

1.0–1.7 μm デュアルコム分光

(慶大理工^a, 産総研^b) ○岩國加奈^a・大久保章^b・稲場肇^b・保坂一元^b・大苗敦^b・
佐々田博之^a・洪鋒雷^b

Dual-Comb Spectroscopy over 1.0–1.7 μm

(Keio Univ.^a; NMIJ, AIST^b) Kana Iwakuni^a, Sho Okubo^b, Hajime Inaba^b, Kazumoto Hosaka^b,
Atsushi Onae^b, Hiroyuki Sasada^a, Feng-Lei Hong^b
k.iwakuni@z7.keio.jp

Dual-comb spectrometers have advantages in spectral resolution, frequency precision, and measurement speed over conventional FTIR. We have developed a broadband dual-comb spectrometer which is able to record spectrum over 1.0–1.7 μm in 140 ms with a spectral resolution of 48 MHz. The spectrum involves the 1.03- and 1.53- μm bands of C_2H_2 , the 1.66- μm band of CH_4 , and the 1.46- μm band of H_2O . The determined transition frequencies agree with the previous sub-Doppler resolution measurement results within 10 MHz.

【序】デュアルコム分光計[1, 2]は、光コムが分光用光源としてコヒーレントな広帯域光源であることを利用した分光計である。広帯域にわたる高精度、かつ高速な測定が可能であり、特に精度と高速性点ではフーリエ変換赤外分光計 (FTIR) を凌駕する。光コムのモード周波数は繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット周波数 f_{ceo} で表され、これらを測定すると各モードの絶対周波数が決定する。また、エルビウム添加ファイバーを用いたコムは高非線形ファイバーを用いて1–2 μm までスペクトルを拡大することができる。

デュアルコム分光では、 f_{rep} がわずかに異なる光コムを2台用いて各モードを分離する。時間軸上では、 f_{rep} の異なる2つのコムが発生する光パルスの時間差がパルス毎に変わることを利用してインターフェログラムを取得することになる。干渉計に機械的に動作する部分がないので、FTIR に比べ安定かつ高速にデータ取得できる。

本研究では相対線幅の狭い2台の光コムを用いて、波長1.0–1.7 μm にわたるスペクトルを1回の測定で観察できるデュアルコム分光計を開発し、 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ (1.03 μm 帯および1.53 μm 帯)、 CH_4 (1.67 μm 帯)、 H_2O (1.46 μm 帯) の吸収スペクトルを観察した。

【原理】図1にデュアルコム分光計の装置図を示す。2台の光コムは、シグナルコム、ローカルコムと呼ばれ、シグナルコムの光路にはガスを封入したセルが配置される。セルを透過した光パルスの中には分子による自由誘導減衰 (Free Induction Decay: FID) が現れる。この信号はローカルコムの光パルスとビームスプリッターで重なり受光器で干渉する。図2は干渉信号のスペクトルを示す。シグナルコムの繰り返し周波数 f_{repS} (約48 MHz) はローカルコムの繰り返し周波数 f_{repL} (約48 MHz) より Δf_{rep} (約10 Hz) だけ高い。(図2上) そのため、シグナルコムとローカルコムのビート信号は Δf_{rep} ごとに等間隔に並び、RF 領域でコムになる。(図2下) 分子の吸収があると、シグナルコムのスペクトルにくぼみが生じ、これに対応して RF コムのスペクトル

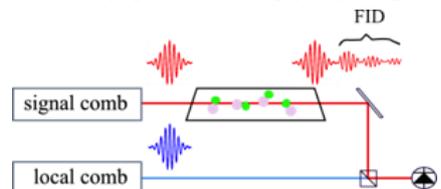


図1 デュアルコム分光計の実験配置

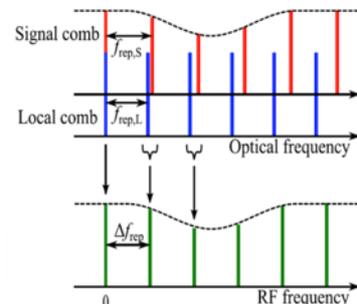


図2 デュアルコム分光の原理

にくぼみが生じる。光コムと RF コムの一対一対応を保ちながら、光コムの広帯域特性を利用するには Δf_{rep} を小さくする必要がある。 Δf_{rep} が小さくなると、ビート信号を分離するためには 2 つの光コムの相対線幅はそれより十分に小さい必要がある。したがって広帯域にわたるスペクトル取得には、相対線幅の狭い光コムが必要である。

本研究では、2 台の光コムの f_{ceo} を RF 信号に、1535 nm 付近の一つのコムモードを狭線幅レーザにそれぞれ安定化した。我々は光コム的高速制御に実績があり [3]、本研究でも相対線幅 1Hz 以下 (測定装置の分解能限界) を実現している。

【実験・結果】図 3 にデュアルコム分光計で観察した 1.0–1.7 μm のスペクトルを示す。横軸は絶対周波数で、縦軸は対数スケールである。1.03 μm 帯と 1.53 μm 帯に $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 、1.67 μm 帯に CH_4 の振動回転バンドが観測できる。また、1.46 μm 帯に大気中の H_2O の吸収が観察されている。 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ は 15 cm のホワイトセル (13 回往復) に 20 Torr、 CH_4 は 50 cm のセルに 40 Torr 封入した。 Δf_{rep} は 7 Hz で、1 回の測定時間は 140 ms である。図 3 は 400,000 回平均したスペクトルで、全測定時間は 15 時間である。

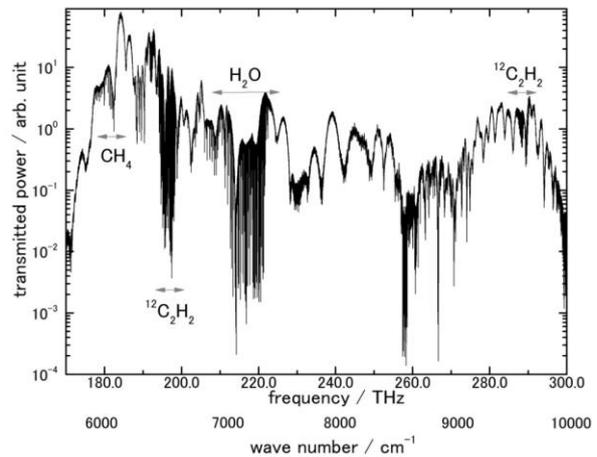


図 3 広帯域スペクトル

図 4 はバックグラウンドを除去したスペクトルであり、1.53 μm 帯の $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ の吸収を示す。図 4 (a) は $\nu_1 + \nu_3$ 振動バンド全体、(b) は $P(10)$ 遷移である。図 4 (a) では強度交代が見られ、またホットバンドも観察された。周波数分解能は光コムの繰り返し周波数で約 48 MHz である。図 4 (b) に示す $P(10)$ の吸収スペクトルの半値全幅は約 500 MHz で、ドップラー広がり制限されている。このスペクトルをフォークト関数でフィッティングして求めた中心周波数は、先行研究のサブドップラー分解能分光のデータ [3] と約 10 MHz の範囲で一致した。

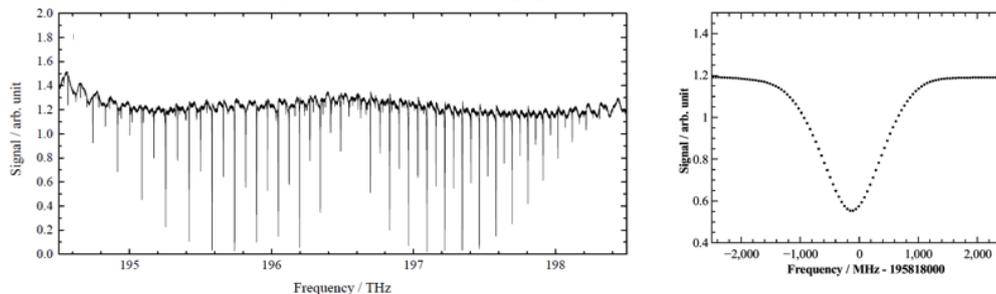


図 4 規格化した $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ のスペクトル (a) バンド全体、(b) $P(10)$ 遷移

【まとめ】

相対線幅の狭い光コムを用いて 1.0–1.7 μm にわたる広帯域デュアルコム分光を行った。この帯域は受光器で制限されており、広帯域受光器を用いてさらに広範囲なスペクトルも観察した。今後は、広帯域高精度特性を活かしたスペクトルの同定や、高速にデータ取得できることを利用した緩和、拡散過程などのダイナミクスを観察する。

- [1] I. Coddington, *et. al*, Phys. Rev. Lett., **100**, 013902 (2008)
- [2] T. Ideguchi, *et. al*, Opt. Lett., **37**, 4847 (2012)
- [3] K. Iwakuni, *et. al*, Opt. Express, **20**, 13769 (2012)
- [4] K. Nakagawa, *et. al*, J. Opt. Soc. Am. B, **13**, 2708 (1996)