

樹液流計測について—グラニエセンサーの自作法—

10/12/2003

10/28/2006 改訂

12/04/2016 改訂 熊谷 朝臣

本編は、「樹液流計測について—グラニエ法の理屈—」の続編です。ここではグラニエセンサーを自作する方法について書きます。高価なグラニエセンサーも、自作すれば1組当り数百円でできてしまいます。前編の最後の方で述べたように”複雑地形上の森林の蒸散”を精度良く知るためには、グラニエセンサーを大量にばら撒く必要がありますが、それは、この”自作”によってはじめて可能になると思います。

本稿は、Nathan Phillips 博士 (現 Boston University) が Duke University の後輩達に残した (教育的) 資料「Granier sapflow sensor construction notes」から多くを引用しています。また、私が実際にセンサーを作成するに当って、Ram Oren 教授 (Duke University) の研究室の学生さん達に、本当にお世話になりました。特に Christopher Oishi と Joshua Uebelherr には、私が納得いくまで懇切丁寧に教えてもらいました。ここに記して、深い感謝の意を表します。

ところで、現在 2016 年、最後の改訂から 10 年経ちました。時代は大きく変わりました。グラニエ法のセンサー・パワーボードの部品は、全て日本環境計測 (<http://www.environment.co.jp/>) で手に入れることができるようになりました。部品の料金表を、ここ (<http://www.environment.co.jp/study/GraniePartsandPrice.xls>) で見るができます。情報の一つとしてお知らせしておきます。

さて、グラニエ法による樹液流計測システムは大きく、センサー部 (あの 2 本の針みたいなヤツのことですね) とヒーターに安定した電力を供給するためのパワーボードの 2 つの部分に分かれます。

まずセンサー部の工作について説明します。実際の手順で、どんどん説明していきましょう。以下は 1 組のセンサー (1 本の木の樹液流速を測るのに必要なセンサー、つまりヒーター付きセンサー (HS) とリファレンスセンサー (RS) (前編を参照のこと) の 2 本のセンサーという意味) を作る手順です。

まず、針部の細工からです。私はテルモのステンレス注射針 (19G×1 1/2”) を使っています。材質とサイズがこれと同じなら、別に他のメーカー製でも構いません。そうそう、工具としてホビールーターと切断砥石が必要です。あと、防護メガネと防塵マスクをつけて

作業すべきです。おいおい分かりますが、切断した針や細かい金属塵が飛んできて健康に悪いだけでなく、結構危険です。

1. HS の場合、注射針の（針だけの）根元から 10mm、21mm のところにマジックで印をつけます。RS では、10mm、20mm のところになります。そして、21mm（HS）、20mm（RS）のところから針を切り落とします。”21mm”の余分な 1mm は、後でヒーター線を巻きつけるときに重要な意味を持ちます。気をつけておいてください。
2. HS の先端の“余分な 1mm”にノッチを作ります。あと、針の根のプラスチックの部分（これから先、”ベース”と呼びます）に小さな穴を開けときます。他の注射針を使うのが便利です。この穴にはヒーター線（後述）が通ります。
3. HS、RS ともに 10mm のところに穴を開けます。このとき、穴が大きすぎると針自体の強度が弱くなります。気をつけて下さい。あと、作業でできたケバケバや削りカスはヤスリできれいにしておいてください。最後に、注射針の内側を細い鋼製の針で、滑らかにしておいて下さい。そうしないと、熱電対やヒーター線（後述）が針の中をうまく通りません。

細工の完了した注射針は、図 1 のような感じになります。

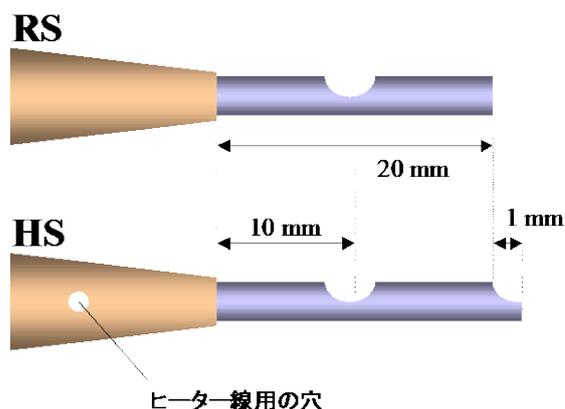


図 1. 細工後の注射針の様子（RS と HS）

次は、熱電対とヒーター線の細工です。熱電対には銅-コンスタンタン線、ヒーター線にはコンスタンタン線を使います。それぞれ Omega Engineering 社製の TT-T-36、TFCC-005 を使います。これ以外の製品を使った場合スペックが変わると思うし、だいたい、針の中に線が通らなくなると思います。これらの製品は、銅線やコンスタンタン線自体が細いだけでなく、その皮膜が薄くて強いのが自慢です。あと、超重要なこととして“貝印”でも“フェザー”でも良いですからカミソリが必要です。カッターでやると線を一杯無駄にすることになると思います。ご注意ください。

- 1'. ヒーター線である TFCC-005 を 50cm の長さで切ります。両端の皮膜を 1cm ほど取っ

て裸線にしときます。

1. 熱電対になる TT-T-36 を 15cm の長さで切ります。
2. TT-T-36 は皮膜付きの銅線と皮膜付きのコンスタンタン線を 2 本まとめてさらに皮膜で覆った形になってます。ここで、一番外側の皮膜を丁寧に取り除きます。つまり、細かい皮膜付き銅線 (CU) と皮膜付きコンスタンタン線 (CO) が別々に誕生です。
3. CU も CO も両端の皮膜を 1cm ほど剥きます。そして CU、CO のお互いの端っこを、きれいによじます。
4. この“よじり”をはんだ付けするのですが、はんだは薄く、なおかつしっかりとつけないとだめです。はんだが玉になったりすると針の中 (特に HS) を熱電対が通らなくなります。気を付けねばなりません。
5. はんだ付けされた“よじり”を 1mm ほど残して切り落とします。これで熱電対接点が出来上がったはずですが。
6. 線の端の方で皮膜がケバケバになってたりしますと、これが邪魔になって熱電対が針の中を通らなくなることがよくあります。不精せず、きれいにしときましょう。
7. 最後に、この熱電対接点の抵抗を測ります。抵抗値は 3 ~ 50Ω の範囲に入るはずですが。この範囲に入らない場合、あなたの作った熱電対接点は失敗作です。

熱電対接点作成の様子は、図 2 のような感じになります。

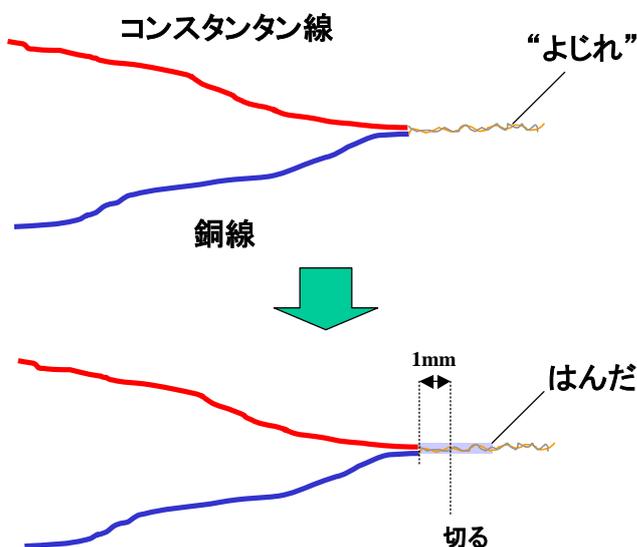


図 2. 熱電対接点作成の様子

さて、センサーの組み立てに入ります。まず HS の組み立てについて説明しましょう。必要なものは、瞬間接着剤 (実は、最重要項目。私はアロンアルファ一般用を使っている)、熱伝導性シリコン (私は、サンハヤト社の SCH-20 を使っている)、アルミニウムチューブです。アルミニウムチューブはサイズが外径 3/32”、壁厚 0.014”であればどこで買ってもい

いのですが、私が知る限り、このサイズのアルミニウムチューブは **Small Parts, Inc.** (www.smallparts.com) でしか手に入りません。と、10年前（現在2016年）書きましたが、**Small Parts** は、この製造を止めてしまいました。今は、私の知る限り、今や世界中でただ一軒、日本環境計測 (<http://www.environment.co.jp/>) でしか買えません。

1. 熱電対接点のコード側とヒーター線を束ねて、針の先端から突っ込みます。
2. 3本線がベースから出てくるはずですが、この3本を、接点部（はんだがついている所）が針の真中の穴の位置に来るまで引っ張ります。こんな感じ（図3）になっているはず

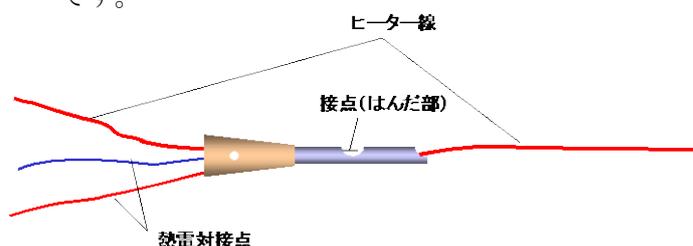


図3. 作りかけのHS-1

3. 針の中央の穴から瞬間接着剤を一滴ずつたらしめます。すると毛管力で針の中に瞬間接着剤が入り込んでいきます。瞬間接着剤が完全に固まる前に、針部と熱電対接点のコード側（どちらでも良い）の裸線をテスターで繋ぎます。つまり、接点が針に触れていないかを調べるのです。触れていたらダメです。接点を千枚通しで押すなり、コードを動かすなりして触れないように直してください。触れなくなったら、瞬間接着剤を中央の穴が埋まるまで流し込んでください。あとは、接着剤が乾くまで待ちます。焦ってはダメです。
4. カミソリで針についた瞬間接着剤カスを削り落します。特に針中央部の瞬間接着剤の塊はきれいに針と連続するよう整形してください。次にヒーター線を針に巻きつけて、さらにその上にアルミニウムチューブを被せるのですが、このチューブに針+ヒーター線が入らなくなります。注意！です。さて、針先端のノッチのところからヒーター線を針に巻きつけます。巻きつけて余ったヒーター線はベースの穴からベースの内側を通して外に出します（結果、4本の線が束ねられることとなります）。こんな感じ（図4：大サービス、写真です）になります。あと、ベースの穴に瞬間接着剤をたらし込んでいきます。
5. 巻きつけたヒーター線（コイル部と呼びます）の表面に熱伝導性シリコンを塗ります。そして21mmの長さに切ったアルミニウムチューブをコイル部に被せます。アルミニウムチューブの両端に補強の意味で瞬間接着剤をつけときます。
6. 最後にベースの内側にシリコン（これは普通の奴で良いです）を流し込んで、ベースを埋めてしまいます。シリコンが乾くまで触っちゃダメです。



図4. 作りかけのHS—2 (デジカメ写真: Special Thanks 内海さん)

RS の工程は、以上の HS の工程からヒーター線の部分を除いただけで、あとは全く同じです。あと、アルミニウムチューブは 20mm (HS は 21mm でしたね) の長さのものを使います。ただし、チューブを被せるのは、実際にセンサーを木に挿すときです。そのときは、もちろん針に熱伝導性シリコンを塗ったくなります。楽勝ですね。

最後に HS の抵抗値を決めなければいけません。HS (正確には HS のコイル部) には正確に 0.2W のジュール熱がかけられなければならないのですが、そのためにはコイル部の抵抗値を知った上で HS に流す電流を決定する必要があります (電流の方はパワーボード (後述) で調整します)。・・・という訳で、HS のコイル部の抵抗値を決める手順です。

1. テスターを使って、ベースから出ている 2 本のヒーター線の両端で抵抗値を測ります。20Ω 程度になるはずですが、この値を R_{total} (Ω) とします。
2. コイル部に含まれていないヒーター線の長さ (2 本の線の合計になりますから、注意して下さい) を測ります。これを L (cm) とします。このヒーター線 (TFCC-005 のことです) の長さ (cm) 当りの抵抗値は 0.4 (Ω/cm) です。よって、コイル部に含まれないヒーター線の抵抗値 R_{lead} (Ω) は $0.4 \times L$ で表されることとなります。
3. もうお解かりですね。コイル部の抵抗値 R_{coil} (Ω) は $R_{coil} = R_{total} - R_{lead} = R_{total} - 0.4 \times L$ で計算されます。ここで求めた R_{coil} はその HS 特有の値です。ベースのところに油性マジックで R_{coil} 値を書いといてください。わかんなくなったら大変ですよ。あ、あと R_{coil} は大体 12~13Ω くらいになると覚えておくと便利です。

パワーボードの作り方は次で説明するとして、ここで、パワーボードから HS に供給する電流の調整手順を説明しときます。パワーボードは HS に電流を流し、またその電流を調節可能な代物である、ということを前提としときます。

1. 1つの電力供給ユニットは図5のように、3つの HS をコントロールします。当たり前ですが、3つの HS に流れる電流は共通です (I (A) としておきましょう)。各 HS のコイル部でのジュール熱は全て 0.2W でなければならないのはわかりますね。つまり、これら 3つの HS のコイル部の抵抗値 (R_{coil} (Ω) です) は全て同じでなければなら

- ないのです。前に作った HS の R_{coil} 値をベースに書いとくよう言いました。ここで、その値を使って、同じ R_{coil} 値の HS を 3 つセットで揃えとかなければなりません。
2. さて、3 つの HS を実際にパワーボードにつなぎます。で、電圧をかけます。そのときの電流値 I (A) をテスターで測ります。0.2W、 R_{coil} (Ω) が既知ですから、

$$I = \sqrt{\frac{0.2}{R_{coil}}} \quad (1)$$

により必要な I (A) がわかります。テスターを見ながら、パワーボードの電流を調整してください。 I は大体 0.12A くらいになるはずですよ。

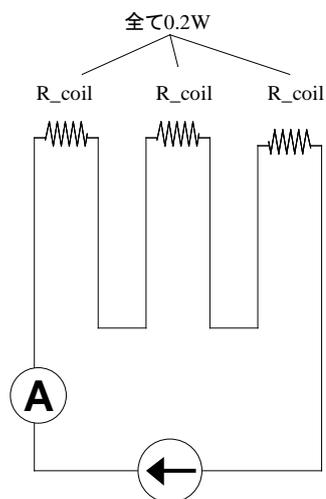


図 5. パワーボードと HS の配置

さて、パワーボードを作っていきます。これが無くてはグラニエ法は成立しません。頑張らしましょう。大変そうですが、“電気に弱い”という人も、もう何も考えず指示通りバカ正直に作っててください。動きゃいいんです動きゃ。実際 Ram の研究室の学生さん達も回路の意味については全く理解していませんでした。

パワーボードは、図 5 のユニットが並列で幾つか集まった形をしています。私が普段作るパワーボードは図 5 のユニットが 10 個、つまり 30 個の HS を制御可能なものです。以下では、1 つのユニットを作るためにどうすれば良いかを説明します。つまり、以下で挙げる材料も 1 つのユニット分の材料です。あとはお好きにどうぞ (とにかく並列に繋がれば良いんです)。

必要な材料リストを示します。各電子部品に番号が付いています。これは回路図 (図 6) 中の電子部品の番号に対応していますから、注意しておいてください。そうそう、基盤が必

要なのは言うまでもないですね(私は 23cm×11cm を適当に切るなりそのまま使うなりしています)。

1. 1/2W、12Ω 固定抵抗× 1
2. 1/2W、47Ω 固定抵抗× 1
3. 1/2W、180Ω 固定抵抗× 1
4. 1/2W、1 kΩ 可変抵抗× 1
5. 25V、220μF 電解コンデンサー× 1
6. 1.2-37V、1.5A、TO-220 レギュレーター (LM317T と言えば買えるはず) × 1
7. 1 A、50V ダイオード× 2
8. 1 A、250V ヒューズ× 1
9. ヒューズホルダー× 1
10. 6 点のターミナルブロック× 1 (例えば、CR10 なんかで入力のコ線を繋ぐネジ式のアレですよアレ。アレを 6 点分揃えて下さい。)

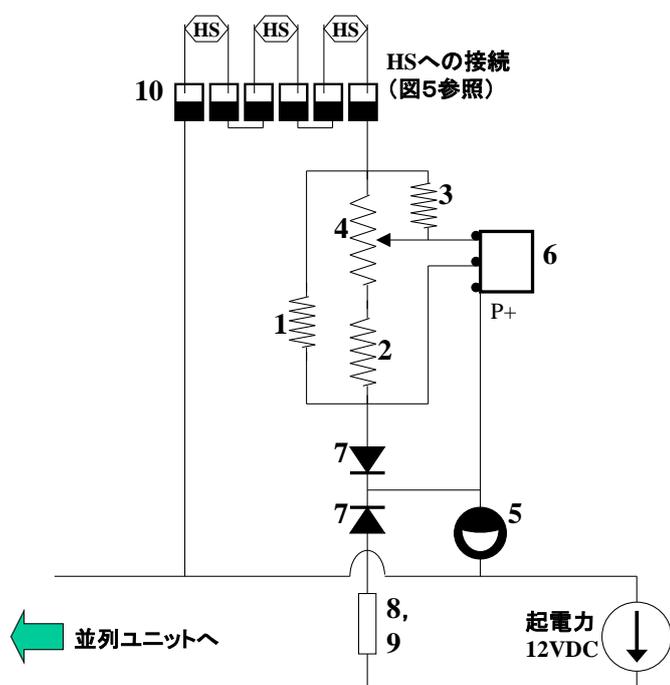


図 6. パワーボードの回路図 (但し図 5 の 1 ユニット分)

何も考える必要はありません。とにかく図 6 の回路図に従って組み立てて下さい。それだけです。時間に余裕のある人はこの回路について考えてみるのも良いでしょう(そんな事は本題ではないのでお薦めしませんが・・・)。図 6 は図 5 に示したユニット (HS×3 センサー分) 1 つ分の回路図です。図 6 の「並列ユニットへ」にこの回路と全く同じモノを組みればもっと多くの HS を制御できます。ただ、そのときバッテリーを使うのでしたら電気のヘタリ具合をきちんと見積もった方が良いでしょう。

最後に、グラニエセンサーを実際に木に挿すときの手順を説明します。前編「樹液流計測について—グラニエ法の理屈—」にはセンサーを実際に木に適用する場合の注意点が一杯書いてあります。以下の手順について、その理由がわからない場合は、これを参照してください。

1. 10～15cm 離して、2箇所直径1～2 cm 程度で樹皮を剥ぎます。位置は胸高にこだわる必要はありません。高い位置の方が、樹液流速分布の変動は小さくなることを覚えておくと便利です。
2. 上記の2箇所に直径2.5mm、深さ22mmの穴を開けます。
3. まず、RSの針部に熱伝導性シリコンをつけてその上にアルミニウムチューブを被せます。このRSを下側の穴、HSを上側の穴に埋めます。
4. HS、RSの熱電対接点のコンスタンタン線（TT-T-36の場合、赤コードになります）を繋ぎます（絶縁も忘れずに）。
5. これで、HSとRSから成る一組のグラニエセンサーから出てるコードは、熱電対出力の2本（TT-T-36の場合、青コードになります。当たり前ですが、HSから出てる線の方がプラス出力になります）とヒーター線入力2本の計4本になります。ぜひ、4線式の頑丈な皮膜付きケーブルを手に入れてください。センサーから出てる4本の線をケーブルに繋ぎます（やっぱり絶縁も忘れずに）。
6. 樹皮が剥けて材がむき出しになってる部分をシリコンで埋めて、センサーを固定します。これをやらないと、“蜜”が出てきて、虫がやってきて、えらいことになります。次にカバーをセンサーにかけて、日射や水からセンサーを守ってください。カバーの意味に関する詳細な説明が前編にあります。参照してください。カバーと樹皮との間をシリコンで埋めて下さい。
7. ケーブルの線を、それぞれデータロガー、パワーボードに繋ぎます。データロガーについては問題無いでしょうが、パワーボードへの電気は12～13VDC（カーバッテリーもしくはACアダプターを使うことになります）ですから、お間違えなく。

これでグラニエ法に関する解説（前・後編）は終わりますが、言うまでも無くグラニエ法自体は単なる手段です（まあ、“より正確に測る方法を探る”、という研究はありえますが）。樹液流計測自体は重要なものではありません（“勉強をするのに紙と鉛筆を手に入れる”という意味では重要ですが）。「樹液流計測から得られるデータを使って何を知りたいのか?」、これが一番大事です。勘違いしている人が結構多いので、ここで書いてみました。「そんなことは当たり前じゃい!」という方に対しては、失礼いたしました。

では、成功を祈ります。

□