

特 集 論 文

高速応答レーザ排ガス計測でのエンジン過渡域計測

Transition Region Exhaust Gas Measurement Using by High-Speed Response Laser Equipment



牟田 研 二^{*1}
Kenji Muta

田 浦 昌 純^{*2}
Masazumi Tanoura

近 藤 明 生^{*3}
Akio Kondou

瀧 田 篤 史^{*4}
Atushi Takita

浅 海 慎 一 郎^{*5}
Asami Shinichirou

加 藤 英 治^{*6}
Eiji Kato

当社は、ボイラやごみ焼却炉などの炉内監視技術を応用し、エンジン配管内のガス温度／濃度を、直接的に、かつ、高速応答で計測できる、コンパクトなレーザ方式の排ガス計測装置を開発した。本報告では、これらの装置を紹介するとともに、本装置を過渡運転時の排ガス（エンジンベンチ／車両）計測に適用し、従来装置では取得困難な、新たな知見が得られた事例を示し、本装置のエンジン開発・排ガス処理装置開発に対する有効性を紹介する。

1. は じ め に

当社は、これまで、主にボイラやごみ焼却炉などの炉内監視技術⁽¹⁾⁽²⁾としてレーザによるガス濃度／温度の計測技術を開発してきた。この技術は非接触計測が可能であるため、従来のようにガスをサンプリングして計測する場合と比較して、応答遅れが無い計測が可能である。現在、本技術の自動車などのエンジン排ガス計測への適用を進めているが、それには、次の2点を新たに開発していく必要があった。

- ① 応答性の更なる向上（秒オーダー→ms オーダー）
- ② 自動車配管などに直接装着できる計測センサ部

本報告では、上記を実現した高速応答タイプのエンジン排ガス計測装置を紹介するとともに、エンジン負荷が急激に変化する過渡領域の計測に適用することで、従来装置では得られなかった、新たな知見が得られる例を示し、本装置のエンジン開発などへの有効性を紹介する。

2. レーザ式エンジン排ガス計測装置

今回、開発したレーザ排ガス計測装置は、レーザ吸収分光法技術を基礎としている。本手法は、ガスが固有波長の光のみを吸収する特性を応用し、その光吸収量からガス濃度／温度を導出する手法である。また、実際の計測は、図1に示すように、装置本体から、配管に直接取り付けけた計測センサ部（計測セル）に、光ファイバを用いてレーザを搬送し、排ガスを透過した

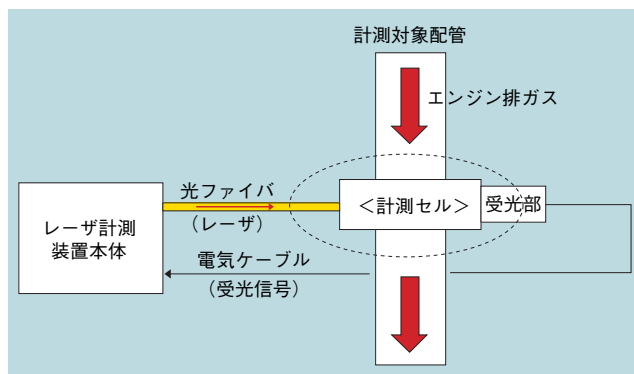


図1 レーザ排ガス計測装置での計測系統
配管内ガス計測を行う場合の代表的な装置系統。

受光信号を装置本体で解析し、排ガス中の濃度／温度を計測する。

なお、当社は、計測原理は同じレーザ吸収分光法を用いながら、制御／解析方式の異なる手法を適用した、高速応答タイプと、高精度タイプの2種類の計測装置を商品化している。

2. 1 計測装置のご紹介

(1) 高速応答タイプのレーザ排ガス計測装置

まず、1 ms の高速応答計測が可能な SUPPLEA (SUPER Prompt Laser Exhaust gas Analyzer) の構成を図2に示す。本装置は、配管に直接取り付けける計測セル、装置本体、解析／表示用パソコン (PC) から構成されており、排ガス温度と、多成分 ($\text{H}_2\text{O}/\text{CO}/\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{O}_2$) 濃度とを同時に、1 ms の時間分解能で計測する。

^{*1} 技術本部先進技術研究センタープロジェクトグループ主席

^{*2} 技術本部先進技術研究センタープロジェクトグループ主席 理博

^{*3} 技術本部先進技術研究センタープロジェクトグループ

^{*4} 技術本部横浜研究所制御システム研究室

^{*5} 神戸造船所先端製品・機械システム部制御システム設計課主席

^{*6} 神戸造船所先端製品・機械システム部メカトロシステム設計課

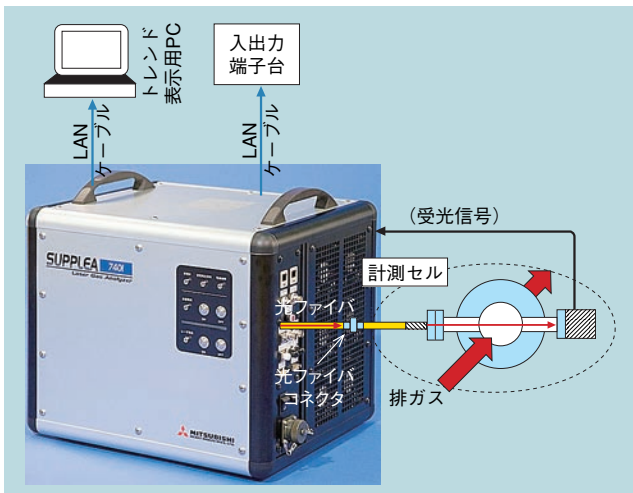


図2 超高速応答型のレーザ排ガス計測装置 (SUPPLEA)
1 ms の超高速応答性で、ガス温度と $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}/\text{CO}_2/$
 CH_4/O_2 濃度の同時計測が可能。

なお、本装置は、主に、ガソリンエンジン排ガスなどの固体粒子が少ない雰囲気での計測に適用する。

(2) 高速応答／高精度タイプのレーザ排ガス計測装置

次に、 NH_3 や NO_x などの ppm レベルの微量成分を高速応答計測できる TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) の構成を図3に示す。本装置も配管直接取付型の計測セル、装置本体、解析／表示用 PC から構成され、排ガス中の ppm レベルの微量成分を 100 ms 以下の応答性で計測する。

本装置は、排ガス中の固体粒子に影響を受けにくいいため、主に、ディーゼルエンジン排ガスの計測に用いられる。さらに、排ガス浄化触媒の前後など、2ヶ所のガス濃度を1台の装置で計測することも可

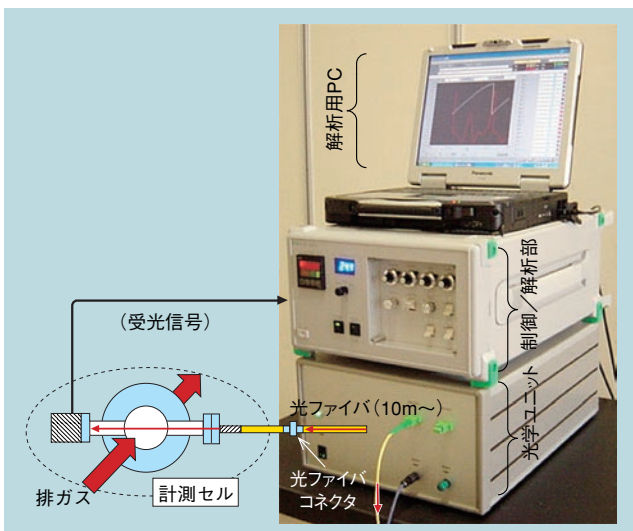


図3 高精度／高速応答型のレーザ排ガス計測装置(TDLAS)
 NO_x 、 NH_3 などの ppm レベルの微量成分濃度を、
100 ms 以下の応答性で、2ヶ所での同時計測が可能。

表1 当社のレーザ排ガス計測装置概要

製品名	1. SUPPLEA ^{*1}	2. TDLAS ^{*2}
特徴	- 超高速応答性 (1 ms) - 多成分濃度 (%レベル) / 温度同時計測 - 一ヶ所計測	- 高速応答性 (100 ms) - 単成分濃度高精度計測 (ppmレベル) - 二ヶ所同時計測
適用先	- ガソリンエンジン排ガス - ディーゼルDPF後流排ガス (固体粒子を含まない環境)	- ディーゼルエンジン排ガス - ガソリンエンジン排ガス (固体粒子の影響なし)
詳細	- 計測化学種： $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}/\text{CO}_2/\text{CH}_4/(\text{O}_2)$ (上記全種の同時計測) - ガス温度計測範囲： 150～800℃	計測化学種： NH_3、NO、NO_2、N_2O 他 (上記中から1種を選択)
計測原理	レーザ吸収分光法 (高速波長掃引と差分検出)	レーザ吸収分光法 (波長変調法)

*1: SUPER Prompt Laser Exhaust gas Analyzer

*2: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

能である。

なお、両計測器の特徴をまとめて表1に示す。

2.2 計測セル

次に、配管に直接取り付ける計測セルを紹介する。尚、計測セルは、配管サイズに応じた各種ラインナップを設けているが、代表的な計測セルとしては、下記2種類がある。

(1) 多重反射型セル

このセルは、図4⁽³⁾に示すように、センサ厚みが薄いため、既設のフランジに直接挟み込んで設置できる。構造は、排ガス中にミラーを2枚、対で設置し、レーザが配管断面内を隈なく透過するように、多重反射させており、“① 配管内の濃度／温度分布の影響を受けずに、断面平均値が得られる”、“② 光路長を長く取れ、計測感度を向上できる”などの特徴を持つ。

ただし、排ガスとミラーが直接接触するため、ミラー部の汚れに課題があり、主に、固体粒子が少ない、ガソリンエンジン排ガスやDPF (Diesel Particle Filter) 後流のディーゼルエンジン排ガス

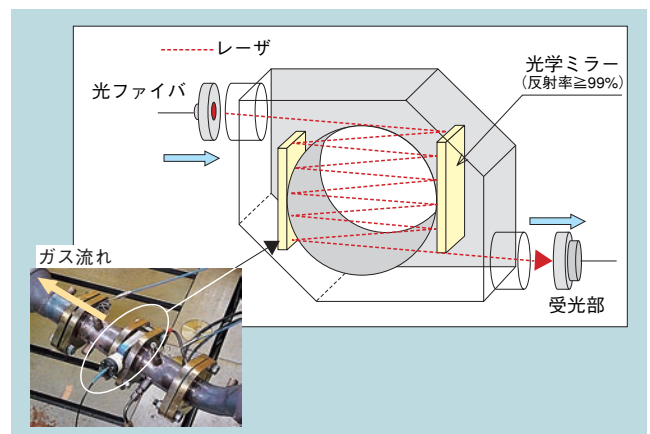


図4 多重反射型セル⁽³⁾
センサ部厚みが薄く、既設配管のフランジ部に直接取り付け可能。

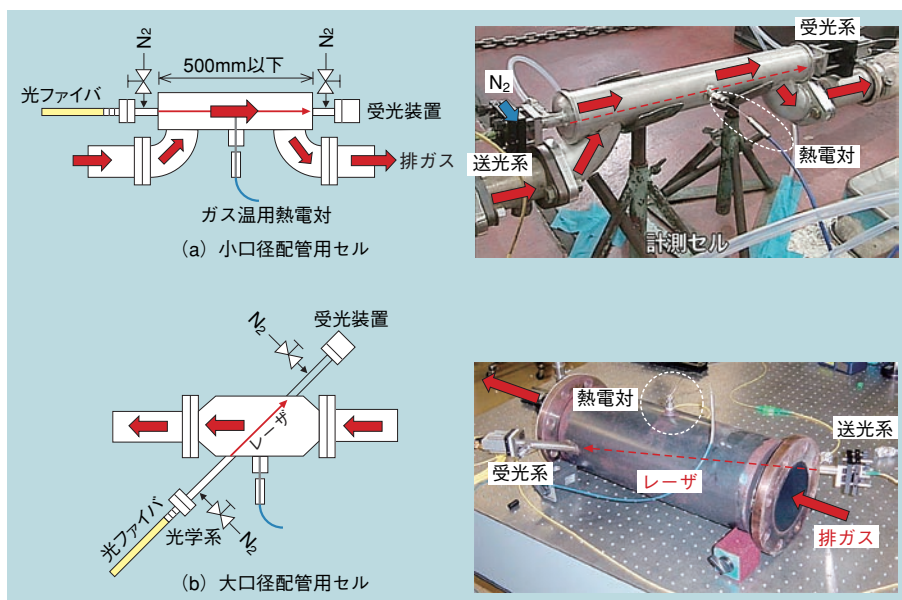


図5 窓部パージ型ワンパスセル
粒子存在下でも、メンテナンスフリーの計測が可能
((a)小口径配管用セル, (b)大口径配管用セル)。

などの計測に適している。

(2) 窓部パージ型ワンパスセル

次に、窓部パージ型ワンパスセルを図5に示す。本セルは、排ガスと直接接触する光学部品を無くし、さらに、窓部に汚れ防止用パージガスを吹き付けることで、メンテナンスフリーの計測を可能にしている。ただし、セルの厚み、サイズが多重反射型と比較して大きいため、取付け時に、配管部の改造が必要な場合もある。主に、ディーゼルエンジン排ガス計測に利用される例が多い。

なお、図5 (a)は50 A 程度以下の小口径の配管向けで、図5 (b)は100 A 以上のような大口径配管向けである。

3. 自動車排ガス計測事例

最後に、従来は計測が困難であった、自動車の過渡域（負荷などが急激に変化する運転条件）で、本装置を用いて排ガス計測した事例を紹介し、本装置のエンジン／車両開発への有効性を紹介する。

3. 1 乗用車シャシダイ試験での計測結果例

乗用車のシャシダイナモ（シャシダイ）試験は、従来のサンプリング式計器を用いても比較的容易に実施できる。しかし、従来計器は応答性が数秒と遅く、かつ、エンジン近傍の計測では、別途、ガスサンプリング設備が必要との理由からエンジン挙動から応答遅れのある、テールエンド計測が一般的である。そのため、エンジンの過渡域での挙動を把握することは非常に困難であった。

一方、当社で開発したレーザ排ガス計測装置は、高速応答であり、かつ、計測セルは、配管部の改造無しで、容易に配管の任意の場所に組み付け可能である。そのため、シャシダイ試験でもエンジンの過渡域挙動に関わる情報を容易に取得可能である。

図6に、シャシダイ上で10-15モード走行した際の、エグゾーストマニホールド出口でのレーザ排ガス計測例を示す。ギヤチェンジによるわずかなスロットル開度の変化に応じた瞬間的なガス濃度／温度の変化や、燃費向上のためのフューエルカット制御など、エンジン制御に関わる過渡現象が明瞭に捉えられている。さらに、CO₂濃度やガス温度の計測値が一見幅広く（変動量が大きく）計測されているが、詳細分析すると、こ

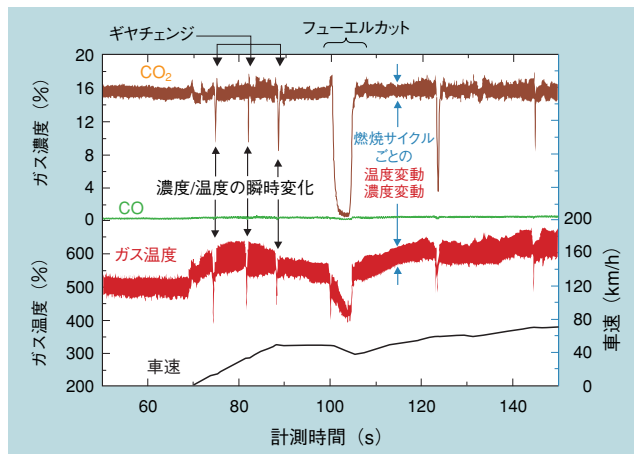


図6 モード走行試験中の高速応答排ガス計測結果例
ギヤチェンジやフューエルカットなどの瞬間的な過渡現象把握に加え、サイクルごとの燃焼変動計測も可能。

の変動は各ピストンの各燃焼サイクルごとに、実際の濃度／温度が変動している状態が計測された結果である。

このように、本装置を用いることで、シャシダイ試験でも容易に過渡域の高速現象や、各燃焼サイクルの変動を計測でき、より高燃費、よりクリーンな車両開発の加速化／高度化につなげることが可能である。

3. 2 エンジンベンチでのガス吹返り把握

現在のエンジン制御の一つに、高負荷域で吸気バルブと排気バルブのオーバーラップを増やし、吸気ガスに排ガスの一部を吹き返しの形で戻すことで、燃焼を安定させる手法がある。

ここで紹介するのは、エンジンベンチ試験（ガソリン）において、吸気マニホールド／吸気ポート間での吸気中 CO_2 濃度を SUPPLEA にて高速応答計測し、吸気ガス中に排気ガスが吹き込む（吹き返し）量の計測が可能かどうかを検証した例である。

計測結果を図7⁽³⁾に示す。このグラフは、横軸がクランクアングル、縦軸が吸気ガス中の CO_2 濃度を示す。また、図中の①～⑤は、吸気バルブと排気バルブのオーバーラップ程度を示し、数字が大きくなるに従って、オーバーラップ量は増えていく。オーバーラップが無い①の条件では、吸気ガス中に CO_2 はほとんど見られないが、オーバーラップが大きくなるに従い、 CO_2 濃度が急激に高くなるとともに、そのピークも早くなる現象を捕らえることができた。

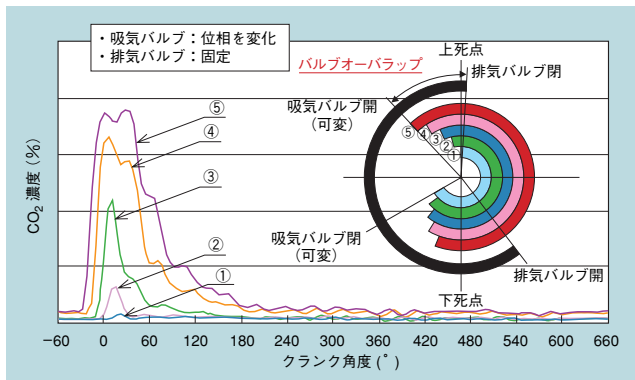


図7 吸気バルブ／排気バルブのオーバーラップ量に応じた吹返り量変化の計測例⁽³⁾
吸気側への排ガスの吹返りをリアルタイム計測できることで、高度なエンジン燃焼制御も容易。

このように、従来は数値シミュレーションでしか評価できなかった吹返し量をリアルタイムで計測できるため、計測結果を基に最適なオーバーラップ量を計測／制御することが可能である。

上記の例で示すように、本装置を利用することで、高度なエンジン燃焼制御の適合作業を簡単に、かつ、迅速に行うことが可能となる。

3. 3 ディーゼル乗用車での NH_3 濃度計測

近年、ディーゼル排ガス規制の強化に伴い、尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) システムが注目を集めており、このシステムは、窒素酸化物 (NO_x) 発生量に応じた最適アンモニア (NH_3) 注入量制御が重要である。また、 NO_x 吸蔵触媒方式の脱硝システムでもアンモニアが重要な役割を演じることが分かっている。

一方、 NH_3 は吸着性の強い物質であるため、ガスサンプリング方式の計測装置では、正確な濃度計測が困難であり、特に、急激に濃度変化する場合（濃度変化過渡域）は、サンプリング式では、応答遅れがあり、変化を捉えることは、非常に困難であった。

そこで、ディーゼル排ガス中の NH_3 濃度 (ppm レベル) 計測にレーザ排ガス計測 (TDLAS) を適用した事例を紹介する。ここでは、乗用車（ディーゼルエンジン）のテールエンドにおける排ガス中 NH_3 濃度を、①レーザ排ガス計測装置 (TDLAS + 窓部パージ型ワンパスセル)、及び、②ガスサンプリング方式の計測装置で計測し、計測定量性、応答性を比較した。

試験は、まず、一定濃度の NH_3 を含む排ガスを計測し、両計測値が同一であることを確認し、その後、 NH_3 発生量がスパイク状に変化する条件（リッチスパイク条件）で車を運転し、計測結果を比較した。

結果例を図8に示す。このグラフは、横軸が計測時間で、上のグラフの縦軸は NH_3 濃度、下のグラフの縦軸が、車への NH_3 生成指令信号（リッチスパイク信号：スパイク時に NH_3 が発生）を示している。本装置は、リッチスパイク信号と同期した NH_3 濃度変化を計測できているが、従来計器はほとんど計測できていない。

このように、従来計器で上記のような脱硝システムを評価／制御することは、応答性の上で問題があるが、本装置では容易に可能であり、より高度な脱硝システムの構築／制御の開発加速につながる。

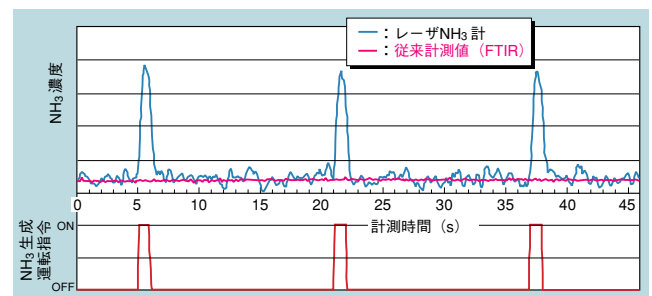


図8 リッチスパイク時のアンモニア発生量計測例
急激な NH_3 変化も計測可能なレーザ計測装置を用いることで、より高度な脱硝システムの構築／制御も可能。

4. ま と め

当社では、エンジン排ガスを高速応答で計測できる、コンパクトなレーザ排ガス計測装置を開発した。

(1) 高速応答レーザ排ガス計測装置 (SUPPLEA)

- 1 ms の応答性でガス温度／濃度（% オーダ： H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , O_2 ）の同時計測が可能
- 装置 1 台で 1 ヶ所の計測

(2) 高精度レーザ排ガス計測装置 (TDLAS)

- 100 ms 以下の応答性で、ppm レベルの高精度濃度計測が可能
- 装置 1 台で触媒前後などの 2 ヶ所同時計測が可能

今後は、本装置をお客様に提供し、従来は把握できなかった各種の現象把握に寄与していくことで、お客様の製品開発のお役に立ちたいと考えています。

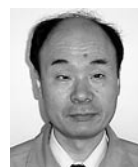
- ① エンジン燃焼工程の各サイクルごとの濃度／温度変化など、従来では取得困難な高速現象
- ② 今後の排ガス処理システムでキーとなる、サンプリング計測では把握困難な、 NH_3 濃度変化など

参 考 文 献

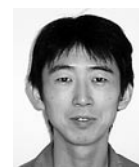
- (1) 牟田ほか, 第 34 回燃焼シンポジウム講演論文集 (1996) p.551
- (2) 牟田ほか, 第 37 回燃焼シンポジウム講演論文集 (1999) p.465
- (3) 山蔭ほか, 2008 自動車技術会論文集 Vol.39 No.2 March 2008 p.123



牟田 研二



田浦 昌純



近藤 明生



瀧田 篤史



浅海 慎一郎



加藤 英治