【実験A－１】　温度計測と熱伝達

1. 実験目的

　本実験では、接触及び非接触法の代表的温度計測法である熱電対と放射温度計の使用法を習得する。また、熱機関が動作する日平行な場では、熱伝達が機器の性能や効率に影響する重要な問題となるため、温度計測を通じて物体からの熱伝達特性を理解することを目的とする。

1. 原理
   1. 熱電対

　A、Bの2種類の金属線を接続し、2つの接点間に温度差を与えると熱起電力（電圧）が発生する。（教科書ｐ.27、図1　熱電対参照）これをゼーベック効果といい、熱起電力Eの大きさは金属の材質と温度によって決定され、温度差が小さい範囲では熱起電力Eは（）に比例し、その比例係数αを熱電能と呼ぶ。

(1)

　熱電対で温度計測を行うには、基準接点（または冷接点）の温度をほかの独立した方法によって知り、測温接点（または温接点）を測定物に接触させ、熱起電力をマイクロボルトの分解能を持つ電圧計で計測し、温度へ換算する。

具体的には、図2（教科書p.27　図2　熱電対の基本的使用法参照）のように、氷水を用い０℃の容器内に基準接点を親戚して冷接点とする方法や、熱電対を接続する端子台の温度を電子的に計測し、基準接点温度を自動的に補正する温度計測機が用いられる。

* 1. 放射温度計

　すべての物体は、それが絶対零度以上であれば、エネルギーをある波長の電磁場として放射する性質がある。理想的な放射体である”黒体”の表面からは単位面積、単位時間当たりエネルギー（射出納）が放射される。

(2)

ここで。はステファン・ボルツマン定数と呼ばれ、放射される全エネルギー量は、絶対温度Tの4乗に比例し、これをステファン・ボルツマンの法則と呼ぶ。

　通常の工業用材料の射出能は黒体のものより必ず小さく、灰色体近似により、次式に用に示される。ここで、放射能εは表面の材質、状態（表面性状）に依存する値である。

(3)

放射温度計では、放射エネルギ量を計測し、放射率の効果を補正し、対象物表面の温度を算出している。

2.3　熱伝達

　物体と周囲流体との熱エネルギーの移動を熱伝達と呼ぶ。熱移動に伴う効果（浮力）で流体に流れを生じるものを自然対流と呼び、外的に流れが作られるものを強制対流と呼ぶ。物体から流体への熱伝達量[W]は、物体の表面積A[m2]、物体表面と流体との温度差([K]に依存し、熱伝達率h[W/m2K]を用いて(4)式のように表される。熱伝達率はy、流体の物性値や流れの状態、物体の形状等に依存する量であり、熱伝達の生じやすさを示す指標である。

(4)

物体が温度の流体中にある場合を例に、温度変化と熱伝達を考える。物体温度が周囲流体温度より高い場合、物体からの放熱により、物体温度は加工し、やがて周囲温度と等しくなる。この非定常状態では、物体の温度変化に伴う顕熱の変化は放熱量と等しく、次式が成り立つ。

(5)

ここで、m：質量、c：比熱、t：時間である。

この微分方程式を、での初期条件の下で解くと

(6)

となる。こえは、物体の温度変化が、熱容量(mc)と熱伝達性(Ah)で決まる時定数を持つ一時遅れ系の挙動をすることを示している。級の大きさ、材質は既知であり、時定数より熱伝達率が求められる。

3.実験装置・器具、手順

3.1放射温度計による温度計測

　電気ヒーターと熱電対が埋め込まれたアルミブロックの温度を放射温度計で計測した。アルミブロック上面は、4領域に分け、裸面、酸化面、透明ペイント面、黒ペイント面と異なる性状に加工してあり、ブロック中央には空洞（穴）があった。ヒーターを直流電源、熱電対を温度指示器に接続した。

3.1.1放射温度計の放射率設定をとした。計測データ表に従いブロック温度を設定

し、熱電対および放射温度計により、アルミブロック上面の各領域、空洞で計測された温度を記録した。

3.1.2　ブロック各所の放射率をデータ表に従い求めた。ブロックを80℃程度の温度に設定し、放射温度計で温度を測り、データをホールドした。放射率設定値を変更し、熱電対指示温度と一致する指示温度になる放射率を求めた。

3.2強制対流熱伝達実験

　真鍮球の冷却過程から強制対流熱伝達の特性を調べる。真鍮球内には熱電対が内蔵してあり、熱電対は温度指示器に接続する。切り替えスイッチで、真鍮球および大気の温度が計測できる。（真鍮はCu70%、Zn30%の黄銅とする。）

3.2.1真鍮球にドライヤーで熱風を当て、球温度を約60℃にする。

3.2.2温風を止め、真鍮球へファンで風を送り、適当な時間間隔で、時間、温度を測り、データ表に記録した。計測開始時刻をとし、定常状態まで計測した。計測時間間隔は、開始直後は3~5秒、温度変化が緩やかになったら広げた。

4．実験結果

以下に3.1、3.2で計測した実験結果の数値を記録したグラフを添付する。

円柱の底面直径：15.1[mm]

円柱の高さ：14.6[mm]

質量：6.68[g]

5．課題考察

5.1

タイプT熱電対の温度と熱起電力に関するグラフを図3に示す。

このグラフより、タイプT熱電対における温度と熱起電力には比例関係があることがわかる。

また熱電能はグラフの2点(0,0),(100,4.279)より、

となる。

(文献サイト名)

5.2

各種の面に対する放射温度計の計測特性をグラフ1に示す。

グラフから、放射温度計は測定物の表面性状によって計測温度が変わってしまうという特徴を持っていることがわかる。放射温度計は、放射エネルギー量を測定し、放射率の効果を補正し、対象物の表面温度を算出する機械であるため、物体の表面性状によって変化する放射率の設定を誤ると、算出した値が誤りになってしまうため、放射温度計で測定する時には事前に測定物の正確な放射率の設定に注意しなければならない。

5.3

　放射エネルギーを放射能であらわす時、放射能Eは反射・透過・吸収エネルギーで表され、それぞれをで表すと、次式が成り立つ。

ここで、反射・透過・吸収エネルギーの放射エネルギーに対する比をそれぞれ反射率・透過率・吸収率と定義すると次式が成り立つ。

反射率、透過率、吸収率は、物体によって0になるものがあり、特に吸収率が1であり、反射率を透過率が0となる物体を黒体と呼ぶ。（文献）

　以上の文献より実験結果を考察する。実験結果と文献より、裸面は吸収率が低く、逆に。表面にペイントや酸化といった加工がしてある部分のほうが吸収率が高くなることもわかる。

　空洞部分の放射率が高いのは空洞部分で放出したエネルギーは囲まれているため空洞部分でのエネルギー損失が少ないからだと考えられる。

　放射温度計の利点は

①測定物に直接触れずに温度が測れるため、温度計による温度変化を起こさずに温度が計測できる。

②測定物に直接触れずに温度が測れるため、移動や回転している物体の温度が測れる。

③温度計等で測れない高温物質も計測できる。

放射温度計の欠点は

①放射率が正確でないと正確な温度が測れない。

②赤外線（波動）から計測するため、大気の状態によっては正確な値が検出できない。

③物体の表面温度しか計測ができない。

である。

5.4

まず球の初期温度、球の定常地として時定数を求める。

にを代入するととなる。

よって時定数を球温度のときの時間、と定める。

また熱伝達率hは物体の質量、アルミの比熱、表面積を

に代入すると求まり、となる。

　文献調査により、円柱等の丸みのある先端を持った物体周りの熱伝達率は、全部淀み点からの角度により、局所熱伝達率は変化することがわかった。また工学範囲における空気中の強制対流は（教科書p.29より抜粋）である。上で求めた熱伝達率hは空気中における強制対流の値の範囲の中に納まっているため、正しいといえる。（文献）

5.5

放射温度計の仕組みがとても興味深かった。対象物に触れずに温度を測れることを聞いた時には、どういう原理なのかとても気になっていたが、文献等で調べることによって、原理がわかりとても納得した。これからもそういった様々な装置の原理を日々気になったら調べ、自分の知識を増やしていきたい。

6．参考文献

1）朝倉邦造、学生のための機械工学シリーズ５　伝熱工学、朝倉書店、2004年、ｐ72~73

2）黒崎・佐藤勲、伝熱工学、コロナ社、2009年、p91

3）計測自動制御学会・温度計測部会、温度計測―基礎と応用―、コロナ社、2018年、p311～p312、p316

4）<http://www.ni.com/white-paper/4231/ja/#toc3　NATIONAL> INSTRUMENTS、2018年10月7日閲覧

【実験A-2】熱力学第1法則（熱と仕事）

1．実験目的

　熱力学第1法則は、熱と仕事がともにエネルギーであり、相互に変換可能であることを示す。本実験では、シリンダ・ピストン内へ閉じ込められた動作媒体を用い、その状態変化を通じて熱と仕事の関係を調べ、熱力学第1法則、および熱機関、ヒートポンプの原理を確認する。

2．原理

2.1　熱力学第1法則

　熱力学第一法則は、「熱と仕事はともにエネルギーの一形態であり、熱を仕事に変換することも、また、その逆も可能である」と表現され、エネルギー保存則を示している。例えば、ジュールの実験では、断熱された容器内の水（熱容量C）に仕事を加えると水温がだけ上昇し、熱量を水に加えることと同じ効果となり、仕事と熱が共に水温を上昇させるエネルギーであることが確かめられている。

　シリンダ・ピストン内の動作流体のような閉じた系では、動作流体へ加えられた熱量を、動作流体が外部へした仕事を、動作流体の温度上昇等の内部エネルギーの増加分をとし、状態変化の前後で、なる関係が成立する。

2.2　サイクル

　一つの体系がある状態から出発し、いくつかの状態変化を経て、再び始めの状態に戻る時、この一連の状態変化をサイクルと呼ぶ。熱力学的には、サイクルを利用し、高温熱源から低温熱源へ移動する熱から仕事を連続的に得る装置を熱機関、一方、仕事を加え低温熱源から高温熱源へ熱量を移動させる装置を冷凍機またはヒートポンプと呼ぶ。

3．実験器具・装置

　実験装置A（教科書p.34 図1　実験装置A(熱機関の実験)参照）は、ピストンロッドに滑車が取り付けられ、ワイヤを介して大利が吊り下げられるようになっている。また、動作媒体の状態を知るため、吸気ポートへ熱電対と圧力センサが連結され、ポートは閉じられている。体積変化は、ピストンロッドの変位より求める。ここで、質量Mのおもりが吊り下げられた場合にピストンへ加わる圧力は、ピストン断面積となる。

　実験装置B（教科書p.34　図2　実験装置B（ヒートポンプの実験）参照）は、ピストンロッドにハンドルが取り付けられ、出口ポート近傍に熱電対が設置されている。熱電対は倍率1000倍のアンプを介しオシロスコープに接続する。出口ポートに指でふさぎピストンを押し込むことで内部の空気を圧縮する。または、出口ポートを急速に開放し圧縮空気を放出することで空気の膨張を行い、温度変化を観察することができる。

シリンダ・ピストン：市販の耐熱式空気圧駆動シリンダ（教科書p.34　図3　シリンダ・ピストンの構造図参照）を用いる。シリンダ両端にポートがあり、通常は圧縮空気によりピストンを出し入れするアクチュエータとして利用されている。本実験では、媒体の膨張によりピストンが押し出されるように、後方のポートを閉じ、前方（ピストンロッド側）ポートは開けた状態で利用する。

圧力計測：半導体圧力センサがシリンダのポートへ連結されている。センサは測定部の圧力と周囲の大気圧との差を表示するゲージ圧タイプであり、圧力範囲は、耐圧である。表示される電圧に対して、圧力で与えられる。

4．実験方法

4.1熱機関の原理を学ぶ実験（実験A）

A1. シリンダ内にはエタノールが入っていた。おもりは使用しなかった。

A2. シリンダをヒートがんの熱風で加熱し、随時、動作流体の圧力、体積、温度を計測した。シリンダ全体を満遍なく暖め、シリンダ内の最高温度は110℃とし、絶対に超えないよう注意した。またヒートガンは250℃を超す熱風がでるため、周囲の人に向けないよう注意した。

A3. 最高温度に達したら加熱をやめる。ピストンを冷却し、動作流体の収縮過程で圧力、体積、温度を計測する。

A4.ピストンロッドに重りをつるし、シリンダを熱風で加熱し、おもりを上昇させた。随時、動作流体の圧力、体積、温度、おもりの上昇量を計測した。シリンダ温度は最高110℃までとした。

A5. 最高温度に達したところでおもりを外した。シリンダを冷却し、動作流体の収縮過程で圧力、体積、温度を計測する。

4.2ヒートポンプの原理を学ぶ実験（実験B）

B1. 熱電対を増幅率1000倍のアンプを介してオシロスコープにつないだ。

B2. シリンダ内に空気を満たし、出口ポートを親指でふさいだ。ピストンを手で真直ぐに急速に押し、空気を圧縮し、次の瞬間ポートを開放した。この時温度が上昇・下降する様子をオシロスコープで記録し、波形のデータをUSBメモリに送り、プリントアウトした。

5．実験結果

以下に実験A、実験Bで計測した実験結果グラフを示す。

6.結果の整理と課題

6.1

①おもりなし

ピストンが最も押し出された時の温度T[K]、圧力p[kPa]、体積V[の各値をに代入し、蒸気質量を求める。（教科書p.37　付録より0.20とする）

とし、

に代入すると、となる。

よって、室温とし、熱量は

なので、

とし、熱量は、

なので、

、最高温度とし、熱量は

なので、

はの和なので、

となる。

位置エネルギーの増減はないので、

このサイクルで外部に取り出された仕事は

より、となる。

②おもりあり

ピストンが最も押し出された時の温度T[K]、圧力p[kPa]、体積V[の各値をに代入し、蒸気質量を求める。（教科書p.37　付録より0.2とする）

とし、

に代入すると、となる。

よって、室温とし、熱量は

なので、

とし、熱量は、

なので、

、最高温度とし、熱量は

なので、

はの和なので、

となる。

で表される位置エネルギーの増加分は、質量m=500g、変位x=0.036、重力加速度より

仕事は

より、となる。

本来であればおもりなしの実験では仕事が行われないが、仕事が発生しているのは、ピストン・シリンダが動いた際に摩擦が生じ、そこでエネルギーを消費したためと考えられる。

またおもりありの仕事がマイナスになったが、これは実験の初期値と最後の値のどちらかに誤りがあるためと考えられる。

6.2

おもりを付けたピストン・シリンダを加熱し、おもりを持ち上げるという仕事をした後で、そのおもりを取り外し（外部に仕事を取り出す）たのちに、シリンダ・ピストンを冷却し、初期体積に戻す。このように、シリンダ・ピストンを加熱し、仕事を外部に取り出し、冷却して元の体積に戻すというサイクルを連続的に行うことで熱機関は仕事を取り出すことができ、以上が熱機関の機構となる。

6.3

実験Bのグラフを図5に示す。この実験では、断熱膨張と断熱圧縮が起きている。断熱圧縮の際には500mV電圧が上昇し、断熱膨張の際には400mV電圧が下降したことがグラフよりわかる。断熱圧縮の際の電圧を、断熱膨張の際の電圧をとする。教科書p.27式(1)に実験A-1の５.1に示した図３より求めたと断熱圧縮・断熱膨張の際の電圧を代入することにより、温度変化を求める。断熱圧縮の際の温度変化は

断熱膨張の際の温度変化は

となる。

6.4

実験Bのように、断熱圧縮を行うことで温度を上昇させ、生成した熱量を高温熱源に渡す機構がヒートポンプである。また熱を渡した後、断熱膨張を行うことで温度が低下させ、低温熱源と

6.5

ピストン・シリンダとヒートポンプ、冷凍機の仕組みを実際に見ることで、普段使われている車のエンジン部分や、エアコン等の原理を詳しく知ることができ、その原理に納得した。