

車載ウィンドウウォッシャー液を利用した車室内用簡易空気清浄法の開発

Simple Air Cleaning Method using Windshield Washer Fluid for Car Cabin

○徳村雅弘¹⁾(会員)、達晃一^{1,2)}(会員)、畑山瑠莉香¹⁾(学生会員)、益永茂樹¹⁾(非会員)

1) 横浜国立大学、2) (株)いすゞ中央研究所

○Masahiro TOKUMURA¹⁾, Kouichi TATSU^{1,2)}, Rurika HATAYAMA¹⁾ and Shigeki MASUNAGA¹⁾

1) Yokohama National University, 2) Isuzu Advanced Engineering Center, LTD.

Abstract: An air-cleaning method that uses windshield washer fluid to remove the volatile organic pollutants from the car indoor air was investigated. The volatile organic pollutants are proposed to dissolve into the windshield washer fluid. To evaluate the feasibility of the air-cleaning method, a simulation model was developed. The simulation results show that formaldehyde, which is a hydrophilic volatile organic pollutant, is removed by the proposed air-cleaning method. Even after one month of continuous use of the proposed air-cleaning method, high removal efficiency was maintained.

キーワード：空気清浄法、ホルムアルデヒド、自動車、揮発性有機化合物、スクラバー

1. 緒言

我々は日本国内の 25 台の乗用車に対し、55 種類の揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds; VOCs) およびアルデヒド類の車室内空気質汚染実態調査を行った¹⁾。本結果より、ホルムアルデヒドのヒト健康リスクが特に高く、対策の必要があることが明らかとなった。ホルムアルデヒドは、揮発性が高く、親水性であるため、吸着剤として汎用的に用いられている活性炭での除去が難しい。また、既存の酸化分解式の空気清浄機は、OH ラジカルによる分解が主な除去メカニズムであるため、電子密度の低いホルムアルデヒドは反応性が低く、除去が困難である。

本研究で提案する空気清浄法は、車に搭載されているウォッシャータンクを改造し、ウェットスクラバーとして用いることで、車室内中の揮発性有機汚染物質をウィンドウウォッシャー液にガス吸収することで空気清浄を行う。ウィンドウウォッシャー液はすべての車に搭載されているため、カーエアコンの配管を変更するだけで空気を清浄することが可能となる。また、吸着剤を使うこともないので、維持費用がかからない。加えて、分解反応を含まないため、有害な二次汚染物質の再放散を防ぐことができる。

本研究では、最もリスクの高かったホルムアルデヒドを中心に、車室内に存在する 55 種類の揮発性有機汚染物質に対して、提案する空気清浄法の妥当性を検討するため、シミュレーションモデルを作成し、処理性能の推定を行った。シミュレーションの不確実性を考慮するため、感度解析を行った。また、1 ヶ月間連続使用した場合の繰り返し性能およびリスクの低減効果の評価も行った。

2. 方法

車室内における揮発性有機汚染物質 i の気相濃度 $Y_{CC,i}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] は以下の式で計算できる。

$$\frac{dY_{CC,i}}{dt} = \frac{Q}{V_{CC}} (Y_{out,i} - Y_{CC,i}) \quad (1)$$

ここで t は時間 [min]、 Q は空気清浄機への導入ガス流量 [m^3/min]、 V_{CC} は車の容積 [m^3]、 $Y_{out,i}$ は揮発性有機汚染物質 i の空気清浄装置出口における気相濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] である。

揮発性有機汚染物質 i の空気清浄装置内での気相濃度 Y_i は、以下の式で求められる。

$$\frac{dY_i}{dt} = \frac{(1-\varepsilon)Q}{\varepsilon V_R} (Y_{in,i} - Y_i) - \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} k_L a_{L,i} (C_i^* - C_i) \quad (2)$$

ここで ε はガスホールドアップ [-]、 $Y_{in,i}$ は揮発性有機汚染物質 i の空気清浄装置の入り口の気相濃

度 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ 、 V_R は空気清浄装置の体積 $[\text{m}^3]$ 、 $k_{LA,i}$ は揮発性有機汚染物質 i の総括物質移動係数 $[\text{min}^{-1}]$ 、 C_i^* は揮発性有機汚染物質 i の飽和濃度 $[\text{mol}/\text{m}^3]$ 、 C_i は揮発性有機汚染物質 i の空気清浄装置内での液相濃度 $[\text{mol}/\text{m}^3]$ を表す。ガスホールドアップ ϵ は以下の式で推算できる。揮発性有機汚染物質 i の総括物質移動係数 $k_{LA,i}$ は以下の Shar の式を Higbie の浸透説をもとに補正し求めた。

揮発性有機汚染物質 i の空気清浄装置内での液相濃度 C_i $[\text{mol}/\text{m}^3]$ は、以下の式で求められる。

$$\frac{dC_i}{dt} = k_{LA,i} (C_i^* - C_i) \quad (3)$$

式(1-3)の3本の常微分方程式を、4次精度のルンゲクッタ法により解くことで、揮発性有機汚染物質 i の空気清浄装置内の気相および液相濃度と車室内の気相濃度を求めた。ウィンドウウォッシャー液の物性は純水と仮定し、容量は3Lとし、車内の空間容積は 3m^3 とした。導入ガス流量は $5\text{m}^3/\text{h}$ とした。

3. 結果と考察

一般的な車の使用の場合（通勤、買い物など）[Typical use]、1回30分乗車で一日1往復、業務利用の場合 [Occupational use] は一日8時間乗車として、その間における車室内空気中の揮発性有機汚染物質の本空気清浄法による除去性能を、シミュレーションモデルを用いて推算を行った。55種類の揮発性有機汚染物質の初期濃度には、既往研究における車室内空気中の揮発性有機汚染物質濃度の調査結果を用いた¹⁾。計算結果を Table 1 に示す。親水性であるアルデヒド類、特にホルムアルデヒドに対し、高い除去率 (Removal Efficiency; RE%) が得られた。車室内濃度の高い疎水性であるトルエンやヘキサンに関しては、ウィンドウウォッシャー液に含まれる界面活性剤の効果により除去率が向上する可能性が考えられる。

4. まとめ

本空気清浄法は、ホルムアルデヒドについて高い除去性能を発揮し、連続使用シミュレーションでは、1ヶ月後でも35%の除去率を維持した。また、感度解析の結果、最も影響の大きいパラメータは空気清浄装置への導入ガス流量であった。

Table 1 Removal efficiencies of 55 organic pollutants by the proposed air cleaning method.

VOCs and Aldehydes	Observed concentration $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ ¹⁾		Simulated concentration after treatment $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$							
	Median	Max	Typical use (30 min)				Occupational use (8 h)			
			Median	RE%	Max	RE%	Median	RE%	MAX	RE%
Acetaldehyde	13.4	36.0	10.5	21.1	28.4	21.1	9.8	26.9	26.3	26.9
Benzaldehyde	0.02	0.02	0.01	33.3	0.01	33.3	0.01	47.8	0.0	47.8
Benzene	0.6	11.3	0.6	0.4	11.3	0.4	0.6	0.5	11.3	0.5
<i>n</i> -Butanol	3.8	9.6	2.1	46.2	5.2	46.2	1.0	73.5	2.5	73.5
Butylacetate	0.02	3.7	0.01	55.4	1.6	55.4	0.00	97.0	0.1	97.0
Cyclohexane	3.2	85.7	3.2	0.0	85.6	0.0	3.2	0.0	85.6	0.0
<i>n</i> -Decanal	0.03	2.4	0.03	1.1	2.4	1.1	0.03	1.4	2.4	1.4
<i>n</i> -Decane	0.03	22.7	0.03	0.0	22.7	0.0	0.03	0.0	22.7	0.0
Dichloromethane	6.5	69.4	6.4	0.7	68.9	0.7	6.4	0.8	68.8	0.8
Diethylether	0.3	25.2	0.3	1.7	24.7	1.7	0.3	2.0	24.7	2.0
<i>n</i> -Dodecane	1.3	8.5	1.3	0.0	8.5	0.0	1.3	0.0	8.5	0.0
Ethylacetate	2.7	20.5	1.2	55.8	9.1	55.8	0.1	97.9	0.4	97.9
Ethylbenzene	3.8	8.1	3.8	0.3	8.1	0.3	3.8	0.3	8.1	0.3
2-Ethylhexanal	2.1	6.9	2.1	2.6	6.7	2.6	2.1	3.2	6.6	3.2
Formaldehyde	9.4	26.7	4.1	56.0	11.7	56.0	0.1	98.6	0.4	98.6
<i>n</i> -Heptane	1.5	7.7	1.5	0.0	7.6	0.0	1.5	0.0	7.6	0.0
<i>n</i> -Hexanal	0.02	7.6	0.02	8.5	6.9	8.5	0.02	10.3	6.8	10.3
<i>n</i> -Hexane	11.5	22.7	11.5	0.0	22.7	0.0	11.5	0.0	22.7	0.0
Isopropylbenzene	0.02	3.3	0.02	0.2	3.3	0.2	0.02	0.2	3.3	0.2
Limonene	0.03	3.9	0.03	0.1	3.9	0.1	0.03	0.1	3.9	0.1
Methylcyclohexane	1.5	7.9	1.5	0.0	7.9	0.0	1.5	0.0	7.9	0.0
Methylcyclopentane	2.7	13.5	2.7	0.0	13.5	0.0	2.7	0.0	13.5	0.0
1-Methyl-2-ethylbenzene	1.8	31.7	1.8	0.4	31.5	0.4	1.8	0.5	31.5	0.5
1-Methyl-3-ethylbenzene	1.6	20.6	1.6	0.2	20.6	0.2	1.6	0.3	20.6	0.3
1-Methyl-4-ethylbenzene	1.4	83.9	1.4	0.4	83.5	0.4	1.4	0.5	83.5	0.5
MethylEihylketone	4.1	13.2	3.2	23.1	10.2	23.1	2.9	30.1	9.2	30.1
2-Methyloctane	0.03	5.9	0.03	0.0	5.9	0.0	0.03	0.0	5.9	0.0
2-Methylpentane	0.8	7.2	0.8	0.0	7.2	0.0	0.8	0.0	7.2	0.0
2-Methylpropane	0.01	310	0.01	0.0	310	0.0	0.01	0.0	310	0.0
3-Methylpentane	2.0	343	2.0	0.0	342	0.0	2.0	0.0	342	0.0
Naphthalene	0.03	5.9	0.02	4.9	5.6	4.9	0.02	5.3	5.6	5.3
<i>n</i> -Nonanal	0.03	2.2	0.03	2.7	2.1	2.7	0.03	3.3	2.1	3.3
<i>n</i> -Nonane	1.0	12.2	1.0	0.0	12.2	0.0	1.0	0.0	12.2	0.0
<i>n</i> -Octanal	2.2	29.9	2.1	3.7	28.7	3.7	2.1	4.6	28.5	4.6
<i>n</i> -Octane	1.7	21.4	1.7	0.0	21.4	0.0	1.7	0.0	21.4	0.0
1-Propanol	5.2	15.1	2.7	47.8	7.9	47.8	1.2	76.8	3.5	76.8
2-Propanol	0.01	0.5	0.01	47.2	0.2	47.2	0.00	75.1	0.1	75.1
<i>p</i> -Dichlorobenzene	1.1	209	1.1	0.9	207	0.9	1.1	1.0	207	1.0
<i>n</i> -Pentane	0.01	34.7	0.01	0.0	34.7	0.0	0.01	0.0	34.7	0.0
<i>n</i> -Propylbenzene	0.02	4.6	0.02	0.2	4.6	0.2	0.02	0.3	4.6	0.3
α -Pinene	0.03	3.1	0.03	0.0	3.1	0.0	0.03	0.0	3.1	0.0
Styrene	0.02	3.2	0.02	0.8	3.2	0.8	0.02	0.9	3.2	0.9
1,2,3-Trimethylbenzene	0.2	163	0.2	0.5	162	0.5	0.2	0.6	162	0.6
1,2,4-Trimethylbenzene	0.02	1.4	0.02	0.4	1.4	0.4	0.02	0.4	1.4	0.4
1,3,5-Trimethylbenzene	0.2	4.6	0.2	0.3	4.6	0.3	0.2	0.3	4.6	0.3
Tetrachloroethylene	0.03	4.4	0.03	0.2	4.4	0.2	0.03	0.2	4.4	0.2
<i>n</i> -Tetradecane	2.3	47.7	2.3	0.0	47.7	0.0	2.3	0.0	47.7	0.0
Tetrahydrofuran	0.01	9.6	0.01	20.3	7.7	20.3	0.01	25.8	7.2	25.8
Toluene	23.5	78.3	23.4	0.4	78.0	0.4	23.4	0.4	78.0	0.4
1,1,1-Trichloroethane	3.4	48.3	3.4	0.2	48.2	0.2	3.4	0.2	48.2	0.2
<i>n</i> -Tridecane	0.4	113	0.4	0.0	113	0.0	0.4	0.0	113	0.0
<i>n</i> -Undecanal	0.3	78.0	0.3	1.5	76.9	1.5	0.3	1.8	76.6	1.8
<i>n</i> -Undecane	1.3	6.2	1.3	0.0	6.2	0.0	1.3	0.0	6.2	0.0
<i>m,p</i> -Xylene	3.6	17.4	3.6	0.4	17.4	0.4	3.6	0.5	17.3	0.5
<i>o</i> -Xylene	1.6	5.3	1.6	0.4	5.2	0.4	1.6	0.5	5.2	0.5
TVOC*	75.9	1514	75.6	0.4	1504	0.6	75.5	0.5	1501	0.8

*TVOC (Total VOC) concentration was calculated between C_6 to C_{16} .

参考文献

1) Tokumura et al., Atmospheric Environment, submitted, 2015