

長さの国家標準「光コム」を用いた 高精度・高速ガス分析

SATテクノロジー・ショーケース2021

■ はじめに

気体分子が固有の波長の光を吸収する性質を利用したガス分析手法は分光法と呼ばれ、温室効果ガスや有害ガスなどの環境ガス計測やエンジンなどの内燃機関の評価に用いられてきました。複数の分子や複雑な構造の分子を含んだガスをリアルタイムで分析するためには、高い分解能と短時間で測定が必要です。「光コム」は、多数の細かいスペクトル成分が等しい周波数間隔で並んだもので、ひとつひとつの成分がガスにどのくらい吸収されるかを調べる「デュアルコム分光法」を用いることで、従来のフーリエ変換赤外分光法 (FTIR) では難しかった高分解能と短時間測定の両立が可能になります。

産総研では、高性能な光コムを2台用いた独自のデュアルコム分光装置を構築し、高速・高分解能でガスを検出・同定する技術を開発しました。この技術により、複数のガスが共存する状態での、環境ガスの分析、内燃機関の評価、呼気分析など、環境、エネルギー、医療といった分野での幅広い応用が期待できます。

■ 光コムとは

光コムは、その名の通り櫛状のスペクトル構造を持ち、多数のレーザーモードが等しい周波数間隔で並ぶ光です(図1)。各モード周波数 $\nu(n)$ は、間隔周波数 f_{rep} とオフセット周波数 f_0 を用いて

$$\nu(n) = n \times f_{\text{rep}} + f_0$$

で表されます(n は整数)。 f_{rep} と f_0 はRF領域の周波数であり、これら2つの周波数を決めることで、すべてのモード周波数が一意に決まります。光コムは、レーザー周波数を周波数標準に基づいて測定できるため、現在、長さの国家標準となっています。

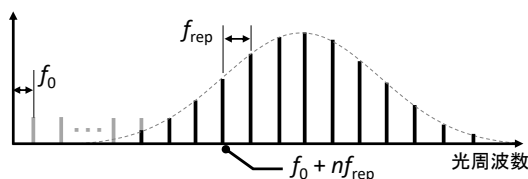


図1: 光コムのスペクトル構造

光コムは、レーザー周波数を周波数標準に基づいて測定できます。そのため、長さの国家標準として、測長用レーザーの周波数(波長)の基準となっています。

■ デュアルコム分光

上述したような性質を持つ光コムが図2のようにサンプル中を透過すると、含まれるガスの種類に応じて光コムの特定周波数のモードが吸収され弱くなります。1つ1つのモードを分離してそれぞれ吸収量を測定すれば、正確な周波数目盛を持つ精密な吸収スペクトルが得られます。

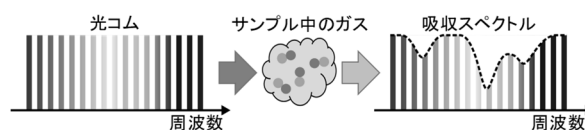


図2: 光コムを用いたガス分析の概念図

従来の分光器では、分解能が足りずに光コムの各モードを分離して検出できません。そこで、もう1台の光コムを用意し、2台の光コム間の干渉によって各コムモードの吸収量を読み取る「デュアルコム分光法」が考案されました。

図3にデュアルコム分光装置の基本構成と原理を示します。光コム1と光コム2の繰り返し周波数差を $\Delta f_{\text{rep}} = f_{\text{rep}1} - f_{\text{rep}2}$ とすると、図3の左端で周波数が一致していた2台のコムのモード対は、一つ対を移るごとに周波数差が Δf_{rep} ずつ広がります。したがって、2台の光コムの干渉信号から差周波成分を抽出すれば、図3の一番下のようにRF領域で光コム1のスペクトルを反映した Δf_{rep} 間隔のスペクトルが得られます。

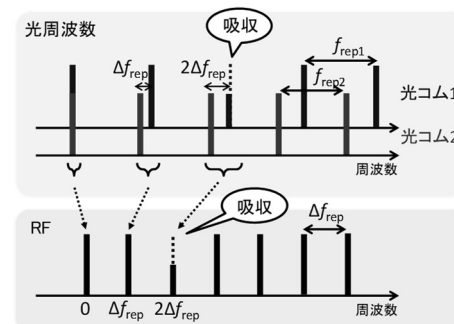
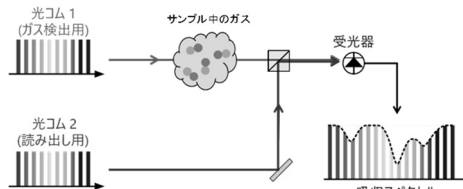


図3: デュアルコム分光の基本構成と原理

代表発表者 大久保 章(おおくぼ しょう)
所属 産業技術総合研究所 計量標準総合センター
物理計測標準研究部門
光周波数計測研究グループ
問合せ先 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第三
TEL: 029-861-2793
E-mail: sho-ookubo@aist.go.jp
Web: https://unit.aist.go.jp/riprn/ofmes-g/

■キーワード: (1) 光周波数コム
(2) ガス分析
(3) 分子分光
■共同研究者: 稲場肇(産総研)
佐々田博之(慶應大・産総研)
山田耕一(産総研)
洪録雷(横国大)
岩國加奈(電通大)
清水祐公子(産総研)
入松川知也(産総研)

■ 活動内容

1. デュアルコム分光装置の開発

産総研独自の高性能な「光コム」を2台用いてデュアルコム分光装置を開発しました。光コムを低雑音化することで、1度に観測できる波長帯域が $1.0\ \mu\text{m}$ - $1.9\ \mu\text{m}$ (周波数範囲140 THz) に広がり、複数種類のガスの吸収を同時に観測できます。また同時に、分解能 $0.4\ \text{pm}$ (50 MHz) 最短測定時間130 msを実現しました (図4)。

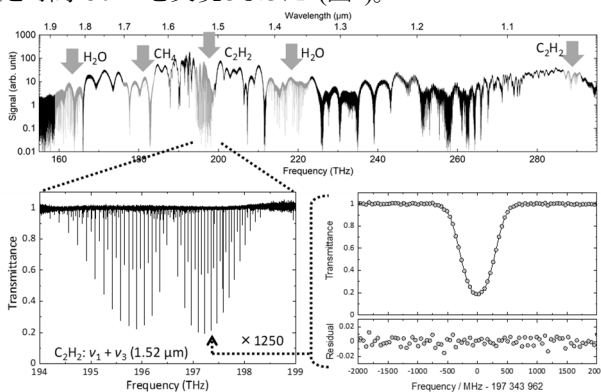


図4: 広帯域デュアルコム分光

2. 精密な分光スペクトル測定

デュアルコム分光は、高分解能かつ高S/Nのスペクトルを短時間で取得できます。分解能が高いため、吸収スペクトルから水の吸収線や同位体の吸収線を分離することができます。スペクトルのS/Nが高いため、分子吸収線データベースを用いたスペクトル解析によって、ガス濃度を精密に測定できます (図5)。

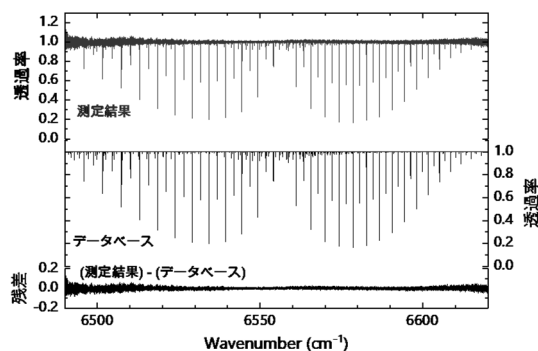


図5: 測定スペクトルとデータベースの比較 (C_2H_2)

3. スペクトル解析によるガス分析

デュアルコム分光装置で得られる精密な吸収スペクトルデータには、多くの情報が含まれています。ガス濃度の情報はもちろん、ガス種ごとの温度を測定することもできます。図6に示すように、ガス吸収線ごとの強度分布がボルツマン分布を反映することから、ガス温度 $23.4\ \text{°C}$ が得られます。

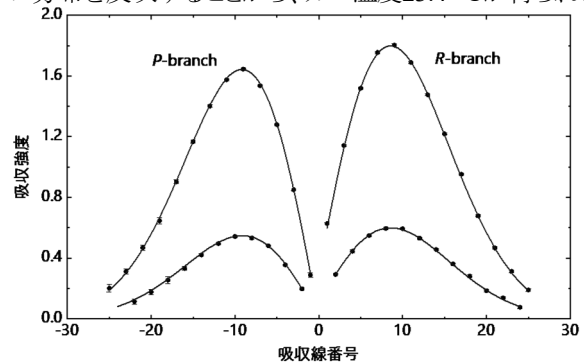


図6: 吸収強度分布を用いたガス温度測定 (C_2H_2)

現在は測定精度の評価および向上に取り組んでおり、測定時間1分で、濃度に関しては感度サブppmレベル、温度に関しては不確かさ $0.1\ \text{°C}$ 以下を目標としています。また、小型堅牢な偏波保持デュアルコム分光装置の開発や、波長帯域の中赤外領域への拡張にも取り組んでいます。

■ 関連情報等(論文・特許)

論文

- S. Okubo, *et al*, Appl. Phys. Express **8**, 082402 (2015).
- S. Okubo, *et al*, Opt. Express **23**, 33184 (2015).
- K. Iwakuni, *et al*, Phys. Rev. Lett. **117**, 143902 (2016).
- S. Okubo, *et al*, J. Mol. Spectrosc. **341**, 10 (2017).
- Y. Shimizu, *et al*, Appl. Phys. B **124**, 71 (2018).

特許

- 超短光パルスの増幅方法及び超短光パルス増幅装置、並びに広帯域コム発生装置, 特許第 5182867 号
- 広帯域光周波数コム光源および広帯域光周波数コムの発生方法, 特許第 6504658 号
- 光周波数コム発生装置, 特許第 6714270 号