

JARIにおけるFCV燃費試験法開発^{*1}

Development of Fuel Consumption Measurement Methods for Fuel Cell Vehicles at JARI

黒田 英二^{*2}
Eiji KURODA矢野 勝^{*2}
Masaru YANO渡辺 正五^{*3}
Shogo WATANABE

1. はじめに

燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle 以下、「FCV」という）は高効率・クリーンという特長から、21世紀のエネルギー・環境対策を担う主要な車として研究開発が進められている。昨今では公道走行試験やリース販売など実用化に向けた動きが活発化しているが、FCVの普及促進を図っていくためにはコスト低減や耐久性向上などハード面の開発とともに、円滑な導入に向けたソフト面の整備が重要である。特に燃費計測は自動車の効率評価に不可欠であり、近年は国際標準化活動の高まりもあって試験法の早急な整備が望まれてきた。そこで当研究所は2000年より水素FCV燃費計測手法の研究に着手し、内燃機関自動車で適用されてきた試験法と同等レベルの精度、簡便性を有する種々の手法を考案、評価してきた^{1)~5)}。成果は国際標準化会議（ISO/TC22/SC21 WG2電動車両の性能・燃費）の議論に活用され、2008年5月1日にFCV燃費試験法が国際規格（ISO 23828:2008 Fuel cell road vehicles - Energy consumption measurement - Vehicles fueled with compressed hydrogen）として発行された。本報では、規格に採用された燃費計測手法の原理・特徴、開発の経緯、計測の実証例などを紹介する。

2. 開発した計測手法の原理・特徴

開発した計測手法は、燃費試験において燃料電池自動車の燃費、すなわち水素消費量を測定消費量の±1%以内の誤差で計測するものである。自動車の燃費評価は通常、シャーシダイナモメータ

上に試験車両を載せ、所定のパターンを走行する際に消費される燃料量を測定することで行う。本開発では、各種の計測標準や従来の試験方法を参考としながら、燃料電池自動車の燃費計測手法として以下の三つを新たに考案した。

2.1 質量法

燃料容器の質量を試験前後で計測することで、水素消費量を求める方法である。

$$W = g_1 - g_2$$

ここで、 W =水素消費量 [g]、 g_1 =試験前の容器質量 [g]、 g_2 =試験後の容器質量 [g]

気体流量の一次標準と基本原理は同様であり、天秤の分解能と計測系の再現性に留意すれば精度の高い計測が可能である。試験車両に搭載された燃料容器を秤量することは実質困難なため、Fig. 1のように秤量用の容器（水素高压容器）を車外に設置して試験をおこなう。

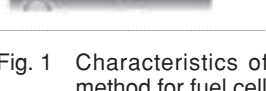
Measurement method	Characteristics
Gravimetric method 	Principle : Weighing the H ₂ tank before and after the test Accuracy : within ±1% error for measured value Equipments : Precise balance, H ₂ tank Result : Total fuel consumption
Pressure method 	Principle : Calculating the change in H ₂ moles in H ₂ tank from equation of state before and after the test Accuracy : within ±1% error for measured value Equipments : Pressure & Temp. sensor, H ₂ tank Result : Total fuel consumption
Flow method 	Principle : Flow Measurement by gas flow meter Accuracy : within ±1% error for measured value Equipments : Flowmeter (Oscillation absorber if necessary) Result : Total fuel consumption Real-time measurement

Fig. 1 Characteristics of fuel consumption measurement method for fuel cell vehicles

*1 原稿受理 2008年6月25日

*2 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター

*3 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター長

2.2 圧力法

高圧容器内のガス圧力・温度から水素消費量を算出する方法である。気体の状態方程式から試験前後の水素のモル数変化を求めることで、消費量がわかる。

$$W = m \times \frac{V}{R} \times \left(\frac{P_1}{z_1 \times T_1} - \frac{P_2}{z_2 \times T_2} \right)$$

ここで、 W =水素消費量 [g], m =水素分子量 2.016 [g/mol], V =試験容器の容積 [m³], R =ガス定数 8.314 [J/(mol・K)], P_1 =試験前のガス圧力 [Pa], P_2 =試験後のガス圧力 [Pa], T_1 =試験前のガス温度 [K], T_2 =試験後のガス温度 [K], $z_1=P_1$, T_1 における圧縮係数, $z_2=P_2$, T_2 における圧縮係数

流量一次標準である定積槽と同様の原理であり、精度の高い計測が期待できる。流量標準では多点の温度計測と槽内温度の均一化で高精度を実現しているが、本開発では実用性を考慮し温度測定は容器内ガス平均温度を代表する容器表面の1点としている。容器容積は正確に把握する必要があり、試験用容器を使用する (Fig. 1)。

2.3 流量法

燃料配管中を流れる水素の流量をガス流量計により計測、積算する方法である。

$$W = b \times m / 22.414$$

ここで、 W =水素消費量 [g], b =標準状態 (273.15K, 101.3kPa) における積算水素流量 [L], m =水素分子量 2.016 [g/mol]

内燃機関自動車の流量測定法⁶⁾と同様の考え方であり、流量計は車内もしくは車外の燃料供給配管中に設置する (Fig. 1)。試験モードの水素消費量のほか、走行中の瞬時流量を計測できる利点がある。

3. 開発の経緯

3.1 評価基準の構築

計測手法の開発にあたり、まず初めに各手法の精度を検証できる評価基準を定めた。本開発では、気体流量の二次標準でもある音速ノズルに着目し、燃料電池自動車の燃費試験で想定される水素流量を安定かつ高精度に発生できる装置を構築した。装置の概略をFig. 2に示す。音速ノズルは計9基用い、2~2,000 [L/min]までの流量を±1%以内 (読み値) で発生できる。この音速ノズルで発生した流量を基準とし、質量法、圧力法、流量法による測定結果と比較することで各手法の精度を評価した。また、実際に水素ガスを使用することで実使用条件 (ガス種、温度、圧力) での評価を可能とし、試験パラメータや機器改良が精度に及ぼす影響を明らかにして各手法の開発を進めた。

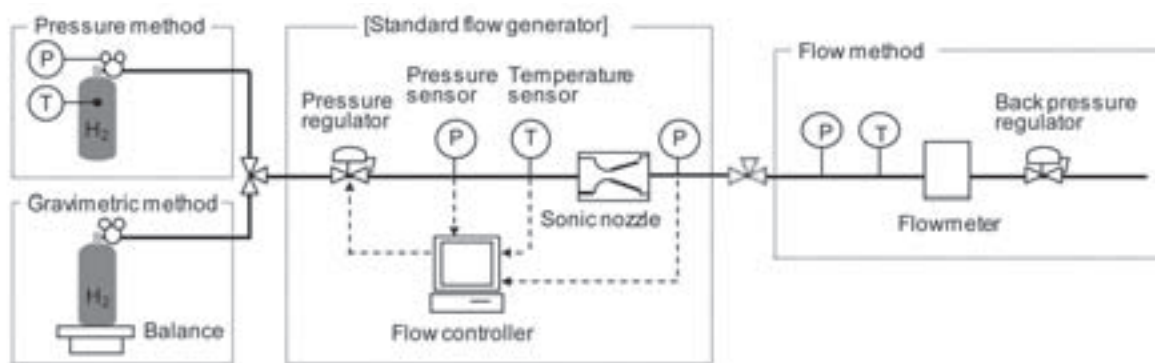


Fig. 2 Schematic diagram of accuracy verification testing system for measurement method

3.2 各手法の検討

3.2.1 質量法

質量法の開発では、水素消費による容器質量の微小な変化を正確に計測するため、高精度な天秤が適用できる計測環境を実現した。

水素は非常に軽い気体であるが、被計量物である試験容器は一般に鋼製の高圧容器であるため、風袋質量に対して微小な質量を計測することになる。このため、十分な分解能を有する天秤と安定した計測環境が重要となる。そこで本開発では、最小表示0.01g（水素 約0.1NL相当）、最大秤量52kgの高精度天秤を導入し、振動や気流、周囲温度の影響を抑制した計測環境を実現した（Fig. 3）。さらに天秤の偏置誤差を低減して高い繰り返し性を維持するため、試験容器の移送機構を設けた。

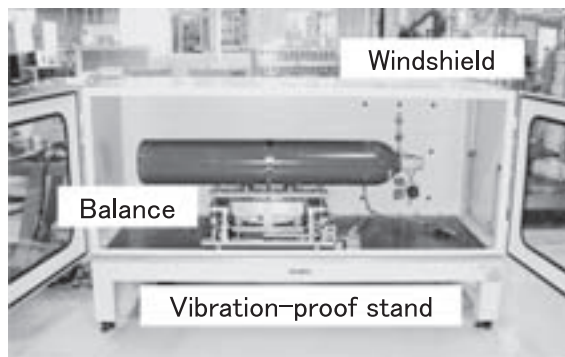


Fig. 3 Test equipment for gravimetric method

測定は、容器を配管に接続したまま天秤上の容器の質量変化から直接求める方法（動的質量法）と試験前後で容器を切り離して質量変化を測定する方法（静的質量法）の2通りが考えられる。先に前者の方法で検討を開始したが、容器温度変化による気流や浮力、ガス圧力変化による配管へかかる力などが誤差を生じることから、本開発では後者の方法を採用した。

3.2.2 圧力法

圧力法の開発では、水素消費時の容器内ガス温度分布を考慮した代表ガス温度の計測と試験容器容積の正確な把握に独自の検討を進めた。

高圧容器から水素が放出される際、圧力の低下とともにガス温度が低下する。この時、容器内部では流動や伝熱により容器上部より下部のガスが低温となっており、この温度分布が圧力法における計測を困難にしている。

容器内のガス温度を多点で測定できる高圧容器を用い、水素放出時の温度挙動を観察した結果をFig. 4に示す。Fig. 4より、容器内各部のガス温度は時間とともに低下し、流量が大きいほどその度合いは大きいことがわかる。また、ガス温度の計測および赤外線カメラによる容器表面の熱画像処理映像から、容器上部より下部が低温となることが確認された。シミュレーション結果をFig. 5に示す。容器空間全体の平均温度に対し、各位置における温度の差分をとり、その絶対値の範囲に応じて色分け表示した。図中、濃色部分が平均温度から $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内の範囲である。図より、ガス放出時には容器の設置方向に関係無く上下方向に温度分布を生じることがわかる。温度分布の推移やガス流動の様子をアニメーションで観察したところ、温度の高い水素は容器壁面付近から上昇し、温度の低い水素は容器中央部を下降した。これより、実験で観察された温度分布現象は、水素放出による温度降下と速度場の作用に加え、浮力によって生じるものと考えられる。種々の充填圧、放出流量の条件で計算した結果、平均温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ となる範囲は空間の1点ではなく広がり分散をもつこと、時間とともに変化し容器中央部から約15～50%上方に位置することがわかった。この平均温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ となる範囲から求めた水素消費量は目標精度 $\pm 1\%$ 以内を満足しており、温度測定点として同範囲が適していることがわかった。

また、試験容器の容積を正確に把握するために、容器製造工程において精密測定（注水秤量）を実施した。さらに、容積安定化の観点から水充填による加減圧を繰り返して容器材料を塑性変形させ、ガス充填圧と容器膨張率の関係を $0.02\%/MPa$ に線形化させたほか、容器弁から減圧弁までの配管部容積も算出して高精度化を図った。

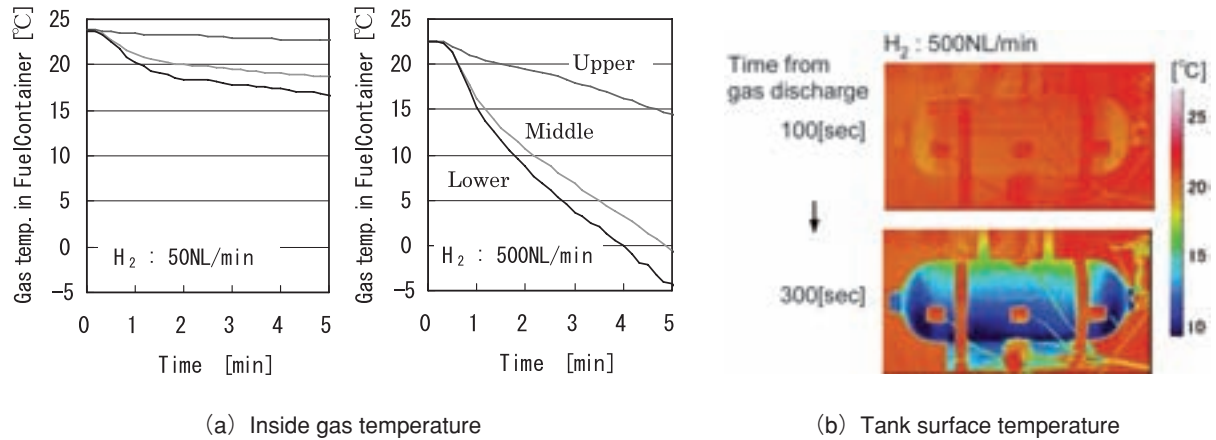


Fig. 4 Change in inside gas temperature and tank surface temperature during gas discharge

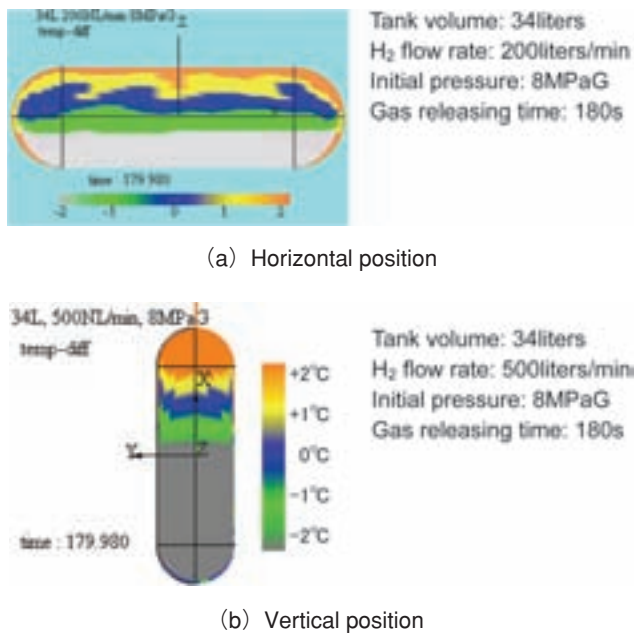


Fig. 5 Gas temperature distribution in vertical cross-section of tank by simulation

以上の検討をもとに圧力法の精度を検証した結果をFig. 6に示す。高压容器内のガス温度計測は一般に困難であることから、試験後に容器をソーク（放置）して容器表面の温度を計測することで代用できないか検討した。温度測定点は実験およびシミュレーションの結果からガス平均温度を代表する1点としている。水素放出前後の容器表面温度・ガス圧力から求めた場合（ソーク無し）では誤差が生じるが、放出後に5分、30分とソークを行うことで誤差が小さくなっており、容器表面温度の計測でも測定点とソーク時間を適切に選べば高精度を実現できることを明らかにした。

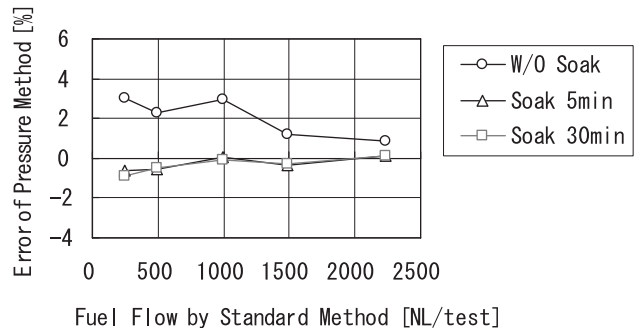


Fig. 6 Influence of soaking time on pressure method (calculation from tank surface temp)

3.2.3 流量法

流量法の開発では、高精度・高応答の水素流量計を検討するとともに、燃料流量の脈動に対応した測定系を構築した。

水素流量計にはさまざまな種類があるが、FCVの燃費計測への適用性は明らかではなかった。そこで当研究所では、これまでに熱式、コリオリ式、体積式、超音波式、差圧式などの水素流量計について定常流での瞬時流量誤差や流量変動を与えた際の積算流量誤差などを調べた。また、FCVの燃費試験から、試験車両によっては誤差が増大すること、そのような車両では流量波形に脈動があることを確認した。

近年の開発では、熱式、超音波式、差圧式流量計について流量範囲の拡大、サンプリングレートの向上、高分解能化などの改良を進めたほか（Table 1）、流量計の脈動影響を解析した。脈動影響評価装置の概要をFig. 7に示す。装置は脈動発生部と流量制御部から構成される。脈動発生部では

空圧弁のPWM制御により脈動周波数を、ニードル弁の開度制御により脈動振幅が調整できる。また、脈動状況は高応答のピトー管式流量計により確認した。流量制御部では音速ノズルで基準となる流量を発生させることで、流量計の誤差評価を可能とした。

Table 1 Specification of hydrogen flowmeter

Type	Thermal	Ultrasonic	Diff. pressure
Range	0-2000 NL/min	0-900 NL/min	0-1500 NL/min
Accuracy	±1 %RD (8-2000 NL/min)	±1 %RD (13-900 NL/min)	±1 %RD (10-1500 NL/min)
Sampling rate	5 ms	20 ms	20 ms
Pressure drop	≤50 kPa (@2000 NL/min)	≤25 kPa (@900 NL/min)	≤20 kPa (@1500 NL/min)
Pressure range	0-1 MPaG (cap. 1.5 MPaG)	0-1 MPaG (cap. 1.5 MPaG)	0.5-1 MPaG (cap. 1.5 MPaG)
Photo			
Note	Three sensor equipped #1: 0-20 NL/min #2: 20-200 NL/min #3: 200-2000 NL/min	Small pipe (φ5.7mm) configuration and axial sensor design	Two sensor equipped #1: 0-100 NL/min (14Pa FS) #2: 100-1500 NL/min (20kPa FS)

[FS: Full Scale, RD: Reading]

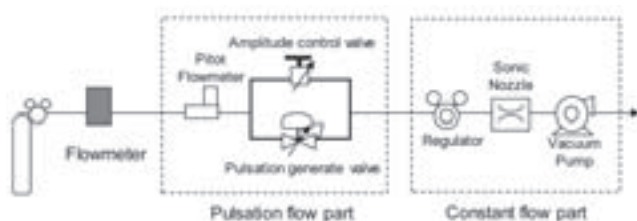


Fig. 7 Testing system capable to generate pulsating hydrogen flow

脈動の振幅比（片側の振幅／平均流量）が流量計誤差に及ぼす影響をFig. 8に示す。脈動周波数や流量計種類により誤差への影響は異なっているが、脈動振幅が大きくなるほど誤差が増大する傾向がすべての流量計で見られた。すなわち、振幅を減衰することで流量法の高精度化が期待できる。そこでさまざまなFCVを想定し、広い周波数帯域に対して脈動抑制効果を有する膨張型バッファを測定系に組み込むこととした。バッファ容量や構造が脈動波形に及ぼす影響をFig. 9に示す。バッファ容量に応じて減衰効果が高くなり、内部に隔壁や挿入管などの構造を持つ消音器が最も高い減衰効果を示した。また、燃料供給圧の調整に用いる減圧弁も絞り弁と同様の特性を示し、脈動減衰に効果的であることがわかった。

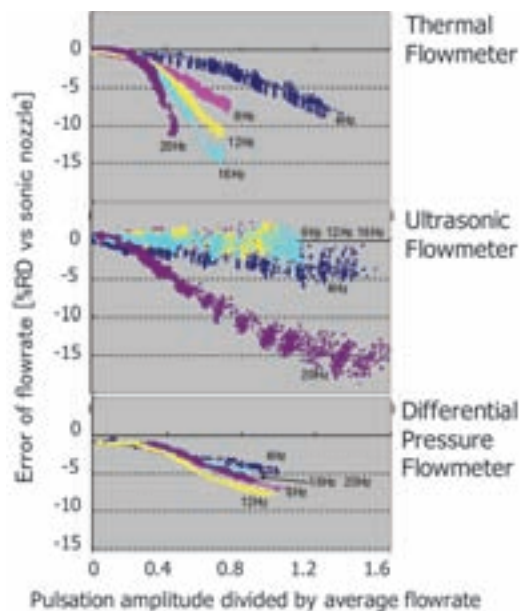


Fig. 8 Influence of oscillation on flowmeter error

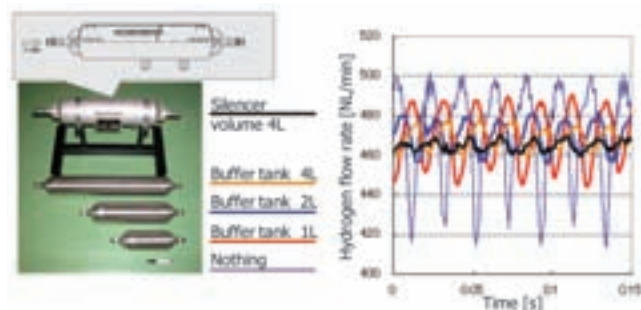


Fig. 9 Effect of silencer and buffer tank volume in reducing pulsation

4. 計測手法の実証

各計測手法の精度・実用性を評価するため、国内外の自動車メーカー協力のもと燃料電池自動車の台上燃費試験をおこなった（第1期：2003年～2004年，第2期：2007年）。2007年の試験結果をFig. 10に示す。質量法を基準として圧力法や流量法の相対誤差を評価した結果、すべての車両において±1%以下の範囲となり、安定して測定できることを実証した。測定原理の異なる3手法がほぼ同一の結果を示しており、目標の±1%の計測精度を実現した。

また、脈動減衰器が流量波形や流量法の誤差に及ぼす影響をFig. 11に示す。減圧弁やバッファにより脈動波形が減衰され、計測誤差も低減できることが確認された。

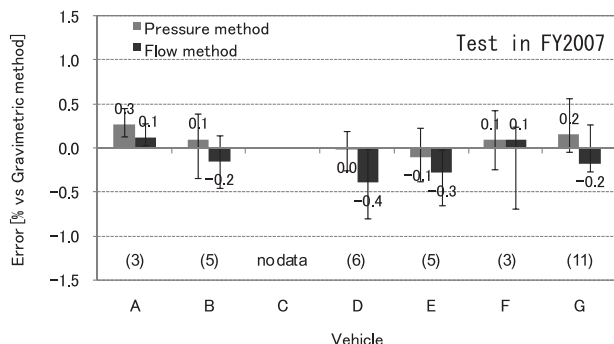
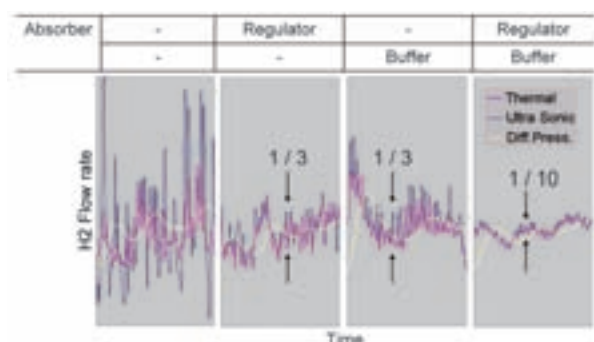
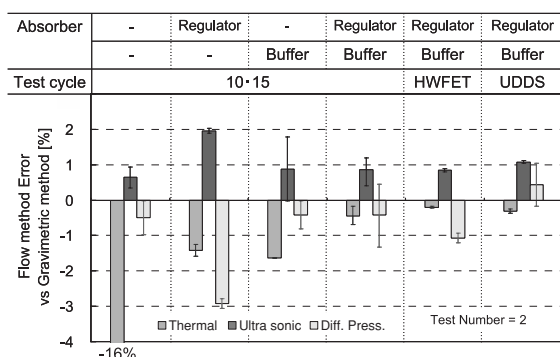


Fig. 10 Relative error of measurement methods in FCV test (10-15mode)



(a) Pulsation attenuation at 10·15mode



(b) Error of flow method

Fig. 11 Effect of ossillation absorber on flow method error

5. 成果の活用

得られた知見は国際標準化会議（ISO / TC22 / SC21 WG2 電動車両の性能・燃費）の議論に活用され、FCV燃費試験法が国際規格（ISO 23828：2008 Fuel cell road vehicles - Energy consumption measurement - Vehicles fueled with compressed hydrogen）として2008年5月1日に発行された。具体的なデータをもとに議論を展開することで、日本が議長国となってリーダーシップを取るなど試験法の国際標準化に日本の活動と技術が大きく貢

献した。また、水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC）では参加車両の燃費を計測し、FCVの高効率や燃費性能向上の実証に貢献した。計測技術や知見、ノウハウは自動車メーカーや測定機器メーカー、研究機関などに広く公開され、同種の計測方法や機器が利用されている。

6. おわりに

本手法の開発により、燃料電池自動車の燃費を定量的に評価することが可能となった。本開発は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施した「固体高分子形燃料電池システム普及基盤整備事業」、「水素社会構築共通基盤整備事業」の成果の一部をまとめたものである。実施にあたり、学識経験者や関係業界の研究者・技術者に多くのご指導とご協力を賜った。また、国際標準化は審議団体はじめ関係各位のご協力、ご尽力により実現したものである。ここに深く謝意を表したい。

最後に、開発した計測手法は目標精度を満足するものの、燃料を車外から供給するために車両改造が必要という課題を有している。水素配管や安全装置に変更が必要となるため、自動車メーカーの協力無しでは測定が難しく、より簡便な手法が望まれている。そこで当研究所では、内燃機関自動車のカーボンバランス法のように排気組成から燃費を算出する手法を考案し、検討中である。検討結果を本誌に掲載しているので併せて参照されたい。

参考文献

- 1) 黒田英二ほか：水素直接形燃料電池自動車の燃費計測手法の検討，自動車研究，Vol.24, No.10, p.463-468（2002）
- 2) 黒田英二ほか：水素直接形燃料電池自動車の燃費計測手法の検討，（社）自動車技術会学術講演会前刷集，No.19-03, p.5-8（2003）
- 3) 平田秀徳ほか：水素直接形燃料電池自動車の燃費計測手法の検討（第2法－流量法），（社）自動車技術会学術講演会前刷集，No.76-04, p.13-16（2004）
- 4) Kuroda, E. et al. : Development of Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen Fuel Cell Vehicles, SAE Paper 2006-01-0217, SAE Transactions, Vol.115, Section3, p.144-154（2006）
- 5) Yano, M. et al. : Development of Fuel Consumption Measurement Method for Fuel Cell Vehicle - Flow Method corresponding to Pressure Pulsation of Hydrogen flow -, JSAE Paper 20077308 / SAE Paper 2007-01-2008（2007）
- 6) 国土交通省監修：新型自動車審査関係基準集第7次改訂版，交文社（2001）