

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13771

研究課題名（和文）光学的手法に基づく新たな圧力計測システムの開発～広範囲を一台で高精度に計測～

研究課題名（英文）Development of pressure measurement system using optical method

研究代表者

武井 良憲（TAKEI, Yoshinori）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：00805145

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、気体の屈折率を計測するために、ファブリ・ペロ共振器を用いた光学系を立ち上げた。また、恒温水を用いて真空チャンバ内の温度変動を制御した。さらに、重錘形圧力天びんを用いてチャンバ内の圧力を安定化した。それらの要素技術を統合して、精確に圧力の相対値を計測できる光学式圧力計を開発した。今後は、圧力の絶対値を計測できるように、光学式圧力計を発展させる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧力は、長さとの組み合わせで量である。一方で、実気体の状態方程式とローレンツ・ローレンスの式より、屈折率と熱力学温度とビリアル係数や分極率といった物理定数から求めることもできる。光学的に屈折率を計測することで、既存の圧力標準や圧力計に比べて、一台で広い範囲を高精度に計測できる。本手法は、将来的には、逆に圧力から熱力学温度や物理定数を計測することも可能であり、広範な科学技術分野の発展に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Pressure is the assembly unit of length and force. On the other hand, from the equations of state of real gases and the Lorentz-Lorenz equation, pressure can be evaluated from gas refractive index, thermodynamic temperature and the physical constants such as virial coefficient and gas polarizability. The optical pressure measurement system using Fabry Perot cavity can measure a wide range pressure with high accuracy compared with a conventional pressure standard or pressure gauges. This system can also measure thermodynamic temperature and physical constants from pressure. In the future, the study results will contribute to the development of a wide range of science and technology fields.

研究分野：精密工学、圧力標準、真空科学

キーワード：圧力標準 ファブリペロ 屈折率 熱力学温度 真空 光学式圧力計

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

圧力は、理想気体とみなせる条件下では式(1)の状態方程式より、密度 ρ ・ボルツマン定数 k_B ・温度 T から導ける。また、気体屈折率 n は、式(2)に示すように気体の分極率 α と磁化率 χ および気体の密度 ρ で決まる。磁化率 χ は分極率 α より 5 桁小さい値であるため圧力 p の計測精度に影響しない。分極率 α は、気体がヘリウムの場合、理論的に第一原理計算から算出可能であると近年発表されている。そのため式(3)から、気体屈折率と温度を測定することにより圧力を求めることが出来る。

$$p = \frac{n_{\text{mol}}RT}{V} = \rho k_B T \quad \dots\dots \text{式(1)}$$

$$n = 1 + 2\pi(\alpha + \chi)\rho \quad \dots\dots \text{式(2)}$$

$$p = \frac{n-1}{2\pi(\alpha + \chi)} k_B T \quad \dots\dots \text{式(3)}$$

2. 研究の目的

本研究では、100 kPa 付近の圧力を対象に、レーザを用いた高精度な圧力計測技術の研究開発を行う。屈折率計測手法の概要を図 1 に示す。FP 共振器の共振周波数 ν_{FP} は、整数 m を用いて式(4)で表される。FP 共振器内を真空にした時の共振周波数 ν_0 とヘリウムを充填した時の共振周波数 ν_1 から、式(5)に示すように、気体屈折率を原理的に計測可能である。

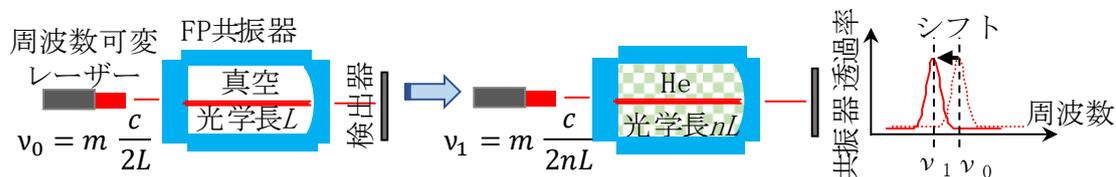


図 1. 屈折率 n の計測手法の概要

$$\nu_{\text{FP}} = m \frac{c}{nL} \quad \dots\dots \text{式(4)}$$

$$n - 1 = \frac{\nu_0 - \nu_1}{\nu_1} \quad \dots\dots \text{式(5)}$$

3. 研究の方法

下記の①②③の要素技術を確立する。その後、④の手法により計測の不確かさを評価し圧力の補間装置を確立する。

① ファブリ・ペロ干渉計による屈折率計測システムの構築

光源には波長約 633 nm の外部共振型半導体レーザを利用する。Pound-Drever-Hall 法を用いてレーザ周波数を FP 共振器の共振周波数にロックする。共振したレーザ周波数の絶対値は、ヨウ素安定化 He-Ne レーザとのビート周波数から決定する。

② 気体の温度の安定化・均一化

実験は恒温室内で行い、厚肉チャンバで覆うことで温度の安定化を図る。また、チャンバ内の気体温度の均一化のために、チャンバの材質は熱伝導率の高いアルミとする。

③ 信頼性の高い圧力発生・計測システムの構築

気圧は常に変動している。チャンバ内に気体を封じ切った場合でも、シャルルの法則から、温度変化に応じて圧力も変化する。目標精度と同程度の安定な圧力場を発生させ評価するために、重錘形圧力天びんおよび高精度デジタル圧力計を使用する。

④ 屈折率の変化量と圧力計の計測値の変化量の比較評価

屈折率と圧力は式(3)のように比例関係にある。しかし、ファブリペロ共振器のスペーサの体積圧縮率など複数の課題のため非直線性が含まれてしまう。本実験結果からそれらの影響を見積もり、今後の研究開発に発展させる。

⑤ 光学式圧力計測システムの応用の検討

4. 研究成果

当初の計画通りに、①②③の要素技術を立ち上げた。①～⑤に関して、図を踏まえて、簡潔に記述する。

- ① 光学系を図3に示す。低熱膨張材料のスペーサと誘電体多層膜からなるファブリペロ共振器を利用した。屈折率をレーザの光周波数から測定できる系を構築した。
- ② 上述のように温調系を構築し、温度変化(peak-to-peak)を24時間で0.003 °C (3 mK)に抑えることに成功した。
- ③ 高精度圧力計や重錘形圧力天びんを組み込んだ。
- ④ 図4に示す結果が得られた。標準偏差と非直線性はそれぞれ0.1 Pa (約1 ppm) 1 Pa (約10 ppm)であり、現開発状況においては良好な結果が得られた。なお、完璧でない原因は、温度計測やガス純度であると考えている。今後、それらの高精度計測にも取り組む。
- ⑤ 本成果に加えて、本研究期間内に、図5に示す成果も得られた。開発した光学式圧力計は、離散的な圧力点だけでなく、連続的な圧力範囲も計測可能である。将来的には、圧力計の連続的な計測感度の校正に応用できる。

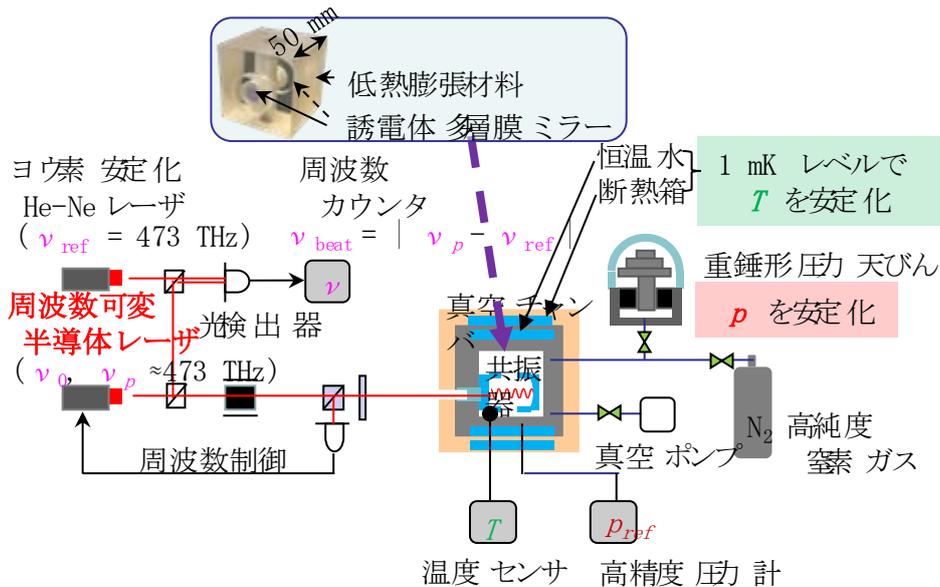


図3. 光学式圧力計測システムの概略

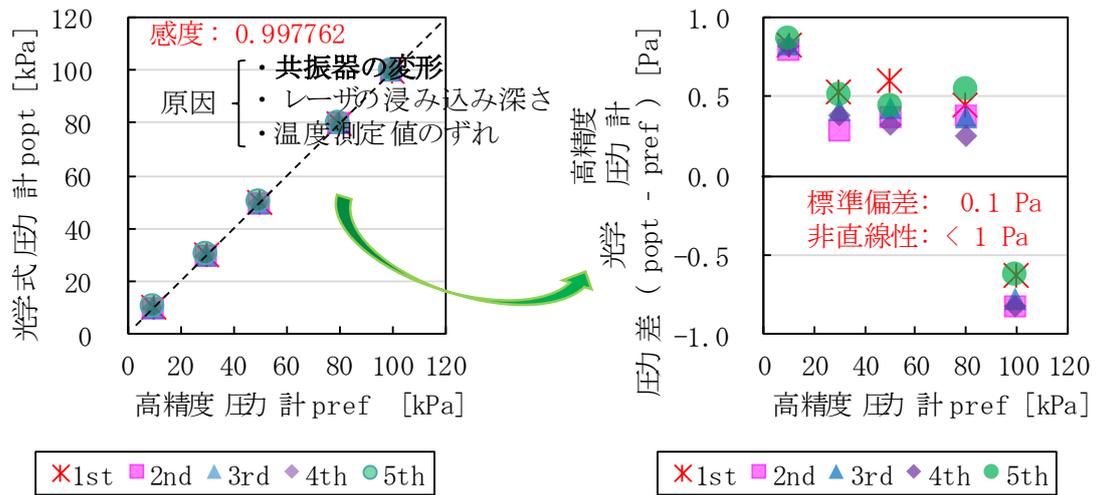


図 4. 開発した光学式圧力計測システムを用いて「離散的な圧力点」を計測した結果

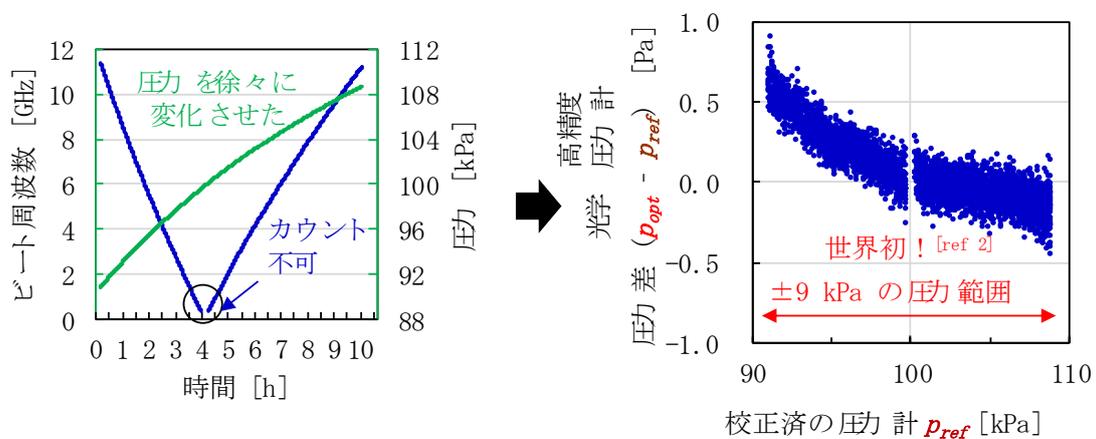


図 5. 開発した光学式圧力計測システムを用いて「離散的な圧力点」を計測した結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件(うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件)

1. 著者名 Youichi Bitou, Yoshinori Takei, Souichi Telada,	4. 巻 Volume 54
2. 論文標題 Accurate and wide-range radius of curvature measurement directly linked to a time standard using a FabryPerot cavity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 Pages 149-153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.05.011 .	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yoshinori Takei, Kenta Arai, Hajime Yoshida, Youichi Bitou, Souichi Telada, and Tokihiko Kobata.
2. 発表標題 Development of a pressure measurement system using an Optical method
3. 学会等名 Asia Pacific Metrology Program(APMP) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武井 良憲、吉田 肇、新井 健太、寺田 聡一、尾藤 洋一、小島 時彦
2. 発表標題 屈折率の計測による真空域の圧力計測装置の開発
3. 学会等名 公益社団法人 日本表面真空学会 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshinori Takei, Kenta Arai, Hajime Yoshida, Youichi Bitou, Souichi Telada, and Tokihiko Kobata.
2. 発表標題 Development of a measurement system for pressures in vacuum regions using an optical method
3. 学会等名 65th AVS(American Vacuum Society) International Symposium and Exhibition. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武井 良憲、吉田 肇、新井 健太、寺田 聡一、尾藤 洋一、小島 時彦
2. 発表標題 圧力計測のためのファブリ・ペロ共振器を用いた屈折率計測システムの開発
3. 学会等名 公益社団法人 精密工学会 2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>科学研究費助成事業データベース https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000000805145/researchmap https://researchmap.jp/takei-yoshinori/</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考