電界型 PM 処理装置におけるすす処理メカニズム*

星野 裕之^{*1}, 満山 陽平^{*2}, 斉藤 正浩^{*3}
古畑 朋彦^{*3}, 新井 雅隆^{*4}

Mechanism of Soot Removal in an Electric Diesel Particulate Trap

Hiroyuki HOSHINO, Youhei MITSUYAMA, Masahiro SAITO,
Tomohiko FURUHATA and Masataka ARAI^{*5}^{*5} Department of Mechanical System Engineering, Graduate School of Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

In order to reveal the soot removal mechanism in Electric Diesel Particulate Trap (E-DPT), mechanism of soot trapping and re-burning of soot particles in exhaust gas was investigated using one channel electric diesel particulate trap (1 channel E-DPT). The E-DPT is capable to trap soot particles by applying DC electric field between electro-plates. The results showed that soot particles like a whisker grew up from negative electrode side toward positive one. Soot particles trapped on the plates formed many soot bridges in narrow space between electro-plates. Formation of soot particles depended on electric intensity. In the condition of $F=200$ kV/m, lumps of soot were observed instead of whisker like soot bridges and soot trapping and soot re-burning were balanced. Ignition of the soot lump was occurred at the contact point between the lump and electro-plate, however re-burning of whole the lump was rarely observed. Remained soot drifted to down stream. It is thought that many remained soot particles were discharged from the E-DPT. Incomplete re-burning of soot lump caused soot removal efficiency deterioration of E-DPT. In the case of narrow space and high electric intensity ($F=600$ kV/m, $L=0.5$ mm), however, soot bridge re-burning was main phenomenon and soot lump re-burning was controlled.

Key Words: Diesel Engine, Combustion, Ignition, Electric Field, Soot Trapping, Soot Re-burning

1. 結 論

ディーゼル機関は熱効率がよく経済的であるため、大型自動車を中心に輸送の手段として広く用いられている。しかし、ディーゼル機関の排出ガスには、人体や地球環境に悪影響を及ぼすPM(粒子状物質)やNO_x(窒素酸化物)が含まれており、その影響が懸念されている。近年ではディーゼル自動車の排ガス規制も強化されてきており、PMやNO_xなどの有害排出物の低減がディーゼル機関改善の重要な課題となっている。その具体的な方策としては、機関における改善(EGR, HCCI エンジンなど)と後処理技術(DPF, 尿素 SCR など)が挙げられる。

ディーゼルパーティキュレートフィルター(DPF)で

は、触媒を利用してすすを排ガス温度条件下で酸化させ、フィルタを再生させる連続再生型DPFが主流となっている。また、wall-flowタイプのフィルタ^{(1)~(3)}や様々な材質と形状のフィルタを用いた研究もなされている。しかし、触媒担持による圧力損失の増大や排ガスを高温に保持する必要があるなどの問題点がある^{(4)~(7)}。

筆者らは、すすを除去する新しい方法として、電極板間に直流電圧を印加することですすを静電捕集し、電極間に架橋されたすすへの直接通電によりすすを連続的に燃焼除去することを提案した。さらに図1に示す電界型PM処理装置(E-DPT, 長さ300mm×幅100mm×高さ100mm, 電極板, 長さ200mm×幅80mm×厚さ0.5mm, 50枚)により、その基本的な性能を調べてきた^{(8), (9)}。その結果、E-DPTでは図2に示すように、電極間隔 $L=1.2$ mmの条件では印加電圧 E_g が200Vと250Vにおいてすすの除去効率は50%前後であり、印加電圧を高めてもそれ以上効率は上がらなかった。また、定常作動時では図3に示すように、E-DPT内のあちこちで赤熱発光を伴ったすすの燃焼が見られた。しかし、電極間にてすすがどのように捕集かつ燃

* 原稿受付 2007年8月2日。

^{*1} 群馬大学大学院工学研究科(☎376-8515 桐生市天神町1-5-1)。^{*2} 群馬大学大学院工学研究科[現:富士重工業(株)(☎160-0023 東京都新宿区西新宿1-7-2)]。^{*3} 正員, 群馬大学大学院工学研究科。^{*4} 正員, フェロー, 群馬大学大学院工学研究科。

E-mail: arai@me.gunma-u.ac.jp

Fig.1 E-DPT

Fig.2 Soot removal efficiency of E-DPT

Fig.3 Soot re-burning in E-DPT ($E_g=200\text{V}$, $L=1.2\text{mm}$)

焼されるかということは明らかではなく、そのメカニズムを把握することは電界型 PM 処理装置の性能向上のために重要であると考えられた。

そこで本研究では、電極が一对のみの 1 channel E-DPT を製作し、すすの捕集と燃焼の挙動を観察することにより、すす処理メカニズムを調べることを目的とした。

2. 実験装置および方法

E-DPT 内部観察を容易にするため、横幅を 46mm に縮小した 1 channel E-DPT の詳細を図 4 に示す。電極板は、長さ 300mm × 幅 46mm × 厚さ 15mm の 2 枚のステンレス板であり、その電極間に直流電圧が印加される。

Fig.4 Details of the 1 channel E-DPT

Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus

Table1 Exhaust gas composition

O ₂ %	4.9
CO ₂ %	8.5
CO %	2.0
NO _x ppm	60
Excess air ratio	1.2
Total PM mg/kWh	150
Engine output kW	1.2
Fuel	JIS 2 Diesel

電極間におけるすすの挙動を調べるために観察窓は耐熱ガラスで構成されている。また、本装置は電極間隔が可変であり、電極間隔 $L=0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$ について実験を行った。実験装置の概略を図 5 に示す。試料ガスには、汎用電気溶接機 (DENYO, DAW-180SS) に搭載されている 4 サイクル水冷縦型渦流室式ディーゼルエンジン (排気量 400cc, KUBOTA, Z402-E) からの排ガスを用いた。このエンジンの定格運転条件では

すすをほとんど排出しないので、吸入空気を絞ることですすを意図的に発生させた。この排ガスの成分分析の結果を表1に示す。排ガスの一部をヒータで約100℃に保温しながら、1 channel E-DPT に導入した。排ガス流量は10 l/min で一定とし、すす流量は $M_{s, in} = 2.5 \text{ mg/min}$ であった。これはエンジン排ガスの2%程度である。電極間隔 $L = 1.0 \text{ mm}$ では、電極間での排ガス平均流速は $V = 3.6 \text{ m/s}$ であり、この場合のSV値を求めてみるとおよそ $SV = 44000 \text{ h}^{-1}$ となる。E-DPT の図2に示した条件でのSV値がおよそ $SV = 60000 \text{ h}^{-1}$ であった。このようにSV値としては開発したE-DPTより若干低い、捕集と燃焼のメカニズムの解析は行えると考えた。また、実際のDPFのSV値はおよそ $5000 \text{ h}^{-1} \sim 80000 \text{ h}^{-1}$ のオーダーであるのでSV値としては1 channel E-DPTも対応している。電圧印加には定電圧型の直流電源装置(松定プレジジョン, PQ350-2)を用い、最大300Vまで印加した。電極間におけるすすの捕集や燃焼の様子は、デジタルカメラ(Nikon, D50)および高速度ビデオカメラ(Photron, FASTCAM-512PCI, 2000frames/s)で撮影した。電界強度 $F [\text{kV/m}]$ は次式より算出した。

$$F = E_g / L \quad (1)$$

E_g は印加電圧 [V], L は電極間隔 [mm] である。

3. 実験結果と考察

3.1 電界によるすすの捕集 図6に電界強度 $F = 200 \text{ kV/m}$, 電極間隔 $L = 1.0 \text{ mm}$ における1 channel E-DPT 内部のすすの挙動の経時変化を示す。E-DPT 装置内に導入されたすす粒子は、電界の影響を受けて電極に引き付けられる。電極へのすすの付着が速いために、入口付近ではブリッジ状すすの濃度が高くなり、個々のブリッジ状すすの挙動観察が困難であった。そのため、ブリッジ状すす濃度が比較的低い出口付近(入口より250mm付近(○印))でデジタルカメラを用いて撮影を行なった。Case 1は上側の電極を正、下側の電極を負として電圧を印加した場合、Case 2は上側の電極を負、下側の電極を正とした場合である。

Case 1において、実験開始($t = 0$)から約60秒後に、負極側からひげ状のすすが横に連なって出現し始めた。電圧を印加しない場合には、このようなひげ状すすは見られないので、ひげ状すすの形成は電圧印加によるものである。 $t = 120 \text{ s}$ を過ぎると、負極側からだけでなく、正極側からもひげ状すすが成長し始める様子が観察された。しかし、正極側からよりも負極側から成長するひげ状すすの割合が多かった。 $t = 170 \text{ s}$ においては、両電極から成長してきたひげ状すすが結合して、電極間にブリッジの形成が見られた。さらに時間が経

Fig.6 Formation of soot bridges ($F = 200 \text{ kV/m}$, $L = 1.0 \text{ mm}$)

過すると($t=220$ s, 310 s), 形成されたブリッジ状すすに後続のすす粒子が付着したり, 周辺のひげ状すすと結合して, 太いブリッジ状すすへと変化していく様子が観察された. その後は時間が経過しても($t=460$ s, 570 s), あまり大きな変化は見られなかった.

Case 2 では, Case 1 と同様に負極側からひげ状のすすが多く成長し, 時間経過とともに太いブリッジ状すすが形成された. しかし, 正極側と負極側におけるひげ状すすの成長速度の違いは Case 1 の場合と比べて顕著ではなかった. この理由として, すすは重力により下側の電極板上に堆積する傾向があるので, Case 1 では, 極性と重力の影響により下方の負極板から上方の正極板に向かって伸びていくひげ状すすの成長が促進されたと考えられる. また, ブリッジ状すすが形成されるまでに要する時間は Case 1 の方が Case 2 よりも若干短かった. このことから, ディーゼルエンジンの排ガス中のすすは正に帯電された粒子の割合が高いと考えられる.

Fig. 7 Relation between electric current and elapsed time ($F=200$ kV/m, $L=1.0$ mm)

3・2 電流変化とすすの再燃焼 $F=200$ kV/m, $L=1.0$ mm における電流値の経時変化を図 7 に示す. ブリッジ状すすの生成過程を説明した図 6 は図 7 における電流値の最初の立ち上がり部分に相当する. ブリッジ状すすが形成されるまでの数分の遅れ時間の後, 電流値はほぼ一定の割合で増加している. これは, ブリッジ状すすが時間とともに増加するためである. $t=15$ min までは電流値が上昇しているが, すすの燃焼は見られなかった. しかし, $t=15$ min で電流値が $I=0.25$ A となり, 目視で確認できるすすの急激な燃焼を引き起こした. その結果, 電流値は 0.15 A に低下した. その後, 電流値は再び上昇していき, $t=23$ min で再度すす

の急激な燃焼により, $I=0.07$ A まで低下した. これ以降は低い電流値で穏やかなすすの燃焼が続き, すすの捕集と燃焼がバランスする電流値が一定の定常燃焼状態となった. なお, 図 1 に示した E-DPT における以前に報告した電流値の変化⁹⁾では, 電流の一定割合の増加と急激な減少が明確には見られなかったが, これは多数の電極間の平均の現象としての電流値の変化を測定していたためと考えられる.

3・3 定常状態におけるすすの再燃焼挙動

すすの燃焼状態を調べるため, 図 7 の定常燃焼状態と同じ条件におけるすす燃焼の様子を高速度ビデオカメラを用いて撮影した. 1 channel E-DPT 内部の様子を図 8 に示す. それぞれの写真での時刻は撮影開始からの時間である. 前項で説明したブリッジ状すすはほとんど観察されず, 電極間を塞ぐすすの塊が観察された. これは図 7 に示したような数回の急激な燃焼でブリッジ状すすが破壊されたためと推測される.

図 8 の図中に示した A 点, B 点, C 点はそれぞれ燃焼前のすすの塊, 燃焼後の燃え残りのすすの塊, 燃え残って分散した小さなすすの塊である. まず, A 点のすすの塊は時間経過とともに下流側へ移動(A-6.0)している. そして $t=7.5$ ms になるとすすの塊と下側の電極板との接触部で発光(A-7.5)が観察され, これがすすの燃焼の開始であると推測される. その発光は大きく(A-8.0)なるが, 一度縮小(A-8.5)したのち再び徐々に大きくなっていき, $t=11.0$ ms で最大となった. その後発光は衰退していき, $t=15.0$ ms で消失した. また, 燃焼が行なわれた電極部分ではすすがなくなっていた. さらに, 燃焼開始直後の A-7.5 と燃焼終了直前の A-12.0 ではすすの塊の形状が異なっていた. このように流動や燃焼によってすすが除去され, すすの塊の形状が変化してゆくことがわかった.

この塊の移動速度を検討してみると, A-0 から燃焼開始直前の A-6.0 までの距離はおおよそ 1.5 mm であり, 速度 $V_s=0.25$ m/s で下流側へ移動している. 電極間の排ガス平均流速が $V=3.6$ m/s であるので, 比較すると, この塊の速度はかなり遅いことがわかる. すなわち, 排ガスの流れに乗って移動するのではなく, 電極間を塞いでいるすすの塊が排ガスの流れにより電極板に付着しながら押し流されていると解釈すべきである. しかし, 燃焼が開始(A-7.5)してから終了直前(A-12.0)まではすすの塊はほとんど移動していない. これは, すすの塊が直接通電を可能にするような強固な付着状態で電極板間を塞いでいるためと考えられる. 燃焼が終了するとすすの塊(B-18.0)は分裂しながら電極間を移動し始めた. そして再び塊同士が接合して電極間

Fig.8 Photographs of soot re-burning ($F=200\text{kV/m}$, $L=1.0\text{mm}$)

を繋ぐと、その接触部で燃焼(B-21.0)が発生した。その後(B-24.0)すすの塊は次第に大きくなっていき、 $t=25.5\text{ms}$ すすの塊の大きさは最大(B-25.5)となった。それ以降は電極間を移動しながら徐々に縮小(B-27.5, B-30.0)していった。このすすの塊については縮小し始める前(B-25.5)まではほとんど移動せず、縮小し始めてから下流側へ移動し始め、(B-25.5)から(B-30.0)までの速度は $V_s=0.33\text{m/s}$ であった。

燃焼後に分散し燃え残った小さなすすの塊(C-24.0)も他の塊と同様に電極間を移動していった。しかし、この小さな塊は排ガスの流れの影響を受けやすいため、上下の移動が顕著で、上下の電極板に衝突(C-25.5, C-26.5)しながら電極間を転がっていった。そしてその小さなすすの塊同士が接合(C-27.0)して電極間を繋ぎ、燃焼が行われ、再びすすの塊は分裂(C-27.5)した。残ったすすの塊(C-30.0)は再び電極板に衝突しながら転がって下流側へ移動していった。この小さなすすの塊は上下の移動が顕著で、下流側への移動はわずかであり、(C-24.0)から(C-30.0)までのすすの塊の速度は $V_s=0.25\text{m/s}$ であった。したがって、ここで注目したどのすすの塊においても速度は排ガス平均流速と比べるとはるかに遅ことがわかった。ただし、この写真シリーズにはないが、電極板間を排ガス流の $V=3.6\text{m/s}$ とほぼ

等しい速度で移動する粒子が存在していることも確認している。

燃焼によってすすは除去されるが、燃え残りのすすは下流へ流れてしまっていることから、多くの燃え残りのすすがそのまま装置外部に排出されてしまうと推測される。そのため図2に示したE-DPTのすす除去効率が50%程度に留まってしまったと考えられる。

ブリッジ状すすの燃焼が観察できなかったのは定常燃焼状態に落ち着いてから撮影を行なったためであり、初期に形成されたブリッジ状すすが定常状態になるまでに燃焼によって破壊されたためと考えられる。また、電極間をすすの塊が移動しているため、移動してきたすす塊の衝突によりブリッジ状すすが破壊されたためと思われる。

3・4 ブリッジ状すすの形成に対する電界強度の影響 電界強度や電極間隔が最初にできるブリッジ状すすの形成に及ぼす影響を図9に示す。写真は各条件において最初の燃焼が発生する前に観察された特徴的なブリッジ状すすを表わしている。ただし、図中の斜線枠の部分は供試電源の能力の限界のために条件が設定できなかった。

$F=100\text{kV/m}$ の場合、 $L=0.5\text{mm}$ の条件でのみブリッジ状すすが形成された。 $L\geq 1.0\text{mm}$ の条件においては、

	$L = 0.5 \text{ mm}$	1.0 mm	1.5 mm
$F=100\text{kV/m}$	$E_g=50 \text{ V}, t=310 \text{ s}$	$E_g=100 \text{ V}, t=660 \text{ s}$	$E_g=150 \text{ V}, t=610 \text{ s}$
200kV/m	$E_g=100 \text{ V}, t=70 \text{ s}$	$E_g=200 \text{ V}, t=220 \text{ s}$	$E_g=300 \text{ V}, t=540 \text{ s}$
300kV/m	$E_g=150 \text{ V}, t=170 \text{ s}$	$E_g=300 \text{ V}, t=230 \text{ s}$	
600kV/m	$E_g=300 \text{ V}, t=200 \text{ s}$		
$V [\text{m/s}]$	7.2	3.6	2.4
$Q [\text{l/min}]$	10	10	10

Fig.9 Effects of electric intensity and space between electro-plates on formation of soot bridges

すすの塊が電極間に堆積するだけで、ブリッジ状すすは形成されなかった。これは電界強度が同じでも電極間隔が狭い方がすすが接触しやすいためであり、ブリッジの形成時間も短縮されると考えられる。

$F=200\text{kV/m}$ と $F=300\text{kV/m}$ では、電極間隔に依らずブリッジ状すすが形成された。しかし、 $F=300\text{kV/m}$ の場合のブリッジ状すすの方が $F=200\text{kV/m}$ のものよりも細く、またその形成時間も短かった。これは、電界強度が高いほど帯電したすす粒子を引き付ける力が強くなり、ブリッジ状すすが容易に形成されるようになったためであると考えられる。

600kV/m では、ブリッジ状すすの燃焼は撮影できず、その燃焼による発光を目視により観察するのみであった。これは、ブリッジ状すすの燃焼が起こる高い電界強度の場合では、ブリッジ状すすは形成されると瞬時に燃焼してしまうので、電極間でのブリッジ状すすの保持時間が非常に短いととらえられる。しかし、高速度ビデオカメラでとらえたものと同じような燃焼現象が最初から観察された。したがって、電極間隔を狭くしたうえで印加電圧を高めれば、ブリッジ状すすの直接燃焼が現象の支配要因となり、除去効率低下の原因と推測されるすすの塊の燃焼を抑制できることが想定できた。

4. 結 論

電界型 PM 処理装置におけるすすの捕集および燃焼の挙動を観察し、以下の知見を得た。

1. $F \geq 200\text{kV/m}$ の条件では、電極間にブリッジ状すすが形成された。その際、負極側から成長するひげ状すすは正極側からよりも多いことが観察された。
2. ブリッジ状すす形成による電極間の電流値は経過時間に比例して上昇し、ある一定値に達すると急激なすすの再燃焼により電流値は低下する。最終的に電流値は一定となり、定常燃焼状態となった。
3. すすの捕集と燃焼がバランスしている定常状態ではブリッジ状すすは観察されず、代わりに電極間にすすの塊が観察された。
4. すすの燃焼はすすの塊と電極板との接触部で起こり、そのすす塊が排ガス流に乗って電極間を移動しながら燃焼し、一部は燃焼せずに下流に移動した。

5. 前報で開発した E-DPT のすす除去効率が 50% 程度に留まることの原因として燃え残りのすすの塊がそのまま外部に排出されてしまうことが考えられる。
6. 本報では 1channel E-DPT を使用して、電極間におけるすす粒子の挙動観察について報告した。図 1 に示すような E-DPT におけるすす除去効率は 50% 前後であり、現段階では実用化は難しいと思われる。しかし、本研究を基に除去効率を向上させる最適条件が得られれば PM 低減に有用となると考えられる。

参考文献

- (1) Y.Miyairi, S.Miwa, F.Abe, Z.Xu and Y.Nakasuiji, "Numerical Study on Forced Regeneration of Wall-Flow Diesel Particulate Filters", SAE paper No.2001-01-0912.
- (2) G.A.Merkel, W.A.Cutler and C.J.Warren, "Thermal Durability of Wall-Flow Ceramic Diesel Particulate Filters", SAE Paper No.2001-01-0190.
- (3) J.Kitagawa, "Current and Future Tasks of Ceramic Honeycomb Diesel Particulate Filter" JSAE, SYMPOSIUM, Challenge for Future Clean Diesel, 1996, pp.23-32.
- (4) Y.Tsushino, K.Harada and A.Takami, "Development of Catalyzed Diesel Particulate", Proceedings of 2005 JSAE Annual Congress, 2005, No.31-05, pp.9-12.
- (5) Gieshoff, M.Pfeifer, A.Schafer-sindlinger, U.Hackbarth and O.Teyssset, "Regeneration of Catalytic Diesel Particulate Filters", SAE Paper No.2001-01-0907.
- (6) P.Richards, B.Terry and M.W.Vincent, "Combining Fuel Borne Catalyst, Catalytic Wash Coat and Diesel Particulate Filter", SAE Paper No.2001-01-0902
- (7) M.Masoudi, A.G.Konstandopoulos, M.S.Nikitidis, E.Skaperdas, D.Zarvalis, E.Kladopoulos and C. Altiparmakis, "Validation of a Model and Development of a simulator for Predicting the Pressure Drop of Diesel Particulate Filters", SAE Paper No.2001-01-0911.
- (8) Z.Hang, M.Saito, K.Amagai and M.Arai, "Soot Trapping and Re-burning by Means of an Electric Field", JSME, Vol.34, No.2, 2003, pp.39-44.
- (9) Y.Mitsuyama, M.Saito, T.Furuhata and M.Arai, "Soot removal characteristics of an electric diesel particulate filter", Internal Combustion Engine Symposium, 2007, pp.495-500.