

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340057

研究課題名(和文)超音波周波数の最適化と気液界面反応を応用した難分解性有機汚染物質の高効率分解手法

研究課題名(英文) Effective decomposition of persistent organic pollutants by the reaction at the gas-liquid interface with the optimal ultrasonic frequency

研究代表者

関口 和彦 (SEKIGUCHI, Kazuhiko)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50312921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：難分解性の過フッ素化合物である疎水性のPF0ならびに親水性のPFOAとPFPrAに対して、200 kHz超音波およびUV254+185による分解を試みた。200 kHz超音波は疎水性のPF0に、UV254+185は親水性のPFOAとPFPrAに効果的に働いた。一方、VOCガスは、2.4 MHz超音波に促進酸化手法を併用して発生させたミスト上において、効果的に分解、無機化された。これら両周波数の効果を発現できる最適周波数を検討し、430 kHz超音波が選択された。この単一周波数において、物性の異なる3種のアルデヒド物質が熱分解とミスト上でのラジカル反応により、効果的に分解されることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effects of 200 kHz ultrasonication and short-wavelength UV (UV254+185) irradiation on the degradation of persistent perfluorochemicals, such as perfluorooctane (PF0) with hydrophobic property, and perfluorooctanoic acid (PFOA) and pentafluoropropionic acid (PFPrA) with hydrophilic property that were found as degradation intermediates of PF0. 200 kHz ultrasonic irradiation strongly affected on hydrophobic PF0, and UV254+185 irradiation was more effective for hydrophilic PFOA and PFPrA. On the other hand, volatile organic compound (VOC) gas was decomposed and mineralized effectively in gas phase on the mist surface generated by 2.4 MHz ultrasonication with advanced oxidation process. Furthermore, the optimal frequency that can cause the effects of both frequencies was chosen from the viewpoint of mist generation, and three aldehydes with different physical properties were effectively decomposed thermally inside the cavity and radical reactions on the mist surface.

研究分野：環境化学、大気エアロゾル科学、大気汚染評価ならびに環境浄化技術開発

 キーワード：超音波分解 超音波霧化 短波長紫外光 促進酸化手法(AOP) 過フッ化合物 揮発性有機化合物(VOC)  
 ) 除去率・無機化率 単一周波数

### 1. 研究開始当初の背景

超音波とは、一般に可聴音 (20 Hz~20 kHz) を超える音波もしくは弾性振動と定義され、水中に照射すると疎密波の中でキャビティと呼ばれる微小な真空核を形成する。その後溶存物質が内部で気化し、高温、高圧な気泡状態となる。それゆえキャビティ内部ではこれら溶存物質を熱分解できるだけでなく、キャビティ崩壊時の衝撃により、物理的な攪拌や洗浄に加え、適切な周波数を選択すれば、ラジカル反応や霧化 (液体のミスト化) といった現象も発現できる。

研究代表者らは既往研究において、二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)光触媒懸濁系における超音波との複合利用による浄化技術研究に積極的に取り組み、液相反応において超音波は疎水性基を持つ物質には効果的に働くが、親水化された分解生成物には超音波熱分解よりもむしろ反応活性種によるラジカル反応の方が効果的に働くこと、また、気相反応では光触媒を含有した反応活性ミストを発生させることで、UV 照射下のミスト界面で有機汚染ガスが効果的に分解できることなどを示してきた。しかし、これらの手法は、廃水の際に TiO<sub>2</sub> 光触媒の回収が必要となることから、TiO<sub>2</sub> を用いない系の開発が望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、光触媒を用いない系において UV 照射や超音波の周波数を複合的に利用し、気液両相において有効な難分解性物質の分解除去手法を開発することを目的とする。

超音波による液相分解では、金属表面への酸化防止剤や焦げ付き防止剤、さらには紙面や冊子等に防水剤などとして幅広く利用されている親疎水性 (溶解度) の異なる 3 種類の過フッ素化合物 (Perfluorochemicals : PFCs) を分解対象物質とした。これらは、難分解性のため生物毒性や蓄積性による生態系への影響が懸念されている。一方、超音波ミストを用いた気相分解では、疎水性性質を示し、環境中への排出量が最も多い揮発性有機化合物 (VOC) ガスであるトルエンガスを分解対象物質とした。数 100 kHz 超音波と UV 照射による PFCs の液相分解と、UV 照射下での促進酸化手法 (AOP) と 2.4 MHz 超音波により発生させた活性ミストによるトルエンガス分解について、それぞれの周波数における超音波の効果を確認する。

さらに、各種周波数において発生する超音波ミストについて個数濃度分布を測定し、その傾向から超音波ミストの発生プロセスに言及するとともに、液相分解と超音波霧化効果を同時に発現できる周波数の検討を行う。

最終的には物性の異なるアルデヒド類をモデル物質として用い、単一周波数の超音波照射と気相 UV 照射による液相分解、気相転移、気相分解を同時に行い、物性の異なる化学物質がすべて効果的に分解できる系の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 超音波による液相分解

実験に用いたステンレス製バッチ型反応器の概要を図 1 に示す。反応器下部に出力 100 W の 200 kHz 超音波を設置し、反応器側面には 185 nm を 3% 含む主波長 254 nm の UV<sub>254+185</sub> ランプ (6.3 W) を 2 本挿入した。分解対象物質としては、疎水性 PFCs としてパーフルオロオクタン (PFO : C<sub>8</sub>F<sub>18</sub>) を用い、また、その分解中間生成物を模擬するため、親水性 PFCs であるパーフルオロオクタン酸 (PFOA : C<sub>7</sub>F<sub>15</sub>COOH)、パーフルオロプロピオン酸 (PFPrA : C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>COOH) の 2 種類を用いた。PFO、PFOA、PFPrA は超純水 1000 mL にそれぞれ 100 ppm となるように添加し、これらを試料溶液とした。PFO、PFOA、PFPrA の分解によって生じるフッ化物イオン濃度は、陰イオンクロマトグラフ (IC) で、また水中の PFO 濃度は、ガスクロマトグラフ水素炎イオン化検出器 (GC-FID) でそれぞれ分析し、各物質の脱フッ素率を算出した。

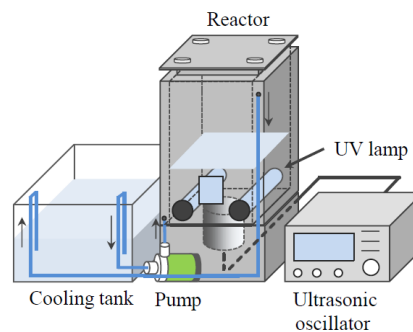


図 1 液相分解実験系の概要

#### (2) 超音波ミストを用いた気相分解

VOC ガス分解に用いた実験系の概要を図 2 に示す。反応器 (約 7.4 L) に UV ランプ (8 W) と超音波ユニット (2.4 MHz) を設置した。UV ランプには UV<sub>254</sub> を用いた。反応器内には超純水 600 mL を供給し、25 ± 5 °C に保った。トルエンガスは標準ガスを希釈することで反応器内に供給し、濃度は約 40 ppm に調製した。また、フロー系の実験では 4.0 ppm のトルエンガスを流量 1.0 L/min で反応器に連続供給した。トルエンガスと水中の全有機炭素 (TOC) 濃度は、GC-FID および TOC 計を用いてそれぞれ測定した。

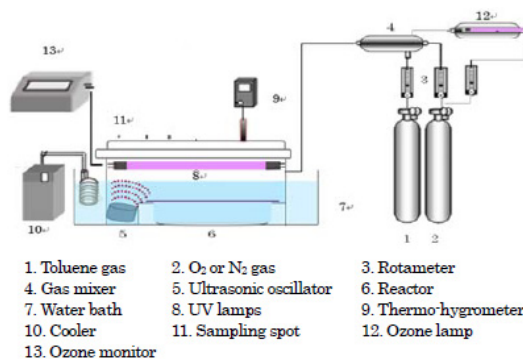


図 2 超音波ミストを用いた気相分解実験系の概要

### (3) 超音波ミストの個数濃度分布測定

超音波ミスト発生および測定系の概要を図3に示す。ミスト発生には、周波数の異なる超音波振動子(200, 430, 950, 1600 kHz, 7.96 W/cm<sup>2</sup>)および2.4 MHzの投げ込み型振動子(14.2 W/cm<sup>2</sup>)を用いた。霧化用液体には超純水、一般的な水道水を使用し、水深は3 cm一定とした。ミスト径は超音波照射の5分後に1 L/minで吸引し、ワイドレンジ粒子スペクトロメーター(WPS)を用いて測定した。

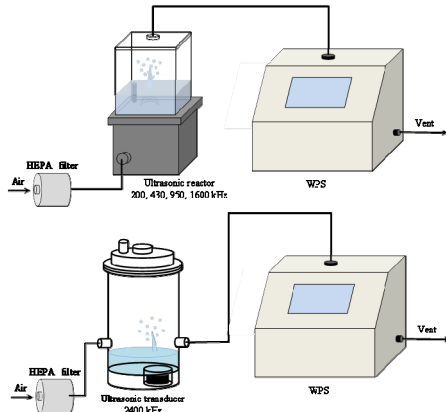


図3 超音波ミスト発生および測定系の概要  
(a: 200, 430, 950, 1600 kHz, b: 2400 kHz)

### (4) 単一周波数による超音波分解

図1に示したステンレス製バッチ型反応器を用い、反応器下部に出力100 Wの430 kHz超音波振動子を設置し、反応器の側面からUV<sub>254</sub> (6.3 W) 2本を挿入した。物性の異なる3種のアルデヒド(ホルムアルデヒド(HCHO)、アセトアルデヒド(CH<sub>3</sub>CHO)、ベンズアルデヒド(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CHO))を分解対象物質として用いた。HCHOの初期濃度は、水質基準値が厚生労働省により0.08 mg/L (2.70×10<sup>-6</sup> mol/L)と定められていることから、約10倍の2.70×10<sup>-5</sup> mol/Lとし、CH<sub>3</sub>CHO、C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CHOについても条件を揃えるために同濃度とした。アルデヒド類の濃度は誘導体化した後に、高速液体クロマトグラフ(HPLC-UV)で測定した。

## 4. 研究成果

### (1) 液相 PFCs の分解

分解対象物質であるPFOの分解において、200 kHz超音波とUV光の併用効果を調査すべく、超音波のみ、UV光のみ、超音波とUV<sub>254+185</sub>併用の3条件で分解実験を行った。各条件でのPFO濃度の経時変化を図4に示す。

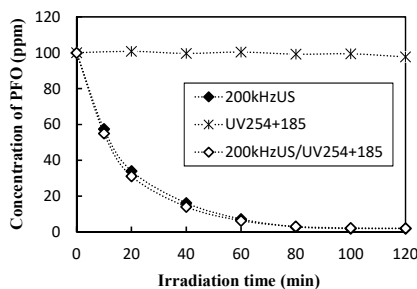


図4 各条件でのPFO濃度の経時変化

200 kHzの超音波照射のみを用いた場合、PFO濃度は時間の経過とともに減少し、照射開始60分で90%以上が分解され、さらに120分後にはGC-FIDの定量限界以下となった。これは、PFOが疎水性であるため、高温高圧な反応場であるキャビティー内部へ容易に揮発し、熱分解が効率的に進行したためであると考えられる。一方、超音波/UV<sub>254+185</sub>併用条件下でのPFOの分解速度は、超音波のものとはほぼ変わらず、UV<sub>254+185</sub>の併用による効果は見られなかった。

各PFCsの脱フッ素率の結果を図5に示すが、PFOの脱フッ素率(図5(a))に着目すると、200 kHz超音波のみを用いた場合には反応開始40分まで単調に増加し15.6%まで達したものの、40分以降は速度が停滞した。しかし、UV<sub>254+185</sub>併用条件下では、超音波のみの場合と同様、40分後以降に脱フッ素率の停滞が見られたものの、120分後の脱フッ素率は17.6%と増加した。これは、PFOの超音波分解により生成した分解中間生成物(親水性PFCs)が、UV光により分解されたためであると考えられる。この時、分解中間生成物が液相中に存在していれば、超音波/UV<sub>254+185</sub>照射中に脱フッ素反応が停滞することはあり得ない。これより、分解中間生成物は液相中での分解反応の進行により低分子化し、揮発性が増加したことで気相中に拡散した可能性が示唆された。

さらに、上述した親水性PFCsの分解に、超音波とUV光がどの程度寄与しているかについて調査を行った。溶解度の異なる2つのカルボン酸(PFOA, PFPrA)の脱フッ素率の結果を図5(b), (c)に示すが、超音波/UV<sub>254+185</sub>照射120分後には、PFOAの12.2%が無機化され、これは超音波のみの場合である8.25%より約4%向上した。一方で、溶解度の高いPFPrAは、超音波のみの場合には2.18%と非常に低い無機化率を示したが、超音波/UV<sub>254+185</sub>照射においては、120分後で9.28%まで無機化率が向上した。この結果より、水溶性PFCsであっても溶解度の低い物質は超音波による熱分解、対して溶解度の高い物質はUV光による光分解が主要な分解経路であることが確認された。

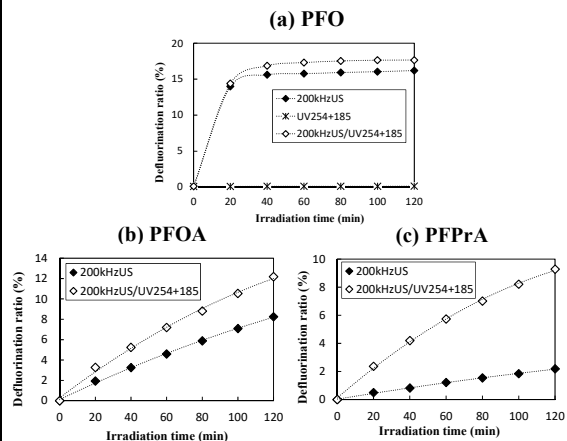


図5 各PFCsの脱フッ素率

本研究により、分解中間生成物の低分子化に伴い、揮発性 PFCs が生成する可能性が確認され、水中での完全無機化は困難であったが、超音波に UV<sub>254+185</sub> による直接光分解を併用することで、分解中間生成物の分解、さらに無機化を促進できることが明らかとなった。

### (2) 超音波ミストによる気相トルエンガスの分解

UV, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> を導入した系におけるトルエン除去率の結果を図 6 に示す。UV<sub>254</sub>/O<sub>3</sub>/mist 条件、O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist 条件における 60 分後のトルエン除去率はそれぞれ約 60、40%程度であったが、UV<sub>254</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist 条件、O<sub>3</sub> を添加した UV<sub>254</sub>/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist 条件においては、より高い除去率が得られた。しかし、UV<sub>254</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist 条件における 30 min でのトルエン除去率は UV<sub>254</sub>/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist 条件と大きな差は無く、O<sub>3</sub> を添加しない条件であっても、トルエンガスの高効率分解は可能であることが示唆された。O<sub>3</sub> の添加は初期のトルエン除去速度の向上に効果的であったが、反応器後段での二次処理や発生コストがかかるといった問題が挙げられるため、本系では二次汚染の影響がなく、トルエンガスの高効率分解が可能である UV<sub>254</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist を最適条件とした。

UV<sub>254</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist 条件でのトルエンガス分解における無機化率の経時変化を図 7 に示す。無機化率は溶液中の TOC 濃度の結果から算出した。この時、無機化率はトルエン除去率と非常に近い値となり、分解されたトルエンガスのほとんどが非常に速く無機化されることが示唆された。

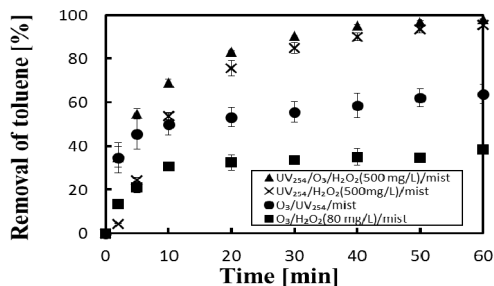


図 6 トルエン除去率の経時変化

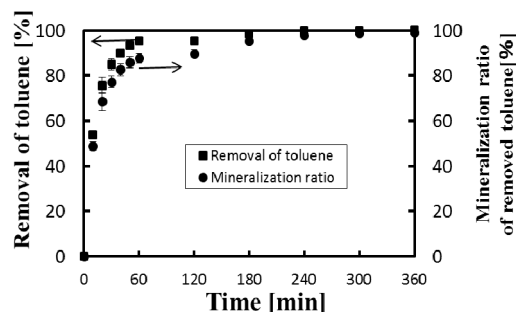


図 7 トルエンガス分解における無機化率の経時変化

一方、トルエンガスを連続的に供給するフロー系の実験も行った。UV<sub>254</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 条件ではトルエン除去率が 10%程度と低い値を示し

たが、AOP と超音波霧化を併用した UV<sub>254</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mist 条件では 33%の除去率を示し、フロー系反応器においても、トルエンガスはミスト表面の OH・と効果的に反応し、分解されることが明らかとなった。さらに連続実験の結果から、除去率、無機化率ともに安定的に進行することが明らかとなり、本手法はフロー系反応器においても有効であることが示唆された。

以上より本手法は、疎水性の高い VOC ガスに対しても安定的な除去率を示し、さらに分解生成物をミスト中に取り込むだけでなく、高い無機化速度も有していることから、VOC ガスに対する空気浄化手法として、十分な効果を見い出せることが明らかとなった。

### (3) 超音波ミスト (ナノミスト) 径の評価

超純水と水道水に対し、200、430、950、1600、2400 kHz の各振動子を用いて発生させた超音波ミストの個数濃度分布を図 8 (a), (b) に、波長とピーク粒径の関係を図 9 にそれぞれ示す。

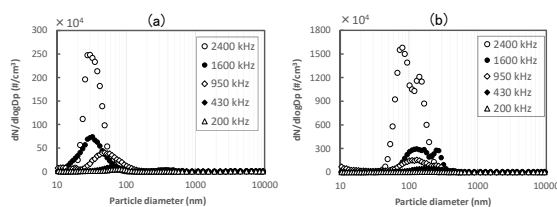


図 8 各周波数での超音波ミストの個数濃度分布

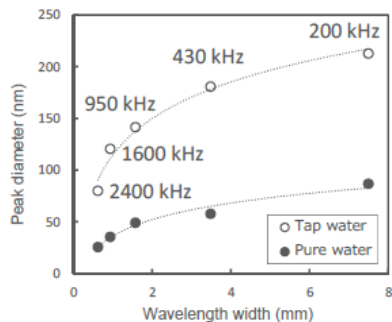


図 9 波長とピーク粒径の関係

図 8, 9 より、10 ~ 1000 nm の範囲において、周波数の増加 (波長の減少) とともに、粒径分布のピーク粒径が小さくなる傾向が確認された。一方で、生成されるミストの個数濃度は、周波数の増加とともに増加した。また、水道水で 2 つのピークが確認できるが、これは水道水に含まれる不純物が核形成を促進したためと推察される。

これらナノミストの生成プロセスとして我々は、これら生成がキャビテーションやキャピラリー波そのものに依存するのではなく、マイクロミスト表面やキャピラリー波表面から放出される水蒸気量に依存している可能性に言及した。ミスト生成雰囲気では液柱表面およびミスト表面から水蒸気が絶え間なく蒸発するため非常に高く、常に過飽和状態であると言える。そのような条件下において水分子が核形成を起こし、その後、凝縮

することでナノミストが生成されているものと推察した。なお、周波数依存については、周波数が小さく（波長が大きくなるにつれて水蒸気量が減少し、ナノミストの揮発が起こるために粒径分布は増大し、個数濃度が減少したものと考えられる。

以上の結果より、液相分解が可能な数 100 kHz の超音波において、430 kHz は十分な超音波ミストの発生も可能であった。これより、この周波数を用いた液相、気相の分解実験を行うことで、単一周波数による分解効果を確かめることとした。

#### (4) 単一周波数超音波の分解手法への応用

HCHO, CH<sub>3</sub>CHO, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CHO に対して、周波数 430 kHz 超音波のみを照射した際の除去率の経時変化を図 10 に示す。2 時間後の最終的な除去率は疎水性の C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CHO で 100%、親水性の HCHO で 21.1%、両者の間の性質をもつ CH<sub>3</sub>CHO で 53.0% となった。結果より疎水性の性質が増すほど分解速度が大きくなることが確認できた。キャビテーションによる反応場は大きく分けて、キャビティ内部、気液界面、気泡周辺のバルク溶液内の 3 つが存在する。C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CHO は疎水性が高いため容易にキャビティの内部や界面で揮発することができ、そこで効果的に熱分解されたものと言える。一方、HCHO はバルク溶液中に存在するため熱分解はほとんど起こらず、活性種に酸化分解が主要であったと考えられる。CH<sub>3</sub>CHO は HCHO よりもオクタノール/水分定数がやや大きいので、キャビティ近傍で反応できた可能性がある。したがって、よりキャビティの界面付近において OH ラジカルの酸化分解や一部熱分解を受けることができたため、HCHO よりも高い除去率を示したものと推察される。

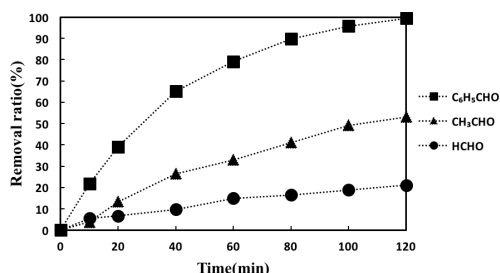


図 10 430 kHz 超音波照射下における各種アルデヒドの除去率

次に超音波霧化によって液相に存在する溶存物質をミスト中に取り込み、気相転移させた後に UV<sub>254</sub> を照射する系について検討を行った。その結果を図 11 に示す。疎水性の C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CHO に対する 120 分後の除去率は、超音波のみと UV 光を併用した場合のどちらにおいても 100% (□, ■) となり、最も除去率に差が出た時間でも 10% 程度であり、UV<sub>254</sub> による分解促進効果は小さかったと言える。一方で、親水性の CH<sub>3</sub>CHO に対する 120 分後の UV ミスト照射による除去率は 91.6% (△)

となり、超音波照射のみの結果と比較して 39% ほど除去率が向上した。また、より親水性の高い HCHO に対する 120 分後の UV ミスト照射による除去率は 65.0% (○) となり、超音波照射のみの結果と比較して 44% ほど除去率の向上が見られた。

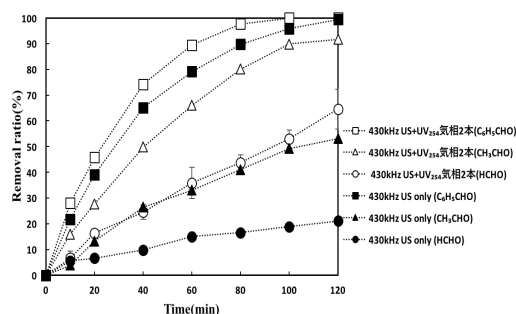


図 11 430 kHz 超音波と UV の併用効果

以上の結果より、親水性が高くなるほど UV<sub>254</sub> による分解促進効果が大きくなるのが明らかとなった。これは、親水性が高くなるほどミストに取り込まれやすくなり、気相中において UV<sub>254</sub> による光分解が効果的に進行するためであると考えられる。これより、430kHz は、液相分解、気相転移、気相分解を同時に起こすことができる最適な周波数であることが本研究により明らかとされ、今後の浄化プロセスへの応用が期待される。

#### 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)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① K. Sekiguchi, T. Kudo, K. Sankoda (2017). Combined sonochemical and short-wavelength UV degradation of hydrophobic perfluorinated compounds, *Ultrason. Sonochem.*, 査読有, 39, 87-92. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.002
- ② T. Kudo, K. Sekiguchi, K. Sankoda, N. Namiki, S. Nii (2017). Effect of ultrasonic frequency on size distributions of nanosized mist generated by ultrasonic atomization, *Ultrason. Sonochem.*, 査読有, 37, 16-22. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.12.019
- ③ K. Sankoda, T. Izumi, K. Sekiguchi, K. Nomiya, R. Shinohara (2017). Aqueous secondary formation of brominated, chlorinated, and mixed halogenated pyrene in the presence of halide ions, *Chemosphere*, 査読有, 171, 399-404. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.044
- ④ 関口和彦 (2015). 促進酸化手法の併用と分解生成物の抑制, *空気清浄*, 査読無, 53, 193-202.
- ⑤ 関口和彦, 工藤貴久 (2015). 紫外光を併用した過フッ化合物の超音波分解, 超

- 音波 TECHNO, 査読無, 27, 14-19.
- ⑥ 並木孝招, 関口和彦, 王青躍, 並木則和, 東賢一, 田村一, 諏訪好英, 鍵直樹, 藤井修二 (2014). 過酸化水素含有ミストを用いた VOC ガス分解処理プロセスの開発, エアロゾル研究, 査読有, 29, 112-118.  
DOI: 10.11203/jar.29.112
- ⑦ K. H. Kim, K. Sekiguchi, T. Yoshida, F. Yasui, H. Tamura (2014). Effective liquid-phase photocatalytic reaction using a newly developed titanium oxide-assisted reactor with ozone microbubble treatment, Sep. Purif. Technol., 査読有, 126, 15-20.  
DOI: 10.1016/j.seppur.2014.02.010

[学会発表] (計 16 件)

- ① 関口和彦, 工藤貴久, 三小田憲史, 並木則和, 二井晋 (2016). 超音波霧化により発生させたナノサイズミスト径に与える周波数の影響, 第 25 回ソノケミストリー討論会, 2016 年 10 月 21 日, 富山大学 (富山県・富山市)
- ② 小野雄誠, 関口和彦, 三小田憲史 (2016). 超音波照射下での気液相反応を用いた有機汚染物質の分解率評価, 第 25 回ソノケミストリー討論会, 2016 年 10 月 21 日, 富山大学 (富山県・富山市)
- ③ 関口和彦, 榎原壮馬, 三小田憲史, 並木則和, 二井晋 (2016). 促進酸化手法を用いた超音波ミスト上での VOC ガスの分解と無機化, 第 25 回ソノケミストリー討論会, 2016 年 10 月 21 日, 富山大学 (富山県・富山市)
- ④ 関口和彦, 榎原壮馬, 並木則和, 藤井修二, 垂水弘夫, 鍵直樹, 諏訪好英, 田村一, 東賢一 (2016). 超音波ミスト上における反応活性種と VOC ガスとの反応性評価, 第 33 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2016 年 9 月 1 日, 大阪府立大学 (大阪府・堺市)
- ⑤ 関口和彦, 工藤貴久, 三小田憲史, 並木則和, 二井晋 (2016). 超音波ミスト発生に与える周波数の影響, 第 33 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2016 年 9 月 1 日, 大阪府立大学 (大阪府・堺市)
- ⑥ 関口和彦, 榎原壮馬, 並木則和, 藤井修二, 鍵直樹, 東賢一, 諏訪好英, 田村一 (2016). 促進酸化手法を用いた超音波ミスト上でのトルエンガスの分解と無機化, 第 33 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, 2016 年 4 月 20 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
- ⑦ 榎原壮馬, 関口和彦, 三小田憲史, 王青躍 (2015). 促進酸化法を用いた超音波ミストによるトルエンガスの分解, 第 24 回ソノケミストリー討論会, 2015 年 10 月 24 日, 大阪府立大学 (大阪府・堺市)
- ⑧ 工藤貴久, 関口和彦, 三小田憲史, 王青躍 (2015). 短波長紫外光を併用した過フッ化化合物の超音波分解, 第 24 回ソノケミストリー討論会, 2015 年 10 月 24 日, 大阪府立大学 (大阪府・堺市)
- ⑨ S. Narahara, K. Sekiguchi, N. Namiki, S. Fujii, N. Kagi, Y. Suwa, K. Azuma, H. Tamura (2015). Removal rate of ultrasonic mist and VOC gas under the conditions of various AOPs, 9th Asian Aerosol Conference 2015, 2015 年 6 月 24 日, Kanazawa Tokyuu Hotel (Kanazawa, Japan).
- ⑩ T. Kudo, K. Sekiguchi, Q. Wang, N. Namiki, S. Nii (2015). Size distributions of fine mist particles by changing in the ultrasonic frequency, 9th Asian Aerosol Conference 2015, 2015 年 6 月 24 日, Kanazawa Tokyuu Hotel (Kanazawa, Japan).
- ⑪ 関口和彦, 工藤貴久, 王青躍 (2015). 超音波と短波長紫外光を用いた過フッ化化合物の分解処理, 第 32 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, 2015 年 4 月 22 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
- ⑫ 関口和彦, 榎原壮馬, 並木則和, 東賢一, 田村一, 諏訪好英, 鍵直樹, 藤井修二, 志村哲也 (2015). 促進酸化反応からみた超音波ミストと VOC ガスの反応性評価, 第 32 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, 2015 年 4 月 22 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
- ⑬ 工藤貴久, 関口和彦, 王青躍 (2014). 超音波と短波長紫外光を用いた難分解性有機フッ素化合物の分解処理, 第 23 回ソノケミストリー討論会, 2014 年 11 月 1 日, 秋田市にぎわい交流館 (秋田県・秋田市)
- ⑭ K. Sekiguchi, T. Kudo, T. Namiki, N. Namiki, K. Azuma, H. Tamura, Y. Suwa, N. Kagi, S. Fujii, T. Shimura (2014). Evaluation of chemical reactivity for VOC gas on the ultrasonic mist and the influence of frequency on mist generation, 23rd International Symposium on Contamination Control, 2014 年 10 月 14 日, Coex Convention Center (Seoul, Korea).
- ⑮ 関口和彦, 工藤貴久, 王青躍 (2014). 超音波ミストの粒径分布に与える周波数の影響, 第 31 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2014 年 8 月 7 日, 筑波大学 (茨城県・つくば市)
- ⑯ 関口和彦, 工藤貴久, 並木孝招, 並木則和, 東賢一, 田村一, 諏訪好英, 鍵直樹, 藤井修二, 志村哲也 (2014). 促進酸化雰囲気下での超音波ミストと VOC ガスの反応性ならびにミスト生成に与える周波数の影響, 第 31 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, 2014 年 5 月 21 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関口 和彦 (SEKIGUCHI, Kazuhiko)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 50312921