

# 光周波数コムを用いた CO 分子吸収線の周波数測定

量子物質工学科 植田研究室 田村洋介 0113058

## 1. 研究背景・目的

光通信に用いられる光の波長は光ファイバーケーブル中で最も分散の少ない  $1.3\ \mu\text{m}$  帯と、最も伝送損失の少ない  $1.5\ \mu\text{m}$  帯とがある。情報の伝送方法としては時分割多重(TDM)通信方式と波長分割多重(WDM)通信方式がある。TDM 通信は時間ごとに複数のデータを等分して送信する方式で一つの波長上に複数のデータを流すことが可能、一定の帯域を保証した通信サービスを提供可能、安定・高速な通信可能というメリットがあるが一方で通信を行っていない他の端末にも時間を割り振ってデータを送信してしまっているため余分な通信作業を用い、一概に高速な通信とは言えなくなっている。TDM の通信速度は  $20\sim 40\text{Gbps}$  が限界とされている。そこで新たに台頭してきた光通信技術が光の異なる周波数ごとにチャンネルを振り分けて一本のファイバーで伝送させる WDM 通信技術である。今までの光通信では一本のファイバーにつき一つの光波のみを使用していたため単一の光波での伝送速度を向上させる必要があり高速化に限界があった。しかし WDM 通信では光波を波長によって分離し多重化しているため高速化が実現しやすい。WDM では既に  $100$  チャンネルを越える多重化が実現しており、これを既存の光通信網に用いれば単純に  $100$  倍の伝送容量が実現可能となる。現在 WDM では高密度化(DWDM)や広帯域化が進められており今後ますます光周波数の維持管理が必要不可欠となる。しかし  $1.5\ \mu\text{m}$  帯の光周波数は約  $200\text{THz}$  と非常に大きいためマイクロ波のよ

うに周波数カウンターなどの電子計測器を用いて分子の吸収周波数を直接計測することは出来ない。よってこの WDM の実現には高精度な測定法の実現が求められている。

現在光通信において最もよく使用されている波長帯の C バンド( $1540\sim 1560\text{nm}$ )では  $\text{C}_2\text{H}_2$  の吸収線が周波数基準となっている。しかし今後ますます光通信技術が発達することを想定するとより長波長側の L バンド( $1565\sim 1625\text{nm}$ )や短波長側の S バンド( $1460\sim 1530\text{nm}$ )においても周波数基準が必要となる。そこで我々は L バンドにおける周波数基準候補として CO 回転振動遷移中にある二つの CO 同位体  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  と  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$  に注目した。 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  は  $1560\sim 1595\text{nm}$  に約  $40$  本、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$  は  $1595\sim 1630\text{nm}$  に約  $40$  本の吸収スペクトル線を有している。よってこれら二つの CO 同位体を用いることで WDM 通信用 L バンドの波長帯域を十分に満たすことが出来る。今回実験で使用した  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  の吸収線の過去の測定[1]においては線形吸収分光による低分解能な測定であるのと波長測定であるため分散の影響を受けてしまっているため、その測定精度は  $5\times 10^{-9}$  程度であった。そこで我々は C バンドにおける  $\text{C}_2\text{H}_2$  の吸収線を第一周波数標準として CO の吸収周波数を直接計測し過去の波長測定精度と絶対値における比較を行い、L バンドにおける第二周波数標準として高精度に定めることを研究の目的としている。

## 2. 原理

### 2.1 周波数計測

COの吸収周波数 $f_{CO}$ の出し方はまず $C_2H_2$ とCOの差周波数 $\Delta f$ を求め、次に第一周波数標準である $C_2H_2$ の吸収周波数 $f_{C_2H_2}$ より $\Delta f$ を引いてやれば(1)式より $f_{CO}$ が求まる。

$$f_{C_2H_2} - \Delta f = f_{CO} \quad (1)$$

$f_{C_2H_2}$ が約193THz、 $f_{CO}$ が約191THzのため差周波数 $\Delta f$ は2THz以上ある。先にも述べたようにこのような大きな周波数は直接計測することは出来ない。よって今回の実験では光周波数グリッドである光コムを用いて実験を行った。光コムは各モードが等しい周波数間隔 $f_{comb}$ で広帯域(数THz)にまで広がっており、各モードが同時に光って見える連続波長多重光源と考えられるため光の物差しとして利用できる。この光コムを介してやると二つの光との間でビート周波数 $f_{beat1}, f_{beat2}$ を得ることが出来る(図1)。よって後は光コムの次数 $N$ が分かれば(2)式より $\Delta f$ を得ることが出来る。

$$\Delta f = N \times f_{comb} + f_{beat1} + f_{beat2} \quad (2)$$

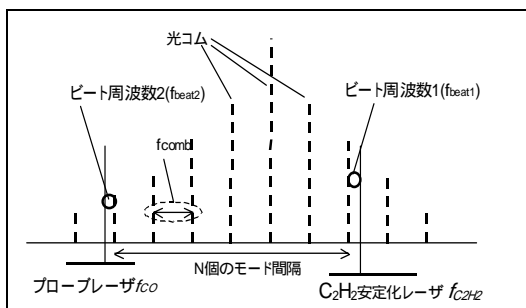


図1 光コムによるビート周波数測定

## 2.2 $C_2H_2$ 安定化レーザー

今回用いた $C_2H_2$ 安定化レーザー[2]の概略図を図2に示す。用いた吸収分子は $^{13}C_2H_2$ 、遷移 $\nu_1 + \nu_3$ , P(16)、周波数194.3695694THzである。 $C_2H_2$ の吸収は非常に弱いので $C_2H_2$ 吸収セルをFP共振器中に置くことにより吸収強度を稼ぎ高いS/Nで $C_2H_2$ の飽和吸収信号を得る工夫をしている。共振器長は180mm、フィネ

スは約200である。このため、入力光約3mWに対して、共振時の共振器内の光パワーは約200mWに増大される。

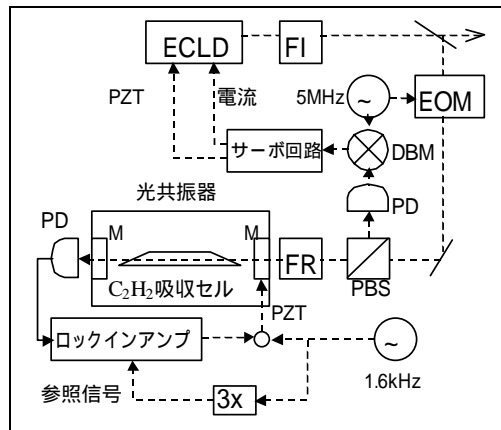


図2  $C_2H_2$ 安定化半導体レーザーの光学系の構成  
ECLD:外部共振器型半導体レーザー、DBM:ダブルバランスドミキサー、PBS:偏光ビームスプリッター、FR:ファラデー回転子、FI:ファラデーアイソレータ、M:鏡。

外部共振器型半導体レーザー(ECLD)から出た光は電気光学変調器(EOM)による5MHzの位相変調を受け光共振器に入射する。そして光共振器からの反射光を検出することでレーザー周波数と共振器の共振周波数 $\nu_c$ が一致させる( $\nu_c = \nu_l$ )。次に透過光を検出することによって $C_2H_2$ の飽和吸収信号 $a$ を得て $\nu_c$ に安定化させる( $\nu_c = a$ )。よってレーザー周波数が $C_2H_2$ 飽和吸収中心に安定化される( $\nu_c = a$ )。この $C_2H_2$ 安定化レーザーの評価は、線幅3MHz、出力パワー5mW、周波数精度0.1MHz、安定度 $10^{-13}$ 台(10秒以上)である。

## 2.3 EOM型光コム発生器

EOMに入った光はEOMの位相変調により間隔の等しいサイドバンドが発生する。EOMはFP共振器中に置かれており光は共振器によって多数回往復を繰り返す。これによって新たなサイドバンドが次々と発生し数THzの広帯域にまで拡大される。今回実験で使用した光コム発生器は光コム研究所製の

BK-SM625C[3]で帯域約 5THz で周波数間隔  $f_{comb}$  は 6.25GHz である。

### 3. 実験

図 3 に実験装置の全体の概略図を示す。

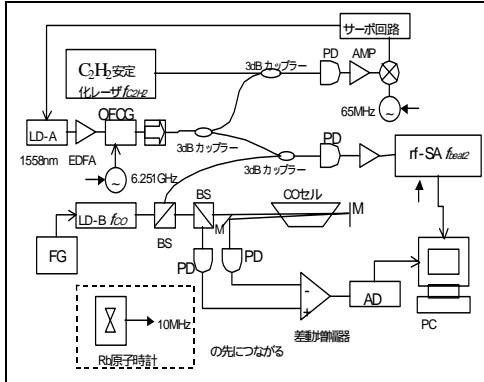


図 3 実験系全体像 OFCG:光コム発生器、BS:ビームスプリッタ、FG:ファンクションジェネレータ、AD:アナログデジタル変換機。

光コムの光源となる外部共振器型半導体レーザー (LD-A:1558nm) から出た光は EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)で 200mW に増幅され光コム発生器(OFCG)に入る。発生した光コムを 3dB カップラーによって分岐させ、一方を  $C_2H_2$  安定化レーザからの光と 3dB カップラーで混ぜ、60dB アンプを通過させてビート周波数  $f_{beat1}$  を得る。得られたビートをデジタル PSD によりシンセサイザからの発振周波数  $f_{syn}=65\text{MHz}$  とミックスして、誤差信号を LD-A に負帰還制御することにより、 $f_{beat1}$  とシンセサイザの 65MHz を位相同期させる。この結果、コム一本と  $C_2H_2$  安定化レーザを 65MHz の間隔で位相同期でき、その結果コム全体の絶対周波数を安定化することができる。

今回使用した  $^{12}C^{16}O$  R(14)は、セル内圧力 1000Torr 中で吸収周波数 191.7299497THz なのでプローブレーザ(LD-B)の波長をその付近で掃引し、 $f_{beat2}$  と吸収信号を同時測定する。また、吸収信号を得るために LD-B の光は CO

セル(セル内圧力 200Torr、セル長 105mm)を 2 回通過させた光と、通過させない光をそれぞれ別の PD に入れ、差動増幅器を通して強度信号変動分を除いた線形吸収を得て、アナログデジタル(AD)変換機を通して記録する。

### 4. 結果・考察

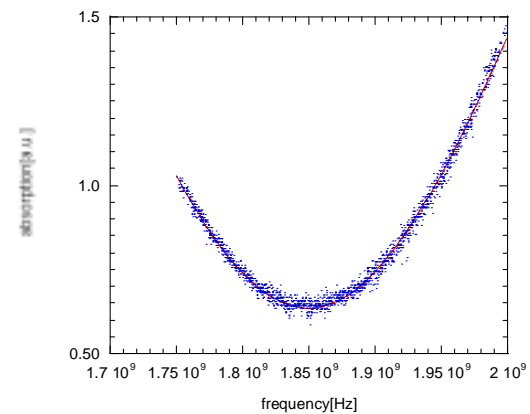


図 4 吸収中心でのビート周波数

図 4 は実験結果から得た LD-B と光コムのビート周波数を横軸に、CO 分子の光吸収を縦軸にとったグラフである。

グラフはローレンツ型曲線でフィッティングをかけてあり、この近似曲線から求めた吸収中心でのビート周波数  $f_{beat2}$  は 1.8496 GHz(誤差  $\pm 0.1\text{MHz}$ )である。近似曲線は本来ならば Voigt profile と呼ばれるガウス関数(ドップラー広がりによる)とローレンツ関数(自然幅・圧力広がりによる)の畳み込み積分で表した関数でフィッティングをかけるべきであるが、 $^{12}C^{16}O$  の自然幅( $<2\text{MHz}$ )とドップラー広がり( $\sim 400\text{MHz}$ )が圧力広がり( $\sim 700\text{MHz}$ )に比べて十分小さいとみなして最小二乗法により最も残差の少なくなるよう吸収曲線に対してフィッティングをかけた結果、吸収中心付近に対してほぼローレンツ関数と一致した。

波長計で読み取った  $C_2H_2$  と  $CO$  の周波数はそれぞれ、 $f_{C_2H_2}=194.3695THz, f_{CO}=191.7302THz$  で、その差は  $2639.3GHz$  であるから  $C_2H_2$  と  $CO$  間のコム次数  $N$  は、 $N=2639.3\div 6.25\cong 422$  とわかる。よって  $C_2H_2$  と  $CO$  の周波数差は(2)式より  $\Delta f=422\times 6.25+0.065+1.8496=2639.4146GHz$  と分かり、 $f_{C_2H_2}=194.3695694 THz$  だから(1)式より  $^{12}C^{16}O$  R(14)のセル内圧力  $200Torr$  での周波数は  $f_{CO}=191.7301548 THz$ (誤差  $0.1MHz$ )である。

次に過去の波長計測[1]との比較のために  $200Torr$  から  $0Torr$  に換算する際に生じる圧力シフト  $51MHz$  を考慮すると  $^{12}C^{16}O$  R(14)の周波数は  $191.7302058THz$  である。今回の実験では  $5\times 10^{-10}$  の精度で測定でき、過去の波長計測よりも一桁良い精度が得られた。吸収周波数は誤差の範囲内ではほぼ一致した。

## 5. 今後の予定

### ・ 他の吸収線の測定

$C_2H_2$  と  $^{13}C^{16}O$  の最大差周波数が約  $12THz$  であるが現在分散の影響により光コム帯域に  $5THz$  の限界が生じてしまっている。これでは  $^{13}C^{16}O$  はおろか  $^{12}C^{16}O$  P-branch すら測定することは出来ない。そこで今後は導波路型の広帯域光コム( $\sim 13THz$ )を使用してより高帯域での測定を行う必要がある。さらに ECLD の掃引幅にも限界があるため、より長波長側に最適化していかなければならない。

### ・ $C_2H_2$ 安定化レーザの狭窄化

今回使用した  $C_2H_2$  安定化レーザはレーザ周波数を  $C_2H_2$  吸収中心に安定化する際に変調を加えている為、線幅が約  $3MHz$  に広がってしまっている。 $C_2H_2$  安定化レーザと光コムは位同期されており  $C_2H_2$  安定化レーザに

線幅の広がりが生じてしまうと光コム全体も揺らいでしまい測定誤差の原因となっている。そこで今後は変調打ち消し法によって  $C_2H_2$  安定化レーザの狭窄化を行い、ビート線幅を細くし吸収中心決定精度を上げる必要がある。

### ・ 圧力シフトの計測

今回  $200Torr$  から  $0Torr$  に換算する際に用いた圧力シフトは過去の波長計測[1]によって求められたものであるため、今後は  $1000Torr$  のセルを用いて今回と同様の実験をし  $200Torr$  における吸収中心と比較して圧力シフトを求める必要がある。

## 参考文献

1. N. Picque and G. Guelachvili, J. Mol. Spectrosc. **185**, pp.244-248 (1997).
2. A. Onae, K. Nakagawa, Optics Comm. **142**, pp.41-44 (1997).
3. M. Kouroggi, K. Nakagawa and M.Ohtsu, IEEEJ. Quantum Electron. **29**, pp.2693 (1993).