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

上野由樹¹⁾・鈴木哲也^{*2)}

1) 新潟大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology,
Niigata University

2) 新潟大学自然科学系（農学部） Faculty of Agriculture, Niigata University

摘要: 造成された緑地では、土壤水分の欠乏など周辺環境の影響を強く受ける。適切な緑地環境の維持管理には、植生に対するストレスの非破壊検出法の開発が急務な技術的課題となっている。本研究では、水ストレス下のセンリョウから発生する弾性波を AE (Acoustic Emission) 法を用いて検出した結果を報告する。水ストレス条件では、植物体から導管に発生する気液二相流起現の弾性波が検出される。検討の結果、弾性波の発生特性は、時系列 AE データを用いた土壌 pF と AE 発生頻度の関係から評価可能であることが認められた。このことから、AE 法により検出された弾性波は、水ストレス条件を定量評価できるものと考えられる。

キーワード: 水ストレス, AE 法, クラスタ解析, センリョウ

UENO, Yuki and SUZUKI, Tetsuya: **Detection of elastic waves generated from *Sarcandra glabra* var. *flava* Makino using acoustic emission in water stress conditions.**

Abstract: A large number of re-vegetation fields are affected by environmental conditions, such as soil water shortage. Prior to optimum management of these fields, non-destructive testing method for stress evaluation of plant is now in urgent demand. In this study, detection of elastic waves generated from *Sarcandra glabra* var. *flava* Makino is going to be performed, applying acoustic emission (AE) method. In water stressed conditions, elastic waves are emitted from gas-liquid flow in plant vessel. The characteristics of elastic waves in soil water stress conditions could be evaluated by comparing soil pF with a rate of AE generation, which is analyzed by time series AE data. A relation between AE rate and soil pF is correlated. Thus, by detecting elastic waves by AE, the water stress condition is quantitatively evaluated.

Key words: Water stress, Acoustic emission method, Cluster analysis, *Sarcandra glabra* var. *flava* Makino

1. はじめに

緑化工の効果を長期的に維持するためには、水ストレスに代表される緑化木への外部環境の影響を精緻に非破壊モニタリングする必要があり、計測法の開発が急務な技術的課題となっている⁸⁾。この背景には、降雨等の気象条件の長期変動や管理地の植生遷移などが必ずしも設計・施工段階の想定とは一致していないことにある⁸⁾。主な変動要因には土壤水分や土性など土壤に起因するものが多く、緑化木においても水ストレスの指標には土壌 pF が用いられることが多く、土壌水分指標である pF と植物の水ストレスの関係については多くの研究が行われてきた。

水ストレス下での植物体では、導管部で気相と液相が混在するキャビテーションが発生する^{2,10)}。筆者らは、キャビテーションの気泡運動に起因する弾性波を検出し、水ストレスを診断するための非破壊評価法を開発している¹⁰⁾。提案手法の特徴は、従来のプレッシャーチャンバー法^{4,5)}などとは異な

り、植物体の状態や部位に関わりなく非破壊モニタリングが可能となる点にある。弾性波の検出には AE (Acoustic Emission) 法を用いている。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。気泡運動に起因する弾性波は、検出波の周波数成分が気泡径に依存し、評価式としてレイリー・ブレット式が提案されている¹⁾。植物体の場合、検出波の周波数成分は広帯域に分布し、その検出波形が異なることが明らかになっている²⁾。水ストレスを受ける植物体では、水ストレスの段階により検出波特性が変質することが示唆されている²⁾。AE 法を用いた非破壊モニタリングでは、一般的に検出波をそ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⁹⁾。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の伝搬が起源であり、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である⁹⁾。

本研究では、土壤水分を精緻にコントロールした条件下で水ストレスを緑化木の一つであるセンリョウ (*Sarcandra*

* 連絡先著者 (Corresponding author) : E-mail : suzuki@agr.niigata-u.ac.jp

glabra var. *flava* Makino) へ与え、その際に発生する弾性波を AE 法により検出した。本論では、水ストレス診断の高度化に資する基礎的検討として水ストレス下の緑化木から検出される弾性波の特性について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

本研究では、供試植物としてセンリョウを用い、高さ $H=20$ cm (後述, Case 1 と Case 2 に使用) と $H=40$ cm (後述, Case 3 と Case 4 に使用) の 2 種類を準備した。実験条件を表-1 に示す。実験的検討では、水ストレスの無い pF 1.8 (又は pF 2.0) から永久しおれ点である pF 4.2 以上まで水ストレスを与えたものをストレス区とした。ストレス区と同様の期間に水ストレスを与えず pF 1.8~2.0 で管理した対照区を準備した。

実験は恒温室内で 2010 年 12 月~2011 年 2 月の期間に行った。計測システムを図-1 に示す。恒温室内での計測は、室温と湿度を一定に保ち実験を行った。照明には植物栽培用の蛍光灯 (Biolux-A 40 W, NEC 社製) を用いて 8 時から 18 時の計 10 時間点灯させ、計測期間中点灯と消灯を繰り返した。計測項目は、AE 法によるセンリョウから発生する弾性波の検出と重量法による蒸発散量の計測である。

弾性波の検出には AE 法を用いた。使用した AE センサは 350 kHz 共振型小型センサ M31 (Fuji Ceramics Corporation 製) である。センサの固定は植物の茎部にカップラントを用いて行った。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。しきい値は本実験の計測条件でのホワイトノイズが計測されない最低値として 32 dB とした。

センリョウの栽培には関東ロームを用いた。水ストレスは土壌水分を調整して与え、その定量的指標には重量法により計測した蒸発散量を pF 値で用いた。土壌条件は、2 mm ふるいを通した関東ロームを湿潤密度 1.1 g/cm^3 に調節したものを用いた。供試土の土壌水分条件は、吸引法と遠心法を用いた pF 試験を行い、含水比と pF の関係を求めた。

検出された弾性波 (以後、AE と記す) の波形形状を図-2 に示す。AE 法の特徴は検出した弾性波を分割し、1 波形 (AE 法では 1 ヒットと示す) の波形情報を定量化指標である AE パラメータを用いて評価することにある。AE の検出数はヒット数と呼ばれる。主な AE パラメータには、最大振幅値 (AMP) や継続時間 (DURATION) やカウント数 (COUN) や重心周波数 (C-FRQ) およびピーク周波数 (P-FRQ) 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-2 丸印)。重心周波数とは、その波形の重心的な周波数である。ピーク周波数とは、最大振幅値に対応する周波数である。その他の AE パラメータとして、最大振幅値までの立ち上がり時間 (RISE) や、AE エネルギー (ENER), 平均

周波数 (A-FRQ), 実効値電圧 (RMS), 最大振幅値までのカウント数 (PCNTS), 信号強さ (SIG) がある^{6,7)}。本研究では、これらの AE パラメータを指標値として用い、突発型 AE と連続型 AE の波形分類に基づく水ストレス評価を試みるものである。後述する AE パラメータの中でも AE ヒット数 (又は AE 発生頻度) は、キャビテーションに起因する AE の発生量を示す。その他、最大振幅値やカウント数は、検出波の質を表わす指標である。検出波の質とは、気泡径や外部環境の影響を受けた結果として伝搬してくる AE の特性を示すものである。

表-1 実験条件 (Case 1-Case 4)

Table 1 Experimental conditions (Case 1-Case 4).

ケース名	供試体植物	体長	水分条件	計測期間		
				開始	終了	日数
Case 1	センリョウ(ストレス区)	20 cm	pF 1.8→ pF 4.4	2010/12/23	2011/1/8	17日間
Case 2	センリョウ(対照区)	20 cm	pF 1.8→ pF 2.0			
Case 3	センリョウ(ストレス区)	40 cm	pF 2.0→ pF 4.6	2011/1/15	2011/2/13	30日間
Case 4	センリョウ(対照区)	40 cm	pF 2.0→ pF 2.0

図-1 AE 計測システム (蒸発散計測を含む)

Fig. 1 Set up for AE and evapotranspiration monitor system.

図-2 検出弾性波の波形形状と AE パラメータの関係

Fig. 2 Relations between shape of detected elastic wave and AE Parameters.

3. 結果

3.1 検出波の分類

実験的検討の結果、AE計測により6種の波形形状の異なる弾性波(AE)を検出した。検出したAEをその波形形状の特徴に合わせて、時系列データにおける振幅値の増加が明確な「突発型AE」と正弦波形に近い「連続型AE」に分類した。波形分類の際には、1ヒット毎に短時間高速フーリエ変換(ST-FFT)を施し、その結果を用いて検出波の波形形状と周波数特性から突発型AEと連続型AEから構成される6種類に分類した。分類した検出波の代表例を図-3に示す。FFTはリアルタイムでの適用が可能である。なお、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を有する波形である。連続型AEは突発型AEとは異なりサイン波に近い波形形状である。

検討の結果、突発型AE(以後、B型)が2種類、連続型AE(以後、C型)が4種類に分類された。突発型AEは、特定域の周波数帯1kHz~200kHzが検出されないBb型とBb型で検出されない周波数帯も検出されたBa型に分類された。連続型AEは、正弦波に最も近い連続型AEをCa型とした。Cb型は単発的なピークを有するノイズ波形であり、Cc型はホワイトノイズと類似した検出波である。Cd型は、

最大振幅値が検出される際に複数のピーク値が認められる波形である。なお、Case 3, Case 4での計測において、Cc型は検出されなかった。

以上の結果を踏まえて3.2では検出波の有意差検定を行った。3.3では3.2の結果を踏まえたクラスタ解析を示す。3.4では検出波の時系列での発生頻度を評価することにより水ストレスによるAE発生挙動の変質を評価した。

3.2 有意差検定

3.1において検出波の波形形状を時系列データから6種類に分類した。検出したAEは、1波形(1ヒット)毎にAEパラメータを用いた定量的な指標値を算出した。

検討方法は、各検出波の特性をAEパラメータの平均値の有意差検定から評価した。AEパラメータの組み合わせに対して、等分散の検定を有意水準5%で行ったのちに、有意差検定を有意水準5%で行った。Case 1とCase 2の比較結果をP値と共に表-2に示す。Case 3とCase 4の比較結果を表-3に示す。両表では、有意差が確認された波形の組み合わせに対して、塗りつぶして表記している。

Case 1とCase 2を比較した結果、AEパラメータの中でもRISE, AMP, A-FRQ, P-FRQが比較検討60パターン中37パターンで有意差が確認された。ENERやRMS, SIGでは、検出波の組み合わせによらず有意差は確認されなかった。

図-3 AE計測により検出した波形(突発型AE:2種,連続型AE:4種)

Fig. 3 Detected AE waves in experiments (Burst type AE: 2 types (Ba-Bb), Continuous type AE: 4 types (Ca-Cd)).

Case 3 と Case 4 では、Case 1 と Case 2 とは異なり、表-2 において有意差の確認数が少ないかあるいは確認されなかった AE パラメータである COUNT, RMS, SIG, C-FRQ においても有意差が確認されるケースが示された。

このことから、検出波の特性を AE パラメータにより定量化し、それらの波形形状の特徴を示す RISE（立ち上がり時間）や AMP（最大振幅値）、A-FRQ（平均周波数）、P-FRQ（ピーク周波数）を用いることにより検出波の分類は可能であると考えられる。連続型 AE の Cc 型と Cd 型では、全ての AE パラメータで有意差が確認されなかったことから、同波形として取り扱いすることに問題はないものと考えられる。

3.3 クラスタ解析

検出波の波形形状毎に AE パラメータを用いた有意差検定を行った結果、波形形状による AE パラメータの特徴が確認された。そこで本研究では、より簡易な方法により検出波形の分類を行うことを目的にクラスタ解析による検討を試み

た。用いたパラメータは、3.2 において検討した AE パラメータの平均と標準偏差である Case 1（ストレス区）での解析結果を図-4 に示し、Case 2（対照区）の結果を図-5 に示す。同様に、Case 3（ストレス区）を図-6、Case 4（対照区）を図-7 示す。

解析的検討の結果、Case 1 においては突発型である Ba 型、Bb 型が同一階層に分類された。Case 2 では、Case 1 とは異なり、Cd 型を除く全ての波形型が同一階層に分類された。この原因は、Case 2 が水ストレスを与えない対照区であることに起因していると考えられる。波形形状の相違は、弾性波の伝搬過程を反映したものであり、気泡運動などと関連していないことから、差が小さかったものと考えられる。階層間の距離で比較すると Case 1 では最大 300,000 であり、Case 2 では最大 40,000 と約 7.5 倍の差が確認された。Case 3、Case 4 では Case 1、Case 2 と同様の傾向が確認された。Case 3 では、Ba 型、Bb 型が異なる階層に分類された。Case 4 では突発型が同一階層に分類された。Case 3、Case 4 共に連続型

表-2 AE パラメータを用いた検出波形の有意差検定結果 ($P<0.05$, Case 1, Case 2)

Table 2 Results of significant difference of detected AE waves using AE parameters ($P<0.05$, Case 1 - 2).

		RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	PCNTS	SIG	C-FRQ	P-FRQ
Ba	Bb	0.979	0.451	0.172	0.078	0.697	0.004	0.901	0.001	0.189	0.195	0.003
Ba	Ca	0.027	0.000	0.826	0.965	0.000	0.000	0.297	0.031	0.825	0.886	0.000
Ba	Cb	0.056	0.929	0.230	0.142	0.000	0.277	0.100	0.320	0.273	0.001	0.000
Ba	Cc	0.042	0.072	0.116	0.057	0.015	0.006	0.110	0.089	0.117	0.869	0.000
Ba	Cd	0.042	0.293	0.168	0.056	0.000	0.000	0.156	0.134	0.182	0.619	0.000
Bb	Ca	0.075	0.000	0.260	0.053	0.000	0.000	0.530	0.000	0.501	0.143	0.000
Bb	Cb	0.057	0.937	0.168	0.072	0.000	0.844	0.099	0.465	0.200	0.256	0.000
Bb	Cc	0.042	0.073	0.114	0.055	0.037	0.000	0.109	0.091	0.115	0.174	0.000
Bb	Cd	0.041	0.343	0.144	0.028	0.012	0.000	0.150	0.188	0.156	0.299	0.000
Ca	Cb	0.088	0.214	0.251	0.138	0.101	0.099	0.078	0.247	0.256	0.000	0.019
Ca	Cc	0.046	0.066	0.116	0.057	0.145	0.198	0.102	0.088	0.116	0.933	0.003
Ca	Cd	0.091	0.091	0.176	0.054	0.001	0.138	0.113	0.108	0.176	0.368	0.000
Cb	Cc	0.085	0.073	0.125	0.068	0.443	0.057	0.252	0.097	0.125	0.002	0.030
Cb	Cd	0.475	0.379	0.440	0.688	0.038	0.072	0.582	0.512	0.435	0.002	0.008
Cc	Cd	0.066	0.082	0.138	0.072	0.680	0.571	0.169	0.106	0.139	0.522	0.353

表-3 AE パラメータを用いた検出波形の有意差検定結果 ($P<0.05$, Case 3, Case 4)

Table 3 Results of significant difference of detected AE waves using AE parameters ($P<0.05$, Case 3 - 4).

		RISE	COUN	ENER	DURATION	AMP	A-FRQ	RMS	PCNTS	SIG	C-FRQ	P-FRQ
Ba	Bb	0.210	0.071	0.056	0.369	0.279	0.030	0.213	0.002	0.111	0.185	0.045
Ba	Ca	0.000	0.000	0.859	0.001	0.000	0.000	0.877	0.000	0.039	0.038	0.000
Ba	Cb	0.021	0.000	0.304	0.001	0.000	0.192	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Ba	Cd	0.000	0.000	0.028	0.076	0.000	0.000	0.792	0.000	0.000	0.001	0.000
Bb	Ca	0.000	0.000	0.060	0.114	0.000	0.000	0.221	0.000	0.039	0.500	0.000
Bb	Cb	0.025	0.000	0.035	0.012	0.000	0.014	0.163	0.000	0.006	0.000	0.000
Bb	Cd	0.069	0.000	0.017	0.114	0.000	0.000	0.206	0.000	0.004	0.998	0.000
Ca	Cb	0.000	0.000	0.311	0.000	0.000	0.016	0.004	0.000	0.000	0.000	0.124
Ca	Cd	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.922	0.000	0.000	0.003	0.000
Cb	Cd	0.000	0.000	0.577	0.027	0.000	0.156	0.002	0.000	0.114	0.000	0.000

*) 表中に略記号（詳細）

RISE：最大振幅値までの立ち上がり時間，COUN：カウント数，ENER：AE エネルギー，DURATION：継続時間，AMP：最大振幅値，A-FRQ：平均周波数，RMS：実行値電圧，PCNTS：最大振幅値までのカウント数，SIG：信号強さ，C-FRQ：重心周波数，P-FRQ：ピーク周波数

である Cb 型が Case 2 と同様に、突発型である Ba 型、Bb 型が同一階層に近い階層に分類された。階層間の距離は、Case 3 が最大 60,000、Case 4 が 600,000 であり Case 1 および Case 2 と同様に大きく差が開く結果となったが、対照区の最大値が大きくなる結果になった。

これらの結果から、クラスタ解析による簡易的な時系列波形データの解析的検討では Ba 型と Bb 型に明確な相違点を導き出すことは困難であるが、AE パラメータを用いて検出波を定量化することは、その特性評価による水ストレス診断において有効であると 3.2, 3.3 の検討結果から考えられる。

3.4 水ストレス下での突発型 AE と連続型 AE の発生頻度

突発型である Ba 型、Bb 型と連続型である Ca 型、Cb 型、Cc 型、Cd 型に関する発生頻度の比較を行った。検討結果を図-8 および図-9 に示す。なお、本図では Ba 型と Bb 型を突発型とし、C 型を連続型として表示した。

検討の結果、Case 1（ストレス区）では、計測開始 2 日後

から突発型 AE である Ba 型と Bb 型での AE が確認された。その後、突発型 AE の発生頻度は増大し、計測 9 日目には確認されなくなった。計測 14 日目より再度、突発型 AE が検出された。17 日目の突発型 AE ヒット数は 150 以上とストレス後期（pF 4.0 以降）は、ストレス初期（pF 1.8～pF 2.7）よりも AE 発生頻度の増大が確認される結果となった。Case 3（ストレス区）では、計測 4 日目で突発型 AE が確認された。計測 8 日目には突発型 AE の発生は収束し、その後計測 24 日目までは、突発型 AE は確認されなかった。計測 24 日目に突発型 AE が再び確認されてからは、計測 26 日目の 129 ヒットをピークに計測 30 日目まで確認された。図-8 と図-9 を比較すると Case 3 および Case 4 の計測結果である図-9 においても水ストレス初期（pF 2.0～pF 2.7）より水ストレス後期（pF 4.0 以降）での突発型 AE の発生頻度の増加が顕著に確認された。

以上のことにより、センリョウにおいては水ストレス初期

図-4 クラスタ解析結果（Case 1）

Fig. 4 Result of Cluster analysis (Case 1).

図-5 クラスタ解析結果（Case 2）

Fig. 5 Result of Cluster analysis (Case 2).

図-6 クラスタ解析結果（Case 3）

Fig. 6 Result of Cluster analysis (Case 3).

図-7 クラスタ解析結果（Case 4）

Fig. 7 Result of Cluster analysis (Case 4).

図-8 土壌 pF と AE 発生頻度の関係 (Case 1, Case 2)

Fig. 8 Comparison of pF and AE hit rate (Case 1, Case 2).

から突発型 AE が確認され、水ストレス後期にはさらに突発型 AE の発生が顕著になる傾向が確認された。水ストレス初期に発生する突発型 AE は、微小気泡の運動に起因する弾性波であると考えられる⁹⁾。水ストレス中期 (pF 2.7~pF 4.0) における突発型 AE の発生頻度の低下は、気泡の連鎖による導管内を塞ぐような大きな空洞が生成されることにより、気泡運動が阻害され結果として突発型 AE の発生抑制が生じたものと考えられる。水ストレス後期では、植物体の細胞壁が乾燥収縮³⁾による細胞破壊により突発型 AE が検出されたものと考えられる。連続型 AE である Ca 型は水ストレスを与えない対照区である Case 2, Case 4 において計測期間中、常に検出された。既往の研究より、連続型 AE は満流下での定常流条件において検出される⁹⁾。構造や通水方法が同一でないことから断定的な議論は困難であるが、一つの可能性として連続型 AE は導管内の流水音を検出しているものと推察される。

4. まとめ

本研究では、水ストレスに起因する弾性波を AE 法により検出し、特性評価を試みた。供試したセンリョウは、AE 発生頻度の観点から水ストレスを評価した。本研究から明らかになった事項を以下に列挙する。

- 1) 検出波の時系列データにより突発型 AE と連続型 AE に分類できることが明らかになった。
- 2) 統計的検討の結果、AE パラメータの中でも RISE, AMP, A-FRQ, P-FRQ の 4 種において波形形状において 5 % 有意水準で有意差が確認された。
- 3) クラスタ解析を用いることにより検出波特性を分類できることが示唆された。より詳細な検討には、植物起源弾性波の検出精度の向上が必要であるが、本研究での計測精度においても検出波の概略分類は可能であると考えられる。

図-9 土壌 pF と AE 発生頻度の関係 (Case 3, Case 4)

Fig. 9 Comparison of pF and AE hit rate (Case 3, Case 4).

- 4) 水ストレスの初期、中期および後期において突発型 AE の発生挙動が変化し、AE と導管内部の気泡形成と運動とが密接に関連していることが示唆された。
- 5) 今後の検討課題は、本論で提示した AE 法による水ストレス評価手法を進展させ、より精密な植物体の状態評価技術として確立することにある。

引用文献

- 1) 藤川重雄 (2004) 10.2 キャビテーション, 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) 野口昌巳 (1985) 木質材料とアコースティック・エミッション, 材料, 34(383): 896-904.
- 4) 野並浩 (2001a) 植物水分生理学, 養賢堂.
- 5) 野並浩 (2001b) 作物の水分生理に関する土, 根, 葉, 茎における計測, 日本作物学会紀事, 70(2): 151-161.
- 6) 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.
- 7) 大津政康 (2006) 2.5 信号処理, 日本非破壊検査協会編「アコースティック・エミッション試験 I」, 日本非破壊検査協会, pp. 16-19.
- 8) 斜面緑化研究部会 (2004) のり面における自然回復緑化の基本的な考え方ととりまとめ, 日本緑化工学会誌, 29(4): 509-520.
- 9) 鈴木哲也・中達雄・樽屋啓之・田中良和・青木正雄 (2010) AE 法を用いたオープン型パイプラインに発生する気液二相流の特性評価, 構造工学論文集, 56(A): 665-670.
- 10) 上野由樹・鈴木哲也・鈴木直也・鈴木創三 (2011) 弾性波計測に基づく植物体の水ストレス評価, 日本緑化工学会誌, 37(1): 171-174.

(2012. 7. 3 受理)