

## 樹液流計測について—グラニエ法の理屈—

09/26/2003

10/01/2003 改訂

09/29/2006 改訂

熊谷 朝臣

以下の内容の大部分は、André Granier 博士の INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) における 1996 年の技術資料「SAP FLOW MEASUREMENTS using the radial flowmeter technique」に依ります。また、グラニエ法の実際の適用については、Duke University の Christopher Oishi と Joshua Uebelherr から (私のヘタクソな英語と、しかも、かなりしつこい質問にも関わらず) 私が満足するまで大変懇切丁寧に教えていただきました。また、実験室・物品の使用、それどころか、センサー試作品をいただくことを Ram Oren 教授 (Duke University) に許していただきました。ここに記して尊敬と感謝の意を表する次第です。

さて、まずグラニエセンサーとはどんなものかを説明します (図 1)。

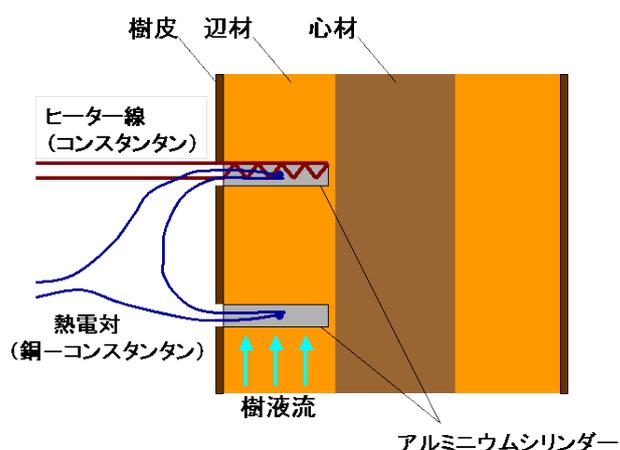


図 1. グラニエセンサーとその設置状況

グラニエセンサーは、2つの針状 (図 1 では太く書いてありますが、あくまで針状です) のセンサーから成ります。どちらのセンサーにも熱電対接点があつて、センサー間の温度差が出力されます。上側のセンサーにはヒーターが付いています (ヒーター付きセンサー: HS と呼びましょう)。下側のセンサーは参照温度としての木の温度を測るためにあるので、リファレンスセンサー (RS) と呼ばれます。HS には一定のジュール熱がかけられています。HS の温度は、HS の近傍の樹液流が熱を運び去りますから、樹液流量が速くなればなるほど小さくなるはずですが、HS と RS の温度差という見方からすれば、この温度差は樹液流が止まっているとき最大で、樹液流が速くなればなるほど小さくなるはずですが。

結論から言ってしまうと、グラニエ法とは、「HS と RS の温度差は樹液流量の関数となることが予想されるので、えいや！と、その関数を作ってしまえ！」という方法なのです。

さて実際にグラニエ法を運用するに当っては、色々細かい注意点が一杯あるのですが、まず、その関数とやらを導出することにします。細かい話はそれからです。

まず、HS における熱収支式を示します。ジュール熱を  $P$ 、HS を外側から包んでいるアルミニウムシリンダーの表面積を  $S$ 、そして、HS が発熱していないとした時の温度と発熱している時の温度の差を  $\Delta T$  とします（この  $\Delta T$  は HS の近傍を流れる平均樹液流フラックス  $u$  の関数になるだろう、ということで  $\Delta T(u)$  と書いてしまいます）。なお、下線部には注意しておいてください。あとで言及します。すると、

$$P = hS\Delta T(u) \quad (1)$$

となります（というか、なってもらいます）。ここで、 $h$  は熱の輸送係数です。この（怪しい） $h$  は、 $u$  が増加すると増加しそうです。というわけで、

$$h = h_0(1 + \alpha u^\beta) \quad (2)$$

という式を作っちゃいます。ここで、 $h_0$  は  $u$  が 0 の時の  $h$ 、 $\alpha$  と  $\beta$  は（後で強引に決める）係数です。

また、(1) 式から、

$$P = h_0S\Delta T(0) = h_0S\Delta T_{\max} \quad (3)$$

という式も成り立ちます。ここで、 $\Delta T(0)$  は  $\Delta T(u)$  の最大値になるということで、 $\Delta T_{\max}$  と書き換えました。

そして、(1)、(2)、(3) 式から  $P$ 、 $S$ 、 $h$ 、 $h_0$  を消去してまとめると、

$$u = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T(u)}{\Delta T(u)} \right)^{1/\beta} \quad (4)$$

が得られます。(4) 式がどんな意味を持つかと言いますと、係数  $1/\alpha$ 、 $1/\beta$  が決まりさえすれば、 $u$  が 0 の時（というより、“と仮定される”と言った方が適切でしょう）の  $\Delta T$ （つまり  $\Delta T_{\max}$  ですな）と現在計測される  $\Delta T$  が得られれば樹液流フラックスが得られる、ということになります。

ここで、上の“下線部”の話に戻ります。本編のはじめの方で、「グラニエセンサーは HS と RS から成り、その温度差が測られる。RS は参照温度の計測点としての役割を持つ」なんてようなことを書いたかと思えます。ここで、「ん？」と思って下さい。(4) 式中の  $\Delta T$

は「発熱している HS と発熱していない時の HS の温度差」であって厳密には「HS と RS の温度差」ではないのです。・・・もうおわかりでしょう、RS とは「発熱していない HS」の代用に過ぎないのです。もっと言ってしまうと、 $\Delta T$  は本当は「発熱している HS と発熱していない時の HS の温度差」なんだけど、そんなのは測れないから「HS と RS の温度差」で代用してしまおう！ということなんです。実際、(4) 式中の $\Delta T$ は HS と RS の温度差です（もう一度、図1を見てみてください）。

このことは、センサーの設置条件に深く関わってきます。後で出てくる“センサーの実際の設置に当たっての注意事項”で詳しくお話しますから、もうちょっと待っててください。

話を戻します。(4) 式中の係数  $1/\alpha$ 、 $1/\beta$  のことです。 $u$  を求めるためには、こいつらを決めなければならないのですが、グラニエ先生は、色々な種類の木の幹、枝、根っこ、さらには、おが屑やナイロン線を集めて作っただけの多孔質にまでグラニエセンサーを突っ込んで、これらのサンプルを水で浸して圧力を加えて、色々な“樹液流速度”を作って、 $(x, y) = (u, [(\Delta T_{\max} - \Delta T(u)) / \Delta T(u)])$  をプロットしてみました。その結果が図2です。

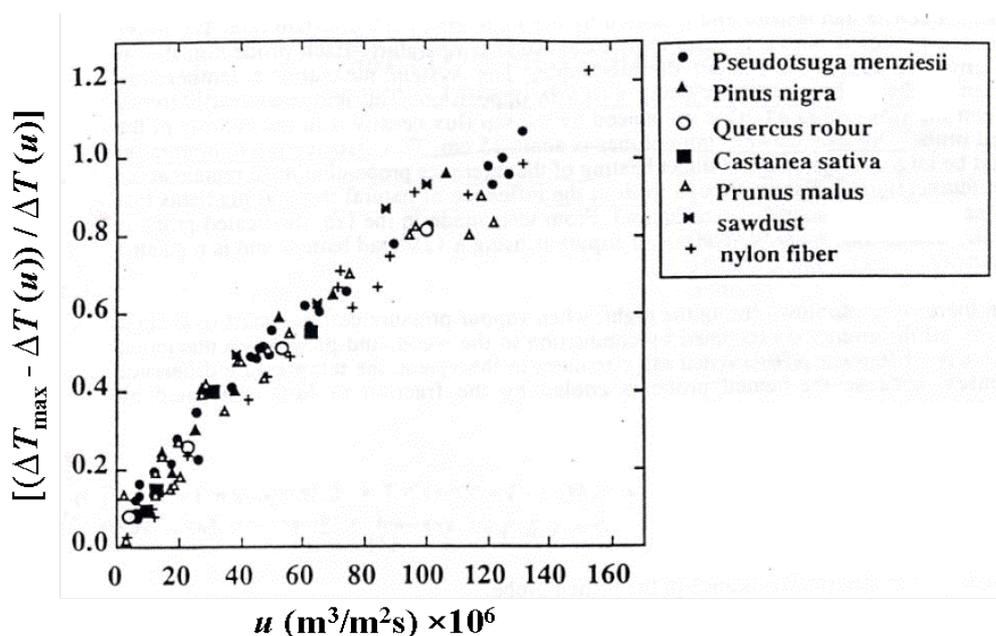


図2.  $u$  と  $[(\Delta T_{\max} - \Delta T(u)) / \Delta T(u)]$  の関係 ((4) 式参照のこと)  
(Granier (1996) より引用)

驚くべきことに、材質によらず  $[(\Delta T_{\max} - \Delta T(u)) / \Delta T(u)]$  (面倒くさいから、以降  $K$  と書きます) と  $u$  の関係は一本の曲線上に乗ってしまいそうです。そこで、図2のプロットに(4)式を回帰して  $1/\alpha$ 、 $1/\beta$  を求めた結果、

$$u = 1.19 \times 10^{-4} K^{1.23} \quad (5)$$

が得られました。なお、 $u$  の単位は  $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ですので確認しておいてください。せっかくですから、図3にグラニエ法を適用した場合に観測された $\Delta T(u)$ と(5)式によって変換されて得られた  $u$  の時系列を示します。特に補正とか施していないし、丁寧に測ったわけではないので、少々ギザギザがありますが、気にしないで下さい。

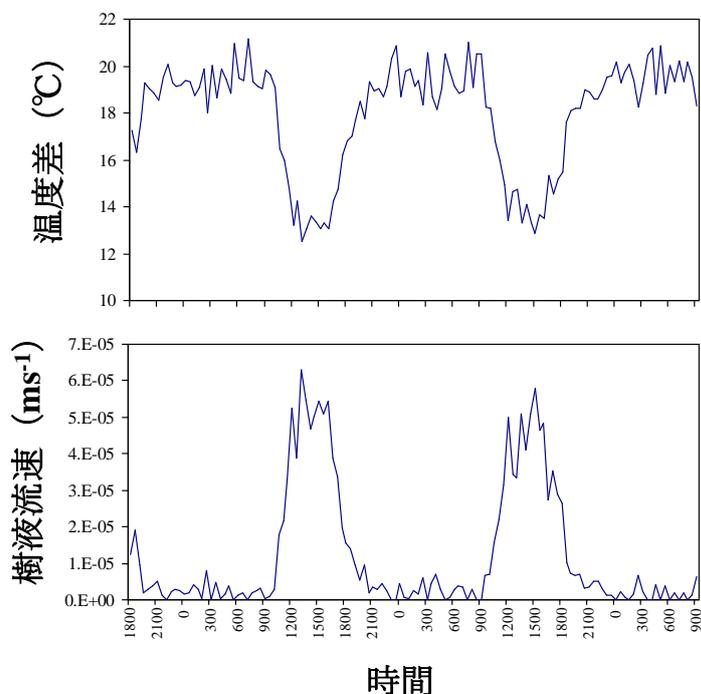


図3. グラニエ法センサーから出力された温度差（上図）と変換された樹液流速（下図）

ここで、図2や(5)式の意味をもう一度考えてみましょう。ここで言っていることは、「センサーの針部が触れている多孔質の、その触れている部分の平均流量（フラックス）は多孔質の材質（というか、孔隙径とか孔隙密度）によらず(4)式で一意に表現されてしまうのだ。ただし、センサーが触れている多孔質がその触れている範囲内で（ある程度）均質（もしくは、規則的）である、という条件込みで。」ということになるでしょう。

よって、一本の木のレベルでの樹液流量  $F$  ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) は、(5)式で得られた  $u$  に、辺材面積（というより、道管が分布する面積） $SA$  ( $\text{m}^2$ ) を掛けることで、

$$F = u \times SA \quad (6)$$

のように得られます。ただし、この式が成立するためには、「センサーに触れている辺材を流れる“平均的樹液流速”が辺材面積中に均質に分布している」という前提が必要なことは、前に述べたことで想像できるでしょう。

辺材面積とセンサーの挿し方について、ちょっと詳しく説明します。図4は色々な辺材面積とセンサーの長さとの関係です。あ、言い忘れてましたが、グラニエセンサーの針部の典型的長さは20mmです。センサーのサイズはこれに固定されていると思ってください。(自分でセンサーを作るときなど) サイズの変更は止めといた方が身の為です。

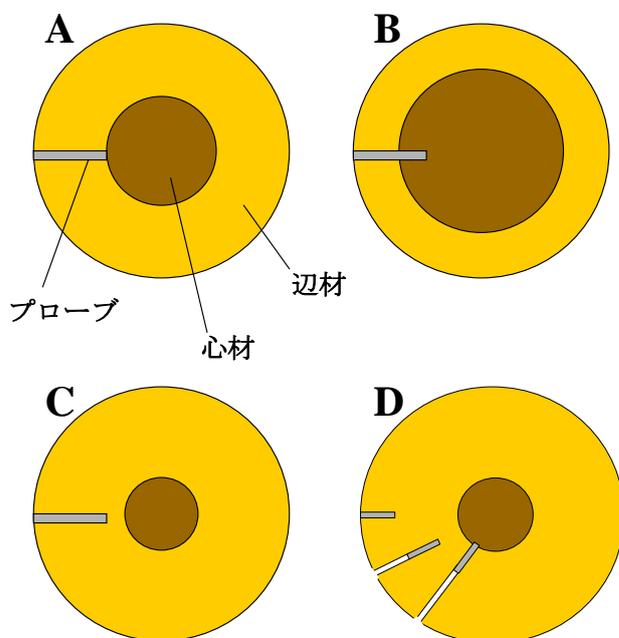


図4. センサー長さと辺材面積の相対的な関係

A では辺材の深さとセンサーの長さが一致しています。これが、まさに理想です。

B ではセンサーの長さが辺材の範囲を飛び越えて心材にまで達しています。心材では  $u$  は0 ですから、このセンサーで計測される  $u$  は真の辺材平均樹液流速よりも低く評価されることとなります。しかし、心配御無用。計測される  $u$  は心材に達したセンサーの分も含めた “センサー長さ平均樹液流速 “なのです。この場合、(6) 式で辺材面積  $SA$  でなくセンサー長さが作る面積 (木の半径を  $r$  (m) として  $3.14 \times \{r^2 - (r - 0.02)^2\}$  だってことですか) を使えば良いのです (ってことになってます)。でも、あまり心材に多くのセンサー部分が達してしまつてはダメです。こうなるとほとんどの熱輸送は伝導で起きて、樹液による移流はほんの僅かです。あと、樹皮付近で集中的に起きる樹液による熱輸送は、外気との熱交換の影響を強く受けてしまいます。・・・まあ、これが「ある程度の太い木でないとグラニエ法は適用できない」という主な理由です。

上で、「ってことになってます」と書きましたが、実は B のような状況は結構な誤差を生みます。対処法については Clearwater et al. (1999)なんかを読むと良いでしょう。いずれ、この論文の説明も本稿に加えようとは思っていますが。あと、Clearwater et al.の論文では、A の

ような場合でもセンサー長さの範囲で樹液流速勾配が生じた場合どうなるのか？を論じています。環孔材、散孔材のどちらでも勾配は生じそうですが、環孔材で強烈なのが起きそうです。彼らの結果では、散孔材ではあまり誤差は生じていません。が、環孔材では救いようの無いくらいの誤差が生じています。

Cでは、センサーの長さが辺材深さを完全にはカバーできていません。ここで出力された樹液流速を辺材面積に掛けると、実際の樹液流量を過大評価することになります。樹液流速は髄方向に減少するからです。

DはCが極端になった場合、つまり、対象木が大径木の場合のセンサーの適用例です。とにかくセンサーを埋めまくって全ての辺材深さをカバーしています。これが、大径木へのグラニエ法の適用法の一つです。しかし、この方法は、ロガーのチャンネル数も必要だし、なによりデータ処理の仕事が増えてしまいます（測らなければならない木は一杯ありますから）。そこで、数本の木で、Dのような測り方をやってみます。そして出てきた全樹液流量（もしくは樹液流速分布特性）と一番外側の1つのセンサーの出力の関係を調べます。そして、林分の多くの木には、一組ずつしかセンサーを挿さず、「全樹液量-外側センサー出力」関係を使って、他の大径木の樹液流量を推定してしまうのです。この適用の様子は、Granier et al. (1996)や Schäfer et al. (2000, 2002 ; "2002"はかなりお奨め)を参照すると良いでしょう。

言い忘れてましたが、辺材面積を求めるためには、普通、成長錐を使います。これまでのお話でお分かりのように、グラニエ法をやる上で、成長錐は必需品です。お忘れなきよう。

ちょっと話の流れから逸れますが、ヒーターにかけられるジュール熱は基本的には0.2Wということになってます。自作する時とかに、これと違ったジュール熱をかけるのは、止めといた方が身の為です。この状況はセンサー長さが20mmに固定されているのに似ています。

さて、実際にセンサーを挿していく流れで、適宜注意とその解説を述べたいと思います。

まず、センサーを挿す時の、2つのセンサー間隔です。15cmが推奨されていますが、特に正確にこの長さを守る必要はありません。このセンサー間隔の長さは、①HSの発する熱がRSに影響しない（つまり、センサー間隔を十分に離す）、②RSが「発熱していないHS」の代用になる（つまり、センサー間隔が十分に小さい）、の2つの相反する条件の妥協の産物なのです。離れすぎても、近すぎてもいけません。できれば15cmを守っとくのが無

難です。

これまで結構口を酸っぱくして言ってきたことなのですが、**RS**は「発熱していない**HS**」の代用でなければなりません。このことは、「**HS**と**RS**を挿した2つの場所で温度勾配があつてはならない（もちろん**HS**に熱を加えない状態で）」と言い換えることができます。実は、この”温度勾配問題”はグラニエセンサーの適用において、重大な問題です。まず、この温度勾配がどんな時に生じるかを示します。

- (1) センサーを挿した場所に直接日射が当たるとき。当たっているところとそうでないところの温度差は推して知るべし。
- (2) 気温の日較差が大きいサイトでは、気温の移り変わりに対して温度勾配が生じやすい。
- (3) センサーを挿した場所が地面に近いとき。地面と大気の温度差は大きいですから。
- (4) 小径木は温度勾配が生じやすい！

実際にヤバイほど温度勾配が生じているのかどうかの判定法として、**HS**に熱を加えない状態でセンサーからの出力を日変化として観察する、というのがあります。これを何日間かの快晴日に行つて、最大日較差が $\pm 5 \mu\text{V}$ で収まれば、このセンサーは適正に挿された、ということになります。

では、温度勾配防止のためにどんな方法が考えられるでしょうか？以下に対策法の例を挙げときます。

- (1) センサーはとにかく幹の日陰の場所に挿す。ただし、方位角方向で樹液流速にバラツキがある場合は・・・どうしようもないですね。
- (2) アルミ箔カバーが有効です。このカバーは長い形のモノが良いです。覚えとかなければいけないのは、カバーがかかってないところで日射が当たっているところとカバーがかかっている部分とではかなりの温度差ができてしまうということです。つまり、カバーが温度勾配を誘発することがあり得るのです。”カバーは大きく”が基本です。
- (3) **HS**に熱を加えない状態で出力を得ます。**HS**と**RS**間で温度勾配が検出された場合、これを気温とか日射とかの環境変数を用いたモデルで表現します。このモデルを用いて、センサー出力を補正するのです。

あと、**Goulden and Field (1994)**が温度勾配の影響を取り除く、うまい方法を提案しています。普通のグラニエセンサー1式に加えさらに熱電対2つを加えるという、結構面倒臭い方法ですが、有効です。試す価値はあります（かな？実際にやっている所を見たわけではないので、強気になれません）。

カバーは、日射が当たるのを防ぎながらもカバー内部と外気の間で熱交換がスムーズに行われるような材質である必要もあります。カバー内部に熱が溜まってしまつてはマズイ

のです。あ、あと、カバーにはセンサー防水の役割もあります。シリコンでも防水パテでも使って、とにかく降雨中にセンサーが濡れない（もっと言うと。センサー付近を水が”走らない”）ようにしてください。

もちろん、長期連続計測すると色々な問題が生じてきます。それを避けるためには、できる限り頻繁にデータ回収するしかありません（当たり前ですが）。グラニエ法は、結構ほったらかしでもきれいな値をそれっぽく返してくるので、つい長期間サイトに行かないということをしてしまいがちです。と言う訳で、ここに書いてみました。

さて、この色々な問題点の多くは、辺材を傷つけたことに起因します。辺材を傷つけることで道管から水が抜けます。するとセンサーと辺材の間の熱伝導率が下がります。結果、 $\Delta T_{\max}$ が増加していきます。樹体内の貯留水量の変動（Kumagai, 2001 が良いかな？）も熱伝導率への影響を経由して $\Delta T_{\max}$ を変えてしまいます。移流の効果が強い $\Delta T(u)$ と比べ、伝導で作られる $\Delta T_{\max}$ は材の含水率の影響を強く受けるのです。 $\Delta T_{\max}$ は長期で見ると一定にはならないのです。・・・どうしましょう？そこで、Granier (1987)は10日以上の日 $\Delta T$ の最大値を線形回帰して、その期間の $\Delta T_{\max}$ を決定しています。これが、今のところ一番良い方法のようです。

今更という感じがしますが、データのロギングの基本は「10~30 秒間隔で計測し、これを10~30 分間隔で平均化してストア」です。放射関係のデータロギングに似てますね。

センサー出力は熱電対出力になるわけですから、結構な低電圧（200~600 $\mu$ V）です。当たり前ですけど、これに対応したロガーが必要です。まあ、CR10とかCampbellのロガーが無難なところでしょう。熱電対出力ですから、シングルエンド（SE）でいくことも可能ですが、ロガーを使い慣れてる方はお分かりでしょう、SEの熱電対出力はノイズが出やすいです。チャンネル数は半分になってしまいますが、ディファレンシャル（DIFF）でいくことをお勧めします。

最後に思いの丈をひとつ。現時点では、グラニエ法は最も簡便で信頼度の高い樹液流計測法であり、さらには蒸散量計測法となります。測るための技術が楽勝、ロガーのチャンネル数が一杯取れる（=ロガーにかかる費用が安く済む）、ってのは、ものすごいメリットです。でも、グラニエ法が最も真価を発揮するのは、”大量にばら撒いた”ときです。これによって、例えば流域レベルの蒸散量を算定したりするのです。そうすると、本当にグラニエ法が生きてくるのは、日本のような複雑地形でフラックスを算定するときなのではないでしょうか（複雑地形での乱流変動法は、まだまだ問題山積みです）。

この”大量ばら撒き”を可能にするためには、センサーが簡単に、安価に、手に入らなければならないです。実は、これこそがグラニエ法の素晴らしいところなのです。グラニ

エセンサーは安く（一組当り数百円）簡単に自作できます！

次編では、グラニエセンサーの自作法をできるだけ詳しく報告するつもりです。

### 引用・参考文献

Clearwater et al. (1999) *Tree Physiology* **19**, 681.

Goulden and Field (1994) *Functional Ecology* **8**, 125.

Granier (1987) *Tree Physiology* **3**, 309.

Granier (1996) “SAP FLOW MEASUREMENTS using the radial flowmeter technique”  
INRA-d’Ecophysiologie Forestière, Champaenoux.

Granier et al. (1996) *Global Change Biology* **2**, 265.

Kumagai (2001) *Agricultural and Forest Meteorology* **109**, 105.

Schäfer et al. (2000) *Plant, Cell and Environment* **23**, 365.

Schäfer et al. (2002) *Global Change Biology* **8**, 895.

□