技術レポート

電気集塵装置を用いた気中におい成分の除去に関する研究

大川 翔太郎*-1, 川田 吉弘*, 清水 洋隆*

(2020年4月20日受付;2020年7月13日受理)

Reduction of the Odor Component Using Electrostatic Precipitator

Shoutarou OKAWA^{*,1}, Yoshihiro KAWADA^{*} and Hirotaka SHIMIZU^{*}

(Received April 20, 2020; Accepted July 13, 2020)

In order to add deodorizing with electrostatic precipitator for indoor environment, reduction of the odor components with positive and negative corona discharge in a closed space were tested. In this study, phenethyl alcohol was used as a odor component, and then the concentration was measured with a gas chromatograph and an adsorptive desorption agent. As results, the phenethyl alcohol concentration was dropped after 5 minutes operation from starting with corona discharge, and thereafter operation, the concentration was slightly decreased with increasing operation time. When the applied voltage was increased, the discharge current increased and the reduction ratio of the Phenethyl Alcohol concentration also increased. It has been considered that the decreasing of the phenethyl alcohol concentration are caused with adhesion to the grounded plate electrodes in the corona discharge or the walls of the enclosed spaces. In addition, the ozone oxidation is also considered for the reduction of the phenethyl alcohol. The time dependencies of the ozone generation concentration setting with or without the phenethyl alcohol in the closed space were compared.

1. はじめに

室内用の空気清浄機には、PM2.5を代表とする微小粒 径粒子の捕集や小型高性能化が望まれる. その手段とし て、正コロナ放電を用いた電気集塵装置が搭載される例 がある¹⁾. 電気集塵装置はコロナ放電により生じるイオ ンが微粒子を荷電し、静電気力により電極に集塵する装 置である²⁾.繊維フィルタなどに比べて通気の際の圧力 損失が低く,高温でも使用可能である³⁾.大容量を処理 する場合や,低濃度の煤塵を処理することにも適してい る. 正コロナ放電の場合, 負コロナ放電に比べてオゾン が発生しにくいという利点がある.一方で火花電圧が低 くスパークに至りやすいといった欠点もある. そのため 産業用では負コロナ放電が用いられ、家庭用など生活環 境に近い場合は正コロナ放電が用いられる場合が多い4. 空気清浄機に望まれる機能として脱臭がある.一般的な 脱臭方法として、活性炭やゼオライトなどの吸着剤を用 いたフィルタに、対象とするガスを通気させることで除 去するものがある⁵⁾. 産業用途においては、燃焼法や薬 剤による洗浄法があるが、補機が大きく消費エネルギー

キーワード:コロナ放電,オゾン,ウッドセラミックス, 電気集塵装置,空気清浄機

* 職業能力開発総合大学校電気工学専攻

(〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1)

Department of Electrical Engineering, Polytechnic University, 2-32-1, Ogawanisi-machi, Kodaira-shi, Tokyo 187-0035, Japan

syonoji@icloud.com

も大きいことから,家庭用の装置には不向きである.ま た家庭では,消臭剤の散布や脱臭剤を配置する方法もあ る.しかしながら,消臭剤の散布ではその都度薬剤を散 布する手間がかかる.脱臭剤においては,におい分子の 駆動はガス拡散にゆだねられる.そのためエネルギーを 投入した積極的な除去に比べて効果が少ない.ところで 脱臭対象の分子は,鼻の臭粘膜で溶解し,嗅覚に作用す る分子である⁶⁰.アンモニアなど比較的小さい分子もあ るが,におい,香りを発現する分子は官能基に依存し, 比較的大きい分子であることが多い.

本研究では、これら分子も微小粒径粒子の延長と考え[®]、 静電捕集により空間から除去できる可能性について検討 を行った.これまで負コロナ放電によるにおい分子の除 去について行われた研究例はある⁷⁹⁾.除去プロセスに ついては、コロナ放電やパルスコロナ放電で発生する OH ラジカルやオゾン、イオン風が挙げられている.オ ゾンを脱臭に使用する例は多いが、放電を直接利用した 脱臭技術は少ない¹⁰⁾.

対象におい成分は実験の安全性や周囲の環境を配慮 し、β-フェニルエチルアルコールを用いた.本稿では、 におい成分をβ-フェニルエチルアルコールと定義する. におい成分をアクリル立方体の閉鎖的空間内に充満させ て、一段式電気集塵装置を稼働させた.評価においては、 吸着脱離剤による濃縮を行い、ガスクロマトグラフを用 いて測定することで、β-フェニルエチルアルコールの定 性分析を可能とした¹¹⁾.負コロナ放電は正コロナ放電よ りオゾン濃度が高いことが知られている¹²⁾.人生活環境 下での使用を目指す観点からオゾン発生量が少ない正コ ロナ放電を用いた.ステンレス平板電極を捕集用電極と し,正コロナ放電を用いた場合におけるβ-フェニルエチ ルアルコールの濃度変化を評価した.更にオゾン発生量 が少ない正コロナ放電において脱臭性能を向上させるた め,電極材料に着目した.表面積が大きい多孔質,かつ 放電に与える影響が少ない導電性という2点の物理的・ 電気的な特徴を有する材料として,ウッドセラミックスを 用いた¹³⁾.ウッドセラミックスは炭素が主成分であること から,放電により生成されたオゾンは炭素と反応し分解 される可能性がある.電極材料をステンレス,ウッドセ ラミックスとした場合に加え,コロナ放電の正負極性に 対するβ-フェニルエチルアルコールの濃度変化・クロマト グラムを評価し,物質の除去プロセスについて考察した.

2. 実験方法

2.1 対象臭気の選定

本実験の試料として、臭気の官能試験(パネル試験)に 携わる嗅覚正常者の選定に使用される基準臭液を用いた. 現有のガスクロマトグラフのカラムとの相性,吸着剤との 相性,文献値の有無を考慮しβ-フェニルエチルアルコー ルを選定した.その構造式を図1に示す.カラムにおいては、 5%-フェニル-95%-ジメチルポリシロキサンの微極性カ ラム(Phenomenex 社製 ZB-5)を用いた.吸着剤において は、有機溶剤用でβ-フェニルエチルアルコールの分離例 がある信和化工製 Needlex®を用いた¹⁴⁾.また ZB-5 に近 いカラムにおいて、リテンションタイム(保持指標)が開 示された文献がある¹⁵⁾.基準臭液(ジーエルサイエンス株 式会社製基準臭液 A)は濃度 10-3.0 (0.1%,流動パラフ ィンで希釈)であり、これを常温で揮発させて使用した.



図1 β -フェニルエチルアルコールの構造式 Fig.1 Chemical formula of Phenethyl Alcohol.

ガスクロマトグラフによるβ-フェニルエチルアル コールの評価方法

ガスクロマトグラフ(島津製作所製 GC-2014) にキャ ピラリーカラム(上述, 膜厚 0.25 µm, 内径 0.25 mm, 長さ 30 m)を用いた.キャリアガスを純窒素(G3)とし, 線速度は 20 cm/min とした.検出器は炭化水素の検出に 優れる FID(水素炎イオン化型検出器, 280℃に設定) を用いた.カラムオーブンについては昇温条件を45℃





Fig.2 Chromatogram of test sample (Phenethyl Alcohol) with headspace Analysis of Reagent for Panel Screening Test.

-10℃/min-240℃とし、サンプル時間1分間のスプリット レス分析とした.スプリットレス分析では気化室温度を 250℃に設定し、気化した物質は45℃に設定したカラム の導入部で一旦吸着し濃縮される.

本計測条件を適用した場合の,基準臭液のヘッドスペ ース分析に対するクロマトグラムを図2に示す^{III}.リテ ンションタイム 10.25 min 付近に特徴的なピークが生じ た.リテンションインデックスから求めた理論値とほぼ 同等であることからも,このピークがβ-フェニルエチ ルアルコールによるものと考えられる.また10.25 min のピークを時間積分(電圧 [mV] ×時間 [sec])し, ピーク面積として評価を行った.ピーク面積は濃度に比 例した値となる.図2におけるピーク面積は63.3 [mV・s] であった.カラムオーブンを一定温度とした場合のリテ ンションタイムもリテンションインデックスから求めた 理論値とほぼ同等であった.

2.3 吸着剤を用いたサンプリング法

今回用いた吸着剤 Needlex® は針状である. ガス採取 器やシリンジにもつけることができ,そのままガスクロ マトグラフの注入口に挿入できる. サンプリング前に, 注入口圧力を 100 kPa に設定し,1分間吸着剤の吸着ガ スを脱離させることで,コンディショニングを行った. その後,吸着剤をガス採取器に取り付け,壁面からおお よそ 100 mm 離れたアクリル箱内の大気を 100 mL サン プリングした. さらに窒素 1 mL を充填したシリンジに 吸着剤を付け換え,ガスクロマトグラフ注入口で 8 秒加 熱した後にガスクロマトグラフに注入した.操作により 大気中の濃度から 100 倍の濃縮が可能となった¹⁶.

2.4 におい除去実験の概要

実験装置の概略図を図3に示す.一辺50 cmの密閉し たアクリル箱の中に、コロナ放電電極およびファンを配



図3 実験装置概略図

Fig.3 Schematic diagram of Experimental Apparatus.



図4 側面から見た電極構造 Fig.4 Side view of electrode structures.

置した.基準臭液 300 mg を蒸発皿に入れ、電気集塵装 置の前側に設置した. 電気集塵装置のファン回転数を調 整し、平均処理流速を 3.0 m/s とした、側面から見た電 極構造を図4に示す. 電極構造はガス処理用の放電極と して一般的に使用される線対平板電極とした17. 接地平 板電極には厚さ 0.1 mm のステンレス製, または厚さ 11 mmのウッドセラミックス製を使用した. 接地平板間隔 は16mmとし、その中央にワイヤ線電極を配置した. ワイヤ線電極には、直径 0.28 mm のステンレス製を用い た、ステンレス電極使用時において、ワイヤ線電極に正 極性電圧 (DC+7.5 kV, DC+8.0 kV, DC+8.5 kV, DC+9.0 kV) を印加し、コロナ放電(放電電流 0.13 mA, 0.20 mA, 0.31 mA, 0.42 mA) を発生させた. 負極性電圧 (DC-8 kV)印加時に発生した放電電流は 0.28 mA であ った. ウッドセラミックス電極使用時において, 正極性 電圧 (DC+8 kV) 印加時の放電電流は 0.23 mA, 負極性 電圧 (DC-8 kV) 印加時の放電電流は, 0.39 mA であった. コロナ放電電極の下流側には、整風板とファンを配置し た. 整風板には、パンチングメタル板を用いた. β-フェ ニルエチルアルコールが電極へ吸着するまでのプロセス は以下の通りである.ファンの流れによってβ-フェニ ルエチルアルコールを含むガスは電極内を通過する. コ ロナ放電により発生したイオン風によりβ-フェニルエ チルアルコールを含むガスは電極に移動すると考えられ る¹⁸⁾. β-フェニルエチルアルコールをアクリル箱内に充 満させるため45分間ファンを稼働させた後、電圧印加 およびサンプリングを開始とした.実験の評価は吸着剤 Needlex©で濃縮を行い,ガスクロマトグラフを用いて 測定した.またオゾン濃度については,オゾンセンサ (NISSHA-FIS 製 SP61-02F)をアクリル箱内床面に設置 し測定した.オゾンセンサ出力電圧から濃度への換算は カタログ値を用いた¹⁹⁾.

3. 実験結果および検討

3.1 正コロナ放電による性能評価

印加電圧 DC+8 kV 時におけるリテンションタイム 10.25 min 付近のクロマトグラムの時間変化を図5に示す. 初期条件に対し,時間経過とともに10.25 min 付近のピー クについては減少している.時間経過に対して,ピーク を示すリテンションタイムがシフトすることはなかった.

印加電圧 DC+8 kV 時におけるピーク面積の経時変化 を図6に示す. 凡例の No. は実験回数を示している. 横 軸の0は, 電圧印加開始時を示す. 初期のピーク面積は 20 [mV・s] 付近であったが, 多少のばらつきは生じた. 初期のピーク面積は平均で 18.6 [mV・s] であった. ア



図5 アクリル箱内のガスのクロマトグラム

Fig.5 Chromatogram around retention time of 10.25 min from 0 to 45 minutes operation.



図 6 β-フェニルエチルアルコールのピーク面積の経時変化 Fig.6 Time dependencies of peak-area for Phenethyl Alcohol from chromatogram.

クリル箱内のガスサンプリング時は、吸着剤により100 倍に濃縮していることから、図2の結果に対しアクリル 箱内のβ-フェニルエチルアルコール濃度は340分の1程 度であることが分かる. No.4の結果を除いて、実験稼働 開始5分後において値は大きく減少した. その後は、全 ての結果において穏やかに低下した. また45分後のピー ク面積はいずれの実験条件も10 [mV・s] 程度となった.

放電開始時に対し,45分後における低減の割合を低減 率として,以下の式で示す.

$$\eta = \left(1 - \frac{Peak-area \ at \ sampling}{Peak-area \ at \ initial \ condition}\right) \times 100 \tag{1}$$

印加電圧の増加に対する放電電流および β -フェニルエ チルアルコールの低減率の変化を図 7 に示す.本装置に おける放電開始電圧は 6.5 kV である. 7.5 kV 以上にお いては,確実にコロナ放電が発生している電圧である. 図 7 には、印加電圧と放電電流との関係もあわせて示し ている.印加電圧の増加(DC+7.5 kV, DC+8.0 kV, DC +8.5 kV, DC+9.0 kV)に伴い、放電電流(0.13 mA, 0.20 mA, 0.31 mA, 0.42 mA)は増加した.0 kV 時は計 5 回の 実験を行った.そのうちの1回で非常に大きい低減率 74%が観測された.この結果は外れ値であると考えられ、 残り4回の平均低減率は7.5%であり、エラーバーが 31.2%となった.ばらつきはあったが、印加電圧の増加 に伴い低減率も増加する傾向となった.このことからコ



図7 印加電圧の増加に対する放電電流及びβ-フェニルエチ ルアルコールの低減率の変化

Fig.7 Reduction rate and discharge current as a function of Applied Voltage.

主う

ロナ放電がアクリル箱内のβ-フェニルエチルアルコー ルの濃度低減に効果を与えていることが明らかとなっ た. また0kV時の低減率は平均で21%程度であり,コ ロナ放電がなくても濃度は低減した.

3.2 ウッドセラミックス電極の特徴と効果

電極材料をステンレスからウッドセラミックスとした 場合,および正コロナ放電からオゾン生成量の多い負コ ロナ放電を発生させた場合におけるにおい成分の空間濃 度変化を比較評価した.ウッドセラミックス電極とステ ンレス電極の違いは,抵抗率と比表面積である.各電極 の抵抗率を表1に示す.ウッドセラミックスはステンレ ス電極と比較して,350倍表面抵抗率が高い.一方,比 重の違いを補正するためBET比表面積に質量を乗じた 値(電極表面=コロナ放電と接する面における表面積) を算出した値も含め,BET比表面積を表2に示す.ス テンレスに対してはクリプトンを,ウッドセラミックス に対しては窒素を用いて,ガス吸着脱離からBET比表 面積を計測した.表からウッドセラミックスはステンレ スに対し,約25000倍比表面積が大きい,つまりガスを 吸着しやすいことが明らかとなった.

正コロナ放電発生時において,ウッドセラミックスを用 いた場合におけるβ-フェニルエチルアルコールのピーク面 積変化を図8に示す.ウッドセラミックス電極使用時の放 電電流はステンレス電極使用時に比べて1.15倍増加した.

ステンレス電極よりウッドセラミックス電極の方が, 放電電流が大きいことが示された.このことから,表1 の電気抵抗率は放電電流に影響していないと考える.同 図には比較のために,ステンレス電極を用いた場合の結 果も示している.ステンレス電極に対し,ウッドセラミ ックス電極の方が初期濃度は低くなった.この結果から, ウッドセラミックス電極では,放電がなくても電極への 吸着が存在する可能性がある.どちらの電極材料におい

表1 各電極の表面抵抗率 Table 1 Surface Resistivity of each electrode.

	Surface Resistivity $\left[\Omega/cm^2 \right]$	
Woodceramics	3.4	
Stainless	9.6×10^{-3}	

1×2 L	电压力超载曲度
Table 2	Specific Surface Area of each electrode.

久雪極の比害面積

	BET 比表面積	質量 (電極1枚あたり)	接地電極 表面積 (電極1枚あたり) (比表面積×質量)
ステンレス電極	0.006	3.30	0.0098
(厚さ:0.1 mm)	[m/g ²]	[g]	[m ²]
ウッドセラミックス電極	149.5	62.0	2925
(厚さ:11 mm)	[m/g ²]	[g]	[m ²]



図8 正コロナ放電発生時の稼働時間におけるピーク面積の 変化(印加電圧: DC+8 kV)

Fig.8 Peak-area as a function of operation time with positive corona discharge (applied voltage: $DC+8 \ kV$).

ても、ピーク面積は穏やかに減少した.各経過時間に対 するピーク面積は、いずれの時間においてもウッドセラ ミックス電極の方が低い値となった.比表面積が大きい ウッドセラミックスにおいて、吸着による低減が放電に より促進されたと考える.

3.3 コロナ放電の極性の影響

負極性電圧を印加し、負コロナ放電を発生させた場合 におけるβ-フェニルエチルアルコールのピーク面積変 化を図9に示す.負コロナ放電時の放電電流は正コロナ 放電時と比較して、ステンレス電極で1.4倍、ウッドセ ラミックス電極では1.7倍大きい.正コロナ放電実験時 と同様、ステンレス電極に対し、ウッドセラミックス電 極実験時の方が初期濃度は低い値となった.各経過時間 におけるピーク面積の値はほぼ同じであった.また正コ ロナ放電実験時と比較し、負コロナ放電実験時の方が放 電電流は大きく、ピーク面積は低い値となった.

負コロナ放電では、正コロナ放電の場合と比較して、 電界の移動に寄付するイオン種およびオゾンの発生量が 異なる.β-フェニルエチルアルコールの低減は、オゾン による分解の可能性がある。各実験条件における電気集 塵装置の稼働時間に対するオゾンセンサ出力を図10に示 す。同図の結果からウッドセラミックス電極の方が、ス テンレス電極よりオゾン濃度がわずかに高いことが示さ れた。ウッドセラミックス電極の方が、放電電流も大き いことからオゾンがより多く発生し、β-フェニルエチル アルコールのオゾン分解が促進していると考える。負コ ロナ放電では、開始15分で本センサの測定限界である 430 ppb に達した。この結果から負コロナ放電のピーク面 積が低い理由として、オゾン発生量が多いことが考えら れる。今後、オゾンによる分解低減と静電気力による吸 着低減について、比較評価ができるよう検討を進める。



図9 負コロナ放電発生時の稼働時間におけるピーク面積の 変化(印加電圧: DC-8 kV)

Fig.9 Peak-area as a function of operation time with negative corona discharge (applied voltage: DC-8 kV).



図 10 電気集塵装置の稼働時間に対するオゾンセンサ濃度 Fig.10 Time dependencies of ozone concentrations.





Fig.11 Peak-area as a function of operation time Without corona discharge electrodes.

3.4 吸着の効果

電極への吸着効果を確認するため、電極を配置せずフ ァン稼働のみの場合および、電圧を印加せず電極間を通 気させた場合におけるピーク面積の時間変化を図11に示 す. 横軸の0は、図6や図8・図9と同様に45分間安定 させた後のサンプリング開始時間を示す. ウッドセラミ ックス電極では初期濃度が15 [mV・s]であった.その 後はおだやかな増減を繰り返し、45分後には12 [mV・s] となった.他の2つの条件に比べて,全ての時間におい てピーク面積が最も低く,ウッドセラミックスは放電無 しでも濃度低減効果が高いことが示された.ステンレス 電極およびファン稼働のみの結果においては,初期濃度 に比べて45分後の値はともに減少傾向にあった.ファン 稼働のみおよびステンレス電極においては,アクリル箱 内での対流によりアクリル箱壁面や機器へ付着し,空間 の濃度が減少したと考える.ステンレス電極では,測定 開始10分後以降に安定した値となっている.

3.5 副生成物に関する考察

ステンレス電極およびウッドセラミックス電極を用い た場合のガス測定結果について,保持時間 8-15 min に おけるクロマトグラムを図 12 に示す.稼働時間 5分後 以降に生じる保持時間(8.48 min, 10.00 min, 11.02 min, 11.55 min, 13.10 min, 13.70 min, 14.43 min)は副生成 物だと考えられる.稼働 45分後では正コロナ放電を用 いた場合において,ステンレス電極よりウッドセラミッ クス電極の方がβ-フェニルエチルアルコールおよび副 生成物の濃度は小さくなることが示された.特に正コロ ナ放電とウッドセラミックス電極の組み合わせにおい て,他の3つの条件に比べ全体的にピークが小さいこと が見て取れる.β-フェニルエチルアルコールおよびその 副生成物の濃度は、ウッドセラミックス電極を用いた方 が小さくなることが示された.しかし、11.55 min の物 質においては、他の条件と同等の濃度が検出された.こ れらの副生成物に対し、高極性カラムを使用した場合の リテンションタイムを保持指標と照らし合わせる.本微 極性カラムの結果と比べて、これら副生成物の推定を行 うことで、β-フェニルエチルアルコールの濃度低減のプ ロセスを明らかにする.これらの物質が生じる原因の一





図 13 β フェニルエチルアルコールの有無に対するオゾン濃度 Fig.13 Ozone concentration with and without Phenethyl alcohol.

図 12 各条件時の稼働時間におけるアクリル箱内のガスのクロマトグラム (保持時間 8-15 min)

Fig.12 Chromatograms for sampling the air in the closed space of operation time with each condition. (Retention Time:8-15 min)

つに、オゾンによる酸化が考えられる. 静電気力による 電極表面への吸着による除去を目的としているが、オゾ ンによる分解が生じている可能性もある.β-フェニルエ チルアルコールの有無によるオゾン濃度の値を図13に 示す.β-フェニルエチルアルコールをアクリル箱内に設 置することでオゾン濃度が36.37ppb低下している.こ の結果からβ-フェニルエチルアルコールがオゾンと反 応している可能性が示された.ただし本データはオゾ ンセンサによる測定値である.今後、精度の高いオゾン モニターで実験を行い、信頼性向上を図る.

4. おわりに

一段式電気集塵装置と同様の線対平板電極構成におい て、コロナ放電を発生させ、閉鎖空間におけるにおい成 分除去について評価した.対象物質である β-フェニル エチルアルコールの濃度をガスクロマトグラフと吸着脱 離剤を用い測定した. その結果, コロナ放電による空間 濃度の低下が示された. またコロナ放電の正負極性の違 い、および電極材料の違い(ステンレス、ウッドセラミ ックス) に対する, β-フェニルエチルアルコールの空間 濃度変化を評価した、結果、正コロナ放電を用いたウッ ドセラミックス電極で、ステンレス電極時に比べ、高い 低減効果が示された. 電極の比表面積・抵抗率がステン レスに比べ、大きいことが理由だと考えられる、また負 コロナ放電を用いた場合では、ステンレス、ウッドセラ ミックスの両電極とも低減が示された. ただしオゾン濃 度は正コロナ放電より高いことから、オゾンによる分解 の可能性がある.オゾンにより部分酸化され化学吸着し やすい分子となり、電極に吸着していることも考えられ る²⁰⁾. 空気清浄機として、物質吸着の促進を目的として おり、オゾンによる効果との分離評価する方法を今後検 討する. さらに実験結果におけるクロマトグラムより, 電極をステンレスからウッドセラミックスに変更するこ とで、副生成物の発生を抑制できた、特にウッドセラミ ックスを用いて正コロナ放電を発生させた場合、効果は 顕著だった. これらの特徴から、今後はオゾン排出が少 なく、かつβ-フェニルエチルアルコールの低減が高い条 件、つまり静電気力で電極への吸着を促進するシステム について追究する.

謝辞

ガス吸着脱離による BET 比表面積の測定においては, 群馬県立群馬産業技術センターに依頼し,分析を行いま した.計測,データ解析,および評価結果に対しご助言 を賜り,著者一同,お礼を申し上げます.

参考文献

- 1) 静電気学会編:静電気ハンドブック,オーム社(1981)
- 水野 彰:大気圧放電プラズマと触媒の組み合わせによる ガス浄化. The Vacuum Society of Japan, 47 [11] (2004) 775
- 3) 松山卓蔵,青木 功:電気集塵機入門.環境技術,2[11] (1973)47
- 4) 日空気清浄協会編:室内空気清浄便覧,オーム社(2000)
- 5) 矢内雅人 編:においの分析・評価と最新脱臭/消臭技 術実務集,技術情報協会(2008)
- 6) ウィリアム C. ハインズ、早川一也:エアロテクノロジー,井上書院,1[1](1985)6
- 田門 肇:コロナ放電を利用した気相汚染物質の除去. 化学工学, 66 [12] (2002) 10
- N. Sano, T. Nagamoto, H. Tamon, T. Suzuki and M. Okazaki: Removal of Acetaldehyde and Skatolein Gas by a Corona Discharge Reactor., Ind.Eng.Chem.Res., 36 [9] (1997) 3783
- Y. Shi, J. Ruan, X. Wang, W. Li and T. Tan : Evaluation of Multiple Corona Reactor Modes and the Application in Odor Removal. Plasma Chem Plasma Process, 26 (2006) 187
- 10) 電気学会技術報告, 481, p.94 (1994)
- 大川翔太郎,川田吉弘,清水洋隆:コロナ放電によるガス状物質の除去に関する研究,PTUフォーラム 2018講 演論文集,19-D-7 (2018)
- 12) 高倉一千,久米文貴,小林達男,早川昌秋,関谷昌久:正・ 負コロナ放電のオゾン生成特性に対する一考察.静電気 学会誌,25[2](2001)101
- 13) Y.Kawada, S.Okawa and H.Shimizu: コロナ放電とウッド セラミックス電極による室内空気中の1-メントール除去 /Effect of corona discharge and woodceramics electrode on removal levomenthol in room air, 28th Annual Meeting of MRS-Japan 2018, E2-019-004 (2018)
- 14) 信和化工株式会社ホームページ:試料濃縮用注射針ニー ドレックス技術資料 2, CN10178 (アクセス日 2019.1.4)
- 15) V. I. Babushok, P. J. Linstrom and I. G. Zenkevich : Retention Indices for Frequenwtly Reported Compounds of Plant Essential Oils. J. Phys. Ref. Data, 40 [4] (2011)
- 16) 大川翔太郎, 川田吉弘, 清水洋隆:正コロナ放電による 気中香り成分の除去に関する研究. 静電気学会春期講演 会論文集, p.65 (2019)
- 17)川田吉弘,清水洋隆,大川正洋,森 茂樹,柿下和彦: ウッドセラミックス集塵電極を用いた電気集塵装置に関 する検討.静電気学会誌,42 [4] (2018) 180
- J. Chang, A. J. Kelly, J. M. Crowley: Handbook of Electrosatic Processes. Marcel Dekker, Inc. (1955)
- NISSHAエフアイエス株式会社:O₃モジュール取扱書 (2018)
- 20)株式会社リアライズ:オゾン利用の理論と実際, p.276 (1989)