

天体反射望遠鏡の鏡面蒸着

中 桐 正 夫*

1. はじめに

今までにも岡山天体物理観測所における鏡面蒸着の報告は月報誌上に「残像」、「雑報」、「月報アルバム」等として何回か紹介されましたが、今回は実際に蒸着装置を操作している者の立場からいささか蒸着作業を紹介してみたいと思います。

筆者は東京天文台岡山天体物理観測所において、188 cm, 91 cm 望遠鏡, 65 cm 太陽望遠鏡等の主鏡, さまざまの副鏡類, その他分光器の多種の反射鏡類の鏡面蒸着に従事している者の1人であります。これから述べるのは同観測所における鏡面蒸着作業の紹介になります。

2. 反射鏡の汚れ

天体反射望遠鏡は御承知のように鏡面を上にして何らかのカバーのない状態で観測がなされます。したがって砂ほこりをはじめ, ありとあらゆる大気中のほこりがアルミニウム蒸着面に降り注ぐわけであります。望遠鏡でありますから星の光だけ入ってくれば良いのですがそうはいきません。そこで天文台の立地条件の一つにごみの少い所というのが入るのであります(もっともこれは光学的な意味の方が大きいのですが)。レンズを用いた望遠鏡ですと, アルコールのような溶剤をガーゼにつけて磨くことも可能であります, アルミニウムの蒸着面は傷が付きやすくレンズの場合には可能である汚れを拭き取るということができません。大望遠鏡の主鏡は大変に大きなものでありますから(188 cm 主鏡は重量2トンもあります)熱容量も大変に大きく, 太陽光線による熱ができるだけ入らないように設計施工されたドーム内に湿った暖かい空気が入って来ますと, ドーム内は外気より冷たいものですから鏡一面に露がつくわけであります。鏡面に降り注いだほこりがこの露のおかげで鏡面にびったりへばりついてプロアで吹いたぐらいでは決して飛ばないような状態になります。ついでであります, このような場合望遠鏡自身も大変な露をつけましてポタポタと汗がしたり落ちるような様になります。天文台は多くの場合山頂にありますので霧におおわれたり, 雲の中に入ることが平地よりもずっと多く, 湿気の問題は大きいわけです。このように鏡面にほこりが落ち, 湿気で鏡面にへばりつくということが繰り返えされると鏡の反射率は

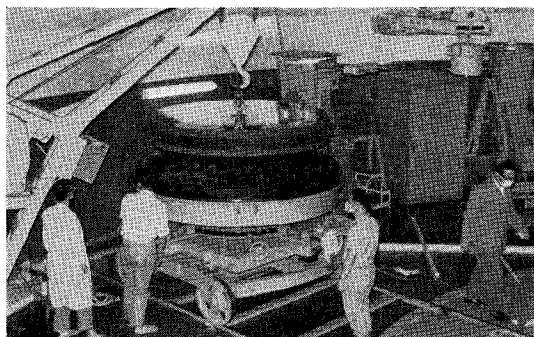
どんどん悪くなり, ついには蒸着した頃の半分以下にもなってきます。また, 大きな望遠鏡になりますと筒先にいろいろな機械装置をつけたり, 望遠鏡の微動装置等が主鏡よりも高いところにあたりして, 望遠鏡の姿勢によってはよく整備していてもギアボックスから油がしたり落ちたりするものであります。望遠鏡を動かしている時はたいていミラー・カバーは開いておりますので, 神聖であるべき鏡面にポタリと落ちたりして一層鏡を汚してしまうのです。鏡面の汚れとは関係ありませんが鏡面に傷をつくらないために, 筒先での作業や観測の時, 胸のポケットから物を落したり, 筒先に工具の類を置き忘れたりすることのないように細心の注意を払うのも天文屋たる心構えであります。

このようないろいろな原因による鏡面の汚れのために岡山天体物理観測所では年1回蒸着をやり直すわけあります。

3. 蒸着の時期

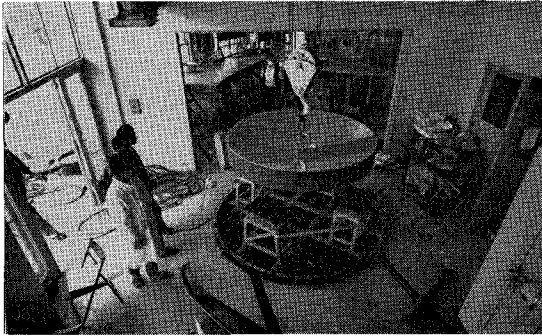
鏡がかなり汚れたからさて蒸着というようなわけにいかないのが観測所の望遠鏡であります。1年間びっりと組まれたプログラムにしたがって観測が続けられているのでありますから, このような望遠鏡の整備的な仕事は星の見えることの少ない観測の不能な時期にやることになってしまいます。そんな時期といえますと梅雨の頃から9月の秋雨前線や台風が多い頃なのであります。ところがそんな時は湿度が高く蒸着作業にはまことに都合が悪いのです。蒸着作業は空気が乾燥している時の方がずっとやりやすいのです。その理由は,

1. 湿度が低いと鏡面を磨いたアルコールエーテル等



第1図

* 東京天文台



第2図

の蒸発が早く、鏡面の磨きが楽であること。

2. 真空ポンプが水分の多い空気を吸うと能率が悪くなること。
3. 湿度が高いと作業員が汗をかき、鏡面、真空タンク壁を汚す可能性が大きいこと。

等であります。しかしながら天文台は多くの場合山頂にあり、水道が引けず、水の確保には大変苦勞をしております。天よりの雨のみが水の供給源であります。岡山の観測所も雨が山の沢を流れ落ちるのを受け止める貯水槽を掘り(これを井戸と称しています)、そこからポンプで天文台まで押し上げているので十分に水のある時は6月の梅雨以外にはないわけでありませう。このように観測不能な時期で水の十分ある6月に蒸着作業が行なわれることになったのです。なにしろ鏡面の洗滌、真空ポンプの冷却にと大量の水を要する作業なのです。

4. 望遠鏡から鏡の取りはずし

洗練された望遠鏡メーカーのものは手順さえうまくやれば難なく取りはずしができます。岡山の188cm鏡はその点非常によくできており、観測用の昇降床が鏡2トン、ミラーセル2トン、ミラー運搬車2トン、作業員0.5トンの6.5トンをスローモーションで昇降させることができ、実にうまく鏡を裸にすることができます。主鏡の取りはずしは望遠鏡を垂直に立て、赤経赤緯方向をサポート棒を立てたり、ロープで固定したりしてから昇降床を用いて運搬車の上にミラーセルごと下します。ボルトを対角線方向で観測所の力自慢の者が声をかけ合いながらゆるめます。運搬車の上を下りるとき、鏡を吊り上げるアイボルトが鏡のカセグレン穴より顔をのぞかせるようにセットされる手順のよさで、そのままレールの上をクレーンの下まで運ばれ、鏡は保持用ベルトをつけたまま真上に吊り上げられ(第1図)、ドームの床に開けられている直径2.5mの穴から下の洗滌台の上に吊りおろされて(第2図)、そこで保持用のベルトをはずし、洗滌が始められるわけですね。その他の種々の鏡の類も完全

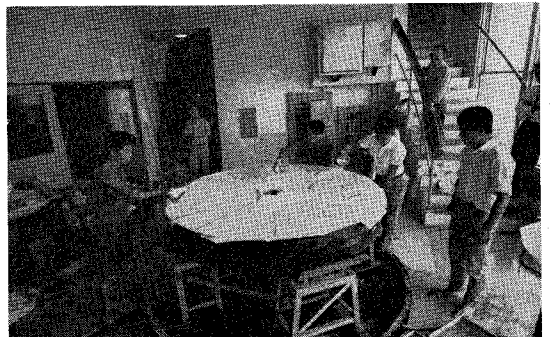
に復元できるようメモを取りながら裸にしていきます。鏡に傷をつけないよう細心の注意を払って作業を進めていきます。

5. ミラーの洗滌および磨き

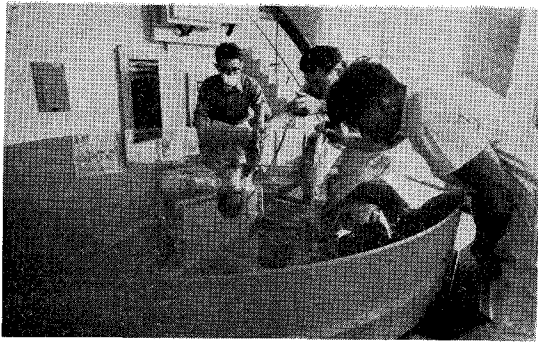
鏡は非常に汚れており、砂ほこりのようなものが最も多く、いやな汚れであります。こいつは強くこすると鏡のガラスの面にまで傷がつく恐れがあります。洗滌の手順を列挙してみると次のようになります。

- ① 水洗
- ② 10% NaOH 溶液で古いアルミニウムの剝離。
- ③ NaOH 溶液を水で洗い流す。
- ④ 重曹で鏡面を物理的にこすって磨く。
- ⑤ 重曹を水で洗い流す。
- ⑥ 鏡のピンホールの中の汚物を注射器のアルコールを注入し、物理的・化学的手段によって追い出す。
- ⑦ 純水(イオン交換水)による洗滌。
- ⑧ 無水アルコールをふりかけできるだけ早く水分を鏡面より拭き取る。
- ⑨ よく脱脂したサラシ布に適度の割合に混合されたアルコールエーテル(湿度により混合比を変える)をつけて鏡面をよく磨く。
- ⑩ よく脱脂乾燥したサラシ布で鏡面を磨く。

以上の作業を入念にやっけて鏡を真空タンクの中に納めるわけでありませう。②のNaOH溶液による古いアルミニウム面の剝離の際、NaOH溶液を鏡面に保持しておくために、奉書を用います。鏡面一杯に奉書を拵けてその上からNaOH溶液をふりかけます(第3図)。なぜ奉書を用いるかというのを和紙は粘土様のものを用いていないのが最も大きな理由であります。奉書の厚さが適度にNaOH溶液を含んでくれるからであります。一説にこのNaOH溶液使用の後中和のために硝酸を用いるというのがありますが、ガラスは一般に酸に侵されやすいので我々はこの中和はやらず、十分に水洗をすることにしております。⑥の作業(第4図)は小さな鏡ではほとんど不用であります。これは大きなガラス塊を作る時にできた



第3図



第4図

気泡が鏡面に現われたものでありますから小さな鏡にはほとんどないと考えられます。⑧の水をできるだけ早く拭き取るのは鏡面が水焼けという現象を起こすとされているからであります。

次に鏡面を磨くサラシ布であります我々はこれを次のようにして用意しております。市販のサラシ布は30cm幅ぐらいですから、これを長さ30cmぐらいに切り30cm平方の布とし、これを10% NaOH溶液で3~4時間煮沸した後よく水洗をしてほこりの少ない所で陰干しにします。なぜ太陽光線にあてぬかという、ごみ、ほこりが飛んできて付着することを恐れるためであります。このようにして脱脂乾燥したサラシ布をデシケターに入れて保存し備えておきます。この量は大変なもので岡山の観測所ぐらいの規模のところでは鏡の量も多く、大量に備えたサラシ布も使ったものをさらに脱脂乾燥して使うというローテーションを組まないとも足りないのです。

アルコールエーテルによる鏡面磨きから乾燥したサラシ布による拭き上げは実に熟練を要する仕事であり、広い鏡面を少しのむらもなく拭きあげることが大変であります。少しのむらも蒸着後はすぐばれてしまい、そこから蒸着面が剝離してくるのであります。

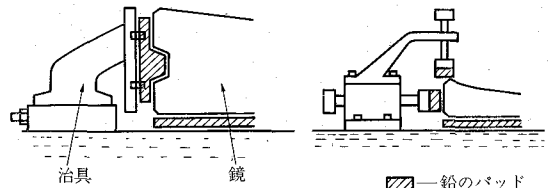
6. 真空タンクの準備

天文台における蒸着装置は一年に一回しか使用しないので、その間は $5 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$ mmHg程度の真空度に保ってありますが、使用前、タンク内の洗滌と脱ガスを行ないます。洗滌にはトリクレン(トリクロールエチレン)を使い、タワシでごしごしこすり、後アセトンで洗い、中に3kWのヒーターを張り加熱し、12時間ぐらい脱ガスを行ないます。これは1年間にタンク壁に吸着したガスを追い出すため、大きなタンクが $40 \sim 50^\circ\text{C}$ ぐらいになる程加熱して 10^{-5} mmHg程度になるまでやります。

7. 真空タンク内への鏡の装着

真空タンクは蓋の部分に鏡が装着されるようになっていて、これを水平に傾けることができます。この中に人が入って鏡をセットするので人間の脂がタンク壁に着かないように細心の注意を払います。まず足は脱脂した白靴下をはき、白いトレーパンをはいて、頭には手術用の帽子をかぶりふけが落ちないように気を配ります。当然ポマードの類は真空タンクを扱う者は一切つけません。そして顔にはマスクをして、口や鼻からの飛沫を防ぎます。次に手は長袖の服を着て肌が直接真空タンクにさわらないようにし、軍手をはめて作業をします。軍手は新しいものは綿ごみが出ますので、脱脂水洗してから使用します。真空タンク内で使用する工具類はトリクレンで洗った脱油工具ばかりです。脱脂のためにアセトンを用いたりしますので、ドライバーのエポナイト柄のものは溶けてしまいますから木の柄のものを用います。

真空タンクはステンレス鋼でできていて固いので鏡が



第5図

直接タンクに触れることを避けるために、鏡は鉛の板の上にのせ、また周囲からの止め金もすべて鉛のパッドをあてて押します。また水平にセットした鏡を垂直に立てて真空タンクを閉じることになりますから鏡のあおり止めもします。これもやはり鉛のパッドを用います。ところでこのあおり止めのためには鏡面を押えるのですから、できるだけ蒸着されない面を少なくするために縁にそって押えます。そのときは鏡にいわゆる“かん”というものを作らぬように細心の注意を払わねばなりません。もっとも188cm鏡とか91cm鏡などは第5図の如く鏡の側面に凹みがあってこの部分を用いてセットするので鏡面を押える面倒さはありません。このことは鏡の拭き上げの時にも面倒さをずっと減ずることになります。

このようにして機械的に真空タンクに鏡が入りますと、鏡の装着の際に着いたごみ、もしくは油脂などを今一度取るために真空タンク内で鏡を磨きます。この際もアルコールエーテルの混合液で油脂を溶解し拭き取るというつもりでやっております。一説にはアルコールエーテル溶液で拭くことは油脂を鏡面一杯に薄く引き延しているだけだとの説もあります。しかしこれで残った汚れは真空にしてからイオンボンバードという行程で吹き飛ばされるはずであります。アルコールエーテル拭きが終わると仕上げ拭きをやります。これは脱脂サラシ布になにもつけず鏡面をキュキュとこするのであります。これ



第6図

ら一連の作業は斜め上から強烈なライトで照らしながら拭きむらのないように念には念を入れて、一心不乱に磨きあげます。鏡面の仕上りの成功不成功は実にこの拭きあげにかかっているのです(第6図)。これを終えて真空タンクをセットする前にテストピースの小さいガラスを適所にぶらさげておきます。我々はこの鏡の装着の一連の行程を納棺と呼んで厳粛に行なっております。

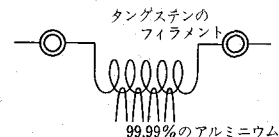
8. アンニール

鏡の洗滌が行なわれている行程において真空タンクの係の者がやらねばならないことにアンニールと呼ばれる行程があります。このアンニールというのは蒸着するアルミニウムを蒸発源のタングステンフィラメントに融かしつけるものであります。

前回の蒸着が終って鏡を取り出して次の蒸着に備えて鏡の治具を取り換え、フィラメントにアルミニウムを吊してやります。第7図の如く一本のフィラメントに4~5本のアルミニウムを馬蹄形に切ったものをフィラメントの螺旋形の部分に吊します。このフィラメントは2つの同心円上に36本並んでいます。

このアルミニウムはアセトンでよく洗ったものを用い、フィラメントに吊る作業を行なうときには口からの飛沫を防ぐためにマスクをしてピンセットを使って注意深くやります。このアルミニウムは純度99.99%のもので通称フォーナインと呼んでおります。これが終わります

とタンクの排気を行いません。これについては次の節の真空引きで詳しく述べると同じであります。ロータリーポンプで粗引をやり、油拡散ポン



第7図

プで 2×10^{-4} mmg ぐらいまで引いてやります。ここまでに2.5~3.0時間を要します。このぐらいの真空度になりますと拡散ポンプの能率はいささか悪くなります。このぐらいの真空度でアンニールを油拡散ポンプを作動させたままの状態で行ないません。なぜならばフィラメントを加熱しますので、フィラメントからのガスも出ますし、アルミニウムを融かしつけるのでありますからアルミニウムに取り込まれていた物質がガスとなることが予想されるものをどんどん引いてやるためであります。

このアンニールの操作が蒸着の時の操作の基本になります。電圧を徐々にかけていきフィラメントを加熱しますが、前回のアルミニウムが少し残っていたりして一様には赤熱されませんので時間をかけて徐々に電圧を上げて全体を一様に赤熱させます。急激に加熱いたしますとフィラメントが折れたり、ガスを取り込んでいたものは爆発的に火花を飛ばしてフィラメントが飛び鏡面を傷つけたりする原因になります。

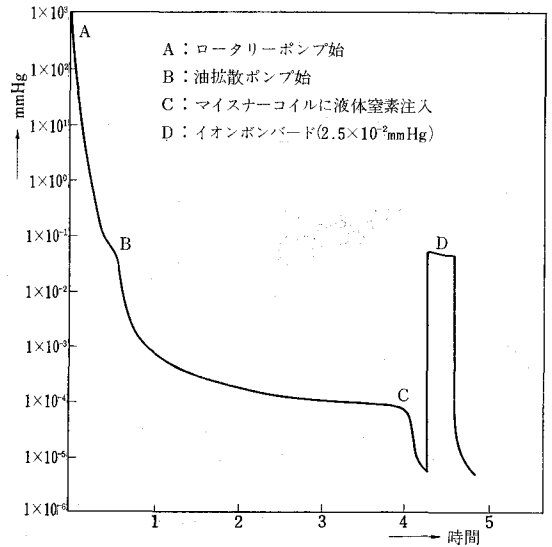
アルミニウムが融けるほどにフィラメントが加熱されますと、馬蹄形に切ったアルミニウムがだらりとぶらさがり、ややあつてチュルチュルとフィラメントに巻きつくような感じでフィラメント全体を濡していきます。そこでOKの声をかけ電源を切ってもらいます。この時フィラメントにアルミニウムが融け着くと抵抗値が変わりますので、電流が急激に増えます。また真空度も 2×10^{-4} mmHg が 3×10^{-4} mmHg ぐらいまで低下しますので、このフォーナインのアルミニウムにもガス化される不純物がいくらか混っているものと考えられます。またアルミニウムも少しは蒸発してこれの蒸気圧も真空計に現われるのだらうと思われます。この段階でいくらかアルミニウムが蒸発してゲッターポンプの作用を果して、 2×10^{-4} mmHg 位ではじめた真空度は2~3組の(1回に2本)フィラメントのアンニールで $7 \sim 8 \times 10^{-5}$ mmHg 位の真空度に上ります。しかしアルミニウムの融ける時、 $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ mmHg 位まで真空度は下ります。18組のフィラメントで20~30分の時間でアンニールを終ります。終わりますと直ちに真空引きをやめ、10~20分間加熱されたフィラメントを放置し冷却した後にタンクに空気を入れます。熱いフィラメントを空気にさらさないためであります。これでアンニールの操作は終了です。

9. 真空引き

鏡が真空タンクの中に装着されるといよいよタンクの中の空気を抜き始めるわけですが、急速に引き始めるとタンク内のごみやほこりが舞い上り鏡面についてしまいますので徐々に引き始めます。タンクが完全に閉じられて空気が抜けているかどうかはタンク内にできる霧によって確認されます。これは注射器の針をつける部分を指で押えてピストンを引く時中に霧ができるのと同じことであります。10分位徐々に引いてからバルブをもう少し開いてやります。そして真空ポンプの音を聞きながらバルブの操作をやります。これを粗引きと称してロータリーポンプのみを使ってやります。このポンプの電源を入れる時、同時に油拡散ポンプの電源も入れておきます。この拡散ポンプが電源を入れて作動するまでに30~40分かかりますがちょうどそのくらいの時間ロータリーポンプで引いていると拡散ポンプに許された背圧である 1×10^{-1} mmHg ぐらいまで引くことができます。拡散ポンプは14吋径で3kWのヒーターを持ち、4,800 l/secの排気速度であります。

拡散ポンプに切り換える前に拡散ポンプの上部にあるコールドトラップにドライアイスとアセトンを入れてやります。これは寒剤で約 -72°C に冷やすことができます。これは拡散ポンプの油の逆流防止のために用いるものであり、逆流した油はこのコールドトラップに捉えられ鏡の入っているタンクに入ることができないわけがあります。油の逆流防止のためにこの一段前に水冷バブルがついておりますがそこで防ぎきれない油をこのコールドトラップで止めるのです。拡散ポンプで2.5~3時間排気を続けると、 1×10^{-4} mmHg 位の真空度に到達します。ここで次のポンプ行程としてマイスナーコイルを用います。これは真空タンク内に銅管を導入し、これに液体窒素を注入して、タンク内の凝縮性のガスを捉えることによってポンプ作用をさせるものであります。 10^{-5} mmHg に入る位の真空度で液体窒素を注入しますとコイルの冷えるのに少々時間を要した後ぐんぐんポンプ作用を現わし20分も液体窒素を注入すると約 6×10^{-6} mmHg に到達いたします。

この段階でイオンポンバードという行程を行いません。この時真空度は 2.5×10^{-2} mmHg まで下げますので、終わりますとまた拡散ポンプ、マイスナーコイルとポンプ作用を続けますが、イオンポンバードの時入れた空気は乾燥したものであり、短時間なためタンクの壁面への吸着もなされていなくて、急速に真空度はよくなっていきます。第8図を見ていただくと一目瞭然であります。こうしてまた 6×10^{-6} mmHg 位になった時蒸着をはじめます。ロータリーポンプは補助ポンプとしていつも働いており、マイスナーコイルのポンプ作用の時には拡散



第8図

ポンプとロータリーポンプが補助ポンプとして働いていることになります。

真空度の測定にはピラニ真空計(大気圧 $\sim 5 \times 10^{-3}$ mmHg)、電離真空計($5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-7}$ mmHg)を用いています。

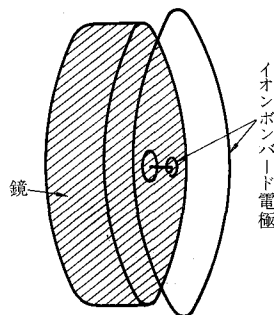
10. イオンポンバード

このイオンポンバードは低真空中でグロー放電させて、鏡面についている有機物、ほこり、ごみ等を焼いてたたき落とすという作用があるとされております。すなわち鏡面の洗滌の最終手段であります。

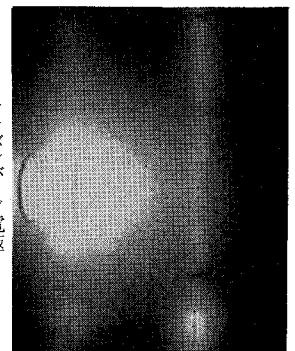
この行程のためにバルブ類を全て閉じポンプ作動を切った状態で、リークバルブから乾燥空気を入れ 2.5×10^{-2} mmHg まで真空度を下げてやります。

放電は鏡のカセグレン穴を利用して1本の電極を出しもう一方の電極は鏡の周囲に沿うように円周に取り付けられております。

ポンバードを行なう高圧はリーケージトランスを用い



第9図



第10図

20,000 V までかけられるようになっております。2次電圧のメーターがないので我々は一次電圧でコントロールしており、タンク内の放電の色を見てコントロールするわけでありまして、淡紫色のみごとな美しい放電で作業の苦しさを柔らげてくれます。真空会社の人の話では7~8,000 V かかっているだろうということです。このボンバード作業中はロータリーポンプのみを動かさながら行ないます。

11. 蒸着

イオンボンバードを終わって30分以内に蒸着を行ないます。イオンボンバードが終わって30分以上経つとかえってこれをやる前よりも鏡面の状態が悪くなるとさえいわれております。蒸着における蒸発源フィラメントの加熱のやり方はほぼアンニールの時と同じであります。この場合加熱されてフィラメントに捉えられていたガスが出てしまうのを待たないとまずいので真空計を見ながらフィラメントの電圧調整ハンドルを操作します。

第11図に蒸着時の時間による真空度の変化を示しましたが、フィラメントを加熱していき、アルミニウムが融ける温度になったころの①ように真空度が下りはじめしばらくしてまた真空度が上りはじめます。この時アルミニウム中のガス化される不純物が出ていくものと解釈し、次にアルミニウムが蒸発する温度に上げるべく電圧を上げ②の段階でアルミニウムの蒸気圧が出ているものと考え、②の山の下のところでフラッシュと呼ぶ操作を行ないます。終りに電圧を上げ残ったアルミニウムを蒸発させるわけであり、これが③の山となります。この操作を36本のフィラメントに繰り返して、アルミニウムを飛ばして鏡面を作るのであります。この操作は側面ののぞき窓からフィラメントを監視しながらハンドルを操作してやります。

12. 鏡の取り出し

蒸着が終了するのは夜7時とか8時になります。それでタンクに空気を入れるのは翌朝にします。空気を入れるのに6,000 lのタンクで10分間位かかります。タンクを開き鏡を取り出す時もタンク内を脂で汚さないように気を配りますが、それよりも仕上がった蒸着面を大切にします。ごみ、ほこり、口や鼻からの飛沫が敵であります。美しい蒸着面にほこりがごんごん落ちていくのが見えていささか悲しい気持ちになります。鏡の取り出しは装着

の逆の手順で作業することはいうまでもありません。クレーンで吊り上げられてミラーセルに入るとほっと一息するのであります。

13. 鏡面のテスト

タンクを開いた状態で鏡の垂直なうちにライトをあらゆる方向からあてて拭きむらがあるかないかを調べます。そして次にミラーセルでかくれる場所を利用してスコッチテストと称するテストをやります。蒸着できたばかりの面にセロテープを貼りつけペリッとをはがしてみます。蒸着のよくないものはアルミニウムの蒸着面がセロテープについてはがれてしまいます。これに合格しますとテストピースを用いて膜の厚さの可否を調べて成功不成功を決めます。

14. おわりに

一年中休みなく働いている望遠鏡を梅雨の時を利用して蒸着作業をやるのでありますからいろいろ問題があることは前に述べた通りであります。重量2トンもの188 cm主鏡の取り扱いは何度この作業を経験しても神経のすり減る思いであります。また40~50 kgの副鏡類でも金具にコチンと当てようものなら縁に“かん”が入る恐れがあり、鏡は割れ物だけに取扱いはまことに精神的に苦勞の多い作業であります。

また、真空ポンプに用いる液体窒素は30 kmも離れた町から魔法瓶で一日おきにきますし、天文台内の各ドームからの鏡の運搬に町役場から車を借りたりして、運転手の人もこの作業には大きな役目を果たします。図書係の女の職員には脱脂サラン布の調達をお願いしたり、鏡の拭き上げの際には病院の手術の時の看護婦さんのような役割りをしてもらったり、また薬品の調合をやらしてもらったりと少ない観測所の職員がフルに仕事を分担して能率的に仕事を進めるのであります。

真空ポンプはこの作業中一日14~16時間は運転されっぱなしでありますし、さまざまの機械類の運転に電気の使用量も多く、またいろいろな多量の薬品、アルミニウム、液体窒素、ドライアイスと大変にお金のかかる仕事であります。

マイスナーコイルを取りつける前には拡散ポンプの次のポンプとして、チタニウムゲッターポンプを用いていましたが、その時より現在は真空引きの時間が1/3減られ不眠不休に近かった真空装置係は大変助かりました。現在はこのチタニウムゲッターポンプは取りはずされております。日々真空技術も進歩していることでもありますから次々と改良がなされていくことと思われま

この文章を書くにあたって岡山天体物理観測所の方々にお世話になったことを感謝します。