

車両改造不要な FCV 燃費試験方法の開発

—CVS を用いた酸素バランス法の課題調査—

Development of a Fuel Consumption Measuring Method without Vehicle Modification

—Oxygen Balance Method using a Constant Volume Sampler—

矢野 勝*1

Masaru YANO

下坂 琢哉*2

Takuya SHIMOSAKA

石戸谷 重之*3

Shigeyuki ISHIDOYA

Abstract

An oxygen balance method using a Constant Volume Sampler (CVS) was investigated as a fuel consumption measuring method for fuel cell vehicles (FCV) that does not require vehicle modification. Because a highly accurate oxygen concentration measurement is required, the technology for measuring oxygen concentrations in the environmental atmosphere was used. In each phase of the WLTC (Worldwide Light duty Test Cycle), differences between the gravimetric method and the oxygen balance method using the CVS ranged from -4% to 0.5%.

1. 背景

燃料電池自動車（以下、FCV）燃費試験方法を定めるISO23828にはNormative（規範）として質量法、圧力法、流量法が定められている。いずれも車外から水素（以下、 H_2 ）を供給する方法であり、FCVの水素供給ラインに外部から水素供給ラインを介入させる改造が必要である^{1)~4)}。近年、国内外で完成車検査の重要性が高まっており、早期にFCVの車両改造不要な燃費試験方法の確立が必要である。

これを実現する手段として、排出ガス中の酸素（以下、 O_2 ）濃度の変化量を計測することによって、反応に使われた H_2 量を算出する酸素バランス法が考えられる。（一財）日本自動車研究所ではNEDO水素社会構築共通基盤整備事業（2005年度～2010年度）において、排出ガスの流量と濃度を直接計測する直接計測法を実施し、酸素バランス法の原理確認を行った⁵⁾。

一方、経済産業省が2019年3月12日に策定した水素・燃料電池戦略ロードマップでは、2030年までにFCVの国内普及目標を80万台としている。今後のFCVの普及を考えた場合、内燃機関自動車の燃費・排出ガス試験設備として普及している

Constant Volume Sampler（以下、CVS）をFCVの燃費試験に用いることができれば、設備や試験担当者を共有でき、メリットが大きいと考えられる。

そこで本報では、CVSを用いたFCVの車両改造不要な燃費試験方法を考案・検討し、その課題について調査した。

2. バックグラウンド補正のための非反応性ガス変換法

CVSを用いた内燃機関自動車の燃費計測には、計測対象成分のバックグラウンド補正のために排出ガス希釈率（以下、DF:Dilution Factor）が用いられているが、このDFをそのままFCVに適用することはできない。そのため、本報ではDFを用いないバックグラウンド補正手法として非反応性ガス変換法を提案する。考え方の理解のために2.1にて直接計測法を示し、2.2にて今回採用したCVS法について示す。

2.1 直接計測法における非反応性ガス変換法

直接計測法は、FCVの排出ガスの流量、ガス濃度（ O_2 、 H_2 、 H_2O ）を連続的に計測し、 O_2 消費量を算出し、反応した H_2 を換算する手法である。計測手法の概略図を Fig. 1 に示す。 O_2 消費量は

*1 一般財団法人日本自動車研究所 電動モビリティ研究部

*2 国立研究開発法人産業技術総合研究所 博士（工学）

*3 国立研究開発法人産業技術総合研究所 博士（理学）

FCV が吸入および排出した O₂ 量の差分より求めるため、吸入と排出の両方に流量計が必要となる。しかし、この方法は流量が過渡的に変化する際に流体に生じる弾性等によって、吸入・排出における流量計間で差を生じやすい。

そこで、吸入側の流量計を省略して H₂ 消費量を求めることとした。算出式を式(1)~(3)に示す。

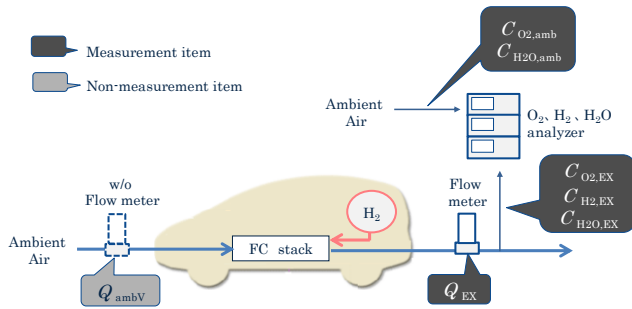


Fig. 1 Schematic diagram of the oxygen balance method by direct measurement.

$$\begin{aligned} \Delta Q_{O_2} &= Q_{ambV} \times C_{O_2,amb} - Q_{EX} \times C_{O_2,EX} \\ &= (Q_{EX} \times C_{URG,EX}) \times (C_{O_2,amb} / C_{URG,amb}) - Q_{EX} \times C_{O_2,EX} \end{aligned} \quad (1)$$

$$Q_{H_2,EX} = Q_{EX} \times C_{H_2,EX} \quad (2)$$

$$\Delta Q_{H_2} = \Delta Q_{O_2} \times 2 + Q_{H_2,EX} \quad (3)$$

以下の量は、いずれの量もドライの状態での流量および濃度を表す。

- Q_{ambV} : 吸入空気流量 [m³/min]
- $C_{O_2,amb}$: 吸入空気中の O₂ 濃度 [vol.%]
- $C_{H_2O,amb}$: 吸入空気中の H₂O 濃度 [vol.%]
- $C_{URG,amb}$: 吸入空気中の非反応性ガス濃度 [vol.%]
- Q_{EX} : 排出ガス流量 [m³/min]
- $C_{O_2,EX}$: 排出ガス中の O₂ 濃度 [vol.%]
- $C_{URG,EX}$: 排出ガス中の非反応性ガス濃度 [vol.%]
- $C_{H_2O,EX}$: 排出ガス中の H₂O 濃度 [vol.%]
- $C_{H_2,EX}$: 排出ガス中の H₂ 濃度 [vol.%]
- $Q_{H_2,EX}$: H₂ 流量 [m³/min]
- ΔQ_{O_2} : O₂ 消費流量 [m³/min]
- ΔQ_{H_2} : H₂ 消費流量 [m³/min]

質量保存の観点から、燃料電池の反応に寄与しない N₂ や Ar, CO₂ (以下、非反応性ガス. 式の中では URG : Unreacted Gases) の量は、吸入と排出において同じである。そのため吸入した O₂ 量は、排出ガス中の非反応性ガス量と吸入する空気中の O₂ 濃度と非反応性ガス濃度の比から求めることができる。すなわち、以下の式(4)の関係があり、これを式(1)の一行目の式に代入することで二行目の式が得られる。なお、 $C_{URG,amb}$, $C_{URG,EX}$ は、吸入および排出ガス中の酸素および水素濃度を 100 vol.% から引くことにより求められる。

$$Q_{ambV} \times C_{URG,amb} = Q_{EX} \times C_{URG,EX} \quad (4)$$

この式(1)~(3)の算出方法を、本報では非反応性ガス変換法と称する。一方、燃料電池スタックはアノードの H₂ 純度を一定の水準に保つために適時 H₂ を排出している。この行為をパージと言う。パージされた H₂ 量の計測は、バックグラウンド補正が不要であるため、単純に式(2)で求めることができる。燃料電池の発電には O₂ の 2 倍のモル体積の H₂ が消費されるため、最終的な H₂ 消費量は式(3)により求める⁵⁾。

2.2 CVS を用いた非反応性ガス変換法

CVS を用いた非反応性ガス変換法は、内燃機関自動車と同様の CVS を用いて FCV の排出ガスをバッグにサンプリングする。

直接計測法と CVS 法は、使う計器や計測方法が大きく異なるが、次の理由により基本的に H₂ 消費量の算出の考え方は同じである。計測手法の概略図を Fig. 2 に示す。燃料電池スタックは吸入した O₂ の半分程度を消費し、残りは排出する。CVS 法では水蒸気の液化を回避するため、排出ガス量の 10 倍以上の希釈ガスで排出ガスを希釈する。この希釈混合したガスを希釈排出ガスと呼ぶ。この希釈排出ガスは、空気利用率のきわめて低い FCV からの排出ガスとみることでもできる。その場合の H₂ 消費量は、式(1)~(3)を流用して求めることができる。算出式を式(5)~(7)に示す。式(1)~(3)との違いは、CVS 法の場合はバッチ法であるため、流量(Q)を体積(V)に置き換えていることと、吸入

空気が車両経由 (V_{ambV}) に加えて希釈空気経由 (V_{ambD}) が加わり 2 系統になっている点である。

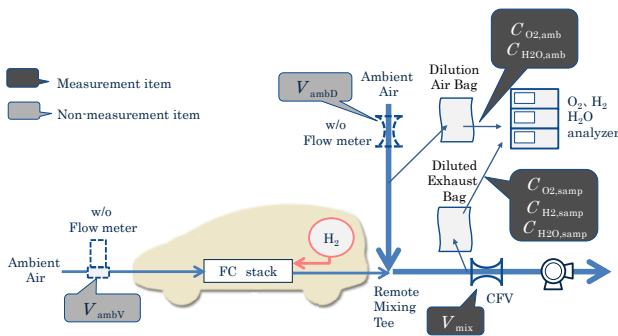


Fig. 2 Schematic diagram of the oxygen balance method using CVS.

$$\begin{aligned} \Delta V_{O_2} &= (V_{ambD} + V_{ambV}) \times C_{O_2,amb} \\ &\quad - V_{mix} \times C_{O_2,samp} \\ &= (V_{mix} \times C_{URG,samp}) \times (C_{O_2,amb} / C_{URG,amb}) \\ &\quad - V_{mix} \times C_{O_2,samp} \end{aligned} \quad (5)$$

$$V_{H_2,EX} = V_{mix} \times C_{H_2,samp} \quad (6)$$

$$\Delta V_{H_2} = \Delta V_{O_2} \times 2 + V_{H_2,EX} \quad (7)$$

ここで用いる記号は以下の通りであり、前節と同じ記号は説明を省略する。また、いずれもドライの状態での流量および濃度を表す。

V_{ambV} : 吸入空気量 [m^3]

V_{ambD} : 希釈ガス量 [m^3]

V_{mix} : 希釈排出ガス量 [m^3]

$C_{O_2,samp}$: 希釈排出ガス中の O_2 濃度 [vol.%]

$C_{URG,samp}$: 希釈排出ガス中の非反応性ガス濃度 [vol.%]

$C_{H_2,samp}$: 希釈排出ガス中の H_2 濃度 [vol.%]

$C_{H_2O,samp}$: 希釈排出ガス中の H_2O 濃度 [vol.%]

$V_{H_2,EX}$: H_2 放出量 [m^3]

ΔV_{O_2} : O_2 消費量 [m^3]

ΔV_{H_2} : H_2 消費量 [m^3]

3. 試験方法および試験設備

車両の走行条件の模擬には、シャシダイナモメータを使用した。FCV からの排出ガスは、車両からの排出直後に気液分離され、加熱導入管等を介して希釈ガスと混合し、採取装置を介して CVS のバッグに採取される。また、希釈ガスは、排出

ガスと混合される前の段階で CVS のバッグに分取した。気液分離した凝縮水は、排気漏れを生じない閉鎖空間に溜め置いた。排出ガスの採取に関しては、気液分離器を介在させる以外は、内燃機関自動車用の CVS (希釈トンネルはガソリン用) をそのまま流用した。

ガス分析に関わる装置の仕様を Table 1 に、概略図を Fig. 3 に示す。計測系統は分析計の仕様の都合によりウェットガス (Fig. 3 上部)、ドライガス (Fig. 3 下部) の 2 系統とした。

バッグに採取したガスの分析対象は O_2 , H_2 , H_2O (気体) であり、既設の内燃機関自動車用の分析システムには含まれないため、独自に装置を組み上げた。ガスの分析には時間を要するため、希釈排出ガスを CVS によっていったんバッグに分取した後、個々に 20 L のアルミニウムバッグに分取した。なお、アルミニウムバッグは H_2 の透過が無視できるものを採用した。一方、CVS 装置の採取用バッグ (Kynar 社製) の H_2 の透過性も試験には有意差を与えない程度であることを確認している。

Table 1 Test equipment specifications for gas analysis

Item	Manufacturer/Model	Remarks
O_2 analyzer	Air Liquide/POM-6E	Paramagnetic type.
MFC (Mass Flow Controller)	Alicat/MC-100SCCM-D/5M	Flow control for O_2 analyzer
Digital multimeter	Agilent/34970A	for analog output of O_2 analyzer
H_2 sensor	RIKEN KEIKI/GD-70/ES	Max 2000ppm
MFC	HORIBA STEC/Z500 (300sccm,30sccm)	Flow control for standard gases.
Dew point sensor	VAISALA/DM70/DMP74A	

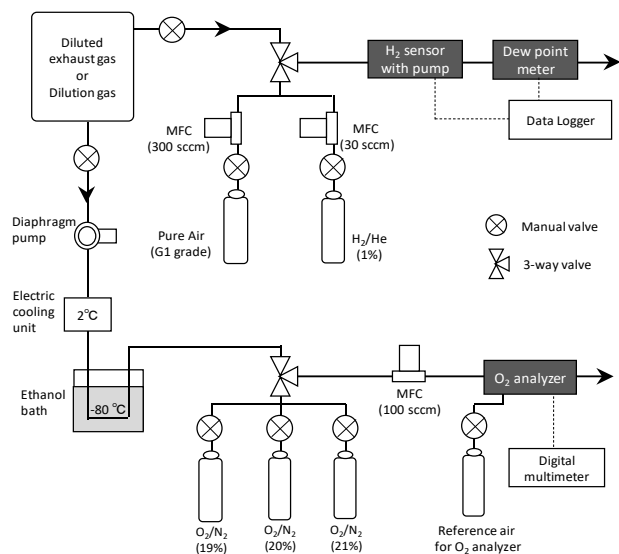


Fig. 3 Schematic diagram of the measurement system for O₂, H₂ and H₂O in diluted exhaust gas and diluting air.

ウェットガスシステムでは、H₂、H₂O濃度を分析した。H₂センサーは試験前後に標準ガスによって構成し、標準ガスは純空気と1 vol.%のH₂を流量比混合で供給した。H₂O濃度は露点計によって求め、希釈排出ガス量のドライ換算に活用した。

ドライガスシステムではO₂濃度を分析した。ガスの除湿は圧送ポンプを経由して2段階で行い、露点は水蒸気の存在を無視できる程度として-80°C (0.54 ppm) とした。除湿したガスはマスフローコントローラーによって流量制御したのち、O₂分析計に送った。O₂分析計の校正用に用いた標準ガスをTable 2に示す。本手法におけるO₂分析では、例えば20 vol.% (200,000 ppm) のO₂を±50 ppm程度で計測する必要がある。しかし、現在計量法校正事業者登録制度 (以下、JCSS) に則った校正証明付きの標準ガスは20±0.2vol.% (±2,000 ppm) が限度であり、要求を満たすことができない。

一方、産業技術総合研究所 計量標準総合センター (以下、NMIJ) では、JCSSに属さない標準ガスの提供を行っており、本調査用に標準ガスを作製した。その結果、Table 2に示すように、O₂ : 20 vol.%±50 ppmの計測精度を満たすのに十分な標準ガスを得られた。また、Table 2のO₂標準ガスを活かすには高精度なO₂分析を行う必要があり、NMIJより同種のガスの提供を受けて大気中

のO₂分析を行っている同所 環境管理研究部門 大気環境動態評価研究グループの技術を活かし、高精度なO₂分析を実現した^{6),7)}。

Table 2 Standard gases for O₂ analyzer

Gas, values	Uncertainties
O ₂ /N ₂ : 191,524.1 μmol/mol	7.2 μmol/mol
O ₂ /N ₂ : 199,548.4 μmol/mol	7.5 μmol/mol (k=2)
O ₂ /N ₂ : 210,793.3 μmol/mol	7.7 μmol/mol (k=2)

酸素バランス法の計測誤差の評価基準として質量法を用いた。質量法は、車外の高圧水素容器から燃料としてH₂をFCVに供給し、試験前後で容器の質量計測を行い、その変化分をH₂消費量とするものである。電子天秤はメトラー社 XPE64003LC (64 kg/5 mg) を風防内に設置し、専用の高圧容器昇降機構を用いて再現性に配慮した質量計測を行った。FCV燃料消費量測定法を定めるGTR (Global technical regulation, 国際技術基準) No.15では、質量法に用いる電子天秤の最小読み取り値を100 mg以下と定めており、今回用いる電子天秤は十分な読み取り分解能を持っている。

なお、高圧水素容器はMn鋼製47 L容器であり、充填されるH₂ガスはG1級 (不純物0.1 ppm未満, ジャパンファインプロダクツ社製) を用いた。

4. 試験車両

試験には既販の小型乗用タイプのFCVを用いた。試験車両の諸元をTable 3に示す。酸素バランス法実施のための車両改造は施さないが、比較基準である質量法を実施するため、車載容器からのH₂供給を停止し、同容器と燃料電池スタック間に車外からH₂を供給するための改造を施した。

Table 3 Test vehicle ⁸⁾

Item	Specifications
Type	FCV
Sales start date	2014/12/15
Vehicle Mass	1,850kg
Size(L,W,H)	4,890 × 1,815 × 1,535mm
Wheelbase	2,780mm
FC stack	PEFC, 370cells, Max114kW
Fuel	Compressed hydrogen
Hydrogen Tanks	2 (front 60.0L/rear 62.4L), 70MPa
Battery	NiH ₂ , 6.50Ah
Motor	Permanent Magnet Synchronous Motor
Max power / Max torque	113kW, 335Nm
Drive system	FWD
Max speed	175km/h

5. 試験条件および試験結果

5.1 試験条件

試験条件をTable 4に示す. 今回は本手法の課題調査のため, 限られた試験実施回数の中で複数の条件を与えた. 速度パターンは全てWLTC (Worldwide Light duty Test Cycle) とした. 速度パターンをFig. 4に示す. なお, 本報ではWLTCの各フェーズを速度域の低い順にL, M, H, eHと略式で記す. シャンダイナモ室の温度は23, 40, -7°Cとし, 臨界流量ベンチュリ (以下, CFV) は5, 7, 9 m³/minを用いた.

Table 4 Experimental conditions

Item	Specifications	
C/D	Test cycle	WLTC
	Room temp.(°C)	23, 40, -7
FCV	Starting SOC	Uncontrolled
	Air conditioner	-7°C · 23°C > OFF, 40°C > ON
Exhaust	CFV(m ³ /min)	5, 7, 9
	Heating pipe temp.	70°C

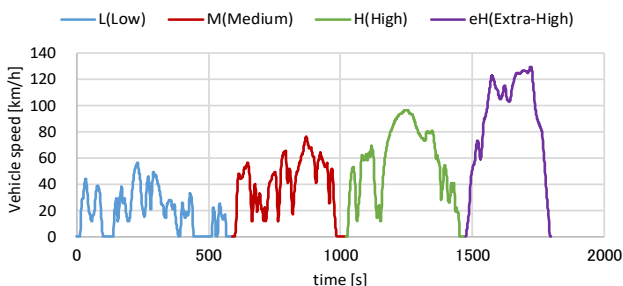


Fig. 4 WLTC class 3 test cycle

5.2 試験結果

評価基準である質量法によるH₂消費量と, 酸素バランス法によるH₂消費量の差異 (以下, 誤差)をFig. 5に示す. 誤差は-4%~0.5%の間に分布しており, 全体として質量法の結果に対しマイナスの傾向であった. H₂消費量の少ないLフェーズは, 比較的誤差が大きく, CFVが小さいほど誤差がマイナス傾向になっている. 一方, M・H・eHフェーズは, シャンダイナモ室の温度が低いほど誤差がマイナスの傾向になっている. また, コールドスタートの影響を確認するため, 40°C, -7°Cのそれぞれの室温環境において, 各1回ホットスタートのLフェーズを行った. それぞれのコールドスタートとホットスタートのLフェーズの誤差を比較すると, 逆の傾向を示しており, 複数の誤差要因が重なった可能性が考えられる.

なお, 本報で掲載するデータには含まれないが, 今回の試験全体を通じて希釈排出ガス中のH₂濃度は, 各フェーズ間で比較するとバラつきが大きかった. また, FCVがパージするH₂量は一般的にH₂消費量全体の数パーセントと考えられる. これより想定される希釈排出ガス中のH₂濃度に対して, 試験結果のH₂濃度は低濃度となった. この原因については検討の余地を残すが, FCV特有の課題と考えられる.

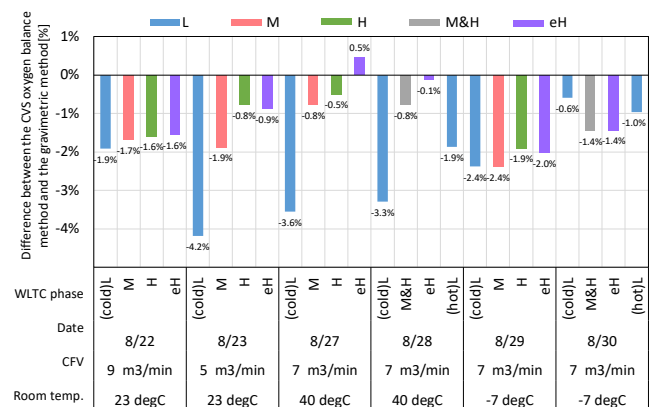


Fig. 5 Difference between the CVS oxygen balance method and the gravimetric method (each phase of WLTC)

WLTCモード燃費を Fig. 6 に示す。eH フェーズは採用国の走行事情によって適用除外となるため、Fig. 6 では、eHの有無によって標記を分けている。Fig. 6 より、誤差は概ね-2%~-1%の間に分布し、Fig. 5 と同じく質量法の結果に対して全体的にマイナス傾向であった。

酸素バランス法の誤差の目標を評価基準比で±1%以内とした場合、Fig. 5, Fig. 6ともに誤差の平均値は目標を達成できない。酸素バランス法を車両改造が必要な質量法の代替にするには、誤差は±1%に近づける必要がある。そのためには、今後誤差要因の解明と、その改善を進める必要がある。

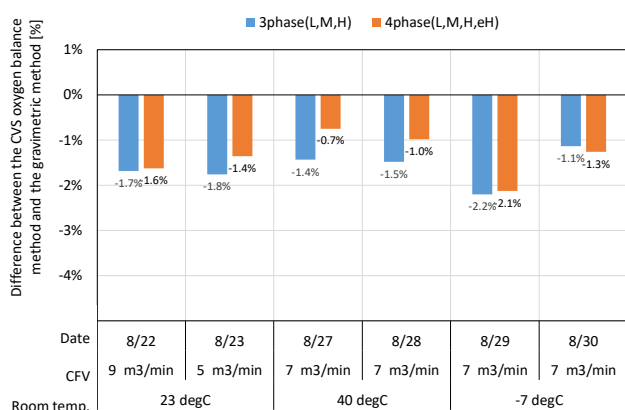


Fig. 6 Difference between the CVS oxygen balance method and the gravimetric method (WLTC mode)

6. まとめ

車両改造不要な FCV 燃費試験方法の早期確立が求められる中、FCV を評価対象として CVS を用いた酸素バランス法の課題調査を行った。結果を以下にまとめる。

- 評価試験では、シャシダイナモ室の温度、CFV, WLTC の各フェーズをパラメータとして変化させ、質量法を基準に酸素バランス法の誤差を評価した。その結果、WLTC のフェーズ毎の誤差は-4%~0.5%程の間に分布し、WLTC モード全体では誤差は-2%~-1%程の間に分布した。

- 酸素バランス法の誤差の目標を±1%以内とした場合、現段階では目標を達成できない。そのためには、今後誤差要因の解明と、その改善を進める必要がある。

CVS法は内燃機関自動車の排出ガス測定手法として半世紀以上も使われ続けており、信頼性の高い手法である。そのため、本手法の誤差要因の解明の際、FCV特有の課題を発見し、改善していくことが重要と考える。またそれにより、本手法が実用化に大きく近づくことになると考える。

謝辞

本報は一般社団法人日本自動車工業会からの委託事業の一部をまとめたものである。本調査にご協力をいただいた皆様に深く感謝する。

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) Yano, M. et al., Development of Fuel Consumption Measurement Method for Fuel Cell Vehicle (Flow Method corresponding to Pressure Pulsation of Hydrogen flow), SAE Paper 2007-01-2008
- 4) Kuroda, E. et al., Calculation of Hydrogen Consumption for Fuel Cell Vehicles by Exhaust Gas Formulation, SAE Paper 2008-01-0465
- 5) 矢野 勝ほか：車両改造不要なFCV燃費計測手法の開発（酸素バランス法の検証実験), 自動車研究, Vol.30, No.7, p.339-342 (2008)
- 6) Aoki, N., Shimosaka, T., Development of an Analytical System Based on a Magneto - pneumatic Oxygen Analyzer for Atmospheric Oxygen Determination, Analytical Sciences, Vol.34, No. 4, (2018)
- 7) Ishidoya, S. et al., Development of a continuous measurement system for atmospheric O₂/N₂ ratio using a paramagnetic analyzer and its application in Minamitorishima Island, Japan. SOLA 2017, 13, 230-234.
- 8) トヨタ MIRAI 主要諸元表
https://toyota.jp/pages/contents/mirai/001_p_001/pdf/spec/mirai_spec_201501.pdf