もみ殻灰を活用したセメント改良土の緑化基盤材としての適用性

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

2) 新潟大学自然科学系（農学部）

摘要：農業廃棄物であるもみ殻は資源量が豊富であり、その有効な活用法の確立が求められている。本論では、もみ殻灰を活用したセメント改良土の緑化基盤材としての適用性を、圧縮強度試験、X線 CT 撮影、透水試験、保水性試験から評価した結果を報告する。検討の結果、もみ殻灰置換率が 60 % のとき、ポゾラン反応の効果が最大となることが明らかになった。もみ殻灰置換率が 60 % では、空隙率、透水性の性能目標値を満たすことが明らかになった。

キーワード：もみ殻灰、セメント改良土、圧縮強度、空隙構造、水分特性

SHIMAMOTO, Yuma, SUZUKI, Tetsuya and MORII, Toshihiro: **Ability of cement improved soil mixed with rice husk ash as greening material**

Abstract: Rice cropping produces a lot of waste material such as rice husks. New ways of the utilizing of rice husks are in urgent need. In this study, the ability of cement improved soil mixed with rice husk ash as greening material was evaluated by four kinds of examination: compression test, X-ray CT, permeability test, and water retention test. As a result, replacing 60 % of the cement with rice husk ash had a positive effect on pozzolanic reaction. And, the cement improved soil (replacement rate: 60 %) passed target values of porosity and permeability.

Key words: rice husk ash, cement improved soil, compressive strength, void structure, moisture characteristic

1. はじめに

農業廃棄物であるもみ殻は資源量が豊富であり、その有効な活用法の確立が求められている。国際連合食糧農業機関（FAO）の調査によると、世界全体で 2014 年には年間約 7.4 億トンの玄米が生産された³⁾。乾燥状態の質量比約 20 % がもみ殻とすると、1.5 億トンものもみ殻が排出されたこととなる。稲作地域においてももみ殻の活用は十分に進んでいない。例えば、新潟市ではもみ殻の 60 % (27,615 t/年) が未利用のまま廃棄されているという現状がある⁹⁾。地域資源であるもみ殻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だと考えられる。

筆者らは、もみ殻の焼却灰“もみ殻灰”を有効活用した緑化基盤材の開発を試みている^{15,16)}。もみ殻灰の利点は、廃棄物の再利用だけでなく、土壌改良効果による植物生長の促進およびポゾラン反応による基盤の安定を可能にする機能が付加されると考えられる点である。土壌改良効果については、既往研究において、もみ殻灰を水田へ施用した場合、収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^{7,13)}。筆者らの既往研究においても、酸化マグネシウム改良土での芝草を用いた植栽実験の結果、酸化マグネシウムの添加率によら

ず、すべてのケースでもみ殻灰を混和することで生長量が増加することが確認されている¹⁵⁾。基盤の安定性については、ポゾラン反応による組織の緻密化に起因すると考えられる。ポゾラン反応とはセメントの水和反応に際して遊離する Ca^{2+} ともみ殻灰に含まれる非晶質シリカが反応し、C-S-H ゲルや C-A-H ゲルを生成することで密実な組織を形成する反応である²⁾。主にコンクリート材料を対象に、もみ殻灰をセメント代替材として用いることで、耐久性が向上することが明らかにされている^{4,6)}。筆者らの既往研究においても、セメント改良土にもみ殻灰を混和することで圧縮強度が増加することが確認されている¹⁶⁾。

開発材料は、山地森林に発生する表層崩壊の防止や河川堤防の緑化への適用が考えられる。河川堤防においては、耐浸食能を維持するために、速やかな緑化が求められる。目標種の定着と初期生育の場を確保するために、一定の期間、復元対象地を裸地にすることが多く、その安全性が課題となっている^{5,19)}。耐浸食能を維持するためには、植生が定着するまで結合材による基盤の安定が必要であると考えられる。本研究では、先に示したように、もみ殻灰を活用することで基盤の安定と植物生長とを同時に可能にするものの検証を目的としている（図-1）。

緑化基盤材の必要な性能として、安定性、通気性、透水性、

* 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

保水性、保肥性が挙げられる¹⁾。本論では、もみ殻灰を活用したセメント改良土の緑化基盤材としての適用性を、圧縮強度試験、X線CT撮影、透水試験、保水性試験から評価した結果を報告する。

2. 緑化基盤材の評価指標

本研究では安定性（強度）、通気性（空隙率）、透水性、保水性、保肥性に関して性能目標値を既往研究から設定した。表-1に性能目標値の一覧を示す。

2.1 安定性

安定性については圧縮強度を指標とした。一般に土壌硬度が増加するほど根の伸長は阻害される。地盤改良マニュアルでは植物の根の生長が可能な改良土の圧縮強度を 0.3 N/mm^2 以下としている¹⁴⁾。本研究では、圧縮強度 0.3 N/mm^2 以下を性能目標値と設定した。

2.2 通気性

一般に、固相率50%、液相率25%、気相率25%程度のとき作物根が生育しやすい分布状況であるとしている¹⁾。ポーラスコンクリートの設計・施工法に関する研究委員会は、空隙率を20~30%で設計することを提案している¹¹⁾。以上を考慮して、本研究では、空隙率20%以上を目標値と設定した。

2.3 透水性

透水性の指標は透水係数で表される。日本道路協会は植栽土壌において、植物がストレスなく生育するための必要な透水係数として 10^{-5} m/s 以上と規定している⁸⁾。人工土壌およびポーラスコンクリートにおいても同様に 10^{-5} m/s 以上と規定されている^{11,18)}。本研究でもこれに準じて透水係数の目標値を 10^{-5} m/s 以上と設定した。

2.4 保水性・保肥性

水分量の指標に、都市緑化機構では、客土のように新たに土を搬入して緑化基盤を作成する場合の品質基準として、真砂土および山砂の有効水分保持量は 60 L/m^3 以上と規定している¹⁸⁾。

一方、保肥性の指標には陽イオン交換容量（CEC）が用いられる。日本道路協会は、植栽地として 6 cmol/kg 以上であることが望ましいとしている⁷⁾。

本研究では、砂質土を使用するとともに、肥料の添加を行わなかった。この理由は、粘性土や肥料添加の影響を除外し、もみ殻灰の混和によるポズラン反応の変化を明らかにするためである。このため、本実験では保肥性の検討を行わなかった。

3. 実験材料および方法

3.1 配合設計

配合設計を表-2に示す。もみ殻灰の内割り置換率が異なる5つのケースを用意し、次項以降に示す4つの実験（圧縮強度試験、X線CT撮影、透水試験、保水性試験）を行った。内割り置換とは、もみ殻灰をセメントの一部と置換し結合材

図-1 もみ殻灰を混和したセメント改良土の緑化基盤材としての利点

Fig. 1 Merit of cement improved soil mixed with rice husk ash as greening material.

表-1 性能目標値

Table 1 Target values for planting soil.

圧縮強度	0.3 N/mm^2 以下
空隙率	20%以上
透水性	10^{-5} m/s 以上
保水性	pF1.5で 60 L/m^3 以上

表-2 配合設計

Table 2 Mix proportion.

ケース	砂質土 (g)	普通ポルトランド セメント (g)	もみ殻灰 (g)	水 (g)
0%	350.00	24.50	0.00	32.55
10%	350.00	22.05	2.45	32.55
25%	350.00	18.38	6.13	32.55
40%	350.00	14.70	9.80	32.55
60%	350.00	9.80	14.70	32.55

*ケース名は、もみ殻灰の内割り置換率を示す

図-2 使用砂の粒径加積曲線

Fig. 2 Grain size accumulation curve of sandy soil.

として使用する方法である。もみ殻灰置換率 P は式(1)で定義した。

$$P = \frac{m_R}{m_{CE} + m_R} \times 100 \quad (1)$$

ここで, m_R : もみ殻灰質量, m_{CE} : セメント質量である。

3.2 実験材料

3.2.1 砂質土

本研究では, 砂質土 (土粒子密度: 2.66 g/cm^3) を使用した。使用砂の粒径加積曲線を図-2 に示す。均等係数 U_c : 5.3, 曲率係数 U_c' : 1.0, 粗砂分: 40.4 %, 中砂分: 40.0 %, 細砂分: 18.0 %, シルト分: 1.6 % である。JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験」の A 法による最適含水比は 9.3 % であった。この結果から, 配合設計においては砂質土の含水比を 9.3 % に調整して実験を行った (表-2)。

3.2.2 結合材

結合材には普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm^3) を使用した。

3.2.3 もみ殻灰

本研究では, 新潟県で実際に稼働しているもみ殻ガス化プラントから排出されたもみ殻灰を使用した。このガス化プラントでは, もみ殻を $130 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ で熱分解によりガス化し, そのエネルギーをカントリーエレベータの稼働およびビニールハウスの加温に再利用している。システムはコジェネレーションシステムで運用されている。このガス化プラントより排出されるもみ殻灰を活用することで, 環境負荷量を低減できることが筆者らの既往研究より明らかにされている¹⁶⁾。

ガス化プラントから排出されるもみ殻灰の組成を XRD/Rietveld 解析¹²⁾によって検討した。解析における定量対象は, クオーツ (SiO_2), クリソバライト, トリディマイト, コランダム ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) とした。非晶質量は内部標準物質の Rietveld 解析における定量値から式(2)によって算出した。

$$G = \frac{100(A-R)}{A} \times \frac{100}{100-R} \quad (2)$$

ここで, G : 非晶質量 (%), R : $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 添加量 (%), A : Rietveld 解析における $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の定量値 (%) である。

表-3 にもみ殻灰の XRD 結果を示す。もみ殻ガス化プラントから排出されたもみ殻灰は非晶質量が少なく, 結晶物質であるクリソバライトが 30 % と多いことが確認された。焼成もみ殻灰の結晶化については, 焼成温度が $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度までは, 非晶質シリカであり, 焼成温度が $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ を超えるとクリソバライトが生成されることが XRD の結果から報告されている¹³⁾。ガス化発電により排出されたもみ殻灰は, ガス化炉の温度が $130 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ であり, 高温域での焼成が部分的に行われているため, クリソバライトの多く生成されたと推察される。

3.3 実験方法

3.3.1 圧縮強度試験

もみ殻灰置換率と安定性との関係を明らかにするため, 材齢 7 日および 28 日において圧縮強度試験を行った。直径 50 mm, 高さ $98 \pm 2 \text{ mm}$ の円柱供試体を JGS 0811「安定処理土の突固めによる供試体作製方法」に準じて作製した。こ

表-3 もみ殻灰の組成

Table 3 Composition of rice husk ash disposed in energy plant.

非晶質量 (%)	クオーツ (%)	クリソバライト (%)	トリディマイト (%)
61.73	0.23	32.83	5.21

写真-1 X線CT撮影状況

Photo-1 Location of X-ray CT scanning.

表-4 X線CT撮影条件

Table 4 Condition for X-ray CT scanning.

ヘリカルピッチ	51.0
スライス厚	0.5 mm
速度	0.5 mm/rotation
照射線量	120 kW and 210 mA
再構成マトリックス	512×512
有効視野	100-200 mm
再構成関数	FC-81

図-3 画像解析処理対象の断面

Fig. 3 Sectional views processed by image analysis.

のときの締固めエネルギー E_c は JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験」の A 法と同様な 550 kJ/m^3 とした。供試体は製作後 $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ で 7 日および 28 日水中養生させた後に供試した。

3.3.2 X線 CT 撮影

1) 撮影条件

セメント改良土の空隙構造を X 線 CT 法により可視化した。X 線 CT 法は、放射線を照射させながら物体を走査させ、可視画像化し物体の内部構造を評価する手法である。

写真-1 に X 線 CT 撮影状況、表-4 に撮影条件を示す。東芝全身用 X 線コンピュータ断層装置（東芝メディカルシステムズ株式会社製）で撮影した。計測には、圧縮強度試験と同一な寸法の供試体（直径 50 mm、高さ 98 ± 2 mm）を用いた。

2) 画像解析方法

本論では、供試体内部の空隙を画像より抽出するために、明度による二値化処理を行った。二値化処理とは濃淡のある画像をしきい値により黒と白の二色に置き換える画像処理方法である。処理面を図-3 に示す A 面および B 面の二断面とした。図-4 にもみ殻灰置換率 60 %・材齢 7 日の供試体の CT 画像および二値化画像を示す。本研究では、明度の強度を 0 ~ 255 で表し、最適なしきい値を決定した。数値が大きいほど強度が大きいことを示している。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。本解析では筆者らの既往研究²⁰⁾を参照し、明度が 0~40 の範囲内のものを空隙として抽出した。

3) 透水試験

透水性を評価するために変水位透水試験を実施した。材齢 7 日および 28 日で直径 50 mm、高さ 50 mm の円柱供試体を作製した。締固めエネルギーは他の実験と同様な 550 kJ/m³ とした。供試数は 5 で、その最大値および最小値を除く 3 つを平均し透水係数を算出した。

4) 保水性試験

保水性を保水性試験の加圧板法から評価した。透水試験と同一な材齢 28 日の供試体を用いた。pF 3.2 まで計測した後、炉乾燥を用いて 105 °C で 24 時間乾燥させ、含水比を測定した。

4. 結果および考察

4.1 圧縮強度試験による安定性の評価

図-5 に圧縮強度試験結果を示す。材齢 7 日においては、もみ殻灰置換率の増加に伴い圧縮強度が減少することが確認された。セメント添加率の減少に伴い、水和反応が低下したためだと推察される。

材齢 28 日においては、もみ殻灰置換率 60 % のときは 40 % と圧縮強度が約 0.9 N/mm² でほぼ等しくなることが確認された。圧縮強度の材齢 7 日から 28 日の増加率のもみ殻灰置換率 60 % のとき 2.5 倍であり、全ケースで最も大きくなった。中・長期の強度の増加はポズラン反応性物質の特徴であることから⁴⁾、もみ殻灰置換率 60 % ではポズラン反応によって圧縮強度が増加したと考えられる。

もみ殻灰置換率 60 % では材齢 7 日において圧縮強度が 0.3 N/mm² となることが確認された。目標値である 0.3

*二値化画像において白色が空隙を表す

図-4 供試体断面画像（もみ殻灰置換率 60 %・材齢 7 日）

Fig. 4 Example of sectional image
(replacement rate: 60 %, casting after 7 days.)

図-5 もみ殻灰置換率が圧縮強度に及ぼす影響

Fig. 5 Effect of replacement ratio of rice husk ash on compressive strength.

図-6 もみ殻灰置換率が空隙率に及ぼす影響

Fig. 6 Effect of replacement ratio of rice husk ash on

N/mm² 以下を満たす結果となった。今後、根の伸長と基盤の硬化との関係を明らかにしていく必要がある。

4.2 X線 CT 撮影による空隙構造の可視化

X 線 CT 撮影画像から算出した空隙率の結果を図-6、二値

*二値化画像において白色が空隙を表す

図-7 もみ殻灰置換率と空隙構造の関係

Fig. 7 Relation between replacement ratio of rice husk ash and void structure.

化画像を図-7に示す。空隙率は、全ケースで材齢7日から28日で減少することが確認された。もみ殻灰置換率60%での空隙率の減少率は約6%（材齢7日：22%，材齢28日：16%）であり、全ケースの中で最も減少率が大きいたことが確認された。このことから、もみ殻灰置換率60%ではポズラン反応による組織の緻密化が生じたと推察される。

図-8に圧縮強度と空隙率の関係を示す。両者には強い負の相関があることが確認された。セメント改良土の強度の発現は土粒子間の空隙構造と密接に関係することが明らかになった。

空隙率の目標値である20%を満たしたもみ殻灰置換率は材齢7日の40%および60%であった。圧縮強度を考慮した場合、材齢7日ではもみ殻灰置換率60%が最も適当であると考えられる。

4.3 透水性の評価

透水試験結果を図-9に示す。材齢7日において透水係数に有意な差は確認できなかった。材齢28日においてももみ殻灰置換率の増加とともに透水係数も増加することが確認された。もみ殻灰無混和でセメント量が最も多いもみ殻灰置換率0%において材齢28日の透水係数が他のケースと比較して最も低くなることが確認された。これは土粒子間が結合材の水和物で充填されることに起因すると考えられる。空隙率と圧縮強度との関係とは異なり、空隙率と透水係数には明確な関係は確認されなかった。既往研究より、透過率と気孔率とは明確な比例関係が存在せず、連続空隙率との間に関係性を見いだせることが明らかされている¹⁷⁾。もみ殻灰置換率60%では材齢7日および28日において透水係数がほぼ変化しなかったことから、今後連続空隙量およびアスペクト比等の空隙構造の特性を明らかにしていく必要があると考えられる。すべてのケースで透水係数の目標値である 10^{-5} m/s以上を満たすことが確認された。この理由は砂質土を用いたため

図-8 圧縮強度と空隙率の関係

Fig. 8 Relation between compressive strength and porosity.

図-9 もみ殻灰置換率が透水係数に及ぼす影響

Fig. 9 Effect of replacement ratio of rice husk ash on coefficient of permeability.

図-10 もみ殻灰置換率に伴う水分特性曲線の変化

Fig. 10 Changes of moisture characteristic curve with replacement ratio of rice husk ash.

だと推察される。砂質土に結合材を粉体添加した場合、粘性土やスラリー添加した時と比較して透水係数の低下率が小さいことが報告されている¹⁴⁾。透水係数には使用土の特性および結合材の添加方法が強く影響したと推察される。

4.4 水分特性曲線による保水性の評価

水分特性曲線の比較結果を図-10 に示す。もみ殻灰置換率が大きいほど保水性が大きいことが確認された。もみ殻灰の吸水率は約 400 % と極めて高いことが報告されている¹⁰⁾。このことが置換率と保水性の関係に影響したと推察される。pF1.5～2.0 においては置換率によらずほぼ同様の挙動を示した。透水係数と同様に、砂質土の特性を強く受けたと推察される。

4.5 セメント改良土の緑化基盤材への適用性と課題

本研究より、セメント改良土にもみ殻灰を内割り置換配合することで、緑化基盤材としての適用性が増すことが示唆された。1 点目として、もみ殻灰の混和によって透水性および保水性が向上することが明らかになった。使用土の影響については今後の検討課題である。2 点目として、もみ殻灰の置換率を調整することで、ポゾラン反応に起因する空隙構造の発達や強度を時間軸上で制御できる可能性が考えられる。現在、植生および根系を主として基盤を安定させている飛砂抑制工や山腹工においても有益だと考えられる。今後、植栽試験を実施し、根圏の発達と基盤の硬化および基盤の空隙構造との関連を明らかにしていく必要がある。これらの結果を踏まえて、緑化基盤材として適切なもみ殻灰混入量を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、もみ殻灰を混和したセメント改良土の緑化基盤材としての適用性を圧縮強度試験、X 線 CT 撮影、透水試験、保水性試験から評価した。検討の結果を以下に示す。

- 1) もみ殻灰置換率 60 % のときに材齢 7 日から 28 日の圧縮強度増加率が 2.5 倍と最大になること、X 線 CT 撮影から求めた空隙率の材齢 7 日から 28 日の減少率が 6 % と最大になることが確認された。もみ殻灰置換率 60 % でポゾラン反応の効果を最大に示すと考えられる。
- 2) 透水係数においてすべてのケースで目標値である 10^{-5} m/s 以上を満たすことが確認された。
- 3) 水分特性曲線の比較結果から、もみ殻灰置換率が大きいほど保水性が大きいことが確認された。
- 4) もみ殻灰置換率 60 % では空隙率および透水性において緑化基盤材としての性能目標値を満たした。

引用文献

- 1) 安西徹郎・犬伏和之 (2001) 土壌物理学. 朝倉書店, 228 pp.
- 2) 荒井康夫(2002) 改訂 2 版セメントの材料化学. 大日本図

書, 262 pp.

- 3) Food and Agriculture Organization of United Nations (2014) <http://faostat.fao.org>.
- 4) 石黒寛 (2000) 粉殻灰混合セメントを用いたモルタルの強度特性. 農業土木学会論文集, 210: 83-88.
- 5) Isseleitein, J. Tallowin, J. R. B. and Smith, R. E. N (2002) Factors affecting seed germination and seedling establishment of fen-meadow species. *Restoration Ecology* 10: 173-184.
- 6) Mehta, P.K. and Folliard (1995) Rice Husk Ash - A Unique Supplementary Cementing Material: Durability Aspects. *Advances in Technology, ACI SP*, 154(28): 531-541.
- 7) 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.
- 8) 日本道路協会 (2002) 道路緑化技術基準同解説, 日本道路協会, pp.307-318.
- 9) 新潟市. “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/tiikibiomas_sangyokasien/pdf/06_niigata.pdf
- 10) 緒方英彦・服部九二雄・高田龍一 (2006) 造粒した粉殻炭を混合したコンクリートの基礎的性質. *コンクリート工学年次論文集*, 28(1): 1379-1384.
- 11) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会 (2003) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書. 日本コンクリート工学会.
- 12) Rietveld, H. (1969) A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structure. *Journal of applied Crystallography*, 2(2): 65-71.
- 13) Savant, N. K., Snyder, G. H. and Datnoff, L. E. (1997) Silicon management and sustainable rice production. *Adv. Agron.*, 58: 151-199.
- 14) セメント協会 (2012) セメント系固材による地盤改良マニュアル第 4 版. セメント協会, 442 pp.
- 15) 島本由麻・鈴木哲也・森井俊広 (2015) 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. *日本緑化学会誌*, 41(1): 9-14.
- 16) 島本由麻・鈴木哲也・森井俊広 (2016) 環境負荷量から見たセメント改良土へのもみ殻灰活用の可能性. *地盤工学会誌*, 64(11/12): 28-29.
- 17) 素木洋一 (1973) 水和膨張と凍害, 近藤連一編, 多孔材料. 技報堂, pp.203-225.
- 18) 都市緑化機構 (2004) 基盤整備工事共通仕様書 施工関係基準 4 土木造園材料仕様書. pp.33-35.
- 19) 山田晋・根本正之 (2013) 張ンバに播種された数種の半自然草地構成種の初期生育に関する実験的研究. *緑化工学会誌*, 39 (1): 33-38.
- 20) 山岸俊太郎・鈴木哲也・森井俊広 (2015) X 線 CT 画像を用いたコンクリート内部のひび割れ特性評価. *コンクリート工学年次論文集*, 37(1): 1795-1800.

(2017 年 7 月 7 日受理)