T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	 三元触媒粒子メンプレンフィルターの流体せん断応力耐久性に関する 研究
Title(English)	Durability of Three-Way-Catalyst-Particles Membrane Filter for Fluid- Dynamic Shear Stress
著者(和文)	荒井柊人, 藤井慎平, Koko Phyozin, Suteerapongpun Teerapat, 花村克 悟
Authors(English)	Shuto Arai, Shimpei Fujii, Phyozin Koko, Teerapat Suteerapongpun, Katsunori Hanamura
出典(和文)	自動車技術会論文集, Vol. 54, No. 3, pp. 566-573
Citation(English)	Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 54, No. 3, pp. 566-573
発行日 / Pub. date	2023, 5
権利情報 / Copyright	

三元触媒粒子メンブレンフィルターの流体せん断応力耐久性に関する研究*

荒井 柊人¹⁾ 藤井 慎平¹⁾ Koko Phyozin¹⁾ Suteerapongpun Terrapat¹⁾ 花村 克悟¹⁾

Durability of Three-Way-Catalyst-Particles Membrane Filter for Fluid-Dynamic Shear Stress

Shuto Arai Shimpei Fujii Koko Phyozin Suteerapongpun Terrapat Katunori Hanamura Durability of a three-way-catalyst particles membrane filter was investigated experimentally. After manufacturing of the membrane filter similar to trapping of soot, a working-gas flow was changed from a wall flow type to a straight flow type to make a constant shear stress on the surface of the membrane. Then, by integrating the fitting curve of peeling rate obtained from the experimental points from zero to infinite time, the total peeling percentage was calculated.

KEY WORDS: Heat engine, particulate filter, measurement/diagnosis/evaluation (A1)

1. まえがき

持続可能な社会の実現のために、自動車等をはじめとする 運輸機器に対して一層の環境配慮が求められている. 販売台 数が多い小型自動車においては、燃費向上や炭酸ガス排出量 低減を目的として、直噴ガソリンエンジンがハイブリッドも 含めて広く普及している^⑴.従来のようなガソリン吸気ポー ト噴射による完全予混合燃焼とは異なり、2000年初頭から導 入されたガソリン筒内直噴により少なからず粒子状物質 (Particulate Matters; PMs)がガソリンエンジンにおいても 排出されることになる. このため、従来の三元触媒(Three-Way-Catalyst; TWC)に加えてガソリン微粒子フィルター (Gasoline Particulate Filter; GPF)の装着がゼロエミッシ ョンに向けて必須となっている.この GPF や DPF (ディーゼル 微粒子フィルター(Diesel Particulate Filter; DPF))は, コ ージライトや炭化ケイ素により作製されており,10~20µmの 空孔を伴う多孔質壁により微粒子を捕集しようとするもので あるが、その初期捕集率はおよそ 50%と極めて低く、PMの捕 集にともないその捕集率は 100%に近づくもののその過程で ある表面空孔捕集において大きな圧力損失が生じることが分 かっている^{(2),(3)}.したがって、ゼロエミッション達成および カーボンニュートラル社会の実現のためには捕集初期から 100%捕集効率を維持しつつ従来に比べて低圧力損失となる排 ガス処理システムが必要である.また,エンジンとモーターの ハイブリッド式パワーユニットやe-fuelの導入も考慮し後処 理システムの小型化や多様性にも対応する必要がある.

著者らは、スス捕集過程の電子顕微鏡タイムラプス可視化 により得られた知見を基に、PM 堆積時の圧力損失を低減しつ つ、PM 捕集効率が初期から 100%となるように、直径 1~2µm の TWC 粒子をススケーキ層のように予め既存のコージライト 製 GPF に堆積させた、TWC 粒子メンブレンフィルターを提案し *2022 年 10 月 31 日受理. 2022 年 10 月 13 日 自動車技術 会秋季学術講演会において発表.

1) 東京工業大学(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

ている⁽⁴⁾. これにより三元触媒機能とフィルター機能が一体 化され、従来に比べほぼ同程度の浄化性能とほぼ100%の初期 捕集効率が得られている.また、PM 捕集時の圧力損失も従来 に比べて低く、これは TWC 粒子フィルターの平均空孔径が2 ~4μm と小さいものの、空隙率が64%と高いことに起因して いる⁽⁵⁾.

しかしながら、このTWC 粒子メンブレンフィルターがどの ように多孔質構造を維持しているのか、あるいはその強度な どについては明らかになっていない.本研究では、このTWC 粒子フィルターの耐久性を定量的に評価する手法を提案し、 TWC 粒子の剥離率を明らかにしたので報告する.

2. 実験方法

実験用サンプルの準備

2.1.

既存のコージライト製フルサイズ GPF から縦横 9×9 の流路,長さ10mm 余りの実験用サンプルを切り出す.切り出したサンプルを溶かしたワックスに含侵し,ワックスが固化した後にその両端面を研磨し,長さ10mm とする.その後ワックスをエタノールで溶解させた後に800℃にて加熱処理することでワックスを除去する.その後初期重量を測定し,水性接着剤にて熱収縮性フィルムをその両面に張り付ける(図1(a)).





(a) after covered by a heat-shrinkage film

(b) after alternatively opened by a soldering iron

Fig. 1 Miniature-sized GPF with a wall flow structure by a heat shrinkage film plug

そして入口と出口が互い違いにプラグされるように温度調節 可能なニードル半田ごてを用いてフィルムに穴を開ける(図 1(b)).これによりサンプルの内部は従来 GPF のようにウォー ルフロー構造となる.

2.2. TWC 粒子メンブレン層の形成

得られる.

図2に凝集TWC 粒子メンブレンフィルター製作装置を示す. 従来から利用されている三元触媒微粒子(平均粒径 200nm, Al₂O₃: 47.7%, ZrO₂: 26.1%, CeO₂: 18.3%, LaO₃: 3.3%, Nd₂O₃: 2.9%, PdO: 1.4%, Rh₂O₃: 0.26%)の懸濁液を超音波噴霧器に より水滴径 5~10 µm に霧化する.この水滴群はキャリアガス (窒素ガス)によって配管系に導かれ,さらに希釈ガス(窒素 ガス)と混合した後,蒸発管へ送り込まれる.この蒸発管を通 過する際に水滴中の水分が蒸発し,水滴中に含まれていた三 元触媒の微粒子(平均粒径 200nm)のみが凝集することにより 図3に示したような直径1.5 µm 程度の球状の凝集TWC 粒子が

この凝集した TWC 粒子が,作動ガスとともに既存 GPF 壁を 通過する際に捕集されることにより TWC 粒子メンブレンが形 成される.このとき,GPFの入口と出口の圧力を測定し,凝集 TWC 粒子の堆積に伴う圧力損失をモニターする.著者らの従来 の研究⁶⁰により,堆積初期から粒子による架橋過程を示す下 に凸の圧力上昇,その後の基材 GPF の表面空孔堆積を示す上 に凸の圧力上昇,さらにケーキ層堆積を示す線形の圧力上昇 を検知することにより,既存 GPF 表面における堆積量を推測 できる.なお,この TWC 粒子メンブレンフィルターの製作は, 全て表1に示す室温における作動ガス条件を用いて行った.



Fig. 2 Three-Way-Catalyst particle deposition setup



Fig. 3 Agglomerated TWC-particle

Table 1 Three-way-catalyst particle deposition conditions

Flow rate	0.325 LPM
Superficial velocity	5.4 mm/s
Space velocity (SV)	19600 /h

2.3. サンプル焼成および TWC 粒子堆積重量測定

図4に,温度700℃,800℃,900℃における焼成プログラム を示す.焼成の際の昇温および降温速度は±2.5℃/minとし, 保持時間はいずれも4時間とした.また,ウォッシュコート GPFの焼成方法⁽⁷⁾を参考に,100℃において1時間保持し水分 を完全に取り除いたのちに焼成を行った.予備実験において TWC 粒子層が厚い場合には焼成の際に基材 GPF 壁も含めてク ラックが生じることが明らかとなったため,基材 GPF の表面 空孔堆積後に一旦焼成を行い(一段階焼成),その後さらにTWC 粒子をケーキ層まで堆積させた後再度焼成する二段階焼成を 行なった.

図5に堆積前の基材 GPF 壁面(a),およびこれらの工程を 経て製作された,表面空孔堆積および一段階焼成後のメンブ レン(b),ケーキ層堆積および二段階焼成後のメンブレン(c) を示す.これらは700℃,4時間保持の焼成条件である.図 5(a)の基材 GPF 壁表面には多くの表面空孔が確認できる.図 5(b)ではその表面空孔へのTWC 粒子堆積が終了しているもの の少なからず基材の凹凸や表面うねりに伴う斑模様が確認で きる.さらにその表面にTWC 粒子が堆積しケーキ層が形成さ れると図5(c)に示されるように均一なメンブレン層表面とな っている.



Fig. 4 Program of sintering for the maximum temperature of 700°C, 800°C and 900°C and retention time of 4 hours



Fig. 5 Samples before deposition (a), after surface pore deposition and the first sintering (b) and after cake layer deposition and the second sintering (c)

本研究では基材 GPF の表面空孔堆積が終了(初期から 40Pa の圧力上昇後)した TWC 粒子メンブレン(Fig.5(b))と,そこ からさらにケーキ層まで堆積(初期から 80Pa の圧力上昇後) させた TWC 粒子メンブレン(Fig.5(c))を耐久性評価の対象と した.なお、この焼成工程において熱収縮フィルムは完全に焼 失する.堆積した TWC 粒子層の重量は、この焼成を終えたサ ンプルの重量と初期重量の差から求められる.このとき、基材 GPF の重量は空間の湿度により大きく左右されるため、全ての サンプルの秤量は、湿度 30%に調整されたグローブボックス 内に12時間以上安置した後に行った.湿度1 ポイントの差 (30%と 31%)により剥離率に約0.1%の誤差が生ずること を確認している.

2.4. 剥離実験用サンプルおよび剥離実験

焼成を終えたサンプルの流路がストレートフロー構造と なるように、TWC 粒子が堆積していない流路の入口と出口を、 セラミック接着剤を用いて目封じする.その目封じされたフ ィルターサンプルを図 6 に示す.このサンプル重量を測定し たのち、所定の流量をサンプルに導入し剥離実験を行う.所定 の時間ごとにサンプルの重量を測定し、その時間内に剥離し た TWC 粒子重量を求め、初期に堆積した TWC 粒子重量との比 を剥離率として求めた.



Fig. 6 Sample for peeling rate experiment

3. 実験結果

3.1. TWC 粒子堆積過程と圧力損失上昇

TWC 粒子メンブレン製作過程における TWC 粒子堆積過程の 圧力損失を図 7 に、その時のタイムラプス可視化における基 材 GPF 断面 SEM 像を図 8、図 9、図 10、図 11 に示す.GPF 壁 面に流入する作動ガスの空塔速度は 5.4mm/s である.このた め、初期圧力損失は 8Pa と小さい.TWC 粒子の堆積とともに、 およそ 350 秒後には圧力損失は 20Pa となり、図 9 および図 10 に示すように表面空孔のネック部(赤丸線内)にTWC 粒子に よる架橋の形成が完了しようとしている.これは図 7 におい て圧力損失上昇の変曲点近傍であることがわかる.さらに表 面空孔にTWC 粒子が堆積する(図 10 および図 11)ことによ り、図 7 に示すように圧力損失上昇は上に凸となり表面空孔 堆積が完了する.その後、時間とともに線形に圧力損失が上昇 するケーキ層堆積へと移行する⁽⁶⁾.



Fig. 7 Pressure drop increase during TWC-particles deposition on a sample for a visualization experiment



Fig. 8 SEM image of the conventional GPF cross-sectional area around surface pore without TWC-particle



Fig. 9 SEM image of TWC-particles deposition around bridge formation completion



Fig. 10 SEM image of TWC-particles deposition during surface pore accumulation



Fig. 11 SEM image of TWC-particles deposition around the completion of surface pore accumulation

3.2. 剥離速度とフィッテング曲線

表2に、剥離実験開始からの累積時間10分後,40分後, 100分後,160分後,1600分後におけるサンプル重量と初期サ ンプル重量との差を示す.このときのサンプルは、表面空孔堆 積後(初期圧力損失から40Pa上昇)のTWC粒子メンブレン層 であり、メンブレンのみの重量は35.96mgであった.焼成温 度は700°C,4時間保持である.また、ストレートフローチャ ネル内の流速は7.1m/sである.これは一般的な粒子状物質捕 集時の空塔速度である2.5cm/sから算出できるチャネル内平 均速度4.7m/s(入口9.4m/s及び出口プラグ直前0m/sの算術 平均)の1.5倍に相当する.累積時間とともにサンプル重量 が減少しているが、160分後から1600分後の間に剥離したTWC 粒子粒状はわずか0.05mgに留まっている.また、1600分後に おける剥離量1.19mgは実験前のメンブレン重量35.96mgの 3.31%に留まっている.

表3に、この累積時間表示を各時間間隔の単位時間当たり の剥離率、つまり剥離速度として示す。例えば、初期から10 分後までの10分間では0.05562%/min.の平均剥離速度となる.ここで、表3左欄カッコ内の数値は各時間間隔中心の(初 期からの)経過時間を示す。例えば、2行目の10~40(25)の場 合、時間間隔30分間(累積時間10分後~40分後)の中心は 15分であり、これに1行目の累積時間10分を足した時間が、 10分後から40分後の平均剥離速度を示す(初期からの)経過 時間となる。経過時間とともに剥離速度が急激に減少してい ることがわかる。

図12には表3のカッコ内の経過時間に対する平均剥離速度 が示されている.時間とともに平均剥離速度が急激に減少し, 1600分以降では秤量が困難となるほどに達している.そこで, この平均剥離率の時間変化を指数関数として表現することを 試みた.図12には以下の式(1)により記述されるフィッティ ング曲線が同時に示されている.

Table 2 weight of 1 we particles peeled on white capsed time			
Elapsed time [min]	Sample	Weight of particles	
	weight [g]	peeled off [g]	
initial	1.09731		
10	1.09711	0.00020	
40	1.09670	0.00061	
100	1.09638	0.00093	
160	1.09617	0.00114	
1600	1.09612	0.00119	

Table 2 Weight of TWC particles peeled off with elapsed time

Table 3 Peeling rate with time

Time interval [min]	Peeling rate [%/min]
$0 \sim 10(5)$	0.05562
$10 \sim 40 (25)$	0.03801
$40 \sim 100 (70)$	0.01483
$100 \sim 160 (130)$	0.00973
$160 \sim 1600 (880)$	0.00010

$$Peeling \ rate = Be^{-At} \tag{1}$$

ここで, tは経過時間であり, A は実験点を用いた最小二乗法 により決定され, B は t =0 に近い2つの実験点を通る直線 の縦軸切片の値とした.このフィッティング曲線を初期から 無限時間まで積分することにより, 無限時間の剥離実験によ り得られる全剥離率が推定できる.その値は 3.35%である. 一方, 剥離実験により得られた 1600 分後の剥離率は3.31% である.先述のグローブボックス内の湿度誤差から生ずる秤 量誤差は剥離率 0.1%の誤差を生ずることから考えると, 1600 分後の剥離率は無限時間後の剥離率としても十分耐えら れることがわかる.



Fig. 12 Peeling rate with elapsed time



Fig. 13 Pressure drop increase during TWC-particle deposition up to surface pore accumulation completion

3.3. 表面空孔堆積メンブレン層の剥離実験

図 13 には、表面空孔堆積 TWC 粒子メンブレン層の作製時 の圧力損失上昇を示す.いずれも初期圧力損失から 40Pa の圧 力損失上昇に達した際に堆積を終了させたメンブレン層であ る. また, サンプル番号と焼成温度その保持時間がそれそれ記 されている. なお, TWC 微粒子スラリーからの噴霧量が必ず しも一定とはならないため、実験によっては図7のような時 間とともに S 字曲線を描く圧力損失上昇とはならないが、ス ラリー内の TWC 濃度が等しく空塔速度も等しければ単位時間 あたりに供給される TWC 粒子数に関わらず空隙率の等しいメ ンブレン層が製作できることから, 圧力損失上昇をモニター することによりメンブレン層厚みを推定できることをここに 記す.3.2節にて無限時間後の剥離率をフィッティング曲線に て推定する際の焼成温度は700℃であるが,実験はそれに加え て表 4 に示されるように 800℃ (Sample ③と④), 900℃ (Sample ①と②) について行った. このとき, TWC 粒子メンブ レン構造を維持する成分のなかでアルミナのガラス転移温度 が最も低く,およそ900℃である.したがって,各温度におい て焼成しても図 3 に示した球形を維持しメンブレン構造に及 ぼす影響はほとんどないと考えられる.後に示すように、表面 空孔堆積後とその焼成後の圧力損失がほぼ等しいことからも 影響がないことがわかる.

Table 4 Initial and final pressure drop of each sample (Surface pore deposition)

Sample	Initial	Final	Sintering
number	pressure drop	pressure	temperature
	[Pa]	drop [Pa]	[°C]
Sample(1)	6	46	900
Sample ²	6	46	900
Sample ³	8	48	800
Sample ⁽⁴⁾	8	48	800

図14には、この表面空孔堆積TWCメンブレン層の平均剥 離速度の経時変化を示す.ストレートフローチャネル内の平 均流速は9.4m/sとした.これはフルサイズGPFチャネル内 部の平均流速4.7m/sの2倍、すなわちGPFにおける入り口 チャネル内の最大流速である入口流速と等しい流速である. さらに指数関数によるフィッティング曲線も同時に図14に 示す.この条件においても平均剥離速度は時間とともに急激 に減少し、指数関数を用いたフィッティング曲線から250分 後には無視し得るほど平均剥離速度が小さくなっていること がわかる.表5にはこの指数関数を初期時間から無限時間ま で積分して得られた全剥離率を示す.温度800℃により焼成 されたTWC粒子メンブレンの剥離率が2.69%(Sample ③)ある いは1.23% (Sample ④) であるのに対して、温度900℃によ り焼成したメンブレンの剥離率が4.20% (Sample ①) あるい は4.49% (Sample ②) と高くなっている. 図 15 には横軸を焼成温度として,流速 9.4m/s における表 5 の結果と,流速 7.1m/s における図 12 の結果および秤量限界 となった 800℃と 900℃の結果を示す.先述したように流速 7.1m/s においては,焼成温度を 800℃以上とすることで剥離 は無視し得るほど小さくなるが,流速が 9.4m/s となると,焼 成温度を 800℃や 900℃と高くしても剥離することがわかる. さらに焼成温度 900℃の場合の方が 800℃に比べて剥離率が高 いことが示されている.TWC 粒子において 47.7%を占めるアル ミナのガラス転移温度はおよそ 900℃であることから考える と温度が高いほど剥離率が低くなると考えられるが,これに 加えて,基材のコージライト製 GPF とTWC 粒子の熱膨張係数 が数倍異なることから,表面空孔堆積メンブレンでは,基材と の接合部からの剥がれが多いことが考えられる.



Fig. 14 Peeling rate of TWC-particle membrane (Surface pore deposition)

Table 5 Peeling percentage of each sample (Surface pore deposition)

Sample number	Measured peeling percentage [%]	Total peeling percentage [%]
Sample①	3.99	4.20
Sample(2)	4.46	4.49
Sample ³	2.47	2.69
Sample ④	1.03	1.23



Fig. 15 Total peeling percentage with sintering temperature (Surface pore deposition)

3.4. ケーキ層堆積メンブレン層の剥離実験

図16にケーキ層堆積メンブレン層の製作過程の圧力損失上 昇を示す.この場合には表面空孔堆積後(図16中の1st step deposition後)に一旦所定の温度で焼成し、その後再び初期 から80Paの圧力損失上昇までTWC粒子を堆積させ(図16中 の2nd step deposition)、再び同じ所定温度で2回目の焼成 を行っている.このとき、各サンプルにおいて1st step deposition後の圧力損失と、それを焼成した後の圧力損失が 概ね等しく、圧力損失上昇が連続していることがわかる.すな わちいずれの焼成温度においてもメンブレン構造が焼成前後 においてほとんど変化ないことが示されている.また、いずれ のサンプルにおいても2回目の堆積過程ではほぼ線形に圧力 が上昇しケーキ層堆積となっていることがわかる.表6に示 すように、Sample⑤と⑥は焼成温度900℃、Sample⑦は800℃ である.



Fig. 16 Pressure drop increase during TWC-particle up to cake layer

Table 6 Initial and final pressure drop of each sample

(Cake layer deposition)			
Sample	Initial	Final pressure	Sintering
number	pressure drop	drop [Pa]	r
	[Pa]		
Sample ⁵	6	86	900
Sample ⁶	6	86	900
Sample ⁷	8	88	800

図 17 には、このケーキ層堆積 TWC 粒子メンブレン層の平均 剥離速度の経時変化を示す.ストレートフローチャネル内の 流速は平均の2倍の9.4m/sとした.同時に指数関数で記述さ れるフィッティング曲線も実線で示されている. 平均剥離速 度は初期から低く、また時間と共に急激に減少し 150 分後に は無視し得るほど低くなっている.フィッティング曲線を積 分して得られる無限時間経過後の剥離率を表7に、焼成温度 を横軸とした剥離率を図18に示す.ケーキ層堆積TWCメンブ レンにおいては、温度が高いほど剥離率が低くなっている.先 述したように TWC 粒子の 47.7%を占めるアルミナのガラス転 移温度は約 900℃であることからメンブレン層内の結合が強 くなると同時に, 流体せん断応力が, 結合が強くなった TWC 粒 子ケーキ層の表層近傍にのみ作用し、メンブレン層内部には ほとんど速度勾配が生じないため TWC 粒子と GPF 基材の接合 部には大きな応力が作用しなかったこと、さらに2回目の焼 成により構造内の内部応力が緩和されたことなどが考えられ る.



Table 7 Peeling percentage of each sample

(Cake layer deposition)			
Sample number	Measured peeling percentage [%]	Total peeling percentage [%]	
Sample ⁵	1.03	1.30	
Sample ⁶	0.23	0.31	
Sample ⁷	1.02	1.42	



Fig. 18 Total peeling percentage with sintering temperature (Cake layer deposition)

4. まとめ

本研究では、三元触媒粒子メンブレンフィルターにおける 流体せん断応力耐久性を、メンブレン層厚みと焼成温度を変 化させて評価した.メンブレン表面全域に、従来のPM 捕集時 のチャネル平均速度の2倍の流速による一定のせん断応力を 付加した場合においても、900°Cによる2段階焼成により、そ の剥離率は1%程度であることを示した.また、表面空孔堆積 TWC メンブレンフィルターに比べて、ケーキ層堆積TWCメンブ レンフィルターの方が剥離しにくいことを示した.これらは、 既存基材とTWC 粒子の熱膨張率の相違やTWC 粒子成分のガラ ス転移温度に起因する焼結、さらに2段階焼成による応力緩 和などによると考えられるが、さらに詳細に検討する必要性 も明らかとなった.

謝辞

この成果は、自動車用内燃機関技術研究組合(AICE)の支援 及び、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の委託業務(JPNP14004)の結果得られたもので す. 心より感謝申し上げます. 参 考 文 献

(1) 日本機械学会,日本機械学会 最近十年のあゆみ,第3 最近十年の部門活動,7.エンジンシステ部門,

https://www.jsme.or.jp/history/2007-

2016/data/pdf/divesd.pdf

(参照日 2022 年 10 月 18 日)

(2) Ryoko Sanui. A study on particulate matter trapping process in filtration through time lapse visualization using scanning electron microscope, doctoral dissertation, 2017.

(3) Satoshi Ihara, Hiroyuki Kurita, Takashi Araki, Hiroshi Murakami, Katsunori Hanamura, Feasibility Study of Membrane Filter for Gasoline Particulate Filter through Electron Microscopic Time-lapse Visualization of Soot Trapping Process, Extended Abstracts of the Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference, 2019.

(4) Teerapat Suteerapongpun, Katsunori Hanamura. Numerical simulation of soot trapping process and manufacturing of three way catalyzed membrane filter, Int. J. of Automotive Engineering, Vol.13, No.2, pp.38-45, 2022.
(5) Phyozin Koko, Teerapat Suteerapongpun, Katsunori Hanamura Manufacturing of Three-way Catalyst Membrane Particulate Filter and Porosity Measurement using Electron Microscopy Image Analysis, JSAE Annual

Congress (Spring), 2022.

(6) Ryoko Sanui, Katsunori Hanamura. Scanning electron microscopic visualization of bridge formation inside the porous channels of diesel particulate filters, SAE Int. J. Fuels Lubr. 9(3), pp.725-733, 2016.

(7)ビー・エイ・エス・エフ・コーポレーション, ウェン・チェ ンメイ, 微粒子トラップを有するガソリンエンジン排出ガス 処理システム, 特表 2011-525579, 2011-9-22.