

超音波式携帯型ガスリーク検知器(MoLeTELL®)の開発 Development of Ultrasonic Portable Gas Leak Detector (MoLeTELL®)

日本無線株式会社¹ 日清紡ホールディングス株式会社² 上田日本無線株式会社³

新 福 修 史¹ 鳥 山 泰 弘¹ 松 林 克 征²
Yoshifumi Shinfuku Yasuhiro Toriyama Katsuyuki Matsubayashi
伊 藤 智 彦³ 坂 口 治³
Tomohiko Ito Osamu Sakaguchi

要 旨

地球温暖化対策およびエネルギーセキュリティ確保に貢献する水素エネルギーは究極のクリーンエネルギーとして位置づけられている。日本ではエネルギー基本計画や水素基本戦略によって水素社会に向けた取り組みが促進されている⁽¹⁾。安全・安心な水素社会を支えるためには、水素ガスの漏れをいち早く検知する水素ガスセンサが必要不可欠である⁽²⁾。既存の水素ガスセンサは、化学反応により水素を検知する「接触燃焼式」「半導体式」などの方式を採用しているが、これらは検知速度の遅さ、触媒劣化をはじめとした数々の課題を抱えていた⁽³⁾。当社は、センサに超音波を応用することによってこれらの問題点を解決し、検知速度が速く(0.5秒以下)、触媒を使用しない超音波式携帯型ガスリーク検知器(MoLeTELL®⁽⁴⁾)を開発した。

Abstract

Hydrogen energy, which contributes to global warming countermeasures and ensuring energy security, is positioned as the ultimate clean energy. In Japan, efforts toward a hydrogen society are promoted by the Strategic Energy Plan and the Basic Hydrogen Strategy [ref.⁽¹⁾]. In order to support a safe and secure hydrogen society, the hydrogen gas sensor that quickly detects hydrogen gas leaks is indispensable [ref.⁽²⁾]. Existing hydrogen gas sensors adopt methods such as “contact combustion type” and “semiconductor type” that detect hydrogen by chemical reactions, however, these have several problems such as slow detection speed and catalyst deterioration [ref.⁽³⁾]. JRC solved these problems by applying ultrasonic waves to the sensor and has developed an ultrasonic portable gas leak detector (MoLeTELL® [ref.⁽⁴⁾]) that has a fast detection speed (0.5 seconds or less) and does not use any catalysts.

1. まえがき

「製造、貯蔵・輸送、利用」の水素サプライチェーンにおいて従来使用されていた水素ガスセンサは、検知速度の遅さ、触媒劣化のしやすさ、高湿度環境下における検知性能の低下、検知濃度範囲の狭さなどの課題を抱えていた。

当社では、ガスの種類や濃度によって測定空間における音速が変化する点に着眼し、音速からガス濃度を測定するMoLeTELL®(以降、本検知器)の開発に成功した。本検知器は触媒フリーであることから、NO_xやSO_xなどの触媒作用を低下させる物質による劣化がないことに加え、起動や検知動作の速さ、高温や高湿度環境下への適応性の高さなどの特長をもつ。さらに、本検知器は水素ガス以外(気密検査などに用いられるヘリウムガスなど)の検知も可能である。従来のヘリウムガス検知器は、コスト、サイズ、可搬性、寿命などの面において多くの解決すべき課題を抱えていたが、本検知器は、これらの課題を一掃し、利便性を大幅に向上させた。

本稿では、超音波を用いたガス漏れ検知の仕組み、および機器概要とその評価結果について報告する。

2. 超音波を用いたガス漏れ検知の仕組み

本検知器は超音波を用い、音速に基づいてガス濃度を測定する。以下にガス濃度測定原理とガス濃度検知方法、および使用イメージについて説明する。

2.1 ガス濃度測定原理

本節では、音速によるガス濃度の測定原理を説明する。理想気体の音速Cは、式(1)で表される⁽⁵⁾。

$$C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

ここで、Mは気体の平均分子量、 γ は気体の比熱比、Rは気体定数、Tは気体の絶対温度である。

空気と各種気体の混合割合を変えると、気体内を伝搬する音速が変化する。音速は被検知ガス内を伝搬する時間(超音波を送信してから受信するまでの時間)を計測し、その伝搬時間と伝搬距離から算出する。算出された音速と本検知器に装備される温度、湿度、気圧の各センサの出力値からガスの平均分子量と比熱比を算出し、ガス濃度を求める。

20℃の空気中における各種ガスの濃度と音速の関係を図1に示す。比重が空気より小さいガス(水素、ヘリウムなど)

が混合された気体内の音速はガス濃度が高いほど上昇し、比重が空気より大きいガス（六フッ化硫黄など）が混合された気体内の音速はガス濃度が高いほど下降する。

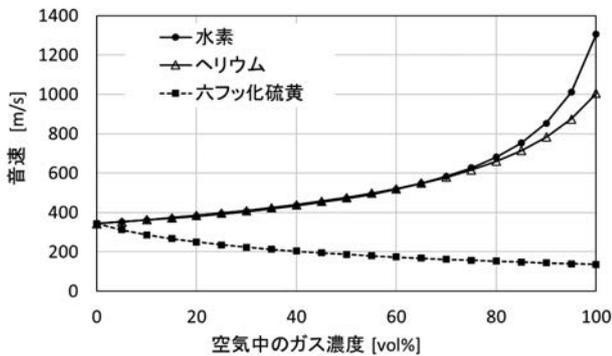


図1 20 °Cの空気における各種ガス濃度と音速の関係
Fig.1 Relationship between various gas concentrations and sound velocity in the air at 20 °C

2.2 ガス濃度検知方法

ガス配管や気密を必要とする機器にヘリウムや水素ガスを充填し、接続部や溶接部などに本検知器を近づけ、ガスの漏れ箇所の特定制と漏れ量の測定を行う（スニッファ法）。図2に本検知器の使用イメージを示す。



図2 「MoLeTELL®」の使用イメージ
Fig.2 Image of using “MoLeTELL®”

3. MoLeTELL®の概要

本検知器は、空気中や不活性雰囲気中における水素・ヘリウムガスの漏れ検知において小型軽量による利便性を持ち、データの数値化や保存が可能である。以下に本検知器の概要を示す。

(1) 特長

- (a) 小型（手のひらサイズ）、軽量（500 g以下）
- (b) 屋外でも見やすい高輝度表示
- (c) **Bluetooth® LE**を搭載。取得データをスマートフォンに転送し、数値およびグラフによる表示、データ保存が可能

- (d) ガスの漏れ箇所を特定する「吸引式」および雰囲気中のガス濃度を検知する「拡散式」の両機能を搭載
- (e) 広い検出濃度範囲（水素：0～20 vol %※、ヘリウム：0～5 vol %）※吸引式の場合
- (f) 速い起動と応答速度（電源ON後 1 分後に測定可能、拡散式の計測応答速度：0.5秒以下）
- (g) 広範囲な計測環境（温度 -20～50 °C、湿度 95 % RH（水蒸気量）以下※）※40 °C時
- (h) 触媒フリー

(2) 検知機能・用途

本検知器は、吸引式検知機能と拡散式検知機能の2種類の検知機能を搭載する。両機能の選択は、本検知器側面のスライドスイッチにより行う。吸引式検知機能は検体のガス漏れ箇所の特定に使用し、拡散式検知機能は検体からのガス漏れの有無確認および実験室内、ドラフトチャンバー内におけるガス濃度測定に使用する。

(a) 吸引式検知機能

水素ガス配管、水素ステーション機器、燃料電池などの水素ガス漏れ箇所の特定や、ヘリウムガス漏れ箇所の特定に使用。狭い場所に適した吸引ホースを用いたガス配管フランジ部と、片手での操作が可能な直付けノズルを用いたタンク溶接部のガス漏れ検知例を図3に示す。

(b) 拡散式検知機能

ボンベ保管場所、実験室、ドラフトチャンバー等の水素ガスやヘリウムガスの取扱場所におけるガス漏れ検知に使用。



図3 吸引式によるガス漏れ箇所検知の様子

- (1) ガス配管フランジ部における検知（吸引ホースを使用）
- (2) タンク溶接部における検知（直付けノズルを使用）

Fig.3 State to detect the gas leak part by the suction type

- (1) Detection at the gas piping flange part (using the suction tube)
- (2) Detection at the tank welding part (using the direct attachment nozzle)

(3) 外観

本検知器の外観を図4に示す。



図4 検知器の外観

Fig.4 Appearance of the detector

(4) 機器の仕様

本検知器の仕様を表 1に示す。

表1 仕様

Table 1 Specifications

項目	仕様		
対象検知ガス	水素またはヘリウム		
検知方式	吸引式	拡散式 (オプション)	
検知範囲	水素	0~20 vol%	0~10 vol%
		$0\sim 2\times 10^2\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	-
	ヘリウム	0~5 vol%	
		$0\sim 5\times 10^3\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	-
検知下限濃度	0.03 vol%		
検知下限漏れ量	$3\times 10^5\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	-	
連続使用時間	8時間以上 通信機能停止, 新品アルカリ乾電池, 無警報, 25 °C		
電源	単3形アルカリ乾電池 4本		
外形寸法	本体 : (W) 82 mm × (H) 155 mm × (D) 41.6 mm 突起部・ベルト部含まず		
	拡散式検知部 : φ 29 mm × (H) 85mm		
質量	500 g以下 乾電池は含まない		
使用温度	-20~+50 °C		
使用湿度	40 °C 95 % RH 水蒸気量以下 (ただし, 結露なきこと)		
通信機能	Bluetooth® v4.2搭載 通信距離最大3m		

本検知器は、図5に示すように、アナログ部、センシング部、演算部、表示・操作部、Bluetooth®モジュール部、電源部により構成される。アナログ部は、超音波振動子の駆動および受信信号の増幅を行う。センシング部は、センサが出力するデータ（温度、湿度、気圧）の取得、および超音波の伝搬時間の計測を行う。演算部は、センシング部が取得したデータ（温度、湿度、気圧）および超音波の伝搬時間により音速を計算し、ガスの濃度を算出する。表示・操作部は、算出されたガスの濃度を表示する。Bluetooth®モジュール部は、算出されたガスの濃度をスマートフォン（アンドロイド端末、Bluetooth® v4.2対応）に無線で送信する。

吸引式検知部には、吸引ポンプにより吸引ノズルから吸い込んだガスが滞留する。一方、自然吸気により取得したガスは拡散式検知部に滞留する。

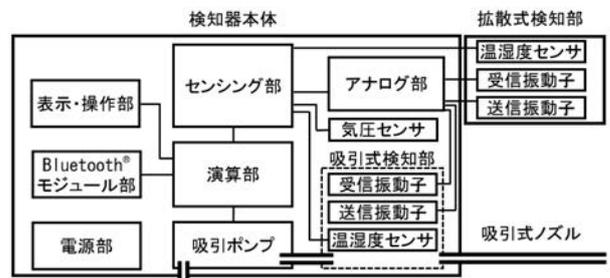


図5 検知器のブロック図

Fig.5 Block diagram of the detector

4. MoLeTELL®の開発目標

「いつでもどこでも、簡単に、高い精度でガス漏れの検知を可能とする」をコンセプトとし、「小型軽量」「高精度」「屋外使用への対応」「可燃性ガス環境への対応」「電源ケーブル不要（バッテリー駆動）」を目標として本検知器を開発した。本章では、開発目標としたこれらの要素について述べる。

4.1 機器の小型化

高い測定精度を確保しながら機器を小型化するうえでの課題は、計測に必要な超音波伝搬路を機器内に収納することである。本検知器では、以下の手法によりこの課題を解決し、小型化と高い測定精度を両立した。

- (1) 吸引式検知においては、超音波の伝搬路内に2基の反射板を設置し、反射板に超音波を反射させてコの字状の伝搬路を形成することで必要な伝搬路長を確保
- (2) 拡散式検知においては、送受信振動子と反射板との間で超音波が多重反射し、往復伝搬することを利用して必要な伝搬路長を確保

両方式における超音波の伝搬の様子を図6に示す。拡散式検知においては、超音波は送受信振動子と反射板の間で複数回反射する。

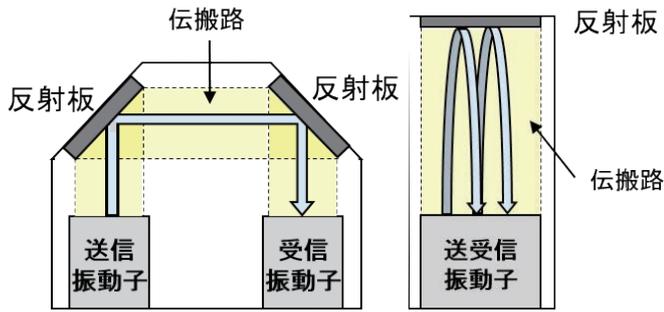


図6 吸引式検知と拡散式検知における超音波の伝搬の様子
(1) 吸引式検知における伝搬 (2) 拡散式検知における伝搬

Fig.6 State of ultrasonic wave propagation in the suction type detection and the diffusion type detection

- (1) Propagation in the suction type detection
(2) Propagation in the diffusion type detection

4.2 超音波伝搬時間の測定精度向上

超音波の伝搬時間を高い精度で測定するためには、受信信号の波形上において、伝搬時間算出の基準となる点を実際に検知し、特定する必要がある。そこで、吸引式においては、送信用振動子へ印加するパルスの波数、位相、振幅を制御したうえで送信することにより、受信時に波形の基準点を特定できるようにした。超音波信号の受信波形の例を図7に示す。この例では、測定のための波形の基準点として「振幅が極小となる点が第7波目」となるように送信信号が制御されている。受信時にはこの第7波目の正の最大振幅を検出し、波形の基準点として伝搬時間を測定する。さらに、ADCのサンプリングタイミングによって基準点に生じる測定時間の誤差を補完するため、基準点直後でゼロをまたぐ正負のデータ間を直線近似して図7のゼロクロス時間を算出し、伝搬時間測定に用いることで測定精度を向上させた。本測定方法は特許出願済みである⁽⁶⁾。

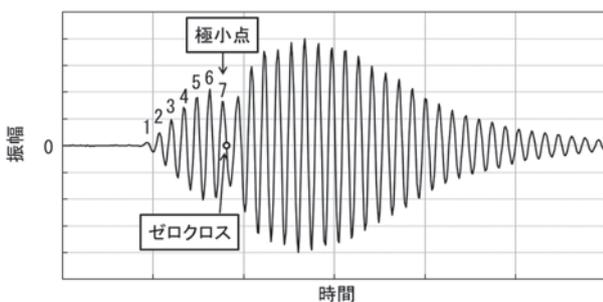


図7 吸引式検知における超音波信号の受信波形
Fig.7 Received waveform of ultrasonic signal in the suction type detection

4.3 屋外使用への対応

屋外で濃度測定を行う場合、拡散検知において風向・風量の変化が伝搬路内の気流を乱し、超音波の伝搬速度が変動する。伝搬速度の変動は濃度測定の誤差要因となる。屋外において高い測定精度を維持するため、風向・風量の影響を受けないように拡散式検知部の筒体側面にある複数のガス吸排気口は、お互いに対向とされない位置関係の構造とした。図8に本構造の外観図を示す。本構造については、特許出願済みである⁽⁷⁾。

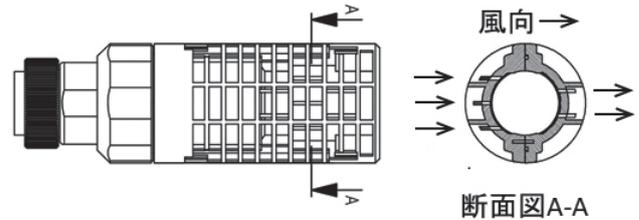


図8 拡散式検知部外観図

Fig.8 Appearance drawing of the diffusion type detector attachment

4.4 可燃性ガス環境への対応 (本質安全防爆構造設計)

本質安全防爆構造とは、製品の使用時または事故時に発生する火花や高温部により可燃性ガスに引火・着火しないことが公的機関において認められた構造を指す。

本検知器が認証取得した規格(本質安全防爆構造「Exia II C 250℃ (T2) Ga」)は、「発火点が250℃以上の可燃性ガス環境下における通常運転中に想定される機能不全事態においても着火源とはなり得ない」という性能を満たすものである。

本質安全防爆構造を実現するためには、製品の使用時および事故発生時の「部品表面温度上昇」「火花発生」の抑止が鍵となる。

(1) 部品表面温度上昇の抑止

回路に異常が生じた時に部品の表面温度が可燃性ガスの発火温度(250℃)に達しないことを要件とする。

本検知器は可燃性ガス環境下において使用されるため、いかなる状況においても回路内の部品の表面温度が可燃性ガスの最低発火点(250℃)を絶対に超えない設計が求められる。この点を検証するため、基板の層構成、搭載する部品の形状および実装位置を変えた評価用プリント基板を製作し、対象部品に印加する電力を変え、部品表面温度を測定した。評価用プリント基板における測定結果からシミュレーションモデルを作成し、設計段階において部品表面温度の上昇の度合いを確認しながら実装位置を最適化した。プリント基板の設計段階において、対象部品に印加する電力と部品表面温度上昇の関係のシミュレーション結果、および試作機において実際に測定した結果例を図9に示す。

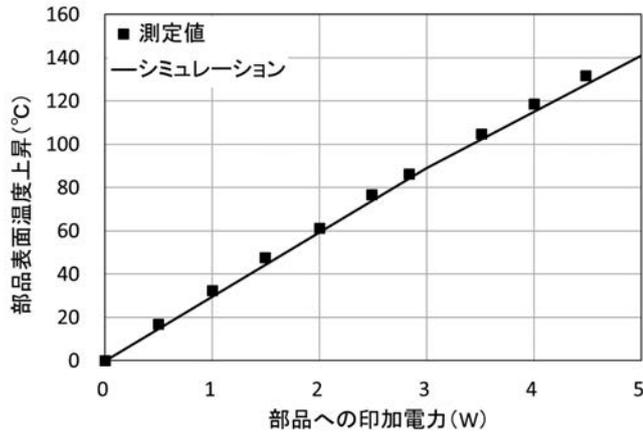


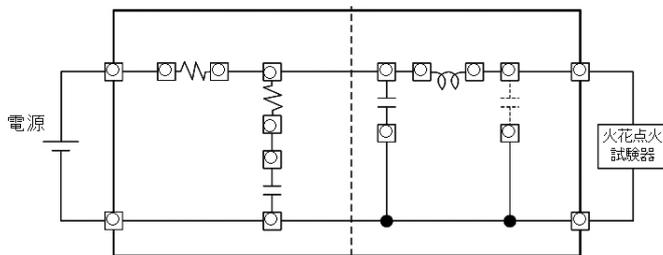
図9 回路に印加する電力と部品表面温度上昇 (シミュレーション結果と実測値の比較)

Fig.9 Power applied to the circuit and temperature rise of the component surface (comparison between simulation results and actual measured values)

(2) 火花発生による爆発の抑止

回路に故障が生じた場合 (回路に過大な電気的ストレスが印加された場合) に回路内に発生する火花により爆発が生じないように、設計において使用するキャパシタンス、インダクタンスを制限することを要件とする。

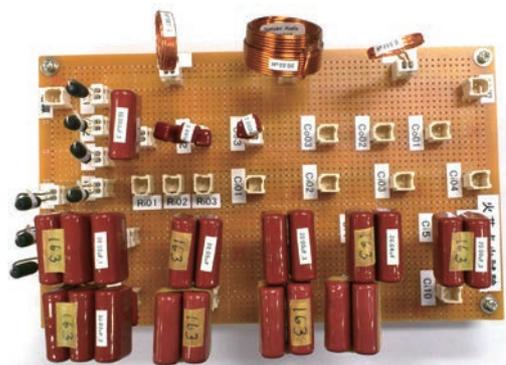
回路上に実際の故障を再現することは困難であるため、回路を構成するキャパシタンス、インダクタンスおよび電流制限抵抗のみを等価回路として製作し、火花点火試験により爆発を生じないことを確認し、等価的に本質安全防爆構造設計を保証する。図10に本検知器の等価回路と試験用基板を示すが、被試験ガスが満たされた試験機内の電極に試験基板を接続して電気的ストレスを与え、電極において発生する火花により爆発しないことを確認した。



(1) 等価回路

Fig.10 Equivalent circuit for an explosion-proof test, and circuit board for the test

(1) Equivalent circuit



(2) 試験用基板

(2) Circuit board for the test

5. 評価結果

本章では、吸引式検知機能、拡散式検知機能の各々の評価結果を示す。

5.1 吸引式検知機能

微量なガス漏れの検知に要する時間 (応答性) を評価するため、本検知器の使用環境温度範囲において、検知下限値 ($3 \times 10^5 [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$) のガスの漏れ量を測定した。ヘリウムガスの標準的な漏れ量を用いて取得した測定結果を表2に示す。各温度における測定精度は十分に高く、微量な漏れ量検知が可能であることを確認した。また、吸引式における検知応答性を評価するため、直付けノズル先端を標準的な漏れ量 (ヘリウムガス、漏れ量 $2.9 \times 10^5 [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$) のガス漏れ箇所接近させ、検知までの時間を測定した。温度 $+20^\circ\text{C}$ における測定結果を図11に示す。測定開始から検知を開始するまでの所要時間は0.5秒以下であり、検知開始の4秒後には漏れ量の測定値が安定する。

表2 ガス漏れ検知 (吸引式) の測定結果

Table 2 Measurement results of gas leak detection (with the suction type)

温度	漏れ量 2.90 (単位: $10^5 \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)	
	測定値	検知可否
-25 °C	2.80	可
+20 °C	2.53	可
+55 °C	2.88	可

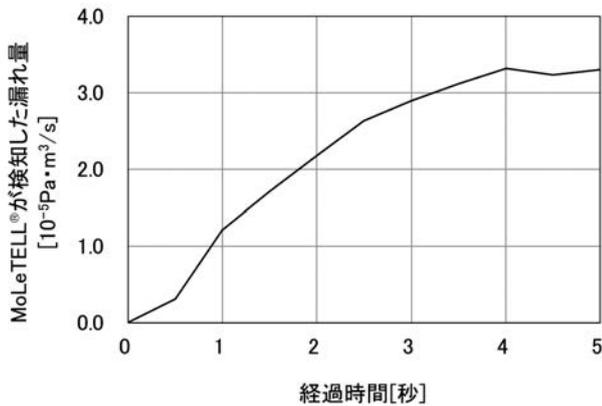


図11 ガス漏れ検知 (吸引式検知) の応答特性

Fig.11 Response characteristic of gas leak detection (with the suction type)

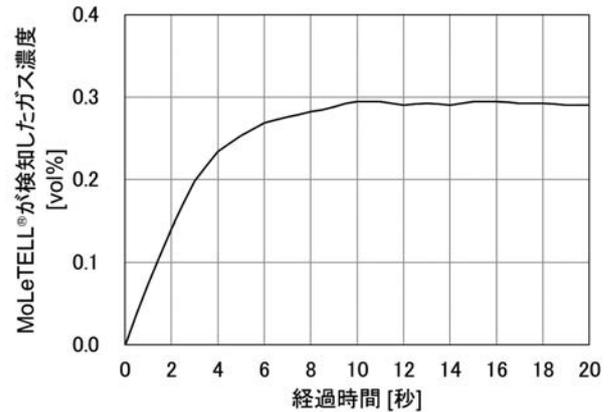


図12 ガス濃度測定 (拡散式検知) の応答特性

Fig.12 Response characteristic of gas concentration measurement (with the diffusion type)

5.2 拡散式検知機能

ヘリウムガスを使用して、拡散式検知機能により取得した濃度測定結果を表3に示す。ヘリウムガスの濃度にかかわらず測定誤差は非常に小さく、高い精度で測定できることが確認された。また、応答特性の評価として、濃度0.29 vol%のヘリウムガスを充填した容器に拡散式検知部を挿入し、ガス濃度の検知開始時間を測定した。温度+20℃での測定結果を図12に示す。測定開始 (容器に検知部を挿入した時点) から0.5秒以下でガス濃度を検知し、高速な応答特性を確認した。

表3 拡散式ヘリウム濃度精度測定結果

Table 3 Accuracy measurement results in a helium concentration using the diffusion type

	ガス濃度			
	0.29 (vol%)		5.06 (vol%)	
温度	測定値	誤差	測定値	誤差
-25℃	0.27	-0.02	5.03	-0.03
+20℃	0.27	-0.02	5.00	-0.06
+55℃	0.27	-0.02	5.00	-0.06

6. あとがき

本稿では、日清紡グループのコア技術である超音波技術と信号処理技術を応用し、従来使用されていた水素ガスセンサの問題であった「検知速度の遅さ」「触媒の劣化のしやすさ」「高湿度環境下における検知性能の低下」「検知濃度範囲の狭さ」の克服について、および安全・安心な水素社会を強力にサポートするMoLeTELL®の開発について紹介した。

また、MoLeTELL®が多様なガスの検知が原理的に可能である点を活かし、小型軽量化、起動や検知の高速化など、利便性を大幅に向上させたヘリウムガスリーク検知器への応用例についても言及した。

当社は、日清紡グループの一員として、今後も数多くの分野にわたり保有する高度な技術を融合させ、人々の安全・安心に向けた付加価値の高いものづくりを進めてゆく。

参考文献

- (1) 経済産業省 ようこそ！水素社会へ～水素・燃料電池政策について
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/hydrogen/
- (2) 水素エネルギーナビ
<http://hydrogen-navi.jp/property/handling.html>
- (3) 水素エネルギーシステムVol30, No.2(2005) 水素エネルギー協会編集
- (4) MoLeTELL®, 登録商標6090892号
- (5) 国立天文台編『理科年表2020』丸善出版
- (6) 日本無線ほか：伝搬時間測定器、気体濃度測定装置、および伝搬時間測定プログラム, 特開2019-066421
- (7) 日本無線ほか：気体センサ, 特開2020-106299
- (8) 日清紡ホールディングス
https://www.nisshinbo.co.jp/r_d/message.html

用語一覧

ADC: Analog to Digital Converter (アナログ-デジタル変換機)

Bluetooth LE: Bluetooth Low Energy (低消費電力の通信モード)

MoLeTELL: Monitoring Leakage and TELL

NOx: 窒素酸化物

SOx: 硫黄酸化物

理想気体: 気体分子の大きさが0で、分子間の力が働かないと仮定した気体

伝搬距離: 超音波が空間を伝搬する総距離

伝搬時間: 送信された超音波が空間を伝搬し、受信されるまでに要する時間

ドラフトチャンバー: 揮発性の有害物質を取り扱うときに、作業者を保護するために用いる囲われた作業空間を持つ局所排気装置

「Bluetooth[®]」はBluetooth SIG, INCの登録商標です。

「MoLeTELL[®]」は日清紡ホールディングス[®]の登録商標です。