

群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答

1. 赤松群落内外の温度場の特徴

Dynamic response of a Red pine canopy to
changes of the outside environment

1. Characteristics of temperature field
within and above a Red pine canopy

林 陽生*・原 菌 芳信**・那須野正明***・鳥谷 均****
Yousay HAYASHI, Yoshinobu HARAZONO, Masaaki NASUNO,
and Hitoshi TORITANI

I まえがき

植物群落の周囲には固有の環境が形成されている。この環境を計測することによって、群落固有の機能を適切に評価すると同時に、その有効利用を図るために、基礎的な知識の蓄積が必要である。

植物群落と環境に関する課題はこれまで数多く取り上げられ、群落の種類と構造が環境と密接に関係することが指摘されている。しかし少し詳細に考えると、これに加えて、同種の群落でも外的環境変化によりその構造自体が変化する効果等をも評価する必要があると思われる。

そこで、これらの点を明らかにするための基礎として、赤松群落を対象とした気象観測を実施した。植物群落が外的な気象変化に対して、機械的あるいは植物生理的にどのように反応するかといった点に注目し、解析をおこなった。

本論では、赤松群落内外の温度場の特性を示すとともに、群落上の気温変化によって起こる群落内気層および樹幹部の貯熱量について予察的な考察を

おこなった結果を示す。

また、最近CO₂濃度上昇やそれによる地球規模の気温上昇が大きな問題となってきた。森林が、地球環境変化に対してどのように関わっているか、また将来予想されている気候変化シナリオに対して森林自体がいかに反応する能力を保有しているかといった点については、引続き農業環境技術研究所と筑波大学水理実験センター間の共同観測により解析が進むことを期待する。

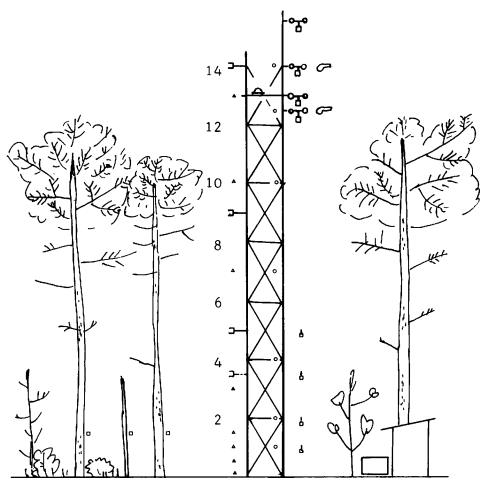
II 測定対象群落の概要と測定方法

1) 赤松群落の特徴と測定値の取り扱い

筑波大学水理実験センターの南側に位置する赤松群落(東西200m, 南北100m)を測定対象とした。この赤松群落の構造については、杉田ほか(1986)、杉田・古藤田(1987)の詳細な調査がある。それ等によると、群落の平均高度は12.5m, 立木密度は27本・100m⁻²で、観測を実施した10月下旬から11月上旬における葉面積指数は約3である。

群落内および群落直上の諸要素の測定には、群落

*農業環境技術研究所・気象管理科(現:四国農業試験場・生産環境部) **農業環境技術研究所・気象管理科 ***筑波大学・院・地球科学研究科(現:芙蓉情報センター) ****筑波大学・水理実験センター(現:防衛大学校)



- Trunk Temp.
- Air Temp.
- Soil Temp.
- ♣ Wind Speed
- Fluctuation (Velo. & Temp, SAT)
- ☉ Wind Speed (Cup)
- ☒ Dry & Wet B. Temp.
- ▲ Short Wave Rad.
- Gas Inlet

図1 赤松群落における測定方法の概要
数字は設置高度を示す。

のほぼ中央に立てられた高さ15mの鉄塔を利用した。この鉄塔は杉田・古藤田 (1984), 杉田ほか (1986) が使用したものと同一である。また, 群落外の気象要素としては, 鉄塔の約150m北側に位置する水理実験センター熱収支・水収支観測施設気象観測塔 (古藤田ほか, 1978) における測定値を使用した。

2) 測定要素と方法

観測は1988年10月27日から11月11日の16日間実施した。測定項目, 感部の種類と形式, 設置位置, 記録媒体を表1に, また鉄塔への取り付け方法の概略を図1に示す。

群落内の気温は, C-C熱電対の接点に簡単な日除けカバーを取り付けた感部で測定した。群落上では, 通風乾湿計にて乾湿球温度を測定した。これは, 湿球部にセラミックカップを使用したものである (原菌・矢吹, 1986)。地温は内径3mmのアルミ管に熱電対を挿入し, シリコン系樹脂を充填した防水型感部を使用した。樹木の温度は, 胸高直径が22.1, 11.5, 8.0cmの3本の赤松の地上1.5m, 表皮下1cmに熱電対を埋め込み測定した。

風速については, 群落内では熱線風速計

表1 測定要素とセンサーの種類, 設置高度, 記録媒体

要素	気温	地温	幹球・湿球温度	樹木温度	群落上風速	群落内風速	風速・温度微変動	風向	日射量	炭酸ガス濃度 水蒸気濃度
シンボル	T	T_s	T_b, T_w	T_v	U	U	u, v, w, θ	D	R_s	c, q
センサー種類, 形式	熱電対 (C-C)	熱電対防水型 (C-C)	熱電対通風式 (C-C)	熱電対 (C-C)	風杯型光電式	熱線型	超音波風速温度計	矢羽型光電式	日射計	赤外線吸収式
設置高度	12.5m	1cm	14.0m	1.5m	15.5m	5.1m	14.0m	15.5m	13.0m	13.5m
深度	10.5	3	12.4		14.0	3.5	8.7			
	7.0	5			13.0	2.0	5.0			
	5.0				12.4	1.0	3.4			
	3.0									
	1.5									
	1.0									
	0.5									
	0.1									
記録媒体	HB	HB	FD	HB	FD	FD	AMT	FD	AMT, FD	AMT

HB: ハイブリッドレコーダチャート, FD: フロッピーディスク, AMT: アナログ磁気テープ

(KANOMAX1000型)と小型3次元超音波風速温度計(海上電機WAT-395, スパン長5cm)を, 群落上では3杯型光電式風速計(牧野応用測器AF-750S)と3次元超音波風速温度計(海上電機WAT-310, スパン長10cm)を使用した. 特に超音波風速温度計は, 群落内外の乱流構造測定のために小型のものを用いた. また, 群落上の卓越風向を光電式風向計(牧野応用測器VF-016)で測定した.

この他, 赤外線吸収式CO₂・H₂Oガス分析器(アドバンスシステムE-009)および日射計(石川産業S-140)を群落の直上に設置して, 炭酸ガスフラックスと日射の変動を測定した.

これらの測定値は, 表1に示した記録媒体を用いて収録した. 熱収支・水収支観測施設の気象観測値は, 群落外の気象を説明する場合の基準値として使用した.

本論の解析に用いた値は, ハイブリッドレコーダに記録された1時間毎の数値を読み取り, データファイルに収録したものである.

III 観測期間中の気象の概要

10月27日から11月11日における代表的な気象要素の日平均値の変化を図2に示す. 日照時間は約10km南に位置する農業環境技術研究所の値を, 風速と気温は熱収支・水収支観測施設気象観測塔の高さ30mの値を示す. また, 降水量は同施設観測圃場における測定値を示す.

10月28日は, 日中の最大日射量が $83.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 地上付近の日平均気温が 13.2°C で日照時間が比較的小短くかつ弱風となった. 20時から23時にかけて 2.5mm の降水があった. 11月10日は快晴となり最大日射量が $485.9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 気温が 12.2°C となった. 以下の第4, 5章では, 曇天の場合には前者を, 晴天の場合には後者を典型的な例として取り上げる. 一方, 第6章の林内の貯熱に関しては, 観測全期間の測定値を使用して解析をおこなった. また, 第6章では単位体積当りの熱の出入りにつき議論するため, フラックスの概念の代わりに貯熱(熱エネルギーが貯えられる場合に正)の概念を使って議論することにする.

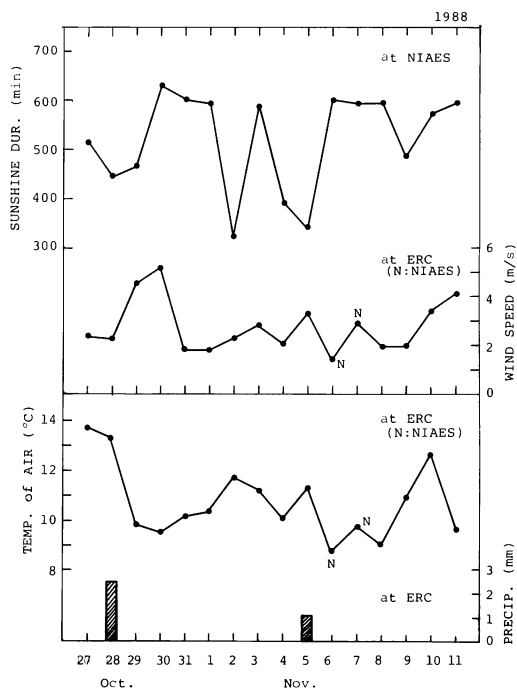


図2 代表的要素の日平均値の変化
ERCは水理実験センター, NIAESは農業環境技術研究所における値を示す.

IV 気温, 地温の時間一高さ分布に現れる特徴

10月28日と11月10日前後の期間における群落内外温度および地温のアイソプレスを図3, 4に示す. 縦軸は高さを横軸は時間を示す. 両図の上端の気温の値は, 気象観測塔における測定値を示す.

図中の影を付けた部分は, これまでの調査結果から葉面積密度が特に大きな領域である. すなわち, この付近が葉層となっている. 一方, 7mより下層では葉が繁っている割合は非常に少ない. そこで, 以後本論では, 高さ7-12.5mの領域をL層(leaf layer), 1-7mの領域をT層(thank layer)と呼ぶことにする. 1m以下の層は低木が生えているため, T層とは区別する.

日中L層で気温が高くなる特徴が図3, 4に現れている. 10月28日, 11月10日も13時頃に 20°C 以上となり, T層気温との差はほぼ 2.5°C となった. このため群落直上の大気の成層状態はほぼ中立であるが, 群落内では安定成層となる. この傾向は他の種の植

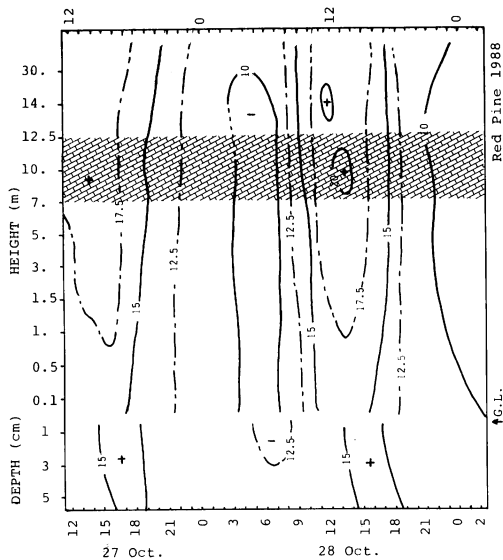


図3 群落内外の気温、地温のアイソプレス（10月27日—28日）影の部分は赤松群落の葉層を示す。GLは地表示す。単位は°C。

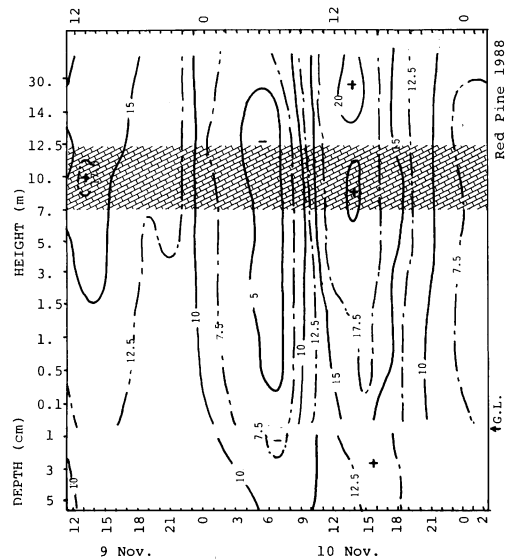


図4 前図に同じ（11月9日—10日）

物群落でも認められており（依田，1974；Kashiwagi，1984），日中における一般的な特徴と考えられる。

L層からT層に向かって，相対的な高温域が約1時間の位相で伝播している．この現象は地中でも明瞭に現れており，ほぼ2時間で5cmの深さまで高温域が伝播している。

夜間は，群落内全層で気温が下降する．これは，11月10日の0時から9時にかけて顕著に現れている．林床に近いほど気温が高く，弱い不安定成層が形成されている．深さ1cmの地温は6時30分頃最低となり，低温域が下方へ伝播している．これらの特徴は晴天の場合に顕著に現れる．

群落内の地表付近で日中には安定成層，夜間には不安定成層となるのは，裸地上の接地境界層とは異なる特徴である．この点，群落内の気流の植物生態学的意義を考える場合，また群落内の外と空気循環を考える場合に注目すべき現象である．

V 群落直上の気温と群落内気温，樹幹温度，地温との関係

群落直上における気温 (T_{14} ，高さ14m) とL層，T層の気温 (T_{10} ，高さ10m； $T_{1.5}$ ，高さ1.5m)，直径11.5cmの樹木の樹幹部表皮温度 ($T_{V11.5}$) および深さ1cmの地温 (T_{S1}) との関係を図5，6に示す．図中の添え字は時刻を表す．前図は曇天時の，後図は晴天時の代表的な場合である．

まず第1の特徴として， T_{14} の変化に対して各要素にヒステリシス的な変化が現れている．この現象は，晴天の場合に樹幹温度との関係において最も顕著に現れている．これは熱容量の異なる層へ熱エネルギーが伝わる過程として考えることができる．興味あるのは，T層の気温あるいは僅かであるがL層気温との関係にも同様の現象が認められる点である．大気中で熱エネルギーが輸送される過程は乱流混合が主であるが，群落内では樹木が熱の吸湧源になる効果が大きいため，ヒステリシス的な変化が現れるものと考えられる．

T_{14} に対する平均的な変化率は， $T_{1.5}/T_{14}=0.82$ ， $T_{V11.5}/T_{14}=0.42$ ， $T_{S1}/T_{14}=0.30$ となった．これらの変化率は，晴天日の場合に大きな値となる．

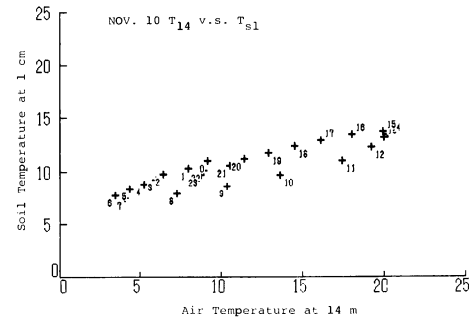
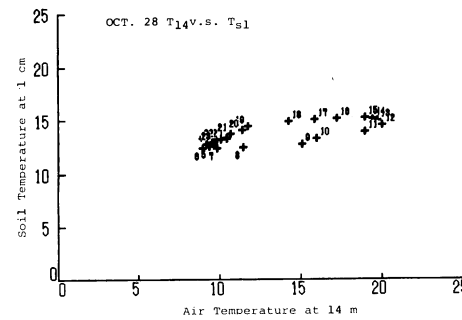
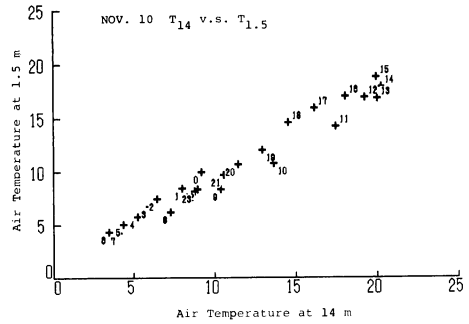
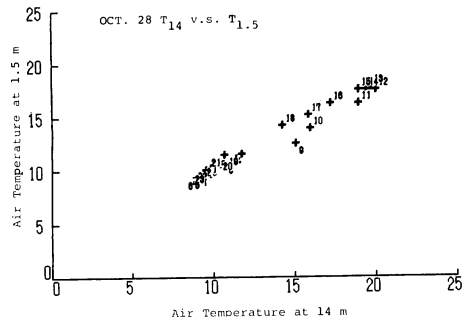
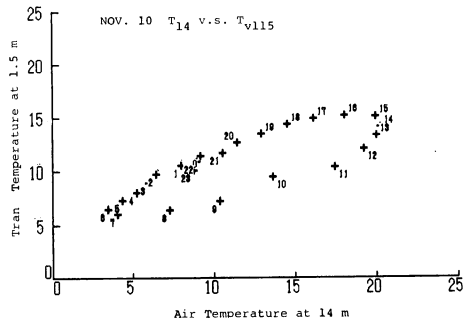
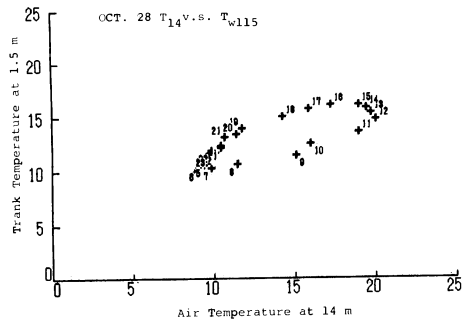
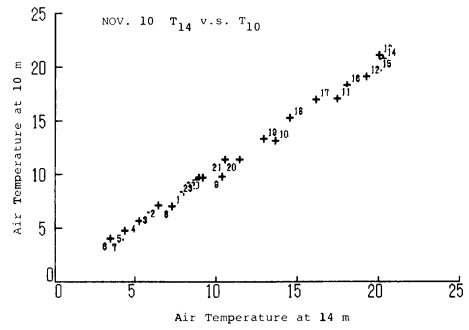
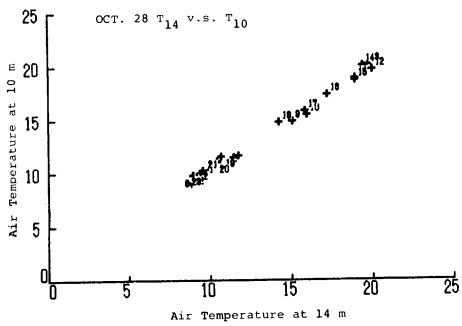


図5 群落直上気温に対する各温度の散布図(曇天日)
 T_{14} : 群落直上の気温, T_{10} : 葉層の気温, $T_{1.5}$: 樹幹層の気温, T_{v115} : 樹木表皮の温度, T_{s1} : 深さ1 cmの地温

図6 前図と同じ(晴天日)

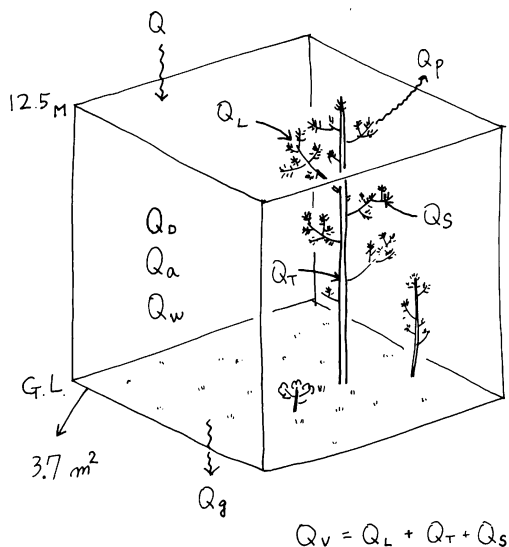


図7 群落内の熱収支モデルの概略
 Q : 群落上面を通したエネルギーフラックス,
 Q_0 : 土壌貯熱, Q_a : 気層の顕熱貯熱, Q_w : 潜熱貯熱,
 Q_v : 植物体の貯熱, Q_b : 光合成貯熱, Q_L : 葉部の貯熱,
 Q_T : 幹部の貯熱, Q_S : 枝部の貯熱

日平均値についてみると、晴天日の樹幹温度は曇天日のそれよりも 2.2°C 低くなっている。一方、群落上の気温差は 1.7°C 低い。 0.5°C の温度差は、晴れた夜間の場合に樹幹表面の温度が放射冷却によって下降する割合が大きいため起こるものと考えられる。

温帯林の群落内気温は、外気温と比較して日較差が小さくなる傾向がある (Kittredge, 1948)。今回の赤松群落では約 2°C 小さくなった。また、群落内外の平均気温の間には顕著な差は認められなかった。

VI 群落内の気層への貯熱

群落内への顕熱エネルギーによる貯熱量を推定するため、線形エネルギー収支モデル (Geiger, 1973) の概念を、今回の赤松群落の場合に当てはめた。モデルの概要を図7に示す。最近、McCaughey and Saxton (1988) は胸高直径 11cm 、高さ 15m 程度のカエデを優占種とした混交林に対してこのモデルを当てはめている。ちなみに今回の赤松林の平均群落高は 12.5m 、胸高直径は約 12.4cm である。

モデルの基本となる群落上面におけるエネルギー

収支式は、

$$R_n = H + IE + Q \quad (1)$$

ここで、 R_n は正味放射フラックス、 H は顕熱フラックス、 IE は潜熱フラックス、 Q は群落内へのエネルギーフラックスである。 Q を単位体積当りの貯熱量の概念 Q_{down} に置き換え、各項に分解すると、

$$Q_{\text{down}} = Q_g + Q_a + Q_w + Q_v + Q_b \quad (2)$$

Q_g は土壌の貯熱項、 Q_a は群落内の気層の顕熱貯熱項、 Q_w は同じく潜熱貯熱項、 Q_v は植物体への貯熱項、 Q_b は光合成による貯熱項を示す。さらに、植物体に関する項は、樹幹、葉、枝の各項に分けることができるであろう。

このモデルを赤松群落に適用して、群落内のT層の気層の貯熱項 (Q_a) および樹幹の貯熱項 (Q_v) が、林外気温の変化とどのような関係にあるかにつき考察する。各項は次式で定義することができる。

$$Q_a = \int_{z_1}^{z_2} \rho C_p \left(\frac{d \langle T \rangle}{dt} \right) dz \quad (3)$$

$$Q_v = \int_{z_1}^{z_2} \rho_v C_v \left(\frac{d \langle T_v \rangle}{dt} \right) dz \quad (4)$$

ρ は空気密度、 C_p は空気比熱、 $\langle T \rangle$ はT層の平均気温、 ρ_v は樹幹部の密度、 C_v は樹幹部の比熱、 $\langle T_v \rangle$ は樹幹部の平均温度である。 t は時間、 z_1 は 1m 、 z_2 は 7m とする。ここで、 $\langle T_v \rangle$ は T の変化に対し1時間で平衡温度に達するものと仮定する。また、樹幹部の密度は実測により $\rho_v = 0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、比熱は水の70%として $C_v = 3\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ とする。(3)、(4)式を使い観測全期間の Q_a および Q_v を求めた。

群落直上の気温変化率 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hour}^{-1}$) と Q_a ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hour}^{-1}$) との関係を図8に示す。両者の間には直接関係が認められ、群落外の気温変化率を差分の形で表すと次式となる。

$$Q_a = 2.3 \frac{\Delta T_4}{\Delta t} + 0.14 \quad (5)$$

ここで、相関係数は 0.718 となった。これより、外気温が1時間当たり 1°C 上昇すると群落内T層空気塊に約 $2.3\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hour}^{-1}$ のエネルギーが貯えられることがわかる。この値を単位変換すると、 $6.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と

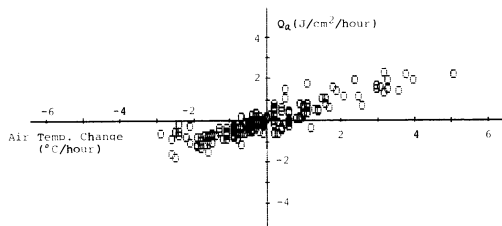


図8 群落直上気温変化と群落内樹幹層の貯熱量の関係

なる。単位体積当りの貯熱量 Q_a に対する Q_v の比は、 $Q_v/Q_a=0.012$ となった。立木密度が増せば、この値は大きくなると考えられる。

McCaughey and Saxton (1988) は、夏期(7, 8月)におけるカエデ群落に関して、外気温が 1°C 変化すると(Q_a+Q_v)の値が約 $16.3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 変化するという結果を示している。今回の赤松群落の場合にはその値のほぼ0.4倍となった。これは、主として観測季節の違いや群落構造の差異によるものと考えられる。

VII まとめ

赤松群落内外で10月下旬から11月上旬にかけて気象要素の観測を実施した。典型的な曇天日と晴天日について群落上-群落内-地中温度のアイソプレスおよび散布図を作成して、温度場の特性につき解析した。その結果、(i)最高気温は14時頃、群落内L層に現れる。この時刻にはT層下部付近の気温がL層に比較して相対的に低くなり、群落内には安定層が形成される。(ii)6時頃、群落内全体で気温が下がり、最低気温が現れる。この時刻には林床近くで弱い不安定層が形成される。(iii)群落内地温は林床の気温に調和した日変化を示す。地中への温度の伝播速度はほぼ $2.5\text{cm}\cdot\text{hour}^{-1}$ である。(iv)群落上の気温が 1°C 変化するとT層気温は約 0.8°C 、樹幹部温度は 0.4°C 、地温は 0.3°C 変化する。

次に、群落上の気温変化と群落内の貯熱量の関係について解析した。その結果、(v)群落上の気温が $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{hour}^{-1}$ の割合で変化すると、T層の気層には $6.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ のエネルギーが貯えられる。樹木幹部への貯熱量は気層への約1%と非常に小さい。

謝辞

赤松群落の共同観測を実施するに際して、筑波大学水理実験センター長河村 武教授に多方面のご配慮を頂きました。また、同センター川村隆一氏には測器の設置を、名漢学園米山なおみさんにはデータ整理をお願いした。このほか、農林水産省森林総合研究所気象研究室の皆様に対して感謝の意を表します。

文献

- 古藤田一雄・佐倉保夫・林 陽生・甲斐憲次 (1978): 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ収録処理について。筑波大学水理実験センター報告, 2号, 65-89.
- 杉田倫明・古藤田一雄 (1984): ポーエン比・熱収支法と渦相関・熱収支法によるアカマツ林冠上の潜熱フラックスの測定。筑波大学水理実験センター報告, 8号, 83-7.
- 杉田倫明・古藤田一雄 (1987): アカマツ林の葉面積指数の季節変化。筑波大学水理実験センター報告, 11号, 111-112.
- 杉田倫明・山下孔二・古藤田一雄 (1986): アカマツの形態構造。筑波大学水理実験センター報告, 10号, 47-52.
- 原蘭芳信・矢吹万寿 (1986): 傾斜地の大規模ブドウハウスの内部微気象環境と施設が周辺環境に及ぼす影響。日本生命財団研究助成報告, p.162.
- 依田恭二 (1974): 森林の生態学。築地書館, p.331.
- Geiger, R. (1973): *The climate near the ground*. Harvard Univ. Press., p. 611.
- Kashiwagi, Y. (1984): Microclimate of the successional stands from *Miscanthus sinensis* to *Pinus densiflora* in Sugadaira, Central Japan. Univ. of Tsukuba, Master Thesis. P. 100.
- Kittredge, J. (1948): *Forest Influences*. McGraw-Hill Press, P. 350.
- McCaughey, J.H. and Saxton, W.L.(1988): Energy balance storage terms in a mixed forest. *Agric. and Forest. Meteor.*, 44, 1-18.