

Product Introduction

新製品紹介

加熱NDIR計を用いた 過渡運転時のEGR率計測装置の開発

Development of Transient EGR Ratio Analyzer Utilizing Heated NDIR

吉村 友志

Tomoshi YOSHIMURA

ディーゼルエンジンは高効率・高耐久性という特性に加えて燃料の適用範囲が広いことから、地球環境問題やエネルギー問題の対策として有効である。しかし、ガソリンエンジンと比較して、規制対象物質であるPMやNO_xの低減が課題である。NO_xの低減技術として、燃焼室からの発生量自体を抑えるEGR（排気再循環）技術がある。近年のエンジンの精密な制御に伴って、EGR率の制御も複雑化してきている。それに伴い、EGR率計測装置にはエンジンが過渡運転状態の場合にも対応できる性能が必要とされている。つまり、高速応答、また水分含有ガスでも精度よく測定できる性能が必要となる。そこで過渡運転状態時にEGR率が計測できる装置の開発を行い従来装置との比較試験を行った結果、EGR率を応答良く、かつ高精度で測定することができたので報告する。

Most of the recent clean diesel engines are generally equipped with exhaust gas recirculation (EGR) technology in order to meet the strict criteria of NO_x emission regulations. In the field of emission control, accurate and fast transient EGR ratio operation is becoming very critical. In this study, a transient EGR analyzer has been developed and evaluated to confirm the advantage of the transient EGR analyzer by comparing it to a conventional exhaust gas analyzer system. A faster response has been observed from the transient EGR analyzer without significant transient error during transient test cycles. Furthermore, there was a high correlation between the EGR valve behavior and the EGR ratio measured by the transient EGR analyzer. These results show the advantages of the transient EGR analyzer when measuring the EGR ratio during the transient cycle.

はじめに

ディーゼルエンジンは、高効率・高耐久性という特性に加えて燃料の適用範囲が広いことから、環境問題やエネルギー問題の対策として有効である。その一方、課題としてガソリンエンジンよりも高いNO_xやPMの排出レベルの低減を求められている。

NO_xの低減には、エンジン燃焼室からの発生量自体を制御する方法と発生したNO_xを後処理で除去する方法がある。ただ、後処理を用いる場合でも、エンジン燃焼室内でのNO_x発生量を可能な限り減らしておくことが望まし

い。そのような燃焼過程でのNO_x低減法のひとつに、排気再循環(Exhaust Gas Recirculation : EGR)技術がある。EGR用のバルブの制御により燃焼後のガスを吸気側に戻し、燃焼室内温度の低減やポンピングロスの低減を実現する。EGRはすでに実用化されている技術であるが、近年のエンジン制御の複雑化に伴い、エンジン過渡運転状態における精密な制御が重要になってきている。一方、過渡状態のEGR率計測ができる装置は一般的ではない。本稿では、過渡EGR率計測を目的として著者らが新たに開発したEGR率計測装置(**Figure 1**)について、従来装置と比較した性能検証結果を報告する。



Figure 1 Transient EGR Analyzer

EGR率の演算式

EGR率は、吸気側流量に対するEGR流路のガス流量の比で定義される。EGR率は、エンジンの吸気側と排気側のガスを採取し、それぞれのCO₂濃度測定値から以下の式を用いて算出することができる。

$$EGR = \frac{[CO_2]_{int} - [CO_2]_{amb}}{[CO_2]_{exh} - [CO_2]_{amb}} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

EGR : EGR率(%)

[CO₂]_{int} : 吸気側のCO₂濃度(vol%)

[CO₂]_{exh} : 排気側のCO₂濃度(vol%)

[CO₂]_{amb} : 大気中のCO₂濃度(vol%)

CO₂をトレーサとして利用するEGR率計測法は、簡便であるのに加え、計測技術が確立しているために信頼性が

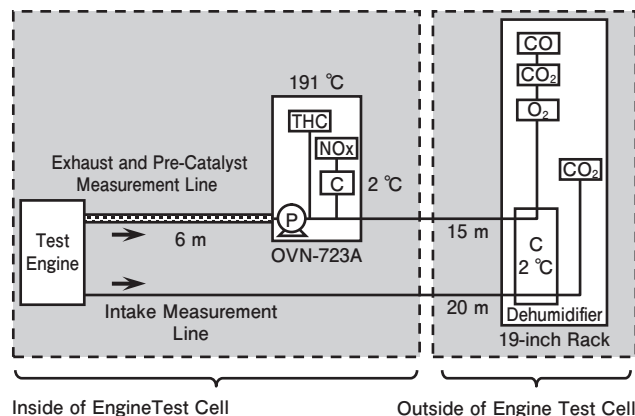


Figure 2 Schematic diagram and general installation of conventional system

高い。そのため、広く用いられているが基本的に定常状態での測定を目的としている。また、水分干渉影響を避けるために除湿機を備えたものが多く、水分分圧補正などのデータ処理が必要となる。

装置構成

Figure 2に、性能試験で比較対象とした従来型のエンジン排ガス測定装置(MEXA-7100DEGR)の構成を示す。この従来装置は、エンジンから排出される主要ガス成分(CO₂, CO, O₂, THC, NOx)の濃度を同時に計測する。さらに、EGR率算出のため、吸気側のガス測定用のCO₂分析計を備えている。CO₂分析計へのサンプルガスは、水分干渉影響を低減するために除湿機を通した後、分析計に導入される。装置は、分析計に対するエンジンの振動や熱の影響を避け、操作者の安全性を確保するために、測定対象エンジンから離れた制御室内に設置するのが一般的である。そのため、応答時間に大きく影響するサンプルライン長は20 m程度になることが多い。

Figure 3に、新たに開発したEGR率計測装置の構成を示す。エンジンの吸気、排気ライン内のガス測定用に加熱NDIR分析計を2式備えており、サンプルラインは水分凝結が発生しない加熱ラインとしてある。これにより、除湿機を省略してサンプルラインおよび分析部の構成を簡素化できる。さらに、振動影響を受けにくい焦電素子を検出器として用い、装置架台もコンパクトな設計とした。そのため、振動が発生しやすく装置の混み合うエンジン近傍にも設置することが容易で、分析計までのサンプルラインは従来装置よりも短くできる。また、吸気側と排気側のサンプルラインを同じ構造とし、ライン間の応答時間差が発生しないように考慮している。水分干渉については、

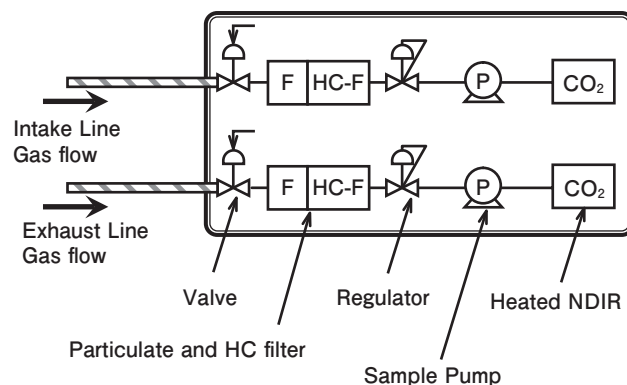


Figure 3 Schematic diagram of new EGR analyzer

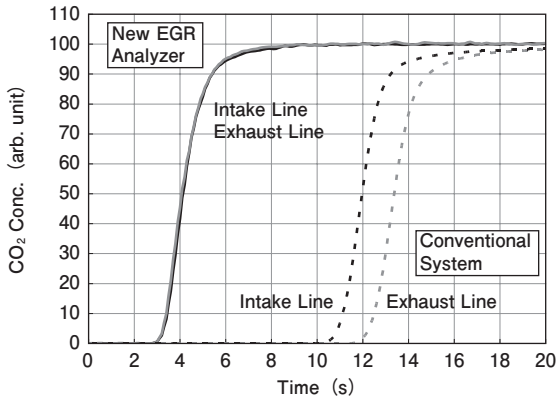


Figure 4 Analyzer response comparison

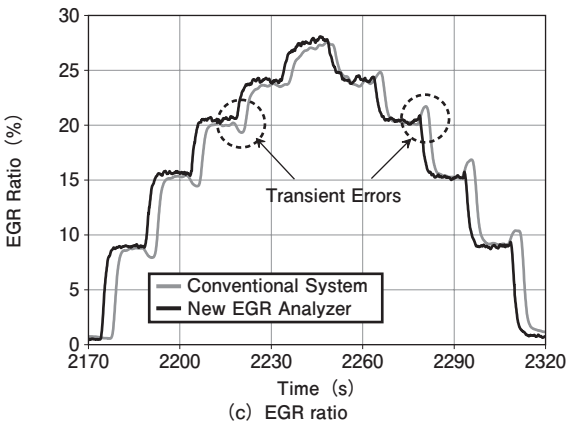
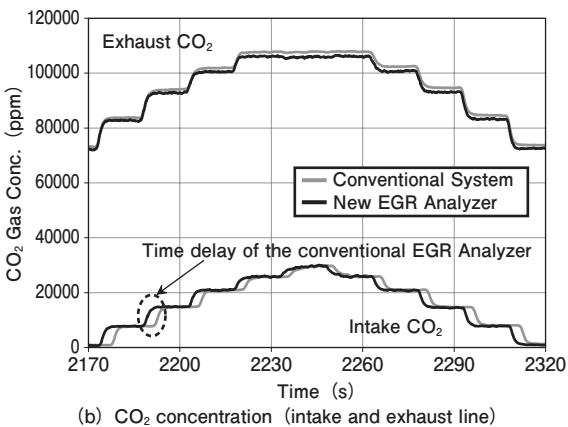
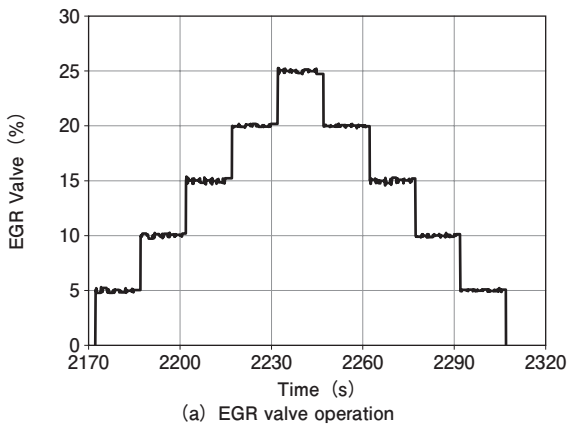


Figure 5 Comparison under step change of EGR valve

水分測定用の検出器を搭載し常時補正を有効にしているため、測定対象ガス内の水分濃度が変化してもCO₂濃度への影響は最小限にとどまる。これらの装置を用いた実排ガス比較試験には、シリンダ容量2.0 L、ターボチャージャー付き、コモンレール噴射式のディーゼルエンジンを用いた。排気管は直径150 mmの配管で、後処理装置はないため、排気側での圧力損失はない。エンジンはダイナモメータと接続されており、回転数とトルクは任意に制御できる。EGRバルブの開度とスロットル開度も、エンジンコントロールユニットから任意に制御が可能である。

スパンガスによる応答時間評価結果

Figure 4に、従来装置、新EGR率計測装置の吸気、排気ラインそれぞれの応答波形を示す。この試験では、サンプルライン入口において、サンプルガスをゼロガスからスパンガスに切り替えて濃度指示値を測定している。新EGR率計測装置では、吸気、排気ラインの応答波形はよく一致しており、遅延時間の差もない。一方、従来装置では、ライン間での応答時間の差が大きい。また新EGR率計測装置と比較して応答時間が長い。Table 1に、ガス切り替え時点を T_0 としたときの応答時間を示す。新EGR率計測装置の T_0-T_{99} は8秒前後で、従来装置(24秒以上)の約1/3に短縮されていることがわかる。

このように、新EGR率計測装置は従来装置よりも応答が速くライン間の差も少ない。従来装置の場合、ライン間の応答差を補正するため、ソフトウェア上で、応答の速いデータを遅いデータに合わせるように遅れ時間を補正する処理を行わなければならない。新EGR率計測装置ではこの処理が不要になり、信号処理も簡素化できるメリットがある。

実排ガス試験結果 (EGRバルブのステップ変化時)

エンジンベンチで、EGR率計測を行った。運転条件は、ア

Table 1 Response time of each line

Analyzer	New EGR Analyzer		Conventional System	
Line	Intake	Exhaust	Intake	Exhaust
T_0-T_{10}	3.4	3.4	11.1	12.5
$T_{10}-T_{90}$	2.0	2.0	2.1	2.4
T_0-T_{90}	5.4	5.4	13.2	14.9
T_0-T_{99}	8.4	7.8	24.0	25.6

Unit : seconds

クセル開度38%, エンジン回転数2000 rpm, 正味トルク140 Nm, 正味平均有効圧力は0.88 MPaであった。

試験時, ターボチャージャが有効になっており, 吸気マニホールドの内圧は約70 kPaまで上昇していた。EGRバルブの開度は, **Figure 5(a)**に示すように5%ずつステップ状に変化させた。

Figure 5(b)に, このときのCO₂濃度, **Figure 5(c)**にEGR率を示す。新EGR率計測装置はサンプルガスを除湿せずに測定しているのに対し, 従来装置のCO₂濃度は除湿した状態で測定している。従来装置では除湿により減少した水分分圧に応じて見かけのCO₂濃度が変化するため, その分の補正を行っている。さらに, 従来装置は, 吸気と排気のライン応答時間差について, スパンガスによる応答試験のデータを元に補正している。

Figure 5(b)のCO₂濃度の測定結果では, ライン応答差補正を行っているにもかかわらず, 従来装置の吸気側のCO₂が排気側より約4秒遅くなっている。この遅れは, 吸気側のマニホールドの内圧が上昇していたことが影響していると推測できる。サンプルガス採取部の内圧が上がると, 計測装置のサンプルライン内のガス密度も高くなり, ライン内のガスの置換に時間がかかる。サンプルラインが長いほどライン内の容積が増え, この影響は大きくなる。従来装置ではサンプルラインが20 mと長い。そのため, サンプル入口部の内圧上昇の影響も大きく, ライン応答時間差が発生し, **Figure 5(c)**に示すEGR率にもそれによる誤差(トランジェントエラー)が発生している。一方, 新EGR率計測装置では, この試験条件下ではほとんど影響が見られない。これは, サンプルライン長が3 mと短く, サンプルラインの容積が小さいことで, 内圧上昇時の影響も小さく抑えられているためと考えられる。

これにより, サンプルラインの体積の小さい新EGR率計測装置の方が, 従来装置と比較して, トランジェントエ

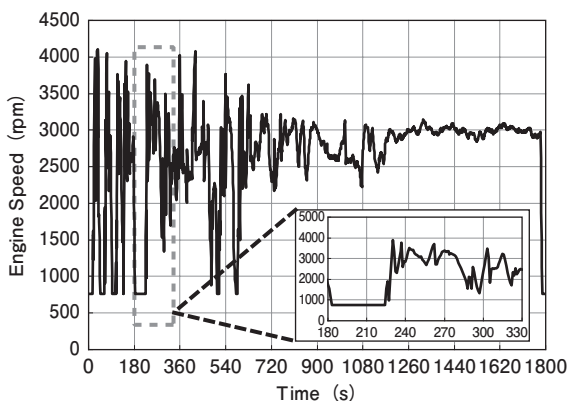


Figure 6 Engine speed of ETC test

ラーが発生しにくくなることが実際の試験で確認できた。

実排ガス試験結果(過渡状態下)

European Transient Cycle (ETC)でのEGR率計測の比較試験を行った。ETCのエンジン回転数を**Figure 6**に示す。180秒から330秒の区間で大きくEGRバルブ開度が変わるため, 解析時はその区間に注目した。

Figure 7(a), (b), (c)に, 新EGR率計測装置と従来装置について, EGRバルブの開度, CO₂濃度とEGR率の結果

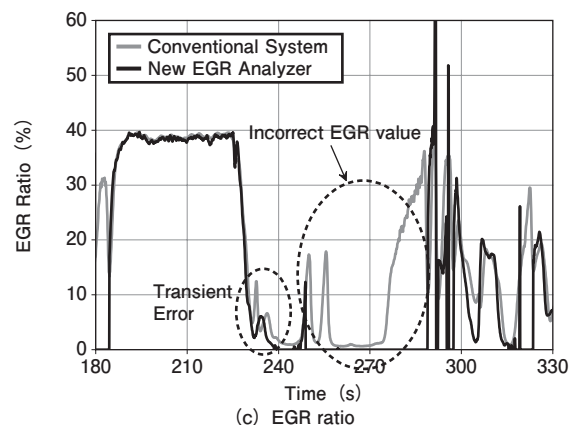
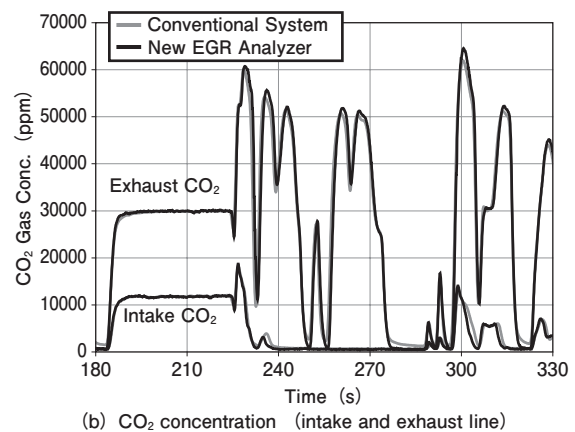
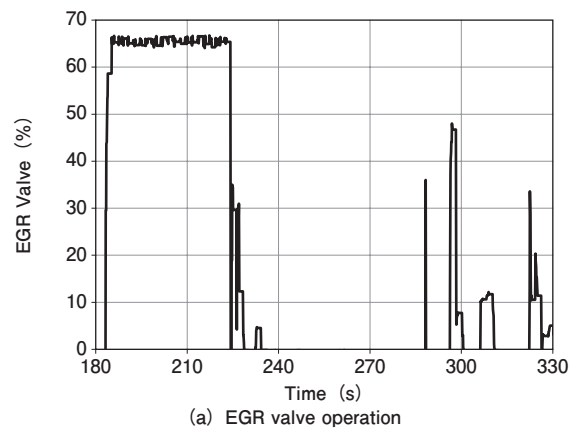


Figure 7 EGR measurement comparison under ETC test

をそれぞれ示す。Figure 7(b)のCO₂濃度は、従来装置では立ち下がり時に遅れが見られるものの、全体の傾向はおおむね一致している。ところが、Figure 7(c)のEGR率では、250秒、255秒、275～285秒の付近で結果に大きな差が出ていることがわかる。CO₂濃度やEGRバルブの動きから判断して、該当区間は燃料カットの状態EGRバルブも閉じているため、従来装置では正しいEGR率の値が得られていないことがわかる。このような結果となった要因として、EGR率の計算法の問題があげられる。燃料カットの状態では、排気側のCO₂濃度は大気レベル近くまで減少する。そのため、式(1)の分母がゼロに近づき、ライン間の応答時間差や応答遅れによるCO₂濃度値の少しの誤差が、EGR率としては大きく影響する。この影響を極力排除するため、排気側CO₂濃度が下限を下回った場合、燃料カットの状態として判断してEGR率をゼロとみなすアルゴリズムを導入した。本試験においては、CO₂濃度の下限は700 ppmに設定した。これにより、新EGR率計測装置で計測されるEGR率は、250～290秒の間で正しくゼロとなっている。一方、従来装置では、同じアルゴリズムを適用したにもかかわらず、上述のようにゼロではない不正確な計算結果を示している。これは従来装置のCO₂応答が新EGR率計測装置ほど速くないため、EGRバルブが閉じていてもサンプルラインにガスが残留しており、700 ppmよりも高いCO₂濃度を示していたためである。このように、応答の速い新EGR率計測装置では、CO₂濃度に下限を設けるアルゴリズムとの組み合わせで、燃料カットを伴う過渡状態のEGR率もより正確に測定できることが確認できた。

まとめ

以上、本稿では、過渡状態でのEGR率計測を目的として開発したEGR率計測装置について報告した。スパンガスおよび実排ガスを用いた従来装置との比較評価より、以下の結果が得られた。

- (1) サンプルライン入口でゼロガス、スパンガスを切り替えたときの応答時間 T_0 、 T_{99} について、従来装置では24秒であったが、新EGR率計測装置では8秒と、1/3の応答時間であった。
- (2) 従来装置では、吸気ラインの内圧上昇時に発生したライン応答時間差により、過渡状態においてトランジェントエラーが発生した。これに対し、新EGR率計測装置では、従来装置と比較してサンプルラインの容積が

小さくなっているため、同条件においてもこの影響はほとんど見られなかった。

- (3) 新EGR率計測装置では、排気側CO₂濃度に下限値として700 ppmを設定することにより、燃料カット時に発生する不正確なEGR率演算結果を排除することができた。

おわりに

本装置によって、当社が所有する特許技術を活かした上で新しいアプリケーションをお客様に提案することができた。本稿で述べたエンジン過渡運転状態でのEGR率計測のみならず、近年用いられている多段EGR技術の評価計測にも適用可能である。また、CO₂トレーサ流量計としての適用も可能である。さらなるアプリケーションをお客様に提案できる装置として育てていきたい。



吉村 友志

Tomoshi YOSHIMURA

株式会社 堀場製作所
開発本部 アプリケーション開発センター
エナジーシステム計測開発部