

ディーゼル車両の排出ガス測定・評価手法の開発

芳賀 一郎* 村上 浩一*

中村 英男* 前橋 心一*

Development of a Method for Measuring and Evaluating Exhaust Emissions from Diesel Railcars

Ichiro HAGA Koichi MURAKAMI

Hideo NAKAMURA Shinichi MAEHASHI

Since pertinent regulations applicable to exhaust emissions on diesel railcars are unavailable currently in Japan, thus, measuring of the exhaust gas at rolling stock yards is not readily possible, it is essential to comprehend the gas emission in terms of reduction countermeasures. Therefore, we initially investigated a current measuring method for exhaust emissions objective to large-size cars. In addition, we made a study on a measuring method relatively easily applicable to exhaust gas emissions on engine bench-test board of JR rolling stock yard, or on running diesel railcars. Then, we introduced measurement into operation of exhaust emission substantially applying this method. In addition, we performed a research applying the frequency of notch and the engine speed area on many commercial trains. Based on the research, we completed an alternative test-cycle for applying the evaluation of the measured results. We hereby introduce these results and suggestions.

キーワード：ディーゼルエンジン，排出ガス，NOx，PM，測定方法，試験サイクル

1. はじめに

日本の鉄道車両用ディーゼルエンジンの排出ガスは、現時点では排出ガス規制がなく、測定の手がかりが非常に少ない。しかし、排出ガス低減対策等の面から、排出実態の把握は重要であり、そのためには検修現場で比較的容易に排出ガスが測定できることが必要である。

そこで、まず大型自動車等を対象とする、既存の排出ガス規制で指定される測定方法を調査した。そして、規制対象排出ガスについて、JRの検修工場等のエンジン台上試験装置（以下、ベンチ試験台）や走行中のディーゼル動車で、比較的容易に実施可能な排出ガス測定手法を開発した。この方法を用いて、ベンチ試験台および走行中のディーゼル動車で実際に排出ガス測定を実施し、その排出実態を調査した。また、多数の営業列車で、走行中のノッチおよび機関回転速度域ごとの使用頻度を調査し、その分析結果を基に、測定値の評価に用いる試験サイクル案を作成した。これらのディーゼル車両の排出ガス測定・評価手法の開発について報告する。

2. 自動車の排出ガス規制と測定方法

自動車の排出ガス規制では、対象の排出ガス成分と規制値および試験方法が指定される¹⁾。ディーゼル自動車の場合、対象の排出ガス成分は、一般に、NOx（窒素酸化物）、CO（一酸化炭素）、HC（炭化水素）、PM（粒子状物質）が指定され、規制値の単位は、大型車の場合「g/kWh」が用いられる。試験方法は、シャシベース（車両単位でシャシダイナモ上で行う）、エンジンベース（エンジン単体でベンチ試験台上で行う）のどちらで行うか、また、運転条件を指定した試験サイクル等が指定される。大型車ではエンジンベースが指定される。

エンジンベースの試験サイクルは、定常モードと過渡モードがある。定常モードの試験サイクルは、エンジンの複数の運転条件（回転速度と負荷率とで示される）と、その各運転条件の測定結果を集計する際の重み係数を指定する。一方、過渡モードの試験サイクルは、加速・減速・停止等を繰り返す走行パターンを指定する。測定は、この走行パターンで走行したものとして、ベンチ試験台上で、エンジンを連続運転する。なお、これらの排出ガス規制や試験サイクルの詳細については、過去の鉄道総研報告^{2), 3)}を参照されたい。

* 車両制御技術研究部（動力システム）

特集：車両技術

3. 鉄道車両の排出ガス測定方法

鉄道車両の排出ガス測定は、シャシベースで行うことが困難であるため、大型自動車と同様、エンジンベースで行うことが適切と考えられる。

そこで、仮設・撤去が容易なこと、必要な精度は確保すること等を考慮して、JR検修工場等のベンチ試験台で実施可能な排出ガス測定方法を考案した。また、排出ガス測定のためだけに車両からエンジンを解装するのは非効率であること、過渡時も含めた排出量の把握のために、走行中の車上測定方法も考案した。

3.1 排出ガスのサンプリング方法の開発

3.1.1 ベンチ試験台測定

排出ガスの測定には、排気管から排出ガスをサンプリングする必要がある。JR 検修工場等での測定を考慮し、ベンチ試験台の排出ガスサンプリング用として、既設の排気管の改造が不要で、取付が容易なサンプリングアダプタを開発した(図1)。これは、排気管のフランジ接続部に挟み込むもので、複数のサンプリング口、温度・圧力等のセンサ取付座をまとめて設けたものである。その設置方法を図2に示す。サンプリングした排出ガスは、このアダプタから、専用のホースで排出ガス測定器まで導く。JR検修工場のベンチ試験台における排出ガス測定器設置例を図3に示す。

3.1.2 走行中の車上測定

車上測定時の排出ガスのサンプリングは、屋根上の排気管先端、または排気管下部の点検蓋から行うこととし、それぞれの取付、加工方法を考案した。サンプリングプローブ取付方法を図4(車両屋根上の排気管先端)と図5

(排気管下部)に示す。また、サンプリング用に作成した排気管下部点検蓋を図6に示す。

3.2 排出ガス測定値の計算処理における課題

各排出ガス成分別の体積濃度(単位はppmなど)は、排出ガス測定器で直接測定されるが、排出ガス規制値は排出率(g/kWh)で示される。体積濃度から排出率の算出には、各排出ガス成分別の排出量(kg/h)と機関出力(kW)が必要である^{4), 5)}。これらの計算処理の流れを図7に示す。この中で、鉄道車両の排出ガス測定値の計算処理における課題は、大気補正の必要性和排出ガス総流量の算出方法であった。

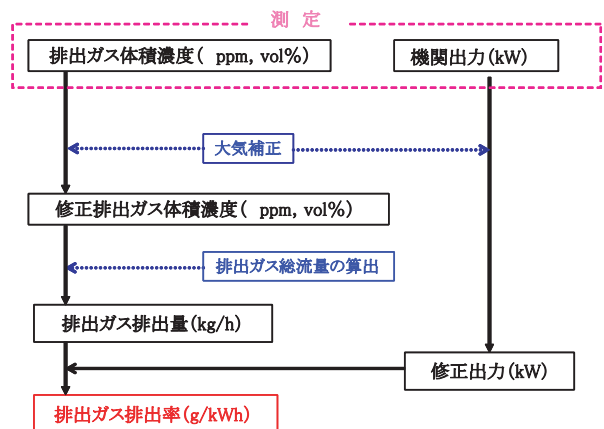


図7 計算処理の流れ

3.2.1 大気補正

NOx濃度は、温湿度の影響を受けやすいので、様々な大気条件下の測定値を同一レベル(標準状態)に修正する大気補正が必要とされる^{4), 5)}。

この補正の必要性を調査するため、鉄道総研ベンチ試

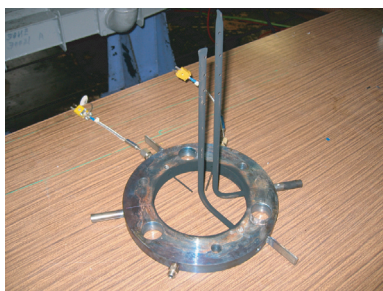


図1 開発したサンプリングアダプタ

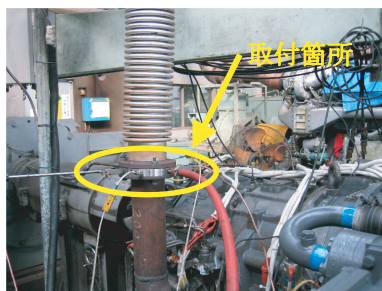


図2 アダプタ設置方法



図3 ベンチ試験台の排出ガス測定



図4 車両屋根上のプローブ取付方法



図5 排気管下部のプローブ取付方法



図6 サンプリング用点検蓋

験台において、同一エンジン・同一運転条件で、年間を通じて様々な大気条件下でNOx濃度を測定した。その測定結果を図8に示す。補正前は、同じ運転条件にも関わらず大きくばらついているのに対し、補正後は概ね同一の値となり、補正の必要性和有効性が確認できた。なお、機関出力も同様に大気補正を行う必要がある⁶⁾。これらの補正のために、大気圧、吸入空気の温度と相対湿度の測定は必須となることがわかった。

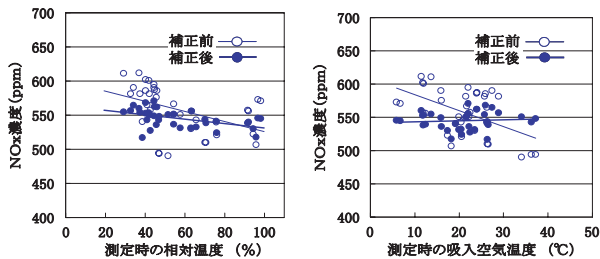


図8 温湿度補正前後の比較

3.2.2 排出ガス総流量の算出方法

各排出ガス成分別の排出量 (kg/h) の算出には排出ガスの総流量値が必要である。しかし、大型ディーゼルエンジンの排出ガスは、大流量、煤が多い、高温、脈動大などのため、排出ガス総流量の直接測定は難しい。

そこで、「排出ガス総流量＝吸入空気量＋燃料消費量」(kg/h) に基づき、吸入空気量を測定し間接的に算出する方法などについて、鉄道総研ベンチ試験台で、以下の3方法を比較検討した。

(1) 吸気管内の空気流速 (風速) 測定による方法

吸気管中心部に小型の風速計を設置して空気流速を測定し、空気密度、配管断面積等から吸入空気量を計算する方法である。しかし、JR 検修工場等のベンチ試験台では、吸入空気をエンジン吸気口から直接取り込むことが多く、車上測定では吸気装置の加工を要するため、いずれも風速計の設置は困難である。

(2) 過給空気の温度、圧力測定による方法

エンジンの給気マニホールド内の温度、圧力測定値から過給空気密度を算出し、シリンダ容積、機関回転速度から吸入空気量を算出する方法である。測定は比較的容易だが、給気マニホールドにセンサ取付用の栓が設置してある必要がある。また、過給空気冷却を行っているエンジンの場合は冷却後の空気を測定する必要がある。この方法は、栓が無い場合には適さない。

(3) カーボンバランス法

炭素バランス法ともいい、エンジンの入側 (吸入空気＋燃料) と出側 (排出ガス) で総炭素原子数は不変という原理に基づく算出方法である。一般にCO濃度測定器はCO₂濃度も測定可能である。規制対象外のCO₂の濃度も測定する必要があるが測定器やセンサの追加を要しないので比較的容易である。

以上の3方法を比較検討した結果、測定が最も容易である点で、カーボンバランス法が最適と判断した。そして、JR 検修工場のベンチ試験台、車上測定では本方法を採用した。

3.3 PM (粒子状物質) の測定

3.3.1 PM の定義

PMは、黒煙や煤と混同され易いが、排出ガス中の全ての粒子状物質をいう。排出ガスには、大気中で冷却すると固化する成分がある。そこで、PMの測定では、排出ガスを一定の温度 (52°C) 以下まで空気で希釈・冷却し、その状態で捕集フィルタに吸着させ、吸着前後のフィルタの重量差からPMを測定する⁵⁾ (フィルタ重量法と呼ばれる) (図9)。

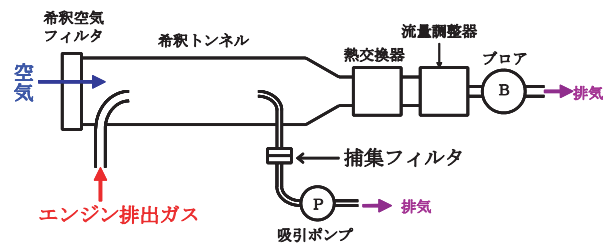


図9 PMの測定方法

3.3.2 PMの測定方法の問題点

前述の希釈は、希釈トンネル、希釈空気の温度調節・流量測定機構などを要し、さらに大型エンジンの排出ガスの全量希釈は困難なので、一部を分流希釈する機構を要する。また、粒子を捕集したフィルタを、一定の時間恒温装置で乾燥後に電子天秤で重量測定するなど、手間と時間を要し、かつリアルタイムの測定ができない。さらに、これらの装置は一般に据付式で高価であり、JR 検修工場等での使用は難しい。

3.3.3 光透過式スモークメータによる測定

そこで、今回、PM測定の代替方法として、光透過式スモークメータ (オパシメータともいう) (図10) を導入した。これは、JR 検修工場等で多く用いられる反射式スモークメータとは異なり、連続測定が可能である。

測定原理は、光源と受光部の間に排出ガスを流し、煤などの微粒子による光源の光強度の減衰量から排気煙濃度を算出する。測定値は、スモークオパシティ (不透過率) (%), または吸光係数 (m⁻¹) で示される。

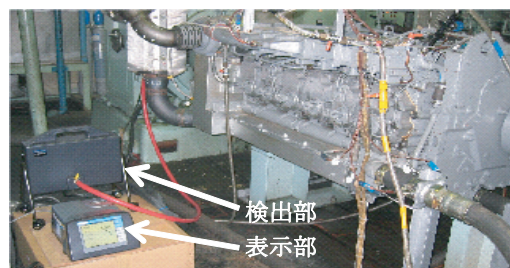


図10 光透過式スモークメータ

特集：車両技術

なお、この光透過式スモークメータと、フィルタ重量法による測定値は、測定原理や単位が異なるので直接比較はできない。しかし、JR 検修工場等のベンチ試験台や車上測定では、設置や測定方法などの面から、このスモークメータによる測定が現実的に限度と考えられるので、今後、PM に換算できるような運転条件、換算方法などを検討する必要がある。

4. 開発した手法による排出ガス測定結果

4.1 ベンチ試験台における排出ガス測定

開発した測定手法を用いて、鉄道総研およびJR 検修工場のベンチ試験台で、新旧のディーゼル自動車用エンジン7形式の排出ガス測定と、既存の試験サイクルによる評価を行った(図11)。使用した試験サイクルは、UIC(国際鉄道連合)とEUの鉄道車両を対象とする排出ガス規制でそれぞれ指定されるFサイクルとC1サイクル³⁾、国内の大型ディーゼル自動車を対象とする2005年までの前回規制(新短期規制)指定のD13Mサイクル²⁾の3種で、いずれも定常モードの試験サイクルである。

測定の結果、エンジン形式による差は、どの試験サイクルでも概ね同じ傾向にあることがわかった。また、NOxの排出率は、どの試験サイクルもほぼ同じ値であるが、COは低回転速度域の排出率が大きいので、低回転速度域のモードを含むD13Mサイクルでは排出率が大きくなることわかった。

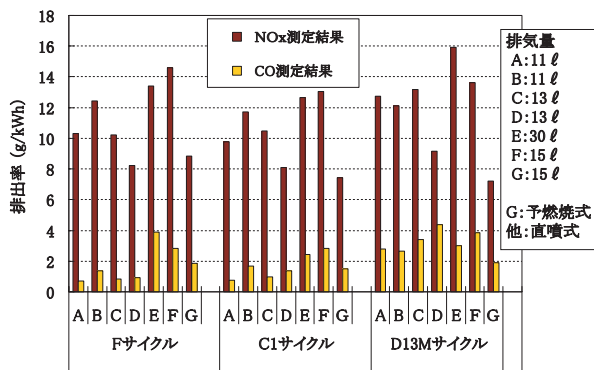


図11 排出ガスベンチ測定結果

4.2 走行中の車上排出ガス測定

約20%の上り勾配を速度約44km/hで均衡走行した時の測定結果を、横軸を時刻にして図12に示す。

測定の結果、力行開始後は、NOxは徐々に増加して安定することがわかった。一方COは、力行開始直後に急激に増加し、その後徐々に減少し安定することがわかった。

また、ベンチ試験結果と比較した場合の課題として、以下の点が明らかになった。

- (1) 測定値の安定に時間を要するので、ベンチ試験台と同等の定常時の測定値を得るには、同一運転条件で

の連続力行走行を要する。

- (2) 上記の工夫が出来ても、任意の機関回転速度に設定するのは困難である。

以上から、走行中の車上測定において、ベンチ試験台測定と同等の定常時の結果を得るのは、現実的には難しいことがわかった。

なお、図で示した単位時間あたりの各排出ガス排出量(kg/h)を積算すれば、その区間での各排出ガスの総排出量(kg)が算出できる。

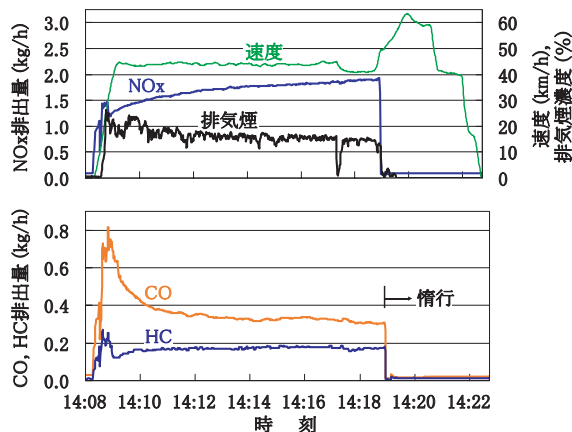


図12 排出ガス車上測定結果

5. ディーゼル自動車用の試験サイクルの作成

試験サイクルは、排気量や出力が異なる各種鉄道用エンジンにおいて、使用実態に即した同一の基準で評価できるように決めておく必要がある。また、国内の大型自動車の試験サイクルは、現行排出ガス規制(新長期規制)からは過渡モードが用いられるが、特殊な制御装置を備えたベンチ試験台を要するので、ディーゼル自動車用試験サイクルは、UICやEUの鉄道車両用排出ガス規制³⁾と同様、定常モードが適切である。

さらに、その運転条件と重み係数は、ディーゼル動車の実際の運転条件、即ち使用頻度の高いノッチ、使用割合の高い機関回転速度域を反映したものが望ましい。

そこで、JRディーゼル動車の実際の運転状態(ノッチ、速度、機関回転速度などの状態。以下、運転データ)を調査し、この調査結果を基に、新たにディーゼル自動車用の試験サイクルを作成した。

5.1 ディーゼル動車の運転データの調査

5.1.1 調査方法

調査は、JR北海道の特急車とJR九州の一般車で行った。測定は、通常の営業運転中、または営業運転とほぼ同一ダイヤの走行試験時の計100本以上の列車で、データロガー等を用いて実施した。調査箇所、列車等を表1に示す。データロガーのサンプリング時間は、1~2secである。

表1 運転データの調査箇所、列車

会社	測定区間、線区	列車種別	車両形式	測定列車数
JR北海道	函館～札幌（函館本線，千歳線）	特急	キハ281	3
”	”	特急	キハ283	2
JR九州	長崎～佐世保（大村線，長崎線等）	快速，各停	キハ200	37
”	大分～由布院（久大線）	各停	”	27
”	大分～豊後竹田（豊肥線）	各停	”	45

5.1.2 集計方法と結果

収集したデータは以下の処理を行った。

- (1) データは列車単位で、ノッチ別、機関回転速度の使用域別に、百分率で集計した。
- (2) JR北海道における収集データは、キハ281系（3本）、キハ283系（2本）を別個に集計した後、両者を単純平均した。
- (3) JR九州における収集データは、大村線・長崎線等、豊肥線、久大線をそれぞれ個別に集計し、3者を単純平均した。
- (4) 最後に、北海道と九州のデータを単純平均した。
- (5) ノッチごとのデータは、測定車両のノッチ数が異なること、実車ではノッチ区分が出力に対して均等になっていないことから、最高ノッチを100%とするトルク換算の負荷率のデータに読み替え、さらにそれを20%刻みの負荷率に換算した。
- (6) 機関回転速度は、便宜的に200rpm刻みで集計した（例：1100rpm～1300rpmのデータは1200rpmに集約）。

図13に、負荷率と機関回転速度の使用域別の、運転データ集計結果を示す。円の大きさは使用頻度を示す。停車中のデータは含まない。負荷率0%はアイドルングを示す。

また、既存の試験サイクル3種を図14に示す。円の位置が運転条件、大きさは重み係数を表す。

調査結果から、高ノッチとアイドルングの割合が高いこと、既存の試験サイクルとはかなり異なることなどがわかった。

5.2 試験サイクルの作成

5.2.1 基本的考え方

調査結果を基に、ディーゼル動車用試験サイクルを作成することとした。作成にあたっては以下の点に留意した。

- (1) 運転データの調査結果を最大限反映させる。
- (2) 試験条件（モード）数をあまり増やさない。特に、ベンチ試験台での通常の性能確認時の試験条件以外のものはなるべく避ける。
- (3) 検証は、ベンチ試験データを用いる。

5.2.2 試験サイクル案

表2と図15に、運転データ集計結果から作成した試験サイクルのA～D案を示す。円の大きさは各運転条件（モード）の重み係数を示す。

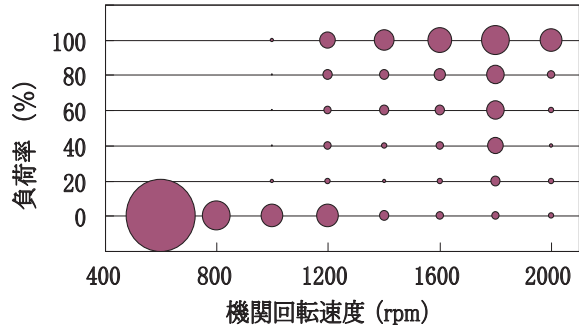


図13 運転データ集計結果

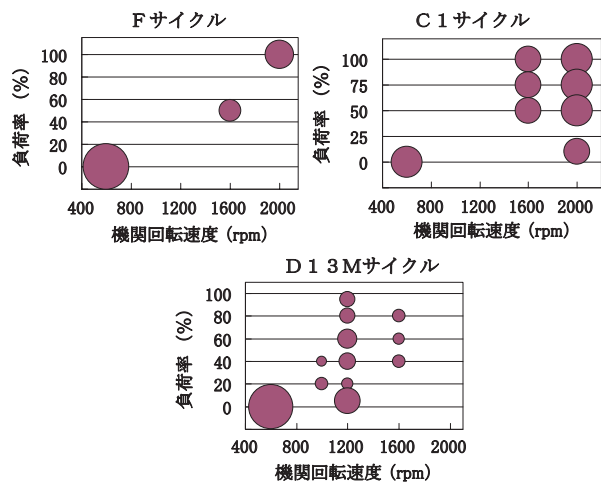


図14 既存の試験サイクル

また、図16に、2形式のエンジンの実測値に基づいた、既存の試験サイクル（FおよびC1サイクル）（図14）と今回作成した4つの試験サイクル案による、NOxとCOの排出率の集計結果を示す。なお、「全モード集計」とは、各エンジンの全ての運転条件の測定結果を、運転データ集計結果（図13）を用いて集計したものである。集計結果がこの値に近いほど、実態を反映した試験サイクルといえる。

こうして解析された図16が示すように、試験サイクル案を用いれば、既存の試験サイクルよりも実態に近い評価ができたことがわかる。ただし、NOxはどの試験サイクル案も概ね実態を反映しているが、COはやや乖離が認められる。また、COは低回転速度域の排出量が大きいため、低回転速度域のモードを含むB案、C案で、COの排出率が大きく示された。

今後は、より多くの車両や線区で運転データを収集し、試験サイクル案の絞り込みや改良を図る予定である。

特集：車両技術

表2 試験サイクル案

案	モード	機関回転速度 (rpm)	負荷率 (%)	重み係数
A	1	ローアイドル	-	0.568
	2	1400	100	0.078
	3	1600	100	0.123
	4	1800	100	0.159
	5	1800	60	0.072
B	1	ローアイドル	-	0.568
	2	1200	100	0.049
	3	1400	100	0.069
	4	1600	100	0.109
	5	1800	100	0.141
	6	1800	60	0.064
C	1	ローアイドル	-	0.568
	2	1200	100	0.058
	3	1400	100	0.082
	4	1600	100	0.127
	5	1800	100	0.165
D	1	ローアイドル	-	0.568
	2	1400	100	0.094
	3	1600	100	0.147
	4	1800	100	0.191

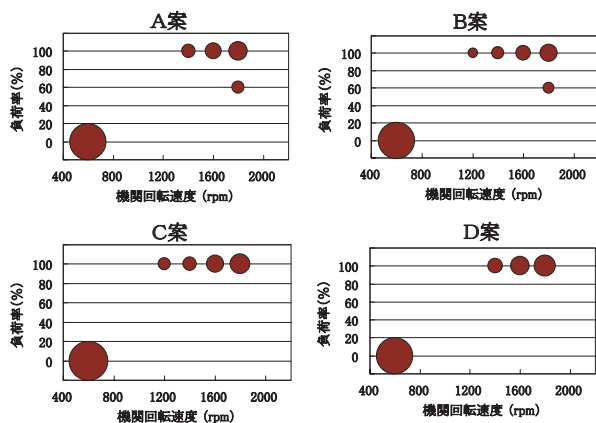


図15 試験サイクル案

6. まとめ

- (1) JR検修工場等のベンチ試験台や走行中のディーゼル動車で比較的容易に実施可能な排出ガス測定手法を開発した。
- (2) その手法を用いてJRディーゼル動車の代表的エンジン7形式の排出ガスのベンチ測定を行い、既存の複数の試験サイクルを用いて評価した。その結果、エンジン形式による差は、どの試験サイクルでも概ね同じ傾向にあることなどがわかった。
- (3) 走行中の車上測定を実施した。その結果、ベンチ試験台測定のような定常時の結果を得るのは難しいことがわかった。
- (4) JRディーゼル動車の運転データを調査し、それを基に、排出ガス測定値の評価に用いる試験サイクル案を作成した。この試験サイクル案を用いれば、既存の試験サイクルに比べ、排出実態に近い評価が可能

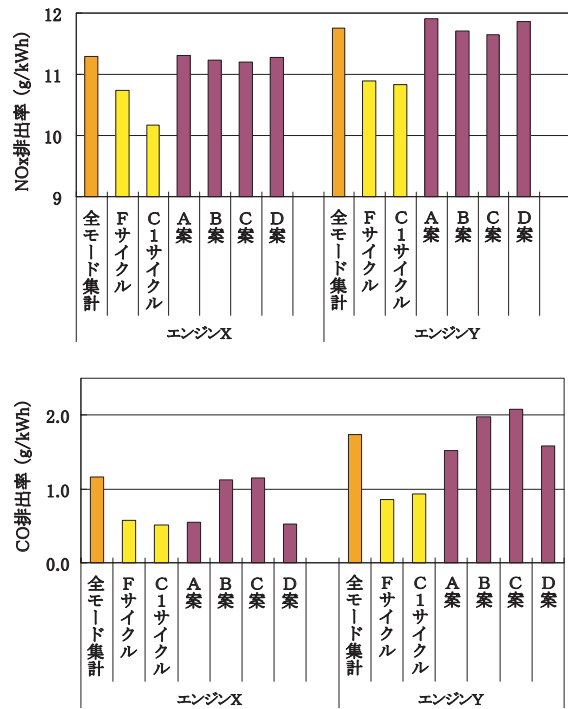


図16 各試験サイクルによる評価

となる。

7. おわりに

本報告では、JR工場等の検修現場で比較的容易に実施可能な排出ガス測定手法、JRディーゼル動車の使用実態に即した排出ガス評価方法の開発について述べた。今後は、PMの簡易測定方法、鉄道車両に適した低減対策、ディーゼル機関車用試験サイクルなどを検討、実施する予定である。

文献

- 1) 大気汚染防止法第19条に基づく「自動車排出ガスの量の許容限度」(昭和49年1月21日 環境庁告示1号)
- 2) 村上, 芳賀他: 国内の排出ガス規制動向, 鉄道総研報告, vol.19, No.5, 2005
- 3) 中村, 芳賀他: ディーゼル車両の排出ガス規制の動向: 鉄道総研報告, vol.20, No.7, 2006
- 4) JISD1030 「自動車-排気ガス中の一酸化炭素, 二酸化炭素, 全炭化水素および窒素酸化物の測定」
- 5) JISB8008-1 「往復動内燃機関-排気排出物測定-第1部: ガス状物質および粒子状物質の台上測定」
- 6) JISD1001 「自動車用エンジン出力試験方法」, JISB8002-1 「往復動内燃機関-性能-標準大気条件, 出力・燃料消費量・潤滑油消費量の表示及び試験方法」など