

テクノロジーマップの整備に向けた調査研究  
(アナログ規制の見直しに向けた技術実証等) における技術実証

## 技術実証報告書

実証類型番号 4 : センサー、AI 解析等を活用した設備の状態の定期点検の実証

理研計器株式会社

2024 年 2 月 22 日

## 目次

1	技術実証の概要	3
1.1	目的	3
1.2	対象業務（法令）	4
1.3	全体像	4
1.3.1	付与条件	5
1.3.2	重要成果指標（KPI）	5
1.3.3	技術実証の概要	7
1.4	実施体制・期間	9
1.4.1	実施体制	9
1.4.2	実施期間	10
2	技術実証内容の詳細	11
2.1	技術実証の方法	11
2.1.1	技術の概要	11
2.1.2	要素技術	12
2.1.3	実証試験	27
3	技術実証の結果	35
3.1	結果の評価ポイント・方法	35
3.1.1	評価ポイント	35
3.1.2	評価方法	42
3.2	結果及び評価・分析	46
3.2.1	結果	46
3.2.2	評価・分析	86
3.2.3	有識者の見解、及び今後の運用について	95
	用語集	96

## 1 技術実証の概要

### 1.1 目的

本技術実証は、ガス事業者が実施するガスの熱量及び燃焼性（ウォッベ指数<sup>用語1)</sup>、燃焼速度<sup>用語2)</sup>の法定測定において、センサー等のデジタル技術を活用し、従事事業者の安全性を確保した上で、現状の人手による測定と同等の精度での確認を実現し、測定に要する時間や人手の縮減を図ることを目的としている。

現在、ガスの熱量及び燃焼性の（ウォッベ指数、燃焼速度）の法定測定は、ユンカース式熱量計<sup>用語3)</sup>、ブンゼンシリング法<sup>用語4)</sup>、比重瓶法<sup>用語5)</sup>、あるいはガスクロマトグラフ<sup>用語6)</sup>などのJIS K2301：2022で定められている分析機器を用いて測定することが求められている。

これらの分析機器は、いずれも分析結果を得るまでのプロセスが複雑で、日々の法定測定で常に正確な分析結果が得られるようにするためには、分析機器の慎重な維持管理とメンテナンスが必要となる。

現在主流となっているガスクロマトグラフを例に挙げると、ガスの熱量、ウォッベ指数、燃焼速度の分析結果を得るまでのプロセスが

- 1) ガスの採取
- 2) カラムとキャリアガス（主にヘリウム）を用いた成分分離
- 3) 成分別の割合の分析
- 4) 熱量、ウォッベ指数、燃焼速度の計算

と複雑であるため、それらのプロセスが正常に行われるための分析機器のメンテナンスや、使用環境の整備や維持などに、多くの人手とコストを要する。

これに対して本技術実証において活用する技術は、ガスクロマトグラフのような複数のプロセスを経て測定結果を導く分析的な手法に代わり、ガス中を伝わる光と音の速度を、屈折率センサーと音速センサーを用いてリアルタイムで連続的に測定し、それらのセンサーからの出力データから、理研計器が独自に開発した演算処理を施すことによって、法定測定で要求されるガスの熱量及び燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）を求める。測定結果が得られるまでのプロセスがシンプルであるため、容易な操作で測定ができるばかりでなく、夏季や冬季の屋外のような過酷な環境でも測定の性能が維持できるように設計されている。

本技術実証では、本技術が現状のガス事業者が実施するガスの熱量及び燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の法定測定と同等の精度を有すること及びその精確さを長期間にわたって維持し、校正と測定の頻度の合理化ができることを示す<sup>1)</sup>。

---

<sup>1)</sup> 本技術が対象とするガスは、天然ガスなどに代表される、メタンを主成分とするパラフィン系炭化水素から構成されるガスで、その他の成分として窒素、二酸化炭素、ガス状炭化水素類、酸素、一酸化炭素を少量含む可能性があるものである。

## 1.2 対象業務（法令）

ガス事業法施行規則第 17 条、第 22 条、第 78 条、第 90 条、第 126 条及び第 144 条に係るガスの成分・特性の検査・測定

## 1.3 全体像

本技術実証は、ガス事業法施行規則第 17 条、第 22 条、第 78 条、第 90 条、第 126 条及び第 144 条に係るガスの成分・特性の検査・測定の内、下記の①～④に挙げるガス事業者による測定業務と作業を対象としたものである<sup>1</sup>。

- ① 毎日一回行う、ガスの熱量の測定業務
- ② 毎日一回行う、ガスの燃焼性の内のウォッペ指数の測定業務
- ③ 毎日一回行う、ガスの燃焼性の内の燃焼速度の測定業務
- ④ ガスの熱量、ウォッペ指数、燃焼速度の法定の測定方法である JIS K2301（2022）の中で求められている、測定前に行う測定機器の校正業務

本報告書で実証する技術は、ガス中を伝わる光と音の速度を、屈折率センサーと音速センサーを用いて測定し、それらの結果から演算処理で熱量、比重<sup>2</sup>、ウォッペ指数、燃焼速度を求めるものである。

本技術実証は、本技術が現行の測定方法と比較して遜色のない精度をもち、校正業務の頻度を減らしても長期にわたってその精度が維持できることを示すものである。

---

<sup>1</sup> ガス事業法施行規則第 22 条、90 条は、全硫黄、硫化水素、アンモニア、ナフタレン、水分などの成分（特殊成分）の検査方法に関するものであるが、本技術実証は特殊成分の検査方法を対象とはしていない

<sup>2</sup> 比重はウォッペ指数を測定する際に必要になる測定値である。

### 1.3.1 付与条件

本技術実証では、採択に際し次の二つの条件が付与された。

- A) ガス事業者や有識者等の第三者からアドバイスを受ける体制を設けること。
- B) 活用する機器・技術等の具体的な検証やデモンストレーション等を行うこと。

これらの内、A) の付与条件に対しては、「1.4.1 実施体制」の表 1 に記載する 3 名の有識者に、実証方法の妥当性確認や、後述の「3.2 結果及び評価・分析」の内容についての妥当性確認を依頼することで対応した。また、B) の付与条件に対しては、有識者の立会いのもとで本技術の実証・検証を行う「2.1.3 実証試験」の中で説明する実証試験⑤を行うことで対応した。

### 1.3.2 重要成果指標 (KPI)

本技術実証においては、次の (ア) ~ (エ) の 4 項目の重要成果指標 (KPI) が求められていた。

- (ア) デジタル技術を活用した代替手法が、現行の人手による点検等を同等以上の精度で実施可能であるか
- (イ) センサー等の経年劣化による取得情報の精度低下が考慮されているか
- (ウ) 定期点検等の実施者（事業者、自治体、国の出先機関又は民間の調査員）の実務（点検対象や点検方法）に対応する技術であるか
- (エ) 定期点検等の実施者にとって、技術導入が容易な、汎用性の高い技術であるか

これらの KPI を本技術実証の目的を踏まえて具体的に整理すると、以下のとおりとなる。

- 【ア】 本技術が、現行のガスクロマトグラフ等によるガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定と同等以上の精度で実施可能であるか
- 【イ】 本技術に用いているセンサー（屈折率センサー、音速センサー）等の経年劣化による、ガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定精度の低下が考慮されているか
- 【ウ】 ガスの熱量、燃焼性の測定を行うガス事業者の実務である、ガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定に対応する技術であるか
- 【エ】 ガスの熱量、燃焼性の測定を行うガス事業者にとって、技術導入が容易な、汎用性の高い技術であるか

本技術実証では、各 KPI に対して以下の方法で検証を行う。

【ア】の KPI に対して

「1.3.3 技術実証の概要」で説明する、繰り返し精度<sup>用語 7)</sup>と再現精度<sup>用語 8)</sup>を検証することで、本技術が現行のガスクロマトグラフ等によるガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定と同等以上の精度で実施可能であることを示す。

【イ】の KPI に対して

「1.3.3 技術実証の概要」で説明する 期間検証を実施することで、本技術に用いているセンサー（屈折率センサー、音速センサー）等の経年劣化による、ガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定精度の低下が発生し難く、長期にわたって高い精度で測定が出来ることを示す。

【ウ】の KPI に対して

「1.3.3 技術実証の概要」で説明する、真度<sup>用語 9)</sup>を評価することで、本技術がガスの熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の正確な値を与える能力を有することを示し、それにより本技術が、ガス事業者の実務である、ガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定に対応する技術であることを示す。

【エ】の KPI に対して

本技術の導入、運用、保守に係るコストを検討し、現在広く使われているガスクロマトグラフのコストと比較することで、ガス事業者にとって技術導入が容易なものであることを示す。

また、操作性に優れ、ガス事業者の業務である熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定を全て容易にできる、汎用性の高い技術であることを「1.3.3 技術実証の概要」で説明する真度評価を通して示す。

### 1.3.3 技術実証の概要

本技術実証では、下記の(1)～(5)の検証を行うことで、本技術が現行の測定方法と比較して遜色のない精度をもち、校正業務を減らしても長期にわたってその精度が維持できることを示す。

#### (1) 真度検証

この評価では組成の明らかな複数のテストガス、あるいは組成をガスクロマトグラフで明らかにした都市ガスを用いる。これらのガスの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度を本技術で測定し、その測定結果 $x$ と、その時々ガスの組成から計算で求められる理論値を参照値 $Ref$ とし、(1)式に示す差 $y$ を求め、(2)式に示すその平均値 $\tilde{y}$ のかたよりが、「3.1.2 評価方法」で定める真度の評価基準を満足するかを検証する。

$$y_i = x_i - Ref \quad (1)$$

$$\tilde{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - Ref) \quad (2)$$

ここで、 $n$ はデータ数を、 $x_i$ は個々の測定結果を、 $Ref$ は測定結果 $x_i$ が得られた時々ガスの組成から理論計算で求めた参照値をそれぞれ表す。

この評価により、本技術の測定方法が熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の正確な値を与える能力を有するか検証する。

#### (2) 繰り返し精度検証

この評価では組成の明らかな複数のテストガスを用いる。それぞれのテストガスの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度を、本技術を用いて、同一条件下で繰り返し測定し、この時の測定結果 $x_i$ から、繰り返し標準偏差 $sr$ と、繰り返し許容差 $r$ をそれぞれ(3)(4)式より求め、この繰り返し許容差 $r$ が、「3.1.2 評価方法」で定める繰り返し許容差の評価基準を満足するかを検証する。

$$sr = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2} \quad (3)$$

$$r = 1.96 \times sr \quad (4)$$

ここで、 $n$ はデータ数、 $x_i$ は個々の測定結果、 $\tilde{x}$ は平均値をそれぞれ表す。

### (3) 再現性精度検証

この評価では組成の明らかな複数のテストガス、あるいは組成をガスクロマトグラフで明らかにした都市ガスを用いる。これらのガスの熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を、同一条件下ではない、温度や時間、季節などが異なる再現条件下で測定する。

この時の測定結果  $x_i$  から、再現標準偏差  $sR$  と、再現許容差  $R$  をそれぞれ(5)(7)式より求め、この再現許容差  $R$  が、「3.1.2 評価方法」で定める再現許容差の評価基準を満足するかを検証する。

$$sR = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

$$y_i = x_i - Ref \quad (6)$$

$$R = 1.96 \times sR \quad (7)$$

ここで、 $n$  はデータ数を、 $x_i$  は個々の測定結果を、 $Ref$  は測定結果  $x_i$  が得られた時々のガス組成から理論計算で求めた参照値を、 $\bar{y}$  は測定結果  $x_i$  と参照値  $Ref$  の差  $y_i$  の平均値をそれぞれ示す。

### (4) 期間検証

この評価では、(2)式の真度のかたより  $\bar{y}$ 、(4)式の繰り返し許容差  $r$ 、及び(7)式の再現許容差  $R$  が、それぞれの評価基準を満足する期間について評価を行う。本技術実証では、いずれの試験も、用いるセンサーの感度調整を試験機の製造時にのみ行い、その後は実証試験時を含め現場等でのセンサー感度調整を一切行わない条件で検証を行う。

製造/調整から数ヶ月～数年経過した時点での、試験機の熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定に対する、真度、繰り返し精度、再現精度の評価を行い、その結果がそれぞれの評価基準を満足するかを検証することで、本技術が正確に測定できる期間を示す。

### (5) その他の検証

本技術実証では、センサーの校正を行う際に「2.1.2 要素技術」で説明する2とおりの校正方法を用いている。この評価では、これらの校正方法の違いが測定結果に及ぼす影響についての検証を行う。



## 1.4 実施体制・期間

### 1.4.1 実施体制

本技術実証に関わった事業者、関係者及びそれぞれの業務・役割は以下のとおりである。

表1：本技術実証に関わった事業者、関係者

事業者名	実施業務・役割
理研計器株式会社	本技術実証の実施
群馬大学 名誉教授 角田 欣一 (理研計器株式会社からの 再委託先)	本技術実証のアドバイザーを担当。分析化学が専門。専門家としての立場から、実証試験の解析結果、結果報告の妥当性についての検討を実施。
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (AIST) 下坂 琢哉 (理研計器株式会社からの 再委託先)	本技術実証のアドバイザーを担当。分析化学、計量標準が専門。2022年のJIS K 2301の改訂時の委員を務めており、都市ガス事業における熱量や燃焼性の測定に関する専門的な知見を有する。 専門家としての立場から、当該実証試験の解析結果、結果報告の妥当性についての検討を実施。
一般財団法人 化学物質評価研究機構 (CERI) 上原 伸二 (理研計器株式会社からの 再委託先)	本技術実証のアドバイザーを担当。標準物質、標準ガスが専門。2022年のJIS K 2301の改訂時の委員を務めており、都市ガス事業における熱量や燃焼性の測定に関する専門的な知見を有する。 専門家としての立場から、当該実証試験の解析結果、結果報告の妥当性についての検討を実施。

表2：本技術実証の解析/評価に用いたデータを取得/提供した事業者、機関

事業者名	実施業務・役割
オランダ 国際法定計量認 証機関 NMi Certin B.V	実証試験①の評価に用いたデータを取得した機関。
一般社団法人 日本ガス協会	都市ガス事業者（都市ガス会社 A、B、C 社含む）からなる業界団体。JISK2301の原案作成を行っており、本技術実証に際して、現行の法定測定に関する情報提供や、実証試験で用いるデータ提供者への協力依頼を担当。
都市ガス会社 A社	実証試験②,③のデータの提供者
都市ガス会社 B社	実証試験④のデータの提供者
都市ガス会社 C社	実証試験④のデータの提供者

#### 1.4.2 実施期間

本技術実証の実施期間（契約期間）は以下のとおりである。

2024年1月11日から 2024年2月22日

## 2 技術実証内容の詳細

### 2.1 技術実証の方法

#### 2.1.1 技術の概要

技術の概要を図 1 に示す。本技術は、ガス中を伝わる光の速度と音の速度を、屈折率センサーと音速センサーでそれぞれ測定し、その結果から熱量、ウォツベ指数、燃焼速度を演算で求めるものである。

本技術に用いられている屈折率センサーと音速センサーは、夏季、冬季の屋外のような厳しい温度環境下でも影響を受けることなく、長期にわたって安定した感度を維持するため、従来の測定方法で求められる毎日一回の校正頻度を大幅に減らすことが出来る。

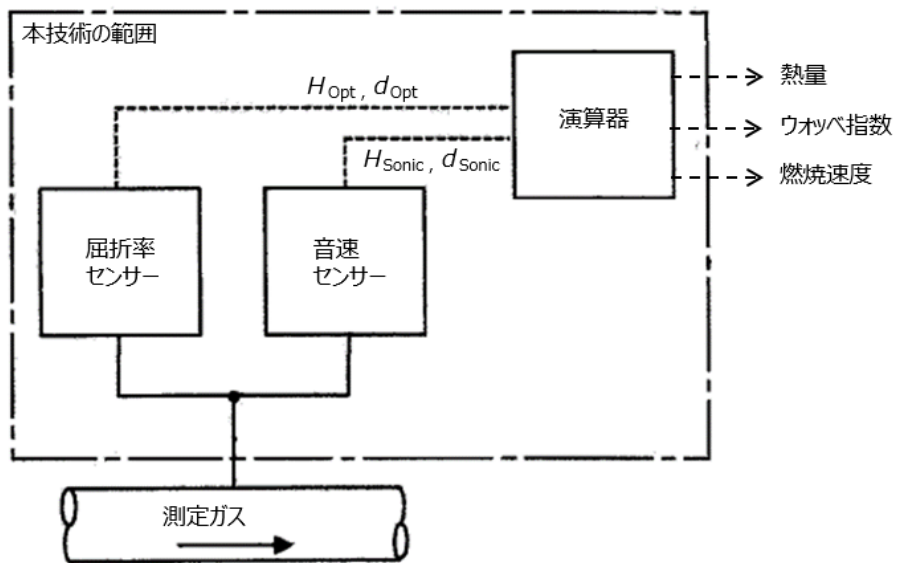


図1：本技術の概要



図2：本技術を用いた試験機の写真

### 2.1.2 要素技術

本技術に使用されている理論及び要素技術について、以下に示す。前半の「(1) 理論」では、ガス中を伝わる光と音の速度から、熱量、比重、燃焼速度を求める演算式を導くための理論について説明する。後半の「(2) センサー原理」では、本技術で採用している要素技術として、ガス中を伝わる光の速度を測定するためのセンサー原理、及び音の速度を測定するためのセンサー原理について、それぞれ説明する。また、これらのセンサーの校正方法について説明を行う。

#### (1) 理論

##### (ア) ガス中を伝わる光と音の速度から熱量を求める技術の理論

図 3 は各種純ガスの熱量と屈折率の関係を表したグラフである。赤色 ■ 印は、パラフィン系炭化水素 ( $\text{CH}_4$ :メタン、 $\text{C}_2\text{H}_6$ :エタン、 $\text{C}_3\text{H}_8$ :プロパン、 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ :ブタン) の、緑色 ● 印は、アルケン系炭化水素 ( $\text{C}_2\text{H}_4$ :エチレン、 $\text{C}_3\text{H}_6$ :プロピレン) の、青色 ▲ 印は炭化水素以外のガス ( $\text{N}_2$ :窒素、 $\text{CO}_2$ :二酸化炭素、 $\text{O}_2$ :酸素、 $\text{H}_2$ :水素、 $\text{CO}$ :一酸化炭素) の熱量と屈折率の関係をそれぞれ表している。

図中に描かれている直線は、パラフィン系炭化水素ガスの点 (赤色 ■ 印) を結び、屈折率と熱量の関係を示す関数  $H_{\text{Opt}}$  を表している。

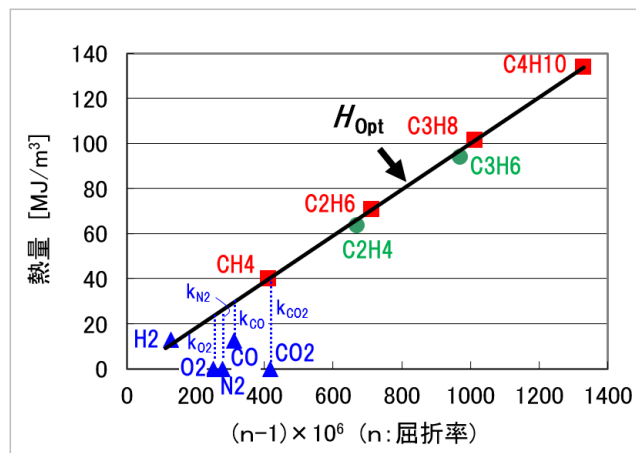


図3：熱量と屈折率の関係

図 4 は各種純ガスの熱量と音速の関係を表したグラフである。図中に描かれている直線は、パラフィン系炭化水素ガスの点を結び、音速と熱量の関係を示す関数  $H_{\text{Sonic}}$  を表している。

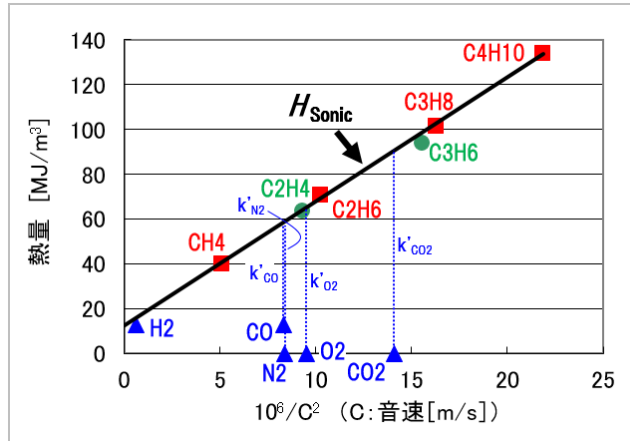


図4：熱量を音速の関係

測定対象ガスがパラフィン系炭化水素のみから構成されている場合、熱量と屈折率の関係、熱量と音速の関係は、それぞれの関数  $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$  で表すことができ、測定対象ガスの屈折率、あるいは音速を測定することで、関数  $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$  から、測定対象ガスの熱量  $H$  を求めることが可能である。

しかし、測定対象ガスに関数  $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$  が描く直線に乗らない成分  $N_2$ :窒素、 $CO_2$ :二酸化炭素、 $O_2$ :酸素、 $CO$ :一酸化炭素などが含まれている場合、これらの成分は誤差を与える雑ガスとなり、関数  $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$  の演算結果は、熱量  $H$  と等しくならない。

測定対象ガスが  $N_2$ :窒素、 $CO_2$ :二酸化炭素、 $O_2$ :酸素、 $CO$ :一酸化炭素などの雑ガスを含む場合、熱量  $H$  と、関数  $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$  の関係は、それぞれ(8)(9)式のように表すことができる。

$$H = H_{Opt} - \sum k_i \cdot x_i \quad (8)$$

$$H = H_{Sonic} - \sum k'_i \cdot x_i \quad (9)$$

ここで  $x_i$  は雑ガス成分  $i$  の体積分率を、 $k_i$ ,  $k'_i$  は雑ガス成分  $i$  が及ぼす誤差係数を表している。誤差係数  $k_i$ ,  $k'_i$  は、図 1, 2 のグラフの上で、成分  $i$  の点から関数  $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$  が描く直線までの縦軸方向の大きさに相当する。

これらの各雑ガス成分の誤差係数  $k_i$  と  $k'_i$  の関係は、その比が(10)式のように雑ガスの種類に関わらず、ほぼ一定となる関係が成り立つ。

$$k'_i \approx \alpha \cdot k_i \quad (10)$$

この関係式(10)を用いると、(9)式は下の(11)式のように書き表すことができる。

$$H \approx H_{Sonic} - \alpha \cdot \sum k_i \cdot x_i \quad (11)$$

(11)式の右辺第二項は、(8)式の右辺第二項を $\alpha$ 倍した形となるため、(8)式と(11)式から連立方程式を立てて熱量 $H$ について解くと、下の(12)式が得られる。

$$H \approx H_{Opt} - \frac{H_{Opt} - H_{Sonic}}{1 - \alpha} \quad (12)$$

この(12)式は、測定対象ガスの熱量 $H$ が、屈折率、音速を引数とする関数 $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$ で表すことが出来ることを示している。

下図5は、は各種純ガスの、屈折率、音速を使用して関数 $H_{Opt}$ ,  $H_{Sonic}$ で表した(12)式と、ガス組成から計算した理論熱量の関係を描いたものである。

(12)式を用いることで、パラフィン系炭化水素のガスのみならず、 $N_2$ :窒素、 $CO_2$ :二酸化炭素、 $O_2$ :酸素、 $CO$ :一酸化炭素などの成分も1本の直線に乗り、雑ガスの影響を効果的に除去でき、ガス組成から計算した理論的な熱量にほぼ一致する結果となる。

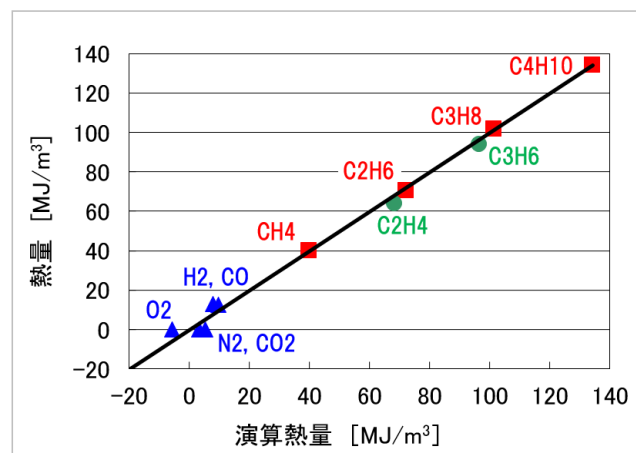


図5：(12)式と熱量の関係

(イ) ガス中を伝わる光と音の速度から比重を求める技術の理論

図 6 は各種純ガスの比重と屈折率の関係を表したグラフである。赤色 ■ 印は、パラフィン系炭化水素 (CH<sub>4</sub>:メタン、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>:エタン、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>:プロパン、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>:ブタン) の、緑色 ● 印は、アルケン系炭化水素 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>:エチレン、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>:プロピレン) の、青色 ▲ 印は炭化水素以外のガス (N<sub>2</sub>:窒素、CO<sub>2</sub>:二酸化炭素、O<sub>2</sub>:酸素、H<sub>2</sub>:水素、CO:一酸化炭素) の熱量と屈折率の関係をそれぞれ表している。

図中に描かれている直線は、パラフィン系炭化水素ガスの点 (赤色 ■ 印) を結び、屈折率と比重の関係を示す関数  $d_{Opt}$  を表している。

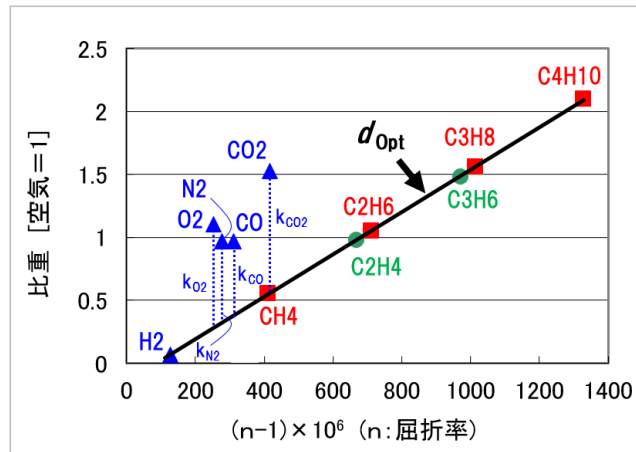


図6：比重と屈折率の関係

図 7 は各種純ガスの比重と音速の関係を表したグラフである。図中に描かれている直線は、パラフィン系炭化水素ガスの点を結び、音速と比重の関係を示す関数  $d_{Sonic}$  を表している。

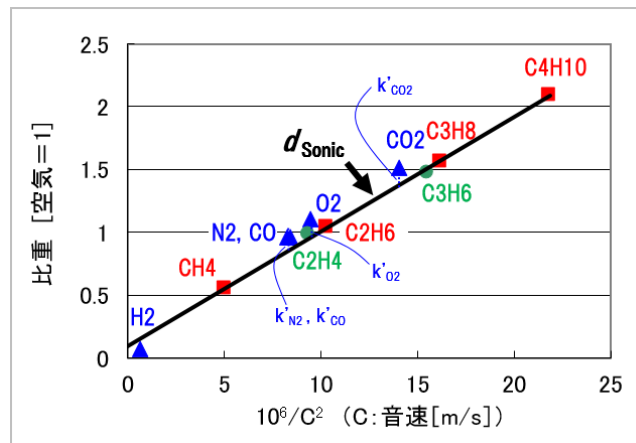


図7：比重と音速の関係

測定対象ガスがパラフィン系炭化水素のみから構成されている場合、比重と屈折率の関係、比重と音速の関係は、それぞれの関数  $d_{Opt}$ 、 $d_{Sonic}$  で表すことができ、測定対象ガスの屈折率、あるいは音速を測定することで、関数  $d_{Opt}$ 、 $d_{Sonic}$  から、測定対象ガスの比重  $d$  を求めることが可能である。

しかし、測定対象ガスに関数  $d_{Opt}$ ,  $d_{Sonic}$  が描く直線に乗らない成分  $N_2$ :窒素、 $CO_2$ :二酸化炭素、 $O_2$ :酸素、 $CO$ :一酸化炭素などが含まれている場合、これらの成分は誤差を与える雑ガスとしてふるまい、関数  $d_{Opt}$ ,  $d_{Sonic}$  の演算結果は、比重  $d$  と等しくならない。

測定対象ガスが  $N_2$ :窒素、 $CO_2$ :二酸化炭素、 $O_2$ :酸素、 $CO$ :一酸化炭素などの雑ガスを含む場合、比重  $d$  と、関数  $d_{Opt}$ ,  $d_{Sonic}$  の関係は、それぞれ(13)(14)式のように表すことができる。

$$d = d_{Opt} - \sum k_i \cdot x_i \quad (13)$$

$$d = d_{Sonic} - \sum k'_i \cdot x_i \quad (14)$$

ここで  $x_i$  は雑ガス成分  $i$  の体積分率を、 $k_i$ ,  $k'_i$  は雑ガス成分  $i$  が及ぼす誤差係数を表している。誤差係数  $k_i$ ,  $k'_i$  は、図 6, 7 のグラフの上で、成分  $i$  の点から関数  $d_{Opt}$ ,  $d_{Sonic}$  が描く直線までの縦軸方向の大きさに相当する。

これらの各雑ガス成分の誤差係数  $k_i$  と  $k'_i$  の関係は、その比が(15)式のように雑ガスの種類に関わらず、ほぼ一定となる関係が成り立つ。

$$\beta \cdot k'_i \approx k_i \quad (15)$$

この関係式(15)を用いると、(13)式は下の(16)式のように書き表すことができる。

$$d \approx d_{Opt} - \beta \cdot \sum k'_i \cdot x_i \quad (16)$$

(16)式の右辺第二項は、(14)式の右辺第二項を  $\beta$  倍した形となるため、(14)式と(16)式から連立方程式を立てて比重  $d$  について解くと、下の(17)式が得られる。

$$d \approx d_{Sonic} - \frac{d_{Sonic} - d_{Opt}}{1 - \beta} \quad (17)$$

この(17)式は、測定対象ガスの比重  $d$  が、屈折率、音速を引数とする関数  $d_{Opt}$ ,  $d_{Sonic}$  で表すことが出来ることを示している。



下図 8 は、各種純ガスの、屈折率、音速を使用して関数  $d_{Opt}$ ,  $d_{Sonic}$  で表した(17)式と、ガス組成から計算した理論的な比重の関係を描いたものである。

(17)式を用いることで、パラフィン系炭化水素のガスのみならず、 $N_2$ :窒素、 $CO_2$ :二酸化炭素、 $O_2$ :酸素、 $CO$ :一酸化炭素などの成分も 1本の直線に乗り、雑ガスの影響を効果的に除去でき、ガス組成から計算した理論的な比重にほぼ一致する結果となる。

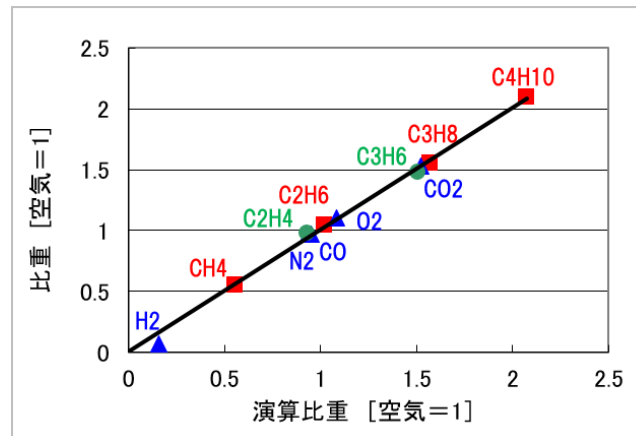


図8 : (17)式と比重の関係

(ウ) ガス中を伝わる光と音の速度から燃焼速度を求める技術の理論

ここで扱う理論は、水素、一酸化炭素を含まない、あるいはその含有量が無視できる程度に微量である天然ガスを主成分とするガスに限定したものである。

前半では ガスの熱量  $H_s$ 、二酸化炭素濃度  $x_{CO_2}$ 、窒素濃度  $x_{N_2}$  の 3 つのパラメーターから、燃焼速度 MCP の近似解を算出する関数を示す。

また後半では、前半の理論を発展させて、図 3、図 4 の中で説明した、ガスの屈折率と音速を引数とする関数  $H_{OPT}$  と、 $H_{SONIC}$  から、燃焼速度 MCP の近似解を算出する関数を示す。

都市ガスの燃焼速度 MCP は、下の(18)式を用いて、ガス組成データから算出することが、ガス事業法施行規則に基づく告示「ガスの熱量及び燃焼性の測定方法を定める件」（昭和 45 年通商産業省告示第 634 号）で示されている。

$$MCP = \frac{\sum(S_i \times f_i \times A_i)}{\sum(f_i \times A_i)}(1 - K) \quad (18)$$

- $S_i$  : ガス中の可燃性ガスの燃焼速度で表 3 に掲げる値
- $f_i$  : ガス中の各可燃性ガスに係る係数であって、表 3 に掲げる係数
- $A_i$  : ガス中の各可燃性ガスの含有率（体積百分率）
- $K$  : 減衰係数であって下式より算出した値

$$K = \frac{\sum A_i}{\sum(\alpha_i \times A_i)} \left\{ \frac{2.5 \times CO_2 + N_2 - 3.77 \times O_2}{100 - 4.77 \times O_2} + \left( \frac{N_2 - 3.77 \times O_2}{100 - 4.77 \times O_2} \right)^2 \right\}$$

- $\alpha_i$  : ガス中の可燃性ガスの補正係数であって、表 3 に掲げる補正係数
- $CO_2$  : ガス中の二酸化炭素の含有率（体積百分率）
- $N_2$  : ガス中の窒素の含有率（体積百分率）
- $O_2$  : ガス中の酸素の含有率（体積百分率）

表3：燃焼速度の計算に用いる係数

	水素	CO	メタン	エタン	エチレン	プロパン	プロピレン	ブタン	ブテン	その他
$S_i$	282	100	36	41	66	41	58	38	47	40
$f_i$	1	0.781	8.72	16.6	11.0	24.6	21.8	32.7	28.5	38.3
$\alpha$	1.33	1.00	2.00	4.55	4.00	4.55	4.55	5.56	4.55	4.55

まず、パラフィン系炭化水素ガスだけで構成されているガスの熱量  $H_{HC}$  と燃焼速度の関係について考える。(18)式を使って、3種類の2成分混合ガス  $CH_4-C_2H_6$ 、 $CH_4-C_3H_8$ 、 $CH_4-C_4H_{10}$  の熱量  $H_{HC}$  と燃焼速度 MCP の関係を求めると、その関係は 図 9 の3本の曲線のように描くことができる。

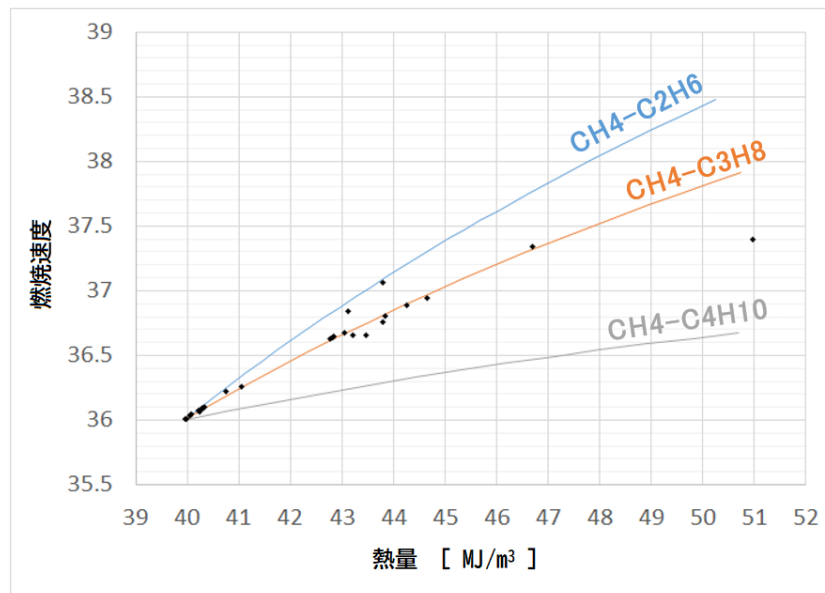


図9：熱量と燃焼速度の関係

実在する天然ガスの組成 (ISO TR22302 2014 Table B.6 No.1~26) から窒素、二酸化炭素を取り除いた場合、すなわちパラフィン系炭化水素ガスだけで構成されていた場合のガスで検討すると、その熱量  $H_{HC}$  (以後、基礎熱量  $H_{HC}$ ) と燃焼速度 MCP の関係は、図 9 の●印で表すように  $CH_4-C_3H_8$  の関係に近いものとなる。

従って、実在する天然ガスから窒素、二酸化炭素を取り除いたガスの燃焼速度 MCP は、基礎熱量  $H_{HC}$  を使って  $CH_4-C_3H_8$  の曲線を描く下の(19)式で、近似的に表すことができる。

$$MCP = -0.004637 \times H_{HC}^2 + 0.5961 \times H_{HC} + 19.5965 \quad (19)$$

次に、基礎熱量  $H_{HC}$  のガスに窒素、二酸化炭素が加わった場合について考える。

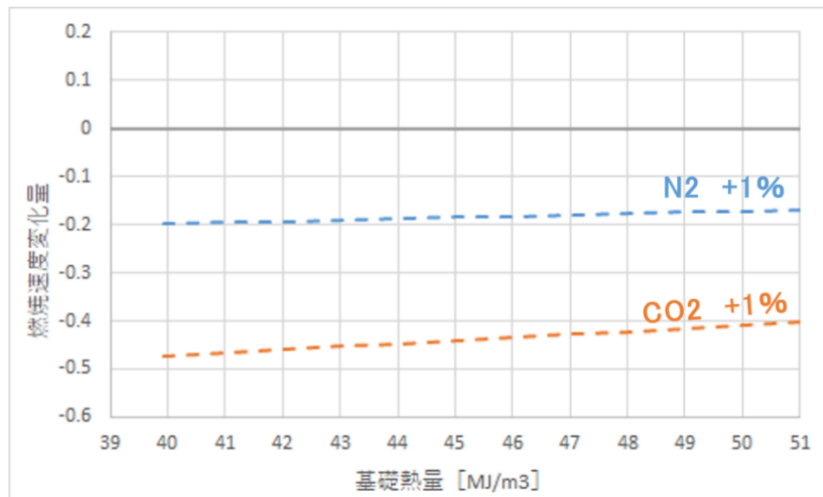


図10：ガスにN<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>が加わった時の燃焼速度の変化量

基礎熱量  $H_{HC}$  のガスに体積分率  $x_{N_2}$  の窒素が加わった場合、燃焼速度の変化量  $\Delta MCP_{N_2}$  は(20)式のように表すことができる。

$$\Delta MCP_{N_2} = A \times x_{N_2} \quad (20)$$

ここで、

$$A = (0.2654 \times H_{HC} - 30.47) \quad (20.1)$$

基礎熱量  $H_{HC}$  のガスに体積分率  $x_{CO_2}$  の二酸化炭素が加わった場合、燃焼速度の変化量  $\Delta MCP_{CO_2}$  は(21)式のように表すことができる。

$$\Delta MCP_{CO_2} = B \times x_{CO_2} \quad (21)$$

ここで、

$$B = (0.6285 \times H_{HC} - 72.34) \quad (21.1)$$

図 10 は基礎熱量  $H_{HC}$  のガスに窒素、二酸化炭素が加わった時の燃焼速度の変化量を示したグラフである。

基礎熱量  $H_{HC}$  が 39～51MJ/m<sup>3</sup> の場合、(20.1)(21.1)式の A,B の間には、次の関係式が成り立つ。

$$B \approx 2.38 \times A \quad (22)$$

以上(19)～(22)式を用いることにより、基礎熱量  $H_{HC}$  のガスに窒素、二酸化炭素がそれぞれ  $x_{N_2}$ 、 $x_{CO_2}$  加わった場合の燃焼速度 MCP は、(23)式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} MCP &= -0.004637 \times H_{HC}^2 + 0.5931 \times H_{HC} + 19.5965 + A \times x_{N_2} + B \times x_{CO_2} \\ &= -0.004637 \times H_{HC}^2 + 0.5931 \times H_{HC} + 19.5965 + A \times (x_{N_2} + 2.38 \times x_{CO_2}) \end{aligned} \quad (23)$$

ただし

$$A = 0.2654 \times H_{HC} - 30.47$$

天然ガスの発熱量  $H_S$ 、基礎熱量  $H_{HC}$  の関係は(24)式で表すことができる。

$$H_{HC} = H_S \times \frac{1}{1 - (x_{N_2} + x_{CO_2})} \quad (24)$$

(24)式は、天然ガスの熱量  $H_S$ 、二酸化炭素の体積分率  $x_{CO_2}$ 、窒素の体積分率  $x_{N_2}$  の三つのパラメーターから、燃焼速度 MCP の近似解を算出する演算式である。

次に、前半の理論を発展させて、図 3、図 4 の中で説明した、ガスの屈折率と音速を使用した関数  $H_{OPT}$ 、 $H_{SONIC}$  から、燃焼速度 MCP の近似解を算出する関数について考える。

本技術では、屈折率センサーで測定したガスの屈折率を使用した関数  $H_{Opt}$  と、音速センサーで測定したガス中を伝わる音速を使用した関数  $H_{Sonic}$  から、下記(25)式を用いて天然ガスなどの燃料ガスの熱量  $H_S$  を求めている。

$$H_S = H_{Opt} - \frac{H_{Opt} - H_{Sonic}}{1 - \alpha} \quad (25)$$

ここで(25)式の右辺第二項について考える。この項は、前述の(8)式の第二項のように、関数  $H_{OPT}$  に含まれる雑ガスによる干渉影響を取り除く働きをする。天然ガス中の雑ガスが  $N_2$  と  $CO_2$  のみと見なせる場合、(25)式の右辺第二項は(26)式のように表すことができ、窒素濃度  $x_{N_2}$  と二酸化炭素濃度  $x_{CO_2}$  を 1.56 倍した値の和に比例する。

$$\begin{aligned} \frac{H_{Opt} - H_{Sonic}}{1 - \alpha} &= k_{N_2} x_{N_2} + k_{CO_2} x_{CO_2} \\ &= 0.2529 \times (x_{N_2} + 1.56 \times x_{CO_2}) \end{aligned} \quad (26)$$

本技術では、窒素濃度  $x_{N_2}$  と二酸化炭素濃度  $x_{CO_2}$  を個別に特定することは出来ないが、(26)式の  $(x_{N_2} + 1.56 \times x_{CO_2})$  を雑ガスの量を示す 1 つの変数  $y$  としてとらえ、前述の(24)式を使って基礎熱量  $H_{HC}$  を求める代わりに、下の(27)式を用いて仮想基礎熱量  $H'_{HC}$  を求める。

$$H'_{HC} = H_S \times \frac{1}{1-y} \quad (27)$$

ただし

$$y = (x_{N_2} + 1.56 \times x_{CO_2}) = \frac{1}{0.2529} \times \frac{H_{Opt} - H_{Sonic}}{1-\alpha} \quad (27.1)$$

さらに、前述の(23)式で燃焼速度 MCP を求める代わりに、(27)式で求めた仮想基礎熱量  $H'_{HC}$  と、変数  $y = x_{N_2} + 1.56 \cdot x_{CO_2}$  を用いて、下に示す(28)式で燃焼速度 MCP を計算する。

$$\begin{aligned} MCP &= -0.004637 \times H'^2_{HC} + 0.5931 \times H'_{HC} + 19.5965 + A \times C \times y \\ &= -0.004637 \times H'^2_{HC} + 0.5931 \times H'_{HC} + 19.5965 + A \times C \times (x_{N_2} + 1.56 \times x_{CO_2}) \end{aligned} \quad (28)$$

ただし

$$A = 0.2654 \times H_{HC} - 30.47$$

$$y = (x_{N_2} + 1.56 \times x_{CO_2}) = \frac{1}{0.2529} \times \frac{H_{Opt} - H_{Sonic}}{1-\alpha}$$

係数 C は、(28)式が(23)式と近い結果となるようにするために導入した調整係数で、本技術実証では一律 C=1.25 とした。

比較のために(23)式と、C=1.25 にした(28)式を以下に並べて記す。

$$\begin{aligned} MCP &= -0.004637 \times H^2_{HC} + 0.5931 \times H_{HC} + 19.5965 \\ &+ A \times (x_{N_2} + 2.38 \times x_{CO_2}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} MCP &= -0.004637 \times H'^2_{HC} + 0.5931 \times H'_{HC} + 19.5965 \\ &+ A \times (1.25 \times x_{N_2} + 1.95 \times x_{CO_2}) \end{aligned} \quad (28)$$

実在する天然ガスの組成データ (ISO TR22302 2014 Table B.6 No.1~26) に基づいて、法定測定法の(18)式から求めた燃焼速度と、(28)式の方法で燃焼速度を求めた場合のシミュレーション結果を図 11 の赤色の点で示す。

いずれのデータもグラフ中に示す傾き 1 の破線付近に描かれており、(28)式の方法でもとめた燃焼速度の結果が、法定測定法の(18)式の結果と高い一致を示していることがわかる。

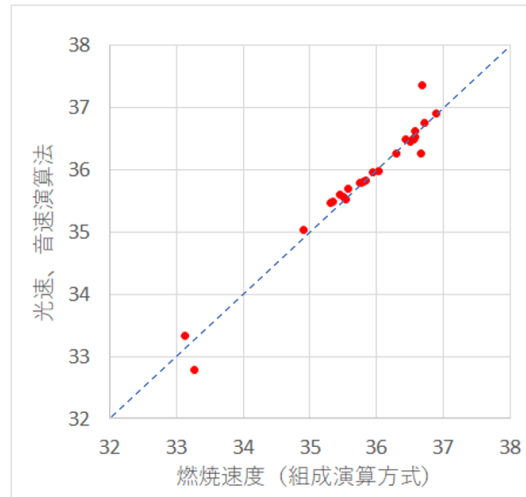


図11：シミュレーションの結果

## (2) センサー原理

### (ア) ガス中を伝わる光の速度を測定する屈折率センサーの説明

屈折率は、真空中を伝わる光の速度を、物質中を伝わる光の速度で割った値である。本技術ではガス中を伝わる光の速度を直接測定する代わりに、測定対象のガスの屈折率を測定している。

本技術に用いている屈折率センサーの模式図を以下の図 12 に示す。

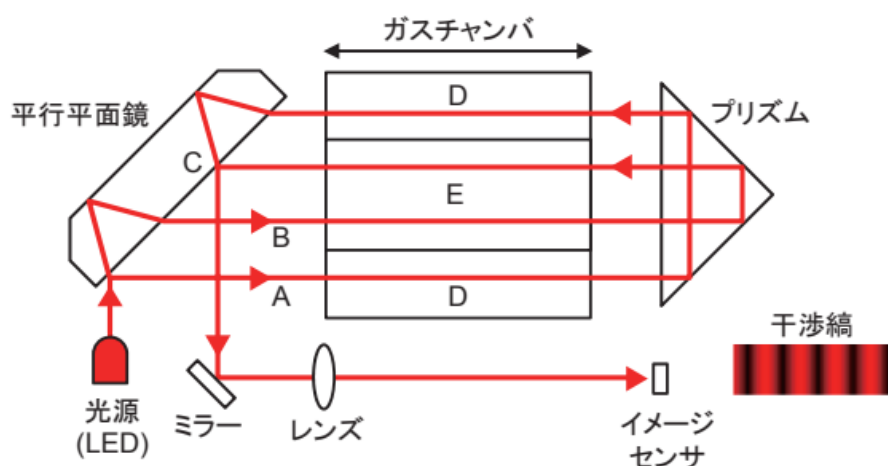


図12：屈折率センサーの模式図

光源から出た光は、平行平面鏡で A, B 二つの光に分けられる。A の光は測定ガスが流れるガスチャンバ D を、B の光はリファレンスガスが流れるガスチャンバ E をプリズムで折り返されながら、それぞれ一往復して、平行平面鏡の C の点で再び重なる。

それぞれ違う光路を通過してきた A, B の光は、C の点で合流した後、ミラーレンズを介してイメージセンサ上に干渉縞を形成する。

この干渉縞は、測定ガスとリファレンスガスの屈折率の差に比例して移動する性質を持ち、干渉縞の移動量  $\Delta\theta$  は次式で表すことができる。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi L(n_{GAS} - n_{REF})}{\lambda} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{P}{P_0}$$

$L$  : ガスチャンバの長さ

$n_{GAS}$  : 基準温度  $T_0$  基準圧力  $P_0$  時における測定ガスの屈折率

$n_{REF}$  : 基準温度  $T_0$  基準圧力  $P_0$  時におけるリファレンスガスの屈折率

$\lambda$  : 光源波長

$T$  : ガス温度

$P$  : ガス圧力



屈折率センサーは干渉縞の移動量 $\Delta\theta$ を読み取ることによって、測定ガスの屈折率を求めることができる。このセンサーの感度は、光源波長 $\lambda$ とチャンバーの長さ $L$ にのみ依存し、どちらも物理的に安定したパラメーターであるため、長期にわたって安定した感度を得ることが出来る。

(イ) ガス中を伝わる音の速度を測定する音速センサーの原理

本技術に用いている音速センサーの模式図を図 13 に示す。この音速センサーでは、測定ガスが流れている筒に向かって、音波発信源から音を発し、音が測定ガス中を伝播して音波受信源に達するまでの時間 $\tau$ を測定する。

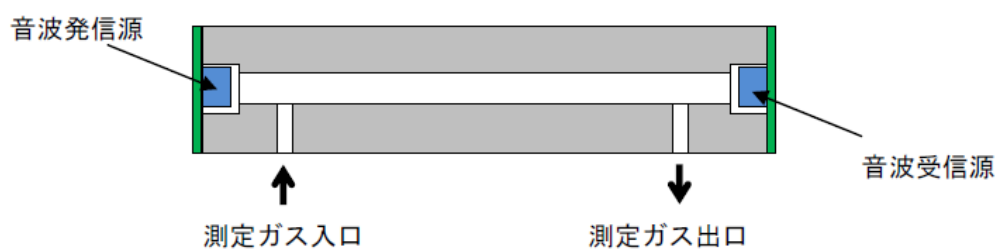


図13：音速センサーの模式図

ガス中を伝わる音の速度  $v_{GAS}$  は、次式で表すことができる。

$$v_{GAS} = \frac{L}{\tau}$$

- $L$  : 音波発信源から音波受信源までの距離
- $\tau$  : 音波発信源から音波受信源に音が到達するまでの時間

このセンサーの感度は、音波発信源から音波受信源までの距離  $L$  にのみ依存する。距離  $L$  は物理的に安定したパラメーターであるため、長期にわたって安定した感度を得ることが出来る。

### (3) 校正方法

本技術は、屈折率センサーで測定したガスの屈折率を使用した関数  $H_{Opt}$  と、音速センサーで測定したガス中を伝わる音速を使用した関数  $H_{Sonic}$  から、ガスの熱  $H_s$  を求めているものであるが、これら屈折率センサーと、音速センサーの感度校正の方法は、精確さを決める重要な要素となる。

これまで理研計器では、本技術の内、熱量、比重、ウォッペ指数を測定する機能を搭載した製品を販売してきたが、それらの製品では、メタンの体積分率  $x_{CH_4}$  と、エタンの体積分率  $x_{C_2H_6}$  が(29)式で表すことが出来る 2 成分混合の校正ガスを用いて、センサーの感度校正を行っていた。

$$x_{CH_4} + x_{C_2H_6} = 1 \quad (29)$$

しかし、このようなメタン、エタンの 2 成分混合ガスで校正を行うと、実際の都市ガス (LNG+LPG) や天然ガスのような  $C_3H_8$ :プロパン,  $C_4H_{10}$ :ブタン,  $C_5H_{12}$ :ペンタンなどの高分子成分を含んだガスの測定をする際に、熱量の測定結果が若干高めになる傾向が解ってきた。

そこで本技術実証では、後述の「2.1.3 実証試験」で説明する実証試験①、②、③、⑤の試験機で、メタン、エタン、プロパンの体積分率、 $x_{CH_4}$ 、 $x_{C_2H_6}$ 、 $x_{C_3H_8}$  が、(30)式で表すことが出来る 3 成分混合の校正ガスを用いたセンサーの感度校正を行い、真度の向上を図るようにしている。

$$x_{CH_4} + x_{C_2H_6} + x_{C_3H_8} = 1 \quad (30)$$

ただし、

$$x_{C_2H_6} = 2 \times x_{C_3H_8} \quad (30.1)$$

これらの校正方法の違いが及ぼす、測定結果への影響については、「3 技術実証の結果」の中で検証を進めるが、理論やセンサーの原理だけでなく、センサーの校正方法も真度を左右する重要な要素であることに注意が求められる。

### 2.1.3 実証試験

実証試験①～⑤の、データが取得された場所、日付、及び本技術実証として行ったデータ解析・評価を行った期間等の情報について記す。

#### (1) 実証試験①

場所	: オランダ 国際法定計量認証機関 NMi Certin B.V
試験内容	: 組成の異なる 7 種類の認証標準ガス物質 <sup>用語 10)</sup> を用いた 真度検証、繰り返し精度検証、期間検証
センサー感度校正	: 2022 年 1 月
センサー校正方法	: メタン、エタン、プロパン 3 成分混合
データ取得日	: 2022 年 10 月 4 日
データ解析/評価期間	: 2024 年 1 月 11 日～1 月 17 日

実証試験①のデータは、本技術実証の実施期間以前に取得されたもので、本技術実証は、これらのデータの解析・評価を行ったものである。実証試験①のデータが取得された際の試験系を図 14 に示す。

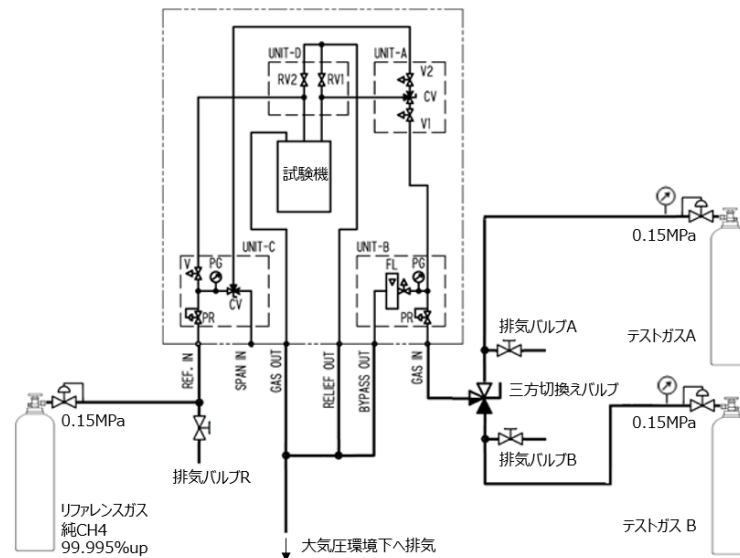


図14：実証試験①の試験系

この試験では 7 本の認証標準ガス物質（ CRM: Certified Reference Gas Material ）を用いて評価が行われ、各ガスボンベの測定は、図 14 中のテストガス A, B の箇所に順次付け替える形で行われた。排気バルブ A, B 及び R は、ボンベの接続後や交換後、配管内に残っているガスを排気するためのものである。

## (2) 実証試験②

場所	: 都市ガス会社 A 社、A1 工場
試験内容	: 屋外に設置された試験機 A による都市ガス（LNG+LPG 気化ガス）の測定、及び法定測定用のガスクロマトグラフと、同じ環境下（同室）に設置された試験機 B による、ガスクロマトグラフ用標準ガス、純メタン及び製造されている都市ガスの切換え測定。
センサー感度校正	: 2021 年
センサー校正方法	: メタン、エタン、プロパン 3 成分混合
データ取得期間	: 2021 年 夏季 約 4 ヶ月
データ解析/評価期間	: 2024 年 1 月 11 日～1 月 17 日

実証試験②のデータは、本技術実証の実施期間以前に取得されたもので、本技術実証は、これらのデータの解析・評価を行ったものである。実証試験②のデータが取得された際の試験系を図 15 に示す。測定対象は LNG 気化ガスに LPG（プロパン系）を加えて熱量調整された都市ガスで、球形ガスホルダーから供給されるものである。

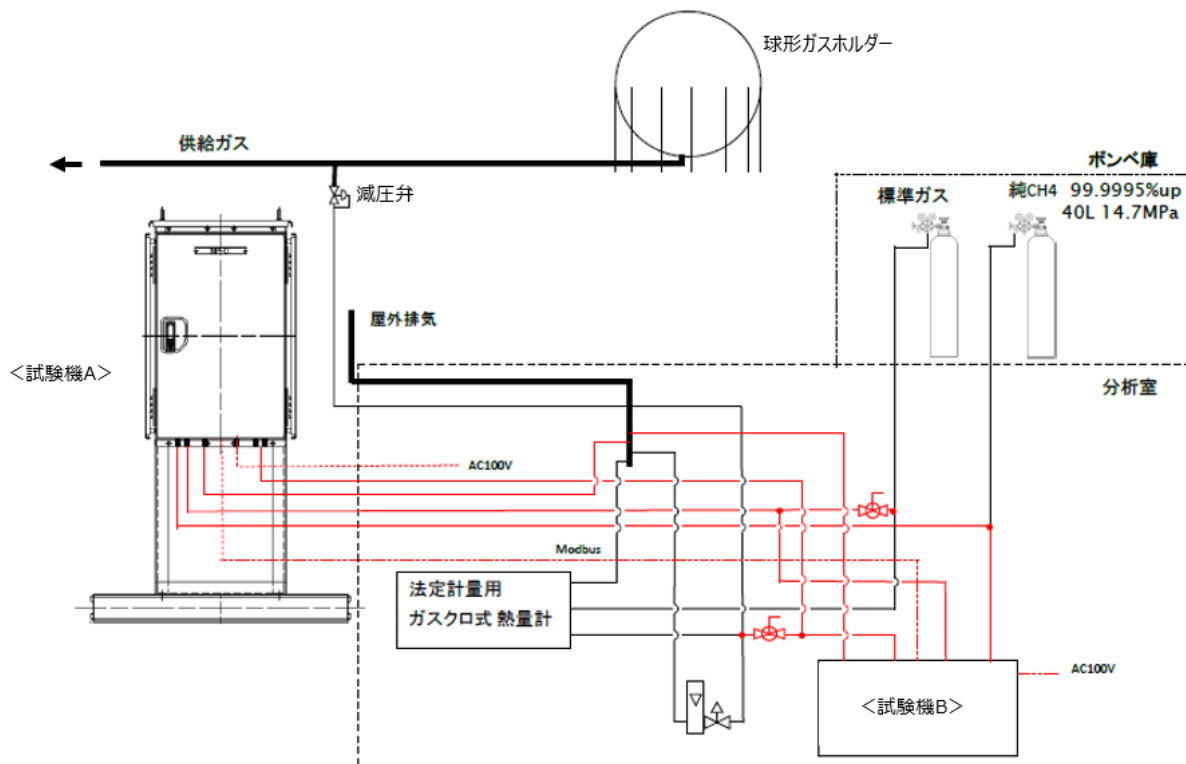


図15：実証試験②の試験系

この試験では試験機 A と試験機 B の 2 台を使ってデータの取得が行われた。

試験機 A は、より過酷な環境下での測定となるよう、屋外の直射日光が当たる盤の中に設置して、測定対象ガスを連続的に測定した。

一方試験機 B は、法定測定用のガスクロマトグラフが設置されている空調の効いた分析室に設置して測定を行った。特に試験機 B では、図 16 に示すように、都市ガス、標準ガス及び純メタンを電磁弁で切換えて測定できるようにして評価を行った。これは本技術が、法定測定用のガスクロマトグラフのように JIS K2301 : 2022 で求められている日々の校正作業を必要とするか否かを検証するためである。

JIS K2301:2022 では、ガスクロマトグラフは経時的なセンサー感度の変動があるものとして考えられており、それにより標準ガスの分析結果も日々変動し得るものとして考えられている。そのためガスクロマトグラフでは、日々の法定測定を行う際、その都度標準ガスの分析を行い、変動し得るその分析結果を基準にして、同一条件下で行われる都市ガスの法定測定の結果を校正するよう求めている。

今回、試験機 B において、図 16 のように都市ガスの測定の合間に組成が安定している標準ガスや純メタンの測定を実施した理由は、ガスクロマトグラフで起こり得る標準ガスや純メタンの測定結果の変動が発生するか確認するためである。

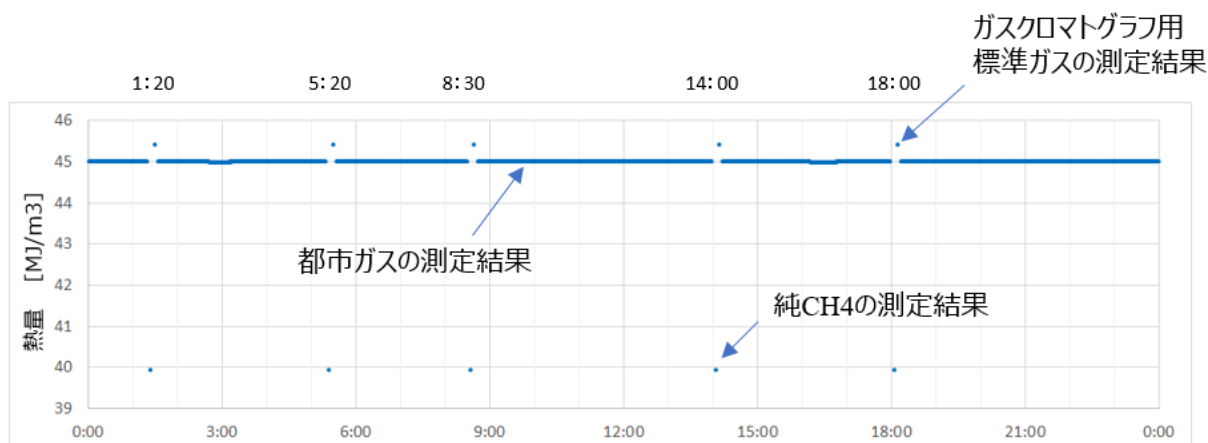


図16：試験機Bによる熱量測定結果の様子

### (3) 実証試験③

場所	: 都市ガス会社 A 社、A2 工場
試験内容	: 実証試験②と同じ試験装置（試験機 A, B）を A1 工場から A2 工場に移設して行った試験。A2 工場で製造している都市ガスは、国産天然ガスで 雑ガスに CO <sub>2</sub> を含む。
センサー感度校正	: 2021 年
センサー校正方法	: メタン、エタン、プロパン 3 成分混合
データ取得期間	: 2021 年～2022 年 冬季 約 4 ヶ月
データ解析/評価期間	: 2024 年 1 月 11 日～1 月 17 日

実証試験③のデータは、本技術実証の実施期間以前に取得されたもので、本技術実証は、これらのデータの解析・評価を行ったものである。実証試験③のデータが取得された際の試験系を図 17 に示す。測定対象は天然ガスをベースとした都市ガスで、球形ガスホルダーから供給されるものである。

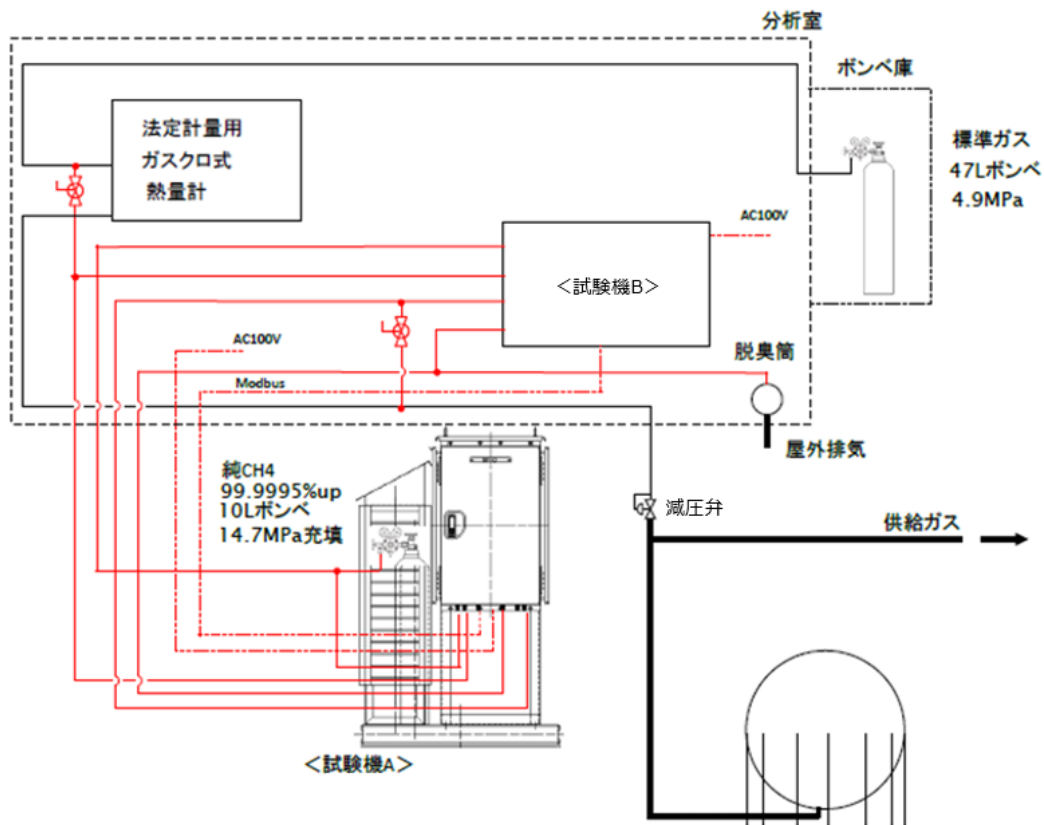


図17：実証試験③の試験系

この試験は実証試験②に用いた試験機 A と試験機 B の 2 台を移設してデータの取得が行われた。

試験機 A は、より過酷な環境下での測定となるよう、屋外の直射日光が当たる盤の中に設置して、測定対象ガスを連続的に測定した。

一方試験機 B は、法定測定用のガスクロマトグラフが設置されている空調の効いた分析室に設置して測定を行った。また試験機 B では、実証試験②と同様に、都市ガス、標準ガス及び純メタンを電磁弁で切替えて測定できるようにして評価を行った。

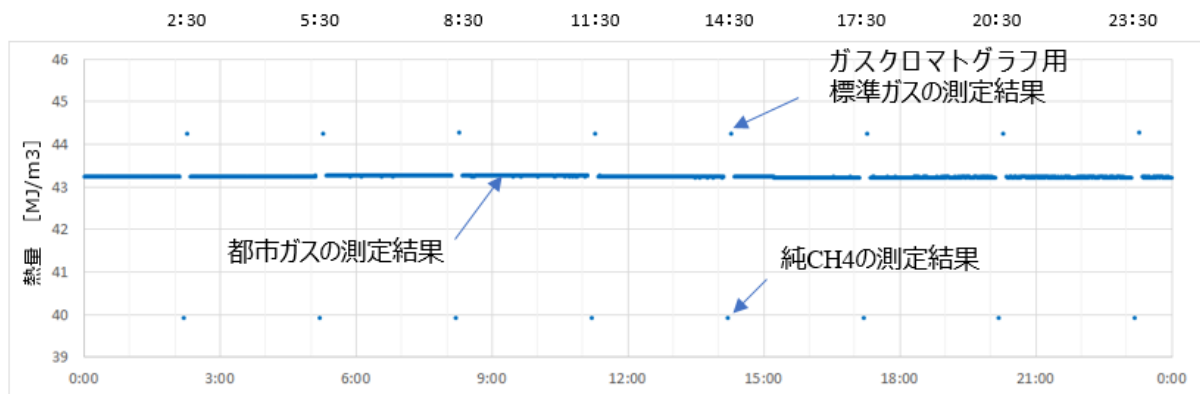


図18：試験機Bによる熱量測定結果の様子

#### (4) 実証試験④-1

場所	: 都市ガス会社 B 社 B1 工場
試験内容	: 都市ガスの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定
センサー感度校正	: 2017 年
センサー校正方法	: メタン、エタン、2 成分混合
データ取得期間	: 2022 年～2023 年 約 12 ヶ月
データ解析/評価期間	: 2024 年 1 月 11 日～1 月 17 日

実証試験④-1 のデータは、本技術実証の実施期間以前に取得されたもので、本技術実証は、これらのデータの解析・評価を行ったものである。実証試験④-1 のデータが取得された際の試験系を図 18 に示す。測定対象は LNG 気化ガスに LPG（ブタン系）を加えて熱量調整された都市ガスで、球形ガスホルダーから供給されるものである。

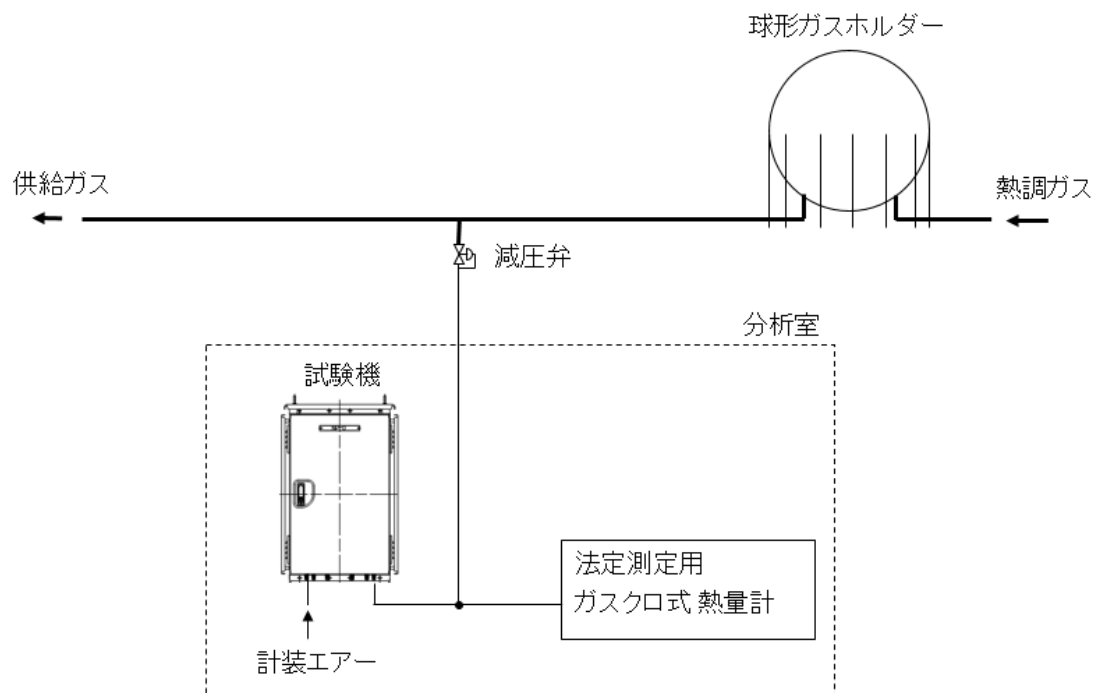


図19：実証試験④-1の試験系



## 実証試験④-2

場所	: 都市ガス会社 C 社 C1 工場
試験内容	: 都市ガスの熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定
センサー感度校正	: 2019 年
センサー校正方法	: メタン、エタン、2 成分混合
データ取得期間	: 2022 年～2023 年 約 12 ヶ月
データ解析/評価期間	: 2024 年 1 月 11 日～1 月 17 日

実証試験④-2 のデータは、本技術実証の実施期間以前に取得されたもので、本技術実証は、これらのデータの解析・評価を行ったものである。実証試験④-2 のデータが取得された際の試験系を図 20 に示す。測定対象はガスミキサーで熱量調整された LNG 気化ガス+LPG（プロパン系）の都市ガスである。

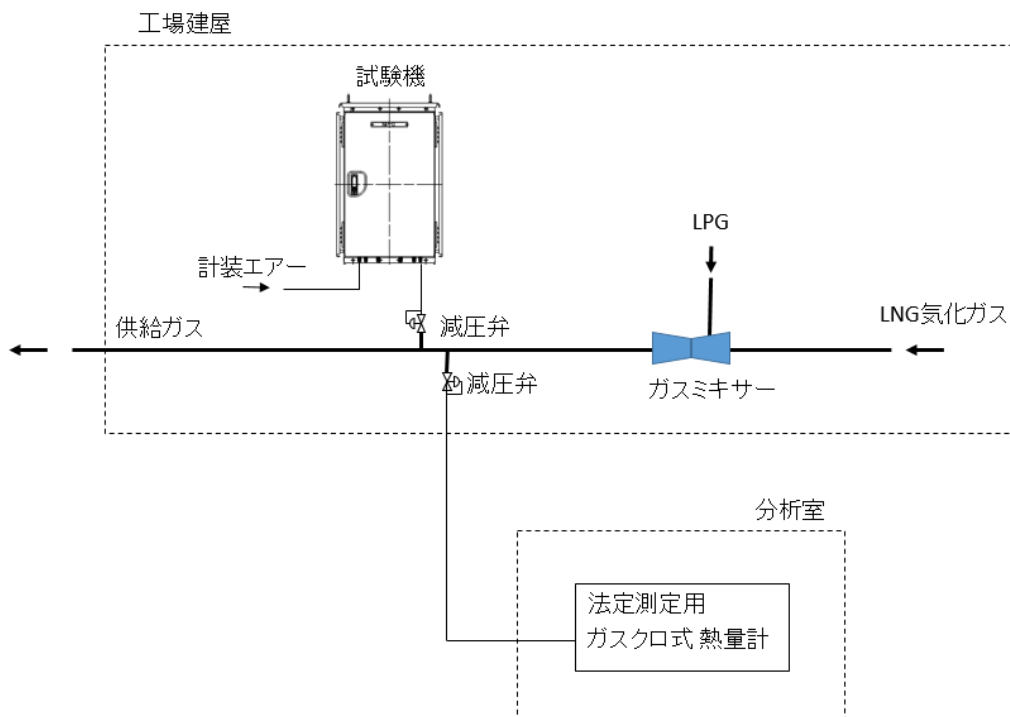


図20：実証試験④-2の試験系

(5) 実証試験⑤

場所	: 理研計器株式会社 開発センター
試験内容	: 実証試験④で用いた試験機を用いて、有識者立会いのもとで実施する試験。純メタン、 $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8$ ブレンドガス 及び標準ガスの測定を行い、熱量、ウォッペ指数、燃焼速度の測定精度を評価。
センサー感度校正	: 2022年1月
センサー校正方法	: メタン、エタン、プロパン 3成分混合
試験実施日	: 2024年1月26日

実証試験⑤の試験系を図 21 に示す。この試験では、2本の標準ガスボンベと、ガスブレンダーを使用して  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  を 85 : 10 : 5 の体積比でブレンドしたガスの測定を行った。

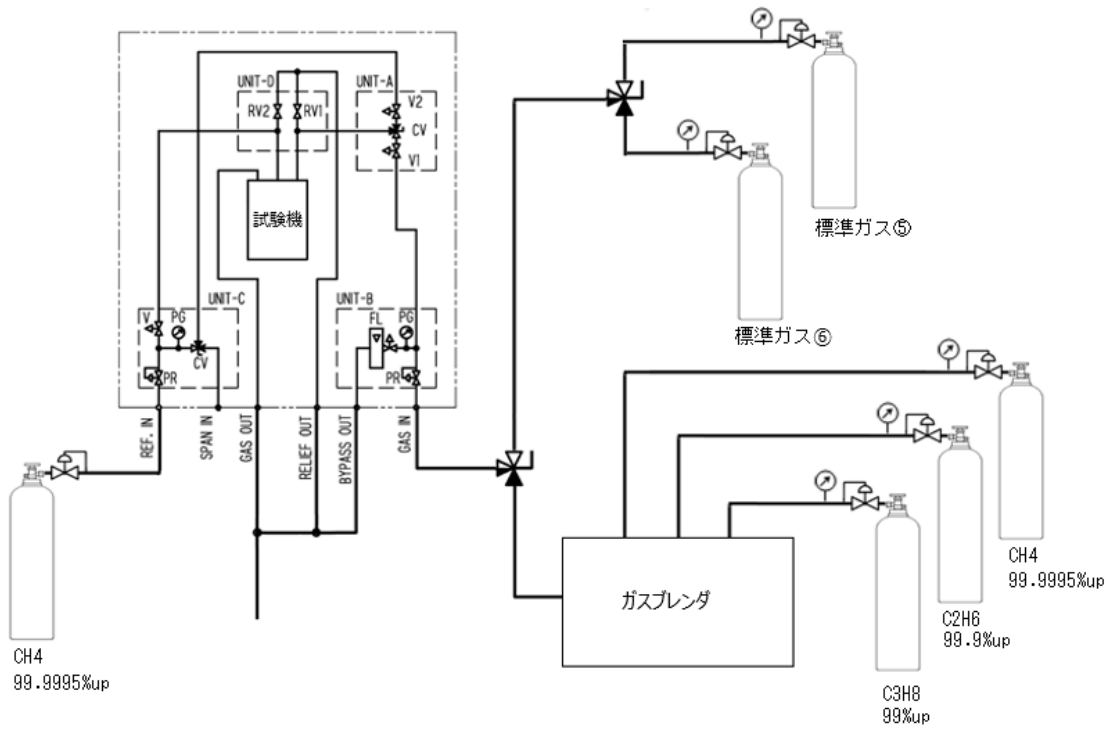


図21：実証試験⑤の試験系

### 3 技術実証の結果

#### 3.1 結果の評価ポイント・方法

##### 3.1.1 評価ポイント

1.3.2 重要成果指標（KPI）【ア】～【エ】、5つの検証項目(1)真度検証、(2)繰り返し精度検証、(3)再現精度、(4)期間検証、(5)その他 及び 実証試験①～⑤の関係を表4に示す。

【ア】 本技術が、現行のガスクロマトグラフ等によるガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定と同等以上の精度で実施可能であるか

【イ】 本技術に用いているセンサー（屈折率センサー、音速センサー）等の経年劣化による、ガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定精度の低下が考慮されているか

【ウ】 ガスの熱量、燃焼性の測定を行うガス事業者の実務である、ガスの熱量、燃焼性（ウォッベ指数、燃焼速度）の測定に対応する技術であるか

【エ】 ガスの熱量、燃焼性の測定を行うガス事業者にとって、技術導入が容易な、汎用性の高い技術であるか

表4：KPI, 検証項目、実証試験①～⑤の関係

KPI	【ア】		【イ】	【ウ】、【エ】	—
	検証項目 繰り返し精度	再現精度 (再現条件)	期間検証 (経過月)	真度検証 (対象ガス)	その他 (校正ガス)
実証試験①	○	—	○ 9カ月	○ (CRM)	○ (3成分)
実証試験②	試験機 A	— (夏季屋外)	○ 4カ月	○ (都市ガス)	○ (3成分)
	試験機 B	— (屋内)	○ 4カ月	○ (標準ガス他)	○ (3成分)
実証試験③	試験機 A	— (冬季屋外)	○ 8カ月	○ (都市ガス)	○ (3成分)
	試験機 B	— (屋内)	○ 8カ月	○ (標準ガス他)	○ (3成分)
実証試験④	B社 B1 工場	— (通年/温変大)	○ 79カ月	○ (都市ガス)	○ (2成分)
	C社 C1 工場	— (通年/温変大)	○ 49カ月	○ (都市ガス)	○ (2成分)
実証試験⑤	○	—	○ 24カ月	○ (標準ガス他)	○ (3成分)

(1) 実証試験① 評価ポイント

繰り返し精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。測定対象ガスは、表 5 に示す 7 種類の認証標準ガス物質 (CRM) a~g である。

各成分から理論計算で用いた熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。校正は、メタン、エタン、プロパンの 3 成分混合ガスで行っており、センサー校正後 9 ヶ月の期間を経て試験が行われた。

表5：認証標準ガス物質 (CRM) と その熱量、比重、燃焼速度

ガス		a	b	c	d	e	f	g
組成 [mol/mol]								
メタン	CH4	0.7514	0.7776	0.7877	0.8886	0.9899	0.7880	0.7999
エタン	C2H6	-	-	0.0506	0.0405	-	0.1207	0.1500
プロパン	C3H8	-	-	0.0204	0.0204	0.0101	0.0409	0.0502
ノルマルブタン	n-C4H10	-	0.0100	-	-	-	-	-
ノルマルペンタン	n-C5H12	-	0.0035	-	-	-	-	-
ノルマルヘキサン	n-C6H14	-	0.0020	-	-	-	-	-
窒素	N2	0.1987	0.1570	0.1111	0.0404	-	0.0403	-
二酸化炭素	CO2	0.0499	0.0499	0.0304	0.0101	-	0.0100	-
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]		29.9975	33.2758	37.0286	40.3628	40.5410	44.0300	47.4922
比重 [空気=1]		0.6859	0.6951	0.6754	0.6216	0.5652	0.6808	0.6779
ウォッベ指数		36.221	39.912	45.054	51.195	53.925	53.360	57.679
燃焼速度 MCP		29.467	30.826	33.495	35.518	36.139	36.491	37.740

(2) 実証試験② 試験機 A 評価ポイント

再現精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。試験機は、直射日光の当たる屋外に設置され、試験は夏季に行われた。測定対象ガスは、表 6 に示す LNG 気化ガスに LPG (プロパン系) を加えた都市ガスである。法定測定用のガスクロマトグラフの分析結果を熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。

校正は、メタン、エタン、プロパンの 3 成分混合ガスで行っており、試験終了の時点でセンサー校正後 4 ヶ月の期間を経ている。

表6：測定ガスの熱量、燃焼性及びガスグループ

標準熱量	45 MJ/m <sup>3</sup>
ウォッベ指数	52.7~57.8
燃焼速度	35~47
ガスグループ	13A

(3) 実証試験② 試験機 B 評価ポイント

再現精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。試験機は、法定測定用のガスクロマトグラフが設置されている空調の効いた分析室に設置された。測定対象ガスは、表 7、8 に示す 2 種類の標準ガスと純メタンである。各成分から理論計算で用いた熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。

校正は、メタン、エタン、プロパンの 3 成分混合ガスで行っており、試験終了の時点でセンサー校正後 4 ヶ月の期間を経ている。

表7：0週目 ～ 11週目の標準ガス①

		[vol%]
メタン	CH4	( 88.5821 )
エタン	C2H6	6.08
プロピレン	C3H6	0.105
プロパン	C3H8	3.61
ノルマルブタン	n-C4H10	0.617
イソブタン	i-C4H10	0.501
ノルマルペンタン	n-C5H12	0.101
イソペンタン	i-C5H12	0.0999
ノルマルヘキサン	n-C6H14	0.101
窒素	N2	0.101
二酸化炭素	CO2	0.102
熱量 [MJ/m3]		45.432
比重 [空気=1]		0.6476
ウォッベ指数		56.456
燃焼速度 MCP		37.022

表8：11週目～ 17週目 の標準ガス②

		[vol%]
メタン	CH4	( 88.65 )
エタン	C2H6	6.06
プロピレン	C3H6	0.10
プロパン	C3H8	3.59
ノルマルブタン	n-C4H10	0.6
イソブタン	i-C4H10	0.5
ノルマルペンタン	n-C5H12	0.1
イソペンタン	i-C5H12	0.1
ノルマルヘキサン	n-C6H14	0.1
窒素	N2	0.1
二酸化炭素	CO2	0.1
熱量 [MJ/m3]		45.393
比重 [空気=1]		0.6469
ウォッベ指数		56.456
燃焼速度 MCP		37.017

(4) 実証試験③ 試験機 A 評価ポイント

再現精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。試験機は、直射日光の当たる屋外で設置され、試験は冬季に行われた。測定対象ガスは、表 9 に示す天然ガスをベースとした都市ガスである。法定測定用のガスクロマトグラフの分析結果を熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。

校正は、メタン、エタン、プロパンの 3 成分混合ガスで行っており、試験終了の時点でセンサー校正後 8 ヶ月の期間を経ている。

表9：測定ガスの熱量、燃焼性及びガスグループ

標準熱量	43 MJ/m <sup>3</sup>
ウォッベ指数	52.7～57.8
燃焼速度	35～47
ガスグループ	13A

(5) 実証試験③ 試験機 B 評価ポイント

再現精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。試験機は、法定測定用のガスクロマトグラフが置かれた空調の効いた分析室に設置された。測定対象ガスは、表 10,11 に示す 2 種類の標準ガスと純メタンである。各ガスの成分から理論計算で用いた熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。

校正は、メタン、エタン、プロパンの 3 成分混合ガスで行っており、試験終了の時点でセンサー校正後 8 ヶ月の期間を経ている。

表10：0週目～11週目の標準ガス③

		[vol%]
メタン	CH <sub>4</sub>	( 84.977 )
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.96
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5.0
ノルマルブタン	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.508
イソブタン	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.401
ノルマルペンタン	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.101
イソペンタン	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.153
ノルマルヘキサン	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.1
窒素	N <sub>2</sub>	2.01
二酸化炭素	CO <sub>2</sub>	1.79
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]		44.318
比重 [空気=1]		0.6772
ウォッベ指数		53.854
燃焼速度 MCP		36.101

表11：11週目～ 15週目の標準ガス④

		[vol%]
メタン	CH <sub>4</sub>	( 84.979 )
エタン	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.98
プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4.99
ノルマルブタン	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.498
イノブタン	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.396
ノルマルペンタン	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.102
イノペンタン	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.154
ノルマルヘキサン	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.101
窒素	N <sub>2</sub>	2.00
二酸化炭素	CO <sub>2</sub>	1.80
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]		44.308
比重 [空気=1]		0.6770
ウォッベ指数		53.850
燃焼速度 MCP		36.099

(6) 実証試験④ B社 B1工場 評価ポイント

再現精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。試験機は、法定測定用のガスクロマトグラフが設置されている空調の効いた分析室に設置された。対象ガスは、表 12 に示す LNG 気化ガスに LPG（ブタン系）を加えた都市ガスである。法定測定用のガスクロマトグラフの分析結果を熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。

校正は、メタン、エタンの 2 成分混合ガスで行っており、試験終了の時点でセンサー校正後 79 ヶ月の期間を経ている。

表12：測定ガスの熱量、燃焼性及びガスグループ

標準熱量	45 MJ/m <sup>3</sup>
ウォッベ指数	52.7～57.8
燃焼速度	35～47
ガスグループ	13A

(7) 実証試験④ C社 C1工場 評価ポイント

再現精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。試験機は、空調の無い工場建屋内に設置された。対象ガスは、表 13 に示す LNG 気化ガスに LPG(プロパン系)を加えた都市ガスである。法定測定用のガスクロマトグラフの分析結果を熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。

校正は、メタン、エタンの 2 成分混合ガスで行っており、試験終了の時点でセンサー校正後 49 ヶ月の期間を経ている。

表13：測定ガスの熱量、燃焼性及びガスグループ

標準熱量	45 MJ/m <sup>3</sup>
ウォッベ指数	52.7～57.8
燃焼速度	35～47
ガスグループ	13A



(8) 実証試験⑤ 評価ポイント

繰り返し精度検証、真度検証、期間検証、その他の検証が対象となる。試験機は実証試験①に使われたものと同じものである。測定対象ガスは、表 14、15、16 に示す標準ガス、ブレンドガス、純メタンである。各成分から理論計算で用いた熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を参照値として評価を行う。

校正は、メタン、エタン、プロパンの 3 成分混合ガスで行っており、センサー校正後 24 ヶ月の期間を経て試験が行われた。

この試験は、有識者立会いのもとで行われ、応答速度や標準ガスの安定性などに関する検証も行った。

表 14：標準ガス⑤

		[vol%]
メタン	CH4	( 88.6626 )
エタン	C2H6	6.08
プロピレン	C3H6	0.0985
プロパン	C3H8	3.56
ノルマルブタン	n-C4H10	0.599
イソブタン	i-C4H10	0.497
ノルマルペンタン	n-C5H12	0.101
イソペンタン	i-C5H12	0.101
ノルマルヘキサン	n-C6H14	0.100
窒素	N2	0.0999
二酸化炭素	CO2	0.101
熱量 [MJ/m3]		45.378
比重 [空気=1]		0.6467
ウォッベ指数		56.428
燃焼速度 MCP		37.015

表 15：ブレンドガス

		[vol%]
メタン	CH4	85
エタン	C2H6	10
プロパン	C3H8	5
熱量 [MJ/m3]		46.033
比重 [空気=1]		0.6544
ウォッベ指数		56.905
燃焼速度 MCP		37.402

表16：純メタン

メタン	CH4	99.995 %up
熱量 [MJ/m3]		39.935
比重 [空気=1]		0.5553
ウォッベ指数		53.605
燃焼速度 MCP		36.00

### 3.1.2 評価方法

実証試験①～⑤で行う真度評価、繰り返し精度評価、再現精度評価の概要については「1.3.3 技術実証の概要」に記載したが、ここでは本技術実証の評価方法となる、繰り返し精度、再現精度、真度の評価基準の決め方について記載する。

#### (1) 繰り返し精度の評価基準

本技術実証で用いる繰り返し精度の評価基準を決めるのに際し、ガスクロマトグラフに求められる成分分析値の繰り返し性を参考にした。表 17 は JIS K2301 : 2022 の中で求めているガスクロマトグラフの分析に係る許容差を示したものである。

この表は、ガスクロマトグラフによる濃度分析値の繰り返し許容差が、体積分率 25%以上の成分に対しては 0.30%、体積分率 5%以上 25%未満の成分に対しては 0.15%までであることを示している。

表17：ガスクロマトグラフ法の分析許容差（出典 JIS K2301 : 2022）

分析値	許容差
1 未満	0.03
1 以上 5 未満	0.05
5 以上 25 未満	0.15
25 以上	0.30

このガスクロマトグラフに求められる成分濃度分析値の許容差が、熱量、比重、燃焼速度の分析結果にどれだけの影響を与えるかを検討した。

検討には LNG にブタンを加えて 45MJ/m<sup>3</sup> にする場合を想定したモデルを立てた。

モデルに用いた LNG の組成と、ブタンを加えて 45MJ/m<sup>3</sup> に熱量調整を行った（以後ブタン熱調）後の組成を表 18 に示す。

表18：繰り返し性の許容差の検討に用いたモデル

	組成 [vol%]							熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	比重	MCP
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> +	N <sub>2</sub>			
モデル LNG	90.16	6.36	2.23	0.61	0.41	0.02	0.21	44.051	0.6245	36.855
ブタン熱調	89.15	6.29	2.21	1.06	1.06	0.02	0.21	45.004	0.6401	36.896

モデル LNG 組成の出典：都市ガス工業概要（製造編）（2018 年改訂版）

10 頁、表 2.3 LNG 性状例、カターン

更に、このブタン熱調の組成モデルから、ガスクロマトグラフの分析許容差によって、ガスの熱量、比重、燃焼速度が、高く分析されるケース（上振れ）と、低く分析されるケース（下振れ）を考え、それぞれどれだけの差が生じるかを検討した。その結果を表 19 に示す。

表19：ブタン熱調モデルで許容される繰り返し性

	組成 [vol%]							熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	比重	MCP
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> +	N <sub>2</sub>			
ブタン熱調	89.15	6.29	2.21	1.06	1.06	0.02	0.21	45.004	0.6401	36.896
上振れ	88.85	6.44	2.26	1.11	1.11	0.05	0.18	+0.2128	+0.0032	+0.029
下振れ	89.44	6.14	2.16	1.01	1.01	0.00	0.24	-0.2022	-0.0029	-0.028

その結果、ガスクロマトグラフの分析許容差で発生し得る熱量、比重、燃焼速度の分析値の変化幅は、それぞれ以下のように判った。

熱量： ±0.2 MJ/m<sup>3</sup>

比重： ±0.003

燃焼速度： ±0.03

そこで本実証試験に用いる熱量、比重の繰り返し性許容差の評価基準には、それぞれ熱量±0.2MJ/m<sup>3</sup>、比重±0.003を用いることとした。

しかし燃焼速度の測定の目的を考えると、燃焼速度の繰り返し性許容差の評価基準を±0.03 と設定するのは、小さすぎると考えた。

ガスの熱量及び燃焼性の管理の目的については、社団法人日本ガス協会が発行する都市ガス工業概要（製造編）〔平成 15 年改訂版〕96 頁の中で以下のように書かれている

ガスの熱量及び燃焼性の管理の目的は、供給約款に定めた熱量および燃焼性のガスを供給することにより、供給ガスが器具において良好な燃焼が行われるようにすることと、供給約款で定める需要家との契約を遵守することである。

ガス事業者は、供給約款の中で「ガス用品の技術上の基準等に関する省令」（昭和 46 年通商産業省令第 27 号）の別表第 3 に基づくガスグループを定めており、満たすべき燃焼速度の範囲についても約款の中で示している。

現在主流となっている 13A のガスグループを例に挙げると、満たすべき燃焼速度の範囲は 35 以上 47 以下と広い範囲になっている。これに対して実際のガスがとり得る燃焼速度が 37 付近になることを考えると、ガスクロマトグラフの成分分析値の繰り返し性から導き出した±0.03 は、繰り返し性許容差の評価基準としては小さすぎると判断した。そこで本技術実証では、燃焼性の管理の目的を鑑みて、燃焼速度の繰り返し性許容差の評価基準を±0.5 に定めることとした。

この評価基準の決め方については、有識者からも妥当であるとの見解が示されている。

ウォッベ指数 WI は、熱量 H と比重 d から次式を使って求めることが、告示「ガスの熱量及び燃焼性の測定方法を定める件」（昭和 45 年通商産業省告示第 634 号）で示されている。

$$WI = \frac{H}{\sqrt{d}} \quad (22)$$

ウォッベ指数の繰り返し性許容差  $r_{WI}$  は、熱量と比重の繰り返し性許容差  $r_H$ ,  $r_d$  から下(23)式の合成計算で求めた。

$$r_{WI}^2 = \left[ \frac{\partial WI}{\partial H} \right]^2 r_H^2 + \left[ \frac{\partial WI}{\partial d} \right]^2 r_d^2 \quad (23)$$

本実証試験で用いる、熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の繰り返し性許容差の評価基準を表 20 に示す。

表20：繰り返し性許容差の評価基準

熱量	: ±0.20 MJ/m <sup>3</sup>
比重	: ±0.003
ウォッベ指数	: ±0.28
燃焼速度	: ±0.5

## (2) 再現精度の評価基準

JIS K2301：2022 には繰り返し許容差に該当するものはあるが、同一条件ではない環境下での測定に求められる再現性許容差に該当するものはない。これは JIS K2301：2022 が、測定毎に機器を同一条件下で校正することを前提としており、校正条件と同一条件ではない環境下（温度、場所、時間などが異なる再現条件下）での測定を想定していないためである。

しかし、本技術実証では校正の頻度を減らし、同一条件ではない環境下でも、高い精度での測定ができることを目指しているため、再現性許容差の評価基準を独自に定める必要がある。

一般に繰り返し精度は全て同じ条件下で行う測定になるため、測定の変動量は最小となる。一方で再現精度は同一条件ではない環境下での測定になるため、様々な外乱の影響を受けて、測定の変動量は最大になる。

そこで本技術実証では、再現許容差の評価基準に、繰り返し許容差に求められる評価基準と同じ条

件を用いることとした。再現性精度は繰り返し精度より必ず低くなるものであるため、繰り返し許容差に求められる評価基準で不足することはない。

本技術実証で用いる、熱量、比重、ウォッベ指数、燃烧速度の再現性許容差の評価基準を表 21 に示す。

表21：再現性許容差の評価基準

熱量	: ±0.20 MJ/m <sup>3</sup>
比重	: ±0.003
ウォッベ指数	: ±0.28
燃烧速度	: ±0.5

### (3) 真度の評価基準

真度とは、十分多数の測定結果の平均値と、真の値または参照値との一致の程度を示すものであり、測定方法の正確な値を与える能力を示すものである。本技術の真度の評価は、当初の実施計画書の中には入れていなかったが、有識者からのアドバイスを受けて実施することとなった。

通常真度は、十分多数の測定結果から得られた平均値（期待値）と比較対象となる参照値との差から求められる“かたより”によって表される。

JIS K2301：2022 には真度やかたよりに関する規格はない。しかし本技術実証では、本技術による熱量、比重、ウォッベ指数、燃烧速度の測定方法の正確な値を与える能力を評価する必要がある。

そこで本技術実証では、真度をあらわす“かたより”の評価基準に、繰り返し許容差に求められる評価基準と同じ条件を用いることとした。

本技術実証で用いる、熱量、比重、ウォッベ指数、燃烧速度の真度（かたより）の評価基準を表 22 に示す。

表22：真度（かたより）の評価基準

熱量	: ±0.20 MJ/m <sup>3</sup>
比重	: ±0.003
ウォッベ指数	: ±0.28
燃烧速度	: ±0.5

### 3.2 結果及び評価・分析

実施した実証試験①～⑤の結果及び評価・分析を以下に記す

#### 3.2.1 結果

##### (1) 実証試験①の結果

##### (ア) 熱量の測定結果

認証標準ガス物質（CRM）a～gの熱量を、同一条件下で各5回ずつ測定した結果を、表23に示す。表の最右列に示す参照値は、JIS K2301：2022で示された計算方法を用いて、テストガスa～gの組成から算出した理論値である。

表23：熱量の測定結果

熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]									
テスト ガス	測定値					平均値	繰り返し 許容差	真度 (かたより)	参照値 JIS K2301
	1	2	3	4	5				
a	30.041	30.041	30.042	30.045	30.044	30.0426	0.0032	+0.0451	29.9975
b	33.253	33.256	33.258	33.258	33.260	33.2570	0.0046	-0.0188	33.2758
c	37.124	37.119	37.121	37.116	37.120	37.1200	0.0051	+0.0914	37.0286
d	40.303	40.300	40.302	40.300	40.303	40.3016	0.0027	-0.0612	40.3628
e	40.468	40.468	40.468	40.468	40.468	40.4680	0.0008 未満	-0.0730	40.5410
f	44.004	44.001	44.001	44.001	43.997	44.0008	0.0022	-0.0295	44.0300
g	47.368	47.369	47.369	47.371	47.371	47.3696	0.0012	-0.1226	47.4922

繰り返し許容差は、何れも評価基準の0.2MJ/m<sup>3</sup>より低い値となった。また参照値との差を示す真度（かたより）も、評価基準の±0.2MJ/m<sup>3</sup>の範囲内の結果となった。

図 22 は表 23 に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。a～g のいずれのデータもグラフ中の示す傾き 1 の破線付近に描かれている。

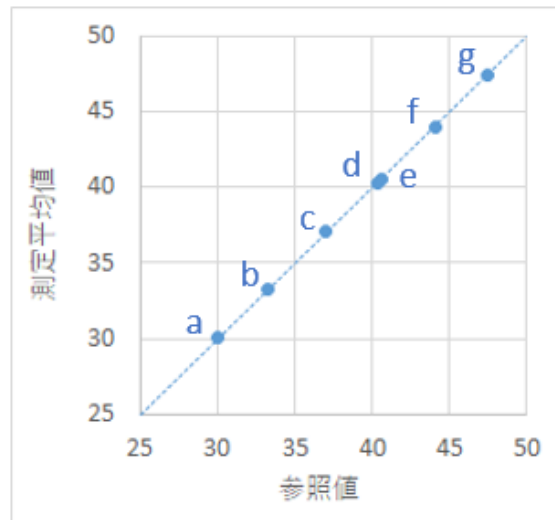


図22：熱量の測定結果 [MJ/m<sup>3</sup>]

図 23 は表 23 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。a～g のいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

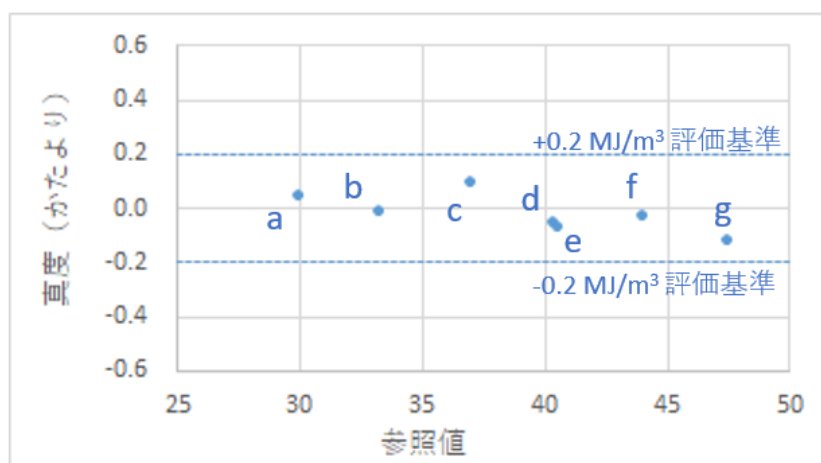


図23：熱量の測定結果（かたより）

(イ) 比重の測定結果

認証標準ガス物質（CRM）a～gの比重を、同一条件下で各5回ずつ測定した結果を、表24に示す。表の最右列に示す参照値は、JIS K2301：2022で示された計算方法を用いて、テストガスa～gの組成から算出した理論値である。

表24：比重の測定結果

比重									
テスト ガス	測定値					平均値	繰り返し 許容差	真度 (かたより)	参照値 JIS K2301
	1	2	3	4	5				
a	0.686	0.687	0.686	0.686	0.686	0.6862	0.0008	+0.0003	0.6859
b	0.698	0.698	0.698	0.698	0.698	0.6980	0.0008 未満	+0.0029	0.6951
c	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.6760	0.0008 未満	+0.0006	0.6754
d	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621	0.6210	0.0008 未満	-0.0006	0.6216
e	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.5650	0.0008 未満	-0.0002	0.5652
f	0.68	0.681	0.681	0.681	0.681	0.6808	0.0008	0.0000	0.6808
g	0.677	0.677	0.677	0.677	0.677	0.6770	0.0008 未満	-0.0009	0.6779

繰り返し許容差は、何れも評価基準の0.003より低い値となった。また参照値との差を示す真度（かたより）も、評価基準の±0.003の範囲内の結果となった。

図24は表24に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。a～gのいずれのデータもグラフ中の示す傾き1の破線付近に描かれている。

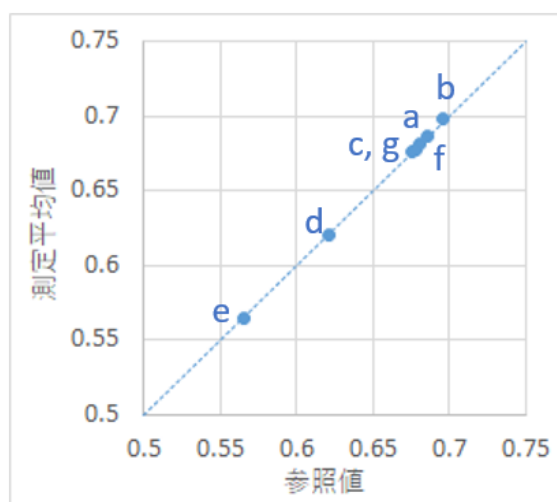


図24：比重の測定結果



図 25 は表 24 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。a～g のいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

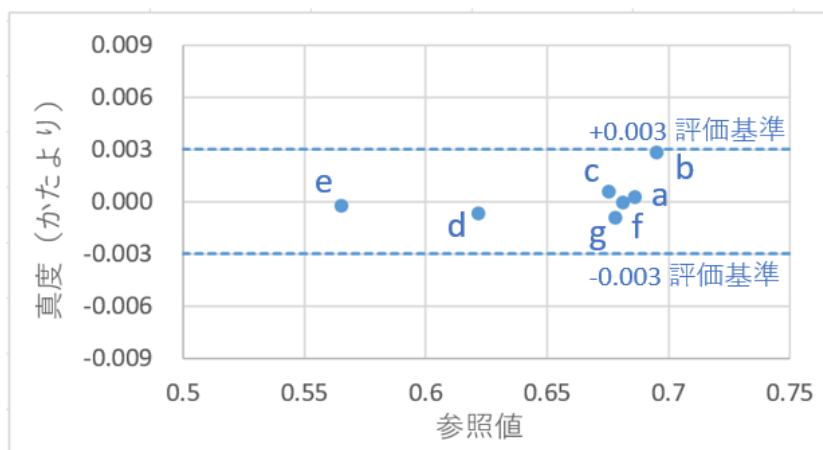


図25：比重の測定結果（かたより）

(ウ) ウォッベ指数の測定結果

認証標準ガス物質（CRM）a～g のウォッベ指数を、同一条件下で各 5 回ずつ測定した結果を、表 25 に示す。表の最右列に示す参照値は、告示「ガスの熱量及び燃焼性の測定方法を定める件」（昭和 45 年通商産業省告示第 634 号）で示された計算方法を用いて、テストガス a～g の組成から算出した理論値である。

表25：ウォッベ指数の測定結果

テストガス	測定値					平均値	繰り返し許容差	真度（かたより）	参照値 JIS K2301
	1	2	3	4	5				
a	36.257	36.256	36.259	36.264	36.261	36.2594	0.0056	+0.0384	36.221
b	39.802	39.808	39.810	39.810	39.812	39.8084	0.0067	-0.1036	39.912
c	45.149	45.139	45.143	45.133	45.140	45.1408	0.0103	+0.0868	45.054
d	51.142	51.135	51.136	51.132	51.138	51.1366	0.0065	-0.0584	51.195
e	53.850	53.850	53.850	53.850	53.851	53.8500	0.0008	-0.0748	53.925
f	53.344	53.337	53.337	53.337	53.330	53.3370	0.0087	-0.0230	53.360
g	57.563	57.563	57.564	57.564	57.565	57.5638	0.0015	-0.1152	57.679

繰り返し許容差は、何れも評価基準の 0.28 より低い値となった。また参照値との差を示す真度（かたより）も、評価基準の±0.28 の範囲内の結果となった。

図 26 は表 25 に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。a～g のいずれのデータもグラフ中の示す傾き 1 の破線付近に描かれている。

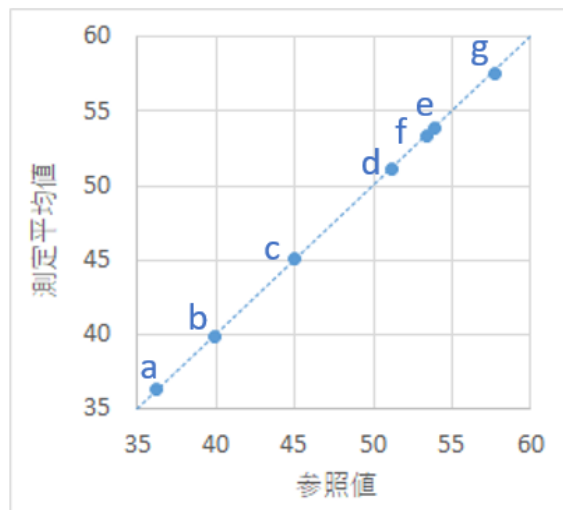


図26：ウォッベ指数の測定結果

図 27 は表 25 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。a～g のいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

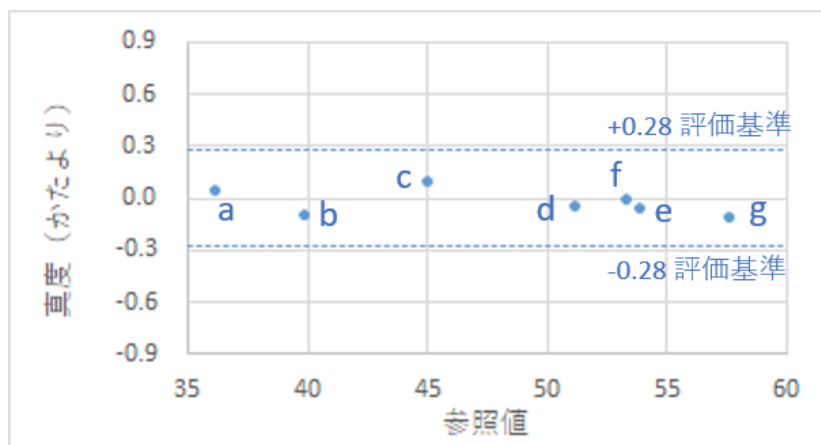


図27：ウォッベ指数の測定結果（かたより）

(工) 燃焼速度の測定結果

表 26 は、同様に認証標準ガス物質 (CRM) a~g を測定した時の屈折率センサー、音速センサーの出力から得られた、 $H_{opt}$ 、 $H_{sonic}$  の値と、(28)式を用いて計算した燃焼速度の結果を示している。

他の表と同様、表の最右列に示す参照値は、告示「ガスの熱量及び燃焼性の測定方法を定める件」(昭和 45 年通商産業省告示第 634 号) によって示された計算方法(18)式を用いて、テストガス a~g の組成から算出した理論値である。

表26：燃焼速度の測定結果

燃焼速度									
テスト ガス	測定値 (上段 $H_{opt}$ , 中段 $H_{sonic}$ , 下段 MCP)					測定 平均値	繰り返し 許容差	真度 (かたより)	MCP 参照値
	1	2	3	4	5				
a	37.20	37.20	37.20	37.20	37.20	37.20	---	---	29.467
	46.26	46.26	46.26	46.26	46.26	46.26	---	---	
	29.536	29.536	29.536	29.536	29.536	29.536	0.0008 未満	+0.069	
b	39.43	39.43	39.43	39.43	39.43	39.43	---	---	30.826
	47.22	47.22	47.22	47.22	47.22	47.22	---	---	
	31.094	31.094	31.094	31.094	31.094	31.094	0.0008 未満	+0.268	
c	41.24	41.24	41.24	41.24	41.24	41.24	---	---	33.495
	46.40	46.41	46.41	46.41	46.41	46.41	---	---	
	33.131	33.125	33.125	33.125	33.125	33.126	0.0047	-0.369	
d	41.81	41.81	41.81	41.81	41.82	41.81	---	---	35.518
	43.66	43.66	43.66	43.66	43.66	43.66	---	---	
	35.247	35.247	35.247	35.247	35.255	35.248	0.0063	-0.270	
e	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	---	---	36.139
	40.53	40.53	40.53	40.52	40.53	40.53	---	---	
	36.141	36.141	36.141	36.141	36.141	36.141	0.0008 未満	+0.002	
f	45.49	45.49	45.49	45.49	45.49	45.49	---	---	36.491
	47.31	47.31	47.31	47.31	47.31	47.31	---	---	
	36.045	36.045	36.045	36.045	36.045	36.045	0.0008 未満	-0.446	
g	47.44	47.44	47.44	47.44	47.44	47.44	---	---	37.740
	47.40	47.39	47.40	47.40	47.40	47.40	---	---	
	37.439	37.439	37.439	37.439	37.439	37.439	0.0008 未満	-0.301	

繰り返し許容差は、何れも評価基準の 0.5 より低い値となった。また参照値との差を示す真度 (かたより) も、評価基準の±0.5 の範囲内の結果となった。

図 28 は表 26 に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。a～g のいずれのデータもグラフ中の示す傾き 1 の破線付近に描かれている。

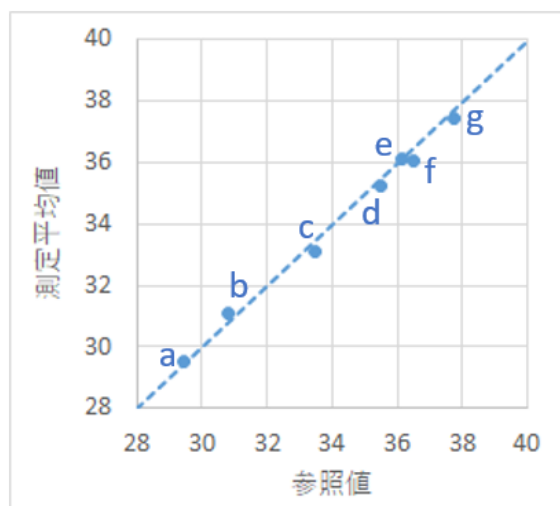


図28： 燃焼速度の測定結果

図 29 は表 26 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。a～g のいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

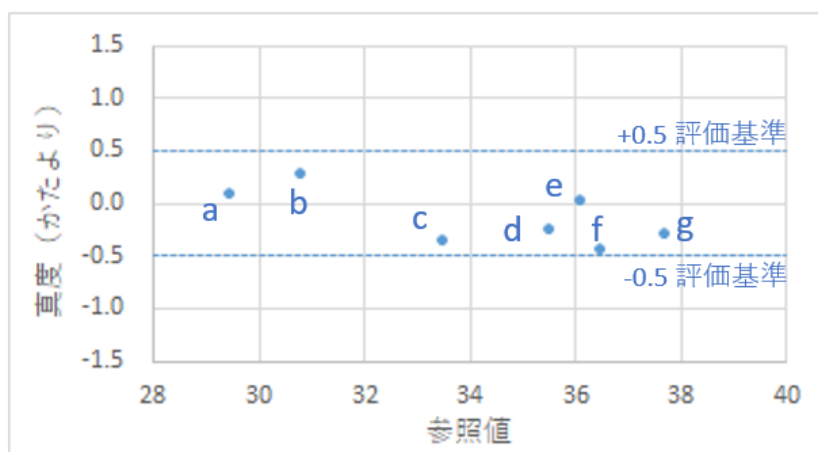


図29： 燃焼速度の測定結果（かたより）



## (2) 実証試験②試験機 A の結果

直射日光があたる盤の中に設置された試験機 A による、2021 年夏季約 4 ヶ月の 都市ガスの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果を図 30～33 に示す。

ただし、これらのグラフは、次式の結果で描いている

$$y_i = x_i - Ref$$

ここで、 $x_i$  は本技術によって取得された、熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の個々の測定結果を、 $Ref$  は測定結果  $x_i$  が得られた時点での、ガスクロマトグラフの分析結果から理論計算で求めた参照値をそれぞれ示している。

グラフ中に描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた再現性許容差の評価基準を示している。

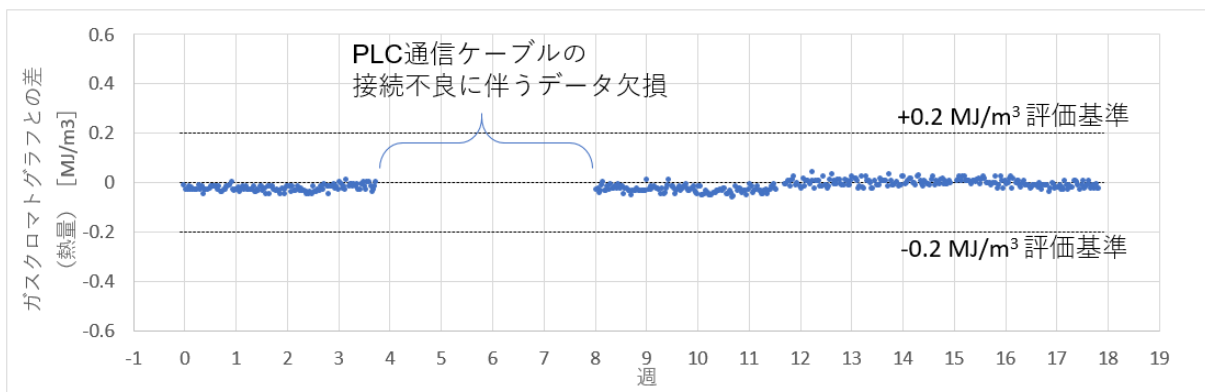


図30：試験機Aによる都市ガスの熱量の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

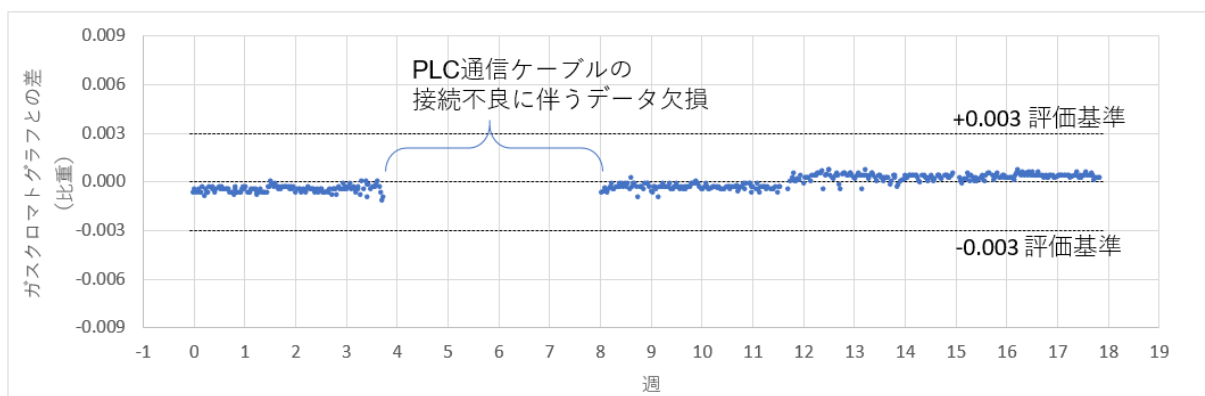


図31：試験機Aによる都市ガスの比重の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

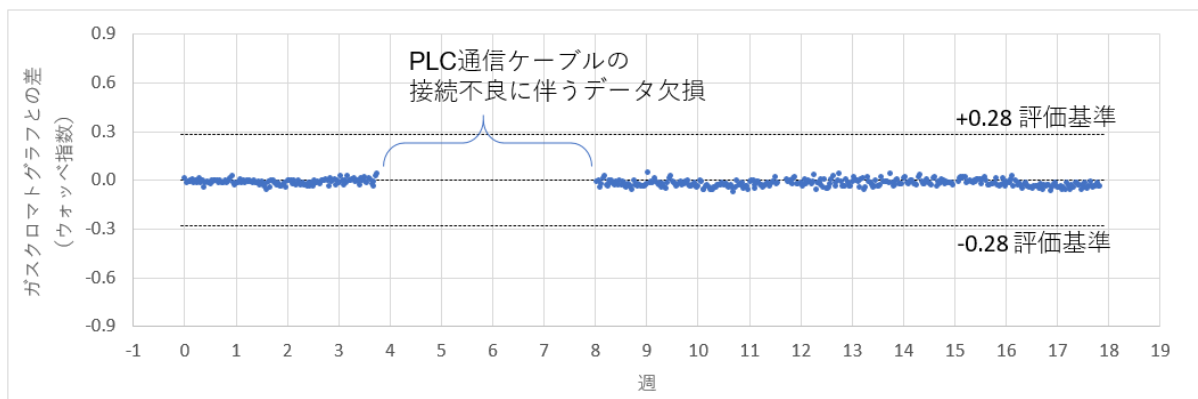


図32：試験機Aによる都市ガスのウォッベ指数の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

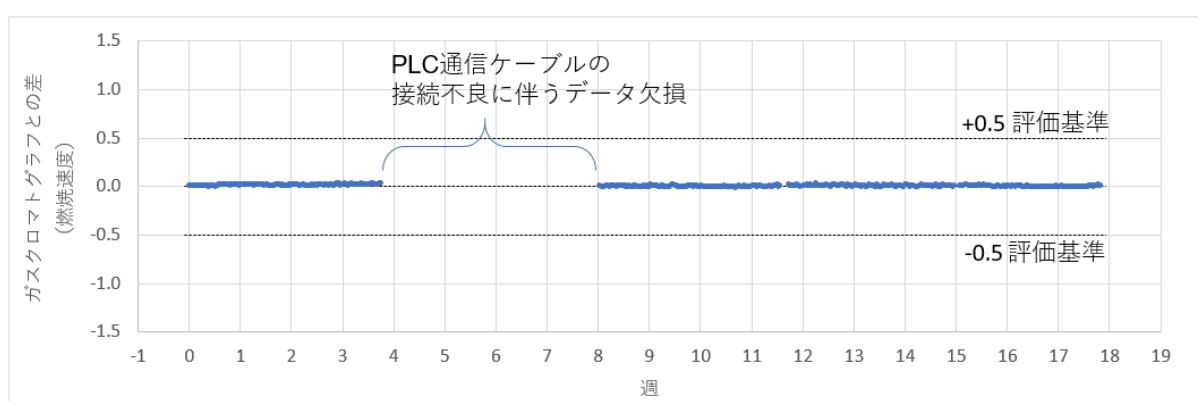


図33：試験機Aによる都市ガスの燃焼速度の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

本技術による熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果 $x_i$ と、ガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 27 に示す。

表27：試験機Aの熱量測定結果における真度（かたより）と再現性許容差

	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	-0.016	±0.20	0.0373	±0.20
比重	-0.0002	±0.003	0.0007	±0.003
ウォッベ指数	-0.012	±0.28	0.038	±0.28
燃焼速度	+0.014	±0.5	0.015	±0.50

熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度のいずれの真度（かたより）も、「3.1.2 評価方法」で定めた真度の評価基準を満足した。また、再現性許容差も評価基準を満足した。

図 34 は製品内部温度と、熱量の測定結果 $x_i$ とガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ の差 $y_i$ をプロットしたグラフである。

このデータは、2021 年夏季約 4 ヶ月の評価期間中に、試験機 A が置かれた周辺環境温度が大きく変化していたことを示すものであるが、熱量の測定結果 $x_i$ は温度変動の影響を受けることなく、校正と同一環境下で行われたガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ と一致する結果になっていたことが判る。

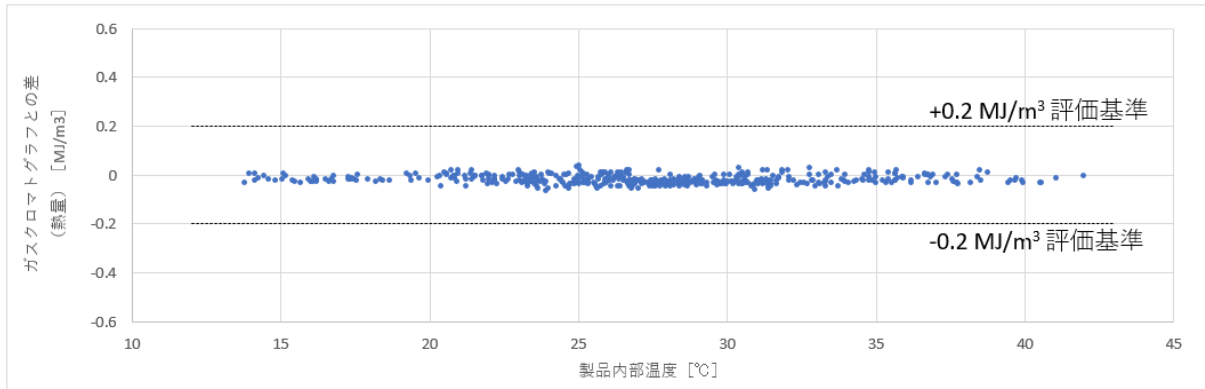


図34：製品内部温度と測定結果のガスクロマトグラフとの差

図 35 はセンサー部の絶対圧<sup>用語 11)</sup>と、熱量の測定結果 $x_i$ とガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ の差 $y_i$ をプロットしたグラフである。

このデータは評価期間中の大気圧変化に伴い、試験機 A のセンサー部の圧力が変化していたことを示すものであるが、何れのデータも大気圧変化の影響を受けることなく、熱量の測定結果 $x_i$ は、校正と同一環境下で行われたガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ と一致する結果になっていたことが判る。

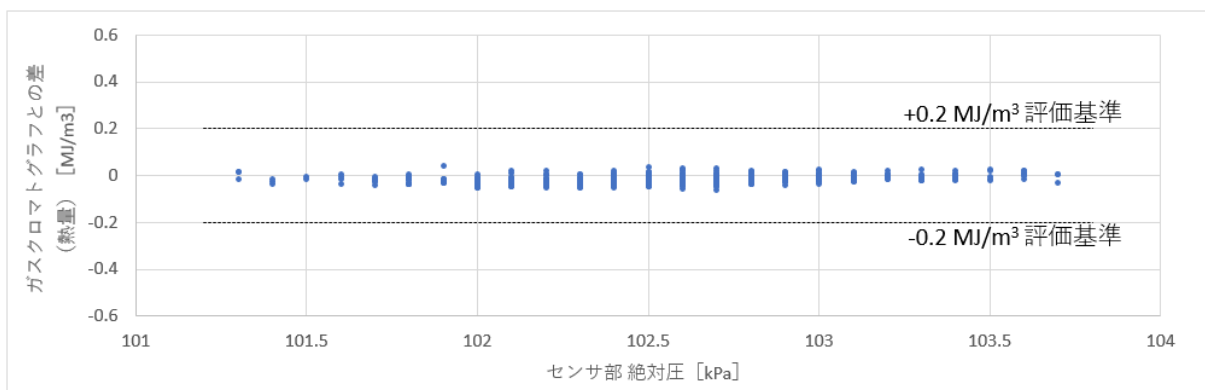


図35：センサー部の絶対圧と測定結果のガスクロマトグラフとの差



(3) 実証試験②試験機 B の結果

試験機 B による、2021 年夏季約 4 ヶ月の純メタンの熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果を図 36～39 に示す。

グラフ中に描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた再現性許容差の評価基準を示している。

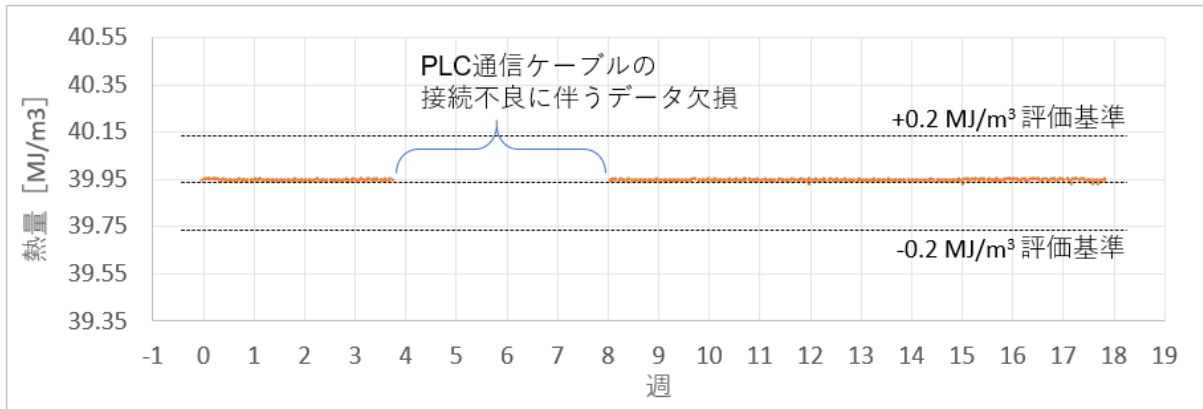


図36：試験機Bによる純メタンの熱量の測定結果

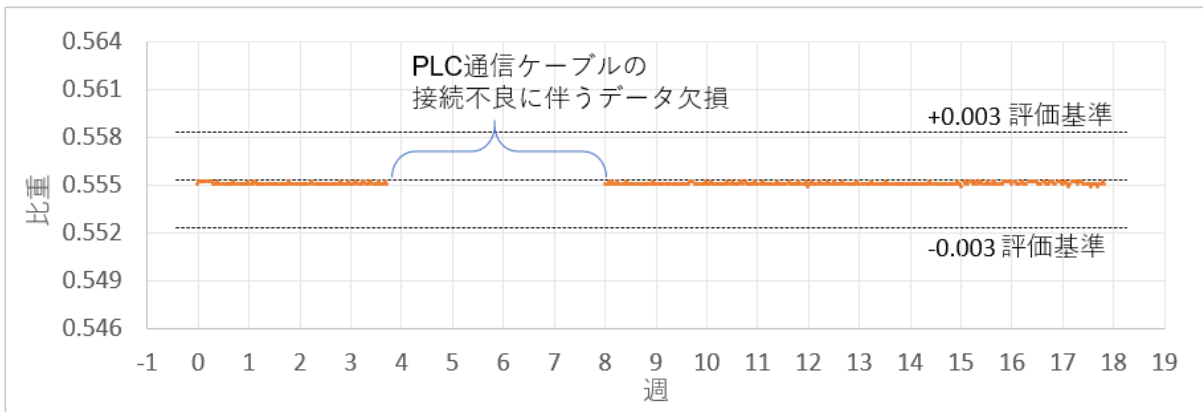


図37：試験機Bによる純メタンの比重の測定結果

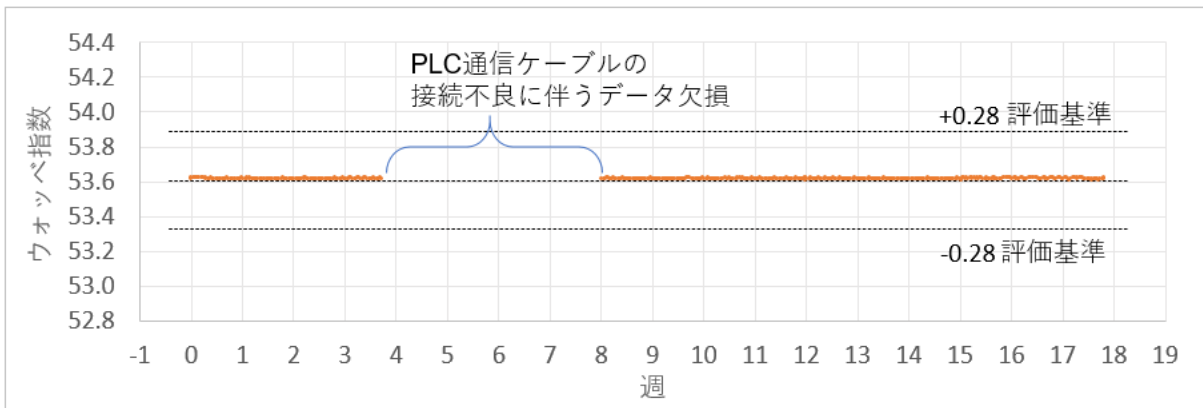


図38：試験機Bによる純メタンのウォッベ指数の測定結果

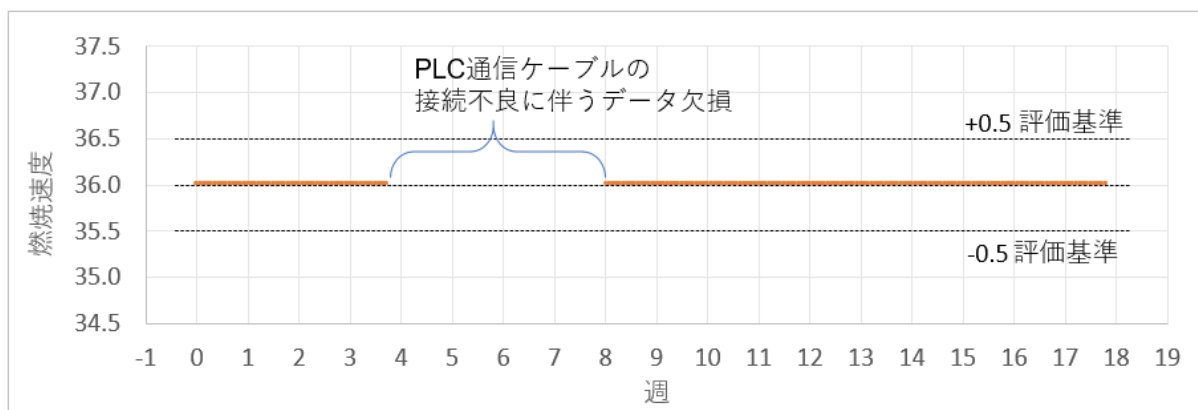


図39：試験機Bによる純メタンの燃焼速度の測定結果

本技術による熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果 $x_i$ と、ガス組成から理論計算で求めたそれぞれの参照値 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 28 に示す。

表28：試験機Bによる純メタンの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果（平均）

	測定結果 平均値	参照値	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	39.942	39.935	+0.007	±0.20	0.0084	±0.20
比重	0.5550	0.5553	-0.0003	±0.003	0.0001	±0.003
ウォッペ指数	53.613	53.605	+0.008	±0.28	0.0019	±0.28
燃焼速度	36.008	36.00	+0.008	±0.5	0.0047	±0.50

純メタンの、熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度を測定した時の真度（かたより）、及び再現性許容差は、いずれも、「3.1.2 評価方法」で定めたそれぞれの評価基準を満足した。

試験機 B による、表 9、10 に示す標準ガス①②の熱量、比重、燃焼速度の測定結果  $x_i$  を図 40～43 に示す。グラフに描かれている 3 本の破線の内、中央の破線は標準ガスの組成から理論計算でもとめた参照値  $Ref$  を示しており、その上下に描かれている 2 本の破線は、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した真度（かたより）の許容差の評価基準を示している。

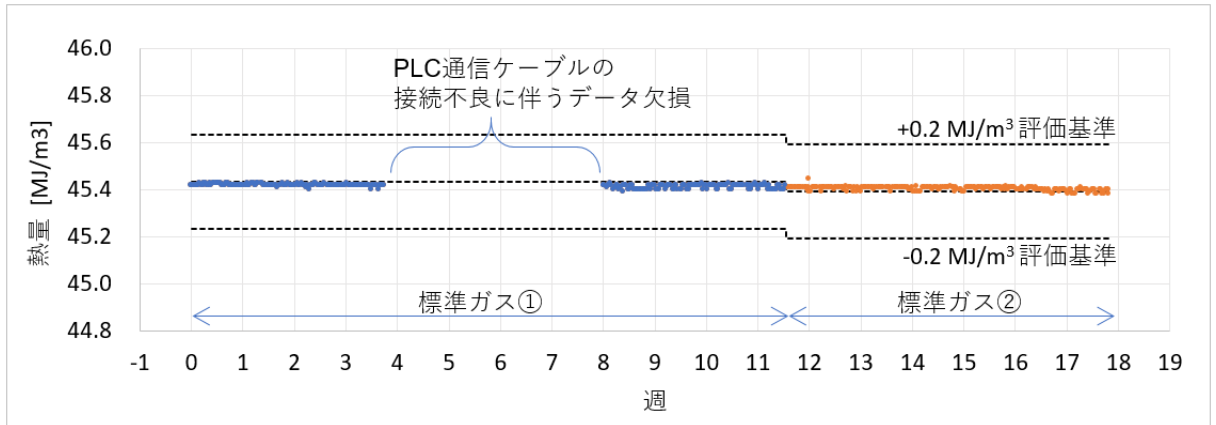


図40：試験機Bによる標準ガス①②の熱量の測定結果

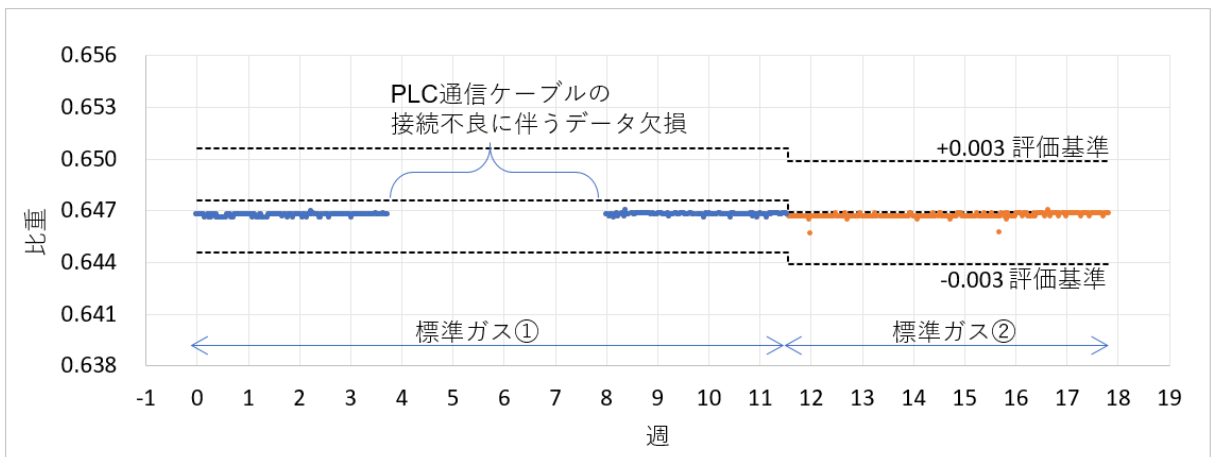


図41：試験機Bによる標準ガス①②の比重の測定結果

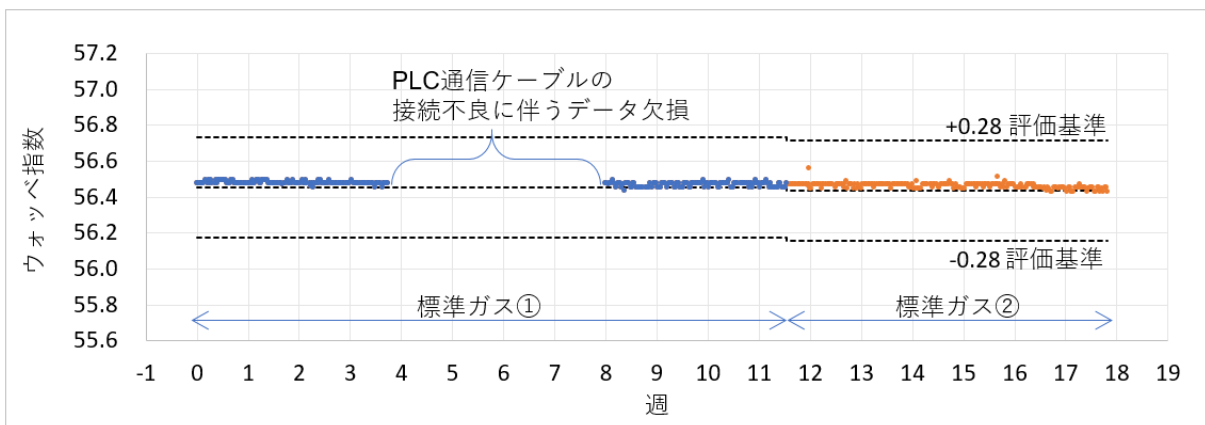


図42：試験機Bによる標準ガス①②のウォッベ指数の測定結果

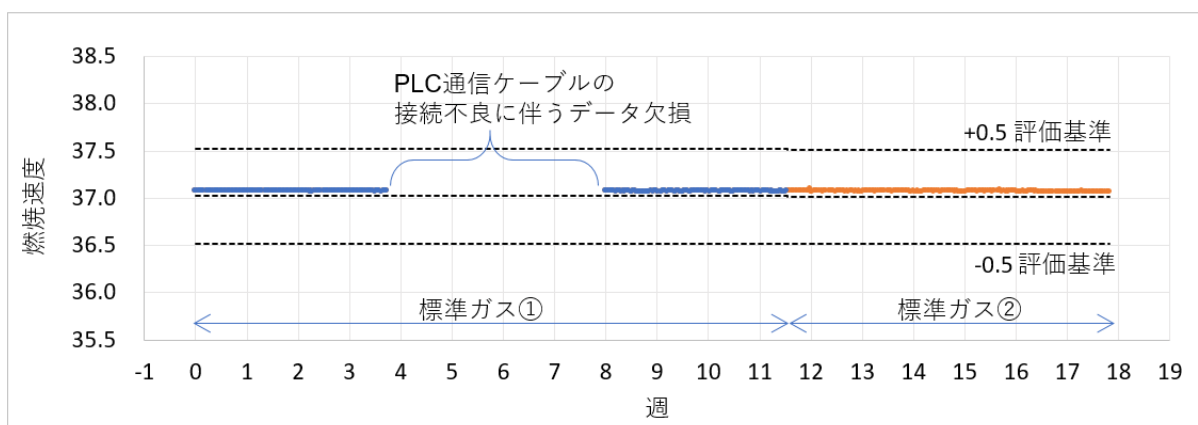


図43：試験機Bによる標準ガス①②の燃焼速度の測定結果

本技術による熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果 $x_i$ と、標準ガスのガス組成から理論計算で求めたそれぞれの参照値 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 29, 30 に示す。

表29：試験機Bによる標準ガス①の熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果

	測定結果 平均値	参照値	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	45.415	45.432	-0.017	±0.20	0.0155	±0.20
比重	0.6467	0.6476	-0.0009	±0.003	0.0001	±0.003
ウォッペ指数	56.471	56.456	-0.015	±0.28	0.0233	±0.28
燃焼速度	37.074	37.022	+0.052	±0.5	0.0067	±0.50

表30：試験機Bによる標準ガス②の熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果

	測定結果 平均値	参照値	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	45.403	45.393	+0.010	±0.20	0.0082	±0.20
比重	0.6466	0.6469	+0.0003	±0.003	0.0001	±0.003
ウォッペ指数	56.460	56.438	+0.022	±0.28	0.0146	±0.28
燃焼速度	37.071	37.017	+0.054	±0.5	0.0041	±0.50

標準ガス①、②の、熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度を測定した時の真度（かたより）、及び再現性許容差は、いずれも、「3.1.2 評価方法」で定めたそれぞれの評価基準を満足した。

#### (4) 実証試験③試験機 A の結果

##### (イ) 測定精度の耐環境性能 (冬季)

直射日光があたる盤の中に設置された試験機 A による、2021 年～2022 年冬季約 4 ヶ月の 都市ガスの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果を図 44～47 に示す。

ただし、これらのグラフは、次式の結果で描いている

$$y_i = x_i - Ref$$

ここで、 $x_i$  は本技術によって取得された、熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の個々の測定結果を、 $Ref$  は測定結果  $x_i$  が得られた時点での、ガスクロマトグラフの分析結果から理論計算で求めた参照値をそれぞれ示している。

グラフ中に描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた再現性許容差の評価基準を示している。

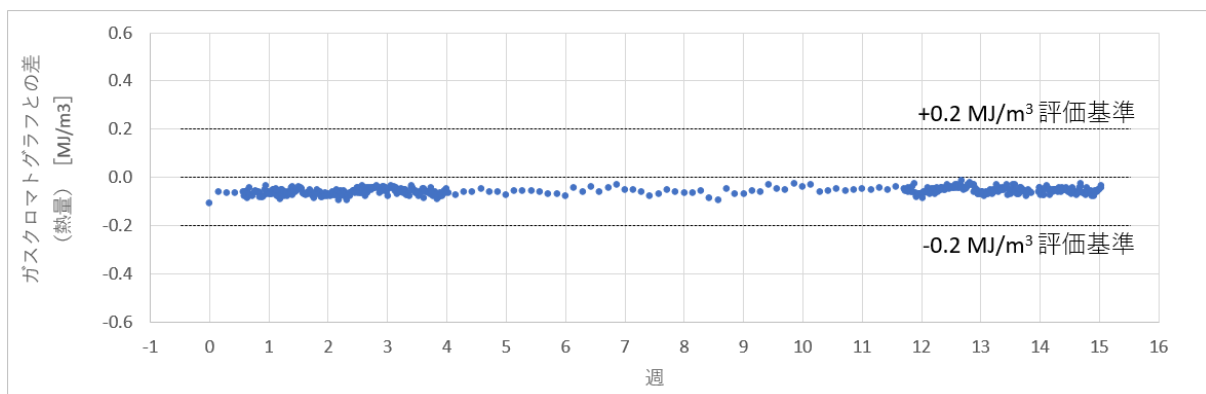


図44：試験機Aによる都市ガスの熱量の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

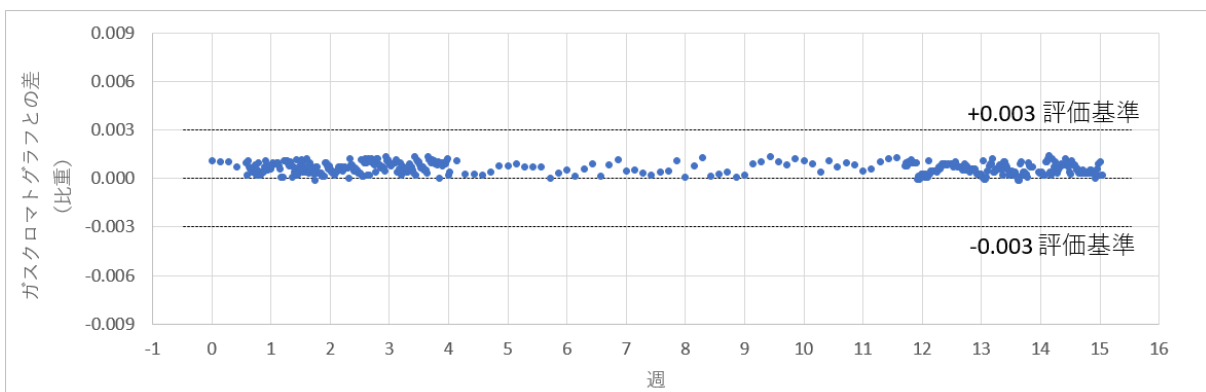


図45：試験機Aによる都市ガスの比重の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

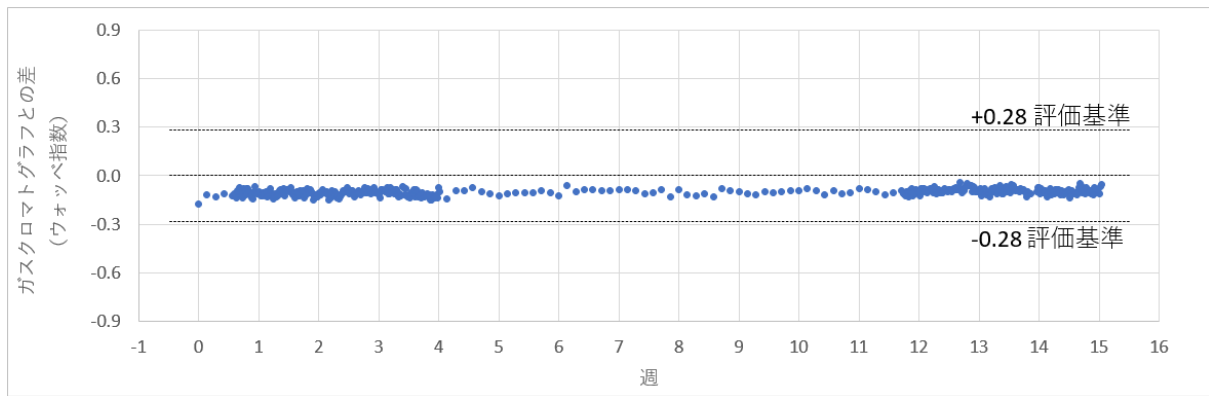


図 46：試験機 A による都市ガスのウォッベ指数の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

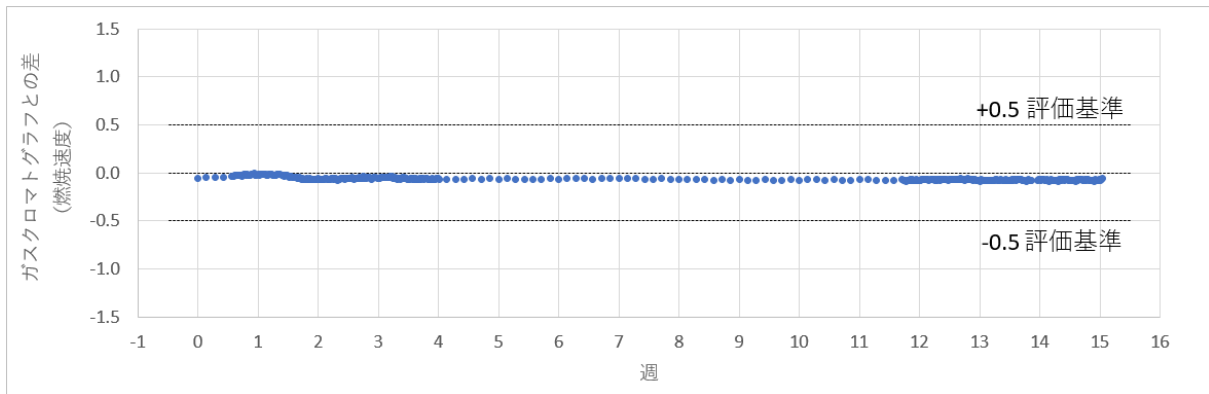


図47：試験機Aによる都市ガスの燃焼速度の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

本技術による熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果 $x_i$ と、ガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 31 に示す。

表 31：試験機Aによる都市ガスの測定結果のかたより

	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	-0.059	±0.20	0.027	±0.20
比重	+0.0006	±0.003	0.0006	±0.003
ウォッベ指数	-0.100	±0.28	0.038	±0.28
燃焼速度	-0.061	±0.5	0.035	±0.5

熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度のいずれの真度（かたより）も、「3.1.2 評価方法」で定めた真度の評価基準を満足した。また、再現性許容差も評価基準を満足した。

図 48 は製品内部温度と、熱量の測定結果 $x_i$ とガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ の差 $y_i$ をプロットしたグラフである。このデータは、2021 年～2022 年冬季約 4 ヶ月の評価期間中に、試験機 A が置かれた周辺環境温度が大きく変化していたことを示すものであるが、熱量の測定結果 $x_i$ は温度変動の影響を受けることなく、校正と同一環境下で行われたガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ との差は、ほぼ一定値になっていたことが判る。

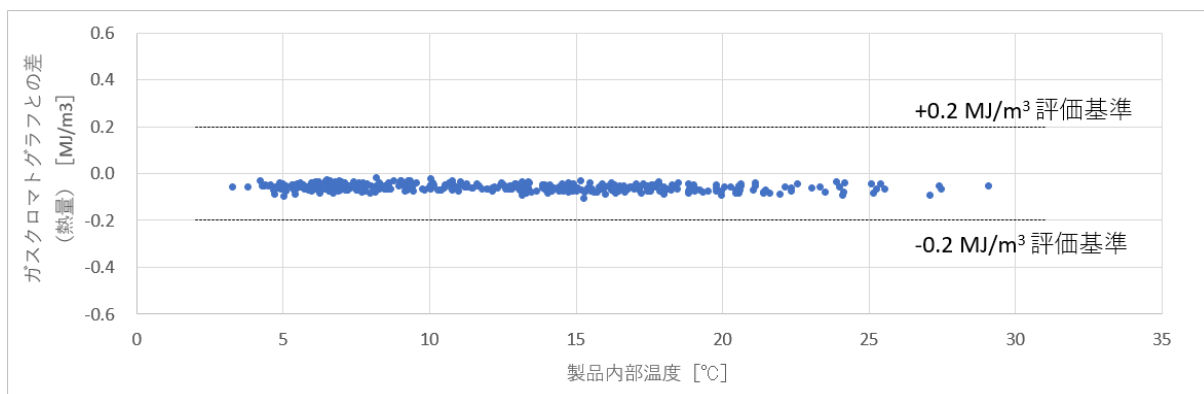


図48：製品内部温度と測定結果のガスクロマトグラフの差

図 49 はセンサー部の絶対圧と、熱量の測定結果 $x_i$ とガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ の差 $y_i$ をプロットしたグラフである。

このデータは評価期間中の大気圧変化に伴い、試験機 A のセンサー部の圧力が変化していたことを示すものであるが、何れのデータも大気圧変化の影響を受けることなく、熱量の測定結果 $x_i$ は、校正と同一環境下で行われたガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ との差は、ほぼ一定値になっていたことが判る。

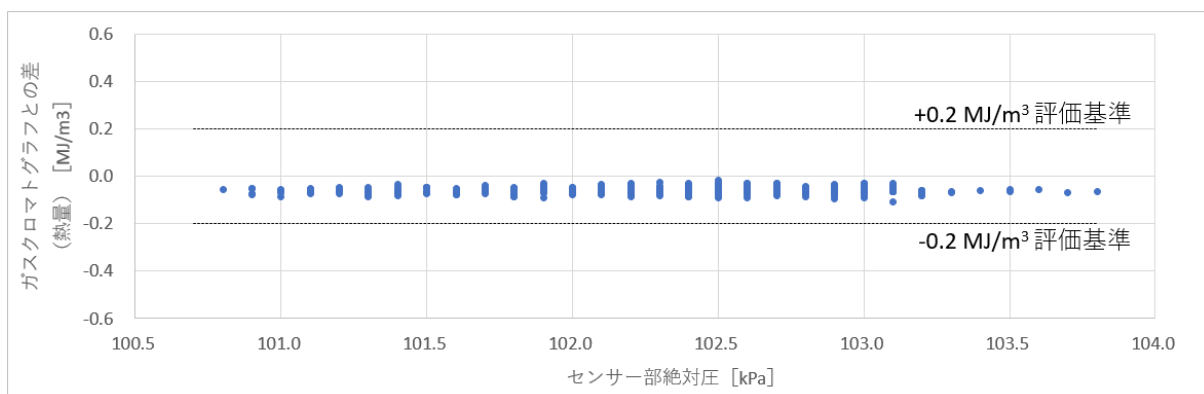


図49：センサー部の絶対圧と測定結果のガスクロマトグラフとの差

(5) 実証試験③試験機 B の結果

試験機 B による、2021 年～2022 年冬季約 4 ヶ月の純メタンの熱量、比重、ウォッペ指数、燃烧速度の測定結果を図 50～53 に示す。

グラフ中に描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた再現性許容差の評価基準を示している

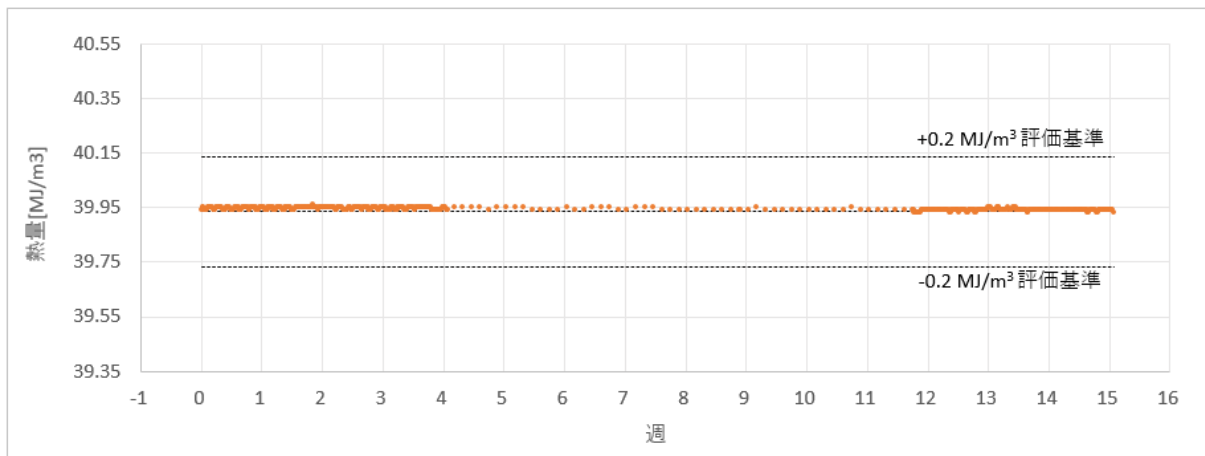


図 50：試験機Bによる純メタンの熱量の測定結果

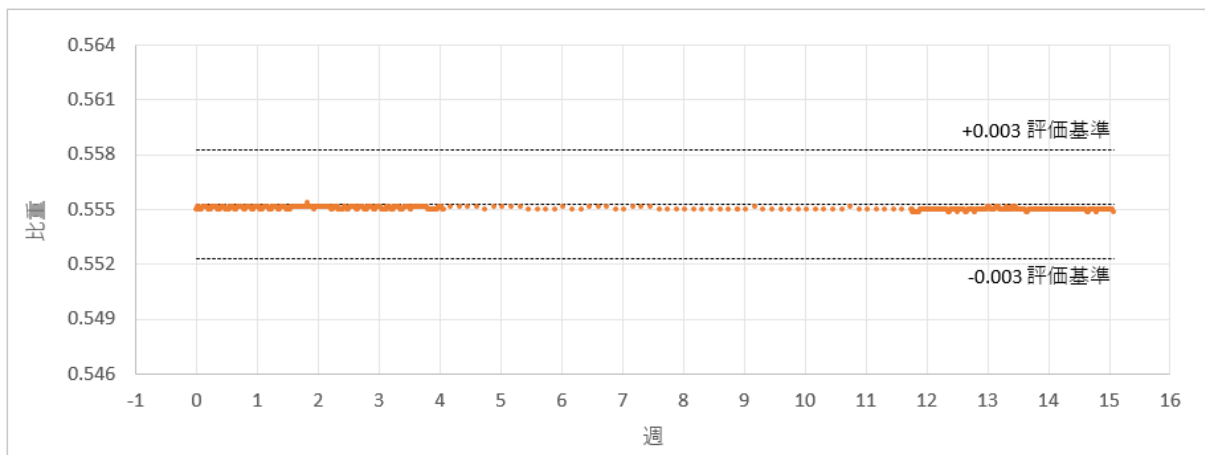


図 51：試験機Bによる純メタンの比重の測定結果



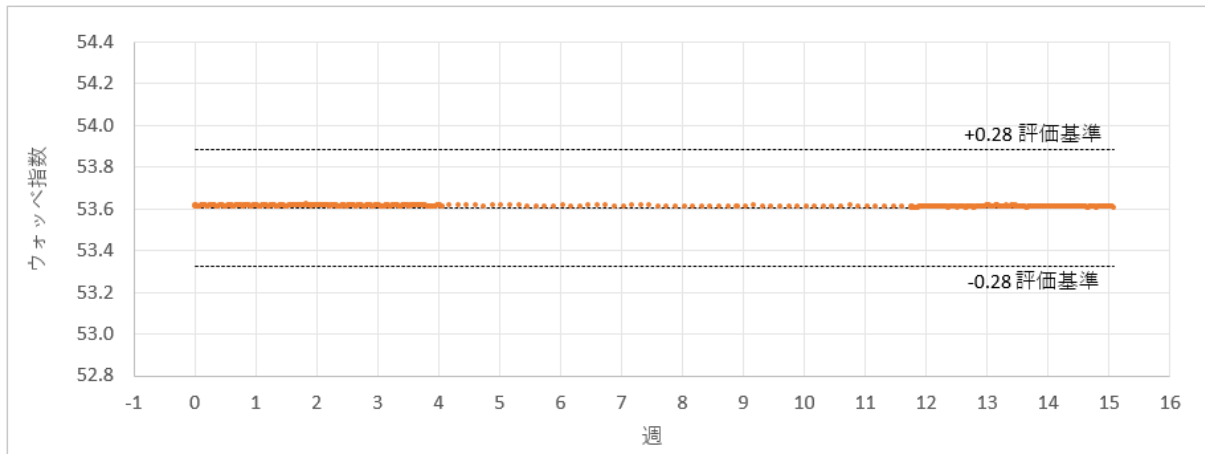


図52：試験機Bによる純メタンのウォッペ指数の測定結果

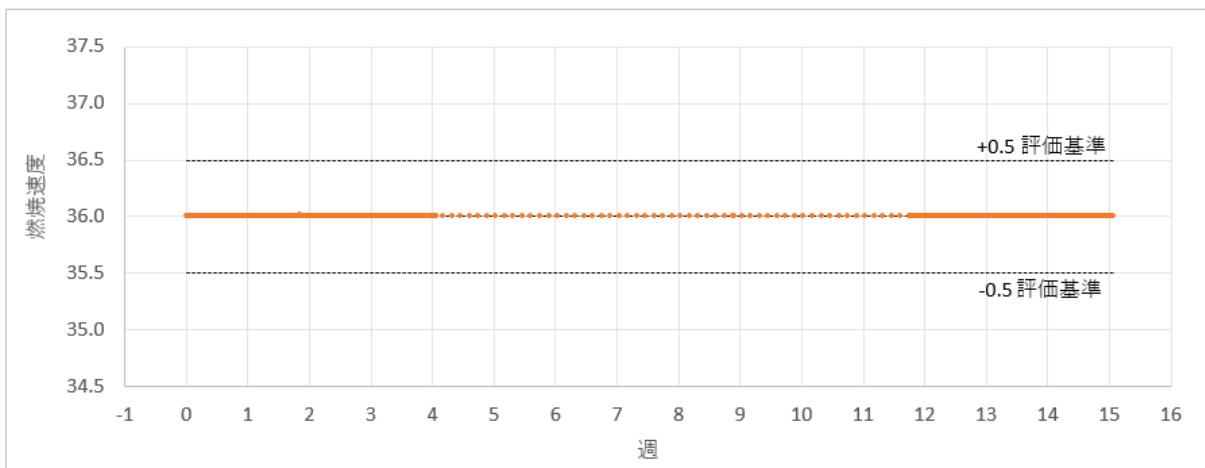


図53：試験機Bによる純メタンの燃焼速度の測定結果

本技術による熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果 $x_i$ と、ガス組成から理論計算で求めたそれぞれの参照値 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 32 に示す。

表32：試験機Bによる純メタンの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果（平均）

	測定結果 平均値	参照値	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	39.943	39.935	+0.008	±0.20	0.0110	±0.20
比重	0.5550	0.5553	-0.0003	±0.003	0.0001	±0.003
ウォッペ指数	53.613	53.605	+0.008	±0.28	0.0024	±0.28
燃焼速度	36.008	36.00	+0.008	±0.5	0.0061	±0.5

純メタンの、熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度を測定した時の真度（かたより）、及び再現性許容差は、いずれも、「3.1.2 評価方法」で定めたそれぞれの評価基準を満足した。

試験機 B による、表 11、12 に示す標準ガス③④の熱量、比重、燃焼速度の測定結果 $x_i$ を図 54～57 に示す。グラフに描かれている 3 本の破線の内、中央の破線は標準ガスの組成から理論計算でもとめた参照値 $Ref$ を示しており、その上下に描かれている 2 本の破線は、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した真度（かたより）の許容差の評価基準を示している。

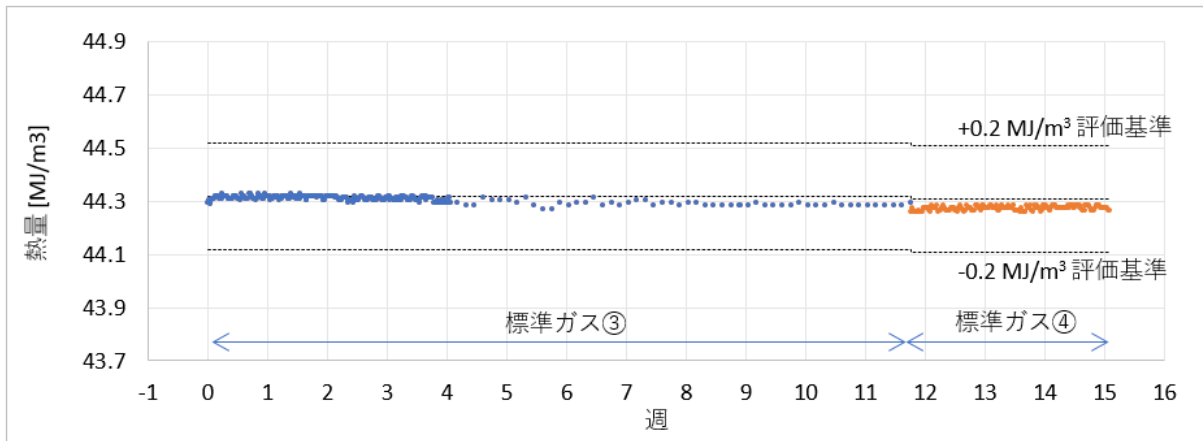


図54：試験機Bによる標準ガス③④の熱量の測定結果

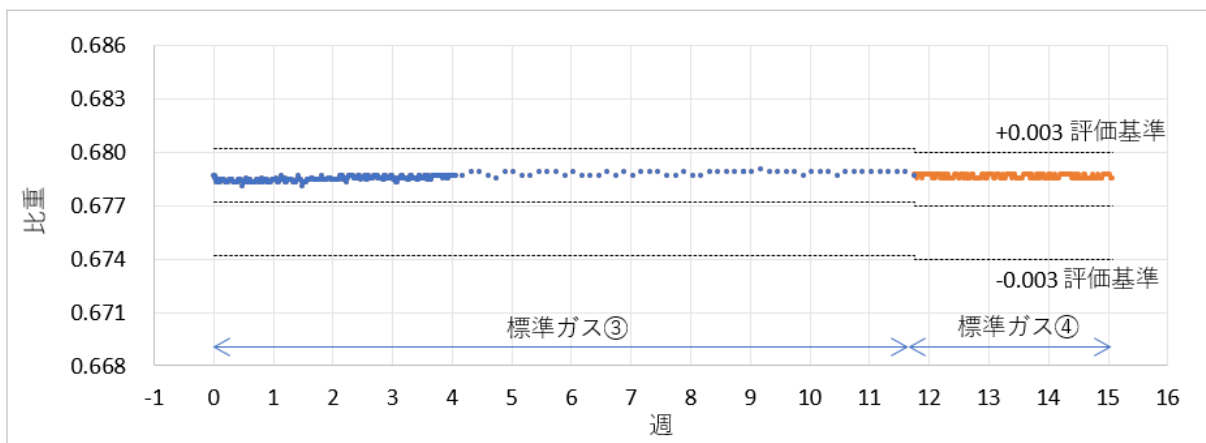


図55：試験機Bによる標準ガス③④の比重の測定結果

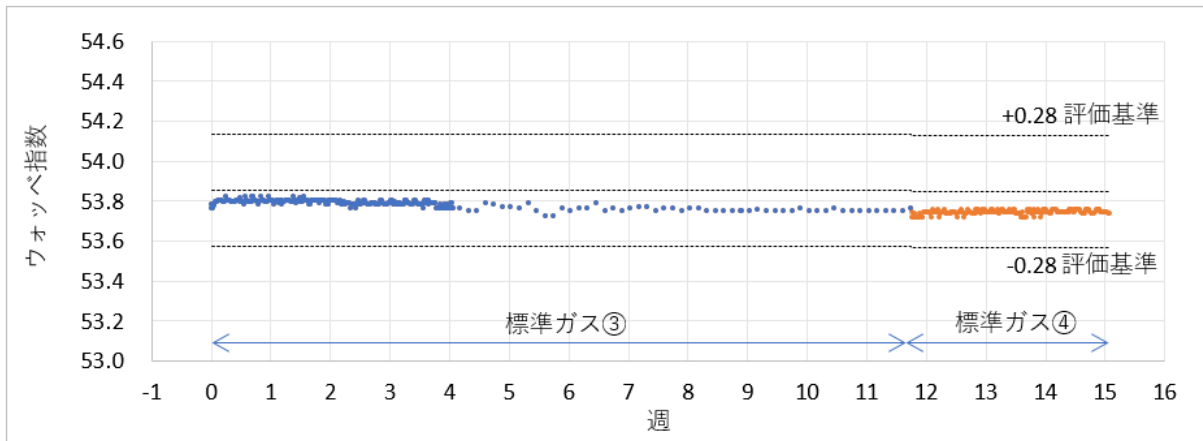


図56：試験機Bによる標準ガス③④のウォッベ指数の測定結果

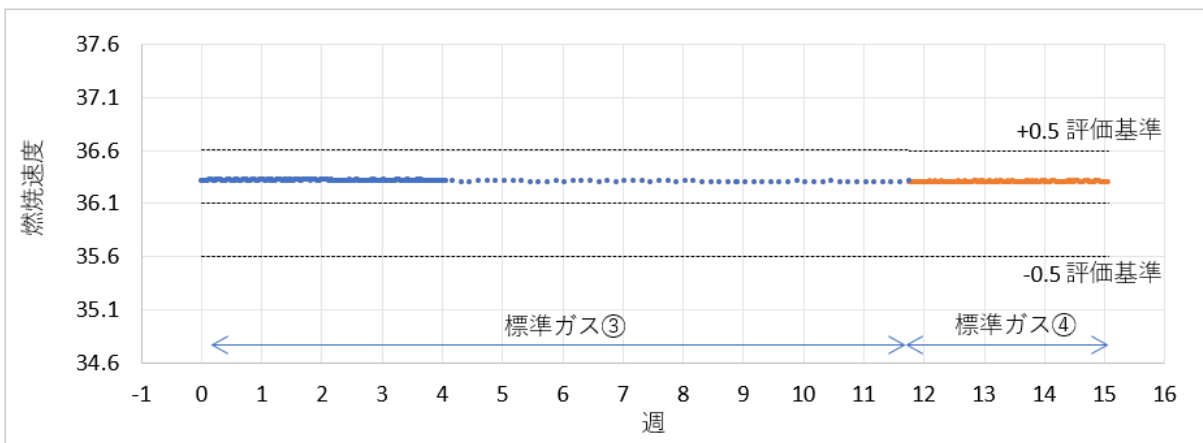


図57：試験機Bによる標準ガス③④の燃烧速度の測定結果

本技術による熱量、比重、ウォッベ指数、燃烧速度の測定結果 $x_i$ と、標準ガスのガス組成から理論計算で求めたそれぞれの参照値 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 33, 34 に示す。

表33：試験機Bによる標準ガス③の熱量、比重、ウォッベ指数、燃烧速度の測定結果（平均）

	測定結果 平均値	参照値	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	44.305	44.318	-0.013	±0.20	0.0235	±0.20
比重	0.6785	0.6772	+0.0013	±0.003	0.0003	±0.003
ウォッベ指数	53.786	53.854	-0.068	±0.28	0.0394	±0.28
燃烧速度	36.314	36.101	+0.213	±0.5	0.0114	±0.5

表34：試験機Bによる標準ガス④の熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果（平均）

	測定結果 平均値	参照値	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	44.273	44.308	-0.035	±0.20	0.0156	±0.20
比重	0.6786	0.6770	+0.0016	±0.003	0.0001	±0.003
ウォッベ指数	53.743	53.850	-0.107	±0.28	0.0222	±0.28
燃焼速度	36.301	36.099	+0.202	±0.5	0.0065	±0.5

標準ガス③、④の、熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度を測定した時の真度（かたより）、及び再現性許容差は、いずれも、「3.1.2 評価方法」で定めたそれぞれの評価基準を満足した。

#### (6) 実証試験④ B社 B1 工場の結果

ガス事業者 B社 B1 工場の分析室に設置された試験機による、2022年～2023年にかけての都市ガスの熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果を図58～61に示す。

ただし、これらのグラフは、次式の結果で描いている。

$$y_i = x_i - Ref$$

ここで、 $x_i$ は本試験機によって取得された、熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の個々の測定結果を、 $Ref$ は測定結果 $x_i$ が得られた日の、ガスクロマトグラフの分析結果から理論計算で求めた参照値をそれぞれ示している。

グラフ中に描かれている2本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた再現性許容差の評価基準を示している。

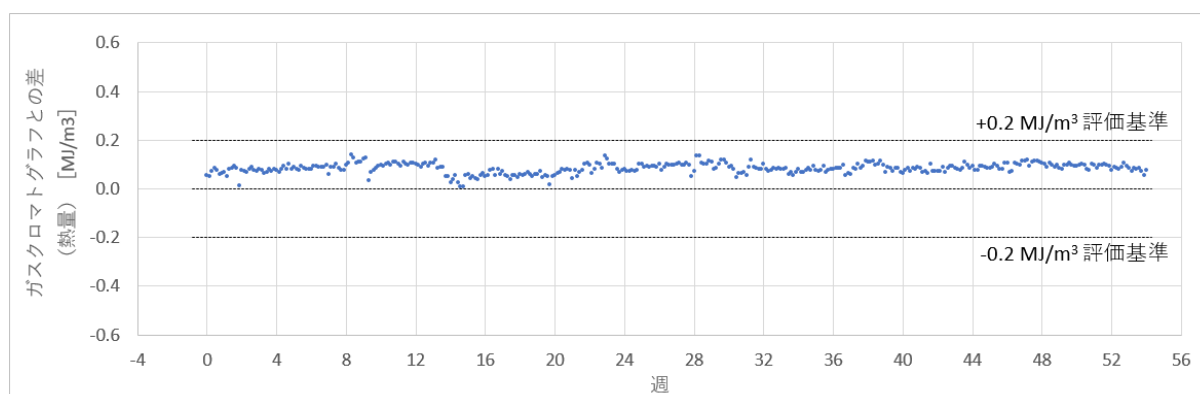


図58：都市ガス会社B社での都市ガスの熱量の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

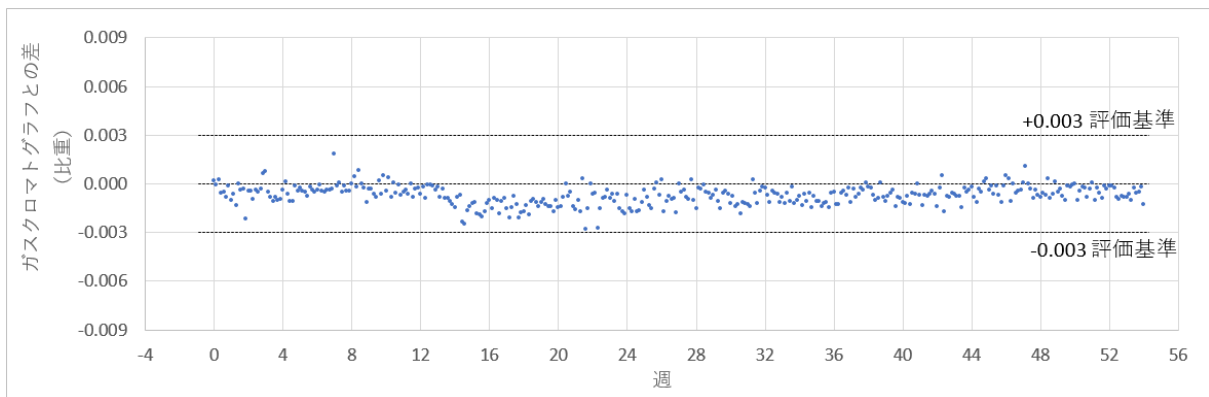


図59：都市ガス会社B社での都市ガスの比重の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

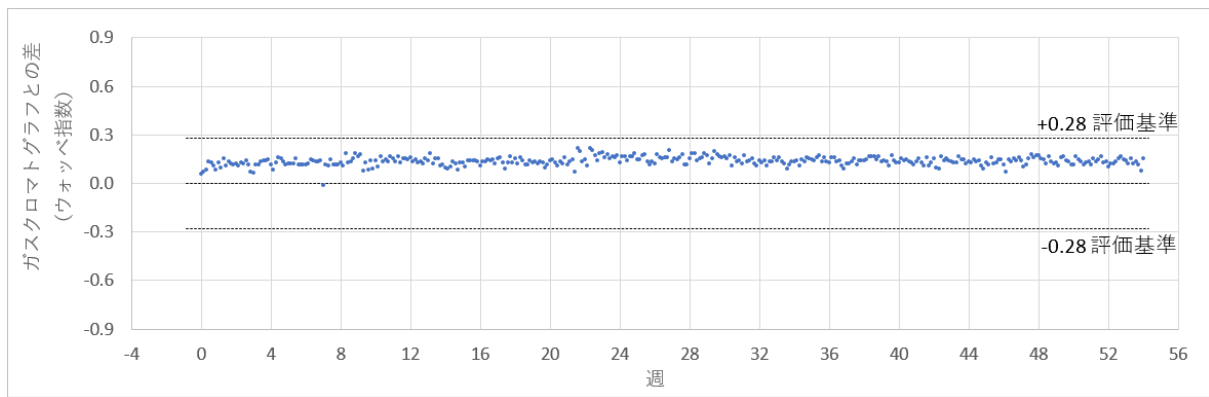


図60：都市ガス会社B社での都市ガスのウォッベ指数の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

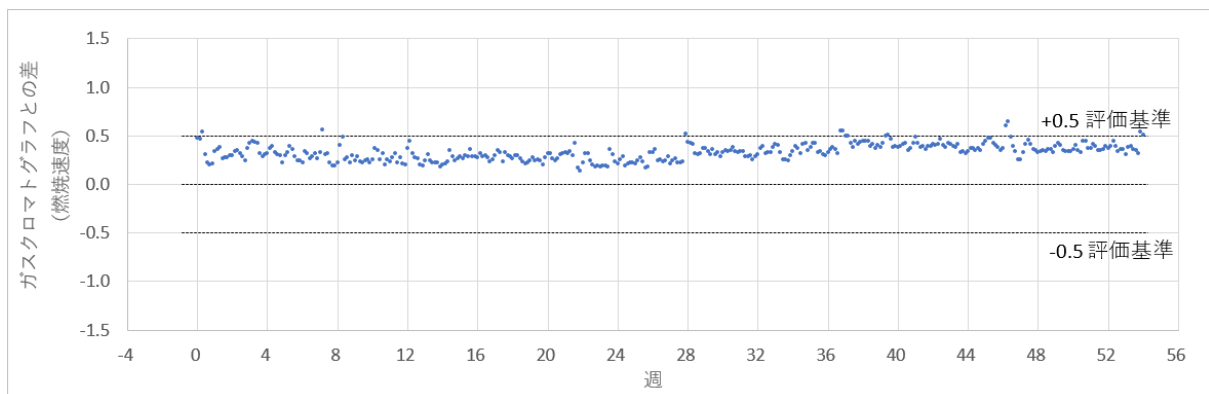


図61：都市ガス会社B社での都市ガスの燃焼速度の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

本技術による熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果 $x_i$ と、ガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 35 に示す。

表35：熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果のかたよりと再現性許容差

	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	+0.083	±0.20	0.040	±0.20
比重	-0.0007	±0.003	0.001	±0.003
ウォッベ指数	+0.135	±0.28	0.051	±0.28
燃焼速度	+0.328	±0.5	0.163	±0.5

熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果のかたよりと再現性許容差は、「3.1.2 評価方法」で定めた評価基準をそれぞれ満足した。

### (7) 実証試験④ C社 C1工場の結果

ガス事業者 C社 C1工場の工場建屋内に設置された試験機による、2022年～2023年にかけての都市ガスの熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果を図62～65に示す。

ただし、これらのグラフは、次式の結果で描いている。

$$y_i = x_i - Ref$$

ここで、 $x_i$ は本試験機によって取得された、熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の個々の測定結果を、 $Ref$ は測定結果 $x_i$ が得られた日の、ガスクロマトグラフの分析結果から理論計算で求めた参照値をそれぞれ示している。

グラフ中に描かれている2本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた再現性許容差の評価基準を示している。

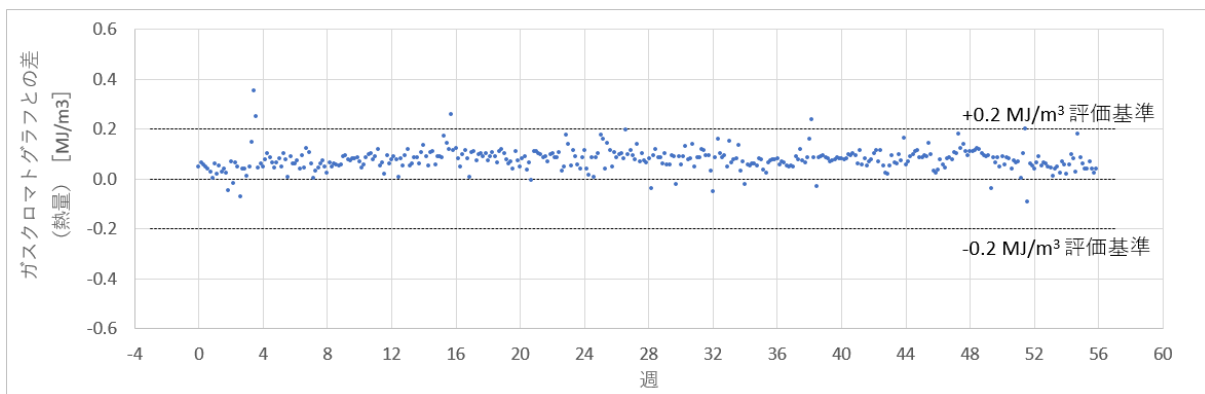


図62：都市ガス会社C社での都市ガスの熱量の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

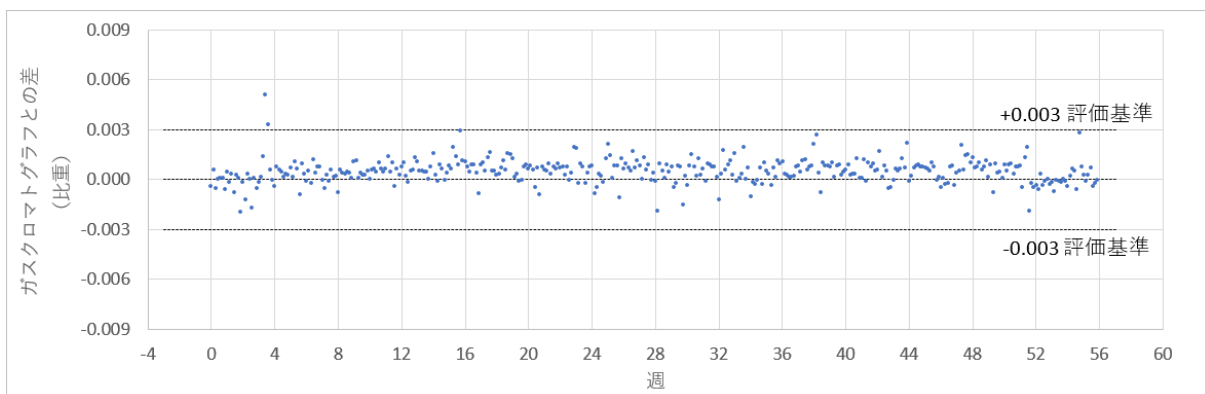


図63：都市ガス会社C社での都市ガスの比重の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

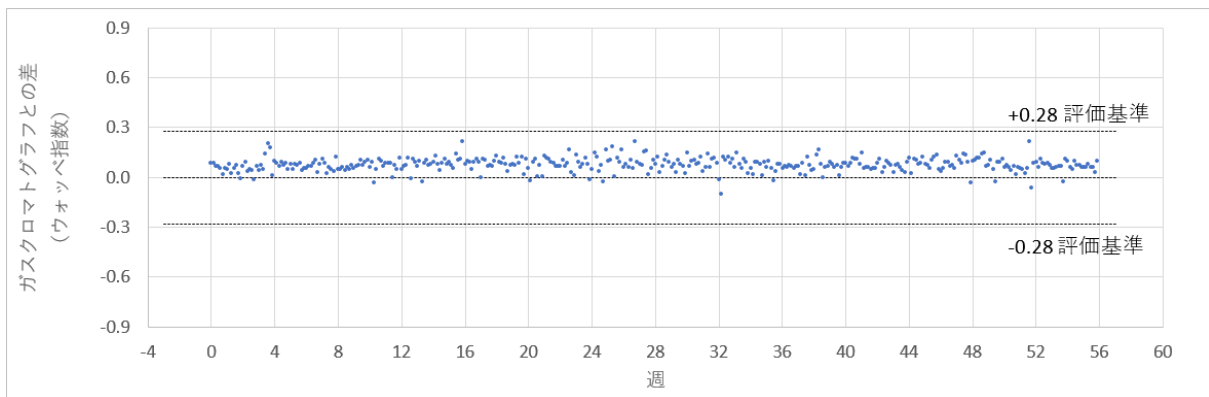


図64：都市ガス会社C社での都市ガスのウォッベ指数の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

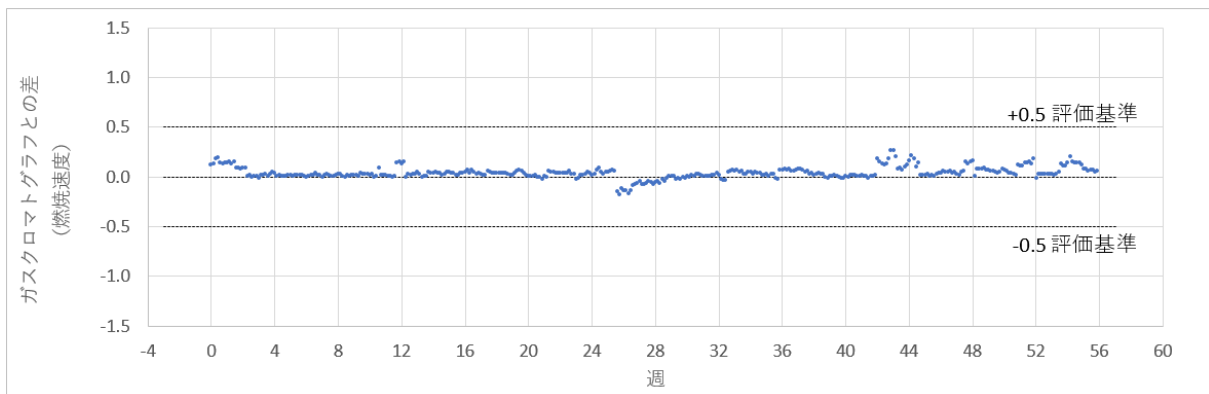


図65：都市ガス会社C社での都市ガスの燃焼速度の測定結果（ガスクロマトグラフとの差）

本技術による熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果 $x_i$ と、ガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ より、「1.3.3 技術実証の概要」で説明した(2)(7)式を用いて、真度（かたより）と、再現性許容差をもとめた。その結果を表 36 に示す。

表36：熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果のかたよりと再現性許容差

	真度 (かたより)	真度 評価基準	再現許容差	再現許容差 評価基準
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]	+0.076	±0.20	0.084	±0.20
比重	+0.0004	±0.003	0.001	±0.003
ウォッベ指数	+0.075	±0.28	0.080	±0.28
燃焼速度	+0.039	±0.5	0.115	±0.5

熱量、比重、ウォッベ指数、燃焼速度の測定結果のかたよりと再現性許容差は、「3.1.2 評価方法」で定めた評価基準をそれぞれ満足した。



図 66 は製品内部温度と、熱量の測定結果 $x_i$ とガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ の差 $y_i$ をプロットしたグラフである。このデータは、2022 年～2023 年の約 12 ヶ月の評価期間中に、試験機が置かれた周辺環境温度が大きく変化していたことを示すものであるが、熱量の測定結果 $x_i$ は温度変動の影響を受けることなく、校正と同一環境下で行われたガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ との差は、ほぼ一定値になっていたことが判る。

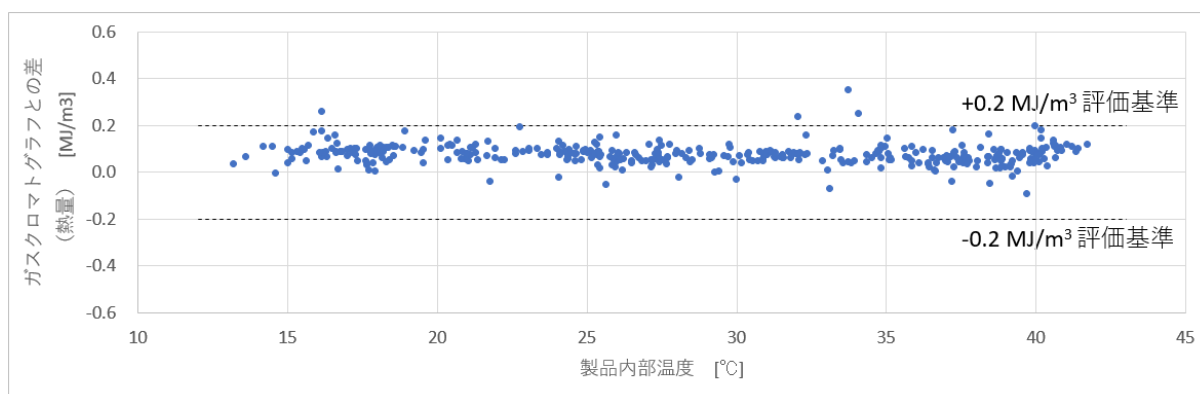


図66：製品内部温度と測定結果のガスクロマトグラフとの差

図 67 はセンサー部の絶対圧と、熱量の測定結果 $x_i$ とガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ の差 $y_i$ をプロットしたグラフである。

このデータは評価期間中の大気圧変化に伴い、試験機のセンサー部の圧力が変化していたことを示すものであるが、何れのデータも大気圧変化の影響を受けることなく、熱量の測定結果 $x_i$ は、校正と同一環境下で行われたガスクロマトグラフの分析結果 $Ref$ との差は、ほぼ一定値になっていたことが判る。

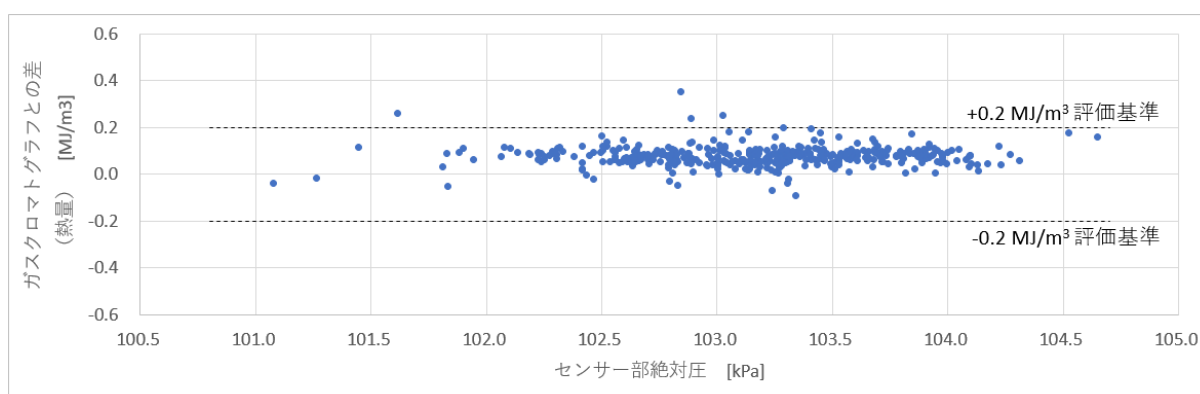


図67：センサー部の絶対圧と測定結果のガスクロマトグラフとの差

## (8) 実証試験⑤の結果

### (ア) 熱量の測定結果

純メタン、ブレンドガス、標準ガス⑤の熱量を、同一条件下で各 3 回ずつ測定した結果を、表 37 に示す。表の最右列に示す参照値は、JIS K2301：2022 で示された計算方法を用いて、それぞれのガスの組成から算出した理論値である。

表37：熱量の測定結果

	熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]						参照値 JIS K2301
	測定値			平均値	繰り返し 許容差	真度 (かたより)	
	1	2	3				
純 CH <sub>4</sub>	39.938	39.943	39.944	39.941	0.0053	+0.006	39.935
ブレンドガス	46.028	46.030	46.029	46.029	0.0016	-0.004	46.033
標準ガス⑤	45.355	45.354	45.354	45.354	0.0009	-0.024	45.378

繰り返し許容差は、何れも評価基準の 0.2MJ/m<sup>3</sup> より低い値となった。また参照値との差を示す真度（かたより）も、評価基準の±0.2MJ/m<sup>3</sup> の範囲内の結果となった。

図 68 は表 37 に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータもグラフ中の示す傾き 1 の破線付近に描かれている。

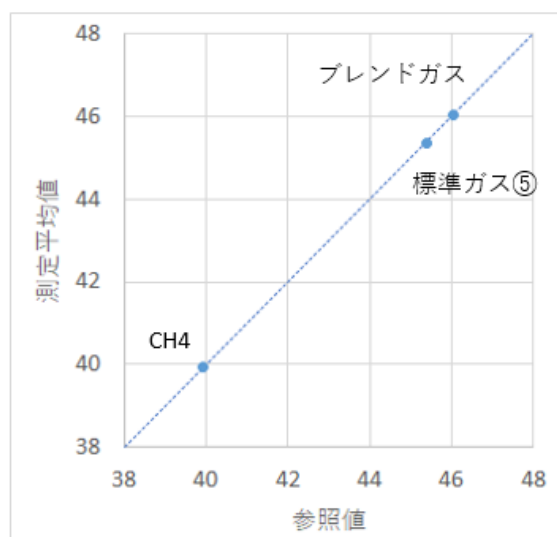


図68：熱量の測定結果 [MJ/m<sup>3</sup>]

図 69 は表 37 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

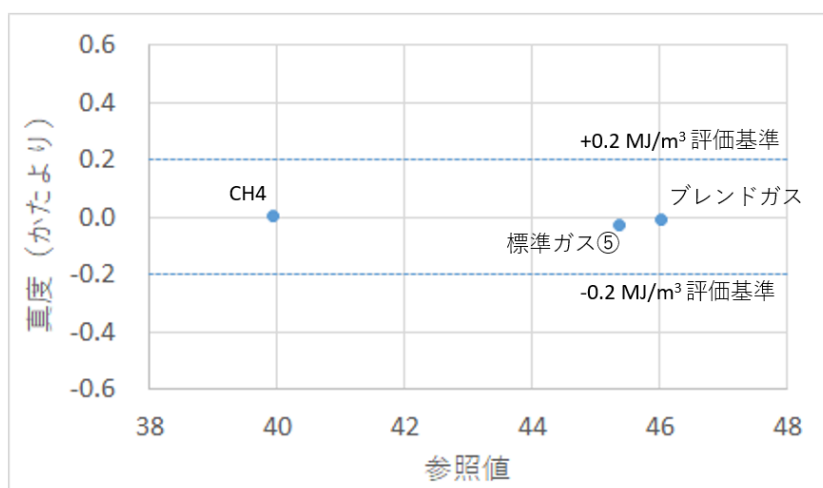


図69：熱量の測定結果（かたより）

(イ) 比重の測定結果

純メタン、ブレンドガス、標準ガス⑤の比重を、同一条件下で各3回ずつ測定した結果を表38に示す。表の最右列に示す参照値は、JIS K2301：2022で示された計算方法を用いて、それぞれのガスの組成から算出した理論値である。

表38：比重の測定結果

	比重			平均値	繰り返し許容差	真度 (かたより)	参照値 JIS K2301
	1	2	3				
純 CH4	0.555	0.555	0.555	0.555	0.001 未満	0.000	0.5553
ブレンドガス	0.654	0.654	0.654	0.654	0.001 未満	+0.001	0.6544
標準ガス⑤	0.644	0.644	0.644	0.644	0.001 未満	-0.0027	0.6467

繰り返し許容差は、何れも評価基準の0.003より低い値となった。また参照値との差を示す真度（かたより）も、評価基準の±0.003の範囲内の結果となった。

図70は表38に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータもグラフ中の示す傾き1の破線付近に描かれている。

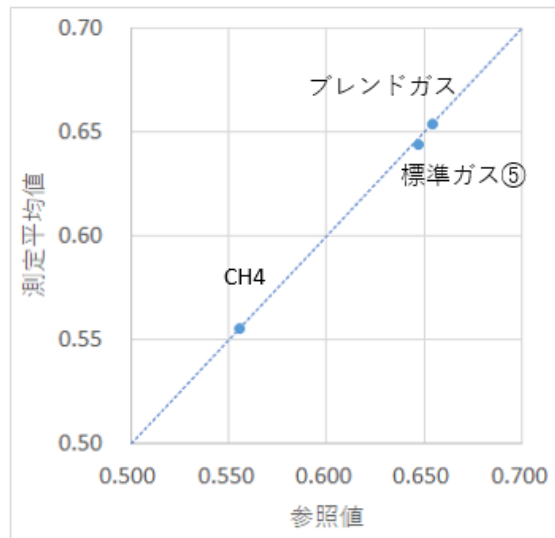


図70：比重の測定結果

図 71 は表 38 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

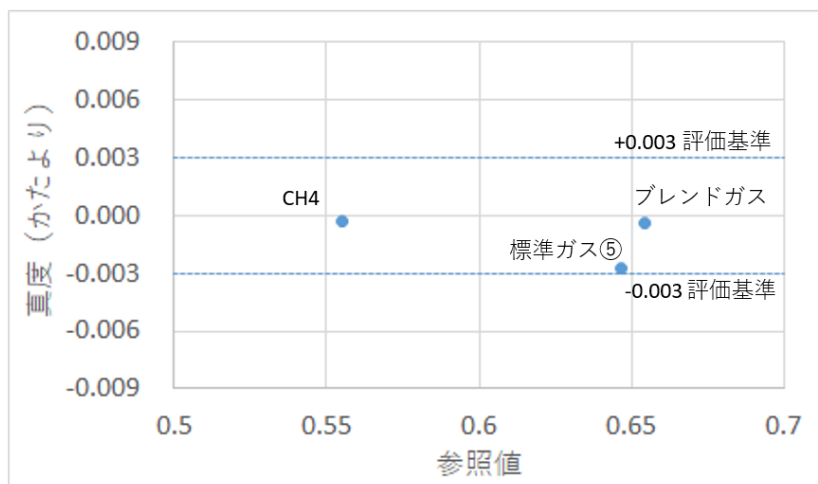


図71：比重の測定結果（かたより）

(ウ) ウォッベ指数の測定結果

純メタン、ブレンドガス、標準ガス⑤のウォッベ指数を同一条件下で各 3 回ずつ測定した結果を表 39 に示す。表の最右列に示す参照値は、告示「ガスの熱量及び燃焼性の測定方法を定める件」（昭和 45 年通商産業省告示第 634 号）で示された計算方法を用いて、それぞれのガスの組成から算出した理論値である。

表 39 : ウォッベ指数の測定結果

ウォッベ指数							
	測定値			平均値	繰り返し許容差	真度 (かたより)	参照値
	1	2	3				
純 CH <sub>4</sub>	53.60	53.61	53.61	53.61	0.007	+0.01	53.60
ブレンドガス	56.91	56.91	56.91	56.91	0.01 未満	-0.05	56.96
標準ガス⑤	56.51	56.51	56.51	56.51	0.01 未満	+0.10	56.429

図 72 は表 39 に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータもグラフ中の示す傾き 1 の破線付近に描かれている。

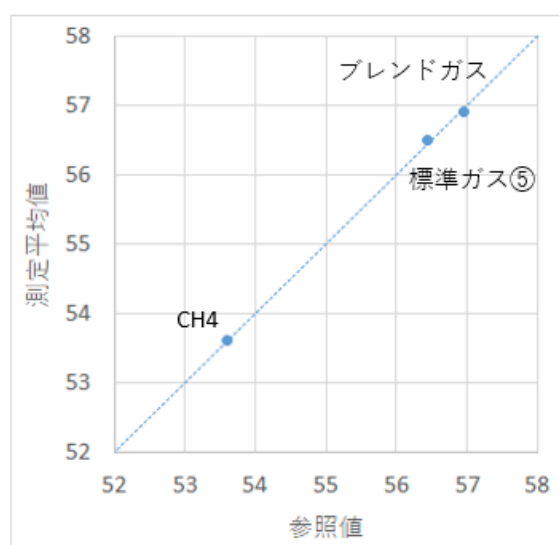


図 72 : ウォッベ指数の測定結果

図 73 は表 39 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

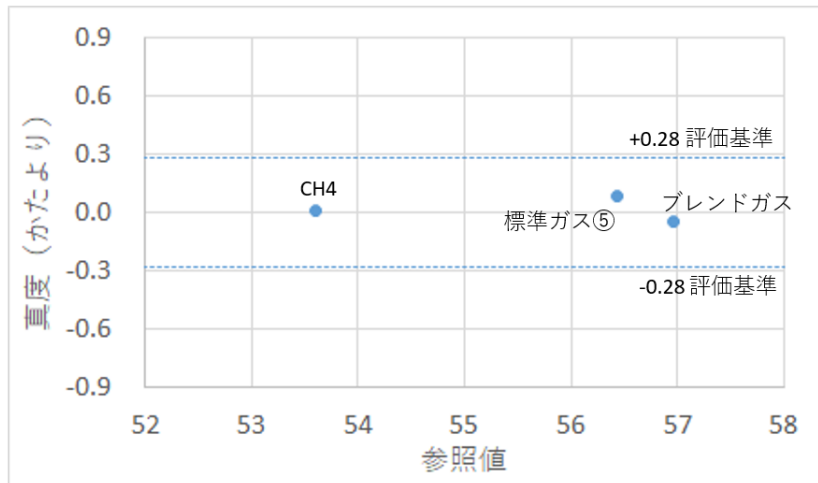


図73：ウォッベ指数の測定結果（かたより）

(工) 燃焼速度の測定結果

純メタン、ブレンドガス、標準ガス⑤の燃焼速度を、同一条件下で各 3 回ずつ測定した結果を、表 40 に示す。表の最右列に示す参照値は、告示「ガスの熱量及び燃焼性の測定方法を定める件」（昭和 45 年通商産業省告示第 634 号）で示された計算方法を用いて、それぞれのガスの組成から算出した理論値である。

表40：燃焼速度の測定結果

	燃焼速度						参照値
	測定値			平均値	繰り返し許容差	真度 (かたより)	
	1	2	3				
純 CH4	36.0	36.0	36.0	36.0	0.1 未満	0.0	36.00
ブレンドガス	37.2	37.2	37.2	37.2	0.1 未満	-0.2	37.40
標準ガス⑤	37.1	37.1	37.1	37.1	0.1 未満	+0.1	37.01

図 74 は表 40 に示した参照値と、測定結果の平均値の関係をプロットしたグラフである。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータもグラフ中の示す傾き 1 の破線付近に描かれている。

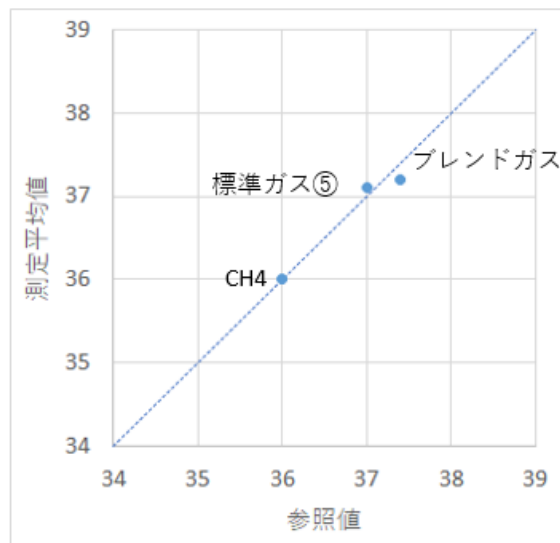


図74： 燃焼速度の測定結果

図 75 は表 40 に示した参照値と、真度（かたより）の関係をプロットしたグラフである。グラフに描かれている 2 本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度（かたより）の評価基準である。純メタン、ブレンドガス、標準ガスのいずれのデータも評価基準を満たしていることが判る。

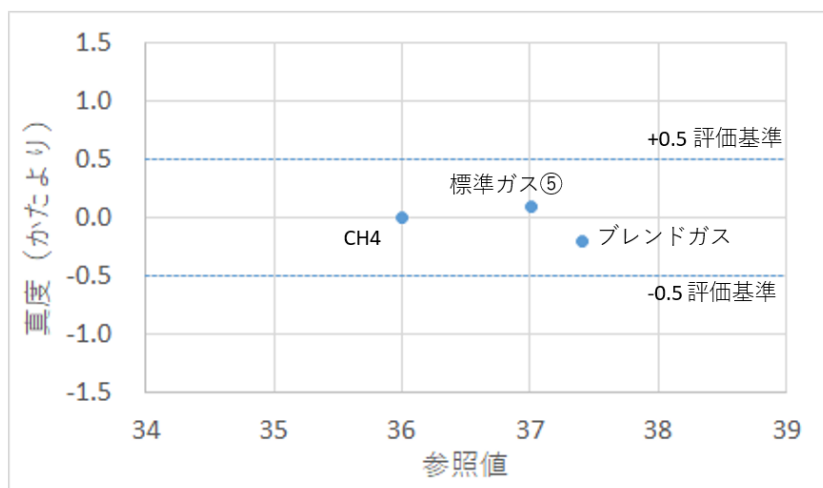


図75： 燃焼速度の測定結果（かたより）

### (オ) 応答速度

この実証試験⑤の中では、本技術の応答速度の速さについても評価を行った。

図 76 は実証試験⑤の中で行われた、測定ガスを純メタン（計算熱量  $39.935\text{MJ/m}^3$ ）から、ブレンドガス（計算熱量  $46.033\text{MJ/m}^3$ ）に切替えた時の、熱量測定結果の変化の様子を示している。

図 77 は図 76 の赤色破線枠で示す部分を拡大したグラフである。

出力に変化が現れてから約 2 秒で 90% 応答に達し、10 秒後には 98% 応答である  $45.91\text{MJ/m}^3$  を超えている様子がわかる。

今回の技術実証では評価対象になってはいないが、この試験で示した応答速度の速さも、本技術の特徴の一つである。

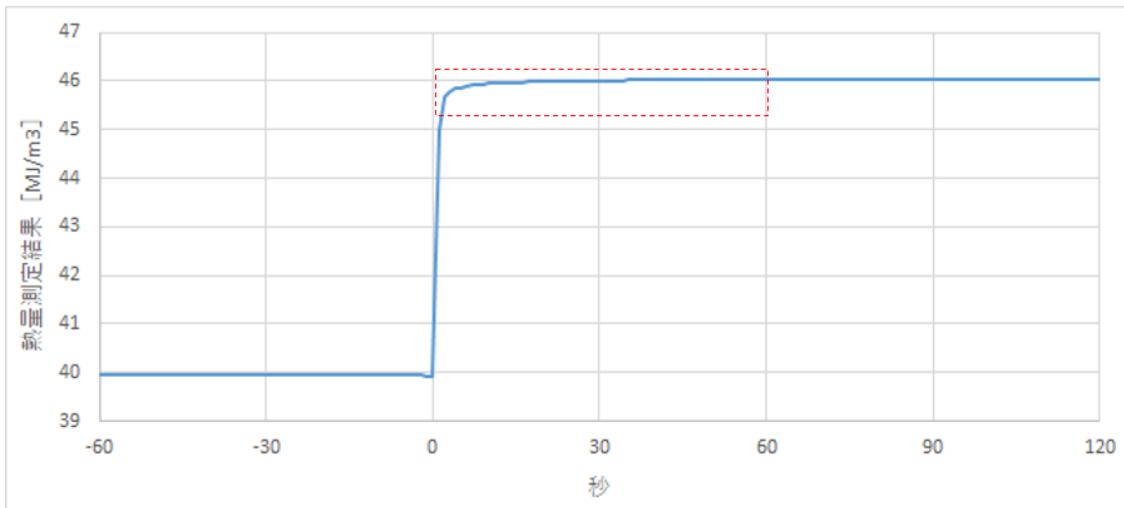


図76：純CH<sub>4</sub> ⇒ ブレンドガス 切り替え時の応答速度

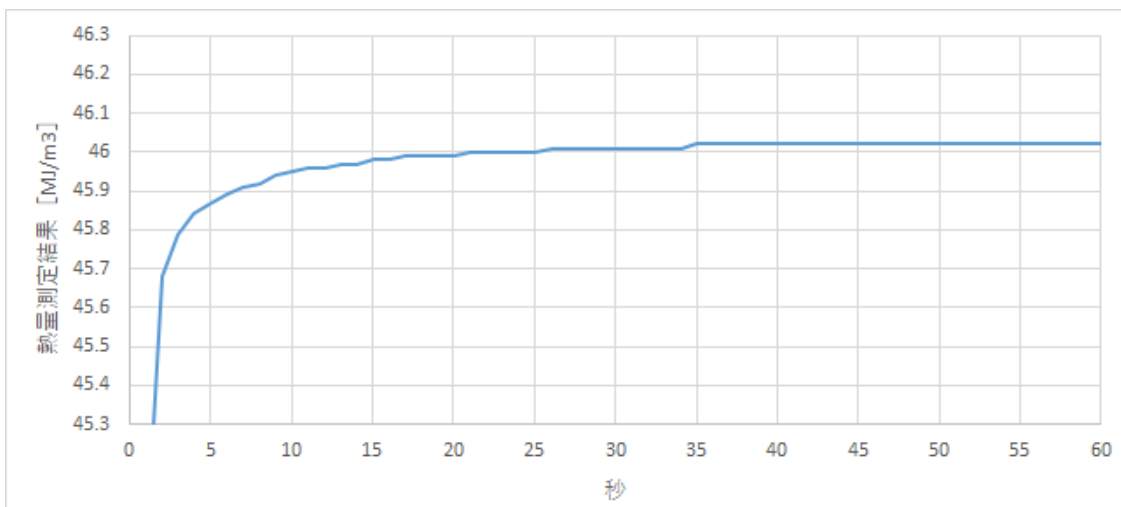


図77：純CH<sub>4</sub> ⇒ ブレンドガス 切り替え時の応答速度（拡大図）



(カ) 校正時に用いるガスの製造方法

独自に開発したガスブレンダーを用いて、メタン、エタン、プロパンを体積比 85 : 10 : 5 となるように 4 回 調合し、この混合ガスの熱量を本技術で測定した。結果を表 41 に示す。

表41：ガスブレンダーで調合したガスの測定結果

熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]						
	測定値			平均値	誤差	参照値 JIS K2301
	1	2	3			
ブレンドガス 1	46.028	46.030	46.029	46.029	-0.004	46.033
ブレンドガス 2	46.022	46.023	46.021	46.022	-0.011	
ブレンドガス 3	46.030	46.033	----	46.032	-0.001	
ブレンドガス 4	46.035	46.035	----	46.035	+0.002	

注 1) ブレンドガス 3、4 のデータは、実証試験⑤とは別に 2024 年 2 月 2 日に調合、測定した結果である

注 2) ブレンダー及びプロパンガスポンペを 20～25℃の環境下で 2 時間以上馴染ませた時の結果である。

同じ条件で調合したガスの熱量の測定値は、高い精度で一致し、その平均値、及び標準偏差は以下のとおりであった。

平均 : 46.030 [MJ/m<sup>3</sup>]

標準偏差 : 0.0055 [MJ/m<sup>3</sup>]

かたより : 0.003 [MJ/m<sup>3</sup>]

(キ) 標準ガスの熱量の不安定性

現行のガスクロマトグラフによる法定測定では、標準ガスで校正を行ってから、測定対象ガスの組成を同一条件下で測定することが JIS K2301 : 2022 の中で求められている。

この実証試験⑤の中では、標準ガスの熱量の不安定性に関する評価も行った。

この調査は、標準ガスが充填されているボンベの保管条件によっては、法定測定の基準として用いる標準ガスの熱量が不安定になることを示すものである。

図 78 は表 42 に示す標準ガス⑥の熱量の測定結果である。ただしこの測定では、標準ガス⑥のボンベを 0℃近くまで冷やした状態から開始し、その後ボンベを温めながら熱量測定値の変化の様子を調査した。

図中に示す破線は、標準ガス⑥の組成から計算した理論熱量値を示している。熱量測定値の結果は、測定開始時のボンベ表面温度 0℃付近では、44.1MJ/m<sup>3</sup> 付近の低い値を示し、ボンベが温まるにつれて、徐々に増加して、最終的には理論熱量値近くまで上昇している様子が判る。

表42：標準ガス⑥

		[vol%]
メタン	CH4	( 85.0142 )
エタン	C2H6	4.97
プロパン	C3H8	4.97
ノルマルブタン	n-C4H10	0.502
イソブタン	i-C4H10	0.402
ノルマルペンタン	n-C5H12	0.101
イソペンタン	i-C5H12	0.151
ノルマルヘキサン	n-C6H14	0.0998
窒素	N2	2.00
二酸化炭素	CO2	1.79
熱量 [MJ/m <sup>3</sup> ]		44.299
比重 [空気=1]		0.6767
ウォッペ指数		53.851
燃焼速度 MCP		36.099

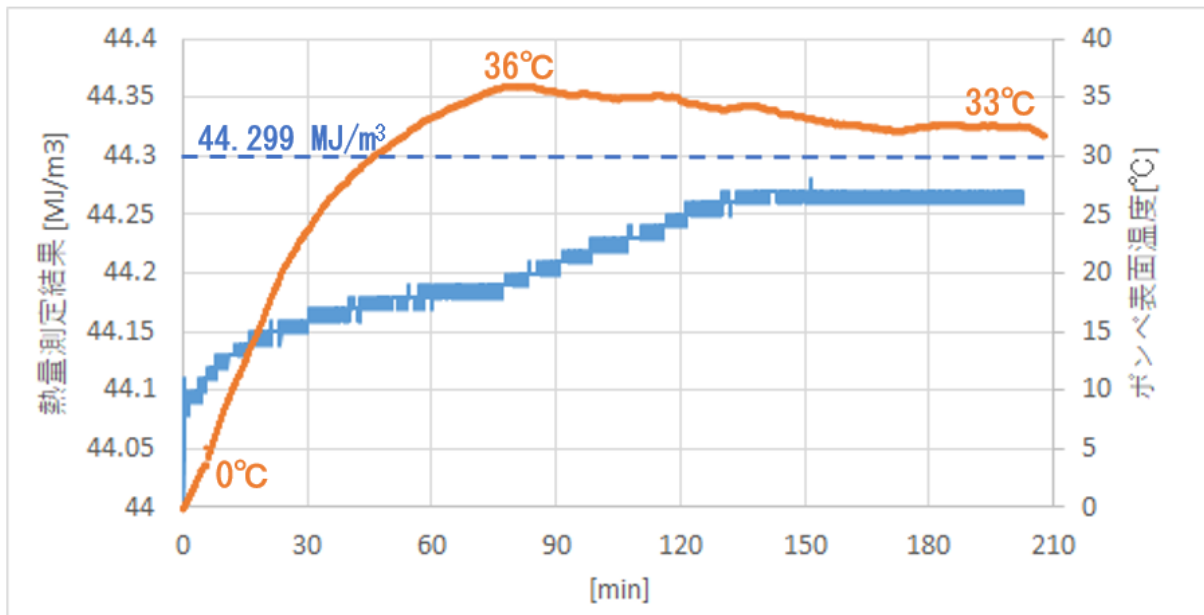


図78：標準ガス⑥の熱量の測定結果と、ポンペ表面温度の関係

これはポンペが冷えている状態のとき、標準ガス中に含まれるブタン、ペンタンなどの高分子成分がポンペの内壁に吸着することにより、ポンペから出てくるガスの熱量が低下し、その後ポンペが温められることによって吸着していた高分子成分が脱離して、ガスの熱量が上昇したものと考えられる。

ここで注視すべきは、ポンペ温度の上昇に対して、熱量上昇の追従が遅い点である。これはポンペの温度が上昇することで吸着していた高分子成分の脱離が促されても、その成分はポンペ内壁付近に留まり、拡散してポンペ内部に均一になるまでに時間を要したためと考える。

図 79 は、この調査を行っていた時の(5)式 第二項の部分を描いたものである。

(12)式 第二項は、 $N_2$ 、 $CO_2$  の濃度で変化するものであるが、この調査中、一定の値になっていたことが判る。

これは図 78 で観測されていた熱用変動が、 $N_2$ 、 $CO_2$  の濃度変動によるものではなく、炭化水素成分の変動によってもたらされていたことを示すものである。

$$H \approx H_{Opt} - \frac{H_{Opt} - H_{Sonic}}{1 - \alpha} \quad (12)$$

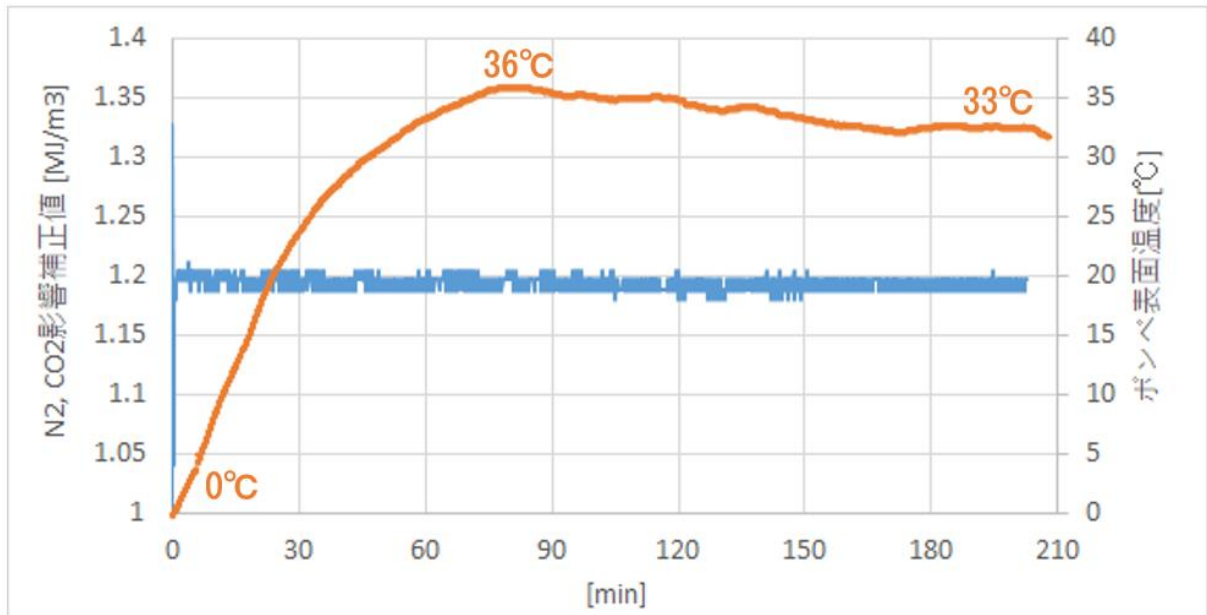


図79：N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>の影響補正項の変化の様子

標準ガス⑥の熱量、比重、燃焼速度の測定結果を表 43～45 に示す。表面温度が低い時には、熱量の測定値が低く、表面温度が高くなって計算熱量とほぼ一致する結果になっていることが判る。

表43：標準ガス⑥の熱量の測定結果

熱量		
ポンベ表面温度	測定値	参照値 JIS K2301
2℃	44.09	44.299 MJ/m <sup>3</sup>
33℃	44.26	

表44：標準ガス⑥の比重の測定結果

比重		
ポンベ表面温度	測定値	参照値 JIS K2301
2℃	0.672	0.6767
33℃	0.675	

表45：標準ガス⑥の燃焼速度の測定結果

MCP		
ポンベ表面温度	測定値	参照値
2℃	36.3	36.1
33℃	36.3	

現在、法令が引用している JIS K2301:2022 では、法定測定を行う際に標準ガスポンベで校正を行うことを求めているが、その標準ガスポンベの保管条件までは触れておらず、一般的にポンベは外気温と同じ屋外のポンベ庫に保管されていることが多い。

冬期の明け方に標準ガスポンベが冷やされることによって、ブタン、ペンタンなどの高分子成分がポンベの内壁に吸着し、基準としている標準ガスの熱量低下が発生することは起こり得るものとする。

### 3.2.2 評価・分析

#### (1) 真度（かたより）の結果についての分析

実証試験①～⑤の結果では、いずれの真度も「1.3.3 技術実証の概要」で定めた評価基準を満たしたが、測定結果は、参照値より高くなるケースや、逆に低くなるケースなどが発生していた。

下図 80～82 は実証試験①～⑤の熱量、ウォッベ指数、燃烧速度の測定値の真度（測定値の平均値と参照値の差）を示したグラフである。

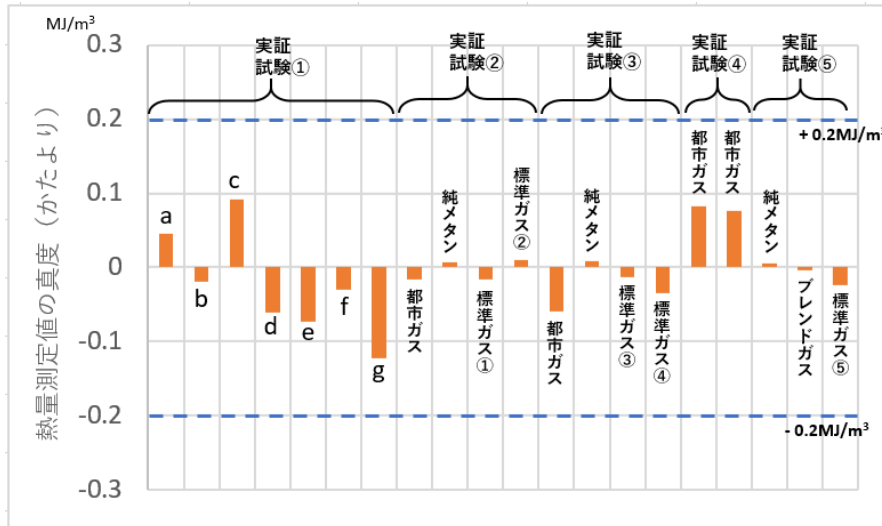


図80：熱量の測定値の真度（かたより）

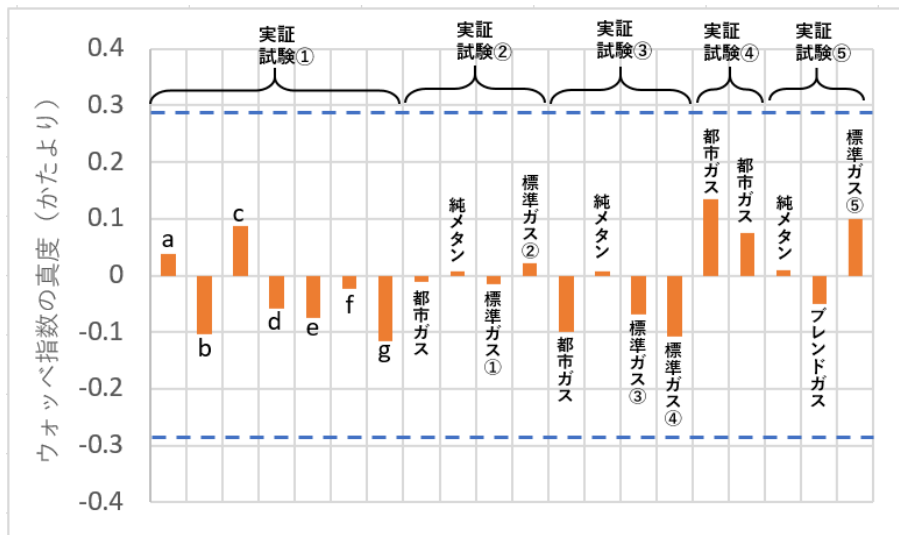


図81：ウォッベ指数の測定値の真度（かたより）

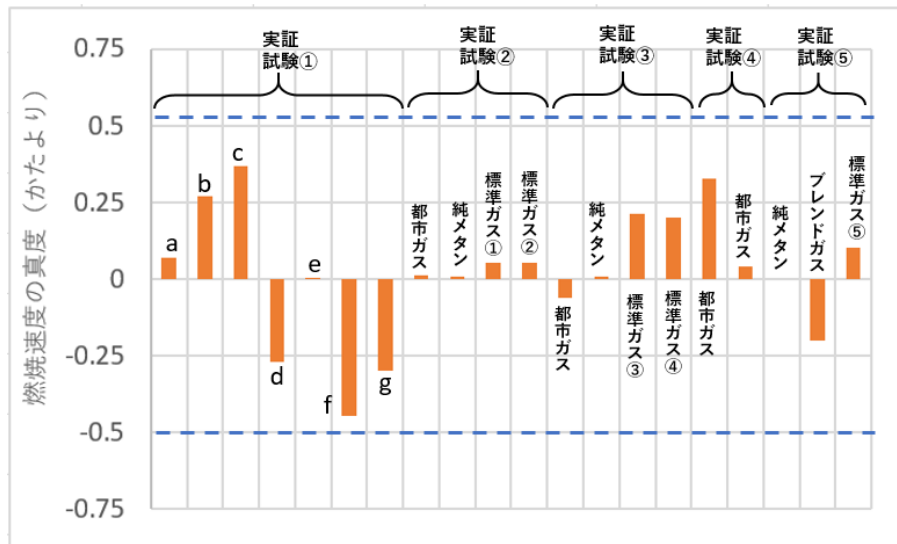


図82： 燃烧速度の測定値の真度（かたより）

真度が 0 にならない原因には、(A) 原理上の限界、(B) 校正方法による誤差、(C) 参照値の三つの要素が挙げられる。以下にそれぞれの要素の説明をする。

#### (A) 原理上の限界

本技術は、ガス中を伝わる光と音の速度を測定して、熱量、比重、ウォッペ指数、燃烧速度を演算で求める技術である。これら演算は、あくまで近似解を求めるものであり、完全に理論値と一致した解を出すことは出来ない。

熱量の演算(12)式は、高い精度の近似解を導くことができるが、実証試験①の a～g のガスに認められる熱量の真度（かたより）の大小は、この原理上の限界で発生している成分が支配的である。

燃烧速度の演算(28)式は、モデル化した天然ガスをベースにたてた近似式であるため、熱量や比重に比べて近似解の精度は劣るものとなる。そのため エタン成分、ブタン成分、ペンタン成分の増減が、直接真度に影響する。実証試験③の標準ガス③、④、実証試験④の都市ガス、実証試験⑤のブレンドガスの燃烧速度の真度（かたより）が大きくなっている理由は、このモデル化した天然ガスからのずれによるものである。

#### (B) 校正方法による誤差

「2.1.2 要素技術」で説明した校正方法の違いで発生する成分もある。実証試験④の試験機は、「2.1.2 要素技術」で説明した メタン、エタンの 2 成分混合ガスで校正をおこなっており、都市ガスに含まれる  $C_3H_8$ :プロパン,  $C_4H_{10}$ :ブタン,  $C_5H_{12}$ :ペンタンなどの高分子成分の影響を受けて、熱量の測定結果が高めになる傾向がある。図 80 において、実証試験④の都市ガスの熱量測定値の真度が高くなっている原因は、この校正方法の違いによるものである。

#### (C) 参照値の誤差

真度を求める際に使った参照値が持つ誤差も、真度が 0 にならない原因の一つである。ガスクロマトグラフが基準として用いる標準ガスの組成にも誤差があり、またガスクロマトグラフの分析結果にも誤差がある。これらの誤差源も少なからず真度に影響を及ぼしている。

本技術を用いた、熱量、比重、ウォッペ指数、燃烧速度の測定は、高いと真度の測定結果を提供するものであるが、参照値との差がゼロになることはない。そのため、その差を許容出来るものとして無視するか、その差分を測定結果から減算するオフセット調整などを行って、運用する必要が出てくる。

## (2) 再現性許容差の結果についての分析

実証試験①～⑤の熱量測定結果に対する、繰り返し許容差と再現性許容差の結果を図 83 に示す。実証試験①と⑤の繰り返し許容差は一樣に十分低い値となったが、実証試験②③④の再現性許容差については、バラツキの大きい結果になっており、とくに都市ガスの測定結果に対する再現性許容差が大きくなっている様子が分かる。

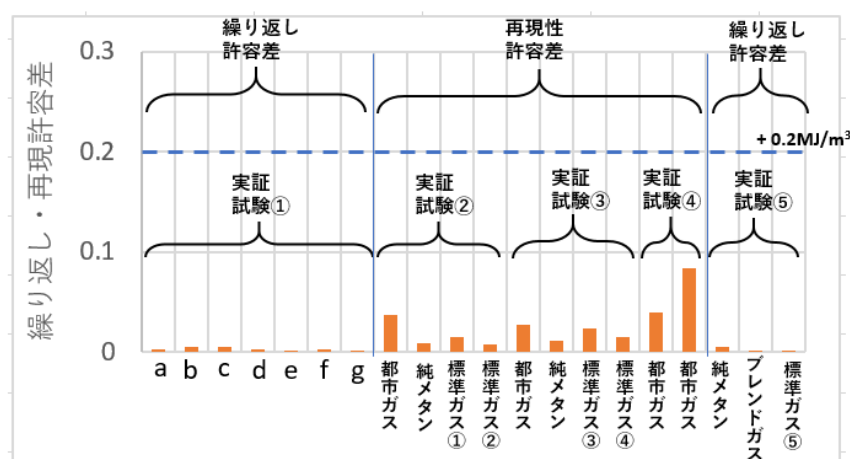


図83：実証試験①～⑤の繰り返し許容差と再現性許容差

この評価では本技術による熱量の測定結果と、ガスクロマトグラフによる分析結果との差から再現性許容差を求めたが、それぞれの測定結果には時間的な差異があり、それぞれが測定したガスに時間的な不一致が発生していたことが原因になっている。

特に実証試験④の C 社 C1 工場の試験では、LNG 気化ガスと LPG を混合するガスミキサーの下流からガスを採取しているため、ガスミキサーより下流の均質に混ざりきっていないガスの測定を行っていることが原因で再現性許容差が大きくなったのである。



### (3) 総合評価

実証試験①～⑤で得られた、各種ガスの熱量、ウォッペ指数、燃焼速度の全測定結果をまとめたグラフを図 84～89 に示す。

これらのグラフの横軸は、テストガスの組成、あるいはガスクロマトグラフで明らかにした都市ガスの組成に基づいて、理論計算で求めた熱量、ウォッペ指数、燃焼速度の参照値をそれぞれ示し、縦軸は、本技術による熱量、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果をそれぞれ示している。

各グラフ中の赤色の印は実証試験①で行った認証標準ガス物質 a～g の測定結果を、緑色の印は、実証試験②③⑤で行った標準ガス①～⑤の測定結果、および純メタン、ブレンドガスの測定結果を、それぞれ表している。

また、各グラフ中の黒色の印は実証試験②で行った都市ガス(LNG+プロパン)の測定結果を、灰色の印は実証試験③で行った都市ガス(天然ガス)の測定結果を、橙色の印はB社B1工場での都市ガス(LNG+ブタン)の測定結果を、青色の印は、C社C1工場での都市ガス(LNG+プロパン)の測定結果をそれぞれ描いている。ただし都市ガスの測定結果はガスクロマトグラフとの差における95%信頼性区間内のデータで描いている。

各グラフ中に描かれている2本の破線は、「3.1.2 評価方法」で定めた真度(かたより)の評価基準を示している。

図 85 は図 84 の赤色破線枠 A で示す部分を、図 87 は図 86 の赤色破線枠 B で示す部分を、図 89 は図 88 の赤色破線枠 C で示す部分をそれぞれ拡大したグラフである。

各ガスの熱量、ウォッペ指数、燃焼速度の測定結果は、いずれのデータも評価基準を満足していることがわかる。

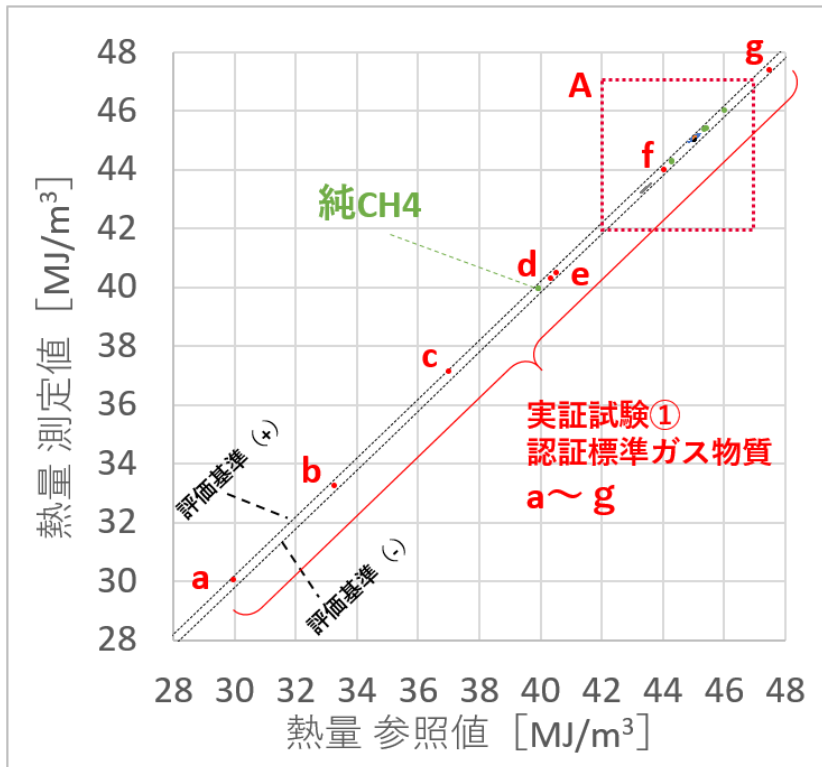


図84：測定結果と参照値（熱量）

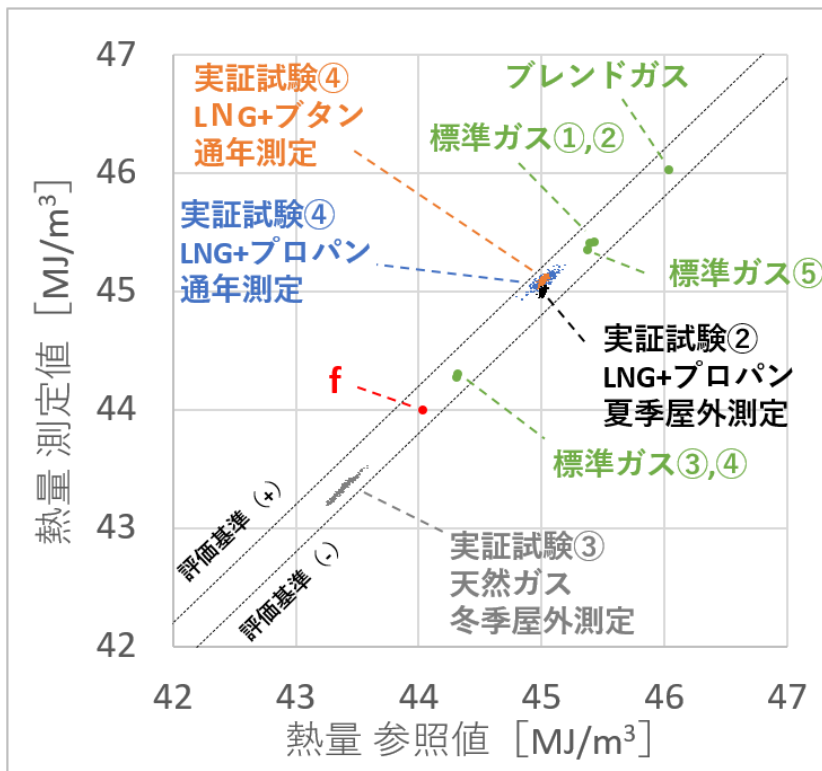


図85：測定結果と参照値（熱量，A部拡大）

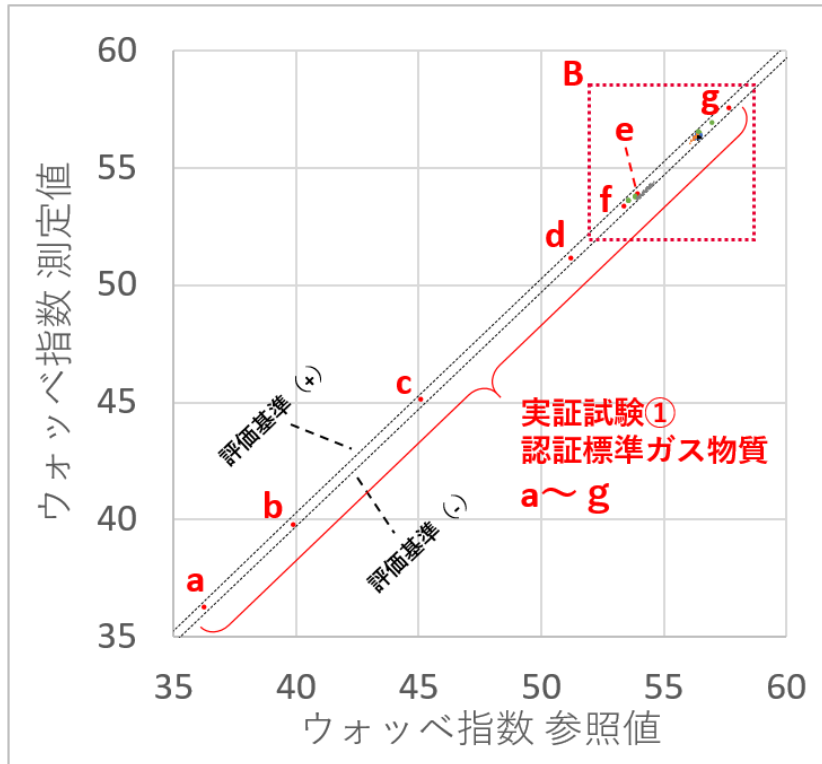


図86：測定結果と参照値（ウォッベ指数）

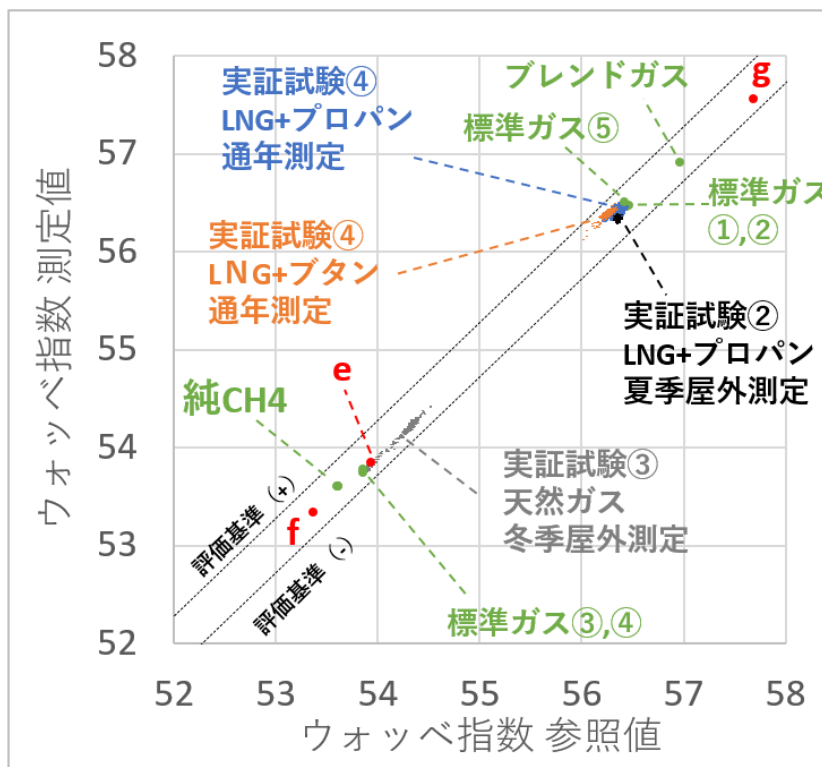


図 87：測定結果と参照値（ウォッベ指数, B部拡大）

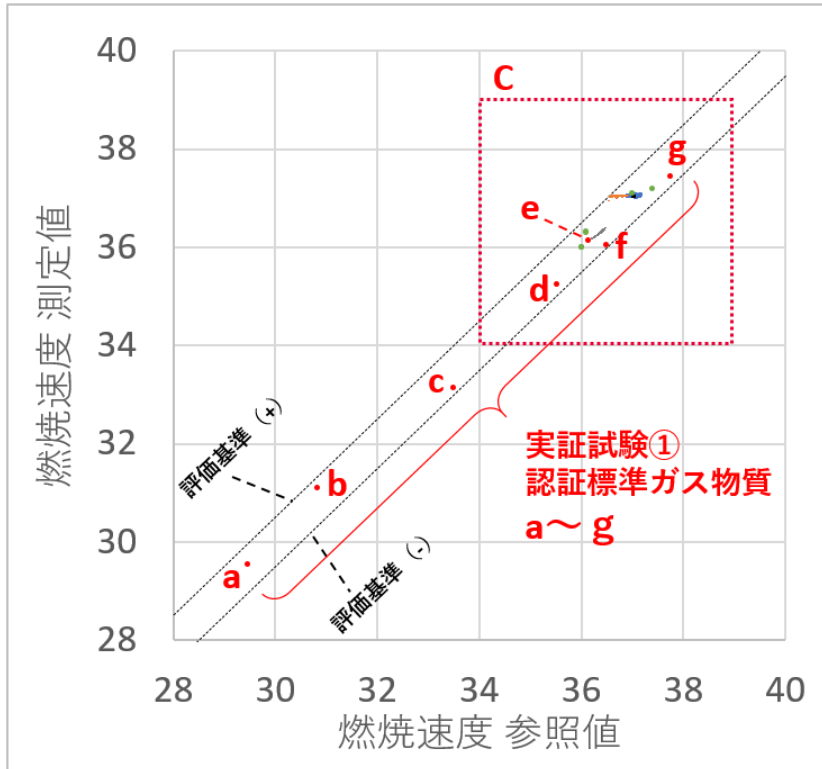


図88：測定結果と参照値（燃焼速度）

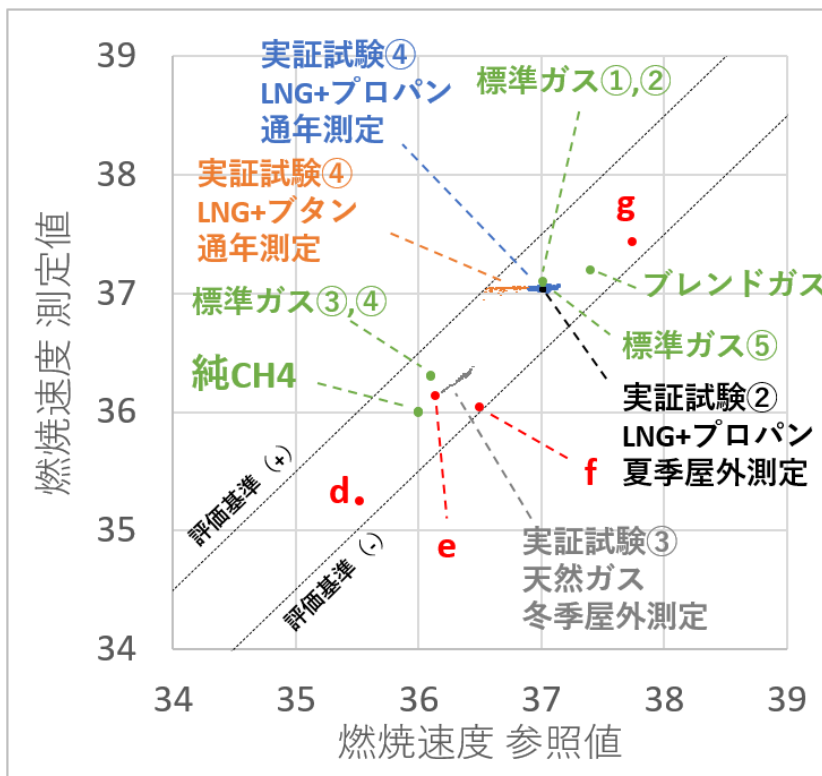


図 89：測定結果と参照値（燃焼速度、C部拡大）

実証試験①～⑤の結果を踏まえ、本技術実証で求められていた、下記【ア】～【エ】の KPI（重要成果指標）に対する結果をまとめる。

【ア】 本技術が、現行のガスクロマトグラフ等によるガスの熱量、燃焼性（ウォッペ指数、燃焼速度）の測定と同等以上の精度で実施可能であるか

【イ】 本技術に用いているセンサー（屈折率センサー、音速センサー）等の経年劣化による、ガスの熱量、燃焼性（ウォッペ指数、燃焼速度）の取得情報の精度低下が考慮されているか

【ウ】 ガスの熱量、燃焼性の測定を行うガス事業者の実務である、ガスの熱量、燃焼性（ウォッペ指数、燃焼速度）の測定に対応する技術であるか

【エ】 ガスの熱量、燃焼性の測定を行うガス事業者にとって、技術導入が容易な、汎用性の高い技術であるか

「3.1.1 評価ポイント」で示した KPI、検証項目、実証試験①～⑤の関係を示した表 4 を再度掲載する。

表 4：KPI、検証項目、実証試験①～⑤の関係

KPI	【ア】		【イ】	【ウ】、【エ】	—
検証項目	繰り返し精度	再現精度 (再現条件)	期間検証 (経過月)	真度検証 (対象ガス)	その他 (校正ガス)
実証試験①	○	—	○ 9 ヵ月	○ (CRM)	○ (3 成分)
実証試験②	試験機 A —	○ (夏季屋外)	○ 4 ヵ月	○ (都市ガス)	○ (3 成分)
	試験機 B —	○ (屋内)	○ 4 ヵ月	○ (標準ガス他)	○ (3 成分)
実証試験③	試験機 A —	○ (冬季屋外)	○ 8 ヵ月	○ (都市ガス)	○ (3 成分)
	試験機 B —	○ (屋内)	○ 8 ヵ月	○ (標準ガス他)	○ (3 成分)
実証試験④	B 社 B 1 工場 —	○ (通年/温変大)	○ 79 ヵ月	○ (都市ガス)	○ (2 成分)
	C 社 C 1 工場 —	○ (通年/温変大)	○ 49 ヵ月	○ (都市ガス)	○ (2 成分)
実証試験⑤	○	—	○ 24 ヵ月	○ (標準ガス他)	○ (3 成分)

## 【ア】

実証試験①、⑤の繰り返し精度検証の結果より、本技術による熱量、比重、ウォッペ指数、燃烧速度の測定における繰り返し許容差が、「1.3.3 技術実証の概要」で定めた繰り返し精度の評価基準を満足することをしめした。この評価基準は、JIS K2301：2022の中でガスクロマトグラフに求められている分析許容差、乃至は、燃烧性の管理目的から検討して決めたものであり、この基準を満たしたことから、本技術が 現行のガスクロマトグラフ等によるガスの熱量、燃烧性（ウォッペ指数、燃烧速度）の測定を同等の精度で実施することが可能であると言える。

現行の法定測定用のガスクロマトグラフ等は、季節や設置場所の異なる条件下での測定における精度（再現精度）を求められていない。しかし実証試験②、③、④の結果より、本技術が季節や設置場所の異なる条件下での測定が可能で、その測定における精度（再現精度）が、繰り返し精度に求められる評価基準を満足することを実証した。これにより、本技術が、現行のガスの熱量、燃烧性（ウォッペ指数、燃烧速度）の測定をガスクロマトグラフ等と同等以上の精度（再現精度）で実施可能であることを示した。

## 【イ】

実証試験①～⑤は、何れもセンサー感度調整は評価試験機の製造時にのみ行い、その後、現場等でのセンサー感度調整を一切行わない条件で評価試験を行った。製造/調整から 4 ヶ月後～79 ヶ月後における、本技術による熱量、比重、ウォッペ指数、燃烧速度の測定に対する、繰り返し精度、再現精度、真度の評価は、何れも評価基準を満足しており、長期にわたり精度が低下することなく測定ができることを示した。

## 【ウ】

実証試験①～⑤の真度評価試験で、組成が異なり、且つ、組成の明らかな複数のガスの、熱量、比重、ウォッペ指数、燃烧速度を本技術で測定し、ガスの組成から計算で求められる理論値を参照値としたときの、測定結果と参照値の差（かたより）を評価し、その結果が評価基準を満足することを示した。この結果より、本技術の測定方法が熱量、比重、ウォッペ指数、燃烧速度の正確な値を与える能力を有することを示した。

## 【エ】

本技術は、既に多くのガス事業者で熱量監視や熱量制御の目的で使用されており、その事実からガス事業者にとって技術導入が容易なものであると言える。

また本技術の導入、運用、保守に係るコストで比較しても、一般的なガスクロマトグラフのコストより低く抑えることができ（表 46 参照）、ガス事業者にとって導入が容易なものであると言える。

また本技術が、法定測定で求められる熱量、ウォッペ指数、燃烧速度を全て測定できることを示し、本技術が汎用性の高い技術であることを示した。

表 46：技術導入に要するコスト（当社調べ）

	初期購入費	ポンベ	消耗部品	メンテナンス費
ガスクロマトグラフ	～1000 万円	He 10L ポンベ 3 万円 x 12 本/年 標準ガスポンベ 40L 16 万円 x 1 本/年	20 万円～ 50 万円/年	50 万円/年
本技術	～450 万円	CH <sub>4</sub> 50L ポンベ 10 万円 x 1 本/年 標準ガスポンベ 10L 11 万円 x 1 本/年	なし	25 万円/年

### 3.2.3 有識者の見解、及び今後の運用について

#### (1) 有識者の見解

本技術実証の結果について、有識者より専門家としての立場からフィードバックを受けた。

#### (2) 今後の運用について

本技術実証では、校正を行うことなく長期間にわたって、高い精度での測定が行える事を示したが、この結果は、保守点検の必要性/重要性を否定するものではない。

本技術は、センサーの感度低下等が発生し難い原理及び構造となっているが、機器の破損が無く、全ての機能が健全に動作していることを確認するための保守点検は必ず必要になってくる。

本技術による熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度の測定値の、高い繰り返し精度、再現精度、真度は確認されたが、この技術は近似解を求めるものであるため、真度のかたより（測定結果-参照値）の差が零になるものではない。

このかたよりが発生する原因は、本技術の正確さの問題にだけに依存するものではなく、参照値自体が持つ不確かさによるもの含まれる。それでも参照値が、業界や JIS の合意値として扱われる場合は、本技術による測定結果を参照値に合わせる必要性が出てくる。

今後、本技術を用いてガスの熱量、比重、ウォッペ指数、燃焼速度などの法定測定を行うようにするためには、機器の健全性の確認方法、参照値との合わせ込み（オフセット調整）の方法、その頻度等について、関係省庁、業界団体と協議を進める必要がある。

## 用語集

	用語	定義・解説
1	ウォッベ指数	燃料ガスの燃焼性を示す指標の一つで、ノズルからの噴出熱量を示す指数。熱量を比重の平方根で割った値を用いる。
2	燃焼速度	ガスが燃焼する際の火炎の伝搬を示す値。 未燃のガスが火炎面に対して垂直に入る速度で、空気との混合比と最大となる速度。
3	ユンカーズ式熱量計	ガスの熱量を測定する方法。試料ガスを空気とともに完全燃焼させ、燃焼で発生した熱を全て水に吸収させて、水の温度上昇量から試料ガスの総発熱量を求めるもの。
4	ブンゼンシリング法	ガスの比重を測定する方法。温度と圧力が調整された一定量の試料ガスが微細孔から流出する時間を計測し、同じ条件での空気を流出させた時に要した時間との比から比重を算出するもの。
5	比重瓶法	ガスの比重を測定する方法。質量が既知の同一の比重瓶に試料ガス、乾燥空気を温度と圧力を調整してそれぞれ充填し、秤量して比重を求めるもの。
6	ガスクロマトグラフ	測定ガスをカラムとキャリアガスを用いて成分別に分離して、成分の同定や成分量を分析する装置の呼称。 本報告書では特に JIS K2301 の要件を満たした燃料ガス・天然ガス用のガスクロマトグラフを意味する。
7	繰り返し精度	同一とみなせる試料を同一条件下で測定した結果の精度。
8	再現精度	異なる場所、異なる温度、異なる気圧など同一ではない条件下でした結果の精度。
9	真度	多数の測定結果の平均値と真の値または参照値との一致の程度。測定方法の正確な値を与える能力。
10	認証標準ガス物質 (CRM)	ISO/IEC17025 の認定を受けた工場で、分析機器の校正や、分析方法の評価のために、高い精度のガス組成で製造された 認証標準ガス物質。 CRM: Certified Reference Gas Material
11	絶対圧	絶対真空を 0 の基準とした圧力。