

論文 合成エトリングタイトの体積変化メカニズムに関する基礎的研究

赤羽根 駿之介*1・五十嵐 豪*2・西脇 智哉*3・丸山 一平*4

要旨: 本論文では、DEF の膨張メカニズムを解明するための基礎的検討として、合成したエトリングタイトの粉末試料とペレット試料のそれぞれの水蒸気吸脱着等温線およびペレット試料のひずみ等温線を実験的に取得した。その結果、エトリングタイトのマクロな体積変化メカニズムは、毛管張力の変化やメタエトリングタイトからエトリングタイトへの結晶相の変化ではなく、メタエトリングタイト、エトリングタイトそれぞれの結晶水量の変化に伴う結晶格子の格子定数の変化であることが示唆された。

キーワード: エトリングタイト、体積変化メカニズム、水蒸気吸脱着等温線、ひずみ等温線、結晶水、毛管水

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化現象のひとつとして、遅延エトリングタイト生成（以下、DEF と記載。）が知られる。DEF は、初期高温履歴を受けたマスコンクリート内部で組織が硬化した後に、温度降下に伴い遅れて生成されるエトリングタイトによる膨張が原因とされているが、エトリングタイトの生成・膨張メカニズムやマクロな体積変化の性状については完全には解明されていない。

エトリングタイトの結晶構造は、古くから研究がおこなわれており、Moore and Taylor によってはじめて報告されている¹⁾。また、エトリングタイトの乾燥・加熱に伴う結晶水の変化について Skoblinskaya *et al.*をはじめとして、数多く報告されている^{2),3)}。同様に、エトリングタイトの乾燥・加熱に伴う格子定数の変化についても Shimada and Young をはじめとして、数多く報告されている^{4),5)}。一方で、湿度変化に伴うエトリングタイトの結晶水の変化や格子定数の変化がマクロな体積変化の挙動⁶⁾に及ぼす影響については明らかになっていない。

上記のような背景から、本論文では、湿度変化に伴うエトリングタイトのマクロな体積変化メカニズムを解明するための基礎的検討として、SEM による形状観察と、X線回折測定による定性分析を行った合成エトリングタイトを対象に、粉末試料およびペレット試料の水蒸気吸脱着等温線とペレット試料のひずみ等温線を実験的に取得し、湿度変化に伴う合成エトリングタイトの水分とひずみの関係について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および試料の作製

エトリングタイトの合成材料には、Goetz-Neunhoeffler *et al.*の手法⁷⁾を参考に、酸化カルシウム、硫酸アルミニウム無水物、蒸留水を用いて合成を行った。酸化カルシウム

は、炭酸カルシウム（JIS K8617 特級適合品）を小型電気炉にて 1 時間、900°C で強熱して得られた。硫酸アルミニウム無水物は、硫酸アルミニウム水和物を小型電気炉にて 1 時間、300°C で強熱して得られた。なお、硫酸アルミニウム水和物を強熱で無水化した理由は、市販の試薬が 14~18 水和物と結合水量に分布をもったモル量を正しく計量するためであり、合成における強熱の必要性は特にないと考えられる。蒸留水は、市販の蒸留水をマイクロ波オーブンにて 10 分程度沸騰させることで脱炭処理を行ってから用いた。

エトリングタイトの合成は、窒素雰囲気中に保たれたグローブボックス内で前述のように作製した酸化カルシウム、硫酸アルミニウム無水物を mol 比 6:1 で混和した粉体および質量あたりの液固比 10 で蒸留水を加え、ポリプロピレン製のボトルに密封した。なお、蒸留水は前述の脱炭処理を行った直後の高温状態のまま使用した。密封したボトルは、20°C に保たれた恒温室にてローターを用いて、毎分 80 回転で 4 週間攪拌を行った。その後、ボトルを開封し、得られたスラリーを、ブフナー漏斗、電動アスピレータを用いて、多量のアセトンとともに減圧濾過を行い、粉末試料を得た。

ペレット試料の作製は、上記の手順で得られた粉末試料を 1.5 g 秤量し、内径 20 mm、高さ 54.9 mm の圧縮成型金型に入れ、アムスラー式万能試験機を用いて載荷を行った。載荷は、1.0 kN/sec. (≒3.2 MPa/sec.) で行い、180 kN (≒573 MPa) に到達した時点で 10 秒間、一定荷重を維持してから除荷した。ペレット試料のサイズは、直径 20 mm、厚さ 2 mm のものが作製された。

2.2 測定項目および手順

(1) SEM による合成物の形状の観察

合成した粉末試料は、24 時間、40°C で真空乾燥を行ってから、カーボンコーティングを施し、走査型電子顕微

*1 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

鏡 (KEYENCE 製, 型式: VE-9800, 分解能: 8 nm) を用い, 加速電圧: 1.4 kV, 倍率: $\times 7500$ の条件で二次電子像の撮影を行った。

(2) X線回折測定による定性分析

合成物は, 粉末試料, ペレット試料ともに, X線回折測定を行い, 鉱物組成の定性分析を行った。測定は, X線源: Cu-K α , 管電圧: 40 kV, 管電流: 40 mA, 走査範囲: $2\theta=5\sim 65^\circ$, スキャンスピード: $5^\circ/\text{min}$ で反射法により行った。得られたXRDパターンに対して, Ettringite, Monosulfate, Lime, Calcite, Portlandite, Millosevichite, Aluminum sulfate hexadecahydrate, Alunogenの文献値^{8),9)}と回折ピークの位置の比較を行い, 鉱物組成の定性分析を行った。

(3) 40°C 真空乾燥条件における結合水率の測定

結合水率は, 1時間, 900°Cで強熱後の試料を無水物, 強熱減量分を結合水と仮定して以下のように測定した。粉末試料を前処理として24時間, 40°Cで真空乾燥を行った後, アルミナるつぼに0.5 gずつ秤量し, 小型電気炉にて1時間, 900°Cで強熱を行った。るつぼは, 300°C付近まで自然放冷を待ってから乾燥デシケータに移し, 20°Cまで放冷し, 質量を測定した。測定には, 分析天秤 (精度: 0.1mg) を用いた。

(4) ペレット試料の密度および飽和含水率の測定

ペレット試料の密度および飽和含水率は, 1時間の減圧水中含浸の後を表乾状態, 24時間, 40°Cで真空乾燥後を絶乾状態と仮定して以下のように測定した。ペレットを十分な量の精製水に浸漬させ, 電動アスピレータを用いて, 1時間, 減圧水中含浸を行った後, 表面の水分をウェスでふき取り, 表乾質量とアルキメデス法によるみかけの密度を測定した。その後, 24時間, 40°Cで真空乾燥を行ってから絶乾質量を測定した。測定には, 分析天秤 (精度: 0.1 mg) を用いた。上記の測定手順から得られる飽和含水率は, 後述のペレット試料の吸脱着等温線において, 吸脱着過程とともに原点および飽水時 (100% RH) の値として用いた。

(5) 水蒸気吸脱着等温線の測定

粉末試料とペレット試料の水蒸気吸脱着等温線の測定は, 20°Cに保たれた恒温室にて塩飽和を利用したデシケータ法により行った。

粉末試料の吸着過程は, 前処理として24時間, 40°Cで真空乾燥を行ってから所定の湿度に調湿したデシケータ内に0.5 gずつPS製トレイに秤量した粉末試料を静置した。所定の湿度は, 11%, 33%, 40%, 60%, 80%, 95%RHである。粉末試料の脱着過程は, 前処理として24時間, 40°Cで真空乾燥を行った後, 95%RHのデシケータ内で調湿し, 恒量になった粉末試料を吸着過程と同様に, それぞれのデシケータ内に0.5 gずつ静置した。

ペレット試料の吸着過程は, 前処理として24時間,

40°Cで真空乾燥を行ってから, 2つの試験片を低湿から高湿のデシケータへ順繰りに, 各デシケータ内で恒量になるのを待ってから移動させた。所定の湿度は, 11%, 33%, 40%, 60%, 80%, 95%RHである。脱着過程は, 前処理としてペレットを十分な量の精製水に浸漬させ, 電動アスピレータを用いて, 1時間, 減圧水中含浸を行った後, 2つの試験片を高湿から低湿のデシケータへ, 吸着過程とは逆の順序で, 各デシケータ内で恒量になるのを待ってから移動させた。ペレット試料の吸脱着等温線は, 2つの試験片の平均値とした。

静置した粉末試料とペレット試料ともに, 3日おきにデシケータ内からトレイごと取り出し質量を測定する作業を恒量になるまで繰り返した。測定には, 分析天秤 (精度: 0.1 mg) を用いた。恒量の判定とする質量変化は, 0.1%/3dayとした。デシケータ内の調湿はそれぞれ, 11% RH: LiCl, 33% RH: MgCl₂, 40% RH: NaI, 60% RH: NaBr, 80% RH: KBr, 95% RH: KNO₃を用い, 温湿度ロガー (testo製, 型式: 174H, 精度: $\pm 0.5^\circ\text{C}$, $\pm 3\%$ RH) でモニタリングを行った。デシケータ内には, 二酸化炭素吸収材 (矢橋工業製) を設置し, 脱炭処理を行った。

(6) ペレット試料のひずみ等温線の測定

ペレット試料のひずみ等温線の測定は, 20°Cに保たれた恒温室にて塩飽和を利用したデシケータ法により行った。前処理は, ペレット試料の吸脱着等温線の測定と同様にを行い, ペレット両面にひずみ測定用のワイヤストレーンゲージ (東京測器製, 型式: FLA-1-11-3LT, 精度: 1×10^{-6} , 限界ひずみ: 5%, 接着剤: PS) の貼付, ゲージの防水処理を施したのち, 再度, 前述の前処理を行った。ペレット試料の試験片は, 吸脱着過程ともに2枚ずつ用意した。前処理後のペレットをデシケータ内に静置し, ひずみをデータロガーで経時的に測定した。デシケータ内の調湿湿度は, 1週間ごとにデシケータ内の調湿用試薬を取り換えることで, 順繰りに変化させた。デシケータ内には, 二酸化炭素吸収材 (矢橋工業製) を設置し, 脱炭処理を行った。吸着過程は, 調湿湿度を11%, 33%, 40%, 60%, 80%, 95% RHの順にひずみ変化を測定した後, ペレットを十分な量の精製水に浸漬させ, 電動アスピレータを用いて, 1時間, 減圧水中含浸を行い, 測定終点とした。脱着過程は, 吸着過程の逆の順序で変更した。ひずみと湿度は10分おきに取得した。各湿度におけるひずみの恒量点は, 1週間の期間内に恒量に至らなかった場合, 推定式との最小二乗法による回帰値とみなす外挿法を採用した。外挿法に用いた式は, 多田らが提案する動的方法による質量の恒量点の推定式をひずみの恒量点の推定に修正したものである^{10),11)}。

$$m(t) = a[1 - b \exp(-ct)] \quad (1)$$

ここで、 $m(t)$: 任意の湿度下での有限時間経過後の試料の伸び、 a, b, c : フィッティングパラメータであり、それぞれ、任意の湿度下での無限時間経過後の試料の伸び、試料の形態に係る係数、試料の拡散係数 $\times \pi^2$ /材料の半径 R^2 、 t : 測定継続時間である。

3. 実験結果および考察

3.1 合成試料の確認

合成された試料の構成相の確認は、二次電子像による粉末試料の結晶形状の観察および粉末試料、ペレット試料のX線回折パターンの定性分析から行った。撮影された二次電子像を図-1に示し、測定されたXRDパターンをMoore and Taylorの回折パターンと比較したものを図-2に示す。図-1に示されるように、粉末試料は既往の文献⁷⁾と同様に、エトリンサイトとみられる針状結晶で構成されていることが確認された。図-2に示されるように、粉末試料およびペレット試料はともに、エトリンサイトの回折ピークの位置が文献値⁷⁾と一致し、他のピークが検出されないこと、バックグラウンド強度が小さいことから、合成に用いた原料がすべて消費され、モノサルフェートなどの他相を生成せずに、エトリンサイトの単相が適切に合成されていると判断した。また、ペレット化の手順において、モノサルフェートなどへの変化を生じていないことを確認した。

3.2 結合水率、飽和含水率、密度

粉末試料の強熱から測定した 40°C 真空乾燥条件下のエトリンサイトの結合水率とペレット試料の乾燥から測定したペレットの飽和含水率を表-1に示す。なお、結合水率(質量比)の算出は、40°C 真空乾燥時での試料質量ではなく、900°C 強熱時の試料質量を分母とした。なお、飽和含水率のモル比による整理および考察は、飽和含水率に対して、表中上段の結合水率の実験値を用いて進める。表-1に示されるように、40°C 真空乾燥環境下の結合水率は、10.1 (mol/mol)となり、既往の文献値とおおよそ整合した^{3),12),13)}。一方、飽和含水率と結合水率を足し合わせた総水分量は、44.1 (mol/mol)となり、一般に知られるエトリンサイト 32 水和物よりも大きな値となった。これは、ペレット化に伴い生じた毛管空隙構造へと毛管水が侵入したためと考えられる。

水中浸漬でのアルキメデス法によるみかけの密度および真空乾燥による減量から算出した真密度を表-2に示す。真密度の算出には、真空乾燥による減量がすべて体積変化を伴わない水分の蒸発によると仮定し、質量減少量を飽水時にアルキメデス法から得られた体積で除した。真密度に着目すると、エトリンサイトの文献値よりもはるかに高く、水和物としてありえない値であることから¹⁴⁾、水分の蒸発に伴ってペレット試料が収縮してい

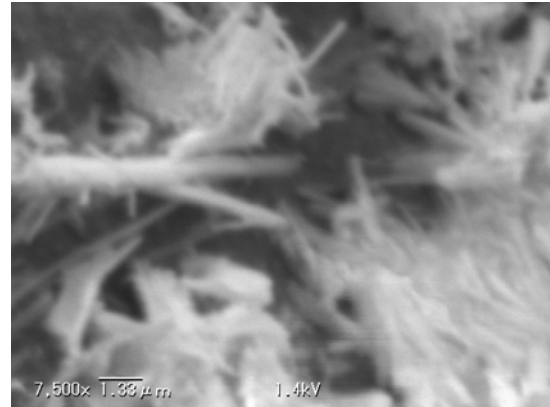


図-1 粉末試料の二次電子像 (x7500)

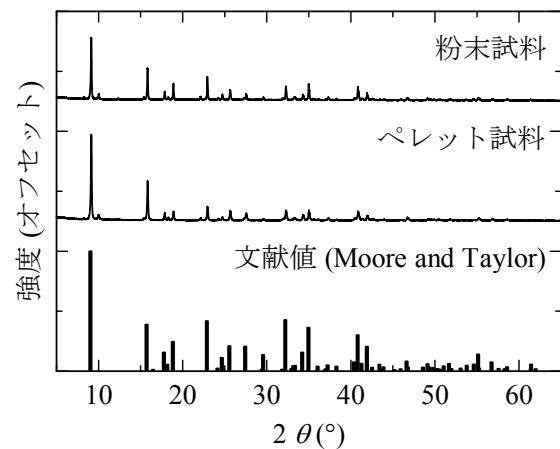


図-2 合成物の XRD パターン

ることが間接的に確認された。みかけの密度に着目すると、文献値よりも低い値が得られた。これは、前述のようにペレット化に伴い毛管空隙構造が生じたためと考えられる。このことから、エトリンサイト 32 水和物から余剰な水分が、結晶格子内に存在するか毛管空隙内にあるか下式で分離を行った。なお、毛管水の密度は、自由水と同じ値 ($=1.0 \text{ g/cm}^3$) と仮定した。

$$H_s = H_{cry} + H_{cap} \quad (2)$$

$$H_{cap} = \left[\{M_{32Et} + (H_s - H_{32Et}) \cdot M_H\} / \rho_p - V_{32Et} \right] / V_H \quad (3)$$

ここで、 H_s : 総水分量 (mol/mol), H_{cry} : 飽水状態のエトリンサイトの結晶水量 (mol/mol), H_{cap} : 毛管水量 (mol/mol), H_{32Et} : エトリンサイト 32 水和物の結晶水量 ($=32 \text{ mol/mol}$), M_{32Et} : エトリンサイト 32 水和物の分子量 ($=1255 \text{ g/mol}$), M_H : 水の分子量 ($=18 \text{ g/mol}$), ρ_p : ペレットのみかけの密度 (g/cm^3), V_{32Et} : エトリンサイト 32 水和物のモル体積 ($=717 \text{ cm}^3/\text{mol}$), V_H : 水のモル体積 ($=18 \text{ cm}^3/\text{mol}$)である。

得られた結果を、表-3に示す。上記の結果から、本検討で合成したエトリンサイトは、飽水状態においてエ

トリンガイト 32 水和物よりも結晶水が多いが、既往の報告の範囲内にあることが確認された¹⁴⁾。なお、上式による結晶水量の同定は、エトリンガイト 32 水和物の結晶格子の格子定数が変化しないことを前提としているため、真密度において考察したように 40°C 真空乾燥などの強い乾燥条件下においては、誤差を生じる可能性があることを付記する。

3.3 水蒸気吸脱着等温線

粉末試料およびペレット試料の水蒸気吸脱着等温線をそれぞれ図-3、図-4に示す。ここで、粉末試料については吸着側、ペレット試料については脱着側の 40°C 真空乾燥後の質量を原点とした。これは、ペレット試料の吸着側の終点である飽水点 (100%RH) での測定時にペレット試料が溶解や減圧に伴う脱泡により破壊を生じ、誤差を生じるリスクを排除するために測定を行わなかったためであり、図-4において吸着側の最終点は点線で結んだ。また、質量変化について、エトリンガイトと水の分子比に換算したものを R 軸に示した。図-3に示されるように、粉末試料の水蒸気吸着等温線は、形状に加えて、脱着過程の 95~11%RH のすべての測定点で、総水分量は、31.5~33.0 (mol/mol) の範囲に収まっており、Skoblinskaya and Krasilnikov の報告と同様の傾向であることが確認された²⁾。また、塩飽和による乾燥では、30 (mol/mol) までしか乾燥しない傾向については、Baquerizo *et al.* の報告と一致した¹³⁾。加えて、前節で同定した飽水状態の結晶水量の値とも整合性が確認された。以上から、吸着過程においては、前処理乾燥によりメタエトリンガイトに変化したエトリンガイトが元の状態に回復することにより得られる吸着パターンであると考えられる¹⁵⁾。

同様に、図-4に示されるように、ペレットの吸脱着等温線についても図-3と基本的には同様の形状であることが確認された。

粉末試料とペレット試料の水蒸気吸脱着性状を比較するために、表-3の飽水時の結晶水量とともに重ね書きしたものを図-5に示すが、着目すべき相違は3点みられる。1点目は、吸着過程において、40% RH までは完全に一致が見られるが、総水分量が 13 (mol/mol) から 32 (mol/mol) へ移行する際の立ち上がり時の湿度に相違がみられる。これは、ペレット化に伴い、粒子間で拘束応力がはたらき結晶格子の変形が抑制されることで、メタエトリンガイトからエトリンガイトへの相変化の平衡点が高圧側にシフトし、内部への水蒸気の侵入が妨げられたためと考えられる。2点目は、ペレットの飽水点 (100% RH) にみられる毛管水についてである。脱着過程の 95% RH 以下の値に着目すると、表-3の飽水時の結晶水量とほぼ同じであることから、毛管水は、飽水から 95% RH までの範囲で、ほとんど蒸発しており、95% RH 以下の

表-1 エトリンガイトの水分特性

	g/g	mol/mol
結合水率	0.268 (900°C 時質量基準)	10.1
飽和含水率	0.711 (40°C 時質量基準)	34.0*
総水分量	—	44.1*

*結合水率の値を用いた計算値

表-2 ペレットの密度 (g/cm³)

みかけの密度	1.63
真密度	2.96*

*減量がすべて体積変化を伴わない水分の蒸発と仮定した場合の計算値

表-3 ペレット内の水の存在形態 (mol/mol)

結晶水量	毛管水量	総水分量*
33.7	10.4	44.1

*表-1の値を転記

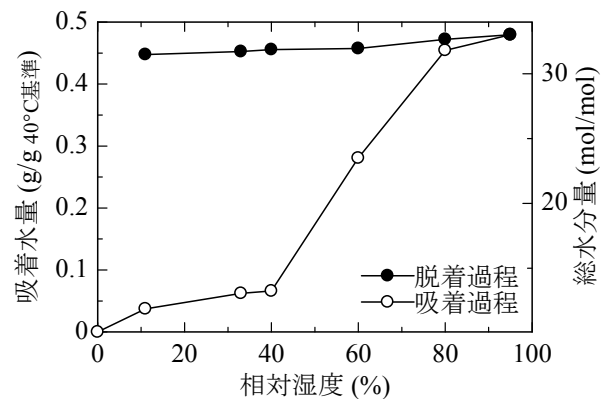


図-3 粉末試料の吸脱着等温線

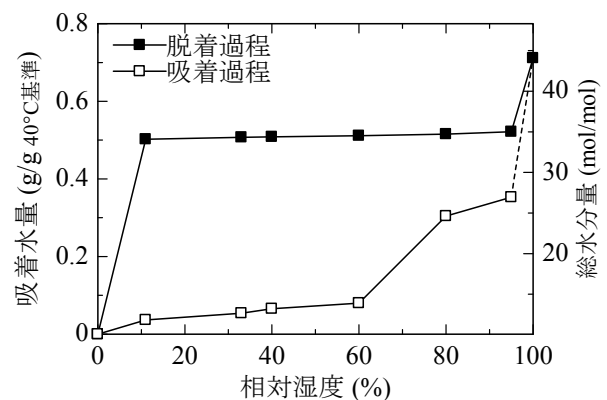


図-4 ペレット試料の吸脱着等温線

範囲においては、粉末試料、ペレット試料ともに結晶水量の変化とみなせると考えられる。3点目は、脱着過程における総水分量の差異である。こちらも1点目の考察と同様に、ペレット化に伴い、外部への水分の蒸発が妨げられたことによって、差異が生じたためと考えられる。

以上の考察をまとめると、95% RH 以下の体積変化と水蒸気吸着性状の関係について考察するには、粉末試料の水蒸気吸脱着等温線を取得するだけで、必ずしもペレット試料の水蒸気吸脱着等温線を取得する必要はないことが示唆された。

3.4 ひずみ変化等温線

デシケータ内に静置したペレットの2つの試験片のひずみの平均値および湿度の経時変化を吸着過程については図-6、脱着過程については図-7に示す。ここでは、暫定的にひずみの原点は吸脱着過程それぞれで測定の開始点として示した。図-6および図-7に示される経時変化への式(1)による回帰から得られた各湿度における恒量点を同定し、得られたひずみ等温線を図-8に示す。なお、ひずみの原点については、吸着過程の測定開始点として整理を行った。図-8に示されるように、ひずみ等温線は、図-5に示した吸脱着等温線と同様にヒステリシスが生じる傾向が確認された。ここで、95% RH—飽水間のひずみに着目すると、吸着過程では、 $\Delta \epsilon_{ad95-100} = 55 \times 10^{-6}$ 、脱着過程では、 $\Delta \epsilon_{de100-95} = 23 \times 10^{-6}$ とひずみ等温線全域におけるひずみ変化と比較して極めて小さい。一方で、前節での考察から95% RH—飽水間の質量変化は、ほぼすべて毛管水量の変化とみなせることから、95% RH—飽水間のひずみは毛管水によって生じる毛管張力の変化によるひずみ変化と考えられる。このことについて考察するために、ペレット試料のひずみ等温線と総水分量の関係について、表-3の飽水時の結晶水量とともに図-9に示す。図-9に示されるように、総水分量に対するひずみ変化として整理すると、上述の毛管水量の変化は、ひずみ変化にほとんど寄与していないことがわかる。毛管張力は、毛管空隙内の毛管水から形成されるメニスカスの半径によって決定するので、毛管水量の変化によるひずみ変化が生じないということは、エトリンガイトのペレット試料において、毛管張力の変化に伴うマクロな体積変化は生じないとみなせる。

一方で、総水分量の変化に対して大きなひずみ変化を伴う領域が2ヶ所あり、1点目は、10~14 (mol/mol)であり、2点目は34~35 (mol/mol)である。これは、それぞれメタエトリンガイト、エトリンガイトの結晶水量の変化に対応していると考えられる¹³⁾。このことから、エトリンガイトのマクロな体積変化メカニズムは、結晶構造の変化の中でも、メタエトリンガイトからエトリンガイトへの結晶相の変化ではなく、メタエトリンガイト、エトリンガイトそれぞれの結晶水量の変化に伴う結晶格子の格子定数の変化であることが示唆された¹³⁾。

今後の方針としては、DEFによる膨張メカニズムについて明らかにするために、各湿度環境における電子線回折を測定項目に追加し、モノサルフェートを出発点とし

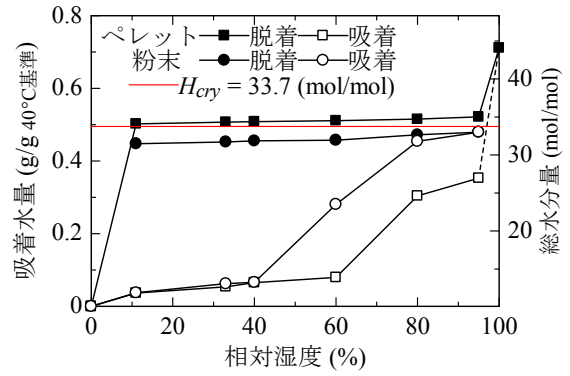


図-5 粉末試料とペレット試料の比較

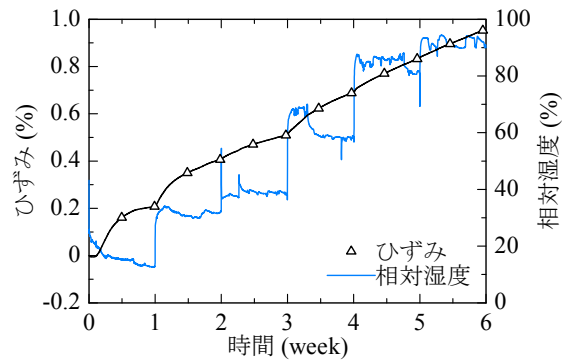


図-6 吸着過程のひずみ、湿度の経時変化

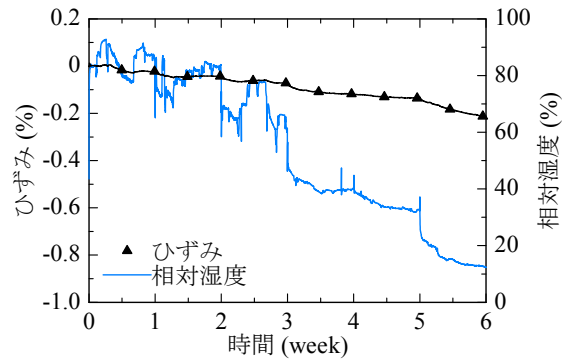


図-7 脱着過程のひずみ、湿度の経時変化

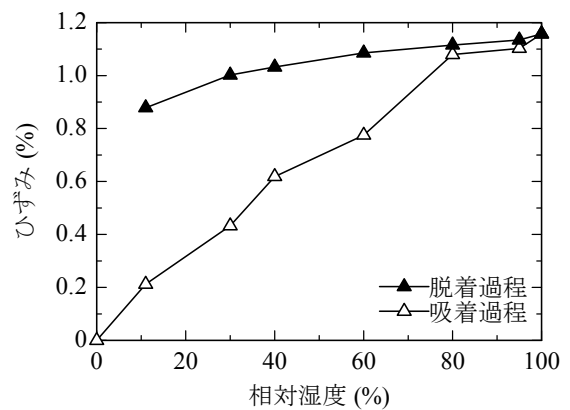


図-8 ペレット試料のひずみ等温線

たペレット試料を作製し、モノサルフェートからエトリンサイトへの結晶相が変化する系において、本検討と同様の検討を進める予定である。

4. まとめ

本検討では、エトリンサイトの合成を行い、粉末試料とペレット試料のさまざまな乾燥状態における水分変化とひずみ変化を実験的に取得し、エトリンサイトの体積変化メカニズムに関して得られた知見を以下に示す。

- (1) 本検討に示した合成手順により、エトリンサイトとみなせる単相の粉末試料が得られること、ペレット化により単相が維持されることが確認された。
- (2) 飽水状態のペレットは、33.7 (mol/mol)の結晶水をもつエトリンサイトと 10.4 (mol/mol)の毛管水で構成されていることが同定された。
- (3) 粉末試料の水蒸気吸脱着等温線は、結晶水量の変化、ペレット試料の水蒸気吸脱着等温線は、95% RH 以上が毛管水量の変化で、95% RH 以下が結晶水量の変化とみなせる。
- (4) エトリンサイトのマクロな体積変化メカニズムは、毛管空隙内の毛管水によって生じる毛管張力の変化ではないことが確認された。
- (5) エトリンサイトのマクロな体積変化メカニズムは、メタエトリンサイト、エトリンサイトの結晶水量の変化に伴う格子定数の変化であることが示唆された。

謝辞

本研究の成果の一部は、JSPS 科研費 15H04077 (代表：丸山一平)、26889008 (代表：五十嵐豪) の助成を受けて得られた。ここに付記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) Moore, A.E., Taylor, H.F.W.: Crystal structure of ettringite, *Nature*, Vol.218, pp.1048-1049, 1968
- 2) Skoblinkaya, N.N., Krasilnikov, K.G.: Changes in crystal structure of ettringite on dehydration. 1, *Cement and Concrete Research*, Vol.5, No.4, pp.381-394, 1975
- 3) Skoblinkaya, N.N., Krasilnikov, K.G., Nikitina, L.V., Varlamov, V.P.: Changes in crystal structure of ettringite on dehydration. 2, *Cement and Concrete Research*, Vol.5, No.5 pp.419-432, 1975
- 4) Shimada, Y., Young, J.F.: Structural changes during thermal dehydration of ettringite, *Advances in Cement Research*, Vol.13, No.2, pp.77-81, 2001
- 5) Renaudin, G., Filinchuk, Y., Neubauer, J., Goetz-Neunhoffer, F.: A comparative structural study of wet and dried ettringite, *Cement and Concrete Research*,

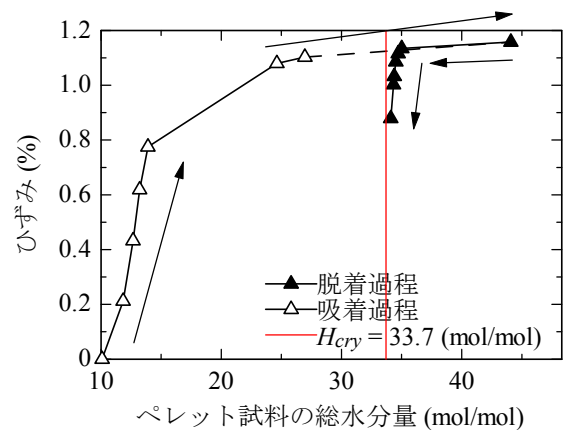


図-9 ペレット試料のひずみと総水分量の関係

Vol.40, No.3, pp.370-375, 2010

- 6) Mehta, P.K., Hu, F.: Further evidence for expansion of ettringite by water adsorption, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.61, No.3-4, pp.179-181, 1978
- 7) Goetz-Neunhoffer, F., Neubauer, J., Schwesig, P.: Mineralogical characteristics of Ettringites synthesized from solutions and suspensions, *Cement and Concrete Research*, Vol.36, No.1, pp.65-70, 2006
- 8) Downs, R.T., Hall-Wallace, M.: The American Mineralogist Crystal Structure Database, *American Mineralogist* Vol.88, pp.247-250, 2003
- 9) Sun, X., Sun, Y., Yu, J.: Crystal structure of aluminum sulfate hexadecahydrate and its morphology, *Crystal Research and Technology*, Vol.50, No.4, pp.293-298, 2015
- 10) 多田眞作, 孫喜山, 渡辺一正: セメント系硬化体の水蒸気吸着等温線の動的測定, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.22, No.2, pp.775-780, 2000
- 11) Maruyama, I., Igarashi, G., Nishioka, Y.: Bimodal behavior of C-S-H interpreted from short-term length change and water vapor sorption isotherms of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.73, pp.158-168, 2015
- 12) Zhou, Q., Glasser, F.P.: Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120°C, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.9, pp.1333-1339, 2001
- 13) Baquerizo, L.G., Matschei, T., Scrivener, K.L.: Impact of water activity on the stability of ettringite, *Cement and Concrete Research*, Vol.79, pp.31-44, 2016
- 14) Balonis, M., Glasser, F.P.: The density of cement phases, *Cement and Concrete Research*, Vol.39, No.9, pp.733-739, 2009
- 15) Zhou, Q., Lachowski, E.E., Glasser, F.P.: Metaettringite, a decomposition product of ettringite, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.4, pp.703-710, 2004