

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02610

研究課題名(和文)光コム分光温度計によるSIの新定義に基づく温度標準の構築

研究課題名(英文) Construction of Temperature Standard Based on New Definition of SI by Optical Comb Thermometry

研究代表者

清水 祐公子 (Shimizu, Yukiko)

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・研究グループ長

研究者番号：30357222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、RDT法を高精度化することを目的とし研究を進めた。本手法は光コムの強度スペクトルを利用し温度を求めるため、スペクトル強度(縦軸)の高安定性が必須である。一方で光コムは、これまでスペクトル強度が長期的に安定していないという課題があった。今回、コサイン類似度という指標を導入することでコムの長期安定度を世界で初めて検証し、光コムを用いた熱力学温度の測定を支える最も重要な要素技術を確立した。長期的に安定している光周波数コムを使うことで、温度決定の標準偏差が  $N$  で減少していることが示された。現時点では、温度決定の際のモデル式によるフィッティングエラーは0.2 程度である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SI単位に基づいた温度は、熱力学の法則に従って決定される熱力学温度により測定されるべきである。しかし実用としては、1990年国際温度目盛(ITS-90)が利用されており、これは物質の凝固点など物性値に基づいて与えられている。しかし、2019年に熱力学温度の単位ケルビンは、ボルツマン定数を媒介とする定義に改定された。これにより、気体分子の熱平衡状態からボルツマン定数を介して熱力学温度を求められる本手法は、ケルビンの新定義に直結できることになる。そしてこの手法の高精度化は、ITS-90と熱力学温度の差異の検証につながり、さらにはITS-90を必要としない新定義に基づく温度標準として適用出来る。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a new thermodynamic temperature measurement method (Rotational-state Distribution Thermometry:RDT) based on absorption spectroscopy of gas molecules using dual comb spectroscopy. We have improved the accuracy of the RDT method. Since this method uses the intensity spectrum of an optical comb to determine temperature, high stability of the intensity spectrum is required. On the other hand, optical comb has a problem that its spectral intensity is not stable over a long period, and this problem has not been solved. In this study, the long-term stability of the comb was verified by introducing a parameter called "cosine similarity", which is applied for the first time. By analyzing this parameter, the most important elemental technology supporting the measurement of thermodynamic temperature using optical combs has been established. By using a long-term stable optical frequency comb, the standard deviation of the temperature determination was decreased by  $N$ .

研究分野：温度計測、光計測、レーザー計測、温度標準、量子エレクトロニクス

キーワード：気体温度計測 温度標準 熱力学温度 デュアルコム分光 光周波数コム 分子分光

1. 研究開始当初の背景

SI 単位に基づいた温度は本来、熱力学の法則に従って決定される熱力学温度により測定されるべきである。しかし実用としては、1990 年国際温度目盛 (ITS-90) が利用されており、これは物質の凝固点など物性値に基づいて与えられている。しかし、2019 年に熱力学温度の単位ケルビンは、ボルツマン定数を媒介とする定義に改定された。これにより、気体分子の熱平衡状態からボルツマン定数を介して熱力学温度を求められる本手法 (RDT 法) は、ケルビンの新定義に直結できることになる。そしてこの手法の高精度化は、ITS-90 と熱力学温度の差異の検証につながり、さらには ITS-90 を必要としない新定義に基づく温度標準として適用出来る。

2. 研究の目的

デュアルコム分光技術により高精度かつ高速性を兼ね備えた温度計測システムを確立し、2019 年に改定したケルビンの新定義に基づく熱力学温度を具現し、現行の国際温度目盛に代わる、新たな温度標準の構築を目指す。本手法は光コムの強度スペクトルを利用し温度を求めるため、高精度化にはスペクトル強度 (縦軸) が時間的に安定していることが必須である。コサイン類似度という指標を導入することで光コムのスペクトルの時間変動評価を検証することで、本手法の高精度化を目的とする。

3. 研究の方法

スペクトル強度の安定性評価の指標として次の式で表されるコサイン類似度を導入した。周波数  $\nu_i$  においてそれぞれ強度  $p_i$ ,  $q_i$  を持つスペクトルをベクトル  $\vec{p} = (p_1, p_2, p_3 \dots)$ 、 $\vec{q} = (q_1, q_2, q_3 \dots)$  とみなせば、コサイン類似度はベクトルのノルムで正規化した内積であり、(1) 式のように表すことができる。この方法を用いることで二つのスペクトルの類似度を定量的に評価できる。

$$\cos \theta = \frac{\vec{p} \cdot \vec{q}}{|\vec{p}| |\vec{q}|} \quad (1)$$

本研究では、はじめにモード同期ファイバーレーザーへの制御量を変えてスペクトル変化をコサイン類似度で評価し、それがスペクトル類似度を適切に示していることを示し、その後、これを経時的なスペクトル変化の評価に適用した。実験系の概略を図 1 に示す。光源として 1400 nm to 1700 nm 程度に広帯域化された 4 台の自作の光コム装置を用いた。本研究ではそれぞれのコムについてモード同期ファイバーレーザーの光を二つにわけ、片方のブランチで fCEO 信号および frep 信号を検出し、必要に応じてそれらを基準信号に位同期し、いわゆる位相安定化コムとした。fCEO 信号の位同期においては、制御信号をモード同期ファイバーレーザーの励起レーザーへの注入電流に帰還し、frep 信号の位同期においては制御信号をモード同期ファイバーレーザーの共振器長 (PZT、EOM、および温調で制御) に帰還した。光コム装置の出力は、デュアルコム分光を想定し、偏光子で直線偏光成分を切り出してから光スペアナでスペクトルを観察した。

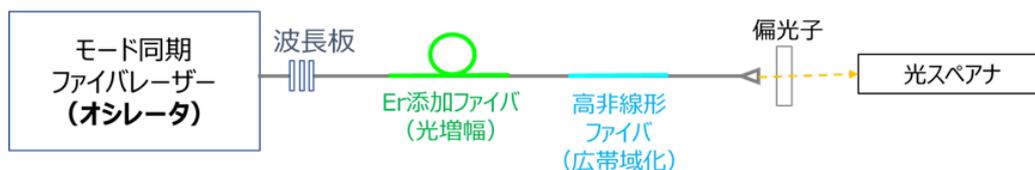


図 1 実験セットアップ

4. 研究成果

3 章で述べた実験系で光コムのスペクトルを取得し、そのスペクトルをコサイン類似度により評価した。まずはコムのいくつかのアクチュエータへの制御量 (モード同期ファイバーレーザーおよび光増幅器への励起パワー、モード同期ファイバーレーザー共振器の温度、共振器長) を変えて、光コムのスペクトルがどのように変化するかをコサイン類似度で評価した。こ

これは、スペクトル類似度の評価指標として妥当かどうかの評価でもある。次に、光コムへの帰還制御を行わず、フリーラン状態での光コムのスペクトル変化をコサイン類似度で評価した。最後に光コムの f<sub>rep</sub>、f<sub>CEO</sub> を帰還制御で安定化し、その状態での光コムのスペクトル変化を評価した。

二つの偏波保持光コムおよび二つの非偏波保持光コムについて、フリーラン時、および位相安定化時のスペクトル安定性の評価結果としては、偏波保持光コムと非偏波保持光コムの間に顕著なスペクトル安定性の差は観察できず、帰還制御の有無については、帰還制御されているときの方が、若干安定性が低く見えることがあった。

スペクトルが不安定だった例として、ある測定における偏波保持型コムの帰還制御時のスペクトル変動を図2に示す。併せて、このデータを取得する際、同時にアクチュエータ（オシレータ電流）の制御量をコサイン類似度に変換したのもも示す。変換結果は、実際のコサイン類似度と良く一致し、このスペクトル変化がオシレータ電流によるものであることが強く示唆された。同時にこの結果により、コサイン類似度によるスペクトルの時間変動評価の妥当性を確認することができた。

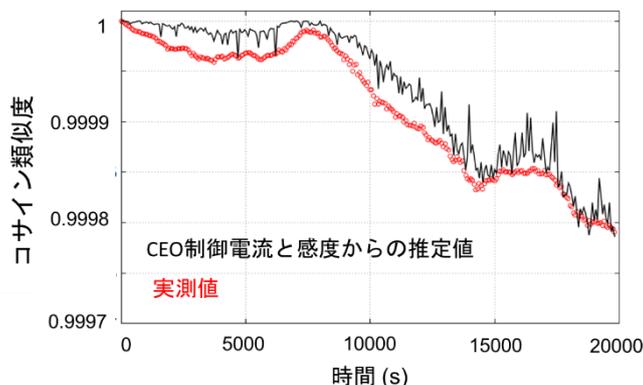


図2. 余弦類似度の実測値とCEO制御電流変化から計算される推定値の比較

コサイン類似度によるスペクトル評価の結果を基に長期安定化した光コムを用いて、初期的な熱力学温度の測定を行った。長期的に安定している光周波数コムを使うことで、温度決定の標準偏差が $\sqrt{N}$ で減少していることが示された（図3）。これにより、光周波数コムのスペクトル強度の安定性が測定の不確かさの抑制に寄与していることを確認することができた。現時点では、温度決定の際のモデル式によるフィッティングエラーは0.2 °C程度である。

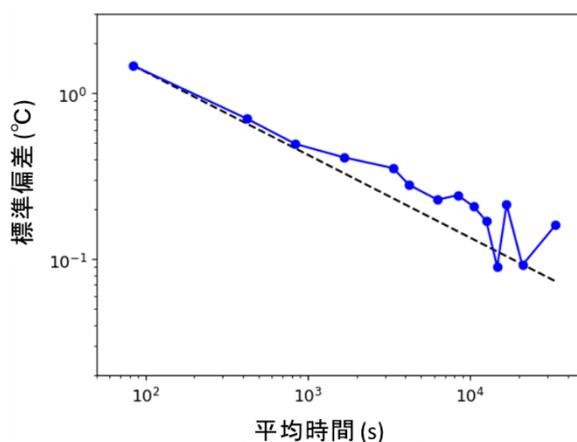


図3 温度決定の標準偏差

本研究により、光コムを用いた熱力学温度の測定を支える最も重要な要素技術を確立したと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 T. Irimatsugawa, Y. Shimizu, S. Okubo and H. Inaba	4. 巻 29
2. 論文標題 Cosine similarity for quantitatively evaluating the degree of change in optical frequency comb spectra	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OPTICS EXPRESS	6. 最初と最後の頁 35613-35622
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 清水祐公子、稲場肇、大久保章、入松川知也	4. 巻 75
2. 論文標題 光を用いた非接触・高精度な気体温度測定 - 分子の運動を新たな光源「光周波数コム」ではかる -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術	6. 最初と最後の頁 82-88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水祐公子、稲場肇、大久保章	4. 巻 60
2. 論文標題 デュアルコム分光による非接触かつ高精度な気体の温度計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 入松川 知也、清水 祐公子、大久保 章、柏木 謙、中村 圭佑、稲場 肇
2. 発表標題 コサイン類似度を用いた光コムのスペクトル安定性評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入松川 知也、清水 祐公子、大久保 章、柏木 謙、中村 圭佑、稲場 肇
2. 発表標題 全偏波保持デュアルコム分光のためのNALM型モード同期ファイバーレーザーの開発
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	入松川 知也  (Irimatsugawa Tomoya)  (00828056)	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   (82626)	
研究分担者	大久保 章  (Okubo Sho)  (30635800)	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・主任研究員   (82626)	
研究分担者	稲場 肇  (Inaba Hajime)  (70356492)	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・研究グループ長   (82626)	
研究分担者	中野 享  (Nakano Toru)  (20357643)	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・研究企画室長   (82626)	
研究分担者	浦野 千春  (Urano Chiharu)  (30356589)	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・研究グループ長   (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------