

Feature Article

アプリケーション

排ガス流量計とジルコニア空燃比計を用いた 燃料消費率の瞬時計測

Real-time Fuel Consumption Measurement
Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor

秋田 将伸

Masanobu AKITA

燃費改善のためにはエンジンの挙動と関連した瞬時の燃料消費率の計測が重要である。今回超音波方式の排ガス流量計と直挿型O₂センサによる空燃比計測を組み合わせることにより、排ガスの瞬時燃料消費量を簡便かつ高速応答で計測する手法を提案する。高い応答速度で、配管内同位置の直接計測を行うことにより時間遅れや応答遅れの影響を受けずに計測を行うことができ、従来計測法との高い相関性を確認できた。また、過渡サイクル走行時の燃料カット前後での急激な燃料消費率の変化に対して希釈計測法と比較して応答速度の違いによる燃料消費率の差異が見られ、瞬時燃費を計測する手法として有用であることを示した。

The improvement of fuel efficiency is one of the most important issues in the R&D of powertrain system. The real-time fuel consumption can be determined by AFR (Air-to-Fuel Ratio) and raw exhaust gas flow rate and can be easily obtained without delay time by the in-situ measuring devices which can be installed at the same location. Integrated fuel consumption by this method showed a good correlation with that by the carbon balance method. On the other hand, when a fuel-cut is operated, the difference in transient behavior of the fuel consumption has been also observed due to the response time difference between these two methods. The result suggests that this method has a large potential for measuring the real-time fuel consumption.

はじめに

排ガスの分析・評価において、排ガス流量を直接計測することは困難な課題の一つであった。中軽量車両で排ガス規制への適合性評価に用いられる公定法には、排ガス流量を必要としない定容量希釈サンプリング(CVS)法が採用されており、排ガスの直接計測はこれまで大きな必要性を迫られることはなかったが、近年車両ハイブリッド化やアイドルストップ車の普及に伴い、走行中のエンジンの間欠動作が、CVS法での計測の誤差要因となることへの懸念が注目されてきた。この間欠動作に同期してサンプリング自身も間欠動作させることにより、CVS法自体の改良が提案される一方^[1]で、排ガス濃度と流量を直接計測し、瞬時マス計測を行うダイレクトマス計測も特に

研究開発用途で注目されるようになってきた。このような背景のもと、著者らは超音波方式の排ガス流量計を開発し、ダイレクト排ガス分析計と組み合わせたダイレクトマス計測をエンジン・車両開発効率向上手段としてユーザーに提案している。

今回、この排ガス流量計を用いた計測アプリケーションの一つとして、排ガス流量と空燃比を用いた瞬時燃料消費量計測を提案する。これはHORIBAグループが提案する新しい計測法である。この計測法の利点は、完成車両など燃料配管への加工が困難な計測対象に対して、その排ガスと空燃比を計測するだけで燃料消費量が計測できる点にある。エンジンベンチ上での評価試験の場合は、給油タンクからエンジンに至る燃料配管に燃料流量

計を接続して、燃料消費量を計測する方法が一般的である^[2]。一方、完成車両の試験の場合は、燃料流量計やそのための配管を燃料系に追加するのは困難である。CVS法を用いたカーボンバランス法では車両への加工無しで燃料消費量計測が可能であるが、原理上、過渡状態における急激な燃料消費率の変化に対しては十分な応答速度が得られにくい。著者らは、自動車の研究・開発において、これらの従来法と比較して簡便に、過渡的な挙動確認に十分な応答速度で、計測できる方法として(排ガス流量・空燃比法)を検討した。本稿では、その考え方と装置構成、および従来法との比較評価の結果を報告する。

燃料消費量の間接的な算出方法

燃料流量以外の計測値から間接的に瞬時燃料消費量を求める方法として、従来法であるカーボンバランス法、および本研究で著者らが検討した方法(排ガス流量・空燃比法)を説明する。

カーボンバランス法による燃料消費量

カーボンバランス法は、エンジンで消費された燃料中の総炭素質量と排出ガス中の総炭素質量とは同じという理論に基づいて総炭素質量を求める。すなわち、排ガス中の炭素を含む成分(CO₂, CO, HC)の濃度をCVS法で計測して排出質量に換算し、そこから総炭素質量を算出することにより、最終的に消費された燃料の質量を求める。CVS法では通常サンプリングバッグに希釈された排ガスを一定量蓄えた上で濃度計測を行うバッグ法が一般的であるが、バッグ法の代わりに希釈連続測定法(ダイリュートストリーム法)を用いれば、各成分の瞬時排出質量を得ることができ、燃料消費量を連続的に算出することが可能である^[3]。Equation 1に、カーボンバランス法による瞬時燃料消費量の計算方法を示す。

$$F_{CB}(t) = \frac{1}{R_{CWF}} \times \left(\frac{M_C}{a_{exh} \times M_H + M_C} \times HC_{MASS}(t) \right) + \frac{M_C}{M_{CO}} \times CO_{MASS}(t) + \frac{M_C}{M_{CO_2}} \times CO_{2MASS}(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで $F_{CB}(t)$ は時間 t における瞬時燃料消費量、 R_{CWF} は燃料の炭素質量割合、 $HC_{MASS}(t)$ 、 $CO_{MASS}(t)$ 、 $CO_{2MASS}(t)$ は時間 t におけるCO、CO₂、HC各成分の瞬時排出量、 M は各成分のモル質量、 a_{exh} は排ガス中のHCの平均水素

炭素原子数比を表す。

排ガス流量と空燃比に基づく燃料消費量

次に、排ガス流量と空燃比より燃料消費量を算出する方法について説明する。

空燃比は、エンジンに供給される空気と燃料の質量比であり、下式のように表現できる^[4]。

$$AFR(t) = \frac{q_{maw}(t)}{q_{mf}(t)} = \frac{q_{maw}(t) - q_{mf}(t)}{q_{mf}(t)} \dots \dots \dots (2) = \frac{q_{vew}(t) \times \rho_{ew} - q_{mf}(t)}{q_{mf}(t)}$$

ここで、 $AFR(t)$ は時間 t における空燃比、 $q_{maw}(t)$ は吸入空気の質量流量、 $q_{mf}(t)$ は燃料消費量、 $q_{mew}(t)$ は排ガスの質量流量、 $q_{vew}(t)$ は排ガスの体積流量、 ρ_{ew} は排ガス密度を表す。

Equation 2を変形することにより、燃料消費量を排ガス体積流量と排ガス密度及び空燃比で表す式が得られる。

$$q_{mf}(t) = \frac{q_{vew}(t) \times \rho_{ew}}{AFR(t) + 1} \dots \dots \dots (3)$$

排ガス密度はリッチ領域では数%変化するが、リーン領域ではほとんど変化がないため、一定値を使うことによる影響は実用上無視できると考えられる。また、排ガスの燃焼反応式に適切な仮定を設定することで空燃比の値から各成分濃度を推定できることが知られており、成分濃度から排ガス密度を算出することで、より高精度な計測が可能である。この「排ガス流量・空燃比法」の測定パラメータである排ガス流量と空燃比は、後述するように、いずれもエンジン排気管にて高速応答で計測できる可能

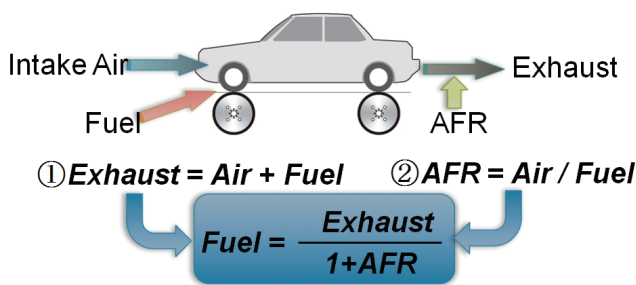


Figure 1 Principle of fuel flow measurement by exhaust gas flow and air-to-fuel ratio.

性がある^[5]。そのため、サンプリングや計測機器に由来する応答遅れの影響を受けにくいというメリットが予想できる。ただし、吸入空気流量が排ガス流量を用いて計算されるため、エンジン始動直後(コールドスタート時)など、排ガス流量計までの間で結露による体積変化が発生しやすい条件では注意が必要である。

計測装置の構成

排ガス流量計には新規開発した超音波方式の流量計を用いた。この方式は高速応答が得やすく排気管での計測が可能であるため、本計測に最適である。また、空燃比の測定には同じく排気管に直接設置できる直挿型のジルコニア(ZrO₂)式センサを用いた。これらの計測機器は、いずれも設置による圧力損失が非常に小さく、エンジンへの負荷は無視できる。以下に、詳細を説明する。

超音波排ガス流量計

Figure 2に超音波流量計の構造を示す。測定対象ガスが流れている配管内の対面に、超音波送受信器が角度をつけて取り付けられている。この送受信器は圧電素子を中心に構成されており、電気的信号を機械的振動に変換できる。この素子の共振周波数は適切な超音波周波数帯に設計されている。これらの送受信器に共振周波数の電圧パルスを印加すると、圧電効果により超音波パルスが発振される。超音波パルスは配管内のガス中を伝搬して、

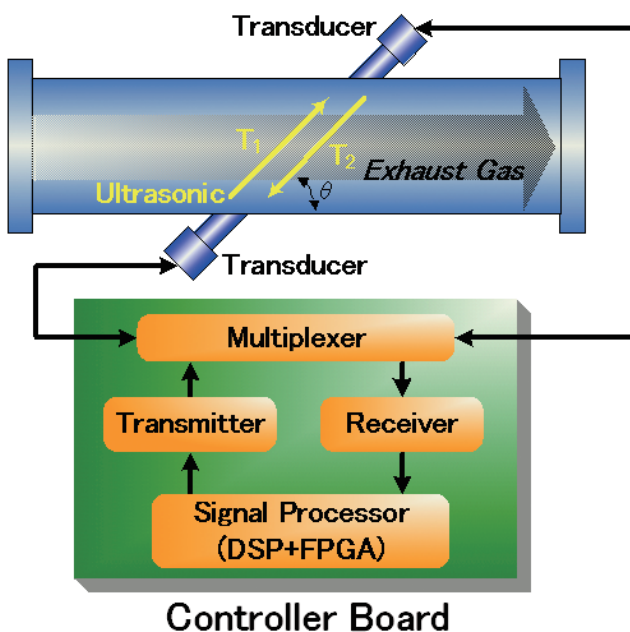


Figure 2 Principle of ultrasonic exhaust gas flow meter

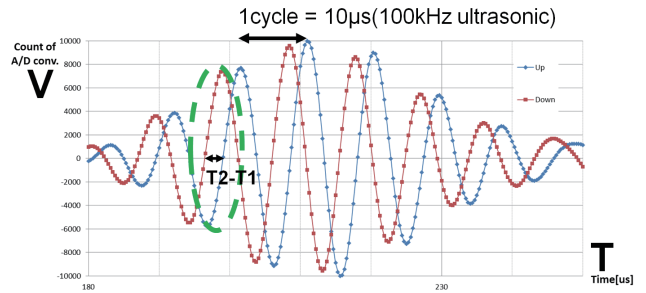


Figure 3 Ultrasonic signal wave form

互いに対面にある送受信器に到達し、再度電気信号へと変換されてFigure 3に示すような波形としてCPU基板内に格納される。

配管内のガスに流れがある場合、超音波パルスの伝播時間はその影響を受ける。上流向き、下流向きの伝搬時間は、それぞれ次のように表される。

$$T_1 = \frac{L}{c(t) + v(t) \cos \theta} \dots\dots\dots (4)$$

$$T_2 = \frac{L}{c(t) - v(t) \cos \theta} \dots\dots\dots (5)$$

ここで T_1 は下流方向への伝搬時間[s]、 T_2 は上流方向への伝搬時間[s]、 L は超音波送受信器間の距離[m]、 c は音速、 v はガス速度、 θ は超音波の伝播角度を表す。

Equation 4, 5は、それぞれEquation 6, 7のように変形できる。

$$c(t) = \frac{L}{T_1} - v(t) \cos \theta \dots\dots\dots (6)$$

$$c(t) = \frac{L}{T_2} + v(t) \cos \theta \dots\dots\dots (7)$$

Equation 6, 7から音速 $c(t)$ の項を消去すると、ガス流速を表すEquation 8が得られる。

$$v(t) = \frac{L}{2 \cos \theta} \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

Equation 8より分かるように、この方法で求められるガス流速は音速には依存しない。すなわち、組成の変化によりガス密度が変化しても、算出されるガス流速は影響を受けない。排ガス体積流量(標準状態)は、この排ガス

流速と配管径から計算できる。

$$q_{vev}(t) = k_{profile} \times A \times v(t) \times \frac{T_0}{T(t)} \times \frac{P(t)}{P_0} \quad \dots (9)$$

ここで、 q_{vev} は排ガス体積流量(標準状態換算)、 $k_{profile}$ は補正係数、 A は配管表面積、 T_0 標準温度、 T は排ガス温度、 P は排ガスの絶対圧、 P_0 は標準絶対圧を示す。なお、係数 $k_{profile}$ は、配管内のガス流速や温度の分布による影響を補正するためのものである。スムーズアプローチオリフィス(SAO)流量計など、参照流量計との比較により決定される。

本研究では、排気管で排ガス流量を計測することを前提に、エンジン排ガス専用の超音波流量計を用いた。この装置では、特殊な超音波送受信器を用いているため、高温のガスでも計測が可能である。また、伝搬時間差を計測しているため、配管汚れによる超音波伝搬時間の影響を低減できる利点がある。標準状態換算の流量応答は排ガス温度の応答にも依存するため、ガス温度に対して急峻な応答を示す温度センサを採用した。

ジルコニア式空燃比センサ

Figure 4に、ジルコニア式空燃比センサの構造を、Figure 5に同センサの実物を示す。測定対象のガスは、センサ表面の拡散孔より内部のスペース(拡散室)に拡散する。センシングセル部は、ジルコニア固体電解質の両面に電極が形成されており、基準大気側と拡散室側の O_2 濃度差により発生する電位差をモニタしている。ポンピングセル部は、外部から電圧をかけることで、ジルコニア固体電解質を通して O_2 を移送する働きがある。ポンピングセル部の電圧は、センシングセル部でモニタしている電位差が理論空燃比相当で一定になるように制御される。すなわち、リーン条件では拡散室に入った余剰 O_2 をくみ出し、リッチ条件では拡散室内の CO 、 H_2 、 HC を燃焼させる分の O_2 が汲み入れられる。ポンピングセルでは、移

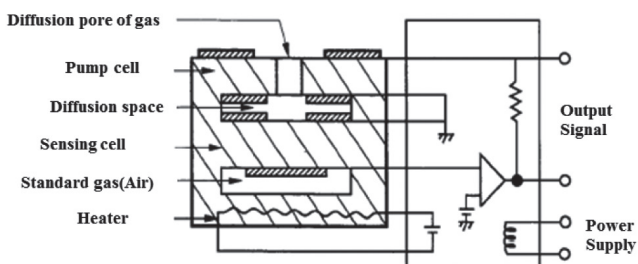


Figure 4 Configuration schematic of zirconia AFR sensor

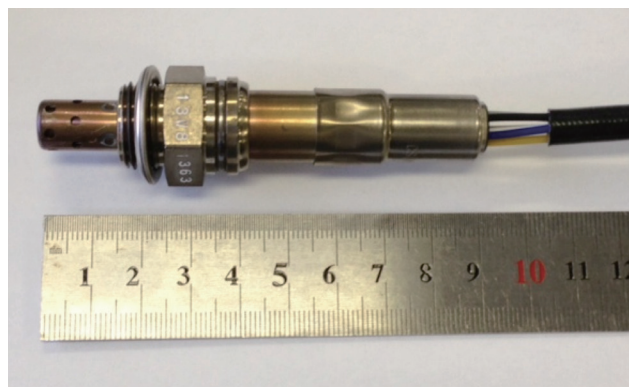


Figure 5 Zirconia AFR sensor

送する O_2 の量に比例した電流(ポンピング電流)が流れる。ポンピング電流は、Equation 10のように表される。

$$I_p = \frac{n \times F \times S \times P}{R \times T \times L} \times D_{O_2} \times C_{O_2} \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 I_p はポンピング電流[A]、 n は電極反応における電荷の数(=4)、 F はファラデー定数、 S はガス拡散孔の断面積、 P は圧力、 R はガス定数、 T は温度、 L はガス拡散孔の長さ、 D_{O_2} 、酸素の拡散係数、 C_{O_2} 、酸素濃度を表す。

ポンピング電流を測定することで理論空燃比と比較した O_2 の過不足が分かり、空燃比を求めることができる。

実験条件および方法

燃料消費量計測のためのセットアップ

Figure 6に、燃料消費量計測のための装置のセットアップを示す。超音波流量計は、試験車両のテールパイプ後に接続した。ジルコニア式空燃比センサは、超音波流量計の配管内に設置することにより、近接した位置での同時計測を実現するとともに、排ガス流量計と燃料流量計の2役を同一筐体で提供することが可能である。また、カーボンバランス法との関連評価のため、排ガス流量計の排気側をCVSシステムに接続した。

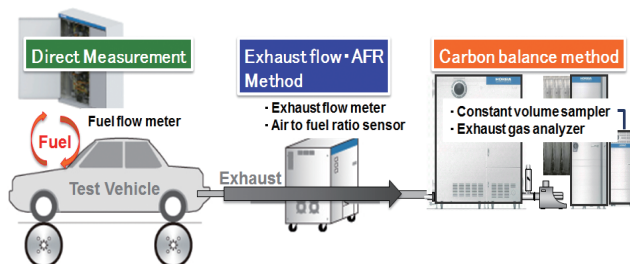


Figure 6 Experimental setup for fuel consumption measurement

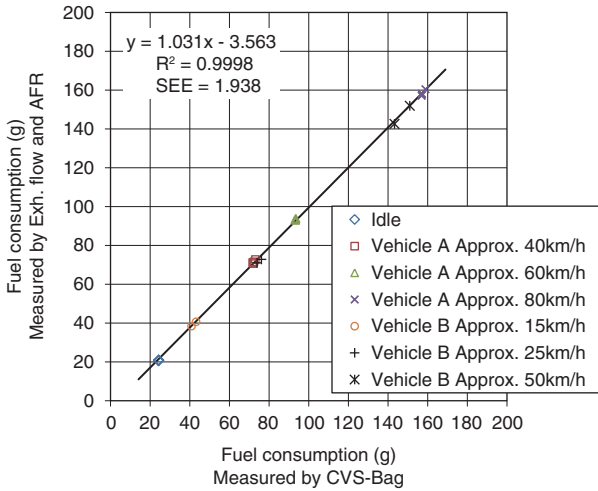


Figure 7 Correlation with CVS carbon balance method (integrated fuel consumption, steady-state condition)

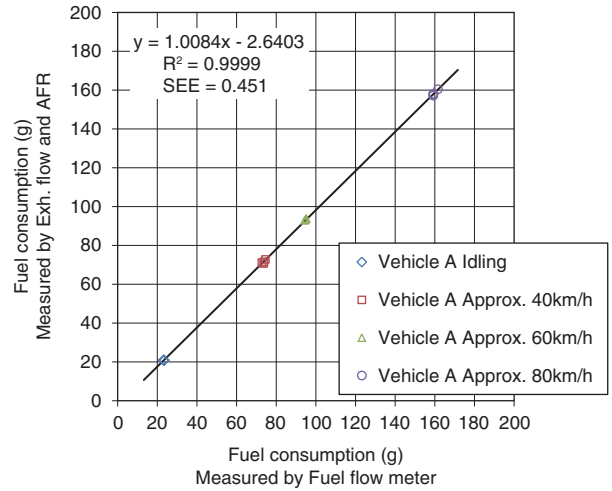


Figure 9 Correlation with fuel flow method (integrated fuel consumption, steady-state condition)

実験結果と考察

カーボンバランス法との比較(積算燃料消費量)

Figure 7に、定常走行状態における、排ガス流量・空燃比法およびカーボンバランス法(CVSバッグ計測)による燃料消費量の比較を示す。各プロットにおける排ガス流量・空燃比法の値は、3分間連続計測の積算値であり、カーボンバランス法では同一区間の排ガスをバッグ採取した。この結果では、アイドル状態から80 km走行時まで、良好な相関が得られていることが分かる。

Figure 8に、FTP試験サイクルを計2回走行した際の、各フェーズにおける積算燃料消費量を示す。「n1」で示す



Figure 8 Comparison with CVS carbon balance method (integrated fuel consumption, transient test)

データが1回目、「n2」が2回目のものである。図中、「Difference」で示したカーボンバランス法との計測結果の差は、最大で2%程度であった。また、フェーズ間のデータの傾向も、n1とn2でよく再現していることが分かる。

燃料流量計との比較(積算燃料消費量)

Figure 9に、定常走行状態における燃料流量計との比較を示す。各プロットにおけるデータ処理方法はFigure 7と同様である。カーボンバランス法との比較の場合と同様、全範囲で良好な相関が得られている。

Figure 10に、日・欧・米でそれぞれ使用される過渡サイクルにおける積算燃料消費量の比較を示す。傾向はFigure 8の場合と同様である。

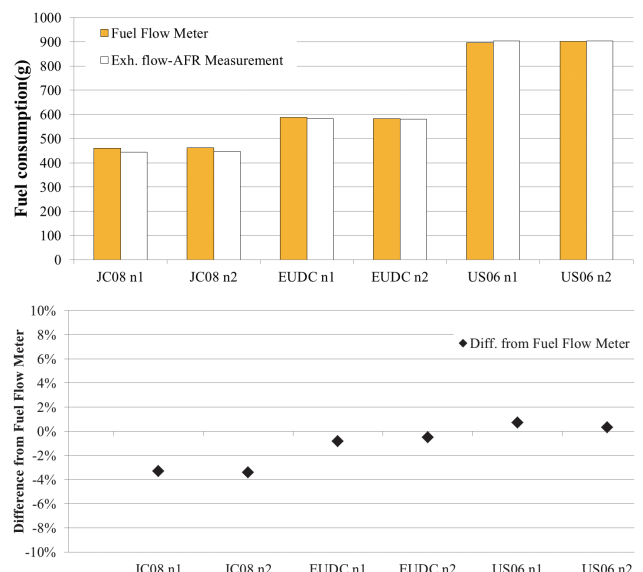


Figure 10 Comparison with fuel flow method (integrated fuel consumption, transient test)

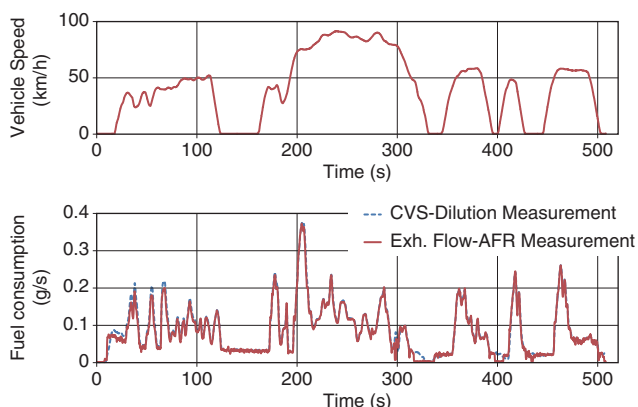


Figure 11 Example of real time fuel consumption measurement (FTP75 cycle phase 1)

カーボンバランス法との比較(瞬時燃料消費量)

Figure 11に、排ガス流量・空燃比法およびカーボンバランス法(ダイリュートストリーム計測)にて、FTP75コールドスタートフェーズにおける瞬時燃料消費量を計測した結果を示す。全体の挙動としては、比較的良好に一致していることが分かる。Figure 12に、300秒から500秒の拡大図を、空燃比の計測結果とともに示す。車両の減速中、空燃比が理論空燃比付近から急激に増加している区間がある。これは、減速時の不要な燃料消費を低減するために燃料カット機構が動作していることを示している。排ガス流量・空燃比法での燃料消費量の計測値は、予想されたとおり、燃料カットの間はゼロに近い値となっている。

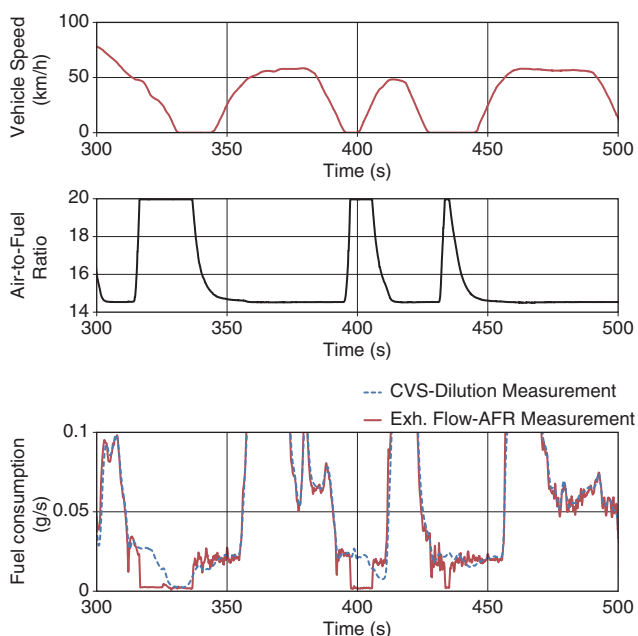


Figure 12 Real-time fuel consumption measurement of FTP75 phase 1

一方、カーボンバランス法では、燃料カットの間も燃料消費量がゼロにならない区間がある。これは、サンプルラインでのガス伝達の遅れや排ガス分析計の応答速度の影響によるものと考えられる。この結果より、エンジン動きに対応した瞬時計測が要求される場合に関しては、排ガス流量・空燃比法の方がより精度の高い結果を得られる可能性があると考えられる。

おわりに

本稿で提案している排ガス・空燃比法は排気配管に流量計を接続することにより、安全かつ簡便に計測が行えることが大きな利点である。車両の詳細特性が不明なベンチマーク試験や完成車両での実燃費評価での活躍が期待される。また、この手法は排ガス流量計アプリケーションの一つでもある。他のHORIBAグループ製品との組合せによるアプリケーション提案を増やし、HORIBAグループと自動車産業の発展に寄与していきたい。

参考文献

- [1] Yoshinori, O. et al., "Emissions Measurement System for Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Intermittent Sampling Strategy", SAE Paper 2013-01-1047
- [2] Nevius, T. et al., "A Comparison of Direct Vehicle Fuel Consumption Measurements With Simultaneous CVS Carbon-Balance Fuel Economy", SAE Paper 2008-36-0274
- [3] Inoue, K. et al., "Numerical Analysis of Mass Emission Measurement Systems for Low Emission Vehicles", SAE Paper 1999-01-0150
- [4] Nakamura, H. et al., "Development of hydrocarbon analyzer using heated-NDIR method and its application to on-board mass emission measurement system", *JSAE Review*, **24**, 127-133 (2003)
- [5] Masanobu, A. et al., In-Situ Real-Time Fuel Consumption Measurement Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor, SAE Paper 2013-01-1058



秋田 将伸

Masanobu AKITA

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