

# 論文の内容の要旨

論文題目： 自動車用排出ガス浄化装置の実用化研究

氏名： 橋本 重治

自動車は 20 世紀初頭以降、ここ 100 年にわたり発展し、1970 年代以降の高度経済成長に寄与し経済産業の発展をもたらしただけでなく、生活環境の向上をもたらしている。しかしその一方で、自動車のガソリンエンジンやディーゼルエンジンから排出される、一酸化炭素 (CO)、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)、燃料の未燃焼分の炭化水素 (HC) および主にディーゼルエンジンから排出される浮遊粒子状物質 (PM) が、大気汚染を引き起こし、沿線住民への健康被害を招いていた。

このような排出ガスによる人体への影響を避けるため、1970 年以降に自動車からの排出ガス規制が強化されてきた。特に 2000 年以降には排出ガス浄化規制が一段と厳しくなり、1997 年にアメリカ合衆国カリフォルニア州の Air Resources Board が提案した ULEV 規制値は、従来の 1992 年規制値で定められた排出規制量と比較し、Non-Methane Organic Gases (NMOG) では 84 % 減という厳しい内容であった。この規制値では、エンジン始動後の数秒から十数秒後には許容される HC の総排出量を上回る為、触媒担体を電氣的に加熱する事により、触媒が活性化する時間を短縮する手法として電気加熱型触媒 (EHC) が提案された。

一方、欧州では 1990 年以降にコモンレール式燃料供給システムが登場すると、高級車を中心にディーゼル車の販売比率が増加し、ディーゼル車から排出される窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) やパーティキュレート (PM) の除去が社会問題となった。抜本的な PM 排出量低減対策として大型車を中心にディーゼル・パーティキュレート・フィルター (DPF) の実用化が検討されるようになった。

このような状況により、本研究では電気加熱式触媒コンバータ (EHC) およびディーゼ

ル・パーティキュレート・フィルタ（DPF）の実用化研究を行った。

EHCの実用化研究については、フェライト系焼結金属を薄板状のハニカム形状に押し出し成形し、これにスリットを入れたEHCの開発を行った。このEHC担体は、通電加熱を図るために従来のセラミックス製の触媒担体に代わり金属製担体を用いており、EHC担体の加熱による熱膨張吸収が設計上の大きな課題になっていた。さらにEHCを車載搭載するために、EHCの消費電力を実用搭載可能となる2.5 Kw程度以下に抑え、さらにオルタネータによる昇圧により、EHC抵抗値として350 mΩが求められた。この抵抗値を実現するためには、EHC担体の担体厚を薄くし、スリット本数を多くし回路長を長くする必要があったが、これは、EHC担体の剛性を低下させるため、構造信頼性確保の課題になっていた。

本研究では、EHC担体の熱膨張を吸収するため、セル形状を六角形にするとともに、“Ring Fit”型EHCと呼ぶ構造設計を採用した。“Ring Fit”型構造はEHC担体の外周部にリングを装着し、このリングの材質をオーステナイト系ステンレス鋼とする事により、EHC担体とリング缶の熱膨張を緩和するとともに、リングと缶体を結ぶリング足により熱膨張を吸収し、さらにこのリングをEHC担体の外周部に装着する事により、EHC担体の剛性を確保している。

本研究ではまず、六角形セル構造のEHC担体の熱膨張吸収の優位性を、エンジンを用いた耐久評価で検証し、“Ring Fit”型EHCの基本コンセプトが成立することを、加熱加振耐久、エンジン実機の耐久試験で確認した。

次に、オルタネータによる電圧供給システム用EHC（APEHC）では、担体厚が薄く、スリット本数が多くなる為、熱膨張補償のコンセプトの成立と担体の耐振動性確保について検証した。まず、熱膨張補償にたいしては、担体試験片を用いた熱変位限界量測定と、実使用時の主要部品の温度測定結果から熱膨張吸収のコンセプトの成立性を確認し、エンジン実機や実車を用いた評価試験で実際に不具合がない事を立証した。

EHC担体の耐振性にたいしては、EHC担体のスリット部を梁とみなしたモデル化を行い、固有振動数を求めた。このモデル化により、EHC担体の固有振動数が実機での共振周波数よりも高い事を確認した。さらに耐振動性を高めるにはEHC担体径を従来のφ88 mmからφ75 mmと小径化する事が有利である事を見出し、ニューマークβ法を用いた耐振構造解析により、振動による発生応力が1/3となり、信頼性が向上する事を確認した。

またEHCへ電力を供給する電極構造の開発を行った。タルクを用いた絶縁封止コンセプトにより振動・熱サイクル・飛水・飛石が生じ得る過酷な排気管環境条件においても、構造信頼性のあるEHC電極を実現出来た。

以上に述べたAPEHCを用い、APEHC後流に装着されるL/O担体を最適化する事により高いエミッション浄化性能を発揮するとともに、圧損増加等を最小限に抑えるEHCコンバータを実現した。

本研究の成果、車載搭載可能なシステムとして、“Ring Fit”型EHCコンバータを開発し、

その構造・信頼性をエンジン実機や実車を用いた種々の耐久試験によって実証した。

また DPF の実用化については、排出ガス中の Soot を高い効率で捕集するだけでなく、捕集した Soot による目詰りを防止する為、実使用中に捕集した Soot を燃焼除去する再生制御の確立が重要な課題であった。2000 年当時、乗用車用途には燃料に添加した  $\text{CeO}_2$  の触媒能力により、低い排出ガス温度で Soot を再生させる燃料添加剤システムが、大型車用途には DPF 前段に配置した酸化触媒で生成される  $\text{NO}_2$  の Soot 酸化能力を利用した連続再生システムが実用化されていた。

しかし、これら既存 DPF システムでは、燃料添加剤システムでは  $\text{CeO}_2$  の有毒性や再生時に発生する  $\text{CeO}_2$  の Ash 分の堆積による圧力損失の上昇が大きな課題であり、連続再生システムでは、システムが成立する排出ガス温度帯が狭いという課題があり、これらの課題解決を図るため、触媒付 DPF システムが検討されていた。この触媒付 DPF システムでは堆積した Soot の強制再生を安全に行うシステム・制御法の確立が重要な課題であった。

本研究はこのような背景を基に、DPF の圧損への寄与する DPF 構造・材料因子を明確にし、SiC DPF と Cordierite DPF にたいし、高セル密度化と高気孔率材料により高捕集効率を確保しつつ、低圧損化を実現出来る SiC DPF、Cordierite DPF の開発を行った。

本研究ではまず、Wall Flow 型 DPF における圧損損失のメカニズムの解明を行い、それに基づく評価式を確立した。ここでは、DPF 圧力損失を目封じ部での損失、流路内損失、壁通過損失、コーン部での拡大・収縮損失とに分解し、それぞれの要因で求めた圧力損失の実験式から DPF 圧力損失評価式を確立した。

この評価式を用い、Soot が堆積していない条件と堆積した条件で、それぞれの要因に対する材料・設計構造の影響因子を解析し、Soot 堆積の有無により圧力損失の挙動が大きく異なる事を示した。実用上、圧力損失が問題となる Soot 堆積状態での圧力損失では、壁通過部での圧力損失が主たる要因であり、DPF 材料のガス透過性と、DPF セル密度が支配因子となる事を示した。

この検討結果から、DPF のセル密度を高めることにより、壁通過部の圧力損失が減少し、DPF の低圧力損失化が可能である事を明らかにした。一方セル密度が高くなりすぎると流路内圧力損失が増加することから、セル密度の最適値が存在し、触媒付 DPF 用として 300 cpsi を設定した。300 cpsi では従来の 100 cpsi に比べ、圧力損失は 1/2 程度となる。

また DPF 材料特性の圧力損失と捕集効率への影響解析により、DPF 材料の気孔分布が 10~70 $\mu\text{m}$  の範囲に制御し、気孔率を向上させる事で、圧力損失と捕集効率の両立を図れることを示し、Cordierite DPF と SiC DPF を用いこれを実証した。

Cordierite DPF では気孔率を 53%から 59%に増加し、約 20%の圧力損失の低減が可能となった。SiC DPF においても、46%気孔率から 52%気孔率に増加する事により、約 18%の低圧力損失化を実現した。

触媒付 DPF では、触媒の Wash Coat で DPF の気孔が塞がれる事により、高気孔化を図

る事が低圧損化にたいし、特に重要であることを示し、触媒付 SiC DPF でこの事を実証した。100 g / L の Wash Coat を付与した触媒付 SiC DPF では、気孔率を 52 %から 60 %に増加する事により、圧力損失は約 30 %低減可能となった。

触媒付 SiC DPF を用いたエンジン実機において、堆積した Soot を完全に再生出来る条件と、再生が途中で中断されても DPF に不具合が生じない条件が両立する事を示し、触媒付 DPF システムが実使用可能であることを示した。

DPF の再生シミュレーションを行い、燃料添加システム、CRT システム、触媒付 DPF システムのそれぞれにたいし、実用可能である事を示した。

本研究の以上の成果により、世界初の乗用車用途の触媒付 SiC DPF の量産化を実現した。