

卒業論文題目:かなた望遠鏡の指向精度と架台の温度分布の
研究

所属・著者:広島大学理学部物理科学科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B063955

石田将行

主査 川端 弘治

副査 城 健男

日付:第一版 110210

概要

望遠鏡を用いた観測では、望遠鏡の指向精度や、それに付随する追尾精度が観測の効率を大きく左右する。かなた望遠鏡の指向精度は一定ではなく、季節変化することが経験的に判ってきた。その原因の一つとして、架台温度の非一様な変化によるゆがみが考えられる。そこで我々は、指向精度向上の第一段階として、かなた望遠鏡の指向精度と温度分布を測定して、その関連性を調べた。

望遠鏡は方位軸と高度軸の2軸で任意の方向に指向する。これら2軸の水平性、真円性、原点などの微小誤差パラメータを望遠鏡の指向解析で決定して指向精度を向上させている。我々は、まず架台の各箇所の温度分布とその時間変化を調べ、左右ヨーク(柱)の熱膨張を考慮して、水平性がどの程度保たれているかを推定した。その結果、熱廃棄装置がある側のヨーク上部の温度が、ドームを閉めている場合と開けている場合とで相対的に大きく変化していることが明らかとなり、指向精度に影響を与えていることが判った。次に、全天34星に対する指向解析を複数回行って、誤差パラメータの変化を求め、架台の構造が温度と共にどう変化しているかを調べた。その結果、水平性などのパラメータで変化がみられたものの、誤差も大きく、有意な結論は得られていない。より詳細な指向解析が必要と考えられる。

目次

第1章	背景と目的	4
1.1	かなた望遠鏡	4
1.2	経緯台と各軸の特徴	5
1.2.1	望遠鏡の架台と鏡筒	5
1.2.2	各軸の特徴	5
1.3	ポインティングアナリシスとその特徴	6
1.3.1	ポインティングアナリシス	6
1.4	指向精度を悪化させる要因とその弊害	7
1.4.1	架台温度分布の非一様性	7
1.4.2	指向精度が悪い場合の弊害	7
1.5	本研究の目標	7
1.5.1	東西ヨークの熱膨張と水平性	7
1.5.2	誤差パラメータと温度変化の相関	8
第2章	測定	9
2.1	温度計のキャリブレーションと設置	9
2.1.1	温度計のキャリブレーション	9
2.1.2	キャリブレーション結果	10
2.1.3	温度計操作方法	11
2.1.4	温度計の設置箇所	11
2.1.5	温度計の通信手段	12
2.2	ポインティングアナリシスと誤差パラメータ	12
2.2.1	IA(index error in azimuth)	13
2.2.2	IE(index error in elevation)	13
2.2.3	AN(azimuth axis misalignment north-south)	13
2.2.4	AW(azimuth axis misalignment east-west)	13
2.2.5	NPAE(Az/El non-perpendicularity)	13
2.2.6	CA(left-right collimation error)	13
2.2.7	TF(tube flexure(sine))	14
2.2.8	TX(tube flexure(tangent))	14
2.2.9	ACES(azimuth centering error sine component)	14
2.2.10	ACEC(azimuth centering error cosine component)	14

第 3 章	結果	15
3.1	架台温度の一樣性について	15
3.2	ポインティングアナリシスの結果	18
3.2.1	Tpoint フィッティング図	18
3.2.2	誤差パラメータ	19
第 4 章	考察	21
4.1	架台各位置とヨーク伸縮の温度依存性	21
4.1.1	架台各位置の温度依存性	21
4.1.2	ヨーク伸縮の温度依存性	23
4.1.3	金属の熱膨張と指向精度の悪化	24
4.2	誤差パラメータ温度依存性とポインティングアナリシス改善策	24
4.2.1	星像パターンマッチングによる指向精度向上への方策	25
4.2.2	温度変化に対する指向精度向上への方策	26
第 5 章	まとめ	27
第 6 章	Appendix	28

図目次

1.1	かなた望遠鏡	4
1.2	望遠鏡寸法図	4
1.3	軸の概略図	6
1.4	指向誤差図	6
2.1	12月9日温度変化図	9
2.2	12月14日温度変化図	9
2.3	12月9日平均温度	10
2.4	12月14日平均温度	10
2.5	温度設置箇所	11
2.6	温度計データの取り込みのダイヤグラム	12
3.1	1月5日温度変化図	16
3.2	1月10日温度変化図	17
3.3	フィットモデルと測定値との残差を示した図	18
3.4	誤差パラメータの温度依存性	20
4.1	1月10日15時10分ー1月11日11時の間の架台各位置の温度変化	21
4.2	1月10日15時10分ー1月11日11時の間のヨーク東西、上下部差分温度変化図	23
6.1	1月5日温度変化図	28
6.2	1月6日温度変化図	28
6.3	1月8日温度変化図	29
6.4	1月10日温度変化図	29
6.5	1月12日温度変化図	30
6.6	1月13日温度変化図	30
6.7	1月16日温度変化図	31
6.8	1月29日温度変化図	31
6.9	9月18日フィッティング図	32
6.10	12月14日フィッティング図	32
6.11	12月29日フィッティング図	33
6.12	1月8日フィッティング図	33

第1章 背景と目的

1.1 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡とは、宇宙科学センター附属東広島天文台の基盤をなす 1.5m 光学赤外線望遠鏡のことである。この望遠鏡はもともと大学共同利用機関である国立天文台がその三鷹キャンパス内に「赤外シミュレータ」という名前で建設、所有し、主にすばる望遠鏡の観測装置の試験に活躍していた。望遠鏡の集光力を決める主鏡の有効径は 1.5m である。これは、すばる望遠鏡の有効径 8.2m の 5 分の 1 以下だが、国内に存在する望遠鏡としては最大級で、大学が国内に所有する望遠鏡では最も大きい望遠鏡になる。広島大学は 2005 年から 2006 年にかけて、この望遠鏡を、観測環境および利便性に優れた東広島市東南部の山頂部に移設し、望遠鏡制御系の改良、新しい観測装置の開発を進め、研究基盤を充実させた。そして、X 線やガンマ線で天体を観測する人工衛星と密着した大学望遠鏡ならではの、特徴あるユニークな観測研究を推進している。鏡筒が青色、架台が緑色に塗装されているが、これは広島大学のカラーを表している。

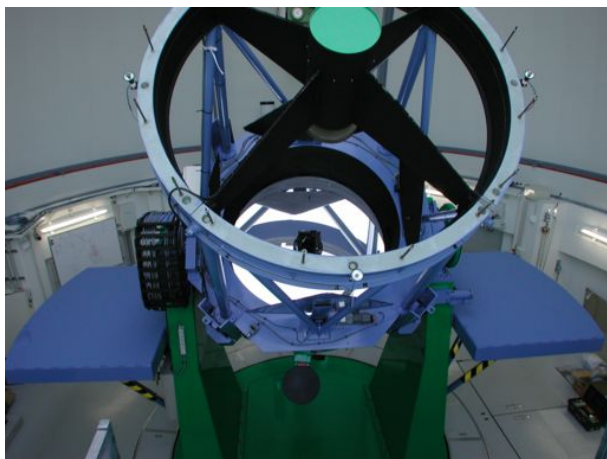


図 1.1: かなた望遠鏡

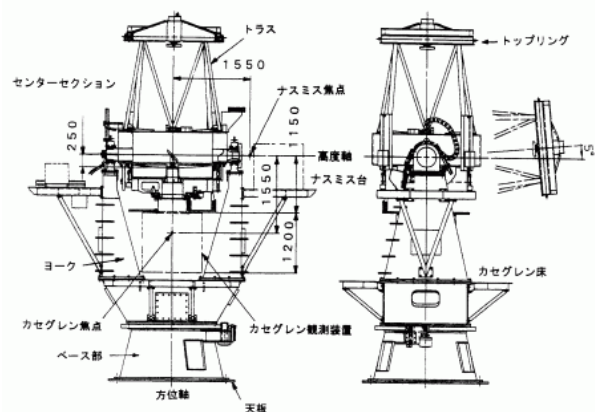


図 1.2: 望遠鏡寸法図
(架台部分は現在と異なる)

光学系	リッチークレティアン光学系
主鏡の有効径	1540mm
主鏡材	ULE(超低膨張ガラス) 直径 1600mm 質量 983kg
合成 F 値と焦点距離 f	F=12.01 F=18501.7mm
視野	15 分角 (15 分角は月のみかけの半径程度)
焦点面スケール	1mm あたり、投影した天球面上の 11.15 秒角
架台	経緯台 (トルク、モーターによるフリクションドライブ)
総重量	約 17 トン
搭載可能重量	500kg(カセグレン焦点)、1000kg(ナスミス焦点)
駆動速度 高度軸駆動 方位軸駆動	高度軸 2 度/秒 方位軸 5 度/秒

表 1.1: 望遠鏡仕様

1.2 経緯台と各軸の特徴

1.2.1 望遠鏡の架台と鏡筒

望遠鏡は、天頂を向いた状態でのドーム観測室床面から最上部までの高さは約 5.8m ある。望遠鏡の架台は、ドームの回転や人の動きによる振動が望遠鏡に伝わらないように、ドーム施設とは独立した基礎を持つピアに据え付けられている。この望遠鏡の架台は経緯台と呼ばれ、鉛直軸 (方位軸という) まわりの水平回転と、水平軸 (高度軸という) まわりの垂直回転 (望遠鏡がおじぎをするような運動に対応) の 2 軸の回転により、鏡筒が望みの天体へ指向される。鏡筒とは、望遠鏡の光学系を実装している部分で、トップリング、トラス、センターセクションなどで構成される。有効径 1.5m の主鏡は中央がへこんだ凹面になっており (中央部の厚み 200mm)、センターセクションの中で、下から 12 点 (うち 3 点は固定点)、横から 10 点で支えられている。副鏡は直径 302.8mm (新セラミック副鏡では*表中の括弧内の値は、新セラミック副鏡を用いた場合 323.2mm) の凸面鏡で、トップリングに据え付けられている。望遠鏡で集められた光は、第 3 鏡 (平面鏡) の着脱により、ナスミス焦点かカセグレン焦点のいずれか一方に像を結ぶ。それぞれの焦点に観測装置が搭載可能である。カセグレン焦点には可視赤外線 3 色同時撮像分光器装置 TRISPEC が、第一ナスミス焦点 (東側) には、露出型偏光撮像装置 HOWPol が、第二ナスミス焦点 (西側) には高速分光器が、それぞれ設置されている。このうち HOWPol は空冷の冷蔵機コンプレッサーがナスミス台に置かれ、その熱廃棄が HOWPol に当たっていることが懸念される。

1.2.2 各軸の特徴

望遠鏡は図 1.3 に表されているように方位軸と高度軸の 2 軸で指向を行っており、方位軸は水平面、高度軸に対して垂直にベース部分で回転するようになっている。高度軸は方位軸と垂直になっており、左右のヨークに支えられて回転する仕組みになっている。

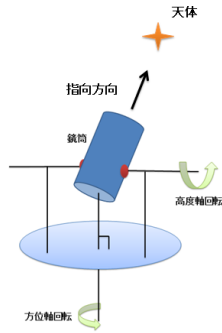


図 1.3: 軸の概略図

1.3 ポインティングアナリシスとその特徴

1.3.1 ポインティングアナリシス

望遠鏡は、機械的な製作誤差・設置誤差や、重力によるたわみなどの影響により、星に指向したときに、一般に視野中心にあるはずの星が視野中心からずれてしまう。これを指向誤差と呼ぶ。また、指向した後天体を追尾する必要があるが、その際に発生するズレとして追尾誤差とがある。経緯台は高度軸と方位軸が常に回転しながら星を追尾しているので、ある瞬間の指向誤差と一定時経過した後の瞬間の指向誤差の差が追尾誤差になる。つまり指向誤差は追尾精度にも影響している。

指向誤差は、視野中心から星までの仰角成分 (E) と方位角成分 (A) (の2成分に分けられる (図 1.4))。これらは指向方向に対して変化し、その指向誤差のパターンを解析する作業がポインティングアナリシスである。

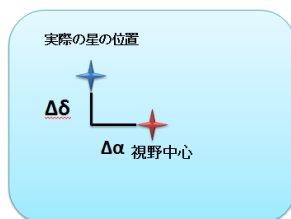


図 1.4: 指向誤差図

ポインティングアナリシスとは、天球上の座標が正確に求められている多数の星 (数十～数百個) を位置のキャリブレーター (位置標準星) として使い、望遠鏡の指向誤差をモデル化することを言う。全天の様々な位置に散らばっている位置標準星に望遠鏡を指向し、それぞれの星に対しての指向誤差を計測して指向誤差の全天分布マップを作り、そのマップに対して望遠鏡の機械的モデルを当てはめて指向誤差パラメータを求める。モデルの当てはめには、汎用的な望遠鏡指向誤差解析ソフトである Tpoint を用いた。Tpoint は P.T.Wallace 氏が作成したもので、天文学の業界では世界的に広く用いられている有償ソフトウェアで

ある。Tpoint では、取得した指向誤差のパターンに対してモデルフィッティングすることで、測定データとモデル値のズレを評価した図を表示させたり、指向誤差パラメータを算出することができる(詳しくは第三章結果を参照)。

1.4 指向精度を悪化させる要因とその弊害

1.4.1 架台温度分布の非一様性

かなた望遠鏡の指向精度は一定ではなく、季節変化することが経験的に判ってきた。その原因として様々なことが考えられるが、その中の大きな原因として架台温度の非一様な変化によるゆがみが考えられる。望遠鏡の架台は全体が金属で構成されている。その部分が温度変化することにより伸び縮みすることで指向精度に大きく影響していると考えられる。

望遠鏡に求められる指向精度は約 1 秒角、追尾精度では 10 分間で 1 秒角以内である。例として高度軸を支えるヨークが 1 温度変化した場合を考える。高度軸の高さは床から 2600mm で、ヨーク素材である、鉄鋼材 (SS400) の線膨張率は $-50 \sim +20$ の間で平均で $11.8 \times 10^{-6} \text{mm/}$ である。つまりヨークは 1 温度変化があると約 0.03mm 変化することになる。これは秒角に直すとおよそ 5 秒角となり、指向精度や追尾精度を考える上で無視できない影響を及ぼす可能性がある。

1.4.2 指向精度が悪い場合の弊害

指向精度が悪いと、最初の星をポインティングする作業に時間が要する。また追尾精度も悪くなり観測効率も減少してしまう。例えば分光観測の場合は幅 2 秒角程度の細いスリットを用いて観測するが、追尾誤差が悪いとすぐにスリットからはみ出し、観測にかからなくなる。追尾精度を改善するものとして別途オートガイダーを開発中だが、出来たとしてもオートガイドを開始するまでに時間を要するため、短時間以内での観測に対する改善として、指向精度そのものを改善する方が近道である。

1.5 本研究の目標

かなた望遠鏡の指向精度は一定ではなく、季節変化することが経験的に判っている。その原因の一つとして、架台温度の非一様な変化によるゆがみが考えられる。ゆがみの具体的な部分は架台の東西ヨークがもっとも熱膨張と水平性に関して効いていると推測した。そこで我々は指向精度向上の第一段階として、かなた望遠鏡の指向精度と温度分布を測定して、その関連性を調べて、指向精度の改善策を考えることを目標とする。

1.5.1 東西ヨークの熱膨張と水平性

まず架台の各箇所温度計を設置し温度分布とその時間変化を調べる。その中でも高度軸は左右ヨークの二点に支えられているだけである。もしこの左右ヨークが温度変化により熱膨張したとすると高度軸の水平との傾きが発生すると容易に推測できる。方位軸については軸対称な構造になっているため熱膨張に

たいしてゆがみが生じる可能性は比較的小さい。傾きやズレなどを直接的に測定する機材は高価で今回は用意できなかったため、複数の温度計を用いて架台各部分の温度の測定を行い、特に東西ヨークの熱伸縮から架台の水平性がどの程度保たれているのかを推察する。

1.5.2 誤差パラメータと温度変化の相関

全天 34 星に対する指向解析を複数回行うことで仰角、方位角のズレから成る指向誤差を出すことができる。その指向誤差をプログラムで処理することで水平性、真円性、原点に関する誤差パラメータが求められる。その測定を複数日行い、誤差パラメータと温度変化の相関を調べ、架台の構造が温度と共にどう変化しているかを調べる。

第2章 測定

2.1 温度計のキャリブレーションと設置

2.1.1 温度計のキャリブレーション

この研究では温度計を10個使用する。温度計を架台に設置する前に、各々の温度計の非一様性を調べるために、キャリブレーションを行った。温度計10個に対してここではsnare1～snare10と名前を付けた。

キャリブレーション方法としては、天文台ドーム内にある温度計に対して大きな金属塊に10個の温度計のセンサー部分をアルミテープで固定して、異なる二日の温度変化をモニターしたデータを用いた。大きな金属塊を用いた理由は体積が大きいことで測定部分の温度変化が他の場所の温度変化に左右されないため、また金属は熱電導性が高いため温度ムラも生じにくい。二日間の測定結果を以下に示す。12月9日は昼間の、12月14日は夜間のサンプルとしてデータを得たが、12月14日は天候が悪くドームを閉じたままであったため、期待ほどには温度が下がらず、逆に12月9日よりも温度が高い結果となったが、特に問題ないので、そのまま用いることにした。

キャリブレーション(12月9日10-16時)

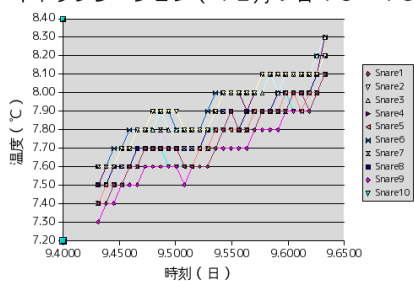


図 2.1: 12月9日温度変化図

キャリブレーション(12月14日4-6時)

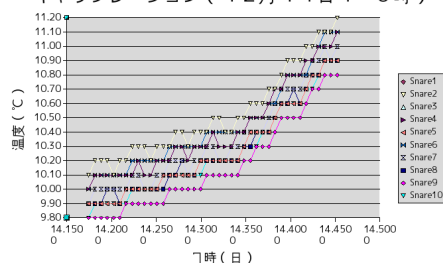


図 2.2: 12月14日温度変化図

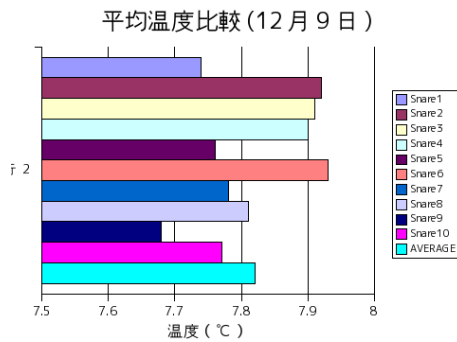


図 2.3: 12月9日平均温度

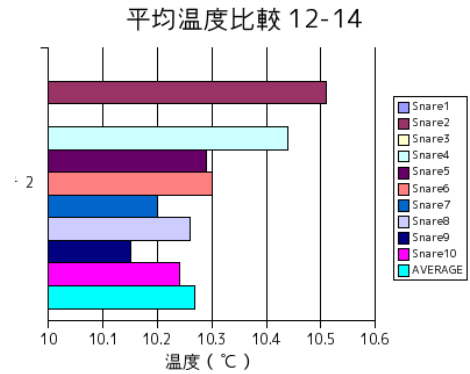


図 2.4: 12月14日平均温度

2.1.2 キャリブレーション結果

図 2.1, 図 2.2 より各温度計の個体差はほぼ原点のずれのみで説明できることがわかる。この結果により原点の補正のみで十分なキャリブレーションが可能であると判断した。二日間のキャリブレーションにより各温度計補正値を算出した。

補正値の算出式は以下である。

$$\frac{(\text{12月9日全温度計平均温度の平均} - \text{各温度計の平均温度})}{2} + \frac{(\text{12月14日全温度計平均温度の平均} - \text{各温度計の平均温度})}{2} \quad (2.1)$$

12月14日は、snare1 と snare3 で温度測定が出来ていないことが後に判明した。これらについては一日分のデータでも十分に信頼性の高い結果であるとみなして、一日分の補正値を使用した。なお全温度計平均温度の平均として採用した値はデータの無い温度計を除いたものであるため12月9日と12月14日の平均温度には、これによる系統誤差は除外されている。

得られた補正値を以下に示す。

温度計	補正値 ()
snare1	0.08
snare2	-0.16
snare3	-0.09
snare4	-0.11
snare5	0.03
snare6	-0.06
snare7	0.07
snare8	0.02
snare9	0.14
snare10	0.05

表 2.1: 補正値一覧

2.1.3 温度計操作方法

温度計の値を読み取るには、まずパソコンからロガーにLAN(RS232C 通信)を通して命令を送りそしてロガーから温度計に無線通信をする仕組みになっている。

今回の実験で利用するプログラムは広島大学宇宙科学センター植村誠助教作の thermo というプログラムである。今回使った主なコマンドを以下に示しておく。

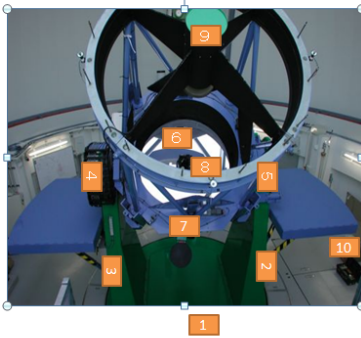
命令	内容
add grp-num, g-name, s-num, s-name, fq (c or s)	子機登録する命令
datadel data-num (" -1" delete all)	ロガー中の指定データを削除する命令
del grp-num s-num	指定した子機の子機登録を解除する命令
delall	全子機の子機登録を解除する命令
getdata data-num output-file	ロガー中の指定データを作業ディレクトリにコピーする命令
getlist	ロガー中のデータをリストアップする命令
now grp-num s-num mode(AorT)	現在の子機の状態を表示する命令
search grp-num	現在ロガーと通信している子機の数を表示する命令
show	現在ロガーに登録しているグループと子機の数を表示する命令
sread grp-num s-num duration	子機の記録データをロガーに集約する命令

表 2.2: 命令一覧

2.1.4 温度計の設置箇所

キャリブレーションが終了した時点で温度計を望遠鏡架台の各部分に取り付けた。その場所を図 2.6 および表 2.3 に示す。

■ ... 温度計
(ESPEC社製RTW305.)



温度計	設置箇所
snare1	ドーム中二階
snare2	ヨーク下部西側
snare3	ヨーク下部東側
snare4	ヨーク上部東側
snare5	ヨーク上部西側
snare6	主鏡セル北側
snare7	主鏡セル南側
snare8	トップリング南側
snare9	トップリング中央
snare10	ドーム内床付近

図 2.5: 温度設置箇所

表 2.3: 温度計設置箇所一覧

2.1.5 温度計の通信手段

キャリブレーションを終えたところで温度計を架台各部に設置した。ロガーはドーム内電源の横に設置し、そこから LAN 経由の RS232C 通信でパソコンにデータを飛ばす。また、各温度計とロガーは無線通信になっている。この通信方法を図 2.5 に示す。

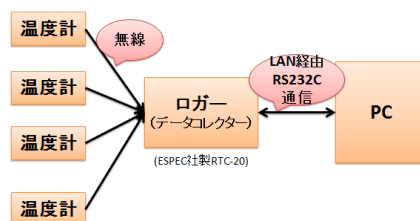


図 2.6: 温度計データの取り込みのダイヤグラム

2.2 ポインティングアナリシスと誤差パラメータ

ポインティングアナリシスの概要は 1.3 章で述べたが、ここではポインティングアナリシスで得られる誤差パラメータが視野の仰角、方位角方向に実際どのように効いているのかを説明する。

まず、多数の位置標準星の観測をすることで、全天の指向誤差データを求める。そしてプログラム Tpoint を用いて解析することで、以下に示す指向誤差パラメータを得る。

IA(index error in azimuth)	方位軸の原点ズレ
IE(index error in elevation)	高度軸の原点ズレ
AN(NS misalignment of azimuth axis)	南北方向への方位軸のずれ
AW(EW misalignment of azimuth axis)	東西方向への方位軸のずれ
NPAE(nonperpendicularity of azimuth and elevation axes)	方位軸と高度軸の垂直性誤差指数
CA(nonperpendicularity of elevation and pointing axes)	高度軸と指向軸との垂直性誤差指数
TF(tube flexure-sin law)	鏡筒のたわみ sin 成分
TX(tube flexure-tan law)	鏡筒のたわみ tangent 成分
ACES(Az centering error(sin component))	方位角のセンタリングエラー (sin 要素)
ACEC(Az centering error(cos component))	方位角のセンタリングエラー (cos 要素)

表 2.4: 誤差パラメータ

実際に仰角と方位角の指向誤差に対してこれらのパラメータがどのように作用しているのかを以下に示す。

2.2.1 IA(index error in azimuth)

このパラメータは架台の方位角の誤差で、方位角の原点誤差であり、以下のような依存性をもつ。

$$A = -IA \quad (2.2)$$

2.2.2 IE(index error in elevation)

このパラメータは架台の仰角の誤差で、仰角の原点誤差である。

$$E = -IE \quad (2.3)$$

2.2.3 AN(azimuth axis misalignment north-south)

このパラメータは架台の方位軸の南北方向の誤差である。

$$A \simeq -AN \sin A \tan E \quad (2.4)$$

$$E \simeq -AN \cos A \quad (2.5)$$

2.2.4 AW(azimuth axis misalignment east-west)

このパラメータは架台の方位軸の東西方向の誤差である。

$$A \simeq -AW \cos A \tan E \quad (2.6)$$

$$E \simeq +AW \sin A \quad (2.7)$$

2.2.5 NPAE(Az/El non-perpendicularity)

このパラメータは方位軸と高度軸の非垂直性誤差である。

$$A \simeq -NPAE \tan E \quad (2.8)$$

2.2.6 CA(left-right collimation error)

このパラメータは架台の左右(東西)のコリメーションエラーである。コリメーションエラーは指向方向と高度軸の非垂直性である。

$$A \simeq -CA \sec E \quad (2.9)$$

2.2.7 TF(tube flexure(sine))

このパラメータは古典的な鏡筒のたわみである。

$$Z = +TF\cos E \quad (2.10)$$

赤道座標 (時角 h , 赤緯 δ) で表すと

$$h \simeq +TF\cos \delta \sinh \sec \delta \quad (2.11)$$

$$\simeq +TF(\cos \delta \cosh \sin \delta - \sin \delta \cos \delta) \quad (2.12)$$

2.2.8 TX(tube flexure(tangent))

このパラメータは経験的な鏡筒のたわみである。古典的な sine 成分に比べてこの tangent 成分の方が実際のたわみをよくあらわすと考えられている。天頂角に対する依存性は

$$Z = +TX\cot E \quad (2.13)$$

赤道座標で表すと

$$h \simeq +TX\cos \delta \sinh \sec \delta / (\sin \delta \sin \delta + \cos \delta \cosh \cos \delta) \quad (2.14)$$

$$\simeq +TX(\cos \delta \cosh \sin \delta - \sin \delta \cos \delta) / (\sin \delta \sin \delta + \cos \delta \cosh \cos \delta) \quad (2.15)$$

2.2.9 ACES(azimuth centering error sine component)

このパラメータは方位軸が偏心しているために周期的に発生する誤差の sine 成分である。

$$A = +ACES\sin A \quad (2.16)$$

2.2.10 ACEC(azimuth centering error cosine component)

このパラメータは方位軸が偏心しているために周期的に発生する誤差の cosine 成分である。

$$A = +ACEC\cos A \quad (2.17)$$

第3章 結果

第二章で温度計を架台各部に取り付けて架台温度分布の一様性について調べるため、天体観測の時間(ドームが開いている時間)とその前後の時間の間の温度測定を8日行ったことについて述べた。また、計4回にわたりポインティングアナリシスを行い、誤差パラメータを算出すると同時にその時の典型的な温度も測定した。測定ログは表 3.1 にまとめた。

観測日時	夜間のドームの状況
1月5日14時40分ー1月6日10時30分	ドームを開けた時間が短い
1月6日15時40分ー1月7日12時40分	観測時間内で複数回ドームを開閉
1月8日15時30分ー1月9日12時20分	二回に分けてドーム開、Base 温度は測定できず
1月10日15時10分ー1月11日11時	二回に分けてドーム開
1月12日15時10分ー1月13日15時	後半夜はドーム閉
1月13日15時ー1月14日13時50分	ほぼ全夜にわたりドーム開
1月16日15時10分ー1月17日15時	複数回に分けてドーム閉
1月29日16時20分ー1月30日16時10分	二回にわけてドーム開

表 3.1: 観測状況

3.1 架台温度の一様性について

ドームスリットを開けて観測している時間帯とその前後の時間帯の各温度計のデータを取得し、縦軸を温度()、横軸を時間(日)としてグラフに表した(図 3.1, 図 3.2)。グラフには、全ての温度計の結果を示すと見ずらくなるので、温度計の中でも典型的な変化を行っているもののみ示してある。またグラフ下部には架台の伸縮に関わると考えられる2点間の温度差、すなわち高度軸を支える二本のヨークの南北、東西間での温度差なども併せて載せてある。グラフの各シンボルは以下に示す。

グラフパラメータ	意味
Base	ドーム中二階の温度
Room	天文台ドーム内温度
Topring	架台のリングの温度
yoke-top:e	ヨーク東側の上部温度
diff(yoke-e:top-bot)	ヨーク東側の上下温度差
diff(yoke-w:top-bot)	ヨーク西側の上下温度差
diff(yoke-top:e-w)	ヨーク上部の東西温度差
diff(yoke-bot:e-w)	ヨーク下部の東西温度差

表 3.2: 図 3.1,3.2 におけるパラメータの意味

測定した日の中で温度変化の少なかった日 (1月5日) と激しかった日 (1月10日) の二例について以下に詳しく説明する。その他の日のデータは Appendix に載せている。

1月5日温度変化

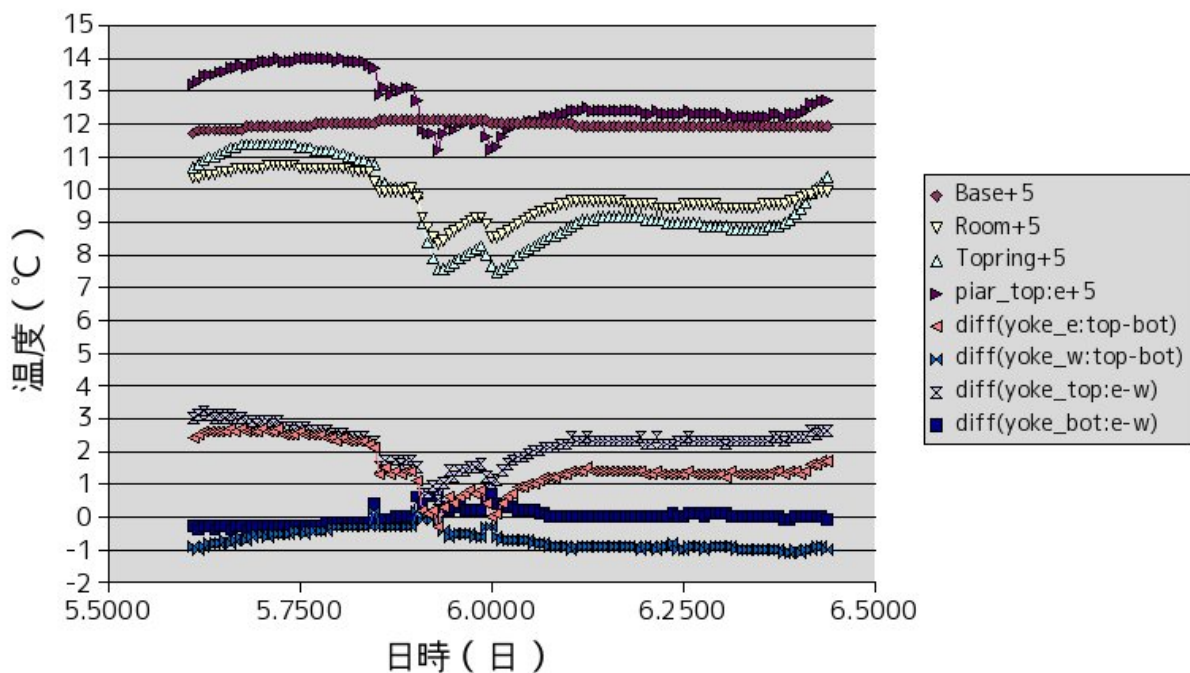


図 3.1: 1月5日温度変化図

グラフの X 軸は日時を日単位で表している。つまりは時間を 24、分の値を 1440 で割って日単位に直してある。グラフパラメータに+5 と記しているのは、グラフ下段に示した差分温度と区別して、温度変化を見るために縦方向にずらしてして表示していることを表している。温度変化を追っていくと急に温度が下がっている部分がある。これは観測のために天文台ドームスリットを開いたことによりドーム内温度が外の温度と平衡になろうとして変化した部分である。また温度が急に上昇している原因の大部分は観測終了でに

ドームを閉じたことによるものである。温度変化に2回の谷があるのは天候が不安定でドームを2回に分けて開けたためである。特徴的な温度変化を示しているのもとしてドーム中二階ある Base が挙げられる。ドーム内ではあるが、直接外界と触れない別の部屋にあるため、ほとんど温度変化の影響を受けていない。対照的にドーム内温度 (Room) や Topring、yoke-top:e は大きく変化している様子がわかる。これらは互いに温度差はあるものの、温度変化としてはほとんど同じ曲線を見せている。グラフ下部には東西のヨークの上下、計4点間の温度差を載せている。これを見ると、東側ヨークの上部の温度が関わった温度差が、温度変化とよく相関して変化していることがわかる。つまりドームを閉じている時は東側ヨーク上部の温度はヨークの他の3ヶ所に比べて温度が高いものの、ドームを開けている間は温度差はほぼゼロになっている。

1月10日温度変化

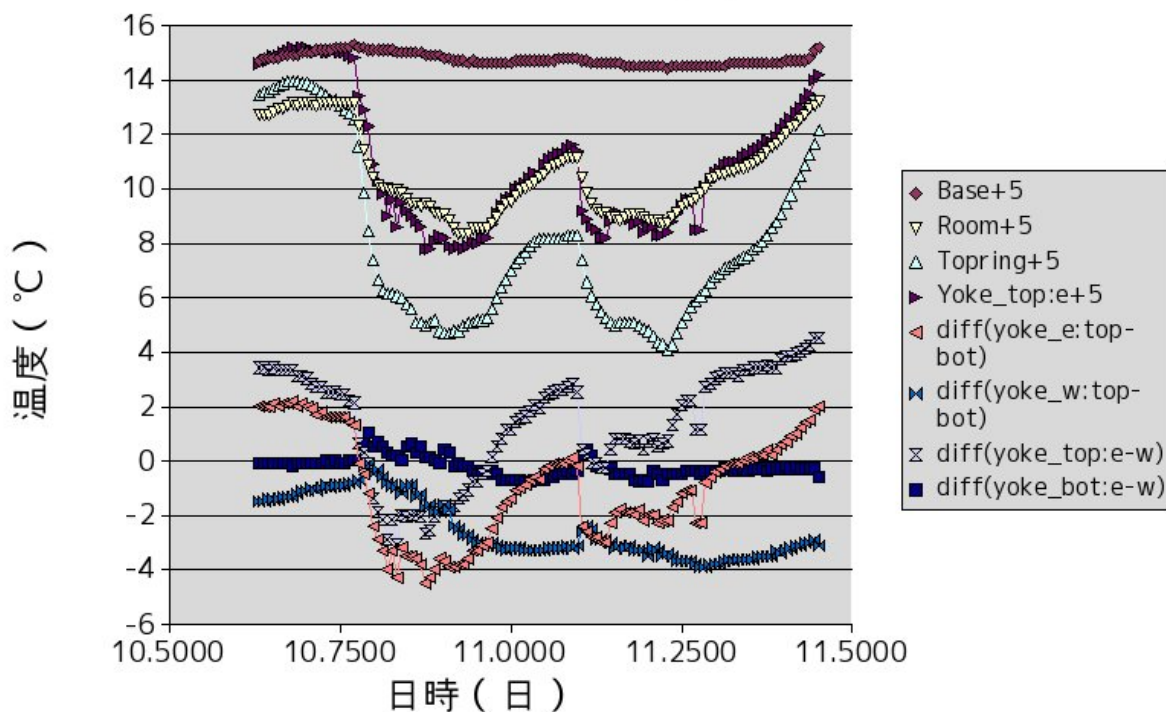


図 3.2: 1月10日温度変化図

図 3.2 に 1 月 10 日のデータを載せる。1 月 10 日は温度変化が大きいことがよくグラフからわかる。またの温度差も 1 月 5 日のグラフに比べて大きく変化しているが、その変化の様子は 1 月 5 日と同じ傾向を示している。二日間のデータを詳しくみると、ドーム内温度が下がっているとき、 $\text{diff}(\text{yoke-w:top-bot})$, $\text{diff}(\text{yoke-bot:e-w})$ のパラメータが若干上昇している所があることもわかった。その他の日のデータは Appendix にあるが、どのデータもこの二例と同じような傾向を示している。これらの結果については第四章、で詳しく考察する。

3.2 ポインティングアナリシスの結果

ポインティングアナリシスは9月18日、12月14日、12月29日、1月8日の計4回行った。9月のデータは温度計測前のため、ドーム内温度(+24.9)は別途得られている結果から参考値として引用した。

3.2.1 Tpoint フィッティング図

ポインティングアナリシスを行って、誤差指数をプログラム Tpoint でフィッティングして求める。その際、フィッティングで求めたモデル値と測定値とのずれの値の評価をして視覚化した図を得る。計4回の測定で4枚の図を得ているが、その一例を以下に示す。他の日のデータは Appendix に載せてある。

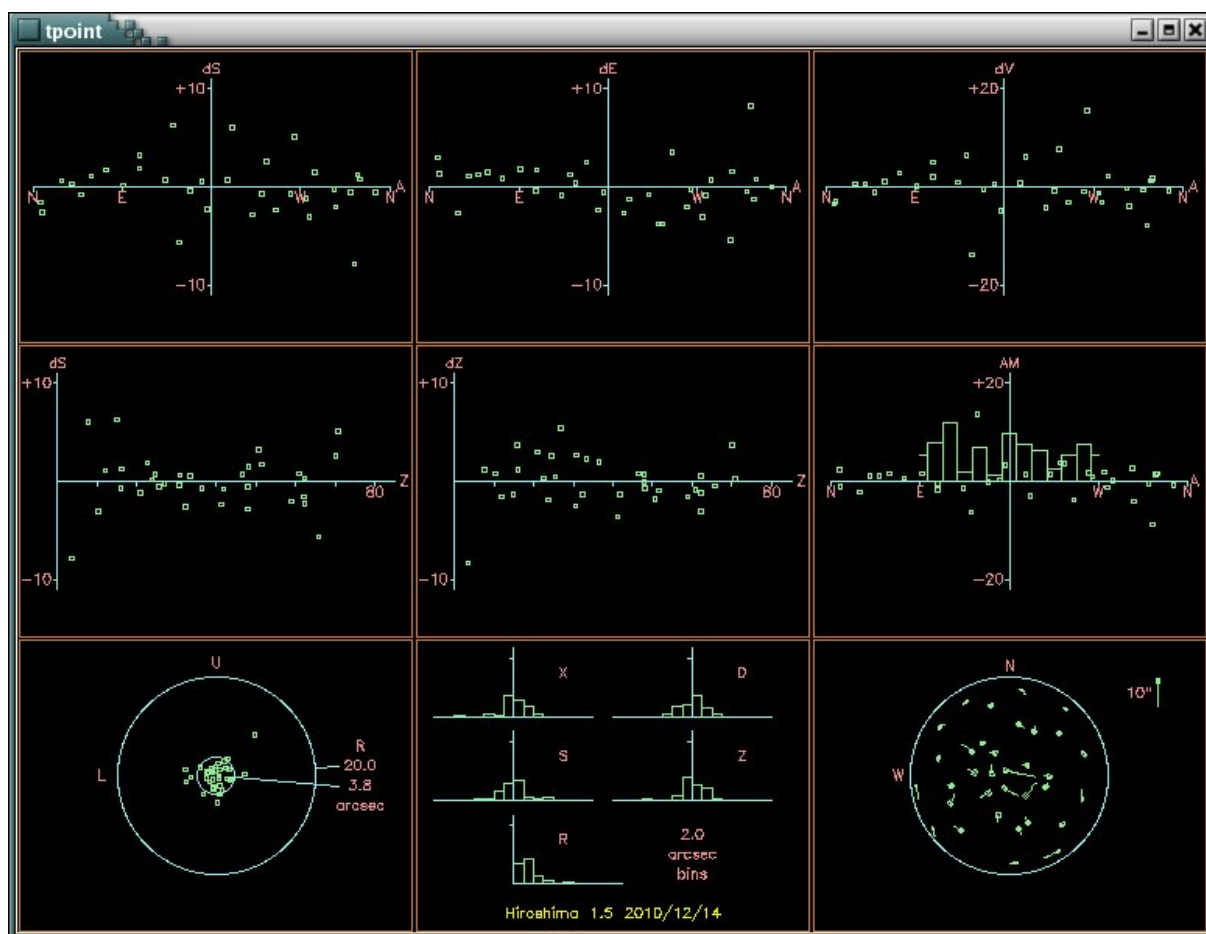


図 3.3: フィットモデルと測定値との残差を示した図

左上は東西南北に対しての方位角方向のズレ、中上は東西南北に対しての仰角方向のズレ、右上は東西南北に対しての方位角/仰角の非垂直性のズレ、中右は天頂方向に対しての方位角のズレ、中左は天頂方向に対しての天頂角のズレ、中右は東西南北方向に対してのXXXのズレ、左下はズレを二次元化したもの、中下は左下の二次元で表されたズレをを様々な断面でヒストグラム化したもの(Xは赤径、Dは赤緯、Sは方位角、Zは天頂角、Rはズレの動径成分)右下は天頂方向から見た、フィッティング後のズレのバラツキである。

この評価図を見ることで、フィッティングした 34 星それぞれのポインティングのずれの様子がわかる。この図を用いてあまりにも特異なデータ点がある場合は、入力データから省くことができる。今回の 4 回の測定では特に特異なデータ点は見あたらないので、全 34 天体を tpoint によるフィッティングに用いている。

3.2.2 誤差パラメータ

前のセクションでは個々の星とのポインティングずれを示した。これは、tpoint プログラムでフィットして求めたずれモデルから測定値の残差を示したものであるが、それらのモデルにおける架台のゆがみに関するパラメータ (誤差パラメータ) は表 3.3 の通りである。

誤差パラメータ	9月18日	誤差	12月14日	誤差	12月29日	誤差	1月8日	誤差
IA	197.900	8.56	177.04	8.25	187.1	6.36	191.43	6.75
IE	286.1104	1.98	319.89	1.99	287.74	1.54	288	1.7
AW	-3.03	0.79	-4.43	0.85	-3.17	0.66	-6.71	0.74
AN	-6.91	0.83	-7.85	0.84	-8.61	0.65	-9.25	0.75
NPAE	17.46	10.65	-4.56	10.37	7.1	8.21	14.22	8.57
CA	175.36	12.78	203.15	12.39	185.25	9.73	176.5	10.17
TF	11.68	6.45	9.4	6.23	17.4	4.88	20.78	5.12
TX	7.73	2.29	12.22	2.17	14.93	1.78	14.55	1.76
ACES	-3.71	1.59	-5.06	1.7	-3.25	1.35	-6.11	1.49
ACEC	-7.24	1.57	-8.35	1.67	-5.85	1.28	-6.04	1.47

表 3.3: 誤差パラメータ結果。単位は秒角 (温度を除く)
 温度、9月18日 24.9 12月14日 10.8 12月29日 6.9 1月8日 7.14

この表から、IA,IE の値がほかのパラメータに比べて非常に大きいことがわかる。これは望遠鏡駆動の基本となる二軸の原点のズレであり、器械精度としてこの程度になることは一般的で、特に問題ない。NPAE,CA はそれぞれ、高度軸と方位軸の垂直性及び方位軸の指向方向に対する鉛直度であり、これらも加工、設置の精度で決まり得るもので、少々大きめの値になるのは問題ない。AW,AN,ACES,ACECなどは方位軸の不完全性にかかわる誤差で、値、誤差ともに小さな値になっているのがわかる。TF,TX に関しては鏡筒のたわみに関する誤差パラメータであるが、やはり経験的にたわみをよく表すとされる TX の値の方が誤差が小さく信頼性も高いようである。

この計 4 回のポインティングアナリシスで得られた誤差パラメータと測定日の平均のドーム内温度とを図にして以下に示す。

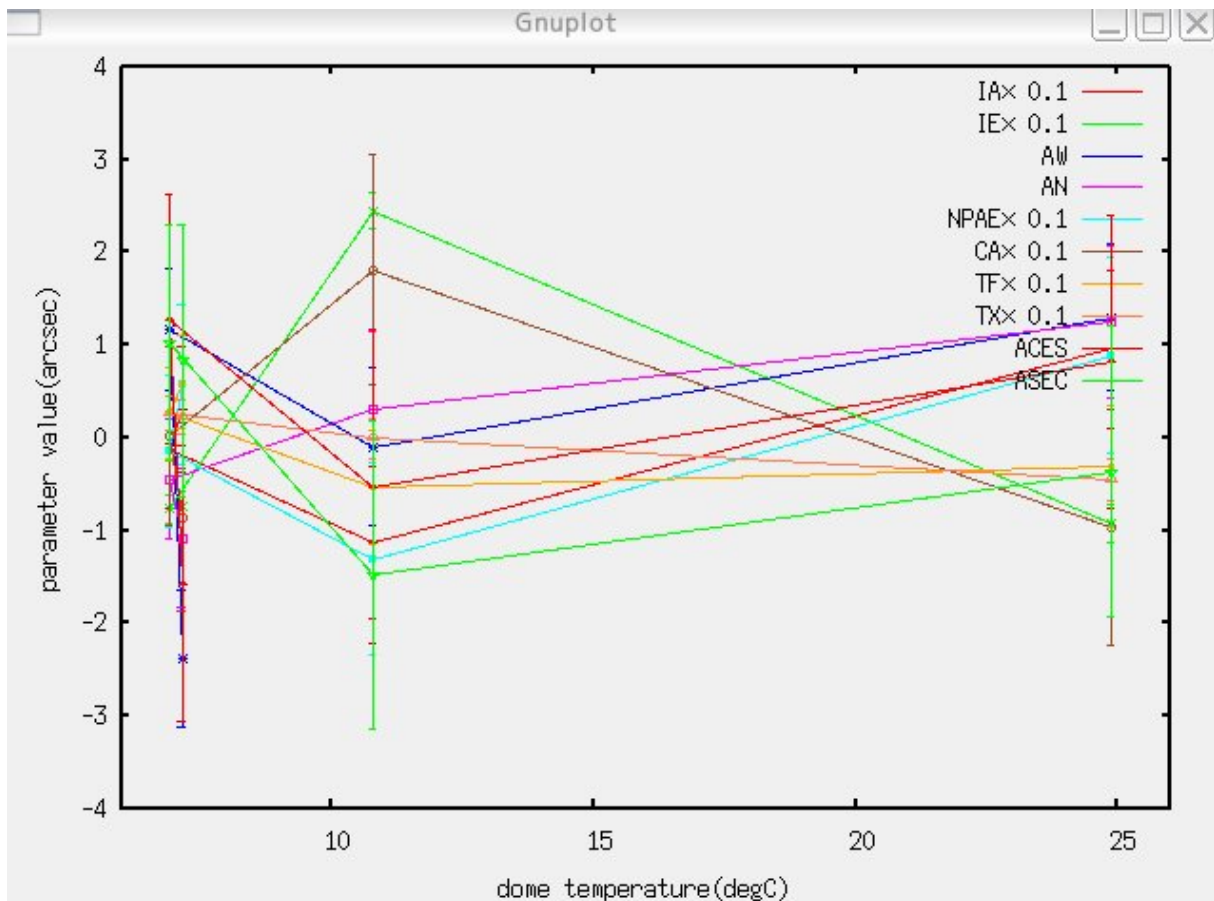


図 3.4: 誤差パラメータの温度依存性

図 3.4 に、ポインティングアナリシスで得られた誤差パラメータのドーム内温度依存性をグラフ化したものを示す。見やすくするために誤差パラメータ (IA, IE, NPAE, CA, TF, TX) に関しては真の値を十分の一にして、他のグラフと同程度の値に収まるようにスケールして載せている。ドーム内温度は、9月18日が+24.9、12月14日が+10.8、12月29日が+6.9、1月8日が+7.14 となっている。このグラフを見るかぎり、温度変化と共に有意に誤差パラメータが変化している傾向は見られなかった。これは測定点 (34 星) が少なかったためかまたポインティングアナリシスを行う回数が不十分であったためである可能性がある。しかし、今の方法では1天体に指向するまでの時間が約3分程度と時間がかかっており、通常の観測時間を圧迫してしまうためポインティングアナリシスの作業自体の効率が問題となってくるため、単純に解決できる訳ではない。

この詳しい考察は第4章で行う。

第4章 考察

4.1 架台各位置とヨーク伸縮の温度依存性

第三章で得た架台温度の一様性について考察を行う。第一章で述べたように、指向精度悪化に特に大きな影響を与えると考えられるのは、東西ヨークの熱膨張による伸縮である。以下では架台各位置の温度依存とヨーク伸縮の温度依存性について、別個に議論していく。

4.1.1 架台各位置の温度依存性

図 4.1 に最も特徴的とみられる 1 月 10 日の架台各位置の温度変化を示す。

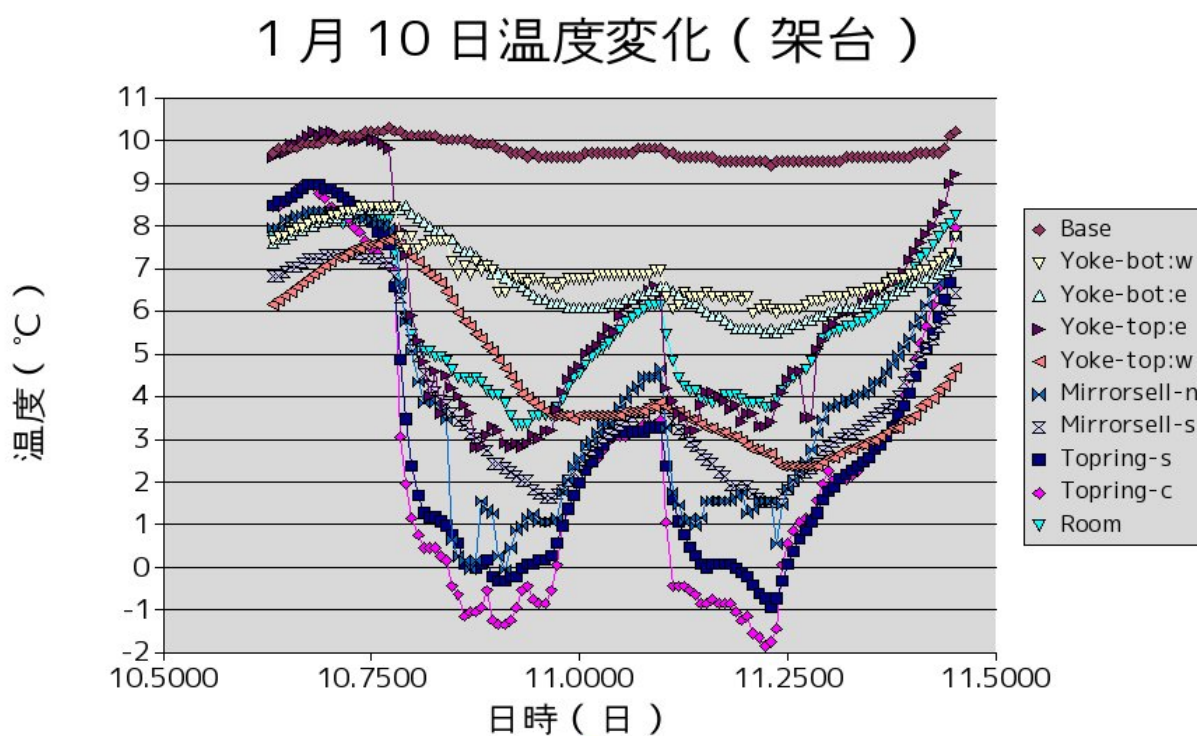


図 4.1: 1 月 10 日 15 時 10 分 - 1 月 11 日 11 時の間の架台各位置の温度変化

架台各位置と温度計の対応表は以下である。

パラメータ	温度計	設置箇所
Base	snare1	ドーム中二階
yoke-bot:w	snare2	ヨーク下部西側
yoke-bot:e	snare3	ヨーク下部東側
yoke-top:e	snare4	ヨーク上部東側
yoke-top:w	snare5	ヨーク上部西側
mirrorsell-n	snare6	主鏡セル北側
mirrorsell-s	snare7	主鏡セル南側
topring-s	snare8	トップリング南側
topring-c	snare9	トップリング中央
room	snare10	ドーム内床付近

表 4.1: 温度計設置箇所一覧

図 4.1 からドームスリットを開けたときは温度が下降して、閉じると上昇している様子がわかる。また、ドームスリットの開閉の影響を余り受けない部分に関しては、建物躯体の温度（望遠鏡ピアを通じて地下へ通じている）の影響を受けていると考えられる。

グラフの変化の様子から測定点をいくつかに分けることができる。一つ目は、yoke-bot:e,yoke-bot:w,yoke-top:w のグループ。二つめは、room,mirrorsell-s のグループ。三つめは、yoke-top:e,mirrorsell-n,topring-s,topring:c のグループである。Base はドーム中二階にあるので、例外的な温度変化するのでグループからは省く。

一グループ目はドームスリットを開けたときの温度変化の影響をゆっくりとしか受けない。これは架台など大質量の金属でできていることや、ドーム躯体に接していることから、熱容量が大きく温度変化をあまり受けていないためと考えられる。このグループ内で温度の高低差が見られるのはドーム床から離れるほど外気の影響の受けやすいことが反映されていると考えられる。

二グループ目は外気の影響を受けているものの、第三のグループほど急激な温度変化は起こっていない箇所である。

三グループ目は急激に温度変化しその変化の割合も大きいグループである。理由として床から離れていてドームスリットに近く、外気の影響を受けやすくなっていること、第二に鏡筒など熱容量が小さい箇所であるために温度変化を受けやすいことが原因と考えられる。

次に yoke-top:e,yoke-top:w の変化の違いについて議論する。yoke-top:e の近くは熱廃棄装置 (HOWPol の冷蔵機コンプレッサー) がついているために、ドームスリットを閉じている場合はどのパラメータよりも温度が高くなっている、しかしドームスリットを開けると急激に温度変化してしまう。yoke-top:w も同じヨークの上部にありながら yoke-top:e に比べるとゆっくりとした温度変化しか見せていない。これは yoke-top:w のまわりには大型の装置があり、風にさらされにくいいため、外気の影響を受けにくいことが理由であると考えられる。

今回の測定により架台各位置の温度変化にはバラツキもあり相関もあることがわかった。特に温度変化の大きい部分とそうでない部分があり、観測時にその変化はより大きくなってしまっている。これは観測時の指向精度になんらかの影響を与えることが推測できる。

4.1.2 ヨーク伸縮の温度依存性

4.1.1 章では架台各部の温度変化について考察したが、この章はより指向精度に影響を与えると推測されるヨークの伸縮の温度依存性とその影響による指向精度の悪化について考察する。

まず三章で得られた結果をもとに、ヨークがどの程度温度変化をしているのかを考察する。ドーム開閉により最も大きな変化を示した1月10日のヨーク東西、上下部差分温度のグラフを以下に示す。

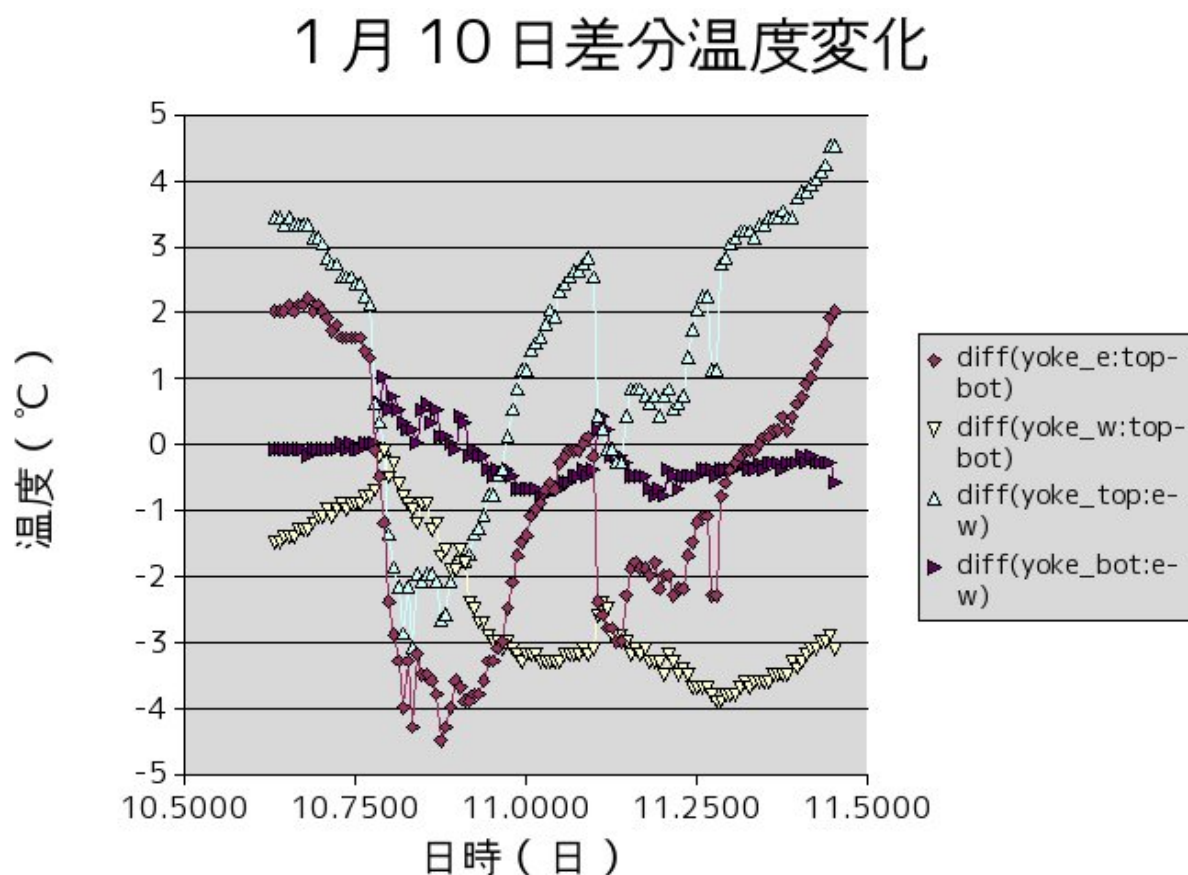


図 4.2: 1月10日15時10分ー1月11日11時の間の
ヨーク東西、上下部差分温度変化図

$\text{diff}(\text{yoke-e:top-bot})$ はヨーク東側の上下温度差、 $\text{diff}(\text{yoke-w:top-bot})$ はヨーク西側の上下温度差、 $\text{diff}(\text{yoke-top:e-w})$ はヨーク上部の東西の温度差、 $\text{diff}(\text{yoke-bot:e-w})$ はヨーク下部の東西の温度差である。特徴として熱廃棄装置のあるヨーク東側の上部の変化が関わっている、 $\text{diff}(\text{yoke-e:top-bot})$, $\text{diff}(\text{yoke-top:e-w})$ はドームスリット開閉による温度変化を強く受けている。 $\text{diff}(\text{yoke-bot:e-w})$ はドーム躯体に近くドームスリットからの距離が離れているので外気の温度変化をあまり受けていない、 $\text{diff}(\text{yoke-w:top-bot})$ は三章の結果にあるように、Room の温度変化によく似ている。

これよりヨークの伸縮に関わってくる東西ヨークの上下の差分温度、つまり $\text{diff}(\text{yoke-e:top-bot})$ 、 $\text{diff}(\text{yoke-w:top-bot})$ の二つの変化について考える。ドームスリット開放前より左右ヨークには温度があるが、ドームスリット開閉することで、互いの温度差が縮まったり、広がったりと、不規則な変化をしていることがわ

かる。この晩の左右ヨークの最高温度差は約 5 ° である。ヨークの伸縮は、は 1 秒角 程度の変化でも指向精度の誤差を越える可能性があるので、次の小節で指向精度に対する影響を定量的に評価する。

4.1.3 金属の熱膨張と指向精度の悪化

4.2.2 章でドーム開閉に伴う温度変化が指向精度の悪化に影響を与える可能性を指摘した。ここではヨークの伸縮と指向精度の変化について議論する。まずヨークは金属 (鉄鋼材 SS400) でできているので、その金属の大きさや熱膨張率 (線膨張率) を議論する必要がある。またヨークの上下に温度差がある場合、その温度勾配が一定であるとして例えば温度差が 5 ° あった場合はヨーク全体が温度差の半分の 2.5 ° だけ変化した場合と一致することを考慮する。以上から、片方のヨークが 1 ° 温度変化した場合を考えてみる。ヨークの高さ (カセグレン床から高度軸までの高さ) は 2600mm である。ヨークの素材である SS400 の線膨張率 (いわゆる膨張率はこの線膨張率である) は、常温で $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。つまり、ヨークは 1 ° 温度変化があると $a = 2600 \times 11.8 \times 10^{-6} \text{ mm} = 0.036 \text{ mm}$ だけ伸び縮みすることになる。また、左右のヨーク間に 1 ° の温度差があった場合に、高度軸がどれだけ傾くかは、 a と、左右のヨーク間の距離から計算できる。左右のヨーク間の距離は図 1.2 から 2485 mm なので、 $\tan \theta = 0.036/2485$ より $\theta = \arctan(0.036/2485) = 8.3 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ} = 2.98 \text{ arcsec}$ の傾きがある。この傾きは 2 章で述べた誤差パラメータの NPAE にあたるので、2.2 式に代入することにより

$$A = 2.98 \tan E \quad [\text{arcsec}] \quad (4.1)$$

となり方位軸方向への誤差を出すことができる。例えばここに $E=30^{\circ}$ を代入すると $A=1.72 \text{ arcsec}$ となり 1 ° の温度変化で方位角方向におよそ 1 秒角の誤差生じ、 $E=60^{\circ}$ を代入すると $A=5.16 \text{ arcsec}$ となり 1 ° の温度変化で方位角方向におよそ 3 秒角の誤差が生じることになる。これらの秒角誤差は観測精度に十分影響を及ぼすほどの値である。さらにもし左右ヨークの温度差が 5 ° あった場合を考える。温度差が 5 ° であるのでヨーク全体として 2.5 ° 温度変化していると考えられる。つまりヨークは $2600 \times 11.8 \times 2.5 \times 10^{-6} \text{ mm} = 0.09 \text{ mm}$ 伸び縮みし、高度軸の傾きは $\theta = 7.47 \text{ arcsec}$ となり指向精度に多大に影響を及ぼすと推察される。この結果により、ヨークの熱膨張による伸縮は観測精度に影響を及ぼすと考えられるので、ヨークの温度変化に対する対策が必要になると考えられる。

4.2 誤差パラメータ温度依存性とポインティングアナリシス改善策

三章で計 4 回のポインティングアナリシスの結果を示した。表 4.2 に各誤差パラメータの平均値、および変動幅 (peak-to-peak 値)、そしてフィッティング時の各パラメータの決定精度の平均を示している。これから、どのパラメータも変動幅は 4 秒角以内に収まっていることがわかる。鏡筒のたわみによるパラメータ (TF, TX) は変動幅が特に小さく、安定している様子が伺える。高度の原点ずれである IE はフィッティングにより高い精度で求まっており、この 3 秒角幅の変動は有意であろうと考えられる。それ以外のパラメータは変動幅に比べてフィットの誤差が大きく、有意な変化を示したとは言いがたい。NPAE, CA という高度軸の水平性に関するパラメータの誤差が、他のパラメータに比べてやや大きいように見える。これは、34 星のデータを取得している間に、架台温度の非一様な変化による影響を受けたことによるとも考えられる

が、今回の結果だけからは有意とは言い難い。また有意な変化を示したと思われる IE についても温度に対する明瞭な依存性はみられなかった (図 3.4)

誤差パラメータ	平均値	peak-to-peak	平均誤差
IA	0.42	2.09	0.75
IE	0.68	3.38	0.18
AW	0.73	3.68	0.76
AN	0.47	2.34	0.77
NPAAE	0.44	2.2	0.94
CA	0.56	2.78	1.13
TF	0.23	1.14	0.75
TX	0.14	0.72	0.2
ACES	0.57	2.86	1.53
ACEC	0.5	2.5	1.5

表 4.2: 誤差パラメータの peak-to-peak と平均誤差

すなわち、有意に誤差パラメータが温度との相関を持っているとは言えない。ここでは、より詳しい測定をするために改善策を検討してみる。改善策として、一つ目は今回ポインティングアナリシスを全 34 天体に対して行ったが、指向誤差を低減させるために指向する星の数を増やすという手段がある。二つ目はポインティングアナリシスの回数を増やして、誤差パラメータと温度のデータ数を増やす手段がある。しかしこれらの測定は望遠鏡を目標の星に対して指向し、視野中心に手動で合わせる作業が必要で、1 天体あたり 3 分程度かかってしまうので、ポインティングアナリシス 1 回に 100 星指向する場合は 5 時間を要することになる。これは貴重な観測時間を考えると現実的ではなく、ポインティングアナリシス自体の作業の効率を改善する抜本的な改善案が必要になる。それが次に述べる星像パターンマッチングになる。また別の観点として 4.1 章で考察した架台温度の伸縮による影響も考えられる。ドームを開けた直後は架台の温度が変化し易いため、ポインティングアナリシスを開始する 1 時間以上前にドームを開けておくことが望ましいが、今回のポインティングアナリシスではそれが徹底できていなかった。今後は 4.2.2 章に述べる改善策をポインティングアナリシスの際にも適用することが望ましい。

4.2.1 星像パターンマッチングによる指向精度向上への方策

星像パターンマッチングとは、視野内に写り込んでいる星ぼしの位置のパターンをあらかじめ用意された星のカタログと対応づけて、現在向いている位置の天球座標を自動的に特定することを指す。具体的には、取得した画像から星像を検出し、パターンマッチングにかけて、視野中心の座標を高い精度で導出する。この座標と実際に望遠鏡に命令した座標との差が指向誤差になる。この指向誤差を Tpoint プログラムでフィッティングすることによりポインティングアナリシスができる。星像パターンマッチングを用いると、多数の位置での画像データを撮り貯めた後に自動で指向誤差の計算ができるようになるので、ポインティングアナリシスにかかる時間と手間を大幅に軽減できる。今回の 34 星の星の位置検出を撮像、視野中心検出の作業はおよそ 3 時間かかったが、パターンマッチングを導入することで、作業時間がおよそ六分の一

になると考えられる。また自動の作業が増えるので、人的作業時間の浪費を軽減させることができるようになる。これはポインティングアナリシスの回数を増やすことにも役にたち、指向精度を向上させることができるようになる。天体画像のパターンマッチングのソフトウェアとして東京大学の松永氏が開発したライブラリが無償で配布されている。(http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/hmatsuna/software/OPM.html)

4.2.2 温度変化に対する指向精度向上への方策

本研究では、架台の温度の非一様性、特に左右ヨークの伸縮による指向精度の悪化を議論してきた。ここでは、温度変化に対する対策を議論する。

一つ目に、現有の望遠鏡設備を保ったまま温度変化に対する対策を考える。観測精度に最も影響すると考えられるのが、ドームスリットを開けてから、外気との平衡温度に達するまでの架台各位置、特にヨーク東側の上部の温度変化である。この温度変化が進行している際の観測では指向精度が落ちていると考えられる。考察で述べてきたように、左右ヨークの温度差は方位角方向のずれに関係してくるので、観測はこの激しい温度変化を避けることが望ましい。激しい時間変化をしている時間を調べてみると、ドームを開けてからおよそ1時間-1時間20分程度である。よってすぐに対処可能な対策として、観測を始める前に1時間程度ドームスリットを開けて、激しい温度変化をしている時間は観測しないということが考えられる。また夜間観測中のドームスリットの開閉による温度変化も観測精度に影響している可能性がある。温度変化を一定にするためにも観測時間内はドーム内温度と外気温が平衡である必要がある。東広島天文台ドームにはベンチレータという通風窓があるので、夜間のドーム閉塞時もベンチレータを開放し、ドーム内温度を一定に保つ対策が考えられる。

二つ目は、ヨーク東側上部にある熱廃棄装置への対策である。これは、HOWPolとCCDを冷やす冷凍機のコンプレッサーである。この熱廃棄装置があるために、普段から架台各部とヨーク東側上部との温度差が生じてしまい、ドームスリット開放時から外気温との平衡温度になるまでの時間がかかってしまっていると考えられる。この影響を軽減するための方法が、熱廃棄装置にダクトを取り付け、架台に熱廃棄が当たらないように対処することができる。また装置とコンプレッサーとの間を結ぶフレキシブルケーブルを伸ばすことで、熱廃棄装置自身をドーム外に移動する対処も考えられるが金属製のフレキシブルケーブルであり自由に曲げることはできないので、大きく回転する望遠鏡の外まで伸ばすことは容易ではない。

最後に架台温度一様性について述べておきたい。ここまで、左右ヨークの温度差に議論してきたが、ヨーク上部の温度変化の様子が下部に比べてあまりにも顕著すぎる。このことは、ヨークの温度勾配が一様ではなく、上部のみが特に大きく変化していることを示唆しているように思われる。この変化をさらに精度良く測定するために、ヨークに取り付けてある温度計の数を増やす必要があると考えられる。これは他の架台に取り付けた温度計にも同様だが、温度計を増やしすぎると、データ処理数の問題も浮上してくる。

第5章 まとめ

本研究ではかなた望遠鏡の指向精度と架台の温度分布の関係を調べてきた。まず、背景としては指向精度が季節変化することを受けて、もし架台が温度変化するならば指向精度に影響するならば、架台のなかでも左右ヨークの温度差がヨークの熱膨張による伸縮を生み、この伸縮が高度軸と方位軸の垂直性に影響を及ぼすと考えた。またポインティングアナリシスをする中で、Tpoint プログラムによって指向誤差を誤差パラメータにフィッティングすることができるので、誤差パラメータを計4回のポインティングアナリシスから測定し、その時のドーム内平均温度との相関を調べることを試みた。

そこで、温度計を用意してキャリブレーションを行った後、計10個の温度計を架台の各部分に取り付け、測定を開始した。測定された架台各部の温度を左右ヨークの温度差を含めて詳しく考察した結果、左右ヨークには温度差があることがわかった。熱廃棄装置のあるヨーク東側上部が、ドームスリット閉めている昼間はその他の架台の温度より高く、夜間、観測を開始してドームスリットを開放した直後から熱廃棄の影響が消え、急激な温度変化を示していることがわかった。また、この温度差による伸縮が高度軸と方位軸の垂直性の誤差になり、指向誤差として具体的な数値で影響してくることを示した。さらに、架台各部の急激な温度変化をしている際の観測は、高精度の指向を行う必要がある観測では望ましくないことが結果から推察できた。

ポインティングアナリシスで得られた誤差パラメータと温度の相関については、得られた結果からは有意な相関が見られなかった。有意な相関を得るには、サンプルを数倍以上増やさないといけないと考えられるが、現在の方法では時間がかかりすぎて観測時間を圧迫するため、効率の高い測定が必要になる。

以上の結果を踏まえて、架台各部の温度変化が望遠鏡の指向精度に影響を及ぼす可能性があることを証明し、またその改善対策までを議論した。望遠鏡指向精度向上のために、温度変化の急激な時間帯での観測を避ける対策は有効であろう。またポインティングアナリシスの効率を上げるためにおよび指向精度向上のための星像パターンマッチングを導入することが望まれる。

第6章 Appendix

・ 温度観測結果一覧

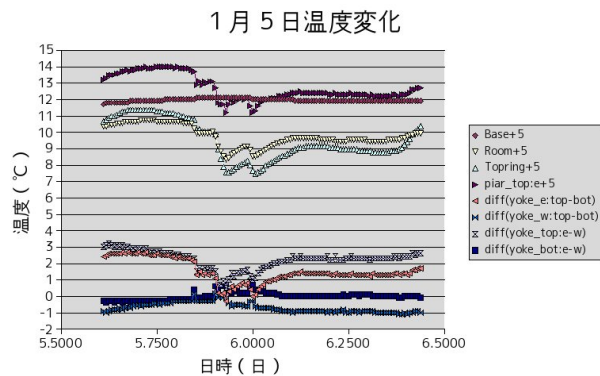


図 6.1: 1月5日温度変化図

これ図は結果に示した1月5日の温度変化図で、夜間のドームスリット開閉が少なく、架台の温度変化は緩やかであったことがわかる。

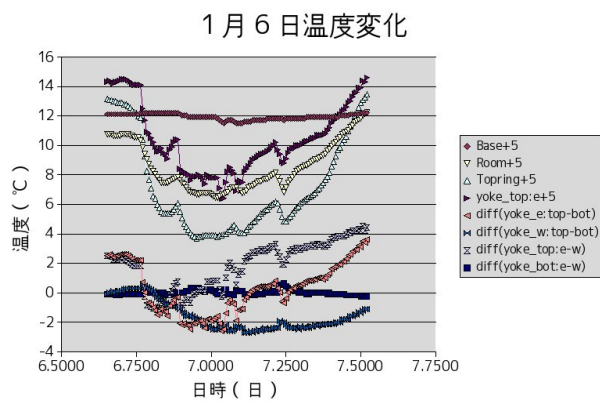


図 6.2: 1月6日温度変化図

この図は1月6日の温度変化図で、夜間複数回ドームスリット開閉を行い、架台の温度変化は急激であったことがわかる。

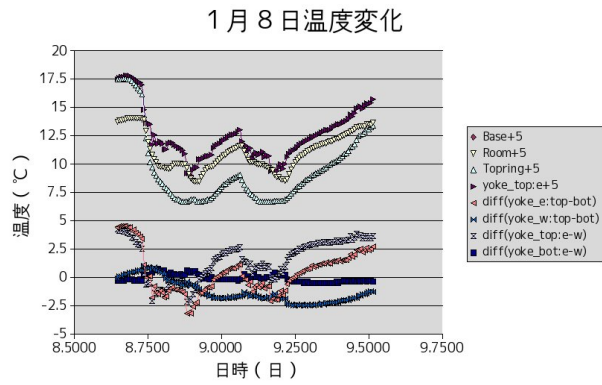


図 6.3: 1月8日温度変化図

この図は1月8日の温度変化図で、夜間前半と後半の二回にわけて長い時間ドームスリットを開放していること、架台の温度変化は緩やかであったことがわかる。

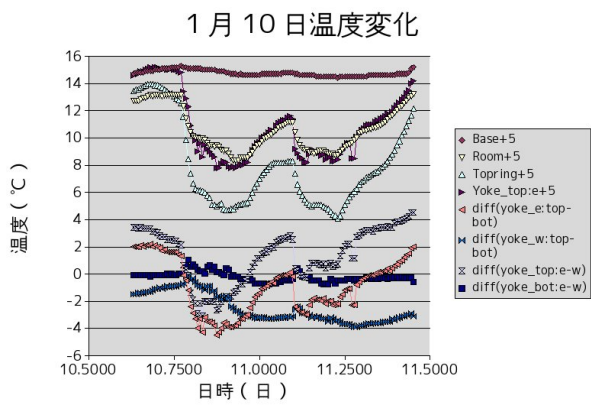


図 6.4: 1月10日温度変化図

この図は1月10日の温度変化図で、夜間前半と後半の二回にわけて長い時間ドームスリットを開放していること、架台の温度変化は急激であったことがわかる。

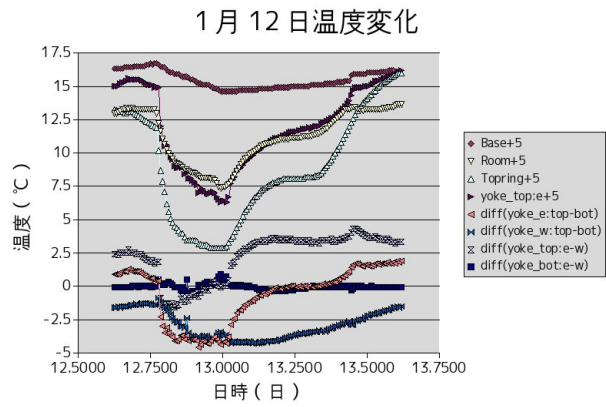


図 6.5: 1月12日温度変化図

この図は1月12日の温度変化図で、夜間前半に長い時間ドームスリットを開放しその後は閉じていること、架台の温度変化は滑らかで、大きいことがわかる。

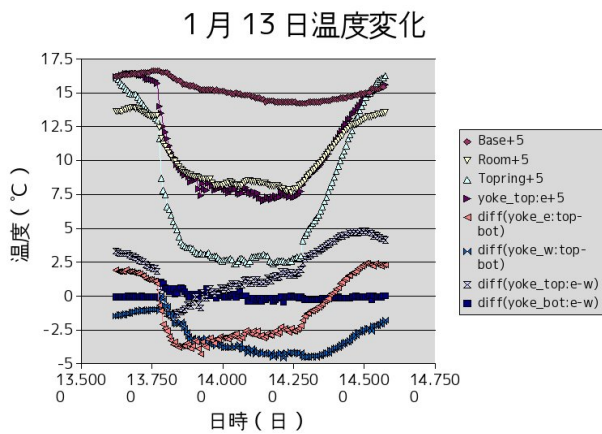


図 6.6: 1月13日温度変化図

この図は1月13日の温度変化図で、夜間全体を通してドームスリットを開放していて、架台の温度変化は滑らかで、大きいことがわかる。

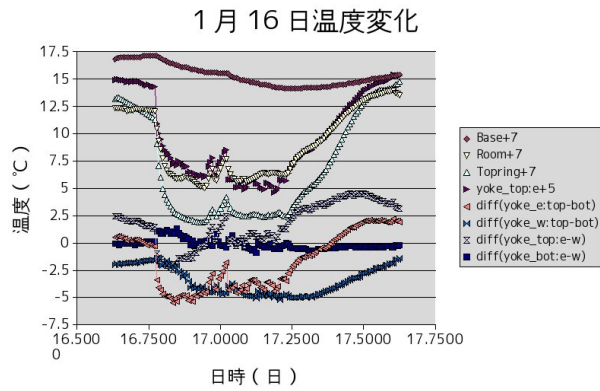


図 6.7: 1月16日温度変化図

この図は1月16日の温度変化図で、夜間全体を通してドームスリットを開放しているが、数回開閉をしているのがわかる。架台の温度変化は滑らかであるが、大きいことがわかる。

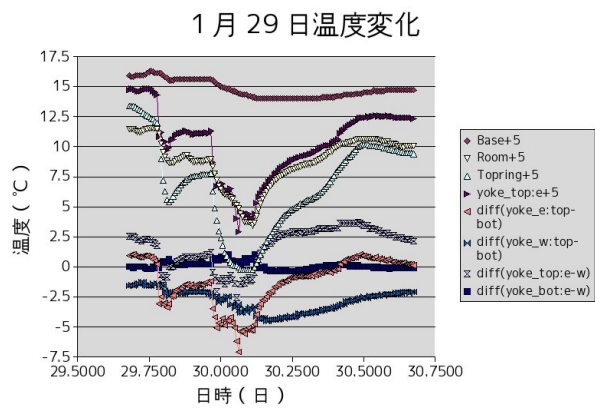


図 6.8: 1月29日温度変化図

この図は1月29日の温度変化図で、夜間前半に一回、後半に長い時間ドームスリットを開放しているのがわかる。架台の温度変化は急激で、大きいことがわかる。

・ Tpoint フィッティング図一覧

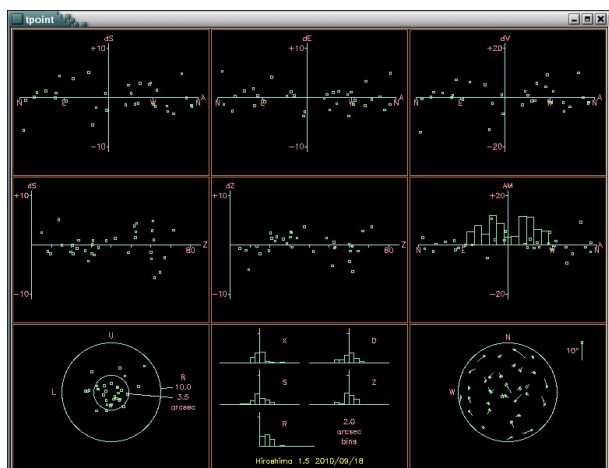


図 6.9: 9月18日フィッティング図

この図は9月18日に行ったポインティングアナリシスで測定した指向誤差とモデル値をフィッティングした図である。この図を見ると、ズレデータはおよそ3.5秒角内に入っていて、天頂や水平付近でズレが大きいことがわかる。

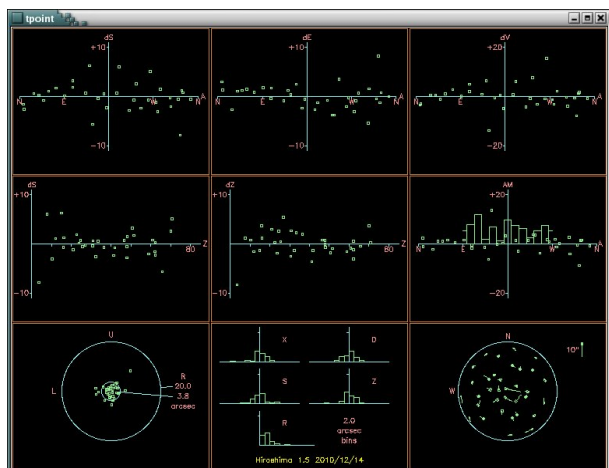


図 6.10: 12月14日フィッティング図

この図は12月14日に行ったポインティングアナリシスで測定した指向誤差とモデル値をフィッティングした図である。この図を見ると、ズレデータはおよそ3.8秒角内に入っていて、天頂付近でズレが大きいことがわかる。

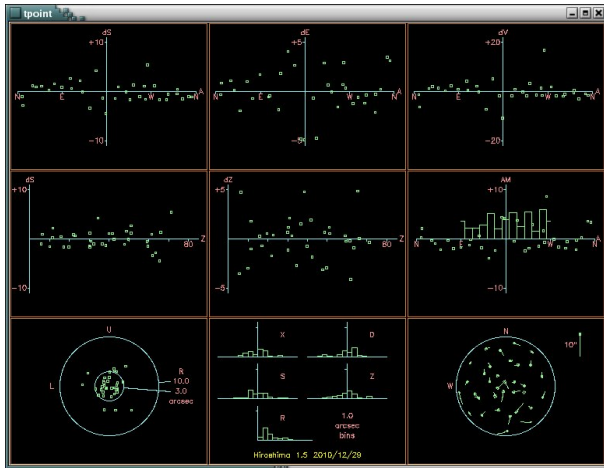


図 6.11: 12月29日フィッティング図

この図は12月29日に行ったポインティングアナリシスで測定した指向誤差とモデル値をフィッティングした図である。この図を見ると、ズレデータはおよそ3.0秒角以内に入っていて、天頂付近と、南東方向でズレが大きいことがわかる。

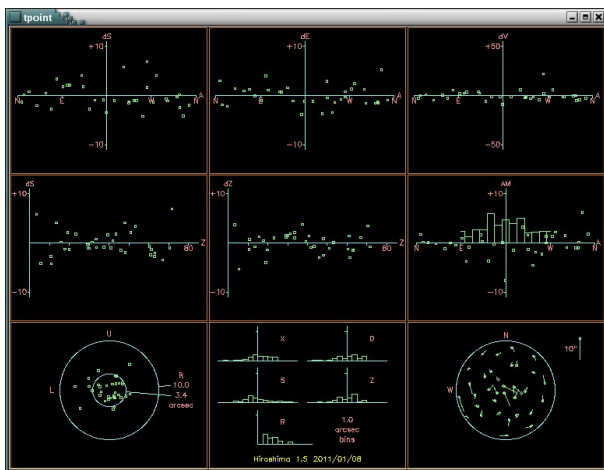


図 6.12: 1月8日フィッティング図

この図は1月8日に行ったポインティングアナリシスで測定した指向誤差とモデル値をフィッティングした図である。この図を見ると、ズレデータはおよそ3.4秒角内に入っていて、天頂付近と、西南西方向水平付近でもズレが大きいことがわかる。

謝辞

本研究におきまして、御指導を下さった宇宙科学センター川端先生、他本研究室所属のみなさまには多大な御迷惑をおかけしました。皆様の御享受のもと無事卒業論文完成に至ることができました。また私生活で回胴遊戯談義を共に楽しんだ宇井君には特に感謝しています。この場を借りて皆様にお礼申し上げます。

関連図書

- [1] A Telescope Pointing Analysis System
- [2] Software Manual of Pointing Analysis