

概要

1. 調査の目的

本調査では残渣油（原油の精製課程で残る重油等）を分解した分解軽油（LCO: Light Cycle Oil）を軽油に混合することによる排出量への影響を調査し、大気汚染防止法に基づく自動車の燃料の性状に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度の見直しに資する情報を得ることを目的とする。

2. 調査内容

軽油に分解軽油が混合され、芳香族成分の含有量が増加する事を重質化と捉え、燃料の重質化がディーゼル車から排出される規制物質などの排出量に及ぼす影響を調査した。

3. 調査方法

3. 1 供試車両

国内で販売されている車両総重量 3.5 トンを超えるディーゼル貨物車から車両総重量の異なる 2 台を選定し、レンタカーにより調達した。選定は、適合している規制や排気量、販売台数等を踏まえ決定した。**概要表 1**に供試車両の諸元を示す。供試車両にはアイドリングストップ機能が付与されている。しかし、本調査では燃料影響を調査するため、アイドリングストップ機能は使用せず、試験条件が一定になるように配慮した。

概要表 1 供試車両諸元

供試車両	車名	貨物車A	貨物車B
	型式	2RG	2PG
	適合規制	H28年排出ガス規制 H27年燃費基準10%低減レベル	H28年排出ガス規制 H27年燃費基準5%低減レベル
	規制対応サイクル	WHSC, WHTC	WHSC, WHTC
寸法・重量	全長 (mm)	4,980	8,630
	全幅 (mm)	1,890	2,310
	全高 (mm)	3,050	3,520
	乗車定員 (人)	3	2
	最大積載量 (kg)	2,000	2,300
	車両重量 (kg)	2,590	5,580
	車両総重量 (kg)	4,755	7,990
	試験時車両重量 (kg)	4,645	7,935
原動機	等価慣性重量 (kg)	4,645	7,935
	シリンダー, バルブ	直列4気筒, DOHC, インタークーラー付きターボ	直列4気筒, SOHC, 単段過給ターボ
	圧縮比	17.3	17.5
	総排気量 (cc)	2,999	5,123
	最高出力 (kW/PS /rpm)	110/150/2,800	177/240/2,300
	最大トルク (N・m /rpm)	375/1,280-2,800	794/1,400
	燃料供給装置	電子制御式	電子制御式
排出ガス低減装置	DPF, 尿素SCR	DPF, 尿素SCR	
主要燃費向上対策	アイドリングストップ	アイドリングストップ	
その他	既走行距離 (km)	4,425	9,582

3. 2 供試燃料の性状

本調査では性状の異なる3種類の軽油を供試燃料とした。即ち、一般に販売されているJIS 2号軽油（JIS 2号）と国内認証試験用軽油（認証軽油）、および重質化した認証軽油（認証重質化）である。本調査ではLCOの混合によって燃料中の芳香族含有量が高くなることを重質化と定義し、認証重質化を調製した。調製の際、LCOの入手は一般に困難であるため、LCOの代替としてナフサ由来の溶剤（ENEOS、カクタスソルベントP-180）を重質化剤として用いた。LCOと同様に、重質化剤は芳香族分が多くて動粘度が低い特徴がある。本調査で用いた重質化剤の芳香族分は99.8 vol%、動粘度（30℃）は1.603 mm²/sであった。重質化の基準は総芳香族分とし、総芳香族分が35vol%以上になるよう重質化剤を認証軽油に混合した。重質化剤の添加によって芳香族分が増えると、着火性が低くなってセタン価が低下する。セタン価については50を下回るとDPF再生への負荷が増大する傾向があるとの報告¹がある。また、セタン価向上剤（2-Ethylhexyl nitrate）を添加するとセタン価向上剤に含まれる窒素分によってNO_x排出量が高くなることも報告されている。そこで、認証軽油の規格からは外れるが、セタン価向上剤の添加量を少なくできるようにセタン価の目標値を50程度として調製し、結果としてセタン価向上剤を1,500 ppm添加した。

供試燃料の性状を**概要表 2**に示す。JIS 2号および認証軽油はそれぞれの規格を満足していた。認証重質化は重質化によって、セタン指数、蒸留性状の50%留出温度、総芳香族、動粘度の値が認証燃料の規格から外れた。ただし、動粘度についてはJIS 2号の規格を満足していた。**概要図 1**に3種の燃料と重質化剤をそれぞれガスクロマトグラフ-水素炎イオン化検出器で測定したクロマトグラムを示す。JIS 2号と認証軽油は炭素数25の直鎖飽和炭化水素（C₂₅）程度までで構成されている燃料であった。認証重質化は重質化剤の添加によって2-メチルナフタレンや1-メチルナフタレン等の芳香族分が大きなピークとなっており、認証軽油に含まれていた直鎖飽和炭化水素類のピークは相対的に低くなっていることを確認した。**概要図 2**には芳香族分の質量割合を比較して示す。JIS 2号と認証軽油の芳香族分は単環芳香族と多環芳香族の合計が約20mass%程度であるのに対し、認証重質化は約40mass%となって調製目標を満足していた。また、不完全燃焼によってススになり易い2環以上の多環芳香族²はJIS 2号と認証軽油が約1~2mass%であるのに対し、認証重質化は約9mass%と高い値になった。**概要図 3**には3種の燃料の蒸留曲線を示す。認証重質化は芳香族分の観点からは重質となったが、蒸留性状としては軽質となって蒸留性状50%留出温度における認証燃料規格から外れた。これは沸点の高いC₁₄以上の成分が相対的に減少したためである。認証重質化のセタン価は50.4となって調製目標値を満足し、JIS 2号の60.2や認証軽油の56.6よりも低い値になった。窒素分については、JIS 2号は1 mass ppm、認証軽油では検出下限1 mass ppm以下で検出されなかったが、認証重質化はセタン価向上剤に含まれる窒素の影響を受けて116 mass ppmとなった。

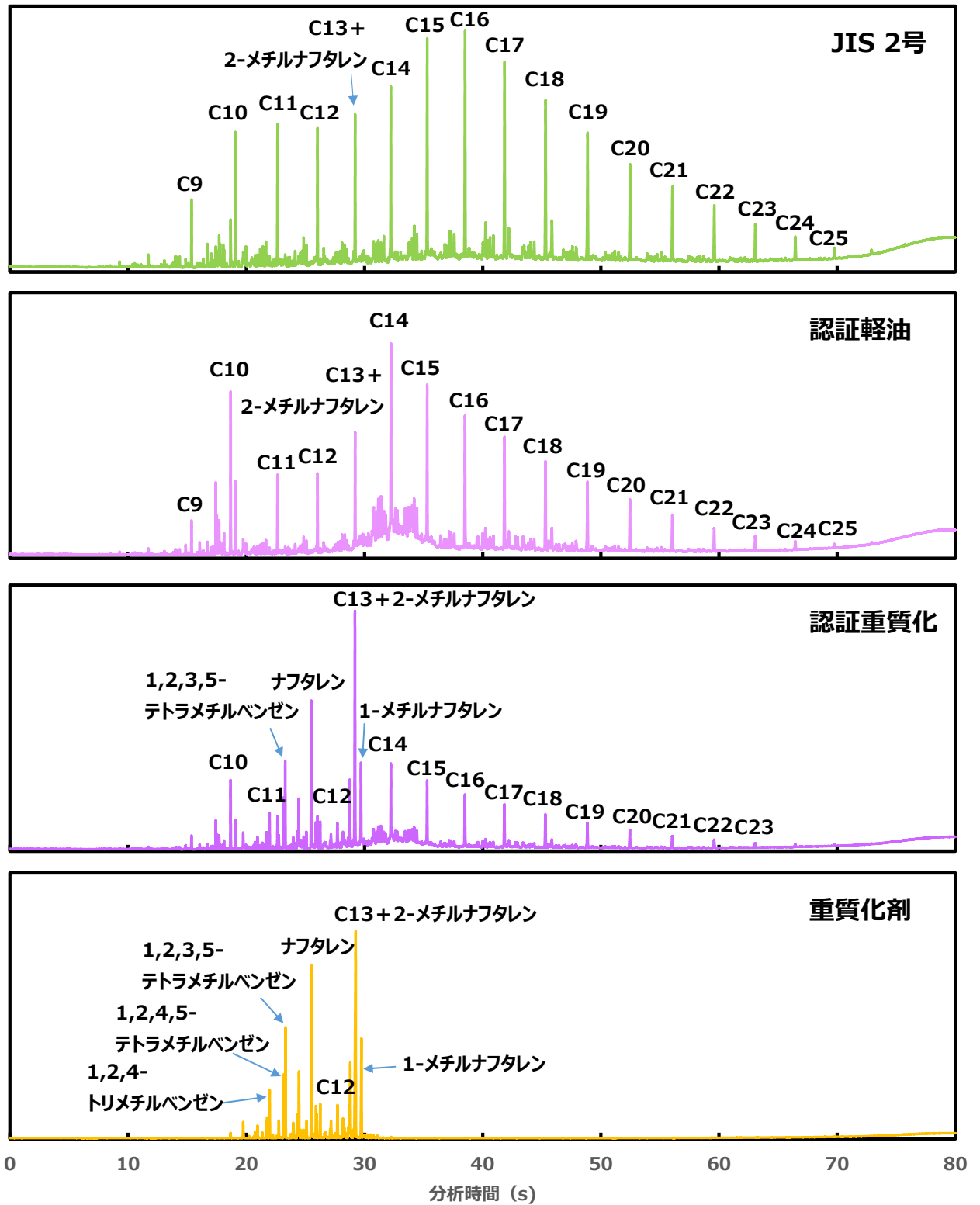
¹ J-MAP ディーゼル車WG報告, https://www.pecj.or.jp/file/j-map/20200528/index_jmap_1-2.pdf (2022. 3. 5 閲覧)

² 中島ら, 軽油性状のディーゼルエンジン排出物質への影響(2), https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki1995/33/4/33_4_262/_pdf (2022. 3. 5 閲覧)

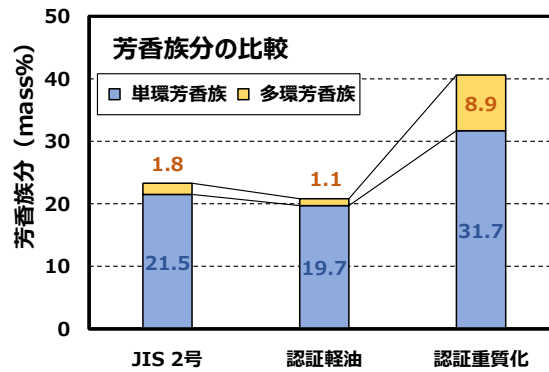
概要表 2 供試燃料性状

試験項目	JIS 2号		認証軽油		認証重質化		試験法	
	規格	性状値	規格	性状値	目標値	性状値		
セタン指数	45 以上	59.5	53~60	55.3	-	42.3	JIS K 2280-5	
セタン価	-	60.2	-	56.6	50	50.4	JIS K 2280-4	
密度 (15℃)	g/cm ³	0.86 以下	0.8252	0.815~0.840	0.8278	-	0.8535	JIS K 2249-1
真発熱量	kJ/cm ³	-	43,180	-	42,950	-	42,410	JIS K2279
蒸留性状	初留点 ℃	-	177.0	-	183.0	-	187.5	JIS K 2254
	5% ℃	-	199.5	-	204.5	-	205.0	
	10% ℃	-	212.0	-	215.0	-	211.0	
	20% ℃	-	232.5	-	232.5	-	220.5	
	30% ℃	-	253.5	-	247.5	-	229.5	
	40% ℃	-	268.5	-	257.0	-	238.0	
	50% ℃	-	280.5	255~295	264.5	-	247.5	
	60% ℃	-	292.5	-	272.0	-	257.5	
	70% ℃	-	304.0	-	282.0	-	269.5	
	80% ℃	-	317.5	-	297.0	-	288.0	
	90% ℃	350 以下	336.0	300~345	319.5	-	314.5	
	97% ℃	-	351.0	-	347.0	-	343.0	
	終点 ℃	-	351.0	370 以下	347.5	-	343.0	
全留出量	%	-	98.0	-	98.5	-	98.0	
残油量	%	-	2.0	-	1.5	-	2.0	
減失量	%	-	0.0	-	0.0	-	0.0	
総芳香族	mass%	-	23.3	-	20.8	-	40.6	IP391
多環芳香族	mass%	-	1.8	-	1.1	-	8.9	IP391
総芳香族	vol%	-	18.7	25 以下	17.7	35	-	JPI-5S-49
多環芳香族	vol%	-	1.9	5.0 以下	1.7	-	-	JPI-5S-49
窒素分	mass ppm	-	1	-	<1	-	116	JIS K 2609
硫黄分	mass ppm	10 以下	6	10 以下	5	-	4	JIS K 2541-6
潤滑性(HFRR摩耗痕径)	μm	-	237	-	288	-	429	JPI-5S-50-98
動粘度 @30℃	mm ² /s	2.5 以上	3.654	3.0~4.5	3.219	-	2.594	JIS K 2283

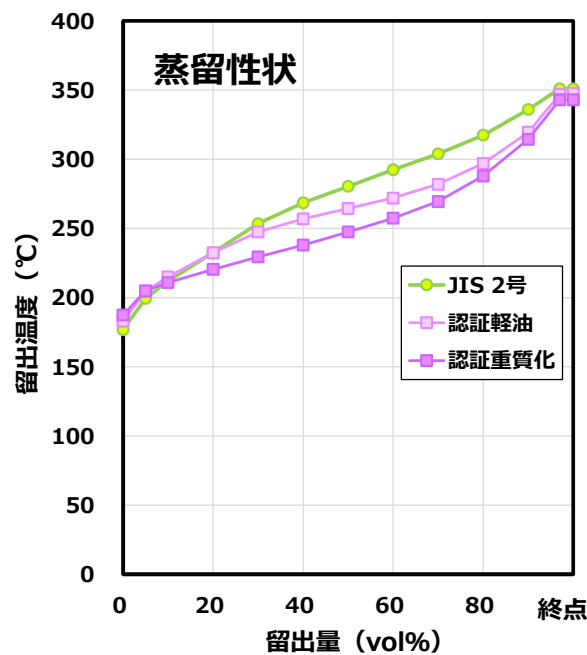
- : 該当なし



概要図 1 供試燃料 3 種と重質化剤の分析クロマトグラム



概要図 2 供試燃料の芳香族体積割合の比較



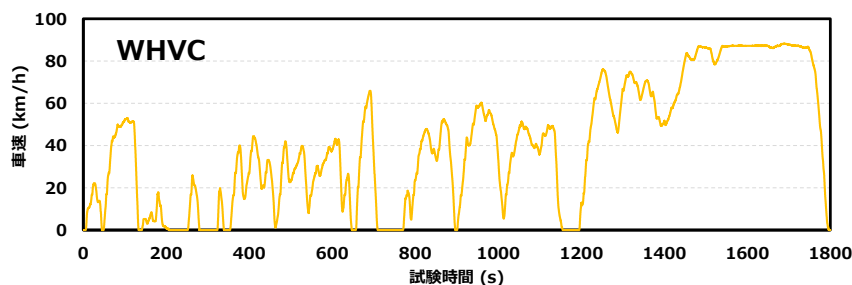
概要図 3 供試燃料の蒸留曲線

3. 3 試験サイクルと設備

排出ガス測定は WHVC モードに準拠し、冷機始動あるいは暖機始動の始動条件でそれぞれ 3 回ずつ実施した。試験サイクルの車速パターンは概要図 4 に示す通りである。排出量は各始動条件ごとに算出した。ただし、NO_x 排出量については、トルクコンバータを有する自動変速機または変速段を有しない自動変速機を備えていなくても 0.5 を乗じる補正は行わなかった。また、参考として WHTC と同様に冷機始動と暖機始動での試験の重みづけをした値 (combine) を算出した。combine の算出方法を以下の式に示す。排出量を走行距離当たりで算出する際は式中の実際のサイクル仕事量を実走行距離に読み替えた。

$$\text{combine 排出量} = \frac{(0.14 \times \text{冷機始動試験の試験当たり排出量}) + (0.86 \times \text{暖機始動試験の試験当たり排出量})}{(0.14 \times \text{冷機始動試験の実際のサイクル仕事量}) + (0.86 \times \text{暖機始動試験の実際のサイクル仕事量})}$$

試験には大型車試験用シャシダイナモメータ (C/D) 及び定流量希釈装置 (CVS)、希釈トンネル、排出ガス分析計から構成される設備を用いた。試験期間中は試験室内温度を $25 \pm 5^\circ\text{C}$ に保持した。供試車両は大型車試験用 C/D 上に設置して走行試験を行った。エンジン吸入空気は $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度 $55 \pm 5\%$ に調製した。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、排出ガスは希釈トンネルに全量導入し、希釈空気精製装置で浄化した空気希釈した。試験に用いる走行抵抗値は、目標抵抗走行値を計算によって算出した。



概要図 4 WHVC の車速パターン

3. 4 調査項目

調査対象物質は、概要表 3 に示すとおり規制物質である一酸化炭素 (CO)、非メタン炭化水素 (NMHC)、窒素酸化物 (NO_x)、粒子状物質 (PM) の他、一酸化窒素 (NO)、二酸化窒素 (NO₂)、全炭化水素 (THC)、二酸化炭素 (CO₂)、下限粒径が 23 nm の固体粒子数 (PN)、亜酸化窒素 (N₂O)、アンモニア (NH₃)、ホルムアルデヒド (HCHO) 及び PM 中の炭素成分とした。また、PN、CO、CO₂、THC、NO_x 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。希釈トンネルは各車両の試験前に洗浄してから設置し、燃料性状以外の要素が調査項目の測定結果に影響を及ぼさないようにした。

概要表 3 調査項目の一覧

調査対象		調査項目		備考
		排出量	時系列挙動	
粒子状物質	PM	○		規制物質
	PN	○	○	
	炭素成分	○		有機炭素 (OC)、元素炭素 (EC) 全炭素 (TC = OC + EC)
ガス状物質	一酸化炭素 (CO)	○	○	規制物質
	二酸化炭素 (CO ₂)	○	○	温室効果ガス
	全炭化水素 (THC)	○	○	
	非メタン炭化水素 (NMHC)	○		規制物質
	窒素酸化物 (NO _x)	○	○	規制物質
	一酸化窒素 (NO)	○		
	二酸化窒素 (NO ₂)	○		
	亜酸化窒素 (N ₂ O)	○		Euro 7 規制候補物質, 温室効果ガス
	アンモニア (NH ₃)	○		Euro 7 規制候補物質
	ホルムアルデヒド (HCHO)	○		Euro 7 規制候補物質

4. 調査結果

燃料成分中の芳香族分を増加させて重質化した燃料が排出ガスに及ぼす影響を把握するため、芳香族分の影響を受けやすいと推測される PM および PN、PM 中の炭素成分の排出量と、セタン価向上剤の窒素の影響を受けやすいと推測される NO_x および NO、NO₂、N₂O の排出量を主に確認した。

4. 1 PM と PN、PM 中の炭素成分

(1) PM および PN の排出量と PN 排出挙動

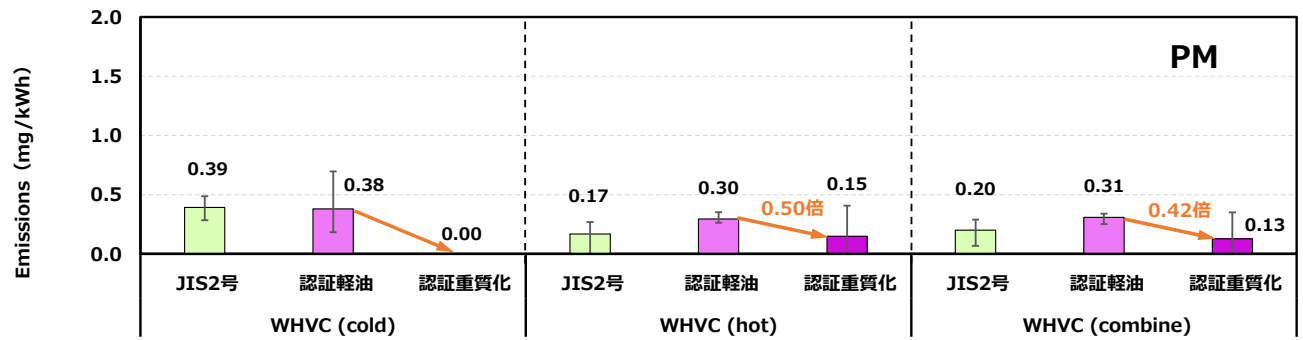
重質化剤を用いて芳香族成分を高めて重質化されることにより、PM および PN の排出量が増加するかを確認した。PM の排出量を**概要図 5**に、PN 排出量を**概要図 6**にそれぞれ示す。また、冷機始動と暖機始動のそれぞれについて、希釈トンネル内の PN 濃度による PN 排出挙動を貨物車 A は**概要図 7**と**概要図 8**に、貨物車 B は**概要図 9**と**概要図 10**に示す。芳香族分によって燃料が重質化すると PM や PN の生成が増加して排出量が高くなると予想された。しかし、車両に搭載されているディーゼル粒子除去フィルター (DPF) で除去されるため、実際の排出傾向は車両によって異なった。

貨物車 A において、冷機始動では JIS 2 号と認証軽油の PM 排出量が得られたが、認証重質化ではゼロとなった。また、PN 排出量は冷機始動でも暖機始動でも認証重質化の排出量が低く、混合基材となった認証軽油の排出量を基準にすると冷機始動では 0.67 倍、暖機始動では 0.77 倍、combine では 0.76 倍となり、減少した。そこで、**概要図 7**で冷機始動時の PN の排出挙動を確認すると、一般に PN が最も排出されやすい冷機始動直後において、繰返し 3 回実施しても認証重質化の排出ピークが無く、燃料による排出量の差は始動直後の排出挙動の違いによると考えられた。一方、**概要図 8**に示した暖機始動においてはいずれの燃料でも始動直後の大きな排出ピークが無く、1200 秒以降の高車速で加減速のある走行時に認証重質化の排出が僅かに低くなっていた。また、認証重質化の冷機始動と暖機始動の PN 排出量の平均値は $8.50 \times 10^9 \text{ \#}/\text{kWh}$ と $7.62 \times 10^9 \text{ \#}/\text{kWh}$ で、他の燃料程には始動条件の排出量差が大きくなかった。これらのことから、認証重質化を燃料に用いると、PM が多く排出されるために DPF に堆積し、早く目詰まりを起こして PM あるいは PN が排出されにくくなっていると推測された。

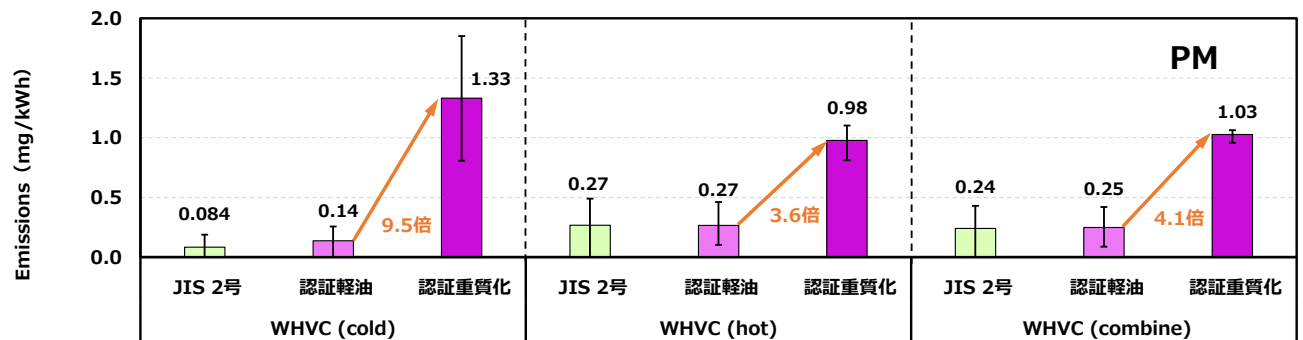
貨物車 B において、認証重質化の PM 排出量は始動条件によらず他の燃料より高く、混合基材となった認証軽油の排出量を基準にすると冷機始動では 9.5 倍、暖機始動では 3.6 倍、combine では 4.1 倍であった。また、PN 排出量は冷機始動の排出量が他の燃料の変動範囲内ではあるものの排出量の平均値としては認証軽油より 1.1 倍高く、暖機始動では 0.92 倍、combine では 0.94 倍と同程度の排出量であった。**概要図 9**で冷機始動時の排出挙動を確認すると、始動直後の排出ピークよりも高いピークが加速時に散発的に発生していた。暖機始動の排出挙動ではこのように高く散発的なピークは現れていないため、冷機始動によって発生し、DPF に堆積していた PM が加速時の排気圧によって散発的に排出された可能性が考えられた。

以上の結果から、燃料の重質化によってエンジンからの PM および PN 排出は増加するが、最終的にテールパイプから排出されるか否かは各車種の排出ガス後処理装置によると推測された。従って、燃料重質化によって PM および PN 排出量の影響を把握するためには、様々な車種について調査を行い、貨物車全体として排出量が増加するか否かを調査する必要がある。また、エンジンからの PM や PN が多くなり、DPF に負荷が掛かって耐久性に問題が生じることが懸念される。

【 貨物車 A 】

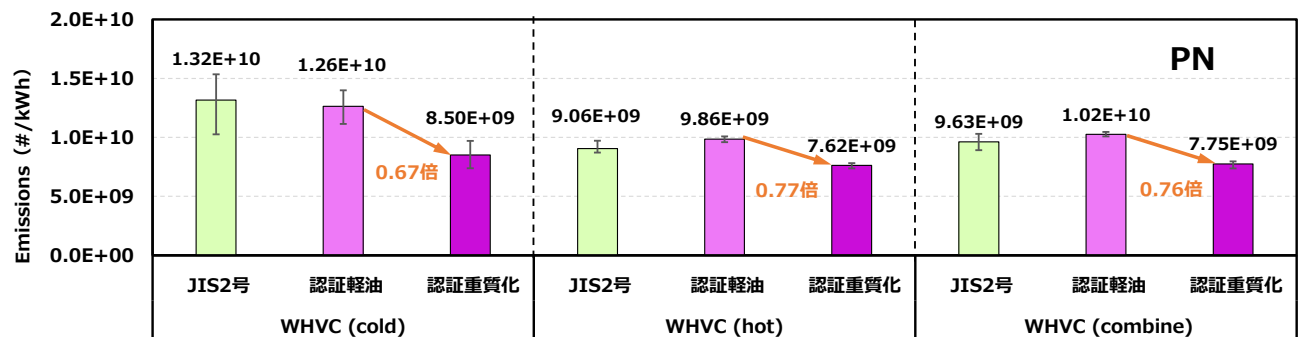


【 貨物車 B 】

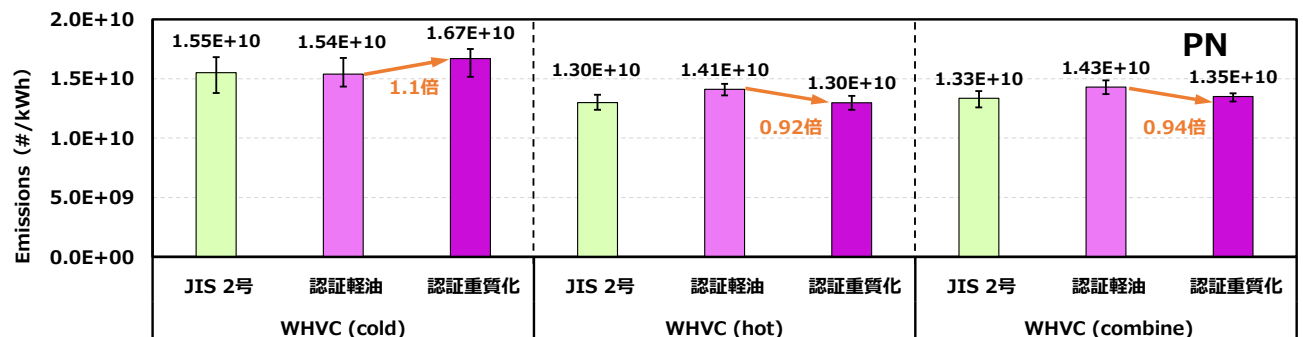


概要図 5 性状が異なる燃料による PM 排出量(mg/kWh)の比較 (エラーバーは最大・最小を表す)

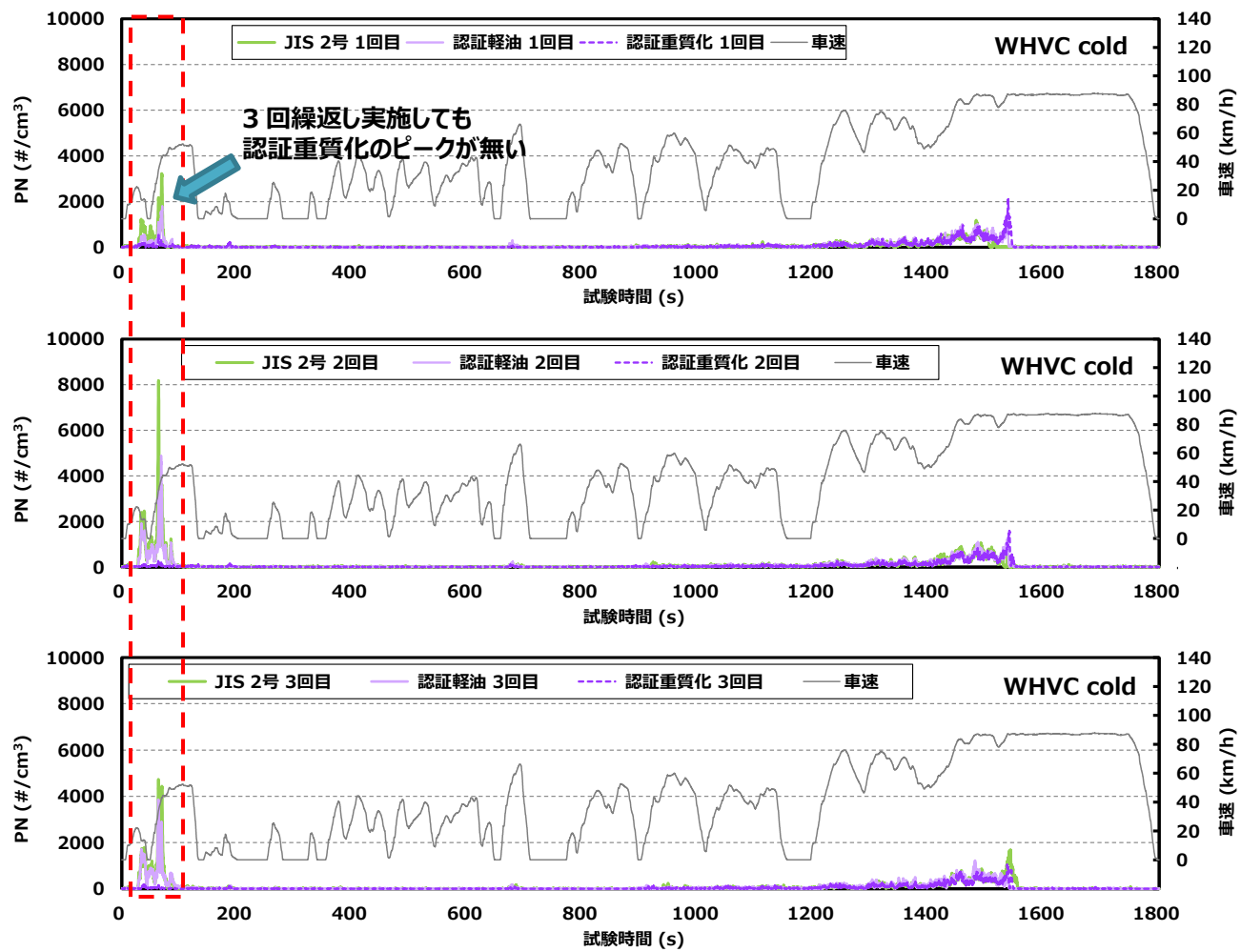
【 貨物車 A 】



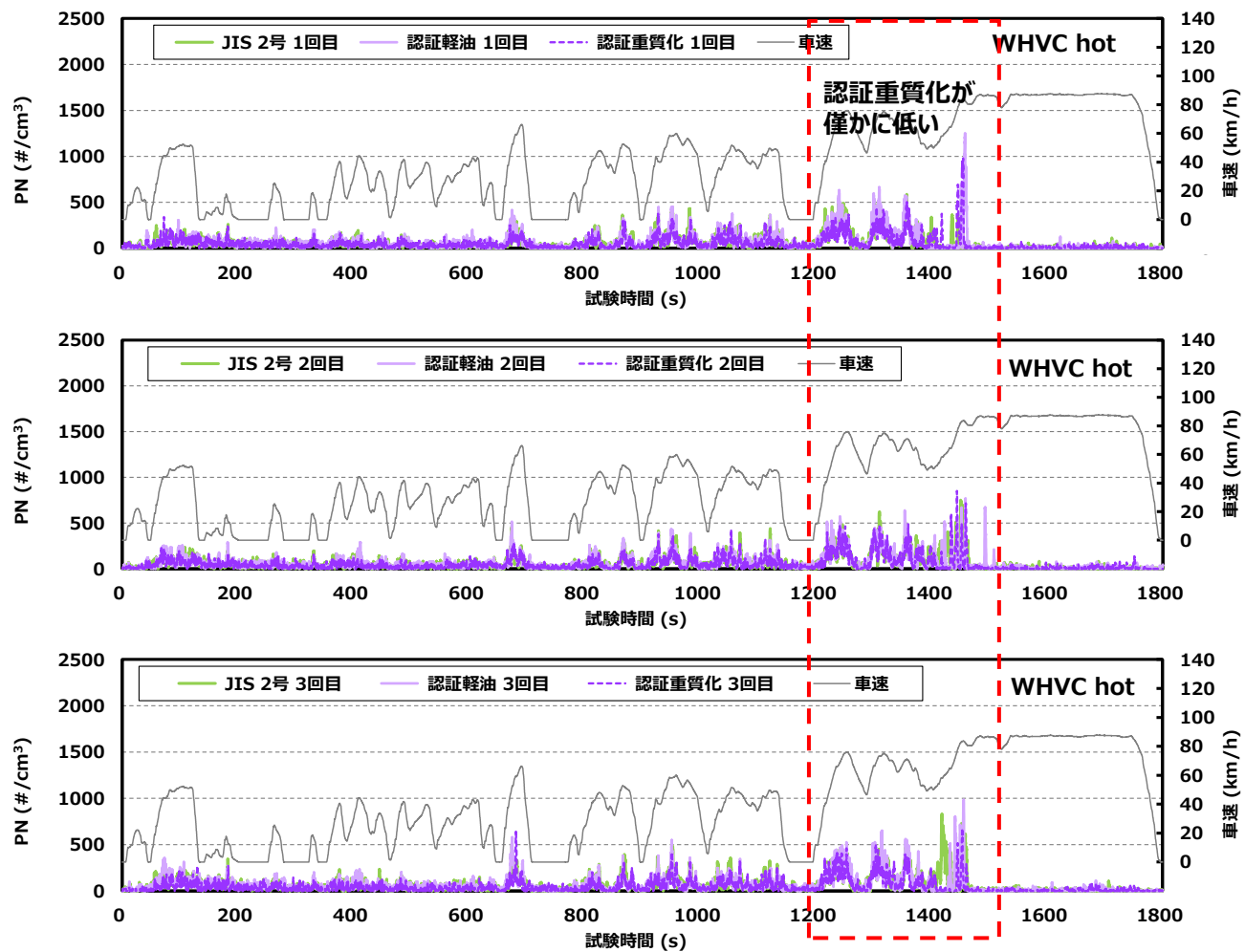
【 貨物車 B 】



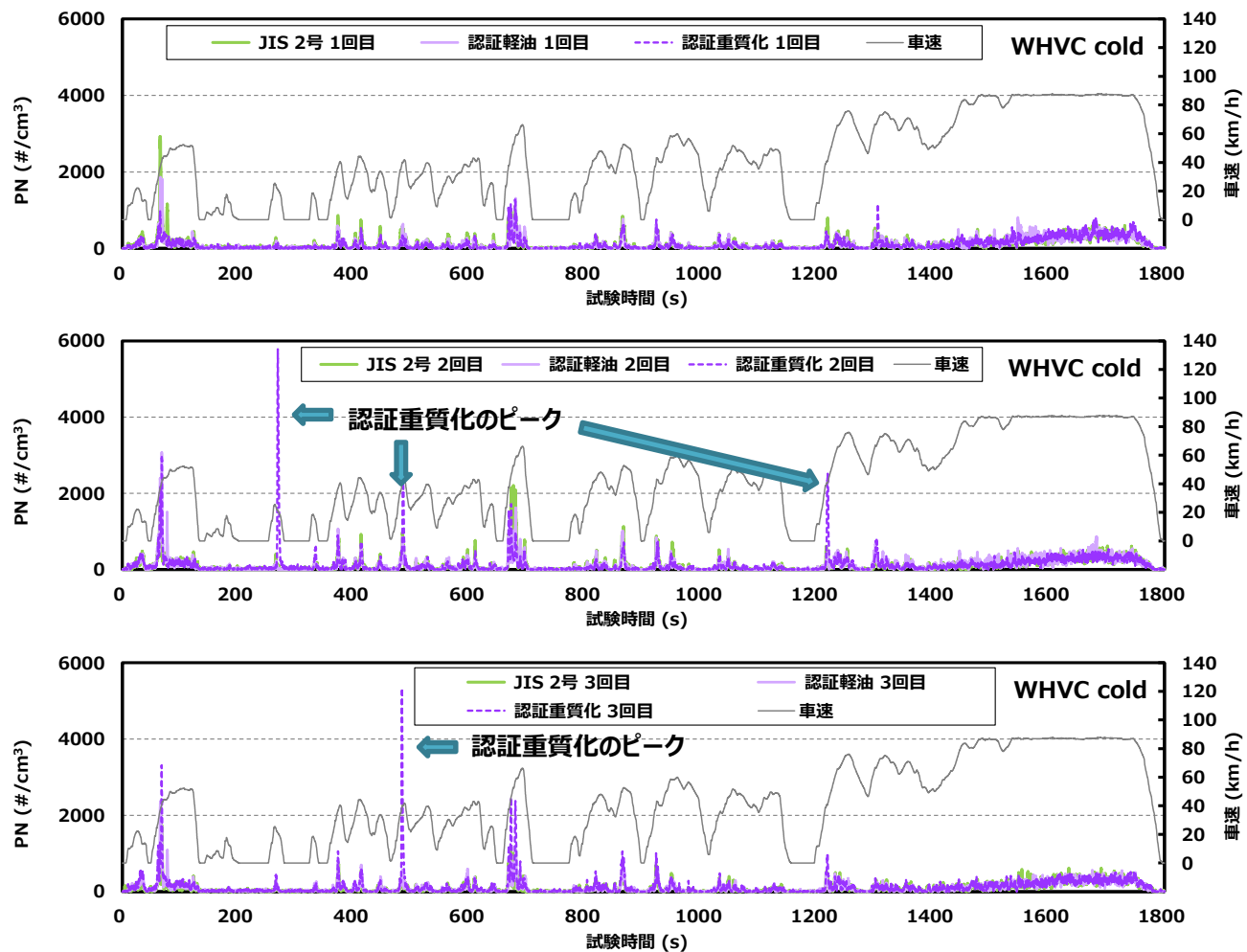
概要図 6 性状が異なる燃料による PN 排出量(#/kWh)の比較 (エラーバーは最大・最小を表す)



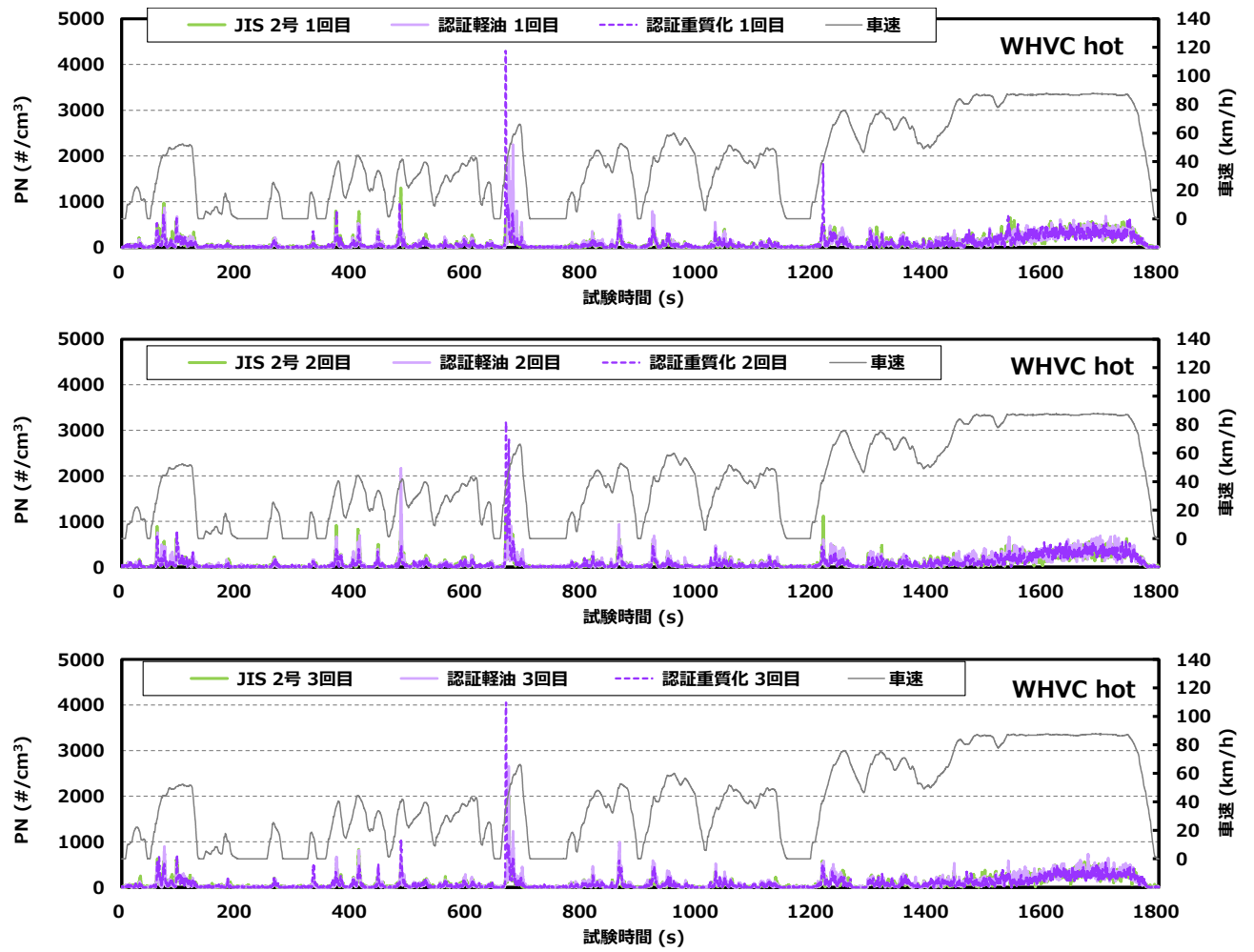
概要図 7 貨物車 A の PN 排出挙動(冷機始動)



概要図 8 貨物車 A の PN 排出挙動(暖機始動)



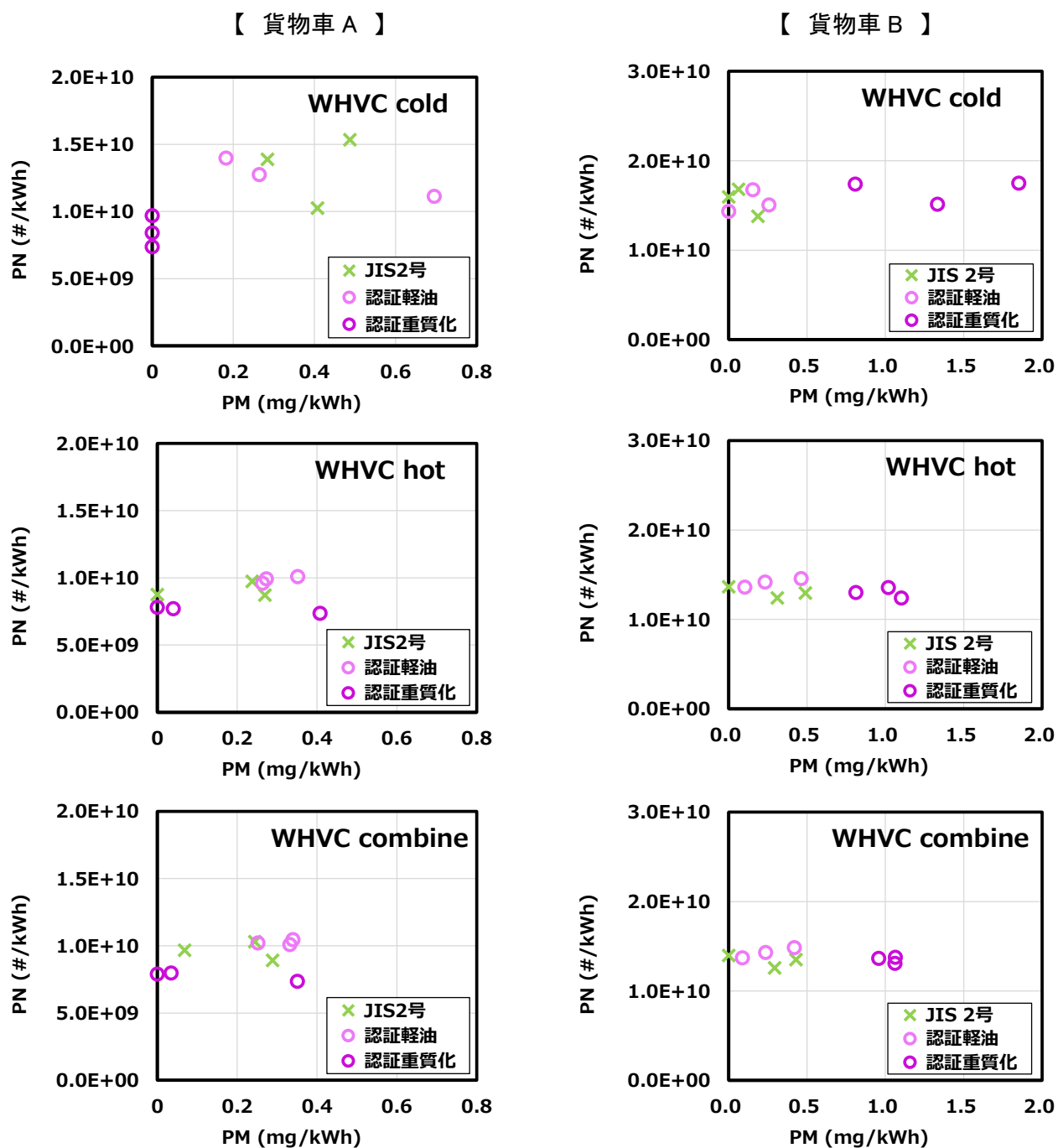
概要図 9 貨物車 B の PN 排出挙動(冷機始動)



概要図 10 貨物車 B の PN 排出挙動(暖機始動)

(2) PM 排出量と PN 排出量の関係

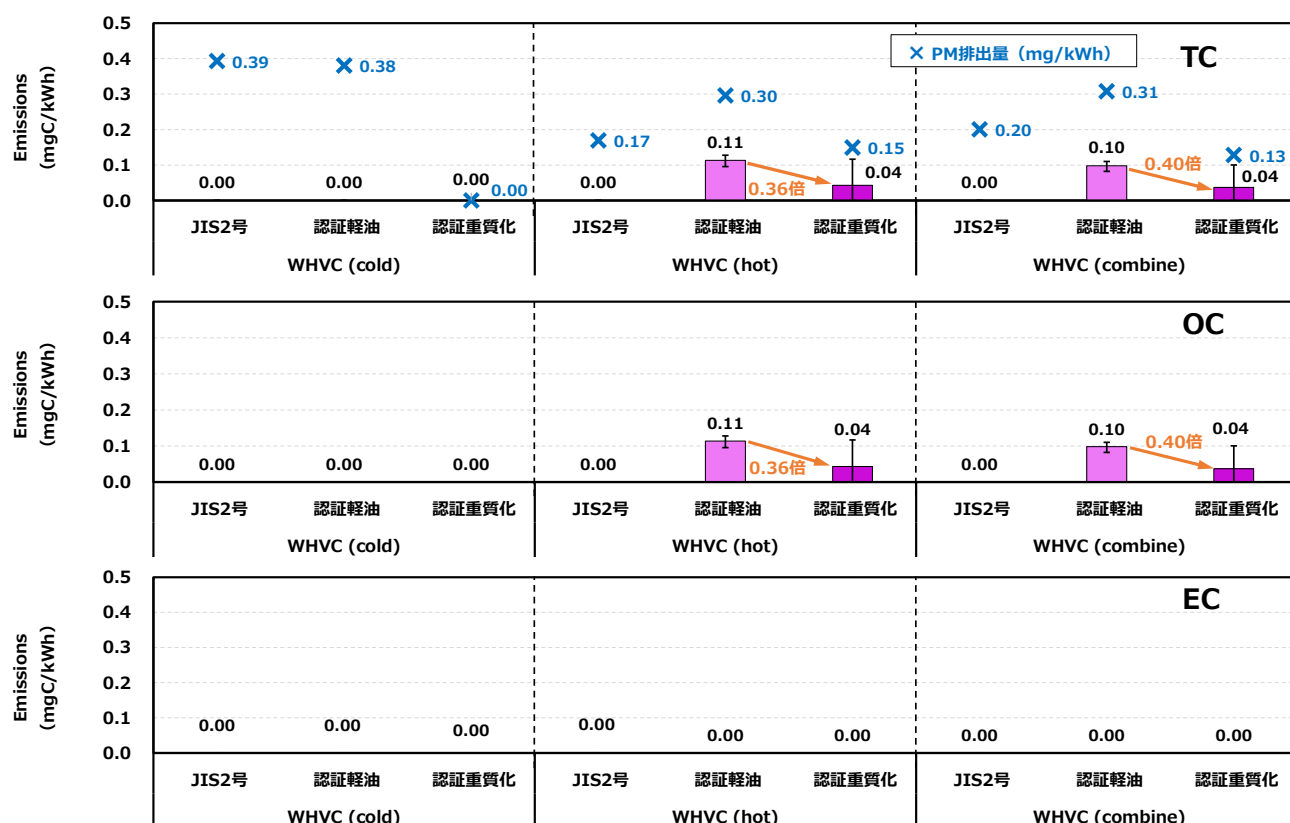
WHVC の冷機始動および暖機始動で得られた PM 排出量と PN 排出量の関係をそれぞれ概要図 11 に示す。どちらの供試車両においても、PN 排出量は PM 排出量の変化と比較して大きな変動がなかった。



概要図 11 PM 排出量に対する PN 排出量の関係

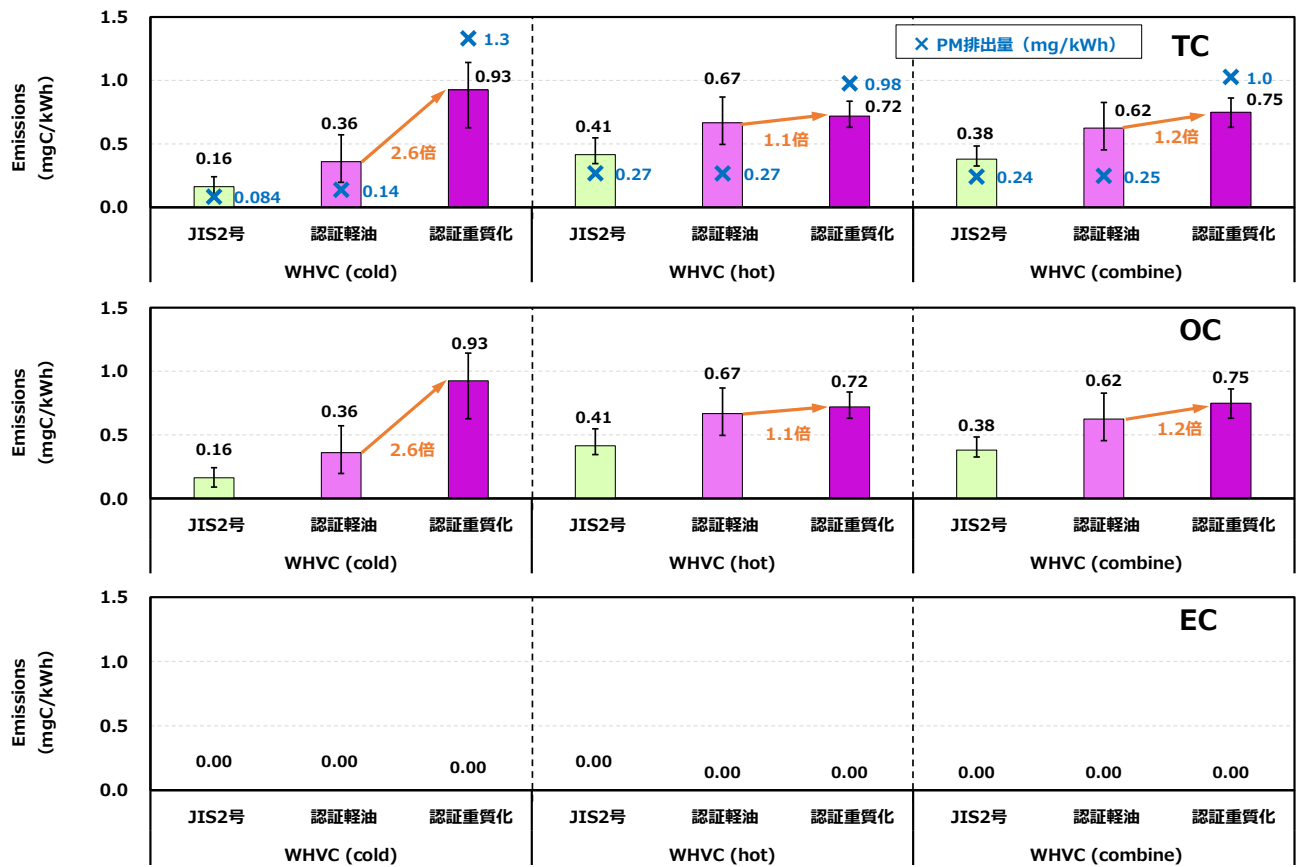
(3) PM中の炭素成分排出量

PM中の炭素成分を測定し、OC、EC、OCとECを合算したTCについて排出量を算出した結果を貨物車Aは**概要図 12**に、貨物車Bは**概要図 13**にそれぞれ比較して示す。貨物車Aと貨物車Bのどちらでも、PM中の炭素成分はOCであり、ECは検出されなかった。従い、OC排出量はTC排出量と同じとなった。貨物車AのOC排出量は冷機始動においてすべての燃料で不検出となった。暖機始動においてはJIS 2号が不検出、認証軽油と認証重質でそれぞれ平均0.11 mgC/kWh、平均0.04 mgC/kWhと極わずかに確認され、combineではそれぞれ平均0.10 mgC/kWh、平均0.04 mgC/kWhとなった。貨物車BのOC排出量は冷機始動の認証重質化で高くなっており、認証重質化の排出量の平均は認証軽油の2.6倍となった。また、暖機始動では1.1倍、combineでは1.2倍でエラーバーの範囲が大きく重なっているため、燃料中の芳香族分が高くなると冷機始動時のOC排出量が高くなる可能性が示された。尚、参考としてTCのグラフ上にPMの平均排出量を記してある。**概要図 13**においてPM成分であるOCの排出量がPM排出量を超えている場合があるが、これは種類が異なる2つの捕集フィルターに同時に捕集したPMについて、片方をPM排出量 (mg/kWh) の解析に用い、もう片方を炭素成分排出量 (mgC/kWh) の解析に用いているため、フィルターの材質や捕集時の流量等の要因もあり、厳密には双方の質量は一致しないことに加え、PMの排出量および捕集量が微量であるために誤差の影響が大きいこと等が原因として挙げられる。



概要図 12 性状が異なる燃料による炭素成分排出量 (mgC/kWh) の比較 (貨物車 A)

(エラーバーは最大・最小を表す)



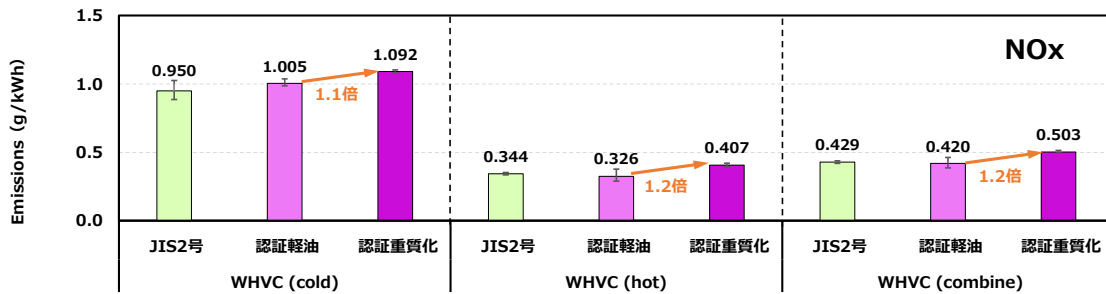
概要図 13 性状が異なる燃料による炭素成分排出量(mg/kWh)の比較 (貨物車 B)
(エラーバーは最大・最小を表す)

4. 2 窒素酸化物 (NO_x、NO、NO₂、N₂O)

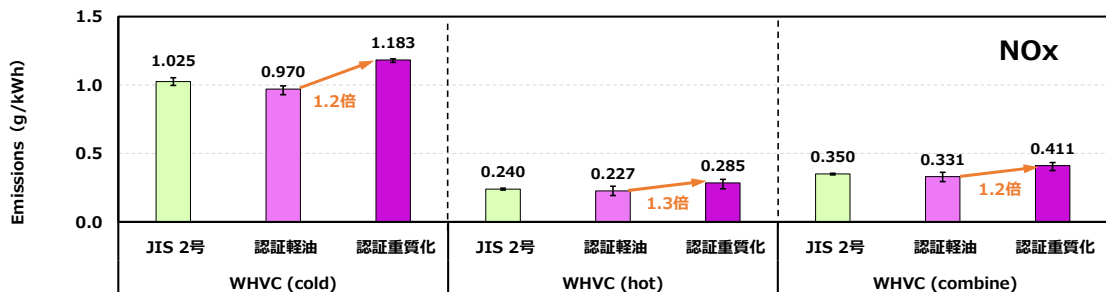
(1) NO_x の排出量と排出挙動

本調査で得た NO_x の排出量を概要図 14 に、冷機始動と暖機始動の時系列の排出挙動を貨物車 A は概要図 15 と概要図 16 に、貨物車 B は概要図 17 と概要図 18 に示す。貨物車 A と貨物車 B のどちらにおいても、窒素を含むセタン化向上剤を添加した認証重質化の排出量が僅かに高くなった。認証軽油を基準とすると、貨物車 A では冷機始動が 1.1 倍、暖機始動が 1.2 倍、combine が 1.2 倍となった。また、貨物車 B では冷機始動が 1.2 倍、暖機始動が 1.3 倍、combine が 1.2 倍となった。NO_x 排出量が高くなった原因は、セタン化向上剤が窒素源となって燃焼時の NO_x 生成に寄与したからであると推測される。排出挙動を確認すると、JIS 2 号や認証軽油から大きく乖離したピークは見られないが、認証重質化の各ピークが他の燃料よりも僅かに高いことが確認された。

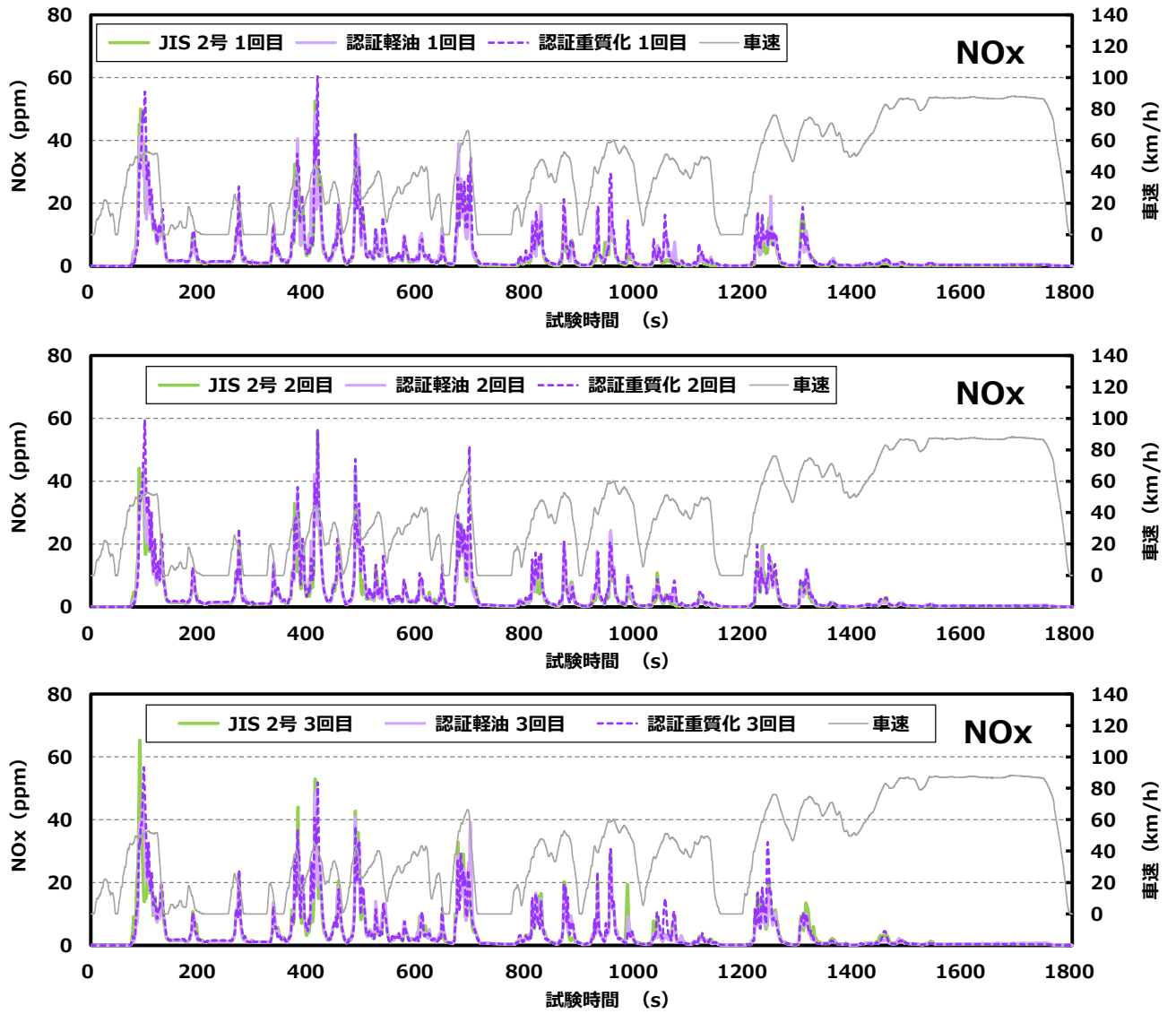
【 貨物車 A 】



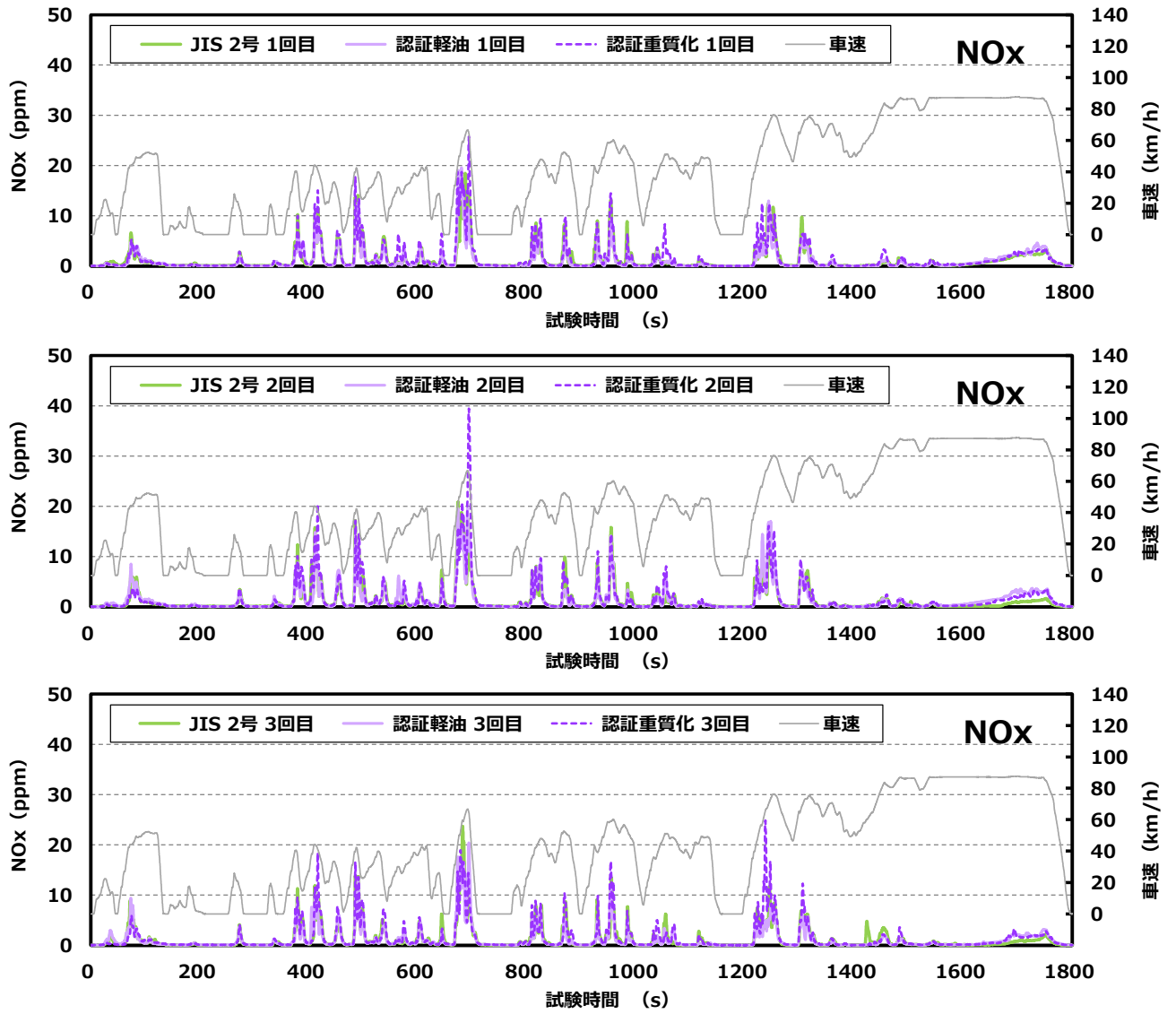
【 貨物車 B 】



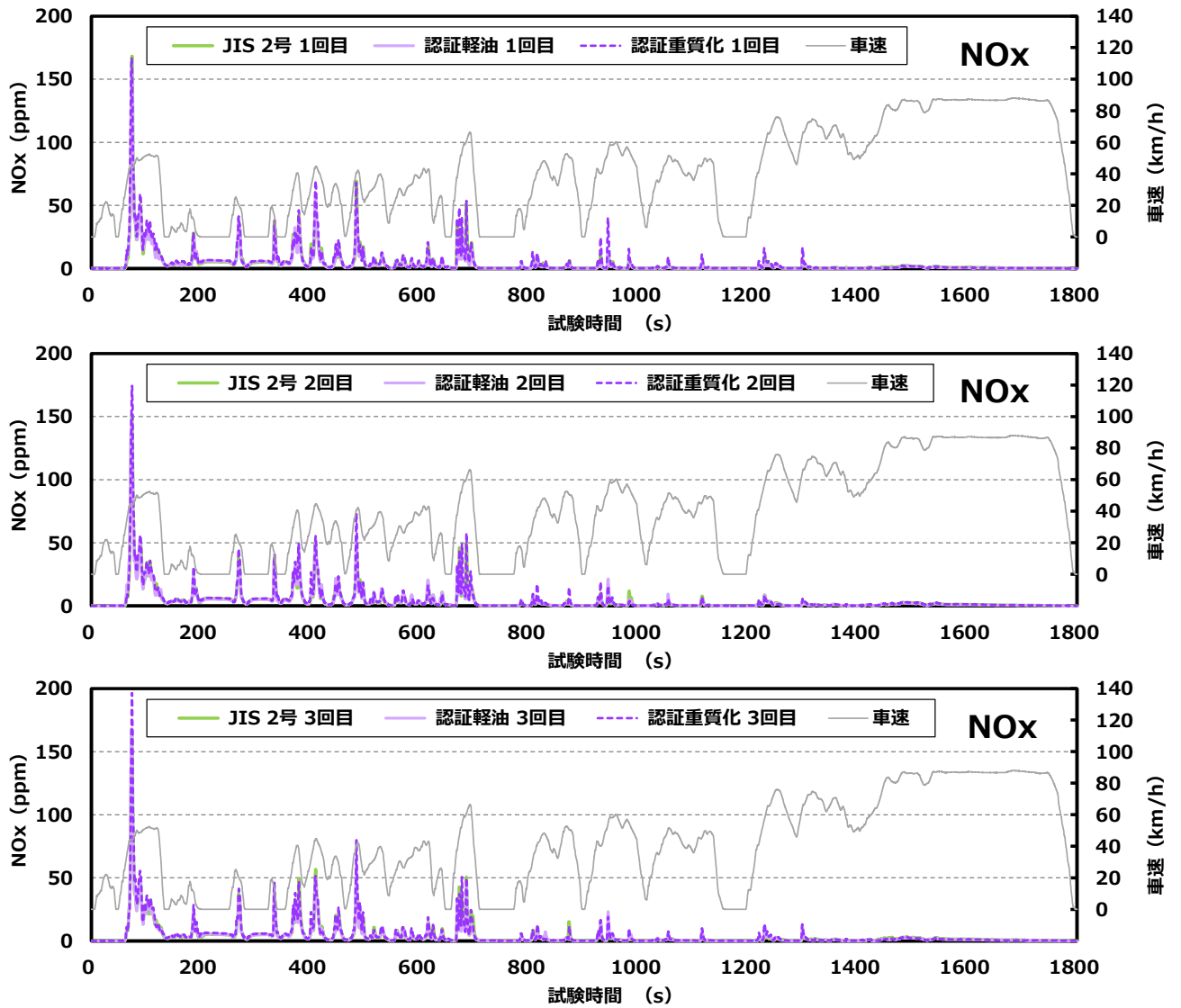
概要図 14 性状が異なる燃料による NO_x 排出量 (g/kWh) の比較 (エラーバーは最大・最小を表す)



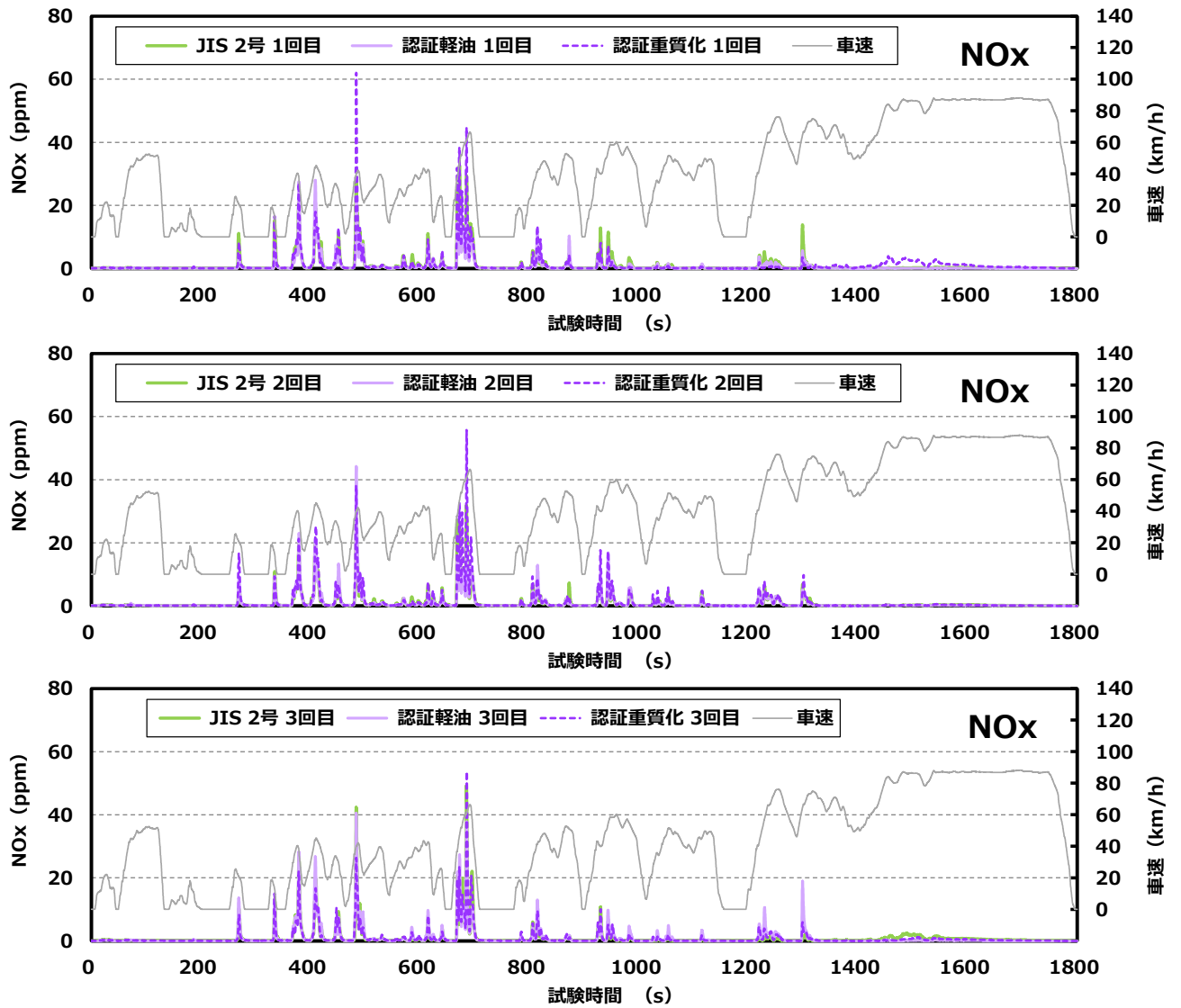
概要図 15 貨物車 A の NO_x 排出挙動(冷機始動)



概要図 16 貨物車 A の NO_x 排出挙動(暖機始動)



概要図 17 貨物車 B の NOx 排出挙動(冷機始動)

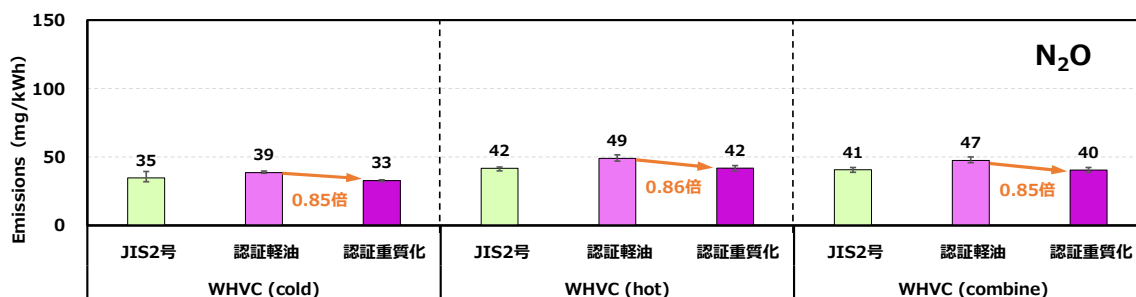


概要図 18 貨物車 B の NOx 排出挙動(暖機始動)

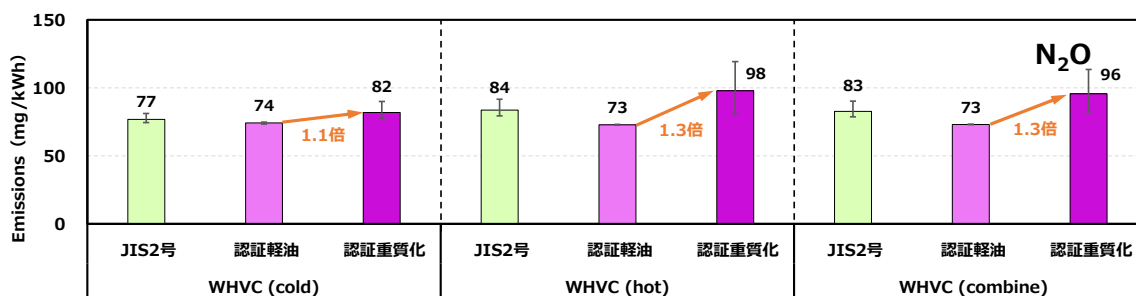
(2) N₂O の排出量

本調査で得た N₂O の排出量を概要図 19 に示す。認証重質化の排出傾向は供試車両によって異なった。貨物車 A では、認証重質化の排出量は認証軽油と比較して、冷機始動と combine が 0.85 倍、暖機始動が 0.86 倍となり、減少した。反対に貨物車 B では、冷機始動が 1.1 倍、暖機始動が 1.3 倍、combine が 1.3 倍となり、増加した。従って、セタン化向上剤による窒素分が N₂O 排出量に及ぼす影響は車両によって異なることが分かった。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】



概要図 19 性状が異なる燃料による N₂O 排出量(mg/kWh)の比較 (エラーバーは最大・最小を表す)

5. まとめ

軽油への LC0 混合を想定した芳香族分による重質化が排出ガスに及ぼす影響について、本調査で得られた主な結果は次のとおりである。

▶ PM と PN、PM 中の炭素成分

芳香族分によって燃料が重質化すると PM や PN の生成が増加して排出量が高くなると予想された。しかし、実際の排出傾向は車両によって異なり、燃料の重質化によってエンジンからの PM および PN 排出は増加するが、最終的にテールパイプから排出されるか否かは各車種の排出ガス後処理装置によると推測された。

▶ 窒素酸化物 (NO_x、NO、NO₂、N₂O)

セタン化向上剤が窒素源となって窒素酸化物の生成に及ぼす影響を調査した。供試車両 2 台において、セタン化向上剤を添加した認証重質化の NO_x 排出量が僅かに高くなった。N₂O 排出量は貨物車 A では、認証重質化の排出量は認証軽油と比較して減少し、反対に貨物車 B では増加した。従って、セタン化向上剤の窒素分による N₂O への影響は車両によって異なる事が分かった。

▶ その他の調査項目

PM、PN、NO_x 及び N₂O 以外の調査物質については、燃料の重質さによる明らかな影響は見られなかった。

6. 今後の課題

今年度の結果から、ディーゼル車は触媒や DPF 等の後処理装置が複雑であり、燃料性状の相違による排出ガス量は車種によって異なると推測されるため、今後も異なる車種による試験データを収集する必要がある。

また、2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略により電動化への転換が推進されるなか、乗用車に比べ電動化に課題のある商用車においては、燃料の効率的利用とともに、燃料のカーボンニュートラル化（合成燃料 (e-fuel) 等）の取組が重要とされ、このような燃料が 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が重要だと考えられる。

Overview¹

1. Purpose

The purpose of this study is as follows: to investigate the effects of mixture of light cycle oil (LCO) produced by cracking residual oil e.g. fuel oil that remains in the refining process of crude oil into light oil; to obtain information that contributes to a review of the maximum permissible level concerning properties of automobile fuels and the maximum permissible quantity level of material contained in automobile fuels based on the Air Pollution Control Act.

2. Introduction

We consider an increase in aromatic component content due to the mixture of LCO into light oil as an increase in heavy component. Therefore, we investigated the effects of the increased heavy component of fuel on emissions of controlled substances from diesel freight vehicles.

3. Methods

3.1 Tested vehicles

We selected two diesel freight vehicles with different gross vehicle weight (GVW) from diesel freight vehicles marketed in Japan whose GVW exceeds 3.5 ton, and procured the test vehicles as rental cars. The test vehicles are equipped with idling stop functions. However, we made test conditions constant without using such idling stop functions in this investigation in order to investigate the effects of fuel.

3.2 Test fuels

We used three kinds of light oil with different properties as test fuel in this investigation - namely, commercially available JIS No. 2 light oil, light oil used for certification test in Japan (certification light oil), and heavy component-increased certification light oil. In this investigation, we define an increase in aromatic content in fuel due to the mixture of LCO as an increase in heavy component and prepared heavy component-increased certification light oil. Since it is generally difficult to procure LCO, we used naphtha-derived solvent (ENEOS Cactus Solvent P-180) as heavy component-increasing agent as a substitute for LCO for preparation. In the same way as LCO, heavy component-increasing agent has the characteristics of having large aromatic content and low kinematic viscosity. The heavy component-increasing agent used in this investigation has aromatic content of 99.8 vol% and kinematic viscosity (30°C) of 1.603mm²/s. We consider total aromatic content as the criteria for an increase in heavy content, and mixed the heavy component-increasing agent into the certification light oil so that total aromatic content becomes 35vol% or higher. When aromatic content increases with an addition of heavy component-increasing agent, ignitability decreases and the cetane number falls. There is a report² that if the cetane number falls to below 50, load to DPF regeneration tends to increase. Moreover, it is reported that, if the cetane number improver (2-Ethylhexyl nitrate) is added, NO_x emissions increase due to nitrogen content contained in the cetane number improver. Therefore, although it deviates from the standards of certification light oil, so that the addition amount of cetane number improver can be reduced, we targeted the cetane number of about 50 when preparing the heavy component-increased certification light oil by mixing heavy component-increasing agent into the certification light oil. As a result, we added the cetane number improver by 1,500ppm.

¹ Translation by acrossU. Inc., <https://www.across-u.com/>

² J-MAP Diesel WG report, https://www.pecj.or.jp/file/j-map/20200528/index_jmap_1-2.pdf (Referred on March 5, 2022 in Japanese)

Table 1 shows the properties of test fuels. Whereas the aromatic content of JIS No. 2 and certification light oil was about 20mass% in the total of monocyclic aromatic compound and polycyclic aromatic compounds, that of heavy component-increased certification light oil was about 40mass%, which satisfied the preparation target. Moreover, with regard to the ratio of polycyclic aromatic compounds¹ with two or more rings that are easy to become soot due to incomplete combustion, whereas the ratio of JIS No. 2 and certification light oil was about 1mass%, that of heavy component-increased certification light oil became a high value of about 9mass%. Fig. 1 shows the distillation curve of three kinds of fuel. Heavy component-increased certification light oil became heavy product from the perspective of aromatic content, but it became light product from the perspective of distillation characteristics, and, as a result, it deviated from the certification fuel standard as to 50% distilling temperature of distillation characteristics. This state occurred because the content of C14 or higher with a high boiling point relatively decreased. The cetane number of heavy component-increased certification light oil was 50.4, which satisfied the preparation target, and was lower than the cetane number 60.2 of JIS No. 2 and 56.6 of certification light oil. As for nitrogen content, 1 mass ppm was detected in JIS No. 2, but it was not detected in the certification light oil because it was less than the lower detection limit of 1 mass ppm. However, nitrogen content became 116 mass ppm in the heavy component-increased certification light oil due to the effect of nitrogen contained in the cetane number improver.

¹ Nakajima et al., Effects of fuel properties on diesel exhaust emission (2), https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki1995/33/4/33_4_262/_pdf (Referred on March 5, 2022 in Japanese)

Table 1. Properties of test fuels

Test item		JIS No. 2		Certification light oil		Heavy component-increased certification light oil		Test method
		Standard	Property value	Standard	Property value	Target	Property value	
Cetane index		45 or more	59.5	53-60	55.3	-	42.3	JIS K 2280-5
Cetane number		-	60.2	-	56.6	50	50.4	JIS K 2280-4
Density (15°C)	g/cm ³	0.86 or less	0.8252	0.815-0.840	0.8278	-	0.8535	JIS K 2249-1
Net heating value	kJ/cm ³	-	43,180	-	42,950	-	42,410	JIS K2279
Distillation characteristics	Initial boiling point °C	-	177.0	-	183.0	-	187.5	JIS K 2254
	5% °C	-	199.5	-	204.5	-	205.0	
	10% °C	-	212.0	-	215.0	-	211.0	
	20% °C	-	232.5	-	232.5	-	220.5	
	30% °C	-	253.5	-	247.5	-	229.5	
	40% °C	-	268.5	-	257.0	-	238.0	
	50% °C	-	280.5	255-295	264.5	-	247.5	
	60% °C	-	292.5	-	272.0	-	257.5	
	70% °C	-	304.0	-	282.0	-	269.5	
	80% °C	-	317.5	-	297.0	-	288.0	
	90% °C	350 or less	336.0	300-345	319.5	-	314.5	
97% °C	-	351.0	-	347.0	-	343.0		
End point °C	-	351.0	370 or less	347.5	-	343.0		
Total distillation amount	%	-	98.0	-	98.5	-	98.0	
Residual oil amount	%	-	2.0	-	1.5	-	2.0	
Reduction amount	%	-	0.0	-	0.0	-	0.0	
Total aromatic compounds	mass%	-	23.3	-	20.8	-	40.6	IP391
Polycyclic aromatic compounds	mass%	-	1.8	-	1.1	-	8.9	IP391
Total aromatic compounds	vol%	-	18.7	25 or less	17.7	35	-	JPI-5S-49
Polycyclic aromatic compounds	vol%	-	1.9	5.0 or less	1.7	-	-	JPI-5S-49
Nitrogen content	mass ppm	-	1	-	<1	-	116	JSI K 2609
Sulfur content	mass ppm	10 or less	6	10 or less	5	-	4	JSI K 2541-6
Lubricity (HFRR wear scar diameter)	µm	-	237	-	288	-	429	JPI-5S-50-98
Kinematic viscosity @ 30°C	mm ² /s	2.5 or more	3.654	3.0-4.5	3.219	-	2.594	JSI K 2283

-: Not applicable

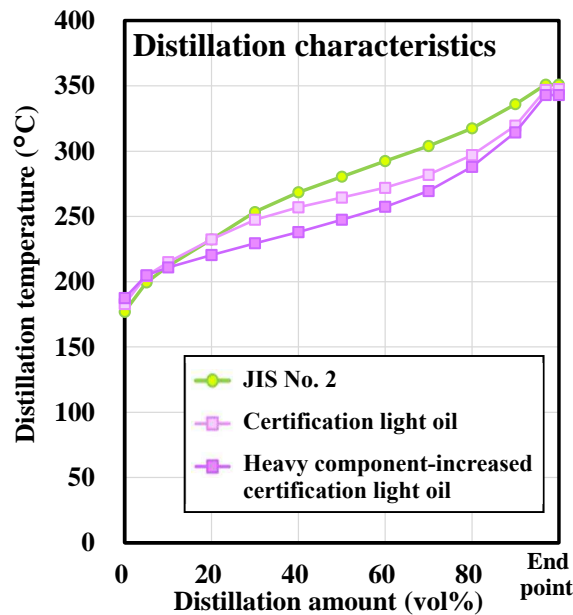


Fig.1. Distillation curve of test fuel

3.3 Test cycle

We measured exhaust three times in the conditions of cold start and hot start respectively based on the WHVC mode method. Also, we calculated emissions by each start condition. Although the test vehicles are not equipped with automatic transmission with torque converter or automatic transmission without shift gear stage, we did not perform correction of the values of NOx emissions by multiplying 0.5. As reference, we calculated the value (combine) after weighing of test in the cold start and hot start in the same way as WHTC. The calculation method of combine is shown below.

$$\text{combine emissions} = \frac{(0.14 \times \text{emissions per cold start test}) + (0.86 \times \text{emissions per hot start test})}{(0.14 \times \text{actual cycle work load of cold start test}) + (0.86 \times \text{actual cycle work load of hot start test})}$$

3.4 Study items

Study items include controlled substances - carbon monoxide (CO), nonmethane hydrocarbon (NMHC), nitrogen oxides (NOx), and particulate mass (PM) as well as nitric oxide (NO), nitrogen dioxide (NO₂), total hydrocarbon (THC), CO₂ (CO₂), solid particle number (PN), nitrous oxide (N₂O), ammonia (NH₃), formaldehyde (HCHO), and carbon component in PM.

4. Results

To grasp effects that fuel with aromatic content increased in its component has on exhaust, we mainly investigated emissions of PM and PN and carbon component in PM that are assumed to be easily affected by aromatic content as well as emissions of NOx, and NO, NO₂, N₂O that are assumed to be easily affected by cetane number improver.

4.1 PM, PN and carbon component in PM

(1) Emissions of PM and PN, and PN emission behavior

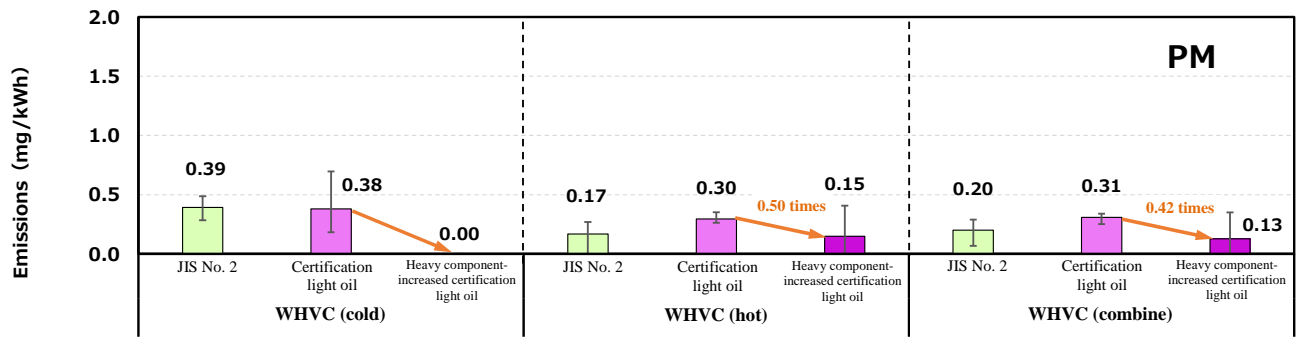
We investigated if emissions of PM and PN change by the fuel with increased aromatic component, using heavy component-increasing agent. **Fig. 2** shows emissions of PM and **Fig. 3** shows emissions of PN respectively. We predicted that, if heavy component in fuel increases due to aromatic content, the generation of PM and PN increases and emissions become higher. However, since PM and PN are removed by the diesel particulate filter (DPF) mounted on vehicles, actual emissions trend varied according to vehicles.

First, we analyzed the results of the freight vehicle A. In the case of cold start, PM emissions of JIS No. 2 and certification light oil were obtained, but PM emissions became zero for heavy component-increased certification light oil. Moreover, PN emissions of heavy component-increased certification light oil were low for both cold start and hot start. If it is based on the emissions of certification light oil which became mixed base material, PM emissions of heavy component-increased certification light oil decreased by 0.67 times for cold start, 0.77 times for hot start, and 0.76 times for combine. Therefore, we checked the example (**Fig. 4**) of PN emission behavior at the time of cold start and learned that the heavy component-increased certification light oil has no peak in emissions at the timing of immediately after cold start when emissions of PN generally most occur. Based on the results, we consider that the difference of emissions by fuel is due to the difference of emission behavior immediately after engine start. Moreover, the average value of PN emissions of heavy component-increased certification light oil at the time of cold start and hot start was 8.50×10^9 #/kWh and 7.62×10^9 #/kWh respectively. The results show that the difference of emissions of heavy component-increased certification light oil by start conditions was not as large as other fuels. Based on the results, it can be assumed that, if heavy component-increased certification light oil is used for fuel, a large amount of PM is discharged and accumulates to the DPF and it causes clogging at an early time which makes emissions of PM or PN difficult.

Secondly, we analyzed the results of the freight vehicle B. PM emissions of heavy component-increased certification light oil were higher than other fuels regardless of start conditions. If it is based on the emissions of certification light oil which became mixed base material, PM emissions of heavy component-increased certification light oil increased by 9.5 times for cold start, 3.6 times for hot start, and 4.1 times for combine. As for PN emissions of heavy component-increased certification light oil, the emissions at the time of cold start are within the variation range of other fuels, and the average value of emissions was, however, higher than the certification light oil by 1.1 times while the emissions at the time of hot start and combine are about the same levels as the certification light oil at 0.92 times for hot start and at 0.94 times for combine. Next, as for the heavy component-increased certification light oil, we checked the example of emission behavior at the time of cold start in **Fig. 5** and found that peaks that are higher than the emission peak immediately after start sporadically occurred during acceleration. In the case of emission behavior at the time of hot start, there were no such high sporadic peaks. Therefore, there is a possibility that PM, which occurred by cold start and has accumulated to the DPF, was sporadically discharged by exhaust pressure during acceleration.

Based on the results above, it can be assumed that an increase in heavy content in fuel causes increase of PM and PN emissions from the engine, but whether or not PM and PN are eventually discharged from the tail pipe depends on the exhaust post treatment device of each vehicle model. Therefore, to grasp effects of PM and PN emissions by an increase in heavy content in fuel, it is necessary to conduct investigation for various vehicle models to determine whether or not emissions increase in the entire freight vehicles. Also, there is a concern that an increase in heavy content in fuel causes an increase in emissions of PM and PN from the engine and it applies load to the DPF and causes problems of durability.

[Freight vehicle A]



[Freight vehicle B]

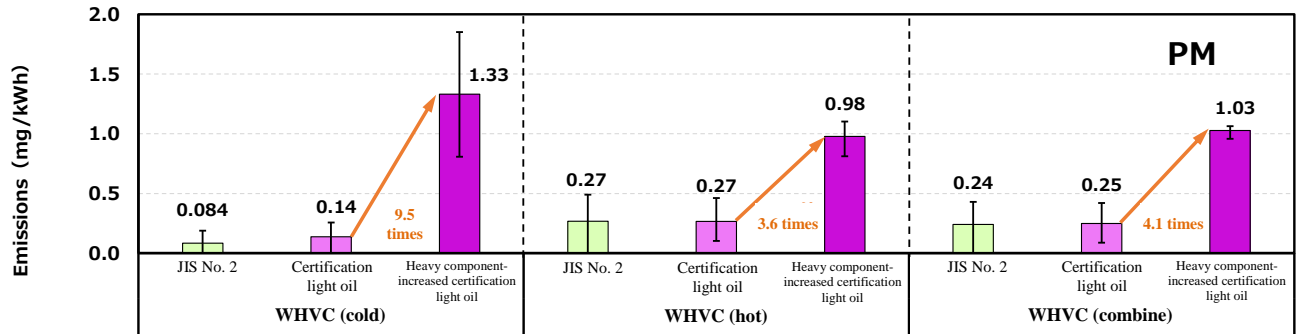
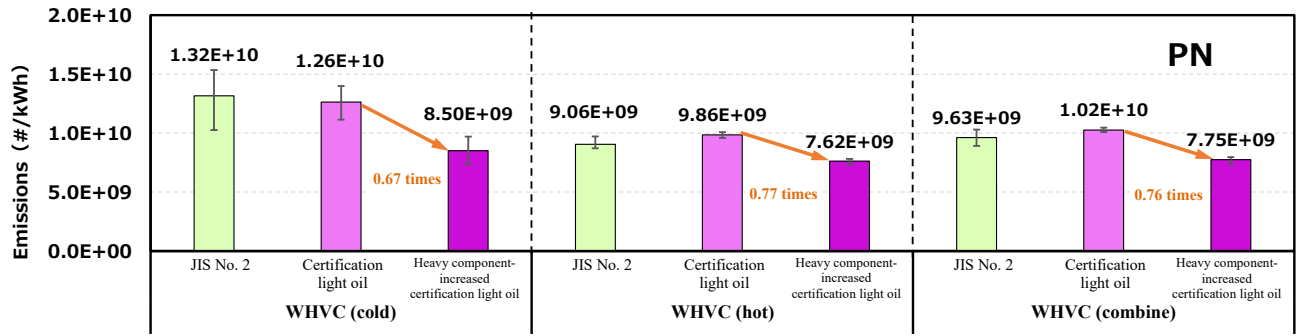


Fig. 2 Comparison of PM emissions by fuels with different properties (mg/kWh)

(Error bars show the maximum and minimum)

[Freight vehicle A]



[Freight vehicle B]

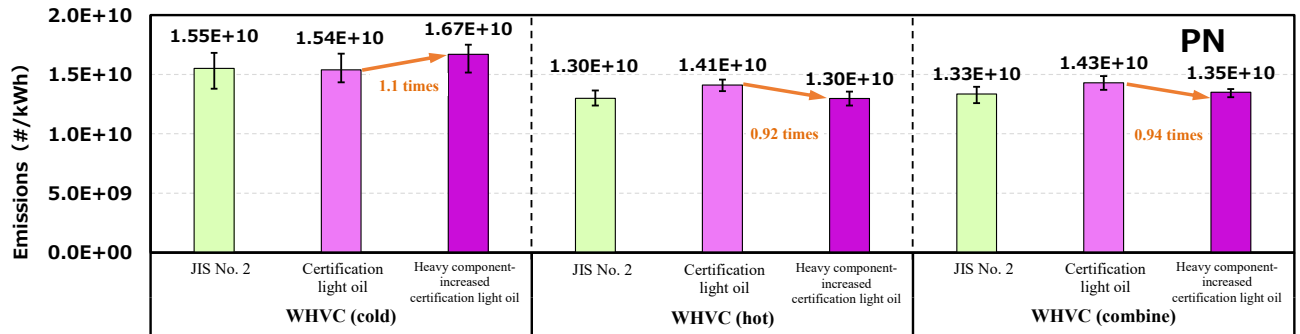


Fig. 3 Comparison of PN emissions by fuels with different properties (#/kWh)

(Error bars show the maximum and minimum)

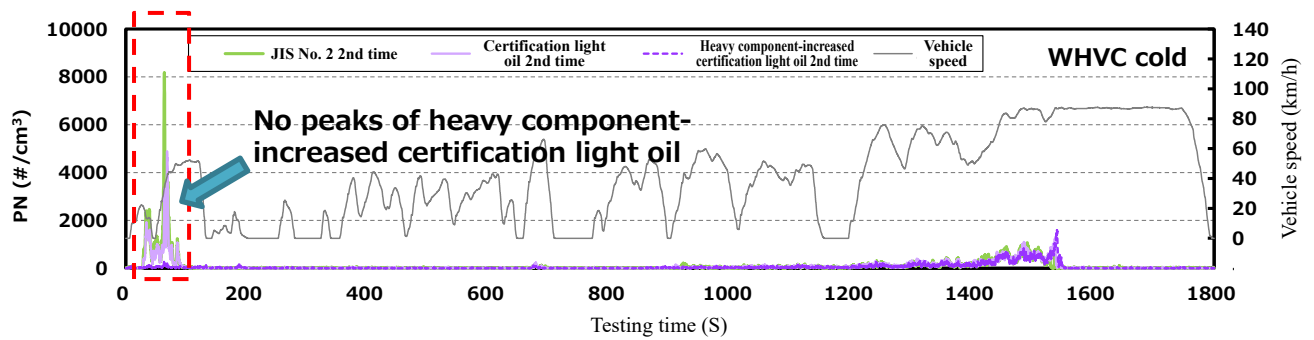


Fig. 4 Example of PN emission behavior of freight vehicle A (cold start)

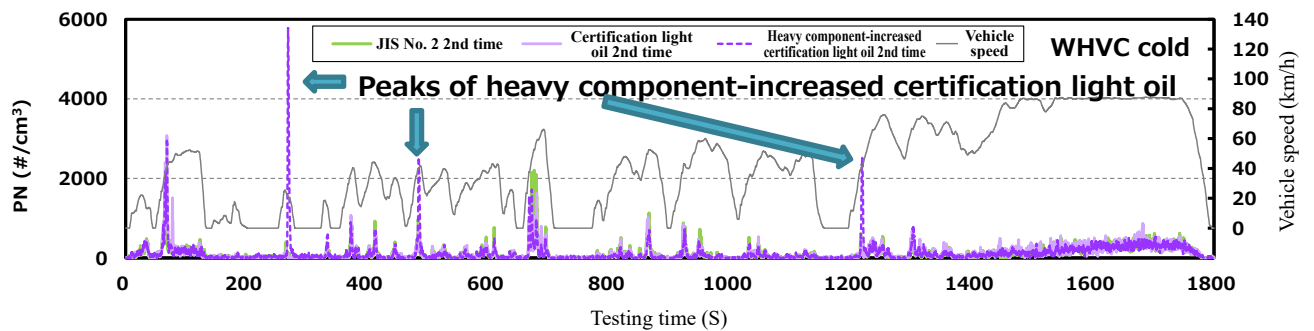


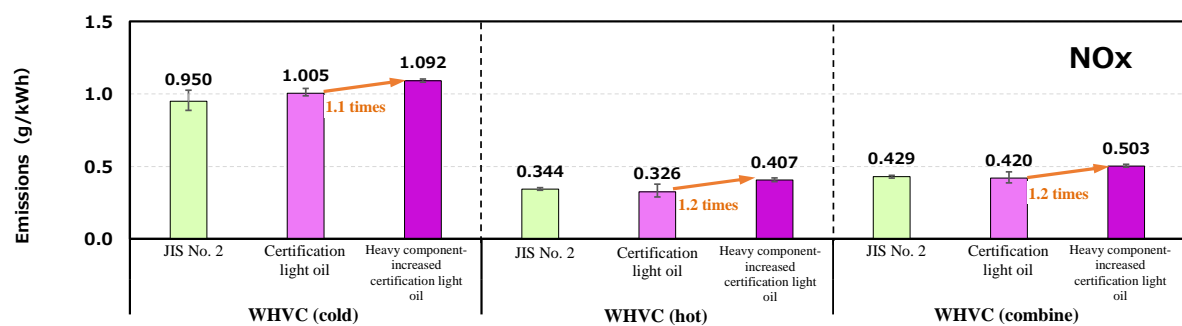
Fig. 5 Example of PN emission behavior of freight vehicle B (cold start)

4.2 Nitrogen oxides (NO_x, NO, NO₂, N₂O)

(1) NO_x emissions and emission behavior

Fig. 6 shows the amount of NO_x emissions obtained in this investigation. For both the freight vehicle A and freight vehicle B, emissions of heavy component-increased certification light oil to which the nitrogen-containing cetane number improver that was added, became slightly higher than those of JIS No. 2 and certification light oil. Compared the emissions of certification light oil, in the case of freight vehicle A, NO_x emissions of heavy component-increased certification light oil increased by 1.1 times for cold start, 1.2 times for hot start, and 1.2 times for combine. In the case of freight vehicle B, NO_x emissions of heavy component-increased certification light oil increased by 1.2 times for cold start, 1.3 times for hot start, and 1.2 times for combine. It can be assumed that higher NO_x emissions were caused because the cetane number improver became nitrogen source and contributed to generation of NO_x during combustion.

[Freight vehicle A]



[Freight vehicle B]

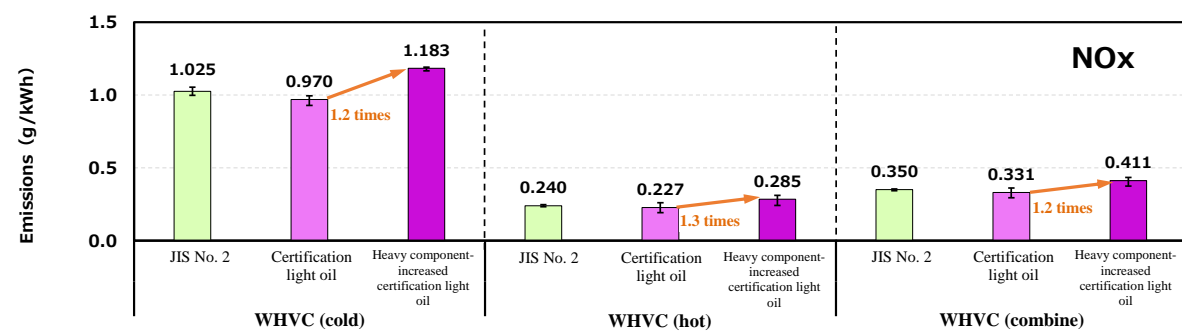


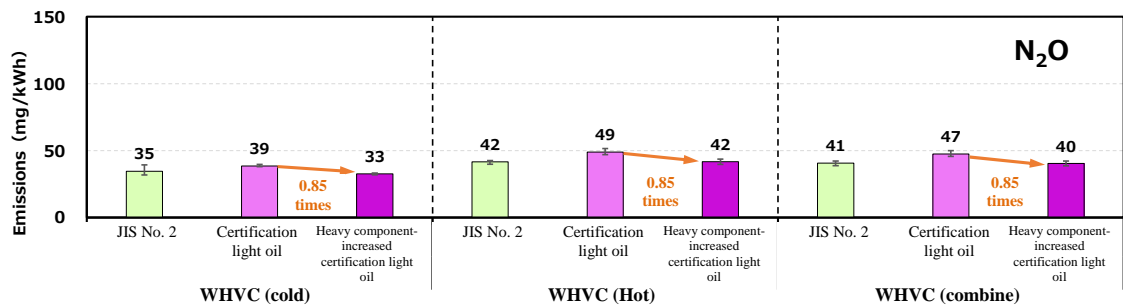
Fig. 6 Comparison of NO_x emissions by fuels with different properties (g/kWh)

(Error bars show the maximum and minimum)

(2) N₂O emissions

Fig.7 shows the amount of N₂O emissions obtained in this investigation. Emissions trend of heavy component-increased certification light oil varied according to test vehicles. In the case of freight vehicle A, compared with certification light oil, N₂O emissions of heavy component-increased certification light oil decreased by 0.85 times for cold start, hot start, and combine. Conversely, in the case of freight vehicle B, N₂O emissions of heavy component-increased certification light oil increased by 1.1 times for cold start, 1.3 times for hot start and 1.3 times for combine. Therefore, it is found that the effects of nitrogen content of cetane number improver differ according to vehicles.

[Freight vehicle A]



[Freight vehicle B]

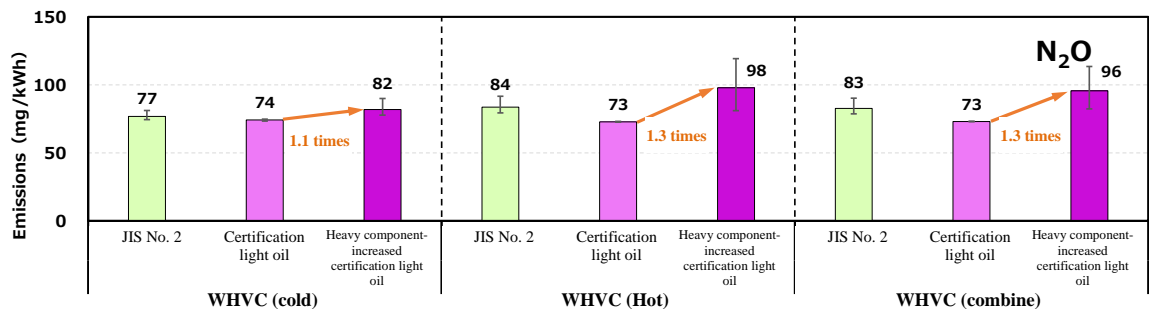


Fig. 7 Comparison of N₂O emissions by fuels with different properties (mg/kWh)
(Error bars show the maximum and minimum)

5. Conclusions

The main results obtained in this investigation on the effect of the increased heavy component of fuel due to aromatics assuming LCO mixing with light oil on exhaust gas are as follows.

➤ PM, PN and carbon component in PM

We predicted that, if heavy component in fuel increases due to aromatic content, generation of PM and PN increases and emissions become higher. However, actual emissions trend varied according to vehicles, and it can be assumed that an increase in heavy content in fuel causes increase of PM and PN emissions from the engine, but whether or not PM and PN are eventually discharged from the tail pipe depends on the exhaust post treatment device of each vehicle model.

➤ Nitrogen oxides (NO_x, NO, NO₂, N₂O)

We investigated the effects of cetane number improver as nitrogen source on generation of nitrogen oxides. For the two test vehicles, NO_x emissions of heavy component-increased certification light oil to which the cetane number improver was added became slightly higher than those of JIS No.2 and certification light oil. In the case of freight vehicle A, N₂O emissions of heavy component-increased certification light oil decreased compared with the certification light oil. Conversely, it increased in the case of freight vehicle B. Therefore, it is found that the effects of nitrogen content of cetane number improver differ according to vehicles.

➤ Other survey items

For investigation items other than PM, PN, NO_x and N₂O, no clear effect was observed due to the increased heavy component.

6. Future issues

Based on the results of investigation we have obtained in this fiscal year, it can be assumed that, since diesel vehicles use complicated exhaust post treatment devices including catalyst and DPF, emission gas volume by difference of fuel properties differ according to vehicle model. Therefore, it is necessary to collect test data from different vehicle models in the future.

Also, with the green growth strategy that accompanies with achieving the goal of carbon neutrality in 2050, the conversion to electrification will be further promoted. In the case of commercial vehicles which have problems with electrification compared with passenger cars, it is important to efficiently use fuels and make efforts for making fuels carbon-neutral e.g. synthetic fuel (e-fuel). Therefore, we consider it is also important to grasp the effects of such fuels on emissions of PM and PN.