

物理化学的処理によるリン酸エステル系難燃剤の除去

川村恭平・小山幸男

Removal of Phosphate Ester Flame Retardant by Physicochemical Treatment

Kyohei KAWAMURA, Yukio OYAMA

物理化学的処理によるリン酸エステル系難燃剤 (PFRs) の除去効果について、曝気、オゾン、紫外線および促進酸化処理 (UV/O₃) で比較試験を行い、PFRs の性質と低減速度との関連性を調べた。その結果、曝気およびオゾン処理については、オクタノール/水分分配係数 log Pow と高い相関がみられた。紫外線処理については、重回帰分析において、PFRs (OP(OR)₃) の官能基 R を構成する元素数から説明できるモデルが得られた。促進酸化処理については、PFRs の性質によらず高い除去効果が認められた。

1. はじめに

リン酸エステル系難燃剤 (PFRs) は、防災などを目的として、繊維製品や生活用品などに幅広く使用されている^{1,2,3)}。最近の報告によると、これら PFRs は河川環境中においても検出することが確認されており^{4,5,6)}、我々が調査した 9 物質では、予測無影響濃度 (PNEC) をおおむね下回ったものの、1 物質で PNEC を超える濃度で検出された河川が認められている⁵⁾。PFRs の主な負荷源は、工場や下水処理施設等からの放流水と考えられている^{5,6,7)}。一般に、下水処理施設では、凝集沈殿および活性汚泥処理が行われているため、疎水性または微生物分解性の高い物質は除去されやすい⁸⁾。しかし、PFRs は製品の材質や目的に応じ、様々な性質のものが使用されているため、性質によっては下水処理施設で十分に除去されないものも存在する^{6,7,9)}。電気電子機器廃棄物指令 (WEEE) や有害性化学物質管理指令 (RoHS) などの規制によって、臭素系難燃剤から PFRs への代替が進む中、PFRs に効果的な処理方法を開発することは、河川環境を保全する上で、重要な課題となることが予想される。宍田らは、塩化アルキル型の PFRs であるリン酸トリス (2-クロロエチル) (TCEP) に対し、促進酸化処理 (AOP : UV/O₃) による除去効果を調べ、オゾン単独処理と比較し、AOP は除去効果が高いことを報告している¹⁰⁾。

表 1 調査対象物質とその物理化学的性質

物質名	略称	化学式	分子量	蒸気圧 log P ⁰ (Pa, 25°C)	オクタノール/水分分配係数 log Pow	水溶解度 S (mg/L, 25°C)
リン酸トリエチル	TEP	OP(OC ₂ H ₅) ₃	182.2	1.72	0.8	500,000
リン酸トリプロピル	TPP	OP(OC ₃ H ₇) ₃	224.2	1.31 ^{a) b) c)}	1.87 ^{a)}	6,458 ^{a) b)}
リン酸トリブチル	TBP	OP(OC ₄ H ₉) ₃	266.3	-0.82	4.00	280
リン酸トリフェニル	TPhP	OP(OC ₆ H ₅) ₃	326.3	-3.08	4.59	1.9
リン酸トリクレジル	TCP	OP(OC ₆ H ₄ CH ₃) ₃	368.4	-4.10	5.11	0.36
リン酸トリス (2-ブトキシエチル)	TBXP	OP(OC ₂ H ₄ OC ₄ H ₉) ₃	398.5	-3.14 ^{a) b) c)}	3.76	1,100
リン酸トリス (2-クロロエチル)	TCEP	OP(OCH ₂ CH ₂ Cl) ₃	285.5	0.91	1.44	8,300
リン酸トリス (2-クロロイソプロピル)	TCPP	OP(OCH(CH ₃)(CH ₂ Cl)) ₃	327.6	-0.23 ^{a) b) c)}	2.75	1,300
リン酸トリス (1,3-ジクロロ-2-プロピル)	TDCPP	OP(OCH(CH ₂ Cl) ₂) ₃	430.9	-2.46 ^{a) b) c)}	3.76	100

注1) 蒸気圧、オクタノール/水分分配係数および水溶解度の値は、文献12)~18) およびEPAのDSSToxデータベース^{a)}による。

注2) b) の値は、温度条件不明。c) の値は、推定値。

石川は、7 種類の PFRs に対し、紫外線処理による除去効果を調べ、アリール型の PFRs は分解されやすく、塩化アルキル型の PFRs は、分解されにくいことを報告している¹¹⁾。

上記の報告から、PFRs は、処理方法により除去効果が異なり、さらに性質によっても効果が異なることが予想される。しかし、これまでの報告では、調査されている PFRs にも限りがあり、性質との関連性を調べた報告は見られない。

本報では、AOP および AOP に関する紫外線やオゾンなどの処理において、PFRs の除去効果を調査した結果を報告する。我々は、処理ごとに低減速度と性質を比較することで、除去効果との関連性を評価した。

2. 方法

2.1 調査対象物質

既報⁵⁾の河川調査と同様に、環境中からの検出事例があり、難燃剤として使用が示唆される 9 物質を調査対象とした。調査対象物質とその物理化学的性質を表 1 に示す。

2.2 調査対象処理

TCEP に高い除去効果が確認されている促進酸化処理 (AOP : UV/O₃) および AOP (UV/O₃) に関する下記

の処理を調査対象とした。

- ・曝気処理
- ・オゾン処理
- ・紫外線処理
- ・促進酸化処理 (UV/O₃)

2. 3 処理方法

(1) 試薬

- ・混合標準原液：有機リン系難燃剤 9 種類混合標準溶液 (100µg/mL) (林純薬工業株)
- ・精製水：Milli-Q 水

(2) 処理装置

- ・紫外線・オゾン流水殺菌装置 (UZON)：UZ1101GN (UP-2、UP-3) (セン特殊光源株)

(3) 各調査対象処理の方法と条件

処理装置の模式図を図 1 に示す。曝気処理については、反応槽 1 の被検水に、室内空気をポンプで送り、曝気装置により曝気した。オゾン処理については、低圧水銀ランプを点灯させた反応槽 1 の UZON 管に室内空気をポンプで送り、発生したオゾンを紫外線の遮蔽された反応槽 2 の被検水に送り、曝気装置により曝気した。紫外線処理については、反応槽 1 の被検水に低圧水銀ランプの紫外線を照射した。促進酸化処理については、低圧水銀ランプを点灯させた反応槽 1 の UZON 管に室内空気をポンプで送り、発生したオゾンを反応槽 1 の被検水に送り、曝気装置により曝気した。なお、このときの曝気流量は、曝気、オゾンおよび促進酸化処理の全てで 10L/min に設定した。また、室温条件については、全ての処理が 23±2°C の範囲に収まるように設定した。

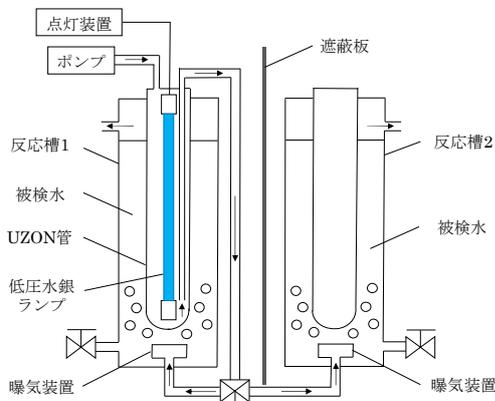


図 1 装置の模式図

(4) 試験方法

精製水 5 L を 20 L ポリタンクに入れ、9 種混合標準原液 (100µg/mL) を 0.5 mL 添加し攪拌する。その全量を処理装置に注入し 1 時間静置後、一部を処理前の測定用試料として採取する。残りの約 4L を処理開始時の試験水とした。

2. 4 分析方法

(1) 試薬

- ・混合標準原液：有機リン系難燃剤 9 種類混合標準溶液 (100µg/mL) (林純薬工業株)

- ・混合内部標準原液：有機リン系難燃剤 9 種類 (ラベル体) 混合標準溶液 (100µg/mL) (林純薬工業株)
- ・固相カートリッジ：Oasis® HLB Plus LP Extraction Cartridge (Waters)
- ・アセトン：残留農薬試験・PCB 試験用 (5,000 倍濃縮) (関東化学株)
- ・メタノール：LC/MS 用 (関東化学株)
- ・0.1vol% ぎ酸-蒸留水：LC/MS 用 (関東化学株)

(2) 測定装置

- ・超高速液体クロマトグラフ：Nexera X2 (株島津製作所)
- ・高速液体クロマトグラフ質量分析計：LCMS-8050 (株島津製作所)

(3) 前処理方法

既報⁵⁾の方法について、サロゲート添加量などを一部変更し、前処理を行った。図 2 に、前処理のフローチャートを示す。

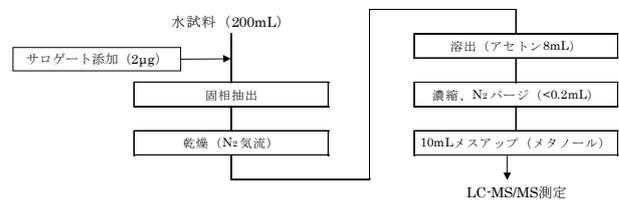


図 2 前処理のフローチャート

(4) 測定方法

株島津製作所製の LC-MS/MS を用いて、MRM により測定を行った。測定条件を表 2 に示す。

表 2 LC-MS/MS の測定条件

LC 装置	(株) 島津製作所製 Nexera X2
カラム	CORETECS™ (2.1×100 mm、粒径 1.6 µm)
カラム温度	40 °C
流速	0.2 mL/min
移動相	A : 0.1 vol% ぎ酸 B : メタノール 0~5 min A : 70% B : 30% 5~30 min A : 70→0% B : 30→100%
試料注入量	1 µL
MS 装置	(株) 島津製作所製 LCMS-8050
イオン源	ESI (+)
測定モード	MRM

2. 5 計算方法

各処理方法における低減速度定数 k と半減期 $T_{1/2}$ の算出は、残存率 (C/C_0) の対数プロットにおいて、各 PFRs の反応初期に直線性がみられたことから、反応初期の低減速度は一次式に従うと仮定し、Excel の指数近似により算出した。

$$\text{一次式: } \frac{C}{C_0} = A e^{-kt}$$

C, C_0 : 時間 t および最初の時刻における濃度
 A : 切片 k : 低減速度定数 t : 反応時間

3. 結果および考察

3.1 曝気処理

曝気処理による除去効果を調べるため、PFRs を添加した精製水を 5 時間曝気処理し、一定時間ごとに濃度を測定した。図 3 に、PFRs の残存率 (C/C_0) 推移を示す。また、表 3 に、この時の低減速度定数 k と半減期 $T_{1/2}$ を示す。最も除去効果が高かったのは、アリアル型の TCP であり、10 分で 88% が除去された。次いで高かったのは、アルキルエーテル型の TBXP であり、10 分で 62% が除去された。逆に効果が低かったのは、アルキル型の TEP および塩化アルキル型の TCEP であり、5 時間で残存率は 100% であった。分子構造ごとの比較では、アリアル型 (TPhP、TCP) およびアルキルエーテル型 (TBXP) の半減期が 4~39 分と比較的に短いのに対し、塩化アルキル型 (TCEP、TCPP、TDCPP) は 347 分以上と長い傾向にあった。アルキル型 (TEP、TPP、TBP) は、アルキル鎖の長さで除去効果が大きく異なり、長鎖ほど半減期が短い傾向にあった ($T_{1/2}=6,000$ 以上、347、12)。

次に、PFRs の性質との関連性を調べるため、表 1 の数値との比較を行った。表 4 に、低減速度定数 $\ln k$ と各性質の単回帰分析における相関係数を示す。このうち、最も相関が強かったオクタノール/水分配係数 $\log Pow$ との散布図と回帰線を図 4 に示す。 $\ln k$ と $\log Pow$ には強い正の相関があり、 $\log Pow$ が大きい PFRs ほど除去されやすい傾向にあった。

文献^{6,9)}では、曝気を工程に含む活性汚泥処理が主流となっている下水処理施設においても、 $\log Pow$ の高い TBP、TPhP、TCP および TBXP の除去率が高く、本試験結果の傾向と一致していた。このため、下水処理施設においては、曝気による大気中への放散によって除去されている可能性が示唆された。

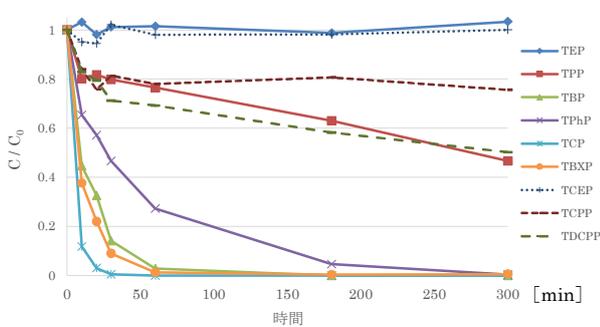


図 3 曝気処理における PFRs 残存率 (C/C_0) の推移

表 3 曝気処理における PFRs の低減速度定数と半減期

略称	低減速度定数 k (min^{-1})	半減期 $T_{1/2}$ (min)	分子構造分類
TEP	0.00005	> 6,000	アルキル型
TPP	0.002	347	アルキル型
TBP	0.059	12	アルキル型
TPhP	0.018	39	アリアル型
TCP	0.171	4	アリアル型
TBXP	0.078	9	アルキルエーテル型
TCEP	0.00007	> 6,000	塩化アルキル型
TCPP	0.0004	1,733	塩化アルキル型
TDCPP	0.002	347	塩化アルキル型

表 4 曝気処理における低減速度定数 $\ln k$ と各物理化学的性質の相関係数

物理化学的性質	相関係数
分子量	0.50
蒸気圧 $\log P^0$	-0.81
オクタノール/水分配係数 $\log Pow$	0.88
水溶解度 $\ln S$	-0.75

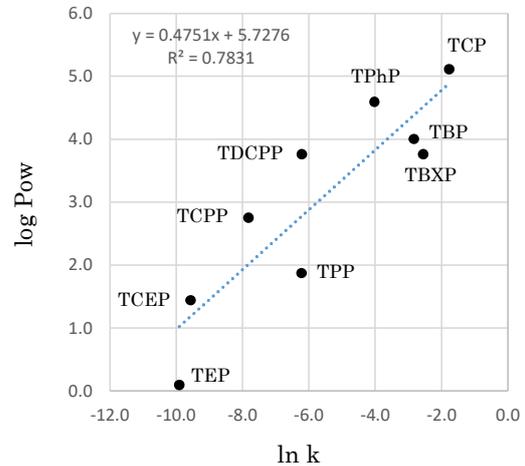


図 4 曝気処理における低減速度定数 $\ln k$ とオクタノール/水分配係数 $\log Pow$ の散布図と回帰線

3.2 オゾン処理

オゾン (O_3) 処理による除去効果を調べるため、PFRs を添加した精製水を 5 時間オゾン処理し、一定時間ごとに濃度を測定した。図 5 に、PFRs の残存率 (C/C_0) 推移を示す。また、表 5 に、この時の低減速度定数 k と半減期 $T_{1/2}$ を示す。オゾン処理の除去効果は曝気処理の傾向と非常によく似ており、曝気処理で効果の高かった TCP、TBXP および TBP は、オゾン処理でもほぼ同じ除去効果を示した。この他、上記 3 物質よりも除去効果の低かった TPhP、TPP、TDCPP、TCPP および TEP については、曝気処理よりも効果の増大がみられ、低減速度定数で 1.3~14 倍の増加が見られた。しかし、TCEP については、オゾン処理においてもほとんど除去効果は認められなかった。分子構造ごとの比較においても曝気処理と同様の傾向であった。

次に、PFRs の性質との関連性を調べるため、表 1 の数値との比較を行った。表 6 に、低減速度定数 $\ln k$ と各性質の単回帰分析における相関係数を示す。このうち、相関が強かったオクタノール/水分配係数 $\log Pow$ との散布図と回帰線を図 6 に示す。 $\ln k$ と $\log Pow$ には、曝気処理よりは若干下がるものの強い正の相関があり、 $\log Pow$ が大きい PFRs ほど除去されやすい傾向にあった。

文献¹⁹⁾では、TCEP、TDCPP および TBXP は、オゾン単独の処理では分解速度が極めて遅かったとあり、塩化アルキル型の TCEP、TDCPP についてはおおむね傾向が一致していたが、TBXP については一致しなかった。この理由については、本試験で設定した曝気流量 (10L/min) が文献値 (3.6L/min) よりも高かったこと、また、曝気処理 (図 3) とオゾン処理 (図 5) で TBXP の除去が同程度とみられることから、曝気による拡散除去が一因であると推察している。

この他、低減速度定数は蒸気圧 $\log P^0$ とも強い相関がみられているが、予想していた正の相関とは逆の負の相関がみられている。蒸気圧は、揮発のしやすさを表しているため、この値が大きくなるほど、曝気により低減効果は増大すると予想される。しかし、蒸気圧は図 7 に示すとおり、 $\log Pow$ とも負の相関関係にあり、 $\log P^0$ の高い物質は、脂溶性 ($\log Pow$) が低くなる傾向にある。今

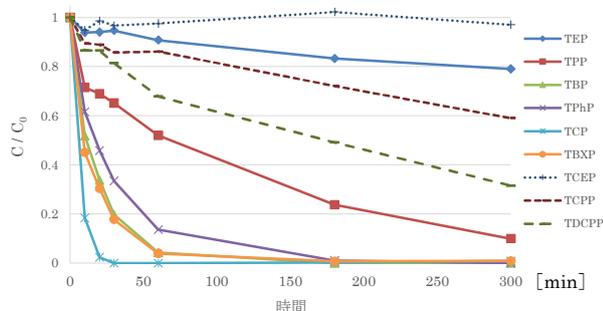


図 5 O₃ 処理における PFRs 残存率 (C/C₀) の推移

表 5 O₃ 処理における PFRs の低減速度定数と半減期

略称	低減速度定数 k (min ⁻¹)	半減期 T _{1/2} (min)	分子構造分類
TEP	0.0007	990	アルキル型
TPP	0.007	99	アルキル型
TBP	0.043	16	アルキル型
TPhP	0.024	29	アリール型
TCP	0.187	4	アリール型
TBXP	0.052	13	アルキルエーテル型
TCEP	0.00004	> 6,000	塩化アルキル型
TCPP	0.002	347	塩化アルキル型
TDCPP	0.004	173	塩化アルキル型

表 6 O₃ 処理における低減速度定数 $\ln k$ と各物理化学的性質の相関係数

物理化学的性質	相関係数
分子量	0.38
蒸気圧 $\log P^0$	-0.81
オクタノール/水分係数 $\log Pow$	0.80
水溶解度 $\ln S$	-0.68

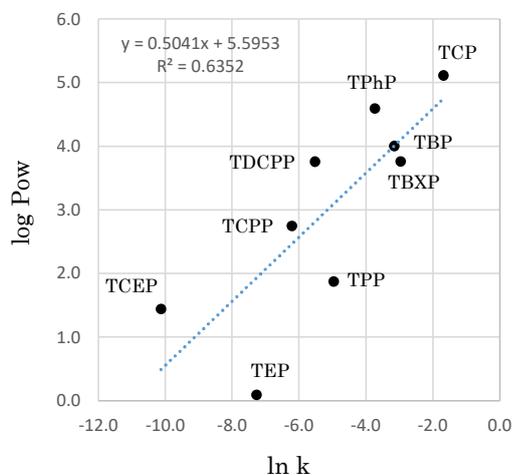


図 6 O₃ 処理における低減速度定数 $\ln k$ とオクタノール/水分係数 $\log Pow$ の散布図と回帰線

回このような結果となった理由は、除去効果における $\log P^0$ の影響は $\log Pow$ に比べ非常に小さく、 $\log Pow$ による除去効果が $\log P^0$ との疑似相関として観測されたと推察される。

本試験によって、オゾン処理は、曝気処理と同様の傾向を示し、一部の PFRs については、オゾンによる分解が除去効果に加わると示唆された。

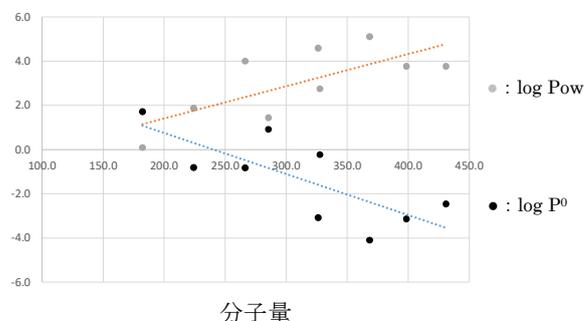


図 7 PFRs における蒸気圧 $\log P^0$ とオクタノール/水分係数 $\log Pow$ の関係性

3.3 紫外線処理

紫外線 (UV) 処理による除去効果を調べるため、PFRs を添加した精製水を 5 時間紫外線処理し、一定時間ごとに濃度を測定した。図 8 に、PFRs の残存率 (C/C₀) 推移を示す。また、表 7 に、この時の低減速度定数 k と半減期 $T_{1/2}$ を示す。紫外線処理は、アリール型の TPhP と TCP に対し特に除去効果が高く、20 分でそれぞれ 86% と 93% が除去された。また、曝気やオゾン処理では除去が難しかった TEP や TCEP に対しても除去効果が認められ、最も除去効果が低かった TCEP でも 60 分で 54% が除去された。分子構造ごとの比較では、アリール型の半減期が最も短く ($T_{1/2}=5, 7$)、次いでアルキルエーテル型 ($T_{1/2}=20$)、アルキル型 ($T_{1/2}=24\sim 46$)、塩化アルキル型 ($T_{1/2}=50$) の順に長くなる傾向にあった。アルキル型は、曝気やオゾン処理同様に、アルキル鎖が長いほど半減期が短い傾向にあった ($T_{1/2}=46, 32, 24$)。

次に、PFRs の性質との関連性を調べるため、表 1 の数値との比較を行った。表 8 に、低減速度定数 $\ln k$ と各性質の単回帰分析における相関係数を示す。また、図 9 に、最も相関が強かった水溶解度 $\ln S$ との散布図と回帰線を示す。 $\ln k$ と $\ln S$ には強い負の相関があり、 $\ln S$ が小さい PFRs ほど除去されやすい傾向にあった。しかし、分子構造ごとに傾向をみると、塩化アルキル型 (TCEP、TCPP、TDCPP) は上記相関関係とは傾向が一致せず、 $\ln S$ により $\ln k$ はほとんど変化しなかった。このような傾向は $\log P^0$ や $\log Pow$ についても認められたことから、物質の構成元素に要因があると予想し、他の手法で関連性を調べた。表 9 に示す低減速度定数 k を従属変数、PFRs (OP(OR)₃) の官能基 R を構成している炭素、水素、酸素および塩素の数を独立変数として、重回帰分析を行った結果を表 10 に示す。その結果、自由度調整済み決定係数 R^2 は 0.97 とモデルの精度は非常に高く、官能基 R の構成元素数で低減効果のほとんどが説明できると予測された。また、構成元素別では、炭素が多く、水素と塩素が少ないほど低減速度定数は増加し、不飽和度の高い芳香環を持ち、塩素が少ない PFRs ほど、除去効果が高くなると推測された。なお、塩素については、一般的に有

意水準の P 値 0.05 を満たしていなかったが、0.066 と非常に近い値であったことから、有意とみなした。

文献¹¹⁾では、低圧水銀ランプによる紫外線処理では、TPhP、TCP>TBP>TDCPP>TCPP>TCEP の順に減少割合が低くなるとあり、本結果の傾向とおおむね一致していた。

本試験によって、紫外線処理は、PFRs の官能基 R の構成元素数により除去効果を予測できる可能性があり、

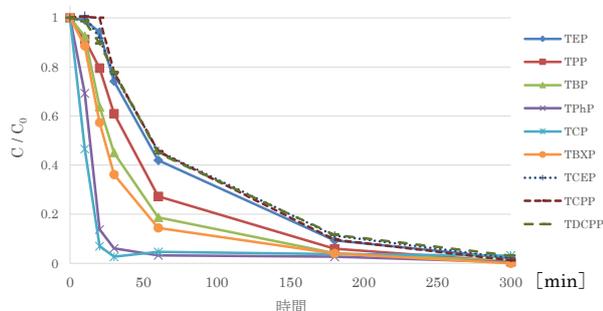


図 8 UV 処理における PFRs 残存率 (C/C₀) の推移

表 7 UV 処理における PFRs の低減速度定数と半減期

略称	低減速度定数 k (min ⁻¹)	半減期 T _{1/2} (min)	分子構造分類
TEP	0.015	46	アルキル型
TPP	0.022	32	アルキル型
TBP	0.029	24	アルキル型
TPhP	0.100	7	アリール型
TCP	0.128	5	アリール型
TBXP	0.034	20	アルキルエーテル型
TCEP	0.014	50	塩化アルキル型
TCPP	0.014	50	塩化アルキル型
TDCPP	0.014	50	塩化アルキル型

表 8 UV 処理における低減速度定数 ln k と各物理化学的性質の相関係数

物理化学的性質	相関係数
分子量	0.26
蒸気圧 log P ⁰	-0.76
オクタノール/水分配係数 log Pow	0.74
水溶解度 ln S	-0.82

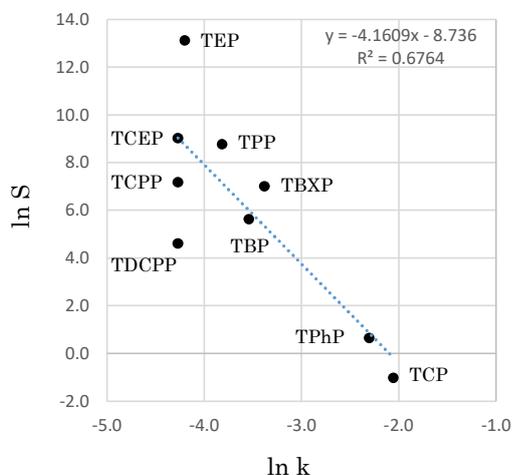


図 9 UV 処理における低減速度定数 ln k と水溶解度 ln S の散布図と回帰線

炭素が多く、水素と塩素が少ないほど低減速度が速くなる傾向が認められ、新しい知見が得られた。

表 9 低減速度定数 k と、PFRs の官能基 R を構成している炭素、水素、酸素、および塩素の数

略称	低減速度定数 k	OP(OR) ₃ R=C _x H _y O _z Cl _s			
		x	y	z	s
TEP	0.015	2	5	0	0
TPP	0.022	3	7	0	0
TBP	0.029	4	9	0	0
TPhP	0.100	6	5	0	0
TCP	0.128	7	7	0	0
TBXP	0.034	6	13	1	0
TCEP	0.014	2	4	0	1
TCPP	0.014	3	6	0	1
TDCPP	0.014	3	5	0	2

表 10 重回帰分析の結果

	偏回帰係数	t値	P値
炭素数 (x)	0.024	13.839	0.00016
水素数 (y)	-0.007	-3.624	0.022
酸素数 (z)	-0.016	-1.014	0.368
塩素数 (s)	-0.011	-2.516	0.066
切片	0.002	0.134	0.900
重相関係数 (R)	0.99		
重決定係数 (R ²)	0.98		
自由度調整済み決定係数 (R ² _{adj})	0.97		

3. 4 促進酸化処理

促進酸化処理 (AOP : UV/O₃) による除去効果を調べるため、PFRs を添加した精製水を 5 時間促進酸化処理し、一定時間ごとに濃度を測定した。図 10 に、PFRs 残存率 (C/C₀) の推移を示す。AOP による除去効果は非常に高く、すべての PFRs において、10 分で 90% 以上が除去された。TCEP の残存率が 8% と他と比べ約 6% 程高いが、それでも 92% が除去されており、AOP はすべての PFRs に対し、性質によらず高い除去効果を示すことが認められた。

文献¹⁹⁾では、TCEP、TDCPP および TBXP は、促進酸化処理によって速やかに分解したとあり、本結果と一致していた。

本試験によって、促進酸化処理は PFRs の性質に関係なく、上記 3 物質に加え、アルキル型の TEP、TPP、TBP、アリール型の TPhP、TCP および塩化アルキル型の TCPP についても除去効果が高いことを示した。

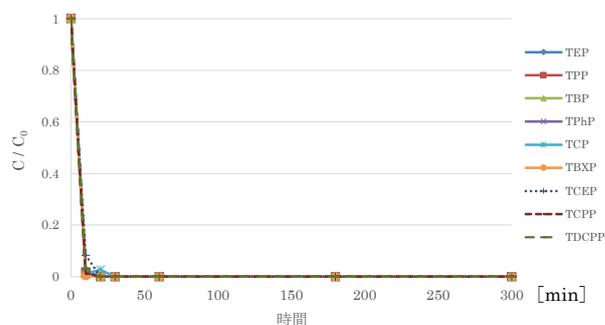


図 10 AOP における PFRs の残存率 (C/C₀) の推移

4. まとめ

物理化学的処理による PFRs の除去効果について、曝気、オゾン、紫外線および促進酸化処理 (UV/O₃) で比較試験を行い、PFRs の性質と低減速度との関連性を調べた。その結果、PFRs の性質と除去効果には下記の関連性が認められた。

曝気およびオゾン処理では、PFRs の低減速度定数 $\ln k$ はオクタノール/水分分配係数 $\log Pow$ と強い相関があり、 $\log Pow$ が高い PFRs ほど除去効果が高かった (図 4、6)。また、一部の PFRs については、オゾン処理において、曝気処理よりも高い除去効果がみられ、オゾンによる効果も示唆された。

紫外線処理では、重回帰分析において、低減速度定数 k は PFRs (OP(OR)₃) の官能基 R を構成している元素の数でほとんどが説明できると予測され、炭素が多く、水素と塩素が少ないほど除去効果が高くなると統計的に説明できた (表 10)。

促進酸化処理では、すべての調査対象 PFRs について、性質に関係なく高い除去効果が認められた (図 10)。

本研究は、単純な精製水での基礎的な低減試験であり、工場排水のような夾雑物が含まれる複雑な実験系で試験されたものではない。また、曝気による大気拡散という課題も有する。したがって、実際の現場で直ちに本技術を適用できるわけではないが、本研究で得られた知見が、今後の PFRs 処理技術の開発や普及に繋がるものと期待される。

謝辞

本研究は、文部科学省の「特別電源所在県科学技術振興事業補助金」により「化学物質対策調査研究事業」として実施した。調査に御協力を賜りました関係者の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西澤仁, 武田邦彦: 難燃材料活用便覧, テクノネット社, 千葉(2002)
- 2) 西澤仁: 難燃剤・難燃材料の活用技術, シーエムシー出版, 東京(2004)
- 3) 西澤仁: 難燃化技術の基礎と最新の開発動向, シーエムシー出版, 東京(2016)

- 4) 宮尻久美, 坂雅宏: リン酸エステル系難燃剤分析法の精度と京都府南部河川水を試料とした本法の適用結果について, 京都府保健環境研究所年報, **64**, 24-29(2019)
- 5) 川村恭平, 西澤憲彰: 福井県内の河川におけるリン酸エステル系難燃剤の実態について(第 2 報), 福井県衛生環境研究センター年報, **17**, 76-85(2019)
- 6) 西野貴裕 他: 国内都市域の水環境中における生活由来化学物質の環境実態解明及び生態リスク評価, 環境化学, **30**(1), 37-56(2020)
- 7) 嶋津治希 他: 黒瀬川流域における有機リン酸トリエステルの挙動と濃度予測, 環境工学研究論文集, **38**, 227-237(2001)
- 8) 水川薫子, 高田秀重: 環境汚染化学, 丸善出版, 東京(2015)
- 9) 石川精一 他: 工場排水および生活排水中の有機リン酸エステル類の定量, 水質汚濁研究, **8**(8), 529-535(1985)
- 10) 宍田健一 他: 廃棄物最終処分場浸出水のオゾン/過酸化水素法, オゾン/紫外線法, 過酸化水素/紫外線法による処理特性, 廃棄物学会論文誌, **10**(5), 247-256(1999)
- 11) 石川精一: 工業用有機リン酸エステル類の環境化学的研究, 九州大学博士論文(1992)
- 12) T.E. Daubert, R.P. Danner: Physical and Thermodynamic Properties of Pure Chemicals Data Compilation, Taylor & Francis, Washington, DC(1989)
- 13) Hansch, C. et al.: Exploring QSAR - Hydrophobic, Electronic, and Steric Constants, American Chemical Society, Washington, DC(1995)
- 14) S.H. Yalkowsky, He, Yan.: Handbook of Aqueous Solubility Data: An Extensive Compilation of Aqueous Solubility Data for Organic Compounds Extracted from the AQUASOL dATABASE, CRC Press LLC, Boca Raton(2003)
- 15) 環境省 環境保健部 環境リスク評価室: 化学物質の環境リスク評価 第 4 巻(2005)
- 16) 製品評価技術基盤機構 他: 化学物質の初期リスク評価書 Ver.1.0 No.141(2008)
- 17) 福島実: 有機リン酸トリエステル類の水環境中での動態, 水環境学会誌, **19**(9), 8-15(1996)
- 18) 製品評価技術基盤機構 他: 化学物質の初期リスク評価書 Ver.1.0 No.205(2008)
- 19) 越後信哉 他: 有機リン酸トリエステル類をモデル物質とした促進酸化プロセスの特性に関する基礎的研究, 日本水環境学会年会講演集, **39**(1995)