易くなった．

2. 3. 3 データの取り込み

非接触変位センサを使用した実験装置のデータの取り込みについて述べる。ひずみゲージを使用した実験と同様に、球面ガラスに働くメニスカス力は板ばねのたわみとして検出される。このたわみによる変位を非接触センサが計測し、アンプを介し、 $\pm 5\text{ V}$ の範囲で電圧として出力される。この電圧はコンピュータ内にあるソフト LabVIEW に取り込まれ記録する。メニスカスの形状の変化は顕微鏡に接続されたカメラによって撮影され、コンピュータ内に取り込まれる。撮影開始のトリガをコンピュータから出力することで、映像とメニスカス力は同期される。非接触変位センサの出力は 100 Hz でコンピュータに取り込んだ。

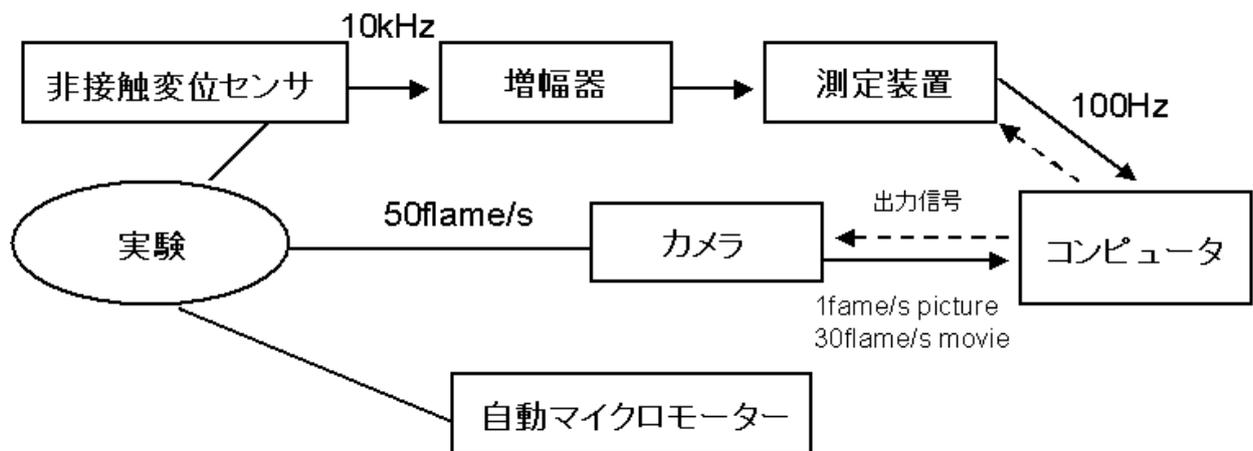


Fig. 20 非接触変位センサのデータ取り込み



Fig. 21 変位計用プローブ



Fig. 22 静電容量型変位計

2. 3. 4 静電容量型非接触変位センサ

ひずみゲージの出力が $\pm 10V$ に対し、非接触センサの出力は $\pm 5V$ であるのでコンピュータ側の入力電圧の設定を変更した。その他のデータの取り込みについては、ひずみゲージを用いた実験と同様なので省略する。

ひずみゲージを使用し実験を行った結果、測定するメニスカス力は当初予想していたよりも小さく、より高い分解能を持つ非接触静電容量型のセンサを使用することにした。今回使用した変位計（IWATSU ST-0536A）は、小さい変位も検出可能であることから、周囲の振動の影響を小さくするために、ひずみゲージを使用した板ばねよりもばね定数が大きくなるように設計した。ばねの作成はワイヤーカットによりアルミ合金から切り出した。板厚を $200\mu m$ 、板幅を $10mm$ 、板ばねの長さを $30mm$ に設計した。これにアルミ合金の縦弾性係数 $72kN/mm^2$ を(2.2.4)項で述べた式に代入し、ばね定数を得る。ばね定数の決定についてはキャリブレーションの節で詳しく述べる。

センサの性能を表 2 に示す。

表 2 静電容量型非接触変位センサ仕様

| | |
|------------|---------------------------------------|
| 機種名 | ST-0536A |
| 測定範囲 | $30 \pm 10\mu m$ |
| 感度 | $0.5V/\mu m$ |
| 確度 | $\pm 2\%$ FS |
| 分解能(10kHz) | $0.005\mu m$ |
| 分解能(1kHz) | $0.001\mu m$ |
| 分解能(100Hz) | $0.0005\mu m$ |
| 電極寸法 | $1.0\phi mm$ |
| 外形寸法 | $5\phi \times 20, 16\phi \times 82mm$ |
| ケーブル長 | $1.5m$ |
| 接栓 | 多芯丸形 |
| 重さ | 約 $120g$ |

本実験で使用する静電容量型非接触変位センサは、測定範囲が $30 \pm 10\mu m$ と小さい。実験の際に一度位置決めをすれば、再び調整する必要がないように板ばねと一体型の構造とした。また、板ばねに取り付ける球面ガラスを洗浄する際に、球面ガラスのみを取り外しできるように設計した。Fig. 23, Fig. 24 に板ばねとセンサの構造を示す。

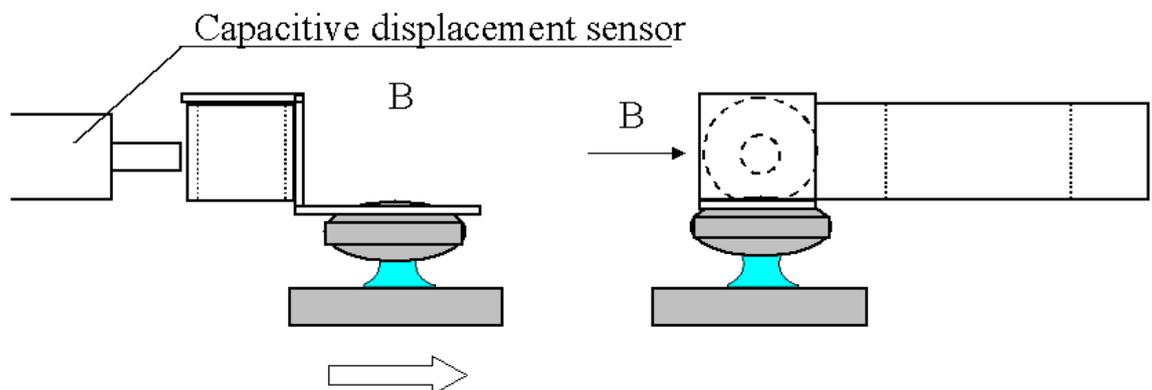


Fig. 23 非接触変位センサ板ばね

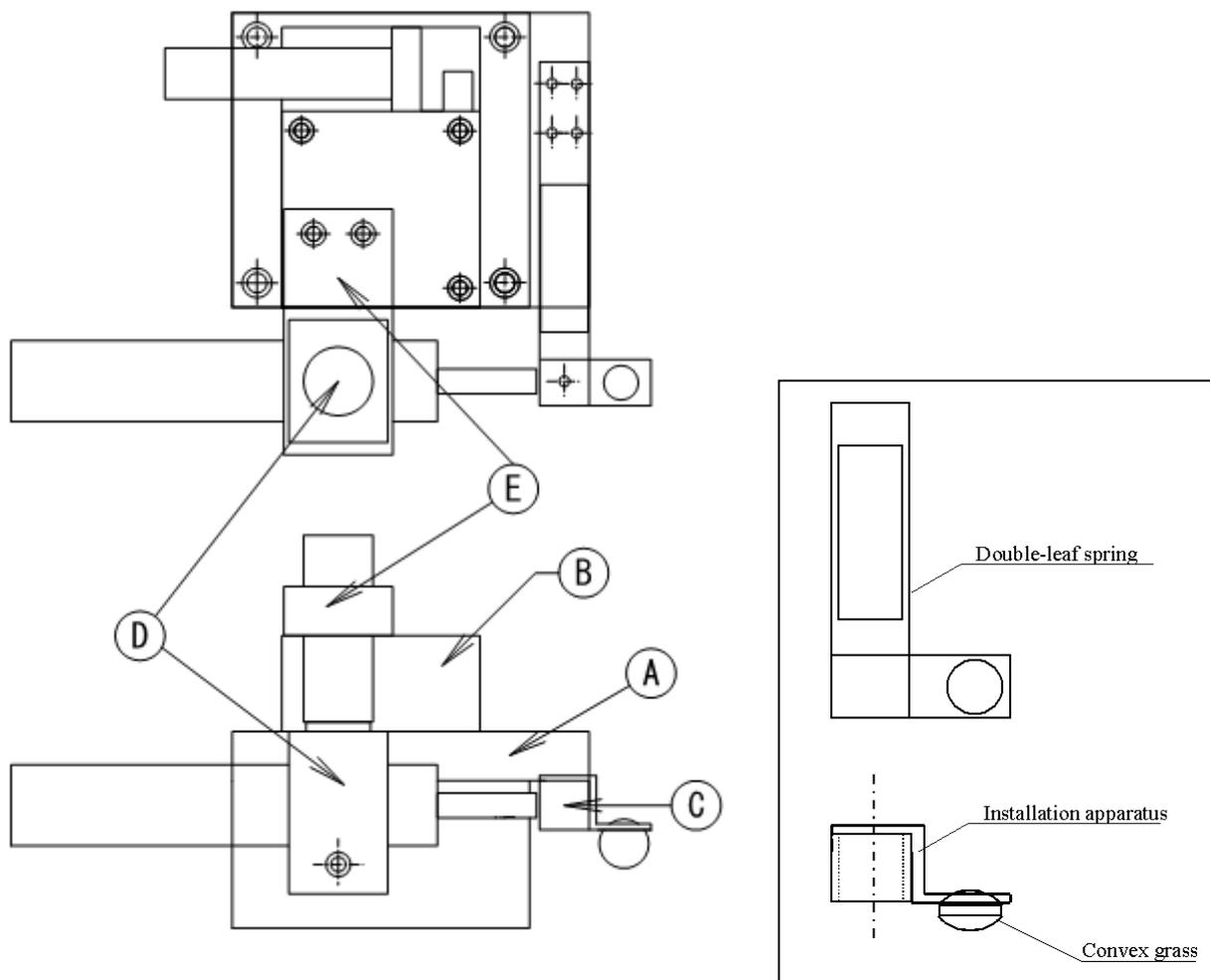


Fig. 24 静電容量型非接触変位センサ測定装置

- A . . . 板ばね接続ステージ
- B . . . セン位置決め用マイクロステージ
- C . . . 板ばね
- D . . . センサ固定用丸型クランク
- E . . . センサ固定用角型クランク

2. 3. 5 キャリブレーション

板ばねに取り付けた球面ガラスに働く横方向のメニスカスを、板ばねのたわみとして測定する。たわみは板ばねに当てられた非接触変位センサから変位として出力される。この非接触変位センサの校正を行うために Fig. 25, Fig. 26 に示すような装置を製作した。マイクロメータにより測定対象に荷重を与え、電子天秤により荷重を計測し、変位と荷重のキャリブレーションを行い、ばね定数を求める。また、変位は非接触変位センサより電圧として出力されるため、電圧に対する荷重のキャリブレーションも同時に行った。

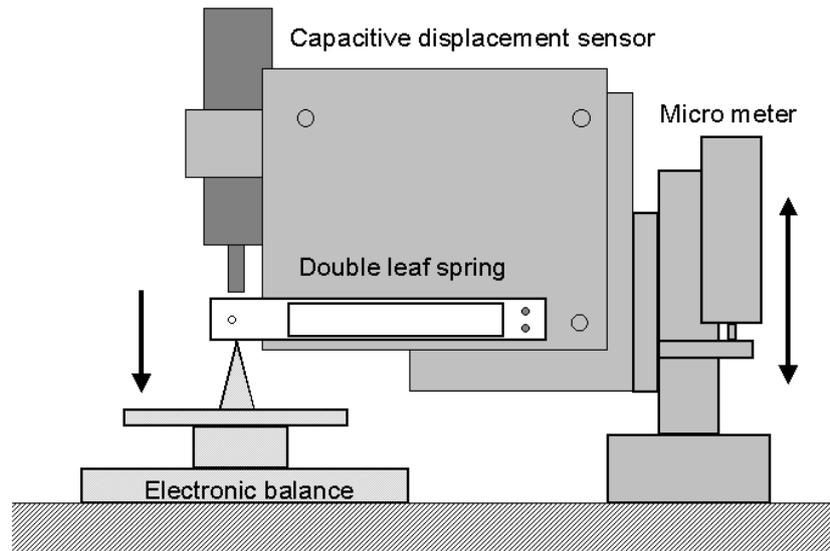


Fig. 25 静電容量型非接触変位センサのキャリブレーション装置

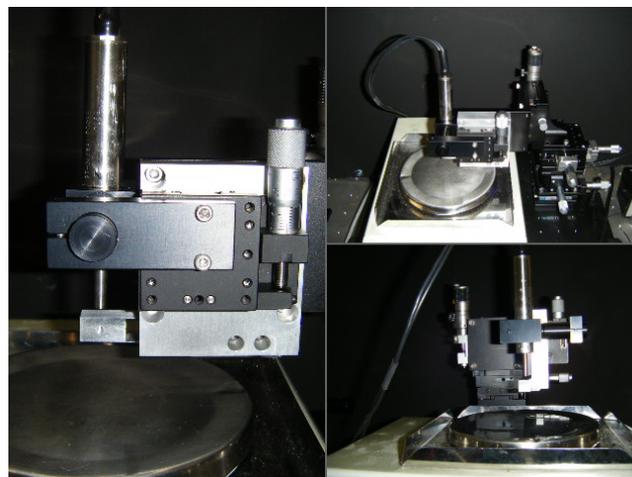


Fig. 26 非接触変位センサのキャリブレーション装置(写真)

ひずみゲージの実験と同様に、キャリブレーションでは変位は $1 \mu\text{m}$ ずつ動かし測定した。しかし、計測に使用したマイクロメータでは、荷重増加の方向から減少の方向への切り替え時に、実際の変位量とメーター読みで内部ギア間のバックラッシュが発生する。

そこで変位に対する荷重のキャリブレーションには、平行板ばねを振動させ固有振動数を測定することで、ばね定数を得た。固有振動数の測定にはメニスカス力計測用の静電容量型非接触変位センサを使用した。測定により得られた振動数をコンピュータ内の LabVIEW によりスペクトル解析しグラフ化したものを Fig. 27 に示す。

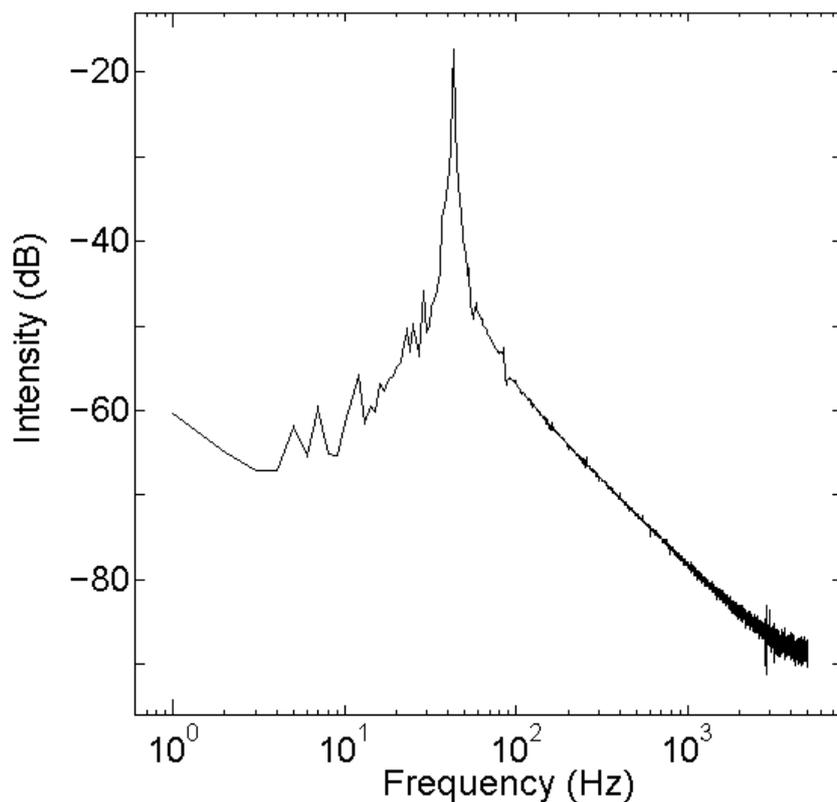


Fig. 27 実験装置 2 板ばねの固有振動数

グラフを見ると振動数にピークがあることが確認できる。このピークは板ばねの固有振動数である。44Hz が固有振動数であった。ばねの材料はアルミ合金である。密度は 2.7g/cm^3 であるから、ばね先端部の質量 m は 4.86g となる。なお、ばね部の詳細設計図面は付録に記す。下式に示すばね定数と固有振動数の関係式を用いてばね定数を算出する。

$$2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

ばね定数 k は 371N/m となる。設計段階での板ばねのばね定数は下式にそれぞれの値を代入し 408N/m であったので、ほぼ設計どおりのばね定数を得られたこととなる。

$$\text{ひずみ } \varepsilon = \frac{3FL}{2Eb t^2}$$

$$\text{変位 } \delta = \frac{FL^3}{2Eb t^3} \quad (\text{mm})$$

$$\text{バネ定数 } k = \frac{F}{\delta} \quad (\text{N/mm})$$

次に、電圧に対する荷重のキャリブレーション結果を下の Fig.28 に示す。

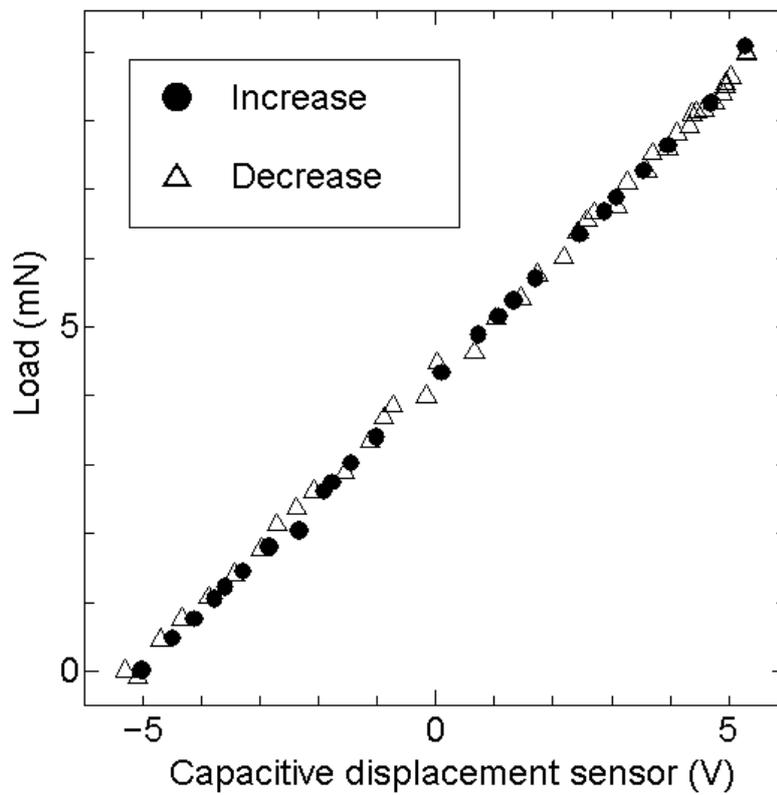


Fig. 28 実験装置 2 キャリブレーション荷重と電圧の関係

センサからは±5Vの電力で出力される。電圧に対する荷重の関係はよい線形が得られた。荷重を増加させたときの傾きと、減少させた時の傾きを平均化し、電圧に対する荷重の傾き0.849mN/Vを得た。これを電圧に乗じたものをメニスカス力として計測する。

2. 3. 6 実験装置の改良点

ひずみゲージを非接触変位センサに変えることで小さな変位も測定できるようになった。これによりばね定数を大きくでき、周囲の振動の影響を少なくすることができた。また、出力電圧も安定して取得できるようになり、実験の信頼度、効率ともに高くなった。

また、高速度の測定が可能となったため、短時間にメニスカス形状が急激に変化するようなすべり現象についても計測が可能となった。

2. 4 実験機器及び試料

実験機器

| | | |
|-----------------|-----------------------|-----------|
| ひずみゲージ | KFG-5-120-C-1-16L1M2R | 共和電業 |
| 静電容量型非接触変位センサ | ST-0536A | 岩通 |
| マイクロステージ/コントローラ | OPT MIKE-E | シグマ光機 |
| 各種マイクロステージ | TSD | シグマ光機 |
| ひずみゲージアンプ | TR2114 | ADVANTEST |
| 非接触センサアンプ | ST-3511 | 岩通 |
| カメラ | HAS-220 | DIRECT |
| 電子天秤 | METTLER | シイベル機械 |
| 除振台 | AY-1510K4 | 明立精機 |
| 実験ステージ | | |
| 非接触センサ固定用丸クランプ | } Almite シリーズ(設計) | } MITSUMI |
| 非接触センサ固定用角クランプ | | |
| 非接触センサ用平行板ばね | | |
| 非接触センサ用固定器具 | | |

試料

| | | |
|-------|------------|---------|
| 蒸留水 | — | 関東科学(株) |
| 球面ガラス | SLB-15-100 | シグマ光機 |
| ガラス板 | OFPXP | シグマ光機 |
| 撥水剤 | フッ素系(市販) | ソフト 99 |

2. 5 実験方法

2. 5. 1 メニスカス形成後の横方向メニスカス力の測定

Fig. 29 に後に示す実験条件 1-1~1-3, 2-1~2-2 で行う実験の概要を示す. 球面ガラス(曲率半径 103.8mm)と下部のガラス板の間にメニスカスを形成する. ガラス板は自動マイクロステージで水平方向に移動させる. 球面ガラスは手動マイクロステージにより高さ方向にそれぞれ移動させることができる. 球面ガラスの変位はひずみゲージを貼り付けた平行平板(非接触変位センサで測定される平行平板)により測定できる. この変位の測定により, 横方向のメニスカス力を計測できる. また, 顕微鏡に接続したビデオカメラによりメニスカス形状の変化を観察する.

平面ガラス基板の上に蒸留水の液滴を置いた後, 上部の球面ガラスを液滴に近づけメニスカスを形成する. メニスカスの高さとなる固体面間の距離をマイクロステージにより定め, 自動マイクロステージによりガラス基板を水平移動させる. このとき顕微鏡に接続されたカメラでメニスカスを正面から撮影する. 実験後この画像を解析し, メニスカス上部の前進・後退接触角を読みとり, ガラス基板の移動に伴う接触角の変化を測定する. また, 球面ガラスに作用する横方向の力の変化を測定する.

液滴の量は $40\mu\text{l}$, 固体面間の距離は 2.0mm とし, 下部のガラス基板は $2.4\times 10^{-2}\text{mm/s}$ で移動させる.

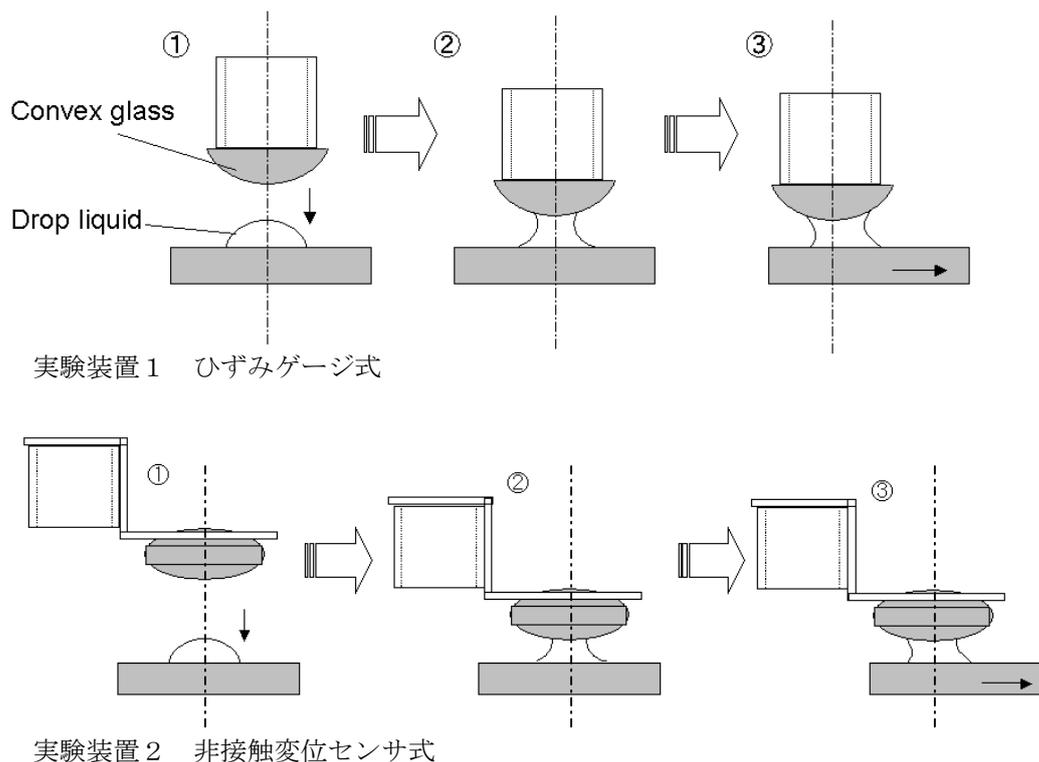


Fig. 29 実験概要 メニスカス形成後の横方向メニスカス力の測定

2. 5. 2 メニスカス形成を伴う横方向メニスカス力の測定

Fig. 30 に後に示す表 3 の実験条件 3 で行う実験の概要を示す。上部の球面ガラス（曲率半径 100mm）と下部ガラス板との距離を 2mm に調節する。その後、下部ガラス板の上に液滴を置き、自動マイクロステージにより水平方向にガラス板の移動を始める。ガラス板の移動を続けるとメニスカスが形成され、球面ガラスにメニスカス力が働く。この時の横方向のメニスカス力を板ばねの変位として非接触変位センサで測定する。またこの時の正面から顕微鏡に接続されたカメラでメニスカス形状の変化を撮影する。

液量は $40\mu\text{l}$ 、固体面間の距離は 2.0mm とし、下部のガラス基板は $2.4\times 10^{-2}\text{mm/s}$ で移動させる。

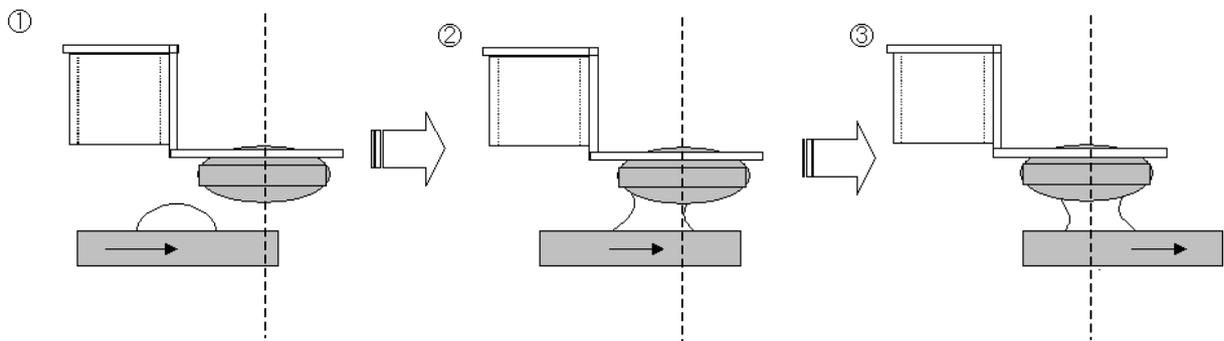


Fig. 30 実験概要 メニスカス形成に伴う横方向メニスカス力の測定

2. 5. 3 実験器具操作

次に実験の操作手順を詳しく示す。

メニスカス形成後の横方向メニスカス力の測定

- ① エアーコンプレッサーの電源を入れ、除振台に十分な圧力がかかるまで待つ。
- ② ひずみゲージアンプ(非接触変位センサ)の電源を入れる(出力が安定するまで 30 分程度待つ)。
- ③ 球面ガラス、ガラス板を洗浄する。
- ④ 各種電源を入れる(コンピュータ、マイクロモータ、アンプ、照明装置)。
- ⑤ コンピュータ内のソフト LabVIEW と HAS-500CS を起動する。
- ⑥ ひずみゲージのゼロ点(非接触変位センサの位置)を調整する。
- ⑦ マイクロモータの移動速度を 6 に設定する。(移動速度 $6 \cdots 2.4 \times 10^{-2} \text{mm/s}$)
- ⑧ 液滴をガラス板の上に置く。
- ⑨ マイクロメータで球面ガラスを液滴に近づけ、メニスカスを形成。
- ⑩ 顕微鏡、カメラの映像を見ながら明るさ・ピントを調整する。
- ⑪ カメラを録画モードに切り替え、トリガースタートモードにする。(HAS-500CS)
- ⑫ メニスカス力の測定を開始。同時にトリガにより撮影開始される。
- ⑬ 測定開始 10 秒後、マイクロモータの操作パネルによりステージの移動を開始する。
- ⑭ 測定終了後、カメラ、非接触センサの順に停止する。
- ⑮ センサ出力データに名前をつけて保存。
- ⑯ カメラの映像を 1frame/s で画像として保存。30frame/s で動画保存。

メニスカス形成を伴う横方向メニスカス力の測定

- ① エアーコンプレッサーの電源を入れ、除振台に十分な圧力がかかるまで待つ。
- ② 非接触センサの電源を入れる(出力が安定するまで 30 分程度待つ)。
- ③ 球面ガラス、ガラス板を洗浄する。
- ④ 各種電源を入れる(コンピュータ、マイクロモータ、アンプ、照明装置)。
- ⑤ コンピュータ内のソフト LabVIEW と HAS-500CS を起動する。
- ⑥ 非接触センサと板ばねの位置決めを行う。
- ⑦ マイクロモータの移動速度を 6 に設定する。(移動速度 $6 \cdots 2.4 \times 10^{-2} \text{mm/s}$)
- ⑧ マイクロメータで球面ガラスとガラス板との距離を決める。
- ⑨ 液滴をガラス板の上に置く。
- ⑩ 顕微鏡、カメラの映像を見ながら明るさ・ピントを調整する。
- ⑪ カメラを録画モードに切り替え、トリガースタートモードにする。(HAS-500CS)
- ⑫ メニスカス力の測定を開始。同時にトリガにより撮影開始される。
- ⑬ マイクロモータの操作パネルによりステージの移動を開始する。
- ⑭ 測定終了後、カメラ、非接触センサの順に停止する。
- ⑮ センサ出力データに名前をつけて保存。
- ⑯ カメラの映像を 1frame/s で画像として保存。30frame/s で動画保存。

2. 6 実験条件

実験条件について述べる．実験で液体メニスカスは固体面間に形成される．固体面の横方向の移動に伴うメニスカスの形状の変化を観察し，その時に発生するメニスカス力を測定する．

球面ガラス・ガラス板

固体面は上部に球面ガラス，下部にガラス板を使用する．使用する球面ガラス及びガラス板はシグマ光機製の球面ガラスで，材質はBK7，表面粗さはRa 5 nmである．球面ガラスの曲率半径は100mm，長さは15mmを使用．また表3における実験条件の実験1-1，1-2，1-3では凸型球面ガラスで，実験2-1，2-2，3では両凸型の球面ガラスを使用した．

撥水剤

市販のフッ素系撥水剤を使用．ガラス板の表面に塗布し，約24時間放置した後に表面を軽くふき取って使用した．

試料液体

蒸留水，液量 $40 \mu\text{l}$ ．

周囲環境

温度は $15\sim 25^\circ\text{C}$ ，湿度は $30\sim 50\%$

接触角

上記したガラスに液滴（蒸留水）を置いた場合の接触角は，ガラスに撥水処理を行っていないもので接触角 50° ，ガラスに撥水剤を塗布し撥水処理を行ったもので接触角 80° となった．下の Fig. 31 参照

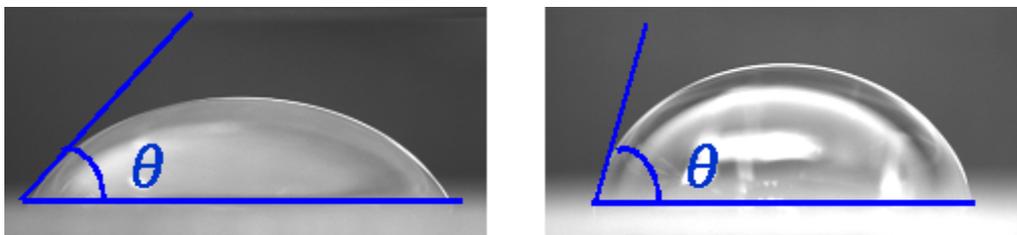


Fig. 31 実験条件 接触角

表3にそれぞれの実験の条件をまとめる．

表3 実験条件 ○…撥水処理 ×…未処理

| | 実験 1-1 | 実験 1-2 | 実験 1-3 | 実験 2-1 | 実験 2-2 | 実験 3 |
|---------|----------|--------|--------|----------|--------|------|
| 球面ガラス | × | × | ○ | × | × | × |
| ガラス板 | ○ | ○ | ○ | × | × | ○ |
| ステージ移動量 | ∞ | 1.0mm | 1.0mm | ∞ | 1.0mm | |

第3章 結果と考察

【濡れ性の異なるガラス板の移動に伴うメニスカス形状・メニスカスカ力の変化①】

3. 1 実験結果

対象：実験 1-1, 実験 2-1

球面ガラスとガラス板の間にメニスカスを形成させ、ガラス板の設置されたステージを移動させる。実験条件は表 3 における実験 1-1 と実験 2-1 である。実験 1-1 では、撥水処理を施したガラス板を使用し、実験 2-1 では、処理を行っていないガラス板を使用した。ガラス板の濡れ性が異なることがメニスカス形状、メニスカスカ力に与える影響を調べる。

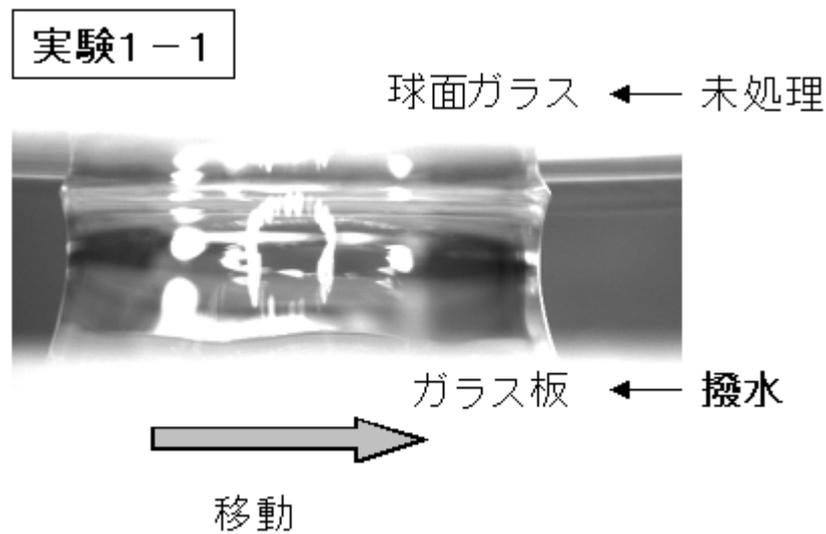


Fig. 32 撥水処理を施したガラス板

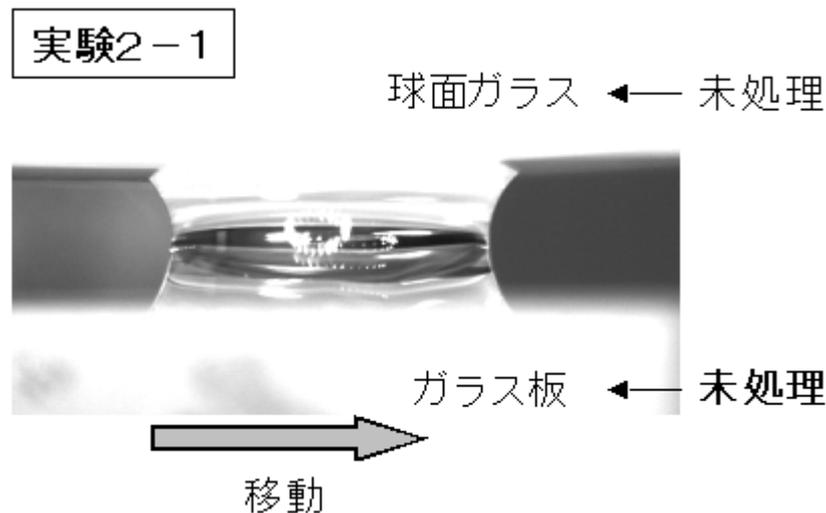


Fig. 33 未処理のガラス板

実験 1-1. メニスカス形状の変化 (球面ガラス：未処理 ガラス板：撥水)

Fig. 34 に下部の球面ガラスに撥水剤を塗布した時の実験 1-1 におけるメニスカス形状の変化を示す。撥水処理をしていない球面ガラスと撥水処理を施したガラス板を使用した。ステージの移動を開始した時間を 0s とする。

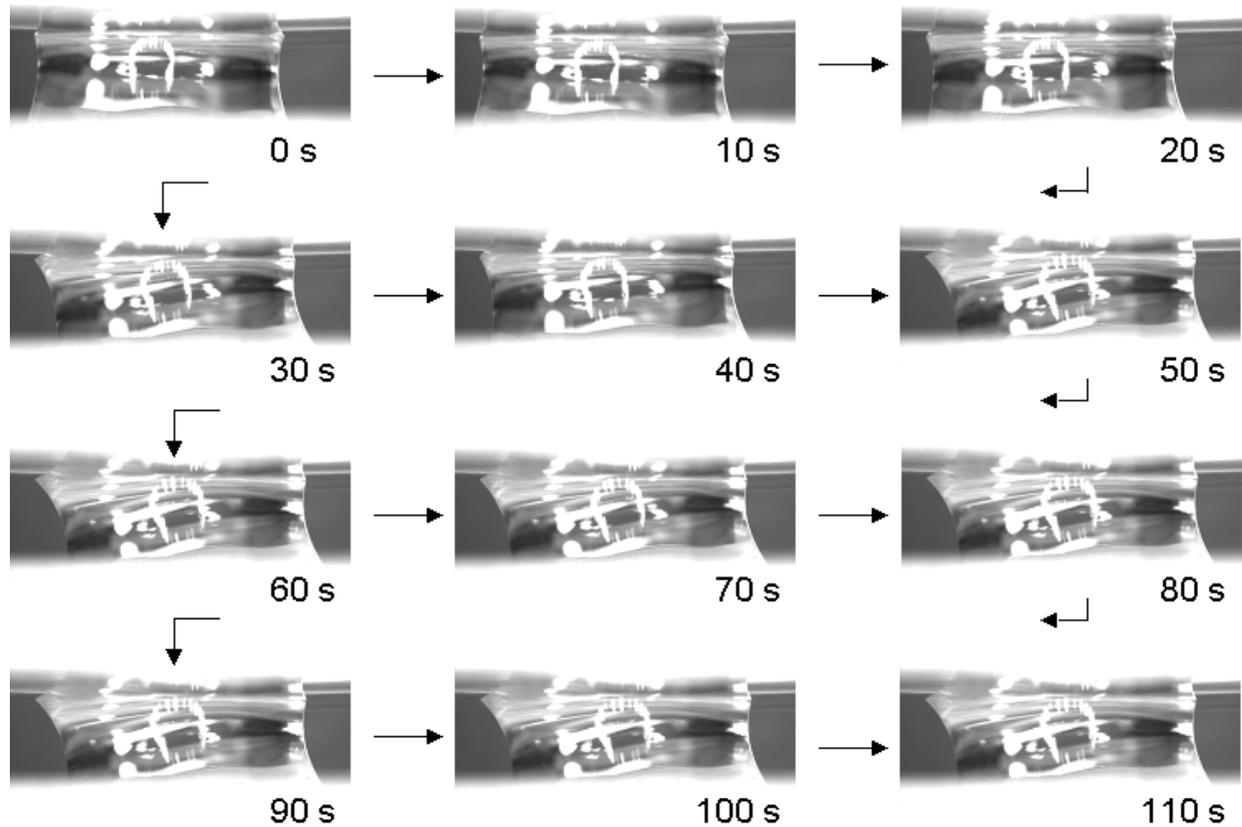


Fig. 34 実験 1-1 メニスカスの形状変化 (球面ガラス・未処理, ガラス板・撥水)

形成直後は左右対称の液滴が横方向へのガラス板の移動に伴い、徐々に左右非対称の形状に変化した。ただし、60秒を過ぎたあたりからメニスカス自体の形状はほとんど変化していないのが分かる。さらに、横方向メニスカスに影響を及ぼすとされる、上部球面ガラスとの接触角に注目すると、徐々に右上の接触角が大きくなり、左上の接触角は小さくなっていくことが観察された。また、メニスカス形状が変化しなくなる時間前後で、ガラス板と液滴間で連続的なすべりが見られ、ガラス板のみが移動している状態となった。詳しくは(3.2)節すべり現象について述べる。

実験 2-1. メニスカス形状の変化 (球面ガラス：未処理 ガラス板：未処理)

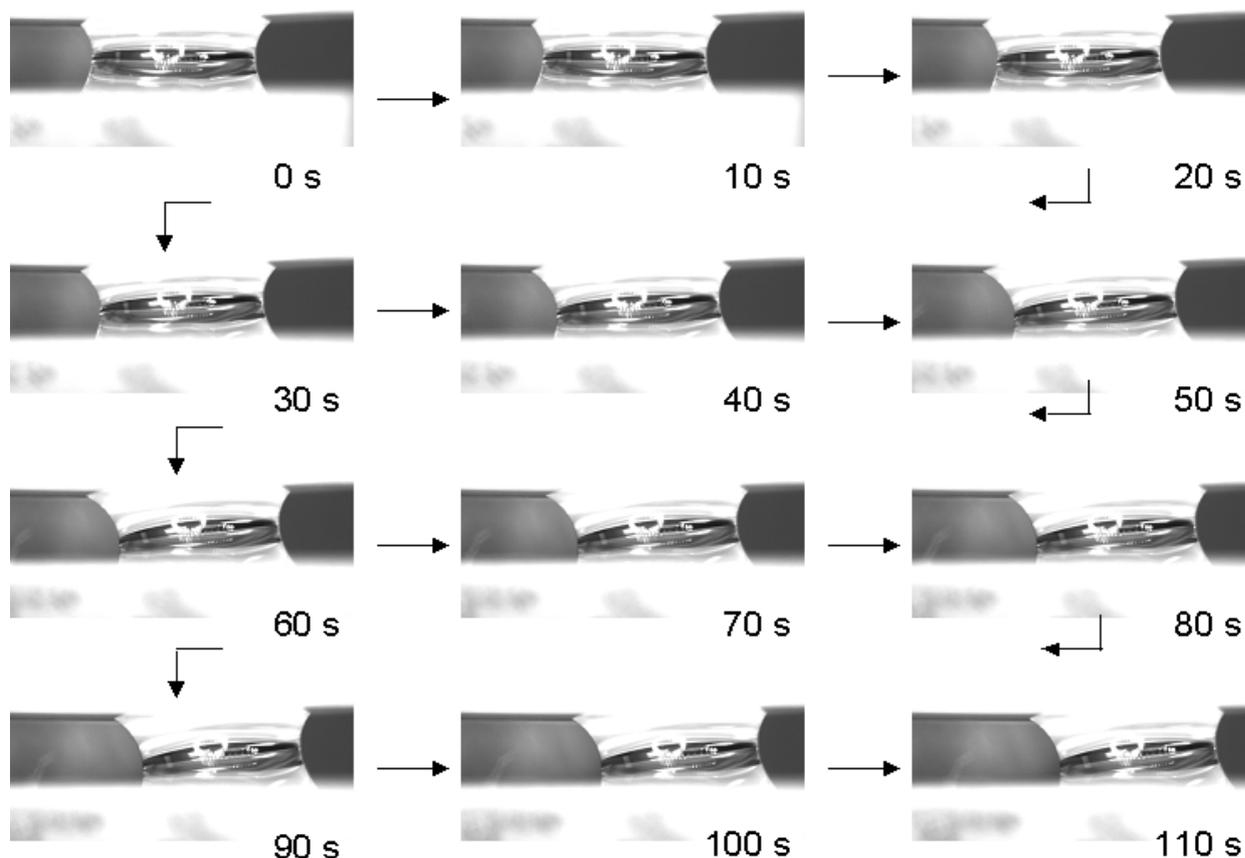


Fig. 35 実験 2-1 メニスカスの形状変化 (球面ガラス・未処理, ガラス板・未処理)

実験 1-1 と同様に形成直後は左右対称の液滴が横方向へのガラス板の移動に伴い、徐々に左右非対称の形状に変化し、60 秒を過ぎたあたりからメニスカス自体の形状はほとんど変化していないのが分かる。下部のガラス板は撥水処理を施していないために、実験 1-1 と比較して接触角が小さくなっているのが分かる。上部の球面ガラスとの接触角も小さくなっているように見える。下部のガラス面の接触角が異なることで、上部の液体を引っ張る力が変わり、その影響が出たと考えられる。

実験 1-1. メニスカスカ力の変化 (球面ガラス：未処理 ガラス板：撥水)

Fig. 36 (a) にステージの移動に伴うメニスカスカ力の変化を示す。横軸は時間、縦軸はメニスカスカ力の変化である。実験装置 1 のひずみゲージで測定した結果である。下部ガラス板には撥水処理を行ったものを使用している。

ステージの移動開始と同時にメニスカスカ力が増加していくのが分かる。撮影された映像ではステージの移動開始後 40 秒あたりから、メニスカスカ形状がほとんど変化せずすべりが発生していること分かった。横方向のメニスカスカ力もステージの移動 30 秒まではステージの移動量に対し比例するように増加して行くが、次第に増分は少なくなって行き、70 秒を経過したあたりからほとんど変化しなくなる。

実験 2-1. メニスカスカ力の変化 (球面ガラス：未処理, ガラス板：未処理)

Fig.36 (b) にステージの移動に伴う代表的なメニスカスカ力の変化を示す。計測には非接触変位センサを用いた。実験 1-1 と同様に、ステージの移動に比例するようにメニスカスカ力は増加して行く。やがてその増分は少なくなって行き、メニスカスカ力は落ち着いた。

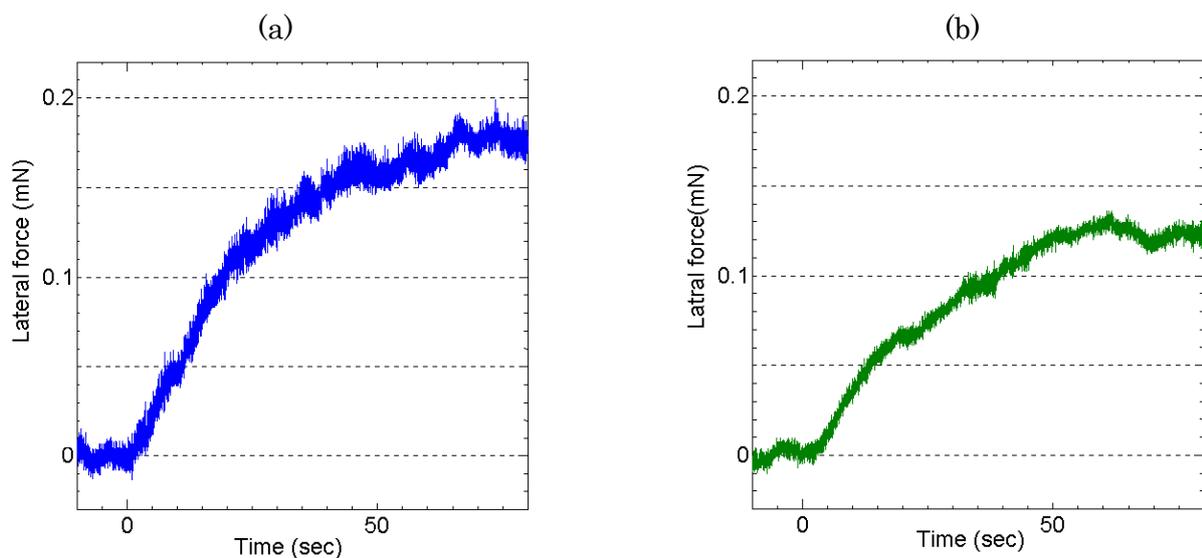


Fig. 36 ガラス板の濡れ性の違いによるメニスカスカ力の変化 (a) : 実験 1-1 (b) : 実験 2-1

実験 1 - 1 と実験 2 - 1 との比較 (ガラス板の濡れ性の違い)

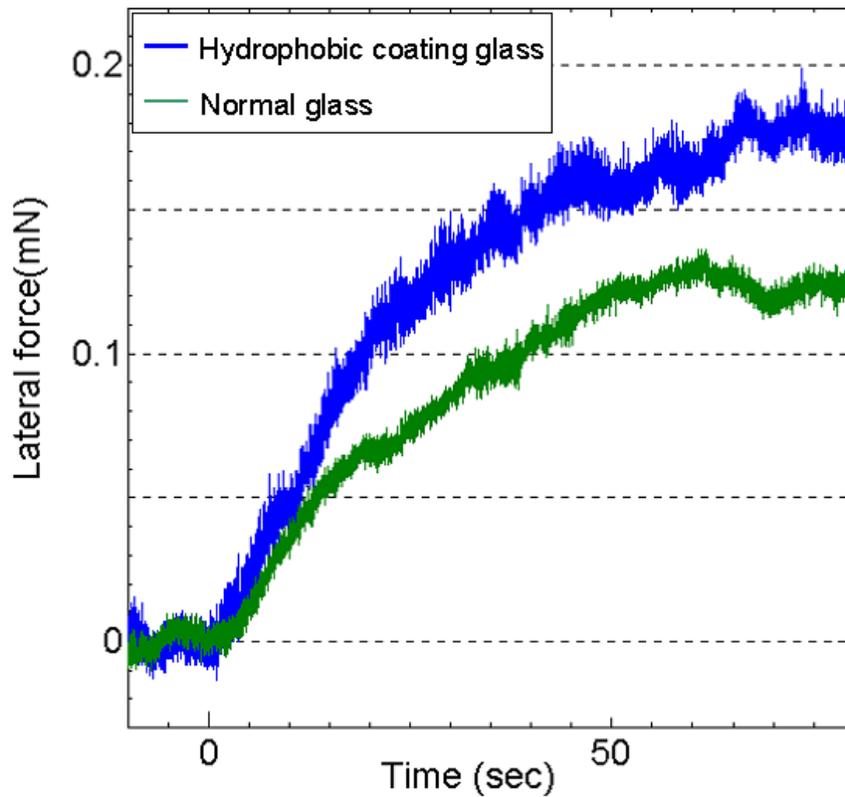


Fig. 37 ガラス板の濡れ性の違いによるメニスカスカ力の変化比較

Fig. 37 に示すようにメニスカスカ力の大きさは、未処理のガラス板を使用した方に比べて、表面に撥水処理を施したガラス板を使用した方が大きい値に落ち着いた。映像を比較すると、撥水処理を施していないガラス板の方が、上部の球面ガラスの接触角が小さい。これは下部ガラス板の接触角の違いが液滴の吸着力成分に変化を与え、計測を行なう球面ガラス側の接触線周囲の液体を引っ張る力が変わったために接触角が小さくなったと考えられる。

【濡れ性の異なるガラス板の移動に伴うメニスカス形状・メニスカス力の変化②】

対象：実験1-2，実験2-2

ステージの移動を続けた実験1-2，実験2-2では，移動を開始した50秒後前後からガラス板と液滴間に連続的なすべりが見られた．ステージの移動にともなって増加していたメニスカスが連続的なすべりを発生すると同時に，メニスカス力は増加しなくなる．この連続的なすべりの影響がない範囲でステージの移動と停止の影響を調べた．ステージの移動を開始して約40秒(移動量1.0mm)で停止する．表3における実験1-2，実験2-2である．

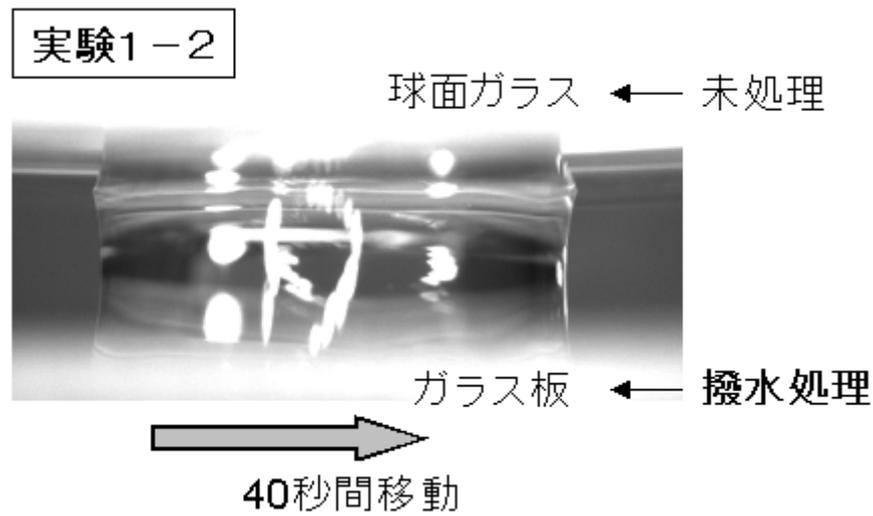


Fig. 38 撥水処理を施したガラス板

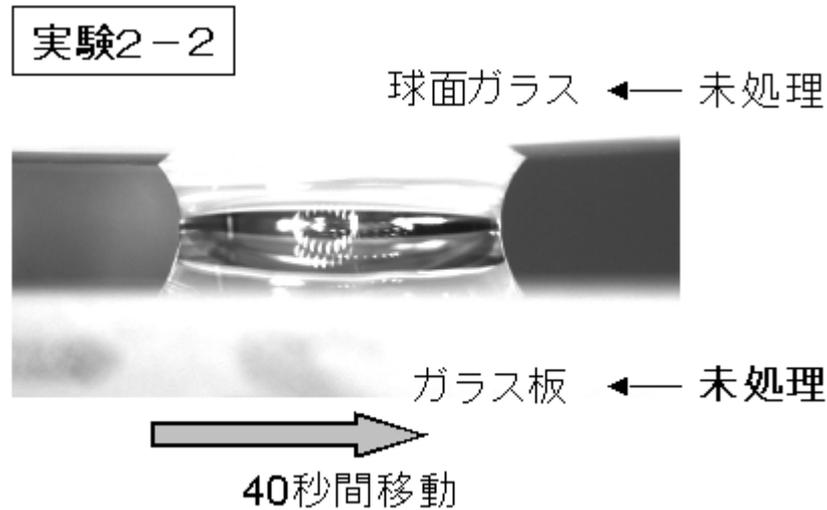


Fig. 39 未処理のガラス板

実験 1-2. メニスカス形状の変化 (球面ガラス: 未処理, ガラス板: 撥水)

Fig. 40 にステージ移動開始後, ステージの移動量が 1 mm となったところでステージの移動を停止したメニスカスの形状変化を示す.

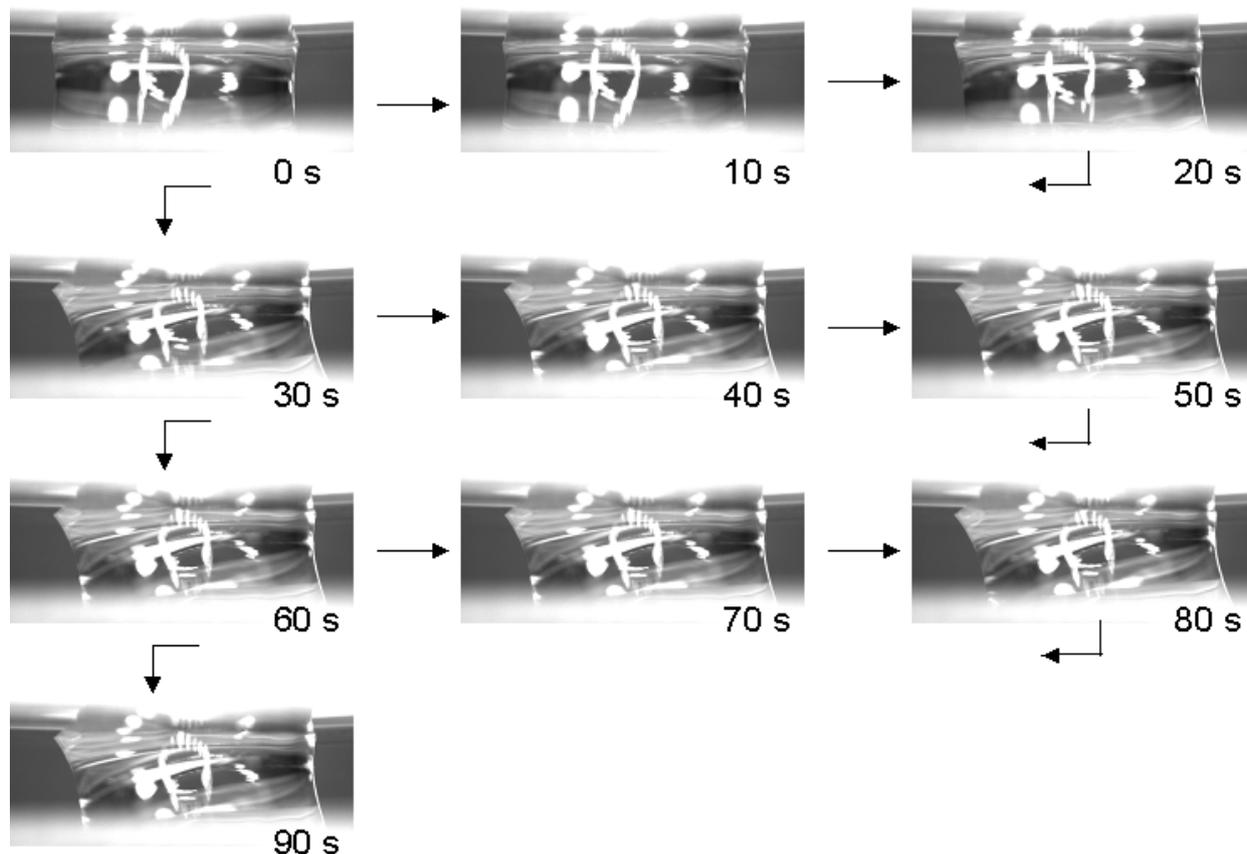


Fig. 40 実験 1-2 メニスカスの形状変化 (球面ガラス・未処理, ガラス板・撥水)

ステージの移動が 1 mm のとき, 時間は移動を開始して約 40 秒後である. ステージの移動を止めるとメニスカス形状は変化しなくなることが分かる. 形成後, 左右対称のメニスカスはステージを移動すると左右非対称に変形し, ステージの移動を止めると, メニスカスは左右非対称の形状を保ったままになることが映像から確認できた. 移動を止めるまで, 液滴とガラス板間にはすべりは見られず, ガラス板に伴ってメニスカス下部の接触面は移動した.

実験 2-2. メニスカス形状の変化 (球面ガラス: 未処理, ガラス板: 未処理)

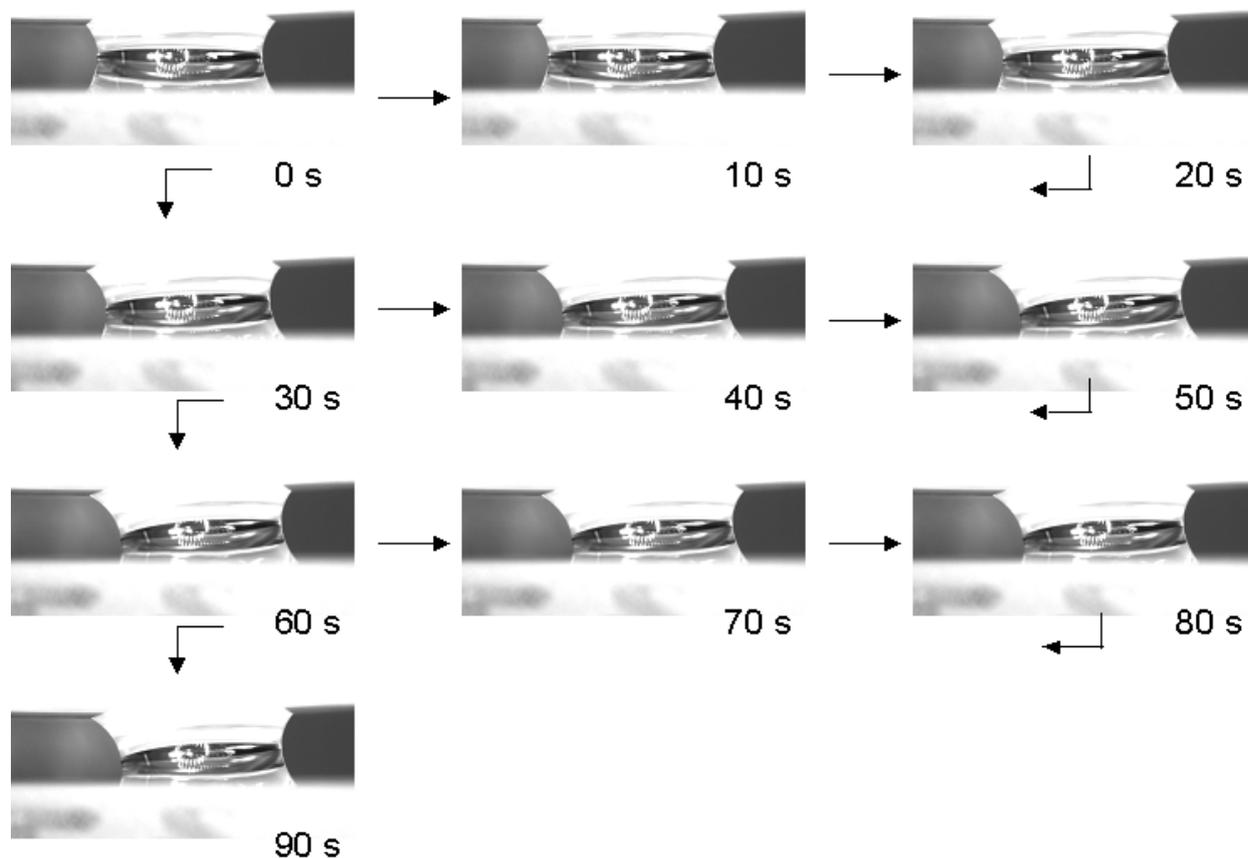


Fig. 41 実験 2-2 メニスカスの形状変化 (球面ガラス・未処理, ガラス板・未処理)

開始直後から実験 2-1 とほぼ同様の結果を得た. ステージを停止した 40 秒からはメニスカス形状はほとんど変化せず, ステージが停止しているためにガラス板とのすべりも見られなかった.

実験 1-2. メニスカス力の変化 (球面ガラス: 未処理 ガラス板: 撥水)

Fig. 42 左に実験結果を示す. ステージの移動開始後, 40 秒までメニスカス力は移動量に比例して増加していく. 40 秒で移動量が 1mm となり, ステージの移動を停止すると, メニスカス力は僅かに減少し, その後約 0.14mN 前後の値に落ち着く. 液体とガラス間のすべりが少ないと考えられる移動量が 1mm 以内の範囲では, ガラス板の移動量に比例して横方向メニスカス力は増加して行くことが分かった

実験 2-2. メニスカス力の変化 (球面ガラス: 未処理, ガラス板: 未処理)

Fig. 42 右に実験結果を示す. 実験 1-1 と同様にガラス板の移動開始後にメニスカス力は増加を始め, ガラス板の停止と同時に増加は止まった. また, ガラス板の移動停止後に, 僅かにメニスカス力が減少している. この間にガラス板と液滴の間に連続的なすべりは観察されなかった.

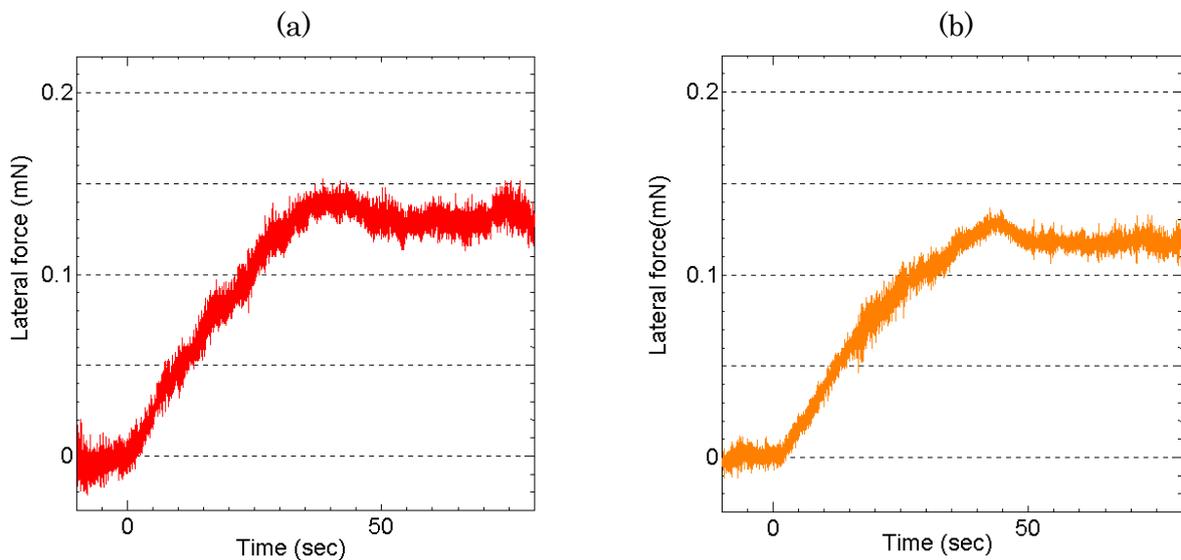


Fig. 42 ガラス板の濡れ性の違いによるメニスカス力の変化 (a)実験 1-2 (b)実験 2-2

実験 1-2 と実験 2-2 の比較 (ガラス板の濡れ性の違い)

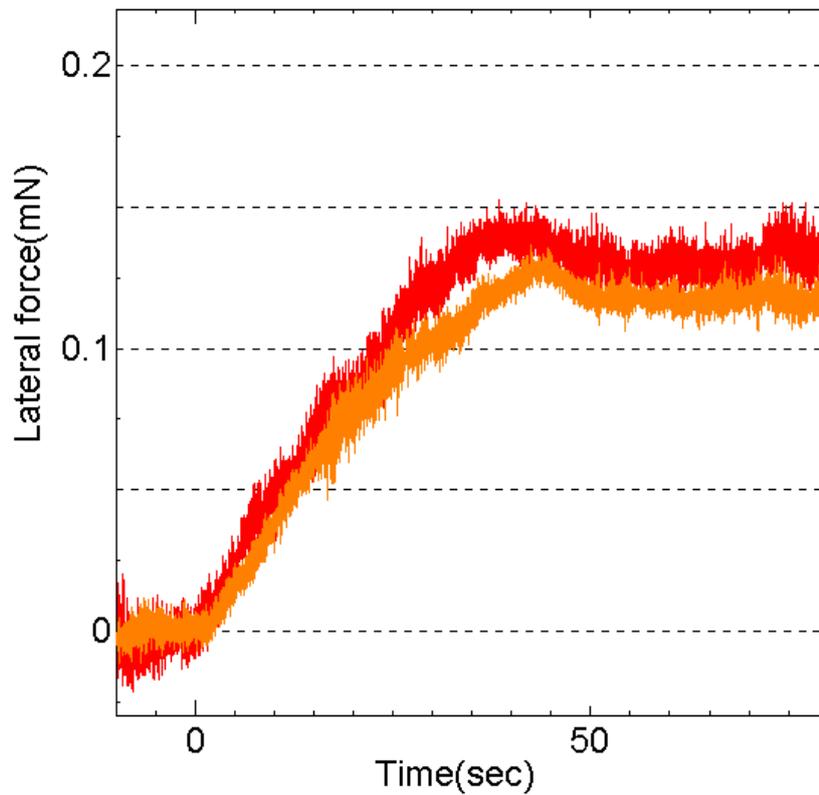


Fig. 43 ガラス板の濡れ性の違いによるメニスカス力の変化比較

下部のガラス板の撥水性が低いことでメニスカス力は僅かに小さくなった値をとるように見える。Fig. 37の結果と比較すると、下部のガラス板の撥水性が低いことによりメニスカス力は小さくなると言える。また、どちらのガラス板の実験でも移動開始後40秒、移動距離1.0mm以内であれば連続的なすべりは発生しづらい。つまり、ガラス板の移動とともに接触面も移動していると考えられる。どちらの結果も、ガラス板の移動を停止した直後にメニスカス力は僅かに減少している。

【濡れ性の異なる球面ガラスを使用したガラス板の移動に伴うメニスカス形状・メニスカスの変化①】

対象：実験 1-3, 実験 1-2

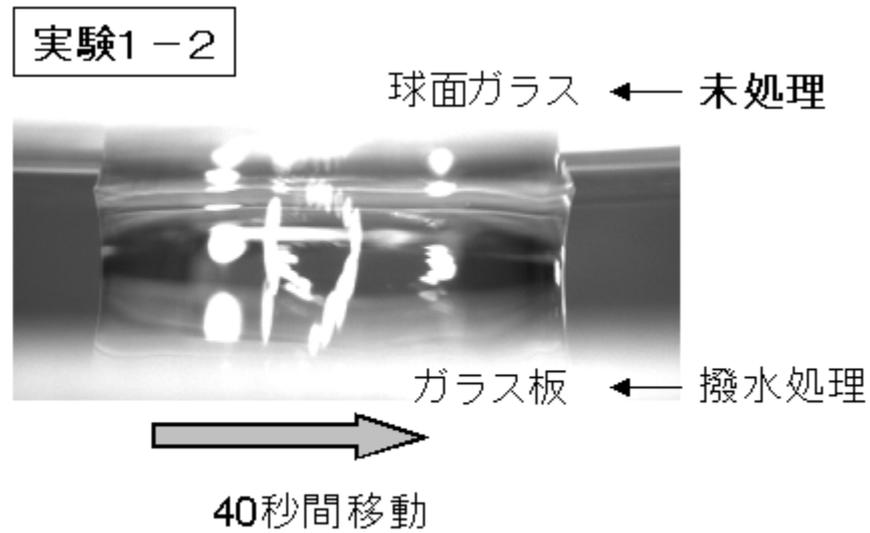


Fig. 44 球面ガラスの濡れ性の違い 1

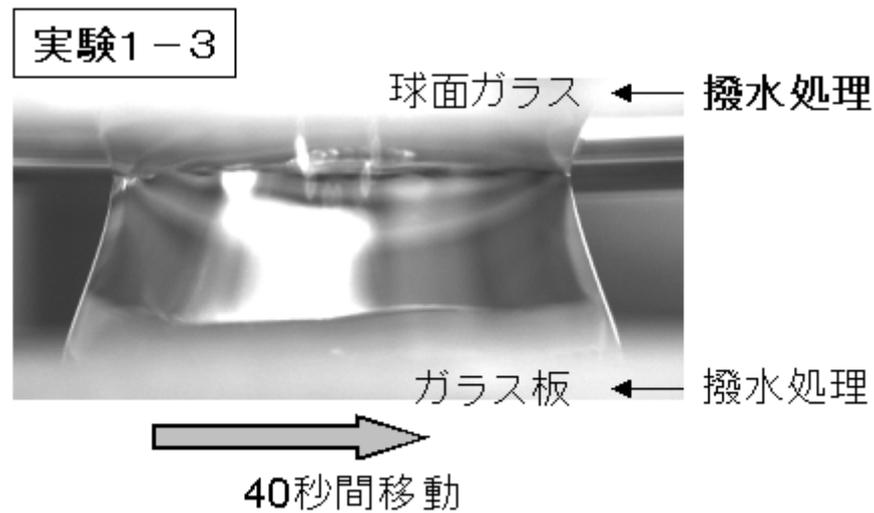


Fig. 45 球面ガラスの濡れ性の違い 2

実験 1-3. メニスカス形状の変化 (球面ガラス: 撥水 ガラス板: 撥水)

1-2の実験と同様にステージ移動量を 1mm とし, 上部の球面ガラスにも撥水処理を施し実験を行った. 実験の映像を Fig. 46 に示す.

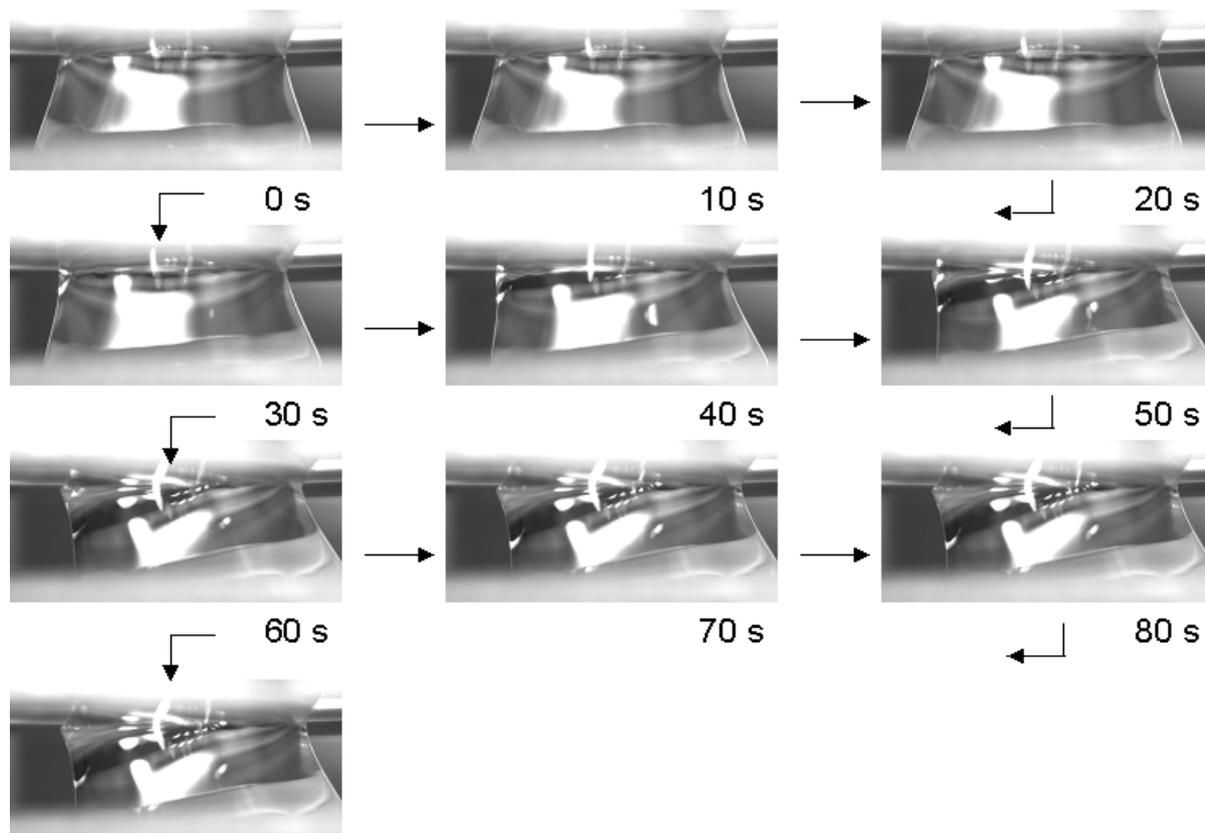


Fig. 46 実験 1-3 メニスカスの形状変化 (球面ガラス・撥水, ガラス板・撥水)

メニスカスの形状が撥水処理を行っていない球面ガラスと比べると異なることが分かる. 上部の球面ガラスと下部のガラス板で, 同じ撥水処理を行っているが, 下のガラス板の接触角が小さく見えるのは, 重力の影響でガラス球面の接触面の蒸留水は下方へ引っ張られ, ガラス板の接触面でも下方への力が働いているためである.

実験 1-1, 1-2と同じように, ステージの移動に伴いメニスカス形状は変化し, 左右非対称になる. ステージの移動を止めると形状を保ったまま変化しなくなる.

実験 1-3. ステージの移動に伴うメニスカス力の変化 (球面ガラス:撥水 ガラス板:撥水)

次に、実験 1-3 におけるメニスカス力の変化をグラフ化したものを下の Fig. 47 に示す。ガラス板の移動に比例してメニスカス力は増加し、ステージの移動を止めるとメニスカス力は落ち着く。球面ガラスに撥水処理を行ったことで、メニスカス形状は撥水処理を行っていないものと大きく異なっていたが、ステージ停止後に僅かなメニスカス力の減少は見られるものの、撥水処理を行っていないものとほぼ同様の同じ結果が得られた。

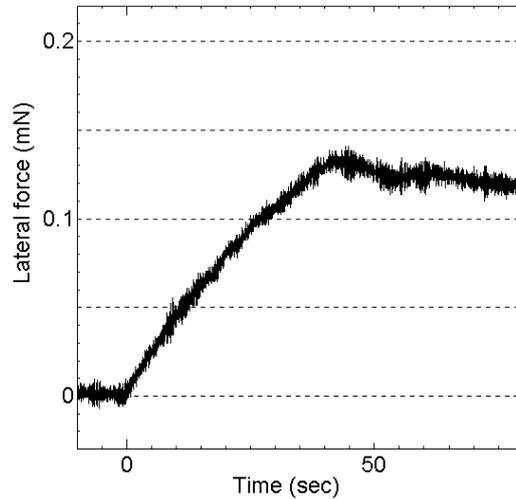


Fig. 47 球面ガラスの濡れ性の違いによるメニスカス力 (実験 1-3)

実験 1-2 と実験 1-3 の比較 (球面ガラスの濡れ性の違い)

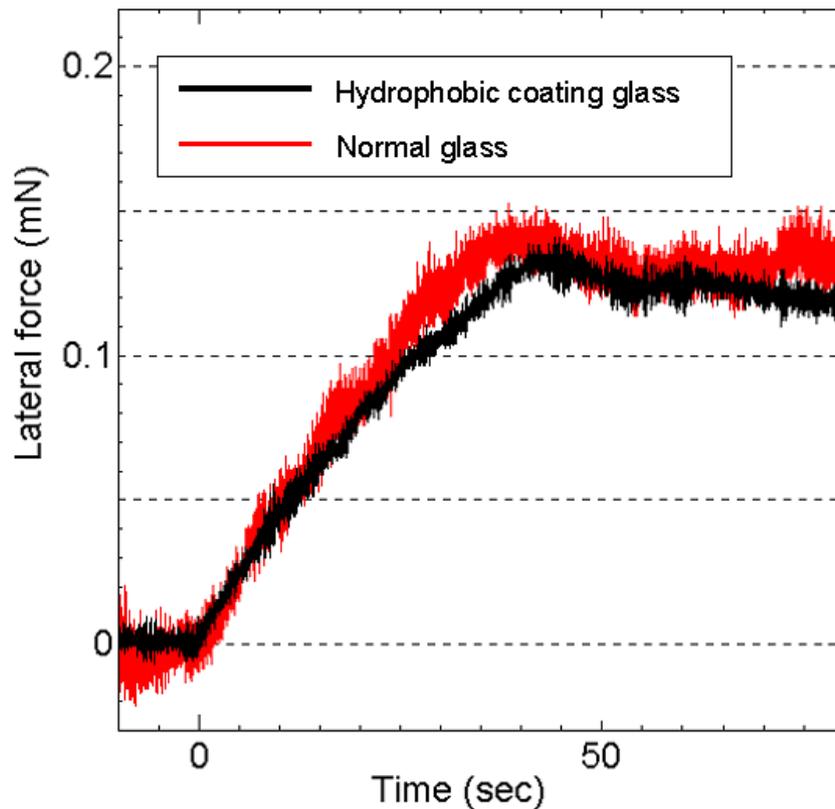


Fig. 48 球面ガラスの濡れ性の違いによるメニスカス力比較

撥水処理を行っていない球面ガラスでの実験と、撥水処理を行った球面ガラスを使用した実験では、メニスカスの形状に大きな変化が見られた。しかし、Fig. 48 に示すように、ガラス板を 1mm 移動したときの横方向のメニスカス力を比較してみると、僅かに撥水処理を行った球面ガラスのメニスカス力が小さいが、ほぼ同じメニスカス力 0.14mN 前後で落ち着いている。上部の球面ガラスに撥水処理を行っても、メニスカス力に影響が現れなかったことについて、横方向のメニスカス力は左右の接触角差から発生するものと考えた。映像からメニスカス形状が変わり、球面ガラスとの接触角は変化しているのが分かるが、左右の接触角の差に注目するとその差は明らかではない。そこで次章にて、実験映像からメニスカスの接触角について考察する。

【メニスカスの形成を伴う横方向メニスカスカの測定】

対象：実験 3

表 3 に示す実験 3 では、ガラス板の上に置いた液滴をステージの移動により球面ガラスへと近づけ、メニスカスを形成する。その後も移動を続け、メニスカスの形状の変化を撮影し、横方向メニスカスを測定する。球面ガラスは撥水処理をしていないもの、ガラス板は撥水処理を施したものを使用した。

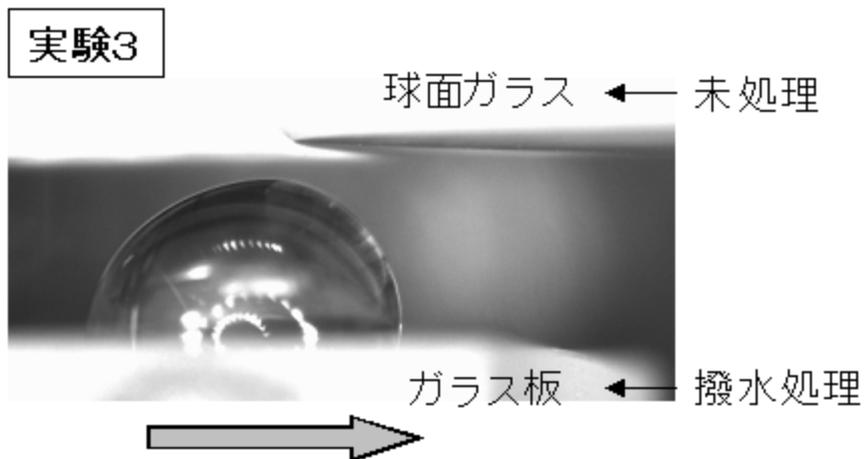


Fig.49 メニスカスの形成を伴う実験

実験3. メニスカスの形成を伴うメニスカス形状の変化 (球面ガラス:撥水 ガラス板:撥水)

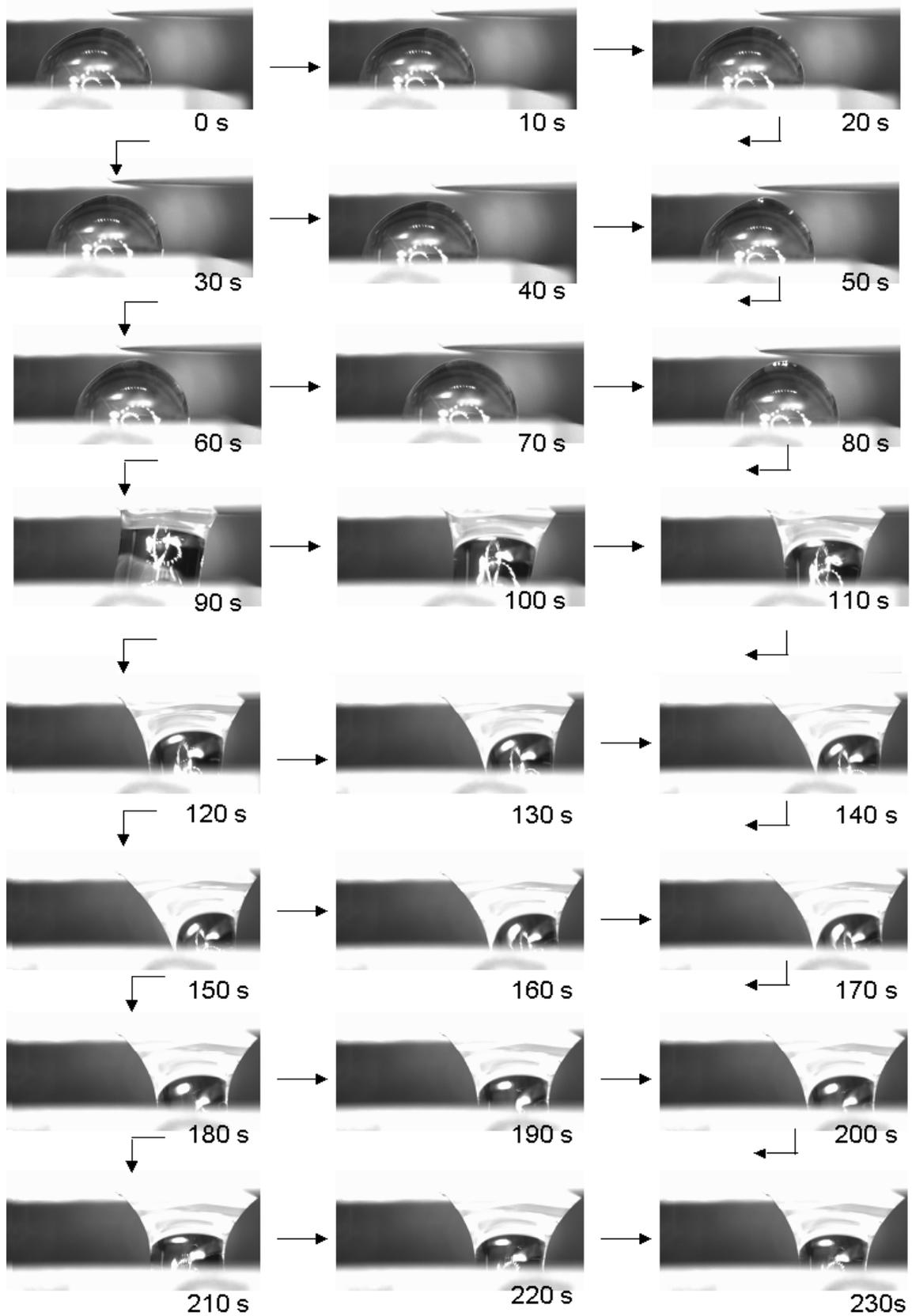


Fig. 50 メニスカスの形成をともなうメニスカス形状の変化

撥水処理を行ったガラス板の上に液滴を置き、液滴の載ったガラス板を移動させ、球面ガラスに接触させる。この時のメニスカス形状の変化を捉える。球面ガラスとガラス板との距離は3.2mmとする。これまでの実験と同様に液滴の量は $40\mu\text{l}$ 、下部のガラス基板は $2.4\times 10^{-2}\text{mm/sec}$ で移動させる。

移動を開始して20秒前後で、液滴は球面ガラスに引き寄せられるように僅かに液滴上部の形状を変化させる。移動を続けると、液滴と球面ガラスが接触するまでの間に数回程度、液滴の表面が持ち上げられ、球面ガラスに一瞬接触するが、はじき返されるようにもとの形状へと戻る。この現象は、静電気力によるものだと考えられる。アースをとるなどの対処を行ったが、同じような現象が発生した。

移動開始後88秒に、液滴は球面ガラスに接触し、メニスカスを形成する。メニスカス形成直後は左上の接触角が大きく、右上の接触角が小さい。

移動を続けると、メニスカス形状は徐々に変化し、120~130秒あたりで左右対称の形状となる。更に移動を続けると、メニスカスの形状は左上の接触角が右上よりも小さくなり、形成直後とは反対の形に変化する。

また、映像を見ると分かるように形成直後から上側2ヶ所の接触角がメニスカスの接触角全体が小さくなっていくことが分かる。徐々にぬれ広がって行く様子が観察される。

移動開始後180秒前後までは、ガラス板の移動に伴うようにメニスカス形状は変化していくが、180秒を過ぎたあたりから、後述する短時間の急激なすべりが不規則に発生する。

230秒後からは、連続的なすべりを発生し、メニスカス形状は変化しなくなった。

実験3. メニスカスの形成を伴うメニスカスカ力の変化 (球面ガラス:撥水 ガラス板:撥水)

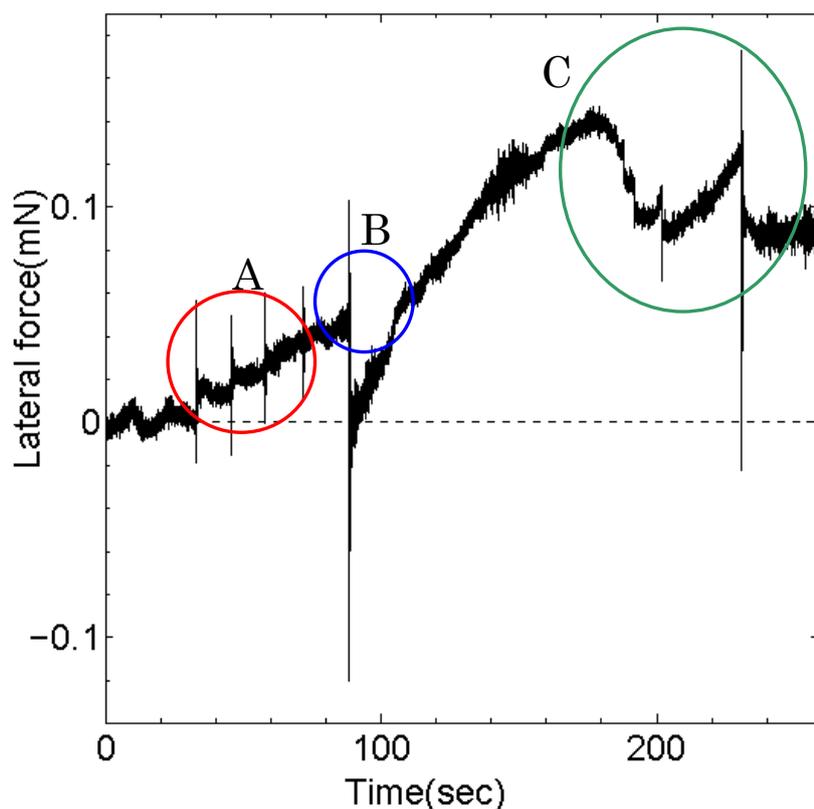


Fig. 51 メニスカスの形成を伴うメニスカスカ力の変化

横方向メニスカスカ力測定結果を Fig. 51 に示す. 映像からも分かるように, ガラス板におかれた液滴を近づけていくと, 測定開始から 20 秒あたりで液滴が球面ガラスに引き寄せられる. 液滴が球面ガラスに引き寄せられ, 弾き返されるという現象は力の変化にもあらわれており, A で囲った範囲で発生していることが分かる. 注目すべきは, この現象が発生する度に力が瞬時に減少した後, 増加しているということである. 力は, 板ばねが右に変位すると正の値を取る. 左から液滴を近づけることで, ガラス球が液滴に対して反発し板ばねが右に変位しているということになる. これは, 液滴とガラス球の間に発生した静電気力により一瞬引き寄せられ, またばねの力で引き戻されると予想される.

次に, 時間を同期した映像から, B で囲った点でメニスカスが形成されていることが分かる. 瞬時にメニスカスカ力はマイナスの値を取り, その後の移動で徐々に増加していく.

C の範囲では, 急激なメニスカスカ力の変化が数回発生している. ここでは, 固液界面で急激なすべりを発生し, メニスカスカ力が瞬時に減少していると思われる.

230 秒以降はメニスカスカ力は変化せず, 一定の値に落ち着いた.

このメニスカスの形成を伴うメニスカスカ力測定実験については, 球面ガラスの曲率が小さいため, 球面ガラスのエッジ周辺に液滴が触れてしまい, メニスカスカ力の値の精度に疑問が残る. また静電気力の影響も大きく, 実験方法の改善が必要である.

3. 2 すべり現象について

連続的なすべり

表3における実験1-1, 実験2-1では, 測定を開始10秒後, ステージの移動を始めてからメニスカスの形状が左右非対称に変化している. ステージの移動に伴い, 右上の接触角は僅かに大きくなって行くのに対し, 左上の接触角は小さくなって行く. しかし, 50秒を過ぎたあたりからメニスカスの形状はほとんど変化しない. これはステージの移動を続けることでメニスカスを形成している液体と下部のガラス板との間ですべりが発生しているためと考えられる.

そこで, 撮影範囲を広げてメニスカス全体と球面ガラスを撮影して見ると, Fig. 52に表すように, 時間の経過に従い, 液体とガラス板との接触点が移動しすべりが発生しているのが確認できた.



Fig. 52 メニスカスの連続的なすべり現象

急激なすべり

また、Fig. 53にあるようにステージの移動を続けると、上述した連続的なすべりとは別に、短い時間で急激にメニスカス力が変化することがある。実験を重ねても、この急激な短時間でのすべりは予想が難しく、特に決まった条件はなく発生する。この原因について、表面性状の問題が考えられる。均質でない現実の表面では、液滴の接触点周囲の持つ自由エネルギーが最も安定となる接触角の状態の他に、多数の準安定な状態の接触角が存在するとされる⁽⁸⁾。本実験では、ステージの移動という外乱により、接触角は安定する準安定状態の接触角から次の準安定状態の接触角へとエネルギーバリアを超えて移動するため、この短時間の急激なすべりが観察されたと考えられる。

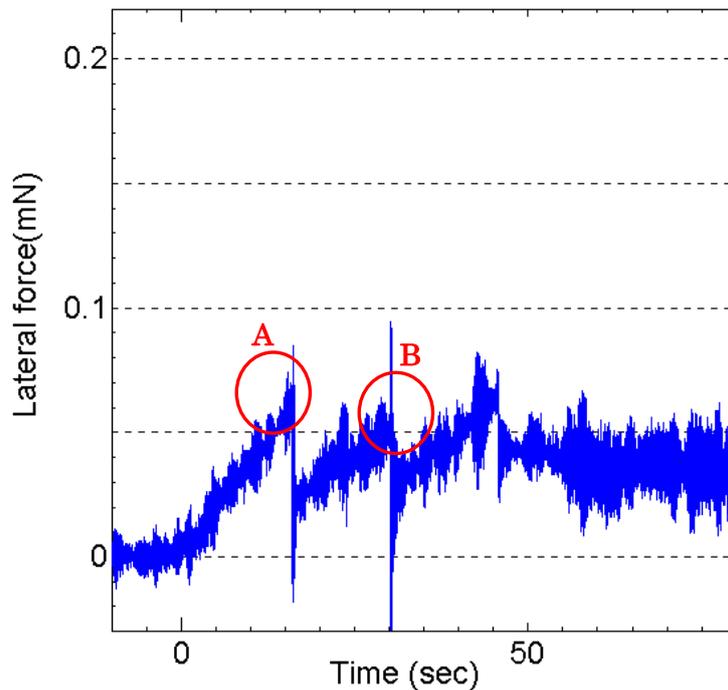


Fig. 53 急激なすべりによるメニスカス力の変化

ここで、メニスカスの形状変化を撮影したカメラにより接触角を計測した結果を Fig. 55 に示す。前進接触角を θ_A 、後退接触角を θ_R で表す。前進接触角と後退接触角の定義については、次章で詳しく述べる。

ガラス板の移動・メニスカス力の増加に伴って、前進接触角は大きくなり後退接触角は小さくなっていく。これは、その他の急激なすべりを起こしていないとされる実験結果と同じ推移で、メニスカス形状が左に傾いていく状態である。移動開始から 17 秒後、と 30 秒後の急激なすべりが発生したとされる A 点、B 点で共通して後退接触角が大きくなっている。しかしこの瞬間の前進接触角に注目すると、A 点で小さくなっているのに対し、B 点では大きくなっている。このことから、この接触角の変化だけがメニスカス力に変化を及ぼしたとは言えない。さらに A 点における急激なすべりが発生した時間の映像を Fig. 54 に示す。この映像から、下のガラス板の接触角はすべりにより大きく変化しているが、上部の球面ガラスとの接触角は僅かに変化したように見える。

これらの結果から、急激なすべり現象に関して、下の接触角が横方向メニスカス力に与える影響や、接触角測定精度の向上、前進接触角・後退接触角がそれぞれ別にメニスカス力に与える影響の大きさなど、さらに実験と考察を加える必要がある。

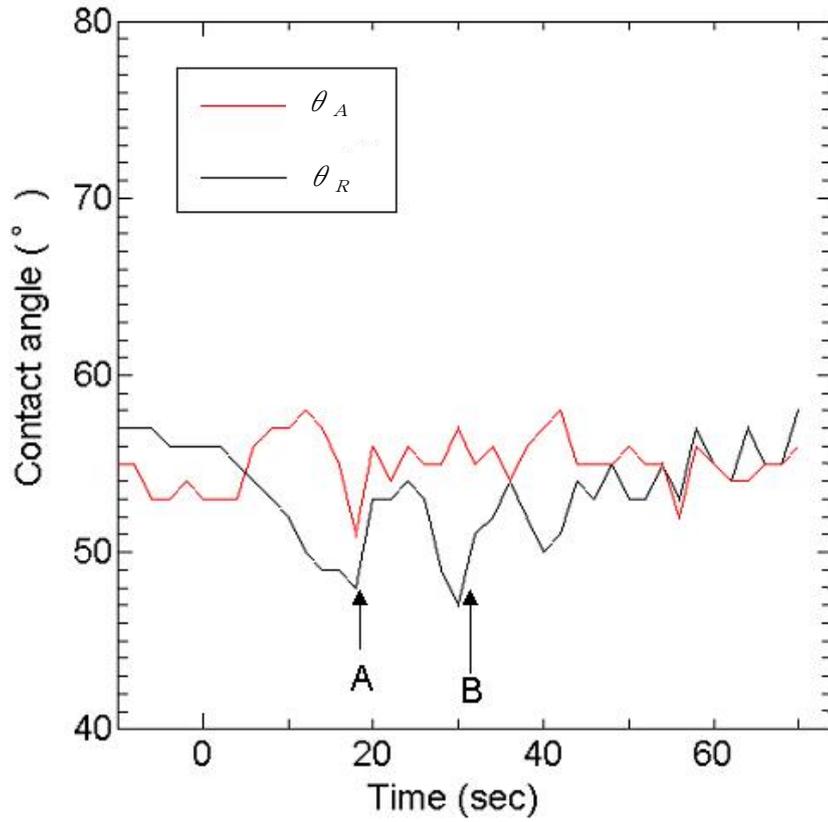


Fig. 54 急激なすべりが発生する時の接触角の変化

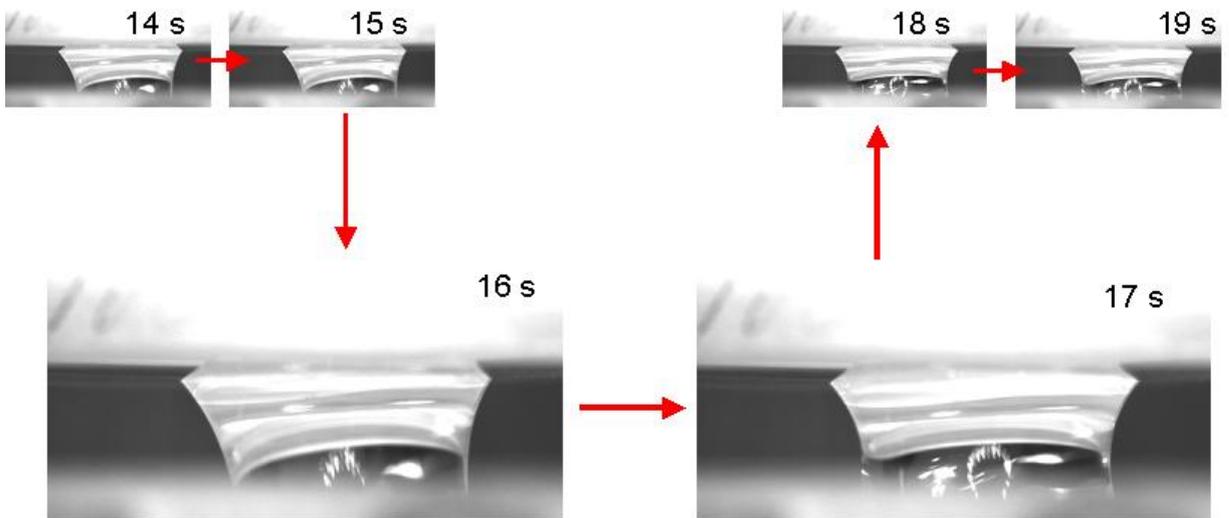


Fig. 55 急激なすべりが発生した瞬間の画像

3. 3 実験の再現性について

変位を測定するセンサ及び、実験装置全体を改良したために実験結果が異なる恐れがある。そのため、実験装置1と同様の実験を、改良した実験装置2で行うことで再現性について確認した。Fig. 56は上部球面ガラスを撥水処理なし、下部のガラス基板に撥水処理をしたものを使用し、ステージの移動を続けた実験結果である。メニスカス力変化の推移、大きさともほぼ同じ結果が得られたと言える。

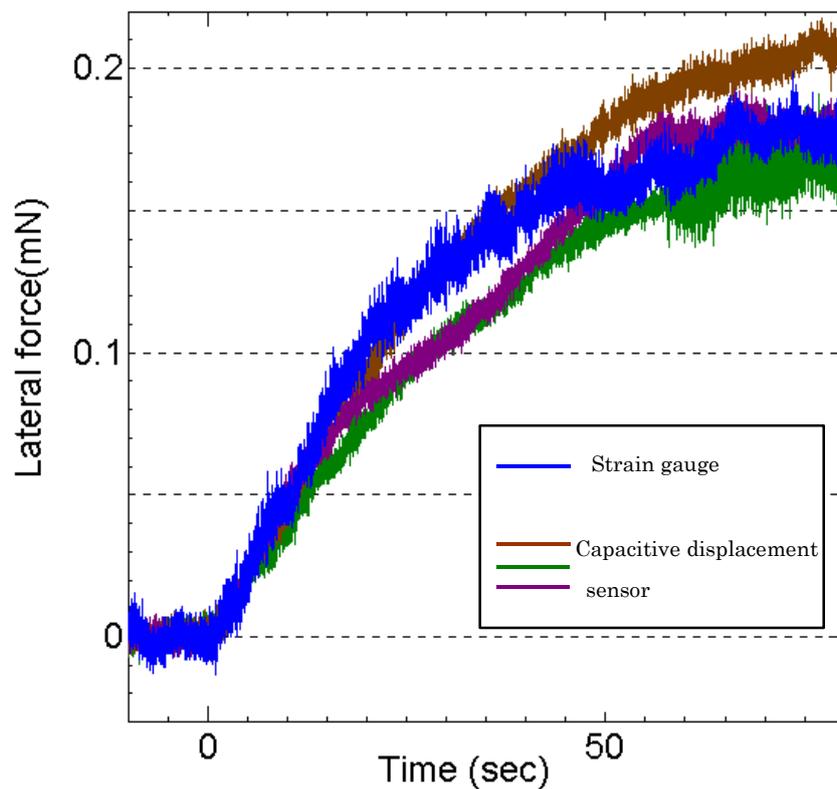


Fig. 56 実験装置の再現性

第4章 横方向メニスカスの起因

4. 1 液滴周囲の力学的な釣り合い

横方向のメニスカス力において、固体表面での液体自体のすべりは無いものと仮定すれば、横方向のメニスカス力とは水滴に加えらるせん断力であると考えられる。もし、この仮定が成り立つならば、実験の映像から分かる様に水滴が斜めに変形することで、左右の接触点において表面張力が非対称の向きに働く。このことで表面張力の水平成分に力の差が生じ、実験で計測される横方向のメニスカス力となる。

気体と液体と固体の境界線に沿って、接触線上に表面張力が働き、接触角がその力の向きを決めていることは、加藤らによる傾斜平板上の液滴の転落機構についての研究で理論的・実験的に検討されている⁽⁶⁾。この研究では傾斜平面上の液滴において、重力や表面張力に加え、固液の濡れ性を考慮した上で、傾斜平面状を液滴が転落する臨界条件を得ている。

この傾斜平面上を転落する液滴の固液間の挙動、接触線上の力学的な釣り合いの考え方が、横方向メニスカス力の発生にも適用できると考えた。傾斜平面上で液滴の先端では液体が固体を濡らす方向として前進接触角 θ_A が、後端には固体面を乾かす方向として後退接触角 θ_R が現れる。これらの接触角は、液体と固体表面の組み合わせで決まりこれが濡れやすさを表す指標となる。液滴が転落する臨界状態において、重力と液滴周囲に作用する表面張力 σ の斜面方向の釣り合いにより、次式が導かれる⁽⁷⁾。

$$-\sigma \int_c \cos \theta \cdot \cos \alpha ds = \rho g V \sin \phi \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで ϕ は平板の傾斜角度、 ρ は液体の密度、 g は重力加速度で、 V は液滴体積を表す。

この液滴周囲の釣り合いの式 (1) を液滴の最大幅 b で分断して考えるとき、最大幅より前方の周囲すべての位置で前進接触角が現れ、最大幅より後方の位置すべてで後退接触角が現れると仮定すれば、接触線の形状にかかわらず、式 (1) は次のように書き直すことができる。

$$\sigma(\cos \theta_R - \cos \theta_A) \cdot b = \rho g V \sin \phi \quad \dots \dots \dots (2)$$

上記の傾斜平面における力学的な液滴の釣り合いを、本実験における液滴の周囲の釣り合いに適用する。

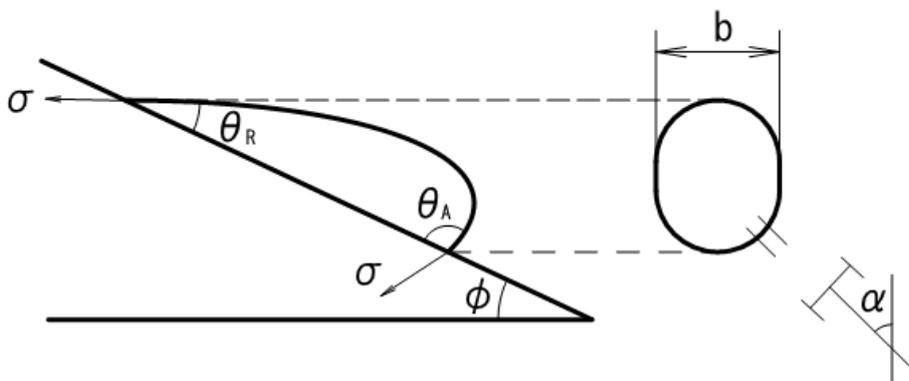


Fig. 57 傾斜平面における液滴周囲の力学的釣り合い

Fig. 59 に示すように本実験では水平面上で計測するために、式 (2) の左辺の値が横方向メニスカス力の大きさとなる。このことから、力を計測する球面ガラス側の前進接触角と後退接触角の差が、横方向メニスカス力に影響を与えると考えられる。

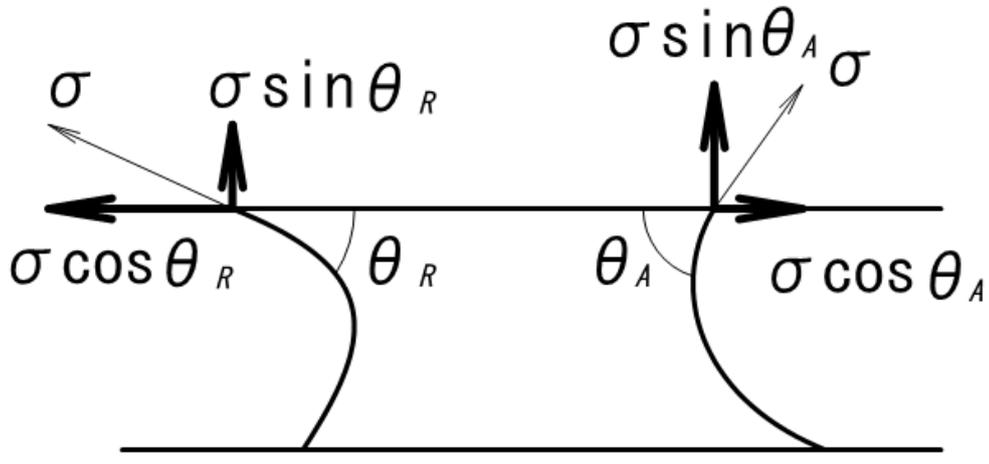


Fig. 58 横方向メニスカス力における接触線モデル

実際には液滴周囲の接触角 θ は Fig. 60 にあるように前進接触角 θ_A と後退接触角 θ_R 間で適当な値を取る。この接触線上に現れる接触角を、液滴幅が最大となる中心線よりも右側ではすべて接触角 θ_A が現れ、左側では接触角 θ_R が現れると仮定すると、接触点に働く表面張力 σ は θ の余弦を取ることによって水平成分となる。このときの前進方向 (右) と後進方向 (左) の余弦の差が、横方向メニスカスとして計測されることとなる。

$$F = \sigma(\cos \theta_R - \cos \theta_A) \cdot b \quad \dots \dots \dots (3)$$

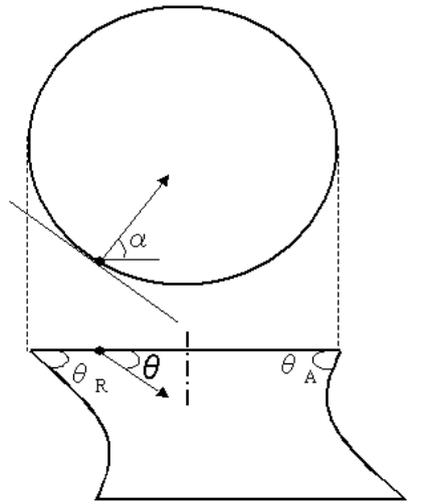


Fig. 59 前進接触角と後退接触角

4. 2 実験での接触角差

実際に実験での接触角差をカメラにより得られた映像より測定しグラフ化したものを Fig. 60, Fig. 61 に示す. また, 映像で左上に現れる接触角を前進接触角 θ_A , 左上に現れる接触角を θ_R とする.

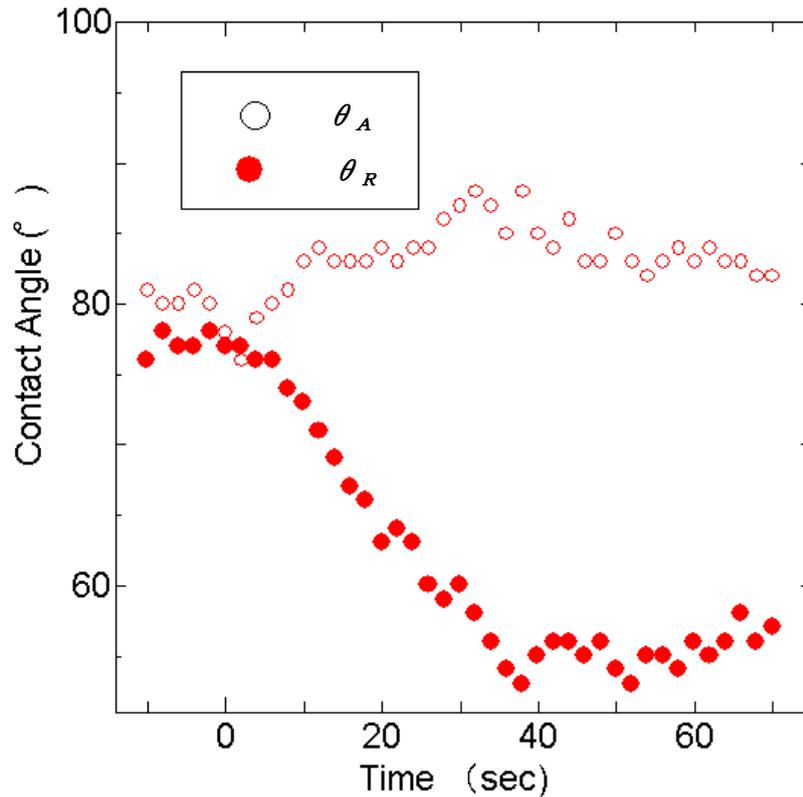


Fig. 60 実験 1-2 における接触角変化

表 3 における実験 1-2 の接触角を測定しグラフ化したものを Fig. 60 に示す. 上部の球面ガラスは液滴を置いた状態で接触角 50° , 下部のガラス板は撥水処理を行い, 液滴を置いた状態で接触角が 80° となるものである. ステージの移動を始めた時間を 0 とし, 横軸に時間, 縦軸に接触角をとる. メニスカス形成時には, ほぼ同じ接触角を持つが, ステージの移動に伴い左右の接触角差は大きくなって行く. ステージの移動を開始して 40 秒後にはステージの移動を止めると同時に接触角は変化しなくなる. 映像では左右非対称となることしか分からなかったが, 接触角の測定により前進接触角は後退接触角に比べて変化が小さいことが分かった.

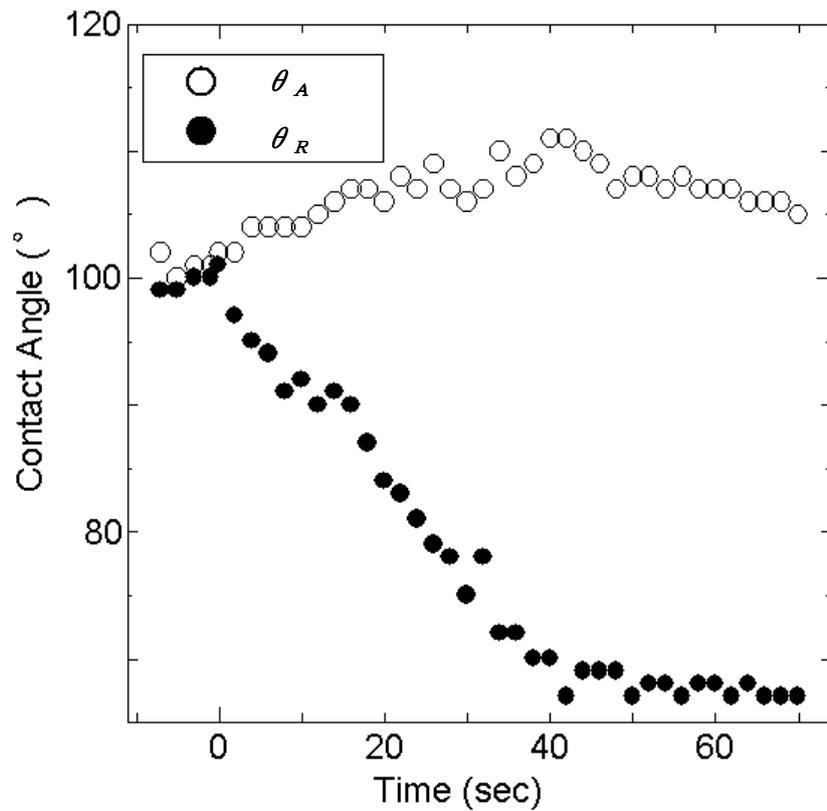


Fig. 61 実験 1-3 における接触角変化

表 3 における実験 1-3 の接触角変化のグラフを Fig. 61 に示す. 上部の球面ガラス及び下部のガラス板に撥水処理を行い, 液滴を置いた状態で接触角が 80° となるものである. 映像からも接触角が大きくなったことが分かったが, 実際に計測するとメニスカス形成時の接触角の開始点が 100° 前後となっており, 実験 1-2 の開始状態の接触角に比べて 20° 前後高くなっている. 下部ガラス板は実験 1-2 と同様の処理を行ったものを使用しているが, 開始時点での接触角が異なる. このことから, 上部の固体面となる球面ガラスの濡れ性が, 下部の固体面の接触角にも影響を与える事が分かった.

接触角の変化に注目すると, 実験 1-2 と同様の変化をしており. 前進接触角は僅かに大きくなり, 後退接触角はステージの移動に伴い小さくなっていく.

4. 3 接触角差による横方向メニスカスカ力の変化

式(3)により横方向メニスカスカ力が表される。しかし液滴幅に測定値 b を用いており、実際には形状の変化しているメニスカスカの液滴幅を厳密に測定することは難しい。しかしながら、実験のように水平方向のみにステージを移動させる場合、最大幅方向への形状の変化は少ないと考え、横方向のメニスカスカ力 F は接触角の余弦の差に依存している。

この仮定をもとに、横軸に前進接触角と後退接触角の余弦の差、縦軸に横方向のメニスカスカ力を取り図示したものを Fig. 62 に示す。

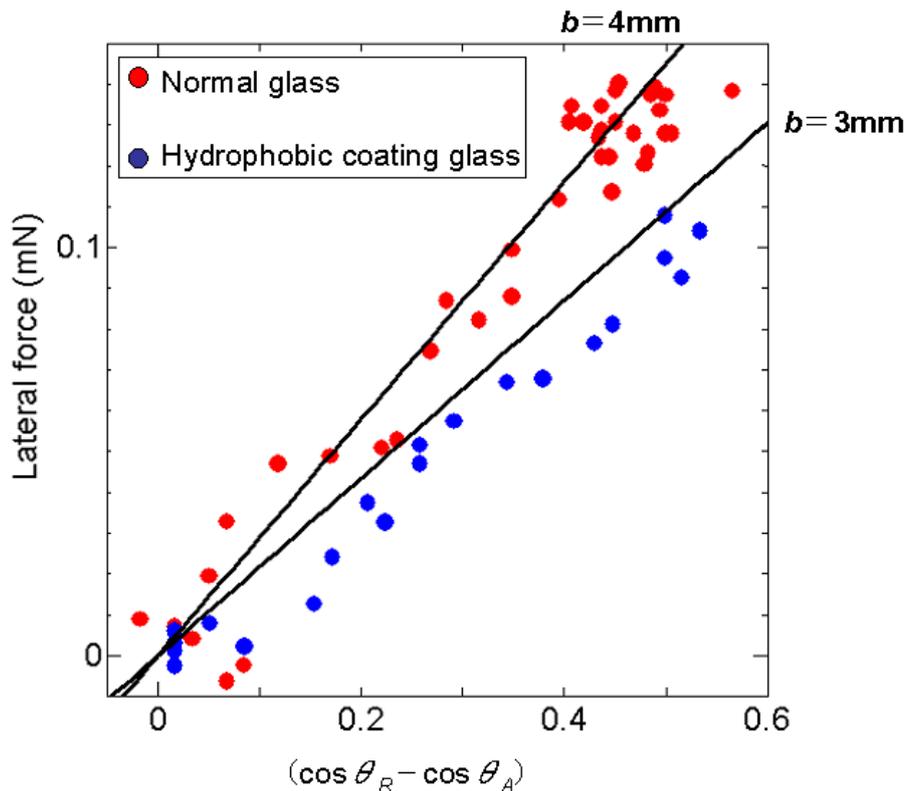


Fig. 62 接触角余弦の差とメニスカスカ力の関係 (実験 1-2, 1-3)

接触角に違いのあった実験 1-2 と実験 1-3 であるが、前進接触角と後退接触角の余弦の差と横方向メニスカスカ力を図で示すと、ほぼ接触角余弦の差に横方向メニスカスカ力は比例する結果となった。多少の誤差はあるものの、接触角の測定精度を考慮し、その他の実験結果も検討した結果、一致しているとみなせる。また前述した式(3)に蒸留水の表面張力係数と液滴幅を入れた値をグラフ中の実線で表す。液滴幅 b は得られる画像の液滴に対し、奥行き方向の長さである。画像から実際の奥行きは測定できないため、画像に映される横幅と同程度と予想し、3mm~4mm 程度と見積もった。この式(3)の値は、実験結果とよく一致している。このことから横方向のメニスカスカ力は、メニスカスカ力の働くことされる側の固体面の表面性が異なり、メニスカスカ形状が違っていても、接触角の余弦の差に比例した値をとるといえる。

第 5 章 結論

・メニスカスの形成された固体面を水平方向に移動させることで、メニスカス形状の変化を観察した。固体面間に形成されたメニスカスでは固体面の移動と共に、特に後退接触角が変化する。一方の固体面の濡れ性を変えると、接触角は大きく変化するが、固体面の移動に伴うメニスカス力の挙動に違いは見られなかった。

・横方向メニスカス力は固体面の移動に伴い増加するが、ある一定の移動量を超えると、固液間ですべりが発生し、それ以上大きな力は発生しない。

・固体面の移動を止めると、横方向メニスカス力もある一定の値に落ち着いた。固体面の濡れ性を変えて測定してもメニスカス力に大きな違いは見られない。

・液体のすべり現象について実験から得られた映像と横方向メニスカス力の変化から考察した。すべりには、メニスカス形状は変化せずに固液間ですべり続ける連続的なすべりと、瞬時にメニスカス形状を変化させメニスカス力に大きな変化をもたらす急激なすべりの2種類に分けられる。連続的なすべりは本研究の実験では、ガラス板を移動させ続けると必ず生じる。急激なすべりは、固体の微細な表面性状等に影響されると考えられ、すべりの発生する条件を予測することは難しい。

・メニスカスの形成から形状の変化までの観察とメニスカス力の測定を行った。形成直前は液滴がガラス球に引き寄せられるように変化し、ガラス球に触れて弾かれるという現象を繰り返す。左からガラス球を近づけると、形成直後はメニスカス形状は左に傾き、ガラス板の移動に伴って右に傾く。数回の急激なすべりを発生し、やがて連続的なすべりへと変わる。メニスカス力は形状の変化に対応するように、力の向きや大きさが変わる。

・メニスカス力の水平成分と固液間の接触線上での表面張力の関係を考察した。横方向のメニスカス力は前進・後退の接触角差に依存することが明らかになった。

参考文献

- (1) 鈴木健司, ” マイクロマシーンにおけるトライボロジー” (月刊トライボロジー)pp. 40 (2003. 11)
- (2) W. Zisman, ” Contact angles, wettability and adhesion” (F. M. Fowkes ed.)pp. 1 (1964)
- (3) ドゥジェンヌ, ブロシャール-ヴィアール, ケレ 奥村剛, ” 表面張力の物理学” (吉岡書店), (2003. 9)
- (4) 小泉俊介, “メニスカスの形成をともなう運動” (東京海洋大学修士論文) (2008. 3)
- (5) 小森裕介, 松岡広成, 福井繁寿, “液体メニスカスのフォースカーブ測定” (トライボロジー会議予稿集)pp. 293 (2007. 5)
- (6) 加藤健司, 東恒雄, 東根光善, 宮本侑典, “傾斜平板上の液滴の転落機構” (日本機械学会論文集)pp. 179 (2006. 5)
- (7) Dussan, V. E. B. and Chow, R. T. P., ” On the ability of Drops or Bubbles to Stick to Non-Horizontal Surfaces of Solids” (Journal of Fluid Mechanics, Vol. 137)pp. 1 (1983)
- (8) 鈴木健司, 土肥徹次, “微小荷重条件下の摩擦力に及ぼす液体架橋の影響” (トライボロジスト第 47 巻 11 号)pp. 852 (2002. 5)

付録

- ・計測ソフト LabVIEW について
- ・設計図面

・計測ソフト LabVIEW について

Fig. 63, Fig. 64 に LabVIEW のブロックダイアグラムを示す. Fig. 63 左のダイアグラムは、ひずみゲージ測定で使用したものである. DAQ アシスタント 1 にセンサからの出力電圧を受け、表示器に出力する. 並びにこのセンサからの出力をシーケンス内の書き込みプログラムにより、変位出力ボタンを押すことで書き込みを開始する. 同じシーケンス内にある DAQ アシスタント 2 では、変位出力ボタンの ON によりパルス出力をカメラ側に出すことで、撮影を開始するように設定している.

Fig. 63 右ダイアグラムは非接触変位センサでの測定で使用したものである. ひずみゲージでのダイアグラムにチャートを加えることで、実験の途中でメニスカス力の変化が確認できるようにした.

Fig. 64 はばね定数を測定するときを使用したプログラムである. センサからの電圧出力を DAQ アシスタント 1 で受け、この信号を測定値の表示・書き込み用の電圧出力と、固有振動数を測定するためのスペクトル解析への出力に信号分割し表示する. 振動の立ち上がりトリガを設定することで、エッジの検出から 1 秒間の振動の測定を行いスペクトル解析する. また本実験では使用しなかったが、ステージ変位用の変位センサを組みこむことで、ステージの移動量も同期できるプログラムを組んである.

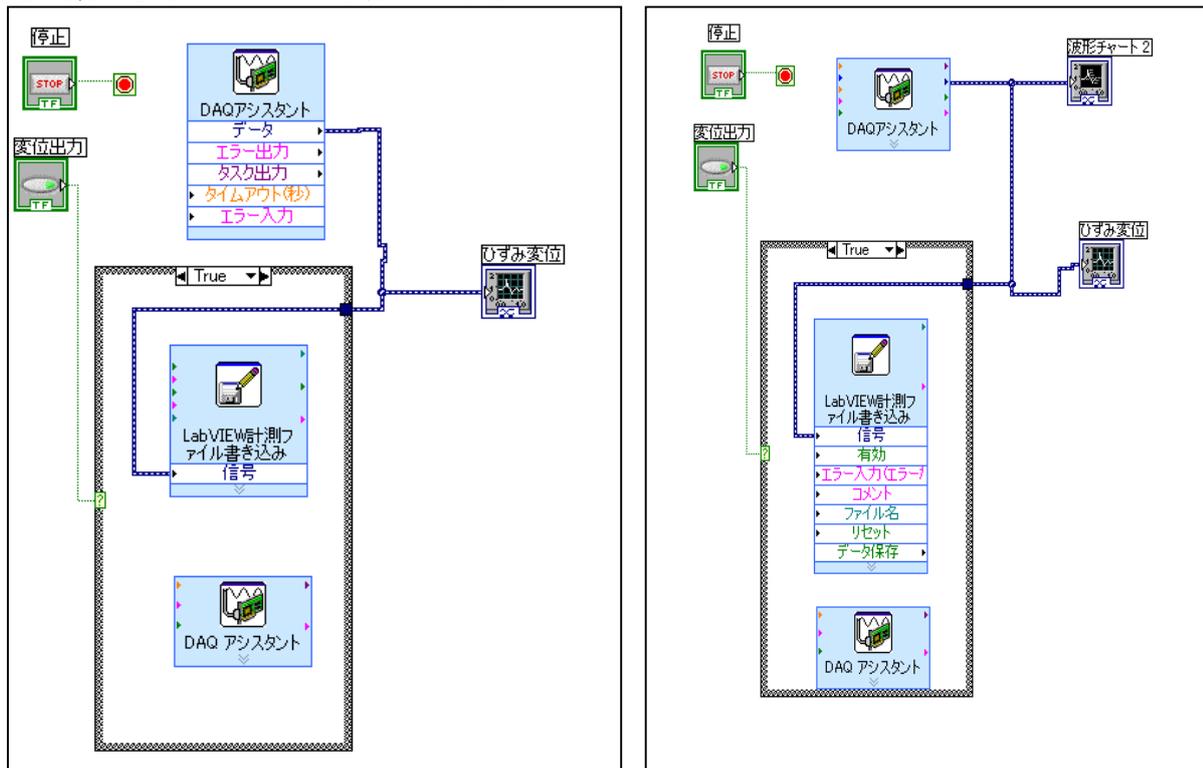


Fig. 63 LabVIEW ブロックダイアグラム

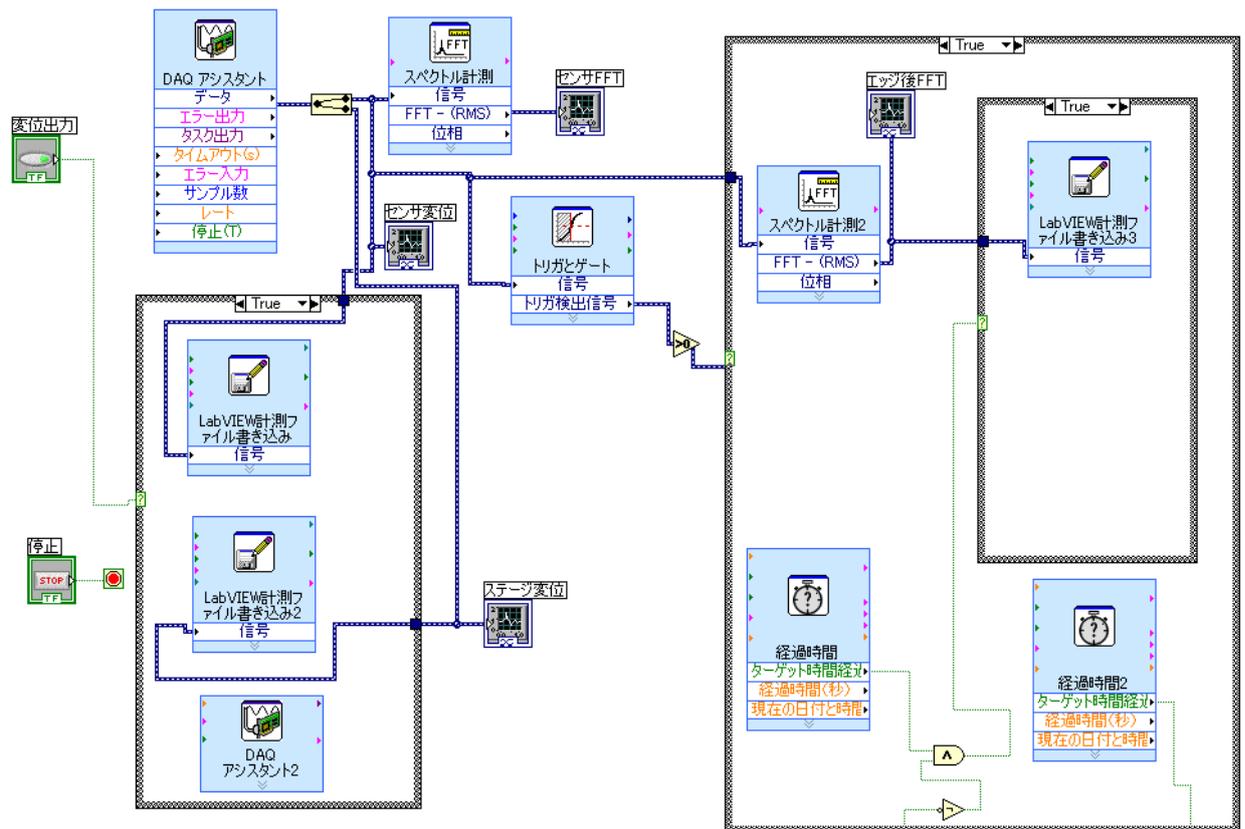
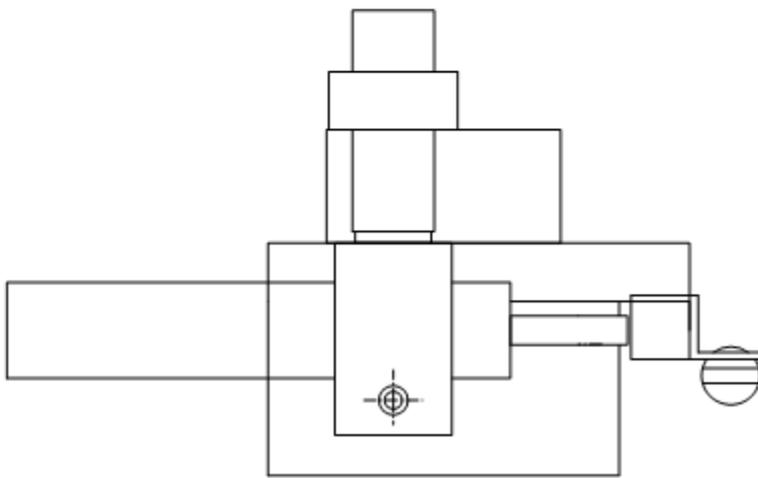
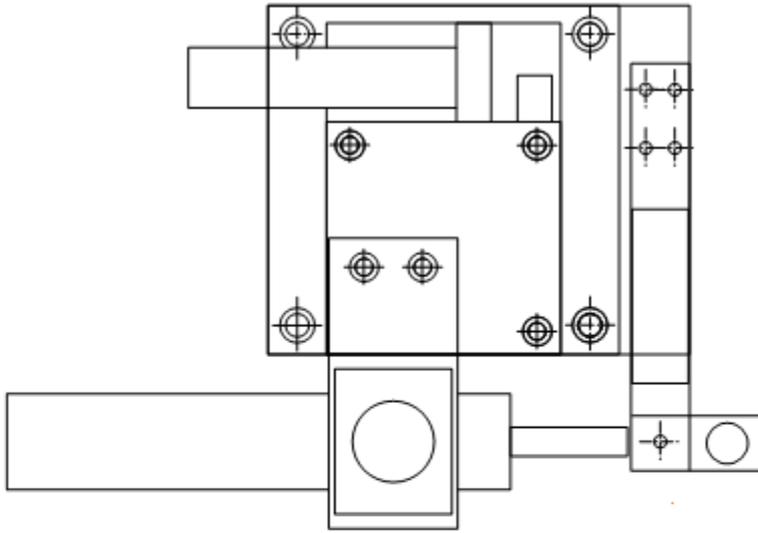


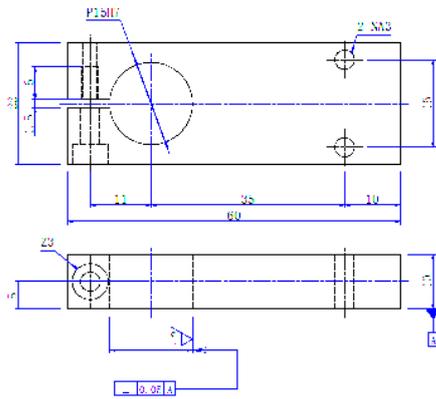
Fig.64 LabVIEW ブロックダイアグラム 振動解析用

設計図面

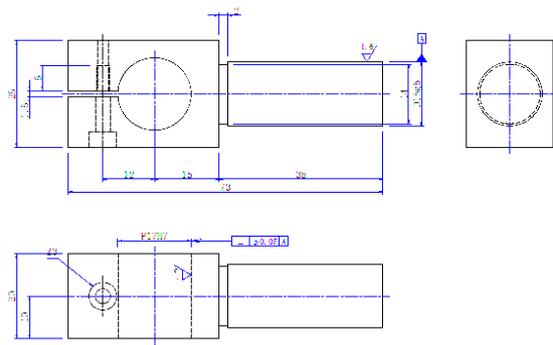
センサ側全体図



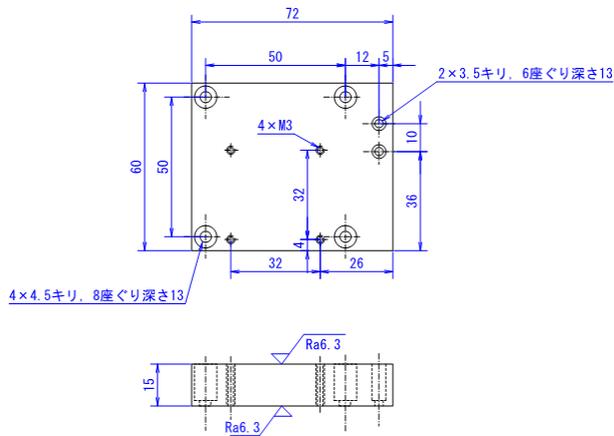
角クランプ



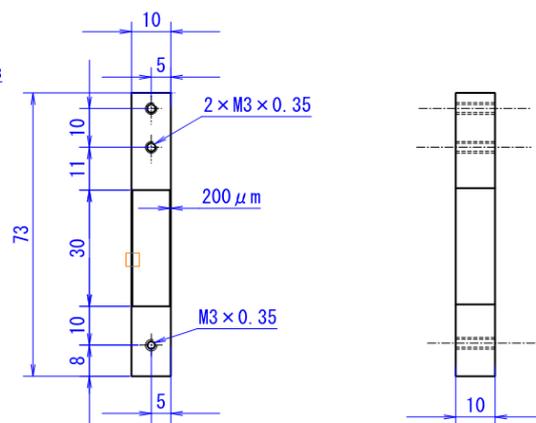
丸クランプ



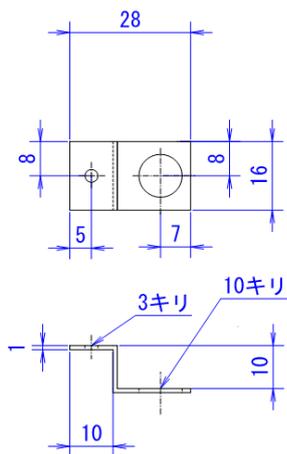
ばね取り付け部と角クランプの接続部



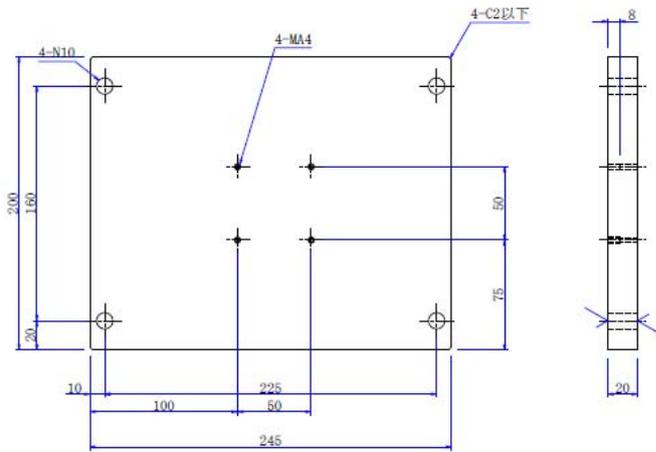
板ばね



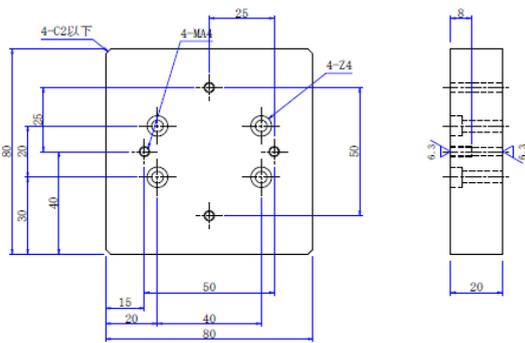
球面ガラス取り付け部



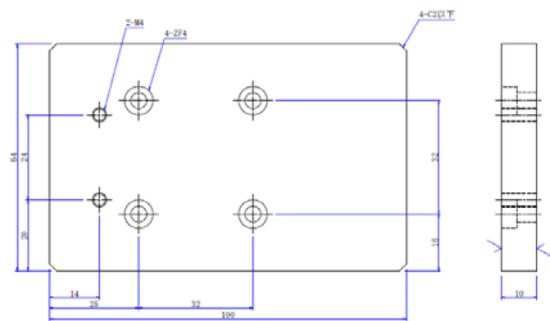
土台ステージ C



スライドとゴニオステージ間スペーサー



ゴニオステージとカメラ間スペーサー



謝辞

本論文は、私小杉康太が東京海洋大学海洋工学部機械設計研究室に在籍中に行った研究をまとめたものです。私が無事に論文をまとめることができたのは、多くの皆様のご助言、ご指導によるものと思っています。ここでお礼を述べたいと思います。

岩本勝美教授には、留年していて成績も良くない私を快く受け入れてくださり本当に感謝しています。私が学部生の頃から、研究だけではなく進路、就職に関する相談にもものって頂きました。私が大学院への進学を決意し、研究をまとめ、無事就職できたのはいつも岩本教授が気にかけてくださっておかげだと思っています。よく私の肩に手を置き、最近どう？と言ってくくださる手の重みには、研究を進めなくてはいけないという気持ちになると同時に、優しさと温かさを感じました。ほんとうにありがとうございました。

田中健太郎准教授には、研究、私生活に渡りお世話になりました。研究に関して未熟な上に頑固な私に、粘り強くご指導して頂き、研究とはこゆうものだという道を教えて頂きました。また田中先生は年齢もお若く、その気さくで話しやすいお人柄であることに甘え、私は大変失礼なことを多々申してしまったと思っています。そんな私のために休みの日にも関わらず、早朝に学校まで来て頂き、私の履歴書をコピーしてくださったこともありました。深夜まで私の論文作成を手伝ってくださり、夕食をご馳走になったこともありました。一緒に釣りをしたこともありました。見事なボラでした。忘れることのできない感謝の思い出が多くあります。ありがとうございました。

本研究室の大石誠治助手、外山一雄技術職員には、実験装置の製作に関するアドバイスや、研究発表会における適切なご指摘など、大変お世話になりました。顔を合わせると、お二人ともいつもにこやかにご挨拶をしてくさるので、元気を頂いたような気がします。

博士後期課程の藤野俊和さん。機械設計研究室は穏やかな方が多く、時にたるんだ空気になることもありましたが。そんな時にいつも冗談ばかり言っている藤野さんの先輩としての、厳しいお言葉はこの研究室を支えていたと思います。そして私が困った時には、いつも真剣にその問題について一緒に考えてくださいました。ありがとうございました。

阿久澤憲仁君、小林慶子さんにとって留年した私は、まさに目の上のタンコブだったと思います。それにも関わらず、優しく接してくれてありがとうございます。阿久澤君にはいつもパソコンの使い方や、提出書類の締め切りについてなど質問ばかりしていました。優しく教えてくれてありがとう。小林さんは私の就職が決まった時や、発表が終わった時など、まるで自分のことのようにいつも喜んでくれました。本当に嬉しかったです。ありがとう。

浅見文彦君。同じ液滴に関する研究ということで、一緒に勉強しました。来年はさらによい研究にしていってください。いつも私の愚痴を笑って聞いてくれてありがとう。私と一緒に愚痴を言わずに、笑ってそうですねと言える事は素晴らしいと思います。

熱川慧君は研究室でパソコンが隣ということもあり、机と机の間の国境線で領域争いが絶えませんでした。無口な熱川君のおかげで研究に専念することができました。酒を飲んだ時の変貌振りには驚きましたが、とても楽しかったです。

宮崎悠造君は修士1年生を率いて合宿や飲み会などいろいろ大変だったと思います。いつも夕食を味見させてくれてありがとう。この一年で料理の腕は大きく成長したと思います。

吉田怜史君。唯一大学院に進学する4年生ということで、研究室の皆に使われて大変だったと思います。しかし、それは皆が吉田君の血糖値を気にしてのことです。今後も大いに働いてください。また、研究分野も同じなので私の研究もたくさん手伝ってくれてありがとう。ジュースを買いに行くという研究は、これからの吉田君の研究にもきっと役立つと信じています。

鈴木君、樋口君、田中君。いろいろ私の話につきあってくれてありがとう。来年はそれぞれ

の道で頑張ってください。

一足先に卒業していった小泉君は、私の研究の先駆けとして大変立派な成果を残して行ってくれました。枝廣君にはパソコンの使い方から英語の勉強の方法など本当にお世話になりました。

ここには名前を挙げるのでできなかった多くの先生方や先輩、友人、後輩にお世話になりこの論文を仕上げることができました。また私の研究は援助を続けてくれた家族に支えられてのものでした。深く感謝しております。ありがとうございます。

平成 21 年 1 月 小杉康太