

## A-2 臭化メチル等の環境中挙動の把握と削減・代替技術の開発に関する研究

### (2) 臭化メチル等の削減・代替技術の開発と評価に関する研究

#### ④ 臭素系化合物等分解技術の開発と評価に関する研究

研究代表者 通商産業省工業技術院 資源環境技術総合研究所 指宿堯嗣

通商産業省 工業技術院 資源環境技術総合研究所

大気圏環境保全部長

指宿堯嗣

励起化学研究室

清水征生・二村 森

保全技術研究室

櫛山 暁

温暖化物質循環制御部

光利用研究室

竹内浩士・根岸信彰

環境影響予測部長

水野光一

(委託先)

九州大学工学部

岩林勝彦

平成8～10年度合計予算額 46,688千円

(平成10年度予算額 4,999千円)

〔要旨〕発生源で使用可能な臭化メチル等分解技術を確立するため、触媒分解法、プラズマ分解法、光分解法について触媒開発、分解条件の最適化等の研究を行った。1) 触媒分解では、臭化メチルの完全酸化分解を目的として触媒探索を行い、銅を担持した $WO_3/Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 触媒が高い分解率及び $CO_2$ 選択率を与えることを見いだした。2) プラズマ分解では、バックグラウンドガス中の酸素濃度の影響について精査し、酸素が2%程度含まれていると、臭化メチル分解率を高く維持しつつ有機副生成物と $NO_x$ の副生を抑制できることを明らかにした。さらに実用化をねらったセミベンチスケールの分解実験も行い、臭化メチル含有、大容量排ガスの分解処理に非平衡プラズマが有効な手法であることを確認した。3) 光触媒分解では、循環式光触媒反応装置による触媒評価を行い、本研究で調製した $TiO_2$ 薄膜光触媒は市販の光触媒と同等以上の性能を有すること、触媒存在下では $CO_2$ までの酸化分解が起こることを見いだした。

〔キーワード〕臭化メチル、触媒分解、非平衡プラズマ分解、光触媒分解

#### 1. 序

成層圏オゾン層破壊防止のため、特定フロン等は1996年から全廃されたが、臭化メチルはなお生産・消費が続いており、放出抑制対策が必要である。対策技術の一つとして、土壌くん蒸及び検疫くん蒸等の発生源での使用に適した臭化メチル分解技術の開発が望まれる。

#### 2. 研究目的

本研究は、小規模事業場等における臭化メチル等含有排ガスの処理に適した安全かつ効率的な分解技術の開発を目的としている。すなわち、触媒を用い低温で分解する技術（触媒分解法）、

非平衡プラズマを用いて分解する技術（プラズマ分解法）、および光触媒による分解技術（光触媒分解法）の3種類の技術について、分解プロセスの最適化と技術評価を行うこととした。

### 3. 触媒分解

#### 3. 1 研究方法

臭化メチル等の有機ハロゲン化合物の分解反応では、腐食性の強いハロゲン化水素等が生成する。従って、反応に適用する触媒は、これら腐食ガスに対して耐久性を有する必要がある。筆者らは、フロン類の触媒分解に関するこれまでの研究において、耐フッ素化性に優れ高い活性を示す $WO_3/Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 触媒を見いだしている<sup>1)</sup>。そこで、本研究においては、当触媒を臭化メチルの分解に適用することを目指した。反応系としては、最も簡単な系である酸素存在下の直接酸化分解を選定した。

$Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 担体は、硝酸ジルコニル水溶液にベーマイト粉末を分散し、アンモニアでpHを調整した後、ろ過し、一晚乾燥後、空気焼成を行って調製した。この担体に酸化タングステンを含浸法にて担持し、空気焼成を行い、 $WO_3/Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 触媒を得た。担体の $Al_2O_3$ と $ZrO_2$ の比は3:1、酸化タングステン担持量は担体に対し0.25mmol/gとした。この触媒に金属あるいは金属酸化物を添加した触媒を調製する場合も、含浸法によって調製した。

反応には固定床流通式反応装置を用い、触媒充填量は1gとした。原料ガスには、臭化メチル、酸素及び窒素の混合ガスを用い、全流量を90ml/minとなるようにした。原料ガスおよび生成ガスの分析にはガスクロマトグラフを用いた。

#### 3. 2 実験結果と考察

$WO_3/Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 触媒による臭化メチルの転化率と反応温度の関係を図1に示す。反応温度400℃では反応開始直後の臭化メチル転化率は92%であったが、その直後から活性劣化が認められ、最終的には約70%となった。反応温度500℃および600℃では97%以上の転化率を示し、活性の経時変化もほとんど認められなかった。この反応温度領域における主生成物は、 $CO_2$ およびCOであった。反応開始直後の生成物選択率を臭化メチル転化率とともに表1に示す。反応温度の低下に伴って $CO_2$ の選択率が減少し、CO選択率が増加していることがわかる。反応温度600℃においてもCOが副生成物の約半分を占めることから、臭化メチルを完全に分解するには、さらに高い反応温度で反応を行うか、もしくは原料ガス中の酸素濃度を増加させる必要があると考えられる。

図2は、原料ガス中の酸素濃度の影響を検討した結果である。この図から、酸素濃度の増加は転化率の向上にはつながらないものの、活性劣化の抑制には効果があることがわかる。しかし、 $CO_2$ 選択率は酸素供給量に関わらず一定であり、 $WO_3/Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 触媒を用いた直接酸化分解反応で臭化メチルを完全分解するには高い反応温度を要することが示唆された。

これらの実験結果を踏まえ、 $CO_2$ 選択率を高めるための触媒の改良を行った。すなわち、CO酸化に有効であるとされるCo、Ni、Mn、あるいは、CFC-12の接触酸化分解で高活性を示したPt<sup>2)</sup>、および、臭化メチルの分解に有効であるとされるCu<sup>3)</sup>、をそれぞれ $WO_3/Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 触媒に添加し、活性の比較を行った。金属添加量は $WO_3/Al_2O_3 \cdot ZrO_2$ 触媒に対し0.5%とした。

図3に、活性がほぼ定常になる反応4時間目における臭化メチル転化率を示す。検討した金属の中で、添加効果が認められたのはCoおよびCuであり、フロンの直接酸化分解で著しい添加効果が

認められたPtは、未添加触媒よりも低い臭化メチル転化率を示した。次に、これら金属添加触媒の反応4時間目におけるCO<sub>2</sub>選択率を図4に示す。臭化メチル転化率に対して効果が認められなかったPt添加触媒は、反応開始直後にはほぼ100%のCO<sub>2</sub>選択率を示したが、反応時間の経過に伴い選択率は低下し、反応時間4時間目には54%となった。反応後の触媒には炭素の付着が認められなかったことから、この選択率の経時変化は分解生成物である臭素によって触媒が被毒したために生じたものと推察される。さらに、臭化メチルに対する反応特性を考慮すると、Ptは臭化メチルそのものとは反応せず、臭化メチルの分解により生じたCOに対してのみ反応するものと推察された。また、臭化メチル転化率の向上が認められたCo, Cu添加触媒についてみると、Co添加触媒のCO<sub>2</sub>選択率が16%であったのに対し、Cu添加触媒では約90%の高いCO<sub>2</sub>選択率を示した。これらの実験結果から、Cuを添加したWO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・ZrO<sub>2</sub>触媒を用いると臭化メチルの完全分解が可能となることが明らかになった。

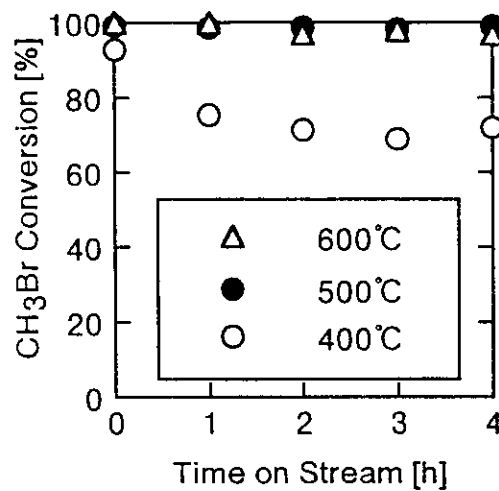


図1 WO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・ZrO<sub>2</sub>触媒による臭化メチル転化率の温度依存性  
(原料ガス組成 CH<sub>3</sub>Br:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=1:82:17)

表1 臭化メチルの直接酸化分解反応特性

Reaction Temp. [°C]	400	500	600	
Selectivity [%]	CH <sub>3</sub> Br	7.3	0.8	-
	CO <sub>2</sub>	4.1	15.5	49.4
	CO	88.6	82.6	50.6
	Others	-	1.1	-
CH <sub>3</sub> Br Conv. [%]	92.7	99.3	100	

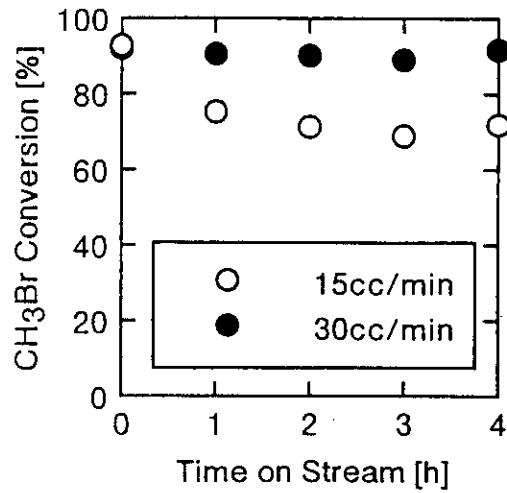


図2 酸素供給量に対するWO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub>触媒の活性  
(原料ガスの酸素濃度(○)17%; (●)33%)

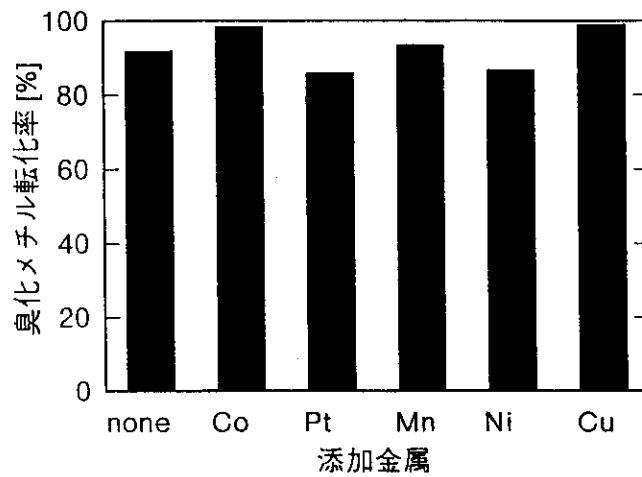


図3 各種金属添加WO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub>触媒による臭化メチル転化率  
(原料ガス組成CH<sub>3</sub>Br:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=1:59:30; 反応温度400℃)

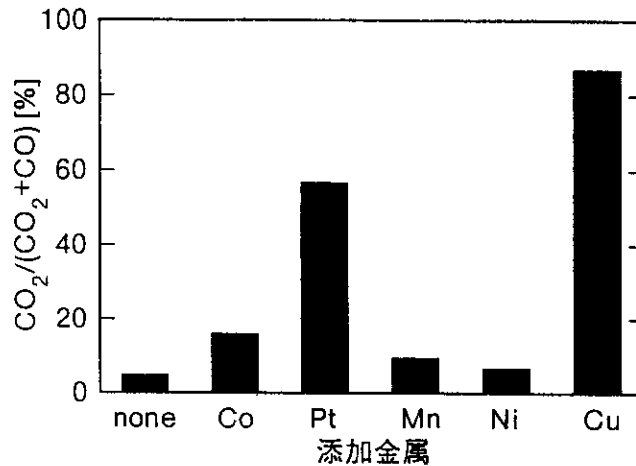


図4 各種金属添加WO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·ZrO<sub>2</sub>触媒による分解反応のCO<sub>2</sub>選択率  
(原料ガス組成CH<sub>3</sub>Br:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=1:59:30; 反応温度400℃)

#### 4. プラズマ分解

非平衡プラズマは1%以下の低濃度大気汚染物質を高効率分解する手法として近年注目を集めており、燃焼法に代わる分解技術として電子ビーム法や光触媒法とともに精力的に研究が行われている。本研究では、チタン酸バリウム（粒径1 mm、誘電率5,000）を充填したパケットベッド型プラズマ反応器を用いて臭化メチルのプラズマ化学反応性につき検討した。さらにパルスコロナ型プラズマ反応器によりセミベンチスケールで臭化メチルの分解実験を実施し、1,000 ~ 2,000 ppm程度の臭化メチルを含有する大容量排ガスの高速分解処理に非平衡プラズマが有効であることを確認した。

##### 4. 1 研究方法

パケットベッド型反応器を用いた臭化メチルの分解実験により、臭化メチル分解率に及ぼす初濃度の影響、バックグラウンドガス中の酸素や加湿水の濃度が臭化メチル分解率と副生成物分布に与える影響、バックグラウンドガス中の酸素濃度が副生NO<sub>x</sub>濃度に及ぼす影響などを精査した。分解実験では、臭化メチル1%を含む窒素ガスをガス混合器にて他のガスと混合し、ガス組成と濃度を調整して反応器に導入した。反応ガスは蒸留水の入った洗浄瓶を通すことにより加湿した。ガス流量はマスフローコントローラーにより調整した。生成物はGC-MSにより同定し、定量分析はGCにより行った。

臭化メチル分解率や生成物分布に及ぼす上記反応因子の影響については、パルスコロナ型反応器とパケットベッド型反応器の場合で大きな差異が認められなかった。そこで、パルスコロナ型反応器を用いたセミベンチスケールの実験では窒素中の臭化メチルの分解反応に焦点を当て、反応器中のエネルギー密度と臭化メチル分解率との相関関係について検討した。

##### 4. 2 結果と考察

臭化メチル分解率に及ぼす初濃度の影響を図5に示す。バックグラウンドガスが窒素と空気のいずれにおいても臭化メチル濃度が1,000 ppmから1%に増加するにつれて分解率は減少する。

ガス流速 1.0 L/min で滞留時間は 4.4 s であるが、滞留時間を長くすることで分解率を 95% 以上に高めることができた。

0.5 ~ 2.5 L/minの流速で行った臭化メチルの分解反応に及ぼす酸素濃度の影響を図 6 に示す。酸素濃度の増加とともに臭化メチル分解率は単調に減少するが、酸素濃度が高い領域では、臭化メチルの分解率に及ぼすガス流速の影響が小さくなることからわかる。酸素濃度が高いときには、酸素分子による高速電子の失活が速やかに進行するため、反応時間の影響が現れにくくなるものと考えられる。

臭化メチルの分解で副生する主な有機化合物の生成濃度に及ぼすバックグラウンドガスの影響を表 2 に示す。臭化シアン、ジブロモメタン、トリブロモメタンといった有機臭化物の生成濃度は酸素や水の添加により低下する。メタンやメタノールは窒素を加湿することで生成量が増えるものの、空気中における分解では微量しか生成しなかった。臭化メチルの分解で得られる CO と CO<sub>2</sub> の合計選択率は酸素濃度 2 % で 90 % 以上となり、微量の酸素存在下でも臭化メチル分解フラグメントラジカル等の再結合は抑えられ、有機副生成物の生成量は大幅に減少することがわかった。

図 7 には CO<sub>2</sub> と CO の生成選択率に及ぼす酸素濃度の影響を示す。ガス流速に依存せず、酸素濃度 2 % 程度で CO<sub>2</sub> 選択率が最大値を示すことがわかる。酸素濃度が高くなっても CO<sub>2</sub> 選択率はほぼ一定な値をとっている。酸素濃度が高くても CO のプラズマ酸化が進行しないことと、CO<sub>2</sub> のプラズマ分解がクエンチされることを別途確認していることから、CO<sub>2</sub> と CO の生成選択率は、両者を与える、異なる前駆体の生成過程の起こりやすさにより決定されるものと考えられる。

窒素-酸素混合ガスの酸素濃度を 2 % まで低減すると、上記の反応で副生する NO<sub>x</sub> の生成濃度が抑制できることが明らかになった (図 8)。

パルスコロナ型反応器により、窒素中で臭化メチルを分解した際の反応器内電力密度と分解率との関係を図 9 に示す。ガス流速 40 L/min、滞留時間 0.9 s で高い分解率が得られることがわかる。さらなるエネルギー効率の向上が達成されれば、非平衡プラズマによる臭化メチルの分解システムの実用化も可能となるであろう。

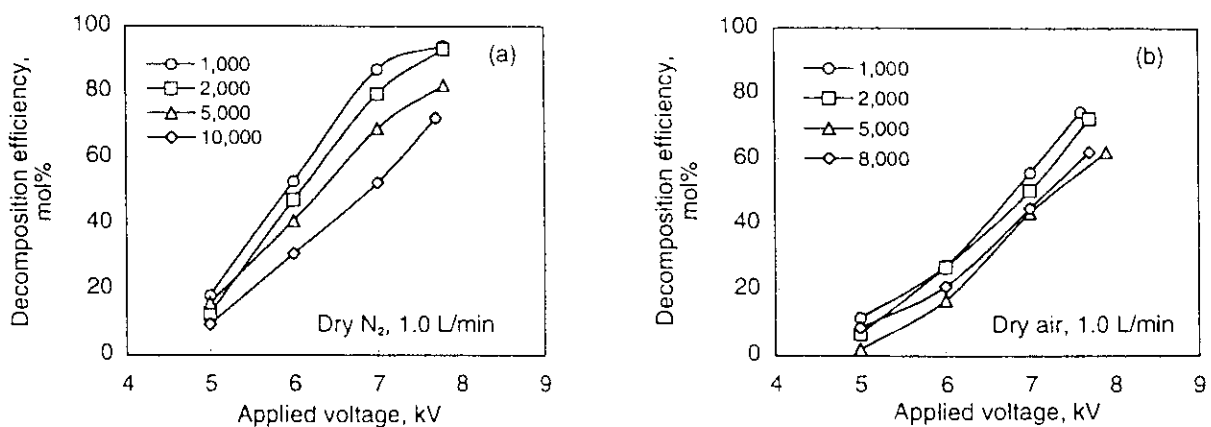


図 5 臭化メチル分解率に及ぼす初濃度の影響

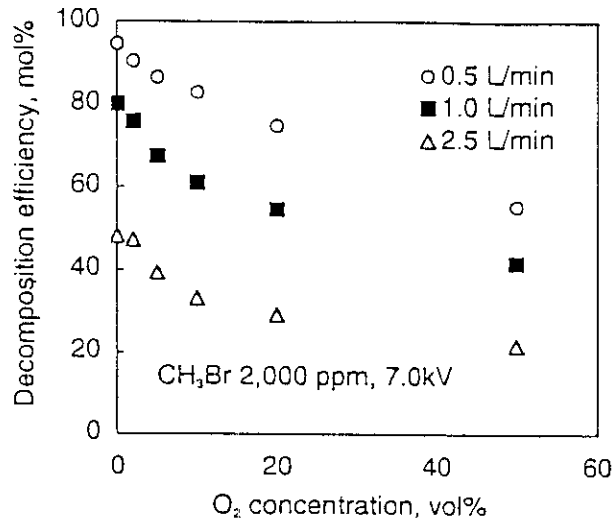


図 6 臭化メチル分解率に与える酸素濃度の影響

表 2 有機副生成物の生成挙動に及ぼすバックグラウンドガスの影響

Background gas	DE <sup>a</sup> (mol %)	RC <sup>b</sup> (ppm)	Organic byproducts (ppm)				
			CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> OH	BrCN	CH <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	CHBr <sub>3</sub>
Dry N <sub>2</sub>	71.2	719.1	47.8	0	282.3	38.5	13.7
Humid N <sub>2</sub>	39.8	402.0	113.7	35.8	94.1	6.6	1.8
Dry air	33.9	339.0	1.9	0	7.4	1.4	0
Humid air	26.6	266.0	8.2	0	7.1	0	0

CH<sub>3</sub>Br ~ 1,000 ppm      Flow rate: 1.0 L/min      Applied voltage: 7.0 kV

a: Decomposition efficiency

b: Reacted carbon concentration

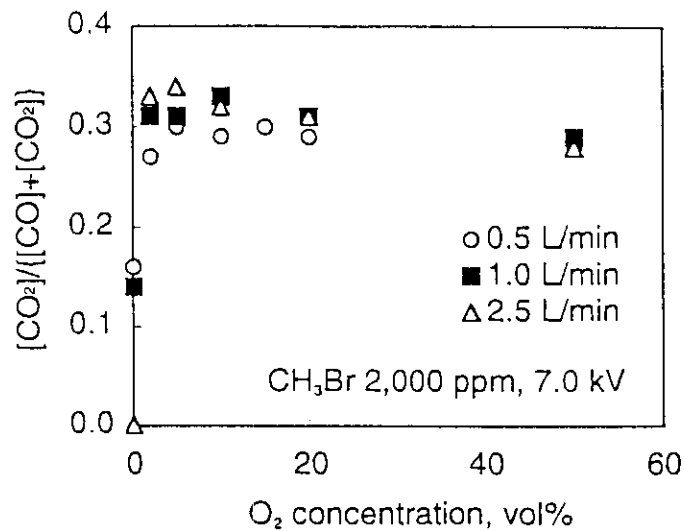


図 7 CO<sub>2</sub> と CO の選択率に及ぼす酸素濃度の影響

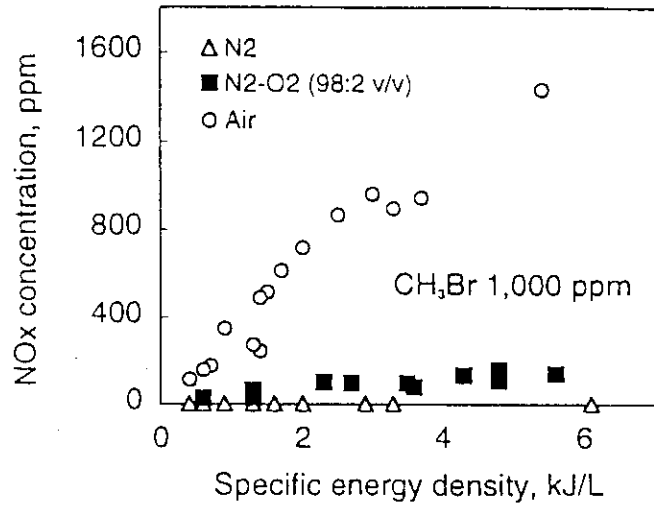


図 8 副生 NOx の生成挙動に及ぼす酸素濃度の影響

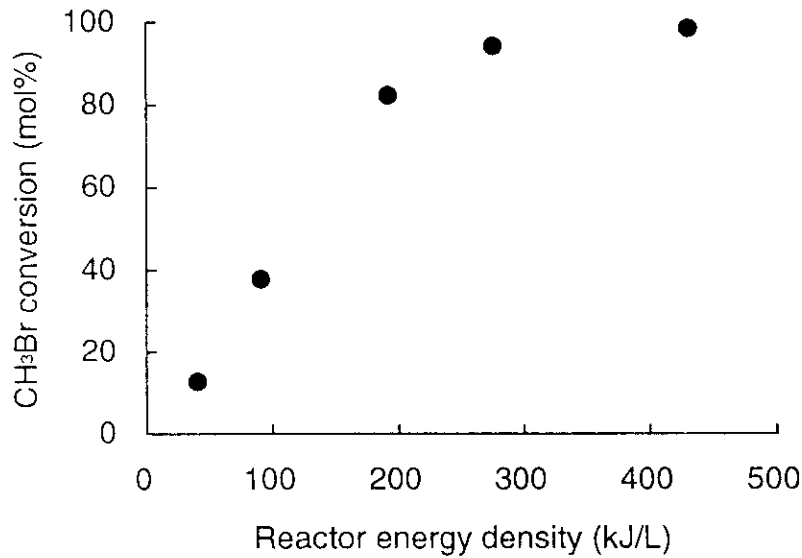


図 9 パルスコロナ型反応器による窒素中臭化メチルの分解挙動

## 5. 光分解

酸化チタン光触媒による臭化メチルの分解反応は、今まで殆ど行われていない反応である。臭化メチルがオゾン層破壊等の物質であり、2005年に全廃の方向で使用規制が行われているが、検疫及び出荷前処理は規制対象となっておらず、その使用は今後とも続くものと考えられる。このため、土壌蒸気あるいは倉庫蒸気で使用された臭化メチルを大気放出する際に無害化する必要性が求められている。一方、酸化チタン光触媒はVOCを始め、有機塩素化合物の光分解に極めて有効であることが数多くの報告で示されている。この反応を応用すれば、臭化メチル等の有機臭素化合物をも光分解できるものと考えられる。本研究では、市販の光触媒を使用すると共に、当研究室で独自に開発した透明薄膜酸化チタン光触媒を用いて臭化メチルの光触媒分解を検討した。



### 5. 1 研究方法

使用した光触媒はP25（日本アエロジル）、ST-01（石原産業）、および当研究室製HDep透明薄膜光触媒である。P25およびST-01は直径70mmのシャーレに1.6gを散布して使用した。HDepは一辺100mmのガラス基板の上に酸化チタンをチタンテトライソプロポキシドの熱分解により製膜したものである。この薄膜の酸化チタン重量はおよそ60mgであった。P25およびST-01は白色粉末で、それぞれ、20nmおよび7nmの粒径を有する。HDepは可視光領域の光を80%以上透過する無色透明の光触媒であり、酸化チタン層の膜厚はおよそ1 $\mu$ mであった。使用した反応装置の概略を図10に示す。臭化メチルの分析には、日本分光FT/IR-610Vを使用した。反応時間は8時間とした。励起光源には10Wブラックライト3本を使用した。光触媒面における紫外線強度はおよそ0.2mW/cm<sup>2</sup>であった。

### 5. 2 結果と考察

およそ2000ppmの臭化メチルを反応系に導入した場合の各光触媒による臭化メチル濃度の時間変化を図11に示す。比較として光触媒を用いずに照射を行った系も示した。この図から明らかなように、光触媒を用いた系では、効率よく臭化メチルが分解されていることが分かる。特に、ST-01およびHDepでは、照射後およそ4時間で測定限界となり、ほぼ完全に臭化メチルが除去されていると考えられる。HDepの触媒重量は60mgであり、ST-01等に比べると重量比で約1/30であるが、光触媒活性は粉末光触媒より高かった。この結果から、低濃度領域の臭化メチルの光分解では触媒重量ではなく、照射面積が重要であることがわかる。

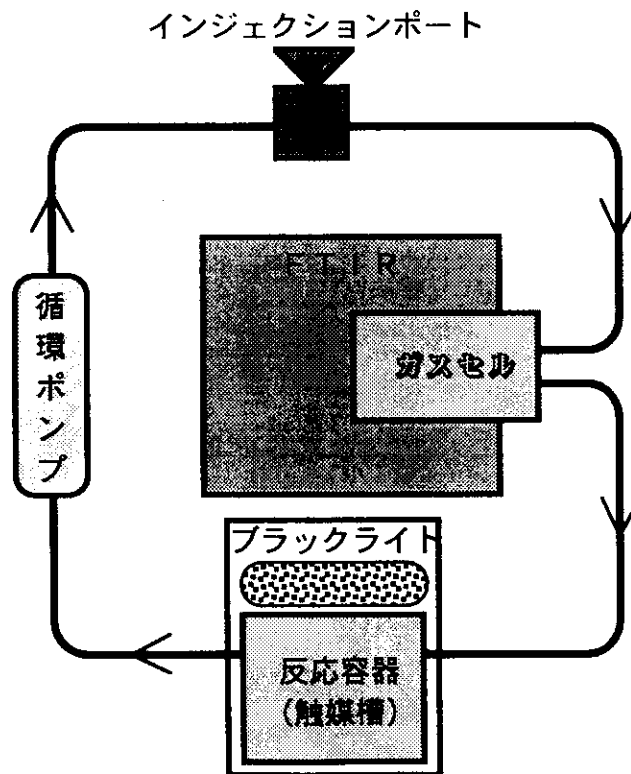


図10 気相光反応分析装置

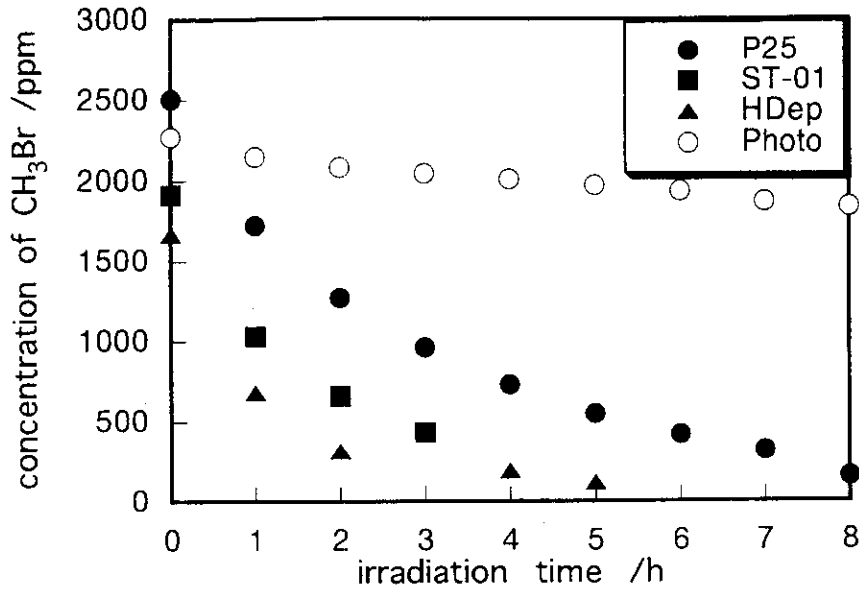


図 11 酸化チタン光触媒による低濃度臭化メチルの分解挙動

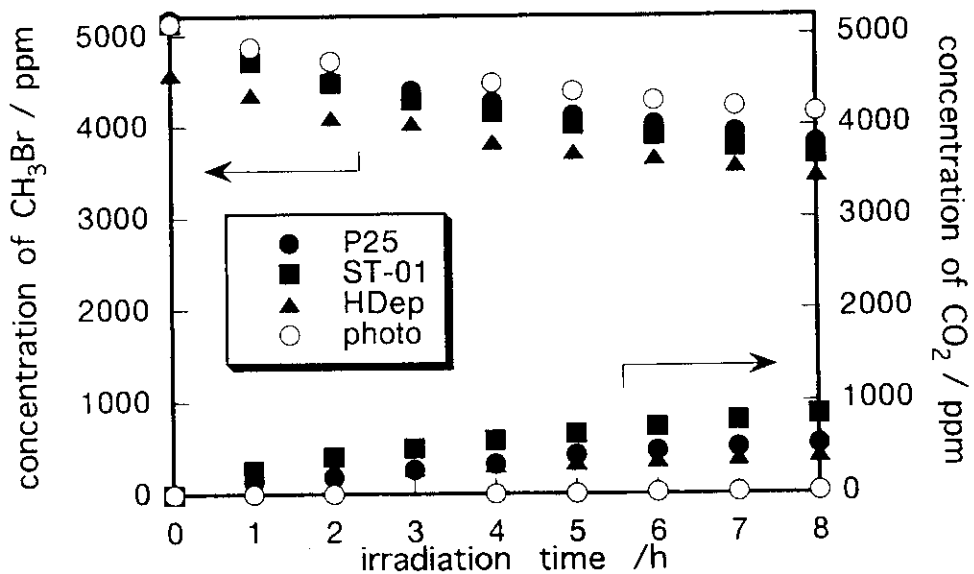


図 12 酸化チタン光触媒による高濃度臭化メチルの分解挙動と CO<sub>2</sub> の生成挙動

一方、光触媒がない場合には、臭化メチルがほとんど分解しないことが分かった。以上の結果から、臭化メチル濃度が 2000 ppm 程度の場合、これら光触媒を用いることにより速やかに光分解が可能であると考えられる。

約 5000 ppm の臭化メチルを導入した系では、低濃度系に比べて反応速度はかなり遅くなった (図 12)。これは光量律速のためと考えられる。この光反応に使用した紫外線強度はおよそ  $0.2 \text{ mW/cm}^2$  であり、これは冬の薄曇りの日の屋外の紫外線強度とほぼ同じである。すなわち、光量子数が臭化メチルの分解に必要な量に達していないために分解速度が低くなったと考え

られる。太陽光などの強力な光源を用いた場合、光触媒活性はこれより高くなると考えられる。太陽光の紫外線強度は、夏の晴れた日の場合、約  $4 \text{ mW/cm}^2$ 、冬の曇りの日でも  $0.1 \text{ mW/cm}^2$  はあり、光触媒を用いた臭化メチルの分解反応には十分な強度を有すると考えられる。図 12 に示すように、臭化メチルの光触媒分解に伴って、二酸化炭素の生成が確認された。しかしながら、光触媒がない条件では、二酸化炭素の生成は全く確認されなかった。

高濃度臭化メチルの光触媒分解では、各触媒の活性には大きな違いはなかったが、強いていえば、ST-01 が最も活性が高く、逆に、HDep が最も活性が低かった。これは、ほぼ各触媒の表面積に依存すると考えられる。P25 と ST-01 では触媒重量は同じ  $1.6 \text{ g}$  であるが、比表面積は P25 が  $50 \text{ m}^2/\text{g}$  なのに対し、ST-01 では  $300 \text{ m}^2/\text{g}$  である。一方、HDep の比表面積は約  $100 \text{ m}^2/\text{g}$  であり、P25 の倍の比表面積を有するが、酸化チタン量はわずかに  $60 \text{ mg}$  であるため、絶対表面積は P25 よりさらに小さくなる。以上の結果から、高濃度領域では、吸着表面積が大きい方がより臭化メチルの除去効果が高いことを示している。

以上の結果をまとめると、紫外線強度が  $0.2 \text{ mW/cm}^2$  の場合、臭化メチル濃度が  $2000 \text{ ppm}$  以上の領域では、光触媒による臭化メチル分解効率は光量律速であるが、 $2000 \text{ ppm}$  以下の領域では一次反応となり、効率的に臭化メチルの分解・除去が可能になると考えられる。実際に、倉庫薫蒸等では、薫蒸後の臭化メチルの排気濃度が  $2600 \text{ ppm}$  程度であることを考えると、これら光触媒を用いることにより日中の太陽光照射でほぼ臭化メチルの完全除去が可能になるものと予期される。

## 6. まとめ

### [触媒分解]

臭化メチル分解に適した触媒の探索、反応条件最適化等について検討した結果、Cu を添加した  $\text{WO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{ZrO}_2$  触媒が臭化メチルの完全分解に高い活性を示すことを明らかにした。

### [非平衡プラズマ分解]

ラボスケールの非平衡プラズマ反応器により、 $1,000 \sim 2,000 \text{ ppm}$  の臭化メチルを  $3 \sim 9 \text{ s}$  の滞留時間で効率よく分解することができた。NO<sub>x</sub> や有機副生成物による二次汚染を伴わない、臭化メチルの高効率分解を達成するためにはバックグラウンドガスとして窒素-酸素 ( $98:2 \text{ v/v}$ ) が最適であることがわかった。セミベンチスケールのプラズマ反応器により、 $1,000 \text{ ppm}$  程度の臭化メチルが  $40 \text{ L/min}$  の窒素中で効率よく分解できたことから、実用的なプラズマ分解システムの構築は可能であると考えられる。

### [光触媒分解]

酸化チタンによる臭化メチルの光分解では、臭化メチル初濃度が分解率に大きな影響を与えた。 $0.2 \text{ mW/cm}^2$  の紫外線強度において、 $5,000 \text{ ppm}$  程度の臭化メチルは約 8 時間で 20% 分解し、 $2,000 \text{ ppm}$  程度の場合は、高活性光触媒を用いて同程度の励起光強度で 5 ~ 8 時間照射することによりほぼ完全に分解することができた。また、無触媒光照射では臭化メチルの分解がほとんど進行しなかった。

## 7. 参考文献

- 1) Nagata, N., Takakura, T., Tashiro, S., Kishida, M., Mizuno, K., Tamori, I.,

- Wakabayashi, K., Sekiyu Gakkaishi, 37, 209-212(1994)
- 2) 田代ら、第78回触媒討論会(A)講演予稿集、194(1996)
- 3) 吉野ら、第6回ハロゲン関連物質触媒研究発表会、17(1996)

[研究成果の発表状況]

(口頭発表)

- [1]田代静香、岸田昌浩、若林勝彦、長田秀夫、榊山 暁、水野光一、「臭化メチルの接触酸化分解」、第7回ハロゲン関連物質触媒研究発表会 (1997)
- [2]Zhang, A., Futamura, S., and Yamamoto, T., "Nonthermal Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants," Abstr., 7th Asian Chemical Congress, Hiroshima, p. 89 (1997)
- [3]Yamamoto, T., Futamura, S., and Zhang, A., "Optimization of Nonthermal Plasma for the Treatment of Hazardous Air Pollutants", Proc., 2nd Int. Symp. on Non-Thermal Plasma Technology for Pollution Control, Salvador, pp. 101-106 (1997)
- [4]Yamamoto, T., Futamura, S., Zhang, A., and Prieto, G., "Application of Nonthermal Plasma Technology for Perchloroethylene Dry Cleaning Facilities," Proc., 2nd Int. Symp. on Non-Thermal Plasma Technology for Pollution Control, Salvador, pp. 123-129 (1997)
- [5]Futamura, S., Zhang, A., and Yamamoto, T., "Control of Byproduct Distributions in Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants," Proc., IEEE-IAS Ann. Meeting, New Orleans, pp. 1961-1968 (1997)
- [6]張 愛華、ニタ村 森、山本俊昭、「臭化メチルのプラズマ分解反応」、第21回静電気学会講演論文集、東京、pp. 7-10 (1997)
- [7]Futamura, S. and Zhang, A., "Chemical Aspects of Nonthermal Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants," Proc., NEDO Symposium on "Non-Thermal Discharge Plasma Technology for Air Pollution Control 1997," Oita, pp. 100-108 (1997)
- [8]Futamura, S., Zhang, A., and Yamamoto, T., "Behavior of  $N_2$  and Nitrogen Oxides in Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants," Proc., IEEE-IAS Ann. Meeting, St. Louis, pp. 1794-1800 (1998)
- [9]根岸信彰、竹内浩士、指宿堯嗣、「大気汚染物質除去を目指した酸化チタン薄膜光触媒の開発」、日本化学会第73秋季年会 (1997)

(論文発表)

- [1]Futamura, S., Zhang, A., and Yamamoto, T., "Mechanisms for Formation of Inorganic Byproducts in Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants," IEEE Trans. Ind. Appl., in press
- [2]Zhang, A., Futamura, S., and Yamamoto, T., "Nonthermal Plasma Chemical Processing of Bromomethane," J. Air & Waste Manage. Assoc., in press

- [3]Futamura, S., Zhang, A., and Yamamoto, T., "Behavior of N<sub>2</sub> and Nitrogen Oxides in Plasma Chemical Processing of Hazardous Air Pollutants," submitted to IEEE Trans. Ind. Appl.