弾性波検出による緑化木の水ストレス評価に関する実験的研究

上野由樹¹⁾・島本由麻¹⁾・鈴木哲也^{*2)}・森井俊広²⁾・河合隆行³⁾

1) 新潟大学大学院自然科学研究科

2) 新潟大学自然科学系（農学部）

3) 新潟大学災害・復興科学研究所

摘要：緑化木の維持管理には、モニタリング技術が必要である。植物は、水ストレス下において道管内部で負圧が増大しキャビテーション現象に伴う弾性波が発生する。本報では、植物起源弾性波を計測・特性評価した結果を報告する。計測手法には、弾性波を受動的に検出するAE法を用いた。供試植物には、緑化木であるセンリョウとAE法での既往研究において多くの報告があるトマトを用いた。検討の結果、両供試植物から得られた検出波特性とAEパラメータとの関連性が明らかとなった。

キーワード：AE法、レーリー・プレセット方程式、トマト、センリョウ

1. はじめに

緑化木の維持管理において精緻な非破壊モニタリング法の開発が急務な課題となっている。緑化木の維持管理において、土壤水分は重要な環境要因である。このため、水ストレスの指標には土壤pFが用いられている。この指標は植物体の水ストレスを間接的に評価していることから、気象条件や生育段階を精緻に検討することは困難である。

筆者らは、キャビテーション現象により発生する弾性波に着目した水ストレス非破壊評価法を開発している⁷⁾。植物体内におけるキャビテーションの発生は、道管内の負圧の増大に起因する。根の吸水と蒸散により、道管内のポテンシャルに差が生じて満流状態から気液二相流状態へと変質する。気液二相流では、気泡の運動や破裂などにより弾性波が放出される。放出された弾性波は、非破壊検査法の一つであるAE (Acoustic Emission) 法により検出可能である。AE法とは、弾性波を受動的に検出する非破壊検査法である^{2,3,5)}。既往の研究¹⁾から気泡運動に起因する弾性波の周波数特性は、気泡径に依存することが明らかにされている。気泡径と周波数の関係は、レーリー・プレセット方程式^{4,6)}により評価されている。植物体を対象にした場合、検出波の特性は道管構造に影響を受けると考えられる。

本報では、現状において十分に研究開発が進められていない緑化木に関する水ストレスの非破壊検査法を提案するための基礎的検討を行った。供試植物として緑化木であるセンリョウ (*Sarcandra glabra* var. *flava* M) と水ストレスにおける既存研究が多いトマト (*Solanum lycopersicum* L) を用いた。AE法を用いた水ストレス状態での植物起源弾性波の検出と両植物間のAEパラメータ特性評価を試みた結果を報告する。

2. AE法による植物起源弾性波計測

本研究で対象となる植物起源弾性波は極微弱な弾性波であり、周波数は数kHzから数MHzまでの高周波成分である。植物体が水ストレスを受けると道管内の負圧が増加し、気泡が発生する。このキャビテーションと呼ばれる現象により弾性波が発生する。弾性波の発生要因としては、気泡発生や発生した気泡と道管壁との衝突が考えられている。

計測されるAE波形模式図を図-1に示す。AE波形を数値的に解釈したものにAEパラメータがある。AEパラメータとは、波形情報を定量化した指標値である。代表的なパラメ

図-1 AEパラメータ

* 連絡先著者:E-mail : suzuki@agr.niigata-u.ac.jp 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050番地

ータは、最大振幅値、継続時間、カウント数、平均周波数などがある。最大振幅値は、1 ヒット時の最大振幅値である。継続時間とは、最初のカウント時から、最後のカウント時の時間である。カウント数とは、設定しきい値を超えた回数である（図-1 丸印）。設定しきい値は、予め計測環境下でのバックグラウンドノイズを確認し、それらが計測されない値とした。平均周波数は、一定時間当たりの振幅回数であり、カウント数を継続時間で除したもので表される。

一般的に AE 計測では、検出波の周波数成分と検出波の波形形状から突発型 AE と連続型 AE に分類することが可能である。突発型 AE は、検出波の時系列データにおいて弾性波の到達が明確な振幅値の急増点がある波形である。連続型 AE は、突発型 AE とは異なり、正弦波に近い波形形状である。突発型 AE は気泡の衝突や破裂などエネルギー放出に伴う弾性波であると考えられる。連続型 AE は環境ノイズないし定常的な水流の影響によるものと考えられる。

3. 気泡運動方程式による検出波の定量評価

キャビテーションや気泡発生挙動について多くの研究がなされてきた。Rayleigh (1917)⁶⁾は、気泡の変形速度が音速より小さいとして気泡近傍の液体の圧縮性を考慮しないとき、気泡壁面の運動方程式が式 (1) であらわされることを明らかにした。式中の $\dot{R}$ は R の1回微分、 $\ddot{R}$ は R の2回微分を示す。

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}(\dot{R})^2 = \frac{p(R)-p_\infty}{\rho} \quad (1)$$

このとき、 ρ は液体密度、 p_∞ は無限遠における圧力（常に一定）、 $p(R)$ は気泡表面での液体圧力である。式 (1) を変形し

$$f = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_{i,eq}}{\rho} - \frac{2\sigma}{\rho R_0}} \quad (2)$$

式 (2) を用いて大気圧下 20 °C の水中における気泡半径と周波数の関係を図-2 に示す。本図の条件は、比熱比 $\gamma=1.33$ 、大気圧 $p_{i,eq}=101$ kPa、水密度 $\rho=1000$ kg/m³、表面張力係数 $\sigma=0.073$ N/m である。

4. 実験方法

4.1 センリョウ

センリョウの栽培は恒温室内で行った。AE 計測には、SAMOS (PAC 社製) を用いた。AE センサは 350 kHz 共振型小型センサ M31 (Fuji Ceramics Corporation 社製) を用いた。センサは、カップラントを用いて植物の茎部に設置した。AE の計測条件は、メインアンプ 20 dB、プリアンプを 40 dB で増幅し、合計 60 dB とした。しきい値は 32 dB とした。栽培土は、2 mm ふるいを通した関東ロームを用いた。供試植物は、高さ 20 cm のものを一対と高さ 40 cm のもの一対用意した。一対の片方をストレス区もう一方を対照区とした。土壌水分のコントロールとして、重量計を用いて蒸発散

図-2 気泡運動方程式による気泡半径と周波数の関係

量を求め、ストレス区には給水を行わず土壌水分を pF 1.8（または 2.0）から直線的に pF 4.2 以上まで低下させストレスを与えた。対照区には毎朝 8 時に給水を行い、水ストレスを与えなかった。計測期間は、2010 年 12 月～2011 年 2 月である。

4.2 トマト

AE 計測はセンリョウと同様に SAMOS・AE システムを用いた。AE センサはセンリョウ計測時と同様の 350 kHz 共振型小型センサ M31 を使用し、メインアンプを 20 dB、プリアンプを 40 dB で増幅して、合計 60 dB にし、しきい値は 35 dB に設定した。センサは、植物の基基部及び果実直近部に設置した。栽培方法としては、圃場（ビニールハウス）に苗木を定植させ生育した。栽培土は砂質土である。栽培環境条件として、土壌水分、温度、湿度、光量子の計測を行った。植物生長量として、植物の草丈、茎径、葉数、果実糖度を計測した。土壌水分のコントロールは、2 区画設定し、毎日給水を行った対照区と給水量を対照区の 30 %（または 0 %）に減らしたストレス区を設けた。給水は毎日 7 時に行った。計測は、2012 年 8 月 13 日から 9 月 22 日まで行った。

5. 実験結果

5.1 検出波の分類

センリョウとトマトに対して行った AE 計測より、各植物体とも 2 種類の波形形状を検出した。検出された AE は波形形状の特徴より、振幅値の増幅が明確で突発的に立ち上がり点がある突発型 AE と立ち上がりが明確ではない連続型 AE に分類した。検出波の代表例を図-3、図-4、図-7、図-8 に示す。ここで図-3、図-4 はセンリョウの検出波形である。図-7、図-8 は、トマトの検出波形である。高速フーリエ変換 (FFT) の結果を図-5、図-6、図-9、図-10 に示す。ここで図-5、図-6 はセンリョウの検出波形である。図-9、図-10 は、トマトの検出波形である。

5.2 突発型 AE と連続型 AE の周波数帯域の比較

検出波形が突発型 AE と連続型 AE に分類できることが明らかとなったので、センリョウとトマト両供試植物において突発型 AE と連続型 AE の周波数に着目し検討を行った。そ

図-3 検出波形（センリョウ，連続型）

図-4 検出波形（センリョウ，突発型）

図-5 FFT 結果（センリョウ，連続型）

図-6 FFT 結果（センリョウ，突発型）

図-7 検出波形（トマト，連続型）

図-8 検出波形（トマト，突発型）

図-9 FFT 結果（トマト，連続型）

図-10 FFT 結果（トマト，突発型）

図-11 ピーク周波数帯域のセンリョウとトマトの比較（連続型 AE）

図-12 ピーク周波数帯域のセンリョウとトマトの比較（突発型 AE）

の結果を連続型 AE は図-11、突発型 AE は図-12 に示す。この図は、検出波に高速フーリエ変換（FFT）を施し、第 1 ピークから第 3 ピークまでの周波数の発生頻度を示したものである。

センリョウにおいて検出された突発型 AE は、計測期間中 1,232 ヒット確認された。周波数帯域は、20～140 kHz であった。特に 60～100 kHz では全体の約 65 % が確認された。トマトにおいて検出された突発型 AE は、計測期間中 36,837 ヒット確認された。突発型 AE の周波数帯域は、20～520 kHz であった。特に 20～80 kHz および 120～180 kHz において全体の約 54 % が確認された。

弾性波の減衰がないものと仮定し、突発型 AE の周波数からレーリー・プレセット方程式を用いて気泡直径を求めた。センリョウの道管内に発生している気泡の直径は、32～54 μm となる。トマトの道管内に発生している気泡の直径は、40～160 μm と 18～27 μm となる。センリョウとトマトの道管から発生していると考えられる気泡径は異なることが示唆された。

センリョウにおいて検出された連続型 AE は、計測期間中 7,462 ヒット確認された。トマトにおいて検出された連続型 AE は、計測期間中 1,572,618 ヒット確認された。連続型 AE は主に 20～100 kHz に分布している。トマトでは全体の 70 % にあたる発生数であった。センリョウでは全体の 98 % が確認された。また、トマトにおいて突発型 AE と連続型 AE 両型の AE において 360～380 kHz に発生数が頻発しているのは、使用した AE センサが 350 kHz であったことが影響していると考えられる。

6. おわりに

本報告では、センリョウとトマトを用いて AE 法による植物起源弾性波の検出と両供試植物から得られた検出波の特性

評価を試みた。本研究から明らかになった事項を以下に列挙する。

- 1) センリョウおよびトマト両供試植物において、AE 法を用いた植物起源弾性波の計測は可能である。
- 2) 両供試植物において、検出波形は波形形状より、突発型 AE と連続型 AE に分類することが可能である。
- 3) 両供試植物において、突発型 AE のピーク周波数帯域に差が見られた。これは道管内で発生している気泡径の差が影響していると考えられる。

引用文献

- 1) 藤川重雄 (2004) 10.2 キャピテーション, 日本混相流学会編「混相流ハンドブック」, 朝倉書店, pp.310-313.
- 2) Kageyama, K., Kaminaga, M. and Kato, H. (2007) Correlation between acoustic emissions generated from cavitation in rubber tree leaf veins, *Environmental Control Biol.*, 45 (1) : 59-65.
- 3) 大津政康 (2005) アコースティック・エミッションの特性と理論 (第 2 版), 森北出版, 130 pp.
- 4) Plesset, M. S. and A. Prosperetti (1977) Bubble dynamics and cavitation, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 9: 145-185.
- 5) Ralf, Laschimke, Maria, Burger and Hartmut, Vallen (2006) Acoustic emission analysis and experiments with physical model systems reveal peculiar nature of the xylem tension, *Journal of Plant Physiology.*, 163:996-1007.
- 6) Rayleigh, L. (1917) On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity, *Philosophical Magazine.*, 34 (200) : 94-98.
- 7) 上野由樹, 鈴木哲也 (2012) AE 法を用いた水ストレス条件下で発生したセンリョウ起源弾性波の検出に関する研究, *日本緑化工学会誌*, 38 (1) : 73-78.

(2013. 6. 13 受理)