

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05556

研究課題名(和文)水中機能固体触媒を用いた植物由来炭化水素からのワンポット乳酸合成反応の構築

研究課題名(英文)One-pot synthesis of lactic acid from biomass-derived carbohydrates over water-tolerant solid catalyst

研究代表者

中島 清隆 (Kiyotaka, Nakajima)

北海道大学・触媒科学研究所・准教授

研究者番号：90451997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,600,000円

研究成果の概要(和文)：固体触媒の技術を駆使して、人類の食料と競合しない植物由来の原料(炭水化物)から一段階反応にて乳酸を合成することを検討した。生分解性プラスチックを含む多様な用途開発が進んでいる乳酸を、油脂工業の廃棄物(グリセリン)や木材を構成する糖(グルコース)から固体触媒によって合成できることを見出した。“高効率で副生成物のない環境調和型化学反応”にて低エネルギー消費条件で大量に乳酸が合成できることは意義深い。

研究成果の概要(英文)：Chemocatalytic conversion of biomass-derived carbohydrates including glycerol and glucose to lactic acid was studied using a stable and highly active solid catalysts. We found that metallic Pt sites and Lewis acid sites on TiO₂-supported Pt nanoparticles are active for aerobic oxidation of glycerol to triose sugars and subsequent transformation of these C3 sugars to lactic acid, respectively. A combination Lewis acid and base sites on niobium-containing mixed oxides is effective for step-wise conversion of glucose to lactic acid that contains isomerization (glucose to fructose), retro-aldol condensation (fructose to triose sugars), and dehydration/isomerization (triose sugars to lactic acid) in water.

研究分野：触媒科学

キーワード：固体触媒

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、化石資源に代わる再生可能な“新たな化学資源”の獲得が重要な課題となっている。木質系バイオマスに代表される植物由来の炭化水素から不可欠な必須化学品の原料を獲得することができれば、二酸化炭素を介した新たな循環型社会を構築できる。例えば、セルロース・ヘミセルロースから得た糖類はそれ自体が食品、医薬品の原料となるだけでなく、フラン類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機能性化学品の代替原料となる。固体触媒は工業触媒として優れた基本特性（①分離回収が容易で繰り返し利用できる高い安定性を持つ、②触媒の分解に伴う無機塩廃棄物の副生がない、など）を兼ね備えており、これまでの化石資源を基本とした“低コスト・低エネルギー・低環境負荷で持続可能なものづくり”という産業の理想像を実現するために大きな役割を果たしてきた。しかし、植物由来の炭化水素をフラン類・有機酸へと変換できる有効な固体触媒は見出されていなかった。このような背景から、申請者は木質系バイオマスの主な構成糖であるグルコース、また油脂化学やバイオディーゼル製造で大量に副生するグリセロールの酸化体である3炭糖（1,3-ジヒドロキシアセトン；1,3-DHA）を原料とし、有用な化学品原料である5-ヒドロキシメチルフurfural（HMF）や乳酸の環境低負荷合成を検討してきた。

2. 研究の目的

乳酸は生分解性プラスチックの原料や多様な機能性化学品の原料となるため、その消費量は毎年10-20%程度の需要増加が続いている。乳酸をバルクケミカル原料として活用するためには、従来の発酵法ではなく固体触媒による環境低負荷な大規模合成法の確立が求められる。本研究課題では、豊富な炭化水素であるグルコースまたはグリセロールを原料とした水溶液内での乳酸直接合成を可能とする固体触媒の創生と高効率な反応系の構築を計画した（図1）。

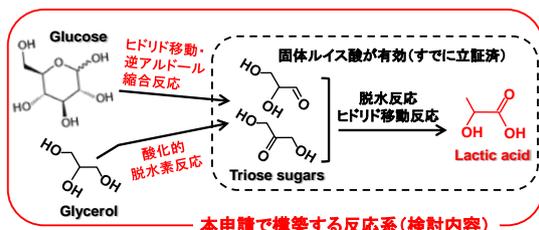


図1. 本申請課題の検討内容の概要図

3. 研究の方法

グリセロールからの乳酸合成：固体ルイス酸に金属ナノ粒子を固定して酸素を酸化剤と

したグリセロールからのトリオース生成を検討した。既報の論文から、有効な金属類はPt, Ru, Pd, Au, Agなどある程度は限定されている。トリオースから乳酸合成に有効な固体ルイス酸であるTiO₂およびNb₂O₅を担体とし、金属担持量依存性や酸素圧依存性をベースにした反応活性評価や金属サイトの構造解析（XPS測定、金属分散度評価など）を進めた。

グルコースからの乳酸合成：これまでの検討によって、ニオブやチタンをベースとした酸化物表面に形成されるルイス酸がトリオースからの乳酸合成に有効であることを明らかにしている。そこで本申請では、それらの酸性酸化物の特性とグルコースを乳酸の前駆体であるトリオースへと分解するための塩基サイトとを併せ持つ酸化物をデザインした。具体的にはYNbO₄, LaNbO₄, CaTiO₃, BaTiO₃などの酸化物の高表面積を図り、その酸塩基性質を詳細に検討し、水中におけるグルコースからの乳酸合成活性を検討した。

4. 研究成果

水溶性ニオブ錯体を利用した液相沈殿法によるニオブ系複合酸化物の合成

酸化ニオブは水中で機能するブレンステッド酸とルイス酸を併せ持つ固体酸触媒であり、グルコースを水溶液内でHMFへと変換することができる。ニオブ酸化物の高活性化を目指したアプローチとして、高表面積をもつニオブ含有複合酸化物に着目した。例えば、塩基性酸化物となる金属種を第二成分とした複合酸化物では、ニオブ酸化物に由来するブレンステッド酸およびルイス酸の酸量・酸強度の変化、または第二成分の酸化物に由来する塩基性質の発現などが期待できる。ゾルゲル法で調製した非晶質の含水酸化ニオブ(Nb₂O₅·nH₂O, 10 mmol)にアンモニア水溶液1.5 mLと過酸化水素水溶液9 mLを加えて0℃で静置し、含水ニオブ酸を完全に溶解させる。その後、溶液に更にアンモニア水溶液3 mLを加えて0℃で2-3時間程度、溶液を熟成させて結晶状の過酸化ニオブ錯体((NH₄)₃[Nb(O₂)₄])を生成させる。回収したニオブ過酸化ニオブ錯体が溶解した水溶液(150 mL)に等量のY(NO₃)₃が溶解した水溶液をゆっくりと滴下し、室温で3時間攪拌した。溶液内に生成した白色沈殿を遠心分離で回収し、400または700℃、3時間で焼成することによって目的のYNbO₄を得た。

酸化ニオブは6配位ニオブ種(NbO₆)で構成される酸化物であり、表面の配位不飽和な4配位ニオブ種がルイス酸として機能する。一方、YNbO₄は骨格自体が4配位ニオブで構成されるユニークな酸化物である。400℃で焼成した試料はアモルファス酸化物であるが、ラマン分光分析によりNbO₄ユニットによって骨格が形成されていることが確認できており、その表面酸塩基特性は従来の非晶質酸化ニオブとは異なっていると期待でき

る。一方、700 °C で焼成した試料は正方晶 YNbO_4 で構成された結晶性酸化物であり、その構成成分は同様に 4 配位ニオブ種である (図 2)。

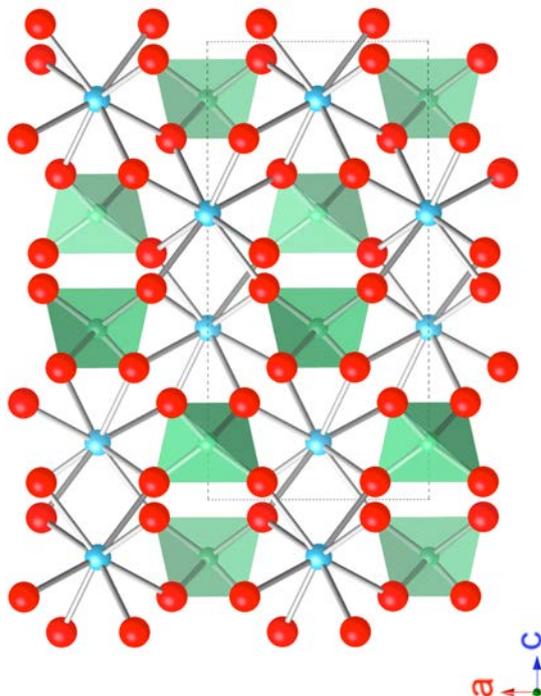


図 2. 正方晶 YNbO_4 の構造図 (赤:酸素原子, 水色:イットリウム原子, 緑:ニオブ原子)

これらの試料の特徴は、その大きな表面積にある。固相法に代表されるように、一般的には 2 種類の酸化物を混練して高温焼成することによって複合酸化物を合成するが、得られる高結晶性酸化物の表面積は非常に小さい。一方、液相沈殿法によって得られる前駆体は 2 種類の金属種 (Y と Nb) が原子レベルで均一混合した状態であり、非晶質の状態から複合酸化物に特有の構造特性を有し、700 °C 程度の比較的高温で結晶化した後でも $50 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 程度の大きな表面積を保持していた。この液相沈殿法ではニオブ過酸化物アニオン ($[\text{Nb}(\text{O}_2)_4]^{3-}$) と 3 価の金属カチオンとの沈殿生成をベースとしており、適切なカチオン種 (例えば Sc^{3+} , La^{3+} , Al^{3+} など) を選択することによって組成の拡張が可能となる。

ニオブ系複合酸化物によるグルコースからの有機酸・フラン類の合成

焼成温度の異なる YNbO_4 の触媒特性をグルコース転換反応にて検討した。耐圧ガラス容器に酸化物触媒 0.05 g, 2 wt% グルコース水溶液 2.5 mL, 生成物の抽出用有機溶媒として 2-sec-butylphenol 7.5 mL を入れ、140 °C のオイルバスで加熱攪拌することにより、その触媒活性を評価した。

図 3 に触媒活性評価の概要を示す。400 °C 焼成試料では、グルコースが異性化してフルクトースが生成し、その後 C3 成分の有機

物 (グリセルアルデヒド, 1,3-ジヒドロキシアセトン, ピルブアルデヒド, 乳酸) と HMF が生成した。

この反応は固体表面の水中機能ルイス酸によってグルコースからフルクトースが生成し、その後で 2 種類の反応が並行して起きている。一つは逐次的な脱水反応によって HMF が生成する反応経路、もう一つは逆アルドール反応によって 2 種類のトリオースを経由して C3 有機物が生成する反応経路である。前者はルイス酸のみでは反応が効率的に起こらないが、最近の DFT 計算による検討ではルイス酸と塩基サイトの協奏的な触媒作用が効果的であることが分かっている。後者に関しては塩基サイトによる逆アルドール反応によって誘発され、生成したトリオース (1,3-ジヒドロキシアセトンとグリセルアルデヒド) がその後のヒドリド移動・脱水反応によってピルブアルデヒドおよび乳酸へと変換されている。一方、700 °C 焼成試料でもヒドリド移動によって生成したフルクトースが逐次的に HMF および C3 有機物へと変換されているが、C3 有機物の生成量は少ない。これは高温焼成によって逆アルドール反応を引き起こす塩基性サイトが減少したことを示唆している。

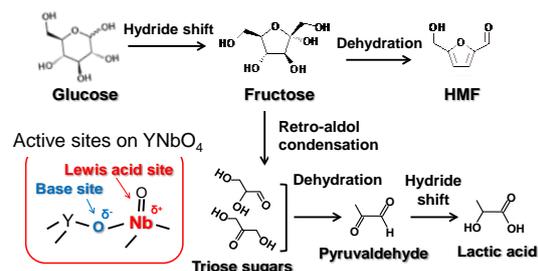


図 3. 固体酸塩基触媒によるグルコース変換反応

酸化チタン担持白金触媒による酸素存在下におけるグリセロールからの乳酸合成

余剰なバイオマス資源であるグリセロールから工業的に有用な化合物である乳酸を one-pot で合成する反応は、大きな注目を集めてきた。この反応は塩基フリー条件下で固体触媒のみを用いて行うことで中和処理や生成物との分離処理の手間を省くことができるため、このような反応系の構築が望まれている。グリセロールからの乳酸合成では、グリセロールの酸化による 1,3-ジヒドロキシアセトン (DHA) またはグリセルアルデヒド (GLA) の生成と、生成したトリオースの脱水、水和、異性化による乳酸生成の多段階反応で進行する。

そこで、DHA からの乳酸合成反応に高活性を示すことが見出されている水中機能ルイス酸触媒にグリセロール酸化能をもつ金属種を担持することで多段階反応を効率的に促進する担持金属触媒を開発し、グリセロールからの乳酸の one-pot 合成反応を達成しよ

うと考えた。具体的には後段のトリオース (DHA または GLA) からの乳酸合成に有効な酸性質をもつ酸化チタンを担体とし、その表面にグリセロールの1級または2級アルコールの酸素酸化に有効な触媒能をもつ白金ナノ粒子を固定した (図4)。

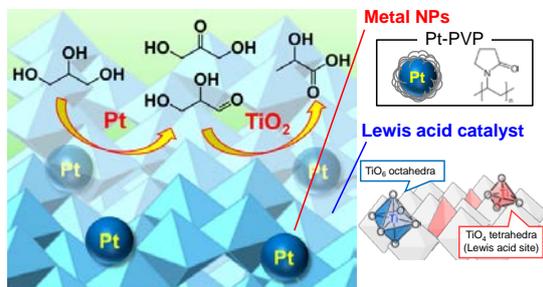


図4. 酸化チタン担持白金ナノ粒子の構造概念図とグリセロールからの乳酸生成経路

金ナノ粒子などアルコール部位の活性化に延期を必要とする酸化反応系もあるが、本反応では強塩基などの添加剤を使用せず酸素雰囲気下で63%の乳酸収率を与えた。さらにこの触媒は、触媒性能を著しく損なうことなく再使用することができた。反応機構を検討したところ、本反応系では酸化チタン上のPtナノ粒子はグリセロールを選択的にC3アルデヒド/ケトンに酸化し、酸化チタン上のルイス酸サイトが中間体の脱水および再水和/異性化反応を円滑に促進することによって、良好な収率で乳酸を生成していた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

1. Navneet Kumar Gupta, Atsushi Fukuoka, Kiyotaka Nakajima, “Metal-free and Selective Oxidation of Furfural to Furoic Acid with an N-Heterocyclic Carbene Catalyst”, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6, 3434-3442. (査読有) (DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b03681)
2. Kiyotaka Nakajima, Jun Hirata, Minjune Kim, Navneet Kumar Gupta, Toru Murayama, Akihiro Yoshida, Norihito Hiyoshi, Atsushi Fukuoka, Wataru Ueda, “Facile Formation of Lactic Acid from a Triose Sugar in Water over Niobium Oxide with a Deformed Orthorhombic Phase”, *ACS Catalysis*, 2018, 8, 283-290. (査読有) (DOI: 10.1021/acscatal.7b03003)
3. Hideki Kato, Katsuya Shimizu, Kiyotaka Nakajima, Makoto Kobayashi, Masato Kakihana, “Synthesis of Rare Earth Niobates and Tantalates Powders via a Peroxo Complex Route”, *Chemistry Letters*, 2017, 46, 1515-1517. (査読有) (DOI:10.1246/cl.170652)
4. Ken Motokura, Marika Ikeda, Masayuki Nambo, Wang-Jae Chun, Kiyotaka Nakajima, Shinji Tanaka, “Concerted Catalysis in Tight Spaces: Palladium-Catalyzed Allylation Reactions Accelerated by Accumulated Active Sites in Mesoporous Silica”, *ChemCatChem*, 2017, 9, 2924-2929. (査読有) (DOI: 10.1002/cctc.201700439)
5. Nobuhiro Ishito, Kiyotaka Nakajima, Yoshifumi Maegawa, Shinji Inagaki, Atsushi Fukuoka, “Facile Formation of Gold Nanoparticles on Periodic Mesoporous Bipyridine-silica”, *Catalysis Today*, 2017, 298, 258-262. (査読有) (DOI: 10.1016/j.cattod.2017.03.012)
6. Navneet Kumar Gupta, Atsushi Fukuoka, Kiyotaka Nakajima, “Amorphous Nb₂O₅ as a Selective and Reusable Catalyst for Furfural Production from Xylose in Biphasic Water and Toluene”, *ACS Catalysis*, 2017, 7, 2430-2436. (査読有) (DOI: 10.1021/acscatal.6b03682)
7. Toru Murayama, Kiyotaka Nakajima, Jun Hirata, Kaori Omata, Emiel J. M. Hensen, Wataru Ueda, “Hydrothermal synthesis of a layered-type W-Ti-O mixed metal oxide and its solid acid activity”, *Catalysis Science & Technology*, 2017, 7, 243-250. (査読有) (DOI: 10.1039/C6CY02198K)
8. Emiko Wada, Masaaki Kitano, Kazuto Yamamoto, Kiyotaka Nakajima, Shigenobu Hayashi, Michikazu Hara, “Synthesis of Niobium-doped Titanate Nanotubes as Solid Acid Catalysts”, *Catalysis Science & Technology*, 2016, 6, 4832-4839. (査読有) (DOI: 10.1039/C6CY00044D)
9. Tasuku Komanoya, Ayaka Suzuki, Kiyotaka Nakajima, Masaaki Kitano, Keigo Kamata, Michikazu Hara, “A combined catalyst of Pt nanoparticles and TiO₂ with water-tolerant Lewis acid sites for one-pot conversion of glycerol to lactic acid”, *ChemCatChem*, 2016, 8, 1094-1099. (査読有) DOI: 10.1002/cctc.201501197
10. Nobuhiro Ishito, Kiyotaka Nakajima, Kenji Hara, Atsushi Fukuoka, “Selective Synthesis of Carbon Monoxide via Formates in Reverse Water-Gas Shift Reaction over Alumina-Supported Gold Catalyst”, *Journal of Energy Chemistry*, 2016, 25, 306-310. (査読有) (DOI: 10.1016/j.jechem.2015.12.005)
11. Tasuku Komanoya, Kiyotaka Nakajima, Masaaki Kitano, Michikazu Hara, “Synergistic Catalysis by Lewis Acid and Base Sites on ZrO₂ for Meerwein-Ponndorf-Verley (MPV) Reduction”, *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119, 26540-26546. (査読有) (DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b08355)
12. Nobuhiro Ishito, Hirokazu Kobayashi,

- Kiyotaka Nakajima, Yoshifumi Maegawa, Shinji Inagaki, Kenji Hara, Atsushi Fukuoka, “Ruthenium-Immobilized Periodic Mesoporous Organosilica: Synthesis, Characterization, and Catalytic Application for Selective Oxidation of Alkanes”, *Chemistry – A European Journal*, 2015, 21, 15564-15569. (査読有)
(DOI: 10.1002/chem.201502638)
13. Ryouhei Noma, Kiyotaka Nakajima, Keigo Kamata, Masaaki Kitano, Shigenobu Hayashi, Michikazu Hara, “Formation of 5-(Hydroxymethyl)furfural by Stepwise Dehydration over TiO₂ with Water-Tolerant Lewis Acid Sites”, *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119, 17117-17125. (査読有) (DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b03290)
14. Kiichi Fukuhara, Kiyotaka Nakajima, Masaaki Kitano, Shigenobu Hayashi, Michikazu Hara, “Transesterification of Triolein over Hydrophobic Microporous Carbon with SO₃H Groups”, *ChemCatChem*, 2015, 7, 3945-3950. (査読有)
(DOI: 10.1002/cctc.201500525)
15. Michikazu Hara, Kiyotaka Nakajima, Keigo Kamata, “Recent Progress in the Development of Solid Catalysts for Biomass Conversion into High Value-added Chemicals”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 2015, 16, 034903 (page 1-22) (査読有)
DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/034903

[学会発表] (計 27 件)

- (1) Nakajima, K.: “Catalytic conversion of biomass-derived hydroxymethylfurfural to dicarboxylic acid (FDCA) as a new building block for biopolyester”, CLS, Tokyo Tech. International Forum 2018, “Redox regulation of protein functions, transcription, translation and folding”, Tokyo Tech Campus Innovation Center, Tokyo (2018/3/4-5)
- (2) 中島清隆, “再生可能化学資源の活用: 固体触媒によるバイオマスからの必須化学品原料の創生”, 東京工業大学科学生命科学研究会講演会, 東京工業大学すずかけ台キャンパス, 横浜市 (2018/1/23) [依頼講演]
- (3) Nakajima, K.: “Lewis acid-base catalysis for sugar conversion”, TU/e -ICAT Joint International Symposium on Catalysis for Sustainable Society, Eindhoven, The Netherlands (2017/11/3) [Invited lecture].
- (4) Fukuoka, A.: Yokoya, T.: Jiang, C.: Nakajima, K.: “Low-temperature oxidation of ethylene by silica-supported platinum catalysts”, 13th European Congress on Catalysis, Palazzo dei Congressi, Florence, Italy (2017/8/27-31) [Oral].
- (5) Kim, M.: Kato, H.: Fukuoka, A.: Nakajima, K.: “Acid-basic property of YNbO₄ for lactic acid formation from glucose in water”, 13th European

- Congress on Catalysis, Palazzo dei Congressi, Florence, Italy (2017/8/27-31) [Oral].
- (6) Gupta, N. K.: Fukuoka, A.: Nakajima, K.: “Selective conversion of xylose into furfural using Nb₂O₅ as a heterogeneous catalyst with water-tolerant lewis acid sites”, 13th European Congress on Catalysis, Palazzo dei Congressi, Florence, Italy (2017/8/27-31) [Oral].
- (7) 中島清隆, “触媒が先導する新しいバイオプラスチックの世界”, エコマテリアル研究会講演会 (主催: 高分子学会), 東京大学農学部中島董一郎記念ホール, 東京都 (2017/7/21) [依頼講演].
- (8) Kim, M.: Kato, H.: Fukuoka, A.: Nakajima, K.: “Acid-Base Catalysis of YNbO₄ for Sugar Conversion in Water”, 16th Korea-Japan Symposium on catalysis & 3rd International Symposium of Institute for Catalysis, Kaderu 2.7, Sapporo (2017/5/15-17) [Oral].
- (9) Sattar, S. S.: Nakajima, K.: Fukuoka, A.: “Calcination Temperature Effect on Silica Supported Pt Catalyst for Low Temperature Ethylene Oxidation”, 16th Korea-Japan Symposium on catalysis & 3rd International Symposium of Institute for Catalysis, Kaderu 2.7, Sapporo (2017/5/15-17) [Oral].
- (10) Gupta, N. K.: Fukuoka, A.: Nakajima, K.: “Efficient Xylose Dehydration to Furfural over Lewis Acid Catalysts in Biphasic Water and Toluene”, 16th Korea-Japan Symposium on catalysis & 3rd International Symposium of Institute for Catalysis, Kaderu 2.7, Sapporo (2017/5/15-17) [Oral].
- (11) Nakajima, K.: Gupta, N. K.: Fukuoka, A.: “Lewis Acid Catalysis of Nb₂O₅ for Selective Furfural Formation from Xylose in Water”, 8th International Symposium on Acid-Base Catalysis, Lio de Janeiro, Brazil (2017/5/7-10 日) [Oral].
- (12) 中島清隆, “固体ルイス酸による糖類からの有用フラン類合成”, 先端材料・材料技術部会, 高選択性反応分科会 講演会, 公益社団法人 新化学技術推進協会, 東京都 (2017/4/20) [招待講演].
- (13) 中島清隆: 「ニオブ系酸化物の水中ルイス酸作用と糖変換への応用」東北大学多元物質科学研究所, 第 10 回新機能無機物質探索研究センターシンポジウム, 仙台市 (2017/2/10) [依頼講演]
- (14) 中島清隆: 「固体ルイス酸によるバイオマス由来糖類からの有用フラン類・有機酸の合成」第 41 回触媒化学融合研究センター講演会, つくば市 (2017/2/3) [依頼講演]
- (15) Nakajima, K.: Fukuoka, A.: “Reaction Mechanism on Glucose to HMF Transformation in Water over Phosphate/TiO₂” 7th Asia-Pacific Congress on Catalysis (APCAT-7), Mumbai, India (2017/1/17-21) [Oral]
- (16) 中島清隆, 村山徹, 上田渉, “結晶性ニオブ酸によるトリオース水溶液からの乳酸合成”, 第 46 回石油・石油化学討論会, 京都

- リサーチパーク，京都市 (2016/11-17-18)
- (17) Minjune Kim, Kiyotaka Nakajima, Hideki Kato, Atsushi Fukuoka, “Basic property of YNbO_4 in water”, 岩手大学，盛岡市 (2016/9/21-23)
- (18) 中島清隆，松本慶江子，キムミンジュン，加藤英樹，福岡淳，“ YNbO_4 によるグルコースからの HMF 合成”，岩手大学，盛岡市 (2016/9/21-23)
- (19) Nakajima, K.: Noma, R.: Hara, M.: "Efficient Production of Furfural from Xylose in Water over Phosphate/ TiO_2 " 6th International IUPAC Conference on Green Chemistry ICGC-6 Venice, Italy (2016/9/4-8) [Poster]
- (20) Nakajima, K.; Noma, R.: Hara, M.: "Facile HMF Formation from Glucose in Water over Phosphate/ TiO_2 with Water-Tolerant Lewis Acid Catalyst" 6th International IUPAC Conference on Green Chemistry ICGC-6 Venice, Italy (2016/9/4-8) [Oral]
- (21) Ishito, N.: Kobayashi, H.: Nakajima, K.: Maegawa, Y.: Inagaki, S.: Hara, K.: Fukuoka, A.: "Synthesis of Ru-Immobilized Periodic Mesoporous Organosilica and Application for Selective Oxidation of Alkanes" 6th International IUPAC Conference on Green Chemistry ICGC-6, Venice, Italy (2016/9/4-8) [Oral]
- (22) 中島清隆，“水中機能固体ルイス酸によるバイオマス変換”，平成 27 年度石油学会ジュニアソサイアティ北海道・東北地区講演会，秋田大学，秋田市 (2016/1/15) [依頼講演]
- (23) 中島清隆，“水中で機能する固体ルイス酸の開発と糖変換反応への応用”，平成 27 年度触媒学会・触媒工業協会交流サロン，化学会館，東京都 (2015/12/11) [依頼講演]
- (24), Kiyotaka Nakajima, Michikazu Hara, “Reaction mechanism on HMF formation from glucose over Phosphate/ TiO_2 ”, 3rd International Congress on Catalysis for Biorefinery, Rio de Janeiro, Brazil (2015/9/30-10/1)
- (25) 中島清隆，“水中で機能する固体ルイス酸の開発と糖変換反応への応用”，第 116 回触媒討論会，三重大学，津市 (2015/9/17) 奨励賞受賞講演
- (26) 中島清隆，“配位不飽和チタン種の水中ルイス酸性質と糖変換反応への応用”，触媒学会北海道支部第 55 回オーロラセミナー，ほろしん温泉ほたる館，沼田町 (2015/7/26) [依頼講演]
- (27) 中島清隆，“固体酸化物の水中ルイス酸性質を利用した糖変換反応”，第 361 回触媒化学研究センターコロキウム，北海道大学，札幌市 (2015/4/8) [依頼講演]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島清隆 (Kiyotaka NAKAJIMA)

北海道大学・触媒科学研究所・准教授

研究者番号：90451997