



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

産業技術総合研究所

清水祐公子, 稲場 肇, 大久保 章

1. はじめに

光周波数コム（以下、光コム）は、ドイツ Max-Planck 量子光学研究所、および米国 JILA/NIST (Joint Institute for Laboratory Astrophysics / National Institute of Standard and Technology) のグループを中心に 20 世紀末に開発され、T. W. Hänsch と J. L. Hall が 2005 年にノーベル物理学賞を受賞する際の授賞理由の一つとなった。光コムは多数の CW レーザーモード群が等しい周波数間隔で並んだ「光のものさし」である。当初の応用は絶対光周波数計測^{1,2)} が中心であったが、その後、分光測定、天体視線速度測定³⁾ など応用範囲が急速に広まるとともに、超低雑音マイクロ波発生⁴⁾、レーザースペクトルの線幅転送⁵⁾、および精密測長⁶⁾ など、周波数計測や測長技術への展開も進んでいる。特に、二つの光コムを用いるデュアルコム分光法 (Dual-Comb Spectroscopy: DCS) は、本来、光周波数領域である分光情報をマイクロ波領域へ変換することが可能な技術であり、従来のフーリエ変換赤外分光法に比べ、高いスペクトル分解能と周波数決定精度、高速測定といった特長から注目を集めている^{7,8)}。本稿では、DCS の応用事例として、我々の提案した温度解析手法である「回転状態分布温度計測法」⁹⁾を併用した新しい温度計測への展開について述べる。

温度は、気温や体温といった日常的に触れるものから、製造現場での管理や先端的な分析計測に至るまで、我々がもっとも使用している物理量である。産業界で最も利用されている温度計は、いわゆる、抵抗温度計と呼ばれるものである。また、非接触で温度を測定するような鉄鋼分野や環境モニタリングなどには放射温度計も利用されている。さらに、古くから広く用いられている水銀などの液柱の高さの変化を読み取るガラス製温度計に至るまで、ほぼ全ての実用的な温度計において、温度目盛を付与する「校正」と呼ばれる作業が必要である。この校正の際に基準となる温度目盛として広く用いられているのが、1990 年国際温度目盛 (International Temperature Scale of 1990, ITS-90)¹⁰⁾である。ITS-90 を基準とした温度計校正では、温度の「ゼロ点校正」なしで、使用温度域で何点かの温度校正点を利用するのが通常であるが、標準温度である水の三重点温度と離れた温度域での温度定点や補完式の精度（熱力学温度の絶対精度）に難点がある。例えば、ITS-90 以前の国際温度目盛りである IPTS-68 と ITS-90 との間では、銅の凝固点による温度定点 (ITS-90 では 1084.62 °C) において、 < 0.1 °C の校正の再現性を大きく超えて 0.26 °C ほど定義温度が変更されるといった事例もあった。

一方、ITS-90 等の温度基準に依らず、直接熱力学温度 T を測定する（算出する）手法もある。具体的には、ボルツマン定数 k を介するもので、何らかの手法で kT に相当する量（単位はジュール）を測定し、それをボルツマン定数 k で除算することにより熱力学温度 T を求める¹¹⁾。近年、このボルツマン定数 k を利用した熱力学温度測定法の進展は著しく、特に音響気体温度計 (Acoustic Gas Thermometer, AGT) の高精度化、広温度域化を技術的な背景として、2019 年 5 月に熱力学温度（ケルビン）の定義が、「ケルビン (K) は水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 倍である」から、「ボルツマン定数 k を単位 JK^{-1} ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$ に等しい) で表わしたときに、その数値を $1.380\,649 \times 10^{-23}$ と定めることによって定義される」と改定された。これにより、これまでは水の三重点温度を標準として値を求める対象であっ