

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21654078

研究課題名（和文）スメクタイトーマイカ系列は連続固溶体か？

研究課題名（英文）Do the layered silicates in smectite-mica series form solid solution？

研究代表者

山田 裕久（YAMADA HIROHISA）

独立行政法人物質・材料研究機構・環境再生材料ユニット・グループリーダー

研究者番号：00343848

研究成果の概要（和文）：

層状ケイ酸塩であるスメクタイト、マイカは、それぞれ「膨潤性粘土鉱物」、「非膨潤性層状ケイ酸塩」として分類されてきた。最近、非膨潤性マイカの膨潤性挙動を見出し、これらの分類に根本的な疑問を提示した。本研究では、スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の本質を、実験鉱物学、材料科学、結晶化学、計算科学の融合により検討した。

研究成果の概要（英文）：

Smectite and mica, which belong to a group of layered silicate, have classified into expandable clay mineral and non-expandable layered silicate, respectively. Recently we found the expandable behavior of mica, and proposed the basic issues of their classification. In this research, we have carried out the fundamental researches for smectite – mica system by combing experimental mineralogy, material science, crystal chemistry and computational science.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	0	1,000,000
2010 年度	1,200,000	0	1,200,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	270,000	3,370,000

研究分野：実験鉱物学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・4406 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：岩石・鉱物・鉱床学，人工・天然鉱物，層状ケイ酸塩，粘土鉱物学

1. 研究開始当初の背景

スメクタイト、マイカは共に、水酸化物八面体が連結した八面体シートを、2枚のシリカ四面体シートでサンドイッチした基本構造をもつ2：1型層状ケイ酸塩である。しかしながら、教科書でさえ「Mica」と「Hydrous Phyllosilicates (exclusive of micas)」と大別されている。その大きな要因として「層電荷」と「膨潤性」という定義・概念がある。図1のように、2：1型層状ケイ酸塩は「2：

1層の内部の同形置換による負の電荷」を持ち、層間に「正の電荷を有する陽イオン」を挟んでいる。この負電荷を層電荷と定義し、構造化学組成式あたりの電荷の絶対値で、便宜上2：1型層状ケイ酸塩を細分類してきた。「膨潤性」というマクロな性質においては、スメクタイトは「膨潤性粘土鉱物」、マイカは「非膨潤性層状ケイ酸塩」と見なされてきた。最近本研究者らは、従来「非膨潤性層状ケイ酸塩」と見なされて来た雲母粘土鉱物イ

ライトの「膨潤性挙動・有機化合物インターカレーション能」とその「ポリマー中への均一な分散・膨潤状態」を見出した。従って、「膨潤性」を基準としたスメクタイト、マイカをはじめとする一連の2：1型層状ケイ酸塩の定義・概念にはいまだ混乱があると言わざるを得ない。これは、従来の研究が主として組成・構造が限定された天然に産する層状ケイ酸塩を研究対象とし、広範囲なスメクタイトーマイカ系列に関する解析が十分行われていないためである。

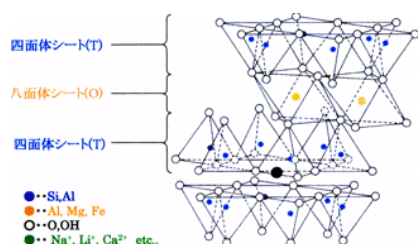


図1 2:1型層状ケイ酸塩の模式図

2. 研究の目的

地球表層に多く存在し、有史以来、陶磁器、鋳物など幅広い分野で利用されてきた古くて新しい「2：1型層状ケイ酸塩」の本質を明らかにする。これまでの粘土研究は、地球表層に産するサンプルを用いた研究と、粘土が地殻の比較的低压・低温での産物との認識による水熱合成実験による研究に偏っていた。天然での産状の再現が中心課題であり、物質科学・材料科学的な視点に欠けていたといえる。本研究者は、スメクタイト、混合層鉱物、雲母粘土鉱物などの各種粘土鉱物の合成とこれらのキャラクタリゼーションに関して豊富な研究成果を有している。

ナノレベルで物質の組成・構造・形態を制御することは、次世代機能性物質の設計・開発における重要な課題である。特異なモルフォロジーをもつナノマテリアルは、高機能性電子材料、光学材料、センサー材料、環境・エネルギー材料としての展開が大いに期待されている。そのためには、合成化学、材料科学、物質科学のみならず、微粒子科学、表面科学の手法を駆使したナノレベルでの構造制御・表面特性制御を行うことが必要不可欠と考えられる。2：1型層状ケイ酸塩は、2次元に広がるケイ酸塩の薄いシート（シリケートナノシート）が積み重なった層状物質であり、その異方性の大きな二次元空間を有すること、膨潤性、インターカレーション能など一般の無機化合物としては特異な性質を有している。

従って、本研究では「組成・構造・形態が精緻に制御されたスメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩」を多様な条件で合成する。同時に合成物を電子顕微鏡学、分光学、X線回

折法による構造解析、計算機科学による理論的アプローチを用いて、その本質の解明を目指す。

3. 研究の方法

いまだ十分に解明されていない「スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の本質」を実験鉱物学、材料科学、結晶化学、計算機科学の融合により追求する。そのために、(1) 組成・構造・形態が精緻に制御された2：1型スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の水熱条件での合成、(2) 合成スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩のキャラクタリゼーション（電子顕微鏡学やX線回折法による構造解析、分光学による機能解析）、および(3) 第1原理バンド計算による計算機科学・理論的アプローチを推進した。

(1) スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の合成

2：1型層状ケイ酸塩は、図1に示すように金属水酸化物八面体シートが2枚のシリカ四面体シートでサンドイッチされた基本構造を有する。代表的なMg-Al系のスメクタイトーマイカ系列の理想的な構造化学組成式は、式(1)と表現できる。

$$E_x Mg_3 (Si_{4-x} Al_x) OH_2 \cdot \cdot \quad (1)$$

$x=1$ の場合が、マイカ（金雲母）であり、 $x=0.33$ の場合がスメクタイト（サポナイト）である。Eは、層間の交換性陽イオンである。これらの内スメクタイト組成に関しては、圧力100MPa、温度200-600℃での研究実績が既にあり、短冊状スメクタイト、リボン状マイカ/スメクタイト混合層鉱物、特殊な形態を有する雲母粘土鉱物の合成に成功し、従来にないサイズで、新しい形態を有する層状ケイ酸塩の創製の可能性を示している。

以上の状況を踏まえ、Mg-Al系のスメクタイトーマイカ系列の理想的な構造化学組成において、精緻に化学組成を制御したスメクタイト、混合層鉱物、雲母粘土鉱物などの各種2：1型層状ケイ酸塩の合成を行い、スメクタイトーマイカ系列の本質、理想的な連続固溶体か否かを検討する。

さらに、Mg系以外での、Ni系およびZn系に関しての研究実績も踏まえ、これらに対しても系統的な合成実験を推進し、スメクタイトーマイカ系列の各種2：1型層状ケイ酸塩の相互の関係を検討した。

(2) 合成スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩のキャラクタリゼーション

合成スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の化学組成・結晶度・結晶粒子径・形状、構成元素の配位状態を、電子顕微鏡学やX線回折法による構造解析、分光学による機能解析によって検討する。具体的には、粉末X線法

(XRD)、単結晶X線構造解析装置、走査型電子顕微鏡 (SEM)、透過型電子顕微鏡 (TEM)、原子間力顕微鏡 (AFM)、フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR)、熱分析法 (TG-DTA)、核磁気共鳴法 (NMR)、光電子分光法 (XPS)、ICP、レーザ回折・散乱法を応用したナノ粒子分布測定等の手法をもちいて検討する。スメクタイトをはじめとする2:1型層状ケイ酸塩そのもののキャラクタリゼーションに関しては研究実績がありその実験手法は確立している。

計算機科学による理論的アプローチとしては、第1原理バンド計算を用いて、各種2:1型層状ケイ酸塩の要素解析を進める。これらの電子状態解析、電荷密度解析、振動解析、軌道解析等を行うと共に、各種物性値 (比熱、エントロピー、膨潤性等) の理論的計算を進め、スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の本質を見極める。さらに計算結果を、スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の合成条件へのフィードバックを行い、合成物の再検討した

4. 研究成果

層状ケイ酸塩であるスメクタイト、マイカは、それぞれ「膨潤性粘土鉱物」、「非膨潤性層状ケイ酸塩」として分類されてきた。非膨潤性マイカの膨潤性挙動を見出し、これらの分類に根本的な疑問を提示した。本研究では、スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の本質の解明を、実験鉱物学、材料科学、結晶化学、計算科学の融合により進めた。また合成プロセスが精緻に制御できれば、従来にない単結晶サイズで、新しい構造・形態・機能を有する膨潤性層状ケイ酸塩の創製も可能となるはずである。

いまだ十分に解明されていない「スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の本質」を追求するために、以下の合成、キャラクタリゼーション研究を推進した。

(1) スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の合成および電子顕微鏡学やX線回折法による構造解析

スメクタイトーマイカ系列の理想的な構造化学組成において、精緻に化学組成を制御したスメクタイト、混合層鉱物、雲母粘土鉱物などの各種2:1型層状ケイ酸塩の合成を水熱条件下 (圧力100MPa、温度200-800°C) で行った。さらにこれら合成層状ケイ酸塩の化学組成・結晶度・結晶粒子径・形状、構成元素の配位状態を、透過型電子顕微鏡学や粉末X線回折法による構造解析によって検討した (図3)。

3八面体型層状ケイ酸塩の端成分としては、サポナイトおよびフロゴパイトが代表的である。その化学組成の多様性に伴って、形態・結晶度などの結晶化学的性質に加えて膨

潤性・インターカレーション能などの特性が大きく変化する。特に四面体層・八面体層の同型置換によって生じる層電荷量は、膨潤性・インターカレーション能に大きな影響を与えることが期待される。従って、Na-フロゴパイト組成ガラスの水熱処理を、広範囲な温度条件で行った。得られた層状ケイ酸塩の結晶化学的特徴づけとそれらの膨潤挙動を検討した。その結果、高層電荷サポナイト、バーミキュライトおよび合成 Na フッ素四ケイ素雲母と同様な膨潤挙動を示す相を得た。

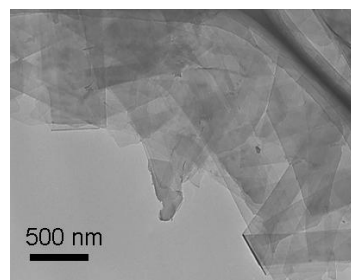


図3 合成レクトライトのTEM像

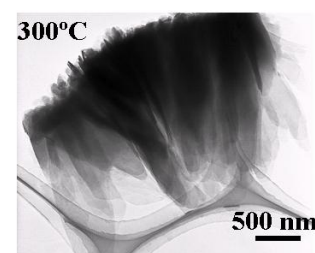


図4 高電荷サポナイトのTEM像

(2) プロセスの制御による従来にない機能を有する膨潤性層状ケイ酸塩の創製

各種層状ケイ酸塩鉱物 (ヘクトライト、サポナイト、バーミキュライト、フロゴパイト) と ZnO との組み合わせに注目し、水溶液中での不安定性という ZnO の欠点を補うとともに、有用元素 Zn の使用量を削減できる新しい光触媒材料の創製を目指し、基本構造内に形成される八面体シート内の金属元素を Zn で置換した材料に注目した。特に水溶液中での光触媒活性の発現を、色素ローダミン B の脱色・分解反応を用いて検討した。これらの紫外線照射下でのその光触媒活性について、色素ローダミン B およびメチレンブルー等の分解挙動を評価した (図5)。光触媒活性を示した層状ケイ酸塩鉱物 (ヘクトライト、サポナイト) が膨潤性・RhB の包摂能を有しているのに対し、活性を示さない層状ケイ酸塩鉱物 (バーミキュライト、フロゴパイト) が非膨潤性・RhB の非包摂能を示すのが特徴である。本結果は、溶液中での光触媒活性には

「吸着能・膨潤性・包摂能」が重要な要素であることを示唆している。またスメクタイトの特徴の一つである広範囲の pH 条件の溶液中での安定性も、新たな環境浄化材料としても応用が可能であることを示している。

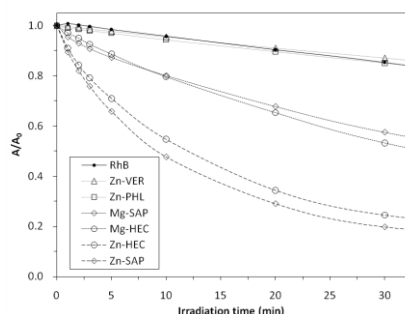


図5 Znを含む層状ケイ酸塩の光触媒活性 (RhBの光分解の時間依存性)

さらに、各種層状ケイ酸塩の膨潤性挙動・有機化合物インターカレーション能とそのポリマー中への均一な分散・膨潤状態を検討し、各種層状ケイ酸塩の本質への足がかりを得た。

(3) 第1原理バンド計算による計算機科学・理論的アプローチ

第1原理バンド計算を用いて、Mg-Al系スメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の要素解析を進め、これらの電子状態解析、電荷密度解析、振動解析、軌道解析等を行うと共に、各種物性値(比熱、エントロピー、膨潤性等)の理論的検討を進めた。

豊富な実験データを利用しながら、金雲母をはじめとする層状珪酸塩の興味深い特徴(例えば、層間イオン・分子の多様性や超構造の多様性等)を探るべく、第1原理シミュレーションを進めた。現在、分子や固体の電子状態計算分野では、第1原理的な手法が主流となりつつあるが、その計算コストは非常に高く、原子数が多い場合や数値的精度を上げた場合には計算が不可能になったり、たとえ計算を開始できたとしても、現実的な時間内にシミュレーションが終了しないということがしばしば起こる。特に、多くの層状ケイ酸塩では部分占有率で示されたサイトが存在し、1種類の層状ケイ酸塩構造に注目しても、部分占有率を満たすような原子配置が数多く存在するため、計算モデルがその配置数分されてしまい、計算コストの問題が起きやすい。そこで、この問題を回避することを目的として、部分占有率あらわされたTサイトにそのまま配置できる仮想原子(Virtual atom)を作成し、金雲母とパラゴナイトの第1原理計算を行っ

た。金雲母については、8つのTサイトに6つのSiと2つのAlを配置した全28通り(対称性を考慮しない場合 $8C_2=28$ となる)の構造最化計算も行い、most probableなSiとAlの配置の決定も試みた。結論として、Virtual Crystal近似による計算値と実験値との一致は良好でると言えた。Virtual Crystal近似は平均化する前の各々の原子の個性の差を消してしまう大胆な近似手法ではあるが、今回の場合のよ

Table 1: 金雲母の構造パラメータ(Å)と、298.15Kでの比熱(Cv)、エントロピー(S) (Jmol/K)の計算結果(括弧内の数値は実験値からのずれ)

	Calc. (virtual crystal)	Calc. (most probable)	Expt. (Refs. 2,3)
Cell parameters			
a	10.423 (+1.1%)	10.454 (+1.4%)	10.310
b	5.322 (+0.1%)	5.322 (+0.1%)	5.316
c	9.202 (-0.0%)	9.215 (+0.1%)	9.204
gamma(deg.)	99.7 (-0.2%)	99.9 (+0.0%)	99.9
Bond lengths			
<T-O>	1.670 (+0.7%)	1.675 (+1.0%)	1.658
<Al-O>		1.768 (+6.6%)	
<Si-O>		1.644 (-0.8%)	
<M-O>	2.079 (+0.3%)	2.081 (+0.4%)	2.073
<K-O> (inner)	2.953 (-0.7%)	2.945 (-0.9%)	2.973
<K-O> (outer)	3.434 (+1.3%)	3.458 (+2.0%)	3.389
<O-H>	0.957 (+16.7%)	0.959 (+17.0%)	0.820
Thermodynamic Parameters			
Cv (Cp for Exp.)	348.6 (-1.8%)	348.2 (-1.9%)	355.1
S	310.6 (-1.7%)	310.1 (-1.8%)	315.9

うに、ある程度マクロな描像が成立する特性を低コストで調べたい場合には、非常に有効に働くとの結論を得た(表1)。

(4) 今後の課題

今後の課題としては、以下の点が考えられる。膨潤性粘土鉱物スメクタイトから、非膨潤性層状ケイ酸塩マイカの一連の層状ケイ酸塩の合成に成功し、その鉱物学、材料科学、結晶化学的検討は進んだ。しかしその根本的な疑問である非膨潤性マイカの膨潤性挙動については、残念ながらいまだ明確になっていない。実験鉱物学、材料科学、結晶化学、計算科学の融合により、合成に成功したスメクタイトーマイカ系層状ケイ酸塩の本質の解明をさらに進める必要がある。その結果は、天然層状ケイ酸塩の産状の解明と共に、各種2:1型層状ケイ酸塩の本質・相互の結晶化学的性質、連続固溶体か否か等が明らかになる。さらに、混合層鉱物は結晶学的にいかに取り扱えるか、いかにしてこのような構造ができるかの要因を明らかにする可能性がある。その結果、地球表層の代表的な鉱物種である2:1型層状ケイ酸塩が、環境の変化に対応して如何に生成し、または変化する過程で示される結晶学的姿を再認識できる。2:1型層状ケイ酸塩は、2次元に広がるケイ酸塩の薄いシート(シリケートナノシート)が積み重なった層状物質であり、その異方性の大きな二次元空間を有している。膨潤性、インターカレーション能など一般の無機

化合物としては特異な性質を有している2:1型層状ケイ酸鉱物の本質の解明は、新しい構造・形態・機能を有する膨潤性層状ケイ酸塩の創製への貢献等の学術面だけでなく産業応用への影響も大きい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① S. Suehara, H. Yamada, T. Sasaki, Virtual-crystal approach to aluminum-avoidance materials: A first-principles density-functional calculation of micas, *Physical Review B* (Accepted) (査読有).
- ② H. Yamada, K. Tamura, Y. Watanabe, N. Iyi and K. Morimoto, Geomaterials: their application to environmental remediation, *Science and Technology of Advanced Materials*, 12, 2011, 064705 (13pp) (査読有).
- ③ T. Hatta, T. Echigo, S. Nemoto, K. Tamura and H. Yamada, Intercalation of sugar alcohols into the interlayer of montmorillonite by wet and dry processes, *Clay Science*, 15, 2011, 61-66 (査読有).
- ④ Y. Watanabe, T. Kasama, K. Fukushi, T. Ikoma, Y. Kamatsu, J. Tanaka, Y. Moriyoshi and H. Yamada, Synthesis of nano-sized boehmites for optimum phosphate sorption, *Separation Science and Technology*, 46, 2011, 818-824(査読有).
- ⑤ K. Morimoto, K. Tamura, N. Iyi, J. Ye and H. Yamada, Adsorption and photodegradation properties of anionic dyes by layered double hydroxides, *J. Physics and Chemistry of Solids*, 72, 2011, 1037-1045(査読有).
- ⑥ K. Tamura, K. Morimoto, T. Ushirouchi, H. Yamada, T. Hatta, Y. Mito, Preparation and Properties of Exfoliated Vermiculite-Polyamide 6 Nanocomposite, *Clay Science*, 14, 2010, 147-153 (査読有).
- ⑦ N. Iyi and H. Yamada, One-step conversion of CO32- LDH (layered double hydroxide) into anion-exchangeable LDHs using an acetate- buffer/salt method, *Chem. Lett.*, 39, 2010, 591-593 (査読有).
- ⑧ K. Morimoto, K. Tamura, J. Ye and H. Yamada, Adsorption and photodegradation reactions of anionic dye on Zn-Al-substituted layered double hydroxide, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.*, 35, 2010, 813-816 (査読有).
- ⑨ C. S. Pascua, H. Yamada, M. Ohnuma, K. Tamura, Y. Matsushita, J. Cuadros, J. Ye., Synthesis of mono-dispersed Zn-smectite, *Applied Clay Science*, 46, 2010, 55-59(査読有).
- ⑩ 末原 茂, 第1原理電子状態計算で熱力学: その第一歩, 金属(アグネ技術センター), 80, 2010, 11-17(査読無).
- ⑪ K. Tamura, H. Uno, H. Yamada, K. Umeyama, Layered Silicate-Polyamide 6 Nanocomposites: Influence of Silicate Species on Morphology and Properties, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 47, 2009, 583-595 (査読有).
- ⑫ H. Yamada, K. Tamura, C.S. Pascua, S. Yokoyama, T. Hatta, Self-assembled silicate nanolayers by Geonics, *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.*, 34, 2009, 363-366 (査読有).
- ⑬ H. Uno, K. Tamura, H. Yamada, K. Umeyama, T. Hotta, Y. Moriyoshi, Preparation and mechanical properties of exfoliated mica-polyamide 6 nanocomposites using sericite mica, *Applied Clay Science*, 46, 2009, 81-88(査読有).

[学会発表] (計 15 件)

- ① 山田裕久, 田村堅志, 越後拓也, 森本和也, 八田珠郎, (Fe, Zn)置換サポナイトによるローダミンBの光分解, 第21回日本MRS学術シンポジウム, 2011.12.19, 横浜情報文化センター, 横浜.
- ② 田村堅志, 森本和也, 八田珠郎, 山田裕久, 溶融混合反応によるブルーサイトへの糖アルコールのインターカレーション, 第21回日本MRS学術シンポジウム, 2011.12.19, 横浜情報文化センター, 横浜.
- ③ 末原茂, 佐々木泰造, 山田裕久, 第1原理計算による無水粘土鉱物の層間イオン交換エネルギー, 第55回粘土科学討論会, 2011.9.15, 鹿児島大学, 鹿児島.
- ④ H. Yamada, K. Tamura, K. Morimoto and T. Hatta, Photocatalytic properties of synthetic(Fe, Zn)-substituted saponite, Euroclay2011, 2011.6.27, Antalya, Turkey.
- ⑤ H. Yamada, K. Tamura, K. Morimoto & J. Ye, Development of Photocatalytic Clay Minerals, 1st Korean Clay Workshop 2011, 2011.5.2, Ewha Womans University, 韓国.
- ⑥ 田村堅志, 八田珠郎, 道上勇一, 森本和也, 山田裕久, 有機セリサイトのステージング挙動, 第54回粘土科学討論会,

- 2010.9.7, 名古屋大学, 愛知県.
- ⑦ H. Yamada, K. Morimoto, K. Tamura, C. S. Pascua, & T. Hatta, Photocatalytic degradation of Rhodamine B in water by synthetic Zn-substituted phyllosilicates, 5th Mid-European Clay Conference, 2010.8.27, Eotvos Lorand Univ. Hungary.
- ⑧ H. Yamada, K. Tamura, K. Morimoto, S. Yokoyama & T. Hatta, Synthesis and Characterization of Phyllosilicates in montmorillonite-stevensite compositional series, 2010 Trilateral Meeting on Clays (SEA, CSSJ, CMS), 2010.6.9, Hotel Melia Sevilla, Spain.
- ⑨ K. Tamura, T. Hatta, H. Yamada, Polymer nanocomposite using a second-staged alkylammonium-sericite complex, 2010 Trilateral Meeting on Clays (SEA, CSSJ, CMS), 2010.6.9, Hotel Melia Sevilla, Spain.
- ⑩ 山田裕久, 粘土:古くて新しい素材, 耐火物の基礎学問と検査技術研修, 2010.5.17, 岡山セラミックスセンター、備前市
- ⑪ H. Yamada, S. Yokoyama, K. Tamura, Y. Watanabe, Hydrothermal Syntheses of Interstratified Clay Minerals from (K, Na)- Montmorillonite Glass, The 26th International Japan-Korea Seminar on Ceramics, 2009.11.24, つくば国際会議場, つくば.
- ⑫ 山田裕久, 田村堅志, 横山信吾, 渡辺雄二郎, 八田珠郎, 3八面体型パーミキュライト様相の合成と特徴づけ, 第53回粘土科学討論会, 2009,9,9, 岩手大学、岩手県盛岡市
- ⑬ 末原 茂, 山田裕久, 田村堅志, 佐々木泰造, Virtual Crystal 近似による雲母の第1原理計算, 第53回粘土科学討論会, 2009,9,9, 岩手大学、岩手県盛岡市
- ⑭ H. Yamada, K. Tamura, S. Yokoyama, Synthesis of Trioctahedral Phyllosilicates in Sodium Saponite - Phlogopite system, 14ICC - International Clay Conference Italy 2009, 2009.6.16, Nova Yardinia venue, Italy.
- ⑮ K. Tamura, H. Yamada, S. Yokoyama, K. Kurashima, Preparation of Regularly Interstratified Layered Silicate-Polymer Nanocomposite, 14thICC, 2009.6.16, Nova Yardinia venue, Italy.

[図書] (計4件)

- ① 山田裕久・田村堅志・森本和也, 産業技術総合研究所, Clayteam 技術解説書, 2011, 15-20.
- ② 山田裕久, オーム社, 環境・エネルギーハ

ンドブック, 2011, 452-462.

- ③ K. Tamura and H. Yamada, Wiley-VCH, Optimization of Polymer Nanocomposite Properties, 2010, 333-350.
- ④ 田村堅志, 山田裕久, シーエムシー出版, 機能性粘土素材の最新動向, 2010, 219-228.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 裕久 (YAMADA HIROHISA)
独立行政法人物質・材料研究機構
環境再生材料ユニット・
グループリーダー
研究者番号: 00343848

(2) 研究分担者

田村 堅志 (TAMURA KENJI)
独立行政法人物質・材料研究機構
環境再生材料ユニット・
主任研究員
研究者番号: 80370310

末原 茂 (SUEHARA SHIGERU)
独立行政法人物質・材料研究機構
理論計算科学ユニット・
主任研究員
研究者番号: 00354374