

1. 調査の目的

我が国の石油需要は、人口減少や省エネの取組等を背景として、平成11年をピークに減少している。このような状況を踏まえ、製油所の精製過程で発生する残渣油（原油の精製過程で残る重油等）を分解しガソリンや軽油に混合することにより有効な利用が進んでいる。

一方で、残渣油の混合により、燃料が重質化され、自動車排出ガスの排出量が増加することが懸念されるため、「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（第十四次答申）」（令和2年8月20日）の今後の検討課題において、燃料性状が排出ガスに与える影響を調査し、その結果を踏まえて対策を検討する必要があるとされている。これを受け、本調査では残渣油を分解した分解軽油（LC0：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LC0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。

2.1 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。供試車両の車両諸元を表2.1に、供試車両の写真を図2.1に示す。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。

表 2.1 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
	等価慣性重量 (kg)	4,645	7,935
原動機	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

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】



図 2.1 供試車両

2.2 供試燃料の性状

「燃料性状が自動車排出ガスに及ぼす影響調査委託業務」は今年度を含めて 3 年間継続して実施している業務である。初めの 2 年間はガソリン車が対象で、ガソリンに分解ガソリンが混合されることを想定し、PM-Index を指標にして燃料の重質化を行った。PM-Index はガソリン車から排出される PM とガソリン性状との関係から提唱された燃料性状の指標の一つである。重質化に用いた物質は、ガソリン中に存在し、且つ炭素数が大きい芳香族炭化水素である 1-メチルナフタレンとした。今年度の調査はディーゼル車が対象で、LC0 が混合されることを想定した。ガソリンの重質化で指標とした PM-Index はガソリンのみに適用されるため、軽油では LC0 に多く含まれると推定される芳香族分を指標として重質化を行った。

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 LC0 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、LC0 の入手は一般に困難であるため、LC0 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。LC0 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 99.8vol%、動粘度 (30°C) 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 NOx 排出量が高くなる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

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)

表 2.2 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。

図 2.2 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 (C) 25 の直鎖飽和炭化水素 (C25) 程度ま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 C11 の 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。図 2.3 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¹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。尚、総芳香族の単位が mass%であるのは極性物質であるセタン価向上剤が含まれると JIS 規格で定められた性状分析法である JPI-5S-49(単位は vol%)による分析が出来ないためである。本調査では代替法として米国材料試験協会の試験法規格である IP 391 法 (単位は mass%) を用いて分析した。

図 2.4 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 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)

表 2.2 供試燃料性状

試験項目	JIS 2号		認証試験用		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
炭化水素組成(vol%)	Mono-Arom.	-	16.8	-	16.0	-	-	JPI-5S-49-2007
	Di-Arom.	-	1.1	-	1.0	-	-	
	Tri-Arom.	-	0.8	-	0.7	-	-	
	Olef.	-	0.1	-	0.1	-	-	
	Sat.	-	81.2	-	82.2	-	-	
窒素分	mass ppm	-	1	-	<1	-	116	JIS K 2609
炭素分	mass%	-	86	-	86	-	87.2	JPI-5S-65-11
水素分	mass%	-	13.9	-	13.9	-	12.7	
酸素分	mass%	-	< 0.1	-	< 0.1	-	< 0.1	
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
引火点	℃	50 以上	69.5	58 以上	72.5	-	73.5	JIS K 2265-3
曇り点	℃	-	-4	-	-10	-	-14	JIS K 2269
流動点	℃	-7.5 以下	-22.5	-	-25	-	-32.5	JIS K 2269
目詰まり点	℃	-5 以下	-8	-	-19	-	-27	JIS K 2288
硫黄分	mass ppm	10 以下	6	10 以下	5	-	4	JIS K 2541-6
酸化安定性(ランマツト)	h	-	19.3	-	20.8	-	19.4	EN15751
PetroOXY	min	-	115	-	98	-	97	経済産業省告示第72号
水分	ppm	-	32	-	35	-	38	JIS K 2275-3
酸価	mg KOH/g	-	0.01	-	<0.01	-	<0.01	JIS K 2501

-: 該当なし

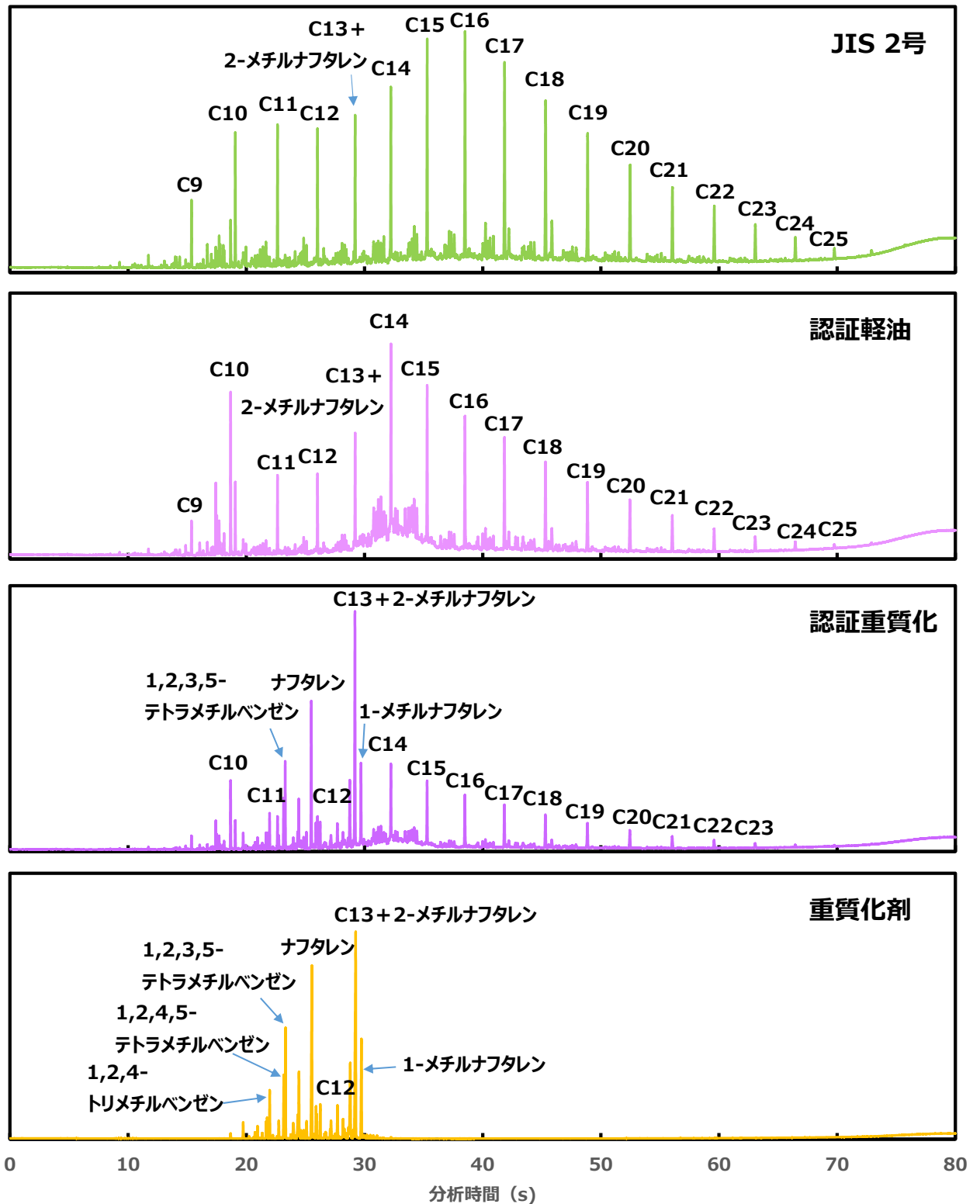


図 2.2 供試燃料 3 種と重質化剤の分析クロマトグラム

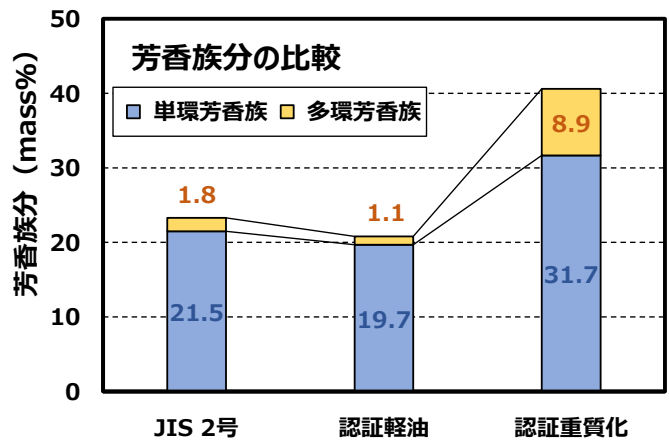


図 2.3 芳香族分の体積割合比較

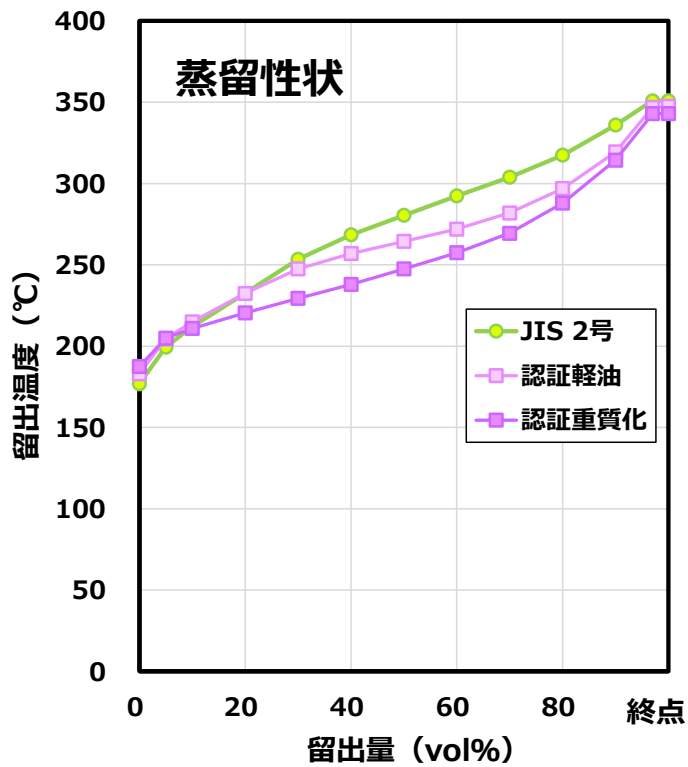


図 2.4 供試燃料の蒸留曲線

2.3 試験設備と準備・設定

試験には表 2.3 に示す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 24 時間 $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ 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て、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。

表 2.3 シャシ・ダイナモメータ等の試験設備諸元

装置	仕様	
実験室	室内空調	$25^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$
シャシ・ダイナモメータ (C/D)	製造元	明電舎
	エンジン吸入空気温度, 湿度	$25^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, $55\pm 5\text{ RH}$
	型式	FCDY
	最大吸収 (駆動) 容量	370kW (駆動300 kW)
	制御方式	ALR、ASR (減速時慣性軽減機能付)
	ローラ軸制御	等速制御 (フリ制御、追従制御)
	2軸間距離	1,200~1,500mm (300mm)
	ローラ口径	1,061mm (平滑)
	電機慣性重量	1軸 : 1,500~30,000 kg 2軸 : 3,000~30,000 kg
	最高速度	150 km/h
	車両冷却ブロウ	90 km/h (車速比例/手同制御)
	タイヤ冷却ブロウ	100 km/h (可変) (Max : $125\text{ m}^3/\text{min}$)
デフ冷却ブロウ	41 km/h (一定) (Max : $55\text{ m}^3/\text{min}$)	
定流量捕集装置 (CVS)	製造元	堀場製作所
	型式	CVS 9400T
	希釈方式	CFV方式
	ベンチュリーサイズ	$30\sim 90\text{ m}^3/\text{min}$
	希釈空気温度, 湿度	温度 : $25^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, 湿度 : $50\%\text{RH}$ ($\pm 8\%\text{RH}$ 以内)
	希釈空気精製装置	触媒加熱式 (最大 $100\text{ m}^3/\text{min}$) フィルタ除塵式 (ヘパフィルタ+活性炭)
希釈トンネル	口径	18 inch
排出ガス分析計	希釈分析計	MEXA7200D
	製造元	堀場製作所
	NOx	化学発光分析計
	CO, CO ₂	非分散形赤外線分析計
	THC	加熱型水素炎イオン化形分析計
	CH ₄	選択燃焼式メタン分析計
	直接分析計	MEXA7100DEGR
	製造元	堀場製作所
	NOx	化学発光分析計
	CO, CO ₂	非分散形赤外線分析計
	THC	加熱型水素炎イオン化形分析計
	CH ₄	選択燃焼式メタン分析計

2.4 試験サイクル

排出ガス測定は WHVC モードに準拠し、冷機始動条件（冷機始動）あるいは暖機始動条件（暖機始動）でそれぞれ3回ずつ試験を実施した。試験サイクルの車速パターンは図 2.5 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、NOx 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) も算出した。combine の算出方法を以下の式に示す。尚、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。

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

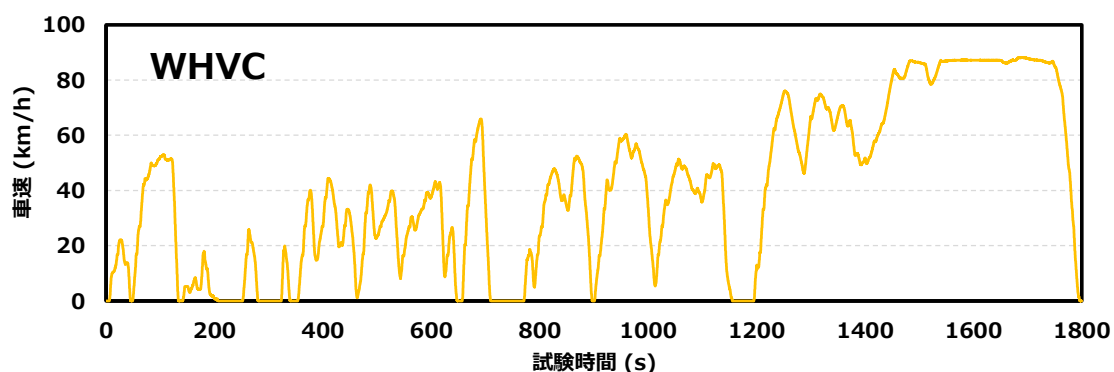


図 2.5 WHVC の車速パターン

2.5 調査項目

本試験の調査対象物質と調査項目を

表 2.4 に纏めて示す。調査対象物質は、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、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。更に、希釈トンネルが清浄であることを確認するため、希釈トンネル内に残留し易いと予想される PM についてトンネルブランクの測定を行った。トンネルブランクの測定方法については次項で詳細を述べる。

表 2.4 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)、元素状炭素 (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

2.6 試験方法

(1) 希釈トンネルの準備とトンネルブランク

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、希釈トンネルの上流からは希釈空気を、希釈トンネルの下流からはトンネル後部空気を同時に採取し、WHVC と同じ時間 (1800 秒) PM を捕集して秤量するトンネルブランク試験を行った。試験開始後は、各試験日ごとにトンネルブランク試験を行ってから排出ガス試験を実施し、排出ガスを希釈トンネル内に導入する前のトンネルブランク測定値 (付録 6.2) によって設備の清浄性を示す根拠とした。

(2) 試験実施前の調整運転

試験前の車両の調整として、排出ガス試験の前日に DPF の強制再生を行った。強制再生が終了した後は WHVC を連続して 2 回走行させた。走行後、80 km/h で 20 分間の定常運転を行い、10 分停止後に WHVC を 1 回走行させて 6 時間以上ソークした。

(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 を用いて希釈空気希釈した。排出ガスの希釈には触媒、中性能フィルター、活性炭フィルター、高性能フィルターを備えた希釈空気精製装置 (DAR: Dilution Air Refinement system) でろ過し、温度 25±5°C に調整した空気を用いた。

PN は、希釈トンネルの後部から希釈排出ガスを採取し、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。PN 以外の物質は希釈空気と希釈排出ガスを同時に捕集して測定した。測定に用いた捕集材や測定装置などの概要を表 2.5 に示す。

表 2.5 調査項目と測定方法の概要

調査対象		捕集材, 導入配管など	測定装置
粒子状物質	PM	フィルター (ポリテトラフルオロエチレン, φ47 mm)	電子天秤
	PN	加熱導入管	固体粒子数計測装置
	炭素成分	フィルター (石英, φ47 mm)	熱光学式炭素分析計 (IMPROVE方式)
ガス状物質	一酸化炭素 (CO)	バッグ (テドラー)	非分散形赤外線分析計
	二酸化炭素 (CO ₂)	バッグ (テドラー)	非分散形赤外線分析計
	全炭化水素 (THC)	加熱導入管	加熱型水素炎イオン化形分析計
	非メタン炭化水素 (NMHC)	(THCとCH ₄ より算出)	
	窒素酸化物 (NO _x)	加熱導入管	化学発光分析計
	一酸化窒素 (NO)	バッグ (テドラー)	化学発光分析計
	二酸化窒素 (NO ₂)	(NO _x からNOを差し引いて算出)	
	亜酸化窒素 (N ₂ O)	バッグ (ビニルアルコール系ポリマー)	ガスクロマトグラフ (電子補足検出器)
	アンモニア (NH ₃)	バブラー (0.5%ホウ酸水溶液)	イオンクロマトグラフ (電気伝導検出器)
	ホルムアルデヒド (HCHO)	バブラー (2,4-DNPHアセトニトリル溶液)	液体クロマトグラフ (フォトダイオードアレイ検出器)

3. 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、NO、NO₂、N₂O の排出量を主に確認した。排出量の考察については、ディーゼル重量車の排出ガス規制に用いられる試験サイクル (WHSC および WHTC) がエンジンベースの試験であることを考慮し、結果をサイクル仕事量あたりで述べる。また、WHVC は車両ベースの試験サイクルであるため、走行距離あたりの排出量も算出し、図表に示す。希釈空気および希釈排出ガス中の濃度と排出量の値はすべての調査対象項目について付録 6.1 に記載した。

3.1 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することにより、PM および PN の排出量が増加するかを確認した。PM の冷機始動と暖機始動の排出量を図 3.1 と図 3.2 に、PN の冷機始動と暖機始動の排出量を図 3.3 と図 3.4 にそれぞれ示す。また、希釈トンネル内の PN 濃度による PN 排出挙動を、冷機始動は図 3.5 と図 3.7 に、暖機始動は図 3.6 と図 3.8 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。

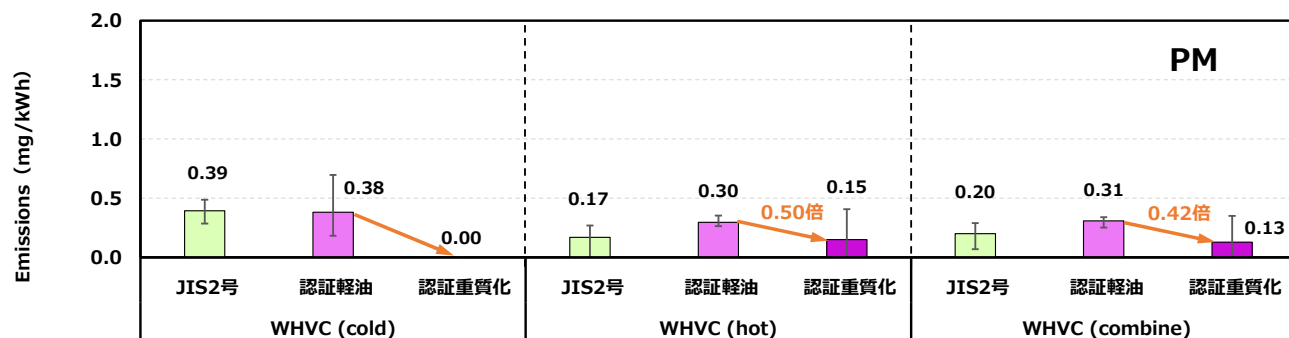
貨物車 A において、冷機始動では JIS 2 号と認証軽油の PM 排出量が得られたが、認証重質化ではゼロとなった。また、PN 排出量は冷機始動でも暖機始動でも認証重質化の排出量が低く、混合基材となった認証軽油の排出量を基準にすると冷機始動では 0.67 倍、暖機始動では 0.77 倍、combine では 0.76 倍となり、減少した。そこで、図 3.5 で冷機始動時の PN の排出挙動を確認すると、一般に PM が最も排出されやすい冷機始動直後において、繰返し 3 回実施しても認証重質化の排出ピークが無く、燃料による排出量の差は始動直後の排出挙動の違いによると考えられた。一方、図 3.6 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 $8.50 \times 10^9 \text{ \#/kWh}$ と $7.62 \times 10^9 \text{ \#/kWh}$ で、他の燃料程に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寄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。図 3.7 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 】

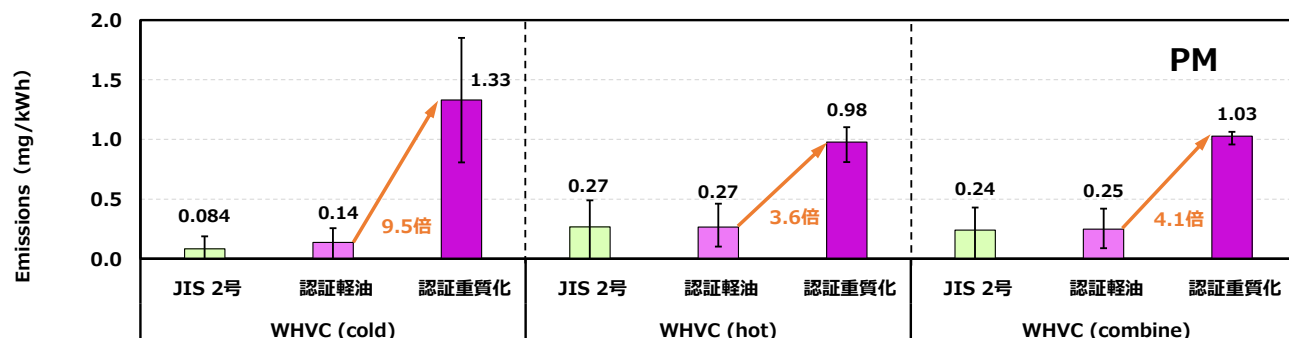
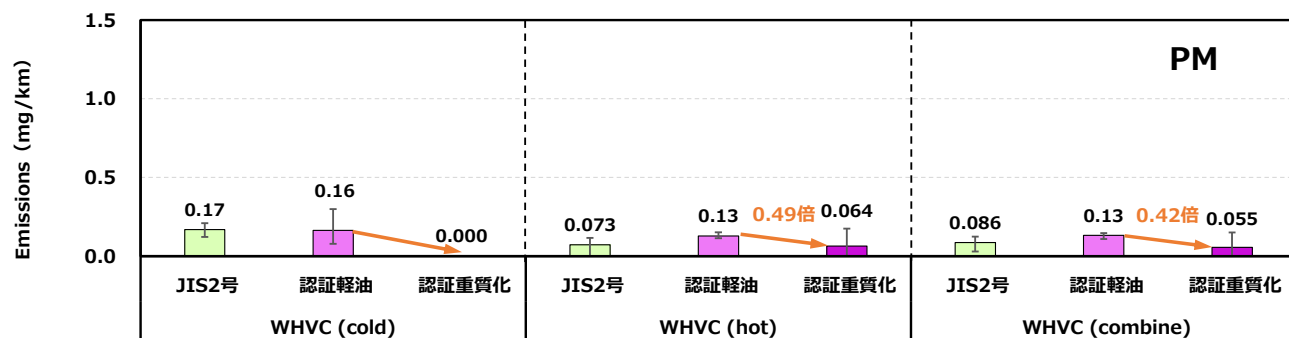


図 3.1 性状が異なる燃料による PM 排出量 (mg/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

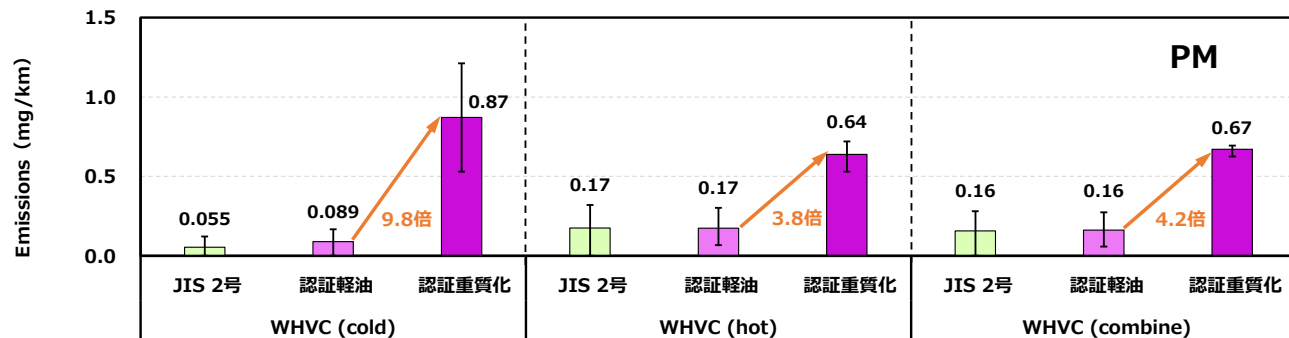
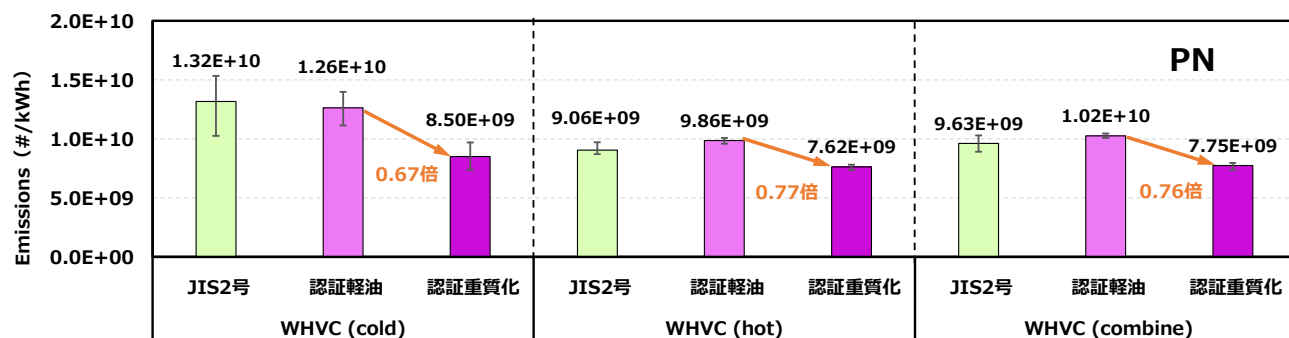


図 3.2 性状が異なる燃料による PM 排出量 (mg/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

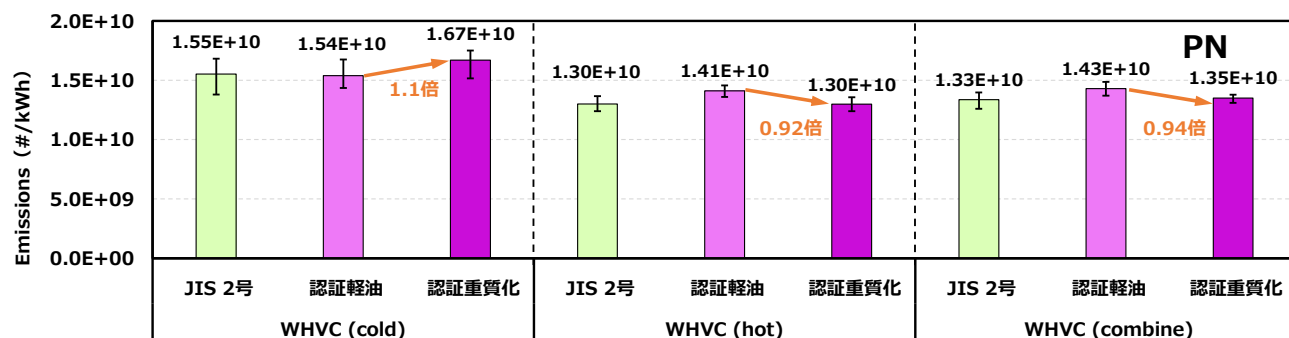
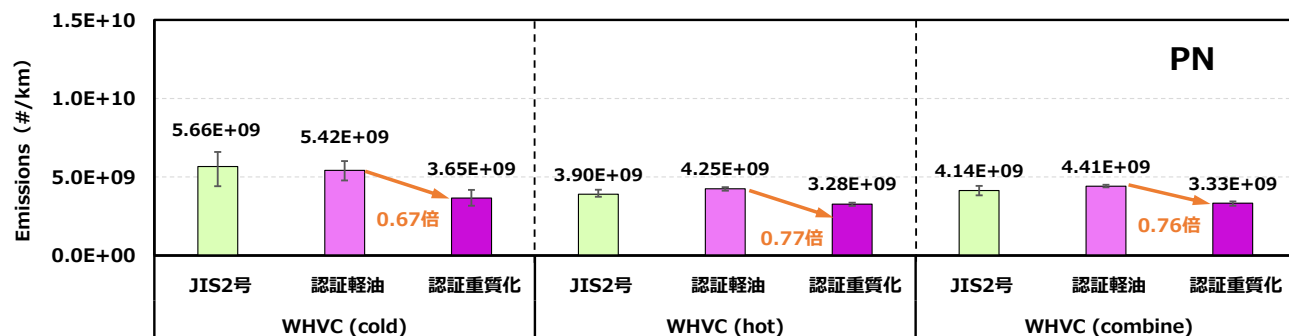


図 3.3 性状が異なる燃料によるPN 排出量(#/kWh)の比較

(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

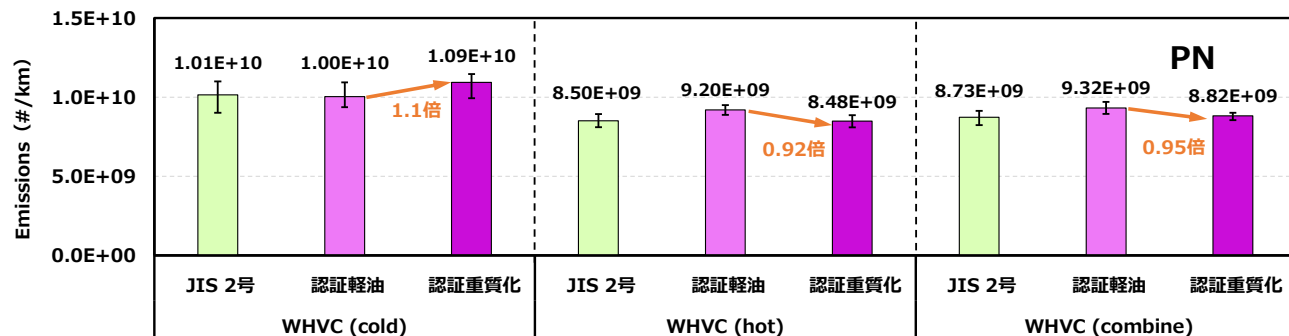


図 3.4 性状が異なる燃料によるPN 排出量(#/km)の比較

(エラーバーは最大・最小を表す)

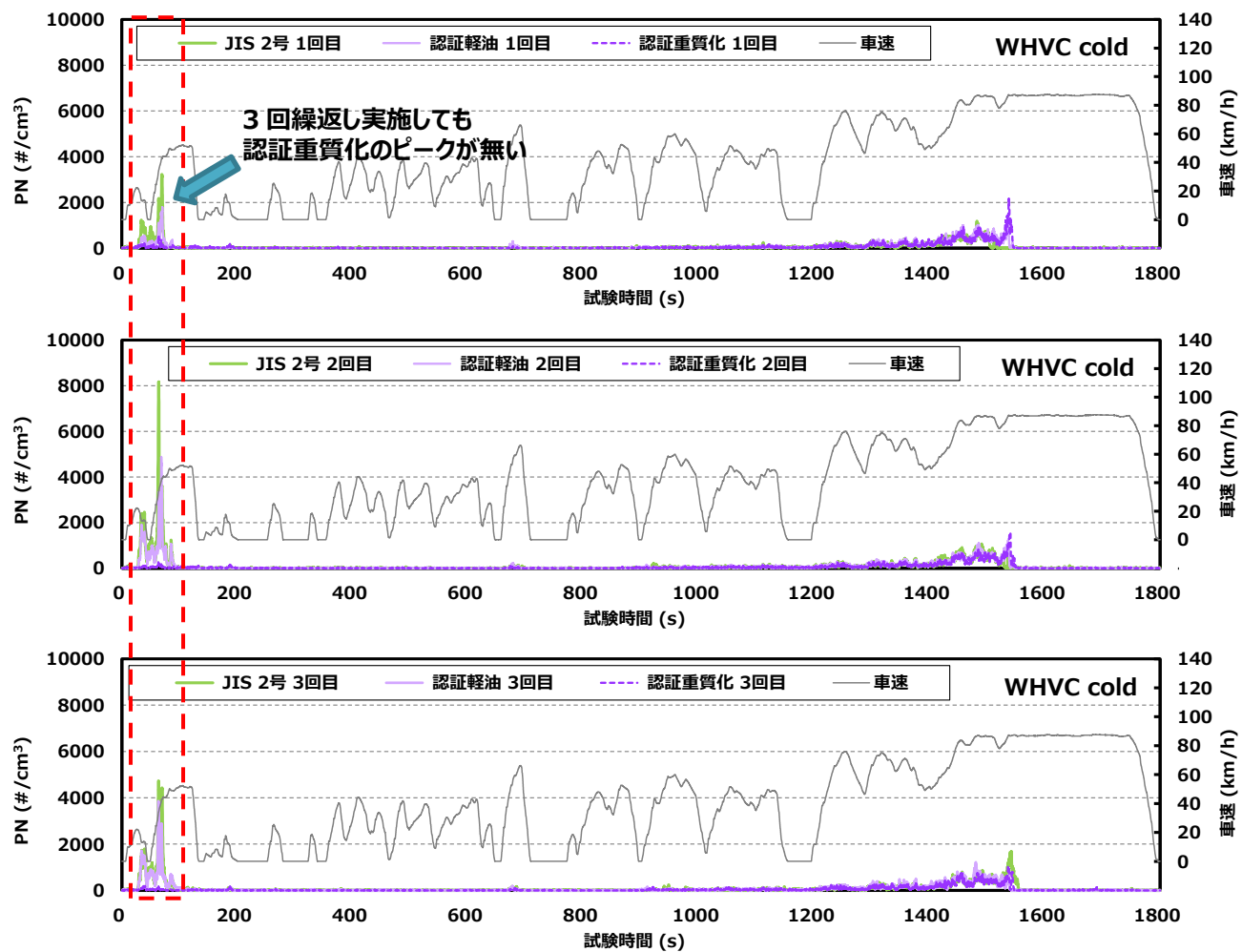


図 3.5 貨物車 A の PN 排出挙動(冷機始動)

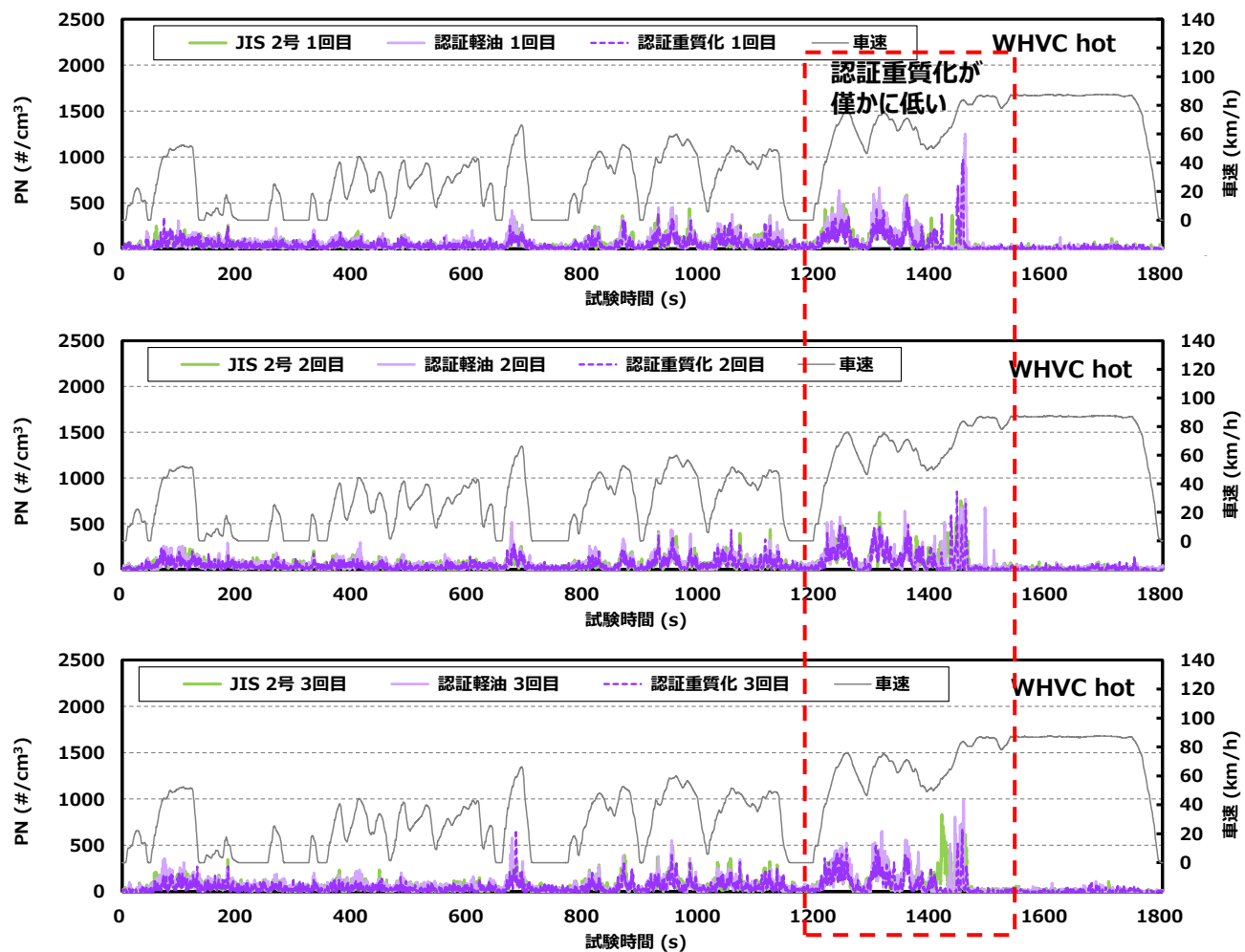


図 3.6 貨物車 A の PN 排出挙動(暖機始動)

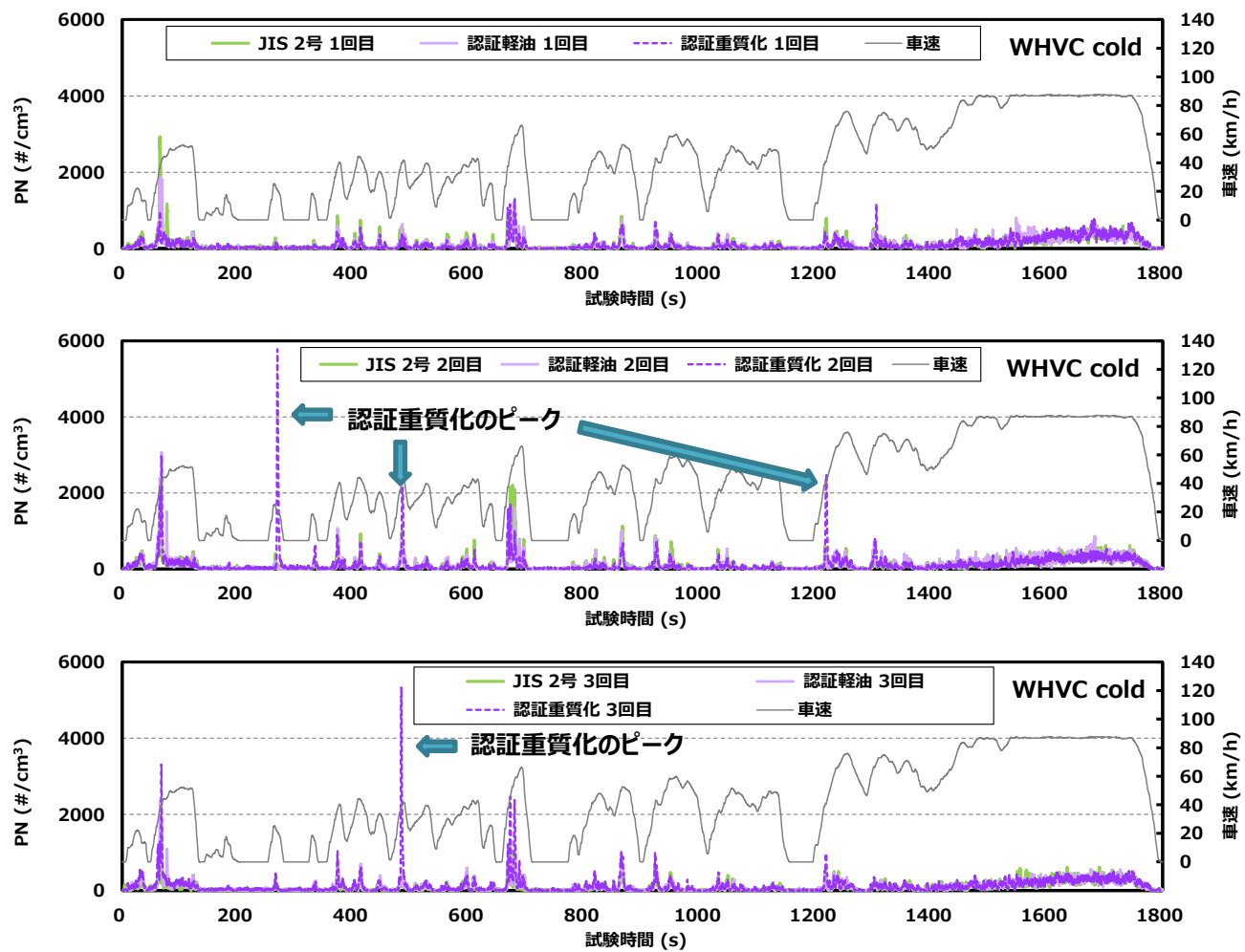


図 3.7 貨物車 B の PN 排出挙動 (冷機始動)

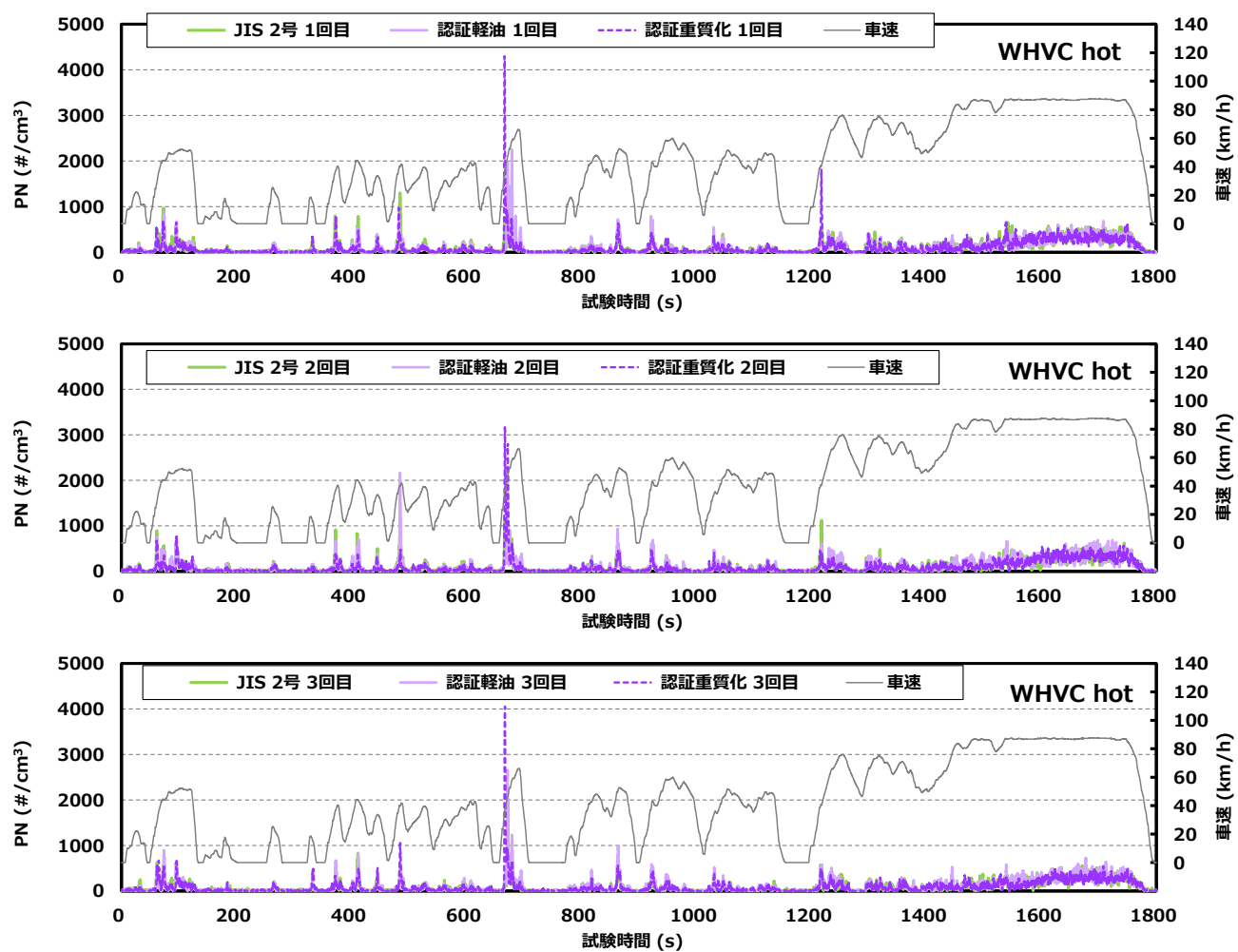


図 3.8 貨物車 B の PN 排出挙動(暖機始動)

(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 排出量の関係について、サイクル仕事量あたりを図 3.9 に、走行距離あたりを図 3.10 にそれぞれ示す。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。

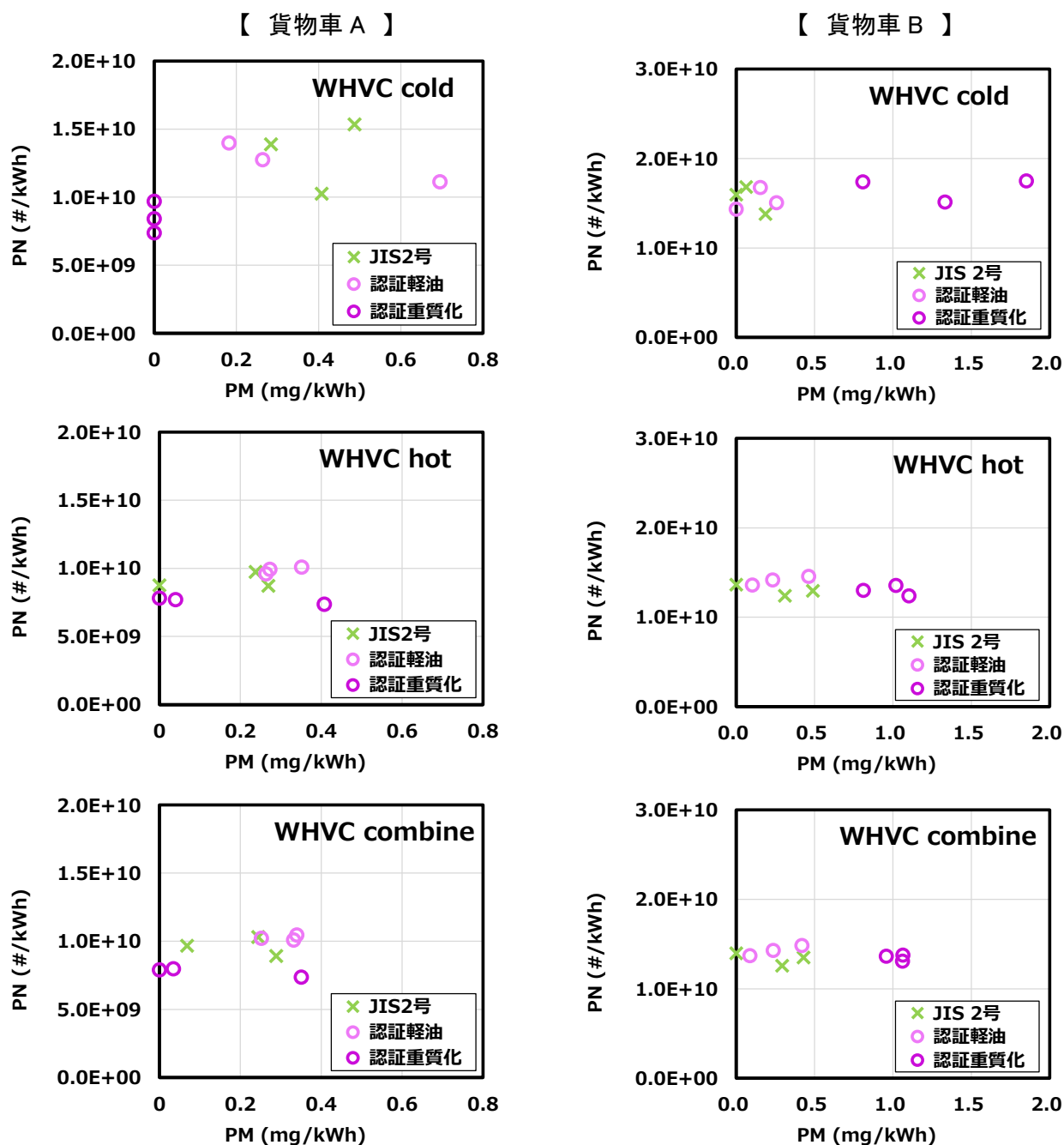


図 3.9 PM 排出量(mg/kWh)に対するPN 排出量(#/kWh)の関係

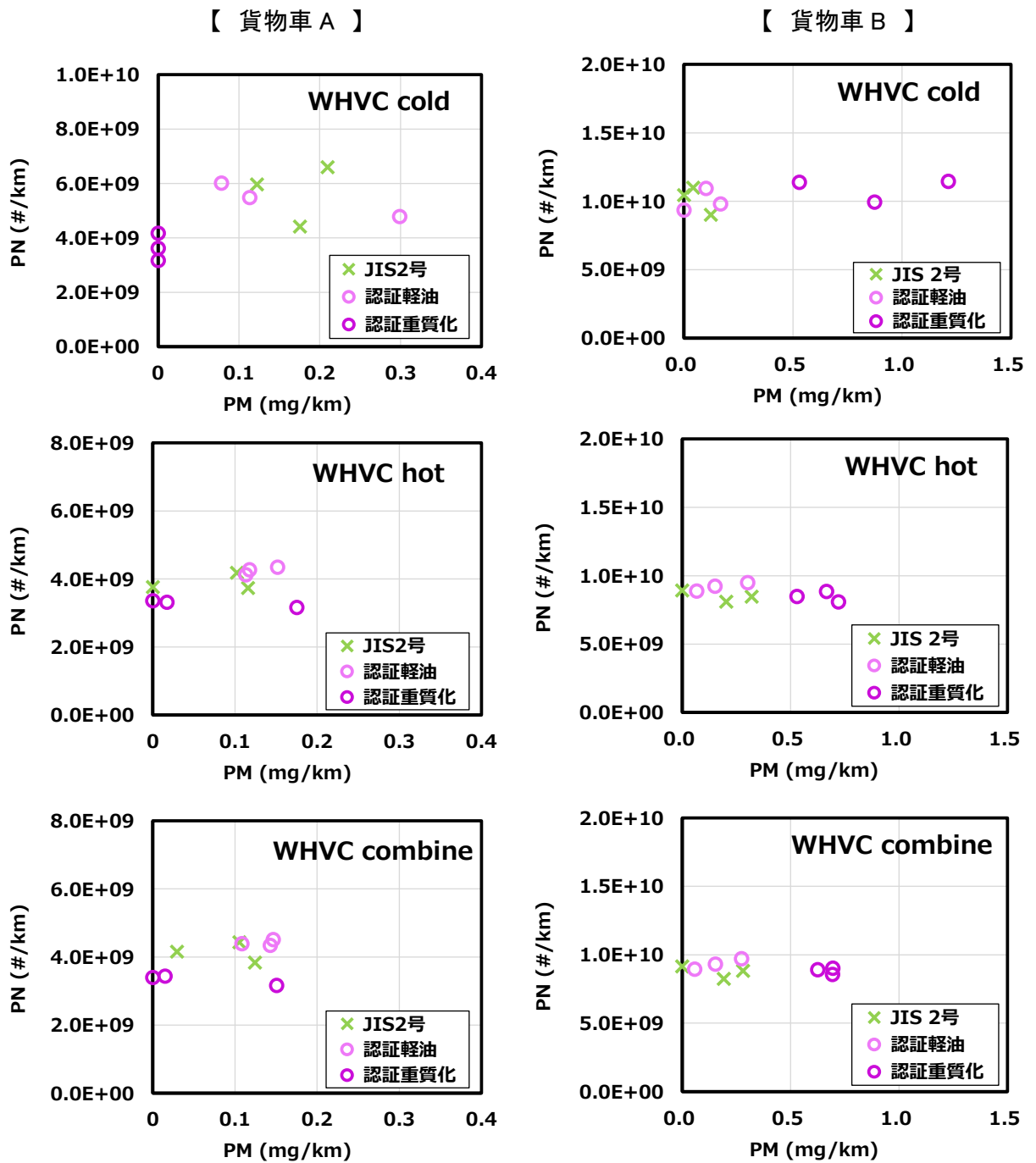


図 3.10 PM 排出量(mg/km)に対するPN 排出量(#/km)の関係

(3) PM中の炭素成分排出量

自動車から排出されるPMに含まれる炭素成分は、主に有機炭素(OC)と、元素状炭素(EC)に分けられる。また、ECは比較的低い燃焼温度で生成するChar-ECと高い燃焼温度で生成するSoot-ECに分けられる。このため、炭素成分は大気中の微小粒子状物質についても測定され、組成率等から発生源を推定するための情報として用いられている。本調査では、PM中の炭素成分を測定し、OC、EC、Char-EC、Soot-ECと、OCとECを合算した全炭素(TC)について排出量を算出した。炭素成分の詳細な説明や測定方法と排出量の算出方法については、付録6.3に記した。

性状が異なる3種の供試燃料を用いて測定した各炭素成分の排出量について、サイクル仕事量あたりと走行距離あたりの結果を貨物車Aは図3.11と図3.12に、貨物車Bは図3.13と図3.14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JIS2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 gmC/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。図3.13と図3.14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、mg/km)の解析に用い、もう片方を炭素成分排出量(mgC/kWh、mgC/km)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。

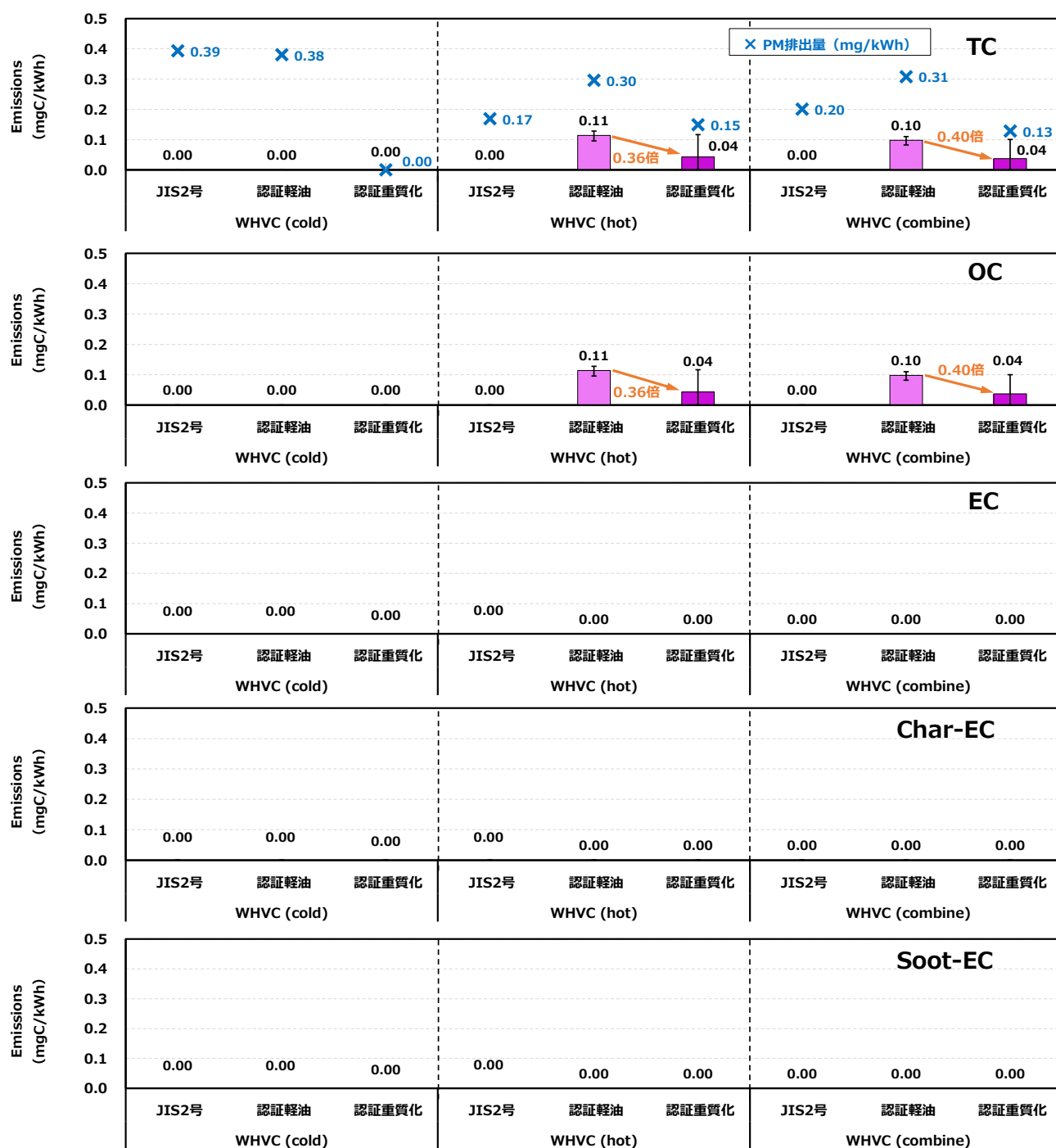


図 3.11 性状が異なる燃料による炭素成分排出量(mgC/kWh)の比較 (貨物車 A)
(エラーバーは最大・最小を表す)

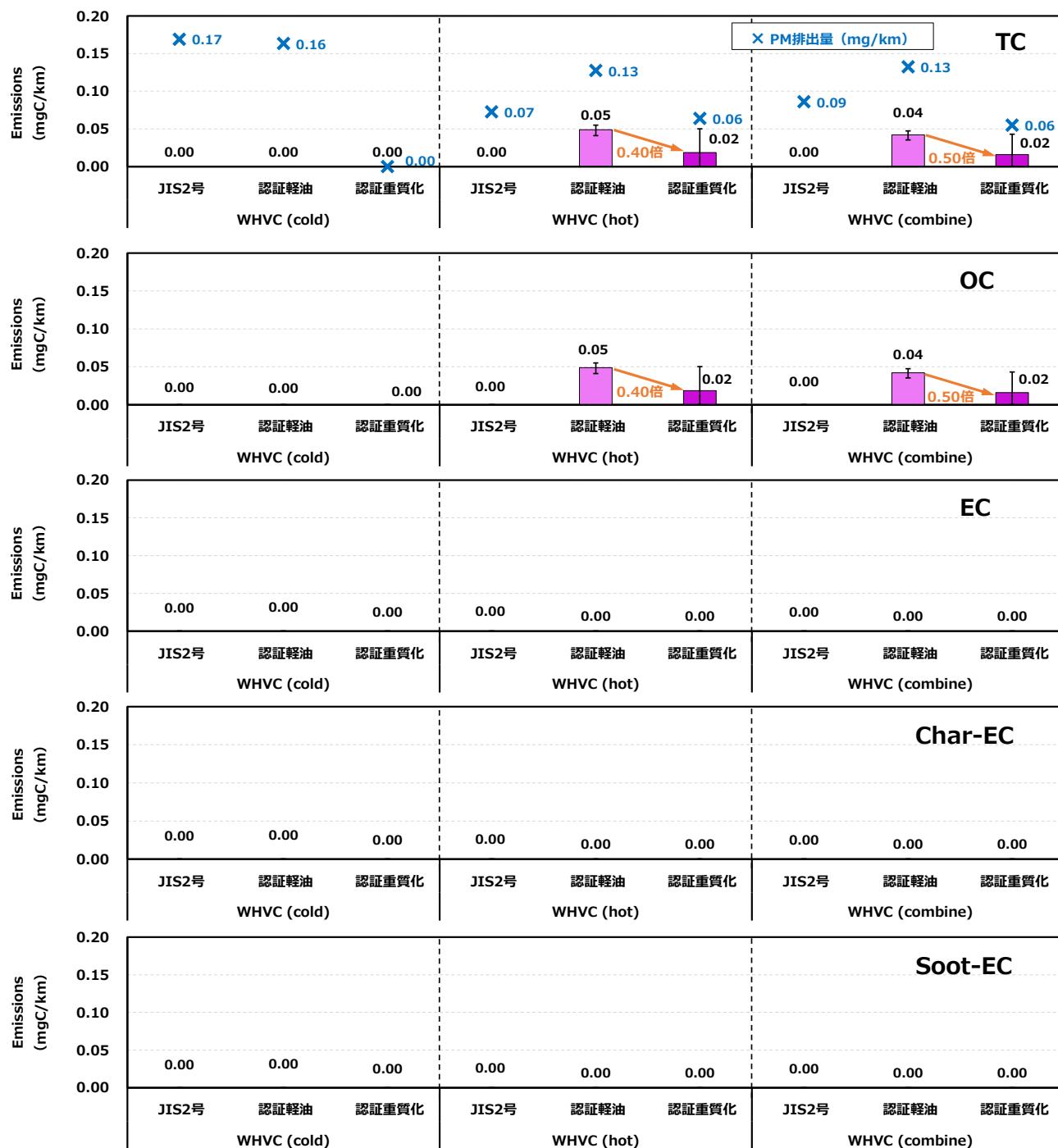


図 3.12 性状が異なる燃料による炭素成分排出量 (mgC/km) の比較 (貨物車 A)
(エラーバーは最大・最小を表す)

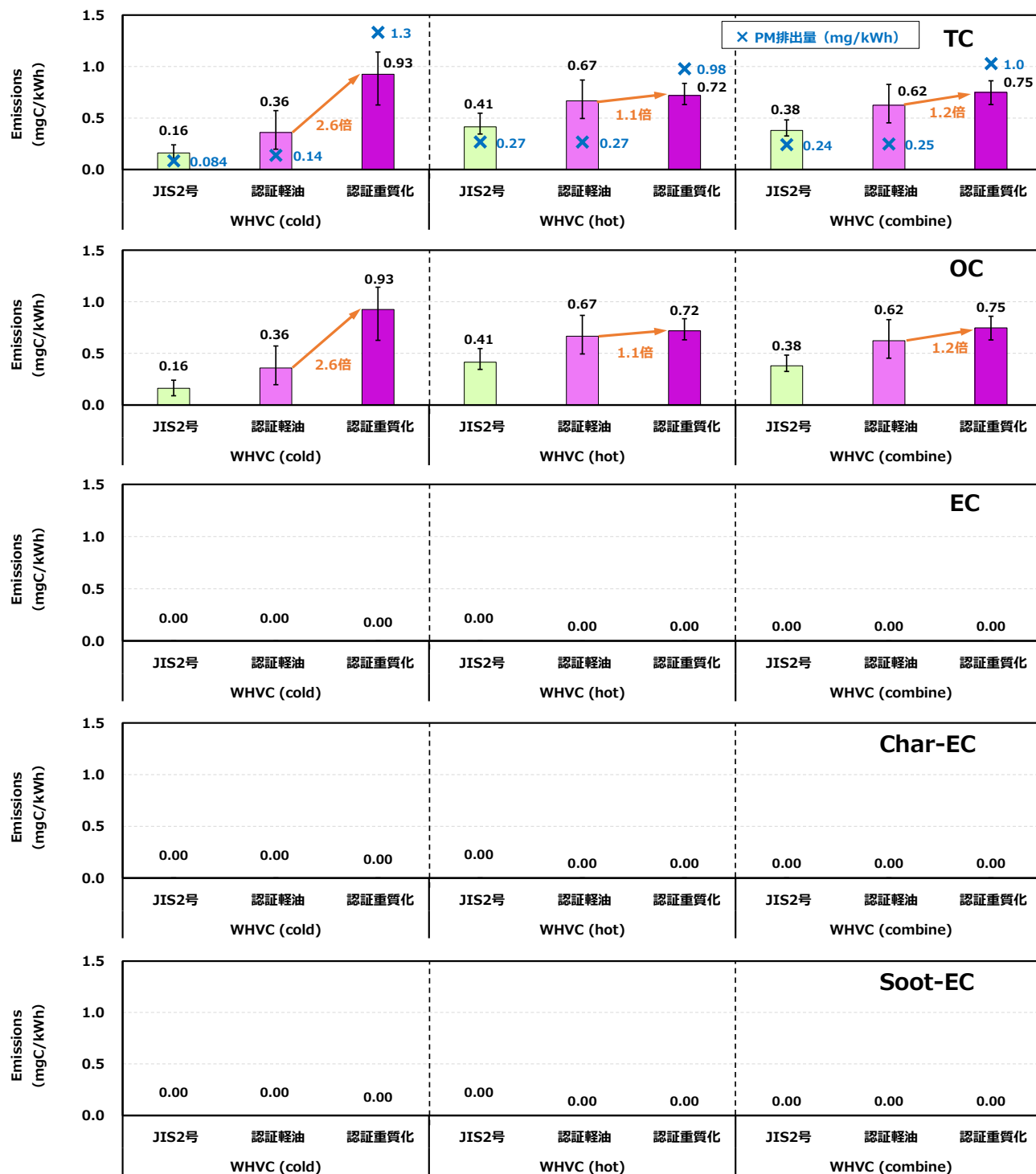


図 3.13 性状が異なる燃料による炭素成分排出量(mgC/kWh)の比較 (貨物車 B)
(エラーバーは最大・最小を表す)

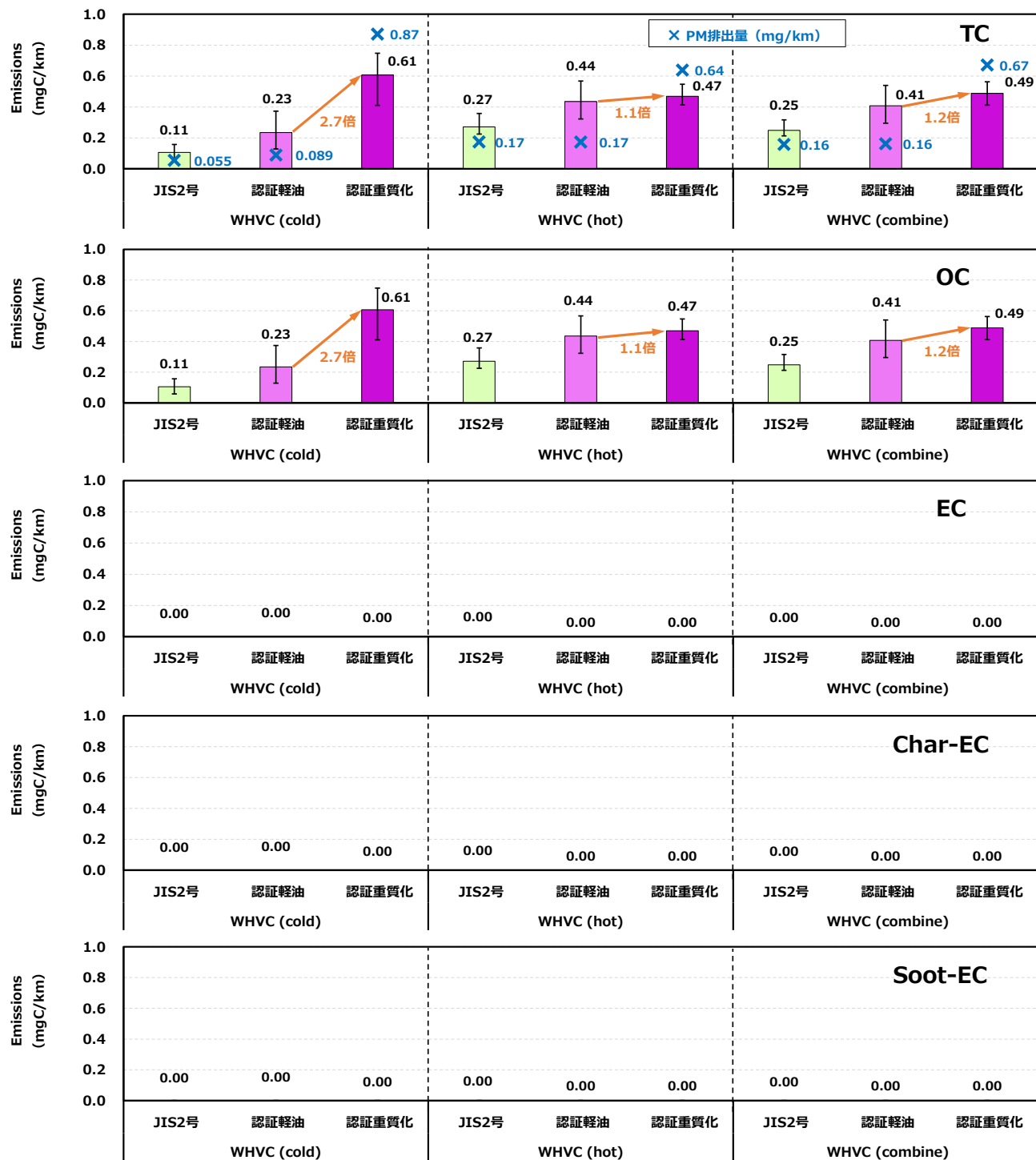


図 3.14 性状が異なる燃料による炭素成分排出量 (mgC/km) の比較 (貨物車 B)
(エラーバーは最大・最小を表す)

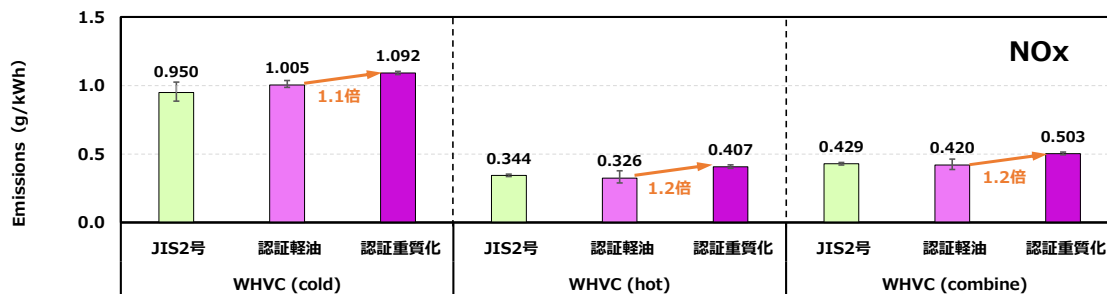
3.2 窒素酸化物(NO_x 、 NO 、 NO_2 、 N_2O)

(1) NO_x の排出量と排出挙動および NO 、 NO_2 の排出量

本調査で得た NO_x の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.15 に、走行距離あたりを図 3.16 に示す。また、冷機始動および暖機始動の時系列の排出挙動を貨物車 A は図 3.17 と図 3.18 に、貨物車 B は図 3.19 と図 3.20 にそれぞれ示す。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。

NO の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.21 に、走行距離あたりを図 3.22 に示す、また、 NO_2 の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.23 に、走行距離あたりを図 3.24 に示す。ただし、 NO_x 排出量が連続分析計による積算値を基に算出されているのに対し、 NO がテドラーバッグに捕集した試料を試験後に分析されていることや、 NO_2 排出量が NO_x 濃度と NO 濃度の差し引きから算出されていることから参考値の扱いとする。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

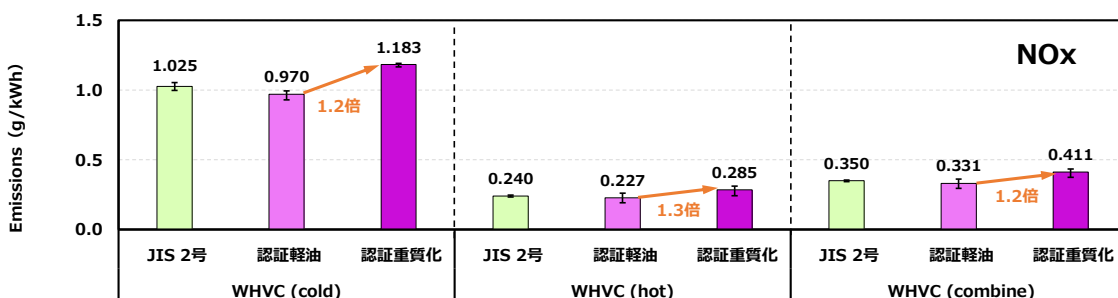
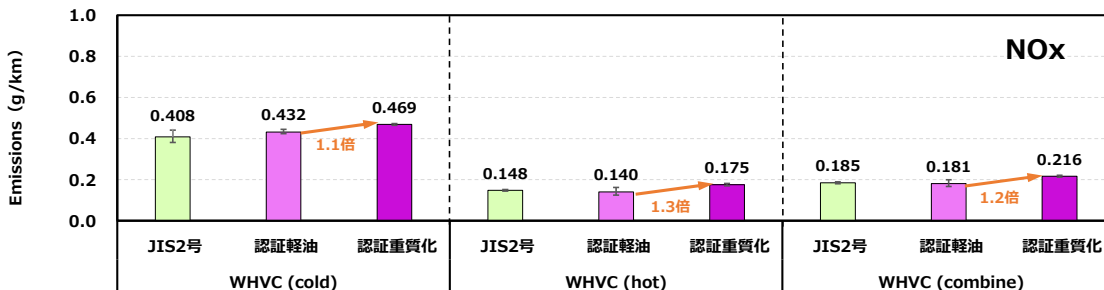


図 3.15 性状が異なる燃料による NO_x 排出量 (g/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

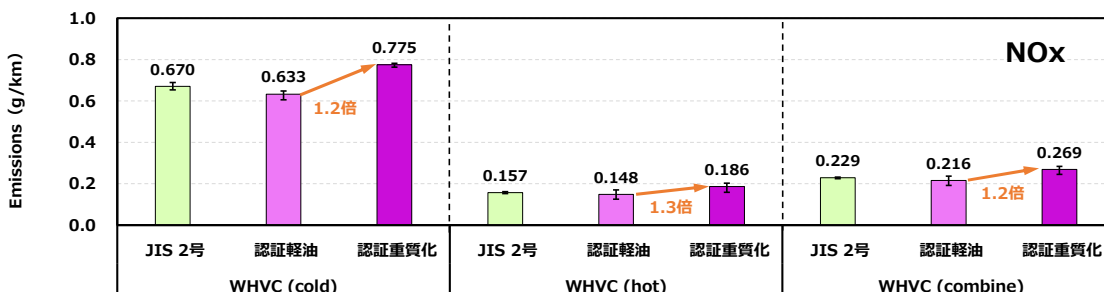


図 3.16 性状が異なる燃料による NO_x 排出量 (g/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

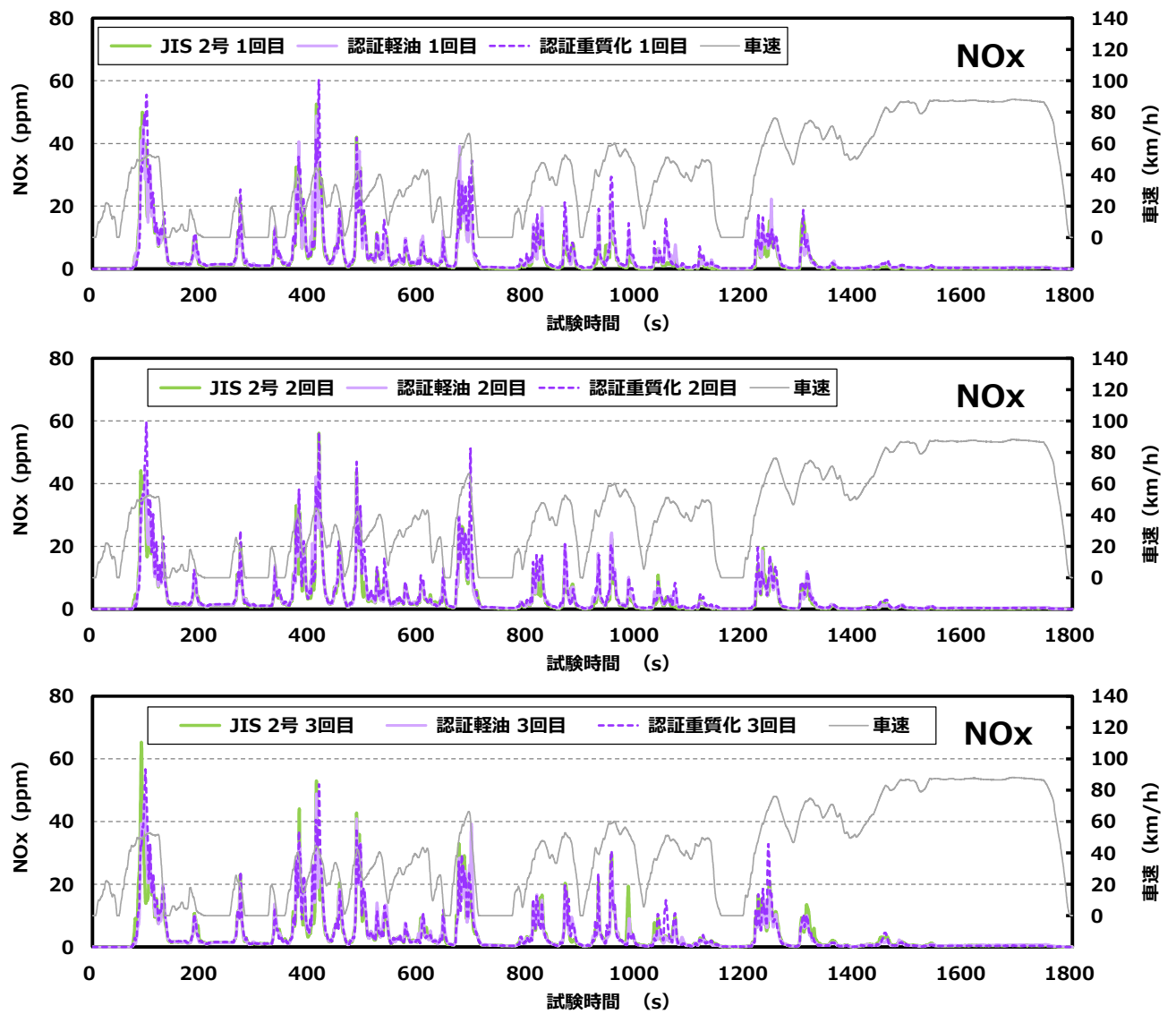


図 3.17 貨物車 A の NOx 排出挙動(冷機始動)

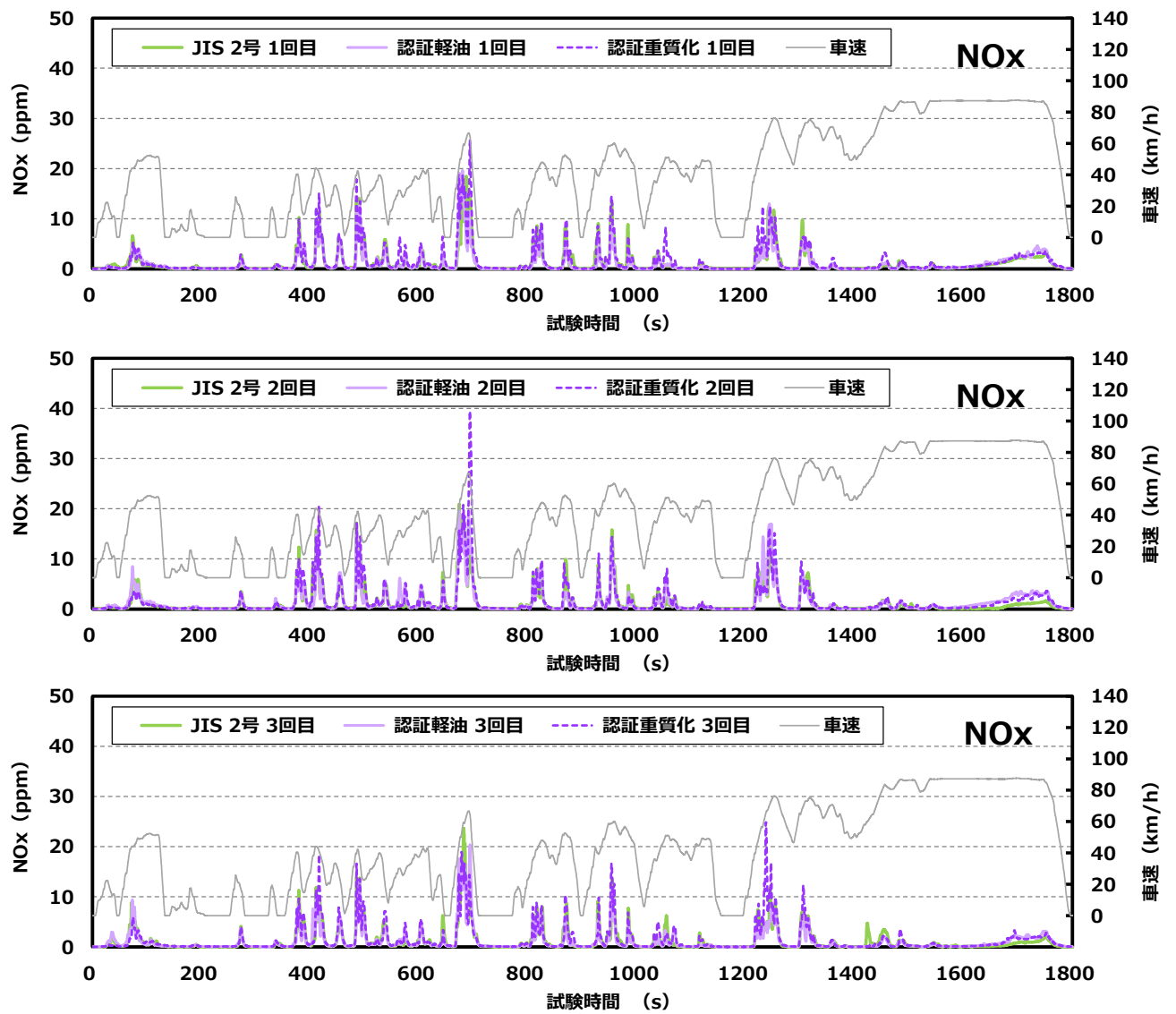


図 3.18 貨物車 A の NOx 排出挙動(暖機始動)

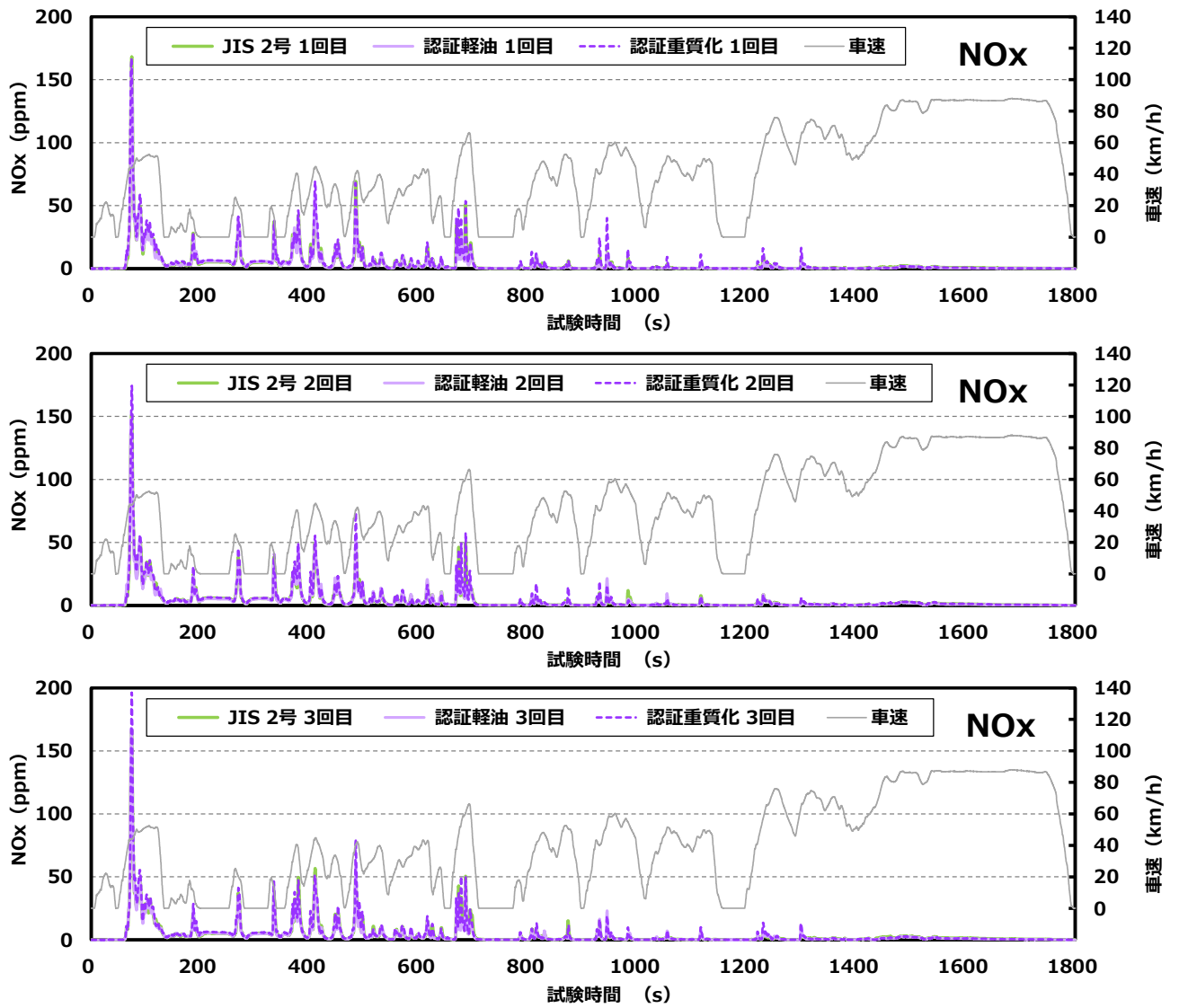


図 3.19 貨物車 B の NOx 排出挙動(冷機始動)

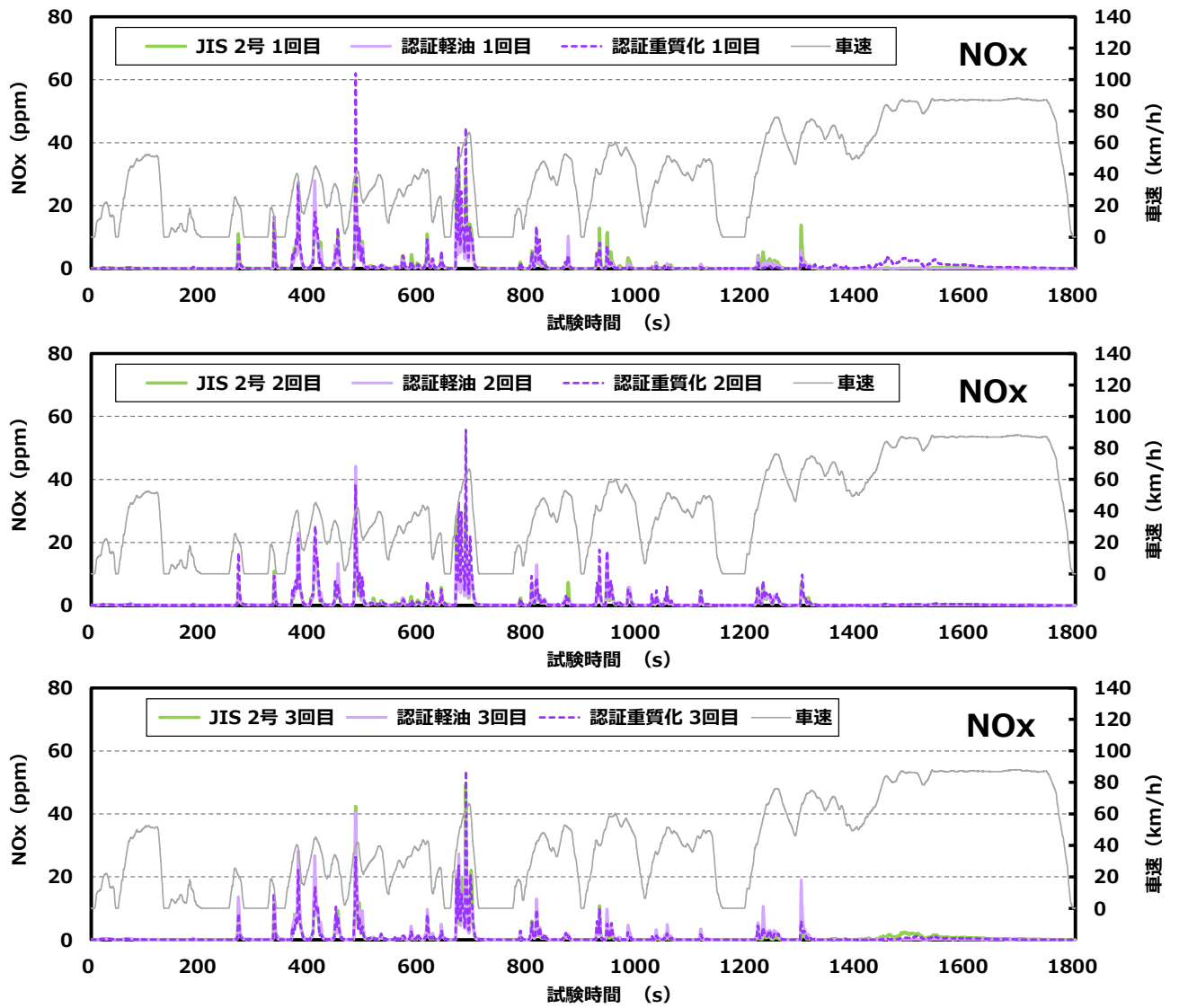
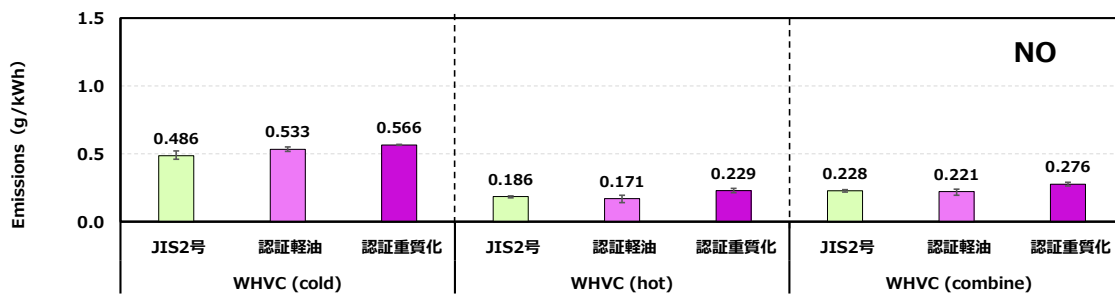


図 3.20 貨物車 B の NOx 排出挙動(暖機始動)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

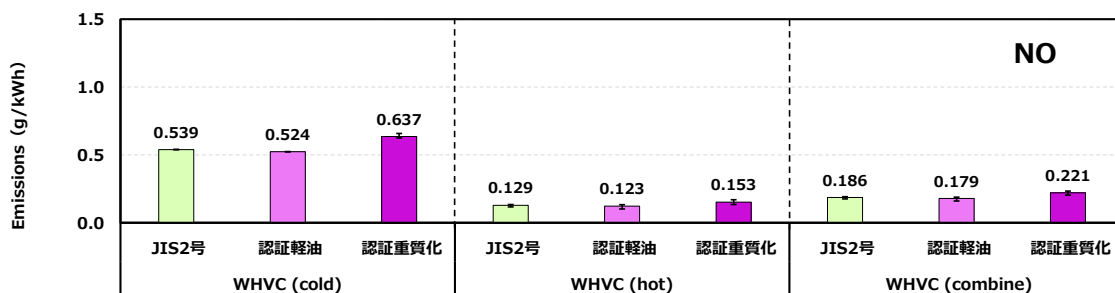
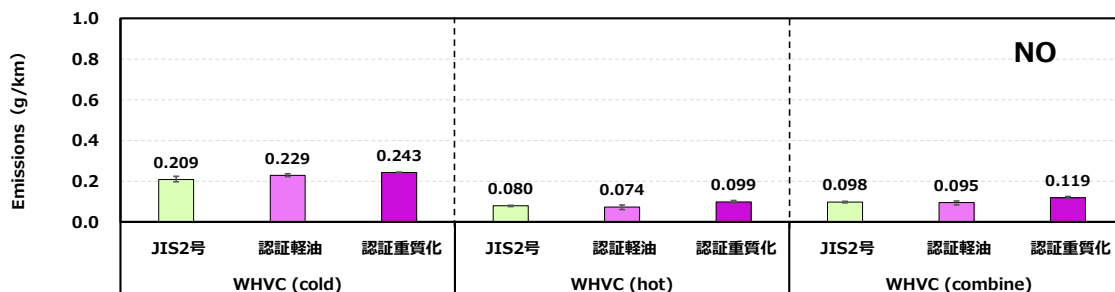


図 3.21 性状が異なる燃料による NO 排出量 (g/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

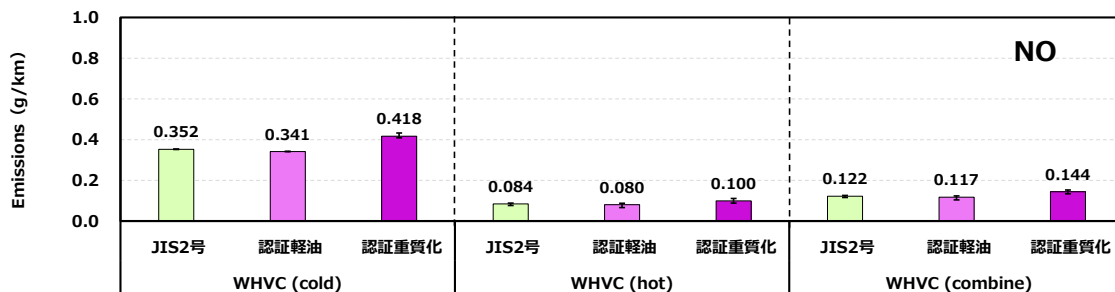
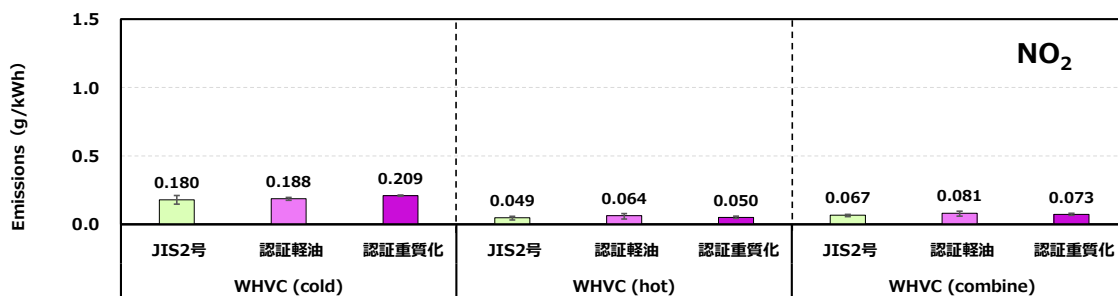


図 3.22 性状が異なる燃料による NO 排出量 (g/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

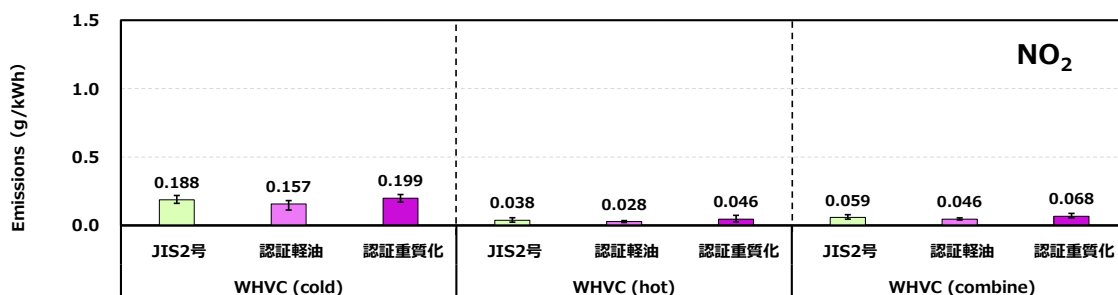
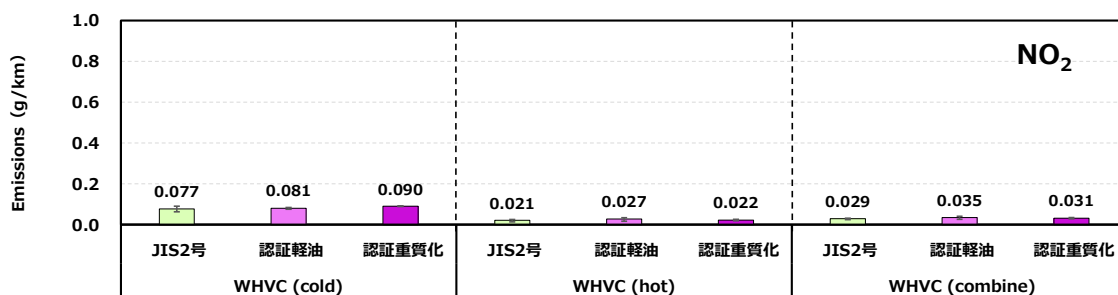


図 3.23 性状が異なる燃料による NO₂ 排出量 (g/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

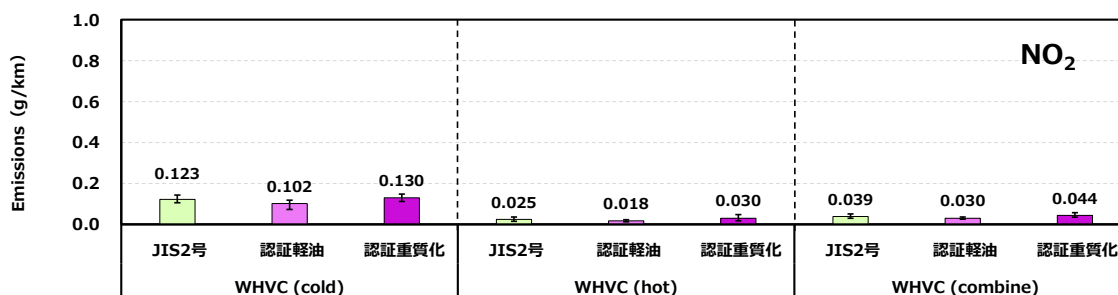
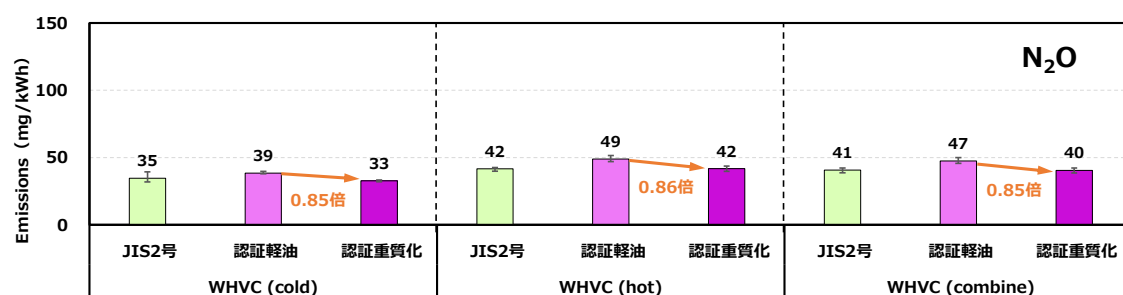


図 3.24 性状が異なる燃料による NO₂ 排出量 (g/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

(2) N₂O の排出量

本調査で得た N₂O の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.25 に、走行距離あたりを図 3.26 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、暖気始動が 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 】

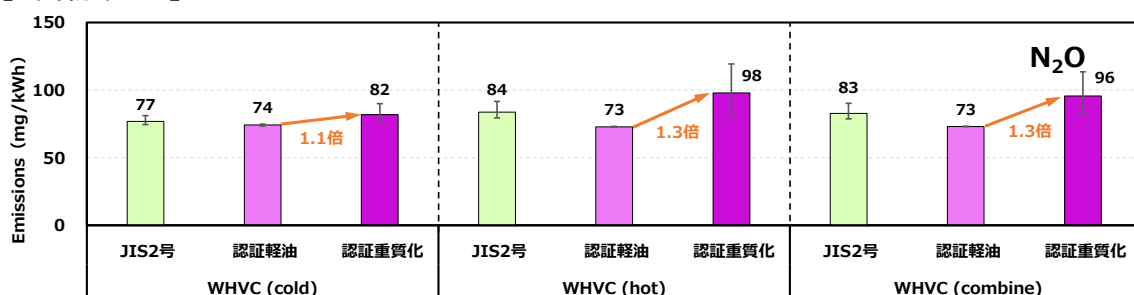
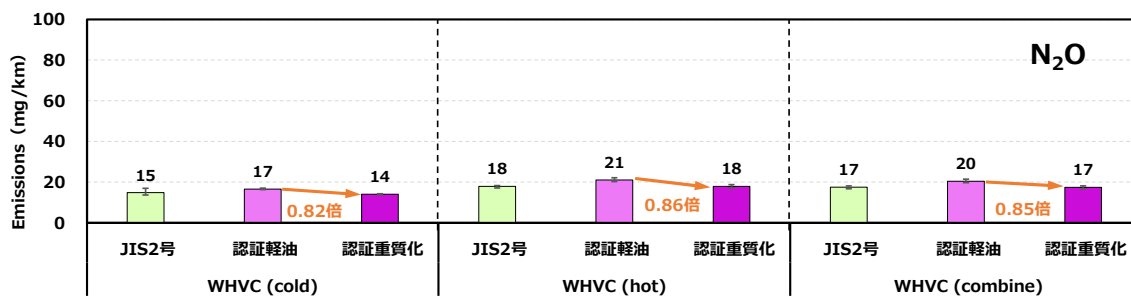


図 3.25 性状が異なる燃料による N₂O 排出量 (mg/kWh) の比較

(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

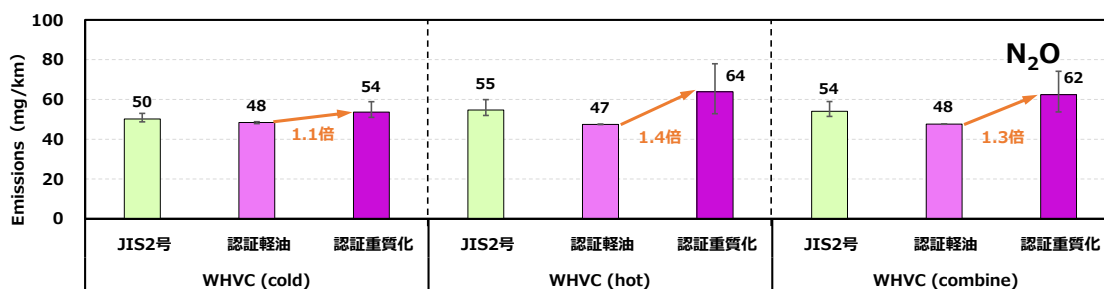


図 3.26 性状が異なる燃料による N₂O 排出量 (mg/km) の比較

(エラーバーは最大・最小を表す)

3.3 CO、NMHC、THC、CO₂、NH₃、HCHO

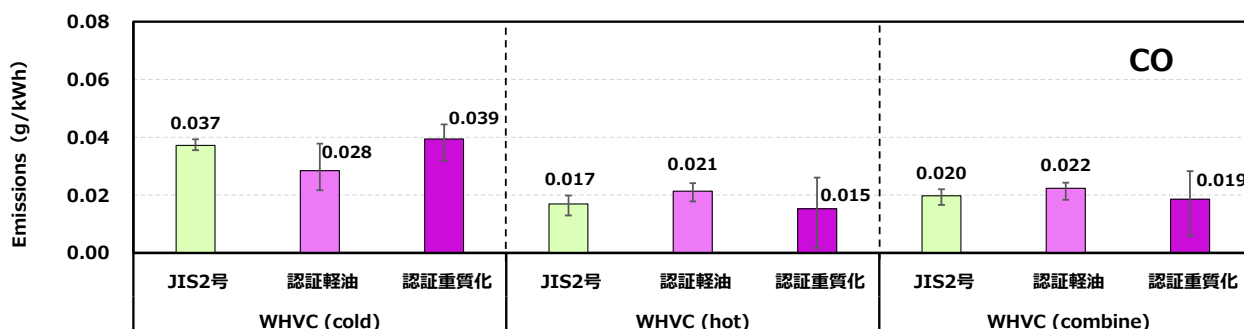
本調査で得られた排出量の内、CO、NMHC、THC、CO₂、NH₃、HCHO について、排出量を纏めた。また、CO、THC、CO₂については、時系列的な排出挙動を希釈トンネル内の質量濃度によって示した。本節に纏めた測定物質の排出量に対する評価は、排出量が低濃度であるために計測の繰返し再現性が低い、あるいは燃料重質化による影響を受けたと判断するための知見が不足している等の理由により、詳細に述べることを控えた。ただし、セタン価向上剤の窒素影響と誤解されやすいNH₃については結果を図示すると共に尿素由来であることを述べた。

(1) CO の排出量と排出挙動

CO の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.27、走行距離あたり

図 3.28 に示す。また、時系列の排出挙動について、貨物車 A は冷機始動を図 3.29、暖機始動を図 3.30 に、貨物車 B は冷機始動を図 3.31、暖機始動を図 3.32 にそれぞれ示す。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

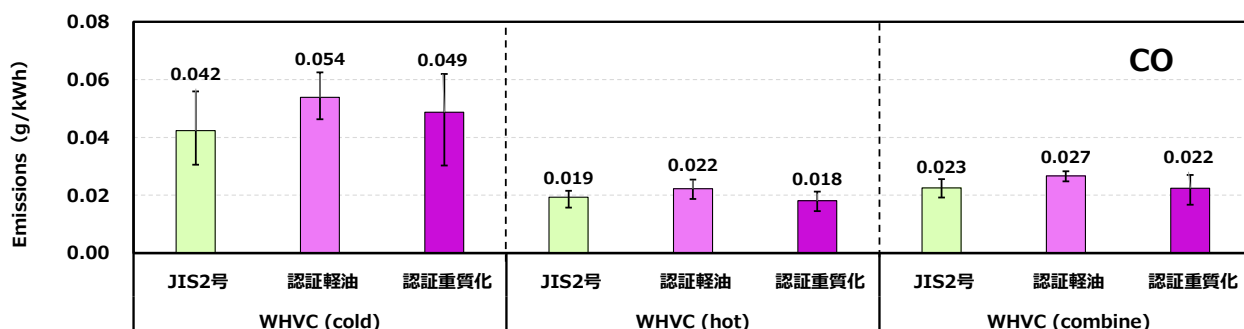
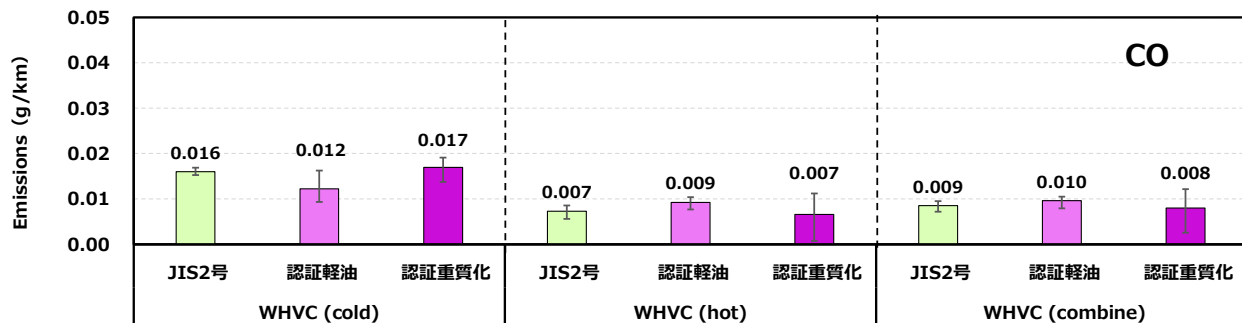


図 3.27 性状が異なる燃料による CO 排出量 (g/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

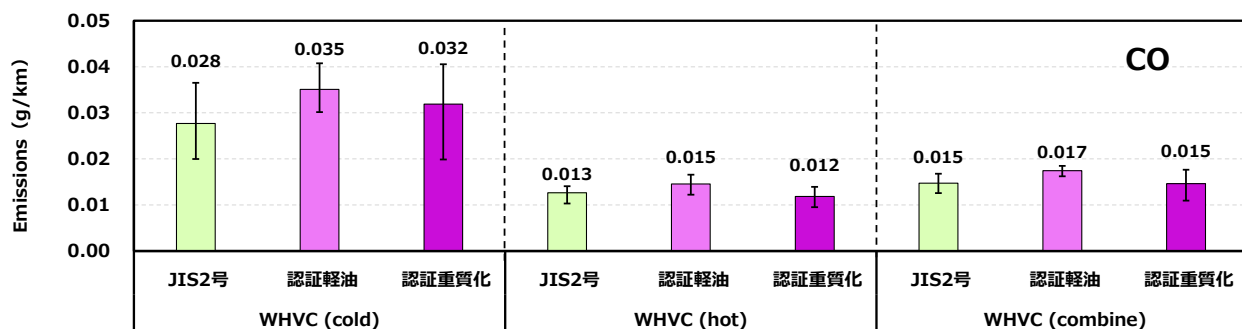


図 3.28 性状が異なる燃料による CO 排出量 (g/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

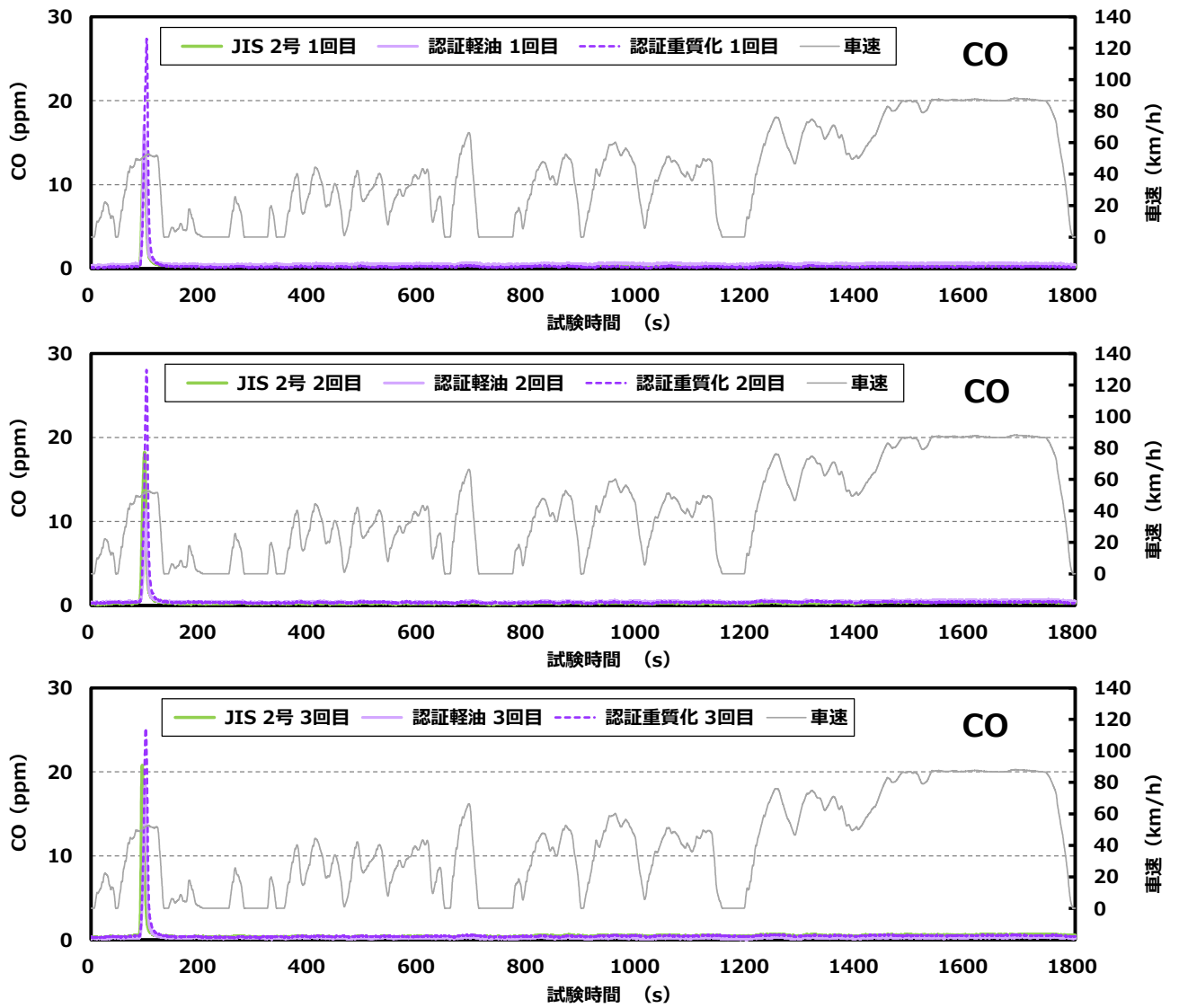


図 3.29 貨物車 A の CO 排出挙動(冷機始動)

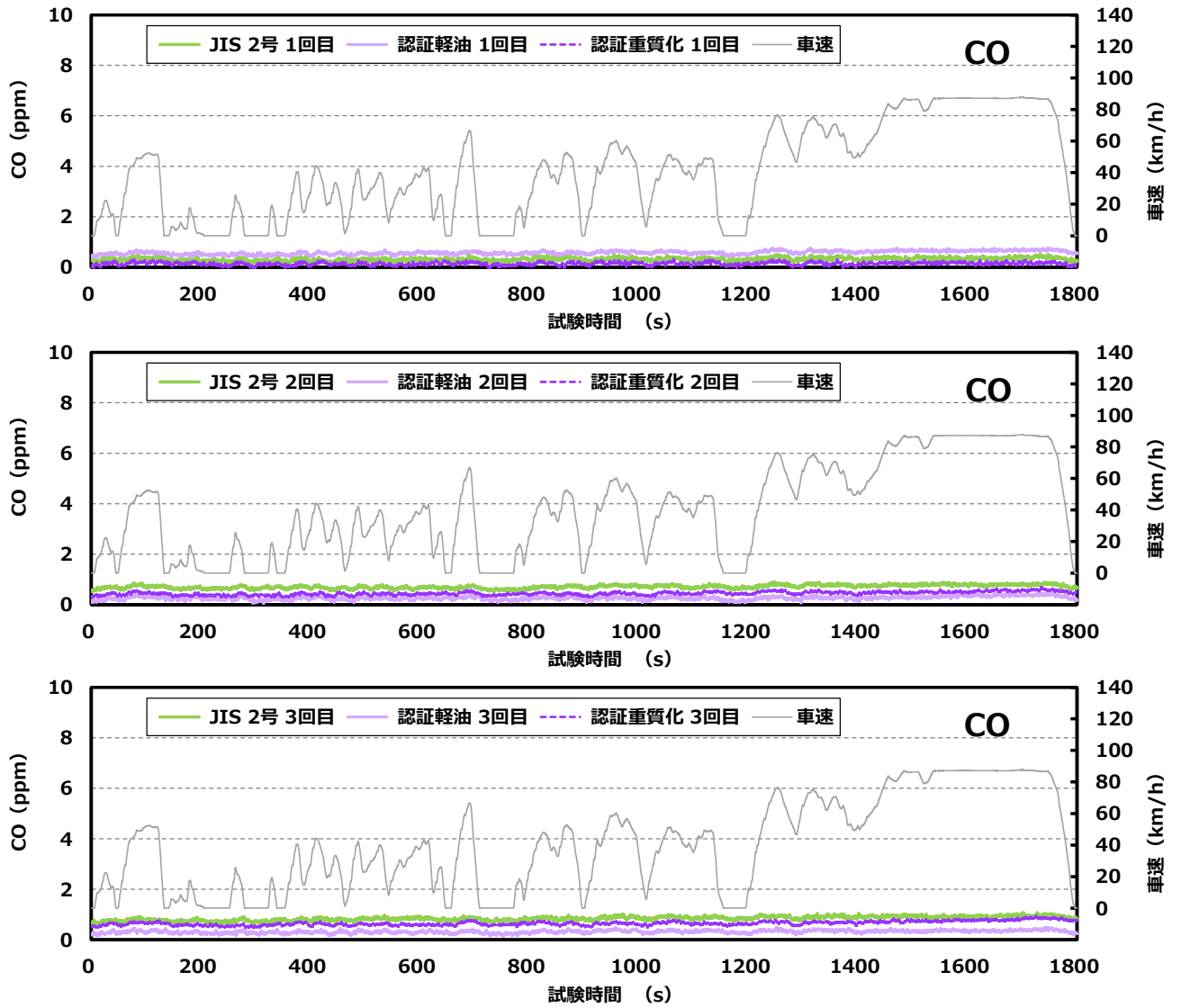


図 3.30 貨物車 A の CO 排出挙動(暖機始動)

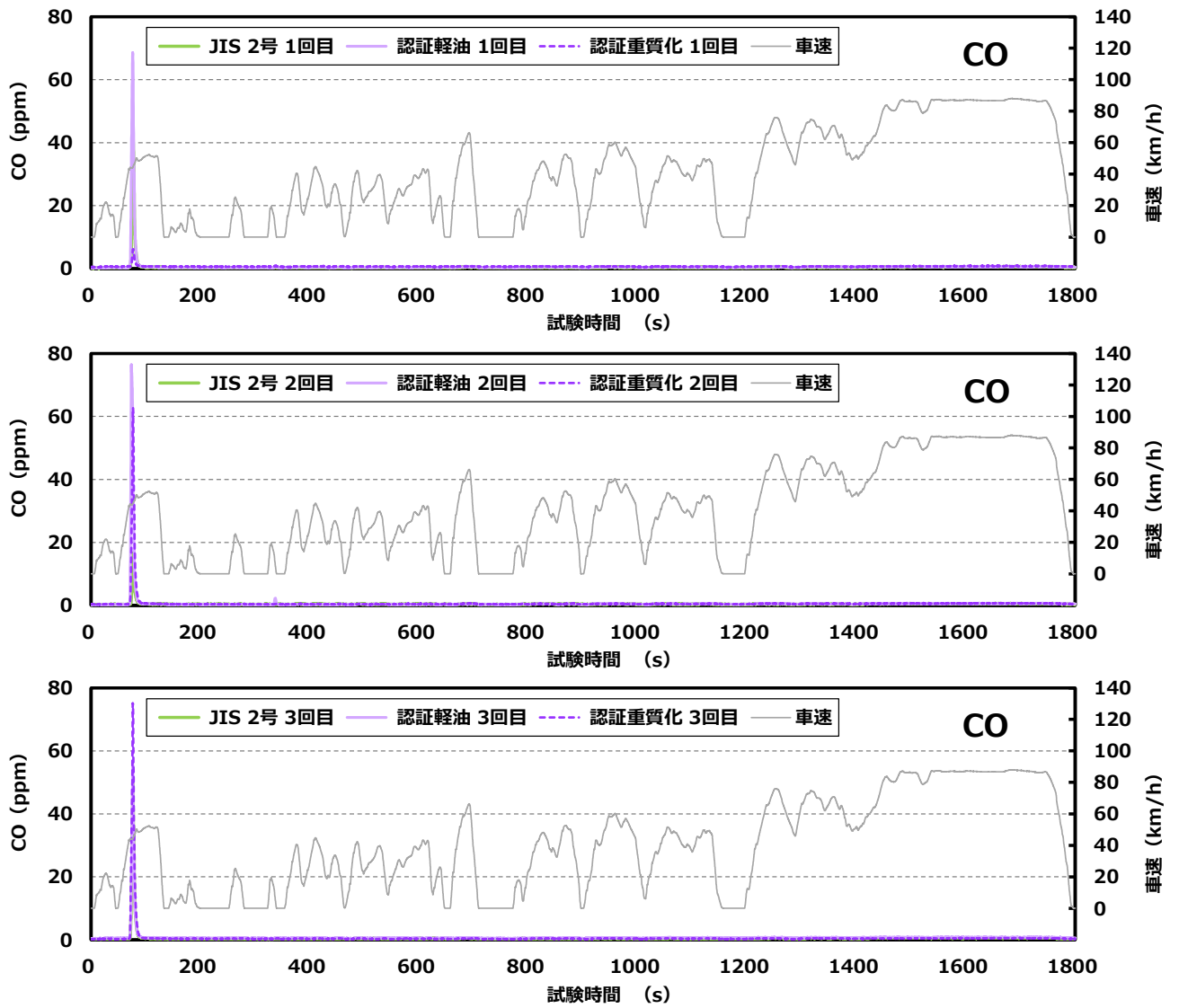


図 3.31 貨物車 B の CO 排出挙動(冷機始動)

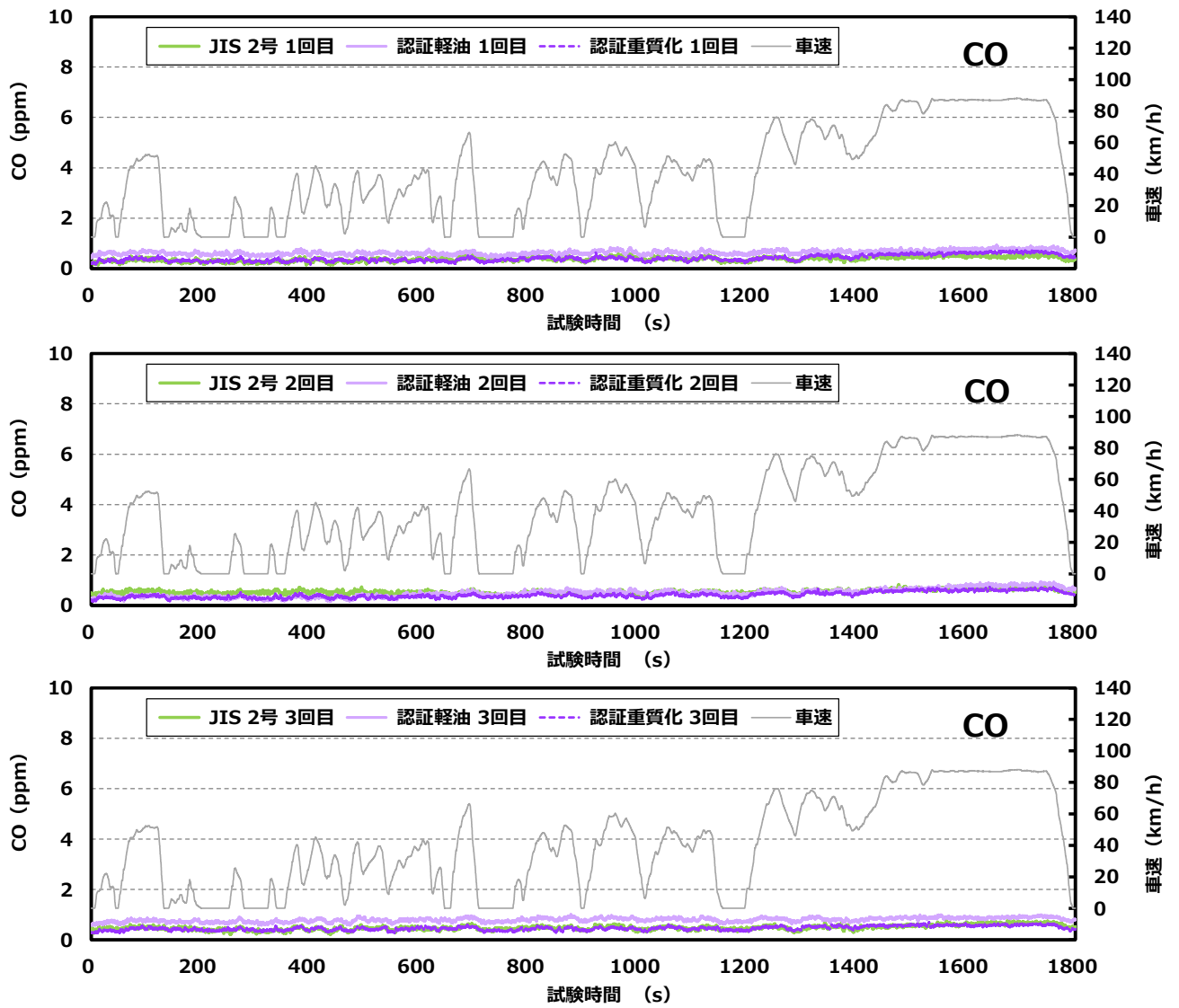
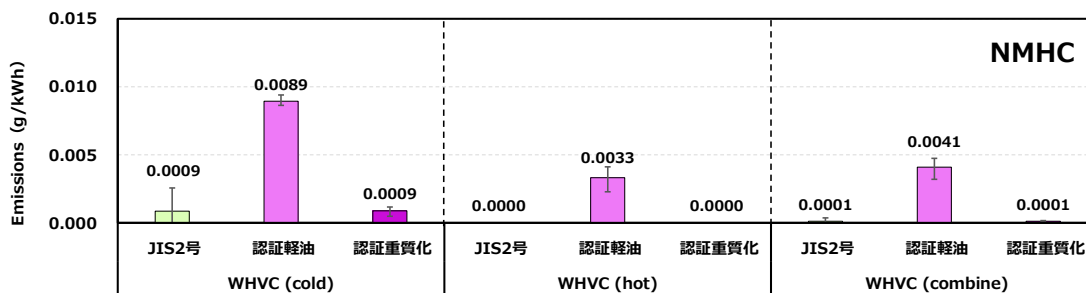


図 3.32 貨物車 B の CO 排出挙動(暖機始動)

(2) NMHC の排出量

本調査で得た NMHC の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.33 に、走行距離あたりを図 3.34 に示す。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

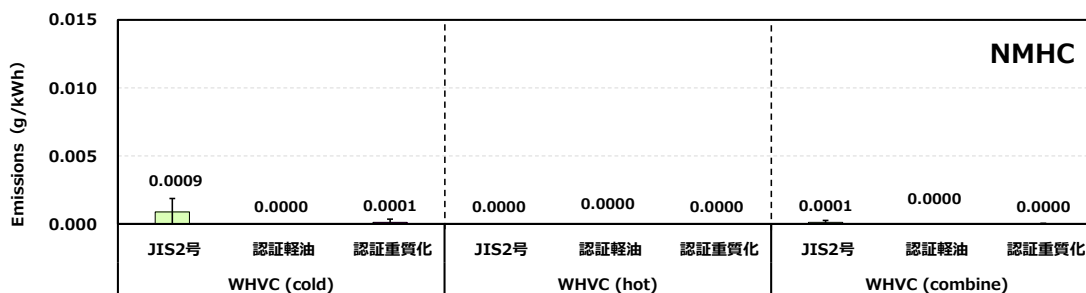
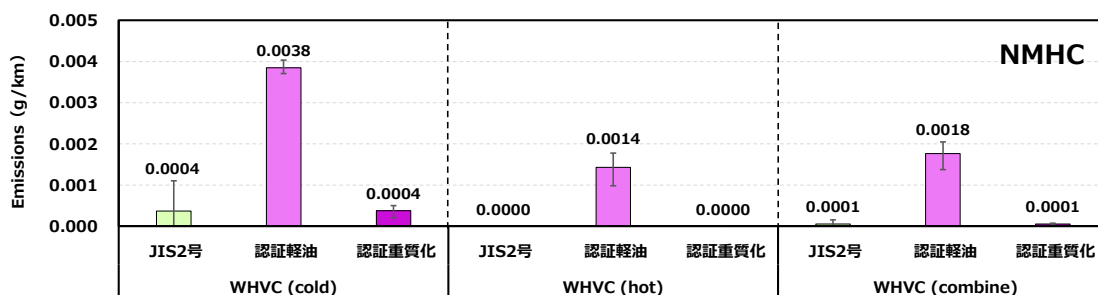


図 3.33 性状が異なる燃料による NMHC 排出量 (g/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

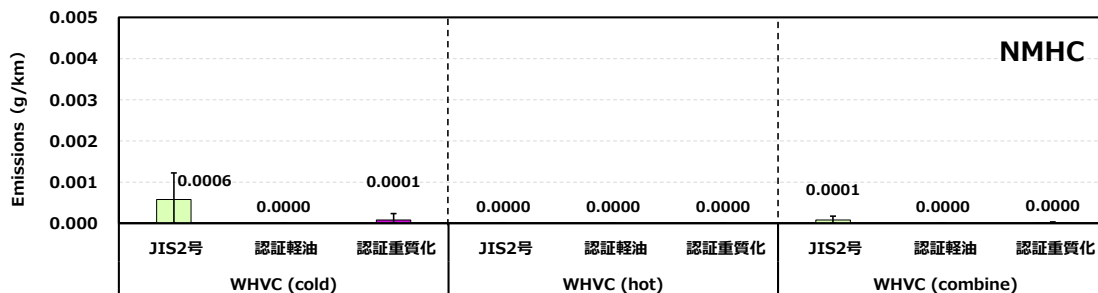
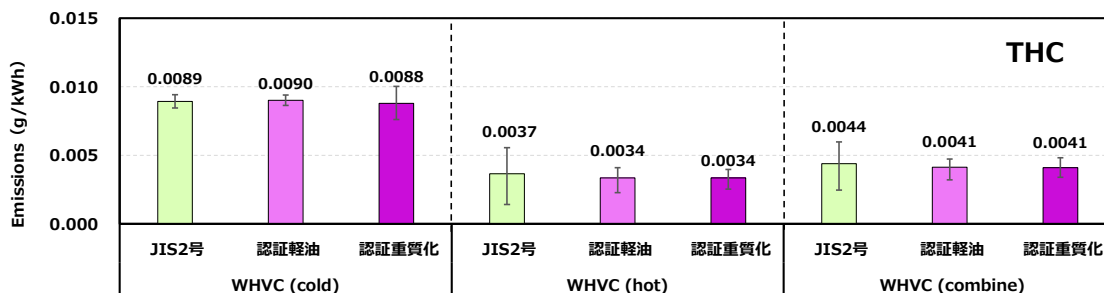


図 3.34 性状が異なる燃料による NMHC 排出量 (g/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

(3) THC の排出量と排出挙動

本調査で得た THC の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.35、走行距離あたりを図 3.36 に示す。また、時系列の排出挙動を貨物車 A は冷機始動を図 3.37、暖機始動を図 3.38 に、貨物車 B は冷機始動を図 3.39、暖機始動を図 3.40 にそれぞれ示す。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

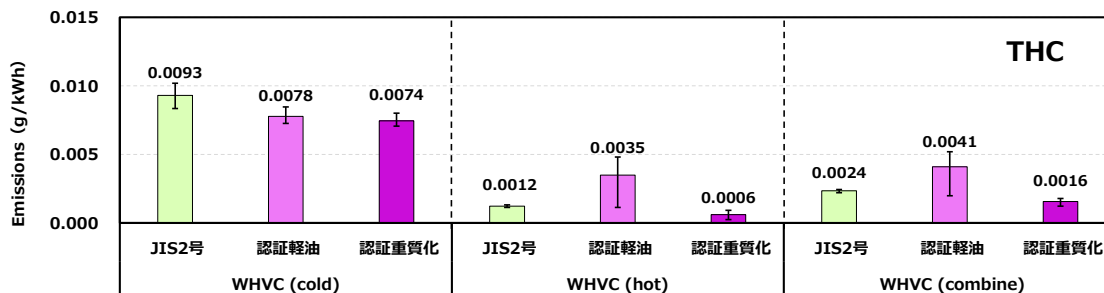
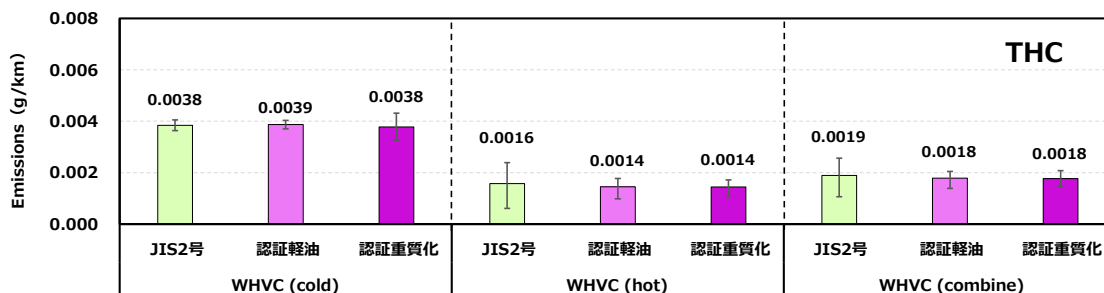


図 3.35 性状が異なる燃料による THC 排出量 (g/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

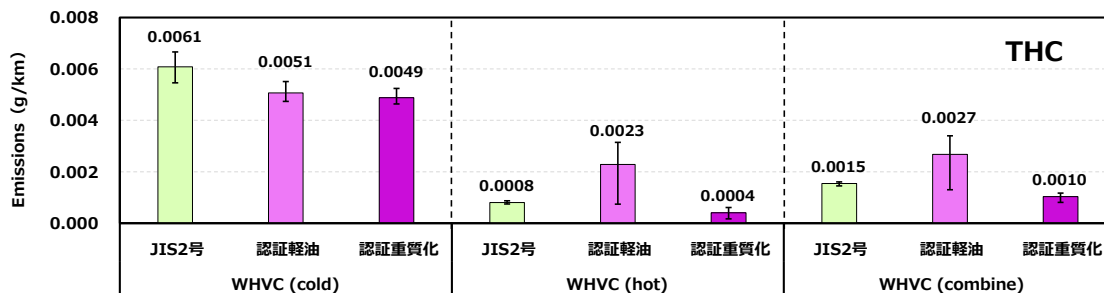


図 3.36 性状が異なる燃料による THC 排出量 (g/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

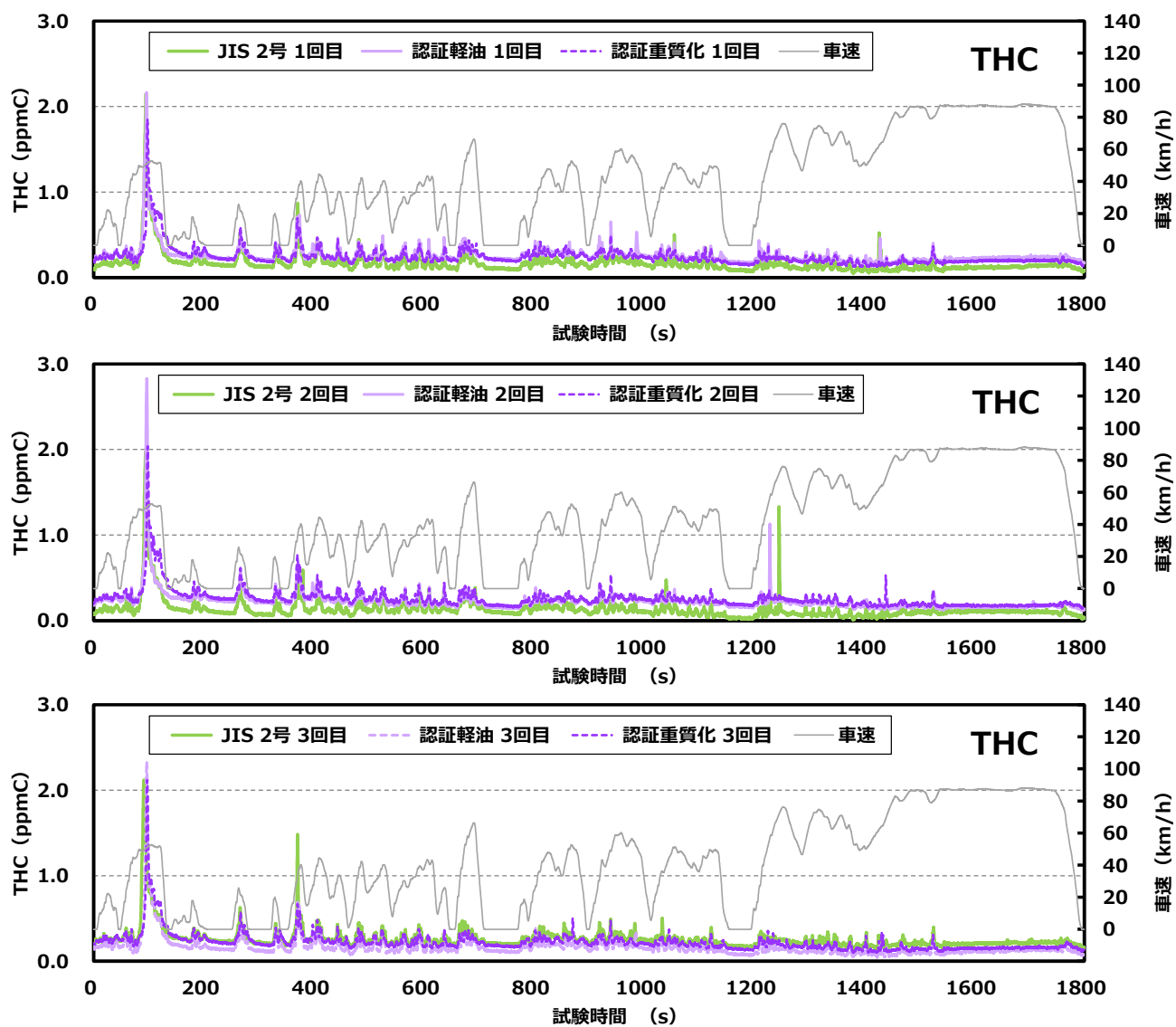


図 3.37 貨物車 A の THC 排出挙動(冷機始動)

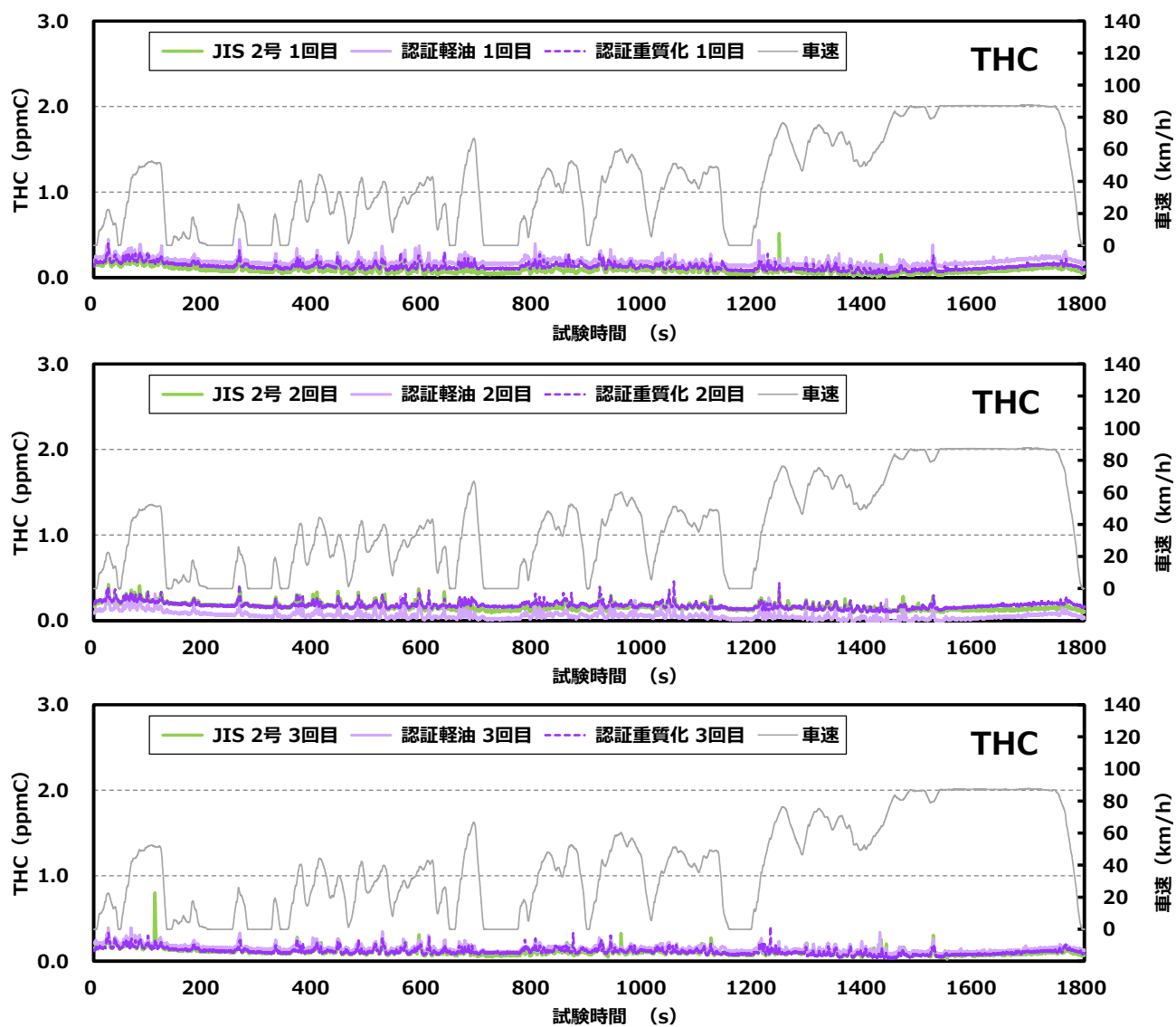


図 3.38 貨物車 A の THC 排出挙動(暖機始動)

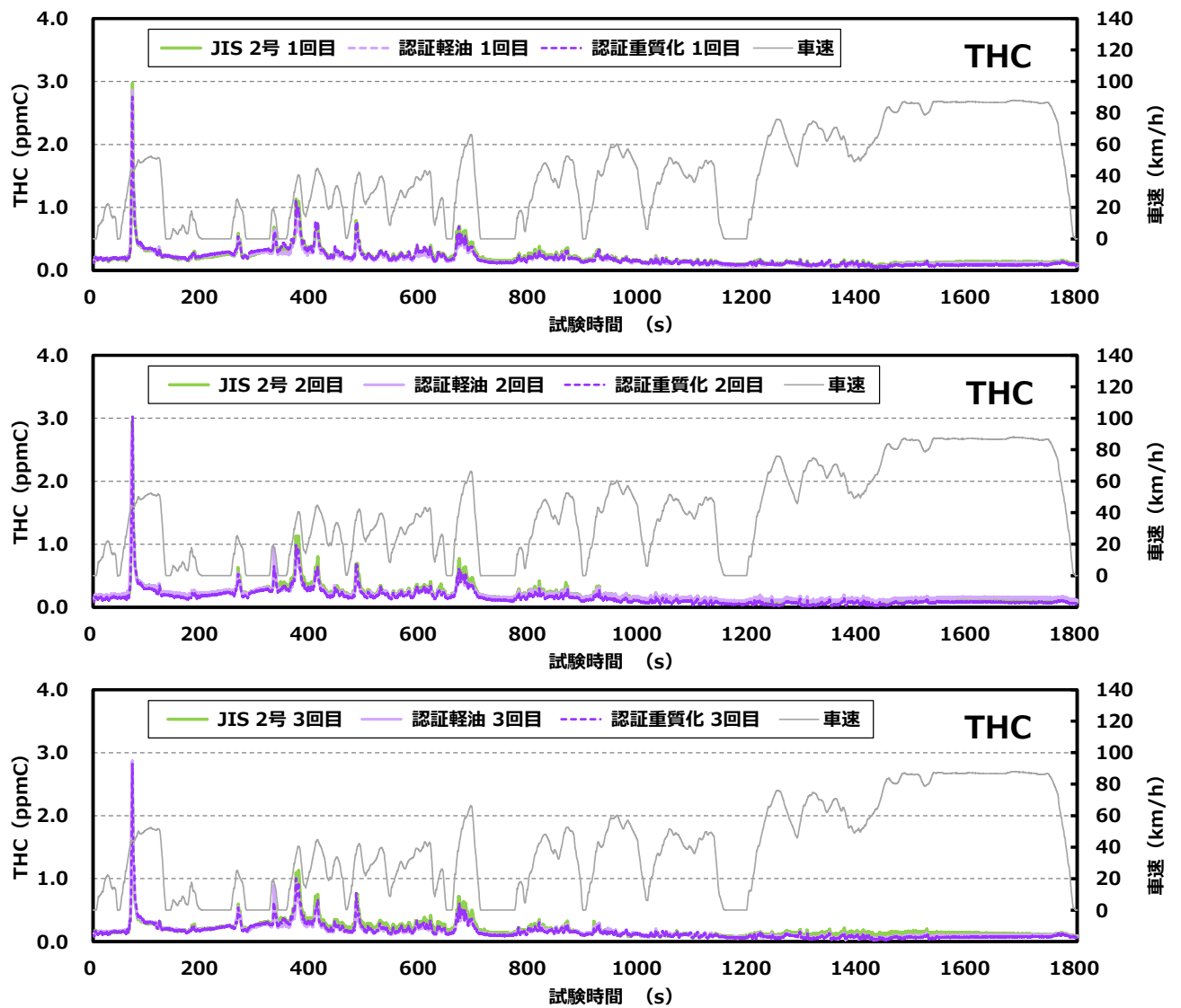


図 3.39 貨物車 B の THC 排出挙動(冷機始動)

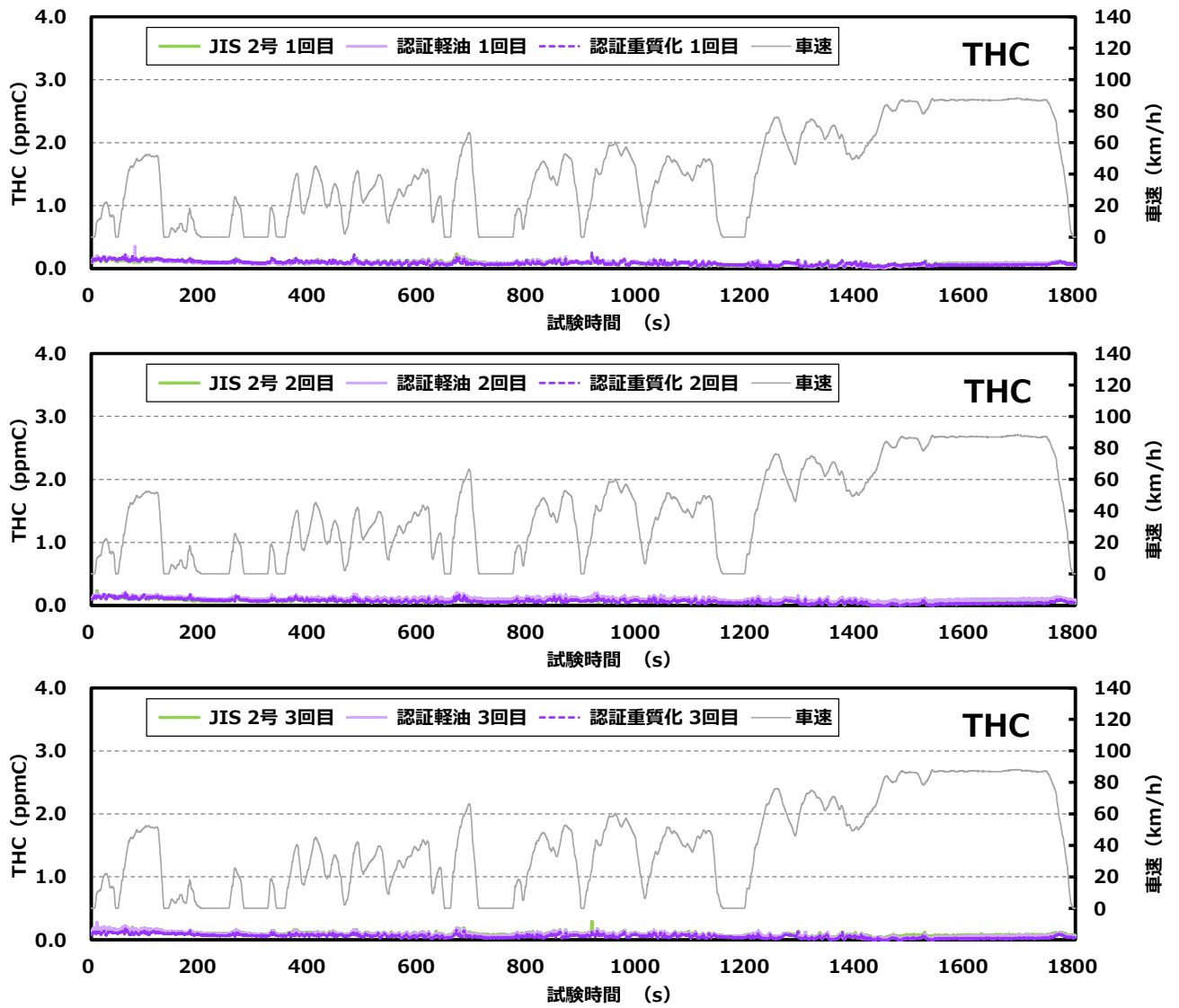
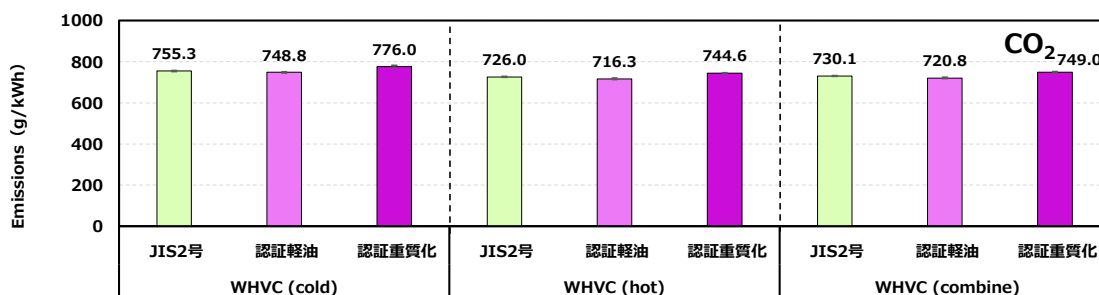


図 3.40 貨物車 B の THC 排出挙動(暖機始動)

(4) CO₂の排出量と排出挙動

CO₂の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.41、走行距離あたりを図 3.42 に示す。また、時系列の排出挙動として、貨物車 A は冷機始動を図 3.43、暖機始動を図 3.44 に、貨物車 B は冷機始動を図 3.45、暖機始動を図 3.46 にそれぞれ示す。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

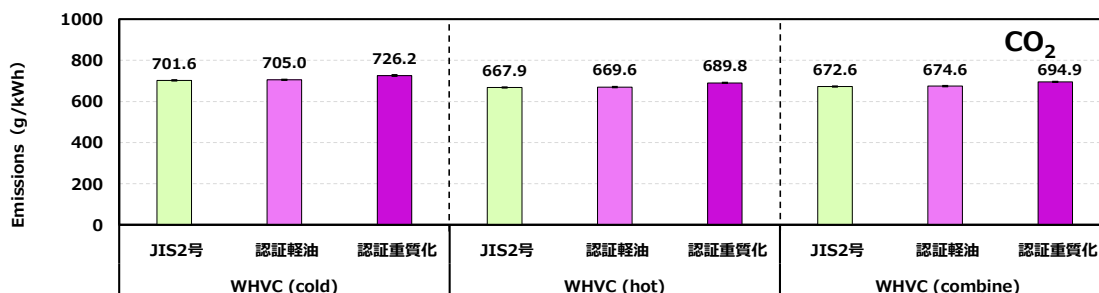
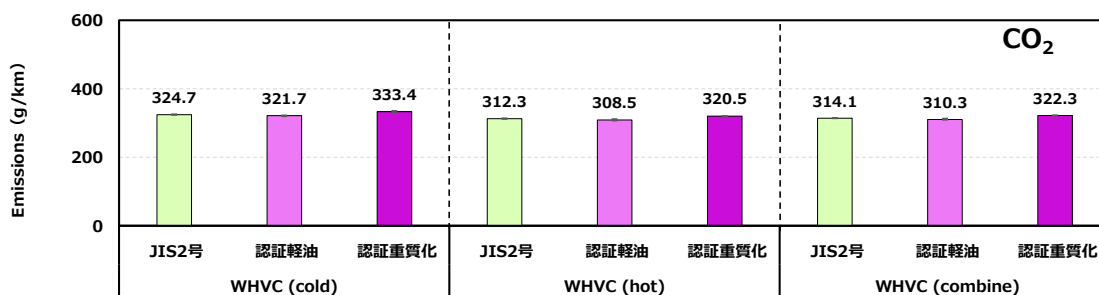


図 3.41 性状が異なる燃料による CO₂ 排出量 (g/kWh) の比較

(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

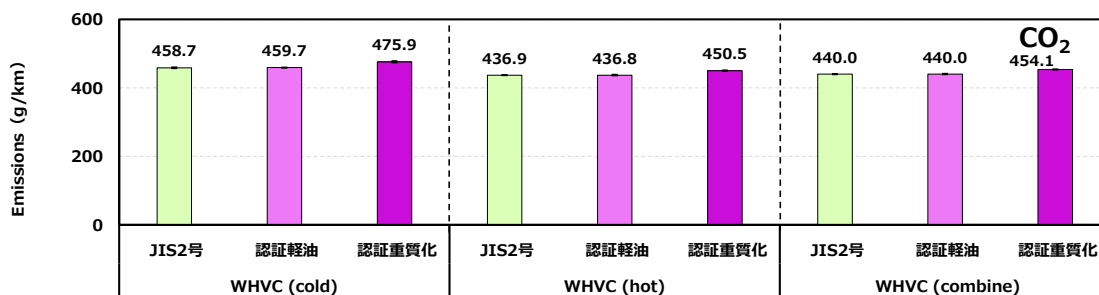


図 3.42 性状が異なる燃料による CO₂ 排出量 (g/km) の比較

(エラーバーは最大・最小を表す)

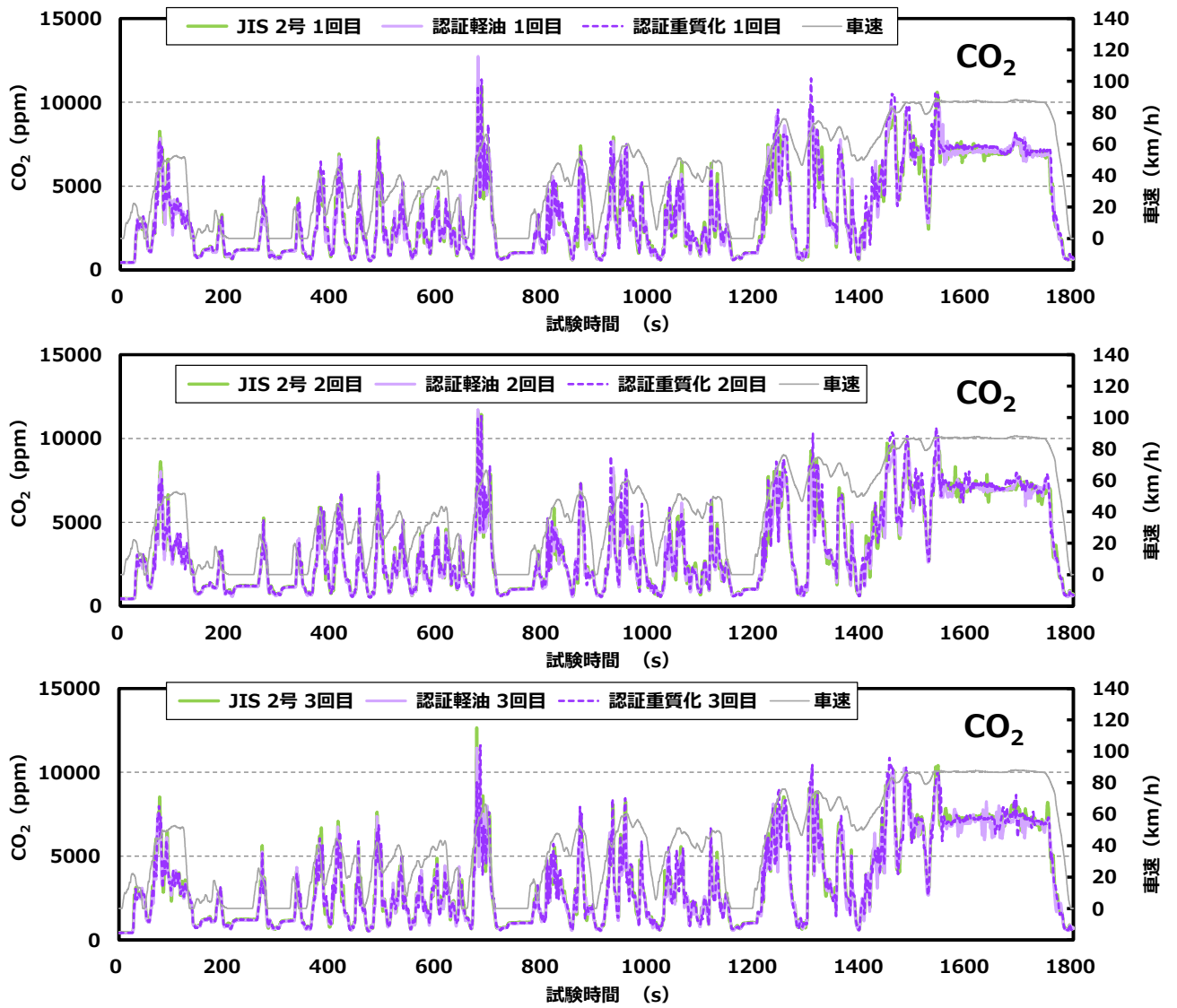


図 3.43 貨物車 A の CO₂ 排出挙動(冷機始動)

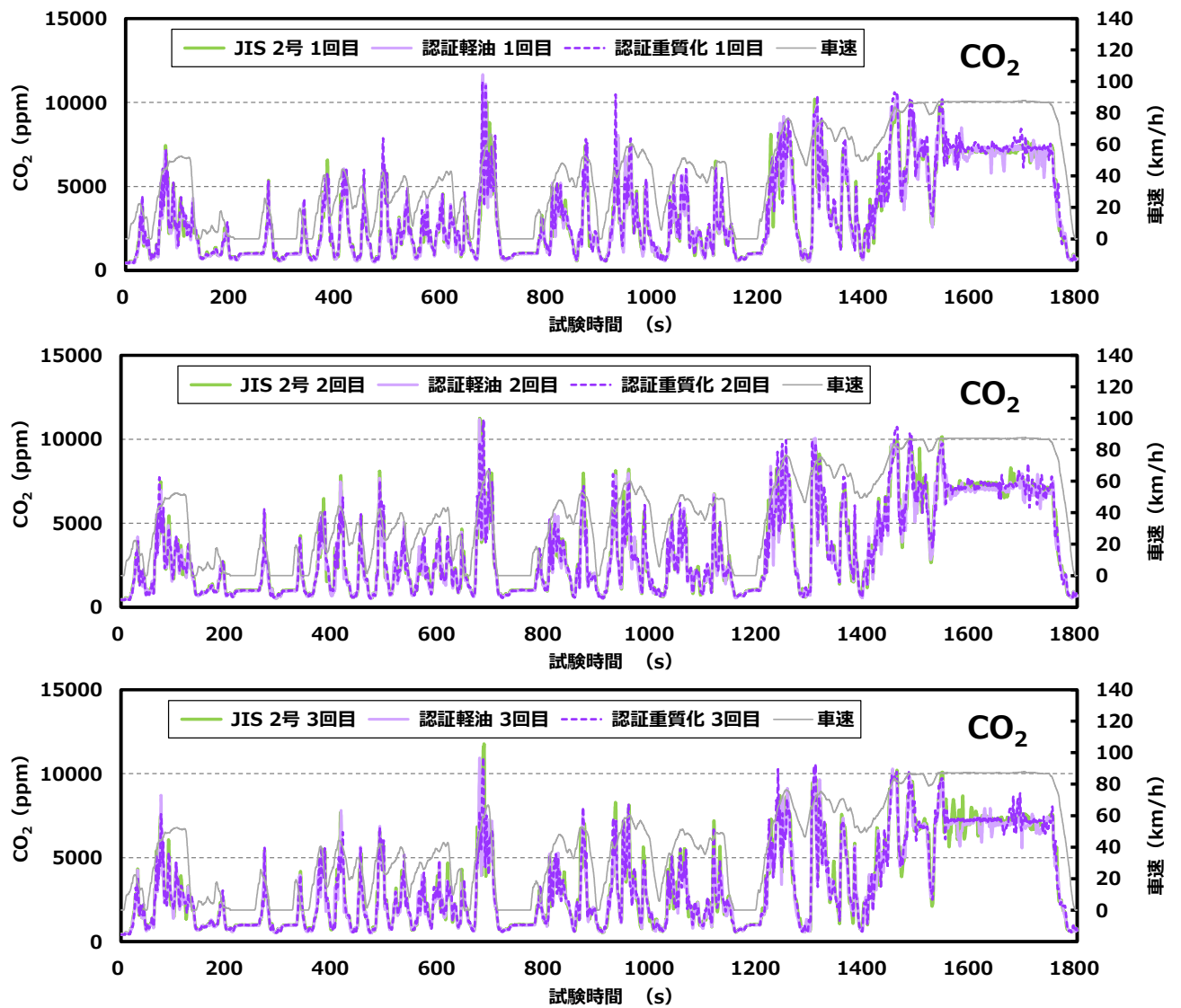


図 3.44 貨物車 A の CO₂ 排出挙動(暖機始動)

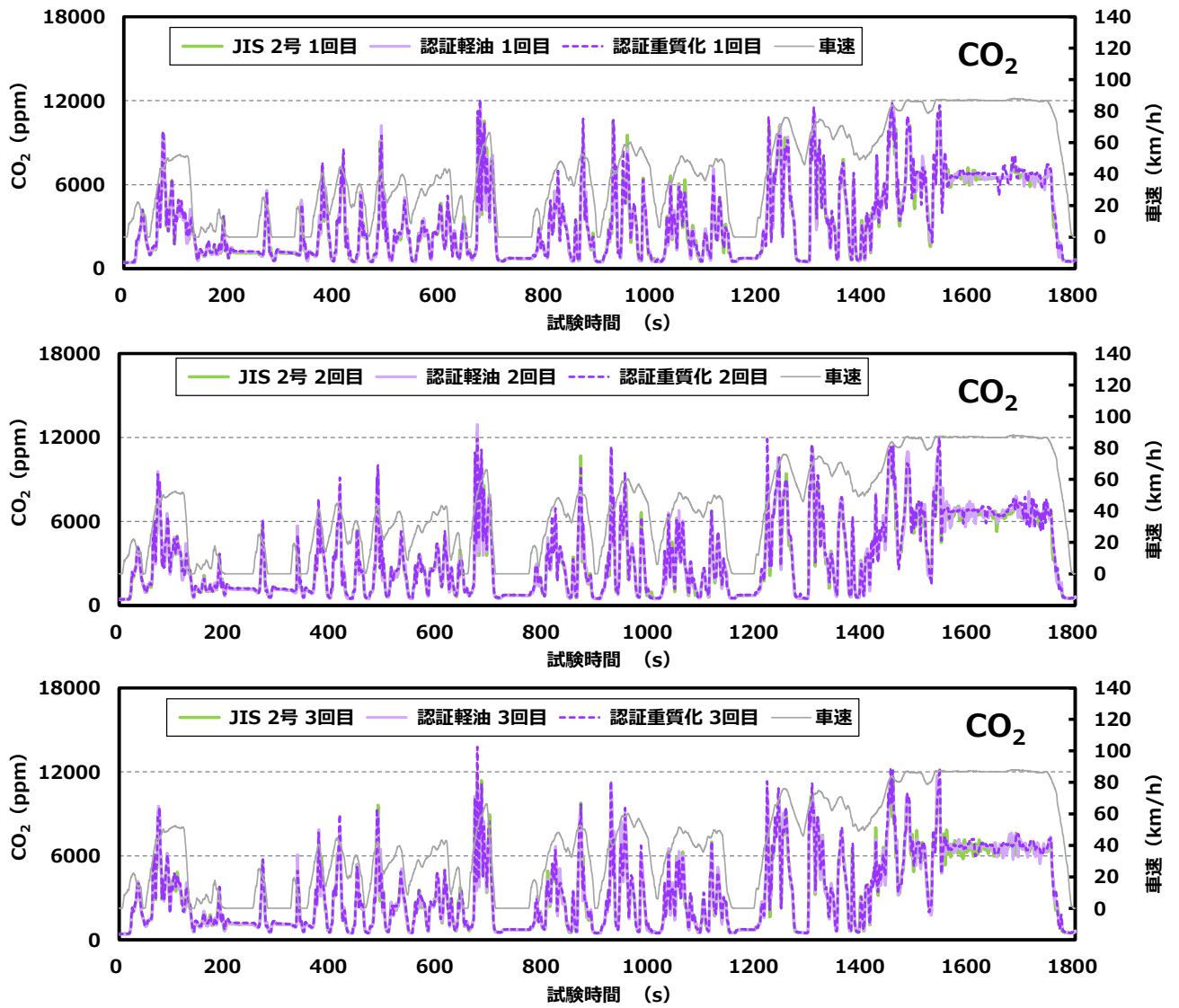


図 3.45 貨物車 B の CO₂ 排出挙動(冷機始動)

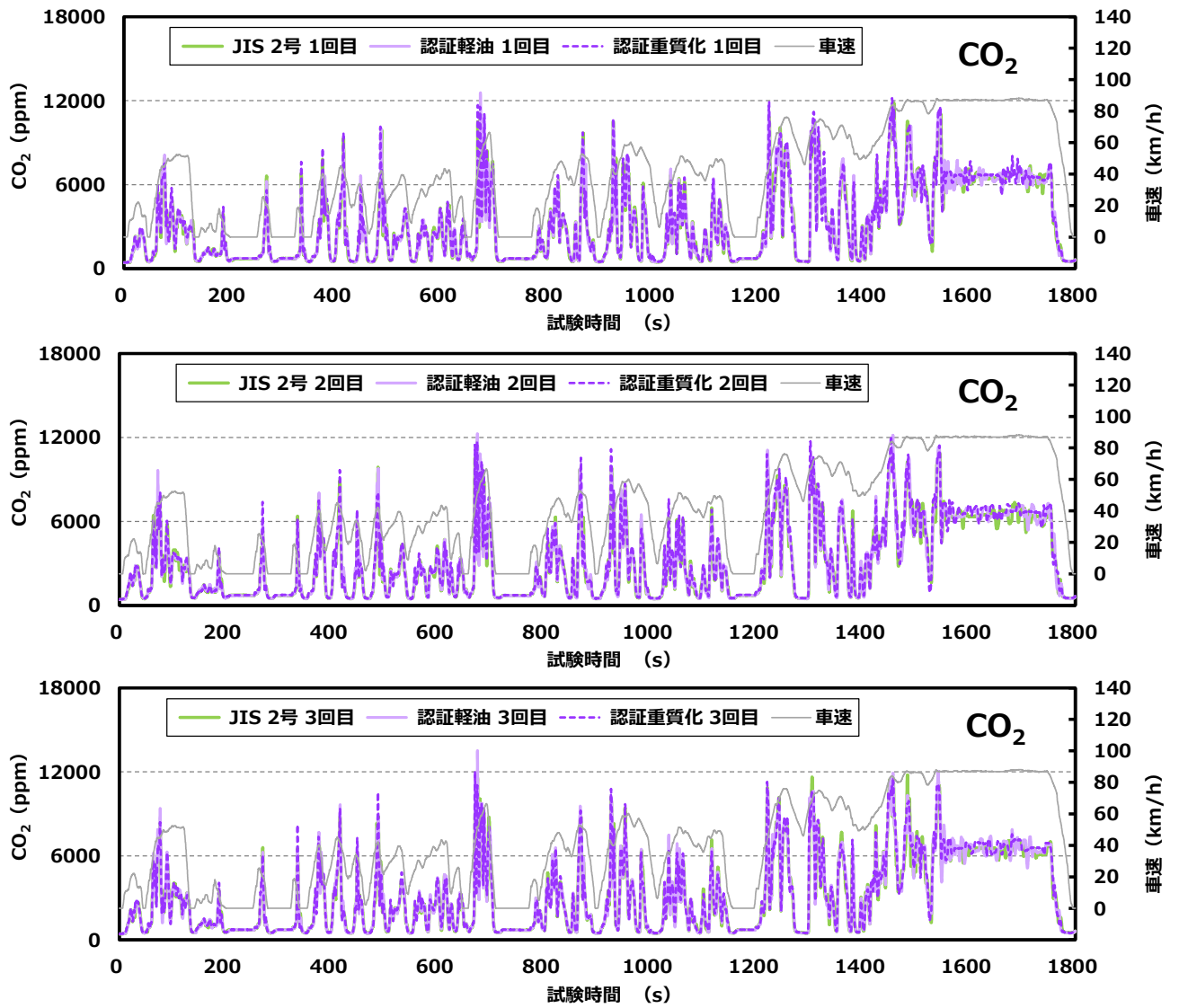
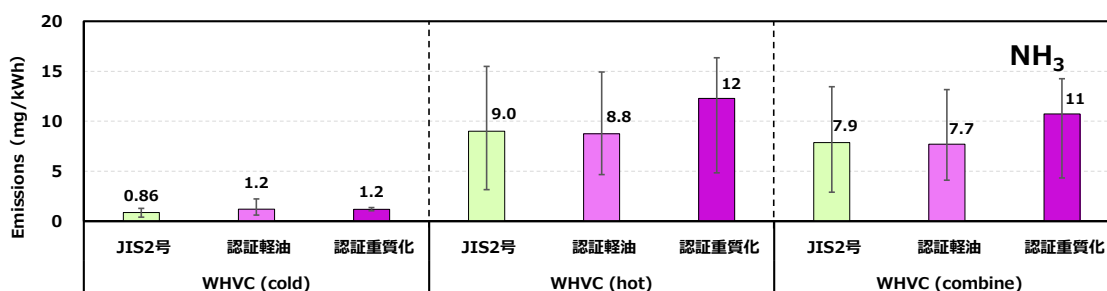


図 3.46 貨物車 B の CO₂ 排出挙動(暖機始動)

(5) NH₃の排出量

NH₃の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.47、走行距離あたりを図 3.48 に示す。貨物車 A では燃料による排出量の違いは見られなかったが、貨物車 B では重質化燃料を用いた場合、始動条件によらず排出量が低くなる傾向が見られた。NH₃はセタン価向上剤ではなく尿素由来の物質で、排出量はアンモニアスリップを防止する酸化触媒による影響を受ける。従って、同じ燃料を用いても、車種や排出ガスの後処理装置によって排出傾向が異なると推測された。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

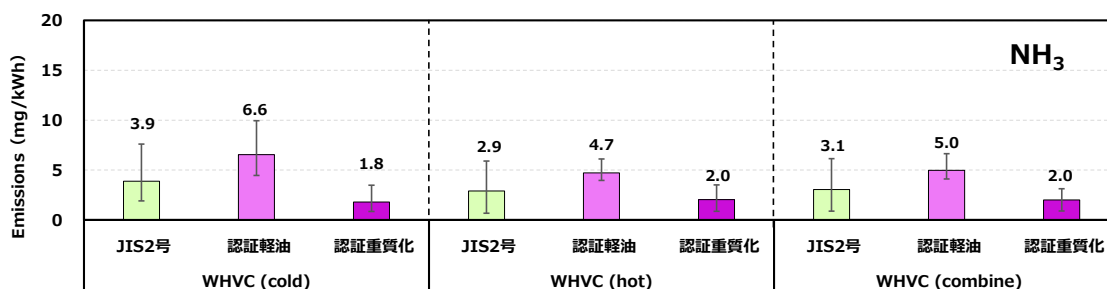
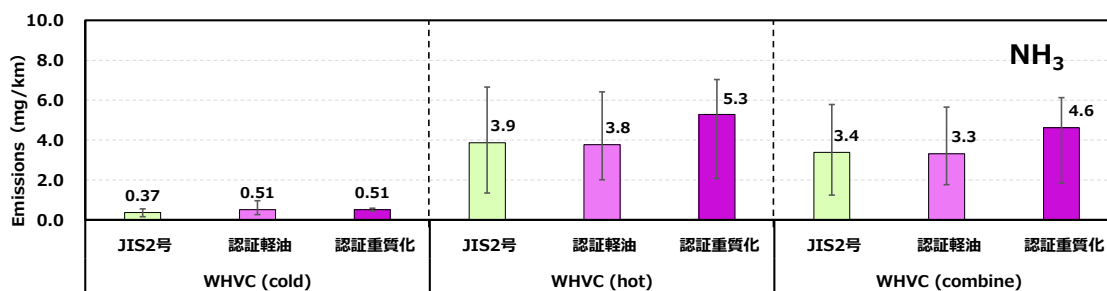


図 3.47 性状が異なる燃料による NH₃ 排出量 (mg/kWh) の比較

(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

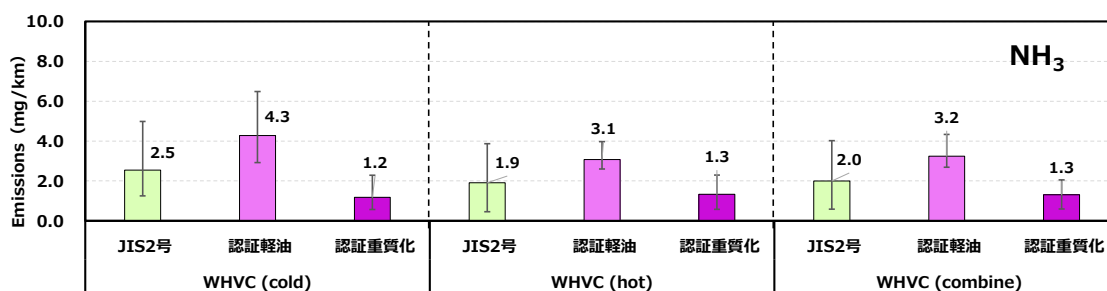
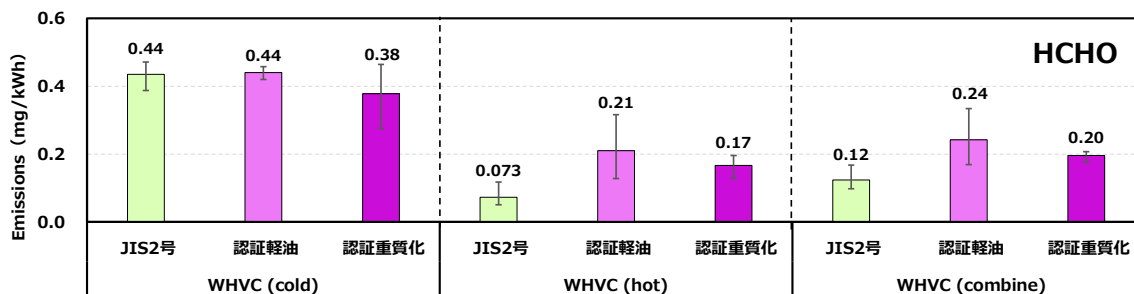


図 3.48 性状が異なる燃料による NH₃ 排出量 (mg/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

(6) HCHO の排出量

HCHO の排出量について、サイクル仕事量あたりを図 3.49、走行距離あたりを図 3.50 に示す。

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

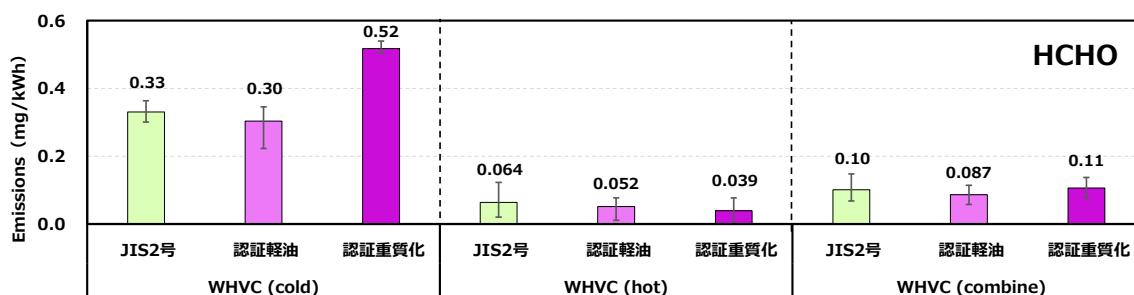
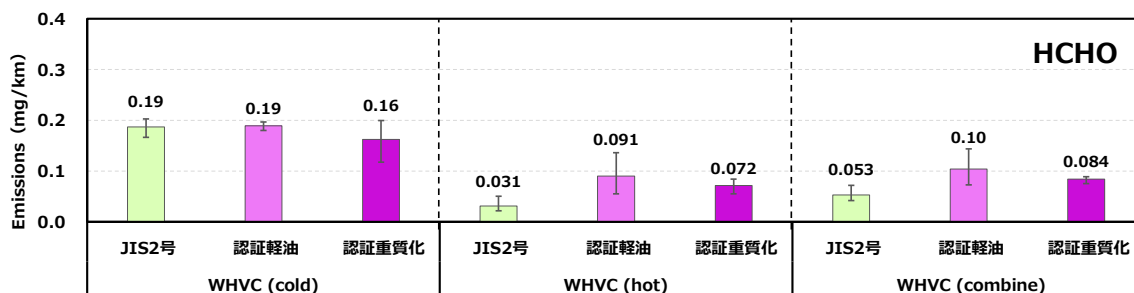


図 3.49 性状が異なる燃料による HCHO 排出量 (mg/kWh) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

【 貨物車 A 】



【 貨物車 B 】

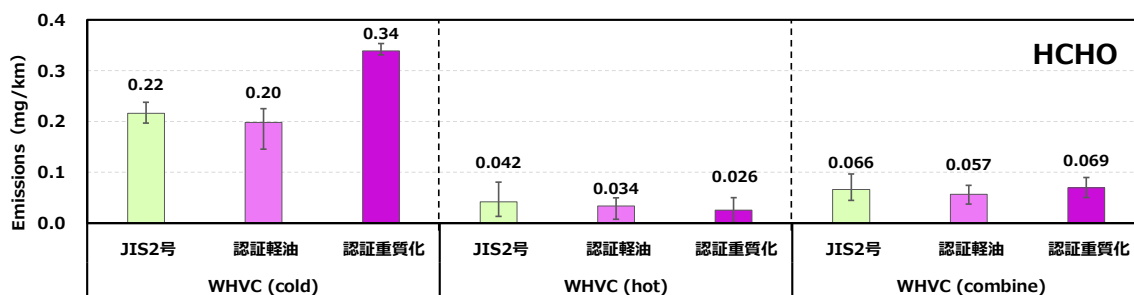


図 3.50 性状が異なる燃料による HCHO 排出量 (mg/km) の比較
(エラーバーは最大・最小を表す)

4. まとめ

軽油への LCO 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。

5. 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。