

農業副産物を活用した  
環境親和型構造材料の開発に関する研究  
ーもみ殻灰の緑化資材への応用を事例としてー

島本 由麻

新潟大学自然科学研究科博士後期課程

環境科学専攻

---

農業副産物を活用した環境親和型構造材料の開発に関する研究  
ーもみ殻灰の緑化資材への応用を事例としてー

---

## 目 次

### 第1章 序論

1.1	研究背景.....	1
1.2	研究目的および方法.....	3
1.3	本論文の構成.....	4
1.4	既往研究.....	5
1.4.1	ポゾランを活用した構造材料に関する研究.....	5
(1)	ポゾランおよびポゾラン反応.....	5
(2)	構造材料へのフライアッシュの活用に関する研究.....	6
(3)	構造材料へのもみ殻灰の活用に関する研究.....	8
1.4.2	環境負荷低減を考慮した材料設計に関する研究.....	14
(1)	ライフサイクルでの構造材料の環境影響評価法.....	14
(2)	脆性材料を中心とした材質評価法.....	17
1.4.3	構造材料への植物導入に関する研究.....	21
1.5	本研究の新規性・有用性.....	24
	参考文献.....	25

### 第2章 もみ殻の構造材料への活用における環境影響評価

2.1	概説.....	32
2.2	コージェネレーションシステムの位置づけ.....	33
2.3	もみ殻ガス化システムの概要ともみ殻灰の供給.....	34
2.3.1	解析対象.....	35
2.3.2	解析条件および方法.....	37
2.3.3	結果および考察.....	40
2.4	排出されたもみ殻灰の構造材料への利用可能性.....	41
2.4.1	解析および実験方法.....	41
(1)	固化材の相違による二酸化炭素排出量比較.....	41
(2)	もみ殻灰の品質分析方法.....	43
(3)	緑化基盤材へ適用時の作製可能量の試算方法.....	44
2.4.2	結果および考察.....	45

(1) 固化材の相違が二酸化炭素排出量に及ぼす影響 .....	46
(2) ガス化プラントから排出されたもみ殻灰の品質評価 .....	46
(3) 緑化基盤材における作製可能量の試算 .....	47
2.5 まとめ .....	51
参考文献 .....	53

### 第3章 弾性波指標に基づくセメント改良土の材質評価法の開発

3.1 概説 .....	56
3.2 材料中の AE の発生とその特徴 .....	56
3.3 実験材料および方法 .....	57
3.3.1 実験材料 .....	57
(1) 細骨材 .....	57
(2) 結合材 .....	57
(3) もみ殻灰 .....	57
3.3.2 配合 .....	59
3.3.3 実験方法 .....	59
(1) 細孔径分布試験 .....	60
(2) 透水試験 .....	61
(3) 保水性試験 .....	61
(4) 割裂引張強度試験 .....	61
(5) 圧縮強度試験 .....	62
(6) AE 計測およびデジタル画像相関法による各種応力場での破壊 過程の評価 .....	62
(7) 超音波伝播速度の測定 .....	64
3.4 解析方法 .....	65
3.4.1 ひずみエネルギーの評価 .....	66
3.4.2 画像解析によるエネルギー解放率の評価 .....	67
3.4.3 AE エネルギー解析 .....	69
3.4.4 SiGMA 解析 .....	72
3.5 結果および考察 .....	75
3.5.1 細孔径分布評価 .....	72
3.5.2 透水性評価 .....	79
3.5.3 保水性評価 .....	80
3.5.4 AE エネルギーの評価方法の検討 .....	81
3.5.5 割裂引張応力場における破壊力学指標の推定 .....	85
(1) 応力ひずみ曲線による力学特性の評価 .....	86

(2) AE エネルギーを用いたひび割れ挙動の評価 .....	86
3.5.6 圧縮応力場における力学指標の推定 .....	90
(1) 応力ひずみ曲線による力学特性の評価 .....	90
(2) デジタル画像相関法による圧縮破壊特性の考察 .....	93
(3) AE エネルギーを用いた材質評価 .....	96
3.6 まとめ .....	101
参考文献 .....	104

## 第4章 根圏の発達状況を指標とした緑化基盤材の設計

4.1 概説 .....	108
4.2 酸化マグネシウム改良土の緑化基盤材としての性能評価 .....	109
4.2.1 実験材料および配合 .....	110
4.2.2 実験方法 .....	110
4.2.3 解析方法 .....	110
(1) フラクタル次元による根系発達状態の評価 .....	110
(2) 葉色による生育性評価 .....	112
4.2.4 結果および考察 .....	112
(1) もみ殻灰混和による生育量の比較 .....	112
(2) フラクタル次元による根系の発達状態評価 .....	116
(3) 葉色を用いた植物の健全度評価 .....	118
4.3 セメント改良土の緑化基盤材としての性能評価 .....	121
4.3.1 緑化基盤材の評価指針 .....	121
4.3.2 実験材料および配合 .....	123
4.3.3 実験方法 .....	123
4.3.4 解析方法 .....	124
4.3.5 結果および考察 .....	124
(1) 改良土の物理性に基づく性能評価 .....	124
(2) 根圏の発達状況を指標とした導入植物の生育性評価 .....	126
4.3.6 もみ殻灰置換率の相違が材料特性に与える影響 .....	134
4.4 まとめ .....	136
参考文献 .....	139

## 第5章 結論 .....

## 謝辞 .....

# 第1章 序論

## 1.1. 研究背景

近年、環境問題の解決や社会の持続的発展を目指して、社会資本整備において地域資源を活用し、環境親和性に優れた構造材料の開発が求められている<sup>1)~3)</sup>。地域資源のなかでも、稲作地域では農業副産物であるもみ殻に対する有効な活用方法の確立が求められている。国際連合食糧農業機関（Food and Agriculture Organization of the United Nations: 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<sup>4)</sup>。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。このようにもみ殻は多量に排出されているにもかかわらず、十分に活用されていない。地域レベルで見ても、例えば、新潟市では2013年において、もみ殻の60%（27,615 t/年）が未利用のまま廃棄されている<sup>5)</sup>。もみ殻は現在、暗渠排水の疎水材や家畜飼料および燐炭として土壌改良材に活用されている。その他の用途としては、施設園芸の暖房熱源や畜舎内の敷材があげられる。圃場内に廃棄されている地域も多くある。もみ殻をエネルギー資源として利用することも試みられているが、費用対効果が小さく、もみ殻をガス化した際に排出されるもみ殻灰は未利用のままであるなど課題が多い<sup>6)</sup>。もみ殻やもみ殻灰を有効活用することは地域の持続的発展を可能にするうえでも重要であると考えられる。

このような現状を踏まえて、既往研究では、もみ殻灰をコンクリート混和材として再活用する試みが、数多く行われてきた<sup>7)~9)</sup>。これらの研究から、もみ殻灰をセメント代替材（セメントをもみ殻灰で置換する）として使用することで、ポゾラン反応によって、材料の力学性能や化学抵抗性が向上することが明らかにされている。一方、もみ殻灰を混和材として実用化するうえで、2つの課題が指摘されている。1点目は、もみ殻灰でセメントを置換することで、ワーカビリティが減少するという点である。十分なワーカビリティを確保するためには単位水量および高性能減水剤の添加量の増加が必要不可欠である<sup>10)</sup>。このため、

コストの増加が懸念されている。2点目の課題は、もみ殻灰で置換することで環境負荷量がどれだけ低減するのかが不明瞭であるという点である。

1点目の課題に対して、現在主に用いられているコンクリートではなく、セメント改良土や酸化マグネシウム改良土（コンクリートと地盤材料との中間材料<sup>11)</sup>）において、もみ殻灰の活用を検討することが有効であると考えられる。これらの改良土は、高性能減水剤を必要とせず、ワーカビリティの影響が限定的なためである。加えて、もみ殻灰の利点として高い保水性<sup>12), 13)</sup>と植物への肥効<sup>14), 15)</sup>が明らかにされていることから、植物導入可能な緑化基盤材として適用することで、さらに有用性を示すことができると考えられる。2点目の課題に対して、もみ殻灰の供給源から構造材料の製造、廃棄までの過程での環境負荷量を試算する必要があると考えられる。

国土が限定されている日本でどのように緑化資材を調達および循環させていくのか、コンクリート構造物と比較してメンテナンスの必要性が大きいという緑化基盤材（緑化資材を用いて造成された基盤材）の問題にどのように対応していくのか、という2点の課題を挙げることができる<sup>16)</sup>。この課題の解決には、緑化資材に地域資源を活用するとともに、その緑化基盤材を適切に維持管理することが必要であると考えられる。緑化基盤材は植物根系の発達を阻害しない空隙構造が求められる多孔質材料である。多孔質材料の力学的性質の問題点は、各種応力場で最小強度部位において応力集中に伴う破壊が進行することにある<sup>17)</sup>。一般的に脆性材料の破壊現象は、確率論的観点から最弱リンク説<sup>18)</sup>により説明できる。この考え方に基づくと、開発材料においては、均質性を仮定できる構造材料と比較して、局所的なひび割れによって低強度で破壊が進行すると予測される。このため、応力ひずみ曲線に基づく評価に加えて、破壊過程でのひび割れの挙動を評価することで基盤の適切な維持管理につながるものと考えられる。

## 1. 2. 研究目的および方法

以上の研究背景を踏まえて、本研究では、もみ殻灰の有効活用による環境親和性に優れた緑化基盤材の開発およびその材質評価法の提案を目的とする。緑化基盤材の開発において、(1) 環境親和性（二酸化炭素排出量の削減効果）、(2) 空隙構造と力学性能との関係、(3) 空隙構造と植栽への適合性（根の発達状況）との関係の3つの性能に、もみ殻灰の置換率が与える影響を明らかにする。材質評価法において、強度指標を補完するため、多孔質材料の結合力を推定する方法を提案する。本論では、以下に示す4点の研究課題を実施する。

- (1) もみ殻灰の供給源から構造材料の製造までの過程での環境負荷量（二酸化炭素排出量）を明らかにする。具体的には、現在稼働しているもみ殻ガス化コージェネレーションシステムを事例に、システムのエネルギー収支ともみ殻灰の供給実態を整理する。加えて、ガス化プラントより排出されたもみ殻灰の構造材料への利用可能性について考察する。以上から、環境親和性の観点から適切な配合設計を提示する（第2章）。
- (2) もみ殻を活用した基盤材としての有用性を空隙構造と力学性能との関係から明らかにするとともに、セメント改良土の新たな材質評価法を提示する。具体的には、細孔分布試験、割裂引張強度試験および圧縮強度試験を実施し、もみ殻灰の置換率が空隙構造や力学特性に及ぼす影響を明らかにする。強度試験にはAE法とデジタル画像相関法を導入し、破壊挙動を詳細に評価する。割裂引張過程においてAE指標であるAEエネルギーと破壊力学パラメータの一つであるエネルギー解放率とを比較し、AEエネルギーの有効性を検証する。以上から、AEエネルギーを指標とした多孔質材料の結合力を推定する方法を提案する（第3章）。

(3) 緑化基盤材の要求性能を整理し、開発材料の適用性を、安定性、通気性、透水性および保水性から検証する。具体的には、透水試験、保水性試験、細孔径分布試験および開発基盤材における植栽試験を実施した。これらの試験結果から、もみ殻灰の置換率の相違による空隙構造と根系の発達状況との関係を考察する。以上から、根圏の発達状況を指標として、緑化基盤材の設計法を提示する（第4章）。

### 1.3. 本論文の構成

本論は5章で構成されている。第1章では、本研究の目的および社会的背景をもみ殻の構造材料への活用における課題を踏まえて論じる。第2章では、もみ殻ガス化コージェネレーションシステムを事例に、もみ殻灰の供給源から構造材料の製造までの過程での環境負荷量（二酸化炭素排出量）を明らかにする。第3章では、もみ殻灰の置換率が空隙構造および力学特性に及ぼす影響を、圧縮強度試験および割裂引張強度試験結果から詳述する。強度試験にはAE法とデジタル画像相関法を導入し、新たな材質評価方法を提示する。第4章では、開発材料の緑化基盤材としての適用性を植栽試験から根圏の発達状況を指標として検証する。第5章では、以上から本研究の結論をまとめる。

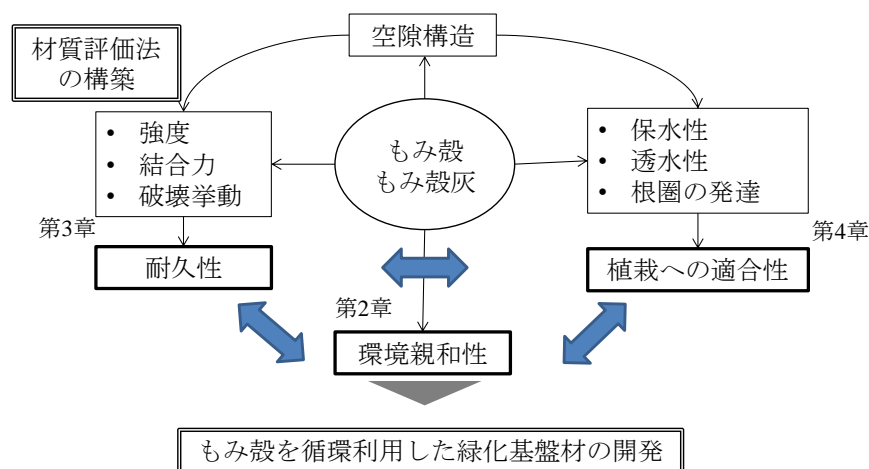


図 1-1 本論文の構成



## 1. 4. 既往研究

### 1. 4. 1. ポゾランを活用した構造材料に関する研究

#### (1) ポゾランおよびポゾラン反応

ポゾランは反応性のシリカを含む材料である。イタリアの **Puzzoli** 地方から産出される火山灰が、石灰などとの混合材として古代ローマ時代から用いられていたことに基づいて命名されたものである<sup>19)</sup>。ASTM 618-94a のより明確な定義によれば、ポゾランとは、それ自体にセメント状材料としての機能はほとんどあるいはまったくないが、微粉末状で水分が存在する場合は常温で水酸化カルシウムと化学的に反応してセメント状の性質を形成するケイ酸質あるいはケイ酸質とアルミナ質の材料である、と説明されている<sup>20)</sup>。ポゾランはコンクリートの混和材として用いられることが多い。次項にポルトランドセメントの水和反応およびポゾラン反応について略述する。

図 1-2 にセメントの水和反応式を示す。ポルトランドセメントは主としてエーライト ( $C_3S$ )、ビーライト ( $C_2S$ )、アルミネート相 ( $C_3A$ )、フェライト相 ( $C_4AF$ ) の 4 種のクリンカー鉱物とセッコウから構成される<sup>21)</sup>。セメント化合物の  $C_3S$ 、 $C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$  は反応性の高い無水和物である。セメント水和物の大部分は、C-S-H という記号で表す種々の組成と結晶度をもつケイ酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムで、残りはアルミン酸カルシ

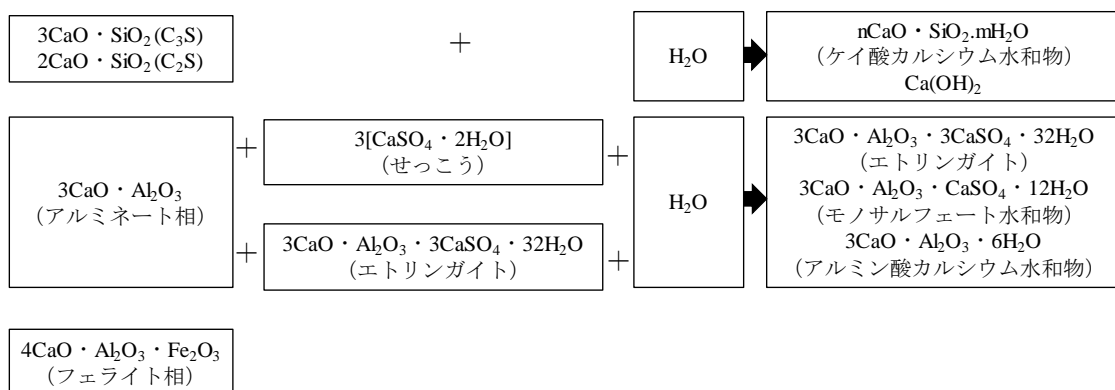
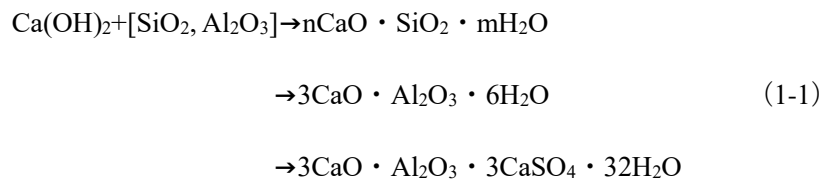


図 1-2 セメントの水和反応<sup>23)</sup>

ウム水和物，アルミン酸硫酸カルシウム水和物などである<sup>22)</sup>。C<sub>3</sub>S および C<sub>2</sub>S は水との反応（水和反応）によって，水酸化カルシウムおよびケイ酸カルシウム水和物（C-S-H ゲル）を生成する<sup>22)</sup>。C<sub>3</sub>S と水との反応では，まず Ca-O 結合が切断されて Ca<sup>2+</sup>が溶解し，過飽和濃度に達すると Ca(OH)<sub>2</sub> 結晶が析出する。残った SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>は水と反応して，[Si(OH)<sub>6</sub>]<sup>2-</sup>のような形の水素ケイ酸イオンとして溶解する<sup>22)</sup>。その後，縮合して C<sub>3</sub>S 未水和粒子の周りに水和シリカ（hydrate silica）のゲル状膜を形成する。このゲルは溶出する Ca<sup>2+</sup>と結合してケイ酸カルシウム水和物の結晶核との生成と成長を誘発する<sup>21)</sup>。ポゾランは可溶性の SiO<sub>2</sub> および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を多く含んでいる。これらの可溶分は，セメントの水和反応に際して遊離する Ca<sup>2+</sup>と化合し，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<sup>21)</sup>。この二次的な反応がポゾラン反応と呼ばれる反応である。ポゾラン反応を次式に示す。

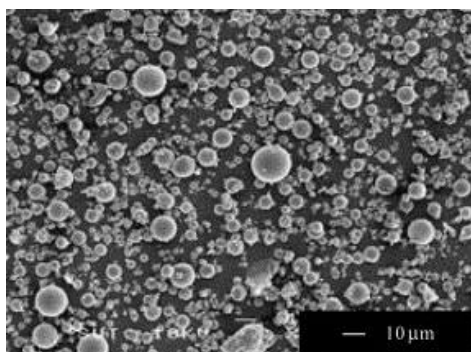


ポゾランには天然材料と人工材料の 2 種類がある。天然材料には，火山灰，軽石，オパール質頁岩，チャート，煅焼珪藻土および焼粘土が含まれる。人工材料には，フライアッシュ，シリカフュームおよびもみ殻灰などが含まれる<sup>19)</sup>。コンクリートにおいて，ポゾランでポルトランドセメントを置換することで，防水性の付与，化学抵抗性の増大，水和発熱（C<sub>3</sub>S の水和熱）の低減，長期強度の向上が可能となる<sup>19)</sup>。次項では，代表的な人工ポゾランであるフライアッシュについて略述するとともに，本研究対象であるもみ殻灰に関する既往研究を詳述する。

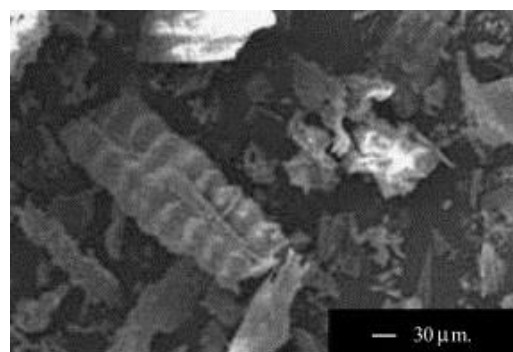
## (2) 構造材料へのフライアッシュの活用に関する研究

本項では，日本コンクリート工学協会反応モデル解析研究委員会報告書<sup>24)</sup>を全般的に参照し，構造材料へのフライアッシュの活用に関する研究について概説する。フライアッ

ュは火力発電所で微粉炭を燃焼する際に生成される石炭灰である。人工ポズランとしてフライアッシュを用いる着想は 1914 年にはじめて報告されている<sup>19)</sup>。フライアッシュの研究は 1940 年頃からアメリカで本格的にダムコンクリートに多量に使用され、実用性が高いことが実証された<sup>19)</sup>。国内では、1950 年ごろから実用化の開発研究が進められ、1952 年着工の鉄道会館（東京都）、1953 年打ち込み開始の須田貝ダム（群馬県）が実用化の始まりとされている<sup>19)</sup>。フライアッシュの顕微鏡写真を写真 1-1 (a) に示す。フライアッシュの形状は大部分が球形であるが、その中に約 20 % の中空粒子があり、フライアッシュの外殻の中にフライアッシュの球を含むものもある<sup>24)</sup>。粉末度はブレーン比表面積で  $2,500 \sim 4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、粒径は数百  $\mu\text{m}$  以下である<sup>24)</sup>。フライアッシュのセメントに対する置換率は 5～30 % であるが、置換率を 20～30 % にするとフライアッシュの長所がよく発揮されるとしている<sup>24)</sup>。フライアッシュは品質の違いによって反応性が大きく異なるので、JIS A 6201 で品質を規定している。フライアッシュはエーライトの初期の水和を遅延し、後期の水和を促進するとしている<sup>24)</sup>。エーライトの水和速度、C-S-H および  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の核生成と成長には、フライアッシュから溶出する Al イオンが大きく関与し、Al イオンが溶出するとエーライトからの  $\text{Ca}^{2+}$  イオンの溶出が停滞するのでエーライトの水和を遅延するとしている。また、アルカリ溶液での Al イオンの溶出量が多いフライアッシュほど初期のエーライトの水和を遅延すると



(a) フライアッシュ



(b) もみ殻灰

写真 1-1 ポズランの顕微鏡写真<sup>25)</sup>

している<sup>24)</sup>。フライアッシュを混和したセメントの水和生成物は普通ポルトランドセメントの場合とほとんど同様であるが、生成する C-S-H の Ca/Si 比は普通ポルトランドセメントよりも低く 1.0~1.7 になるとしている<sup>24)</sup>。

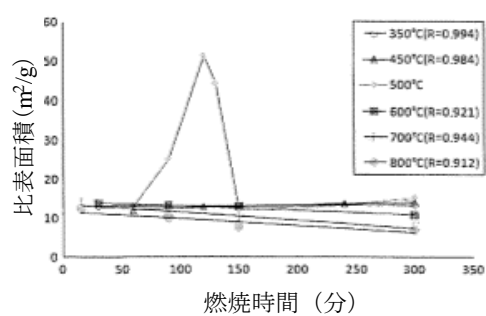
### (3) 構造材料へのもみ殻灰の活用に関する研究

もみ殻灰はもみ殻を燃焼した時に生じる副産物である。もみ殻はセルロース：50 %，リグニン：25~30 %，ケイ酸質：15~20 %で構成される<sup>7)</sup>。もみ殻灰は，もみ殻の細胞構造をそのままケイ酸質骨格として残していることから多孔構造である<sup>20)</sup>。**写真 1-1 (b)**にもみ殻灰の顕微鏡写真を示す。**写真 1-1 (a)**に示したフライアッシュと比較して，もみ殻灰は球形ではなく，複雑な形状をしていることがわかる。適切に焼成した場合，粒子サイズが 75 $\mu\text{m}$ と大きい場合でも，比表面積（窒素吸着法によって測定）が 50,000 m<sup>2</sup>/kg の大きさになりうる<sup>20)</sup>。

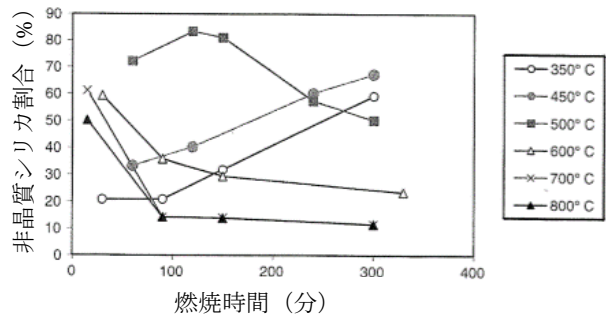
もみ殻灰の成分に着目し，コンクリートの混和材として活用した初期の研究としては，1970 年代中頃の Mehta<sup>26), 27)</sup>らによる研究が著名である。国内では，1980 年代初期，Yamamoto ら<sup>28)</sup>による研究が最初である。その後，数多くの研究が行われてきた。その中でもみ殻灰に関する検討は 3 つに大別される。つまり，(1) 燃焼温度や燃焼時間，徐冷時間，破碎時間といった製造条件がもみ殻灰の特性に及ぼす影響，(2) もみ殻灰の混和がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響，(3) もみ殻灰の混和がコンクリートの力学特性，化学的抵抗性および耐久性に及ぼす影響である。以下に，Paris ら<sup>7)</sup>，Apriantia ら<sup>8)</sup>，迫井<sup>9)</sup>の総説を全般的に参照し，もみ殻灰の既往研究を整理する。

もみ殻灰をポゾランとして利用するためには，もみ殻灰の品質として非晶質シリカ量が多いことと微粉末状で比表面積が大きいことが重要である<sup>9), 20), 21)</sup>。ポゾランが微粉末状であるとき，シリカが水との反応によって水酸化カルシウムと化合し，ケイ酸カルシウムを形成することができるからである<sup>20)</sup>。非晶質シリカ量および比表面積は燃焼条件と関連し

ているため、燃焼条件ともみ殻灰の特性について検討が行われている。Muthadhi ら<sup>29)</sup>は、反応性もみ殻灰を製造するための最適条件を明らかにするため、燃焼温度を 350～800℃、燃焼時間を 15～300 分まで変化させ、もみ殻灰の特性について検討した。BET 比表面積は、500℃で 120 分燃焼した際に 50 m<sup>2</sup>/g 以上となり、実験条件の中で最大値を示すことが報告されている<sup>29)</sup>。また、上記の条件で製造したもみ殻灰の非晶質シリカ量は、比表面積と同様な傾向を示したとしている（図 1-3）<sup>29)</sup>。以上から、ポゾラン性を有するもみ殻灰を製造するための最適条件は 500℃-120 分であると結論付けている。Nair ら<sup>30)</sup>は、もみ殻灰製造時の燃焼温度、燃焼時間、燃焼後の冷却方法の違いがもみ殻灰に及ぼす影響を検討した。もみ殻灰が高い反応性を有するのは、500℃で 12 時間燃焼するとともに、冷却過程においては燃焼後炉から取り出し急冷を行ったときだと結論付けている（図 1-4）<sup>30)</sup>。Savant ら<sup>31)</sup>は、焼成温度が 600℃程度までは非晶質シリカであり、焼成温度が 1000℃を超えると結晶物であるクリストバライトが生成されると報告している。以上の既往研究から、高活性なもみ殻灰を得るための最適な燃焼温度は約 500℃～600℃であると考えられる。そのほか、高活性なもみ殻灰の製造方法として、杉田ら<sup>32)</sup>は二段階焼却法を提案している。また、破碎時間の検討<sup>33)</sup>や燃焼前のもみ殻を塩酸など無機強酸での前処理<sup>34)-36)</sup>、クエン酸による洗浄処理<sup>37)</sup>によるもみ殻灰の品質の違いについて検討した例もある。これらの前処理は高品質なもみ殻灰の抽出に寄与するが、コンクリート用混和材としての利用を前提としているため、環境負荷や経済性の観点からは必ずしも十分であるとはいえない。もみ殻灰の新たな付加価値を創出するとともに、環境負荷特性について定量的に評価する必要があると考えられる。

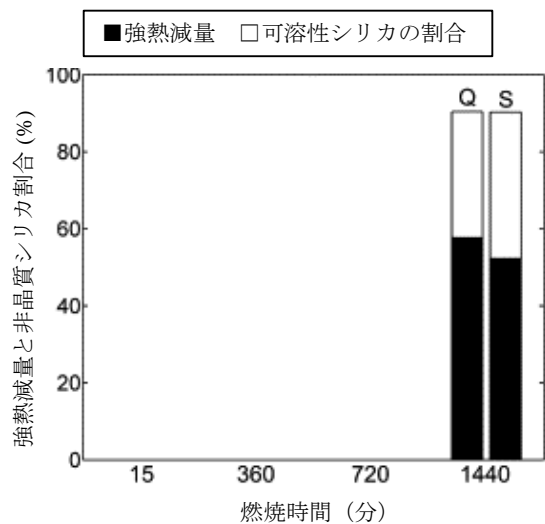


(a) 比表面積

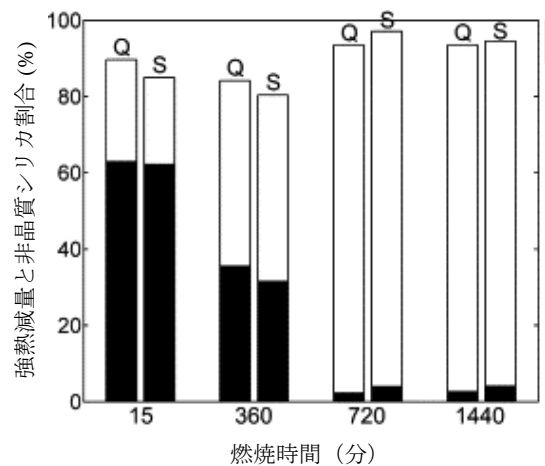


(b) 非晶質シリカ量

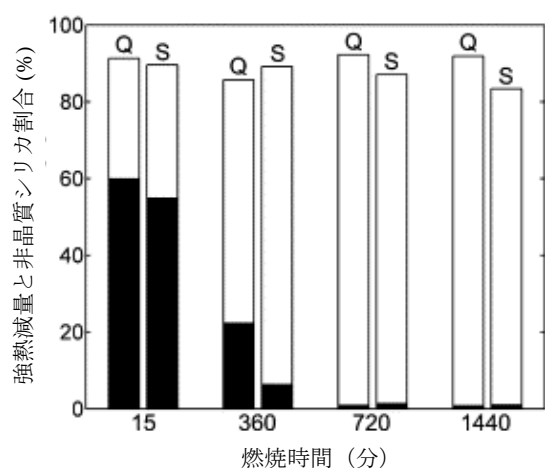
図 1-3 燃焼条件がもみ殻灰の比表面積および非晶質シリカ量に及ぼす影響<sup>29)</sup>



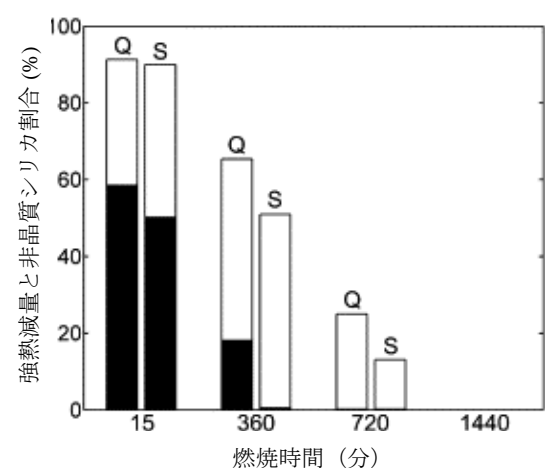
(a) 燃焼温度 300 °C



(b) 燃焼温度 500 °C



(c) 燃焼温度 700 °C



(d) 燃焼温度 900 °C

図 1-4 燃焼条件がもみ殻灰の強熱減量および非晶質シリカ量に及ぼす影響<sup>30)</sup>

次に、もみ殻灰をコンクリート用混和材として活用するうえで、ワーカビリティが低下するという課題があげられる。このため、多くの研究で、もみ殻灰を混和したコンクリートの配合には高性能減水剤が使用されている。もみ殻灰の製造条件の違いによらず、もみ殻灰置換率の増加に伴い、減水剤の添加量が増加することが報告されている<sup>9), 38)</sup>。Bui ら<sup>39)</sup>は、粉末度の異なる2種類のセメントを用いて、セメントの内割で10～20 %もみ殻灰を置換したコンクリートに対して、高性能減水剤の添加量を一定とした場合のスランプともみ殻灰置換率の関係について検討した。セメントの粉末度の違いによらず、もみ殻灰置換率の増加に伴い、スランプ値が減少したと報告している(図 1-5)。もみ殻灰の置換によってワーカビリティが減少する要因は、もみ殻灰の多孔構造、高い比表面積および燃焼条件による未燃カーボン量によるものと考えられている<sup>9), 20)</sup>。十分なワーカビリティを確保するためには単位水量および高性能減水剤の添加量の増加が必要不可欠である<sup>10)</sup>。このことから、高性能減水剤を必要とせず、ワーカビリティの影響が限定的である改良土において、もみ殻灰の混和を検討することで、上記の課題に対応できると考えられる。

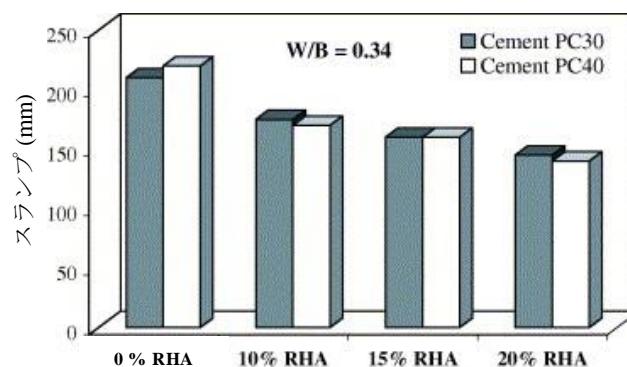


図 1-5 もみ殻灰置換率がスランプに及ぼす影響<sup>39)</sup>

もみ殻灰を混和したコンクリートおよびモルタルの圧縮強度については多くの研究が行われている。既往研究では、もみ殻灰を混和することで、初期材齢の圧縮強度は結果が分かれるが、長期材齢の圧縮強度は増加することが明らかにされている（表 1-1）。セメントの 5～30 %をもみ殻灰で置換することによって、無混和やフライアッシュで置換したケースと比較して、初期材齢での圧縮強度が増加し、長期材齢での強度も無混和のときより高い値を示すことが報告されている<sup>38), 40)~43)</sup>。一方で、混和するもみ殻灰のポズラン活性によっては初期材齢で低い値を示すものもあることが報告されている<sup>44), 45)</sup>。Salas ら<sup>46)</sup>は、もみ殻灰の置換率を変化させて圧縮強度試験を行い、最大圧縮強度を示す置換率が存在するとしている。Giaccio ら<sup>47)</sup>は、もみ殻灰を混和することによって、圧縮強度が増加するのは、低水結合材比で顕著であると報告している。一方で、圧縮強度に及ぼす水結合材比の影響は、高水結合材比で顕著であるという報告もある<sup>32)</sup>。これらの結果はいずれももみ殻灰のポゾ

表 1-1 ポズランが力学性能や化学的抵抗性に及ぼす影響<sup>7)~9)</sup>

	フライアッシュ	シリカフューム	もみ殻灰
圧縮強度	増加 (10-50 %)	増加 (5-20 %)	増加 (5-30 %)
引張強度	増加 (10-50 %)	増加 (5-30 %)	増加 (5-30 %)
曲げ強度	増加 (40-75 %)	増加 (5-25 %)	増加 (5-20 %)
透水性	減少 (10-100 %)	減少 (> 5 %)	減少 (7.5-40 %)
ワーカビリティ	増加 (10-40 %)	減少 (> 5 %)	減少 (10-40 %)
水和熱	減少	減少 (10 %)	-
ASR への抵抗性	増加 (20-40 %)	増加 (4-20 %)	増加 (4-15 %)
凍結抵抗性	増加 (40-60 %)	増加 (10-20 %)	増加 (10 %)
耐硫酸塩性	増加 (< 50 %)	増加 (5-15 %)	増加 (7.5-40 %)
浸食への抵抗性	増加 (10-30 %)	増加	増加 (5-30 %)
凝結時間	増加	増加 (5-20 %)	増加 (5-30 %)
ブリーディング	減少 (10-40 %)	-	-

\* 無混和を基準としたときの変化率を示す。



ラン反応による効果のみではなく、その微粉末による分離低減効果や骨材界面の性状改善などに関連していると推察されている<sup>9)</sup>。以上より、もみ殻灰を混和したコンクリートの強度特性はもみ殻灰の品質や置換率の影響を強く受けるものと考えられる。

もみ殻灰を置換したコンクリートにおいては、曲げ試験による検討も行われている。Giaccio ら<sup>47)</sup>は、もみ殻灰を混和したコンクリートにおいて 3 点曲げ試験を行い、曲げ強度と破壊エネルギーについて検討した。曲げ強度は、もみ殻灰の置換率や材齢によらず、無混和のケースと比較してわずかに高い値または同等の値を示す。一方、破壊エネルギーは、もみ殻灰で置換すると、わずかに低い値を示すとしている。これは骨材とマトリックス間の遷移帯の改善によるものと推察している。Feng ら<sup>35)</sup>は、もみ殻灰をセメントの内割で 10 % 置換したモルタル強度を測定している。材齢初期段階より、もみ殻灰を混和しないケースと比較して、もみ殻灰を混和したモルタルの圧縮強度および曲げ強度はいずれも増加したとしている。また、Feng ら<sup>35)</sup>は硬化ペースト中の  $\text{Ca(OH)}_2$  量を測定した。もみ殻灰を混和したペーストは、材齢 7 日以降で硬化ペースト中の  $\text{Ca(OH)}_2$  量が無混和のケースより小さく、ポズラン反応により硬化ペースト中の  $\text{Ca(OH)}_2$  が消費されたためだとしている。加えて、水銀圧入法より硬化ペースト中の細孔分布を測定し、もみ殻灰を用いたモルタルの細孔分布がより小さい径へ変化したのは、ポズラン反応により密実な水和生成物となったためと推察している<sup>35)</sup>。Yu ら<sup>48)</sup>は、二次的に生成する C-S-H は  $\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$  であると報告している。

以上のように、もみ殻灰の品質、フレッシュ性状および力学性能については、コンクリートを中心として多くの検討がなされている。一方、改良土における研究事例は十分ではない。改良土にもみ殻灰を混和してもコンクリートと同様に力学性能が向上するとした、Bagheri ら<sup>49)</sup>による報告にとどまっている。加えて、もみ殻灰を混和した構造材料の環境負荷量を解析した研究事例も少ない。Gursel ら<sup>50)</sup>は、LCA 分析を用いて、コンクリートにおいてポルトランドセメントをもみ殻灰およびフライアッシュで置換した際の地球温暖化係

数（Global Warming Potential: GWP）を概算した。もみ殻灰の GWP はフライアッシュと比較して約 2 倍大きいと報告している。これはフライアッシュの原料調達までの距離に対して、もみ殻灰での距離が約 2 倍大きいことに起因するためである。もみ殻灰およびフライアッシュの GWP はいずれも、ポルトランドセメントの約 1 %であることから、環境負荷を低減できる材料であると結論付けている。先述したとおり、ポルトランドセメント等の固化材をもみ殻灰で置換した時の構造材料の環境負荷量の解析は十分ではない。環境負荷量も含め総合的に材料性能を評価し、開発していく必要があると考えられる。

## 1.4.2. 環境負荷低減を考慮した材料設計に関する研究

### (1) ライフサイクルでの構造材料の環境影響評価法

ライフサイクルにおいて環境負荷を低減した構造材料の開発が求められている<sup>51)</sup>。この背景には、持続可能な社会の推進や地球温暖化に代表される環境問題への積極的な対応があげられる。持続可能な社会の実現について議論されるようになったのは、1970 年代までさかのぼる。1972 年のローマクラブの委託を受けた米国の Meadow らが成長の限界と題するレポートを発表し、高度経済成長に基づく社会や経済のあり方に問題を投げかけた<sup>52)</sup>。1980 年代になると開発と環境の両立が課題となってきた<sup>53)</sup>。開発途上国における貧困の解決には開発が不可欠だが、開発に伴い環境問題が生じるという矛盾である。この矛盾する因子の調和をとるために「持続可能な開発」という概念が生まれた。1987 年のブルントラント委員会（World Commission on Environment and Development : WCED, 環境と開発に関する世界委員会）の報告書では、持続可能な開発とは将来の世代の必要性を満たすような開発と定義されている<sup>53)</sup>。この考え方は 1992 年のリオデジャネイロで開催された地球サミット（UNCED : 国連環境開発会議）のテーマとなり今日に続いている。加えて、1990 年代後半から地球温暖化に代表される気候変動が課題となっている。大気中の二酸化炭素濃度の長期的な上昇が明らかとなり、この上昇が地球の気温上昇をもたらしていると考えられて

いる<sup>3)</sup>。2015 年フランスにて開催された COP21（第 21 回気候変動枠組条約締約国会議）においてパリ協定が締結され、産業革命前からの世界の平均気温の上昇を 2℃未満に抑えることが定められた。このように現在進行している環境問題に対応していくため、土木分野においても積極的に環境負荷を低減していくことが求められている。

表 1-2 環境負荷を低減した構造材料への取り組み

年代	社会的背景	主要な国際会議	土木学会・日本コンクリート工学協会委員会の環境負荷指標作成への取り組み		
1950 ～ 1970	公害問題の 顕在化				
1970 ～ 1990	高度成長期 石油依存	持続可能な 開発提唱 ブルントラン 委員会（1987）			
1990 ～ 2000	地球温暖化 の顕在化	温暖化防止 条約 地球サミット （1992）	土木学会コンクリート資 源有効利用小委員会	エコバリュー の提唱	定性的な 指標
			土木学会土木建設業にお ける環境負荷評価（LCA） 研究小委員会	LCA 手法の導入 （産業連関法）	↓ 定量的な 指標
			土木学会コンクリートの 環境負荷評価研究小委員 会	LCA 手法の導入 （積上げ法）	
2000 ～			日本コンクリート工学協 会コンクリート構造物の 環境性能に関する研究委 員会	廃棄物の再利用， 資源輸送の最適化	↓ 地域性や 資源循環 を考慮
		COP21 （2015）	土木学会環境調和型コン クリート材料学創造研究 委員会	環境調和指標 （地域資源，再資源 化率，CO <sub>2</sub> 排出量）	

日本において、環境負荷を低減した構造材料について議論がなされるようになったのは、気候変動が注目され始めた 1990 年代後半である。以下では、土木学会および日本コンクリート工学協会の委員会報告を基に、構造材料における環境負荷量の評価方法を時系列でまとめる（表 1-2）。1997 年に設置された土木学会コンクリート資源有効利用小委員会では、省資源、省エネルギーでのコンクリート開発と利用を目的として、資源を有効に利用するための材料評価システムとコンクリート構造物の環境負荷評価手法に関する提言がなされた<sup>54), 55)</sup>。ライフサイクルでの環境負荷の性能評価値として、エコバリューが定義された<sup>54), 55)</sup>。エコバリューは、バリューエンジニアリングの概念を導入した指標で、コンクリートに必要な要求性能を建設にかかわるコストと環境を意識したコスト（エココスト）の和で除した値としている<sup>54), 55)</sup>。このエコバリューは、環境負荷の低減効果について具体的な数値で示していないことから、概念的であると指摘されている<sup>56)</sup>。このことを受けて、環境負荷をライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment / Analysis : LCA）を用いて定量的に評価する試みが行われた。LCA は、製品の製造に用いる原料の調達からその製品が機能を失って廃棄処分になるまでのライフサイクルにおける各段階での環境に及ぼす負荷を定量的に解析する手法である<sup>51)</sup>。土木学会土木建設業における環境負荷評価（LCA）研究小委員会は、建設業にかかわるインベントリデータを産業連関法によって整理した<sup>57)</sup>。一方、土木学会コンクリートの環境負荷評価研究小委員会は、積上げ法によってインベントリを取りまとめた<sup>56)</sup>。ここで、産業連関法とは、産業連関表（国内 400 業種以上の産業間および消費者との経済取引を行列で表した統計表）を利用し、各産業部門に投入あるいは各産業部門から排出されるエネルギーや物質量を基に環境負荷量を求める方法である<sup>58)</sup>。産業連関法は、マクロ的な評価に優れる反面、個々の製品またはプロセスごとの評価が困難であることや、産業連関表の発行が 5 年ごとであることから必ずしも現時点での環境負荷を評価しているとはいえないことに短所をもつ<sup>58)</sup>。一方、積上げ法は、一つ一つの単位プロセスごとの環境負荷量を積み上げていく方法である<sup>58)</sup>。積上げ法は、製品やプロセスご

との評価に優れており最新のデータを収集できる反面、精度を高めるためには収集すべきデータが膨大となるという短所をもつ<sup>58)</sup>。いずれの委員会においても、LCA 手法がコンクリートおよびコンクリート構造物に対して環境負荷を評価する手法として有効であることが認められた。これらの研究を発展させ、日本コンクリート工学協会コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会は、エネルギー技術、再生骨材等の解体コンクリートの再利用および資源輸送の観点から、資源循環を考慮した材料設計を提案した<sup>59)</sup>。環境負荷低減型コンクリートをさらに発展させ、土木学会環境調和型コンクリート材料学創造研究委員会は、地域産出する材料を最大限に有効活用し、地球環境、地域環境に最大限配慮した結果、最小の負荷で生産された材料で構成するコンクリートとして環境調和型コンクリートを新たに定義した<sup>60)</sup>。ここでは、二酸化炭素排出量、再資源化率、地域性（地産地消）の3つの指標からなる環境調和指標を用いて、環境負荷因子の効果を総合的に評価した。以上のように、環境負荷を評価する指標は、定性的な指標から定量的な指標、地域性や資源循環を考慮した指標へと変化していることがわかる。

## (2) 脆性材料を中心とした材質評価法

構造材料を適切に設計するためには、材料の強度や破壊挙動を精緻に評価する必要がある。セメント改良土やコンクリートは、微細なひび割れの発生、累積、連結、成長によって破断に至る。このような脆性材料においては、急速なひび割れの伝播によって部材の破壊が生じ、平均的な応力の評価に基づく従来の破壊基準では合理的な解析ができない<sup>61)</sup>。このため、強度特性においては、決定論的な取り扱いだけでなく、確率論的な取り扱いが必要となる<sup>62)</sup>。脆性材料の確率論においては、極値理論と確率過程論の考え方がある。極値理論は、部材強度の統計的な変動を、要素の結合状況を単純化し、空間的なモデルとして構築するものである<sup>18)</sup>。要素の結合モデルには、最弱リンク説と繊維束モデルがあげられる。一方、確率過程論は材料の破壊現象の時間的な変動を取り扱っている<sup>18)</sup>。その始

まりは、平田<sup>63)</sup>によるガラス材料の遅れ破壊に関する研究である。その後、横堀<sup>64)</sup>は、主に金属材料を対象として、速度過程論や核生成論、平田の理論を統合した理論を構築した。また、Bogdanoff ら<sup>65)</sup>は、疲労き裂進展挙動について確率過程論に基づく確率モデルを提案した。確率過程論を基礎として、破壊現象の解明が進められている。

また、脆性材料のような不均質性を有する材料へ破壊力学を適用することが試みられている。破壊力学は、1920 年前後 Griffith の脆性固体の破壊理論<sup>67)</sup>を基礎としている。この理論は、ガラスのような脆性材料において、荷重によって供試体中に蓄えられたひずみエネルギーは新たに形成されるひび割れの表面エネルギーとして消費されるというものである<sup>68)</sup>。線形弾性体中および非線形弾性体・弾塑性体中の 2 種類の弾性体中におけるひび割れの解析に基づき、破壊力学パラメータによって破壊現象を解明することが試みられている（表 1-3）<sup>69)</sup>。破壊力学パラメータとして、線形弾性体中においては、応力拡大係数およびエネルギー解放率、非線形弾性体あるいは弾塑性体中においては J 積分およびき裂先端開口変位が用いられている<sup>69)</sup>。破壊力学がコンクリートへ適用されたのは、1960 年代初頭に Kaplan<sup>70)</sup>によってだといわれている<sup>61)</sup>。Kaplan は、切欠き梁試験体中において、最大荷重に達する前に、安定なひび割れの伝播過程が存在していることを見出した<sup>70)</sup>。1970 年中頃には、Hillerborg ら<sup>71)</sup>が、引張応力を受けるひずみ軟化特性に関する最初の提案として、仮想ひび

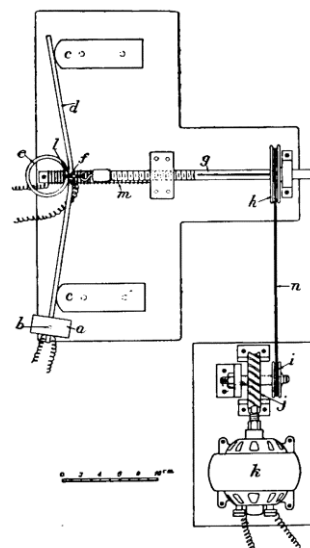
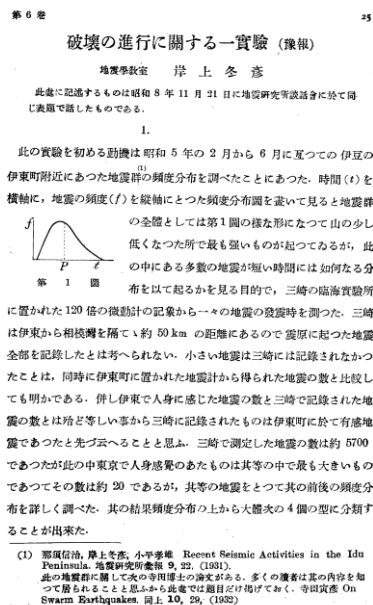
表 1-3 破壊力学および AE 法の研究の流れ

\*文献 66)に追記

年代	破壊力学の取り組み	AE 法に関する研究
1960 年以降	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 応力拡大係数，エネルギー解放率，J 積分などの破壊靱性値</li> <li>● FRC 破壊性状の評価</li> </ul>	金属材料や岩石を中心とした適用
1980 年以降	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 引張軟化曲線，破壊エネルギー</li> <li>● FEM 等による数値解析用の構成則</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● コンクリートへの実用化</li> <li>● AE の波形解析</li> </ul>
2000 年以降	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ひずみ軟化曲線，ひび割れ幅</li> <li>● 繊維補強モルタル（SHCC）の構造設計用の材料特性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 社会基盤施設への適用</li> <li>● コード化の推進</li> </ul>

割れ (fictitious crack) モデルを提案した。このモデルは、外力によりひび割れ面が開こうとするのに抗して、コンクリート材料そのものが開かれまいとしてその内部に生じる応力とひび割れ幅 (開口変位) との関係を表すものである<sup>61)</sup>。軟化曲線下の面積は、のちに破壊エネルギーと呼ばれるようになる単位面積のひび割れをつくるのに必要なエネルギーと定義された。破壊力学について今日に至るまで様々な検討がなされ、実際の構造物やその諸問題に対して応用が進められている (表 1-3)。

破壊挙動をとらえる方法の一つとして AE 法がある。AE 法は、破壊時に発生する弾性波を受動的に検出することで材料のエネルギー放出を検出できる。これにより、破壊力学パラメータの推定が可能となる。以下に、AE の技術開発史を既往の総説<sup>72)-75)</sup>を参照し取りまとめる。AE 法に関する技術開発は 20 世紀に開始された<sup>76)</sup>。1933 年 (昭和 8 年) に東京大学地震研究所で行われた岸上冬彦博士による木材の曲げ破壊の際に発生する非可聴音を検出する試みが、科学的手法により AE を計測した最も古い記録であると考えられている (図 1-6)<sup>74)</sup>。岸上論文の論題は「破壊の進行に関する一実験」である<sup>76)</sup>。本報は、地震学が専門の



(a) AE 実験報告の表紙

(b) AE 計測装置

図 1-6 岸上による世界最初の AE 実験報告<sup>76)</sup>

岸上が、実際の地震の際に発生する地盤の破壊現象を竹の曲げ破壊過程で模擬し、その際に発生する音響や振動を詳細な観察と計測から考察したものである。岸上は、実験的検討から、「ピシピシと云う音の他に聞こえない振動のあることが判り、・・・」と記述している。曲げ破壊に伴う非可聴音や微弱な振動を引張縁に挿入したレコード針で検出している(図 1-6)。現在では圧電素子型の AE センサを用いており、計測システムが異なる。

海外においては 1953 年に Kaiser により行われた金属材料の引張り破壊の際に発生する AE の検出に関する研究が著名である<sup>77)</sup>。計測機器を使用して AE の検出に成功したのは、アメリカ鉱山局の技術者であった Obert が 1938 年に鉱道内の鉱柱に関する弾性波探索中に検出したことが最初とされている<sup>78)</sup>。この計測技術は当初、Micro Seismic Activity と呼ばれていたが Schofield<sup>79)</sup>によって Acoustic Emission と名づけられ、今日に至っている。

本格的な AE 研究は、1950 年代に開始された圧力容器やロケットなど機械工学分野で始まり、コンクリート工学分野では既存の計測技術が金属や岩石分野から導入され、Rusch<sup>80)</sup>, L'Hermite<sup>81)</sup>, Robinson<sup>82)</sup>などの研究が歴史的に創始と認められている。いずれの研究でも主破壊前に発生する微小破壊を加速度計などにより波動現象として検出できることが報告されている。コンクリートの AE 研究が実用化に向けて注目され始めたのは 1970 年代後半から 80 年代初頭であり、近年では AE センサの改良や適用する構造体の拡大、コード化の推進により一般的な計測技術として実用化されつつある。特に 1980 年代には AE の波形解析に関する理論的検討が活発に行われ<sup>83)~86)</sup>, SiGMA 解析手法<sup>87)</sup>の開発が行われている。この波形解析理論は Generalized Theory of Acoustic Emission と名付けられており、検出された AE が変形ないし破壊の発生機構の特性を有していることが理論的観点から明らかにされている。その間、米国では AEWG (Acoustic Emission Working Group) が組織され、国際会議が主催されている。EU 圏では EWGAE (European Working Group on Acoustic Emission) が組織されている。日本国内では、日本非破壊検査協会に AE 特別委員会が設置され、JSNDI 規格 (NDIS) に関する検討が進められている<sup>88)~90)</sup>。



AE 法は、材料損傷や新規開発材料の特性評価にも活用されている。例えば、2002 年に鈴木ら<sup>91)</sup>によるコンクリートの損傷度評価の試みが報告されている。この試みは、載荷過程の AE 発生挙動を固体の破壊や損傷過程の一連の速度過程と考え、時間軸ないし処理過程における現象の発生頻度を確率過程論（レート・プロセス論）によって評価するものである。その他、2008 年に発表された山本ら<sup>92)</sup>による EPS ビーズを添加したモルタルの載荷過程における AE 発生挙動を評価した研究がある。これらの既往研究では AE 発生頻度に着目し解析を行っている。地震や材料破壊に起因する弾性波動は、Gutenberg-Richter 式で説明できるように、主破壊に代表される大きな規模の現象は数少なく発生し、小さな現象は数多く発生することが明らかにされている<sup>73), 93), 94)</sup>。このことから、検出波の AE エネルギーを考慮することで、AE 発生頻度において十分に考慮されていない検出波 1 波あたりのエネルギーレベルを反映させることができ、評価精度の向上につながると考えられる。本研究では、空隙が発達したセメント改良土の材質評価指標に、従来の強度指標に加えて AE エネルギーと画像解析を導入し、評価精度の向上を試みる。

#### 1.4.3 構造材料への植物導入に関する研究

環境負荷の低減を目指して、ライフサイクルにおける二酸化炭素排出量の削減のほかに、構造材料への植物導入が進められている。構造材料への植物導入には、ポーラスコンクリートの活用や緑化工の推進があげられる。

ポーラスコンクリートは、内部に連続空隙を有し、透水性や保水性、植物導入といった機能が付与された材料である。利用用途は舗装、水質浄化、吸音・防音、河川護岸、法面保護などと多岐にわたっている。ポーラスコンクリートは、19 世紀半ばに西欧で誕生し、米国を経由して日本に導入された<sup>95)</sup>。日本では、1964 年にポーラスコンクリート製ヒューム管が開発され、軟弱地盤や湧水地盤から排水する工法として利用された<sup>95)</sup>。1980 年代からは、透水性舗装として歩道や駐車場にポーラスコンクリートが適用された。1990 年代か

ら日本コンクリート工学協会ではポーラスコンクリートの緑化技術への適用が検討された。

2003 年には日本コンクリート工学協会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<sup>96)</sup>をはじめ、様々な関連の委員会で、ポーラスコンクリートの施工基準や品質保証の基準整備に関する議論が進められている。日本コンクリート工学会環境対応型コンクリートの環境影響評価手法の構築研究委員会は、ポーラスコンクリートに代表される特殊コンクリートを環境調和型コンクリート（自然環境が本来有する性質や機能を保つため必要となる材料的性能をあらかじめ備えることにより、環境の劣化を緩和、低減、さらにはその質を改善向上させ、時間経過とともに構造材料の全部または一部が自然環境となるような材料）と定義し、時系列変化に伴う環境性能指標を提示した<sup>97)</sup>。2013 年に設置された性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会は、製造・施工指針案をとりまとめた<sup>98)</sup>。これによると、ポーラスコンクリートの強度は主に空隙率、結合材強度、骨材粒径および骨材強度、締固め程度に影響をうけるとされている<sup>95)</sup>。上記委員会では、空隙率と圧縮強度に関して共通実験<sup>99)</sup>を行われ、空隙率と結合材強度を用いた圧縮強度推定式および新たな強度管理法が提案された。以上から、ポーラスコンクリートの規準化や実用化にむけての課題として、空隙率や結合材強度といった品質を定量的かつ非破壊で評価する手法の確立が必要であることが指摘されている<sup>95)</sup>。本研究で扱う構造材料もポーラスコンクリートと同様に多孔質材料であり、その空隙率や結合材強度といった品質評価手法を検討することが実用化に向けての重要な課題であると考えられる。

一方、緑化工において、植物の発芽および生育状況とともに、基盤の安定性を評価する重要性が高まっている<sup>100)</sup>。緑化基盤材の要求性能を検討する前提として、平成 27 年 10 月に環境省より公表された自然公園における法面緑化指針<sup>101), 102)</sup>（以下、指針と記す）を参照し、法面緑化に求められる要求性能を概観する。本指針は、自然公園内において生態系、種、遺伝子の 3 つのレベルでの生物多様性の保全に配慮した環境調和と自然回復を目的と

する法面緑化の方法論を定めたものである。自然公園内の荒廃地などを対象としているが、それ以外の地域環境の保全・再生にも応用可能である。緑化基盤材には、侵食や損壊等の防止に加えて、地域の生態系へ影響を与えない材料であることが求められている。そのため施工後から初期緑化目標達成までの間にあっては、緑化基盤の侵食等の点検に加えて、植生誘導の管理の実施を実施するとともに、最終緑化目標に向けて監視的管理を進めていくことが必要とされている。

本論の研究対象である緑化基盤材に環境親和性を付加する論点には、緑化初期から最終段階までに安定した植生遷移を支える生育基盤であることが求められる。このため、従来の植被率のような指標だけでなく、空隙構造と根圏の発達状況とを精緻に評価する必要があると考えられる。

## 1.5. 本研究の新規性・有用性

本論を執筆するにあたり，本研究の新規性と有用性を提示する。新規性は研究の特色や独創的な点，有用性は学術的または産業的な観点からの有利な点として提示する。

農業副産物であるもみ殻を有効活用した環境親和性に優れた緑化基盤材の開発を試みた点が新規性の一つであると考えられる。既往研究では，もみ殻をエネルギー資源として活用するうえでの LCA を中心とした研究が多く<sup>9)</sup>，その際に排出されるもみ殻灰を構造材料へ活用することでの環境負荷特性に着目した研究は少ない。本研究では，具体的なもみ殻ガス化プラントでのもみ殻利用の実態を調査分析し，もみ殻をガス化することで環境負荷が低減することを明らかにした。加えて，もみ殻灰でセメントを置換するという材料設計の観点からも環境負荷を検討した。材料設計において 2 つの視点から環境負荷を考慮することは，地域の農業実態に即した環境負荷低減策の実現につながっていく可能性を十分にもつと考えられる。

2 つ目の新規性は，多孔質材料の材質評価に AE 法および画像解析を導入した点である。開発材料は耐久性と植物根系の発達を阻害しない空隙構造を同時に有することが求められる多孔質材料である。本研究では，最大応力である強度値に加えて，AE エネルギー指標，画像解析によるひずみ分布および破壊力学パラメータを用いて材質を評価することを試みた。このことで，最大応力のみでは判断が困難な，通常管理下の応力におけるひび割れ発生の可能性とその特性を評価でき，長期耐久性能の評価につながるものと推察される。

構造材料への植物導入が推進される中で，開発材料を緑化基盤として適用できる可能性を十分に持つ点が有用性として挙げられる。本研究では，もみ殻灰の置換率の相違による空隙構造と根系の発達状況との関係を精緻に検討した。以上，本研究では環境調和性，耐久性，植栽への適合性の 3 点を満たす材料設計について多孔質材料という視点にたち考察した。このことは，地域資源の循環が可能となり，環境調和に基づく農業農村環境の持続的発展に寄与できると考えられる。

## 参考文献

- 1) 環境省総合環境政策局：環境白書/循環型白書/生物多様性白書 平成 26 年度版，482 p.，日経印刷，2014.
- 2) 土木学会地球温暖化対策特別委員会編：土木学会地球温暖化対策特別委員会報告書 地球温暖化に挑む土木工学，土木学会，146 p.，2009.
- 3) 土木学会：特集 気候変動への適応の時代，102(1)，pp. 6~35，2017.
- 4) Food and Agriculture Organization of United Nations, <http://faostat.fao.org>, 2014.
- 5) 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～，更新：2013 年 4 月，[http://www.jora.jp/tiikibiomass\\_sangyokasien/pdf/06\\_niigata.pdf](http://www.jora.jp/tiikibiomass_sangyokasien/pdf/06_niigata.pdf)（参照：2017 年 9 月 8 日）
- 6) Ramchandra, P.: Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp. 1469~1485, 2016.
- 7) Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., Deford, H. D. and Townsend, T. G.: A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete, *Journal of Cleaner Production*, 121, pp. 1~18, 2016.
- 8) Apriantia, E., Shafighb, P., Bahrib, S. and Farahanib, J. N.: Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review, *Construction and Building Materials*, 74, 2015.
- 9) 迫井裕樹：コンクリート用混和材としてのもみ殻灰の利用に関する研究事例，*コンクリート工学*，50(7)，pp. 628~633，2012.
- 10) Antiohos, S. K., Papadakis, V. G. and Tsimas, S.: Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness, *Cement and Concrete Research*, 61-62, pp. 20~27, 2014.
- 11) 内村太郎：コンクリートと地盤材料の中間領域の材料について，*コンクリート工学*，43(10)，pp. 3~8，2005.
- 12) 竹内雍監修：多孔質体の性質とその応用技術，*フジ・テクノシステム*，1999.
- 13) 安部郁夫：多機能材料：活性炭，木炭，*色材協会誌*，72(6)，pp. 388~396，1999.
- 14) 森泉美穂子，Prakash, N. B.，伊藤純雄：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，*日本土壤肥料科学雑誌*，75(5)，pp. 609~612，2004.
- 15) 島本由麻，鈴木哲也，森井俊広：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，*日本緑化工学会誌*，41(1)，pp. 9~14，2015.

- 16) 日本緑化工学会：特集 グリーンインフラを活用した新しい街づくりに向けて，日本緑化工学会誌，42(3)，pp. 404~424，2017.
- 17) 近藤連一編：機械的性質，多孔材料，技報堂，pp. 165~183，1973.
- 18) 日本材料学会：破壊強度の確率モデル，日本材料学会，pp. 76~77，2012.
- 19) 笠井芳夫編：コンクリート総覧，技術書院，758 p.，1998.
- 20) Neville, A. M. (三浦尚訳)：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，963 p.，2004.
- 21) 荒井康夫：改訂 2 版セメントの材料化学，大日本図書，262 p.，2002.
- 22) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 4 版，技報堂出版，pp. 23~36，2012.
- 23) セメント協会：セメントの常識，セメント協会，2017.
- 24) 日本コンクリート工学協会反応モデル解析研究委員会編：反応モデル解析研究委員会報告書セメントコンクリートの反応モデル解析の現状と今後の展望，日本コンクリート工学協会，pp. 58~85，1996.
- 25) Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V.: Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash, Construction and Building Materials, 22, pp. 932~938, 2008.
- 26) Mehta, P. K. and Pitt, N.: A new process of rice husk utilization, Proceedings of the International Conference on Rice By-product Utilization, 1, Valencia, Spain, pp. 42~58, 1974, (A brief introduction is given in ACI Journal, 72(5), 1975.
- 27) Mehta, P. K.: Properties of blended cements made from rice husk ash, Journal of the American Concrete Institute, 74(9), pp. 440~442, 1977.
- 28) Yamamoto, Y and Lakho, S. M.: Production and utilization of active rice husk ash as a substitute for cement, 土木学会論文集，32，pp. 157~166，1982.
- 29) Muthadhi, A. and Kothandaraman, S.: Optimum production conditions for reactive rice husk ash, Materials and Structures, 43(9), pp. 1303~1315, 2010.
- 30) Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A. K. and Kentgens, P. M.: A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes, Cement and Concrete Research, 38, pp. 861~869, 2008.
- 31) Savant, N. K., Snyder, G. H. and Datnoff, L. E.: Silicon management and sustainable rice production, Advances in Agronomy, 58, pp. 151~199, 1996.
- 32) 杉田修一，庄谷征美：ポゾラン材としてのもみ殻灰の有効利用に関する基礎的研究，土木学会論文集，526，pp. 43~53，1995.

- 33) Filho, R. D. T. and Fairbairn, M. R.: Use of ultrafine rice husk ash with high carbon content as pozzolan in high performance concrete, *Material and Structures*, 42, pp. 983~992, 2009.
- 34) Chakraverti, A., Mishra, P. and Banergee, H. D.: Investigation of combustion of raw and acid-leached rice husk for production of pure amorphous white silica, *Journal of Materials Science*, 23, pp. 21~24, 1988.
- 35) Feng, Q., Yamamichi, H., Shoya, M. and Sugita, S.: Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloride acid pretreatment concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 521~526, 2004.
- 36) Van Tuan, N., Ye, G., Van Breufel, K. Fraaij, A. and Bui, D. D.: The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 25, pp. 2030~2035, 2011.
- 37) 梅田純子, 高田龍一, 道浦吉貞, 近藤勝義: 農作物非食部バイオマスから高純度非晶質シリカの抽出プロセスとコンクリート用混和材としての利活用, *スマートプロセス学会誌*, 3(5), pp. 323~327, 2014.
- 38) 石黒覚: 粃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, pp. 83~88, 2000.
- 39) Bui, D. D., Hu, J. and Stroeve, P.: Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 27, pp. 357~366, 2005.
- 40) Jamil, M., Kaish, A. B. M. A., Raman, S. N. and Zain, M. F. M.: Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system, *Construction and Building Materials*, 47, pp. 588~593, 2013.
- 41) Bui, L. A., Chen, C., Hwang, C. and Wu, W.: Effect of silica forms in rice husk ash on the properties of concrete, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19, pp. 252~258, 2012.
- 42) Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavel, K.: Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 22, pp. 1675~1683, 2008.
- 43) Jain, N.: Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement, *Construction and Building Materials*, 27, pp. 39~44, 2012.
- 44) Rodríguez De Sensale, G., Ribeiro, A. B. and Gonçalves, A.: Effects of RHA on autogenous shrinkage of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 30, pp. 892~897, 2008.

- 45) Nehdi, M., Duquette, J. and El Damatty, A.: Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1203~1210, 2003.
- 46) Salas, A., Delvasto, D., Mejía de Gutiérrez, R and Lange, D.: Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 773~778, 2009.
- 47) Giaccio, G., Rodríguez De Sensale, G. and Zerbino, R.: Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash, *Cement and Concrete Composites*, 29, pp. 566~574, 2007.
- 48) Yu, Q., Sawayama, K., Sugita, Shoya, M. and Isojima, Y.: The reaction between rice husk ash and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solution and the nature of its product, *Cement and Concrete Research*, 29, pp. 37~43, 1999.
- 49) Bagheri, Y., Ahmad, F. and Ismail, M. A.: Strength and mechanical behavior of soil-cement-lime-rice husk ash (soil CLR) mixture, *Material and Structure*, No.47, pp. 55~66, 2014.
- 50) Gursel, A. P., Maryman, H. and Ostertag, C.: A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash, *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 823~836, 2016.
- 51) 藤井卓:環境にやさしいコンクリートーエコマテリアルを目指してー, 鹿島出版会, 267 p., 2001.
- 52) Meadows, D. H, Meadows, D. L. and Randers, J. (枝広淳子訳): 成長の限界 人類の選択, ダイヤモンド社, 408 p., 2005.
- 53) 山本良一監修, 鈴木淳史, 土肥義治, 原田幸明編: エコマテリアルハンドブック, 丸善, pp. 2~27, 2006.
- 54) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 29 コンクリートと資源の有効利用, 土木学会, 322 p., 1998.
- 55) 土木学会: コンクリートライブラリー96 資源有効利用の現状と課題, 160 p., 1999.
- 56) 土木学会コンクリートの環境負荷評価小委員会編: コンクリートの環境負荷評価小委員会報告, *コンクリート工学*, 40(12), pp. 10~16, 2002.
- 57) 土木学会: 土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会講演要旨集, 1997.
- 58) 河合研至: 土木分野における環境性能評価, *コンクリート工学*, 45(5), pp. 31~34, 2007.



- 59) コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会編：環境時代におけるコンクリートイノベーション（委員会報告書），日本コンクリート工学協会，2008.
- 60) 土木学会コンクリート委員会環境調和型コンクリート材料創造研究委員会編：環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究委員会成果報告書，土木学会，153 p., 2011.
- 61) 三橋博三，六郷恵哲：コンクリートの破壊の力学，コンクリート工学，37(9)，pp. 4~9，1999.
- 62) 榎学：マテリアルの力学的信頼性－安全設計のための弾性力学－，内田老鶴圃，pp. 65~81，2006.
- 63) 平田森三：機械の研究，養賢堂，1，231 p., 1949.
- 64) 横堀武夫：材料強度学，技報堂，334 p., 1974.
- 65) Bogdanoff, J. L. and Trans. ASME, J. Appl. Mech., 45, 246 p., 1978.
- 66) 三橋博三，六郷恵哲，国枝稔：コンクリートのひび割れと破壊の力学－現象のモデル化と制御－，技報堂出版，pp. 47~63，2010.
- 67) Griffith, A. A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philos. T. Roy. Soc. A., 221, pp. 163~197, 1921.
- 68) 三橋博三，白井伸明，六郷恵哲：コンクリート構造への破壊力学の応用，コンクリート工学，30(6)，pp. 1~10，1992.
- 69) 東郷敬一郎：材料強度解析学 基礎から複合材料の強度解析まで，内田老鶴圃，pp. 57~115，2004.
- 70) Kaplan, F. M.: Crack Propagation and the Fracture of Concrete, J. ACI, Vol. 58, pp. 591~610, 1961.
- 71) Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersoon, P. E.: Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 773~782, 1976.
- 72) Grosse, C. U. and Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission Testing, Springer, 2008.
- 73) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論－構造物の診断と破壊現象解析－，森北出版株式会社，2005.
- 74) 大津政康：コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション（AE）研究の歴史と現状，土木学会論文集，No.496/V-24，pp.9~19，1994.
- 75) 島本由麻，鈴木哲也：農業農村工学におけるアコースティック・エミッション研究の歴史と現状，水土の知（農業農村工学会誌），86(2)，pp. 23~26，2018.

- 76) 岸上冬彦：破壊の進行に関する一実験，地震，6，pp. 25~31，1934.
- 77) Kaiser, V. J.: Knowledge and Research on Noise Measurements during the Tensile Stressing of Metals, Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, 24, pp.43~44, 1953.
- 78) Obert, L.: The Microseismic Method of Predicting Rock Failure in Underground Mining, U.S.Bureau of Mines Report, Inv. 3797, 1945.
- 79) Schofield, B. H.: Acoustic Emission under Applied Stress, Report ARL-150, Lessels and Associates, 1961.
- 80) Rusch, H.: Physical Problems in the Testing of Concrete, Zement Kalk-Gips (Wiesbaden), 12 (1), pp.1~9, 1959.
- 81) L'Hermite, R. G.: Volume Change of Concrete, Proc.4th Int. Symp. Chemistry of Cement, V-3, NBS Monograph, 43, pp.659~694, 1960.
- 82) Robinson, G. S.: Methods of Detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete, Proc. Int. Conf. on the Structure of Concrete and Its Behavior under Load Cement and Concrete Association, pp.131~145, 1965.
- 83) Wadley, H. N. G. and Scruby, C. B.: Acoustic Emission Source Characterization, Advances Acoustic Emission, Dunhart Publishers, pp. 125~153, 1981.
- 84) Pao, Y. H.: Theory of Acoustic Emission, Elastic Waves and Nondestructive Testing of Materials, AMD-Vol. 29, pp. 107~128, 1981.
- 85) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康：アコースティック・エミッションの発生機構に関する考察，土木学会論文報告集，314，pp. 125~136，1981.
- 86) Ohtsu, M. and Ono, K.: A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Functions in a Half Space, Journal of Acoustic Emission, 3(1), pp. 27~40, 1984.
- 87) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久：AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発，非破壊検査，42(10)，pp. 111~117，1987.
- 88) 日本非破壊検査協会：NDIS2106-1997 アコースティック・エミッション試験装置の性能測定及び表示方法，1997.
- 89) 日本非破壊検査協会：NDIS2419-1997 金属製圧力容器などのアコースティック・エミッション連続監視方法，1997.
- 90) 日本非破壊検査協会：NDIS2421-2000 コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法，2000.

- 91) 鈴木哲也, 渡辺弘史, 大津政康: AE 法によるコンクリートの定量的損傷度評価に関する研究, 応用力学論文集, 5, pp. 809~816, 2002.
- 92) 山本清仁, 小林晃, 青山咸康: EPS ビーズ混入劣化によるモルタルの AE 挙動, 材料, 57(10), pp. 1011~1018, 2008.
- 93) 日本非破壊検査協会編: 非破壊検査技術シリーズ アコースティック・エミッション試験 II, 日本非破壊検査協会, 164 p, 2008.
- 94) 水谷仁, 渡辺輝彦: 地球, 岩波書店, pp. 175~176, 1992.
- 95) 岡本亨久, 中新弥: ポーラスコンクリート, コンクリート工学, 54(5), pp. 542~547, 2016.
- 96) 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: 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協会, 2003.
- 97) 日本コンクリート工学協会: 環境対応型コンクリートの影響評価手法の構築研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 199 p., 2007.
- 98) 日本コンクリート工学協会: 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 2015.
- 99) 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会: ポーラスコンクリートの強度-空隙率関係に関する共通実験報告, コンクリート工学, 54(4), pp. 375~379, 2016.
- 100) 吉田寛: 播種工における法面緑化とモニタリング手法, 日本緑化工学会誌, 30(3), pp. 532~540, 2005.
- 101) 環境省自然環境局: 自然公園における法面緑化指針, 2015.
- 102) 吉田祥子: 「自然公園における法面緑化指針」の策定について, 日本緑化工学会誌, 41(4), pp. 438~441, 2016.

## 第2章 もみ殻の構造材料への活用における環境影響評価

### 2.1. 概説

農業廃棄物であるもみ殻は稲作地域において多量に排出され、その有効な活用方法の確立が求められている。その一つとして、もみ殻をガス化し、そのエネルギーをカントリーエレベータの動力等に再利用する試みがアジア地域を中心として実施されている<sup>1)</sup>。しかしながら、ガス化に伴い排出されるもみ殻灰の多くは活用されていない。もみ殻を循環利用し、環境親和性に優れた緑化基盤材を開発するためには、ライフサイクルでの環境負荷量を最小化する必要がある。本章では前述したもみ殻ガス化コージェネレーションシステムを事例として、もみ殻灰の供給源から構造材料の製造までの過程での環境負荷量（二酸化炭素排出量）を明らかにする（図2-1）。2.3ではもみ殻ガス化コージェネレーションシステムのエネルギー収支ともみ殻灰の供給実態を整理する。2.4では排出されたもみ殻灰の構造材料への利用可能性について（1）改良土製造における固化材の相違が二酸化炭素排出量に与える

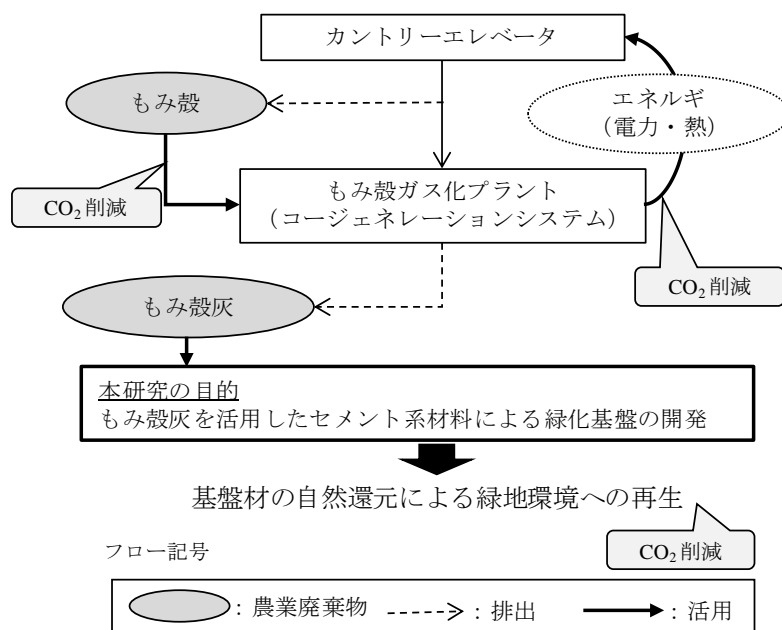


図2-1 もみ殻の循環利用と緑化基盤への適用

影響の考察，(2) ガス化炉で排出されたもみ殻灰の品質評価，(3) 開発材料を緑化基盤材として適用した時の作製可能量の試算の3点から考察する。

## 2.2. コージェネレーションシステムの位置づけ<sup>2),3)</sup>

コージェネレーションシステムとは、JIS B 8121「コージェネシステム用語」によれば、単一または複数のエネルギー資源から、電力または動力と有効な熱を同時に生産する操作と定義される。一般的には発電とその排熱による熱利用を行う形態が多く、熱電供給とも呼ばれる。海外では、“Combined Heat and Power”(CHP)あるいは“Cogeneration”等と呼ばれる。

コージェネレーションシステムの基本的な考え方とは、化石燃料等のエネルギーがもつ高温部の熱をまず熱機関によって可能な限り動力や電力などの質の高いエネルギーに変換し、その排熱である低温部の熱を一般産業プロセスや冷暖房・給湯に利用することである。換言すれば、コージェネレーションシステムは、化石燃料等のエネルギーがもつ温度ポテンシャルを高いところから低いところまで段階的に有効利用（エネルギーのカスケード利用）するものである。

コージェネレーションシステムの利点は主に4点ある。1点目は省エネルギー性が高い点である。発電と同時に熱を回収するので、総合効率が70～85%と高く、エネルギーロスを最小限に抑えることができる。2点目は環境保全に優れている点である。電力と熱を有効活用することによって従来型のシステムより排出量を抑制することができる。3点目は経済性が高い点である。発電による買電量の削減や契約電力の低減によって電気料金が削減できるとともに、排熱利用による熱源費を削減できる。4点目はエネルギーの供給への信頼性が高い点である。商用電力とコージェネレーションの発電電力の併用により電源の二重化および安定化を図ることができる。エネルギー源を分散することによって熱の安定確保も可能となり、信頼性の高いエネルギー供給システムを構築できる。

## 2.3. もみ殻ガス化システムの概要ともみ殻灰の供給

### 2.3.1. 解析対象

本研究では、新潟県 A 市に立地するもみ殻ガス化コージェネレーションシステムを事例として環境負荷量を概算した<sup>4)~7)</sup>。もみ殻灰は、燃焼作業後の副産物として同システムから廃棄される。**写真 2-1** にもみ殻ペレットおよび排出されたもみ殻灰を示す。システムフローを**図 2-2** に示す。このシステムはもみ殻ペレットを用いて発電し、カントリーエレベータの動力や近隣のビニールハウスへの温水の供給を行う再利用システムである。**写真 2-2** にガス化プラントの外観を、**写真 2-3** にもみ殻ペレットガス化発電システムを示す。なお、システムより発生する電力および熱は、11 月～3 月の期間はビニールハウスの育苗施設の加温に、4 月～5 月は水稻育苗施設、9 月～10 月はカントリーエレベータの運転に使用される。



写真 2-1 もみ殻ペレットおよび排出されたもみ殻灰

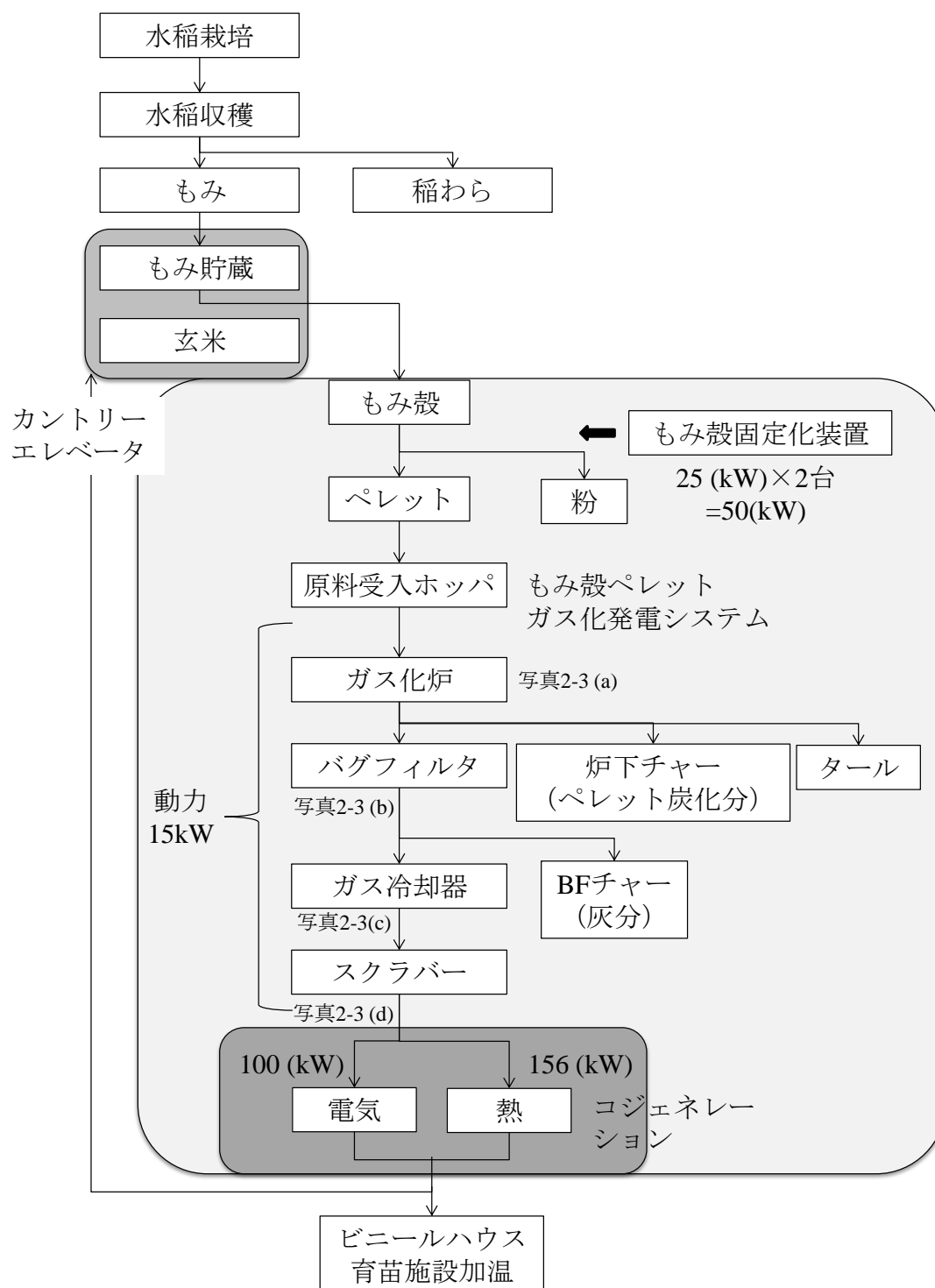


図 2-2 もみ殻ガス化コージェネレーションシステムのフロー



写真 2-2 もみ殻ガス化プラントの外観ともみ殻ペレットの製造過程



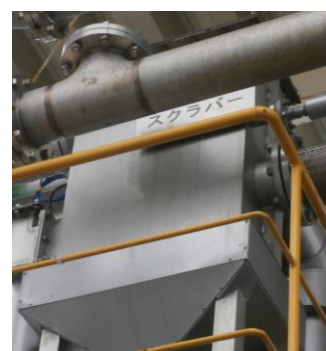
(a) ガス化炉



(b) バグフィルタ



(c) ガス冷却器



(d) スクラバー

写真 2-3 もみ殻ペレットガス化発電システム



### 2.3.2. 解析条件および方法

本検討では図 2-2 に示すもみ殻ガス化システムフローからエネルギー収支を求めた。その際、エネルギー投入量および生産量は、2014 年 9 月 21 日～12 月 9 日（80 日間）での調査結果から概算した。このときのガス化炉運転時間は 360 時間であった。エネルギー投入量はもみ殻をペレット化する固定化装置に使用された電力：50 kW，ガス化炉の動力として使用された電力：15 kW およびガス化の補助燃料として使用された軽油：3,300 L，もみ殻による発熱量である。なお，もみ殻固定化装置はガス化炉と同様な運転時間であると仮定した。もみ殻の投入量は表 2-1 に示すとおりである。エネルギー産出量はコージェネレーションシステムにより産出された電力量：35,562 kWh および熱量：168 GJ である。エネルギー量は原油換算量と二酸化排出量で評価した。

原油換算量は、エネルギーの使用の合理化等に関する法律施行規則<sup>8)</sup>に準じて、発熱量として換算（電力：9,970 kJ/kWh，熱・蒸気：1.36 GJ/GJ，軽油：37.7 GJ/kL）した後に、原油換算係数 0.0258 kL/GJ を乗じて算出した。もみ殻ペレットの発熱量は木質ペレットの低位発熱量である 16.5 MJ/kg<sup>9)</sup>を参照した。セルロース，ヘミセルロースやリグニンなどの炭素，水素，酸素よりなる有機物を主要構成成分とするバイオマスは，完全燃焼させると主に二酸化炭素と水を生成する。生成した水（水蒸気）は多量の潜熱をもっており，凝縮の際これを放出する。潜熱を包含した発熱量を高位発熱量（HMV: Higher Heating Value，総発熱量ともいう）といい，潜熱を差し引いたものを低位発熱量（LHV: Lower Heating Value，真発

表 2-1 ガス化発電に伴う原料投入量および副生成物量

日付	運転時間 (h)	もみ殻 投入量 (kg)	粉排出量 (kg)	ペレット 炭化分 (kg)	もみ殻灰 (kg)
2014 年 9 月 21 日 ～12 月 9 日	360.0	48622.0	2977.0	4825.0	5838.5

熱量ともいう) という<sup>10)</sup>。

二酸化炭素排出量は、電力については環境省<sup>11)</sup>による電気事業者別二酸化炭素排出係数から2013年度東北電力の換算値0.000589 t-CO<sub>2</sub>/kWhを用いて算出し、熱については経済産業省・環境省<sup>12)</sup>による原油換算を用いた二酸化炭素排出係数2.619 kg-CO<sub>2</sub>/Lから算出した。

表 2-2 ガス化システムにおけるエネルギー収支一覧

投入 エネルギー (2014/9/21~12/9)	電力 (kW)	稼働時間 (h)	電力量 (kWh)	発熱量換算係数 (kJ/kWh)	発熱量 (GJ)	原油換算係数 (kL/GJ)	原油換算量 (kL)	調整後排出係数 (t-CO <sub>2</sub> /kWh)	CO <sub>2</sub> 換算量 (t-CO <sub>2</sub> )
	65	360.00	23400	9970	233	0.0258	6.02	0.000589	13.78
			軽油量 (L)	発熱量換算係数 (GJ/kL)	発熱量 (GJ)	原油換算係数 (kL/GJ)	原油換算量 (kL)	原油単位あたり CO <sub>2</sub> 換算量 (kg-CO <sub>2</sub> /L)	CO <sub>2</sub> 換算量 (t-CO <sub>2</sub> )
			3300	37.7	124	0.0258	3.21	2.619	8.41
投入 エネルギー (2014/9/21~12/9)	もみ殻投入量 (kg)	ペレット率 (%)	ペレット量 (kg)	木質ペレット 低位発熱量 (MJ/kg)	発熱量 (GJ)	原油換算係数 (kL/GJ)	原油換算量 (kL)	原油単位あたり CO <sub>2</sub> 換算量 (kg-CO <sub>2</sub> /L)	CO <sub>2</sub> 換算量 (t-CO <sub>2</sub> )
	48622	93.9	45645	16.5	753	0.0258	19.43	2.619	50.89
生産 エネルギー (2014/9/21~12/9)			電力量 (kWh)	発熱量換算係数 (kJ/kWh)	発熱量 (GJ)	原油換算係数 (kL/GJ)	原油換算量 (kL)	調整後排出係数 (t-CO <sub>2</sub> /kWh)	CO <sub>2</sub> 換算量 (t-CO <sub>2</sub> )
			35562.74	9970	355	0.0258	9.15	0.000589	20.95
			熱量（蒸気） (GJ)	発熱量換算係数 (GJ/GJ)	発熱量 (GJ)	原油換算係数 (kL/GJ)	原油換算量 (kL)	原油単位あたり CO <sub>2</sub> 換算量 (kg-CO <sub>2</sub> /L)	CO <sub>2</sub> 換算量 (t-CO <sub>2</sub> )
			167.73	1.36	228	0.0258	5.89	2.619	15.41

### 2.3.3. 結果および考察

表 2-2 および図 2-3 に 2014 年 9 月 21 日～12 月 9 日の 80 日間におけるもみ殻ガス化システムのエネルギー収支を示す。もみ殻によるエネルギー量がエネルギー投入量の約 68 %を占めることが明らかになった。もみ殻を燃料とし有効活用することで、原油換算量で約 15 L のエネルギーを創出できることが明らかになった。ガス化炉が年間で 270 日稼働すると仮定して、1 年間でのエネルギー収支を概算すると、もみ殻ガス化システムにより原油換算量で年間約 50 kL のエネルギーを創出できる。二酸化炭素排出量に関しては、もみ殻を活用することで二酸化炭素排出量が約 14 t 削減できることが明らかになった。なお、年間では 47 t の削減に相当する。以上の検討結果より、もみ殻を活用することで、エネルギーを創出できるとともに二酸化炭素排出量を削減できることが明らかになった。ガス化システムより残渣物として排出されるもみ殻灰を有効利用することで、エネルギーを得られるだけでなく、より環境保全に寄与すると考えられる。

もみ殻灰はもみ殻投入質量の約 1/8 排出される（表 2-1）。新潟市のもみ殻の未利用量は 27,615 t /年である<sup>13)</sup>。ヒアリング調査から本プラントにおけるもみ殻処理能力は 1000 t/年である。新潟市で年間に廃棄されたもみ殻を全て灰にするには 28 機のガス化炉が必要であると試算できる。

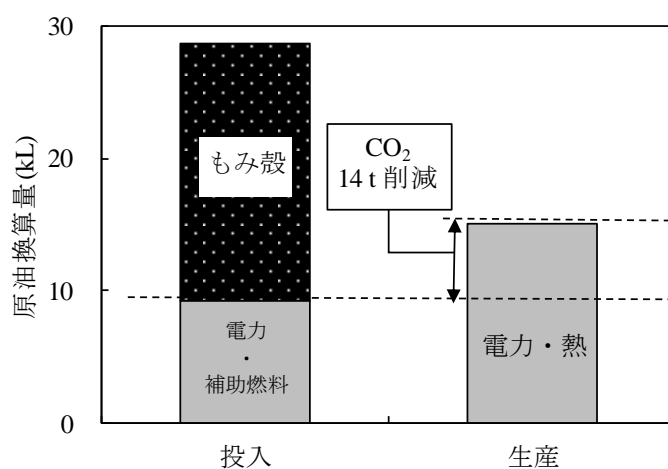


図 2-3 ガス化システムにおけるエネルギー収支

## 2. 4. 排出されたもみ殻灰の構造材料への利用可能性

前節では，もみ殻ガス化プラントのエネルギー収支を中心に議論を展開し，もみ殻を燃料として活用することで二酸化炭素排出量が削減できることを示した。本節では，ガス化プラントで排出されたもみ殻灰を構造材料に活用することで，さらなる環境負荷の低減が可能であるか考察する。

### 2. 4. 1. 解析および実験方法

#### (1) 固化材の相違による二酸化炭素排出量比較

本研究では，改良土製造において固化材の相違が二酸化炭素排出量に与える影響を考察した<sup>4),7)</sup>。検討材料の二酸化炭素排出量は，表 2-3 に示す配合表に基づき，システム境界を資材採取から資材製造のみを対象とし，資材運搬および排水・廃棄物処理を含まない場合について検討した。最適な固化材を選択するために，酸化マグネシウム（以下，MgO と示す），生石灰（以下，CaO と示す）および普通ポルトランドセメントをもみ殻灰で内割り置換した時の二酸化炭素排出量を算出し，固化材の相違による環境負荷量を比較した。加えて，コンクリートにおける二酸化炭素排出量も同様に算出し，開発材料と比較した。比較

表 2-3 改良土の配合（1m<sup>3</sup>あたり）

もみ殻灰内割置換率	砂質土 (kg)	固化材 (kg)	もみ殻灰 (kg)	水 (kg)
0%	1782.54	124.78	0.00	165.78
10%	1782.54	112.30	12.48	165.78
25%	1782.54	93.58	31.19	165.78
40 %	1782.54	74.87	49.91	165.78
50 %	1782.54	62.39	62.39	165.78
60 %	1782.54	49.91	74.87	165.78
70 %	1782.54	37.43	87.34	165.78
80 %	1782.54	24.96	99.82	165.78

対象に MgO を加えたのは、近年生態系への負荷低減を背景として、MgO 改良土の研究が進められているためである<sup>14)~17)</sup>。MgO は石灰系固化材や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という利点がある。MgO 改良土は可溶性成分を多く含む火山灰土に対してセメント改良土と比較して優れた改良効果を示すとの報告もあり<sup>15)</sup>、もみ殻灰の混和に際しても有効であると考えられる。筆者らも既往研究において、もみ殻灰を混和した MgO 改良土の植栽への適合性を検証するとともに、もみ殻灰の混和によって MgO 改良土の力学性能が向上することを明らかにした<sup>18)~22)</sup>。

資材の CO<sub>2</sub> 原単位は、粗骨材および細骨材は土木建設業における環境負荷評価（LCA）研究小委員会講演要旨集<sup>23)</sup>に記載されている CO<sub>2</sub> 排出量原単位の奨励値、MgO、CaO および普通ポルトランドセメントはカーボンフットプリント制度試行事業 CO<sub>2</sub> 換算量共通原単位データベース（Ver. 4.01）<sup>24)</sup>を使用した。使用した原単位を表 2-4 に示す。コンクリートにおいては、表 2-5 に示す示方配合を仮定し算出した。

表 2-4 使用した二酸化炭素原単位<sup>23), 24)</sup>

分類項目	CO <sub>2</sub> 原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /kg)
粗骨材・細骨材	0.00565
MgO	3.24
CaO	1.12
普通ポルトランドセメント	0.882

表 2-5 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位数 (kg/m <sup>3</sup> )				
					セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
25	10	47	5	35.7	328	154	656	1154	0.131

## (2) もみ殻灰の品質分析方法

もみ殻灰を混和材として利用する場合、非晶質シリカ量が多いことが重要である。材料設計において、もみ殻灰の利用の論点は、内在する可溶性  $\text{SiO}_2$ （非晶質）によってポズラン反応が促進される点にある。もみ殻灰中の可溶性  $\text{SiO}_2$  含量は焼成温度に依存する<sup>25)~27)</sup>。本研究では、筆者らが実験室内で電気炉を用いて焼成したもみ殻灰と実際にガス化プラントから排出されたもみ殻灰の品質を比較検討し、エネルギープラントにおける非晶質シリカの産出状況を明らかにすることを試みた。なお、電気炉での焼成したもみ殻灰は、市販のもみ殻燐炭を  $500^\circ\text{C}$  で 1 時間焼成し、焼成後すぐに急冷したもみ殻灰である。この電気炉の焼成温度は、高活性なもみ殻灰を得るには  $500^\circ\text{C}$  が最適であるという既往研究を参照し決定した<sup>26)~28)</sup>。

密度および比表面積は JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュの品質分析」に準じて行った。強熱減量は  $975^\circ\text{C}$  で 1 時間強熱した後の減量値とした。成分は粘土類検量線を用いた定量分析（検量線法）により決定した。装置は蛍光 X 線分析装置 ZSX PrimusIV（リガク社製）を用いた。

XRD/Rietveld 解析<sup>29)</sup>においては、供試材をボールミルにて試料を粉砕し  $90\ \mu\text{m}$  ふるいを全通させ、R. H. 11 % 乾燥を行い、解析試料とした。解析ソフトは Topas4.2（Bruker AXS 社製）を使用した。XRD の測定条件は、ターゲット： $\text{CuK}\alpha$ 、管電圧： $40\ \text{kV}$ 、管電流： $30\ \text{mA}$ 、走査範囲： $5\sim 70\ \text{deg}(2\theta)$ 、サンプリング幅： $0.02^\circ$ 、係数時間：3 秒とした。非晶質量を定量するための内部標準物質として、特級試薬の  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  を試料質量に対して内割りで 10 % 混合した解析における定量対象は、クォーツ ( $\text{SiO}_2$ )、クリストバライト、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 (2-1) によって算出した。

$$G = \frac{100(A - R)}{A} \times \frac{100}{100 - R} \quad (2-1)$$

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。

### (3) 緑化基盤材へ適用時の作製可能量の試算方法

表 2-1 より新潟市のもみ殻を全て灰化すると 3,316 t のもみ殻灰が排出される。本研究では緑化基盤材として適用することを想定し、作製可能な緑化基盤材の面積を試算した。緑化基盤材は表層厚 3 cm と仮定した。加えて、新潟市の公園および緑地面積 9.6 km<sup>2</sup> に対する割合を算出した。面積は新潟市が公表している 2016 年 3 月 31 日現在のデータ<sup>30)</sup>を基にした。なお、住区基幹公園（街区公園、近隣公園、地区公園）、都市基幹公園（総合公園、運動公園）、特殊公園（交通公園、歴史公園、動植物公園）、広域公園、緑地、緑道に区分した。なお、それぞれの公園は次に示すように配置することが公園法により定められている<sup>31), 32)</sup>。街区公園は、街区に居住する者の利用に供することを目的とする公園で誘致距離 250 m の範囲内で 1 箇所当たり面積 0.25 ha を標準として配置することが定められている<sup>32)</sup>。<sup>33)</sup>。近隣公園は、主として近隣に居住する者の利用に供することを目的とする公園で近隣住区当たり 1 箇所を誘致距離 500m の範囲内で 1 箇所当たり面積 2 ha を標準として配置することと定められている<sup>31), 32)</sup>。地区公園は、主として徒歩圏内に居住する者の利用に供することを目的とする公園で誘致距離 1 km の範囲内で 1 箇所当たり面積 4 ha を標準として配置する。都市計画区域外の一定の町村における特定地区公園（カントリーパーク）は、面積 4 ha 以上を標準とする<sup>32), 33)</sup>。総合公園は、都市住民全般の休息、観賞、散歩、遊戯、運動等総合的な利用に供することを目的とする公園で都市規模に応じ 1 箇所当たり面積 10～50 ha を標準として配置する<sup>31), 32)</sup>。運動公園は、都市住民全般の主として運動の用に供することを目的とする公園で都市規模に応じ 1 箇所当たり面積 15～75 ha を標準として配置する<sup>31), 32)</sup>。広域公園は、主として市町村の区域を超える広域のレクリエーション需要を充足することを目的とする公園で、地方生活圏等広域的なブロック単位ごとに 1 箇所当たり面積 50 ha 以上を標準として配置する<sup>31), 32)</sup>。緑地は、主として都市の自然的環境の保全並びに改善、都市の景観の向上を図るために設けられている緑地であり、1 箇所あたり面積 0.1 ha 以上を標



準として配置する。ただし、既成市街地等において良好な樹林地等がある場合あるいは植樹により都市に緑を増加又は回復させ都市環境の改善を図るために緑地を設ける場合にあつてはその規模を 0.05 ha 以上とする<sup>31), 32)</sup>。(都市計画決定を行わずに借地により整備し都市公園として配置するものを含む) 緑道は、災害時における避難路の確保、都市生活の安全性及び快適性の確保等を図ることを目的として、近隣住区又は近隣住区相互を連絡するように設けられる植樹帯及び歩行者路又は自転車路を主体とする緑地で幅員 10~20 m を標準として、公園、学校、ショッピングセンター、駅前広場等を相互に結ぶよう配置する<sup>31), 32)</sup>。

## 2.4.2. 結果および考察

### (1) 固化材の相違が二酸化炭素排出量に及ぼす影響

図 2-4 に固化材の相違に基づく二酸化炭素排出量の比較結果を示す。固化材をもみ殻灰で置換することで、固化材添加率が減少し二酸化炭素排出量が減少することが明らかになった。固化材の種類で比較すると、MgO 改良土は CaO 改良土やセメント改良土より二酸化炭素排出量が約 2~3 倍大きいことが明らかになった。MgO 改良土では、もみ殻灰内割り置換率が 25 %以下でコンクリートとほぼ同量の二酸化炭素が排出されると試算された。これは、MgO の製造法が大きく影響していると推察される。MgO の製造方法には大きく 2 種類ある。1 つはドロマイト ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) 中の天然炭酸マグネシウム鉱石 ( $\text{MgCO}_3$ ) を焼成・粉砕し製造する方法である。もう 1 つは海水中の  $\text{Mg}^{2+}$  を反応させ製造する方法である<sup>16), 33), 34)</sup>。本解析では、後者の海水により製造したときの MgO の  $\text{CO}_2$  原単位を使用した。具体的な製造方法は、海水に石灰乳 (消石灰  $\text{Ca(OH)}_2$  の懸濁液) および生石灰を加え、海水に含有されている塩化マグネシウムと反応させ、水酸化マグネシウムと塩化カルシウムを生成させる。沈殿した水酸化マグネシウムを回収して、焼成炉で重油等の燃料により、600~900°C加熱分解して MgO を製造する<sup>25)</sup>。主な二酸化炭素排出源は、消石灰・生石灰および高温脱水・焼成における処理に起因すると考えられる。ただし、MgO においては、焼成温度、粉末度、焼成法等、製造時のパラメータが大きく異なる種類のものが流通している

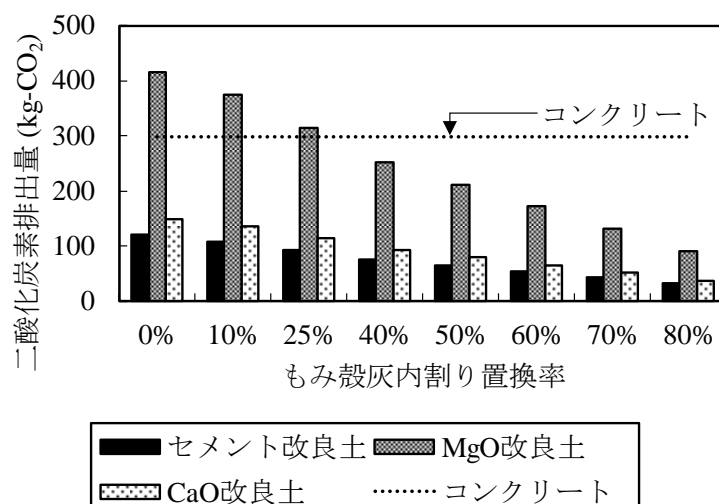


図 2-4 固化材の相違に基づく二酸化炭素排出量の比較

のが現状であり<sup>16)</sup>、積上げ法による二酸化炭素排出量の評価は今後の検討課題である。以上の検討結果より、二酸化炭素排出の観点から地盤改良材における環境調和性を考察すると、MgOと比較してCaOおよびセメントがLCAの観点から優位にあると考えられる。

## (2) ガス化プラントから排出されたもみ殻灰の品質評価

写真 2-4 に電気炉およびガス化プラントで焼成されたもみ殻灰、表 2-6 にそれぞれのもみ殻灰の物性値、表 2-7 に成分分析結果を示す。電気炉で焼成されたもみ殻灰は白色であるのに対して、ガス化プラントから排出されたもみ殻灰は黒色であった。ガス化プラントのもみ殻灰は電気炉でのものと比較して、強熱減量が約 18 倍も大きく、未燃炭素含有率が高かった。ガス化プラントのもみ殻灰は電気炉のもみ殻灰と比較して、比表面積が約 1/2 以上小さかった。なお、ガス化プラントのもみ殻灰の比表面積は 3,670 cm<sup>2</sup>/g であり、ポゾランの一つであるフライアッシュ (2,000~4,000 cm<sup>2</sup>/g<sup>35)</sup>) と同程度の比表面積だった。既往研究において、強熱減量や比表面積は燃焼温度の影響を強く受けることが明らかにされている<sup>27), 28)</sup>。例えば、Muthadhi らは 500 °C で 120 分燃焼したとき、BET 比表面積が最大になったと報告している<sup>27)</sup>。本研究では電気炉において 500 °C で焼成を行ったため比表面積が大きかったと推察される。以上の検討結果より、ガス化プラントから排出されたもみ殻灰

は未燃炭素含有率が高く、比表面積も小さいことから、電気炉で焼成されたもみ殻灰と比較してポゾラン活性度が低いと考えられる。

表 2-8 および図 2-5 に使用したもみ殻灰の XRD 結果を示す。ガス化プラントより排出されたもみ殻灰は電気炉で作製したものと比較して非晶質量が小さく、結晶物質であるクリストバライトが大きかった。焼成もみ殻灰の結晶化については、焼成温度が 600 °C 程度までは非晶質シリカであり、焼成温度が 1000 °C を超えるとクリストバライトが生成されることが既往研究より明らかにされている<sup>30)</sup>。電気炉における焼成ではこれに従い、500 °C で焼成を行ったため非晶質量が多かったものと推察される。ガス化プラントより排出されたもみ殻灰は、システム上、ガス化炉の温度が 130～800°C であり、高温域での焼成が部分的に行われているため、クリストバライトの生成量が増加したと推察される。開発材料の実用化にあたっては、炉内の適切な温度管理が必要だと考えられる。

### (3) 緑化基盤材における作製可能量の試算

新潟市の公園および緑地面積の内訳を図 2-6、緑化基盤材の作製可能面積の試算結果を図 2-7 に示す。検討の結果、1.1～8.8 km<sup>2</sup> (11～92 %) の作製が可能であることが明らかになった。すべての緑化基盤材は年間に更新しないことを考慮すると、もみ殻灰は需要量に対して十分な供給量を有していると考えられる。



(a) ガス化プラントから排出されたもみ殻灰



(b) 電気炉で焼成したもみ殻灰

写真 2-4 焼成方法の相違によるもみ殻灰の比較

表 2-6 もみ殻灰の物理試験結果

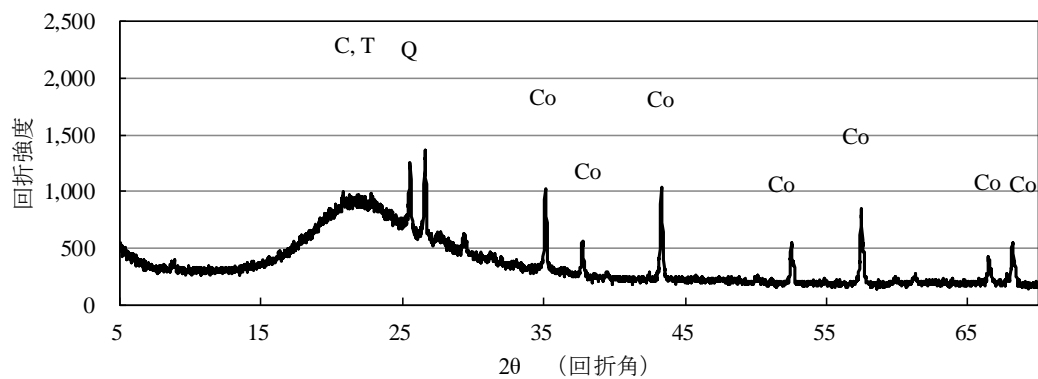
焼成方法	密度	比表面積
	(g/cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>2</sup> /g)
ガス化 プラント	1.79	3,670
電気炉	2.12	8,900

表 2-7 もみ殻灰の成分分析結果

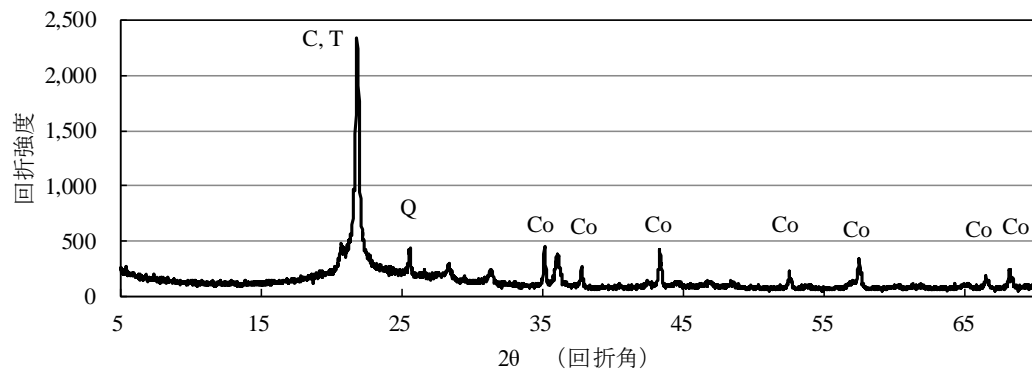
焼成方法	ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
ガス化 プラント	39.85	56.87	0.34	0.07	0.60	0.19	0.05	0.04	1.91	0.00	0.31	0.12
電気炉	2.93	89.36	0.67	0.26	1.29	0.46	0.42	0.12	3.39	0.02	0.69	0.44

表 2-8 もみ殻灰の XRD/Rietveld 解析結果

焼成方法	非晶質量 (%)	クオーツ (%)	クリストバライト (%)	トリディマイト (%)
ガス化プラント	61.73	0.23	32.83	5.21
電気炉	97.83	2.17	0.00	0.00



(a) ガス化プラントで排出されたもみ殻灰



(b) 電気炉で焼成したもみ殻灰

\*C：クリストバライト， T：トリディマイト， Q：クオーツ， Co：コランダム（内部標準物質）を示す。

図 2-5 もみ殻灰の X 線回折結果

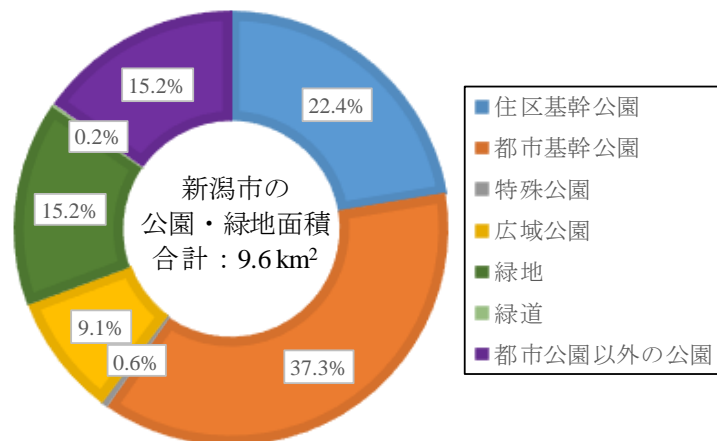
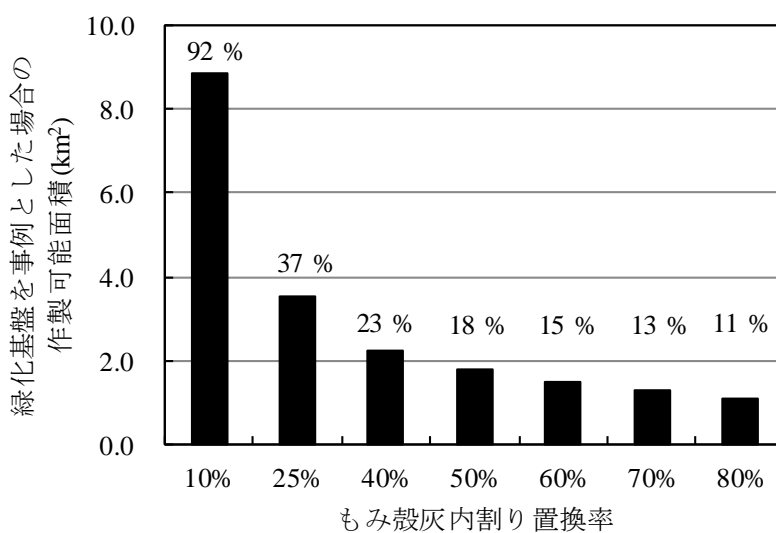


図 2-6 新潟市の公園および緑地面積 <sup>32)</sup>



\* 棒グラフの上部に示した数値は新潟市の公園および緑地合計面積である 9.6 km<sup>2</sup> に対する割合を示す。

図 2-7 緑化基盤を事例としたときの作製可能面積の試算結果

## 2.5. まとめ

第 2 章では、新潟県で実施されているもみ殻ガス化コージェネレーションシステムを事例として、もみ殻灰の供給源から構造材料の製造までの過程での環境負荷量（二酸化炭素排出量）を明らかにした。もみ殻ガス化システムによるエネルギーの創出ともみ殻灰の排出の実態を調査するとともに、排出されたもみ殻灰の構造材料への利用可能性について考察した。もみ殻ガス化システムによるエネルギーの創出およびもみ殻灰の排出の実態はシステムのエネルギー収支から明らかにした。排出されたもみ殻灰の構造材料への利用可能性を 3 つの視点、つまり、(1) 改良土製造において固化材の相違が二酸化炭素排出量に与える影響、(2) ガス化炉で排出されたもみ殻灰の品質、(3) 開発材料を緑化基盤材として適用した時の作製可能量から考察した。(1) の影響の度合いは固化材の二酸化炭素原単位から評価した。(2) は XRD/Rietveld 解析による非晶質シリカ量、比表面積および強熱減量から評価した。検討の結果、次のことが明らかとなった。

- (1) もみ殻ガス化システムの 1 年間でのエネルギー収支を概算した結果、もみ殻ガス化システムにより原油換算量で年間約 50 kL のエネルギーを創出できることが明らかになった。二酸化炭素排出量に関しては、もみ殻を活用することで年間二酸化炭素排出量が約 47 t 削減できると試算された。
- (2) ヒアリング調査から本プラントにおけるもみ殻処理能力は 1000 t/年であることが明らかになった。新潟市で排出された年間で廃棄されたもみ殻（27,615 t/年）を全て灰にするには 28 機のガス化炉が必要であると試算できた。
- (3) もみ殻灰で固化材を置換することで、固化材添加率が減少し二酸化炭素排出量が減少することが明らかになった。

- (4) 二酸化炭素排出の観点から地盤改良材における環境調和性を考察すると、 $\text{MgO}$  と比較して  $\text{CaO}$  およびセメントが LCA の観点から優位にあることが明らかになった。 $\text{MgO}$  改良土は  $\text{CaO}$  改良土やセメント改良土より二酸化炭素排出量が約 2～3 倍大きかった。
- (5) ガス化プラントより排出されたもみ殻灰は電気炉で焼成されたもみ殻灰と比較して、強熱減量が約 18 倍も大きく、未燃炭素含有率が高かった。ガス化プラントのもみ殻灰は電気炉のもみ殻灰と比較して、比表面積が約 1/2 以上小さかった。ガス化プラントのもみ殻灰は電気炉のもみ殻灰と比較して、非晶質シリカ量が 30 %少なく、結晶物質であるクリストバライトが 30 %多かった。このようなもみ殻灰の品質の相違は燃焼温度に起因していると推察される。開発材料の実用化にあたっては、炉内の適切な温度管理が必要だと考えられる。
- (6) 新潟市における作製可能な緑化基盤材の面積を試算した結果、 $1.1\sim 8.8 \text{ km}^2$ （占有率：11～92 %）の作製が可能であることが明らかになった。すべての緑化基盤材は年間に更新しないことを考慮すると、もみ殻灰は需要量に対して十分な供給量を有していると考えられる。

以上より、もみ殻およびもみ殻灰を活用することで、エネルギーを創出できるとともに、二酸化炭素排出量を削減できることが明らかになった。ガス化プラントから排出されるもみ殻灰はポズラン活性が小さいが、供給量を十分満たしているため、利用可能性が高いことが明らかになった。二酸化炭素排出量を指標とした環境親和性の観点からは、セメントを固化材とすることで、最も環境負荷を低減できることが明らかとなった。このことから、次章では、セメント改良土における空隙構造および力学性能を考察する。



## 参考文献

- 1) Ramchandra, P.: Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp. 1469~1485, 2016.
- 2) 日本エネルギー学会編：エネルギーの事典，朝倉書店，pp. 335~343，2009.
- 3) コージェネレーションエネルギー高度利用センター編：コージェネレーション白書 2016，日本工業出版，pp. 10~14，2017.
- 4) 島本由麻，鈴木哲也，大橋慎太郎，森井俊広：LCA 分析に基づく稲副産物を混和した地盤改良土の材料設計，第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 337~342，2014.
- 5) 島本由麻，鈴木哲也，森井俊広：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，pp. 28~29，2016.
- 6) 島本由麻，鈴木哲也，森井俊広：稲副産物を活用した構造材料の開発における二酸化炭素排出量の試算 - もみ殻ガス化コージェネレーションシステムを事例として - ，農業農村工学会資源循環研究部会論文集，11，pp. 1~6，2016.
- 7) 島本由麻，鈴木哲也：地域資源「もみ殻」の循環利用を考慮した材料設計の試み，農業農村工学会誌，2017，投稿中.
- 8) 経済産業省：エネルギーの使用の合理化等に関する法律施行規則，最終改正：2017 年 2 月 24 日，<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S54/S54F03801000074.html>（参照：2017 年 9 月 8 日）
- 9) 日本エネルギー学会編：バイオマスハンドブック，オーム社，pp. 17~20，2009.
- 10) 化学工学会，日本エネルギー学会共編：バイオマスプロセスハンドブック，オーム社，pp. 234~236，2012.
- 11) 環境省：温室効果排出量算定・報告・公表制度，更新：2015 年 8 月 27 日  
<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/>（参照：2017 年 9 月 8 日）
- 12) 経済産業省，環境省：特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令，更新：2006 年 3 月 29 日，<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H18/H18F15002002003.html>（参照：2017 年 9 月 8 日）
- 13) 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～，更新：2013 年 4 月，[http://www.jora.jp/tiikibiomass\\_sangyokasien/pdf/06\\_niigata.pdf](http://www.jora.jp/tiikibiomass_sangyokasien/pdf/06_niigata.pdf)（参照：2017 年 9 月 8 日）
- 14) 藤森新作，小堀茂次：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)，pp.1297~1300，2000.

- 15) 西形達明, 山田哲司, 西田一彦, 松田豊: 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, Vol.54, No.7, pp.19~21, 2006.
- 16) 山田哲司, 西形達明, 西田一彦: 酸化マグネシウムの製造方法が改良土の性質に及ぼす影響について, 土木学会論文集 C (地盤工学), Vol.68, No.4, pp.732~741, 2012.
- 17) Yi, Y., Lu, K. Liu, S. and Al-Tabbaa, A.: Property changes of reactive magnesia-stabilized soil subjected to forced carbonation, Canadian geotechnical journal, 53(2), pp. 314~325, 2016.
- 18) 島本由麻, 鈴木哲也: 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), pp. 84~89, 2014.
- 19) 島本由麻, 鈴木哲也: 稲副産物を混和した酸化マグネシウム改良土の材質評価, 環境情報科学学術研究論文集, 28, pp. 257~262, 2014.
- 20) 島本由麻, 鈴木哲也: AE-SiGMA 解析を援用した酸化マグネシウム改良土の割裂破壊特性評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 70(2), pp. I\_43~I\_50, 2014.
- 21) 鈴木哲也, 島本由麻, 森井俊広: 稲副産物を利用した酸化マグネシウム地盤改良材の材料特性評価, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 331~336, 2014.
- 22) 島本由麻, 鈴木哲也, 森井俊広: 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, 日本緑化工学会誌, 41(1), pp. 9~14, 2015.
- 23) 土木学会地球委員会環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会編: 土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会講演要旨集, 1997.
- 24) CFP 制度試行事業事務局 (社団法人産業環境管理協会): カーボンフットプリント制度試行事業 CO<sub>2</sub> 換算量共通原単位データベース ver. 4.01, 更新: 2012 年 4 月, <http://www.cms-cfp-japan.jp/> (参照: 2017 年 9 月 8 日)
- 25) 迫井裕樹: コンクリート用混和材としてのもみ殻灰の利用に関する研究事例, コンクリート工学, 50(7), pp. 628~633, 2012.
- 26) Muthadhi, A. and Kothandaraman, S.: Optimum production conditions for reactive rice husk ash, Materials and Structures, 43, pp. 1303~1315, 2010.
- 27) Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A. K. and Kentgens, P. M.: A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes, Cement and Concrete, 38, pp. 861~869, 2008.
- 28) Savant, N. K., Snyder, G. H. and Datnoff, L. E.: Silicon management and sustainable rice production, Advance Agronomy, 58, pp.151~199, 1997.
- 29) Rietveld, H.: A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structure, Journal of applied Crystallography, 2(2), pp.65~71, 1969.

- 30) 新潟市：種類別公園数・面積，更新：2016年12月15日，  
[https://www.city.niigata.lg.jp/kurashi/park/cyosa/data/data\\_syurui.html](https://www.city.niigata.lg.jp/kurashi/park/cyosa/data/data_syurui.html)（参照：2017年9月20日）
- 31) 都市公園法研究会編（国土交通省都市局公園緑地・景観課監修）：都市公園法解説改訂新版，日本公園緑地協会，752 p.，2014.
- 32) 国土交通省都市局公園緑地・景観課：都市公園の種類，  
[http://www.mlit.go.jp/crd/park/shisaku/p\\_toshi/syurui/](http://www.mlit.go.jp/crd/park/shisaku/p_toshi/syurui/)（参照：2017年9月22日）
- 33) 根本茂：初歩から学ぶマグネシウム，工業調査会，pp.136~141，2002.
- 34) Bhatti, A. S., Dollimore, D. and Dyer, A.: Magnesia from Seawater A Review, Clay Minerals, 19, pp. 865~875, 1984.
- 35) 日本コンクリート工学協会反応モデル解析研究委員会編：反応モデル解析研究委員会報告書セメントコンクリートの反応モデル解析の現状と今後の展望，日本コンクリート工学協会，pp. 58~86，1996.

## 第3章 弾性波指標に基づくセメント改良土の材質評価法の開発

### 3.1. 概説

緑化基盤材は、構造材料として長期安定性を保ち、同時に植物根圏の発達を阻害しない空隙構造をもつ多孔質材料であることが求められる。開発材料は脆性材料かつ多孔質材料であることから、従来の強度指標に加えて、材質を評価する指標が必要だと考えられる。本章では、開発材料の空隙構造を評価するとともに、AE法およびデジタル画像相関法を用いて、割裂破壊過程および圧縮破壊過程における多孔質材料の破壊特性を考察する。加えて、多孔質材料の結合力と本章で提案するAEエネルギー指標との関係から新たな材質評価法を構築する。3.3では、実験材料および方法について記述する。3.4では、解析方法としてひずみエネルギー、エネルギー解放率およびAEエネルギーといったエネルギーの概念を整理する。3.5では、結果および考察をまとめる。具体的には、3.5.1～3.5.3では、空隙構造を細孔径分布試験、透水試験および保水性試験よりそれぞれ考察する。3.5.4では、割裂破壊過程における破壊特性をエネルギー解放率とAEエネルギーとの関係から考察する。3.5.5では、もみ殻灰の内割置換率が異なるケース間での圧縮破壊過程における破壊特性の違いを明らかにする。空隙構造や結合力が圧縮強度およびAEエネルギーに与える影響を考察し、AEエネルギーの材質評価指標としての有効性を示す。

### 3.2. 材料中のAEの発生とその特徴<sup>1)</sup>

材料試験では、載荷過程におけるひび割れの発生・発達と材質との関係の中で、破壊に伴うエネルギー放出によりAEが検出される。波動伝播に関係したAE法の特徴は、試験を物体の表面で行うことにある。物体表面では、力学的観点から面に対する法線方向の応力成

分が常に 0 となる。このことから、自由表面に到達した弾性波が反射され、この結果として物体表面での AE 計測では、縦波（P 波）と横波（S 波）に加えて、その反射により発生した反射 P 波と反射 S 波が混在して検出されることになる。実際の試験では、実体波である P 波と S 波に加えて、レイリー波やラブ波に代表される表面波が検出される。表面波は、自由表面が存在することにより発生する弾性波であり、その振幅は自由表面で最大となり、表面からの距離が増加するにつれて指数的に減少する。実体波や表面波の伝播過程は、伝播する媒体の不均一性や多層構造などに影響され複雑な様相を呈するが、検出波長と比較して小さな不均一性の影響は無視できる。

### 3.3. 実験材料および方法

#### 3.3.1. 実験材料

##### (1) 細骨材

本研究では、砂質土（土粒子密度： $2.66 \text{ g/cm}^3$ ）を使用した。使用砂の粒径加積曲線を図 3-1 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（表 3-1）。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（図 3-2）。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。

##### (2) 結合材

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

##### (3) もみ殻灰

もみ殻灰は第 2 章に示した新潟県のガス化プラントから排出されたものを使用した。もみ殻灰の品質は第 2 章を参照する。

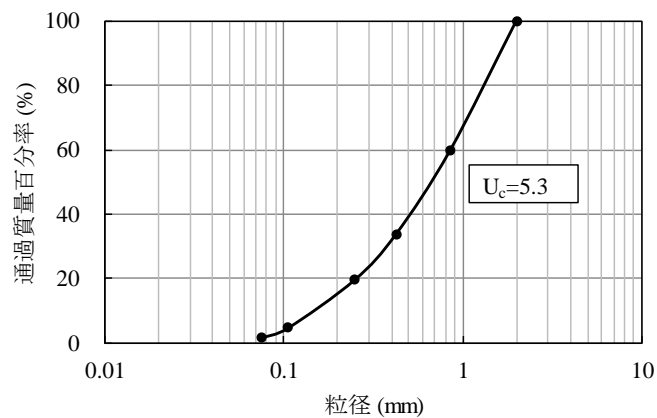


図 3-1 粒径加積曲線

表 3-1 使用砂の粒度

土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最大粒径 (mm)	60%粒径 (mm)	50%粒径 (mm)	30%粒径 (mm)	10%粒径 (mm)
2.66	2.00	0.85	0.69	0.37	0.16

均等係数 U <sub>c</sub>	曲率係数 U <sub>c'</sub>	礫分 (%)	粗砂分 (%)	中砂分 (%)	細砂分 (%)	シルト分 (%)
5.3	1.0	0.00	40.4	40.0	18.0	1.6

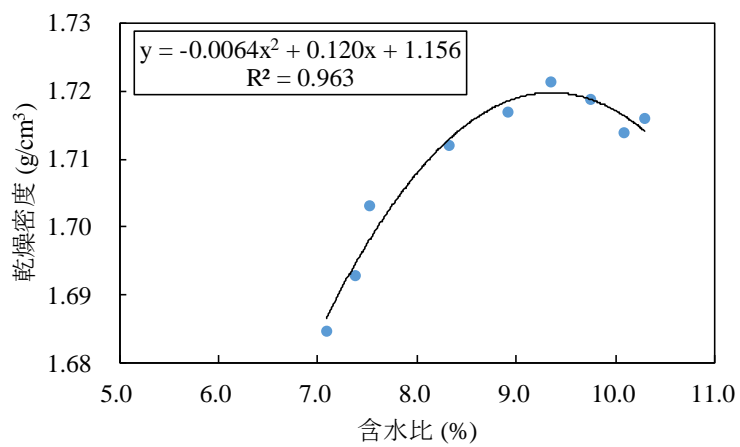


図 3-2 締固め曲線 (砂質土)

### 3.3.2. 配合

配合設計を表3-2に示す。もみ殻灰の内割り置換率が異なる8つのケースを用意した。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として使用する方法である。もみ殻灰内割り置換率 $P$ は式(3-1)で定義した。

$$P = \frac{m_R}{m_{CE} + m_R} \times 100 \quad (3-1)$$

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

### 3.3.3. 実験方法

本研究では、開発材料の空隙構造および力学特性を明らかにした。空隙構造は細孔径分布試験、透水試験および保水性試験から評価した。力学特性はAE法およびデジタル画像相関法を用いた圧縮強度試験および割裂引張強度試験から評価した。もみ殻灰の置換率の相違が空隙構造や力学特性に及ぼす影響を考察した。加えて、AEエネルギーを用いた材質評価方法の構築を試みた。

表 3-2 配合

もみ殻灰 内割置換率	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
50 %	350.00	12.25	12.25	32.55
60 %	350.00	9.80	14.70	32.55
70 %	350.00	7.35	17.15	32.55
80 %	350.00	4.90	19.60	32.55

\*直径 50 mm，高さ 100 mm の円柱供試体 1 本分を示す。

### (1) 細孔径分布試験

もみ殻灰を混和したセメント改良土の細孔径分布を測定した。直径 50 mm，高さ 100 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<sup>3</sup> とした。製作後 20 ± 3 °C で 28 日水中養生させた後に供試した。

試料の高さ方向の中央付近より，湿式ダイヤモンドカッターを用いて厚さ 10 mm 程度の円盤状片を切り出し，アセトンに 1 日以上浸漬させ，水和停止した。これらの外周 10 mm 程度をニッパーで取り除いた後，5 mm 角程度の小片に加工し，凍結乾燥機で 1 時間乾燥したものを測定に供した。測定には micromeritics 社製水銀圧入法式ポロシメーター AutoPoreIV9520 を用いた。なお，本研究で使用したポロシメーターの分解能は 0.1 mm<sup>2</sup> (0.0001 ml) である。

ガラス製試料容器（試料室容積：5 ml，キャビラリ容積：0.392 ml）に試料をはかり取り，ポロシメーターにセットし，容器内に水銀を注入した。容器ごと圧力を加え，水銀を試料の細孔に圧入し，その量を測定した。圧力は段階的に増加させた。加える圧力と水銀が圧入される細孔径は式 (3-2) の関係がある。なお，水銀の表面張力  $\gamma$  を 0.484 N/m，水銀と試料との接触角  $\theta$  を 130° ( $\cos\theta = -0.643$ ) とした。式 (3-2) より各圧力に相当する細孔径を算出した。各圧力における水銀圧入量を，その点までに水銀が圧入された細孔の量とし，両者より細孔径分布を求めた。

$$d = -4\gamma \cos\theta / P \quad (3-2)$$

ここで  $d$ ：細孔径（直径）， $\gamma$ ：水銀の表面張力， $\theta$ ：水銀と試料の接触角， $P$ ：圧入圧力である。



## (2) 透水試験

透水性を評価するために変水位透水試験（土壌透水性測定器 4 点式 DIK-4000，大起理化工業社製）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/m<sup>3</sup> とした。供試数は 5 サンプルとした。

## (3) 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。自動圧力調節器加圧用 DIK-9222（大起理化工業社製）を用いて計測した。透水試験と同一な材齢 28 日の供試体を用いた。pF 3.2 まです計測した後に、炉乾機を用いて 105 °C で 24 時間乾燥させ、含水比を測定した。

## (4) 割裂引張強度試験

引張応力に対するひび割れの発生や進展の挙動を把握することは、構造材料の破壊現象解明において重要な課題である。引張特性を評価するために、金属材料においては直接引張試験が実施されている。しかしながら、開発材料は低強度で脆性的に破壊に至るため、金属材料と同様な方法で評価することは難しい。このため、既往研究では、脆性材料の引張特性を、供試体形状を工夫した直接引張試験（例えば、西村<sup>2)</sup>）や割裂引張強度試験によって評価している。金田らは、セメント改良土の引張挙動を割裂引張強度試験から評価できることを明らかにしている<sup>3)</sup>。筆者らの既往研究においても、酸化マグネシウム改良土やセメント改良土に割裂引張強度試験を適用できることが明らかにされている<sup>4-7)</sup>。このことから、本研究では、割裂引張強度試験から引張特性の評価を試みた。

割裂引張強度試験は、赤沢<sup>8)</sup>により圧裂試験として提案された試験方法である。試験方法の理論は町田<sup>9)</sup>や岸谷ら<sup>10)</sup>によって確立された。その後の多くの既往研究から、割裂引張強度と直接引張試験から求められる引張強度とが相対的に一致することや、供試体寸法の影響が明らかにされている。

本研究では、材齢 28 日において割裂引張強度試験を行った。載荷速度は 0.3mm/min とした。直径 50 mm、高さ 100 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<sup>3</sup> とした。供試体は製作後 20 ± 3 °C で 28 日水中養生させた。

## (5) 圧縮強度試験

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 100 mm の円柱供試体を割裂引張強度試験と同様な方法で作製した。供試体は製作後 20 ± 3 °C で水中養生させた。

## (6) AE 計測およびデジタル画像相関法による各種応力場での破壊過程の評価

開発材料のような多孔質材料においては、各種応力場で応力集中により破壊が進行する<sup>11)</sup>。最弱リンク説<sup>12)</sup>によれば、開発材料では、均質性を仮定できる構造材料と比較して、局所的なひび割れによって低強度で破壊が進行すると予測される。このため、応力ひずみ曲線に基づく評価に加えて、破壊過程でのひび割れの挙動を評価する必要があると考えられる。また、ひずみの計測には一般的にひずみゲージや変位計が点的に用いられるが、この方法では局所的なひずみ挙動を評価することが難しい。この課題に対して、既往研究では、複数本のひずみゲージの設置（例えば、渡辺ら<sup>13)</sup>）、スペックル干渉を利用した計測（例えば、松田ら<sup>14)</sup>）および画像による面的なひずみ分布（例えば、車谷ら<sup>15)</sup>）の計測が試みられている。本研究では、割裂引張強度試験および圧縮強度試験に AE 計測とデジタル画像相関法（DICM）<sup>16)</sup>による計測を導入し、局所的に進行する破壊挙動を評価した。

AE 計測には、SAMOS（PAC 社製）を用いた。150 kHz 共振型センサ R15α を 6 個設置した。しきい値を 40 dB、増幅値を 60 dB、周波数域を 5 kHz～400 kHz に設定した。割裂引張強度試験の実験概要図を写真 3-1、圧縮強度試験および割裂引張強度試験の AE センサ配置

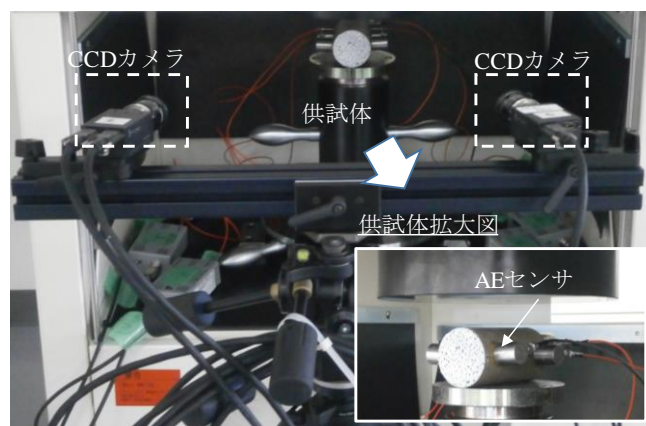


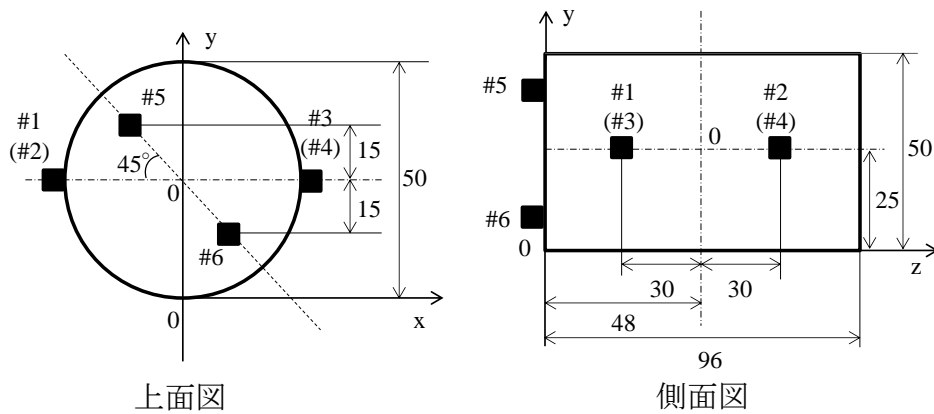
写真 3-1 実験概要図

を図 3-3 に示す。

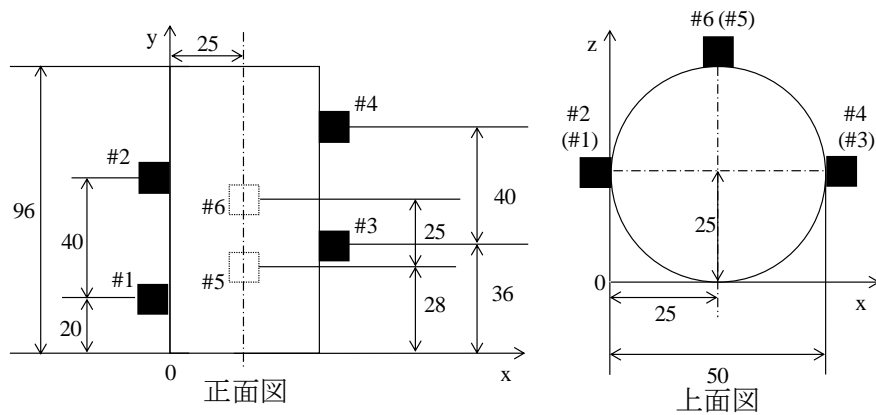
DICM によってひずみ分布を算出するため、2 台の CCD カメラを用いて、載荷過程での供試体の変形を撮影した。DICM は測定対象物表面を CCD カメラで撮影したデジタル画像を解析することにより、変形量と方向を推定する解析手法である。解析原理は測定対象物表面の計測範囲にスプレーなどで不定形ドット（ランダムパターン）を施し、測定対象物の変形前後の移動量を追跡することにより、変形量と変形方向を解析するものである。

CCD カメラは Xenoplan2.0/28（Schneider KREUZNACH 製）を用いた。計測前に校正プレートを用いて、位置および角度を変えながら 20 枚程度撮影し、画像のひずみ補正を行った。供試体の計測面には、白色のスプレーで下地を塗布し、下地の上から黒色のランダム模様を描いた。計測表面を一定の明るさに保ち、CCD カメラの撮影間隔を 10 Hz に設定し撮影を行った。

ひずみ分布の解析においてはサブセットを 51 pixel に設定した。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索し、このサブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出した。この処理を全ての小領域で繰り返すことによって全視野の変位データを得た。以上の方法により得た変形量を利用し、変形後の二点間の長さの変化を算出することで計測点のひずみを求めた。



(a) 割裂引張強度試験



(b) 圧縮強度試験

\*#はチャンネル番号を示す。

図 3-3 AE センサ配置図 (単位 : mm)

## (7) 超音波伝播速度の測定

供試体の内部構造を把握するため、供試体の短軸方向に対して超音波伝播速度 (P 波速度) を測定した。計測装置は Pundit Lab (PROCEQ 社製) を使用した。計測は供試体中心部において行った。探触子にはグリスを薄く塗布し、供試体との密着性を高めた。入力超音波は周波数 54 kHz、入力電圧 500 V とした。

### 3. 4. 解析方法

#### 3. 4. 1. ひずみエネルギーの評価<sup>17)</sup>

物体が外力の作用を受けると，外力の作用点は力の方向に指導し変形を生じる。外力とその方向の変位の関係は，外力  $P(x)$  が  $dP$  だけ増加する間に変位  $x$  が  $dx$  だけ増加するとすれば，この間，外力は

$$dU = P(x)dx + \frac{1}{2}dPdx \quad (3-3)$$

の仕事を行うが，右辺の第 2 項は高次の微小量なので省力すると，この仕事は，図 3-4 (a) の斜線部の面積で表される。このような微小量の総和をとれば，物体が  $x_1$  まで変形するまでに外力のなした仕事は

$$W = \int dU = \int_0^{x_1} P(x)dx \quad (3-4)$$

となる。この仕事は，物体内に変形のエネルギーとして蓄えられる。このエネルギーをひずみエネルギーという。図 3-4 (b) に示すように，外力と変形が正比例の関係にある時  $k$  を比例定数とすると

$$P = kx \quad (3-5)$$

の式が成立する。したがって外力のなした仕事（蓄えられるひずみエネルギー）は次式で与

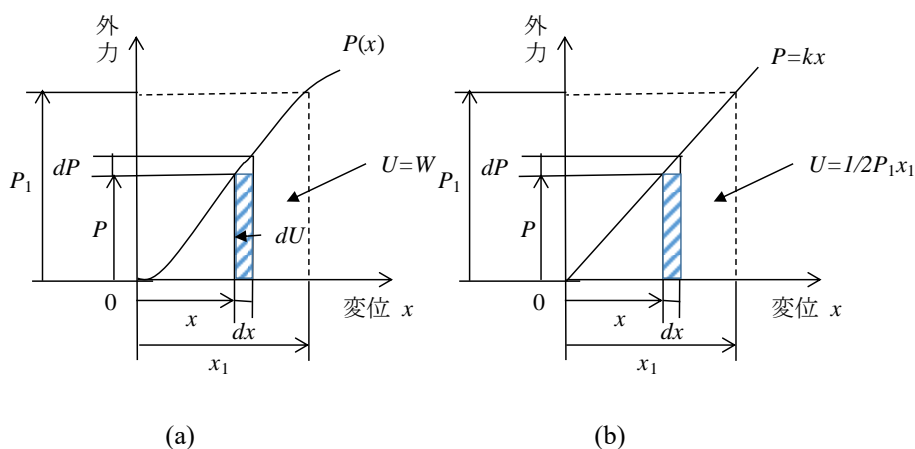


図 3-4 ひずみエネルギーの算出方法

えられる。

$$U = \int dU = \int_0^{x_1} P dx = \int_0^{x_1} k x dx = \frac{1}{2} k x_1^2 = \frac{1}{2} P_1 x_1 \quad (3-6)$$

本研究では、圧縮強度試験において、応力ひずみ曲線からひずみエネルギーを算出した。

### 3.4.2. 画像解析によるエネルギー解放率の評価

開発材料では、強度指標による評価だけでは十分ではない。破壊強度は、破壊を引き起こす最大荷重を、その部材断面が均等にあるいは滑らかな勾配をもって負担するものと仮定し、その単位面積あたりに作用する応力として定義される<sup>18)</sup>。しかしながら、脆性材料かつ多孔質材料においては、応力分布が均質ではないため、応力集中する部分からひび割れが発生し破壊に至る<sup>11)</sup>。このため、強度を補完する指標が必要である。既往研究では、破壊力学パラメータを用いて、ひび割れの進展特性をとらえる試みが行われ、その有用性が明らかになっている<sup>18)-20)</sup>。本研究では、破壊力学パラメータの一つであるエネルギー解放率を算出することで、開発材料の破壊特性を評価する。加えて、AE エネルギーを用いて、エネルギー解放率の推定を試みる。以下に、東郷<sup>21)</sup>の文献を参照し、エネルギー解放率の評価方法を示す。

図 3-5 にき裂進展に伴うポテンシャルエネルギーの変化を示す。き裂面積  $A$  のき裂を有する部材が荷重  $P$  を受けて、図 3-5 の a 点まで変化しているとする。そのときのき裂材に蓄えられるひずみエネルギー  $W_T$  は、き裂材の応力-ひずみ分布よりひずみエネルギー密度  $W$  を求め、体積積分することにより、

$$W = \int_0^{\epsilon} (\sigma_x d\epsilon_x + \sigma_y d\epsilon_y + \sigma_z d\epsilon_z + \tau_{yz} d\gamma_{yz} + \tau_{zx} d\gamma_{zx} + \tau_{xy} d\gamma_{xy})$$

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx} + \tau_{xy} \gamma_{xy}) \quad (3-7)$$

$$W_T = \iiint_V W dx dy dz \quad (3-8)$$

$$U = \int_0^\delta P d\delta = \frac{1}{2} P \delta \quad (3-9)$$
$$\Pi = W_T - U \quad (3-10)$$
$$I_0 = \text{面積 } Oab - \text{面積 } Oab = 0 \quad (3-11)$$
$$I_1 = \text{面積 } Ocd - \text{面積 } Oacd \quad (3-12)$$

67

$$\Delta\Pi = \Pi_1 - \Pi_0 = \text{面積 Ocd} - \text{面積 Oacd} = \text{面積 Oac} \quad (3-13)$$

となり。負の値になるのでポテンシャルエネルギーは解放されることがわかる。解放されるポテンシャルエネルギーは

$$-\Delta\Pi = \text{面積 Oac} \quad (3-14)$$

と表され、常に正となる。図 3-5 において、一定荷重下でのき裂進展および一定変位下でのき裂進展に対しては、それぞれ、e 点および f 点に移動することとなり、そのときの解放されるポテンシャルエネルギーは面積 Oae, 面積 Oaf で表されるが、き裂面積の増加  $\Delta A$  を限りなく小さくすると、境界条件に関係なく一定の値に収束する。これは、面積 Oae に比べて、面積 acf, 面積 ace は高次の微小量で無視できるためである。

き裂進展の単位面積あたりに解放されるポテンシャルエネルギー（エネルギー解放率）は次式で表される。

$$G = - \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta\Pi}{\Delta A} = -d \frac{d\Pi}{dA} \quad (3-15)$$

ここで、 $dA$ ：ひび割れ面積の増加量、 $d\Pi$ ：ポテンシャルエネルギーの解放量である。

本研究では、荷重と DICM による変位との関係から、図 3-5 に示すように面積 Oac を求めることでポテンシャルエネルギーを算出した。ひび割れ面積は、撮影画像を二値化処理した後、載荷前における撮影画像の二値化画像と差分することで求めた（図 3-6）。二値化

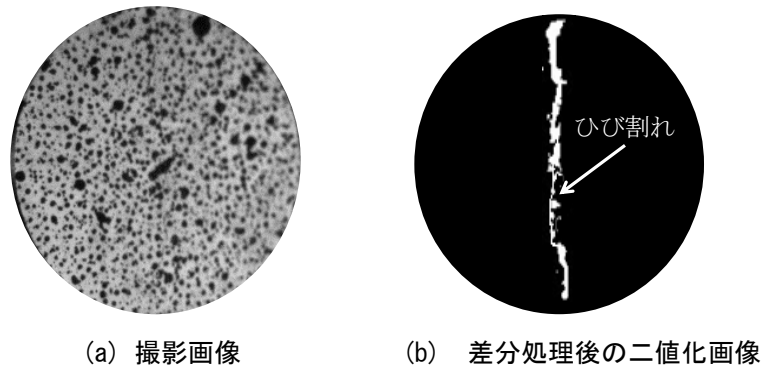


図 3-6 二値化処理によるひび割れ面積の算出方法



処理には明度を用いて、しきい値は 137 とした。差分処理は黒点とひび割れとを区別するために行った。

### 3.4.3. AE エネルギー解析

AE法により検出される弾性波は、各種波動成分が混在したものであるが、ひび割れ形成により発生する弾性波と物体に外力が作用して発生する弾性波とはその成分が異なる。AE 波動を境界要素法（BEM）により定式化すると境界 $S$ で囲まれた物体の点 $\chi$ における時刻 $t$ での変位 $u_i(\chi, t)$ は次式で表すことができる<sup>22)</sup>。

$$u_i(\chi, t) = \int_S [G_{ik}(\chi, t; \chi', t') * t_k(\chi', t') - T_{ik}(\chi, t; \chi', t') * u_k(\chi', t')] ds \quad (3-16)$$

ここで、 $t_k(\chi', t')$ ：面  $S$  上の応力ベクトル、 $u_k(\chi', t')$ ：面  $S$  上の変位ベクトル、 $G_{ik}(\chi, t; \chi', t')$ ：BEM 基本解（グリーン関数）、 $T_{ik}(\chi, t; \chi', t')$ ：グリーン関数の変位による応力ベクトル（第二種グリーン関数）である。この式（3-16）に基づく波形解析理論は Generalized Theory of Acoustic Emission と名付けられており、検出された AE が変形ないし破壊の発生機構の特性を有していることを理論的観点から明らかにしている。

しかしながら、AE 計測で検出される弾性波には、各種要因により発生した波動の反射や透過による変質や表面波が含まれている。この特徴から、小規模の試験体への AE 法の適用では、高精度の破壊源探査による破壊機構の解析は困難であり、AE パラメータを用いた破壊過程の評価および分析の有効性が認められている<sup>1)</sup>。

各種材料は微細なひび割れの発生、累積、連結、成長によって破断に至る。その際、ひび割れの発生および発達に伴い、エネルギー規模の異なる AE が発生する。AE パラメータの一つである AE 発生頻度に着目した既往研究では、一連の载荷過程において AE が検出されること自体を損傷蓄積によるエネルギー放出と捉え、AE 発生頻度と各種物性値との関連を考察している<sup>23), 24)</sup>。地震や材料破壊に起因する弾性波動は、Gutenberg-Richter 式で説明できるように、主破壊に代表される大きな規模の現象は数少なく発生し、小さな現象は数多く

発生することが明らかにされている<sup>1), 25), 26)</sup>。検出波の AE エネルギーを考慮することにより、AE 発生頻度において十分に考慮されていない検出波 1 波あたりのエネルギーレベルを反映させることができ、評価精度の向上につながると考えられる。

AE エネルギーには、次式に示す 4 つの定義が提案されている<sup>25)</sup>。

$$E_{AE} = \int_0^{T_d} a^2(t) dt \quad (3-17)$$

$$E_{AE} = \int_0^{T_d} |a(t)| dt \quad (3-18)$$

$$E_{AE} = (a_p)^2 \quad (3-19)$$

$$E_{AE} = (a_p)^2 \cdot T_d \quad (3-20)$$

ここで、 $E_{AE}$  : AE エネルギー、 $a(t)$  : AE 信号の電圧の瞬時値、 $T_d$  : 持続時間、 $a_p$  : AE 信号振幅 (AE 信号のピーク振幅) である。

加えて、AE 実効値電圧 (RMS 値 : Root Mean Square) は式 (3-21) で定義され、波形のもつパワーの相対的な値を示していると考えられている<sup>25)</sup>。注意点としては、RMS 値は時定数の影響を受けることがあげられる。特に、突発型 AE のような大振幅の AE 信号が低い発生率で生じる場合には時定数の影響を強く受け、時定数が長い場合には計測雑音レベルとの弁別が困難になることが明らかにされている<sup>27)</sup>。

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} a^2(t) dt} \quad (3-21)$$

ここで、 $a_{RMS}$  : AE 信号の実効値電圧、 $a(t)$  : AE 信号の電圧の瞬時値、 $T_d$  : 持続時間である。

本研究では、AE エネルギーを指標とした材質評価法を構築することを目的としている。解析の効率化を図るため、AE エネルギーには AE パラメータの使用を検討した。このため、まず、既往研究で提案されている AE エネルギーの中で、AE パラメータを用いても精度が低下せず有効な指標について検討した。検討方法は、AE 波から求めた AE エネルギーと AE パラメータから求めた AE エネルギーを比較した。検討ケースは上記に示した式 (3-19) から式 (3-21)

の 3 つのエネルギー指標とした。

波形データから AE エネルギーを求める際には、AE 波の包絡線面積を算出した。波形データはプリトリガー（Pre Trigger）以後を対象とした。本研究では Pre Trigger を  $256\ \mu\text{s}$  に設定した。このように算出した理由は、AE 波はしきい値を超える AE 波を入力した時間を起点として Pre Trigger で設定した時間だけさかのぼった地点から記録されるためである。

AE パラメータから AE エネルギーを求める際は、AE 信号振幅  $a_p$  は AE パラメータとして得られる最大振幅値（AMP，単位：dB）を、式（3-22）よりボルト（V）変換したものを値として用いた。

$$\text{AMP} = 20 \log(V_{\max} / 1\ \mu\text{ volt}) - \text{Preamplifier Gain in dB} \quad (3-22)$$

$$V_{\max} = 0.000001 \times 10^{\frac{\text{AMP} + \text{Preamplifier Gain}}{20}} \quad (3-23)$$

ここで、 $V_{\max}$ ：最大振幅値（V）、Preamplifier Gain in dB：プリアンプの増幅値である。本研究では Preamplifier Gain in dB を 40 dB に設定した。

AE エネルギーの比較には、もみ殻灰を混和していないセメント改良土（表 3-2 0%）において、圧縮強度試験で検出された AE 波を用いた。対象波は最大振幅値の偏りがないように任意に選択した 100 波とした。持続時間  $T_d$  が  $1024\ \mu\text{s}$  より小さく、平均周波数（A-FRQ）が 1000, 2000, 3000 kHz である波形を除いた波形を使用した。使用した AE の最大振幅値

表 3-3 AE エネルギーの比較に使用した AE 波の最大振幅値の内訳

最大振幅値 (dB)	持続時間 ( $\mu\text{s}$ )	頻度
42~49	1024 未満	28
50~59		20
60~69		31
70~79		21
80~	1024 以上	14

の内訳を表 3-3 に示す。なお、この条件にすると、セメント改良土では 77 dB 以下の AE し  
か該当しなくなった。突発型 AE の最大振幅値が大きいほど、減衰は時間を要するため持続  
時間が長くなったことに起因すると考えられる。

次に、同様なセメント改良土において、80 dB 以上の AE を含んだとき AE エネルギーの相  
関関係が変化するか検討した。最大振幅値 80 dB 以上の 14 波を加えて AE エネルギーを比較  
した。この 14 波はすべて持続時間  $T_d$  が 1024  $\mu$ s 以上だった。

### 3. 4. 4. SiGMA 解析

AEパラメータ解析の評価制度の向上には、AEの発生源位置標定が有効である。多チャン  
ネル計測でのAE波の到達時間差を用いることで、発生源からAEセンサへの距離に応じたP波  
の到達時間差が得られ、これにより発生源の空間的な位置を決定することができる<sup>28), 29)</sup>。  
加えて、発生源から放射されるAE波の振幅パターン<sup>30)</sup>、逆問題<sup>31)</sup>へと進み、AE波形から発  
生源の幾何学的情報（モーメントテンソル）を求めれば、AEの位置のみではなく、運動の  
種類や方向を決定することができる<sup>32), 33)</sup>。また、AICを用いた初動部の自動読み取り技術  
も開発されている<sup>34)</sup>。以下に、大津<sup>1)</sup>の文献を参照し、モーメントテンソル解析（SiGMA解  
析<sup>35)</sup>）についてまとめる。

SiGMA解析は、6個以上のAEセンサによりAE波形を取得し、初動の到達時間差からAE発  
生源の位置と運動方向を決定する手法である。AE波の初動振幅値と到達時間差からモーメ  
ントテンソル成分に関する線形連立方程式をつくり、成分を決定することができるもので  
ある。

モーメントテンソル  $m_{pq}$  は 2 階のテンソルで、等方性材料では、AE 波の発生源となっ  
たマイクロクラックの面が運動した方向をベクトル  $l$ ，その法線ベクトルを  $n$  とすると次  
式で表すことができる。

$$m_{pq} = (\lambda_k n_k \delta_{pq} + \mu l_p n_q + \mu l_q n_p) \Delta V \quad (3-24)$$

ここで、 $\lambda$  と  $\mu$  はラメの定数、 $\delta$  はクロネッカーのデルタ記号である。 $\Delta V$  は相対変位量をクラック面状で積分して算出される体積量である。

モーメントテンソルは2階のテンソルであることから、固有値解析を行い、主値と主方向を知ることができる。第1固有値 $e_1$ 、第2固有値 $e_2$ 、第3固有値 $e_3$ および第1固有ベクトル $e_1'$ 、第2固有ベクトル $e_2'$ 、第3固有ベクトル $e_3'$ は式 (3-25) および式 (3-26) で表される。

$$\begin{aligned} e_1 &= \mu b \left( \frac{l_k n_k}{1-2\nu} + 1 \right) \\ e_2 &= 2\mu b \nu \frac{l_k n_k}{1-2\nu} \\ e_3 &= \mu b \left( \frac{l_k n_k}{1-2\nu} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3-25)$$

$$\begin{aligned} e_1' &= l + n \\ e_2' &= l \times n \\ e_3' &= l - n \end{aligned} \quad (3-26)$$

ここで、クラック面の運動ベクトルバーガースペクトル  $\mathbf{b}$  を大きさ  $b$  と方向ベクトル  $\mathbf{l}$  の積  $\mathbf{b} = b \mathbf{l}$  とする。なお、 $\mu$  と  $\lambda$  の関係は次式から得られる。

$$\lambda = \frac{2\mu\nu}{1-2\nu} \quad (3-27)$$

モーメントテンソルの固有値は、図 3-7 に示すように、せん断成分  $X$ 、引張偏差成分  $Y$  および引張静水圧成分  $Z$  の3つの成分に分解される。各固有ベクトル方向に対応したそれぞれの固有値各成分は次式で表される。

$$\begin{aligned} X + Y + Z &= e_1 / e_1 = 1.0 \\ 0 - Y/2 + Z &= e_2 / e_1 \\ X - Y/2 + Z &= e_3 / e_1 \end{aligned} \quad (3-28)$$

本研究では、モーメントテンソル成分を決定したのちに、固有値解析を行った。せん断率

$R_s = X / (X + Y + Z)$ と定義し、固有値からせん断率  $R_s$  を算出した。大津ら<sup>36)</sup>と同様に、 $R_s$  が 40 %未満を引張ひび割れ、 $R_s$  が 60 %より大きいものをせん断ひび割れ、 $R_s$  が 40～60 %を混合型ひび割れに分類した。AE イベント定義時間は  $500 \mu s$  とした。イベント定義時間とは、発生源に最も近い AE センサでの到達時間と、その他の 5 個の AE センサとの到達時間の差である。本研究では、割裂引張強度試験で検出された AE 波を用いて SiGMA 解析を行い、AE 源の位置および破壊モードを同定した。圧縮強度試験結果に対しては、SiGMA 解析を実施せず、AE エネルギーを用いて破壊挙動を評価した。これは、圧縮载荷過程には各種の破壊運動が内在されているため、正確な運動解析ができないためである。

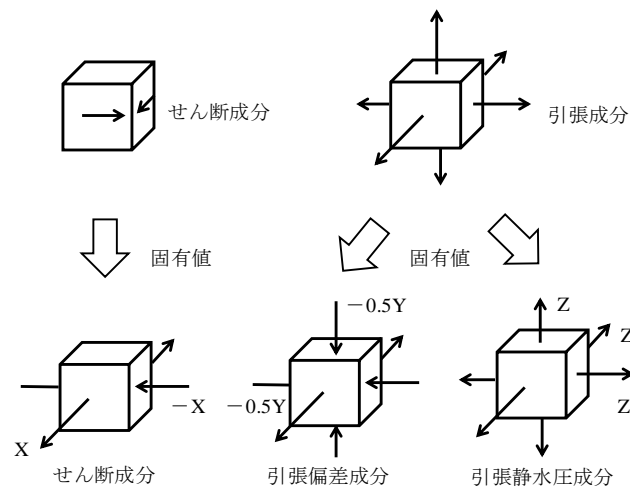


図 3-7 モーメントテンソルの固有値成分<sup>32)</sup>

### 3. 5. 結果および考察

#### 3. 5. 1. 細孔径分布評価

もみ殻灰の置換率の相違による全細孔容積と平均細孔直径の変化を図 3-8,  $10\ \mu\text{m}$  以下の細孔径分布を図 3-9, すべての細孔径分布の比較結果を図 3-10, 細孔に関する各種の数値データを表 3-4 に示す。本研究で使用したポロシメーターの分解能は  $0.1\ \text{mm}^2$  ( $0.0001\ \text{ml}$ ) である。本研究では, 試料量が  $1.2\sim 1.3\ \text{g}$  なので,  $0.00007\sim 0.00008\ \text{ml/g}$  で相違があると考えることができる。図 3-8 より, もみ殻灰の置換率が増加すると, 全細孔容積および平均細孔直径が増加することが明らかになった。細孔率では  $24\ \%$  から  $34\ \%$  と約  $10\ \%$  の相違があることが明らかになった (表 3-4)。図 3-9 より, 細孔直径が  $0.010\ \mu\text{m}$  未満では, 置換率による大きな違いは確認されなかった。ただし, 表 3-4 より置換率  $0\ \%$  および  $10\ \%$  では, ゲル空隙の割合が  $0.900\ \%$  であり, その他の置換率と比較して多いことが明らかになった。この傾向は, セメント添加量が多い上位 2 ケースで示された。水和進行によって C-S-H の C/H 比は低下し, 空隙量が減少するとともに空隙径も小さくなったと推察される。砂質土を使用したセメント改良土を対象とした既往研究においても, 細孔径分布における細孔径への移行は, 長期材齢およびセメント添加量を増加した場合に確認されたとしている<sup>37)</sup>。加えて, 置換率  $25\ \%$  以上では, 置換率  $10\ \%$  以下と比較して, 細孔直径が  $1.000\ \mu\text{m}$  以上の細孔が増加した。以上から, 置換率  $10\ \%$  以下と置換率  $25\ \%$  以上では空隙構造が異なることが明らかになった。細孔直径が  $0.050\sim 0.080\ \mu\text{m}$  および  $1.480\sim 2.200\ \mu\text{m}$  において, 置換率によらず細孔容積がピーク値を示した (図 3-9)。セメントゲルによる砂粒子間の結合は砂粒子同士の接触部分に限られているために, 砂質土を使用したセメント改良土では比較的大きなセメント添加量においても数  $10\ \mu\text{m}$  程度の大きな間隙が残存することが明らかにされている<sup>37)</sup>。置換率  $80\ \%$  では, 2 つのピーク地点ですべての置換率の中で最も細孔容積が大きかった。加えて,  $7.000\sim 10.600\ \mu\text{m}$  でも細孔容積においてピーク値を示した。置換率  $80\ \%$  では空隙構造が最も発達していると考えられる。

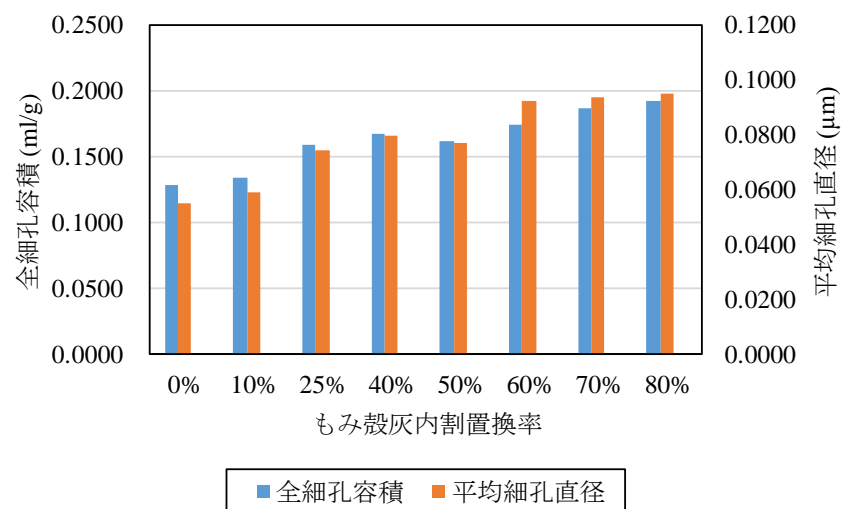


図 3-8 もみ殻灰の置換率の相違による全細孔容積と平均細孔直径の変化

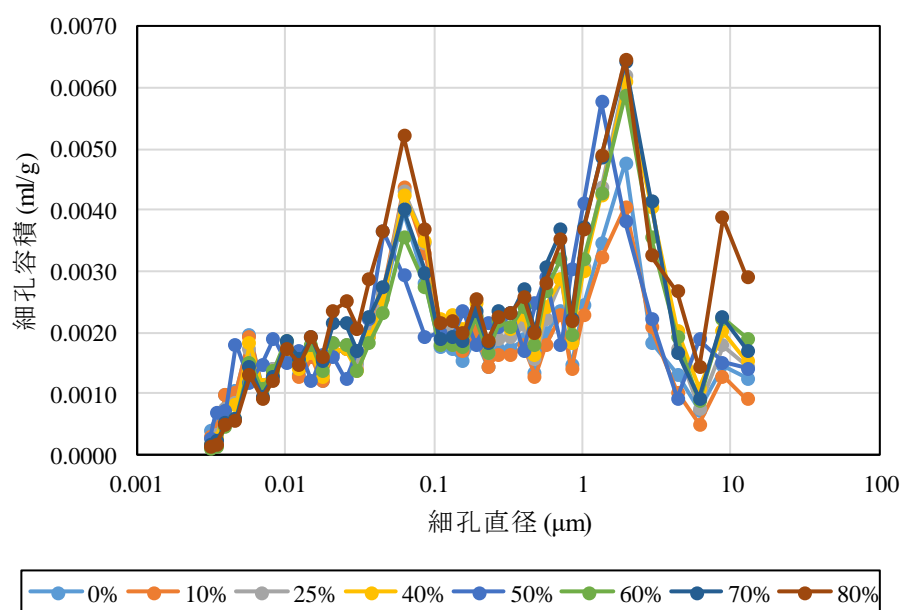


図 3-9 10 μm 以下の細孔径分布



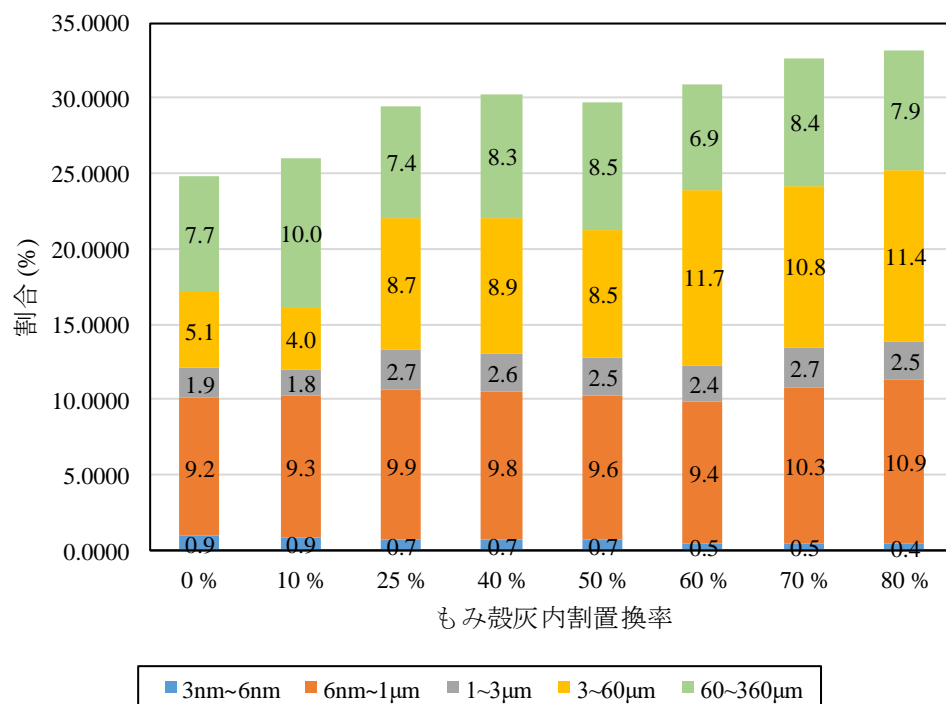


図 3-10 もみ殻灰の置換率の相違による細孔径分布の比較

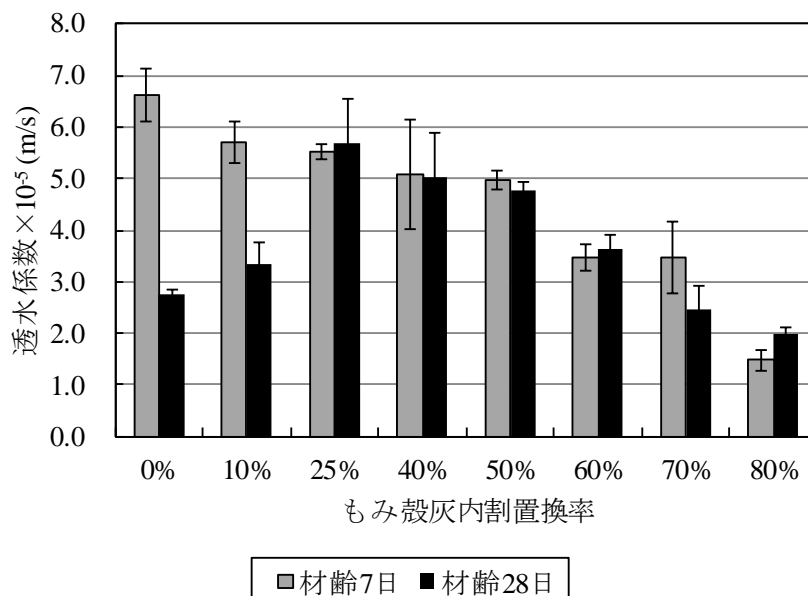
表 3-4 細孔に関する各種の数値データ

項目		もみ殻灰 内割り置換率							
		0 %	10 %	25 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
全細孔容積	(ml/g)	0.1289	0.1347	0.1601	0.1684	0.1619	0.1751	0.1873	0.1920
全細孔比表面積	(m <sup>2</sup> /g)	9.2980	9.0960	8.6040	8.4270	8.4140	7.5900	8.0030	8.0510
メディアン細孔直径 (容積基準)	(μm)	6.7675	23.7128	23.5835	30.1160	28.5958	31.2729	32.3244	24.0480
メディアン細孔直径 (比表面積基準)	(μm)	0.0071	0.0072	0.0084	0.0084	0.0082	0.0096	0.0101	0.0114
平均細孔直径	(μm)	0.0555	0.0593	0.0744	0.0799	0.0770	0.0923	0.0936	0.0954
かさ密度	(g/ml)	1.9293	1.9330	1.8392	1.7996	1.8334	1.7633	1.7416	1.7250
見かけ密度 (真密度)	(g/ml)	2.5679	2.6137	2.6068	2.5821	2.6071	2.5509	2.5851	2.5793
細孔率	(%)	24.8675	26.0451	29.4467	30.3046	29.6785	30.8754	32.6289	33.1195
ゲル空隙率	(%)	0.9265	0.8955	0.6941	0.6723	0.6788	0.4933	0.5023	0.4486
毛細管空隙率	(%)	9.1881	9.3277	9.8957	9.8315	9.5845	9.3699	10.2600	10.8946
毛管孔隙率	(%)	5.0645	4.0044	8.7249	8.9059	8.4508	11.6808	10.7745	11.3701
粗孔隙率	(%)	7.7486	10.0124	7.4384	8.3060	8.4599	6.9171	8.4080	7.8893

### 3.5.2. 透水性評価

変水位透水試験結果を図 3-11 に示す。透水係数はすべての置換率において  $10^{-5}$  m/s のオーダーであり、Cleager の式<sup>38)</sup>に従えば、微細砂から細砂の土質に属することが示された。セメントの添加量の増加による大きな違いは確認されなかった。これは、砂質土に結合材を粉体添加したことに起因すると考えられる。砂質土に結合材を粉体添加した場合、粘性土や砂質土へ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<sup>39)</sup>。既往研究では、 $\rho_t=1.7$  g/cm<sup>3</sup>、 $w_n=12$  %のセメント改良土（砂質土）の場合、変水位透水試験において、セメント添加量を 100 kg/m<sup>3</sup> から 300 kg/m<sup>3</sup> に増加しても、透水係数は約  $6.0 \times 10^{-4}$  m/s から  $9.0 \times 10^{-4}$  m/s 程度の減少にとどまったとしている<sup>39)</sup>。本研究結果においても使用土の特性および結合材の添加方法が透水係数に強く影響したと推察される。

材齢 7 日と 28 日の透水係数を比較すると、置換率 0 %および 10 %では、材齢 28 日で透水係数が 1/2 程度減少することが明らかになった。置換率 25 %以上では材齢 7 日と 28 日で透水係数に変化がみられなかった。この違いは、前項で示した細孔径分布試験結果で示し



\*エラーバーは標準誤差を示す

図 3-11 もみ殻灰置換率の相違による透水係数の変化

たとおり、置換率 10 %以下と置換率 25 %以上では空隙構造が異なることに起因すると考えられる。置換率 10 %以下で材齢 28 日において透水係数が低かったのは、水和反応が促進され、土粒子間が結合材の水和物で充填されたためだと考えられる。材齢 28 日における透水係数と気孔率（細孔径分布試験からの細孔率結果）と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<sup>11)</sup>。連続空隙量およびアスペクト比等の空隙構造の特性をさらに明らかにしていくことが課題としてあげられる。

本研究では既往研究と異なり、もみ殻灰の置換率が増加する（セメント添加量が減少する）と、透水係数が減少した。材齢 7 日では置換率 0 %から、材齢 28 日では置換率 25 %から透水係数が減少した。この減少値に相違があるかは議論が必要だが、透水係数の減少にはセメント添加量と比較してもみ殻灰量が影響を及ぼしたと考えられる。これは水分子に対して吸着力が高いというもみ殻灰の特徴<sup>40)</sup>に起因すると考えられる。先に記述したとおり、砂質土へ結合材を粉体添加した場合、セメント添加量の増加が透水係数に及ぼす影響が非常に小さいことから、本研究においてはもみ殻灰量が透水係数の減少に影響を及ぼしたと考えられる。

### 3.5.3. 保水性評価

水分特性曲線の比較結果を図 3-12 に示す。全体の傾向としては、吸引圧が大きいとき含水率が小さく、吸引圧が小さくなるにつれて間隙保水成分が増加する傾向だった。このことから、本材料の水分特性曲線は砂質土の水分特性曲線と類似していると考えられる。置換率 0 %および 10 %では pF 2.1 以後から含水率が一定となった。置換率 40 %～80 %では、0 %および 10 %と比較して、吸引圧の高い部分でも水分が保持されていることが明らかになった。初期含水率においても、置換率 0 %および 10 %、25～80 %の順で大きかった。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おり<sup>41)</sup>、このことでもみ殻灰置換量

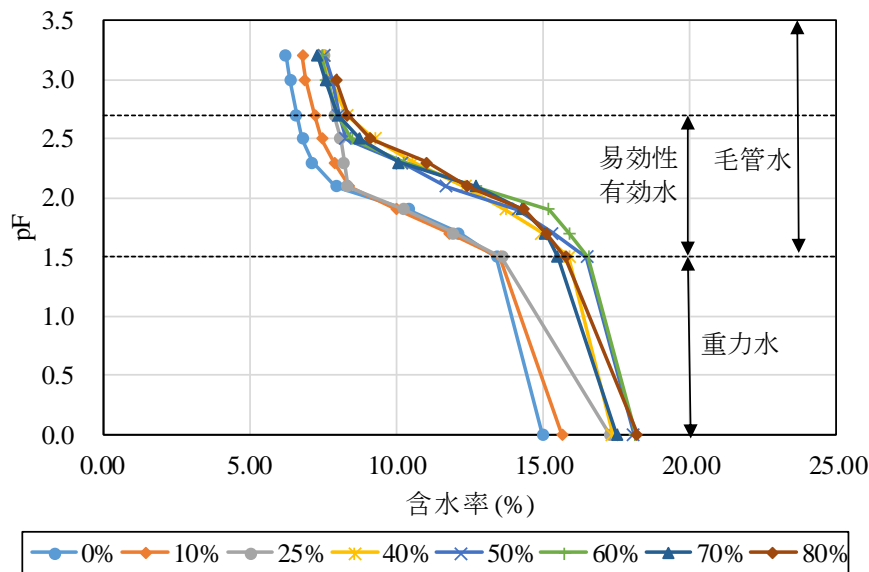


図 3-12 もみ殻灰置換率の相違による水分特性曲線の比較結果

の増加に伴って保水性が増加したと推察される。なお、もみ殻灰置換率の増加に伴う保水力の増加は、前項の透水試験結果からも示されている。ただし、水分特性曲線では、置換率 0 %および 10 %と置換率 40 %～80 %においては相違が明らかとなったが、置換率 40 %～80 %の中では明確な差異が確認できなかった。このことから、空隙構造を適切に評価することができるよりよい指標が必要だと考えられる。

#### 3.5.4. AE エネルギーの評価方法の検討

波形データから求めた AE エネルギーと AE パラメータから求めた AE エネルギーとの比較結果を、図 3-13 に示す。最大振幅値の 2 乗値および最大振幅値の 2 乗値と持続時間の積による AE エネルギーにおいて、波形データからの AE エネルギーと AE パラメータからの AE エネルギーとの決定係数が 0.9 以上と相関が高かった。一方、RMS 値においては、相関がみられなかった。RMS 値は時定数の影響を受けるため、突発型 AE のような大きな振幅の AE 信

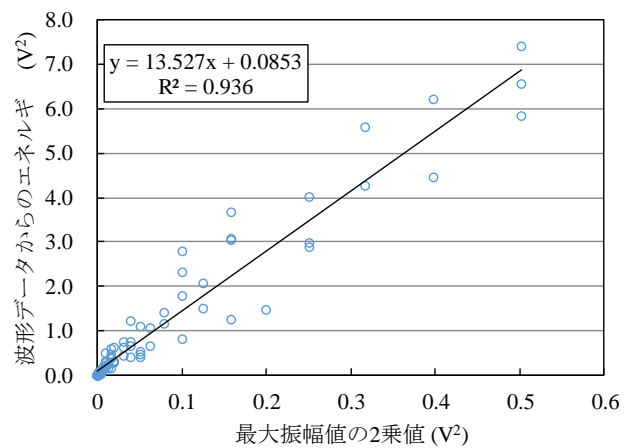
号が生じる場合には波形の特徴を捉えることが難しいと考えられる。セメント改良土では突発型 AE の発生頻度が高く、RMS 値が小さいためこのような結果を示したと考えられる。

図 3-14 に最大振幅値が 80 dB 以上の AE10 波を加えて AE エネルギーを比較した結果を示す。この検討は、上述した 80 dB 未満で相関がみられなかった RMS 値においては行わなかった。80 dB 以上の AE を加えると決定係数が 0.8 程度に減少し、相関が低くなった。80 dB 以上では、AE パラメータで得られた値と波形データから得られた最大振幅値との差が大きくなるためだと考えられる。このことについて、AE パラメータの最大振幅値と波形データの最大振幅値を比較した（図 3-15）。検討の結果、AE パラメータの最大振幅値と波形データの最大振幅値は線形関係ではないことが明らかになった。最大振幅値が 1 V（80 dB）以下では、AE パラメータでの最大振幅値は波形データの最大振幅値より小さく、最大振幅値が 1 V（80dB）以上では、AE パラメータから得られた最大振幅値は波形データの最大振幅値より大きく評価されることが明らかになった。特に、1 V 以上の時には AE パラメータで最大振幅値を最大 7 倍程度まで過大に評価してしまうことが明らかになった。

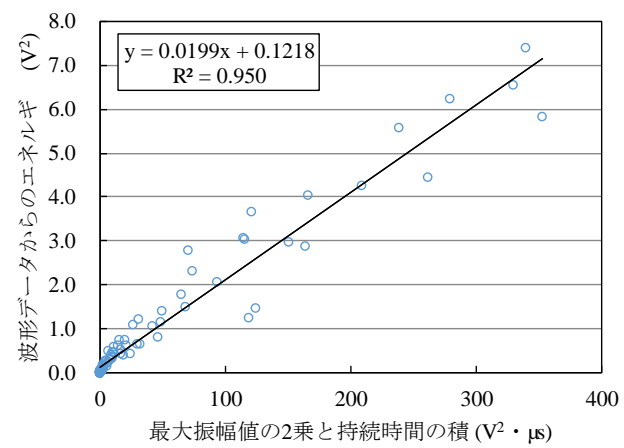
以上の結果を踏まえて、本研究では、AE パラメータを用いた AE エネルギーの算出には、相関が最も高かった最大振幅値の 2 乗値を用いることとした。加えて、AE パラメータから得られた最大振幅値と波形データの最大振幅値との差が大きかったことから、AE パラメータから得られた最大振幅値を次式に示す最小二乗法による指数近似曲線に変換した値を使用した。

$$V = 0.9854 V_{amp}^{0.5066} \quad (3-29)$$

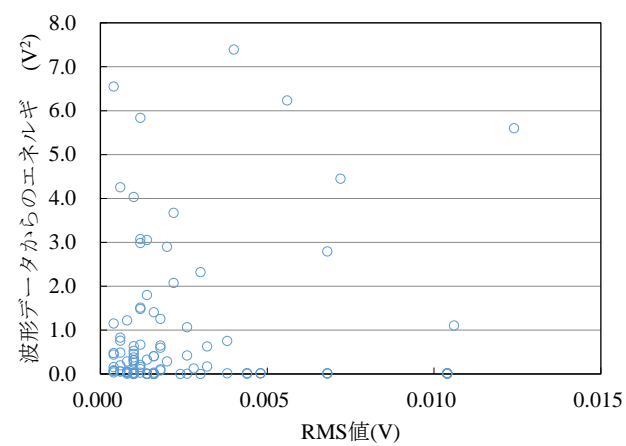
ここで、 $V_{amp}$ ：AE パラメータから得られた最大振幅値（V）である。



(a) 最大振幅値の 2 乗値

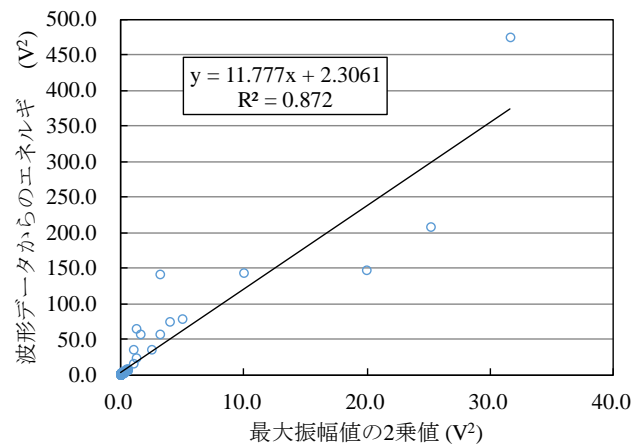


(b) 最大振幅値の 2 乗値と持続時間の積

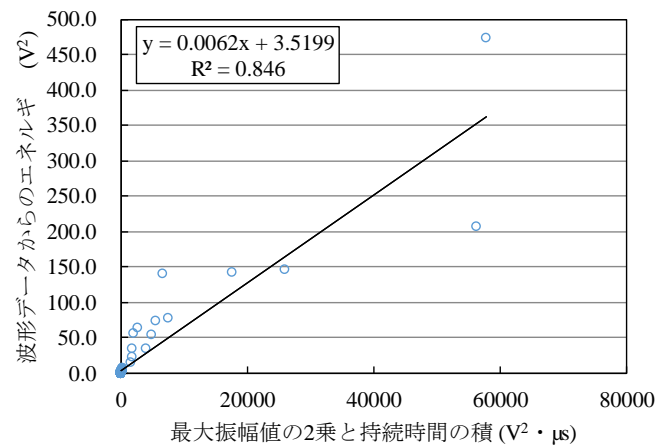


(c) RMS 値

図 3-13 波形データから算出した AE エネルギーと AE パラメータから算出した AE エネルギーとの比較結果



(a) 最大振幅値の 2 乗値



(b) 最大振幅値の 2 乗値と持続時間の積

図 3-14 波形データから算出した AE エネルギーと AE パラメータから算出した AE エネルギーとの比較結果 (80 dB 以上の AE 波を含んだとき)

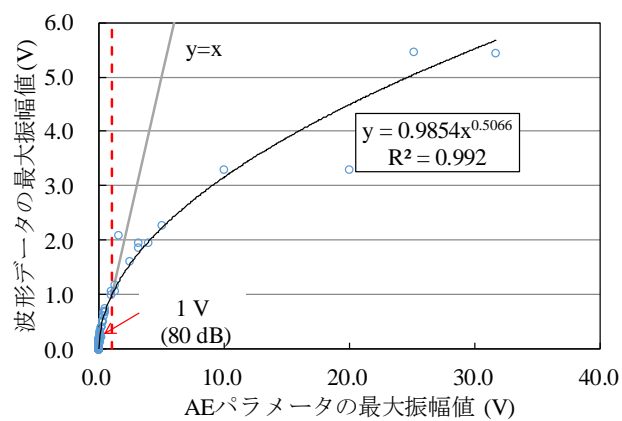


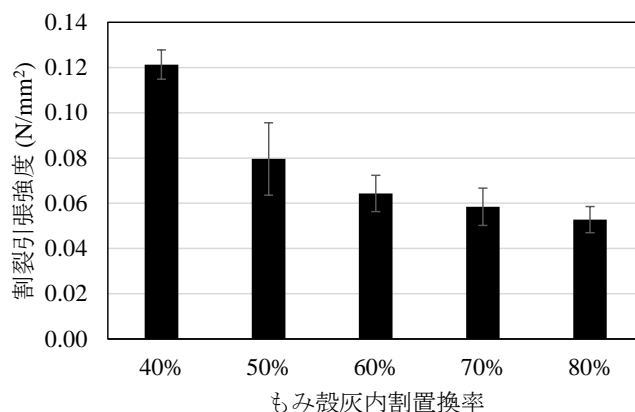
図 3-15 波形データおよび AE パラメータの最大振幅値の比較結果



### 3.5.5. 割裂引張応力場における破壊力学指標の推定<sup>7), 42)</sup>

#### (1) 応力ひずみ曲線による力学特性の評価

本研究では、材齢 28 日においてもみ殻灰の置換率が異なる 5 ケースで割裂引張強度試験を実施した。図 3-16 にもみ殻灰の置換率の相違による割裂引張強度の比較結果を示す。材齢 28 日での割裂引張強度は、0.05～0.12 N/mm<sup>2</sup>を示し、もみ殻灰置換率の増加に伴って、割裂引張強度が低下した。割裂引張強度は圧縮強度の約 1/10 だった。そこで、図 3-17 にもみ殻灰置換率 0 %のときの応力ひずみ曲線を示す。図 3-18 に DICM による横ひずみ分布および SiGMA 解析結果を示す。応力ひずみ曲線において、ひずみは供試体中心部および中心



\*エラーバーは標準誤差を示す

図 3-16 もみ殻灰置換率の相違による割裂引張強度の比較(材齢 28 日)

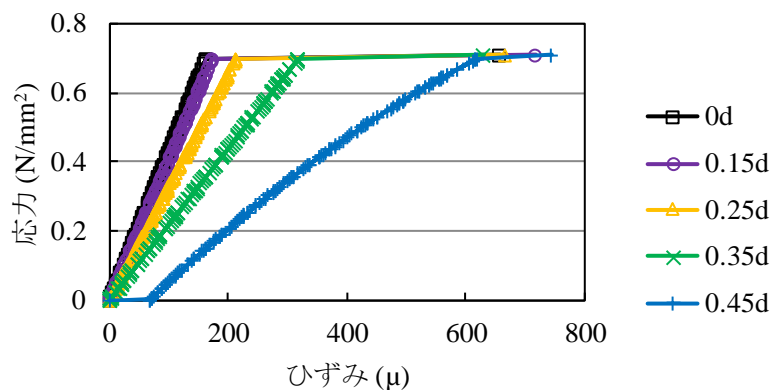


図 3-17 DICM で検出した応力ひずみ曲線(もみ殻灰無混和サンプル)

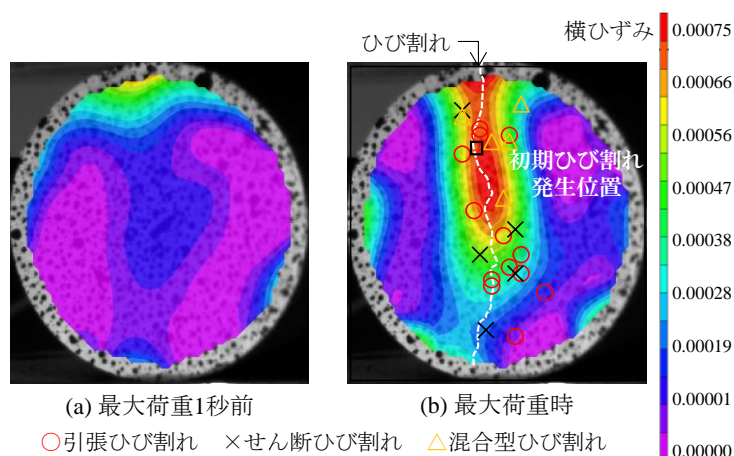


図 3-18 DICM による横ひずみ分布と SiGMA 解析結果

部から  $0.15d$ ,  $0.25d$ ,  $0.35d$ ,  $0.45d$  ( $d$ : 供試体直径) 離れた 4 点を DICM より求めた。

応力  $\sigma$  は次式より算出した。

$$\sigma = \frac{2p}{\pi dl} \quad (3-30)$$

ここで、 $p$ : 荷重,  $d$ : 供試体直径,  $l$ : 供試体長さである。

図 3-17 および図 3-18 より載荷面上の位置によってひずみ分布が異なることが確認された。供試体中心から  $0.45d$  離れた載荷板付近において、載荷初期にひずみが顕著に大きくなった。コンクリートを用いた既往の研究においても同様に、載荷板付近での塑性化領域の形成が載荷初期に認められている<sup>36), 43), 44)</sup>。これは載荷板付近で大きな圧縮応力分布が作用したためだと推察される。

## (2) AE エネルギーを用いたひび割れ挙動の評価

画像解析結果より、ひび割れは供試体中心から  $0.25 \sim 0.30d$  離れた位置で発生した (図 3-18)。この位置では SiGMA 解析より引張ひび割れが卓越することが明らかになった。二値化処理の結果、最大荷重時のひび割れ幅は  $0.35 \text{ mm}$ 、ひび割れ長さは  $1.02 \text{ mm}$  だった。ひび割れの発生位置は既往研究と類似した結果を示した。川上<sup>45)</sup>や上田ら<sup>46)</sup>の結果によれば、供試体断面中心から  $0.3 \sim 0.4d$  付近で破壊が開始するとしている。本実験結果では既往研究

と比較して供試体中心部からひび割れが発生した。これは寸法効果に起因すると推察される。既往研究より供試体の破壊挙動と寸法効果との関連が指摘されており、AE イベントが直径の増加に伴い載荷面付近で集中することが報告されている<sup>47)</sup>。

図 3-19 に AE エネルギーとエネルギー解放率の関係を示す。図 3-20 に検出波を示す。エネルギー解放率が増加する 0.5 秒前に、最大振幅値 80 dB 以上の AE 波が検出され（図 3-20 b）、AE エネルギーが急増することが明らかになった。このとき、引張ひび割れが卓越することが確認された。加えて、エネルギー解放率の増加以前（載荷開始 60～70 秒後）に、AE エネル

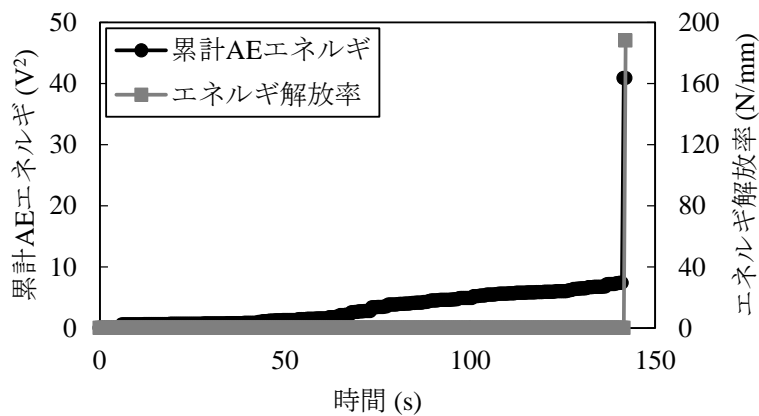


図 3-19 AE エネルギーとエネルギー解放率との関係

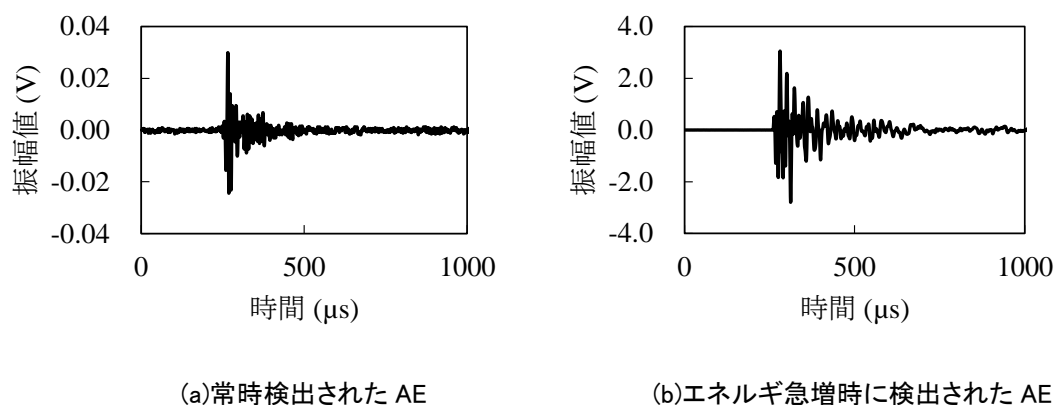


図 3-20 検出された AE 波形の変化

ギが増加した（図 3-19）。このときにも、SIGMA 解析より引張ひび割れの卓越が確認された。このことから、供試体内部または画像解析では判別できないひび割れを AE 計測によって検出できたと考えられる。簡便に破壊力学パラメータを推定する方法が求められている。既往研究では、ひずみゲージによるひずみ場の測定結果から推定する手法（例えば、黒崎ら<sup>48)</sup>）や、画像解析による変位量の測定結果から推定する手法（例えば、館石ら<sup>49)</sup>）が提案されている。本実験結果から、AE エネルギーはエネルギー解放率を推定する指標として有効であることが明らかになった。

次に、式 (3-31) に示す AE 発生割合  $f_e(t)$  を定義し、時系列変化における一次モーメント（重心位置）を算出した。本研究では、単位時間あたりの AE エネルギーとして評価した。

$$f_e(t)\Delta t = \frac{\Delta E_{AE}(t)}{E_{AE}} \quad (3-31)$$

ここで、 $E_{AE}$  は AE エネルギーを示す。

図 3-21 に割裂引張強度と AE エネルギーの重心位置の関係を示す。図 3-21 の横軸である AE エネルギーの重心位置は最大荷重時を 1.0 とした相対値で表した。AE エネルギーの重心位置は、全体の傾向として、置換率が高いほど载荷初期に変化し、低応力下での顕著な AE エネルギー放出が明らかになった。同強度のとき置換率が高いほど重心位置が载荷後期となることが示唆された。これはもみ殻灰の置換率によって空隙構造が変化したためだと考えられ

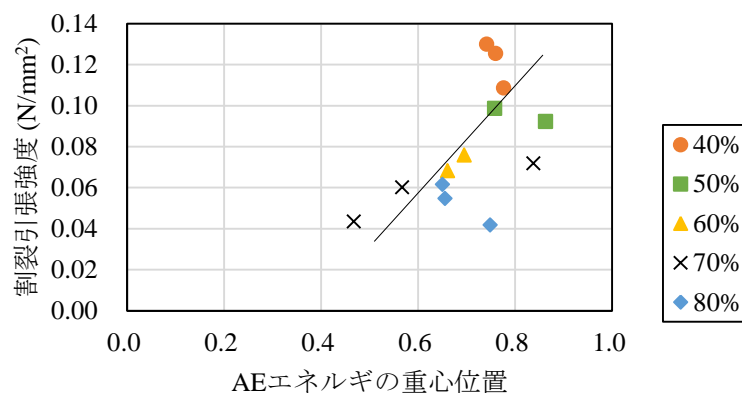


図 3-21 割裂引張強度と AE エネルギー重心位置の関係

る。

以上のことから、セメント改良土の材質の相違は、AE エネルギー放出を変質させることが明らかになった。AE エネルギー特性を用いることで精緻な材質評価が可能になると考えられる。緑化基盤造成後の長期耐久性を議論するには、強度特性に加えて、各種応力場における AE エネルギー指標を計測することでひび割れの発達過程や破壊力学指標の推定が可能になると推察される。

### 3.5.6. 圧縮応力場における力学指標の推定

#### (1) 応力ひずみ曲線による力学特性の評価

もみ殻灰内割置換率の相違による圧縮強度の比較結果を図 3-22, もみ殻灰置換率と材齢 7 日から 28 日での圧縮強度の増加率との関係を図 3-23, ひずみエネルギーと圧縮強度の関係を図 3-24, 材齢 7 日および 28 日における応力ひずみ曲線より求められた力学特性を表 3-5 に示す。

材齢 7 日での圧縮強度は  $0.13 \sim 1.42 \text{ N/mm}^2$ , 材齢 28 日での圧縮強度は  $0.39 \sim 2.12 \text{ N/mm}^2$  を示し, もみ殻灰置換率の増加に伴って圧縮強度が低下した (図 3-22)。圧縮強度の増加率は, 置換率 0 % から 40 % にかけて低下し, 置換率 50 % 以上から 2.50 倍以上に急増した (図 3-22)。中・長期の強度の増加はポゾラン反応性物質の特徴であることから, 置換率 50 % 以上ではポゾラン反応によって圧縮強度が増加したと考えられる。なお, 既往研究において, もみ殻灰で置換したケースでは, 無混和やフライアッシュで置換したケースと比較して, 初期材齢での圧縮強度が増加し, 長期材齢での強度も無混和のときより高い値を示すことが報告されている<sup>50)~54)</sup>。加えて, Salas らは, もみ殻灰を添加したコンクリートにおいて, もみ殻灰の置換率を変化させて圧縮試験を行い, 最大圧縮強度を示す置換率が存在している<sup>55)</sup>。本研究においても, もみ殻灰の置換率が増加した 50 % 以上で, ポゾラン反応によって圧縮強度が増加したと考えられる。置換率 50~80 % の圧縮強度を比較すると, 置換率 60 % で最大値を示した。細孔径分布試験より, 置換率 50~80 % ではゲル空隙率に変化が見られなかった。一方で, 粗空隙率においては 60 % で最小値を示した。このことから, 水和反応やポゾラン反応が促進された場合, 10~12 nm 以下の空隙量が減少することが報告されている<sup>56), 57)</sup>。このことから, 置換率 60 % において圧縮強度が増加した主要因は, 水和反応やポゾラン反応による化学的作用ではなく, 締固めが最適含水比近傍となったためだと推察される。図 3-24 より, 圧縮強度とひずみエネルギーの間には正の相関があることが確認された。回帰分析の結果, ひずみエネルギーは圧縮強度に対して 1 % 水準で有意であること

が示された。同一強度でも、材齢 28 日の方が材齢 7 日よりひずみエネルギーが小さかった。圧縮強度の増加に伴い、その傾向は顕著に示された。この傾向は材齢の経過に伴い硬化が促進したためだと推察される。

表 3-5 応力ひずみ曲線より求められた力学特性

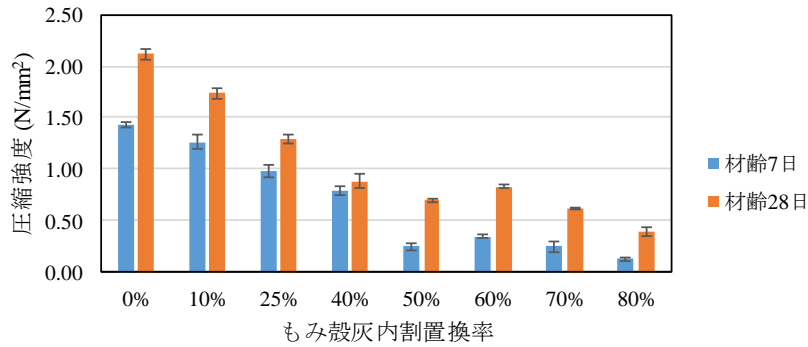
(a) 材齢 7 日					
もみ殻灰 内割置換率	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大ひずみ (μ)	初期接線 弾性係数 (MPa)	割線 弾性係数 (MPa)	ひずみ エネルギー (J)
0 %	1.42	9,253	99	155	1.28
10 %	1.26	10,035	187	138	1.25
25 %	0.98	7,144	207	140	0.69
40 %	0.79	10,395	113	83	0.80
50 %	0.25	3,477	- <sup>*2</sup>	148	0.14
60 %	0.35	7,451	70	51	0.25
70 %	0.25	4,773	- <sup>*2</sup>	53	0.13
80 %	0.13	4,581	- <sup>*2</sup>	94	0.03

(b) 材齢 28 日					
もみ殻灰 内割置換率	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大ひずみ (μ)	初期接線 弾性係数 (MPa)	割線 弾性係数 (MPa)	ひずみ エネルギー (J)
0 %	2.12	7,276	379	292	1.47
10 %	1.73	6,780	382	259	1.13
25 %	1.29	6,042	426	214	0.75
40 %	0.88	5,907	275	151	0.50
50 %	0.69	4,012	305	174	0.27
60 %	0.83	5,257	268	158	0.42
70 %	0.61	6,665	174	96	0.39
80 %	0.39	6,045	82	63	0.23

\* 表中の数値は平均値を示す。

<sup>\*2</sup> 応力-ひずみ曲線の不具合により算出されたエラー値は除く。



\*エラーバーは標準誤差を示す。

図 3-22 もみ殻灰内割置換率の相違による圧縮強度の比較結果

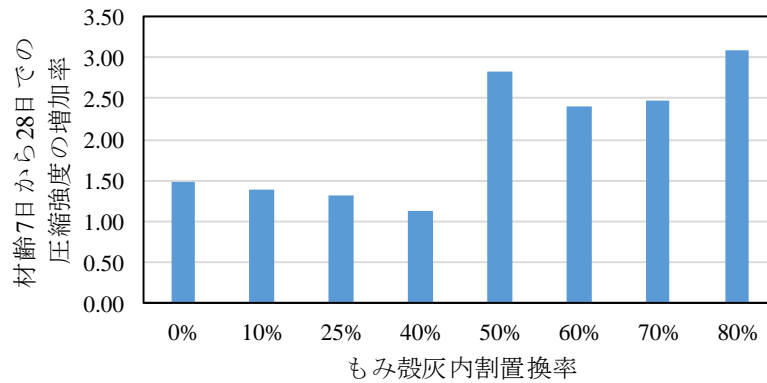
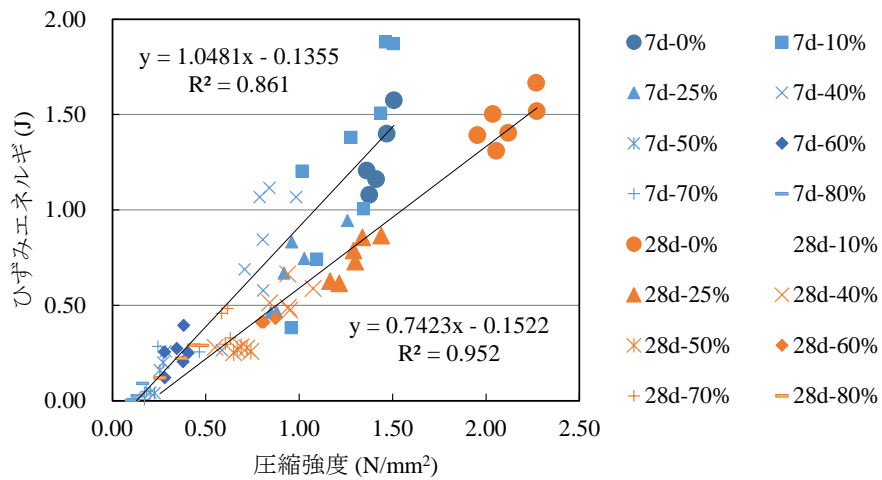


図 3-23 もみ殻灰内割置換率と材齢 7 日から 28 日での圧縮強度の増加率との関係



\*凡例の 7d は材齢 7 日，28d は材齢 28 日を示す。

図 3-24 圧縮強度とひずみエネルギーとの関係



## (2) デジタル画像相関法による圧縮破壊特性の考察

圧縮载荷過程において、ひずみは供試体全体に共通するひずみ、損傷領域内の平均負荷ひずみ（圧縮割裂ひび割れ）およびせん断帯などによる局所変形（局所化したせん断ひび割れ）の 3 つの成分から構成できると考えられている<sup>58)</sup>。本研究では、DICM により y 軸（鉛直）方向および x 軸（水平）方向の 3 つのひずみ分布から、開発材料の破壊挙動を考察した。なお、せん断方向のひずみは、x 軸および y 軸方向のひずみと比較して約 1/10 以上小さかったため、解析の対象にしなかった。高さ 100 mm の供試体を 10 等分し、各々の高さでのひずみ分布を求めた。図 3-25 および図 3-26 に、もみ殻灰の内割置換率 0 %および 80 %の時の DICM による y 軸方向のひずみ分布と供試体高さごとの y 軸方向のひずみ量の変化を、図 3-27 および図 3-28 に x 軸方向のひずみ分布と供試体高さごとの x 軸方向のひずみ量の変化を示す。y 軸方向のひずみ分布を比較すると、もみ殻灰の置換率によらず、载荷初期から供試体上部でひずみが大きいことが明らかになった。これは締固めの影響だと考えられる。既往研究より、地盤材料において、締固め方法や含水比によって強度や変形特性が大きく変化することが明らかにされている<sup>59), 60)</sup>。特に、本研究で実施したような動的締固めでは静的締固めと比較して、土構造がランダム配列を有し、各層での力学特性に違いが生じやすいことが指摘されている<sup>61), 62)</sup>。本研究では、3 層に分けて締固めを行ったため、供試体上部が最も空隙が多くひずみが大きくなったと推察される。一方、x 軸方向のひずみは、供試体下部では置換率による変化は認められなかったが、供試体上部では置換率によって変化することが示唆された。供試体下部では、x 軸方向のひずみは、置換率によらず応力レベル 80 %程度で下部 1/3 の位置から大きくなり破壊に至った。供試体上部では、置換率 80 %では、x 軸方向のひずみは载荷初期から増加することが明らかになった。この傾向は置換率 0 %および 10 %では示されず、置換率 25 %以上で示された。細孔径分布試験より置換率 10 %以下と 25 %以上では空隙構造が異なることが示唆されており、置換率 25 %以上では、空隙構造が発達していたため供試体全体で破壊が進行したと考えられる。

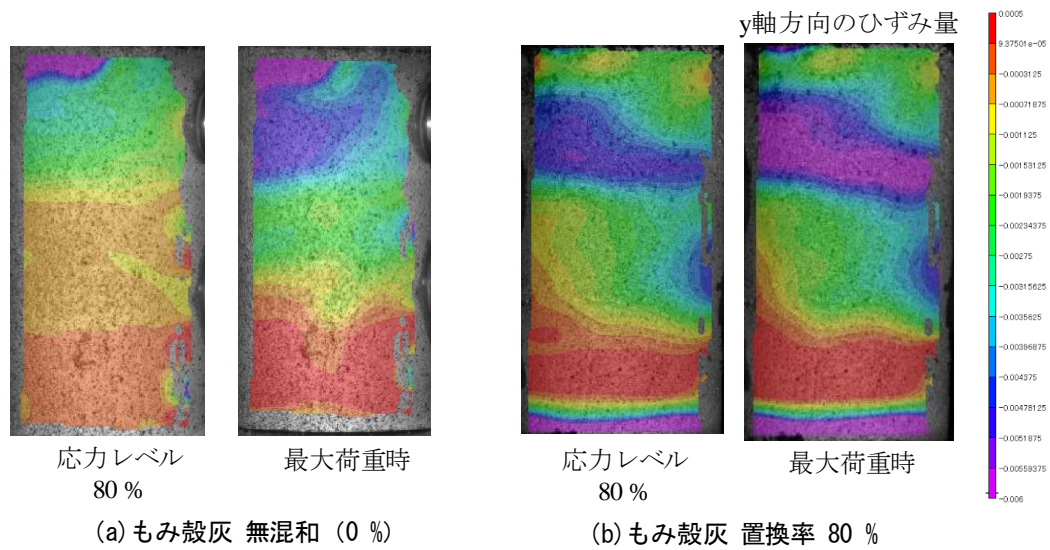


図 3-25 DICM による y 軸方向のひずみ分布

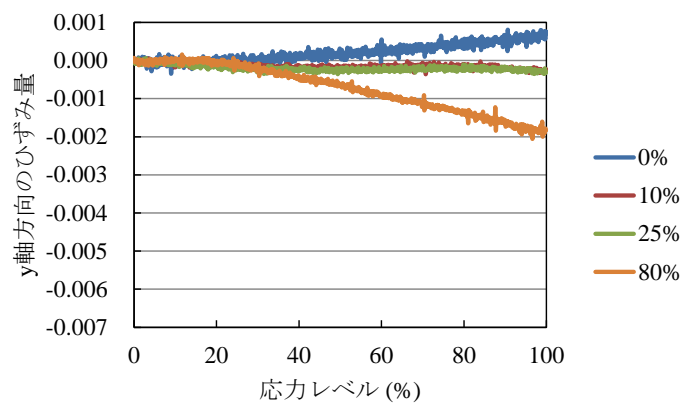
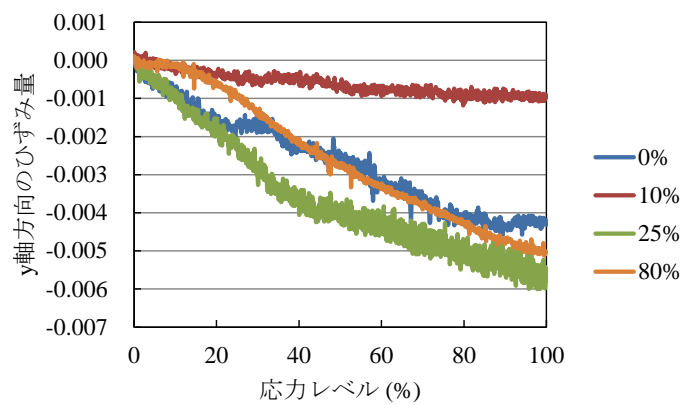


図 3-26 応力レベルに伴う y 軸方向のひずみ量の変化

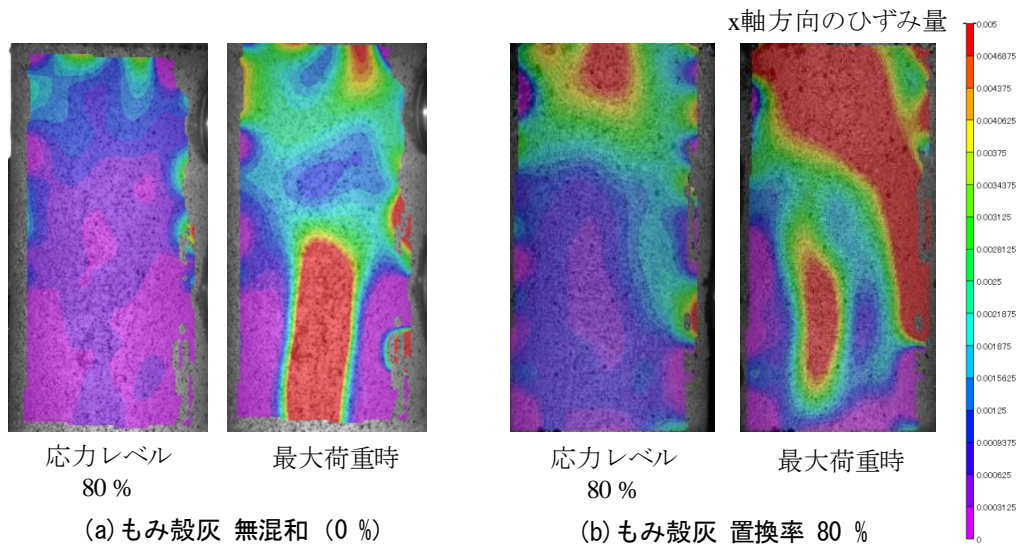


図 3-27 DICM による x 軸方向のひずみ分布

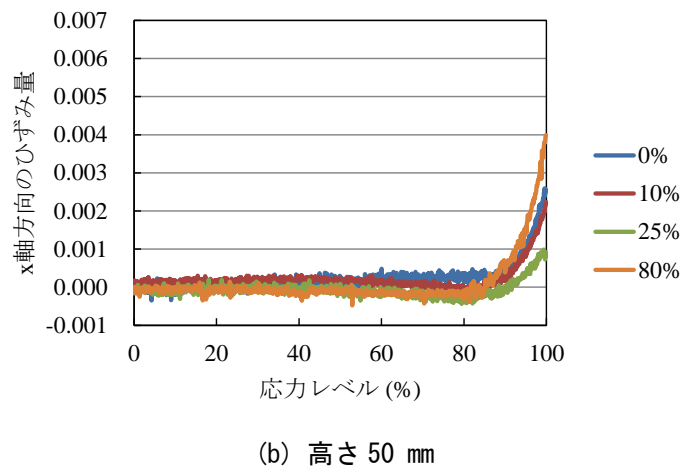
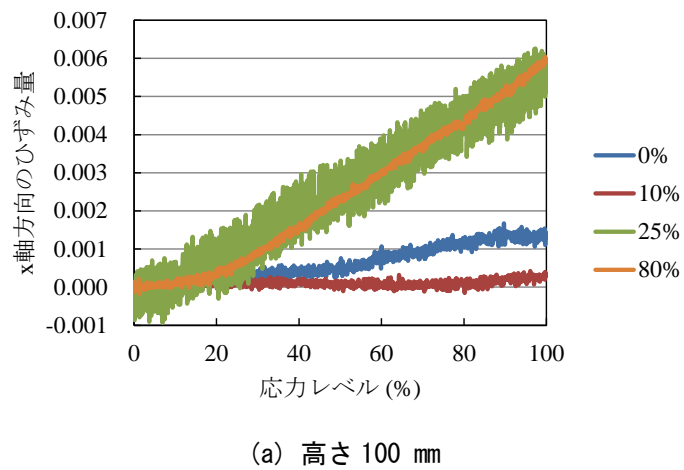


図 3-28 応力レベルに伴う x 軸方向のひずみ量の変化

### (3) AE エネルギーを用いた材質評価

本研究では AE エネルギーを用いた材質評価を試みた。図 3-29 に材齢 28 日での累積 AE エネルギーと圧縮強度の関係を示す。累積 AE エネルギーと圧縮強度には正の相関があり，単回帰分析から 1 %水準で示された。累積 AE エネルギーは，置換率が増加するほど減少した。図 3-30 に P 波速度と累積 AE エネルギーとの関係を示す。P 波速度と累積 AE エネルギーの間には 1 %水準で正の相関があることが明らかになった。P 波速度の相違は，供試体内部の空隙構造に

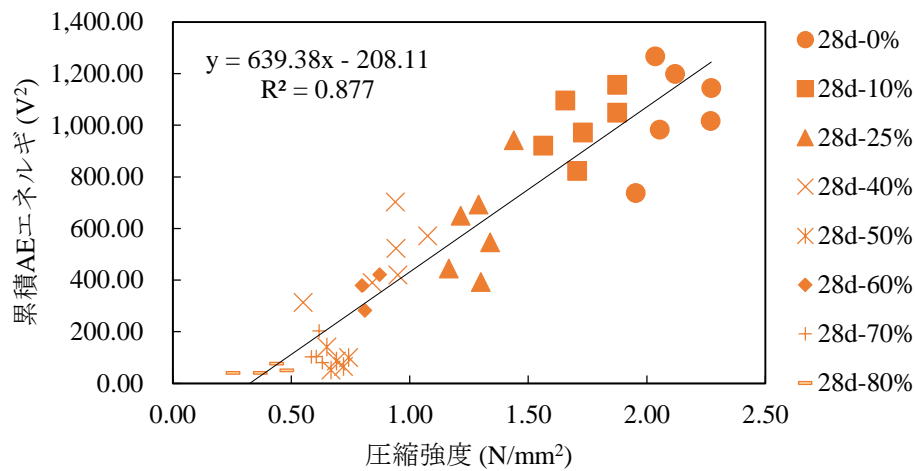


図 3-29 材齢 28 日での累積 AE エネルギーと圧縮強度の関係

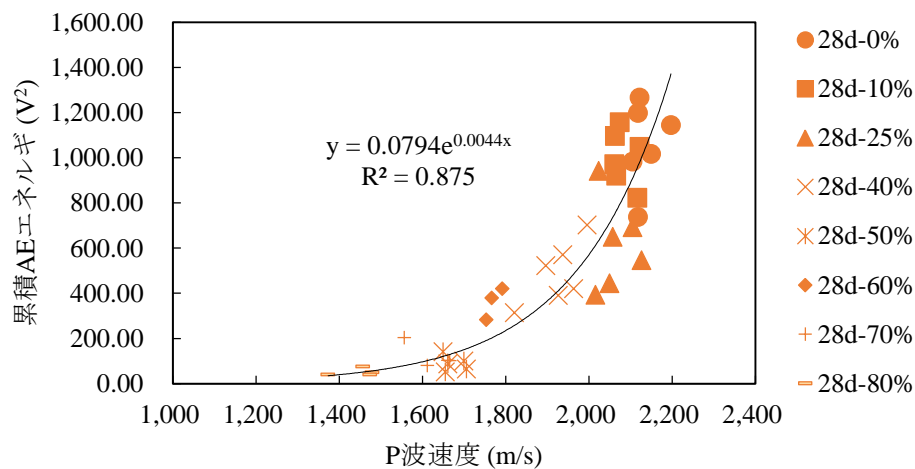


図 3-30 累積 AE エネルギーと P 波速度の関係

起因すると考えられる。物体中の音波伝播特性には音響インピーダンス  $Z$  が指標として用いられる。 $Z$  は次式で求められる<sup>63)</sup>。

$$Z = \rho V \quad (3-32)$$

ここで、 $\rho$  : 物質の密度,  $V$  : 音速を示す。

上式より開発材料および空気の音響インピーダンスを求めると、開発材料は  $2.5 \sim 4.0 \times 10^6$  Pa・s/m<sup>3</sup>, 空気は  $4.0 \times 10^2$  Pa・s/m<sup>3</sup> となり著しく異なることが示された。したがって、開発材料中に存在する空隙は相互に音波が伝播しないと考えられる。

空隙構造を代表する指標である空隙率と圧縮強度、割線弾性係数および累積 AE エネルギーとの関係を考察した。図 3-31 に空隙率と圧縮強度、図 3-32 に空隙率と割線弾性係数、図 3-33 に空隙率と累積 AE エネルギーとの関係を示す。空隙率と圧縮強度および空隙率と割線弾性係数には負の相関が確認された。多孔質体の圧縮強度の気孔率依存性については多数の実験が行われており、圧縮強度  $\sigma$  と空隙率  $P$  との間には、一次式や指数式の関係があることが明らかにされている<sup>11), 64)</sup>。

$$\sigma = \sigma_0(1 - aP) \quad (3-33)$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-aP) \quad (3-34)$$

ここで、 $\sigma_0$  :  $P=0$  における強度もしくは実質部分の強度,  $a, \alpha$  : 正の定数である。同様に空隙率と割線弾性係数との間にも、上式と類似した関係があることが明らかにされている<sup>11)</sup>。本実験結果はこれらの既往研究と一致することが示された。割線弾性係数は、体積についてほぼ加算的な物理量であることから、圧縮強度と空隙率との関係より相関が高かったと考えられる。一方、空隙率と累積 AE エネルギーについては、空隙率と圧縮強度や割線弾性係数との関係と比較して相関が低かった。これはもみ殻灰置換率 50 %の累積 AE エネルギーが低かったためである。このことから、累積 AE エネルギーは、空隙率のみに依存していないと推察される。

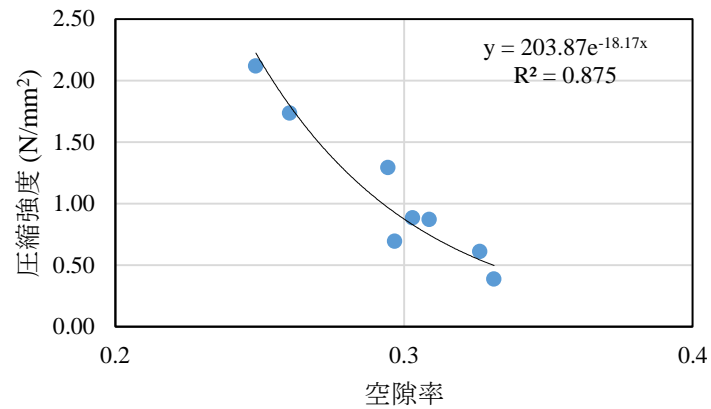


図 3-31 空隙率と圧縮強度の関係

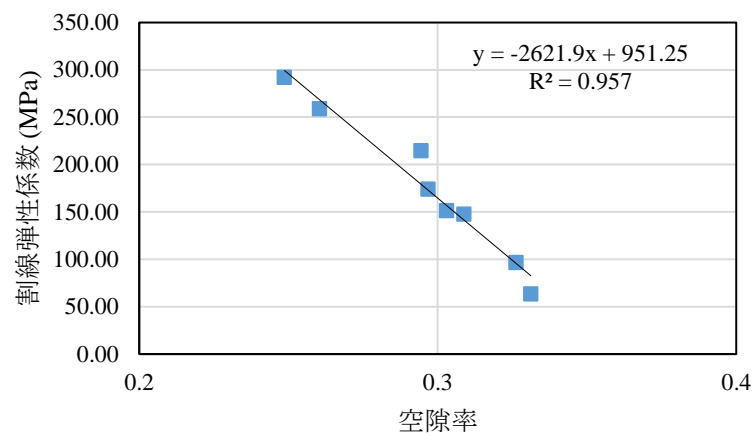


図 3-32 空隙率と割線弾性係数の関係

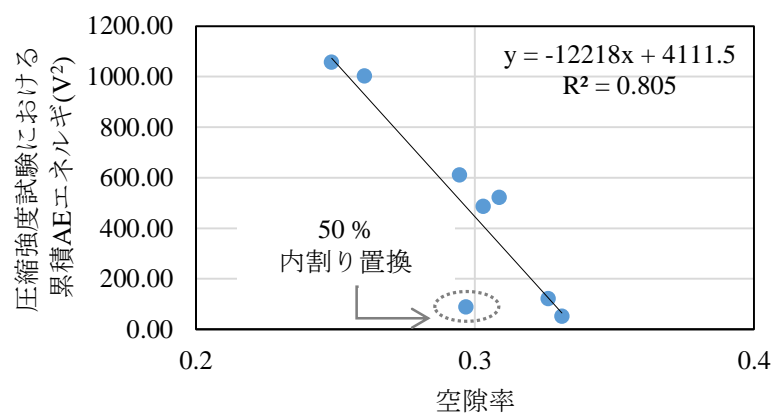


図 3-33 空隙率と累積 AE エネルギーの関係

そこで、累積 AE エネルギーと多孔質材料の結合力の積の関係を考察した。多孔質ペレットの圧縮強度  $\sigma$  と空隙率  $P$  との関係は次式で表される<sup>65)</sup>。

$$\sigma = \frac{(1-P)kF}{\pi d^2} \quad (3-35)$$

ここで、 $k$ ：他の粒子との接点数、 $F$ ：接触点での結合力、 $d$ ：構成粒子の直径である。本研究では上式を変形して、他の粒子との接点数  $k$  と接触点での結合力  $F$  との積を求めた。なお、構成粒子の直径  $d$  は 50 % 粒径である 0.69 mm を用いた。図 3-34 に累積 AE エネルギーと他の粒子との接点数  $k$  と接触点での結合力  $F$  との積の関係を示す。この 2 つの指標には、回帰分析 1 % 水準で正の相関があることが明らかになった。このことから、累積 AE エネルギーは多孔質材料の結合力を表す指標として有効であることが明らかになった。この結合力は、空隙率や結合材強度を合わせた指標であり、構造材料の材質評価指標として重要である。例えば、ポーラスコンクリートにおいては、主に空隙率と結合材強度によって耐久性が決定されることが明らかにされている<sup>66)~68)</sup>。圧縮強度の推定式として次式が提案されている<sup>67), 68)</sup>。

$$\sigma = A \exp(-Bx) \quad (3-36)$$

ここで、 $\sigma$ ：圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $A$ ：結合材強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $B$ ：実験定数、 $x$ ：全空隙率 (%)

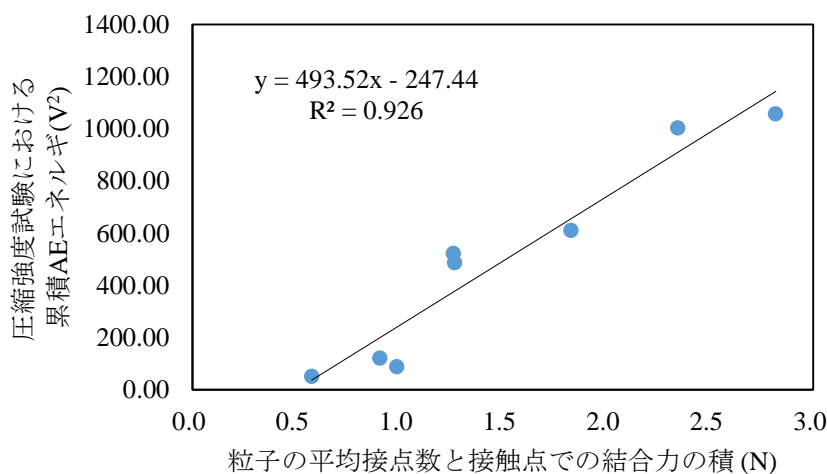


図 3-34 累積 AE エネルギーと他の粒子との接点数  $k$  と接触点での結合力  $F$  との積の関係

を示す。ポーラスコンクリートの規準化や実用化にむけての課題として、空隙率や結合材強度といった材質を定量的かつ非破壊で評価する手法の確立が必要であることが指摘されている<sup>66)</sup>。本研究で扱う構造材料もポーラスコンクリートと同様に多孔質材料であり、その空隙率や結合材強度といった材質評価手法を検討することが実用化に向けての重要な課題であると考えられる。本実験結果より、圧縮強度試験の際に AE エネルギーに着目することで詳細に材質を評価できることが明らかになった。このことから、材料の適切な維持管理につながると考えられる。



### 3.6. まとめ

第3章では、もみ殻灰を内割り置換したセメント改良土を対象に、空隙構造と圧縮および割裂破壊特性を明らかにすることを試みた。空隙構造は、細孔径分布試験、変水位透水試験および保水性試験（加圧板法）から評価した。破壊特性は、AE法およびデジタル画像相関法を用いて割裂引張強度試験および圧縮強度試験から評価した。そして、これらに基づいて、AEエネルギー指標を用いた材質評価法について検討した。検討の結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 細孔径分布試験結果より、もみ殻灰の置換率が増加すると、全細孔容積および平均細孔直径が増加することが明らかになった。置換率25%以上では、置換率10%以下と比較して、細孔直径 $1.000\ \mu\text{m}$ 以上の細孔が増加した。
- (2) 透水試験結果より、透水係数はすべての置換率において $10^{-5}\ \text{m/s}$ のオーダーであり、セメントの添加量の増加による大きな違いは確認されなかった。材齢7日と28日の透水係数を比較すると、置換率0%および10%では、材齢28日で透水係数が1/2程度減少することが明らかになった。置換率25%以上では材齢7日と28日で透水係数に変化がみられなかった。
- (3) 保水性試験結果より、置換率40%～80%では、0%および10%と比較して、吸引圧の高い部分でも水分が保持されていることが明らかになった。もみ殻灰置換率の増加に伴い、保水力が増加したと考えられる。

- (4) AE の波形解析結果より，最大振幅値が 1 V (80dB) 以上では，AE パラメータから得られる最大振幅値は波形データの最大振幅値より大きく評価されることが明らかになった。AE エネルギーの算出には，相関が最も高い最大振幅値の 2 乗値の使用が適当だということが明らかになった。加えて，AE パラメータから得られる最大振幅値と波形データの最大振幅値との差が大きかったことから，AE パラメータから得られる最大振幅値を指数近似曲線で変換することが有効だと考えられる。
- (5) 材齢 28 日での割裂引張強度は， $0.05 \sim 0.12 \text{ N/mm}^2$  を示し，もみ殻灰置換率の増加に伴って，割裂引張強度が低下した。割裂引張強度は圧縮強度の約  $1/10$  だった。デジタル画像相関法より，ひび割れは供試体中心から  $0.25 \sim 0.30 d$  ( $d$ : 供試体直径) 離れた位置で発生することが示された。
- (6) 割裂引張強度試験において，エネルギー解放率が増加する以前に，AE エネルギーが増加することが明らかになった。供試体内部または画像解析では判別できないひび割れを AE 計測によって検出できることが示された。AE エネルギーの重心位置は，全体の傾向として，置換率が高いほど载荷初期に変化し，低応力下での顕著な AE エネルギー放出が示唆された。これはもみ殻灰の置換率によって空隙構造が変化したためだと考えられる。
- (7) 圧縮強度がもみ殻灰置換率の増加に伴って低下した。圧縮強度の材齢 7 日から 28 日での増加率は，置換率 0 % から 40 % にかけて低下し，置換率 50 % 以上から 2.50 倍以上に急増した。置換率 50 % 以上ではポゾラン反応によって圧縮強度が増加したためだと考えられる。

- (8) 圧縮強度試験において、デジタル画像相関法から算出したひずみ分布結果から、置換率 10 %以下と置換率 25 %以上で、横ひずみ分布が異なることが示された。空隙構造の相違が破壊挙動に影響を及ぼしたと推察される。
- (9) 圧縮強度試験において、P 波速度と累積 AE エネルギーの間には 1 %水準で正の相関があることが明らかになった。累積 AE エネルギーと、他の粒子との接点数と接触点での結合力  $F$  の積の関係には、回帰分析 1 %水準で正の相関があることが明らかになった。このことから、累積 AE エネルギーは多孔質材料の結合力を表す指標として有効であることが明らかになった。圧縮強度試験の際に AE エネルギーに着目することで詳細に材質を評価できると考えられる。

以上より、置換率 10 %以下と置換率 25 %以上では空隙構造が異なり、透水性や保水性にも変化が認められることが明らかになった。もみ殻灰置換率が 50 %以上に増加すると、ポゾラン反応によって圧縮強度が増加し、セメント改良土へもみ殻灰を混和することの有効性が明らかになった。さらに、AE エネルギー指標を用いて、多孔質材料の結合力を推定できることが明らかとなり、新たな材質評価法を構築した。

## 参考文献

- 1) 大津政康：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，144 p，2005.
- 2) 西村眞一：平板状供試体による粘性土の直接引張試験，農業農村工学会論文集，78(5)，pp. 355~360，2010.
- 3) 金田一広，鬼丸貞友，重野喜政，土屋富男：セメント改良土の構成式と割裂試験の数値シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，77(675)，pp. 723~730，2012.
- 4) 島本由麻，鈴木哲也：稲副産物を混和した酸化マグネシウム改良土の材質評価，環境情報科学学術研究論文集，28，pp. 257~262，2014.
- 5) 島本由麻，鈴木哲也：AE-SiGMA 解析を援用した酸化マグネシウム改良土の割裂破壊特性評価，土木学会論文集 A2 (応用力学)，70(2)，pp. I\_43~I\_50，2014.
- 6) 鈴木哲也，島本由麻，森井俊広：稲副産物を利用した MgO 地盤改良材の材料特性評価，第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 331~336，2015.
- 7) 島本由麻，鈴木哲也：破壊力学パラメータに基づく割裂引張応力場におけるセメント改良土のひび割れ進展挙動の考察，第 21 回アコースティック総合コンファレンス論文集，pp. 21~24，2017.
- 8) 赤沢常雄：コンクリートの圧縮による内部応力を求める新試験法 (圧裂強度試験法について)，土木学会誌，29(11)，pp. 777~787，1943.
- 9) 町田篤彦：コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究，土木学会論文集，1978(279)，pp. 99~112，1978.
- 10) 岸谷孝一，平居孝之：コンクリートの割裂引張試験に関する考察，日本建築学会論文報告集，224，pp. 63~65，1974.
- 11) 近藤連一編：多孔材料，技報堂，395 p，1973.
- 12) 日本材料学会：破壊強度の確率モデル，pp. 76~77，2012.
- 13) 渡辺健，二羽淳一郎，横田弘，岩波光保：圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化，土木学会論文集，2003(725)，pp. 197~211，2003.
- 14) 松田浩，神原天鳴，才本明秀，阪上直美，山下務，崎山毅：スペckル干渉による非接触全視野ひずみ計測法，応用力学論文集，6，pp. 1081~1088，2003.
- 15) 車谷麻緒，松浦遵，根本忍，呉智深：コンクリートのひび割れ進展計測のための画像解析手法に関する基礎的研究，土木学会論文集 A2 (応用力学)，70(2)，pp. I\_135~I\_144，2014.

- 16) Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. W. : Image correlation for shape, motion and deformation measurements, Springer, pp. 81~118, 2009.
- 17) 邊吾一, 藤井透, 川田宏之共編: 標準材料の力学, 日刊工業新聞社, pp. 171~172, 2001.
- 18) 三橋博三, 六郷恵哲, 国枝稔: コンクリートのひび割れと破壊の力学—現象のモデル化と制御—, 技報堂出版, pp. 47~63, 2010.
- 19) 三橋博三, 六郷恵哲: コンクリートの破壊の力学, コンクリート工学, 37(9), pp. 4~9, 1999.
- 20) 三橋博三, 白井伸明, 六郷恵哲: コンクリート構造への破壊力学の応用, コンクリート工学, 30(6), pp. 5~17, 1992.
- 21) 東郷敬一郎: 材料強度解析学, 内田老鶴圃, pp. 77~97, 2013.
- 22) Ohtsu, M. and Ono, K.: A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Functions in a Half Space, Journal of Acoustic Emission, 3(1), pp. 27~40, 1984.
- 23) 鈴木哲也: AE 法を援用したひび割れコンクリートの損傷度評価, 非破壊検査, 64(6), pp. 267~273, 2015.
- 24) 山本清仁, 小林晃, 青山咸康: EPS ビーズ混入劣化によるモルタルの AE 挙動, 材料, 57(10), pp. 1011~1018, 2008.
- 25) 日本非破壊検査協会編: 非破壊検査技術シリーズ アコースティック・エミッション試験II, 164 p, 日本非破壊検査協会, 2008.
- 26) 水谷仁, 渡辺輝彦: 地球, 岩波書店, pp. 175~176, 1992.
- 27) 仲佐博裕: アコースティックエミッションの理論と実際—非破壊検査におけるフラクタル評価法—, 地人書館, p.32, 1994.
- 28) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康: アコースティック・エミッションによる破壊源探査, 1978(1276) , pp. 135~147, 1978.
- 29) 川上泰司, 魚本健人: AE 法による二次元破壊進展位置標定を用いたコンクリート割裂試験の破壊挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 10(2), pp. 385~390, 1988.
- 30) 大津政康: アコースティック・エミッション波動の放射形式に関する考察, 材料, 32 (356), pp. 577~583, 1983.
- 31) 大津政康: アコースティック・エミッションの波形解析理論とモーメントテンサー解に関する考察, 材料, 36 (408), pp. 1025~1031, 1987.
- 32) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, Vol.42, No.10, pp.570~575, 1993.
- 33) Grosse, C. U., Weiler, B. and Reinhardt, H. W.: Relative moment tensor inversion applied to concrete fracture test, Journal of Acoustic Emission, 14(3-4), pp. 64~87, 1997.

- 34) 大野健太郎, 下藺信一郎, 澤田陽佑, 大津政康 : AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, 57(11), pp. 210~2106, 2008.
- 35) Ohtsu, M. eds: Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, Springer, pp. 105~132, 2016.
- 36) 大津政康, 野崎渉太, 川崎佑磨 : AE-SiGMA 解析によるコンクリート割裂破壊の考察, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.27~34, 2011.
- 37) 鳥居和之, 川村満紀 : 締め固めた安定処理土における強度と間隙径分布に関する研究, 土木学会論文集, 1988(400), pp. 131~140, 1988.
- 38) Creager, W. P., Justin, J. D. and hinds, J. : Chap. 16 soil tests and their utilization in engineering for dams Vol. III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, pp. 645~654, 1944.
- 39) セメント協会 : セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 4 版, セメント協会, p. 55, 2012.
- 40) 安部郁夫 : 多機能材料 : 活性炭, 木炭, 色材協会誌, 72(6), pp. 388~396, 1999.
- 41) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一 : 造粒した粗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), pp. 1379~1384, 2006.
- 42) 島本由麻, 鈴木哲也 : 環境親和型材料の要求性能と性能評価法の開発, 水土の知 (農業農村工学会誌), 2018 (掲載可) .
- 43) Chen, W.F. (色部誠ら監訳) : コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, pp. 437~442, 1985.
- 44) 大野健太郎 : 既設コンクリートと補修材料の付着界面破壊挙動における AE 法の適用, 非破壊検査, pp. 284~289, 2015.
- 45) 川上英男 : 骨材種類がコンクリートの力学的挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.63~68, 1991.
- 46) 上田稔, 長谷部宣男, 佐藤正俊, 奥田宏明 : コンクリートの割裂試験における破壊メカニズムの破壊力学的研究, 土木学会論文集, Vol.21, No.478, pp.61~70, 1993.
- 47) 川瀬麻人, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦 : コンクリートの割裂引張強度試験における破壊過程に関する考察, コンクリート工学年次論文集, 34(1), pp.334~339, 2012.
- 48) 黒崎茂, 野崎英明, 福田収一 : ひずみゲージによるモード I 応力拡大係数の測定, 日本機械学会論文集 A 編, 56(524), pp. 875~882, 1990.
- 49) 舘石和雄, 小山田拓人, 足立一郎, 魚本健人 : 画像計測による応力拡大係数の簡易測定手法, 鋼構造論文集, 6 (23), pp. 99~103, 1999.

- 50) Bui, L. A., Chen, C., Hwang, C. and Wu, W.: Effect of silica forms in rice husk ash on the properties of concrete, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19, pp 252~258, 2012.
- 51) Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavel, K.: Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 22, pp. 1675~1683, 2008.
- 52) Jain, N.: Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement, *Construction and Building Materials*, 27, pp. 39~44, 2012.
- 53) Jamil, M., Kaish, A. B. M. A., Raman, S. N. and Zain, M. F. M.: Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system, *Construction and Building Materials*, 47, pp. 588~593, 2013.
- 54) 石黒 寛： 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， pp. 83~88， 2000.
- 55) Salas, A., Delvasto, D., Mejía de Gutiérrez, R and Lange, D.: Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 773~778, 2009.
- 56) 須田裕哉， 佐伯竜彦， 斎藤豪： C-S-H の組成がゲル空隙の量およびゲル空隙の空隙径分布に及ぼす影響， 土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）， 70(2)， pp. 134~152， 2014.
- 57) Jennings, H. M.: Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II, *Cement and Concrete Research*, 38, pp. 275~289, 2008.
- 58) 谷川恭雄監修： 硬化コンクリートの性質， セメントジャーナル社， pp. 9~35， 2004.
- 59) Seed, H. B., Mitchell, J. K. and Chan, C. K.: Structure and strength characteristics of compacted clays, *Journal of SMDP, Proceeding of ACSE, SM5*, pp. 87~125, 1959.
- 60) 川尻峻三， 川口貴之， 澁谷啓， 高橋正和： 締固めた地盤材料の変形・強度特性に及ぼす締固め時の含水比および締固め方法の影響， 土木学会論文集 C（地圏工学）， 67(4)， pp. 532~543， 2011.
- 61) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. : Introduction to Soil Behavior, Macmillan, pp. 106~107, 1966.
- 62) 鬼塚克忠， 吉武茂樹： 締固め混合土の強度異方性について， 土質工学論文報告集， 23(4)， pp. 149~156， 1983.
- 63) 日本非破壊検査協会編： 新コンクリートの非破壊試験， 技報堂出版， pp. 61~66， 2010.
- 64) 日本コンクリート工学協会： 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書， 2015.
- 65) 竹内雍監修： 多孔質体の性質とその応用技術， フジ・テクノシステム， pp. 372~392， 1999.

- 66) 岡本亨久, 中新弥: ポーラスコンクリート, コンクリート工学, 54(5), pp. 542~547, 2016.
- 67) 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度: 空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 70(594), pp. 17~23, 2005.
- 68) 日本コンクリート工学協会: 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 2015.



## 第 4 章 根圏の発達状況を指標としたもみ殻灰を活用した 緑化基盤材の設計

### 4.1. 概説

緑化基礎工としての生育基盤材には、侵食や損壊等の防止に加えて、地域の生態系へ影響を与えない材料であることが求められる<sup>1)3)</sup>。この研究対象である緑化基盤材に環境親和性を付加する論点には、緑化初期から最終段階までの過程において安定した植生遷移を支える生育基盤であるとともに、環境負荷を最小化する視点が含まれる。本章では、緑化基盤材の要求性能を整理し、開発材料の適用性を、安定性、通気性、透水性および保水性から検証する。具体的には、第 3 章で用いた透水試験、保水性試験、細孔径分布試験および圧縮強度試験に加えて、開発材料を用いて造成した基盤上での植栽試験の 5 つである。これらの試験の結果から、もみ殻灰の置換率の相違による空隙構造と根系の発達状況との関係を考察する。4.2 では、MgO 改良土を対象として緑化基盤材の性能を評価する。根圏の発達状況はフラクタル次元と葉色より評価する。4.3 では、セメント改良土を対象として緑化基盤材の性能を評価する。根圏の発達状況はフラクタル次元、根の到達深度および根の伸長方向により評価する。4.4 では、第 2 章から第 4 章までの結果を整理し、環境負荷量、耐久性、植栽への適合性の 3 つの観点から、セメント改良土におけるもみ殻灰置換率の相違が材料特性に与える影響を考察する。

## 4. 2. 酸化マグネシウム改良土の緑化基盤材としての性能評価

### 4. 2. 1. 実験材料および配合

配合を表 4-1 に示す。使用した材料は砂質土（土粒子密度 2.65 g/cm<sup>3</sup>）、バーミキュライト（気中乾燥状態における密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>）、もみ殻灰（密度 2.32 g/cm<sup>3</sup>）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。もみ殻灰は砂質土およびバーミキュライトの合計体積の 5 %を置換した。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 AccuPyc II 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<sup>4)</sup>によるもみ殻灰の非晶質量は 97 %であった（第 2 章第 4 節参照）。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。

表 4-1 酸化マグネシウム改良土での植栽試験における配合（質量比）

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	100.00	5.00	0.00	0.00	26.25	0.00	0.53	1.05	3.15	5.25	21.00
もみ殻灰 混和区	95.00	4.75	4.39	0.00	26.25	0.00	0.53	1.05	3.15	5.25	21.00
もみ殻灰・ 稲わら繊維 混和区	95.00	4.75	4.39	0.13	26.25	0.00	0.53	1.05	3.15	5.25	21.00

## 4.2.2. 実験方法

開発材料における植栽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 倍の体積から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、炉乾機を用いて 80 °C で 48 時間乾燥させ、乾物重を測定した。

## 4.2.3. 解析方法

### (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 4-1 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 Mandelbrot<sup>5)</sup>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った形（微分が定義できないような形）を記述することができるという特徴がある<sup>6)</sup>。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 Tatsumi らによって明らかにされている<sup>7)</sup>。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

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  $N(r)$  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  $N(r)$  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 (4-1) が得られる。式 (4-1) の  $D$  をフラクタル次元と定義する。

図 4-2 に根圏の撮影画像と二値化処理後の画像を示す。

$$N(r) = k \cdot r^{-D} \quad (4-1)$$

ここで  $k$  は定数である。なお、本解析では、 $r$  を 2, 3, 4, 6, 12,  $2^4$ ,  $2^5$ ,  $2^6$ ,  $2^7$ ,  $2^8$  pixel と変化させ、 $N(r)$  を画素数、式 (4-1) の関係を満たす  $D$  は最小二乗法により算出した。

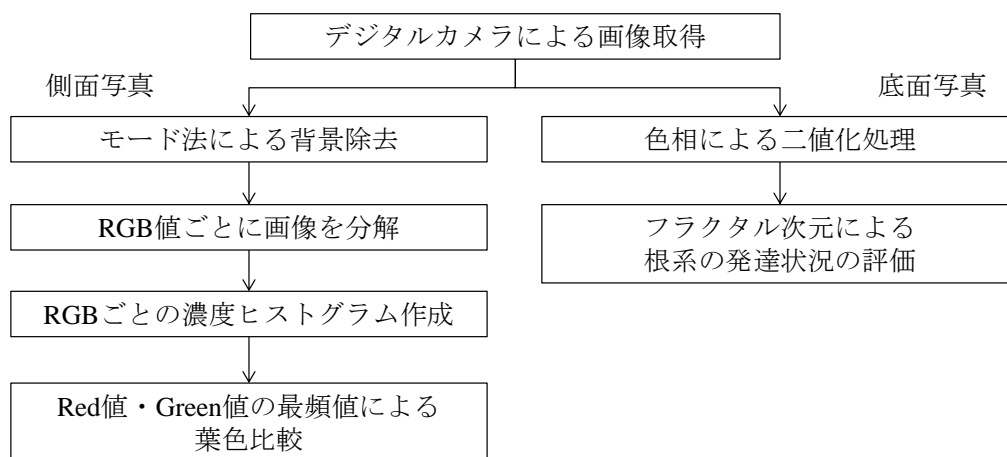


図 4-1 画像解析の流れ

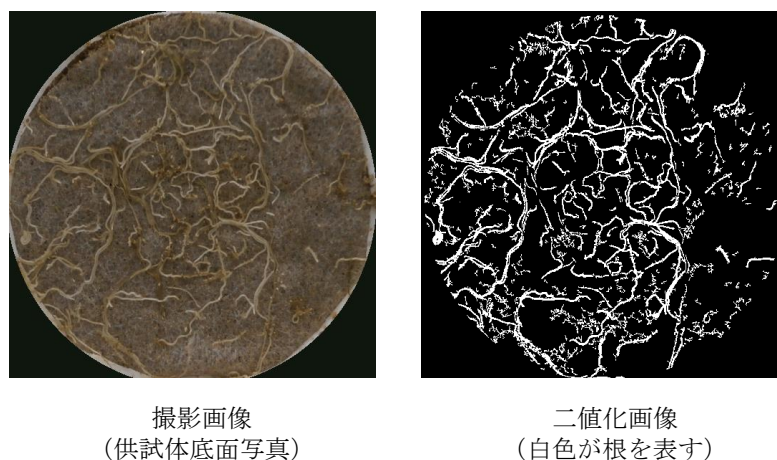


図 4-2 根圏の撮影画像と二値化画像

## (2) 葉色による生育性評価

葉色による評価には、分光光度計や色彩色差計（例えば、吉村ら<sup>8)</sup>）、リモートセンシングや地上撮影による写真解析（例えば、飯田ら<sup>9)</sup>）が用いられている。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 4-1 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<sup>10)</sup>。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。

## 4. 2. 4. 結果および考察<sup>11)</sup>

### (1) もみ殻灰の混和による生育量の比較

植栽試験中の平均気温は 21℃、平均湿度は 70 %であった。写真 4-1 に播種から 28 日目の植物生長写真を示す。写真 4-1 より MgO 3 %以上のとき、種子を混和した層で改良土にひび割れが発生しており、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、芝草が改良土から抜けおちた。

31 日目の植物の地上部および地下部（根）の平均乾物重を図 4-3 に示す。これら乾物重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

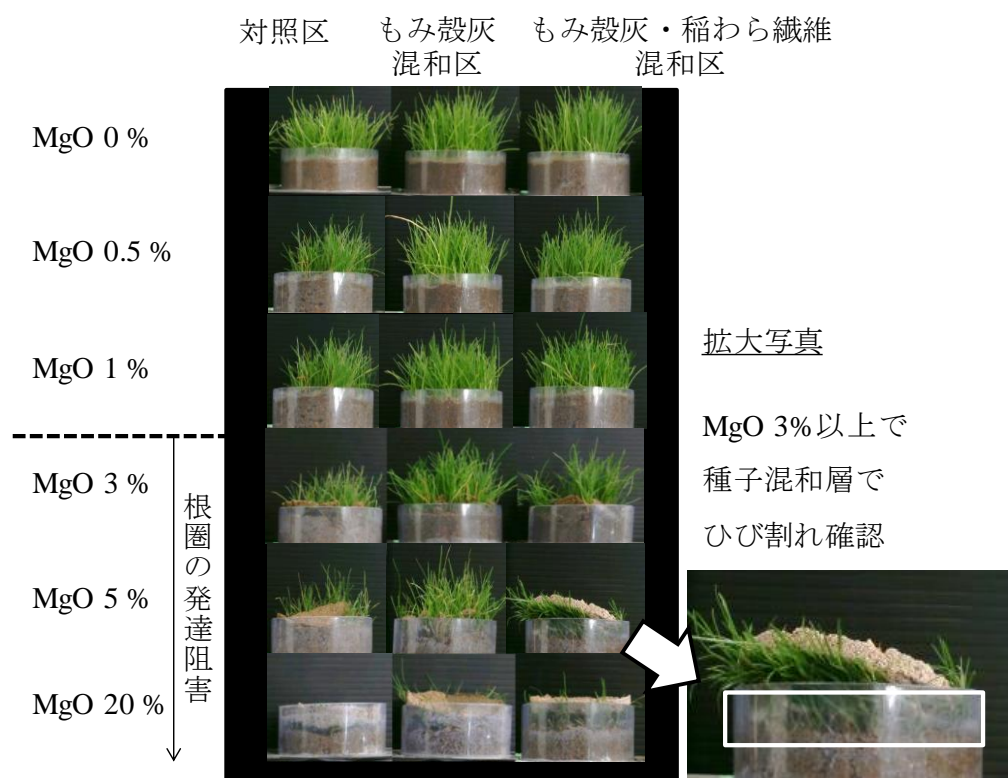
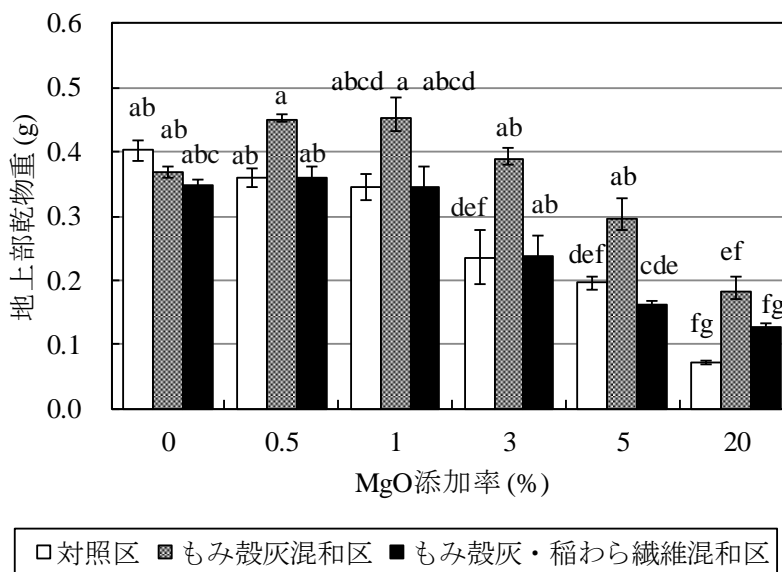
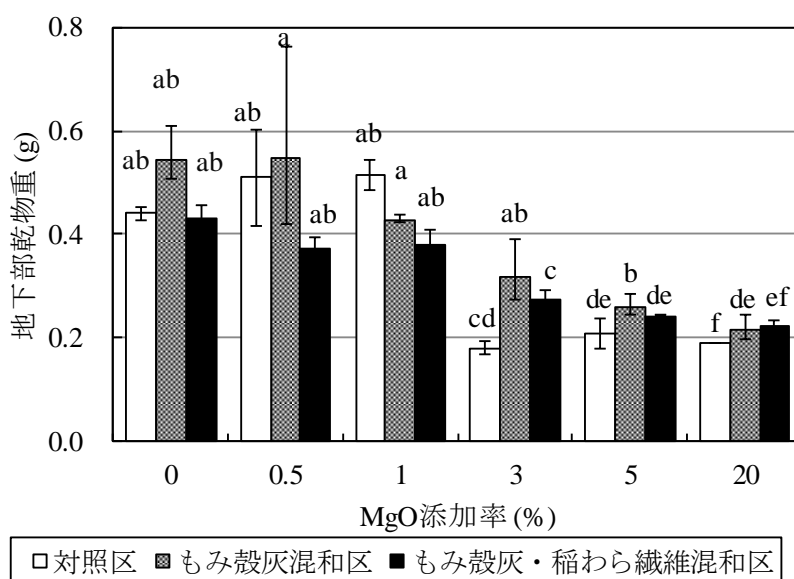


写真 4-1 植物生長写真（播種から 28 日目）

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。もみ殻灰および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 %以上ではもみ殻灰混和区は対照区と比較して、地上部乾物重が増加することが確認された。特に、MgO 添加率が増加するほど、対照区と比較して、もみ殻灰混和区での地上部乾物重の増加が確認された。もみ殻灰混和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<sup>12), 13)</sup>。本研究においても、乾物重が増加し、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



(a) 地上部



(b) 地下部

\*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。

図 4-3 MgO 添加率の相違による地上部および地下部の乾物重量の比較

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。

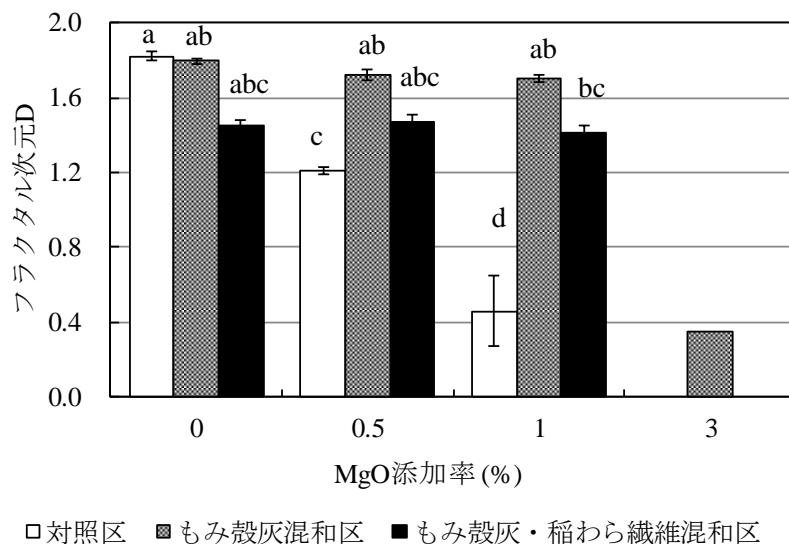
分散分析で地上部の生長量および根系形成に対して MgO 添加率および稲副産物の混和において有意差が明らかになったことから、次にどのケースで有意差があるか検定を行った。ルベーン検定より等分散であることが明らかになったことから、多重比較検定の Tukey 法を用いて平均値の差の検定を行った。地上部において、対照区およびもみ殻灰・稲わら繊維混和区では MgO 添加率が 3 %以上となったとき、有意差 1~5 %で MgO 1 %以下と違いがあることが明らかになった。もみ殻灰混和区では、MgO 5 %から MgO 1 %以下との有意差が生じた。この理由としては、2 点考えられる。1 点目としては、Mg 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<sup>14)</sup>。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<sup>14), 15)</sup>。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<sup>16)</sup>。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に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<sup>17)</sup>。実際、対照区において硬度を播種 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。

地下部の乾物重（根の乾物重）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 %の違いが確認された。もみ殻灰混和区では 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・稲わら繊維混和区では、有意差は確認されなかった。



## (2) フラクタル次元による根系の発達状態評価

図4-4に各シリーズのフラクタル次元 $D$ 、図4-5にシリーズごとの根圏の二値化画像(深さ2.5 cm 底面部)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・稲わら繊維混和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。もみ殻灰混和区では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4-4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程度まで明らかになった。減少することが確認された。一方、もみ殻灰混和区・もみ殻灰稲わら繊維混和区では、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混和区で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4-3で示した地下部乾物重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。



\*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。

図4-4 MgO添加率の相違による根系のフラクタル次元の比較

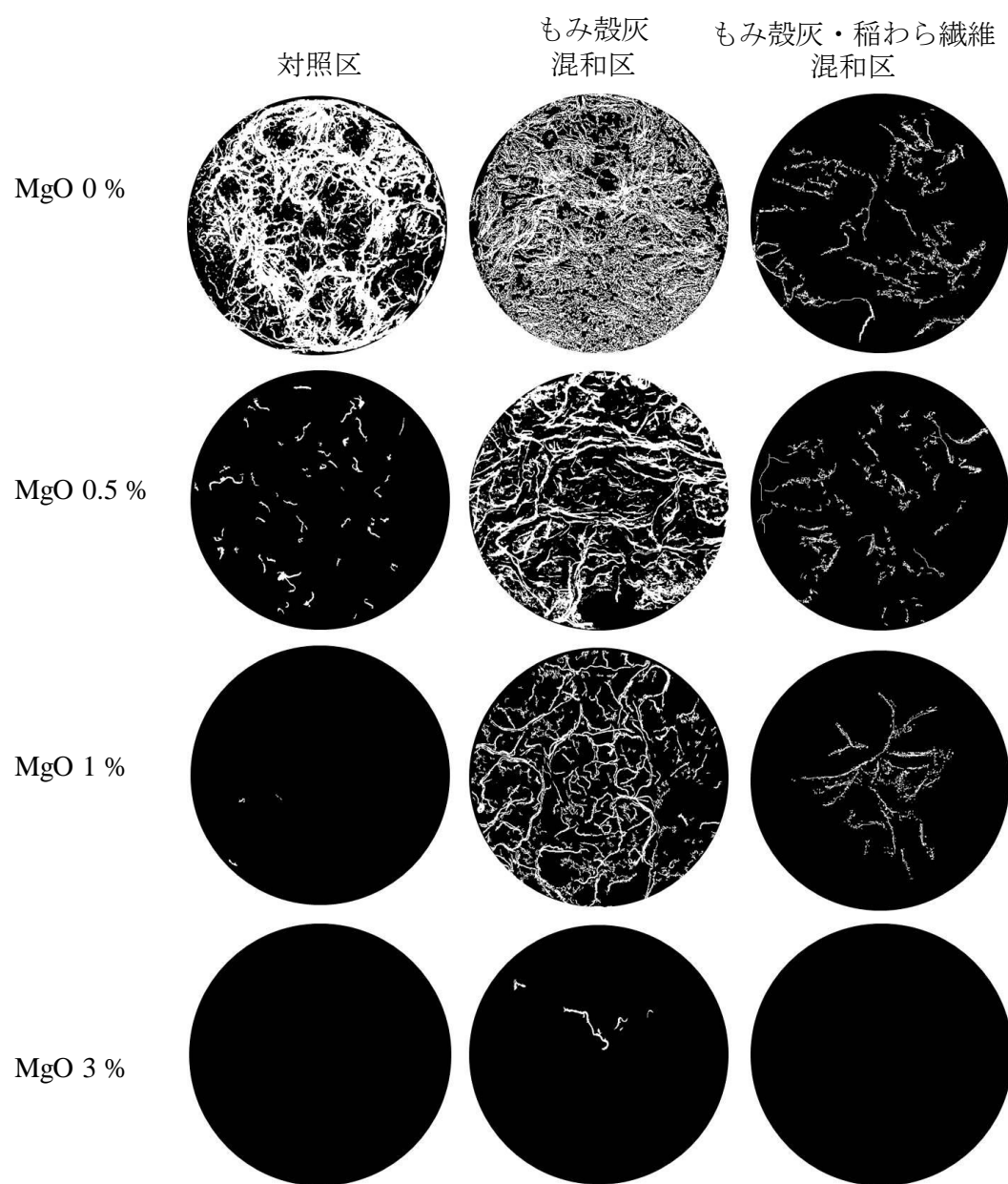


図 4-5 根圏の二値化画像（播種から 31 日目）

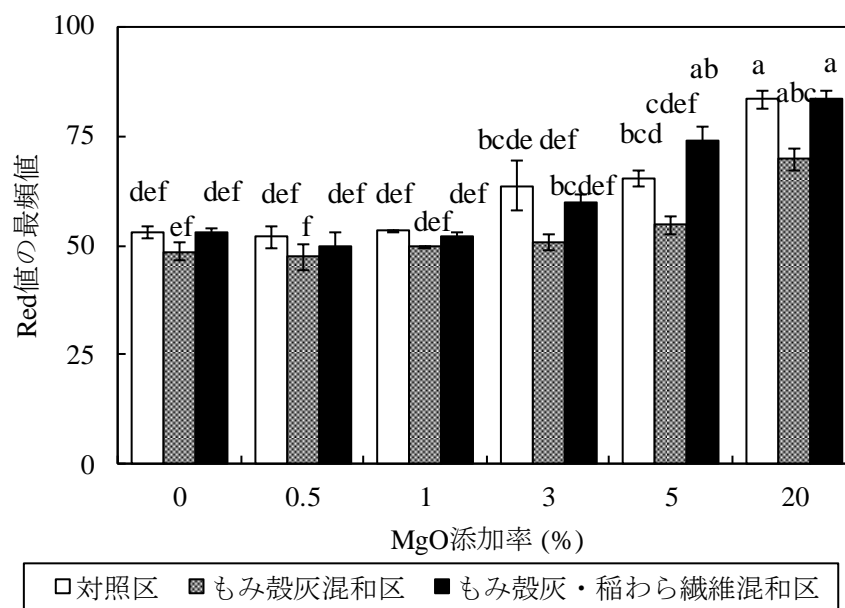
### (3) 葉色を用いた植物の健全度評価

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 4-6 に示す。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混和区では、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，もみ殻灰混和区：22，もみ殻灰・稲わら繊維混和区：33 であった。もみ殻灰混和区では他の 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。

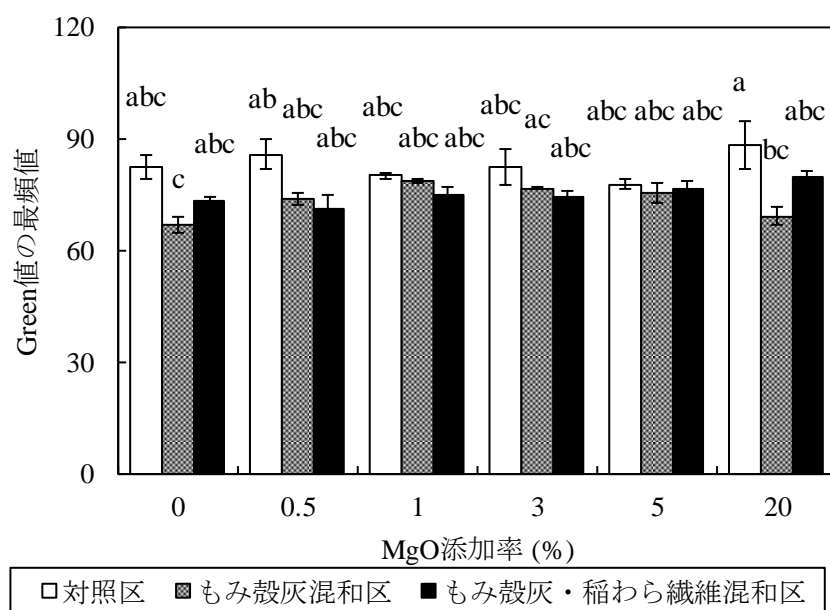
Green 値が変化を示さず、Red 値が増加したことから、MgO 添加率が増加すると葉色の褐色化が顕著になると推察される。もみ殻灰を混和することで葉色の褐色化が弱まり、稲わら繊維を混和することで稲副産物を混和していないときとほぼ同様に葉色の褐色化がすすむと考えられる。

図 4-7 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。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は相関が高かった（相関係数：0.804）。Red 値および地上部乾物重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。

以上の検討より、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、緑化基盤材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。



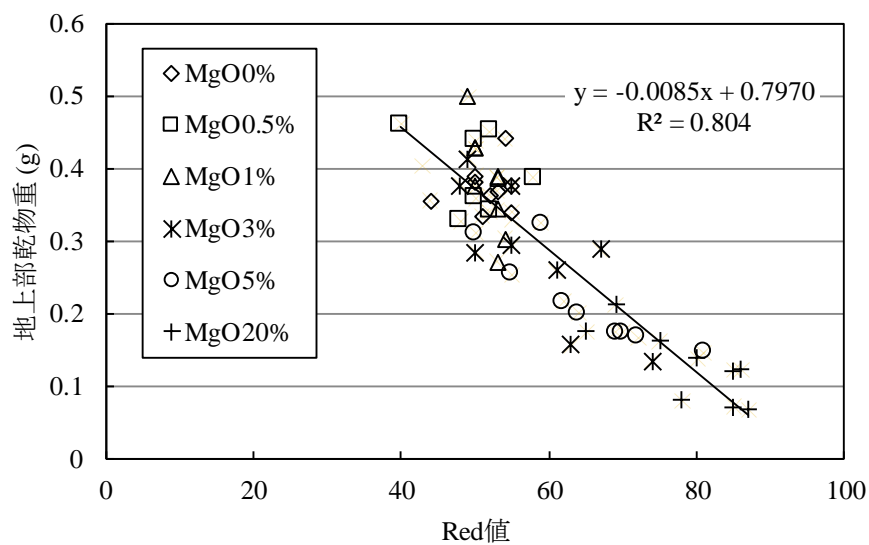
(a) Red 値



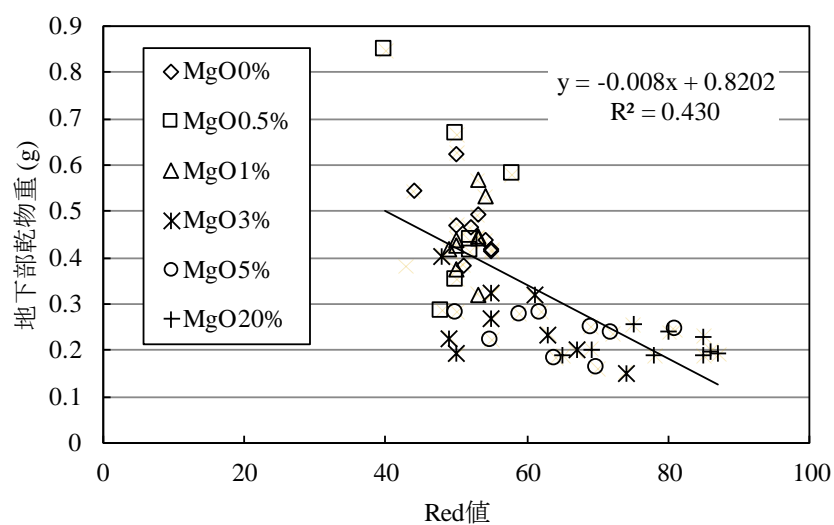
(b) Green 値

\*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。

図 4-6 葉色の比較（播種から 31 日目）



(a) 地上部



(b) 地下部

図 4-7 葉色と地上部および地下部の乾物重の関係

### 4.3. セメント改良土の緑化基盤材としての性能評価

#### 4.3.1. 緑化基盤材の評価指針

本研究では安定性（圧縮強度）、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 4-2 に性能目標値の一覧を示す。

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  $0.3 \text{ N/mm}^2$  以下としている<sup>18)</sup>。このことから、本研究では、圧縮強度  $0.3 \text{ N/mm}^2$  以下を性能目標値と設定した。

通気性については、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<sup>19)</sup>。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<sup>20)</sup>。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。

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  $10^{-5} \text{ m/s}$  以上と規定している<sup>21)</sup>。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  $10^{-5} \text{ m/s}$  以上と規定されている<sup>20), 22)</sup>。本研究でもこれに準じて透水係数の目標値を  $10^{-5} \text{ m/s}$  以上と設定した。

保水性の指標に、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  $60 \text{ L/m}^3$  以上と規定して

表 4-2 性能目標値

圧縮強度	$0.3 \text{ N/mm}^2$ 以下
空隙率	20 % 以上
透水性	$10^{-5} \text{ m/s}$ 以上
保水性	pF1.5 で $60 \text{ L/m}^3$ 以上
保肥性	$6 \text{ cmol/kg}$ 以上

いる<sup>22)</sup>。

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。一例として、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<sup>21)</sup>。本研究では、砂質土を使用するとともに、肥料を混和しなかった。この理由は、粘性土や肥料混和の影響を除外し、もみ殻灰の混和によるポゾ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。

#### 4.3.2. 実験材料および配合

実験材料は第 3 章第 3 節と同様な材料（砂質土、普通ポルトランドセメント、ガス化プラントから排出されたもみ殻灰）を用いた。表 4-3 に配合を示す。植栽試験における実験ケースは、もみ殻灰内割り置換率 40～80 %の 5 ケースと対照区（セメント無添加）の合計 6 ケースとした。なお、この配合は第 3 章第 3 節と同様である。

表 4-3 配合（質量比）

実験ケース	砂質土	普通ポルトランド セメント	もみ殻灰	水
40 %	100.00	4.20	2.80	9.30
50 %	100.00	3.50	3.50	9.30
60 %	100.00	2.80	4.20	9.30
70 %	100.00	2.10	4.90	9.30
80 %	100.00	1.40	5.60	9.30
対照区(砂質土)	100.00	0.00	0.00	9.30

\*実験ケース名の 40 %～80 %は、もみ殻灰内割り置換率を示す。

### 4.3.3. 実験方法

基盤材上において植栽試験を実施した。試験に用いた供試植物はイワダレソウ (*Lippia canescens Kunth*) である。試験サンプルは高さ : 11.0 cm, 幅 : 11.0 cm, 奥行き : 2.0 cm の直方体を PET 樹脂板 (厚さ : 1.0 mm) で製作し, 供試植物の苗を移植した。機器を用いて吹き付けることが困難であったため, 圧密させ充填することで吹付工の代用とした。上部 1 cm に培養土として, 底面には穴をあけ排水溝を設けた。

試験地は屋外 (新潟大学農学部圃場) とし, 試験期間は 2017 年 6 月 1 日 ~ 7 月 15 日の 45 日間とした。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 10~25 ml の給水を改良土が乾いたときに行った。供試植物は 45 日後, 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, 炉乾機を用いて 80 °C で 48 時間乾燥させ, 乾物重量を測定した。45 日後の緑化基盤材の pH をポケットマルチテスター PCST35 (竹村電機製作所製) を用いて測定した。

### 4.3.4. 解析方法

本研究では, 播種から 45 日後の可視画像を二値化処理することで, 根の形状から発達状況を評価した。評価指標は, 根のフラクタル次元, 根の到達深度 (最大伸長量), 根の伸長方向 (根の角度) とした。供試体側面写真 (1400×1400 pixel) を取得し, 明度による二値化処理より根のみを抽出した。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。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 43~75 に設定した。図 4-8 に供試体側面の可視画像と二値化処理後の画像を示す。

根の到達深度 (最大伸長量) および根の伸長方向については, 二値化処理後に粒子解析することで算出した。根の伸長方向は, 水平方向に対する角度を用いて評価した。角度は 0 ~ 90° の範囲で表した。0° に近づくほど水平方向 (地面と平行な方向), 90° に近づくほ





(a) 可視画像

(b) 二値化画像

図 4-8 可視画像と根の二値化画像(播種から 45 日後)

ど鉛直方向（重力方向）に伸長したと考えることができる。

フラクタル次元の算出には前節と同様に、ボックスカウンティング法を用いた。本解析では、 $r$  を 2, 3, 4, 6, 12,  $2^4$ ,  $2^5$ ,  $2^6$ ,  $2^7$ ,  $2^8$ ,  $2^9$ ,  $2^{10}$  pixel と変化させ、フラクタル次元  $D$  を最小二乗法により算出した。

#### 4.3.5. 結果および考察

##### (1) 改良土の物理性に基づく性能評価<sup>23)</sup>

本研究では、細孔径分布試験、透水試験、保水性試験、圧縮強度試験の 4 つの試験結果から、緑化基盤材の性能を評価した。

細孔径分布試験結果より、もみ殻灰置換率 0～80 %において細孔率は 25～33 %であり、置換率が増加するほど細孔率が増加する傾向が示された。通気性の観点から評価すると、すべてのケースで性能目標値である 20 %以上を満たすことが明らかになった。毛管孔隙率は、置換率 0 %・10 %：4～5 %，25～50 %：8～9 %，60～80 %：11 %だった。植物が吸収可能な有効水のほとんどが毛管孔隙を移動できる毛管水であることが明らかにされている<sup>19)</sup>。このことから、毛管孔隙が最も大きい置換率 60 %以上で植物の生長が他のケースより促進されると考えられる。

透水試験結果より、置換率 0～80 %のすべてのケースにおいて、透水係数は  $10^{-5}$  m/s のオーダーであることが示された。透水性の観点から緑化基盤材としての性能を評価すると、すべてのケースで性能目標値である  $10^{-5}$  m/s を満たすことが明らかになった。ただし、この傾向は、砂質土の特性と結合材の添加方法に依存したためだと推察される。

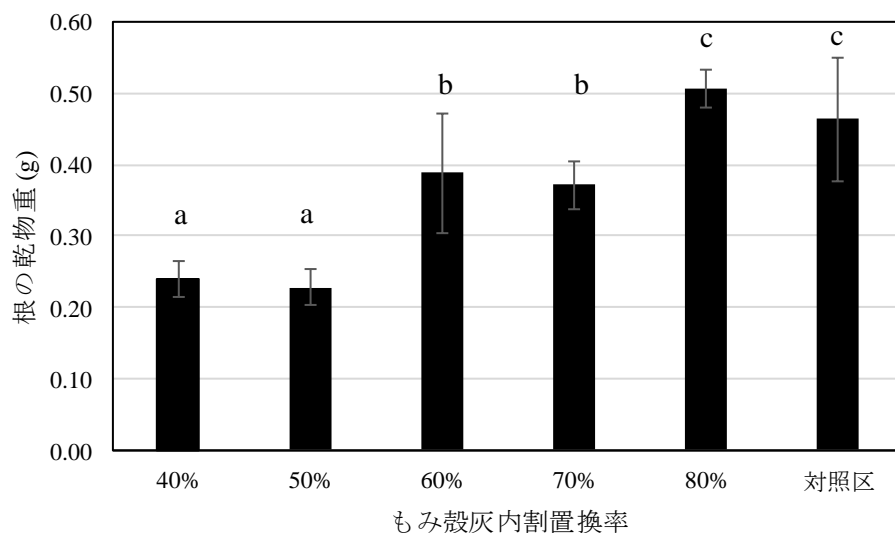
保水性試験結果より、置換率 40 %～80 %では、0 %および 10 %と比較して、吸引圧の高い部分でも水分が保持されており、もみ殻灰の混和量の増加に伴って保水力が増加することが示唆された。全体の傾向としては、吸引圧が大きいとき含水率が小さく、吸引圧が小さくなるにつれて間隙保水成分が増加する傾向で、砂質土と類似した水分特性曲線を示した。このため、保水性の観点から評価すると、すべてのケースで性能目標値を満たさないことが明らかになった。高い保水性が必要な植物に対しては本材料の適用が難しいことが示唆された。

圧縮強度試験結果より、材齢 7 日において、置換率 40 %以下では圧縮強度が  $0.3 \text{ N/mm}^2$  以上、置換率 50 %以上では圧縮強度が  $0.3 \text{ N/mm}^2$  以下だった。安定性の観点から評価すると、置換率 50 %以上で性能目標値を満たすことが明らかになった。

以上の 4 つの観点から緑化基盤材としての適用性を評価した結果、置換率 50 %以上で、通気性、透水性、安定性の性能目標値を満たした。このことから、本研究では、置換率 50 %以上に、置換率 50 %と類似した水分特性曲線を示した置換率 40 %および対照区を加えた 6 つのケースにおいて、植栽試験を行った。植栽試験を行うことで、もみ殻灰置換率の相違による根圏の発達状況を比較した。

## (2) 根圏の発達状況を指標とした導入植物の生育性評価

図 4-9 に地下部（根）の乾物重の結果を示す。写真 4-2 に播種から 45 日後の植物生長の比較、写真 4-3 に根量の比較写真を示す。置換率 80 %ではセメントを添加していない対照区と同程度に根が伸長していることが明らかになった。前節で示した MgO 改良土の実験結果からも、もみ殻灰の混和によって、植物生長が促進することが明らかとなっている<sup>11)</sup>。セメント改良土の実験結果においても同様の傾向が示されたことから、セメントの添加率が砂質土の質量比で 1.4 %（もみ殻灰置換率 80 %）以下では、もみ殻灰による植物の生長促進へ効果があると考えられる。図 4-9 より置換率が減少すると根の乾物重が減少することが明らかになった。置換率 80 %および対照区における乾物重と比較して、置換率 40 %および 50 %では約 45%，置換率 60 %および 70 %では約 75 %に減少した。一方、圧縮強度試験結果より、置換率 80 %の圧縮強度と比較して、置換率 40 %では約 6 倍、置換率 50～70 %では約 2～3 倍が増加することが示された。これらの結果から、置換率の減少に伴って改良土の硬度が増加したことで根の伸長が阻害されたと考えられる。



\*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、t 検定より  $p < 0.10$  であることを示す。

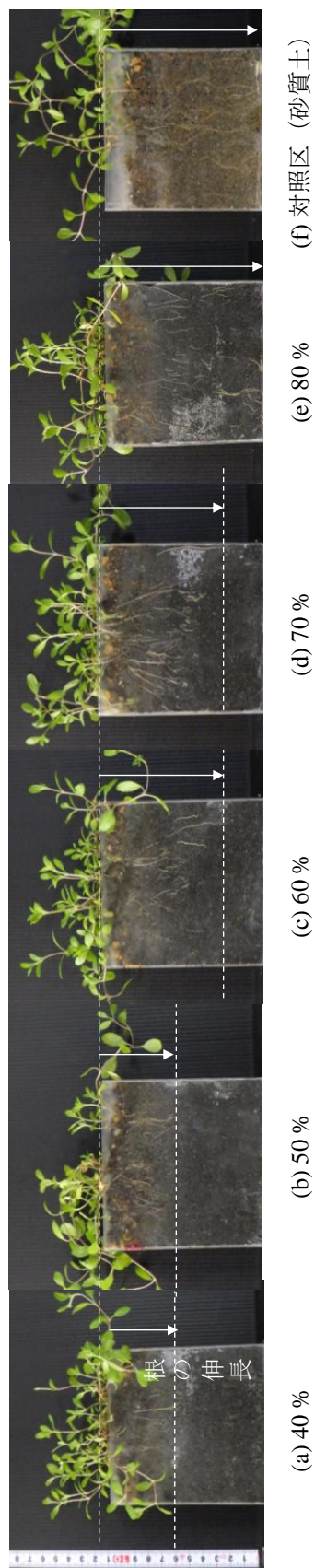


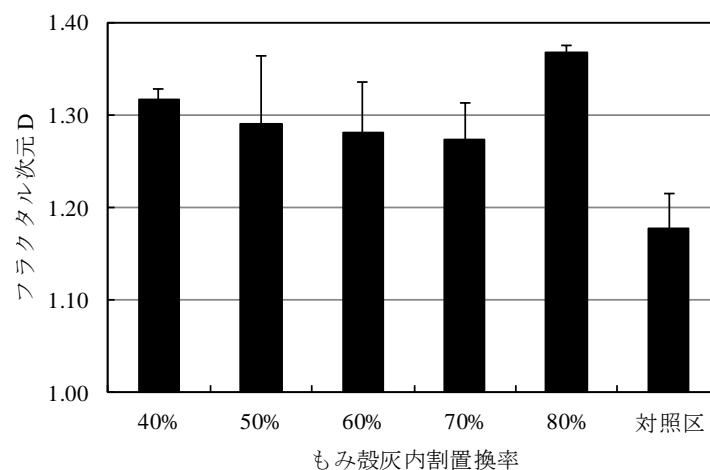
写真 4-2 植物生長の比較 (播種から 45 日後)



写真 4-3 根量の比較 (播種から 45 日後)

根の乾物重は植物生長量のパラメータとして従来多用されており、特に炭素収支等を研究するうえでは不可欠なパラメータであると認められている。その一方で、根の機能と直接関係づけることが難しいと指摘されている<sup>24)</sup>。そこで、本研究では、画像解析を用いて、根の空間分布、根の到達深度（根の最大伸長量）、根の伸長方向を合わせて検討した。

図 4-10 にもみ殻灰置換率の相違によるフラクタル次元の比較結果を示す。対照区とその他のケースで有意差 5 %水準が認められた。セメントを添加したケース間では有意差が認められなかった。対照区では乾物重が最も大きかったが、フラクタル次元が小さい傾向を示した。対照区では観察面ではなく、容器内部で根が発達したためだと推察される。既往研究において、特にボックスカウンティング法によるフラクタル次元の算出過程では、二次根や三次根を除去してしまうという問題点も指摘されている<sup>25), 26)</sup>。以上から、本実験結果ではフラクタル次元によって根圏の発達状況を評価することが難しかった。近年、根圏の発達状況を三次元で捉えるための技術開発が進められている<sup>27)</sup>。一例として、マイクロ X 線 CT 法を用いて、分解能について課題が残されているが、根系の状態を評価できることが明らかにされている（例えば、Maihofer ら<sup>28)</sup>）。今後、X 線 CT 法を用いて根の三次元構造

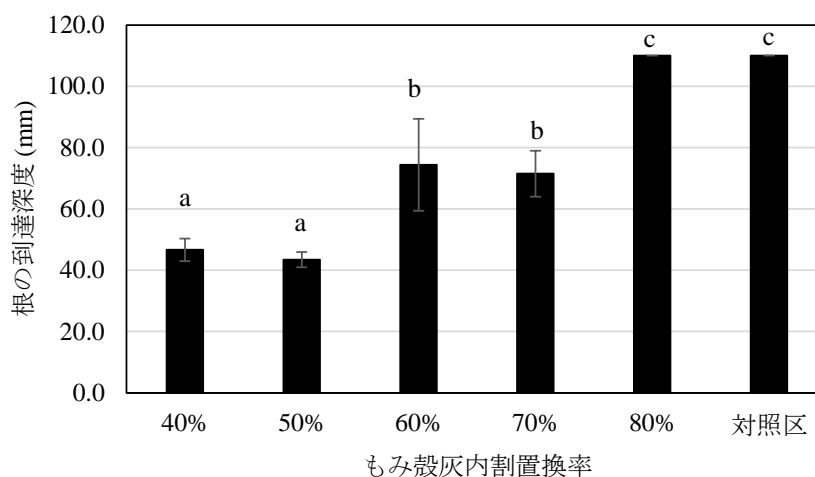


\*図中のエラーバーは標準誤差を表す。

図 4-10 もみ殻灰置換率の相違によるフラクタル次元の比較

について検討していく必要があると考えられる。

図 4-11 にもみ殻灰置換率の相違による根の到達深度（根の最大伸長量）の比較結果を示す。なお、根の到達深度の最大値は容器高さの 110 mm である。根の到達深度は、置換率 40 %および 50 %, 60 %および 70 %, 80 %および対照区との 3 つの間で有意差を示した。置換率によって根の到達深度に相違が生じた理由として、改良土の硬度、pH および保水力が考えられる。まず、置換率の減少に伴い改良土の硬度が増加したことに起因する可能性が考えられる。機械的抵抗の大きな土壌（硬い土壌）で生育した根は特異的な形態変化を示すことが知られている。根の伸長速度が遅くなり、これに伴って根の長さが短く（浅根性）になることが明らかにされている<sup>29)</sup>。浅根となるのは、空隙率が減少し、根の伸長が抑制されるといった物理的な作用だけではなく、いくつかの植物ホルモンが影響を与えていると考えられている<sup>24)</sup>。特に、その植物ホルモンとして、エチレンやエチレンの合成に関与するインドール酢酸が着目されている<sup>30)</sup>。本実験結果では、置換率 40 %および 50 %では、実験ケースの中で最も到達深度が浅かった。空隙率を比較すると、置換率 40 %では置換率



\*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、t 検定より  $p < 0.10$  であることを示す。

図 4-11 もみ殻灰置換率の相違による根の到達深度の比較

70 %以上と比較して約 3 %少なかった。加えて、圧縮強度を比較すると、置換率 40 %では置換率 50 %以上と比較して 2~6 倍大きかった。以上から、置換率 40 %において浅根性を示したのは改良土の硬度に起因すると考えられる。一方、置換率 50 %に関しては、置換率 60 %と比較して圧縮強度が小さくかつ置換率 70 %と圧縮強度が同一であるにもかかわらず、根の伸長が小さかった。このことから、改良土の硬度だけでは、根の伸長量の違いを十分に説明できないと考えられる。そこで相違の理由として置換率による pH および保水性の相違が考えられる。アルカリ性土壌ではカルシウム過剰によって鉄欠乏の症状が起きやすく、植物の生長が抑制されることが明らかにされている<sup>24)</sup>。本研究で pH を測定した結果、pH は置換率 40 % : 12.18, 50 % : 12.22, 60 % : 11.04, 70 % : 11.97, 80 % : 11.88 であった。もみ殻灰置換率が減少するとアルカリ化が進む傾向が確認された。このことから、土壌のアルカリ化が根の伸長を阻害した要因の一つと考えられる。植物の根にとって土壌の保水性および排水性は重要な環境条件であり、有効団粒の多い土壌ほど根の発達が良好であることが明らかにされている<sup>24)</sup>。細孔径分布試験結果より、置換率 60 %および 70 %では 50 %と比較して毛管孔隙率が約 3 %多いことが示された。加えて、平均細孔直径も置換率 60 %および 70 %では 50 %と比較して 0.02  $\mu\text{m}$  大きかった。保水力が増加し、空隙が大きくなったことで、土壌硬度が同様または大きくとも根の伸長が促進されたと考えられる。

置換率 80 %および対照区では最大値の 110 mm であり、容器の底面まで根が到達した。既往研究より、セメントを添加した緑化基盤材において、改良土の硬度の増加や強アルカリ化 (pH の増加) の影響で、根の伸長が抑制されることが明らかにされている<sup>31), 32)</sup>。本研究でも、セメントの添加によって改良土の硬度が増加し、基盤材は強アルカリ性を示した。それにもかかわらず、置換率 80 %と対照区の根の伸長量に有意差は示されなかった。供試植物であるイワダレソウの適応できる土壌 pH が 4.5~9.0<sup>33)</sup>と幅広いという特徴を有していることを考慮しても、置換率 80 %と対照区では根の伸長量が同様であったことから、セメント改良土においても、もみ殻灰には根の伸長を促進する効果があると考えられる。

既往研究より、養分吸収には、根が長く伸長し、根系が利用できる土壌を開拓していくことが効果的であり、特にリン酸イオンやカリウムの吸収については、局所的な根長の増加も効果があることが明らかにされている<sup>34)~36)</sup>。Silberbush らは、土壌中のマスフローと拡散によって根まで運ばれるイオンについて記述するモデルを微砂土壌でのダイズの根系に適用したところ、根の伸長速度、根の伸長量、根の直径といった形態的なパラメータの方が、根にかかわる生理的なパラメータより、カリウムの吸収量に顕著な影響を与えることを明らかにしている<sup>34)</sup>。Barder らは根長の増加により根相互間の距離が減少して吸収に競合が生じる場合や、根長の増加に応じて根の直径が小さくなるような場合においても、根の伸長量が増加することがカリウムの吸収に効果的であるとしている<sup>35)</sup>。リン酸イオンや硝酸イオンについても同様な計算がなされている。リン酸イオンは土壌中の移動速度が小さいため、細い根であっても根が長くなることで吸収に有利に働くことが明らかにされている<sup>24)</sup>。このことから、置換率 60 %以上では養分の吸収が促進されたと推察される。

図 4-12 および図 4-13 にもみ殻灰置換率の相違による根の伸長方向の比較結果を示す。伸長方向は水平方向に対する角度で表している。 $0^{\circ}$  に近づくほど水平方向（地面と平行な方向）、 $90^{\circ}$  に近づくほど鉛直方向（重力方向）に伸長することを示している。実験結果より、すべてのケースで  $75\sim 90^{\circ}$  の根の割合が最も大きいことが明らかになった。双子葉植物の根系は幼根から発達した 1 本の主根を中心に形成される。主根は多くの場合強い正常重力屈性を示し、植物体の直下に伸長する<sup>24)</sup>。このため、 $75\sim 90^{\circ}$  の根の割合が大きかったと考えられる。置換率 80 %および対照区では、その他のケースと異なり全ての方向に根が広がっていることが示された。置換率 80 %では、機械的抵抗力が小さく、根の発達を阻害する要因が少なかったことに加えて、もみ殻灰による肥効が大きかったためだと推察される。置換率  $50\sim 70\%$  では、置換率 40 %と比較して、 $15\sim 30^{\circ}$  の根の割合が 4~6 %増加した。置換率 40 %では、他のケースと比較して、改良土の硬度が大きく、根が狭い範囲で伸長したと考えられる。機械的抵抗が根の分布範囲に影響を与えることが、既往研究から



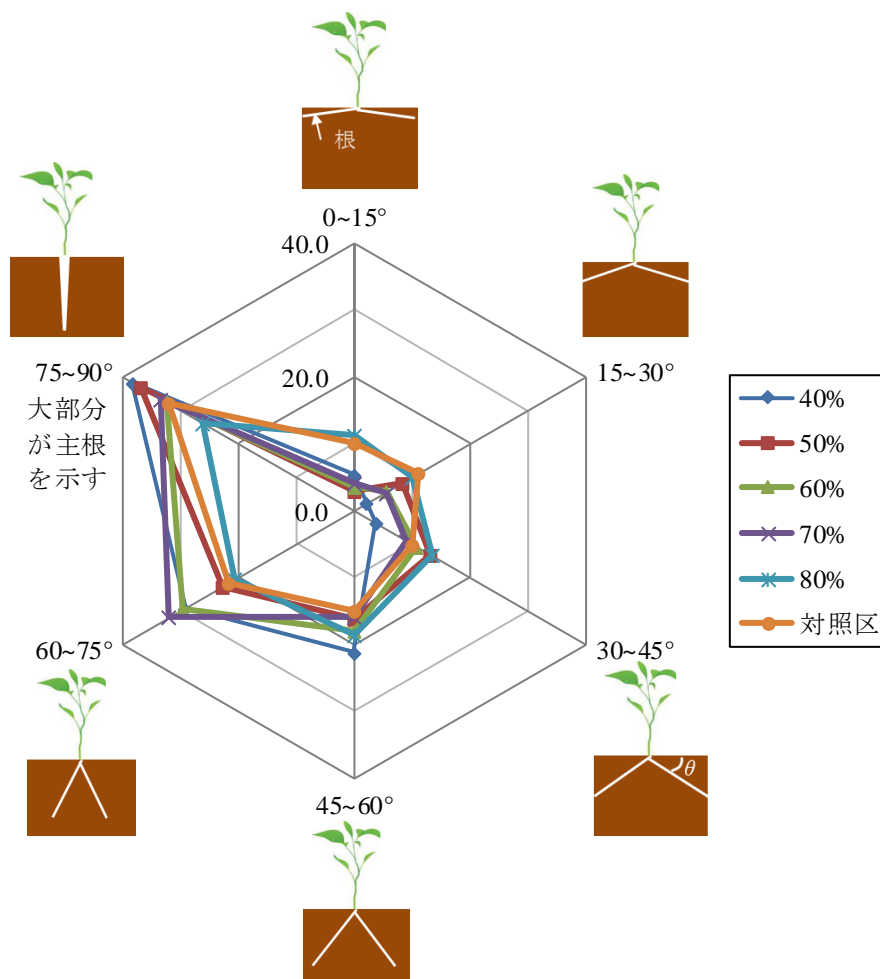
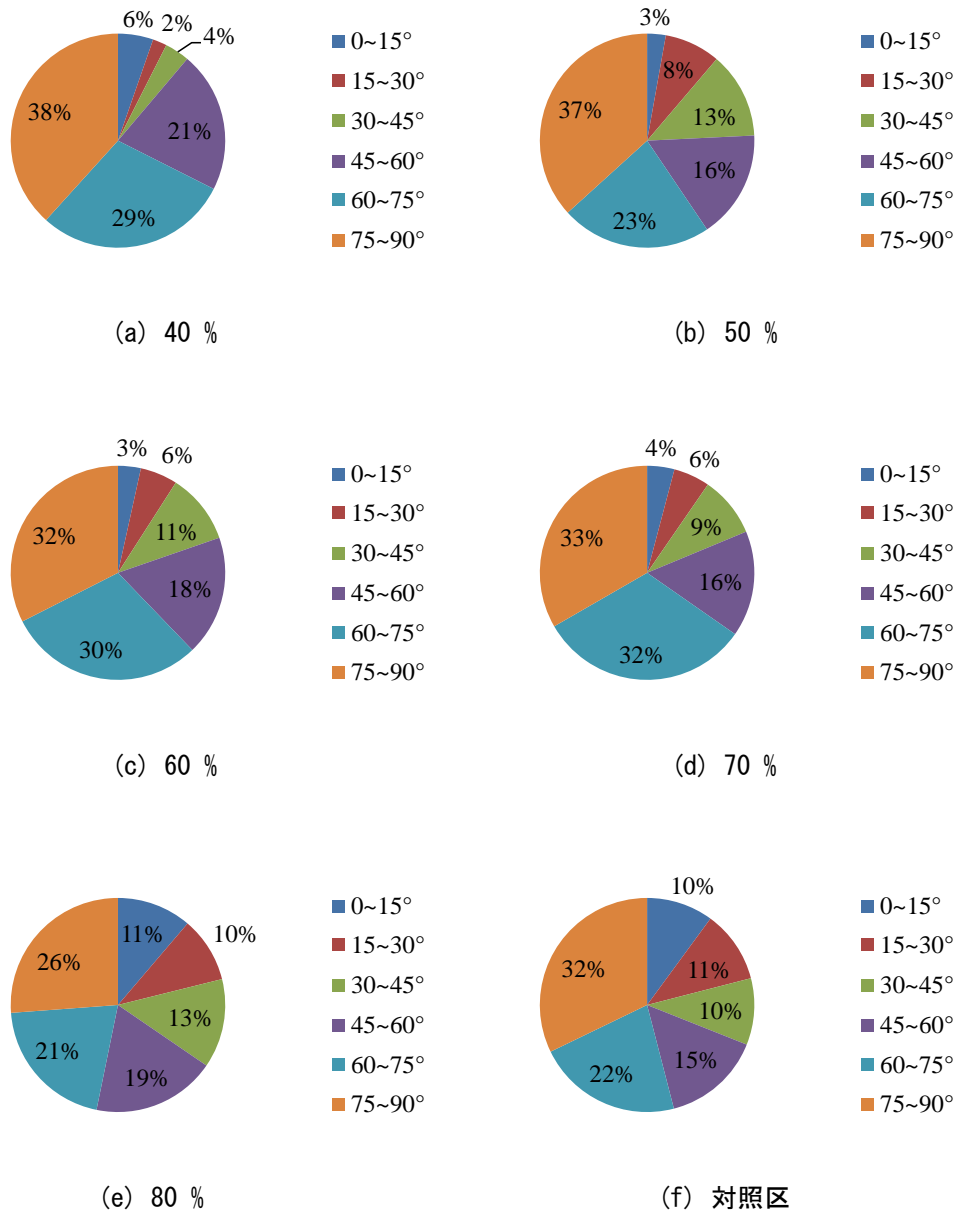


図 4-12 もみ殻灰置換率の相違による根の伸長方向の比較（単位：％）

も明らかにされている<sup>37)</sup>。次に、置換率 60 %・70 %と置換率 50 %を比較すると、置換率 60 %および 70 %では 60～75° の根の割合が大きかった。側根は傾斜重力屈性を示し、横あるいは斜め方向へ伸長する<sup>24)</sup>。置換率 60 %および 70 %では 50 %と比較してより側根が発達したと推察される。このような根圏の発達には、乾物重に対する考察でも記述した通り、空隙構造の発達と保水力の増加によると考えられる。



\*0°に近づくほど水平方向（地面と平行な方向）, 90°に近づくほど鉛直方向（重力方向）に伸長することを示している。

図 4-13 もみ殻灰置換率の相違による水平方向に対する根の角度の分布

#### 4. 4. もみ殻灰置換率の相違が材料特性に与える影響

第2章～第4章の結果を踏まえて、環境負荷量、耐久性、植栽への適合性の3つの観点から、セメント改良土においてももみ殻灰置換率が材料特性に与える影響を考察する。図4-14に単位結合力あたりのCO<sub>2</sub>排出量と根系の形成の可否を示す。結合力は第3章の式(3-35)より算出した他の粒子との接点数 $k$ と接触点での結合力 $F$ との積である。単位結合力あたりのCO<sub>2</sub>排出量は実質的な環境負荷量を示している。

図4-14より、単位結合力あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、置換率50%で最大値を示し、置換率60%で最小値を示したのちに増加する傾向だった。植栽を必要としない圧縮強度1.0 N/mm<sup>2</sup>以上の場合（置換率0～25%）には、もみ殻灰を混和しないほうが環境負荷量を低減できることが明らかになった。次に、植栽が可能な置換率40～80%の場合について考察する。図4-15に置換率40～80%における単位結合力あたりのCO<sub>2</sub>排出量と根の最大伸長量の関係を示す。置換率40%および50%は環境負荷量が大きく、植栽への適合性が低いため、緑化基盤材の必要条件を満たさないと考えられる。置換率60%～80%では植栽への適合性が高く、緑化基盤材として適用可能だと考えられる。その中で、耐久性や環境親和性を考慮すると、置換率60%は、根圏が発達できるとともに、粒子結合力が大きく、環境負荷が小さいことから、本実験条件では適当な配合だと考えられる。

以上のように、求められる要求性能によって、もみ殻灰の混和の有無やもみ殻灰の置換率が異なることが明らかになった。

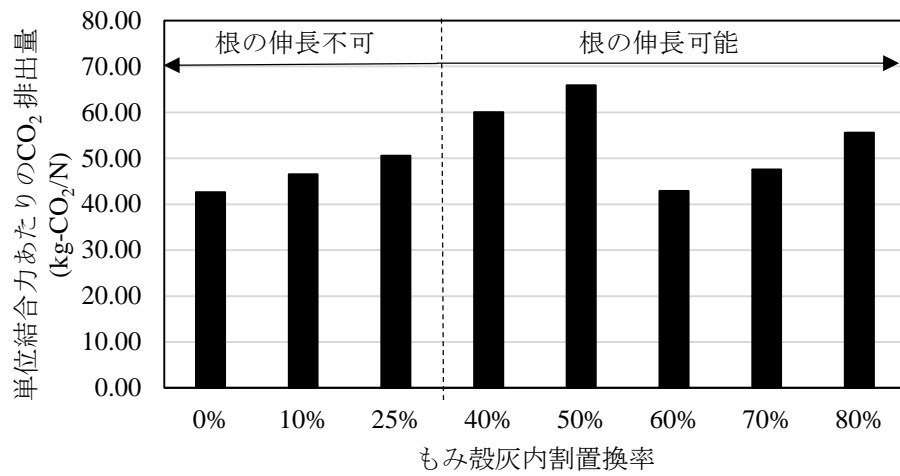


図 4-14 単位結合力あたりの CO<sub>2</sub> 排出量と根系の形成の可否

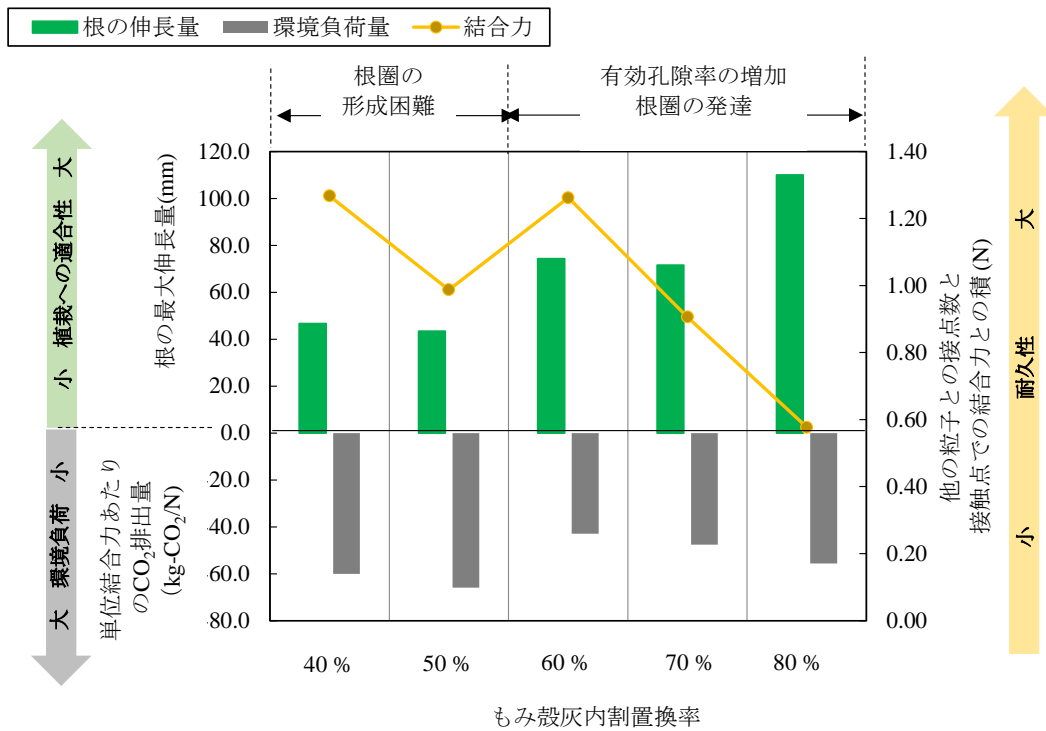


図 4-15 もみ殻灰置換率が植栽への適合性・耐久性・環境親和性に与える影響

## 4.5. まとめ

第4章では、もみ殻灰混和した MgO 改良土およびセメント改良土を対象に、植栽試験を行い、緑化基盤材としての性能を評価した。MgO 改良土では、ペレニアンライグラスおよびトールフェスクを混合した種子を用いて植栽試験を行った。フラクタル次元および葉色を用いて根圏の発達状況を検討した。セメント改良土では、緑化基盤材としての性能を通気性、透水性、保水性、安定性の観点から評価した。植栽試験はイワダレソウ (*Lippia canescens Kunth*) を用いて実施した。画像解析から根の到達深度および根の伸長方向を検討した。セメント改良土において環境負荷量、耐久性、植栽への適合性の3つの観点から、もみ殻灰置換率の相違が材料特性に与える影響を考察した。検討の結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 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の混和が有意差1%で影響することが明らかになった。特に、MgO 添加率が増加するほど、対照区と比較して、もみ殻灰混和区での地上部乾物重量の増加が確認された。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。
- (2) 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、もみ殻灰混和区では、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。もみ殻灰を混和することで根が発達することが明らかになった。
- (3) MgO の添加率が増加すると、Red 値が増加することが確認された。もみ殻灰混和区では、すべてのケースで他の2シリーズ（対照区およびもみ殻灰・稲わら繊維混和区）と比較して Red 値が小さいことが確認された。

- (4) もみ殻灰を混和したセメント改良土において緑化基盤材としての性能を評価した結果、置換率 50 %以上で、通気性、透水性、安定性の性能目標値を満たした。
- (5) もみ殻灰置換率 80 %ではセメントを添加していない対照区と同程度に根が伸長しており、もみ殻灰の肥効が明らかになった。置換率 80 %および対照区における乾物重と比較して、置換率 40 %および 50 %では約 30 %、置換率 60 %および 70 %では約 70 %に減少した。置換率の減少に伴って土壌硬度が増加したことで根の伸長が阻害されたと考えられる。
- (6) 根の到達深度は、置換率 40 %および 50 %、60 %および 70 %、80 %および対照区との 3 つの間で有意差を示した。深度の相違は、土壌硬度と空隙構造および保水力に起因すると考えられる。
- (7) すべてのケースで 75~90° の根 (鉛直方向) の割合が最も大きいことが明らかになった。置換率 80 %および対照区では、その他のケースと異なり全ての方向に根が広がっていることが示された。置換率 80 %では、機械的抵抗力が小さく、根の発達を阻害する要因が少なかったことに加えて、もみ殻灰による肥効が大きかったためだと推察される。置換率 50~70 %では、置換率 40 %と比較して、15~30° の根の割合が 4~6 %増加した。置換率 60 %・70 %と置換率 50 %を比較すると、置換率 60 %および 70 %では 60~75° の根の割合が大きかった。

(8) 単位結合力あたりの CO<sub>2</sub> 排出量は、置換率 50 %で最大値を示し、置換率 60 %で最小値を示したのちに増加する傾向だった。一方、植栽を必要としない圧縮強度 1.0 N/mm<sup>2</sup> 以上の場合（置換率 0～25 %）には、もみ殻灰を混和しないほうが環境負荷量を低減できることが明らかになった。

以上より、改良土の物理性の観点からは、もみ殻灰置換率 50 %以上で性能目標値を満たすが、根圏の発達状況を指標とすると、置換率 60 %以上からが緑化基盤材として適していることが明らかになった。置換率によって、植栽への適合性、環境負荷量および力学性能が変化することが明らかになった。このことから、要求性能によって、もみ殻灰の混和の有無や混和量の最適値が異なることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) 環境省自然環境局：自然公園における法面緑化指針，2015.
- 2) 吉田祥子：「自然公園における法面緑化指針」の策定について，日本緑化工学会誌，41(4)，pp. 438~441，2016.
- 3) 吉田寛：播種工における法面緑化とモニタリング手法，日本緑化工学会誌，30(3)，pp. 532~540，2005.
- 4) Rietveld, H.: A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structure, Journal of applied Crystallography, 2(2), pp. 65~71, 1969.
- 5) Mandelblot, B.B.: The fractal geometry of nature, W.H. Freeman & Company, 480 p, 1982.
- 6) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，186 p，1986.
- 7) Tatsumi, J. Yamauchi, A., Kono, Y. : Fractal analysis of plant root system, Annals of Botany, 64, pp. 499~503.
- 8) 吉村晴佳，石田雅士，小橋澄治，大手桂二：樹葉の季節的可視域分光特性変化におよぼす植物色素の影響，日本緑化工学会誌，20(2)，pp. 99~110，1994.
- 9) 飯田義彦，今西純一，森本幸裕：デジタル画像の色彩学的指標を用いた 2 ヶ年におけるヤマザクラ開芽特性の比較，日本緑化工学会誌，40(1)，pp. 66~71，2014.
- 10) 内村圭一，岩崎洋一郎，松島宏典：画像処理入門，培風館，180 p，2010.
- 11) 島本由麻，鈴木哲也，森井俊広：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，日本緑化工学会誌，41(1)，pp. 9~14，2015.
- 12) 森泉美穂子，Prakash, N. B., 伊藤純雄：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)，pp. 609~612，2004.
- 13) Savant, N. K., Snyder, G. H. and Datnoff, L. E.: Silicon management and sustainable rice production, Adv. Agron., 58, pp. 151~199, 1997.
- 14) 嶋田典司：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，pp. 1~105，1972.
- 15) 日本芝草学会編：新訂芝生と緑化，ソフトサイエンス社，562 p，1988.
- 16) 牛嶋孝，兼子明，山本富三：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，pp. 476~483，2004.
- 17) 日本法面緑化技術協会：のり面緑化技術 厚層基材吹付工，山海堂，169 p，2005.



- 18) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 4 版， セメント協会， pp. 67~69, 2012.
- 19) 安西徹郎， 犬伏和之：土壌学概論， 朝倉書店， 228 p, 2001.
- 20) 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：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協会， 2003.
- 21) 日本道路協会：道路緑化技術基準同解説， pp. 307~318, 日本道路協会， 2002.
- 22) 都市緑化機構：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, 都市再生共済会， 2004.
- 23) 島本由麻， 鈴木哲也， 森井俊広：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， 日本緑化工学会誌， 43(1)， pp. 127~132, 2017.
- 24) 根の事典編集委員会編：根の事典新装版， 朝倉書店， 438 p, 2012.
- 25) Nielsen, K. L., Lynch, J. P. and Weiss, H. N. : Fractal geometry of bean root systems: correlations between spatial and fractal dimension, *Am J Bot*, 84, pp. 26~33, 1997.
- 26) Da Silva, D., Boudon, F., Godin, C. , Puech, O., Smith, C. and Sinoquet, H. : A critical appraisal of the box counting method to assess the fractal dimension of tree crowns. In G Bebis, R Boyle, B Parvin, D Koracin, P Remagnino, A Nefian, G Meenakshisundaram, V Pascucci, J Zara J Molineros, H Theisel, T Malzbender, eds, *Advances in Visual Computing*, Vol 4291. Springer, Berlin, pp. 751~760, 2006.
- 27) Danjon, F. and Reubens, B. : Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation, *Plant and Soil*, 303(1-2), pp. 1~34, 2008.
- 28) Mairhofer, S., Zappala, S. Tracy, S. Sturrock, C. Bennett, M. J., Mooney, S. J. and Pridmore, T. : RooTrak: automated recovery of three-dimensional plant root architecture in soil from x-ray microcomputed tomography images using visual tracking, *Plant Physiology*, 158, pp. 561~569, 2012.
- 29) 飯嶋盛雄， 河野恭広：土壌圧縮の影響下における 4 種のイネ科作物の根系構造の種間差， 日本作物学会紀事， 60(1)， pp. 130~145, 1991.
- 30) Sarquis, J. I. and Jordan, W. R. : Ethylene Evolution from Maize (*Zea mays* L.) Seedling Roots and Shoots in Response to Mechanical Impedance, *Plant Physiology*, 96, pp. 1171~1177, 1991.
- 31) 中野裕司， 東村榮之助， 本郷章：繊維補強厚層基材吹付工法の開発， 緑化工技術， 12(3)， pp. 7~12, 1986.
- 32) 堀江直樹， 石垣幸整， 福永健司：セメントを混合した連続繊維補強土の生育基盤としての適用性， 日本緑化工学会誌， 34(1)， pp. 207~210, 2008.
- 33) 大出真毅：イワダレソウ， 草と緑， 2， pp. 24~28, 2010.

- 34) Silberbush, M. and Barber, S. A.: Sensitivity analysis of parameters used in simulating K uptake with a mechanistic mathematical model, *Agronomy Journal*, 75, pp.851~854, 1983.
- 35) Barber, S. A. and Silberbush, M.: Plant Root Morphology and Nutrient Uptake, ASA Special Publication, *Roots, Nutrient and Water Influx, and Plant Growth*, 49, pp. 65~87, 1984.
- 36) Van Noordwijk, M. and De Willigen, P.: Plant Roots and their Environment (McMichael, B. L. and Perssoneds, H. eds.), Elsevier Science Publishers B. V., pp. 381~385, 1991.
- 37) Eshel, A. and Beeckman, T.: *Plant Roots: The Hidden Half*, Fourth Edition, CRC Press, 848 p., 2013.

## 第 5 章 結論

近年、環境問題の解決や社会の持続的発展を目指して、地域資源の活用による環境親和性に優れた植物導入可能な構造材料の開発が求められている。地域資源のなかでも、稲作地域では農業副産物であるもみ殻に対する有効な活用方法の確立が求められている。加えて、緑化基盤材のような多孔質材料は低強度での破壊進行が予測されるため強度値を補完する指標が必要である。

本研究では、もみ殻の活用による環境親和性に優れた緑化基盤材の開発およびその材質評価方法の構築を目的としている。開発材料は環境親和性（二酸化炭素排出量の削減効果）、空隙構造および力学性能、植栽への適合性の 3 つの視点から総合的に評価した。材質評価方法は割裂引張強度試験および圧縮強度試験に Acoustic Emission (AE) 法を導入することで検討した。

材料の環境親和性は、新潟県で運用中のもみ殻ガス化コージェネレーションシステムを対象として、ライフサイクルでの二酸化炭素排出量を試算することで評価した。システムのエネルギー収支を概算した結果、もみ殻を活用することで、年間約 47 t の二酸化炭素排出量が削減できることが示された。もみ殻灰で固化材を置換することで、固化材添加量の減少に伴って、二酸化炭素排出量を削減できることが明らかになった。もみ殻およびもみ殻灰を活用することで、環境負荷を十分に低減できることが明らかになった。

空隙分布および透水性、保水性を評価した結果、置換率の相違によって多孔質構造の物性値へ及ぼす影響が異なることが示唆された。もみ殻灰の内割り置換率が 10 %以下と 25 %以上で空隙分布が異なることが明らかになった。力学特性および破壊挙動は、AE 法およびデジタル画像相関法を用いた割裂引張強度試験および圧縮強度試験から評価した。破壊力学パラメータとの比較結果から、AE エネルギーの有用性が明らかになった。累積 AE エネルギーと他の粒子との接点数と接触点での結合力の積の関係には、1 %水準で正の相関があるこ

とが示された。このことから、累積 AE エネルギーは多孔質材料の結合力を表す指標として有効であることが明らかとなり、AE 法を用いた新たな材質評価法を提示できたものと考えられる。

もみ殻灰を置換した MgO 改良土およびセメント改良土を対象に、イワダレソウ (*Lippia canescens Kunth*) を用いて植栽試験を行い、緑化基盤材として適している配合を検討した。土壌の物理性の観点からは、もみ殻灰置換率 50 %以上で性能目標値を満たすが、根圏の発達状況を指標とすると、置換率 60 %以上からが緑化基盤材として適していることが明らかになった。さらに、耐久性や環境親和性を合わせて考慮すると、置換率 60 %では粒子結合力が大きく、環境負荷量が少ないことが明らかになった。細孔径分布試験より置換率 60 %では置換率 40 %, 50 %, 70 %, 80 %と比較して、ゲル空隙率に変化がなく、粗孔隙率が最小値を示した。このことから、置換率 60 %において最適な締固め条件であったため粒子結合力が大きかったと推察される。一方、植栽を必要としない圧縮強度 1.0 N/mm<sup>2</sup> 以上の場合（置換率 0~25 %）には、もみ殻灰を混和しないほうが環境負荷量を低減できることが明らかになった。

以上の成果より、要求性能によって、もみ殻灰の混和の有無や混和量の最適値が異なることが明らかになった。本研究は、地域資源の循環利用を可能にし、地域の持続的発展につながるという点で有用性が高いと考えられる。今後、緑化基盤材の維持管理が課題となる中で、開発手法は性能評価において精度の向上に寄与できると考えられる。

## 謝辞

本論文は、筆者が新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程に在学中の2015年4月から2018年3月までの研究成果を取りまとめたものです。

本論文の主査として、新潟大学農学部森井俊広教授に多くのご指導を賜りました。ご多忙の中、懇切丁寧にご対応していただきましたことに心より感謝申し上げます。

新潟大学農学部中野和弘教授、新潟大学工学部佐伯竜彦教授には、論文審査における副査として、多くのご教示を賜りました。記して、感謝申し上げます。

本研究の遂行ならびに本論文のとりまとめにあたりましては、新潟大学農学部鈴木哲也准教授にご指導を賜りました。鈴木准教授には、学部4年生からの6年間にわたり、数多くの貴重な機会を与えていただくとともに、研究に限らず筆者が迷っているとき温かくご相談にのっていただきました。深く感謝申し上げます。

もみ殻ガス化プラントの解析において、新潟大学農学部大橋慎太郎助教に多くのご教示を賜りました。記して、感謝申し上げます。

もみ殻灰の化学分析に関して、新潟大学工学部佐伯竜彦教授、新潟大学工学部斎藤豪准教授、新潟大学自然科学研究科博士後期課程の佐藤賢之介さんにご指導ならびにご協力いただきました。記して、感謝申し上げます。

X線CT計測において、日本大学生物資源学部笹田勝寛准教授、中山智宏教授にご協力いただきました。また、日本大学生物資源学部動物病院の石川智恵子先生、照井治子先生には、X線CTの基礎知識をご教示いただくとともに、撮影方法に関して多くのご助言をいただきました。記して、感謝申し上げます。

新潟大学農学部粟生田忠雄助教、稲葉一成助教には、多くの土質実験器具をお借りするとともに、実験に関するご助言をいただきました。記して、感謝申し上げます。

AE-SiGMA解析において、首都大学東京大学院大野健太郎助教にご教示いただきました。

記して、感謝申し上げます。

鈴木研究室の皆さんには班を問わず、多くの実験および解析の遂行にご協力いただきました。現研究室メンバーである新潟大学自然科学研究科博士前期課程の高橋航さん、新潟大学農学部菅原渉平さん、高橋健一さん、土田真生さん、西村咲紀さん、鈴木研究室卒業生の小林秀一さん、上野由樹さん、山岸俊太郎さん、舘翔平さん、鶴見竜也さん、寺井達郎さん、岸直人さん、高橋茉央さん、本田泰大さん、上村わこさん、須田翼さん、永井太耀さん、目黒健さん、大岡綾美さん、永田瑞穂さんに心より感謝申し上げます。

最後に私事になりますが、在学期間中を通して終始支えてくれた家族に感謝いたします。