

## Estimating heat storage in Amazonian tropical forest アマゾンの熱帯林における貯熱の見積り

Moore, C.J. and Fisch, G. (1986) Agric. For. Meteorol. 38, 147-169

**要旨** バイオマス温度の測定とバイオマス分布についての情報から、バイオマスの貯熱変化をどのようにして見積もることができるかという手法を記す。本手法はバイオマス温度の変化が不均質であることを考慮し、その測定の適切な位置を提示する。高さ 35 メートルの熱帯雨林へ本方法を適用した結果、全貯熱の時間変化は  $\pm 80\text{Wm}^{-2}$  にも達し、地表面エネルギー収支に対して、気温成分、湿度成分、バイオマス貯熱成分がほぼ均等に寄与することが示される。日平均値は正味放射量の 5%程度であることが多く、たまに 10%を超える。気候データを用いてアマゾン林の貯熱を見積もるための簡単な式が提案される。

## イントロのイントロ

時代背景: ポーエン比法での顯熱・潜熱フラックス測定が一般的だった時代、渦相関法の観測をした頃の論文。エネルギー収支が合わないから、幹貯熱のみならず、大気の貯熱をようやく考え出した。たぶん、この手の話の先駆けでしょう。

…で、未だ、エネルギー収支は閉じない。しかも、貯熱だけでは説明できないはずなんだけど、考慮しないわけにはいかないので、そんな時、この論文が持ち出されて、「貯熱の寄与は高々この程度よ」と言い訳するための論文。いろいろと出てくる値が割と重要。

## イントロ

エネルギー収支における植生層貯熱変化量: バイオマス量が大 有意に寄与(特に短時間収支で)

熱帯雨林のバイオマス量は 700t/ha 以上 (Klinge, 1975)。

(訳注:  $= 70\text{kg m}^{-2}$ 、桐生ヒノキ林 32、シベリアカラマツ 30 以下)

大気 - 陸面相互作用系においても重要な要素 Sellers(1985) で GCM へ組み込み

Aston(1985): ユーカリ林で 40 個の熱電対で葉、小枝、枝、幹の温度を様々な高さで測定 貯熱を評価。でも測定が大変だ。

Thom(1975):  $S_b=0.8M_{\text{veg}}\delta T_1$  バイオマスが小さく、幹が細い場合にのみ妥当。幹が太いと誤差が大きくなる。 $(M_{\text{veg}} \text{ バイオマス量(kg)} / \delta T_1 \text{ 気温変化(K hr}^{-1}\text{)})$  (訳注:  $S_b=0.8M_{\text{veg}}3600\delta T_{1\text{sec}}=2880 M_{\text{veg}}\delta T_{1\text{sec}}$  比熱  $c_m=2880\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

本論文: ブラジル、アマゾン熱帯雨林、限られた数点の温度計測から合理的に貯熱変化を推定する。

形態学的調査 物性(熱容量など)の分布を考慮する。

葉と小枝の温度は周囲の気温に完全追従と仮定。

上部群葉の日射による昇温は有意でない。(熱容量が微小)

幹と太い枝の貯熱は、気温の変化に応じて幹表面を通過する平均熱フラックスとして、計算する方法がある。気温を正弦波として計算した例(Denmead & Bradley 1985)

本研究では、気温と数点の幹温度を実測して計算する。

## 貯熱の見積り

$S=S_b+S_{bc}+S_T+S_q$  幹部、枝葉部、温度成分、湿度成分の和

温度成分:  $S_T=\rho_a C_p \int_0^h \frac{dT}{dt} dz$ 、湿度成分:  $S_q=\rho_a \lambda \int_0^h \frac{dq}{dt} dz$ 、

枝葉部:  $S_{bc}=C_m M_{\text{can}} \frac{dT}{dt}$ 、幹部:  $S_b=\int_0^h C(z) \frac{dT_b(z)}{dt} dz$

気温  $T$ 、比湿  $q$ 、枝葉の比熱  $C_m$  と面積あたりの質量  $M_{\text{can}}$

高さ毎の代表的な幹温度  $T_b(z)$  と熱容量  $C(z)$  が必要。

## 理論的背景

熱拡散方程式(幹表面と幹内部)

$$F=k \frac{dT_b}{dr} \Big|_{r=R} = h_c(T-T_s) \quad c_v \frac{dT_b}{dt} = k \left( \frac{d^2 T_b}{dr^2} \right) + \frac{k}{r} \left( \frac{dT_b}{dr} \right)$$

$F$ : 表面熱フラックス、 $h_c$ : 表面コンダクタンス、 $T_s$ : 表面温度、 $k$ : 热伝導率、 $c_v$ : 体積熱容量

フーリエ変換などして、ゴチャゴチャと解く…(中略)…と、幹直径 4cm 以下では殆ど直ちに気温に追従など…で、…

結局、 $C(z)=\frac{W_{C_v}}{A_s} \frac{dV}{dz}$  : 体積  $V$  プロファイルと占有面積  $A_s$  とバイ

オマス温度の不均一性を表現する無次元定数  $W$  で表現。

## 熱帯林の特性 Table1、Table2

毎木調査: タワーから半径 30 メートル円内の胸高直径 15cm 以上の 40 本について、樹高  $h$  と胸高直径  $dbh$  を測定。平均

$h=30.1\text{m}$ 、 $dbh=41\text{cm}$ 、幹表面積  $A=27\text{m}^2$ 、幹体積  $V=2.7\text{m}^3$ 。  
 $dbh<15\text{cm}$  の木の分を外挿し、 $A=3765\text{m}^2\text{ha}^{-1}$ 、 $V=372\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ 。

A と V のプロファイル Fig.1(c, d)

コアサンプル: 密度  $600 \sim 800\text{kgm}^{-3}$ 、重量含水比 50% 前後

木 1 本  $2.7\text{m}^3$  なら、 $3000\text{kg}$ 、1ha あたり  $372\text{m}^3$  なら  $410\text{t}$ 。

文献調査: 小枝の重量  $200\text{t ha}^{-1}$ 、葉の重量  $18\text{t ha}^{-1}$ 。

樹冠内の枝葉の密度:  $0.5\text{t ha}^{-1}\text{m}^{-1}$  ( $=50\text{gm}^{-3}$ )  $\times 25\text{m} = M_{\text{can}}$

$$\text{湿潤木材の比熱: } c_m = \left( \frac{c_0 + c_w m}{1+m} \right) + \Delta c$$

セルロースの比熱:  $c_0=4.85T+1113\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  (Skaar, 1972)

水の比熱:  $c_w=4184\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、補正項:  $\Delta c=335\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

平均  $T=25$  として、 $c_m=2650\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、 $c_v=2.9\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$

$k=[g(2.0+5.5m)+238]*10^{-4}\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  (Herrington 1969; Siau 1971)

密度  $g=750\text{kgm}^{-3}$ 、含水比  $m=0.5$  熱伝導率  $k=0.38\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

表面コンダクタンス  $h_c=(k_a B/d)Re^n$  ( $n=0.5$ ,  $B=0.79$  実験係数)

空気の熱伝導率  $k_a$  と幹直径  $d$  とレイノルズ数  $Re$  から計算可

誤差は大きいとしても、解析にはほとんど影響しない。

## 熱帯林貯熱の計算

高さ刻み 1m で計算。風速の相違  $0.5 \sim 4.0\text{ms}^{-1}$  は無視。

幹径バラツキが大きい樹冠中央部で水平平均効果が大きい。

**下部 25% で 40mm、中央部で 30mm、上部で 0mm 内部の幹温度変化の位相が貯熱変化の位相と一致(計算結果)。**

樹冠下部 80% 地点で  $W=0.5 \sim 0.6$ 、樹冠上部 20% でほぼ 1.0

標準木の 31mm 内部幹温度変化と気温変化の実測値 Fig.2

測器: quartz crystal thermometer プローブの大きさ約 4mm

センサーサイズによる温度変化の過大評価は 10% 以下で無視

位相の誤差(上部に対する下 2 つの時間遅れ)は 24 ~ 38 分

上部ほど幹温度日較差が大。気温日較差も上ほど大。

比率は、各高度とも気温日較差の 0.4 ~ 0.5 でほぼ一定。

熱容量  $C(z)$  の計算 Fig.1(e) (誤差 60%、 $c_v, k, V$  の誤差が大)

樹冠を 3 つの層 (0-8m, 8-18m, 18-41m) に分けて計算。

$C(z)$  を幹温度日較差で重み付け、各層ごとの熱容量  $C_i$  Table3

枝貯熱の誤差が 40%、葉貯熱は非常に小さい。

誤差評価: バイオマス貯熱の誤差は 50% + 幹温度測定誤差 10%、気温変化 + 湿度変化成分の誤差は 5% 以下。

## 結果

顯熱・潜熱フラックスの直接測定値から算定したエネルギー欠損(Rn-G-H-IE)と、本研究で算定した貯熱変化  $S$  Fig.3

朝方  $S$  が大。  $50\text{Wm}^{-2}$  ぐらい。たまに  $80\text{Wm}^{-2}$  超。  $Rn$  の 50% 超エネルギー欠損( $Rn$  の 5-10% 規模)の変化と良く一致する。

夜間は乱流フラックスが過小だから  $20 \sim 30\text{Wm}^{-2}$  程度  $S$  が大。

晴れた日の朝方に特に一致する。  $Rn$  が急変すると乖離する。

日平均値では、 $Rn$  の  $\pm$  数パーセント Fig.4

## 単純化したモデル Fig.5

$$S_T + S_q = 16.78Tr + 28.08q_r \quad S_b = 12.68Tr^*$$

( $T$ ,  $Tr^*$ : 樹冠上気温、および、1 時間前の樹冠上気温)

## 結論

樹高の高い植生においては、バイオマス貯熱変化  $S_b$ 、気温・湿度変化  $S_T \cdot S_q$  は、エネルギー収支に有意な寄与を持っている。

## 参考文献(引用文献にあらず)

渡辺力・大谷義一(1998)農業気象 54, 47-54

和田ら(2002) 京都大・農、森林研究 74, 69-76