

## 近赤外デジタルカメラとサーモグラフィ装置による マツノザイセンチュウ接種クロマツ苗の撮影<sup>\*1</sup>

作田耕太郎<sup>\*2</sup> · 村上 拓彦<sup>\*2</sup> · 遠山 昌之<sup>\*3</sup>

樹木の健全度を非接触・非破壊で評価する上で、樹木の生理状態と関連する近赤外域や熱赤外域の電磁波を利用する方法がある。近赤外域は葉での反射率が高く、相対的に反射率の低い可視赤色域との域差や比から、また、熱赤外域は樹体から放射される熱の波長域であり、温度に変換することで健全度が評価できるとされている。本研究では、近赤外デジタルカメラとサーモグラフィ装置を用いて、マツノザイセンチュウを接種されたクロマツ苗、および土壌への灌水を停止して人為的に乾燥状態としたクロマツ苗を定期的に撮影し、得られた画像を解析することから、より簡便な樹木の健全度判定への赤外波長域応用の可能性について検討した。その結果、サーモグラフィで観測された葉温は葉面コンダクタンスと、正規化植生指標は夜明け前の水ポテンシャルとの間に関係性が見いだされた。

### I. はじめに

樹木の健全度を判定する方法は、活力（生理状態）を調べること、樹体の維持や腐朽の度合いを調べることで、そして形や外観に直接表れていることを調べることで、の3つに大別され（渡辺, 1999）、さまざまな計測機器や判定方法が開発されている。これらの計測機器や方法のほとんどは、単木への適用を想定していることから、大量の樹木を判定するには比較的多大な時間と労力を要する。また、機器の使用に際して対象樹木への物理的破壊がともなう方法も多い。

以上のような問題点を解消し、樹木の健全度を判定する方法として、近年、非接触・非破壊で樹木の生理状態に強く関連する近赤外域や熱赤外域の電磁波を利用する方法が発達してきた。その一つが樹体から放射される熱の波長域である熱赤外域の波長を感知し、樹体の温度に変換し、デジタル画像化して温度分布を調査するサーモグラフィ装置であり、実際に樹木の診断への適用を検討した研究例もある（大政ら, 1990; 1993）。サーモグラフィ装置の他に、葉における反射率が高い近赤外域と、相対的に反射率の低い（吸収率の高い）可視赤色域（Innes, 1993）を感知し、デジタル画像化する近赤外デジタルカメラがある。この2つの装置は、数本から数十本単位での計測が可能であり、林分単位での異常木の検出など林業分野への応用も可能であろう。

しかしながら、電磁波を利用する装置と生理的測定機器によって同一試料を計測し、電磁波を利用する装置の有用性や理論的な裏付けを行った研究例は少なく（中尾ら, 1994）、特に近赤外デジタルカメラについては開発されたのがごく最近であり、検証例を蓄積して、より有用な観測の方法や理論を構築する必要がある。

本研究は人為的にストレス状態に導入した樹木苗を材料として、サーモグラフィ装置と近赤外デジタルカメラによる樹冠葉群の観

測と樹体の生理状態測定を同時に行い、電磁波を利用した樹木の健全度の評価方法を構築する基礎的資料とすることを目的とした。

### II. 材料と方法

#### (1) 供試材料と測定方法

材料には九州大学農学部構内の苗畑で生育するクロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.) 6年生苗12本（平均苗高163.5 ± 11.7cm, 平均地際直径19.0 ± 1.4mm）を使用した。苗は真砂土を土壌として11号素焼き鉢（容積：13,500cc）で生育した。これらの苗は対照苗6本と人為的にストレス処理を行う苗（処理苗）の6本に分け、2本で1組のペアとした（合計6ペア）。6ペアのうち半分の3ペアの処理苗に対して強毒性Ka-4系統のマツノザイセンチュウ (*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle) の接種、残りの3ペアの処理苗には朝夕十分に行っていた灌水を停止した。これらの処理は2001年7月30日に行った。なお、線虫の接種は苗1本あたり1万頭を主軸先端部に行い、また、灌水停止苗には処理開始16日目に灌水を再開し、22日目に再び灌水を停止した。

処理日より、4日から10日間隔で近赤外デジタルカメラ (Agricultural Digital Camera, Dycam, USA) とサーモグラフィ装置 (TH-3102MR, NEC san-ei, Tokyo) による各ペアの樹冠部分の観測、携帯式光合成測定装置 (SPB-H4, ADC, UK) による当年生針葉の葉面コンダクタンス (*Gleaf*) の測定を午前10時から正午にかけて行った。また、苗の水分状態の指標として夜明け前の針葉の水ポテンシャル ( $\psi_{pd}$ ) をプレッシャーチャンパー (Model 600, PMS, USA) によって測定した。これらの測定は2001年9月16日まで行い、*Gleaf* と  $\psi_{pd}$  の測定については、灌水停止ペアの対照苗では行わず、線虫接種ペア（対照苗 C1, C2, C3 と線虫接種苗 I1, I2, I3）、および灌水停止苗 D1, D2,

<sup>\*1</sup> Sakuta, K., Murakami, T. and Tohyama, M.: Photography of the pine wilt nematodes inoculated Japanese black pine seedlings by the NIR (near infrared) digital camera and the thermographical unit

<sup>\*2</sup> 九州大学大学院農学研究院 Fac. Agric., Kyushu Univ., Fukuoka 812-8581

<sup>\*3</sup> 九州大学大学院生物資源環境科学府 Grad. Sch. Biores. and Bioenvir. Sci., Kyushu Univ., Fukuoka 812-8581

D3について実施した。また、測定期間中の気温を温湿度計測装置 (SK-L200TH, SATO KEIRYOKI MFG., Tokyo) を使用して10分間隔で測定した。なお、線虫接種苗の病徴の進展を既報 (鈴木, 1992; 作田ら, 1994) を参考にして4段階に分けて判定した。

## (2) 画像解析

サーモグラフィ装置によって撮影した画像から、コンピュータ上で当年生の側枝1本の葉群部分を解析対象領域とし、各測定日の画像より同じ領域の平均気温を算出した。また、近赤外デジタルカメラによって得られた画像も同様に、当年生側枝1本の葉群部分を解析対象領域とし、各測定日の同一領域の植生指標を算出した。算出した植生指標は RVI (ratio of vegetation index) と NDVI (normalized difference vegetation index) で (Innes, 1993), 以下の (1) 式および (2) 式によって、それぞれ算出した。

$$RVI = \frac{NIR}{red} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (2)$$

ここで、NIR ; 0.72~1.10  $\mu\text{m}$  の近赤外領域 (near infra-red), red ; 0.64~0.77  $\mu\text{m}$  の赤色領域の波長強度である。

## Ⅲ. 結果

### (1) $\psi_{pd}$ と $G_{leaf}$ の変化

図-1に对照苗, 線虫接種苗および灌水停止苗の  $\psi_{pd}$  と  $G_{leaf}$  の変化を示す。对照苗の  $\psi_{pd}$  は測定期間を通じて高く,

-0.1~-0.5MPaであった。 $G_{leaf}$ は測定日によって変動が大きかった。いずれの对照苗も測定開始より3週間ほどは20~40  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の値だったが、その後は上昇傾向にあった。線虫接種苗の  $\psi_{pd}$  は個体間で異なる変化を示した。I1とI2は病徴IからII段階の間は对照苗と同等の値だったが、病徴がIII段階になると急激に低下し、I1は処理開始から32日目、I2は28日目で測定限界値 (-6.0 MPa) 近くまで低下した。I3については病徴がIII段階まで進行しても  $\psi_{pd}$  の低下は認められず、線虫接種後32日目に測定限界値を越えた。 $G_{leaf}$ はいずれの線虫接種苗も20~40  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で推移していたが、 $\psi_{pd}$  が低下する3~7日前から低下し、0  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となった後での増加は認められなかった。灌水停止苗の  $\psi_{pd}$  と  $G_{leaf}$  は密接に対応した変動を示した。 $\psi_{pd}$  と  $G_{leaf}$  は処理開始後徐々に低下していき、再灌水を行う前の8日目から14日目にかけていずれの個体も  $G_{leaf}$  は0  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となった。このころの  $\psi_{pd}$  は-1.2~-2.0MPaだった。再灌水の後、D1とD3については  $\psi_{pd}$ ,  $G_{leaf}$  がともに一時的に上昇したが、再度の灌水停止以後、低下していき、 $G_{leaf}$  は処理30日目には0  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、その後  $\psi_{pd}$  も測定限界値 (-6.0 MPa) 以下まで低下し、枯死した。D2については再灌水時の一時的な  $\psi_{pd}$  と  $G_{leaf}$  の上昇は認められず、他の個体よりも早く枯死した。

### (2) 日中の葉温の変化

図-2に对照苗の葉温と測定時の気温、さらに線虫接種苗と灌水停止苗のペア对照苗との葉温差 (処理苗-对照苗) と測定時の気温の変化を示す。对照苗の葉温は測定期間を通じて気温よりも常に低く、また気温と対応した変化を示した。線虫接種苗の对照

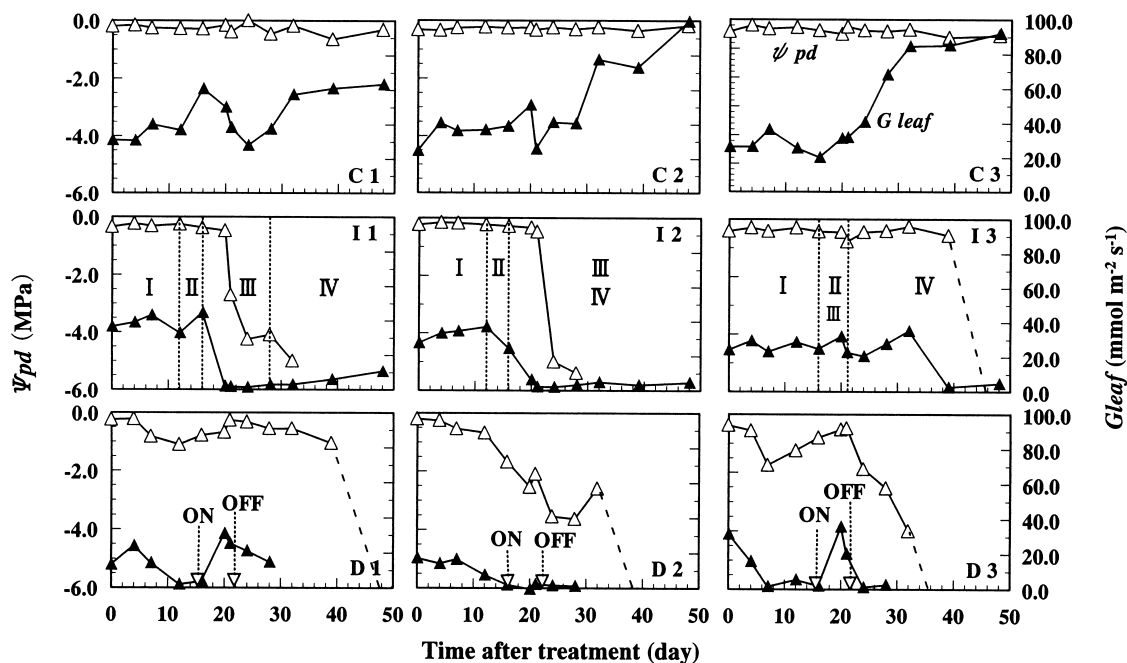


図-1. 对照苗 (C1, C2, C3) と線虫接種苗 (I1, I2, I3) および灌水停止苗 (D1, D2, D3) の  $\psi_{pd}$  と  $G_{leaf}$  の変化  
図中の I, II, III および IV はそれぞれ、健全、樹脂滲出低下、樹脂滲出停止および当年葉の退色を示し、ON と OFF はそれぞれ、再灌水と再灌水停止を示す

Fig-1. Changes of  $\psi_{pd}$  and  $G_{leaf}$  in control (C1, C2, C3), inoculated (I1, I2, I3) and drought treated (D1, D2, D3) seedlings, each measuring day.

苗との葉温差は、I1, I2 および I3 のいずれも病徴進展のⅢ段階までは  $0 \sim +1^\circ\text{C}$  だったが、Ⅲ段階からⅣ段階においては  $+1^\circ\text{C}$  を越えるようになり、I1 については最大  $+2^\circ\text{C}$  まで差が広がった。灌水停止苗の対照苗との葉温差の変化は、D1 では測定当初より対照苗よりも葉温が低く、灌水停止によってやや高くなった。その後、再灌水を行った頃には再び対照苗よりも低くなり、22日目の灌水停止によって再び対照苗よりも高い葉温を示した。D2 についても、測定開始当初は対照苗よりも低かったが、徐々に上昇して対照苗よりも高くなった。その後の再灌水や灌水停止のころの変化は小さく、上昇傾向は測定終了まで続いた。D3 については、測定開始日には対照苗よりも  $1$  度以上低い葉温だった。その後、処理苗の葉温は急速に対照苗よりも高くなり、処理後15日目には  $+2.6^\circ\text{C}$  に達した。再灌水を行っても、処理当初の水準までは復帰せず、測定終了まで対照苗よりも高い葉温だった。

### (3) 日中の *RVI* と *NDVI* の変化

図-3 に対照苗、線虫接種苗および灌水停止苗の *RVI* と *NDVI* の変化を示す。対照苗の *RVI* は C1 は  $5 \sim 17$  と変動が大きく、C2 と C3 では  $3 \sim 10$  の値で C1 より小さかった。*NDVI* はいずれの対照苗も  $0.6 \sim 0.9$  の値で推移し、上昇あるいは低下といった一定の傾向は認められなかった。また、C2 と C3 の *RVI* と *NDVI* は同調した変動を示した。線虫接種苗の *RVI* は I1 で10前後、I2 で  $5 \sim 10$ 、そして I3 で5前後と個体間で差があったが、測定期間中の変動は小さく、対照苗と同様に上昇あるいは低下は認められなかった。*NDVI* は I3 の処理後49日目の  $0.4$  を除いては、 $0.6 \sim 0.9$  の

値を推移した。また、C2 と C3 と同様に *RVI* と *NDVI* は同調した変動を示した。灌水停止苗の *RVI* と *NDVI* はいずれも低下傾向にあった。*RVI* は測定開始時にいずれの個体も10程度の値だったが、その後低下し、測定終了時には  $2 \sim 4$  となった。*NDVI* は測定開始時にいずれの個体も  $0.8$  程度の値だったが、その後低下し、測定終了時には D1 で  $0.4$ 、D2 で  $0.2$  そして D3 で  $0.5$  となった。

## IV. 考察

### (1) クロマツ供試苗のストレス状態

対照苗 (C1, C2, C3) の  $\psi_{pd}$  は測定期間中を通じて比較的高い値で推移し、また *Gleaf* についても測定開始時よりも低下する傾向には無く、対照苗の水分状態は悪化しなかったと判断される (図-1)。線虫接種苗 (I1, I2, I3) は樹脂滲出の減少・停止、当年葉の退色、そして旧年葉の変色という典型的なマツ材線虫病の病徴を呈し (鈴木, 1992; 作田ら, 1994)、測定終了時には枯死に至った。また、線虫接種苗の  $\psi_{pd}$  と *Gleaf* は樹脂滲出の停止以後に急激に低下し (図-1)、これまでの報告 (作田ら, 1994; Fukuda *et al.*, 1992) と同様であったが、*Gleaf* の低下は  $\psi_{pd}$  の低下よりもわずかに早かった。その一方で、灌水停止苗 (D1, D2, D3) の  $\psi_{pd}$  と *Gleaf* はともに処理開始後、対応した変化を示しながら低下し、D2のみが再灌水と再灌水停止に関係なく、低下を続けて他の個体よりも早く枯死した。D1 と D3 については、再灌水による  $\psi_{pd}$  と *Gleaf* の上昇と再灌水停止による低下が認められた (図-1)。このような灌水停止苗にお

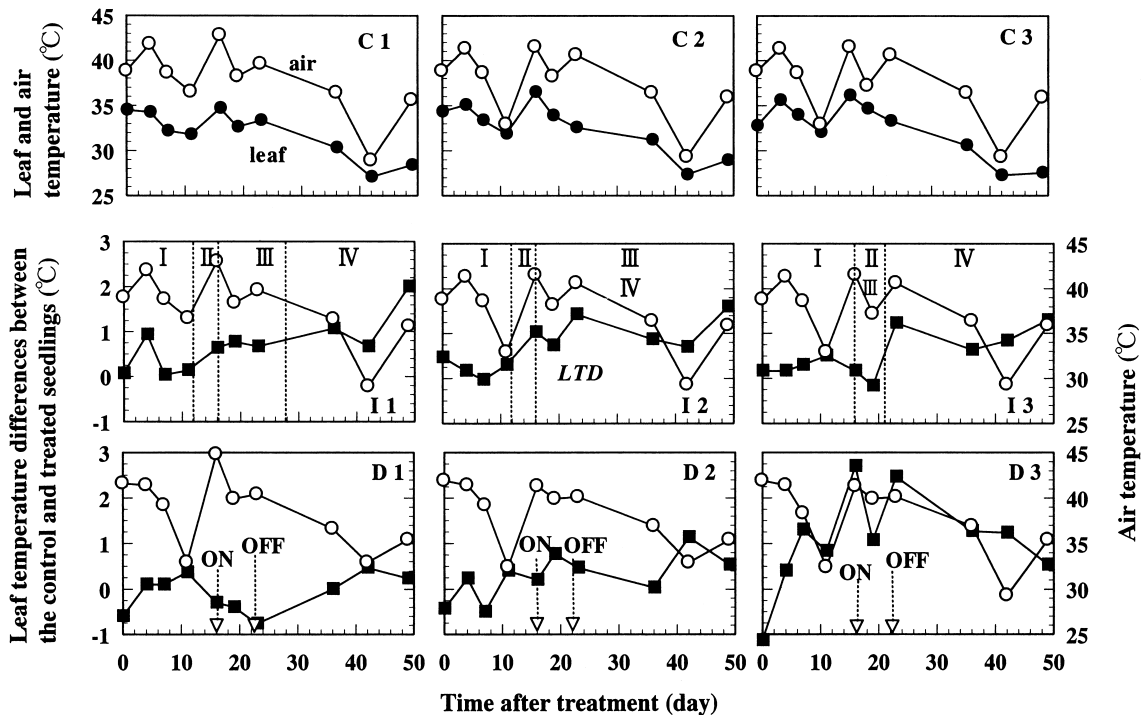


図-2. 対照苗 (C1, C2, C3) の葉温と気温、線虫接種苗 (I1, I2, I3) と灌水停止苗 (D1, D2, D3) と対照苗との葉温差および気温の変化

図中の I, II, III および ON, OFF は図1と同じ

Fig-2. Changes of leaf temperature in control seedlings (C1, C2, C3), leaf temperature differences (*LTD*) between the control and inoculated (I1, I2, I3), drought treated (D1, D2, D3) seedlings, and air temperature in each measuring day.

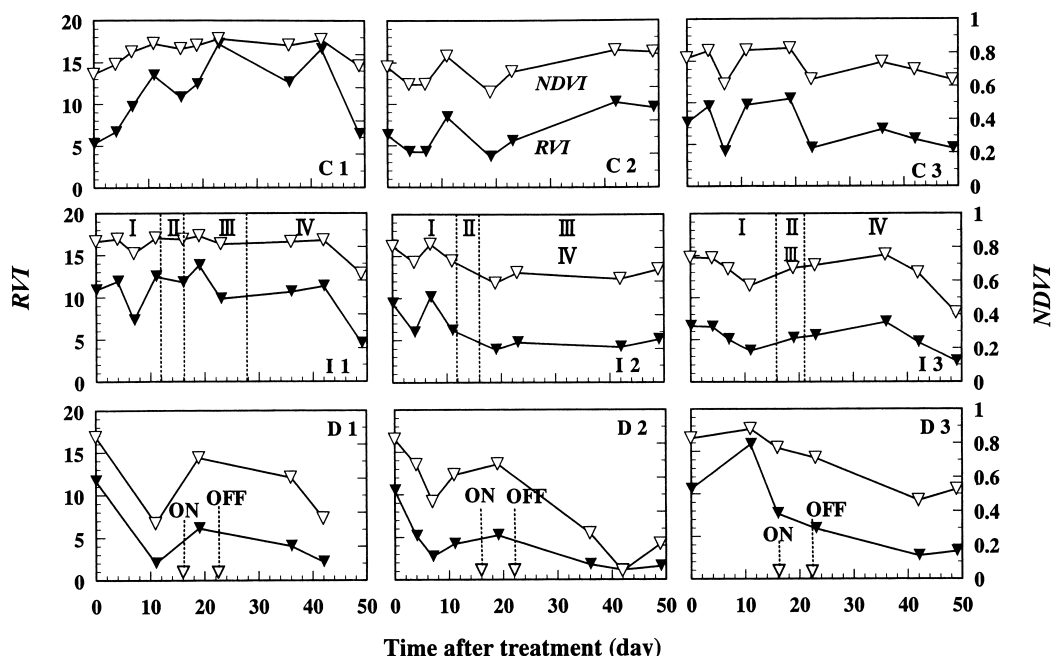


図-3. 対照苗 (C1, C2, C3) と線虫接種苗 (I1, I2, I3) および灌水停止苗 (D1, D2, D3) の RVI と NDVI の変化  
 図中の I, II, III, IV および ON, OFF は図 1 に同じ

Fig-3. Changes of RVI and NDVI in control (C1, C2, C3), inoculated (I1, I2, I3) and drought treated (D1, D2, D3) seedlings, each measuring day.

る  $\psi_{pd}$  と *Gleaf* の密接な対応は、気孔の開度が葉の水分状態に大きく影響すること (Johnson and Caldwell, 1976) によると考えられる。

以上のように、本研究で行った人為的なストレス誘導処理は効果的に処理苗を枯死に至らしめたものの、苗の生理状態の指標とした  $\psi_{pd}$  と *Gleaf* との関係は線虫接種苗と乾燥処理苗では若干異なっており、マツ材線虫病の進展に関わる水分以外の要因が示唆される (鈴木, 1994)。

#### (2) 葉温と気温

各測定日の対照苗の葉温は、測定時の気温と非常に密接な関係にあった (図-2)。しかしながら、その絶対値は常に気温よりも低かった。一般に葉温は、気温、湿度、放射、気流などの熱環境状態と蒸散によって変化する (大政ら, 1990)。すなわち本研究の対照苗での葉温は、気温を筆頭とした周囲の熱環境状態に追随しながらも、正常な生理活動が行われていたために常に気温よりも低い値を示したと考えられる。その一方で線虫接種苗および灌水停止苗はベアの対照苗よりも高い葉温であった測定日が多く、特に線虫接種苗では病気の進展にともなって徐々に温度差が大きくなった (図-2)。これは、IV-(1) でも述べたように、処理苗においては *Gleaf* の低下が認められたことによると考えられる。気孔からの蒸散作用は葉温を制御する機能を持つ (大政ら, 1990)。そのため、*Gleaf* の低下した処理苗では対照苗よりも葉温が高くなったものと判断される。

#### (3) RVI と NDVI

近赤外デジタルカメラによって観測された画像から算出した植生指標である RVI と NDVI は、健全な葉における赤色域の反射率が低く、逆に近赤外域の反射率が相対的に高いことが、葉の活性の低下によって赤色域の反射率が上昇し、近赤外域の反射率が

低下することを応用した指標である。したがって、式 (1) と式 (2) で示される RVI と NDVI は処理後、葉の生理活性の低下にともなって低下する (Innes, 1993) ことが予測される。しかしながら、本研究では灌水停止苗には RVI と NDVI の低下が観察されたもののマツ材線虫病の進展が確認された線虫接種苗での RVI と NDVI の低下は不明瞭であった (図-3)。この理由については、測定時の気象条件の影響 (渡辺, 1999) や撮影条件などが考えられるものの、現時点では不明である。

#### (4) 生理的指標と電磁波を利用した指標との関係

図-4 (a~f) に *Gleaf* に対する葉温 (a), RVI (b) および NDVI (c) の関係と  $\psi_{pd}$  に対する葉温 (d), RVI (e) および NDVI (f) の関係を示す。なおここでは、すべての苗の晴天日 (光量子束密度  $> 800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) のデータについて散布図を作成した。*Gleaf* の上昇に対して葉温は低下し、両者は負の直線 ( $y = -0.06x + 35.1, r = 0.513$ ) で回帰された ( $p < 0.05$ ) (図-4 (a))。これに対して RVI と NDVI については *Gleaf* の低下とともに小さくなるようではあったもののばらつきが大きく、統計的に有意な関係は認められなかった (図-4 (b, c))。また、 $\psi_{pd}$  の低下に対しては、NDVI が  $0 \sim -1.0 \text{MPa}$  の範囲について限定した場合にのみ曲線 ( $y = 1.00 \exp(-1.16x), r = 0.920$ ) で近似された ( $P < 0.05$ ) もの (図-4 (f))、葉温と RVI については直線、あるいは曲線で近似できる関係は認められなかった (図-4 (d, e))。IV-(2) で述べたように、本研究で材料としたクロマツ対照苗の葉温は気温の変化に大きく支配されながらも、常に気温よりも低い値を示した。これは葉からの蒸散が健全に行われていたことに起因し (大政ら, 1990)、水分状態が高く保たれ、気孔開度が維持されていたことを示している (Johnson and Caldwell, 1976)。図-4 (a) において相対的に低い *Gleaf* は

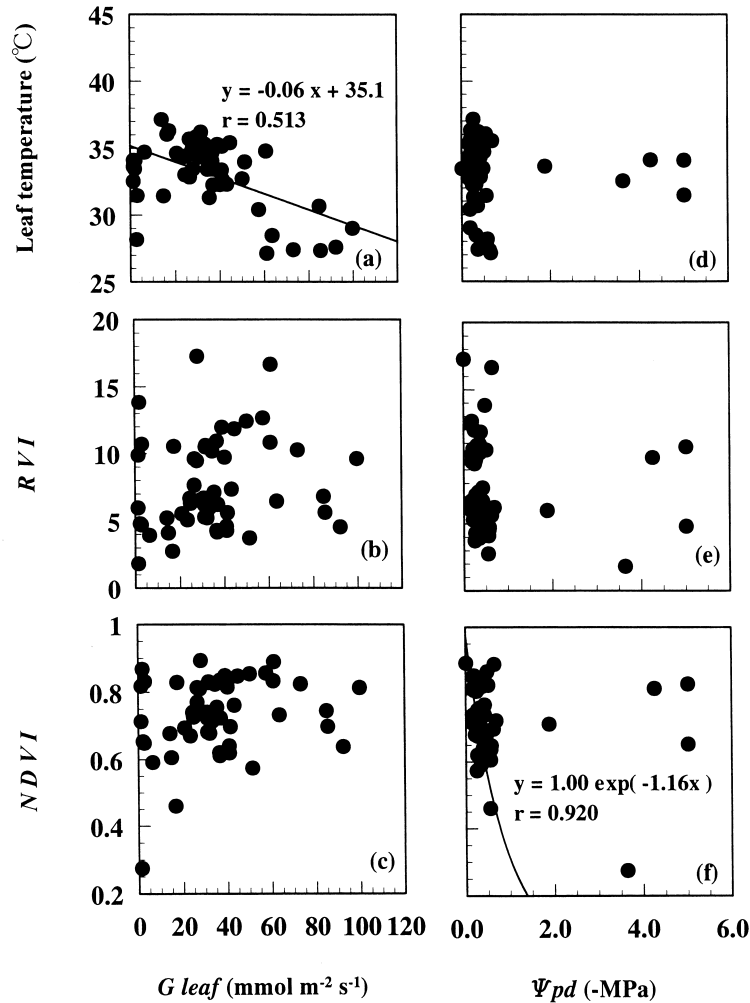


図-4. (a～f)  $G_{leaf}$ に対する葉温 (a),  $RVI$  (b) および  $NDVI$  (c),  $\psi_{pd}$ に対する葉温 (d),  $RVI$  (e) および  $NDVI$  (f)

Fig-4. (a～f) Relationships between  $G_{leaf}$  and leaf temperature (a),  $RVI$ (b)and  $NDVI$  (c), and relationships between  $\psi_{pd}$  and leaf temperature (d),  $RVI$  (e) and  $NDVI$  (f)

樹脂滲出停止以後の線虫接種苗と灌水停止苗のデータであり、ストレスの進行が葉での健全な蒸散を阻害し、結果として葉温が上昇したものであろう。また、 $\psi_{pd}$ の低下は気孔開度に影響する (Johnson and Caldwell, 1976) だけではなく、葉内の電子伝達回路や様々な代謝活動にも影響する (Larcher, 1995)。そのため、細胞の膨圧が維持されていると考えられる  $\psi_{pd} = -1.2\text{MPa}$  前後まで (Larcher, 1995) は、 $\psi_{pd}$ と  $NDVI$ との間に関係が認められたと思われる。しかし、曲線によって近似された生理的な理由については不明であり、今後さらに検討を進める必要がある。

以上のことより、一度に複数個体の測定が可能である電磁波を利用した2つの測定装置の長所を生かした樹木の健全度評価法を確立するには、まず対象樹種の水分状態と葉のガス交換機能との関係を明確にすることが急務といえる。今後は水分以外のストレスとの関係性や測定条件の設定方法、対象樹種による差異などを明らかにするとともに、ノイズとして影響する観測時の気象状況など (渡辺, 1999) も考慮した、さらなるデータの蓄積と解析の深化が必要と考えられる。

## 引用文献

- Fukuda, *et al.* (1992) J. Jpn. For. Soc. 74(1): 1-8.  
 Innes, J. L. (1993) Forest health: Its assessment and status. 677pp., CAB International, Wallingford. : 198-266.  
 Johnson, D. A. and Caldwell, M. M. (1976) *Physiol. Plant.* 36: 271-278.  
 Larcher, W. (1995) *Physiological Plant Ecology* 3rd. Edit. 506pp. Springer-Verlag, Berlin : 254, 384-385.  
 中尾登志雄ら (1994) 日林九支研論 47: 29-30.  
 大政謙次ら (1990) 農業気象 45 (4): 271-275.  
 大政謙次ら (1993) 生物環境調節 31 (3): 161-168.  
 作田耕太郎ら (1994) 九大演報 71: 27-34.  
 鈴木和夫 (1992) 森林防疫 481: 59-64  
 渡辺直明 (1999) 樹木の診断. (樹木医学. 鈴木和夫, 325pp, 朝倉書店, 東京.) 282-292.

(2001年11月23日 受理)