

## 光触媒を用いた CO<sub>2</sub> 燃料化/資源化

泉 康雄

千葉大学 大学院理学研究院

[yizumi@faculty.chiba-u.jp](mailto:yizumi@faculty.chiba-u.jp)

### 1. 本研究の背景

石油、天然ガス等化石燃料や化学原料を不可逆的に消費すれば大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇する。一方、再生可能エネルギーを利用して CO<sub>2</sub> を燃料や有用な化学原料に変換できれば、新たなカーボンニュートラルサイクルを作ることができ、持続可能社会に向けての有力なオプションとなる<sup>1,2)</sup>。太陽光からの光エネルギーは地球に届く光 1 時間分だけで、人類が消費する 1 年分をまかなえるほど膨大であるため、光触媒は持続可能なオプションとして利用することが期待できる。しかし、光エネルギー利用効率が低いことや、用途に応じて求めている化合物を得ようとする際に選択性が低い問題がある。

本章では、筆者の研究室で開発した、用途に応じて求めている化合物を選択して得られる光触媒について紹介する。光触媒を用いた、CO<sub>2</sub> からの主な生成物を図 1 に示す。

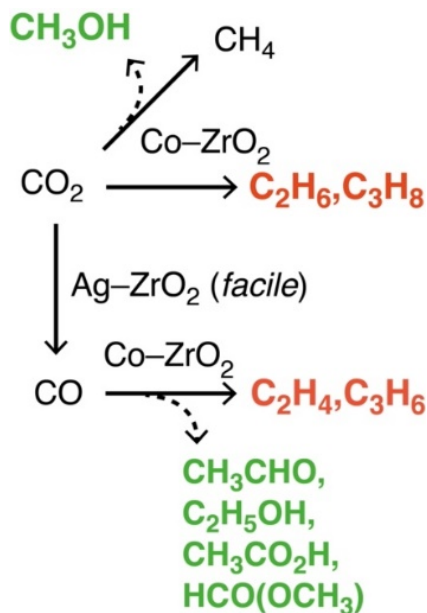


図 1. 本研究グループによる CO<sub>2</sub> から C<sub>1-3</sub> 炭化水素および C<sub>1,2</sub> 含酸素化合物への自在な持続可能光変換。点線矢印は開発中。

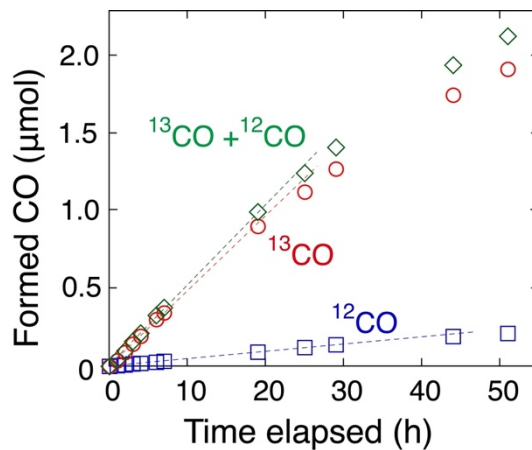


図 2. <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> (2.3 kPa) および H<sub>2</sub> (21.7 kPa) 下で Ag-ZrO<sub>2</sub> 光触媒 (0.100 g) に紫外可視光照射したときの CO 生成の経時変化<sup>3)</sup>。101.3 kPa = 1 気圧。

## 2. $^{13}\text{CO}_2$ から $^{13}\text{CO}$ を光生成

$\text{CO}_2$  は熱力学的にたいへん安定な分子である。そのため、再生可能エネルギーのみを利用して  $\text{CO}_2$  還元する際、本当に  $\text{CO}_2$  ガスが反応して生成物に至っているのか、厳密な検証が必要である。筆者らは、 $^{13}\text{C}$  を含む  $^{13}\text{CO}_2$  ガスを利用することで、光生成物に含まれる炭素が  $^{13}\text{CO}_2$  由来かを確かめた。 $^{12}\text{CO}_2$ ,  $^{13}\text{CO}_2$  それぞれ 1 モルの質量は 44, 45 グラムであるから、質量分析計により区別できる。

$^{13}\text{CO}_2$  ガスおよび  $\text{H}_2$  ガスを導入し、光触媒に紫外可視光を照射して光反応試験を行ったところ、銀-酸化ジルコニウム ( $\text{Ag-ZrO}_2$ ) を用いると  $^{13}\text{CO}_2$  から光触媒 1 g (グラム) あたり毎時 0.52  $\mu\text{mol}$  の一酸化炭素  $^{13}\text{CO}$  を定常的に光還元した (図 2) <sup>3-5)</sup>。

半導体である  $\text{ZrO}_2$  内部で、光照射により酸素原子の 2p 電子が周辺の Zr 原子の 4d 空軌道にまで励起されるエネルギー (5.0 eV ; 1 eV は  $1.602 \times 10^{-19}$  J) は波長 248 nm に相当する。照射光の波長を変えた光反応試験や発光観測により、 $\text{ZrO}_2$  が紫外光を吸収し、 $\text{ZrO}_2$  内部でこの電荷分離が起きることが発端となって  $\text{CO}_2$  光還元作用が起きたことが示された。同様に  $\text{Au-ZrO}_2$  光触媒でも  $^{13}\text{CO}_2$  から  $^{13}\text{CO}$  光生成を示した <sup>6)</sup>。

## 3. $^{13}\text{CO}_2$ から $^{13}\text{CH}_4$ を光生成

2 項で生成した  $\text{CO}$  は燃料というより化学原料である。より持続可能社会に向けた  $\text{CO}_2$  光燃料化として、多電子還元を進める光触媒についても研究を進めたところ、ニッケル-酸化ジルコニウム ( $\text{Ni-ZrO}_2$ ) を用いると、 $^{13}\text{CO}_2$  から高選択的に  $^{13}\text{CH}_4$  を光生成した (図 3) <sup>4,7)</sup>。 $^{13}\text{CH}_4$  の生成速度は光触媒 1 g 当たり毎時 0.98 mmol に達し、世界屈指の高活性  $\text{CO}_2$  還元用光触媒と言える。反応開始 24 h 経過後に活性が低下しているのは失活ではなく、供給  $\text{CO}_2$  ガスが消費されて無くなったため (図 3 右、上側の点線が初期供給量) である。

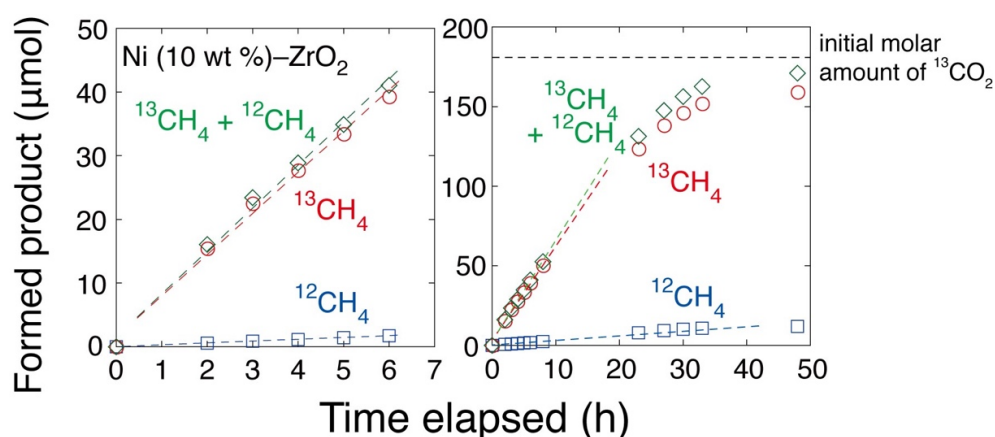


図 3.  $^{13}\text{CO}_2$  (2.3 kPa) および  $\text{H}_2$  (21.7 kPa) 下で  $\text{Ni-ZrO}_2$  光触媒 (0.020 g) に紫外可視光照射したときの  $\text{CH}_4$  生成の経時変化 <sup>7)</sup>。

このとき供給  $^{13}\text{CO}_2$  ガスの同位体純度(99.0%)に対して、生成メタン( $^{13}\text{CH}_4 + ^{12}\text{CH}_4$ )中の  $^{13}\text{CH}_4$  の割合は 92.5~98.0%となり、 $^{13}\text{C}$  の比率が一致しなかった。2項の Ag-ZrO<sub>2</sub> 光触媒でも同様の現象が見られており、原因として ZrO<sub>2</sub> 表面に強い化学吸着サイトがあり、そこに空気中から吸着した  $^{12}\text{CO}_2$  の関与が強く示唆された。そのサイトには光触媒の前処理後も  $^{12}\text{CO}_2$  が残っており、それが弱い吸着サイトよりも優先してメタン生成に至ったために、生成メタンの  $^{13}\text{C}$  純度が反応ガス中の純度よりも低くなったと考えられた。

#### 4. $^{13}\text{CO}_2$ から $^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ および $^{13}\text{C}_3\text{H}_8$ を光生成

3項で紹介した  $\text{CO}_2$  を光  $\text{CH}_4$  化する Ni-ZrO<sub>2</sub> 光触媒の持続可能な適用の可能性を模索してきたが、いくつかの企業との話でネックとなったのはコストであり、比較的安価な  $\text{CH}_4$  を光触媒で生成しても採算がとれない、という点であった。すなわち、CO および  $\text{CH}_4$  の価格はキログラムあたり 0.06~0.18 米ドルであり、持続可能性を目指した技術/手法が経済的に成り立つことも考慮する必要がある。分子内に含まれる炭素数 2 ( $\text{C}_2$ ) および 3 ( $\text{C}_3$ ) の炭化水素であればキログラムあたり 0.9~8 米ドルと 10~100 倍の価格になり、持続可能社会での  $\text{C}_{2,3}$  合成法の適用が現実味を帯びてくる。

Co-ZrO<sub>2</sub> 光触媒を水素ガス中で還元処理をしてから、 $\text{H}_2$  ガス共存下で  $\text{CO}_2$  を還元する光反応試験を行った。使用した光源はキセノンアーク灯で、太陽光の波長分布に似ている。以下、 $x$  K (ケルビン) で  $\text{H}_2$  中還元処理した光触媒を Co-ZrO<sub>2</sub>- $x$ R のように示す。

Co (7.5 重量%)-ZrO<sub>2</sub>-823R が最も高活性で、メタン ( $^{13}\text{CH}_4$ ,  $^{12}\text{CH}_4$ )、 $^{13}\text{CO}$ 、エタン ( $^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ )、およびプロパン ( $^{13}\text{C}_3\text{H}_8$ ) を生成した (図 4)。経時変化をみると、 $^{13}\text{CO}$  が反応初期 5 時間まで生成するが、それ以降は  $^{13}\text{C}_{1-3}$  パラフィン ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  で表せる化合物のこと) 生成が主となった (図 4)。2, 3 項と同様に、 $^{12}\text{CH}_4$  は、 $^{13}\text{CO}_2$  試薬中の同位体不純物の  $^{12}\text{CO}_2$  のモル比 (1%) から予測されるより有意に多く生成した<sup>8)</sup>。

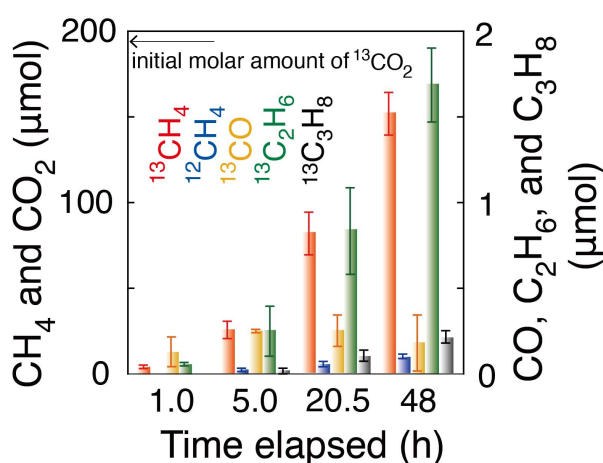


図 4.  $^{13}\text{CO}_2$  (2.3 kPa) および  $\text{H}_2$  (21.7 kPa) 下で Co (7.5 重量%)-ZrO<sub>2</sub>-823R 光触媒 (0.020 g) に紫外可視光照射したときの  $^{13}\text{CH}_4$ ,  $^{12}\text{CH}_4$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $^{13}\text{C}_3\text{H}_8$  生成の経時変化<sup>8)</sup>。

ZrO<sub>2</sub>のバンドギャップは 5.0 eV であり、価電子帯にある電子を電導体にまで励起するためには波長が 248 nm 以下の紫外光が必要となる。ここで Co-ZrO<sub>2</sub>-823R への照射光を可視光のみにした場合でも、活性は低下するものの <sup>13</sup>CH<sub>4</sub>, <sup>12</sup>CH<sub>4</sub>, <sup>13</sup>CO, <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, <sup>13</sup>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 生成比率は紫外可視光を照射した場合と変わらなかった。このことから、Co-ZrO<sub>2</sub> 光触媒の CO<sub>2</sub> 光還元作用には ZrO<sub>2</sub> 表面の酸素欠陥 (V<sub>O</sub><sup>••</sup>) サイトが関わっており、たとえば可視光のエネルギーに対応する、価電子帯から V<sub>O</sub><sup>••</sup> サイトの不純物準位への電子遷移、あるいは V<sub>O</sub><sup>••</sup> サイトの不純物準位から電導帯への電子遷移も有効な可能性がある。

## 5. <sup>13</sup>CO から <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> および <sup>13</sup>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> を光生成

4 項で <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> 光還元反応に最も高活性だった Co (7.5 重量%)–ZrO<sub>2</sub>-823R を用いて、H<sub>2</sub> ガス共存下 <sup>13</sup>CO 光還元反応を行った。その結果、主生成物の <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> (67 モル%) に次いで <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> が生成した (24 モル%)。この傾向は反応初期 5 時間まで見られたが、その後は <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> が生成するようになった。つまり反応が逐次的に進行しており、反応初期には、CH<sub>2</sub> 中間種から C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> が生成し、次いで C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> へと順次、水素化されていったと考えられる。

光生成物は <sup>13</sup>CH<sub>4</sub>, <sup>12</sup>CH<sub>4</sub>, エチレン (<sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, <sup>13</sup>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> だった。<sup>13</sup>CO<sub>2</sub> からの光触媒還元での生成物と比べて、オレフィン (C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> で表せる化合物のこと。<sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> では n = 2) が生成するようになっただけでなく他の生成物の比も異なっており、<sup>13</sup>CO<sub>2</sub> および <sup>13</sup>CO からの光触媒還元反応それぞれが共通の反応経路を経由するというよりも、CO を優先して光活性化している可能性が示唆された。

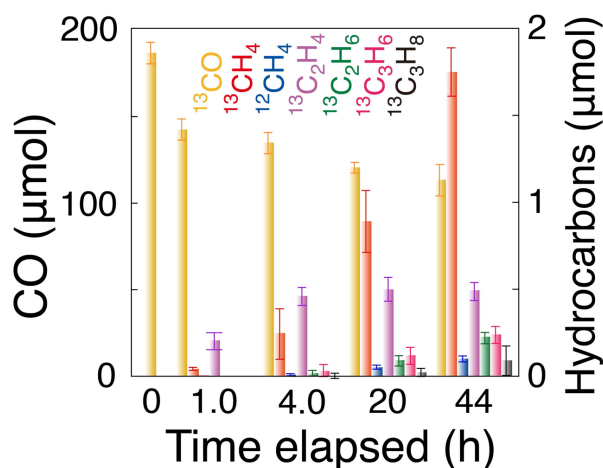


図 5. <sup>13</sup>CO (2.3 kPa) および H<sub>2</sub> (2.3 kPa) 下で Co (7.5 重量%)–ZrO<sub>2</sub>-973R 光触媒 (0.020 g) に紫外可視光照射したときの <sup>13</sup>CO 消費および <sup>13</sup>CH<sub>4</sub>, <sup>12</sup>CH<sub>4</sub>, <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, <sup>13</sup>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, <sup>13</sup>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 生成の経時変化<sup>8)</sup>。

さらに還元温度を上げて、Co サイトを全て金属状 Co<sup>0</sup> とした Co-ZrO<sub>2</sub>-973R 光触媒

を用いて  $^{13}\text{CO}$  光還元反応を行ったところ (図 5)、 $^{13}\text{C}_2\text{H}_4$  (61 モル%)およびプロピレン ( $^{13}\text{C}_3\text{H}_6$ , 8.6 モル%)が  $^{13}\text{CH}_4$  (25 モル%) より多く生成し、主生成物となった。 $^{13}\text{C}_2\text{H}_4$  の触媒 1 g 当たり毎時の生成物質量 ( $5.2 \pm 0.5 \mu\text{mol h}^{-1} \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$ ) および選択性 (61 モル%) は、2023 年以降の報告中での値 ( $12\sim 68 \mu\text{mol h}^{-1} \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$ ,  $11\sim 86$  モル%) と同程度だった<sup>8)</sup>。一方、CO および  $\text{CO}_2$  からの光触媒的な  $\text{C}_3\text{H}_6$  生成 ( $0.74 \mu\text{mol h}^{-1} \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$ ) はこれまでほとんど報告例がない。逐次反応の 1 段階めで  $^{13}\text{C}_2\text{H}_4$  を生成し、次いで  $^{13}\text{C}_2\text{H}_6$  を生成、3 段階めで  $^{13}\text{C}_3\text{H}_6$  および  $^{13}\text{C}_3\text{H}_8$  を生成したと考えられる。X 線吸収微細構造スペクトルにより分析したところ、CO 光還元反応条件にて Co (7.5 重量%)– $\text{ZrO}_2$ -973R 中の Co 種は金属状  $\text{Co}^0$  種となっていることが示された。

図 4, 5 で、試験に用いた  $^{13}\text{CO}_2$  および  $^{13}\text{CO}$  ガスの同位体純度は 99%だが、全  $\text{CH}_4$  生成に対し  $^{12}\text{CH}_4$  の割合は  $^{13}\text{CO}_2$  からは 4.5~12%であり、 $^{13}\text{CO}$  からは 6.7~18%となった。これは  $^{13}\text{CO}_2$  交換反応速度解析や X 線光電子分光の結果を基にすると、 $\text{ZrO}_2$  表面に存在する酸素欠陥サイトに空気中から吸着した  $^{12}\text{CO}_2$  から光触媒反応試験中に  $^{12}\text{CH}_4$  が生成したため、と考えられる。酸素欠陥サイトは気相にある  $^{13}\text{CO}_2$  および  $^{13}\text{CO}$  と吸着平衡にあり、光反応試験中に  $^{13}\text{CH}_4$ ,  $^{12}\text{CH}_4$  いずれも定常的に生成したということは  $\text{V}_\text{o}$  サイトは  $\text{CO}_2$  還元反応経路に含まれ、 $\text{CO}_2$  還元活性サイト (のひとつ) として働いていると思われる。

## 6. $^{13}\text{CO}_2$ と $\text{H}_2\text{O}$ から $^{13}\text{CH}_4$ , $^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ および $^{13}\text{C}_3\text{H}_8$ を光生成

2~5 項では、再生可能エネルギーを用いて  $\text{H}_2\text{O}$  から得た  $\text{H}_2$ 、あるいは既存の産業で現在、余っている  $\text{H}_2$  を用いて、 $\text{CO}_2$  を還元する光触媒について紹介した。より直接のステップとして、 $\text{H}_2\text{O}$  を  $\text{CO}_2$  の還元剤として直接用いる光還元試験を行った。水蒸気を用いる実験では気相に生成した  $\text{O}_2$  が熱力学的に有利な  $\text{H}_2\text{O}$  へと再び還元されてしまうため、液体の  $\text{H}_2\text{O}$  を用いた。

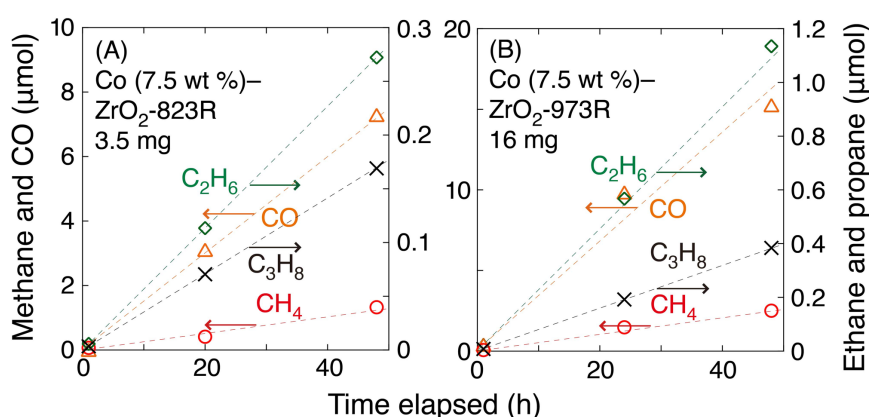


図 6.  $\text{CO}_2$  (95 kPa) および  $\text{H}_2\text{O}$  (70 mL) 下で Co (7.5 重量%)– $\text{ZrO}_2$ -823R (3.5 mg; A) および -973R (16 mg; B) に紫外可視光照射したときの CO,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  生成の経時変化<sup>8)</sup>。

$\text{C}_2\text{H}_6$  および  $\text{C}_3\text{H}_8$  が  $2.0\sim 2.7 \mu\text{mol h}^{-1} \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$  の速度で 48 h 定常生成し (図 6)、Co-



ZrO<sub>2</sub>-823Rの方が、若干高活性だった(図 6(A))。H<sub>2</sub>を還元剤に用いたとき(図 5)の60 mol%のC<sub>2,3</sub>炭化水素生成速度となり、O<sub>2</sub>も66 μmol h<sup>-1</sup> g<sub>cat</sub><sup>-1</sup>以上の速度で生成した。

液体のH<sub>2</sub>Oを用いたときに、H<sub>2</sub>を還元剤に用いる場合と比べてC<sub>2,3</sub>炭化水素の生成比がCH<sub>4</sub>(31~60 mol%)と比べて大きくなる理由として、炭化水素中間種とH<sub>2</sub>OがCo<sup>0</sup>表面に競争吸着するのに対して、H<sub>2</sub>を還元剤とした場合にはHがCo<sup>0</sup>表面に吸着しやすいため、CH<sub>4</sub>が主生成物となり、C<sub>2,3</sub>炭化水素は1.4~1.8 mol%となった(図 4)。H<sub>2</sub>およびH<sub>2</sub>Oを還元剤にした場合いずれでも、図 6(A)のようにしてCO<sub>2</sub>がC<sub>2,3</sub>パラフィンへ、またCOがC<sub>3</sub>H<sub>6</sub>を生成する(図 5)ことはこれまでほとんど報告されていない。

## 7. 密度汎関数計算によるCO<sub>2</sub>の光燃料化/資源化反応経路追跡

3節のNi-ZrO<sub>2</sub>光触媒による、CO<sub>2</sub>からCH<sub>4</sub>への反応経路についての密度汎関数理論(DFT)計算は以前紹介した<sup>4,9)</sup>。ここでは4,5節のCO<sub>2</sub>のCH<sub>4</sub>およびC<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、COのCH<sub>4</sub>およびC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>への競合反応経路についてのDFT計算を紹介する<sup>8)</sup>。

CO<sub>2</sub>はV<sub>o</sub><sup>••</sup>サイトに吸着した(図 7A(a))。H種が供給されると吸着CO<sub>2</sub>は活性化エネルギー( $E_{act}$ )1.3 eVでOCOH種に変換された((b))。V<sub>o</sub><sup>••</sup>サイトがCo<sup>0</sup>ナノ粒子に近接している場合、OCOHのO原子がV<sub>o</sub><sup>••</sup>サイトを埋め、COH部分が金属状Co<sup>0</sup>表面原子上に $E_{act}$ =0.28 eVでホップした((c))。ZrO<sub>2</sub>表面上にCoナノ粒子はV<sub>o</sub><sup>••</sup>サイトよりも数的に多く分布しており、(b)の状況は十分ありうると思われる。また、コバルトのフェルミ準位(真空準位から仕事関数5.0 eV分だけ安定なエネルギー位置)はV<sub>o</sub><sup>••</sup>サイトのエネルギーより安定なため、Coナノ粒子の近傍にV<sub>o</sub><sup>••</sup>サイトを形成しやすくする効果もある。

CH<sub>4</sub>生成経路(図 7A(a)~(e))では(a)から(b)への $E_{act}$ が最大だった。C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>生成にはCH<sub>3</sub>のカップリング( $E_{act}$ =1.0 eV; (d))ではなく、図 7A'のようにCH<sub>2</sub>のカップリングを経るエテン経路を経る( $E_{act}$ =0.70 eV)と思われる。

COからC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>生成経路もDFT計算により調べた。COはZrO<sub>2</sub>表面ではなくCo<sup>0</sup>サイトに吸着エネルギー( $E_{ads}$ )2.23 eVで吸着した(図 7B(b))。CH<sub>4</sub>に至るメチル経路ではCH<sub>3</sub>が水素化されてCH<sub>4</sub>に至る経路が律速的だった(0.75 eV; 図 7B右)。これに対して、CH<sub>2</sub>が重合するエテン経路では重合の $E_{act}$ が0.75 eVを下回り(0.70 eV; (e), (f))、実験で0~4 hで<sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>および<sup>13</sup>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>を生成したことを理論的に支持した(図 2)。

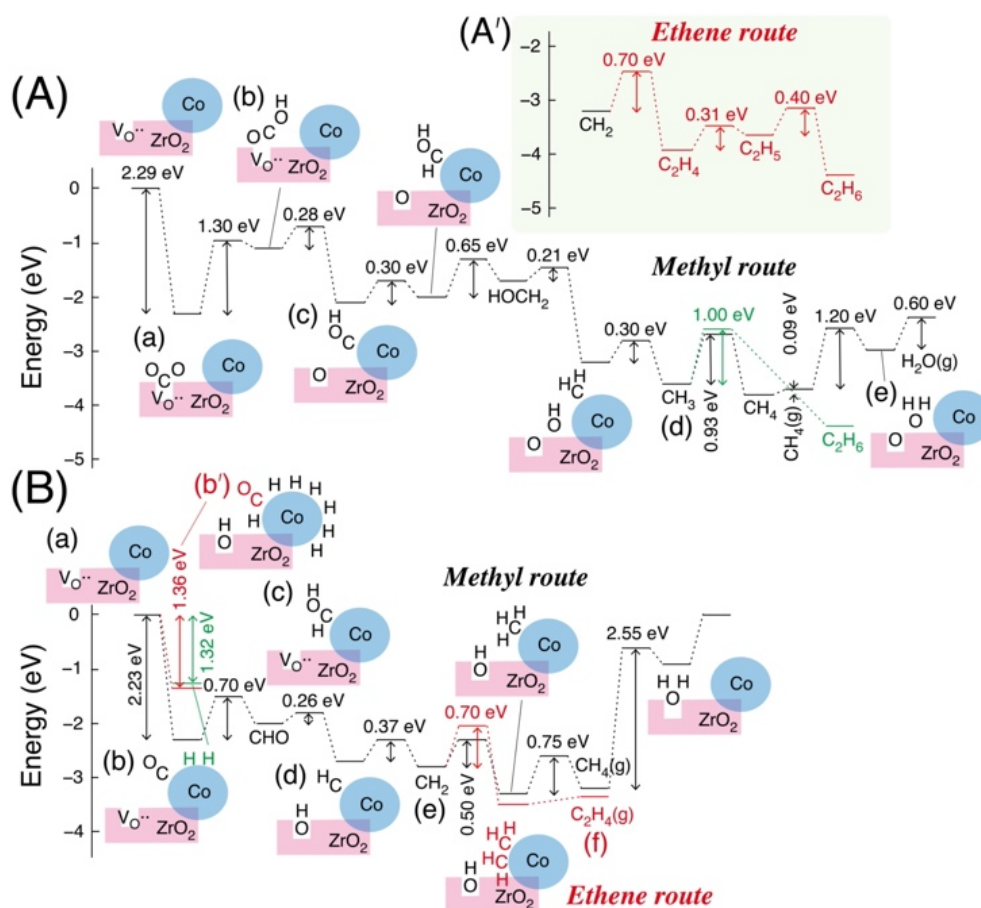


図 7. 六方最密(0 1 0)  $\text{Co}_{19}$  クラスタと単斜晶系  $\text{ZrO}_2$  (1 1 1) 表面 との複合系に (A)  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2$  および (B)  $\text{CO}$  と  $\text{H}_2$  を導入したときの反応経路図。メチル経路の他に(A') および (B) に競合するエテン経路も示した。

## 8. まとめと展望

光触媒を  $\text{CO}_2$  還元の名所は、シンプルな反応装置で炭化水素やアルコール等含酸素化合物を得られるところにある。太陽電池と電極触媒を組み合わせたシステムとを組み合わせたシステムと比べて、簡便で済む。本章で紹介した、光触媒を用いた  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  は  $\text{H}_2$  ガスかあるいは  $\text{H}_2\text{O}$  (液体) をシステムに供給できればよく、十分に持続可能な用途開発の可能性があるとと思われる。あるいは二段階式の光触媒として一旦  $\text{CO}_2$  を  $\text{CO}$  へ還元してから  $\text{H}_2$  ガスかあるいは  $\text{H}_2\text{O}$  (液体) を供給して  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$  生成しても十分に持続可能になると考えられる。

コスト的には  $\text{Ag}$ ,  $\text{Au}$  を用いた光触媒から、 $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$  を用いた光触媒を開発した。同時に、 $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$  を選択光生成する条件を見つけ、その高速化を試みた。第一周期遷移金属ではさらに安価な  $\text{Fe}$  を用いた光触媒も現在開発中である<sup>10)</sup>。本章で紹介した生成物に加え、現代の化学産業においては、 $\text{CO}_2$  からのメタノール ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )、アセトアルデヒド ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ )、エタノール ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )、酢酸 ( $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ )、ギ酸メチル ( $\text{HCO}(\text{OCH}_3)$ ) (図 1) の光選択合成も魅力的で、企業からの照会も多い。

目的含酸素化合物を選択光合成する、水溶液中を含めた光触媒反応の開発研究を進めている。

## 文献

- (1) Y. Izumi, *Coord. Chem. Rev.* **257**, 171–186 (2013).
- (2) Y. Izumi, ACS Books "*Advances in CO<sub>2</sub> Capture, Sequestration, and Conversion*", F. Jin, L.-N. He, and Y. H. Hu, Eds., ACS Symposium Series; ACS Publications, 2015; Volume *1194*, Chapter 1, pp 1–46.
- (3) H. Zhang, T. Itoi, T. Konishi, Y. Izumi, *J. Am. Chem. Soc.* **141**(15), 6292–6301 (2019).
- (4) 泉 康雄、メタネーションとグリーン水素の最新動向、関根 泰監修、第 2 章 3 節、シーエムシー出版、2023.
- (5) 泉 康雄、脱石油に向けた CO<sub>2</sub> 資源化技術 – 化学的・生物学的利用法を中心に、湯川英明監修、第 23 章、シーエムシー出版、2020.
- (6) H. Zhang, T. Itoi, K. Niki, T. Konishi, and Y. Izumi, *Catal. Today* **356**, 544–556 (2020).
- (7) H. Zhang, T. Itoi, T. Konishi, Y. Izumi, *Angew. Chem. Int. Ed.* **60**(16), 9045–9054. (2021)
- (8) T. Loummissi, R. Ishii, K. Hara, T. Oyumi, I. Abe, C. Li, H. Zhang, R. Hirayama, K. Niki, T. Itoi, Y. Izumi, *Angew. Chem. Int. Ed.* **63**, e202412090 (2024).
- (9) K. Hara, M. Nozaki, T. Hirayama, R. Ishii, K. Niki, Y. Izumi, *J. Phys. Chem. C* **127**(4), 1776–1788 (2023).
- (10) T. Oyumi, I. Abe, M. Sasaki, and Y. Izumi, to be submitted very soon to *Chem. Commun.*

## 著者

泉 康雄

千葉大学 大学院理学研究院

教授

千葉市稲毛区弥生町 1 の 33

Phone 043-290-3696

FAX 043-290-2783

E-mail yizumi@faculty.chiba-u.jp