

森林樹体の貯熱量の推定*

近藤 純正・中園 信・山崎 剛・桑形 恒男**

要 旨

植生地の熱収支を議論するとき、直接測定が難しく無視されることの多かった樹体による貯熱量の推定を試みた。まず樹体(幹)を円柱の組み合わせで表現し、その個々の円柱において熱伝導方程式を解くことにより、一般的な周期関数の表面温度変化に対する貯熱量およびその変化の特徴を求めた。

半日程度の貯熱量を推定する場合には表面温度の日変化は正弦関数を与えれば十分であり、さらに樹体を細い部分と太い部分の2つに分類するだけの近似法を用いても貯熱量は正しく表現できる。

代表的な森林樹体の貯熱量を計算してみると、日中 $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 程度に達することもあり、熱収支量としては無視できない大きさであることがわかった。

1. はじめに

植生地における熱収支は、植生の上端で次のように表される(近藤1984; 1989)。

$$R - G = \sigma T_s^4 + H + LE \quad (1)$$

$$R \equiv (1 - \text{ref}) S \downarrow + L \downarrow$$

ここで R は入力放射量、 G は地表面が単位時間に貯える熱量(以後これを貯熱量と呼ぶ)、 σT_s^4 は地表面の放出する赤外放射量、 H は顕熱輸送量、 LE は潜熱輸送量、 $S \downarrow$ は水平面日射量、 $L \downarrow$ は下向き大気放射量、 ref は地表面アルベドである。なお、簡単化のために地表面は黒体と仮定した。式(1)は、左辺が与えられたとき、右辺の各熱収支量の配分比および地表面温度 T_s を知るときの基本式である。われわれはこの基本式を用いて、気候を決定する重要なパラメータである熱収支配分比が、地表面の状態によってどのように変化するかを明らかにするための研究を行っている。

さて、植生に覆われた地表面の貯熱量 G は

$$G = Q_g + Q_a + Q_w + Q_v + Q_p \quad (2)$$

と表すことができる。 Q_g は土壌内の貯熱(いわゆる地

中伝導熱)、 Q_a 、 Q_w はそれぞれ植被層内大気の顕熱貯熱および潜熱貯熱、 Q_v は植物体による貯熱、 Q_p は光合成に使われる熱量である。 G は長時間にわたって平均すると小さいが、数時間の熱収支を議論するときには重要で、気温変化が大きいときは $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上にもなることがある(Kondo *et al.*, 1989)。また日出、日没などには R が σT_s^4 にほぼ等しく、相対的に G が重要となる。

正味放射量 $R_n \equiv R - \sigma T_s^4$ にある係数をかけて地表面の貯熱量を表す方法が用いられることもあるが、その係数は地形や植生によって異なるはずで、その方法は汎用性がない。

森林のように背の高い植生では、特に植物体の温度変化にエネルギーが費やされる。しかし、実際にこの貯熱量 Q_v を観測から求めることは、植物体温度の測定値の正確さや代表性などに問題があり、非常に困難である。そのためこれまでの植生地における熱収支の研究で植物体の貯熱を独立に評価しているものは少ない(例えば Stewart and Thom, 1973; McCaughey, 1985; McCaughey and Saxton, 1988)。そこで本研究では、樹木を円柱の組み合わせで表現する簡単なモデルを用いて、理論的に植物体の貯熱量 Q_v の推定を行った。

2. 円柱の貯熱量の推定モデル

2.1 円柱モデル

まず、半径 a の一本の円柱に対して単純な周期関数の

* Heat Storage in Forest Trees

** Junsei Kondo, Makoto Nakazono, Takeshi Yamazaki and Tsuneo Kuwagata, 東北大学理学部地球物理学教室

——1990年7月3日受領——

——1990年11月6日受理——

表面温度変化を与える場合を考える。

円柱内で比熱 C 、密度 ρ 、熱伝導率 λ は一様で、かつ熱の移動は半径方向にのみ起こると仮定する。円柱内で中心からの距離 r での時刻 t の温度を T とすれば、円柱座標系における熱伝導方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3)$$

$$\kappa \equiv \lambda / C\rho$$

となる。ここで κ は温度拡散係数である。

境界条件として、 $r=a$ で、

$$T = T_a \exp(i\omega t) \quad (4)$$

$$\omega \equiv 2\pi/\tau$$

とする。 T_a は表面での温度変化の振幅、 ω は角振動数、 τ は周期である。貯熱量は温度変化率に依存し、温度の絶対値は意味を持たないため、ここでは一周期の平均温度をゼロとした。

これに対する解析解は例えば小平 (1933) によって既に与えられているが一般的な関数ではないので、ここでは数値解を求めることにする。計算の技術上の問題から中心である振幅の正弦変化を与え、中心から表面に向かって計算する方法をとる。すなわち中心における温度変化を次式のように仮定する。 $r=0$ で、

$$T = T_0 \exp\{i(\omega t - \varphi)\} \quad (5)$$

ここで T_0 は中心での温度振幅、 φ は表面温度変化との位相差である。このとき円柱内の温度 T は中心からの距離 r と時刻 t の関数として表すことができ、

$$T(r, t) = T_0 F(r) \exp\{i(\omega t - \varphi)\} \quad (6)$$

ここで $F(r)$ は半径方向の構造関数である。

また中心では温度勾配はゼロなので、 $r=0$ で、

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (7)$$

まず、 $F(r)$ を求めよう。式 (6) を式 (3) に代入すれば $F(r)$ に関する方程式

$$\frac{d^2 F}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} \left(-\frac{i\omega}{\kappa} \right) F = 0 \quad (8)$$

を得る。 F_r 、 F_i をそれぞれ $F(r)$ の実部、虚部とすれば、式 (5)、(6) より $r=0$ で、

$$F_r = 1, F_i = 0 \quad (9)$$

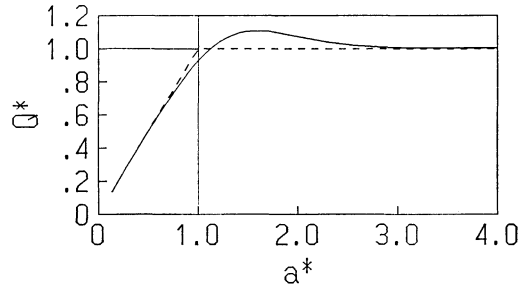
であり、また式 (7) より $r=0$ で、

$$\frac{dF_r}{dr} = 0, \frac{dF_i}{dr} = 0 \quad (10)$$

である。式 (9)、(10) の条件を用い、式 (8) を数値的に中心から表面に向かって解く。

式 (4)、(6) より、表面 $r=a$ で、

$$T_a \exp(i\omega t) = T_0 F(a) \exp\{i(\omega t - \varphi)\} \quad (11)$$



第1図 円柱の半径と単位表面積当たりの貯熱量の関係。横軸 a^* は無次元半径、縦軸 Q^* は最低温度時～最高温度時の間の単位表面積当たりの無次元積算貯熱量。実線は2.1節の計算、破線は2.2節の近似を表す。

これを満たすように T_0 、 φ を決定すれば、式 (6) により円柱内の温度場が表されることになる。

最後に表面での温度勾配を用いて、次式により円柱の単位表面積当たりの貯熱量を次式より求める。

$$Q_0 = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=a} \quad (12)$$

以上のようにして表面温度変化が単純な周期関数の場合の貯熱量を計算することができる。複雑な表面温度変化の場合にも、フーリエ成分に分解して各周波数ごとに計算し、合成することで貯熱量を見積もることができる。

2.2 半径と貯熱量の関係

基本的な性質を知るために、一本の円柱に対して周期 τ 、振幅 T_a の正弦関数の表面温度変化を与えた場合について計算した。第1図の実線は貯熱量と半径の関係である。ただし、

横軸 a^* : 半径 a を $a_0 = \sqrt{2\kappa/\omega}$ で無次元化、

縦軸 Q^* : 最低温度時～最高温度時の間の単位表面積当たりの貯熱量積算値を $Q_0 = T_a \sqrt{2C\rho\lambda/\omega}$ で無次元化した量

である。第1表の熱物理想数を用いれば、周期 $\tau = 1$ 日のとき $a_0 = 6.8$ cm、 $Q_0 = 0.16 \times T_a$ MJ $\cdot$ m $^{-2}$ (T_a の単位は $^{\circ}$ C) となる。次に a_0 、 Q_0 の物理的な意味を説明しよう。

円柱の半径を無限大にした場合、その表面を平面とみなすことができる。 z 座標を表面から垂直に内向きにとると、熱伝導方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (13)$$

となる。式 (4) と同様の条件のときの解析解は、よく知

られているように

$$T(z, t) = T_a \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} z\right) \exp\left\{i\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} z\right)\right\} \quad (14)$$

となり、温度振幅が表面での振幅 T_0 の $1/e$ となる深さ $\sqrt{2\kappa/\omega}$ が a_0 である。またこの場合の最低温度時～最高温度時の間の貯熱量積算値が Q_0 である。

第1図の実線から、半周期間の積算貯熱量 Q^* は、ずっと大きな半径の場合よりも、 a_0 より少し大きい程度の半径 (a_0 の 1.1～3 倍) の場合の方が大きいことがわかる。半径が有限であることと、円柱である効果がこのことを特徴づけていると考えられる。

さて、 a^* が大きくなればもちろん Q^* は 1 に近づき、逆に a^* が小さくなれば熱容量に規定されて Q^* は小さな値になる。そこで、 $a^*=1$ をしきい値として次のような近似を考えることができる。

- (i) $a^* < 1$ の場合、近似的に円柱の芯まで等温的に変化するとみなす。
- (ii) $a^* > 1$ の場合、半径無限大すなわち“平面”と同等とみなす。

このとき Q^* は第1図の破線で表される。

3. 森林への拡張

3.1 一本の木

ヒノキなどの樹木の幹の形はほぼ円錐形であることが知られている (例えば森川, 1974)。地面からの高さ z と半径 a の関係を

$$a(z) = a(0) - Kz \quad (15)$$

とする。ここで $a(0)$ は $z=0$ での半径だが、林学の分野ではむしろ DBH (胸高直径: ここでは $z=1.2$ m での直径) が用いられており、 DBH と木の高さ h が与えられたとき

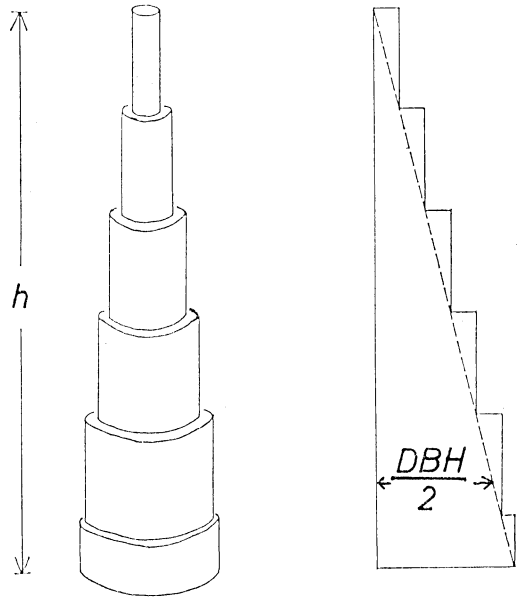
$$K = \frac{DBH/2}{h-1.2} \quad (16)$$

$$a(0) = K \cdot h \quad (17)$$

である。

この円錐形を円柱の組み合わせで表す (第2図)。実測されたヒノキの体積と比較すると、円錐形の体積は過小となることが多い。従って第2図のように円柱 (実線) は円錐 (破線) の外側にとることとした。円柱の半径は頂部から下に向かって 1 cm ずつ大きくした。

枝葉 (幹以外の地上部分) はその形状から考えて芯まで全部が気温と共に温度変化しているとみなされる。そ



第2図 円柱の組み合わせで表された木のモデル。

第1表 計算に使用した熱物理定数と森林の形態。

比熱 C	3.0×10^3	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
密度 ρ	0.8×10^3	$kg \cdot m^{-3}$
熱伝導率 λ	4.0×10^{-1}	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
胸高直径 DBH	0.187	m
平均樹高 h	14.1	m
植生密度	1325	本/ha
枝葉の割合	19.7	%

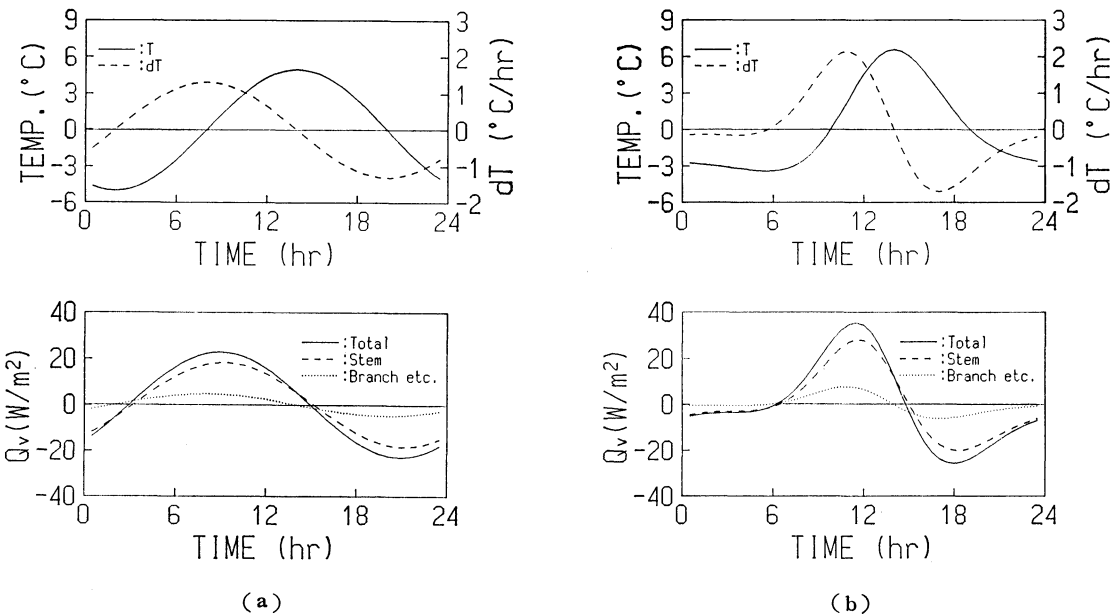
の貯熱量 Q_b は

$$Q_b = m_b C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

ここで m_b は単位地表面積当たりの枝葉の質量である。日本の人工林での実測によれば、 m_b は地上部全体の質量の10～20%である。もちろん木の種類や季節などの条件によってこの割合は異なる。

3.2 実際の森林への適用

いくつかの気温変化を用いて、国内の人工のヒノキ林にこのモデルを適用する。計算には、 C , ρ , λ の代表値、および Morikawa *et al.* (1986) による胸高直径などの測定値を用いる (第1表)。表面温度変化および計算結果を第3図(a)(b)に示す。図の横軸は時刻、縦軸は単位地表面積当たりの貯熱量である。表面温度変化は



第3図 森林樹体の貯熱量日変化の計算例。振幅 $T_a=5^{\circ}\text{C}$ の (a) 単純な正弦関数の表面温度変化の場合、(b) 典型的な表面温度変化の場合。上段の表面温度変化を与えることにより下段の貯熱量を得る。上段の実線：表面温度、破線：温度変化率。下段の破線：幹の部分の貯熱量、点線：幹以外の部分の貯熱量、実線：合計

(a)単純な正弦関数の日変化、
(b)(a)よりも現実的な、武政ら(1988)の提案する式を参考にした日変化、
の場合である。また時刻は最高温度が14時になるように合わせている。このように表面温度変化パターンに対して貯熱量の日変化を得ることができた。

(a)に比べ(b)では06時~12時での温度変化率が大きく、それに対応して貯熱量も $30\sim40\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ と大きくなっている。このように、短い時間スケールの貯熱量を議論する際に樹体貯熱量 Q_v は重要となる。また幹の貯熱量の変化(破線)は幹以外の部分の変化(点線)に比べて約1時間位相が遅れている。

表面温度最低時~最高時の積算貯熱量は(a)(b)ではほとんど違いがなく約 $0.6\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ である(第2表)。従って半日程度の貯熱量を問題にする場合は、表面温度変化は周期1日の正弦関数を用いれば十分である。さらにその貯熱量の推定に前述の近似(第1図破線)を用いてみた。すなわち、半径が $a_0(=6.8\text{ cm})$ より小さい幹の部分はその体積に熱容量と気温日較差をかけ、 a_0 より大きい部分はその表面積に Q_0 をかけて貯熱量とする方法である。この簡単な近似計算でもおおむね妥当な数値を

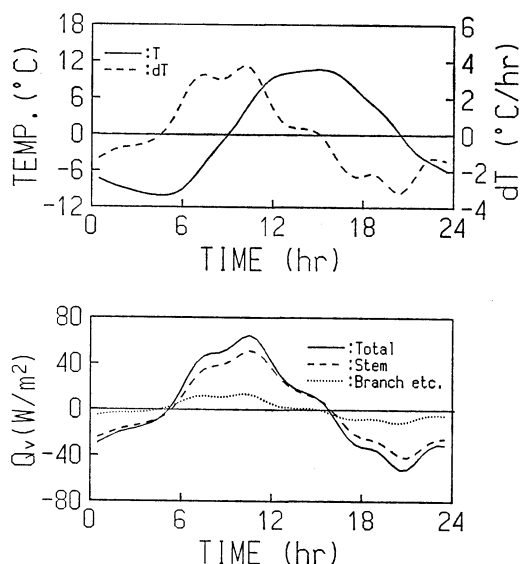
第2表 人工林の樹体貯熱量の計算値。
(気温最低時から最高時までの積算値)

	a	b	c	d
積算 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	0.61	0.60	0.58	1.31
(平均 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	(13.5)	(18.6)	(13.4)	(33.1)

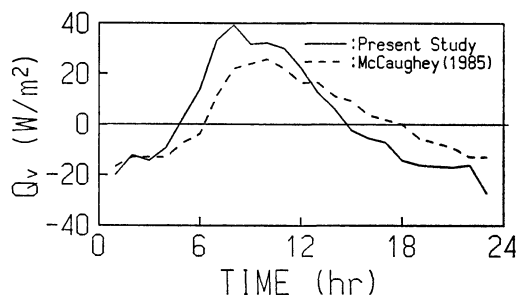
- a: 正弦関数の温度変化を与えたとき
- b: 典型的な温度変化を与えたとき
- c: aで近似(第1図破線)を用いたとき
- d: 会津の地上気温変化(1987年4月28日)を与えたとき

得ることができた(第2表c欄)。

次にこの森林に対して、表面温度が地上気温と等しいと仮定して会津盆地で実測された地上気温変化(Kondo et al., 1989)を与えて計算を行った(第2表d欄)。ただし気温の測定場所は森林の中ではないので、この計算は狭い森林の場合に相当する。春季の弱風晴天日の盆地の気温変化は、日較差が大きく、また夕方遅くまで気温の高い状態が続くという特徴を持っている。時間変化を第4図に示すが、 Q_0 の最大値は11時に $70\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ にも達している。このときの R_n は約 $550\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった



第4図 森林樹体の貯熱量日変化の計算例。ただし植物体の表面温度が気温に等しいと仮定して、1987年4月28日に会津盆地において実測された地上気温の変化を与えた場合、各線の意味は第3図と同じ。



第5図 McCaughey (1985) のデータに基づく計算。実線は本モデルによる計算、破線は McCaughey (1985) による。

から、 Q_v は R_n の約13%にもなり、地表面の熱収支を評価する際に重要となることがわかる。

最後に、樹体の貯熱量の観測値 (McCaughy, 1985) との比較を第5図に示す。McCaughy (1985) では太い木の表面から 10 cm 内部の樹体温度を測定し、これを植生全体の温度として貯熱量を計算している。一方、本モデルでは地上 3.05m での気温を樹体表面温度として計算した。全体の傾向はよく再現されているが、いくら

か振幅、位相に差がみられる。これは McCaughey (1985) の計算で、樹体内部の温度を植生全体の代表として用いていることに原因があると考えられる。

4. 今後の課題

本論文では植物体の表面温度は高度によらないと仮定して計算を行った。しかし実際には、植物体の表面温度は植生内の熱収支によって決まり、高さ方向に分布を持っている。今後は本研究の方法を植生の熱収支モデルと組み合わせて、植物体の表面温度の高度変化も考慮した Q_v の推定、さらに植被層内の貯熱量 (Q_g および Q_b) も考慮した森林の熱収支各項の評価を行っていく予定である。これによって、例えば植生の頂部の温度を人工衛星から測ることで、土壌を含む植被層全体の貯熱量を求め、植生のある地表面の熱収支のパラメータ化を行いたい。

文 献

- 小平吉男, 1933: 物理学第2巻, 岩波書店, 539-543.
- 近藤純正, 1984: 複雑多様な地表面の熱収支—研究の指針—, 天気, 31, 573-581.
- , 1989: 平衡蒸発量と地表面蒸発, 水文・水資源学会誌, 2, 25-32.
- Kondo, J., T. Kuwagata and S. Haginoya, 1989: Heat budget analysis of nocturnal cooling and daytime heating in a basin, *J. Atmos. Sci.*, 46, 2917-2933.
- McCaughy, J.H., 1985: Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario—a case study, *Boundary-Layer Meteor.*, 31, 89-101.
- , ——, and W.L. Saxton, 1988: Energy balance storage terms in a mixed forest, *Agric. For. Meteor.*, 44, 1-18.
- 森川 靖, 1974: ヒノキの樹液の流れ—林木の水分収支と関連して—, 東大演習林報告, 66, 251-297.
- Morikawa, Y., S. Hattori and Y. Kiyono, 1986: Transpiration of a 31-year-old *Chamaecyparis obtusa* Endl. stand before and after thinning, *Tree Physiology*, 2, 105-114.
- Stewart, J.B. and A.S. Thom, 1973: Energy budgets in pine forest, *Q.J.R. Meteorol.*, 99, 154-170.
- 武政剛弘, 長 智男, 黒田正治, 藤田広章, 1988: 乾砂層内の温度日変化の新しい表現法, 農業気象, 43, 305-310.