

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18915

研究課題名（和文）光コム制御レーザーを局部発振光とする熱放射ヘテロダイン検出による熱力学温度決定

研究課題名（英文）Thermodynamic temperature determination by thermal radiation heterodyne detection using an optical frequency comb

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、光周波数コムを用いて、インコヒーレント光をヘテロダイン検出する方法を開発することである。

ヘテロダイン検出の局発光として用いる光コムの強度安定化が必須であるため、偏波保持型の光コムを製作した。次にインコヒーレント光とレーザー光とのビート信号を得るために、ファイバー光学系で局発光と信号光を結合させる光学系干渉計を設計・構築した。本光学系ではシングルモードファイバを用いることで空間コヒーレンスの整った光だけを取り出し、後に続く系で時間コヒーレンスが備わった光だけを光コムとヘテロダイン干渉させることで電氣的に検出可能な系とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射温度計は広く社会で利用されているが、その温度指示の根拠はプランクの放射公式の原理に基づいていない。さらに、国際単位系SIの定義が改定され、熱力学温度の単位は、ボルツマン定数による普遍的な定義に移行し、科学的な観点からも、プランクの放射公式の重要性が極めて高くなってきた。本申請は熱放射の温度をプランクの放射法則から直接算出することを目的とする。光コムを横軸、ヘテロダイン法により高感度検出した熱放射信号を縦軸にとり、プランクの放射公式を高精度に再構成し熱力学温度を算出する。これによりSIの新定義に従った熱力学温度が現示でき、計量標準のみならず社会における温度測定技術の向上に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop a method for heterodyne detection of incoherent light using an optical frequency comb. Since it is essential to stabilise the intensity of the optical comb used as the local emission for heterodyne detection, a polarisation-maintaining optical comb is fabricated. Next, an optical interferometer was designed and constructed to couple the local emission and the signal light with fibre optics to obtain a beat signal between the incoherent light and the laser light. In this optical system, only light with spatial coherence was extracted by using a single-mode fibre, and only light with temporal coherence was made electrically detectable by heterodyne interference with the optical comb in a subsequent system.

Translated with DeepL.com (free version)

研究分野：光計測、計量標準

キーワード：熱力学温度 光周波数コム インコヒーレントヘテロダイン デュアルコム分光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

温度という物理量は、熱力学温度として定義されていながら、ITS-90が実用的に運用されている。近年この熱力学温度とITS-90で定められる温度との間に有意な差がみられることが各国の標準研究所による測定の結果分かってきた。世界的にもこの差の測定は限られた手法でしか行われていない。温度の単位ケルビンの定義改定を受け、今後異なる手法でこの差の検証を行い、不確かさを低減しつつ信頼性を高めていく必要がある。本提案は各国が行っている手法とは異なる手法であり、かつ新手法RDT法によって決定した熱力学温度値との直接比較も行うことができるため、熱力学温度とITS-90の目盛の差の検証を詳細に行える。光技術、温度計測技術、標準技術といった多方面の技術を融合させた挑戦的研究であると共に、各国の標準研究所の中でも優位に立てる可能性があり、国際的な意義も大きい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光周波数コム(光コム)を用いて安定化したレーザー光を局部発振光(局発光)として、インコヒーレント光をヘテロダイン検出する方法を開発し、黒体からの熱放射を多波長で広帯域観測し、その多数の周波数および信号強度の情報からプランクの放射公式を再現し、温度の新定義に基づいた熱力学温度を決定することである。2019年に国際単位系SIの定義が改定され、熱力学温度の単位ケルビンは、ボルツマン定数の数値を定めることで定義されることとなった。しかしこの定義から温度値を現示する方法はまだ確立されていない。現在も熱力学温度の最良近似である国際温度目盛(International Temperature Scale: ITS-90)が、実用的な温度標準として運用されている。一方、社会で広く使用されている放射温度計は、物理的な一次法則であるプランクの放射公式から温度を実現できるにもかかわらず、熱放射の一部だけを観測し、ITS-90によって決められた温度計または定点で校正された目盛を表示している。これらの理由は広い波長領域で、熱放射強度を正しく測定することが困難なためである。本提案によるインコヒーレントヘテロダイン法は、グラフの横軸を光コムによって目盛り、縦軸にヘテロダイン法によって高感度に検出された熱放射強度を目盛り、正確なプランクの放射公式を再構成することを原理とし、SIの新定義に従った熱力学温度を現示し、またITS-90による校正が不要な放射温度計システムを構築するものである。さらに我々は標準黒体を所有しているため、新定義の温度とITS-90とを実験過程において比較することができる。

また我々はこれまでに光コムを2台用いたデュアルコム分光装置により、気体分子の振動回転スペクトル線強度が温度の関数であることを利用した温度計測法(Rotational state Distribution Thermometry: RDT)を確立し、新定義に基づく熱力学温度を実現した(業績1)。本提案が実現されればRDT法で得られた熱力学温度値との直接比較が可能となり、新定義に基づく熱力学温度を、信頼性高く実現するシステムが構築される。

3. 研究の方法

ボルツマン定数を使って、プランクの放射公式により新定義に基づく熱力学温度を決定するには、放射公式の波長依存性(スペクトル分布)を観測結果から忠実に再現させることが重要である。図1に実験装置の概念図を示す。黒体放射光と局発光のレーザー光を合わせ、両者のビート信号を取り出す。局発光の周波数から中間周波数だけずれ、かつ局発光と偏光などの空間モードが一致する放射のみ切り出すことになる。プランクの放射法則において、黒体から放射される電磁波の分光放射輝度 P は、周波数 ν と温度 T の関数として(1)式で、またヘテロダイン検

出力 I_r は(2)式で表すことができる。

$$P = \frac{av^3}{\exp\left(\frac{hv}{kT}\right)-1} \quad (1) \quad I_r = bI(I_1 + I_2) \quad (2)$$

ここで、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 I はレーザー光強度、 ν はレーザー周波数、 I_1 は $\nu = \nu_r$ における放射強度、 I_2 は $\nu = \nu_r - \nu_b$ における放射強度、 ν_b は熱放射とレーザー光のビート周波数、 a, b は比例定数である。(1)式と(2)式を合わせると以下が得られる。

$$I_r = abI \left\{ \frac{(\nu + \nu_r)^3}{\exp\left(\frac{h(\nu + \nu_r)}{kT}\right)-1} + \frac{(\nu - \nu_r)^3}{\exp\left(\frac{h(\nu - \nu_r)}{kT}\right)-1} \right\} \quad (3)$$

局発レーザー光を同調し、(3)式のRFビート信号強度を2周波数で観測する。比をとることで、比例定数 a, b が消えて、未定のパラメータは温度 T だけとなる。多くの周波数点で観測した場合は、(3)式の右辺と左辺の差の2乗和を最小にする方法で、本提案による温度 T が求まる。

局発光として使用予定の外部共振器型半導体レーザーは、1.5 μm を中心として25 GHzごとに光コムに同期させて発振させることができる。対象として温度23 $^{\circ}\text{C}$ の熱放射を考え、波長1.50 μm (200 THz) の前後で、0.01 μm 間隔で1.47 μm (204.1 THz) から1.53 μm (196.2 THz) まで7点の観測点を設定する。この波長域では、プランク関数は周波数に対して単調減衰関数である。シミュレーションによるとこの関数は、6 区間の間に相対強度は 65 %減衰し、区間ごとには平均約 17 %減少する。これは十分観測可能な値と考えられ、設計の目安とする。7点の観測値にプランク関数を最小二乗法でフィッティングさせ、熱力学温度を決定する。

4 . 研究成果

インコヒーレント光源として、レーザー励起のプラズマ光源(LDLS) を用いた。LDLS 光はエネルギー密度の高いレーザー集束部のみから発生するので非常に輝度が高いことが特長である。図1に光コムとインコヒーレント光との干渉計の概要図、図2に実際の光学系を示す。この干渉計の大きな特長は自然光とレーザー光のヘテロダイン干渉を行うことである。

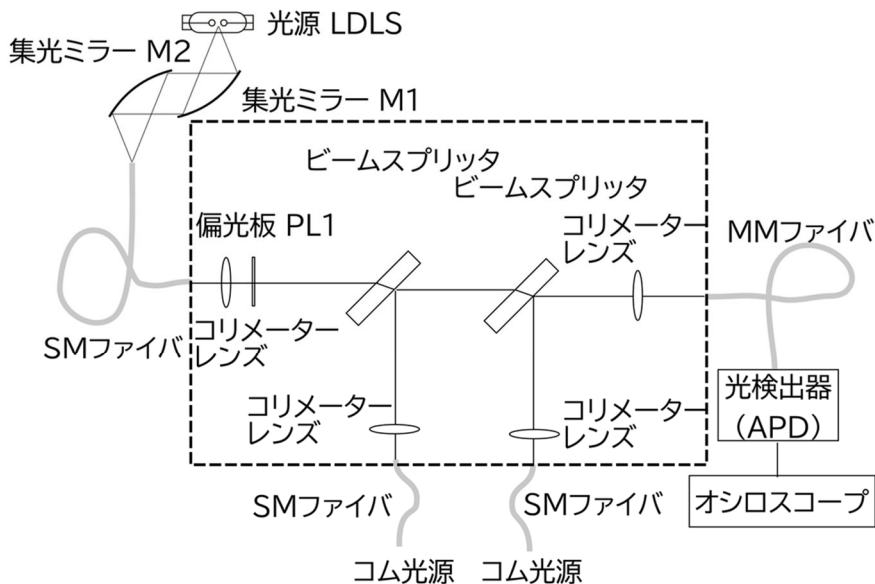


図1 インコヒーレント光とレーザー光のとの干渉光学系の概要

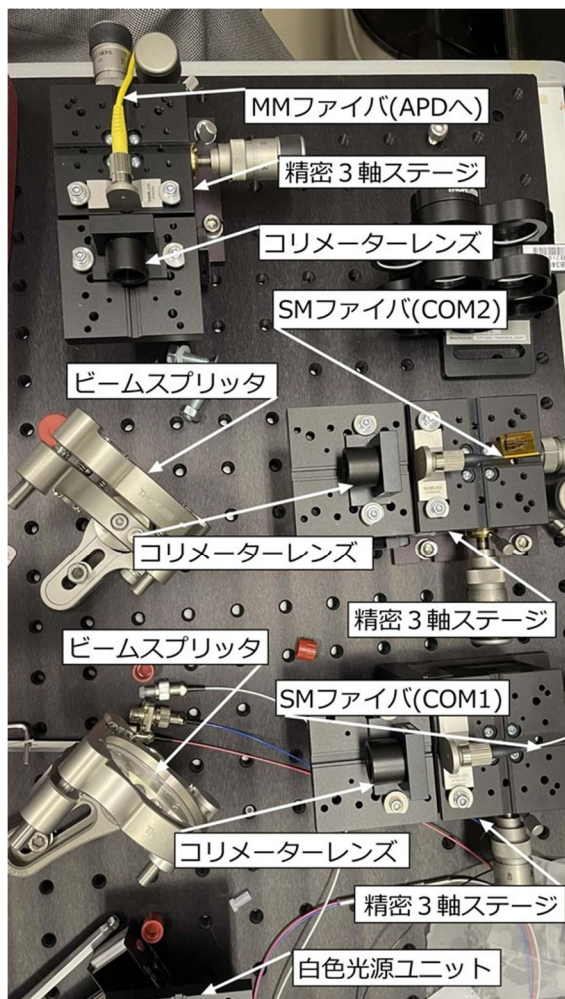


図2 干渉光学系

FB3 によって装置に導き、コリメーターレンズ L3 によって並行光に変換した。LDLS 光、COM1 からの光および COM2 からの光はビームスプリッタ BS1 およびビームスプリッタ BS2 によって同軸上にアライメントした。これで原理的には偏光面の揃った3本の光はアライメントされ互いに干渉しヘテロダイナミクスを発生させることができる。ヘテロダイナミクスは集光レンズ L4 面では位相が異なるビートが集合するが、これらは L4 によって集光されることで、全体をベクトル加算されシングルモードファイバ FB4 に結合する。

光源の像は集光ミラー M1, M2 の働きでシングルモードファイバ FB1の端面に等倍投影した。ここで光源の像の大きさはサブミリオオーダーであるのに対して FB1 の端面はミクロンオーダーなので光源からの光はほとんど全てが失われるが、このような選択過程を経て FB1 に結合された光は空間的なコヒーレンスが良く干渉光源として適している。

FB1 を出た光はコリメーターレンズ L1 の働きによって並行光に変換した。ここで並行光にする目的は他光源からの光と干渉させるにあたり、調整を容易にするためである。L1 からの光は偏光板 PL1 によって特定の方向包囲の光のみを通過させる。PL1 を使用することで偏光方向の揃った光を選択的に透過させ可干渉性を向上させた。次に、光コム COM1 からの光は偏波面保存シングルモードファイバ FB2 によって装置に導き、コリメーターレンズ L2 によって並行光に変換した。光コムは位相が揃っているだけでなく偏波面も揃っているため可干渉性に優れている。更に光コム COM2 からの光も同様に偏波面保存シングルモードファイバ

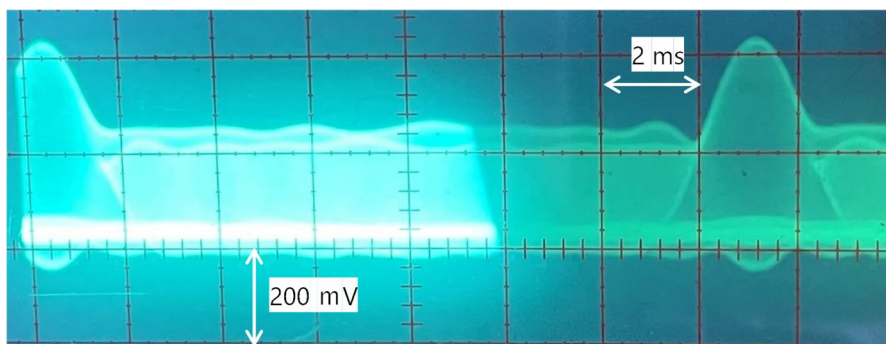


図3 2台の光コムとインコヒーレント光との3波混合

FB4 によって導かれる光は 3 周波混合干渉であり電氣的に検出可能なコム間のビート信号成分を含んでいるため、光検出器によって光電変換された後スペクトラムアナライザによって解析する。可干渉距離の短い自然光はエネルギーのほぼ全てが位相不連続であり有効な可干渉連続出力を得られないためヘテロダイン干渉の光源と使用されることは稀である。今回の実験系ではシングルモードファイバを用いることで空間コヒーレンスの整った光だけを取り出し、後に続く系で時間コヒーレンスが備わった光だけを光コムとヘテロダイン干渉させることで電氣的に検出する。図 3 に光コム COM1 と光コム COM2 および LDLS 光源を混合した 3 波混合の干渉ビートを観測した様子を示す。どちらもプロセスも極めて効率が低く、有効な電気信号を検出できるか意欲的な実験であったため、結合効率が課題として残り、まだプランク放射を再現するに十分なヘテロダインビートを観測できていない。今後光学系に放物面光学系を採用し、結合効率を上げることでプランク放射を再現するに必要な信号を取得し、プランクの放射公式を再現し、温度の新定義に基づいた熱力学温度を決定する予定である。

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 0件）

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 39-48
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 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水祐公子、入松川知也、大久保章、稲場肇
2. 発表標題 デュアルコム分光による非接触・高精度な気体温度計測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大久保章、入松川知也、清水祐公子、佐々田博之、稲場肇
2. 発表標題 デュアルコム分光を用いた精密ガス分析法の開発
3. 学会等名 第66回光波センシング技術研究会講演会（招待講演）
4. 発表年 2022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)	2023.3.31まで

6. 研究組織（つづき）

	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	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	柏木 謙 (Kashiwagi Ken) (10509730)	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)	

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