

ディーゼル車排出微粒子の排気系内挙動の解明に関する研究

環境研究領域

後藤 雄一

1. はじめに

今後ディーゼル車に装着される DPF により粒子状物質 (PM) が大幅に低減される。その中で過渡運転時の DPF すり抜けや DPF 再生時等の排気系内の粒子排出挙動を解明することは、DPF 装着後の粒子状物質排出状態を知り環境影響評価や環境対策を検討する上で今後の重要な課題である。

しかしながら、排気系内における粒子挙動は粒子サンプルから断片的に調べられるのみであり、粒子成長、SOFの吸着、排気系へのPM沈着・脱離、拡散等のPMの動態についてはほとんどわかっていない。ナノサイズの粒子を直接観察等することは困難であるため、排気系内のPM挙動を明らかにするには計測データに基づくモデル化による考察が必要である。

本研究では、環境評価や対策に資するため DPF 等の後処理装置の直前までの排気系の PM 動態について個別現象からモデルを構成し、排気系におけるディーゼル車排出微粒子の粒径分布等の計測結果とモデルの比較検討から粒子挙動メカニズムを考察した。

2. モデル内容と計算法

2.1. モデル内容

排気管内の熱流動にガス管路系ネットワークにおける圧縮性流体の過渡解析可能な「GLIELMO」²⁾を使用しその連成を考慮した生成モデルを開発した。

生成モデルの解析機能を表1に示す。エアロゾルの相変化による熱移動やガス流動に及ぼす抵抗等は排気系内のガス流動場に反映しないと仮定する。「生成モデル」はガス流動計算プログラムのガス流動計算結果を入力データとして利用する。表1のプロセスのうち、対流拡散沈着では円管内層流・乱流拡散を考慮し、熱泳動では Block の熱泳動沈着速度を利用した。凝集ではブラウン運動・層流せん断・乱流せん断による凝集を考慮し、凝縮・蒸発では均一核生成を基本に連続

表1 生成モデルの解析機能

項目	内容
流れ場状態	1次元圧縮性流れ
流れ場境界	エンジン出口～テールパイプ
熱流動以外のプロセス	均一核生成、蒸発・凝縮、凝集、熱泳動、対流沈着
基礎方程式	一般動力学方程式
解析法	区間分割法
時間積分法	Euler陰解法

領域と自由分子領域の凝縮・蒸発の式、Clausius Clapeyron の飽和蒸気圧式、不揮発性溶質を含む液滴表面の飽和蒸気圧式を利用した。

2.2. 計算法

粒子径は区間分割法により離散的に粒子径の上限と下限を定め、その範囲を有限個区間に分割した。

他の計算結果^{3) 5)}と比較して開発モデルの妥当性を確認した。また、実測結果と比較のため DPF 前後の粒径分布を連続的に計測しながら、D13 モード試験を行った。図1に試験配置と DPF 入口側粒子数濃度を示す。エンジン出口から DPF 入口までの排気系を 56 の直管でモデル化した。流入境界条件は、吸入空気流量から求めた排気流量、排気温度、排気圧力を与えた。

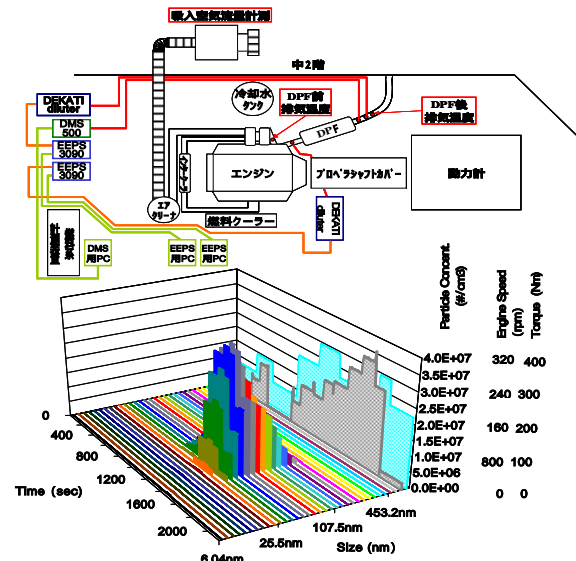


図1 試験配置と DPF 入口側粒子数濃度

3. 結果および考察

3.1. 不揮発性溶質を考慮した核凝縮ナノ粒子生成

アイドル時の核モード粒子は、高沸点炭化水素(炭素数 19 以上)が主成分と考えられるため、排ガス中の代表的 HC として $C_{26}H_{54}$ を考える。凝縮性ガス濃度が 1ppm 程度⁵⁾に対して、凝縮が進行するための(数 nm の液滴が安定に存在するための)飽和蒸気圧を考えると、Kelvin 効果を考慮した場合、測定粒子濃度を再現するには本来の飽和蒸気圧の $1/10^3 \sim 1/10^5$ 程度となり、均一核生成理論から高沸点炭化水素($C_{26}H_{54}$)で測定粒子数に見合う核生成速度を説明できない。⁵⁾

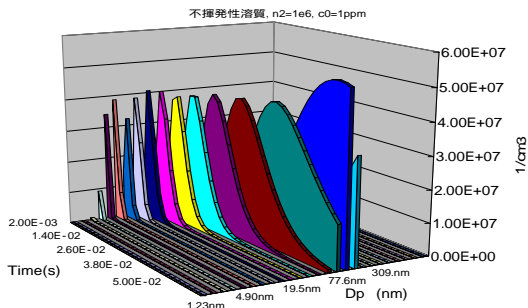


図2 不揮発性溶質を考慮したナノ粒子粒径分布

問題を解決するため不揮発性溶質を導入し、それを含む液滴表面の飽和蒸気圧で考えると溶質分子数は 1×10^6 個程度でなければならない。分子体積から計算すると粒径 115nm の液滴に含まれる凝縮性ガス分子の個数に匹敵する数である。凝縮過程では粒子の総個数が保存され、凝集過程では粒子の総体積が保存される。また、凝集過程では粒子数が減ることはあっても、増えることはない。したがって、粒子濃度は最初の核となる物質の核生成速度で決定される。図2に不揮発性溶質を考慮したナノ粒子粒径分布を示す。より高沸点物質や固体粒子等の不揮発性溶質が最初の核となり、低沸点物質はそれらの核の周りに凝縮していく。

3.2. アイドル時の定常条件

図3に各管路位置における粒径分布を示す。凡例はエンジン出口からの距離である。40cm程度下流までは核生成モードが顕著であるが、それより下流側では凝集モードが顕著となる。図4に粒径毎の乱流による管壁対流沈着量 $[1/m^2/s]$ 分布を示す。大粒径ほど下流方向に個数密度が増大し、小粒径ほど管壁への沈着速度が増大する。管壁への沈着量は、個数密度と物質伝達係数の積に比例するため図3の分布は定性的には妥当な結果である。

3.3. D13モード条件

図5に、D13モード条件における排気流量、温度、圧力を入力条件として管壁への吸着・脱離⁶⁾を考慮したシミュレーションによる粒径分布の時間変化を示

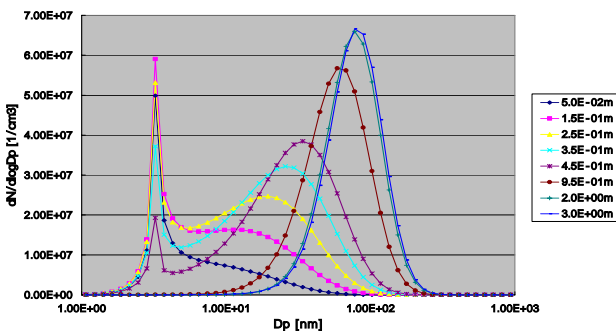


図3 各管路位置における粒径分布

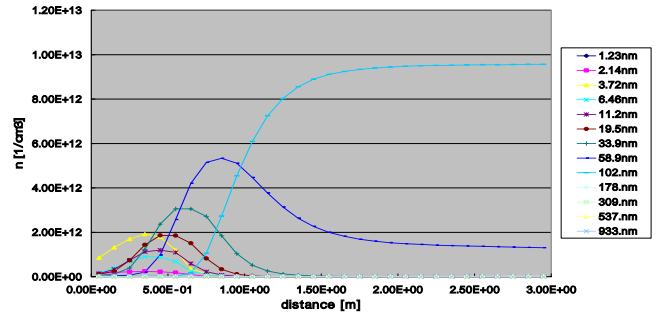


図4 粒径毎の乱流による管壁対流沈着量分布

す。図1に示す粒径分布変化を再現出来ている。吸着・脱離には対流沈着による管壁面への物質輸送が寄与しており、その結果として管内の気相濃度変化に伴い、全粒径範囲で個数密度も変化する。

4. まとめ

DPF等の後処理装置直前の排気系におけるPM動態についてデータとの比較から粒子挙動を考察した。

(1) 凝縮過程では粒子の総個数が保存され、凝集過程では粒子の総体積が保存される。また、凝集過程では粒子数が減っても増えることはない。より高沸点物質や固体粒子等が最初の核となり、より低沸点物質は核の周りに凝縮していくものと考えられる。

(2) アイドル時にはエンジン出口近くで核生成モードから下流に行くほど凝集モードが顕著となる。

(3) D13モード試験における粒径分布結果と比較して傾向を再現し影響要因の評価が可能となった。

今後は、DPF下流への影響やバイオ燃料等の異なる蒸発特性の影響を評価する予定である。

5. 参考文献

- 1) 中央環境審議会、今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について、平成17年4月8日、2) みずほ情報総研パッケージソフト、3) A.D. Maynard et al.: Development and Validation of a Simple Numerical Model for Estimating Workplace Aerosol Size Distribution Evolution Through Coagulation, Settling and Diffusion, *Aerosol Sci. & Tech.*, 37, 804-817 (2003)、4) C. Seigneur et al.: Simulation of Aerosol Dynamics A Comparative Review of Mathematical Models, *Aerosol Sci. & Tech.*, 5, 205-222 (1986)、5) 久保他: ディーゼル車両排出ナノ粒子の性状と生成メカニズム, 自動車技術会学術講演会前刷集, 109-04, 13-16 (2004)、6) 渡邊佳英: 選択還元型NOx触媒のシミュレーションと最適化(1)HC吸着を利用した選択還元型NOx触媒のモデリング、トヨタR&Dレビュー

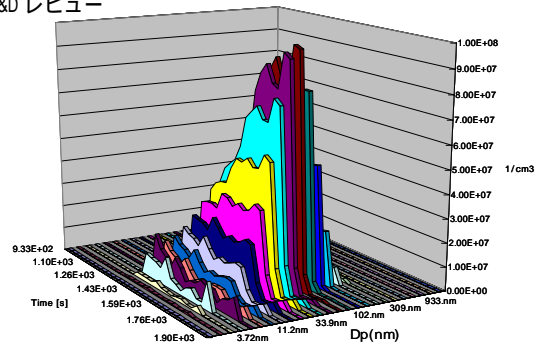


図5 D13モード条件における粒径分布の時間変化