

赤外画像による果樹の葉中水分量の推定

村松 昇*・平岡潔志

近畿中国四国農業研究センター 765-0053 香川県善通寺市生野町

Estimation of Water Content in the Leaves of Fruit Trees Using Infra-red Images

Noboru Muramatsu* and Kiyoshi Hiraoka

National Agricultural Research Center for Western Region, Zentsuuj, Kagawa 765-0053

Abstract

A method was developed to evaluate water contents of fruit trees using infra-red photography. The irrigation of potted Satsuma mandarin trees and grapevines was suppressed to induce water stress. During the drought treatment, the leaf edges of basal parts of the shoots of grapevines became necrotic and the area of necrosis extended as the duration of stress increased. Necrosis was clearly distinguished from the viable areas on infra-red images. In Satsuma mandarin, an abscission layer formed at the basal part of the petiole, then the leaves fell. Thus, detailed analysis was indispensable for detecting of the leaf water content. After obtaining infra-red images of Satsuma mandarin leaves with or without water stress, a background treatment (subtraction of the background image) was performed on the images, then the average brightness of the leaf was determined using image analyzing software (Image Pro-plus). Coefficient correlation between the water status index using the infra-red camera and water content determined from dry weight and fresh weight of leaves was significant ($r = 0.917$ for adaxial surface data and $r = 0.880$ for abaxial surface data). These data indicate that infra-red photography is useful for detecting the degree of plant water stress.

Key Words : grapevine, infra-red camera, satsuma mandarin, water stress

キーワード : ブドウ, 赤外カメラ, 水分ストレス, ウンシュウミカン

緒 言

植物を栽培・管理する上で、植物体の水分状態を知ることとは、極めて重要である。野菜などの栽培現場では、テンシオメータなどを用いて土壤水分を測定し、灌水などの栽培管理に利用している場合が多いが、果樹の場合は、根域の広さや深さが樹によって異なるため、土壤水分を測定してもその値は必ずしも植物の水分状態に反映されない。したがって、樹体の水分ストレス程度を簡易に診断する手法が開発されれば、灌水時期や量を的確に判断することができるようになる。

植物の水分状態を測定する手法として、これまで、水ポテンシャル法（間苧谷・町田, 1980）、ポロメータなどを用いた葉の蒸散速度（葦澤ら, 1983）、茎熱収支法（Sakuratani, 1981）による方法、デンドロメータによる茎径変化（Linkら, 1998）など数多くの手法が試みられてきた。これらの手法は、いずれも根から吸水された水が枝茎を経て葉で蒸散されるまでの樹体内の水の自由エネルギー、樹体内水流速およ

び膨圧に関連するパラメータを計測する手法である。

一方、近赤外分光法を使った葉中水分含量の計測については、すでに、数多くの報告がある（Facini ら, 2004; Hunt and Rock, 1989; 山本ら, 1994; Zarco-Tejada ら, 2003）。波長の情報量が多いため、この手法は測定部位については正確に測定ができるが、多くの部位を一度にとらえることはできない。葉、特に障害を受けた葉では、1枚の葉の中でも水分含量が部位により大きく異なると考えられるため、分光法による測定には限界がある。赤外光を利用した葉の水分分布のイメージングが可能になれば、栽培樹の水分状態を診断する手法として有効であると考えられる。

遠赤外波長域（4～1,000 μm ）の熱画像法は、植物体の表面温度を測定する手法としてトマト（中原・井上, 1997）、ブドウ（Jones ら, 2002）、イネ（脇山, 2002）、トウモロコシおよびコムギ（Inoue, 1990）など多くの作物で行われている。一方、近赤外波長域（0.7～2.5 μm ）では、CCDカメラにバンドパスフィルターを取り付けてメロンの果実内糖度分布を計測した例（杉山・小川, 2001）や、病害を検出する試みが行なわれている（Apan ら, 2004; Fletcher ら, 2001; 佐々木ら, 1999）。

現在、近赤外波長域の光を撮影する赤外カメラは、光通

2005年11月24日 受付. 2006年4月14日 受理.

* Corresponding author. E-mail: muramatsu@affrc.go.jp

信関連のレーザー光の検定に用いられ、光ファイバーの端面や新規材料の光透過度の検証などに利用されている。また、近年では、医療診断技術への応用も試みられている。しかし、農業の生体計測分野への応用例は少ない。そこで、果樹の葉の水分含量の測定法を開発するための基礎的なデータを得るため、近赤外波長域の画像を撮影する赤外カメラを使って果樹の葉を撮影し、葉中分布状態を推定する手法を検討した。

材料および方法

赤外画像と可視画像の比較

デジタル赤外カメラ（インディゴ社 Merlin シリーズ NIR 測定波長 0.9 ～ 1.68 μm ）とデジタルカメラ（NIKON COOLPIX5400）を使って、ポット植えのブドウ（品種：デラウェア）の切葉を撮影し、両カメラで撮影した画像の比較を行った。

赤外カメラには、水の吸収波長にあたるバンドパスフィルター（Spectrogon CWL: 1460 nm, FWHM: 85 nm）を取り付け、撮影台に固定した。赤外カメラは常時パソコン（DELL OptiPlex GX60）に接続し、デジタルデータを 1/10 秒間隔で取得した。撮影および画像の管理はパソコンで行った。デジタルカメラは、絞り値 F4.6、シャッタースピード 125 分の 1 秒にて行った。照明として 100 W の電球を撮影台の両側に取り付け、撮影時には常に点灯した。なお、カメラと被写体との距離は後述するろ紙の撮影以外は 60 cm とした。

ろ紙によるキャリブレーション

ろ紙（アドバンテック No. 1）を 3 × 4 cm に切り取り、80°C で 3 時間熱風乾燥した。重量を測定した後、霧吹きで湿らせて、乾燥ろ紙の上に時間を変えて放置した後、再び重量測定を行った。その後、乾燥を防ぐためにポリエチレン袋に入れ、シーラーで四辺を閉じた。このろ紙を上述の方法で赤外カメラで撮影し、平均輝度を算出した。なお、カメラと被写体の距離は 40, 50, 60 cm とした。ろ紙の水分含量 (%) は、(撮影時のろ紙の重さ - 乾燥時のろ紙の重さ) / 撮影時のろ紙の重さ × 100 として計算した。

ポット植樹の乾燥試験

ポット植え 4 年生ウンシュウミカン（品種：大津 4 号）を用いた。乾燥処理は、2005 年 8 月 31 日から灌水を控えることにより行った。なお、この時期は気温が高く、灌水を控えると急激に水分ストレスが生じるおそれがあったため、白色の寒冷紗をかけて日射を制限した。乾燥処理期間中に、1 日おきに赤外カメラによる葉の撮影、熱乾燥重量法による葉の水分含量の測定をおこなった。葉の水分含量を推定するため、赤外カメラで撮影した画像を画像解析ソフト（Media cybernetics, Image-Pro Plus）にて解析を行った。撮影は 2 点光源で行ったが、その際、照明が不均一になったため、葉を撮影する前にあらかじめ背景だけを撮影し、撮影した葉の画像から背景画像を減算した（以下、背景処

理）。1 回の測定には 7 ～ 8 枚の葉を用い、各葉の輝度の平均を葉の輝度とした。このとき、水分変化を防ぐためビニールシートでシールした乾燥ろ紙、および水で湿らせたろ紙を葉の横に並べて撮影した。得られた画像から次式を使って水分指数を算出した。

(赤外画像による水分指数) = { (葉の平均輝度 - 乾燥ろ紙の平均輝度) / (乾燥ろ紙の平均輝度 - 湿潤ろ紙の平均輝度) } × 湿潤ろ紙の水分含量 (%)

撮影後、葉を 80°C で 16 時間熱風乾燥した後、熱乾燥中重量法で水分含量 (%) を算出し、赤外画像による水分指数と比較した。

また、光合成蒸散測定装置（LI-6400 LI-COR 社製）による葉のみかけの光合成速度および蒸散速度の測定を行った。測定にあたっては、チャンバー内の炭酸ガス濃度を 400 ppm とし、LED 冷光システムを取り付け、光強度の目標値を 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に設定して行った。その他、TDR 土壌水分計（中村理化学工学社製 TDR-251A, センサー長 10 cm）により土壌の体積含水率測定を併せて行った。

結果および考察

可視画像と赤外画像の比較

ブドウを使って可視画像と赤外画像の比較を行った（第 1 図）。可視画像では、葉の表側から撮影した場合、葉脈はやや見にくいだが、赤外カメラでは、葉の裏表側どちらから撮影しても葉脈の部分は特に黒く写っているのが分かる。

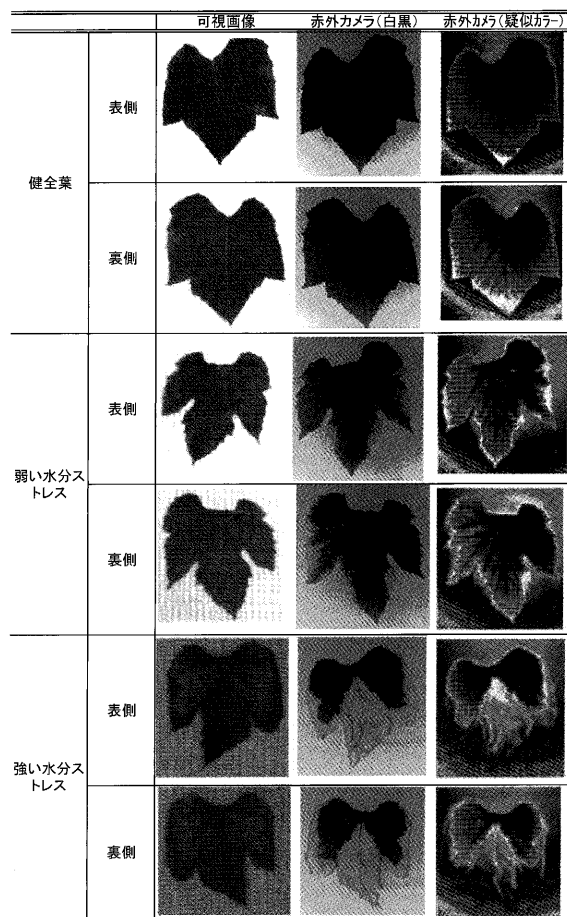
水分ストレスが生じると（弱い水分ストレス）、枝の基部に近い葉の一部が壊死した。赤外カメラの画像では、葉の縁辺部の壊死部分は色が白っぽくなっていた。さらに、水分ストレスの程度が強い葉（強い水分ストレス）では、可視カメラでは、葉緑素が抜けてクロロシスが認められ、クロロシスを起こした部分と壊死した部分は見分けにくい部分があったが、赤外カメラではクロロシスを起こしているがまだ壊死していない部分は黒く、壊死した部分は白く明確に区別できた。この画像を、疑似カラーにすると壊死していない部分だけが赤くはっきりと映し出された。

輝度の分布をみると、健全葉では葉の裏側、表側共に鋭いピークが 1 つあったのに対し、水分ストレスが弱い葉では上記ピークよりも高い輝度領域に分布が認められた（第 2 図）。さらに、ストレスが強い葉では、明らかに 2 つピークが認められた。

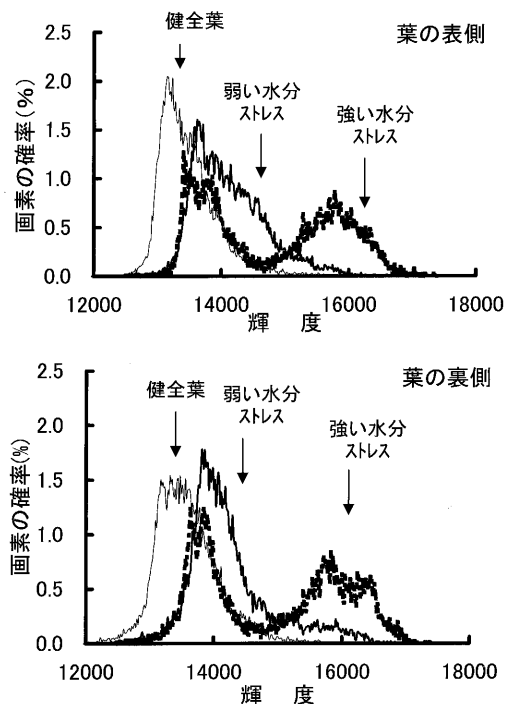
一方、ウンシュウミカンの葉では、ブドウの葉と異なり、水分ストレスをかけても部分的な葉の壊死を認められず、強い水分ストレスが生じると葉柄基部に離層を形成した後、落葉した。このことから、落葉が起こらない程度の水分ストレスを検出するには、より高精度の葉中水分含量の測定を行う必要があると考えられた。

背景処理の効果

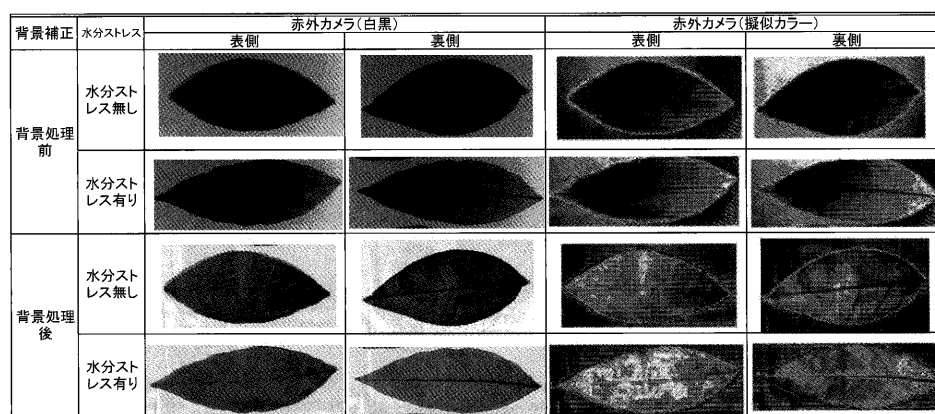
光のムラをなくすために、予め被写体を置いていない場合の画像を差し引く背景処理を行った。その結果、背景処



第1図 CCD カメラ (左) と赤外カメラ (中と右) で撮影したブドウ (品種: デラウェア) の葉画像の比較



第2図 赤外カメラで撮影したブドウ葉の輝度分布の1例(第1図の画像より算出)



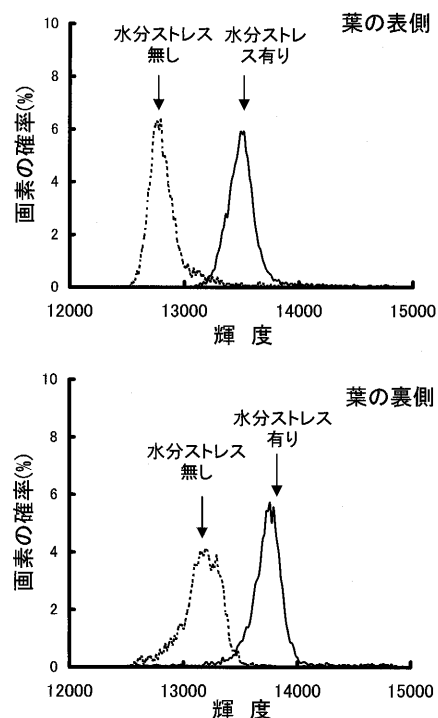
第3図 赤外カメラで撮影したウンシュウミカン (品種: 大津4号) の葉の画像 (ストレス無し: 乾燥処理前の8月31日に採取, ストレス有り: 乾燥処理後の9月7日に採取)

理を行う前には水分ストレスが検出できなかったが、背景処理を行うことにより、乾燥処理前後の画像に明確な差異が認められた (第3図)。画像の輝度の分布を見ても、ブドウとは異なり、水分ストレスの有無にもかかわらずピークは1個であった (第4図)。ただし、「水分ストレス有り」でピーク輝度が高かった。また、葉の表側と裏側では、表

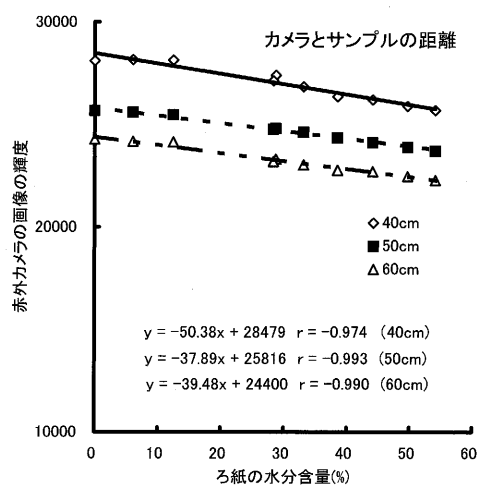
側の方がやや黒く写っており、ヒストグラムのピーク輝度は水分ストレスの有無にかかわらず低かった。

検量線の作成

ろ紙の水分含量と赤外カメラ画像の輝度の関係について検討した。背景処理を行った後、ろ紙の輝度を計測した結果、ろ紙の水分含量と赤外カメラ画像の輝度との間に直線的



第4図 赤外カメラで撮影したウンシュウミカンの葉の輝度分布の1例(第3図内の背景処理を行った画像より算出)

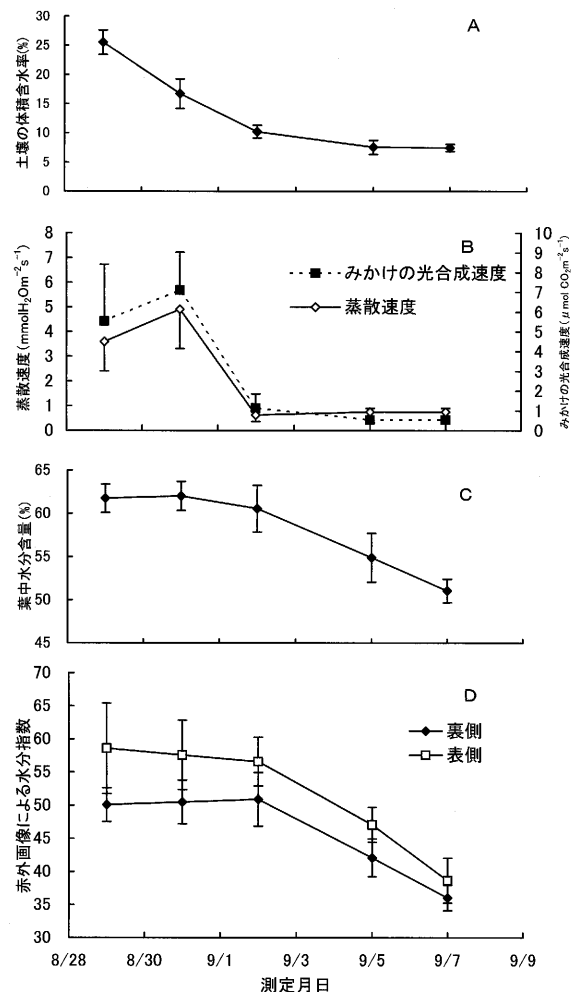


第5図 ろ紙の水分含量と赤外カメラ画像の輝度との関係 (rは相関係数, 数式は, 各距離における関係式)

関係が認められた(第5図)。ただし, 反射光を利用しているためカメラと被写体との距離が近い方が輝度が高かった。

乾燥処理による葉の水分含量の変化

乾燥処理により, 4日目にはウンシュウミカンの葉に萎凋が認められはじめ, 乾燥処理を終了した7日目には, 一部の葉が落葉した。乾燥処理中, 土壌水分は計測開始当初に急激に低下した(第6図A)。蒸散速度とみかけの光合成速度は, 乾燥処理2日目まで変化しなかったが, 乾燥処理後4日目に急激に低下した(第6図B)。また, 葉の水分含量は処理6日目以降になって低下し始めた(第6図C)。

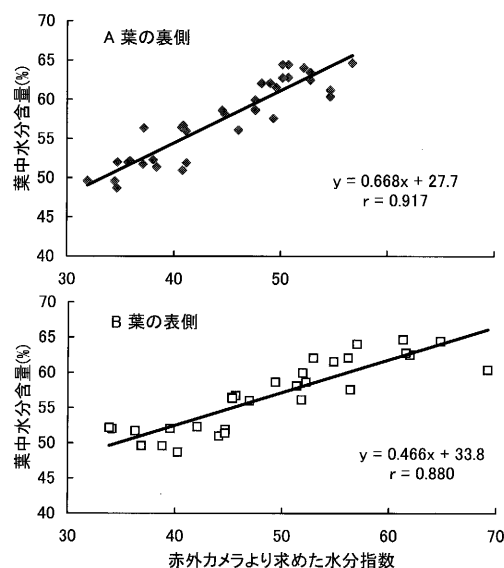


第6図 乾燥処理(8月31日～9月7日)を行ったポット植えウンシュウミカンの土壌水分(A), 葉のみかけの光合成速度と蒸散速度(B), 熱乾燥重量法による葉中水分含量(C)および赤外カメラの画像から推定した水分指数の変化(D) 縦棒はSDを示す

赤外カメラを使って推定した水分含量も, 処理開始6日目から低下した(第6図D)。

乾燥処理期間に採取した葉の裏側・表側の赤外カメラの画像から推定した水分指数と熱風乾燥により採取した葉から求めた水分含量との間には, 有意な高い相関関係($r = 0.917$ (裏側), 0.880 (表側))が得られた(第7図)。

ただし, 葉の表側と裏側では, 関係式の傾きが異なった(第7図), また, カンキツ葉の単位面積当たりの水分量は, キャリブレーションで用いた湿潤ろ紙より多かったにもかかわらず, 赤外カメラ画像では葉の方がろ紙より輝度が高く(白く)写っている場合があった(データ略)。一般に, 赤外光は, 可視光に比べて波長が長い散乱しにくい性質があり, 煙や薄い布の向こう側にある物体を撮影できる。しかし, 近赤外光が葉肉組織をどこまで透過するか, あるいは, 葉肉組織の構造が赤外画像に及ぼす影響についてなど不明な点も多い。今回用いた赤外カメラは, 光学顕微鏡



第7図 乾燥処理を施したポット植えウンシュウミカン樹における赤外カメラ画像とろ紙による検量線から求めた水分指数との葉中水分含量との関係 (A: 葉の裏側を撮影, B: 葉の表側を撮影, r は相関係数, 数式は両者の関係式を示す)

にも接続ができることから, 今後, 葉中の水分分布と赤外画像との関係について, 検討する必要がある。

森永ら (1985) は, ウンシュウミカンを用いて葉の水ポテンシャル, みかけの光合成速度と含水率を測定しており, みかけの光合成速度は水ポテンシャル (ϕ_L) が -1.5 MPa 以下の水分ストレスで低下するのに対して, 含水率は -2.5 MPa 以下にならないと低下しないとしている。今回の鉢植え樹の乾燥処理の結果でも, みかけの光合成速度と蒸散速度は, 処理開始4日後に急激に低下したのに対して, 葉の水分含量は, 6日後に低下した (第6図)。乾燥処理を行うと, 処理日数が長いほど乾燥ストレスが強くなると考えられるため, この結果は, 森永らの結果を支持していると考えられる。

これまで, 農業生体計測分野への赤外カメラの利用可能性を探るため, 本報では, 果樹葉の水分分布状態の赤外カメラを用いた推定法を検討した。その結果, ブドウやキウイフルーツなど水分ストレスにより葉先から障害が生じる植物であれば, 赤外カメラを用いた圃場撮影により, その障害程度の診断は可能と思われる。一方, ウンシュウミカンのように葉柄に離層が形成される植物では, 離層形成前の水分状態の圃場診断は難しいが, 葉を採取して室内で葉を撮影し, 背景処理を行うなど画像処理法を工夫すれば, 葉の水分含量の推定は可能であると考えられた。

摘 要

赤外カメラを使った樹体の水分ストレス程度を診断する手法の開発を試みた。ブドウは水分ストレスにより, 枝の基部に近い葉の一部が壊死し, 壊死した部分の面積は, 水分ストレスが生じる時間が長くなるにつれて拡大した。壊

死した部分は, 赤外カメラで撮影した画像により明確に区別できた。一方, ウンシュウミカンでは, 葉柄基部に離層が生じた後, 落葉した。したがって, 落葉する前の葉の水分含量を正確に測定する必要があると考えられた。そこで, 水分含量の異なる濾紙を赤外カメラで撮影し, キャリブレーションを行った後, ウンシュウミカン葉の撮影画像を画像処理ソフト (Image Pro-plus) を使って背景処理することにより, 水分ストレスの有無による画像の輝度の違いが認められた。赤外カメラの画像から推定した水分指数と実際に熱風乾燥した水分含量との間に有意に高い相関が認められた。これらの結果から, 赤外カメラによる葉の水分含量の推定は, 可能であると考えられた。

引用文献

- Apan, A., A. Held, S. Phinn and J. Markley. 2004. Detection sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 hyperion hyperspectral imagery. *Inter. J. Remote Sen.* 25: 489-498.
- 葦澤正義・割石俊哉・真部 桂. 1983. 夏季におけるウンシュウミカン樹の水管理の指標としての葉の蒸散速度. 香川大学農学部学術報告. 35: 5-12.
- Facini, O., S. Loreti, F. Rossi and C. Bignami. 2004. Canopy and leaf light reflectance features in relation to water content in apple. *Acta Hort.* 664: 217-224.
- Fletcher, R. S., M. Skaria, D. E. Escobar and J. H. Everitt. 2001. Field spectra and airborne digital imagery for detecting phytophthora foot rot infection in Citrus Trees. *HortScience* 36: 94-97.
- Hunt, E. R. Jr. and B. N. Rock. 1989. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-reflectance. *Remote Sen. Envir.* 30: 43-54.
- Inoue, Y. 1990. Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery. *Japan. J. Crop Sci.* 59: 762-768.
- Jones, H. G., M. Stoll, T. Santos, C. Sousa, M. M. Chaves and O. M. Grant. 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *J. Exp. Bot.* 53: 2249-2260.
- Link, S. O., M. E. Thiede and M. G. van Bavel. 1998. An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter. *J. Exp. Bot.* 49: 1583-1587.
- 間苧谷徹・町田 裕. 1980. 夏季におけるウンシュウミカン樹の水管理指標としての葉の水ポテンシャル. *園学雑.* 49: 41-48.
- 森永邦久・池田富喜夫・木原武士. 1985. カンキツの光合成作用と果実生産に関する研究. (第2報) ウンシュウミカンの光合成作用に及ぼす水分の影響. *四国農試報.* 45: 157-166.
- 中原正一・井上吉雄. 1997. 赤外線放射測温によるトマト

- の水ストレス反応の検出. 農業気象. 53: 191–199.
- Sakuratani, T. 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. J. Agr. Met. 37: 9–17.
- 佐々木豊・岡本次夫・芋生憲司・鳥居 徹. 1999. 植物病害の自動診断に関する基礎研究. 農業機械学会誌. 61: 119–126.
- 杉山純一・小川幸春. 2001. メロンの糖度分布の3次元可視化. 日食科工誌. 48: 263–267.
- 脇山恭行. 2002. 赤外リモートセンシングによる水稻の群落表面温度の観測並びに葉温と葉色の関係. 農業気象. 58: 185–194.
- 山本晴彦・鈴木義則・小島孝之・早川誠而・井上 康・田中宗浩. 1994. 近赤外分光反射特性による植物の葉内水分量の推定. 日本リモートセンシング学会誌. 14: 9–17.
- Zarco-Tejada, P. J., C. A. Rueda and S. L. Ustin. 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion method. Remote Sen. Envir. 85: 109–124.