

卒業論文

オプトガルバニック効果による
高分解能分光装置の開発

平成 13 年 2 月

高知工科大学知能機械システム工学科
木村・戸名グループ

鈴木 淳志

(共同研究者：日野 聡一)

目次

1章 序論	1
2章 原理	3
3章 方法	5
1) 機器の配置.....	5
2) 実験機器の説明.....	5
4章 製作	11
1) ハード面.....	11
2) ソフト面.....	17
5章 結果	18
広範囲のスペクトル.....	18
piezo素子を使ったスペクトル.....	19
6章 考察	20
7章 まとめ	23
謝辞	24
参考文献	25

1章 序論

Penning はネオン放電管に別のネオン放電管を近づけたときに放電電圧が変化するという「新しい光電効果」を発見した。これがオプトガルバニック効果の発見であり、放電管中の準安定ネオン原子が別の放電管からの光によって励起され、それが放電インピーダンスの変化につながることで原因と考えられた。約 60 年以上も前のことである。

このように、オプトガルバニック効果とは、原子またはイオンの遷移に相当する波長の光で放電媒質を照射したときに、原子の準位のポピュレーションに変動が生じて放電インピーダンスが変化し、結果として放電電流・放電電圧の変化として観測される現象である¹⁾。

オプトガルバニック効果の研究は、Green らが 1976 年に波長可変のレーザを使い始めてから飛躍的に進展し、さまざまな応用も考えられた。彼らの用いた実験装置は、現在でもオプトガルバニック効果の研究にもっとも典型的な装置となっている。

オプトガルバニックスペクトルは、炎、放電気体やプラズマの中での励起やイオン化過程を研究することに適したテクニックである。特に関心を持つのは、放電中の電子衝撃分裂によってつくられたラジカル（遊離基）と不安定な反応の研究である。これらの種は星間媒体中の分子雲の極めて高いプラズマ中で重要な役割を行っている。

オプトガルバニック効果の実験では、放電管自体が分光観測のサンプルであると同時に検出器にもなっていることと、通常の蛍光分光や吸収分光の実験と違い、励起レーザ光によるバックグラウンドが入ってこないという長所を持っている。このように簡単な装置で感度の高い実験ができるということがオプトガルバニック効果の実験の大きな特徴となっている。

放電管として、ホローカソードランプがよく用いられている。ホローカソードランプの陰極材料が放電中、イオン衝撃によってスパッタリングすることによって放電気体中に陰極材料の金属原子が混入する。この金属原子をオプトガルバニックスペクトルによって検出することができる。

衝突過程や放電気体のイオン化、燃焼過程などの研究のための応用に加えて、このテクニックは、レーザ分光において簡単な波長校正にも使われる。波長可変レーザからの出力の一部はホローカソードスペクトルランプに、他の部分は放電管に入射して測定を行う。この場合未知のスペクトルと既知のスペクトルが同時に記録される。トリウムやウランの多数の線は可視紫外線のスペクトル領域のほとんどいたところに密に分布している。それらは、より明確に測定されるまでの第2波長基準として、約 0.001cm^{-1} の精度で波長のマーカーとして使うことができる²⁾。

今回、高分解能分光装置を開発するに当たって、重要なことは、線幅の狭いレーザを用いることと、高感度にレーザ波長を決定することである。

本実験では、非常に線幅の狭い半導体レーザを用いて、オプトガルバニック効果によって測定された共鳴波長と、既知の原子の波長からレーザ波長を校正した。さらに、その校正されたレーザ波長を用い、Liの共鳴線の測定によって得られたスペクトル線の形からLi原子の温度を決定した。

2章 原理

図1のように、放電中の原子又はイオンの2つのエネルギー準位 E_k, E_i を考える。遷移 $E_k \rightarrow E_i$ を起こすような周波数のレーザを照射すると、それぞれの準位の分布数 n_k, n_i は、光ポンピングによって変化させられる。図1の分布数の変化 $\Delta n_k, \Delta n_i$ はインピーダンス（電流の流れにくさ）の変化に寄与する。

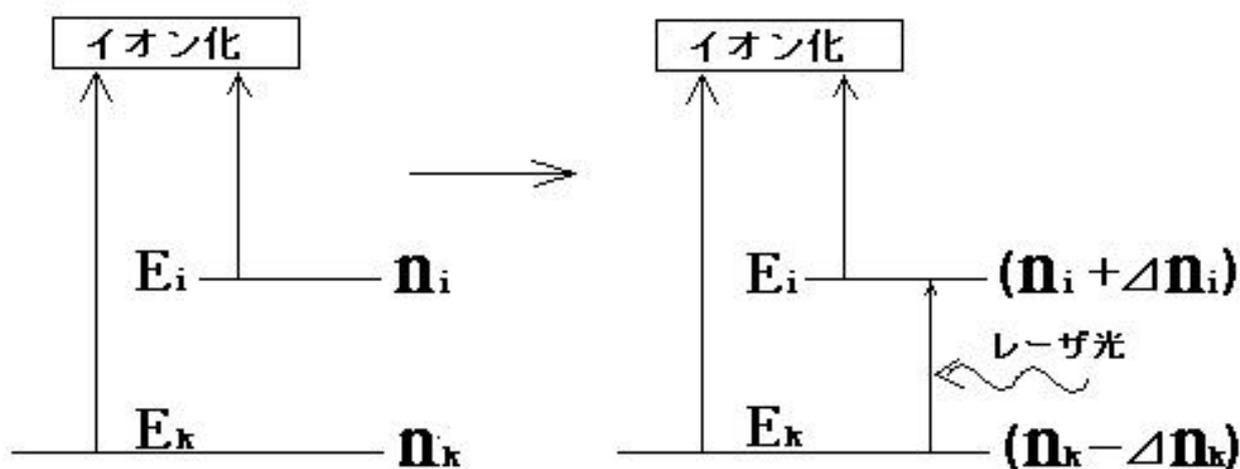


図1 光ポンピング

図2のようにホローカソードランプに一定の電流を流す場合を考える。ホローカソードランプに遷移 $E_k \rightarrow E_i$ を起こすような光が入射すると、電圧変化 V は

$$V = aI(n_i P_i - n_k P_k) \quad (1)$$

で表わされる（ P_m はエネルギー準位 E_m からのイオン化確率を示す）。

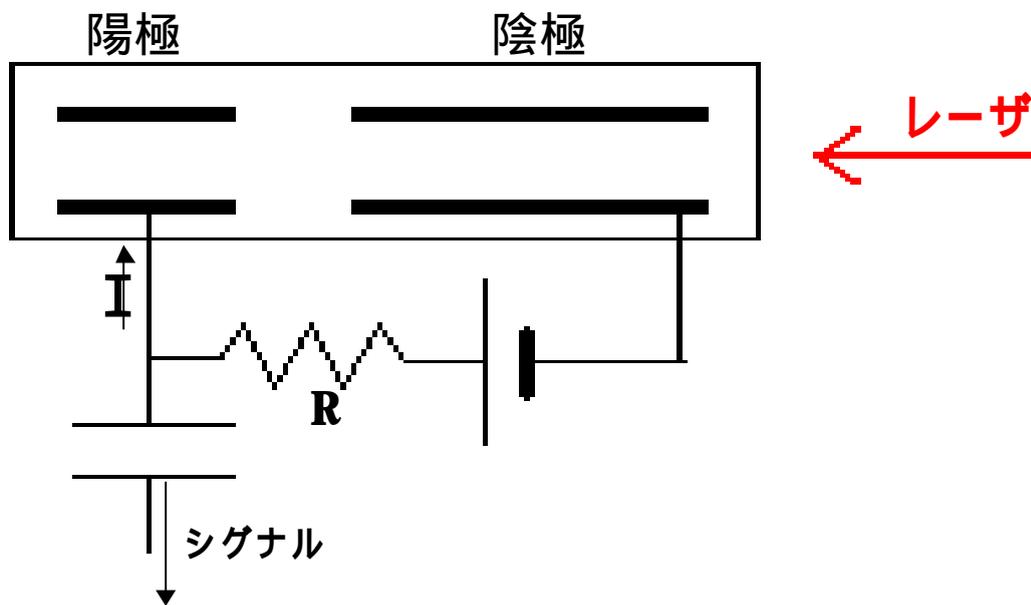


図2 ホローカソードランプの回路図

放電空間内に自由電子を生成する機構が放電インピーダンス、つまりオプトガ
ルバニックスpekトルを決定していることになるが、自由電子の生成過程を取
ると次のいくつかの過程が競合する²⁾。

- ・ 陰極からの二次電子放出：正イオンにたたかれた陰極からの二次電子の放出
- ・ 電子衝撃電離： $A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$ による直接的な衝突
- ・ ペニング電離： $A + B^m \rightarrow A^+ + B + e^-$ の準安定原子の衝突
- ・ 結合性電離： $A^* + B \rightarrow AB^+ + e^-$ の高く励起された原子が関与する衝突

3章 方法

1) 機器の配置

図3に示すような光学系および測定機器を用いて測定を行った。半導体レーザーから出た光をハーフミラーで2つに分け、ホローカソードランプと光波長計に当てる。チョッパからの参照信号と同期したホローカソードランプからのシグナルをロックインアンプで増幅し、そのシグナルと光波長計の出力をそれぞれパソコンに取り込み、オプトガルバニックスペクトルを得ることにした。

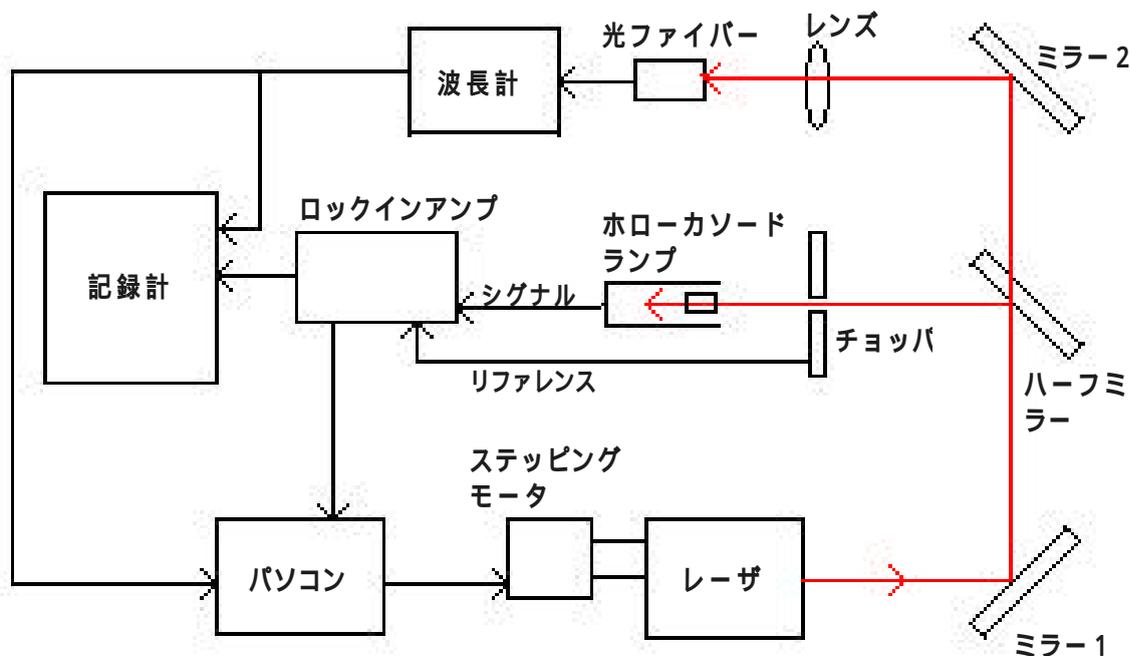


図3 実験装置の配置図

2) 実験機器の説明

半導体レーザー

本実験で光源として用いた半導体レーザー(図4)は、外部共振器を持った波長可変のレーザーで、そのスペクトル線幅は $4\text{MHz}(=6 \times 10^{-6}\text{nm})$ である。

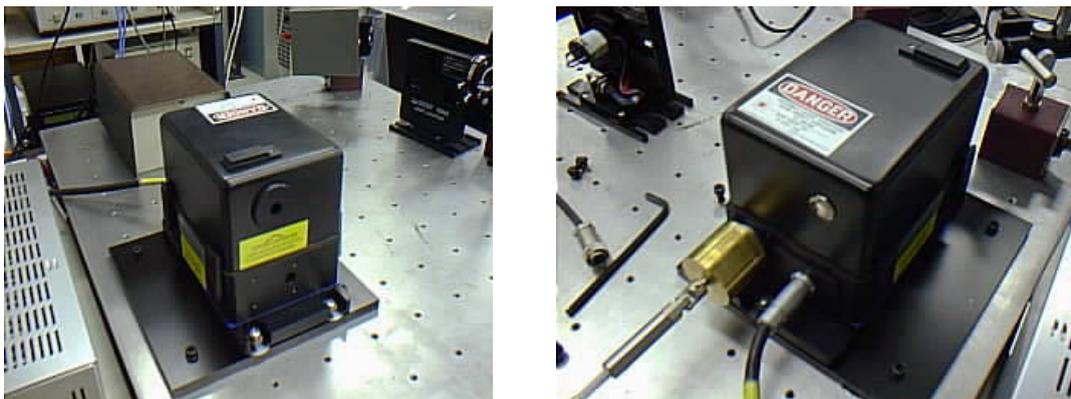


図4 半導体レーザー

今回、半導体レーザーの役割は重要なので、実験を開始する前に半導体レーザーのグレーティングの角度を最適化する必要があった。

最適化する方法として、半導体レーザーのマニュアルに説明されていたことを利用することにした。手順は以下に示す。

-) 最初にあらかじめ調整済みの ECU(Electronic Control Unit)のパワーを ON にして 45 分放置し動作を安定させておく。そして、レーザーをオプティカルテーブルに乗せ、レーザーを ON にして最大許容量までレーザーの電流を上げていく。その最大電流はダイオードモジュールの限界抵抗によって決定される。
-) ECU のパネルから波長を読み取り、ダイオードモジュールのチューニングレンジの真ん中になるようにレーザーを調整する。
-) ファンクションジェネレータから ± 1 V、100 Hz の三角波を出力しオシロスコープに接続する。
-) ECU の後面パネルにある「DETECTOR OUT」からのシグナルをオシロスコープに接続し、「volts/div」を調整する。その時、直流電流が最も敏感に反応するスケールが決定できる。

)ミラーの仰角をアレレンチで調節し、出力に対する電流曲線が最大の傾きになるようにする。

最適化した後、レーザ出力の電流依存性と周波数依存性を測定した。その結果のグラフを図5に示す。

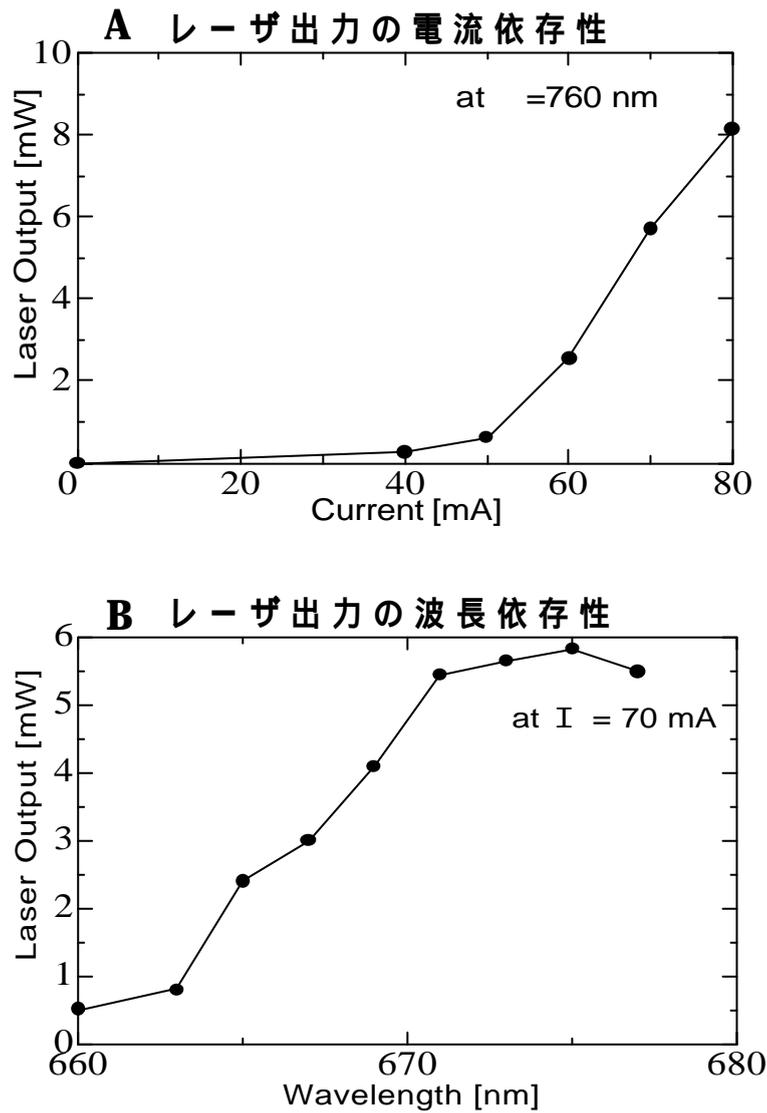


図5 レーザの出力

図5のAよりレーザのスレッショールド電流が50 mAであることが分かる。Bより外部共振器による波長可変の範囲が10 nm以上であることが分かる。

ホローカソードランプ

陰極が筒状になっている放電管のことをホローカソードランプという。本実験で使用したホローカソードランプ(図6)は、中に Ne ガスが封入されており、電極に Li 原子が含まれている。

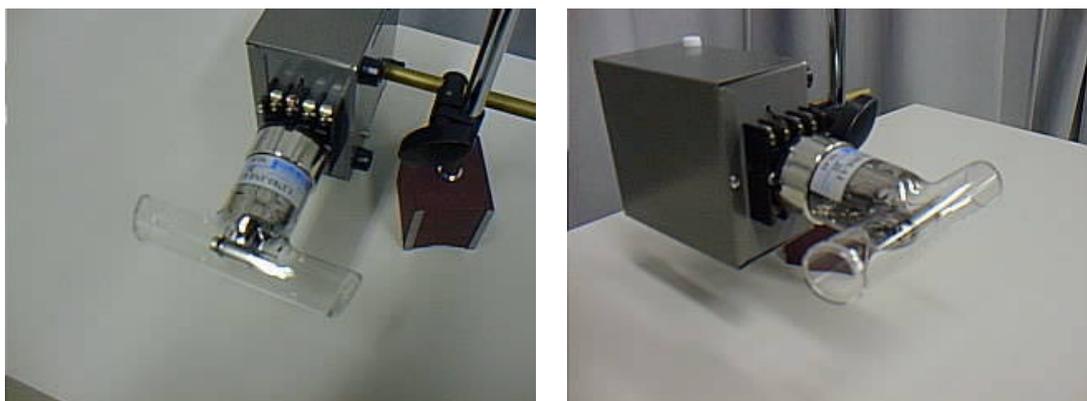


図6 ホローカソードランプ

ステッピングモータ

パソコンにより回転速度、回転角度を制御できるのが、ステッピングモータである。本実験で使用したステッピングモータ(図7)の特徴を以下に挙げる。

- ・励磁方式は4相、4 - 5相励磁で、動作速度は40kPPSまで可能なため、高速かつ高精度な制御が行える。
- ・ドライブ方式にバイポーラスタンダード、定電流チョッピング方式を用いている。
- ・供給電源はAC100Vだけで済む。
- ・カレントダウン、電流調整、カレントダウン時の時間調整、励磁OFF、アラーム機能付きである。

- ・通信回線に RS232C、TTL、20mA カレントループの通信レベルを持っている。

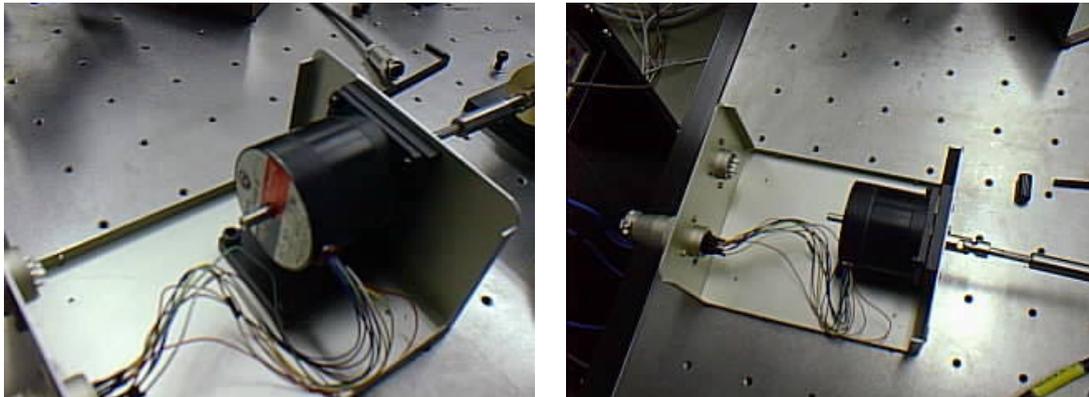


図7 ステッピングモータ

チョッパ

等間隔で穴の開いた円盤を回転させることによって、レーザ光を連続的に ON、OFF することができる。本実験で使用したチョッパ(図8)は、制御部とチョッパ部に分離されている。制御部は、4桁数字表示器によりチョッピング周波数を表示する。

チョッピング周波数は、4Hz~400Hz または 40Hz~4kHz 間を連続可変で設定でき、INNER(4Hz~400Hz)と OUTER(40Hz~4kHz)の参照信号(REF)出力がある。

チョッパ部は、4Hz~400Hzと40Hz~4kHzの2種のアパーチャからなり、デューティファクタは50%となっている。



図8 チョッパ

その他使用機器

その他に、オシロスコープ、記録計、デジタルマルチメータ、光ファイバーからレーザを取り入れた光波長計、ホローカソードランプに一定に電流を流す直流電、参照信号と同期したホローカソードランプからのシグナルを増幅させるロックインアンプなども本実験で使用した。

4章 製作

本実験では、広範囲の波長域を測定するためにステッピングモータを使用した。半導体レーザの波長掃引は、グレーティングをステッピングモータで回転することによって行うため、半導体レーザのマイクロメータとステッピングモータを接続し、波長の変化をより精密にすることにした。

そこで、ハード面を鈴木が、ソフト面を共同実験者の日野君が、分担して作業をした。

その分担の内容とは、

ハード面：ステッピングモータとマイクロメータの接続

ソフト面：ステッピングモータを制御するためのプログラム作り

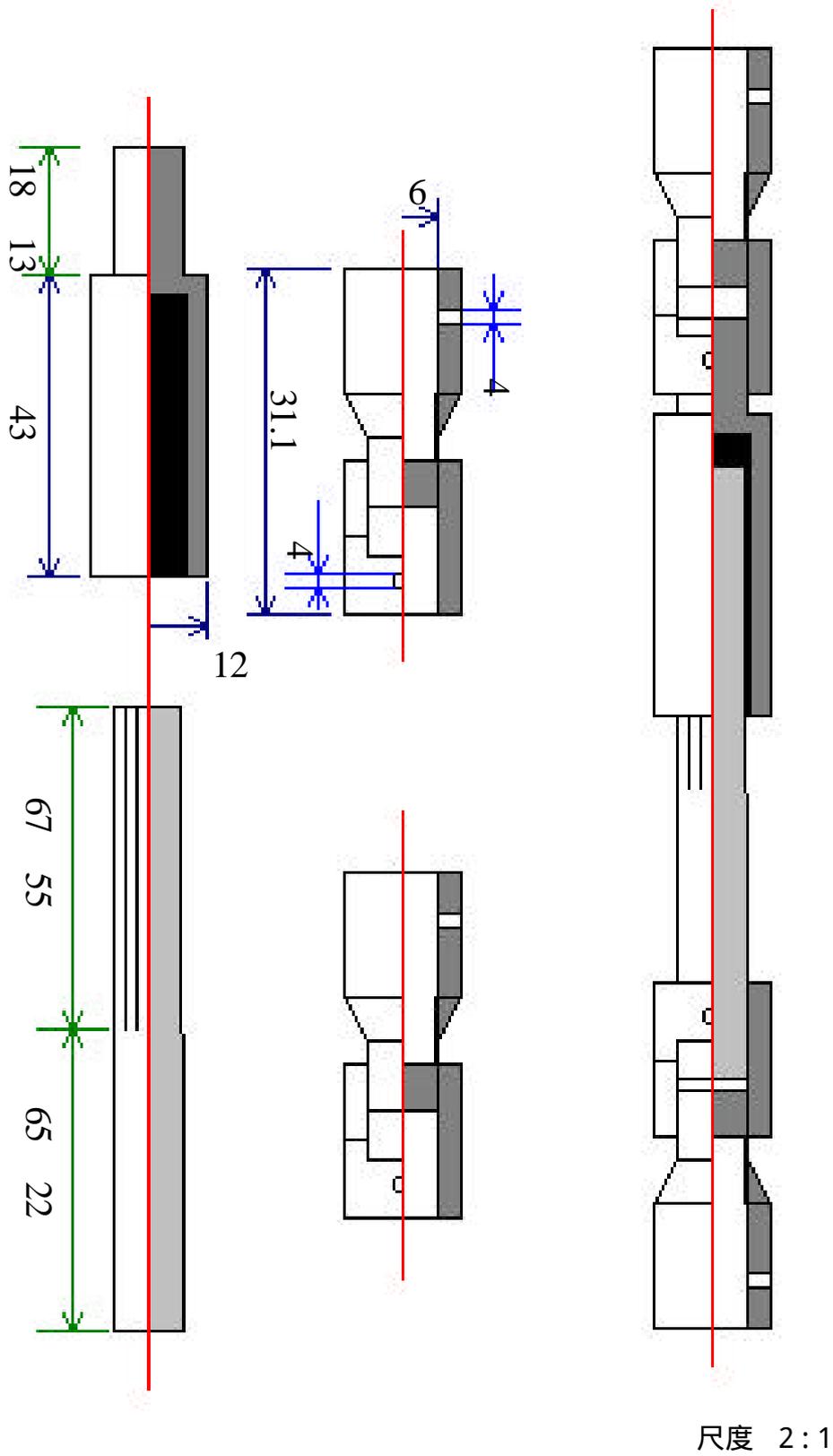
である。

1) ハード面

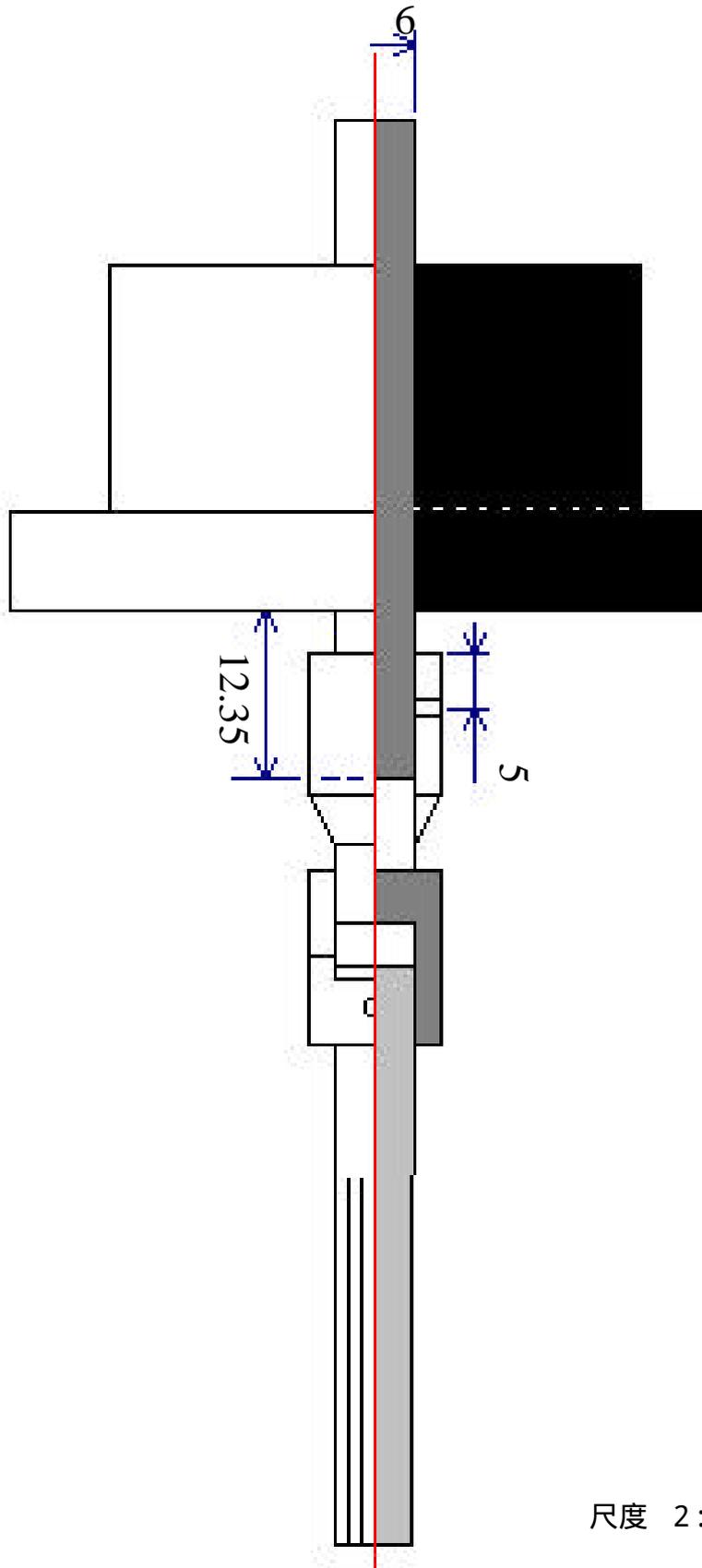
ハード面では、ステッピングモータの軸と半導体レーザのマイクロメータを接続するために、「ユニバーサルジョイント」と呼ばれる軸のずれを吸収してくれるジョイントを使用した。

まず、始めに使うユニバーサルジョイントを設計図1のような(株)三好キカイ社製GXシリーズ ボビータイプR型に決定した。元々長さは、調整されていなかったなので、寸法を変えられるところを切断し、ステッピングモータとマイクロメータの間に合うようにして調整をした。

次に、それぞれステッピングモータとジョイント(設計図2)、ジョイントとマイクロメータ(設計図3)をはめようとした。しかし、ジョイントとマイクロメータの直径が異なっているため、間に真鍮の棒を組込み、うまく合うように加工して、ソケット部を作った。

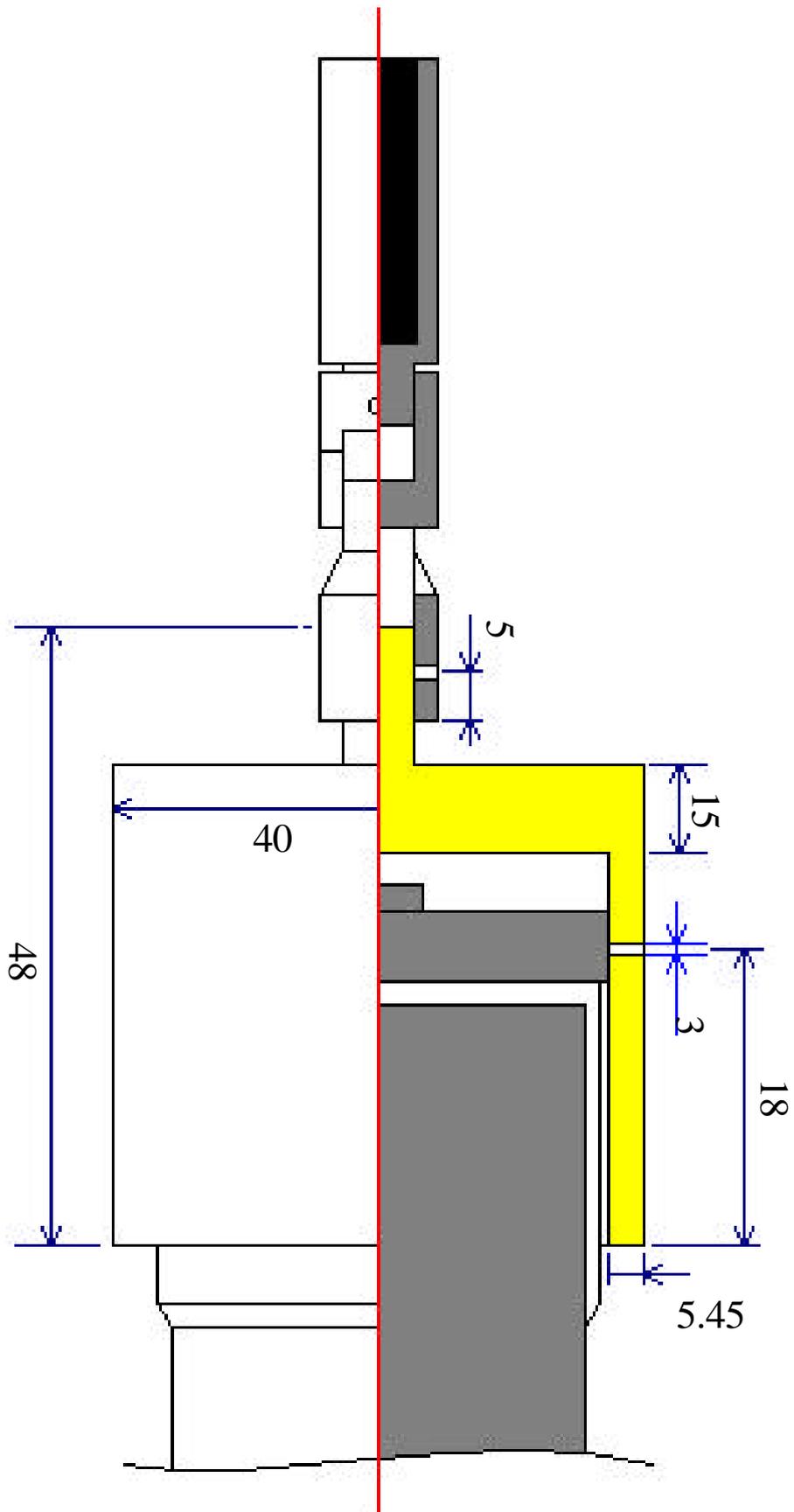


設計図 1 ユニバーサルジョイント (GX シリーズ ボビータイプ R 型)



尺度 2:1

設計図 2 ステッピングモータ側



尺度 2:1

設計図3 半導体レーザ側

以上のような設計図 1 ~ 3 から次の図 8 のような形で設置することができた。特に、難しかったのは真鍮を中ぐりする時であった。

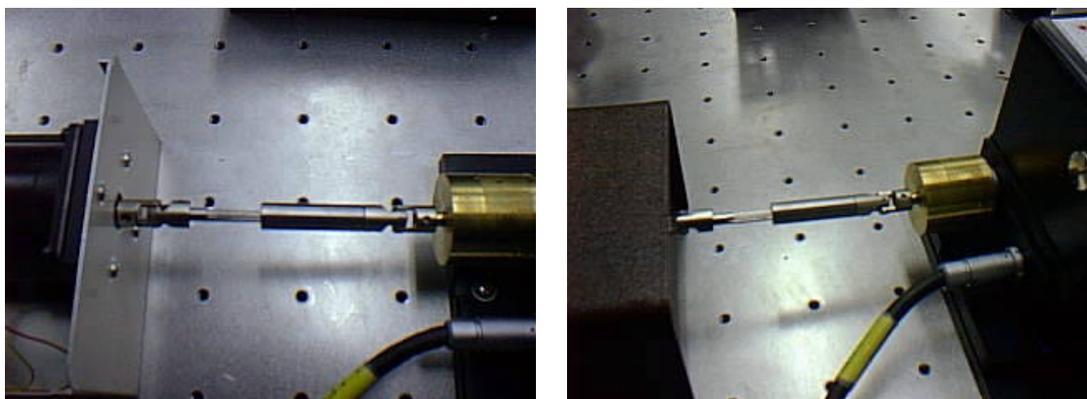


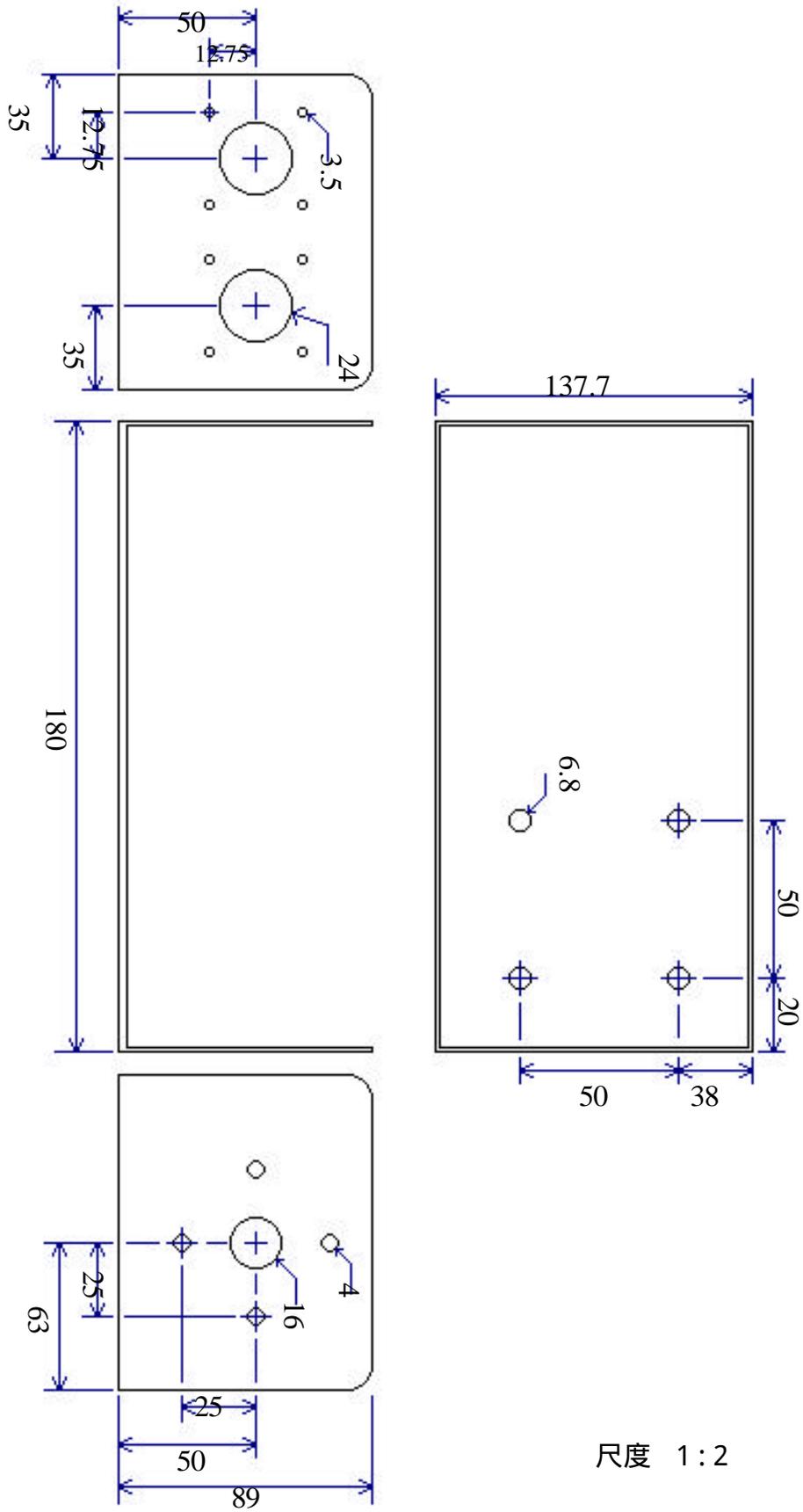
図 8 ユニバーサルジョイント完成写真

このようにして、ジョイント部分を設置することができた。

ハード面では、これで終了したかのように思ったが、新たな課題が出てきた。それは、ステッピングモータをボックスに収めることである。モータを裸のまま放置しておくともータに接続されているコードが切れる恐れがあるため、そのことを考え製作することにした。

ボックスに適切な位置に穴を開ける場所を決めて、設計図 4 のような図を描き、ドリルによって穴を開けていった。

最終的にできた形は、ステッピングモータの説明時、図 7 のようになり、うまく設置することができた。



尺度 1:2

設計図4 ステッピングモータ用のボックス

2) ソフト面

今回製作したプログラムは、ビジュアルベーシックで書いたものである。ステッピングモータの動作速度、動作パルス数を自由に設定することができ、測定して取り込んだ波長、電圧を表示して、グラフにすることができる。

シリアル接続を使用したステッピングモータの制御と同時に光波長計とデジタルマルチメータの出力のデータを GP - IB 接続で読み込むことができるプログラムを図9のようなフローチャートで作成した。

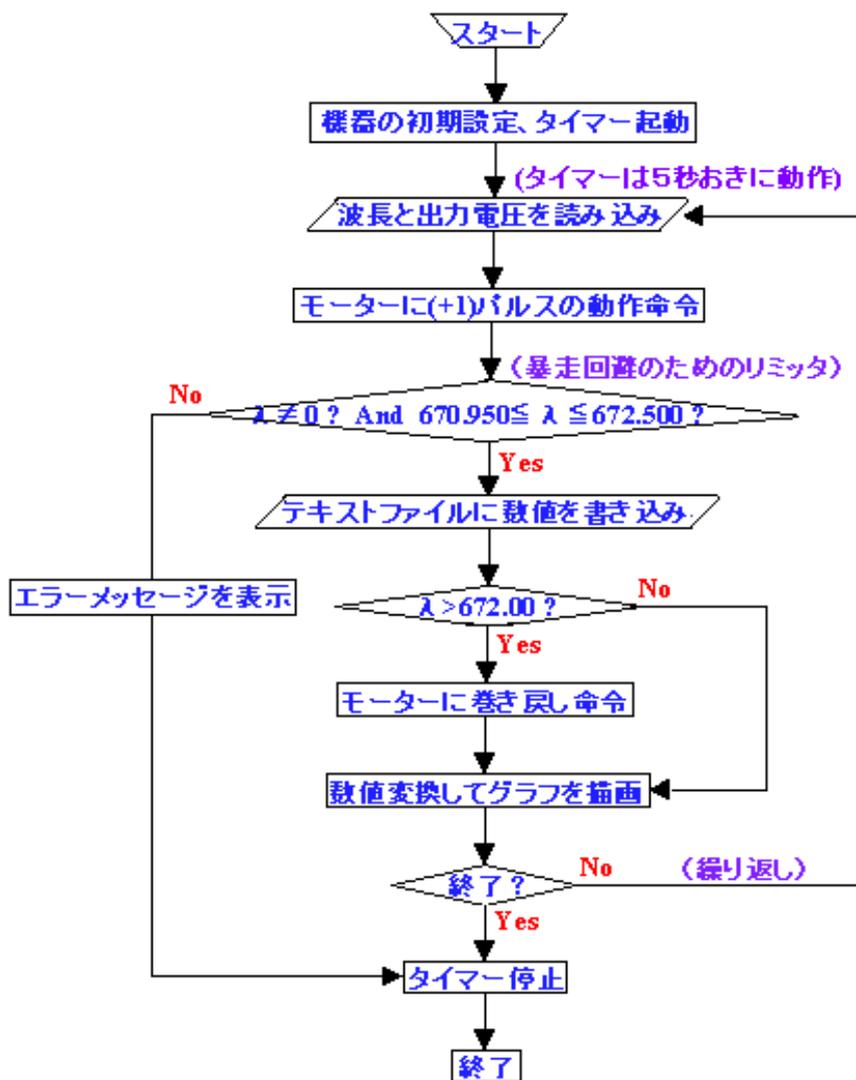


図9 ステッピングモータ制御プログラムのフローチャート

5章 結果

広範囲のスペクトル

ステッピングモータと半導体レーザのマイクロメータを接続し、作成した制御プログラムを用いて、広範囲の波長を測定した。取り込んだオプトガルバニックシグナルを図 10 に示す。

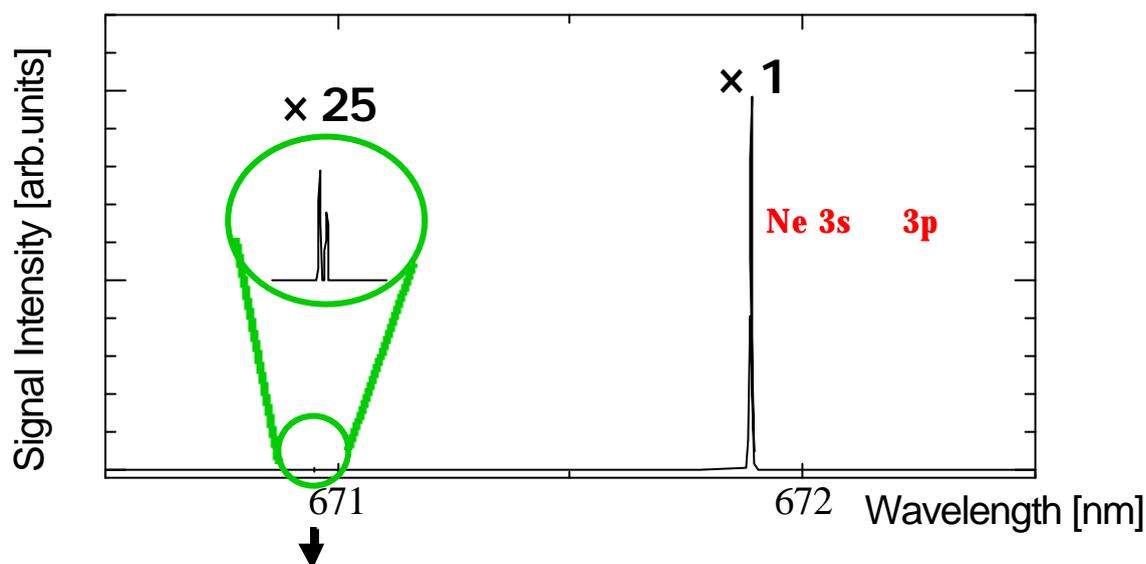


図 10 広範囲の波長域のオプトガルバニックスペクトル

右側に出ているスペクトル線は、Ne の 3s 3p 遷移に対応するオプトガルバニックスペクトルである。

左側には、スペクトルが何も出てないように見えるが、感度を 25 倍にすると、Li 原子のスペクトル線が見え、狭い範囲に 2 つ重なって出ているのが分かる。

ステッピングモータによる波長掃引では、1 パルス分の波長変化がオプトガルバニックスペクトル線の幅より大きくなってしまい、精度の高い測定ができない。

そこで、左側の重なっている部分のスペクトルの波長域をより高精度にするため、 piezo素子でグレーティングを微小に回転する方法で測定することにした。

ピエゾ素子を使ったスペクトル

電圧をかけると微小な伸び縮みする素子をピエゾ素子という。ピエゾ素子の使用により、本実験で使用した半導体レーザのマイクロメータより微小な波長変化を見ることができるようになった。半導体レーザに付属しているピエゾ素子の波長変化は、 $\pm 7V$ で $150GHz(=0.18nm)$ ということが可能である。

ピエゾ素子を使用することによって、Li 原子のオプトガルバニックスペクトルが見られる波長域の範囲を高精度に測定すると、図 11 のようなスペクトルを得ることができた。

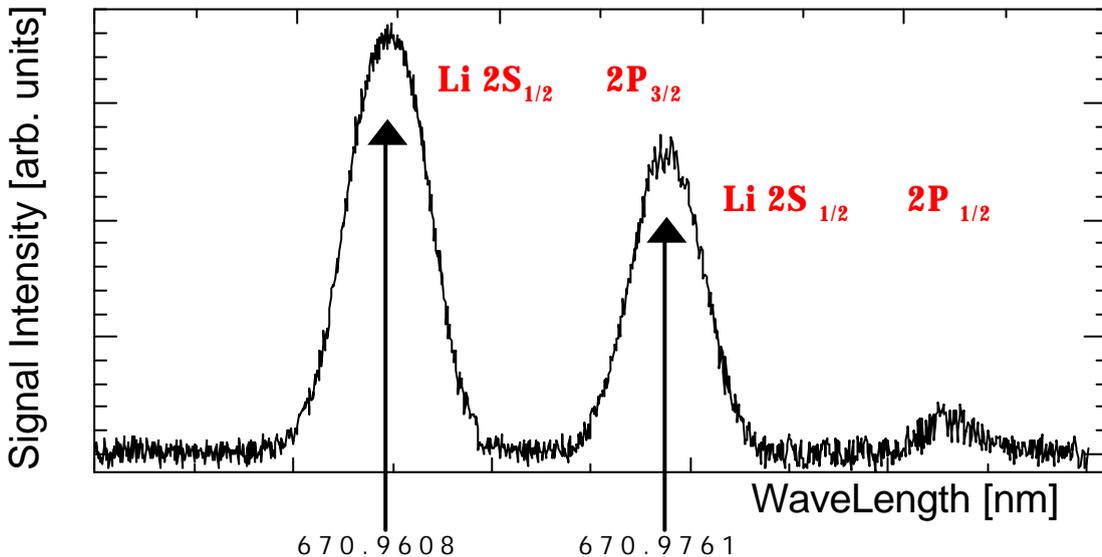


図 11 高精度にした Li 原子のオプトガルバニックスペクトル

Li 原子のオプトガルバニックスペクトルは狭い波長域に 2 つの共鳴波長が出ているのが分かる。図による 2 つのピークの波長は、 670.9608 nm 、 670.9761 nm と文献³⁾から知ることができた。よって、この 2 つの共鳴波長の値の差と、x 軸間隔によりレーザ波長の校正をすることができる。

6章 考察

Li 原子の2つの既知の共鳴波長からレーザー波長を校正し、それを基準にして未知のスペクトルを測定することができる。得られたオプトガルバニックスペクトル図 11 で見ると、右端に小さなスペクトルが出ているのが分かる。このスペクトルは、明らかに Li 原子のオプトガルバニックスペクトルではなく、別の原子のスペクトルが出ていると思われる。

本実験で校正したレーザー波長を使うと、この小さなスペクトルのピーク波長は、 670.9921 nm になった。この波長を文献³⁾で調べると、おそらく W (タングステン) の共鳴波長と思われる。今回使用したホローカソードランプの電極には、タングstenは含まれていないと言われていたので、おそらく電極中に不純物として含まれていると思われる。

このように、オプトガルバニック法を使えば、極微量の不純物のスペクトルまで調べることができる。

放電中のホローカソードランプ内 (図 12 に示す) では、多くの原子が飛び回っている。飛んでいる方向は様々で、速度分布は温度によって決まっている。そこに共鳴する波長のレーザーを照射し、オプトガルバニックスペクトルを測定すると、ドップラー効果によりスペクトルは広がりを見せる。

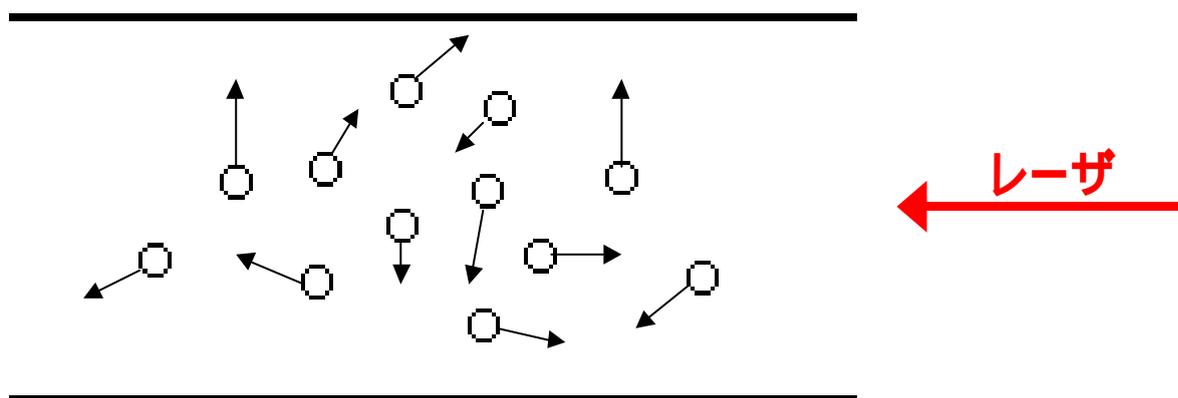


図 12 放電中のランプ内の原子

図 13 は、原子のドップラー幅と呼ばれるものである。原子の飛んでいる速度分布は温度によって決定されるため、スペクトル線の半値幅により原子の温度が決定される。

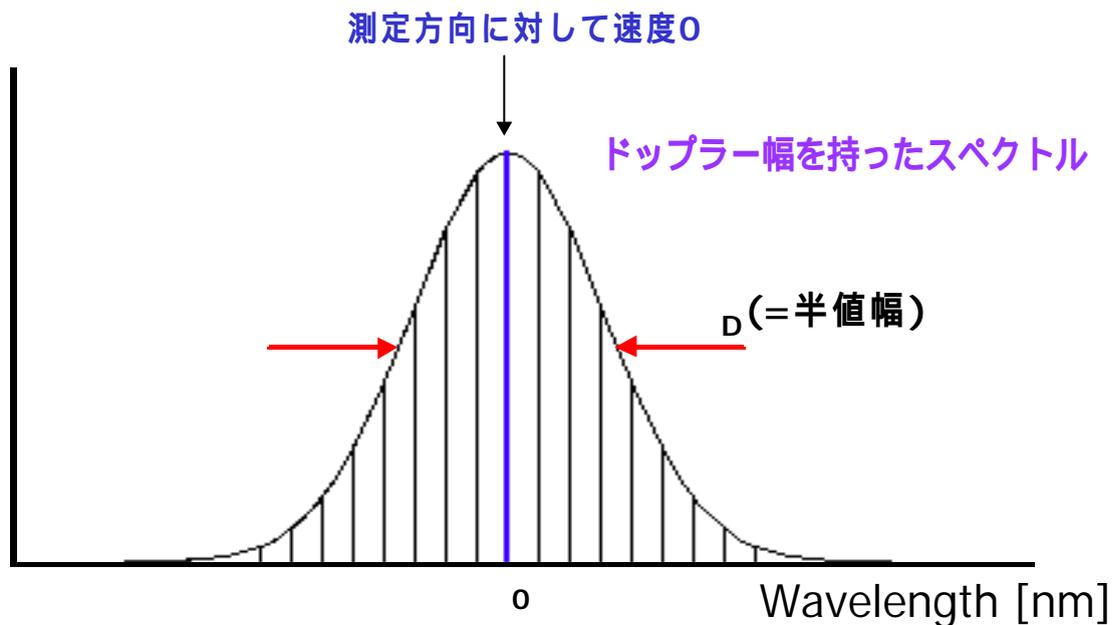


図 13 ドップラー幅を持ったスペクトル

ドップラー幅について詳しく述べると、次のようになる。

速度 v で飛んでいる原子の、レーザを照射している方向の成分を v_z とすると、 $v_z \sim (v_z + dv_z)$ の間に分布している原子数は次の式で表される。

$$n(v_z)dv_z = \frac{N_i}{v_p \sqrt{\pi}} e^{-(v_z/v_p)^2} dv_z \quad \text{ただし、} v_p = \sqrt{2kT/m} \quad (2)$$

ここで m は原子の質量、 k は Boltzman 定数、 T はガス温度である。また、

$$v_z = \frac{c}{\mathbf{w}_0} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_0), \quad dv_z = \frac{c}{\mathbf{w}_0} d\mathbf{w} \quad (3)$$

の関係がある。ここで ω_0 は静止原子による共鳴周波数， ω はドップラーシフトした共鳴周波数である。(3) 式を (2) 式に代入すると、

$$n(v_z)dv_z = N_i \frac{c}{\omega_0 v_p \sqrt{p}} \exp\left[-\left\{\frac{c(\omega - \omega_0)}{\omega_0 v_p}\right\}^2\right] d\omega \quad (4)$$

となる。よって強度 $I(\omega)$ は

$$I(\omega) = I_0 \exp\left[-\left\{\frac{c(\omega - \omega_0)}{\omega_0 v_p}\right\}^2\right] d\omega \quad (5)$$

となる。これが、ドップラー広がりを表す式である。その半値幅 $d\omega_D$ は、

$$d\omega_D = 2\sqrt{\ln 2} \omega_0 v_p / c = \left(\frac{\omega_0}{c}\right) \sqrt{8kT \ln 2 / m} \quad (6)$$

となる。原子量を $M = mN_A$ (N_A はアボガドロ定数) として、(6) 式を波長の半値幅の式に変換すると、

$$d\lambda_D = 7.16 \cdot 10^{-7} \lambda_0 \sqrt{T/M} \quad (7)$$

となる。

この(7)式から、原子の温度を求めることができ、今回計算した結果、Li 原子の温度は

$$T = 450 \text{ K}$$

となった。

7章 まとめ

本実験では、オプトガルバニック効果を用い、高分解能の分光装置を開発した。今回は、外部共振器を持った非常に線幅の狭い半導体レーザや電極に Li 原子が含まれ、内部に Ne ガスが封入されたホローカソードランプを使用した。測定した Li 原子のオプトガルバニックスペクトルと既知の共鳴波長からレーザ波長の校正を行った。

その準備として、ステッピングモータと半導体レーザの波長を掃引するためのマイクロメータをユニバーサルジョイントで接続した。また、このステッピングモータを制御するプログラムをビジュアルベーシックで作成した。

既知の Li 原子の波長でレーザ波長を校正することによって、スペクトル線の半値幅を求め、その求めた半値幅と温度との関係式から Li 原子の温度を決定した。

今後、本研究で開発した測定システムを用いて、未知の物質のオプトガルバニックスペクトルを測定し、含まれている原子・分子種の決定や励起状態に関する情報を得ることにしたい。

謝辞

本実験を進めるにあたって、終始ご指導して下さいました木村正廣先生に深く感謝致します。戸名正英先生には貴重な助言と熱心なご指導をして頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) 関根 重幸、 和田 昭英、 廣瀬 千秋 :
「光ガルバノ - 測定法と応用計測 - 」レーザ研究 17 (1989) 558.

- 2) Wolfgang Demtroder : Laser Spectroscopy ,
P67~69 , p114~141 , p298~304 , p405~408 springer,(1998)

- 3) NIST(National Institute of Standards Technology)
Physical Reference Data
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/contents.html>