

## 水溶液中の微量有害有機物の除去に 対する溶媒浮選法の適用\*

松本茂野<sup>1</sup> 木田泰孝<sup>2</sup>  
山本秀樹<sup>3</sup> 芝田隼次<sup>4</sup>

### Application of Solvent Sublation for Removal of Toxic Organic Compounds from Aqueous Solution

by Shigeno MATSUMOTO<sup>1</sup>, Yasutaka KIDA<sup>1</sup>  
Hideki YAMAMOTO<sup>1</sup> and Junji SHIBATA<sup>1</sup>

1. Faculty of Engineering, Kansai University, Suita-shi, Osaka 564

Removal of 12 organic compounds containing chloro-chemicals from an aqueous solution has been carried out using solvent sublation. The removal mechanism of solvent sublation was studied, from which the calculated value for removal was obtained to compare with the experimental results.

The removal rate of organic compounds is strongly concerned with the physical and chemical properties of their compounds, such as solubility, vapor pressure, surface tension and distribution coefficient between the aqueous and organic phase. The experimental removal rate is evaluated and discussed concerning the physical and chemical properties of the compounds to be removed. A model for the removal mechanism is constructed by considering several terms such as adsorption on bubble, entrainment with boundary layer of bubble, vaporization to bubble and mass transfer to the organic solvent in the upper part of column. The calculated value is in good agreement with the experimental results. According to the removal model, contribution percentage of the above terms is estimated and then it is clarified which terms are significant for the removal of the organic compounds with different chemical properties.

**KEY WORDS:** Solvent Sublation, Adsorption, Separation, Bubble, Removal Model, Chloro-compounds

#### 1. 緒 言

排水中に含まれる塩素系有害有機物の除去技術の開発は地球環境保全の観点から重要な問題である。現在、これらの有機汚染物質の分解・除去には物理・化学処理と生物処理が行われているが、沈澱、凝集、吸着、イオン交換、紫外線処理、オゾン処理などの物理・化学処理は生物処理に比べて処理コストが高いことから、生物処理が困難な排水中からの有機汚染物質の除去に用いられている (エッケンフェルダールら, 1976; Grieves, 1975)。

Sebba は、界面活性な有機物を対象として、溶媒浮選法により水溶液中から有害有機物を除去することを試みた。溶媒浮選法は、英語表現では Solvent Sublation と呼ばれ、泡沫分離法を応用したプロセスである。このプロセスでは、有害有機物を含む水溶液中に気泡を導入することにより、有機物を気泡表面に吸着させたり、気泡の境膜および気泡内の気相中に同伴させて、水溶液上部に設けた有機溶媒相に除去・回収することができる。(芝田・徳永, 1995; Clarke ら, 1983; Mahne ら, 1968; Sebba,

1962; Tamamushi ら, 1984)。これまでの研究では、任意の時間における水溶液中に残留する有機物濃度および除去率の測定と推算は行われているが、水溶液中からの有機物の除去率と除去対象有機物の物理的および化学的性質との関わりについて検討した報告は皆無である。

本研究では、溶媒浮選法を用いて回分式操作で水溶液中の有機物の除去実験を行うとともに、除去の機構について検討を行った。実験に使用した除去対象有機物は有機塩素化合物を含む 12 種類の有機物である (木田ら, 1996; 芝田ら, 1995)。

#### 2. 試薬および実験方法

除去対象有機物として、モノクロロベンゼン (MCB)、トリクロロベンゼン (TCB)、ナフタレン (NAP)、トリクロロエチレン (TCE)、トルエン (TOL)、フェノール (PHE)、4-モノクロロフェノール (MCP)、2, 4-ジクロロフェノール (DCP)、2, 4, 6-トリクロロフェノール (TCP)、ペンタクロロフェノール (PCP)、クロロ安息香酸 (CBA) およびクロロサリチル酸 (CSA) の希薄水溶液を選んだ。これらの有機物の物理的および化学的性質は Table 1 に示されている。溶媒浮選法の回収部に相当する有機溶媒相には n-オクタノールを用いた。

実験に使用した装置は Fig. 1 に示されている。カラムは内径 50 mm、長さ 440 mm のガラス製で、底部にはガラスフィルタ (No. 3) が取り付けられている。カラム内に 600 cm<sup>3</sup> の水相お

\* 1997年5月12日受付 7月18日受理

1. 関西大学研究員 工学部化学工学科

2. 関西大学大学院学生

3. 正会員 工博 関西大学助教授 工学部化学工学科

4. 正会員 工博 関西大学教授 工学部化学工学科

[著者連絡先] FAX06-388-8869 (関西大・資源循環工学研究室)

キーワード: 溶媒浮選, 吸着, 分離, 気泡, 除去機構, 塩素化合物

Table 1 Physical and chemical properties of organic compounds at 298 K.

Substance	Molecular weight M [-]	Vapor pressure P <sub>vap</sub> [Pa]	Aqueous solubility S [g/m <sup>3</sup> ]	Distribution K <sub>ow</sub> [-]	Surface tension γ [mN/m]
Phenol(PHE)	94.1	36	6.7×10 <sup>3</sup>	30	65 <sup>a)</sup>
Monochlorophenol(MCP)	129	25	2.4×10 <sup>4</sup>	130	66 <sup>a)</sup>
Dichlorophenol(DCP)	163	20	4.1×10 <sup>3</sup>	154	67 <sup>a)</sup>
Trichlorophenol(TCP)	197	15	8.0×10 <sup>2</sup>	188	65 <sup>a)</sup>
Pentachlorophenol(PCP)	266	1.2×10 <sup>-1</sup>	1.4×10 <sup>1</sup>	239	67 <sup>a)</sup>
Trichloroethylene(TCE)	132	1.0×10 <sup>4</sup>	1.1×10 <sup>3</sup>	56	71 <sup>a)</sup>
Toluene(TOL)	92.1	3.8×10 <sup>3</sup>	4.7×10 <sup>2</sup>	15	68 <sup>a)</sup>
Monochlorobenzene (MCB)	113	1.7×10 <sup>3</sup>	4.9×10 <sup>2</sup>	5.7	65 <sup>b)</sup>
Trichlorobenzene(TCB)	182	33	3.7×10 <sup>1</sup>	4.5	41 <sup>c)</sup>
Naphthalene(NAP)	128	22	3.0×10 <sup>1</sup>	11	49 <sup>d)</sup>
Chlorosalicylic acid(CSA)	173	-	9.0×10 <sup>2</sup>	14	41 <sup>a)</sup>
Chlorobenzoic acid(CBA)	157	44 (100°C)	4.4×10 <sup>2</sup>	7.1	44 <sup>a)</sup>

Surface tensions are measured at the concentration of a)50g/m<sup>3</sup>, b)35g/m<sup>3</sup>, c)39g/m<sup>3</sup> and d)20g/m<sup>3</sup>

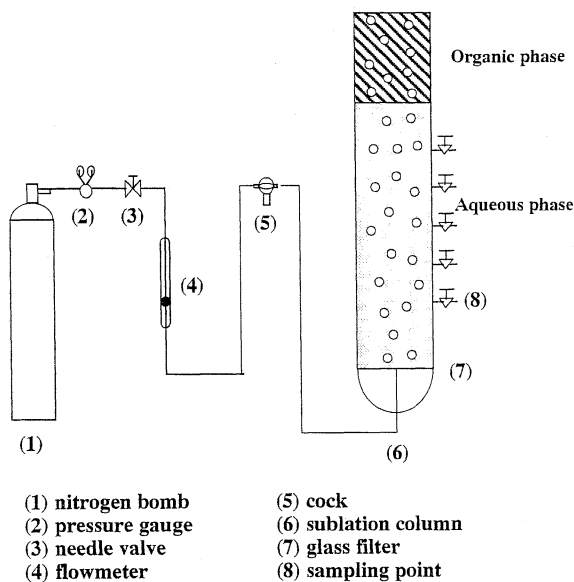


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus of solvent sublimation.

よび 30 cm<sup>3</sup> 有機溶媒相を導入し、カラム底部から窒素ガスを 3.3 cm<sup>3</sup>/s の流量で送入して、ガラスフィルタから気泡を発生させた。水相の有機化合物濃度は一定時間ごとにガラスフィルタから 8 cm 上部の位置より水相を採取し、残留している有機物濃度を測定した。有機物の定量には可視紫外分光光度計 (島津 UV2100) を用いた。トリクロロエチレンの濃度はアルカリーピリジン法により測定した。

気泡の半径は写真撮影法により測定し、ランダムサンプリングした 100 個の気泡半径の平均値を用いた。有機化合物を含む水溶液の表面張力は、自動表面張力計 (協和界面科学(株) CDVP-Z 型) により測定した。有機化合物の分配係数は、遠心分離管に有機化合物を含む水相および有機溶媒相を相比 (1:1) で導入し、抽出実験を行うことにより決定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 水溶液からの有機物の除去

12 種の有機物、ジクロロベンゼン、トリクロロベンゼン、ナフタレン、トリクロロエチレン、トルエン、フェノール、4-モノクロロフェノール、2, 4-ジクロロフェノール、2, 4, 6-トリクロロフェノール、ペンタクロロフェノール、クロロ安息香酸およびクロロサリチル酸の除去実験を行った。Fig. 2 にフェノール系の有機化合物の除去率を示し、Fig. 3 にその他の有機化合物の除去率を示した。それぞれの実験は有機物の初期濃度 50 g/m<sup>3</sup>、水相体積 600 cm<sup>3</sup>、有機溶媒相体積 30 cm<sup>3</sup>、ガス流量 3.3 cm<sup>3</sup>/s で行った。いずれの物質も通気時間の増加とともに除去率は増加し、3 時間程度の通気操作で一定の除去率に達した。除去率には、除去対象有機物の水への溶解度、蒸気圧、分配係数、表面張力などの物理的および化学的性質が強く関係する。表面張力および水への溶解度が小さいほど、蒸気圧および分配係数が高いほどその物質の除去率が高くなると考えられる。トルエンおよびトリクロロエチレンの蒸気圧は著しく高いために、1 時間の操作で完全に水溶液中から除去された。これには気泡内への揮発による除去が大きく係わっている。クロロフェノール類は、塩素原子の数が増加するにつれて蒸気圧および水への溶解度が低下し、気泡への蒸発や気泡境膜層への同伴による除去は低下するが、分配係数が

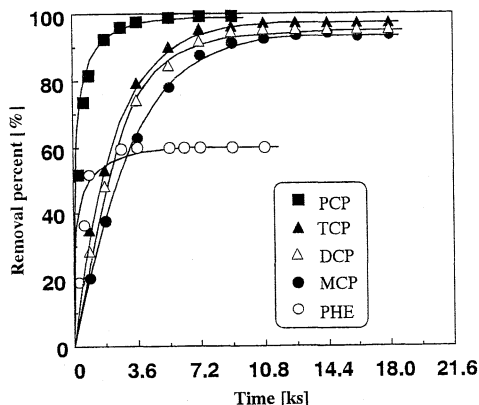


Fig. 2 Removal percent of some phenols by solvent sublation.

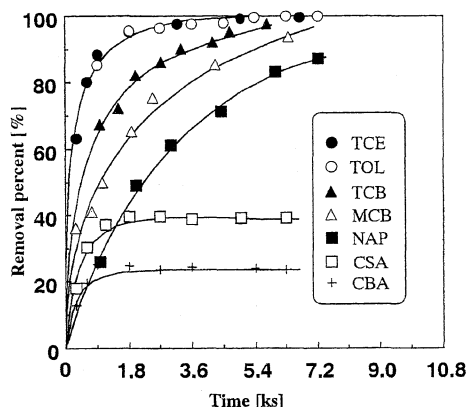


Fig. 3 Removal percent of some organic compounds by solvent sublation.

増加するために、塩素数が多くなるにつれて全除去率は増加した。

フェノールの除去率が低いのは、界面活性が低いために通気の際に生じる気泡径が大きく、気泡表面への吸着および気泡境膜層への同伴による除去量が少なくなるためと考えられる。クロロサリチル酸およびクロロ安息香酸は、他の有機物とは異なり、水溶液中で大部分がイオン化した状態で存在しているため、著しく低い除去率を示す。

除去率におよぼす有機物初濃度の影響について検討した結果、モノクロロフェノールおよびクロロサリチル酸の初濃度を変化させると、モノクロロフェノールではほとんど除去率に変化がみられなかったが、クロロサリチル酸は初濃度の増加につれて除去率が増加した。モノクロロフェノール濃度を 0~200 g/m<sup>3</sup> に増加させると、表面張力は 8 mN/m 程度低下した。一方、クロロサリチル酸は界面活性が高いため、同様の濃度範囲において 20 mN/m の著しい表面張力の低下が観測された。表面張力の低下は、気泡径の減少、気泡表面への吸着および気泡境膜層への同伴に深く関わるので、クロロサリチル酸の除去率が増加したと考えられる。

### 3・2 溶媒浮選法の除去機構

水相から有機溶媒相中への有機物の除去は、気泡による輸送と水相-有機溶媒相間での物質移動によって生じる。気泡による有機物の輸送には、気泡表面への吸着、気泡境膜層への同伴および気泡内への揮発が含まれる(芝田ら, 1995)。除去機構をモデル化するにあたり、水相および有機溶媒相内は完全混合状態で溶質濃度は均一であり、水相と有機溶媒相の界面に到達した気泡は、水相中で吸着平衡の状態にあると仮定した。

単位時間あたりに気泡によって水相から除去される溶質量  $X_1$  は次式によって表される (Valsaraj ら, 1991 a)。

$$X_1 = Q_a \frac{3}{a} K_{ad} C_w + Q_a \frac{3}{a} d_i C_w + Q_a H_c C_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中の第 1 項は気泡表面での吸着、第 2 項は気泡境膜による同伴、第 3 項は気泡内への揮発による寄与である。

水相中の溶質は、水相-有機溶媒相界面での物質移動によってカラム上部の有機溶媒相へ移動する。単位時間あたりに界面での物質移動によって輸送される溶質量  $X_2$  は、次のように示される。

$$X_2 = \pi r_c^2 K_1 \left( C_w - \frac{C_o}{K_{ow}} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

気泡が水相から有機溶媒相に入るときには、気泡の周りに厚さ  $d_i$  の水相を同伴する。気泡が壊れると、気泡境膜に同伴された水相は、水滴として有機溶媒相から水相に戻る。これらの過程によって水相に戻る溶質濃度は主に分配係数に支配される。したがって、水相に戻る溶質量  $X_3$  は、次式によって表される。

$$X_3 = Q_a \frac{3}{a} d_i \frac{C_o}{K_{ow}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

気泡表面への吸着および気泡内への揮発により水相から除去される有機化合物は有機溶媒相および大気相に移動した後、水相には戻らないとすると、水相から除去される全溶質量  $X$  は次式で示される。

$$X = X_1 + X_2 - X_3 = Q_a \frac{3}{a} K_{ad} C_w + Q_a \frac{3}{a} d_i \left( C_w - \frac{C_o}{K_{ow}} \right) + Q_a H_c C_w + \pi r_c^2 K_1 \left( C_w - \frac{C_o}{K_{ow}} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

有機溶媒相、水相および大気相の 3 相間における溶質の物質収支は次式で示される。

$$V_w C_{wi} = V_w C_w + V_o C_o + Q_a H_c \frac{C_o}{K_{ow}} t \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式を時間  $t$  で微分すると次式が得られる。

$$V_w \frac{dC_w}{dt} = -V_o \frac{dC_o}{dt} - Q_a H_c \frac{C_o}{K_{ow}} - \frac{Q_a H_c}{K_{ow}} \frac{dC_o}{dt} t \quad \dots\dots (6)$$

(4)および(6)式に初期条件として  $t = 0$  で  $C_o = 0$ ,  $C_w = C_{wi}$  と与えることにより、任意の時間における水溶液からの有機物の除去量および除去率を推算することが可能になる。

気泡表面に吸着される有機物の吸着量  $\Gamma$  は、Gibbs の吸着式を用いて推算した。

$$\Gamma = - \frac{C_w}{RT} \left( \frac{d\gamma}{dC_w} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

有機物の濃度と表面張力の関係を測定し、これを Gibbs の吸着式に適用することにより、気泡-液界面での有機物の吸着量  $\Gamma$  を決定した。実験に用いた濃度範囲では、いずれの有機物についても吸着量  $\Gamma$  とその濃度  $C_w$  はヘンリー型吸着式で表現できる。

$$\Gamma = K_{ad} C_w \quad \dots\dots\dots (8)$$

気泡内に揮発する有機物の量は、次式より推算されるヘンリー-定数  $H_c$  を用いて求めた (Valsaraj ら, 1986, 1991 b)。

$$H_c = \frac{P_{vap} M}{133.32 \times 760 \times 82.05 \times ST} \quad \dots\dots\dots (9)$$

水相側基準総括物質移動係数  $K_1$  はルイスセルを用いて、物質収支式より導かれる  $\ln \{ C_w - C_i / (K_{ow} + 1) \}$  と時間の関係の直線の傾き、界面積およびセル体積より求めた (Lewis, 1954)。

分配係数は、除去対象有機物について抽出実験を行って決定した。分配係数は次式に従って決定した。

$$K_{ow} = \frac{C_o}{C_w} = \frac{C_{wi} - C_w}{C_w} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Table 2 Simulation parameters for organic compounds.

Substance	$Q_a$ [cm <sup>3</sup> /s]	$C_{wi}$ [g/m <sup>3</sup> ]	$H_c$ [-]	$a$ [cm]	$d_i$ [cm]	$r_c$ [cm]	$K_{ow}$ [-]	$K_l$ [cm/s]	$K_{ad}$ [cm]
PHE	3.3	50	$2.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-3}$	2.5	30	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-5}$
MCP	3.3	50	$5.4 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-2}$	$1.45 \times 10^{-3}$	2.5	130	$1.2 \times 10^{-2}$	$2.4 \times 10^{-5}$
DCP	3.3	50	$3.2 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-2}$	$1.47 \times 10^{-3}$	2.5	154	$1.5 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-5}$
TCP	3.3	50	$1.5 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-2}$	$1.45 \times 10^{-3}$	2.5	188	$1.6 \times 10^{-2}$	$7.5 \times 10^{-5}$
PCP	3.3	15	$9.2 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-2}$	$1.45 \times 10^{-3}$	2.5	239	$1.7 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-4}$
TCE	3.3	50	$4.9 \times 10^{-1}$	$2.4 \times 10^{-2}$	$1.47 \times 10^{-3}$	2.5	56	$2.0 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-4}$
TOL	3.3	50	$3.0 \times 10^{-1}$	$3.4 \times 10^{-2}$	$1.44 \times 10^{-3}$	2.5	15	$2.4 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-5}$
MCB	1.7	35	$1.5 \times 10^{-1}$	$3.4 \times 10^{-2}$	$1.44 \times 10^{-3}$	2.5	5.7	$8.1 \times 10^{-3}$	$7.2 \times 10^{-5}$
TCB	1.7	39	$6.6 \times 10^{-2}$	$2.4 \times 10^{-2}$	$1.47 \times 10^{-3}$	2.5	4.5	$1.9 \times 10^{-2}$	$7.0 \times 10^{-5}$
NAP	1.7	15	$3.9 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$	$1.45 \times 10^{-3}$	2.5	11	$3.4 \times 10^{-2}$	$6.2 \times 10^{-5}$
CSA	3.3	50	-	$3.1 \times 10^{-2}$	$1.44 \times 10^{-3}$	2.5	14	$9.2 \times 10^{-2}$	$9.8 \times 10^{-5}$
CBA	3.3	50	-	$2.3 \times 10^{-2}$	$1.46 \times 10^{-3}$	2.5	7.1	$7.1 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-5}$

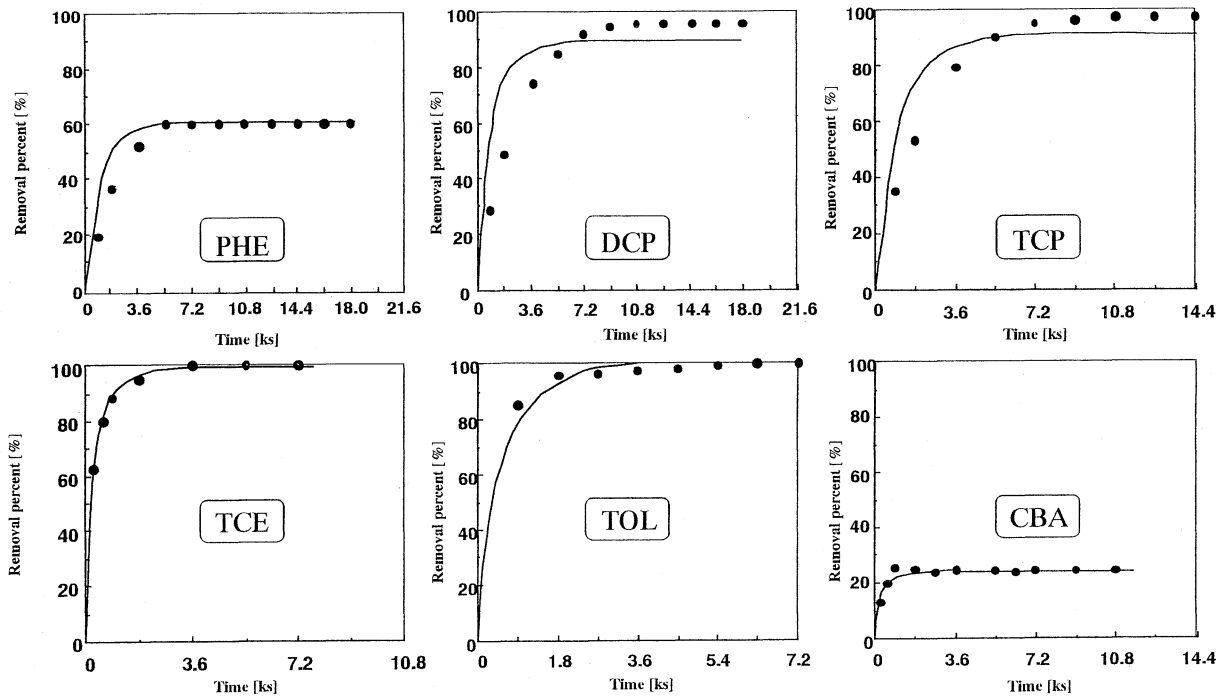


Fig. 4 Comparison between experimental and calculated values for removal of organic compounds by solvent sublation (Solid line shows the calculated values using the presented model).

平均気泡径  $a$  の決定には写真撮影法を用い、気泡を任意に 100 個サンプリングし、得られた気泡径を平均して求めた。気泡の境界膜厚  $d_i$  は Levich により調べられており、レイノルズ数が 800 以下のときには次式で推算できる (Levich, 1962)。

$$d_i = \left( \frac{\eta a}{\rho U} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (11)$$

気泡の上昇速度  $U$  は、水中での単一気泡の上昇速度と気泡径の関係が調べられているので、実測した平均気泡径からその上昇速度を推算した (Clift ら, 1978)。

3・3 計算値と実測値の比較

溶媒浮選法による有機物の除去モデル式にしたがって、得られた除去率の計算値と実測値を比較検討した。計算値は、Table 2

に示されている物性値および実験条件を Eqs. (4), (6) に代入して求めた。Fig. 4 はフェノール, ジクロロフェノール, トリクロロフェノール, トルエン, トリクロロエチレンおよびクロロサリチル酸の除去率の実測値と計算値を示しており, 図中の実線は計算値である。いずれの有機物についても除去率の実測値と計算値は概ねよい一致を示している。揮発性の高いモノクロロベンゼン, トリクロロベンゼン, トルエンおよびトリクロロエチレンについては実測値と計算値は良好に一致している。このことは, 気泡内への揮発による溶質の輸送機構は, ヘンリー定数とガス流量を用いることによって良好に表現できることを示唆している。フェノール, モノクロロフェノールおよびトリクロロフェノールは, 初期の除去率の実測値と計算値に幾分ずれを示した。気泡表面における有機物の吸着量は, Gibbs の吸着式に従って決定しており, この方法で得られる吸着量は水相中の有機物濃度に対する最大吸着量に相当する。しかし, 気泡のカラム内滞留時間が短いため, 有機物が気泡表面に吸着する量は最大吸着量に達していない可能性がある。このために, 溶媒浮選の初期で気泡表面への吸着による除去量の計算値が実測値より高く評価されたと考えられる。

有機物の全除去量に対する気泡および界面での物質移動により除去される割合を全除去量を 100% とし, それぞれの項の寄与率として式(4)の第 1 項~第 4 項から推算した。(1)気泡表面への吸着による除去, (2)気泡の境界層による除去, (3)気泡内への揮発による除去, および(4)水相-有機溶媒相の界面での物質移動による除去の各項目について, その寄与率を Table 3 に示した。分配係数が大きく蒸気圧の低いフェノール, モノクロロフェノールおよびトリクロロフェノールは, 主に気泡境界層への同伴と水相-有機溶媒相間での物質移動によって除去される。クロロフェノール化合物の除去において, 気泡境界層への同伴による除去が 56~72% と高い値になった。これらの有機化合物は水に対する溶解度が高く, 分配係数も高いので, 気泡の境界層に同伴された有機化合物が有機溶媒相に運ばれた後, 有機溶媒相に分配して高い値になったと考えられる。また, 塩素数が増加するにつれて溶解度が小さくなり, 気泡境界層への同伴による除去量は減少した。しかし, 気泡表面の吸着による除去量は塩素数の増加に伴わずかに増加した。ペンタクロロフェノールの除去では, 気泡表面への吸着の寄与が約 15% であり最も高い値を示した。溶解度が小さく, 蒸気圧の高い有機化合物であるモノクロロベンゼン, トルエンおよびトリクロロエチレンは気泡内に揮発して除去される量が全除去量の約 50~67% を占めた。この場合の除去率の値は有

機化合物の蒸気圧の大きさに依存しており, 気泡表面の吸着によってはほとんど除去されない。ナフタレン, クロロ安息香酸およびクロロサリチル酸は蒸気圧および表面張力が小さく, 物質移動係数が大きいので, 水相-有機溶媒相間の物質移動の寄与が 64~77% と高い値を示し, 気泡境界層への同伴による除去が 20~30% を占める。

Fig. 5 に全体の除去率に占める各項目(1)~(4)の寄与率を示した。すなわち, 全体の除去率には Fig. 2 および Fig. 3 に示した実験から得られる値を用い, その全除去率に占める各項目の寄与率を表した。一般的に蒸気圧が高く, 気泡内への同伴の寄与が大きい有機化合物は全体の除去率も高いといえる。気泡境界層への同伴による寄与が大きい場合には, 全体として高い除去率を得ることが困難である。この原因は気泡境界層に同伴された有機物はいったん有機溶媒相に除去された後, いくらかが再び水相にもどるためである。この量は分配係数によって支配される。フェノール, モノクロロフェノール, ジクロロフェノール, トリクロロフェ

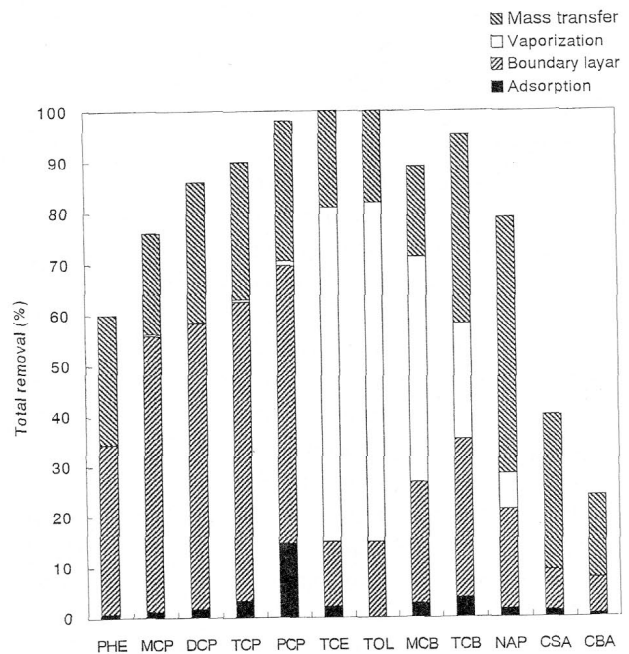


Fig. 5 Total removal percent and contribution percent of 3 terms of bubbles and mass transfer.

Table 3 Contribution percent of bubbles and mass transfer for removal of some organic compounds (These values are calculated from model equation).

	PHE	MCP	DCP	TCP	PCP	TCE	TOL	MCB	TCB	NAP	CSA	CBA
Adsorption [%]	1.0	1.5	1.8	3.5	15	2.0	0	3.0	4.0	2.0	3.0	2.0
Boundary layer of bubbles [%]	56	72	66	66	56	13	15	27	33	25	20	30
Vaporization in bubbles [%]	0	0.5	0.2	0.5	1.0	66	67	50	24	9.0	0	0
Mass transfer [%]	43	26	32	30	28	19	18	20	39	64	77	68

ノールおよびペンタクロロフェノールは、気泡境膜層への同伴による除去と、水相-有機溶媒相間の物質移動の寄与が支配的であるが、先に述べた理由から分配係数の高い有機化合物ほど全体の除去率は高くなる。ほとんどの有機化合物は気泡への吸着による除去の寄与は低く、pHの調節および界面活性剤の添加など、何らかの操作によって気泡表面への吸着が促進されるならば、さらに高い除去率が期待できる。溶媒浮選法による有機化合物の除去率に対する各項目の寄与率は、対象とする有機物の物性(蒸気圧、溶解度、分配係数、表面張力)と密接に関係していることが明らかになった。

#### 4. 結 言

水溶液中の微量有害有機物の除去に溶媒浮選法を適用した。溶媒浮選法を用いる利点は、エアレーションではほとんど除去できない蒸気圧の低い有機物に対しても効率的な除去が可能な点にある。溶媒浮選法による除去機構のモデル化により計算されたそれぞれの有機物の除去率は実測値とよい一致を示した。したがって、溶媒浮選法の除去機構は、水溶液中の有機物の気泡への吸着、気泡境膜層への同伴、気泡内への揮発のような気泡に関わる項とカラム上部に設けた有機溶媒相への物質移動の項から成り立っていると考えられる。

#### 使用記号

$a$	= diameter of a bubble	[cm]
$C_w, C_o$	= solute concentration	[mg/cm <sup>3</sup> ]
$C_{wi}$	= initial solute concentration	[mg/cm <sup>3</sup> ]
$d_i$	= thickness of boundary layer of a bubble	[cm]
$H_c$	= Henry's constant	[-]
$K_{ad}$	= adsorption constant	[cm]
$K_1$	= mass transfer coefficient	[cm/s]
$K_{ow}$	= partition coefficient	[-]
$M$	= molecular weight	[-]
$P_{vap}$	= vapor pressure	[Pa]
$Q_a$	= gas flow rate	[cm <sup>3</sup> /s]
$r_c$	= radius of column	[cm]
$R$	= gas constant	[J/K · mol]
$R_e$	= removal percentage of solute from aqueous phase	[%]
$S$	= aqueous solubility	[mg/cm <sup>3</sup> -water]

$t$	= time	[s]
$U$	= velocity of a rising bubble	[cm/s]
$V_w, V_o$	= phase volume	[cm <sup>3</sup> ]
$X$	= whole amount of solute removed	[mg]
$X_1$	= amount of solute removed by bubbles	[mg]
$X_2$	= amount of solute removed by mass transfer	[mg]
$X_3$	= amount of solute returning to the aqueous phase	[mg]
<Greek>		
$\Gamma$	= amount of solute adsorbed at interface	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$\gamma$	= surface tension	[N/m]
$\eta$	= viscosity	[Pa · s]
$\rho$	= density	[g/cm <sup>3</sup> ]

#### 引 用 文 献

- Clarke, A. N. and Wilson, D. J. (1983): "Foam Flotation Theory and Application", Marcel Dekker, p. 317-334, p. 341-353
- Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E. (1978): "Bubbles, Drops and Particles", Academic Press, p. 169-202
- エッケンフェルダール・市川邦介・前田嘉道 (1976): 産業排水の処理, p. 1-27, p. 261-268
- Grievies, R. B. (1975): The Chem. Eng. J., Vol. 9, p. 93-106
- 木田泰孝・松本茂野・山本秀樹・芝田隼次 (1996): 化学工学会第 61 年会研究発表講演要旨集, p. 148
- Levich, V. G. (1962): "Physicochemical Hydrodynamics", Prentice-Hall, p. 434-448
- Lewis, J. B. (1954): Chem. Eng. Sci., Vol. 3, p. 260-278
- Mahne, E. J. and Pinfeld, T. A. (1968): J. Appl. Chem., Vol. 18, p. 52-55
- Sebba, F. (1962): "Ion Flotation", Elsevier, p. 112-117
- 芝田隼次・徳永 宏 (1995): "化学工学論文集", Vol. 21, NO. 2, p. 327-333
- 芝田隼次・木田泰孝・深田尚司 (1995): 化学工学会第 60 年会研究発表講演要旨集, p. 145
- Tamamushi, K. and Wilson, D. J. (1984): Sep. Sci. Technol., Vol. 19, p. 1013-1023
- Valsaraj, K. T. and Thibodeaux, L. J. (1991): Sep. Sci. Technol., Vol. 26, p. 37-58
- Valsaraj, K. T. and Thibodeaux, L. J. (1991): Sep. Sci. Technol., Vol. 26, p. 367-380
- Valsaraj, K. T., Porter, J. L., Lijenfeldt, E. K. and Springer, C. (1986): Water Research, Vol. 20, p. 1161-1175