

論文の内容の要旨

生物・環境工学専攻

平成8年度博士課程 入学

氏名 ナンシー・キヨコ・オカムラ
Nancy Kiyoko Okamura

指導教官名 蔵田憲次

論文題目 Nondestructive Detection of Water Deficit Stress in Plants
Using Electromagnetic-Wave Sensing Techniques
(和訳 電磁波を利用した植物の水ストレスの非破壊検出)

1. 序論

さまざまな波長域における電磁波の反射、吸収や透過特性の測定は、植物の状態の非破壊的測定法として以前より研究されてきた。電磁波を利用して、植物の損傷、肥料や水の状態を検出しようとする研究も多くなされている。異なった波長域を利用することで、異なったストレスを検出することが可能である。

本研究では、可視域、近赤外域（以下 NIR: near-infrared）とマイクロウエーブの波長域における電磁波に着目して、水ストレスに伴う植物の状態の変化を非破壊的に検出する方法を試みた。高付加価値農産物の温室内栽培においては、灌水管管理や作物の状態の観測等の栽培管理作業の自動化が注目されている。例えば、メロンやトマトの栽培では、厳密な灌水管管理によって、意識的にさまざまな時期に水ストレスを発生させている。しかし、ストレスが強すぎると苗は弱くなり収穫量が低下するため、植物からの情報に基づいてストレスの程度を判定する方法が必要である。本研究では、電磁波を利用して水ストレスに伴う温室植物の状態の変化を非破壊的に検出することに関する基礎研究を行うことを目的とした。植物個体から葉を切離せずに、可視域では反射率、近赤外域では吸収度、マイクロウエーブ域ではマイクロウエーブの伝送特性を測定した。

2. 水ストレス下メロン苗の葉色変化の解析（可視域）

はじめに 通常の温室メロン生産では、根系の発達を促進させるため、一時的に灌水をせずに植物に水ストレスを与えることがよく行われている。栽培の専門家は苗を観察し、成長点に近い葉の色の変化をストレスの指標として用い、最適なストレスレベル、即ち灌水の再開適期を判定している。本章では、水ストレス下メロン苗の葉色変化を定量化し、栽培の専門家の判断と対比させて、灌水管再開適期判定の自動化のための基礎的知見を得ることを試みた。

材料及び方法 播種後 24-28 日目のメロン苗 5 株の成長点に近い葉の画像を 7:30 から 16:30 の間に 30 分間隔で撮った。Table 1 に栽培の専門家が判定した最適ストレス時点と灌水管時間を示した。栽培の専門家の観察対象である成長点に近い葉の色の変化を解析した。撮影にはスチルビ

デオカメラを用いた。輝度を正規化した緑成分（色度 g ）に着目し、（方法1）5株の成長点に近い葉の色度 g の平均値の経時変化を解析し、（方法2）また、専門家の判定による最適ストレス時点の g と水ストレスを与えていない早朝時の g の関係を解析した。

結果及び考察（方法1）平均した葉色 g の値は、早朝から低下し、しだいに一定の値に近づき安定した (Fig. 1)。栽培家が判定した最適ストレスの時点は g が一定値を示し始めてから約1時間後であった。（方法2）栽培家が判定した最適ストレス時点の g の、水ストレスを与えていない早朝の g に対する比率は、早朝の g の2次関数で近似できた (Fig. 2)。栽培の専門家が判定した最適ストレス時点と上記の2次関数から計算した最適ストレス時点との差は、30分から1時間強であった (Table 2) が、実用には、方法2の可能性が高いことが示唆された。しかし、1日以内に最適ストレスに至らない場合には、この方法は適用できない。

Date	Stress time judged by expert grower	Irrigation	
		Time of day	Water (ml/plant)
Sept. 7	13:00*	-	-
Sept. 8	7:00	7:00	400
	8:00	8:00	300
	13:00	13:00	400
Sept. 9	11:30	11:30	400
Sept. 10	no stress	15:45**	500
Sept. 11	11:30	11:30	500

* Plants were not watered because it was assumed the soil held sufficient moisture for recovery during the night.

** Plants were watered to prevent excessive stress.

Table 1. Stress point time judged by expert grower, and irrigation time for each day during experiment period.

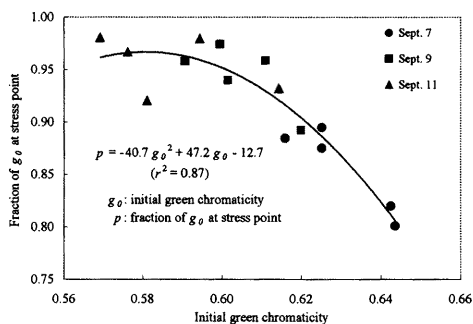


Fig. 2. Relationship between initial green chromaticity, g_0 , and fraction of g_0 at stress point, p .

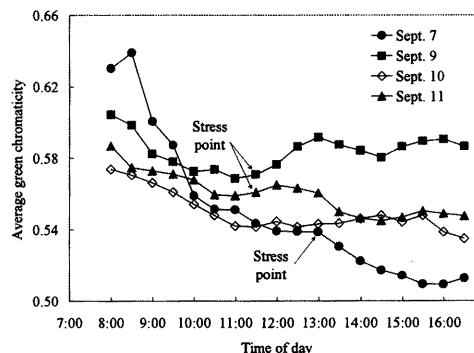


Fig. 1. Time course changes in average green chromaticity of youngest leaf. Data from five plants were averaged.

Date	*Initial g_0	Stress time		
		Expert grower	Green chromaticity analysis	Difference
Sept. 7	0.63	13:00	11:52	1:08
Sept. 9	0.60	11:30	11:00	0:30
Sept. 10	0.57	no stress	11:03	-
Sept. 11	0.59	11:30	10:54	0:36

*Average of green chromaticity, g , at 7:30, 8:00 and 8:30.

Table 2. Expert grower vs. green chromaticity analysis for judging water stress. (Stress times were estimated for five plants by chromaticity analysis, and then these stress times were averaged.)

3. NIR吸収スペクトルの解析による水ストレス下トマト苗の状態変化の非破壊的検出

はじめに 日本での温室トマト生産では、果実の糖度を高めるため、葉7-8枚の苗に連続的に水ストレスを与えることがある。この栽培方法では、最適なストレスレベルを維持することが重要である。本章では、波長1100-2500 nmのNIRのトマト葉面における吸収度を測定することで、非破壊的に水ストレスに伴う植物の状態の変化を検出することを試みた。

材料及び方法 播種後8-9週間目のトマト苗に水ストレスを2-3日間与え、時間経過に伴うNIRの吸収度を測定した（吸収度は非ストレス状態の葉を基準とした反射量の対数比）。測定高さにおける光量子密度を $200 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の条件下で、トマトに水ストレスを与えた。Fig. 3にNIRプローブと葉の様子を示した。ストレス状態の指標として光合成速度及び気孔コンダクタンスの変化を測定した。

結果及び考察 葉における NIR の吸収度を測定した結果、水ストレスを与えると時間とともにスペクトルの 1600 nm 近辺の谷が深くなる現象が明らかになった (Fig. 4)。Fig. 5 には光合成速度及び気孔コンダクタンスの変化を示し、Fig. 6 には NIR の吸収度と気孔コンダクタンスの関係を示した。測定対象のトマトの個体差、測定する葉の位置、葉齢等の影響が見られたものの、NIR の吸収度を測定することにより、非破壊的に水ストレスを検出することが可能であることが示唆された。

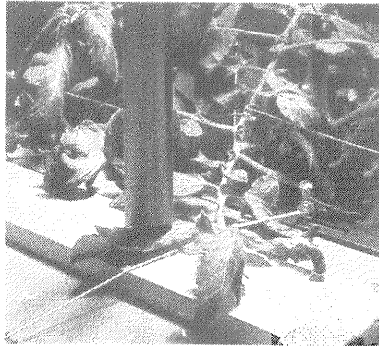


Fig. 3. Configuration of NIR probe for absorbance measurements.

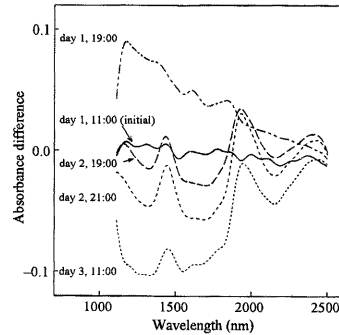


Fig. 4. Typical changes in absorbance difference for leaf of tomato plant during water stress.

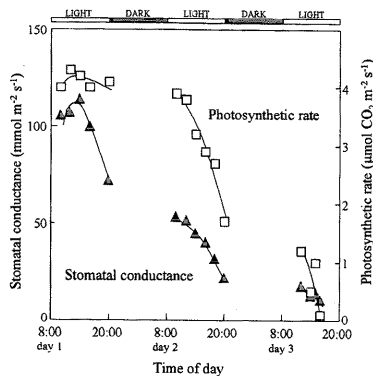


Fig. 5. Typical changes in stomatal conductance and photosynthetic rate for leaf of tomato plant during water stress.

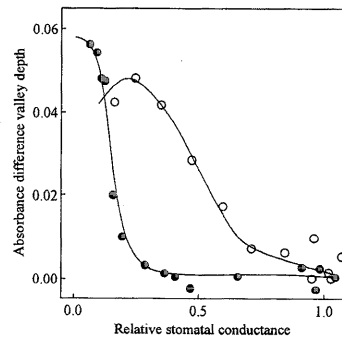


Fig. 6. Relationship between absorbance difference valley depth and stomatal conductance during water stress. Data from two different tomato plants show the range of responses observed.

4. マイクロウェーブの伝送特性の解析による水ストレス下トマト苗の状態変化の非破壊的検出

はじめに 赤外線を用いた手法では、植物体の観測は一点で行ったが、マイクロウェーブを用いる方法では、より大きな領域を観測しその平均的な情報を得ることができるという大きな長所がある。マイクロウェーブの伝送特性はアンテナ間の植物体とその周辺を含めた領域全体から影響を受ける。植物体の水分だけではなく、植物体の形態的な変化も、植物体とその周辺を含む空間の誘電的な特性を変化させる。植物体を含めた空間のマイクロウェーブの伝送特性を測定することにより、非破壊的かつリアルタイムに水ストレスに伴う植物の状態変化を検出する方法についてトマトを用いて検討した。

材料及び方法 播種後 12-13 週間目のトマトに水ストレスを 2 日間与えて、時間経過に伴う 100-300 mm (1.0-3.0 GHz) の波長のマイクロウェーブの伝送特性の変化と光合成速度及び気孔コンダクタンスの変化を測定した。マイクロウェーブの伝送特性は発信したマイクロウェーブ強度に対する受信した強度の比であるパラメータ S21 で評価した。光量子密度を $200 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の条件下でトマトに水ストレスを与えた。実験の様子を Fig. 7 に示した。

結果及び考察 Fig. 8 に水ストレス付加後のマイクロウェーブ伝送特性 S21 の経時変化を示した。また、Fig. 9 に波長別の経時変化を示した。Fig. 10 に S21 と光合成速度の関係を示した。光合成速度が初期値から初期値の 80%まで減少する程度の水ストレスのレベルを検出するには、250 mm における S21 は有効である可能性が示唆された。125 mm あるいはそれ以下の波長については、光合成速度の低下によって示されるようにさらに進んだ水ストレスを検出するのに効果的であると考えられた。

以上の結果は、マイクロウェーブによる、水ストレスによって生じるトマトの変化を検出する方法が有用であることを示している。異なった波長域における S21 を測定することで、水ストレスの異なった段階を検出することができた。水ストレスに伴う気孔コンダクタンスや光合成速度と 100 - 300 mm 間の S21 の関係には、一貫した関係が観察された。実験に用いたサンプルによって気孔コンダクタンスや光合成速度の変化のタイミングに若干の差が見られたが、これは気孔コンダクタンスと光合成速度を 1 枚の葉で測定したことによるばらつきが原因と考えられた。

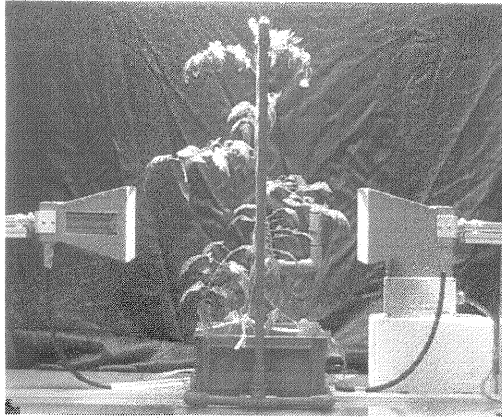


Fig. 7. Equipment configuration for microwave measurements.

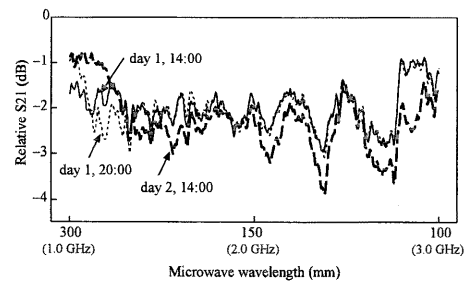


Fig. 8. Typical changes in microwave transmission measurements with time for tomato plant during water stress.
Relative S21 = $S21_{\text{plant}} - S21_{\text{no plant}}$.

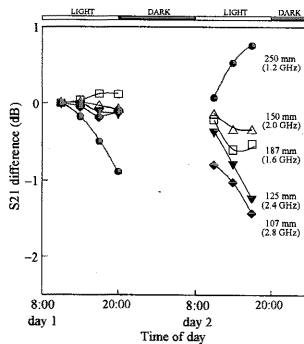


Fig. 9. Typical changes in S21 difference with time for tomato plant during water stress. $S21 \text{ difference} = S21_{\text{stressed}} - S21_{\text{non-stressed}}$.

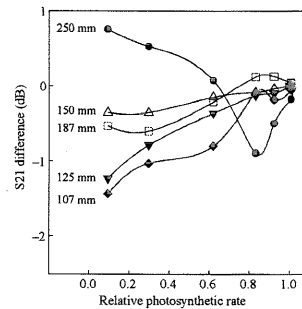


Fig. 10. Relationship between S21 difference and relative photosynthetic rate for tomato plant during water stress.

5. 総括

温室栽培の自動化に際しては、植物の状態を非破壊的に観測する技術が必要不可欠である。また、メロンとトマトの温室栽培には灌水管理のための水ストレスの検出が重要である。そこで、本研究では、電磁波を利用した水ストレスの非破壊検出方法を検討した。検討したそれぞれの波長域による解析方法は、それぞれに固有な目的に有効である。可視域の色度 g を用いた方法は、人間の観測能力をシミュレートし、簡便で安価に応用できる。NIR の吸収度の解析方法は葉レベルの水分状態に関する変化の観察に適している。マイクロウェーブを利用した解析方法は植物全体の観察に有効であるし、安価に実用できる可能性がある。