

## 話 題

NIOSH MultiVapor™ を用いた  
活性炭層の有機ガス破過時間の推算Estimation of Organic Vapor Breakthrough  
Time of Activated Carbon Bed Using  
NIOSH MultiVapor™ Software安彦 泰進<sup>1</sup><sup>1</sup> 独立行政法人労働安全衛生総合研究所 環境計測管理研究  
グループHironobu ABIKO<sup>1</sup><sup>1</sup>Work Environment Research Group, National Institute of  
Occupational Safety and Health, Japan

doi: 10.1539/sangyoeisei.wadai13001

キーワード: Activated carbon, Breakthrough time, Estima-  
tion, Organic vapor, Respirator, Wheeler-Jonas equation

## 1. 緒 言

有機ガス用の呼吸保護具吸気筒などに見られる活性炭層の利用可能時間は、入口のガス濃度に対する出口のガス濃度の時間変化を表した破過（はか）状態から、破過時間・破過濃度という定義を基に多くの議論がなされている<sup>1-3</sup>。破過状態に影響する要素は多く、これまでに活性炭層の適切な利用に向けて、各種の有機ガスと使用条件に対する破過状態の実測の努力がなされると共に、数式モデルによる予測への期待も存在している<sup>1,2</sup>。

前稿<sup>3</sup>では、活性炭層での破過状態を表した代表的な数式モデルである Wheeler-Jonas 式<sup>4-7</sup>を紹介し、直径として数 cm から数 mm 程度である小型の円筒状活性炭層での有機ガス破過に同式を適用した場合の有効性

についての検討を記した。あらためて同式の構成の例を以下に示す。

$$t_b = \frac{W_e W}{C_0 Q} - \frac{\rho_B W_e}{k_0 C_0} \ln \left( \frac{C_0 - C}{C} \right) = W_e \left\{ \frac{W}{C_0 Q} - \frac{\rho_B}{k_0 C_0} \ln \left( \frac{C_0 - C}{C} \right) \right\} \quad (1)$$

 $t_b$  = 破過時間 [min] $W_e$  = 活性炭の単位重量あたりの有機ガス吸着容量 [g/g] $W$  = 活性炭層の重量 [g] $C_0$  = 入口ガス濃度 [g/cm<sup>3</sup>] $Q$  = ガス流量 [cm<sup>3</sup>/min] $\rho_B$  = 活性炭層のかさ密度 [g/cm<sup>3</sup>] $k_0$  = 吸着速度定数 [min<sup>-1</sup>] $C$  = 破過濃度（出口ガス濃度）[g/cm<sup>3</sup>]

2004年、ロスアラモス国立研究所 (Los Alamos National Laboratory (LANL), USA) の研究者であった G. O. Wood は、上記の Wheeler-Jonas 式を中心とする活性炭層の破過時間の詳細な推算モデルを報告した<sup>6,8</sup>。このモデルは、前稿に示したような Wheeler-Jonas 式の単独での破過状態への適用から発展して、吸着対象の有機ガスの種類、使用環境の温度・相対湿度などを考慮に入れており、より詳細な推算が可能である。活性炭層のガス吸着性能のうち、特に吸着容量は湿度の影響によって減少することが知られている<sup>9-12</sup>。これは実際の活性炭層の利用では、事前に乾燥雰囲気下で保管するか、または使用の直前までに十分に乾燥させることで抑えることができるが、ここでの推算は湿度が破過時間にどの程度の影響をもたらすかという予防的知見を得るものである。Wood はさらに、複数種類の有機ガスが同時に吸着する場合の破過時間推算モデルについても報告している<sup>13</sup>。本稿ではその詳細までは触れないが、ここでは式 (1) での活性炭の単位重量あたりの有機ガス吸着容量  $W_e$  は、混合溶液における各成分のモル分率と蒸気圧の関係を表した Raoult の法則などにより、各有機ガスそれぞれに相当する容量にさらに分けて考慮の上で計算が行われている。

さらに近年、アメリカ合衆国・労働安全衛生研究所 (National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), USA) の National Personal Protective Technology Laboratory (NPPTL) では、上記の Wood の破過時間推算モデルを基にしたソフトウェア MultiVapor™ (以降は MultiVapor と記載する。) をウェブサイト上で公開している<sup>14</sup>。この MultiVapor は、前述の Wood の破過時間推算モデルに多くの人が比較的容易に触れることができるツールとして大きな関心を持たれる。しかし、その一方で MultiVapor から得られる計算結果についてはその妥当性をはじめとして多くのことが現在のところまだ明らかではなく、今後の具体的な応用に向けて、

2013年5月20日受付；2013年7月22日受理  
J-STAGE 早期公開日：2013年8月21日連絡先：安彦泰進 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾  
6-21-1 独立行政法人労働安全衛生総合研究所 環境計測管理  
研究グループCorrespondence to: H. Abiko, Work Environment Research  
Group, National Institute of Occupational Safety and Health,  
6-21-1 Nagao, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8585, Japan  
(e-mail: abiko-h@umin.ac.jp)

より詳しい検証と検討が進められる必要が大きいと言える。

ここで本稿では MultiVapor 2.2.3 とその利用方法について紹介するとともに、上記の検討を行うにあたって、呼吸保護具吸収缶に見られる大きさの活性炭層を対象とした日本国内での既報中にある有機ガス破過データを利用し、まず単一種類の有機ガスでの破過状態に同ソフトウェアを適用した場合の有効性について確認した結果を以下に示す。

## II. NIOSH MultiVapor™ の概要

MultiVapor 2.2.3 は、Multi という語句に示されるように5種類までの有機ガスが混合した状態での破過を想定した計算が可能である。MultiVapor は現在、Microsoft Windows での32ビット及び64ビットオペレーティングシステム (OS) に対応する MultiVapor 2.2.3 (732KB, 使用言語は英語のみ。) の無償でのダウンロードが提供されている。MultiVapor は2012年12月末までに公開されていたプログラムでは32ビットOSのみが対象となっており、さらに筆者が同プログラムのインストールを試行した結果では、Windows XPでは問題なく作動したものの、それ以降のOSであるWindows Vista, Windows 7では条件入力や実行の途中でエラーメッセージが表示され計算ができないという問題を残していた<sup>15)</sup>。しかし、2013年1月以降に公開されたプログラムでは最近のOSでの利用も行えるものとなっている。

MultiVapor 2.2.3 での破過時間推算の実行にあたっては、

- (1) 活性炭層の物性値
- (2) 有機ガスの性質に関するデータ
- (3) ガス流量・温度・相対湿度などの使用条件

の3事項のデータの入力が順に必要である。それぞれの入力項目と呼吸保護具吸収缶での数値の例を Table 1 から Table 3 までに示す。これらの Table の番号は、MultiVapor 2.2.3 の実行において入力を要求される画面が現れる順である。Table 1 での条件入力に際して、特に Micropore volume (マイクロ孔容積), Adsorption potential (吸着エネルギー、ここではベンゼンを基準とする。), Affinity coefficient for water (水への親和係数) については、厳密には既報<sup>6)</sup> に示したように専門の測定装置を使用して、推算の対象とする活性炭に関する物性値を事前に得る必要がある。ただし、これらの各項目を直接入力する方法のほかに、MultiVapor 2.2.3 では吸収缶における代表的な値 (cartridge (小型吸収缶), canister (大型吸収缶) の2種類) が最初から登録されており、それらを使用することも可能である。

同様に、Table 2 に示した有機ガスの性質に関する

**Table 1.** Input conditions of cartridge or carbon bed data in MultiVapor 2.2.3, and the values used for estimation in Table 4, Table 6, Fig.1 and Fig.2

Input condition	Value
Bed diameter / cm	8
Bed depth / cm	2
Carbon weight per cartridge or bed / g	22
Micropore volume / cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>	0.533
Preconditioned relative humidity / %	50
Carbon granule average diameter / cm	0.22
Adsorption potential (for Benzene) / kJ mol <sup>-1</sup>	18.666
Affinity coefficient for water / dimensionless number	0.06

**Table 2.** Organic vapor data used in the calculation by MultiVapor 2.2.3

Input data
Name
CAS Number (Chemical Abstracts Service Registry Number)
Molecular weight / g mol <sup>-1</sup>
Liquid density / g cm <sup>-3</sup>
Molar polarization / cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup>
Water solubility factor
Average vapor concentration / ppm
Antoine vapor pressure parameters
<i>A, B, C</i>
$P = A - B / (T + C)$
<i>P</i> / Torr, <i>T</i> / K
1 Torr = 1 mmHg

**Table 3.** Use conditions data of cartridge or carbon bed used in MultiVapor 2.2.3 and the values used for estimation in Table 4 and Fig.1

Input condition	Value
Temperature / °C	20
Atmospheric pressure / atm	1
Relative humidity / %	50
Number of cartridges on a respirator	1
Average breathing air flow / L min <sup>-1</sup>	30
Vapor concentration / ppm	300
Breakthrough concentration / ppm	5

データについても、直接入力する方法のほかにはあらかじめプログラム中に登録されている物質名 (728個) を選択し、それらのデータを読み出して使用することもできる。これは Table 2 での物質名または CAS Number を入力することによって自動的に読み出しがなされる。しかし、あらかじめ登録されていない有機ガスに関するデータについては直接入力する必要がある。それらのうち、使用条件として定まる Average vapor

concentration (平均ガス濃度) 以外は各種の便覧, ハンドブックなどのデータ集<sup>16-19)</sup>を参照して値を得ることができる<sup>9)</sup>. ただし, それらのうち Water solubility factor (水への溶解度因子) だけはその定義が明らかでない. 多くの場合に, ある物質の水への溶解度 (Water solubility) は水の単位重量または体積あたりに溶解する重量または体積などで表されるが, ここでは Water solubility の後に factor という語句が付加されており, さらにあらかじめ登録されている物質での値も各データ集に掲載されているものとは異なっている. 詳しく見ると, MultiVapor 2.2.3 では Acetone cyanohydrin (アセトンシアノヒドリン) での Water solubility factor が 1.0000 となっている. 他の登録されている物質での値との比較の結果から, おそらくここではアセトンシアノヒドリンでの水への溶解度を基準とした相対的な値が使用されているものと考えられる.

以上の一連のデータの入力に基づき, 各有機ガスの破過時間の計算が行われる.

### III. 対象と方法

呼吸保護具吸収缶や, それを模した小型の活性炭カラムによる有機ガス破過測定<sup>20)</sup>の日本国内での報告例のなかで, 田中らは多くの種類の有機ガスを使用した破過状態の測定結果をこれまでに示している<sup>20, 21)</sup>. 今回はそれらのなかの実測データを利用して, MultiVapor による推算結果との比較検討を行った.

### IV. 結果と考察

本稿での計算に使用した活性炭層のデータは Table 1 に示すとおりである. 田中らの既報には, 使用された活性炭の重量以外の物性値のデータは記載がなく, 過去の製品ということもあり詳細は明らかでない. それらの物性値は厳密には活性炭製品それぞれに対していくらかの違いがあるが<sup>22, 23)</sup>, ここではまずおおその破過時間の推算結果を得るために, Table 1 に示される重量以外のデータは MultiVapor 2.2.3 にあらかじめ登録されている代表的なデータ (cartridge) を参考にして数値を適用することとした.

田中らは Table 3 に示される測定条件の下に, 46 種類の有機ガスの破過時間の実測データを報告している<sup>20)</sup>. それらのうち異性体の区別が難しかったものなどを除き, MultiVapor 2.2.3 での計算結果を得た 34 種類の有機ガスについて推算値と実測データとの比較を Table 4 に示した. ここでは左から 2 列目に示される実測データに対して, 3 列目から 5 列目まで 3 つの推算値が示されている. MultiVapor 2.2.3 の計算では, 通常の推算値の他

に最小値, 最大値の合計で 3 つの推算値が示される. 筆者が MultiVapor 2.2.3 を操作した印象では, 通常の推算値と最小値, 最大値との違いはそれぞれほぼ同じく取られているように見受けられる (ただし, そのままでは最小値がマイナスの値となる場合は, いずれも 0 分と結果が表示されているように見受けられる). 3 つの推算値のうち, 最小値, 最大値の算出の根拠はウェブサイト上の説明からも明らかでない<sup>14, 24)</sup>. この根拠について考えると, Wood の破過時間推算モデルでは, 式 (1) での吸着速度定数  $k_0$  に相当する箇所を中心として, 理論式だけではなく経験的な要素を多く含む式がいくつか採用されている. しかし, Wood らによる既報中のグラフからは, これらの経験式のなかには必ずしも精確さが高いと見えないものもある<sup>25, 26)</sup>. よって MultiVapor においては, その点の不足を補うために推算結果に幅を取り, 3 つの推算値を提供するかたちを採っていることが予想される.

まず Table 4 における結果では, 計算結果のうち最小値はほとんどが 0 分であり, 明らかに実測データとは見合っていない. 田中らの測定<sup>20, 21)</sup>では有機ガス用の直結式小型マスク用吸収缶である日本国内製品が使用されている. これには Table 3 での測定条件において, シクロヘキサンを対象として破過時間が 50 分以上のものであることが求められており<sup>27)</sup>, 国家検定が実施されている<sup>28)</sup>. そのことから考えても, ここでの最小値における一連の推算の結果はあまり有意なものとは見なしがたい.

そこで通常の推算値と最大値について, 実測データとグラフ上での比較を行った (Fig. 1). ここでは, 横軸が実測データ, 縦軸が計算値を示しており, グラフ上のプロットが図中にある斜線 ( $y=x$ ) に近いほど計算値が実測データに見合っていることを示す. 比較の結果, 通常の推算値では実測データからはいずれも外れており, 全体的に推算値が低い水準にある (Fig. 1 (a)). 一方, 最大値の場合は, やはり外れてはいるものの実測データといくらか見合った結果となっている (Fig. 1 (b)).

田中らは同じ活性炭層を使用して, 6 種類 (アセトン, アクリロニトリル, 四塩化炭素, ジメチルホルムアミド, トルエン, 二硫化炭素) の有機ガスにより, ある一定の破過濃度に対して入口ガス濃度を変えていった場合の破過時間の測定結果も報告している<sup>21)</sup>. それらのデータのうち, あらかじめ MultiVapor 2.2.3 に有機ガスの性質のデータの登録があった 4 種類について, 同様に MultiVapor 2.2.3 での計算を行った. ここでの測定条件を Table 5 に, 計算の結果を Table 6 に示すとともに, 通常の推算値と最大値について実測データとグラフ上での比較を行った (Fig. 2). その結果として, Table 4 と同様に最小値はほとんどが 0 分であった (Table 6).

**Table 4.** Experimental data of organic vapor breakthrough time of an activated carbon bed by Tanaka *et al.*<sup>20)</sup>, and the results of estimation by MultiVapor 2.2.3

Organic vapor	Measurement breakthrough time /min	Ordinary estimation by MultiVapor 2.2.3 / min	Minimum estimation by MultiVapor 2.2.3 / min	Maximum estimation by MultiVapor 2.2.3 / min
Cyclohexane	124	52.5	0	153
Methanol	1.8	0	0	0
Dichloromethane	28.1	0	0	0
Acetone	63.5	0	0	0
Methyl acetate	78	0	0	0
Ethyl ether (Diethyl ether)	80.7	0	0	0
Chloroform	97	29	0	105
n-Hexane	109.7	33.9	0	120
Ethyl acetate	126.9	35.2	0	121
Carbon tetrachloride	131.4	55.8	0	160
Pentyl acetate	134.2	79.6	0	189
Isobutyl acetate	142	55.8	0	155
1,1,1-Trichloroethane	137.8	49.4	0	148
2-Propanol (Isopropyl alcohol)	142.3	52.3	0	166
Isopentyl acetate	145	75.8	0	184
2-Butanone (Methyl ethyl ketone)	145	33.9	0	119
Isopropyl acetate	145.9	50.6	0	150
1,1-Dichloroethane	154.1	19.1	0	77
Propyl acetate	158.6	65.1	0	176
Tetrahydrofuran	165	23.1	0	91
Butyl acetate	169.5	92.7	0	204
4-Methyl-2-pentanone (MIBK)	173.1	74.9	0	189
Toluene	175.8	93.9	0	215
Tetrachloroethylene	176.7	107	0	234
Trichloroethylene	184.9	70.7	0	188
1,1,2,2-Tetrachloroethane	191.3	128.7	0	261
Ethylene glycol monomethyl ether (Methyl cellosolve)	194	121.6	0	277
2-Butanol	198.5	92.4	0	228
Chlorobenzene	203.9	118.8	0	248
Styrene	208.5	117.1	0	239
Ethylene glycol monoethyl ether (Cellosolve)	212.1	154.2	2	306
Ethylene glycol monoethyl ether acetate (Cellosolve acetate)	219.4	103.6	0	233
Cyclohexanone	223	126.7	0	267
1-Butanol	224.8	125.5	0	274

通常の推算値では実測データからいずれも外れており、推算値が全体的に低い水準にある (Fig. 2 (a)). 一方、最大値の場合は、アクリロニトリルを除いてそれぞれの入口ガス濃度の場合について、実測データとかなり近い結果となった (Fig. 2 (b)). ただし、推算結果に対するその他の明瞭な物質依存性などは今回の結果からは見いだすことはできなかった。ここまでの推算結果については、既報<sup>22, 23)</sup>の値を参考に Table 1 での活性炭に関する物性値をいくらか変えてみた場合にもほぼ同様の傾向であった。

MultiVapor の基となっている Wood の破過時間推算モデルについては既に詳細が明らかとされており、我々はその問題点と予想される改善方法を過去に指摘して

いる<sup>6, 7, 12, 15)</sup>。ただし、入力するデータと計算結果として与えられる値の数などから考えて、MultiVapor はこのモデルとはいくらか違いがあるとも思われる。また、MultiVapor 2.2.3 ではプログラム中の数式の詳細とその決定の経緯までは明らかとされていないため、言わばブラックボックスのような状態の箇所もあり、踏み込んだ議論が難しい。しかし、上記の2件の比較検討の結果からは、MultiVapor 2.2.3 ではいずれの実測データに対しても式 (1) での吸着速度定数  $k_0$  および活性炭の単位重量あたりの有機ガス吸着容量  $W_0$  に相当する箇所が実際よりも小さく見積もられるために破過時間が短く計算される傾向があると予想される。そして、通常の推算値に対して最大値での推算結果に改善が見られる

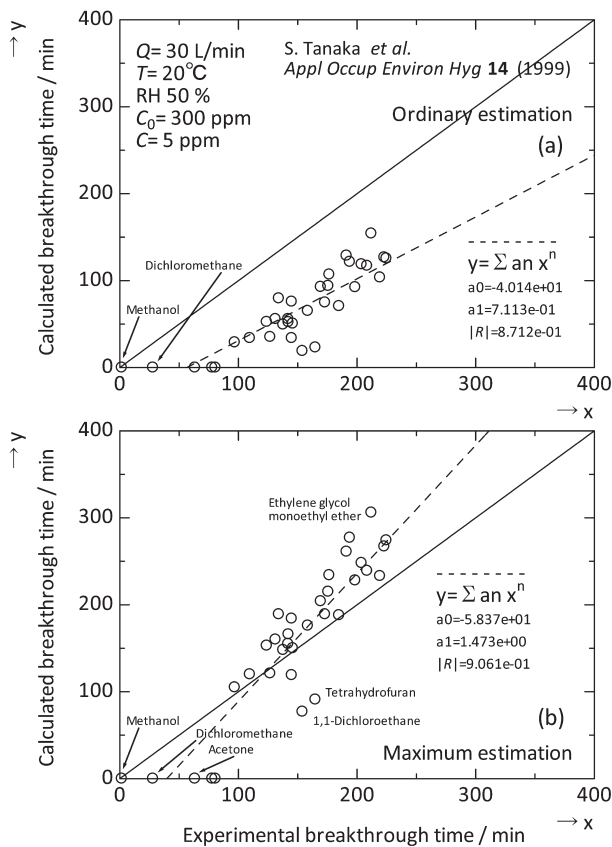


Fig. 1. Comparison of the experimental organic vapor breakthrough time of an activated carbon bed by Tanaka et al.<sup>20)</sup> and the calculated breakthrough time by MultiVapor 2.2.3 described in Table 4.  $R$  = correlation coefficient.

Table 5. Use conditions of cartridge or carbon bed used in MultiVapor 2.2.3 and the values used for estimation in Table 6 and Fig. 2

Input condition	Value
Temperature / °C	20
Atmospheric pressure / atm	1
Relative humidity / %	50
Number of cartridges on a respirator	1
Average breathing air flow / L min <sup>-1</sup>	30
Vapor concentration / ppm	50, 100, 300
Breakthrough concentration / ppm	2, 5, 20 described in Table 6

ことは、より適した定数が算出されて用いられているためと考えられる。そこで、これらの点の補正または修正によって、同ソフトウェアでのより精度の高い推算が可能となると見込まれる。

実際の利用を考慮したとき、現行の MultiVapor 2.2.3 は活性炭の物性や有機ガスの科学的知識を要する部分も大きいことから、まだ現在の段階では労働現場での

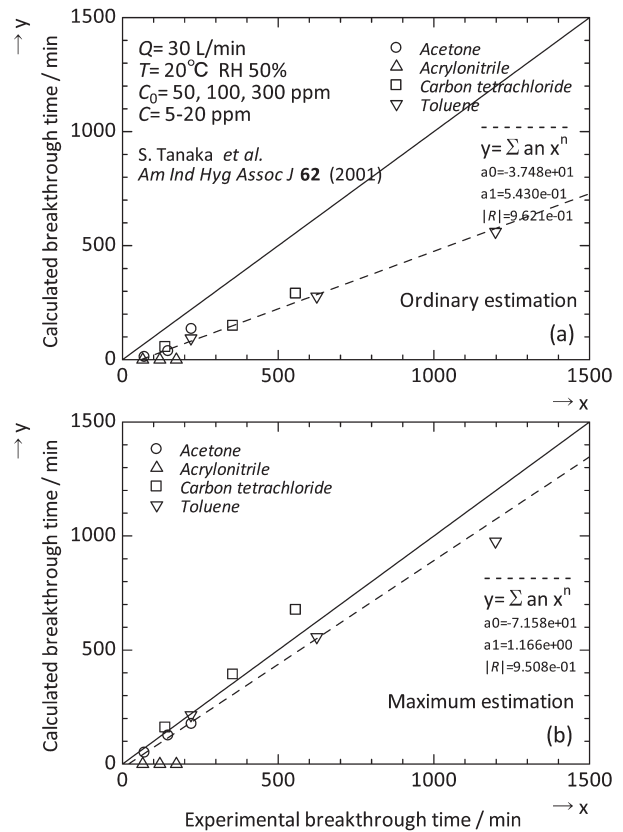


Fig. 2. Comparison of the experimental organic vapor breakthrough time of an activated carbon bed by Tanaka et al.<sup>21)</sup> and the calculated breakthrough time by MultiVapor 2.2.3 described in Table 6.

具体的な応用に供されるものというよりも、科学研究用のソフトウェアとして理解するのが妥当である。しかしその用途に際しても、本稿での検討の結果では、MultiVapor 2.2.3 は単一種類の有機ガス破過状態に対しても、まだそのままの適用は推算結果の精度をはじめとして困難があると見られ、注意が必要である。また、混合ガスにおける破過を想定して計算での有機ガスの数を増やした場合は、さらに推算結果の実測データとの差異の増加につながることが予想される。加えて、今回は相対湿度に関して活性炭層への影響が低いと考えられる50%の条件下で検討を行ったが、より高い相対湿度条件下での推算はさらに複雑となると考えられる<sup>9-12)</sup>。

しかしその一方、今回の比較検討の結果では、最大値での推算結果は多くの場合に実測データといくらか見合ったものとなっていることは注目される。MultiVapor はまだ不完全な部分を残しているが、破過時間推算の計算モデルそのものとしては、さらなる改良により高い水準に向かう可能性があると考えられる。現在の MultiVapor を基にして、計算の過程で用いられ

**Table 6.** Experimental data of organic vapor breakthrough time of an activated carbon bed according to change of vapor concentration by Tanaka *et al.*<sup>21)</sup> and the results of estimation by MultiVapor 2.2.3

Organic vapor	Vapor concentration / ppm	Breakthrough concentration / ppm	Measurement breakthrough time / min	Ordinary estimation by MultiVapor 2.2.3 / min	Minimum estimation by MultiVapor 2.2.3 / min	Maximum estimation by MultiVapor 2.2.3 / min
Acetone	50	20	222	134.9	94	176
	100	20	147	37.8	0	125
	300	20	71	12	0	50
Acrylonitrile	50	2	173	0	0	0
	100	2	120	0	0	0
	300	2	65	0	0	0
Carbon tetrachloride	50	5	557	289.7	0	676
	100	5	355	148.3	0	393
	300	5	138	55.8	0	160
Toluene	50	5	1198	561.1	146	976
	100	5	624	277.2	0	557
	300	5	220	93.9	0	215

る式や係数の調整などの今後の改良により、将来に破過時間の推算に向けたより有効なソフトウェアが開発されることが期待される。

## 文 献

- 1) 松村芳美. 防毒マスク吸気缶の除毒特性. 労働衛生工学 1980; 25-35.
- 2) 保利 一. 吸着を利用した労働衛生管理用機器の特性と課題. 労働衛生工学 2007; 3-19.
- 3) 安彦泰進. 小型活性炭カラムにおける有機ガス破過曲線の近似計算の検討. 産衛誌 2013; 55: 69-72.
- 4) Yoon YH, Nelson JH. Application of gas adsorption kinetics. I. A theoretical model for respirator cartridge service life. Am Ind Hyg Assoc J 1984; 45: 509-16. [Medline] [CrossRef]
- 5) Yoon YH, Nelson JH. Application of gas adsorption kinetics - II. A theoretical model for respirator cartridge service life and its practical applications. Am Ind Hyg Assoc J 1984; 45: 517-24. [Medline] [CrossRef]
- 6) 安彦泰進. Wheeler-Jonas式による活性炭層のガス吸着のモデル化とその拡張を用いた破過時間の推算. 炭素 2011; 133-43.
- 7) 安彦泰進. Wheeler-Jonas式を利用したWoodのモデルによる吸湿活性炭層の有機ガス破過時間の推算. 炭素 2011; 185-90.
- 8) Wood GO. Estimating service lives of organic vapor cartridges II: a single vapor at all humidities. J Occup Environ Hyg 2004; 1: 472-92. [Medline] [CrossRef]
- 9) Jonas LA, Sansone EB, Farris TS. The effect of moisture on the adsorption of chloroform by activated carbon. Am Ind Hyg Assoc J 1985; 46: 20-3. [Medline] [CrossRef]
- 10) Werner MD. The effects of relative humidity on the vapor phase adsorption of trichloroethylene by activated carbon. Am Ind Hyg Assoc J 1985; 46: 585-90. [CrossRef]
- 11) Abiko H, Furuse M, Takano T. Quantitative evaluation of the effect of moisture contents of coconut shell activated carbon used for respirators on adsorption capacity for organic vapors. Ind Health 2010; 48: 52-60. [Medline] [CrossRef]
- 12) Abiko H, Furuse M, Takano T. Reduction of adsorption capacity of coconut shell activated carbon for organic vapors due to moisture contents. Ind Health 2010; 48: 427-37. [Medline] [CrossRef]
- 13) Wood GO, Snyder JL. Estimating service lives of organic vapor cartridges III: multiple vapors at all humidities. J Occup Environ Hyg 2007; 4: 363-74. [Medline] [CrossRef]
- 14) The National Personal Protective Technology Laboratory (NPPTL). MultiVapor™ Version 2.2.3 Application. [Online]. 2013 [cited 2013 Apr 13]; Available from: URL: <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/multivapor/multivapor.html>
- 15) 安彦泰進. 湿度を考慮した小型活性炭層での各種有機ガス吸着における破過時間推算法. 社団法人大阪工研協会 活性炭技術研究会第146回講演会資料 2012; No.172: 9-18.
- 16) 有機合成化学協会編. 有機化合物辞典. 東京: 講談社サイエンティフィク, 1985.
- 17) Poling BE, Prausnitz JM, O'Connell JP. The properties of gases and liquids Fifth edition, New York: McGraw-Hill, 2001.
- 18) 日本化学会編. 化学便覧基礎編改訂5版. 東京: 丸善, 2004.
- 19) Haynes WM, ed. CRC handbook of chemistry and physics, 92nd edition. Boca Raton (FL): CRC Press, 2011.
- 20) Tanaka S, Nakano Y, Tsunemori K, Shimada M, Seki Y. A study on the Relative Breakthrough Time (RBT) of a respirator cartridge for forty-six kinds of organic solvent vapors. Appl Occup Environ Hyg 1999; 14: 691-5. [Medline] [CrossRef]
- 21) Tanaka S, Tsuda Y, Kitamura S, Shimada M, Arito H, Seki Y. A simple method for detecting breakthroughs in used chemical cartridges. AIHAJ 2001; 62: 168-71. [Medline]
- 22) 安彦泰進. 呼吸保護具用活性炭製品の吸湿とその脱着のヒステリシス. 産衛誌 2010; 52: 216-8.
- 23) Abiko H. Water vapor adsorption and desorption isotherms

- of activated carbon products used in Japanese gas respirators. TANSO 2011; 127–32.
- 24) MultiVapor TUTORIAL Gerry Wood, March 18, 2007. [Online]. 2007 [cited 2013 Apr 13]; Available from: URL: <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/multivapor/Tutorials/MultiVapor-213Tutorial.pdf>
- 25) Wood GO. Affinity coefficients of the Polanyi/Dubinin adsorption isotherm equations: A review with compilations and correlations. Carbon 2001; 39: 343–56. [CrossRef]
- 26) Wood GO, Lodewyckx P. An extended equation for rate coefficients for adsorption of organic vapors and gases on activated carbons in air-purifying respirator cartridges. AIHA J 2003; 64: 646–50. [Medline]
- 27) 一般財団法人日本規格協会. 日本工業規格 T8152 防毒マスク (制定1972, 改正1994, 確認2007). 東京: 一般財団法人日本規格協会, 2007.
- 28) 公益社団法人産業安全技術協会. 機械等の検定制度の概要 労働安全衛生法のもとでの「検定制度」のあらまし. [Online]. 2006 [cited 2013 Jul 1]; Available from: URL: <http://www.tiis.or.jp/examination>