

# マイクロウェーブによる植物の塩環境適応応答の検出

下町多佳志\*・小橋川千晶\*\*・谷川弘明\*\*・面田絵美\*\*

## Detection of Plant Adaptation Responses to Saline Environment in Rhizosphere Using Microwave Sensing

Takashi SHIMOMACHI\*, Chiaki KOBASHIKAWA\*\*, Hiroaki TANIGAWA\*\* and Emi OMODA\*\*

\* Faculty of Environmental Studies, Nagasaki University,  
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan

\*\* Graduate School of Science and Technology, Nagasaki University,  
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan

### Abstract

The physiological adaptation responses in plants to environmental stress, such as water stress and salt stress induce changes in physicochemical conditions of the plant, since formation of osmotic-regulatory substances can be formed during the environmental adaptation responses. Strong electrolytes, amino acids, proteins and saccharides are well-known as osmoregulatory substances. Since these substances are ionic conductors and their molecules are electrically dipolar, it can be considered that these substances cause changes in the dielectric properties of the plant, which can be detected by microwave sensing. The dielectric properties (0.3 to 3GHz), water content and water potential of plant leaves which reflect the physiological condition of the plant under salt stress were measured and analyzed. Experimental results showed the potential of the microwave sensing as a method for monitoring adaptation responses in plants under saline environment and that suggested the saline environment in rhizosphere can be detected non-invasively and quantitatively by the microwave sensing which detects the changes in complex dielectric properties of the plant.

**Key words** : plant, adaptation response, salt stress, complex permittivity, microwave

### 1. はじめに

水ストレスや塩ストレスに対する環境適応応答として、植物体内での浸透圧調節物質の誘導合成が知られている。浸透圧調整物質として、強電解質類、アミノ酸類、糖類などがあるが、これらの物質はイオン伝導を有することや、分子が電気双極子を持つことから、それらの量が増減することによって、植物体の複素誘電率 ( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ :  $\epsilon'$ は誘電率,  $\epsilon''$ は誘電損率,  $j$ は複素数, 以降, 本論文で使用する誘電率は誘電率と真空の誘電率  $\epsilon_0$  との比である比誘電率のことである) の周波数特性である誘電緩

和スペクトルが変化すると考えられる (Hewlett Packard Application Note 1217-1, 1992: Pethig, 1984.)。

これまでのマイクロウェーブ応用計測に関する研究は、農業生産物の水分量や密度の測定についての研究 (Kraszewski, 1980, 1991, Kraszewski and Nelson, 1995; Nelson, 1992; Schilz and Schiek, 1984; El-royes and Ulaby, 1987) が主流であり、この原理に着目し、植物の環境適応応答を検出しようとした研究はこれまでなかった。著者らの近年の研究を通じて、水ストレスや塩ストレスのような環境ストレスを受けた植物葉部の複素誘電率の変化をマイクロウェーブの透過性を利用して測定す

\*長崎大学環境科学部〒852-8521 長崎市文教町 1-14

\*\*長崎大学生産科学研究科〒852-8521 長崎市文教町 1-14

キーワード: 植物, 適応応答, 塩ストレス, 複素誘電率, マイクロウェーブ

ることによって、植物の環境適応応答の非破壊的検出が可能であり、植物体内で生じた浸透圧調整物質の増減が複素誘電率の変化として捉えられたことが明らかにされてきた (Shimomachi *et al.*, 2001, 2004, 2005)。

本研究の目的は、環境適応応答の過程で植物体内に生じた物理化学的な変化をマイクロウェーブの透過性を利用して捕らえ、植物の環境適応応答の検出法を開発することである。

本研究では、様々な植物を一定期間塩環境に適応させた後、マイクロウェーブを用いて植物葉部の複素誘電率を測定し、植物の塩環境適応応答の定量的評価可能性を検証した結果、植物の環境ストレス適応応答の非破壊的・定量的評価可能性を示す成果が得られた。

## 2. 材料と実験

測定に使用した植物は、塩生植物のシチメンソウ、ウラギク、好塩性植物のアイスプラント、ビート、弱耐塩性植物のカボチャ、ズッキーニ、サラダナ、コマツナ、トマト、ホウレンソウ、ハダイコンである。

実験室での栽培が困難なシチメンソウとウラギクは有明海で採取した。トマト以外の植物は、気温を  $25 \pm 3^\circ\text{C}$  とした実験室内で、光強度を成長点で約  $\text{PPF } 200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 12 h/12 h (明期/暗期) とし養液栽培した。トマトについては、Shimomachi ら (2005) の塩ストレス適応応答検出実験で得た測定結果をそのまま使用した。栽培条件は光強度のみが異なっており、約  $\text{PPF } 1,000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  光強度で栽培されたトマトのデータを使用した。

液肥は、大塚1号および2号のA処方標準溶液 (ECは約  $0.26 \text{ Sm}^{-1}$  に調整) を用いた。培地はロックウール ( $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ ) を使用した。生長の早いカボチャは播種後2週目に液肥のNaCl濃度を  $100 \text{ mmol L}^{-1}$  の塩環境とし2週間適応させた。生長の遅いアイスプラントは6週目に液肥中のNaCl濃度を0, 100, 200,  $300 \text{ mmol L}^{-1}$  とし, 6週間適応させた。トマトとビートは, 0, 50, 100,  $200 \text{ mmol L}^{-1}$  の塩環境に4週間適応させた。他の材料は4週目にNaCl濃度で  $100 \text{ mmol L}^{-1}$  の塩環境に4週間適応させた。それぞれの植物は塩環境に適応させた後、測定に用いた。植物葉部の複素誘電率の周波数特性 (以降、誘電緩和スペクトルと呼ぶ)、ベクトルネットワークアナライザ (Model HP8714ES, Agilent technologies Co., U.S.A) と Open-ended coaxial probe (Agilent 85070D Dielectric Probe Kit, Agilent Technologies Co., U.S.A) により測定した。均一な組織が得られると測定が容易になるので、葉部を粉碎後  $25^\circ\text{C}$  に温度調整して測定した。

それぞれの植物の個体数は、トマトとビートが5, ア

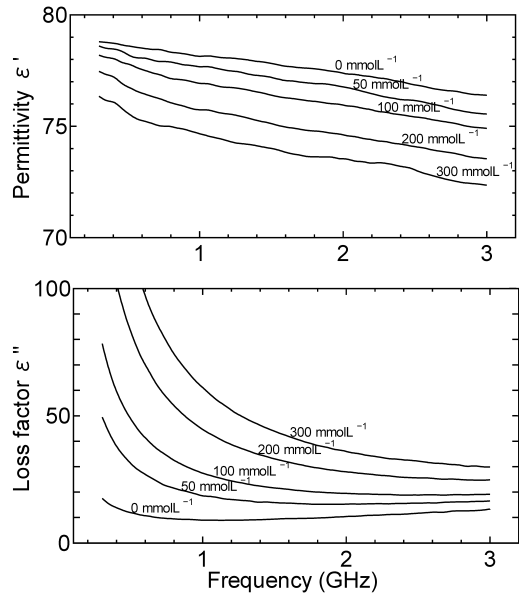


図-1 NaCl 濃度 ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) による液肥の誘電特性の変化

Fig. 1 Effects of NaCl concentration ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) in liquid fertilizer on dielectric properties of liquid fertilizer.

イスプラントが5, カボチャが4, ズッキーニが5, ホウレンソウが6, サラダナが4, コマツナが4, 大根が4, ウラギクとシチメンソウが10以上であった。

それぞれの植物から十分に展開した葉部を均等に採取後粉碎し誘電緩和スペクトルの測定に用いた。従って、各植物の測定値は、個体数による平均値である。

水ポテンシャルは、Dew point Microvoltmeter (HR-33T, Wescor Inc., U.S.A.) および Sample Chamber (C-52-SF, Wescor Inc., U.S.A.) を用い、 $25^\circ\text{C}$  に設定したインキュベータ内に Sample Chamber を2時間保存後測定した。葉部の水分量は、 $80^\circ\text{C}$  の乾燥炉の中で96時間乾燥させた後、乾燥前後の重量差を測定して求めた。

## 3. 結果および考察

図-1に液肥に0, 50, 100, 200,  $300 \text{ mmol L}^{-1}$  のNaClを加えたことによって変化した液肥の誘電緩和スペクトルを示す。誘電緩和スペクトルから見た液肥は、強電解質をわずかに溶解させた水の様な物質ということになる。NaClの濃度の増加に伴って液肥の誘電率はわずかに減少する一方、誘電損率は特に1GHz以下の低周波数域で大きく増加した。これは、液肥に含まれる強電解質成分の増加を反映したものである (Hewlett Packard

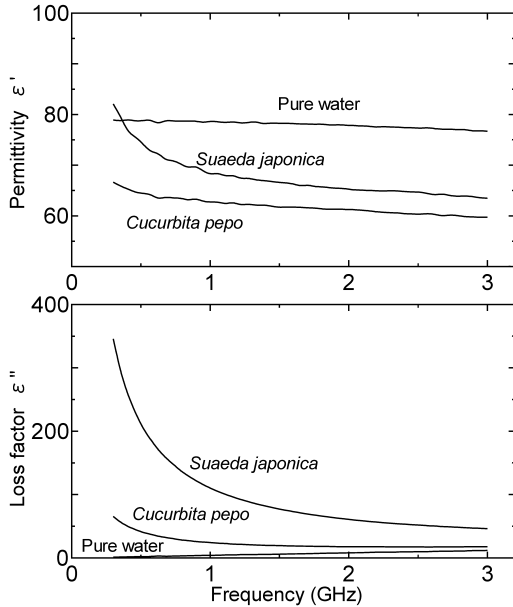


図-2 植物葉部と水の誘電特性  
(シチメンソウ (*Suaeda japonica*) とカボチャ (*Cucurbita pepo*) の水分量はそれぞれ 89.8% と 89.5% でほぼ同じであった.)

Fig. 2 Dielectric properties of plant leaves and pure water.  
(Water content of *Suaeda japonica* and *Cucurbita pepo* was 89.8% and 89.5% respectively.)

Application Note 1217-1, 1992)。また、強電解質 (NaCl) の増加が、液肥の誘電損率を増加させると同時に、誘電率を減少させる効果も同時に示している (Pethig, 1984)。図-2 に、純水、塩性植物であるシチメンソウおよび弱耐塩性植物であるカボチャの誘電緩和スペクトルを示す。

植物の誘電率は、純水のそれよりも小さい。シチメンソウとカボチャの水分量はそれぞれ 89.8% と 89.5% とほぼ等しかったが、誘電率と誘電損率どちらも、シチメンソウの方がカボチャよりも大きく、両者の誘電緩和スペクトルは大きく異なった。これは、植物体に含まれるセルロースなどの繊維質やアミノ酸、タンパク質、糖類等の化学成分と水の間が生じた相互作用によるものである。このことは、同じ水分量を有する植物であっても、植物の種によって葉部を構成する固有の物質の組成が異なれば、違った誘電緩和スペクトルを持つことを示している。さらに、植物はその種類によって異なる固有の葉部複素誘電率を持つと同時に、生息している環境に適応する過程で複素誘電率を変化させることを示唆している。

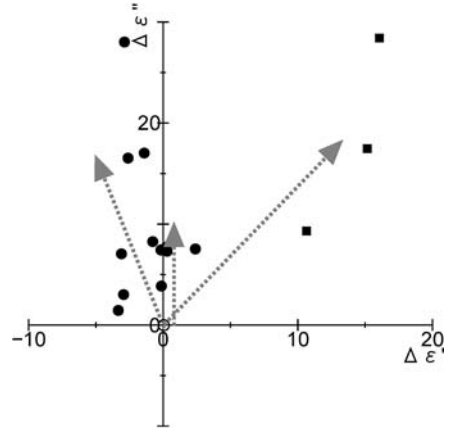


図-3 塩環境適応応答によって変化した植物葉部の誘電率  $\Delta\epsilon'$  と誘電損率  $\Delta\epsilon''$   
(●) トマト以外の植物, (■) トマト  
 $\Delta\epsilon' = \epsilon'$  (適応後)  $-\epsilon'$  (コントロール)  
 $\Delta\epsilon'' = \epsilon''$  (適応後)  $-\epsilon''$  (コントロール)

Fig. 3 Changes in permittivity  $\epsilon'$  and loss factor  $\epsilon''$  by plant adaptation responses to saline environments.

(●) plant except tomato, (■) tomato  
 $\Delta\epsilon' = \epsilon'$  (after adaptation)  $-\epsilon'$  (control)  
 $\Delta\epsilon'' = \epsilon''$  (after adaptation)  $-\epsilon''$  (control)

図-3 に塩環境に対する適応応答によって変化した誘電率および誘電損率の変化を示す。図では、0.3~3GHz の周波数で平均した誘電率および誘電損率のコントロールからの変化分を示した。塩環境に対する適応応答によってすべての植物の誘電損率は増加した。このことは、植物が体内に NaCl を取り込んだか、あるいは同時に浸透圧調整物質として強電解質を体内に誘導合成したことを示している。図-3 は植物が塩環境に対する適応応答の過程で、葉部の誘電率と誘電損率を、図上の第 1 象限と第 2 象限内でのみ変化させたことを示している。共通している現象は、どの植物も塩環境に適応する過程で誘電損率を増加させたことである。誘電率については、誘電率を減少させるもの、ほとんど変化させないもの、増加させるもの、と図中の矢印で示した様に 3 種類に分類されることが解った。図中で大きく誘電率を増加させた植物はトマトであった。これは、栽培時にメタルハライドランプを使用し、光強度が約  $\text{PPF } 1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  と他の植物の約 5 倍の光強度で栽培したために光合成量が增大し、浸透圧調整物量が増加したことによる。誘電損率が増加したにもかかわらず、誘電率がほとんど変化しない、あるいは増加した。つまり、強電解質の増加に

よって本来減少しなければならぬ誘電率が維持された、あるいは増加したことは、誘電率を増加させる効果を持つアミノ酸様やタンパク質様の物質が浸透圧調整物質として同時に誘導合成されたことを示唆している (Pethig, 1984)。

塩環境に対する適応応答によって生じた植物葉部の水分量の変化は、コントロールとの差で約 $-3\sim+1$ 重量%であり、中には塩環境に適応する過程で水分量を増加させた植物もあった。これらのことから、水分量の変化が誘電率に与えた影響はほとんど無いと考えられる。

図-4に0.3~3GHzの周波数で平均した誘電率、誘電損率およびロスタングメントと水ポテンシャルの関係を示す。誘電率と水ポテンシャルの関係では、塩環境に適応した植物の誘電率が同じでも、液肥中の塩濃度の増加、すなわち塩環境が強まるにつれて、水ポテンシャルは減少する傾向を示したが、液肥中の塩濃度との間で明確な相関関係は見られなかった。誘電損率と水ポテンシャルの関係では、プロットデータは塩環境の強さ毎にある程度まとまりを見せたことから、植物葉部の誘電損率を測定することによって、植物が生息している場所のおおまかな塩環境の強さを推定可能であることが分かった。また、生息している場所の塩環境が強まるにつれて(液肥中の塩濃度が増加するにつれて)、植物の誘電的特性は塩生植物の特性へと近づこうとしているかのような傾向が図上で示された。ロスタングメントと水ポテンシャルの関係からは、その傾向はさらに明確になった。植物はそれぞれ固有のロスタングメントを持ち、塩環境に適応する過程でControlから塩生植物の方向に向かうほぼ直線上(図中の矢印はトマトの例である)で変化した。また、植物の置かれた塩環境の強さに応じて図-4中に示した破線の近傍に各植物の点が存在するらしい事も解った。栽培時の光環境の違いからか、図-3で示したように、塩環境によって誘電率を大きく増加させたトマトも、図-4に示したロスタングメントと水ポテンシャルの関係では、Controlの植物が存在する破線近傍にあったことは、根圏の塩環境以外の環境すなわち強い光環境で成長したことで光合成量が增大し、葉部の誘電率や誘電損率が大きく変わっても、ロスタングメントを指標に用いるとその影響がほとんど無くなり、統一的な取り扱いができるかもしれない事を示唆している。

本研究で得られた測定結果は、植物葉部の誘電緩和スペクトルを測定・解析することによって、植物の塩環境適応応答がどの程度生じているかを定量的に評価することが可能であることを示した。さらに、植物が生息している場所の塩環境の強さの推定方法としても極めて有効な手段となりうる事が示された。

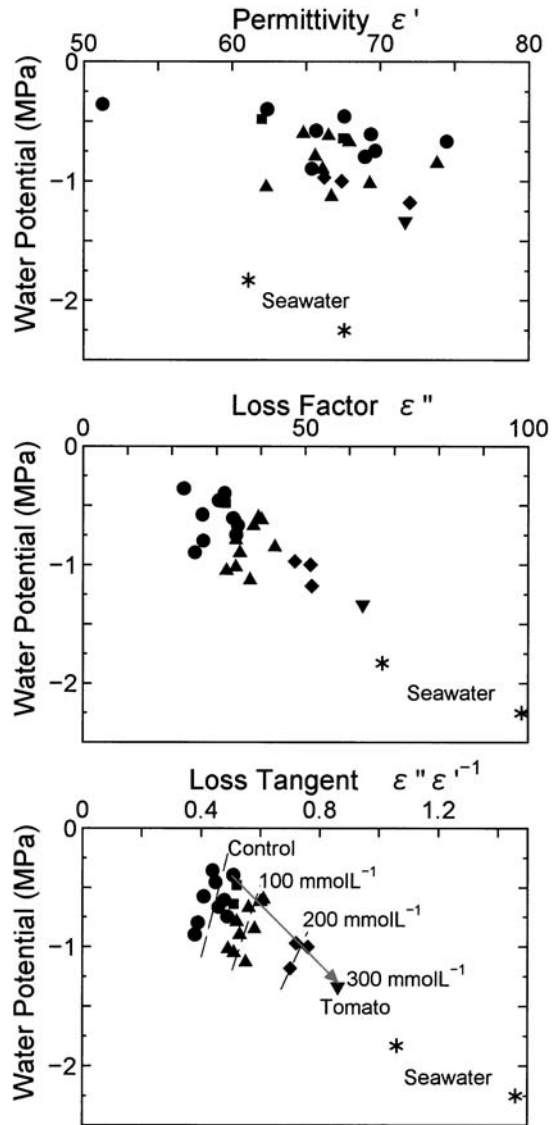


図-4 植物葉部の誘電特性と水ポテンシャルの関係 (●) Control, (■)  $50 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (▲)  $100 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (◆)  $200 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (▼)  $300 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (\*) Seawater.

Fig. 4 Relationship between dielectric properties of plant leaves and water potential under saline environment. (●) Control, (■)  $50 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (▲)  $100 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (◆)  $200 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (▼)  $300 \text{ mmolL}^{-1}$  NaCl, (\*) Seawater.

#### 4. おわりに

塩生植物のシチメンソウ、ウラギク、好塩性植物のアイズプラント、ビート、弱耐塩性植物のカボチャ、ズッキーニ、サラダナ、コマツナ、トマト、ハウレンソウ、ハダイコンのような様々な耐塩性を持つ植物を実験室内で養液栽培を行った。液肥に NaCl を加えることによって一定期間塩環境に適応させた後、マイクロウェーブを利用して植物葉部の誘電緩和スペクトルの変化を測定・解析することによって以下の成果が得られた。

- ① 植物の塩環境への適応応答の非破壊的・定量的検出可能性が示された。
- ② 植物が生育している土壤の塩環境の強さの推定可能性が示された。
- ③ 誘電緩和スペクトルの変化パターンを解析することによって従来の好塩植物、耐塩性植物、弱耐塩性植物、感受性植物など塩性による植物の生育反応による分類とは異なった電解質やアミノ酸類などの適合物質の誘導合成パターンによる植物の新たな分類可能性が示された。

#### 謝 辞

電磁波を利用した植物の物理計測に関する経験のみで、研究対象とした植物も、根や葉はあっても土壌が無い水耕栽培によるものです。これまで、土壌に関して関心はあったものの知識や経験が全くない私に、思いがけず土壤物理学第 49 回土壤物理学シンポジウム「電磁波を利用した最新の土壌物理計測」において、植物に関する研究紹介の機会をいただきましたことを会長筑紫二郎先生、副会長井上光弘先生、原口暢朗先生、長裕幸先生、近藤文義先生、宮本輝仁先生ほかお世話になりました多くの先生方に心から感謝いたします。

本研究は、財団法人ソルト・サイエンス研究財団助成番号 05B4, 06B4, 07B4 の助成を得て遂行された。記して謝意を示す。

#### 引用文献

El-Rayes, M.A. and Ulaby, F.T. (1987): Microwave dielectric spectrum of vegetation —Part 1: Ex-

perimental observations. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-25, No. 5, September : 541-549.

Hewlett Packard Application Note 1217-1. (1992): Basis of measuring the dielectric properties of materials.

Kraszewski, A.W. (1980): Microwave aquametry — a review. *J. Microwave Power*, (15) 4 : 209-220.

Kraszewski, A.W. (1991): Microwave aquametry-needs and perspectives. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **39** (5), May : 828-835.

Kraszewski, A.W. and Nelson, S.O. (1995): Application of microwave techniques in agricultural research. *SBMO/IEEE MTT-S IMOC '95 Proc.* : 117-126.

Nelson, S.O. (1992): Measurement and applications of dielectric properties of agricultural products. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, **41** (1), February : 116-122.

Pethig, R. (1984): Dielectric properties of biological materials : biophysical and medical applications. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-19, No. 5, October : 453-474.

Schilz, W. and Schiek, B. (1984): Microwave system for industrial measurements. *Advances in Electronics and Electron Physics*, **55** : 321-325.

Shimomachi, T., Okamura, N., Takemasa, T. and Takakura, T. (2001): Nondestructive detection of water stress in tomato plants by microwave sensing. *Environ. Control in Biol.*, **39** : 17-25.

Shimomachi, T., Takemasa, T., Kurata, K. and Takakura, T., (2004): Nondestructive detection of water stress in tomato plants by microwave sensing (2). *Environ. Control in Biol.*, **42** : 83-90.

Shimomachi, T., Ou, S., Ichimaru, Y., Cho, S., Takemasa, T., Yamazaki, S. and Takakura, T. (2005): Nondestructive Detection of Salt Stress in Tomato Plants using Microwave Sensing, *Environ. Control in Biol.*, **43** : 33-41.

## 要 旨

土壌中の水分が欠乏したり塩類濃度が上昇したりして、植物がストレスを感じると、植物は環境適応応答の過程で浸透圧調節物質を誘導合成する。環境適応応答を通じて浸透圧調整物質が植物体内で増減すれば、それらがイオン伝導や電気双極子を持つことから、植物体は自身の誘電緩和スペクトルを変化させるであろう。この現象を、マイクロウェーブの透過性を利用して捉えることによって、植物の環境適応応答を非破壊的検出が可能になるかもしれない。本研究では、植物に塩環境に適応応答させながら植物葉部の誘電緩和スペクトルの変化を測定・解析した結果、植物の環境ストレス適応応答の非破壊的・定量的評価可能性を示す結果が得られた。

受稿年月日：2007 年 12 月 2 日

受理年月日：2008 年 2 月 16 日