

放電・触媒複合リアクタにおける触媒二重化による温度特性改善

林 和 夫^{*1}, 安井 祐之^{*}, 田中 元史^{*}

(2010年2月3日受付; 2011年2月7日受理)

Improvement of Discharge-Catalyst Hybrid Reactor by Applying Dual Structure of Combustion and Ozone Catalysts

Kazuo HAYASHI,^{*1} Hiroyuki YASUI,^{*} and Motofumi TANAKA^{*}

(Received February 3, 2010; Accepted February 7, 2011)

The reactor composed of dielectric-barrier-discharge and ozone-decomposition-catalyst is effective for removal of toluene at as low as 72 J/L. The synergistic effect of discharge and catalyst, which is the highest at room temperature, diminishes gradually with a temperature rise. The performance deterioration has been improved by adding the combustion catalyst activated at the temperature over 100°C. The combustion catalyst also worked synergistically with the discharge to decompose toluene at higher than 50°C. The effect reached its maximum around 100°C. The toluene decomposition was assisted by the activation of the combustion catalyst itself at higher than 100°C. The combustion catalyst was placed upstream in the catalyst bed, as ozone transited the combustion catalyst at lower than 100°C. The new hybrid reactor with the dual structure of combustion and ozone catalysts destructed more than 70% of the initial toluene content (94 ppm) at lower than 300°C. The flow rate was 2.5 SLM and the discharge input power was 3.0 W. The dominant decomposition product was CO₂ in the outflow gas. The amount of CO and volatile products were small.

1. はじめに

放電と触媒を組み合わせる両者の相乗作用を利用する VOC (Volatile Organic Compound: 揮発性有機化合物) 処理技術は、経済性の観点から注目を集め、研究開発が盛んに行われている^{1,4)}。

オゾン分解性を持つ酸化マンガンとオゾンを組み合わせたシステムでは、ベンゼンを使った常温の実験でオゾンと触媒の相乗作用を確認している⁵⁾。触媒表面で分解されたオゾンから酸素活性種が生成され、触媒表面に吸着されたベンゼンの分解を促進すると説明されている。酸化触媒と放電の組み合わせでも、VOC 処理の有効性が確認されている⁶⁾。

現在、大規模工場の排ガス処理では触媒を使った燃焼方式が主流だが、中小工場における濃度が比較的低温の排ガス処理には、小規模でも経済性が期待できる放電と触媒の組み合わせのようなシステムが適していると考えられる。例えば、印刷工場の排ガスは、常温から 200°C 程度の温度で、100 ppm 弱の VOC を含む。

このような背景のもとに、筆者らは、放電とオゾン分解

触媒から構成される複合リアクタのトルエン分解特性の温度依存性を調べた⁷⁾。実用性を考慮し、リアクタへの入力放電エネルギーを、これまで主に研究されていた条件である数 100-数 1,000 J/L から 72 J/L に低減した。放電部で生成されるオゾン濃度は、常温の乾燥空気です約 300 ppm である。実験の結果、常温では分解率が高いが、100-200°C では低下する特徴が明らかとなった。低温での高分解率は、放電による直接分解に加えて、放電で生成されたオゾンとオゾン分解触媒の相乗作用が有効に働いたことによる。200°C 以下ではオゾン分解触媒自身はトルエンを直接分解することはないが、分解したオゾン起因の酸素活性種が触媒表面に吸着されたトルエンを分解するので、放電単独での処理を大きく上回る分解率が得られる。高温になるにつれ、放電部から供給されるオゾン量が減り、触媒表面への吸着量も少なくなるので、分解率が減少する。

そこで、常温における放電とオゾン分解触媒の相乗作用を保ちつつ、100-200°C の温度域の VOC 除去特性を向上させることを目的とし、オゾン生成用の放電部とオゾン分解触媒で構成される従来の複合リアクタに、100°C から分解能力を発揮する酸化触媒を組み込んだ (複合二重触媒リアクタ)。この酸化触媒は、既に、文献⁵⁾によって、オゾンとの相乗作用が報告されているが、実験が 1,000 ppm という高濃度のオゾンを用いて行われたので、今回、我々の運転条件である 72 J/L の放電入力下で、どのような特性を示すか、再確認を行った。その結果に基づき、オゾン分解触

キーワード: 誘電体バリア放電, 触媒, オゾン, 相乗作用, トルエン

^{*} (株)東芝 (230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4)
Toshiba Corporation, 2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045, Japan

¹ kazu1.hayashi@glb.toshiba.co.jp

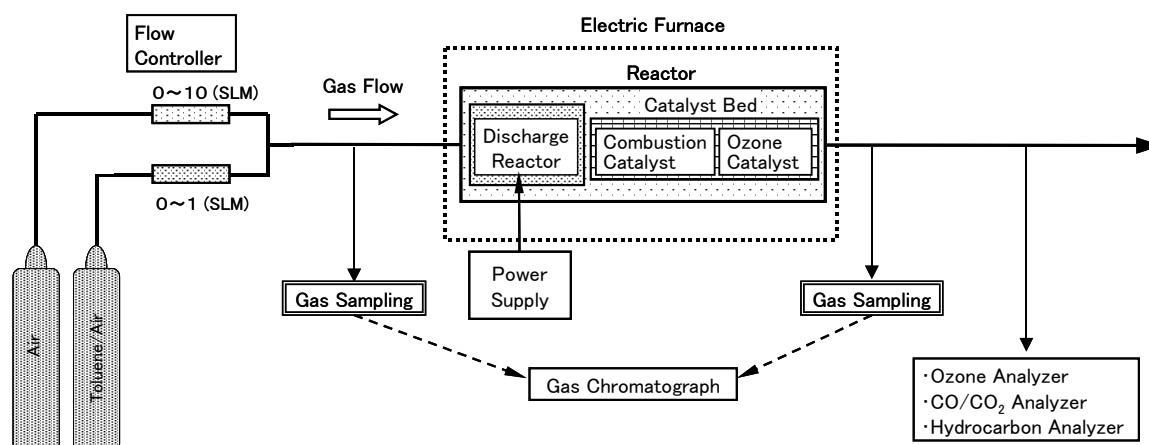
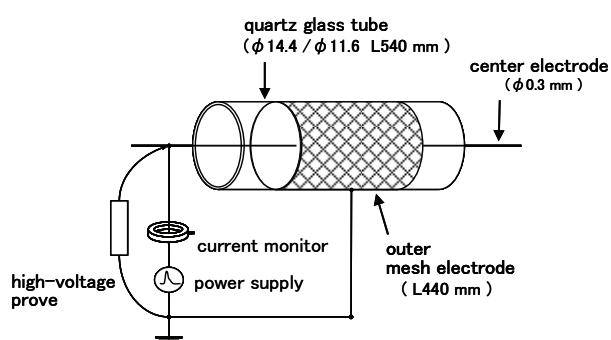


図1 実験装置の概略図

Fig. 1 Experimental setup.

図2 放電部の詳細⁷⁾Fig. 2 Detailed drawing of the discharge reactor⁷⁾.

媒との組み合わせ方法を決定し、複合二重触媒リアクタとしての総合性能を測定した。

本論文では、トルエンを被処理 VOC とし、酸化触媒と放電の相乗作用確認実験の結果を述べ、続いて、酸化触媒とオゾン分解触媒で構成した二重触媒リアクタの処理特性を記す。

2. 実験装置の概要

図1は、実験装置の概略図である。リアクタは、放電部と触媒部から成る。放電部(図2、参考文献⁷⁾より引用)は、石英ガラス管(内径11.6 mm、厚さ1.4 mm)の中心にワイヤ(外径0.3 mm)を通し、ガラス管の外周に張ったメッシュとで同軸円筒の電極配置をなすように構成した。電極の長さは、440 mmである。容量移行型のパルス電源にて、中心ワイヤに、パルス幅約0.2 μsec、ピーク電圧約15 kVのパルス高周波電圧を印加し、誘電体バリア放電を発生させた。中心ワイヤとメッシュ間の電圧は高周波用高電圧プローブ(テクトロニクス(株), P6025P)にて、電源から供給される電流は高電圧電源と中心ワイヤを接続するケーブルに取り付けたカレント・モニタ(Peason LTd., 110)にて測定した。パルスの繰り返し周波数を変えて、入力パワーを調

整した。触媒部は、低温活性酸化触媒とオゾン分解触媒を石英ガラス管(内径16.0 mm、厚さ1.4 mm)に隙間なく詰め込み構成した。低温活性酸化触媒は、エヌ・イー・ケムキャット(株)Cu-1230E(ペレット、充填重量13.5 g)を、オゾン分解触媒は、ズードケミー触媒(株)NKH-20LE(ハニカム構造、外形φ15×L75 mm)を用い、両者の総表面積が等しくなるように触媒量を選んだ。酸化触媒の主成分は、Cu(23wt%)、Cr(22wt%)であり、オゾン分解触媒の主成分は、Fe₂O₃(60wt%)、MnO(30wt%)である。

温度特性を調べるため、リアクタ全体を電気炉に収めた。空気希釈のトルエンと空気を混合し、模擬ガスを作った。リアクタ流入前とリアクタ通過後のガスを採取し、ガスクロマトグラフ((株)島津製作所, GC-14B)にてトルエン濃度を測定した。オゾン濃度はオゾン濃度計(荏原実業(株), EG-2001)により、リアクタ通過ガス中のCO、CO₂濃度はCO・CO₂分析計((株)島津製作所, CGT-7000)により、炭化水素濃度はTHC計(F-Technology Ltd. FXL-500)により測定した。

模擬ガスのトルエン濃度は94 ppm、流量は2.5 SLM、放電入力は3.0 W(72 J/L)とした。常温の乾燥空気では、この放電入力で約300 ppmのオゾンが生成される。

放電電極間への印加電圧(V_{appl} : 図中実線で表示)、電流(I_c : 図中破線で表示)、電力(電圧と電流の積)を積分して得られる放電入力エネルギー(E_{in} : 図中短い破線で表示)を図3に示した。

容量移行型のパルス電源では、発生する電圧と流れる電流の波形が、負荷のインピーダンスに依存する。ガス温度の上昇とともに、放電のインピーダンスが低下するので、図3のように、ガス温度によって電圧・電流波形が変化する。常温(図3(a))では、ピーク電圧が15 kV、電流のパルス幅が0.14 μsecである。これに対して、200°Cでは、電圧

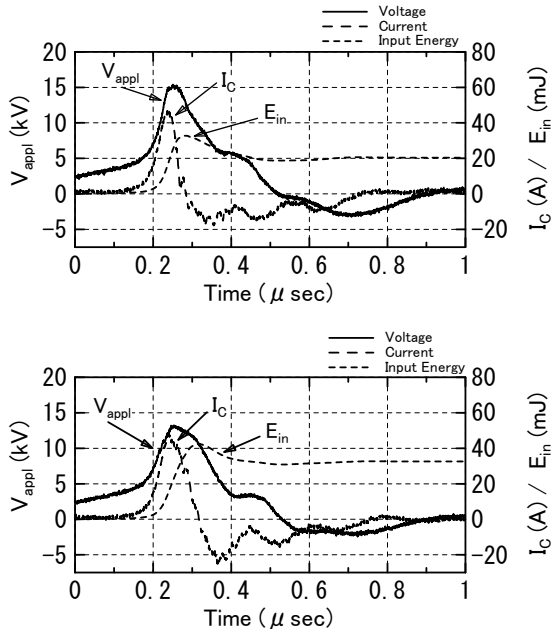


図3 印加電圧, 電流, 入力エネルギー波形 (a) 常温, (b) 200°C.

Fig. 3 Voltage, current and input energy waveforms. (a) waveforms at ambient temperature, (b) waveforms at 200°C.

ピーク値が 13 kV に低下し, 電流のパルス幅が 0.17 msec に広がる. 高温で電流のパルス幅が広がった結果, 初めのパルスで注入されるエネルギーが増加し, 1 パルスあたりの入力エネルギーは, 20 mJ から 31 mJ に増加する. ガス温度によらず放電部への入力電力を 3.0 W に保つために, 繰返し周波数を調整した. 常温では 150 pps (パルス/秒) に, 200°C では 97 pps に設定した.

3. 実験結果と考察

3.1 酸化触媒のトルエン分解特性

リアクタに流入する空気に含まれるトルエン濃度に対する, リアクタでの低減量 (リアクタ通過前後のトルエン濃度の差) の比をとり, トルエン分解率と定義する.

図 4 は, 今回用いた酸化触媒 (Catalyst A) のトルエン処理結果 (触媒単独 ∇ , 放電との組み合わせ \blacktriangledown) を, 放電による処理結果 \circ , オゾン分解触媒 (Catalyst B) による処理結果 ∇ (触媒単独 \triangle , 放電との組み合わせ \blacktriangle) と比較して示したものである.

放電だけの処理 (\circ) において, トルエン分解率は温度上昇とともに直線的に増加し, 常温では 18%, 100°C では 24%, 200°C では 35%, 300°C では 43% である.

酸化触媒単独による処理 (∇) では, 100°C までは 10% しかないが, 100°C を超えると分解率が上昇し, 200°C で 67%, 250°C で 90% 以上のトルエンが分解される. 200°C 以上にならないと活性化しないオゾン分解触媒 (\triangle) に比べ, 活性化温

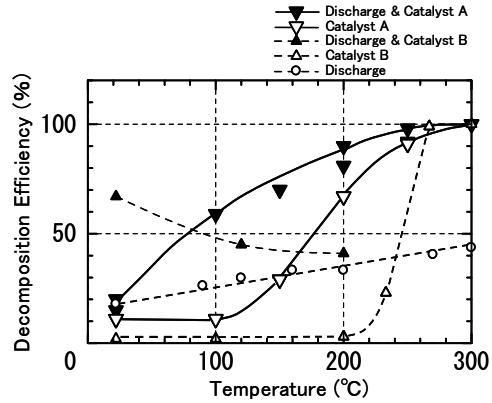


図4 触媒のトルエン分解特性

Fig. 4 Effect of discharge, catalyst and temperature in toluene decomposition.

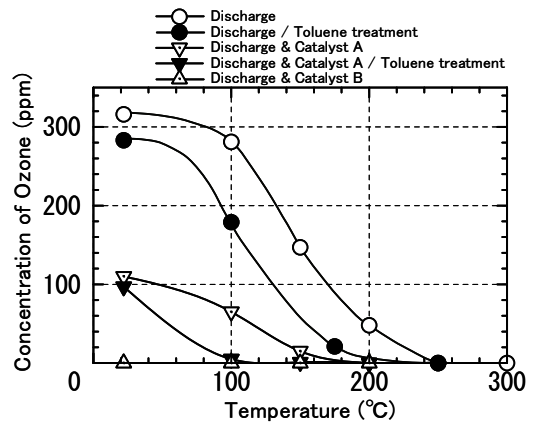


図5 酸化触媒のオゾン分解特性

Fig. 5 Ozone decomposition by combustion catalyst.

度が低いことが分かる. 酸化触媒の前段に放電部を加えると (\blacktriangledown), 特に100°C 付近の分解率が大きく改善される. 常温では 15% だが, 100°C では 60% に向上し, 200°C で 80% になる. 放電を加えた場合 (\blacktriangledown) と触媒単独の場合 (∇) の差が, 放電による直接分解 (\circ) とオゾンと触媒の相乗作用によるトルエン分解率の増加分にあたる. 相乗作用が分解率の改善に寄与するのは, 50 から 180°C までだが, 特に, 90 から 130°C では効果が大きく, 26% のトルエン分解率が得られる. 130°C 以上では放電付加の効果が徐々に小さくなるが, これは, 放電部から触媒部へ供給されるオゾン量の減少 (図 5) と, 触媒表面に吸着されるトルエン量の減少による. 200°C 以上では触媒部へ供給されるオゾンがなくなるので, 放電を付加することによる増加分は, 放電による直接分解である.

放電部の後段に置かれたオゾン分解触媒は, 200°C 以下では, それ自身がトルエンを分解する機能は持たない (\triangle). しかし, 触媒表面に付着したオゾンを分解する過程で生成される酸素活性種が有効に作用し, トルエンを分解する^{5,7)}. この効果は, 常温で約 68% ともっとも高く, 温度上昇とともに低下し, 100°C では 48% に, 200°C では 41% になる (\blacktriangle). 200°C 以上では, 触

媒部に達するオゾンが0 ppmとなるので、オゾンとの相乗作用はなくなる。放電単独による分解とオゾン分解触媒単独による分解の和が複合リアクタとしての性能になり、230°Cでは60%、270°Cでは100%の分解率が得られると推定される。

オゾン分解触媒と放電を組み合わせた場合(▲)は、常温での分解率改善が著しかったが、酸化触媒では、常温での分解率改善は見られなかった。今回用いた酸化触媒は、オゾンとの相乗作用の発現が温度依存を持ち、少なくとも50°C以上の高温が必要である。

100°Cから200°Cの範囲では、酸化触媒と放電の組み合わせ(▼)が、オゾン分解触媒と放電の組み合わせ(▲)の分解率を大きく上回る。このことは、触媒二重化による性能向上の可能性を示唆するものである。

3.2 オゾン生成

図5は、酸化触媒のオゾン分解特性を示したものである。放電部と触媒部の間でガスをサンプリングし、純空気するとき放電部で生成されるオゾン濃度(○)とトルエン処理時のオゾン濃度(●)を測定した。同様に、リアクタ出口で純空気の場合(▽)とトルエン処理時(▼)に酸化触媒を通過するオゾン濃度を測定した。比較のため、オゾン分解触媒のオゾン分解特性(△)も示した。放電部で発生したオゾンは、すべて触媒部で分解される。トルエン処理時も、リアクタ出口でオゾンは観測されなかった。

放電部単独の結果(○, ●)を見ると、トルエンを処理することによって、放電部で生成されるオゾン濃度が30%程度減少している。この結果は、トルエンの分解に、励起酸素原子の寄与が大きいことを示唆する。つまり、オゾン生成に向かうべき酸素原子がトルエン分解に消費されて、オゾンの生成量が減少するものと考えられる。放電空間でのオゾンの減少は、図4でも明らかなように、触媒との相乗作用を妨げる量ではない。

純空気を流したとき、酸化触媒によって、流入したオゾンの約70%が分解される(▽)。トルエンを処理するときは、処理されたトルエンの量に対応して、さらにオゾンが減少する。常温では、酸化触媒とオゾンの相乗作用によるトルエン分解は無いが、オゾンの減少も無い。100°Cでは、60 ppmの減少がある。オゾン由来の酸素活性種がトルエンを酸化分解する反応が触媒表面で進行することによって、等価的にオゾンの被覆率が低下し、酸化触媒へのオゾンの吸着速度が増加したためと考えられる。100°C以上では、触媒を通過するオゾンは無くなり、流入したオゾンがすべてトルエンの分解に使われるようになる。

3.3 酸化触媒のカーボンバランス

酸化触媒によるトルエン処理に関連するカーボンバランスを図6に示した。同図(a)は放電単独の場合、(b)は酸化触

媒単独の場合、(c)は放電と酸化触媒を組み合わせた場合である。リアクタへの流入トルエン濃度(破線)と処理によって除去されたトルエン濃度(○)は、ガス・クロマトグラフにより測定したトルエン濃度を7倍して、炭素濃度に換算した。リアクタから排出される炭化水素濃度(◇)は、THC計で測定された排出ガス中の炭化水素濃度からトルエン濃度を引いたものである。

放電による処理(図6(a))では、最終分解生成物としてほぼ同じ量のCOとCO₂が発生する。トルエン分解率は温度上昇に対して直線的に上昇し、100°Cでは24%、200°Cでは35%である。

酸化触媒によるトルエン処理の特徴は、分解生成物の最終形態がCO₂であることと、揮発性炭化水素の排出が微量なことである。副生成物は主として不揮発性物質であり、リアクタ内に蓄積される。この性質は、触媒単体で用いた場合も、放電と組み合わせて用いた場合も同様である。

酸化触媒単体を用いた処理(図6(b))では、100°C以上でトルエンの分解が進み、200°Cではリアクタに流入したトルエンの67%が処理される。しかし、CO₂の排出量は、200°Cでも70 ppmしかなく、分解されたトルエンの80%は不揮発性の副生成物としてリアクタ内に留まる。オゾン分解触媒を使った実験では、常温の処理で、ベンズ・アルデヒド、ジメチル・ベンゾキノン、ベンジルアルコール、安息香酸、安息香酸ベンジルが触媒表面に付着していた。200°Cでは、微量のベンズ・アルデヒド、ベンジルアルコール、安息香酸が観測された⁷⁾。今回の実験でも、同様の付着物があるものと推測される。温度上昇とともに、リアクタ内に留まる副生成物の量は減少し、250°Cでは、分解されたトルエンのほとんどは、CO₂にまで分解される。

放電を加えた場合(図6(c))は、オゾンとの相乗作用によって、温度上昇とともにトルエンの分解が進み、CO₂濃度も徐々に増加する。150°Cを超えるとCO₂が急激に増え始める。図6(b)から分かるように、150°C以上になると触媒が活性化し、CO₂へ至る酸化過程が促進されるからである。250°CのCO₂濃度は、触媒単独(図6(b))の場合に比べ低くなっている。しかし、放電単独でも⁷⁾、酸化触媒単独でもトルエン処理能力を持つので、両者を直列につないだリアクタ(図6(c))は、触媒単独より、処理能力が増加し、排出されるCO₂濃度も、増加するはずである。CO₂濃度の測定値は、実験の再現性も含めて±20%程度の誤差を持つ。誤差を考慮すると、250°CにおけるCO₂濃度は、酸化触媒単独が550 ppmC、放電と酸化触媒を組み合わせた場合が550 ppmC以上と考えられる。

COとCO₂の測定データがないが、図4を参考に推定すれば、300°Cでは、触媒単独、放電と組み合わせた場合ともに、

流入したトルエンの完全酸化が行われ、CO₂の濃度がトルエン濃度に等しくなると考えられる。

図 6(b),(c)において、リアクタから排出されるトルエンの分解生成物は CO₂ である。従って、リアクタで処理されたトルエン濃度 (○) と CO₂ 濃度 (△) の差は、リアクタ内に捕集される不揮発性副生成物の量を表す。

放電により分解されたトルエンは、ほぼ等量の CO₂ と CO に分解される。100℃では約 30 ppm, 200℃では約 50 ppm の CO が排出される (図 6(a))。しかし、酸化触媒と放電を

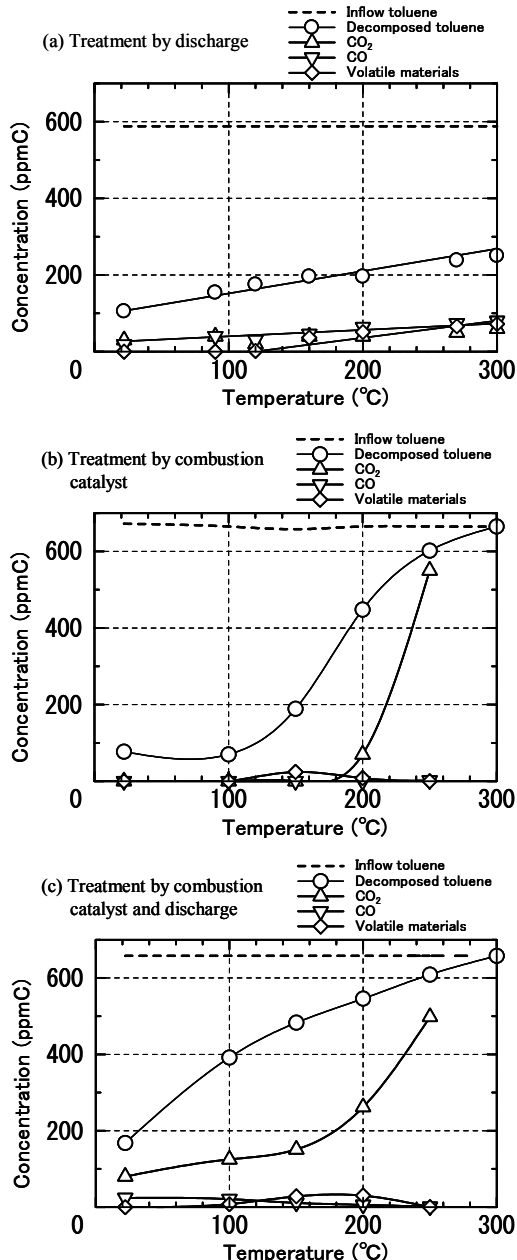


図6 酸化触媒処理におけるカーボンバランス (a) 触媒単独の処理, (b) 放電と酸化触媒を組み合わせた処理.

Fig. 6 Carbon balance in combustion catalyst treatment. (a) treatment by discharge only, (b) treatment by discharge and combustion catalyst.

組み合わせた処理では、それほど多くの CO は排出されていない。酸化触媒によって、CO₂ にまで酸化されたものと考えられる。

オゾン分解触媒と放電を組み合わせた処理でも、CO が CO₂ とほぼ同じ量だけ発生し、100℃以上では分解されたトルエンは完全に CO₂ と CO に分解された⁷⁾。しかし、今回の酸化触媒を使った処理では、CO の発生が非常に少なく、完全酸化が行われるのは 300℃以上という、これまでとは異なる結果が得られた。

酸化触媒とオゾンの相乗作用の特徴は、トルエン分解効果の発現にある程度の高温が必要という点にある。常温では相乗作用は現れないが、20 ppm 程度のトルエンを分解する機能は有している。およそ 50℃以上で、相乗作用が発現する。

オゾン分解触媒とオゾンの相乗作用は、触媒表面で進行するオゾンの分解過程で酸素活性種が生成され、これによって触媒表面に付着したトルエンの分解が行われると説明される⁹⁾。酸化触媒とオゾンの相乗作用も、原則として同様と推測される。しかし、両者の温度依存性には、相違が見られる。

オゾン分解触媒と放電の組み合わせでは、常温でトルエンの分解率がもっとも大きく、温度上昇とともに低下した。温度上昇とともに、触媒表面の吸着効果が落ち、放電部から供給されるオゾン量が減少することが原因である。

一方、酸化触媒と放電の組み合わせでは、常温では、触媒単独のときと同程度の分解率しか得られなかった。温度上昇によって、吸着の低下とオゾンの供給量減というマイナス効果があるにもかかわらず、分解率が上昇した。温度上昇により酸化触媒が活性化するので、例えば、トルエンの分解が進み、酸素活性種との反応速度が大きい物質が生成されたと考えられる。分解の最終形態が CO₂ だけであることもオゾン触媒との相違点であるが、酸化触媒の強い酸化力が CO₂ までの酸化を促進したためと考えられる。放電によるトルエン分解で CO が発生するが、これも、酸化触媒によって CO₂ にまで酸化される。

3.4 触媒二重化の効果

図4に示した2種類の触媒のトルエン分解特性から、100℃以下ではオゾン分解触媒の性能が優れており、100℃を超えると酸化触媒の性能が優れていることが読み取れる。両者を組み合わせることにより、常温から 200℃までの範囲をカバーする高性能リアクタを構成することが期待される。

ともに、トルエン分解性能が発揮されるのにオゾンが必要である。オゾン分解触媒ではオゾンが完全に分解されるのに対して、酸化触媒では、トルエン処理を行っても、通過ガス中にオゾンが残留している、常温では、100 ppm のオゾンが存在し、徐々に減少するが 100℃まではオゾンが残留する。従って、図1に示したような、前段に酸化触媒

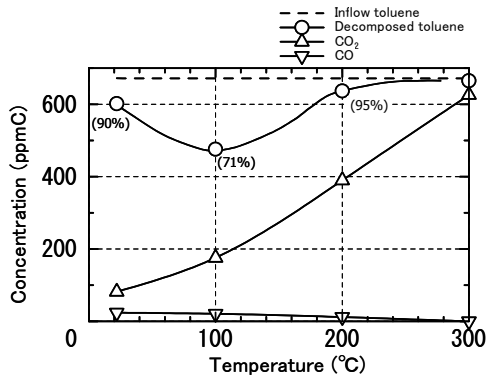


図7 酸化触媒とオゾン分解触媒の2重化リアクタによるトルエン処理のカーボンバランス（括弧内は、トルエン分解率）

Fig.7 Carbon balance in discharge, combustion-catalyst and ozone-decomposition-catalyst treatment.

Toluene decomposition efficiencies are put in brackets.

を置き、後段にオゾン分解触媒を置く構成が決定される。100°Cまではオゾン分解触媒にオゾンが供給されるので、主にオゾン分解触媒が働き、100°C以上では前段の酸化触媒がトルエン分解を受け持つ。

二重触媒リアクタのトルエン分解特性を、図7に示した。94 ppmのトルエンを含む空気（流量2.5 SLM）を、放電入力3.0 W（7.2 J/L）で処理した。リアクタに導入したトルエン濃度（破線）に対して、リアクタで除去されたトルエン濃度（○）、リアクタのからの排出ガス中に含まれるCO₂濃度（△）とCO濃度（▽）の温度依存性をプロットした。トルエン濃度は、炭素換算値であり、括弧内の数値は、トルエン分解率である。排出ガス中には、トルエン以外の炭化水素はほとんど含まれていなかったため、炭化水素のプロットは省略した。

常温では90%、100°Cで71%、200°Cで95%の分解率が得られた。図4に示した100°C以下でのオゾン分解触媒の高処理能力と100°C以上での酸化触媒の高処理能力が、ともに発揮される特性となっている。

常温での高トルエン分解率は、オゾン分解触媒のトルエン分解性能に酸化触媒の寄与が加わったものである。前段の酸化触媒から100 ppmのオゾンが供給されるが、これだけのオゾン濃度があれば、オゾン分解触媒の性能を十分引き出せるということが分かった。

温度上昇に伴って酸化触媒を通過するオゾン量が減少するので、オゾン分解触媒のトルエン分解能力が低下するが、酸化触媒がこれを補うので、100°Cでも71%の分解率が維持される。100°Cを超えると、後段のオゾン分解触媒へ供給されるオゾンがなくなるので、オゾン分解触媒は働かなくなる。しかし、酸化触媒の分解性能が温度上昇とともに大きくなり、分解率は200°Cで95%に達する。

リアクタ排出ガス中には、分解されなかったトルエン以外では、CO₂とCOと微量の炭化水素が含まれていた。常温では、オゾン分解触媒が担うトルエン分解によってCOが作られるが、温度上昇とともにオゾン分解触媒の寄与が小さくなり、排出されるCO濃度は減少する。二重化触媒リアクタの分解生成物はCO₂が主なもので、これ以外の物質は少ない。

図7において、リアクタで除去されるトルエン濃度（○）とCO₂濃度（△）の差が、リアクタ内に留まる副生成物を表す。放電とオゾン分解触媒の組み合わせでは、100°C以上でリアクタ内に残留する副生成物はなくなったが、酸化触媒を付加した場合は、除去されたトルエンのうち、100°Cで60%、200°Cで35%が、不揮発性の副生成物としてリアクタ内に残留する。

4. まとめ

放電と、その下流に2種類の触媒を配置した複合二重触媒リアクタを試作し、その性能をトルエンを用いて調べた。前段の触媒は200°C以下で活性化させる酸化触媒（Cu、Crを主成分とする）、後段はオゾン分解触媒（Fe₂O₃とMnOを主成分とする）である。94 ppmのトルエンを含む空気（流量2.5 SLM）を、放電入力3.0 W（7.2 J/L）で処理し、常温では90%、100°Cで71%、200°Cで95%の分解率を得た。100°C以下では主にオゾンとオゾン分解触媒の相乗作用が、100°C以上ではオゾンと酸化触媒の相乗作用が、トルエン分解を担っている。オゾン分解触媒と放電の相乗作用は常温から発揮されるが、酸化触媒と放電の相乗作用の発現には、およそ50°C以上の高温が必要だった。リアクタから排出される空気中に含まれる分解生成物は、主にCO₂であり、COや炭化水素はほとんど含まれなかった。除去されたトルエンのうち、100°Cで60%、200°Cで35%が、不揮発性の副生成物としてリアクタ内に残留する。

VOCを処理するにあたって、触媒単独では、活性温度まで触媒を加熱することが必須である。しかし、200°Cまでの低温ガスで、濃度100 ppm程度なら、オゾンと触媒の相乗作用を利用して、7.2 J/Lという低電力で分解処理が可能になったことが明らかとなった。

参考文献

- 1) T. Yamamoto : J. Electrostat., **42**, (1997) 227
- 2) 尾形敦 : 静電気学会誌, **24** (2000) 29
- 3) S. Futamura, H. Kabashima, and H. Einaga: J. Jpn. Petrol. Inst., **45** (2002) 329
- 4) S. Futamura and M. Sugawara : IEEE Trans. Ind. Appl., **44** (2008) 40
- 5) H. Einaga and S. Futamura: J. Catal., **227** (2004) 304
- 6) A. Gervasini, G.C. Vezzoli, and V. Ragaini: Catal. Today **29** (1996) 449
- 7) K. Hayashi, H. Yasui, M. Tanaka, S. Futamura, S. Kurita, and K. Aoyagi: IEEE Trans. Ind. Appl., **45** (2009) 155