

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2008～2010

課題番号：20580283

研究課題名 (和文) ハイブリッド音響センシングによる草本植物のエンボリズム密度計測技術の開発

研究課題名 (英文) Development of Measuring Technique of Embolism Density in Herbaceous Plants Using Hybrid Acoustic Sensing

研究代表者

蔭山 健介 (KAGEYAMA KENSUKE)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30272280

研究成果の概要 (和文)：

ミニトマト茎部のハイブリッド音響測定システムを構築し、茎部を伝播するガイド波とキャビテーション（発泡音）による AE の検出を同時に行った。その結果、茎部を伝播するガイド波の伝播速度と減衰率は、維管束の構造や茎部の水ポテンシャル（水分状態）と強い相関を示した。また、多数のセンサーを用いる事で灌水前後のハイブリッド音響測定からエンボリズム密度（エンボリズム修復能力）を評価でき、ミニトマトの水利用効率を向上させることができた。

研究成果の概要 (英文)：

Hybrid acoustic measurement system was fabricated to detect simultaneously the guided wave travelling a stem and the acoustic emission due to cavitation. As a result, the travelling velocity and the attenuation of the guided waves through a stem were deeply related to the structure of the vascular tissue and the water potential of the stem. Embolism density (vulnerability of cavitation) could be evaluated by the hybrid acoustic measurement during irrigation with several sensors. Thereby, the hybrid acoustic measurement enhanced the water use efficiency of a miniature tomato.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	400,000	120,000	520,000
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：非破壊評価

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：エンボリズム，音響，草本植物，灌水，アコースティック・エミッション

## 1. 研究開始当初の背景

植物は日中気孔を開いて蒸散を行うが、それにより木部では水ポテンシャルの低下に伴った負圧が発生し、根から水を引き寄せる駆動力となる。蒸散量が増加して水分が不足すると木部中の負圧が増大するが、負圧の増大に伴い細胞間隙から空気が引き

込まれ、木部中の道管要素が空気で満たされるようになる。これをエンボリズムと呼び、エンボリズムが発生すると、木部の通水抵抗が増加するため、さらに水不足状態が悪化してしまう。このようなエンボリズムの発生と増加は、草本植物の生育に重大な影響を及ぼすが、十分に灌水を行ってい

れば問題はない。しかしながら、近年の世界的な灌漑用水の使用量の増加により水資源の枯渇が懸念され、水資源を効率的に使用した作物栽培は重要な課題となりつつある。そして、乾燥環境において最小限の灌水で作物を栽培するためには、植物の水分状態を非破壊で計測し、エンボリズムの発生状況を明らかにする必要がある。

エンボリズムを非破壊で検出する手法としては、アコースティック・エミッション(AE)法が提案されている。エンボリズムは道管要素に空気が引き込まれることにより生じるが、その際空気が発泡する(キャビテーション)。AE法は、キャビテーション時に発生するAE(弾性波)を検出する手法で、木本植物と草本植物のいずれにおいても数多くの研究がなされているが、エンボリズムの発生状況を定量評価するには至っていない。この原因として、道管要素でキャビテーションが生じてAEを検出しても、道管要素中の空気が再び細胞間隙に押し出される(リフィリング)ため、AEの発生数がエンボリズムの数とは一致しないことが挙げられる。また、AE測定は通常長期間にわたって行われ、作物の診断手法として実用的とは言い難い。

一方、申請者らはさまざまな乾燥条件におけるミニトマト茎部のAE発生挙動を調べてきた結果、木部のエンボリズム密度が低いときは負圧の増加につれてAE発生頻度が増加し、エンボリズム密度が高い時は逆の傾向を示すことを見いだした。そして、木部の負圧は茎部を締め付けることにより一時的に変動させることができる。これを利用して短時間で木部負圧を変動させてAE測定を行えば、エンボリズムの密度を定性的に計測できることが期待できる。しかし、AEの発生頻度は、AEセンサーが検出可能な範囲とそこに存在する道管要素の数の影響を受けるため、定量的なエンボリズム密度計測のためには、これらの因子を把握する必要がある。

AEセンサーの検出範囲とそこに存在する道管要素の数は、茎部の音響減衰特性と維管束組織の発達状態に強く依存している。そこで、申請者らはミニトマトの茎部に圧

電振動板とAEセンサーを取り付け、茎部を伝播する音響の送受信(音響測定法)を行ったところ、茎部の音響減衰率と音速を同時に測定することができた。また、音速は維管束組織の体積率(維管束率)に比例することを明らかにした。このような茎部での音響測定により得られた減衰率と維管束率からAEセンサーの検出範囲に存在する道管要素の数をそれぞれ推定できると考えられる。そして、この推定結果を、前述した木部の負圧変動時のAE発生挙動にあてはめれば、定量的なエンボリズム密度を計できるようになる。

以上の経緯から、申請者はAE法と音響測定法を組み合わせたハイブリッド音響センシングにより、草本植物の茎部におけるエンボリズムの発生状態を計測する着想を得るに至った。

## 2. 研究の目的

本研究で開発を目指す計測手法技術の概念は以下の通りである。

- (1) 草本植物の茎部を締め付けおよび灌水により木部の負圧を変動させる。
- (2) 多点AE測定を行い、負圧の増加時と減少時のAE発生頻度を比較することにより、エンボリズム密度を相対的に評価する。
- (3) 音響測定によりキャビテーションを発生した場合AEセンサーが検出可能な道管要素数を推定する。
- (4) AE測定と音響測定の結果を統合し、エンボリズム密度を定量的に評価する。

上記技術を開発するため、本研究では以下のような研究を行うことを目的とした。

- (1) 草本植物の茎部の音響測定、断面観察、水分率測定を行い、音響測定によりAEセンサーが検出可能な道管要素数の推定手法を開発する。
- (2) 制御された環境で灌水量の変化により木部の負圧を変動させながら、草本植物茎部の多点AE、木部の負圧変動、土壌水分、水ポテンシャル、気孔伝導率測定を長期間行い、エンボリズム密度を相対的に評価する。そして、木部の負圧の増加時と減少時のAE発生頻度比を用いてエンボリズム密度を相対的に評価する手法を開発する。
- (3) 草本植物の茎部の締め付けにより木部

の負圧を一時的に変動させながらハイブリッド音響センシング(多点 AE+音響測定)を行うことにより、短時間でエンボリズム密度を定量的に評価する手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) ミニトマト茎部の音響測定による木部の非破壊評価

ミニトマト茎部に圧電発音体と複数の AE センサーを取り付け、圧電発音体により 5~100kHz の音響を茎部に照射し、茎部を伝播してきた音響を AE センサーにより受信した。そして、受信した音響の到達時間差と信号強度から音速と減衰率を算出した。また、測定部位の切断面を顕微鏡観察することにより維管束厚さを算出した。さらに、測定中の茎部の水ポテンシャルをプレッシャーチャンバー法により測定した。これらの結果を用いて、音速と減衰率から、木部が含まれる維管束厚さと水ポテンシャルを推定することを試みた。

#### (2) 制御された環境下でのミニトマト育成と、灌水量変化による木部の負圧変動時の多点 AE 測定とエンボリズム密度の相対評価

温度、光量を制御した環境を構築した(恒温室、自動灌水装置(自作))。この環境でミニトマトの茎部に AE センサーと径ゲージ(圧力センサを使用)を組み合わせたクリップ型測定プローブを複数取り付け、土壌水分計、テンシオメータ、水ポテンシャル測定器を使用することにより、以下の5つの項目を長期間(1週間~2ヶ月)測定した

- (1) キャピテーションによる AE 発生
- (2) 茎木部の負圧変動(茎径変化)
- (3) 水ポテンシャル
- (4) 土壌水分
- (5) 土壌ポテンシャル

上記5項目の測定結果を用いて、木部の負圧を長期的に変動させた際の、負圧の増加時と減少時の AE 発生頻度比と照らし合わせるにより、AE 発生頻度比からエンボリズム密度を相対評価することを試みた。

#### (3) ミニトマト茎部の締め付けによる木部の負圧変動時の多点 AE 測定とエンボリズム密度の相対評価

ミニトマト茎部に AE センサーと径ゲージを組み合わせたクリップ型測定プローブを複数取り付け、温度、湿度、光量を制御した環境下で、AE、木部の負圧変動、水ポテンシャル、土壌水分などの測定を行った。そして、茎部を締め付けることにより局所的に通水

抵抗を増加させ、締め付け点上下の木部の負圧を一時的に変動させて AE 測定を行った。締め付け点上下の木部の負圧変動(径変化に対応)と AE 発生頻度比を用いて茎部の締め付けにより短時間でエンボリズム密度を相対評価することを試みた。

#### (4) ミニトマト茎部のハイブリッド音響測定(AE+音響測定)とエンボリズム密度の定量評価

複数の AE センサー、径ゲージ、圧電発音体をミニトマトの茎部に取り付け、茎部の締め付けによる木部の負圧変動時の多点 AE 測定を行い、エンボリズム密度を相対評価を試みた。同時に、圧電発音体と AE センサーにより茎部を伝播する音響の送受信を行い、木部の負圧変動の推定を行った。そして、その結果に基づき灌水量の節約を試み、評価手法の有効性を検証した。

### 4. 研究成果

#### (1) ミニトマト茎部の音響測定による木部の非破壊評価

圧電発音体によりミニトマト茎部に音響を照射したところ、茎部に取付けた AE センサーにより 5~100kHz の音響が計測された。しかし、超音波領域の音響は、伝達経路の茎部を切断しても検出されたことから空気中を伝播してきたものと考えられた。そこで、茎部を伝播していることが明らかな 5kHz の音響波について着目した。センサーとして加速度センサーと AE センサーを用いて、5kHz の音響波を検出したが、加速度センサーでは残響音が大きいため、複数のモードを分離することができなかった。一方、AE センサーは本来の測定レンジは超音波領域であるが、図 1 に示すように 5kHz のガイド波について複数のモードを検出することができた。

5kHz のガイド波について、茎長手方向の伝播速度と減衰率を測定したところ、図 2 に示すように検出された二つのモードはいずれも維管束厚さと強い相関が認められた。このことから、ガイド波を用いた維管束厚さの非破壊測定の可能性を示すことができた。しかし、測定したガイド波の周波数が低いため測定距離が長くなることが課題として残った。

主軸の茎を切断することにより強制的に水ポテンシャルを低下させたとき、茎径と相関の強いガイド波は水ポテンシャルの影響を強く受け、水ポテンシャルの低下に伴い、伝播速度は低下し、減衰率は増加した。このことから、ガイド波を用いた水ポテンシャルの非破壊評価の可能性を見出した。しかし、水ポテンシャルの定量的な評価のためにリファレンスとなるデータの必要性が課題として残った。

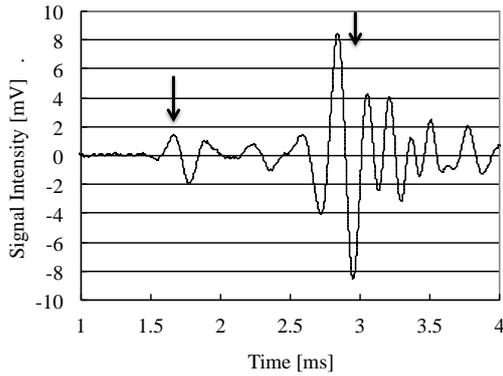
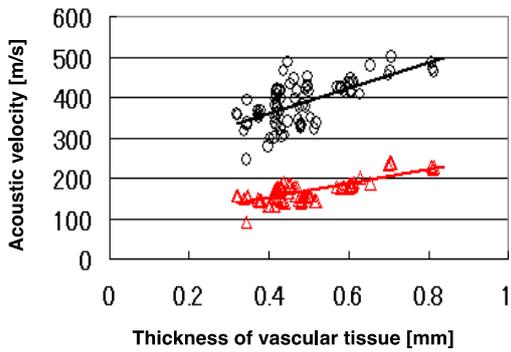
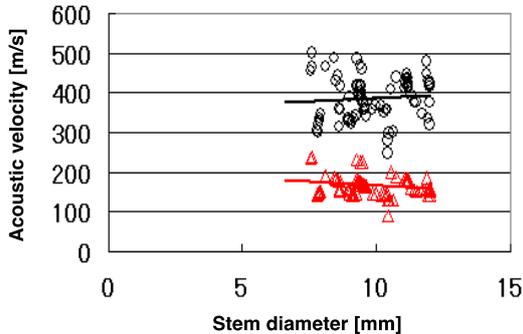


図 1. ミニトマト茎部を伝播するガイド波の検出例 (矢印で示す二つのモードが認められる)



(a)



(b)

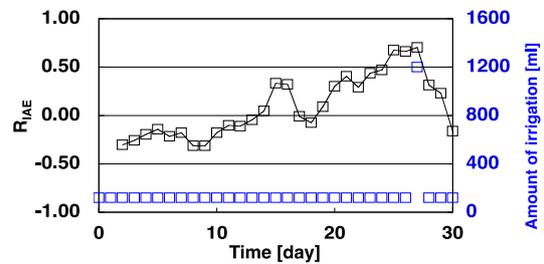
図 2. ガイド波の伝播速度と維管束厚さおよび茎径との関係 (図 1 に示す二つのモードについての結果を示す)

(2) 制御された環境下でのミニトマト育成と、灌水量変化による木部の負圧変動時の多点 AE 測定とエンボリズム密度の相対評価

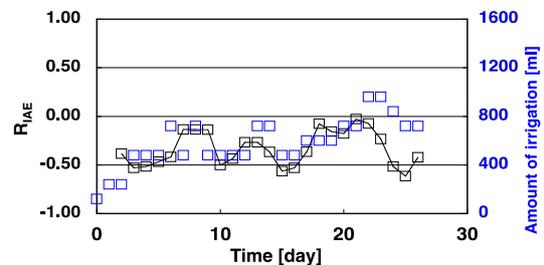
発芽してから 1 ヶ月のミニトマトの個体について、2 ヶ月間 2~4 個の AE センサーを取付けて多点 AE 測定を行った。その結果、灌水による木部の負圧の変動量 (茎径の変動量) が十分に大きければ、灌水前後 2 時間の AE 発生頻度は、乾燥ストレスに応じた変化を示した。図 3 に典型的な例を示す。灌水を行わなければ、乾燥ストレスの増大に伴い、エンボリズムの修復能力が徐々に失われ、それ

に応じて  $R_{IAE}$  は徐々に増加した (図 3(a))。一方、適切な灌水を行えば、エンボリズムの修復能力は保たれ、 $R_{IAE}$  は一定の範囲内で変化した (図 3(b))。このような結果から、灌水前後の 2 時間の AE 発生頻度の変化率  $R_{IAE}$  を定義した。実験結果とモデルから  $R_{IAE}$  が負であればエンボリズムは修復可能な状態であると結論付けられた。

また、当初はエンボリズム密度を数値化する事が目的であったが、同じエンボリズム密度でも、エンボリズムを修復可能かどうかで植物の生育状態は大きく変化する。逆に言えば、エンボリズムの修復能力を数値化できれば、それが植物の生育状態を直接的に示す指標となることになる。つまり、 $R_{IAE}$  は、ミニトマトのエンボリズムが修復可能かどうかを示していることから、これを用いてエンボリズム修復能力 (当初のエンボリズム密度と同じ概念) の数値化が可能と考えられた。



(a)



(b)

図 3. ミニトマト茎部の灌水前後の AE 発生頻度の変化率  $R_{IAE}$  の挙動: (a) 灌水しない場合, (b) 毎日 1 回灌水を行った場合

(3) ミニトマト茎部の締め付けによる木部の負圧変動時の多点 AE 測定とエンボリズム密度の相対評価

ミニトマト茎部の木部の負圧を変動させるために、茎部を締め付ける事により木部中の通水抵抗を局所的に増加させることを子試みたが、茎が潰れるまほど過大な力で締め付けても、締め付け点上下の AE 発生挙動と水ポテンシャルには締め付けとの相関が認められなかった。木部はミニトマト茎部において最も剛性の高い組織である事から、茎部を

締め付けても木部はほとんど変形しなかったものと思われる。

#### (4) ミニトマト茎部のハイブリッド音響測定 (AE+音響測定) とエンボリズム密度の定量評価

ミニトマト茎部の AE 発生挙動と圧電発音体により発生したガイド波の伝播速度の挙動から、灌水前後の AE 発生頻度の変化率  $R_{IAE}$  を用いてエンボリズム密度 (エンボリズムの修復能力) の定量評価を試みた。

図4に示すように、水ポテンシャルと強い相関を示したガイド波の伝播速度は、茎径の変化と良い一致を示した。このことから、ガイド波の伝播速度は細胞の膨圧や木部の負圧と密接な関係がある事が示された。そして、灌水時に灌水により水ポテンシャルが変動しているかどうかをガイド波の伝播速度の変動量から判断し、灌水による水ポテンシャル変動がある場合について  $R_{IAE}$  によりエンボリズムの修復能力を判定する手法を考案した。

実際に上記手法を用いてエンボリズムが修復可能 ( $R_{IAE} < 0$ ) を維持しながら、灌水量を極力減らして栽培したところ、土壌ポテンシャルを用いて栽培した時と同程度の生育状態であった。その時の  $R_{IAE}$  の挙動を図5に示す。土壌ポテンシャルで制御した場合、灌水量が多いにも関わらず  $R_{IAE}$  はハイブリッド音響測定で制御した場合と同等または高い値を示しており、灌水量をある程度減らしてストレスを与える事が、エンボリズムの修復能力の強化につながる事を示している。

そして、総灌水量に対する果実の乾重量を見かけの水利用効率として算出したところ、表1に示すようにハイブリッド音響測定を用いる事により水利用効率を向上させることができた。

このようにハイブリッド音響測定の有効性を示すことができた。しかし、多数の AE センサーを使用しないと十分な数の AE を検出できないこと、図5に示すように  $R_{IAE}$  の値に大きなばらつきがあることなど、センサを含めたシステムの改善が必要であることも分かった。

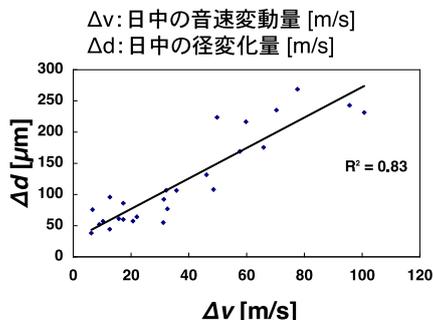


図4. ガイド波の伝播速度の変動と茎径変化との関係

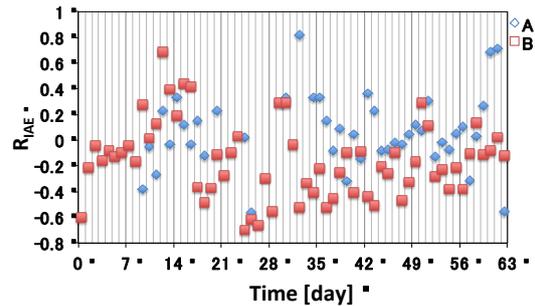


図5. ミニトマト栽培時の  $R_{IAE}$  の挙動; A: 土壌ポテンシャルで灌水制御, B: ハイブリッド音響測定で灌水制御

表1. 制御方法による栽培したミニトマトの灌水量と収量の違い

制御方法		ハイブリッド音響測定	土壌ポテンシャル測定
総灌水量 [l]	Wt	27.6	45.9
果実の乾重量 [g]	Md	43.3	36.2
見かけの水利用効率 [g/l]	Md/Wt	1.6	0.8
平均土壌ポテンシャル [kPa]	$\psi_s$	-44.0	-22.4
平均 $R_{IAE}$	$R_{IAE}$	-0.2	0.0

#### (5) まとめ

ミニトマト茎部のハイブリッド音響測定システムを構築し、茎部を伝播するガイド波とキャビテーションによる AE の検出を同時に行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. 茎部を伝播するガイド波の伝播速度は、茎径や維管束厚さと強い相関を示した。
2. 茎部を伝播するガイド波は、伝播速度と減衰率が水ポテンシャルと強い相関を示すモードがあった。
3. 灌水により水ポテンシャルが変動し、十分な数の AE を検出できた場合、灌水前後の AE 発生頻度の変化率からエンボリズム密度 (エンボリズム修復能力) を評価できた。
4. AE 測定とガイド波測定を組み合わせると灌水前後のハイブリッド音響測定により、ミニトマトの水利用効率を向上させることができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- (1) Kageyama, K., Inoue, Y. and Kato, H. : Estimation for Embolism Risk of Tomato Using Acoustic Emission Response to Increased Drought Stress, Environment Control in Biology, vol. 47, No. 3, pp 127-136 (2009).

- (2) Kageyama, K., Watanabe, E. and Kato, H.: Non-Destructive Measurement of Vascular Tissue Development in Stems of Miniature Tomato Using Acoustic Method, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, vol. 2, No. 12, pp 1487-1496 (2008).

〔学会発表〕(計3件)

- (1) 蔭山健介, 乾燥ストレス変動時の AE 測定によるミニトマト茎部の水分診断 - 乾燥ストレス下での成長と AE 発生挙動との関係-, 平成 22 年度農業機械学会年次大会, 2010.9.15., 愛媛大学.
- (2) 蔭山健介, ハイブリッド音響測定によるミニトマト茎部の水分診断 - 乾燥ストレスによる音速と AE 発生挙動の変化-, 農業環境工学関連学会 2009 年合同大会, 2009.9.12., 東京大学.
- (3) Kageyama, K., INFLUENCE OF DROUGHT STRESS INDUCED BY CUTTING STEM ON AE BEHAVIOR IN MINIATURE TOMATO, The 19th International Acoustic Emission Symposium, 2008.12.12., Kyoto University.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: 灌水方法、フィルム状エレクトレット

センサ及びフィルム状 ECM アレイ

発明者: 蔭山健介

権利者: 埼玉大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-311569

出願年月日: 2008.12.5

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

蔭山 健介 (KAGEYAMA KENSUKE)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 30272280

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し