

# 卒業論文

## Rb 含有ガラスからの Rb 原子の光誘起脱離実験 と Rb の結合状態の解明

東京農工大学 物理システム工学専攻  
畠山研究室  
学籍番号:10256010  
小川 大翔

2014年2月14日 提出

指導教員 畠山 温 准教授

担当教員	物理事務



# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	5
1.1	研究背景と目的	5
1.2	結果	5
1.3	本論文の構成	6
<b>第 2 章</b>	<b>実験方法</b>	7
2.1	実験の流れ	7
2.2	Rb 含有ガラスの作製方法	7
2.2.1	石英ガラスを用いた理由	7
2.2.2	ガラス配管での Rb 含有ガラスの作製方法	8
2.2.3	洗浄方法	10
2.3	Rb 原子の検出方法	10
2.3.1	表面イオン化	10
2.3.2	光イオン化	11
2.4	脱離量の見積もり方法	12
2.5	ガラスセル実験：FM 吸収分光	12
<b>第 3 章</b>	<b>実験装置</b>	14
3.1	装置の構成	14
3.1.1	サンプルホルダ	15
3.1.2	アルカリ原子検出器	16
3.2	カウント回路	16
3.3	光学系	17
3.4	ロックインアンプ	19
<b>第 4 章</b>	<b>実験と結果</b>	20
4.1	光誘起脱離実験と脱離量の見積もり	20
4.1.1	大気さらし基板	21
4.1.2	水さらし基板	22
4.1.3	超音波洗浄基板	22

---

4.2	活性化エネルギーの見積もり . . . . .	23
4.2.1	推測 1:活性化エネルギーを吸着エネルギーとしたとき . . . . .	26
4.2.2	推測 2:拡散に必要な活性化エネルギーとしたとき . . . . .	27
4.3	表面分析 . . . . .	27
4.3.1	光学顕微鏡で見た表面状態 . . . . .	27
4.3.2	X 線光電子分光法 . . . . .	29
4.4	セルでの実験 . . . . .	32
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>33</b>
5.1	まとめ . . . . .	33
5.2	課題と展望 . . . . .	34
<b>付録 A</b>		<b>35</b>
A.1	5 V 電源装置 . . . . .	35
<b>参考文献</b>		<b>37</b>

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景と目的

光誘起脱離 (Light-Induced Desorption : 以下 LID と略) とは表面に吸着した原子が光を照射されると表面から脱離する現象である。この現象はアルカリ蒸気セル (比較的高い蒸気圧によってアルカリ原子気体が漂っているアルカリ金属が封じられた容器) 内で偶然発見された。LID の応用としては新たな光駆動型の原子供給源があげられる。従来の方法は原子を熱脱離させて供給していたが、供給するまでにタイムラグがあり、また温度上昇を伴うことがある。一方で LID は光が入射してすぐに原子密度が上がるので応答性がよく、温度をあげることなく原子を供給することが可能である。LID については様々な研究が行われてきて、本研究室でもガラス表面に吸着させた Rb (ルビジウム) 原子の脱離について研究が行われてきた。その研究の中で昨年には Rb をガラス内部に拡散させたガラス (以下: Rb 含有ガラスと記す) からの LID が初めて観測された [1]。Rb 含有ガラスはガラス自体が原子の供給源としての役割を果たすため、ガラスセル内で行われるレーザー冷却実験において非常に有望である。しかしながら脱離のメカニズムはよくわかっておらず、Rb 含有ガラスについては脱離が観測されただけで詳しい研究はなされていない。例えば、Rb がガラス内部でどのような結合をしているのか、こういった脱離の特徴があるのかなどもわかってはいない。もし Rb 含有ガラスの LID の理解が深まれば、脱離のメカニズムの解明の大きな手がかりになるだろう。また新しい原子供給源としての応用に一步近づけるかもしれない。

そこで本研究では Rb 含有ガラスを自作して Rb の LID を観測しその脱離量を見積もるとともに、温度依存性などの脱離の特徴を捉え、Rb がどのような結合状態にいるかを解明することを目的とする。また、Rb 含有ガラスセルを作製して実際に原子供給源としての応用が可能かどうかを示すことも目的とする。

### 1.2 結果

石英ガラス基板に Rb を浸食させて作製した Rb 含有ガラスからの Rb 原子の LID を観測した。脱離の温度依存性から脱離に必要な活性化エネルギーを約 0.2 eV と約 0.9 eV であると見積もった。脱離光が波長 375 nm、パワー約 170 mW、レーザー面積 40 mm<sup>2</sup> のとき、室温での最大の脱離量は $\sim 10^8$  個/s と見積もった。この量はレーザー冷却実験の応用を考えると必要な脱離量には達していない。光学顕微鏡

での観察と XPS 測定での表面分析を行い、脱離量と Rb の表面密度は比例することがわかり、Rb が O (酸素) と結合しているところを確認できた。ガラスセルでの Rb 原子の脱離を FM 分光によって観測しようとしたが観測できる脱離量まで到達しなかったためガラスセルでの Rb の脱離は観測できなかった。現在の段階では Rb 含有ガラスは応用に耐えうる性能がないことがわかった。

### 1.3 本論文の構成

第2章に実験方法を詳しく記した。例えば、Rb 含有ガラスの作製方法や、脱離原子の検出方法、脱離量の見積もり方などが記載されている。第3章には実験装置として実験に用いた装置について書かれている。第4章に基板からの脱離の様子と脱離量、温度依存性を示し、表面の状態を交えて目的にそった議論をしている。そして第5章にまとめとこれからの展望を記した。

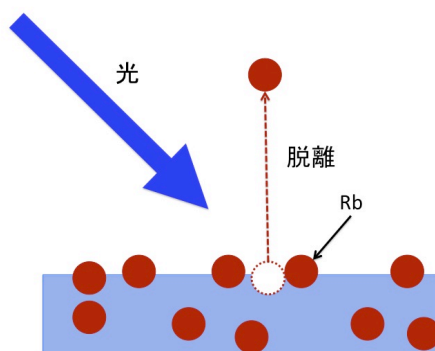


図 1.1 Rb 含有ガラスからの LID のイメージ

## 第2章

# 実験方法

ここでは Rb 含有ガラスの実験のおおまかな流れを示した後に、Rb 含有ガラスの作製方法とその Rb の検出方法、また脱離量の見積もり方法について詳しく述べていく。また、ガラスセルでの実験方法についても述べていく。

### 2.1 実験の流れ

はじめに Rb が含有された石英ガラス基板と石英ガラスセルの2つの試料を作製した。基板での実験は主に脱離現象解明のために行い、ガラスセルでの実験は原子供給源としての応用に耐えうるかどうかを調べるために行った。

ガラス基板での実験は、基板を真空チェンバー内に設置した状態で紫外光レーザー（波長 375nm：以下脱離光と略）を照射して Rb を脱離させる。脱離させた Rb は2種類の方法（光イオン化と表面イオン化）でイオン化し、二次電子増倍管 (Secondary Electron Multiplier：以下 SEM と略) で検出する。SEM からの信号はカウント回路で矩形波に変換してパソコンに出力する。信号の頻度から実際の脱離量を計算していく。温度依存性を調べるため、光を照射する温度を変えていき測定を行った。

ガラスセル実験では真空チェンバーにつないだセルに脱離光を照射し、脱離してくる Rb を FM 分光によって観測できるようにして測定を行った。

### 2.2 Rb 含有ガラスの作製方法

石英ガラスの状態から実験ができるまでの Rb 含有ガラスにするまでの行程を記載する。

#### 2.2.1 石英ガラスを用いた理由

過去の研究ではパイレックスガラス ( $\text{SiO}_2$ :81 %、 $\text{B}_2\text{O}_3$ :13 %、 $\text{Na}_2\text{O}$ :4 %) のイオン交換で作製した基板からは脱離が観測されずに、アルカリ原子の浸食作用で作製した基板から脱離が観測された [1]。また、過去とは異なる方法でイオン交換で作製した基板（パイレックスガラスを水酸化 Rb 溶液に浸したものの (70°C、4 h)）からもやはり脱離は観測されなかった。図 2.1 にあるようにイオン交換での Rb はアルカリ硼珪酸ガラス的な結合であり、浸食作用ではアルカリ珪酸塩ガラス的な結合である。従って今回の実

験ではアルカリ珪酸塩ガラス的な結合が多くできるように石英ガラスを用いた。また応用を考えてもパイレックスガラスは波長 300 nm 以下の紫外光を透過しない性質があるため、石英ガラスを用いてガラスセルを作製した。

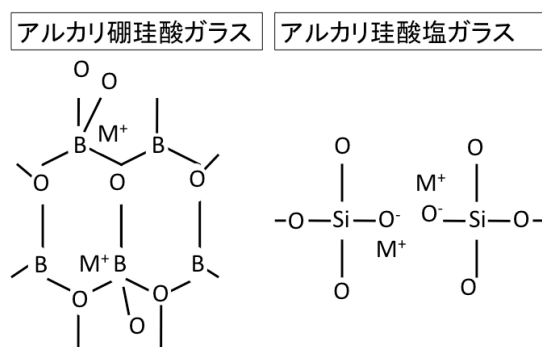


図 2.1 Rb がガラスに含有されている様子

石英ガラスはパイレックスガラスに比べると組成が  $\text{SiO}_2$  で単純である。このことから Rb がどのような結合をしているかを考える上では比較的容易であることも石英ガラスの利点である。基板での実験では  $\phi 20$  mm、厚み 0.5 mm の石英ガラス基板を用いて、セルは  $\phi 20$  mm、長さ 30 mm、枝管の外径  $\phi 6$  mm の円筒形の石英ガラスセルを用いた。

### 2.2.2 ガラス配管での Rb 含有ガラスの作製方法

Rb 含有ガラス基板は図 2.2 のようなガラス配管を利用して作製する。真空ポンプで真空中に排気された状態にしてから、Rb アンプルの右側の先端を破壊することにより右側の基板が入っているセル部分に熱を利用して Rb を追い込む。この際に液体窒素トラップすることで Rb が真空ポンプに行くことを防いでいる。Rb を追い込んだら点線の部分で封じきってその Rb 封入セルを  $370^\circ\text{C}$  で 2 時間バークし、石英ガラス基板に Rb を拡散させて Rb 含有ガラスを作製する。この方法で 5 枚の基板を作製した。Rb 含有ガラスセルの場合は図 2.3 のように図 2.2 の点線からの先端を直接ガラスセルにして Rb を追い込んで封じきってから同様にバークして作製した。



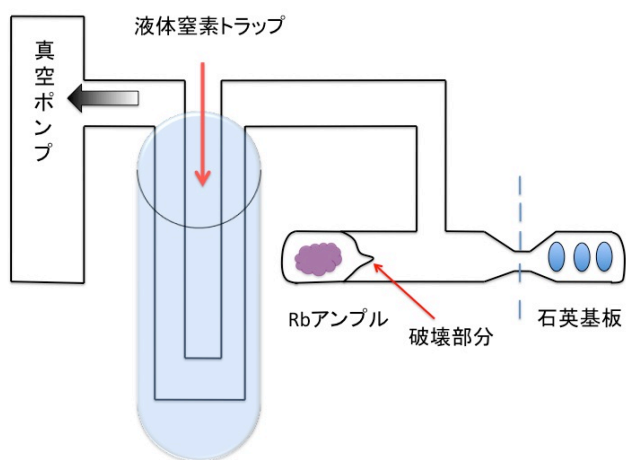


図 2.2 ガラス配管模式図



図 2.3 ガラス配管写真

図 2.4～7 にそれぞれ状態の写真を記載した。なお、作製したガラスはグローブボックス内で取り出すことで大気にさらさないで外に出せるようになっている。



図 2.4 ベーク前の Rb 封入セル



図 2.5 ベーク後の Rb 封入セル



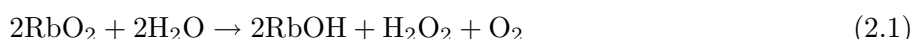
図 2.6 ベーク前の石英ガラスセル



図 2.7 ベーク後の石英ガラスセル

### 2.2.3 洗浄方法

図 2.5、2.7 にあるようにベークした状態ではガラス表面にも Rb の化合物が付着してしまっている。この状態では、レーザー光がガラスを透過しないためガラスセル実験には使用できない。また、本実験ではガラス内部に含有された Rb の LID を研究することを目的としている。以上の理由から表面に付着している Rb は取り除く必要がある。著者は表面に付着しているものの色からおそらく Rb の酸化物 ( $\text{Rb}_2\text{O}$ =淡黄色や  $\text{RbO}_2$ =暗橙色) だと予想した。これらの物質は水と以下のような反応を起こして除去することが可能である [2]。



また反応していない Rb が表面に残っていたとしても同様に水と以下のような反応をして除去することができる。



以上のことから作製した 5 枚の基板については

- ・大気にさらしてから約 30 秒後に純水とエタノールでリンスする (以下、大気さらし基板と略)
- ・大気にさらさずにすぐに純水に浸して (1 分間) から取り出す (以下、水さらし基板と略)
- ・大気にさらさずにすぐに純水に浸してからそのまま超音波洗浄 (15 分間) をする (以下、超音波洗浄基板と略)

以上の 3 種類の方法で洗浄を行った。洗浄方法に関わらず表面に付着している物体は取り除けたように見えた。詳しい表面の状態は第 4 章に記載する。また、水さらし基板と超音波洗浄基板においては 2 枚ずつ用意して 1 枚は基板を作製する前にピラニア溶液 (硫酸：過酸化水素水 = 1 : 1) で洗浄しておいた。その理由は本研究室でピラニア溶液で洗浄すると Rb が付着しやすいという報告があり拡散する量も増えるのではないかと予想したからである。

Rb 含有ガラスセルについてはピラニア溶液での洗浄は行わずに作製して、大気にさらさずに純水に浸す洗浄方法をとった。

## 2.3 Rb 原子の検出方法

脱離してきた Rb を表面イオン化と光イオン化の 2 種類の方法でイオン化させて検出する。この 2 種類の検出方法は一長一短なのでその点について詳しく述べていく。

### 2.3.1 表面イオン化

原子を仕事関数の高い金属に衝突させて、金属表面でイオン化させる方法のことである。金属表面からイオンとして飛び出す粒子と中性原子として飛び出す原子の割合は次の式に従う。

$$\frac{i_+}{i_0} = A \cdot \exp\left(\frac{\Phi - E_i}{kT}\right) \quad (2.4)$$

$i_+$ : 表面から飛び出す+イオンの流れ       $i_0$ : 表面から飛び出す中性原子の流れ  
 $\Phi$ : 金属の仕事関数       $E_i$ : 原子のイオン化エネルギー

上式のように、原子のイオン化エネルギーが金属の仕事関数より低いほどイオン化し易くなる。そのため今回は仕事関数の高いリボン状のプラチナ（以下 Pt フィラメントと略）を表面イオン化の金属に用いた。ただし、イオン化した原子は Pt フィラメントからは飛び出さずに表面に吸着する。このことを解消するために Pt フィラメントに電流を 5.0 A 流すことにより、Pt フィラメントを高温にしてイオン化した原子を表面から飛び出させて SEM に検出されるようにした。表面イオン化の検出効率も過去の実験より 0.05 だとわかっている [1]。この値は実際に Pt フィラメントに原子が到達した際に検出される確率である。表面イオン化は後に出てくる光イオン化よりも検出効率が良い検出方法であるが、Pt によりイオン化するので Rb 以外の原子を検出してしまう可能性がある。従って、この方法で検出できた信号がすべて Rb 由来のものであるとは言えない。

### 2.3.2 光イオン化

2種類のレーザー光を原子に照射することによって特定の原子をイオン化させる方法である。2種類のレーザー光には原子と共鳴する励起光と、その励起した原子をイオン化させるイオン化光とに分けられる。具体的には Rb をイオン化させるために励起光には波長が 780.246 nm のレーザー光（D2線）を使い、イオン化光には波長が 450 nm のレーザー光を使う。この検出方法は表面イオン化よりも検出効率が悪い（約 1/2000）が、選択的に Rb を検出できるというメリットがある。図 2.8 に光イオン化のイメージ図を示す。

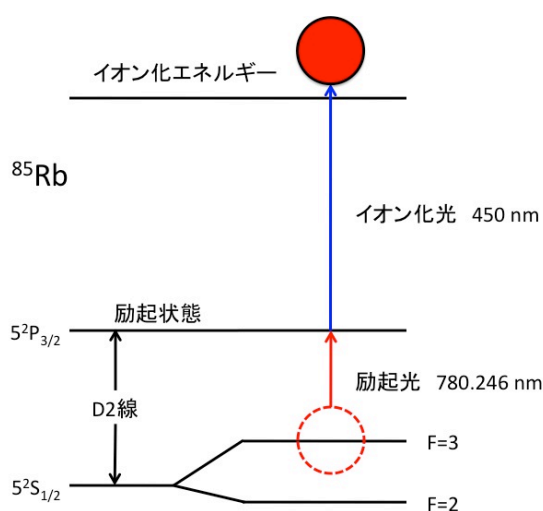


図 2.8 光イオン化

## 2.4 脱離量の見積もり方法

イオン化された原子は二次電子増倍管で電気信号となりそれをカウント回路でカウント数として検出する。表面イオン化でそのカウント数から実際の脱離量を見積もる方法を示す。基板表面から脱離してきた原子が等方的に飛び出すとすると Pt フィラメントに到達する原子の割合は以下の式ようになる。

$$\frac{A}{2\pi L^2} = 1.15 \times 10^{-4} \quad (2.5)$$

$A$  : Pt フィラメントの面積=3.53 mm<sup>2</sup>     $L$  : 基板と Pt フィラメントとの距離=70 mm

この割合と先ほどの検出効率 (0.05) を使うと実際の脱離量が見積もれる。例として 50 カウント検出されたとすると実際の脱離量は以下のように見積もることができる。

$$50 \div 0.05 \div 1.15 \times 10^{-4} \simeq 9 \times 10^6 \text{ 個/s}$$

この見積もり方でわかるようにこの検出器では 10<sup>5</sup> 個/s 以下の脱離を検出することは不可能とも言える。しかし応用上を考えると脱離量は 10<sup>11</sup> 個/s ほどは必要になるので検出効率は十分である。

## 2.5 ガラスセル実験：FM 吸収分光

ガラスセル実験では脱離してくる Rb をイオン化させて検出することは出来ないため、別の方法を考える必要があった。そこで著者は FM 吸収分光により脱離してくる Rb を高感度に検出する方法をとった。以下にその構想を示す。

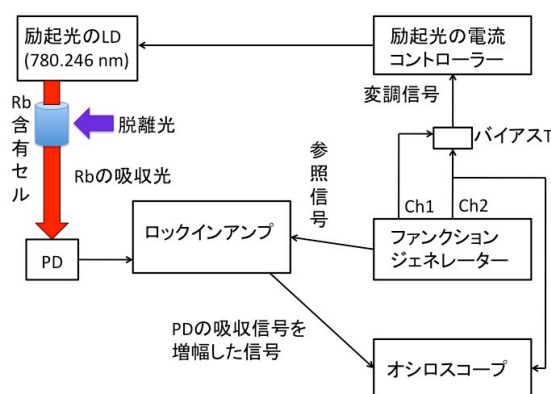


図 2.9 ガラスセル実験構想

吸収光には光イオン化でも用いる波長 780.246 nm の励起光を用いる。この励起光の電流コントローラーにファンクションジェネレーター (AFG3102) からの変調信号をかけて、脱離した Rb の吸収の信号をフォトダイオード (NEW FOCUS 2031、帯域 : 1 MHz) で検出し、その信号をロックインアンプ

(SIGNAL RECOVER7270) で増幅してオシロスコープ (GDS-2064) で観測するという機構になっている。変調信号はファンクションジェネレーターの Ch1 の設定を [Freq:150 kHz, Amp:20 mV<sub>p-p</sub>, 波形:sin 波]、Ch2 の設定を [Freq:100 Hz, Amp:300 mV<sub>p-p</sub>, 波形:三角波] にしてその二つの信号をバイアス T により足し合わせることにより実現させた。また、ロックインアンプにはファンクションジェネレーターの Ch1 と同期した矩形波を参照信号として入力した。

この機構で Rb 蒸気セル (大きさ  $\phi=30$  mm 長さ 60 mm の円筒形、室温で約  $3.0 \times 10^9$  個/cm<sup>3</sup> の Rb が存在) に励起光を通し、吸収信号が検出できるか確認してみた。その結果を図 2.10~11 に示す。図 2.10 はロックインアンプからの増幅信号で、図 2.11 は増幅などを行っていない、普通の吸収信号である。黒線には Ch2 の信号を載せている。しっかりと増幅信号がとれたのだが、このとき普通の吸収信号と SN 比を比較すると 1:1 になってしまったため、検出効率が上がったかどうかを確認できなかった。理由は Rb 蒸気セルの Rb の数が多かったため、普通の吸収信号でもはっきりと Rb の吸収分光ができてしまったからである。

しかしながら実際の実験では LID での Rb は微量であると予想される。検出効率が上がることを確認するために、Rb 蒸気セルに氷をあてがうことで中の Rb の平均時自由行程を下げて再度吸収分光を行った。その結果を図 2.12~13 に同様に示す。図 2.13 では Ch2 の信号は見やすいようにスケールを小さくして表示している。この 2 つの信号の SN 比からロックインアンプにより検出効率が約 6 倍上がったことがわかる。検出感度が上がったことを確認できたため、ガラスセル実験の事前準備が終了した。また、増幅信号の大きさを室温のときと冷やしたときとで比較することで、冷やしたときの Rb 蒸気セル中の Rb の量は約  $1.7 \times 10^9$  個/cm<sup>3</sup> であるとわかった。このようにして信号の大きさからセル内の Rb の多さを計算することができる。

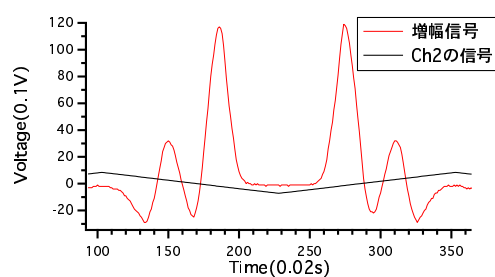


図 2.10 室温での増幅信号

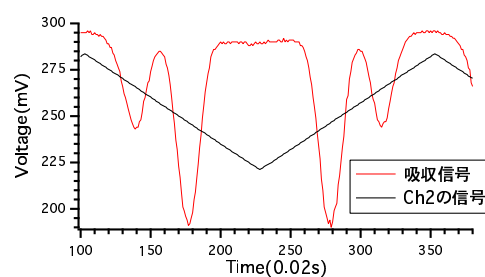


図 2.11 室温での吸収信号

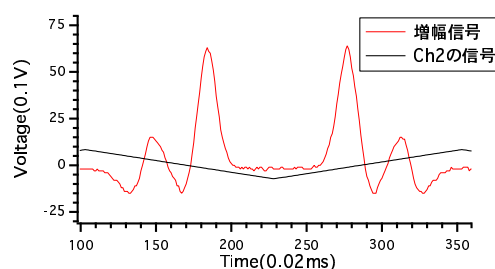


図 2.12 セルを冷やしたときの増幅信号

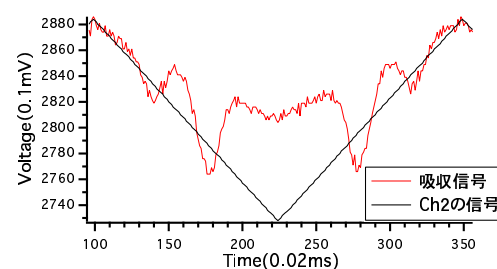


図 2.13 セルを冷やしたときの吸収信号

## 第3章

# 実験装置

まずは実験を行う際の真空チャンバーの全体像を示す。そのあとにマウントされているサンプルホルダ、アルカリ原子検出器について触れる。3.2ではSEMからの信号を矩形波に変換するカウント回路、3.3では実験を行う際の光学系について詳しく述べる。3.4ではガラスセル実験に使うロックインアンプの設定について述べる。

### 3.1 装置の構成

図3.1にチャンバーの大まかな外観を、図3.2にその写真を載せている。真空引きにはスクロールポンプとターボポンプを使用していて、実験の際は温度にもよるがだいたい  $10^{-7} \sim 10^{-6}$  Paで行えるように真空に引いてある。

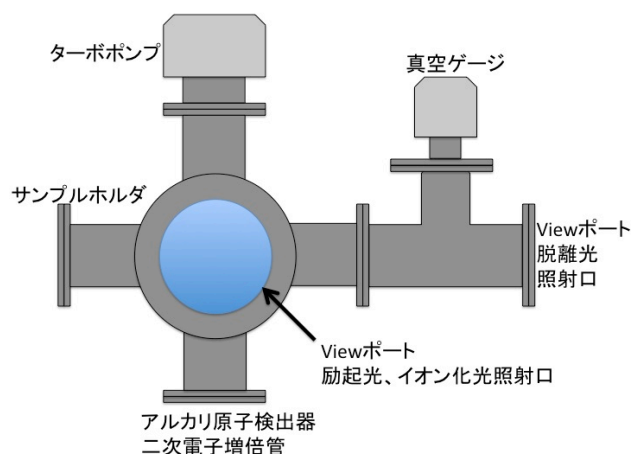


図 3.1 真空チャンバー外観

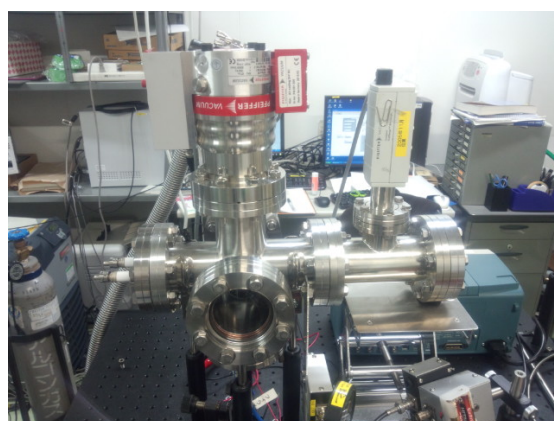


図 3.2 真空チャンバー外観写真

また、図3.3にはチャンバーにマウントされているサンプルホルダ、Ptフィラメント、二次電子増倍管の位置関係を示したチャンバー内部の大まかなセットアップを示している。

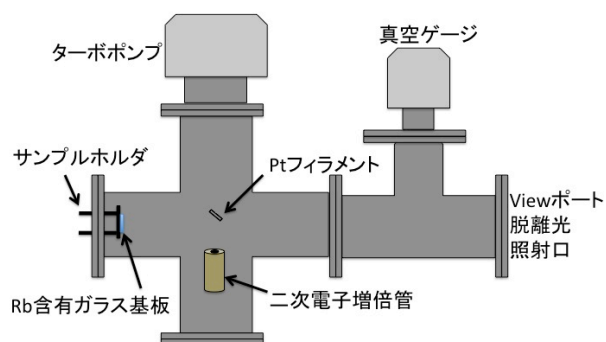


図 3.3 真空チェンバー内部

### 3.1.1 サンプルホルダ

Rb 含有ガラスを PG/PBN ヒーターと押さえで挟み込むように固定する。熱電対は押さえとガラス基板の間に挟み込んで固定する。押さえの中央には  $\phi 18$  mm の穴があいており、脱離光を Rb 含有ガラス基板に照射できるようになっている。図 3.4 にサンプルホルダの概要図を、図 3.5 にサンプルホルダの実際の写真を載せた。また実験をする前に基板を  $200^{\circ}\text{C}$  まで昇温し、24h 放置して基板のデガスを行ってから実験を行った。テスターで熱電対の抵抗を測ると  $1.8 \Omega$  で、ヒーターの抵抗を測ると  $11.7 \Omega$  であった。温度のコントロールと計測を正しく行えるように、抵抗値がこの値になるようにガラス基板と熱電対を押しやる必要があった。

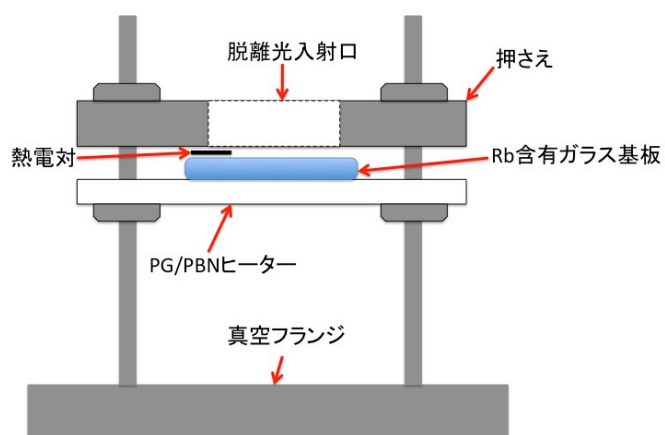


図 3.4 サンプルホルダ概要図



図 3.5 サンプルホルダ上図

### 3.1.2 アルカリ原子検出器

アルカリ原子検出器には図 3.6 のように Pt フィラメントと SEM がマウントされている。実験を行う際は Pt フィラメントには 5.0 A の電流を流し、SEM には  $-2.0$  kV 印加してイオン化した Rb が引き込まれるようにしている。また、Pt フィラメントは実験の 1 日前に 5.4 A 電流を流し続けてデガスを行う。この作業でフィラメントに残っていた原子をとばすことができ、表面イオン化においてバックグラウンドを抑えることができる。また 3.1.1 であった基板のデガスと同時にこの作業は行う。

SEM は図 3.7 のように筒状で、内壁全体がダイノードになっている。イオンが引き込まれて内壁に衝突すると、イオンから運動エネルギーやポテンシャルエネルギーを受けて二次電子が放出される。増倍管の両端には高電圧が印加されている為、放出された二次電子は電場を受けて加速し、内壁に衝突するところにより再び二次電子を放出する。この行程を繰り返し、二次電子が増倍されてイオンは大きなパルス信号となって検出される。

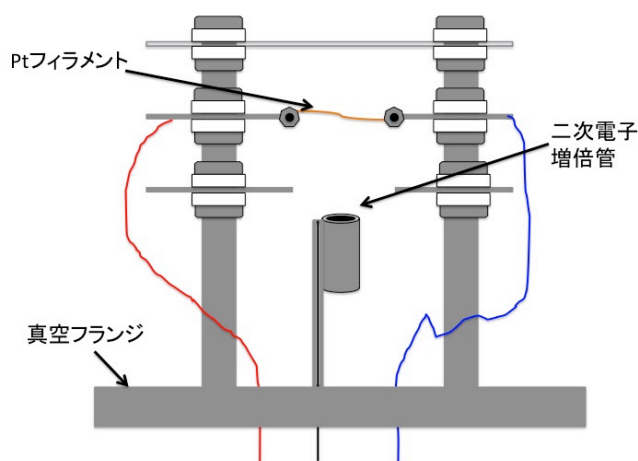


図 3.6 アルカリ原子検出器

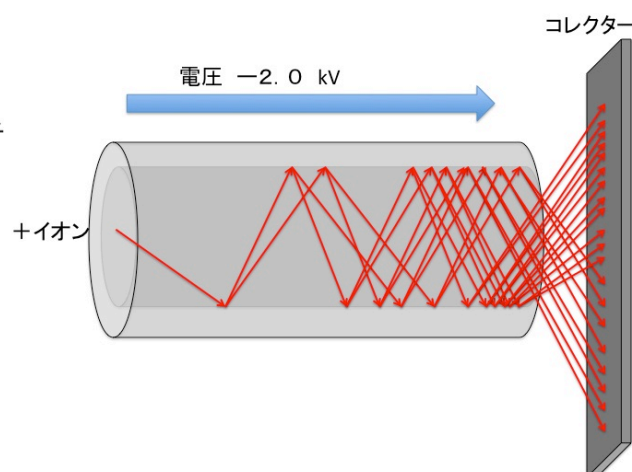


図 3.7 二次電子増倍管

## 3.2 カウント回路

A121(AMPTEK 社製) を PC121(AMPTEK 社製) に取り付けただけのものを使用する。配線は図 3.8 の通りである。 $+5V$  印加すると作動し、入力されたパルス波形を矩形波として出力する。図 3.9 はファンクションジェネレーターからのパルス波形を矩形波に出力している様子である。青線がファンクションジェネレーターからの波形で緑線がカウント回路からの波形である。実験は SEM からの電気信号を矩形波にして出力、出力された矩形波の個数を LabView で見ることで、どの程度原子が検出されたかわかる。このカウント回路はチェンバーに取り付けて固定している。また、実験の際には A・OUT (アナログアウト) に  $50 \Omega$  の抵抗を取り付けて回路内の反射を防ぎ余計なカウントの増加を抑えるようにしてある。また、3.1.2 のアルカリ原子検出器とカウント回路の Ground は真空チェンバーと共通にしている。



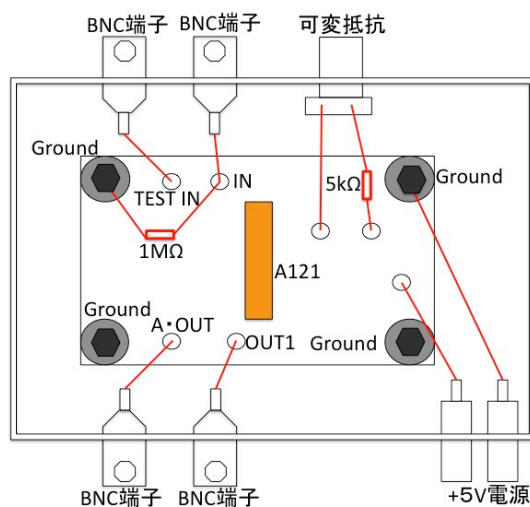


図 3.8 カウント回路配線図

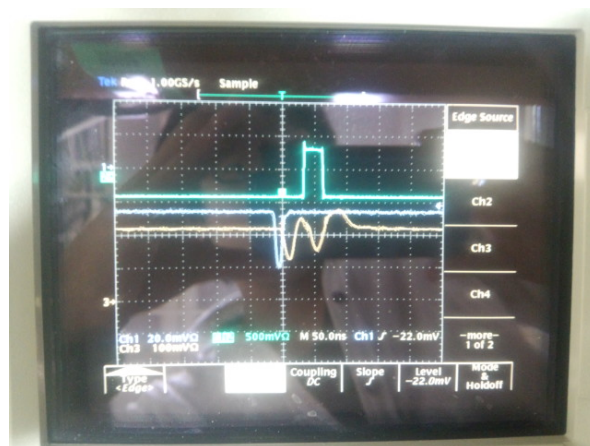


図 3.9 カウント回路動作図

### 3.3 光学系

図 3.10 に基板実験での光学系、図 3.11~12 にセル実験での光学系を示した。紫外光はよく脱離を起こすという報告があるため、脱離光には 375 nm の LD を使用した。光イオン化に用いる波長 780.246 nm の励起光と波長 450 nm のイオン化光はダイクロイックミラー (Thorlabs 社製 DMLP567) を使ってオーバーラップさせる。ダイクロイックミラーは高波長域の光を透過し、低波長域の光を反射させる性質があるので励起光は透過しイオン化光は反射する。励起光にはアイソレータを取り付け、反射によるレーザーのダメージを防いだ。イオン化光は光ファイバーからコリメータを通して出射される。ただそれでもイオン化光はコリメートされなかったので  $f=170$  のレンズを使い、チャンバー内の二次電子増倍管の真上で径が最小になるようにした。脱離光はパワーが約 170 mW、基板に当たる面積が約  $40 \text{ mm}^2$  である。イオン化光はパワーが約 950 mW、オーバーラップの位置で  $\phi 3 \text{ mm}$  の円形。励起光はパワーが約 20 mW で、 $\phi 3 \text{ mm}$  の円形である。このパワーの値は本実験室で出力できる最大の値である。その理由として脱離光は脱離がおりやすいように、イオン化光、励起光では光イオン化がおきやすいようにするためである。

ガラスセルの実験では励起光を Rb の吸収をみる光として利用してガラスセルを通過させるようにした。LID の光には脱離光と Xe ランプを使用した。Xe ランプは波長 400 nm 以下の波長領域の光を出せ、またパワーも脱離光と比べて 350 mW と大きい。そのため Rb は多く脱離するだろうと予想をたて、Xe ランプを使用した。脱離光は励起光と同じ向きから、Xe ランプはガラスセルの円柱の側面から当てるようにした。励起光のパワーは ND フィルタにより 1.41 mW まで落としてある。これはパワーが強いと光が吸収される割合が減り、Rb の検出感度が下がるためである。

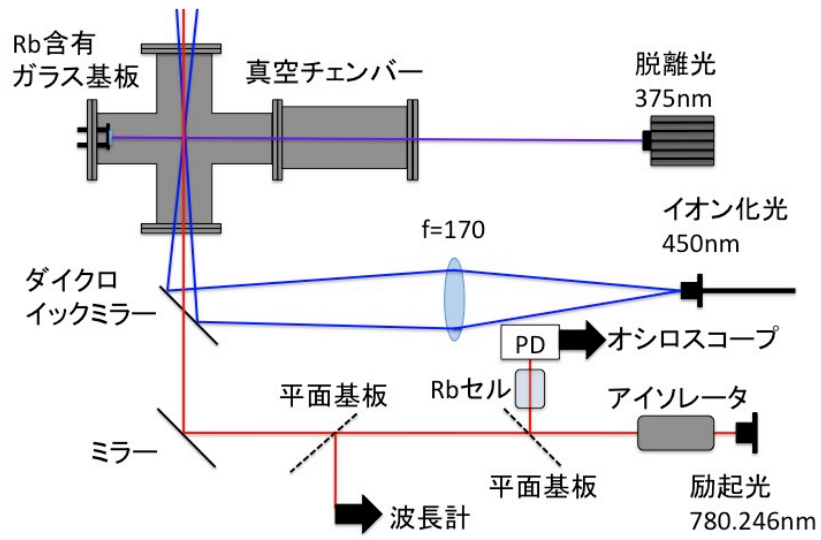


図 3.10 基板実験光学系

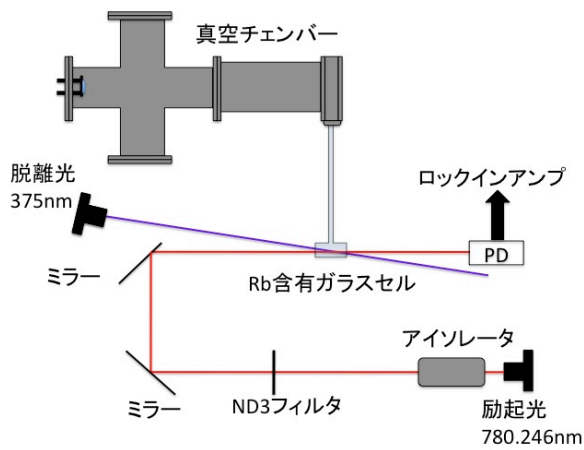


図 3.11 セル実験光学系 (脱離光)

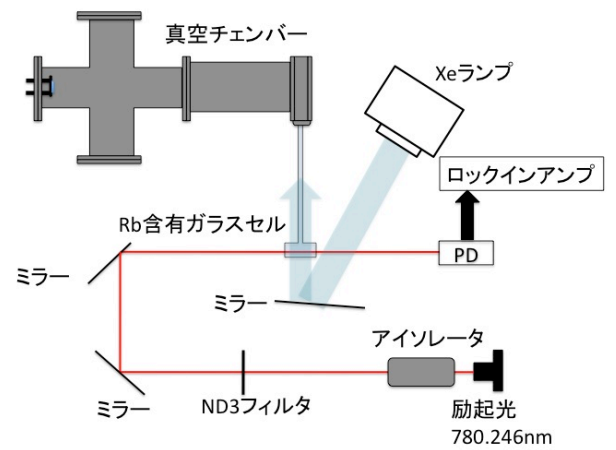


図 3.12 セル実験光学系 (Xe ランプ)

### 3.4 ロックインアンプ

ロックインアンプとは、増幅機能と特定信号検出機能を併せ持ったアンプのことである。特定の周波数の信号を検出して増幅させることができる。これにより、ノイズに埋もれた微小信号の検出や、より高感度の信号検出が行えるようになっている。ロックインアンプは、入力される信号の中から検出したい信号だけを取り出すために参照信号を必要とする。今回の場合は変調周波数と同期した信号を参照信号としている。2.5にあった事前準備のときのロックインアンプの設定を表 3.1 に示す。Rb 蒸気セルでの分光はできたので、ガラスセル実験でもこの設定で行わなければならないが、脱離してくる量は少量であることが見込まれる。よって出力する感度をあげて実験を行う必要がある。従って今回の実験において動かすパラメーターは SENSITIVITY のみで後の設定は変えないで行う。

AC GAIN	24dB,DR28	INPUT LIMIT	180mV <sub>pk</sub>
SENSITIVITY	2mV	TIME CONSTANT	50 $\mu$ V
REF PHASE	66.000°	INPUT COUPLING	AC
INPUT SHELL	FLOAT	INPUT MODE	VOLTAGE
INPUT CONNECTOR	A	INPUT DEVICE	FET
LINE NOTCH FILTER	OFF	AUTO AC GAIN	OFF
TIME CONSTANT	50 $\mu$ s	SLOPE	12 dB/OCT
SYNC THE CONSTANT	OFF	TIME CONSTANT MODE	FAST

表 3.1 ロックインアンプセットアップ

## 第4章

# 実験と結果

この章では作製した基板の LID 実験と表面分析の結果を示す。4.1 ではいずれの基板でも Rb 原子だと思われる光脱離を観測したので各基板での脱離量を示してある。4.2 では脱離量の温度依存性から活性化エネルギーの見積もりを行い、そのエネルギーの解釈について述べている。4.3 で表面分析として作製した基板について光学顕微鏡で表面状態を見て、X 線光電子分光法を用いてガラス表面の元素の特定を行った。また 4.4 にガラスセルでの実験の結果を示す。

### 4.1 光誘起脱離実験と脱離量の見積もり

LID 測定では脱離光の照射を 20 s 間隔で繰り返してオン・オフし、カウントの増加を記録した。表面イオン化ではこれを 3 回繰り返して 1 セットとして行った。光イオン化の場合は励起光を 780.246 nm に合わせて照射を 3 回行い、励起光を離調して 3 回、また 780.246 nm に戻して 3 回行い、計 9 回の脱離光照射を 1 セットとして行った。図 4.1 が表面イオン化での測定例、図 4.2 が光イオン化での測定例である。測定例はどちらも大気さらし基板の 150°C のときのものである。光イオン化の場合は励起光を離調したときにはカウントの増加が見えていない。つまり選択的に Rb だけがイオン化できている証拠である。室温から約 200°C まで 10°C ずつの各温度で測定を行い、Rb の LID を確認した。

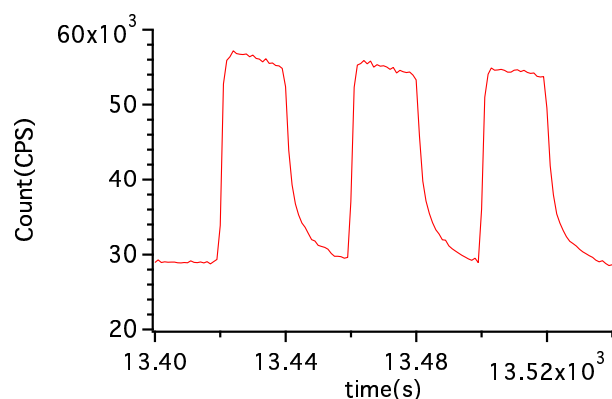


図 4.1 表面イオン化測定例

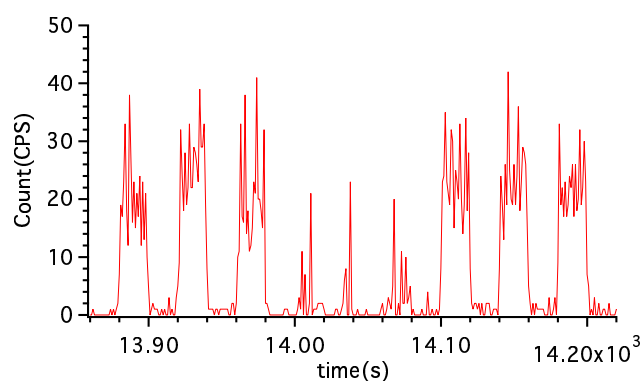


図 4.2 光イオン化測定例

LID 実験は各基板も数回測定を行ったが、実験を行う日によってカウントが変化することはなかった。本研究室での別の研究では堆積させた Rb は LID によってなくなってしまうといった報告がされている。つまり Rb 含有ガラスは Rb を堆積させただけの基板と比べると非常に長い時間 Rb を供給できることがわかった。以下の各基板での結果ではカウントが最大のときの脱離量と温度を示して、指標として 100°C のときと室温についての脱離量を示す。その後に縦軸が脱離光を当てたときに増加したカウント数、横軸が実験を行ったときの温度としたグラフを示す。グラフのエラーバーはカウント数を見積もる際に生じた不確かさである。

#### 4.1.1 大気さらし基板

大気さらし基板では測定を 2 回行った。1 回目と 2 回目でカウント数の変化は見られなかったため 1 回目の結果を図 4.3~4 に示す。大気さらし基板での脱離量の見積もり結果は以下の通りである。

$$7.8 \times 10^8 \text{ 個/s at } 100^\circ\text{C} \quad 1.7 \times 10^8 \text{ 個/s at } 29^\circ\text{C}$$

大気さらし基板は他の 2 種類の基板よりも脱離が多く、光イオン化での測定も多くの温度で可能であった。その理由は後にも述べるが表面の Rb の濃度に起因している。しかしレーザー冷却実験の応用を考えると室温での脱離が  $10^{11}$  個/s (レーザー冷却でトラップできる原子の数は  $\sim 10^8$  個で、脱離してくる Rb をすべてトラップすることはできず、およそ 1/1000 程度しかトラップできないと考えたため) は必要なため大気さらし基板でも今回の実験系での脱離量は応用の量には達していない。温度が上がるにつれて脱離が増加するのがわかる。ここから Rb 含有ガラスの光誘起脱離にも温度依存性が存在することがわかる。その脱離の仕方が表面イオン化と光イオン化で類似している為に表面イオン化で測定したカウントの増加も Rb に由来するものと推測できる。

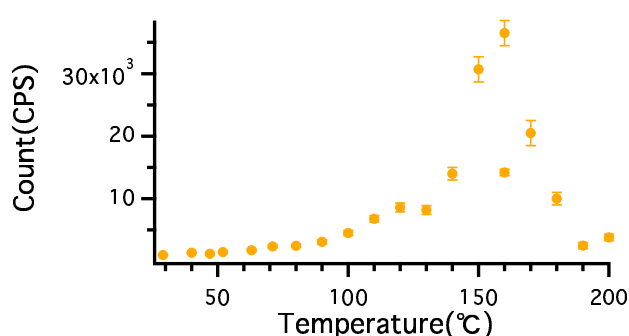


図 4.3 大気さらし基板 表面イオン化

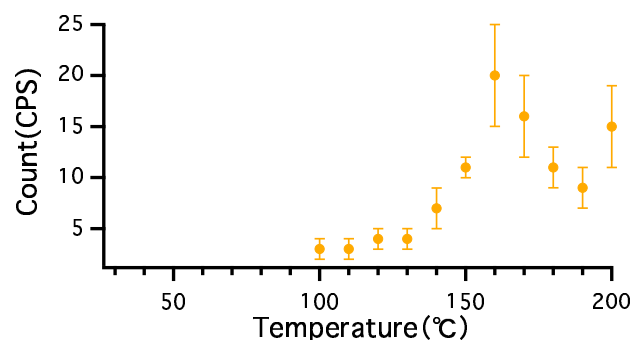


図 4.4 大気さらし基板 光イオン化

150°C 以上では光イオン化、表面イオン化どちらでもカウント数が低下している。本研究室での研究で堆積させた Rb の LID の熱脱離には 200°C 付近にピークがあることもわかっている。従って、今回の Rb 含有ガラスの LID 実験でも熱脱離のピークを越してしまって脱離の量が減ってしまったとも考えるこ

とができる。また表面イオン化と光イオン化の比は 1/2000 よりも大きい 1/1000 くらいになってしまっている。これは熱脱離（高温になるとバックグラウンドが増加してくるのが表面イオン化、光イオン化のどちらでも確認できた）による影響で光脱離のカウントが埋もれてしまい、カウントが正確にとれなかったと考えることができる。高温になると出てくる 2つの現象は温度は異なるが後に出てくる基板にも起きている。しかしながら一概に上に述べたような原因だけでこのような現象が起きているとはいえない。だが、レーザー冷却などの応用を考える際にはそれほど高温にする必要はないので高温部の詳しい議論は避けておく。

#### 4.1.2 水さらし基板

水さらし基板はピラニア溶液で洗浄したものとしてないものの 2枚を作製。洗浄によるカウントの明確な変化は見られなかったが 1割程度ピラニア基板のほうが脱離量が多かった。ピラニア基板は 3回、無洗浄基板は 1回測定を行った。図 4.5~4.6 にはピラニア水さらし基板 3回目の結果を載せた。水さらし基板での脱離量の見積もり結果は以下の通りである。

$$7.8 \times 10^6 \text{ 個/s at } 100^\circ\text{C} \quad 7.0 \times 10^5 \text{ 個/s at } 31^\circ\text{C}$$

水さらし基板のカウントの最大値は大気さらし基板の約 1/3 になっている。したがってカウントが多くなる 190°C 以上の温度でのみ光イオン化での測定が出来た。ここでも表面イオン化と光イオン化のカウントの増加が類似しているため表面イオン化でのカウントは Rb に由来するものと推測できる。室温での温度が大気さらし基板と異なっているのは Pt フィラメントが発する熱によるものである。

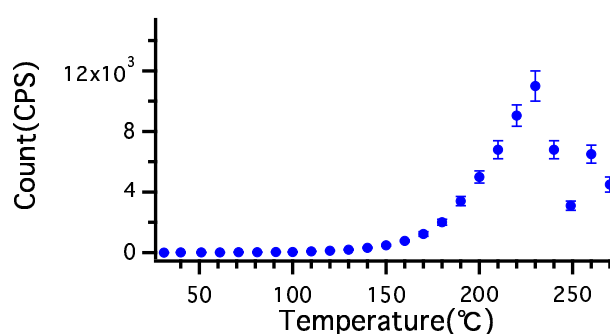


図 4.5 ピラニア水さらし基板 表面イオン化

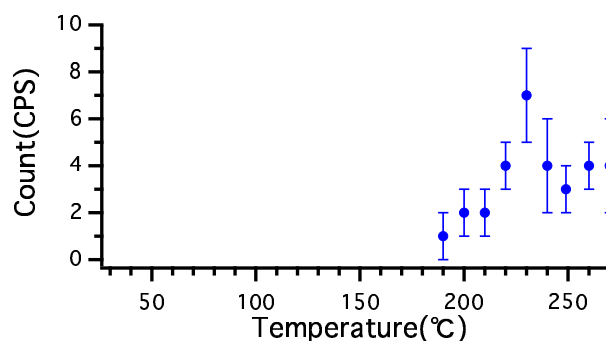


図 4.6 ピラニア水さらし基板 光イオン化

#### 4.1.3 超音波洗浄基板

超音波洗浄基板もピラニア洗浄したものとしてないものの 2枚を作製した。こちらでもピラニア基板の方がわずかに脱離が多くなった。以上より少しでも脱離を多くさせたいならばピラニア溶液で洗浄した方

が良いと言える。ピラニア基板は3回、無洗浄基板は1回測定を行った。図4.7にはピラニア超音波洗浄基板の3回目の結果を載せた。超音波洗浄基板での脱離量の見積もり結果は以下の通りである。

$$3.7 \times 10^6 \text{ 個/s at } 100^\circ\text{C} \quad 7.0 \times 10^5 \text{ 個/s at } 27^\circ\text{C}$$

超音波洗浄基板のカウント数は他の2枚の基板と比べると1番少なく、カウントの最大値は水さらし基板の約1/2になっている。そのため高温にしていってもグラフ化できるほどの光イオン化での検出は出来なかった(210°Cと220°Cの2点でカウント数は2と3で誤差±1)。超音波洗浄によって表面にあるRbが削られてしまったのが原因と考えられる。しかしながら表面イオン化で測定した信号も水さらし基板と作製方法などはさして変化ないことからRb由来のものと考えても良いだろう。

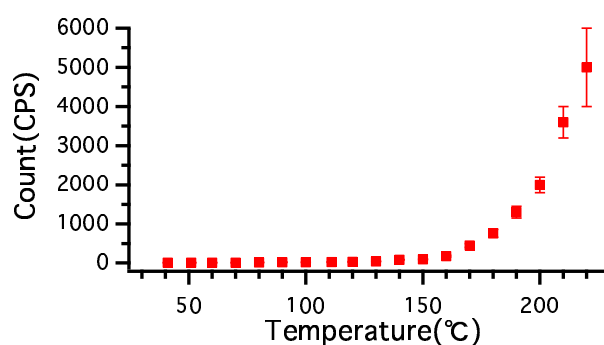


図4.7 ピラニア超音波洗浄基板 表面イオン化

## 4.2 活性化エネルギーの見積もり

各基板には脱離の量に温度依存性があった。これを受けてアレニウスプロットよりRbの脱離に必要な活性化エネルギーを求めようとした。もともとアレニウスの式とはある温度での化学反応の速度を予測する式である。理論式は以下のように表される。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (4.1)$$

k : 速度定数                                      A : 温度に無関係な定数 (頻度因子)  
 $E_a$  : 活性化エネルギー                       $k_B$  : ボルツマン定数                      T : 温度

この式より両辺の対数をとって、縦軸を速度定数の対数、横軸が温度の逆数としてグラフを書くとその傾きが活性化エネルギーとして求まる。これがアレニウスプロットというものである。この方法に従い、今回の脱離実験について横軸が温度の逆数、縦軸をカウント数の対数にしてみるとすべての実験結果でも二つの直線で表されるようなグラフの形になった。例として図4.8にピラニア水さらし基板のグラフを示す。

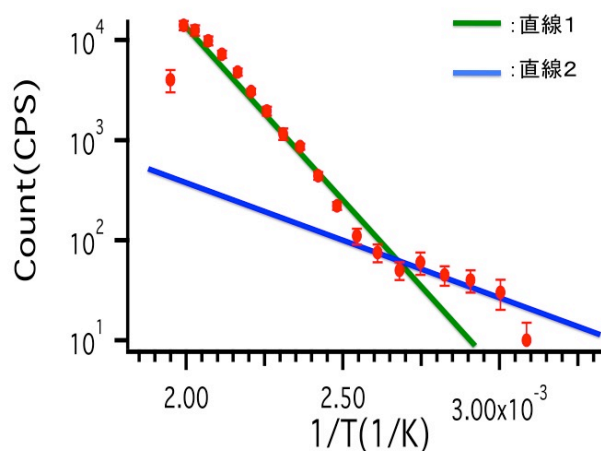


図 4.8 アレニウスプロット例

そこで今回の実験では2種類の活性化エネルギーが脱離に関わったと考えられる。式にすると以下のようになる。

$$k = A_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{k_B T}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_{a2}}{k_B T}\right) \quad (4.2)$$

よって得られた脱離信号のグラフを縦軸をカウント数、横軸を温度の逆数にして再びグラフ化し、そのグラフに以下のような式でフィッティングをおこなった。ただし絶対零度では脱離は0としている。

$$y = A_1 \exp\left(-\frac{x}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{x}{\tau_2}\right) \quad (4.3)$$

(4.2),(4.3) より活性化エネルギーはそれぞれ以下の通り求まる。

$$E_{a1} = \left(\frac{k_B}{\tau_1}\right), E_{a2} = \left(\frac{k_B}{\tau_2}\right) \quad (4.4)$$

以上より 4.1 のグラフを縦軸がカウント数、横軸が温度の逆数のグラフにしてフィッティングを行った結果を以下に示す。また光イオン化のフィッティングにはデータ点が少なくうまく行えなかったため、表面イオン化で求めた  $\tau_1$  と  $\tau_2$  の値を式 (4.3) に代入してプロット点がうまくグラフに乗るかを確認した ( $A_1$  や  $A_2$  はフィッティングに適した値に変えてある)。

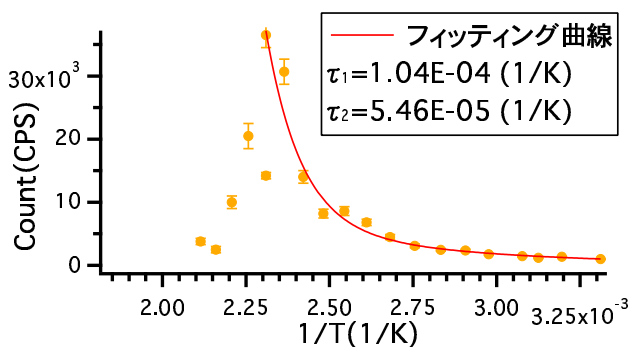


図 4.9 大気さらし基板 表面イオン化

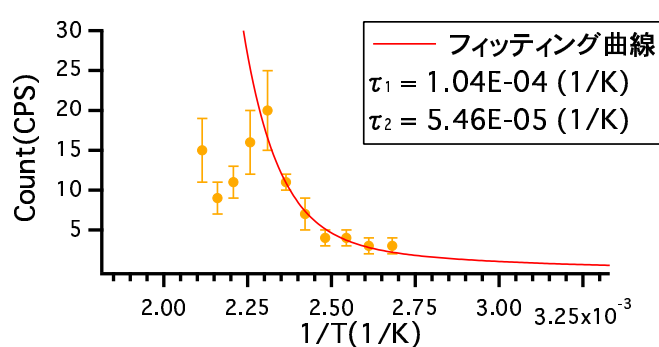


図 4.10 大気さらし基板 光イオン化



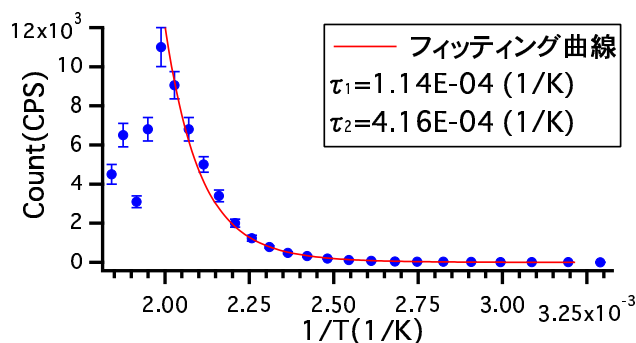


図 4.11 ピラニア水さらし基板 表面イオン化

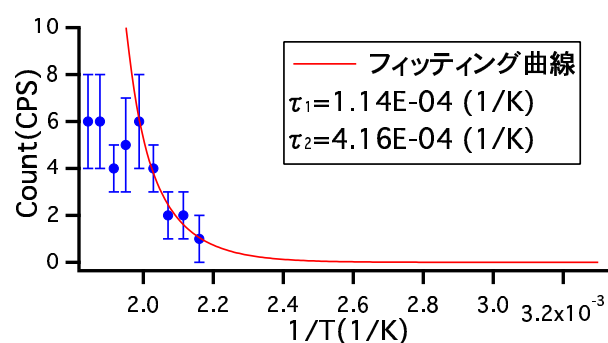


図 4.12 ピラニア水さらし基板 光イオン化

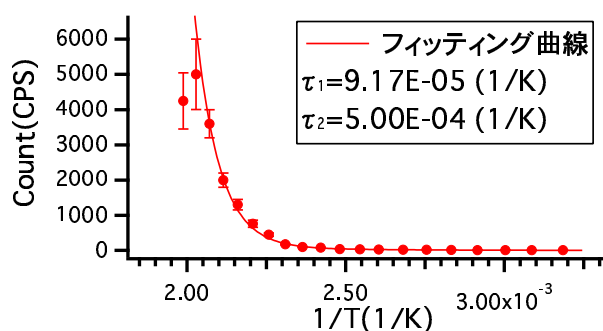


図 4.13 ピラニア超音波洗浄基板 表面イオン化

上のグラフより、表面イオン化と光イオン化でのプロット点はどちらもフィッティング曲線上に乗っている。つまり表面イオン化での脱離に要するエネルギーは光イオン化でのものと同じといえる。ここからも表面イオン化の信号が Rb 由来のものであるといえる。フィッティングによって求めた  $\tau_1$  と  $\tau_2$  により各活性化エネルギーを求めたものを以下の表 4.1 に示す。また上にある結果以外の測定結果で同様の計算を行って求めた活性化エネルギーのグラフを図 4.14~4.15 に示す。表やグラフにある誤差はフィッティングによる誤差である。

基板種類	$E_{1a}$ (eV)	$E_{2a}$ (eV)
大気さらし基板	$0.830 \pm 0.063$	$0.158 \pm 0.016$
水さらし基板	$0.758 \pm 0.024$	$0.207 \pm 0.066$
超音波洗浄基板	$0.939 \pm 0.108$	$0.172 \pm 0.040$

表 4.1 活性化エネルギー

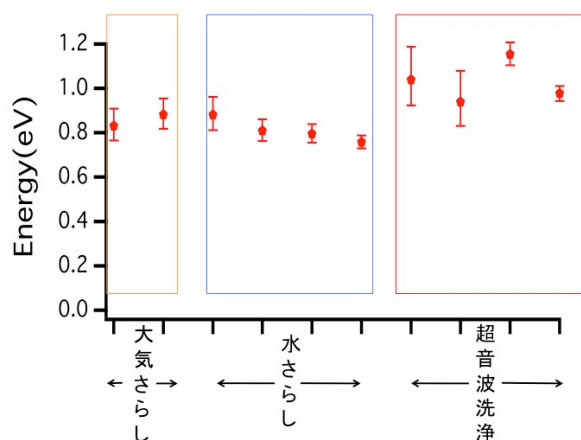


図 4.14 大きい方の活性化エネルギー

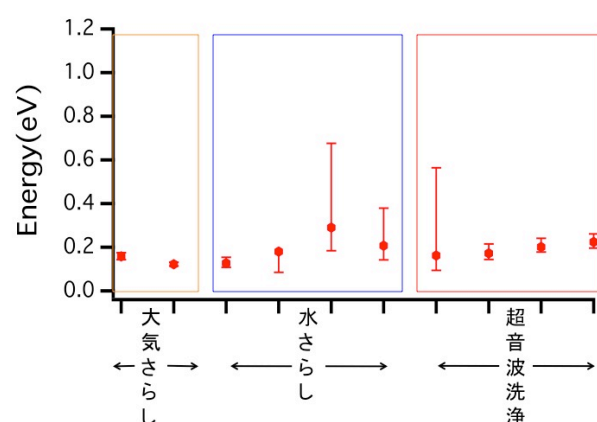


図 4.15 小さい方の活性化エネルギー

以上より Rb 含有ガラスからの LID には 2 種類の脱離の仕方があり、そのエネルギーは Rb と結合しているものの違いにあると考えられる。1 つ目は必要なエネルギーが約 0.8~1.2 eV で高温部分でなければ脱離はしないが基板表面に多くある成分からの脱離。2 つ目は必要なエネルギーが約 0.15~0.30 eV で低温部でも脱離するが基板表面の占有率は低い成分からの脱離であると考えられる。レーザー冷却の応用を考えれば後者の成分を増やしていく方法を考えるべきであろう。しかしながら求めた活性化エネルギーが実際の脱離の中でなにに相当するのかわかっていない。筆者は 2 つの推測を行ったのでそれを以下に示す。

#### 4.2.1 推測 1: 活性化エネルギーを吸着エネルギーとしたとき

参考文献 [3] は石英基板に堆積させた Cs (セシウム) の吸着エネルギーを求めている。その文献によると架橋酸素と結合した Cs の吸着エネルギーは 0.1~0.2 eV、Si (シリコン) と結合した Cs の吸着エネルギーは 0.88~1.07 eV と見積もっている。Cs と Rb や、堆積と含有の違いなどはあるが、同じアルカリ原子であり、吸着エネルギーを脱離するのに必要なエネルギーだと考えられる。そのため本研究で算出したエネルギーも同じような結合からの脱離エネルギーと考えることができる。よって吸着エネルギー 0.8~1.2 eV の成分は Si と結合した Rb からの脱離であり、吸着エネルギー 0.15~0.30 eV の成分は架橋酸素と結合した Rb からの脱離によるものだと予想できる。図 16,17 にそれぞれの結合の模式図を示す。

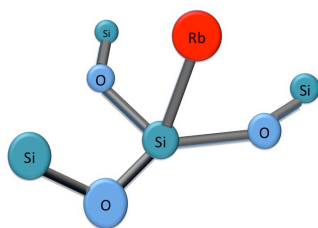


図 4.16 Si と結合している Rb

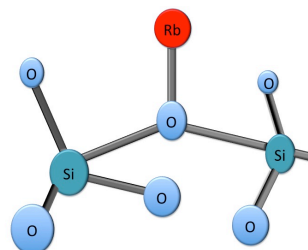


図 4.17 架橋酸素と結合している Rb

### 4.2.2 推測 2:拡散に必要な活性化エネルギーとしたとき

ここでいう活性化エネルギーとは、石英ガラス中にある Rb イオンが石英ガラス中を動き回るのに必要なエネルギーのことをさす。参考文献 [4] では合成ガラス (RbO<sub>2</sub>:20 %、SiO<sub>2</sub>:80 %) 中に含有されている Rb イオンの拡散エネルギーを求めている。その値は約 0.8eV~1.0eV であった。条件はこの場合もやや異なるが、この値も求めた活性化エネルギーとよく一致している。この場合の Rb は図 2.1 にあるような非架橋酸素と結合している。よってこの文献から求めた活性化エネルギーのうち 0.8~1.0 eV の成分は非架橋酸素と結合している Rb だと予想される。もう一方の成分はこの文献からは近い値の結合は見つからなかったが、こちらは非架橋酸素と結合している Rb よりも早く動ける結合からなる Rb だと言える。4.1 の結果と対応させて考えてみる。4.1 の結果ではどの基板でも、脱離する量は低温側ではほとんど変わらずに脱離を起こし、温度が高くなると指数関数的に多くなっていった。これは低温側ではガラス表面にある Rb がすぐに供給されないために脱離量が増えていかず、温度を上げれば Rb の供給される速度があがった (拡散する Rb の量が増えた) ために脱離が多くなったと考えることができる。

## 4.3 表面分析

いずれの基板でも Rb の LID は観測されたが、表面の状態を知ることは応用上非常に重要である。そのため光学顕微鏡での表面状態の観察と X 線光電子分光法 (X-ray photoelectron spectroscopy:以下 XPS と略) で表面にどれくらい Rb があるのか、またどのような結合をしているのかを調べた。

### 4.3.1 光学顕微鏡で見た表面状態

光学顕微鏡でみた写真を図 4.18~22 に載せる。どの基板でも洗浄が終わった直後の写真である。表面の状態は超音波洗浄基板は加工前のガラスと変わらない様子であり、反して大気さらし基板は至る所に穴のようなものが確認され、水さらし基板はその中間くらいの状態であった。レーザー冷却実験での応用を考えるとレーザーをまっすぐ通らないほど表面が荒くなっている大気さらし基板は使えない。また、LID 実験後にも表面の状態を見た。その結果は大気さらし基板の表面がさらに荒くなっていた。大気さらし基板に比べると表面の荒さはそこまで悪くはないが水さらし基板と超音波洗浄基板もすこし表面が荒くなっていた。

なぜこのような変化が生まれるのかを考察する。Rb などのアルカリ原子にはガラス表面を浸食する作用があることが知られている [5]。それぞれの基板の違いは作製してからの洗浄方法の違いにある。大気さらし基板は大気にさらすことによって表面にある酸化 Rb の割合を増やすような作業をしていると考えられる。大気さらし基板だけガラス表面が大きく浸食されたので酸化 Rb がガラスを浸食する作用を強く持っていると考えられる。また、水さらし基板や超音波洗浄基板ではガラスが削られている箇所が少なかったことから、表面に単体として存在する酸化 Rb は水にさらすことによって大部分を除去できたといえる。また別の考えで、表面についている Rb を取り除くまでに時間がかかったため、その間にガラスが浸食されたということも考えられる。

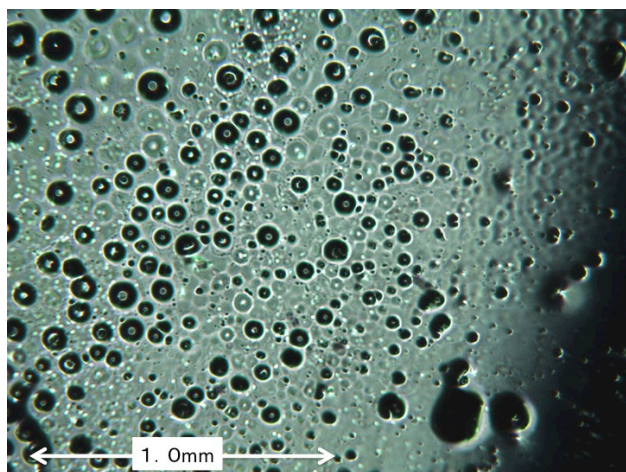


図 4.18 大気さらし基板

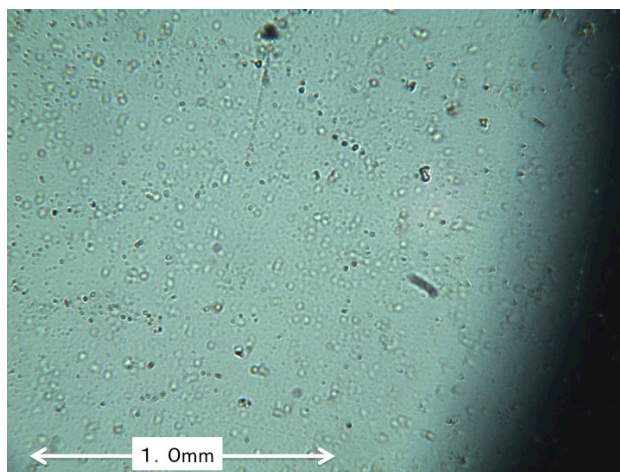


図 4.19 水さらし基板

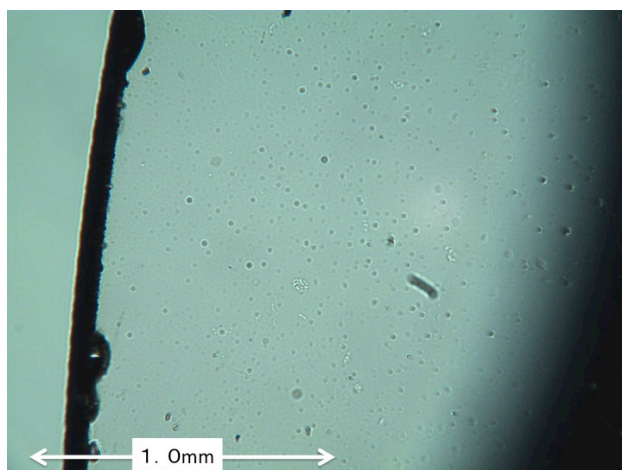


図 4.20 超音波洗浄基板

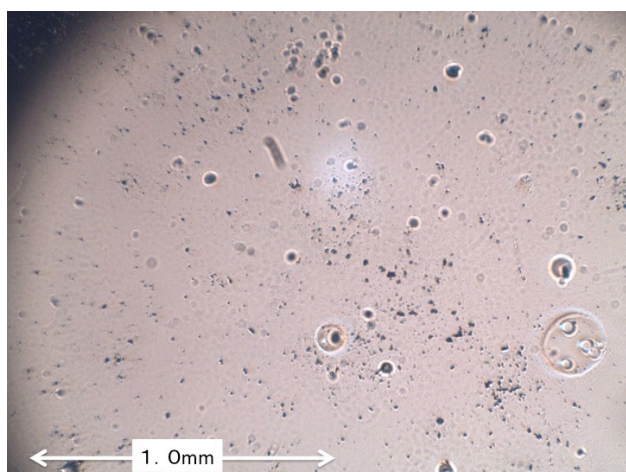


図 4.21 ピラニア水さらし基板

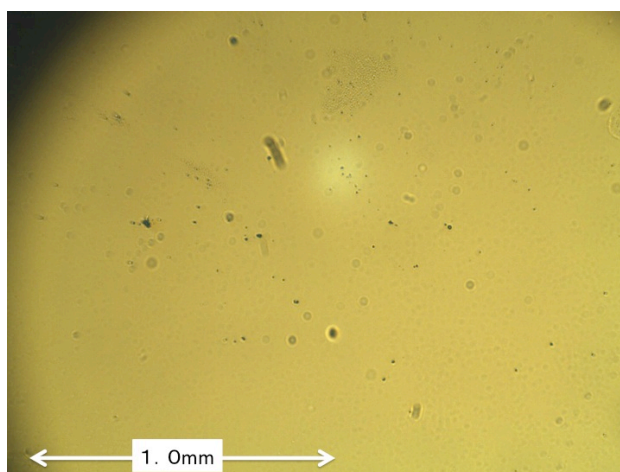


図 4.22 ピラニア超音波洗浄基板

### 4.3.2 X線光電子分光法

作製したすべての基板について LID 実験後に XPS 測定を行った。XPS とは試料に X 線（本研究室では  $AlK_{\alpha}$  線：1486.6 eV）を照射することで試料表面にある原子の原子軌道の電子が励起され、外にたたき出された光電子の運動エネルギーを分光器によって測定することによって試料表面にある元素の特定や結合状態を知ることの出来る測定法である。この方法は深さ約 5 nm の元素の種類とその濃度、また結合状態などを知ることが出来る。図 4.23 にそのスペクトル例として大気さらし基板の結果を示す。

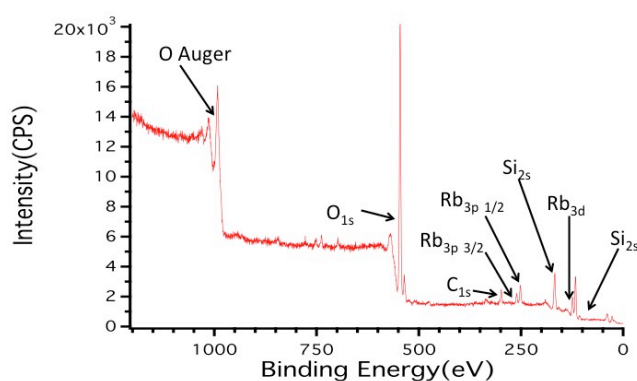


図 4.23 XPS スペクトル

すべての基板から石英基板の成分である O と Si、含有されている Rb、不純物である C 由来のスペクトルが確認できた。これからナロウスペクトルをとり、各元素がどれくらい表面に含まれているかをスペクトルのピーク面積より求めた。図 4.24~26 に O、Si、Rb の表面密度の各基板ごとのグラフを示す。

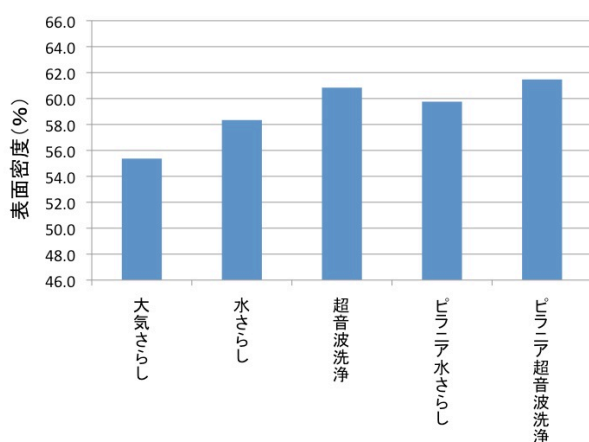


図 4.24 O の表面密度

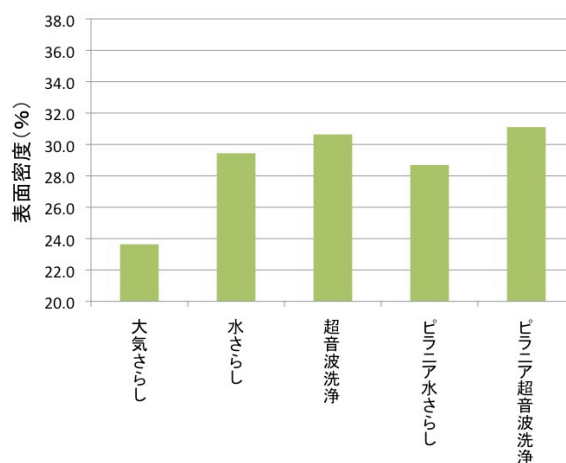


図 4.25 Si の表面密度

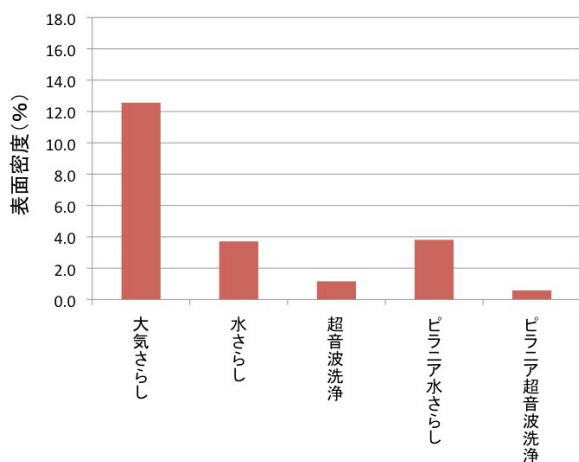


図 4.26 Rb の表面密度

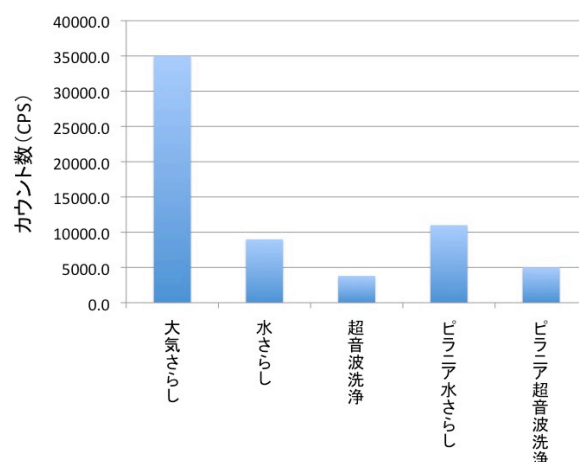


図 4.27 各基板の最大脱離量

図 4.27 に各基板の最大の脱離量（高温部分）のグラフを載せた。Rb の表面密度と LID 実験の脱離量とはよく合致した結果を示したと言える。よって浸食作用によって作製した Rb 含有ガラスの脱離量は Rb 含有量と深く関わりがあり、脱離量を増やすならば Rb の含有量を増やせばいいと言える。

次にそれぞれの元素がどの元素と結合しているのかを示す。図 27、28 は前処理をしていない基板の O と Si のスペクトルである。図 29、30 はピラニア洗浄基板の O と Si のスペクトルである。どちらの元素でも Rb と結合していればグラフの右側（低エネルギー側）にピークが見えるはずである。グラフを見てみると Rb と O との結合はスペクトルから確認できるが、Si と Rb の結合は確認できない。そのため、基板表面上にある Rb は酸素と結合している成分が大部分を占めることがわかった。

Rb と O の結合が見えたのは推測 2 での非架橋酸素と結合している Rb が大部分を占めると考えを後押しする結果となった。しかしながらこの結果だけでどちらの推測が正しいというのは判断材料にかける。なぜなら Rb と Si の結合が XPS で観測できる量（ $\sim 10^{11}$  個/cm<sup>2</sup>）に達していなかったと考えることができるからである。

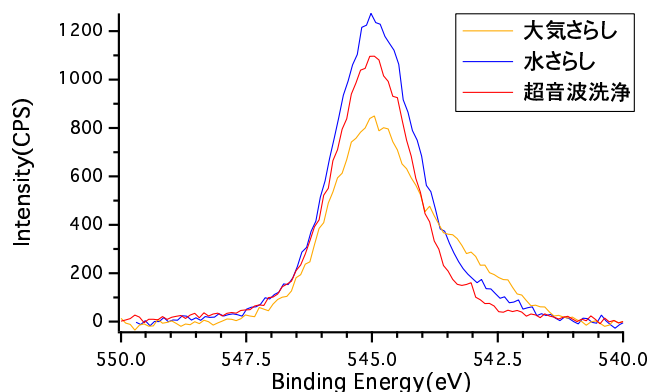


図 4.28 前処理なし基板 O のスペクトル

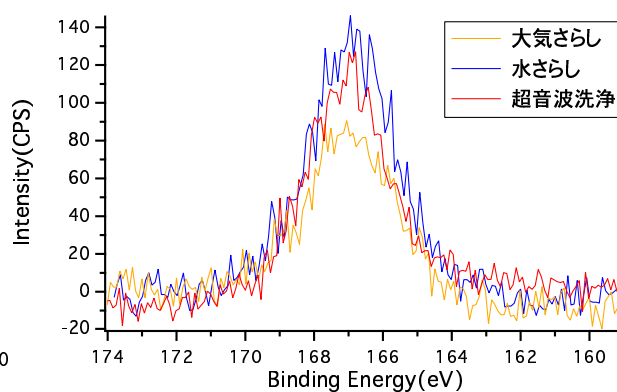


図 4.29 前処理なし基板の Si のスペクトル

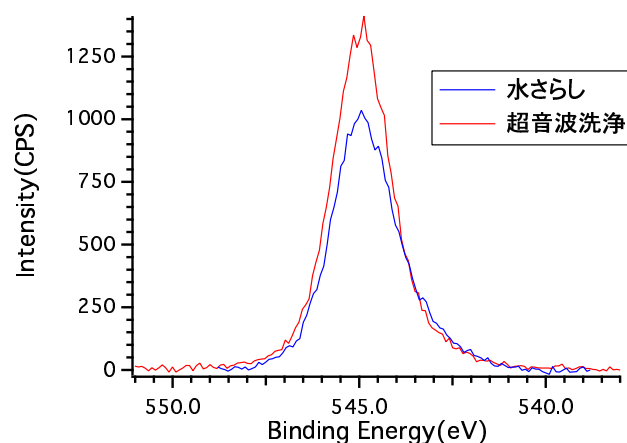


図 4.30 ピラニア基板 O のスペクトル

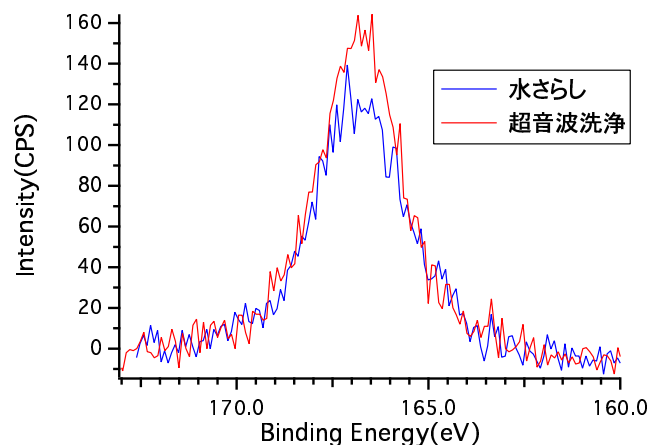


図 4.31 ピラニア基板の Si のスペクトル

また本研究室の XPS 装置は温度を制御できるようにヒーターと熱電対がついた機構になっている。よって温度によるスペクトルの変化があるのかを2つのピラニア基板について調べた。具体的には室温から 200 °C まで 50 °C ずつの温度で XPS を行い、それぞれの温度について各元素の表面密度を求めた。Rb の表面密度についてのグラフを以下に示す。

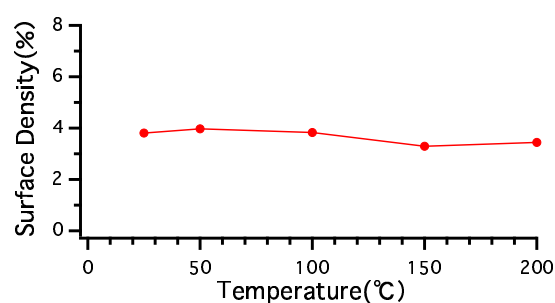


図 4.32 ピラニア水さらし基板 Rb 密度

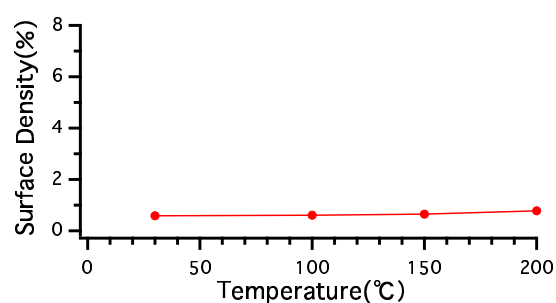


図 4.33 ピラニア超音波洗浄基板 Rb 密度

グラフを見てわかる通り、温度による Rb 表面密度の変化は見られなかった。他の元素の密度は温度が上がるにつれて C が下がり（水さらし基板で約 4 %、超音波洗浄基板で 2.5 % 減少）、その分 O や Si の密度があがった。つまり不純物である C が昇温によって減り、その分基板の成分 ( $\text{SiO}_2$ ) が見えるようになった。以上の結果から高温になると Rb の脱離量は増えるが、表面の密度が増えるわけではないことがわかった。

## 4.4 セルでの実験

実験当日には再び室温で Rb 蒸気セルで分光を行い、ロックイン検出が出来るようにした。その際のロックインアンプは 3.5 のセットアップで行い、大きい山で 7.6 V 出力された。その後にガラスセルに Xe ランプの光を照射して吸収分光実験を行ってみたが Rb の吸収は見えなかった。従って SENSITIVITY を 500  $\mu\text{V}$  (最高の感度) にして再び光を照射してみたが、Rb の分光を見ることは出来なかった。そのときのオシロスコープの波形を図に示す。2.5 で会ったような増幅信号がとれなかったことがわかる。また、脱離光に変えて実験を行ったがそれでも Rb の吸収を見ることはかなわなかった。このあと、ドライヤーでセルを暖めて脱離光を照射したり、ヒーターによって高温 (およそ 200  $^{\circ}\text{C}$  近く) にして脱離光を照射してみたりしたがそれでも Rb 由来の信号は観測できなかった。

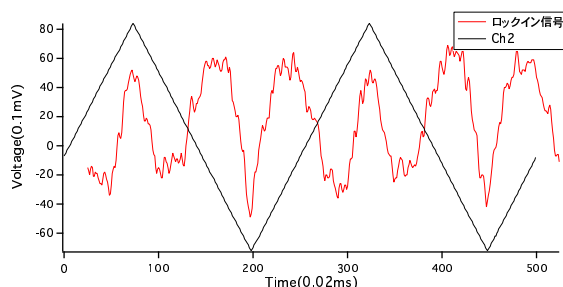


図 4.34 オシロスコープの信号

吸収によって Rb が検出できなかった理由を考える。まず  $10^9$  個/ $\text{cm}^3$  の Rb 蒸気セルで 7.6 V で出力されたものが (SENSITIVITY 2 mV)、20 mV のスケールでオシロスコープで観測しても波形に変化はなかった (SENSITIVITY 500  $\mu\text{V}$ ) ことから、Rb 蒸気セルの 1000 分の 1 に満たない量 ( $10^6$  個/ $\text{cm}^3$ ) の脱離であったと考えられる。ガラスセルは水さらし基板と同じ製法で作ったので、4.1.2 より室温でおよそ  $10^5 \sim 10^6$  個/s の Rb の脱離が見込まれる。セルの大きさは  $\phi=20$  mm、長さ 30 mm の円筒形なので単位を 個/ $\text{cm}^3$  に直すと 1 秒当たりの脱離量は  $10^4 \sim 10^5$  個/ $\text{cm}^3$  であり、脱離した原子が 1 秒間セル中に滞在したとしても検出できる脱離量を満たしていないことがわかる。よって今回のやり方では Rb の吸収信号が見えなかったのだと考えられる。今後、同じように実験するならばもう少し Rb の脱離量が多い Rb 含有ガラスを作製してから行う必要がある。



## 第5章

# 結論

### 5.1 まとめ

石英基板で Rb 含有ガラス基板を作製した。作製後の洗浄方法によって大気さらし基板、水さらし基板、超音波洗浄基板の3種類にわけ、作製前にピラニア溶液で洗浄したものをピラニア水さらし基板、ピラニア超音波洗浄基板と区別することで計5種類の基板にわけた。

光イオン化、表面イオン化の2種類の検出方法を用いて LID 実験を行い、どの基板においても Rb の脱離を観測することが出来た。脱離量は大気さらし基板、水さらし基板、超音波洗浄基板の順番に多く、それは表面の Rb の表面密度に比例する形になった。しかしながら大気さらし基板の室温で一番多い脱離で $\sim 10^8$  個/s なのでレーザー冷却の応用に必要な脱離の量は達していない。基板作製前にピラニア溶液で洗浄することにより脱離量が 10~15 % 増加することを確認した。

各基板の脱離の温度依存性よりアレニウスプロットをして、脱離に必要な活性化エネルギーを求めたところ、LID には2つの Rb の結合由来のものがあることがわかった。1つは脱離に 0.8~1.0 eV のエネルギーが必要な成分、もう1つは脱離に 0.15~0.2 eV のエネルギーが必要な成分がある。この活性化エネルギーは吸着エネルギーもしくは拡散エネルギーなのではないかと推測した。

光学顕微鏡の観察から脱離が多い大気さらし基板は酸化 Rb によるガラスの浸食作用によって表面が削られてしまっているのでレーザー冷却実験には向かないことがわかった。各基板で XPS を行い、基板表面にある元素の表面密度を算出したところ Rb の表面密度は大気さらし基板で約 12 %、水さらし基板で約 4 %、超音波洗浄基板で約 1.5 % である。各基板のナロウスペクトルを見ることにより、Rb が O と結合していることがわかった。また、温度による表面密度の変化を調べてみた結果、温度による変化はないことがわかった。

以上のことから Rb 含有ガラスの LID について理解を深めた。

ガラスセルの実験では Rb の吸収信号は観測できなかった。これは測定の検出限界に Rb の脱離が足りなかった為と考えられる。

## 5.2 課題と展望

本研究では洗浄による脱離の違いにしか着目して LID 実験を行えなかったので今後は多角的に LID の性質を調査する必要がある。例えば、作製方法に着目して実験を行う（バークの温度や時間、または他の作成方法の模索）、脱離光の波長依存性やパワー依存性を調べる必要がある。今のところレーザー冷却実験などの応用を考えた際に一番適している状態は低温（室温付近）での脱離量が増えることである。よって Rb の含有量を増やすとともに、ガラスの劣化を防ぐため表面にある酸化 Rb は取り除く必要がある。また今回の研究では推測で終わってしまったが、Rb がどのような結合状態であるのかをはっきりさせれば LID 減少の解明にもおおきな役割を果たすだろう。LID に最適な作製条件と脱離条件（光の波長や強度等）がわかればガラスセルを作製して応用に耐えるだけの性能を示せるかもしれない。Rb 含有ガラスが新しい原子供給源として使われる日がくることもそう遠くないかもしれない。

## 付録 A

### A.1 5 V 電源装置

カウンタ回路に使用する定電圧電源装置を自作した。仕様としては商用電源 AC100V から定電圧 DC+5V を出力する電源装置である。以下にその回路図を示す。

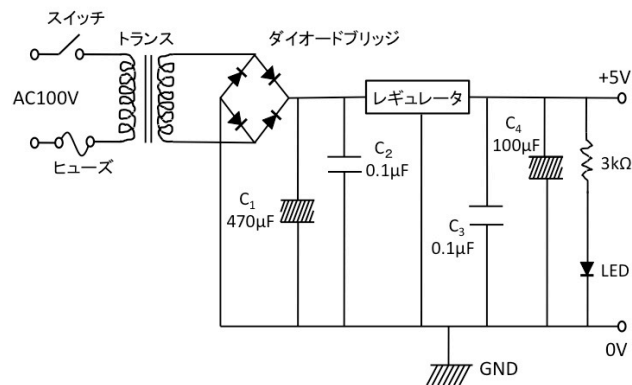


図 A.1 5V 電源装置回路図

トランスは AC100V から AC6V に変化する素子、ダイオードブリッジは AC 信号から DC 信号に変換する整流素子、レギュレータは入力された電圧信号を決められた電圧に出力する素子で今回は +5V 出力する素子を選んだ。C2,C3 はレギュレータを使用する際に必要になるセラミックコンデンサ、C1,C4 は回路の発振を押さえる電解コンデンサである。抵抗と LED は完全な無負荷状態にならないようにする為の素子である。実際の写真は以下の図に示す。



図 A.2 +5V 電源上からの写真



図 A.3 +5V 電源装置前面写真

作製後、オシロスコープ (DS-4354ML) につないで動作確認を行った。その結果、DC5V の電圧が供給されていることが確認できた。以下はそのオシロスコープでの出力画像である。また、テスターで実際の出力量を計測してみると +4.89V の電圧が出力されていた。これはカウント回路を動作させるのには十分な電圧である。

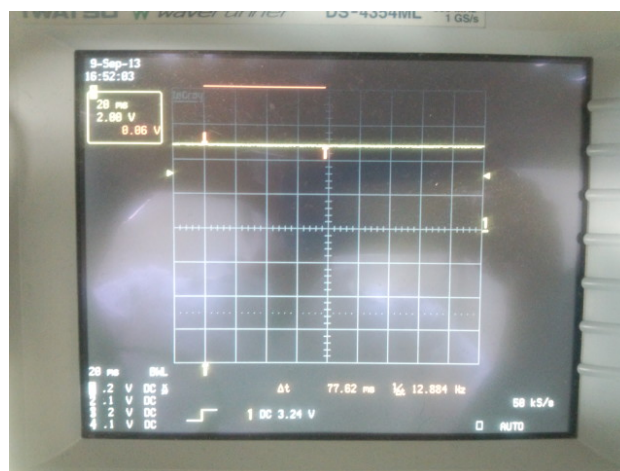


図 A.4 5V 電源装置動作確認

## 参考文献

- [1] 加藤浩 “Rb 含有ガラスからの Rb 原子の光誘起脱離”, 東京農工大学物理システム工学科, 卒業論文, (2013)
- [2] 岩波書店出版 “岩波 理化学辞典 第5版”(2008)
- [3] Nuria Lopez, Francesc Illas, and Gianfranco Pacchioni “Adsorption of Cu, Pd, and Cs Atoms on Regular and Defect Sites of the SiO<sub>2</sub> Surface”(1999).*J. Am. Chem. Soc.***1999**,*121*,813-821
- [4] NAROTTAM P.BANSAL, R.H.DOREMUS “Handbook of Glass Properties” (ACADEMIC PRESS, INC 1986)
- [5] 土橋正二 “ガラス表面の物理化学”(講談社 1979)
- [6] 宮田武雄 “速解 電子回路 -アナログ回路の基礎と設計-”(コロナ社 1991)

## 謝辞

本研究を行うにあたって丁寧に装置の使い方や実験原理などを教えてくださった畠山准教授に大変感謝致します。来年からは違う研究室になってしまいますが、畠山研で身につけた力（普段から議論をする、青春を注ぐくらいの気持ちで研究に取り組む、よく考える）をむこうの研究室でも発揮したいと思います。1年間お世話になりました。ありがとうございました。また研究室の先輩や同期のみなさんとは実験でお世話になることはもちろん、研究室生活でも楽しい1年間を過ごせたと思っています。これも皆さんのおかげです。ありがとうございました。