

温度による空間移動

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科
松澤俊介, 小暮浩史, 出川達也, 坂野多加史

1 はじめに

本実験では熱エネルギーを用いて物体を移動させることを考える．熱エネルギーで物体を移動させる方法として，空気中の温度差によって発生する気流を用い，風船などの軽く浮きやすい物体の移動を考える．まず，気流の発生の確認を行い，発生した気流によって風船などを動かすことができるか検討を行う．

次に，熱エネルギーを用いた物体移動の別の方法として，ライデンフロスト現象を用いる．料理をするとき，熱したフライパンに水をたらずと蒸発することなく，水滴がフライパンの上を回りまわるといった現象を見る事が出来る．このような不思議な現象をライデンフロスト現象という．このライデンフロスト現象を用いて様々な液体による挙動の違いや，温度による動きの変化などの観測を行う．

2 気流による物体移動実験

2.1 温度差による気流発生確認実験

空気の温度差により気流が生まれることを確認するため，線香を使った実験を行った．

2.2 実験方法

部屋の温度 20℃，部屋の外の温度 32℃ とし，線香の煙の流れを確認した．

2.3 実験結果

ドアの上部での空気の流れの図 1，ドアの下部での空気の流れの図 2 に示す．



図 1: ドア上部での気流の流れ



図 2: ドア下部での気流の流れ

図 1,2 の実験から温度差により気流が発生することを確認した．ドアの上部では暖かいほうから冷たいほうへ，ドアの下部では冷たいほうから暖かいほうへ空気の流れがあることがわかる．

2.4 実験方法の考案

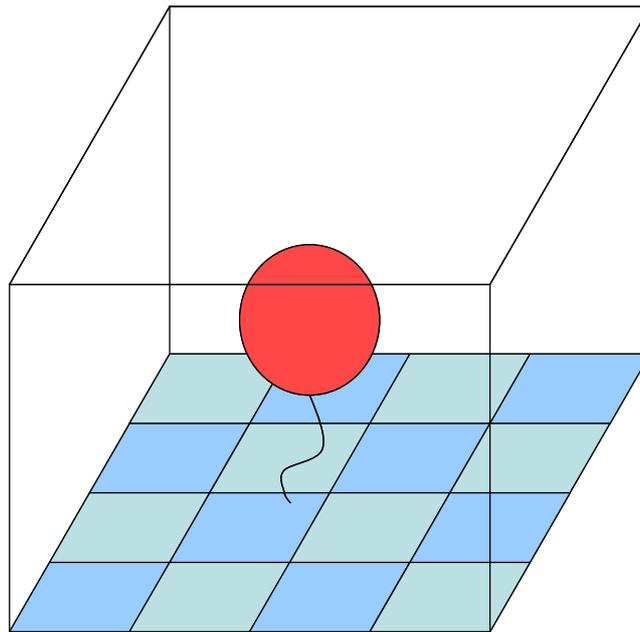


図 3: 実験システム

温度差による気流発生確認実験で温度差により気流が生まれることが確認できたので、この気流を用いて風船を移動させるシステムを考えた。

図 3 のように密閉された空間で、右側を高温、左側を低温とすることで温度差を作り、右から左への気流を発生させ、風船を移動することを考える。このとき、気体の状態方程式は式 (1) で表される。 P は圧力、 V は体積、 n はモル数 R は気体定数を表している。

$$PV = nRT \quad (1)$$

密閉された空間で風船の移動を考えたとき、 V, n, R は一定である。ここで変化させることができるものは T である。 T の変化に応じて P の値も変化しこれが物体を動かす力となる。 $T = 273.15 + t$ (t は摂氏温度) で表すことができる。この t の値を変化させたとき P の変化量は $\frac{t}{273.15}$ となる。よって 10 の温度差を作ったとしても、 $0.003[Pa]$ しか発生しないため実際のもの動かすためには非常に大きな温度変化が必要であるという結論となった。

そこで、実際に空間移動に使用するものを液体と限定し、ライデンフロスト現象というものを使うことで、大きく動き、変化に富んだ空間移動の実験を行う。

3 ライデンフロスト現象

フライパンなどの高温になった鉄板の上に水滴をたらすと、鉄板に接する部分が気化・蒸発して薄い蒸気の膜を作り、水が鉄板の上を浮いたような状態となる。このとき、鉄板と水滴の間の摩擦は非常に小さくなるため、容易に横滑りするようになる。この現象をライデンフロスト現象といい、水の場合は鉄板の温度が約 160 ~ 300 のときに確認することが出来る。

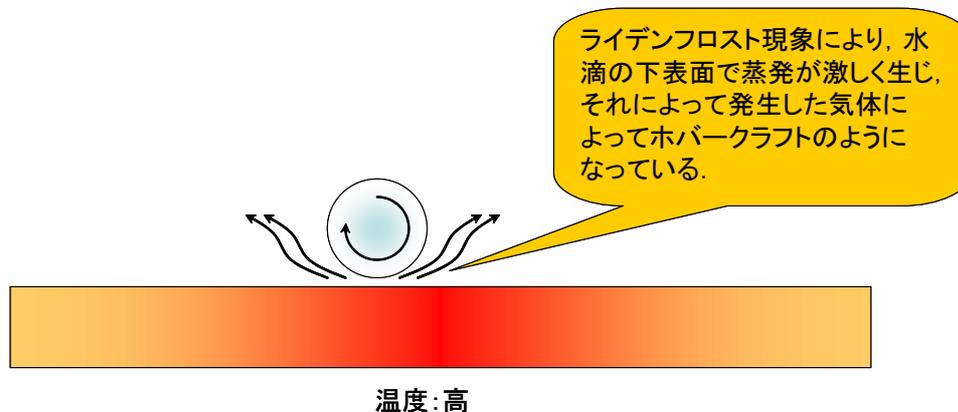


図 4: ライデンフロスト現象

4 実験機器・試料一覧

以下に今回使用する実験機器を、実験試料・器具を表 1 に示す。ホットプレートの表面温度の確認はホットプレートの表示計のほかにサーモメータを用いて行う。

ホットプレート	熱実験機器	サーモメータ
		
設定温度範囲 0 ~ 400 温度均一範囲 300 × 300	ステンレス製	測定レンジ: -30 ~ 500 確度: 10 ~ 30 : ± 1

表 1: 実験試料・器具

水	塩水 [2%,5%]
清涼飲料水	砂糖水 [2%,5%]
日本酒 (アルコール濃度 7%)	ウイスキー (アルコール濃度 40,54%)
卵	牛乳
中性洗剤	低脂肪乳
墨汁	MAX コーヒー
オレンジジュース	着色水
スポイト	銅板
アルミ板	ステンレス板
真鍮板	メスシリンダー

5 実験 1

5.1 実験条件

熱したホットプレート上に水などの液体をたらし，ライデンフロスト現象が発生するかどうかの検証を行う．また，発生した場合どのくらいの温度から発生したのかの確認，温度や液体によって動きに違いがあるかの観察を行う．

5.2 実験結果

ライデンフロスト現象が発生した温度を表 2 に示す．

表 2: ライデンフロスト現象発生温度

	100[]	160	170	180	190	200	210	220	230	240	260	270	300
水	×	×	×										
塩水 (2%)	×	×	×	×	×	×							
塩水 (5%)	×	×	×	×	×	×	×						
砂糖水 (2%)	×	×	×	×	×								
砂糖水 (5%)	×	×	×	×	×								
清涼飲料水	×	×	×	×	×	×							
日本酒	×	×	×										
卵 (白身)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
卵 (黄身)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
牛乳	×	×	×	×	×								
牛乳+水 (1:1)	×	×											
低脂肪乳	×	×											
MAX コーヒー	×	×	×	×									
墨汁	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
着色水 (赤)	×	×	×	×	×	×							
着色水 (青)	×	×	×	×	×	×							
オレンジジュース	×	×	×	×	×								
ウイスキー (40%)	×												
ウイスキー (54%)	×												
中性洗剤	×	×	×	×	×	×							
中性洗剤 + 水 (1:1)	×	×	×	×	×								

○：ライデンフロスト成功， ◐：弱いライデンフロストが発生， ×：ライデンフロスト失敗

表 2 の結果より，ウイスキーが最も早くライデンフロスト現象が現われ次に水，日本酒の順番で現象が現れている．これは，液体の揮発性によりウイスキーが早くなったと考えられる．揮発性が高ければそれだけ蒸発がしやすいため，早くライデンフロスト現象が得られたと考える．また，塩水がもっとも高い温度が必要であった．これは，塩を入れたことにより沸点が上がってしまったためであると考えられる．また，卵の黄身と白身はどれだけ高温にしても固まり，墨汁は炭化してしまうためライデンフロスト現象を確認することは出来なかった．

図 5，図 6，図 7 に赤の絵の具で着色した水を鉄板にたらし時の様子を示す．図 5 はホットプレートの温度が 160 ，図 6 は 200 ，図 7 は 300 のときのものである．



図 5: 160

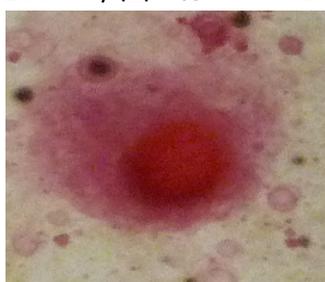


図 6: 200



図 7: 300

図5を見ると、ライデンフロスト現象はまったく発生せず、水分が蒸発して残った塗料が鉄板に付着している。図6では、多少ライデンフロスト現象が発生しているため丸くなっているが、蒸発しているものもあるため、やはり鉄板に塗料が付着している。図7では、完全にライデンフロスト現象が発生しており、塗料も鉄板に付着することなくきれいな球状になっている。

次に、ライデンフロスト現象の持続時間の比較を行う。300℃に熱した鉄板に数種類の液体をたらし、ライデンフロスト現象の持続時間を比較する。

持続時間の測定結果を表3に示す。

表 3: ライデンフロスト現象持続時間

実験試料	1回目	2回目	3回目	平均値 [sec]
水	1.43	1.63	1.70	1.59
塩水 (2%)	1.90	2.47	3.71	2.69
塩水 (5%)	2.30	2.20	2.77	2.42
砂糖水 (3%)	1.60	1.58	1.82	1.67
砂糖水 (5%)	1.70	1.84	1.87	1.80
清涼飲料水	2.02	2.10	2.00	2.04
日本酒	2.64	2.64	2.13	2.47
牛乳	8.32	7.15	6.21	7.23
牛乳+水 (1:1)	3.43	5.58	3.60	4.20
低脂肪乳	7.35	5.38	4.41	5.71
MAX コーヒー	7.22	6.23	5.92	6.46
着色水 (赤)	1.80	1.80	1.67	1.76
着色水 (青)	1.90	1.77	1.83	1.83
オレンジジュース	9.39	8.92	7.00	8.44
ウイスキー (40%)	2.47	2.23	2.50	2.40
ウイスキー (54%)	1.77	1.67	1.34	1.59
中性洗剤	37.57	29.05	31.98	32.87
中性洗剤+水 (1:1)	28.01	20.04	17.54	21.86

今回の実験では中性洗剤を含む溶液がもっとも長く持続した。ついで、オレンジジュース、MAX コーヒーがとなっている。しかし、中性洗剤などに含まれる界面活性剤には機能することの出来る適正な温度範囲が存在する。この温度範囲を越えるような高温になってしまうと、溶液が白濁しゲル化してしまう。今回の実験では、溶液が白濁することが観測できた。この結果より、中性洗剤ではライデンフロスト現象が発生したのではなく、ゲル化したのだと考えられる。また、オレンジジュース、MAX コーヒーの持続時間が長いことから糖度が高いものほど、長くライデンフロスト現象が持続すると考えられる。

6 実験 2

ライデンフロスト現象において，前述したギザギザに加工した鉄板を熱し，上に水滴をたらすと，図 8 の矢印の方向に水滴が動くことがわかっている．

そこで，この鉄板を熱し，水をたらしたときにこの現象が発生するかの確認を行う．また，水以外の液体をたらしたときの水滴の速度などの動きの違いを比較する．

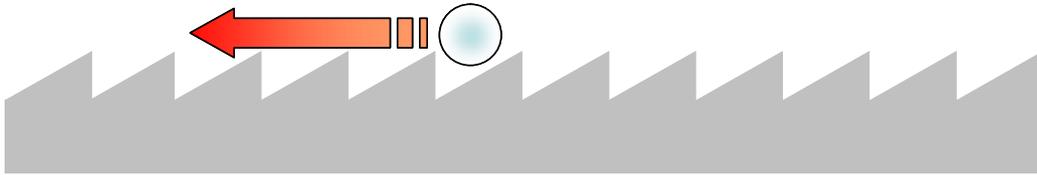


図 8: ギザギザに加工した鉄板上の水滴の動き

6.1 実験条件

1. 図 9 のようにギザギザに加工した鉄板を 300℃ に熱したホットプレートの上に置く．
2. ギザギザに加工した鉄板の上に液体をたらし，液体の速さの変化の観察を行う．(ただし，実験 1 でライデンフロスト現象が発生しなかったものに関しては実験を行わない．)

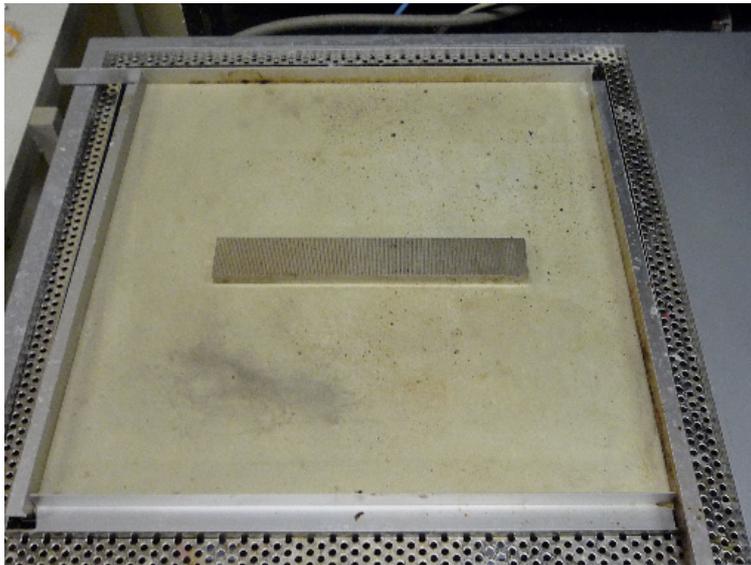


図 9: 実験 2 の実験環境

6.2 実験結果

水をギザギザに加工した鉄板の上にたらし、滑走する際の映像を実験 2.avi に示す。また、各液体の速度を観察した結果を表 4 をに示す。

これらの結果より、糖分の高い液体ほど滑走速度が遅いのではないかと考えることができる。また、着色水の濃度を変化させたところ、濃度が高くなるにつれて、滑走速度が遅くなることが確認できた。

しかし、中性洗剤を含んだ溶液はライデンフロスト現象は発生するものの、その場に止まったりすぐ横にそれてしまいギザギザの鉄板からの影響を受けていることを確認できなかった。これは、ライデンフロスト現象が発生しているのではなく、ゲル化しているためギザギザの鉄板の影響を受けなかったものと考えられる。

表 4: 実験試料滑走速度

溶液	速さ [cm/sec]
水	12.5
塩水 (2%)	10.8
塩水 (5%)	6.7
砂糖水 (2%)	15.2
砂糖水 (5%)	20.5
清涼飲料水	8.5
日本酒	9.7
牛乳	12.3
牛乳+水 (1:1)	10.0
低脂肪乳	12.1
MAX コーヒー	8.1
着色水 (薄い)	11.9
着色水 (濃い)	10.4
オレンジジュース	7.0
ウイスキー (40%)	5.7
ウイスキー (54%)	5.5
中性洗剤	測定不能
中性洗剤+水 (1:1)	測定不能

7 実験3

実験1, 実験2の結果より, 液体中の糖度がライデンフロスト現象の持続時間や水滴の移動速度に大きな影響を与えるのではないかと推測できる. その検証を行うために, 水に更に多くの砂糖を混ぜ濃度を変化させ実験を行う.

7.1 実験条件

濃度が5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%の砂糖水を用意し, それぞれの濃度の砂糖水でライデンフロスト現象の持続時間と移動速度の測定を行う. 持続時間の測定では鉄板の温度は300とし, 各濃度5回ずつ測定を行い一番高い値と低い値を除外した3つのデータで平均値を求めた. また, 移動速度の測定では鉄板の温度を350とし測定を行った.

7.2 実験結果

ライデンフロスト現象の持続時間測定の結果を表5に, 平均時間を濃度ごとにプロットした波形を図10に示す.

表 5: 砂糖水の濃度の違いによるライデンフロスト現象持続時間

濃度	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均値 [sec]
5%	1.83	1.73	1.67	1.53	2.03	1.74
10%	2.67	2.33	2.64	1.80	3.07	2.55
15%	3.10	2.98	3.21	2.40	2.31	2.83
20%	4.38	4.34	3.61	4.00	4.71	4.24
25%	7.20	7.04	6.23	6.01	6.51	6.59
30%	5.11	5.08	5.04	5.12	4.98	5.08
35%	5.22	5.18	5.63	5.93	5.03	5.34
40%	5.16	4.83	5.79	5.17	4.93	5.09

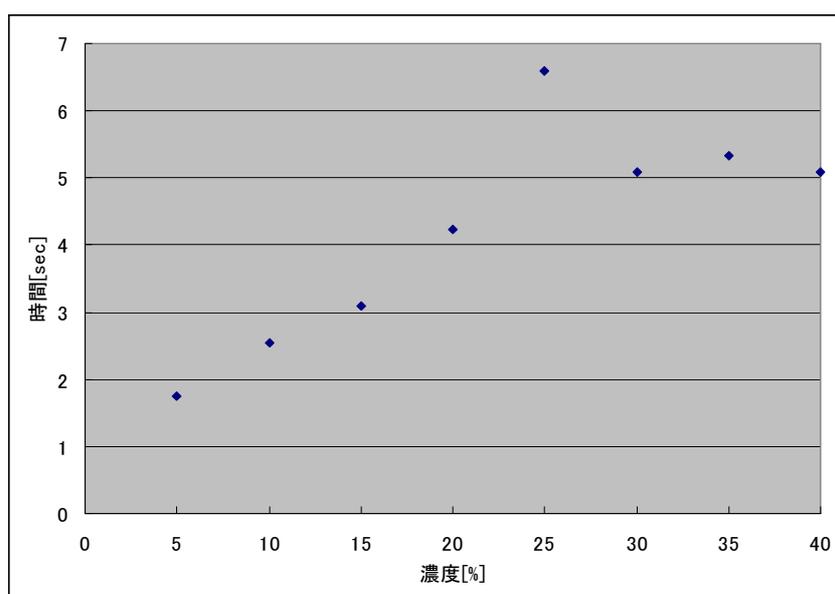


図 10: 砂糖水の濃度の違いによるライデンフロスト現象の持続時間

表5と図10を見ると、濃度が5%から25%までは線形性があるように見えるが、30%以降は25%のときの値よりも小さくなり30%、35%、40%の3つの値はさほど変わらないものとなっている。その理由として、濃度が30%以上になると、今回設定した温度である300℃ではライデンフロスト現象の途中で砂糖水が焦げ付き、ホットプレートに付着してしまうため持続時間が減少してしまっている。そこで、5%から25%までのデータの線形近似を図11に示す。

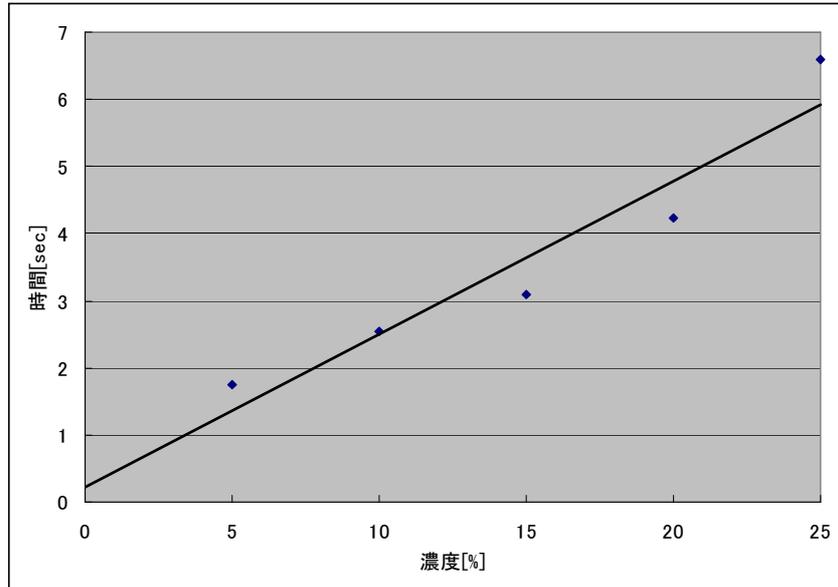


図 11: 5%から 25%までの線形近似

この近時線の式は

$$y = 0.2278x - 0.0008 \quad (2)$$

となった。

実験1の結果を見ると、糖度の高い液体以外に牛乳も持続時間が長くなっていることがわかる。このように、液体中の砂糖の濃度が高い液体や牛乳のような液体のライデンフロスト現象の持続時間がなくなる理由として、ライデンフロスト現象の現れるときに「膜」が発生しているからではないかと考えられる。砂糖水が熱したホットプレート上に接したとき、急激に熱せられた砂糖水の水の部分は蒸発し、ライデンフロスト現象を起こす。そのとき、蒸発した水に含まれていた砂糖が鉄板と水滴の間に膜を作ることによって、ライデンフロスト現象の持続時間が増加したと考えられる。また、牛乳の場合も同様に、ホットプレートに接した部分の水が蒸発し、ガゼインというたんぱく質の膜が生じライデンフロスト現象の持続時間が増加したと考えられる。

次に、砂糖の濃度の違いによる移動速度の測定結果を表6に示す。

表 6: 実験試料滑走速度

溶液	速さ [cm/sec]
砂糖水 (5%)	20.5
砂糖水 (10%)	17.9
砂糖水 (15%)	17.4
砂糖水 (20%)	16.5
砂糖水 (25%)	15.0
砂糖水 (30%)	14.7
砂糖水 (35%)	測定不能
砂糖水 (40%)	測定不能

表6を見ると、濃度が35%のときと40%のときが測定不能となっている。この2つの濃度のときにはギザギザの鉄板の影響を多少受けてはいるが、非常に速度が遅くまた、横にそれてしまうことが多く、正確な速度の測定を行うことが出来なかった。それ以外の濃度では、濃度が上昇するとともに速度が遅くなっていることがわかる。これは、砂糖の比重の問題が関係してくるのではないかと考えられる。ライデンフロスト現象により、砂糖水の中の水分が蒸発し砂糖が残ってしまう。砂糖の濃度が高い砂糖水では、残る砂糖も多くなる。砂糖の比重は水よりも重いため、残った砂糖が多いほうが、移動速度も遅くなってしまうと考えられる。

8 実験4

8.1 実験条件

ホットプレート上の一点を冷やし、その部分でライデンフロスト現象による水滴の動きが変化するかの確認を行う。使用した液体は、水滴の動きの確認がしやすいように赤の絵の具で着色した水を用い、ホットプレートの冷却は冷水を用いて行った。ホットプレートの温度は350で固定し、冷却後のホットプレートの温度はサーモメータで測定を行い、約200程度になるように冷却を行った。

図12に今回の実験環境の写真を示す。青の丸で囲った冷却ポイントへ向け、ギザギザに加工した鉄板を用い水滴を移動させる。



図 12: 実験4の実験環境

8.2 実験結果

実験時の映像を実験4.aviに、実験後のホットプレートの様子を図13に示す。映像を見ると、冷却ポイントへ到達した水滴はその場にとどまり、しばらくした後に蒸発していることが確認できる。また、図13を見ても蒸発後に残った赤の塗料が冷却ポイント内に集まっていることが確認できる。



図 13: 実験4の実験結果

9 実験5

9.1 実験条件

種類の違う金属の板を並べ、ホットプレートの温度を 150 から 350 まで 50 刻みで変化させたときの金属の違いによる水滴の挙動の違いを検証する。各金属板の温度はサーモメータでは測定できないため、今回はホットプレートの温度を基準とした。

図 14 に今回使用した 4 種類の金属の板と、実験環境を示す。使用した金属の板は、ステンレス、銅、アルミ、真鍮の 4 種類である。

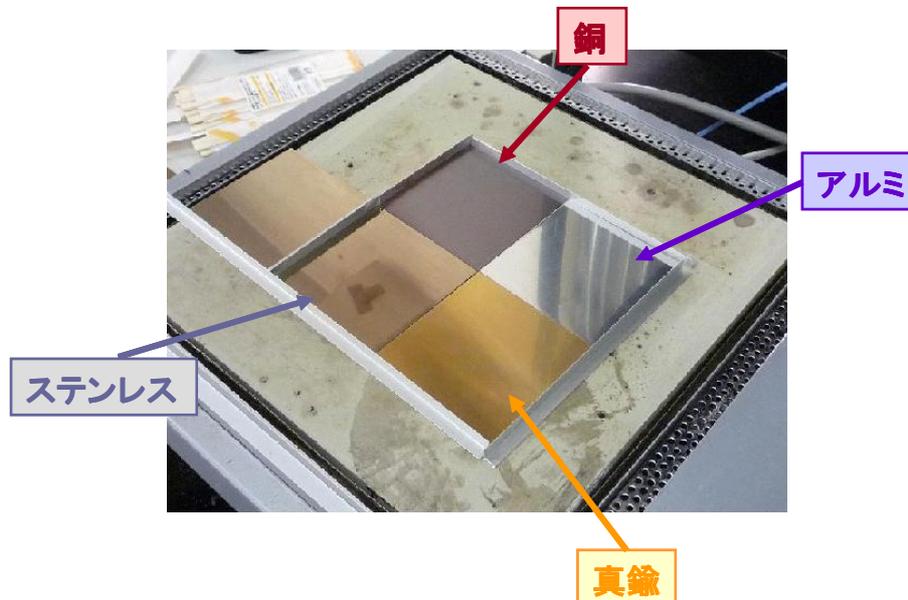


図 14: 実験 5 の実験環境

9.2 実験結果

ホットプレートの温度を 300 のときの映像を、実験 5(300).avi に示す。また、各金属板の特徴を以下に示す。

9.2.1 ステンレス

4 種類の金属の中で一番温度が上昇しにくく、完全にライデンフロスト現象が確認できるのは 300 のときであった。また、ライデンフロスト現象で発生した水滴が小さく、激しく動き回るという特徴があった。

9.2.2 銅

200 のときにライデンフロスト現象が確認できた。また、発生した水滴がしばらくするとはじけ、小さな水滴が回りに飛び散るという現象が確認できた。4 つの金属の中で、一番動きが激しいという特徴を見ることが出来た。

9.2.3 アルミ

200 のときに小さい水滴でのライデンフロスト現象を確認し、250 では完全にライデンフロスト現象を確認することが出来た。ステンレスや銅と違い、発生した水滴はゆっくりと動き、激しい動きをすることはしない。

9.2.4 真鍮

200 のときに小さい水滴でのライデンフロスト現象を確認し、250 では完全にライデンフロスト現象を確認することが出来た。アルミと非常に似た特徴を持ち、発生した水滴はゆっくりと動くことを確認した。しかし、アルミよりも温度の上昇が低いようである。

10 おわりに

1つ目の実験では、様々な液体によるライデンフロスト現象の発生温度や、発生後の持続時間の検証を行った。特徴的だったものとして、アルコール度数の高いウイスキーではライデンフロスト現象が水よりも低い温度で発生した。また、オレンジジュースやMAX コーヒーなどの糖度の高いものが長時間ライデンフロスト現象を維持していた。

2つ目の実験では、ギザギザに加工し熱した鉄板の上に様々な液体をたらした際の挙動の違いについて検証を行った。この実験では、アルコール度数の高いウイスキーが水滴の移動が一番遅く、次いでオレンジジュースや濃度の高い塩水の移動が遅いという結果になった。逆に、砂糖水が水よりも速く動き、糖度の高いオレンジジュースの動きが遅く、砂糖水の動きが早いという結果になった。

3つ目の実験では、砂糖水に着目し砂糖水の砂糖の濃度を変えたときのライデンフロスト現象の持続時間について検証を行った。砂糖の濃度が上昇するとともにライデンフロスト現象の持続時間が上昇することが確認できた。また、砂糖の濃度が上昇すると移動速度は減少することも確認できた。

4つ目の実験では、ホットプレートの一点を冷やし、そこへライデンフロスト現象が発生している状態の水滴をギザギザの鉄板を使い放り込むことで、温度の高い場所から低い場所へ水滴が移動した際の挙動の確認を行った。

5つ目の実験では、水滴をたらず金属の違いによる温度別の水滴の挙動の違いの検証を行った。ステンレスが一番温まりにくく、アルミと真鍮は同じような特徴を持っていることが確認できた。銅が一番温まりやすい性質を持っていることを確認し、さらにたらした水滴が激しく動くことも確認できた。

謝辞

今回、このような実験の機会を与えていただくとともに、使用したホットプレートの貸し出しにあたり株式会社 八光様には深く感謝申し上げます。

本実験を進めるにあたり、さまざまな意義深い提案、適切な指導を承りました本学情報システム工学科の岩瀬 将美准教授、貞弘 晃宜助教に心より深く感謝いたします。

また、畠山・岩瀬研究室の院生の方々に深く感謝申し上げます。

最後に、本実験をともした皆様に、様々な面で感謝いたします。

平成 20 年 12 月 19 日 松澤 俊介，小暮 浩史，出川 達也，坂野 多加史