

サーモグラフィ装置によるヘリコプターからの樹木の診断

大政 謙次・清水 英幸・小川 和雄*・増喜 彰久**

国立環境研究所・*埼玉県公害センター・**日本電子株式会社

Diagnosis of Trees from Helicopter by Thermographic System

Kenji OMASA, Hideyuki SHIMIZU, Kazuo OGAWA*
and Akihisa MASUKI***National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305, Japan***Saitama Institute of Environmental Pollution, Urawa 338, Japan****JEOL Ltd., Akishima, Tokyo 196, Japan*

In order to diagnose physiological activities of individual trees growing in urban area, a remote sensing using a thermographic system from a helicopter was examined at the temple of "Heirin-ji" and adjacent area in Saitama Prefecture. Under cloudy and steady-state thermal conditions the information about activities of physiological functions such as stomatal movement, transpiration, photosynthesis, and air pollutant absorption was obtained from the thermal image of trees. The slight injury, which was found in the field survey of individual trees, was diagnosed by the thermal image, although it was not detected from aerial photographs in color. The difference in species of trees was also detected by the thermal image.

The stomatal conductance of several tree species measured by a porometer, which is an indicator of stomatal opening, decreased with a lowering of PPFD. The decrease rate was large at PPFD below $200 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ but it was small and constant at PPFD above $300 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$. This result means that it is possible to diagnose stably the slight injury of trees from the thermal image measured under a cloudy sky with PPFD above $300 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$.

The resolution and error in temperature image measured by the thermographic system depended on spatial distributions of temperature. When the difference (5°C) between high and low temperatures in the image was given by slits with zigzag patterns, the resolution and error were *ca.* 300 lines and *ca.* 5% (0.25°C) at 50 slits. This result shows that it is necessary to measure at a height below 300 to 500 m in order to obtain the exact temperature of individual trees within 5% in error.

(Received May 27, 1993)

1993年5月27日受付

結 言

森林や農作物などの診断に人工衛星や航空機を利用したリモートセンシングがよく用いられる^{1,2)}。通常、この分野で利用されるセンサーには、可視から近赤外バンドを対象としたものと、熱赤外バンドを対象としたものがある。たとえば、航空機 MSS やランドサット TM などの可視から近赤外バンドによるリモートセンシングで

は、群落の形態や構造のほか、生体内の含有色素や水分状態、組織構造などにより変化する反射スペクトルを解析することによる診断が行われている^{1,2)}。また、植物の活力度診断によく用いられる赤外カラーの空中写真もこのバンドの情報を利用した診断法である^{1,3)}。

いっぽう、熱赤外バンドは、表面温度や蒸発散に関する情報が得られ、米国などでは土壌や農作物の水分状態の把握や灌がい時期の決定などに利用されている^{4,5)}。また、最近、緑地機能の研究に関連して、蒸発散に伴う

緑地温度の低下などの研究にも利用されるようになってきた⁹⁻¹¹⁾。しかし、この分野の研究の多くは、群落を対象としたリモートセンシングで、一般に、背景となる土壌をも含めた群落としての診断となり、個々の植物の診断を行う場合には問題がある。

都市化や環境汚染による樹木への影響を診断する場合、群落としての診断のほかに、個々の樹木への影響を早期に診断する必要がある。このため、最近、地上での観測により診断を行う種々の画像計測診断法が開発されてきている^{9,10)}。温度画像の計測のために開発されたサーモグラフィ装置は可搬性にすぐれており、気孔反応や蒸散、光合成、大気汚染ガス吸収などの生体情報と対応つけた野外植物の診断に利用できる⁹⁻¹¹⁾。最近、筆者らは、この装置を街路樹の診断に適用した¹²⁾。しかし、地上からの計測だけでは、都市林や森林地域の個々の樹木の診断は困難である。そこで、数十mから数百の高度から計測できるヘリコプターからのサーモグラフィ装置による診断法について検討した。

葉温画像から得られる生体情報

樹木と大気とのあいだのガス交換は、おもに、葉肉組織-気孔-葉面境界層-大気という系を通して行われる^{13,14)}。たとえば、根から吸い上げられた水は、水蒸気として気孔から放出され、葉の温度を調節するのに利用

される。また、光合成に関係する二酸化炭素 (CO₂) も気孔を介して吸収される。大気が汚染されていると、同じ経路で汚染ガスも吸収され、他の物質に代謝される¹⁵⁾。この拡散過程を単純化した次元のガス拡散抵抗モデルが Fig. 1 である。このモデルにおいては、気孔の呼吸腔内の気液界面から気孔を通して葉面の気層までをバルク気孔抵抗 (bulk stomatal resistance)、葉面の気層から葉面境界層を通り自由大気にいたるまでを空気力学的抵抗 (aerodynamic resistance) で表す¹⁶⁾。バルク気孔抵抗は、気孔の開度のほか、大きさ、数、構造などの影響を受け、また、空気力学的抵抗は、風速や大気安定度、葉の形状や大きさ、樹冠部における葉群の分布構造などにより変化する^{13,14)}。

朝露や雨によって葉表面が濡れていない通常の樹木からの水蒸気の拡散、すなわち蒸散を考えると、蒸散速度 W は、

$$W = \{X_s(T_l) - \phi X_s(T_a)\} / (r_{aw} + r_{sw}) \quad (1)$$

で表される。 $X_s(T_l)$ は、呼吸腔内の気液界面での飽和水蒸気密度で、葉温 T_l によって変化する。また、 $X_s(T_a)$ は、気温 T_a の自由大気での飽和水蒸気密度で相対湿度 ϕ を掛けると大気の水蒸気密度を示す。 r_{aw} 、 r_{sw} は、それぞれ、水蒸気の空気力学的抵抗とバルク気孔抵抗である。

また、光合成速度 (CO₂ の吸収速度) や汚染ガスの吸

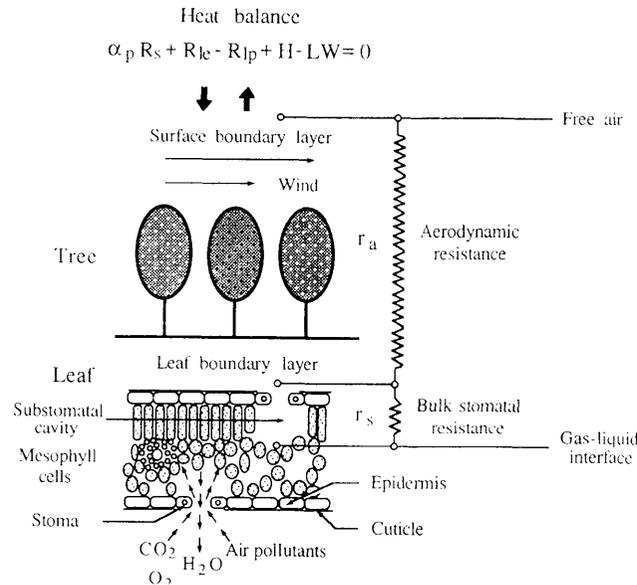


Fig. 1 Simple resistance model for heat and gas exchanges between tree and its environment.

収速度 Q は、

$$Q = (C_a - C_i) / (r_{ag} + r_{sg}) \quad (2)$$

または、

$$Q = C_a / (r_{ag} + r_{sg} + r_{mg}) \quad (3)$$

で表される。ここで、 C_a は対象とするガスの自由大気でのガス濃度、 C_i は呼吸腔内の気液界面でのガス濃度、 r_{ag} は空気力学的抵抗、 r_{sg} はバルク気孔抵抗、 r_{mg} は葉肉抵抗 (mesophyll resistance) である。 C_i はガスの種類によって異なるが、主要な汚染ガスである NO_2 、 O_3 、 SO_2 では体内での他の物質への代謝速度が大きく 0 と仮定できる¹⁵⁾。 CO_2 の場合には、 C_i の代わりに r_{mg} で表すことが多く、環境条件や生育状態で変動するが、昼間 $0.5 \sim 10 \text{ sec cm}^{-1}$ 程度の値が得られている¹⁴⁾。

いっぽう、樹木における熱収支は、葉の長波放射率 ϵ が 1 と仮定でき、また、呼吸などによる反応熱が他の成分にくらべて無視できるとすると、次式で近似される。

$$\alpha_p R_s + R_{le} - R_{lp} + H - LW = 0 \quad (4)$$

ここで、 R_s は環境からの短波放射 (太陽の直達放射と散乱放射: 波長 $\leq 3 \mu\text{m}$)、 α_p は樹木の短波放射の吸収率、 R_{le} は環境からの長波放射 (波長 $\geq 3 \mu\text{m}$)、 R_{lp} は樹木からの長波放射、 H は対流による顕熱伝達、 L は蒸発の潜熱である。

(4) 式において樹木からの長波放射 R_{lp} は、フランクの法則によれば、

$$R_{lp} = \sigma T_l^4 \quad (5)$$

となり、絶対温度の 4 乗に比例する。また、顕熱伝達 H は、

$$H = \rho c_p (T_a - T_l) / r_{ak} \quad (6)$$

で表される。ここで、 σ はステファン-ボルツマン定数、 ρ は空気の比重量、 c_p は空気の定圧比熱、 r_{ak} は顕熱の空気力学的抵抗である。

(4) 式に、(5)、(6) 式を代入して、樹木の蒸散速度 W を求めると、

$$W = \{ \alpha_p R_s + R_{le} - \sigma T_l^4 + \rho c_p (T_a - T_l) / r_{ak} \} / L \quad (7)$$

を得る。なお、樹木からの長波放射の項 σT_l^4 は、通常、野外で計測される程度の範囲では、 $\sigma (CT_l + D)$ で近似できるので、(7) 式は次式のように簡略化される。

$$W = AT_l + B \quad (8)$$

ただし、

$$A = -(\sigma C + \rho c_p / r_{ak}) / L \quad (9)$$

$$B = (\alpha_p R_s + R_{le} - \sigma D + \rho c_p T_a / r_{ak}) / L \quad (10)$$

ここで、 C 、 D は定数で、 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ (絶対温度で、 $293.15 \sim 303.15 \text{ K}$) の範囲では、 $C = 1.06 \times 10^8 \text{ K}^3$ 、 $D = -2.37 \times 10^{10} \text{ K}^4$ である。

野外の個々の樹木を対象として、そのつど、正確な微気象状態を計測し、(8) 式を計算することは困難で、実際的ではない。しかし、曇天で、微風の状態を選んで計測を行えば、太陽からの直達短波放射とそれに伴う陰の影響が少なく、樹木への短波放射 R_s や長波放射 R_{le} 、気温 T_a 、空気力学的抵抗 r_{ak} などの熱環境が比較的均一な状態に保たれるので、(8) 式の A 、 B が一定と仮定でき、定性的ではあるが樹木の葉温 T_l から蒸散速度 W の違いを診断できる。このような状態では、蒸散 W は葉温 T_l の一次関数として表され、また、葉温が低いほど、蒸散速度が大きく、健全であることを意味している。

それぞれの空気力学的抵抗のあいだには、大気の安定な条件が卓越する夜間を除けば、比較的広い大気の安定度にわたって、

$$r_{ak} = r_{aw} = r_{ag} \quad (11)$$

の関係が認められ¹⁶⁾、また、バルク気孔抵抗のあいだにも、

$$r_{sg} = (D_w / D_g) r_{sw} \quad (12)$$

の関係が成立する。ただし、 D_w 、 D_g は、それぞれ、空気中の水蒸気とガスの分子拡散係数である。ここで、(1) 式に (8)、(11) 式を代入し、水蒸気のバルク気孔抵抗 r_{sw} を求めると、

$$r_{sw} = \{ X_s(T_l) - \phi X_s(T_a) \} / (AT_l + B) - r_{ak} \quad (13)$$

となり、大気の気温、湿度、空気力学的抵抗などが一定の場合には樹木の葉温 T_l から気孔反応の指標である r_{sw} に関する情報を得られることがわかる。なお、 $1/r_{sw}$ は、気孔コンダクタンスとよばれ、ポロメーターの測定値などを表すのによく用いられる。

(2) 式あるいは (3) 式に (11)、(12) 式を代入すると、

$$Q = (C_a - C_i) / \{ r_{ak} + (D_w / D_g) r_{sw} \} \quad (14)$$

または、

$$Q = C_a / \{ r_{ak} + (D_w / D_g) r_{sw} + r_{mg} \} \quad (15)$$

となり、呼吸腔の気液界面でのガス濃度 C_i あるいは葉肉抵抗 r_{mg} が既知のガスについてはガス吸収速度に関する情報も葉温 T_l から得られることがわかる。

実験方法

調査地域は、都市近郊の寺社林として埼玉県新座市の平林寺を選んだ。平林寺は、埼玉県南部に位置し、都市化や光化学オキシダントなどにより樹木に被害が発生しているといわれている地域にある。ヘリコプターからの調査は、樹木の活力度が高い 6 月 (1991 年) の熱環境が比較的均一な状態に保たれている曇天で、微風の状態を選んで行った。サーモグラフィ装置 (日本電子 JTG-

4200) による葉温計測は、13:00 から 15:30 の間に行い、同時にカラー写真を撮影した。そのさい、計測結果の信頼性を高めるために同一地点を複数の角度から計測した。地上調査では、樹木の目視による診断のほか、ポロメーター (LI-COR Model LI-1600) による気孔コンダクタンス (1/バルク気孔抵抗) の測定やサーモグラフィ装置による樹木の葉温の計測を行った。また、計測した画像は連続してハードディスク (連続して 160 枚記録可能) に記録し、現場で簡単な解析と編集作業を行った。

調査に用いたサーモグラフィ装置の性能は、観測波長域、温度分解能、画像表示、フレームタイムが、それぞれ、 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ (HgCdTe, 液体窒素冷却), 0.025°C , $512\ \text{H}\times 240\ \text{V}$, $0.8\ \text{sec}$ であった。さらに、画像解像度に関係する計測対象の温度分布の違いによる誤差については、黒体¹⁾の表面を、黒体²⁾にくらべて温度が T_A ($=5^\circ\text{C}$) 低い、開口形状の異なる 3 種類の黒体スリット板 (Fig. 6 の (a)~(c) 参照) で覆い、黒体¹⁾とスリット板の真の温度差 (T_A $^\circ\text{C}$) とサーモグラフィ装置により計測した温度差 (T_B $^\circ\text{C}$) とから、式 $100\times(T_A-T_B)/T_A$ (%) により算出した。図において、白い部分がスリット板で、黒い部分がスリット板のスリット (開口部) を通して見える黒体¹⁾である。スリット板 (a) では中心部に一個のスリットが、スリット板 (b) ではスリットとそうでない部分の幅が同じになるように (a) と同じ形状のスリットが配列的に切られている。また、スリット板 (c) では、(a) と同じ幅をもつ方形のスリットが千鳥格子状に切られている。温度分布の違いは、画面の水平方向にスリットを敷き詰めたときに入るスリットの数 (F_h)、すなわち、一画面の水平方向に入る温度変化 (高低) の回数で与えた。なお、一個のスリットしかもないスリット板 (a) の F_h は、スリットの配列がスリット板 (b) と同様であると仮定して求めた。 F_h の調節は、スリットの開口幅やスリット板とサーモグラフィ装置の間の距離を変えることにより行った。

いっぽう、ヘリコプターで計測した時間帯における光合成や気孔の開度に関係する波長帯の光量子束密度 (photosynthetic photon flux density; PPFD) の変化に対する正常な樹木の気孔反応を調べるために、7月の微風で薄曇り (気温 = $30\sim 33^\circ\text{C}$; 湿度 = $50\sim 60\%$ R.H.) の日を選んで、国立環境研究所内に育成している樹木の成熟葉の気孔コンダクタンス (裏面) の経時変化をポロメーターにより測定した。そのさい、樹種としては、比較的育成状態のよい、樹高 $3\sim 5\ \text{m}$ のケヤキ (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino), シラカシ (*Quercus myrsinaefolia* Blume), コナラ (*Quercus serrata* Thunb. ex

Murray), クスギ (*Quercus acutissima* Carruthers), エゴノキ (*Styrax japonica* Sieb. et Zucc.) など、平林寺の境内で育成している樹種と同種のものを選んだ。また、光量子束密度の測定には、LI-COR, Model LI-185A の quantum センサーを用いた。

結果および考察

都市近郊の寺社林や公園などの樹木には、自動車の排気ガスなどに起因する光化学オキシダントや都市化に伴う地下水位と湿度の低下などによると考えられる顕著な被害が発生している¹⁷⁻¹⁹⁾。これらの被害は、枝条枯死、異常落葉、病虫害などとして現れるが、被害の程度が軽微な場合にも気孔の閉鎖やそれに伴う蒸散および光合成の低下などの不可視障害が生じ、成長が阻害される^{18,20)}。前節で述べたように、サーモグラフィ装置による診断は、この不可視障害を葉温画像から診断するものであり、被害の早期診断に利用できる。また、樹種による蒸散や光合成の違いについての情報を得ることもできる。

Fig. 2 は、平林寺境内のケヤキやスギなどの樹木の写真とサーモグラフィ装置により計測された温度画像の例である。温度画像の計測は、日射や空気力学的抵抗などの熱環境の違いによる影響をできるだけ取り除くために、熱環境が比較的均一な状態に保たれている曇天で、微風の日を選んで行った。写真 (Fig. 2A) の右側手前のケヤキ (a) は比較的健全で、左側後方のスギは木によって程度の違いはあるが先端部に異常落葉が認められた。温度画像 (Fig. 2B) をみると、スギのほうがケヤキにくらべて $0.5\sim 2^\circ\text{C}$ 程度葉温が高く、また、おのおのの部位によるばらつきも大きかった。これは、樹種の違いによる葉の蒸散速度の違いのほか、不可視障害としての気孔閉鎖とそれに伴う蒸散や光合成機能の低下を示唆している。とくに、先端部に他の樹木の陰による影響がない最も左側のスギ (b) についてみると、幹の部分が温度が高いことに加えて、先端部の温度が高かった。正確な診断のためには、おのおのの部位の熱収支解析を必要とするが、過去に筆者らが行ってきた直射日光の影響がない曇天・微風時の孤立木の温度計測の結果によれば、正常に機能している樹木では、先端部の葉温は他の部位と同程度かそれよりも低いことが知られている¹²⁾。このことから、左側のスギの先端部では、葉の気孔が閉鎖し、蒸散や光合成の機能が低下していると推察される。このように、サーモグラフィ装置を用いた葉温画像による診断は、定性的ではあるが、従来困難であった針葉樹や高木の機能診断を容易にする。

次に、Fig. 3 に平林寺の境内林 (左上) と道路を隔

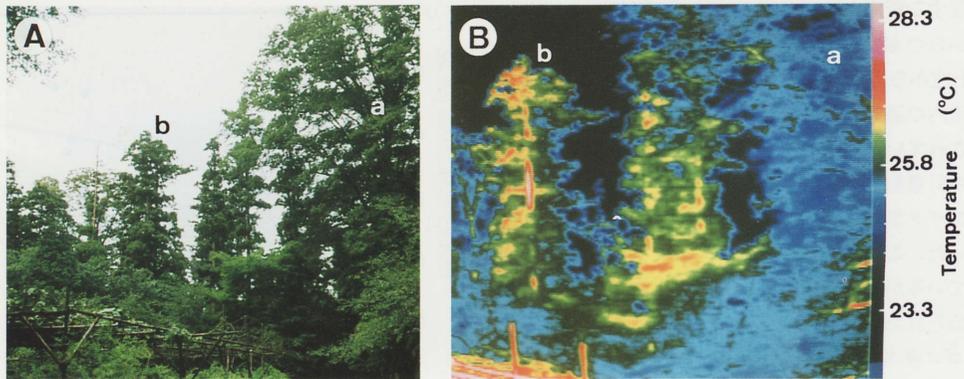


Fig. 2 Photograph (A) and thermal image (B) of *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino (a) and *Cryptomeria japonica* (L. fil.) D. Don (Japanese cedar) (b) in the temple of "Heirin-ji."
Environmental conditions: air temperature=23.6°C, PPFD=*ca.* 400 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$.

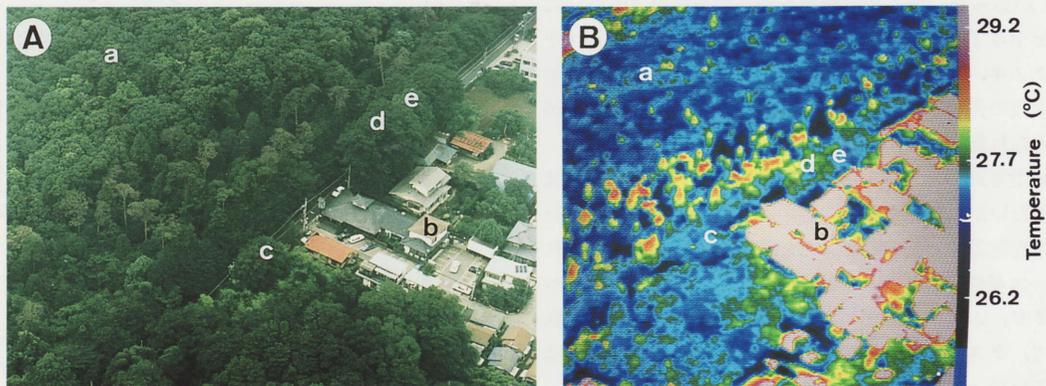


Fig. 3 Photograph (A) and thermal image (B) of "Heirin-ji" and adjacent area measured from a helicopter at a height of *ca.* 300 m.
Sites of a to e in A correspond to those in B. Environmental conditions were not measured at "Heirin-ji" but at Saitama Institute of Environmental Pollution with distance of *ca.* 10 km from "Heirin-ji," air temperature and PPFD measured after 30 min were *ca.* 29°C and 400 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ respectively.

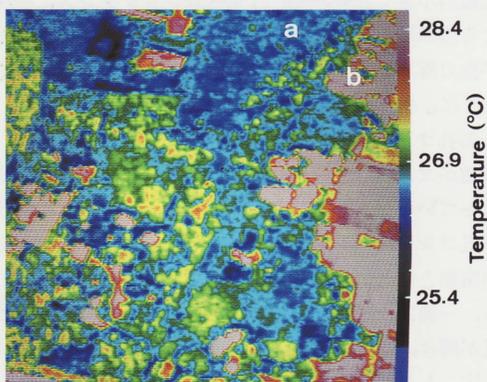


Fig. 5 Thermal image of "Heirin-ji" and adjacent area measured from a helicopter at a height of *ca.* 700 m.
Sites of a and b in Fig. 5 correspond to those in Fig. 3B. This image was taken at *ca.* 100 sec before the measurement of Fig. 3B.

て隣接する新座市役所南部の地域（右下部）のヘリコプターからの航空写真と温度画像を示す。観測は、約300 m 上空から行った。この地域の地上調査によると、平林寺境内の道路沿いにはソメイヨシノとイロハモミジが植栽されていた。その内側は、アカマツ、スギ、ヒノキなどの針葉樹とエゴノキ、クリ、コナラ、ムクノキ、ウワミズザクラなどの種々の落葉広葉樹が生育する混交林があった。この林では、多くのアカマツが枯れ、また衰退しているが、スギにも先端部が落葉するなどの衰退木が認められた。さらに、その内側には、クヌギ、コナラ、エゴノキを中心とした比較的均一な落葉広葉樹林 (a) が広がっているが、この林にはめだった衰退木はなかった。いっぽう、道路を隔てた平林寺の向い側下部には、規模の小さい広葉樹林があった。また、道路沿いの家屋 (b) との境には竹林があり、そのなかにムクノキ (c) があった。さらに、家屋を挟んで上方の道路沿いにはケヤキ (d) とシラカシ (e) の高木があった。竹林やムクノキ、シラカシには異常は認められないが、ケヤキには葉の先端部が成長せず、葉が丸くなった葉形異常が認められた。

航空写真 (Fig. 3A) からは、樹種名を特定することはできないが、色調や形態の違いから樹種の違いや枯れた樹木を認識することはできた。地上調査との比較によれば、スギやヒノキなどの針葉樹とソメイヨシノ、イロハモミジ、ムクノキ、ケヤキなどの広葉樹は比較的濃い緑色で、クヌギ、コナラ、エゴノキなどの広葉樹や竹林は明るい緑色であった。温度画像 (Fig. 3B) をみると、樹木の温度は、樹種や日当りの違い、被害の状態などで異なっていたが、比較的健全な境内の内側のクヌギ、コナラ、エゴノキを中心とした広葉樹林では 26.5~28.0°C と低く、枯れたアカマツやスギでは 28.0~29.0°C と高かった。また、葉形異常が認められた道路沿いのケヤキは、異状が認められなかったムクノキやシラカシにくらべて、0.5°C 程度温度が高かった。なお、家屋や道路、駐車場、裸地などは、枯れた樹木よりもさらに高温 (別の温度画像によれば 35°C 以上) を示した。

Fig. 4 は、比較的成育状態のよい、樹高 3~5 m のケヤキやシラカシ、コナラ、クヌギ、エゴノキなどの樹木の葉の気孔コンダクタンスと光量子束密度の変化 (PPFD) との関係を示す。測定は、ヘリコプターからの温度計測の時間帯にあわせて 13:00~18:00 に行った。葉によるばらつきはあるが、樹種の違いにかかわらず、光量子束密度の低下とともに気孔コンダクタンスが低下した。とくに、200 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 以下では気孔コンダクタンスの低下が急速であった。しかし、300

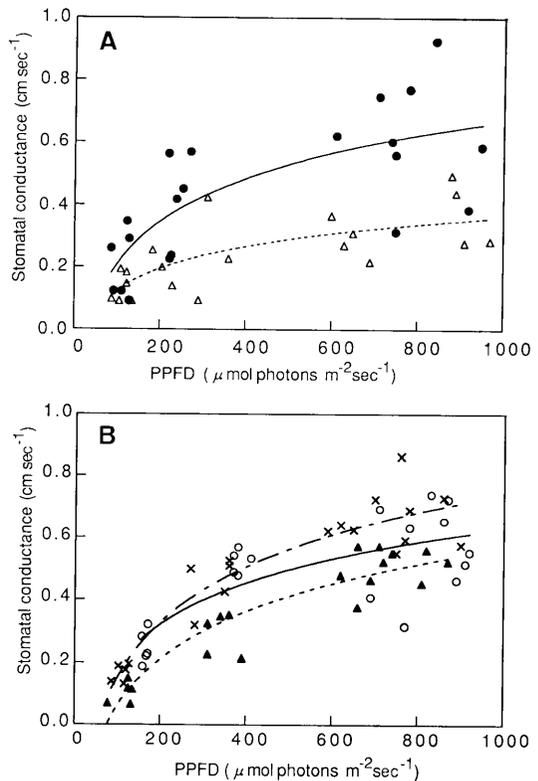


Fig. 4 Relationships between stomatal conductance and PPFD.

● in A, *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino; Δ in A, *Quercus myrsinaefolia* Bulume; ○ in B, *Quercus serrata* Thunb. ex Murray; \blacktriangle in B, *Quercus acutissima* Carruthers; \times in B, *Styrax japonica* Sieb. et Zucc. Environmental conditions: air temperature = 30–33°C, relative humidity = 50–60%.

$\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 以上の状態では、低下の程度が比較的小さく、かつ一定で、気孔コンダクタンスに樹種による差が明確に現れた。具体的には、常緑樹のシラカシが他の落葉樹にくらべて気孔コンダクタンスが小さく、とくに、ケヤキと比較すると、約半分の値であった。

気孔コンダクタンスは、バルク気孔抵抗の逆数で、その値が大きいほど、気孔が開き、活発に蒸散や光合成を行っていることを意味する。このため、Fig. 4における気孔コンダクタンスの低下は、光強度の低下による気孔の閉鎖とそれに伴う蒸散や光合成速度の低下を示している。一般に、正常な樹木では、日の出とともに急速に気孔が開き、正午を過ぎたころから徐々に気孔が閉鎖する¹⁴⁾。しかし、都市化や環境汚染により被害を受けた樹

木では、日中における気孔の開きが不十分で、蒸散や光合成の機能が低下し、成育が阻害される^{19,20}。このような状態の樹木は、正常な樹木にくらべて葉温が高くなる^{12,20}。たとえば、ケヤキとシラカシを比較すると、正常に機能している状態では、落葉樹のケヤキが常緑樹のシラカシにくらべて、一般に気孔コンダクタンスが大きく、葉温も低くなるはずである (Fig. 4A)。しかし、Fig. 3の温度画像において、ケヤキ (d) とシラカシ (e) では、ケヤキのほうが葉温が高く、活力度が低下していると診断された。実際に、地上調査を行うと、ケヤキに葉形異常が観察されたが、この異常は同時に撮影されたカラー写真からは認識できなかった。

樹木の診断を目的とした温度画像のリモートセンシングでは、診断にさいして、流動的で不均一な雲の影響が問題になる。このため、雲の影響のない快晴の状態か、比較的均一な散乱短波放射が得られる曇天の状態のいずれかを選んで計測を行うことになる。しかし、快晴の状態では、太陽からの直達短波放射による樹木の陰が問題となり、これを避けるために、陰が極力できない方向からの計測に限定される。いっぽう、曇天で、比較的均一な散乱短波放射下での計測では、樹木の陰の影響が少なく、このため計測方向を選ばないが、あまりにも弱光下だと光強度の低下による気孔閉鎖の問題が生じる。この点に関しては、Fig. 4の結果から判断して、種々の樹木で気孔開度が比較的安定する $300 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 以上の状態で行うと問題がない。なお、曇天の日を選んで計測を行うと、診断にさいして、快晴の日によくみられる日中の過度な蒸散とそれに伴う水ストレスにより引き起こされる気孔閉鎖の影響を避けることもできる¹⁹。

サーモグラフィ装置により葉温を計測する場合、葉の長波放射率や環境温度が計測精度に影響を与える。葉の長波放射率は、樹木の種類や成育状態などにより異なるが、感度波長として、 $8\sim 13 \mu\text{m}$ のセンサー (HgCdTe) を用いれば、通常、 $0.95\sim 0.99$ の値が得られており、ほぼ1に近い^{21,22}。葉が繁った樹木の場合、個々の葉の放射率の指向特性や多重反射の効果を考慮する必要があるが、個葉の場合と同程度の値が得られている。周囲環境からの長波放射量を調節する機能をもつサーモグラフィ装置を用いれば 0.1°C の精度で葉温を計測することができるが^{23,24}、天空からの長波放射量が時々刻々変化する場合には、樹木の温度の計測値に誤差が生じることは避けられない。しかし、曇天で、比較的均一な散乱短波放射下での計測では、晴天時にくらべて、地表面からの長波放射と天空からの長波放射の差 (長波有効放射) が減少し、また、その値が比較的安定しているため、計測誤差

を小さくできる。なお、 $8\sim 13 \mu\text{m}$ の波長域では、太陽からの直達長波放射は $1 \times 10^{-4} \text{W cm}^{-2}$ 程度で、温度計測への直接影響は小さいが、曇天下ではさらに小さく無視できる²⁵。

いっぽう、 $8\sim 13 \mu\text{m}$ の波長は大気窓とよばれており、サーモグラフィ装置による計測において、大気による吸収や大気からの放射の影響が小さい領域である²⁶。しかし、近距離からの計測ではこれらの影響を無視できるが、遠隔計測では、大気による吸収や大気からの放射が表面温度の計測精度に影響を与える。Fig. 5は、Fig. 3Bの地点を同一時刻に、高度約700mの位置から計測した例である。右上のa, bの地点は、Fig. 3Bのa, bの地点に対応している。Fig. 3Bの場合と同様、家屋や道路、駐車場、裸地の温度が高く、樹木の温度は樹種や被害の状態で異なっていた。比較的均一な温度を示す境内の内側のクヌギ、コナラ、エゴノキを中心とした広葉樹林 (a) についてみると、約400mの高度の違いにより約 0.8°C の温度差が認められた。一般に、高度が上昇すると、大気による吸収の増加に加えて、環境温度の低下による大気放射の影響で、温度の指示値は低下する。その程度は、大気の状態により異なるので一概にいえないが、ここで示した程度の影響は生じると考えてよい。

高度が上昇すると、サーモグラフィ装置の画像解像度の問題で、個々の樹木の温度差が平滑化される。Fig. 6は、計測対象の温度分布の違いによるサーモグラフィ装置の計測誤差を示す。スリットの数 (F_n) の増加とともに画像解像度が悪くなり、計測誤差が増加した。また、開口形状の違いによっても画像解像度や計測誤差は異なり、千鳥格子状の温度分布の場合が最も悪かった。計測

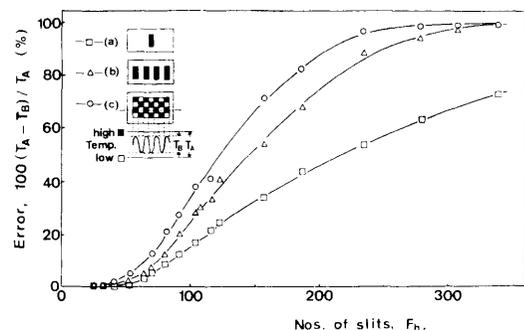


Fig. 6 Relationships between error in temperature measured with a thermographic system and temperature distribution.

Sites of (a) to (c) give difference in temperature distribution.

誤差が最も大きい千鳥格子状の場合、温度差が識別できる解像度は約 300 lines であったが、計測誤差でみると、5% (0.25°C) の誤差で約 50 lines, 10% (0.5°C) の誤差で約 65 lines であり、スリット数の増加とともに急激に誤差が増大した。上空からみたときの樹木の直径を 3~5 m とし、5% 程度の誤差を許すとすると、約 150~250 m の範囲の計測が可能であり、これを高度に直すと約 300~500 m である。他のメーカーの装置も同程度の性能であり、市販のサーモグラフィ装置を用いた個々の樹木のリモートセンシングでは、これ以上高度が高くなると誤差が急激に増大することに注意する必要がある。

ヘリコプターによる調査は、朝日新聞社の協力を受けて行った。また、平林寺には、地上調査を快く許可していただいた。埼玉県公害センターの松本利恵氏、国立科学博物館 筑波実験植物園の門田裕一研究官には、それぞれ、平林寺での地上調査と植物種の同定に協力していただいた。関係各位には感謝の意を表する。

文 献

- COLWELL, R. N. (ed). 1983. "Manual of Remote Sensing. Second Edition. Vols. I and II" 1232 pp., 2240 pp., American Society of Photogrammetry, Virginia.
- HOBBS, R. J. and H. A. MOONEY (eds). 1990. "Remote Sensing of Biosphere Functioning" 312 pp., Springer-Verlag, New York. また、訳本として、大政謙次・恒川篤史・福原道一監訳. 1993. 「生物圏機能のリモートセンシング」397 pp., Springer-Verlag, Tokyo.
- 中島 巖. 1973. 赤外カラー写真による環境と樹木活力の診断. 農及園 48: 195-200.
- BARTHOLIC, J. F., L. N. NAMKEN, and C. L. WIEGAND. 1972. Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and of crop canopies differing in water stress. Agron. J. 64: 603-608.
- CLAWSON, K. L. and B. L. BLAD. 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. Agron. J. 74: 311-316.
- 本條 毅・高倉 直. 1987. 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響(2)リモートセンシングによる緑地の抽出と表面温度の解析. 農業気象 43: 31-36.
- NEMANI, R. R. and S. W. RUNNING. 1989. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. J. Appl. Meteorol. 28: 276-284.
- 金子大二郎・日野幹雄. 1993. 蒸発散に伴う森林温度の低下に関する TM による実態把握. 日本リモートセンシング 13: 1-13.
- 大政謙次. 1988. 画像計測とリモートセンシング. 「植物の計測と診断」(大政謙次・近藤矩朗・井上頼直編) 155-192, 朝倉書店, 東京.
- OMASA, K. and I. AIGA. 1987. Environment measurement: Image instrumentation for evaluating pollution effects on plants. In "Systems & Control Encyclopedia" (Ed. by Singh, M. G.) 1516-1522, Pergamon Press, Oxford.
- 井上吉雄. 1987. 作物群落の生産機能および状態の非破壊接触診断に関する研究. 第4報 野外条件下における光合成と蒸散速度の定量的関係. 日作紀 56: 474-481.
- 大政謙次・田島 彰・宮坂佳代子. 1990. サーモグラフィによる街路樹(仙台市ケヤキ並木)の診断. 農業気象 45: 271-275.
- MONTEITH, J. L. 1973. "Principles of Environmental Physics" 241 pp., Edward Arnold, London.
- JONES, H. G. 1983. "Plants and Microclimate" 323 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- 大政謙次. 1979. 植物群落の汚染ガス収着機能一現象の解明とそのモデル化. 国立公害研究所報告 10: 367-385.
- 古藤田一雄・杉田倫明. 1988. 群落の物質輸送量の計測. 「植物の計測と診断」(大政謙次・近藤矩朗・井上頼直編) 147-154, 朝倉書店, 東京.
- SEKIGUCHI, K., Y. HARA, and A. UJIYE. 1986. Dieback of *Cryptomeria japonica* and distribution of acid deposition and oxidant in Kanto District of Japan. Environ. Technol. Lett. 7: 263-268.
- 高橋啓二・梨本 直・植田洋匡. 1991. 関西・瀬戸内地方におけるスギ衰退とオキシダント指数, 降雨量との関係. 環境科学 4: 51-57.
- 松本陽介・丸山 温・森川 靖. 1992. スギの水分生理特性と関東平野における近年の気候変動一樹木の衰退現象に関連して一. 森林立地 34: 2-13.
- SHIMIZU, H., Y. FUJINUMA, K. KUBOTA, T. TOTSUKA, and K. OMASA. 1993. Effects of low concentrations of Ozone (O₃) on the growth of several woody plants. J. Agric. Meteorol. 48: 723-726.
- GATES, D. M. and W. TANTRAPORN. 1952. The reflectivity of deciduous trees and herbaceous plants in the infrared to 25 microns. Science 115: 613-616.
- FUCHS, M. and C. B. TANNER. 1966. Infrared thermometry of vegetation. Agron. J. 58: 597-601.
- OMASA, K., F. ABO, Y. HASHIMOTO, and I. AIGA. 1980. Measurement of thermal pattern of plant leaves under fumigation with air pollutant. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. 11: 239-247.
- HASHIMOTO, Y. 1990. Leaf temperature based on image processing. In "Measurement Techniques in Plant Science" (Ed. by Hashimoto, Y., P. J. Kramer, H. Nonami, and B. R. Strain) 373-386, Academic Press, San Diego.
- GATES, D. M., H. J. KEEGAN, J. C. SCHLETER, and V. R. WEIDNER. 1965. Spectral properties of plants. Appl. Opt. 4: 11-20.