

Ⅱ-3 ディーゼルエンジン複合脱硝システム試験装置の製作

前節で述べた複合脱硝システム試験装置の基本仕様に基づき、まずディーゼルエンジンの選定を行い、このエンジンをエンジン性能試験装置（エンジンダイナモ）に設置し、EGRシステムと還元剤供給装置および脱硝触媒反応層をセットしたシステム試験装置を製作した。

1. ディーゼルエンジンの選定

エンジンの選定は下記の条件を考慮して実施した。
以下に選定条件を示す。

- 条件1 長期規制適合または適合可能なエンジンであること。
 - 条件2 最高負荷量の60%運転時の排ガス温度が400℃以上であること。
 - 条件3 複合脱硝システムが搭載可能であること。
 - 条件4 エンジン技術が公開されており、エンジン部品が入手可能であること。
 - 条件5 エンジン最高出力が負荷用動力計の稼働範囲であること。
- 最後の条件は、利用可能な試験設備からの制約である。

① エンジンの選定

H社製NA（自然吸気）エンジン2機種と過給器付きエンジン1機種を選定候補し、比較検討した。

表3-1にJO5C型とJO8C型NAエンジンと、JO5C-TI型過給器付きエンジン（インタークーラ付き）の主要諸元を示す。

JO5C型とJO8C型エンジンは平成6年度規制適合の新型エンジンで、吸気スワール、燃料噴射時期、燃料噴射圧などの燃焼改善対策を積極的に行っており、既存エンジンより大幅にNO_x排出量を削減していた。特に、JO8C型は他のエンジンより排気量が高く、また燃料噴射ポンプに電子制御式（コモンレール式）噴射装置を採用し、燃料を高圧噴射しているため、燃焼効率が高く、PMの排出量が低いといわれている。しかしながら、このエンジンは試作段階であり、現時点では、本研究に採用できなかったが、他のエンジン（JO5C型）は一部の車種で市販されていた。過給器付きエンジン（JO5C-TI型）はJO5C型NAエンジンに過給器を付けた機種であり、市販もされている。したがって、入手可能なエンジンは、今後の改良により長期規制適合が可能なJO5C型エンジンが有望であった。

② 最高負荷量の60%運転時に排ガス温度が400℃以上であること

本複合脱硝システムは、中低負荷域ではEGR運転、また高負荷域では脱硝触媒反応器によりNO_x排出量の低減化を目指しているため、排気温度は脱硝触媒の性能を左右する重要な因子である。特に、高負荷域の排気温度が大きく影響する。

JO5C型とJO8C型NAエンジン、JO5C-TI型過給器付きエンジンについて負荷率と排気温度の関係をみると、JO8C型とJO5C型NAエンジンの排気温度はほぼ同一挙動を示すことから、JO8C型エンジンとJO5C-TI型過給器付きエンジンで比較した。JO8C型エンジ

表3-1 選定候補エンジンの主要諸元

	NAエンジン		過給器付きエンジン
型 式	JO5C	JO8C	JO5C-TI
総排気量(L)	5.307	7.961	5.307
最高出力(kW/rpm)	107/2900	140/2900	129/2900
燃料噴射ポンプ	電装NL型	電子式	列型

ンは、定置走行の目安となる1740rpm（最高回転数2900rpmの60％に相当）のとき、エンジン負荷60％以上の排気温度が400℃以上であり、さらに、回転数が上がるとエンジン負荷50％でも触媒作用温度範囲に達すると考えられた。

一方、JO5C-TI型エンジンは、エンジン回転数が高くなるほど、排気温度が低くなる傾向である。エンジン回転数1620rpm（最高回転数2900rpmの60％に相当）のとき、エンジン負荷が80％以上でなければ400℃以上に達せず、さらに回転数が上がっても排気温度はそれほど高くないことがわかった。両者の排ガス温度をエンジン13モードの各モードごとに整理すると、表3-2に示すとおりである。脱硝触媒の作用温度を400℃以上とした場合、JO8C型エンジンではモード8～12の領域、JO5C-TI型エンジンではモード10～12が脱硝触媒作用範囲となることがわかった。

以上のことから、脱硝触媒反応器の性能を発揮させるには、過給器付きエンジンよりもNAエンジンの方が適していると考えられた。

③ 複合脱硝システムが実車に搭載出来るか

前項では排気温度を基準にして、NAエンジンと過給器付きエンジンを比較し、開発した脱硝触媒が高温型（400℃以上）であることから、NAエンジンが有望とした。しかし、さらなる低公害エンジンは、NAエンジンから過給器付きエンジンまたは過給器+EGR付きエンジンに移行すると予想される。そこで、過給器とEGRを併用した検討例¹⁾²⁾を調べた結果、以下の知見が得られた。

①過給器により、PM排出量は大幅に低減したが、逆にNO_x排出量は増加。

②過給器とEGRの併用によりNO_xとPMとのトレー

表3-2 NAエンジンと過給器付きエンジンの排気温度の比較

モード	運 転 条 件		JO8C		JO5C-TI	
	回転数 (%)	負荷 (%)	回転数 (rpm)	排気温度 (℃)	回転数 (rpm)	排気温度 (℃)
1	IDOL					
2	40	20	1160	150	1080	180
3	40	40	1160	160	1080	270
4	IDOL					
5	60	20	1740	210	1620	200
6	60	40	1740	300	1620	280
7	80	40	2320	330	2160	270
8	80	60	2320	450	2160	330
9	60	60	1740	400	1620	350
10	60	80	1740	520	1620	410
11	60	95	1740	630	1620	440
12	80	80	2320	560	2160	400
13	60	5	1740	140	1620	140

① 回転数(%)：最高出力時の回転数に対する割合。

② 負荷 (%)：全負荷に対する割合。

③ JO8CとJO5Cの回転数：最高出力時の回転数と各モード回転比から算出。

ドオフ関係の改善が示唆された。

③吸気温度の上昇はNO_x排出量を増加。

④EGRと過給器を適切に制御する技術の確立が必要。

このことから、過給器とEGRを組み合わせるだけでNO_x低減率は約20%になると推定されるが、さらなるNO_x低減化を実行するには脱硝触媒の利用が不可欠と思われた。しかし、これには脱硝触媒の作用温度範囲（Window）の拡大と低温活性が必要である。また過給器とEGRとの併用技術が未確立などの問題点もある。したがって、技術の達成度、EGR制御の簡素化および排気温度と触媒作用範囲の関係を考慮すると、現状では、本試験装置用エンジンにはNAエンジンが最適と思われた。

●文献

- 1) 下形, 大聖, 内田, 斉藤: 内燃機関シンポジウム講演論文集 Vol.111, 457-462 (1993)
- 2) 鈴木, 小池, 小高: 交通安全公害研究所講演集 Vol.23, 77-80 (1993)

④ エンジン技術が公開され、エンジン部品の入手可能か

複合脱硝システムの性能試験を実施するにあたり、エンジンの一部分を改造する必要がある、そのためにはエンジン技術の公開とその部品の入手が可能でなければならない。NAエンジンであるJO8C型とJO5C型を比較すると、前者は当時市販されておらず、部品、必要情報の入手はきわめて困難であった。したがって、JO5Cを選定することとなる。

このエンジンと負荷用動力計の性能を比較すると、動力計の吸収馬力、吸収トルクとエンジンの最大出力、最大トルクが仕様値を満たしていた。

(W型渦電流動力計) W130型渦流動力計

最大吸収馬力 (kW (PS)) 130 (177)

最大吸収トルク (N・m) 400

最大回転数 (rpm) 10,000

(NA型エンジン) JO5C型

最高出力 (kW (PS)/rpm) 107 (145)/2900

最大トルク 373 (38)/1700

(N・m (kgf・m)/rpm)

⑤ まとめ

複合脱硝システム用エンジンは、NAエンジン2機種と過給器付き (TI) エンジン1機種について、排気温度、EGRとの適合性、技術資料と部品類の入手および渦流動力計との適合性などを検討した結果を表3-3に示す。

以上の比較により、本複合脱硝システム試験装置用ディーゼルエンジンとしてJO5C型NAエンジンを選定することとした。

表3-3 エンジン選定条件に対する各エンジンの適合性

	JO5C	JO8C	JO5C-TI
条件1	△*1	○	△*1
条件2	○	○	×
条件3	○	○	△*2
条件4	○	×	○
条件5	○	×	○

2. 試験装置の製作

前節で選定したJO5C型NAエンジンをエンジン性能試験装置に設置し、このエンジンにEGRシステムと触媒反応器、軽油還元剤供給装置などをセットした。

製作した複合脱硝システムの基本仕様を下記の表3-4に示す。

エンジン性能試験装置全体のフローシートを図3-1に、エンジンおよびエンジン試験装置を図3-2～図3-4に示す。エンジンと負荷用動力計はユニバーサルジョイント付きプロペラシャフトで連結した。

なお、エンジンにはクラッチ、トランスミッションを設置せず、ユニバーサルジョイントの片方にはエンジンのフライホイールのジョイントカップリングに取り付け、もう一方には負荷用動力計の主軸に取り付け、その中間にゴム製カップリングを設けた。

表 3-4 複合脱硝システムの基本仕様

ディーゼルエンジン 種 類 排気量 (cc) 最高出力 (PS/rpm) 最大トルク	平成 6 年度規制適合 (日野自動車製) 水冷 4 気筒直接噴射式 5,307 145/2900 373 (38) / 1700 (N・m (kgf・m) / rpm)
動力計 最大吸収馬力 (PS) 最大吸収トルク (N・m) 最大回転数 (rpm)	W130 型渦流動力計 (東京衡機製作所製) 180 400 10,000
EGR 作動方式 作動範囲 循環率 (EGR 率)	手動式 最大負荷率の 60% 以下、排気温度 400℃ 以下 0~50%
脱硝触媒反応器 形状 作動範囲 触媒体積	球状、ハニカム状 最大負荷率の 60% 以上、排気温度 400℃ 以上 11 L
還元剤	軽油燃料 (S<0.05%)

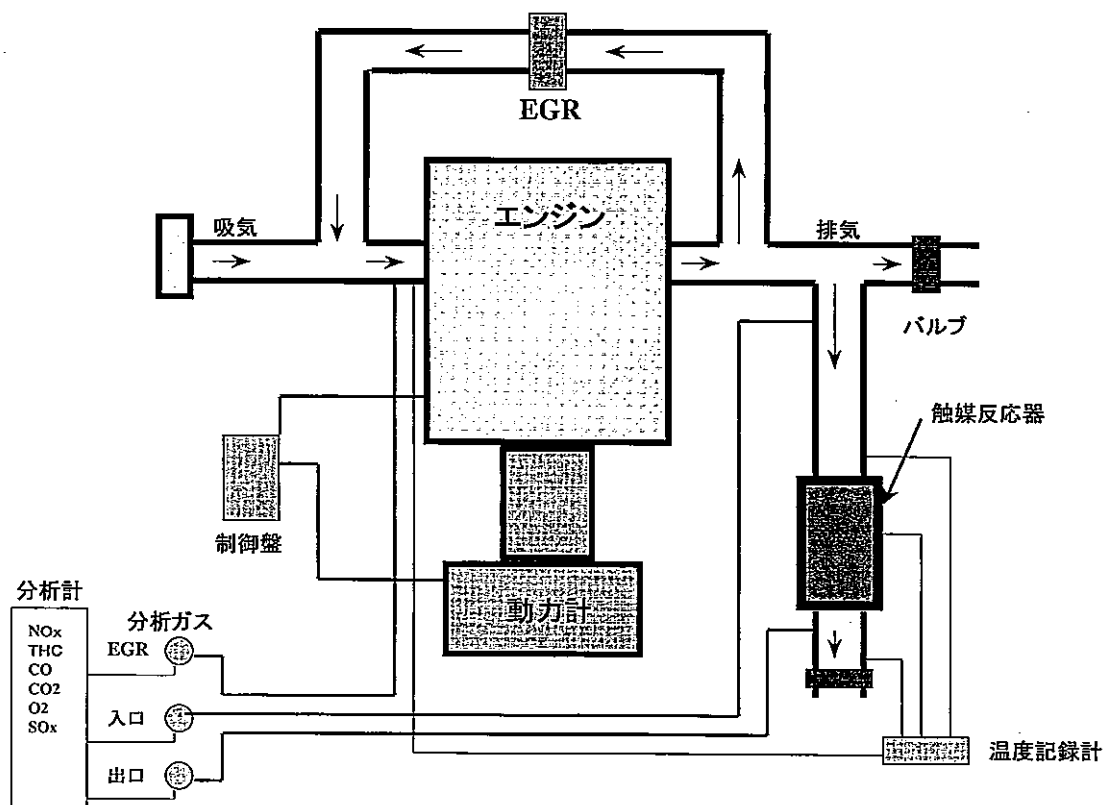


図 3-1 複合脱硝システム試験装置のフローシート

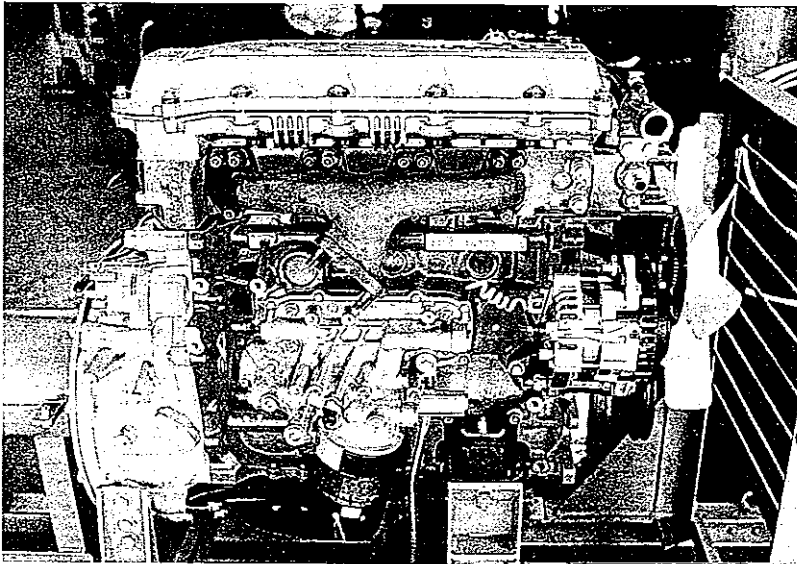


図 3-2 試験装置用ディーゼルエンジン
本体 (JO 5 C型、排気側より)

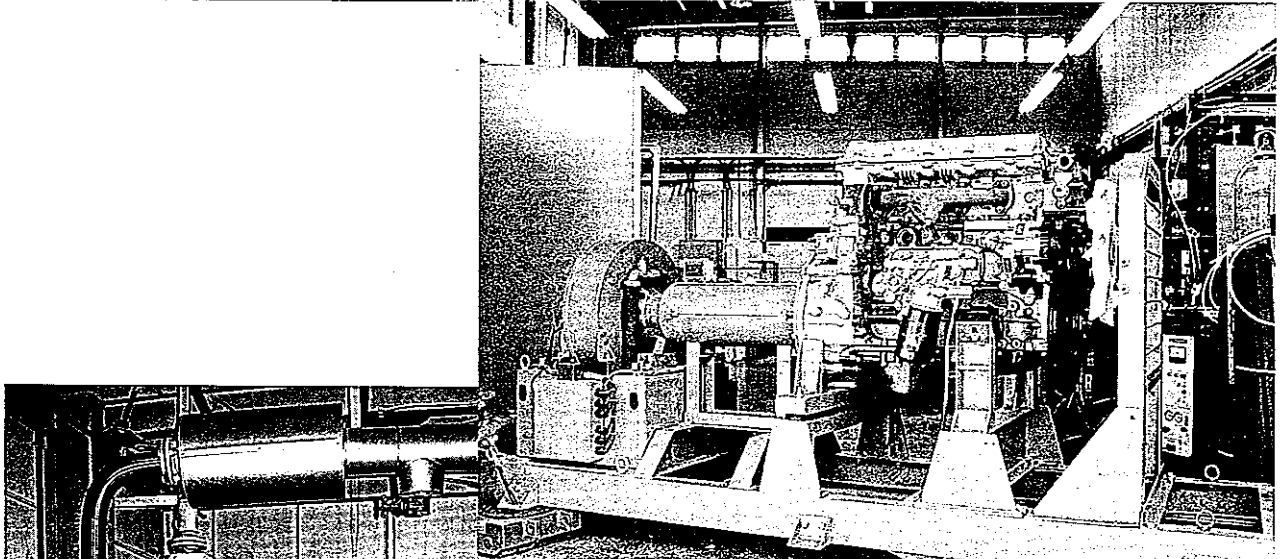


図 3-3 ディーゼルエンジンと負荷用動力計

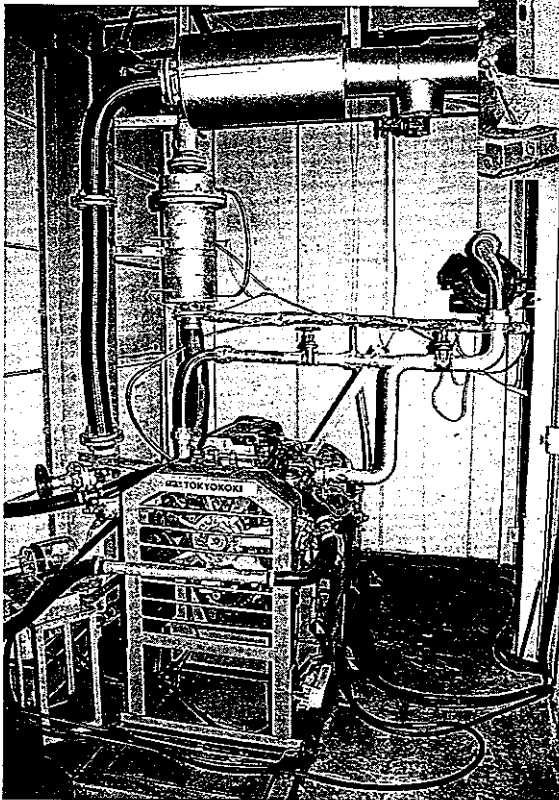


図 3-4 ディーゼルエンジン複合脱硝システム
試験装置

運転制御と計測用制御盤には、エンジンスタート・ストップスイッチ、スロットルレバー等のエンジン調節系とエンジン回転数、負荷量、燃料消費量計測およびエンジンオイル温度、吸・排気温度、冷却水温度の監視系を設置した。

エンジンおよび動力計の冷却系は、図3-5～図3-6に示すとおり、エンジン室外に循環式冷却用水層（容積約 1 m^3 ）を設け、その水槽内にエンジン用（1セット）と動力計用（2セット）の冷却用ラジエータを固定し、動力計用には、動力計と冷却用ラジエータの中間に空冷器を設置した。

EGRシステムでは、EGR配管は吸気マニホールド配管と排気マニホールド直後の配管に連結し、その配管（ID43m/m）の中間にEGR率調節用バルブを設置

した。また脱硝触媒反応器は、排気マニホールドから3m後方に設置した。

軽油還元剤供給位置は吸気・排気マニホールドに各1カ所ずつと燃料噴射ノズル（サックボリューム）によるシリンダ内への直接供給の3カ所とし、吸気・排気マニホールドへの供給は定量ポンプにて所定量の軽油燃料を注入した。

排気系は、排気マニホールド後方で排気管（ID76m/m）を二方向に分割し、一方の配管には触媒反応器を、他の一方は直接エンジン室外への放出用とした。

分析ガスと黒煙のサンプリングは、排ガス用加熱配管（ 250°C ）を用い、触媒反応器の前後とEGRガスの3カ所とした。また黒煙採取口は触媒反応器前後に各1カ所ずつ設けた。

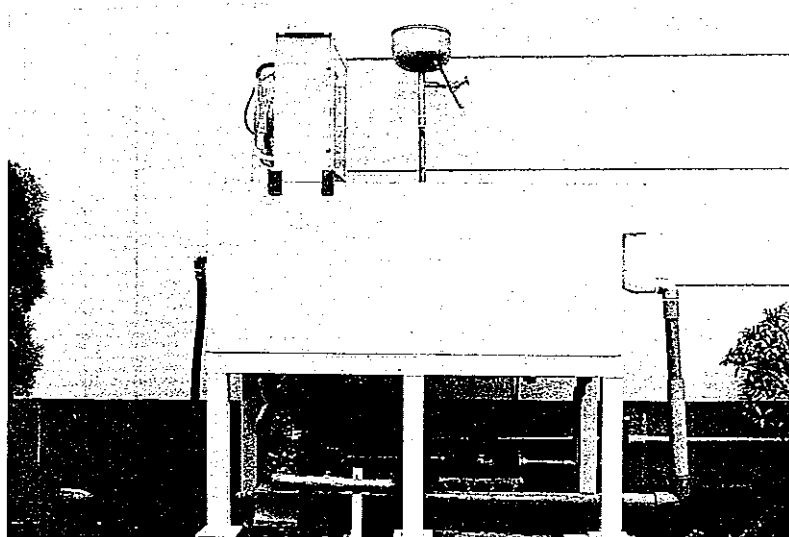


図3-5 エンジンと動力計の冷却装置の全景

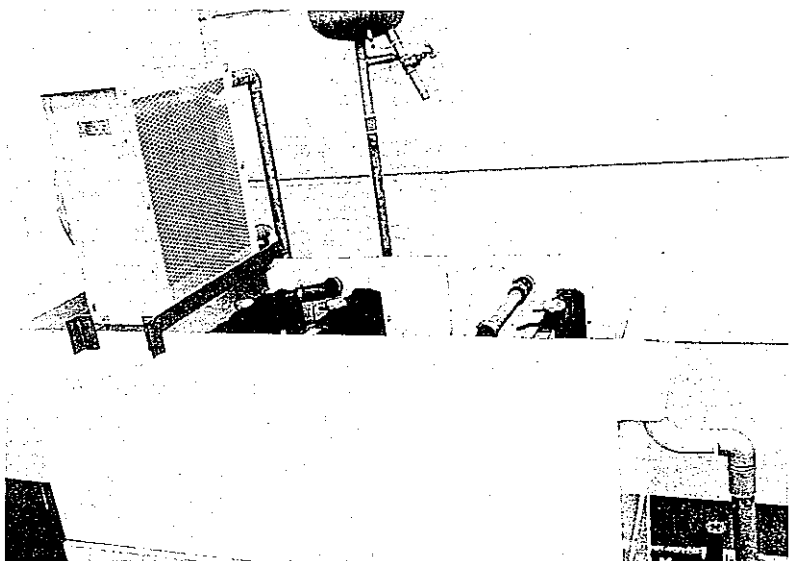


図3-6 冷却装置の内部
（左側から空冷式クーラー、動力計用、エンジン用）

3. エンジン性能と排気特性の確認

製作した試験装置の性能確認と排気特性を調べ、エンジンメーカ公示値と比較するとともに、ディーゼル13モードによる排気特性も調べた。

(1) エンジン性能

試験装置に設置したエンジンについて、回転数を変えて軸出力、燃費および排気ガス組成を調べた。

①試験方法

天候による出力の変化をみるために、気温21℃（雨）と気温29℃（曇り、晴れ）の2ケースの測定を行った。燃料はJIS 2号軽油（S<0.04%）を用いた。

10分間のアイドリング後、1000rpm～3200rpmの範囲でエンジン回転数を200rpmごとに変え、その時のエンジン回転数の最高出力を渦電流動力計で計測した。なお、メーカ公称値の最高トルクと最高出力の回転数1700rpm、2900rpmについても計測した。また各回転数における計測時間は5分間とし、同時に燃費と排気ガス組成も計測した。

出力性能の補正は下記の計算式¹⁾により行った。

$$Ne_0 = Ne \frac{P_0 - H_0}{P - H} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

- Ne_0 : 補正した軸出力

Ne : 測定時の軸出力

P_0 : 101300Pa

T_0 : 293K

H_0 : 1400Pa

p : 測定時の気圧 (Pa)

T : 測定時の気温 (吸気温度K)

H : 測定時の水蒸気圧 (Pa)

また排気ガス量は燃費とCO、CO₂濃度から算出した。

(測定項目)

- エンジン軸出力
- エンジン軸トルク
- 燃費と吸・排気温度
- 気圧、湿度
- 排気ガス組成

- NO_x

: 常圧化学発光法
- THC

: 加熱型水素炎イオン法 (FID)

- 酸素

: 磁気方式
- CO, CO₂

: 非分散型赤外法 (NDIR)
- SO_x

: 火炎発光光度法 (FPD)

②試験結果

図3-7にエンジン回転数に対する軸出力と軸トルクの関係、図3-8にその時の燃費および図3-9に排気温度と排気ガス量を示す。図3-7のエンジン出力は計測時の天候の影響を受けているが、補正後の軸出力、軸トルク値は両者ともよく一致していた。また得られた値はメーカ公称値のほぼ90%であった。同様

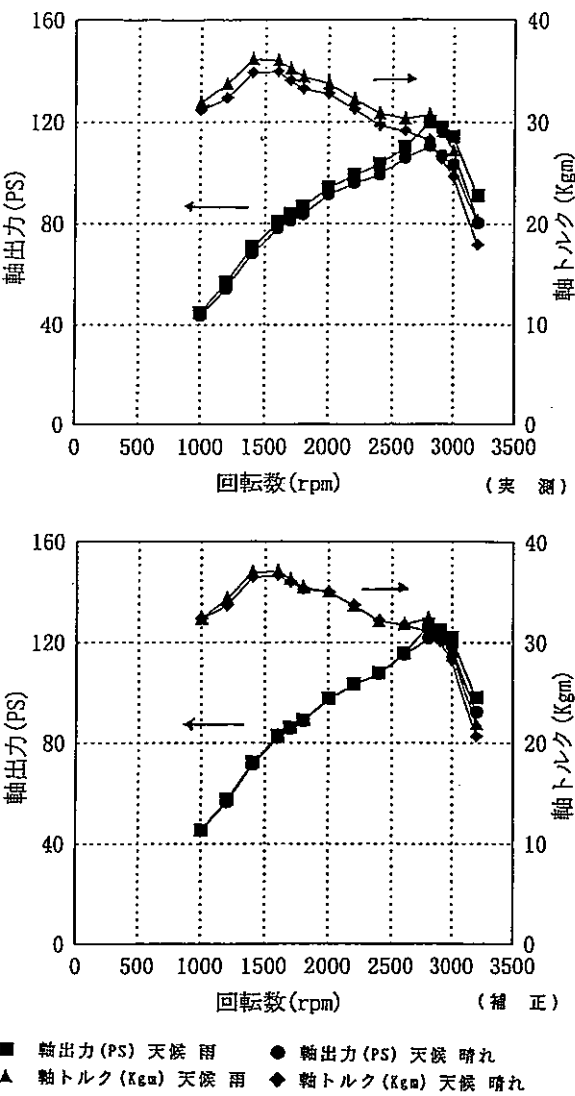


図3-7 試験装置用エンジンの性能曲線

に、図3-8はその時の燃費を示し、天候変化によるバラツキは小さく、メーカー公称値とほぼ同等であった。

図3-9は排気マニホールド直後の各回転数ごとの最大負荷時の温度を示す。計測された温度は450～800℃と高温で、特に定置走行時の目安となる回転数60%（最大回転数に対して）では約700℃であった。その時の排気ガス量は、天候によるバラツキは小さく、最大ガス量が約300Nm³/hで、回転数60%では200Nm³/hであった。

排気ガス組成の測定結果を図3-10～図3-11に示す。図3-10に示すように、NO_x濃度は1000rpm（低回転数）と3000rpm（高回転数）の最大負荷時の排出量が約900ppmと最も高く、2400rpm（最大回転数の

82%に相当）のとき550ppmであった。またSO_x濃度は回転数が増すにしたがって増加し、定置走行時の目安の回転数（回転数60%）では約16ppmであった。

酸素とCO₂濃度は、酸素濃度は平均すると約11%、同様にCO₂濃度は約5%であった。図3-11にTHCとCO濃度を示す。両者は天候の影響を受けており、特に、THC濃度は湿度が高い（試験時は雨）ときに高くなる傾向を示した。

(2) ディーゼル13モード運転

エンジン性能試験により、その性能と排気特性を確認した結果、メーカー公表値とよく一致していたため、ディーゼル13モードによる排気特性を調べた。

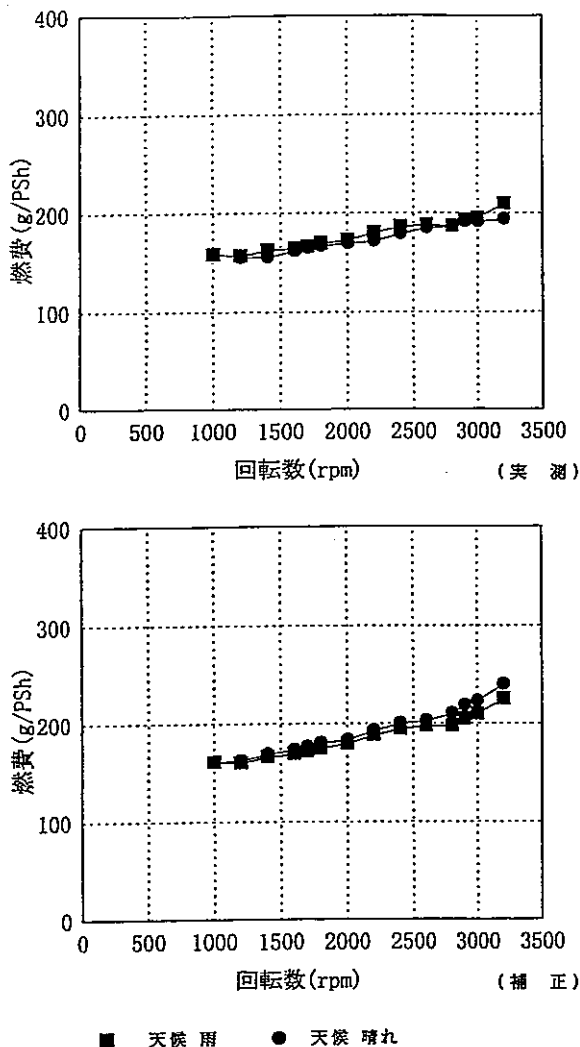


図3-8 試験装置用エンジンの燃料消費量

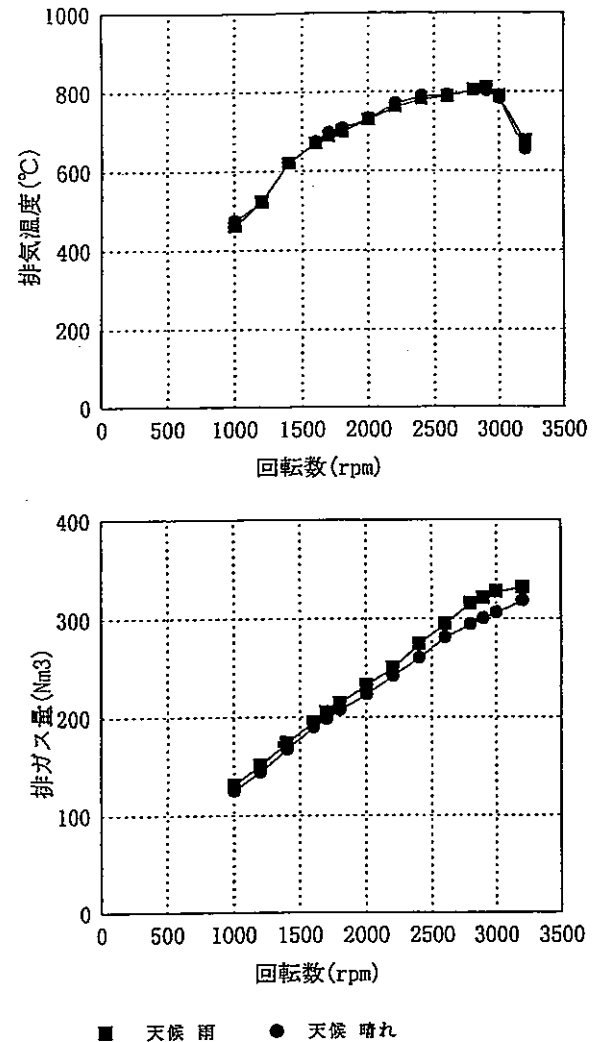


図3-9 試験装置用エンジンの排気温度と排気ガス量

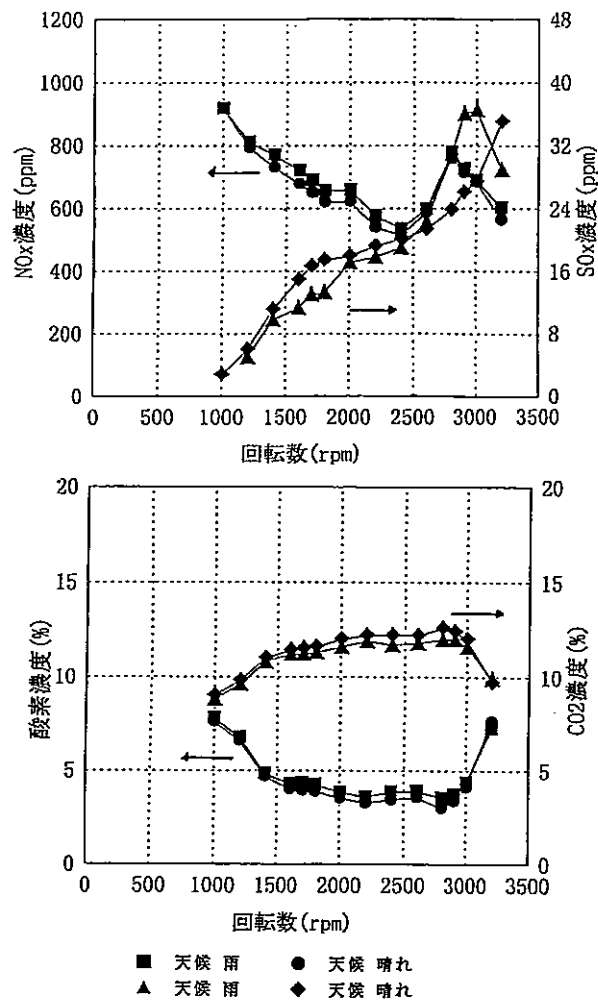


図 3-10 試験装置用エンジンのNO_x、SO_xおよび酸素、CO₂濃度

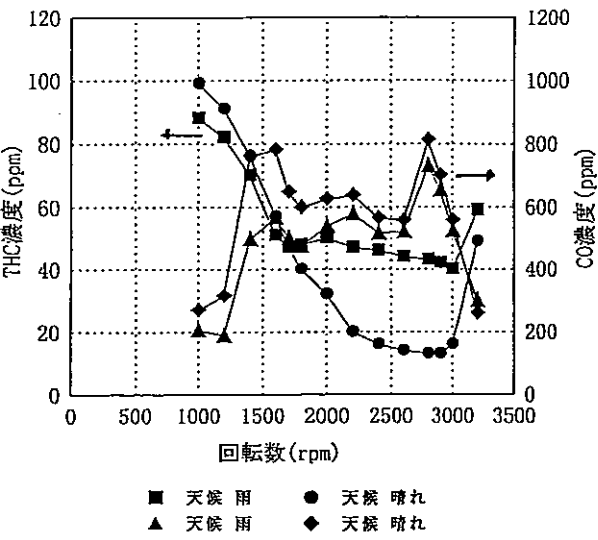


図 3-11 試験装置用エンジンのTHCとCO濃度

①試験方法

試験はモード1から順次行った。各モードの計測時間を約5分間とし、その時間内に各項目を測定した。測定項目は前節の項目に黒煙濃度を追加した。黒煙濃度測定はBosch方式（反射式）スモークメータを用い、その校正は汚染度50%の標準紙で補正した。ディーゼルエンジン13モード運転条件を表3-5に示す。

表 3-5 ディーゼルエンジン13モード運転条件

モード	重み係数	負荷比(%)	速度比(%)
1	0.205	0	Idle
2	0.037	20	40
3	0.027	40	40
4	0.205	0	Idle
5	0.029	20	60
6	0.064	40	60
7	0.041	40	80
8	0.032	60	80
9	0.077	60	60
10	0.055	80	60
11	0.049	95	60
12	0.037	80	80
13	0.142	5	60

負荷比(%)：最大負荷に対する割合

速度比(%)：最大回転数に対する割合

②試験結果

表3-6に各モードにおける燃費、排気温度と酸素、NO_x、炭化水素（THC）、SO_x、CO、CO₂の排出濃度を示す。排気温度は中低負荷域（1～6、13モード）では300℃以下、高負荷域では300～660℃であり、触媒作用温度範囲が400℃付近以上とすると、運転モード7～12が触媒反応器の運転領域となり、それ以外の運転モードはEGR運転領域と考えられた。

NO_x濃度は、高負荷域の排出量が高く、ディーゼル13モードの重み付き排出量の合計は63.1g/hであり、

表3-6 ディーゼルエンジン13モード運転における排出ガス組成と排出量

モード	燃費 (kg/h)	排気温度 (°C)	酸素 (%)	黒煙 (%)	NO _x (g/h)	THC (g/h)	SO _x (ppm)	CO (g/h)	CO ₂ (%)
1	0.9	84	17.6	1	18.8	2.2	0	18.9	1.9
2	2.4	159	16.5	1	43.4	3.1	0	18.6	2.7
3	3.6	229	14.4	2	75.7	3.4	0	16.4	4.1
4	0.7	109	18.4	0	14.9	1.6	0	6.1	1.5
5	3.9	209	16	2	42.4	7.7	0	34.4	3.1
6	6.1	299	13.6	6	80.1	8.2	0	37.8	4.8
7	8.3	346	13.1	7	97.6	12.3	1.2	56.3	5.1
8	11.1	458	10.6	8	140.4	14.6	4.6	42.2	6.7
9	8.5	422	10.8	10	122.9	10.7	5.6	29.4	6.7
10	11.3	543	7.5	12	173.9	10.7	8.3	23.6	8.8
11	13.8	660	4.3	21	186.8	8.2	11.5	73.3	11
12	14.3	599	7.4	9	178.9	12.1	9.9	36.9	9.1
13	2.3	172	17.4	3	19.9	6.2	0	20.7	2.5

重み付き仕事率 (kW) あたりに換算すると、NO換算で3.8g/kWh、NO_x換算では5.6g/kWhであったことから、このエンジンは平成6年度排出規制に適合していた。

黒煙濃度は、NO_x濃度と同様に高負荷域に移行するにしたがって、その排出量も増加し、モード11では20%に達した。SO_xは燃料中のS分が酸化され輩出されて、その排出濃度は約1～11ppmであり、燃費と軽油中のS分 (S : 0.04%) から算出した値の半分以下であった。

THC排出量は、重み付き排出量の合計でみると5.7g/hで、重み付き仕事率あたりの排出量は0.3g/kWhであった。また各モードのTHC濃度は100ppm以下であった。

排気ガス量は、速度比60%以上の運転モードではほぼ200Nm³/hであり、最大でも約260Nm³/hであった。

●参考文献

- 1) 内燃機関, p.71, コロナ社