

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760636

研究課題名(和文)水存在下で機能する固体ルイス酸触媒を用いた糖類からの必須化学資源の合成

研究課題名(英文) Conversion of sugars into important chemical intermediates over solid Lewis acid catalysts workable in water

研究代表者

中島 清隆 (Kiyotaka, Nakajima)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教

研究者番号：90451997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：前周期遷移金属を含む固体酸化物表面の電子欠損サイトが水溶液内でも安定なルイス酸性質を示すことを見出した。この酸化物ルイス酸をトリオース(3炭糖)が溶けた水溶液内にいれ110℃で加熱すると、高い効率で乳酸が生成することを見出した。これは固体表面のルイス酸が活性サイトとして機能し、3炭糖の脱水・異性化反応を進行させたためである。安定な固体酸化物触媒を用いて多様な糖類の水溶液内での変換反応を制御することができれば、化石資源が枯渇した後に植物由来の炭化水素を原料とした必須化学品合成の基盤技術となる。

研究成果の概要(英文)：Lewis acid sites on early transition metal oxides and their mixed oxides are found to be active in water. They can convert 1,3-dihydroxyacetone, a triose sugar, into lactic acid through stepwise dehydration and hydride transfer reactions. This finding is one important technology for the development of environmentally benign production of important chemicals from renewable plant-derived carbohydrates after diminishing fossil fuel resources.

研究分野：触媒化学

キーワード：固体酸塩基

## 1. 研究開始当初の背景

持続可能な循環型社会を確立するため、化石資源に代わる循環可能な“新たな化学資源”の獲得が重要な課題となっている。代表的な木質系バイオマスの場合、その構造は糖類の高分子「セルロース・ヘミセルロース」と芳香族炭化水素の複雑な高分子「リグニン」で構成されている。セルロース・ヘミセルロースから得た糖類は食品、医薬品の原料となるだけでなく、フルフラールや有機酸を経由しエンジニアプラスチックなど高分子の原料を含めた様々な化成品に変換することができる。高効率でバイオマスを必須化学品に変換する化学プロセスの構築は、化石資源に依存しない新たな循環型社会を構築するための基盤技術となる。

糖類を有用な化成品原料に変換するプロセスは主に発酵法によるエタノール合成が代表的であるが、近年では触媒による変換法が活発に研究されている。触媒法による化学変換では大規模な展開が比較的容易に可能となるため、汎用的な製造プロセスを展開する上で非常に有利となる。さらに、触媒法により廃棄物の出ないクリーンなバイオマス変換プロセスが構築できれば、本格的な化石資源の代替化が進行すると期待できる。

我々はすでに、生成物と触媒の分離が容易で繰り返し利用可能な固体酸触媒を用いて、代表的な植物由来の炭化水素であるグルコースから多様な必須プラスチックの代替原料となる 5-ヒドロキシメチルフルフラール (HMF) を選択的に合成する触媒反応システムの構築に取り組み、含水状態のアモルファス酸化ニオブ (以下、含水ニオブ酸) が水溶液中でも HMF を合成できることを見出した。含水ニオブ酸の水中での触媒作用の解明を進めれば、糖変換反応に適用できる新たな固体触媒の開発が進み、これまで達成されていない高選択的な水中での糖変換反応系が構築できる。

## 2. 研究の目的

IV, V 属の遷移金属酸化物の水存在下におけるルイス酸性質とその酸触媒特性を明らかにすることを研究目的と設定した。具体的には  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  とその複合酸化物に焦点を絞り、①高表面積化による高活性化、②表面改質による酸性質制御、③塩基性プローブ分子による表面酸性質 (酸量・酸強度) の評価と活性サイトの解明に取り組んだ。

## 3. 研究の方法

### (1). 酸化チタン触媒の合成

20 mL の  $\text{Ti}(\text{i-pro})_4$  を 200 mL の蒸留水に加え、その溶液を室温で 3 時間攪拌した。生成した白色沈殿を吸引濾過で回収し、多量の蒸留水で洗浄し副生したアルコールを除去した。回収した白色粉末を 0.1 M の塩酸水溶液 (300 mL) に加え室温で 12 時間攪拌し、酸化チタン骨格の加水分解・重縮合を促進させ

た。吸引濾過によって回収した白色粉末を濾液が中性になるまで蒸留水で繰り返し洗浄し、目的の酸化チタンを得た。

次に、酸化チタン (約 5 g) を 1.0 M のリン酸水溶液 (300 mL) に加えて室温で 48 時間攪拌し、酸化チタンの表面水酸基にリン酸を固定した。得られた試料を大量の蒸留水により濾液が中性になるまで繰り返し洗浄した。吸引濾過で回収した触媒を 353~373 K のオーブンで乾燥させ、目的のリン酸固定酸化チタン (Phosphate/ $\text{TiO}_2$ ) を得た。

### (2). $\text{WO}_x/\text{ZrO}_2$ の合成

前駆体  $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  を含む水溶液を  $\text{Zr}(\text{OH})_4$  に  $\text{W}/\text{Zr} = 1\sim 15$  atom% の割合で含浸担持し、873 K で焼成することにより  $\text{WO}_x/\text{ZrO}_2$  を得た。以下、合成した試料を  $\text{X}\%\text{WO}_x/\text{ZrO}_2$  (X: タングステン含有量 (mol%)) と表す。

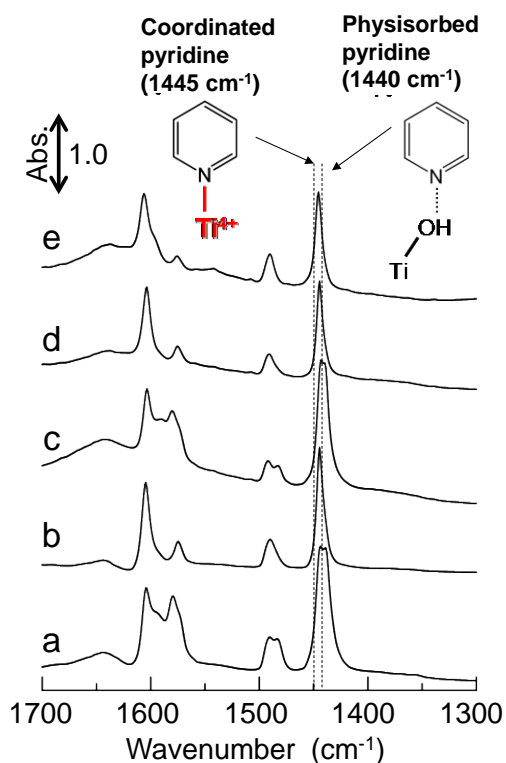
### (3). トリオースからの乳酸合成

1,3-DHA 水溶液 (0.1 M, 2 mL) と触媒 (0.1 g) を耐圧バイアルに導入し、383 K で 3 時間加熱攪拌した。得られた溶液を HPLC により定性・定量した。

## 4. 研究成果

### (1). 酸化チタン触媒の水中ルイス酸性質と乳酸合成反応

XRD および  $\text{N}_2$  吸着分析の結果より、合成した  $\text{TiO}_2$  および phosphate/ $\text{TiO}_2$  は低結晶性のアナターゼ相で構成されており、その表面積は 252 および  $266 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  であった。また高分解能 SEM 分析より、これらの試料は 10~20 nm 程度の一次粒子が凝集して数  $\mu\text{m}$  の二次粒子を形成しており、一次粒子の粒子間隙によってメソ細孔が形成されている。Figure 1 はピリジン吸着した  $\text{TiO}_2$  および phosphate/ $\text{TiO}_2$  の FT-IR スペクトルを示す。脱水および水和した酸化チタンにピリジン蒸気を導入した場合 (Figures 1(a), 1(c)), ルイス酸サイトに配位したピリジン ( $1445 \text{ cm}^{-1}$ ) および物理吸着ピリジン ( $1440 \text{ cm}^{-1}$ ) に由来するシグナルが見られ、配位ピリジン種のシグナルは真空排気処理後も確認された (Figures 1(b), 1(d))。水和した試料表面は約 4.2 層の物理吸着水で覆われており、酸化チタンのルイス酸は水存在下でも機能することが示唆された。また、これらスペクトルではピリジニウムイオン種に由来するシグナル ( $1540 \text{ cm}^{-1}$ ) が見られなかったため、 $\text{TiO}_2$  表面にはブレンステッド酸が存在しない。Phosphate/ $\text{TiO}_2$  の場合も同様の傾向を示しており、水和した試料でもルイス酸に配位したピリジン種のシグナルが確認された (Figure 1(e))。吸着ピリジン種のモル吸光係数を用いて脱水・水和した  $\text{TiO}_2$  および Phosphate/ $\text{TiO}_2$  のルイス酸量を算出すると、それぞれ  $0.26$ ,  $0.24 \text{ mmol g}^{-1}$  および  $0.24$ ,  $0.22 \text{ mmol g}^{-1}$  と算出された。よって、酸化チタン表面の大部分のルイス酸サイトは水中でも機能すると考えられる。



**Figure 1.** Difference FT-IR spectra for  $\text{TiO}_2$  samples at 298 K. (a) Pyridine adsorbed on dehydrated  $\text{TiO}_2$ . Prior to pyridine adsorption, the sample was heated at 473 K for 1 h under vacuum to remove physisorbed  $\text{H}_2\text{O}$ . Gas phase pyridine pressure: 0.67 kPa. (b) After vacuum evacuation (298 K, 60 min) of (a). (c) Pyridine adsorbed on  $\text{TiO}_2$  in the presence of saturated water vapor. Water vapor pressure: 2.0 kPa. Gas phase pyridine pressure: 1.4 kPa. (d) After vacuum evacuation (298 K, 60 min) of (c). (e) Pyridine adsorbed on Phosphate/ $\text{TiO}_2$  in the presence of saturated water vapor. Water vapor pressure: 2.2 kPa. Gas phase pyridine pressure: 1.1 kPa. After pyridine adsorption, the sample was evacuated at 298 K for 60 min.

**Table 1** Catalytic activity for lactic acid production from 1,3-DHA over acid catalysts.

Catalyst	Acid density / $\text{mmol g}^{-1}$		Conv <sup>d</sup> (%)	Product yield (%)		
	BAS <sup>a</sup>	LAS <sup>b</sup>		PA	LA	Others <sup>e</sup>
$\text{H}_2\text{SO}_4$	20.4	-	>99	58.8	32.6	8.6
$\text{H}_3\text{PO}_4$	26.0	-	>99	81.9	2.5	15.6
Nafion NR50	0.90	-	82.0	51.9	2.6	27.6
$\text{Sc}(\text{OTf})_3$	-	2.0 <sup>c</sup>	>99	17.7	65.5	34.5
$\text{TiO}_2$	0.0	0.26 <sup>c</sup>	>99	0.0	20.7	79.3
Phosphate/ $\text{TiO}_2$	0.0	0.24 <sup>c</sup>	>99	7.9	78.5	13.6

<sup>a</sup> Brønsted acid sites. <sup>b</sup> Lewis acid sites. <sup>c</sup> Water-tolerant acid sites. <sup>d</sup> 1,3-DHA conversion (%). <sup>e</sup> Undetectable species.

Table 1 には、1,3-DHA 水溶液からの乳酸合成におけるブレンステッド酸およびルイス酸触媒の触媒活性を示す。1,3-DHA は酸触媒によって脱水生成物であるピルブアルデヒド (Pyruvaldehyde: PA) へと変換され、さらにヒドリド移動を含む逐次的な異性化反応によって乳酸へと変換される。ブレンステッド酸触媒 (硫酸, 塩酸, ナフイオン樹脂) は高い転化率を示すが主生成物は脱水生成物である PA であり、乳酸収率は低い。一方、水中で機能する均一系ルイス酸錯体である  $\text{Sc}(\text{OTf})_3$  は高い転化率と乳酸収率を示した。従って、ブレンステッド酸触媒は脱水反応のみ進行させるが、ルイス酸触媒は脱水・異性化反応の両方を触媒することが確認された。 $\text{TiO}_2$  は  $\text{Sc}(\text{OTf})_3$  に類似の反応特性を示したが、リン酸処理することにより乳酸収率の大幅な向上が見られた。 $\text{TiO}_2$  および Phosphate/ $\text{TiO}_2$  はブレンステッド酸を持たないこと、さらにリン酸自体は本反応に活性を示さないことを考慮すると、その活性サイトは水中で機能するルイス酸サイトと考えられる。リン酸処理による収率向上は副反応の抑制によるものであり、主にアルドール縮合反応などで生成する高分子成分 (unknown) の収率が 1/5 に減少した。

$\text{TiO}_2$  および phosphate/ $\text{TiO}_2$  の触媒活性の差を検討するため、CO をプローブ分子とした FT-IR 測定によりルイス酸の酸強度を評価した。脱水・水和した試料に対して 100 K で CO を導入するとルイス酸に吸着した配位ピリジンが約 2179~2182  $\text{cm}^{-1}$  に確認された。リン酸導入前後もルイス酸強度に変化はないため、触媒活性の違いは単純なルイス酸の酸量・酸強度では整理できない。次に、反応基質である 1,3-DHA を吸着分子に用いた FT-IR 測定を行った。脱水した試料に 1,3-DHA を吸着させるとカルボニル基の C=O 伸縮振動の低波数シフトが確認され、これはルイス酸に 1,3-DHA のカルボニル基が配位したことによる。Phosphate/ $\text{TiO}_2$  では、C=O 伸縮振動のシフト幅が  $\text{TiO}_2$  よりも大きく、さらにリン酸の OH 伸縮振動の減少も同時に見られた。2 つの試料ではルイス酸の酸強度に変化がなく、Ti-OH と反応基質は水素結合を形成しないため、カルボニル基のピークシフトの差はリン酸との水素結合形成に由来すると考えられる。一般に水素結合を形成した基質は反応性が低下すると考えられており、リン酸導入による反応性の変化は基質との水素結合形成が寄与していると考えられる。以上の結果より、ルイス酸近傍に固定したリン

酸基が反応基質と水素結合を形成することによりカルボニル基を介した分子間副反応を抑制し、その結果として乳酸収率が飛躍的に向上したと考えられる。

## (2). $\text{WO}_x/\text{ZrO}_2$ の水中ルイス酸特性

Figure 2 には試料の XRD パターンを示す。すべての試料において酸化タングステンに由来する回折ピークは現れず、 $\text{ZrO}_2$  担体の回折パターンのみが観測された。873 K で焼成した  $\text{ZrO}_2$  は安定な単斜晶となるが、 $\text{WO}_x$  の導入により準安定相である正方晶へと変化した。一方、酸化タングステンに由来するシグナルは見られていないため、幅広い担持量領域においてタングステン種はジルコニア担体上に高分散していると考えられる。Figure 3 には試料のラマンスペクトルを示す。 $\text{ZrO}_2$  担体の正方晶および単斜晶に由来するシグナルが現れており、XRD パターンの結果と良い一致を示した。また、バルク状酸化タングステンに由来するシグナル ( $714, 804 \text{ cm}^{-1}$ ) は見られず、 $820 \text{ cm}^{-1}$  および  $970\sim 980 \text{ cm}^{-1}$  に W-O-W 結合および W=O 結合に由来するシグナルが確認された。これらのシグナルはタングステン導入量の増加に伴ってそのシグナル強度が増加しており、導入したタングステン種は微小なクラスター状態となってジルコニア表面に高分散していると考えられる。

試料の酸性質は塩基性プローブ分子であるピリジンを用いた FTIR 測定によって評価した。 $\text{ZrO}_2$  はルイス酸のみを有するが、タングステンの導入によりブレンステッド酸に由来するシグナル ( $1540 \text{ cm}^{-1}$ , ピリジニウムイオン) が現れた。ブレンステッド酸量はタングステン導入量と連動して増加した。これらのブレンステッド酸・ルイス酸サイトは吸

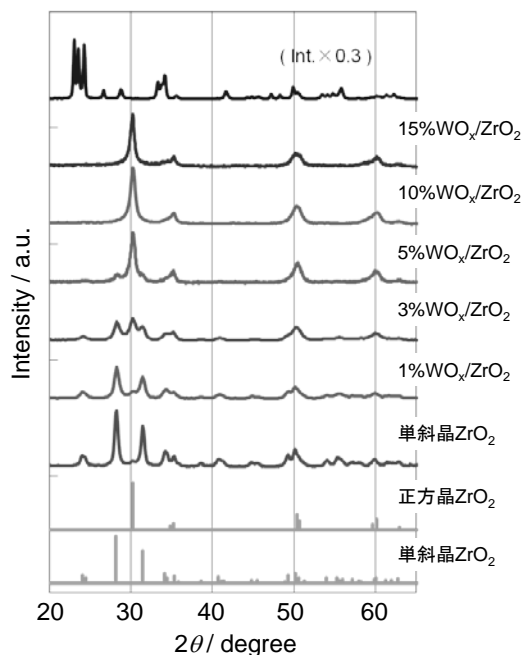


Figure 2. XRD patterns of  $\text{WO}_x/\text{ZrO}_2$  samples with various W contents.

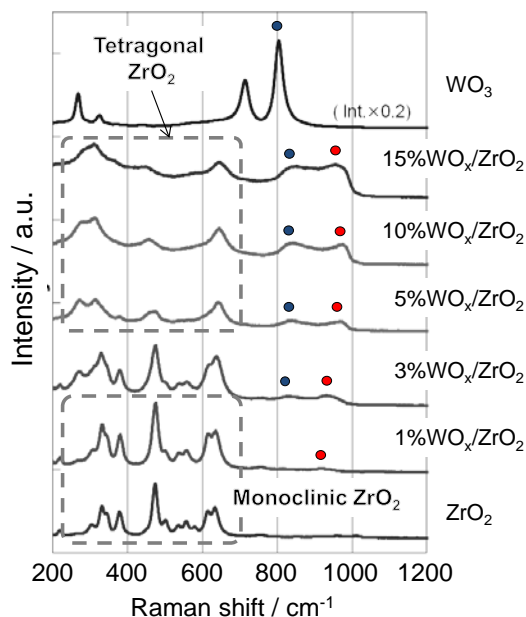


Figure 3. Raman spectra of  $\text{WO}_x/\text{ZrO}_2$  samples with various W contents.

着水存在下においてもピリジン分子と相互作用できるため、 $\text{WO}_3/\text{ZrO}_2$  のルイス酸とブレンステッド酸は水溶液内でも機能すると期待できる。

試料の触媒活性は、1,3-ジヒドロキシアセトン (1,3-DHA) 水溶液からの乳酸合成によって評価した。本反応は 1,3-DHA の脱水反応と中間生成物であるヒドリド移動反応によって進行する。Figure 4 には  $\text{WO}_3/\text{ZrO}_2$  および比較触媒である均一系触媒の触媒活性を示す。均一系ブレンステッド酸触媒 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) は高い 1,3-DHA 転化率を示すが、主な生成物は脱水反応によるピルブアルデヒドとなった。一方、均一系ルイス酸触媒である  $\text{Sc}(\text{OTf})_3$  では高い転化率 (> 99%) と乳酸収率 (ca. 60%) を示しており、後段のヒドリド移動反応にはルイス酸が有効であるこ

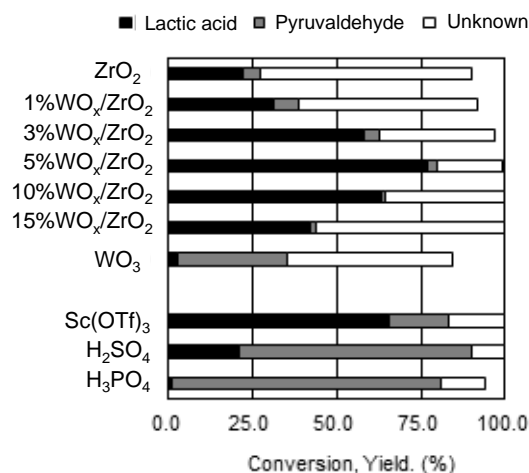


Figure 4. Catalytic activities of  $\text{WO}_x/\text{ZrO}_2$  and reference catalysts for lactic acid formation from 1,3-DHA in water

とが確認できた。WO<sub>x</sub>/ZrO<sub>2</sub> の触媒活性を比較すると、WO<sub>x</sub> 導入量の増加とともに乳酸収率・選択率が向上し、WO<sub>x</sub> 導入量 5 % で最高活性を示した。WO<sub>x</sub>/ZrO<sub>2</sub> の高い触媒活性は、ブレンステッド酸およびルイス酸が脱水・ヒドリド移動反応に対して有効に機能したためであると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文 (査読有)〕 (計 11 件)

1. Hiroshi Shintaku, **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, "Efficient Mukaiyama aldol reaction in water with TiO<sub>4</sub> tetrahedra on a hydrophobic mesoporous silica surface", *Chemical Communications*, **2014**, 50, 13473-13476.

DOI: 10.1039/C4CC05711B

2. Hiroshi Shintaku, **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Nobuyuki Ichikuni, Michikazu Hara, "Lewis Acid Catalysis of TiO<sub>4</sub> Tetrahedra on Mesoporous Silica in Water", *ACS Catalysis*, **2014**, 4, 1198-1204.

DOI: 10.1021/cs401149n

3. Yusuke Koito, **Kiyotaka Nakajima**, Ryota Hasegawa, Hisayoshi Kobayashi, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, "Slow reactant-water exchange and high catalytic performance on metal triflates", *Chemistry- A European Journal*, **2014**, 20, 8068-8075.

DOI: 10.1002/chem.201400240

4. Masaaki Kitano, Emiko Wada, **Kiyotaka Nakajima**, Shigenobu Hayashi, Souichi Miyazaki, Hisayoshi Kobayashi, Michikazu Hara, "Protonated Titanate Nanotubes with Lewis and Brønsted Acidity: Relationship between Nanotube Structure and Catalytic Activity", *Chemistry of Materials*, **2013**, 25, 385-393.

DOI: 10.1021/cm303324b

5. Yusuke Koito, **Kiyotaka Nakajima**, Ryota Hasegawa, Hisayoshi Kobayashi, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, "Lewis acid properties of some metal salts for lactic acid formation in water: <sup>31</sup>P NMR spectroscopy with trimethylphosphine oxide as a molecular probe", *Catalysis Today*, **2014**, 226, 198-203.

DOI: 10.1016/j.cattod.2013.10.071

6. Emiko Wada, Masaaki Kitano, **Kiyotaka Nakajima**, Michikazu Hara, "Effect of Preparation Conditions on Structural and Acid Catalytic Properties of Protonated Titania Nanotubes", *Journal of Materials Chemistry A*, **2013**, 1, 12768-12774.

DOI: 10.1039/c3ta13015k

7. Hironobu Oki, Tsuyoshi Morita, **Kiyotaka Nakajima**, Michikazu Hara, "MoO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> as a stable, reusable, and highly active solid acid catalyst for polyester polyol synthesis", *Chemistry Letters*, **2013**, 42, 1314-1316.

DOI: 10.1246/cl.130635

8. **Kiyotaka Nakajima**, Ryouhei Noma, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, "Titania as an Early Transition Metal Oxide with a High Density of Lewis Acid Sites workable in Water", *Journal of Physical Chemistry C*, **2013**, 117, 16028-16033.

DOI: 10.1021/jp404523r

9. Kiichi Fukuhara, **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Shigenobu Hayashi, Michikazu Hara, "Synthesis and Acid Catalysis of Zeolite-Templated Microporous Carbons with SO<sub>3</sub>H Groups", *Physical Chemistry Chemical Physics*, **2013**, 15, 9343-9350.

DOI: 10.1039/c3cp43853h

10. Satoshi Suganuma, **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Shigenobu Hayashi, Michikazu Hara "sp<sup>3</sup>-linked Amorphous Carbon with SO<sub>3</sub>H Groups as a Heterogeneous Acid Catalyst", *ChemSusChem*, 2012, 5, 1841-1846.

DOI: 10.1002/cssc.201200010

11. **Kiyotaka Nakajima**, Michikazu Hara, "Amorphous Carbon with SO<sub>3</sub>H Groups as a Strong Brønsted Acid Catalyst", *ACS Catalysis*, **2012**, 2, 1296-1304.

DOI: 10.1021/cs300103k

〔学会発表〕 (計 20 件)

① **中島清隆**, "酸化チタンの水中類酸特性とグリセロール水溶液からの乳酸合成への応用", 日本化学会第 95 回春季年会, 2015 年 3 月 26-29 日, 日本大学船橋キャンパス (千葉県習志野市)

② **中島清隆**・野間遼平・北野政明・原亨和, "酸化チタン触媒による水中でのグルコースからの HMF 生成メカニズム", 第 44 回石油・石油化学討論会, 2014 年 11 月 16-17 日, 旭川グランドホテル (北海道旭川市)

③ **Kiyotaka Nakajima**, "Lactic Acid production from a Triose Sugar over Solid Lewis Acid Catalyst in Water", 第 44 回石油・石油化学討論会, 2014 年 11 月 16-17 日, 旭川グランドホテル (北海道旭川市)

④ **中島清隆**, "固体ルイス酸による糖類からフラン類・有機酸の環境低負荷合成", 第 17 回規則性多孔体セミナー・鳥取講演会, 2014 年 11 月 13 日, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市)

⑤ **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, "(5-Hydroxymethyl)furfural Production from Glucose Aqueous Solution over Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> with Water-Tolerant Lewis Acid Sites", 8<sup>th</sup> International Symposium on Group Five Elements, June-24<sup>th</sup>-27<sup>th</sup>, 2014, Malaga, Spain.

⑥ **中島清隆**・新宅泰・北野政明・原亨和, "チタン含有メソポーラスシリカによる水中での向山アルドール反応", 石油学会第 62 回発

表会, 2014年5月27-28日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

⑦中島清隆, “固体NMRによるカーボン固体強酸の構造解析と機能解明”, ナノテクノロジープラットフォーム技術セミナー「固体NMR」, 2013年12月16日, 産業技術総合研究所つくばセンター(茨城県つくば市)

⑧中島清隆・竹田大樹・北野政明・原亨和, “タングステン担持ジルコニア触媒の水中ルイス酸特性”, 第43回石油・石油化学討論会, 2013年11月7-8日, 北九州国際会議場(福岡研北九州市)

⑨中島清隆, “固体ルイス酸を用いた糖水溶液からのフラン類・有機酸合成”, 第112回触媒討論会, 2013年9月18-20日, 秋田大学(秋田県秋田市)

⑩ **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, “Selective Production of Lactic Acid from Triose over Phosphate/TiO<sub>2</sub> with Water-Tolerant Lewis Acid Sites”, 11<sup>th</sup> European Congress on Catalysis, September 1<sup>st</sup>-6<sup>th</sup>, 2013, Lyon, France.

⑪中島清隆・新宅泰・北野政明・一國伸之・原亨和, “メソポーラスチタノシリケートの水中ルイス酸特性”, 石油学会第61回研究発表会, 2013年5月28-29日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

⑫中島清隆, “カーボン固体酸の高機能化および含水ニオブ酸の水中ルイス酸触媒特性”, 石油学会第62回研究発表会, 2013年5月28-29日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

⑬ **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, “Selective Production of Lactic Acid from Triose over Phosphate/TiO<sub>2</sub> with Water-Tolerant Lewis Acid Sites”, 7<sup>th</sup> International Symposium on Acid-Base Catalysis, May 12<sup>th</sup>-15<sup>th</sup>, 2013, Tokyo, Japan (TKP Garden City Shinagawa).

⑭中島清隆, “固体ルイス酸を用いた水中でのバイオマス変換: 植物から化学品原料への環境低負荷合成”, 第16回規則性多孔体研究会セミナー, 2013年3月4日, 東京大学(東京都目黒区)

⑮中島清隆, “固体ルイス酸による水溶液内の糖類の脱水・異性化反応”, 2012年度触媒学会北海道支部・札幌講演会, 2012年12月7日, 北海道大学(北海道札幌市)

⑯中島清隆・福原紀一・北野政明・林繁信・原亨和, “スルホン化したマイクロポーラスカーボンの酸触媒特性”, 第28回ゼオライト研究発表会, 2012年11月29-30日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

⑰中島清隆・野間遼平・北野政明・原亨和, “酸化チタンの水中ルイス酸特性”, 第42回石油・石油化学討論会, 2012年10月11-12日, 秋田大学(秋田県秋田市)

⑱中島清隆・北野政明・原亨和, “固体ルイス酸を用いたトリオース水溶液からの乳酸合成”, 第110回触媒討論会, 2012年9月

24-26日, 九州大学(福岡県福岡市)

⑲ **Kiyotaka Nakajima**, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, “Selective Production of lactic acid from Triose over Phosphate/TiO<sub>2</sub> with Water-Tolerant Lewis Acid Sites”, International Congress on Catalysis 2012, July 1<sup>st</sup>-6<sup>th</sup>, 2012, Munich, Germany

⑳中島清隆・北野政明・原亨和, “固体ルイス酸によるトリオース水溶液からの乳酸合成”, 石油学会第60回発表会, 2012年5月24-25日, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

中島 清隆 (Kiyotaka NAKAJIMA)

国立大学法人東京工業大学・応用セラミック  
ス研究所・助教

研究者番号: 90451997