

令和 元年 9 月 13 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05816

研究課題名(和文) 廃石膏由来二水石膏の半水石膏転換メカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of hemihydrate gypsum conversion mechanism of waste gypsum derived dihydrate gypsum

研究代表者

尾形 公一郎(Ogata, Koichiro)

大分工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：50370028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では廃石膏ボード由来二水石膏が半水石膏へ変化する加熱脱水メカニズムを実験的、理論的に調査した。その結果、二水石膏が半水石膏へ転換する評価方法として加熱透過試験の有効性を確認した。恒温乾燥炉と加熱透過試験結果の比較から加熱空気流が二水石膏の半水石膏化を促進することを見出した。二水石膏を加熱空気中で乾燥する場合に粒子レイノルズ数、有効熱伝導率や熱流束が石膏の乾燥特性に影響することを明らかにした。二水石膏充てん層の温度を分析し、石膏の温度差がなくなる時に二水石膏の自由水や結晶水が脱水して半水石膏へ変換することを確認した。廃石膏の適用先や含水比測定方法についての検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした廃石膏ボード由来二水石膏は加熱すると半水石膏および無水石膏に変化する。半水石膏は加水すると固化する性質を持ち、土壌改良剤などと混合する固化材としての有効利用が期待されている。このため、本研究で得られた二水石膏が半水石膏へ転換する加熱脱水メカニズムの知見は学術的に重要である。さらに廃石膏ボードの加熱装置開発や石膏の有効利用へ繋げることが期待でき、工業的意義および社会的意義があるといえる。

研究成果の概要(英文)：This study experimentally and theoretically investigated heating mechanism to transferring from dihydrate gypsum to hemihydrate gypsum that produced from waste plasterboard. As the result, it confirmed heating permeation test has an effectivity to evaluation of transferring gypsum particle. It is found the flow of heating air promote to become hemihydrate gypsum by comparison of constant temperature drying oven test and heating permeation test. It revealed experimentally and theoretically that particle Reynolds number, effective thermal conductivity and heat flux are strongly affecting drying properties of gypsum when dihydrate gypsum was heating at flow of air. Furthermore, it was confirm that free water and crystal water of dihydrate gypsum dehydrated and converted to hemihydrate gypsum based on analysis of temperature change of particle bed of dihydrate gypsum. In addition, the reclaim application of waste gypsum and the measuring method of water content examined.

研究分野：流体力学

キーワード：廃石膏ボード 二水石膏 半水石膏 加熱脱水 熱流束

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

環境省の基準では、廃石膏ボードは紙と石膏を分離して管理型最終処分場へ埋め立てることが義務付けられているが、廃石膏ボードの排出量増加に伴う処分場の残余容量の問題が発生している。特に、解体系石膏ボードの排出量は25年後には年間280万トンに達して、現在の3倍となる見込みであり、廃石膏ボードの廃棄物化を抑制するためのリサイクル技術の開発は急務の課題である。通常、廃石膏ボードは分別機で破碎・分離処理を行い、粉粒体状の廃石膏由来二水石膏として排出される。二水石膏は加熱脱水処理で水と固化する性質を有する半水石膏に転換できるため、半水石膏を地盤改良材に添加して再利用する取り組みがあるが、石膏ボード工業会の調査では、解体系石膏ボードの8割近くがリサイクル利用されていないとされている。

問題の一つに半水石膏の製造技術向上がある。通常、粒子径が数十 $\mu\text{m}$ ～数 $\text{mm}$ の二水石膏をロータリーキルン炉で加熱処理して半水石膏を得るが、二水石膏の粒子径や処理量に応じた適切な温度や時間で加熱処理が行われていないために、石膏に焼きむらが発生する事例が存在する。また、廃石膏を建設資材として再利用する研究などは見られるが、本研究で対象とする二水石膏を半水石膏に転換するメカニズムの解明に関する研究は皆無である。以上の背景から、本研究課題では、廃石膏ボードから排出される二水石膏を加熱処理した際の半水石膏転換特性の解明に取り組んだ。

### 2. 研究の目的

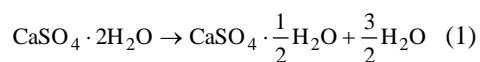
本研究の目的は、廃石膏ボードから生成された二水石膏の加熱空気中での乾燥特性と流動メカニズムを実験的、理論的に理解することである。具体的には、以下の項目に沿って研究を遂行し、研究成果を得ることを目的とした。

- (1) 加熱透過試験装置の設計製作、計測システムの構築を行う。
- (2) 廃石膏由来二水石膏の粉体物性の調査（平均粒子径、真密度、かさ密度、空隙率、流動性指数、噴流性指数）する。
- (3) 粒子径、充てん質量や加熱温度を変化させた場合の恒温乾燥炉による加熱試験を行う。
- (4) 粒子径、充てん質量、加熱温度や熱流束を変化させた場合の加熱透過試験を行う。
- (5) 二水石膏が半水石膏へ変化する乾燥特性の調査及び評価方法の有効性を検証する。
- (6) 二水石膏から半水石膏への変化に及ぼす熱流動の影響を考察するために、粒子層内部の熱流動理論を用いて有効熱伝導率や石膏充てん層の熱流束を推定し、二水石膏が半水石膏へ変化する半水化時間との関係を調査する。
- (7) 時間的に変化する二水石膏の充てん層内の熱流動現象を解明するために、層内温度や熱流束の時間変化を調査して、二水石膏から半水石膏への転換メカニズムを考察する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 石膏の乾燥特性の評価

本研究では、石膏を加熱した際の石膏の質量の変化量で二水石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) から半水石膏 ( $0.5\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) への変化を推定する方法を用いた。式(1)に二水石膏から半水石膏への形態変化、および分子量の変化を示す。式(1)の分子量の関係から二水石膏の質量が84.3%になると半水石膏へ変化したと判定できる。本研究では、この値と二水石膏を加熱した際の石膏の質量を比較して二水石膏の半水石膏への変化を評価した。



分子量 172.182→145.158 + 27.024

さらに、本研究では上述の質量変化による二水石膏から半水石膏への形態変化の妥当性を確認するために全自動多目的X線回折装置を用いた定性分析を行った。

#### (2) 恒温乾燥炉による加熱試験

本研究では熱源に恒温乾燥炉を用いた加熱実験を行った。本装置のヒーター容量は2.7kWで、設定可能温度範囲は室温+10℃～360℃である。図1に実験手順のフローチャートを示す。まず、実験は内径60mm、高さ30mmのステンレス製容器に質量基準の50%粒子径が98, 272, 1083 $\mu\text{m}$ の二水石膏を初期質量10, 20, 30gで充てんする。次に、この容器を恒温乾燥炉の中に静置し、加熱温度110, 130, 150℃に設定して、加熱時間 $t$ を変化させて二水石膏を加熱した。加熱終了後に加熱した石膏をデシケータ内で室温に達するまで30分間冷ましてから、加熱後の石膏の質量を測定した。

#### (3) 加熱透過試験装置による加熱試験

本研究では、二水石膏の乾燥特性に及ぼす加熱空気流の影響を調査するために加熱透過試験装置を製作した。図2に加熱透過試験装置の概略を示す。試験装置の加熱源には熱風発生機を用いた。本発生機のヒーター容量は5kWで、設定可能温度範囲は常温～350℃である。熱風発

生機で発生した加熱空気流は長さ 1500mm、内径 75mm のステンレス配管を通して加熱試験部へと導く構造である。加熱試験部はステンレス配管とふるいで構成され、全長 120mm、内径 50mm となっている。ここで、加熱透過試験中に試験部に充てんした二水石膏が飛散しないように、試験部の上部と底部には目開き 53 $\mu$ m のふるい網を取り付けている。

乾燥方法は二水石膏を加熱試験部に静置した状態で加熱空気流を透過させて半水石膏に変化させる。実験中の加熱試験装置入口部と出口部に熱電対を設置して加熱空気の温度を測定した。また中部に熱線流速計と圧力センサを設置して試験部の流速と圧力を測定した。ただし、流速の測定は常温下で行った。加熱終了後は石膏をデシケータで 30 分冷ました後に電子天秤で加熱後の石膏の質量を測定した。

本実験でも恒温乾燥炉の実験と同一のふるい分けした 3 種類の二水石膏を使用した。また、実験条件も初期質量 10, 20, 30g、試験装置入口部の温度 110, 130, 150 $^{\circ}$ C に設定して、恒温乾燥炉実験と同一とした。

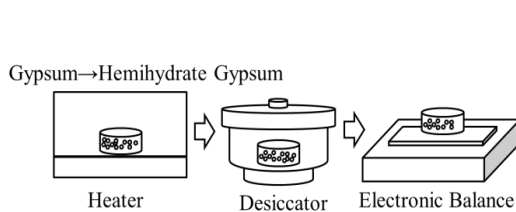


図 1 恒温乾燥炉実験

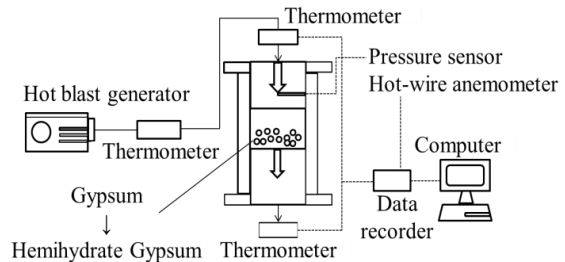


図 2 加熱透過試験

#### 4. 研究成果

##### (1) 二水石膏の形態変化に及ぼす加熱空気流の影響

図 3 に恒温乾燥炉による二水石膏加熱前後の質量割合  $M_p/M_{pi}$  と加熱時間  $t$  の関係を示す。加熱温度  $T=130^{\circ}$ C、石膏の初期質量  $M_{pi}=10$ g で粒子径を 3 種類に変化している。図中の点線は二水石膏が半水石膏へ変化する質量を表す。図より、約 55 分で二水石膏が半水石膏へ変化することが分かる。ここで、粒子径の影響を見ると、粒子径の変化に関わらず二水石膏が半水石膏へ変化する時間にほとんど差がないことが明らかとなった。さらに、加熱温度や初期質量を変化させた実験でも同様の傾向が得られた。

図 4 に加熱透過試験入口部の温度  $T=130^{\circ}$ C の場合の二水石膏加熱前後の質量割合  $M_p/M_{pi}$  と加熱時間  $t$  の関係を示す。二水石膏の初期質量  $M_{pi}=10$ g である。図中の点線は半水石膏に変化する質量を表す。図より、全ての条件において石膏の質量割合は加熱時間の増加とともに減少する傾向を示す。ここで、粒子径の影響を見ると、粒子径の増加とともに二水石膏が半水石膏へ変化する時間が短くなることが明らかとなった。この結果は他の条件でも確認された。

以上より、二水石膏から半水石膏への転換には加熱空気流と粒子径が大きく影響する結果が得られた。また、X 線回折装置を用いた分析結果から、本研究で用いた石膏の質量変化で二水石膏から半水石膏へ変化する判定方法も有効であると考えられる。

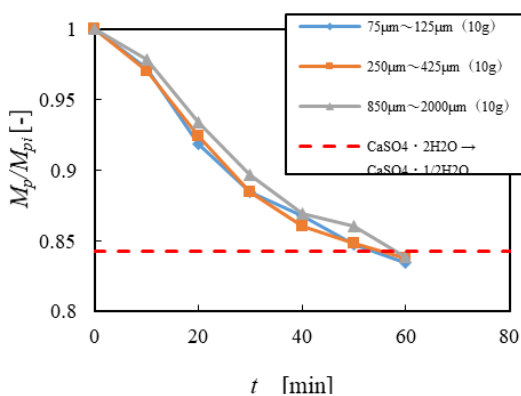


図 3 恒温乾燥炉による加熱試験結果

( $T=130^{\circ}$ C,  $M_{pi}=10$ g)

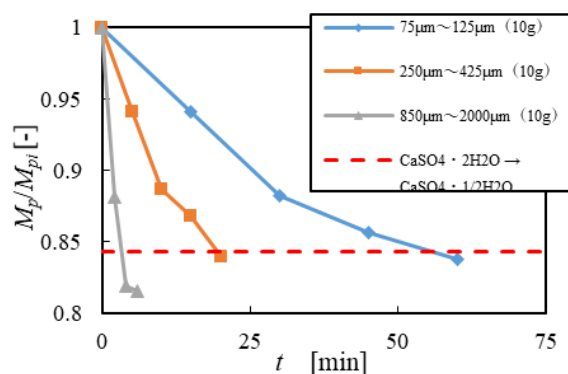


図 4 加熱透過試験による試験結果

( $T=130^{\circ}$ C,  $M_{pi}=10$ g)

##### (2) 二水石膏充てん層内部の熱流動と石膏の乾燥特性の関係

図 5 に初期質量が一定で粒子径と加熱温度を変化させた場合の粒子充てん層の熱流束  $q$  と半水化時間  $t_c$  の関係を示す。各図より、熱流束の値が高い WGL の場合に半水化時間が短く、熱流束の値が低い WGM および WGS で半水化時間が長くなることが確認された。この結果は、加熱透過試験で得られた粒子径や加熱温度の増加とともに半水化時間が短くなることに対応していると考えられる。本研究を通して、二水石膏を加熱空気中で乾燥する場合に、粒子充てん層の粒子レイノルズ数、有効熱伝導率や熱流束が石膏の乾燥特性に大きく影響することを明らかにした。

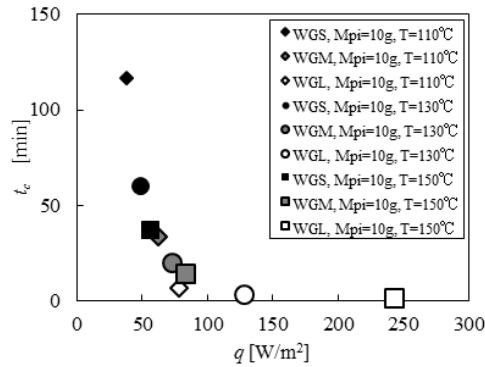


図5 二水石膏充てん層内部の熱流束と半水化時間の関係 ( $M_{pi}=10g$ )

### (3) 粒子層内部の熱流動の時間変化

図6に加熱透過試験部に充てんした二水石膏の上部と下部の温度  $T$  と加熱時間  $t$  の関係を示す。ここでは、試験装置内部の設定加熱温度  $T_a=130^\circ\text{C}$ 、粒子径は  $1400\sim 2000\mu\text{m}$ 、粒子レイノルズ数  $Re_p=7.7$  である。図中の  $T_{in}$  は粒子層上部温度、 $T_{out1}\sim T_{out4}$  は粒子層下部温度で、添え字1は試験部中心から  $6\text{mm}$  の温度、添え字2, 3, 4はそれぞれ中心部から  $14, 22, 29\text{mm}$  の温度である。さらに、図7に同一実験条件下での粒子層下部の熱流束の時間変化を示している。図6より、二水石膏上部と下部の温度は加熱時間の増加とともに  $100^\circ\text{C}$  付近まで線形的に増加した後、温度が  $100\sim 110^\circ\text{C}$  で推移することが分かる。このとき、温度勾配は急激に減少して加熱時間が  $160$  秒あたりから、粒子層の上部温度は徐々に上昇していき、 $440\sim 540$  秒付近で温度が収束している。ここで、収束温度の最大値は約  $125^\circ\text{C}$  に達しており、設定加熱温度付近まで上昇していることが分かる。一方、粒子層の下部温度  $T_{out}$  は加熱時間が  $160\sim 340$  秒の間に温度上昇が見られないが、 $340$  秒付近から温度が徐々に上昇して約  $440$  秒付近で上部温度  $T_{in}$  とほぼ同じ温度に達する。図7の熱流束も図6の二水石膏の温度変化と同様に、加熱時間が  $160$  秒までは線形的に上昇しており、その後、熱流束の時間に対する傾きが徐々に減少してほぼ一定値に達する傾向が見られた。両図より、二水石膏の上部と下部の温度変化と熱流束の変化は類似した傾向を示し、両者に強い相関性があることが理解できる。これらの結果から、粒子層の上部と下部に温度差が発生し、その後、両者の温度が一致するまでの間に二水石膏に含まれる結晶水の減少が発生したのではないかと推測される。加えて、廃石膏の適用先や含水比測定方法についての検討も行った。

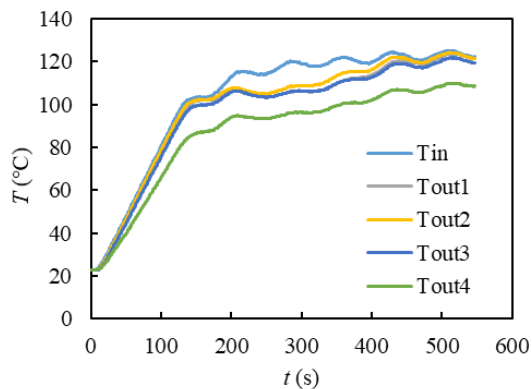


図6 粒子層上部と底部の温度の時間変化  
( $x_p=1400\text{-}2000\mu\text{m}$ ,  $T_a=130^\circ\text{C}$ ,  $Re_p=7.7$ )

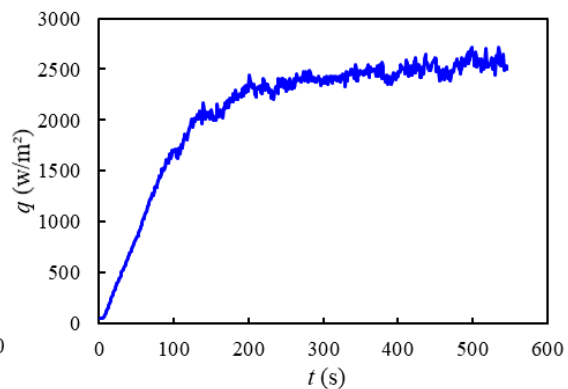


図7 粒子層底部の熱流束の時間変化  
( $x_p=1400\text{-}2000\mu\text{m}$ ,  $T_a=130^\circ\text{C}$ ,  $Re_p=7.7$ )

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) 尾形公一郎, 猪原健史, 佐野博昭, 川原秀夫, 加熱透過法による廃石膏粉体の乾燥特性評価, 混相流, Vol.30, No.5, 499-510 (2017), 査読有, DOI: <https://doi.org/10.3811/jjmf.30.499>

[学会発表] (計 7 件)

- (1) 河野李奈, 荒尾俊介, 佐野博昭, 小竹望, 森岡秀一, 川満洋, 前稔文, 尾形公一郎, 川原秀夫, 福村卓也, 廃石膏ボード由来の再生石膏および再生石膏混合土の含水比測定に関する一考察, 平成30年度土木学会西部シム研究発表会講演概要集, III-058, pp.393-394, 2019.3
- (2) 大窪律哉, 尾形公一郎, 佐野博昭, 川原秀夫, 廃石膏粒子充てん層の熱流動特性に関

- する研究, 日本機械学会講演論文集 No.198-2 [19-3-1 九州支部第 50 回学生員卒業研究発表講演会], pp.1-4, 2019.3.1, 佐賀大学本庄キャンパス, 佐賀県佐賀市
- (3) Koichiro Ogata, Takeshi Ihara, Satoru Umeki, Hiroaki Sano and Hideo Kawahara, Drying Characteristics on Waste Gypsum Particle Bed by Using Permeation Test of Heated Air, Book of Abstract- 9<sup>th</sup> International Conference Conveying and Handling of Particulate Solids, 2018.9, Greenwich, London
  - (4) 佐野博昭, 小竹望, 桑嶋啓治, 尾形公一郎, 川原秀夫, 庄司良, 磯村尚子, 沖縄地域の赤土等流出に係る農地から海域までの総合的環境保全・修復技術の開発, 平成 29 年度赤土等流出防止交流集会発表予稿集, 2017.9
  - (5) 尾形公一郎, 猪原健史, 佐野博昭, 川原秀夫, 廃石膏由来二水石膏の乾燥特性の評価, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2016, 2016.8.8-8.10, 同志社大学今出川キャンパス
  - (6) 松尾悠平, 猪原健史, 佐野博昭, 尾形公一郎, 山田幹雄, 川原秀夫, 廃石膏ボード由来再生石膏のデシケータ保管時の質量特性, 2015 年度 (平成 27 年度) 土木学会西部支部研究発表会, 2016.3.6, 九州産業大学, 福岡市東区
  - (7) 猪原健史, 川邊海人, 尾形公一郎, 佐野博昭, 川原秀夫, 廃石膏粉体の乾燥特性に関する研究, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2015, 2015.8.6, 高知工科大学香美キャンパス, 高知県香美市

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：佐野 博昭

ローマ字氏名：Sano Hiroaki

所属研究機関名：大分工業高等専門学校

部局名：都市・環境工学科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：50187275

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。