

車両改造不要なFCV燃費計測手法の開発^{*1}

—酸素バランス法の検証実験—

Development of Fuel-Consumption Measuring Method for FCV
without Vehicle Modification

—Experiment Verification of Oxygen-Balance Method—

矢野 勝^{*2}
Masaru YANO黒田 英二^{*2}
Eiji KURODA

Abstract

An oxygen balance method that does not need vehicle modification was developed to measure fuel consumption of fuel cell vehicles. This method calculates oxygen consumption based on the difference in the quantity of oxygen between intake air and exhaust gas and converts oxygen consumption into hydrogen consumption. Real-time fuel consumption measurement was enabled by measuring exhaust gas directly. The error range was from -3% to +1% for a fuel cell system operating in the Japanese JC08 test cycle.

1. はじめに

(財)日本自動車研究所(JARI)は燃料電池自動車(FCV)の燃費計測手法として、車外に設けた高圧水素容器の質量変化を計測する質量法¹⁾、高圧水素容器の温度と圧力を計測する圧力法¹⁾および水素流量を計測する流量法²⁾を開発し、その成果をISO23828(FCV燃費測定法)へ反映した。これらの方法はJARIにおいては相対誤差が±0.5%以下に入るなど高い精度を示している反面、いずれも車外から水素を供給するために車両改造が必要となり、自動車メーカーの協力なしでは実施できない。そこでJARIでは車両改造が不要な手法として、排出ガスを計測する酸素バランス法³⁾を提案した。ガソリン車などに用いられるカーボンバランス法は、排出ガスを空気希釈しながらバックに取り込む稀釈サンプリング法(CVS法)を用いるため、実時間の燃費計測ができない。本手法では排出ガスの流量と酸素濃度を直接計測することにより、実時間の燃費計測を可能にした。

2007年にJHFC(水素・燃料電池実証プロジェクト)における国内外4車種のFCVの燃費計測に対し、

開発中の酸素バランス法を適応した。その結果、JC08モードにおいて質量法に対する酸素バランス法の誤差は-12%~0%となり、計測精度のばらつきが課題となった。解析の結果、FCVの排出ガス出口から酸素濃度の計測位置までの配管容積によって酸素濃度の計測遅れが生じることが分かった。

本研究では燃料電池システムを供試体として、酸素バランス法の配管容積による課題を解決し、最終的にJC08モードの出力負荷形状による燃費を検証した結果について報告する。

2. 計測原理

2.1 基本原理

酸素バランス法の計測原理をFig. 1に示す。酸素バランス法とは燃料電池の発電に伴う酸素消費量を吸入酸素量と排出酸素量の差分から求め、その2倍のモル数を水素消費量として算出する手法である。図中では Q はガス流量、 ΔQ_{O_2} は酸素消費量、 ΔQ_{H_2} は水素消費量、 C_X はX成分の濃度を示す。燃料電池前後では窒素量は変化しないと考えられるため、吸入空気量(Q_{IN})は排出ガス中の窒素量($Q_{OUT} \times C_{N_2,OUT}$)と吸入空気中の窒素濃度の逆数($1/C_{N_2,IN}$)により求める。これにより吸入空気側の流量計が不要となり、計測設備を簡素化している。

*1 原稿受理 2008年6月10日

*2 (財)日本自動車研究所 FC・EVセンター

なお、吸入空気の窒素濃度 ($C_{N_2_IN}$) と酸素濃度 ($C_{O_2_IN}$) は排出ガス側の分析計を用いて試験前後に計測する。

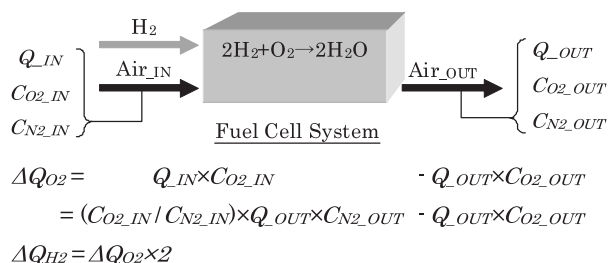


Fig. 1 Principle of oxygen balance method

2.2 酸素濃度の時間補正

排出ガスの流量と酸素濃度が時間によって変動する場合、排出ガス流量は気体の圧縮性を無視すれば排気管のどこで計測しても同じ値になるが、酸素濃度は燃料電池システム出口からの距離によって値が異なる。排出ガス流量と酸素濃度の時制が一致するのは燃料電池システムの出口部分であり、距離が離れるほど時制がずれてしまう。ここでは酸素濃度の時間の補正方法について述べる。

排気管に設置する流量計の位置では、酸素濃度の時制が遅れるため酸素流量は式(1)に示すように酸素濃度を時間 $\tau(t)$ だけ遅らせて算出する。 $\tau(t)$ は燃料電池システムから排出されたガスが流量計の位置に到達するまでの時間を示す。よって $\tau(t)$ は、時間 t から流量計の位置の流量を積算し、積算値が燃料電池システム出口から流量計までの配管容積 V と等しくなる条件によって求める。 V と $\tau(t)$ の関係式を式(2)に示す。式(2)より、 $\tau(t)$ は一定ではなく、流量 Q によって変動することを示す。

$$Q_{O_2}(t) = Q(t) \cdot C_{O_2}(t + \tau(t)) \quad (1)$$

$$V = \sum_{i=t}^{t+\tau(t)} Q(i) \cdot dt \quad (2)$$

$Q_{O_2}(t)$: 時間 t の燃料電池システム出口の酸素排出量

$Q(t)$: 時間 t の排出ガス流量

$C_{O_2}(t)$: 時間 t の流量計位置の酸素濃度

$\tau(t)$: 時間 t に燃料電池システムから排出されたガスが流量計位置への到達に必要な時間

V : 燃料電池システム出口から流量計までの配管容積

3. 計測機器

3.1 酸素分析計 (磁気圧法)

FCVの酸素利用率は平均して20~30%程度と考えられ、酸素分析計のダイナミックレンジを十分に生かすことが難しい。そのため、酸素分析計には高い計測精度が求められる。また、FCVでは運転条件によっては酸素利用率がダイナミックに変化するため、酸素分析計には早い応答性も求められる。

以上の条件より、酸素分析計として磁気圧法 (酸素の磁気的性質を利用し、測定ガス中の圧力に変換する手法) を測定原理とするものを選択した。標準ガスと比較した酸素分析計の誤差について繰り返し5回計測した結果をFig. 2に示す。図中のNo.2, No.4は誤差が最も大きい場合でも-1.3% (読み値) 程度だが、No.1, No.3, No.5についてはばらつきが大きく、線形性、繰り返し性、ドリフトに課題が見られる。他方、応答性の実験検証結果では10~90%応答時間は1.5sであり、FCVの排出ガス中の酸素濃度の変化速度を考慮しても十分な応答速度と考えられる。

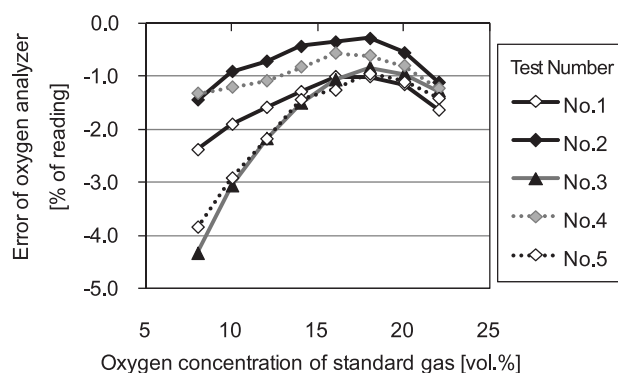


Fig. 2 Error of MPD (Magneto-pneumatic detection) oxygen analyzer

3.2 排出ガス流量計 (ピトー管式)

FCVの排出ガスは水分を多く含むため、配管を加熱することによって相対湿度を下げ、流量計測部での結露を防ぐ必要がある。しかし、流量計に水分が付着するような場面を想定し、排出ガス流量計には水分に強いピトー管式を選択した。ピトー管式流量計は圧力損失が低いという利点があるが、一般に計測レンジは20:100程度と狭い。そこで、動圧と静圧の計測圧をレンジの異なる複数の差圧計に導くことによってマルチレンジ化し、計測範囲を拡大した。

計測範囲は広い範囲で $\pm 1\%$ （読み値）精度を確保するために $100\sim 800\text{NL/min}$ と $600\sim 3,000\text{NL/min}$ に分割した。また、高分子薄膜タイプの露点計を内蔵し、ウェット状態の排出ガス流量から水分を除去した流量を算出している。校正機関の基準器を用いてピトー管式流量計の精度を検証した結果をFig. 3に示す。マルチレンジ化することによって、 $200\sim 3,000\text{NL/min}$ の範囲で $\pm 1\%$ の精度を確認することができた。他方、応答性の実験検証結果では $10\sim 90\%$ 応答時間は 1.0s であり、FCVの排出ガス流量の変化を考慮して十分な速度と考えられる。

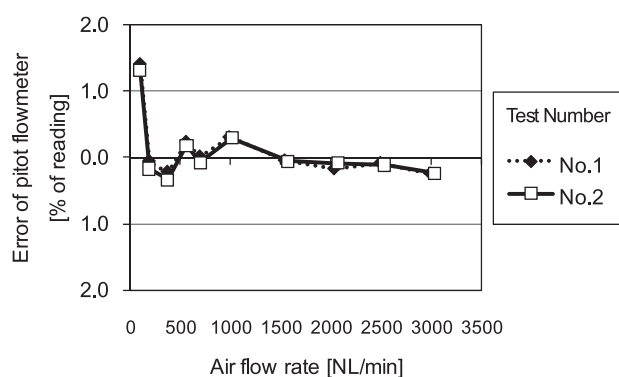


Fig. 3 Error of pitot flowmeter

3.3 試験レイアウト

燃料電池システムを供試体とした試験レイアウトをFig. 4に、計測部の写真をFig. 5に示す。酸素バランス法の計測精度を評価するために、燃料電池システムへの水素供給ライン中に水素流量計を設置した。この水素流量計は流量法用に開発したもので、現在まで数々のFCVの燃費試験に用いてきた。その際、質量法や圧力法との相対誤差は $\pm 0.5\%$ 以下であり、酸素バランス法を評価するための基準として十分な精度を持っている。2007年のFCV試験時では排出ガス出口から計測位置までの配管容積は約 19L あったが、本試験では容積を減らし、 9L と 3L で検討を行った。燃料電池システムからの排出ガスラインにはピトー管式流量計を配置し、結露を防ぐために配管を排出ガス温度以上に加熱している。ピトー管式流量計の直後では、排出ガス分析のためのサンプルラインを設けた。また、試験前後の室内空気の酸素濃度を計測するために、サンプルラインに室内空気を採取できる

分岐を設けた。なお、FCVでは燃料電池内の水素の純度を保つため、微量の水素を捨てている（水素パージ）。本手法では排出ガス中の水素量についても計測を行い、水素消費量に加算している。

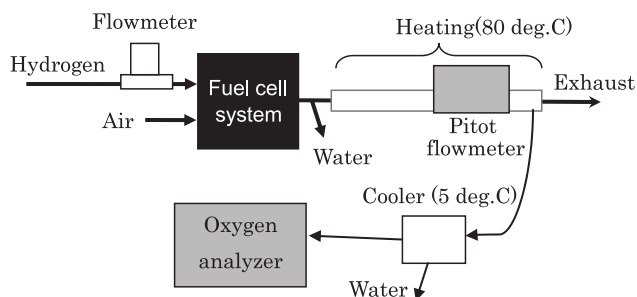


Fig. 4 Examination equipment for oxygen balance method evaluation

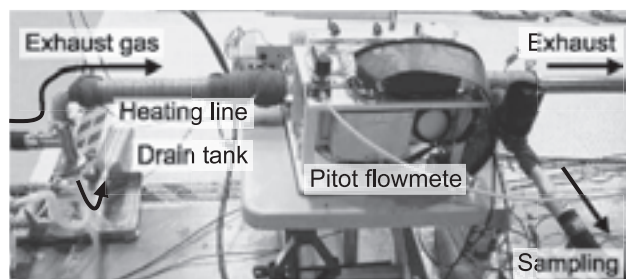


Fig. 5 Equipment of oxygen balance method

4. 実験検証

4.1 配管容積の低減効果

物理的に時制のずれを改善するために、燃料電池システムの排出ガス出口から流量計までの配管容積を低減させて効果を確認した。配管容積が大きい場合（ 9L ）と小さい場合（ 3L ）の実時間燃費をそれぞれFig. 6 [a], [b] に示す。配管容積を小さくした [b] の場合、酸素バランス法の結果が水素流量計による水素消費波形に近づき、配管容積の低減が有効であることを確認した。

4.2 酸素濃度の時間補正

Fig. 6 [b] のデータに対し2.2の酸素濃度の時間補正式(1)(2)を適用した結果をFig. 6 [c] に示す。補正を行うことで、物理的に容積を減少させた水素消費量の波形Fig. 6 [b] に比べ、さらに水素流量計の結果に近づくことが分かり、酸素濃度の時間補正効果を確認できた。

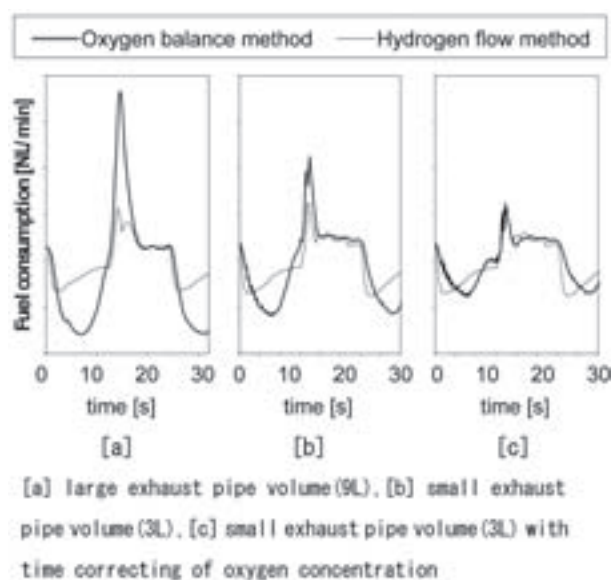


Fig. 6 Evaluation of real time fuel consumption measuring with fuel cell system

4.3 JC08モードによる評価

Fig. 6 [c] と同じ条件で、燃料電池システムに JC08モードの出力負荷形状を与えて水素消費量を計測した結果の一部（1,020～1,180s間）をFig. 7に示す．酸素バランス法では水素流量計の計測結果に見られるスパイク状の水素パージの波形を確認できないが、全体的に高い追従性を示した．

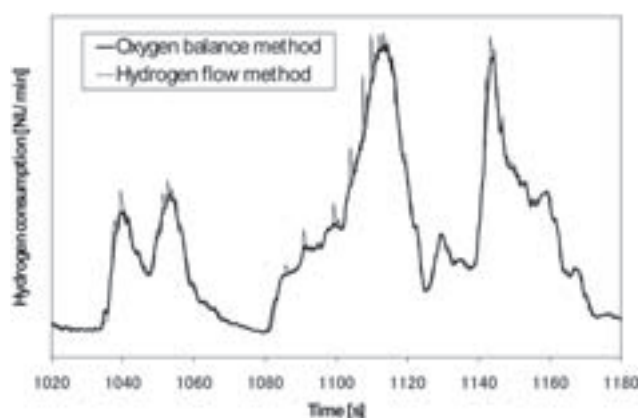


Fig. 7 Real time fuel consumption measuring at JC08 test cycle with fuel cell system

JC08モードの出力負荷形状を35回繰り返した際の水素流量計による水素消費量と酸素バランス法の相対誤差をFig. 8に示す．2007年のFCV燃費計測では誤差が-12%～0%であったのに対し、-3%～+1%に改善した．残る誤差の主要因としては

Fig. 2に示したように酸素分析計の線形性，繰り返し性，ドリフトのばらつきが考えられ，これらを改善することによって，更なる計測精度の向上が期待できる．

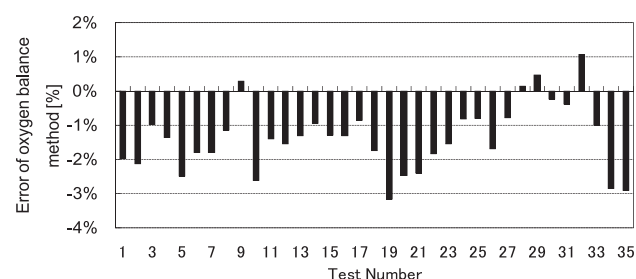


Fig. 8 Error of oxygen balance method at JC08 test cycle with fuel cell system

5. まとめ

車両改造が不要なFCV燃費計測手法として酸素バランス法を実験により検証した．燃料電池システム出口から計測位置までの配管容積を減らし，酸素濃度の時間補正を行うことで，実時間の燃費計測特性の向上を確認した．また，JC08モードの出力負荷形状による燃料電池システムの水素消費量を酸素バランス法で計測した結果，水素流量計による結果に対し-3%～+1%の誤差となり，2007年にFCV燃費計測の誤差-12%～0%から大幅に改善した．

今後の課題としては，酸素分析計の線形性，繰り返し性，ドリフトのばらつきを改善させることによって，酸素バランス法の更なる計測精度の向上が期待できる．

なお，本研究は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）事業「水素社会構築共通基盤整備事業」の助成を受け実施した．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 矢野 勝ほか：燃料電池自動車の燃費計測手法（質量法，圧力法），自動車研究，Vol. 26, No.6, p.257-260（2004）
- 2) 矢野 勝ほか：燃料電池自動車の燃費計測手法（脈動に対応した流量法），自動車研究，Vol.29, No.6, p.243-246（2006）
- 3) Kuroda, E., et al., : Calculation of Hydrogen Consumption for Fuel Cell Vehicles by Exhaust Gas Formulation, SAE Paper 2008-01-0465