

伝熱教育用の実験装置作りに関する試みと失敗

Trial and Failure on Making of Experimental Apparatus for Heat-Transfer Teaching

吉田 英生（京都大学）
Hideo YOSHIDA (Kyoto University)

1. それはさておき…

関西支部から「もの作りと伝熱に関する大学の取り組みについて」というテーマをいただいた。あれこれ考えてみたが、現状では、「もの作り」、「伝熱」、「京都大学」の三つのキーワードの共通集合を求め、これに真っ向から答えることは容易ではない。そこで本稿では、これらのキーワードを部分的に入れ替え、さらに語順を変更して表題のようにして、筆者のかなり以前の経験を紹介させていただくことでお許し願いたい。

本来は、学生の「もの作り」だったのを筆者の「もの作り」とし、「大学の取り組み」という「教育」的要素は、実験装置という「もの」に対する形容部分「伝熱教育用の」に移ってしまったわけである。昔の大学生（小林秀雄の仲間？）の話であつたろうか、試験で解答できない問題を出されたとき、「それはさておき…、○○の件は…」と、自説を展開できる問題にしてしまう横着なやり方を、いい年をした筆者が繰り返すことになる。

2. Benard セルから Rayleigh の問題へ

いうまでもなく、理科教育において学生の興味を喚起する有効な手法の一つは実験である。その中でも、可視化実験は直感に訴えやすいという点で、最右翼に挙げられると思う。そんな思いから、大学院を卒業して大学職員となった駆け出しの頃、それまでの学生実験の装置が老朽化していたこともあり、Benard セルの実験装置を手作りした。四角い水田のような形をした、一辺 150mm、深さ 5mm 程度の装置に作動流体としてシリコンオイルを満たす。可視化用トレーサーとしてアルミの微小粉末を添加する。そして、上面は大気開放して、底面だけをステンレス箔に電流を流して加熱する。しばらくすると、蜂の巣のような渦構造が浮かび上がる。その渦構造の中に筆者が指を突っ込んでシリコンオイルをグチャグチャにかき混

ぜても、渦はそのような逆境にもめげず何度も成長を繰り返す。まるで生き物のような渦の挙動に、それまで筆者の説明に対して勉強する気なく仏頂面をしていた学生も、身を乗り出し大いに関心を示す。半年間、毎週繰り返される学生実験の度に、このような体験をした。

見せ物としての Benard セルの効果は疑うべくもないが、一步進んで理論との比較を行おうとすると、不安定解析の理論そのものが学部 2・3 回生には難しいし、上面が気液界面の Benard セルは Marangoni 対流も重畳されているので、さらに難しい。また、対流が生じる臨界 Rayleigh 数を実験で精度よく求めるのも難しい。つまり

(難しい)³ = (結局見るだけの実験) (1)
となってしまって、全く引き締まらない。

そこで、伝熱の基礎的な問題の一つである非定常熱伝導ならば、比較的簡単に求められる解があるから、その解と実験結果がピタッと合つたら学生の喜びもひとしおだろうと考えた。問題は、何とかこれを可視化実験でできないか？ そうだ！ 運動量の拡散とのアナロジー、Rayleigh の問題を用いよう！

Rayleigh の問題は、図 1 に示すように、流体力学の教科書でおなじみの無限平板が静止流体中でステップ的に運動し始める場合の速度境界層の拡大現象である。解析解は誤差関数で表される。こ

無限静止流体

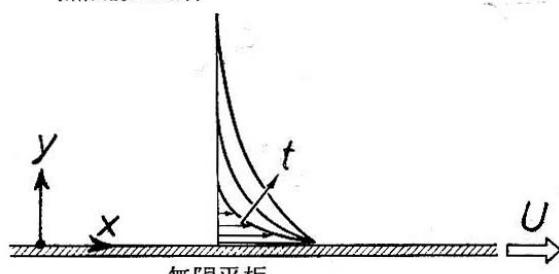


図 1 Rayleigh の問題

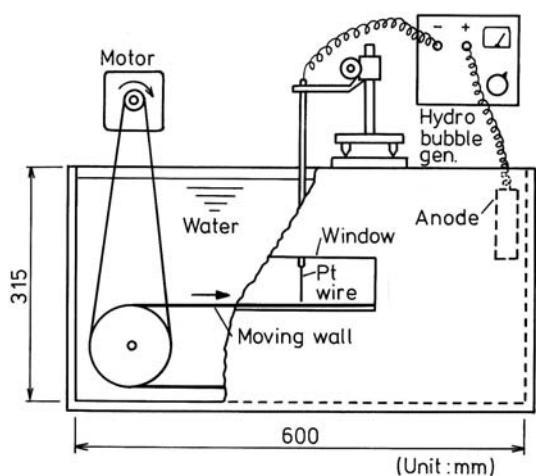


図2 Rayleigh の問題の実験装置

れだったら、例えば図2のように、水槽の中にキャタピラーのように循環するゴムベルトを沈め、このゴムベルト表面に近い領域の速度分布を、パルス的にタイムラインを発生させる水素気泡法により可視化できるのではないか！ と期待に胸はふくらんだ。

3. 苦難の装置作りとその結果

思い立つたら設計はすぐだった。会議や幾多のメールに悩まされることもない時代。朝、研究室に来たら終日、作業服と安全靴に身を固め、ひたすら旋盤やフライスでの工作に打ち込んだ。

水中でも鋳びないようにピカピカのアルミのアングルとステンレスのネジでフレームを組み、ゴムベルト駆動用の二つのローラーは、直径12cm、長さ（奥行）30cm程度の塩ビパイプの側面に一回り大きめのガイド円板を接着し、ちょうど巨大な糸巻きのような構造とした。これを対（つい）にして、シームレス幅広ゴムベルトで形成される疑似無限平板面を、サーボモーターによりベルトドライブ駆動するという計画だった。

幸いシームレス幅広ゴムベルトを加工してくれる業者は、電話帳から探し出せた。しかし、できあがったベルトを回転させると、またたく間に片寄っていって片側のガイド円板に乗り上げてしまう。フレームの一部を解体し、ローラーの回転軸の方向や、回転軸の間隔を微調整できる構造に改良してもみたが、問題は一向に解決しない。困り果ててシームレス幅広ゴムベルトを製作してくれ

た業者に相談したところ、そういう場合はローラーを中心太に、ちょうどギリシャのエンタシスのようにしなさいと教えてもらった。そればかりか、塩ビ製パイプでできたローラーも滑らかなテープーに削ってもらって（この加工は、工作では平均レベル以上の腕を自負していた筆者にとってもハードルが高かった）、何とか問題解決した。それでも、ローラーの端面に鉄道車輪のようにフランジを付けておけば大丈夫だろうという四角の発想をしていた筆者にとって、正反対の凸形の発想はショックだった。こんなことは、たぶん機械力学や機械要素の授業でも教わらなかったのではないかと思う。（筆者は大学の講義をサボリがちだったので、ひょっとして理論的裏付けを含めて講義していただいていたとしたら、大変申し訳なく思います。その場合は、お許し下さい。）

かくして、疑似無限平板はローラーの中央に安定して機嫌よく動いてくれたが、シームレスとはいえ若干のつなぎ目のために、ちょうど自動車暴走防止用のハンプのようになり、さらにゴムの弾性による振動も含めて1mmオーダーの上下動は抑えることができなかつた。このため、境界層厚さが0から数mmに発達してゆく過程を追う際に、水素気泡発生用白金ワイヤも壁面極近傍までは近づけられなかつた。さらに境界層が10mm程度まで厚く発達するころは、装置の有限性により水槽全体に伝播した擾乱のために、水素気泡で可視化されるはずの境界層内速度分布は、きわめて定性的（いいかげん）なものとなつた。

このように問題を抱えながらも、手塩に掛けて育てた我が実験装置に後ろ髪を引かれ、学生実験としては続行させた。ただ、これだけで終わつては前述の式(1)の繰り返しである。そこで窮屈の策として何をしたのかというと、毎回の学生実験の後半約1時間で、当時普及してきたPC9801のN88BASICを使って、放物形偏微分方程式の数値シミュレーションを行つた。そして、「本来ならこのような分布が可視化されるはずだったんだけど…」ということで、学生実験を締めくくるというパターンになつてしまつた。実験というactualな感動を学生に、と願つて出発した学生実験の試みであったが、筆者の浅慮・力不足で結局、数値シミュレーションというvirtualなPC画面上で終わつてしまつた、ほろ苦い失敗である。