

ドーム内の熱環境の調査II

岡野浩平¹、尾久土正己²、定金晃三¹

1)大阪教育大学

2)兵庫県立西はりま天文台

Thermal Condition in the Observing Room II

Kohei OKANO¹, Masami OKYUDO², and KOZO SADAKANE¹

1)Astronomical Institute, Osaka-Kyoiku University, Kashiwara-shi, Osaka 582

2)Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-53

Abstract

We are performing measurements of thermal conditions in the observing room and in the telescope tube of Nishi-Harima Astronomical Observatory since February, 1991, extending over one year. Measurements are carried out automatically using thermister devices and a personal computer system. We find that the thermal shield by the dome and the telescope tube results in a degradation of seeing except in summer. In order to overcome the degradation of image, we began air ventilation in the observing room all the day. Consequently the thermal conditions and the seeing have been obviously improved.

Key words: Dome; Telescope; Thermal condition; Seeing

1. はじめに

近年、観測天文学の分野では、より高精度な観測をするために、望遠鏡の大型化、観測装置の高性能化が進められてきた。その中でも特に、CCDカメラ等の受光素子の性能の向上にはめざましいものがあり、これまでの写真乾板による観測にとってかわって、観測の主流となった。おかげで、従来の中小型の望遠鏡でも、高性能な観測装置を導入することによって、学問的な研究にたえうる精度をもつ観測ができるようになった。

このように観測装置の発展には、目を見張るものがあり天体観測者の関心を集めたが、気象条件などの外的要因や特に観測ド

ーム内の環境などには、あまり関心を持たれていなかったように思われる。観測環境の問題を具体的に述べると次のようなものがある。例えば、観測ドーム内や鏡筒内の気温分布が一樣でないため、対流にともなう乱気流が起こる。それが、ドーム内シーイングやミラーシーイングと呼ばれる現象になり、星像が大きくなったり、乱れたりする。しかし最近まで、これらのローカルなシーイングが問題になるのは、高層大気によるシーイングが非常に良いサイトだけのことだと考えられていた。言い替えれば、わが国における冬のシーイングの悪さは季節風のためだとあきらめていたことになる。しかし、本当にそうだろう

か？人為的に手を加えることでシーイングを幾分かでも良くする余地はないのだろうか？

この疑問に答えるため、まず観測ドーム内の気温を自動測定するシステムを製作し、観測時の熱的環境の時間的、空間的变化をとらえることにした(岡野・他, 1991)。このデータを分析することにより、観測室内の熱的環境を改善し、質的によりよい観測を実現するための基礎とすることが本研究を行った動機である。

はじめて、ミラーシーイングを温度環境との関係で定量化したのはLowne(1979)である。彼は、主鏡とまわりの空気との温度差 1°C につき0.5秒角の星像の劣化があると報告している。また、中桐・他(1986)は東京天文台(当時)の観測所(三鷹・岡山・木曾・堂平)において、多チャンネルの温度計測システムで観測室および望遠鏡の温度環境の変化を計測している。しかし、彼らの観測は各観測所で数日間行われただけで長期にわたるものではなかった。最近、このような研究が重要視され、いくつかの研究が報告され始めている。例えば、西原(1992)は国立天文台岡山観測所188cm望遠鏡の鏡筒内シーイングとドーム外のシーイングの分離に成功した。しかし、わが国のような四季の変化が大きく、天候も不安定な、どちらかといえば天体観測に適していない環境で、実際の天体観測と並行して温度環境を長期にわたって調査した例はまだない。

今回の報告では、四季を通して観測した温度データを解析する一方、その結果から得た環境改善方法とその効果についても報告する。

2. 観測

本研究では実際に活動している天文台での熱環境の観測を行うため、兵庫県立西はりま天文台のドーム内に測定機器を設置して1991年冬から観測を始めた。同天文台の60cm反射望遠鏡の詳細については、黒田・西

村(1991)に記載されている。観測ドームは、3階建ての天文台の建物の上であり、一辺の長さが7mの正方形の空間の上に、直径6.5mの半球がのった形をしている。観測ドームの容積は 155m^3 、半球部分の表面積は 66.4m^2 、スリット開口部は、よこ幅1.8m、真横から天頂部まで開き、その面積は 9.2m^2 、半球形部分全体の面積の約14%にあたる。ドームの材質は、外側から厚さ0.3mmのステンレス、空気層50mm、グラスウール製の断熱材50mm、一番内側に0.4mm塩化ビニル鋼板のサンドウィッチ構造でできている。また、公開天文台の為、建物の色とのデザインのバランスを考えて、ステンレスの外板は、濃い褐色に塗られている。しかし、この外装色を与える影響については今回の研究では調査できなかった。また、公開施設のため、日中ドーム内施設の見学が行われており、階下との熱の出入りは自由であった。さらに、直下の3階は研究室として使用していた。また、階下では冷暖房をしている。

観測は、1991年2月1日から始め、現在も継続観測中である。この論文では、1992年3月20日までのデータを用いた。温度測定用にはサーミスタ素子を使い、データ取得にはパーソナルコンピュータによる8チャンネル自動計測システムを開発した。温度観測に使ったサーミスタ素子の特性やデータ取得装置の詳細については岡野・他(1991)の予備報告を参照されたい。8個のサーミスタは、屋外に1カ所、ドーム内の東西南北、床から2mの位置に4カ所、望遠鏡台座下に1カ所、鏡筒内は主鏡付近に1カ所、副鏡付近に1カ所取り付け付けた。すべての温度は気温であり、物の温度ではない。主鏡自体の温度を測定したかったが、鏡筒の構造上難しかった。この点は後の章で述べるようにこの研究の大きな欠点である。近々、望遠鏡の改修を計画しているが、その時には鏡材自体の温度を測定するように改造する予定である。

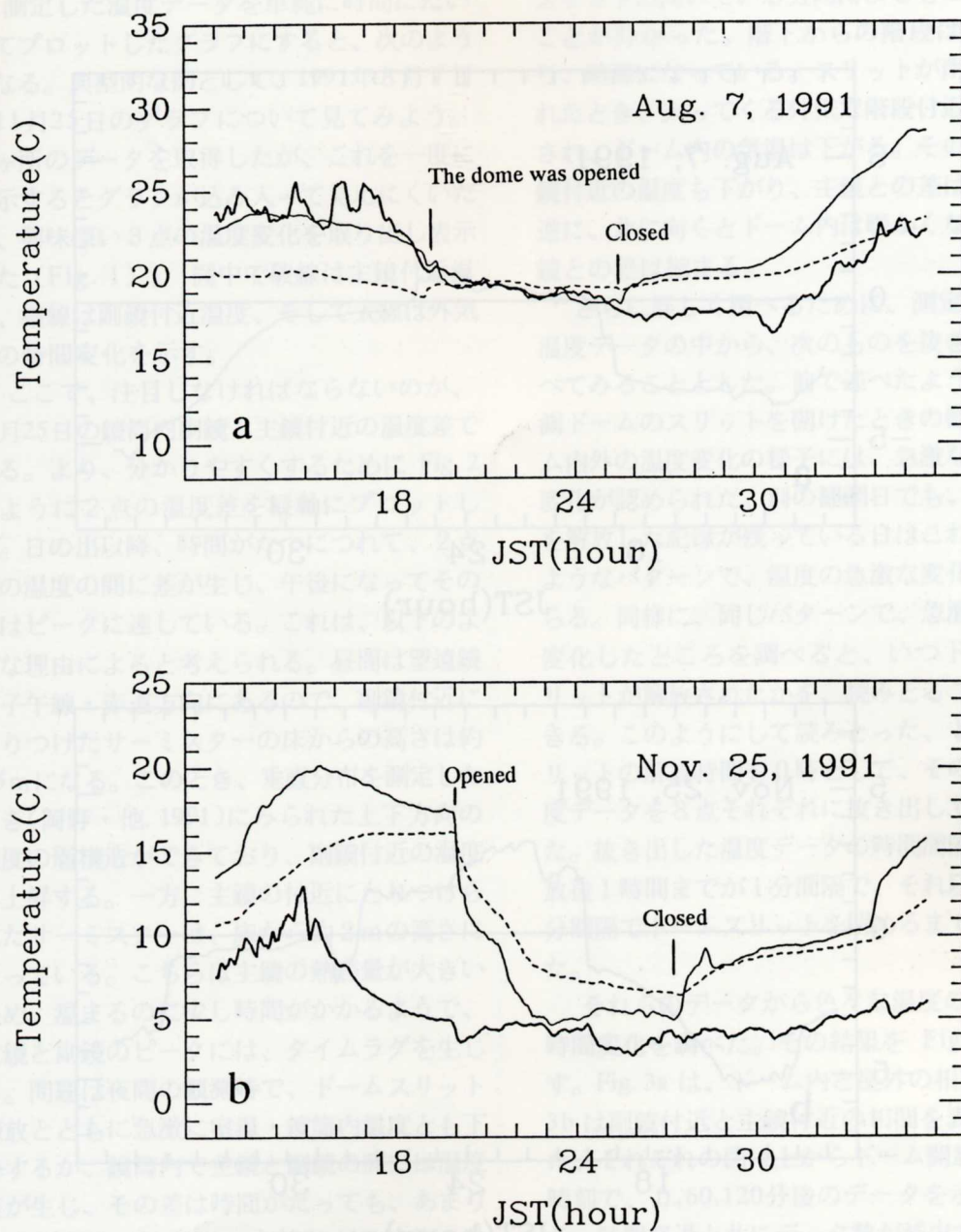


Fig. 1 Figures 1a and 1b show variations of air temperature on August 7 and November 25, 1991, respectively. Thick lines show the air temperature outside of the dome. Solid and dashed lines are air temperature near the secondary mirror and the primary mirror, respectively.

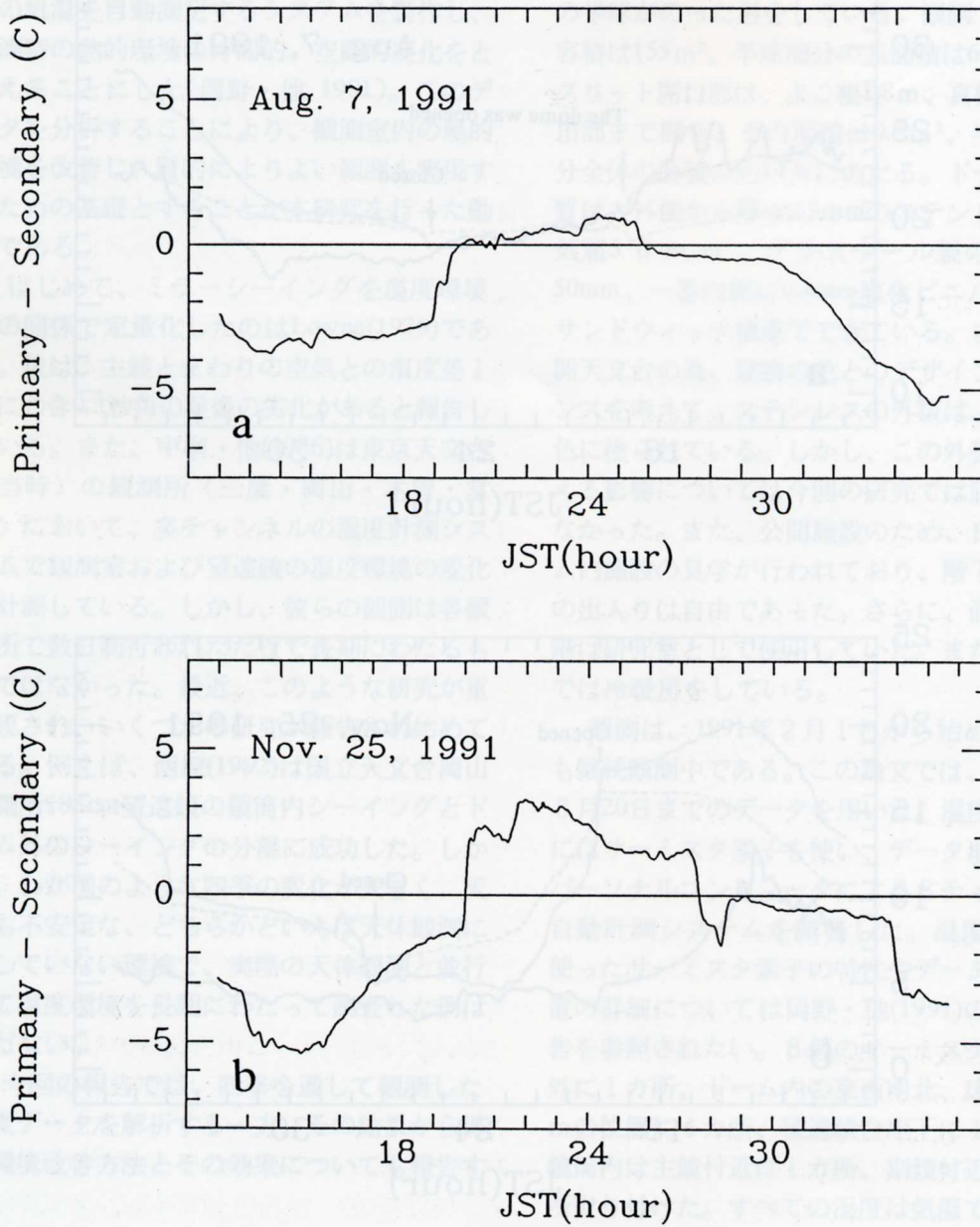


Fig. 2 Diurnal variations of air temperature near the secondary mirror with respect to that near the primary mirror. Figures 2a and 2b show the variations on August 7 and November 25, 1991, respectively.

3. 測定結果

測定した温度データを単純に時間にたいしてプロットしたグラフにすると、次のようになる。典型的な例として、1991年8月7日と11月25日のグラフについて見てみよう。8ヶ所のデータを取得したが、これを一度に表示するとグラフが込み入って見えにくいいため、興味深い3点の温度変化を取り出し表示した (Fig. 1)。図中で破線は主鏡付近温度、細線は副鏡付近温度、そして太線は外気温の時間変化を示す。

ここで、注目しなければならないのが、11月25日の鏡筒内副鏡と主鏡付近の温度差である。より、分かりやすくするために Fig. 2 のように2点の温度差を縦軸にプロットした。日の出以降、時間がたつにつれて、2点間の温度の間に差が生じ、午後になってその差はピークに達している。これは、以下のような理由によると考えられる。昼間は望遠鏡が子午線・赤道方向にあるので、副鏡付近にとりつけたサーミスターの床からの高さは約3.5mになる。このとき、垂直分布を測定したとき(岡野・他, 1991)にみられた上下方向の温度の層構造ができており、副鏡付近の温度は上昇する。一方、主鏡の付近にとりつけられたサーミスターは、床から約2mの高さになっている。こちらは主鏡の熱容量が大きいので、温まるのに少し時間がかかるようで、主鏡と副鏡のピークには、タイムラグを生じる。問題は夜間の観測時で、ドームスリット開放とともに急激に室温・鏡筒内温度とも下降するが、鏡筒内で主鏡と副鏡の間には温度差が生じ、その差は時間がたっても、あまり縮まらない。これは、主鏡などの物体の熱容量が大きいために、熱源として残り、放熱し続けるからであろうと考えられる。11月25日の結果と比較して8月7日の2点の差、および主鏡の温度変化は小さい。これは、ドーム内の冷房によって鏡筒が日中から夜間の気温に冷却されているからである。また、夜間2点の差に階段状の変化が見られるが、当日

行われていたCCDの観測記録から、ドームスリットの向いている方向によるものであることが分かった。階下からの階段は南にあり、熱源になっている。スリットが南に開かれたとき、入ってくる外気で階段付近は冷却され、ドーム内の気温は下がる。そのため副鏡付近の温度も下がり、主鏡との差は開く。逆に、北に向くとドーム内は暖かくなり、主鏡との差は縮まる。

さらに詳しく調べるために、測定された温度データの中から、次のものを抜き出し調べてみることにした。前で述べたように、観測ドームのスリットを開けたときの観測ドーム内外の温度変化の様子には、急激な温度の変化が認められた。別の観測日でも、ドームを解放した記録が残っている日はこれと同じようなパターンで、温度の急激な変化が認められる。同様に、同じパターンで、急激に温度変化したところを調べると、いつドームスリットが解放されたかを、読みとることができる。このようにして読みとった、ドームスリットの解放時間を0時として、その後の温度データを8点それぞれに抜き出して分析した。抜き出した温度データの時間間隔は、開放後1時間までが1分間隔で、それ以降は10分間隔でドームスリットを閉めるまで採取した。

それらのデータから色々な温度の相関の時間変化を調べた。その結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3a は、ドーム内と屋外の相関、Fig. 3b は副鏡付近と主鏡付近の相関を表す。また、それぞれの図は上からドーム開放からの時刻で、0, 60, 120分後のデータを示している。時間経過と共にデータ数が減少するが、これはそれまでの間にドームを閉鎖したからである。外気温と観測ドーム室内気温との関係からは次のようなことが明らかになった。

- 1) 夏の間(7-8月)は観測ドームの開放時から、室内気温と外気温はほぼ等しくなっている。
- 2) 夜間の外気温が22℃を下回る頃から、

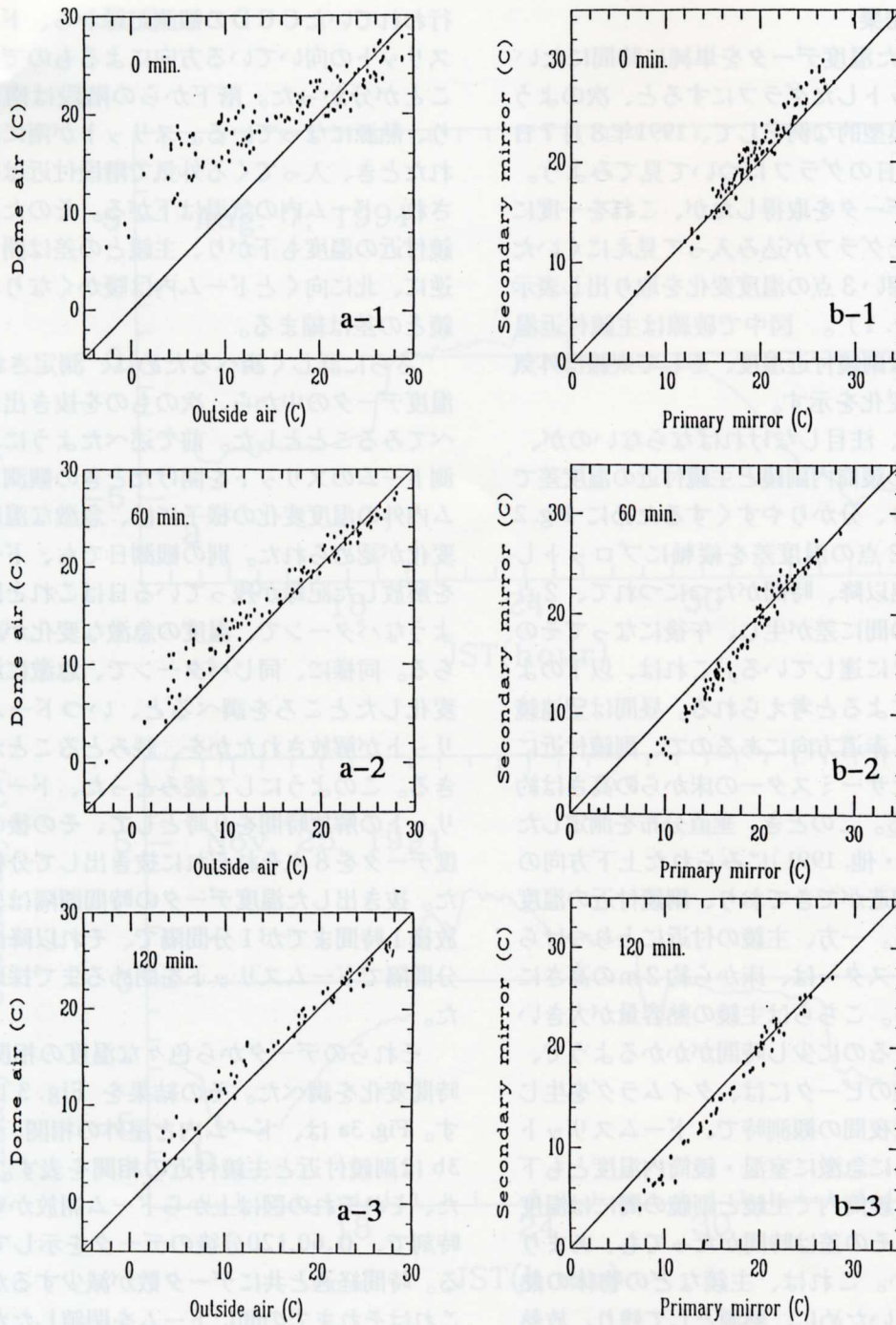


Fig. 3 Figure 3as show correlation between air temperature outside of the dome and that inside of the dome. Figure 3bs are correlation between air temperature near the primary mirror and that near the secondary mirror. Upper, middle and lower panel show the correlation at 0, 60 and 120 minutes after the dome slit opened, respectively.

日中閉めていた観測ドームの中の気温は外気温より高くなり、寒くなるにつれてその傾向は大きくなる。特に冬になると、外気温と観測ドーム室内気温との差は10度以上になることがある。

- 3) 観測ドーム内の温度と外気温との差の平均が2℃程度になるのに、夏以外では2時間以上を要する。
- 4) ドーム開放後3時間以上経過しても、観測ドーム内の温度と外気温との差はなくなり、観測ドームの開口部を通じて熱が外部へ逃げていると考えられる。
同様に主鏡付近の気温と副鏡付近の気温との関係からは次のようなことが言える。
- 5) ドーム開放時は、副鏡付近の方が主鏡付近よりも温度が高い。これは、日中のドーム内の温度構造を反映している。
- 6) 開放直後から、(5)の関係が逆転する。
- 7) 夏場を除いて、主鏡の温度が副鏡の温度より平均2℃程度高い状態がみられる。この差はドーム開放後2～3時間たった後も続く。このことは、鏡筒内でミラーの表面から対流が起こり、それが継続していることを示している。

4. 考察

以上の温度計測の結果、観測中の熱環境に関して、夏の一定期間を除いて、次のような状態になっていることが明かとなった。

外気温 ≤ 室内気温 ≤ 主鏡温度 (1)

この結果、夏の一定期間を除き、対流によるシーイングの劣化が生じていることは明かである。

Lowne(1979)によってはじめてミラーシーイングについて定量解析がされたが、鏡面との周囲の温度差が -2℃～8℃ とかなり大きな範囲で2℃刻みで調査している。実際の

観測現場でこのような大きな差はあまり現実的でない。最近になって、ミラーシーイングについての詳しい研究がいくつか報告されている。

Barret al.(1990)は、1.8mの鏡面を研磨用の室内に水平に置き、鏡面付近の温度とイメージとの関係を調べている。それによると、鏡面と周囲の温度差が0.5℃以内ではほとんどミラーシーイングによる影響は無視できるとしている。さらに、鏡面に起きている熱対流をファンで吹き飛ばすこと(鏡面のフラッシング)で一時的であるがミラーシーイングを改善できると述べている。

また、Iye et al.(1991)は62cmの能動光学系の実験用望遠鏡にShack-Hartmann装置を取り付け、室内でミラーシーイングの定量解析を行っている。特に、鏡面と周囲の空気の温度差がほとんどない微妙な状況下での実験では、鏡面が0.2℃以上高くなると、ミラーシーイングによる像の劣化が起きることを確認している。また、鏡面上に高さの異なる温度測定点を6点取り、鏡面上の対流のスケールを約15cmと見積もっている。さらに、鏡面付近にファンによる層流を作れば像の劣化をかなり抑えることができると報告している。

しかし、これらの実験はすべて実験用に作られたモデル上で、しかも室内での実験であった。実際、研究観測に使用されている望遠鏡を使い、研究観測と並行して行われて、はじめてシーイングの研究観測に及ぼす影響が見積もれ、改善策も具体化する。そのような実験を行っている例として、CFHT (Canada-France-Hawaii 3.6-m telescope)における長期にわたっての熱環境の研究と改善があげられる。その中で、Racine et al.(1991)は、温度データと3.6m望遠鏡に取り付けられた主焦点カメラHRCamのCCD撮像イメージとの比較を行っている。彼らの温度測定は鏡面、ドーム内、屋外の3点で、ミラーシーイングだけでなく、ドームシーイングについても定量化している。それによると床冷却な

どの徹底した熱対策をしたCFHTの状況下では、ドームシーイングはミラーシーイングに比較して小さい。また、ミラーシーイングに関しては $0''.4/^{\circ}\text{C}^{6/5}$ という値を求めている。しかし、マウナケア山頂は気温の年変化がほとんどない恵まれた自然環境であり、わが国のような年変化の大きな観測サイトにとって、そのまま適用できるわけではない。

Iye et al.(1992)の62cm鏡での温度の垂直分布が表すように鏡面付近の温度勾配は大きい。我々の実験では鏡面そのものの温度を測定していないので、鏡面とまわりの温度差はさらに大きいと考えられる。Lowne(1979)の結果を採用するなら、西はりま天文台の望遠鏡では、夏を除いて最低でも1秒角以上の像の劣化が起きているはずである。このような状態になる原因としては、次のようなことが考えられる。天文台のドーム全体を1つの熱システムとしてとらえた場合、昼間太陽熱によってドーム全体が熱を持つが、問題は夜間の放熱の効率にある。西はりま天文台のドームのような形の場合、観測時のドームからの熱放出は、スリット部を通して行われる。このスリット部の面積が、ドーム半球部分の約14%しかないため、放熱の効率が低く、室内気温の低下は外気温の低下に追いつかないと考えられる。ドーム内の床と主鏡は、はじめは室内気温と平衡しているが、これらの熱容量が大きいので、室内気温の低下に追いつかない。その結果上の不等式(1)が、観測時間中成立してしまう状態が続くと考えられる。

そのために考えられる基本的な対策は、次の3つである。

- 1) 昼間、ドーム内への熱の侵入を最少にする。
- 2) たまった熱を観測開始前にすみやかに排出し、不等号の向きが逆になった状態を作る。
- 3) どうしても対流が起きる場合は、そのシーイングに与える影響を最小限に抑

える。

上記の3点に基づき、ドーム内の環境に起因するシーイングの劣化をなくして、より良い星像を得るために有効と考えられる具体的な対策を以下に述べる。

まず、観測ドーム全体について考えられる対策から述べる。

- 1) 観測ドームそのものをなくす。日中は、望遠鏡を幌か何かで覆い、夜間はそれをはずしてしまう（ドームレス望遠鏡）。
- 2) 日中から観測ドーム内全体を冷却し、ドーム内の気温をその日の夜間の予想最低気温まで冷やしておく。夏季はクーラーなどで、対処できるが、冬季はヒートポンプなど使わなければならない。
- 3) 観測ドーム内の床を冷却して、建物自体の熱をなくす。
- 4) ファンを使った強制的な吸排気など、観測ドーム内の空気と外気との流れをよくする。
- 5) 観測ドーム内の熱源（人間を含む）を除く。そして、望遠鏡・観測装置などすべてリモートコントロールにしてしまう。
- 6) 他の部屋の暖房の熱など一切伝わらないように、観測ドーム内への熱の侵入を防ぐ。

次に、望遠鏡について考えられる対策としては次のようなものが考えられる。

- 7) 主鏡及びその周辺を冷却する。具体的には、鏡筒内を上から下へ空気を引くことで、空冷する。あるいは、ポンプを使って冷たい水を流す。
- 8) 鏡筒を金属の筒から棒材の組み合わせにする。このことで、外気温に鏡材が馴染みやすくなる。さらに、鏡面のフラッシングを効率よく行うには鏡面が露出している構造が望ましい。小口径の棒材の鏡筒の多くが、センターピー

スより鏡面側が間隔が狭く、閉じている構造になっているので注意が必要である。

- 9) 筒型望遠鏡の場合。先端を透明の幕でおおい、鏡筒内と外部との空気の出入りをなくし、対流を防ぐ。Thompson (1990)によって同様の試みが行われているが、顕著な改善結果までには至っていない。
- 10) 筒先にガラスを張り、筒の空気を抜き取る。

5. 環境改善と効果

とりあえずこれらの結果をふまえて、現状ですぐできる対策として、1992年1月24日から2月15日にかけて次のような改善を行った。

まず、公開施設であるため、昼間の施設見学を制限することできない。しかし、階下からの熱をできる限り遮断するために、階段途中にある2カ所の鉄扉を閉め、見学者個々に開けてもらうようにした。もちろんサービス面では低下したが、よりよい像が得られるなら理解されるということで強行した。次に、観測室の東西にある窓を取り外し、錠戸にして外気が通り抜けるようにした。風の無い日や、観測時に早く放熱したいときには扇風機も使うことにした。さらに、直下の3階の研究室が観測室の床の熱源になっているということで、2階の図書・資料室と入れ替えを行ない、3階での暖房を止めた。観測室には、もともとクーラーがあるが、冬期に外気温近くにまで下げる能力はないが、少しでも室内気温を下げるために24時間、電源を入れ

ることにした。

これらの改善を行ったところ、1日の温度変化は Fig. 4 のように明らかに小さくなり、外気温の変化にドーム内の気温がかなり追従するようになった。また、眼視観測で明らかにシーイングが向上し、見学者の感想からも、そのことがうかがえるようになった。そこで、西はりま天文台で観測された手持ちのCCD画像データ(尾久土, 1992)の星像を1991年秋からチェックすることにした。その結果を Fig. 5 に示す。このグラフがカバーしている期間は、本来ならシーイングの悪い季節である。縦軸は観測した日のCCDイメージ上での星像の半値幅の平均値を画素単位で表したものである。1画素は天球上で約0.6秒角に相当する。横軸は、ユリウス日だが、階下からの熱を遮断し錠戸にし通気性を良くした日は2448646日に相当する。この前後で明らかに星像が小さくなっており、平均すると1.3画素小さくなっている。これは約0.8秒角に相当している。

光学系の光軸調整など、まだ不十分の点もあり、これが限界だとは考えていない。しかし、冬の星像が良くない原因に観測室内にたまった熱が大きく影響していたのは確かである。

先に述べた改善策の中で現在、鏡筒を金属筒から棒状の構造に交換することで準備を進めている。その際には、鏡面が露出したタイプになるので、鏡面自体の温度が測定できるだけでなく、フラッシングによる効果も実験も行い、その結果を改めて報告する予定である。

《参考文献》

- Barr, L.D., Fox, J., Poczul, G. A., and Roddier, C. A., 1990, SPIE, **1236**, 492.
 Iye, M., Noguchi, T., Torii, Y., Mikami, Y., and Ando, H., 1991, Publ. Astron. Soc. Pacific, **103**, 712.
 黒田武彦・西村有二, 1991, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., **1**, 1.
 Lowne, C. M., 1979, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., **188**, 249.

- 中桐正夫・野口猛・西野洋平・大島紀夫, 1986, 東京天文台報, **20**, 646.
 西原英治, 1992, 東京大学修士論文
 岡野浩平・尾久土正己・定金晃三・黒田武彦, 1991, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., **1**, 8.
 尾久土正己, 1992, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., **2**, 1.
 Racine, R., Salmon, D., Cowley, D., and Sovka, J., 1991, Publ. Astron. Soc. Pacific, **103**, 1020.
 Thompson, L. A., 1990, Publ. Astron. Soc. Pacific, **102**, 1086.

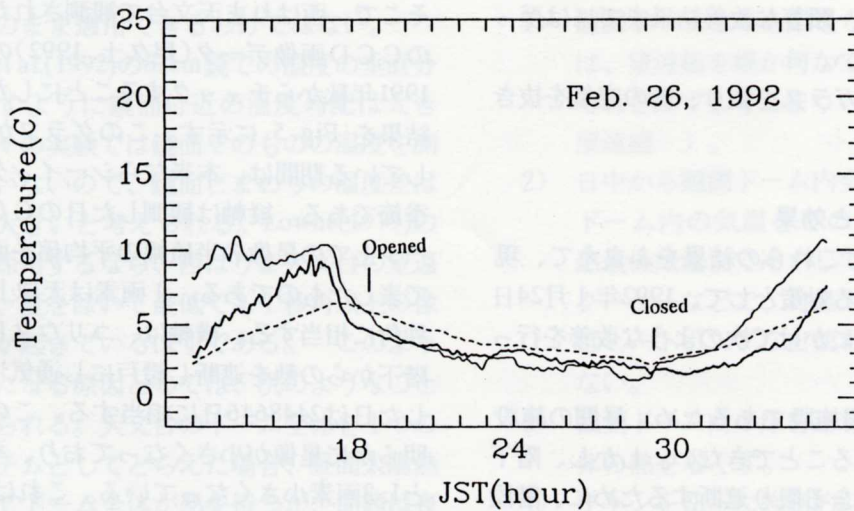


Fig. 4 Variations of air temperature under the condition of air ventilation. Symbols are the same as in figure 1.

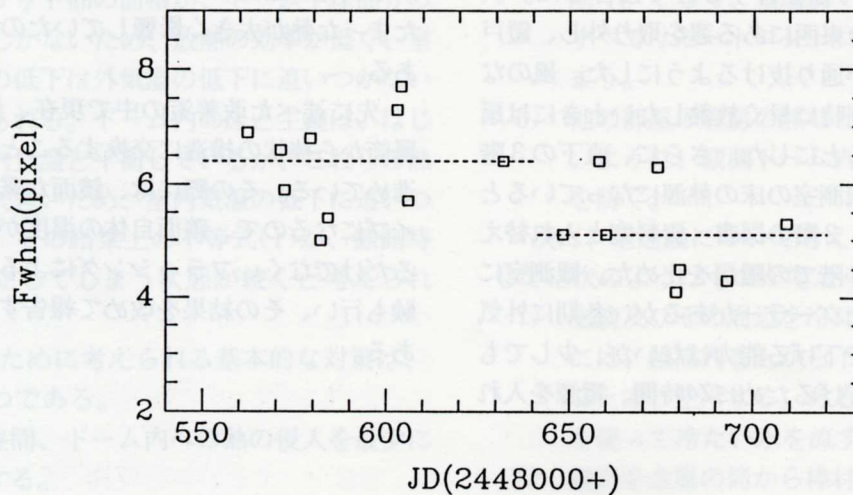


Fig. 5 Fwhm of stellar image profiles on CCD frames obtained with the 60-cm reflector of Nishi-Harima Astronomical Observatory. Air ventilation of the observing room began on 1992 January 24 (JD=2448646).