

大型真空分光器への熱影響

船越康宏・北井礼三郎・木村剛一（飛騨天文台）
中井善寛（花山天文台）

はじめに

飛騨天文台ドーム太陽望遠鏡の垂直式分光器（以下、VSと略記）は、直径1.3m 高さ15.3m 容積約12m³の回転真空槽に納められた、17°レイ非対称ツェルナー型の14m真空分光器で、420×320mmの大型回折格子を261mmφの光束で照射し0.14Å/mm（5000Å, 5次）の高分散を得ている。この分光器が、理論分解能に近い～10°の解像力を実現していることは、水銀の超微細構造線による検査からも確認されている（図1）。同分光器は、本来、高分散分光写真儀として設計・製作されたもので、離散的データ取得を暗黙の前提としていたが、近年の観測的要求・撮像形態の変化から、所要露出時間に比し圧倒的に長い時間に亘る同一観測視点での連続観測が興味の対象となり、その過程で、長い時定数でのスポット像の緩やかな移動が確認され、早急に解明すべき問題として提起された。本稿は、その像移動の特徴・原因・対策についての調査報告である。

1. 分光器の概要

まず本稿絡みに限定して、VSの設置状況を略述する。図2はドーム太陽望遠鏡の全体構成図で、その地下5階分を貫通して真空分光器が屹立している。分光器筒頂及び筒底の主要部は図3に示されている。分光筒の本体は、筒頂部の1.4mのみ直径1.1m、それ以下の部分は直径1.3m、肉厚10mmの鋼製真空タックで、タック筒頂部を覆って直径2.1m、高さ0.8mの観測台が附属し、その最下部外周は油圧ベアリング摺動部で、観測室床に固定された120°割り3点の油圧パッドからの噴出油でラジアルに調心支持される。また筒底部には球状油圧ベアリングと駆動系を含む偏心台座が附属し、11屯の全重量を支えている。油膜厚さはいずれも50μmである。油圧支持された分光器の全体は観測台中心を通る鉛直線（＝入射光軸）の周りに旋回し、スリット方位の設定や像野の日周回転の補償に供されるが、重い真空タック自体は回転軸に対し著しい偏荷重となっている為、油圧を切りVS筒が沈降している状態では、ラジアル部で油膜厚分最大50μm/cos60°の水平ずれがあり、筒の剛性が十分高いとして、VS筒は1.5°弱傾いてパッドに凭れ掛かる。底部球座の半径は125mmで、この部分での横滑りは、あるとしても1μm以下である。ここで注意を喚起しておく、VS筒の

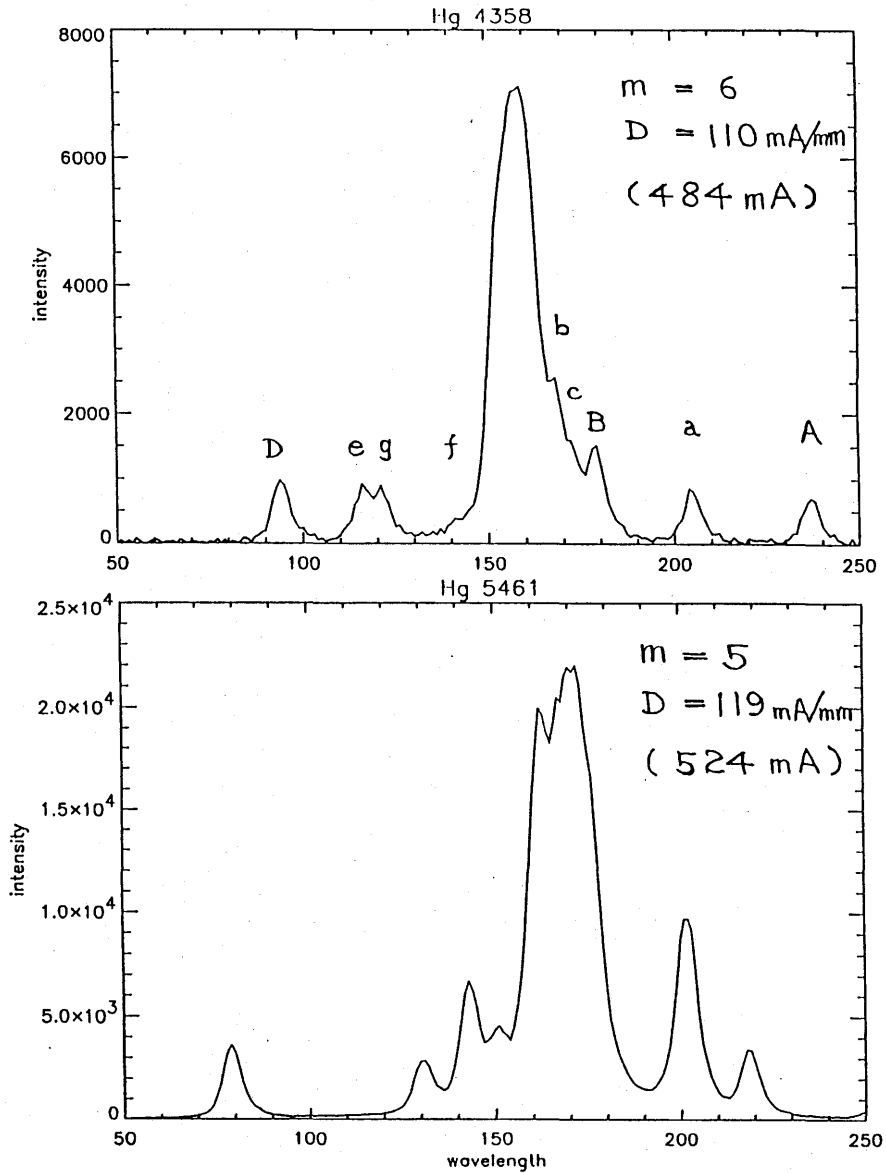


図1 垂直分光器による水銀の超微細構造線スペクトル

縦軸は相対強度、横軸はCCD受光子のピクセル番号(ピクセルサイズ $22 \mu\text{m}$)で、
 図示波長幅約 0.5Å 。(大阪市科学館、川上氏提供)

"DST" (The Domeless Solar Telescope) SYSTEM (Schematic)

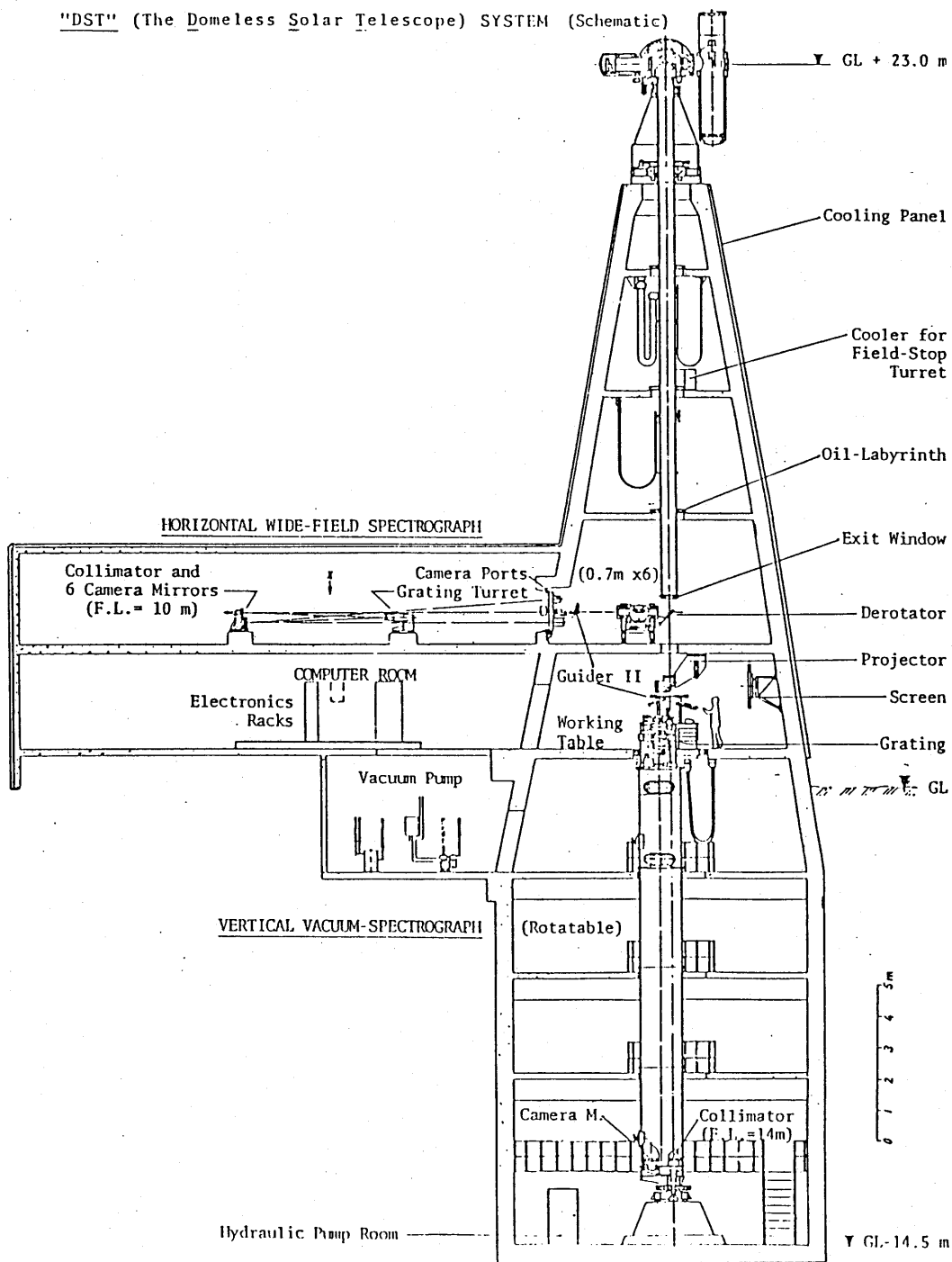
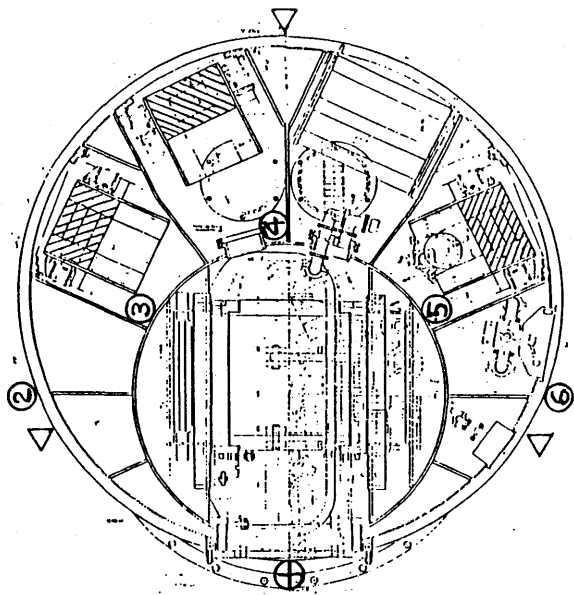
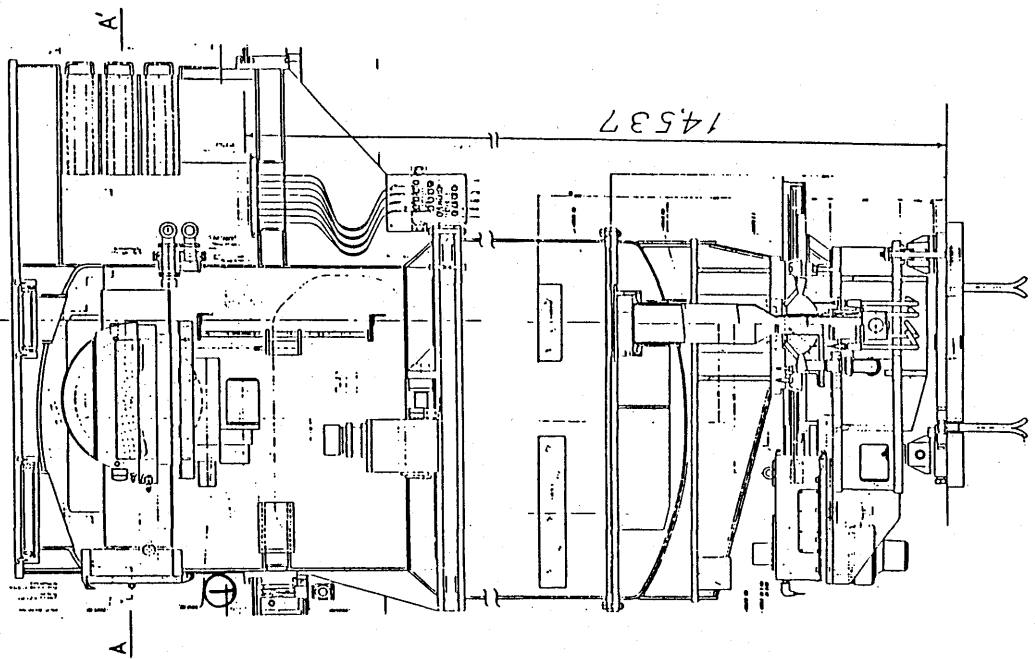


図2 ドームレス太陽望遠鏡全体構成図



View A-A

図 3 垂直分光器主要部

観測台平断面図の右半分を占める4室がワーク室で上からVSR-3, -2, -4, -1。斜線部が基板収納部。VSR-4には小型変圧器とケーブル引込ハッチがある。△印は分光器格納位置での油圧缸17MPa印位置、○印の番号は図8の温度測定点。

剛性が十分高ければ、例えVS筒が傾いても、内部素子が剛体容器たる分光筒に固定されている限りスアクトル像のずれは起らない。外部容器に対し内容物が相対的に移動乃至傾斜して初めて像移動が惹起される。また量的概念を明確にしておく、VSに於いて、像面上1mmの偏移量は、カメラ鏡の傾きで表現すれば、 $1/14000/2 \text{ rad.} = 7.37''$ で、カメラ鏡の直径両端に $\pm 10 \mu\text{m}$ の基準面からのずれがある事に相当する。同様に回折格子の溝方向の傾き(ΔY の場合)と解するなら $\pm 5.7 \mu\text{m}$ の微小量である。観測台上及び内部機器駆動制御回路用エレクトロニクス基板群は比較的消費電力が小さいので、操作性・配線効率を考慮して、観測台内部の偏心した真空筒頂部との空き空間に格納ラック(VSRs)を形成して収納されている。装置運転の実操作としては、主電源(VMB)ONでVSRsもONとなるが、油圧ポンプ及び油圧ONを前提とするVS筒回転駆動系は、個別のスイッチによりON/OFFされる。油圧ポンプや真空ポンプは地下5階の側室(ポンプ室)に納められており、ポンプ運転時には、各階で個別に開閉出来る塔内給排気装置により、狭いポンプ室の昇温の抑制と換気を図っている。分光器の内部光学素子は、リレー鏡、カメラ鏡、回折格子の3点のみである。

2. スアクトル像の移動の実態調査

先ず、スアクトル像の移動の実態を確認する目的で、入射口に螢光灯で照射されたテスト用十字スリットを置き、その0次像をCCD撮像し、タイムラプス録画して長時間の像移動を追跡した。撮像面には1mmピッチの格子模様を重ねられており像位置の読み出しに供された。当初は、像移動の原因についての手掛かりを見出すべく、電源のON/OFF、油圧のON/OFF、トラッキングのON/OFF等、種々の条件下での測定が反復された。図4は長時間測定の一例で、次の4区分から成る延べ42時間以上の連続観測である。

- (1) [-1h~16.3h]主電源(VMB)ONにて、回折格子を0次角に設定駆動(Grating Preset)後、直ちに格子駆動回路(VGR)を遮断して主電源を切り、静穏状態の経過観察。分光筒はテスト開始の百時間以上前より静止状態を継続。
 - (2) [16.3h~20.3h]主電源・望遠鏡油圧・同駆動電源をONとし、作業台保守作業の為、望遠鏡を作業位置1~7にフリセット、作業台昇降。
 - (3) [20.3h~29.0h]分光器油圧もONとする。21.6hより2.2時間、望遠鏡のみ通常観測運転の後、格納位置へ戻す。その後も両油圧ONのまま経過観察。
 - (4) [29.0h~42.5h]油圧、電源を全てOFFとして経過観察。
- 上例を始めとする一連の実態調査の過程で明らかになったスアクトル像

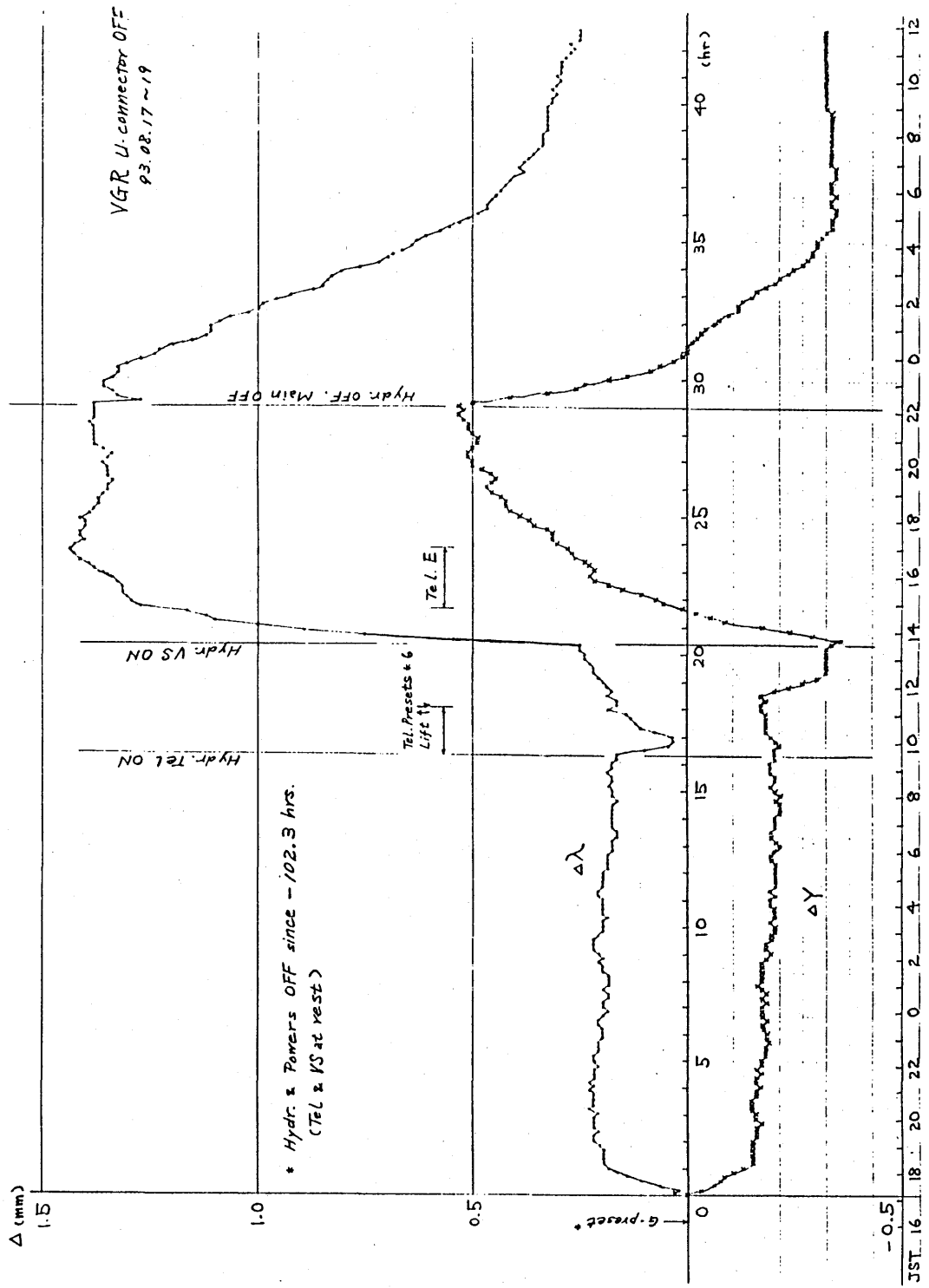


図 4 スペクトル像位置ずれの長時間測定例

の微振動や像移動の特徴を列挙しておく、

- 1) 主電源ONの電気ショックで、像野は堅い短周期の微振動(ビビリ)を起すが、振幅 $\pm 0.2\text{mm}$ 、継続時間数秒である。
- 2) 望遠鏡油圧ONでもビビリは起る。
- 3) VS油圧ONにて像野は激しく2回ビビルが、これは油が底部油圧パトリックに達した時と観測室のダイヤルヘッドに達した時に対応する。振幅は両者共 $\pm 0.2\text{mm}$ で、継続時間は後者の方が稍長く、10秒程度である。
- 4) VS油圧ON/OFFを問わず、観測台テーブル面のクッピックでビビル。
- 5) 観測室床のクッピックでは、油圧ONではビビリは認められないが、VS筒が沈降している状態ではテーブルクッピック同様のビビリがある。即ち、VS筒は、沈降時には床に凭れ掛かり、これと剛体系を成していると見做されるが、浮游時には、少なくともスラスト成分は、十分滑らかに「浮いて」いる。
- 6) 押しボタンによる波長移動では、 ΔY 移動は認められない。
- 7) 望遠鏡フリットや作業台の昇降は、十分に塔屋を揺すり得ると考えられるが、これらと直接対応付けられるようなビビリや像移動の「始点」は認められない。
- 8) 塔底にある排水ピットの揚水ポンプは、停止時に管内落下水による強い水撃を伴う事があるが、VS油圧OFFの沈降状態ですら、これによると思われるビビリは認められていない。
- 9) VS油圧ON直後のVS筒のフリットによる高速回転でもビビリが観測されるが、フリット完了直後の位置ずれは認め難い。但し、長時間像移動は、VS油圧ONを始点として急速に進行する。
- 10) VS筒の回転により、長時間像移動のパターンは変調される。即ち、像移動はポジションインデントである。
- 11) VS油圧OFFと共に、ONによって励起された偏移は、長い緩和時間で次第に減少し、ほぼ元の静穏状態に復帰する。
- 12) 長時間偏移のパターンは概ね指数関数的で、急速な初期移動と緩やかな後期継続移動から成る。
- 13) 静穏状態での長時間変化は、高々 $0.05\text{mm}/15\text{時間}$ 程度の直線的偏移である。

3. 機械的要因による移動可能性

まず順序として、VS構成要素の機械的変移により、観測されるようなスペクトル像の移動が起こり得るかどうかを検討する。

図4の初相の像移動は、格子のフリット後の弛緩状態とも考えられるが、それ以後の像移動は、電気回路(VGR)が遮断されているので、格子の電氣的な回転に起因するものではない。入射スリットないし受光

部の動きであるとするれば、観測結果通りの1mm以上の平面移動となり、有り得ない。分光筒の偏荷重による長時間撓みとすれば、建設当初以来、偏荷重方向が不変で、休止時の格納定位置も同一、更に、観測(浮動)時間より格納位置滞在時間の方が数倍長く、変形は1方向へ不可逆的に進行する永久変形と考えられる事から、当面の問題の原因たり得ない。残余の要素は、リメータ鏡・カメラ鏡及び回折格子の3点のみで、以下にその構成を繙きながら、これらの機械的移動可能性を検討する。

3-1. リメータ鏡

リメータ鏡架台(図5)には基本的に可動部はなく、VS筒に固定されていると考えて良い。425x284x80tの矩形鏡は底面4点、側面5点で支持され、且つ、側面も平面支持である為、可動性は極めて低い。更に、設置位置がVS筒底部球座直上の芯軸上にある為、油圧の脈動効果を含む外部擾乱の影響も受け難く、機械的に安定であると考えて良い。

3-2. カメラ鏡

560φx90tのカメラ鏡は、底面6点、側面3点でほぼ水平に支持され、セルに対しては十分安定である(図6)。セルをその芯軸上で上下する合焦機構部の駆動スピンドルは僅か15φだが、スラスト軸は80φ以上あり、これを100x2の2段積みスラスト軸受けで支持している。もしこの部分で7.4°の傾きを作るとするならば、軸受けの上下端に±3.6μmの揺動可能性が必要となり、精密級鋼球の精度から推して、まず有り得ない。また油圧の突き上げや脈動の衝撃を受けても、鏡が十分重いのので急速に減衰し、長時間に亘り徐々に一方向に偏移し、油圧OFFと共に旧状に復するという長期移動の説明は難しい。

3-3. 回折格子部

回折格子部は、格子本体がVS筒頂部で「宙吊り」にされている事、図3に見られる通り、外部直近には振動源・熱源たり得る3点の油圧ラディアルヘッドがあり、タック外周の奥1/3部は局所熱源たるプリント基板ラック(VSR1-4)に囲まれている事から、VS構成要素中で最も不安要因の多い部位である。回折格子本体は320x420x74t、22kgで、背面4点、溝に平行な側面3点の計7点で双球の垂鈴型吊り金具により格子枠に吊るされて荷重支持され、溝に直交する側面4点の調整当りで回転軸と溝との平行を確保している(図7-a)。格子枠は、格子角回転用の半円筒形フォーク先端部を形成する格子着脱用レール沿いに押し込まれ、その最奥部の定位置で4点の凹部に嵌り込み、フォーク両端部に固定された4本のスプリング押え爪で斜め上方から押さえ込む形で凹部からの

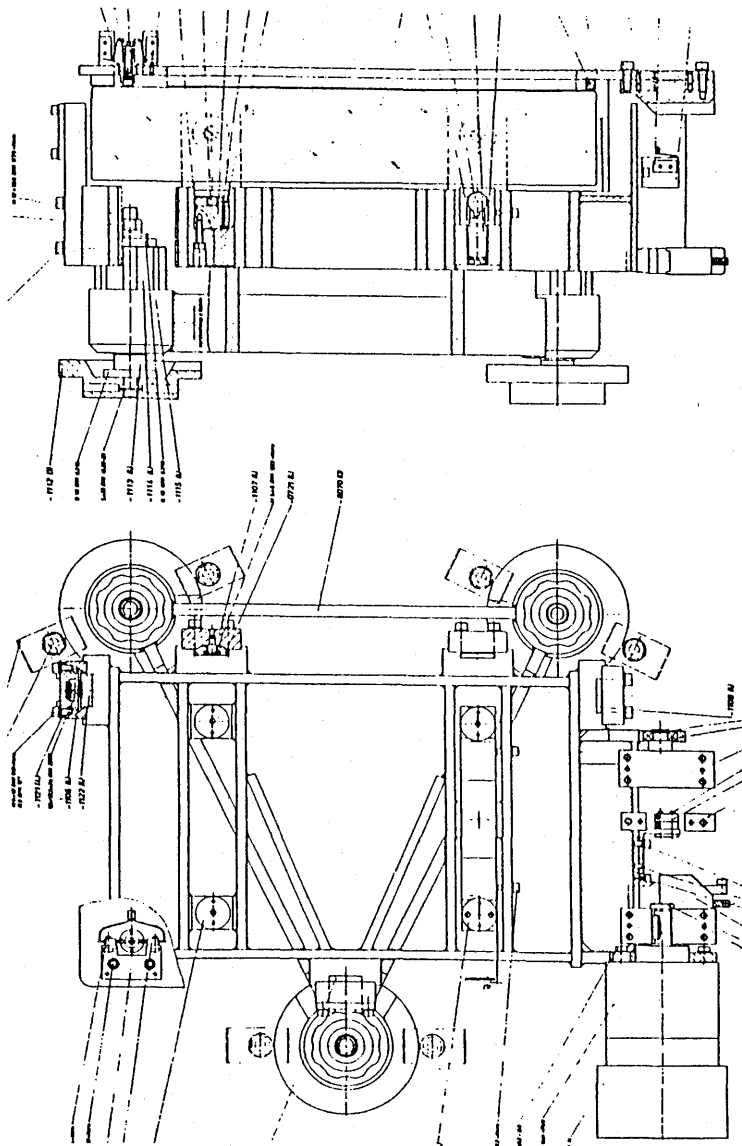


図5 リレー鏡架台

鏡は底面4点、側面5点で保持される。

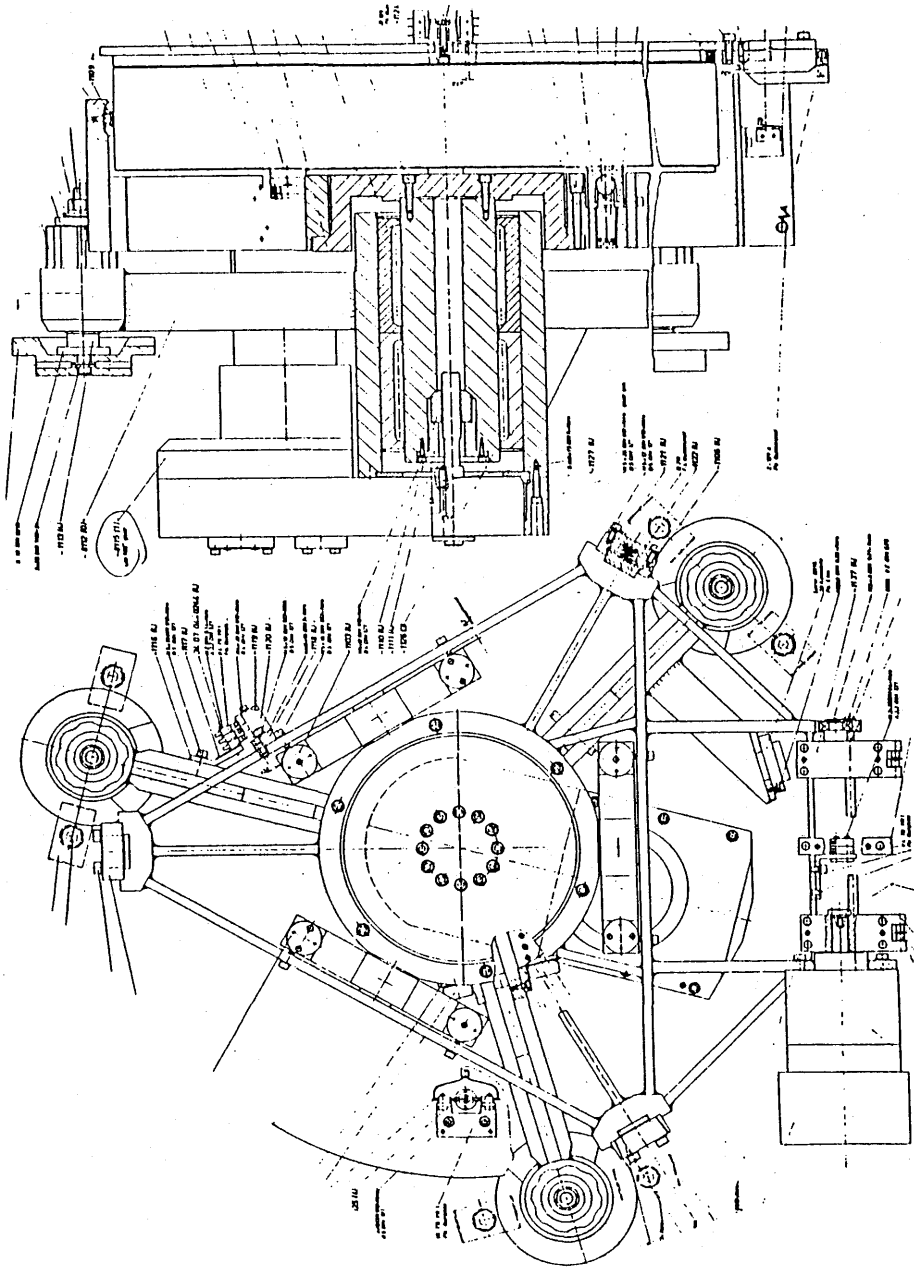


図6 カメラ鏡架台

鏡は底面3対6点、側面3点で支持。その中央下部に合焦用昇降駆動装置がある。

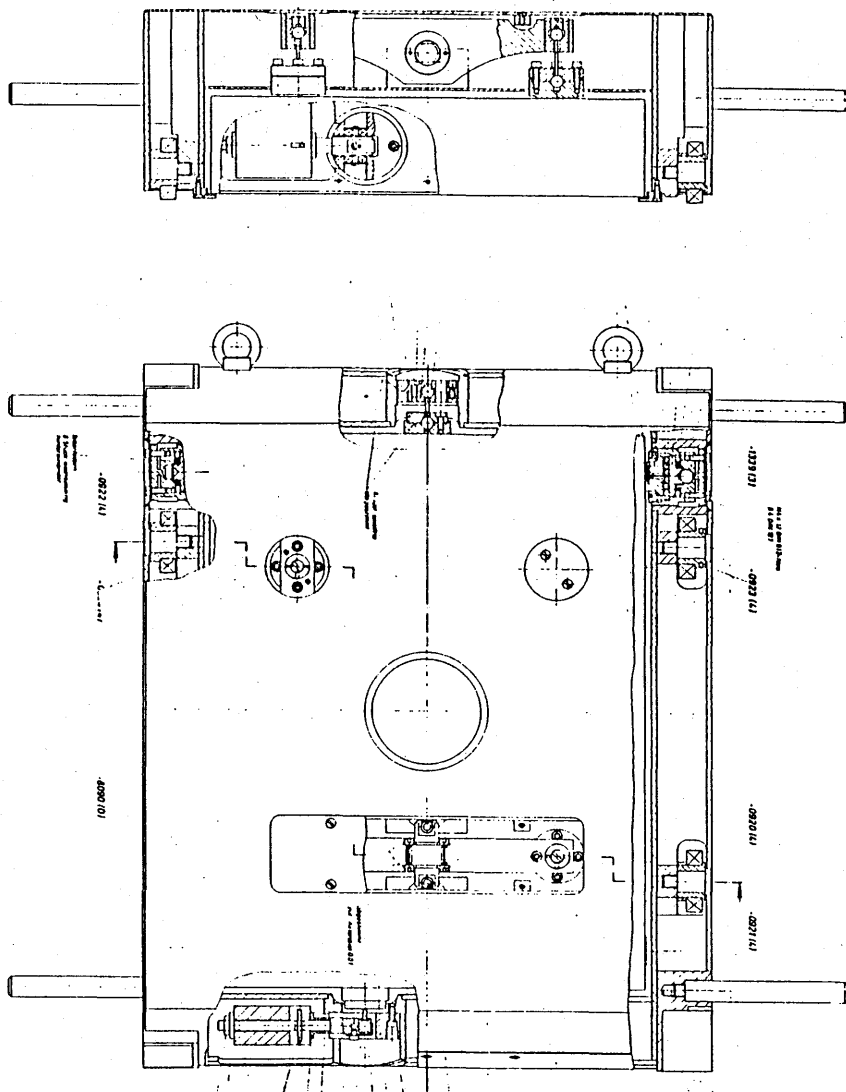


図 7-a 回折格子の部

回折格子は背面4点、溝に平行な側面3点で格子枠に吊るされている。図の左右側面各2点の押さえは溝の傾き調整用。格子前面の4個の爪は脱落防止用で格子とは非接触。4本の突起棒は搬出入作業用把手で組込時には外される。

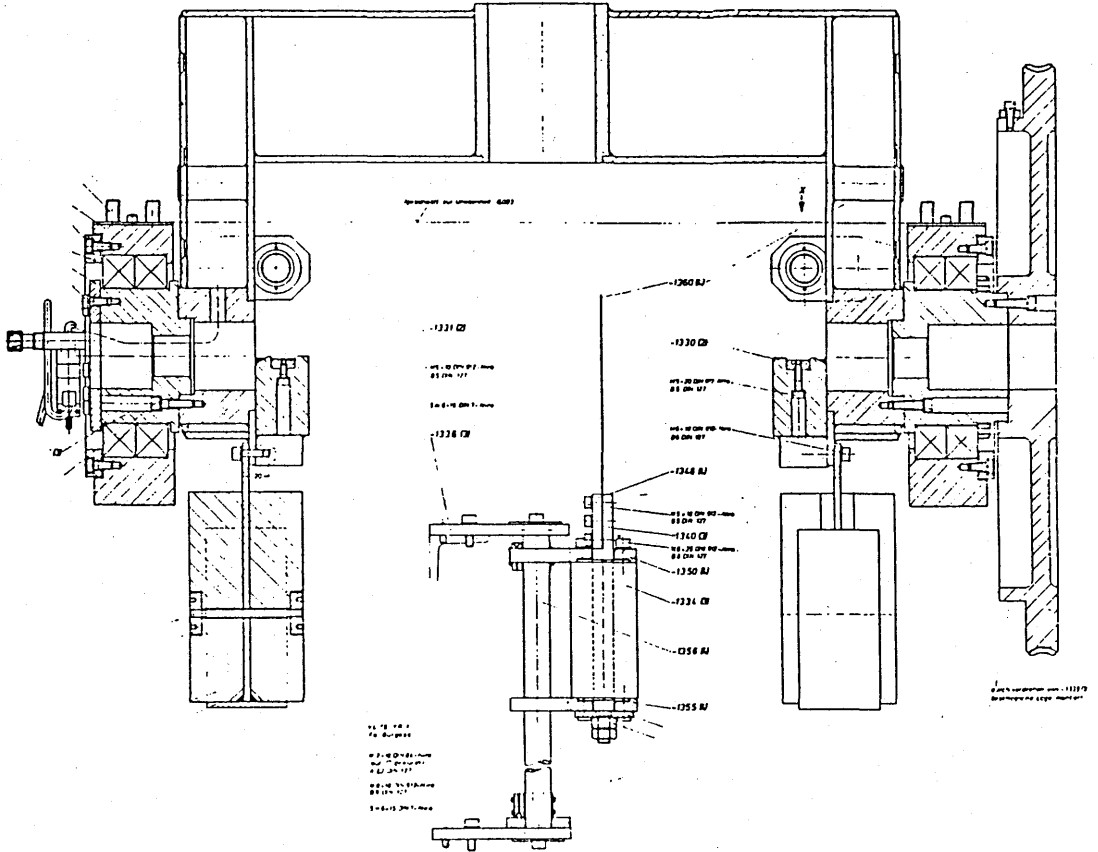


図 7-b 回折格子駆動フォーク部

フォーク先端の矩形突起部が格子脱着用レールを兼ねる格子枠台座。その上方に1対の格子枠押さえ爪が見える。フォーク先端から下方に伸びるのはカウンターウェイト。

逃げを殺している(図7-b)。駆動ウォームは筒内のテラスに動力系と共に固定されており、フォークに固定されたホイールと噛み合っている。噛み合せの遊びは振れ止用ガイドレール沿いに昇降する重錘をホイールに直付けされたワイヤの先端に吊り下げて殺している。この構造から格子部に考えられる可動部・可撓部として、(1)重錘の振動によるホイールの遊び。ピッチ径400φのホイールに±7μmの遊びがあれば7.4°の傾きとなる。(2)ウォームの軸方向7μmのずれでも同じ結果となる。但し、これらはΔλに寄与し得るのみである事、精密歯車誤差としては過大に過ぎる事、重錘のハウスのよるならばもっと応答が速いと思われる事等から観測事実の説明困難である。(3)格子枠のレール上での動き。これはVS筒の油圧ONに伴う膜厚分の最大傾き1.5°より遙かに大きな傾きを格子に与え得る。即ち、何らかの力により格子枠がレール方向に強く押されると、押え爪スプリングの作動限界内で格子枠全体がレール沿いに縦移動し、レールの凹みに落ち込んでいた4箇のローラーが凹斜面上をずり上がる。ローラー外径は50mmしか無いので、僅かのずれでも大きな傾きを作り得る。ΔYずれに関しては、4本の押え爪の些細な圧力不均等から格子枠全体がレールに対し僅かに捻れると考えれば説明可能である。これは、Δλずれがほぼ落ち着いた時点でΔYずれが顕著になる観測例をも説明し得るものでレール凹部上での格子枠の捻りの減少と共により良い当たり面の方向へローラーが横滑りしΔYずれの解消に向かって、或いは左右レールの僅かなバール違いと荷重不均等によっては、ΔYずれを助長する方向へ格子枠全体が横ずれすると考えれば良い。この考えでは、Δλ・ΔY移動共、先ず大きな外力により大きな初期ずれが起こり、時間と共に単調減少する。しかし、4本の押え爪スプリングの予圧が十分高く、またレールの奥側一對と手前側一對との予圧を違えてあるので、中途半端な準安定点は存在せず、格子枠はしっかり凹部に押え込まれていると思われる。これは、大角度のフリットを正逆何れかの方向から繰り返しても、それぞれの終了位置再現性が極めて高い事からも裏付けられる。(4)吊り下げロッドの撓み。格子本体は図7-aに見た通り、7箇の亜鈴型吊り金具により格子枠と接続されているが、この内、背面一對と片側側面の3点は固定ヒンジ、背面のもう1対はリング型バールで連結された可動ヒンジ、対向側面2点はそれぞれがカンチバール構成の可動ヒンジである。この構成は格子の姿勢変更や熱変形への対応を十分考慮したものであるが、亜鈴中央のロッド部に注目すると、両端の亜鈴鋼球(Niro)は9φ、中心距離は部位により、20/24/36の3種で、結合ロッド(X12CrMoS17)の太さは2.5φである。テストされた水平に近い格子角は、伸縮・撓みに対する最大負荷の方向でもあり、もしこのロッドの弾性変形が像移動の原因とするならば、Δλ、ΔYのいずれであれ、僅かの対称性からのずれと解釈出来るし、最初に大きな外力を与えなくとも、適当な「刺激」で格子本

体が格子枠の内部で揺れ動くと考えられる。但し、ロッド材料が高剛性・短尺である事から、例えば振動が励起されたとしても小振幅・短周期で急速に減衰すると考えられる。

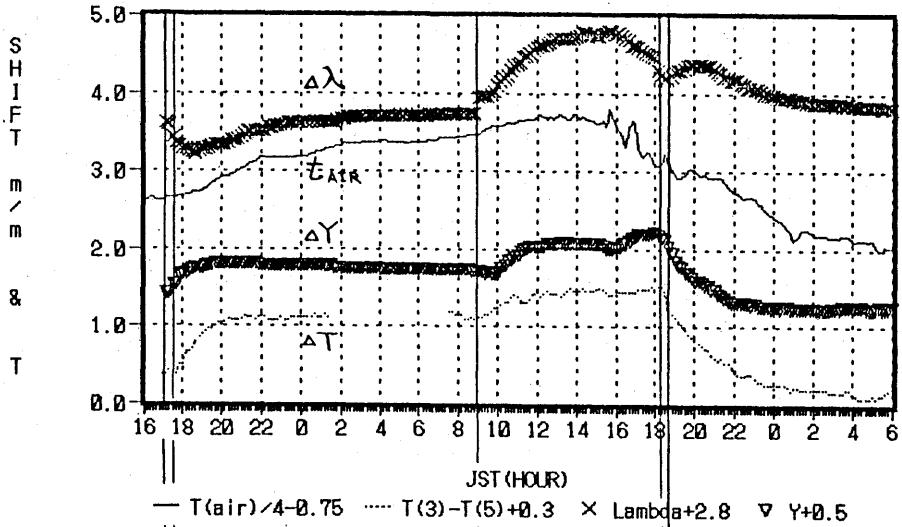
以上の考察から、いずれの内部素子も、機械的には高々ビビリを起し得ても、長時間像移動の原因となるとは考え難い。

4. 熱的要因による移動可能性

前節の考察から、長期的像移動が機械的原因によるもので無さそうであるとすれば、熱影響の可能性が高くなる。実際、前記の長期変動の特徴は、一定発熱量の「熱源」ONに伴う急速加熱、周囲温度との平衡化、熱源OFF後の拡散による徐冷と言う「熱履歴」を想起させる。この観点から、もう1度、VSの構造に立ち返ると、(1)油圧バルブ、(2)エレクトロクランク(VSR1-4)、が主要熱源と考えられる。即ち、(1)VS油圧OFFでも、主電源(VMB)ONでVSRsに火が入り加熱が始まる。(2)VS油圧ONの時には必然的にVMBもON状態なので、主要熱源は一挙に総動員され急加熱が進行する。ここで「加熱」を「像移動」と読み替えば、まず観測された傾向が定性的に説明される。読み変えの妥当性に関しては、1mmの像ずれを作るには直径1300mmのVS筒の回折格子バルブでの水平断面に $\pm 23\mu\text{m}$ のバルブ違いがあればよく、これを熱膨脹とするならば鏡面と回折格子との縦距離13.4m、鋼鉄の線膨脹率 6.7×10^{-6} として、筒の両側面に平均的に 0.5°C の温度差があれば良い。更にVS筒の熱可撓性が十分高く、回折格子バルブの平面に対しVS筒鏡座底面の方が傾くとすれば、結果的に傾き角は4倍に増巾されるので、 1.4° の傾き、即ち鏡座底面の直径両端での基準面からの変位 $\pm 5.8\mu\text{m}$ で1mmの像移動となる。従ってVS筒底部近傍に局所的に熱不均衡があるだけで観測される程度の像移動は容易に起こり得る。

これを検証する為に、まずゲルマニウムトランジスタを利用した多点温度記録装置を作成し、像移動と分光器各所の温度の同時観測を試みた。VS筒を格納定位置、即ち、分光器主断面(格子法線を含む分散平面)に対し油圧バルブが対称位置に配される状態で、油圧ON/OFFにて測定した所、VS筒に抱かせたエレクトロクランク内部の昇温がクランク毎に大きく異なり、これが ΔY 移動の有力な原因たり得る事が確認された。図8-aの下図は、VSRs最奥部の真空筒外壁や観測台外壁の要所で測定された温度であるが、この内、主断面に対し対称位置にあるT(3)とT(5)との温度差が ΔY 移動量と強い正の相関を示す事が上図から明瞭に読み取れる。ここに $\Delta Y/\Delta T$ -勾配は、VSRsのみをONとした初期昇温時、油圧もONとした直後、両者共OFFとした冷却時で異なり、

US Spectral Image Shifts
1993.SEP.17-19

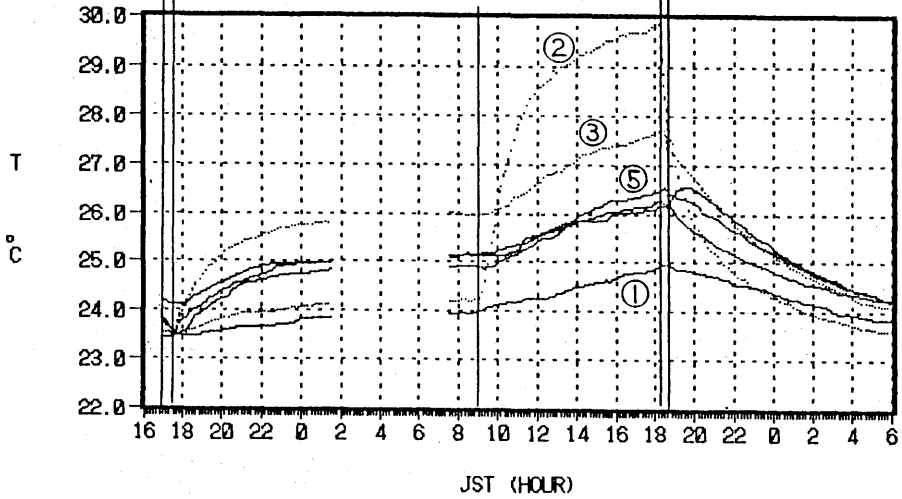


— $T(\text{air})/4 - 0.75$ $T(3) - T(5) + 0.3$ × $\text{Lambda} + 2.8$ ▽ $\gamma + 0.5$

← VSR ON 油圧 ON →

← 給排気 ON →

US TUBE TEMPERATURES
1993.SEP.17 - 19



— BROWN(4) BLUE(3) GREEN(2) -- PURPLE(6) --- RED(1) BLACK(5)

図 8 - a 像移動とVSRs庫内・周辺温度(1)

上図の縦軸は、見易くする為、適宜にワセトされている。
下図の温度測定点の概略位置は、図 3 参照。

US Spectral Image Shifts
1993.SEP.20-22

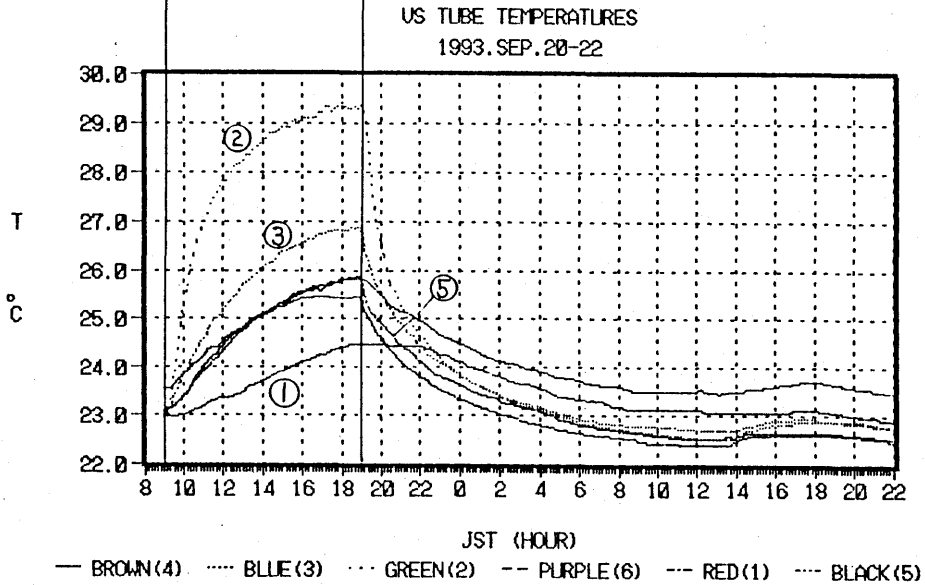
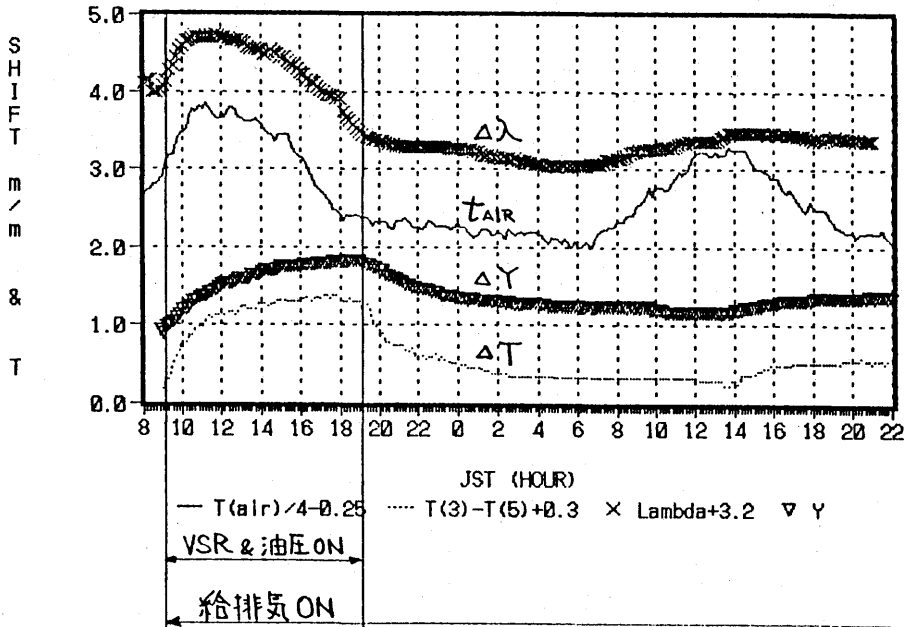


図 8 - b 像移動とVSRs庫内・周辺温度(2)

それぞれ、 $0.4\text{mm}/^\circ\text{C}$ 、 $1.5\text{mm}/^\circ\text{C}$ 、 $0.6\text{mm}/^\circ\text{C}$ であった。これは、追加熱源の油圧ONにより、VSRsの外部への放熱効果が更に悪化し、真空筒側への熱拡散が急増する為と考えられたが、油圧とVSRsを同時にON/OFFした同様過程の追試例(図8-b)でも、 $\Delta Y/\Delta T$ -勾配はON直後の $0.6\text{mm}/^\circ\text{C}$ 、その後の $1.6\text{mm}/^\circ\text{C}$ 、冷却過程の $0.9\text{mm}/^\circ\text{C}$ の3相に分かれた。これは、昇温初期の伝熱遅延と2つの熱源の昇温率が異なる事によるものと考えられる。

一方、油圧ONに伴う $\Delta \lambda$ の急増に関しては、筒頂部及び筒底部での非対称加熱を考えれば良い。VS筒格納定位置では、筒頂部真空筒のスリット側半面がVSRsの電熱と油圧ノットからの局所加熱による暖半面、対するカメラノット側半面が観測室温に開放された冷半面となる。筒底部でも、熱源の球状ノットが主断面内にあるので、これに近いカメラ側側(=スリット側)が暖部、カメラ側が冷部である。従って、この位置でVS筒が一様変形するとすれば、大局的にスリット側側面を凸とする弓形変形となり、スポット像が長波長側にシフトすると思われる。但し、熱源が長大な分光筒の筒頂部と筒底部のみに偏在している為、鏡座底面近傍では、節点の球状ノット中心からの距離が 610mm と小さいが、局所的に撓みの方向を一にする偏荷重方向に撓み、筒頂部でも、熱源分布が広い事、節点からの距離が長く、且つ、軸方向に移動可能である事から、同一方向に傾くという複雑な変形を起すかも知れない。また $\Delta \lambda$ の長時間変動では、ラック内温度との相関が ΔY の場合程明瞭でなく、油圧OFFの状態からの見当としては、外気温依存性も無視できず、程度の差はあれ、油圧ONの状態でも同様と考えられる。図8の例でも、油圧ONと共に $\Delta \lambda$ 移動は急増し、ほぼ平衡に達した後は午後の急速な外気温の降下に呼応して、 $\Delta \lambda$ も大きく減少している。ここで、外気温は、先述の塔内給排気用として導入される外気によるもので、通常、機器の運転開始直前に起動される。VS観測室の室温、塔内地下5階の「静穏」室温はいずれも通年 $18\sim 20^\circ\text{C}$ であるが、外気温は、夏期日中で $20\pm 5^\circ\text{C}$ 、冬期には最高でも 10°C を越える事は無く、殆どの時期を通じ室温以下である。外気温が 8°C 以下になると、機器保全の為導入外気は温水コイル型熱交換器により加熱されて塔内に導かれるが、積極的温度制御は為されていない。

これら熱源3者の寄与の程度を知る為、VS筒の格納定位置で、VSRsと地階との気密を破った状態で、油圧・VSRsのON/OFF、塔内給排気ON/OFFの組合せを変えて測定した結果、以下が明かとなった。

- 1) 塔内給排気のみONとした場合は、先述の通り、緩やかに外気温変動に追随する。
- 2) VSRs ON、油圧OFFの場合の移動量は、塔内給排気をONにする事

により半減される。これは、塔内給排気無しでは、VSR2からの排気が短絡的にVSR4の吸気口へ還流し、VSRsからの排熱効率が十分上がらないのに対し、塔内給排気ONでは、地階各室への冷氣導入と攪拌が利いて、VSRsの昇温が抑制される為と考えられる。

- 3) 油圧OFFでは、ラテイルハット部でのスラスト摺動が滑らかでない為、撓みのずり上がりと思われる段付移動が認められる。
- 4) 油圧ON時には、VSRs・塔内給排気共にONとする必要があるが、外気温変動の小さい時を見計らって、VSRs内部のプリント基板ラックを筒外上方に引き出し、油圧ON+塔内給排気ONの近似とした。タコ油温の上昇は基本的には、油圧ポンプによる急速な加熱と、タコ内の大量の油の比較的緩やかな昇温の2成分からなるが、ON直後の単純汲出過程、約20分後から始まる望遠鏡還流油の混合開始時等には複雑に変動する。またラテイルハットでの吐出油温はタコ内油温より約7℃高く、底部ハアリク部では密閉回路の為、直接測定されていないが、流量・圧力から見て更に高温となる。Δλは大局的にはタコ油温上昇に遅延追従していると見られるが、VSRs扉の開放・給排気ON等の介在要因の影響が大きく、油温との対応は、VSRs単体の場合のように明確でない。

尚、この状態でのΔYずれは極めて小さく、先述のΔYずれの主要因がVSRsの温度不均衡によるものである事を裏付けている。

以上の変動パターンと3熱源の相対的寄与の程度は、図9の簡単なモデルで定性的に良く表わされる。縦軸は任意スケールで、図8との比較から小ファクターの違いを許して1目盛りがΔλの0.5mm、VSRs庫内の等価温度差として2℃の程度である。また横軸はON後の経過時間で、ON継続時間約6時間程度の状況を示している。同図では外気温一定の1次近似であるが、現実には外気温バルと変動により大きく変調される。更に、

- 5) 底部球状ハアリクからの加熱を、鏡座底面近傍の外周帯6点の壁面温度で実測した所、油圧ON後ほぼ直線的に昇温し、10時間後にはハアリクに最近のカメラ側で+2.4℃、最遠のカメラ側で+1.1℃、これらより±60°隔てたカメラ側で+1.8℃、カメラ側で+1.2℃で、主断面に関する対称性は極めて良かった。これと前項によるΔλずれとの比較から、鏡座底面でも傾きの起っている事はまず間違いないが、Δλずれやタコ油温が数時間以内にサチュレした後、壁面温度がなお上昇を続けた理由、筒頂部の傾きとの弁別等に関し、更に調査・検討が必要である。
- 6) ラテイルハアリクでは、油圧ON後90分でハット吐出油温は当初室温より+9.0℃されたが、直近の摺動面温度の上昇は+3.0℃、これより±60°隔てた中間点での温度上昇は+0.5℃以下であった。即ち、摺動部の下端10mmは常に油溝内の油に浸っているが、油溝内油量

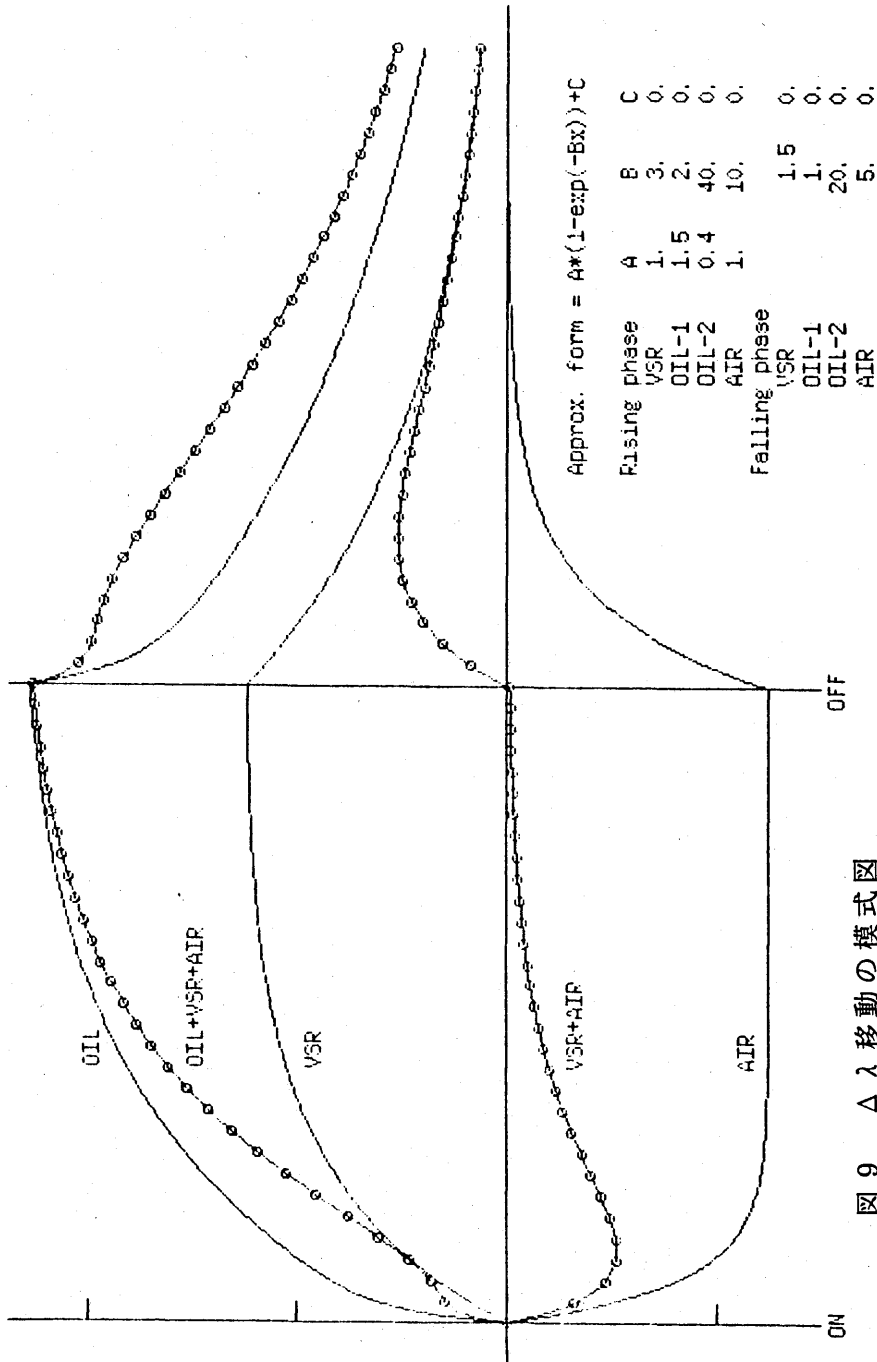


図9 Δλ移動の模式図

VSR・油圧(OIL)・塔内給排気(AIR)の温度変化と、それぞれのΔλ移動への相対的寄与の程度を表す。

に比し吐出油量が少ないので、加熱はハット近傍のみで極めてスポット的である。従って、例えVSRsの内部温度を主断面に関し対称に抑制出来たとしても、VS筒を回転すればハットによる非対称加熱が利いて、新しい位置での平衡に達する迄の間、 Δx 、 ΔY 共にツトする。また、日周運動による像野巡回補償回転でもスペクトル像位置は緩やかに変動する。

以上を通じての長期に亘る反復測定の結果、スペクトル像の長期移動は、熱的原因による分光筒筒頂部及び底部での熱変形によるものと結論された。

5. 熱対策

前節の主要3熱源は何れも現実的に「除去」不能の基本構成要素である。従って、当面措置として対症療法的に、各部の寄与の「軽減」を図る事に努め、以下の対策を施した。

まずVSRsに関しては、庫内温度の上昇抑制とラック相互間の温度差の減少を目標に、従来、地階とは絶縁され観測室温により自然空冷されていた換気系を、地階室温での強制空冷方式に変更した。即ち、VSR2の予備ハッチを開放して地階へ向けた排気ファンを設置し、VSR4のケブルハッチを持ち上げて補償給気口とし、VSRs内部が地階空気の差圧による自然流入と、暖気の強制排気により換気されるようにした。更に、換気効率を高める為、VSR1/3にそれぞれ独立に4本の給排気ダクトと計5箇の内部補助ファンを設置した。また発熱量の多い1部電源基板を節電タイプの基板に変更した。これにより観測室・地下1階・VSRs庫内の相互温度差は大幅に減少出来たが、ラック毎に基板数・構成が異なり、発熱量が同一でない事、特にVSR1には真空配管等有り空気流通スペースが極めて狭く、構造的にも対称性に欠ける事等からなお等温化には至り得ない。真空筒内部にあり主電源ONと共に常時ONとなる格子回転角度読み出し用エンコーダからも若干の異方加熱の寄与があると思われる。

一方、作動油の吐出温度を当該室温程度以下に下げる事が出来れば、追加加熱による温度調整は比較的容易なので、吐出口温度をほぼ室温に調整・維持する事により、油温による局所加熱の問題は回避される。しかし、望遠鏡用60bar、分光器用90barの高圧なので、加圧後の配管途中に作動油冷却装置を増設する事は設備的に容易でなく、次善の策として、油圧パッキンのタック内の油を冷やす方法を試みた。油圧タック容量250ℓに対し、望遠鏡・分光器への循環油量は配管部を含めて約32ℓ、循環率は4.8ℓ/minなので、タック内の油は約45分で入れ替わる。従って7.4kWの加圧ポンプに対しこれより十分高い熱効率

の熱交換器でタツ内の「滞留」油を十分冷やす事でも効率の悪いのは否めないまでも相当の結果が得られると期待された。そこで、狭いタツ内の内部循環を阻害せず、且つ、高い循環率でタツ内を冷却出来る外置型のフィンプレート式水冷熱交換器2台をタツ前面に新設し、熱交換能力を支配する冷却水温と流量の強化の為の大型の冷水機も導入された。また低温の滞留油の総量を増す為、180ℓの補助タツも併設した。現在の設定では冷却回路の循環油量14.4ℓ/min、6℃の冷却水の流量35ℓ/minで、3000kcal/hの熱交換率を得ている。更に、冷水機の余力限界内で、油タツ外壁及び1部高圧配管の水冷、ポンプモーターの冷風空冷等の補助冷却も行っている。但し最も流量の大きな底部球状バリアックが地下5階の油タツ直近にあり加熱された油が冷却されることなく短絡的に還流し滞留油の蓄冷効果を妨げる事、望遠鏡からの還流油は塔頂部で外気冷却される為、外気温変動に極めて敏感に反応する事等が油温保持を困難にしている。また夏期高湿時の冷却水回路の結露対策も厄介な問題である。

塔内給排気系統に関しては既設給排気ファンの容量とダクト太さに制約されつつも、観測室・地下階間の気密を破った事に伴う圧力バランスの再設定、大型冷水機導入に伴う発熱量の増大等に対処すべく、分配風量・ダクト開度の再調整を図った。しかし、現況に対する絶対風量の不足は否めず、盛夏には地下階の昇温が避け難い。また、各室の内部攪拌も十分でなく、分光筒の風当り面と裏半面との表面温度差が解消されていない事、VSRs排気口から給気口への短絡的還流等も解決さるべき問題点である。

以上の対策を施した結果の現状は図10で、立上げ直後の大移動時間の短縮やその後の変動巾の減少等の点で当初状態より改善された。同図は全てを斉時にONとした例であるが、油タツ冷却回路を事前に「予冷」すれば初期変動は更に圧縮される。また、ずれの方向が対策を施す前と逆センスになっている事から、設定水温や換気風量を外気温に応じてきめ細かく調節すれば更に良い結果が得られるはずである。とは言え、像の安定性と言う観点からはまだまだ不十分で、当面、スペクトルの長時間連続観測やその整約の際には十分の注意が必要である。

6. まとめと今後の課題

飛騨天文台ドーム太陽望遠鏡の垂直式14m真空分光器で、緩やかなスペクトル像の移動が観測された。この原因に関し、種々の調査・検討を重ねた結果、最大の要因は、鋼鉄製分光筒自体の熱膨脹による

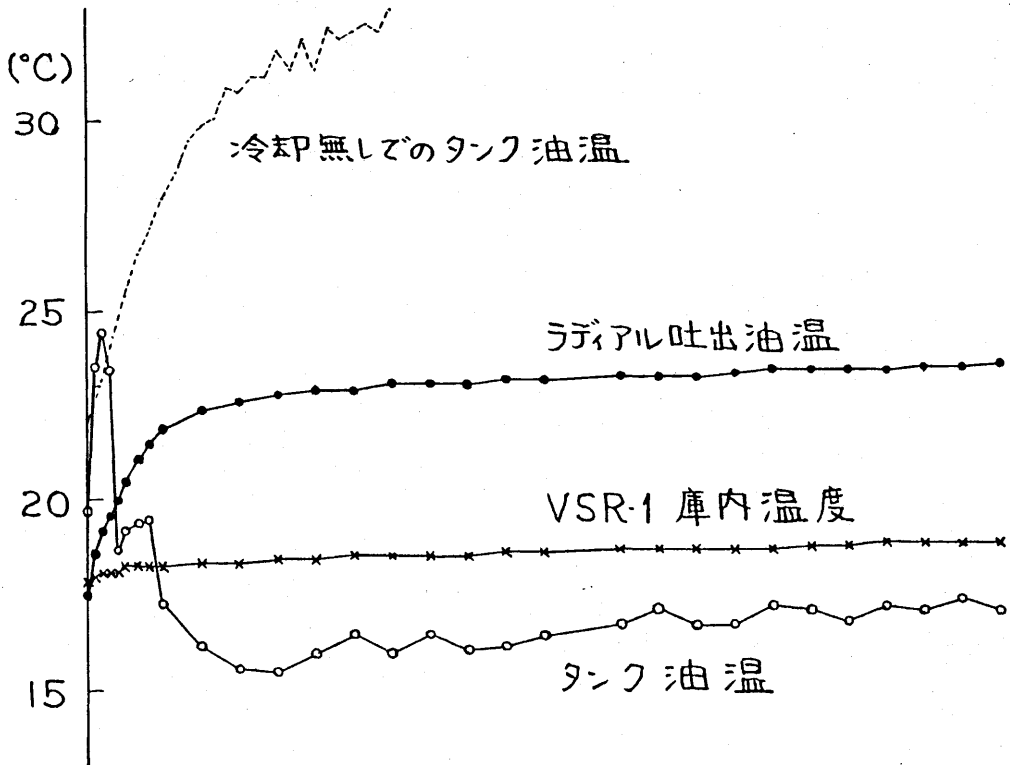
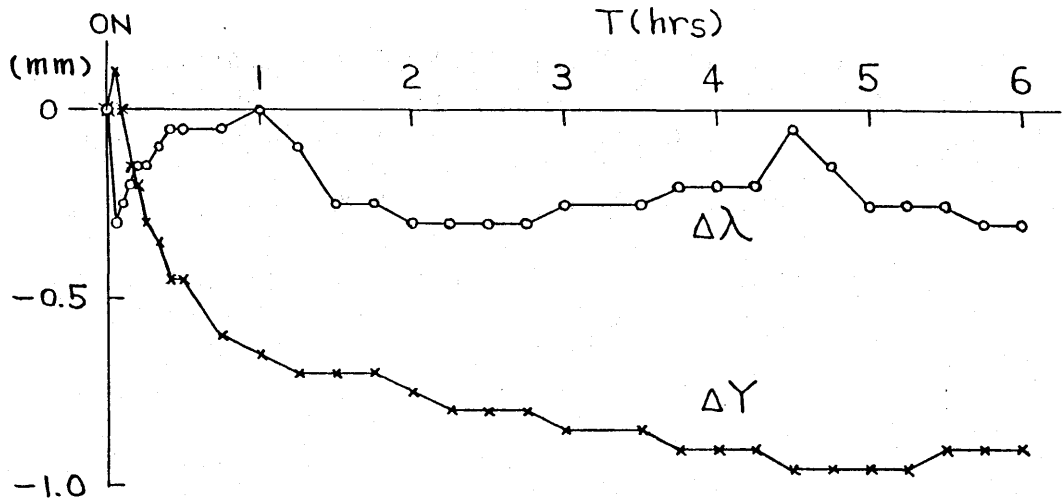


図 10 像移動(上)と油温変化の現状(下)

塔内給排気・VSRs・油圧・冷水器を同時にONした時の変化。油温が安定した後の $\Delta\lambda$ 移動は可成小さくなったが、 $\Delta\gamma$ には尚改善の余地がある。当初状態(図4.8)とずれの方向が逆で、やや補正過剰。

不等変形で、熱源は、(1) 高温の油圧作動油、(2) 制御エレクトロニクス、(3) 室温及び外気温で、不等となる理由は、(1) 油圧吐出口での局所加熱、(2) 分光筒の非対称形状、(3) 電気系統の偏在、(4) 塔内空気の循環不良にあることが判明した。これに基づき、作動油の冷却、エレクトロニクス内部の熱放散性の向上等の対策を施し可成の改善を見たが、これ以上の熱制御には、部分的には応答の早いヒートパイプで高速の熱循環回路を形成し等温化を図る等の対策も考えられるが、本質的には単に個々の要素のみならず、地下5階分約800m³の内部全体に亘る温度差 0.3°C以下の恒温化に相当する本格対策が必要で、当該環境下では、膨大な設備投資が要求される。従って、更なる精度向上には、むしろ適切な「回避策」を講ずる方が、現実的に有効と思われる。例えばカメラポートを十字動架台化し、視野内の適当に細い1本のスケール線とスリット面に張られた1本のアラインの像とで作られる十字線像をモニターし、その位置ずれをリアルタイムで架台にフィードバックするような撮像系の追従移動による能動的補償を考える方がはるかに得策である。2軸の内、 Δ 入は、VGR-駆動の最小単位が軸回転角0.1"なので、レスポンスが十分速ければ、これに戻すのが良いかも知れない。

何れの方策によってであれ、世界的にも稀有の超大型1枚格子を備えた高分散分光器がその性能を最大限に発揮出来るよう、不断の改善を継続する事は、その保有者に課せられた責務であろう。また今回の事例を顧みて、今後の大型分光器設計に際しては、(1) 制御エレクトロニクスのみならず熱源となる付帯機器を、可能な限り分光器本体から遠ざけて熱隔離する事、(2) 放熱効果を十分検討し、不用意な非対称構造を避ける事、(3) 油圧装置を使用する場合は、最も効率良く温度制御の可能な高圧1次回路での熱除去装置を併設する事、(4) 予想される観測継続時間より十分長い伝熱遅延を実現できる断熱処理を施す事等の熱的配慮が、光学的設計と不可分に重要である事が、周知の事ながら再認識された。

最後に、本調査研究に於いて、カルツァイス株式会社の積極的協力を得たことを記して、謝意を表したい。