

1. 調査の目的

平成 29 年 5 月 31 日に発表された環境省中央環境審議会「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第十三次答申）」では、ストイキを含む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）について、粒子状物質（PM）の規制導入が示され、2020 年末までに適用を開始することが適当であるとされた。さらに、今後の課題として、欧州で導入されている固体粒子数（PN）規制の導入について検討する必要があるとされた。一方で、PM 及び PN 排出量については、使用するガソリンの性状によって変化することが学会等で報告されている。

以上のことから、本調査においては、燃料性状が PM 及び PN の排出量に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を目的とする。

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、性状が異なるプレミアムガソリン 3 種とガソリン直噴車 2 台を用いて排出ガスの測定試験を行った。

尚、昨年度にあたる平成 31 年度はレギュラーガソリンの燃料性状が PM 及び PN の排出に与える影響を調査した。このため、車両と燃料については連番にて示している。

2.1 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。選定は、適合している規制、車種、エンジン型式、排気量等を参考とし、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表 2.1 に、試験車両の写真を図 2.1 に示す。

表 2.1 試験車両諸元

供試車両	車名	C車	D車
	型式 適合規制 規制対応サイクル	5BA H30年規制 50%低減レベル WLTC	3BA H30年規制 WLTC
寸法・重量	全長 (mm)	4,440	4,330
	全幅 (mm)	1,800	1,800
	全高 (mm)	1,420	1,460
	乗車定員 (人)	5	5
	車両重量 (kg)	1,400	1,390
	車両総重量 (kg)	1,675	1,665
	試験時車両重量 (kg)	1,580	1,668
	等価慣性重量 (kg)	1,580	1,668
原動機	シリンダー、バルブ	直列4気筒横置、DOHC, ターボチャージャー付	直列3気筒、DOHC, ターボチャージャー付
	圧縮比	10.6	11.0
	総排気量 (cc)	1,331	1,499
	最高出力 (kW /rpm)	100/5,500	103/4,600-6,500
	最大トルク (N・m /rpm)	200/1,460-4,000	220/1,480-4,200
	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, 可変バルブ・タイミング, 無段階可変バルブ・リフト, 電動パワー・ステアリング	アイドリングストップ、DI, 吸排気無段階可変バルブ・タイミング, 無段階可変バルブ・リフト, 電動パワー・ステアリング, ブレーキ・エネルギー回収システム
その他	既走行距離 (km)	13,555	3,897

【 C 車 】



【 D 車 】



図 2.1 試験車両

2.2 供試燃料の性状および保管

本調査では性状の異なる 3 種類のプレミアム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試験期間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。

供試燃料の性状を表 2.2 に示す。3 種の燃料の内、④ 認証試験用 P は、PM-Index 値が 1.3 の国内認証試験用燃料である。⑤ 認証重質化 P は、④ 認証試験用 P に 1-メチルナフタレン (1-MN) と *n*-ヘキサンを添加して重質化し、PM-Index 値が 2.0 程度になるよう調製した燃料である。1-MN とトルエンはいずれもプレミアムガソリンに含まれている一般的な成分である。1-MN は炭素数 (C:Carbons) 11 の芳香族化合物で、PM-Index 値を上げる成分として用いた。ガソリン中の成分として、C12 以上の炭化水素類の含有量は極微量であるため、C11 で PM 排出が増加しやすい芳香族化合物である 1-MN を選択した。*n*-ヘキサンは固体である 1-MN の試薬を溶かす溶媒として用いた。⑥ 市井相当 P は、PM-Index 値が 1.1 の燃料で、一般の小売店 (燃料加工所) で購入した、市井のガソリンスタンドで販売されているものと同等の燃料である。

④ 認証試験用 P は国内認証試験用プレミアムガソリンの規格 (試験用規格) を満たしていた。⑤ 認証重質化 P は、④ 認証試験用 P を基材として調製した結果、全て試験用規格の範囲内となり、国内で認証試験に用いられる燃料規格をほぼ満足する性状になった。また、水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフで分析し、1-MN が添加されていることを確認した (図 2.2)。⑥ 市井相当 P は自動車ガソリンの日本産業規格 (JIS: Japanese Industrial Standards) を満たしていた。

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ことを目的に考案された SPMI、PM を生成しやすい C10 以上の芳香族分^{1,2,3}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。

PM-Index と SPMI の算出方法を表 2.3 に示す。PM-Index は、ガソリン車において PM 排出量と相関

が高いことが知られている。しかし、ガソリン中に含まれる個々の成分から算出されるため、解析に時間を要する。そこで、PM-Index と同等の値を簡易的に算出するために提唱された指標が SPMI である。供試燃料の PM-Index は、⑤ 認証重質化 P (2.0) > ④ 認証試験用 P (1.3) > ⑥ 市井相当 P (1.1) の順に大きく、⑤ 認証重質化 P は目標通りの値に調製できた。SPMI は、⑤ 認証重質化 P (1.1) > ④ 認証試験用 P (0.88) > ⑥ 市井相当 P (0.86) の順で、本試験の供試燃料において、PM-Index と SPMI は、重質さの順番は同じであるものの値は同等にならず、④ 認証試験用 P (0.88) と⑥ 市井相当 P (0.86) はほぼ同じ値になった。SPMI の算出には 130℃あるいは 170℃の時に燃料が蒸留された割合 (%) を用いる。そこで、**図 2.3** の蒸留曲線で供試燃料の重質さを蒸留性状からも確認した。3 種の燃料は 130℃付近の留出量 80%まではほぼ同じ蒸留性状であった。170℃は国内認証試験用燃料の規格において 90%流出量の上限であるが、この付近の留出量でも④ 認証試験用 P と⑥ 市井相当 P はほぼ同程度であった。蒸留性状において、④ 認証試験用 P と⑥ 市井相当 P の違いが見られるのは 90%流出量付近のみで、**表 2.2** に示した通り、④ 認証試験用 P は 152℃、⑥ 市井相当 P は 145℃であり、④ 認証試験用 P の方が僅かに重質であることが確認できた。

燃料成分の内、C10 以上の芳香族分は、半揮発性で蒸気圧が低いナフタレン (C10) の様に、他の成分よりも燃焼しにくいため、PM 排出量を増加させる。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 までの芳香族分について体積割合の合計 (C10-13 芳香族分) を比較して確認した (**図 2.4**)。C10-13 芳香族分は、⑤ 認証重質化 P (3.3) > ④ 認証試験用 P (2.5) > ⑥ 市井相当 P (1.3) の順に大きかった。また、⑤ 認証重質化 P の C11 である 0.84%の内、0.8%が添加した 1-メチルナフタレンに相当した。

¹ 一般財団法人石油エネルギー技術センター：JATOPⅢ 成果発表会 ガソリン車 WG 報告，
https://www.pecj.or.jp/japanese/jcap/jatop3/pdf/index_jatop3_3-3.pdf (2020.3.11 アクセス)

² 一般財団法人石油エネルギー技術センター：J-MAP の成果 ガソリン車 WG 報告，
https://www.pecj.or.jp/file/j-map/20200528/index_jmap_1-3.pdf (2020.3.11 アクセス)

³ Ben Amara, A. et al., "Critical Analysis of PM Index and Other Fuel Indices: Impact of Gasoline Fuel Volatility and Chemical Composition," SAE Technical Paper 2018-01-1741, 2018,
<https://doi.org/10.4271/2018-01-1741> (2020.3.11 アクセス)

表 2.2 供試燃料性状

燃料性状項目	単位	④ 認証試験用P	⑤ 認証重質化P	⑥ 市井相当P	国内認証試験用 プレミアムガソリン規格	JIS規格 (1号, プレミアム)
PM-Index		1.3	2.0	1.1	N.A.※	N.A.
SPMI		0.88	1.1	0.86	N.A.	N.A.
密度 (15℃)	g/cm ³	0.751	0.754	0.751	0.740~0.754	0.783 以下
オクタン価 RON		99.5	99.5	99.7	99~101	96 以上
MON		87.8	87.9	87.5	86~88	N.A.
蒸気圧 37.8℃	kPa	58.3	57.3	62.0	56~60	44~78
実在ガム 未洗	mg/100ml	<1	<1	7.8	N.A.	20 以下
実在ガム 洗浄	mg/100ml	<1	<1	<1	5 以下	5 以下
蒸留性状 初留点	℃	36	36.0	35	N.A.	N.A.
5%	℃	49	48.5	48.5	N.A.	N.A.
10%	℃	54.5	54.5	54.0	45~55	70 以下
20%	℃	62.5	62.0	63.5	N.A.	N.A.
30%	℃	70.5	70.0	72.0	N.A.	N.A.
40%	℃	79.5	80.0	82	N.A.	N.A.
50%	℃	91.0	92.0	92.0	90~100	75~110
60%	℃	103	105	103	N.A.	N.A.
70%	℃	113	113	112	N.A.	N.A.
80%	℃	123	124	122	N.A.	N.A.
90%	℃	152	156	145	140~170	180 以下
97%	℃	169	177	168	N.A.	N.A.
終点	℃	176	197	178	215 以下	220 以下
全留出量	%	97.5	97.5	98	N.A.	N.A.
残油量	%	1.0	1.0	1.0	N.A.	N.A.
減失量	%	1.5	1.5	1.0	N.A.	N.A.
留出量 70℃	%	29.5	29.5	27.5	N.A.	N.A.
130℃	%	84.5	83.0	85.0	N.A.	N.A.
170℃	%	97.5	95	97.5	N.A.	N.A.
硫黄分	mass ppm	3	3	4	10 以下	10 以下
鉛	g/L	< 0.001	< 0.001	< 0.001	検出されない	検出されない
炭化水素組成						
総芳香族	vol%	39.6	40.1	35.7	20~45	N.A.
オレフィン	vol%	15.4	15.3	17.2	15~25	N.A.
パラフィン	vol%	43.1	42.6	36.4	N.A.	N.A.
ナフテン	vol%	2	2	3.60	N.A.	N.A.
炭素量	wt%	87.3	87.3	86.1	N.A.	N.A.
水素量	wt%	12.7	12.7	12.8	N.A.	N.A.
酸素量	wt%	0	0	1.1	検出されない	1.3 以下
ベンゼン	vol%	0.4	0.4	0.5	1.0 以下	1.0 以下
灯油分	vol%	<1.0	<1.0	<1.0	検出されない	4 以下
MTBE	vol%	<0.1	<0.1	<0.1	検出されない	7 以下
ETBE	vol%	<0.1	<0.1	7.1	N.A.	N.A.
メタノール	vol%	<0.1	<0.1	<0.1	検出されない	検出されない
エタノール	vol%	<0.1	<0.1	<0.1	検出されない	3 以下
炭素数別芳香族類の割合						
C10	vol%	2.5	2.5	1.3	N.A.	N.A.
C11	vol%	0.040	0.84	0.043	N.A.	N.A.
C12	vol%	0.007	0.028	0.034	N.A.	N.A.
C13	vol%	0.000	0.000	0.003	N.A.	N.A.
C10-13 合計	vol%	2.5	3.3	1.3	N.A.	N.A.

※ N.A. : Not Available

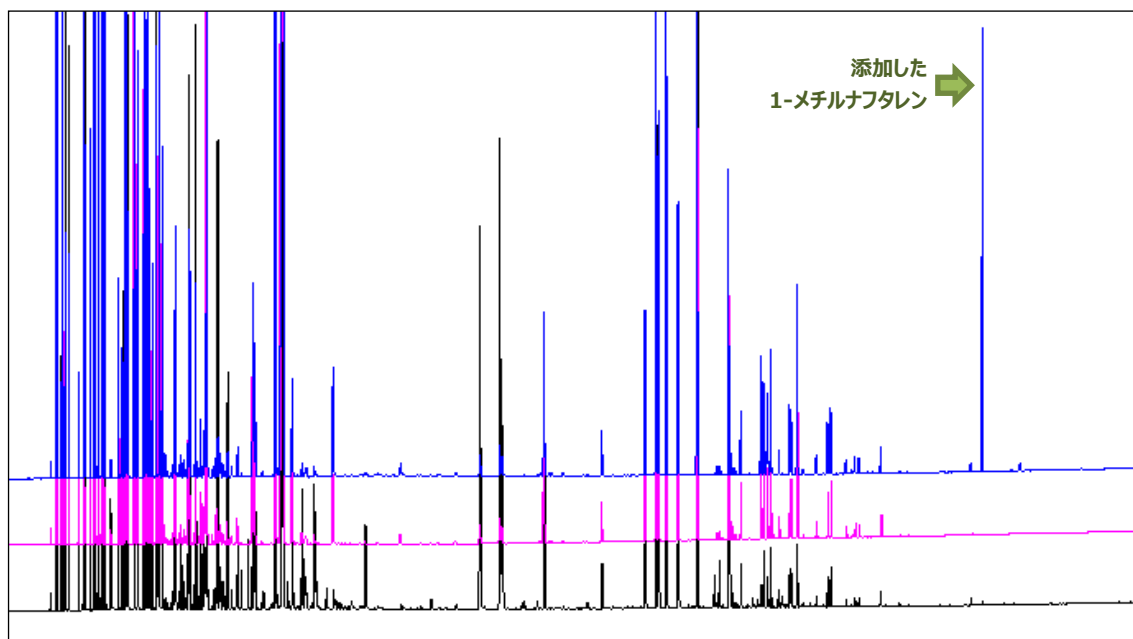


図 2.2 供試燃料の分析クロマトグラム

表 2.3 ガソリン車における PM 排出の指標とされる PM-Index および SPMI の算出方法

指標	分析方法 の通称	JIS	計算式	備考
PM-Index	PONA分析	JIS K 2536-2 石油製品-成分試験方法 第 2 部：ガスクロマトグラフ による全成分の求め方	$\text{PM Index} = \sum_{i=1}^n \mathbf{I}_{[443\text{K}]}$ $= \sum_{i=1}^n \left[\frac{\text{DBE}_i + 1}{\text{蒸気圧 (443 K)}_i} \times \text{重量分率}_i \right]$ DBE = 二重結合の数	燃料中の炭化水素類をPONA分析し、各炭化水素類の蒸気圧と二重結合の数、重量分率を用いて算出する。 ただし、PM-Indexを算出するためにJIS（PONA分析）があるのではなく、燃料中の炭化水素類を定性・定量分析するためにPONA分析を利用している。従って、PONA分析でリストアップされていない炭化水素類が混入していた場合、個別に定性・定量分析を行う必要がある。
SPMI	蒸留性状	JIS K 2254 石油製品-蒸留性状の求め方	$\text{sPMI} = \alpha_1 E_{170} + \beta_1 E_{130} + \gamma_1$ $\alpha_1 = -0.0647, \beta_1 = -0.0324, \gamma_1 = +9.9241$	SPMIにおけるE130、E170とは、130℃あるいは170℃の時に燃料が蒸留された割合（%）を言う。 α、β、γの係数は、市場燃料のPM-Indexと蒸留性状から求められた。 従って、市場燃料の性状が変化する、あるいは販売している国が変わると係数も変化する懸念がある。 尚、通常の蒸留性状では、例えば、全量の80%が蒸留されたときの温度は何℃かを測定している。

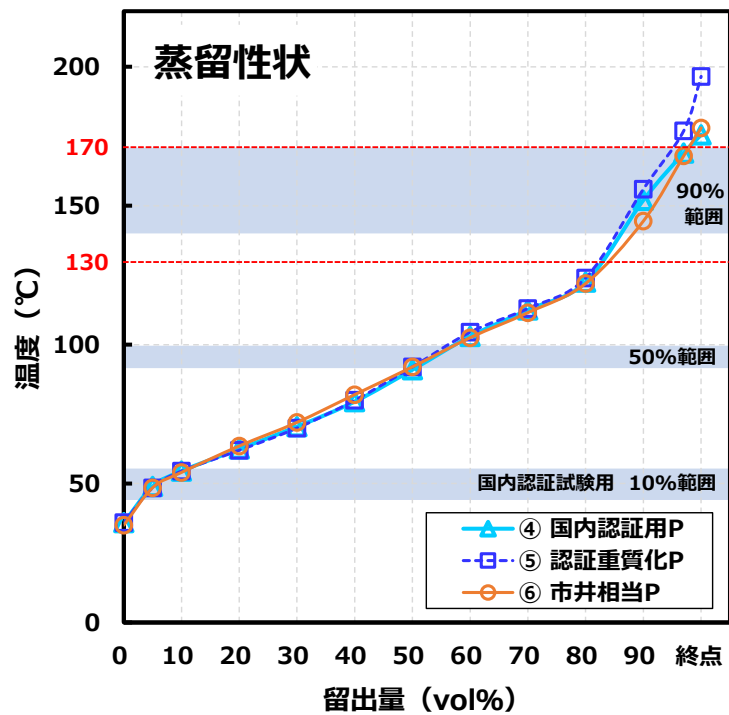


図 2.3 供試燃料の蒸留曲線

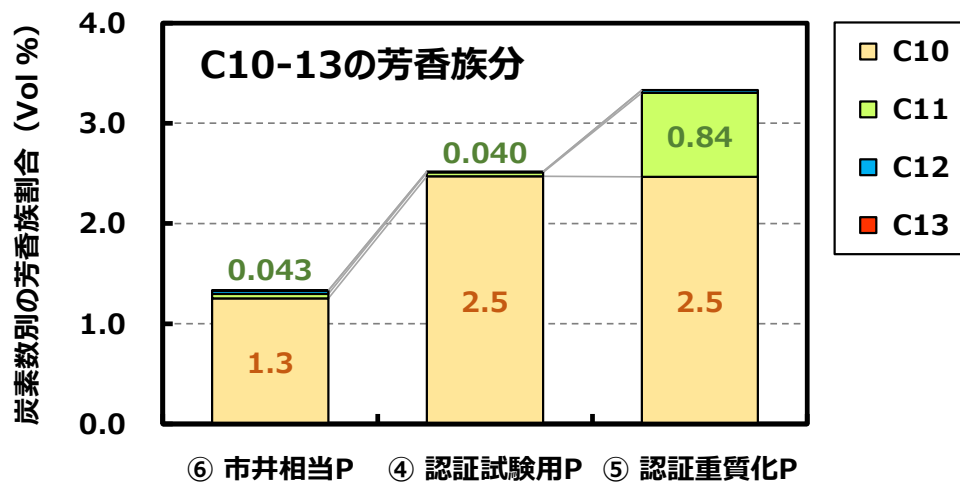


図 2.4 C10 以上の芳香族分の体積割合比較

2.3 調査項目

排出量の調査対象は、PM、PN の他、規制物質（CO、NMHC、NO_x）、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。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、NO_x、 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。

2.4 試験サイクル

排出ガス測定は、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）」に準拠して実施した。WLTC については、Low、Medium、High の 3 phase（WLTC LMH）に続けて Extra High（WLTC ExH）を走行させ、4 Phase の試験サイクル（WLTC LMH+ExH）で実施した。繰返し試験数は各燃料ごとに 3 回とした。ただし、環境省担当官との協議の結果、日本自動車研究所（JARI）が独自調査を行った同じ条件のデータがある場合はこれも含めて本報告書に記載し、考察した。

試験に必要な走行抵抗値は、供試車両とコーストダウン法を用いた実測により取得した。

2.5 試験方法

（1）希釈トンネルの準備

PM 及び PN の測定に際して、燃料性状以外の要素による測定結果への影響を抑えるため、各車両の試験前に希釈トンネルを洗浄し、乾燥させてから実験室に設置した。次に、希釈トンネルが清浄であることを確認するため、希釈トンネル内に希釈空気のみを導入して、WLTC LMH と同じ時間のトンネルブランク試験を行った。トンネルブランク試験における PM および PN のブランク確認方法は以下のとおりである。

PM については、希釈空気の導入部と希釈トンネル後部の 2 カ所から同時に空気を採取し、それぞれポリテトラフルオロエチレン（PTFE）フィルターに通気して捕集し、捕集前後のフィルター秤量差をトンネルブランク値として得た。また、温湿度が管理され、秤量用の天秤が設置されている天秤ボックス内に置いた未使用の PTFE フィルターをレファレンスフィルターとし、試験日毎に秤量して秤量の誤差範囲を確認した。更に、試験日毎に秤量室と試験室の間を持ち運んだ未使用の PTFE フィルターを移送中の温湿度変化や雰囲気からの汚染の影響が無いことを確認するトラベルブランクフィルターとし、持ち運び前後の秤量差をトラベルブランク値とした。最後に、トンネルブランク値がレファレンスフィルターから得た秤量の誤差範囲やトラベルブランク値と同程度であることを確認し、希釈トンネルの清浄さの担保とした。PN については、希釈トンネルの後部から希釈トンネル内の空気を採取して計測し、極低濃度で排出ガス試料の計測に問題が無いことを確認した。また、ガス状の調査対象物質についても希釈空気導入部と希釈トンネル後部で空気を同時に採取し、ほぼ同じ測定値から希釈トンネルが清浄であることを確認した。

尚、トンネルブランク試験は各試験日の初めにも実施し、希釈トンネルが清浄に保たれていることを証明するデータとした。希釈トンネル洗浄・設置後、及び各試験日のトンネルブランク試験の結果は巻末の付録 2 に纏めて記載した。

(2) 試験設備の準備と設定

試験設備はシャシダイナモメータ（C/D、表 2.4）及び希釈空気導入装置、希釈トンネル、定流量希釈装置（CVS）、排ガス分析計、各種捕集装置から構成される。試験期間中は試験室内温度を $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 55% に保持した。供試車両は四輪駆動車試験用の C/D 上に設置した。供試車両のテールパイプから希釈トンネルまでは排気導入管で繋ぎ、 113°C に加熱して排気導入管や希釈トンネル内壁での結露や調査物質の吸着等を防止した。また、希釈トンネルと排気導入管は内壁を洗浄し、乾燥させてから試験に用いた。

表 2.4 シャシ・ダイナモメータの諸元

ダイナモメータ	型式	FC-DY
	車速 (km/h)	200
	最大軸荷重 (kN)	25
	吸収馬力 (kW)	220
	駆動馬力 (kW)	200
ローラ	材質	Fe
	直径 (mm)	1219.2
	ローラ幅 (mm)	800
	ローラ内間隔 (mm)	800
	ローラ表面仕上	平滑 タングステンカーバイト溶射
	軸数	前輪（固定軸），後輪（移動軸） 各 1
慣性補償	軸距離 (mm)	2100~4100
	方式	全電気慣性補償
	機械固定慣性 (kg)	1000
	電気慣性 (kg)	-545~2500
	慣性設定間隔 (kg)	1
	合計慣性範囲 (kg)	455~3500 800~3500 (4WD)
エンジン冷却ファン	形式	ターボファン (最低地上高 : 100mm)
	風速 (km/h)	4~160
	風速制御	車速追従式
	吐出口寸法 (mm)	W1000×H700
室内空調	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	25 ± 3
	湿度 (%RH)	50 ± 10
製造元		明電舎

(3) 調査対象物質の捕集及び測定方法

供試車両の排出ガスは全量を希釈トンネルに導入し、CVS と希釈空気希釈した。希釈空気は温度 $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 55% に調整した試験室内の空気を高性能フィルターとチャコールフィルターおよび HEPA (High Efficiency Particulate Air) フィルターでろ過して用いた。

PN は、希釈トンネルの後部から希釈排出ガスを採用し、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。

(4) 調査対象物質の試料捕集及び排出量の算出区分

供試車両の排出ガスは測定する試料の採取と排出量の算出区分を、表 2.5 に纏めて示す。調査対象物質の内、ガス状物質（CO、NMHC、NO_x、THC、CO₂）及び PN の測定試料はフェーズ毎に捕集した。PM 及び PM 中の炭素成分は WLTC LMH と WLTC ExH とに分けて捕集した。排出量は、ガス状物質は 4 つのフェーズ毎と WLTC LMH 及び WLTC LMH+ExH の値を算出した。

表 2.5 試料の捕集と排出量の算出区分

実施 の 順番	試験		試験時間 (秒)	走行距離 (km)	試料の捕集		排出量の算出			
					ガス状物質 PN	PM (質量, 炭素成分)	ガス状物質, PN			PM (質量, 炭素成分)
①	希釈トンネルブランク		1477 ※2	無し	●	●	無し ※3			無し
②	WLTC LMH	Low	589	3.10	●	●	●			●
		Medium	433	4.76	●		●	●		
		High	455	7.16	●		●		●	
	WLTC ExH		323	8.25	●	●	●	●		●

※1 ガス状物質：CO, NO_x, NMHC, CO₂, THC, NO, NO₂

※2 1477秒 = WLTC LMH

※3 導入する希釈空気と希釈トンネル後部で採取した試料の分析値あるいはフィルター秤量値によって希釈トンネルの清浄さを判断する。