

卒業論文要旨

熱エネルギー回生を目的とした回転体に対し、基材構造と流体の物性が与える影響

Influence of substrate structure and fluid properties on a rotating body for thermal energy recovery

システム工学群

材料革新サステナブルテクノロジー研究室 1240098 田上 遼

1. 背景

私たち人類は様々な機械を発明することでエネルギーを生み出し、変換し、活用してきた。産業革命時、ジェームズ・ワットが熱エネルギーを機械的エネルギーに変換する蒸気機関を発明して以降、エネルギーを利用する技術が急速に発展した。それに伴いエネルギー資源となる石油や石炭などの化石燃料は自然界から年々減少するのに対し、環境破壊の原因となっている温室効果ガスなどが増加した。これは現代社会において非常に問題視されており、その改善のため環境に配慮したエネルギーの開発やエネルギー効率化に関する様々な研究が日本でも行われている。しかし国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センターの産業分野の排熱実態調査報告書⁽¹⁾によると、年間 743 PJ もの排熱があると推定されている。ここで本研究室では液体と固体間で発生しているライデンフロスト現象に着目し、排熱とライデンフロスト現象を組み合わせた新たな動力源の開発に向け様々な観点から研究を行っている。

2. ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とは液滴の沸点よりもはるかに高い温度の固体表面に液滴を導入すると一瞬で加熱されることでその液滴の一部が蒸発し、固体表面と液滴との間に蒸気膜が形成される。この蒸気膜が液滴を浮遊させ、固体表面との熱伝達を阻害し、蒸発時間が長くなる。これがライデンフロスト現象である。図 1 にライデンフロスト現象の模式図を示す。この現象は 1756 年に Johann Gottlob Leidenfrost⁽²⁾が報告したため、この名前からライデンフロスト現象と呼ばれている。

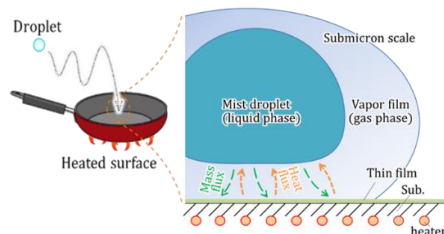


Fig.1 Schematic diagram of the Leidenfrost state

ライデンフロスト現象の特性として高温固体表面を鋸歯面上に加工することによって、液滴の自走方向を制御することが可能であるということが挙げられる。この液滴の自走のメカニズムに関しては未だ解明されていない部分が多いが、基板と液滴の二物体間に発生した蒸気が関係しているのではないかと考えられている。

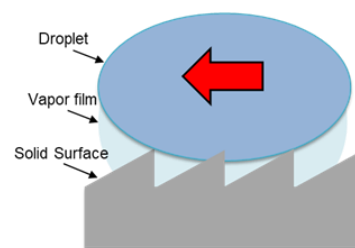


Fig.2 The behavior of a water droplet on sawtooth substrate at the high temperature

3. 目的

上述した通り、本研究室の最終目標は排熱とライデンフロスト現象を利用した新たな動力源の開発である。環式基板を使用したライデンフロスト状態の液滴の角速度を求める先行研究⁽³⁾ではライデンフロスト状態の液滴が環式基板の高温鋸歯面上を回転することが確認されている。その液滴の回転を利用したシステムの開発を行った先行研究⁽⁴⁾ではシステムが作動しなかった。その原因について調査する為、本研究では液滴が回転体を与えるモーメントについて求める実験を行った。また、液滴が影響を及ぼす装置の構造について考案、開発を試みることにした。



Fig.3 Cyclic substrates used in previous studies

4. 環式基板で回転している超純水液滴がアルミ箔に与えるモーメントの調査

4.1 実験方法, 実験手順

先行研究⁽³⁾で液滴の角速度については求められていたが、液滴上に物体を置いた際の液滴が与えるモーメントについては調査されていなかったため、本実験で調査することとした。実験方法としては、ヒーターを設置し、その上に環式基板を設置した。所定の温度に加熱された環式基板上に液滴を導入し、その液滴上部に 2[mm]×2[mm]のアルミ箔を乗せた後、真上からデジタルカメラの 960fps でアルミ箔の回転の撮影を行った。そこでプログラムを用いて液滴の挙動解析を行い、10 フレームごとの角度を測定した。また、エクセルを用いて角速度を算出し、中央差分法で角速度の時間変化をグラフ化した。ここで、0~0.2 秒以内の角速度の傾きから角加速

度を算出し、アルミ箔の慣性モーメントを用いて液滴がアルミ箔に与えるモーメントについて求めた。各温度帯の撮影回数は 5 回ずつ行った。実験系の図を図、実験条件を表に示す。

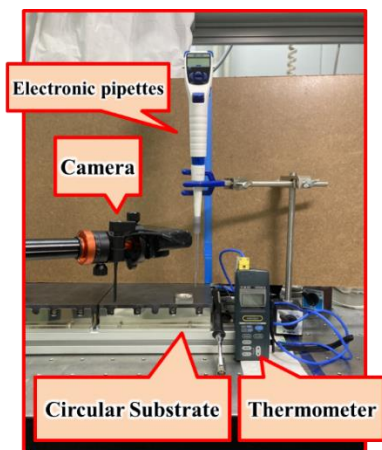


Fig.4 Experimental system

Table. 1 Experimental conditions.

Solvent	H ₂ O
Liquid volume (μl)	1200
Substrate surface temperature (°C)	340 ~ 400
Measurement temperature interval (°C)	10
Substrate material	aluminum
Rotating body material	aluminum
Moment of inertia of rotating body (10 ⁻⁶ g・mm ²)	8.4

4.2 実験結果

動画を解析している際、アルミ箔は環式基板中央を中心とする公転をしていた。また、アルミ箔が基板の縁への接触、液滴上を上滑りしている挙動が観測された。ここでは抜粋して 360℃ 下における角速度の時間変化の平均値を図 4 に示す。0~0.2 秒以内は角速度の変化が一定である。0.2 秒以降はおおよそ値が収束している。また、角速度の時間変化は温度依存によるものが確認されなかった。

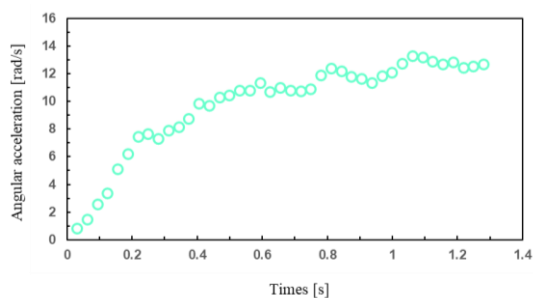


Fig.5 Graph of average change in angular velocity over time at 360℃

4.3 考察

0.2 秒以内における回転運動方程式を考えると、I:慣性モーメント[kg・m²]、 $\dot{\omega}$:角加速度[rad/s²]、M:液滴がアルミ箔に与える回転モーメント[N・m]として、

$$M = I\dot{\omega} \quad (4.1)$$

と表せられる。この式を用いて、各温度帯におけるアルミ箔の角加速度や液滴がアルミ箔に与えるモーメントを算出した。各温度帯の算出した角加速度、モーメントを以下の表 2 に示す。

Table 2 Angular acceleration and torque at each temperature range

Substrate surface temperature (°C)	Angular acceleration (rad/s ²)	Moment (10 ⁻¹² N・m)
340	42.47	3.670
350	47.51	4.105
360	31.51	2.722
370	37.65	3.253
380	51.23	4.427
390	37.10	3.206
400	39.84	3.443

実験を行った環式基板の構造を基に基板の鋸歯構造の改良などを行うことで液滴が与えるモーメントを変化させることができるのではないかと考えられる。ここで、モーメントの最大値は 4.427[10⁻¹²N・m]でアルミ箔の慣性モーメントでこれだけのモーメントしか得られていないため、先行研究⁽⁴⁾で使用した円盤の慣性モーメントと比較すると回すことは難しいと考えられる。

Table. 3 Comparison of moment of inertia between previous studies and this experiment

	Aluminum foil used in this experiment	Disks used in previous studies
Moment of inertia [g・m ²]	8.64×10 ⁻¹¹	6.12×10 ⁻⁵

5. 先行研究における液滴から動力を受ける装置構造の改善

4 章の結果から先行研究⁽⁴⁾における円盤は液滴で回転させることは難しいと考えられた。そこで、本研究では先行研究⁽⁴⁾における円盤よりも高効率に回転する装置が必要だと考え、我々はテスラタービンに着目し、調査を行った。

5.1 テスラタービンの基本構造

テスラタービンとはニコラ・テスラ氏が発明した螺旋状の羽がない形状となっているタービンであり、何枚かの円盤を層状に組み合わせた構造を有している。その円盤間に発生する流体の境界層内の粘性を利用し円盤を回す仕組みとなっている⁽⁵⁾。

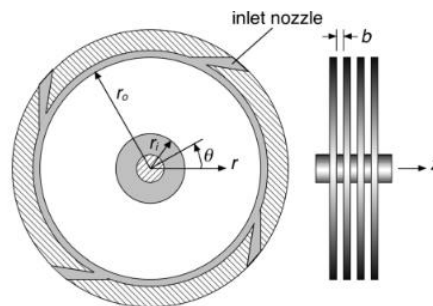


Fig.6 Tesla turbine

5.2 装置の考案

ディスクの流出口の形はテスラタービン⁽⁵⁾を参考に円形とし、ディスクの直径は 50[mm]、流出口の径は 4.3[mm]とする。ベアリングは先行研究⁽⁴⁾で使用していたものを使用した。また、全てのディスクと軸が一体となって回転するように、軸とディスクの穴の形状を図 7 のように加工し、ディスク同士をねじで止めた。ここで、流体をディスク間へ流しこむため、ディスク間にワッシャーを取り付け、流体がディスク間に流れる隙間を作ることとした。また、流体の粘性力を効率よく回転へ変換するため⁽⁶⁾、流体の流れ方向をディスクの接線方向へ制御する図 8 のような機構を 3D

プリンタで試作した．初期構想ではディスクを囲う機構とディスク外縁との幅($d_2 - d_1$)を 2[mm]としていたが，簡易的に実験を行ってみたところ，流体がディスク間に入ることなく一番外側のディスク表面から流出していた．次にディスク外径との幅($d_2 - d_1$)を 0.5[mm]としたところ流体がディスクの流出口から流れ出ていたためディスク間に流体が流れていると判断し，0.5[mm]を採用した．

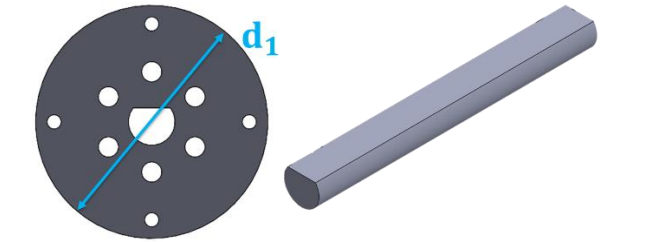


Fig.7 Adopted shaft and disk shape

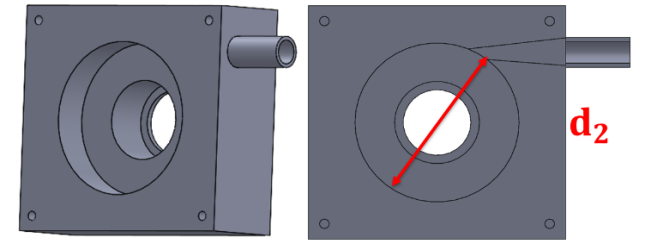


Fig.8 Outer mechanism

6. 試作した装置の挙動観測実験

この装置の大きな目標としては，ライデンフロスト状液滴を利用して装置を回転させることであるが，試作した装置には判明していない部分が多くあるため，本実験ではディスク間の距離やディスクの枚数を変化させて回転数[rpm]を測定することで，ディスク間の距離の変化やディスクの枚数が回転数[rpm]へ与える影響を調査した．

6.1 実験条件，実験方法

実験条件を表 4 に示す．

Table.4 Experimental conditions.		
Working fluid	Number of disks	Width between disks [mm]
Water	1	0
	2	0 0.4
	3	0 0.4

実験方法はまず，流路装置内部に治具を設置し，治具の上に装置が上向きになるように置いた．流入口にチューブをつなぎ，タイマーを 5 秒にセットした．カメラを三脚で固定し，装置の回転を真上から撮影できるように設置した．流路装置の弁を最大に開けると同時にタイマーをスタートし，タイマーが鳴った瞬間にカメラの撮影を開始した．カメラの撮影は 240[fps]で行い，1 回転するのにかかったフレーム数をコマ送りで 20 回転測定した．その値から回転数[rpm]を算出した．各条件で 5 回ずつ撮影を行った．なお，流路装置の弁を最大に開いた際の流量は 5.4[L/min]であった．実験系を図 9 に示す．

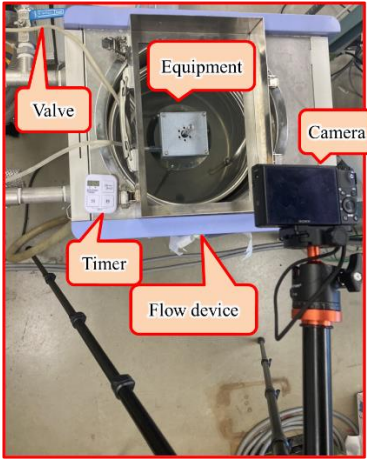


Fig.9 Experimental system

6.2 実験結果，考察

実験結果を表 5 に示す．

Table.5 Number of revolutions for each condition				
Number of disks	1	2	3	
Between disks [mm]	0	0 0.4	0 0.4	
Number of rotations [rpm]	1021.3	1061.2 1091.4	982.36 1045.8	

動画で回転数を測定している際，軸がブレている挙動が見られた．これはベアリングと軸の固定の間でわずかな隙間があり，軸が偏心しているためと考えられる．軸ブレを抑えることについて，固定されていない軸の端をベアリングで固定することで改善を試みていく．ディスク間の幅が 0[mm]の時と 0.4[mm]の時を比較するとディスクが 2 枚の場合，3 枚の場合どちらも 0.4[mm]の幅があったときのほうが回転数が多い．これはディスク間で流体による粘性力が働いたためと考えられる．しかし，ディスクの枚数を増やした際，粘性力を受け取るディスク間が増加するため回転数も増加すると予想できるが，本実験では回転数が落ちている．これはディスクが受け取る粘性力による回転トルクよりもディスク 1 枚につき増える回転に加わる抵抗，つまり慣性モーメントの増加のほうが大きいと考えられる．また，ディスクの流出口が中心から離れているため，粘性力を受け取る面が少なることも原因であると考えられる．

7. 結言

本研究では熱エネルギー回生を目的としたシステム開発に向けて，ライデンフロスト状液滴がアルミ箔に与えるモーメントを算出し，その値を踏まえたうえで先行研究における回転体の改善を行うため，テスラター빈を模した回転体となる装置の試作，検討を行った．装置について実験を行ったが，粘性力によって生み出される回転トルクよりも慣性モーメントが大きいと考えられたため更なる軽量化，またディスク形状の改善を行っていく．

文献

- (1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センター，“産業分野の廃熱実態調査報告書”
- (2) J.G. Leidenfrost , “ De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus ” , translation of portions to appear in

Intern J Heat Mass Transfer (1756)

- (3) 小林俊介, “動力源開発に向けたライデンフロスト効果と基板表面状態に関する研究”,
高知工科大学卒業論文(2021)
- (4) 市川怜司, “排熱回生システムに向けた液滴挙動解析と検討”,
高知工科大学修士論文(2022)
- (5) Vince D. Romanin and Van P. Carey , “An integral perturbation model of flow and momentum transport in rotating microchannels with smooth or microstructured wall surfaces”