概要

1. 調査の目的

本調査の目的は、ガソリンを燃料とする筒内直接噴射式エンジンを搭載している車両(ガソリン直 噴車)から排出される PM 及び PN の排出量に対して燃料性状が与える影響を調査し、PN 規制導入の 検討に必要な知見を収集することである。

2. 調査内容

PM 及び PN 排出量への燃料影響を調査するため、性状が異なるレギュラーガソリンとガソリン直噴 車2台を用いて排出ガスの測定試験を行った。

3. 調査方法

3.1 供試車両

国内で販売されている乗用車からガソリン直噴車 2 台を選定し、レンタカーにより調達した。選 定には 2018 年 1 月から 2019 年 6 月までの新車販売台数および車種、エンジン型式、排気量等を参 考にし、環境省担当官との協議の上決定した。試験車両の車両諸元を**概要表 1**に示す。

供試車両	車名略称		A車	B車	
	排出ガス規制の識別記号		DBA	5BA	
	適合規制		H17年規制 75%低減レベル	H30年規制 50%低減レベル	
	規制対応サイクル		JC08	WLTC	
寸法·重量	全長 (mm)		4,265	4,625	
	全幅 (mn	n)	1,695	1,815	
	全高 (mn	n)	1,710	1,730	
	乗車定員(人))	7	5	
	車両重量 (kg))	1,360	1,540	
	車両総重量 (kg))	1,745	1,815	
	試験時車両重量 (kg))	1,553	1,753	
	等価慣性重量 (kg))	1,553	1,753	
原動機	シリンダー, バルブ		水冷直列4気筒横置,	水平対向4気筒,	
			DOHC	DOHC 16バルブ デュアルAVCS	
	圧縮比		11.5	11.5	
	総排気量 (cc))	1,496	2,498	
	最高出力 (kW	/ /rpm)	96/6600	136/5800	
	最大トルク (N・r	m /rpm)	155/4600	239/4400	
	燃料供給装置		電子制御,燃料直接噴射式(DI),	電子制御,燃料直接噴射式(DI)	
	排出ガス低減装置		三元触媒	三元触媒	
	主要燃費向上対策		アイドリングストップ, DI,	アイドリングストップ, 可変バルブタイミング,	
			可変バルブタイミング, 自動無段変速機,	自動無段変速機, 電動パワーステアリング,	
			バワーステアリング	充電制御, ロックアッフ機構付トルクコンバーター	
その他	既走行距離 (km	ר)	9,520	15,405	

概要表 1 試験車両諸元

3.2 供試燃料の性状および保管

本調査では性状の異なる3 種類のレギュラーガソリンを供試燃料とした。供試燃料の調達にはガ ソリン車の PM 及び PN 排出に対して指標となる PM-Index を目安とした。性状分析用の試料を採取す る時とドラム缶開封後の車両試験中は蒸発等による燃料性状の変化を避けるために冷蔵保管した。 供試燃料の性状を概要表 2に示す。3種の燃料の内、① 認証試験用は、PM-Index 値が比較的低く て軽質な国内認証試験用燃料である。② 認証重質化は、① 認証試験用に 1-メチルナフタレン (1-MN)等を添加して重質化し、PM-Index 値が 1.5~1.9程度になるよう調製した燃料である。③ 市井 重質は、一般のの小売店(燃料加工所)で販売されている燃料の中で PM-Index 値が比較的高い重質 な燃料である。

供試燃料の重質さを、3つの性状項目で確認した。即ち、PM 排出量の指標になるとされている PM-Index、PM-Index に近い値を簡易的に得るために考案された SPMI、PM を生成しやすい炭素数(C: Carbons) 10 以上の芳香族分の体積割合である。芳香族分については、本調査の供試燃料には C13 ま での芳香族分が含まれていたため、C10 から C13 までの芳香族分の体積割合(C10-13 芳香族分)から 重質さを確認した。

供試燃料の <u>PM-Index は、②</u> 認証重質化 (1.9) > ③ 市井重質 (1.5) > ① 認証試験用 (0.82) の順に大きく、② 認証重質化は目標通りの値に調製できた。<u>SPMI は、③ 市井重質 (1.5) > ②</u> 認 <u>証重質化 (1.2) > ①</u> 認証試験用 (1.1) の順で、本試験の供試燃料において、PM-Index と SPMI は 同等の値にはならなかった。この理由は、沸点が 241℃の 1-MN (沸点 241℃) を添加しても、SPMI の 算出に用いる 130℃と 170℃の流出量には大きく影響しないからである。そこで、<u>蒸留性状からも供</u> 試燃料の重質さを確認すると、③ 市井重質が最も重質であった (概要図 1)。 更に、C10-13 芳香 族分でも③ 市井重質の合計が最も高く (概要図 2)、<u>燃料成分の観点からも③ 市井重質が最も重</u> 質であった。

燃料性状項目	単位	① 認証試験用	② 認証重質化	③ 市井重質	国内認証試験用 レギュラーガソリン規格	JIS規格 (2号, レギュラー)
PM-Index		0.82	1.9	1.5	N.A. <mark>※1</mark>	N.A.
SPMI		1.1	1.2	1.5	N.A.	N.A.
密度(15℃)	g/cm ³	0.731	0.734	0.729	0.720~0.734	0.783 以下
蒸気圧 37.8℃	kPa	59.2	56.6	61.4	56~60	44~78
蒸留性状 10%	°C	54.5	55.8 <mark>※2</mark>	52.0	45~55	70 以下
50%	°C	94.0	95.0	86.0	90~100	75~110
70%	°C	112.5	112.8	118.0	N.A.	N.A.
80%	°C	124.5	125.5	138.0	N.A.	N.A.
90%	°C	152.0	156.0	163.5	140~170	180 以下
終点	°C	183.5	209.0	203.5	215以下	220 以下
留出量 70℃	%	28.0	26.3	34.5	N.A.	N.A.
130℃	%	83.0	82.3	76.0	N.A.	N.A.
170℃	%	95.0	93.5	92.0	N.A.	N.A.
炭化水素組成						
総芳香族	vol%	23.3	23.8	20.8	20~45vol%	N.A.
オレフィン	vol%	17.7	16.7	15.7	15~25vol%	N.A.
パラフィン	vol%	52.9	53.7	52.1	N.A.	N.A.
ナフテン	vol%	6.13	5.79	6.40	N.A.	N.A.
酸素量	wt%	0	0	0.82	検出されない	1.3 以下
ETBE	vol%	0.1(-)	0.1(-)	5.09	N.A.	N.A.
炭素数別芳香族類の割合						
C10	vol%	1.1	1.1	2.9	N.A.	N.A.
C11	vol%	0.18	1.4	1.1	N.A.	N.A.
C12	vol%	0.047	0.076	0.498	N.A.	N.A.
C13	vol%	0.000	0.000	0.008	N.A.	N.A.
C10-13 合計	vol%	1.3	2.5	4.5	N.A.	N.A.

概要表 2 供試燃料性状

***1** N.A. : Not Available

※2 国内認証試験用レギュラーガソリンの規格からは外れている.



3.3 調査項目と測定方法

排出量の調査対象は、PM、PNの他、規制物質(CO、NMHC、NOx)、全炭化水素(THC)、二酸化炭素 (CO₂)、一酸化窒素(NO)、二酸化窒素(NO₂)、PM 中の炭素成分とした。PNは、希釈トンネルの後部 から希釈排出ガスを採取し、Euro 5/6 の要求に適合する粒子個数計測システム(MEXA-2300_SPCS、 堀場製作所)で時系列的に測定した。その他の測定は、別添 42 に従った。ただし、希釈排出ガス中 の PM 捕集は WLTC LMH と WLTC ExH とに分けて行った。また、車両の運転状態を確認するため、空気 過剰率(λ)も調査対象とした。PN、CO、CO₂、THC、NOx、λについては試験サイクル中の挙動を時系 列的に計測した。

3. 4 試験サイクルと設備

試験サイクルは、WLTCの3 phase (Low、Medium、High:WLTC LMH) に続けてExtra High (WLTC ExH) を走行させ、4 Phase とした。供試車両は四輪駆動車試験用のシャシダイナモメータ (C/D) 上 に設置し、道路運送車両の保安基準の細目を定める告示の別添 42「軽・中量車排出ガスの測定方法 (II WLTC モード法)」(別添 42) に準拠して試験を実施した。希釈トンネルと排気導入管は試験に 供する前に内壁を洗浄し、乾燥させてから用いた。

4. 調査結果

4. 1 PMの排出量

概要図 3に性状が異なる3種の供試燃料を用いて測定したPM排出量の結果を比較して示す。2 台の車両で若干の違いがあるものの、排出量は概ね③ 市井重質 > ② 認証重質化 > ① 認証試 験用の順に高く、PM-Index による重質評価ではなく蒸留性状やC10~C13芳香族分の割合による重 質評価と同じ順になった。WLTC LMH の平均の排出量について、① 認証試験用を基準にした場合、A 車は② 認証重質化が2.0倍、③ 市井重質が4.1倍であった。同様に、B車は② 認証重質化が4.1 倍、③ 市井重質が7.3倍となった。従って、MLTC LMHのPM排出量は燃料性状によって排出量が大 きく異なることが明らかになった。また、次項で述べるPN排出量よりも、PM排出量の方が燃料性 状による排出量の差が大きいことも分かった。

A 車の PM 排出量は WLTC LMH において③ 市井重質 > ② 認証重質化 > ① 認証試験用の順に 高く、WLTC ExH は③ 市井重質 > ②認証重質化 ≒ ① 認証試験用の順であった。2 つを合わせ た WLTC LMH+ExH は排出量の高い WLTC LMH の影響が大きいために WLTC LMH と同じ傾向になった。 一方、B 車は WLTC LMH の排出量は③ 市井重質 > ② 認証重質化 > ① 認証試験用の順に高くな った。しかし、<u>B 車の WLTC ExH の排出量は大きな差が無く、燃料による影響は見られなかった</u>。こ の原因は、PN 排出挙動を示した次項の概要図 6 において、WLTC Low の排出が最も高く、Medium か ら High へと暖機されていく過程で低くなり、且つ、燃料による明らかな排出差が見られなくなっ ていることから、<u>B 車の場合、本調査の性状範囲では燃料の気化や燃焼制御に対して影響が無いほ</u> ど十分に暖機されたためではないかと推測した。



4.2 PNの排出量と排出挙動

概要図 4に性状が異なる供試燃料を用いて得られた PN 排出量を比較して示す。PM 排出量と同様 に、WLTC LMH の PN 排出量は概ね蒸留性状や C10~C13 芳香族分の割合による重質評価と同じ順に高 くなった。平均の排出量について、① 認証試験用を基準にした場合、A 車は② 認証重質が 1.6 倍、 ③ 市井重質が 2.4 倍であった。同様に、B 車は② 認証重質が 2.6 倍、③ 市井重質が 3.6 倍となり、 燃料性状によって PN 排出量が大きく異なることが明らかになった。WLTC ExH の排出量は排出量のバ ラツキを考慮すると A 車も B 車も燃料による排出量への大きな影響は無いと判断した。

PNの排出挙動を確認するため、時系列的に採取した希釈トンネル内の PN 濃度変化を A 車は概要図 5 に、B 車は概要図 6 に示す。どちらの供試車両においても PN が排出されるのは主に冷機始動後と 加速時であった。また、燃料による PN 排出の違いも冷機始動後と加速時に確認された。ただし、高 温で十分に暖機された状態である WLTC ExH では加速時に PN が排出されても燃料による明らかな違 いは見られなかった。



vi



概要図 5 A車の PN 排出挙動の例 (希釈トンネル内濃度)



概要図 6 B車の PN 排出挙動の例 (希釈トンネル内濃度)

4.3 燃料性状とPM および PN 排出量の相関

燃料の性状項目のうち、PM 排出量の指標になるとされている PM-Index および PM-Index に近い値 を簡易的に得ることを目的に提唱された SPMI、PM を生成しやすい C10-13 芳香族分の 3 つについて、 PM 排出量と PN 排出量の相関を確認した。WLTC LMH と WLTC ExH について、PM 排出量との相関を概要 図 7 と概要図 8 に、PN 排出量との相関を概要図 9 と概要図 10に示す。

決定係数が 0.9 以上、且つp < 0.05 の有意な相関があるかを確認したところ、PM-Index と PM 排 出量については A 車と B 車のどちらでも有意な相関が無かった。PM-Index の簡易版である <u>SPMI と</u> <u>C10-13 芳香族分については、A 車は WLTC LMH と WLTC ExH のどちらにおいても有意な相関が得られ</u> <u>た</u>。しかし、<u>A 車よりも排出量が少ない B 車においては、有意な相関が得られたのは WLTC LMH のみ</u> であった。次に、PN 排出量との相関を確認すると、A 車は有意な相関が無く、B 車は WLTC ExH での み有意な相関が得られた。<u>SPMI と C10-13 芳香族分については、A 車は WLTC LMH と WLTC ExH のどち</u> <u>らでも有意な相関が得られた</u>。しかし、<u>B 車で有意な相関が得られたのは C10-13 芳香族分における</u> <u>WLTC LMH のみ</u>であった。B 車において、SPMI および C10-13 芳香族分に対する PM および PN 排出量の 有意な相関が A 車に比べて得にくい原因は、B 車の PM および PN 排出量が低いためであると考えられ た。



概要図 7 WLTC LMH における燃料性状とPM 排出量の相関



概要図 8 WLTC ExH における燃料性状とPM 排出量の相関



概要図 9 WLTC LMH における燃料性状と PN 排出量の相関



5. まとめ

本調査で得られた結果は次のとおりである。

- ▶ 燃料の重質さの指標である PM-Index、SPMI、C10-13 芳香族分の内、PM および PN 排出量と有意 な相関があるものは SPMI と C10-13 芳香族分で、重質になるほど排出量が高くなった。
- ▶ 燃料性状による排出量への影響は、PNよりも PMの方が大きい結果が得られた。
- ▶ 燃料性状による PN 排出への影響は主に冷機始動時と加速時に現れた。
- ▶ ただし、十分に暖機された状態では PN 排出に明らかな影響は現れなかった。

6. 今後の課題

本調査により、燃料性状によって PM や PN、PM 関連物質の排出量が大きく変化する事が明らかに なった。しかし、どの燃料性状が影響するのかについては引き続き調査が必要である。また、国連で は、実際の走行環境に合わせた温度条件での排出ガス規制が必要とされ、UN-ECE/WP29 において排出 ガス規制の試験法に低温試験および高温試験を加える事が検討されている。更に、我が国では 2017 年5月に発表された第十三次報告において「我が国としても、国際基準の見直しに積極的に参画・貢 献すべきである」と述べられている。従って、今後の規制に対応するためには、特に排出ガスが増加 する低温時の排出状況や、低温環境において燃料性状が PM および PN の排出に与える影響について も把握することを検討する必要がある。

Overview

1. Purpose of the study

The purpose of this study is to investigate the effects of fuel properties on the emissions of Particulate Matter (PM) and Particle Number (PN) emitted from vehicles equipped with direct injection engines using gasoline as fuel (GDI Vehicle: Gasoline Direct Injection Vehicles) and to compile the required knowledge necessary for considering the introduction of PN regulations.

2. Contents of the study

In order to investigate the effects of fuel on PM and PN emissions, measurement tests of PM and PN emissions were conducted using three types of regular gasoline having different specific gravity in terms of PM-Index and distillation properties for two GDI vehicles.

3. Study method

3.1 Tested Vehicles

Two gasoline direct injection passenger vehicles that are being sold in Japan were used as test vehicles. One is a 1.5-liter passenger vehicle that complies with the 75% reduction in the 2005 regulations (Vehicle A). The other is a 2.5-liter passenger vehicle that meets the 2018 regulations (Vehicle B).

3.2 Test fuels

Three types of test fuels were used: ① fuel for domestic certification test (① for WLTC), ② fuel made heavier by adding 1-methylnaphthalene, etc. to the fuel for ① certification test (② for WLTC Heavier), ③ relatively heavy fuel sold at retail stores (③ Heavy for Market).

The specific gravity of the test fuel was confirmed from the following three properties. Particulate Matter Index (PM-Index), which is considered to be an index of PM emissions; the simplified PM-Index (SPMI), which is devised to easily obtain a value close to PM-Index; and the volume fraction of aromatics that have the carbon number (C: Carbons) of 10 or more and therefore tend to generate PM easily. As for the aromatic components, since



the test fuels in this study contained aromatic components up to C13, the specific gravity was confirmed from the volume fraction of aromatic components from C10 to C13 (C10-13 Aroma).

PM-Index	: 2	for WLTC Heavier (1.9) > (3) Heavy for Market (1.5) > (1) for WLTC (0.82)
SPMI	: ③	Heavy for Market $(1.5) > \textcircled{2}$ for WLTC Heavier $(1.2) > \textcircled{1}$ for WLTC (1.1)
C10-13 Aroma	: ③	Heavy for Market $(1.3) > 2$ for WLTC Heavier $(2.5) > 1$ for WLTC (4.5)

The specific gravity of the test fuel was confirmed from the distillation characteristics. It was found that ③ Heavy for Market was the heaviest (Fig. 1).

3.3 Study items

Emissions that are subjected to the study are PM and PN, as well as regulated substances (CO, NMHC, NOx), total hydrocarbons (THC), carbon dioxide (CO₂), nitric oxide (NO), nitrogen dioxide (NO₂), and the carbon component in PM.

3.4 Test cycle

The test cycle consisted of 4 phases, namely WLTC 3 phases (Low, Medium, High: WLTC LMH) followed by Extra High (WLTC ExH). The test cycles were repeated three times or more.

4. Study results

4.1 PM emissions

PM emissions are generally higher in the order of ③ Heavy for Market> ② for WLTC Heavier> ① for WLTC. This result is in accordance with the specific gravity evaluation based on distillation characteristics and the ratio of C10-13 Aroma, not with the specific gravity evaluation of PM-Index. The average emission of WLTC LMH of vehicle A became 2.0 times as much in the case of ② for WLTC Heavier, compared to ① for WLTC when this is used as the reference and 4.1 times in the case of ③ Heavy for Market, compared with the reference. As for vehicle B, the average emission became 4.1 times as much in the case of ② for WLTC Heavier, 7.3 times as much in the case of ③ Heavy for Market, respectively. These results show that the amount of PM emitted from WLTC LMH varies greatly depending on the fuel properties. In addition, it was found that the effect of fuel properties on the emission of PM was larger than that of the PN emission as described below.

4.2 PN emission amounts and emission behavior

As with the PM emissions, the PN emissions of WLTC LMH increased in the same order as the specific gravity evaluations by the distillation characteristics and C10-13 Aroma. The average emission of WLTC LMH in the case of vehicle A became 1.6 times as much in the case of ② for WLTC Heavier, 2.4 times as much in the case of ③ for Heavy for Market when compared to ① for WLTC as the reference. Similarly, for vehicle B, the emission became 2.6 times in the case of ② for WLTC Heavier and 3.6 times in the case of ③ Heavy for Market, respectively. These results show that PN emissions differed greatly depending on fuel properties. However, considering the variation in emissions of WLTC ExH, it can be concluded that there was no significant effect of the fuel on the emissions in both vehicle A and vehicle B.

As regards the behavior of PN emission, PN was emitted mainly after a cold start and during acceleration in both test vehicles. Also difference in PN emissions due to fuel was confirmed after a cold start and during acceleration. In WLTC ExH, where the engine was fully warmed up at a high temperature, there was no obvious effect of fuel difference in this study even if PN was emitted during acceleration.



(error bars indicate maximum and minimum)

4.3 Correlation between fuel properties and PM and PN emissions

Verification has been implemented as to whether the three factors of PM-Index, SPMI, and C10-13 Aroma have a significant correlation with PM emission or PN emission under a condition that the coefficient of determination was 0.9 or more and p <0.05. PM-Index did not have a significant correlation with PM emissions in either vehicle A or vehicle B. On the other hand, SPMI and C10-13 Aroma had a significant correlation with both WLTC LMH and WLTC ExH in the case of vehicle A. However, a significant correlation was found only in WLTC LMH in the case of vehicle B that had less emissions than vehicle A. With regard to the correlation with the PN emission, no significant correlation was observed between the PN emission and PM-Index in vehicle A. A significant correlation was obtained only with WLTC ExH in vehicle B. For SPMI and C10-13 Aroma, vehicle A had a significant correlation with both WLTC LMH and WLTC ExH. However, only WLTC LMH showed a significant correlation with C10-13 Aroma in vehicle B. The reason why the significant correlation between PM and PN emissions and SPMI and C10-13 Aroma was less in vehicle B than in vehicle A is thought to be due to the low PM and PN emissions of vehicle B.

As regards the behavior of PN emission, PN was emitted mainly after a cold start and during acceleration in both test vehicles. Also difference in PN emissions due to fuel was confirmed after a cold start and during acceleration. In WLTC ExH, where the engine was warmed up at a high temperature, there was no obvious effect of fuel difference even if PN was emitted during acceleration.

5. Conclusion

The results obtained in this study are as follows.

 \rightarrow Of the PM-Index, SPMI, and C10-13 aromatics, which are indicators of fuel specific gravity, those that have a

significant correlation with PM and PN emissions are SPMI and C10-13 Aroma. The emissions increased as the fuel becomes heavy.

- \rightarrow The effect of fuel properties on emissions was larger for PM than for PN.
- \rightarrow The effects of fuel properties on PN emissions were mainly observed during a cold start and acceleration.
- \rightarrow However, there was no obvious effect of difference in fuel properties on PN emissions when the engines were fully warmed up.

6. Future issues

This study revealed that the emission of PM, PN, and PM-related substances greatly changed depending on the fuel properties. However, further studies are needed to determine which fuel properties will affect emissions and to what extent. In addition, the United Nations requires emission regulations under temperature conditions that match the actual driving environment, and UN-ECE / WP29 is considering adding low-temperature tests and high-temperature tests to the emission regulation test method. Furthermore, in the thirteenth report released in May 2017, Japan states that "Japan should actively participate in and contribute to the review of international standards." Therefore, in order to respond to future regulations, further study is needed to understand the status of emissions at low temperatures where emissions increase, and the effects of fuel properties on PM and PN emissions in low-temperature environments.