

1.はじめに	- 2 -
2. 二酸化炭素.....	- 3 -
3. マルチパスセルの概要.....	- 4 -
3.1 ランバート・ビアの法則.....	- 4 -
3.2 マルチパスセルによる吸収分光法.....	- 6 -
3.3 マルチパスセルの種類	- 6 -
3.4 マルチパスセルの理論式.....	- 8 -
3.5 マルチパスセルのシミュレーション	- 9 -
4. マルチパスセルの製作	- 11 -
4.1 放物面鏡.....	- 11 -
4.2 ロッドミラー.....	- 11 -
4.3 マルチパスセルの製作	- 12 -
5. 直接吸収法による透過率測定.....	- 14 -
5.1 光検出器.....	- 14 -
5.2 透過率測定	- 14 -
6. 二酸化炭素の吸収測定	- 17 -
6.1 HITRAN データベース	- 17 -
6.2 半導体レーザ.....	- 17 -
6.3 波長変調分光法	- 18 -
6.4 マルチパスセルのアライメント	- 19 -
6.5 シングルビームによる二酸化炭素の吸収測定.....	- 19 -
6.6 デュアルビームによる二酸化炭素の吸収測定.....	- 21 -
7. まとめ	- 23 -
8. 今後の課題.....	- 23 -
参考文献	- 24 -

1.はじめに

近年の地球環境の悪化が懸念されている。中でも注目されているのが地球温暖化である。この地球温暖化は温室効果ガスが原因と考えられている。一般的に温室効果ガスとして二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、対流圏オゾン(O₃)、フロン類(CFCs)などが挙げられる。温室効果ガスは、太陽から流入する可視光の日射エネルギーは透過させて地表面を暖め、地表から放射される波長の長い赤外線は吸収しやすい性質を有している。そのため温室効果ガスが増加すると、地球に入る日射エネルギーと地球から出る熱放射エネルギーとのバランスが崩れ、気温が上昇し、地球温暖化が進むと考えられている。また、気温上昇に伴う生物圏内の生態系の変化、海面上昇による海岸線の侵食など二次的な問題まで含め地球温暖化問題と言われている。この温室効果ガスの濃度は数 ppb から数百 ppm の濃度領域であり、これらの環境問題を解決するためには高感度な原因物質の濃度分布や構成物質の分析技術や測定技術が求められる。

測定方法には、大きく分けて化学的手法と光学的手法に分けられる。従来の主要な測定手段である化学的手法では、測定結果を出すまでにかなりの時間を要し、リアルタイムでの測定が難しい。また、試薬を用いるためサンプルガスを変化させてしまう。

もう一つの光学的手法では、特徴としてリアルタイム測定や広域測定、非破壊性が挙げられる。光学的手法の中で高感度の測定方法として、吸収分光法が挙げられる。吸収分光法は、特定の波長において気体分子が光を吸収することを利用し、その気体の成分や濃度の測定を行うものである。このとき、測定の高感度化は長い光路長により実現される。

本研究では長光路を確保するための Herriott 型マルチパスセルの製作を行い、光学的手法により温室効果ガスの一つと考えられている二酸化炭素の吸収測定を行うことを目的とした。

2. 二酸化炭素

二酸化炭素は赤外線 の $2.5\sim 3\mu\text{m}$ 、 $4\sim 5\mu\text{m}$ の波長帯域に強い吸収帯を持つため、地上からの熱が宇宙へと拡散することを防ぐ、いわゆる温室効果ガスとして働く。二酸化炭素の温室効果は、同じ体積あたりではメタンやフロンにくらべ小さいものの、排出量が莫大であることから、地球温暖化の最大の原因とされる。大気中の二酸化炭素濃度は約 380 ppmv であり、年間 1.5 ppmv 増加していると言われている。産業革命以前の大気中の二酸化炭素濃度は約 280 ppmv であり、過去 200 年間で大気中の二酸化炭素濃度が約 100 ppmv 増加した。この原因の主な理由としては世界の人口増加、工業・農業の発展が考えられている。人為的発生源としては、石炭を用いた火力発電や自動車の排気ガス、工場の排気など化石燃料の燃焼が最も多い。熱帯雨林を破壊する焼畑農業も主要な原因である。一方で自然的発生源としては、火山活動やシベリア、オーストラリアの自然的発火による山火事など、自然現象に起因して発生する広域の自然火災によっても大量に発生する。また、二酸化炭素は海中にも直接取り込まれ、降雨に溶け込み湖沼に流れ込み、最終的に海洋にも流れ込む。炭素自体は単体または化合物として、地球上のほとんど全ての化石燃料や生物にも含まれる。海中のサンゴに炭酸カルシウムなどとして海水含有分から取り込まれ、森林の木々の組成には大気中や地中の水分などから固定される。

3. マルチパスセルの概要

3.1 ランバート・ビアの法則

ランバート・ビアの法則は紫外可視、赤外、近赤外といった多くの波長領域において有用である。ここで透過率 T と吸収率 A を定義する。図 2.1 に示すような長さ l cm のセルに光を入射した場合を考える。セルの入射位置における強度を I_0 、セルを透過した後の強度を I_t とする。このときの透過強度 T は

$$T = I_t / I_0 \quad (3.1.1)$$

となる。つまり透過率 T は「入射光の強度に対する透過光の強度の比」と言い換えることが出来る。一方で、吸収率 A は

$$A = I_a / I_0 \quad (3.1.2)$$

と定義する。すなわち吸収率 A は「入射光の強度に対する吸収された光の強度の比」と言い換えることが出来る。またセルは光を散乱せず、非蛍光性であると仮定する。

(ただし、実際の実験では多重反射のセルを用いているので光の散乱が生じている。)

$$I_0 = I_a + I_t \quad (3.1.3)$$

が成立する。したがってこの場合は、

$$A + T = 1 \quad (3.1.4)$$

となる。

次に入射光の減衰を数式で示す。セル内の入射光が入射位置からの距離 x から $x+dx$ まで進んだとすると透過強度は I から $I-dI$ まで減衰すると仮定する。このときの減衰強度 dI は、入射光強度 I 、試料の濃度 c (mol dm³)、距離 dx に依存する。

$$-dI = \varepsilon^* I c dx \quad (3.1.5)$$

ここで ε^* は比例定数である。式(2.2.5)を長さ 0 から x まで定積分する。(長さ 0 および x における光の強度をそれぞれ I_0 、 I_t とする)

$$-\int_{I_0}^{I_t} \frac{dI}{I} = \varepsilon^* c \int dx \quad (3.1.6)$$

よって

$$I_t = I_0 \exp(-cl\varepsilon^*) \quad (3.1.7)$$

また比例定数 ε^* を補正すると

$$\varepsilon = 0.434\varepsilon^* \quad (3.1.8)$$

これを式(2.1.5)に代入すると

$$I_t = I_0 \exp(-cl\varepsilon) \quad (3.1.9)$$

が得られる

式(2.1.9)は光の強度が指数関数的に減衰することを示している。式(2.1.9)のことをランバート・ビアの法則と呼ぶ。通常、試料が気体の場合は式(2.1.9)を対数で表す。

$$\ln(I_0 / I_t) = \ln(1/T) = cl\varepsilon \quad (3.1.10)$$

$\ln(I_0 / I_t)$ を吸光度(absorbance)という。ここで ε はモル吸収係数と呼び、特定波長における分子の吸収する度合いを示している。吸光度は試料の濃度 c (mol/dm³)、光路長 l 、モル吸収係数(mol dm³ cm⁻¹) ε に依存する。よって濃度 c (mol/dm³)、光路長 l 、モル吸収係数(mol dm³ cm⁻¹) ε のいずれからが大きくなると吸光度は大きくなる。しかしランバート・ビアの法則は常に成り立つと限らない。ランバート・ビアの法則からのずれはセル内の試料の濃度が高い状態でのセル内の分子の相互作用など、いろいろな原因が挙げられる。

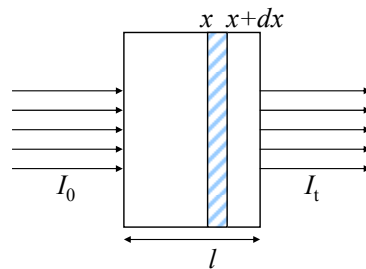


図1 透明体における入出射光

3.2 マルチパスセルによる吸収分光法

図 2 にマルチパスセルを用いた気体の測定の様子を示す。マルチパスセルとは、複数の放物面鏡を使い、光を多重反射させることによって長光路を作る装置である。光源からの光がマルチパスセル内で多重反射することで、セル中の気体を複数回通過し、その吸収により減少した光強度をフォトダイオード (PD) で測定することによって、光の透過率を求める。この透過率からランバート・ビアの法則により濃度を算出される。

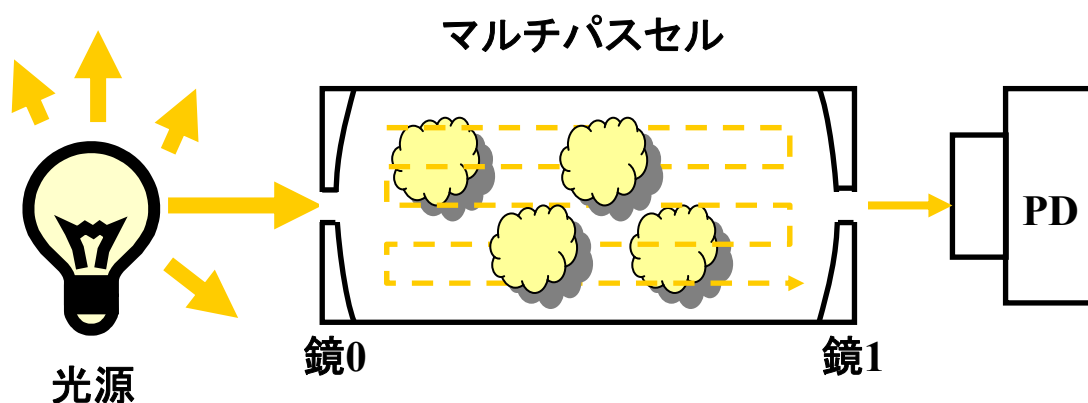


図 2 マルチパスセルの基本構成

3.3 マルチパスセルの種類

マルチパスセルは、おおまかに Herriott 型と White 型の二種類に大別される。

図 3 に Herriott 型マルチパスセルの基本構成を示す。特徴は、入出射光の位置が同じであり反射回数は特定の値を取ることや一方の鏡のみ動かすことで、光路長と反射回数の決定ができることである。

図 4 に White 型マルチパスセルの基本構成を示す。特徴は、複数の鏡を使用することで反射回数を任意に選択することができ、光路長を自由に変えられることである。しかし、複数の鏡を使用するため光路の調整が Herriott 型に比べて困難である。

本研究では、光路の調整が容易なことと鏡 2 枚のみで長光路を得られることから Herriott 型マルチパスセルを用いる。

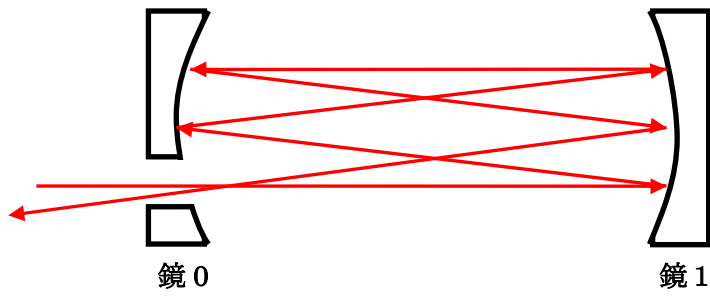


図 3 Herriott 型マルチパスセルの構成

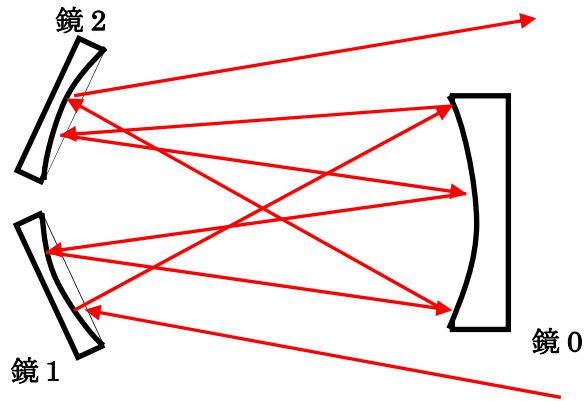


図 4 White 型マルチパスセルの構成

3.4 マルチパスセルの理論式

図5のように鏡の座標系を定める。z軸は2つの鏡の中心を通り、x軸とy軸はz軸に対して垂直である。鏡0にある座標 $(x_0, 0, 0)$ は入射光の位置である。x軸は x_0 に接している。

鏡0と鏡1が平行で2つの鏡の焦点距離 f が等しい場合、反射を繰り返す中で光線がセル内から飛び出さないような鏡の間隔 d の条件は次式で表される。^[2]

$$0 \leq d \leq 4f \quad (2)$$

入射光の傾き x'_0, y'_0 と鏡の間隔 d は次式で示される。

$$x'_0 = -\frac{x_0}{2f}, y'_0 = \frac{x_0}{2f} \quad (3)$$

$$d = 2f \left(1 - \cos \frac{N-2}{2N} \pi \right) \quad (4)$$

ここで N は総反射数である。ここで、 θ を入射角とすると n 回反射後の反射点の位置 x_n, y_n は次式で表される。

$$\begin{aligned} x_n &= x_0 \cos N\theta + \sqrt{\frac{d}{4f-d}} (x_0 + 2fx'_0) \sin N\theta \\ y_n &= y_0 \cos N\theta + \sqrt{\frac{d}{4f-d}} (y_0 + 2fy'_0) \sin N\theta \end{aligned} \quad (5)$$

光が N 回反射した後に再び入射した位置から出射するとき $x_0 = x_N, y_0 = y_N$ となる必要がある。そのときの N の条件は次式で示される。

$$N = 2(2J + 1) \quad (6)$$

ここで、 J は整数であり、鏡面上での反射点の周回数と等しくなる。

各光路長は、反射点の位置によって異なり n 回目に反射したときの光路長は、

$$L_n = \sqrt{d^2 + (x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2} \quad (7)$$

となる。また、総光路長は反射した回数分の光路長を合計したものであり、次式で表される。

$$L = \sum_{n=1}^N L_n \quad (8)$$

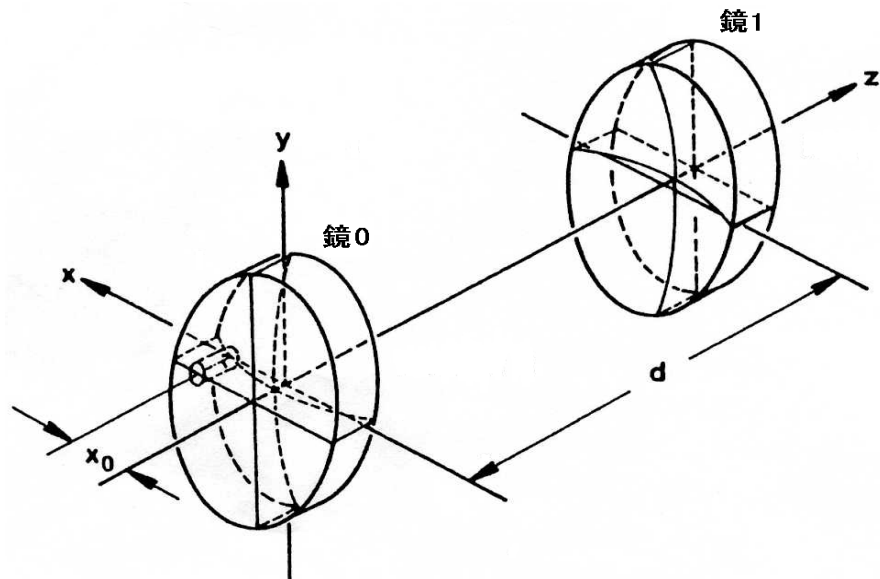


図5 マルチパスセルの座標系

3.5 マルチパスセルのシミュレーション

理論式を用い、総反射数を6回にして、シミュレーションを行った。入射光の位置を $x_0=40\text{mm}$, $y_0=0\text{mm}$ 、焦点距離 f を 647.7mm 、としたとき、式(4)から鏡の間隔 d は 647.7mm になる。図6は鏡0と鏡1を重ねた(図5において x - y 平面)ときの各反射点を表したものであり、6回反射し入射口に戻る事がわかる。各反射点において番号が偶数のものは鏡0の反射点、奇数のものは鏡1の反射点である。また、図6から反射点は楕円状に位置していることが分かる。図7はマルチパスセルを横から見た(図5において y - z 平面)光路の軌跡を表したものである。この6回の反射での総光路長は式(7)より 3.89m である。

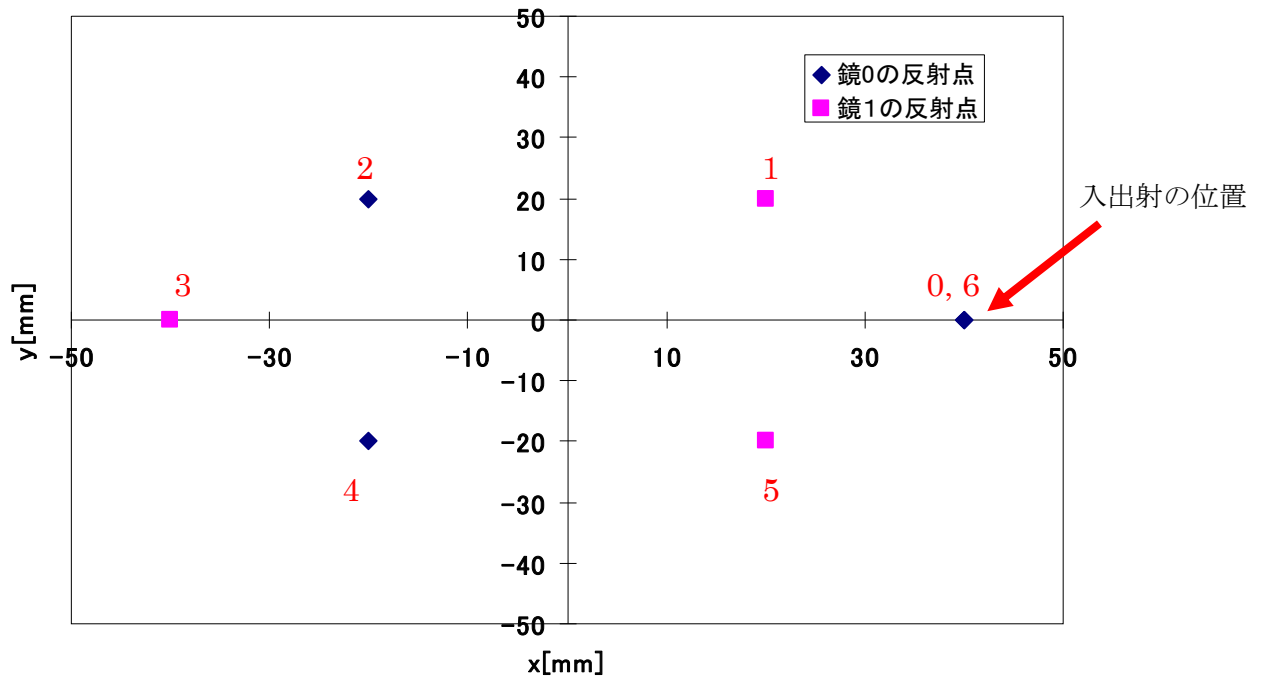


図6 総反射回数6回の反射点

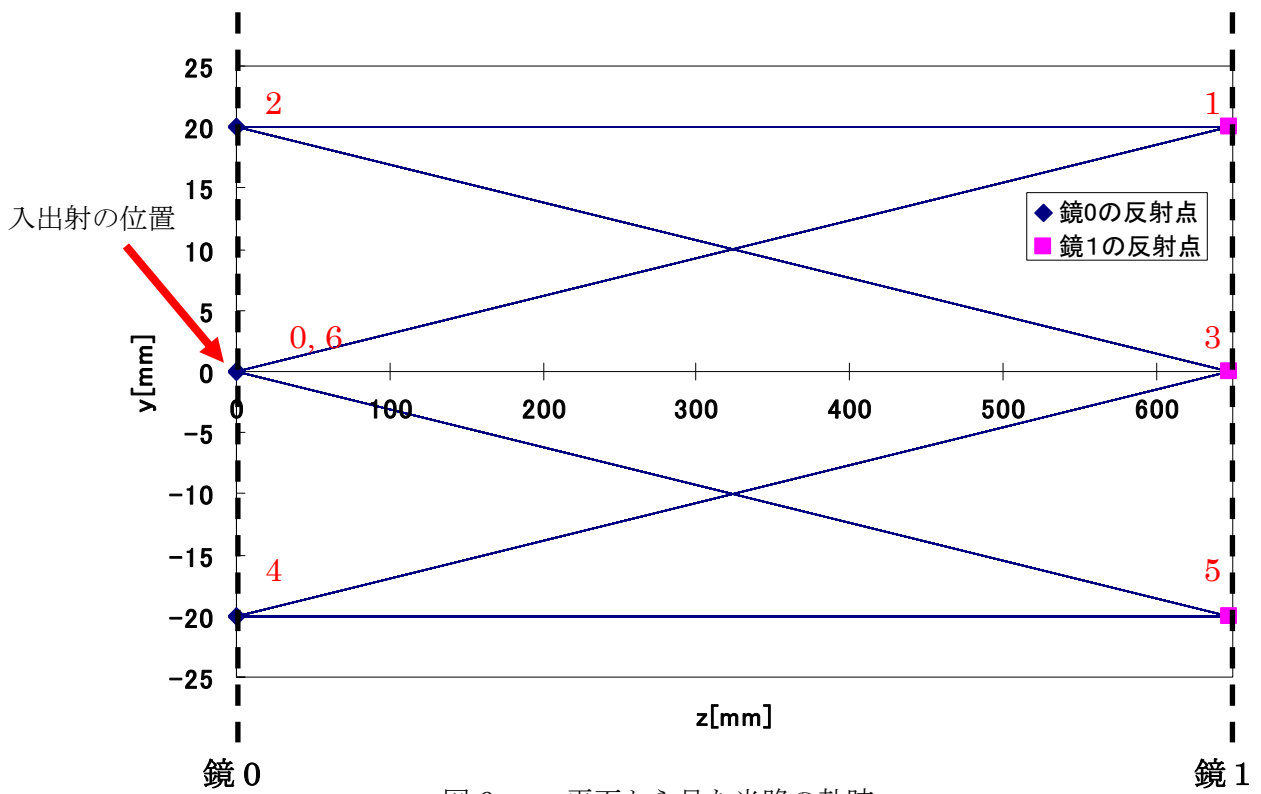


図6 y-z平面から見た光路の軌跡

4. マルチパスセルの製作

4.1 放物面鏡

本研究で使用する放物面鏡の仕様を表 1 に示す。放物面鏡の表面には金属膜として金コート、保護膜として一酸化ケイ素が施されている。鏡に金コートを施すことによって、波長が $0.7\sim 0.8\mu\text{m}$ において 94%以上、 $0.8\sim 2\mu\text{m}$ において 97%以上の平均反射率が得られる。

表 1 放物面鏡の仕様

型番	Edmund 32066566-G
外径 Dia	108.0 + 1.5/-0 mm
焦点距離 f	647.7 mm
焦点距離公差	±1%
コバ厚ET	19.1 mm
コバ厚公差	0 -10%
面精度	1/8λ
表面品質(キズ-ブツ)	60 - 40

4.2 ロッドミラー

ロッドミラーとは、ロッドレンズの一方の端面を 45° にカット研磨し、その面に金属膜を蒸着した小型の鏡である。金属膜としてアルミコート、保護膜には一酸化ケイ素が施されている。平均反射率は波長 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ において 85%以上である。本研究では、ロッドミラーを使用してマルチパスセルにレーザ光を入射させた。表 2 にロッドミラーの仕様を示す。

表 2 ロッドミラーの仕様

型番	Edmund 54098-G
外径 Dia	5.00 mm
全長 L	10.0 mm
基板	BK7
角度公差	$45^\circ \pm 10$
外径公差	0 -0.03 mm
全長公差	±0.1 mm
表面品質(キズ-ブツ)	40 - 20

4.3 マルチパスセルの製作

図7に構築したマルチパスセルの構成と、図8にその外観を示す。図7のように、セル内への光の入出射には、ロッドミラーを介して行った。ロッドミラーを使用する利点として、反射回数を増やすと、鏡に映る反射点の間隔が狭くなり反射点の確認できなくなるがロッドミラーの位置を調整することで間隔を調整できる。ロッドミラーは自作のミラーマウントに固定され、マウントのネジを調整することで微調整ができる。ロッドミラーの位置は、シミュレーションと同様に $x_0=40\text{mm}$, $y_0=0\text{mm}$ の位置にした。これは、本実験で使用する放物面鏡の半径が 50mm であり、その面積を有効に利用するためである。セルの下部には、 1500mm のアルミフレームが2本設置され、鏡を自由にスライドさせることができる。

製作したマルチパスセルでは、鏡の間隔や光源の入出射角度の調整、ロッドミラーの角度調整などから総反射数 50 回程度が限度となる。光源に He-Ne レーザ(波長 632.8 nm) を使用した反射回数の測定では 46 回の反射を確認できた。

図9は、製作したマルチパスセルを総反射数 6 回に設定し、鏡の間にポリエチレンフィルムを置くことで、その反射点を観測したものである。図6のシミュレーションと同様に反射点 6 点を確認することができる。また、反射点の位置が全体的に傾いているが、これはロッドミラーの傾きが原因であると考えられる。

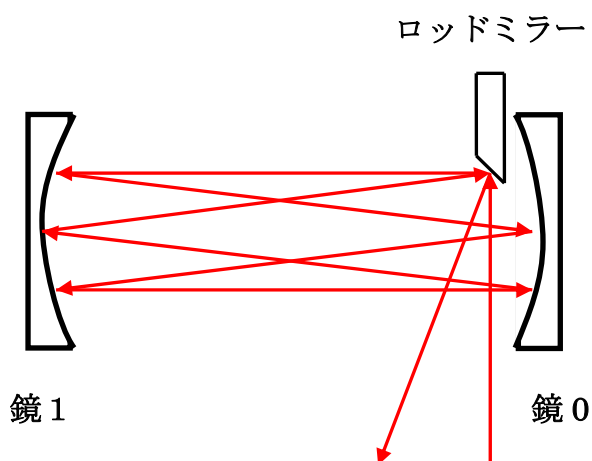


図7 マルチパスセルの構成

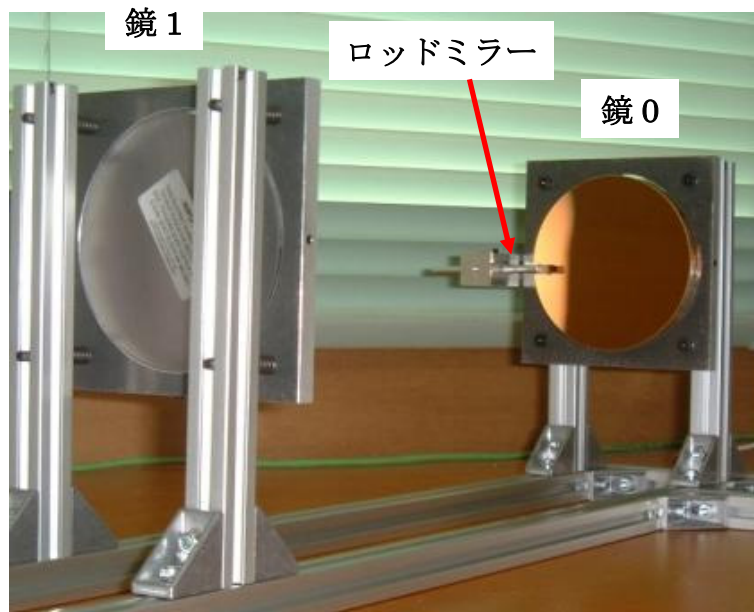


図 8 マルチパスセル外観



図 9 総反射数 6 回の反射点

5. 直接吸収法による透過率測定

5.1 光検出器

直接吸収法による出力光強度を測定するため、光検出器の電流電圧変換回路を製作した。

図 3.4 に自作した光検出器の回路図を示す。

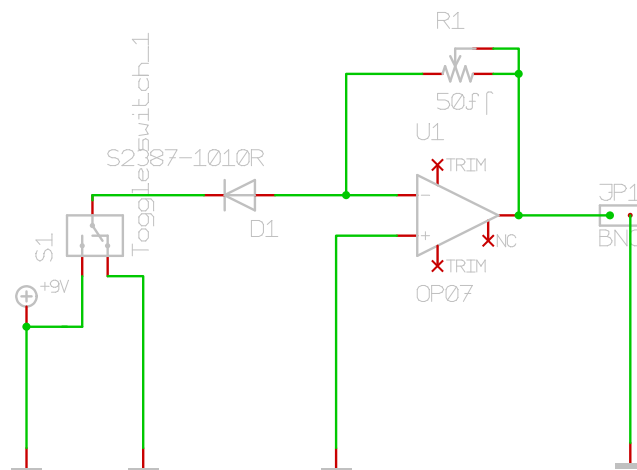


図 10 光検出器回路図

光検出器のフォトダイオード(PD)には Hamamatsu 製 S2387-1010 を用いた。表 3 にフォトダイオードの仕様を示す。自作した光検出器では、光強度が電圧として出力されるため、可変抵抗値より PD による光励起値を求め光出力に換算した。

表 3 フォトダイオードの仕様

型番	S2387-1010R
感度波長範囲	320~1100nm
受光感度 ($\lambda = 633\text{nm}$)	0.37A/W

5.2 透過率測定

製作したマルチパスセルで、直接吸収法による透過率の測定を行った。放物面鏡の間に物質が存在すると透過率が大きく減少することを確認するために、気体の代わりにポリエチレンフィルムの透過率を求めた。図 10 に測定の概略図を示す。図 10 のように鏡の間に縦 20cm、横 15cm、厚さ $10\mu\text{m}$ ポリエチレンフィルムを設置、光源には波長 633nm の He-Ne レーザを使用し出射光の出力強度を、光検出器を用いて測定した。

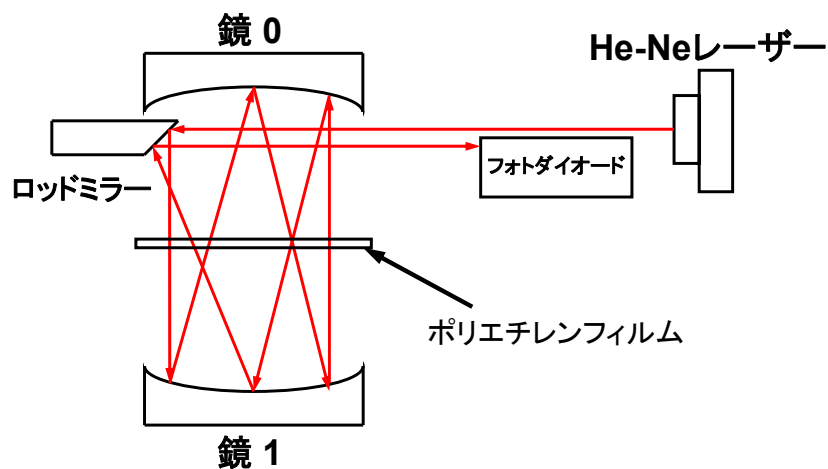


図 10 透過率測定概略図

図 11 はポリエチレンフィルムの透過率の測定結果である。マルチパスセルの総反射数を変えて測定した。図 11 より、ポリエチレンフィルムを設置していない場合の鏡の反射率は 87% に近似でき、ポリエチレンフィルムを設置した場合の鏡の反射率 80% に近似できる。

ポリエチレンフィルムを設置していない場合の光強度とポリエチレンフィルムを設置した場合の光強度を比較すると、透過率に約 7% の変化があった。したがって、ポリエチレンフィルムの透過率は約 91.9% と計算される。また、測定結果より反射回数に伴って透過率が減少することがわかる。この透過率測定結果より、直接吸収法では透過率の小さなものしか測定できないため、より高感度な手法が必要である。

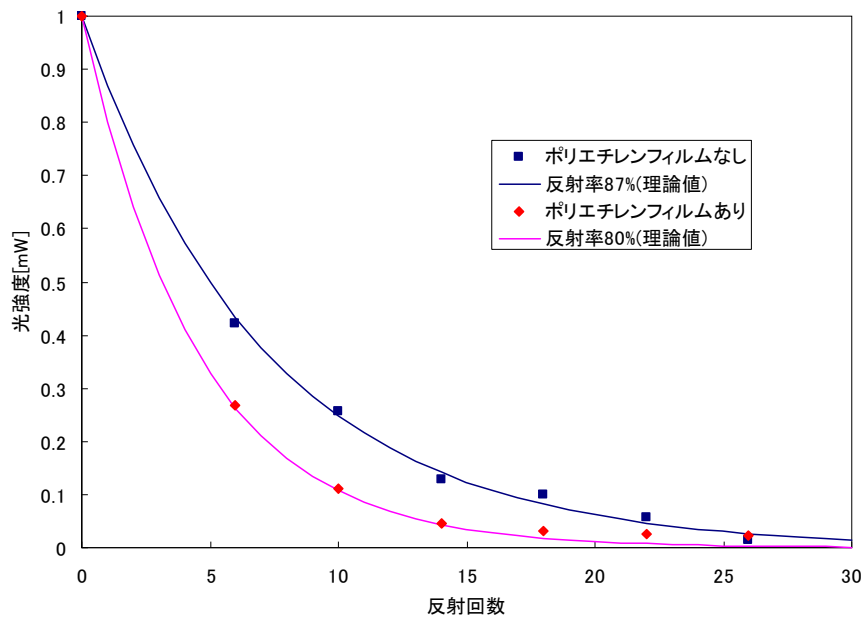


図 11 反射回数と透過率の関係

6. 二酸化炭素の吸収測定

6.1 HITRAN データベース

吸収バンドは通常、低分解能吸収分光測定に利用される。レーザーのような発振線幅が非常に狭くて、高分解能光源を利用した吸収分光測定の場合には吸収波長の選択、他の分子による干渉吸収の有無の確認、吸収分光計の検出能力に関するシミュレーション計算などを行うため、一本一本の吸収線に関する詳細な情報が必要不可欠である。HITRAN は、High-resolution TRANsmission molecular absorption database の名前から簡略化された頭文字であり、数値化された大気成分を中心とした分子吸収線データベースのことである。本研究では、二酸化炭素の吸収線を調べるため、HITRAN データベースを利用した。

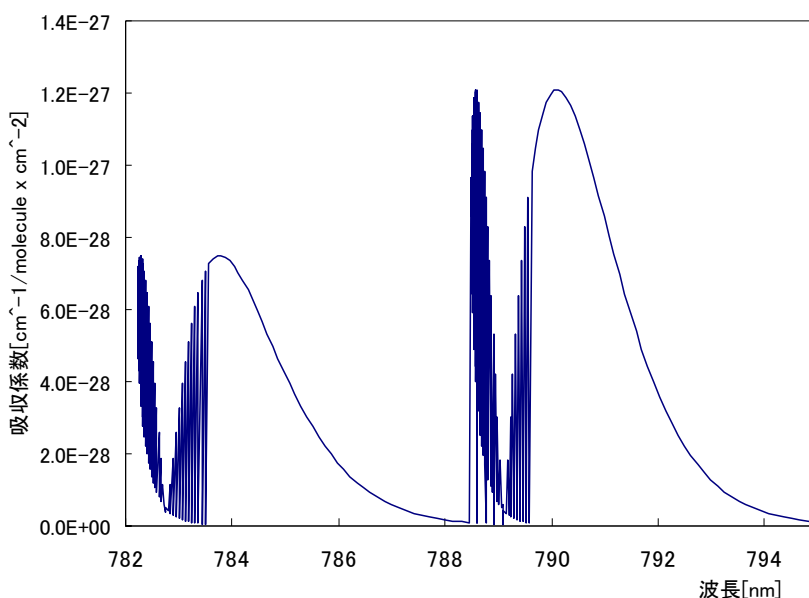


図 12 二酸化炭素の吸収線

図は、HITRAN データベースの二酸化炭素の近赤外線付近の吸収線のデータを横軸に波長、縦軸に吸収係数を取りグラフ化したものである。このグラフより最も吸収の大きな 790.12nm の波長の吸収線を利用し、測定を行うことにした。

6.2 半導体レーザー

近赤外半導体レーザー(LD)は直接遷移型の GaAlAs 結晶を用い Ga と Al の組成を変えることによってバンドギャップ幅を制御し発振波長を調整している。また、市販の LD は活性層($1\mu\text{m}$ 程度)をこれより大きな禁制帯を持つ P 型及び N 型のクラッド層で挟み込んだ、

二重ヘテロ構造を用いている。二重ヘテロ構造によって活性層に効率良く電子と正孔が閉じ込められると同時に、活性層の屈折率がクラッド層よりも大きいために効率の良い光導波路として光子を閉じこめることができる。これらの理由から、低閾値、室温連続発振が可能になっている。本研究では、この波長域の LD である HL7851G(日立製)を使用した。

表 4 使用した半導体レーザ使用 (Tc=25°C)

中心波長	785nm
閾値電流	45mA
スロープ効率	0.55mW/mA
ビーム広がり(平行)	9.5°
ビーム広がり(垂直)	23°

6.3 波長変調分光法

気体分子は、分子種に特有の波長において赤外線を吸収する性質を有しており、この性質を利用して気体を検出することができる。ところが、一般に近赤外領域 (800 nm ~ 2500 nm) に存在する吸収線は吸収が弱く、微量気体を検出するには高感度吸収分光法が必要となる。このような微弱な吸収を高感度に検出するために周波数変調法(frequency modulation spectroscopy : FMS)が利用される。この技術は検出気体を選択的にリアルタイム測定することができ、周波数変調吸収分光を用いた高感度な装置は一般的に大気モニタリングでのガスセンサーなどで用いられる。

周波数変調分光法の原理としては、レーザの発信周波数に対して周波数変調を加えることによって吸収率の変化を透過強度の変化に変換することができる。変調周波数を参照信号として光検出器の出力信号と掛け合わせることで、一次変調の場合はサイドバンドの強度の差を測定し、二次変調の場合は搬送波の強度とサイドバンドの強度の平均の差を測定している。これにより、検出帯域以外のノイズが除去され、吸収スペクトルを高感度に検出することができる。この方法には変調させる周波数が高い場合(100MHz~1GHz)と低い場合(<10MHz)がある。一般的に前者をFMS、後者を波長変調吸収分光法(WMS: wavelength modulation spectroscopy)と呼ぶ。ダイオードレーザの発振周波数はレーザの温度と印加電流によって変調する。一般的にはレーザ分光法においてまず測定したい周波数付近にするレーザ温度を変える。それからある程度レーザの温度が一定になってから印加電流を変え周波数を微調節する。周波数変調はDC電流に時間変化電流を加えられ、変調周波数よりも

遅い速度で走査されている。

測定対象が気体の場合、その吸収線の広がり数は数 GHz に及ぶ。これを FMS で測定する場合、この広がりと同様以上の高い変調周波数が必要とされる。また、これに対応できる高速の受光素子が必要とされるが、GHz に対応できる受光素子は面積が小さく高価なものが多い。一方で、WMS の場合比較的高い周波数(10kHz~10MHz)を用いれば、高価な受光素子や複雑な制御回路なしに FMS に匹敵する検出感度が達成可能である。さらに低い周波数(<100kHz)を用いれば回路設計が容易な上、装置のコンパクト化、低コスト化を図ることができる。

6.4 マルチパスセルのアライメント

多数反射後のレーザー光は非常に弱くなっているため、IR カードのみでのアライメントが難しい。そこで、強度の強い He-Ne レーザを用い、アライメントを行った。He-Ne レーザ光と検出用レーザービーム光を同一軸上に乗せた後、光導入口に入射させる。光は 36 回のパスの後、セルから出てくる。このときの光路長は約 30m に達する。ディテクター検出部に集光するように、光検出器を配置した。IR カードで光の位置を確認しつつ、ディテクターからの取り込み信号を見ながら、得られる信号強度が最適になるように微調整をした。しかし、ディテクターに取り込まれる光の強度が強すぎるとロックインアンプがオーバードライブしてしまうため、光検出器の可変抵抗を調整して出力を調整する必要がある。

6.5 シングルビームによる二酸化炭素の吸収測定

図 13 に半導体レーザーを光源とする吸収分光装置の構成を示す。測定装置は光学系、信号系から構成されている。光源である半導体レーザーから出た光は、二酸化炭素を充満したマルチパスセルを通過した後 PD に入る。PD からの出力信号はロックインアンプ(SRS 製 SR830)に入力される。信号系は電流コントローラ、温度コントローラ、発振器、ロックインアンプ、制御用の PC で構成されている。電流コントローラと発振器はレーザー注入電流を供給するとともに、注入電流を変調させる。まず、レーザーの発振波長が中心波長 $790.12\text{nm}^{[4]}$ に近くなるように温度コントローラで LD 素子(日立製 HL7851G)の温度を変化させる。この状態で、注入電流を階段状に変化させ半導体レーザーの発振波長を一定の間隔で掃引する。変調周波数と同じ周波数成分をロックイン検波することによって吸収スペクトルを測定することができる。

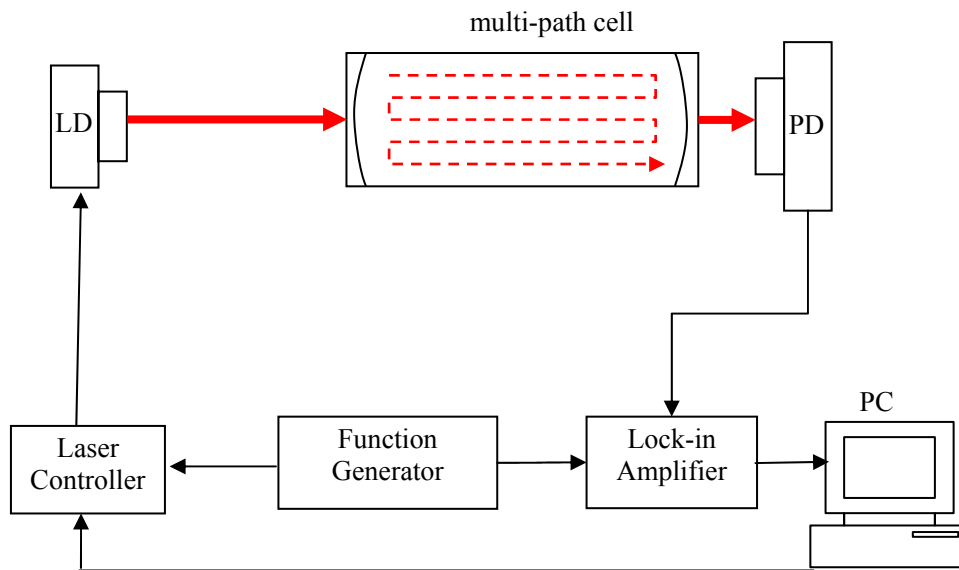


図 13 吸収測定装置の概略 1

図 14 は、二酸化炭素吸収測定結果である。マルチパスセル内に二酸化炭素を充填させた場合と大気中の二酸化炭素濃度の比較である。測定時のロックインアンプの時定数は 300ms、測定感度は 50mV、電流掃引の間隔は 0.2mA、素子の温度は 60.6°C、変調周波数は 1kHz、変調振幅は 2mA、マルチパスセルの光路長は 30m である。65mA 付近において二酸化炭素の吸収による波形が確認できたが、出力にノイズが現れており、高感度測定のためには、その低減が必要となる。

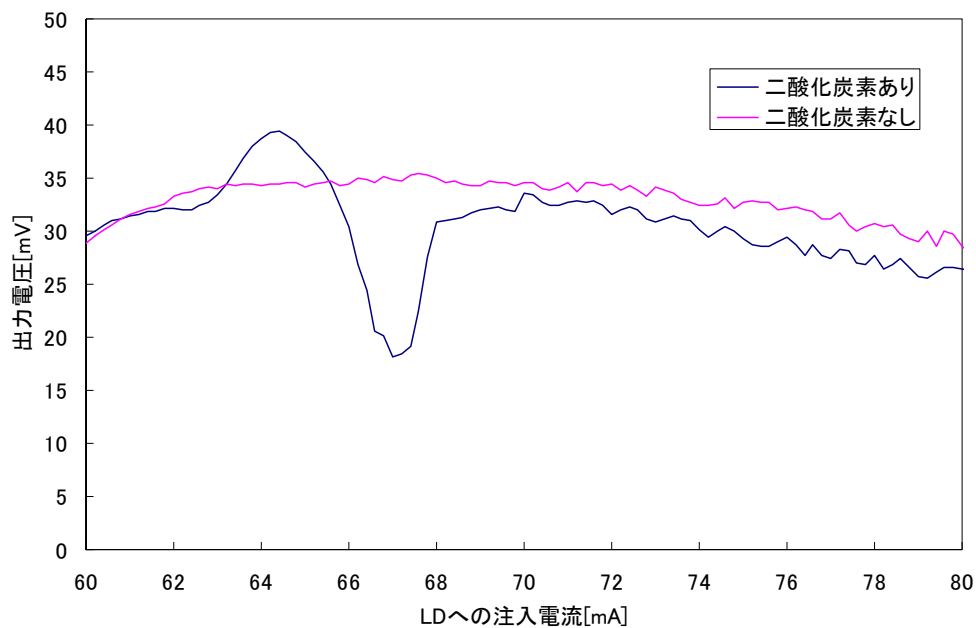


図 14 吸収測定結果

6.6 デュアルビームによる二酸化炭素の吸収測定

シングルビームによる吸収測定ノイズは、光源からの RAM(Residual Amplitude Modulation)ノイズによるものと考えられる。RAM ノイズとは、半導体レーザを注入電流で直接変調するとき同時に発生するものである。この RAM ノイズを低減させるため、本研究ではデュアルビームによるノイズの低減を図った。図 14 にデュアルビームによる吸収分光装置の構成を示す。光源である半導体レーザから出た光は、ビームスプリッター(50:50)により二分されて、測定用ビームとキャンセル用ビームに分かれる。測定用ビームは、マルチパスセルを通過した後 PD1 に入る。一方キャンセル用ビームは直接、PD2 に入る。各 PD からの出力信号は、それぞれロックインアンプに入力され、それぞれ変調周波数と同じ周波数成分をロックイン検波し、その出力の差から光源ノイズを除去した吸収スペクトルが測定される。

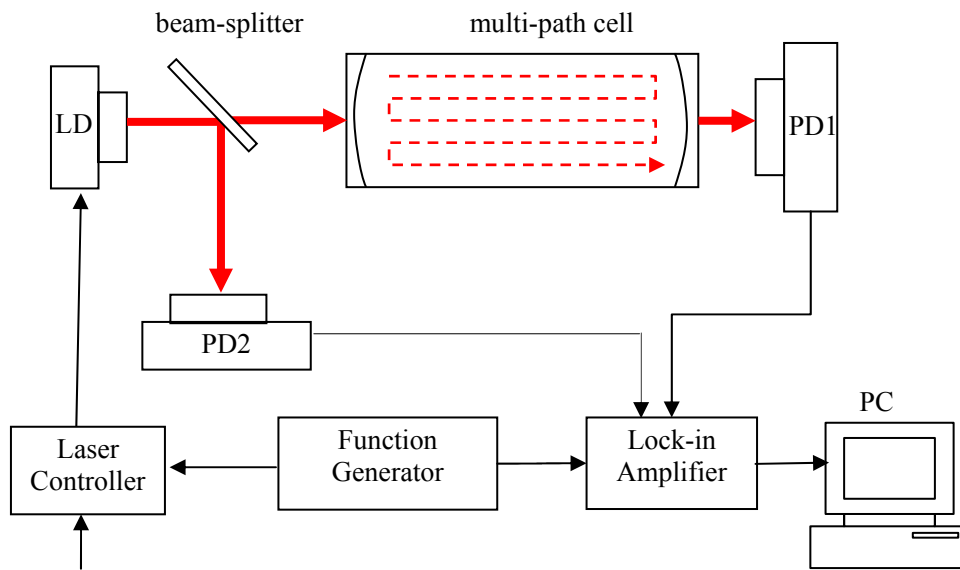


図 15 吸収測定装置の概略 2

図 16 は、二酸化炭素吸収測定結果である。条件は、シングルビームを使った実験と同様に設定した。出力波形はノイズが低減し、二酸化炭素の吸収による微分波形が確認できた。

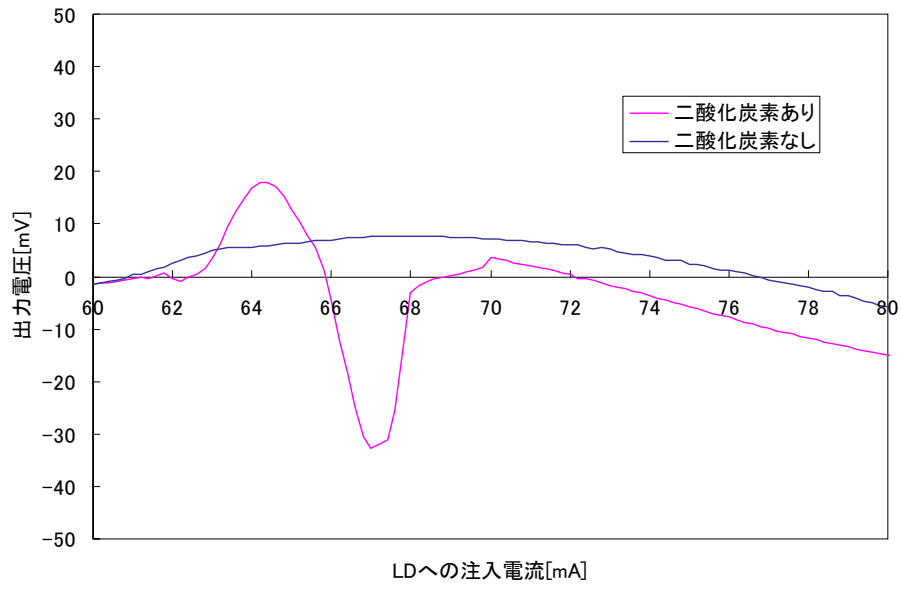


図 16 吸収測定結果

7. まとめ

本研究では、二酸化炭素の吸収測定のため、Herriott 型マルチパスセルの製作を行い、吸収分光法の装置を構成した。製作した Herriott 型マルチパスセルは、He-Ne レーザを用い最大で 46 回の反射を確認することができ、計算により総光路長 55m まで実現できることがわかった。

二酸化炭素の吸収測定では、最初にシングルビームを使った測定を行い、目標である 790.12nm の波長で二酸化炭素の吸収を確認した。また、デュアルビームを用いることで、光源からの RAM ノイズを低減し、二酸化炭素の吸収による微分波形を確認することができた。

8. 今後の課題

製作したマルチパスセルは、幅 1.5m、高さ 0.5m、奥行き 0.5m とサイズが大きい。また、実験で反射回数を変更するたびに、ロッドミラーと放物面鏡の微調整が必要になり、測定前の準備に非常に時間が掛かる。そのため、マルチパスセルの小型化とロッドミラーと放物面鏡の角度、位置を自動調整できる装置の製作が必要である。

使用している半導体レーザーはモードホップが起これ特定の波長を得ることができないため、モードホップ対策に外部共振器型半導体レーザーの製作が必要である。

参考文献

- [1]尾崎 幸洋,河田 聡, 近赤外分光法, 学会出版センター
- [2] J.Altmann, R.Baumgart, C.Weitkamp. Two-mirror multipass absorption cell.Applied Optics.vol.20.995.1981
- [3]J.M.Supplee, E. A. Whittaker, and W. Lenth. Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy. Appl.Optics.vol.33, pp.6294-6302, 1994
- [4]L.S.Rothman, D. Jacquemart, A.Barbe, etc ,The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database, 2004
- [5]山本将史,陳軍,光とレーザー,オーム社