

II-1 技術動向調査

DPFシステムの実用化研究を進めるにあたり、主に海外を中心に年次毎の調査を行った。アメリカの自動車技術会(SAE:Society of Automotive Engineers)は、1984年からDPFに関する論文を特集してきており、SAE論文を主体に調査を行うことによって、DPFシステム研究の大筋の動きをとらえることができた。技術面における調査結果の信ぴょう性については、特許調査を行い、現状ならびに今後の課題の捉え方に、文献調査との整合性があることを確認した。また、DPFシステムの実用化の進め方など、開発研究の周辺の事柄については、海外調査を行ったワーキンググループの調査資料などを参考にすることができた。

資料Ⅲ-1に文献等における技術動向調査を示す。

1. DPFシステム

DPFシステムの基本的な構造ならびに主な仕様について述べる。

(1) 基本的な構造

DPFシステムは、エンジンから出るPMを捕集するDPFと、捕集したPMを燃やすなどして再びフィルタの捕集機能を回復させる再生装置とを組み合わせたものである。構造的には、DPFと再生装置が一体型になったのシステムが多く、排気管のマフラ部に取り付けて使用する例が多い。

通常の運転条件におけるディーゼルエンジンの排出ガスの温度は、200から400℃である。一方、PMの着火温度はおおよそ600℃である。したがって、どうし

ても再生装置が必要である。

図1・1にDPFシステムの一例を示す。ある量のPMがDPFに捕集される時点で、再生が行われる。排出ガスは切換弁によってマフラ側にバイパスされ、その間、通電された電気ヒータによって、DPFに捕集されたPMが燃焼する。プロアは、燃焼用の空気を供給する。

一組のDPFシステムをシングルDPFバイパス方式、バイパス側にもう一組のシステムを取り付け、二つのDPFシステムが交互に捕集再生を繰り返す方式をデュアルDPF方式と言う。DPFシステムの技術上の大きな課題は、再生時の温度制御が難しく、DPFにクラックや溶損が生じてしまうこととされている。その対策のため、各種のDPFあるいは再生装置の研究が進められている。

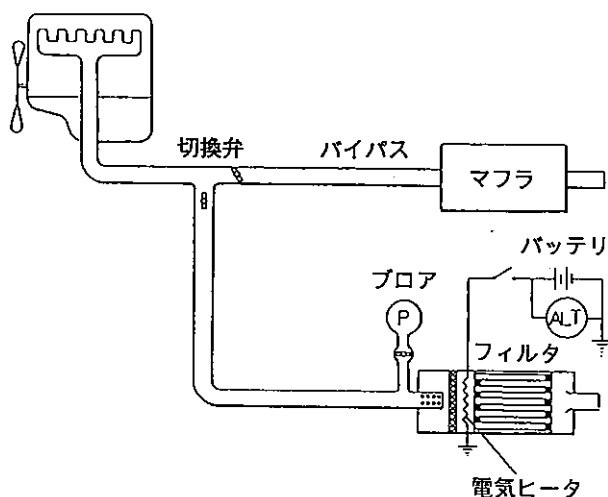


図1・1 DPFシステムの一例

(2) PM捕集メカニズムと各種DPF

DPFの基材には、耐熱性の高い多孔質性のセラミックスや金属などが用いられ、そのPMの捕集メカニズムは、大きく2種類に分けることができる。一つは、DPF表面にPMを捕集し、PMそのものがフィルタ媒体となる捕集メカニズムを持つもので、表面捕集型と呼ばれる。もう一つは空隙を持つ母材が集まった集合体で、PMが空隙に沈着するメカニズムを持つ空隙沈着型である。表面捕集型は、捕集効率が高いが目詰まりがしやすく、空隙沈着型はその逆の特性を持つ。

a. 表面捕集型DPF

表面捕集型の代表例として、WFM（ウォールフローモノリス）とCF（セラミックスファイバ）型DPFを上げることができる。図1・2にWFMの構造を示す。排出ガスはフィルタの正面の開口部よりセラミック壁に囲まれたセルと呼ばれる通路内に入り込むが、セルの後端部が封じられているために隣接するセル壁を通過して流れ出る。排出ガス中のPMは、セル壁の表面に捕集される。図1・3にCF型のDPFを示す。パンチメタルの金属パイプにセラミック繊維を巻き付けたCFコイル（以下、CFCと記述する）と称するものである。表面捕集型に入る各種DPFには次のようなものがある。

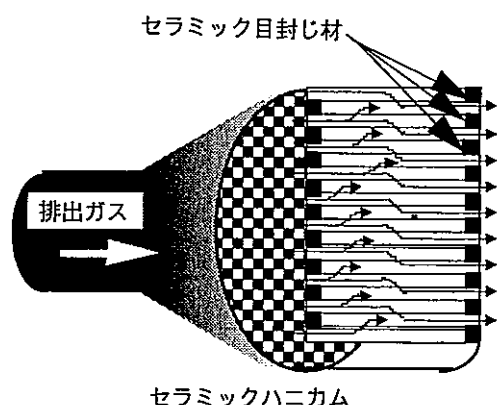


図1・2 WFM型DPFの構造

①コーディエライトWFM

WFM型のDPFが一番多く使われている。その性能は高く評価されており、ほとんどは、アメリカのコーニング社と日本ガイシ（NGK）によって供給されている。両社のDPFの基材にはコーディエライト（ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ）が使われている。コーディエライトは、熱膨張率が比較的小さく、耐熱性も高いが、DPF内に捕集したPMを燃焼させる際の局所的な再生温度の上昇によって、クラックや溶解が生じることがある。

この問題に対して、コーニングならびにNGK社は、DPFの耐久性を向上させる3つの要素を上げている。

①より低い熱膨張率の基材

②DPFを保持する金属性のキャニングとDPFの間に入れる緩衝マットの設計法

③耐熱温度以下で均一な温度分布で再生させる技術
コーニング社は、②の設計法に関してPMの捕集再生を繰り返す試験を行い、DPFとDPFを保持する金属容器（キャニング）の間に入れるセラミックマットとキャニングで受ける円周の圧縮力を測定している。

解析の結果、DPFのセル壁に入る均一なマイクロクラックは、DPFの弾性係数を60%迄減少させていることがわかった。弾性係数の減少は、DPFの局所的な内部応力を低減し、キャニングの圧縮力とDPFの熱応力とがバランスして、クラックが入ったとしても、クラックの広がりを抑えることができPMの漏洩につながらないとしている。

したがって、両社は、WFMの耐久性の向上には熱膨張率を下げるのが重要で、コーニング社は熱膨張率をさらに下げたEX-80を、日本ガイシはC356EとC415Eと称する新基材を開発し、捕集効率は従来品と同等で、使用上の耐熱温度を200℃ほど向上させ、1150℃くらいまで耐えるDPFの供給を可能にした。

②炭化珪素WFM

日本のイビデン社ならびにデンマークのNOTOX社は、炭化珪素を基材とするWFMを供給している。炭化珪素の特徴は、他のセラミックス基材に比べて熱伝導率は3から20倍ほど大きく、融点（昇華）温度が2000℃以上で高温耐久性は優れていると言える。しかし、熱膨張係数はコーディエライトに比べて約4倍ほど大きく、クラックの問題を解決した基材とは言えない。

そこで、イビデン社は、850℃に熱したDPFに常温

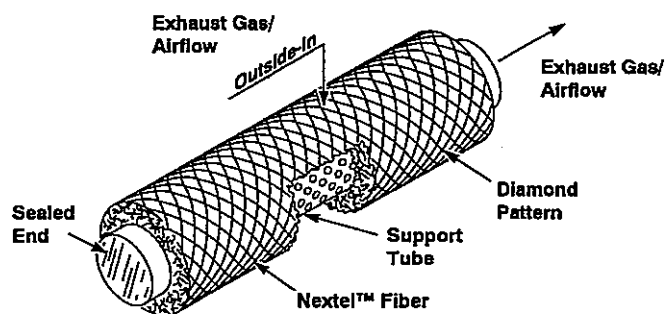


図1・3 CF型DPFの構造

の空気を吹き付けて急冷する熱衝撃試験装置を開発し、クラックの問題を生じない最適形状を追求した。その結果、求められた最適形状（以下セグメントと記述する）は□33×150ミリであることがわかった。

しかし、1セグメントの容積では小さすぎて実用性がなく、複数のセグメントを耐熱接着剤材で重ね合わせた接合型DPFを開発した。炭化珪素WFMは、再生温度を同じにしてコーディエライトと比較すると、約2倍のPMの量を再生することができることなどが報告されている。

③コーディエライトクロスフローモノリス (CFM)

旭硝子社は、DPFにクラックが生じるのはDPFの中でPMを燃焼するためであり、外で燃やせばよいとの発想で、捕集したPMに圧搾空気を吹き付けてふり落とす構造を持つDPFを推奨している。この再生方式は、逆流空気噴射洗浄（以下逆洗と記す）方式と呼ばれ、図1・4に捕集再生メカニズムを示す。縦穴から進入する排出ガスは、縦穴の下流側が閉じられているために、直角に交差するスリットの壁を通して流れる際に、PMは縦穴の内壁面に捕集される。再生時には、捕集方向とは逆の方向から高压空気を瞬間的に吹き付けることによって、PMは縦穴から下部のチョッパにふり落とされて電気ヒータによって焼去される。

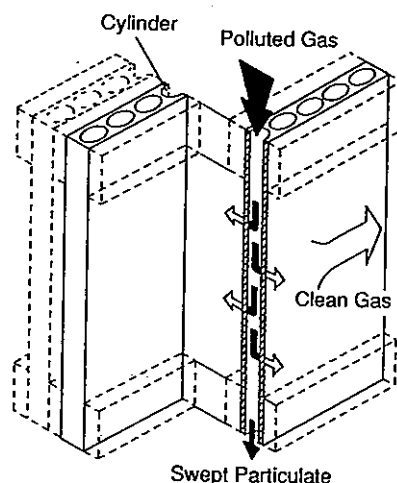


図1・4 クロスフローモノリス型DPF

④セラミックファイバコイル (CFC)

アメリカの3M社は、パンチメタルの金属筒にセラミックファイバの糸を巻き、金属の円筒を発熱体とする電気ヒータ再生方式を用いたDPFを供給している。

CFCの実用上の耐熱温度は900℃くらいと言われるが、CFC表面に堆積したPMの燃焼方向の距離（厚さ）が短いので、燃焼時間が短く、WFMのように高温の熱溜まりができる心配はない。

⑤ニット状CF

ドイツのTTM社は、セラミックファイバをニット状に折り込んだセラミック繊維のDPFを供給している。図1・5にニット状DPFを示す。基材には、ムライト（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ ）、アルミナ（ Al_2O_3 ）、シリカ（ SiO_2 ）およびグラス繊維などが使われており、糸の織り方2種類の評価試験を行った結果、織り方を弱くした方が、熱劣化に対する耐久性が低いなどがわかり、厚さ10と20mmのニットをリング状に丸めたカートリッジの性能などが報告されている。捕集効率は、厚さ20mmの方が高く、10mmの場合は内から外側にガスを流した方が捕集効率が高いが20mmではその差はない、圧損は外から内側に流した方が低いことなどが明らかにされている。

1000回の再生を行う500時間の耐久試験の結果では、耐久性には特に問題はないようであるが、灰分の堆積により圧損が増加したことなどが報告されている。

同社は、燃料に着火促進剤を添加する再生方式の建設機械、乗用車および路線バスを用いた耐久試験を行い、5万キロ走行後の捕集性能を調査した。その結果、浄化性能はやや低下したが繊維が硬化するなどの劣化はないと報告している。

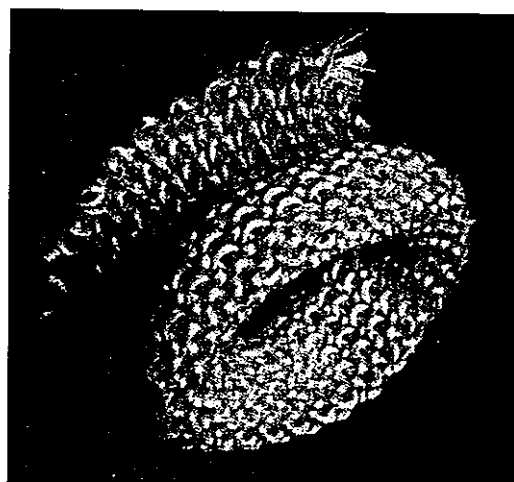


図1・5 ニット状CF型DPF

b. 空隙沈着型DPF

空隙沈着型の代表例には、セラミックフォームと金属DPFを上げることができる。両DPFは、発泡状あるいはメッシュの積層体で、大小さまざまな空隙の集合体の中をPMを含んだ排出ガスが通過するときに、PMの速度がゼロになる場所にPMが沈着する捕集メカニズムが考えられている。

①セラミックフォーム型DPF

アルスイス社は多種多様の形状の空隙を持ったセラミックフォーム型DPFを試作し、その調査結果を報告している。図1・6にセラミックフォームを示す。供試されたDPFは6種類で、捕集面積を広げるために流れ方向に、複数の深孔を明けたものなどを試作し、小型から大型車まで対応するDPFサイズを揃えている。

三菱自動車は、排気量2.3ℓのターボエンジン車に、

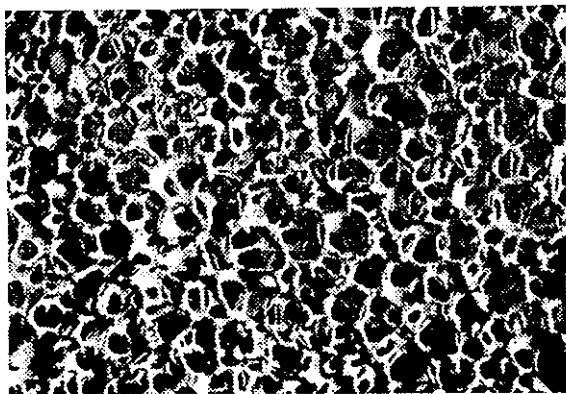


図1-6 セラミックフォーム型DPF

容積が4.5ℓのセラミックフォームDPFを取り付け、8万キロの走行を行っている。同社は、DPF内に再生が終了した通路のような部分ができると、通路周辺のPMが排出ガスの流れに乗って吹き出すブロー現象があることを指摘している。

②金属多孔体DPF

DPFの基材に金属を使用する例は古くからあり、セラミックに対してクラックの問題はなく、低価格のDPFができるとされている。

メタルメッシュと呼ばれる金属たわし状のDPFは、カナダの採鉱用車両への採用例などの報告がある。用

いられたメタルメッシュにはステンレス系の金属が使われ、触媒作用による再生方式が期待されたが、排出ガスの温度条件によっては、硫酸ミストが発生することが明らかにされている。

住友電気工業は、近年、金属多孔体と称するDPFを供給し始めた。図1・7に同社の金属多孔体DPFを示す。DPFの孔径は500ミクロンほどで、捕集効率は、年々向上しており路線バスへの搭載システムの開発が進められている。

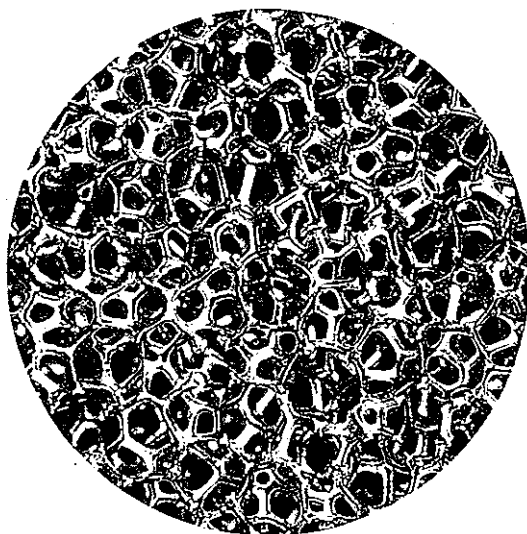


図1-7 金属多孔体DPF(住友電工)

(3) 再生方式

再生用の着火源には、バーナあるいは電気ヒータが使われるのが一般的であるが、新しい再生方法としては高周波電熱等を利用した方法等が提案されている。DPF内に燃え残ったPMが次の再生時に加算されることなどが過熱の原因となり、捕集したPMを確実に燃焼させることが必要である。

①電気ヒータ方式

DPFの前面に電気ヒータを配し、DPFの端面部のPMを着火した後、適量の燃焼用空気を送り込んでDPF内の温度を制御する方式である。電源には車両のバッテリーが使われるが、車両の運転が停止する夜間に外部電源を用いて長時間の再生を行う方式もある。

再生時のガス量が多すぎると中心部だけが再生され、周辺に燃え残ったPMが蓄積する。逆に再生時のガス

量が少なすぎると、DPF中心部の後端に高温の熱溜まりができるなど、この方式の温度制御は難しい。

②バーナ再生方式

バーナ再生方式は、着火源が軽油等の燃料バーナに代わっただけで、電気ヒータ再生方式と構造は変わらない。バーナ再生方式は、電気ヒータに比べて再生ガス量が多いため、再生時のDPF温度がより均一になりDPFのクラックの問題を軽減することが出来る。

バーナの供給熱量を十分に大きくして、全量の排出ガスを600℃以上に昇温して再生を行うフルフローバーナ再生方式は、DPFを均一な温度にすることができ、クラック対策に有利である。図1-8にドイツのゾウナー社が供給しているWFMを用いたフルフローバーナ再生システムの再生時の温度分布を示す。再生時のDPFの温度は、700℃前後の均一な温度分布を示しており、DPFのクラックの問題はほとんどないと言える。しかし、月1回の燃料バーナのノズルの清掃などのメンテナンスが必要とする報告がある。

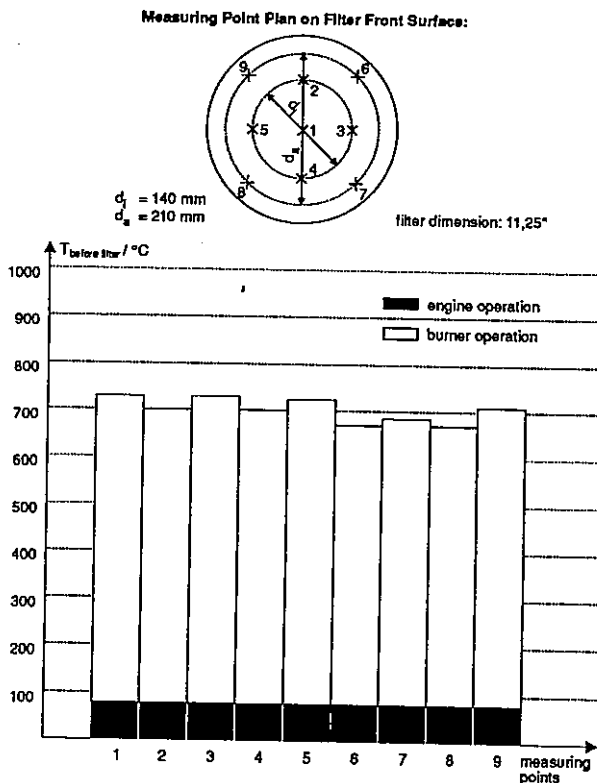


図1-8 フルフローバーナ再生時のWFM型DPF温度分布

③触媒再生方式

触媒を使いPMの酸化を促進し、再生開始温度を下

げることができる。負荷の高い走行ではPMが自然に着火する自己再生が期待できる。

ベンツ社は、銅触媒を担持したDPFに、アセチルアセトンをエンジン停止直後に噴射し、次のエンジン始動時に過酸化状態になったDPFが、再生を起こすシステムを開発し、多くの路線バスに取り付けて実用化を確かめた。

フォルクスワーゲン社は、非常に酸化力の強い五酸化鉄の塩基物を燃料に注入し、再生を起こさせるシステムを搭載した車両の試験を行った。再生に必要な10万マイル分の酸化剤が、予め車両に密閉状態で搭載されており、再生時に、噴射ポンプに供給された酸化剤がDPF内で自己着火する。

燃料に添加剤を混入する再生方式もあり、アメリカのルブリゾール社は銅系の、フランスのローヌプーラン社はセリウム系の燃料添加剤を推奨している。表1-1は、各社の実験結果から触媒の再生開始の温度を整理したものである。触媒担持による再生開始の温度は400℃ほどである。一般の走行では、長い時間400℃以上の排気温度を継続することは少なく、触媒担持だけの再生方式に頼ることはできないが、燃料添加剤による再生方式の実用可能性はありそうである。

表1-1 再生開始の温度

開発機関	再生開始温度℃		
	触媒無し	触媒有り(被覆)	触媒有り(添加)
GMR	540	450	
Cummins	600		
NGK	450-500		
Corning	675		
三菱		350-400	
日本触媒		400	
SWRI	650		250
Ford	530		370
FEV他		400	250
Benz	650	380	210-310
Univ. of Thessalonik		420	250
Ontario他			250
(平均)	(580)	(400)	(270)

触媒再生方式の問題点としては、PMの酸化を促進すると同時に排気ガス中のSO₂の酸化を進めることになり硫酸ミストと呼ばれる硫酸化合物(SO₄, SO₃, 無水硫酸)を生成することがある。活性力の弱い卑金属系の触媒を使用することによって硫酸ミストの生成

が防げるとされているが、卑金属系触媒は、貴金属系の触媒に比べて耐久性が低いとされている。燃料中の硫黄含有率を極力下げること今後必要であろう。

NO_xとPMを反応させる触媒技術がある。アメリカのジョンソマッセイ社は、DPFの前にプラチナ触媒を取り付け、排気中のNOをNO₂に変換した後、DPFに捕集されたC（カーボン粒子）とNO₂とが低い温度で酸化反応を起こすことを確めている。反応温度は265℃と低く、硫酸ミストの発生も抑えられるとしている。モデルガスの実験を行い、水分を含む場合の変換効率は高いと報告している。NOとH₂OからNHO₃を生成し、NHO₃とCとの反応モデルを示しており、すべてNO₂に変換する必要はなくN₂O₅やN₂O等の酸化を促進する物質があればよいとしている。後段のDPFには特に触媒を被覆する必要はなくウォッシュコート（酸化アルミナ）のみでもよいとの結果を得ている。

④吸排気絞り再生方式

排気および吸気管に取り付けた絞り弁を作動させ、給気量を減らして空気に対する燃料の割合を大きくし、かつ、排気行程における断熱圧縮によって排気温度を上昇させる再生方式である。

⑤他の再生方式

イギリスのロックバウロ大学とカナダ原子力エネルギー研究所は、高周波電熱を利用した装置を再生装置に使うことを推奨している。ロックバウロ大学は、低出力の高周波電熱補助再生装置を使った再生装置（MAR）を試作し、実験を行った。WFMにMARを

組み込んだ出力1kWの装置を作り、MAR単体とエンジン試験を行った結果、WFMの上流部にPMの加熱を促進する最適の領域があり、またPMが存在するところだけが再生されるため、再生効率を上げることができることなどを報告している。高周波加熱は、すでに家庭用の電子レンジで実用化されており、安全で値段はバーナ等よりは安く、寿命は4000時間である。大型エンジンの排気対策部品には、エンジンメーカーがユーザに対して行う保証期間が8年間あるいは29万マイルであることが義務づけられているが、その間の再生回数は保証できるとしている。しかし、DC12か24Vの自動車用電源をAC240Vに変換することが課題であるとしている。

カナダ原子力エネルギー研究所は、高周波加熱の再生装置を試作して再生時の燃焼観察を行っており、燃焼が全体に均一に伝播して良好な再生が可能であるとしている。人体に与える高周波の影響は不明で、電波の漏洩を如何に防ぐかが課題となる。

ミネソタ大学は、高圧の電気集塵装置を用いた捕集実験を行っており、捕集効率は30から40%で、今後、構造を変えるなどの改良が必要であるなどの開発例を報告している。

2. 研究開発の経緯

前項では、十数年の間に開発された各種DPFシス

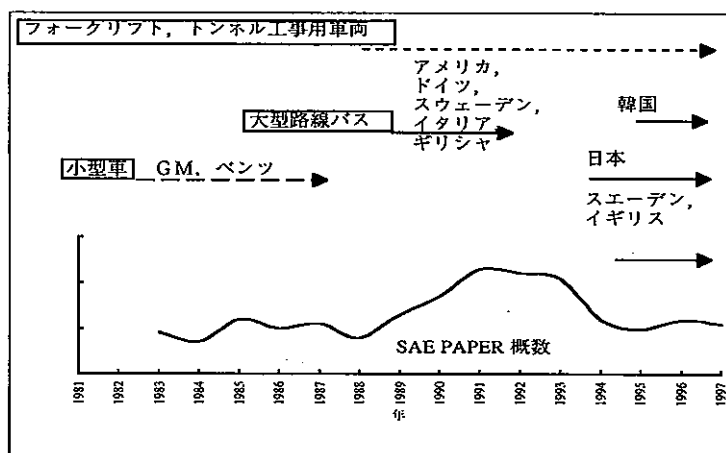


図2-1 DPFシステムの実用化の動き

テムについて述べた。これらのDPFシステムが開発された背景ならびに経緯について述べる。

図2・1に1980年代から行われてきたDPFシステムの実用化の動向を示す。DPFシステムの実用化は、アメリカの排気規制が一段と強化された1994年を目標に始められた。1988年から2, 3年間はDPFシステムの開発研究が活発に行われたが、エンジンの改良によって1994年のアメリカの厳しい規制値が達成できることに一応の目途が立ち始めた頃から低調になった。

しかし、近年、韓国、スウェーデン等において、再びDPFシステムの実用化の動きがある。都市内の大気保全を要望する市民の声は大きく、排気煙が目に触れる路線バスを対象としたDPFシステムの実用化の研究は続けられている。

①1984-1987年の動き

小型車を対象にDPF単体、あるいはエンジンベンチにおける試験研究が多く実施された。アメリカのGMおよびドイツのベンツ社は、精力的にDPFシステムの開発を行った。特にベンツ社は、PM規制が厳しいカリフォルニア州において、触媒再生方式のWFM型DPFを搭載した排気量、3.2ℓのディーゼル乗用車を販売した。しかし、ベンツ社は、2年後にDPF車の販売を中止している。その理由は公表されていない。予想以上のPMがDPFに堆積するため、ユーザが運転性の悪化を指摘したためと言われている。

GM社は、小型から大型車までのDPFシステムを開発し、多くの走行試験を行ったが、PMの捕集性能は高く評価したものの、耐久性および信頼性の評価に大きな課題を残して開発を終了している。

②1988-1992年の動き

DPFの有効性は高く、強化される規制に対する将来性が認められつつあった。そのため、DPFシステムの耐久信頼性の向上に関する研究が多くなった。1988年までは、エンジンメーカーの研究開発が多かったが、エンジンメーカーに代わって、アメリカのコーニンク社、日本ではNGKなどのDPF供給メーカーによる、耐久性に関する解析などの研究が多くなった。また、新型のDPFも多く出現した。

再生技術の改良も進められ、エンジンメーカーに代わってアメリカの部品メーカーであるドナルドソン社、カナダの研究機関ORTECH社、ヨーロッパの部品メーカ

が新型DPFシステムの開発報告を多く行っている。しかし、走行試験に使われた実験例の多くは、依然としてWFM型のDPFとバーナあるいは電気ヒータの再生装置の組合せを基本としており、新型のDPFシステムは、総合的な性能ならびに耐久性の確認までは至っていない。

開発研究が進められた結果、大幅とは言えないが、各種改良によって耐久性等は向上した。しかし、いくつかのDPFシステムが新型車に搭載された例はあるが、継続的に生産された例はなく、十分な信頼性があるとは言えない。そのため、DPFの実用化を断念したり、研究開発への大きな投資をやめるメーカーも出始めた。大部分の自動車メーカーは、規制の強化に対して、燃料噴射系の改良や電子制御の採用、燃焼室の改良などのエンジンモディフィケーションによる開発研究に取り組み、並行して、触媒コンバータやDPFシステムなど後処理技術の開発研究を進めるようになった。

DPFシステムの十分な信頼性を得るにはまだ時間を要すると判断される一方、政府や自治体が推進する路線バスの営業運転における実走行試験が欧米の各所で実施された。DPFシステムにはまだ多くの問題は残されているが、ディーゼル排出ガス対策の緊急性から、実用運転を実施した上での信頼性の問題を議論し、可能性を見いだそうとする進め方が見られた。

日本においても、トンネル掘削用の車両にはDPFシステムが導入されており、DPFの関心が高まってきた。国内の自動車をはじめとする各種メーカーの研究発表が多くなり始めたが、海外ではDPFに積極的に取り組んでいたベンツをはじめとする自動車メーカーの研究発表がなくなった。

③1993年以降の動き

欧米各国で行われたDPFシステムを搭載した路線バスの試験結果が報告された。特にアメリカ、ギリシャ、イタリアにおいて実施された試験結果の詳細が伝えられた。しかし大規模に進められたドイツの試験結果については、内容の多くが報告されていない。これらの走行試験は、報告後に全て終了しており、現在継続されているものはない。