

キャビティリングダウン分光に向けた高フィネス ファブリー・ペロー共振器の性能評価

岩國研究室 立崎陽菜乃

1 背景と目的

キャビティリングダウン分光法(CRDS)は、レーザー吸収分光法の1つである。2枚の高反射率ミラーを向かい合わせて配置したファブリーペロー共振器の透過光強度の時間変化を測定するが、光が共振器内で数千回以上反射するため、実効吸収長は共振器長の数千倍以上となり、原子や分子の定量的な検出が高感度で行える。

波長 1.5 μm帯は、精密分光に適したレーザー光源が入手しやすく、また CRDS によって測定可能な吸収の大きさをもつ分子が多くある。そのため本研究では、波長 1.5 μm帯において反射率 99.996 %のミラーを用いて、ファブリーペロー共振器を構築し、その性能を評価することを目指した。

2 原理

CRDS は、共振器から透過する光のリングダウン減衰を観測し、リングダウン時間から分子の吸収係数を求める分光法である。図 2.1 に実験配置図を示す。

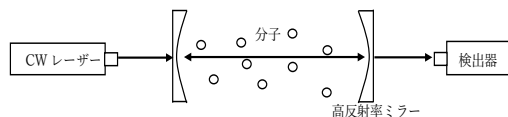


図 2.1：実験配置図

連続発振(CW)レーザーを共振器に入射し、その透過光強度の時間変化を観察すると、図 2.2 のような指数関数的な減衰が観測される。共振器内が真空の場合、 $I(t)$ を時間 t における透過光強度、 I_0 を入射光強度、 τ_0 を真空中でのリングダウン時間として、

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau_0) \quad (2.1)$$

が成り立つ。分子の吸収がある場合の透過光強度は、光速を c 、分子の吸収係数を α とすると、

$$I(t) = I_0 \exp\{(-t/\tau_0) - \alpha ct\} \quad (2.2)$$

となり、リングダウン時間が短くなる。この差を測定することで、入射した CW レーザーの周波数における吸収係数 α を求める。

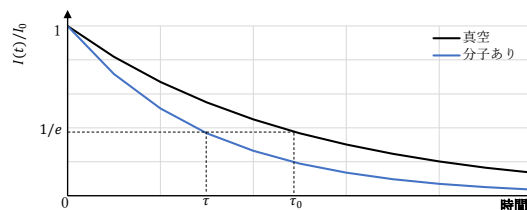


図 2.2：共振器内が真空の場合と分子の吸収がある場合のリングダウン減衰

2枚の反射鏡をある間隔で平行に向かい合わせると、特定の周波数の光が共振する。これはファブリーペロー共振器とよばれる。2枚の反射鏡の振幅反射率 r と振幅透過率 d が等しいとし、反射面は $z = 0$ と $z = L$ にあるとする。 E_0 は入射光の電場の振幅、 k は波数とする。図 2.3 は共振器長 L の中で光が反射、透過する様子を示す。

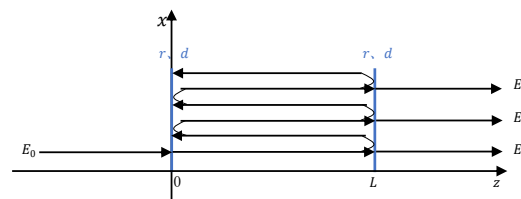


図 2.3：光共振器中の光の光路

共振器中で一度も反射せずに透過した光の

電場 E_1 は $E_1 = E_0 d^2 e^{-ikL}$ 、2回反射した後透過した光の電場 E_2 は $E_2 = E_0 d^2 r^2 e^{-3ikL}$ と表される。このように、共振器中での反射が2回増えるごとに透過光の電場は $r^2 e^{-2ikL}$ 掛けられる。透過光の光電場はこれらの総和になる。透過光の強さを I_d 、入射光の強さを I_0 、強度の反射率を R とすると、透過率 I_d/I_0 は図 2.4 のように変化する。

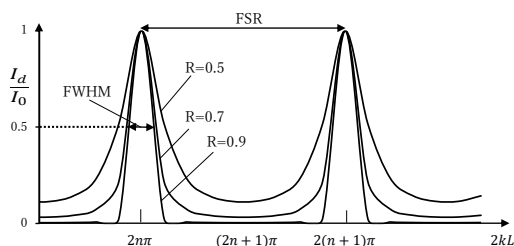


図 2.4：共振器長 L の変化に対する透過率の変化

n を整数とすると、 $kL = n\pi$ すなわち、 $L = \lambda n/2$ のとき透過率が最大となる。ここで λ は波長を示す。共振器長 L を変えていくと半波長ごとに最大透過率となる。この間隔を FSR といい、その周波数範囲 f_{FSR} は、

$$f_{FSR} = c/2L \quad (2.3)$$

となる。ファブリーペロー干渉計では、図 2.4 で示したように反射率 R が大きいと、透過波形の鋭さも大きくなる。この鋭さを表すフィネス F は、

$$F = \pi\sqrt{R}/(1-R) \quad (2.4)$$

で定義される。ファブリーペロー干渉計のフィネス F は、 $R = 99.996\%$ で $F = 78538$ になる。本研究では FSR とフィネスを測定した。

3 共振器の開発

図 3.1(a)は本研究で開発した共振器の図、(b)は実際のクリアセラムスペーサーを示す。クリアセラムは鉄、アルミニウムなどに比べて 2 桁以上熱膨張係数が小さく、温度変化に対して堅牢である。

クリアセラムでできたスペーサーの前後に高反射ミラー、片側に共振器長を変化させるためのピエゾ素子を貼り付けることでファブリーペロー共振器を構成した。

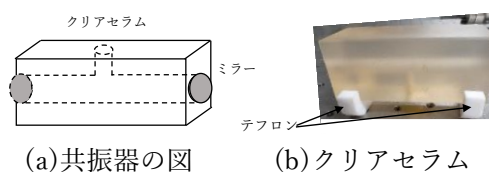


図 3.1：共振器の構成

共振器の製作では、まず片側のミラーとピエゾを固定した。次に反対側のミラーを固定する位置を決定した。He-Ne レーザー光を図 3.2 のように配置し、固定済みのミラーを下にして、スペーサーを縦に置いた。共振器内に真っすぐ入射光が入るようにミラー 1、2 でアライメントし、共振器の 2 つのミラーが平行になる位置で上側のミラーを固定した。

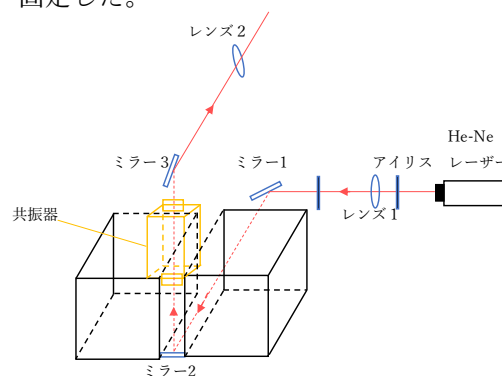


図 3.2：ミラーを貼り付ける位置を決めるための実験配置図

4 共振器の特性評価

効率的に入射光を共振器に結合させるため、入射光の空間モードと共振器の固有モードが一致する必要がある。本研究では、図 4.1 のように、光源と共振器の間にレンズを置くことによって、モードマッチングを行った。

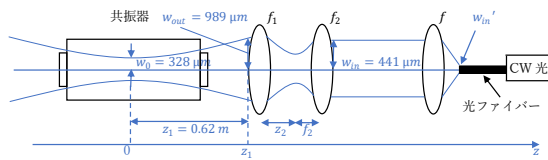


図 4.1：共振器とレンズの位置

光線行列から、共振器の中心でのビームサイズ w_0 を求めた。ビーム半径 w_{in} は、入射ビーム半径を w_{in}' として近似的に求め、最小ビームサイズ w_0 を実現させるビーム半径 w_{out} も求めた。焦点距離 f_1 と f_2 の比は、 $f_1 : f_2 = w_{out} : w_{in} = 2.2 : 1$ となった。本研究では、 $f_1 = 75 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 50 \text{ mm}$ のレンズを用いた。

共振器の特性評価を行うため、図 4.2 のような光学系を組んだ。

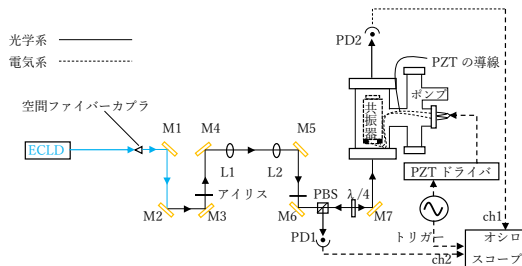


図 4.2：実験の配置図．M1~M7: 金ミラー、PD1,PD2: 受光器、L1 ($f = 50 \text{ mm}$), L2 ($f = 75 \text{ mm}$): 平凸レンズ、PBS: 偏光ビームスプリッタ、 $\lambda/4$: $\lambda/4$ 板。

まず、モードマッチング用レンズ L1、L2 を配置する光路が真つすぐになり、かつ共振器を構成する 2 枚のミラーに対して光が垂直入射するようにアライメントした。そして、共振器の反射光を観測するため、PBS、 $\lambda/4$ 板を配置した。実験では、光源に波長 1550 nm の外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を用いた。

ファンクションジェネレータの出力をピエゾドライバで増幅して、ミラーについているピエゾ素子に印加することで、共振器長を掃引した。ファンクションジェネレータの設定値は、1FSR 以上掃引するため、周波数 10 Hz 、振幅 2 V の三角波とした。図 4.3 にオシロスコープで観測した反射信号と透過信号を示す。入射光が透過の条件 $L = \lambda n/2$ を満たすとき、光は共振器を透過して PD2 で検出される。PD1 で検出される反射信号は、透過光とは逆に $L = \lambda n/2$ のとき著しく下がる。図 4.3 に示す反射光からカップリング効率は 13% と見積もられた。

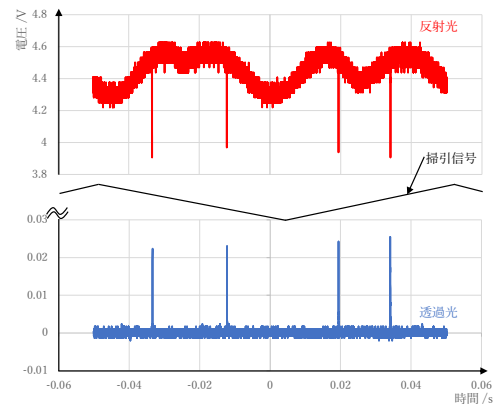


図 4.3：共振器の透過信号と反射信号

図 4.4 に FSR 測定のための配置図を示す。これは図 4.2 とほとんど同じで、違いは Er ファイバーアンプと電気光学変調器 (EOM)

が挿入されたことである。

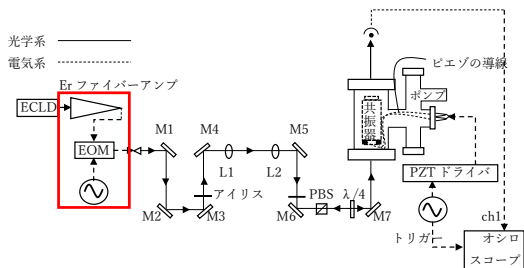


図 4.4 : FSR 測定の配置図

図 4.5 の位相変調した透過光は、サイドバンドがキャリアから 250 MHz はなれたところに現れている。EOM に印加する正弦波の周波数を上げていくと、その周波数に応じてサイドバンドがキャリアから離れていく。正弦波の周波数が FSR の半分になるとき、隣あう縦モードのサイドバンドが重なるので、これを用いて FSR を見積ることができる。

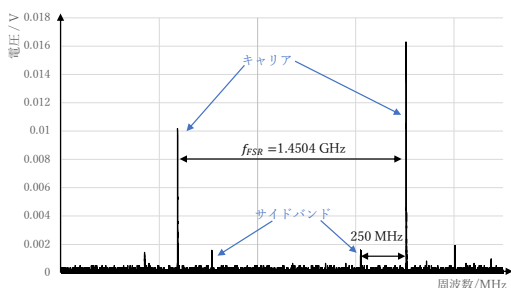


図 4.5 : FSR の測定

測定結果、 $f_{FSR} = 1.4504 \text{ GHz}$ となった。共振器長 L は、スペーサーの長さ 0.10 m に、ピエゾの厚さ 2.4 mm も考慮すると、 f_{FSR} の理論値は 1.46 GHz であり、近い値が計測できた。

フィネスの測定では、リングダウン時間 τ_0 を計測した。図 4.6 にリングダウン減衰を示す。ファンクションジェネレータの設定値は、周波数 10 Hz 、振幅 200 mV の三角波と

した。レーザー光の線幅が約 20 kHz のため、リングダウン減衰を正確に見るには振幅を約 60 mV にするべきだが、このようなゆっくりとした掃引の場合 CW レーザー周波数が安定しないため、 200 mV を採用した。

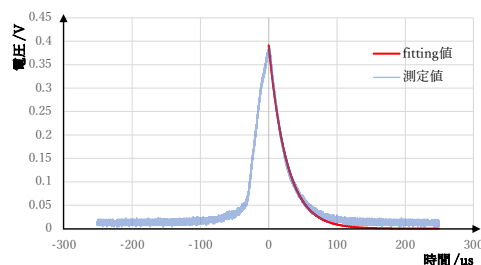


図 4.6 : リングダウン減衰

式(2.1)から、 τ_0 の測定結果は $26.3 \mu\text{s}$ 、フィネスの計測値は 247700 となった。フィネスの理論値は、 78538 であるため、計測値は理論値の約 3 倍となった。

5 考察とまとめ

カップリング効率、モードマッチングで計算した焦点距離の比に、より近いレンズを使用すると上がると考えられる。FSR は、理論値に近い結果が得られた。フィネスは、CW レーザー周波数を安定化し、リングダウン減衰の観測に適切な電圧を掃引すれば、理論値に近い値になると考えられる。

今後の分子分光実験では、共振器に分子を封入し、音響光学素子 AOM を用いて光を ON/OFF してリングダウン時間を測定し、その値から吸収係数を導き出す。また、分子の遷移周波数を高精度で決定するために、光源の CW レーザーの周波数を光コムで制御する予定である。