

防水・防塵フィルタ付水素隔離構造の CFD を用いた設計手法の確立

Developing Method Using CFD to Design Hydrogen Isolation Structure with
Waterproof and Dustproof Filters

佐々本 和 也¹

Kazuya SASAMOTO

須 田 恵 介¹

Keisuke SUDA

要 旨

燃料電池システムの更なる小型・軽量化に向けて、防水・防塵フィルタ付水素隔離構造を、流体解析を用いて設計するために必要なフィルタ特性値を取得する方法を開発した。フィルタ前後のガスの圧力と濃度を測定し、流体解析による測定内容の再現計算によって、フィルタ特性値を同定した。

同定した特性値は、異なるガス種・流量・濃度条件の流体解析でも汎用的に使えることを確認した。

更に、流体解析モデルの妥当性検証のために、取得したフィルタ特性値を用いて、簡易形状の実験装置と解析結果におけるガス濃度を比較し、極低流量のガス流れ条件においても良好に予測できることを確認した。

その結果、フィルタ付水素隔離構造の流体解析を用いて、より安全かつ小型・軽量の隔離構造を実現するための設計手法を確立した。

ABSTRACT

With a view to still greater compactness and lighter weight in fuel cell systems, a method using computational fluid dynamics was developed to obtain the filter properties necessary to design a hydrogen isolation structure with waterproof and dustproof filters. The filter properties were identified by measuring gas pressure and concentration on both sides of the filter and then using computational fluid dynamics to simulate the measurements to reproduce their content.

The identified properties were confirmed to be versatile and applicable for other initial conditions of gas type, flow, and concentration.

The design method was also validated by comparing the gas concentrations obtained from measurement by a simple testing apparatus to the results of computational fluid dynamics using identified properties. It was confirmed that satisfactory prediction was possible even under conditions of extremely low gas flow.

As a result, a design method using computational fluid dynamics was developed to realize a safer, more compact, and lighter-weight hydrogen isolation structure with filters.

1. ま え が き

Honda が開発した CLARITY FUEL CELL では車内空間を広くするため、燃料電池パワートレインをフロントフード内に搭載し⁽¹⁾、Fig. 1 に示す水素隔離構造で水素系部品を覆って、水素 (H_2) に対する安全性設計を実現している。水素隔離構造は、バリア・水素センサ・ダクトの3要素で構成されている。車両衝突などにより、水素系部品が破損すると隔離構造内に水素が漏洩する場合がある。それを

水素センサで検知し、水素の供給を遮断する。

更に、ダクトを通して水素濃度を引火しないレベルに下げてから車外に排出し、車両の安全性を確保させている。

水素は分子が小さいため、通常運転時でも数 cm^3/min 程度の極低流量水素がスタックのシール材料を透過して水素隔離構造内に排出される。この水素がセンサの異常検知濃度しきい値を超えると、通常運転時でも水素が漏洩していると判断されシステムが停止してしまう。そのため、水素隔離構造は、この微小量の透過水素に対しては、水素セン

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: kazuya_sasamoto@jp.honda

サが異常と検知する濃度を超えないように水素を排出することが必要とされる。そのため、流体解析 (CFD) を活用し、前述した量の水素透過があっても水素濃度がしきい値未満になることを確認した上で設計がおこなわれている。

安全性能を満たしていれば、水素隔離構造は小型かつ軽量であることが望ましい。そこでダクトの代わりに水素排出用の防水・防塵フィルタを複数取り付け、前述した機能を持たせる方法が考えられる。本報では、フィルタを用いた水素隔離構造の設計に用いる CFD 手法の構築、及びその妥当性検証結果について報告する。

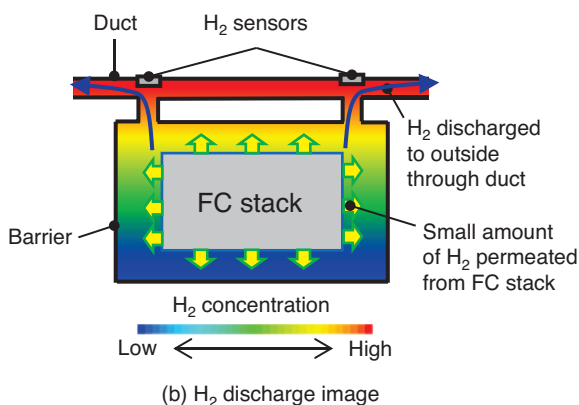
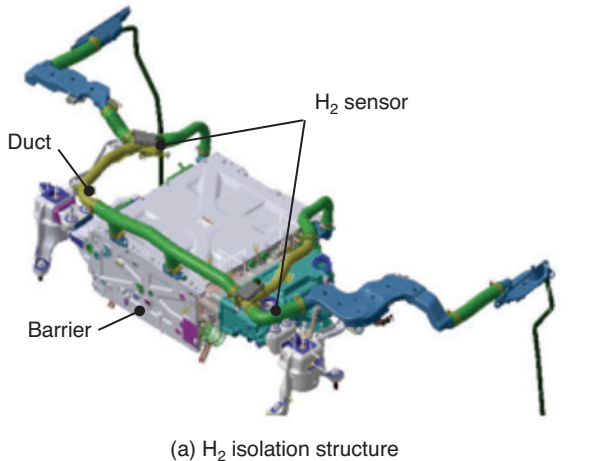


Fig. 1 H₂ isolation structure in Honda CLARITY FUEL CELL

2. 開発のねらい

Fig. 2 に、フィルタ付水素隔離構造の概念図を示す。通気性のある防水・防塵フィルタをバリアの一部に配置し、フィルタを通してフロントフード内の空間に可燃濃度未満の水素を排出する。これにより、ダクトを廃止し隔離構造の小型化・軽量化をおこなう。フィルタにおける水素排出量は、以下の三つの要素によって決定される。

- (1) 設置位置: 水素は空気より軽く、隔離構造内の上方に蓄積するため、フィルタの設置位置によって水素排出量が変化する。

- (2) 面積: 面積が大きいほど水素の排出量が増える。

- (3) 材料特性: 材料自体の水素の通しやすさにより、水素排出量が変化する。

水素の透過量は、車両の運転状況や外気温によって変化するため、CFD に用いる特性値は様々な計算条件に対して汎用的に使える値であることが求められる。

CFD を用いた設計の際、まず水素隔離構造内外の空間と、設置位置・面積を再現したフィルタ空間の三次元モデルを作成する。次に、フィルタ特性をパラメータとして与え、入力条件である水素量に対して出力される水素濃度の予測計算をおこない、水素隔離構造内の水素濃度がしきい値未満を達成する形状やフィルタの面積、配置を決定していく。そのため、CFD をおこなう前にフィルタの特性値を入手しておく必要がある。

しかし、本設計のように、防塵・防水フィルタを水素換気目的で用いること、及び低流量の水素がフィルタを透過する事象は、一般的なフィルタの使用法・想定事象ではない。そのため、本設計に必要な特性値は存在せず、その取得方法も確立されていない。

そこで、本研究では特性値の取得方法を新規に構築し、低流量ガスの CFD 手法を確立させる。

本研究のねらいを、以下のように定める。

- (1) CFD に入力するフィルタを透過する、極低流量のガス特性値を取得する方法を確立し、値を取得すること
- (2) 取得した特性値は、異なる透過量・温度条件でも使用可能な、汎用性の高い値であること
- (3) CFD の予測値と実測値を定量的に一致させること

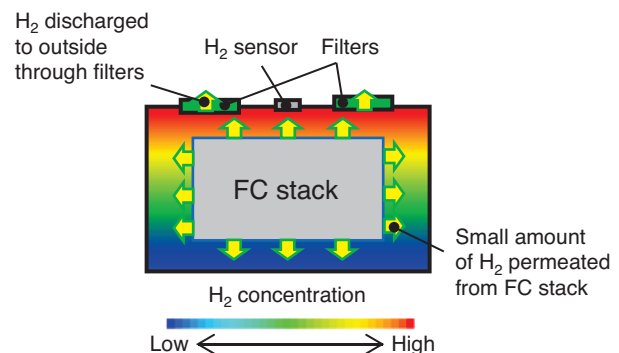


Fig. 2 H₂ discharge image of H₂ isolation structure with filters

3. フィルタ極低流量特性値取得方法の構築

3.1. 基礎方程式

以下に、各パラメータと、ガスの移動現象の相関を表す基礎式を示す。式 (1) が移流方程式 (Darcy 式)、式 (2) が拡散方程式である。

$$\frac{dP}{dx} = -A_1 \mu v + A_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

A_1 : 粘性抵抗係数 [1/m²]

A_2 : 慣性抵抗係数 [1/m]

C : ガス濃度 [mol/mol]

D : 拡散係数 [m²/s]

P : 圧力 [Pa]

t : 時間 [s]

v : ガス流速 [m/s]

x : 距離 [m]

ρ : 混合ガス密度 [kg/m³]

μ : 混合ガス粘度 [Pa·s]

ここで、フィルタ特性は A_1 , A_2 , D であり、この三特性を、式 (1), (2) に示す圧力勾配 (移流) と濃度勾配 (拡散) の二つから推定する。フィルタの特性は、通常の流れ場と同様に移流と拡散で表現することができる。

移流の影響は、圧力と流速の相関式で表現され、一般的には二次関数で示される。その二次関数の係数が、粘性抵抗係数 A_1 , 慣性抵抗係数 A_2 である。

拡散の影響は、拡散方程式に示されるように、濃度差によって生じる。中流量以上の流れ場においては、式 (1) 右辺の v が大きく移流が支配する流れ場となる。一方、流量が微小な流れ場においては、移流の影響が小さくなり、相対的に拡散の影響が強まるため、特に低流量の流れ場において、 D の値を A_1 , A_2 と切り分けて明確化することが重要となる。そのために測定装置を考案し A_1 , A_2 を実測することを試みた。

3.2. 圧力・濃度測定装置と測定手法

A_1 , A_2 , D の値を切り分けるため、二つの空間の間にフィルタを設置し、その両側の圧力と濃度の時系列データを同時に測定できる測定装置を作成した。更に、測定内容を CFD で再現計算し、設計をおこなう際に必要となる CFD パラメータの取得をおこなう手法を考案した。

Fig. 3 にフィルタ両面の圧力・濃度測定の測定装置を示す。流路を $\phi 20$ mm の直管とし、混合ガスの特性を取得するために、左右二ヶ所のガス入口を設ける。閉じたバルブを隔てて、異なる種類のガス A とガス B を流路内に封入する。ここから、ガス A を供給しながら A 側の排出口と B 側の供給口を閉じると同時にバルブを開け、A 側からフィルタを透過して B 側に抜ける一方向の流れを作り、全てのガスを B 側排出口一ヶ所から排出させる。

フィルタは Fig. 4 に示すようにアルミプレートで固定する。フィルタ形状は (a) に示すシート型、(b) に示すボタン

型のどちらでも対応可能な形とした。フィルタ穴は $\phi 10$ mm と小さくし、フィルタの面方向に濃度分布がつかない形とした。このフィルタ付プレートを、両面に O リング付きのフランジで挟んでシールする。フィルタの前後に濃度センサと圧力センサを取り付け、フィルタの前後で測定をおこなう。測定時には、測定装置周辺の室温と、ガス A, B の流入温度を合わせて室温とガス温度の温度差をなくし、温度変化による測定誤差が生じないように配慮した。

フィルタの前後に、それぞれ濃度センサ (C_2 , C_3), 圧力センサ (P_2 , P_3) を配置し、バルブ開放直後から、各センサ値が定常状態に至るまでの時系列データを測定した。

この時、複数のガス流量条件で取得した圧力差 $P_2 - P_3$ と、ガス流量を流路面積で除したガス流速の関係は、式 (3) 及び Fig. 5 に示す二次関数の形で表現される。この時、 a , b は係数である。

$$\frac{P_2 - P_3}{x} = av + bv^2 \quad (3)$$

この式 (3) と式 (1) が同一となることから、

$$-A_1 \mu = a \quad (4)$$

$$A_2 \frac{1}{2} \rho = b \quad (5)$$

の関係式が成り立ち、これにより A_1 , A_2 が求められる。

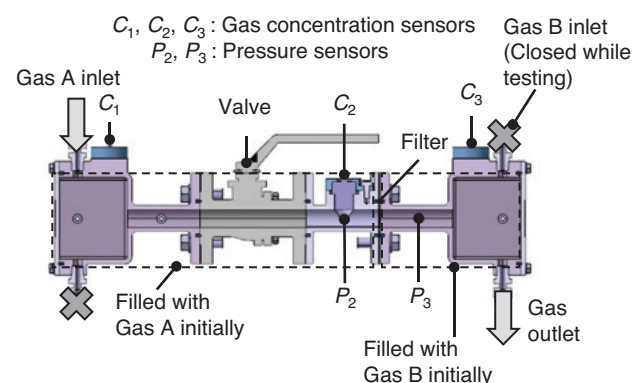


Fig. 3 Filter pressure drop and gas concentration measuring apparatus

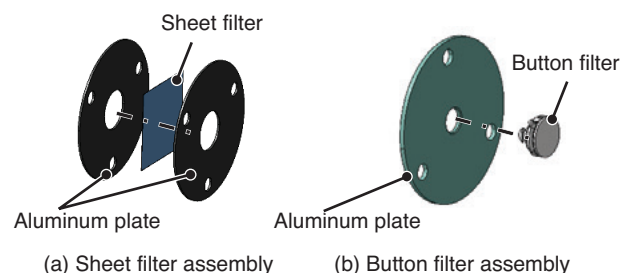


Fig. 4 Filter assembly

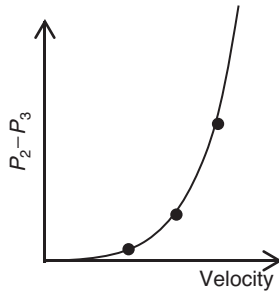


Fig. 5 Gas velocity and filter pressure drop

3.3. CFD 解析による拡散係数 D の同定

濃度は、圧力のように定常状態でフィルタの前後に差がつくものではなく、時間経過とともに C_2 , C_3 は同じ値に近づく。そのため、 D の取得には別の方法が必要となる。

そこで、前述した実機形状と測定方法を CFD で再現し、測定結果と同等の C_2 , C_3 におけるガス濃度の時系列データを再現できる D を同定する。Fig. 3 に示した試験装置の空間及びフィルタのメッシュモデルを作成し、フィルタからガス A 側の空間にガス A、ガス B 側の空間にガス B を充満させた状態を初期条件として与え、その状態から、規定流量・濃度のガス A を流入させて、ガス A がフィルタを通過してガス B 側の出口へ移動する非定常計算をおこなった (Fig. 6)。

CFD のフィルタ部分に A_1 , A_2 , D の値を与えることで、テストで測定されるような現象、すなわち、フィルタ部がガスの移動を阻害し、 P_2 , P_3 の圧力差及び、 C_2 に対して C_3 の濃度の立ち上がりが遅れる現象が CFD でも表現される (Fig. 7)。この遅れが、 A_1 , A_2 , D によって変化する。このうち、 A_1 , A_2 は測定結果から同定されるため、残りの D を CFD により同定する。本手法は、ガス流量が低い程 C_2 , C_3 の差が大きく生じるため、低流量のガス条件であっても測定が可能である。

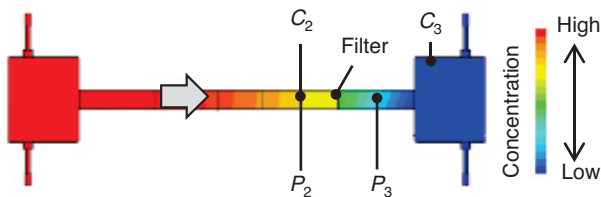
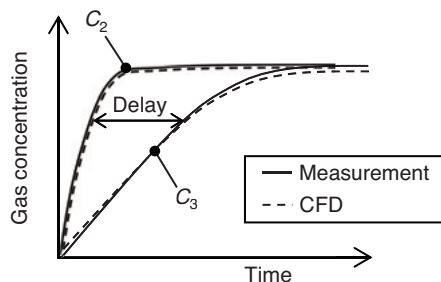


Fig. 6 Image of Gas A concentration distribution


 Fig. 7 Image of C_3 gas concentration rise delay against C_2

D の同定には、Fig. 8 のように、異なる複数の D を入力した CFD を複数回おこない、 C_2 , C_3 の測定値と各 CFD 結果における誤差の二乗値を 1 秒おきに計算し、規定時間 t_e までの最小二乗の積算値 Δ_{sum}^2 を取得した。この時、 Δ_{sum}^2 は式 (6) で示される。

$$\Delta_{\text{sum}}^2 = \sum_{t=0}^{t_e} (C_{\text{test}} - C_{D_i})_{C_2}^2 + \sum_{t=0}^{t_e} (C_{\text{test}} - C_{D_i})_{C_3}^2 \quad (6)$$

C_{D_i} : 時刻 t における、拡散係数 D_i を用いた CFD 結果のガス濃度 [mol/mol]

C_{test} : 時刻 t における、測定結果のガス濃度 [mol/mol]

t_e : 規定時間 [s]

各計算に用いた拡散係数 D_i を横軸に取り、各計算の Δ_{sum}^2 を縦軸に取り、 Δ_{sum}^2 が最小となる D を決定した。

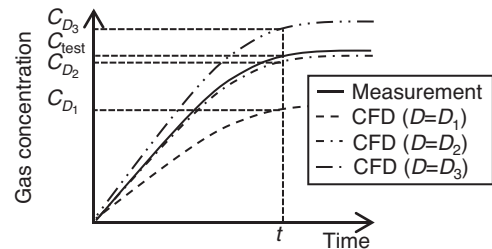
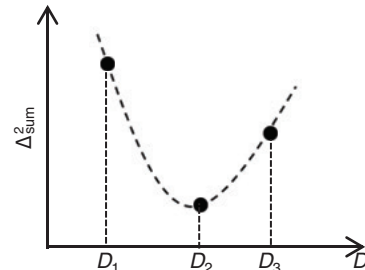

 (a) Image of gas concentration profiles with different D_i s

 (b) Image of Δ_{sum}^2 against D_i

Fig. 8 Diffusion coefficient identification method

4. フィルタ特性の同定結果と考察

4.1. 特性同定試験および CFD 条件

Table 1 に、今回実施した測定および CFD 条件の一覧を示す。フィルタは日東電工株式会社製テミッシュ⁽²⁾ Z3-NTF210SE を使い、ヘリウム (He) と窒素 (N_2) の混合ガスをガス A、窒素単体ガスをガス B として、フィルタにおけるヘリウムと窒素の混合ガス特性を取得する。

本来の燃料電池システムにおける想定では、空気中における水素の特性が必要となるが、水素は可燃濃度が低く試験で用いるには制約があるため、今回は安全性を考慮して

水素の代替としてヘリウム，空気の代替として窒素を使用する。

本試験では，ヘリウム濃度を4%に固定し，合計5，10，20 cm³/minの異なる三条件でガスAを流した時の結果からフィルタ特性を同定する．温度は室温，ガスA，Bともに25℃で固定する．

4.2. ソルバ

FLUENTをソルバとして使用し，非定常計算をおこなった．本解析領域は，通常空間とフィルタ部の二つに分かれており，それぞれ異なるガスの透過特性を持つ．そのため，ユーザー定義関数を作成し，通常空間における混合ガスの相互拡散係数 D_0 ，フィルタ特性 A_1 ， A_2 ， D をそれぞれの場所に与えて計算する． D_0 は，式(7)に示すChapman-Enskogの式で与え，フィルタ特性は，測定で取得した値 A_1 ， A_2 と，任意の D を固定値で与えるものとする．

以下に， D_0 の計算式と変数の一覧を示す．

$$D_0 = \frac{266T^{3/2}}{PM^{1/2}\sigma^2\Omega_D} \quad (7)$$

D_0 : 通常空間における混合ガスの相互拡散係数 [m²/s]

M : 混合ガス分子量 [kg/kmol]

σ : 分子間ポテンシャルパラメータ

Ω_D : 衝突積分

T : 温度 [K]

4.3. 同定結果

異なる三条件のガスA流量に対するフィルタ差圧 P_2-P_3 の測定結果をFig. 9に示す．点で示したものが測定結果，それに対して，測定結果と式(4)，(5)から A_1 ， A_2 を同定した結果を用いたCFD結果の曲線を重ねて表示している．この作業によって A_1 ， A_2 の値を同定した．

Fig. 10に，同定で得られた値近傍の D と Δ_{sum}^2 の結果を示す．この作業によって D の値を同定した．

今回同定した結果を用いて，三ヶ所の測定点におけるヘリウム濃度 C_1 ， C_2 ， C_3 の濃度測定結果と，CFD結果の比較をおこなった．Fig. 11に，Table 1で示した三条件における濃度変化の比較結果を示す．この結果から，今回同定し

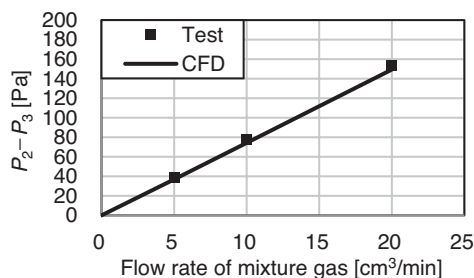


Fig. 9 Comparison of measurement (test) and CFD filter pressure drop with identified A_1 and A_2

Table 1 Measurement and CFD conditions for filter characteristics identification

Gas A				Gas B	Temperature [°C]
He [cm ³ /min]	N ₂ [cm ³ /min]	He+N ₂ [cm ³ /min]	He concentration [%]		
4.8	0.2	5	4	N ₂	25
9.4	0.4	10			
19.2	0.8	20			

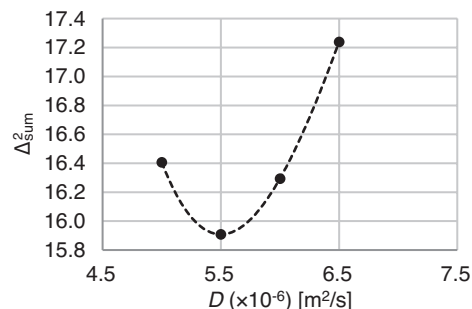
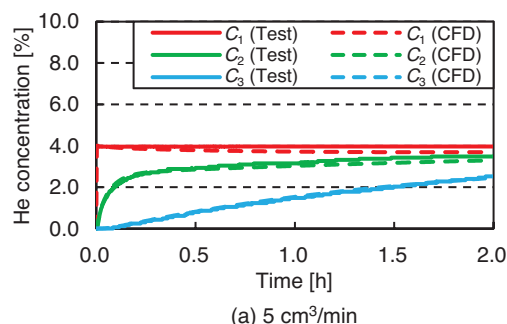
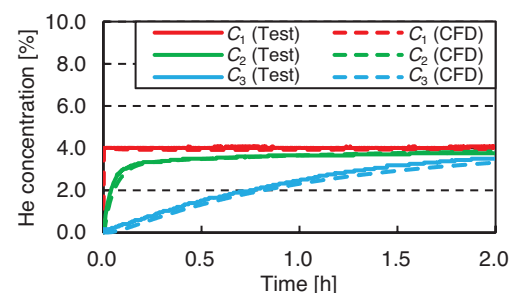


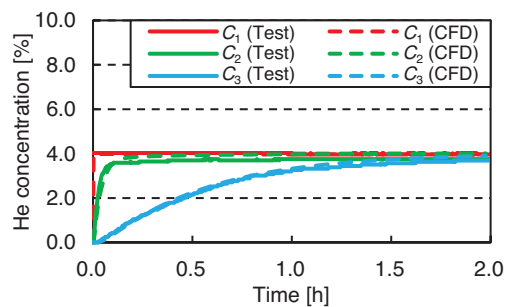
Fig. 10 Δ_{sum}^2 against D_i



(a) 5 cm³/min



(b) 10 cm³/min



(c) 20 cm³/min

Fig. 11 Comparison of measurement (test) and CFD He concentration profiles with identified D at three sensors

Table 2 Measurement and CFD conditions for validation

No.	Gas A				Gas B	Temperature [°C]	
	He [cm³/min]	N ₂ [cm³/min]	He+N ₂ [cm³/min]	He concentration [%]			
1	4.6	0.4	5	8	N ₂	25	
2	9.2	0.8	10				
3	18.4	1.6	20				
	He [cm³/min]	O ₂ [cm³/min]	He+O ₂ [cm³/min]	He concentration [%]			
4	4.8	0.2	5	4	O ₂		
5	9.4	0.4	10				
6	19.2	0.8	20				
7	4.6	0.2	5	8			
8	9.2	0.4	10				
9	18.4	0.8	20				

た数値を用いた CFD 結果は、どの流量条件においても測定結果の濃度変化をよく再現できた。

4.4. 同定結果の汎用性検証結果

この同定したフィルタ特性値が、他の計算条件においても、フィルタの差圧及び濃度予測 CFD に汎用的に使える値であるかどうかの検証をおこなう。

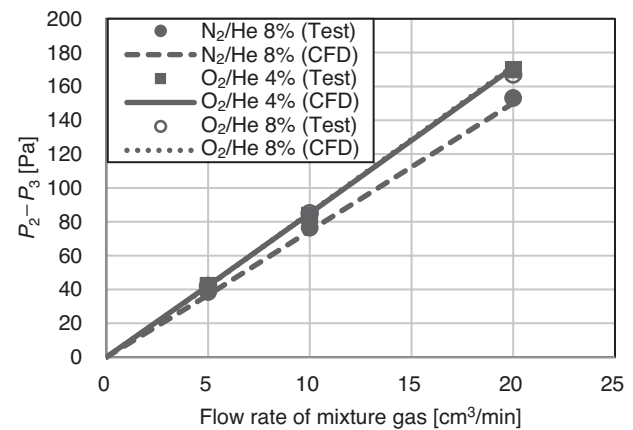
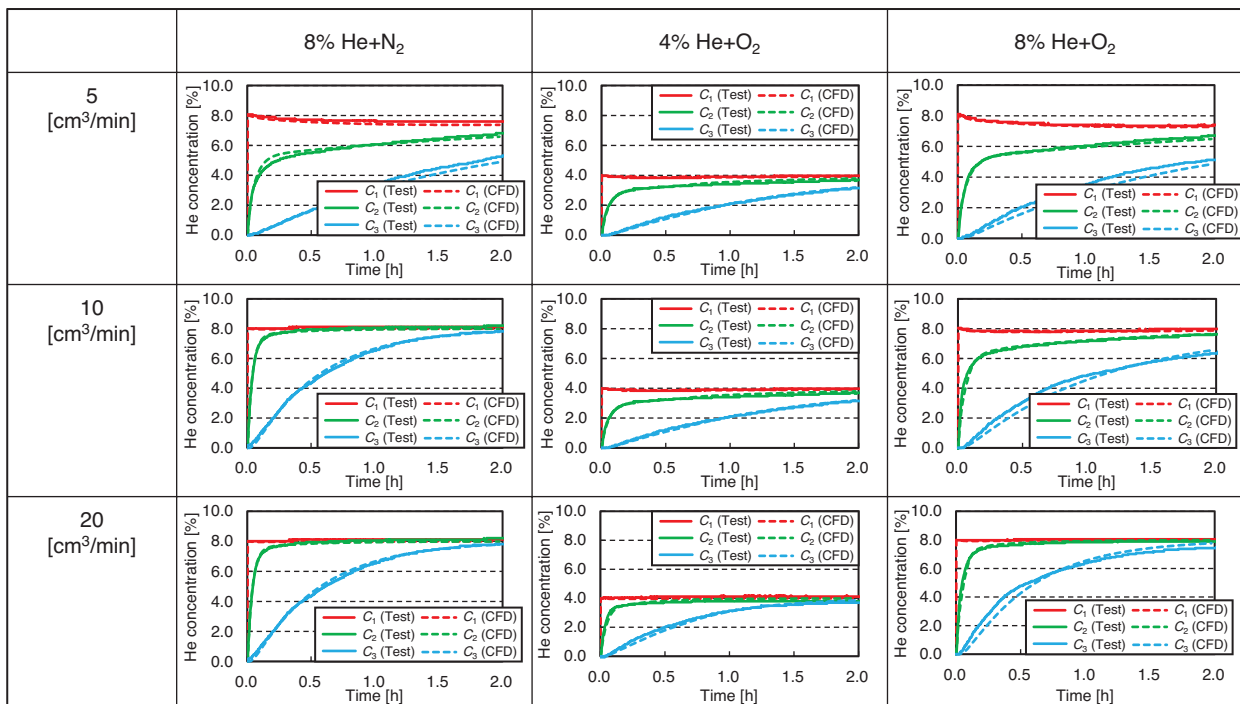
Table 2 に、検証用の測定および CFD 条件を示す。条件 1 から 3 はヘリウム濃度の違いに関する検証、条件 4 から 9 はガス種の違いに関する検証として、窒素の代わりに酸

素を用いている。これにより、様々な流量・濃度・ガス種において、今回の特性値の汎用性を検証する。

この九条件における、フィルタ差圧の測定値と、同定した値を用いた CFD の比較結果を Fig. 12 に示す。この結果が示す通り、同定した特性値を、異なる濃度、ガス種に用いてもフィルタ差圧を精度良く予測できることが確認された。

次に、Fig. 13 に濃度 C_1 , C_2 , C_3 の測定結果と CFD 結果の比較結果を示す。同定した特性値を用いた CFD 結果が、全ての条件における測定結果を良く再現できた。

本手法で得られた特性値は、他の濃度、流量条件でも使うことができる汎用性かつ信頼性の高いデータであることが確認できた。


 Fig. 12 Comparison of measurement (test) and CFD filter pressure drop with identified A_1 , A_2 , and D

 Fig. 13 Comparison of measurement (test) and CFD He concentration profiles with identified D at three sensors for validation

5. 設計手法の検証結果

5.1. 検証計算概要

Fig. 14 に、フィルタ付水素隔離構造を簡易的に模擬した実験装置と CFD による濃度分布イメージを示す。

実験装置はガス流入用の配管、前章で特性取得したフィルタ、FC スタックの水素隔離構造を模した直方体形状の箱、及び濃度センサで構成されている。ガス流入は配管の一つ所からのみとし、そこから濃度 100% のヘリウムガスを箱の内部に流入させる。それ以外の配管及びフィルタ以外の通路は全て封鎖し、箱の内部に拡散したヘリウムガスは、空気と混合しながら内部空間全体に広がり、箱の側面に設置したフィルタを介して外に流出する。この時、箱の内外の濃度差に応じて、空気もフィルタを介して流入出するため、最終的に定常状態の濃度場が構築される。この定常状態における Sensor 1 から Sensor 5 の五ヶ所におけるセンサのヘリウム濃度を測定し、この濃度を今回取得したフィルタ特性値を用いた CFD で予測できるかを検証した。

検証は Table 3 に示す三つの条件でおこなった。条件 1 は、フィルタがなく 20 個のフィルタ取付穴からガスが自由に行き来できる条件とし、フィルタなしにおける超低速 CFD 手法の妥当性検証をおこなった。条件 2, 3 は 1 に対してフィルタの個数とヘリウムガスの流入流量を変えて、取得したフィルタ特性と CFD 技術の妥当性を評価した。なお、条件 2 ではフィルタが付かない部分の穴はアルミテープで封鎖した。なお、温度は一律 25℃ とした。

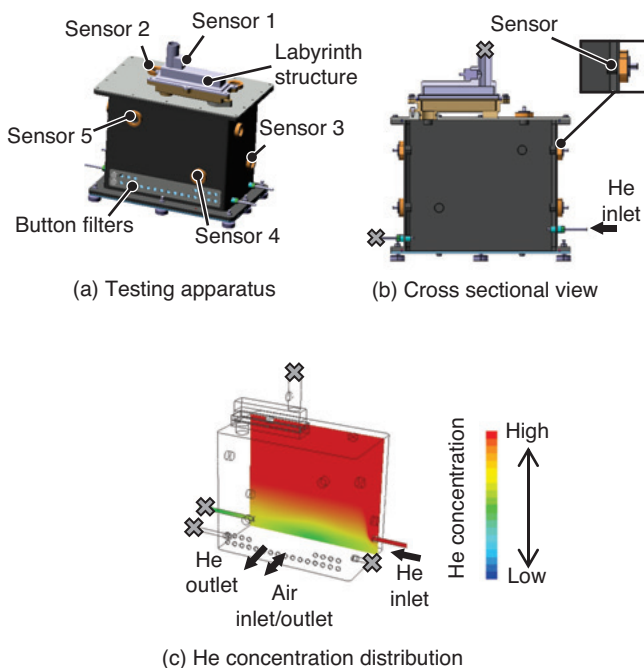


Fig. 14 Testing apparatus and He concentration distribution

Table 3 Measurement and CFD conditions for validation

No.	He [cm ³ /min]	Number of filters	Number of holes
1	18	0	20
2	10	10	0
3	10	20	0

5.2. 検証計算結果

Fig. 15 に、各条件におけるセンサの濃度測定結果と、同条件で実施した CFD による濃度予測結果の比較を示す。

(a) と (c) は本来同一流量で比較すべきであるが、フィルタ無しにおける 10 cm³/min のテストでセンサ濃度の精度保証範囲外となる低濃度の値が測定されたため、(a) の流量を 18 cm³/min に変更した。

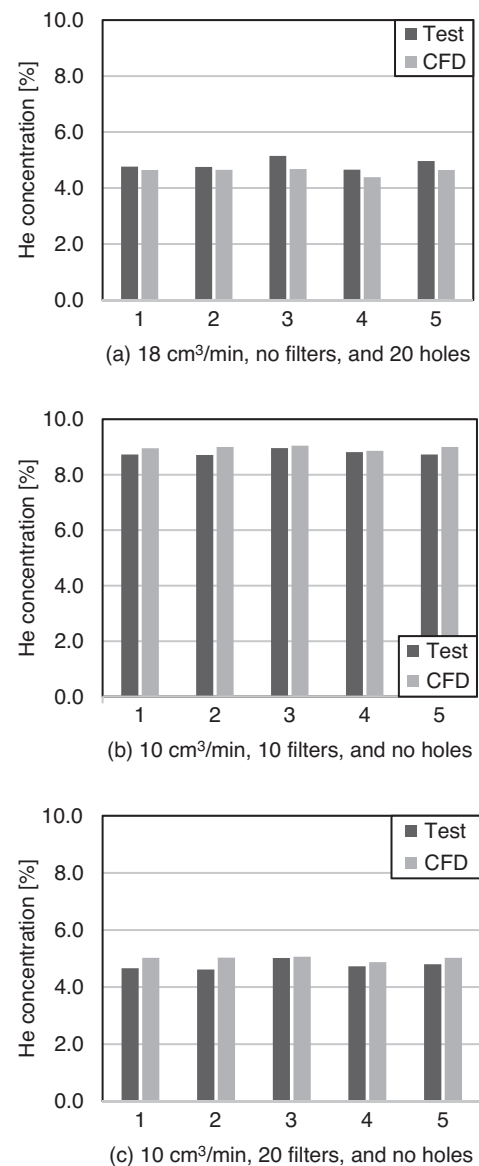


Fig. 15 Comparison of measurement (test) and CFD He concentration at five sensors

この結果、流量が高いフィルタ無しの濃度が、流量が低いフィルタ有りでの濃度よりも低くなり、フィルタによる空気とヘリウムの透過の阻害が確認できた。また (b) と (c) の比較においては、換気をおこなうフィルタの穴数が少ないほどヘリウム濃度が高くなることが確認できた。センサ位置違いでの結果では、差異は小さいものの、流入入口に近い Sensor 3 の濃度が高い傾向を再現できた。

これらの結果が示すように、どの条件、センサ位置においても、CFD 結果はテスト結果を良好に予測することが確認された。これにより、今回取得したフィルタ特性値および CFD 手法の妥当性が確認された。

6. まとめ

フィルタの特性値を CFD により同定した結果を用いて実験装置と解析結果を比較し、別の実験条件での実験値と解析値の検証をおこなった。これにより、防水・防塵フィルタ付水素隔離構造の CFD を用いた設計手法の妥当性を確認した。

- (1) フィルタ前後の圧力と濃度を測定し、CFD による測定内容の再現計算によって、フィルタ特性値を同定した。
- (2) CFD モデルの妥当性検証のために取得したフィルタ特性値を用いて、簡易形状の実験装置と解析結果におけるガス濃度を比較し、極低流量のガス流れ条件においても良好に予測できることを確認した。
- (3) 同定した特性値は、異なるガス種・流量・濃度条件の CFD でも汎用的に使えることを確認した。

水素は目に見えない可燃性ガスであり、試験的にも場所や条件の制約を受けやすい。本手法のように水素濃度を簡便に予測できる技術は、より安全かつ小型・軽量の水素隔離構造を設計する場合には有用な技術と考える。

本 CFD 技術は、更に燃料電池自動車 (FCV) 実車における水素濃度の予測技術にも転用可能であり、安全な水素社会の実現のために必要な技術となることが期待できる。

参考文献

- (1) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.28 No.1, p.1-7
- (2) https://www.nitto.com/jp/ja/products/temish_search/about/
- (3) JIS K 7126-1: プラスチックフィルム及びシートーガス透過度試験方法—第 1 部: 差圧法, (2006)
- (4) JIS K 7126-2: プラスチックフィルム及びシートーガス透過度試験方法—第 2 部: 等圧法, (2006)
- (5) ASTM D1434: Standard Test Method for Determining Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and

Sheeting, (2015)

- (6) ISO 15105-1: Plastics - Film and sheeting - Determination of gas-transmission rate - Part 1: Differential-pressure methods, (2007)
- (7) JIS P 8117: 紙及び板紙—透気度及び透気抵抗度試験方法 (中間領域) —ガーレー法, (2009)
- (8) JIS L 1096: 織物及び編物の生地試験方法, (2010)

■ 著 者 ■



佐々本和也



須田 恵 介