

称号及び氏名 博士（工学）中村博司

学位授与の日付 平成17年3月31日

論文名 「Development of an On-Board Measurement System for  
Vehicle Exhaust Gas」  
(車載型排ガス計測システムの開発)

論文審査委員 主査 教授 坂東 博  
副査 教授 安保 正一  
副査 教授 藤村 紀文

## 論文要旨

自動車排ガスの環境負荷に関心が深まる中で、自動車排ガス中の CO, NO<sub>x</sub> などの排出量規制は非常に厳しいものとなってきている。それにもかかわらず、主要幹線道路周辺では依然として高濃度の NO<sub>x</sub> が検出されるなど、自動車排ガスが一因と考えられる大気汚染は解消できていないのが現状である。従来、エンジン排ガスの評価は、実験室内、すなわちシャーシダイナモやエンジンダイナモ上での規定モード走行を前提として実施されてきた。このような条件が統一できる実験室内での排ガス計測は排ガス認証試験に対しては非常に有効な方法である。その一方、実走行環境を実験室内で再現するのは非常に困難であり、エンジン開発および自動車開発において実路での排ガス状況解析に十分な情報を提供できていなかったのも事実である。また、実験室での計測データを大気反応化学におけるモデリングデータなどに適用するには限界があるといわれている。本研究では、このような課題を解決するために自動車排ガスの実態調査が可能である車載型排ガス計測システムの開発を行った。また、そのシステムを用いて実環境における自動車排ガスの計測および評価を行った。本論文は、これらの結果をまとめたものであり、7章から成り立って

いる。

第1章では、現在までの自動車排ガス規制の動向、従来の排ガス計測設備の概要、問題点を概観するとともに、車載型排ガス計測装置の必要性について記述した。

第2章では、車載型排ガス計測システムの中の排ガス分析計として開発した加熱型非分散赤外線 (NDIR) 分析計について記述した。一般に、自動車排ガス中のCO、CO<sub>2</sub>濃度は、NDIR分析計によって測定される。ただし自動車排ガスに含まれている高濃度(数%~十数%)の水蒸気は赤外線吸収係数が大きく、かつ広範囲にわたって吸収が広がっているため、CO、CO<sub>2</sub>の吸収スペクトルに重なることによって干渉を与える。また、高濃度の水蒸気と測定成分であるCO、CO<sub>2</sub>が同時に存在すると、CO、CO<sub>2</sub>の吸収スペクトル自身に変化する水蒸気共存影響によって測定誤差が生じる。このため、従来の自動車排ガス測定用のNDIR分析計は検出器の前に除湿器を設け、排ガス中の水を除去した後に測定する手法が用いられてきた。しかし、このように測定したCO、CO<sub>2</sub>濃度は実際の排ガス中の濃度よりも除去した水の分圧分だけ高い値となってしまったために、測定濃度を補正する必要があった。補正する際には燃料の燃焼反応式から化学量論的に算出した水の濃度が用いられるが、除湿器によって取り除かれた水と自動車の排気管中で結露した水の量を区別して見積もることができないため、この補正式も完全なものではなかった。本研究では、水を除去せずに排ガスを測定できる加熱型NDIR分析計を開発した。また、NDIR分析計に対する水蒸気による干渉および共存影響の大きさは測定ガス中の水蒸気濃度と測定ガス濃度により支配される。そこで、それらの間に存在する相関を明らかにすることにより、これらの影響を評価しその寄与を取り除くことに成功した。加熱型NDIR分析計は、CO、CO<sub>2</sub>濃度を測定する検出器と水蒸気濃度を測定する検出器によって構成されており、同一の光学系によって同時に測定成分濃度と水蒸気濃度を測定することによりリアルタイムに水蒸気干渉および共存影響を補正することが可能である。このため、瞬時にCO、CO<sub>2</sub>、水蒸気濃度が変化する自動車排ガスの測定に十分対応できるものとなった。また、検出器は振動からの影響を受けない焦電センサを用いることにより、試験車両に搭載することを可能とした。

第 3 章では、車載型排ガス計測システムの中の排ガス流量計として開発を行ったピトー管式排ガス流量計について記述した。実走行中の自動車から排出される排ガス中の汚染物質の総量を計測するためには、排ガス中の汚染物質濃度の計測と同時に、排ガスの流量を正確に計測することが必要である。一方、エンジン排ガスの特徴として、(1) 流体の温度が低温から高温まで変化する、(2) 流量が数十から数千 L/min まで大きく変化する、(3) 流量が瞬時に変化する、(4) 流体中の組成が大きく変動する、(5) 多量の水蒸気、粉塵を含む、(6) 流体の脈動が大きい、などがあげられ、一般的なガス流量測定技術を用いて排ガス流量を直接測定するのは非常に困難である。特に、自動車エンジンの排ガスはアイドル時には逆流を含む大きな脈動流を生じるために、逆流を計測できないベンチュリー流量計や、オリフィス流量計、カルマン流量計などでは正確な計測が不可能である。本研究では、逆流の計測が可能である排ガス流量計のひとつとしてピトー管式流量計を採用し評価を行った。ピトー管式流量計は構造が単純であり、応答も速く、高温で水蒸気を含む流体の測定が可能であるが、脈動流体の計測時に大きな誤差を生じると報告されていた。本研究では、ピトー管流量計の脈動流計測の検証および誤差の解析を行い、脈動流を正確に計測する手法を開発した。すなわち、エンジン排ガスの脈動周波数の約 5 倍以上の応答周波数を持ち、かつ逆方向の差圧を計測できる差圧計とピトー管を組み合わせることにより、脈動流体でも精度よく計測できることを確認した。また、本装置を用いて 1.6 L、4 気筒の一般的な自動車エンジンのアイドル時の排ガス流量を計測した結果、平均流量が 70 L/min であるにもかかわらず脈動流の振幅が 1800 L/min にもなっていることを確認した。この結果より、本装置は車載型排ガス計測システムへの応用の他にも、瞬時排ガス流量のデータが必要であるエンジン排ガスの後処理触媒の開発などにも応用の範囲が拡大できることが分かった。

第 4 章では、本研究によって開発された、車載型排ガス計測システムの評価結果について記述した。車載型排ガス計測システムは加熱型NDIRの技術を利用した車両に搭載が可能であるCO、CO<sub>2</sub>、炭化水素 (HC) 分析計、ジルコニアセンサ技術を利用したNO<sub>x</sub>分析計、およびピトー管式排ガス流量計を組み合わせることによって開

発した。従来の計測方法では全炭化水素（THC）濃度，NO<sub>x</sub>濃度はそれぞれ水素炎イオン化検出器および化学発光法検出器を用いて計測されるが，本装置はいずれも操作ガスが必要でないNDIRおよびジルコニアセンサを用いることにより，より簡易に車両に搭載できる構成とした。本装置ではこれらの測定項目に加えて，走行環境をモニタするために大気温度，湿度，大気圧力，車速，エンジン回転も計測しており，また全地球測位システムを搭載することにより，緯度，経度，高度の位置情報も同時にデータ集録が可能なシステムとした。また本装置の性能を確認するために，実験室内で従来の計測方法である排ガスの定容量サンプリング(CVS)法との並行試験を行った。本装置はCVS法ともよい相関を示したことから，実走行時における排ガスの計測においても十分な性能を持っていることが確認できた。

第 5 章では，本研究によって開発された車載型排ガス計測システムを用いて，実走行時における排ガスの動態調査を行った結果を記述した。2.2 L ディーゼルエンジンを搭載した車両の排ガス動態調査を行った結果，CO，CO<sub>2</sub>，HC，NO<sub>x</sub>の排出量は車両の走行速度と加速度に高い相関を持つことが明らかになった。また，実走行時における排出量データを，エンジン始動時，渋滞時，登り道走行時，下り道走行時，平均速度 20，40 km/h 走行時，高速道路走行時などの各条件に分けて解析を行った。その結果，単位走行距離あたりの排出量は，日本の排ガス規制で定められている 10-15 モードを実験室内で走ったときの結果と比較すると，条件によってNO<sub>x</sub>は最大で 5 倍以上，COは 3 倍以上，CO<sub>2</sub>，HCで 2 倍以上になっていることが明らかとなった。

第 6 章では，車載型排ガス計測システムの将来の展望について述べた。本研究において開発を行った車載型排ガス計測システムでは現在の規制成分であるCO，THC，NO<sub>x</sub>および燃費の計測は可能であるが，将来SO<sub>x</sub>，H<sub>2</sub>SやN<sub>2</sub>Oなど酸性雨や地球温暖化の要因となる未規制物質の計測には対応できていない。本研究の中では未だ車載可能とするまでには至っていないものの，紫外線蛍光法を利用したSO<sub>x</sub>，H<sub>2</sub>S分析計の開発に成功している。紫外線蛍光法は，NOの干渉が大きいため自動車排ガス用のSO<sub>x</sub>分析計としては従来利用されていなかったが，オゾンを積極的に添加するこ

とによりサンプルガス中のNOをNO<sub>2</sub>に変換し、NOからの干渉を低減した。また、H<sub>2</sub>Sを含む全還元性硫黄を酸化触媒によりSO<sub>2</sub>に変換することによりこれらの計測も可能とした。

第7章では、本論文で得られた結果、意義および今後の課題を総括した。米国では本研究によって開発された車載型排ガス計測装置を用いて実走行中の排ガスを計測することにより、新しい規制を制定しようという動きが出てきている。特に、シャーシダイナモ上に載せることができないために、これまで規制の対象となっていなかった大型ディーゼルエンジンを搭載した使用過程車の計測には、車載型の排ガス計測システムが必要不可欠である。このような規制に対応し、自動車排ガスの環境負荷を低減するためには、数多くの研究者あるいは自動車の開発者が自動車排ガスの実態調査を行うことが必要である。そのためには計測技術を高精度化、安定化すると共に、小型化、省電力化された計測システムを開発することが急務である。

## 本論文の基礎となる発表論文

No.	論文題目	著者名	発表誌名	本論文との対応
1	Development of a Wet-Based NDIR and Its Application to On-Board Emission Measurement System	H. Nakamura N. Kihara M. Adachi K. Ishida	SAE paper, 2002-01-0612 (2002) total 8 pages	第2章 第4章
2	Development of Hydrocarbon Analyzer Using Heated-NDIR Method and Its Application to On-Board Mass Emission Measurement System	H. Nakamura N. Kihara M. Adachi S. Nakamura K. Ishida	JSAE Review, <u>24</u> , 127-133 (2003)	第2章 第4章
3	Pitot 管流量計によるエンジン脈動計測の解析	中村博司 浅野一朗 足立正之 千田二郎	日本機械学会論文集(B編), <u>70</u> , 1673-1678 (2004).	第3章
4	Analysis of Pulsation Flow Measurement of Engine Exhaust by Pitot Tube Flow Meter	H. Nakamura I. Asano M. Adachi J. Senda	International Journal of Engine Research, in press	第3章
5	Analysis of CO, CO <sub>2</sub> , HC and NO <sub>x</sub> Emission from Diesel Vehicle in the Real World Condition	H. Nakamura N. Kihara M. Adachi H. Bandow	Atmospheric Environment, submitted for publication	第5章
6	Development of a New-UVF Analyser with O <sub>3</sub> Injection for Measurement of SO <sub>x</sub> and TRS in Vehicle Emission	H. Nakamura I. Asano H. Ohashi M. Adachi	SAE Fuel & Lubricant, 2004-01-1959(2004) total 7 pages	第6章

## 本論文に関係するその他の発表

No.	著書・学術論文等の名称	著者名又は 発行者名	発行所, 発表雑誌又は 発表学会等の名称	巻, 号, 頁 (年) 又は 発表の年月
1	Development of On-Board Emission Measurement System	S. Aoki H. Nakamura N. Kihara M. Adachi	LEMA	<u>473</u> , 19-25 (2003)
2	車載型排ガス計測システムの開発	中村博司 木原信隆	Readout	<u>24</u> , 127-133 (2003)
3	Sonolysis of Organic Liquids: Effect of Vapor Pressure and Evaporation Rate	Y. Mizukoshi H. Nakamura H. Bandow Y. Maeda Y. Nagata	Ultrasonic Sonochemistry	<u>6</u> , 203-209 (1999)
4	Sonochemical Reactions Occurring in Organic Solvents: Reaction Kinetics and Reaction Site of Radical Trapping with 1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl	K. Okitsu H. Nakamura N. Takenaka H. Bandow Y. Maeda Y. Nagata	Research on Chemical Intermediates	<u>30</u> , 763-774 (2004)
5	Raw Exhaust Modal Mass Analysis for Low Emission Vehicles Utilizing Improved Gas Analyzer with Fast Response	I. Asano H. Nakamura M. Miyai M. Adachi	SAE paper	2004-01-0970(2004)

## 審査結果の要旨

本論分は、当該研究によって開発された加熱型非分散赤外線（NDIR）分析計およびピトー管を用いた排ガス流量計を組み合わせた車載型の排ガス計測システムの開発、およびそれを用いた自動車排ガスの実態調査について記述したもので、以下の成果を得ている。

- (1) NDIR分析計に対する水蒸気による干渉および共存影響の大きさは測定ガス中の水蒸気濃度と測定ガス濃度により支配される。それらの間に存在する相関を明らかにすることにより、これらの影響を評価しその寄与を取り除くことに成功した。加熱型NDIR分析計は、測定成分濃度と水蒸気濃度を同一の光学系で測定することによりサンプルガスから水蒸気を除去せずに測定することを可能とした。

称号及び氏名 博士（工学）中村博司

学位授与の日付 平成17年3月31日

論文名 「Development of an On-Board Measurement System for  
Vehicle Exhaust Gas」  
(車載型排ガス計測システムの開発)

論文審査委員 主査 教授 坂東 博

副査 教授 安保 正一

副査 教授 藤村 紀文

- (2) ピトー管流量計の脈動流計測の検証および誤差の解析を行い、自動車排ガスの脈動流を正確に計測する手法を開発した。エンジン排ガスの脈動周波数の約5倍以上の応答周波数を持ち、かつ逆方向の差圧を計測できる差圧計とピトー管を組み合わせることにより、脈動流体でも精度よく計測できることを確認した。
- (3) 加熱型NDIRの技術を利用したCO、CO<sub>2</sub>、炭化水素（HC）分析計、ジルコニアセンサ技術を利用したNO<sub>x</sub>



分析計、およびピトー管式排ガス流量計を組み合わせることによって車載型排ガス計測システムを開発した。本装置では、走行環境をモニタするために大気温度、湿度、大気圧力、車速、エンジン回転、および緯度、経度、高度の位置情報も同時にデータ集録が可能なシステムとした。従来の計測方法である定容量サンプリング法ともよい相関を示したことから、実走行時における排ガスの計測においても十分な性能を持っていることが確認された。

- (4) 車載型排ガス計測システムを用いて、ディーゼル搭載車両の実走行時における排ガス動態調査を行った。排出量データを各走行条件に分けて解析を行った結果、単位走行距離あたりの排出量は日本の排ガス規制で定められている10-15モードを実験室内で走ったときの結果と比較すると、条件によっては $\text{NO}_x$ は最大で5倍以上、COは3倍以上、 $\text{CO}_2$ 、HCで2倍以上になっていることが明らかとなった。

本研究の成果は、今後の自動車排ガスの実態調査あるいは自動車開発に重要な知見を提供するものであり、それにより可能となる環境問題の解決に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

### 3. 最終試験結果の要旨

審査委員会は、平成17年3月1日、委員全員の出席のもとに申請者に論文内容の説明を行なわせ、関連する諸問題についての試問を行なった結果、合格と判定した。

### 4. 公聴会の日時

平成17年3月1日、午後1時00分～2時30分

### 5. 審査委員会の所見

本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。