

アカマツ林の熱的応答の季節変化

Seasonal Change of Thermal Response of Air Layer in a Red Pine Stand

小長谷 瑞木^{*}・林 陽生^{**}

Mizuki KONAGAYA^{*} and Yousay HAYASHI^{**}

Abstract

To clarify seasonal responses of air layer characterized by a Red Pine stand, meteorological observations were conducted from April to December, 2006. The Red Pine stand is composed of matured Red Pine with other shrubs, and is located to the south part of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba. Discussions were focused mainly on the relationship between LAI (Leaf Area Index) and heat storage of the air in the stand.

Hourly data were analyzed to obtain time and space distribution of the thermal fields. The LAI became the maximum stage in June or July and at a constant value in the summer season. In the morning, air temperature in the canopy layer rose quickly and reached the highest temperature within the stand. Simultaneously, upward and downward heat transportations appeared. Especially, the downward component was clearly shown through the trunk layer throughout a growing season of the year 2006, i.e. June to September. In spring and late autumn seasons, the canopy layer of the air performed as a remarkable heat sink and source compared with summer season, respectively.

Regarding a principal regime related between vertical temperature distribution and heat transfer within a stand, the followings were discussed; (1) as heat capacity of the leaf and tree-trunk was larger than that of the air, the canopy layer required relatively large amount of energy for heating, (2) as solar radiation was shaded by the canopy layer, when LAI is larger, sensible heat flux from the ground surface was reduced.

The thermal response of the Red Pine stand to the ambient air temperature changes was strongly influenced by the LAI. Consequently, the seasonal change of the thermal conditions of the Red Pine stand mentioned in this study was essentially caused by increase of LAI of the canopy.

^{*} 筑波大学第一学群自然学類

^{**} 筑波大学大学院生命環境科学研究科

I はじめに

植物群落の周囲には固有の環境が形成されている。その植物群落の周辺環境と相互する機能を適切に理解して、活用していくことは重要である。また、群落機能が熱エネルギーなどの移動など、周りの環境に対してどのような反応を持つのか、さらにはその反応が周りの環境に対してどのように変化を及ぼすのかを理解する必要がある。

植物群落と周辺環境に関する研究は数多くあり、群落自体の種類や構造がその環境と密接に関係している事が指摘されている。林ほか（1989）では、筑波大学水理実験センター（現、筑波大学陸域環境研究センター）のアカマツ群落にて測定を行い、植物群落が1日の外的な気象変化に対して、熱エネルギー的・植物生理的にどのような反応をするかを示している。

しかし、外的な気象変化には、日変化に加えて季節的变化もあり、それに伴い植物群落自体にも季節的变化が見られる。植物群落には、葉などの構造的な季節的变化が見られ、その変化はLAI（葉面積指数）から観察される。そのために、植物群落の機能を適切に理解するためには、季節的な応答を評価する必要があると考えられる。

そこで、これらの点を明らかにするため、アカマツ群落を対象としたほぼ通年の気象観測を行った。群落内外の季節変化を考慮したうえで、群落キャノピーの熱的応答を観測によって明らかにする事を目的とした。特に赤松群落の貯熱量・放熱量が季節的にどのように変化するか、群落内の季節的な変化であるLAIが熱的応答にいかに関わっているかに注目して解析を行なった。

II 測定対象群落の概要と測定方法

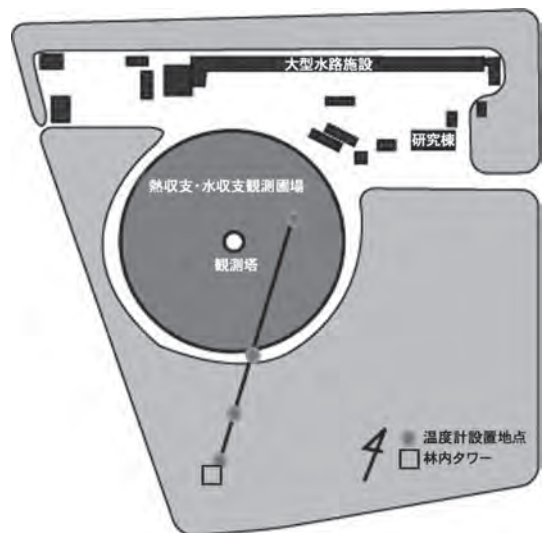
1. 対象群落（アカマツ林）

筑波大学陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場の南側に位置するアカマツ群落を対象と

した。このアカマツ林は二次林であるが、1980年ころから低層木の伐採が行われておらず、様々な陰樹が林内へ侵入している。飯田ほか（2001, 2003）によれば、主な低層木を構成しているのはシラカシ、ヒサカキ、ヤマウルシ、コナラ、クリ、ウワミズザクラなどである。また、高本層アカマツの平均樹高は15.0 m、低木層のシラカシとヒサカキの最大樹高は、それぞれ11.7 m、8.6 mとなっている。一方、草本層では、特にアズマネザサとチヂミザサが卓越している。このアカマツ混合林の総面積は約1.9 haである（杉田、1985）。その他のアカマツ林の構造に関しては、飯田ほか（2003）、飯田ほか（2001）に示されているので参照いただきたい。

2. 測定要素および方法

第1図に観測地の概要を示した。水平方向には圃場とアカマツ林を結ぶ基線上に4箇所、地上1.5 m地点に温度計を設置した。□印で示した場所は、アカマツ林内に立てられた高さ15 mのタワーである。このタワーは、林ほか（1989）で使用されたものと同一で、今回の研究でもこのタ



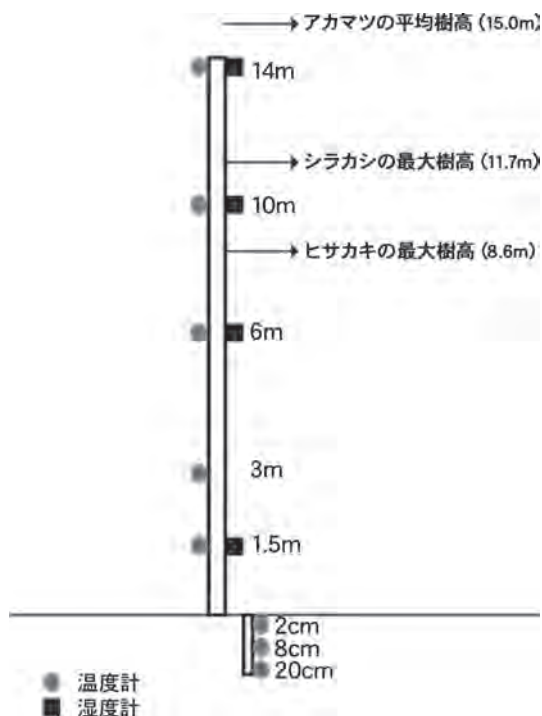
第1図 観測地の概要（陸域環境研究センターホームページ提供）

ワーを用いて群落内および群落直上の気象要素を測定した。

第2図には林内タワーの概要図を示した。タワーでは、5 高度に温度計を設置した。また、このうちの4箇所に湿度計も設置した。また自作した地温計をそれぞれ、タワーの直下に2 cm, 8 cm, 20 cmの深さに設置した。計8個の温度計は全て2006年4月8日に、4個の湿度計および地温計は2006年6月15日に観測を開始した。

温度計はおんどり Jr.(TR-52)、湿度計は TR-72U を使用し、それぞれシェルターの中に入れ、5分毎に測定した。5分毎にとったデータは1時間毎の平均値に修正し解析に用いた。

第1表に、解析に用いた日の代表的な気象要素を示した。数値は全て24時間平均値で、筑波大学陸域環境研究センターのルーチン観測値 (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/database.html>) である。5月9日は曇天日、5月13日は



第2図 アカマツ群落内タワーにおける測定方法の概要

雨天日の代表日である。その他の日は全て晴天日である。また、どの日も強風ではなく、比較的安定した気象条件である。

3. LAI の評価

アカマツ林の熱収支の季節変化を評価するにあたって、林の構造を示す LAI (葉面積指数) は重要なパラメータの一つである。本研究では、林床から林冠に向けて撮影した写真をモノクロ画像化し、その黒い部分の面積率を求めた。こうして被覆率 (%) が求まる。第3図に5月中旬における画像を示した。被覆率の季節的な変化を第4図に示す。第5図に杉田・古藤田 (1987) が本研究の対象地と同じアカマツ林で測定した LAI の季節的な変化を示した。測定した1987年に比較して、現在はアカマツの立木密度は減少し、低木層の立木密度は増加している。飯田ほか (2003) では、1985 ~ 1986 年当時の最大 LAI=4.0 に比べ、2001 ~ 2002 年における最大 LAI=5.0 (± 0.3) となり増加している事を示している。

第4図と第5図を比較すると同様な季節的な変化を見せていて、今回のアカマツ林の被覆率を求める方法は、アカマツ林の葉の繁茂の割合を示すのに十分であると考えられる。すなわち、アカマツ林は4月もしくは5月に葉の量が最も少なくな

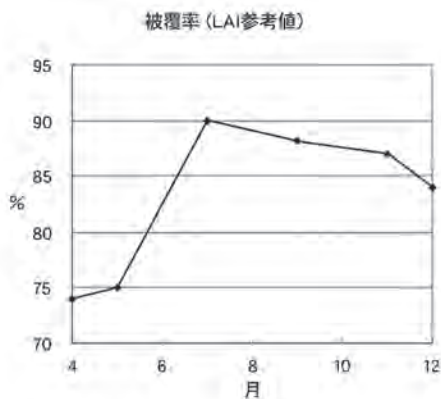


第3図 アカマツ群落内の様子 (黒の面積を被覆率 (%) とした)

第1表 解析に用いた日の気象要素 (2006年4月28日～12月4日)

気温 (Air temperature [℃]) は高さ 1.6 m で、通風式白金抵抗温度計を使用している。風速 (Wind speed [m/s]) は高さ 29.5 m の水平風速のデータで、超音波風速温度計を使用している。降水量 (Precipitation) は地表面上約 0.3 cm に設置された、1 転倒 0.5 mm、直径 20 cm の転倒ます型隔測自記雨量計を使用して測定している。下向き長波放射 (Downward short-wave radiation [W/m²]) は熱伝対式全天日射計を地表面から高度 1.5 m に設置して測定している。

date	Air temperature [℃] *1.6m height	Wind speed [m/s] *30.5 m height	Precipitation [mm/day]	Downward short-wave radiation [W/m ²]
28-Apr	13.4	2.141	0	296.20
30-Apr	16.4	2.671	0	248.84
1-May	20.4	2.867	0	256.03
9-May	13.9	2.735	0	148.44
13-May	12.0	2.602	11	49.953
25-May	15.6	2.873	3	324.46
31-May	20.4	2.734	0	311.56
1-Jun	20.6	2.367	0	291.70
29-Jun	25.4	2.825	0	282.67
4-Jul	23.0	2.890	0	252.98
3-Aug	26.7	1.853	0	282.04
4-Aug	27.9	1.859	0	287.42
5-Aug	27.7	2.531	0	292.61
2-Sep	22.7	2.161	0	252.84
3-Sep	23.7	2.698	0	256.50
5-Sep	26.0	2.579	0	249.99
20-Sep	22.8	2.280	0	229.42
21-Sep	21.0	2.714	0	205.27
24-Sep	19.6	3.575	0	227.89
9-Oct	17.1	2.316	0	210.46
10-Oct	18.8	1.840	0	192.67
8-Nov	10.8	2.307	0	157.06
9-Nov	10.9	1.802	0	150.00
16-Nov	9.5	2.225	0	137.82
2-Dec	6.1	2.149	0	120.32
3-Dec	4.3	1.652	0	122.25



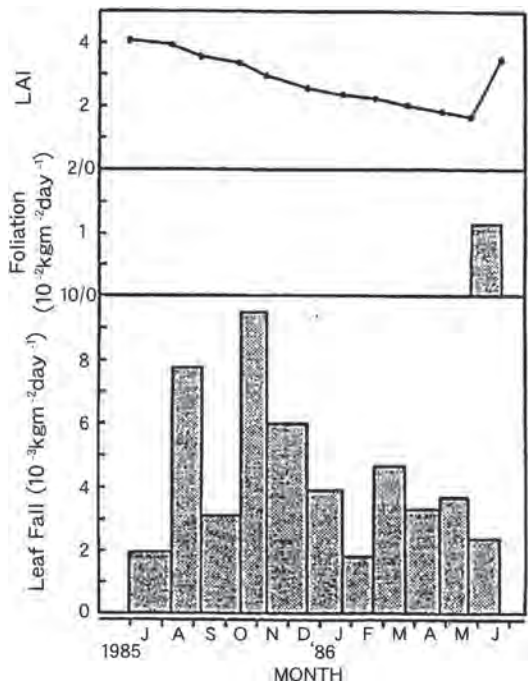
第4図 2006年同観測値におけるアカマツ群落の樹木・葉による被覆率の季節変化 (%)

り、梅雨時期に一気に成長して葉を展開させる。7月頃にピークに達してゆっくりと翌年の4月もしくは5月まで葉を減少させる。第5図では、5月が最も葉が少なくなっているが、2006年は5月の下旬には葉が展開し始めていたと考えられる。

4. 林内の熱量の評価

$$Q_{a(Z_1, Z_2)} = \int_{Z_1}^{Z_2} \rho C_p \left(\frac{dT}{dz} \right) dz = \rho C_p (Z_2 - Z_1) \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad \text{①}$$

上記の①式は、McCaughy and Saxton (1988)



第5図 1985~86年の同観測地におけるアカマツ群落の葉面積指数

及び林ほか(1989)が群落内の空気熱量の変化量(Q_a)を求める時に用いた式である。これらの研究では、樹木の貯熱量(Q_v)も考慮していたが、今回は Q_a のみ考察する。林ほか(1989)では、 $(Q_v/Q_a) = 0.012$ となつて示しており、 Q_a のみでも群落内の気層に熱的特徴について十分考察できると考えることができる。 $Q_a(z_1, z_2)$ は、群落内(高さ z_1 から z_2)の空気貯熱量である。 ρ は空気の密度で、定数とし $1.225 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$ 、また C_p は空気の定圧比熱で、定数とし $1004 \text{ [JK}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{]}$ をそれぞれ①式に代入した。 $d\langle T \rangle / dt$ は、高さ z_1 から z_2 の群落内の平均気温 $\langle T \rangle$ の時間変化である。今回アカマツ林内の空気熱量 Q_a を求めるために、温度計を設置している5地点を各境界高として、4つの層に分けて考えた。つまり林内全体の空気貯熱量は、

$$Q_{a(1.5m, 14m)} = \rho C_p \left(\int_{10}^{14} \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz + \int_6^{10} \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz + \int_3^6 \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz + \int_{1.5}^3 \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz \right) \quad (2)$$

で求められる。

林ほか(1989)では、Trunk(幹)層の貯熱量のみを対象として解析を行ったが、今回はLeaf(葉)層も取り入れ、林内全体の評価を行う。

III 結果と考察

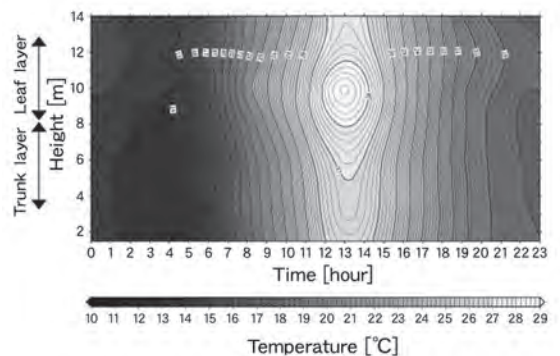
1. 日変化

1) 春期の時間-高度断面における気温変化

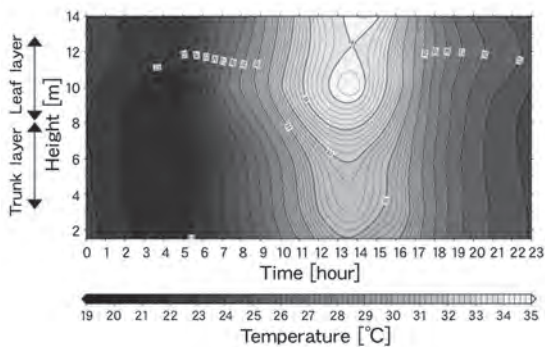
第6図に5月1日のアカマツ林内の温度のアイソプレスを示した。縦軸は高さ、横軸は時間を示している。第6図の左側に矢印で示してあるのは、高さの領域である。高さ約7~12.5mの層は、葉面積密度が特に大きな領域(葉層)でありL層(leaf layer)と呼ぶ。また高さ約1~7mの領域は、葉が茂っている割合が少ない層(幹層)でT層(trunk layer)と呼ぶ。1m以下の層は低木などが茂っているためにT層とは区別する。

日中L層を中心に気温が高くなっている特徴が第6図に見られる。5月1日にはL層とT層の気温差は約2.5℃に達している。林内では安定成層となり、このような傾向は他の種や同種の植物群落でも確かめられており(福岡・松尾, 1988)、日中の一般的な特徴と考えられる。

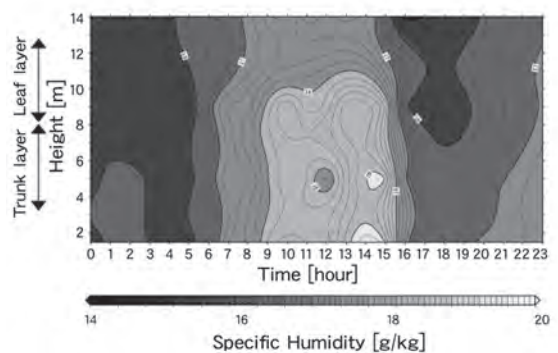
直接届く日射によってL層が暖められて出来たこの高温域からT層への熱の伝播が、約1時



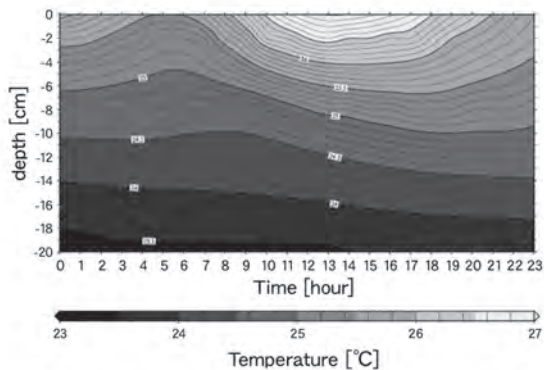
第6図 アカマツ群落内の気温アイソプレス(1, May)



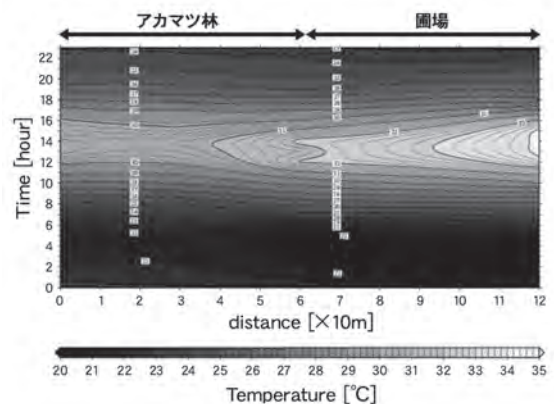
第7図 a アカマツ群落内の気温アイソプレス (4, August)



第7図 b アカマツ群落内の比湿アイソプレス (4, August)



第7図 c アカマツ群落内の地中温度の分布 (18, August)



第7図 d アカマツ群落内から圃場へ水平面方向の気温変化分布 (高さ1.5m) (4, August)

間の位相で見られる。これも林ほか（1989）で確認されている。

夜間は群落内全層で気温は降下する。明け方頃には地表面付近に、冷たい空気が溜まり安定層となっている。この安定層の形成の原因としては、樹木の葉や枝が昼間に吸収した熱を放出して相対的な熱源となっていることや、大気との交換があまりないために相対的に冷たく重い空気がT層に溜まっていることが考えられる。しかし林（1989）では夜間には、地表面付近で弱い不安定層になっている。相異の理由として観測時期（10月下旬～11月上旬）が違うことが考えられ、冷却がより強いものであると、林内上部から冷やされ不安

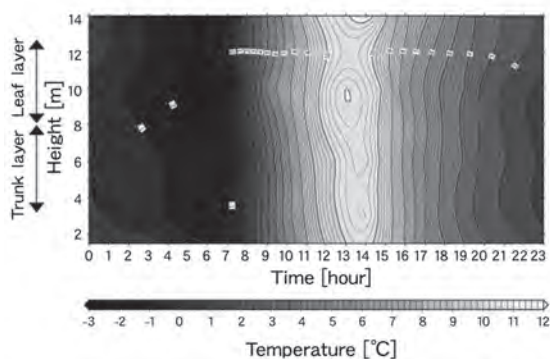
定層が形成されると考えられる。今回の観測でも11、12月頃の夜間には不安定層が形成されている（第8図a）。

2) 夏期（気温・比湿・地温）と冬期（気温・地温）の比較

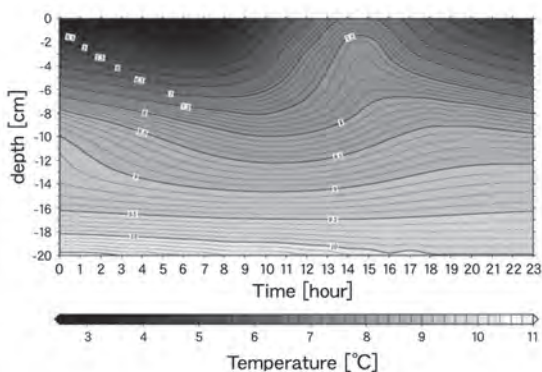
夏期と冬期のアカマツ林内の温度、地温および比湿のアイソプレス、森林から圃場への水平方向の気温アイソプレスをそれぞれ第7図、第8図に示した。夏期（第7図：8月4日）のアカマツ林は第6図（5月1日）及び冬期（第8図：12月4日）よりもL層が密である。そのため、第7図aを見るとL層により暖められてT層との気温差

が大きくなり、最大約4℃になっている。また、その熱は地中面にも伝播して約8 cmの深さまで1時間ほどの位相で伝播している（第7図c）。また、第7図bには林内の鉛直方向の比湿のアイソプレスを示した。草木からの蒸散、地中に貯えられた水分の蒸発によって、日中の地表付近に水蒸気が多く分布している。夜間には、水蒸気量は減少して、8月4日にはさらに乾いた空気が林外から侵入しているのが分かる。

第7図dには、森林から圃場への水平面方向の気温アイソプレス（高さ1.5 m）を示した。縦軸に時間、横軸に距離をとった。日中に注目すると、圃場で気温が上昇して、アカマツ林内との気温差は最大で約3℃となっている。夜間になると



第8図a アカマツ群落内の気温アイソプレス (4, December)

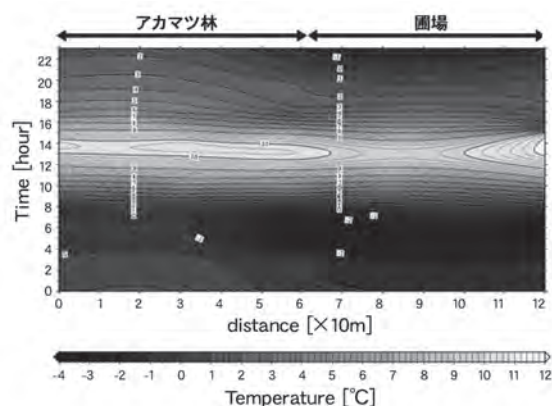


第8図b アカマツ群落内の地中温度の分布 (4, December)

この気温勾配は逆となり林内の方が圃場より約1℃高くなっている。この要因としては、昼間は日射によって圃場の地表付近が暖められ、顕熱伝達によって気温上昇したためだと考えられる。夜間は放射冷却によって圃場の気温が下がるが、林内では展空率が小さいため放射冷却が弱まり、さらに樹木からの下向き長波放射の影響で、林床付近では気温が下がりにくくなっていると考えられる。

また、水平面方向の気温アイソプレスに現れる夏期と冬期の大きな違いは、L層が疎になった事、日射時間の減少、さらに気温の低下があげられる。第8図cに冬期の森林から圃場への水平方向の気温アイソプレス（1.5 m）を示した。夏期（第7図d）と比較すると、林内と圃場間での温度差が昼間では小さく、夜間では温度差が大きくなっているのが見て取れる。これは、圃場での放射冷却の強化されている事と昼間に林内の地表付近にも日射が届くようになった事が理由としてあげられるだろう。

第8図aで示した冬期の林内の高さ-時間アイソプレスでは、夏期の同図（第7図a）とは異なり、日中のL層とT層の気温差がほぼ無い。どの高さもほぼ一様に日中は時間とともに暖められ



第8図c アカマツ群落内から圃場へ水平面方向の気温変化分布（高さ1.5 m）(4, December)

て、日没後は時間とともに冷やされている。夏期同様に熱は約 1 時間の位相で地中にも流出入している（第 8 図 b）。しかし冬期の地温勾配は地表面付近が冷やされているため、深くなればなるほど地温が高い。

2. アカマツ林内大気の熱的応答

1) 熱的応答の季節変化

前章に示した②式を用いて Q_a を求めた。第 9 図は縦軸に Q_a [w/m^2]、横軸に群落直上（高さ 14 m）の気温変化 [$^{\circ}\text{C/h}$] としてある。すなわち、前 1 時間の気温変化とその 1 時間の Q_a の関係を示した。4 月～12 月を解析期間としており、各期間とも代表的な 2～3 日ずつを選択している。いずれも風速が弱い日で、天候の影響を解析するために選んだ 5 月上旬の 3 日間以外は晴天日を選択しており、それぞれの気象要素は第 1 表に示した通りである。これらのグラフから、群落直上の気温変化と林内の熱量の出入りが見て取れる。また、近似直線の傾き（貯熱係数 [$\text{w/m}^2/\text{K}$]）が大きいほど、林内に貯えられたり放出されたりする熱の移動量が多いことを示している。

McCaughy and Saxton (1988) は、夏期のカエデ群落内に関して 1°C 群落外気温が変化すると、 $Q_a + Q_v$ （群落内の空気及び樹木の熱量）の熱量が約 16.3 [w/m^2] 変化することを示している。また、林ほか（1989）では、 1°C 群落直上の気温が上昇すると群落内 T 層の気層には、6.5 [w/m^2] のエネルギーが貯えられる事を示している。今回の観測とほぼ同じ季節で比較すると、第 9 図に示してある近似式の傾き（貯熱係数 [$\text{w/m}^2/\text{K}$]）に示されるように、McCaughy and Saxton (1988) の約 0.25 倍、林ほか（1989）の約 0.64 倍のエネルギー貯熱量 / 放熱量となった。この違いは、主として植生の違いや、植生の遷移などの影響による群落構造の差異によるもの、さらには Q_v について評価していない影響もあると考えられる。林ほか（1989）が観測した後、18 年経過して実施

した今回の観測地の様子を見てみると、アカマツの本数が減少する一方、下層植生が密になるなど大きな変化が現れている。その結果、林内の大気の貯熱 / 放熱の効果が小さくなったと考えられる。

第 2 表に、第 9 図で求めた関係の時期による違いを示した。アカマツ林の貯熱量 / 放熱量が季節的に変化している様子が分かる。近似直線の傾きは、群落直上の気温が 1°C 上昇した時のアカマツ林内大気に貯えられるエネルギー量 [w/m^2] (= 貯熱係数 [$\text{w/m}^2/\text{K}$]) に相当する。主として夏期に貯熱係数が小さくなり、春期、冬期に貯熱係数が大きくなっている変化が見て取れる。この変化傾向は、LAI の季節的变化（第 4 図、第 5 図）と関連していると考えられる。第 10 図に第 2 表に示した貯熱係数 [$\text{w/m}^2/\text{K}$] と LAI 参考値（被覆率 [%]）の関係を示した。その結果、

$$Y = -0.030X + 6.747 \quad (R^2 = 0.887)$$

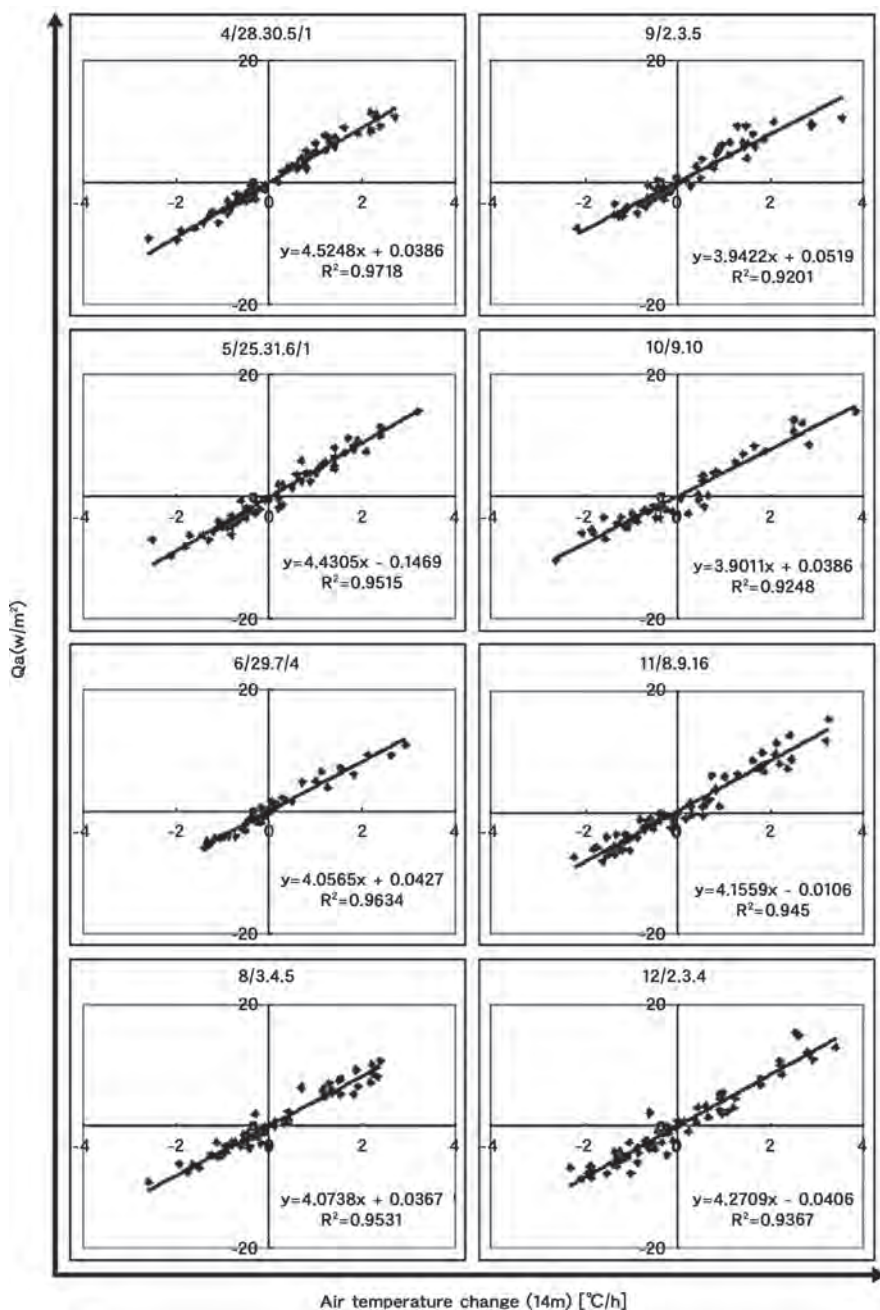
の関係が得られた。つまり、林内の L 層が密生すると、林内の大気の貯熱量 / 放熱量が減少することを意味している。この現象については後の 3 節で考察する。

2) 気象条件による応答の差異

前節までは、全て晴天日を対象にして見てきた

第 2 表 第 10 図における近似直線の傾き（貯熱係数）の季節変化

date	貯熱係数 [$\text{w/m}^2/\text{K}$]	R^2
28,30-Apr, 1-May	4.53	0.972
25,31-May, 1-Jun	4.43	0.952
29-Jun, 4-Jul	4.06	0.963
3,4,5-Aug	4.07	0.953
2,3,5-Sep	3.94	0.920
9,10-Oct	3.90	0.925
8,9,16-Nov	4.16	0.945
2,3,4-Dec	4.27	0.937

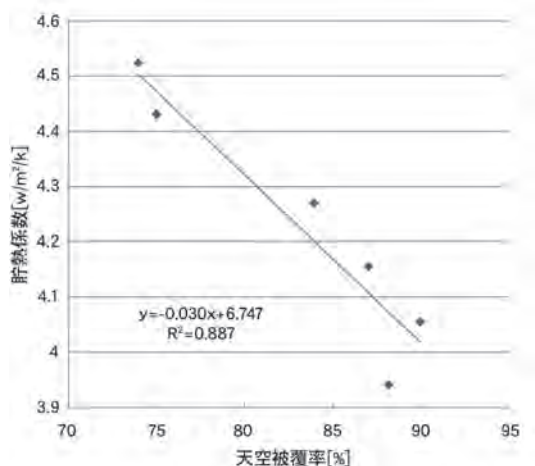


第9図 群落内直上の空気温度変化量と群落内空気熱変化量における相関関係の季節変化

が、ここでは気象条件が異なる日について注目する。第11図に群落の状態に大きな変化のない5月上旬の3日間を選択し、第9図と同様の関係を

示した。5月3日は快晴日、5月9日は曇天日、5月13日は雨天日である。気象要素は第1表を参考にさせていただきたい。

どの日も貯熱係数（群落直上の気温が 1°C 上がった時、群落内のエネルギー増加量）は、ほぼ同様な結果となった。第9図における、4、5月



第10図 第4図における被覆率(%)と第9図における貯熱係数の大きさの相関

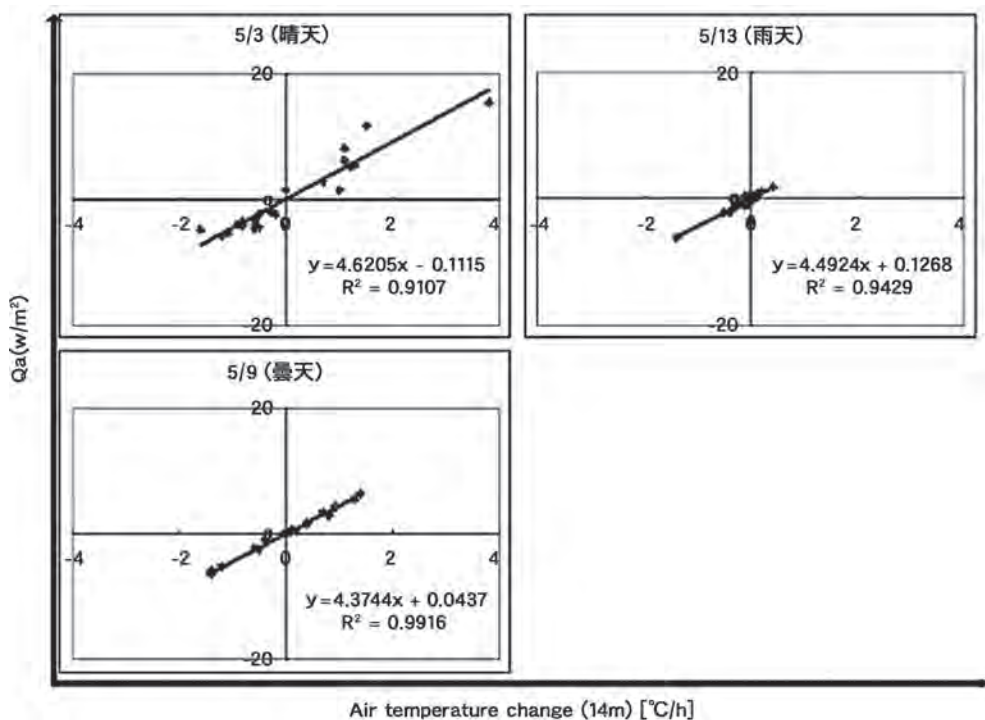
の結果ともほぼ一致していることから、気象条件が異なってもその貯熱量を表す近似直線の傾き（貯熱係数）は大きく変わらないことが分かる。つまり林内に貯えられるエネルギー量は、気象条件ではなく LAI など群落自体の構造の季節変化に依存していると考えられる。

3. なぜL層が密になると林内に貯えられるエネルギーは少なくなるか

以下の2つの仮説が提唱できる。

1)〈仮説1〉樹木葉の熱容量の効果

葉や樹木は、空気に比べて熱容量は大きい。林ほか（1989）では、樹幹部の密度（ ρ_v ）は $\rho_v = 0.3 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ 、樹木の比熱 C_v は水の70%として $C_v = 3 \text{ [J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ である。それを用いると空気と樹木の熱容量は、それぞれ $\rho \cdot C = 1,229.9 \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$ 及び $\rho_v \cdot C_v = 900,000 \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot$



第11図 群落内直上の空気の温度変化量と群落内空気の熱量変化量における相関関係の季節変化（天候による比較）

K^{-1} 〕となる。つまり樹木は大気の約 732 倍の熱容量を持つ。しかし、林内において樹木と大気とを比べると、温度変化が樹木の方が圧倒的に小さいために Q_v は Q_a より小さくなると考えられる。そのために L 層が発達している夏期には葉層を含む樹木全体を暖めるために多くのエネルギーが使われる。その結果、林内全体の貯熱量が相対的に少なくなっていると考えられる。また、T 層には L 層の繁茂により直接日射が届きにくく地表付近に顕熱の発生が少なくなり、下層を貯める熱量は少なくなると考えられる。

ここで議論している貯熱量は、その場の気温上昇の大きさで定義している。つまり時間当たりの気温上昇が大きいほど貯えられるエネルギーも大きい。第 6 図、第 7 図 a、第 8 図 a を見ると、実際に夏期（第 7 図 a）よりも、春期（第 6 図）及び冬期（第 8 図 a）の方が全層の気温変化が大きい事が分かる。また、どの季節にも夕方から夜間にかけて L 層の気温が相対的に高くなっている。これは、葉や樹木が、空気に比べて熱容量が大きいために冷めにくいという現象を裏付けている。

2) 〈仮説 2〉葉の遮へい効果

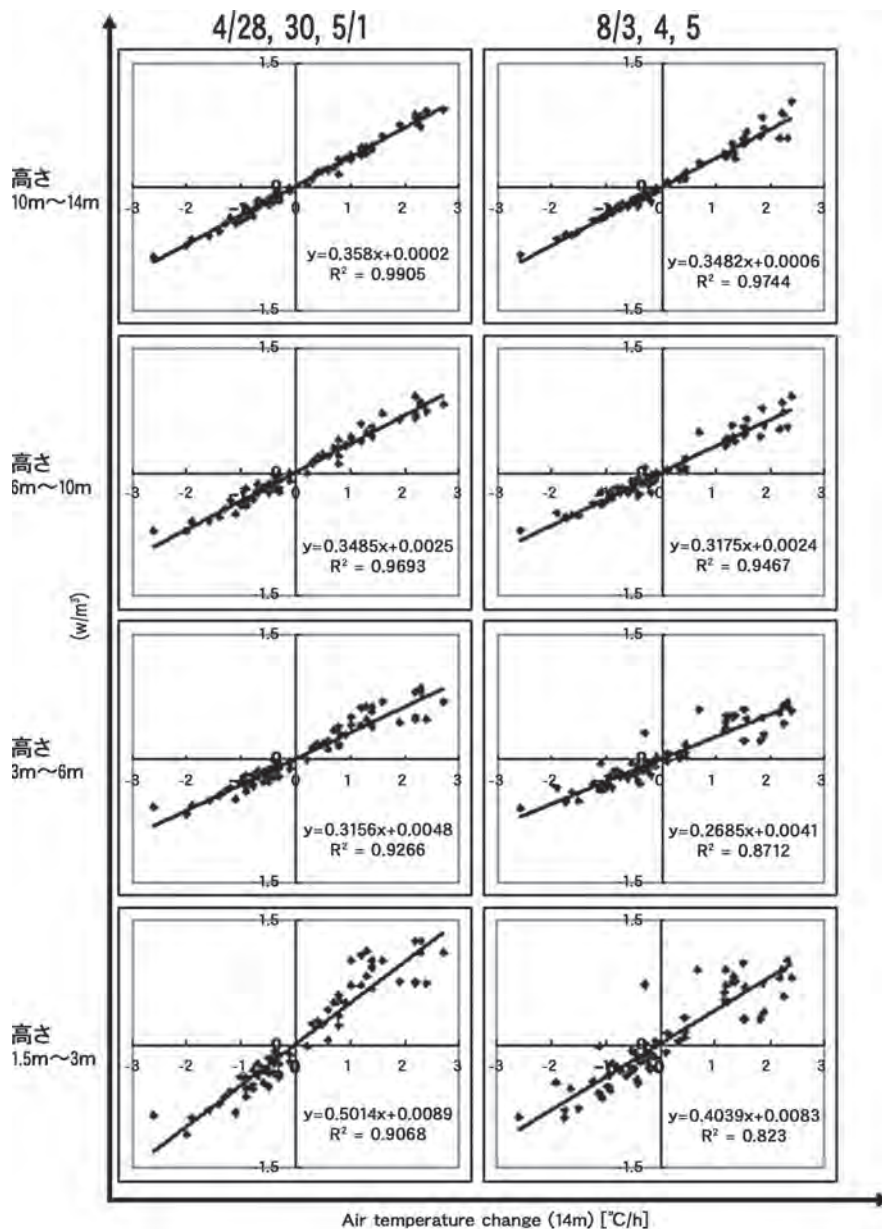
アイソプレスの図で見たように、日中に群落が気温上昇するとき L 層から気温が高くなり、そこからの熱の伝播によって全層が遅れて気温上昇している。特にその現象は L 層が発達している夏期に顕著となる。熱容量が大きい葉、樹木の層がなぜ先に暖まるのだろうか。おそらく、葉は薄いため、日射を遮へいして暖まった後に短時間で大気を暖めるからだろう。特に葉は、日射に直接当たる L 層上部から暖められ、顕熱を発生させて、結果として全層に熱を伝播させると考えられる。

同時に、地表付近では、上層の葉による遮へい効果で日射が直接届きにくい。そのために地表付近の顕熱の発生は夏期には少なくなり、T 層以下の気温が高くならなかったと考えられる。

4. 考察のまとめ

林外の環境変化に対するアカマツ林の熱的応答を季節的に見ることによって、熱的応答の特性が、林内の LAI に大きく関わっている事が確認された。夏期に L 層は最も密に繁茂する。そのため夏期では L 層を中心に日中に気温が上昇する様子が見られた。一方 T 層では葉の遮へい効果によって林床から大気へ伝わる顕熱が少なくなり、春期、冬期に比べて気温上昇の割合は小さくなり貯熱量・放熱量も小さくなった。全層をまとめて見ると大気の熱の交換量は夏期に最も小さく、L 層が疎になる春期、冬期が大きい結果となった。

第 12 図に、林内大気を層別にみた熱の動きについて、春期と夏期を比較した。第 9 図で取り扱ったデータを再整理したものであるが、縦軸は体積あたりの熱の輸送量を示しており、層ごとに比較ができる。全体の評価としては、どの層においても夏期より春期の方がより多く熱の交換が行われている傾向がある。このうち L 層（高さ約 7 m ～ 12.5 m）では春期・夏期間では大きな変化は見られず、主に違いが見られるのは T 層（高さ約 1 m ～ 7 m）である。T 層で春期により多くの熱交換がなされているが、夏期ではその量は大きく減少している。その主な原因は仮説 2 で示した葉の遮へい効果であると考えられる。葉によって日射の多くが地表面に直接届かなくなり、顕熱の発生が減少して、結果として T 層での熱の交換量は減少する。また、遮へい効果を起こす L 層では、春期に比べてより多くの熱を得ていると考えられるにも関わらず、その熱の交換量は変わらない。その原因としては仮説 1 で示した、大気に比べて大きな葉の熱容量が考えられる。葉の温度上昇にエネルギーが使われるため、結果として林内における大気の熱交換量の変化は明瞭でないと考えられる。



第 12 図 横軸は第 9 図と同様. 縦軸は体積あたりの熱量 (春期と夏期を層別に比較)

IV 結論

アカマツ林内外で 2006 年 4 月から 12 月まで気象要素の観測を行った. 晴天日を対象とした解析においては, 群落内-地中温度で鉛直方向のアイ

ソプレスを作成, また群落と圃場を水平方向のアイソプレスを作成して季節的な気温分布から熱の動きを見た. 比湿についても鉛直方向のアイソプレスを作成して林内における水蒸気の動きを見た. その結果,

(i) 林内ではL層を中心に気温は上昇して、L層が最も繁茂する夏期に林内では特に高温層となった。春期、冬期には、夏期と比較すると全層で一様な気温変化が見られた。春期、夏期の夜間林内には、安定層が形成されているが、冬期には群落上からの冷気の侵入によって不安定層が形成された。

(ii) 林内の水蒸気分布では、日中に地表面付近の低木や地面自体の蒸発散が活発となり、林床付近で水蒸気が多く分布している様子が確認された。

(iii) 次に群落直上の気温変化と群落内の貯熱量との季節的な関係について解析した。その結果、外気温の変化に対する林内全層では、LAIが大きい夏期に貯熱量の割合は最も小さく、春期・冬期の方が貯熱量は大きくなった。その要因としては、a) 樹幹や葉の熱容量が大気比べて大きいこと、b) L層が密になるため日射の遮へい効果が生じることが考えられた。

(iv) また、曇天日と雨天日を対象とした解析を行なった結果、晴天日とほぼ同様の傾向であったことから、林内の熱の交換量は日々変化する気象条件より、むしろLAIなど林内の構造の季節的变化に依存すると考えられた。

さらに以下の課題が示された。今回の観測によって季節的に考えると、樹木自体に貯えられる熱量にも注目する必要があると考えられた。また、エネルギーのインプット要素である日射量が夏期に増加しているにも関わらず、林内における空気熱の交換量は夏期に小さくなった。L層、T層、林内直上の気層の間には熱収支に基づいた密接な相関関係があることが確認されたが、どれが要因となり働きかけているのかについて、今後の研究で説明することが必要である。

また、現在大きな問題になっている地球温暖化を考える上にも植物群落の評価を考えないわけにはいかないだろう。今後の地球温暖化の影響評価においても植物群落がどのような反応をもつ能力

があるのかを適切に評価する必要性があり、今後も植物群落の機能に関して観測、解析を進める必要性があるだろう。

謝辞

本研究を進めるにあたって筑波大学の木村富士男教授、田中 博教授、上野健一助教授、植田昭宏講師、日下博幸講師には、ゼミや発表の場において多くの貴重なアドバイスを頂きました。さらに渡来 靖準研究員、飯泉仁之直さん、昆 盛太郎さんをはじめとする先輩方には、研究を進めるにあたっての技術や方法などを丁寧にご指導いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

今回筑波大学陸域環境研究センターにて観測をさせて頂き、貴重なデータも使用させて頂きました。学群実験では3年生に観測をお手伝いいただき、解析作業では、気象学・気候学分野の4年生に助言を頂きました。心より感謝して謝辞の言葉とさせていただきます。

なお、本研究は、平成18年度筑波大学第一学群自然学類（地球科学主専攻）卒業論文をまとめたものである。

文献

- 飯田真一・濱田洋平・田中 正 (2001): 筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林の胸高直径と立木密度の変化について。筑波大学陸域環境研究センター報告, **2**, 1-6.
- 飯田真一・濱田洋平・安部 豊・田中 正 (2003): 筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林の下層植生について。筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 1-9.
- 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。筑波大学陸域環境研究センター報告, **11**, 111-112.
- 林 陽生・原蘭芳信・那須野正明・鳥谷 均

利用したデータ

- (1989): 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. 筑波大学水理実験センター報告, **13**, 97-103.
- 福岡義隆・松尾克美 (1988): アカマツ林からの蒸発散に関する熱収支気候学的研究. 水資源研究センター報告, **8**, 41-54
- McCaughy, J.H. and Saxton, W.L.(1988): Energy balance storage terms in a mixed forest. *Agric. and Forest Meteor.*, **44**, 1-18.
- 筑波大学陸域環境研究センター(TERC) 熱収支・水収支観測圃場におけるルーチン観測データ (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/database.html>)
- (2007 年 5 月 20 日受付, 2007 年 9 月 3 日受理)