

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04124

研究課題名（和文）非晶質構造解析による地球表層に分布するポリアモルファス物質の実態解明

研究課題名（英文）Study on the polyamorphous materials distributed in the Earth's surface using amorphous structural analysis

研究代表者

興野 純 (Kyono, Atsushi)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：40375431

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,675,000円

研究成果の概要（和文）：大気中の二酸化炭素を炭酸塩鉱物として地下に固定する二酸化炭素回収貯留（CCS）技術は、長期間安定に二酸化炭素を隔離できる方法として注目されている。炭酸マグネシウム水和物は地下に固定される主要鉱物の一つである。本研究では、炭酸マグネシウム水和物に由来する非晶質炭酸マグネシウムの構造を明らかにすることを目的に実施した。本研究によって、非晶質炭酸マグネシウムには少なくとも3種類の構造が存在していることが分かった。これによって地球上に分布するアモルファス物質には実は異なる構造を持つポリアモルファスが存在することが分かり、今後はそれぞれのアモルファス物質ごとの性質の違いを明らかにすることが必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アモルファス物質は、土壤中だけでなく河川や海洋にも普遍的に含まれている。アモルファス物質は、熱変成や水質変成などの変成作用や、水中に溶け出した物質のゾルゲル反応など、様々な要因によって容易に生成される。アモルファス物質は、重元素を濃集したり、水や有機物を取り込み運搬したり、地球上で非常に重要な役割を担っている。しかし、これまではアモルファス物質がどのような構造を持つのか、まったく理解できていなかった。本研究によって非晶質炭酸マグネシウムの構造が明らかになり、少なくとも3種類の異なる構造を持つという事実が明らかになったことは大きな成果であり、今後の展開につながる重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：Carbon dioxide Capture and Storage (CCS) technology has attracted considerable attention as a promising method for long-term, stable carbon dioxide sequestration. Magnesium carbonate hydrates are one of the major mineral species occurring the CCS process. The aim of this study was to clarify the structure of amorphous magnesium carbonate derived from the magnesium carbonate hydrates. This study revealed that there are at least three different structures of amorphous magnesium carbonate. This indicates that there are actually polyamorphous materials with different structures distributed on the Earth's surface, and it is necessary to clarify the properties of each polyamorphous materials in the future.

研究分野：鉱物学，地球惑星科学

キーワード：二酸化炭素回収貯留 炭酸マグネシウム Hydromagnesite Dypingite Nesquehonite 非晶質炭酸マグネシウム (AMC) ポリアモルフィズム

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、環境問題には大きな関心が寄せられているが、中でも地球温暖化は関心が高い問題である。地球温暖化対策として CO₂ 地中固定技術に注目が集まっている。CO₂ 地中固定技術は、CO₂ を炭酸塩岩として地中に固定する方法であり、この方法が現在最も安定的に長期間 CO₂ を固定できる有力な方法と考えられている。地下に炭酸塩岩として固定される過程で出現する鉱物種に、炭酸マグネシウム水和物がある。主な炭酸マグネシウム水和物には、hydromagnesite Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·4H₂O (Hmgs), dypingite Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·5H₂O (Dyp), nesquehonite MgCO₃·3H₂O (Nes), Amorphous Magnesium Carbonate (ACC)がある。炭酸マグネシウム水和物は地下水の温度により、沈殿する相が変化する。また、炭酸マグネシウム水和物の前駆体として AMC が形成されることも知られているが、その構造やその温度依存性についてはほとんど理解されていない。

2. 研究の目的

そこで、本研究では異なる温度で得られる炭酸マグネシウム水和物と AMC に対して、放射光 X 線全散乱測定による 2 体相関分布関数法(PDF 法)を適用し、前駆体の AMC と結晶相の構造を比較して、炭酸マグネシウム水和物の構造と形成プロセスを明らかにした。さらに、AMC の結晶化過程における構造変化を、PDF 解析および XAFS 法を用いて調べた。

3. 研究の方法

AMC と炭酸マグネシウム水和物相は、MgCl₂ 水溶液と Na₂CO₃ 水溶液を、20, 60, 80 °C の温度で混合し合成した。さらに、水溶液中で AMC から Nes に結晶化する過程での AMC の構造変化と、水溶液中のアルカリ金属イオンが AMC の結晶化にどのような影響を及ぼすかを明らかにするために、Na₂CO₃, K₂CO₃, Rb₂CO₃, Cs₂CO₃ の 4 種類の異なる水溶液を用いて実験を行った。放射光 X 線全散乱測定は、SPring-8 の BL22XU に設置された κ 型多軸回折計を用い、XAFS 測定は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)放射光施設(PF)の BL11A で行った。

4. 研究成果

(1) AMC の構造と温度依存性

図 1 に、Hmgs と Nes の結晶構造を示す。Hmgs は、MgO₆ 八面体と CO₃ 基からなるシートが、MgO₆ 八面体と CO₃ 基からなる波状の層に挟まれた複雑な構造をしている(図 1a)。また、Hmgs 構造中には水素結合ネットワークはほとんど形成されていない。Dyp の結晶構造はいまだに解明されていないが、Hmgs に類似した近距離構造を有し、長距離構造のみが異なると考えられている。一方、Nes は b 軸方向に走る無限の MgO₆ 八面体リボンから構成されている(図 1b)。Nes のリボンは MgO₆ 八面体が c 軸に平行な 3 つの CO₃ 基に結合したものであり、水分子の水素結合ネットワークによって 3 次的に相互接続されているのが特徴である。

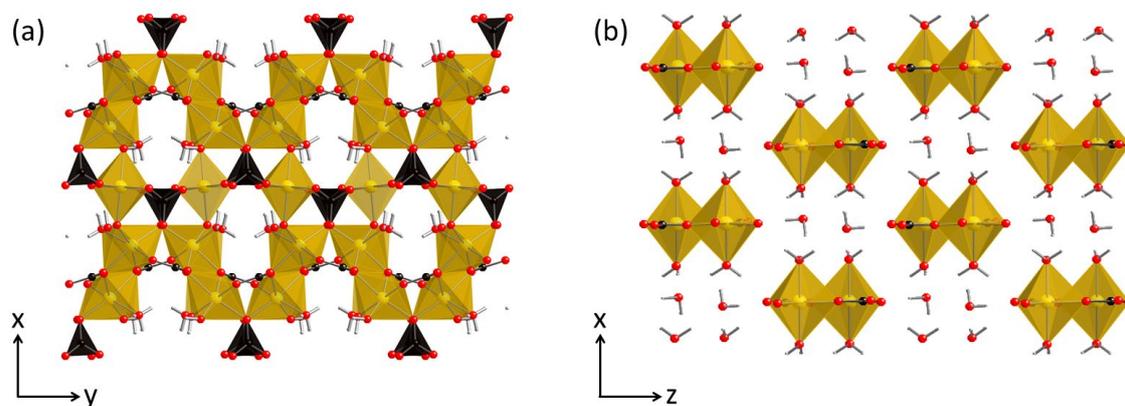


図 1. (a) Hmgs と (b) Nes の結晶構造。黄色が MgO₆ 八面体，黒色が CO₃ 基，赤が酸素，灰色の長棒が OH 基を示す。

図 2 に、20, 60, 80 °C で得られた AMC と Hmgs, Dyp, Nes の PDF パターンを示す。AMC は加熱温度によって異なる炭酸マグネシウム水和物に結晶化すること分かっている。本研究では、20 °C では Nes, 60 °C では Dyp, 80 °C では Hmgs に結晶化することを確かめている(Yamamoto et al., 2021a, 2021b, 2022)。我々は、Hmgs 構造をもとに AMC の構造解析を行った。AMC の PDF パターンを Hmgs 構造でフィッティングした結果、1.3 Å, 2.1 Å, 3.1 Å に観測される原子間相関のピークは、それぞれ Hmgs の C-O 結合, Mg-O 結合, Mg-Mg ピークに対応していた(図 2a, b)。また、4.2 Å に観測されたピークは、Hmgs の Mg と O 原子の第二配位間の相互作用で説明できることが分かった(図 2a, b)。さらに、本研究の結果で特筆すべきことは、20 °C で形成された AMC と 80 °C で形成された AMC がどちらも Hmgs の短距離秩序構造とよく一致したことである(図 2a)。そこで、次のような疑問が生まれた。「20 °C で生成した Nes の前駆体である AMC の構造が 80 °C で形成する Hmgs の構造を持ち、結晶化すると Nes と Hmgs の構造は大きく異なるのはなぜか？」本研究ではその疑問に対する回答を、Nes の結晶構造と相転移特性から考察

した。AMCは室温で攪拌すると、まずNesに結晶化するが、数時間から数日後にはNesはDypに相転移する。この相転移は溶媒媒介転移(solvent-mediated transformation)によるものと考えられている(Tanaka et al., JMPS, 2019)。つまり、Nesの溶解度積は $K_{sp-Nes}=10^{-5.31}$ であるのに対し、Dypの溶解度積は報告されていないが、DypがHmgsと構造が類似していると仮定するとHmgsの溶解度積は $K_{sp-Hmgs}=10^{-36.77}$ であり、Nesよりもはるかに小さい。そのため、Nesが溶解するとHmgsと構造が類似したDypが生成する。20℃では、最初にHmgs構造を持つAMCが形成されるが、このAMCを水溶液中で攪拌すると、直ちに水和しNesの長距離秩序構造に変化(結晶化)する。このとき、攪拌された水溶液の環境は、構造中に等方的な水素結合ネットワークを形成するのに有利な環境である。そのため、Hmgs構造を有するAMCは、水和と結晶化の過程でNesに変化する可能性がある。その後、溶媒媒介転移によりNesは溶解するが、本来AMCの近距離構造がHmgs構造であることを考慮すると、静的環境ではAMCからHmgs構造のDypが形成されることは極めて合理的である。

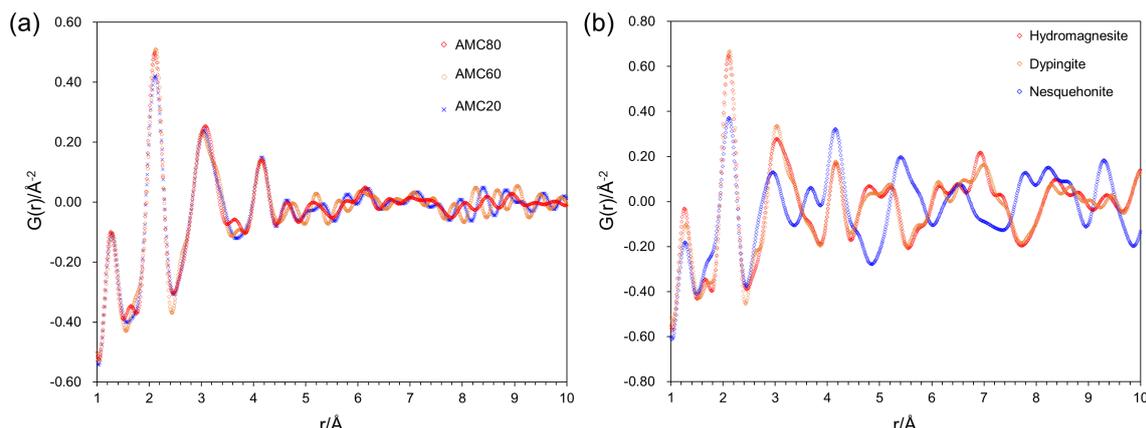


図 2. (a) 20℃, 60℃, 80℃で生成したAMCと(b) Hmgs, Dyp, NesのPDFパターン (Tanaka et al., 2021c). HmgsとNesでは、Mgイオンに6個の酸素原子が配位して MgO_6 八面体を形成していると仮定すると、Nesの MgO_6 八面体の全エネルギーは、Hmgsの全エネルギーよりもわずかに小さい。また、Nesの MgO_6 八面体の歪み指数は、Hmgsの歪み指数よりも明らかに大きい。このようなMg周囲の電子構造や配位構造の違いが、XANESスペクトルの変化に寄与していると考えられる(Yamamoto et al., 2021c)。その結果、Mg周囲の配位構造は温度によってわずかに変化するが、AMCの短距離秩序構造は20℃から80℃までの温度範囲でHmgs構造のまま変化しないと考えられる。

(2) AMCからNesへの結晶化過程

AMCからNesに結晶化する過程でのAMCの構造変化と、水溶液中のアルカリ金属イオンがAMCの結晶化にどのような影響を及ぼすかについて調べた(Yamamoto et al., 2023)。 Na_2CO_3 、 K_2CO_3 、 Rb_2CO_3 、 Cs_2CO_3 の4種類の異なる炭酸種を出発物質に用いて水溶液を作成しAMCを合成した。実験の結果を図3, 4に示す。

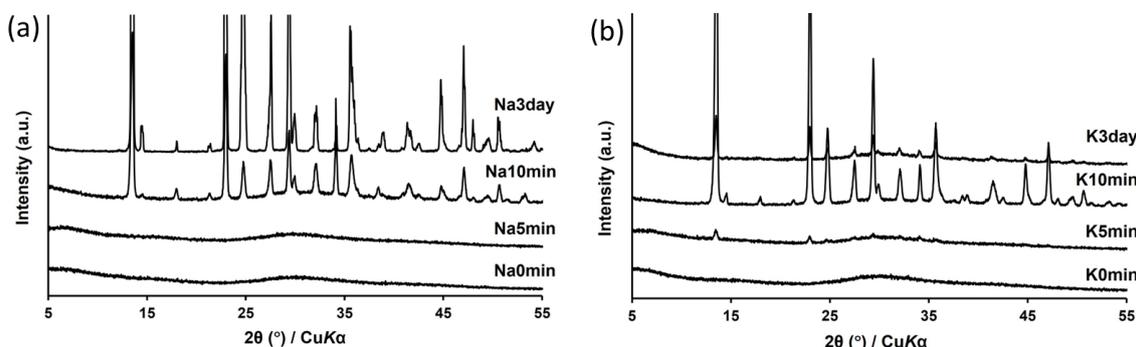


図 3. (a) Na_2CO_3 , (b) K_2CO_3 水溶液から得られた AMC の XRD パターンの時間変化

Na_2CO_3 水溶液の場合は、混合した直後(Na0min)は典型的な非晶質物質の XRD パターンを示した(図 3a)。5 分間攪拌後(Na5min)も AMC の XRD パターンを維持していたが、10 分間攪拌後(Na10min)に Nes に対応する明確な回折ピークを示した。Nes の回折ピークは 3 日後(Na3day)もよく維持されていた。 K_2CO_3 水溶液を混合して生成した AMC(K0min)は、 Na_2CO_3 水溶液から得られたものと同様に AMC の XRD パターンを示した(図 3b)。5 分間攪拌(K5min)すると、Nes の小さな回折ピークがいくつか観察されたが、10 分間攪拌(K10min)で AMC は Nes に結晶化していた。しかし、Nes の回折ピークは 3 日後(K3day)も維持されていたが、いくつかのピーク強度

は明らかに減少していた。これは、Nes から Dyp への溶媒媒介転移が 3 日後には開始していることを示唆している。したがって、AMC は水溶液中の Na イオンや K イオンの影響を受けずに結晶化している。

一方、 Rb_2CO_3 水溶液と Cs_2CO_3 水溶液を用いた場合は、上述の結果とは明らかに異なっていた。実験の結果を図 4 に示す。 Rb_2CO_3 水溶液を混合した直後(Rb0min)は AMC の典型的な XRD パターンを示し、その後 AMC は少なくとも 3 日間は変化しなかった (図 4a)。 Cs_2CO_3 水溶液の場合も、混合直後(Cs0min)と 5 分間攪拌後(Cs5min)では AMC の XRD パターンを示した (図 4b)。しかし、10 分間攪拌後(Cs10min)に Nes の弱い回折ピークを示したが、3 日後(Cs3day)は典型的な AMC の XRD パターンを示した。10 分間攪拌後(Cs10min)に Nes が結晶化した原因は不明であるが、濾過の過程で結晶化した可能性もある。したがって、AMC から Nes への結晶化は、水溶液中に Rb イオンや Cs イオンが存在すると著しく抑制されることが明らかになった。

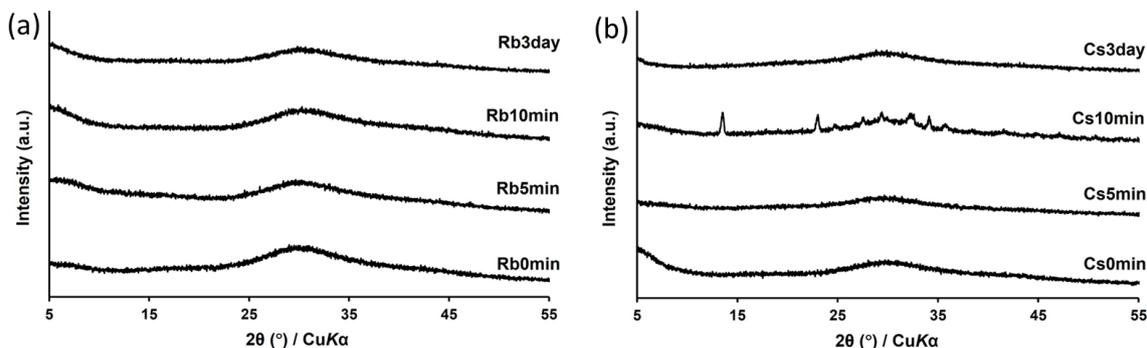


図 4. (a) Rb_2CO_3 , (b) Cs_2CO_3 水溶液から得られた AMC の XRD パターンの時間変化

Na_2CO_3 , Rb_2CO_3 , Cs_2CO_3 水溶液から得られた AMC の PDF パターンの時間変化を図 5 に示す。 Na_2CO_3 水溶液を混合直後(Na0min)の AMC の PDF パターンは、これまでに報告されている AMC と一致しており、 1.0\AA から 4.5\AA の間に特徴的な 4 つのピークが観察された (図 5a)。 1.3\AA と 2.1\AA のピークは、それぞれ C-O 結合と Mg-O 結合に対応する。 3.1\AA と 4.2\AA のピークはそれぞれ Mg-Mg 相互作用と Mg-O 結合に対応している。この PDF パターンを本研究では AMC-I と呼ぶ。 Na_2CO_3 水溶液を混合直後(Na0min)の AMC の PDF パターンは 5\AA を超えると減衰し、これは原子構造が長距離周期性を持たないことを意味している。

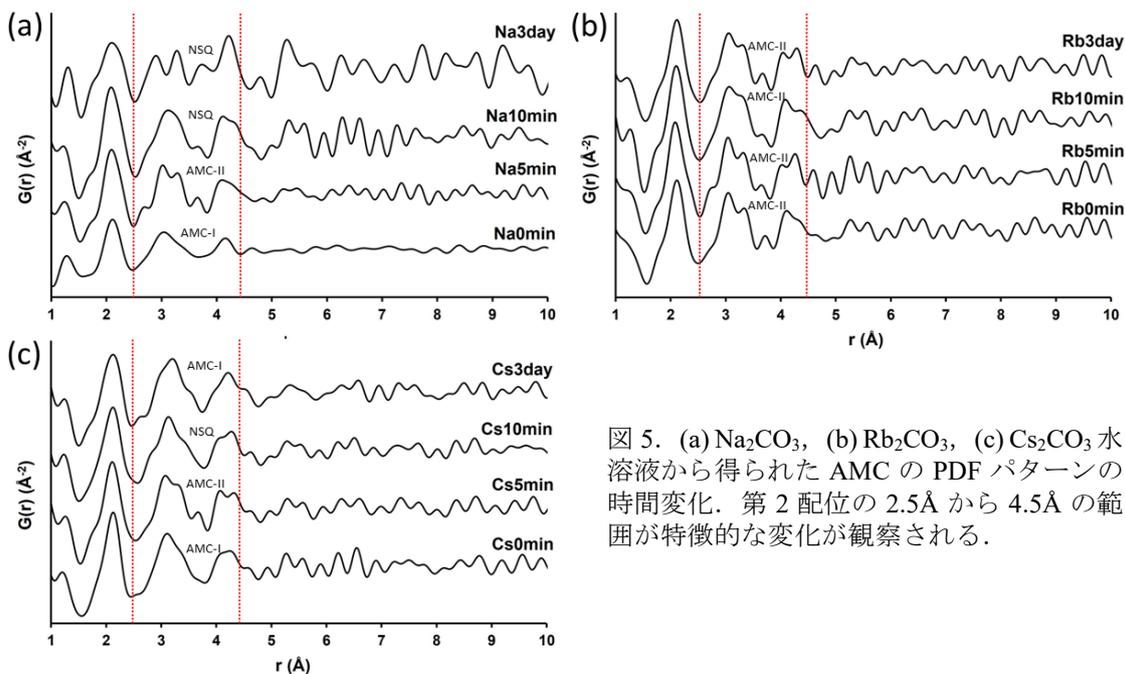


図 5. (a) Na_2CO_3 , (b) Rb_2CO_3 , (c) Cs_2CO_3 水溶液から得られた AMC の PDF パターンの時間変化。第 2 配位の 2.5\AA から 4.5\AA の範囲が特徴的な変化が観察される。

5 分間攪拌(Na5min)すると、第 3 ピークが分裂し、第 3 ピークと第 4 ピークの間に新しいピークが出現していた。一方で、C-O 結合と Mg-O 結合に対応する第 1 ピークと第 2 ピークは本質的に変化しなかった。5 分間攪拌で観測された AMC の PDF パターンを、本研究では AMC-II と呼ぶ。AMC-II は、 5\AA 以上の PDF の振幅がより強くなった。このことは、Mg-O, C-O 結合周囲の第一配位を変化させることなく、AMC の長距離秩序が 5 分後に形成され始めたことを示唆している。続いて、10 分間攪拌(Na10min)で、 3.0\AA と 3.3\AA に分割された第 3 ピークが 1 つのピークに統合されたが、第 1 と第 2 のピークは変化していなかった (図 5a)。 5\AA 以上の PDF の振幅は

次第に強くなり、これはおそらく Nes の形成によるものである。3 日後(Na3day)では、5Å 以上の振幅の強度がより強くなり、Nes の結晶化が進んだことを示唆した。C-O 結合と Mg-O 結合に対応する第 1 と第 2 ピークは変化しなかったが、3Å の第 3 ピークは再び分裂した。本研究で明らかになったことは、第 2 配位に対応する 2.5Å から 4.5Å の範囲の PDF ピークが AMC の形成と Nes の結晶化で大きく変化し、特徴的な変化が観察されることである (図 5a)。さらに、AMC は MgCl₂ 水溶液と Na₂CO₃ 水溶液の混合直後に Hmgs 構造を持つ AMC-I となり、Nes に結晶化する直前に AMC-II に変化する。つまり、AMC-II 構造は、Hmgs 構造と Nes 構造の中間的な構造を持っていると考えられる。

一方、Rb₂CO₃ 水溶液を用いた場合には、1Å から 10Å の中距離秩序は 3 日間ほぼ一定であった (図 5b)。Rb₂CO₃ 水溶液から得られた AMC の中距離秩序は、Na₂CO₃ 水溶液を混合直後の AMC-I 構造とは異なり、5 分間攪拌の AMC-II 構造とほぼ同じであった。その後、AMC-II は 3 日間変化しなかった。AMC-II の特徴は、AMC-I の第 3 ピークが分裂し、第 3 ピークと第 4 ピークの間に新たなピークが出現したことである。AMC-II 構造は Na₂CO₃ 水溶液中での AMC の成長過程でも観察されたため、これらのピークの変化は、AMC-II 構造内で新たな Rb-O 結合が形成されたことを意味するものではない。AMC-II 構造は、本質的に Mg イオンと炭酸イオンと水分子で形成された短距離秩序構造からなる。Rb₂CO₃ 水溶液の 5 分間攪拌(Rb5min)では、2.7Å と 4.2Å に小さなショルダーとピークの分裂が観察された (図 5b)。この特徴から AMC-II 構造と区別できるかもしれないが、これは本研究の限界と考えられる。本研究では、PDF パターンの特徴を 2 つのタイプに分類し、一つは AMC-I、もう一つは AMC-II としている。この分類法は、AMC から Nes への構造変化を解釈する上で非常に有効にみえる。これを Cs₂CO₃ 水溶液の場合に当てはめると、Cs₂CO₃ 水溶液を混合直後(Cs0min)の AMC は AMC-I 構造をとり、5 分間攪拌(Cs5min)で AMC-II 構造に変化し、10 分間攪拌(Cs10min)で Nes に変化している (図 5c)。その後、Nes は 3 日後(Cs3day)に溶解して AMC-I に戻っている。本研究で示した AMC が Nes に変化する連続的な構造変化は、一般的な現象であると思われる。この結果は、AMC には 2 種類 (またはそれ以上) の異なる非晶質構造が存在することを示しており、AMC のポリアモルフィズムの証拠である。Na₂CO₃ 水溶液を混合直後は、AMC-I 構造のクラスターは 5Å 以下の短距離秩序構造で構成されている (図 5a)。このとき、Na イオンはクラスター表面あるいは構造内に吸着あるいは取り込まれている可能性がある。その後、AMC から Nes に結晶化するためには、Na イオンはクラスターから除去されなければならない。つまり、短距離秩序構造から長距離周期秩序構造への再配列には、クラスターに吸着しているすべての Na イオンは排除される必要がある。しかし、Rb イオンの場合は、Rb が除去されずに AMC-II の表面 (あるいは内側) に残留し続け、Nes への結晶化の進行を阻害していると考えられる。これが、Rb₂CO₃ 水溶液中では AMC-II で結晶化プロセスが停止した理由である。

最後に、炭酸マグネシウム水和物の熱分解の過程で出現する AMC の構造について調べた。実験の結果、Nes と Dyp には、熱分解過程では AMC-I 構造を持つ AMC が出現するのに対し、Hmgs では、AMC-I と AMC-II と異なる第三の非晶質構造 (AMC-III 構造) が出現することを確認した。

まとめとして、AMC は、Hmgs に非常に類似した短距離を持っていた。また、Dyp の短距離・中距離秩序は、Hmgs に非常に類似しており、Nes とは明らかに異なっていた。また、AMC は 20 °C から 80 °C でほぼ同一の短距離秩序を持ち、この温度範囲では AMC は低温相-高温相に区別されないことが分かった。さらに、AMC から Nes に結晶化するときには、攪拌環境内で水素結合ネットワークが再構築して AMC-I 構造から AMC-II 構造になり Nes が形成されていることが示され、一方で、Dyp および Hmgs は、AMC-I 構造を維持して結晶化している。

<引用文献>

- Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Yoshinari Sano, Yoshitaka Matsushita, Yasuhiro Yoneda (2021a) In-situ and ex-situ studies on thermal decomposition process of hydromagnesite Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·4H₂O. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 599-609. DOI10.1007/s10973-020-09618-7
- Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Jun Abe, Asami Sano-Furukawa, Takanori Hattori (2021b) Crystal structure of nesquehonite, MgCO₃·3H(D)₂O by neutron diffraction and effect of pH on structural formulas of nesquehonite. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 116, 96-103, 2021. DOI10.2465/jmps.200117
- Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Satoru Okada (2021c) Temperature dependence of amorphous magnesium carbonate structure studied by PDF and XAFS analyses. *Scientific Reports*, 11, 22876. DOI10.1038/s41598-021-02261-8
- Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Satoru Okada (2022) Thermal decomposition process of Dypingite Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·5H₂O. *Materials Letters*, 308, 131125. DOI10.1016/j.matlet.2021.131125
- Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Satoru Okada (2023) Structural variations of amorphous magnesium carbonate during nucleation, crystallization, and decomposition of nesquehonite MgCO₃·3H₂O. *Physics and Chemistry of Minerals*, 50, 5. DOI10.1007/s00269-022-01231-4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamamoto Gen-ichiro, Kyono Atsushi, Okada Satoru	4. 巻 308
2. 論文標題 Thermal decomposition process of dypingite $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 131125 ~ 131125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matlet.2021.131125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takagi Sota, Ichiyangi Kouhei, Kyono Atsushi, Kawai Nobuaki, Nozawa Shunsuke, Ozaki Norimasa, Seto Yusuke, Okuchi Takuo, Nitta Souma, Okada Satoru, Miyanishi Kohei, Sueda Keiichi, Togashi Tadashi, Yabuuchi Toshinori	4. 巻 49
2. 論文標題 Phase transition and melting in zircon by nanosecond shock loading	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-022-01184-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyono Atsushi, Ikeda Ryutaro, Takagi Sota, Nishiyasu Wataru	4. 巻 117
2. 論文標題 Structural evolution of gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) during thermal dehydration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 220811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.220811	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Gen-ichiro, Kyono Atsushi, Okada Satoru	4. 巻 50
2. 論文標題 Structural variations of amorphous magnesium carbonate during nucleation, crystallization, and decomposition of nesquehonite $MgCO_3 \cdot 3H_2O$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-022-01231-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishiyasu Wataru, Kyono Atsushi	4. 巻 118
2. 論文標題 Crystal structures of anhydrous borax $-Na_2B_4O_7$ and $-Na_2B_4O_7$ and ab initio quantum chemical calculations of structural stability on their fundamental building blocks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 230112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.230112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Yoshinari Sano, Yoshitaka Matsushita, Yasuhiro Yoneda	4. 巻 144
2. 論文標題 In-situ and ex-situ studies on thermal decomposition process of hydromagnesite $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	6. 最初と最後の頁 599-609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10973-020-09618-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Jun Abe, Asami Sano-Furukawa, Takanori Hattori	4. 巻 116
2. 論文標題 Crystal structure of nesquehonite, $MgCO_3 \cdot 3H(D)_2O$ by neutron diffraction and effect of pH on structural formulas of nesquehonite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 96-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.200117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Vincenzo Stagno, Luca Bindi, Sota Takagi, Atsushi Kyono	4. 巻 8
2. 論文標題 Can quasicrystals survive in planetary collisions?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-021-00421-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sota Takagi, Koji Inukai, Nobuaki Kawai, Shunsuke Nozawa, Atsushi Kyono, Ryo Fukaya, Shin-ichi Adachi, Kouhei Ichiyanagi	4. 巻 118
2. 論文標題 Visualization of transformation toughening of zirconia ceramics during dynamic fracture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 231901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0044607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石原琴子, 興野純	4. 巻 50
2. 論文標題 遊星ボールミル粉碎と水蒸気処理が石英の - 相転移に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 岩石鉱物科学	6. 最初と最後の頁 79-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/gkk.210314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryutaro Ikeda, Atsushi Kyono	4. 巻 304
2. 論文標題 Temperature dependence of orientationally disordered SO ₄ tetrahedra in mirabilite (Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Solid State Chemistry	6. 最初と最後の頁 122574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jssc.2021.122574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ibuki Kinebuchi, Atsushi Kyono	4. 巻 116
2. 論文標題 Study on magnetite oxidation using synchrotron X-ray diffraction and X-ray absorption spectroscopy: Vacancy ordering transition in maghemite (-Fe ₂ O ₃)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 211-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.210304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gen-ichiro Yamamoto, Atsushi Kyono, Satoru Okada	4. 巻 11
2. 論文標題 Temperature dependence of amorphous magnesium carbonate structure studied by PDF and XAFS analyses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 22876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-02261-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinari Sano, Atsushi Kyono	4. 巻 116
2. 論文標題 Structure changes of nanocrystalline mackinawite under hydrothermal conditions: formation of greigite and its structural properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 235-244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.210418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sota Takagi, Kouhei Ichyanagi, Atsushi Kyono, Shunsuke Nozawa, Nobuaki Kawai, Ryo Fukaya, Nobumasa Funamori, Shin-ichi Adachi	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of shock dynamics study with synchrotron-based time-resolved X-ray diffraction using Nd:Glass laser system.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 371-377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600577519016084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinari Sano, Atsushi Kyono, Yasuhiro Yoneda, Noriko Isaka, Sota Takagi, Gen-ichiro Yamamoto	4. 巻 115
2. 論文標題 Structure changes of nanocrystalline mackinawite under hydrothermal conditions.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 261-275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.190903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sota Takagi, Atsushi Kyono, Shunsuke Nozawa, Nobuaki Kawai, Koji Inukai, Ryo Fukaya, Nobumasa Funamori, Shin ichi Adachi, Kouhei Ichiyonagi	4. 巻 47
2. 論文標題 In situ observation of the phase transition behavior of shocked baddeleyite.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL089592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL089592	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 興野 純, 山本 弦一郎, 岡田 慧, 米田 安宏, 松下 能孝
2. 発表標題 炭酸マグネシウム水和物鉱物の結晶化および脱水プロセスにおける構造変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 興野 純, 長谷川 拓紀, 岡田 慧
2. 発表標題 Portlandite Ca(OH) ₂ からの炭酸カルシウム生成メカニズム
3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nishiyasu Wataru, Kyono Atsushi
2. 発表標題 Thermal behavior of borax and crystal structures of anhydrous borax alpha-Na ₂ B ₄ O ₇ and gamma-Na ₂ B ₄ O ₇
3. 学会等名 2022年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 興野 純, 杵淵 伊吹
2. 発表標題 Magnetite oxidation investigated by synchrotron X-ray diffraction and X-ray absorption spectroscopy
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 一柳光平, 高木壮大, 川合伸明, 興野純, 深谷亮, 足立伸一, 野澤俊介
2. 発表標題 時間分解ラウエ回折法によるシリコン単結晶の衝撃塑性変形過程の観測
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木壮大, 一柳光平, 興野純, 川合伸明, 野澤俊介, 尾崎典雅, 瀬戸雄介, 奥地拓生, 新田蒼真, 岡田慧, 宮西宏併, 末田敬一, 富樫格, 藪内俊毅
2. 発表標題 Phase transition and melting in zircon by nanosecond shock loading
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杵淵 伊吹, 興野 純
2. 発表標題 磁鉄鉱の酸化プロセス: マグヘマイト (γ -Fe ₂ O ₃) の空孔秩序転移
3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野 喜成, 興野 純
2. 発表標題 グレイナイト(Fe ₃ S ₄)の生成とその構造特性
3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杵淵伊吹, 興野純, 佐野喜成
2. 発表標題 The magnetite-maghemite-hematite transformation
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本弦一郎, 興野純, 阿部淳, 佐野亜沙美, 服部高典
2. 発表標題 Crystal structure of nesquehonite, MgCO ₃ · 3(H ₂ O) by neutron diffraction, Raman spectroscopy, and thermal analysis
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野喜成, 興野純, 米田安宏, 高木壮大, 山本弦一郎
2. 発表標題 熱水環境下における硫化鉄ナノ粒子の構造変化プロセス
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木壮太, 興野純, 野澤俊介, 川合伸明, 犬飼浩之, 深谷亮, 船守展正, 足立伸一, 一柳光平
2. 発表標題 In situ observation of phase transition behavior of shocked baddeleyite
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑村理沙, 興野純, 高木壮太, 山本弦一郎
2. 発表標題 酸素欠陥ペロブスカイト brownmirellite 型構造 Ca ₂ Fe ₂₀₅ の高圧相転移
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sota Takagi, Atsushi Kyono, Shunsuke Nozawa, Nobuaki Kawai, Ryo Fukaya, Nobumasa Funamori, Shin-ichi Adachi, Kouhei Ichiyangi
2. 発表標題 In situ observation of the phase transition behavior of shocked baddeleyite
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Kyono, Risa Kuwamura, Sota Takagi, Gen-ichiro Yamamoto
2. 発表標題 High-pressure phase transition in srebrodolskite Ca ₂ Fe ₂₀₅
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学興野研究室
http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~mineralogy_web/kyono_HP/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------