

次世代大型  $\gamma$  線望遠鏡の  
高性能反射鏡の開発

1 0 8 6 1 0 4 7

松本恵里



## 目次

1. はじめに
  - i. CTA について
  - ii. 鏡の開発
  - iii. 研究目的
2. 鏡の構造
  - i. スパッタリング
  - ii. 鏡の構造とピンホール
3. 金属腐食の原理
  - i. アルミの腐食
  - ii. 腐食の種類
4. 実験方法
  - i. 装置 1 : WEB カメラによる撮影セット
  - ii. 装置 2 : 重水素ランプの反射光スペクトルによる反射率変化測定装置
  - iii. 装置 3 : 400nm 半導体レーザーによる反射率変化の測定装置
  - iv. 装置 4 : 電子顕微鏡 SEM と原子間力顕微鏡
5. 実験結果
  - i. WEB カメラによる反射鏡腐食実験の撮影
  - ii. 電子顕微鏡 SEM での腐食した鏡表面の観察
  - iii. 反射率の測定
  - iv. 鏡表面の凹凸を原子間力顕微鏡で測定
6. 結論
7. 考察
8. 謝辞
- 引用・参考

## 1. はじめに

次世代高エネルギーガンマ線観測計画 CTA (Cherenkov Telescope Array : チェレンコフ望遠鏡アレイ) で使用する鏡の開発を行っている。この計画は 24m 口径の大型望遠鏡を複数配置し、高エネルギーガンマ線が大気中で放出する微弱なチェレンコフ光を集光する大型国際共同研究である。この鏡には高精度の集光率と高い反射率が要求され、また野外で雨ざらしの状態で使用されるため高い耐久性をもつ必要がある。

### i. 研究目的

現段階で軽量化、反射率の向上とともにクリアした試作鏡が開発されている。しかしこの鏡の耐久性能は未知数であり、実際に野外で 10 年以上使用し続けられるかは不明である。そこで、鏡が劣化する原因の一つである酸性雨に着目し、酸性水溶液を使った加速試験を行い、鏡の腐食メカニズムを研究することで、鏡の耐久性能を測定することが本研究の目的である。

### ii. CTA について

この研究は、宇宙線研究の第一線に行く研究者たちが参加している。また、日本だけでなく、イギリスやドイツなど海外諸国も参加する大きなプロジェクトである。

#### CTA 公式 HP より

「ガンマ線宇宙物理学は今まさに飛躍的発展の時代を迎えている。GeV 領域においては、フェルミ衛星が千を超える天体を検出し、一方、地上 TeV ガンマ線観測でも、HESS や MAGIC 望遠鏡などが次々に新天体からのガンマ線を報告しており、TeV ガンマ線天文学は今や完全に確立し、創成から発展の時代へと移りつつある。さらに、GeV 領域ではフェルミ衛星が言わば決定版とも言えるプロジェクトであるのに対し、TeV 領域はまだ発展の余地を大きく残している。CTA は、世界で一つという大規模な TeV ガンマ線望遠鏡群により、現在より一桁以上高い感度と、より広い光子エネルギー領域を達成しようという野心的な計画である。現在ヨーロッパを中心に検討が急速に進んでおり、アメリカも合流の公算が高まっている。実現すれば、1000 以上の TeV ガンマ線天体の発見が期待され、単にガンマ線のみならず、高エネルギー宇宙物理学全体を大きく牽引することになるだろう。」

#### \*CTA の研究対象

- 銀河宇宙線の起源・加速・伝搬
- 銀河内高エネルギー天体 (パルサー、マグネター、パルサー星雲、超新星残骸、X 線バイナリー、球状星団)。

- 銀河系外からの高エネルギー宇宙線の起源・加速・伝搬。
- 銀河系外高エネルギー天体（活動銀河、ガンマ線バースト、近傍銀河団、近傍スターバースト銀河等）。
- 活動銀河、ガンマ線バーストからのガンマ線を使った宇宙論的研究。
- 銀河中心、矮小銀河からの暗黒物質の対消滅、崩壊ガンマ線の探索。

\*建設・観測スケジュール

2010-2014年 プロトタイプ望遠鏡開発・建設

2015年 本格的な建設開始

2017年頃 部分観測開始

2020年 フル観測開始

iii. チェレンコフ望遠鏡のスペックと要望

望遠鏡(右図が設計図)のスペックは

- 24m 口径 パラボラ
- >400m<sup>2</sup> 反射面積
- 総重量~50t
- 20秒で180°回転
- ~200枚の1.5m口径分割鏡
- 27.6m 焦点距離

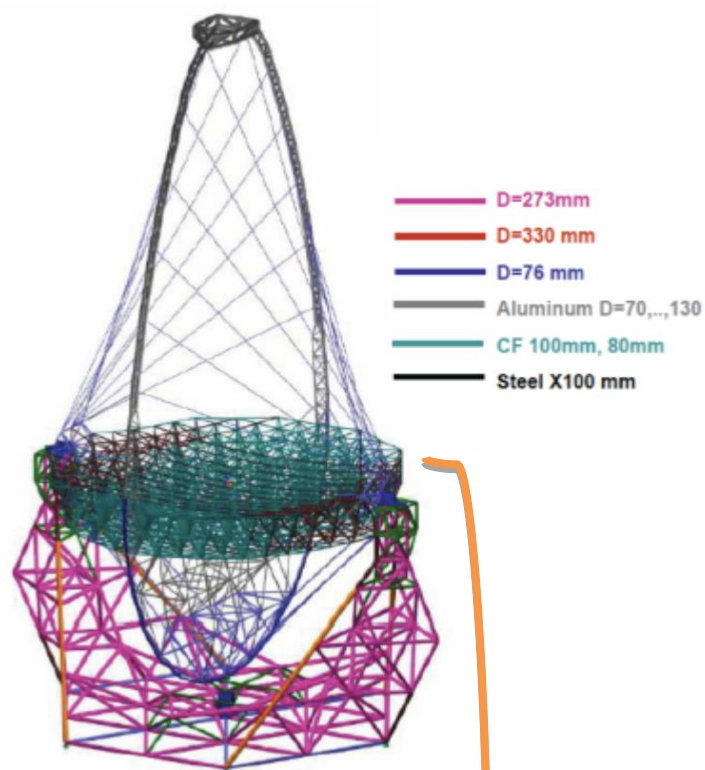
とされる。

これは一枚の巨大な鏡を使用するわけではなくで Large Size Telescope (LST) 用分割鏡(写真)を組み合わせてパラボラを形成する。

それにあわせて、LST 用分割鏡は

- 1.5m 幅の6角形(~2m<sup>2</sup>)
- 焦点距離 27.6m の放物面
- 焦点でのスポットサイズ<1cm
- 軽量(<50kg/枚)・丈夫
- 93%以上の反射率
- 50万円以下
- 10年以上の耐久性

であることが望まれる。



1.5m

## 2. 鏡の製造方法と多層膜構造について

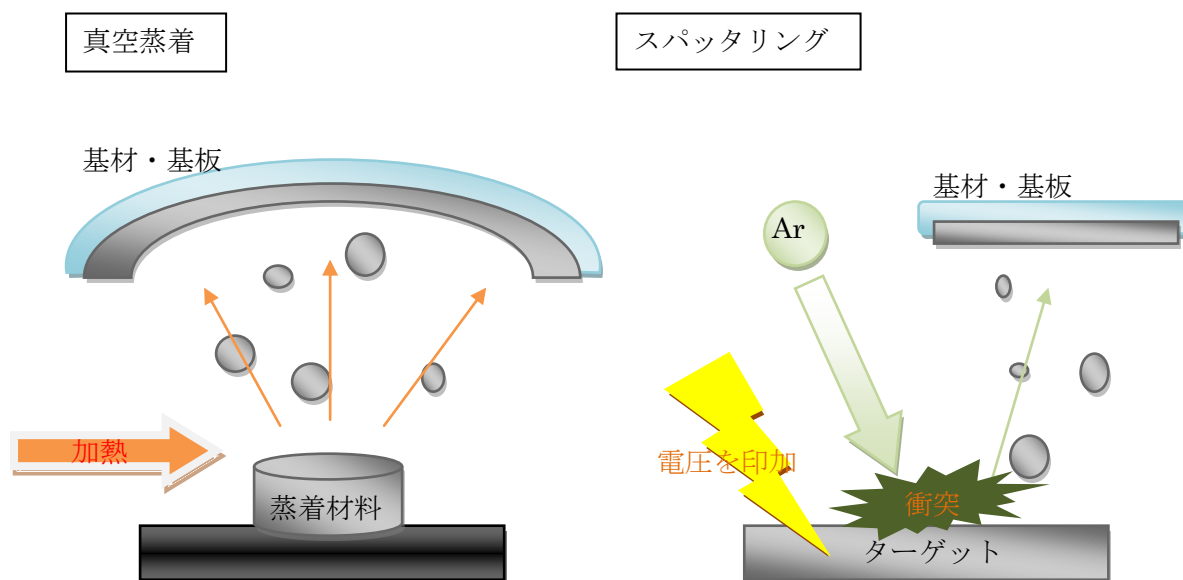
CTAに使用する鏡は、スパッタリングという方法で金属の多層膜を形成して作られる。鏡自体はアルミ一枚でもよいが、反射率の向上、防食の機能を持たせるために多層膜構造になっている。

### i. スパッタリング

ガラスに金属膜をつくる方法のひとつ。

真空蒸着というものも存在する。これは空にした容器の中で、蒸着材料を加熱し気化もしくは昇華して、離れた位置に置かれた基材・基板の表面に付着させ、薄膜を形成するというもの。蒸着材料、基板の種類により、抵抗加熱、電子ビーム、高周波誘導、レーザーなどの方法で加熱される。

これに対しスパッタリングとは、真空中で不活性ガス（主に、Ar）を導入、ターゲットにマイナスの電圧を印加して、不活性ガス原子をイオン化し、高速でターゲット（プレート状の成膜材料）の表面にガスイオンを衝突させて激しく叩き、ターゲットを構成する成膜材料の粒子（原子・分子）を激しく弾き出し、勢いよく基材・基板の表面に付着・堆積させ薄膜を形成するというもの。スパッタリング法では、高融点金属や合金など、真空蒸着法では困難な材料でも、成膜が可能で、広範囲な成膜材料に対応でき、付着力も高くなる。また成膜が滑らかできめ細かい。



### ii. 多層膜構造とピンホール

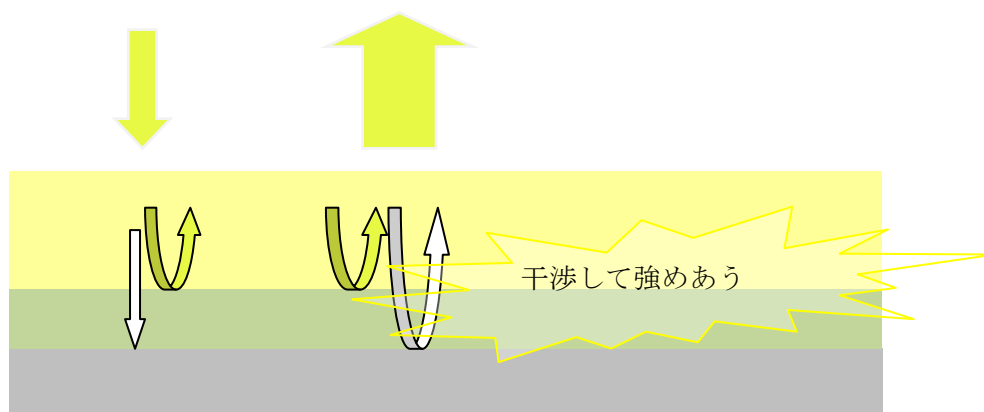
鏡は先述の通り、5層からなる多層膜構造となっている。

HfO<sub>2</sub> は防錆のための膜であり、Al、SiO<sub>2</sub> は反射のための膜、Cr は Al とガラスの付着を強めるための膜である。

#### \*反射率向上の仕組み

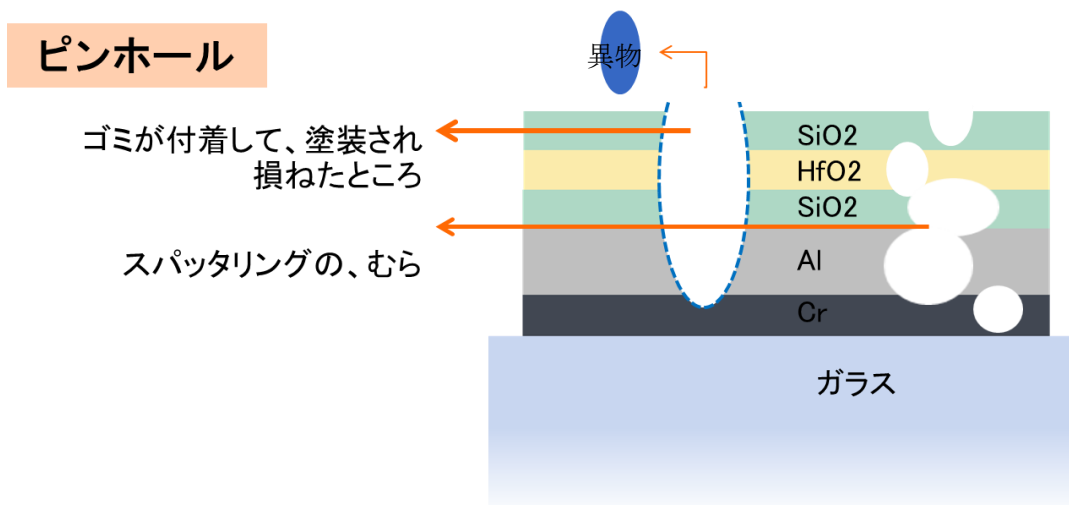
これは光が干渉することを利用する。

図のように SiO<sub>2</sub> で光は反射されるものと透過して Al で反射するものとに分かれる。そこで二か所で反射したものが干渉した際に強め合うように厚みを与えてやれば、微弱なチェレンコフ光でも増幅させて観測することが可能である。



#### \*ピンホール問題

鏡のコーティングは一様ではなく、スパッタリングのむらや異物混入が原因で穴ができていることがある。傷、穴、そこから雨などがしみこみ、腐食が進むと考えられる。



### 3. 金属腐食の原理

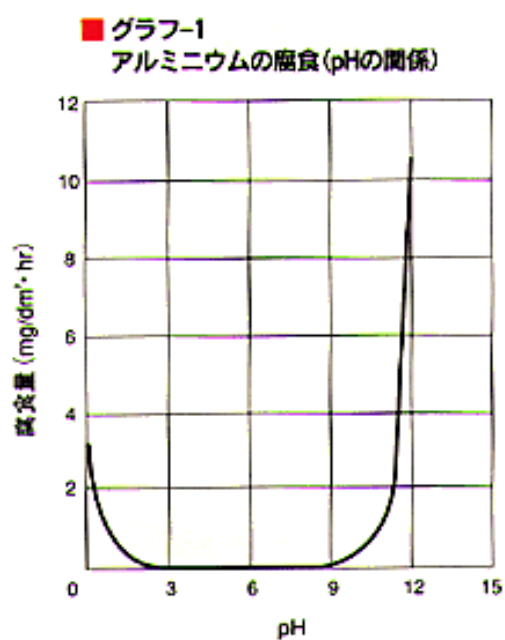
腐食実験を行うにあたって、基礎知識を学ぶ必要がある。

i. アルミの腐食

アルミはとても腐食しやすい金属であり、空気中であればすぐに酸素と結合し酸化アルミニウムの膜を生成する。これはこれ以上変化しにくい性質をもつので、結果としてアルミは腐食しにくい金属となる。(水溶液中であれば水酸化イオンと結合し水酸化アルミニウムの膜を生成する。)

この酸化被膜は、酸素さえあれば皮膜は再生されるので、防食効果も維持される。しかしそれでも腐食が進行する場合があります、酸化皮膜が機械的に損傷を受けたり、化学的に溶解してしまいその回復機能が妨げられた場合である。アルミの酸化皮膜は、pH4～pH8の間では余り影響を受けないが、それ以外のpHでは急激に破壊され、アルミの腐食が進む(グラフ1)。

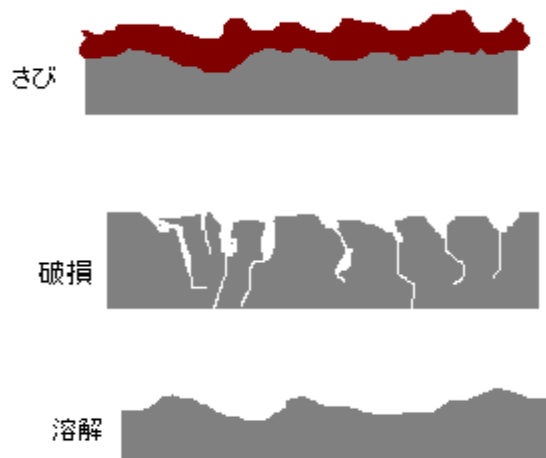
その他の要素としては、アルミ周辺の流動、液比(金属の表面積と腐食媒体の容積比)、表面の熱容量、媒体中の不純物、表面状況、加工などがあげられる。特に表面状況というのは、アルミの表面が粗いと塵や水が窪みにたまりやすく腐食速度を速めてしまうため、これは腐食を抑制するためには適切な表面の処理をすることがたいへん大切だといえる。



ii. 腐食の種類

目にする腐食の現象として、生成物が表面に残っているさびや変色、生成物が残らない溶解、腐食に伴って起きる穿孔や破損の三種類が主である。

要因として、様々な理由が挙げられる。



A) 全面腐食

鉄の赤さびや銀の変色などはこの種のもので、金属の表面で均一に生ずる腐食である。金属の高温酸化(黒皮)もそうである。アルミの場合、酸化皮膜からアルミの素地まで均一に



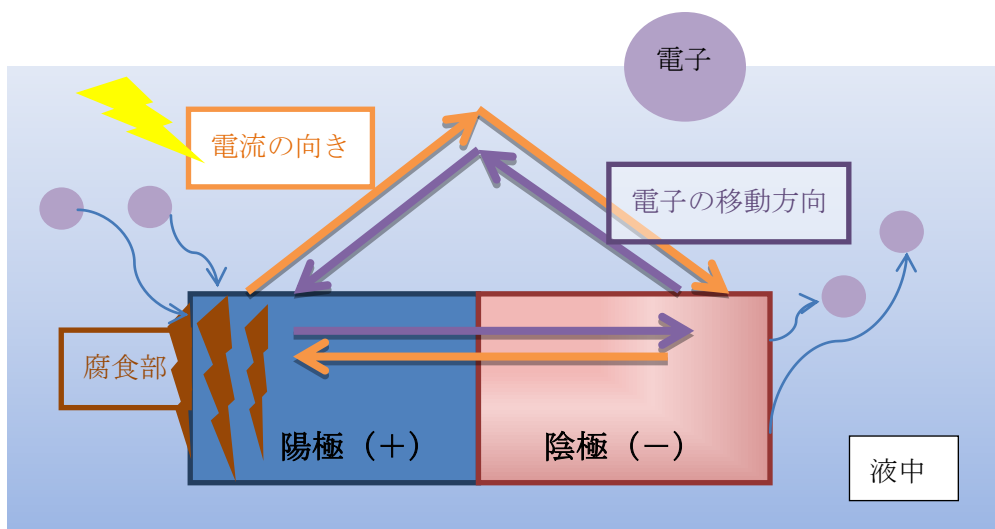
腐食が進んでいくことをさす。

## B) 局部腐食

おもに以下 4 種類がある。

- 異種間金属接触腐食（ガルバニック腐食）

イオン化傾向の大きい金属と小さい金属が接している部分に電解質の溶液が触れることで激しい腐食が起こる。これは液中でイオン化傾向の大きい方が陽極に、小さい方が陰極となり電池が形成されるためである。陽極の金属→陰極の金属→液中→陽極の金属へと電流が流れ、陽極となる金属で腐食が起こる。電位の高い金属を貴な金属、電位の低い金属を卑な金属と言い、両者が接触した場合電位差があるので、卑な金属が陽極（アノード）、貴な金属が陰極（カソード）となって電流が流れて腐食する。



イオン化傾向の表

	◀ 大 (酸化しやすい)											(酸化にくい) 小 ▶				
金属	K	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Fe	Ni	Sn	Pb	(H)	Cu	Hg	Ag	Pt	Au
空気中での反応	乾燥空気中ですみやかに酸化される			空気中で表面が徐々に酸化される									変化しない			
水との反応	常温で反応して水素を発生			高温で水蒸気と反応して水素を発生			変化しない									
酸との反応	塩酸や希硫酸と反応して水素を発生											硝酸や熱濃硫酸には溶ける		王水だけに溶ける		

- 孔食（ピitting）

孔食は金属表面のある小さな部分の腐食速度が他の部分に比べて大きい場合のことを指す。金属表面の比較的小さな部分が固定したアノードとして働き、大きな速度で腐食すると深い孔食、腐食部の面積が大きい場合には浅い孔食となる。

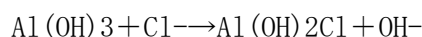
孔食は、腐食が金属の内面に向かって孔状に進行する腐食で、酸化皮膜で覆われた表面は、孔食以外の部分は、光沢のある光った状態に見える。

表面に付着した細かいゴミなどに含まれる塩素イオン、塩化物水溶液が原因で発生する。

孔食はアルミには非常によく見られる腐食形態で、針でつついたような小さな穴が局部的に散在している。

#### \*Al の孔食メカニズム

塩素イオンの存在によって酸化皮膜の一部が破壊される。

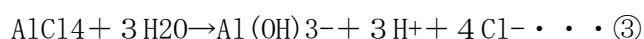


$\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$  は水溶性の物質のため、溶けてなくなる。・・・①(次項の図の番号に対応)

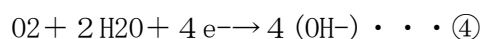
このため、むき出しになった Al 部分は水溶液中では



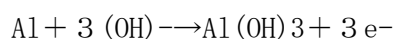
さらに



となる。一方、電子は金属の中を通過して酸化皮膜表面へ行き以下の反応に使われる。



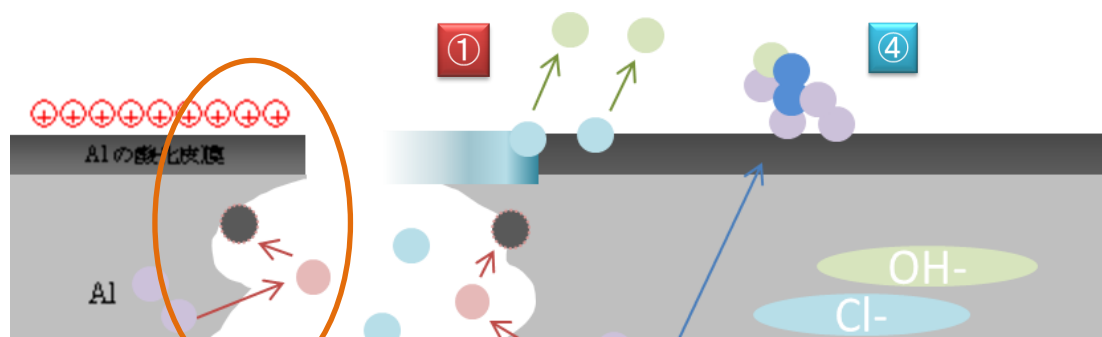
ここで生じた  $(\text{OH})^-$  は



これはそれぞれ電池作用における陽極反応、陰極反応である。Al 表面は卑な電位をもっているためマイナス、周囲の酸化皮膜が存在する部分をプラスとする電池が形成される。

孔食はこの電池作用によって進行する。この時流れる電流を腐食電流といい、マイナス極である Al から水中に流れ出し、この中を通過して、まわりのプラス極へいく。電流が水中を流れるのは電子が動くのではなく、溶解しているイオンが動くからである。電池においては、陰イオンがマイナス極へ、陽イオンがプラス極へと動くことによって電流の流れをつくる。

また、水素イオン  $\text{H}^+$  や塩素イオン  $\text{Cl}^-$  の蓄積は、腐食が進行中の孔の中で起きるので、外の環境中へはなかなか逃げてはいかず、孔食が生成したところは何時までも腐食を続けることになる。



電流の向き



②

③

- すき間腐食

孔食のような現象が、金属と金属またはその他物質の小さな隙間で起こる腐食。  
すきまに入り込んだ水に溶けていた酸素が、腐食反応によって消費され、すきま以外の水中の酸素量と差が生じるため一種の酸素濃淡電池(溶液中に溶解している酸素の濃度差によって電池が形成されるもの。酸素の少ないほうのアノードとなって腐食)を作ることによって腐食されていく。

- 粒界腐食

金属材料の結晶粒界だけが選択的に腐食する現象をいう。  
原子が規則正しく配列した構造をと言ひ、実際の金属材料は、大きな塊が全て同じ原子配列を持っているわけではなく、配列の向きが異なる結晶構造(結晶粒)を持っている。この結晶粒の境界を結晶粒界と呼ぶ。  
このごく限られた面積をもつ結晶粒界が大きい面積を持つ結晶粒と接触し、結晶粒界がアノード、結晶がカソードとなり局部電池が形成され粒界が腐食される  
精製時の不適当な熱履歴などにより、金属中に不純な炭素化合物が増すことが原因。

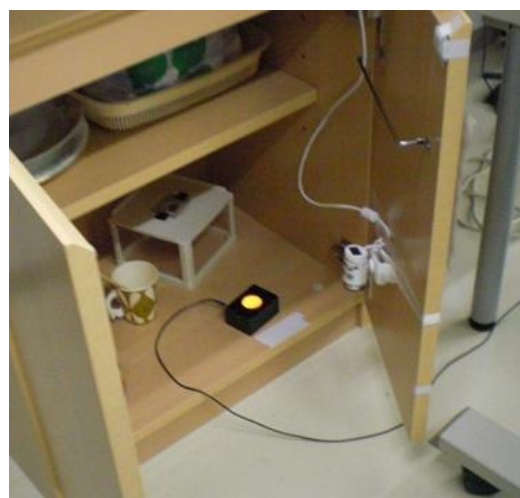
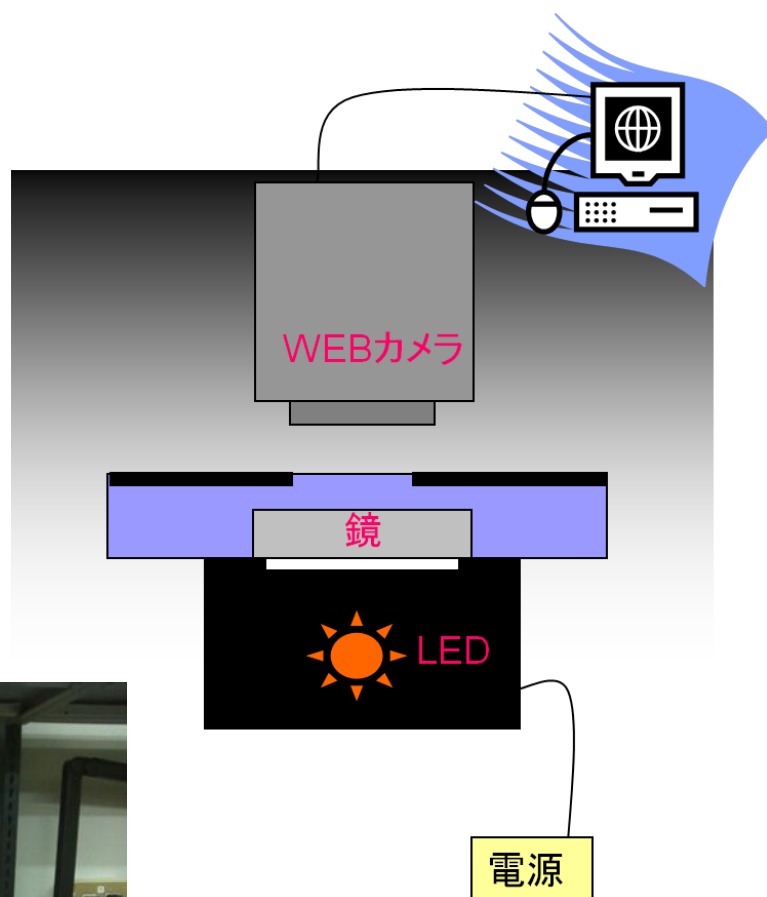
	孔食	粒界腐食	すき間腐食
模式図			
腐食例	 a. 炭素鋼/高温水 100μm	 b. SUS304鋭敏化材/硫酸+硫酸銅溶液 20μm	 c. 海水配管フランジ合せ部(316L)/海水 1cm

i. 装置1：WEBカメラによる撮影セット

Livecapture2 というソフトを用い、一定時間ごとに鏡の様子を画像ファイルとして PC に保存する。

食塩(左)と硝酸(右)の時では装置の場所が変わっているが、用いているもの、仕組みは同じである。

- ① 電源を入れる
- ② LED が壊れるため、電圧には気を付ける(8以上は少し危険)
- ③ 入れ物に溶液、鏡を入れ LED の上にセット
- ④ PC でソフトを起動し、撮影開始



- 腐食に使う薬品について

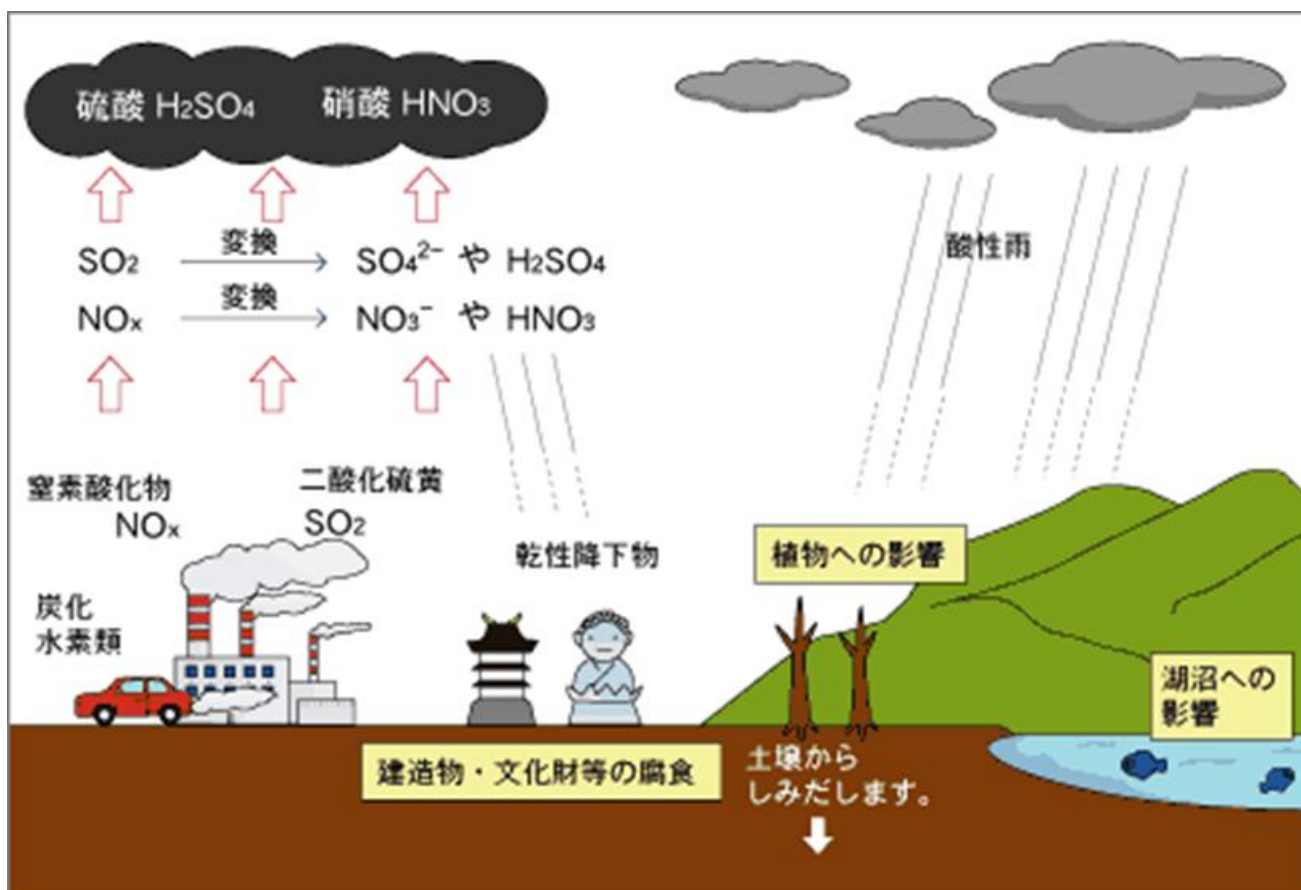
海水、酸性雨の成分を考慮して食塩と硝酸を、強い酸性のものとして漂白剤を使用した。

\*酸性雨

pH5.6以下の酸性の雨を酸性雨という。

酸性雨の原因は化石燃料の燃焼や火山活動などにより発生する硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)や窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、塩化水素(HCl)などである。

これらが大気中の水や酸素と反応することによって硫酸や硝酸、塩酸などの強酸が生じ、雨を通常よりも強い酸性にする。



- pHを求める計算



酸性雨による鏡への影響を考えるために硝酸を使用する。それにあたって、硝酸の濃度よりも pH が大事な指標となるため、pH の計算を避けて通ることは出来ない。

pH 試験紙や pH メーターも使用してもよいが、試験紙では細やかな数値が不明であるし、pH メーターは機械自体の調整と測定にある程度の量の溶液が必要となるため、計算が一番手っ取り速い。以下、濃度 60%の硝酸水溶液(写真のもの)の pH を求める。

まず、濃度 60%の硝酸水溶液 (密度は  $1.38\text{g/cm}^3$ ) のモル濃度を求める  
モル濃度は溶液 1L あたりのモル数。

溶液の密度 (1cm<sup>3</sup> あたりの質量) が与えられているので、溶液 1 L の質量を求める。

溶液 1 L の質量 =  $1.38 \times 1000 = 1380$  [g]

このうち 60%が硝酸なので、溶液 1 L 中の硝酸の質量は、

溶液 1 L 中の硝酸の質量 = (溶液 1 L の重さ)  $\times 0.6 = 828$  [g]

これをモル数にすれば、溶液 1 L 中の硝酸のモル数 (モル濃度) になる。

硝酸の分子量  $\text{HNO}_3 = 63$  より、

モル濃度 = 溶液 1 L 中の硝酸の質量  $\div$  分子量 =  $13.1428\cdots = 13$  [mol/l]

電離定数  $K_a = [\text{H}^+][\text{NO}_3^-]/[\text{HNO}_3]$

※[●]は●のモル濃度を表している

ここで、[●]は電離後の数値を使うので、電離度を  $\alpha$  とおけば

$$K_a = [\text{H}^+] \alpha [\text{NO}_3^-] \alpha / [\text{HNO}_3] (1 - \alpha)$$

$\text{HNO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{NO}_3^-$  という化学式より、モル濃度はすべて 13

電離定数  $K$  は化学便覧より  $\text{p}K_a = -1.8$

$\text{p}K_a = -\log K_a$  であるから、 $K_a = 63.0957\cdots = 63$

$$63 = 13 \alpha \cdot 13 \alpha / 13 (1 - \alpha) = 13 \alpha^2 / 13 (1 - \alpha)$$

すなわち、 $13 \alpha^2 + 63 \alpha - 63 = 0$  を解けば電離度が出てくるはずである。

$$\alpha = (-63 \pm \sqrt{63^2 + 4 \cdot 13 \cdot 63}) / (2 \cdot 13) = 0.850\cdots, -5.6968\cdots = 0.85, -5.7$$

$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$  で求まるので、濃度 60%の硝酸水溶液の場合、

$$\text{pH} = -\log(13) \alpha = -\log(13 \cdot 0.85) = -1.043$$

原液の計算は以上でよい。しかし、だんだん濃度が下がってきた場合にこの計算をすると pH 7 を越えてしまう。どれだけ薄めても、この溶液は酸性であり、塩基性は示

さないはずなので、計算を変えなければならない。

\*酸濃度の低い場合、

$[NO_3^-] \gg$  水のイオン積  $K_w = 10^{-14}$

が成り立たないときであり、

$$[H^+]^2 - [NO_3^-][H^+] - K_w = 0$$

を計算しなければならず、これを解くと

$$pH = -\log\left(\frac{[NO_3^-] + \sqrt{[NO_3^-]^2 + 4K_w}}{2}\right)$$

が成り立つ。

以下、LINUX で計算できるようにプログラムを組んで実験に臨んだ。

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>

main()
{
    float x,y,m,n,l,H;

    printf("HNO3?????[ml/l]?");
    scanf("%f",&m);

    printf("????[ml]?");
    scanf("%f",&n);

    printf("???[ml]?");
    scanf("%f",&l);

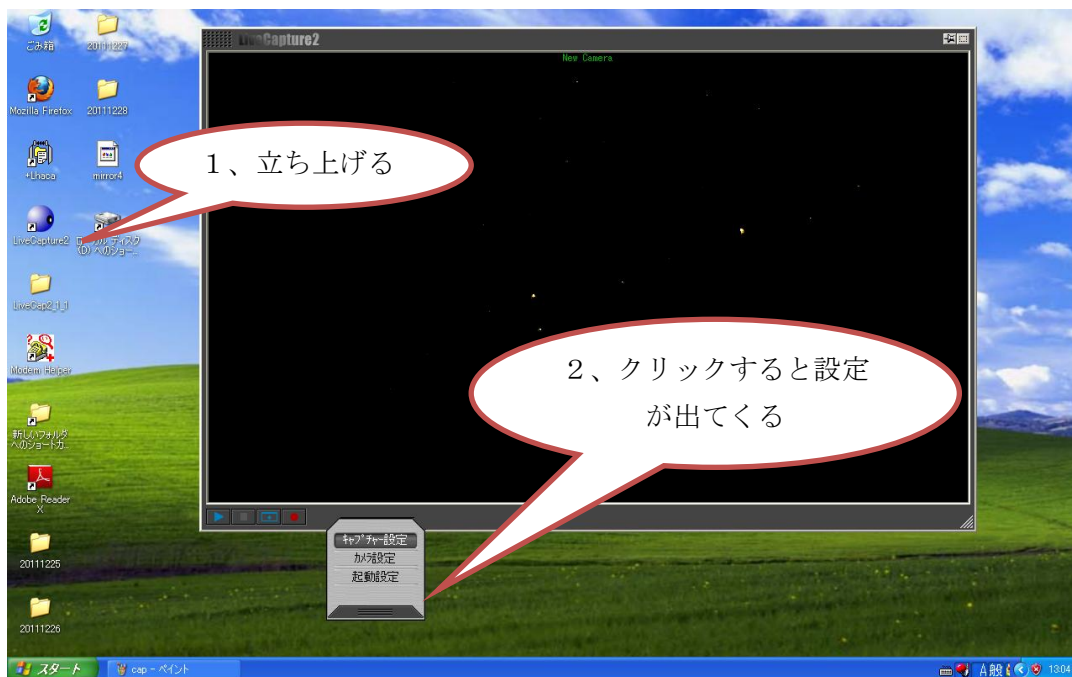
    H=0.85*m*n/l;

    printf("H?");
    printf("%5.3e \n",H);

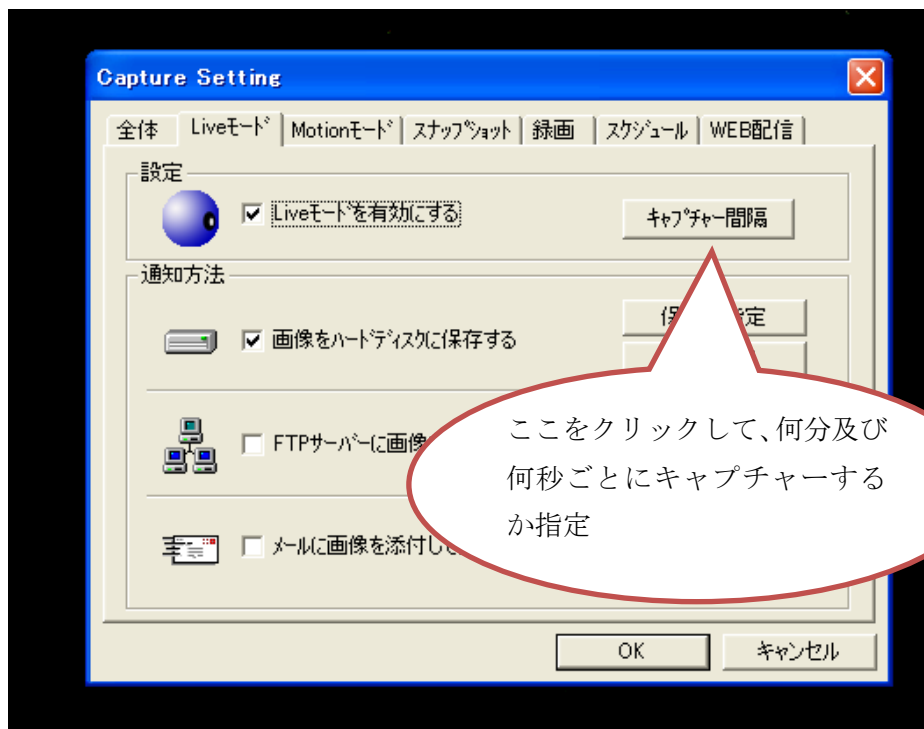
    if(H*H>pow(10,-14))
    {
        x=-log10(H);
        printf("pH=%f \n",x);
    }
    else
    {
        y=-log10((H+sqrt(H*H+4*pow(10,-14)))/2);
        printf("pH=%f \n",y);
    }
}
```

- Livacapturez の使い方

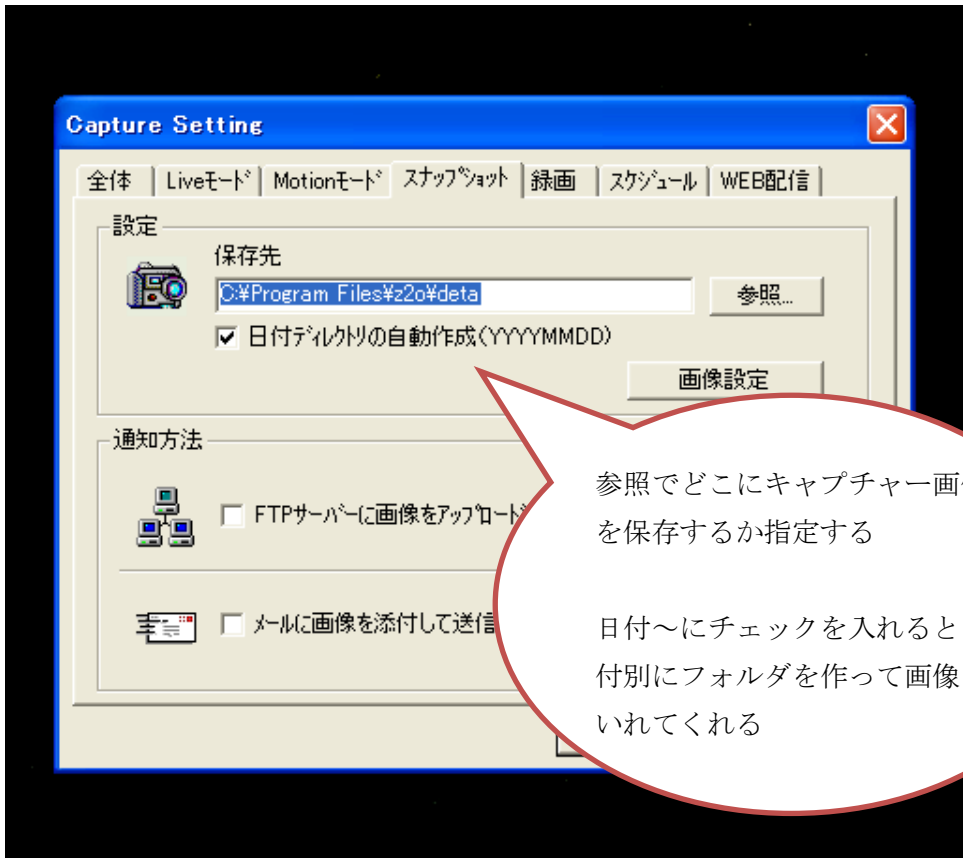
1. <http://www2.wisnet.ne.jp/~daddy/>から Livacapture2 をダウンロード
2. パソコンにカメラを接続したら、ソフトを立ち上げる。



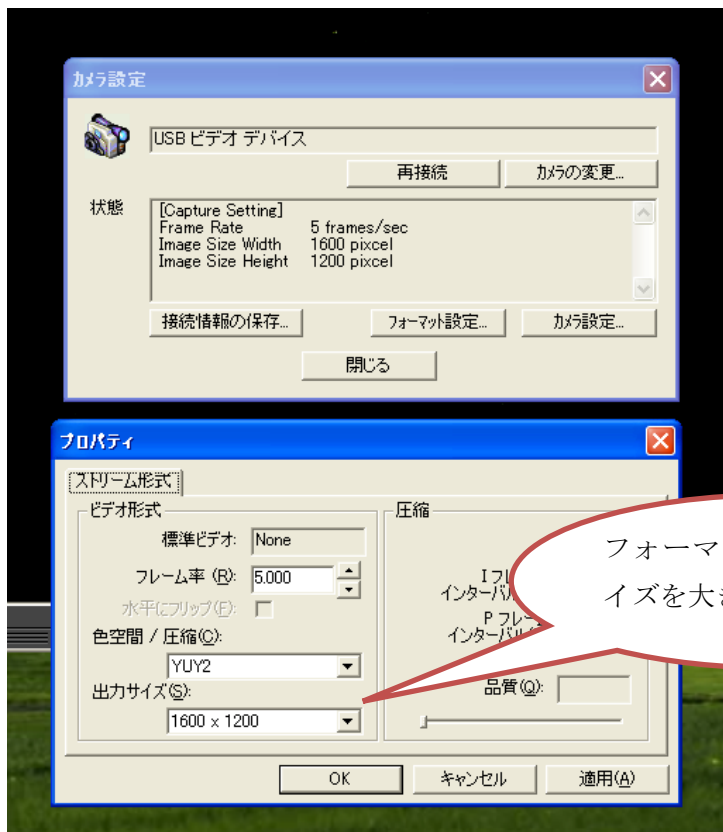
3. キャプチャー設定





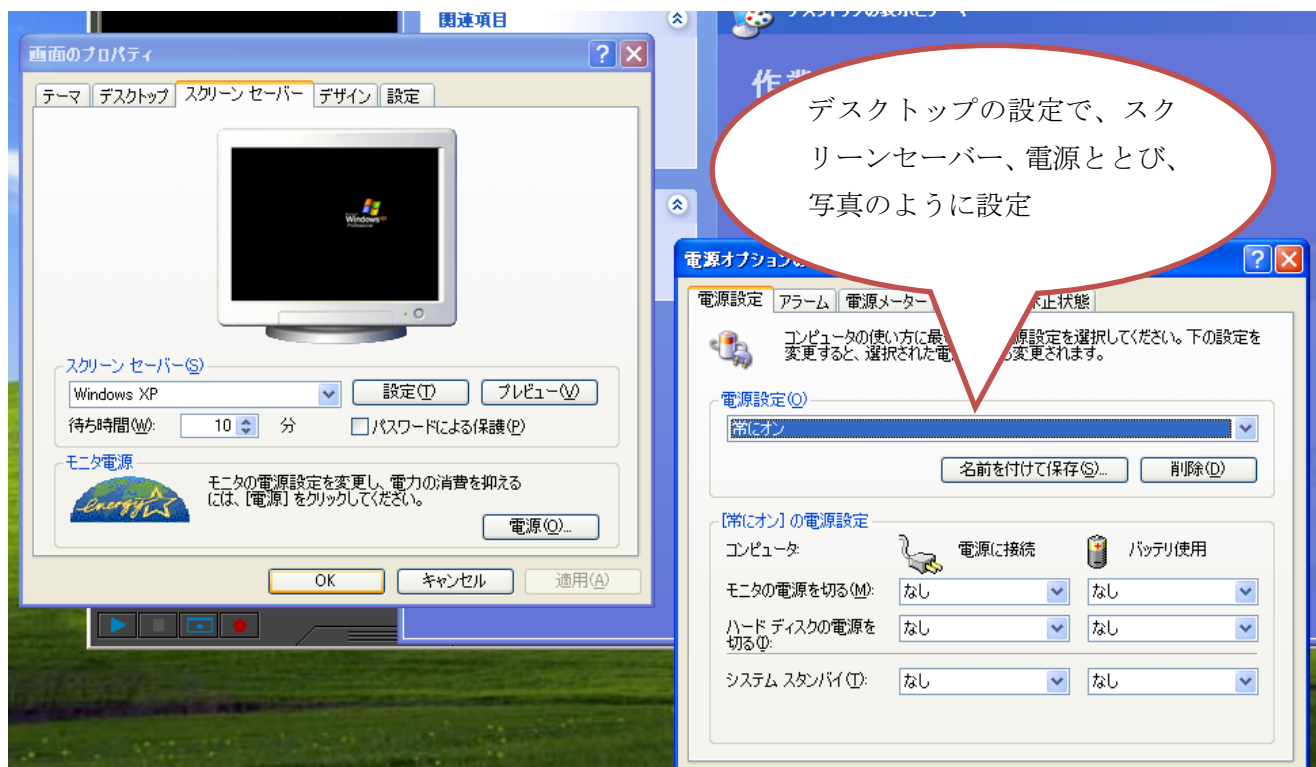
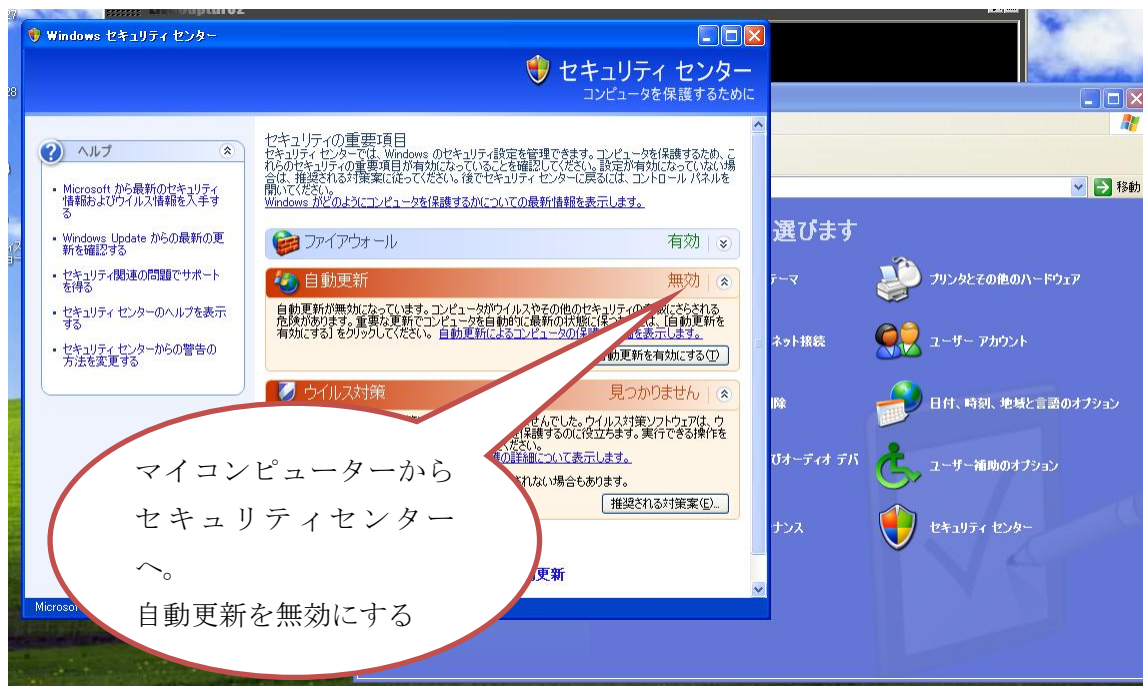


4. カメラ設定



## 5. PCの設定

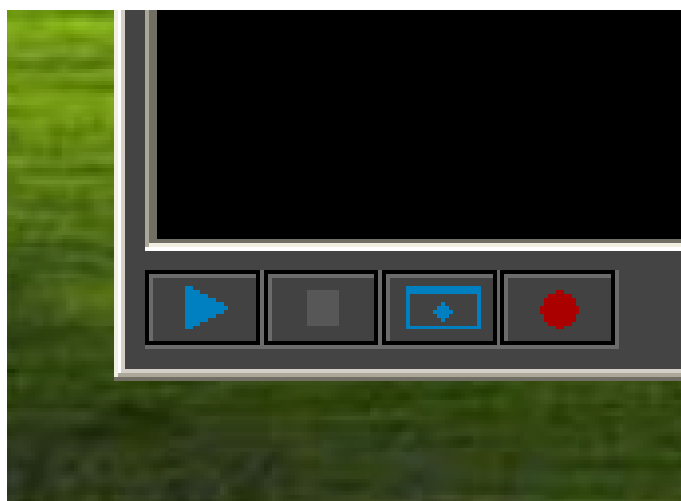
これを確認しないと、PCの電源がおちて記録が取れないことがある。



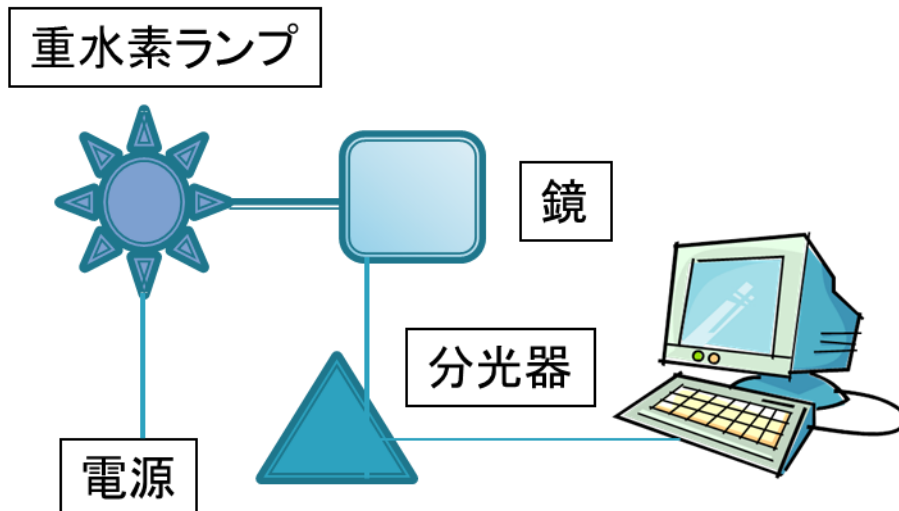
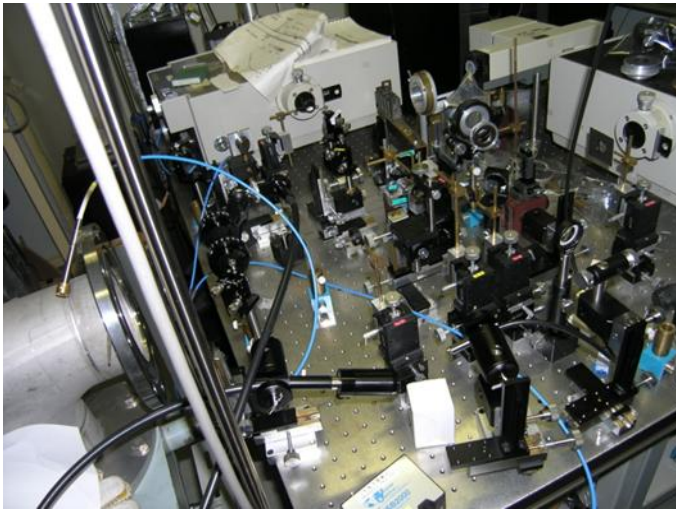
6. あとは撮影を開始するのみ。

ボタンは左から、撮影開始、撮影(録画)停止、スナップショットを撮る、ビデオ録画開始

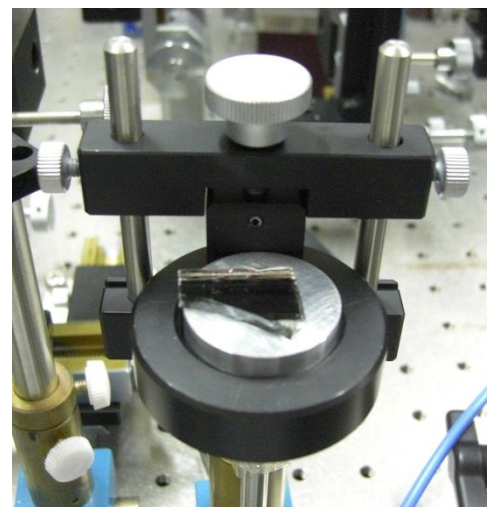
スナップショットは、任意に自分でクリックしてキャプチャー画像を撮ることのできる機能



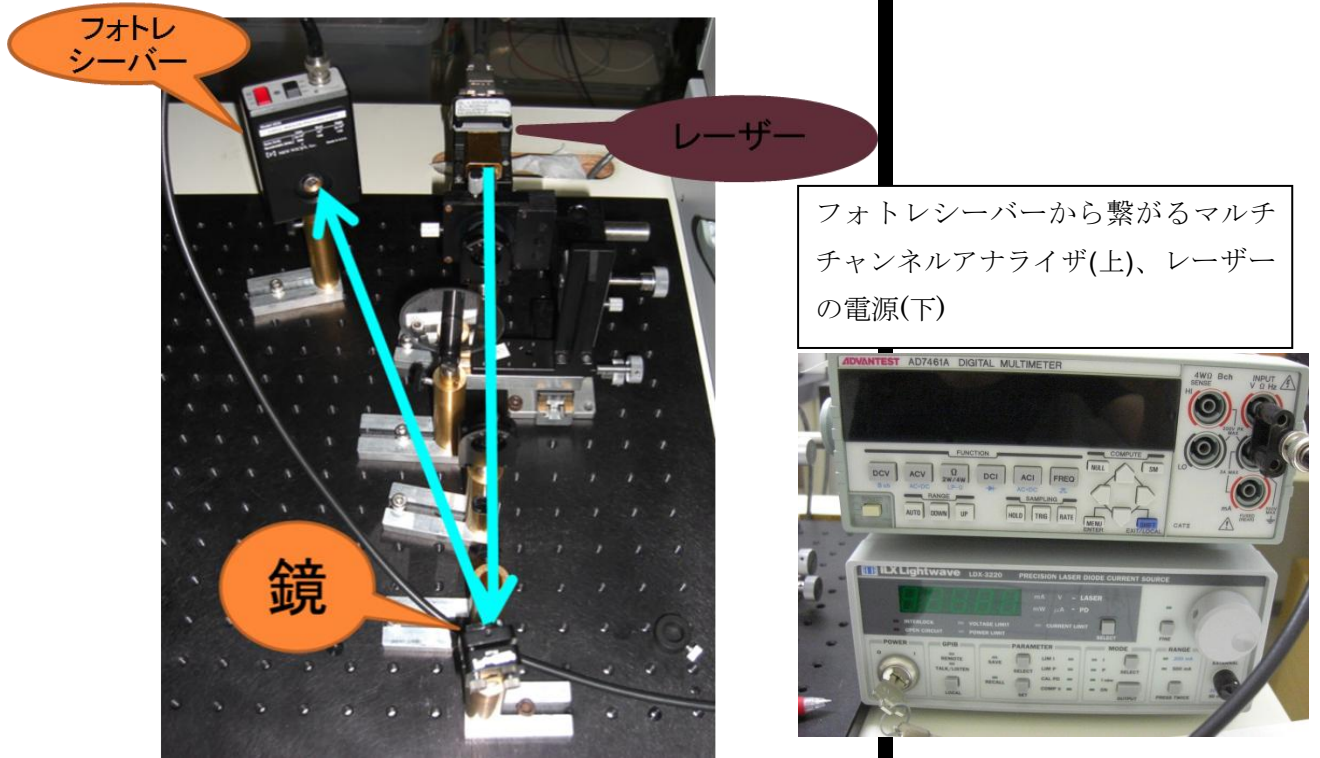
ii. 装置2：重水素ランプの反射光スペクトルによる反射率変化測定装置



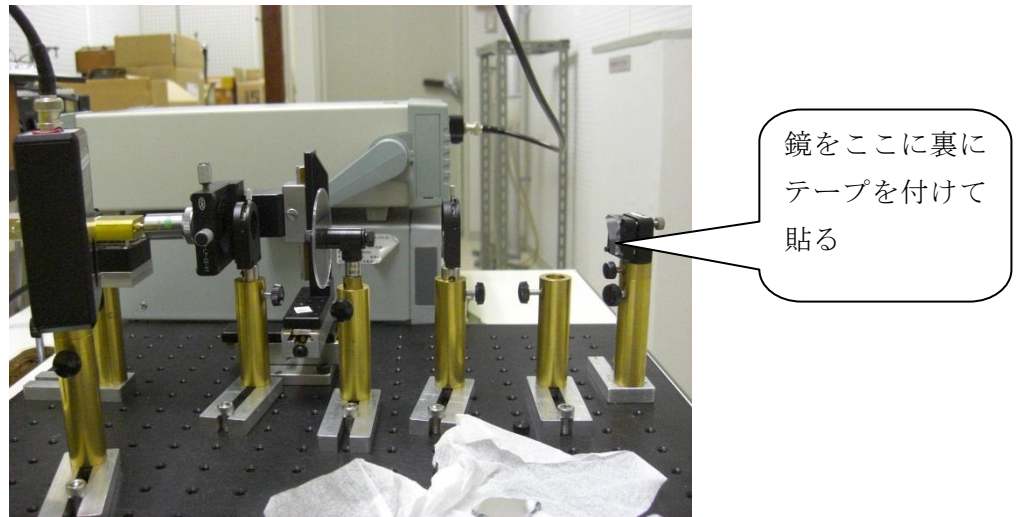
- ① 重水素ランプは着くまでに時間がかかるので始めにつける
- ② 鏡をセットし(右図)、PCでソフトを立ちあげると自動で測定してくれるので、画像を保存する(Fileをクリックして、F、P、Sの順に押せばできる)



iii. 装置3 : 400nm 半導体レーザーによる反射率変化の測定装置



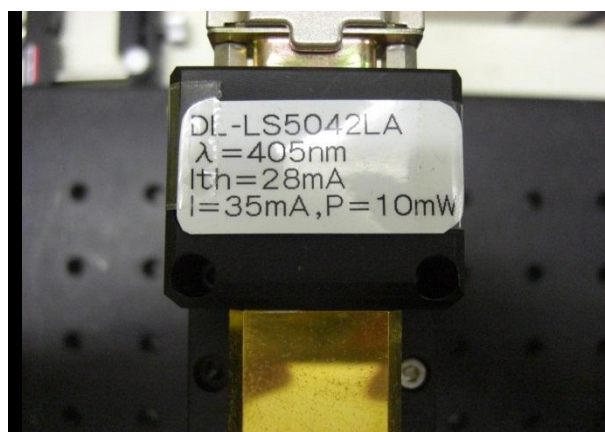
横から見た図



## フォトレシーバー



## レーザー



この実験は暗所にて行う

鏡をセットしたら、装置すべてのスイッチを入れる。

しばらく待って、機械が安定してきたら、測定開始。

任意の強さのレーザー（ただし 35mA 以上）の反射光をフォトレシーバーが読み取りマルチチャンネルアナライザに電圧が表示される。

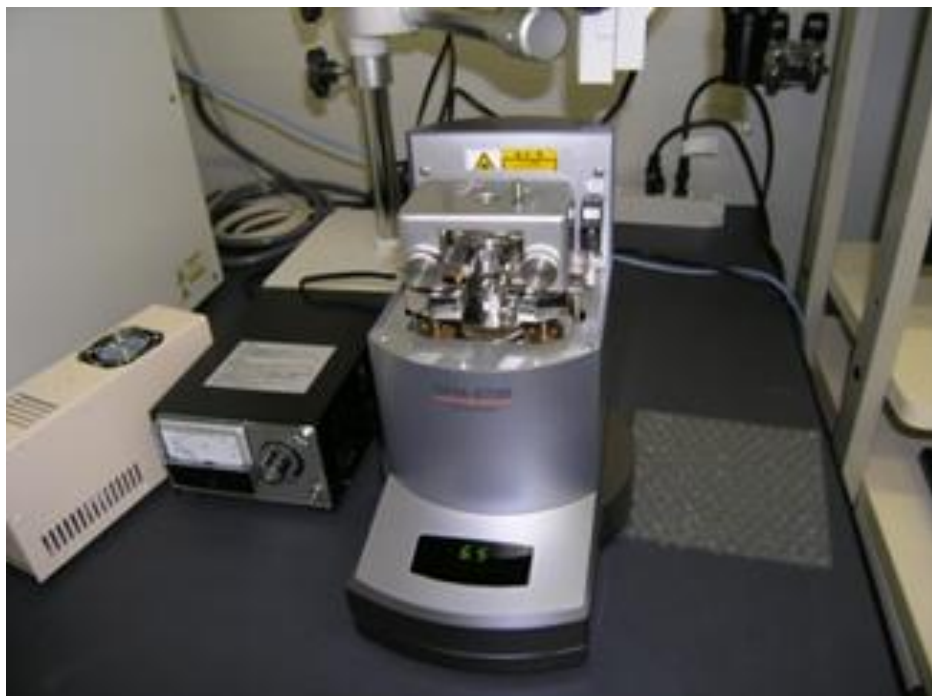
同じレーザーの強さで、腐食していない鏡と腐食した鏡のデータをとる。

測定後、

反射率の変化 = 腐食させた鏡の電圧 / 元の鏡の電圧

これを計算する。

- iv. 装置4：電子顕微鏡 SEM(上)と原子間力顕微鏡(下)  
使い方はマニュアル参照



## 5. 実験結果

### i. WEB カメラによる反射鏡腐食実験の撮影

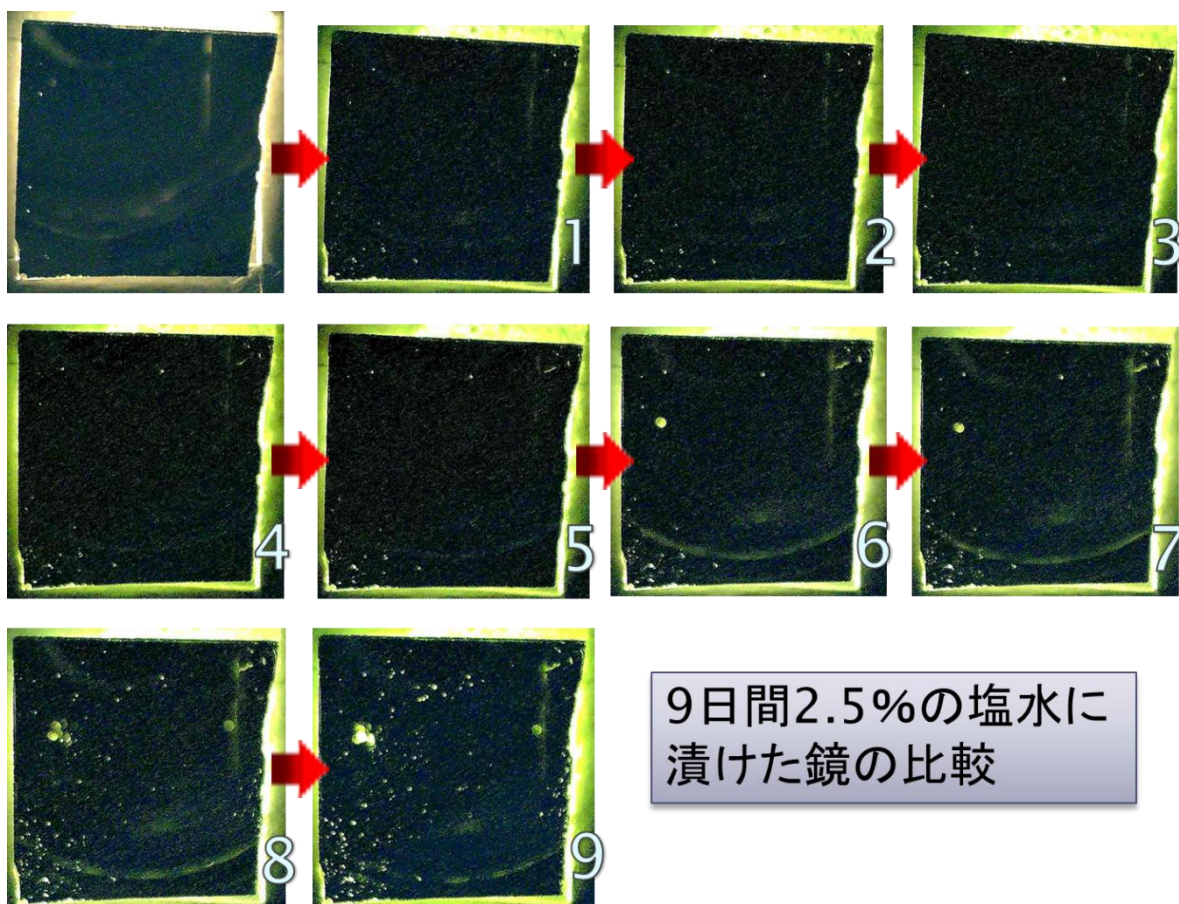
目的：どのようにして鏡の腐食が進んでいるかを調べる。

方法：実験装置1を使って実験を行う。

- ① 食塩による腐食の様子を撮影。溶液に2.5%の食塩水を使用し、数日間の変化を観察
- ② 漂白剤による腐食の様子を撮影。水に漂白剤を投入し、変化を観察
- ③ 硝酸による腐食の様子を撮影。溶液に硝酸水溶液を使用し、濃度を変えて様々なpHで変化を観察

結果：

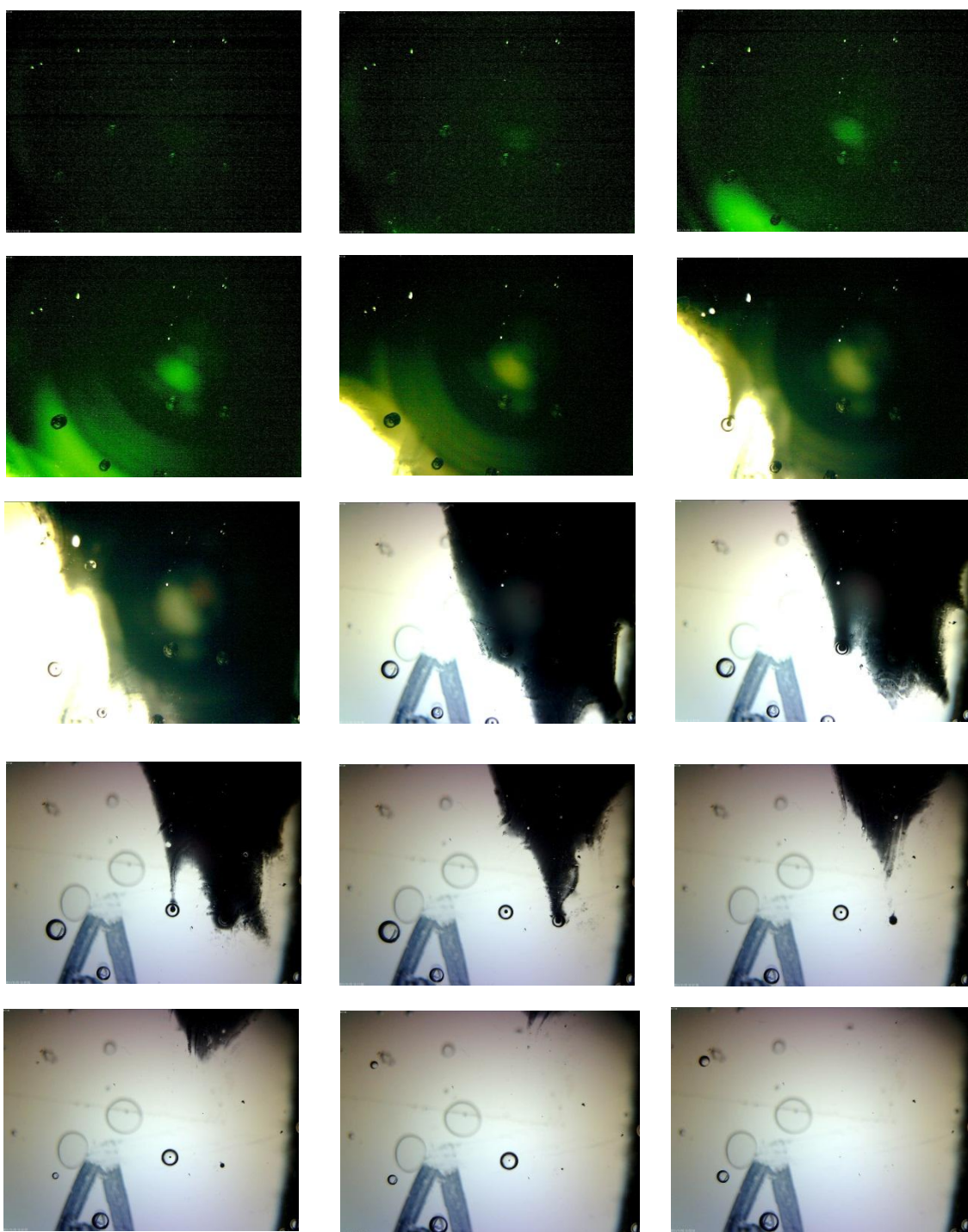
#### ①食塩による腐食



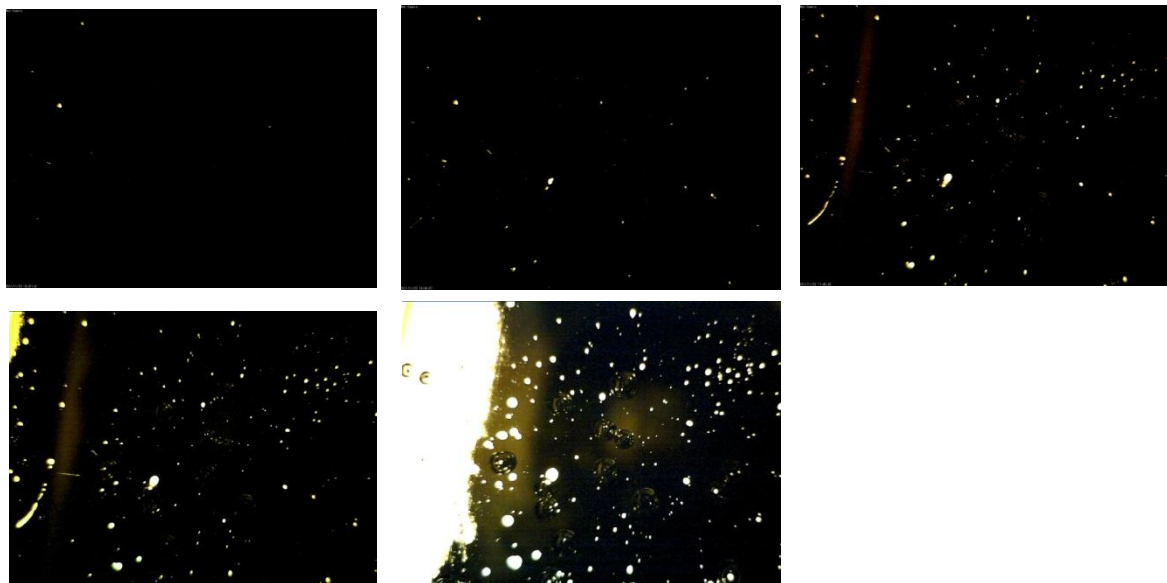
小さな穴がぼつぼつと増えているが、さほど大きくなっていない。  
食塩すなわち NaCl に含まれる Cl<sup>-</sup>によって孔食が進んだのではないと思われる。



## ②漂白剤による腐食



酸素系漂白剤を少量加えたもの。2.5時間ほどでこのような結果になった。  
この漂白剤には炭酸ナトリウムが含まれており、これはアルミニウムを溶解してしまう  
のでこのような結果となった。



こちらは0.008%の漂白剤を溶かした溶液に鏡をつけたもの。

10時間ほどでこのようになった。

孔食のようにも見えるが、穴が急速に大きくなっていることから、ピンホールから液がしみ込んで溶けたのではないかとと思われる。

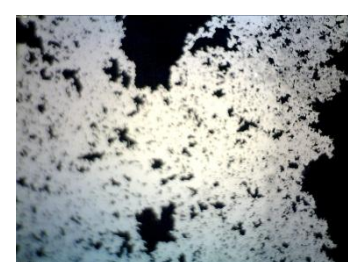
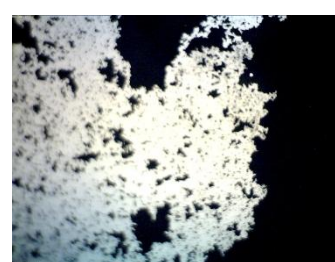
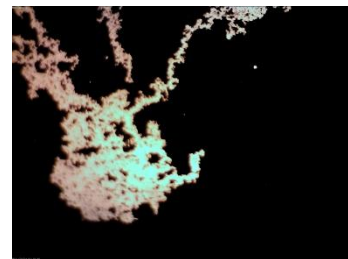
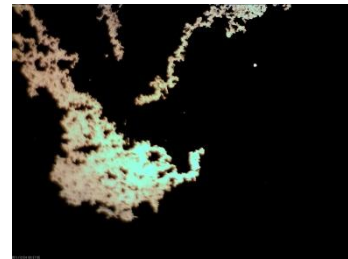
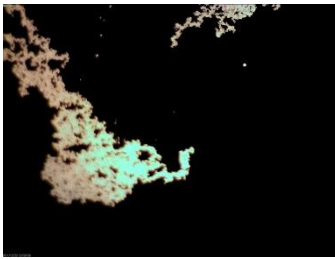
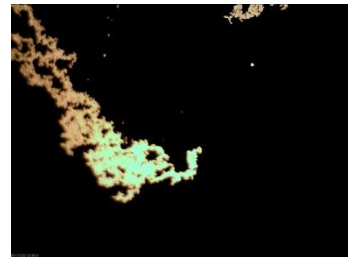
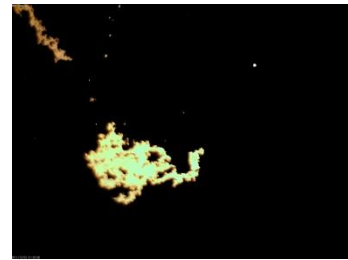
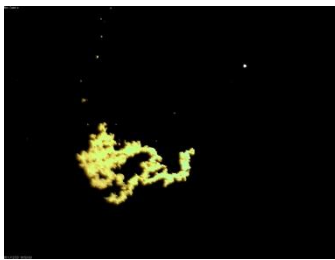
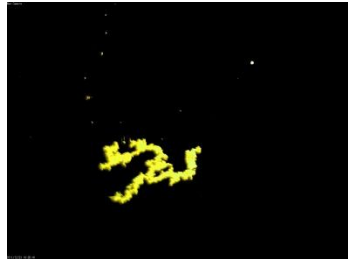
③硝酸による腐食

60%の硝酸から希釈して以下のような pH で腐食させた

pH		12月13日	12月14日
5.65	1日で腐食終わり		
100万倍希釈	◎		
pH		12月23日	12月27日
6.11	2日で腐食終わり		
200万倍希釈	◎		
pH		12月28日	1月4日
6.41	変化なし		
400万倍希釈	×		
pH		1月4日	1月5日
6.29	前回つけたものを そのまま使用		
300万倍希釈			
pH		1月13日	1月19日
6.2	変化なし		
250万倍希釈	×		
pH		1月19日	1月23日
6.16	変化なし		
225万倍希釈	×		



pH6.11 の溶液につけた鏡の  
 およそ 3 時間ごとの画像



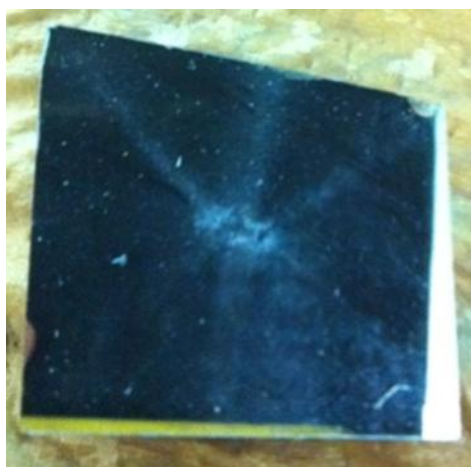
pH5.65 につけたときも同様の腐食の様子が見られた。  
 pH6.11 の溶液につけた鏡の変化  
 およそ 3 時間ごとの画像  
 一見、下の写真のような析出腐食のようにも見えたが、  
 高温加熱をした際に起こる腐食であることや、アルミで  
 は起きにくいことから断定はできない。

孔食がどんどん横に広がっていったのであろうか。  
鏡の端や、ピンホールから局部腐食が始まっている。

【図1】 SUS304の粒界腐食



また、pH6.1を超えると反応しなくなってしまった。  
しかし、表面自体は写真のように白く変化している箇所がある。pH6.1以上で実験した鏡には共通して、中心から放射線状に白く伸びる白いものが現れていた。酸化皮膜ではないかと予測しているが、より高度な解析実験をしなければならず、今回の研究でこれが何であるか解析することは叶わなかった。



ii. 電子顕微鏡 SEM での腐食した鏡表面の観察

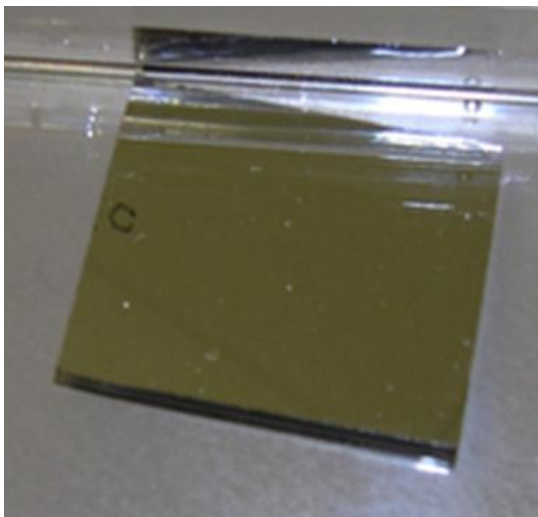
目的：腐食した鏡を、肉眼では見ることのできないミクロの視点で観察していく

方法：電子顕微鏡 SEM を使う

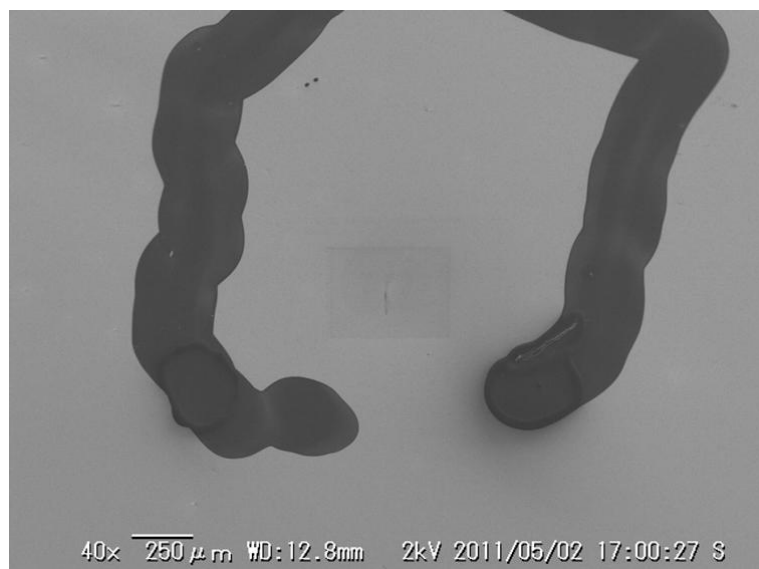
結果：

\*腐食していない鏡

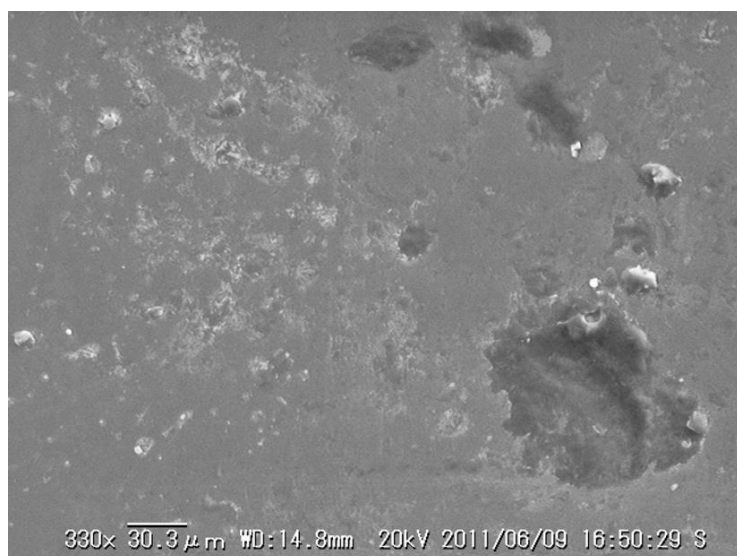
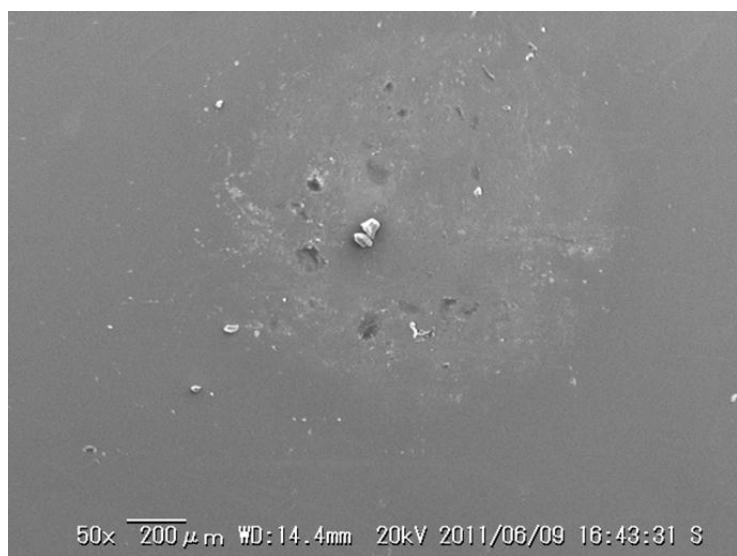
鏡の写真と SEM でみた鏡の端



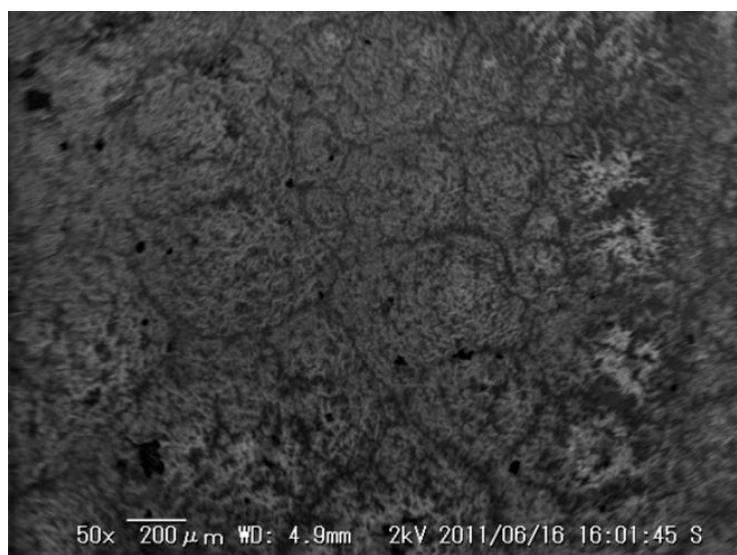
油性マーカーの印とピンホール(左はその拡大図)



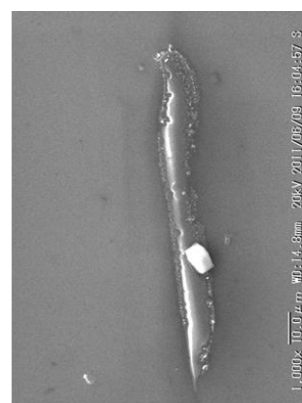
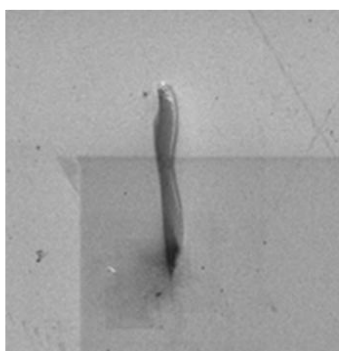
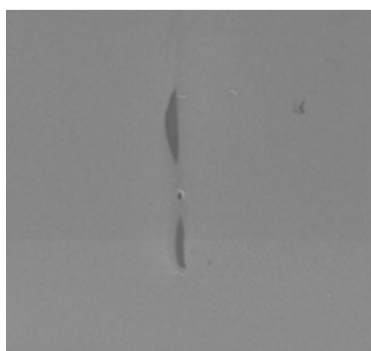
\* 1 か月ほど 2.5%の塩水につけたときの表面の腐食の様



1 か月半後

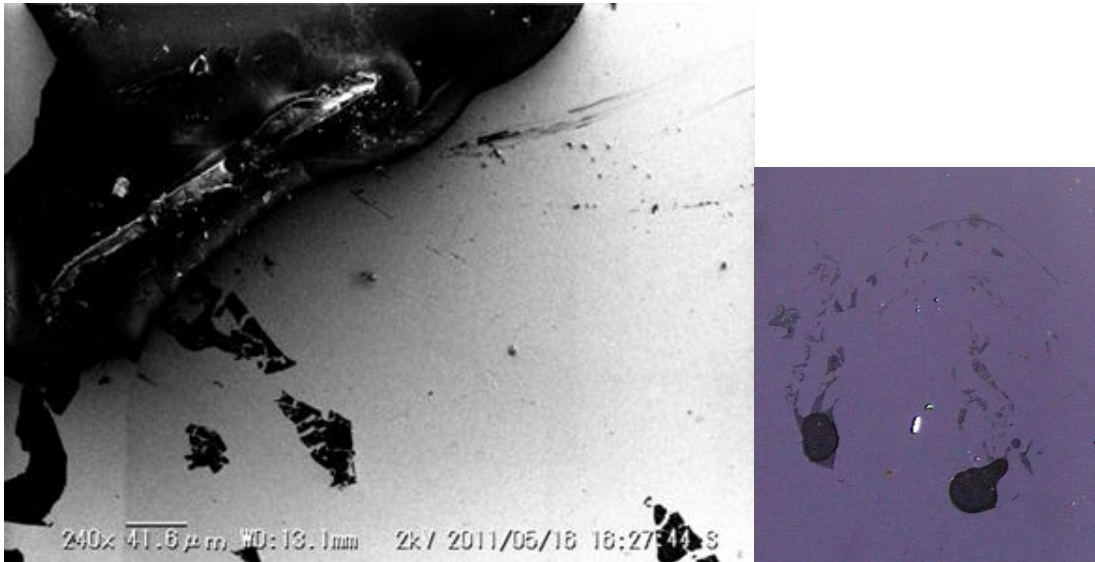


ピンホール部分の腐食の様子

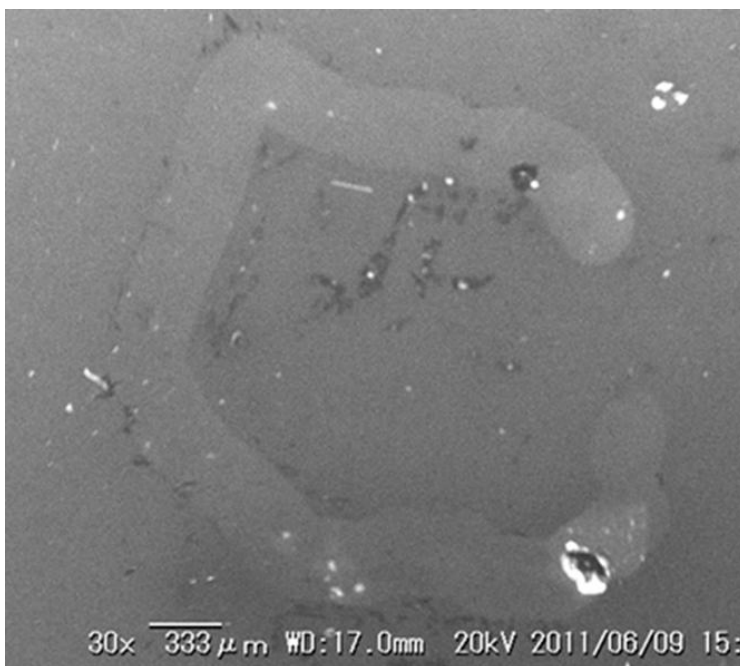


\*マジックで印をつけたところ

3日後にはほとんど消えかかっており、電子顕微鏡で見るとマジックのところが浮いているように見える。印の周りに黒い塊が散っているのが、コーティングが剥げて行っているのではないかとと思われる。左図は光学顕微鏡でみた様子



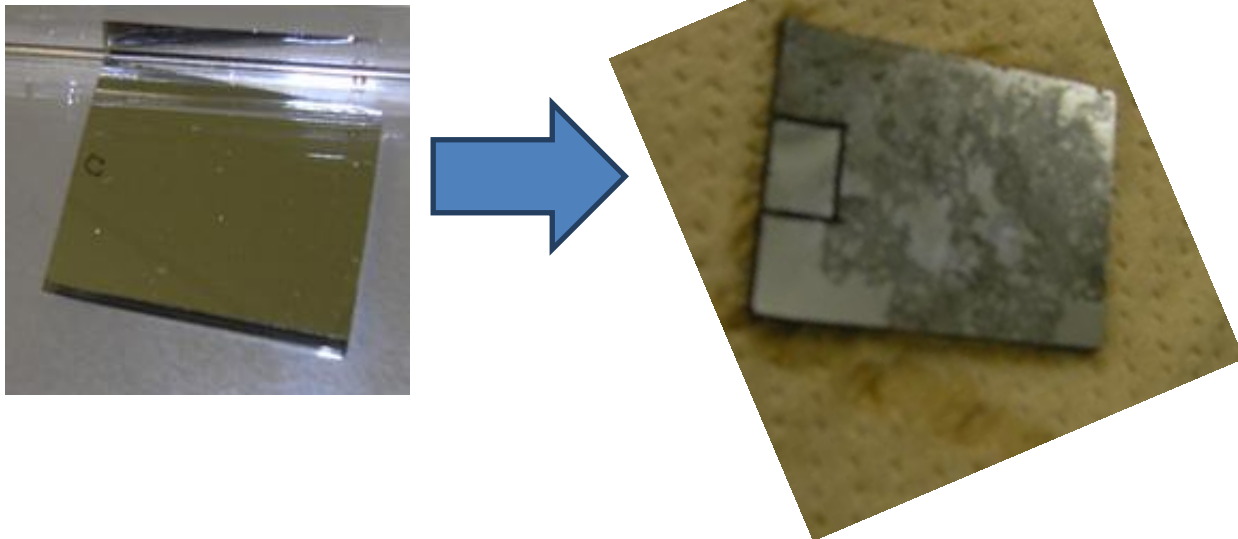
1 1日後には後だけが残って、油性ペンの印は消えてしまっている。



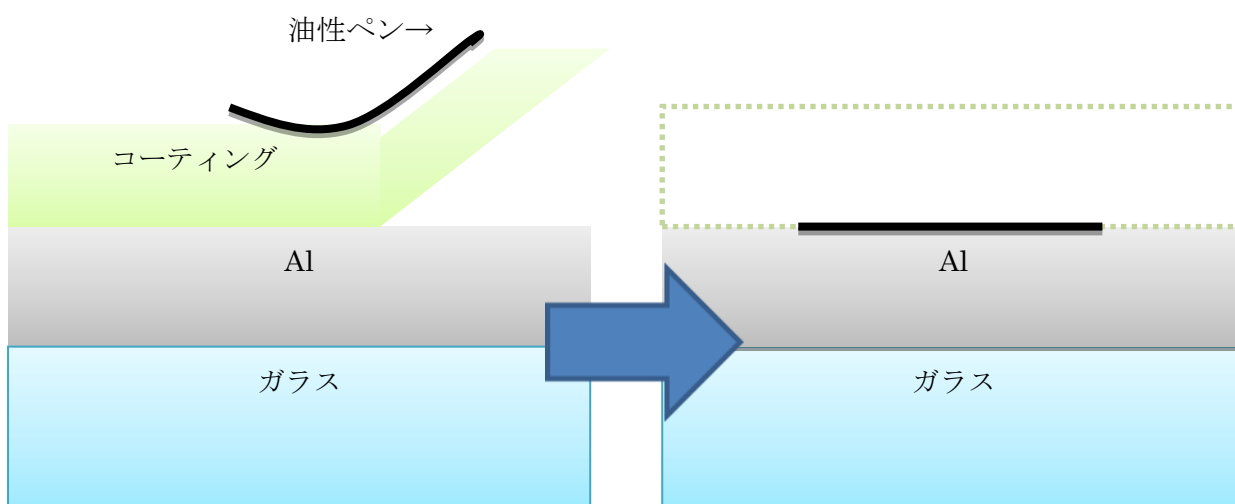


\* 1 か月後の鏡の写真(左)

ほとんど剥げている。しかし、初めの油性ペンの印が消えた後につけた油性ペンの印は残り、その中の鏡は腐食していないように見える。

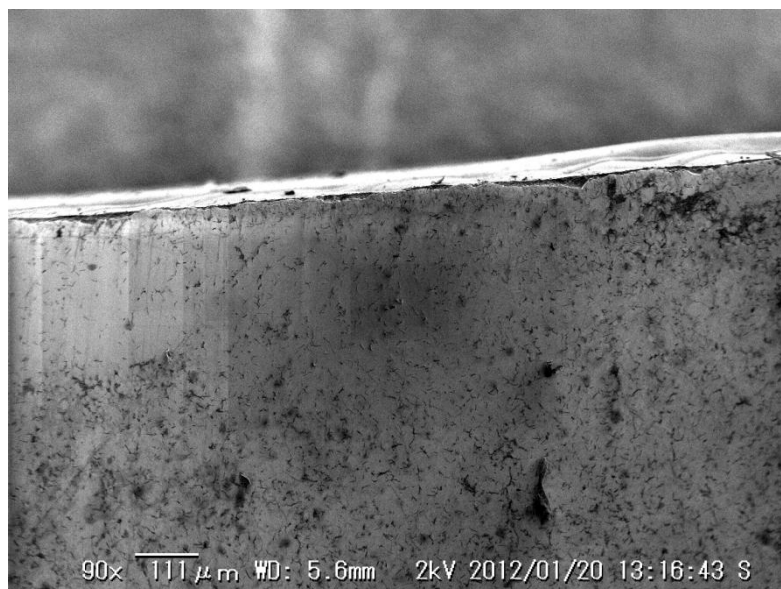
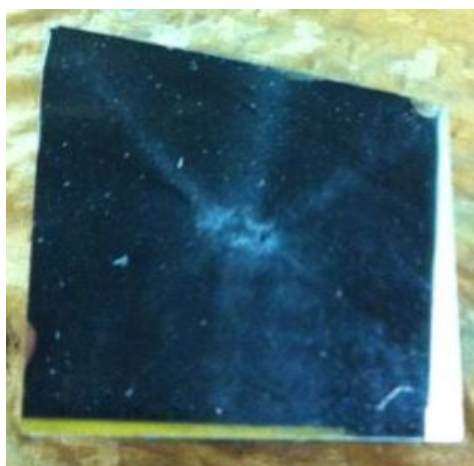


これは油性ペンで囲ったところが抵抗となって、アルミ部分が電池として作用しなくなり、腐食していないのではないかと思います（アルミの表面が陽極となるため、そこに抵抗があれば腐食電流は走らず、腐食しない）

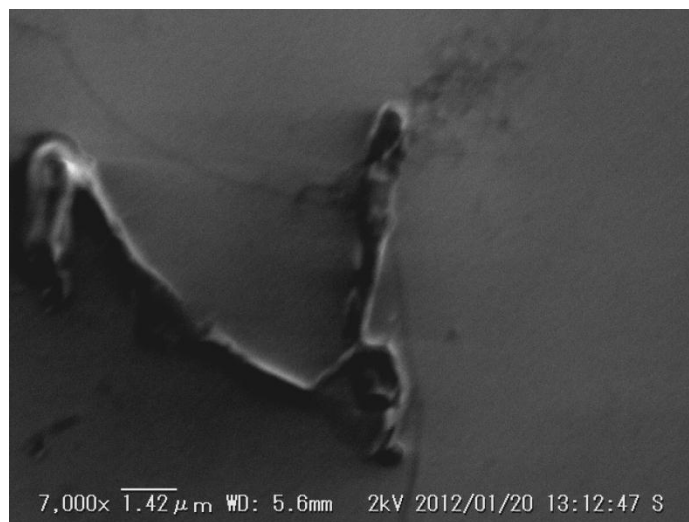
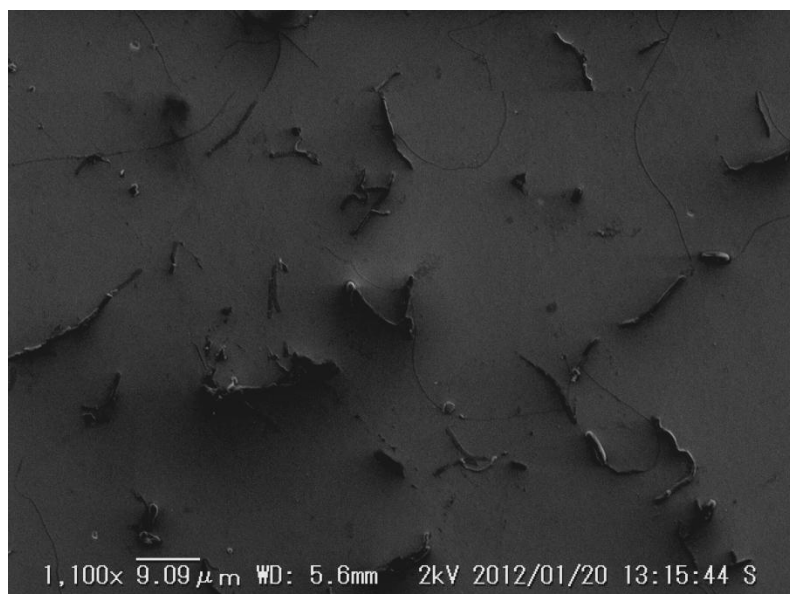


\* 硝酸で WEB カメラでは腐食の様子が見てとれなかった鏡の表面  
pH6.61 につけて何日も実験 i では変化の見られなかった鏡を観察した。  
肉眼では、白く放射線状のものが浮かび上がっているように見える。

写真と SEM でみた鏡の端



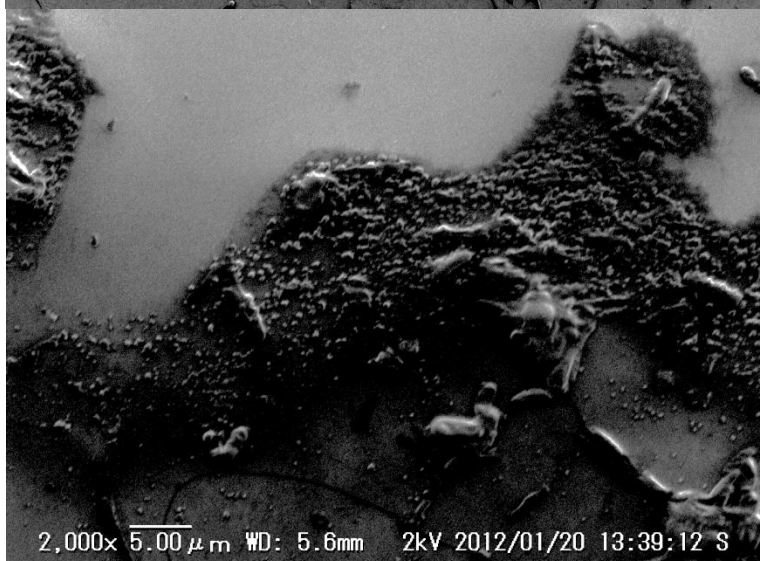
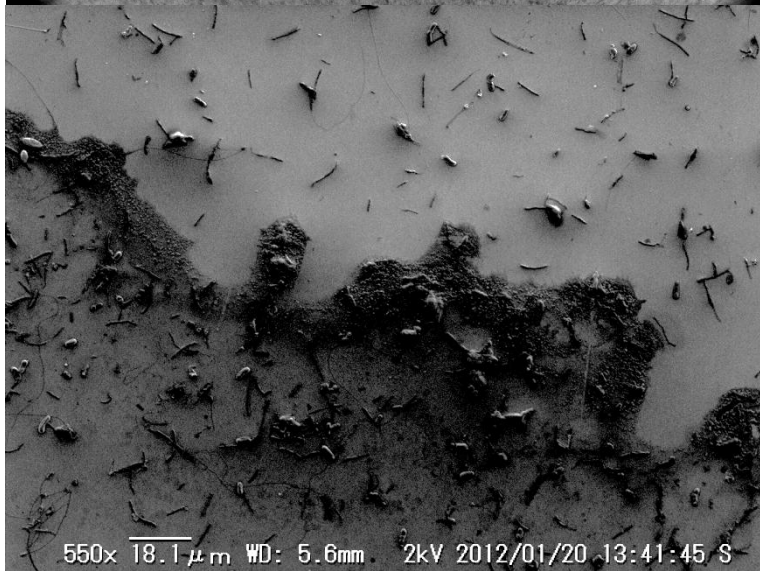
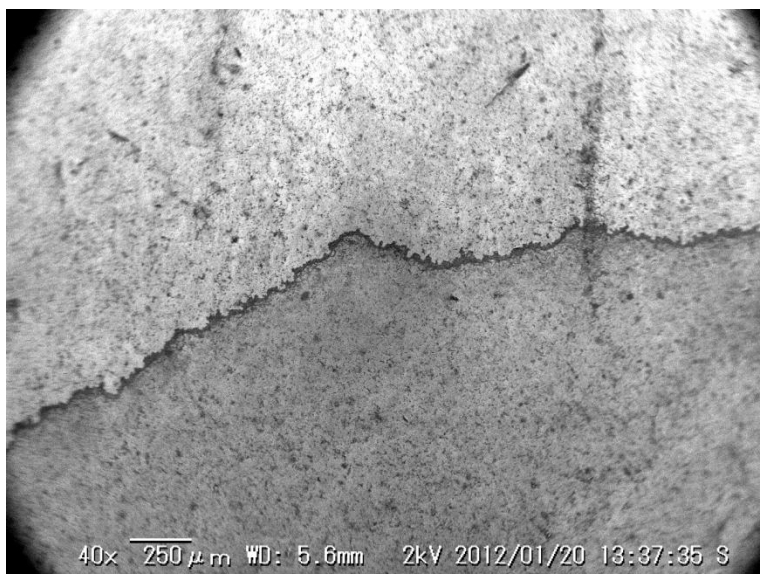
拡大図



中心の白い部分と拡大図



境界線あたりと拡大図(コーティングが剥げているのか…)



iii. 反射率の測定

目的：腐食によって、どのように鏡の反射率が変化していくかを調べる

方法：装置2と3を使用し、1%の食塩水によって腐食していく鏡の反射率の変化を測定

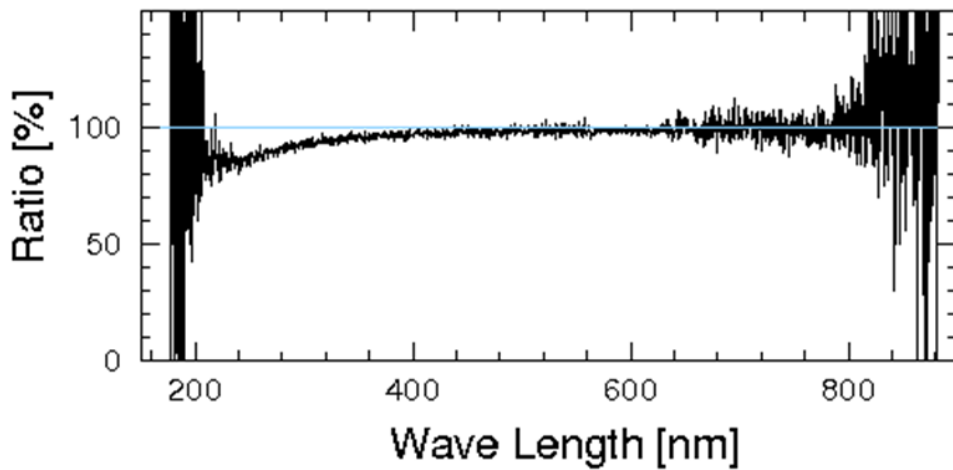
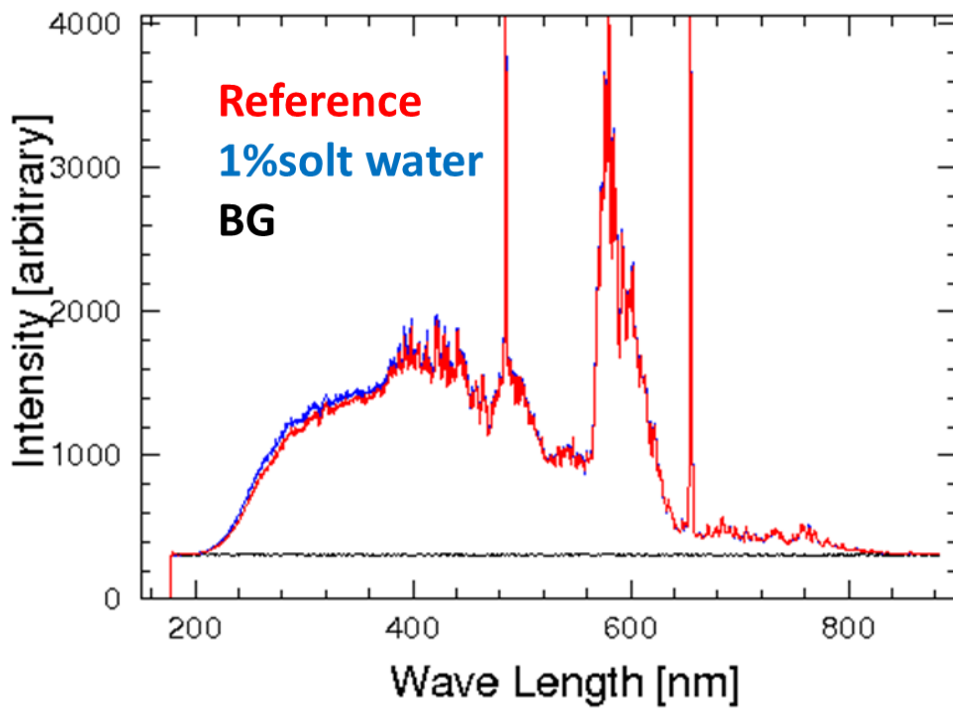
結果：

\*装置2での実験：重水素ランプの反射光スペクトルによる反射率変化測定

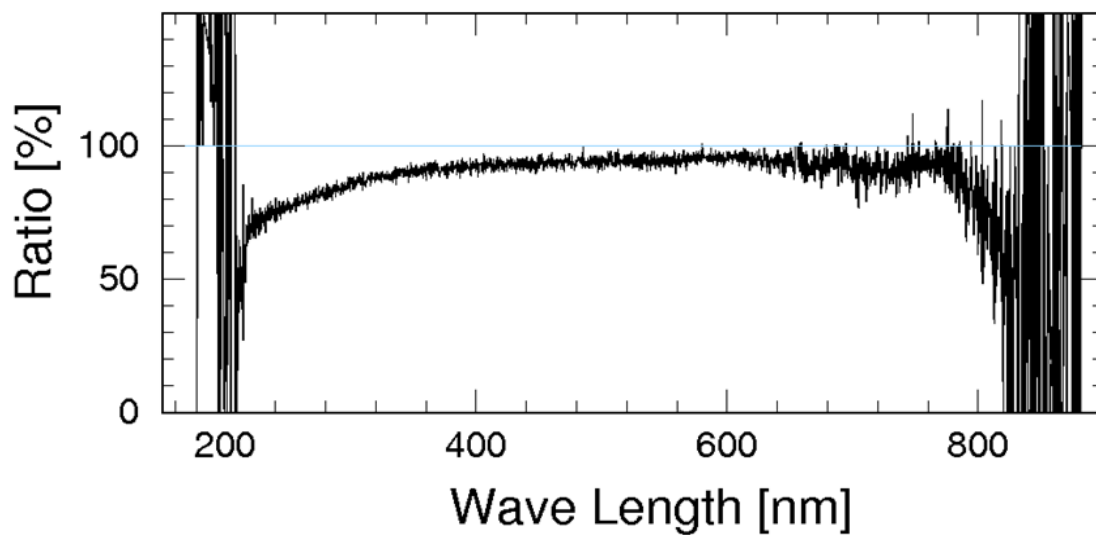
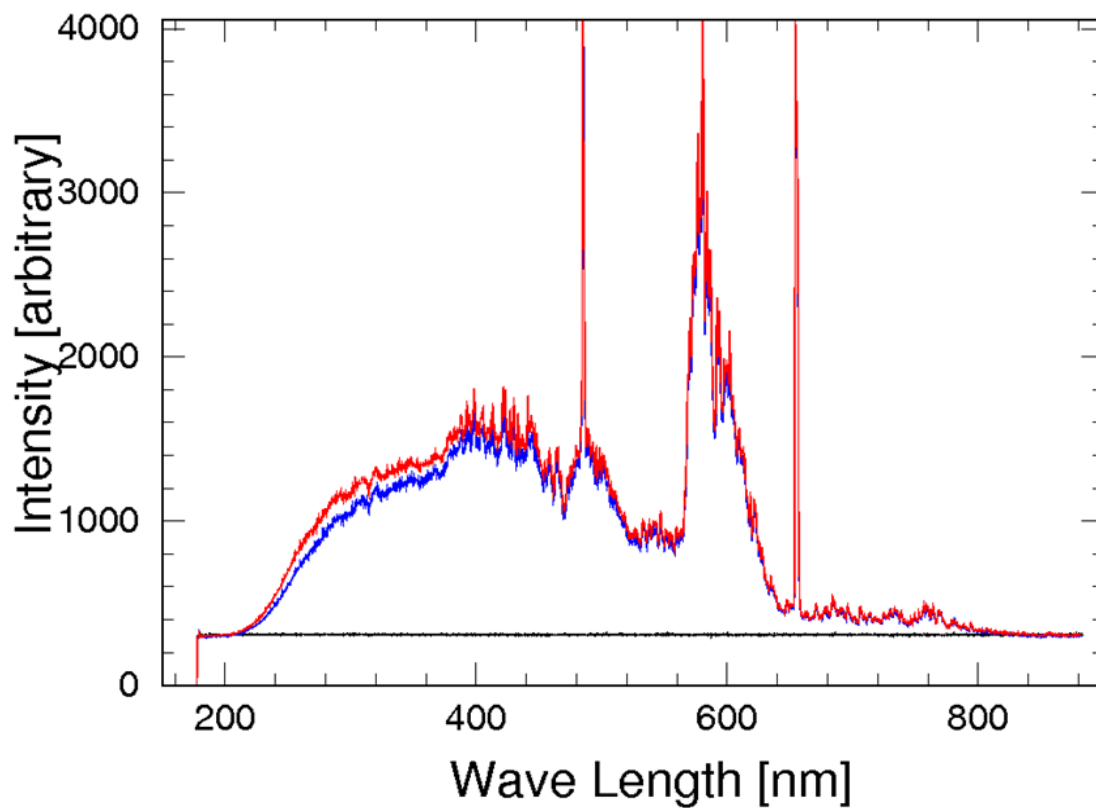
上：縦軸がスペクトルの強さ、横軸が波長

下：縦軸が上図の差分をとったもの、横軸は波長

塩水につけて3日目の鏡



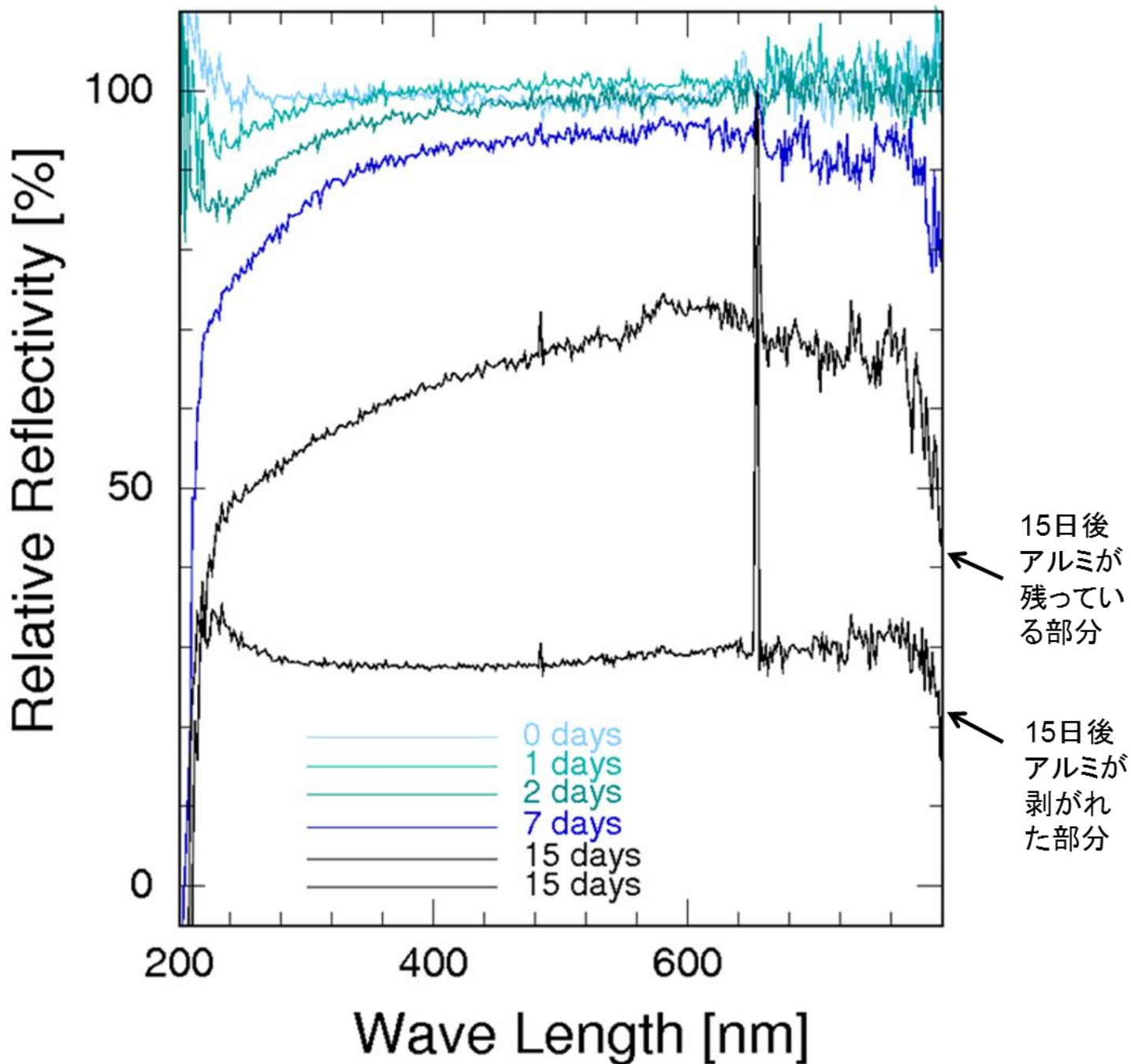
7日目の鏡



15日間のスペクトルの変化をまとめたもの

低波長部での変化が大きい。

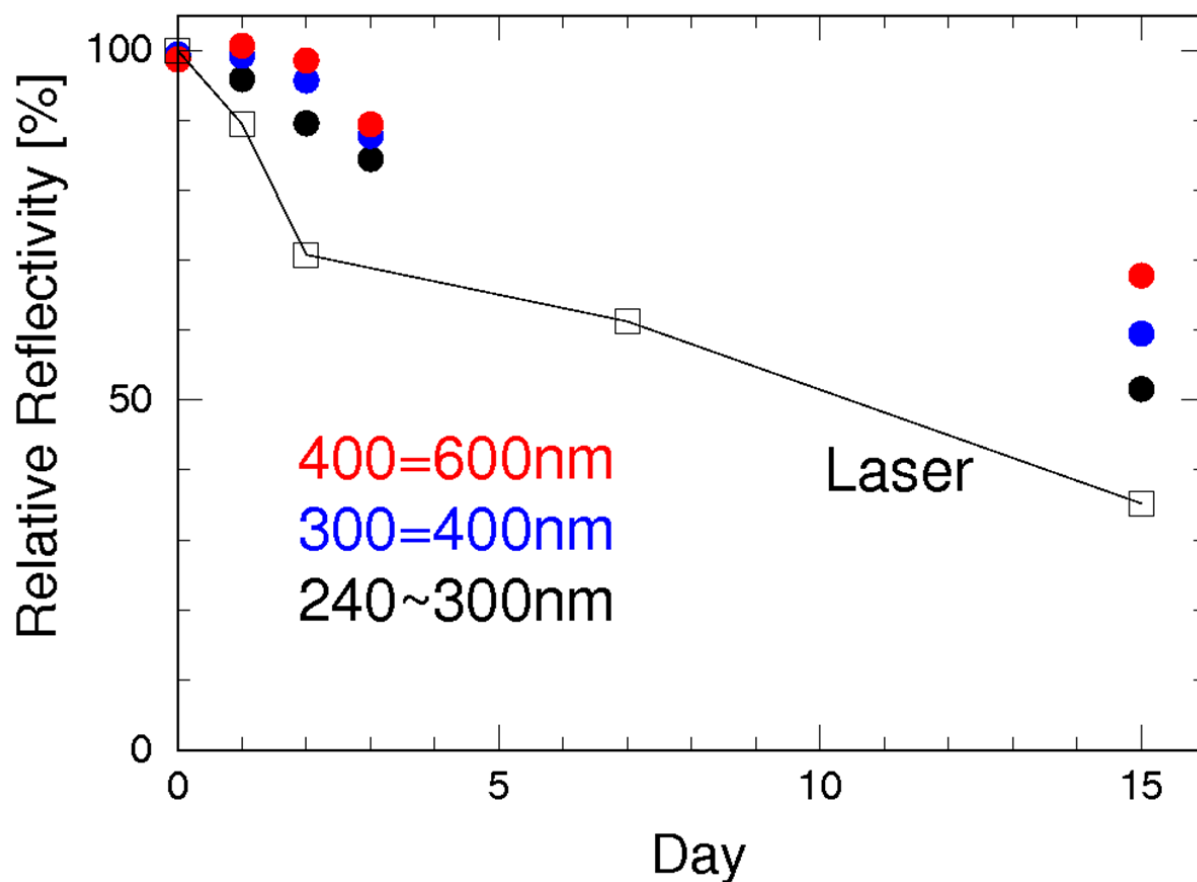
チェレンコフ光の波長はおよそ 390nm なので、激しい変化はないが、それでもかなり反射率が低くなっている。



\*装置3による実験：400nm 半導体レーザーによる反射率変化の測定

縦軸は反射率で、横軸は日数となっている。

また、□の線グラフがこの実験の結果であり、○が装置2による結果である。



これらの結果から、鏡が腐食するにつれてどんどん反射率も下がっていくことがわかる。どちらも短波長のほうがより変化が大きい。

同程度の波長でも、レーザーの結果のほうがより反射率は低くなっている。

実験装置の違いからか、光の反射の具合や測定の失敗など、いろいろ考えられるが、反射率の測定はまだ解析結果を出すには早急である。

今後十分に行ってからの結果に期待したい。



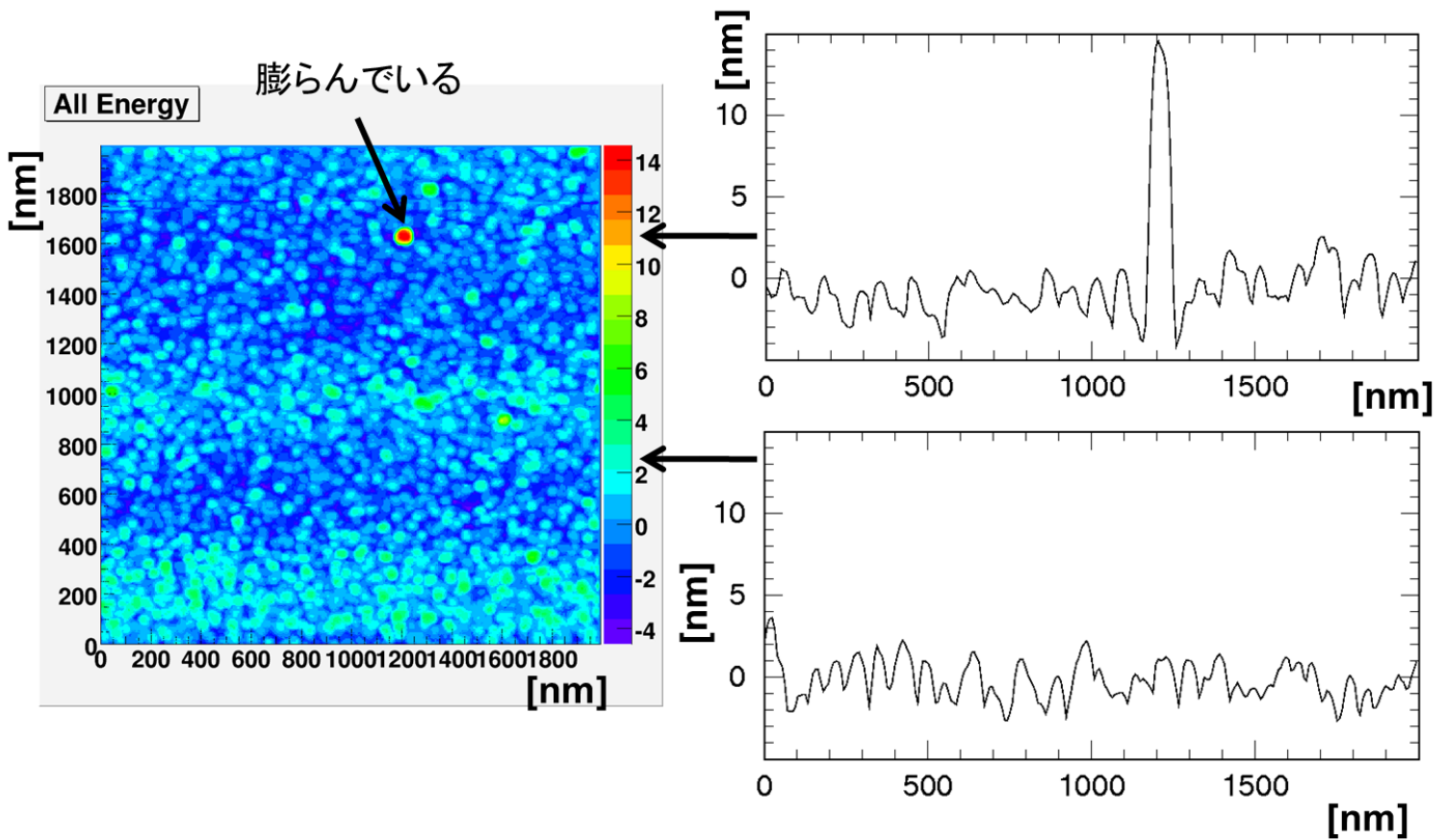
iv. 鏡の表面の凹凸を原子間力顕微鏡で測定

目的：鏡表面の凹凸から、鏡表面の状態をみてる

方法：原子間力顕微鏡を用いて鏡を見る

結果：数 10 から 100nm 程度の大きさで、深さ数 nm 程度の凸凹が見られる。

今回の測定精度は xy 方向に 8nm 程度にした



## 6. 結論

ピンホールは徐々に溶液の濃度や pH に比例して腐食され大きくなっていくと考えていたが、使用した溶液によって含まれるイオンが異なり、アルミはそれぞれのイオンと異なる化学反応を示したため、一概にそのように単純な腐食とは言えないことが明らかとなった。実際、酸性雨はいろいろなイオンを含んだ混合溶液である為、鏡の腐食はさらに複雑なものとなるのではないかと推測する。

腐食していく鏡表面に変化がみられた。腐食の様子から、コーティングが先に剥げ、むき出しになったアルミが順次腐食されていくのではないかと考えられる。

反射率は現段階でまだ測定を完了したわけではないので、再度十分に行う必要がある。そして、研究の大きな目的であった耐久性についてだが、今の段階では鏡が何年もつか計算するのは難しく、今回の研究では推定するところまでは到達できなかった。

## 7. 考察

実際の雨を解析し、実験で使用する溶液にもさまざまなイオンを含ませることで、より加速試験の精度をあげられるのではないかと。それ加えて酸性雨がもつイオンの成分と、実験で使用する溶液の成分を比べられれば鏡の耐久性能をもう少し定量的にできるのではないかとと思われる。

また、今どの金属膜が表面に現れているか調べられれば、コーティングがどのように剥がれていっているか解明でき、腐食のメカニズムがよりわかりやすくなるだろう。

## 8. 謝辞

この卒業論文を形にすることが出来たのは、担当して頂いた山本常夏准教授の熱心なご指導、梶野教授のアドバイスや院生の飯島さん、吉田さんが相談にのっていただいたおかげです。そして、本研究は CTA-japan Colaboration の協力により進めることが出来ました。とくに茨城大学の片桐先生、加賀谷さん、東京大学宇宙線研の手嶋先生を始め、CTA-japan Mirror Working Grope の方々にもお世話になりました。

また、お忙しいなか青木准教授、市田准教授に実験装置を組み立てていただきました。協力していただいた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

➤ 引用・参考

以下それぞれの項目について参考にさせていただいた HP

1) CTA

<http://www.cta-observatory.jp/>



2) 金属腐食の原理

<http://www.oike-kogyo.co.jp/index.html>

[http://www.kobelco.co.jp/alcu/technical/almi/1174614\\_7876.html](http://www.kobelco.co.jp/alcu/technical/almi/1174614_7876.html)

<http://ms-laboratory.jp/zai/part4/5/5.htm>

<http://koza.misumi.jp/surface/2007/08/315.html>

[http://www.smt-inc.co.jp/tsushin/magazine/8\\_3.pdf](http://www.smt-inc.co.jp/tsushin/magazine/8_3.pdf)

<http://tri-osaka.jp/group/kikaikinzo/hyoumen/surface/post/Yanagihara/Y4.pdf>

<http://www.sofutemu.co.jp/page3.html>

3) 酸性雨の成分

[http://www.pref.fukushima.jp/kankyouchousa\\_dl/H19/03H19sanseiu.pdf](http://www.pref.fukushima.jp/kankyouchousa_dl/H19/03H19sanseiu.pdf)