

樹幹温度を用いた樹木活力度の客観的評価 — 樹木活力測定器の開発 —

小澤徹三¹・小林達明²

¹正会員 日本道路公団試験研究所緑化試験研究室長 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

²農博 千葉大学園芸学部環境緑地学科助教授 (〒271-8510 千葉県松戸市松戸648)

光合成・蒸散活動に伴い樹幹を流れる樹液は、根系により集められ根株に集中してから根際を経て樹幹を通過し枝葉に至り、利用される。その際、樹液は樹幹外部の温熱環境からの影響を受け温度が変化する。成育良好な樹木は蒸散が盛んで樹液流量が多く樹冠も大きいため温熱環境からの影響が小さく、成育不良な樹木はその反対となる。そこで、科学技術庁の活力度評価手法と樹液流の温度変化率との関連を検討したところ相関が認められ、物理的な数値による客観的な樹木健全度判定の可能性が認められた。

Key Words : tree vigor, thermal environment, stem temp., sap temp., relative change of sap temp., transpiration, air temp., cork temp., difference between stem surface temp. and air temp.

1. はじめに

地球環境問題、特に、二酸化炭素固定における樹木の役割が重要視され、光合成能力が高い健全な状態に樹木を維持するために、その成育状況の評価や判定が重要となっている。成育状況調査は活力度調査¹⁾とも言い、「樹木の元気さの度合い」又は「生理活動の結果としての樹木成育度合い」の評価を行うもので、農作物等とは異なり²⁾、一般的に緑化分野では科学技術庁資源調査会によるカテゴリー化したランク評価法³⁾(以下「常法」という)による合計値又は平均値をさす場合がほとんどである⁴⁾。しかし、この方法は個人差および習熟度による変化等が生じ易いため⁵⁾、樹木の活力ある状態を「光合成、呼吸作用、養分吸収作用で代表される植物の生理活動が正常で活発である状態又はそれらの累積効果が表れている状態」と定義し、常法による活力度値と相関があり光合成等の生理的機能と関連する物理的な値による樹木成育評価が求められていた。

既報⁶⁾では樹幹表面温度と気温を用いた樹木活力判定法を報告しているが、気温等(放射・風の影響を含む)の影響を受ける前の樹幹温度(樹液温度も含む)の検討や樹幹温度に影響を与える放射・風の影響の除去が課題となっていた。また、樹幹表面となる樹皮は、肥大成長に伴い剥離する外樹皮と生きている組織である内樹皮から構成されている。外樹皮と内樹皮の境界である周皮の外側にコルク層が形成され、樹液と気温等の影響を直接的に受けている。

本研究は、気温等と樹液流の影響を同時に受けている樹幹温度および気温等のみの影響を受けている樹幹温度に等しい樹幹類似物質(コルク材)の温度測定により放射等の影響を除去し、樹液の樹幹内上昇に伴う樹幹温度変化の度合いにより樹木活力の客観的評価を行ったものである。

まず、実際の緑化木の高さ・樹幹挿入深毎の樹幹温度の分布や樹幹も含めた樹木周辺温熱環境の日変化および気温等の影響を受けた樹幹類似物質(コルク材)の温度変化等の把握により測定箇所・時間等を絞り込み(樹木測定B1・B2)、測定対象を広げて判定手法を確認し(樹木測定A)、樹幹温度の変化の度合いを用いた樹木活力判定手法の検討を行った。

2. 調査方法等

(1)調査対象

対象樹木はケヤキとした。Table 1の樹木測定Aは、東名高速道路厚木ICで10本および川崎市宮前区で21本・麻生区で15本の樹木を1回(数分間)のみで1997年8月と9~10月の夏と秋に測定した。樹木測定Bは、5分間隔の連続測定でB1・B2の2種類を行い、樹木測定B1では1997年7~8月に東名高速道路中井PAで2本(12日間)および厚木ICで3本(1本×4日, 2本×17日間)測定した。樹木測定B2では厚木ICで3本(1997年8~9月に約19日間, 10月に11日間, 12月に約15日間)の測定を行った。

Table 1 Measured items types and methods

Tree measured items type "A"
Tree vigor, Height, Crown diameter, Diameter breast high, Air temp. · Globe temp. · Humidity※1, Stem surface temp.:(0m,0.4m,1.2m height), Wind speed, Sap temp.:(0.8cm depth:0m,0.4m,1.2m height)※2, Cork temp.:(0m,0.4m,1.2m height), Planting density
Tree measured items type "B1"
Tree vigor, Height, Crown diameter, Diameter breast high, Insolation in and out of crown※3, Air temp.※5, Cork temp.:(1.2m height), Sap temp.:(0.5cm depth:-0.1m,0m,1.2m height) and (0.8cm depth:0m,0.1m,0.4m,0.8m,1.2m height) and (1cm depth:-0.1m,-0.05m,-0.02m,0m,0.1m,1.2m height), Earth temp.(4 directions:0.05m,0.1m,0.2m,0.4m depth)※4, Stem surface temp.:(0m,0.1m,0.4m,0.8m,1.2m height),
Tree measured items type "B2"
Tree vigor, Height, Crown diameter, Diameter breast high, Air temp.※5, Insolation in and out of crown※3, Sap temp.(4 directions,8mm depth:0m,0.4m height), Cork temp.(4 directions:0.4m height), Earth temp.(4 directions:0.05m,0.1m,0.2m,0.4m depth)※4, Stem surface temp.:(4 directions:0.4m height)

- ※1 : WBGT-101:KYOTO Electric Industries Corp.
- ※2 : HH-20(HYP-2sensor)thermometer: OMEGA Corp.
- ※3 : IKS-35(KOITO Industries Corp.)equal sensor
- ※4 : AD590sensor:ANALOG DEVICES Corp.
- ※5 : Natural ventilation type: (thermocouple "K": ϕ 0.2mm)

(2) 調査方法

活力調査は常法を用い、樹木の温度センサー類は樹幹の北～北東側に設置した。連続測定にはマルチチャンネル・データロガー⁷⁾および江藤電気株式会社モダックを使用した (Table 1)。コルク材としては、入手の容易さ・均質性・品質等を考慮し、人造コルクシート (コルク粒を再成型したもの) によりコルク片 (4cm・4cm・0.5cm) を製作し断熱材を介して幹に設置した。温度センサーは K 型熱電対の 0.2mm 線を原則とし、樹幹・コルク表面温度測定には平滑にした表面 (コルク片では対角線上の中心点) に熱電対が接触・圧着するようコード部分を固定した。

3. 測定結果及び考察等

(1) 新活力評価手法

既報⁹⁾では気温と樹幹表面温度の差 (幹気温較差) により活力を評価した。すなわち、常法による活力度値が 1 に近い健全木ほど蒸散が盛んであり、根から上昇した水分が幹を通過する過程で、成育不良木に比べ樹幹温度は気温等の影響を受ける時間が少なく、その程度は樹液流量に対応する。熱源としての気温等の値が予想される樹幹温度の最大値であると想定されるため、次に示すように、簡易的に幹気温較差 (DSA: Difference between Stem surface temp. and Air temp.) により樹液流量の程度を関連づけ、常

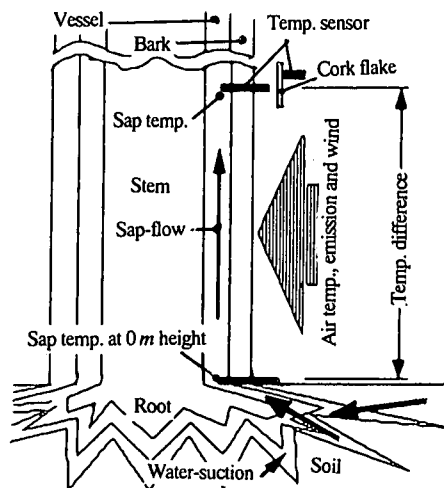


Fig. 1 The basic structure of a sap temp. change with the sap-flow by photosynthesis and transpiration.

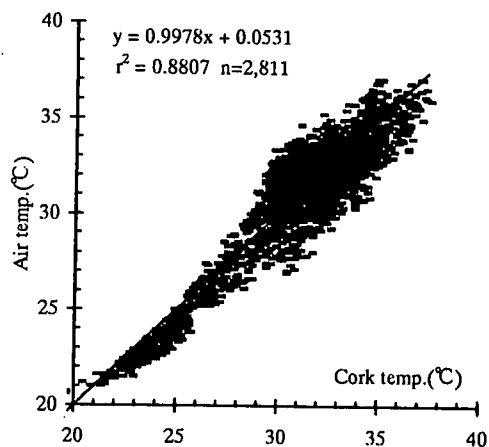


Fig. 2 Correlation between Air temp. and Cork temp. (July-Aug./1997, fine days; 10:00-15:00, Tomei-Atsugi Interchange and Tomei-Nakai Parking area, measured type "B1")

法による活力度値の推定を行ってきた。しかし、樹幹における熱収支の検討により、樹幹温度は温熱環境および樹液流量・温度に主に影響されていることが判明しており^{6),8)}、①気温等の影響を受ける直前の樹液温度である根際部樹幹温度の影響の除去、②放射・風の影響の除去という課題が残されていた。

$$\begin{aligned}
 & \text{幹気温較差: DSA} \\
 & \text{1.2m 高樹幹温度: ST1.2, 気温 (1.2m 高): AT1.2} \\
 & \text{DSA} = \text{ST1.2} - \text{AT1.2}
 \end{aligned}$$

これらの課題に対し、①地際部樹幹温度と地上部樹幹温度の差の把握、②樹幹温度と樹液流の影響を受けていない樹幹類似物質 (コルク材) との温度差の把握により前述の影響の除去が可能と想定された。

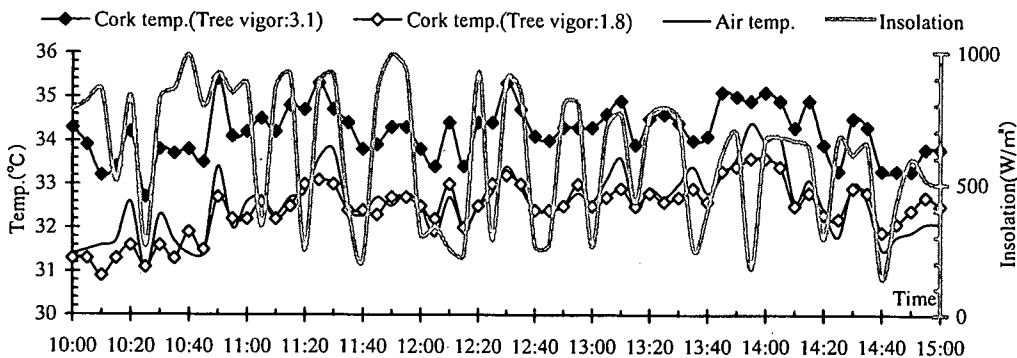


Fig. 3 Diurnal changes of air temp. and cork temp.(9/Aug./1997, fine, Tomei-Atsugi Interchange, measured type "B1")

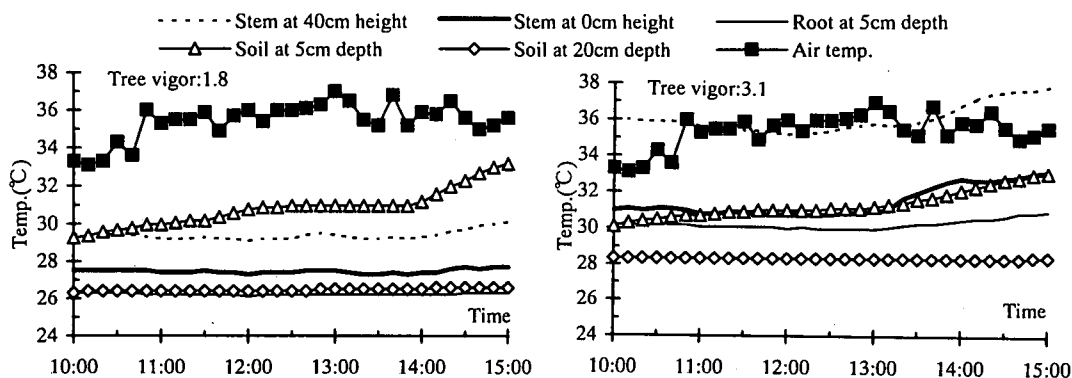


Fig. 4 Diurnal changes of sap temp.(0.8cm depth) and earth temp. at some heights and soil depth(11/Aug./1997, fine, Tomei-Atsugi Interchange, "Zelkova", measured type "B1")

そこで、これらの値を利用した新しい判定手法として「ある環境条件下での樹幹温度の最終予想値である気温等に対し、樹液流に影響された樹幹温度がどれだけの割合に達しているか」という樹幹温変化率(RCS: Relative Change of Sap temp.)を検討することとした(Fig. 1)。樹幹温変化率の考え方を次式に示し、この式に必要な、気温等の影響を受け樹液の影響を受けていない樹幹類似物質としてコルク温度、地面からの高さが 0 m・x m の樹幹温度について検討を加えるものとする。

$$\left[\begin{array}{l} \text{樹幹温変化率: } RCS, \quad x \text{高樹幹温度: } STx \\ \text{根際樹幹温度: } ST0, \quad x \text{高コルク温度: } CTx \\ RCS = \frac{(STx - ST0)}{(CTx - ST0)} \times 100 \end{array} \right]$$

a) コルク温度

人造コルクシートの温度(以下「コルク温」という)と気温について、既報⁹⁾により設定された時間帯である 10:00~15:00 で晴天日のみのデータにより関連をみたところコルク温は気温と高い正の相関が認められた(Fig. 2)。コルク温と気温の日変化を見ると、活力度 1.8 のコルク温は自然通気式の気温変

動に比べ微小な変動が少なく安定的になる傾向が確認された。また、活力度 1.8 の樹木は枝下高 1.97m 平均枝幅 5.05m であり、活力度 3.1 の樹木は枝下高 3.2m・平均枝幅 3.28m で枝下高や樹冠の相違により樹幹部の放射環境に違いが生じ、活力度 3.1 の樹木に取り付けたコルク片の温度が高くなったと考えられる(Fig. 3)。

すなわち、樹幹と同じ場所に設置したコルク片は樹幹と同様に気温・放射・風の影響を受けており、放射・風の影響が少ない場合には、微小な温度変化が少なく安定的な気温測定に有効であるため、気温の影響を反映する物質(気温代替物質)として評価可能であるものと言える。しかし、このコルク温は、生きている樹木の樹幹温度と異なり樹液流の影響を受けておらず、枯損した樹木と同等の樹幹温度を示しているものと言える。

b) 樹幹温度

地際部樹幹温度に最も影響を与えていると想定されるのは地温である。地温は、測定場所により変化すること⁷⁾および根で吸収された地下水は一旦根から幹への転換点である根株の下方に集められ気温等の影響を直接的に受けながら幹を上昇すること等が

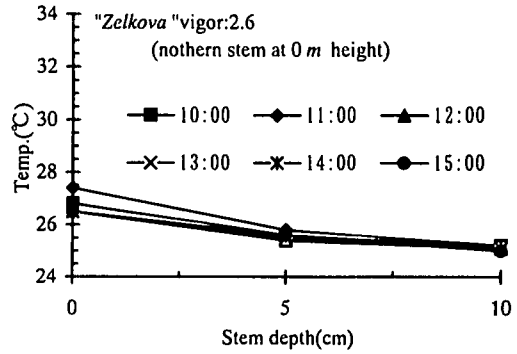
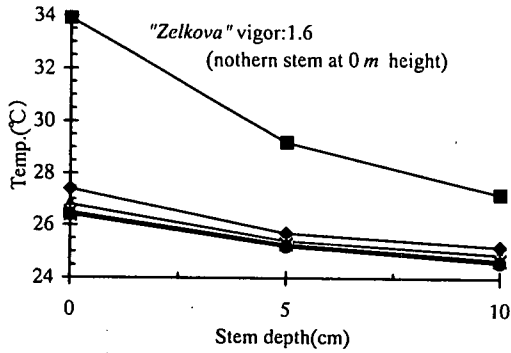


Fig. 5 Changes of stem temp. at each some depths (2/Aug./1997, fine, Tomei-Nakai Parking-area, measured type "B1")

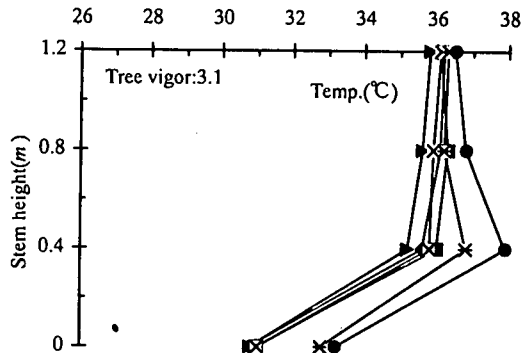
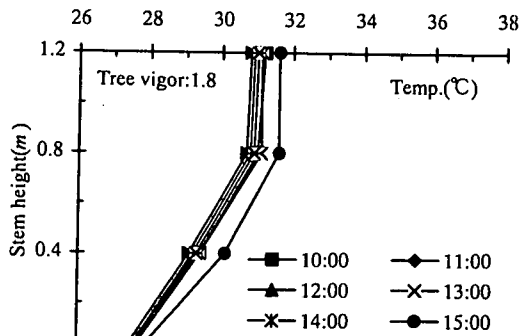


Fig. 6 Changes of sap temp. (0.8cm depth) at some heights on nothern stem (11/Aug./1997, fine, Tomei-Atsugi Interchange, "Zelkova", measured type "B1")

知られている⁹⁾。そこで、気温、地際部樹幹温度、樹根温度および地温の日変化を見たところ、活力の良い樹木の0cm 樹幹温度・5cm 根部温度は、気温等の影響が認められる比較的浅い5cm 深程度の地温と異なり、安定的な温度変化であることが認められた。それに対し、活力の不良な樹木は全体に温度レベルが上昇し、浅い土壌深と同様な変化傾向を示し、気温等の影響が認められた (Fig. 4)。

樹幹温度の直径方向の温度変化を測定したところ、表面から0.5~1.0cm 付近で安定し始めること、10時頃まで朝の日射の影響が推定されることおよび気温等の影響は11~15時頃に安定する傾向が認められた (Fig. 5)。また、ケヤキの樹皮の厚さは生育状況等により異なるが、数mm 程度であり、約5mm 以上で大方樹皮部を貫通できることが多い。そこで、今回は0.5~1.0cm 中間の値である0.8cm 深で11~15時頃に測定するものとした。

樹幹温度の高さ方向の温度変化を測定したところ、林学や造園学において普遍的に使用される胸高(約1.2m)を従来用いていたが、樹液流速度は晴天日の10時~15時頃にほぼ一定となり¹⁰⁾、一般的に50cm/hr を越えることはないこともあり^{11),12),13)}、気

温等の影響をある程度受け安定した樹幹温度を測定するためには50cm 程度以内が望ましいと想定された。また、樹幹中を樹液が40cm 移動するのに約1時間必要となるため、樹液流速度が安定するの10時~15時頃に対して樹幹温度が安定する時間に約1時間のずれが生じたものと言える。さらに、高さ別樹幹温度日変化を測定したところ、活力の良いものは80cm 以上、活力の悪いものは40cm 以上で樹幹温度にほとんど差が無く、良否の判別精度を良くするために温度差を利用するには、地上40cm 高程度での測定が有効であることが判明した (Fig. 6)。また、コルク温と同様に活力度の相違により温度レベルが異なっており、生育状況による樹液流の相違や気温・放射の影響が考えられた。

既報⁶⁾では樹幹表面温度を用いていたが、放射等の直接的な影響を避けると共に安定的な測定をするには0.8cm 深の樹幹温度測定が有効であり、活力度による差を示すためには胸高より低い位置である40cm 高での測定が有効であることが判明した。

(2)新活力指標の有効性

樹木周辺の温熱環境の測定により、次のことが確

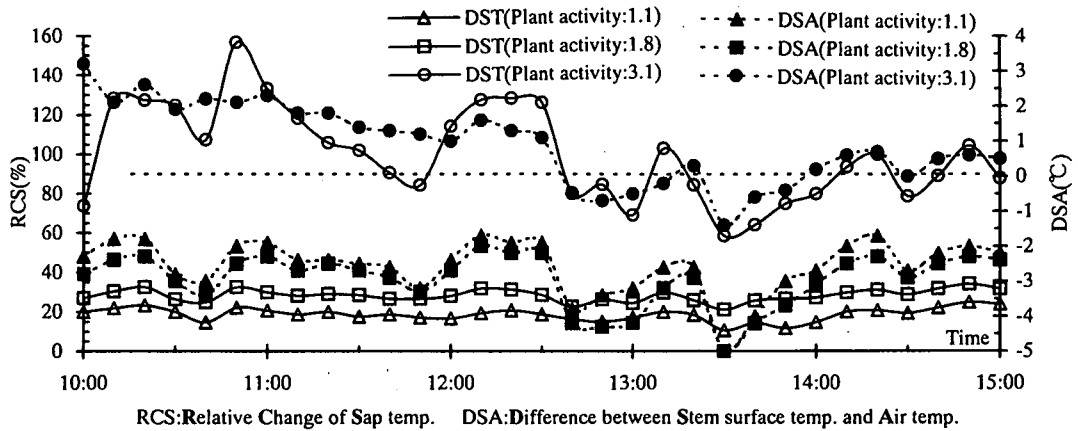


Fig. 7 Diurnal change about RCS and DSA(11/Sept./1997, fine, Tomei-Atsugi Interchange, "Zelkova", measured type "B2")

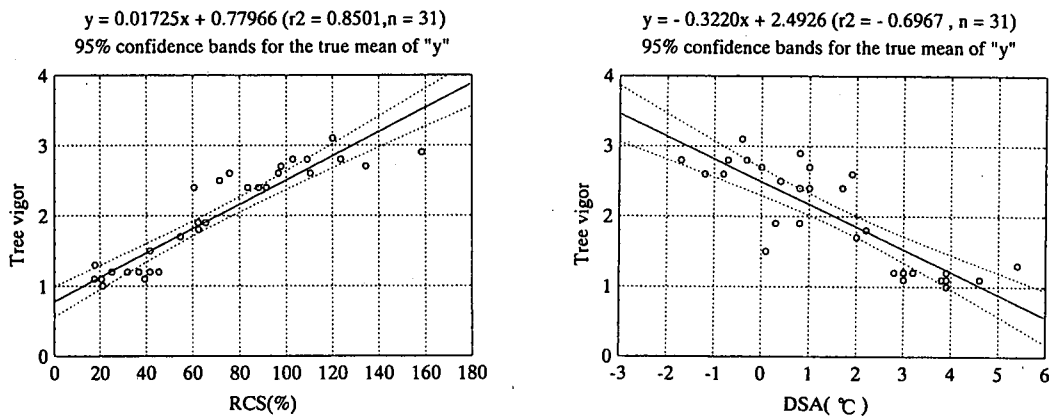


Fig. 8 Correlation between calculated values with stem temp. and tree vigor (19/Aug/1997; fine, Kawasaki city, 21/Aug/1997; fine, Tomei-Atsugi Interchange, "Zelkova", measured type "B1")

認められた。

- ①樹幹類似物質であるコルク材の温度には、気温との相関が強い・気温と比較すると微小変動が少ない・放射等の影響を反映することが確認された。
 - ②成育状況と関連する樹冠の大きさ等により、根際温度が異なり、不良木ほど気温等の影響を受け易く⁷⁾、従来の胸高(約 1.2m)付近より低い位置から樹幹温度は気温等の影響を受けるため、約 40 cm 高での温度測定が望ましい。
 - ③コルク温熱源としての気温等の影響が予想される樹幹温度の最大値である。
 - ④樹木の幹部・根際部・地下部(0.8cm 深)の温度変化は気温に比べ微小変化が少なく安定的である。
- そこで、樹幹温変化率(RCS)と幹気温較差(DSA)の日変化状況を比較して見ると、樹幹温変化率は活力度 1.1 と 1.8 の区分が明確になっていることが判明した(Fig. 7)。また、幹気温較差に比べ相関係数が高

くなっており、特に活力度 2 以下の成育良好木のデータの分散状態が改善し精度の向上が認められ (Fig. 8)、Fig. 7 の変化状況が確認された。ただし、温度測定は瞬間的なため、特に活力度の低い樹木においては樹幹下部等が放射の影響を受け易くなり⁷⁾、100%を越える値が生じたものと推定された。

以上の結果は、前述の仮説を実証するものであり、樹幹温変化率により樹木の健全度を判定できる可能性を示したものと言える。前述した樹幹温変化率の定義式の中の「x」は 0.4(m高)となる。

4. おわりに

単木的な活力測定には、年輪や新梢伸長量等の植物の生長量による方法、クロロフィル(a,b)・N・P・K 等の体内成分分析による方法、熱・質量・運動量等の生物物理的計測による方法、樹形・葉形等の形

態的特徴による方法（ランク評価法）および分光反射特性等のリモートセンシング技術による方法等があるが、機械・サンプリング精度および経済性等の理由により、常法以外ほとんど使用されていないのが現状である。その点で、今回開発した方法は、常法に代わりうるものであると思われる。

本手法の測定条件としては、多少安全側で考えると次のような条件下での測定を行う必要があると想定された。ただし、樹液流と関連が深い蒸散は放射の影響を受けるため放射量が不足する曇りの日は測定が困難となることが判明している^{11),14),15)}。

- ①夏期^{6),16)}で放射があり、そよ風程度の風速で測定時間は11:00~15:00程度であること。
- ②気温等の直接影響を受け易い植栽密度であること。
- ③樹幹温度測定位置は0cm地際部と40cm高程度で深さ約0.8cm(0.5~1.0cm)とすること。

今回提案した手法については、各種環境条件による測定条件の整理、適用範囲の拡大、熱収支式の整理⁸⁾および土壌における水分条件等との関連等について検討を加える必要がある。また、この原理を利用した活力度判定器については、既にプロトタイプを製作しており、実際に現場でデータ収集しながら改良等を行っていく予定である。

謝辞：本研究の実施に当りご助言を得た、元東京農工大学教授真下育久氏、ジオグリーンテック㈱長谷川秀三氏および久保田光政氏に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験所, 東京農業大学: 植物の活力度調査方法に関する研究報告書, pp.2-51, 1975.
- 2) 日本土壌肥料学会: 植物栄養実験法, ㈱博友社, pp.361-367, 1990.
- 3) 科学技術庁資源調査会: 勧告第26号「高密度地域における資源利用と環境保全の調和」, pp.213-222, 1972.
- 4) 内海東男, 小澤徹三: 赤外カラー写真を利用した植生環境調査について, 日本道路公団試験所報告 昭和54年

- 度, pp.224-236, 1980.
- 5) 日本道路公団試験所: 試験所技術資料第703号「赤外カラー空中写真による沿道植生環境調査について」, pp.63-70, 1981.
- 6) 太田敬之, 丹下 健, 佐々木恵彦, 松本陽介, 小澤徹三: 樹木活性の判定方法の検討, 日本緑化学会誌, Vol.17, No.2, pp.18-24, 1992.
- 7) 小澤徹三, 生原喜久雄, 桃井信行, 清宮 浩, 森崎耕一: マルチチャンネル・データロガー及び新温度センサーによる樹木周辺温熱環境の把握, 土木学会論文集, No.580/VII-5, pp.65-70, 1997.
- 8) 吉田裕介, 小林達明, 林美恵子, 田中隆文, 川九邦雄, 小澤徹三: ケヤキ植栽木樹幹表面の熱収支解析, 第28回日本緑化学会研究発表要旨集, pp.337-340, 1997.
- 9) 荻住 昇: 樹木根系図説, 誠文堂新光社, pp.37-46, 1979.
- 10) 森川靖: ヒノキの樹液の流れ—林分の水分収支と関連して—, 東大演報66, pp.251-297, 1974.
- 11) 丹下 健, 松本陽介, 真下育久: 斜面上の異なる位置に成育するスギの樹液流速の日変化, 第94回日本林学会論文集, pp.313-314, 1983.
- 12) 松本陽介, 太田敬之, 佐々木恵彦, 小澤徹三: 高速道路付帯緑地における樹木の活力度と樹幹温度, 第100回日本林学会論文集, pp.423-424, 1989.
- 13) 森川靖: 樹液流測定装置と測定法: 日本林学会誌54(5), pp.166-171, 1972.
- 14) Yasushi Morikawa, Shigeaki Hattori, and Yoshiyuki Kiyono: Transpiration of a 31-years-old *Chamaecyparis obtusa* Endl. stand before and after thinning, *Tree Physiology* 2, pp.105-114, 1986.
- 15) 角張嘉孝, 細川和広: スーパーポロメーターと生態・生理学的シュミレーション・モデルを用いたブナ林分蒸散量の推定法, 日本林学会誌74巻第4号, pp.263-272, 1992.
- 16) 武田佐知子, 生原喜久雄, 小澤徹三, 長谷川秀三, 川九邦雄: ケヤキの活力が気温緩和効果に及ぼす影響—活力度と樹幹温度の関係—, 第108回日本林学会論文集, pp.124-125, 1997.

(1998.7.28受付)

THE OBJECTIVE EVALUATION METHOD OF THE TREE VIGOR WITH THE STEM TEMPERATURE -THE DEVELOPMENT OF A PLANT VIGOR MEASURING INSTRUMENT-

Tetsuzo KOZAWA and Tatsuaki KOBAYASHI

The sap temperature changes by heat exchanged between the tree and its external environment, for example, the air temp., the insolation, and the wind, when the sap is rising in the stem from the root. The good growth tree exchanges less heat from its external world than the bad one, because its amount of flow is more and its bigger crown mitigates the thermal environment of the stem and the root. The relative change of sap temp., which is the change of the sap temp. passing through a fixed length stem divided by the air temp. that is the forecast maximum change, is related to the tree vigor judged with the four-ranking method by the Science and Technology Agency.