

2009 年 春 TIC インターンシップ レポート

3 法熱伝達試験装置の開発

筑波大学
第 3 学群工学基礎学類
物質・分子工学主専攻 3 年

望月 直人

監修 ツクバリカセイキ株式会社

はじめに

本レポートは、2009 年春に TIC¹を介してツクバリカセイキ株式会社において実施されたインターンシップの内容をまとめたものである。本インターンシップのテーマは、産業技術総合研究所に納品するための装置の最終調整と納品後の改良案模索である。前例のインターンシップに比べて日数も少なく、実際の会社の業務に直接的に関与する事柄ということもあって、私自身も不安な面も大きかったが、その中でも自分なりに描いてきた軌跡をここに記したいと思う。

平成 21 年 3 月 26 日 望月 直人

¹ TIC(<Tsukuba Internship Consortium)とは、インターンシップに関するポータルサイトの運営及び学生に対するインターンシップ参加促進活動を行う団体である。つくばを拠点として、インターンシップ中における学生のサポートを行い、企業からのフィードバックに努め、インターンシッププログラムの充実を行っている。

目 次

はじめに	2
. 開発概要	4
. 開発の流れ(インターンシップの工程).....	4
. 原理	5
-i . 伝熱の基本 3 形態.....	5
-ii . 電力計を使用した固体表面と気流間の熱伝達係数(ニュートンの冷却則).....	5
-iii . 固体表面と気流間の熱伝達係数と熱伝達量 [理論式]	6
-iv . 試料から電極への熱伝導量(端効果) [理論式].....	8
. 装置概要	8
. 装置問題点と技術改良の提案.....	10
-i . 端子形状改善	10
-ii . 試料における電力消費量(仕事率)の理論計算.....	10
-iii . テスターによる試料周辺の電圧測定	11
-iv . 端子形状改善	13
. 今後の展望.....	14
. 参考文献	14
謝辞	15

．開発概要

本装置は、ステンレス等の金属試料片(約 20mm 角×100～500 μm,抵抗 1～10m Ω)と気流との熱伝達係数を 3 法により計測するためのものである。3 法による熱伝達係数測定としてはプロトタイプの試験装置となるため、原理開発とその実証が本開発の主目的である。

とりわけ本インターンシップでは、3 法試験装置の計測のために組み込む計算式の導出や、装置納品後の追実験による装置問題点の整理、またそれに基づく理論式の再評価や技術改善の提案を行った。その中でも技術改善に関しては、装置内の核ともいべき金属試料片を固定して電流を流すための電極部分の改良を検討することで、装置の妥当性を高めるための提案を行った。

．開発の流れ(インターンシップの工程)

今回のインターンシップは、2009 年 3 月 16 日(月) - 26(木)の計 9 間の日程²で、以下のような工程のもと実施された。標準勤務時間は 9:30 - 17:00 である。

1 日目	オリエンテーションと 3 法試験装置についての理解
2 日目	熱伝達係数及び端効果の理論計算と装置の動作確認
3 日目	計算式の PC への組み込みとデータ取得、納品準備
4 日目	産業技術総合研究所への納品・設置補助
5 日目	装置の問題点整理と解決方法模索
6 日目	産業技術総合研究所への訪問・追実験と技術改善の提案
7 日目	技術改善の模索と提案
8 日目	レポート作成
9 日目	まとめ

² 土日は除外。3 月 20 日(金)の祝日は出勤。

．原理

-i．伝熱の基本3形態

伝熱とは「熱が空間のある場所から別の場所に移動する現象」であり、その形態は大きく分けて3種類³ある(Table 1)。その他にも流体の濃度差に伴う熱移動(氷に塩を入れると温度が下がる等)などがあり、熱の移動現象は極めて複雑である。

Table 1 伝熱の基本3形態

[形態]	[現象と特徴]
熱伝導	主に固体内部等の隣接する原子や分子に振動にて熱エネルギーを伝える現象。気体や液体でも熱伝導は生じるが、分子同士の衝突頻度が低い為、固体に比べ少ない。
熱伝達	隣接する流体(気体や液体)と固体間の熱エネルギーを伝える現象。固体内部の熱伝導と比較し運動が伝わり難い為に小さい。又、流体と固体間に温度差がある程、大きくなる。ゆえに、熱交換器等は流速を上げる程、効率が良い(但し圧力損失も多くなる)。
熱輻射	隣接していない物質間の熱エネルギーを伝える現象。太陽が地球に与える熱エネルギーの形等が代表例である。

本装置では、主に伝熱の形態として熱伝導と熱伝達による効果が大きいと思われるので、それぞれの効果を見積もる必要がある(-ii~iv)。

-ii．電力計を使用した固体表面と気流間の熱伝達係数(ニュートンの冷却則)

熱伝達係数⁴とは、固体とそこに接触する流体との間に1の温度差があるとき、その固体表面1m²を通して1秒間に流体へ流れる熱量のことであり、単位は[W/(m²·K)]が通常用いられる。これは *Issac Newton* (1642-1727)が1701年に発表したニュートンの冷却則によるもので、流体と固体間の熱移動を扱うための係数として利用されている。

k_1 を求める熱伝達係数[W/(m²·K)]とすれば、eq.1によって算出できる。

$$W = k_1 S (T_s - T_a) \Leftrightarrow k_1 = \frac{W}{S(T_s - T_a)} \quad (\text{eq. 1})$$

ここで、 W は熱移動量[W]、 S は固体の伝熱面積[m²]、 T_s ・ T_a はそれぞれ固体表面・気流の温度[K]である。eq.1はすなわちニュートンの冷却則であるが、この式は単位時間・単位面積あたりの熱移動量が温度差に比例するという実験的事実(eq.2)に基づくもので、この比例定数がすなわち、熱伝達係数 k_1 である。この熱伝達係数が大きい程、流体と物体間の熱

³ 熱伝導(*Heat conduction*)、熱伝達(*Heat transfer*)、熱輻射(*Thermal radiation*)の3形態

⁴ 熱伝達係数は熱伝達率とも呼ばれる。ただし、熱伝導率とは異なる概念なので注意を要する。熱伝導率は物性値であるのに対して、熱伝達率は物性値ではない。

移動能力が大きい。

$$\frac{W}{S} \propto T_s - T_a \quad (\text{eq. 2})$$

また、本装置において k_l を求める際は、試料に流れる電流とかかる電圧から算出される電力を熱移動量 W として計算に組み込まれているため、発生した熱は 100% 気流に放出されるとの仮定がここで生じることとなる。この仮定を確かなものにするためにも、端効果(-iii)を考慮する必要がある。

さらに、熱伝達係数は物性値ではないので、流速・圧力・固体表面形状によって変化する。とりわけ本装置では空気の内対流及び強制対流に対する熱伝達評価を行うが、そのおおまかなオーダーを Figure 1 に示した。

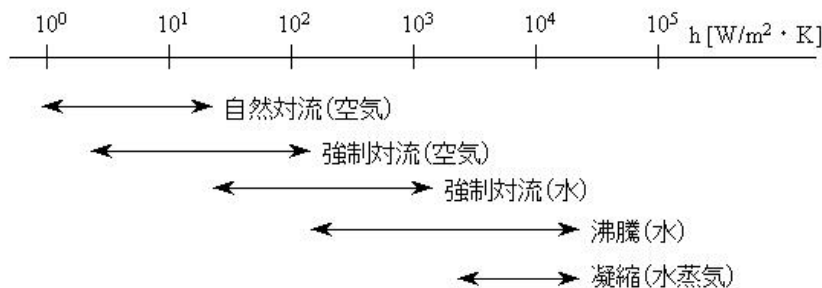


Figure 1 熱伝達係数の流体依存性(筑波大学 阿部豊研究室～熱流体制御研究室～講義ノート第一章)

-iii. 固体表面と気流間の熱伝達係数と熱伝達量 [理論式]

強制対流条件下における熱伝達係数の理論式を提示する。強制対流の場合、その流れは規則正しく流れる層流と流れが不規則な乱流に区別される。これは eq.3 に示されるようなレイノルズ数という無次元量に依存する。

$$\text{Re} = \frac{VL}{\boldsymbol{n}_a} \quad (\text{eq. 3})$$

ここで V は強制対流の流速[m/s]、 L は気流方向の板の長さ[m]、 \boldsymbol{n}_a は動粘性係数[m²/s]である。平板表面を流れる流体のレイノルズ数は限界レイノルズ数⁵というものがあり、それ以上になると層流を保てなくなり、乱流になるといわれている。通常、限界レイノルズ数は $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 程度である。

空気における動粘性係数は eq.4 で算出することができる。

$$\boldsymbol{n} = 1.72 \times 10^{-5} \times \frac{393}{393 + T_a} \times \left(1 + \frac{T_a}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{eq. 4})$$

⁵ 臨界レイノルズ数とも呼ばれる。

さらに気流温度 T_a を 20、流速 0~10[m/s]、試料の気流方向の長さ 0.015[m] を eq.3 に代入してレイノルズ数を計算すると、 $\sim 10^4$ と見積もることができるので、本装置の強制対流は層流と考えてよいことが分かる。

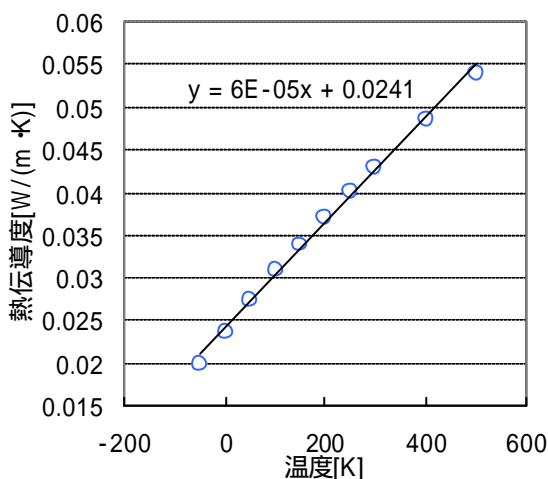
温度が均一の試料板における層流熱伝達係数の理論式を eq.5 に示した(『伝熱工学資料』p.47)。

$$k_2 = 0.664 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \frac{\lambda}{L} \quad (\text{eq. 5})$$

ここで、Pr はプラントル数と呼ばれる無次元数で、空気の場合約 0.71 であるので、本装置でもその数値を採用した。 λ は流体の熱伝導率[W/(m·K)]であり、温度勾配に依存するため、Graph 1 のような 1 次近似を行い、その近似式 eq.6 を計算に組み込んだ。

$$\lambda \approx 6 \times 10^{-5} (T_s - T_a) + 0.0241 \quad (\text{eq. 6})$$

($T_s \cdot T_a$ はそれぞれ固体表面・気流の温度)



Graph 1 空気の熱伝導率(参考文献「大気圧中の空気の物性値」)

また、対流による熱伝達と流体の熱伝導の比率を示すヌセルト数は、eq.7 で評価できる。

$$Nu = \frac{k_2 L}{\lambda} \quad (\text{eq. 7})$$

さらに、熱伝達率が求めれば、その固体から気流に流れる熱の総量(熱伝達量)が求めることができる。 S を試料の伝熱面積、 $T_s \cdot T_a$ をそれぞれ固体表面・気流の温度とすれば、eq.8 の如くとなる。

$$W_1 = k_2 S (T_s - T_a) \quad (\text{eq. 8})$$

-iv . 試料から電極への熱伝導量(端効果) [理論式]

試料から電極への熱伝導を見積もるのに、試料固有⁶の熱伝導率 h を考える。熱伝導率 h とは、厚さ 1 m の板の両面に 1 の温度差があるとき、その板の 1 m² を通して 1 秒間に流れる熱量のことであり、単位は [W/(m²·K)] や [W/(cm²·K)] で表されることが多い。この熱伝導率を用いることによって、端効果による熱伝導量は eq.9 が理論式となる。

$$W_2 = h \frac{T_s - T_e}{D/2} HL \times 2 \quad (\text{eq. 9})$$

ここで試料の気流方向の長さを L [m]、気流と垂直方向の長さを D [m]、試料の厚みを H [m] とした。熱の伝導距離(試料中心から電極まで)は試料中心を基準とすれば $D/2$ であり、断面積(試料と電極との接触面積)は $H \times L$ となる。また、熱は試料両端から流れ出るので最後に 2 をかけてある。

・装置概要

本装置の概略を Figure 2 に示した。

熱伝達係数測定装置システム図

CT: 電流変換器
Tr: 降圧トランス
T : 熱電対

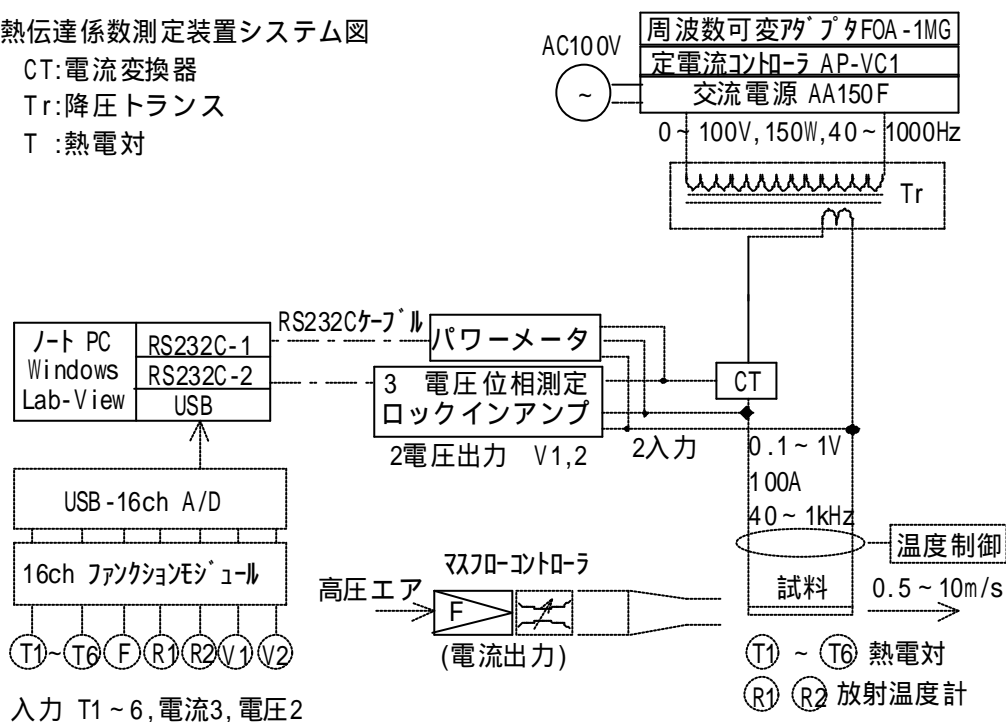


Figure 2 3 法試験装置の概略図(本装置の「仕様書」から転載)

本装置では、試験片に室温空気を流し、試料面と気体の伝熱係数を計測する。試料は 1

⁶ さまざまな物体における具体的な熱伝導率の数値は、『伝熱工学資料』や『理科年表』に記載されている。

~10m 程度の抵抗 R を有し、これに既存の直流電源で定電圧 V_{DC} と重畳された V_{AC} を印加する。回路には、最大 100A の電流 $I = (V_{DC} + V_{AC}) / R$ が流れるものとする。交流電源は、定電流動作させ、電圧 0~100V、周波数 40 から 1000Hz 設定可能とする。交流電源は、直流電圧に重畳させるため、トランスを介して低電圧大電流(100A)に変換して使用する。

試料は約 20mm 角で、板厚 100~500 μm を想定する。試料に通電する電力は、デジタルパワーメータにより計測する。試料に印加する周波数 の電圧(0.1~1V)と分流器 CT からのレファレンス信号としての電流をロックインアンプに入力し、3 成分の電圧、位相差を得る。パワーメータ及びロックインアンプの指示値は RS232C 経由で PC に取り込む。気流系の流量はマスフローコントローラで制御・計測する。

試料周辺の電極等の概略を示したのが Figure 3 である。試料を 2 つの銅電極に接触させて、大電流を流す。また、試料配線からの熱ロスを防止するために、温度制御できるヒーターを銅極には取り付けてある。試料とベークライトの間には熱移動を遮断するために、試料と同サイズの断熱材が敷いてある。

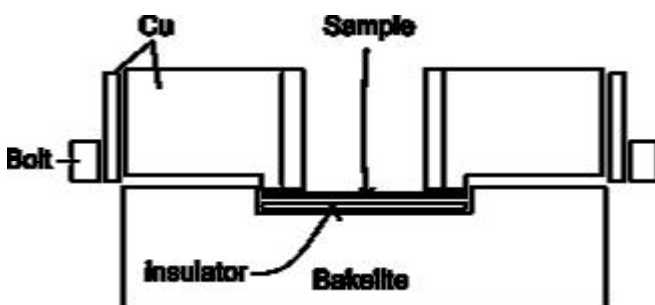


Figure 3 試料周辺の概略図(気流方向に対して垂直にみた断面図)

．装置問題点と技術改良の提案

-i．端子形状改善

装置の組み立て後、納品前の試験運用を行うと、ニュートンの冷却則(-ii)によって算出した熱伝達係数 k_1 が、 -iii の理論式によって求めた k_2 に比べて異常に大きな値を示すことが分かった(3 日目)。ここで考えられる問題は以下の3つである。

装置のどこかで予期せぬ大きな熱消費もしくは電熱が起こっている

-iii の理論計算が間違っている

装置に流れる実際の電流値と電力計が示す値が異なっている

ここで、Figure 1 の熱伝達係数の流体依存性から熱伝達係数 k_1 と k_2 の妥当性を検討すると、 k_2 のオーダーが妥当であることから、 の可能性は低いと考えられる。また、装置とは別のハンディタイプのテスターで装置と装置の間を流れる電流を測定したところ、電力計のそれとほぼ一致したことから、 の可能性は無い。よって、 が大きな原因であることが分かった。

ここで注目したのが、試料の裏面のベークライトへの熱伝導である。実際に試料を取り外し、裏の断熱材を見てみると黒く焼け焦げていた。そこで Figure 4 に示すように、試料と断熱材を全て接触させるのではなく、試料両端(磁極板で押さえ込まれる部分)のみに断熱材を固定することで、試料の裏に空気の断熱層をつくり、ベークライトへの熱伝導効果を少なくした。

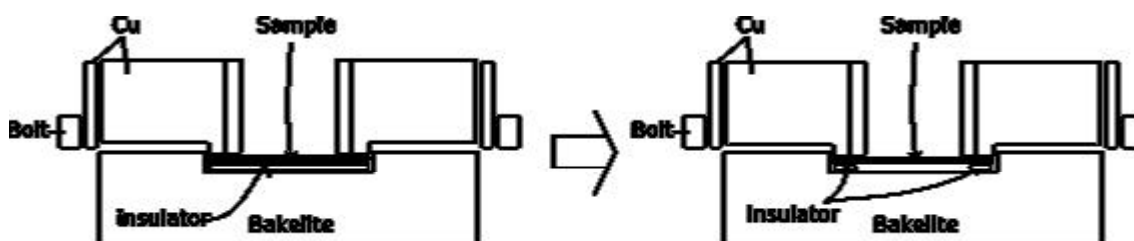


Figure 4 端子形状改善 (試料裏面の空気層による断熱を実現)

-ii．試料における電力消費量(仕事率)の理論計算

端子形状改善 後の実験によって、確かに電力消費は減少していることが確認できた(4 日目)。だがそれでも尚、 k_1 の値は k_2 に比べて異常に大きいものであった。そこで、試料にて発生する単位時間あたりの熱量(仕事率)の測定値の妥当性を検討するために、ステンレス鋼 (SUS304) の電気抵抗率(文献値)から今回の試料で発生し得る仕事率を概算した(5 日目)。

400K 下で導体長 $D=10[\text{mm}]$ 、導体断面積 $A=15 \times 0.2[\text{mm}^2]$ のステンレス鋼 (SUS304) に電流・電圧をかけた場合の電気抵抗 R は

$$R = r \frac{D}{A} = 80 \times 10^{-5} [\Omega \cdot mm] \times \frac{10 [mm]}{15 \times 0.2 [mm^2]} = 2.7 \times 10^{-3} [\Omega]$$

となる。ここでステンレス鋼 (SUS304) の電気抵抗率(文献値)は

$r = 80 \times 10^{-5} [\Omega \cdot mm]$ for 400K (『伝熱工学資料』改訂第4版 日本機会学会 p.318) を用いた。

よって、電流値 10[A]を仮定したときの、試料で発生する単位時間あたりの熱量 W は

$$W(\text{理論値}) = I^2 R = 10 \times 10 \times 2.7 \times 10^{-3} = 0.27 [J/s]$$

となる。

一方、電流値 10[A]を流したときの実際の測定値は $W(\text{測定値}) = 2 \sim 4 [J/s]$ であったので、このことから

$$\frac{W(\text{測定値})}{W(\text{理論値})} = \sim 10$$

となってしまうことが分かった。

この概算が適当であるとすれば、試料にかかる電圧の測定が、何かしらの原因によって正確に行われていない可能性があることになる。電圧の測定は試料両端の銅電極に取り付けてある銅版によって行っている(Figure 5)。よって電極によって考えられる接触抵抗による損失は次の2つが考えられる。

試料と銅電極の接触面における接触抵抗

銅電極と電圧計を繋ぐ銅板との間の接触抵抗

これらを検証するためにも、電圧計を試料に直接接続した際の仕事率を測定してみるべきであると結論づけた。

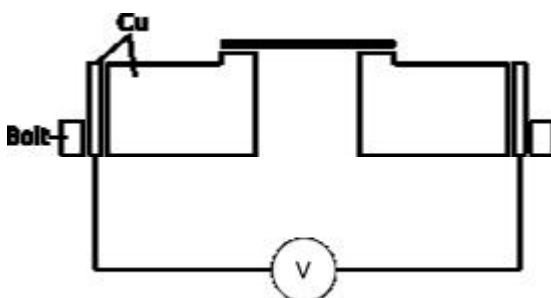


Figure 5 電圧計の測定位置

-iii. テスターによる試料周辺の電圧測定

熱伝達係数測定装置の電極における電圧ロスがあるかどうかを確認するために、テスターを用いて電極や試料の電圧を直接測定した(6日目)。Figure 6 がその結果である。

ただし左図に比べて右図は、接触抵抗を下げるために極板を紙ヤスリで磨き、さらにワッシャー2つから1つにして銅電極と銅板が直接接触するようにした。ここで、電極の温度

は約 34 °C であり、試料もそれに近い温度に設定した。

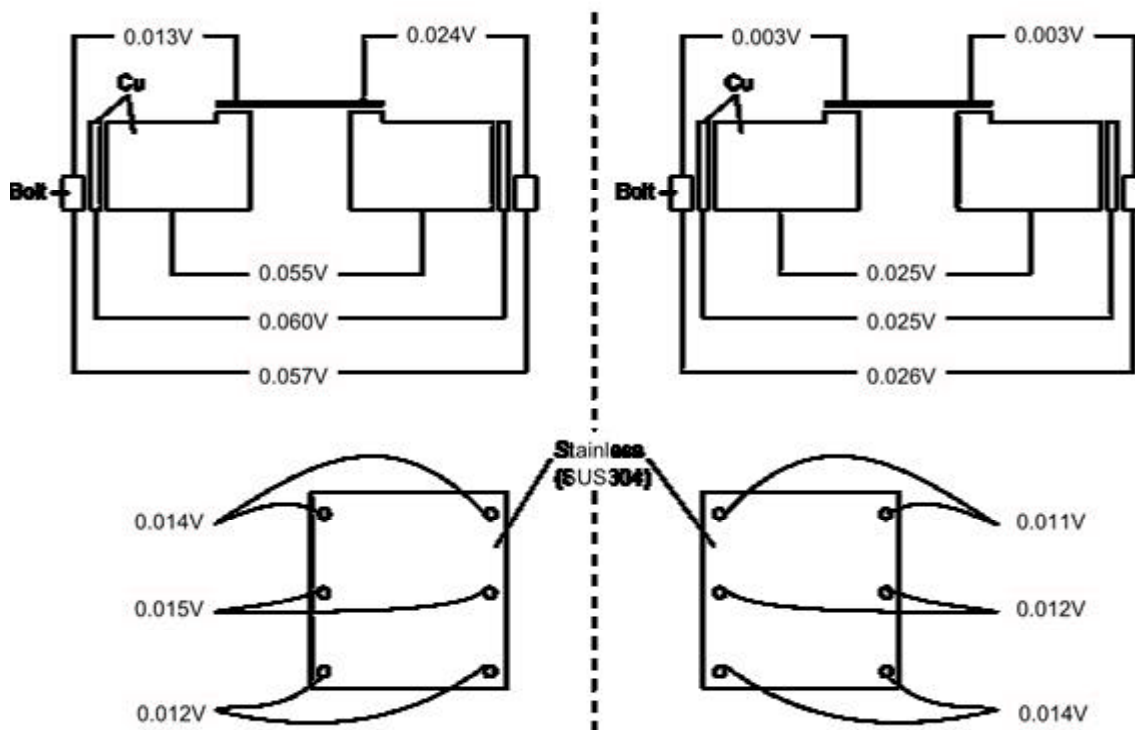


Figure 6 電極と試料のテスターによる電圧測定(左：磨く前、右：磨いた後)

また、このとき PC 上での電圧・電流・電力それぞれの表示は Figure 7 のようであった。

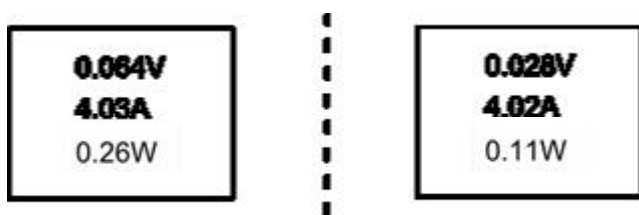


Figure 7 PC での表示(左：磨く前、右：磨いた後)

これらの結果から、次の 2 つのことが分かった。

- 試料の電圧を直接測定し、それによって熱伝達係数を算出する必要がある
- 金属表面を磨くことで接触抵抗を大幅に削減することができる

-iv . 端子形状改善

先ほどの結果に加えて、ベークライト側の熱交換が未知数であることから、試料両面に気流をあてて熱伝達率を測定できるように、電極を再設計する必要が生じた。よってこれまでのことを踏まえて、端子形状の考慮すべき項目を整理すると次の6つになる(7日目)。

- 端子からの漏れ熱量を少なくする
- 試料と端子の接触抵抗を少なくする
- 試料印加電圧を正確に測定できるようにする
- 試料両面に気流をあてることのできる
- 試料の取り外しが容易にできるようにする
- 気流高温化に対応できるようにする

を考えると、現状ではヒーターを用いて試料からの熱伝導を調整するシステムは採用すべきであろう。 を実現するためには試料から直接電圧を計れるようにする必要があるので、 も必然的に解消される。 と は暗黙の考慮項目である。

これらを考慮して端子形状の改善を考えが結果、Figure 8のようになった。左図では試料裏面のベークライトを深く削ることで気流空路を確保し、右図では電極とベークライトとの間にアダプターをはめ込むことで気流空路を確保して項目 を達成した。また、どちらも試料裏側に薄極板を組み込むことによって、項目 を達成している。

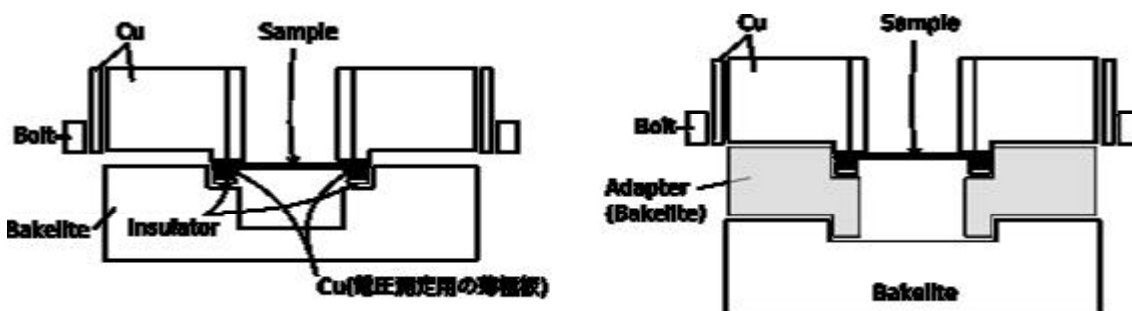


Figure 8 端子形状改善 (左：試料裏面のベークライトを削ることで気流空路を確保、右：電極とベークライトの間にアダプターをはめ込むことで気流空路を確保)

．今後の展望

将来的に装置をより実用的なものにするとすれば、自然対流における熱伝達量の理論計算の組み込み(自然対流と強制対流との垣根の問題)、気流を高温にした場合の理論計算の組み込み(気流温度と試料表面温度の差を絶対値にする、熱輻射の効果を考慮する等)、周波数変化させた際の供給電源の周波数との同調によるノイズ問題解消など、さまざま考えられる。しかしながら、「V. 装置問題点と技術改良の提案」をみて分かるように、ニュートンの冷却則によって導出される熱伝達率 k_l をどのように評価していくかが、当面の最大の課題と成り得るであろう。

端効果を考慮しなくてもよい系(極薄の試料板を用いる等)やヒーター温度調節の精度向上を行って端効果を減らした環境下での追実験なども有用であると思うが、それと共に「原理」で記述した様々な実験式・理論式の妥当性の検討も視野に入れていかなければいけない。何故ならば、それらの実験式や理論式は数メートルオーダーの非常に巨視的な系での実証例は数多く存在するが、本装置のような数 10 ミリメートルオーダーの場合の適用例が稀であり、先行研究があまりなされていないからである。その意味で、新たな理論開拓と検証も今後の展望として取り入れるべきではないかと考える。

．参考文献

『伝熱工学資料』改訂第 4 版 日本機化学会 p.47, 318

『理科年表』昭和 49 年 12 月 10 日発行 丸善株式会社 pp.物 64-66

「筑波大学 阿部豊研究室～熱流体制御研究室～ 講義ノート」

retrieved on March 25, 2009 from <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~abe/index.html>

「熱伝導率が金属によって異なるのはなぜ？」retrieved on March 17, 2009 from <http://www.kagaku.info/faq/thamal000614/index.htm> (3/26/09 キャッシュのみの閲覧可)

「大気圧中の空気の物性値」retrieved on March 25, 2009 from <http://www.takamatsu-nct.ac.jp/yamauchi/lecture/advheat/airphysical.pdf>

「熱伝導を計算する方法は？」retrieved on March 24, 2009 from <http://www.kagaku.info/faq/valve021203/valve01.htm> (3/26/09 キャッシュのみの閲覧可)

謝辞

今回は年度末というとてもお忙しい中、インターンシップという厄介ごと(?)を快く引き受けて面倒をみてくれたツクバリカセイキ株式会社の皆さんには、本当にお世話になりました。とりわけ今回のインターンシッププログラムを組み立てていただき、しかも流体のことなどまったく知識ゼロで右も左も分からなかった私を見放すことなく手取り足取り直々にご指導してくれた中山社長には大変感謝しております。3 法試験装置以外にも様々な技術開発を取り仕切り、さらに会社全体を取りまとめている中山社長の姿はとても輝かしく、「やっぱり起業した人は違うな」と感じました。その妥協を許さない真剣でかつ純粋な眼、大好きです。

また、3 法試験装置の技術担当主任の鈴木さん、お昼ごはんにいろいろなところに連れて行ってくれた清水さん、そして時たま社長に見放されたときに優しく言葉をかけて励ましてくれた安藤さんを始めとする事務員の方々、皆さんの支えがあってこそ今回のインターンシップが無事に終了したと思いますので、ここに新ためて感謝の意を表明いたします。皆さま、ありがとうございました！（P.S. 佐藤さん、元気な赤ちゃんを生んでくださいね。鈴木さん、煙草は控えめにしましょう笑）

最後になりますが、このような素晴らしい出会いをもたらしてくれた TIC 代表の久保田さん、これからも何かとお世話になるかもしれませんが、そのときはよろしくお願いします。