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 川田 吉弘^{*.1},清水 洋隆^{*},大川 正洋^{*},森 茂樹^{*},柿下 和彦^{*} (2018年2月13日受付:2018年5月7日受理) A Feasibility Study on Woodceramics Collector in Electrostatic Precipitator Yoshihiro KAWADA^{*.1}, Hirotaka SHIMIZU^{*}, Masahiro OHKAWA^{*}, Shigeki MORI^{*} and Kazuhiko KAKISHITA^{*}

(Received February 13, 2018; Accepted May 7, 2018)

An electrostatic precipitator is one of the applications using corona discharge. Especially, a single stage type electrostatic precipitator is charging and collecting particles in the corona discharge area. In this area, an ionic wind is generated with moving ions, charged particles are drifted by a Coulomb force from the high voltage wire electrode to the grounded plate electrode. In order to improve the particle collection efficiency, we focused on the high resistivity and porous structure material as the grounded electrode. When the grounded electrode is made of a woodceramics instead of a stainless steel electrode, it is considered that the fine suspended particles trapped on the grounded electrode surface increases due to the porous structure and the high resistivity. The high resistivity electrode prevents that the charged particles on the electrode releasing charge. The woodceramics is able to be adjusted for the suitable electric resistivity. As a result, the discharge current characteristics with the woodceramics grounded electrode was the same as that with the stainless steel grounded electrode. The performance of particle collection with the woodceramics grounded electrode was above the collection efficiency with the stainless steel grounded electrode for the large size particles.

1. はじめに

J. Inst. Electrostat. Jpn.

文

論

電気集塵装置の集塵電極にはステンレスなどの金属を 用いることが一般的と考えられる.理由として,薄くて も強度が保て,かつ槌打ちや水洗浄にも耐えられるため である¹⁾.

ウッドセラミックスは、木質系材料から作られる炭素 材料である²⁾. 廃材となったベニア板やおがくずを炭にし、 フェノール樹脂を加え、加熱加圧により成形し、真空加 熱により焼成するなどして作られる. 木材の再利用方法 として注目され、断熱材や腐食しにくい接地電極の研究 が行われてきた^{3,4)}. ウッドセラミックスは、焼成温度に 対し電気抵抗が異なる. 焼成温度が高いと、炭素を含む 割合が増加し電気抵抗値は低くなる特性を持つ⁵⁾.

本研究において、2つの目的から、ウッドセラミック スを電気集塵装置の集塵電極に用いることを検討した. 1つ目は、電気抵抗値が調整できる点である.低電気抵

キーワード:電気集塵装置,コロナ放電,ウッドセラミ ックス,集塵率

 * 職業能力開発総合大学校 能力開発院 (〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1)
 Polytechnic University, 2-32-1, Ogawanishimachi, Kodairashi, Tokyo 187-0035, Japan
 ¹ kawada@uitec.ac.jp

抗の浮遊粒子を電気集塵装置で処理することは難しい。 一旦集塵電極に捕集された粒子は、互いに数珠状に凝集 するだけでなく、凝集粒子は誘導帯電することで、逆極 性に帯電し、電気集塵装置下流へ流出する.いわゆる再 飛散現象である^{1,6,7)}.また絶縁シートにより電極表面を 被覆した場合、捕集した粒子から電荷が放出され難いこ とから集塵率が一時的に向上するものの、稼働時間が増 加するにつれて集塵率は低下した実験例も報告されてい る⁸⁾. つまり集塵電極の抵抗値を変えれば、電極表面に おける電荷の移動を制御し,凝集粒子形成や誘導帯電を 抑制できる可能性がある。ウッドセラミックスならば製 造過程において、焼成温度を変えることで電気抵抗値を 調整することができる.2つ目はウッドセラミックス表 面が多孔質であるという点である. 粒子を捕集できる面 積、つまり集塵電極面積を増加させることができる。ま た負コロナ放電下の集塵電極では、クーロン力やイオン 風により、負イオンは接地電極表面に移動する、仮に電 極表面が三次元構造をもつ材質であったならば、ガスは 深部まで拡散する. 負イオンに成り得るガス種を選択的 に吸着させる可能性を有している.

本研究では、ウッドセラミックスを電気集塵装置に適 用するための初期段階として、ウッドセラミックスを接 地電極とした一段式の電気集塵装置を製作した^{9,10}.ウ ッドセラミックスの諸特性,ならびに負コロナ放電特性, 集塵特性について,ステンレス電極と比較し検討したの で報告する.

2. 試験材料および実験方法

2.1 ウッドセラミックス製作および電気抵抗測定

ウッドセラミックスの製作方法を示す.おがくずの炭 (オガ炭)を粉砕後,粒径1mm以下の粉末としたのち, オガ炭の粉末とフェノール樹脂(機能性微粒子状フェノ ール樹脂ベルパール[®])を重量比8:2の割合で混合した. これを型に入れ,200℃で圧縮成型した後,600℃で3 時間,真空中で加熱し焼成した.ウッドセラミックス試 験片の外観を図1に示す.寸法は焼成後のものである. 試験に用いたウッドセラミックス,およびステンレスの 抵抗値について,図2の装置を用い簡易測定を行った. 距離19.5 mmの間隔に,先端を平らにした M4 ネジを締 付トルク40 Nm で送り込んだ.ネジを端子とし,LCR メータ(エヌエフ回路設計ブロック社製ZM2253)を接 続した.測定電圧5Vとし,周波数を100 Hz~100 kHz と変えながら抵抗を測定した.



図2 電気抵抗の簡易測定装置

Sample

Fig.2 Measurement apparatus of electrode resistance.

2.2 コロナ放電電極構造

ウッドセラミックス接地電極におけるコロナ放電電極 配置を図3に、ステンレス接地電極におけるコロナ放電 電極配置を図4に示す.接地平板電極間18mm一定とし、 中央にステンレス製線電極(\0.28 mm)をガス流方向



図3 コロナ放電電極配置 (ウッドセラミックス接地電極)

Fig.3 Corona discharge configuration with the woodceramics grounded electrode.



図 4 コロナ放電電極配置 (ステンレス接地電極) Fig.4 Corona discharge configuration with the stainless steel grounded electrode.

に垂直に、2本並列に配置した、線電極および接地電極 の有効な電極長さ(ガス流断面における水平方向)およ びダクト幅は88 mmとした.また接地電極間隔(ガス 流断面における垂直方向)およびダクト高さは18 mm である、線電極には負極性の直流高電圧を印加した、高 電圧電源(松定プレシジョン製 HAR-20R15)を用い, 電源から送り出される電流値をコロナ放電電流値とし た、接地電極には、ウッドセラミックスおよびステンレ ス板を用いた.いずれの電極であっても、電極表面から 線電極までの距離を同じとした. またウッドセラミック スの厚みは10mmあり、ウッドセラミックス背後に銅 製の接地電極を配置した.さらに接地電極の背後にはア クリル板(厚さ 0.5 mm)を配置し、アクリル板を介し て接地電極をウッドセラミックスに押し当てて固定し た. この電極構造において、図1に示したウッドセラミ ックス試験片は4本用いる.

電極間を通過したガスは 20 mm 下流にある, 穴直径 φ5 mm, ピッチ 5 mm, 厚み 0.8 mm のアルミパンチング 板で作られた整風板を通過したのち, ファンにより下流試 験ダクト内へ排出される. ファンの回転数により流速を調 整した. 印加電圧放電電流特性測定時は無風で行い, 集 塵性能評価時は入口における平均ガス流速 3 m/s とした.

2.3 集塵性能試験方法

装置概略図を図5に示す. 試験粒子には, 植物油の不 完全燃焼により生じる煤を用いた.燃焼時の上昇気流, および先に示した電気集塵装置に付属するファンによ り、燃焼ガスはダクト内に入り込む、ダクト内において 煤を含むガスでは、ファンにより拡散されたのち、電気 集塵装置に吸い込まれ処理される.処理後のガスは出口 側ダクト中で循環後、オーバーフローし試験ダクトから 外に排出される. 出口側ダクトにおいて, パーティクル カウンタ(RION 製 KC-01E + 希釈器 KD-01)を用いて 粒子個数濃度を測定した.対象としたガスに含まれる粒 子濃度を表1に示す. 粒径範囲 0.3-0.5 µm において 1L あたり 1.2×10⁴ 個程度, 粒径範囲 0.5-1.0 μm において 5.8×10³個程度で、粒径範囲 1.0-2.0 µm において 5.8× 10²個程度であった. また粒径 2.0-5.0 µm においては 1 L あたり170個程度と少ないため、時間変化の評価におい ては除外した. 室内大気に対し, 増加した粒子は燃焼由 来の粒子であり、8割程度の粒子がこれに該当する、上 流側粒子濃度については、試験前後においてサンプリン グチューブを入れ換えて粒子濃度の測定を行い. 試験開



図 5 試験装置概略図

Fig.5 Experimental apparatus for particle collection.

| 表 1 | 実験条件における粒子濃度 |
|-------|--|
| Tab.1 | Particle concentration under experimental condition. |

| Particle Size Range [µm] | Room Air [Number/L] | Target Gas |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------|
| 0.3-0.5 | $1.6 	imes 10^4$ | 1.2×10^{5} |
| 0.5-1.0 | 9.6×10^{2} | 5.8×10^{3} |
| 1.0-2.0 | 3.0×10 | 5.8×10^{2} |
| 2.0-5.0 | 0 | 1.7×10^{2} |

始時と終了時においてほとんど変化がないことを確認した.また下流ダクト内にオゾンセンサ(NISSHA エフアイエス製 A051020-SP61-02F)を設けた.ただし本装置はアナログ濃度出力を持つセンサであり,計測器ではない.オゾン検知濃度は 0~250 ppb であり,濃度に対応する電圧を 0-5 V の範囲でアナログ出力する.出力において± 10%の誤差がある.

集塵性能は,式(1)を用いて,捕集された粒子数の割合, すなわち集塵率 η として評価した.

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{out}}{N_{in}}\right) \times 100 \quad [\%]$$
⁽¹⁾

ここで,Nは下流粒子個数濃度を示し,N_{in}は電圧印加 直前5分間の平均粒子濃度,N_{out}は電圧印加後の粒子濃 度を示す.この集塵率算出においては,電圧未印加時の 電極への粒子付着は考慮されない.また下流ダクト内に おける処理後の粒子濃度は,室内大気より低くなる場合 もあった.

3. 結果および検討

3.1 電気抵抗

ウッドセラミックス,およびステンレスの電気抵抗測 定結果を図6に示す.今回対象とした周波数に対する依 存性は小さく,ウッドセラミックスの平均値で19.7 Ω, ステンレスで0.02 Ωであり,ウッドセラミックスはス テンレスのおおよそ1000倍の抵抗値であった.





Fig.6 The resistance of woodceramics and stainless steel.

3.2 放電電流特性

接地電極にウッドセラミックス,ステンレスを用いた 場合における,コロナ放電の放電電流特性を図7に示す. 放電開始電圧は、ウッドセラミックスにおいて -6.5 kV



図7 ウッドセラミックス,およびステンレスを接地電極と した場合における放電電流特性



程度,ステンレス電極において-6.8 kV 程度であった. 同一印加電圧時の放電電流についてはステンレス電極の 方が僅かに低いものの,ほぼ同様の放電電流特性が得ら れた.電極構造において,ウッドセラミックス電極の背 後にある銅平板電極と線電極間は19 mm と離れている. 電極間隔9 mmのステンレス電極と同様の放電電流特性 になったことから,ウッドセラミックス表面と線電極間 でコロナ放電が発生したと考えられる.またウッドセラ ミックス表面において,電荷が蓄積し放電を阻害するよ うな現象も起きていないと考えられる.

3.3 集塵性能の比較

集塵性能を確認するにあたり,高電圧線電極には直流 負極性-8 kV を印加した.この際の放電電流は,ウッド セラミックス電極で平均0.37 mA,ステンレス電極で平 均0.33 mA であった.試験粒子,ガス流速や印加電圧等 の試験条件は、ステンレス電極を用いた場合に、極板凝 集および再飛散現象が生じることを確認したうえで決定 した.

ウッドセラミックス電極を用いた場合の集塵率の時間 特性を図8に、ステンレス電極を用いた場合の集塵率の 時間特性を図9に示す.試験中、電気集塵装置のファン は処理ガス流速3m/s一定となるよう稼働させたままと し、線電極に高電圧を印加した時間を稼働時間0分とし た.本実験において発生源の粒子濃度は一定となるよう 努めたが、発生源の燃焼ガスを完全に一定とさせること はできない.そのため装置稼働5分前から0分までにお ける装置通過後の粒子濃度は、粒径1µm以下では±10 %程度、粒径1~2µmでは±40%程度変動した.ただ しこの装置稼働5分前から0分までの集塵率の時間平均



図8 集塵率の時間特性(ウッドセラミックス電極)

Fig.8 Time dependencies of the collection efficiency with the woodceramics electrode.



図9 集塵率の時間特性(ステンレス電極)

Fig.9 Time dependencies of the collection efficiency with the stainless steel electrode.

はいずれの粒径範囲においても -0.8~0%の範囲であっ た.時間変化については図9で示し,集塵率については 時間平均を算出した図10において後述する.ステンレ ス電極において,装置稼働直後に高い値を示すが,粒径 1-2 µmの粒子の集塵率は稼働時間とともに低下し40% 程度となった.大粒径粒子を捕集しつつ,捕集された微 小粒子は極板上で凝集したのち,ガス流に戻り,下流に 流出したと考えられる.ウッドセラミックス電極におい ても粒径1-2 µmの粒子の集塵率は不安定であるが,60 %以上の高い集塵率を維持している.これらの結果に対 し,装置稼働5分後から30分後の間における平均集塵 率の粒子径特性を図10に示す.誤差範囲は装置稼働前 5分間の粒子濃度 N_mにおける最大と最小に対する集塵



図 10 集塵率の捕集粒径特性 Fig.10 Collection efficiencies as a function of particle size.

率が取り得る範囲である.ウッドセラミックスでも大粒 径粒子の集塵率は低下するが、ステンレス電極では著し く低下したことが分かる.つまりウッドセラミックス電 極では、極板上で凝集を抑制している、もしくは捕集さ れた粒子が再飛散しにくいことが示された.集塵電極上 での粒子凝集を抑えて、大粒径粒子の排出を抑えること は、見通しの向上に加え¹¹⁾、集塵装置排気口付近の汚れ を抑制できるなど利点は多い¹²⁾.

ところで、装置稼働 5分後から 30分後の 25分間にお ける下流平均オゾン濃度をセンサ出力より算出した.あ くまで参考値だが、ウッドセラミックス電極においては 72 ppb、ステンレス電極においては 30 ppb であった.ウ ッドセラミックス電極においても、ステンレス電極時と 同様にオゾンが検出された.ウッドセラミックス電極を 使用した際に放電電流は高かったことが発生オゾン濃度 に影響を与えた可能性はある.ウッドセラミックス電極 とガス状物質の反応や吸着について、今後検討する予定 である.

3.4 電極の表面状態

ウッドセラミックス電極とステンレス電極の表面拡大 写真を図 11 に示す.顕微鏡写真は走査型共焦点レーザ 顕微鏡(オリンパス製 OLS-3000)を用い,凹凸の測定 も本顕微鏡の機能を使用した.これら写真の上下中央付 近を水平に走査した場合における凹凸を図 12 に示す. さらに水平,垂直に走査し,凹凸の平均値を基準面(表 面粗さ Surface Roughness = 0)とした場合における凹凸 の累積分布を図 13 に示す.ステンレス表面に比べ,ウ ッドセラミックス表面については,大きな凹凸は多数存 在する.木質として残っているセルロースや結合させる ために添加したフェノール樹脂等の炭化水素は,焼成の



(a) Woodceramics



(b) Stainless steel

図 11 電極表面のレーザ顕微鏡写真 Fig 11 Images of electrode surface





図 12 電極表面における凹凸 Fig.12 The roughness of electrode surface roughness.

際に酸化し水素が脱離する.その結果,分子レベルで構造が変化する^{5,13)}.レーザ顕微鏡ではそのようなレベルは評価できないが,ステンレス表面の凹凸の10-90%は



図 13 基準面に対する凹凸の累積分布 Fig.13 Cumulative frequencies as a function of surface roughness of electrode for standard level.

± 0.3 µm に存在する反面, ウッドセラミックスの凹凸 の 10-90%は -3.8~+2.2 µm に存在することが分かった. 今回パーティクルカウンタで測定した粒子のうち、粒径 範囲 0.3~0.5 µm の粒子が個数の上では大半を占めてお り、ウッドセラミックス表面の凹凸の高さから、粒子が 引っ掛かるように捕集された可能性がある。今回使用し たウッドセラミックスは発泡材と異なり図11(b)の写真 や図12より表面に大きな空隙は見当たらない. そのた め粒子は表層に捕集されると考えられる. 捕集粒子の除 去について電極強度の観点から槌打ちはできないが、エ アブローや水洗浄などの方法は可能と考えられる. また 使用後のウッドセラミック電極は、焼成温度である 600 ℃以下の高温で再生処理することができ、捕集粒子を燃 焼除去できると考えられる. 微細な凹凸が集塵に与える 影響や捕集状態、集塵率向上のプロセスについても、追 って研究を進める.

4. おわりに

環境材料として注目されているウッドセラミックスが 多孔質であること,および高電気抵抗であることに着目 し,電気集塵装置における集塵電極に応用した.その結 果,以下のことが分かった.

- (1) 印加電圧に対する放電電流特性は,通常の金属電極 とほぼ同様であった.
- (2) ステンレス電極に比べ,全粒径範囲において集塵率 は向上した.特に粒径 1-2 μm における大粒径粒子 の集塵率向上が示された.

(2)の理由としては捕集された粒子が電極上で凝集すること、もしくは飛散することが抑制されたと考えられ

る.この原因には,集塵電極の電気抵抗値の増加もしく は表面の凹凸の効果が考えられる.どちらが集塵率向上 に効果があったか,今後の検討課題である.

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)
- 2) 岡部敏弘監修 齋藤幸司,堀切川一男,大塚正久,伏谷 賢美編集:木質系多孔質炭素材料 ウッドセラミックス, 内田老鶴圃(1996)
- H.Shimizu, M.Asada, Y.Kawada : A Feasibility Study on Carbon Grounding Electrode Made of Woodceramics, EntryNo.3320, IUMRS-ICA2014 (2014)
- 4)川田吉弘,松永紗織,清水洋隆:接地電極の腐食評価方法およびウッドセラミックス接地電極の提案.職業能力開発研究誌,31 (2015)94-99
- 5) 川田吉弘,清水洋隆:C-H bonds and phenol resin contents in woodceramics under fabrication. 第25回日本 MRS 年次 大会,F1-010-007 (2015)
- Jen-Shih Chang, Arnold J.Kelly, Joseph M.Crowley edt. : Handbook of Electrosatic Processess, Marcel Dekker, Inc. (1995)
- 7) 瑞慶覧章朝,安本浩二:富士電機システムズのトンネル 用電気集塵装置-再飛散の防止とナノ粒子の集塵性能-. 静電気学会誌,32 [5] (2008) 192-197
- T.Takahashi, Y.Kawada, A.Zukeran, Y.Ehara, T.Ito: Inhibitory Effect of Coating Electrode with Dielectric Sheets on Reentrainment in electrostatic Precipitator. J.Aerosol.Sci., 29E [Suppl.1] (1998) s485-s486
- 9) 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.静電気学会講演論文集 2017, pp.27-30 (2017)
- 10) 川田吉弘, 清水洋隆, 大川正洋, 森 茂樹, 柿下和彦: Effect of High Electrical Resistivity Woodceramics Grounded Electrode on Corona Discharge. 第27回日本MRS年次大会, K-07-015 (2017)
- 11) 瑞慶覧章朝,河野良宏,安本浩二,川田吉弘,藤村英和, 江原由泰,岸田治夫,高橋武男,伊藤泰郎:電気集じん 装置の性能評価における見通し改善率と集じん率の関 係.電気設備学会誌,22 (2002) 650-656
- 12) 安本浩二,瑞慶覧章朝,高木康裕,江原由泰:交流電界 形電気集塵装置における再飛散防止と下流壁面への粒子 付着防止.粉体工学会誌,43 [3] (2006) 198-204
- 13) 石原茂久:機能性炭素材料としての木炭. J.Soc.Mat. Sci,Japan, 48 [5] (1999) 473-482