

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246135

研究課題名(和文)ユニットネットワーク固体の構築工学展開による新機能触媒物質群形成

研究課題名(英文)Structure engineering of functional solid catalysts by unit-network methodology

研究代表者

上田 渉(Ueda, Wataru)

北海道大学・触媒化学研究センター・教授

研究者番号：20143654

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円、(間接経費) 10,620,000円

研究成果の概要(和文)：ユニットが平面性および球状のポリ酸を合成系中で発生させ、水熱条件下でそれぞれ2次元平面ネットワーク構造、3次元立体ネットワーク構造を構築した。前者は6族、5族、4族のほとんどの元素の組み合わせが可能となり、ナノレベルで5員環状ポリ酸ユニットのネットワーク化を達成し、合成を一般化した。後者の3次元構造形成では、型ケギンユニットと金属酸素八面体リンカーが三次元的にネットワーク化した新しいゼオライト様の結晶物質の合成に成功し、構造の確定、対象元素の拡張、マイクロ細孔特性の解析を進めた。二酸化炭素やエタンに対する特異的な親和性を示した。得られた物質の非対称性マイクロ細孔場は新しい触媒機能を示した。

研究成果の概要(英文)：Structure engineering of functional solid catalysts has been conducted on the basis of unit-network methodology of molecular-type polyoxide units under hydrothermal condition for creating three-dimensional network structure of the units. The methods were applied to metal oxide components in 6, 5 and 4 element group and successfully gave various solids with nano-size structure with a heptagonal structural unit, confirming the applicability of the method for creating high-dimensional solid structures. This method was also found useful for creating a new three-dimensional zeolite-type porous solid based on molecular-type polyoxide units. The materials are totally new and showed unique adsorption property for CO<sub>2</sub> and ethane. These obtained materials showed solid-acid property and incomparable catalytic property based on an asymmetric porous structure.

研究分野：化学工学

科研費の分科・細目：プロセス工学，触媒・資源化学プロセス

キーワード：複合酸化物 高次構造 細孔構造 ソフト合成 固体触媒

## 1. 研究開始当初の背景

5族、6族の酸化物をベースとしたユニットネットワーク固体は接触酸化などに使われる複合酸化物触媒に新しい時代をもたらそうとしていた。それは、5族、6族の複合酸化物触媒の活性発現の本質が表面のポリ酸形成に起因するとの漠とした考えから、ポリ酸ユニットによってもたらされた高次の表面構造に起因するとの理解へと飛躍的に展開したからである。これにより、従来のアモルファス構造触媒から結晶構造触媒へと発想が転換し、飛躍的な活性向上が可能となった。また、触媒物質合成も高温焼成合成から、高次構造を発生させ維持できるようなソフトな合成法にシフトする契機ともなっていて、その動きは活発である。

このような転換期、発展期に必要なのは新しい物質合成方法の提示である。高次の構造があれば良いと考えても、それを生み出す方法が無ければ、従来のような試行錯誤で、よりパラメーターの多い中での触媒合成研究を生み出すだけであるからである。したがって、より一般的で応用性が高く、設計性の高い、革新的な方法論が求められていた。

この方向でもっとも進んでいるのがゼオライト物質合成である。複雑ではあるが構造規制剤を用いる方法論の持つ意味は大変大きい。最近では、ゼオライト構造形成は、その連続構造をユニットに切り出して理解できるようになっている。では酸素八面体を与える5族、6族を主構成元素とする複合酸化物触媒の合成ではどうか。その答えは、その構造が示すとおり、まさにユニットネットワーク固体そのものにある。すなわち、ゼオライトとは異なり、明確なユニットで構成された物質であった。したがって、ユニットネットワーク固体合成は合成されたユニットを制御して作る、との考えが出された。

## 2. 研究の目的

本研究では、ユニットで構成された物質はユニットから作る、との考えのもと、酸素多面体が2個から7個からなるユニットをポリ酸イオンから発生させ、異種間、複種間連結による新しいユニットネットワーク固体の合成を進め、構築工学の確立を図る。また、ユニット連結様式に依存する触媒機能や非対称細孔構造により生まれる触媒機能などに着目して新機能触媒群を創出する。

## 3. 研究の方法

### (1) 異種間、複種間ユニット連結によるユニットネットワーク固体合成

①ユニット合成研究：ポリ酸化学の中でもっとも研究事例の多いMoとWを中心にVも加えた範囲で単独ないしは混合して有するポリ酸類としてリスト総集する。同時にリストされたポリ酸の合成を進め、ユニットの

基本データとしてまとめる。

②ネットワーク合成研究：初期段階では、二つのユニットを有する単一のポリ酸を選び、様々なソフト条件（特に最初は水熱合成条件、その後混合溶媒利用も併用）で進める。第二段階では二つ以上のユニットを有する単一のポリ酸や複数のポリ酸の共存で固体合成を進め、より高次の構造物質の合成へと展開する。第三段階では、ユニットに含まれる元素が異なる形のポリ酸を使用したり、同じユニットでも異なるポリ酸を出発物質としたときの影響検討などへと展開させる。

③解析研究：通常、ソフト合成で得られる固体は結晶子が小さく、単結晶解析に向かない場合が多く、特にユニットからの高次構造形成の場合、ネットワーク平面方向の結晶成長はエントロピー的に不利で、垂直方向には有利に働くので、解析できる単結晶の合成は困難である。本研究では、合成試料の粉末X線回折パターンのリートベルト解析により構造を推定する。最終的にはHAADF-STEM分析で構造を確定する。

### (2) 有機アンモニウム存在下でのユニットネットワーク固体合成

ユニットネットワーク固体合成ではユニットが複雑になればなるほどネットワーク化の際に酸素多面体の位置を制限する構造規制が働き、元素のない空間、すなわち細孔構造が生じる。この場合、固体形成にとってその空間を埋める物質があると安定化し、細孔構造に適した有機物の存在はネットワーク化に大きく正に作用すると考えられる。ゼオライト合成における構造規制剤と同様に考えるが、ユニットネットワーク固体ではユニット自体が構造規制しているため、有機物はむしろ構造安定化剤と見ることができる。その上、2次元平面の積み重なり直管型細孔内で存在できれば良いので、ゼオライトのように三次元的な構造に配慮した有機物である必要はなく、単純な直鎖状のものが良い。多くのポリ酸は有機アンモニウム塩を容易に作るため有利となる。

### (3) ユニットネットワーク固体の触媒機能

#### ①ネットワーク構造由来の触媒機能検討

新しい物質創出に伴う新触媒機能の可能性は多岐に及ぶ。ここでは触媒機能についてもユニットに着目し、ユニット由来の触媒機能がネットワーク化することによってどのような触媒機能へと発展するのかを調べる。検討対象とする触媒反応は、5族、6族を主構成元素とする複合酸化物触媒とする過酸化水素による酸化反応と酸触媒反応とした。

#### ②ユニットネットワーク固体中の非対称細孔場の触媒機能

物質創出に伴う新しい細孔構造の可能性

は多岐に及ぶと考えられる。ここでは従来に無い非対称の細孔場に着目し、細孔を形成する格子酸素の還元除去に伴う細孔径変化やアルカン分子の細孔内拡散の挙動を調べる。アルカン類の選択酸化反応を通して、2次元ネットワークで生まれるマイクロ細孔場で起こりうる新しい触媒現象を検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) ユニットネットワーク固体合成—ケギンユニット構造連結

様々なユニットを考え、その連結を水熱合成条件下で進め、いくつかの新しい物質の合成に成功した。例えば酸素5個からなる5員環ユニットが直接それ自身の1個の酸素を共有して連結し、ネットワーク構造を形成したもの、また5員環ユニットが6個環状に平面連結し、その6個環状ユニットがさらに積層してロッドユニットになり、さらにこのロッドユニットが構造配列してネットワーク構造となる新しい物質を創出した。

これらに加え、研究当初では困難であるとして検討を排除していた3次元規則的なユニットのネットワーク形成にも成功した。ユニットはケギン構造であり、マイクロ細孔を有する純粋に無機物質での3次元ユニットネットワーク固体であり、これまで全く報告例のない物質が生まれた。以下その詳細を記す。

最初に合成できた物質の化学式は  $\text{NH}_4\text{Bi}_2(\text{VMo}_{0.5}\text{V}_{2.5}\text{O}_{40})$  であった。通常  $\text{Mo}$  と  $\text{V}$  の複合酸化物の水熱合成条件で、1つの酸素八面体のユニットをリンカーとして水酸化ビスマス加えると、水熱下で生成が可能な  $\epsilon$  型のケギン構造ユニットがビスマスのリンカーで4面体方向で連結され、3次元の固体が生成した。この構造は単結晶X線構造解析で確かめられ、結合の様子は図1に示す。 $\epsilon$  型のケギン構造ユニットがビスマス酸素八面体リンカーを介してダイヤモンド構造が形成されているのが見て取れよう。この形式の連結では  $\epsilon$  型のケギン構造ユニットとビスマス酸素八面体リンカーケギンユニットの間に空隙が当然ながら生じ、結晶化過程では水分子と物質の電荷を中和するためアンモニウムイオンが位置する。これら分子とイオンは加熱により本体の構造を維持したま

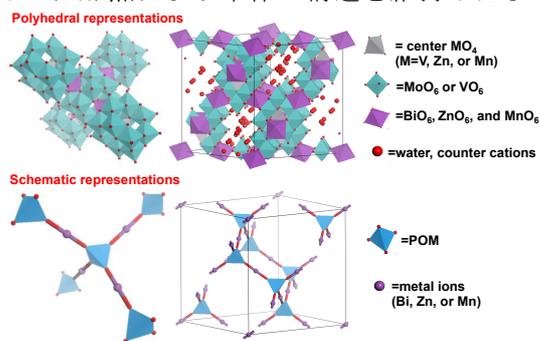


図1  $\epsilon$  ケギンユニットがBiリンカーで結合したダイヤモンド構造

ま取り除かれ、その後には空いたチャンネルとケージが残る。チャンネルの直径は0.4nm弱、ケージの径は0.7nm強と測定された。このサイズは二酸化炭素、メタン、エタンなどの小分子を吸着するに十分な大きさであり、実際図2に示されているような吸着等温線が得られ、マイクロ細孔が形成されていることが明らかとなった。ケギン構造のような分子性の金属酸化物クラスターであるポリオキシメタレートを経組織化して結晶性で細孔性の物質を合成する取り組みはかなり以前からなされていたが、成功することは無く、近年では有機物イオンや分子を介在させてポリオ

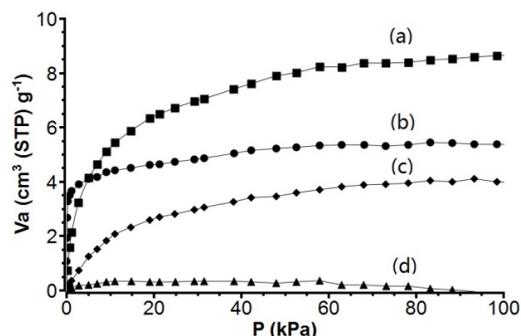


図2  $\text{Bi}_2(\text{VMo}_{0.5}\text{V}_{2.5}\text{O}_{40})$ への小分子の吸着 (a)  $\text{CO}_2$ , (b)  $\text{C}_2\text{H}_6$ , (c)  $\text{CH}_4$ , (d)  $\text{C}_3\text{H}_8$

キシメタレートベースの結晶性細孔物質の合成に注目が集まっている。本研究の成果はこれまでの研究に新たな一石を投じたことになり、得られた成果の価値は非常に高い。

$\text{Mo-Bi-O}$ 、 $\text{Mo-Fe-O}$ 、 $\text{Mo-Mn-O}$ 、 $\text{Mo-Co-O}$ 、 $\text{Mo-Zn-O}$ 系でも合成が可能なことを実証し、イオン交換能や小分子選択吸着能などの特性の検討を終えている。研究は継続して更なる関連物質の合成を目的に進めている。

##### (2) ユニットネットワーク固体合成—有機アミン効果

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (AHM)をMo前駆体として用いた場合、第3金属を添加すると主にMo、Vのアンモニウム塩とa-b面が規則的に配列していないアモルファス  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$ の混合物が得られた。 $(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_3)_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$  (EATM)をMo前駆体として用いた場合、いずれの第3金属M (M = Fe, Cu, Nb, Ta, W)を添加しても三方晶  $\text{MoVO}$ が得られた。Mo前駆体に配位しているカウンターカチオンが  $\text{MoVMO}$ の構造形成に大きく影響していることが分かった。 $\text{Mo}_3\text{VO}_x$ 合成に低級アルキルアンモニウムイオンが構造規定剤として機能することをこれまで見出したが、第3金属添加系においても  $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3^+$ が構造規定剤として機能し、三方晶  $\text{MoVMO}$ の形成を誘起したと考えられる。得られた三方晶  $\text{MoVMO}$ が第3金属を構造内に含んでいることはICP、STEM-EDX、XRDにより明確にした。以上より、カウンターカチオンを変化させることで、種々の第3

金属を  $\text{MoVO}$  の高次構造に導入できることが分かった。

### (3) ユニットネットワーク固体の触媒特性—マイクロ細孔反応場(1)

ユニットネットワーク固体の典型である斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  は低級アルカン酸化選択触媒として極めて有効である。この触媒物質は 5 員環、6 員環および 7 員環を有する  $a$ - $b$  面が  $c$  軸方向に積層して形成されており、触媒酸化活性点は  $a$ - $b$  面に存在する 7 員環部位であることが明らかになっている。一方で、7 員環部位において、反応がその表面で進行しているのか、または細孔内部で進行しているかについては未だ明らかになっていない。そこで、外表面積の異なる  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  を界面活性剤を用いて合成し、分子サイズの異なるエタン、プロパン、および 2-プロパノールの選択酸化反応を行うことで、基質のサイズとこの触媒の活性部位との関係を調べた。

界面活性剤を使用する合成法は以下のとおりである。 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  水溶液に  $\text{VOSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  水溶液をモル比  $\text{Mo}:\text{V}=4:1$  で混合したのち SDS を  $(\text{Mo} + \text{V}) : \text{SDS} = 1 : x$  ( $x = 0, 0.15, 0.30, 0.60$ ) となるように添加し、 $T^\circ\text{C}$  ( $T = 175$  or  $230^\circ\text{C}$ ) で水熱合成を行った。得られた試料を窒素流通下  $400^\circ\text{C}$  で 2 h 熱処理を行い、反応の触媒とした。反応は固定床流通式反応器を用いて行った。

合成温度、SDS の添加量を変えて、斜方晶の構造を維持したまま、結晶子径を大きく変化させることに成功した。直径が増加するに従って側面積、断面積は同様の割合で減少

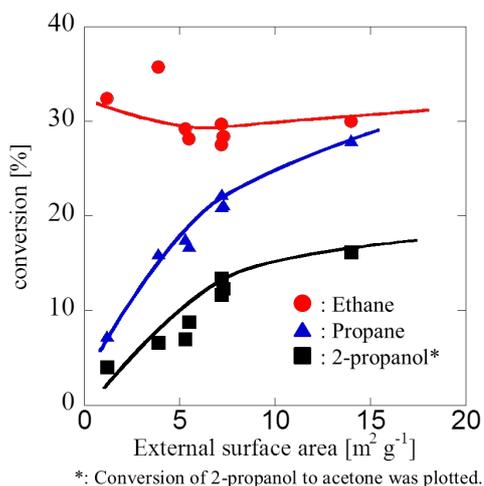


図 3. 斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  の外表面積と各基質の転化率との関係

し、これらの全外表面積に対する断面積の割合は 10% 程度でほぼ同様であった。すなわち棒状結晶の形態を保ち、長さ太さ比(アスペクト比)が一定でサイズ変化したことになる。一方、7 員環チャンネル内に吸着した窒素の量はほとんど変化しなかった。これらについてエタン、プロパンおよび 2-プロパノールの酸化的

脱水素反応を行った。合成した触媒の外表面積と各基質の転化率との関係を図 3 に示す。外表面積の変化に関連せず、エタンの転化率はほぼ一定であった。これはエタンの反応が外表面部ではなく、7 員環チャンネル内で進行していることを強く示している。7 員環のサイズは  $0.40 \text{ nm}$  とエタンのサイズとほぼ同様であり、実際にエタンは 7 員環チャンネルに入り得ることも確認している。一方、プロパン、2-プロパノールは外表面積の減少に伴い、転化率が減少した。プロパン、2-プロパノールとも 7 員環に比べ大きい分子であるために、これらは 7 員環チャンネル内に入れないと考えられ、これらの反応はマイクロ細孔内ではなく外表面で進行したと考えられる。以上より、斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  触媒のエタン選択酸化では、エタン分子は 7 員環マイクロ細孔内を

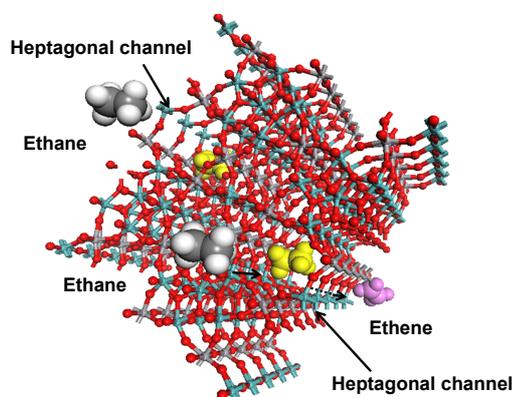


図 4. 斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  のマイクロ細孔内でのエタン酸化スキーム

自由に拡散し触媒作用を受けることになり(図 4)、本触媒の高活性の原因が明確となった。また、酸化物触媒による酸化反応がこのような機構で進む例はほとんど無く、より機能化の方法論を示すことにもなった。このことは次に示す触媒還元の効果ともつながる。

### (4) ユニットネットワーク固体の触媒特性—マイクロ細孔反応場(2)

斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  は基本的な結晶構造を変化することなく還元により格子酸素を取り去ることが出来る。水素還元のプロファイルから 2 種類 ( $\alpha$ 還元と  $\beta$ 還元) の還元部位がこの物質にはあり、還元にもなう XRD ピークシフトや強度変化を基に、前者はユニットネットワークによって形成された 5 個の酸化物八面体クラスター部位で起こり、後者はユニットネットワークのフレームワークで起こることを見出した。すなわち、還元度の進行に伴い、 $\alpha$ 還元が速やかに進行して終了する一方、 $\beta$ 還元は一定に進行し続ける。また  $\alpha$ 還元はクラスター部位で起こるだけであるため構造パラメーターには変化を及ぼさないが、 $\beta$ 還元はフレームワークの変化を伴うためパラメーター変化は著しい。

このような還元に伴い、7員環部位にも大きな構造変化が生じ、結果としてマイクロ細孔性に変化が生じる。 $\alpha$ 還元により7員環を構成する格子酸素が抜けるため、マイクロ細孔サイズが広がることになる。これは実際に通常では吸着しないプロパンが明確に吸着す

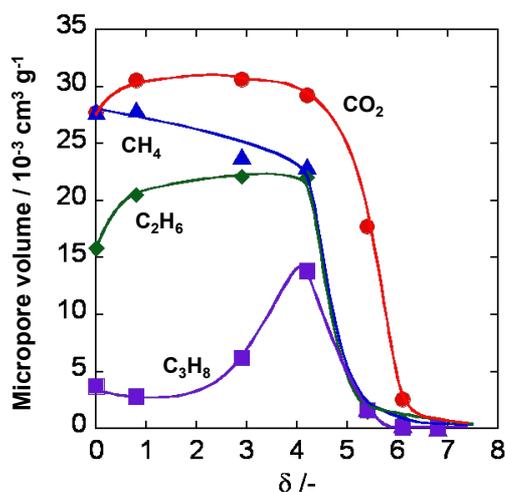


図5. 還元に伴う斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  のマイクロ細孔能変化

ることで確認された(図5)。さらに、還元が進むと7員環の短軸長の長さがユニットフレームワークが歪むため減少することがリートベルト解析で示され、それに伴って小分子の吸着が顕著に減少した(図5)。斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  のユニットネットワーク構造と酸化還元性の構成元素の持つ際立った特徴と言えよう。

それぞれの還元状態でのエタン酸化触媒能を調べた。 $\beta$ 還元は容易に酸素酸化で解消されるので、触媒反応の初期活性をまとめ、図6に示す。エタン酸化活性は一端向上し、そして急激に減少する。高還元での減少はエタン分子が活性部位に到達できないことで

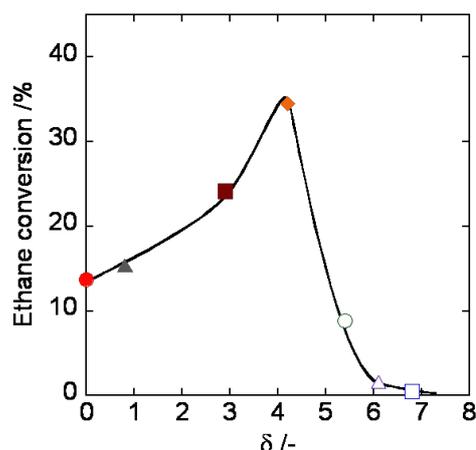


図6. 還元に伴う斜方晶  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  のエタン酸化初期活性変化

容易に説明できる。一方低還元域での活性向上はもともとあった7員環部に面する酸化物クラスターの酸素が抜けることにより酸化触媒活性部位が発生すると考えることで

説明できる。確定には更なる検討が必要であるが、ユニットワークの構造変異がもたらす現象である事に間違いは無く、新しい触媒機能の一つとして捉えるべきであろう。加えて、格子酸素が抜けた後のマイクロ孔はプロパン分子を吸着できる大きさとなり、その形状は非対称マイクロ細孔であった。研究当初に計画した物質状態を作ることに繋がった。

#### (5) ユニットネットワーク固体の触媒特性—その他

Mo やV以外の5族、6族の元素の酸化物にユニットワーク形成の方法論を展開した。Mo に比べ酸素八面体の歪みを許容できないWやNbでは長周期のユニットネットワーク構造がとれない。これが原因で、結晶物質を得ることは今回の研究では成功しなかったが、各種分析により5員環や6員環のユニットの形成は確認され、ネットワークが形成していると結論した。

このような状態の複合酸化物は予想以上に触媒反応(ベンジルアルコールによるアルキレーション、水中でのルイス酸触媒反応など)に高い活性を示し、従来型の合成で得た触媒とは大きく性能が異なった。ユニットネットワーク構造がもたらす特異性能との認識のもと、以上の構造情報を基にその詳細を現在検討している。同時に、ネットワーク形成であるがゆえに長周期構造がとれない特徴は、ナノサイズ物質を与えようとする力となり、その結果としてバルクに比して表面の割合が高くなり、触媒機能発現に有利となる。

以上の触媒物質物性は有機物の液相過酸化水素酸化にも効果を示す。実際スルフィドの酸化に高性能を示すことが実証され、更なる展開が進んでいる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計10件)

- ① Tetrahedral Connection of  $\epsilon$ -Keggin-type Polyoxometalates To Form an All-Inorganic Octahedral Molecular Sieve with an Intrinsic 3D Pore System, Z. X. Zhang, M. Sadakane, T. Murayama, S. Izumi, N. Yasuda, N. Sakaguchi, W. Ueda, *Inorg. Chem.*, **53**, 903-911(2014) 査読有
- ② Layered Perovskite Oxide: A Reversible Air Electrode for Oxygen Evolution/Reduction in Rechargeable Metal-Air Batteries,, T. Takeguchi, T. Yamanaka, H. Takahashi, H. Watanabe, T. Kuroki, H. Nakanishi, Y. Orikasa, Y. Uchimoto, H. Takano, N. Ohguri, M. Matsuda, T. Murota, K. Uosaki, and W. Ueda *J. Am. Chem. Soc.* **135**(30), 11125-11130. (2013) 査読有
- ③ Synthesis of novel orthorhombic Mo and V based complex oxides coordinating alkylammonium cation in its heptagonal channel and their application as a catalyst,

- S. Ishikawa, T. Murayama, S. Ohmura, M. Sadakane, W. Ueda, *Chemistry of Materials*, **25**, 2211-2219(2013) 査読有
- ④ Single-Crystalline-Phase  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$ : An Efficient Catalyst for the Partial Oxidation of Acrolein to Acrylic Acid. C. Chen, N. Kosuke, T. Murayama, W. Ueda. *Chem CatChem*, **5**(10), 2869-2873 (2013) 査読有
- ⑤ An orthorhombic  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  catalyst most active for oxidative dehydrogenation of ethane among related complex metal oxides, T. Konya, T. Katou, T. Murayama, S. Ishikawa, M. Sadakane, D. Buttrey, W. Ueda. *Catalysis Science & Technology* **3**, 380-387(2013) 査読有
- ⑥ Establishment of crystalline complex Mo-V-oxides as selective oxidation catalysts, W. Ueda, *J. Japan Petro. Inst.*, **56** 122-132(2013) 査読有
- ⑦ Assembly of a Pentagonal Polyoxomolybdate Building Block,  $[\text{Mo}_6\text{O}_{21}]^{6-}$ , into Crystalline MoV Oxides, M. Sadakane, K. Endo, K. Kodato, S. Ishikawa, T. Murayama, W. Ueda, *European Journal of Inorganic Chemistry*, **10-11**, 1731-1736(2013) 査読有
- ⑧ Hydrothermal synthesis of W-Nb complex metal oxides and their application to catalytic dehydration of glycerol to acrolein, K. Omata, S. Izumi, T. Murayama, W. Ueda, *Catal. Today*, **201**, 7-11(2013) 査読有
- ⑨ Synthesis of porous and acidic complex metal oxide catalyst based on group 5 and 6 elements, T. Murayama, N. Kuramata, S. Takatama, K. Nakatani, S. Izumi, X. Yi, W. Ueda, *Catalysis Today*, **185**, 224-229(2012) 査読有
- ⑩ Redox tunable reversible molecular sieves: Orthorhombic molybdenum vanadium oxide, M. Sadakane, S. Ohmura, K. Kodato, T. Fujisawa, K. Kato, K. Shimidzu, T. Murayama, W. Ueda, *Chem. Commun.*, **47**, 10812-10814(2011) 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 平田純 村山徹 上田渉 「層構造を有する W-Ti-O 複合酸化物の水熱合成およびその酸触媒活性」第 62 回 石油学会研究発表会 タワーホール船堀(東京都)5 月 28 日 (2013)
- ② Z.X. Zhang S. Izumi T. Murayama, W. Ueda, 「New Octahedral Molecular Sieve Constructed by Polyoxometalates and Bismuth Linkers with Zeolite-like 3D Micropores」APCAT-6 台北 インターナショナルコンベンションセンター(台湾) 10 月 17 日(2013)
- ③ 石川理史、Yi Xiaodong、村山徹、上田渉

「界面活性剤を用いた結晶性 Mo-V-O 複合酸化物の合成および低級アルカン選択酸化活性」第 110 回触媒討論会 九州大学 (福岡県) 9 月 25 日(2012)

- ④ 小林大地、石川理史、村山徹、上田渉 「三方晶 Mo-V-O 複合酸化物の構造解析と酸化触媒活性」第 110 回触媒討論会 九州大学 (福岡県) 9 月 25 日(2012)
- ⑤ T. Murayama, K. Nakatani, T. Konya, and W. Ueda "Mo<sub>3</sub>VO<sub>x</sub> with High Dimensional Structures as True Active Phase for Catalytic Acrolein Oxidation and Ethane Oxidation", Europacat X, グラスゴー (イギリス), 8 月 28-9 月 2 日 (2011)
- ⑥ W. Ueda, T. Murayama, K. Nakatani, T. Konya "Catalytic oxidation property of Mo<sub>3</sub>VO<sub>x</sub> in unit network structure with pore", ADHOC2011, Bankoku Shinryokan(沖縄), 7 月 3-8 日 (2011)
- ⑦ T. Murayama, N. Kuramata, S. Takatama, K. Nakatani, S. Izumi, X. Yi, W. Ueda, "Synthesis of porous and acidic complex metal oxide catalyst based on group 5 and 6 elements", The 13th Korea-Japan Symposium on Catalysis, 済州島(韓国), 4 月 23-25 日 (2011)

[図書] (計 1 件)

- ① M. Sadakane, Y. Kamiya, W. Ueda, Heteropoly Compounds, Comprehensive Inorganic Chemistry II, Vol. 7 Oxford: Elsevier 2013 185-204

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 渉 (Ueda Wataru)  
北海道大学・触媒化学研究センター・教授  
研究者番号: 20143654

(2) 研究分担者

竹口 竜弥 (Takeguchi Tatsuya)  
北海道大学・触媒化学研究センター・准教授  
研究者番号: 30227011

清水 研一 (Shimizu Kenichi)  
北海道大学・触媒化学研究センター・准教授  
研究者番号: 60324000

村山 徹 (Murayama Toru)  
北海道大学・触媒化学研究センター・助教  
研究者番号: 60583531

(3) 連携研究者

定金 正洋 (Sadakane Masahiro)  
広島大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 10342792

神谷 裕一 (Kamiya Yuichi)  
北海道大学・地球環境科学研究所・准教授  
研究者番号: 10374638