稲副産物を活用した酸化マグネシウム改良土が植物生長へ与える影響

島本由麻¹⁾・鈴木哲也^{*2)}・森井俊広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: 新潟県では、籾殻・稲わらの処理が課題となっている。一方、新潟県の海岸地域において、強風および飛砂の対策が求められている。本研究では、これら2つの地域課題を解決するため、籾殻灰および稲わら繊維を混和したMgOを固化材とする吹付材料の開発によって、飛砂の抑制を行うことを目的としている。実験的検討では、MgOの添加率が異なる6ケースにおいて、トールフェスクとペレニアライグラスを用いて栽培試験を行った。葉色の評価および根系のフラクタル次元は画像解析より評価した。検討の結果、MgO添加率が3%以上となると植物生長が阻害されること、籾殻灰における植物生長の促進が示唆された。

キーワード: もみ殻、稲わら、飛砂、酸化マグネシウム

SHIMAMOTO, Yuma, SUZUKI, Tetsuya and MORII Toshihiro: **Effects of MgO improved soil mixed with rice crop residues on plant growth**

Abstract: Disposing of rice hulls and rice straws has been required in Niigata. And, a countermeasure of blowing sand by strong wind is needed at coastal area in Niigata. The purpose of this study is to prevent blowing sand by developing MgO improved soil mixed with rice hull ash and rice straw fibers. Cultivation test using *Festuca arundinacea* Schr. and *Lolium perenne* L. was conducted. Color of leave and rooting zoon were evaluated by image analysis. The results suggest plant grow little by adding MgO over 3 %, plant grow well by mixing rice hull ash.

Key words: rice hull, rice straw, blowing sand, MgO

1. はじめに

近年、新潟市はバイオマス産業都市に認定され、地域資源を有効活用した産業創出を推進している⁷⁾。この背景として、稲作地域では、農業廃棄物の籾殻および稲わらの処理が技術的課題となっていることがあげられる。新潟市では、籾殻の60% (27,615 t/年)、稲わらの80% (138,075 t/年)が廃棄処理されているという現状がある⁷⁾。これらの地域資源を有効活用することは、今後地域の持続的発展を可能にするうえで不可欠であると考えられる。

一方、海岸地域での飛砂の抑制もまた新潟県の地域課題として取り組まれている。現在、新潟県の海岸地域では、強風および飛砂から田畑や住宅を守るため、クロマツ海岸林が形成されている。同時に、波浪による汀線付近の地形変化や飛砂による地表変動を安定化させ、海岸砂地の緑化をはかる目的で、離岸堤・前砂丘・堆砂垣等の築造が行われている¹⁾。しかし、冬期の強風により海岸に隣接する主要幹線道路に砂が堆積し、交通に支障をきたしているといった問題がなお指摘されている¹⁵⁾。このため、汀線側における植物の生長を促進し、その植生および根系の発達によって飛砂の発生を抑制する手法が求められている。たとえば、田中ら¹⁵⁾は砂浜に廃

菌床を利用した植生育基盤を埋設することによって、砂地に自生あるいは潜在している植物の発芽・生育を促進することで飛砂の抑制を試みている。

本研究では、稲副産物を籾殻灰および稲わら繊維として有効活用した酸化マグネシウムを固化材とする吹付材料を開発することによって、飛砂の抑制を行うことを目的としている(図-1)。稲副産物の利点は、廃棄物の再利用だけでなく、稲わら繊維にはじん性の向上¹³⁾、もみ殻灰には土壌改良効果

図-1 本研究の概念図

Fig. 1 Research concept.

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

表-1 配合設計 (質量比)

Table 1 Mix proportion.

実験 シリーズ	砂質土	バーミ キュライト	もみ殻灰	稲わら 繊維	水	MgO					
						0%	0.5%	1%	3%	5%	20%
対照区	100.000	5.000	0.000	0.000	26.250	0.000	0.525	1.050	3.150	5.250	21.000
もみ殻灰添加区	95.000	4.750	4.393	0.000	26.250	0.000	0.525	1.050	3.150	5.250	21.000
もみ殻灰・稲わら 繊維添加区	95.000	4.750	4.393	0.125	26.250	0.000	0.525	1.050	3.150	5.250	21.000

による植物生長の促進^{4), 10)}およびポゾラン反応による基盤の安定¹²⁾を可能にする機能が付加されると考えられる点である。

飛砂を抑制するためには、植生が定着するまで固化材による基盤の安定が必要であると考えられる。同時に混和する酸化マグネシウム固化材（以下、MgO と称す）はセメント系固化材と同様に水和反応により硬化するが、海水より抽出されているため重金属含有量が小さく、弱アルカリ性であるため、生態系への環境負荷の軽減を背景に近年地盤改良材として用いられている^{2), 8)}。しかし、既往の研究において、植生への適用性、MgO 添加率および稲副産物の混和の関係性は明らかにされていない。

本論では、植生生育基盤開発の基礎的検討として、MgO 添加率が異なる 6 ケース、稲副産物の混和量が異なる 3 シリーズに対して、トールフェスク (*Festuca arundinacea* Schr.) およびペレニアンライグラス (*Lolium perenne* L.) による栽培試験を行った結果を報告する。この検討から、稲副産物および MgO 添加量が植生に与える影響を考察した。あわせて、植物の生育性を画像解析により評価した。根系の発達状況はフラクタル次元を、葉色は RGB 値を用いて定量評価した。

2. 材料ならびに方法

2.1 材料

配合を表-1 に示す。使用した材料は砂質土（土粒子密度 2.65 g/cm³）、バーミキュライト（気中乾燥状態における密度 2.67 g/cm³）、もみ殻灰（密度 2.32 g/cm³）および稲わら繊維である。MgO は砂質土とバーミキュライトの合計質量の 0 %, 0.5 %, 1.0 %, 3.0 %, 5.0 %, 20.0 %（以下、MgO 0 %, MgO 0.5 %, ..., MgO 20 %と示す）とした 6 ケースとした。もみ殻灰は砂質土・バーミキュライトの合計体積の 5 %を置換して混和した。稲わら繊維は砂質土体積の 5 %混和した。3 シリーズにおいて供試数 3 で実験を行った。

バーミキュライトを混和した目的は、保水機能のためである。使用砂の粒度特性は、均等係数:2.15 mm, 曲率係数:1.26 mm, 粗砂分:0.25 %, 中砂分:62.10 %, 細砂分:37.90 %である。なお、密度は、砂質土においては JIS A 1202 に準じて行い、バーミキュライトおよびもみ殻灰においては密度（比重びん法）計測器 AccuPycII 1340（micromeritics 社製）を

用いて測定した。なお、もみ殻灰は、市販のもみ殻燐炭を 425 μm のふるいで全通させた後に、電気炉において 500 °C で 1 時間燃焼させて製造した。燃焼方法は急温・急冷とした。XRD / Rietveld 解析⁹⁾によるもみ殻灰の非晶質量は 97 %であった。稲わら繊維（品種：新潟県産コシヒカリ）は気中乾燥状態において平均長さ:1.2 cm, 平均幅:0.5 cm に切断し作製した。

2.2 栽培実験方法

基盤材における栽培試験をトールフェスク 80 %, ペレニアンライグラス 20 %の混合種子を用いて行った。試験地は屋外（新潟大学農学部圃場）とし、試験期間は 2014 年 9 月 9 日～10 月 9 日の 1 か月間とした。雨天時には屋根をかぶせ、ポット下方から水がしみ出す程度である 10~20 ml の給水を毎日行った。種子は 0.48 g（約 100 粒）添加した。本研究では、機器を用いて吹き付けることが困難であったため、塩ビ管 KVP68（直径：6.8 cm, 高さ：2.5 cm）の容積の 1.2 倍の体積の基盤材を圧密させ充填することで吹付工の代用とした。種子は圧密したときに高さ 2.0 cm の位置になるようにした。塩ビ管の底面には、穴をあけ排水溝を設けた透明のプラスチック板を使用した。供試植物は 1 か月後、地上部を切り取り、収穫した。地下部（根）は可能な限り手作業で分別した。地上部、地下部のそれぞれを、炉乾燥機を用いて 80°C 48 時間乾燥させ、乾物重量を測定した。

2.3 画像解析方法

2.3.1. フラクタル次元による根系発達状態の評価

画像解析の手順を図-2 に示す。根系の発達状況をフラクタル次元 D より定量評価した。フラクタルとは Mandelbrot³⁾によって提唱された幾何学理論で、従来のユークリッド幾何学では取り扱うことのできなかつた形（微分が定義できない

図-2 画像解析の流れ

Fig. 2 Flow of image analysis.

ような形)を記述することができるという特徴がある¹⁴⁾。植物に対してフラクタルを応用した研究が多数なされており、例えば植物の根系の発育形態を示すパラメータとしてフラクタル次元が有効であることが異¹⁶⁾によって明らかにされている。供試体底面写真(512×512 pixel)を取得し、色相による二値化処理より根系のみを抽出した。本研究では、色相の強度を0～255で表し、最適なしきい値を決定した。これは、数値が大きいほど強度が大きいことを示しており、しきい値は相対的な値であるため単位は無次元量である。本解析ではしきい値を70～100に設定した。フラクタル次元をボックスカウンティング法により算出した。ボックスカウンティング法とは、画像を一边の大きさが r の正方形の小領域に分割し、対象となる図形を含む小領域の総数 $M(r)$ を数えることによってフラクタル次元を求める解析方法である。一边の大きさ r と $M(r)$ のそれぞれの対数値を横軸と縦軸にプロットすると右下がりの回帰直線、つまりべき乗の関係式(1)が得られる。式(1)の D をフラクタル次元と定義する。図-3に根圏の撮影画像と二値化処理後の画像を示す。

$$M(r) = k \cdot r^{-D} \quad (1)$$

ここで k は定数である。

なお、本解析では、 r を2, 3, 4, 6, 12, 24, 25, 26, 27, 28 pixelと変化させ、 $M(r)$ を画素数、式(1)の関係を満たす D は最小二乗法により算出した。

2.3.2 葉色による生育性の評価

葉色による評価には、分光光度計や色彩色差計、リモートセンシング・地上撮影による写真解析等が用いられている⁶⁾。本研究では、デジタルカメラの撮影画像からRGB値を取得し、葉色を評価した。デジタルカメラ(OLYMPUS社)を用いて、光源条件を一定にした室内において写真-1のように撮影を行った。記録画素数は3264×2448 pixelである。本論では、播種から31日後の供試体を対象として画像解析を行った結果について報告する。取得した撮影画像(側面写真)に対して、モード法によりしきい値を決定し、地上部の葉部分のみを抽出した。モード法とは、対象物と背景の濃度差が大きく、ヒストグラムに明確な差異(谷)が生じているとき、その谷の濃度値をしきい値とする処理方法である¹⁸⁾。画像解析ソフトを用いて、地上部のみを抽出した画像をRGB値ごとのプレーンへ分解し、濃度ヒストグラムを作成した。Red値・Green値・Blue値は、各色の強度を0～255で表している。これは数値が大きいほど色の強度が大きいことを示している。本論では、Red値およびGreen値の最頻値を用いて、シリーズごとの葉色を比較検討した。

3. 結果および考察

3.1 生育量

栽培試験中の平均気温は21℃、平均湿度は70%であった。写真-1に播種から28日目の植物生長写真を示す。写真-1よりMgO 3%以上のとき、種子を混和した層で基盤材にひび割

図-3 根圏の撮影画像と二値化画像

Fig. 3 Filmed and binary images of rooting zone.

写真-1 植物生長写真(播種から28日目)

Photo 1 Outline of plant growth (28 days after seeding).

れが発生しており、根の伸長の抑制も確認された。MgO 5%以上では、表層部分でのみ根の生育が確認され、芝草に少量の力を加えるだけで、芝草が基盤材から抜けおちた。

31日目の植物の地上部および地下部(根)の平均乾物重量を図-5に示す。これら乾物重量に有意差があるか分散分析によって検定した。分散分析結果から、地上部の生長量および根圏形成に対して、MgO添加率およびもみ殻灰・稲わら繊維の混和が有意差1%で影響することが明らかになった。もみ殻灰を混和することで植物生長を促進することが確認された。もみ殻灰・稲わら繊維の両方を混和しても、対照区と比較して、植物生長量は変化しないことが明らかになった。MgO 0.5%以上ではもみ殻灰添加区は対照区と比較して、地上部乾物重量が増加することが確認された。特に、添加率が増加するほど、対照区と比較して、もみ殻灰添加区での地上部乾物重量の増加が確認された。もみ殻灰添加区は対照区と比較して、MgO 0.5・1%:1.2倍、MgO 3・5%:1.6倍、MgO 20%:2.3倍増加した。もみ殻灰を水田へ施用した場合、収

図-4 MgO 添加率と地上部および地下部の乾物重量の関係

図中のエラーバーは標準誤差を表す。異なるアルファベットは、Tukey 法より $p < 0.05$ であることを示す。

Fig. 4 Relation between additive rate of MgO and dry weights of aerial part or roots.

量を増加させるとともに、Al, Mn の吸収を抑制し、P, K, Si の吸収が増進する効果があることが報告されている^{4), 10)}。本研究においても、乾物重量が増加し、同様の結果を示したことから、MgO を添加しても、もみ殻灰の植物生長促進の効果は変化しないと推察される。一方稲わら繊維を混和することで、もみ殻灰の効果が小さくなり、対照区との差が確認できなくなることが明らかになった。稲わら繊維が植物生長量に及ぼす影響については今後検討していく必要があると考えられる。

分散分析で地上部の生長量および根系形成に対して MgO 添加率および稲副産物の混和において有意差が明らかになったことから、次にどのケースで有意差があるか検定を行った。ルビーン検定より等分散であることが明らかになったことから、多重比較検定の Tukey 法を用いて平均値の差の検定を行った。地上部において、対照区およびもみ殻灰・稲わら繊維添加区では MgO 添加率が 3 %以上となったとき、有意差 1~5 %で MgO 1 %以下と違いがあることが明らかになった。もみ殻灰添加区では、MgO 5 %から MgO 1 %以下の有意差が生じた。この理由としては、2 点考えられる。1 点目としては、Mg の過剰障害の可能性である。嶋田は、Mg が植物の多量必須元素の中でアンモニウムイオンに匹敵する毒性を有することを指摘している¹¹⁾。特に、Mg の過剰障害は根部の発育低下に影響を及ぼすことが示されている^{6), 11)}。加えて、牛嶋らは、花崗閃緑岩を客土したキュウリ栽培において、Mg 過剰障害による葉のクロロシスの発生を明らかにしている¹⁷⁾。2 点目としては、MgO 添加率の増加による土壌硬度が増加したこと起因している可能性である。植物生長および根圏の形成は山中式硬度計 27 mm 以上で不良となることが知られている⁵⁾。実際、対照区において土壌硬度を播種 7 日目に測定すると、MgO 1 %で 8 mm、MgO 3 %で 35 mm となることが確認された。このことから添加率の増加による硬度の増加が植物生長に影響を与えたと推察される。

地下部の根量においては、対照区では、MgO 0.5 %および 1 %と MgO 3 %および 20 %に有意差 5 %の違いが確認され

図-5 シリーズごとの根圏の二値化画像（播種から 31 日目）

Fig.5 Binary images of rooting zone(31 days after seeding).

図-6 MgO 添加率と根系のフラクタル次元の関係

Fig. 6 Relation between additive rate of MgO and fractal dimension of roots.

図-7 MgO 添加率と葉色の関係

図中のエラーバーは標準誤差を表す。異なるアルファベットは、Tukey 法より $p < 0.05$ であることを示す。

Fig. 7 Relation between additive rate of MgO and color of leave.

た。もみ殻灰添加区では MgO 0 %および 0.5%と MgO 5%および 20 %に有意差が確認された。もみ殻灰・稲わら繊維添加区では、有意差は確認されなかった。

3.2 画像解析結果

3.2.1 フラクタル次元による根系の発達状態評価

図-5 にシリーズごとの根圏の二値化画像（深さ 2.5 cm 底面部）、図-6 に各シリーズのフラクタル次元 D の比較結果を示す。なお、MgO 3 %以上の時、対照区およびもみ殻灰・稲わら繊維添加区においては底面部で根を確認することができなかったため、 $D=0$ とした。もみ殻灰添加区では 3 サンプルのうち 2 サンプルで根を確認することができなかったため、エラーバー（標準誤差）の表記を行っていない。MgO 5 %以上ではすべてのシリーズで底面部において根を確認することができなかったためグラフ上の表記を省略した。図-6 より対照区においてはフラクタル次元が MgO 添加率とともに 1/3 程度まで減少することが確認された。一方、もみ殻灰添加区・MRF では、MgO 1 %まで違いが確認されず、対照区と比較してフラクタル次元が大きいことが確認された。MgO 0.5 %および 1 %では対照区ともみ殻灰添加区で Tukey 法において有意差 1 %で確認された。

以上から、もみ殻灰を混和することで根が発達することが確認された。しかし、図-4 で示した地下部乾物重量の結果を比較すると、シリーズごとで差異は確認されなかった。根系が深さ別でどのように分布しているかについては今後の検討課題として残る。

3.2.2 Red 値・Green 値を用いた葉色の比較

Red 値および Green 値の最頻値を用いて葉色を評価した結果を図-7 に示す。図-7 よりどのシリーズにおいても MgO 添加率が増加すると、Red 値が増加することが確認された。もみ殻灰を混和したもみ殻灰添加区では、すべてのケースで他の 2 シリーズと比較して Red 値が小さいことが確認された。Red 値の最大値と最小値の差は、対照区：31、もみ殻灰添加区：22、もみ殻灰・稲わら繊維添加区：33 であった。も

図-8 葉色と地上部および地下部の乾物重量の関係

Fig. 8 Relation between color of leave and dry weights of aerial part or roots.

もみ殻灰添加区では他の 2 シリーズと比較して MgO 添加率を増加させても Red 値の増加量が小さい傾向にあることが確認された。Green 値においては MgO 添加率および稲副産物の混和の有無による違いは確認されなかった。

Green 値が変化を示さず、Red 値が増加したことから、MgO 添加率が増加すると葉色の褐色化が顕著になると推察

される。もみ殻灰を混和することで葉色の褐色化が弱まり、稲わら繊維を混和することで稲副産物を混和していないときとほぼ同様に葉色の褐色化がすすむと考えられる。

図-8に葉色に含まれるRed値と地上部および地下部の乾物重量の関係を示す。図-8よりRed値と地上部および地下部乾物重量は負の相関があることが確認された（単回帰分析の有意差検定の結果：有意水準1%）。特に、Red値および地上部乾物重量は相関が高かった（相関係数：0.8035）。Red値および地上部乾物重量に負の相関が確認されたことから、現場への適用を検討した場合、カメラにより簡易に生育性を判定することが可能であると考えられる。

4. おわりに

本論では、MgO添加率が異なる6ケース、稲副産物の混和量が異なる3シリーズに対して、トールフェスクおよびペレニアンライグラスの混合種による栽培試験を行った。検討の結果、MgO添加率が3%以上となると植物の生長および根圏の発達が抑制されることが明らかになった。もみ殻灰を混和することで植物生長が1.5倍すること、葉色の褐色化を抑制すること、根圏が発達することが明らかになった。稲わら繊維を混和しても植物生長を促進することができないことが示唆された。以上より、緑化工への適用を検討した場合、MgO添加率を1%が適当であることが示唆された。

引用文献

- 1) 遠藤治郎 (1998) 海浜地の緑化と土壌. 興水肇・吉田博宣編, 緑を造る植栽基盤—その整備方法と適応事例—. ソフトサイエンス社, pp.275-283.
- 2) 藤森新作・小堀茂次 (2000) 自然環境にやさしい土壌硬化剤マグホワイトの開発. 農業土木学会誌, 68(12): 1297-1300.
- 3) Mandelblat, B.B. (1982) The fractal geometry of nature. W.H. Freeman & Company, 480 pp.
- 4) 森泉美穂子・N. B. Prakash・伊藤純雄 (2004) 熱重量測定法および赤外線分光法を用いた焼成もみ殻灰の特性評価. 日本土壌肥料科学雑誌, 75(5): 609-612.
- 5) 日本法面緑化技術協会 (2005) のり面緑化技術 厚層基材吹付工. 山海堂, 169pp.
- 6) 日本芝草学会編 (1988) 新訂芝生と緑化. ソフトサイエンス社, 562 pp.
- 7) 新潟市. (更新: 2013年4月) “新潟市バイオマス産業都市構想～田園型環境都市にいがたを目指して～”. http://www.jora.jp/tiikibiomass_sangyokasien/pdf/06_niigata.pdf (参照: 2015年3月13日)
- 8) 西形達明・山田哲司・西田一彦・松田 豊 (2006) 酸化マグネシウムの地盤改良への適用について. 土と基礎, 54(7): 19-21.
- 9) Rietveld, H. (1969) A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structure. Journal of applied Crystallography, 2(2): 65-71.
- 10) Savant, N. K., Snyder, G. H. and Datnoff, L. E. (1997) Silicon management and sustainable rice production. Adv. Agron., 58: 151-199.
- 11) 嶋田典司 (1972) 作物のマグネシウム過剰障害に関する研究. 千葉大学園芸学部特別報告, 6: 1-105.
- 12) 島本由麻・鈴木哲也 (2014) 画像解析による酸化マグネシウム植生基盤材の割裂破壊評価に関する研究. 日本緑化工学会誌, 40(1): 84-89.
- 13) 島本由麻・鈴木哲也・森井俊広 (2015) AEモニタリングによる酸化マグネシウム改良土の割裂破壊過程の定量評価. 第41回土木学会関東支部技術研究発表会, CD-R.
- 14) 高安秀樹 (1986) フラクタル. 朝倉書店, 186 pp.
- 15) 田中賢治・森 千夏・山田富市・眞見和樹 (2014) 新潟市の海岸砂丘の腐菌床と腐食を利用した海岸緑化の試み. 日本緑化工学会誌, 40(1): 211-214.
- 16) 巽 二郎 (1999) 根系構造のとらえ方: フラクタル次元, 空隙性およびマルチフラクタル. 土壌の物理性, 82: 11-19.
- 17) 牛嶋 孝・兼子 明・山本富三 (2004) 花崗閃緑岩を客土したハウス栽培圃場で発生したマグネシウム過剰によるキュウリの葉面クロロシス. 園芸学会雑誌, 76: 476-483.
- 18) 内村圭一・岩崎洋一郎・松島宏典 (2010) 画像処理入門. 培風館, 180 pp.

(2015.6.8 受理)