

## 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 25 年 5 月 7 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22550117

研究課題名（和文）CO<sub>2</sub>還元およびCO選択酸化用光触媒の開発と選択分光による作用機構追跡研究課題名（英文）Development of Photocatalysts for CO<sub>2</sub> Reduction and Selective CO Oxidation and Monitoring of the Mechanism by Selective Spectroscopy

研究代表者

泉 康雄 (IZUMI YASUO)

千葉大学 大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50251666

研究成果の概要（和文）：二酸化炭素削減のオプションの一つとして、自然光を利用した二酸化炭素の光燃料化は地球温暖化とエネルギー問題双方に与する。本研究では、亜鉛・銅・ガリウムを主成分とする合成粘土（層状複水酸化物）に紫外可視光を照射すると、二酸化炭素と水素からメタノールおよび一酸化炭素を合成することを見出した。粘土層間で、二酸化炭素と表面水酸基が反応して炭酸水素種となり、粘土層に光照射することで生じた電子と反応して一酸化炭素、さらにメタノールが生ずることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：As one of the options to reduce carbon dioxide, photoreduction of CO<sub>2</sub> to fuels using natural light contributes to the problems of both global warming and energy shortage. In this study, it was found that methanol and carbon monoxide (CO) were synthesized from CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> when synthetic clays (layered double hydroxides) consisting of Zn, Cu, and Ga were irradiated by UV-visible light. It was suggested that CO<sub>2</sub> and surface hydroxy reacted to form hydrogen carbonate (HC) and that the HC reacted with electrons generated by irradiation of clay layers to form CO and methanol.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・機能物質化学

キーワード：二酸化炭素、光触媒、光燃料化、層状複水酸化物、銅、FTIR、XAFS、炭酸水素

## 1. 研究開始当初の背景

TiO<sub>2</sub>を中心に光酸化反应用触媒の研究が広く行なわれている。UV 光で励起される TiO<sub>2</sub> にヘテロ元素ドープすることで可視光触媒とする研究が特に多いが、研究代表者らは V<sup>IV</sup> がカチオン置換することで電子受容準位を形成し、可視光励起 VOC 酸化分解に有効なことを示した。さらに状態選別 X 線吸収微細構造 (XAFS) により、光還元された V<sup>III</sup> が O<sub>2</sub> を還元する光触媒反応機構を見出した。十分な

(+) 電位をもつ TiO<sub>2</sub> の価電子帯 (VB) がホール酸化するため、酸化側反応過程がより速かった。

表面およびバルクに硫黄を導入した場合は、アニオン置換することで可視光励起を可能にする価電子近傍の準位を形成した。V-TiO<sub>2</sub> と比べて十分な (-) 電位をもつ TiO<sub>2</sub> の電導帯 (CB) 電子による還元側反応過程がより速くなり、ドープ元素の正負により律速過程が切り替わった。S-TiO<sub>2</sub> は CO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O → CH<sub>3</sub>OH + 1.5O<sub>2</sub> (式 1) の光触媒反応も進めた。

温暖化ガス CO<sub>2</sub> を自然光により燃料化できれば、最有力な環境調和技術となる。式 1 の  $\Delta G^\circ(25^\circ\text{C}) = +689 \text{ kJ/mol}$  と水分解の +229 kJ/mol より吸熱的で、平衡支配のためドーブ TiO<sub>2</sub> 他での  $\approx 10 \mu\text{mol/g}_{\text{cat}}/\text{h}$  の反応速度にとどまっている。

## 2. 研究の目的

1 項でのカチオン置換 TiO<sub>2</sub> と同様に、式 1 の酸化側反応  $3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1.5\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6e^-$  (式 1a) のみを進めやすい光触媒を意図的に選ぶ。生じた H<sup>+</sup> と e<sup>-</sup> を高分子電解質膜と外部回路経由で伝導させもう一つの光電極触媒で還元側反応  $\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6e^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$  (式 1b) を進める着想に至った。式 1b を気体原料同士の反応 (工業メタノール合成) と近似すれば  $\Delta G^\circ(25^\circ\text{C}) = +3 \text{ kJ/mol}$ , 平衡定数  $K = 0.30$  と十分進行しうる。類似反応  $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$  (式 2) が H<sub>2</sub> 雰囲気下光触媒により常温で進めば、燃料電池用燃料精製に好都合である。この還元側反応  $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{OH}^-$  (式 2a) および酸化側反応  $2\text{CO} + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 4e^-$  (式 2b) はアルコール完全酸化の一過程と見なせ TiO<sub>2</sub> に光照射することで進むが、加えて選択性制御が必要である。

酸化/還元側反応サイトを高分子電解質膜で分割することで、平衡支配を逃れ目的反応過程を振り分けて進める着想で、各サイト構造と電子状態をその場追跡し、CO<sub>2</sub> 燃料化を最適化する。具体的には、光電子受容準位エネルギーと反応選択性の相関、表面水酸種の反応性、CO<sub>2</sub> 由来の M-O<sub>2</sub>CH 表面種の水素化反応性、金属ナノ粒子の役割、半導体 CB あるいは不純物準位から CO<sub>2</sub> および O<sub>2</sub> への高効率 e<sup>-</sup> 受渡しの追跡である。

## 3. 研究の方法

CO<sub>2</sub> 光還元用触媒として、CO<sub>2</sub> 吸着能が知られており、半導体性質をもつ層状複水酸化物 (LDH) を各金属の硝酸塩水溶液から pH 8 で合成した (図 1A)。層間に一旦 [Cu(OH)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup> を生成する LDH については塩化二アンモニウム銅 (II) を使用した (図 1B)。

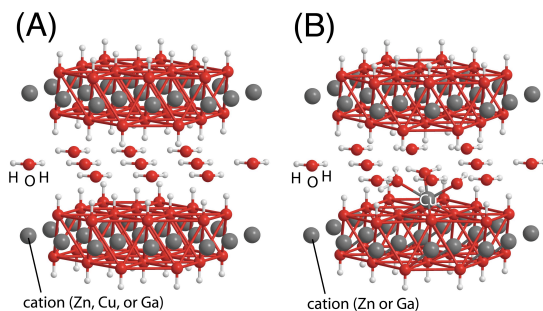


図 1. 通常 (A) および [Cu(OH)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup> を経由する LDH の構造 (B)。

光触媒反応試験は、光触媒を 290 K で真空処理した後、0.20-2.1 kPa の CO<sub>2</sub> と 21.7 kPa の H<sub>2</sub> ガスを系中に導入し、石英製反応セルに入れた光触媒を 500 W キセノンアーク灯で照射し、ガスクロマトグラフ (GC) でオンライン分析することで行った。

XAFS 測定は高エネ研および SPring-8 で行った。光照射下での測定にはポリエチレンナフタレート窓付きの石英セルに所定圧の CO<sub>2</sub> および H<sub>2</sub> ガスを入れ、ディスク状試料にアーク灯から紫外可視光照射しながら測定した。

フーリエ変換赤外スペクトル (FTIR) 測定はやはりディスク状試料を岩塩板窓付きの石英セルに入れ、石英ファイバー経由の紫外可視光を照射し、透過 IR 光を MCT 検出することで行った。<sup>13</sup>CO<sub>2</sub> を利用した。

## 4. 研究成果

CO<sub>2</sub> を水素ガスで光還元する触媒を見出した。[Zn<sub>3</sub>M<sup>III</sup>(OH)<sub>6</sub>]<sup>2+</sup>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·mH<sub>2</sub>O (M = Ga, Al) をベースとする層状水酸化物半導体を光触媒とすることで、それまで CO およびメタンの生成しか報告されていない本反応で、メタノールを生成した (0.17  $\mu\text{mol h}^{-1} \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$ )。とりわけカチオン層中に Cu サイトが含むことで、CO 生成優勢からメタノール選択的にした (68 mol%)。水酸基に挟まれた層間が反応場であり、銅に結合した炭酸水素種が中間種と考えられる。

M<sup>III</sup> = Ga の LDH で、層間の CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> イオンを [Cu(OH)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup> イオンに変更することで、CO<sub>2</sub> から光メタノール合成速度を 0.49  $\mu\text{mol h}^{-1} \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$  にまで向上させた。この層間銅サイトは CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> イオンのように遊離アニオンとしてではなく、カチオン層と脱水縮合した Cu(μ-O)<sub>3</sub>(OH) 種として存在し、層状複水酸化物塩を形成したことが XAFS 解析により分かった。この銅サイトが光照射で発生した励起電子をいったんトラップし、CO<sub>2</sub> をメタノールにまで順次還元するため電子を受け渡す機構 (図 2) を考えた。対照実験を重ね、層状複水酸化物が熱励起ではなく、半導体式原理で CO<sub>2</sub> を還元することも立証した。

次に酸化タングステン光触媒と LDH 光触媒を高分子電解質膜で隔てて組み合わせ、固体電解質型燃料電池セルの炭素電極のサーペンタイン流路をくり抜いて、それぞれ N<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> ガスを流通させ 290 K にて両者に紫外可視光を照射した。すると、それぞれ水を光酸化、CO<sub>2</sub> を 9 nmol のオーダーの速度で光メタノール化した。

上記のように本研究では、特に LDH (亜鉛、銅、ガリウムを含むものが特に有効) を用いたときに CO<sub>2</sub> 光還元でメタノール (および CO) を生成したのが大きな特徴である。この作用機構を知るために、まず X線吸収端近傍微細構

造 (XANES) を用いてLDH中に生じる電子の伝達をみた。CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>下、紫外可視光を照射しながらXANESスペクトルを追跡すると、銅K吸収端前に現れる1s-3dピーク強度が徐々に減少した。紫外可視光照射によりLDH内に分離して生じた電子が拡散し、Cu(II)サイトにトラップされCu(I)に還元された(図2b→c→d)ことを示す。特にカチオン層方向への電子伝達が速く、CO<sub>2</sub>光還元反応速度より数桁速かった。

次にFTIRを用いて、CO<sub>2</sub>光還元反応条件でLDH反応場に現れる吸着種/反応種をモニターした。炭酸種は不活性だった。1655 cm<sup>-1</sup>に炭酸水素(HCO<sub>3</sub>)種のピークがみられ、<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>中の実験では1629 cm<sup>-1</sup>にシフトした。炭酸水素種は気相CO<sub>2</sub>と水酸基に平衡になっており、真空中ではCO<sub>2</sub>に戻って分解した。炭酸水素種への平衡反応もCO<sub>2</sub>光還元反応速度より数桁速かった。水素ガス下紫外可視光を照射するとCO<sub>2</sub>への分解だけでなく、炭酸水素の光還元も進んだ(図2d→e→f)。実際の光CO<sub>2</sub>メタノール化ではH<sub>2</sub>が還元剤となってこの反応過程が進むことを示唆した。

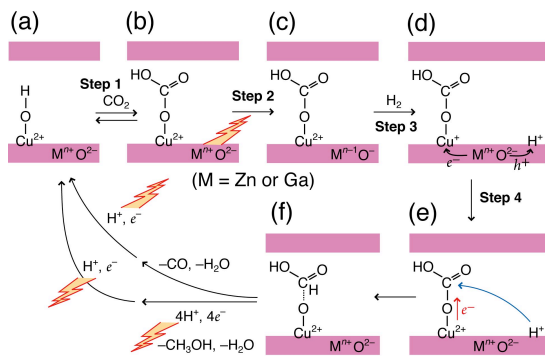


図 2. LDH を用いた H<sub>2</sub> 中 CO<sub>2</sub> 光還元推定反応機構。

水素ガス中での CO 選択光酸化についても触媒を見出した。22 nm を中心に均一な粒子径をもつ紡錘状 ZnO に銅イオンを吸着させた光触媒で水素ガス中不純物 CO (63 Pa) を 2.3 mPa (0.35 ppm) にまで減少させた。ZnO(000-1)面に吸着した Cu サイト近傍で CO 吸着、O<sub>2</sub>活性化機構を提唱した(図 3 上)。光により生じた電子で還元された Cu<sup>I</sup> サイトが O<sub>2</sub> を還元し、ZnO 表面では水酸基と CO よりギ酸イオン種が生じると考えられる。後者から前者に H<sup>+</sup> が移行し、CO<sub>2</sub> を生ずるのだろう。銅サイトでは副反応と想定される水は生じず、水酸基が再生したものと推定した。FTIR によるモニターを行い、Cu トラップサイトとギ酸中間種を推定した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

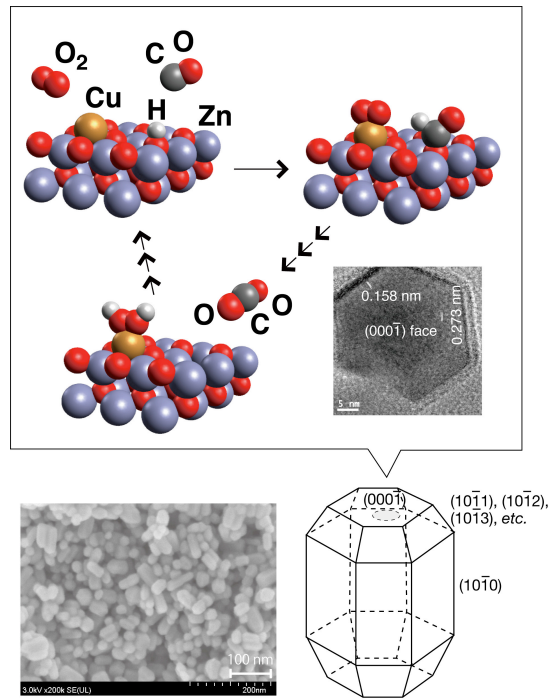


図 3. 紡錘状 ZnO の走査型(左下) /透過型(右)電子顕微鏡像と結晶面および推定する光 PROX 反応機構。

[雑誌論文] (計 15 件)

- (1) "Recent advances in the photocatalytic conversion of carbon dioxide to fuels with water and/or hydrogen using solar energy and beyond", Yasuo Izumi, *Coordination Chemistry Reviews*, **257**, 171-186 (2013), 査読有  
DOI: 10.1016/j.ccr.2012.04.018
- (2) "各種表面分析を用いた材料研究事例(5) 光触媒作用について調べる", 泉 康雄, 色剤協会誌, 印刷中 (2013), 査読有
- (3) "Polymer electrolyte fuel cell supplied with carbon dioxide. Can be the reductant water instead of hydrogen?", Motoharu Morikawa, Naveed Ahmed, Yuta Ogura, and Yasuo Izumi, *Applied Catalysis B*, **117/118**, 317-320 (2012), 査読有  
DOI: 10.1016/j.apcatb.2012.01.026
- (4) "Preferential oxidation of carbon monoxide in hydrogen using zinc oxide photocatalysts promoted and tuned by adsorbed copper ions", Yusuke Yoshida, Yu Mitani, Takaomi Itoi, and Yasuo Izumi, *Journal of Catalysis*, **287**, 190-202 (2012), 査読有  
DOI: 10.1016/j.jcat.2011.12.022

- (5) "Photocatalytic conversion of carbon dioxide into methanol using optimized layered double hydroxide catalysts", Naveed Ahmed, Motoharu Morikawa, and Yasuo Izumi, *Catalysis Today*, **185**(1), 263-269 (2012), 査読有  
DOI: 10.1016/j.cattod.2011.08.010
- (6) Monitoring of Photocatalytic Reduction Sites of Preferential Oxidation of Carbon Monoxide in Hydrogen, Yusuke Yoshida and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2011*, **29B**, 58 (2012), 査読無 (課題審査有)  
<http://pfwww.kek.jp/pfacr/>
- (7) Structure of Copper Hydroxy Anions in the Layered Double Hydroxides for the Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Methanol, Ahmed Naveed, Motoharu Morikawa, and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2011*, **29B**, 55 (2012), 査読無 (課題審査有)  
<http://pfwww.kek.jp/pfacr/>
- (8) "Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide into Methanol using Zinc-Copper-M(III) (M = Aluminum, Gallium) Layered Double Hydroxides", Naveed Ahmed, Yoshiyuki Shibata, Tatsuo Taniguchi, and Yasuo Izumi, *Journal of Catalysis*, **279**(1), 123-135 (2011), 査読有  
DOI: 10.1016/j.jcat.2011.01.004
- (9) 光選択 CO 酸化に高活性な Cu, Pd, Fe, Ti, Ce-ZnO 触媒の作用機構の XAFS 観測, Yasuo Izumi, Yuusuke Yoshida, Naveed Ahmed, Motoharu Morikawa, Kazuki Oka, and Yuta Ogura, *SPring-8 User Experiment Report*, 2011A1978 (2011), 査読無 (課題審査有)  
<http://user.spring8.or.jp/uisearch/expreport/ja>
- (10) Zn-Cu-Ga 層状複水酸化物を用いた CO<sub>2</sub> 光燃料化機構の XAFS 観測, Yasuo Izumi, Naveed Ahmed, Yuusuke Yoshida, Motoharu Morikawa, Kazuki Oka, and Yuta Ogura, *SPring-8 User Experiment Report*, 2011A1977 (2011), 査読無 (課題審査有)  
<http://user.spring8.or.jp/uisearch/expreport/ja>
- (11) Partial Reduction of Copper/Cerium Oxide Catalyst to Activate Carbon Dioxide to Form Dimethyl Carbonate Monitored by Ce L<sub>3</sub>-edge XAFS, Seiki Wada and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2010*, **28B**, 24 (2011), 査読無 (課題審査有)  
<http://pfwww.kek.jp/acr2010pdf/>
- (12) Photoreduction of Copper Sites of Semiconductor Layered Hydroxide Photocatalyst Monitored Using In Situ Cu K-edge XANES, Naveed Ahmed and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2010*, **28B**, 20 (2011), 査読無 (課題審査有)  
<http://pfwww.kek.jp/acr2010pdf/>
- (13) "Synthesis and Site Structure of a Replica Platinum-Carbon Composite Formed Utilizing Ordered Mesopores of Aluminum-MCM-41 for Catalysis in Fuel Cells", Kazuki Oka, Yoshiyuki Shibata, Takaomi Itoi, and Yasuo Izumi, *Journal Physical Chemistry C*, **114**(2), 1260-1267 (2010), 査読有  
DOI: 10.1021/jp909934r
- (14) "化学反応速度と化学平衡", 泉 康雄, *化学と教育*, **58**(5), 230-233 (2010), 査読有
- (15) "Role of copper in the CO<sub>2</sub> photo-reduction to fuels using Zn-Cu-Al/Ga layered double hydroxides", Naveed Ahmed and Yasuo Izumi, *Photon Factory Activity Report 2009*, **27B**, 30 (2010), 査読無 (課題審査有)  
<http://pfwww.kek.jp/acr2009pdf/>
- [学会発表] (計 30 件)
- (1) 渡辺健太郎・岡 和輝・泉 康雄、酸化セリウム表面の Lewis 酸-塩基ペアによる二酸化炭素の炭酸ジメチルへの触媒的変換の最適化と作用機構、日本化学会第 93 春季年会、3G4-47、2013 年 3 月 24 日、草津 (滋賀)
- (2) 吉田祐介・泉 康雄、(0001)面を選択して露出させた酸化亜鉛の合成と CO 光 PROX 反応性の研究、日本化学会第 93 春季年会、1G5-39、2013 年 3 月 22 日、草津 (滋賀)
- (3) 森川元治・Naveed Ahmed・泉 康雄、層状複水酸化物による二酸化炭素の光触媒的メタノール化反応機構の FTIR/XAFS 解析、日本化学会第 93 春季年会、1G5-53、2013 年 3 月 22 日、草津 (滋賀)
- (4) Photocatalytic Conversion of Carbon

- Dioxide into Methanol using Layered Double Hydroxides and its Application to Solar Fuel Cells, Naveed Ahmed, Yasuo Izumi, and Motoharu Morikawa, *15th International Congress on Catalysis*, July 3, 2012, Munich, Germany
- (5) Preferential Oxidation of CO in Hydrogen using Nanosynthesized ZnO Photocatalysts Promoted and Tuned by Adsorbed Cu Ions, Yusuke Yoshida, and Yasuo Izumi, *Abstracts of 15th International Congress on Catalysis*, July 4, 2012, Munich, Germany
- (6) 吉田祐介・泉 康雄、銅イオン吸着 ZnO を用いた、表面水酸基とフォルメート種を経由する CO 光 PROX 特有の反応機構解析、第 110 回触媒討論会 A、2J10、2012 年 9 月 25 日、福岡
- (7) 泉 康雄、光触媒を利用する二酸化炭素光燃料化および次世代ソーラー環境・エネルギー技術；千葉エリア産学官連携オープンフォーラム 2012、4 (2012)、7 月 27 日、習志野
- (8) 渡辺健太郎・和田聖己・岡 和輝・Ahmed Naveed・小倉優太・森川元治・吉田祐介・泉 康雄、穏和な条件で二酸化炭素を炭酸ジメチルに変換する CeO<sub>2</sub> ベース触媒の開発、日本化学会第 92 春季年会、3F5-12、2012 年 3 月 27 日、横浜
- (9) 森川元治・Naveed Ahmed・小倉優太・泉 康雄、層状複水酸化半導体と水光酸化触媒とを高分子電解質で隔てた二酸化炭素光燃料化、日本化学会第 92 春季年会、2G1-13、2012 年 3 月 26 日、横浜
- (10) Naveed Ahmed, Yasuo Izumi、Photocatalytic conversion of carbon dioxide into methanol over layered double hydroxide catalysts (依頼講演)、日本化学会第 92 春季年会、3F3-31、2012 年 3 月 27 日、横浜
- (11) 吉田祐介・糸井貴臣・泉 康雄、銅吸着酸化亜鉛ナノ結晶の異方性と銅イオンサイト構造が CO 光 PROX 反応性に与える影響、日本化学会第 92 春季年会、3G1-48、2012 年 3 月 27 日、横浜
- (12) Photocatalytic Challenge to Convert CO<sub>2</sub> into Methanol, Naveed Ahmed, Motoharu Morikawa, and Yasuo Izumi, *Japan-Spain Workshop on "New Nanomaterials for Clean Energy Technologies"*, September 13, 2011, Alicante, Spain
- (13) Photocatalytic Challenge to Convert CO<sub>2</sub> into Methanol, Naveed Ahmed, Motoharu Morikawa, and Yasuo Izumi, *First Bilateral School and Workshop on Nanotechnology and New Materials with Environmental Challenges*, September 15, 2011, Toledo, Spain
- (14) Photocatalytic conversion of carbon dioxide into methanol using optimized layered double hydroxide catalysts, Naveed Ahmed, Motoharu Morikawa, and Yasuo Izumi, *Proceedings of the 13th Korea - Japan Symposium on Catalysis*, May 23, 2011, Seogwipo, Jeju Island, Republic of Korea
- (15) "Photo-catalytic Conversion of Carbon Dioxide into Methanol using Zinc-Copper-M(III) (M = Aluminum, Gallium) Layered Double Hydroxides and the Derivatives", Naveed Ahmed and Yasuo Izumi, *International Conference on Composites and Nanocomposites*, January 7-9, 2011, Institute of Macromolecular Science and Engineering Kottayam, Kerala, India (Invited)
- (16) 泉 康雄、「高輝度 XAFS により見分ける新たな環境調和触媒作用」SPRING-8 利用者懇談会第 8 回 X 線スペクトロスコープ利用研究会報告会、両国、2011 年 1 月 14 日 (依頼講演)
- (17) 森川元治・アハマド ナヴィード・泉 康雄、水分解/水素酸化と二酸化炭素還元とを分割したセルを用いたメタノール合成触媒の開発、第 108 回触媒討論会 A、3C21、2011 年 9 月 22 日、北見
- (18) Naveed Ahmed・泉 康雄、Photocatalytic Roles of Copper in Cationic Layers and as Anionic Species between Layers in Zinc-Gallium Layered Double Hydroxides to Convert Carbon Dioxide into Methanol、第 108 回触媒討論会 A、1D14、2011 年 9 月 20 日、北見
- (19) 吉田祐介・泉 康雄、銅イオン吸着 ZnO ナノ粒子光触媒を用いた CO 光 PROX 反応における銅イオンの役割のスペクトル追跡、第 108 回触媒討論会 A、3D10、2011 年 9 月 22 日、北見

- (20) 吉田祐介・三谷 悠・泉 康雄、吸着銅イオンで促進された均一ナノ粒子酸化亜鉛の水素中一酸化炭素光 PROX 反応、日本化学会第 91 春季年会、3B4-46、2011 年 3 月 28 日、横浜
- (21) アハマド ナヴィード・泉 康雄、二酸化炭素からメタノールへ光変換する Zn-Cu-Ga 複水酸化物の層間反応場の最適化、日本化学会第 91 春季年会、2B4-28、2011 年 3 月 27 日、横浜
- (22) 和田聖己・泉 康雄、銅担持酸化セリウム触媒を用いた、メタノールと二酸化炭素からの温和な条件での炭酸ジメチル合成、日本化学会第 91 春季年会、1B4-10、2011 年 3 月 26 日、横浜
- (23) 三谷 悠・吉田祐介・泉 康雄、酸化チタンナノ粒子とナノチューブの CO 光 PROX 反応についての相乗効果の最適化と反応機構、日本化学会第 91 春季年会、3B4-45、2011 年 3 月 28 日、横浜
- (24) Naveed Ahmed、泉 康雄、Zn-Cu-M(III) (M = Al, Ga) 層状複水酸化物光触媒を用いた二酸化炭素のメタノール化；第 28 回 PF シンポジウム、2011 年 3 月 14 日
- (25) 泉 康雄、「クリーン化学エネルギーを最大限に活用するナノ触媒設計」、日本テクノセンター・セミナー、新宿、2010 年 12 月 6 日（依頼講演）
- (26) 泉 康雄、燃料電池の進展を支えるナノ粒子電極触媒の立体的構築と三相界面を見分ける選別 XAFS 観察；第 106 回触媒討論会 A、127、2010 年 9 月 18 日、甲府（依頼講演）
- (27) 三谷 悠、泉 康雄、CO 光 PROX 反応を進める酸化チタンについての研究、第 106 回触媒討論会 A、2010 年 9 月 17 日、甲府
- (28) Naveed Ahmed、泉 康雄、Role of copper and aluminum in the photo-reduction of CO<sub>2</sub> over Zn<sub>3-x</sub>Cu<sub>x</sub>M (M = Al, Ga) LDH catalysts；第 106 回触媒討論会 A、209、2010 年 9 月 17 日、甲府
- (29) 和田聖己、泉 康雄、二酸化炭素を炭酸ジメチルに化学変換する触媒の開発；千葉エリア産学官連携オープンフォーラム 2010、38、2010 年 9 月 14 日、西千葉
- (30) 吉田祐介、泉 康雄、ナノ構造を制御し

た各種酸化亜鉛の光 PROX 反応への応用；触媒学会燃料電池関連触媒研究会、第 3 回新電極触媒シンポジウム - 異種界面の現象と触媒開発 -、P-12、2010 年 9 月 9 日、伊東

〔図書〕（計 2 件）

- (1) "Photocatalytic Conversion of Carbon Dioxide into Fuels using Layered Double Hydroxides Coupled with Hydrogen or Water", Naveed Ahmed, Motoharu Morikawa, and Yasuo Izumi, in "New and Future Developments in Catalysis: Activation of Carbon Dioxide", Chapter 21, Steven L. Suib, Ed., Elsevier, in press
- (2) "V ドープ TiO<sub>2</sub>", 泉 康雄, 触媒調製ハンドブック, 岩本正和 監修, エヌ・ティー・エス, 2011, pp. 448-449, 総ページ数 788

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://cat.chem.chiba-u.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉 康雄 (IZUMI YASUO)  
千葉大学 大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：50251666

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし