

Feature Article

アプリケーション

燃料流量計を用いた直接燃費計測

Direct Fuel Consumption Measurement Using Fuel Flowmeter

松山 貴史

Takashi MATSUYAMA

糸賀 友城

Yuki ITOGA

京都議定書に代表される温室効果ガス削減の動向により、運輸部門においては、排気ガス削減に結び付く規制として燃費基準が年々厳しく規定されてきている。それに伴い、各自動車メーカーの低燃費化への取り組みが急速に進んでおり、低燃費化を実現する技術開発のために、高精度の計測が可能な燃費計測システムが求められている。本稿では、高精度のダイレクト燃費計測の要望に応えうる弊社燃料流量計と、センサー・計測システムの視点における燃費計測に重要なポイントを紹介する。

Influenced by the trend toward reducing greenhouse gases represented by Kyoto Protocol, provisions on fuel consumption standard is stricter every year in transportation sector as regulations directly contributing to reduction of exhaust gases. As a result, efforts of automobile manufacturers to reduce fuel consumption are made more actively and quickly and therefore the technical development to realize low fuel consumption requires such a fuel consumption measurement system that enables highly accurate measurement. This article introduces our fuel flowmeter which satisfies the request for direct fuel consumption measurement with high accuracy and the important points to fuel consumption measurement at the viewpoints of sensor and measurement system.

はじめに

自動車やエンジンは、温室効果ガスであるCO₂の排出源の一つとなっている。たとえば、2012年の国内の統計では、運輸部門からのCO₂排出量は全体の約18%を占める (Figure 1)。このため、近年、世界各国でエンジンや自動車からのCO₂排出量が規制されるようになってきた。エンジンでのCO₂発生量は、燃料消費量で決まるため、CO₂の排出量を削減するには燃費の向上が欠かせない。これを受け、自動車業界全体で燃費改善技術の開発がますます盛んになっている。その開発プロセスでは、燃料消費量を精度よく計測することが求められる。

燃費の計測には、いくつかの方法が用いられている。その一つが、エンジンで消費される燃料流量を流量計で直

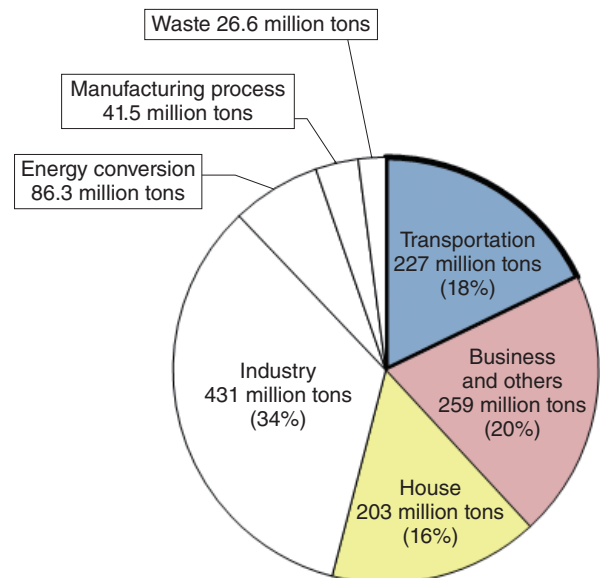


Figure 1 CO₂ emission of the transport sector (Japan 2012)
Source: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

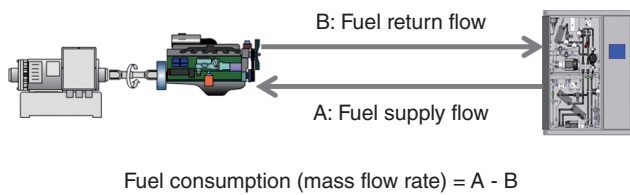


Figure 2 Image of fuel measurement by fuel flowmeter

接計測する方法である。ここで、この燃料流量計測に要求される計測精度を試算してみる。たとえば、排気量10 Lの重量車エンジンの場合、JE05と呼ばれる試験サイクル(1830秒)で運転した場合の燃料消費量は約3.6 kgと見積もられる。これを燃料の質量流量に換算すると約7.1 kg/hとなる。燃費については、この値からの1%の改善でも大きな意味を持つことを考えれば、少なくとも0.07 kg/h程度の変化を明確に検出できる必要があることがわかる。HORIBAグループでは、このような高精度での燃料流量計測への要求に対して、コリオリメータ式燃料流量計FQ-2200CRを提供している。本稿では、このFQ-2200CRにおける精度向上技術について紹介する。

燃料流量計FQ-2200CRの概要

装置の全体構成

Figure 2に、燃料流量計を用いた燃費の直接計測のイメージを示す。実際に消費された量(流量)は、エンジンへの燃料供給ラインとエンジンからの燃料リターンラインとの流量の差分から求める。このような燃料流量計による燃費計測は、リアルタイムの燃料消費量を連続計測できるのが大きな特長である。その一方、燃料ライン中に流量計を組み込む必要があり、完成車両の試験時には適用しにくい面もある。そのため、エンジンの研究開発現場や重量車用エンジンの認証試験など、主にエンジン単体で

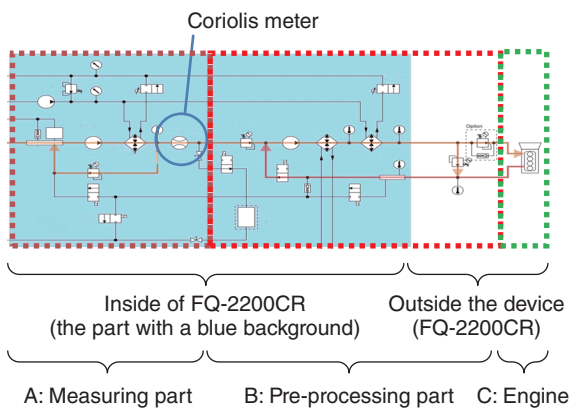


Figure 3 Fuel measurement flow of FQ-2200CR

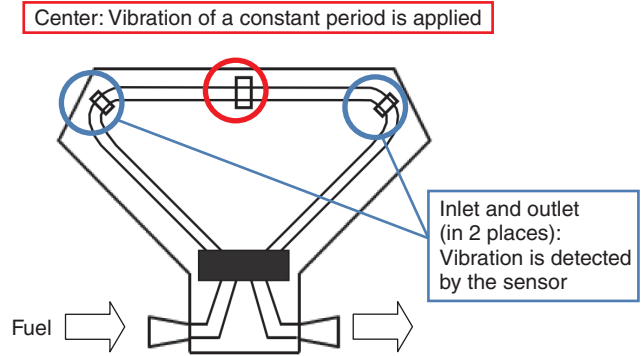


Figure 4 Outline of Coriolis meter

の燃費計測に使用される。

Figure 3に、燃料流量計FQ-2200CRのフロー図を示す。FQ-2200CRでは、コリオリメータと呼ばれる質量流量センサを用いて、燃料流量を検出している。コリオリメータの原理と特徴については後述する。青枠で示した範囲がFQ-2200CRの内部である。Figure 3中、A部は計測部にあたり、コリオリメータもここに搭載されている。また、B部で示す部分は、エンジンに送られる燃料の温度と圧力を調整する前処理部となっている。C部は、試験対象のエンジンである。

コリオリメータの原理と特徴

FQ-2200CRに使用しているコリオリメータは、1本のつながった配管で2つのループを作り、そのループ部を互いに平行に配置した構造となっている。Figure 4に、コリオリメータをループに対して垂直の方向から見た概略図を示す。ループの中央のポイントには、コイルにより一定周期の振動が加えられている。その両側、燃料の入口側と出口側のポイントには、実際の配管の振動を検知するセンサが設置されている。

Figure 5に、コリオリメータによる燃料流量検出の原理を

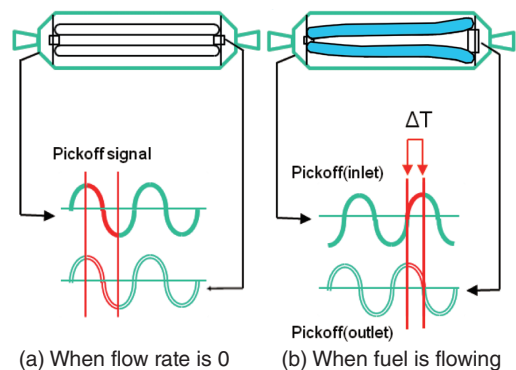


Figure 5 Principle of Coriolis meter

示す。Figure 5aは、ループ内部に燃料の流れがないときで、ループの2箇所でもニタしている振動の位相がそろっている。一方、Figure 5bはループ内部を燃料が流れているときである。このケースでは、2箇所でもニタする振動波形に位相差(ΔT)が生じている。これは、流体の流れている配管に対し、流れと垂直方向に振動を加えると、コリオリ力と呼ばれる力が発生するためである。コリオリ力の大きさは配管内の質量流量に依存するため、検出される位相差から質量流量を算出することができる。

コリオリメータでは、センサから直接、「質量」としてのリアルタイムの流量を知ることができる。「容積」流量を検出するタイプのものとは違い、燃料密度を用いた質量への換算が不要であるため、密度補正に起因する誤差の影響を排除できる。なお、一般には、コリオリメータは低流量域での繰り返し性が確保しづらなのが難点とされている。後述するように、FQ-2200CRでは、HORIBAグループ独自の技術によりこの問題点を解決している。

繰り返し性向上のための技術

コリオリメータ式燃料流量計の繰り返し性を確保するには、センサであるコリオリメータそのものの条件のほか、エンジンに燃料を供給する前処理部の条件もポイントとなる。以下、FQ-2200CRで応用されている技術を紹介する。

流量計測部の条件制御

コリオリメータでは、内部を通っている燃料の温度・圧力の変化が、センサ出力に影響する可能性がある。Figure 6に、この影響を抑制するためのポイントを示す。

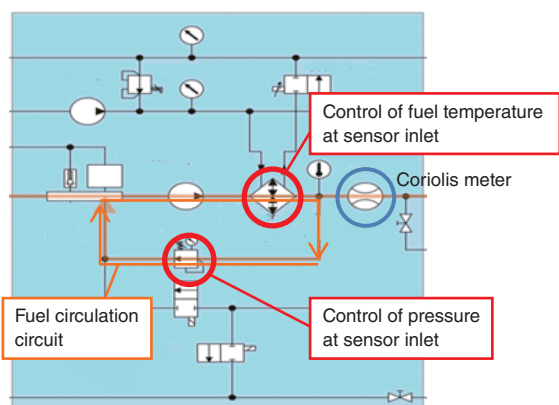


Figure 6 Inhibition of influence of temperature and pressure in coriolis meter.

このように、コリオリメータ入口に燃料循環回路を設け、レギュレータを用いて燃料圧力を、熱交換器にて燃料温度を制御している。この回路によりゼロ点校正時点と実計測時の条件をそろえ、センサ出力への温度・圧力の影響を抑制している。

また、コリオリメータの出力に影響する別の要因として、センサ部の振動があげられる。すでに説明したように、コリオリメータは内部の配管を振動させて質量流量を検出している。配管内の燃料の脈動、あるいは外部の振動がコリオリメータ内の配管振動と共振してしまうと、検出精度を悪化させる可能性がある。そこで、燃料ポンプや外部からの振動が伝わりにくいフレキシ管を燃料配管の一部に使用し、さらにコリオリメータには防振対策を行っている。

前処理部の条件制御

コリオリメータで燃料流量を計測する際、エンジンとコリオリメータを接続する前処理部(配管・レギュレータなど)内にはある程度の容積が存在する。この容積が温度により変動する、あるいはこの部分を流れている燃料の密度が温度・圧力により変動すると、エンジンが消費した燃料をコリオリメータで検出する際の応答時間に影響を与える。この現象は、燃料流量の計測結果の繰り返し性悪化の一因となり得る。Figure 7に、前処理部における温度・圧力影響の低減策を示す。

FQ-2200CRでは、内燃機関直前まで燃料を循環させ、燃料供給温度を安定させている。この温度制御には熱交換器2式を使用する。まず、1次側の熱交換器で燃料温度をターゲット温度+ α °Cまでいったん昇温し、次に、2次側

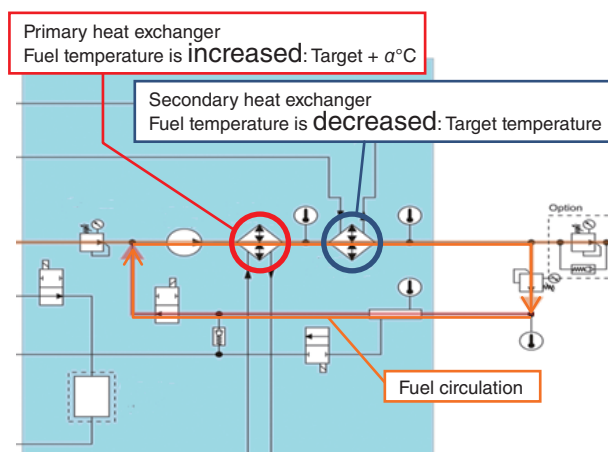


Figure 7 Inhibition of influence of temperature and pressure in the preprocessing part

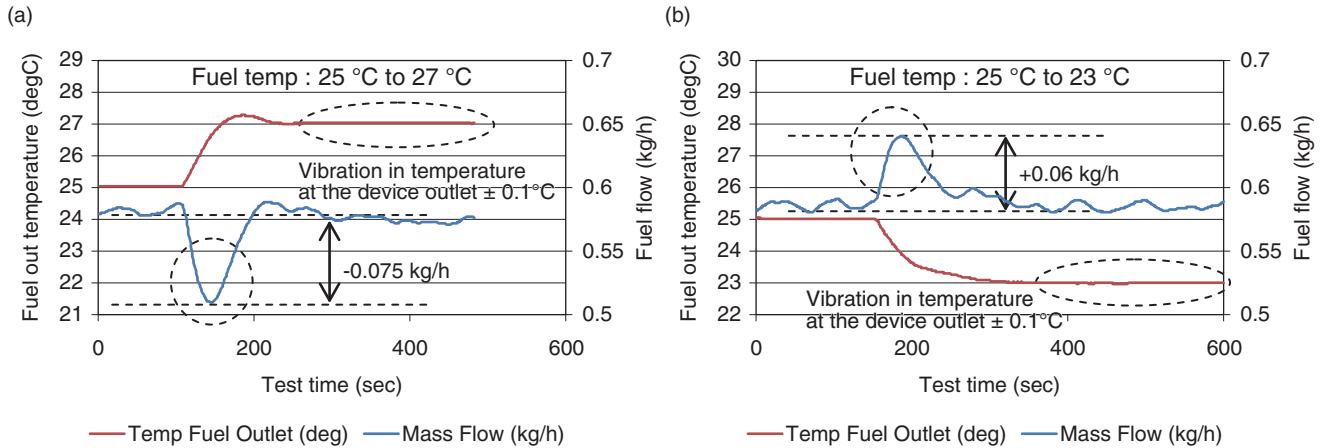


Figure 8 燃料温度を変化させた場合の質量流量出力

の熱交換器でターゲット温度へ冷却する。ここで、 α は一定値である。このように2段構えの制御を行うことで、燃料温度を高精度で制御することが可能である。

前処理部における温度変化の影響の例

ここでは、参考として、燃料温度が変化したときの前処理部での影響を確認した例を紹介する。Figure 8に、FQ-2200CRにて、内部の燃料温度を急変させたときの出力の例を示す。燃料流量は一定の状態、燃料温度制御の目標温度を25°Cから27°C (Figure 8a), または25°Cから23°C (Figure 8b)に変更した。いずれのケースも、燃料温度が約100秒かけて変化する間に、燃料流量出力に-0.075 kg/hまたは+0.06 kg/hのふらつきが発生している。また、温度安定後には、出力は温度設定変更前と同レベルに戻っている。

上の現象の要因として、前処理部に使用しているレギュレータPR4 (Figure 9)の容積が温度により増減していることが考えられる。Figure 10に、このレギュレータの動作と内部で働く力を示す。燃料流量がゼロの場合、レギュレータ内部の流路はレンジスプリングの力により閉じた状態にある (Figure 10a)。一方、圧力を制御した状態で燃料が流れているときには、下部のスプリングにより上部

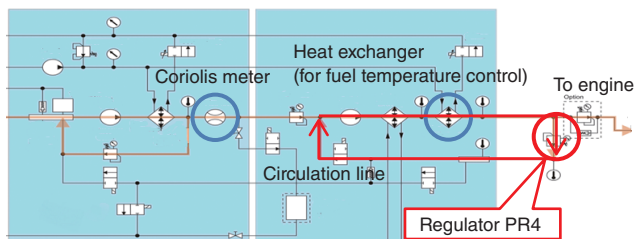
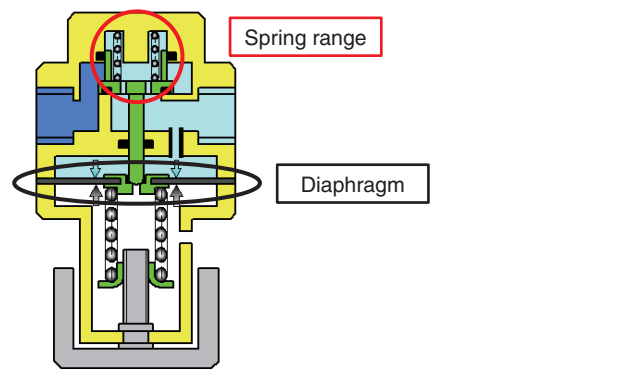
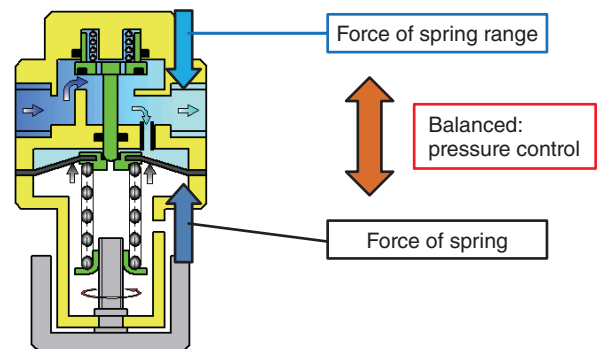


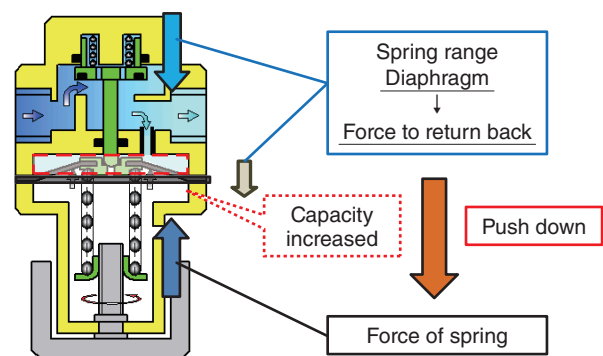
Figure 9 Influence of fuel temperature in regulator (preprocessing part)



(a) : Zero flow rate state

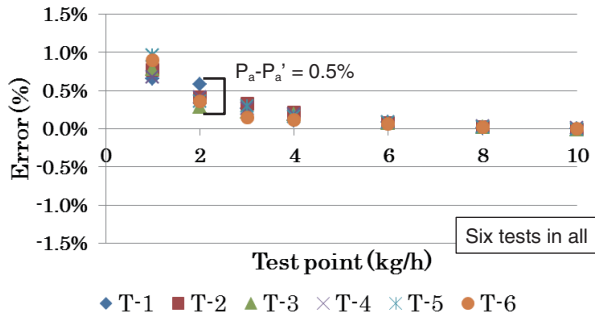


(b) : State where fuel is flowing

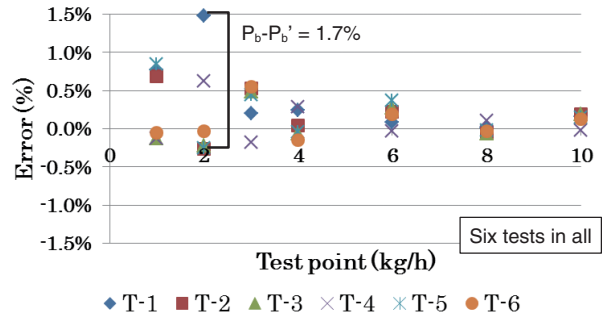


(c) : In case that temperature is decreased from (b) state

Figure 10 Movement of regulator and force within regulator



(a) With temperature control (ordinary operation)



(b) Without temperature control

Figure 11 Result of evaluation of flow rate measurement accuracy

のレンジスプリングが押し上げられて流路が開き、同時にダイヤフラムも燃料流路側にせり出した形となっている (Figure 10b)。ここで、燃料に接しているレンジスプリング(カーボンスチール製)やダイヤフラムは、温度によりスプリング力や硬度が変化する。この作用により、たとえば、燃料温度が25℃から23℃に急に下がった場合、ダイヤフラムおよびレンジスプリングには“元に戻ろうとする力”が発生する (Figure 10c)。その結果、ダイヤフラムの形状がFigure 10aの静止状態に近づき、レギュレータ内の容積が増加する。温度下降時 (Figure 6b) でみられた燃料流量出力のふらつきは、この増加した容積に流れ込んだ燃料分を検出している可能性がある。従って、誤差

要因を低減させるためには、燃費計測中における燃料温度変化を抑える必要があると考えている。FQ-2200CRでは、Figure 9に示すように、循環ラインにある熱交換器とレギュレータを用いて、設定値から±0.1℃の振れ幅で高精度に燃料温度を制御している。

FQ-2200CRの繰り返し性の実力

Figure 11に、FQ-2200CRの流量精度を確認した例を示す。確認の方法の詳細についてはFigure 12, Figure 13を用いて後述する。横軸は基準器とした外部のコリオリメータによる質量流量、縦軸はその基準器とFQ-2200CRの指示差(%)である。Figure 11aには、前述した繰り返し性向上技術を取り入れた通常の状態における確認結果、Figure 11bには、一時的にこれらの対策を無効にした状態での結果を示した。対策をしていないFigure 11bの状態では、特に低流量域で、テスト結果の最大値Pと最小値P'の差が大きい。一方、精度向上技術を取り入れたFigure 11aの状態では、1 kg/h~10 kg/hの全領域についてテスト結果の最大値Pと最小値P'の差が小さく、繰り返し性が大きく向上していることが確認できる。

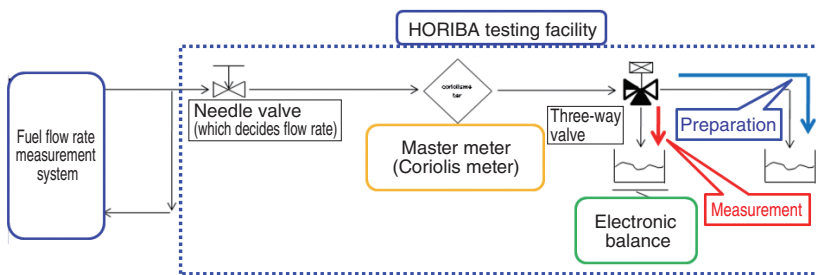


Figure 12 Flow in flow rate measurement accuracy inspection facility

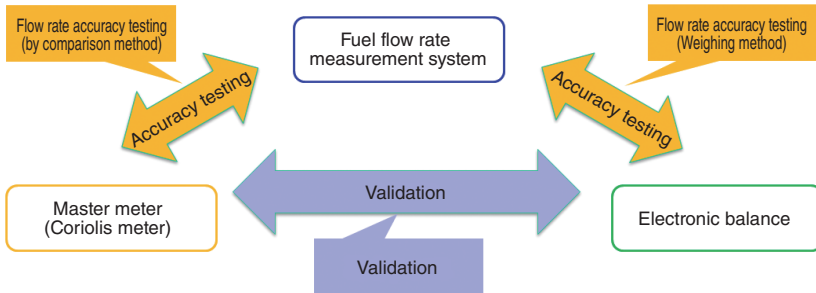


Figure 13 Flow rate accuracy testing method

Figure 12に、Figure 11における流量計測精度評価に用いている検査設備のフロー、Figure 13にそのコンセプトを示す。装置の精度を評価する基準器としては、コリオリメータと電子天秤の2種類を使用している。このうち、コリオリ

メータを基準とする評価は、評価対象の計測システムと基準コリオリメータの出力(ともに質量流量)を直接比較する「比較法」である。なお、2つのコリオリメータを接続して評価することから、検査設備は、振動が相互干渉しないような設計となっている。一方、電子天秤については、流量計測中のみ、流れている燃料が電子天秤(浮力補正付き)の受け皿に流れ込む構成をとっている。評価は、計測システムの流量積算値と電子天秤の読み値である質量とを比べる「秤量法」による。このように、2種類の基準を使用することで、FQ-2200CRの流量計測精度および検査自体の妥当性を同時に検証し、信頼性を確保している。

おわりに

本稿では、燃料直接計測法に使用できるコリオリメータ式燃料流量計(FQ-2200CR)について、繰り返し精度向上のための技術を紹介した。本システムは、高精度なリアルタイム燃費計測ツールとして、エンジンの研究開発の高効率化や評価期間短縮に役立つものと確信している。今後も、より高性能でより信頼できる燃料流量計の提供を通じ、内燃機関・車両の性能計測に引き続き貢献できるように、取り組んでいく。



松山 貴史

Takashi MATSUYAMA

株式会社 堀場製作所
開発本部 エンジニアリングセンター
自動車計測システム設計部



糸賀 友城

Yuki ITOGA

株式会社 堀場製作所
開発本部 エンジニアリングセンター
自動車計測システム設計部