

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

廃石膏ボードリサイクルの品質管理の在り方と社会実装 (3-1702)

平成29年度～平成30年度

Principles and practical implementation of quality control for recycling waste gypsum board

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

福岡大学

愛知工業大学

(株) 日本能率協会総合研究所

(一社) 泥土リサイクル協会

2019年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II－1 廃石膏ボードの地盤利用における環境質の制御に関する研究 （国立研究開発法人国立環境研究所）	14
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II－2 廃石膏ボードの地盤利用時における工学的ベネフィットの検証 （福岡大学）	22
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II－3 廃石膏ボード処理物の品質管理に関する検討 （愛知工業大学）	34
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

Ⅱ－４ 廃石膏ボードのマテリアルフローと他分野を対象とした需要量・経済効果・・・・・・・・ 52
(株式会社日本能率協会総合研究所)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

Ⅱ－５ 環境安全品質ガイドライン策定による廃石膏ボードリサイクルシステムの社会実装・・ 71
(一般社団法人泥土リサイクル協会)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

Ⅲ. 英文Abstract・・・・・・・・・・・・ 85

I. 成果の概要

課題名 3-1702 廃石膏ボードリサイクルの品質管理の在り方と社会実装

課題代表者名 遠藤 和人（国立研究開発法人国立環境研究所福島支部汚染廃棄物管理研究室室長）

研究実施期間 平成29～30年度

累計予算額 59,719千円

（うち平成29年度：30,625千円、平成30年度：29,094千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 廃石膏ボード、再生石膏粉、品質管理、地盤工学的利用、配合試験、硫化水素ガス、有効利用ガイドライン

研究体制

- （1）廃石膏ボードの地盤利用における環境質の制御（国立研究開発法人国立環境研究所）
- （2）廃石膏ボードの地盤利用における工学的ベネフィットの検証（福岡大学）
- （3）廃石膏ボード処理物の品質管理に関する検討（愛知工業大学）
- （4）廃石膏ボードのマテリアルフローと他分野を対象とした需要量・経済効果（株式会社日本能率協会総合研究所）
- （5）環境安全品質ガイドライン策定による廃石膏ボードリサイクルシステムの社会実装（一般社団法人泥土リサイクル協会）

1. はじめに（研究背景等）

建築物の必須資材として石膏ボードは年間300万トン以上が使用されているが、廃石膏ボードの再生利用は思うように進んでいない。現在の廃石膏ボードの排出量は、新築端材系と解体系を合わせて110万トン程度であるが、今後、排出量が培養する試算となっており、十数年先には、製造量と排出量が逆転する可能性が高い。そのため、再生利用が停滞すると、最終処分量が数十万トン規模で増大し、廃棄物業界への打撃となる可能性が高い。現在、新築端材系の廃石膏ボードの多くは、石膏ボード原料となるボードtoボードリサイクルが展開されているものの、解体系の廃石膏ボードでは進んでおらず、多くは埋立処分されている。さらに、解体系の廃石膏ボードのマテリアルフローとして行き先不明な割合が3割を超えている。廃石膏ボードは、建設リサイクル法の特定資材以外では突出した排出量であるが、マテリアルフローが不明確であることと、資源化技術が未熟だとして特定資材化が見送られている。再生利用が進まない他の要因は、過去に、硫化水素ガスの発生事故があったり、石膏ボード原料である副産石膏由来のフッ素の溶出量が高いためと考えられるが、これら環境質の制御は技術的に解決できるレベルにあると思われる。廃石膏ボードのリサイクルは、再生石膏粉を製造することであるが、400社程度と推定されるリサイクル業者があり、各社で再生石膏粉の品質（紙の混入率や、熱処理石膏の半水石膏の割合など）にバラツキがある。そのため、品質を管理するための指標を作るべきとの声がリサイクル業界からも挙がっている。十数年後には倍増するであろう解体系の廃石膏ボードのリサイクル率を上昇させるためには、品質管理のガイドラインが必要であり、業界の信頼性向上と共に、再生石膏粉の品質管理を通して資源化技術を確実なものとし、将来に備えたりサイクルシステムを形作っていく努力が求められている。

2. 研究開発目的

現在、100万トン強の排出量となっている廃石膏ボードは、十数年先には200万トンを超えることが予想されており、その9割以上を解体系の廃石膏ボードが占める。解体系の廃石膏ボードは、品質が一定で無いことから有効利用が進まず50%以上が最終処分されている（マテリアルフロー上の不明分を含む）。将来、倍増する解体系の廃石膏ボードの有効利用のためには、品質を管理し、その利用先を確保するための技術や管理システムを確立することが必要である。そこで、農業や畜産利用先の重要量予測や、将来にわたって適正なリサイクルシステムが確立できるよう、最新の廃石膏ボードのマテリアルフローを調査すると共に時系列を考慮したマテリアルフローを示す（サブテーマ4）。ボードtoボードのリサイクル率を向上させると同時に、地盤改良材等の地盤利用の拡大も必要となる可能性が高い。そのためには、廃石膏粉の品詞検査プロトコルを提案し（サブテーマ3）、廃石膏ボードリサイクル業界のための品質管理ガイドラインを作成することで（サブテーマ5）、廃石膏ボードリサイクルの信頼性を向上させることが求められる。地盤利用では、懸念されている硫化水素ガス発生を評価するための検査法をガイドラインに盛り込み（サブテーマ1）、フッ素の溶出特性に関する留意点を明らかにしつつ、再生石膏粉を用いた地盤改良材の有効性を提示する（サブテーマ2）。また、ガイドラインは、廃石膏ボードのリサイクルに関する全国協議会メンバーに適用して頂く事で、本研究成果の社会実装を完遂させる（サブテーマ5）。

3. 研究開発の方法

（1）廃石膏ボードの地盤利用における環境質の制御

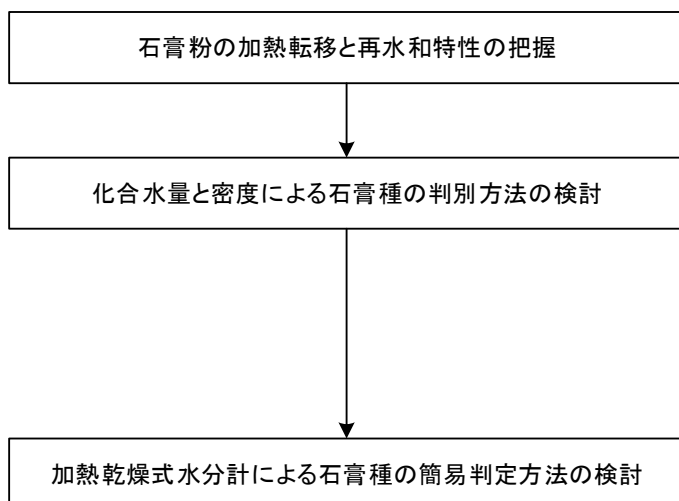
廃石膏ボード由来の再生石膏粉を地盤利用する際に懸念されているのは、フッ素の溶出と硫化水素ガスの発生である。フッ素の溶出については、土壤環境基準等の基準や試験方法が明確であることや、セメントや石灰等の助剤として再生石膏粉を使用する場合にはフッ素の溶出が抑制されること、中性固化材として再生石膏粉を使用する場合でもフッ素溶出抑制剤を添加することで環境基準を満たすことができる等、フッ素については技術的に確率されつつある。一方で、硫化水素ガスについては、試験方法も判定基準も存在しない。そこで、再生石膏粉を用いた改質剤や固化材と土壌を混合した試料を対象として、硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法について検討を行った。試験結果の評価は、なるべく短期間で試験結果が得られる手法を選定することとした。また、共通試料を用いて、選定した試験方法を民間の2分析機関と国立環境研究所の3機関で実施し、試験結果を比較検証することで、本試験方法が普及できるかどうかを検討した。

（2）廃石膏ボードの地盤利用における工学的ベネフィットの検証

本研究では、再生石膏に特殊添加材を混合した中性固化材の開発を行い、その力学特性と不溶化効果の把握を行う。力学特性については、再生石膏の種類（特に二水、半水）、特殊添加材の混入率、養生日数の影響に着目し、これらが土壌改良効果に及ぼす影響について一軸圧縮試験を用いて検討を行う。その際、市販の中性固化材を比較材とし、改良効果を検証する。溶出特性については、力学特性の検討で使用した試験体を使用し、pHの影響、フッ素および六価クロムの不溶化効果について溶出試験（環告46号試験）により環境安全性を検証する。以上の研究結果を基に、石膏系改良材のベネフィットを明らかにする。

(3) 廃石膏ボード処理物の品質管理に関する検討

(3)-1. 石膏種の判別方法

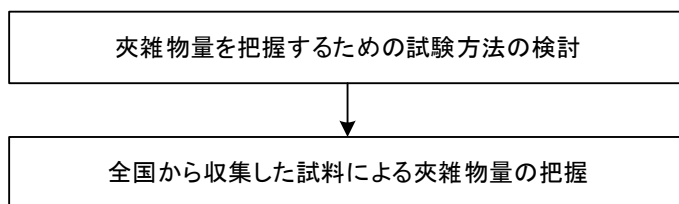


市販の石膏粉(二水, β 型半水, III型無水, II 型無水)を用いて、熱重量-示差熱試験(TG-DTA)および電気乾燥炉による加熱時間と質量変化の試験により、石膏粉の加熱転移と再水和特性を調査した。

再生石膏粉(二水:6試料, 半水:3試料, 無水:3試料)を用いて、X線回折により各石膏種の構成比を把握し、試薬の化合水量および密度から、再生石膏粉の理論上の化合水量および密度を算出した。再生石膏粉の実測の化合水量および密度を測定し、理論値との相関性を確認することで、化合水量と密度の測定によって石膏種および夾雑物量が把握できることを見出した。

市販の二水石膏および半水石膏を用いて、加熱乾燥式水分計によって化合水量を測定する場合の加熱温度、加熱時間、試料量について検討した。二水+半水、半水+無水の混合試料を混合割合を種々変化させて作成し、加熱乾燥式水分計によって測定した化合水量から混合割合を逆算した。逆算した混合割合と試料の混合割合は概ね一致することから、加熱乾燥式水分計によって測定した化合水量から石膏種が判定できることを確認した。

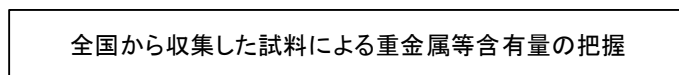
(3)-2. 夾雑物量を把握するための試験方法



夾雑物量を把握するための試験を行い、試験手順を整理した。

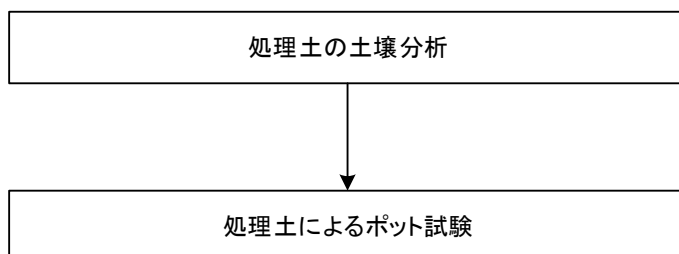
全国から収取した再生石膏粉(二水:37試料, 半水:6試料)について、上記手順により、再生石膏粉の夾雑物量の実態を調査した。

(3)-3. 再生石膏粉の重金属等含有量の調査



全国から収取した再生石膏粉(二水:38試料, 半水:6試料, 無水10試料)について、底質調査法による全含有量試験を実施し、再生石膏粉の重金属等の含有量の実態を調査した。
分析項目:カドミウム, 鉛, 六価クロム, 砒素, 総水銀, セレン, ふっ素, ほう素

(3)-4. 植生基盤材への適用性評価



ため池の浚渫汚泥に対して再生石膏粉を用いて土壌改良を行い、植生基盤材としての適用性を評価するための土壌分析を実施した。

試験項目:pH, 土壌硬度, 飽和透水係数, 有効水分保持量, 全窒素, 有機炭素含有量, 塩基置換容量

養生28日の処理土を用いて、コマツナを用いたポット試験による植生の生育観察を行った。

(4) 廃石膏ボードのマテリアルフローと他分野を対象とした需要量・経済効果

我が国における石膏の流通量については、経済産業省や財務省の統計資料ならびに関係者へのヒアリングによって求めた。廃石膏ボードのマテリアルフローは、ガラス、コンクリートくず、及び陶磁器くず、ガレキ類を扱っている中間処理業者、ならびに管理型最終処分上に対するアンケート調査によって実施した。廃石膏ボードは、

ボードの形態で移動している以外にも、解体時に粉状となって混合廃棄物に混入しているため、建設系廃棄物を中間処理しているふり下残さ中の石膏含有量も評価してマテリアルフローに加えた。再生石膏粉の潜在的需要量を推計するため、地盤改良分野、農業分野、畜産分野に着目し、それぞれにおける潜在的需要量を推算した。

(5)環境安全品質ガイドライン策定による廃石膏ボードリサイクルシステムの社会実装

＜平成29年度＞ 品質管理ガイドラインの策定に向け、有識者、排出事業者、中間処理企業、コンサルタントらをメンバーとした検討委員会を組織すると共に、関係省庁や業界団体にもオブザーバーとして参画して頂き、廃石膏ボードリサイクルの品質管理と市場展開や産業界に及ぼす影響について検討し、ガイドラインの素案を作成する。

＜平成30年度＞ 品質管理プロトコルのリサイクル業者への適用結果や、地盤利用時の品質評価法の提案を含み、検討委員会での議論を深めることでガイドラインを完成させ、全国石膏ボードリサイクル協議会の参画企業への社会実装を行う。また、日本建設業連合会や全国産業資源循環連合会、石膏ボード工業会に知って頂くための啓発活動を行うため、講演会や勉強会を開催し、技術展示会等のイベントに参加して広報活動を行う。

4. 結果及び考察

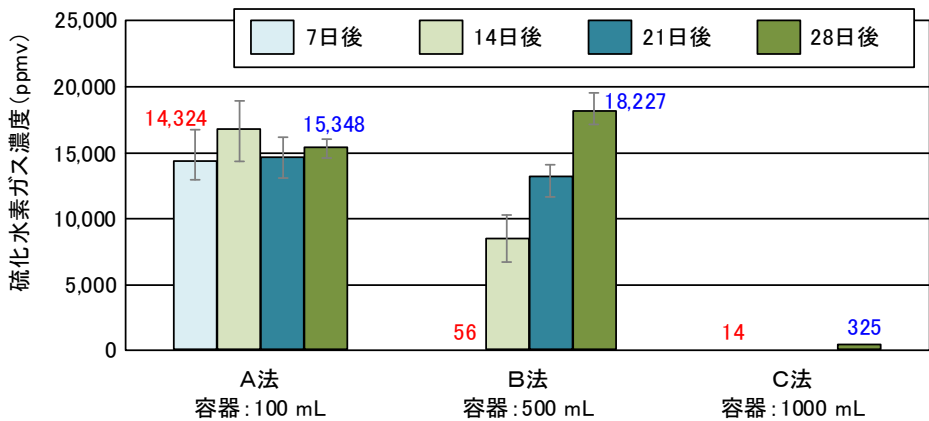
(1)廃石膏ボードの地盤利用における環境質の制御

(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法

硫化水素ガス発生ポテンシャル試験は標準化されておらず、各研究機関で異なる方法が採用されている。主な違いは、容器の大きさと植種の有無である。それぞれの違いを表(1)-1に示す。硫化水素ガスが確実に発生する再生二水石膏粉を用いて、それぞれの培養試験結果の比較を図(1)-1に示す。なお、本試験では植種を実施しなかった。硫化水素ガス発生量はA法≧B法＞C法となった。C法が小さかったのは、植種しなかったことが要因と思われる。本試験は、将来的には地盤改質や地盤改良時の配合試験で実施することを想定しているため、なるべく短期間で判定できることが望ましい。A法は、短期間で硫化水素ガス発生リスクのポテンシャルを測定するという考え方に合致しており、容器自体も小さいため、硫化水素ガスの絶対量が少なく、容器破損時の試験者のリスクも小さいと考えられる。

表(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法

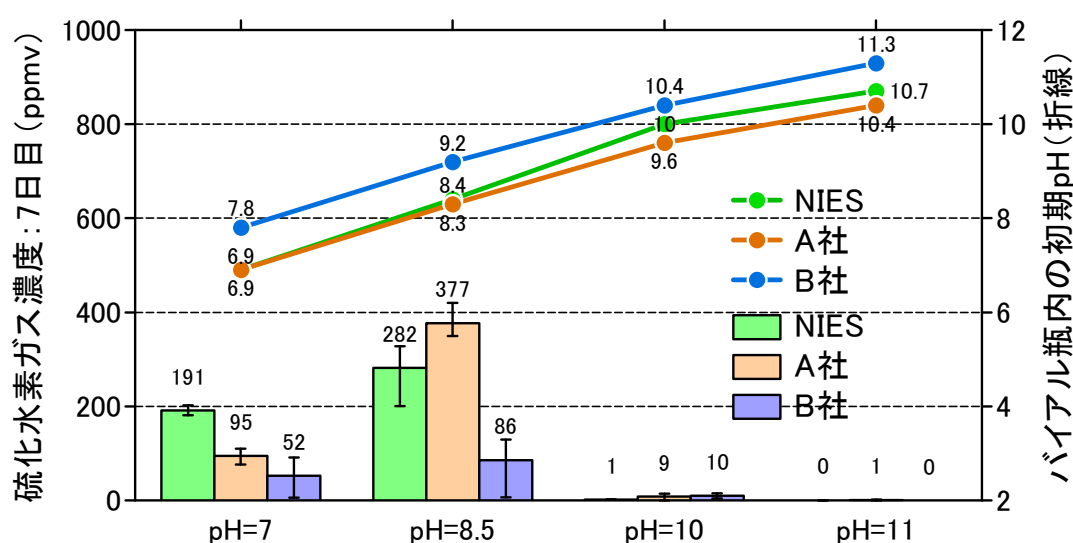
方法	容器の大きさ	植種の有無
A法	100 mL	なし
B法	500 mL	あり
C法	1,000 mL	あり



図(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験方法の違いによる比較結果

(1)-2 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の相互比較試験

標準法が無いために本ポテンシャル試験の実用性について検証されていない。そこで、100 mLの容器を用いたA法について、国立環境研究所(NIES)と民間の分析会社2社との比較実験を行った。A社は過去に同様の試験を実施した経験があり、B社についてはこれまでに試験経験が無い分析会社である。試料は河川浚渫土を母材として再生二水石膏粉を重量比で10%混合した後、懸濁液が所定のpHになるように水酸化カルシウムを用いて調整した試料である。分析会社で改めて初期pHを測定し、その後、硫化水素ガス発生ポテンシャル試験を実施し、7日間養生後の硫化水素ガス濃度を測定した。測定結果を図(1)-2に示す。硫化水素ガスは懸濁pHが9.5付近を境にして、アルカリ側でほぼ発生しなくなるが、本試験結果においても同様の結果が得られ、これまで経験のないB社であってもpHの影響を評価可能であるといえる。また、B社の硫化水素ガス濃度の誤差は、他に比較してやや大きく、経験値の差が原因と思われる。そのため、1試料について3検体を実施する必要性があるといえる。ガイドライン作成時には、本試験方法の詳細な手順について記す必要があると感じられた。

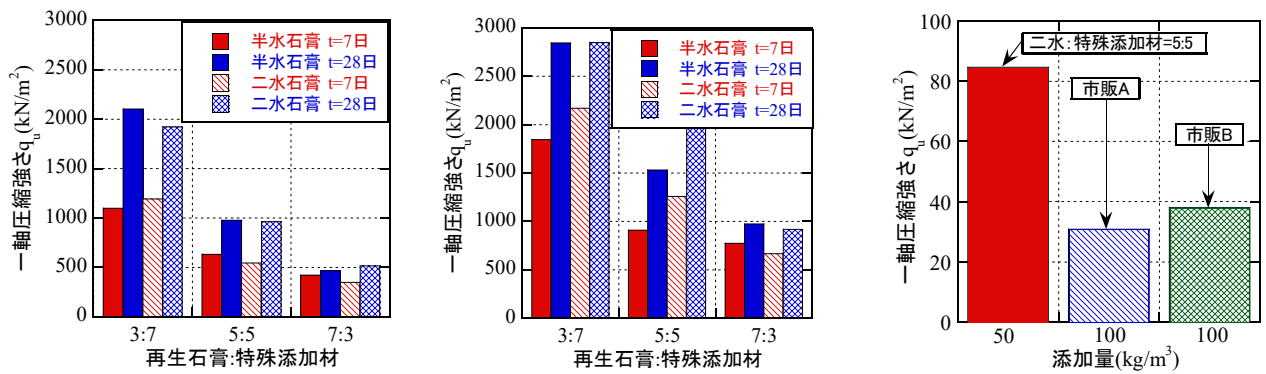


図(1)-2 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の相互比較結果

(2) 廃石膏ボードの地盤利用における工学的ベネフィットの検証

(2)-1 力学特性の把握

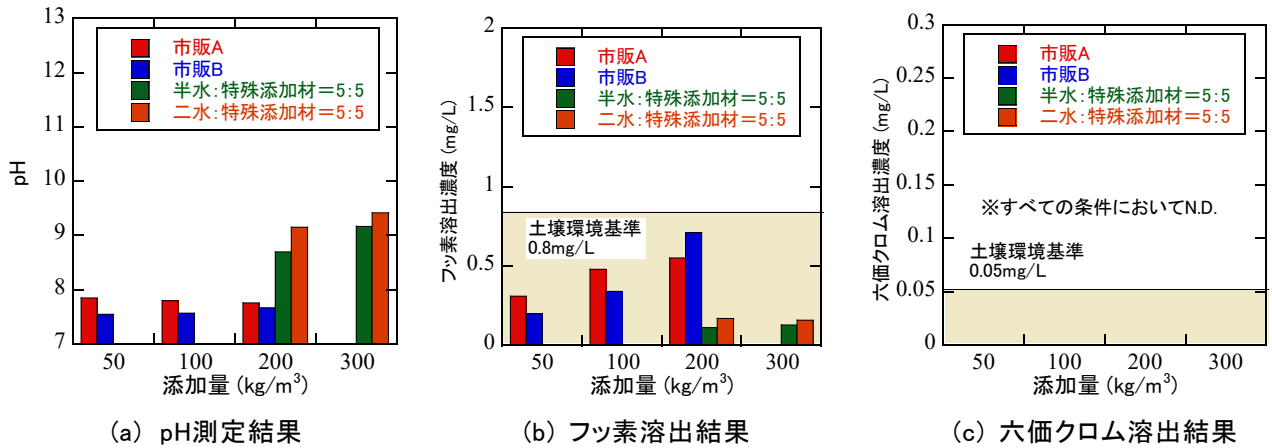
図(2)-1に一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。いずれの条件においても、固化材添加量の増加に伴い、強度増加がみられる。また、石膏の種類について着目すると、半水石膏と二水石膏を用いた条件において、最大圧縮強さにほとんど差異は見られない。このことは、焼成処理前の再生二水石膏を用いることで可能であることを示唆しており、経済的な新しい固化材の開発に期待がもてる。また、図(2)-2に市販の中性固化材と一軸圧縮強さの比較を行った結果を示す。二水石膏と特殊添加材を併用すると、市販の中性固化材より少ない添加量で同程度の強度を得られることが分かる。以上の結果より、再生二水石膏と特殊添加材を併用することで、市販の中性固化材より高い強度が得られることが明らかとなった。



(a) 固化材添加量: 200kg/m³ (b) 固化材添加量: 300kg/m³ 図(2)-2 市販の中性固化材との比較
図(2)-1 一軸圧縮強さと養生日数の関係

(2)-2 溶出特性の把握

図(2)-3にpH測定結果および溶出試験結果を示す。pHについては、市販の中性固化材に比べやや高い値を示すものの、pH8.5～9.0程度の弱アルカリ域を呈することが分かる。フッ素の溶出特性については、市販の中性固化材よりも溶出濃度を低く抑えられる結果を得た。これは、特殊添加材に含まれるアルミナ成分がフッ化アルム等の比較的溶解度の低い化合物を形成したためと考えられる。六価クロムについては、いずれの条件においても土壌環境基準値以下であった。以上の結果から、再生半水石膏および再生二水石膏と特殊添加材を併用し固化させることで、フッ素や六価クロムの溶出を抑えることができることが明らかとなった。



図(2)-3 pH測定結果および溶出試験結果

(3) 廃石膏ボード処理物の品質管理に関する検討

(3)-1 石膏種の判別方法

① 石膏粉の加熱転移と再水和特性

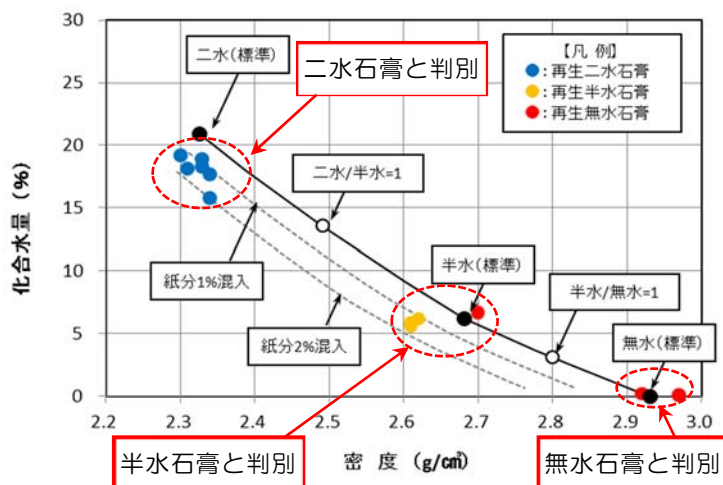
熱重量-示差熱試験(TG-DTA)を行い、各種石膏粉における熱量と相転移の関係を調査した結果、各石膏種における相転移を生じる加熱温度は、以下のとおりであった。また、Ⅲ型無水石膏と半水石膏のDTA曲線は類似した傾向を示した。

- ・二水石膏 ⇒ 半水石膏:134℃、
- ・半水石膏 ⇒ Ⅲ型無水石膏:140℃
- ・Ⅲ型無水石膏 ⇒ Ⅱ型無水石膏:324～337℃、
- ・Ⅱ型無水石膏 ⇒ Ⅰ型無水石膏:916～991℃

次に電気乾燥炉を用いて、加熱温度50℃および110℃で加熱した際の加熱時間と質量変化の関係を調査した。一般に半水石膏は130℃以上でⅢ型無水石膏へと形態が変化するとされているが、本試験で設定した110℃においても相転移を生じ、半水からⅢ型無水に変化することが確認された。また、Ⅲ型無水石膏は、室内での放冷中に、容易に再水和反応を生じて半水石膏に変化することが確認された。

② 化合水量と密度による石膏種の判別方法

熱重量-示差熱試験(TG-DTA)により石膏粉の形態変化は、試料温度の推移に伴う質量変化(すなわち石膏粉の化合水の消失量)として捉えることができることから、石膏粉の化合水量を求めれば石膏の種類(二水、半水、無水)が同定され、さらに粒子密度を把握することにより、再生石膏粉に夾雑する不純物(紙等)の概略的な量を把握することができるものと考えた。図(3)-1に示すとおり、再生石膏粉の化合水量および密度を把握することにより、再生石膏粉の概略的な夾雑物の量と石膏の種類(二水、半水、無水)を把握することができることが分かった。



図(3)-1 化合水量と密度の測定による夾雑物と石膏の種類の管理イメージ

③ 加熱乾燥式水分計による石膏種の簡易判定方法

再生石膏粉の製造業者や中間処理業者が自ら行う自主的な検査では、より簡便的な管理方法が必要であるものと考え、化合水量の測定のみで、概略的な石膏種(二水、半水、無水)の含有量を把握する手法を検討した。また、化合水量の測定は、加熱乾燥式水分計を用いることとし、その試験条件を検討した。

加熱乾燥式水分計を用いた場合、試料量5.0 gと1.0 gでは、理論値に達する加熱時間に大きな差異はなく、試料の代表性を考えれば、試料量は5.0～10.0 g程度が適正であるものと考えられ、加熱温度および加熱時間は、160℃以上で30分程度が適正であるものと考えられた。また、化合水量から、概略的な石膏種を推定するための換算表を作成した。

(3)-2. 夾雑物量を把握するための試験方法

夾雑物量を把握するための試験方法を検討し、具体的な手順を示した。また、全国石膏ボードリサイクル協議会の協力を得て、全国から収集した再生石膏粉を用いて夾雑物量を把握した。繊維分(主に紙分)は全ての試料において1.0%未満であるが、沈殿物(主に土砂)は再生二水石膏で7.37%を含む試料も存在した。

(3)-3. 再生石膏粉の重金属等含有量の調査

全国から収集した再生石膏粉を対象として、8項目の重金属等に着目し、底質調査法による全含有量を調査した。カドミウム、鉛は全調査試料で不検出であり、検出されたふっ素、ほう素、砒素、セレン、六価クロム、水銀に関しては、二水、半水、無水の形態や事業所単位、地域単位において特徴的な差は確認されなかった。

(3)-4. 植生基盤材への適用性評価

① 処理土の土壌分析結果

ため池の浚渫汚泥に対して再生石膏粉を用いて土壌改良を行い、植生基盤材としての適用性を評価した。未処理土と比較して、全ての処理土について土壌硬度の改善が認められた。また、再生二水石膏粉+再生無水石膏粉(8:2混合)では、透水性が向上した。一方、全ての処理土において、有効水分保持量は減少した。pH、全窒素、有機炭素含有量、塩基置換容量については、未処理土と処理土を比較してほとんど変化はみられなかった。

② 処理土によるポット試験結果

養生28日の処理土を用いて、コマツナを用いたポット試験による植生観察を行ったところ、土壌の違いによる発芽時の発芽率・発芽の状況に差異はみられなかった。

(4) 廃石膏ボードのマテリアルフローと他分野を対象とした需要量・経済効果

(4)-1 石膏流通量

経済産業省生産動態統計(化学工業統計編)によると、我が国の化学石膏の生産量は約460万t程度で推移しており、平成28年度では約4,632千tの生産量である。一方、財務省貿易統計によると、我が国の石膏輸入量(天然石膏輸入量)は年次による変動がみられ、近年の10か年間では150万t～270万t程度であり、平成28年度では2,258千tの天然石膏が輸入されている。これらの、化学石膏、輸入石膏について、各種文献、関係者ヒアリング等により、それぞれの活用用途等の整理を行った結果を表(4)-1に示す。

表(4)-1 化学石膏、輸入石膏の活用用途等の推測値(平成28年度)

用途	化学石膏							輸入石膏
	*1	排煙脱硫石膏	製錬石膏	リン酸石膏	チタン石膏	ふっ酸石膏	その他	*2
生産量等	463万t	258万t	116万t	30万t	33万t	16万t	10万t	226万t
活用用途								
石膏ボード	220万t	129万t	51万t	30万t	10万t			135万t
セメント	249万t	129万t	66万t		23万t	16万t	10万t	5万t

*1:「経済産業省生産動態統計年報」

*2:「財務省通関統計」 石膏ボード、セメント以外は、地盤改良材(セメント系固化材)として活用が主体

○排煙脱硫石膏:石炭火力発電所などの排ガスから硫酸化合物(SO_x)を除去する際に副生する石膏

○製錬石膏:銅精錬発生する亜硫酸ガスから石膏を回収する際に副生するもの

○リン酸石膏:リン酸製造のため、リン鉱石に硫酸を反応させる際に副生するもの

○チタン石膏:酸化チタンを製造する際に副生する石膏

○ふっ酸石膏:ふっ酸を製造する際に副生するもの

注:四捨五入の関係で、合計値が合わない場合がある。

(4)-2 廃石膏ボードのマテリアルフロー

廃石膏ボードの処理フロー(排出量、処理量、再資源化量等)を把握する目的で、国内の廃石膏ボード処理施設を対象としたアンケート調査を実施し、表(4)-2に示す事業所から回答(有効回答数)が得られた。

371事業所からの回答データについて整理を行うと、それぞれの施設ごとの平成28年度における廃石膏ボード受入量、及び処理後の利用用途は表(4)-3に示すとおりである。なお、本アンケートでは、『石膏ボード単体での受入量』に加えて、『建設混合廃棄物の受入量』、及び『建設混合廃棄物受入量のうち廃石膏ボードの占める割合』の問い合わせを行っている。このため、建設混合廃棄物として受け入れられる廃石膏ボードについての受入量の推計も合わせて行った。

表(4)-2 廃石膏ボード処理に関するアンケート調査の回答数(有効回答数)

施設区分等	回答事業所数
中間処理施設	
廃石膏ボードの受入あり	271
建設混合廃棄物の受入	235
最終処分場(管理型最終処分場)	
廃石膏ボードの受入あり	47
建設混合廃棄物の受入	35

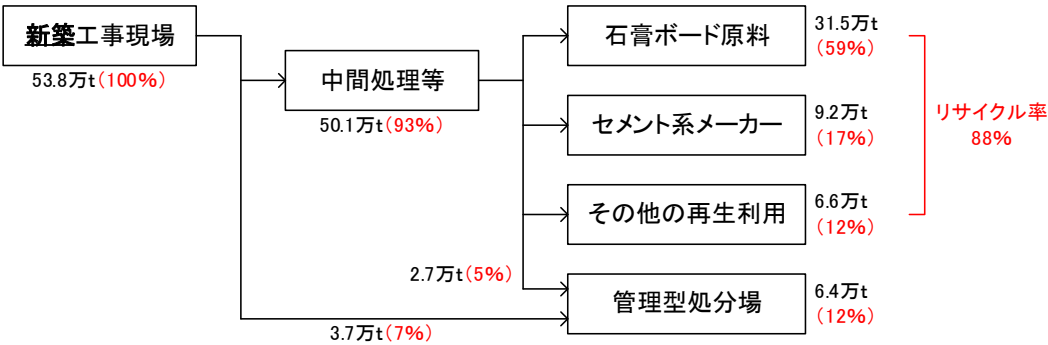
注: 廃石膏ボード、建設混合廃棄物のいずれも受け入れを行っている施設があるため、合計数は有効回答数(371件)にならない。

表(4)-3 廃石膏ボードの受入量(アンケート回答値:平成28年度)

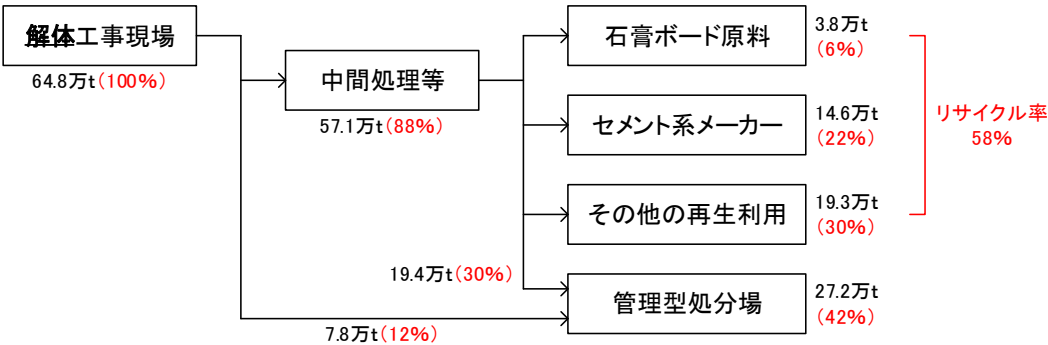
新築系、解体系区分	施設区分	石膏ボード単体での受入量 (a)	建設混合廃棄物の受入量			廃石膏ボード総受入量 (e)=(a)+(d)
			(b)	うち石膏ボード分※ (c)	(d)=(b)×(c)	
新築系廃棄物	中間処理施設	465,596t	586,067t	6%	35,164t	500,760t
	最終処分場	36,412t	8,078t	6%	485t	36,897t
	計	502,008t	594,146t	-	35,649t	537,657t
解体系廃棄物	中間処理施設	348,594t	1,384,459t	10%	138,446t	487,040t
	最終処分場	70,692t	99,906t	7%	6,993t	77,685t
	計	419,286t	1,484,364t	-	145,439t	564,725t
合計	中間処理施設	814,190t	1,970,526t	-	173,610t	987,800t
	最終処分場	107,104t	107,984t	-	7,478t	114,582t
	計	921,294t	2,078,510t	-	181,088t	1,102,382t

※「うち石膏ボード分」の割合は、本調査における設定値。
本アンケートの回答における『建設混合廃棄物中の石膏ボード分の割合』

一方、建設混合廃棄物の受入を行っている事業者に協力を頂き、それらの施設に持ち込まれる建設混合廃棄物のうち、ふるい下残さに含まれる廃石膏ボードの成分量の分析を行ったところ、約17.2%程度の廃石膏ボードを含むことが判明した。国土交通省で実施している「建設副産物実態調査」の最新データである、「平成24年度建設副産物実態調査」によると、我が国の建設混合廃棄物排出量は約280万トンであり、このうちの約48.5万トンが、解体工事や修繕工事等から排出されている。このため、これらのうちの重量比17.2%が廃石膏ボードであると仮定すると、アンケート結果で得られた解体系廃石膏ボード(約56万t)に加えて、約8.3万トンの解体系廃石膏ボードが建設混合廃棄物の処分施設の持ち込まれていることと推定される。これらの8.3万トンを含めた廃石膏ボードのマテリアルフロー(新築系と解体系)を推計すると図(4)-1、図(4)-2に示すとおりとなる。なお、ふるい下残さ中の廃石膏のフローは解体工事現場→中間処理等→管理型処分場として整理した。新築系と解体系を合わせた総排出量は119万トンとなり、リサイクル率は72%と推計され、残りの28%の約34万トンが最終処分されている。



図(4)-1 新築系の廃石膏ボードのマテリアルフロー



図(4)-2 解体系の廃石膏ボードのマテリアルフロー

(4)-3 再生石膏粉の潜在的需要量

各種統計資料の調査結果を参考に、再生石膏粉の有効利用先として地盤改良材、農業分野、畜産分野における潜在需要量の試算を行ったところ、それぞれ表(4)-4に示す結果となった。

表(4)-4 再生石膏粉の潜在的需要量(試算結果)

需要分野	潜在需要量	試算方法の概要
地盤改良材	約100万トン	低質土（第4種建設発生土、泥土：約1,100万m ³ ）に改質剤として5%の再生石膏粉を添加した場合
農業分野	約50万トン	牛糞堆肥使用量（5,000万トン；推計）に再生石膏粉を1%添加した場合
	約100万トン	土壌改良材として稲作及び果樹作付け面積165万haに10a当たり60 kgを施肥した場合
畜産分野	約24万トン	家畜飼料生産量（2,400万トン）に1%の再生石膏粉を添加した場合

(5)環境安全品質ガイドライン策定による廃石膏ボードリサイクルシステムの社会実装

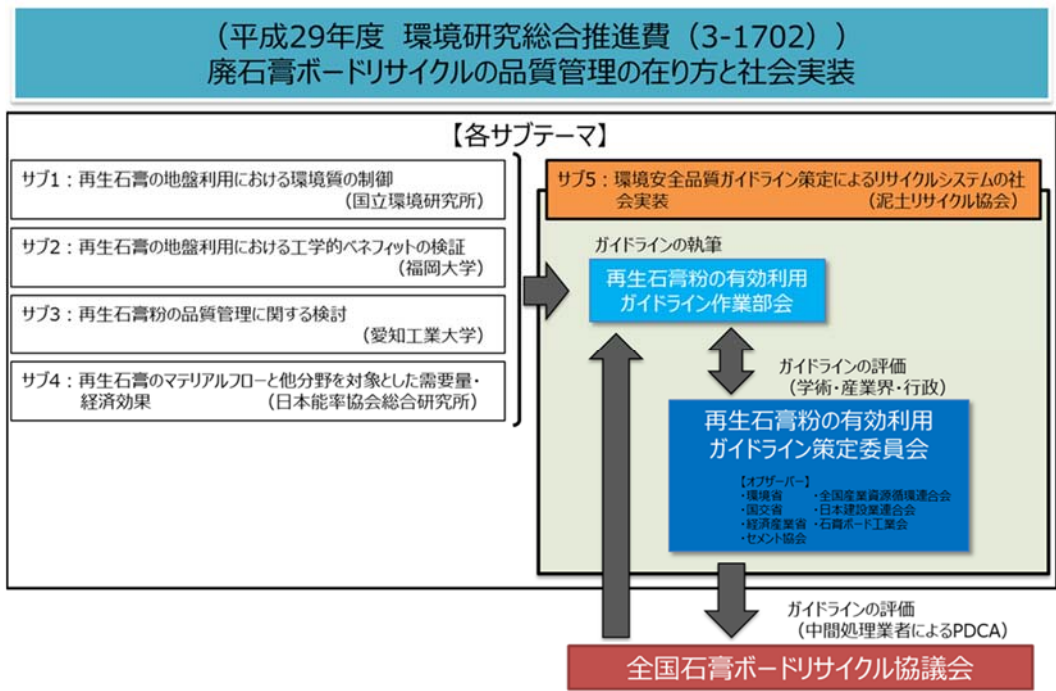
＜再生石膏粉の有効利用ガイドライン策定委員会＞

(5)-1 委員会の構成と役割

ガイドライン策定にあたっては、環境省、国土交通省、経済産業省、日本建設業連合会、全国産業資源循環連合会からの助言、情報提供を依頼する。また、平成28年4月に設立された「全国石膏ボードリサイクル協議会（代表：太田敏則）」で、廃石膏ボードから再生した石膏粉（二水、半水、無水）の地盤改良や土壌改質材料としての適用性を検証するために、サンプリング収集や各種試験を行い取り纏めた基礎データをもとに、同協議会と連携して実証実験を行う。

以上により、廃石膏ボードから再生した石膏粉の利活用を促進するためには安全性と信頼性を高めることが必要であると考え、再生石膏粉の環境安全性を確保するためのガイドラインを策定し、再生石膏粉あるいは再生石膏混合材料の地盤利用時の環境安全質について示すことを目標とする。

本研究のスキームを図(5)-1に示す。



図(5)-1 研究－ガイドライン策定スキーム

(5)-3. 委員会ならびに作業部会開催記録

再生石膏粉の有効利用ガイドライン策定における策定委員会ならびに作業部会の開催記録を表(5)-1に示す。なお、これ以外にも全国石膏ボードリサイクル協議会を研究期間の2年間に4回開催し、研究期間終了後の4月に最終の協議会を開催して再生石膏粉の有効利用ガイドラインを完成させた。

表(5)-1 ガイドライン策定委員会と作業部会の開催記録

名 称	日時／開催場所	内 容
＜準備委員会＞		
準備委員会	平成29年6月1日（14:00～17:00）	・廃石膏ボードリサイクルの現状 ・H29年度環境研究総合推進費研究テーマ ・ガイドライン作成における役割分担
	場所：新橋レンガ通りホール	
＜再生石膏粉の有効利用ガイドライン策定委員会＞		
第1回 委員会	平成29年7月31日（15:00～17:30）	・廃石膏ボードリサイクルの現状 ・全国石膏ボードリサイクル協議会について ・ガイドライン素案提案
	場所：新橋レンガ通りホール	
第2回 委員会	平成30年2月27日（14:00～17:00）	・ガイドラインの原案確認、審査
	場所：新橋レンガ通りホール	
第3回 委員会	平成30年11月9日（14:00～17:00）	・ガイドライン活動計画 ・ガイドライン（試行版）修正箇所ならびに委員等からの意見確認と読み合わせ、意見交換
	場所：新橋レンガ通りホール	
第4回 委員会	平成31年2月21日（15:00～17:00）	・ガイドライン最終確認
	場所：新橋レンガ通りホール	
＜再生石膏粉の有効利用ガイドライン作業部会＞		
第1回 作業部会	平成29年9月21日（13:30～17:00）	・ガイドライン原案 ・各章毎の執筆担当によるグループディスカッション
	場所：新橋レンガ通りホール	
第2回 作業部会	平成29年12月22日（13:30～17:00）	・ガイドライン各章読み合わせならびに意見交換 ・今後予定
	場所：新橋レンガ通りホール	
第3回 作業部会	平成30年2月14日（13:30～18:00）	・用語の定義 ・各章読み合わせならびに意見交換 ・今後予定
	場所：新橋レンガ通りホール	
WG	平成30年5月11日（13:00～18:00）	・ガイドライン（試行版）に向けて最終修正
	場所：TKP東京駅八重洲カンファレンスセンター	
第4回 作業部会	平成30年10月12日（13:30～17:00）	・ガイドライン活動計画 ・ガイドライン（試行版）修正箇所ならびに委員等からの意見確認と読み合わせ、意見交換
	場所：新橋レンガ通りホール	
第5回 作業部会	平成31年2月15日（14:30～17:00）	・ガイドライン最終修正
	場所：新橋レンガ通りホール	

(5)-4. 再生石膏粉の有効利用ガイドライン

本ガイドラインでは、廃石膏ボード現場分別解体マニュアル(以下、「分別解体マニュアル」と称す。)に則って適正な分別が行われている廃石膏ボードを対象としており、中間処理業者によって再資源化された再生石膏粉を用いて製造した固化材や改質剤については、配合試験を行って改良土の強度や環境安全性を担保し、再生石膏粉単味については、重金属等の含有量試験などの環境安全性を含めた管理を行って品質を担保することにより、再生石膏粉の地盤分野への利用だけではなく、“ボードtoボード”やセメント凝結遅延剤等、さまざまな分野での活用が期待される。なお、本ガイドラインはホームページ上に公開することで広く利用して頂くことを想定している。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

廃石膏ボードの再生利用に関する問題が顕在化するのには十数年先の話であるが、そのための準備を今から実施していく必要がある。再生石膏業界のリサイクルに対する意識は、安定型処分場への廃石膏ボードの埋立処分が禁止されてから現在に至るまでの十数年を要した。そのため、今、再生石膏粉に関するガイドラインを作成し、これから十数年をかけて徐々に認識を変えていき、再生利用の問題が顕在化するときに備えておく事が重要である。本研究で作成したガイドラインは、廃石膏ボード由来の再生石膏粉の品質を管理するための指標を示すものであり、基準値を設けるものではない。どのような試験検査を実施すると、どのような事が分かるのか、

といった点に着目している。

廃石膏ボードのマテリアルフローが不明であることから、マテリアルフローをアンケート調査によって明らかにした。廃石膏ボードを取り扱っている処理業者は約400業者といわれているが、本アンケートの回収率は約9割にのぼった。また、平成18年度調査結果では、廃石膏ボードの排出量を新築ならびに解体床面積から発生量原単位を用いて計算しているが、本調査では、処理業者の処理量の積み上げによって排出量を算出した。その結果、廃石膏ボードの排出量は年間119万トンと計算され、そのうち約72%が石膏ボード原料やセメント、地盤改良等に有効利用され、残りの28%（約34万トン）が最終処分されていることが明らかとなった。

再生石膏粉の有効利用は、ボードtoボードリサイクルとして石膏ボードの原料として利用されることが前提であるが、石膏ボード原料として脱硫石膏等の副産物石膏が多く使用されているため、再生石膏粉を利用するには限界がある。そこで、地盤工学的有効利用に着目し、環境安全性を踏まえた上で使用できるよう検討を行った。フッ素の溶出については、中性固化材であったとしても半水再生石膏等を用いることで、溶出濃度を土壤環境基準値以下にまで抑制できることが技術的に可能であることを明らかにした。硫化水素ガス発生については、硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の提案と検証を行い、民間分析機関との相互確認試験等を通して、提案する試験方法をガイドラインに記載した。また、再生石膏粉自体の品質管理として基本事項を取りまとめると同時に、全国の再生石膏粉を一斉調査し、結晶相構造の評価方法、有害重金属の全含有量試験等を行い、品質管理方法を系統的に整理すると共に、品質管理票をガイドラインに提案した。

廃石膏ボードのリサイクルは、「再生石膏粉を作ることであり」という原点に立ち返り、廃石膏ボードのリサイクル企業は再生品の原料を生産しているという観点から、全国廃石膏ボードリサイクル協議会の参画企業群にガイドラインの品質管理を社会実装すると共に、本研究の枠組の中で組織した作業部会、委員会を通して、ガイドラインを作成した。

(2) 環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

本研究では、廃石膏ボード由来の再生石膏粉をリサイクルするための品質管理方法を取りまとめた「再生石膏粉の有効利用ガイドライン」を作成した。これまで、再生石膏粉の品質管理については一定の考え方が存在していなかったことから、自治体間での判断基準に大きな隔たりがあったが、ある一定の考え方をガイドラインで示したことによって、各自治体担当者の参考図書として活用されることが見込まれる。

廃石膏ボードは、建設廃材の中でも突出して排出量が多い廃棄物であるが、本ガイドラインの品質管理に従えば、解体系の廃石膏ボードであっても、再生石膏粉としての品質は新築系廃石膏ボード由来のそれと同等として扱える可能性が高い。このことから、建設リサイクル法の特定建設資材として懸念されていた品質の悪さを克服すると同時に、有効利用時の環境安全性というもう一つの懸念についてもガイドラインで解決できるため、特定建設資材化に向けた議論においても、本研究成果は活用が見込まれる。

特定建設資材化においては、過去のマテリアルフロー調査結果に、行き先不明というフローがあったことも課題となっていたが、本研究によって更新されたマテリアルフローでは、集計方法を変更する事によって行き先不明というフローを削除したマテリアルフローの全体像を示すことに成功した。集計結果の総排出量は年間119万と計算されたが、この数値は、新築・解体工事床面積と発生原単位を用いて計算された統計学的な総排出量120万トンに近い値となっており、本研究で明らかにしたマテリアルフローは、行政上の基礎資料として活用されることが見込まれる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

＜査読付き論文＞

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 三浦真一、遠藤和人：第29回廃棄物資源循環学会研究発表会、199-200(2018)
廃石膏ボードに含まれるデンプンのアルカリ変性による硫化水素ガス発生抑制
- 2) 藤山晶穂・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣：第53回地盤工学研究発表会講演概要集、2319-2320(2018)
再生石膏の有効利用を考えた中性固化材による地盤改良効果
- 3) 藤山晶穂・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣：土木学会第73回年次学術講演会、987-988(2018)
再生半水石膏粉を用いたセメント系固化材による地盤改良土の再泥化特性
- 4) 中村吉男、平田貴博、小島淳一、西川美穂：第53回地盤工学研究発表会(2018)
再生石膏による自硬性汚泥の改質
- 5) 小島淳一、中村吉男、遠藤和人、西川美穂：第29回廃棄物資源循環学会研究発表会(2018)
再生石膏粉の形態変化に伴う化合水量と密度特性について
- 6) 松田愛礼、松橋宏明、遠藤和人：第29回廃棄物資源循環学会研究発表会、193-194(2018)
我が国の廃石膏ボード処理フローの推計について

7. 研究者略歴

研究代表者

遠藤 和人

京都大学大学院修了、工学博士、現在、国立研究開発法人国立環境研究所、福島支部室長

1) 肴倉 宏史

北海道大学大学院修了、博士(工学)、現在、国立研究開発法人国立環境研究所、資源循環・廃棄物研究センター室長

2) 佐藤 研一

九州大学大学院修了、博士(工学)、現在、福岡大学工学部教授

3) 藤川 拓朗

福岡大学大学院修了、博士(工学)、現在、福岡大学工学部助教

4) 中村 吉男

愛知工業大学工学部土木工学科卒業、現在、愛知工業大学工学部土木工学科 教授

5) 松橋 宏明

東京大学大学院 理学系研究科博士後期課程中退(物理学専攻：理学修士修了)、現在、株式会社日本能率協会総合研究所、社会環境研究事業本部、主任研究員

6) 西川 美穂

中部大学女子短期大学部卒業、現在、(一社)泥土リサイクル協会 事務局次長

7) 野口 真一

高知工業高等専門学校土木工学科卒業、現在、(一社)泥土リサイクル協会 事務局長

II. 成果の詳細

II-1 廃石膏ボードの地盤利用における環境質の制御

国立研究開発法人国立環境研究所

福島支部 汚染廃棄物管理研究室

遠藤 和人

資源循環・廃棄物研究センター 循環利用・適正処理処分技術研究室

肴倉 宏史

平成29～30年度累計予算額：14,985千円

(うち平成29年度：7,688千円、平成30年度：7,297千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

廃石膏ボード由来の再生石膏粉を地盤利用する際に懸念される硫化水素ガス発生に着目した研究を実施した。硫化水素ガス発生については試験方法が確立していないことから、他機関で実施している試験方法との比較検証を行った。その結果、100 mL容バイアル培養瓶を用いた硫化水素ガス発生ポテンシャル試験が、最も早期に硫化水素ガスを検出可能であることがわかった。本方法が、民間分析機関でも実施可能であるかを検証するため、同一試料を用いた相互比較試験を実施した。その結果、本試験方法は十分に実施可能であることが明らかになったが、試験方法を記した詳細な手順書も必要であると判断され、再生石膏粉の有効利用ガイドライン（本研究で策定）の中で、詳細な手順書を記載することとした。また、本試験実施後には、硫化水素ガス濃度に関する判定値が必要になると考え、科学的な根拠よりも、社会的なコミュニケーションにおける説明の容易さから、温泉の湯面10 cm上で採用されている20 ppmvを判定値として提案した。

[キーワード]

廃石膏ボード、地盤工学的有効利用、硫化水素ガス

1. はじめに

廃石膏ボード由来の再生石膏粉を地盤利用する際に懸念されているのは、フッ素の溶出と硫化水素ガスの発生である。フッ素の溶出については、次のサブテーマで検討されることと、技術的に溶出抑制が可能であると考えられ、溶出試験法が環境省の告示として明確であることから、本サブテーマでは取り扱わなかった。そこで、本研究では、試験方法が確立していない硫化水素ガスの発生に着目し、試験方法を明確に示すことを目的とした。再生石膏粉を地盤改良材や土壌改質材として用いた場合、改良体の懸濁液pHが9.5を超えるか、溶出液のDOCが10 mg/L以下であると、硫化水素ガスの発生抑制が可能であることが知られている^{1,2)}。また、再生二水石膏粉からは硫化水素ガスが発生する可能性があるが、再生無水石膏からは硫化水素ガスが発生しないことも実験的に明らかにされている³⁾。再生半水石膏の場合、多くの改良体で硫化水素ガスが発生しないが、確実に発生しないとは言えない状況である。

以上の背景を踏まえ、硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法を改めて見直し、他機関で実施している方法との比較検証を行った。また、本研究で提案する試験方法が、民間分析機関においても実施可能であるかを検証するため、同一試料を用いた相互比較試験を実施した。

2. 研究開発目的

(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法

硫化水素ガス発生ポテンシャル試験方法は確立されておらず、各研究機関で異なる方法が採用されている。目的に応じて試験方法が異なることに異論はないが、本研究では、地盤改良等の工事における配

合試験の中で実施することを想定し、最も短期間で硫化水素ガスの発生の有無を判断出来る手法を見出すことを目的とした。

(2)-2 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の相互比較試験

本研究で提案する試験方法の実用性について検証されていないため、民間分析機関2社と国立環境研究所（NIES）との比較試験を実施した。過去に同様の試験を実施した経験がある分析機関と、経験が無い分析機関の2社を選定した。

(2)-3 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の手順書

過去に同様の試験を実施したことがない民間の分析機関であっても本試験を遂行できるような手順書を作成することを目的とした。

3. 研究開発方法

(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法

各研究機関における硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の違いは、主には容器の大きさと、植種の有無である。それぞれの違いを表(1)-1に示す。A法は100 mL容のバイアル培養瓶を用いた方法で植種は無しである⁴⁾。B法は500 mLのメスフラスコを用いた方法⁵⁾で、C法は1,000 mLのメスシリンダーを用いた方法⁶⁾で、共に植種することを基本としている。試料には、最も硫化水素ガスが発生しやすい再生二水石膏粉を用いて、培養期間を7、14、21、28日として硫化水素ガス濃度を測定することで検証した。なお、本試験では植種はなしとした。これは、試料が実際に使用される場合、微生物が異常に増殖する環境を想定しておらず、使用環境下において最も硫化水素ガスが発生しやすい条件で、ガス発生を判定したいためである。

表(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法

方法	容器の大きさ	植種の有無
A法	100 mL	なし
B法	500 mL	あり
C法	1,000 mL	あり

(2)-2 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の相互比較試験

民間分析機関2社と国立環境研究所（NIES）との比較試験に用いた共通試料は、河川浚渫土を母材として再生二水石膏粉を重量比で10%混合した後、懸濁液が所定のpH（pH = 7、8.5、10、11の4種）になるように水酸化カルシウムを用いて調整した試料とした。分析会社で改めて初期pHを測定し、その後、硫化水素ガス発生ポテンシャル試験を実施し、7日間養生後の硫化水素ガス濃度によって試験結果を比較した。

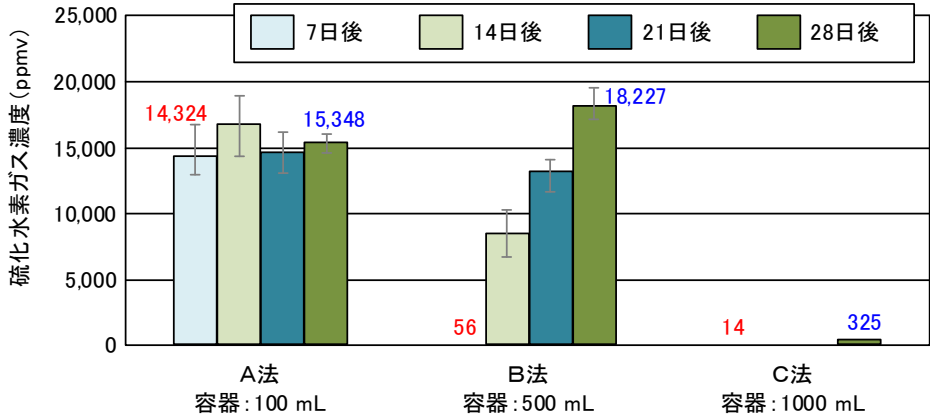
(2)-3 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の手順書

本研究で提案する硫化水素ガス発生ポテンシャルの手順書について、過去に同様の試験を実施したことがない民間の分析機関であっても本試験を遂行できるよう、写真を交えた手順書を作成した。

4. 結果及び考察

(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の方法

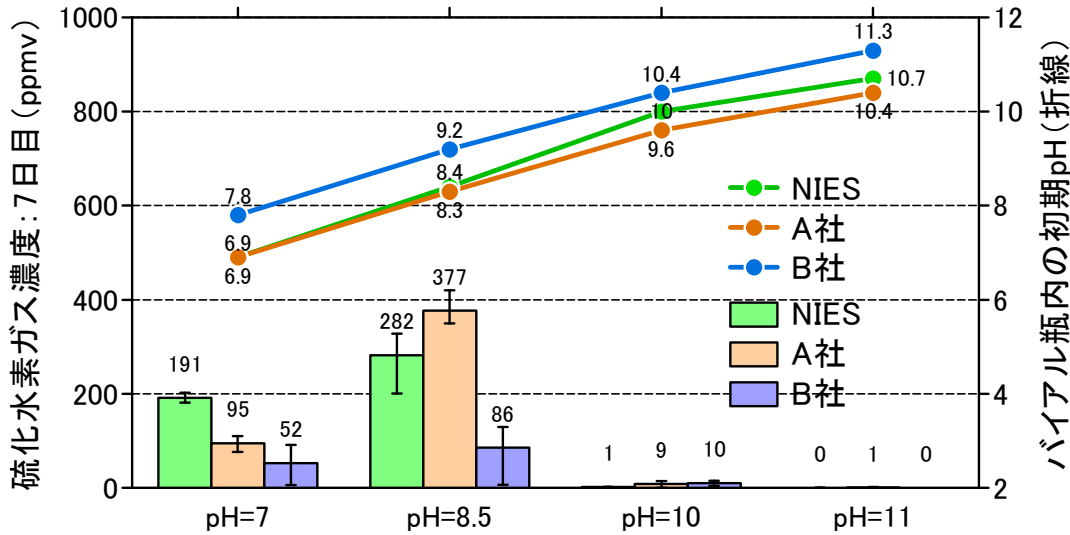
容器の違いによる硫化水素ガス発生の違いを図(1)-1に示す。硫化水素ガス濃度はA法≒B法>C法となった。C法のガス濃度が小さかった理由は、植種しなかったことが要因と思われるが、容器が大きいほど、容器内が嫌気性環境になるのに要する時間が長くなることも原因と考えられる。本試験は、地盤改質や地盤改良時の配合試験で実施することを想定しているため、なるべく短期間で判定できることが望ましい。その意味では、7日後から高濃度の硫化水素ガスを検出可能なA法が優れているといえ、容器自体も小さいために、硫化水素ガスの絶対量が少なく、容器破損時の試験者のリスクも小さいと考えられる。これより、本研究で提案する試験方法としてA法を採用することとした。



図(1)-1 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験方法の違いによる比較結果

(2)-2 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の相互比較試験

民間分析機関2社と国立環境研究所（NIES）との比較試験を実施した結果を図(1)-2に示す。硫化水素ガスは懸濁pHが9.5付近を境にして、アルカリ側ではほぼ発生しなくなることが知られているが、本試験結果においても同様の結果が得られ、これまで実験経験のないB社であっても本試験によって硫化水素ガス発生の有無を評価可能であるといえる。また、B社の硫化水素ガス濃度の誤差は、他に比較してやや大きく、経験値の差が原因と思われる。そのため、1試料について3検体を実施する必要性があるといえる。ガイドライン作成時には、本試験方法の詳細な手順について記す必要があると感じられた。



図(1)-2 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の相互比較結果

硫化水素ガス発生の判定基準としては20 ppmvを提案した。これは、表(1)-2に示す温泉利用基準から採用したものである。硫化水素ガスについては、悪臭防止法等での規制値もあるが、硫化水素ガスは、嫌気的環境下でないと発生しないことから、地盤工学的有効利用においては地表面ではなく土中の深部で発生すると想定できる。また、硫化水素ガスに対しては、土壌による吸着分解性能が非常に大きく、土中で発生した硫化水素ガスは速やかに土壌への吸着されることから、悪臭防止法に示されるような値をポテンシャル試験で採用しても意味がないと判断した。そこで、人暴露として最も高い濃度が基準値となっている温泉利用基準⁷⁾を採用した。この20 ppmvという値を硫化水素ガス発生ポテンシャル試験

の判定値に採用することについては科学的に明確な根拠はない。温泉での人暴露が許容されている濃度なので人体へのリスクは大きくないと判断できる。また、日本国民の多くが利用する温泉における許容濃度をポテンシャル試験の判定値として用い、かつ、土中深部で発生する可能性のある最大濃度として用いているため、地盤工学的有効利用時のリスクコミュニケーションにおいて、容易に説明可能であると判断して本判定値を決定した。

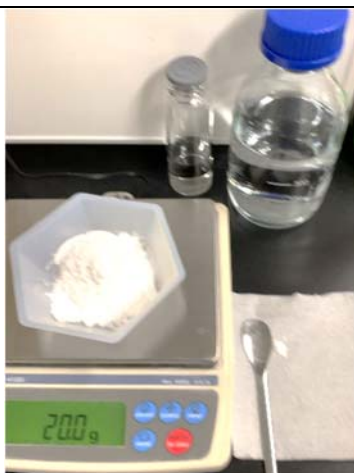
表(1)-2 温泉利用施設の硫化水素ガスの基準

利用施設の構造	換気構造(換気口または換気装置)の開 口部を2カ所以上設ける． そのうち1 カ所は浴室床面と同じ水準に設ける
浴槽湯面から上位10cmの位置の濃度	20 ppmv
浴室床面から上位70cmの位置の濃度	10 ppmv

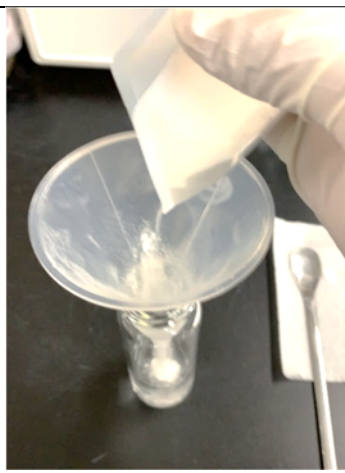
(2)-3 硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の手順書

本研究で提案する硫化水素ガス発生ポテンシャルの手順書を以下に示す。

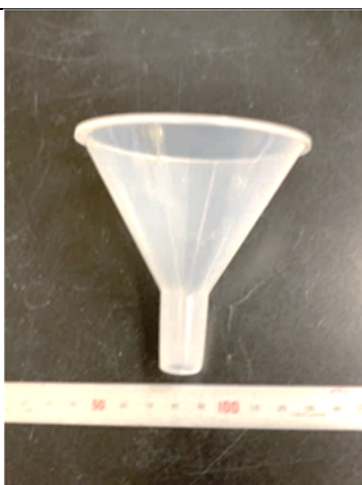
 ① 円筒ガス噴射管 光信理化学製作所； ケラミフィルター B型φ25	 ② MilliQをスターラーで攪拌し、 円筒ガス噴射管を用いてN₂ガスで脱気
 ③ ガスクロバイアル 日電理化学硝子SVG-100標準セット (瓶：外径φ40×全長L120肉厚 t 1.8)	 ④ 脱気水を40ml計量し バイアルへ注ぐ



⑤ 試料20gを計量



⑥ バイアルへ試料を注ぐ



⑦ 粉体ロートφ65
があると操作が容易である



⑧ 注いだ直後に10秒手攪拌



⑨ その後1分間ボルテックスで攪拌



⑩ N_2 ガスで2分間気相を置換
気流は表面が波立つ程度の強さ



- ⑪ 最低3反復で試料を作成し
(同一試料を3検体用意する)
40℃の恒温槽で培養する



- ⑫ 培養中は一日毎
手で10秒強撹拌する
(試料の底部が懸濁するまで)。
土日祝等を挟む場合は、
強撹拌はスキップ。



- ⑬ 測定日(7日目)は恒温槽から試料を出し
て約3時間置き、室温と同程度まで冷却する。
硫化水素ガスは空気よりも比重が高い(対空
気比重1.1905)ため試料下部へ偏在する可
能性がある。そのため、測定直前にバイアル
を撹拌して、バイアル瓶内の気相を均一にす
る。



- ⑭ シリンジを用いてバイアル瓶内から気相
100 μ L採気して、気相中の硫化水素濃度を測
定する。測定における希釈は10倍希釈の場
合は、10 μ Lをバイアルから、90 μ Lを外
気から採気する。50倍希釈の場合は、2 μ L
(最小の目盛)をバイアルから、98 μ Lを
外気から採気する。これ以上の希釈はガス
バックを使う。

ガスクロマトグラフィー測定条件

- ・使用機：SHIMADZU GC-2014(FPD)、ソフトウェア：GC Solution Ver2.42.00 SU2
- ・カラム：SUPELCO Supel-QTM PLOT 30 m $\times$ 0.53 mmID Cat.#25462
- ・インジェクション温度：230℃、カラム室温度(OVEN)：50℃、検出器(FPD)温度：260℃
(カラム洗浄温度：210℃(カラム耐用250℃)30分、コンディショニングタイム2時間以上)
- ・キャリアーガス：N₂、流量10 mL/min

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで明確に示されることがなかった硫化水素ガス発生ポテンシャル試験方法について比較試験を通して明文化した。本研究で提案する試験方法は、100 mL容バイアル培養瓶を用いる方法であり、植

種無しで1週間にて硫化水素ガスの発生有無を評価可能である。なお、ガス発生の有無を判定する閾値は温泉基準の20 ppmvとしている。より小さい容器で硫化水素ガスを評価可能なことから、仮の実験室内で容器を破損したとしても実験者へのリスクを最小限に留めることも可能である。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

廃石膏ボード由来の再生石膏粉を地盤工学的に有効利用する際に懸念されている硫化水素ガス発生について試験方法を明確化し、その判定値を明らかにすることで、硫化水素ガス発生懸念によって有効利用が滞っている再生製品に対して、一定の判断を行うことが可能となる。このことは、自治体担当部署にとって役立ち、再生製品認定等を含めた硫化水素ガスに対する環境安全性の判断指標として活用されることが見込まれる。

6．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7．研究成果の発表状況

特に記載すべき事項はない。

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

特に記載すべき事項はない。

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

特に記載すべき事項はない。

＜その他誌上発表（査読なし）＞

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 三浦真一、遠藤和人：第29回廃棄物資源循環学会研究発表会、199-200（2018）

廃石膏ボードに含まれるデンプンのアルカリ変性による硫化水素ガス発生抑制

（３）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 平成29年度循環型社会形成推進研究発表会（主催：環境省、2017年12月18日、東京、観客約50名）にて講演
- 2) 廃石膏ボード再資源化シンポジウム（主催：石膏再生協同組合、2018年9月7日、参加者約40名）にて講演
- 3) 「建設副産物ならびに循環資源の有効利活用」講習会（主催：宮城県建設発生土リサイクル協同組合、2018年10月31日、聴講者約80名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 週刊循環経済新聞（2019年1月14日、全国版、11頁、「石膏ボ、ガイドライン導入で「品質管理」を）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 遠藤和人・中川美加子・肴倉宏史・井上雄三・井 真宏・杉原元一：再生石こう・石灰系地盤改良における硫化水素ガス発生挙動に関する研究、材料、61(1)、pp. 31-36 (2012)
- 2) 遠藤和人：再生石膏の地盤工学的有効利用における硫化水素ガス発生について、地盤工学会誌、64(11-12)、pp. 99-104 (2016)
- 3) 遠藤和人・中川美加子：廃石膏ボード由来の再生石膏の熱処理による硫化水素ガス発生挙動の違い、第26回廃棄物資源循環学会研究発表会、pp. 215-216 (2015)
- 4) 中川美加子・遠藤和人・肴倉宏史・井上雄三：再生石膏の地盤工学的有効利用時における硫化水素ガス発生のバイアル培養法による評価、第22回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2011)
- 5) 武下俊宏・樋口壯太郎：水に浸漬した石膏ボードからの硫化水素発生、第18回廃棄物学会研究発表会研究発表会、pp. 861-863 (2007)
- 6) 小野雄策・田中信壽：建設廃棄物埋立における硫化水素ガス発生の可能性と管理法に関する考察、廃棄物学会論文集、14(5)、pp. 248-257 (2003)
- 7) 環境省：温泉利用施設における硫化水素中毒事故防止のためのガイドライン、2017年9月.

Ⅱ－２ 廃石膏ボードの地盤利用時における工学的ベネフィットの検証

福岡大学

工学部 社会デザイン工学科 道路土質研究室 教授 佐藤 研一
工学部 社会デザイン工学科 道路土質研究室 助教 藤川 拓朗

平成29～30年度累計予算額：11,412千円

（うち平成29年度：5,896千円、平成30年度：5,516千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

地盤改良や土壌汚染対策等において、セメント安定処理工法が幅広く用いられている。その一方で、近年の環境意識の高まりにより、建設工事に伴う環境負荷の低減が求められており、pHが中性域で施工可能な中性固化材の開発が期待されている。一方、建築物の解体で発生する廃石膏ボードは毎年増加し、2018年は130万トンに達することから、再資源化の促進が緊急な課題となっている。その廃石膏ボードの有効利用技術として、廃石膏ボードをボード紙と石膏に分離や焼成処理することで得られる再生石膏が注目されている。この再生石膏は、中性の性質を示すという特徴を持っているが、土壌環境基準を超えるフッ素の溶出が懸念される材料である。そのため、フッ素溶出を抑えた中性固化材を開発し、土木工事で利用することが、再生石膏の有効利用に繋がる可能性がある。そこで、本報告では再生石膏を用いた中性固化材の開発を目的とし、再生石膏に特殊添加材を混合した新しい中性固化材の固化・改良効果と環境安全性の検討を行った。

【キーワード】

再生石膏粉、中性固化材、安定処理、地盤改良、環境安全性

1. はじめに

地盤改良や土壌汚染対策等において、セメント安定処理工法が幅広く用いられている。その一方で、近年の環境意識の高まりにより、建設工事に伴う環境負荷の低減が求められており、pHが中性域で施工可能な中性固化材の開発が期待されている¹⁾。一方、建築物の解体で発生する廃石膏ボードは毎年増加し、2018年は130万トンに達する²⁾ことから、再資源化の促進が緊急な課題となっている。

2. 研究開発目的

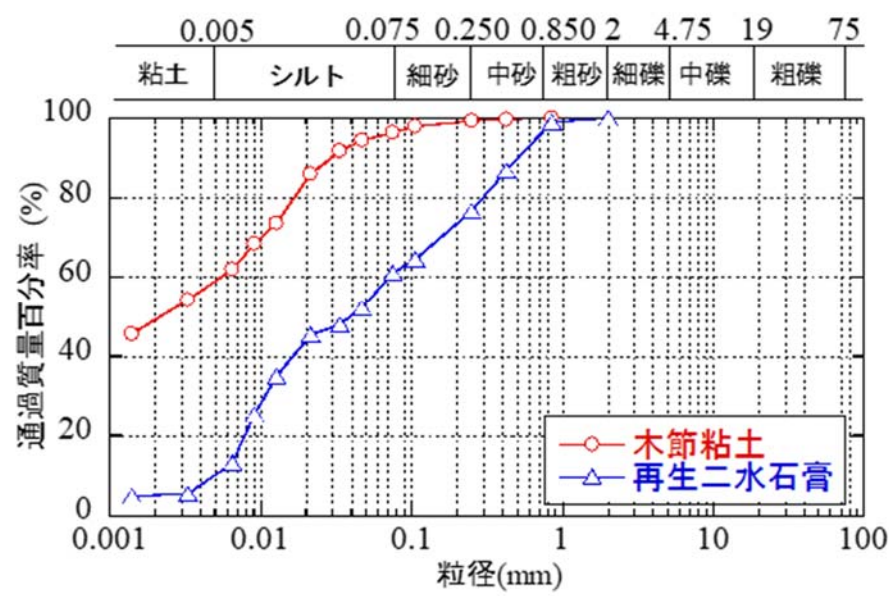
現在、廃石膏ボードの有効利用技術として、廃石膏ボードをボード紙と石膏に分離や焼成処理することで得られる再生石膏が注目されている。この再生石膏は、中性の性質を示すという特徴を持っているが、土壌環境基準を超えるフッ素の溶出が懸念される材料である。そのため、フッ素溶出を抑えた中性固化材を開発し、土木工事で利用することが、再生石膏の有効利用に繋がる可能性がある。そこで、本報告では再生石膏を用いた中性固化材の開発を目的とし、1) 石膏が主原料である市販の中性固化材、2) 再生石膏に特殊添加材を混合した新しい中性固化材の固化・改良効果と環境安全性の把握を行うことを目的としている。

3. 研究開発方法

1) 実験に用いた試料

土質材料には、カオリン鉱物を主成分とし有機物を含んでいる木節粘土を使用した。図(2)-1に各試料の粒径加積曲線を示す。表(2)-1に木節粘土の物理特性を示す。固化材には、表(2)-2に示すように市販されている中性固化材と再生半水・二水石膏に特殊添加材を所定の割合で混合させたもの(以下、中性固化材と定義)を使用した(写真(2)-1)。なお、市販の中性固化材は主成分がマグネシウムと石膏の

ものを用いた(以下、市販と定義)。特殊添加材は、アルミナ成分とカルシウム成分を多く含む材料を使用している。なお、別途行った溶出試験において市販の中性固化材からも有害金属の溶出は無かった。

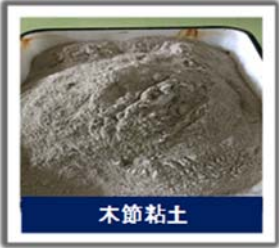


図(2)-1 各試料の粒径加積曲線

表(2)-1 木節粘土の物理特性

試料	木節粘土
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.690
自然含水比 $w_n(\%)$	3.9
最適含水比 $w_{\text{opt}}(\%)$	21.9
液性限界 $w_L(\%)$	44
塑性限界 $w_p(\%)$	16.1
細粒含有率 $F_c(\%)$	96.4
強熱減量 $lg\text{-loss}(\%)$	8.5

【土質試料】



【中性固化材】



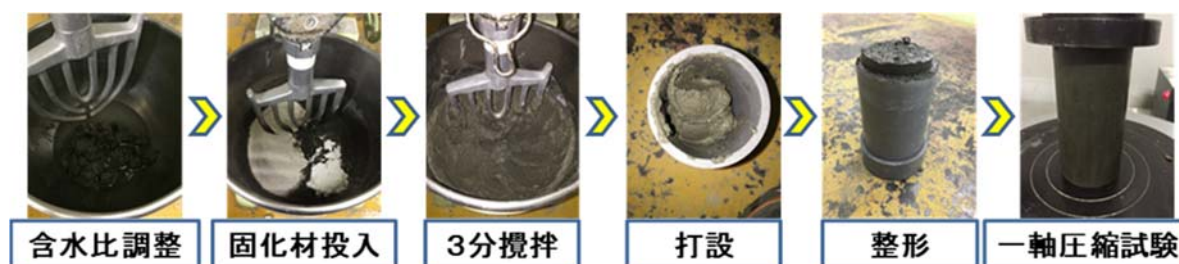
写真(2)-1 実験に用いた試料

表(2)-2 実験条件

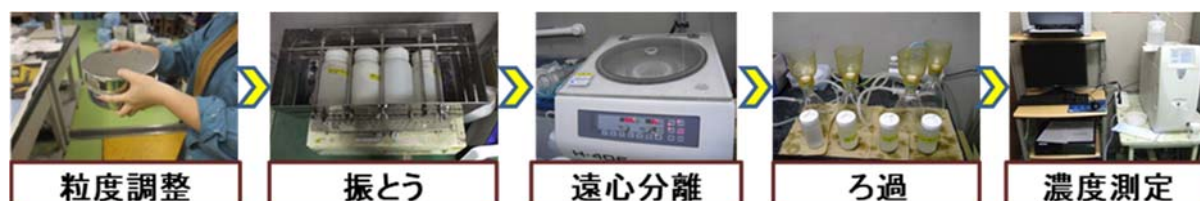
設定含水比 (%)	固化材	固化材添加量 (kg/m ³)	養生日数 (日)
1.5w _L (66.0)	再生半水石膏：特殊添加材(中性固化材)		
	7:3	300	7
	5:5	200	28
	3:7		
	再生二水石膏：特殊添加材(中性固化材)		
	7:3	300	7
	5:5	200	28
	3:7		
1.0w _L (44.0)	再生二水石膏：特殊添加材 5:5	100 50	7
0.95w _L (41.8)	市販	100	
0.9w _L (39.6)			
0.8w _L (35.2)			

2) 実験方法および実験条件

表(2)-2に実験条件を示す。供試体の作製方法は、設定含水比を液性限界（w_L）に対し0.9w_L～1.5w_Lに調整した木節粘土に中性固化材を添加し、十分に攪拌した。その後、直径5cm、高さ10cmのモールドに充填し、締固めを行わない供試体作製(JGS-0821-2000)に準じて、供試体の作製を行った。その後、20℃の一定の恒温室にて養生させ、所定の養生日数にて一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。また、再生石膏と特殊添加材を併用した改良土の溶出特性を把握するため、平成3年環境庁告示第46号法試験（以後、環告46号試験）を実施した。六価クロムの分析には分光光度計(島津社製UVmini-1240)、フッ素の分析にはイオンクロマトグラフィー(ダイオネクス社製ICS-1000)を用いた。供試体作製方法および環告46号試験の流れは、図(2)-2および図(2)-3に示すとおりである。



図(2)-2 供試体作製方法と手順



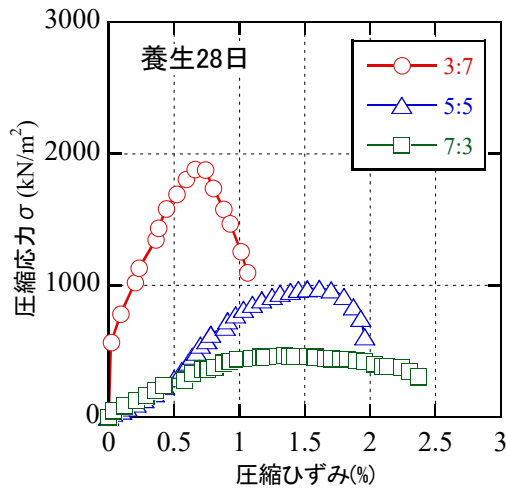
図(2)-3 環告46号試験の方法と手順

4. 結果及び考察

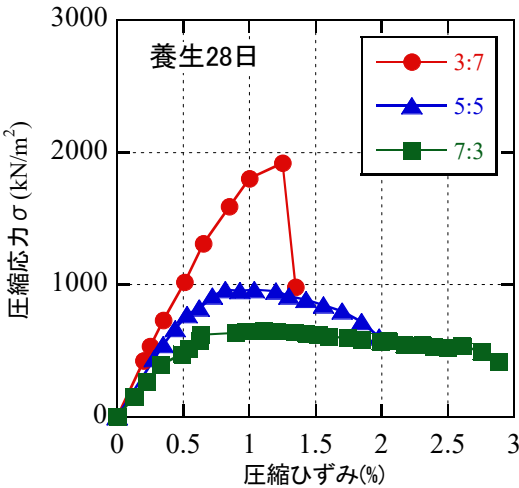
4-1 力学特性の把握

1) 再生石膏の種類が力学特性に与える影響

図(2)-4および図(2)-5に、中性固化材（再生石膏+特殊添加材）と木節粘土（1.5wL）を混合させて作製した供試体の一軸圧縮試験結果（養生28日）を示す。固化材添加量の増加に伴い、いずれの再生石膏+特殊添加材の混合割合においても破壊ひずみは減少し、一軸圧縮強さは増加傾向にある。また、同一固化材添加量においては、特殊添加材の混合率が増えるほど強度は増加する傾向にあることが分かる。石膏の種類（再生半水石膏および再生二水石膏）に着目すると、石膏の種類に関わらず応力ひずみ曲線は、いずれの条件も類似した挙動を示すことが分かる。

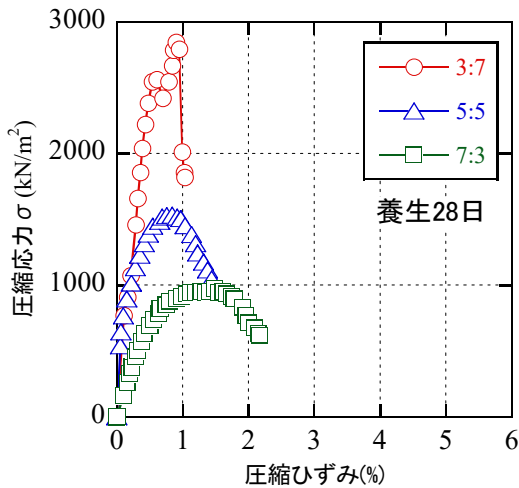


(a) 再生半水石膏

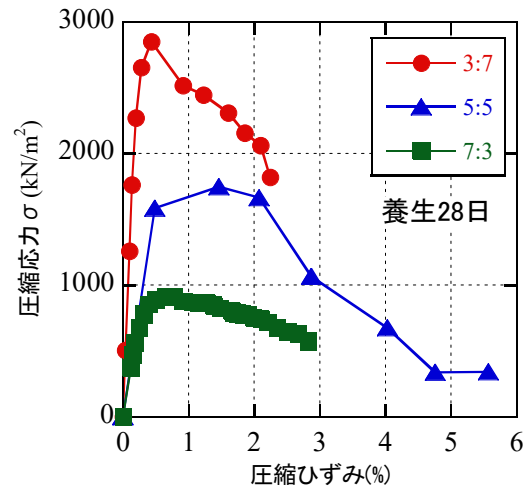


(b) 再生二水石膏

図(2)-4 中性固化材（再生石膏+特殊添加材）を用いた一軸圧縮試験結果
（固化材添加量：200kg/m³）

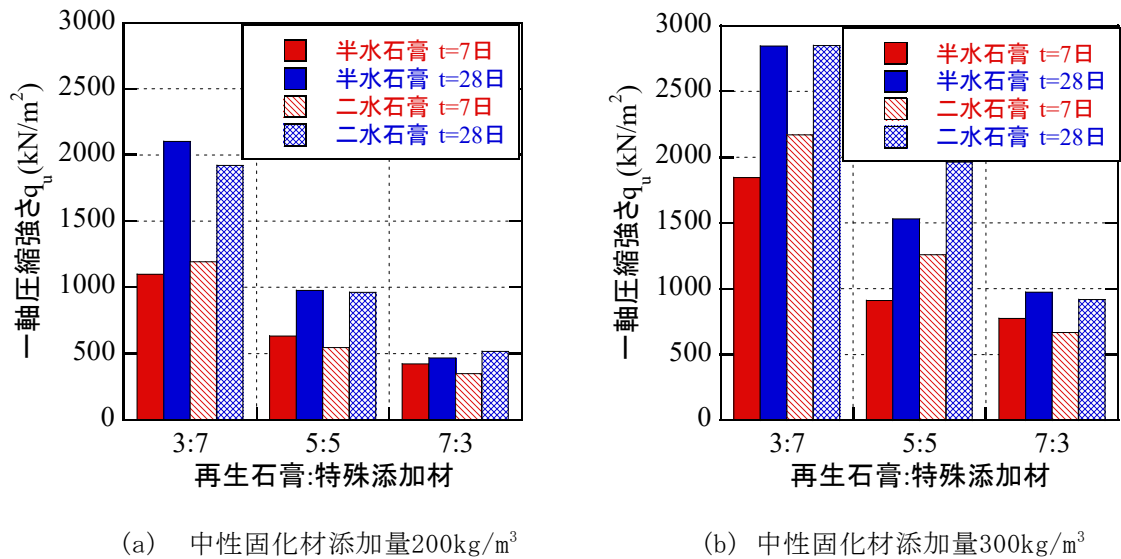


(a) 再生半水石膏



(b) 再生二水石膏

図(2)-5 中性固化材（再生石膏+特殊添加材）を用いた一軸圧縮試験結果
（固化材添加量：300kg/m³）

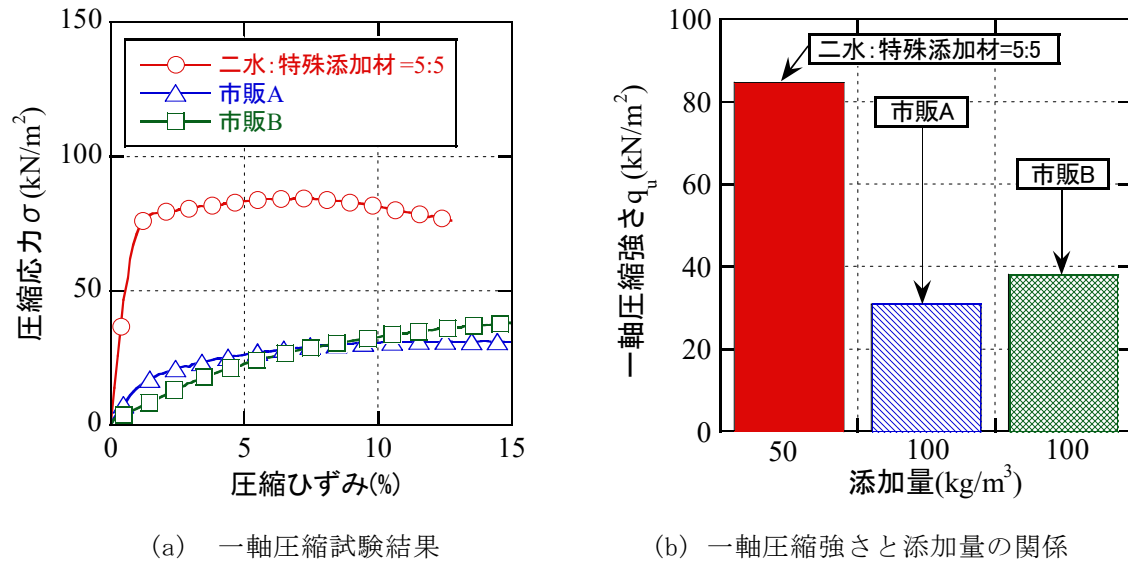


図(2)-6 一軸圧縮試験強さと養生日数の関係

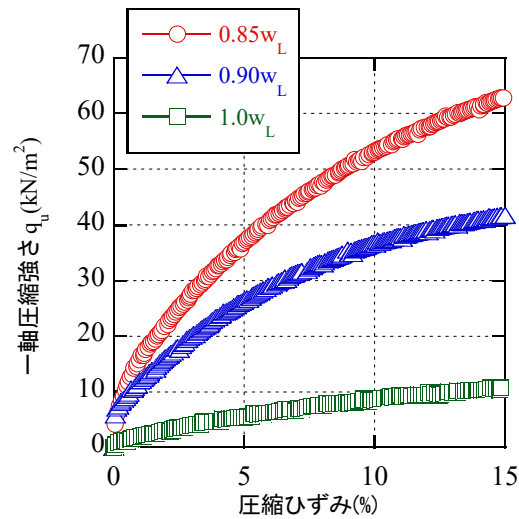
図(2)-6に一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。いずれの混合率においても中性固化材添加量の増加に伴い一軸圧縮強さは増加し、特に再生石膏：特殊添加材=3：7の条件において養生日数の増加に伴う強度発現が著しいことが分かる。また、中性固化材添加量中の特殊添加材の混合率が減少するほど一軸圧縮強さは低下し、養生に伴う強度発現も小さいことが分かる。さらに、石膏の種類に着目すると、応力ひずみ曲線と同様に、いずれの中性固化材添加量においても石膏の種類による影響は見られないことが分かる。このことは、再生二水石膏を焼却処理して再生半水石膏にさせずとも、再生二水石膏をそのまま利用出来ることを示唆しており、経済的な新しい固化材の開発が可能であると考えられる。

2) 市販の固化材との比較

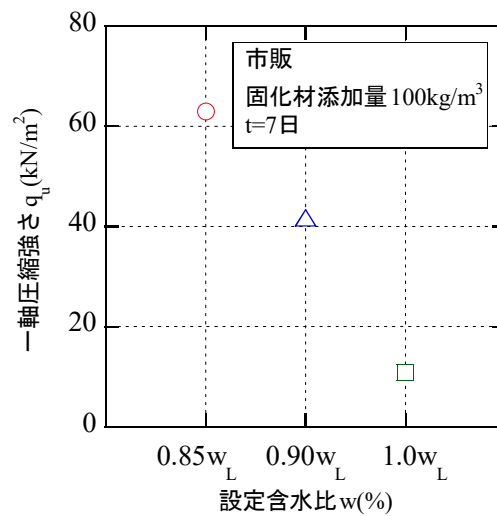
再生二水石膏と特殊添加材を併用した中性固化材と市販の中性固化材が力学特性に与える影響の差異について把握すべく、市販Aおよび市販Bの2種類の固化材を用いた検討を行った。図(2)-7(a)に応力ひずみ曲線、(b)に添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。再生二水石膏と特殊添加材を5：5の割合で混合させた中性固化材は、市販の中性固化材と比べ強度発現性が認められ、せん断初期の剛性が著しいことが分かる。また添加量についてみても、市販の中性固化材添加量の半分の添加量で2倍以上の強度増加を得ることが可能である。よって、二水石膏と特殊添加材を併用すると、市販の中性固化材より少ない添加量で同程度の強度を得られることが明らかとなった。



図(2)-7 市販の中性固化材との比較



図(2)-8 市販の中性固化材を用いた一軸圧縮試験結果 (添加量: 100kg/m³)



図(2)-9 市販の中性固化材を用いた設定含水比と一軸圧縮強さの関係 (添加量: 100kg/m³)

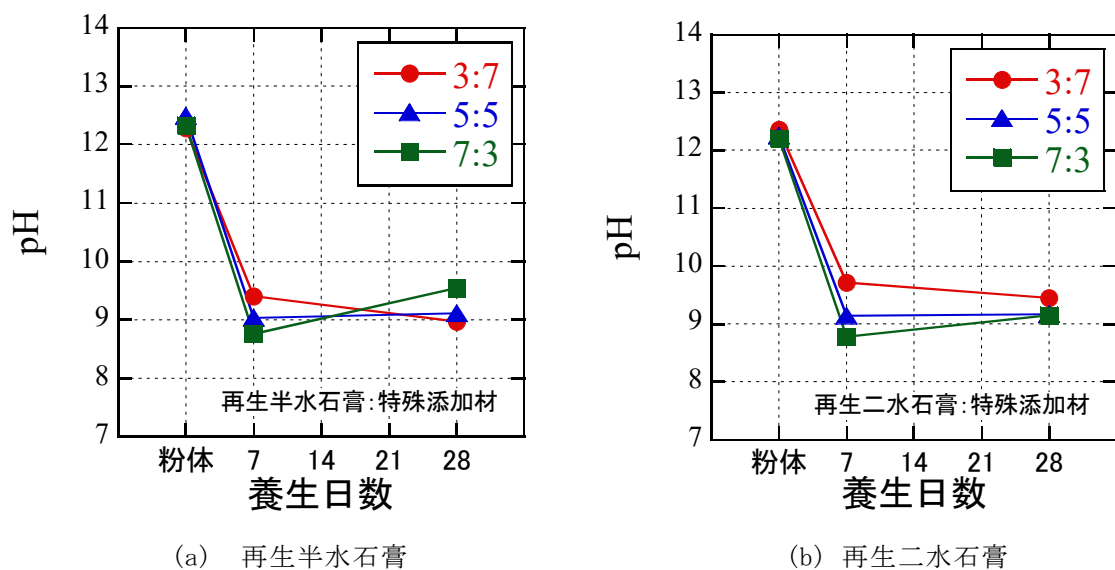
図(2)-8に $w=0.85wL$, $0.90wL$, $1.0wL$ における市販Aを用いた固化材添加量 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 、養生7日の一軸圧縮試験から得られた応力ひずみ関係を示す。設定含水比 $w=1.0wL$ については明確なピーク値を示すことなく、延性的な強度発現を示している。これに対し、 $w=0.90wL$, $0.85wL$ と設定含水比をわずかに低下させると圧縮強度は増加することが分かる。また、図(2)-9に示す設定含水比と一軸圧縮強さの関係より、市販の中性固化材の改良効果は、設定含水比が増加すると、一軸圧縮強さも著しく減少していることが分かる。このことから、市販されている石膏主体の中性固化材は、改良対象の粘性土のわずかな含水比の変化で強度発現が大きく変化する固化材であることが明らかとなった。

4-2 溶出特性の把握

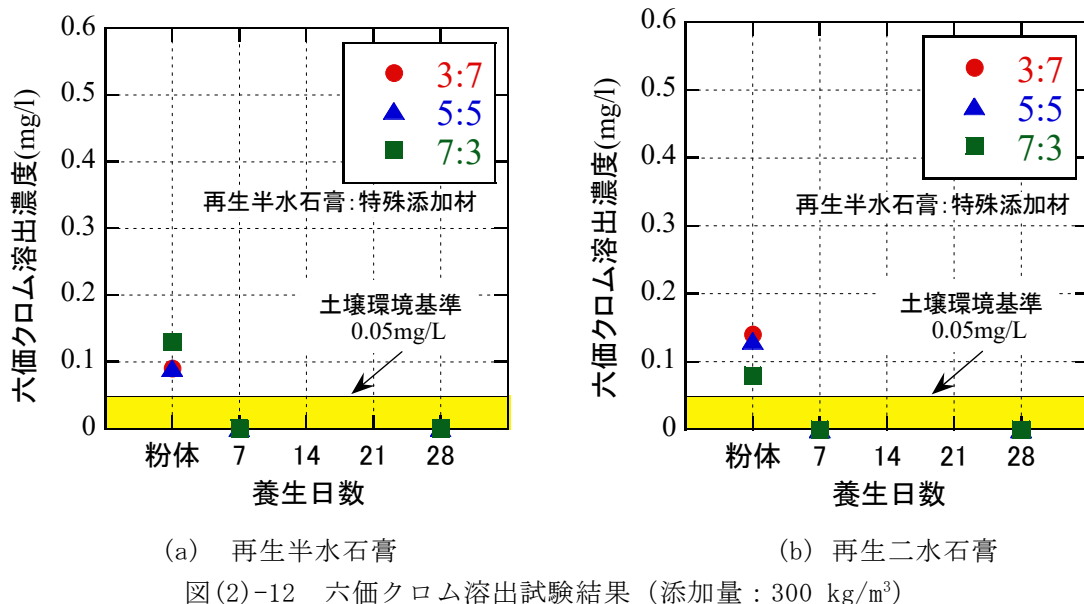
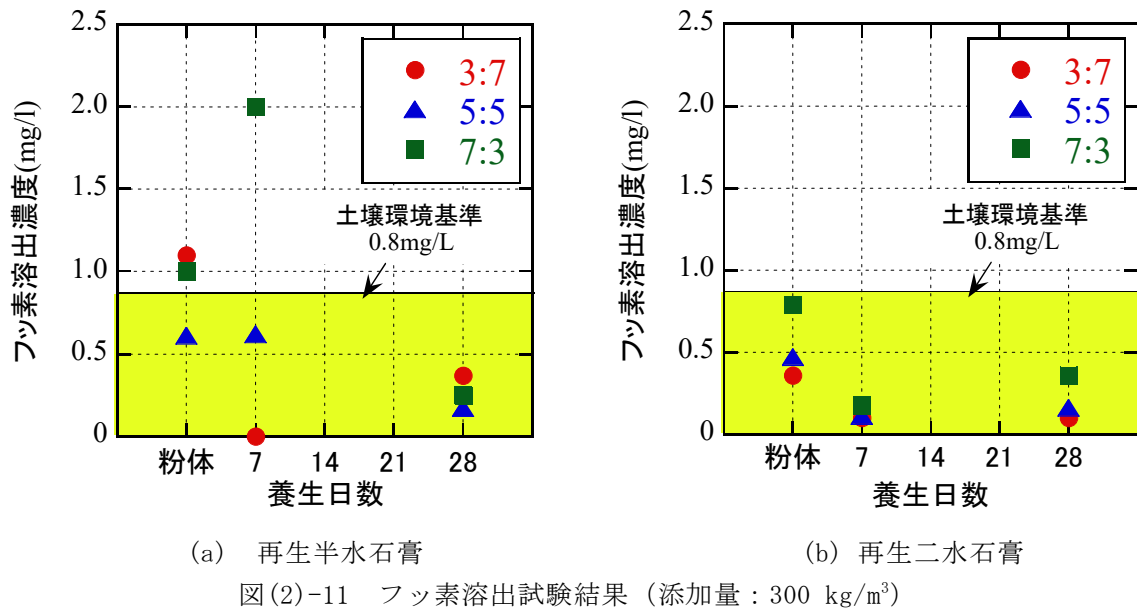
1) 再生石膏の違いが不溶化効果に与える影響

図(2)-10に再生半水石膏および再生二水石膏における養生日数とpHの関係について示す。図中に示す粉体とは、再生半水石膏または再生二水石膏を特殊添加材と混合させた直後のpHを意味している。いずれの条件においても粉体時のpHは12以上と高アルカリを呈するものの、養生日数の増加に伴いpHは低下する傾向にあり、特に養生7日までにおいて顕著である。養生7日以降は、pHの大幅な変動は見られず安定している。これは、固化材中に再生石膏を多く含むことから、pHの低いエトリンガイト等の水和生成物が生成され、改良体中のpH上昇を抑制したと考えられる。また、再生石膏と特殊添加材の混合率の違いは、pHの変動にあまり影響を及ぼさないと考えられる。

図(2)-11に固化材添加量 $300\text{kg}/\text{m}^3$ における養生日数とフッ素溶出濃度の関係を示す。粉体時はフッ素の溶出がみられ、特に再生半水石膏を用いた条件においては土壤環境基準値を上回るものも存在するが、養生日数の増加に伴い、フッ素溶出濃度は低下し、養生28日においては石膏の種類に関係なく全ての条件において土壤環境基準値を下回っていることが分かる。このようにフッ素の溶出量が低下した要因として、特殊添加材に含まれる Al_2O_3 が再生石膏に含まれるフッ素と反応し AlF_3 を生成したと考えられる。またあるいは、亀井ら³⁾はエトリンガイトによるフッ素不溶化のメカニズムとして、エトリンガイトは円柱状の分子構造を持ち、コラムの間にはチャンネルと呼ばれる間隙が存在し、そこに硫酸イオンが取り込まれている構造を有していることを報告しており、その硫酸イオンもしくは水酸化物イオンとフッ化物イオンがイオン交換して取り込まれ不溶化されると考えており、本研究においても同様な反応が行った可能性が考えられる。



図(2)-10 養生日数とpHの関係

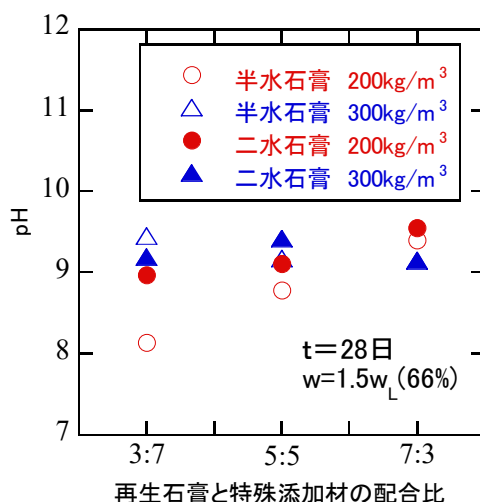


図(2)-12に固化材添加量300 kg/m³における養生日数と六価クロム溶出濃度の関係を示す。六価クロムについてもフッ素と同様に粉体時では半水石膏および二水石膏を用いた際に土壤環境基準値を超過することが分かる。しかしながら、養生日数の増加に伴い溶出濃度は低下し土壤環境基準値を下回ることが分かる。これは、固化した際に生成された水和物に固定されたと考えられる。橋本ら⁴⁾は、C-S-Hは六価クロムをほとんど捕縛することはできず、六価クロムの固定にはモノサルフェート水和物が効果的であることを報告している。また、モノサルフェート水和物が外部のクロム酸を取り込み、クロム酸エトリンガイトを生成することにより六価クロムを固定しているという報告⁵⁾もある。

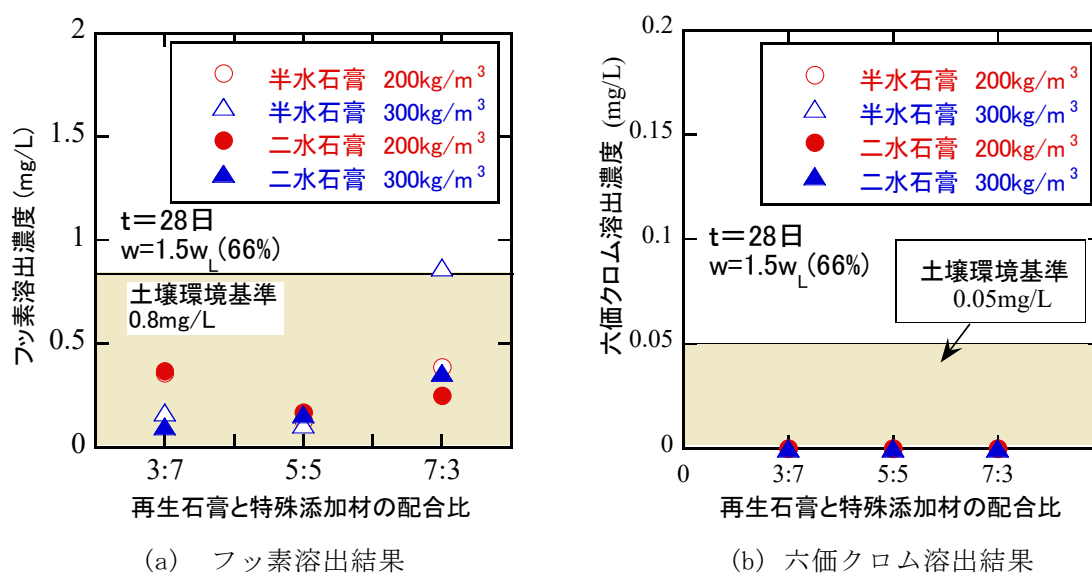
2) 配合条件の違いが不溶化効果に及ぼす影響

配合条件の違いがpHに及ぼす影響として、図(2)-13に養生28日における再生石膏と特殊添加材の配合比とpHの関係を示す。改良土のpHは、特殊添加材の増加に伴い増加する傾向にあるものの、今回設定した条件の範囲においては、弱アルカリ域 (pH=8~9.5) を呈することが分かる。また、図(2)-14に養生28日における再生石膏と特殊添加材の配合比とフッ素および六価クロム溶出濃度の関係を示す。再生石

膏と特殊添加材の配合比や固化材添加量に関係なく、いずれの条件においても土壌環境基準値以下であり、土壌に関して優しい材料であることが分かる。



図(2)-13 六価クロム溶出試験結果 (添加量 : 300 kg/m³)



図(2)-14 六価クロム溶出試験結果 (添加量 : 300 kg/m³)

3) 市販の固化材との不溶化効果の比較

図(2)-15に不溶化効果の比較として、市販の中性固化材を用いて作製した供試体のpH測定結果を示す。市販に比べ本研究で開発した固化材のpHがやや高いものの、pH=8.5~9.0程度（弱アルカリ域）を示すことが分かる。市販A, Bの組成は石膏成分が中心となっているため、本研究で開発した固化材と比べ強度増加には期待が持てないものの（図(2)-7参照）、pHは中性を呈することが分かる。図(2)-16にフッ素と六価クロムの溶出濃度について市販の固化材と比較を行った結果を示す。先述したように、市販A, Bは石膏が主体であることから、いずれの添加量においてもフッ素の溶出が見られ、添加量の増加に伴い溶出濃度も増加する傾向にある。一方、本研究で開発した固化材については、市販の固化材に比べフッ素の溶出濃度は極めて低いことが分かる。これは、先述したように特殊添加材に含まれる Al_2O_3 が再生石膏に含まれるフッ素と反応し AlF_3 を生成したことや、エトリンサイトによるフッ素不溶化の影響と考えられる。なお六価クロムについては、いずれの固化材を用いた改良体からの溶出はみられなかった。

以上の結果から、本研究で開発した固化材は、pHについては引き続き検討課題ではあるが、再生半水石膏または再生二水石膏を特殊添加材と混合させることで、フッ素および六価クロムの溶出を抑えることができることが可能であり、環境に優しい固化材として土木分野における地盤改良材としての活用に期待が持てる。

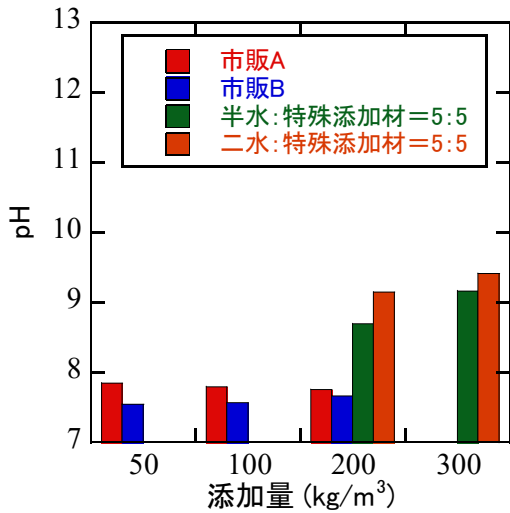


図 (2)-15 固化材添加量とpHの関係

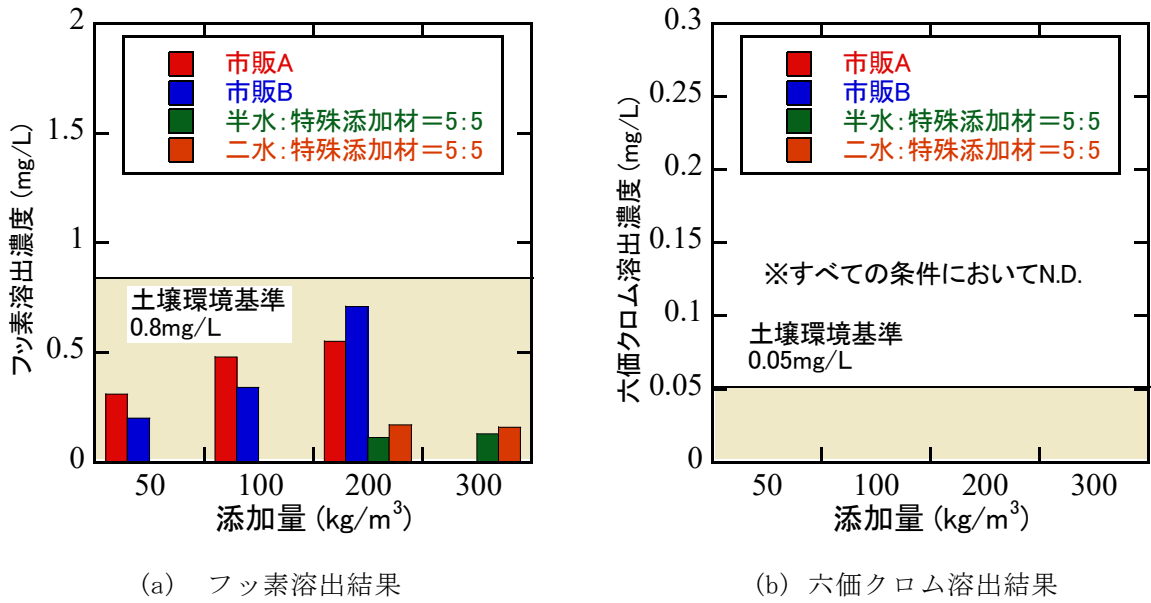


図 (2)-16 市販の固化材との比較

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究で開発した中性固化材は、市販の中性固化材より少ない添加量（1/2程度）で、同程度あるいはそれ以上の強度が得られることが明らかとなった。このことは、焼成処理前の再生二水石膏を用いることで、経済的な新しい固化材の開発が可能であることを示唆している。

本研究で開発した中性固化材は、市販の中性固化材と比べpHはやや高いものの、pHは8.5～9.0程度（弱アルカリ域）を示すことが明らかとなった。また、フッ素や六価クロムの溶出を土壤環境基準値以下まで抑制できることが明らかとなった。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

再生石膏を中性固化材として用いるためにはフッ素の不溶化が不可欠であるが、アルミナ成分を多く含む特殊添加材と混合させることでフッ素の溶出を抑制できることが明らかとなった。さらに、市販の中性固化材と比べ若干pHは高いものの、十分な強度発現効果と経済性を有することから、環境に優しい新しい固化材として、土木分野における地盤改良材としての活用に期待が持てる。

6．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

特に記載すべき事項はない。

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

特に記載すべき事項はない。

＜その他誌上発表（査読なし）＞

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 藤山晶穂・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣：第53回地盤工学研究発表会講演概要集、2319-2320（2018）
再生石膏の有効利用を考えた中性固化材による地盤改良効果
- 2) 藤山晶穂・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣：土木学会第73回年次学術講演会講演概要集、987-988（2018）
再生半水石膏粉を用いたセメント系固化材による地盤改良土の再泥化特性

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

8．引用文献

- 1) 松岡武男・羽田準一・中村正博：環境に優しい固化材を用いた汚泥のリサイクル例，土木学会第57

回年次学術講演会, VII-199, pp397-398, 2002.

- 2) 国土交通省 廃石膏ボード現場分別解体マニュアル 平成24年3月：3 廃石膏ボードの処理及び再資源化
- 3) 亀井健史・蓮葉秀人：高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル，vol.4, No.1, p91-98, 2009.
- 4) 橋本敦美・伊藤 靖・佐藤道生・羽原俊祐：合成したセメント水和生成物による微量元素（六価クロム、ヒ素、セレン、ホウ素、フッ素およびアルミニウム）の固定化について，Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.71-78, 2012.
- 5) 大宅淳一ほか：六価クロムのAFm相への固定化と吸着挙動，セメント・コンクリート論文集，No.64, pp.35-41, 2010.

Ⅱ-3 廃石膏ボード処理物の品質管理に関する検討

愛知工業大学

工学部土木工学科 教授 中村吉男

平成29年度～30年度累計予算額：11,802千円（累計予算額は、間接経費を含む税込額）
（うち平成29年度：6,091千円、平成30年度：5,711千円）

〔要旨〕

製品の原材料として製造される「再生石膏粉（二水、半水、無水）」について、石膏の形態（二水、半水、無水）の品質保証に資するための評価方法を検討するとともに、全国の中間処理業者が製造販売している再生石膏粉について、夾雑物の量ならびに重金属等の含有量について、その実態を調査した。

また、再生石膏粉の活用先の一つとして考えられる植生基盤材としての適用性を評価した。

〔キーワード〕

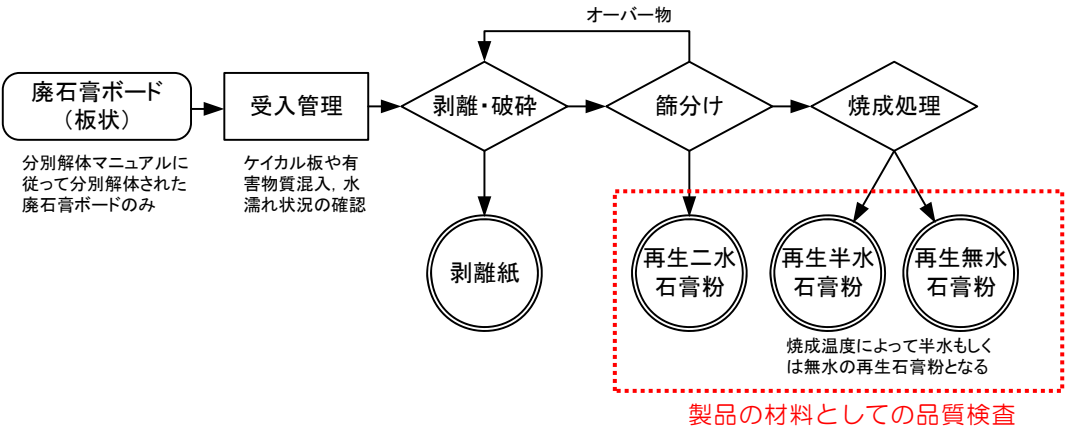
再生石膏粉、相転移、結晶水、密度、品質管理

1. はじめに

再生石膏粉の工学的有効性が報告されている一方で、再生処理技術の優劣により再生石膏粉の品質が一定していないことが再生利用の障壁となる事例が散見される。再生石膏粉の要求品質については、利用用途に応じて異なり、また、品質検査の考え方は、時勢と受け入れ先等の要求事項の変化に対応する必要があることから、再生石膏粉の製造業者は、再生石膏粉の特性を良く理解した上で、製造する再生石膏粉の品質の向上と安定性を確保するために積極的に品質管理を実施する必要がある。

再生石膏粉の基本的な製造方法を図(3)-1に示した。再生石膏粉は、廃石膏ボードを破碎し、剥離紙との分離によって生成される「石膏粉」から、規定の最大粒径を超えるサイズを篩分けにより排除した「再生二水石膏粉」、焼成処理を経た「再生半水石膏粉」および「再生無水石膏粉」が製造される。

本研究は、図(3)-1の赤枠で示した製品の原材料として製造される「再生石膏粉（二水、半水、無水）」について、石膏の形態（二水、半水、無水）の品質保証に資するための評価方法を検討するとともに、全国の中間処理業者が製造販売している再生石膏粉について、夾雑物の量ならびに重金属等の含有量について、その実態を調査するものである。



図(3)-1 再生石膏粉の基本的な製造方法

2. 研究開発目的

利用用途別に求められる再生石膏粉の品質検査項目を図(3)-2に示す。

利用用途		セメント 凝結遅延剤	ボードtoボード	中性固化材	改質剤	改良助剤	農業利用
使用される主な石膏		二水・無水	二水	半水・無水	二水・半水・無	二水・半水・無	二水
夾雑物量		◎	◎	◎	◎	◎	◎
化合水量		—	◎	◎	—	◎	—
粒度	最大粒径	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	粒径分布	※	※	※	※	※	※
重金属等	溶出量	—	※	※	※	※	※
	含有量	◎	◎	◎	◎	◎	◎
pH		◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎：基本的に実施されるべき品質管理項目

※：利用先によっては要求される可能性がある項目

—：不要

図(3)-2 利用用途別の材料としての再生石膏粉の検査項目

本研究は、図(3)-2の赤枠で示した3項目について、以下の事項を目的として検討を行った。また、第4節では、再生石膏粉の具体的な活用先として植生基盤材への適用性を評価した。

1) 石膏種の判別方法

焼成処理によって製造される再生石膏粉は相転移の状態を把握し、石膏の形態（半水、無水）に関する品質保証が必要である。

本研究では、その具体的な評価方法を確立することを目的として、再生石膏粉の化合水分量と密度を指標とした再生石膏粉の形態評価方法を検討するとともに、加熱乾燥式水分率測定試験を用いた迅速な水分量の測定方法とその結果を用いた簡便的な形態評価方法を検討した。

2) 夾雑物量を把握するための試験方法

夾雑物量を把握するための標準的な試験方法を確立するとともに、全国の中間処理業者が製造販売している再生石膏粉の夾雑物量の実態を把握することを目的として、収集した再生石膏粉の夾雑物量の試験を実施した。

3) 再生石膏粉の重金属等含有量の調査

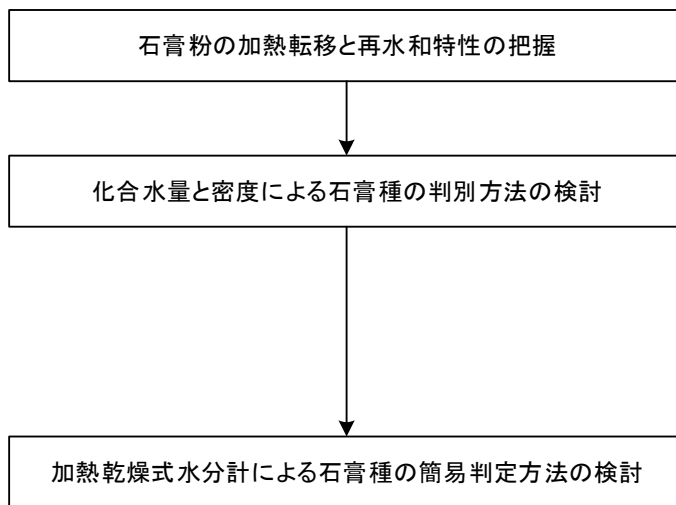
製品の原材料として製造される再生石膏粉については、品質管理の観点から有害物質として重金属等の含有量を評価する必要がある。全国の中間処理業者が製造販売している再生石膏粉の重金属等の含有量の実態を把握することを目的として、収集した再生石膏粉について重金属等8項目の底質調査法による全含有量を調査した。

4) 植生基盤材への適用性評価

再生石膏粉の利活用先として考えられる植生基盤材への適用性を評価することを目的として、ため池の浚渫汚泥に対して再生石膏粉を用いた土壌改良を行い、植生基盤材としての各種試験を実施した。

3. 研究開発方法

1) 石膏種の判別方法

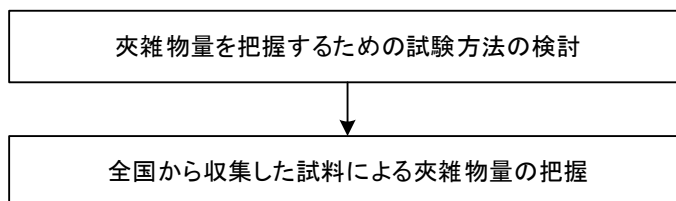


市販の石膏粉(二水, β 型半水, III型無水, II型無水)を用いて、熱重量-示差熱試験(TG-DTA)および電気乾燥炉による加熱時間と質量変化の試験により、石膏粉の加熱転移と再水和特性を調査した。

再生石膏粉(二水:6試料, 半水:3試料, 無水:3試料)を用いて、X線回折により各石膏種の構成比を把握し、試薬の化合水量および密度から、再生石膏粉の理論上の化合水量および密度を算出した。再生石膏粉の実測の化合水量および密度を測定し、理論値との相関性を確認することで、化合水量と密度の測定によって石膏種および夾雑物量が把握できることを見出した。

市販の二水石膏および半水石膏を用いて、加熱乾燥式水分計によって化合水量を測定する場合の加熱温度、加熱時間、試料量について検討した。二水+半水, 半水+無水の混合試料を混合割合を種々変化させて作成し、加熱乾燥式水分計によって測定した化合水量から混合割合を逆算した。逆算した混合割合と試料の混合割合は概ね一致することから、加熱乾燥式水分計によって測定した化合水量から石膏種が判定できることを確認した。

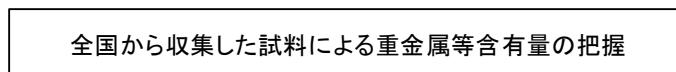
2) 夾雑物量を把握するための試験方法



夾雑物量を把握するための試験を行い、試験手順を整理した。

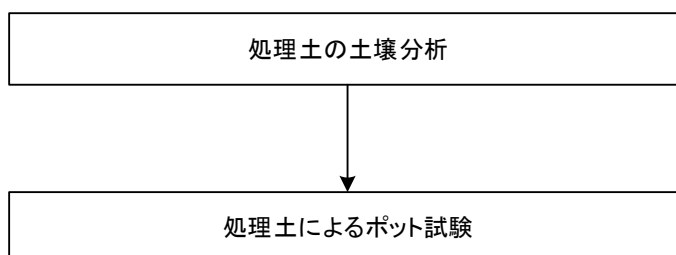
全国から収取した再生石膏粉(二水:37試料, 半水:6試料)について、上記手順により、再生石膏粉の夾雑物量の実態を調査した。

3) 再生石膏粉の重金属等含有量の調査



全国から収取した再生石膏粉(二水:38試料, 半水:6試料, 無水10試料)について、底質調査法による全含有量試験を実施し、再生石膏粉の重金属等の含有量の実態を調査した。
分析項目:カドミウム, 鉛, 六価クロム, 砒素, 総水銀, セレン, ふっ素, ほう素

4) 植生基盤材への適用性評価



ため池の浚渫汚泥に対して再生石膏粉を用いて土壌改良を行い、植生基盤材としての適用性を評価するための土壌分析を実施した。

試験項目:pH, 土壌硬度, 飽和透水係数, 有効水分保持量, 全窒素, 有機炭素含有量, 塩基置換容量

養生28日の処理土を用いて、コマツナを用いたポット試験による植生の生育観察を行った。

4. 結果及び考察

1) 石膏種の判別方法

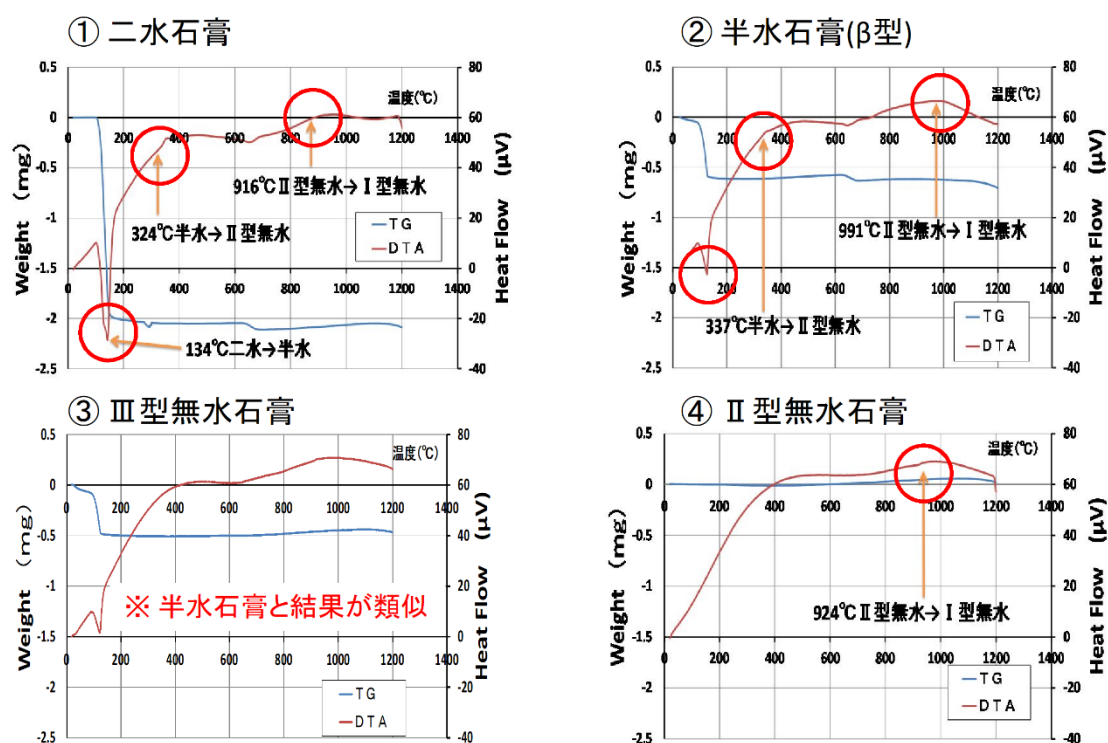
① 石膏粉の加熱転移と再水和特性

①-1 熱重量-示差熱試験結果

市販の石膏粉（㈱ノリタケカンパニーリミテド製）を用いて熱重量-示差熱試験(TG-DTA)を行い、各種石膏粉における熱量と相転移の関係を調査した。

試験結果は、図(3)-3に示すとおりであり、各石膏種における相転移を生じる加熱温度は、以下のとおり整理される。また、Ⅲ型無水石膏と半水石膏のDTA曲線は類似した傾向を示した。

- ・二水石膏 ⇒ 半水石膏：134℃
- ・半水石膏 ⇒ Ⅲ型無水石膏：140℃
- ・Ⅲ型無水石膏 ⇒ Ⅱ型無水石膏：324～337℃
- ・Ⅱ型無水石膏 ⇒ Ⅰ型無水石膏：916～991℃

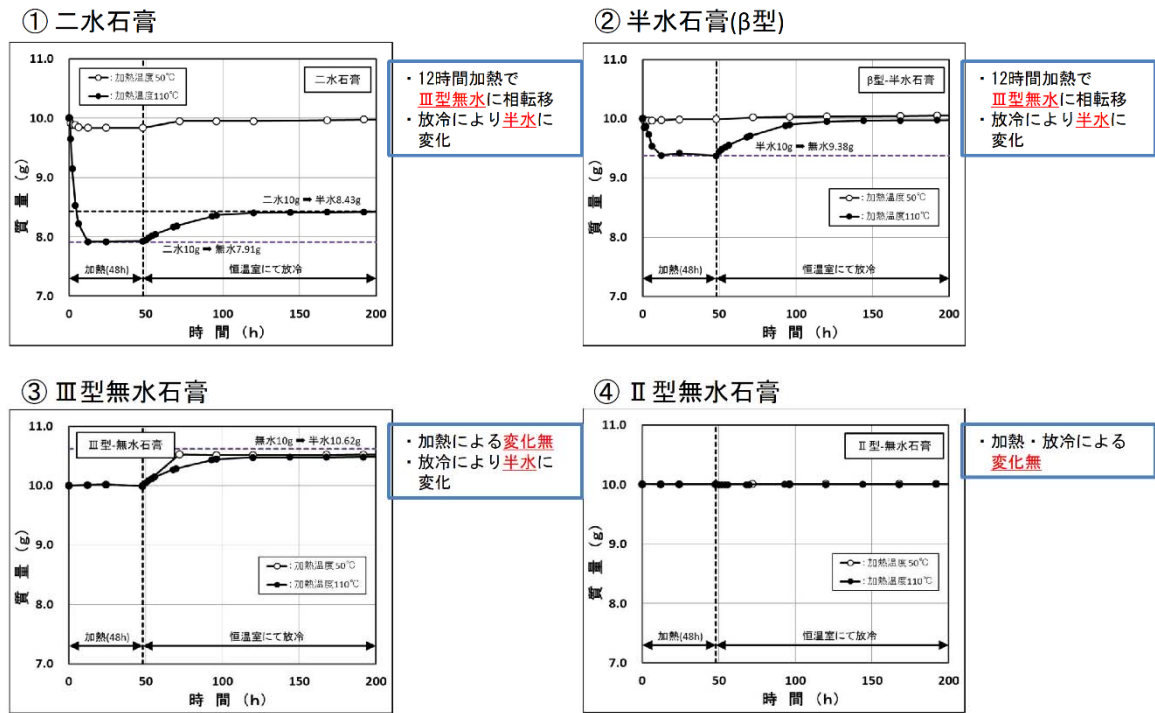


図(3)-3 熱重量-示差熱試験(TG-DTA)結果【市販石膏による】

①-2 電気乾燥炉を用いた加熱時間と質量変化

熱重量-示差熱試験(TG-DTA)と同じ試料で、電気乾燥炉を用いて、加熱温度50℃および110℃で加熱した際の加熱時間と質量変化の関係を調査した。

試験結果は図(3)-4に示すとおりである。各石膏種における理論上の質量は、分子量に基づいて計算することができるため、初期の試料の質量を把握しておけば、質量の変化量によって試料の相転移を確認することができる。一般に半水石膏は130℃以上でⅢ型無水石膏へと形態が変化するとされているが、本試験で設定した110℃においても相転移を生じ、半水からⅢ型無水に変化することが確認された。また、Ⅲ型無水石膏は、室内での放冷中に、容易に再水和反応を生じて半水石膏に変化することが確認された。なお、Ⅱ型無水石膏は、110℃の加熱、加熱後の放冷によって、質量の変化はなく、安定した状態にあった。



図(3)-4 加熱時間と重量変化【市販石膏による】

② 化合水量と密度による石膏種の判別方法

②-1 化合水量と密度の合成値と実験値の関係

熱重量-示差熱試験(TG-DTA)により石膏粉の形態変化は、試料温度の推移に伴う質量変化（すなわち石膏粉の化合水の消失量）として捉えることができることから、石膏粉の化合水量を求めれば石膏の種類（二水、半水、無水）が同定され、さらに粒子密度を把握することにより、再生石膏粉に夾雑する不純物（紙等）の概略的な量を把握することができるものと考えた。本項で対象とした再生石膏粉は、全国の中間処理業者が製造販売している再生石膏粉とした。対象試料における再生石膏粉の製造概要（破碎粒径、焼成温度）及び化合水量、密度を表(3)-1に示す。

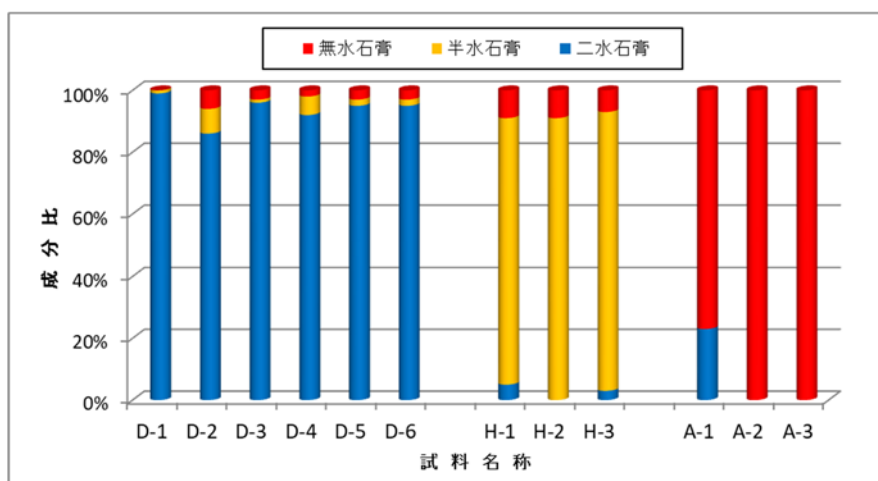
X線回折による対象試料の形態構成（二水、半水、無水）を図(3)-5に示す。再生二水石膏粉製品（D-1～D-6）では一部半水と無水が混在し、再生半水石膏粉製品（H-1～H-3）では一部二水と半水が混在している。また、無水再生石膏粉製品のA-1は20%程度の二水石膏が混在している。

表(3)-1 対象試料一覧

試料名称		破碎粒径	焼成温度	化合水量※1) (%)	密度※2) (g/cm ³)
再生二水石膏	D-1	3mm以下	—	19.2	2.30
	D-2	3mm以下	—	18.3	2.33
	D-3	3mm以下	—	15.8	2.34
	D-4	3mm以下	—	18.9	2.33
	D-5	3mm以下	—	17.7	2.34
	D-6	5mm以上	—	18.1	2.31
再生半水石膏	H-1	3mm以下	120～160℃	5.9	2.61
	H-2	4mm	150～180℃	5.6	2.61
	H-3	3mm以下	不明	6.2	2.62
再生無水石膏	A-1	4mm	200℃	6.7	2.70
	A-2	5mm以上	700～800℃	0.2	2.92
	A-3	3mm以下	700～800℃	0.1	2.97

※1) 「土の含水比試験方法」(JIS A 1203) 炉乾燥法(乾燥温度: 110℃±5℃)による測定結果

※2) 「セメントの物理試験方法」(JIS R 5201) ルシヤテリエ密度ビンによる測定結果



図(3)-5 各試料の形態構成比

測定方法：X線回折（X線回折装置：リガク製 UltimaIV）

石膏の相転移時に生ずる結晶水の離脱は、結晶構造の緻密化を促し、化合水量の低下と密度の上昇となって表れることから、両者を測定することによって再生石膏粉の形態変化を捉えることができるものと考えた。

各形態における理論上の化合水量は分子量を基にして算定すれば、二水石膏粉：20.9%、半水石膏粉：6.2%、無水石膏粉：0.0%となる。また、標準試薬の密度試験結果から、各形態の密度は、それぞれ求め、二水石膏粉：2.325 g/cm³（関東化学(株)試薬特級、純度規格98.0%）、半水石膏粉：2.686 g/cm³（関東化学(株)試薬鹿1級、純度規格99.0%）、無水石膏粉：2.930 g/cm³（関東化学(株)試薬鹿1級を1100℃で焼成）が得られている。これより、再生石膏粉の理論上の合成化合水量及び合成密度は、図(3)-5に示したX線回折による再生石膏粉の形態構成比を用いて、(1)、(2)式から算定することができる¹⁾。

図(3)-6は、化合水量と密度の合成値と実験値の関係を整理したものであり、合成値と実験値の間には高い相関性が認められ、再生石膏粉の化合水量と密度を調べることにより二水、半水、無水の形態を推定することが出来る。

$$w_{(gd+gh+ga)} = w_{gd} \times P_{gd} + w_{gh} \times P_{gh} + w_{ga} \times P_{ga} \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $w_{(gd+gh+ga)}$ ：再生石膏粉の化合水量(%)

w_{gd} , w_{gh} , w_{ga} ：二水、半水、無水の化合水量(%)

P_{gd} , P_{gh} , P_{ga} ：二水、半水、無水の含有率

$$(P_{gd} + P_{gh} + P_{ga} = 1)$$

$$\rho_{(gd+gh+ga)} = \frac{1}{\frac{P_{gd}}{\rho_{gd}} + \frac{P_{gh}}{\rho_{gh}} + \frac{P_{ga}}{\rho_{ga}}} \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $\rho_{(gd+gh+ga)}$ ：再生石膏粉の密度(g/cm³)

ρ_{gd} , ρ_{gh} , ρ_{ga} ：二水、半水、無水の密度 (g/cm³)

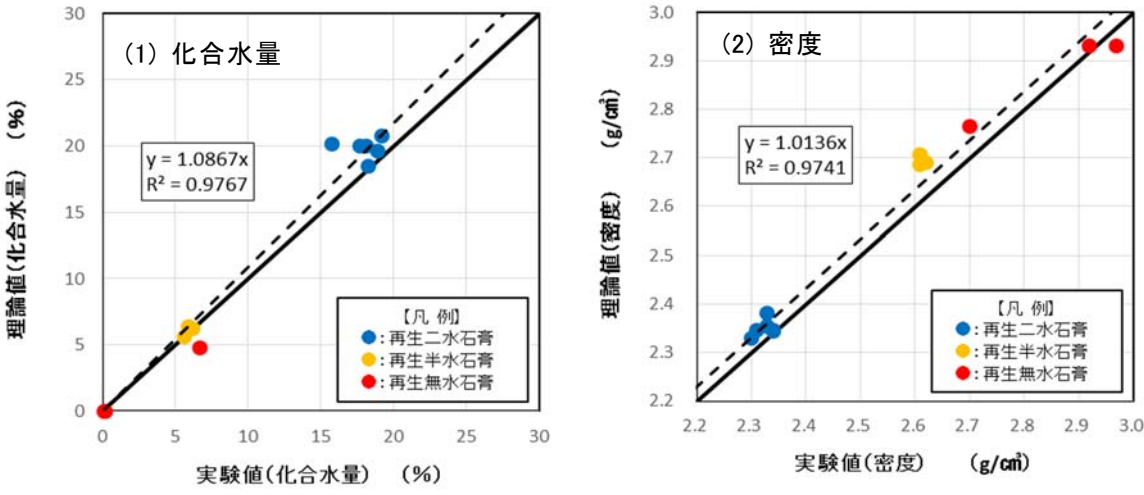


図 (3)-6 実験値と合成値の比較

②-2 化合水量と密度による石膏種の判別

図 (3)-7は、密度と化合水量の関係を整理したものであり、図中●印は標準試薬(純度の高い石膏粉)の状態量(二水、半水、無水)を示している。また、○印は二水と半水および半水と無水がそれぞれ1:1(質量比)の割合で構成された場合の状態量を表しており、各点を実線で結び表記した。破線は、実線に対して1%及び2%の紙片が混入した場合を想定して描いた密度と化合水量の関係であり、●、●、●は再生二水石膏粉、再生半水石膏粉、再生無水石膏粉の実験値をプロットしている。

同図に示すとおり、再生石膏粉の化合水量および密度を把握することにより、再生石膏粉の概略的な夾雑物の量と石膏の種類(二水、半水、無水)を把握することができる。なお、密度の測定方法は、「セメントの物理試験方法」(JIS R 5201)に従った。

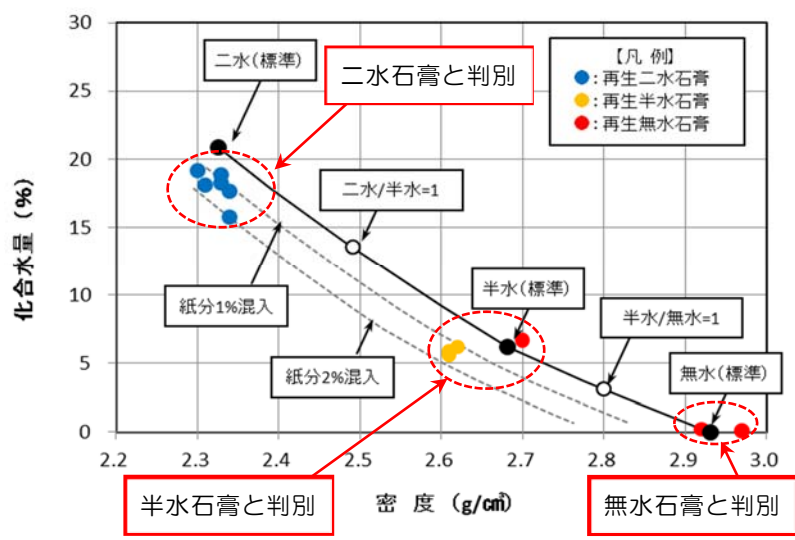


図 (3)-7 化合水量と密度の測定による夾雑物と石膏の種類の管理イメージ

③ 加熱乾燥式水分計による石膏種の簡易判定方法

①、②の検討によれば、再生石膏粉の概略的な夾雑物の量と石膏の種類（二水、半水、無水）を把握する手法として、再生石膏粉の化合水量および密度の測定をすることが提言されるが、再生石膏粉の製造業者や中間処理業者が自ら行う自主的な検査では、より簡便的な管理方法が必要であるものと考え、化合水量の測定のみで、概略的な再生石膏粉の種類（二水、半水、無水）と夾雑物の量を把握する手法を検討した。また、化合水量の測定は、「せっこうの化学分析方法」（JIS R 9101）に従えば、約200 gの試料を（40±2）℃で乾燥した後（自由水量）、約1.0 gを240～260℃で恒量になるまで加熱する（化合水量）こととなるが、これに代わって、加熱乾燥式水分計の適用と具体的な試験手順を検討した。

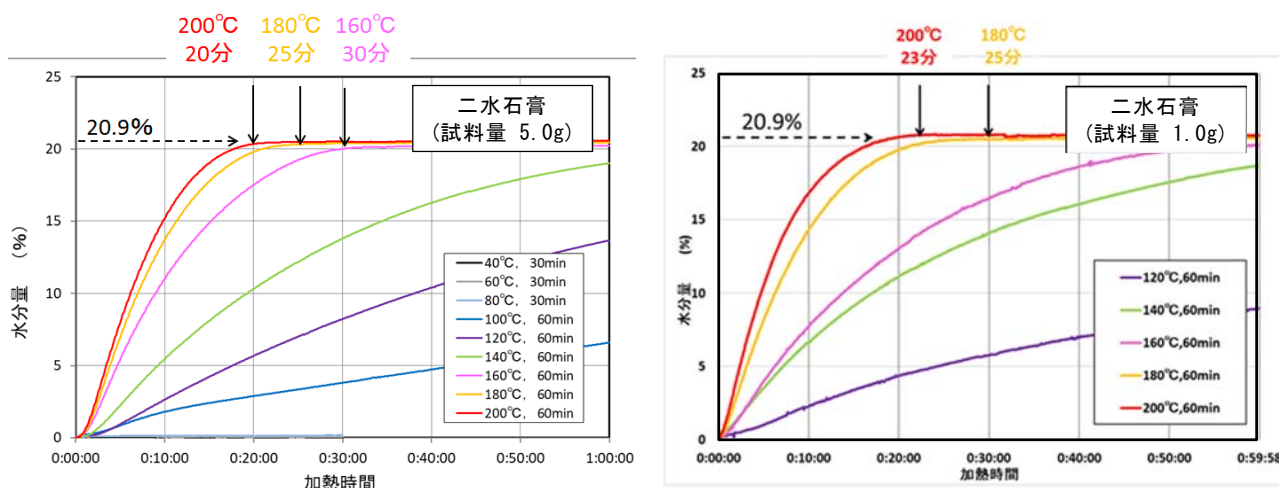
③-1 加熱乾燥式水分計による化合水量の測定方法の検討

加熱乾燥式水分計はエー・アンド・ディ製の加熱乾燥式水分計(MS-70、写真(3)-1)を用いた。市販の二水石膏粉および半水石膏粉を用いて、試料量を5.0 g、1.0 gについて各種加熱温度を設定し、加熱時間と水分量の関係を調べた。



写真(3)-1 加熱乾燥式水分計（エー・アンド・ディ製：MS-70）

加熱乾燥式水分計による測定結果を図(3)-8（二水石膏）、図(3)-9（半水石膏）に示す。また、同図から化合水量の理論値が得られる加熱時間を読み取り、表(3)-2に整理した。試験結果より、加熱乾燥式水分計を用いた場合、試料量5.0 gと1.0 gでは、理論値に達する加熱時間に大きな差異はないことがわかる。試料の代表性を考えれば、試料量は5.0～10.0 g程度が適正であるものと考えられる。また、加熱温度および加熱時間は、160℃以上で30分程度が適正であるものと考えられる。



図(3)-8 加熱乾燥式水分計による加熱時間と水分量の関係（二水石膏）

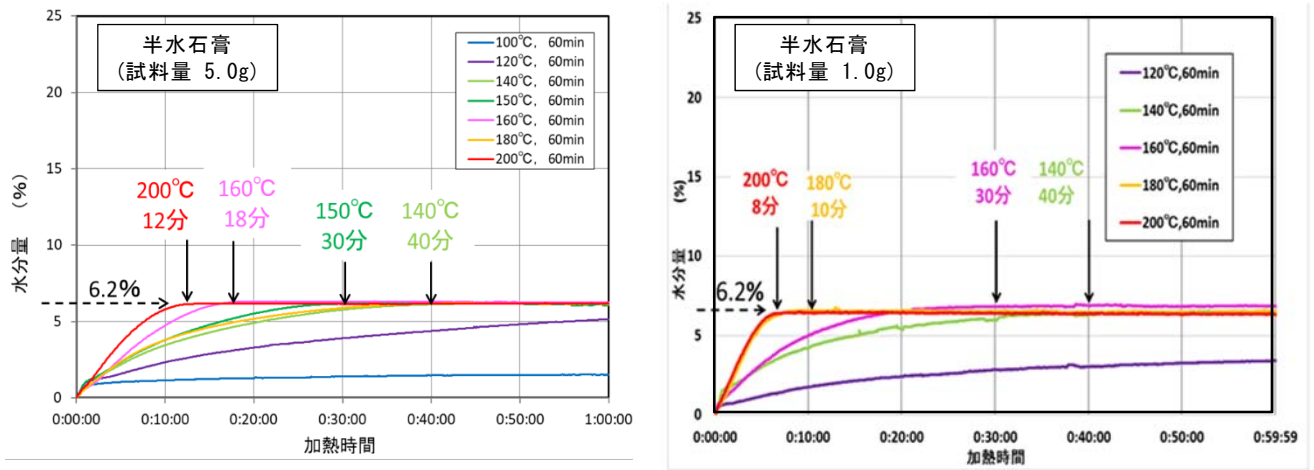


図 (3)-9 加熱乾燥式水分計による加熱時間と水分量の関係（半水石膏）

表 (3)-2 化合水量の理論値が得られる加熱時間

石膏の種類	試料の量 (g)	加熱温度 (°C)	理論値が得られる加熱時間
二水石膏	5.0	160	30 分
		180	25 分
		200	20 分
	1.0	180	25 分
半水石膏	5.0	200	23 分
		140	40 分
		150	30 分
		160	18 分
	1.0	200	12 分
		140	40 分
		160	30 分
		180	10 分
		200	8 分

③-2 化合水量による石膏種の推定含有量

市販の石膏粉を表 (3)-3の割合で混合した試料を作成し、加熱乾燥式水分計による化合水量の測定（加熱温度：200℃、加熱時間：30分、試料量：10 g）を行い、各石膏種の混合割合を逆算した。

表 (3)-3 作成した混合試料

混合試料の種類	混 合 割 合
二水石膏と半水石膏	8：2，5：5，2：8（3種類）
半水石膏と無水石膏	8：2，5：5，2：8（3種類）

試験で得た化合水量と計算で得た化合水量の関係を図 (3)-10に示す。同図に示すとおり、両者は良い一致を示し、試験で得た化合水量から試料の各石膏の割合を推定すれば表 (3)-4に示すとおりとなる。

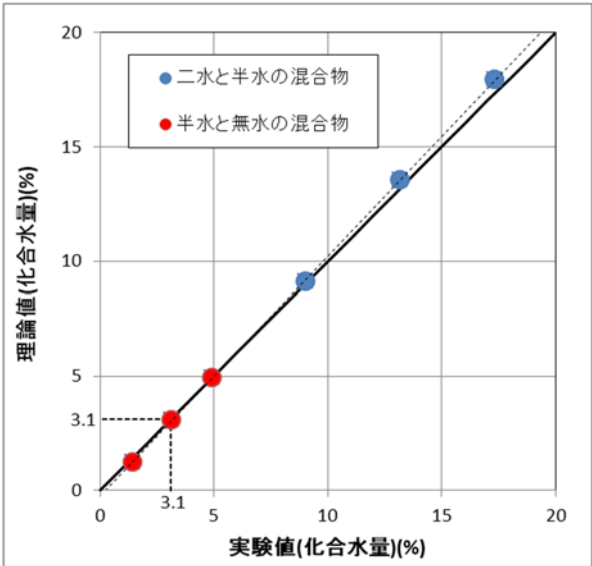


図 (3)-10 化合水量の実験値と理論値の比較

表 (3)-4 化合水量の測定値から求めた各石膏の割合

混合試料の種類	混合割合	化合水量		推定される各石膏の割合
		理論値 (%)	実験値 (%)	
二水石膏と半水石膏	8 : 2	17.96	17.32	7.6 : 2.4
	5 : 5	13.55	13.17	4.7 : 5.3
	2 : 8	9.14	9.03	1.9 : 8.1
半水石膏と無水石膏	8 : 2	4.96	4.91	7.9 : 2.1
	5 : 5	3.10	3.11	5.0 : 5.0
	2 : 8	1.24	1.45	2.3 : 7.7

本試験の結果より、化合水量の測定結果から各石膏種のおおよその含有量を推定することができるものと考え、その換算表を表 (3)-5～表 (3)-7に示した。

表 (3)-5 化合水量による各石膏種の推定含有量の換算表（二水石膏）

石膏の種類	化合水量の測定値： W_g (%)	二水石膏の推定含有量： Pd (wt%)	推定含有量の算定式
二水石膏	20.9 ～ 20.0	100 ～ 96	①
	20.0 ～ 19.0	96 ～ 91	
	19.0 ～ 18.0	91 ～ 86	
	18.0 ～ 17.0	86 ～ 81	
	17.0 ～ 16.0	81 ～ 77	
	16.0 ～ 15.0	77 ～ 72	

【推定含有量の算定式】

$Pd = (W_g - Wi) / (Wd - Wi) \times 100 \dots\dots ①$

Pd : 二水石膏の推定含有量(wt%)、 W_g : 試料の化合水量の測定値(%)、

Wi : 夾雑物の化合水量(0.0%と仮定)、 Wd : 二水石膏の理論上の化合水量(20.9%)

表 (3)-6 化合水量による各石膏種の推定含有量の換算表（半水石膏）

石膏の種類	化合水量の測定値： W_g (%)	半水石膏の推定含有量： Ph (wt%)	推定含有量の算定式
半水石膏	10.0 ～ 9.0	74 ～ 81	②
	9.0 ～ 8.0	81 ～ 88	
	8.0 ～ 7.0	88 ～ 95	
	7.0 ～ 6.0	100 ～ 95	②, ③
	6.0 ～ 5.0	97 ～ 81	③
	5.0 ～ 4.0	81 ～ 65	

【推定含有量の算定式】

(化合水量の測定値が6.3以上の場合)

$$Ph = (W_g - W_d) / (W_h - W_d) \times 100 \dots\dots ②$$

 Ph : 半水石膏の推定含有量(wt%)、 W_g : 試料の化合水量の測定値(%)、 W_d : 二水石膏の理論上の化合水量(20.9%)、 W_h : 半水石膏の理論上の化合水量(6.2%)

(化合水量の測定値が6.2以下の場合)

$$Ph = (W_g - W_i) / (W_h - W_i) \times 100 \dots\dots ③$$

 Ph : 半水石膏の推定含有量(wt%)、 W_g : 試料の化合水量の測定値(%)、 W_i : 夾雑物の化合水量(0.0%と仮定)、 W_h : 半水石膏の理論上の化合水量(6.2%)

表 (3)-7 化合水量による各石膏種の推定含有量の換算表（無水石膏）

石膏の種類	化合水量の測定値： W_g (%)	無水石膏の推定含有量： Pa (wt%)	推定含有量の算定式
無水石膏	2.5 ～ 2.0	60 ～ 68	④
	2.0 ～ 1.5	68 ～ 76	
	1.5 ～ 1.0	76 ～ 84	
	1.0 ～ 0.5	84 ～ 92	
	0.5 ～ 0.0	92 ～ 100	

【推定含有量の算定式】

$$Pa = (W_g - W_h) / (W_a - W_h) \times 100 \dots\dots ④$$

 Pa : 無水石膏の推定含有量(wt%)、 W_g : 試料の化合水量の測定値(%)、 W_h : 半水石膏の理論上の化合水量(6.2%)、 W_a : 無水石膏の化合水量(0.0%)

2) 夾雑物量を把握するための試験方法

夾雑物量を把握するための試験方法を検討した。今回の研究で検討した試験手順を以下に示す。また、試験手順のイメージを図(3)-11に示す。

- 200～300g程度の試料を約40℃で恒量になるまで乾燥し、初期質量を求める。
- 175℃で3時間加熱し、二水石膏部分を半水石膏化とする。
- 100 μ mの篩上で水洗し、半水石膏を軽くすりつぶしながら全てを洗い流す。
(繊維分がほぐれない場合：15分水洗→15分水中養生→完全に溶解するまで水洗)
- 篩上の残存物を繊維分（浮揚物）と不溶解残渣（沈殿物）に分離する。
(繊維分に粒子が絡まっている場合にはピンセット等で取り出し、不溶解残渣に含める。)
- 繊維分と不溶解残渣をそれぞれ40℃で恒量になるまで乾燥し、各質量を計量する。
- 繊維分と不溶解残渣の質量を試料の初期質量で除し、各含有率を算出する。

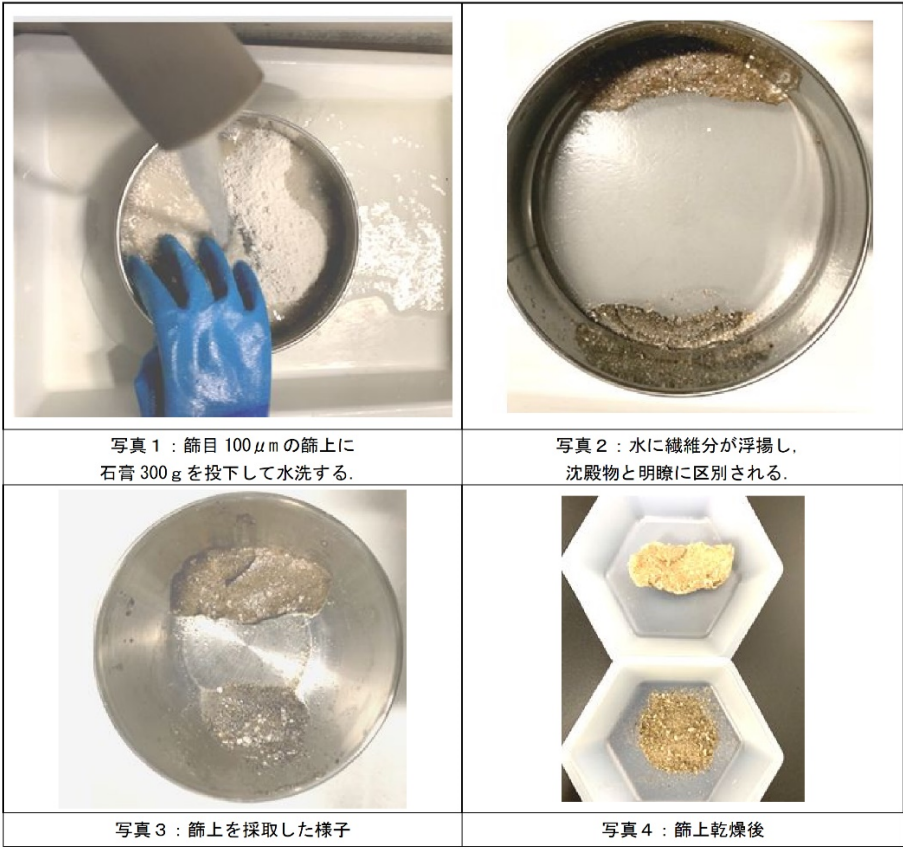


図 (3)-11 “夾雑物の量” の試験イメージ

全国石膏ボードリサイクル協議会の協力を得て、全国から収集した再生石膏粉を用いて実施した試験結果を表 (3)-8 に示す。不溶解-繊維は主に紙分であり、不溶解-沈殿物は主に土砂である。繊維分は全ての試料において 1.0% 未満であるが、沈殿物は再生二水石膏で 7.37% を含む試料も存在した。

表 (3)-8 再生石膏粉の夾雑物量の試験結果

(単位：wt%)

石膏の種類	試料コード	試料数 (n)	不溶解-繊維 (①) (平均値)	不溶解-沈殿物 (②) (平均値)	夾雑物の量 (①+②) (平均値)
再生二水	HOF-D	6	0.87	1.75	2.62
	CHK-D	5	0.36	0.28	0.64
	KNC-D	5	0.69	7.37	8.06
	AIG-D	5	0.37	1.61	1.98
	KYI-D	5	0.80	1.70	2.50
	HYY-D	4	0.50	0.14	0.64
	FKS-D	5	0.51	1.18	1.69
	OKO-D	2	0.40	0.91	1.31
再生半水	HYN-H	1	0.48	0.18	0.66
	FKS-H	5	0.37	1.25	1.62

3) 再生石膏粉の重金属等含有量の調査

石膏粉は土壌、農地利用の他にボード利用やセメント利用がある。前者の土壌・農地利用においては土と混合された状態で環境安全性を評価することになるが、一方で製品の原材料として製造される再生石膏粉については、品質管理の観点から有害物質として重金属等の含有量を評価する必要がある。本研究では、実際に製造された再生石膏粉を対象として、8項目の重金属等に着目し、底質調査法による全含有量を調査した。

調査結果を表(3)-9、表(3)-10に示す。また、8項目のうち、比較的大きな値が検出された砒素、ふっ素、ほう素については、事業者毎にグラフ化し、図(3)-12～図(3)-14に示した（各グラフの横軸ラベルの()内の数値は試験した検体数を表し、エラーバーは最大値・最小値を表す。）。

カドミウム、鉛は全調査試料で不検出であり、検出されたふっ素、ほう素、砒素、セレン、六価クロム、水銀に関しては、二水、半水、無水の形態や事業所単位、地域単位において特徴的な差は確認されなかった。

表(3)-9 底質調査法による再生石膏粉の重金属等の全含有量分析結果（総括）

(単位：mg/kg)

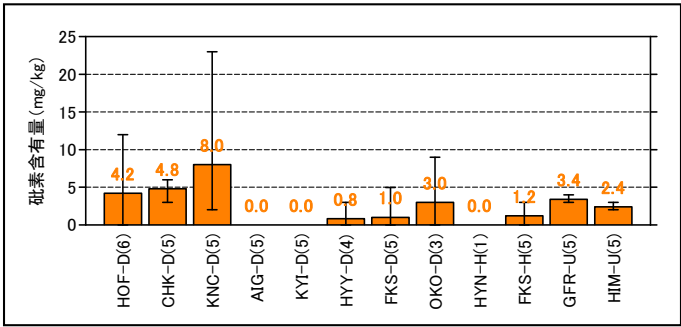
	カドミウム	鉛	六価クロム	砒素	総水銀	セレン	ふっ素	ほう素
平均値	3未満	50未満	0.1	2.6	0.1	0.1	1,187	131
最大値	3未満	50未満	1.8	23	0.5	2.0	2,900	320
最小値	3未満	50未満	0.5未満	2未満	0.1未満	1未満	390	100未満
標準偏差	—	—	0.3	3.9	0.1	0.4	481	79

- ・ サンプル数：52試料(新築系再生石膏粉、解体系再生石膏粉の両者を含む)
- ・ 平均値および標準偏差の算出にあたり、検出下限値未満は0 (mg/kg) として取り扱った。

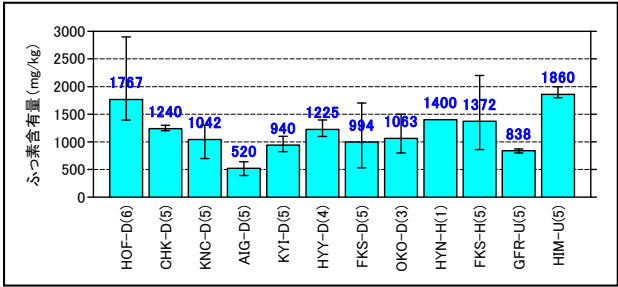
表(3)-10 底質調査法による再生石膏粉の重金属等の全含有量分析結果（事業所毎平均値）

（単位：mg/kg）

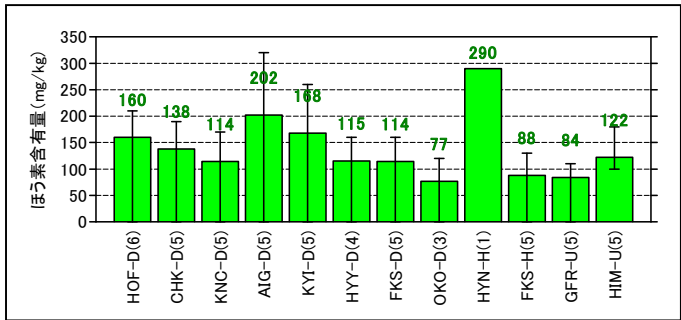
石膏の種類	試料コード	カドミウム	鉛	六価クロム	砒素	総水銀	セレン	ふっ素	ほう素
再生二水	AIG-D	3未満	50未満	0.5未満	4.2	0.2	0.2	1,767	160
	HOF-D	3未満	50未満	0.5未満	4.8	0.1	1未満	1,240	138
	KYI-D	3未満	50未満	0.5未満	8.0	0.1	1未満	1,042	114
	CHK-D	3未満	50未満	0.5未満	2未満	0.1未満	1未満	520	202
	HYI-D	3未満	50未満	0.5未満	2未満	0.1	1未満	940	168
	FKS-D	3未満	50未満	0.4	0.8	0.1	0.5	1,225	115
	KNC-D	3未満	50未満	0.5未満	1.0	0.1	0.6	994	114
	OKO-D	3未満	50未満	0.5未満	3.0	0.1	1未満	1,063	77
再生半水	HYN-H	3未満	50未満	0.4	1.2	0.1未満	1未満	1,372	88
	FKS-H	3未満	50未満	0.5未満	2未満	0.1未満	1未満	1,400	290
再生無水	GFR-U	3未満	50未満	0.2	3.4	0.1未満	1未満	838	84
	HIM-U	3未満	50未満	0.5未満	2.4	0.1未満	1未満	1,860	122



図(3)-12 底質調査法による再生石膏粉の砒素全含有量分析結果（事業所毎平均値）



図(3)-13 底質調査法による再生石膏粉のふっ素全含有量分析結果（事業所毎平均値）



図(3)-14 底質調査法による再生石膏粉のほう素全含有量分析結果（事業所毎平均値）

3) 品質管理票

ここまでに示した品質管理について、再生石膏粉の製造業者（主には中間処理業者）が日常的に実施する「自主検査」と、第三者機関（主には計量証明事業所等の分析機関）が実施する「定期検査」に分けて図(3)-15に示す「再生石膏粉の品質管理票」として記録することを提案する。自主検査は、週に1回以上実施し、定期検査は処理量1000トン毎に実施することを想定している。本管理票は、再生石膏粉有効利用ガイドラインの第3章に適用した。

再生石膏粉の品質管理票

発行日: 年 月 日

1. 石膏の種類: 二水 ・ 半水 ・ 無水

2. 製造業者名:

3. 製造場所:

4. 製造年月日(製造期間):

5. 製造管理番号(製造ロット番号, 略号等):

品質管理検査結果

自主検査結果

検査項目

検査結果

夾雑物の混入状況
(種類, 量等の観察)

最大粒径mm

水分量

自由水量
(乾燥温度:40±2℃)

化合水量
(加熱温度:240~260℃)

自由水量
%

化合水量
mm

水素イオン指数(pH)

定期検査結果

検査項目

検査結果

夾雑物量

繊維分wt%

不溶解残渣分wt%

割合

二水石膏wt%

半水石膏wt%

無水石膏wt%

測定方法: X線回折・化合水量と密度の関係
(化合水量 %)
(密度 g/cm³)

水素イオン指数(pH)

重金属等全含有量
(底質調査方法)

カドミウムmg/kg

鉛mg/kg

六価クロムmg/kg

砒素mg/kg

総水銀mg/kg

セレンmg/kg

ふっ素mg/kg

ほう素mg/kg

検査実施日 年 月 日

検査実施者

検査実施日 年 月 日

検査実施者

【特記事項】

※)保管期限:発行日より5年

図(3)-15 再生石膏粉の品質管理票（再生石膏粉の有効利用ガイドライン第3章）

5) 植生基盤材への適用性評価

① 処理土の土壌分析結果

ため池の浚渫汚泥に対して再生石膏粉を用いて土壌改良を行い、植生基盤材としての適用性を評価した。使用した再生石膏粉は、再生二水、再生無水、再生二水＋再生無水（8：2）、再生二水（造粒固化）の4種類であり、概ねコーン指数が200kN/m²程度が確保できる添加量200kg/m³を混合した。試験結果は、表(3)-11に示すとおりである。なお、同表に併記した評価基準は、以下のマニュアルを参考とした。

- ・「緑化事業における植栽基盤整備マニュアル」（（社）日本造園学会）
（土壌硬度、有機炭素含有量以外）
- ・「植栽基盤整備技術マニュアル」（国土交通省都市地域整備局）
（土壌硬度、有機炭素含有量）

未処理土と比較して、全ての処理土について土壌硬度の改善が認められた。また、再生二水石膏粉＋再生無水石膏粉（8：2混合）では、透水性が向上した。一方、全ての処理土において、有効水分保持量は減少した。pH、全窒素、有機炭素含有量、塩基置換容量については、未処理土と処理土を比較してほとんど変化はみられなかった。

表(3)-11 植生基盤材に対する分析結果

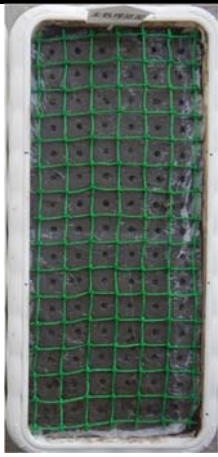
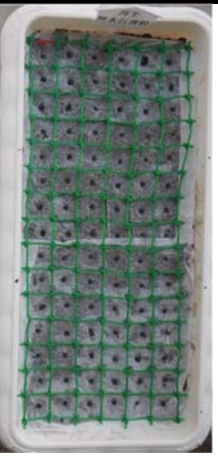
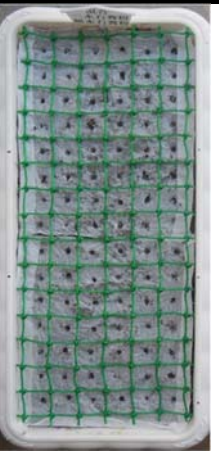
試料名 項 目	未処理土	処 理 土				評 価 基 準			
		再生二水	再生無水	再生二水＋ 再生無水 (8：2)	再生二水 (造粒固化)	優 (良)	良 (可)	不良	極不良
pH	6.7	6.9	6.9	6.8	6.8	5.6～6.8	4.5～5.6 6.8～8.0	3.5～4.5 8.0～9.5	3.5> 9.5<
土壌硬度 (mm)	2	11～13	9～14	10～12	7～9	20～11	24～20	24以上 11以下	
飽和透水係数 (m/秒)	1.2×10^{-7}	8.6×10^{-8}	2.1×10^{-9}	3.0×10^{-6}	4.6×10^{-8}	$10^{-4} <$	$10^{-4} \sim$ 10^{-5}	$10^{-5} \sim$ 10^{-6}	$10^{-6} >$
有効水分保持量 (L/m ³)	85	56	32	54	45	120<	120～80	80～40	40>
全窒素 (wt%-dry)	0.25	0.21	0.20	0.21	0.22	0.12<	0.12～ 0.06	0.06>	—
有機炭素含有量 (wt%-dry)	2.4	2.2	2.1	2.2	2.3	全炭素 10<	全炭素 10～3	全炭素 3>	—
塩基置換容量 (cmol(+)/kg)	28	23	24	23	24	20<	20～6	6>	—

注) は、不良、極不良であることを示す。

② 処理土によるポット試験結果

養生28日の処理土を用いて、ポット試験による植生観察を行った。種子はコマツナを使用し、1ポット当たり6×15＝90個の種子を撒いた。種は処理土に直播し、表面からの乾燥を避けるために5mm程度の覆土（山土）を敷設した。発芽時の状況は表(3)-12に示すとおりであり、土壌の違いによる発芽時の発芽率・発芽の状況に差異はみられなかった。

表(3)-12 ポット試験による植生観察結果

区分	未処理土	処 理 土			
		再生二水	再生無水	再生二水＋ 再生無水(8:2)	再生二水 (造粒固化)
種 ま き					
6日 後					

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究の成果は、「再生石膏粉の有効利用ガイドライン」の第3章「再生石膏粉の品質管理」にとりまとめた。解体系の廃石膏ボードから、安全で良質な再生石膏粉を製造するためのリサイクルシステムを確立する上で必要となる再生石膏粉の品質管理の方法を系統的に整理したことは科学的意義があると考えられる。

(2) 環境政策への貢献

我が国では、石膏ボード製造に化学石膏（副産石膏：排煙脱硫石膏など）、輸入石膏、再生石膏などが活用されており、それらは全体で約300万～400万tと推定される。このうち、廃石膏ボードから再生した再生石膏の活用は、10%程度に留まっている。

その要因の一つには、再生石膏粉はその再生処理技術の優劣により品質が一定しないことがあげられる。ガイドラインによって、再生石膏粉の品質が担保されれば、廃石膏ボードのリサイクルが促進されるものと期待される。

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

本研究成果により、再生石膏粉の品質管理が浸透し、適正なリサイクルシステムが構築されれば、建設リサイクル法における特定建設資材に追加されることも期待でき、相乗的に石膏ボードリサイクルが促進され则认为る。

また、本研究で調査した再生石膏粉の夾雑物量ならびに重金属等の含有量の実態は、「都道府県によるリサイクル製品の認定制度」に関する情報や認定されている再生製品の環境負荷評価に関する基礎情報として活用できるものである。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

＜論文（査読あり）＞

特に記載すべき事項はない。

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

特に記載すべき事項はない。

＜その他誌上発表（査読なし）＞

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中村吉男、平田貴博、小島淳一、西川美穂、第53回地盤工学研究発表会(2018)
再生石膏による自硬性汚泥の改質
- 2) 小島淳一、中村吉男、遠藤和人、西川美穂、第29回廃棄物資源循環学会研究発表会(2018)
再生石膏粉の形態変化に伴う化合水量と密度特性について

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 土質工学会：フィルダムの調査・設計から施工まで、pp, 87-88、1983年

Ⅱ-4 廃石膏ボードのマテリアルフローと他分野を対象とした需要量・経済効果

株式会社日本能率協会総合研究所

社会環境研究事業本部 主任研究員 松橋宏明

平成29年度～30年度累計予算額：6,920千円（累計予算額は、間接経費を含む税込額）
（うち平成29年度：3,650千円、平成30年度：3,270千円）

【要旨】

廃石膏ボードのマテリアルフローを把握するため、アンケート調査を実施し、平成28年度実績としてのマテリアルフローを把握した。その結果、廃石膏ボードの排出量は年間119万トンであり、石膏ボード原料やセメント系メーカー等へのリサイクルが85万トンの72%であり、34万トンが埋立処分されていることがわかった。近い将来、廃石膏ボードの排出量は増加する見込みであるが、石膏ボード原料へとリサイクルするボードtoボード以外の用途として、地盤改質剤や改良材としての需要が100万トン程度、農業利用としての土壌改良剤の潜在的需要も100万トン程度はあることが推測された。

【キーワード】

マテリアルフロー、アンケート調査、将来需要予測

1. はじめに

廃石膏ボードの処理実態は、環境省により平成18年度の実態推計が行われており、それ以降の処理実態については、ほとんど把握されていない。また、当時の推計においては、解体系廃石膏ボードのうち、約3分の1は、その処理実態は不明であり、リサイクルされているのか、埋立処分等されているのか判別ができていなかった。このため、本研究においては、最新の我が国の廃石膏ボードの処理実態を明らかにすることを目的とし、さらに、石膏流通量等についても明らかにすることを試みた。

2. 研究開発目的

最新の我が国の廃石膏ボードの処理実態を明らかにすることを目的とし、さらに、石膏流通量等についても明らかにすることを試みた。その際、解体系廃石膏ボードの管理型処分場へ運ばれる一部の廃石膏ボードは混合廃棄物の篩下残渣（以下、篩下）に含まれる廃石膏ボードと推定されることから、実際にそれらにどの程度含まれるかについても調査を行うこととした。

3. 研究開発方法

1) 石膏流通量

我が国の石膏流通量については、経済産業省の生産動態統計（化学工業統計編）や財務省の貿易統計を用いて整理するとともに、それらの需要先等について、関係者等へのヒアリングにより明らかにした。

2) 廃石膏ボードの処理フローアンケート調査

廃石膏ボードの処理実態については、国内の廃石膏ボードの処理を行っていると考えられる事業者（産廃処分施設等）を対象としてアンケート調査を実施し、廃石膏ボードの受入量（新築系、解体系）、再利用用途などの把握を行った。調査対象の抽出に当たっては、『石膏ボードの受入を行っている施設が対象外とにならない』よう幅広く対象施設を抽出することとし、都道府県・政令市の産業廃棄物処理施設許可情報から、次の条件に該当する施設を抽出した。

【対象①】中間処理施設等

○受入許可品目が次のいずれかのもの

- ・ガラス、コンクリートくず（工作物の新築、改築又は除去に伴って生じたものを除く）、及び陶磁器くず
- ・がれき類（工作物の新築、改築又は除去に伴って生じたコンクリートの破片その他これに類する不要物）

【対象②】最終処分場

○管理型最終処分場

なお、アンケート対象施設は平成29年度9月現在の各都道府県等のHPを参考に抽出し、受入条件に「廃石膏ボードを除く」といった条件があるものは除外した。本条件で抽出したアンケート対象は、全国で約6,300件であった。都道府県ならびに政令市毎の廃石膏ボードフローにおけるアンケート対象施設数を表(4)-1に示す。

表(4)-1 廃石膏ボードフローアンケート対象施設数の一覧

産業廃棄物処理業者名簿 機関別件数 (H29.9.8 現在)									
No.	都道府県	政令市	件数	備考等	No.	都道府県	政令市	件数	備考等
1	北海道		206		24	三重県		123	123
		札幌市	13	247	25	滋賀県		64	73
		函館市	10				大津市	9	
		旭川市	18		26	京都府		49	85
2	青森県		105	123			京都市	36	
		青森市	18		27	大阪府		92	
3	岩手県		33	38			大阪市	62	
		盛岡市	5				堺市	30	
4	宮城県		101	132			東大阪市	15	220
		仙台市	31				高槻市	12	
5	秋田県		77	91			豊中市	2	
		秋田市	14				枚方市	7	
6	山形県		138	138	28	兵庫県		109	
7	福島県		56	92			神戸市	29	
		郡山市	14				姫路市	32	189
		いわき市	22				西宮市	2	
8	茨城県		110	110			尼崎市	17	
9	栃木県		98	117	29	奈良県		32	36
		宇都宮市	19				奈良市	4	
10	群馬県		79	101	30	和歌山県		55	87
		前橋市	12				和歌山市	32	
		高崎市	10		31	鳥取県		57	57
11	埼玉県		131	151	32	島根県		83	83
		さいたま市	11		33	岡山県		71	
		川越市	7				岡山市	47	142
		越谷市	2				倉敷市	24	
12	千葉県		158	196	34	広島県		98	
		千葉市	29				広島市	64	203
		船橋市	3				福山市	31	
		柏市	6				呉市	10	
13	東京都		215	231	35	山口県		117	138
		八王子市	16				下関市	21	
14	神奈川県		73	217	36	徳島県		60	60
		横浜市	77		37	香川県		51	68
		川崎市	33				高松市	17	
		相模原市	19		38	愛媛県		107	132
		横須賀市	15				松山市	25	
15	新潟県		133	176	39	高知県		65	78
		新潟市	43				高知市	13	
16	富山県		98	143	40	福岡県		186	
		富山市	45				福岡市	23	314
17	石川県		24	42			北九州市	66	
		金沢市	18				久留米市	22	
18	福井県		81	81			大牟田市	17	
19	山梨県		58	58	41	佐賀県		48	48
20	長野県		169	192	42	長崎県		80	
		長野市	23				長崎市	25	112
21	岐阜県		119	129			佐世保市	7	
		岐阜市	10		43	熊本県		83	107
22	静岡県		191	270			熊本市	24	
		静岡市	37		44	大分県		62	105
		浜松市	42				大分市	43	
23	愛知県		312	433	45	宮崎県		72	79
		名古屋市	56				宮崎市	7	
		豊橋市	20		46	鹿児島県		138	173
		岡崎市	19				鹿児島市	35	
		豊田市	26		47	沖縄県		89	89
							那覇市	0	※那覇市の許可業者が県とすべて重複
							総計	6309	

上記の条件で抽出した、施設を対象として「廃石膏ボード処理施設アンケート」調査を実施した。
また、多くの回答が得られるよう、アンケート形式は可能な限り簡易なものにするとともに、回答記入後、容易に返信できるよう、FAX回答（フリーダイヤル）により回収を行った。これらの調査方法の概要を表(4)-2に示す。

表(4)-2 廃石膏ボードフローのアンケート調査概要

項目	調査内容等
1. 調査件名	廃石膏ボード等の処理実態に関する調査
2. 調査対象	表(4)-1に示す条件に該当する産業廃棄物処理施設
3. 調査期間	平成29年11月（11月上旬郵送配布） ※回答締切 平成20年11月30日
4. 調査内容	①施設の種類（中間処理施設、最終処分場） ②石膏ボード受入の有無、受入量（新築系、解体系の別、再利用用途） ③建設混合廃棄物の受入の有無、受入量（うち、石膏ボード混入割合） ※それぞれ平成28年度実績について調査 ※「アンケート調査票」は、資料編参照
5. 配布回収方法	○配布；郵送配布 ○回収：調査票に記入後、FAX（フリーダイヤル）による回答

3) ふるい下残さに含まれる廃石膏ボードと処理フロー推計

建設混合廃棄物に混合して排出される廃石膏ボードの推計を行うため、関東の建設廃棄物処分業者である関東処分業者Aおよび、関西の関西処分業者Bに訪問し協議を実施した。また、それぞれの事業所から得られた建設混合廃棄物篩下残さに対して、液固比100にて溶出試験を2回行い、溶出した（溶出液中に含まれる）硫酸イオン、Caイオンの濃度を測定して、篩下残さに含まれる廃石膏ボード量を推定した。

4) 再生石膏粉の潜在需要量の推計

廃石膏ボード由来の再生石膏粉の需要先として、地盤改良分野、農業分野、畜産分野に着目し、それぞれにおける潜在的な需要量について推算した。

4. 結果及び考察

1) 石膏流通量

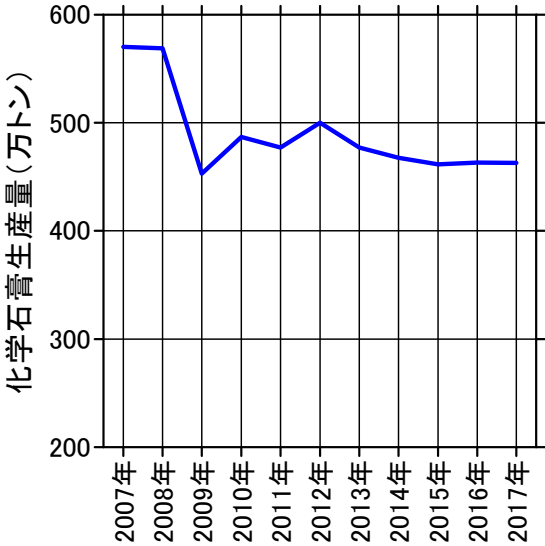
① 化学石膏の流通量

経済産業省生産動態統計（化学工業統計編）によると、我が国の化学石膏の生産量は表(4)-3、図(4)-1に示す通りであり、約460万 t 程度で推移している。

表(4)-3 我が国の化学石膏生産量

年次	(西暦)	化学石膏生産量(t)	指数 (2010年=100)
平成19年	2007年	5,702,122	117.13
平成20年	2008年	5,688,892	116.86
平成21年	2009年	4,531,490	93.08
平成22年	2010年	4,868,159	100.00
平成23年	2011年	4,770,466	97.99
平成24年	2012年	5,002,010	102.75
平成25年	2013年	4,770,962	98.00
平成26年	2014年	4,674,369	96.02
平成27年	2015年	4,614,137	94.78
平成28年	2016年	4,631,835	95.15
平成29年	2017年	4,627,910	95.06

資料:「経済産業省生産動態統計年報-化学工業統計編-」



図(4)-1 化学石膏生産量の推移

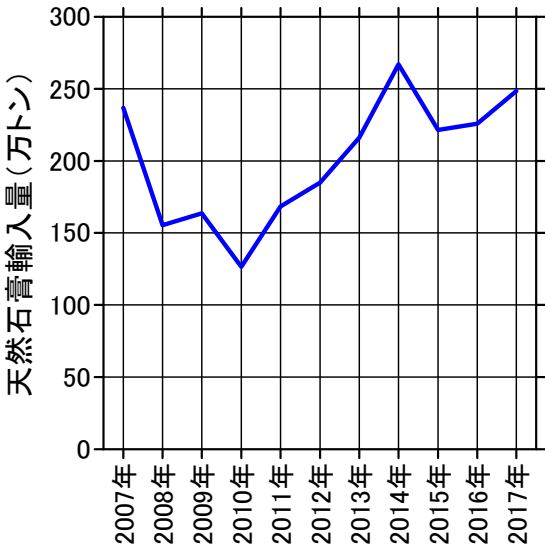
② 天然石膏（輸入石膏）の流通量

財務省貿易統計によると、我が国の石膏輸入量は表(4)-4、図(4)-2に示すとおりであり、約250万トン程度である。2010年以降は、増加傾向にある。

表(4)-4 輸入石膏（天然石膏）量

年次	(西暦)	石膏輸入量(t)	指数 (2010年=100)
平成19年	2007年	2,367,799	187.21
平成20年	2008年	1,554,183	122.88
平成21年	2009年	1,636,579	129.39
平成22年	2010年	1,264,802	100.00
平成23年	2011年	1,684,794	133.21
平成24年	2012年	1,848,965	146.19
平成25年	2013年	2,160,762	170.84
平成26年	2014年	2,669,125	211.03
平成27年	2015年	2,214,103	175.06
平成28年	2016年	2,258,322	178.55
平成29年	2017年	2,483,878	196.38

資料:「財務省貿易統計」



図(4)-2 我が国の石膏輸入量の推移

③ 化学石膏・輸入石膏の活用用途

上記で整理した化学石膏、輸入石膏について、各種文献調査、関係者ヒアリング等を行い、それぞれの活用用途等の整理を行った。活用用途等の推測値を表(4)-5に示す。

表(4)-5 化学石膏・輸入石膏の活用用途等の推測値（平成28年度）

用途	化学石膏							輸入石膏
	*1	排煙脱硫石膏	製錬石膏	リン酸石膏	チタン石膏	ふっ酸石膏	その他	
生産量等	463万t	258万t	116万t	30万t	33万t	16万t	10万t	226万t
活用用途								
石膏ボード	220万t	129万t	51万t	30万t	10万t			135万t
セメント	249万t	129万t	66万t		23万t	16万t	10万t	5万t

* 1:「経済産業省生産動態統計年報」

* 2:「財務省通関統計」 石膏ボード、セメント以外は、地盤改良材(セメント系固着材)として活用が主体

○排煙脱硫石膏: 石炭火力発電所などの排ガスから硫酸化合物(SO_x)を除去する際に副生する石膏

○製錬石膏: 銅精錬発生する亜硫酸ガスから石膏を回収する際に副生するもの

○リン酸石膏: リン酸製造のため、リン鉱石に硫酸を反応させる際に副生するもの

○チタン石膏: 酸化チタンを製造する際に副生する石膏

○ふっ酸石膏: ふっ酸を製造する際に副生するもの

注: 四捨五入の関係で、合計値が合わない場合がある。

2) 廃石膏ボードの処理フローアンケート調査

① 廃石膏ボードの処理実態の推計

アンケート調査の結果、中間処理施設、最終処分場を合わせて371事業所から石膏ボードの受入実績あり（有効回答）の回答が得られた。返信はあったものの、廃石膏ボードの受け入れを行っていないと回答した事業所は有効回答に含まれていない。表(4)-6に有効回答数の内訳を示す。なお、日本全国で廃石膏ボードを取り扱っている産業廃棄物処理業社は400社程度とのヒアリング結果もあることから、実際に受入実績のある大多数の事業所から回答が得られたと考えられる。

表(4)-6 廃石膏ボードフローのアンケート調査の有効回答数内訳

施設区分等	回答事業所数
中間処理施設	
廃石膏ボードの受入あり	271
建設混合廃棄物の受入	235
最終処分場(管理型最終処分場)	
廃石膏ボードの受入あり	47
建設混合廃棄物の受入	35

注：廃石膏ボード、建設混合廃棄物のいずれも受け入れを行っている施設があるため、合計数は有効回答数(371件)にならない。

有効回答について整理を行うと、それぞれの施設毎の平成28年度における廃石膏ボード受入量および処理後の利用用途は次のとおりである。なお、本アンケートでは、『石膏ボード単体での受入量』に加えて、『建設混合廃棄物の受入量』、及び『建設混合廃棄物受入量のうち廃石膏ボードの占める割合』の問い合わせを行っている。このため、建設混合廃棄物として受け入れられる廃石膏ボードについての受入量の推計も実施した。表(4)-7に推計結果を示す。処理施設等で受け入れられた廃石膏ボードのうち、石膏成分、紙成分別の活用用途等の調査結果を表(4)-8、表(4)-9に示す。

表(4)-7 廃石膏ボードの受入量（アンケート回答値：H28年度実績）

新築系、解体系区分	施設区分	石膏ボード単体での受入量	建設混合廃棄物の受入量			廃石膏ボード総受入量
		(a)	(b)	うち石膏ボード分※ (c)	(d)=(b)×(c)	
新築系廃棄物	中間処理施設	465,596t	586,067t	6%	35,164t	500,760t
	最終処分場	36,412t	8,078t	6%	485t	36,897t
	計	502,008t	594,146t	-	35,649t	537,657t
解体系廃棄物	中間処理施設	348,594t	1,384,459t	10%	138,446t	487,040t
	最終処分場	70,692t	99,906t	7%	6,993t	77,685t
	計	419,286t	1,484,364t	-	145,439t	564,725t
合計	中間処理施設	814,190t	1,970,526t	-	173,610t	987,800t
	最終処分場	107,104t	107,984t	-	7,478t	114,582t
	計	921,294t	2,078,510t	-	181,088t	1,102,382t

※「うち石膏ボード分」の割合は、本調査における設定値。

本アンケートの回答における『建設混合廃棄物中の石膏ボード分の割合』

表(4)-8 新築系廃石膏ボードの活用用途等（アンケート回答値：H28年度実績）

			単位:t			
年間受入量			活用用途等		活用量	受入量比
石膏ボード単体での受入	中間処理施設	465,596	石膏成分	石膏ボード原料	315,381	67.7%
				その他ボード原料	621	0.1%
				セメント原料	92,284	19.8%
				土壌固化材	15,809	3.4%
				農業用資材	1,604	0.3%
				その他	8,324	1.8%
				管理型処分	11,911	2.6%
				小計	445,934	95.8%
			紙成分	段ボール	11,637	2.5%
				その他製紙用	3,997	0.9%
				燃料用	1,044	0.2%
				その他	2,387	0.5%
				管理型処分	597	0.1%
				小計	19,662	4.2%
			計		465,596	100.0%
	最終処分場	36,412				
建設混合廃棄物としての受入	中間処理施設	35,164				
	最終処分場	485				
合計		537,657				

表(4)-9 解体系廃石膏ボードの活用用途等（アンケート回答値：H28年度実績）

			単位:t			
年間受入量		年間受入量	活用用途等		活用量	受入量比
石膏ボード単体での受入	中間処理施設	348,594	石膏成分	石膏ボード原料	38,317	11.0%
				その他ボード原料	1,023	0.3%
				セメント原料	145,683	41.8%
				土壌固化材	52,489	15.1%
				農業用資材	3,958	1.1%
				その他	16,483	4.7%
				管理型処分	51,489	14.8%
				小計	309,442	88.8%
			紙成分	段ボール	32,232	9.2%
				その他製紙用	4,146	1.2%
				燃料用	751	0.2%
				その他	981	0.3%
				管理型処分	1,042	0.3%
				小計	39,152	11.2%
			合計		348,594	100.0%
	最終処分場	70,692				
建設混合廃棄物としての受入	中間処理施設	138,446				
	最終処分場	6,993				
合計		564,725				

一方、国土交通省の「建設副産物実態調査」によると、建設混合廃棄物として排出されたもののうち中間処理施設へ持ち込まれたものの58.2%がリサイクルに回るとされている。建設混合廃棄物に混入して排出された廃石膏ボードについても、これらと同率のリサイクル率と仮定すると、今回のアンケート調査で把握された廃石膏ボードのマテリアルフローは新築系と解体系のそれぞれで表(4)-10、表(4)-11に示すとおりと推計できる。

表(4)-10 新築系廃石膏ボードのマテリアルフロー推計

排出区分(処理実態等推計)	排出量等(千t)	算定根拠等
新築系廃石膏ボード	537,657	
石膏ボードとしての排出	502,008	
中間処理施設への搬出	465,596	
石膏成分	445,934	
石膏ボード原料	315,381	アンケートで得られた用途別利用割合で按分
その他ボード原料	621	
セメント系原料	92,284	
土壌固化材	15,809	
農業用資材	1,604	
その他ボード原料	8,324	
管理型処分	11,911	
紙成分	19,662	
段ボール	11,637	アンケートで得られた用途別利用割合で按分
その他製紙用	3,997	
燃料用	1,044	
その他	2,387	
管理型処分	597	
最終処分場への搬出	36,412	
建設混合廃棄物としての排出	35,649	
中間処理施設への搬出	35,164	
中間処理後有効利用	20,465	国交省調査(H24建設副産物実態調査)における中間処理後の有効利用割合等
中間処理後最終処分	14,699	
最終処分場への搬出	485	

表(4)-11 解体系廃石膏ボードのマテリアルフロー推計

排出区分(処理実態等推計)	排出量等(千t)	算定根拠等
解体系廃石膏ボード	564,725	
石膏ボードとしての排出	419,286	
中間処理施設への搬出	348,594	
石膏成分	309,442	
石膏ボード原料	38,317	アンケートで得られた用途別利用割合で按分
その他ボード原料	1,023	
セメント系原料	145,683	
土壌固化材	52,489	
農業用資材	3,958	
その他ボード原料	16,483	
管理型処分	51,489	
紙成分	39,152	
段ボール	32,232	アンケートで得られた用途別利用割合で按分
その他製紙用	4,146	
燃料用	751	
その他	981	
管理型処分	1,042	
最終処分場への搬出	70,692	
建設混合廃棄物としての排出	145,439	
中間処理施設への搬出	138,446	
中間処理後有効利用	80,576	国交省調査(H24建設副産物実態調査)における中間処理後の有効利用割合等
中間処理後最終処分	57,870	
最終処分場への搬出	6,993	

3) ふるい下残さに含まれる廃石膏ボードと処理フロー推計

解体工事等で発生するふるい下残渣に含まれる廃石膏ボードについて推計を行った。推計においては、建設混合廃棄物の受入を行っている事業者協力に協力頂き、それらの施設に持ち込まれる建設混合廃棄物のうち、ふるい下残さに含まれる廃石膏ボードの成分量の分析を行うことにより実施した。実際には、関東地方、近畿地方の建設混合廃棄物の受入施設（各1施設）における建設混合廃棄物の成分分析を行った。

① 関東地方の処分業者 A の視察及び協議記録

日 時：平成30年11月14日 10：30～12：00。

面談者：関東処分業者 A 代表取締役社長、管理部業務課長、業務部品質課長。

関東処分業者 A は創業30年で関東では最も古くから建設廃棄物の中間処理を行っている事業者の一つである。事業所での建築系廃棄物の総搬入量は約24万 m³、総搬出量17万 m³と事業規模は大手に分類される。廃石膏ボードの搬入量は単品目石膏ボードとして1.5万 m³（5,000トン）と未分別混廃のうち分別して石膏ボードラインに入るものは1,692 m³（500トン）で合計1.7万 m³（5,500トン）受け入れている。廃石膏ボードの搬出量は石膏サイクル事業者1.2万 m³（3,000トン）、セメント業者5,000 m³（1,500トン）、石膏ボードメーカー子会社の処分業者750 m³（250トン）へ売却している。また、分別不可能なものや水濡れしているものは管理型処分場へ埋め立てている（平成29年はゼロ）。

建設系混合廃棄物処理ライン、廃石膏ボードの処理ラインの視察の様子をそれぞれ、写真(4)-1～7、写真(4)-8～12に示す。混合廃棄物のラインにおいて廃石膏ボードはフレコン開梱時の粗選別、その後ベルコンの細選別工程で可能な限り除去していると説明を受けたが、一部に石膏ボードと思しきものがあった。恐らく数％は篩下に移行している可能性があると思われる。また、全工程で10人程度が常時選別に関わっており、多くの工程を要している印象がある。更に、半年に一度すべてのストックヤードを空にして清掃をしているため、堆積廃棄物が少なく、臭気がなかった。廃石膏ボードの分別は職員が2名体制で緻密に行っている印象がある。タイルの付着物など剥がしにくいものが多く、分別には課題が多いように感じた。調査の趣旨説明を行い、建設混合廃棄物篩下試料の入手を要請した所、日付の異なる3試料をご提供頂いた。



写真(4)-1 混合廃棄物処理ヤード全景



写真(4)-2 処理ヤードにおける目視での粗選別の状況



写真(4)-3 付着物がある金属類を重機で折り、付着物を剥がしている状況



写真(4)-4 粗選別後の手選別ライン選別コンベアーの状況（6人体制）



写真(4)-5 手選別ライン後の混合廃棄物は風力選別で比重差選別される



写真(4)-6 風力選別後のふるい下（目開き5mmふるい）



写真(4)-7 左から混合廃棄物、重量物、ふるい下残さ、軽量物



写真(4)-8 廃石膏ボード処理ヤード全景



写真(4)-9 手前が未分別の廃石膏ボード、奥は分別済みの廃石膏ボード



写真(4)-10 廃石膏ボード以外の板状建材を手選別で除外している状況



写真(4)-11 付着物を剥がすことができない廃石膏ボードはセメント原料となる



写真(4)-12 分別後の廃石膏ボードストックヤードの様子

② 関西地方の処分業者 B の視察及び協議記録

日 時：平成30年12月3日 10：30～12：00。

面談者：関西処分業者 B 事業所長、業務一課課長、業務一課課長代理。

関西処分業者 B は関西最大手の廃棄物中間処理事業者である。事業体全体での処理能力は選別・焼却・再資源化が3万トン／日、ガス化2千トン／日である。事業内容は①建設廃棄物混合分別再資源化処分、および②廃石膏ボード再資源化（無水石膏化）の2つである。同事業所における建築系廃棄物の容量は400トン／日で直近の処理量は330トン／日で推移しており、中間処理事業者では事業規模は最大手に分類される。また、廃石膏ボードの処理容量は粉砕70トン／日、無水石膏へ焼成60トン／日の能力を有する。こちらも関西圏では最大手である。篩下は関西処分業者 B が同行政区内に所有する管理型処分場に埋め立て処分される。再生無水石膏はセメントメーカーに有価で販売される。また、一部二水石膏は建築資材メーカー（外壁製造メーカー）に販売されている。関西処分業者 B は自社および協力会社に建築廃棄物の分別用の専用コンテナを運用しており、精度が高く質の良いリサイクルを行っていると感じられた。建設混合廃棄物処理ライン、廃石膏ボード分別現場、再生石膏プラントの視察結果をそれぞれ写真(4)-13～18、写真(4)-19～24、写真(4)-25～30に示す。

石膏ボード処理ラインは、専用コンテナで異物を予め除去されている状態なので、分別の手間が少なく70トン／日処理可能である。セメント向け無水石膏は石膏ボードと分別の難しいロックウール天井版の混入が禁止されているため、分別には細心の注意を払うとの説明を受けた。調査の趣旨説明を行い、建築粉砕混合廃棄物篩下試料の入手を要請した所、日付の異なる4試料をご提供頂いた。

廃棄物の分別は特に力を入れており、現場に廃棄物分別用の専用コンテナを導入している。専用コンテナは1 m³と0.5 m³の2種類があり、現場納入時には分類品目を外部に掲示して導入する。下部にキャスターが4つと上部両側に取手があり、現場内部および、同プラント内を人力による運搬が可能となっている。また、下部にはフォークを指す穴があり、フォークリフトでの運搬も可能で、回転リフトなら荷下ろしも短時間で済む。コンテナの導入により現場から自社場内に至るまで、安全性の向上・省力・時短・コスト削減等様々な効果が得られていると説明を受けた。また、コンテナに蓋をするとコンテナ制作費用が高くなり、故障の原因となるので、安価で取り回しの良いブルーシートを採用している。



写真(4)-13 混合廃棄物処理ヤード全景（稼働率80%程度の様子）



写真(4)-14 受入直後の未分別混合廃棄物



写真(4)-15 手選別ライン（5名体制）



写真(4)-16 手選別後のコンテナの様子



写真(4)-17 手選別できなかったものの破碎処理物（50 mm ふるい上）



写真(4)-18 手選別できなかったものの破碎処理物（50 mm ふるい下）



写真(4)-19 廃石膏ボード等の専用コンテナ回収車（1 m³コンテナを4台まで積載可）



写真(4)-20 雨天時にコンテナ上部にブルーシートをかけて水濡れを防止している様子



写真(4)-21 コンテナ (1 m³) 受入直後の様子
(左：廃石膏ボード、右：廃木材)



写真(4)-22 コンテナ内の廃石膏ボード



写真(4)-23 コンテナの運搬 (コンテナ下部は
キャスターとフォークリフト用の穴
がある)



写真(4)-24 コンテナ管理用の IC タグ (コン
テナ毎に管理し、異物や水濡れのあ
るものは返却)



写真(4)-25 再生石膏プラントのストックヤ
ードの様子



写真(4)-26 スtockヤードの廃石膏ボード



写真(4)-27 異物除去のための手選別ライン
(奥の飛散防止措置のある部屋)



写真(4)-28 再生無水石膏焼成キルン (設定温
度：800℃、処理能力60トン/日)



写真(4)-29 トロンメル (目開き4 mm)



写真(4)-30 保管用サイロ (50 m³×3基)

③ 建設混合廃棄物由来のふるい下残さ中の石膏含有分析

関東地方、関西地方のそれぞれ1カ所の中間処理事業者から入手したふるい下残さ中に含まれる石膏成分の分析結果を表(4)-12、表(4)-13に示す。SO₄推定から得られた CaSO₄の含有量は、関東の業者で平均12.1%、関西の業者で21.0%と推定された。両者の平均は、17.2%となる。

表(4)-12 関東地方の中間処理事業者 A 社のふるい下残さ中の推定石膏含有量

	SO ₄ 推定 CaSO ₄ 量 (wt%)	Ca推定 CaSO ₄ 量 (wt%)
関東・処理事業者A#1	9.0	11.5
関東・処理事業者A#2	17.6	21.9
関東・処理事業者A#3	9.6	7.8
平均値	12.07	13.73

表(4)-13 関西地方の中間処理事業者 B 社のふるい下残さ中の推定石膏含有量

	SO ₄ 推定 CaSO ₄ 量 (%)	Ca推定 CaSO ₄ 量 (%)
関西処分業者B#1	13.9	11.1
関西処分業者B#2	16.0	19.3
関西処分業者B#3	35.4	30.3
関西処分業者B#4	18.8	15.8
平均値	21.03	19.13

国土交通省で実施している「建設副産物実態調査」の最新データである、「平成24年度建設副産物実態調査」によると、我が国の建設混合廃棄物排出量は約280万tとなっているが、土木工事では廃石膏ボードが混入する可能性は極めて低いと判断できる。解体系の廃石膏ボードが混入する可能性のある建設混合廃棄物は、建築工事のうち、解体工事や修繕工事等から排出されている48.5万トンと考えられる(表(4)-14参照)。関東と関西の処理事業者におけるふるい下残さ中の推定石膏含有量が代表値であり、かつ、石膏成分の全てが廃石膏ボード由来と仮定すると、48.5万トン×17.2%の約8.3万トンが解体系廃石膏ボードの排出量に加算されることになる。

表(4)-14 我が国の建設混合廃棄物排出量

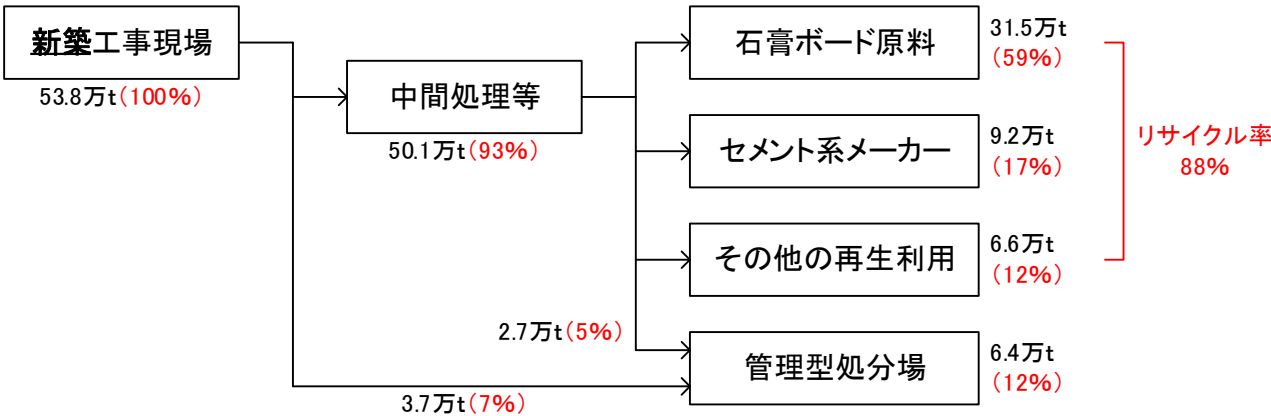
工事区分		建設混合廃棄物排出量
公共土木工事		367.5千t
民間土木工事		98.8千t
建築工事		
	新築工事	1,844.千t
	解体工事	418.8千t
	修繕工事	66.6千t
合計		2,795.7千t

資料:「平成24年度建設副産物実態調査」(国交省)

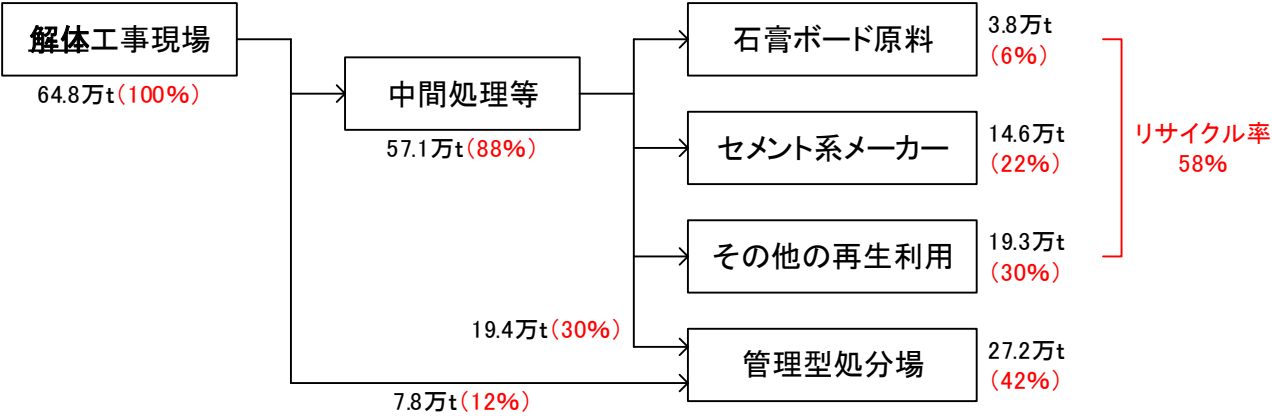
④ 廃石膏ボードの処理フロー推計

以上の検討を踏まえ、アンケート等によって得られた平成28年度実績としての廃石膏ボードの処理フローは、新築系、解体系のそれぞれで図(4)-3、図(4)-4に示す通りとなる。このフローには、建設系混合廃棄物として動いた廃石膏ボード、ならびにふりい下残さに含まれる廃石膏ボードが含まれている。

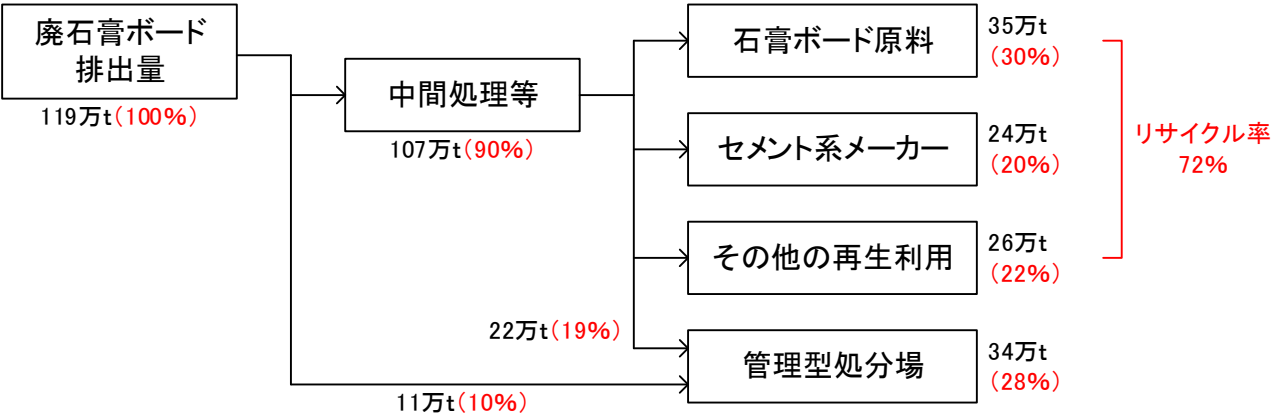
新築系の排出量は約54万トン、うち50万トンが中間処理され、石膏ボード減量やセメント系メーカーへと流れている。管理型処分場に最終処分される量は約6万トンであり、排出量に対して12%程度を占め、リサイクル率は88%と推計された。解体系の排出量は約65万トンであり、うち57万トンが中間処理された後、38万トンがリサイクルされ、19万トンが最終処分されている。最終処分量は直接最終処分量約8万トンを含め、全体で27万トンとなっており、排出量に占める割合は42%と推計された。解体系のリサイクル率は58%であり、新築系に比較すると低い値となっている。実際、廃石膏ボードは新築系、解体系で分類されているが、廃棄物処理法上は同じ分類であることから、廃石膏ボード全体の排出量等を考慮すると、図(4)-5に示す通りとなる。廃石膏ボードの排出総量(約119万トン)で考えると、リサイクル率は72%(約85万トン)となり、最終処分率は28%(約34万トン)と推計される。



図(4)-3 新築系廃石膏ボードの処理フロー推計 (平成28年度)



図(4)-4 解体系廃石膏ボードの処理フロー推計 (平成28年度)



図(4)-5 廃石膏ボードの処理フロー全体像 (平成28年度)

4) 再生石膏粉の潜在需要量の推計

① 土質改良材としての潜在需要

「平成24年度 建設副産物実態調査」(国土交通省)によると、我が国の建設発生土の場外搬出量は、約1億4,080万 m³(平成24年度)である。一方、『建設発生土等の有効利用必携(建設発生土等有効利用研究会:2003年10月)』によると、場外搬出される建設発生土のうちの約8%(約1,126万 m³)が、活用に際して土質改良等が必要となる第4種建設発生土や泥土である(表(4)-15参照)。建設発生土の単位体積重量を1.8 t/m³とし、改良材添加率を5%とした場合、改良材としての需要量は約100万トン程度と想定される。

表(4)-15 我が国の建設発生土の場外搬出量と改良を必要とする土砂量の推計

		単位:千m3
		排出量等
土質別構成比 ※2		
場外搬出量 ※1		140,790
うち第1種建設発生土	39%	54,908
うち第2種建設発生土	33%	46,461
うち第3種建設発生土	20%	28,158
うち第4種建設発生土	6%	8,447
うち泥土等	2%	2,816
第3種、第4種、泥土計		39,421
第4種、泥土計		11,263

※1:「平成24年度建設副産物実態調査」(国交省)

※2:「建設発生土等有効利用必携」による

② 農業分野における潜在的需要

「作物統計調査」によると、我が国の農産物の作付面積（平成29年度）は、稲作が約147万 ha、畑作（麦作、かんしょ、そば、豆類）が約56万 ha などとなっている。その他、果樹や茶なども含め、牛ふんが堆肥として使用されたと想定すると、想定堆肥量は38百万～59百万トンと想定される（表(4)-16参照）。含水比調整等を目的に、堆肥の約1%重量の再生石膏粉を添加したとすると、約50万 t の活用が想定される。

既存の農業用土壌改良材「エコカル」を参考にすると、稲作並びに果樹（みかん、りんご、なし、ぶどう、もも等）に対しては、10 a 当たり60 kg（0.6トン/ha）を施肥するとされている、全国の稲作は147万 ha、果樹は18万 ha であることから、施肥可能な潜在量としては約100万トンと推計される。

表(4)-16 我が国の堆肥の必要量（推定）

		稲作	畑作 ※2	果樹		
作付面積(ha)	a	1,466,000	560,670	216,062		
堆肥の施肥基準(t/10a) ※1						
稲わら堆肥	b1	1 ～ 1	2 ～ 4	2.5 ～ 2.5		
牛ふん堆肥	b2	0.3 ～ 0.3	1.5 ～ 2.5	1.5 ～ 1.5		
豚ふん堆肥	b3	0.15 ～ 0.15	1 ～ 1.5	1 ～ 1		
パーク堆肥	b4	1 ～ 1	1.5 ～ 2	1.5 ～ 1.5		
想定施肥量(千t)						
稲わら堆肥	c1=a×b1	14,660 ～ 14,660	11,213 ～ 22,427	5,402 ～ 5,402		
牛ふん堆肥	c2=a×b2	4,398 ～ 4,398	8,410 ～ 14,017	3,241 ～ 3,241		
豚ふん堆肥	c3=a×b3	2,199 ～ 2,199	5,607 ～ 8,410	2,161 ～ 2,161		
パーク堆肥	c4=a×b4	14,660 ～ 14,660	8,410 ～ 11,213	3,241 ～ 3,241		
		茶	飼料作物	野菜	合計	
作付面積(ha)	a	42,400	985,100	468,700	3,738,932	
堆肥の施肥基準(t/10a) ※1						
稲わら堆肥	b1	2 ～ 4	2 ～ 4	2.5 ～ 4		
牛ふん堆肥	b2	1.5 ～ 2.5	1.5 ～ 2.5	1.5 ～ 2.5		
豚ふん堆肥	b3	1 ～ 1.5	1 ～ 1.5	1 ～ 1.5		
パーク堆肥	b4	1.5 ～ 2	1.5 ～ 2	2.5 ～ 2.5		
想定施肥量(千t)						
稲わら堆肥	c1=a×b1	848 ～ 1,696	19,702 ～ 39,404	11,718 ～ 18,748	63,542 ～ 102,336	
牛ふん堆肥	c2=a×b2	636 ～ 1,060	14,777 ～ 24,628	7,031 ～ 11,718	38,492 ～ 59,061	
豚ふん堆肥	c3=a×b3	424 ～ 636	9,851 ～ 14,777	4,687 ～ 7,031	24,928 ～ 35,213	
パーク堆肥	c4=a×b4	636 ～ 848	14,777 ～ 19,702	11,718 ～ 11,718	53,441 ～ 61,382	

資料: 作付面積(H29年度)「作物統計調査(農林水産省)」

※1:「なるほど土壌診断ガイド(JA全農)」黒ボク土の施肥基準(施肥基準の幅は、寒地・暖地の相違)

※2:畑作は、麦作(子実用)、かんしょ、そば(乾燥子実)、豆類の合計

③ 畜産分野における潜在的需要

「流通飼料価格等実態調査（農林水産省）」によると、我が国の畜産用飼料の年間出荷量（平成29年度）は、配合飼料で約2,350万t、混合飼料で約50万tである（表(4)-17参照）。一方、ある研究成果（特許出願番号：特願平3-305068）によると、養鶏用飼料に石膏成分を1%（重量比）添加することにより、飼育鶏の生育、肉質等の有意な改善がみられるとのことである。このため、畜産飼料に1%程度の石膏の添加が可能と考えられ、これらに再生石膏粉（廃石膏ボード由来）を用いると仮定すると、24万t程度の活用が想定される。（養豚用、乳牛用、肉牛用など向けの効果的な添加率については、同研究での言及はないが、石膏の添加により反芻動物の消化器官中での微生物反応によるメタンガスの発生が抑制される効果が期待されるとしている。このため、本試算では養鶏用飼料編添加率（1%）と同程度と想定した。）

表(4)-17 我が国の飼料出荷量と石膏需要量（推定）

	出荷量(t) ※1	石膏添加率 ※2	石膏需要量(t: 想定)
	a	b	c=a×b
配合飼料			
養鶏用飼料			
育すう	718,516	1%	7,185
成鶏	5,800,381	1%	58,004
ブロイラー	3,897,018	1%	38,970
計	10,415,915		104,159
養豚用飼料			
ほ乳期	721,963	1%	7,220
子豚	1,631,184	1%	16,312
肉豚	2,301,115	1%	23,011
種豚	963,078	1%	9,631
計	5,617,340		56,173
乳牛用飼料	2,994,016	1%	29,940
肉牛用飼料	4,454,511	1%	44,545
うずら用飼料	31,496	1%	315
その他家畜用飼料	26,038	1%	260
配合飼料計	23,539,316		235,393
混合飼料	484,226	1%	4,842
合計	24,023,542		240,235

資料：※1 出荷量「流通飼料価格等実態調査（農林水産省）」

※2 石膏添加率：「石膏または石膏水溶液の飼料への利用方法

（特許出願番号：特願平3-305068）」における飼料中の石膏添加率

上記特許中では、養鶏用飼料への添加による効果を確認

養鶏用飼料以外の添加率は、養鶏用と同等と想定

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

廃石膏ボードのマテリアルフローを平成28年度版として得ることができた。また、アンケートによって得られた廃石膏ボードの排出量は、118万トンであり、新築ならびに解体床面積から推定される120万トンに近い数値となっていることから、アンケート調査によって概ね全量の廃石膏ボードの排出量を得られたといえる。さらに、これまで不明分が数十万トンあった平成18年度のマテリアルフローに比較して、不明分が無くなり、全てのマテリアルフローを推測するに至った。

（2）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

廃石膏ボードのマテリアルフローのうち、不明分が数十万トンに及んでいたことは、建設リサイクル法における特定資材化への障壁の一つとなっていたが、本調査結果によって得られたマテリアルフローでは、不明分が無くなり、廃石膏ボードの排出量に対して、現状は72%のリサイクル率であることが明らかとなった。また、新築系廃石膏ボードのうち、直接埋立処分されている3.7万トンについては、国土交通省が発出している「廃石膏ボード現場分別解体マニュアル」を強化し、解体工事に適用させていくことでゼロにする事も可能と考えられる。また、将来的な有効利用の潜在的需要を明らかにすることによって、将来のリサイクル率向上に向けた道筋を見出すことにも貢献できると思われる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

＜論文（査読あり）＞

特に記載すべき事項はない。

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

特に記載すべき事項はない。

＜その他誌上発表（査読なし）＞

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 松田愛礼、松橋宏明、遠藤和人、第29回廃棄物資源循環学会研究発表会(2018)

我が国の廃石膏ボード処理フローの推計について

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Ⅱ-5 環境安全品質ガイドライン策定による廃石膏ボードリサイクルシステムの社会実装

一般社団法人泥土リサイクル協会
 (主任研究員) 事務局 事務局次長 西川美穂
 事務局 事務局長 野口真一

平成29年度～30年度累計予算額：14,600千円（累計予算額は、間接経費を含む税込額）
 （うち平成29年度：7,300千円、平成30年度：7,300千円）

〔要旨〕

廃石膏ボードリサイクルの品質管理と市場展開や産業界に及ぼす影響について検討し、ガイドラインを作成する。また、品質検査や環境安全に係る試験法をガイドラインとして発信するため、実際のリサイクル業者に社会実装すると共に、ガイドライン策定委員会を開催して有識者や利用者等と議論を重ね、セミナーや勉強会を通じた広報活動を実施する。

〔キーワード〕

再生石膏粉、環境安全性、固化材、改質剤、自主管理基準

1. はじめに

廃石膏ボードは現在、新築系端材の多くは石膏ボード原料となる“ボードtoボード”リサイクルが展開されている。一方、解体系については、主にセメント原料や、溶解度が高いカルシウムを多く含むことから農地の土壌改良剤としてリサイクルされているが、これら以外に石膏の水和性や速硬性を活かし、軟弱な地盤の改良や汚泥等の改質における固化材の主原料としての利活用については現在までのところ至っていない。その理由として廃石膏ボードは、硫化水素の発生、フッ素、ヒ素、カドミウム等の溶出の恐れがあり、一般には必ずしも科学的根拠や法令等に基づいた環境安全性が確保されていないため、行政機関やユーザーである建設現場から評価されにくいことが挙げられる。このため、廃石膏ボードリサイクルを促進するには再生利用に関して安全性と信頼性を高めることが重要である。

廃石膏ボードのリサイクルが進まない要因は、リサイクルに係る体制や技術が確立されていないことに加え、過去の硫化水素ガスの発生事故や石膏ボードの原料としてフッ素を含有するリン酸石膏が使用されていたことなどが挙げられるが、これら環境質の制御は技術的に解決できるレベルにあると思われる。廃石膏ボードリサイクルは、再生石膏粉を製造することを端緒とするが、400社程度と推定されるリサイクル業者が企業毎に製造した再生石膏粉の品質（紙片や焼成後の二水石膏の混入など）にはバラツキがある。そのため、品質を管理するためのガイドラインを作るべきとの声が業界からも挙がっている。

2. 研究開発目的

本ガイドラインは、今後も排出量が右肩上がりで増加することが予測される解体系の廃石膏ボードから、安全で良質な再生石膏粉を製造するためのリサイクルシステムを確立することが目的である。中間処理業者が再生処理をして製造する再生石膏粉、ならびに材料メーカー等が製造する再生石膏粉を用いた固化材・改質剤等（以下、「固化材等」と称す。）を対象とし、リサイクル業者が主導的になって自主管理基準として整備・運用するものである。

(5)-2. 委員会ならびに作業部会開催経緯

委員会は4回、作業部会はWG部会を含め6回開催し、平成29年度末には、大筋ではあるがガイドラインの試行版を策定し、平成30年度に全国石膏ボードリサイクル協議会を通じた企業から意見を吸い上げてブラッシュアップを行い、平成31年3月を持ってガイドラインが策定された。委員会ならびに作業部会の活動経緯を表(5)-1に示す。写真(5)-1、(5)-2に策定委員会と作業部会の様子を示す。

表(5)-1 委員会ならびに作業部会活動経緯

名 称	日時／開催場所	内 容
<準備委員会>		
準備委員会	平成29年6月1日(14:00～17:00)	・廃石膏ボードリサイクルの現状 ・H29年度環境研究総合推進費研究テーマ ・ガイドライン作成における役割分担
	場所: 新橋レンガ通りホール	
<再生石膏粉の有効利用ガイドライン策定委員会>		
第1回 委員会	平成29年7月31日(15:00～17:30)	・廃石膏ボードリサイクルの現状 ・全国石膏ボードリサイクル協議会について ・ガイドライン素案提案
	場所: 新橋レンガ通りホール	
第2回 委員会	平成30年2月27日(14:00～17:00)	・ガイドラインの原案確認、審査
	場所: 新橋レンガ通りホール	
第3回 委員会	平成30年11月9日(14:00～17:00)	・ガイドライン活動計画 ・ガイドライン(試行版)修正箇所ならびに委員等からの意見確認と読み合わせ、意見交換
	場所: 新橋レンガ通りホール	
第4回 委員会	平成31年2月21日(15:00～17:00)	・ガイドライン最終確認
	場所: 新橋レンガ通りホール	
<再生石膏粉の有効利用ガイドライン作業部会>		
第1回 作業部会	平成29年9月21日(13:30～17:00)	・ガイドライン原案 ・各章毎の執筆担当によるグループディスカッション
	場所: 新橋レンガ通りホール	
第2回 作業部会	平成29年12月22日(13:30～17:00)	・ガイドライン各章読み合わせならびに意見交換 ・今後予定
	場所: 新橋レンガ通りホール	
第3回 作業部会	平成30年2月14日(13:30～18:00)	・用語の定義 ・各章読み合わせならびに意見交換 ・今後予定
	場所: 新橋レンガ通りホール	
WG	平成30年5月11日(13:00～18:00)	・ガイドライン(試行版)に向けて最終修正
	場所: TKP東京駅八重洲カンファレンスセンター	
第4回 作業部会	平成30年10月12日(13:30～17:00)	・ガイドライン活動計画 ・ガイドライン(試行版)修正箇所ならびに委員等からの意見確認と読み合わせ、意見交換
	場所: 新橋レンガ通りホール	
第5回 作業部会	平成31年2月15日(14:30～17:00)	・ガイドライン最終修正
	場所: 新橋レンガ通りホール	



写真(5)-1 ガイドライン策定委員会

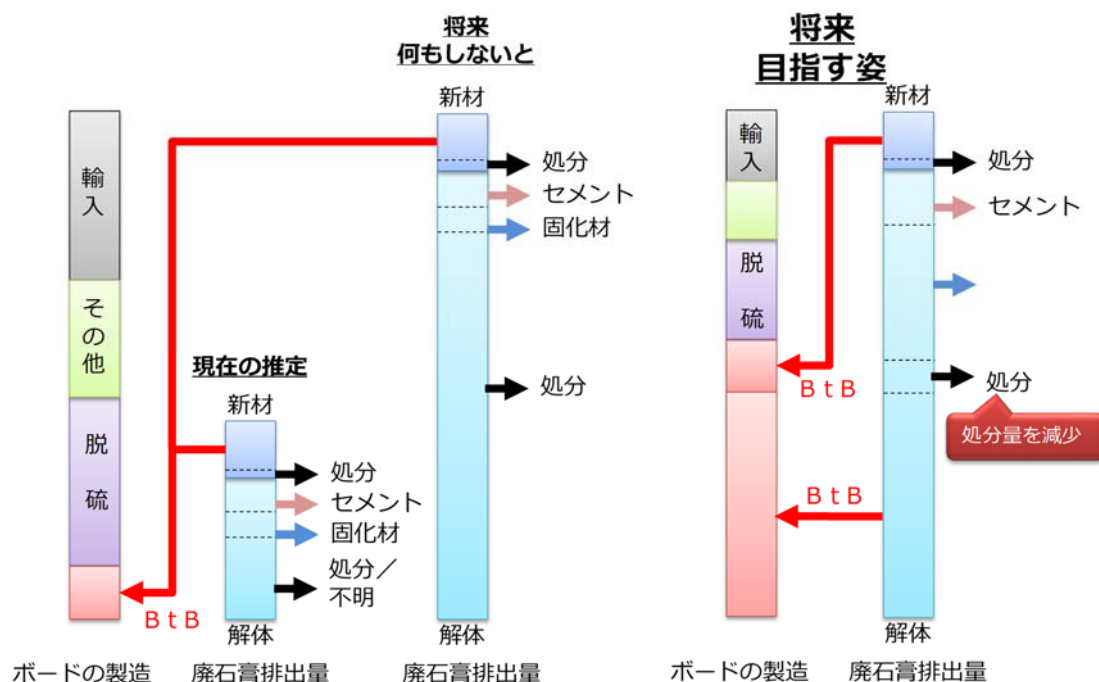


写真(5)-2 作業部会

(5)-3. 再生石膏粉の有効利用ガイドライン

本ガイドラインは、図(5)-2に示すように、解体系の廃石膏ボードのリサイクル率を向上させるために、中間処理業者が再生処理をして製造する再生石膏粉ならびに材料メーカー等が製造する固化材等を対象とし、リサイクル業者が主導的になって整備・運用することとした。特に、再生石膏粉および固化材等の建設業界への普及を図るために、需要側である発注者、設計者および施工業者をはじめ、供給側

である中間処理業者および材料メーカーが再生石膏粉および固化材等を取り扱うに際し、品質および環境安全性を担保するための管理方法について示すとともに、具体的な利用用途も記述した。



図(5)-2 我が国の石膏ボード原料の利用と廃石膏ボードの処理フローの概要（現在の姿と将来の姿）

また、本ガイドラインでは、廃石膏ボード現場分別解体マニュアル（以下、「分別解体マニュアル」と称す。）に則って適正な分別が行われている廃石膏ボードを対象としている。中間処理業者によって再資源化された再生石膏粉を用いて製造した固化材や改質剤については、配合試験を行って改良土の強度や環境安全性を担保し、再生石膏粉単味については、重金属等の含有量試験などの環境安全性を含めた管理を行って品質を担保することとしている。これらにより、再生石膏粉の地盤分野への利用だけではなく、“ボードtoボード”やセメント凝結遅延剤等、さまざまな分野での活用が期待される。

図(5)-3に本ガイドラインの構成を示す。本ガイドラインは5章からなり、以下に各章の概要について述べる。

第1章では、社会的背景を踏まえた本ガイドライン策定の目的を述べるとともに、廃石膏ボードのマテリアルフロー、本ガイドラインの適用範囲、使用する用語の定義および解説、ならびに再生石膏粉および固化材等の利用用途例、環境安全性（重金属等）に対する試験方法の設定の考え方を示す。

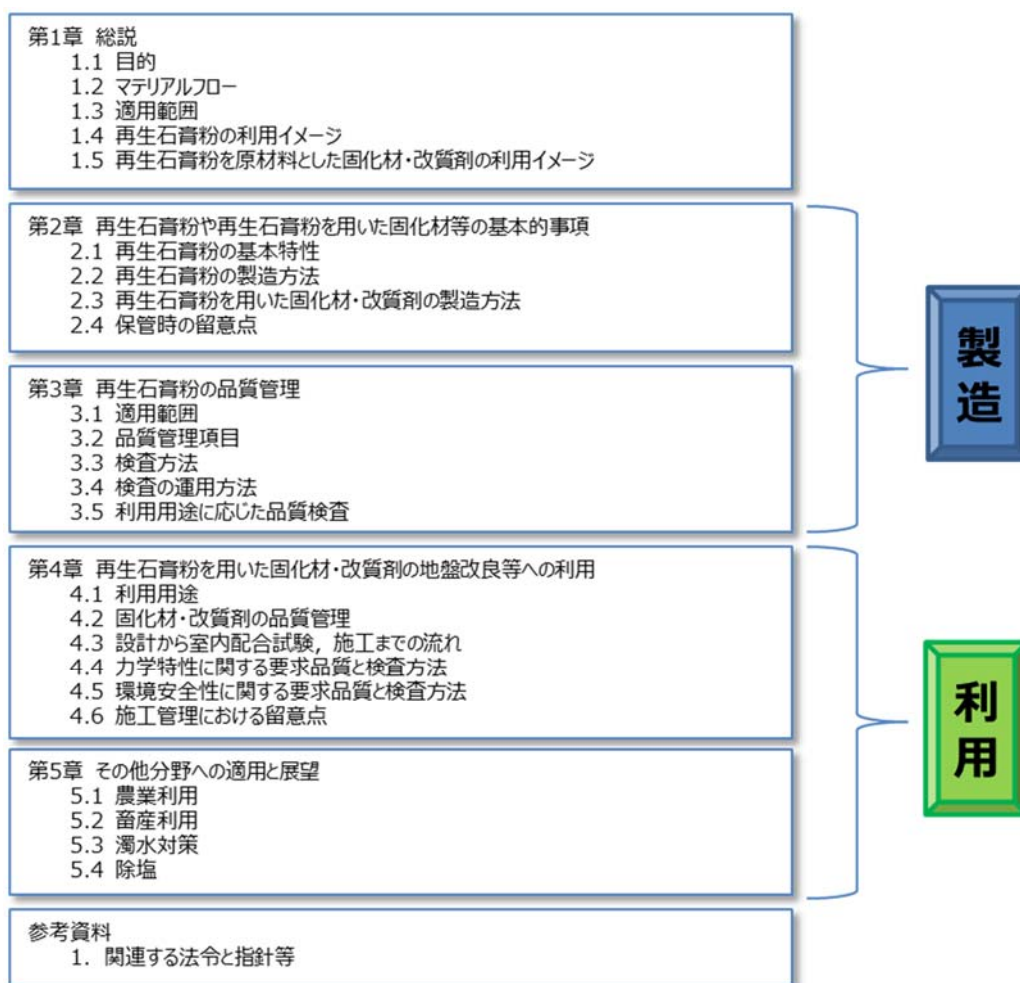
第2章では、再生石膏粉の基本特性と、再生石膏粉および固化材等の製造方法ならびに保管上の留意点を示す。

第3章では、再生石膏粉の品質管理に関して、目的・項目・方法と検査の運用ならびに利用用途に応じた品質検査について示す。

第4章では、再生石膏粉を用いた固化材等を地盤材料として利用するに際しての利用用途、品質管理、配合試験、強度ならびに環境安全品質に関する要求品質と検査、施工管理時の留意点について示す。

第5章では、再生石膏粉の地盤改良分野以外への適用性と展望を示す。

参考資料では、廃石膏ボードのリサイクルにあたって、遵守すべき関連法令と指針等を示す。



図(5)-3 ガイドラインの構成

以下に、各章の内容ならびに委員会および作業部会における討議内容を示す。

[用語の定義および解説]

本ガイドラインで取り扱う用語のうち主なものについて解説している。

<討議内容>

石膏関係の用語においては二水・半水・無水についても詳しく記載した。第2回委員会において、委員より「ガイドラインの中で新たに使用するものは“用語の定義”、それ以外は“用語の解説”である」との意見があり、当初「用語の定義」としていた目次を「用語の定義および解説」とした（図(5)-4参照）。また、「用語の定義および解説」は第1章1.4節として構成されていたが、第5回作業部会において、目次の前に持って行った方が分かりやすいとの意見により、目次の直ぐ後ろに移動させた。

【用語の定義および解説】

本ガイドラインで取り扱う用語のうち主なものについて、以下に解説する。

【石膏関係】

■石膏

・石膏（せっこう, gypsum）とは硫酸カルシウム（ CaSO_4 ）を主成分とする鉱物である。石膏には、その結晶水の存在形態により「二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）」、「半水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ）」、「無水石膏（ CaSO_4 ）」がある。

■二水石膏

・硫酸カルシウム・2水和物（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）をいい、軟石膏ともいう。二水石膏は自然界では非常に安定で、化学的には水とほとんど反応しない。二水石膏は150～185℃で加熱することにより、半水石膏（硫酸カルシウム・1/2水和物）に変化する。

■半水石膏

・硫酸カルシウム・1/2水和物（ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ）をいい、焼石膏ともいう。半水石膏にはα型とβ型が存在するが、α型は緻密な構造で粒子密度が高く、硬化強度がβ型よりも大きいことなどから医療用等に用いられている。一方、β型はポーラス状の空隙があることから粒子密度がα型よりも小さく、石膏ボード等の建築資材として利用されている。これら半水石膏を180℃以上で加熱処理することにより、結晶水が消失した無水石膏（硫酸カルシウム）が生成される。

■無水石膏

・無水石膏にはⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型が存在し、Ⅲ型の無水石膏は更にα型とβ型に分類することができる。Ⅲ型の無水石膏は、180～215℃の範囲で加熱することにより生成し、空気中の湿気を吸って半水石膏に戻る。Ⅱ型の無水石膏は、330℃以上で加熱することによって得られ、加水しても半水に戻らないことから、別名不活性無水石膏と呼ばれている。Ⅰ型の高温無水石膏は、1,180℃以上の加熱により生成される。

図(5)-4 用語の定義および解説

[第1章 総説]

「1.1 目的」

本ガイドラインは、今後も排出量が右肩上がりが増加することが予測される解体系の廃石膏ボードから、安全で良質な再生石膏粉を製造するためのリサイクルシステムを確立することが目的である。中間処理業者が再生処理をして製造する再生石膏粉、ならびに材料メーカー等が製造する再生石膏粉を用いた固化材・改質剤等（以下、「固化材等」と称す。）を対象とし、リサイクル業者が主導的になって整備・運用するものである。

<討議内容>

第1回、第2回作業部会において「再生石膏を使うことのメリットを打ち出した方がよい」「ステークホルダーを明確に」「このガイドラインに則って行うことで品質が担保されることを書いた方がよい」との意見があり、当初“本業界”としていたものを具体的に示すとともに、現場でより使われるための内容にした。

「1.2 マテリアルフロー」

我が国では、廃石膏ボードが新築工事、解体工事の合計で1年間に約140万トン発生しているものと推測され、そのうちの4分の3が何らかの用途で再利用あるいは再生利用（以下、“再利用等”とする。）されているものと考えられる。

<討議内容>

H28年度にサブテーマ4の研究として、産廃の許可を取り、なおかつ廃石膏ボードを受入れている可能性がある処理業者6,309社にアンケートを実施し、マテリアルフローの更新をした。実際の廃石膏ボードの取扱い業者は想定400社程度で、回答率は87%だった。畜産や農業系についての利用可能な再生石膏市場規模についても、潜在的需要を明らかにした。

「1.3 適用範囲」

本ガイドラインの適用範囲は、廃石膏ボードから再生石膏粉を製造する中間処理、ならびに、再生石膏粉を使用した固化材等を製造する際の品質管理を対象としている。

＜討議内容＞

第3回作業部会で、本ガイドラインの適用範囲は、適正な分別解体が行われた後、中間処理業者に入った後の石膏粉の品質管理（第3章）および固化材・改質材メーカーが本ガイドラインを使用して出荷する部分（第4章）が明確に分かるように図を追加した。

「1.4 再生石膏粉の利用イメージ」

再生石膏粉の利用分野および用途は、目的物の要求品質と再生石膏粉の優位性や留意点等を踏まえて選定する。

＜討議内容＞

利用用途の表については第2回、第3回作業部会において、1.4節と4.1節の表は合わせた方がよいとの意見があり、整合性を図った。また、農業等その他利用については、第5章で紹介をするので、1.4節の表に追加をした。

「1.5 再生石膏粉を原材料とした固化材・改質剤の利用イメージ」

再生石膏粉を原材料とした固化材等は、改良対象である地盤や土の特性と改良目的を踏まえ、適切な材料を選定して活用する。なお、ここで固化や改質の対象とする土は土壤汚染対策法の溶出量基準と含有量基準に適合した非汚染土とする。

＜討議内容＞

節内の「（2）施工法（例）」については、当初、第4章に掲載していたが、第3回作業部会において、利用イメージと同じ節にあった方が分かりやすいとの意見があり、本節に移動した。また、「（3）環境安全性（重金属等）に対する試験方法設定の考え方」は参考資料としていたが、この部分は重要であり第1章に持ってこないガイドラインが成り立たないとの意見が第3回委員会の中で挙がり、第1章1.5節（3）の位置づけになった。

〔第2章 再生石膏粉や再生石膏粉を用いた固化材等の基本的事項〕

「2.1 再生石膏粉の基本特性」

再生石膏粉は、結晶水の状態により特性が異なる。廃石膏ボードを破砕したのみでは再生二水石膏であるが、焼成処理することによって再生半水石膏や再生無水石膏となり、水との反応性が異なる再生石膏粉となる。そのため、再生石膏粉を保管する際、水（湿気を含む）との接触を防止するように配慮する必要がある。

石膏ボード製造時に微量の添加剤として有機系材料が使用されるため、再生二水石膏では有機物が残っているが、再生半水石膏では有機物が減少し、さらに再生無水石膏の場合には完全に消失する。

＜討議内容＞

第2回委員会において、石膏の結晶相転移の図があまりにも科学的記号が多すぎるとの意見があり、分かりやすくするために、再生石膏粉だけに着目した簡易図も追加した。

「2.2 再生石膏粉の製造方法」

廃石膏ボードを受入管理した後、金属等の異物除去を行い、廃石膏ボード片に付着しているボード用原紙を除去した後、もしくは同時に粉砕する。剥離したボード用原紙は再生紙としてリサイクルされる。粉砕した廃石膏は篩分けして規定の粒度に調整される。篩下の一定粒度以下の石膏粉は再生二水石膏となる。篩分け後に焼成処理を施すと、温度によって再生半水石膏や再生無水石膏が製造される。なお、篩分け前に焼成処理を施し、その後に篩分けして粒度調整される場合もある。

再生石膏粉の基本的な製造方法を示す。

＜討議内容＞

第2回作業部会において、再生石膏粉の品質については、受入れの段階で9割以上決まってしまうため、国交省の分別解体マニュアルに従って分別された石膏ボードのみ受入れることを強調して欲しいとの意見があり、文章中に記載するとともに、製造方法の図にも追記した。

「2.3 再生石膏粉を用いた固化材・改質剤の製造方法」

再生石膏粉を用いた固化材、改良助剤ならびに改質剤の製造には、品質が確認・管理された粉体もしくは粒状体の再生石膏を用いる。再生石膏粉の受入管理後は、フレキシブルコンテナバッグ（以下、「フレコンバッグ」と称す。）等のまま保管するか、バラで受け入れた場合などはサイロに保管する。再生石膏粉（粒状体を含む）を計量し、目的に応じて他材料とミキシングして製品となる。製品は品質管理を行った後に出荷される。

＜討議内容＞

第2回委員会において、2.3節の再生石膏粉の説明が他の章に示す再生石膏粉とは違うものだとの誤解を招く表現になっているとの指摘を受け、本ガイドラインに従って製造された品質が確認・管理された再生石膏粉であることを追記した。

「2.4 保管時の留意点」

再生石膏粉自体や、再生石膏粉を原材料とした固化材ならびに改質剤を保管する場合は、材料が湿気を帯びないように留意しなければならないため、水（湿気を含む）との接触を避ける必要がある。

＜討議内容＞

保管については委員会、作業部会、協議会の中で、水分との接触を避けることが最も重要なことであるとの意見により、解説で詳しく説明をした。

[第3章 再生石膏粉の品質管理]

「3.1 適用範囲」

本章で示す品質検査は、固化材等の製品の材料として製造される「再生石膏粉（二水、半水、無水）」に適用する。

＜討議内容＞

第3章は製品の材料としての再生石膏粉について述べるものであるが、第2回作業部会、委員会において、第4章との区分が分かりづらいとの意見があり、3.1節の適用範囲で第3章は再生石膏粉について述べることを明記した。

「3.2 品質管理項目」

品質管理は、製品の原材料として製造される「再生石膏粉（二水、半水、無水）」に対して実施する。なお、本ガイドラインは、各品質管理項目に対して、基準値を設けるものではなく、測定データは、出荷先への品質保証に資することを目的としている。

＜討議内容＞

検査頻度等については協議会にヒアリングを行い、特に定期検査の頻度は中間処理業者の処理能力に応じて検査する回数が異なることを示した。また、再生石膏粉の検査項目については基準値を設けるものではないため、重金属等の検査については、土壤汚染対策法の土壤含有量ではなく、全含有量(底質調査法)で行うこととし、中間処理業者が自社でしっかり品質管理を行っていることが重要であることを述べている。

「3.3 検査方法」

検査方法は、JIS (Japanese Industrial Standards)、地盤工学会基準等を基本とする。

＜討議内容＞

サブテーマ3の研究結果を基に、再生石膏粉の密度と化合水量の関係を整理し、標準石膏と照らし合わせて概略的な夾雑物の量と石膏の種類（二水・半水・無水）を把握できるように図に示した。その他にも化合水量による石膏種の推定含有量の換算表を掲載し、化合水量の測定値によってそれぞれの石膏種の推定含有量が一目で分かるように表を作成した。定期検査のうち、重金属等についてはH30年度にガイドライン試行版を運用して行った国環研の再生石膏の品質管理試験互換調査結果とも合わせて検出下限値等を表に示した。また、夾雑物の量については第3回作業部会の意見により、イメージ写真を載せて試験手順を明確に記載することにした。

「3.4 検査の運用方法」

再生石膏粉の製造業者は、第三者機関による定期検査と製造業者自らが行う自主検査によって、再生石膏粉の品質を管理する。

検査結果は、品質管理票として保管し、必要に応じて商品流通時に添付する。

＜討議内容＞

第7回協議会において分析機関から、第三者機関は外部精度管理調査に定期的に参加している機関が望ましいとの指摘を受け、その旨を書き加えた。品質管理票については、国環研で互換調査を行う際に、依頼を受けた分析会社から各問い合わせがあり、その問い合わせを参考に分析結果が記入しやすいように加筆修正を行った。

「3.5 利用用途に応じた品質検査」

ここでは、「3.2品質管理項目」に加えて利用用途別の製品の原材料として必要と考えられる再生石膏粉の品質検査項目を例示する。

ただし、利用用途に応じた要求品質は出荷先の受入条件に委ねられることから、原材料を製造する際には、出荷先の品質管理項目、検査方法、管理基準等を確認の上、本項を参照されたい。

＜討議内容＞

協議会において石膏ボード工業会、固化材メーカー等にヒアリングを行い、利用用途別の再生石膏粉の検査について、本ガイドラインで規定する最低限行わなければならない項目を一覧に示した。利用先によって要求される可能性のある項目についても「※」で示している。また、ボードtoボードについては、国交省から詳しく掲載して欲しいとの要望があり、石膏ボード原料として再生石膏粉を受入れる場合の条件について、石膏ボード工業会から提供された8条件を追加した。

[第4章 再生石膏粉を用いた固化材・改質剤の地盤改良等への利用]

「4.1 利用用途」

再生石膏粉を用いた固化材、改質剤の用途は、主に、固化による力学性能等の向上と改質によるハンドリング（搬送性、篩い分け性能）の向上がある。本章では、再生石膏粉を単味または他の材料と混合した材料を、固化材または改質剤として使用する場合の利用用途について示す。これらの固化材、改質剤を使用する際には、用途に応じた要求品質を満たすことを事前の各種試験等により確認する必要がある。なお、ここで固化や改質の対象とする土は、土壌汚染対策法の溶出量基準と含有量基準に適合した非汚染土とする。

＜討議内容＞

第4章については、第3回委員会において第3章との関連も含め全体的な構成が分かりづらいとの意見が挙がり、大幅な節構成の修正を行った。利用用途における想定pHについては、第2回委員会において、中性域とアルカリ性について、本ガイドラインでの定義が必要であるとの意見があり、文中及び表に示した。

「4.2 固化材・改質剤の品質管理」

再生石膏粉を用いた固化材・改質剤は適切に品質管理されたものを使用しなければならない。

＜討議内容＞

当初、本節には「再生石膏粉を含む固化材・改質材の品質管理項目の概要」として表が掲載されていたが、第4回作業部会において、第3章と重複する部分もあり分かりづらいとの意見があり削除した。

また同部会で、改良土から何か溶出した場合には、土が原因なのか何が原因なのかは必ず判明させなければならないとの意見が出た為、最終的な環境安全性は土と混ぜた時に判断をし、固化材・改質材自体の含有量や溶出量に基準はないことを示した。

「4.3 設計から室内配合試験、施工までの流れ」

再生石膏粉を用いた固化材・改質剤の地盤改良等への利用に際しては、用途に応じて必要な力学性能やpH等を設定する。そのうえで、固化材メーカーと施工業者が協力して、室内配合試験・溶出試験により設定された要求性能と環境安全品質の事前確認を行い、原位置において重機によりまたは土質改良機により均質な攪拌・混合を実施し、品質を確保する。

＜討議内容＞

配合試験については、委員会および部会において、試験実施者の主語を具体的に示す、固化材メーカーが実施するとしても施工業者も確認試験は行う、硫化水素ガス発生試験についても配合試験フローの中に必要だとの意見が挙がり、解説ならびに配合試験フロー図が完成した。なお、本ガイドラインでの溶出試験は土壤汚染対策法ではなく、土壤環境基準（農用地関係は除く）を適用している。

「4.4 力学性能に関する要求品質と検査方法」

再生石膏粉を用いた固化材・改質剤を建設発生土の利用や建設汚泥の再生利用に用いる場合は、本節に示す圧縮強さ、コーン指数等について利用用途の要求品質に適合していることを確認する必要がある。

＜討議内容＞

第3回および第4回作業部会において、再泥化についての議論になった。再泥化については、定義づけをするのは難しいが「長期的に降雨に暴露される環境下」というのが全てであり、本ガイドラインでは、再生石膏粉を使用する際、再泥化が問題ではなく単味利用する場合に留意が必要であることを示した。

「4.5 環境安全性に関する要求品質と検査方法」

再生石膏粉を用いた固化材・改質剤を建設発生土の利用や建設汚泥の再生利用に用いる場合は、固化または改質後の土を対象として、本節に示す環境安全性（重金属等、pH、硫化水素ガスの発生）が、利用用途の要求事項に適合していることを確認する必要がある。

＜討議内容＞

4.3節同様に本節でも環境安全品質検査（重金属等）については基準値を土壤環境基準と同等とし、さらに、条例や他法令等への適合が求められる場合は、受入れ先の条件等を確認する必要があることを示した。硫化水素ガス発生ポテンシャル試験については、温泉利用基準を参考とし、基準値を示すことにより分かりやすくしている。また、第3回作業部会において、今後ため池堆積土を改質する事案が増えるのでは、との意見が挙がったため、改良や改質をする際には、一定の条件をクリアすれば硫化水素ガス発生のリスクはほとんど無いことを示した。硫化水素ガス発生ポテンシャル試験の検査手法については、図を用いて分かりやすく説明するとともに、参考資料としても添付をした。

「4.6 施工管理における留意点」

施工に際しては、固化あるいは改質の目的を踏まえた上で現場施工条件に適合した施工方法を選定し、固化あるいは改質に関わる要求品質と環境安全性を満足するよう適切な施工管理を行わなければならない。

＜討議内容＞

第4回作業部会において、スラリー混合方式での留意事項について議論された。スラリー石膏では地盤強度の改良が期待できないとの意見が挙がり、基本的には粉体石膏を利用することが望ましいとの書きぶりにした。スラリー混合方式を用いざるを得ない場合の留意事項についても示している。

[第5章 その他分野への適用と展望]

「5.1 農業利用」

再生石膏の農業分野への利用は、植物の生育促進を図る目的での使用と、農業土壌の改良を図る目的での使用が想定され、それぞれ混合割合、施用時期・混和方法などが異なったものになる。

したがって、それぞれの活用目的に応じた品質管理等を行うことが必要である。

＜討議内容＞

原案から大きな修正はない。

「5.2 畜産利用」

廃石膏ボードの畜産分野での活用は、敷料としての利用が行われてきており、単味での活用、おがくずとの混合による利用、藁やおが粉との混合・併用しての活用などが行われてきている。

このため、これらの活用形態を考慮した品質管理を行うことが必要である。

＜討議内容＞

原案から大きな修正はない。

「5.3 濁水対策」

石膏は複数のカルシウム系の凝集剤の中でも凝集効果が優れていることから、濁水の凝集処理剤としての活用が期待できる。

＜討議内容＞

原案から大きな修正はない。

「5.4 除塩」

再生石膏を使用することで農地の除塩を効率的に行うことができる。

＜討議内容＞

原案から大きな修正はない。

[参考資料]

「1. 関連する法令と指針等」

本ガイドラインの適用にあたっては、関連する法令・基準・条例等を遵守し、生活環境保全上の支障が生じないように、都道府県等の関連部局と十分に協議する。

＜討議内容＞

「2. その他」として環境安全性（重金属等）に対する試験方法の設定の考え方を掲載していたが、1.6節に移動したため、参考資料は関連する法令と指針等のみとなった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

廃石膏ボードのリサイクルは、「再生石膏粉を作ることである」という原点に立ち返り、廃石膏ボードのリサイクル業は再生品の原料を生産しているという観点から、全国廃石膏ボードリサイクル協議会の参画企業群に品質管理を適用しながらガイドラインを作成したことは、研究体制としての科学的意義があると考ええる。

(2) 環境政策への貢献

我が国では、石膏ボード製造に化学石膏（副産石膏：排煙脱硫石膏など）、輸入石膏、再生石膏などが活用されており、それらは全体で約300万～400万tと推定される。このうち、廃石膏ボードから再生した再生石膏の活用は、10%程度に留まっている。

一方、廃石膏ボードの排出量は、将来的に増大することが見込まれており、廃石膏ボードの活用用途の拡大を図らなければ、最終処分される量が大きくなると考えられている。よって、本ガイドラインを運用することで利用用途が拡大されればその効果は大きいと考える。

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

今後、特に解体系石膏ボードの利用拡大を図ることができれば、建設リサイクル法における特定建設資材に追加されることが期待でき、そうなれば相乗的に石膏ボードリサイクルが促進されと考える。

また、本ガイドラインは、再生製品の需要拡大をめざし取り組まれている、「都道府県によるリサイクル製品の認定制度」に関する情報や認定されている再生製品の環境負荷評価に関する基礎情報として活用できるものであり、自治体における石膏ボードリサイクルが促進されと考える。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表

特に記載すべき事項はない。

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4)「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 2017NEW環境展（主催：日報ビジネス、平成29年5月23日～26日、東京、来客約120名）にて成果紹介
- 2) EE東北'17（主催：EE東北実行委員会、平成29年6月7日～8日、宮城、来客約80名）にて成果紹介
- 3) 建設技術フェア2017in中部（主催：国土交通省中部地方整備局、平成29年10月18日～19日、愛知、来客約60名）にて成果紹介
- 4) 第6回Fクレスト会 「環境研究総合推進費における廃石膏ボードリサイクルへの取り組み」（主催：Fクレスト会、平成29年10月20日、東京、観客約40名）にて成果紹介
- 5) けんせつフェア北陸in新潟（主催：国土交通省北陸地方整備局、新潟、来客約60名）にて成果紹介
- 6) やまぐちブランド技術研究会・廃棄物分科会「廃石膏ボードから再生した石膏粉の利活用の現状と社会実装」（平成30年1月18日、新山口ターミナルビル、参加者約30名）にて成果紹介
- 7) 鹿児島県 産業廃棄物リサイクル推進セミナー「環境研究総合推進費における廃石膏ボードリサイクルへの取り組み」（主催：一般社団法人 鹿児島県産業廃棄物協会、平成30年2月5日、鹿児島市、観客約150名）にて講演
- 8) 鹿児島県 産業廃棄物リサイクル推進セミナー「環境研究総合推進費における廃石膏ボードリサイクルへの取り組み」（主催：一般社団法人 鹿児島県産業廃棄物協会、平成30年2月6日、鹿屋市、観客約80名）にて講演
- 9) 海上の杜技術士会技術研修会「私が実感する循環資源の利活用における現状と課題」（主催：海上の杜技術士会、平成30年5月19日、愛知県産業労働センター ウィンクあいち、観客約120名）にて講演
- 10) 2018NEW環境展（主催：日報ビジネス、平成30年5月22日～25日、東京、来客約120名）にて成果紹介
- 11) EE東北'18（主催：EE東北実行委員会、平成30年6月6日～7日、宮城、来客約80名）にて成果紹介
- 12) 廃石膏ボードリサイクルセミナー「廃石膏ボードリサイクルの社会実装に向けて」（主催：一般社団法人泥土リサイクル協会、平成30年8月8日、名古屋、観客約20名）にて講演
- 13) 建設技術フェア2018in中部（主催：国土交通省中部地方整備局、平成30年10月17日～18日、愛知、来客約60名）にて成果紹介
- 14) 建設副産物ならびに循環資源の有効利活用公開講座「私が実感する循環資源の利活用における現状と課題」（主催：一般社団法人泥土リサイクル協会、資源循環コンソーシアム、宮城県建設発土リサイクル協同組合の3団体合同、平成30年10月31日、エル・パーク仙台、観客約150名）にて講演
- 15) 2019NEW環境展（主催：日報ビジネス、平成31年3月12日～15日、東京、来客約120名）にて成果紹介
- 16) インターネット上での研究成果の継続的な発信
泥土リサイクル協会 ホームページを用いた双方向性のあるインターネット上での情報発信により、研究目的、研究内容、研究成果の発信を行った。
<http://deido-recycling.jp/quality/index.htm>

(5)マスコミ等への公表・報道等

- 1) イーコンテクチャー（2017.7月号、全国版、「ガイドライン策定に向け始動」）
- 2) 日刊建設工業新聞（2017年8月3日、全国版、「指針策定へ検討組織」）
- 3) 循環経済新聞（循環経済新聞（2017年8月28日、全国版、「石膏ボードリサイクル推進を産・官・学から参加」）
- 4) 循環経済新聞（2018年1月15日、全国版、「石膏ボードリサイクル、ガイドライン策定へ」）
- 5) 循環経済新聞（2018年3月19日、全国版、「ガイドライン策定、最終段階に」）
- 6) 日刊建設工業新聞（2018年6月8日、全国版、「再生石こう粉の利用促進」）

- 7) 循環経済新聞（2018年10月22日、全国版、「試験運用結果踏まえ修正」）
- 8) 循環経済新聞（2018年11月19日、全国版、「リサイクル率向上へ期待」）
- 9) 循環経済新聞（2019年1月14日、全国版、「（ガイドライン）完成近づく、大詰めへ」）※図(5)-6
- 10) 循環経済新聞（2019年3月11日、全国版、「各章ごとに確認」）
- 11) 循環経済新聞（2019年3月25日、全国版、「修正事項など確認し完成間近」）

(6)その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

III. 英文Abstract

Principles and practical implementation of quality control for recycling waste gypsum board

Principal Investigator: Kazuto ENDO

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
 10-2 Fukasaku, Miharu Town, Tamura District, Fukushima
 963-7700, JAPAN
 Tel: +81-247-61-6569 (ext. 6550) / Fax: +81-247-61-6562
 E-mail: k-endo@nies.go.jp

Cooperated by: Fukuoka University, Aichi Institute of technology, Japan Management Association Research Institute Inc., Mud Recycling Association

[Abstract]

Key Words: gypsum boards waste, recycle, production quality control, geotechnical use, hydrogen sulfide gas test, recycling guidelines

At the present, the yearly generation of the gypsum boards waste (GBW) is more than 1 million tons. Ten years later, the generation is likely to reach 2 million tons. About 90 % of the GBW is generated by demolition work. Most of the GBW which is landfilled is the GBW generated from the demolition work because its physical qualities, such as impurities, vary. In order to promote the recycling of the GBW, recycling process-quality control is needed to be established. In the geotechnical use of the recycled GBW, the concerns are the mixture of the GBW and soil generates hydrogen sulfide gas and leach fluorine. Using the knowledge acquired by our research, we have created the recycling guidelines for securing both the production quality of the recycled GBW and the environmental safety at the geotechnical site.

We surveyed and updated the data of the material flow of the GBW. The previous survey was carried out in 2007. In the 2007 survey, the GBW quantities were calculated based on demolition and construction statistics and estimated quantities area of structures. The difference between the methodology of our survey and the 2007 survey is that the 2007 survey used two independent data sources, statistical and surveyed. While, we used only surveyed data. As a result, we have no unknown quantities of the GBW. Our survey revealed the total quantities of treated and landfilled GBW of 1.18 million tons. The recycling rate of the GBW is 72%, the remaining GBW is landfilled.

A common recycling process is board-to-board (BtB), the GBW is used as raw material for new gypsum boards production. The GBW quantities to the BtB process are, however, very limited because the other by-product gypsum is used for the BtB process. We, hence, recommend promoting the geotechnical use. In our research, we created a test method of evaluating the hydrogen sulfide gas generated in soil mixed with the recycled GBW. We also described an environmentally safe way of testing the mixture of GBW and soil.

Our study results include recycling guidelines, focusing on the quality control of the recycled GBW and the geotechnical use. A special working group and a committee were organized to create these guidelines. The working group wrote a draft version of the guidelines and then the committee evaluated them. Preparing the guidelines took two years. During these

two years the draft of the guidelines were implemented in the field, by the corporate members of the council on the recycled GBW. Our new completed recycling guidelines will be a tool for promoting new practical technical and legal ways for the GBW recycling.