

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15624

研究課題名（和文）農村地域の持続的発展に資する稲副産物を活用した緑化基盤材の開発

研究課題名（英文）Development of planting infrastructural material using rice by-products for sustainable development of rural areas

研究代表者

阿部 由麻（島本由麻）（Shimamoto, Yuma）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・助教

研究者番号：70826601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：農林緑地の保全・再生には、植物の基盤を適切に導入することが不可欠である。この生育基盤の適否は植物の健全性や基盤の安定性を含めて総合的に評価する必要がある。そこで本研究では Acoustic Emission (AE) 法を用いた植物の水ストレス評価手法の構築とAE法を用いた構造材料の破壊挙動の評価に取り組んだ。課題(1)では、決定木およびランダムフォレストを用いることで、植物起源弾性波とノイズ波を正解率85%以上で自動判別できることを明らかにした。課題(2)では圧縮破壊挙動の評価指標として有効なAEパラメータをクラスター解析と機械学習から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物の生育基盤の開発にあたっては、導入植物のストレス反応を同定するとともに、構造材料の破壊挙動を正確に評価することが重要な課題である。本研究ではノイズ波と植物起源弾性波の自動判別の可能性を明らかにした。これによりAE法による植物の水ストレス評価が実用化に近づいたものと推察される。また、AE法による構造材料の破壊挙動評価においては、モデルの簡素化と性能向上のために、経験的に特徴量を選択してきたが、経験的に開発されたモデルは潜在的な要素を反映できないことが指摘されていた。本研究成果はこの課題に対して有効な改善策の一つとなりうると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The introduction of an appropriate planting infrastructure is essential for the conservation and rehabilitation of agricultural and forest green spaces. The suitability of this infrastructure needs to be comprehensively evaluated in terms of plant growth and base stability. In this study, we developed a water stress evaluation method for plants using the Acoustic Emission (AE) method and evaluated the fracture behavior of structural materials using the AE method. Firstly, it was shown that elastic and noise waves generated by plants can be automatically discriminated with an accuracy of more than 85% by using decision trees and random forests. Secondly, effective AE parameters as evaluation indices of compressive fracture behavior were clarified by cluster analysis and machine learning.

研究分野：農業農村工学

キーワード：アコースティック・エミッション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

農林緑地の保全・再生には、植物の生育基盤を適切に導入することが不可欠である。この生育基盤の可否は植被率に代表される生育状況だけでなく、植物の健全性や基盤の安定性を含めて総合的に評価する必要があると考えられる。申請者は既往研究において、稲副産物である「もみ殻灰」と「稲わら」を活用し、環境親和性を有する緑化基盤材の開発に取り組んでいる。開発にあたっては、導入植物のストレス反応を同定するとともに、構造材料の破壊挙動を正確に評価することが重要な課題である。

そこで、本研究では、Acoustic Emission (AE) 法を用いて、(1) 植物の水ストレス評価手法を構築するとともに、(2) 構造材料の破壊挙動を評価することを目的とする。

### 2. 研究の目的

#### (1) AE 法を用いた植物の水ストレス評価手法の構築

植物から発生する AE の起源は道管内の気泡運動だと考えられている。この気泡運動に起因する AE は気泡衝突などの特定の時点でのエネルギー放出による弾性波（突発型 AE）であることが示されている。AE 法による植物の水ストレス評価を実用化するためには、AE 法による植物の水ストレス評価を実用化するためには、膨大な検出波の中からノイズ波と気泡運動に起因する突発型 AE を正確に判別し、突発型 AE のみを抽出する必要がある。多くの既往研究では突発型 AE の抽出にハイパス処理に代表される周波数フィルタリングを用いているが、抽出の際にノイズ波が含まれてしまうといった課題が残されている。そこで本課題では、決定木およびランダムフォレストを用いて、植物起源弾性波とノイズ波の自動判別を試みる。

#### (2) AE 法を用いた構造材料の圧縮破壊挙動評価

既往研究では、圧縮応力場で検出される AE によって構造材料の損傷度や破壊過程が評価されている。その際、AE ヒット、エネルギー、周波数などの様々な AE パラメータを解析することで破壊過程を推察することが試みられている。多くの AE パラメータが破壊過程の評価に有用であることは明らかであるが、最も有効な AE パラメータは特定されていないことが課題の一つである。そこで本課題ではランダムフォレストおよびクラスター解析を用いて、圧縮破壊挙動を評価するうえで有効な AE パラメータを明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 機械学習を用いた植物起源弾性波とノイズ波の判別

本課題では、決定木およびランダムフォレストを用いて、検出波の判別を試みた。植物の栽培実験を実施した。栽培実験に際して、AE センサを株元に固定し、常時の AE 波のモニタリングを実施した。検出波を波形形状から、突発型 AE、ノイズ波（チップング、連続型 AE、合成波）の 4 種類に目視で分類した。AE 解析の指標として用いられる 13 個の特徴量を説明変数とし、波形分類に寄与する説明変数を重要度から明らかにすることを試みた。

#### (2) 圧縮破壊挙動の評価指標として有効な AE パラメータの推定

コンクリートの圧縮強度試験に AE 計測を導入し、局所的に進行する破壊挙動を評価した。圧縮強度試験を実施したのちに、各供試体において、ひずみ  $20 \times 10^{-6}$  ごとに AE パラメータの統計量を算出した。AE パラメータには AE ヒット数、AE エネルギー、RMS 実効値電圧、継続時間、立ち上がり時間、重心周波数、ピーク周波数の 7 変数を用いた。統計量として、AE ヒット数は合計値、AE エネルギーは合計値、平均値、標準偏差、最大値、そのほかの 5 変数は平均値、標準偏差、最大値を算出した。説明変数はこれら統計量の 20 変数に設定した。なお、前処理として、検出した AE 波に対して、K 平均法によるクラスター解析を行い、全 AE 波を対象としたときとクラスター解析を行ったときでの精度を比較した。最大振幅値、重心周波数、ピーク周波数に基づいて、クラスター数を 3 に設定した。

AE パラメータの統計量を説明変数、応力レベルを目的変数として、ランダムフォレストによる回帰分析を実施した。重要度を算出することで評価指標として有効な AE パラメータを推定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 機械学習を用いた植物起源弾性波とノイズ波の判別<sup>1), 2)</sup>

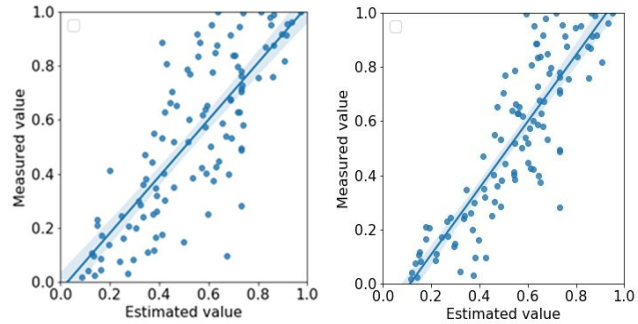
決定木およびランダムフォレストを評価用データに適用し、モデルの精度を検証した。加えて、波形判別で多く用いられる「高速フーリエ変換 (FFT) によるピーク周波数」(以後、FFT ピーク周波数と示す) のみを指標とした場合の判別結果と精度を比較した。

表 1 に判別精度の比較結果を示す。FFT ピーク周波数のみの場合、正解率が 0.623 と F 値が 0.702 であり、目標精度の 0.8 を大きく下回った。この方法では、突発型 AE を正しく判別している割合は 83% (219 波形中 181 波形) と高かったものの、ノイズである連続型 AE のうち 97% を突発型 AE と誤って判別していた。このことから、FFT ピーク周波数のみでは検出波を正確に判別できないことが明らかになった。機械学習を用いた 2 つの手法では正解率および F 値が 0.8

表1 判別手法の相違による植物起源弾性波とノイズ波の判別精度の比較<sup>1)</sup>

指標	方法	決定木		ランダムフォレスト	
	FFT ピーク周波数	N=5,864	N=2,800	N=5,864	N=2,800
正解率		0.623	0.877	0.915	0.903
感度		0.826	0.854	0.858	0.858
適合率		0.609	0.813	0.879	0.891
F 値		0.702	0.833	0.868	0.874

以上であり、波形判別に有用な手法であることが明らかになった。決定木とランダムフォレストとの精度を比較した場合、ランダムフォレストのほうが正解率およびF値が高かった。また、データサイズを削減しても、決定木とランダムフォレストどちらの精度も大きな変化はなく、高精度を保つことができることが明らかになり実用化に資するものと考えられる。



(a) 全波形対象 (b) クラスター1と3  
図1 クラスター解析の有無による回帰分析結果<sup>3)</sup>

(1) 圧縮破壊挙動の評価指標として有効なAEパラメータの推定<sup>3)</sup>

クラスター解析によるAE波の分類

3つのクラスターに分類した結果、クラスター2とクラスター1および3との間にピーク周波数の相違が確認された。クラスター2ではピーク周波数の平均値が68kHzであったのに対して、クラスター1では103kHz、クラスター3では118kHzであった。また、全波形(258,295波形)のうち、クラスター1が43%、クラスター2が37%、クラスター3が20%であった。

回帰分析における精度の比較

すべてのAE波を対象としたケースとクラスター解析後のAE波のみを対象としたケースを比較した。図1に回帰分析結果を示す。全波形を対象とした場合は

$R^2$ : 0.620, RMSE: 0.183, クラスター1および3のみを対象とした場合は  $R^2$ : 0.720, RMSE: 0.157であった。クラスター解析後のクラスター1および3のAE波を対象とすることで、 $R^2$ が増加し、RMSEが減少した。以上より、周波数帯域が低いクラスター2を解析から除外することで、精度が向上する可能性があると考えられる。

説明変数の重要度

図2にクラスター1および3のAE波を対象とした際の説明変数の重要度を示す。重要度は重心周波数(C-FRQ)および立ち上がり時間(RISE)で高かった。このことから、クラスター解析後に重心周波数と立ち上がり時間に注目することで、圧縮破壊挙動を評価できると考えられる。

これまでモデルの簡素化と性能向上のために、経験的に特徴量(説明変数)を選択してきたが、経験的に開発されたモデルは潜在的な要素を反映できないことが指摘されていた。本結果はこの課題に対して有効な手法の一つとなりうると考えられる。

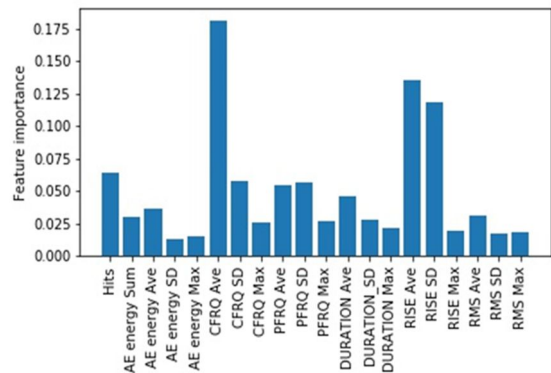


図2 説明変数の重要度(クラスター1と3対象)<sup>3)</sup>

<引用文献>

- 1) 島本由麻, 仲野聡, 鈴木哲也, 馬場光久, 杉浦俊弘 (2021)ランダムフォレストを用いた植物起源弾性波とノイズ波の自動判別, 農業農村工学会論文集, 312: I\_225-I\_233.
- 2) Shimamoto, Y. and Suzuki, T. (2022) Frequency Characteristics of AE Caused by Bubble Motion in Plant's Vessels, Environmental Control in Biology, 60(3): 161-169.
- 3) Shimamoto, Y., Tayfur, S., Alver, N. and Suzuki, T. (2022) Identifying effective AE parameters for damage evaluation of concrete in headwork: a combined cluster and random forest analysis of acoustic emission data, Paddy and Water Environment, doi: 10.1007/s10333-022-00910-w.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimamoto Yuma, Tayfur Sena, Alver NineI, Suzuki Tetsuya	4. 巻 21
2. 論文標題 Identifying effective AE parameters for damage evaluation of concrete in headwork: a combined cluster and random forest analysis of acoustic emission data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Paddy and Water Environment	6. 最初と最後の頁 15 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10333-022-00910-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimamoto, Y. and Suzuki, T	4. 巻 -
2. 論文標題 Frequency Characteristics of AE Caused by Bubble Motion in Plant 's Vessels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental Control in Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimamoto, Y. and Suzuki, T.	4. 巻 5
2. 論文標題 Damage Evaluation of Heavily Cracked Concrete by Initial AE Energy Parameter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 122-127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 島本由麻, 仲野聡, 鈴木哲也, 馬場光久, 杉浦俊弘	4. 巻 312
2. 論文標題 ランダムフォレストを用いた植物起源弾性波とノイズ波の自動判別	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shimamoto, Y., Tayfur, S., Alver, N. and Suzuki, T
2. 発表標題 Estimation of Concrete Strength by Machine Learning of AE waves
3. 学会等名 EURO-C 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shimamoto, Y., Suzuki, T., Tayfur, S. and Alver, N.
2. 発表標題 Estimation of Concrete Mechanical Properties by Acoustic Emission with Random Forest Algorithm
3. 学会等名 NDT-CE 2022 - The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shimamoto, Y., Tayfur, S., Alver, N. and Suzuki, T.
2. 発表標題 Use of Random Forest for Estimating Mechanical Properties of Agro-infrastructure 's Concrete
3. 学会等名 PAWEES 2021 INTERNATIONAL CONFERENCE (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------