

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05294

研究課題名(和文) 協奏的酸塩基複合ナノ構造を有するメタン酸化カップリング触媒の創成

研究課題名(英文) Development of highly active catalysts composed of nano-sized acid-base pair sites for oxidative coupling of methane

研究代表者

羽田 政明 (Haneda, Masaaki)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70344140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：Y2O₃に酸化セリウムを複合化することでメタン酸化カップリング活性が向上した。酸化セリウムはY2O₃マトリックス中にナノ分散しており、その高い分散性がメタン酸化カップリング活性の発現に重要であった。酸化セリウムがナノ分散することによりルイス酸点の発現が期待され、Y2O₃の塩基点と酸化セリウムの酸点が協奏的に作用することにより高い触媒機能が発現するものと推察した。またAサイトにLaを置換したLaBO₃型ペロブスカイト触媒についても検討し、BサイトにAl, Ga, In, Ybを置換した触媒が高い触媒活性を示すこと、XPSにより同定した表面酸素種が活性発現に寄与することを明らかにした

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタン酸化カップリング反応は資源量が豊富なメタンから化学品を直接合成する反応で、1980年代から継続的な研究が実施されているが、未だ実用化に資する触媒は開発されていない。実用化に繋がるブレークスルーを実現するためには新しい観点からの研究が必要である。本研究は異種反応における活性点の類似性から新規触媒の開発に繋げることに着眼して開始した研究で、環境浄化触媒として広く研究されている酸化セリウム系やペロブスカイト系の触媒についてメタン酸化カップリング活性の発現に繋がる特性を明らかにしている。学術的にも新しい取り組みであると考えており高活性触媒の開発に繋がることを期待している

研究成果の概要(英文)：The catalytic activity for oxidative coupling of methane (OCM) was improved by combining Y2O₃ with cerium oxide (CeO₂). From the results of various characterizations, highly dispersed cerium oxide in the matrix of Y2O₃ was considered to be responsible for high catalytic activity for the OCM reaction. The formation of highly dispersed cerium oxide led to the expectation of the creation of acidic sites, and then the combination of acidic sites on cerium oxide and basic sites on Y2O₃ was suspected to be important for the achievement of high performance. The role of cerium oxide was concluded to activate oxygen species via the dissociation on the surface. The catalytic performance of LaBO₃ perovskites for the OCM reaction was investigated. LaBO₃ perovskites substituted with Al, Ga, In and Yb at B site showed higher activity than those substituted with Co, Fe and Mn. Surface adsorbed oxygen species, which was identified by XPS, was suspected to participate in the OCM reaction.

研究分野：触媒化学

キーワード：メタン酸化カップリング反応 酸塩基複合化触媒 ペロブスカイト サステイナブルケミストリー 触媒機能解析 触媒・化学プロセス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

メタンを化学原料とするプロセスの中で、メタン酸化カップリング反応はメタンから直接 C2 化合物を合成する反応であり、長鎖炭化水素の直接転換につながる技術として 1980 年代以降、盛んに研究がなされてきた。これまでに多くの優れた触媒が報告されており (例えば、J.H. Lunsford, *Angew.Chem.Int. Ed.Engl.* 34 (1995) 970; K. Takanabe, *J.Jpn. Petrol.Inst.*, 55 (2012) 1) 塩基性酸化物であるアルカリ土類酸化物を主体とした触媒の有効性が報告されている。また遷移金属とハロゲンの共ドーピングや異種金属の複合化による強塩基点創成による活性向上なども検討されてきており、メタン転化率、C2 選択率が高い触媒も見出されている。最近ではハイスループット装置による探索 (T.N. Nguyen et al., *ACS Catal.*, 10 (2020) 921) や機械学習を用いた触媒インフォマティクスによる探索も検討されており (例えば、K. Suzuki et al., *ChemCatChem*, 11 (2019) 4537) 有望触媒の開発が期待される。触媒研究としては反応機構に基づいた活性点構造の設計・構築が主流であり、これまでも同様のコンセプトで研究が進められてきた。メタン酸化カップリング反応においては活性化された酸素種とメタン分子の反応によるメチルラジカル種の生成が重要なステップとされている。そのため、特に酸素分子の活性化に着目した触媒研究が精力的に実施されてきており、C2 化合物の収率が高い触媒の開発に繋がっている (例えば、U. Zavyalova et al., *ChemCatChem* 3 (2011) 1935)。しかし、実用化の目途となる C2 収率が 30% を超える触媒の開発は実現しておらず、酸素分子活性化に着目した検討のみでは限界があるようである。最近、酸素分子ではなくメタン分子の活性化 (水素引き抜き) による C2 選択性向上を目指し、触媒とプラズマ電場を併用する方法が提案されている (関根ら、*ファインケミカル* 8 (2015) 5)。熱力学的平衡に近い生成物選択性が得られるようであるが、化学プロセスとしては複雑になり、実用的には触媒のみで C2 収率を高めることが望まれている。

メタン酸化カップリング触媒の開発研究は 40 年以上継続されているものの、実用に資する触媒の開発は未踏であり、ブレークスルーに繋げるためには新たな視点からの検討が必要である。

2. 研究の目的

我々はメタンと NO の活性化に効果的な触媒には類似性があるという Boreksov の論文 (*Disc.Faraday Soc.*, 41 (1966) 263) に着目し、NO 分解活性とメタン酸化カップリング活性の関連性について検討してきた (科研費 挑戦萌芽研究 (16K14046))。NO 直接分解に効果的な Ba 添加 Y₂O₃ 触媒について詳細な検討を行ったところ、NO 分解活性と C2 収率に良好な相関性が得られ、両反応の活性点構造の類似性を明らかにした。Ba²⁺イオンが Y₂O₃ 格子中の Y³⁺と置換することにより電子供給サイト (塩基点) が創成され、O₂ 活性化能が向上することにより触媒特性が向上したものと推察した。一方で、メタン分子の活性化 (メチルラジカルやメトキシなどの生成および吸着) は塩基点のみでは起こらず、適度なルイス酸点の存在が必要であると考えられる。

そこで本研究では、酸素分子とメタン分子の活性化を促進できる二元的かつ協奏的な酸塩基点を有する触媒を調製し、メタン酸化カップリング触媒としての有効性を検証するとともに、更なる高活性化に向けての活性支配因子を解明・提案することを目指す。具体的には、塩基性を有する酸化イットリウム (Y₂O₃) に酸化セリウムをナノ分散させた触媒を調製し、酸化セリウムの分散性 (酸塩基特性と関連) と触媒活性との関連性を明らかにする。また A サイトに La を置換した ABO₃ 型ペロブスカイト (LaBO₃, B: Al, In, Ga, Yb, Co, Mn, Fe) を合成し、メタン酸化カップリング活性に対する B サイト元素の影響を検討した。

3. 研究の方法

3.1. 触媒調製

(1) CeO₂/Y₂O₃ 系触媒

Y₂O₃ は硝酸イットリウムを原料とする沈殿法により調製した。CeO₂/Y₂O₃ は、共沈法 (CP)、均一沈殿法 (HP)、含浸法 (I) および水熱法 (HT) により調製した。CeO₂ 添加量は原則 3mol% とし、共沈法のみ 1~10mol% とした。いずれの方法においても、空气中、800°C で 5 時間焼成することで触媒を得た。

(2) ペロブスカイト系触媒

クエン酸法により、A サイトに La、B サイトに Al, In, Ga, Yb, Co, Fe, Mn を置換したペロブスカイトを調製した。空气中、1150°C で 5 時間焼成することで触媒を得た。

3.2. 触媒キャラクタリゼーション

調製した触媒について、XRD による結晶構造解析、BET 法による比表面積測定、TEM による粒子形状観察、XPS による表面状態観察を行った。触媒の還元特性は H₂-TPR により評価した。また、触媒表面での酸素の活性化特性は ¹⁶O/¹⁸O 交換反応により評価した。

3.3. メタン酸化カップリング活性評価

所定量の触媒 (0.1g) を石英製反応管に充填し、前処理として He 流通下、650°C で 2 時間の処理を行った。その後、反応ガス (44.4% CH₄/11.1% O₂/He, 45cm³min⁻¹) に切り替え、650~800°C

まで 50°C 間隔で昇温し、各温度において定常活性を測定した。生成物はガスクロマトグラフ (Shimadzu GC-2014ATTF、TCD×2、FID) で定量した。

4. 研究成果

4. 1. CeO₂/Y₂O₃ 触媒によるメタン酸化カップリング反応

(1) 調製方法の影響

調製した 3mol% CeO₂/Y₂O₃ 触媒について XRD 測定を行ったところ、いずれのサンプルにおいても立方晶の Y₂O₃ に帰属できるピークのみが観察され、酸化セリウム (CeO₂) に帰属できるピークは検出されなかった。これは、酸化セリウムの添加量が少ないため、あるいは酸化セリウムが XRD の検出限界 (3nm) 以下のナノ粒子として存在しているためと考えられる。一方で、水熱法で調製した CeO₂/Y₂O₃(HP)のみ、CeO₂-Y₂O₃ 固溶体の形成が確認された。CeO₂/Y₂O₃ の BET 比表面積は含浸法(I)、共沈法(CP)、均一沈殿法(HP)で調製した触媒に顕著な違いは見られず、25 ~ 35m²/g であったのに対し、水熱法(HT)で調製した触媒の BET 比表面積は小さいことがわかった (10m²/g)。

図 1 に各触媒のメタン酸化カップリング活性を示す。含浸法(I)、共沈法(CP)、均一沈殿法(HP)により CeO₂ を添加することで全温度域においてメタン転化率の向上が見られた (図 1(A))。一方、水熱法で調製した CeO₂/Y₂O₃(HP)では Y₂O₃ と比較して 750°C の温度域においてメタン転化率が低下した。図 1(B)には C₂ 選択性を示すが、メタン転化率と同様に含浸法(I)、共沈法(CP)、均一沈殿法(HP)では Y₂O₃ と比較して C₂ 選択性が大きく向上し、CeO₂ 添加による反応促進効果が見られた。一方で水熱法で調製した CeO₂/Y₂O₃(HP)の C₂ 選択性は Y₂O₃ と比較して大きく低下しており、水熱法は本反応のための CeO₂/Y₂O₃ 触媒の調製方法として適さないようである。CeO₂/Y₂O₃(HP)の低活性の要因については詳細な検討が必要であるが、他の CeO₂/Y₂O₃ 触媒とは異なる粒子形態 (凝集した Y₂O₃ 一次粒子、かつ CeO₂-Y₂O₃ 固溶体) によるものと考えられる。

図 1 より明らかなように、共沈法で調製した CeO₂/Y₂O₃(CP)が最も高いメタン酸化カップリング活性を示したことから、以降、共沈法で調製した触媒について詳細な検討を実施した。

(2) 酸化セリウム添加量の影響

CeO₂/Y₂O₃ 触媒によるメタン酸化カップリング反応の活性支配因子を明らかにするため、共沈法により酸化セリウム添加量が異なる CeO₂/Y₂O₃(CP)を調製し、詳細な検討を実施した。結晶構造を調べるため XRD 測定を行ったところ、いずれの触媒においても Y₂O₃ に帰属されるピークのみが観察され、10mol%の酸化セリウム添加量においても CeO₂ に帰属できるピークは検出できなかった。またラマンスペクトルにおいても C 型構造を有する立方晶 Y₂O₃ に帰属できるピークのみが観察され、酸化セリウムの構造を同定することができなかった。酸化セリウムは Y₂O₃ と構造的な相互作用はなく、Y₂O₃ マトリックス中に CeO₂ ナノ粒子として分散しているものと推察される。

酸化セリウムは Y₂O₃ と比較して弱い塩基性を示す (Y. Doi et al., *J.Mol.Catal.A*, 383-384 (2014) 70)。またナノ粒子化することにより欠陥サイトが増大することで露出した Ce サイトが出現することでルイス酸性も示す。つまり、本研究で調製した CeO₂/Y₂O₃(CP)は酸点と塩基点が協奏的に発現していると推察できる。酸化セリウムの粒子径は添加量に依存すると考えられ、粒子径によって酸塩基性さらにはメタン酸化カップリング活性が異なると思われる。

そこで酸化セリウムの分散状態の評価を試みた。TEM 観察を行ったところ、Y₂O₃ への酸化セリウム添加による粒子形態への顕著な変化は見られなかった。さらに詳細に検討するため H₂-TPR 測定を行った。H₂-TPR は触媒の還元特性を評価するための方法として広く用いら

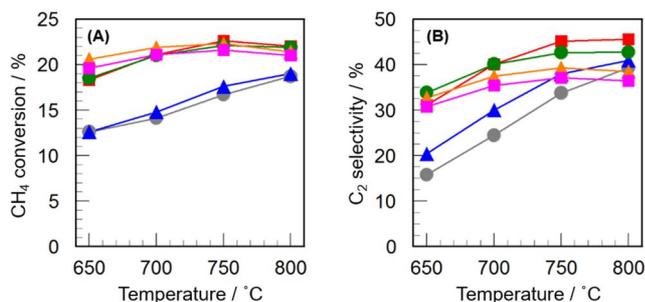


図 1 種々の方法で調製した CeO₂/Y₂O₃ のメタン酸化カップリング活性: (A) メタン転化率、(B) C₂ 選択性: (●) Y₂O₃, (●) CeO₂/Y₂O₃(CP), (▲) CeO₂/Y₂O₃(HP), (■) CeO₂/Y₂O₃(I), (◆) CeO₂/Y₂O₃(HT)

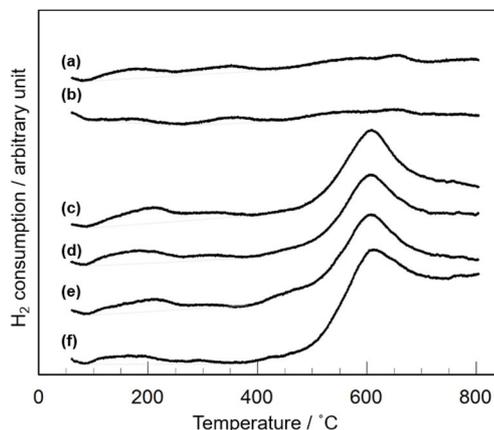


図 2 共沈法により調製した酸化セリウム添加量の異なる CeO₂/Y₂O₃(CP)の H₂-TPR プロファイル: (a) Y₂O₃, (b) CeO₂(1)/Y₂O₃, (c) CeO₂(3)/Y₂O₃, (d) CeO₂(4)/Y₂O₃, (e) CeO₂(5)/Y₂O₃, (f) CeO₂(10)/Y₂O₃

れている。アルミナに担持された酸化セリウムについて H₂-TPR 測定を実施すると、水素消費ピークは酸化セリウムの粒子径に依存することが知られている (M. Haneda et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 66 (1993) 1279)。酸化セリウムの粒子が小さい場合は低温でピークが出現し、大きい粒子では高温域にピークが現れる。本研究ではこのような特性を利用し、高分散した酸化セリウムと凝集した酸化セリウムの分離を試みた。図 2 に酸化セリウム添加量の異なる CeO₂/Y₂O₃(CP)の H₂-TPR プロファイルを示す。図から明らかなように、Y₂O₃ のみでは顕著な水素消費ピークは見られないが、酸化セリウムを添加することで 400°C 以下の温度域と 500°C 以上の温度域に新たなピークの出現が確認できた。特に 500°C 以上のピークは酸化セリウム添加量が 3mol% 以上で顕著である。これらのピークの中で、400°C 以下のピークが高分散した酸化セリウムに帰属できると考え、ピーク面積から水素消費量を算出した。水素消費量は酸化セリウム添加量が 3~5mol% まで徐々に増加し、10mol% とすることで大きく低下した。つまり、酸化セリウム添加量が 3~5mol% の CeO₂/Y₂O₃(CP)では酸化セリウムは高分散状態が維持されていると推察される。

図 3 にメタン転化率と C₂ 選択性の反応温度依存性を示す。メタン転化率は Y₂O₃ に 3mol% 以上の酸化セリウムを添加することで大きく向上し、3~5mol% の添加量で最も高くなった (図 3(A))。C₂ 選択性も酸化セリウムの添加による向上が見られたが、最適な酸化セリウム添加量はメタン転化率とは異なり、3~4mol% が最適値であった。つまり、酸化セリウム添加量が多いとメタンの完全酸化反応が優先的に進行することを示唆している。そこで酸化セリウムの分散状態とメタン酸化カップリング活性の関連性を明らかにするため、750°C におけるメタン転化率と C₂ 選択性を H₂-TPR における 400°C 以下の水素消費量に対してプロットした。結果を図 4 に示すが、両者には比較的良好な相関性が得られ、酸化セリウムの分散状態がメタン酸化カップリング活性を支配する重要な因子の一つであることが明らかとなった。

酸化セリウムをナノ分散化することによりルイス酸点の増大が期待できる。酸素の活性化(解離)はカチオンサイト(ルイス酸点)上で起こると考えられており (D. Martin et al., *J. Phys. Chem.*, 100 (1996) 9429)。酸化セリウムの添加により酸素の活性化が促進されると期待できる。そこで、CeO₂/Y₂O₃(CP)の酸素活性化能を評価するため ¹⁶O/¹⁸O 交換特性を評価した。これまでに種々の酸化物について ¹⁶O/¹⁸O 交換反応が実施されてきており、¹⁶O/¹⁸O もしくは ¹⁶O₂ の生成挙動から 2 種類のメカニズムが提案されている (G.K. Boreskov, *Adv. Catal.*, 15 (1964) 285; J. Novakova, *Catal. Rev.*, 4 (1970) 77)。酸化ジルコニウムなどの格子酸素の反応性が低い酸化物では ¹⁶O/¹⁸O の生成が有利な "simple hetero-exchange mechanism" (¹⁸O₂(g) + ¹⁶O(s) → ¹⁶O¹⁸O(g) + ¹⁸O(s)) が提案されている。本研究で調製した Y₂O₃ において ¹⁶O/¹⁸O の生成が ¹⁶O₂ と比較して低温で見られており、これまでの報告と一致して "simple hetero-exchange mechanism" で酸素の活性化が起こっていることがわかった。一方で酸化セリウムなどの格子酸素の反応性が高い酸化物では格子からの ¹⁶O₂ 放出が優先的に起こる "multiple hetero-exchange mechanism" (¹⁸O₂(g) + ¹⁶O¹⁶O(s) → ¹⁶O₂(g) + ¹⁸O¹⁸O(s)) が提案されている。CeO₂(3)/Y₂O₃(CP)についても ¹⁶O/¹⁸O 交換反応を実施したところ、酸化セリウムが担持されているにもかかわらず ¹⁶O/¹⁸O が低温で生成するプロファイルが得られた。これは、格子酸素が酸素活性化に寄与するのではなく、高分散した酸化セリウム表面で気相酸素の解離吸着を経て酸素の活性化が進行することを示す結果である。なお、酸化セリウムの添加により ¹⁶O/¹⁸O の生成温度が大幅に低温化することを見出しており、酸化セリウムが酸素の活性化に寄与していることが明らかである。

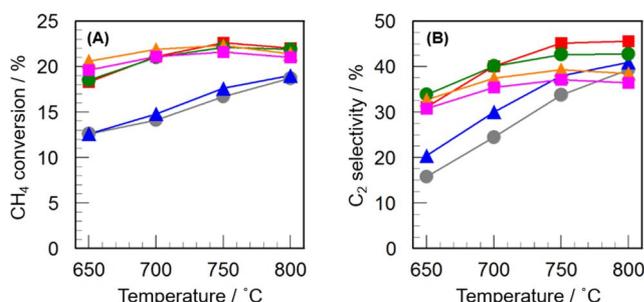


図 3 共沈法により調製した酸化セリウム添加量の異なる CeO₂/Y₂O₃(CP)のメタン酸化カップリング活性: (A) メタン転化率、(B) C₂ 選択性: (●) Y₂O₃, (▲) CeO₂(1)/Y₂O₃, (■) CeO₂(3)/Y₂O₃, (●) CeO₂(4)/Y₂O₃, (▲) CeO₂(5)/Y₂O₃, (■) CeO₂(10)/Y₂O₃

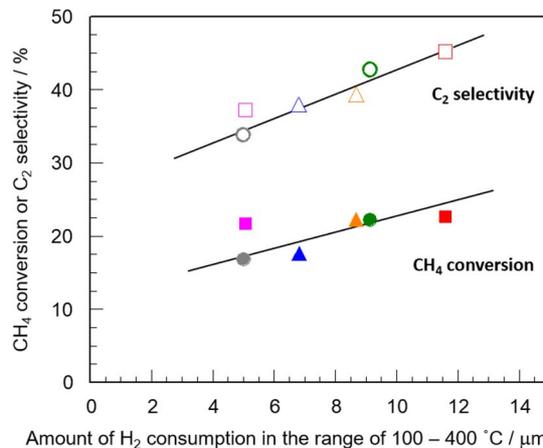


図 4 共沈法により調製した CeO₂/Y₂O₃(CP)のメタン酸化カップリング活性(750°C)と H₂-TPR における 400°C 以下の水素消費量との関係性

4.2. ABO₃型ペロブスカイト触媒によるメタン酸化カップリング反応

酸塩基複合化触媒として、Aサイトに塩基性を示すLaを置換したペロブスカイトに着目し、Bサイトに酸性を示す様々な元素(Al, In, Ga, Yb, Fe, Co, Mn)を置換することによるメタン酸化カップリング活性への影響を検討した。なお、本研究において合成したペロブスカイトの酸・塩基点を定量的に解析するためにCO₂-TPD/NH₃-TPDを試みたが、BET比表面積が小さいために上手く定量できなかった。そこで、Bサイトの元素種と表面酸素種の関係性に着目し、ペロブスカイト触媒のメタン酸化カップリング活性の向上に繋がる知見を創出するための検討を実施した。

図5にAサイトにLaを置換したLaBO₃ペロブスカイト触媒のメタン酸化カップリング活性を示す。非常に興味深い結果として、BサイトにAl, Ga, In, Ybを置換した触媒では反応温度とともにメタン転化率が高くなる傾向が見られたのに対し(図5(A))、複数の原子価を有するFe, Co, Mnを置換した触媒ではメタン転化率は650~800°Cにおいて大きく変化しないことがわかった。詳細は不明であるが、Fe, Co, Mnを置換することで格子酸素が活性化され、650°Cからメタン酸化反応が進行したためと考えられる。また図5(B)にはC₂選択性を示すが、Al, Ga, In, Ybを置換した触媒において高いC₂選択性が得られた。

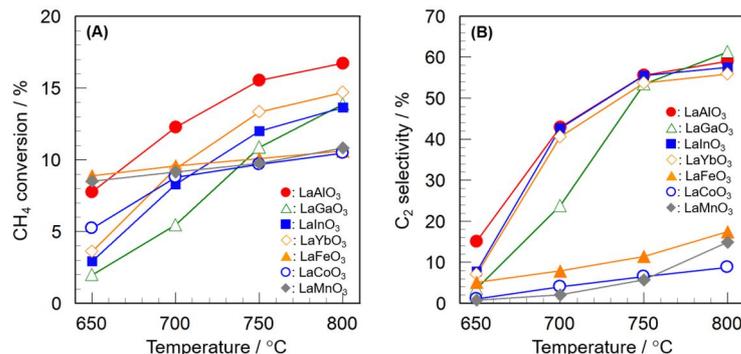


図5 AサイトにLaを置換したLaBO₃ペロブスカイト触媒のメタン酸化カップリング活性：(A)メタン転化率、(B)C₂選択性

CeO₂/Y₂O₃触媒において、触媒表面での酸素の活性化が重要であることが示唆されたことから、ペロブスカイト触媒の表面酸素種をXPSにより測定した。いずれのいずれのペロブスカイトにおいても格子酸素(O_{lat}: 527eV)、吸着酸素種(O_{ads}: 529.5eV)、吸着OH基(O_{OH}: 532.5eV)に帰属できるピークが観察された。しかしながら、それらの比率はBサイト元素により大きく異なる。そこで、表面酸素種(O_{ads})の割合を算出し(O_{ads}/(O_{lat}+O_{ads}+O_{OH}))、700°CにおけるC₂選択性との相関性を比較した。図6に示すように、表面酸素種の割合とC₂選択性には良好な相関性が見られ、表面酸素種の割合が高いペロブスカイトほど、C₂選択性が高くなることが明らかとなった。つまり、表面酸素種が多くなるようにBサイトの元素を選択することで高活性な触媒の開発が可能になることを示唆する結果である。

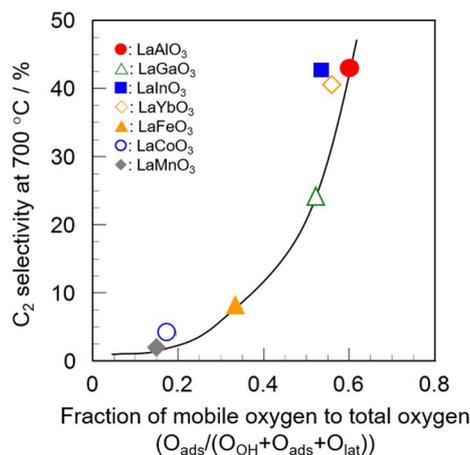


図6 AサイトにLaを置換したLaBO₃ペロブスカイト触媒の吸着酸素種の割合と700°CにおけるC₂選択性との相関性

4.3. まとめ

Y₂O₃への酸化セリウム添加によりメタン酸化カップリング活性が向上した。特に酸化セリウム添加量が3mol%において最も効果的であった。種々のキャラクタリゼーションより、酸化セリウムはY₂O₃マトリックス中にナノ分散しており、その高い分散性がメタン酸化カップリング活性の発現に重要であった。酸化セリウムがナノ分散することによりルイス酸点の発現が期待され、酸化イットリウム上の塩基点と酸化セリウム上の酸点が協奏的に作用することにより高いメタン酸化カップリング活性が発現するものと推察した。酸化セリウムの役割は酸素分子を解離吸着することによる活性化であると提案した。

AサイトにLaを置換したLaBO₃型ペロブスカイト触媒のメタン酸化カップリング活性はBサイトの元素に強く依存することが明らかとなった。検討した元素の中では、Al, Ga, In, Ybを置換した触媒が高い触媒活性を発現した。XPSにより定量した表面酸素種と触媒活性との相関性より、吸着酸素種(O_{ads})がメタン酸化カップリング活性の発現に重要であることがわかった。高活性を示したBサイト元素は酸性を示すことが知られていることから、酸塩基特性の観点からAサイト、Bサイトに最適な元素を選択することで高活性なメタン酸化カップリング触媒の開発に繋がることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masaaki Haneda, Makoto Tanaka, Yasuyuk Doi, Nicolas Bion	4. 巻 457
2. 論文標題 Oxidative coupling of methane over Ba-doped Y2O3 catalyst - Similarity with active site for direct decomposition of NO	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Molecular Catalysis	6. 最初と最後の頁 74-81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mcat.2018.07.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Masaaki Haneda, Yuya Katsuragawa, Yuichiro Nakamura, Atsuya Towata	4. 巻 6
2. 論文標題 Promoting Effect of Cerium Oxide on the Catalytic Performance of Yttrium Oxide for Oxidative Coupling of Methane	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Chemistry	6. 最初と最後の頁 581
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fchem.2018.00581	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 竹中 啓太、林 勇治、羽田政明
2. 発表標題 High-Temperature NO Decomposition over Ceramics Catalysts -Alkaline Earth Containing Yttrium Oxide Based Composite Oxide Catalysts-
3. 学会等名 PACRIM13（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹中 啓太、林 勇治、羽田政明
2. 発表標題 Alkaline earth containing yttrium oxide based catalysts for high-temperature NO decomposition reaction
3. 学会等名 The 9th East Asia Joint Symposium on Environmental Catalysis and Eco-materials（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹中 啓太、林 勇治、羽田政明
2. 発表標題 Alkaline earth containing yttrium oxide based catalysts for high-temperature NO decomposition reaction
3. 学会等名 The 3rd FRIMS International Symposium on Frontier Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桂川侑也、羽田政明
2. 発表標題 酸化イットリウムにナノ分散した酸化セリウム触媒上でのメタン酸化カップリング反応
3. 学会等名 第122回触媒討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中真実、土井泰幸、羽田政明
2. 発表標題 活性点構造の類似性に着目したNO直接分解触媒のメタン酸化カップリング反応への展開
3. 学会等名 第48回石油・石油化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桂川侑也、甘 鎔広、羽田政明
2. 発表標題 酸化イットリウムにナノ分散した酸化セリウム触媒上でのメタン酸化カップリング反応
3. 学会等名 第36回希土類討論会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------