論文・報告

ディーゼルエンジンにおけるPN10排出挙動について

PN10 Emission Behavior in Diesel Engines

阿野田　洋*　Hiroshi Anoda
後藤　陽紀*　Haruki Goto
渋谷　元司郎**　Genshirou Shibuya
Igor Gershkovich***
Mojtaba Keshavarz***

要　旨

新型重量車への適用が2028年5月28日を予定されている次期欧州排出ガス規制Euro 7では、PN規制の対象粒子径が23nm超から10nm超へ拡大される。本稿では、Euro 7対応を想定したディーゼルエンジン後処理システムを対象に、通常走行時、尿素水噴射時及びDPF再生時のPN10排出挙動を調査した。その結果、CSF後段での尿素水噴射及びPM燃焼過程においてPN10排出量が増加し、特に再生時は排出ガス流量の影響が大きいことを確認した。

Abstract

In Euro 7, the regulated particle size range of PN will be expanded from particles larger than 23 nm to those larger than 10 nm. This paper summarizes PN10 emission behavior in a diesel engine aftertreatment system assumed for Euro 7. PN10 emissions increased when urea water was injected downstream of the CSF and during PM oxidation in DPF regeneration. The results also indicate that exhaust gas flow rate is a dominant factor during DPF regeneration.

1　はじめに

ディーゼルエンジンは高い熱効率を示す一方、PM(粒子状物質：Particulate Matter)を排出するため、PM質量及びPN(粒子数Particulate Number)が規制対象となっている。これらの粒子を捕集するためにDPF(Diesel Particulate Filter)が一般的に装着されている。

表1に重量車の欧州排出ガス規制Euro VIの後継規制であるEuro 7におけるWHTC(World Harmonized Transient Cycle)での規制値を一部抜粋して示す。NOx(Nitrogen Oxides)及びPMの規制値が強化されていることがわかるが、特にNOx規制値を満足するためには低温でのNOx浄化性能向上が必要であり、尿素SCR(Selective Catalytic Reduction)システムをエンジン近接位置に追加するなど新規の後処理システムが検討されている。

一方、PN規制値自体に変化は無いものの、対象となる粒子径が23nm超から10nm超に拡大されており、実質的な規制強化となっている。

PN排出挙動については、尿素水噴射やDPF再生に伴いPNが増加する事例が報告されている[(1)-(4)]。しかしながら10nm超の粒子(PN10)を対象とし、Euro 7対応を想定した後処理システムで系統的に整理した例は少ない。本稿では、PN10排出挙動及びPN10排出量に影響する因子を調査した結果を報告する。

表1　WHTCにおける排出ガス規制値比較

	NOx (mg/kWh)	PM (mg/kWh)	PN (#/kWh)
Euro VI	460	10	6×10^{11} ※ > 23 nm
Euro 7	200	8	6×10^{11} ※ > 10 nm

2　実験方法

エンジンベンチにて5.2Lディーゼルエンジンを用い、**図1**に示す後処理システムのテールパイプ位置でPN10を計測した。

*エンジン装置設計部　**PT実験第一部　***Isuzu Motors Germany GmbH

Copyright© 2026 ISUZU MOTORS LIMITED.
All Rights Reserved. 無断転載・複製・配布禁止

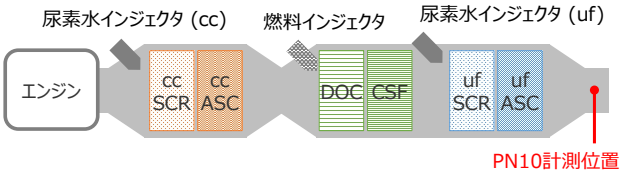

図1　後処理システムとPN10計測位置

Euro 7対応を前提として低負荷運転時におけるNOx浄化に有利な近接SCR(close-coupled SCR、以下「ccSCR」)と高負荷運転におけるNOx浄化に有利な床下SCR(under-floor SCR、以下「ufSCR」)を組み合わせた後処理システムを用いて評価を実施した。各SCRの後段にはSCRからスリップするアンモニアを酸化除去するためにASC (Ammonia Slip Catalyst)を配置した。

尿素水はccSCR上流側及びufSCR上流側の2箇所で噴射可能とした。DPF強制再生時は、DOC(Diesel Oxidation Catalyst)前に配置したインジェクタから燃料を供給し、CSF(Catalyzed Soot Filter)入口温度を上昇させて堆積PMを燃焼・除去した。PN10計測器(堀場製作所製MEXA-2310)を用いた。

3　実験結果

3.1 通常走行時のPN10排出挙動

まずは通常走行時の代表パターンとしてWHTC走行時におけるPN10排出挙動について確認を行った。**表2**に試験条件を示す。ここでは尿素水噴射位置を変更することによる影響について検討を行った。尿素水噴射量は現行規制 Euro VI排出ガス規制対応後処理システムに相当するuf位置のみで噴射した量を基準として、これに対して正規化した値を示している。cc位置ではSCRの温度上昇が早期化しているため、uf位置に対して尿素水噴射量が増加した。WHTC走行時のPN10排出量を**図2**に示す。

表2　WHTC試験条件

	尿素水噴射位置			
	Less	cc only	uf only	cc + uf
正規化尿素水噴射量(cc位置)	0.00	1.48	0.00	1.50
正規化尿素水噴射量(uf位置)	0.00	0.00	1.00(基準)	0.34
正規化尿素水噴射量(トータル)	0.00	1.48	1.00	1.84
CSFへのPM事前堆積	有	有	有	有

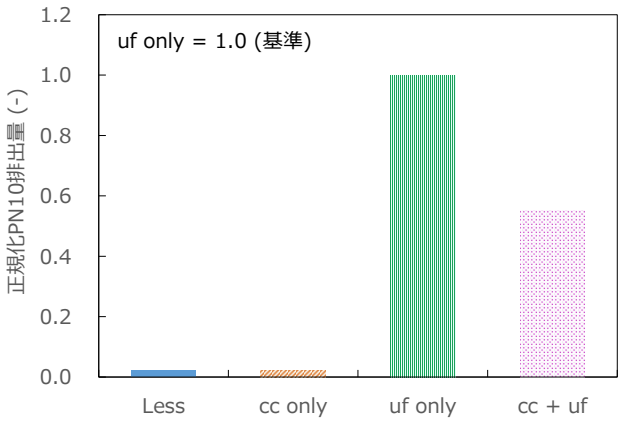

図2　WHTCにおけるPN10排出量

ここではuf位置のみ尿素水を噴射した際のPN10排出量を基準とし、これに対して正規化した値を示している。尿素水を噴射しない条件(Less)に対し、CSF前段のcc位置のみで尿素水を噴射した条件(cc only)ではPN10排出量に大きな差はなく、尿素水由来のPN10はCSFで捕集された可能性がある。一方、CSF後段のuf位置のみで尿素水を噴射した条件(uf only)ではPN10排出量が大きく増加した。Euro 7対応を想定したcc + uf噴射条件(cc + uf)では、uf位置のみで噴射した条件(uf only)に対してPN10排出量が低下した。これはcc位置でのNOx浄化によりuf位置で必要な尿素水噴射量が低減し、uf位置由来のPN10生成が抑制されたためと考えられる。

定常運転にてufSCR入口温度を変化させた際の尿素水噴射量当たりのPN10排出量を**図3**に示す。実験結果から尿素水噴射によるPN10排出量は温度依存性を示し、200℃では小さく、400℃付近で最も大きくなり、500℃では低下することを確認した。

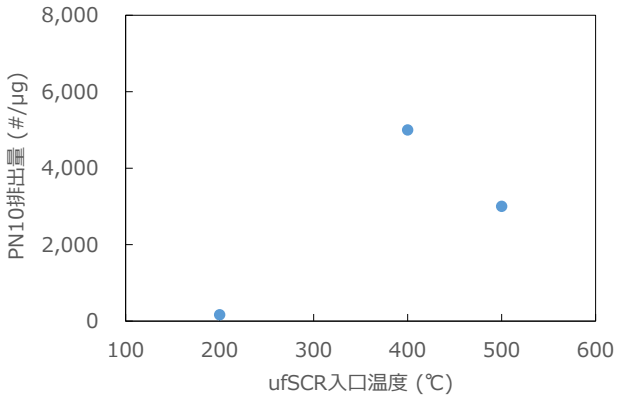

図3　尿素由来PN10の温度特性

3.2 DPF強制再生時のPN10排出挙動

次に、PM堆積有無におけるDPF強制再生時のPN10排出量について確認を行った。結果を**図4**に示す。定常運転にて、CSF入口温度が600℃に到達するようにDOCへ燃料供給を行った。実験結果からPMが堆積している場合、PN10排出量が一時的に高くなることがわかった。CSF温度上昇に伴いCSF圧損が上昇し、その後、堆積PMが燃焼して圧損が低下するタイミングでPN10排出量が増加したことから、PM燃焼過程でPN10が排出されると考えられる。

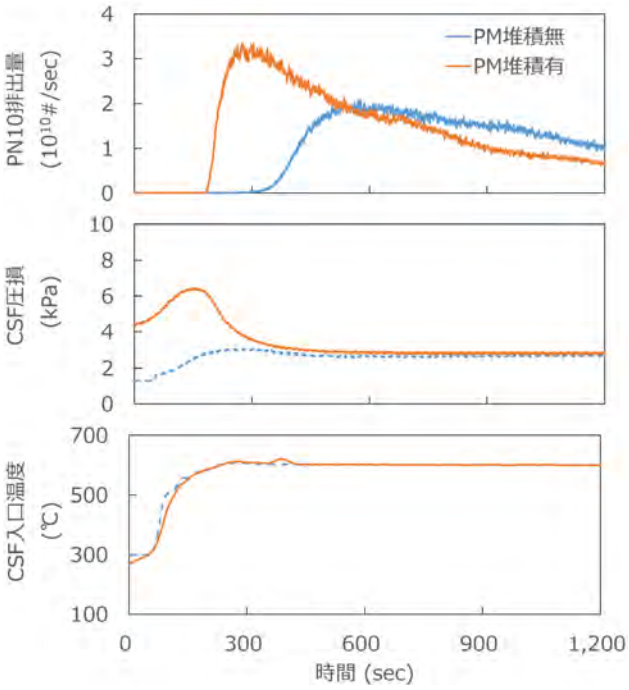

図4　DPF強制再生時のPN10排出挙動

PN10排出量に影響する因子を確認するため、**表3**に示す条件にてDPF強制再生試験を行った。

表3　DPF強制再生試験条件

	A	B	C	D
CSF入口温度 (℃)	600	600	600	600
正規化排出ガス流量	1.00 (基準)	1.46	1.59	3.11
正規化尿素水噴射量 (cc位置)	1.00 (基準)	1.89	0.51	2.85
正規化尿素水噴射量 (uf位置)	-	-	-	-
CSFへのPM事前堆積	有	有	有	有

CSF入口温度はいずれも600℃とし、尿素水はcc位置のみで噴射した。尿素水噴射量及び排出ガス流量は条件Aの値を基準に正規化した値を示している。

図5に各条件のPN10排出量を示す。ここでは現行Euro VI規制におけるRDE(Real Driving Emissions)試験でのデータ処理手法を参考に、WHTC 1回分の仕事量を1つのWork Windowとして1 secごとにWork Windowを作成した。その中で最もPN10排出量が多かったデータを抽出、WHTCにおけるPN10排出量(**図2**、uf only)を基準として正規化した値を示している。

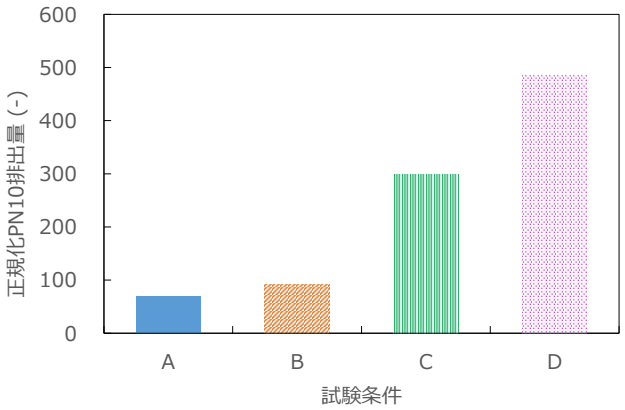

図5　DPF強制再生時のPN10排出量

いずれの条件でも、PM燃焼過程においてPN10排出量が一時的に増加した。条件間で比較すると、PN10排出量は排出ガス流量の増加に伴って大きくなる傾向を示し、排出ガス流量が最も高い条件Dで最大となった。条件Dでは、WHTC走行時のPN10排出量に対して約485倍の排出量を示した。今回はcc位置のみ尿素水噴射を行っているが、尿素水由来のPN10はCSFで捕集される可能性が高く、テールパイプPN10への影響は小さいと考えられる。条件Aと条件Bでは尿素水噴射量が異なるもののPN10排出量に大きな差はなく、条件間差は主にPM燃焼過程及び排出ガス流量の影響と推測される。

3.3 DPF連続再生時のPN10排出挙動

DPF連続再生が起こる高負荷運転条件についても実験を行った。事前にPM堆積を行い、定常運転にてCSF入口温度が400℃となるように設定した。結果を**図6**に示す。DPF強制再生時と同様にCSF圧損が低下するタイミングでPN10排出量が一時的に増加することを確認した。再生方式に依らず堆積したPMが燃焼する過程でPN10排出量が増加することが明らかになった。

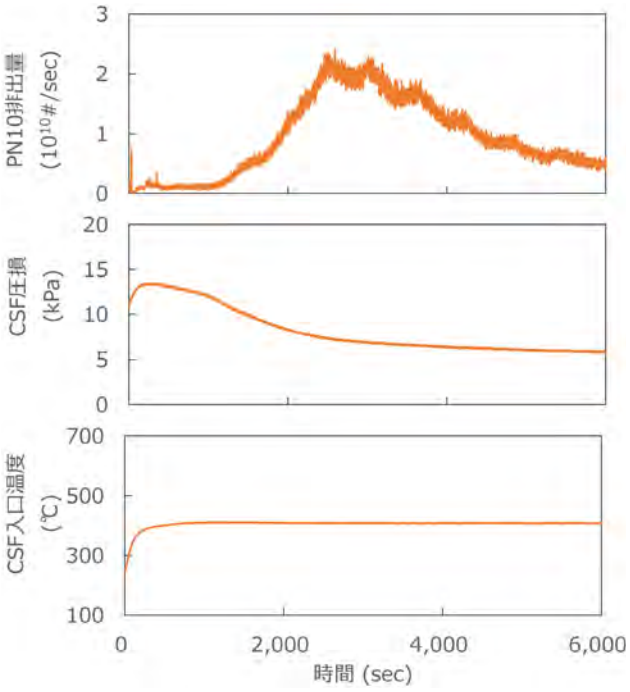

図6　DPF連続再生時のPN10排出挙動

PN10排出量に影響する因子を確認するため、**表4**に示す条件でDPF連続再生試験を行った。尿素水はuf位置のみで噴射し、尿素水噴射量及び排出ガス流量は条件Eの値を基準に正規化した値を示している。

図7に各条件のPN10排出量を示す。**図5**と同様のデータ処理を行い、WHTCにおけるPN10排出量(**図2**、uf only)を基準として正規化した値を示している。

表4　DPF連続再生試験条件

	E	F	G	H	I
CSF入口温度 (℃)	400	400	400	450	488
正規化排出ガス流量	1.00 (基準)	1.29	1.39	1.27	1.40
正規化尿素水噴射量 (cc位置)	-	-	-	-	-
正規化尿素水噴射量 (uf位置)	1.00 (基準)	1.07	1.03	1.18	1.07
CSFへのPM事前堆積	有	有	有	有	有

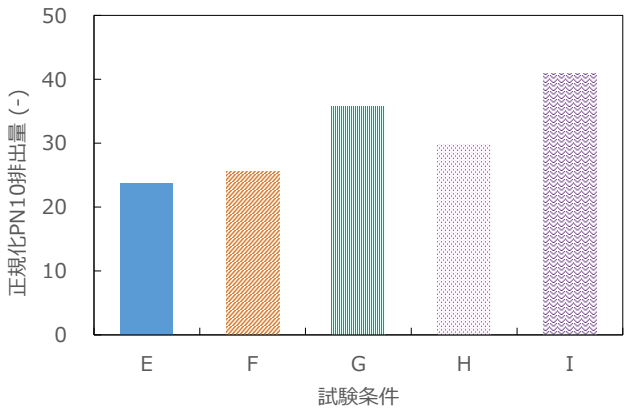

図7　DPF連続再生時のPN10排出量

いずれの条件でもPM燃焼過程においてPN10排出量が一時的に増加した。条件間で比較すると、PN10排出量は排出ガス流量の増加に伴って大きくなる傾向を示し、排出ガス流量が最も高い条件Iで最大となった。条件Iでは、WHTC走行時のPN10排出量に対して約41倍の排出量を示した。今回はuf位置で尿素水を噴射しており、尿素水由来PN10の影響を受け得る。ただし、今回の条件間では尿素水噴射量差が小さく、PN10排出量はDPF強制再生時と同じく排出ガス流量と相関があるものと推測する。

4　考察

4.1 尿素水噴射によるPN10増加メカニズム

尿素水由来のPNはシアヌル酸やアンメリドであると報告されている[(2)(5)]。これらの成分は200℃以上で生成し、300～500℃程度で分解するとされる[(6)]。本試験(**図3**)でも、200℃では尿素水由来のPN10はほとんど検出されず、400℃付近で増加し、500℃で低下する傾向を示した。この挙動は、シアヌル酸やアンメリドの生成及び分解温度に対応していると推測される。

4.2 PM燃焼過程におけるPN10増加メカニズム

PM燃焼過程でPN10排出量が増加するメカニズムの仮説を**図8**に示す。DPFに堆積したPMの燃焼が部分的に進むと、Cake層及び細孔内PMの一部が燃焼して局所的な流路が形成され(**図8(B)**)、一時的に局所流速が上昇することでPN10排出ピークが生じると考えられる。更に燃焼が進むと流路形成が進行し、局所流速が低下するため(**図8(C)**)、PN10排出量も低下すると推測される。

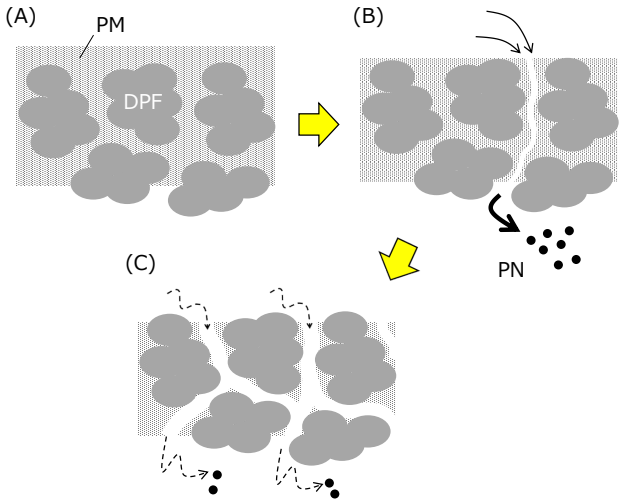

図8　PN10増加メカニズム(仮説)

5　おわりに

Euro 7対応を想定した後処理システムを対象に、PN10排出挙動とPN10排出量に影響する因子を調査した。得られた知見を以下に示す。

① 尿素水を噴射する位置によってPN10排出量への影響は異なり、CSF前段のcc位置ではほぼ影響がなく、CSF後段のuf位置で噴射した場合にPN10排出量が顕著に増加した。
② 尿素水噴射量に応じてPN10排出量は増加し、400℃付近で増加が顕著となった。
③ DPF強制再生及び連続再生では、PM燃焼過程で一時的にPN10排出量が増加した。
④ 再生時のPN10排出量は排出ガス流量が高い条件で増加する傾向を示した。今回の範囲では、強制再生時のワースト条件でWHTC比約485倍、連続再生時のワースト条件で約41倍のPN10排出量を確認した。

今後は、PN10排出量低減に効果的なハード及び制御手法の検討、RDE試験におけるワースト運転条件の探索、並びにPM燃焼時にPN10排出量が増加するメカニズムの解明を進める。

本文献は、自動車技術会論文集2026年57巻2号に掲載された論文を加筆修正のうえ、報告するものである。

参考文献

(1) A. Mamakos, et al.: Effect of selective catalytic reduction on exhaust nonvolatile particle emissions of Euro VI heavy-duty compression ignition vehicles, Aerosol Science and Technology, 53:8, p. 898-910 (2019)
(2) B. Shen, et al.: Experimental and numerical investigations into effects of urea-water solution injection on tailpipe particulate matter emissions, Process safety and Environmental Protection, vol. 148, p. 927-938 (2021)
(3) 山田裕之: 周期再生式Diesel Particulate Filterのすす堆積状況が重量車から排出される粒子数および規制成分に与える影響，自動車技術会論文集，vol. 44，p. 177-183 (2013)
(4) Z. Meng, et al.: An experimental investigation of particulate emission characteristics of catalytic diesel particulate filters during passive regeneration, Chemical Engineering Journal, vol. 468, 143549 (2023)
(5) M.Li, et al.: Investigation on the urea deposit formation and thermal decomposition characteristics in the SCR aftertreatment system of a diesel engine, Journal of Environmental Science, vol. 103, p. 167-171 (2021)
(6) P.M. Schaber, et al.: Thermal decomposition (pyrolysis) of urea in an open vessel, Thermochimica acta, vol. 424, p.131-142 (2004)