

修士論文

南極 40cm 赤外線望遠鏡の開発  
と性能評価

東北大学大学院理学研究科  
天文学専攻

沖田 博文

平成 21 年度



# 要旨

南極内陸部のドームふじは赤外線天文学にとって最も良い観測地の一つである。南極の冷たく乾燥した大気は深い検出限界を、地上 18m と予想される接地境界層の上の安定した大気は高い空間分解能をもたらすと考えられている。さらに一日中太陽の昇らない極夜によって最長 2,000 時間にわたる連続観測が可能である。その為南極大陸内陸高原に設置された 2m クラスの赤外線望遠鏡はハワイ・マウナケア山頂の 8m 望遠鏡と同程度の性能を有し、「深い検出限界」「高い空間分解能」「長い連続観測時間」を持つユニークな観測装置となる。

そこで我々は実際にドームふじが優れた観測地であるかどうか確かめる為、2010 年度にドームふじにおいて光学赤外線望遠鏡を用いた最初のサイト調査を計画している。このサイト調査で用いられる望遠鏡が本修士論文で述べる「南極 40cm 赤外線望遠鏡」(Antarctic Infra-Red Telescope with a 40cm primary mirror, AIRT40) である。2010 年度の観測は太陽の沈まない夏期 1 ヶ月という限定的なものではあるが、南極 40cm 赤外線望遠鏡を用いた DIMM によるシーイング測定や赤外線検出器による背景放射の測定、および南極の低い大気散乱を生かした金星連続観測を行う計画である。また 2012 年度からは南極 40cm 赤外線望遠鏡を用いたリモートによる越冬観測も計画されている。

しかし南極で天体観測を行う為にはドームふじの最低気温 $-80^{\circ}\text{C}$  という極低温環境に対応する望遠鏡が必要である。そこで本修士論文では、まず南極 40cm 赤外線望遠鏡が正しく機能するかどうかハード/ソフト両面の評価実験を行い正しく機能することを確認した。次に望遠鏡の輸送・設置・観測を効率的に行えるよう運搬ハンドル、極軸調整プレート、極軸望遠鏡、Dec 軸バランス調整機構を開発した。また南極での整備作業を効率良く行う為に Dec 軸モーターユニットの改造も行った。さらに望遠鏡の各ユニットを $-80^{\circ}\text{C}$  まで冷却した駆動実験を行い、各ユニットが $-80^{\circ}\text{C}$  でも作動することを確認した。

これらに加え追尾・導入精度と光学性能の評価も行った。追尾精度の評価からピリオディックモーションは $4.3 \pm 1.8''$  で追尾補正無しでも 5 秒程度の露出が可能であることがわかった。また導入精度の評価から RA 軸と Dec 軸の直交誤差が $87 \pm 21''$ 、Dec 軸と光軸の直交誤差が $320 \pm 29''$ 、Dec 軸バックラッシュが $-86 \pm 3.8''$  で導入誤差は最大で $8'$  程度あることがわかった。さらにハルトマン定数は $0.59''$  であった。これらの結果から南極 40cm 赤外線望遠鏡は 2010 年度に計画されているドームふじ基地でのサイト調査・試験観測に必要な性能・精度をすべて有する事が示された。



# 目次

|                    |    |
|--------------------|----|
| 要旨                 | i  |
| 第 1 章 赤外線天文学       | 1  |
| 1.1 赤外線観測          | 1  |
| 1.2 赤外線撮像と等級の定義    | 2  |
| 1.2.1 天体の明るさ       | 3  |
| 1.2.2 空の明るさ        | 3  |
| 1.3 天体の検出          | 5  |
| 1.4 赤外線観測を妨げるもの    | 6  |
| 1.4.1 OH 輝線        | 7  |
| 1.4.2 大気の赤外線放射     | 8  |
| 1.4.3 望遠鏡からの赤外線放射  | 8  |
| 1.4.4 水蒸気の吸収       | 9  |
| 1.5 回折限界とシーイング     | 10 |
| 1.5.1 回折限界         | 10 |
| 1.5.2 シーイング        | 11 |
| 1.6 赤外線天文学         | 12 |
| 1.6.1 遠方銀河         | 12 |
| 1.6.2 近傍銀河・天の川銀河   | 12 |
| 1.6.3 太陽系惑星と太陽系外惑星 | 13 |
| 1.7 地上望遠鏡と宇宙望遠鏡    | 13 |
| 第 2 章 南極           | 15 |
| 2.1 南極大陸の概要        | 15 |
| 2.2 南極観測の歴史        | 16 |
| 2.3 南極観測基地         | 17 |
| 2.4 南極の気候          | 18 |
| 2.4.1 大陸沿岸地域       | 18 |
| 2.4.2 内陸高原地域       | 18 |
| 2.5 南極での天文学        | 18 |

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 2.6   | 南極点                     | 21 |
| 2.6.1 | 南極点での天体観測の歴史            | 22 |
| 2.6.2 | South Pole Telescope    | 24 |
| 2.6.3 | IceCube                 | 24 |
| 2.7   | ドーム C                   | 25 |
| 2.7.1 | ドーム C におけるサイト調査         | 25 |
| 2.7.2 | sIRAiT                  | 26 |
| 2.7.3 | IRAiT                   | 27 |
| 2.7.4 | PILOT                   | 28 |
| 2.8   | ドーム A                   | 29 |
| 2.8.1 | PLATO                   | 29 |
| 2.8.2 | CSTAR                   | 29 |
| 2.8.3 | Gattini                 | 30 |
| 2.8.4 | DASLE                   | 30 |
| 2.8.5 | Pre-HEAT                | 31 |
| 2.8.6 | Snodar                  | 31 |
| 2.9   | ドームふじ                   | 31 |
| 2.9.1 | 南極天文コンソーシアムの取り組み        | 32 |
| 2.10  | 南極特有の問題とその克服            | 33 |
| 第 3 章 | 南極 40cm 赤外線望遠鏡          | 35 |
| 3.1   | 仕様                      | 35 |
| 3.2   | 鏡筒                      | 37 |
| 3.3   | 架台                      | 39 |
| 3.4   | コントローラー                 | 41 |
| 3.5   | 観測装置                    | 41 |
| 3.5.1 | TONIC-II                | 42 |
| 3.5.2 | AIR-C                   | 43 |
| 3.5.3 | Tohoku DIMM             | 44 |
| 3.6   | その他                     | 45 |
| 第 4 章 | 南極 40cm 赤外線望遠鏡の評価実験と改良  | 47 |
| 4.1   | コントローラーの評価実験            | 47 |
| 4.1.1 | パルス周期の測定                | 48 |
| 4.1.2 | パルスカウント                 | 49 |
| 4.2   | スリップ機構評価実験と RA 軸ユニットの改良 | 51 |
| 4.2.1 | (旧)RA 軸ユニット             | 52 |
| 4.2.2 | スリップ実験 (旧ユニット)          | 53 |

---

|        |                                  |    |
|--------|----------------------------------|----|
| 4.2.3  | RA 軸ユニットの改造 . . . . .            | 54 |
| 4.2.4  | スリップ実験 (新ユニット) . . . . .         | 56 |
| 4.2.5  | まとめ . . . . .                    | 57 |
| 4.3    | 極軸調整プレート . . . . .               | 57 |
| 4.3.1  | モデル化 . . . . .                   | 58 |
| 4.3.2  | せん断力 $F$ と曲げモーメント $M$ . . . . .  | 59 |
| 4.3.3  | 曲げ応力によるたわみ $\Delta_b$ . . . . .  | 61 |
| 4.3.4  | せん断応力によるたわみ $\Delta_s$ . . . . . | 62 |
| 4.3.5  | 安全率 . . . . .                    | 63 |
| 4.3.6  | その他 . . . . .                    | 64 |
| 4.3.7  | まとめ . . . . .                    | 64 |
| 4.3.8  | 材質について . . . . .                 | 65 |
| 4.3.9  | 考察と最適化 . . . . .                 | 66 |
| 4.3.10 | 実際の設計 . . . . .                  | 67 |
| 4.4    | Dec 軸モーターユニット改造 . . . . .        | 67 |
| 4.5    | 極軸望遠鏡 . . . . .                  | 69 |
| 4.6    | Dec 軸バランス . . . . .              | 69 |
| 4.7    | 運搬ハンドル . . . . .                 | 70 |
| 4.8    | バッフル . . . . .                   | 71 |
| 第 5 章  | -80°C 冷却実験 . . . . .             | 73 |
| 5.1    | 実験装置 . . . . .                   | 73 |
| 5.1.1  | 冷凍庫 . . . . .                    | 73 |
| 5.1.2  | 温度計 . . . . .                    | 73 |
| 5.2    | RA 軸・Dec 軸モーターユニット冷却実験 . . . . . | 74 |
| 5.2.1  | モーターユニットの構造 . . . . .            | 75 |
| 5.2.2  | 脱調の原理 . . . . .                  | 75 |
| 5.2.3  | 実験方法 . . . . .                   | 77 |
| 5.2.4  | 実験結果 . . . . .                   | 77 |
| 5.2.5  | 考察 . . . . .                     | 78 |
| 5.3    | RA 軸ユニット冷却実験 . . . . .           | 79 |
| 5.3.1  | RA 軸ユニットの構造と実験の概要 . . . . .      | 79 |
| 5.3.2  | 実験方法 . . . . .                   | 80 |
| 5.3.3  | 実験結果 . . . . .                   | 81 |
| 5.3.4  | 考察 . . . . .                     | 81 |
| 5.4    | 副鏡ユニット冷却実験 . . . . .             | 82 |
| 5.4.1  | 副鏡モーターユニットの構造 . . . . .          | 83 |
| 5.4.2  | 実験方法 . . . . .                   | 83 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.4.3 | 実験結果  | 85  |
| 5.4.4 | 考察  | 85  |
| 5.5   | Dec 軸ユニットと冷却実験のまとめ  | 86  |
| 第 6 章 | 追尾誤差の評価   | 87  |
| 6.1   | 座標系   | 88  |
| 6.2   | 赤道儀の設置誤差  | 88  |
| 6.2.1 | 単位時間あたりの時角 $H'$ 方向のズレ $(\partial H'/\partial t)_{pol}$            | 89  |
| 6.2.2 | 単位時間あたりの赤緯 $\delta'$ 方向のズレ $(\partial \delta'/\partial t)_{pol}$  | 90  |
| 6.3   | 大気差による追尾誤差  | 91  |
| 6.3.1 | 大気差の近似  | 91  |
| 6.3.2 | 大気差の向きと大きさ  | 91  |
| 6.3.3 | 単位時間あたりの時角 $H$ 方向の大気差 $(\partial R_H/\partial t)_{atm}$           | 93  |
| 6.3.4 | 単位時間あたりの赤緯 $\delta$ 方向の大気差 $(\partial R_\delta/\partial t)_{atm}$ | 94  |
| 6.4   | ピリオディックモーションによる追尾誤差   | 94  |
| 6.5   | 追尾誤差の見積もり   | 95  |
| 6.6   | 追尾誤差の測定   | 96  |
| 6.6.1 | データ解析   | 97  |
| 6.6.2 | 理論曲線とのフィッティング   | 98  |
| 6.6.3 | 考察  | 102 |
| 6.6.4 | 原因不明の追尾誤差   | 102 |
| 第 7 章 | 導入誤差の評価   | 105 |
| 7.1   | 赤道儀の設置誤差  | 105 |
| 7.1.1 | モデル化  | 106 |
| 7.1.2 | Dec 方向のズレ $\Delta\delta_{set}$                                    | 107 |
| 7.1.3 | RA 方向のズレ $\Delta\alpha_{set} \cos \delta$                         | 107 |
| 7.1.4 | 設置誤差の向きと大きさ   | 108 |
| 7.2   | 大気差によるエラー   | 109 |
| 7.3   | RA 軸と Dec 軸の直交誤差  | 110 |
| 7.3.1 | モデル化  | 111 |
| 7.3.2 | Dec 軸のズレ $\Delta\delta_{rd}$                                      | 112 |
| 7.3.3 | RA 方向のズレ $\Delta\alpha_{rd} \cos \delta$                          | 113 |
| 7.3.4 | RA 軸と Dec 軸の直交誤差の向きと大きさ   | 114 |
| 7.4   | Dec 軸と光軸の直交誤差   | 114 |
| 7.4.1 | モデル化  | 115 |
| 7.4.2 | Dec 方向のズレ $\Delta\delta_{do}$                                     | 117 |
| 7.4.3 | RA 方向のズレ $\Delta\alpha_{do} \cos \delta$                          | 117 |



|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 7.4.4  | Dec 軸と光軸の直交誤差の向きと大きさ                              | 118 |
| 7.5    | ピリオディックモーションによる測定誤差                               | 118 |
| 7.6    | バックラッシュによる測定誤差                                    | 119 |
| 7.7    | 導入誤差の見積もり   | 120 |
| 7.7.1  | (時角, 赤緯)=( $H_p + 90^\circ, 0$ ) でアライメントした場合の導入誤差 | 120 |
| 7.7.2  | 任意の天体でアライメントした場合の導入誤差                             | 120 |
| 7.8    | 望遠鏡の調整箇所と調整量                                      | 122 |
| 7.9    | バックラッシュの測定観測                                      | 123 |
| 7.9.1  | データ解析   | 124 |
| 7.9.2  | 理論曲線とのフィッティング                                     | 125 |
| 7.9.3  | 観測結果  | 127 |
| 7.9.4  | 考察  | 127 |
| 7.10   | 直交誤差の測定観測   | 129 |
| 7.10.1 | データ解析   | 131 |
| 7.10.2 | 観測結果と理論曲線とのフィッティング                                | 132 |
| 7.10.3 | 考察  | 132 |
| 第 8 章  | 光学系の評価  | 135 |
| 8.1    | 光学シミュレーション  | 135 |
| 8.1.1  | ZEMAX   | 136 |
| 8.1.2  | 光軸誤差がある場合のスポットダイアグラム                              | 137 |
| 8.2    | ハルトマンテスト  | 139 |
| 8.2.1  | ハルトマン板の製作   | 139 |
| 8.2.2  | 観測方法の検証   | 140 |
| 8.2.3  | ハルトマン定数 T   | 141 |
| 8.2.4  | 観測  | 142 |
| 8.2.5  | データ解析   | 143 |
| 8.2.6  | 測定結果  | 143 |
| 8.2.7  | 考察  | 144 |
| 第 9 章  | 結論  | 147 |
| 第 10 章 | 将来計画  | 149 |
| 10.1   | シーイング測定   | 149 |
| 10.1.1 | Tohoku DIMM                                       | 149 |
| 10.1.2 | 超音波風速計  | 149 |
| 10.1.3 | SNODAR  | 150 |
| 10.2   | 金星の連続観測   | 150 |
| 10.2.1 | 背景光の明るさの見積もり                                      | 150 |

|        |                           |     |
|--------|---------------------------|-----|
| 10.2.2 | 赤外線での散乱光の明るさ              | 151 |
| 10.2.3 | 金星の明るさ                    | 151 |
| 10.2.4 | 観測可能性                     | 152 |
| 10.2.5 | フィルターホイールの設計              | 154 |
| 10.2.6 | コールドストップの設計 (検討)          | 154 |
| 10.2.7 | 観測計画                      | 154 |
| 10.3   | 太陽系惑星ライブラリ                | 154 |
| 10.3.1 | 観測可能性                     | 156 |
| 10.4   | 技術開発                      | 157 |
| 10.4.1 | 霜対策                       | 157 |
| 10.4.2 | オートガイダー                   | 157 |
| 10.4.3 | 高視野ファインダー                 | 158 |
| 10.4.4 | PLATO-Fuji(仮称)            | 158 |
| 10.5   | 南極 2m 赤外線望遠鏡              | 158 |
| 付録 A   | DIMM を用いたシーイング測定          | 159 |
| A.1    | DIMM                      | 159 |
| A.1.1  | 原理                        | 161 |
| A.1.2  | Fried パラメーター $r_0$ の直感的解釈 | 165 |
| A.2    | Tohoku DIMM               | 166 |
| A.2.1  | DIMM 板                    | 166 |
| A.2.2  | CCD カメラ                   | 167 |
| A.2.3  | ビデオキャプチャ                  | 167 |
| A.2.4  | ソフトウェア                    | 168 |
| A.3    | Tohoku DIMM の性能評価         | 168 |
| A.3.1  | 比較観測                      | 169 |
| A.3.2  | Tohoku DIMM データ解析         | 169 |
| A.3.3  | 広大 DIMM データ解析             | 169 |
| A.3.4  | 観測結果                      | 170 |
| A.3.5  | 考察                        | 171 |
| 付録 B   | 極軸調整方法                    | 175 |
| B.1    | 流れ                        | 175 |
| B.2    | 準備                        | 175 |
| B.2.1  | 望遠鏡の設置                    | 175 |
| B.2.2  | 赤経軸と極軸望遠鏡の軸の一致            | 176 |
| B.3    | 極軸望遠鏡と星図を見比べて極軸を合わせる      | 177 |
| B.4    | 恒星の動きを観測して極軸を合わせる         | 178 |

---

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| B.4.1 | 方位軸の調整          | 178 |
| B.4.2 | 高度軸の調整          | 178 |
| B.4.3 | 注意              | 179 |
| 付録 C  | 光軸調整方法          | 181 |
| C.1   | 光軸合わせの原理        | 181 |
| C.2   | 調整箇所            | 182 |
| C.3   | 目視による光軸調整       | 182 |
| C.3.1 | 光軸が合っている時       | 183 |
| C.3.2 | 副鏡が傾いている時       | 184 |
| C.3.3 | 主鏡が傾いている時       | 185 |
| C.4   | 恒星を使った光軸の追い込み調整 | 185 |
| 付録 D  | 脱脂・グリスアップについて   | 187 |
| D.1   | 原理              | 188 |
| D.2   | 方法と結果           | 188 |
| D.3   | 考察              | 189 |
| 付録 E  | 球面三角法           | 191 |
| E.1   | 球面三角形           | 191 |
| E.2   | 球面三角法の各定理       | 192 |
| 謝辞    |                 | 193 |
| 参考文献  |                 | 195 |



## 第 1 章

# 赤外線天文学

### 1.1 赤外線観測

赤外線とは可視光より長波長で、電波より短波長の電磁波の総称である。概ね  $1\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$  を差し、 $1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$  を近赤外線、 $5\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$  を中間赤外線、 $30\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$  を遠赤外線と呼ぶ。

赤外線波長域では地球大気の水蒸気による吸収があり、ある決まった波長域のみ観測可能である。水蒸気による吸収の少ない波長域は「大気の窓」と呼ばれ、地上での天体観測ではこの窓の波長域でのみ観測可能である。

表 1.1 に赤外線域で主に用いられるフィルターを示す。赤外線観測では概ね大気の窓に合わせたフィルター波長域が設定されている。

| バンド | 中心波長 ( $\mu\text{m}$ ) | 波長幅 ( $\mu\text{m}$ ) |
|-----|------------------------|-----------------------|
| J   | 1.215                  | 0.26                  |
| H   | 1.654                  | 0.29                  |
| K   | 2.179                  | 0.41                  |
| L   | 3.547                  | 0.57                  |
| M   | 4.769                  | 0.45                  |
| N   | 10.47                  | 5.2                   |
| Q   | 20.13                  | 7.8                   |

表 1.1 赤外線で用いられる主なフィルターの中心波長と波長幅 (Cox 1999 [32])

また図 1.1 に波長毎の水蒸気による吸収と各バンドの位置を示す。

水蒸気による吸収は観測地の標高や天候に大きく左右される。その為フィルターの透過特性は天文台毎に異なる。図 1.2 はすばる多天体近赤外撮像分光装置 MOIRCS に搭載されたフィルターの波長-透過率特性の実例である。

なお  $30\mu\text{m}$  より長い遠赤外線は水蒸気による吸収が支配的であり地球上からはほとんど観測できない。

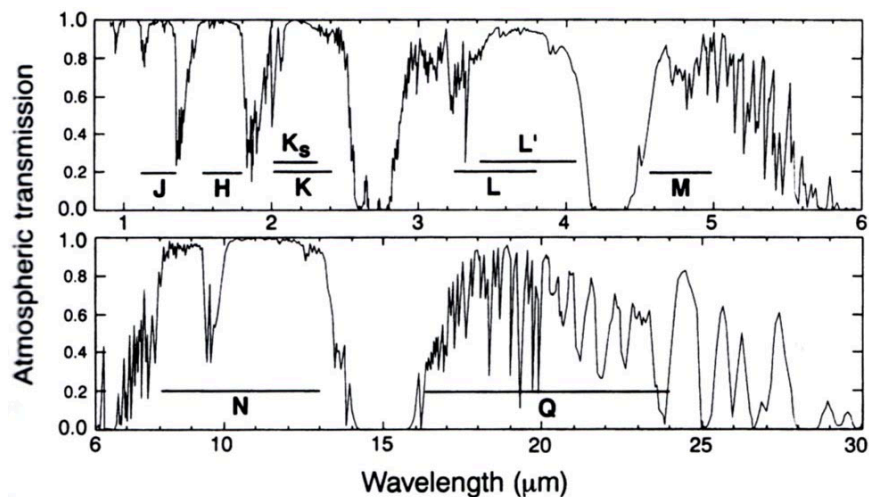


図 1.1 大気の透過率と各波長バンド。横軸が波長で縦軸は透過率を表す。(Cox 1999 [32])

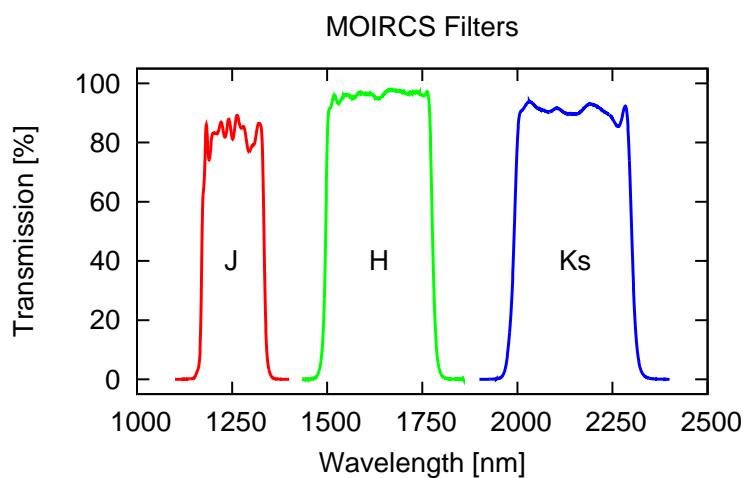


図 1.2 MOIRCS の近赤外線フィルターの波長-透過率特性。横軸は波長、縦軸はフィルターの透過率である。

## 1.2 赤外線撮像と等級の定義

天体を観測する最も基礎的な方法は撮像である。撮像とは空の特定の方向から来る光を特定の波長域だけ選別し、その量を記録することである。可視光での撮像観測と同様に赤外線撮像観測でも光学望遠鏡に赤外線検出器を取り付け、光子の数をカウントすることで天体の明るさを測定する。

赤外線観測が可視光での観測と大きく異なる点は背景ノイズが可視光に比べて桁違いに明るい点である。その為赤外線観測では明るい背景ノイズの取り扱いが重要な課題となる。

### 1.2.1 天体の明るさ

天体 (点源) の明るさは等級で表され、明るさが 100 分の 1 になると等級が 5 等増加する。天体の実視等級  $m_{AB}$  は以下の式で与えられる。

$$m_{AB} = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F_{\nu}}{F_{0\nu}} \right) \quad (1.1)$$

ここで  $F_{\nu}$  は天体のフラックス [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{Hz}$ ] であり、 $F_{0\nu}$  は基準となる明るさのフラックスで AB 等級の場合は波長によらず

$$F_{0\nu} = 10^{3.56} \sim 3630 \text{ [Jy]}$$

と定義される。なお  $1 \text{ [Jy]} = 10^{-26} \text{ [W}/\text{m}^2/\text{Hz}]$  であり

$$F_{\nu} \text{ [W}/\text{m}^2/\text{Hz}] = \frac{\lambda_{\mu\text{m}}^2 F_{\lambda}}{3 \times 10^{14}} \text{ [W}/\text{m}^2/\mu\text{m}]$$

の関係式が成り立つ。

また広がった天体の明るさは単位立体角当たりの等級で表され、フラックス  $F_{\nu}$  のかわりに表面輝度  $I_{\nu}$  [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{Hz}/\text{arcsec}^2$ ] を用いて

$$m_{AB} = -2.5 \log_{10} \left( \frac{I_{\nu}}{I_{0\nu}} \right) \quad (1.2)$$

と表される。但し AB 等級の場合、

$$I_{0\nu} = 10^{3.56} \sim 3630 \text{ [Jy}/\text{arcsec}^2]$$

である。なお等級は基準となる明るさのフラックスによって変わる。AB 等級の他に星座のベガ等を基準とするベガ等級も広く用いられる。

実際の撮像観測では前節で述べたフィルターを用いて、ある特定の波長幅の光をカウントすることになる。

### 1.2.2 空の明るさ

地球大気の熱的・非熱的放射や散乱によって夜空はある程度の明るさで輝いている。これを空 (sky) の明るさ、または背景ノイズと言いその強度を表面輝度で表す。図 1.3 は波長毎の背景ノイズ強度のモデル計算結果である (Cox 1999 [32])。近赤外線域では OH 夜光による背景ノイズ、また  $3\mu\text{m}$  を越えたあたりからは大気の熱放射の影響が支配的となり空が非常に明るい。

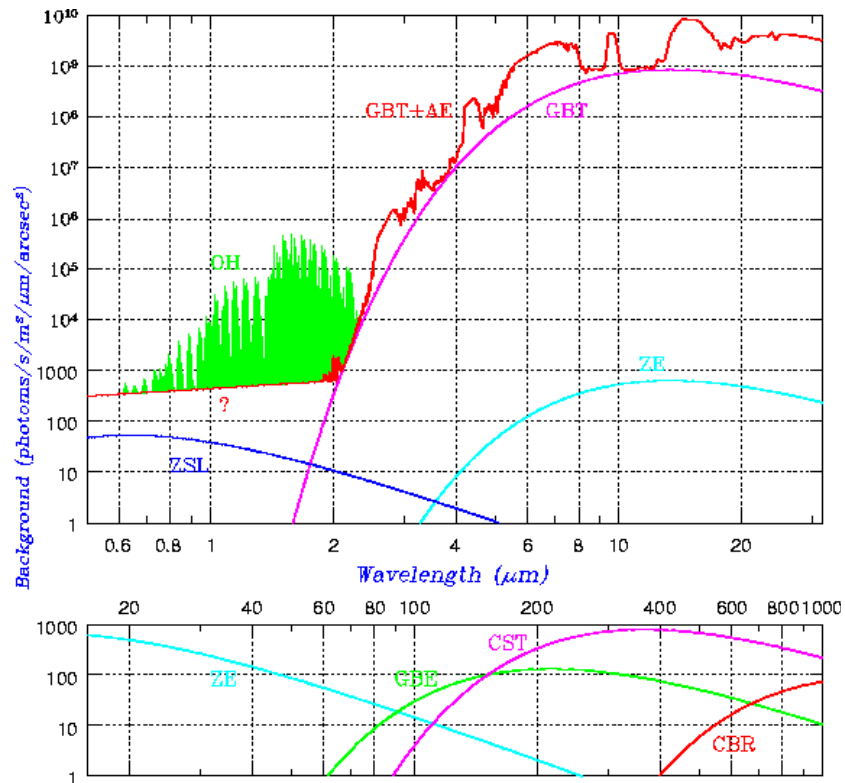


図 1.3 波長毎の背景ノイズ強度のモデル計算結果。横軸は波長、縦軸は単位時間・単位面積・単位波長・単位立体角の光子数を表す。(Cox 1999 [32])

|     |                |
|-----|----------------|
| GBT | 望遠鏡からの熱放射      |
| AE  | 大気からの熱放射       |
| OH  | OH 夜光          |
| ZSL | 黄道光            |
| ZE  | 太陽系ダストの熱放射     |
| GBE | 銀河系ダストの熱放射     |
| CBR | 宇宙背景放射         |
| CST | 冷却した宇宙望遠鏡での熱放射 |

具体的に赤外線域での空の明るさを計算すると、図 1.3 より 2.2 $\mu\text{m}$ (K バンド) での背景ノイズはおよそ  $10^5$  [ $\text{e}^-/\text{sec}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{arcsec}^2$ ]  $\sim$  0.015 [Jy] であるので空の明るさは  $m_{AB} \sim 14$  となる。

また表 1.2 にマウナケア山頂における新月での空の明るさの実測値を示す (Cox 1999 [32])。

このように可視光に比べて赤外線では背景ノイズが極めて大きい。観測対象にもよるが一般に銀河の表面輝度は K バンドで 20 [ $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ ] より暗く、背景ノイズの方が遙か



|   | mag/arcsec <sup>2</sup> |
|---|-------------------------|
| U | 21.6                    |
| B | 22.3                    |
| V | 21.1                    |
| J | 15.9                    |
| H | 13.4                    |
| K | 13.7                    |
| L | 4.9                     |
| M | 4.5                     |
| N | 0.3                     |
| Q | -0.7                    |

表 1.2 マウナケア山頂における新月での空の明るさの実測値 (Cox 1999 [32])

に明るい。また背景ノイズは観測地の標高や気温、また観測日の天候にも左右されるためその変動が大きい。よって赤外線観測においては明るい背景ノイズの影響をいかに取り除くかが重要な課題となる。

### 1.3 天体の検出

天体を検出するということは天体からの光をノイズに対して有意に分離できるということである。これは S/N 比 (Signal to Noise ratio, 信号雑音比) で一般に評価される。S/N=1 とは信号とノイズが同じ程度であることから検出限界となる。実際は S/N=1 だと信号とノイズの区別がつかないため (ノイズの可能性が 32%)、S/N=3~5 程度を検出限界とするのが通例である。ノイズはランダムでありポアソン分布となるため、S/N=3 であれば 99.7%、S/N=5 であれば 99.9999% の確率で天体からの信号であるといえる。

具体的に S/N を計算する。S/N は以下の式で与えられる。

$$S/N = \frac{S_{obj} t}{\sqrt{(S_{obj} + S_{sky} + N_{dark})t + fN_{readout}^2}} \quad (1.3)$$

但し、 $S_{obj}$ ,  $S_{sky}$  は 1 ピクセルに入射する単位時間当たりの光子数を表し以下のように計算される。なお  $S_{obj}$  は天体が点源か広がっているかで場合分けが必要である。

恒星状の天体 (点源) の場合

$$S_{obj} = \int d\lambda \frac{F_{\lambda,obj} A_{tel} \tau_{\lambda} \eta_{\lambda}}{h\nu} \quad [e^- / \text{sec}]$$

広がった天体の場合

$$S_{obj} = \iint d\lambda d\Omega \frac{I_{\lambda,obj} A_{tel} \tau_{\lambda} \eta_{\lambda}}{h\nu} \quad [e^- / \text{sec}]$$

また背景ノイズは

$$S_{sky} = \iint d\lambda d\Omega \frac{I_{\lambda,sky} A_{tel} \tau_{\lambda} \eta_{\lambda}}{h\nu} \quad [e^-/\text{sec}]$$

となる。但し

|                   |                |   |
|-------------------|----------------|---|
| $t$               | 合計観測時間         | [sec]   |
| $N_{dark}$        | 検出器の暗電流        | [ $e^-/\text{sec}$ ]                                  |
| $N_{readout}$     | 検出器の読み出しノイズ    | [ $e^-$ ]   |
| $F_{\lambda,obj}$ | 天体 (点源) のフラックス | [ $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$ ]                 |
| $I_{\lambda,obj}$ | 広がった天体の表面輝度    | [ $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{arcsec}^2$ ] |
| $I_{\lambda,sky}$ | 背景ノイズの表面輝度     | [ $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{arcsec}^2$ ] |
| $A_{tel}$         | 望遠鏡の主鏡面積       | [ $\text{m}^2$ ]                                      |
| $f$               | 露出回数           |   |
| $\tau_{\lambda}$  | 望遠鏡の効率         |   |
| $\eta_{\lambda}$  | 検出器の効率         |   |

赤外線観測の場合は天体からの光や暗電流、読み出しノイズに比べ背景ノイズが圧倒的に大きく、式 (1.3) は以下のように近似できる。

$$S/N \sim \frac{S_{obs}}{\sqrt{S_{sky}}} \sqrt{t} \propto \frac{\sqrt{A_{tel}} \sqrt{t}}{\sqrt{I_{sky}}}$$

よって赤外線観測で検出限界を深くするためには (1) 望遠鏡の口径を大きくする (2) 観測時間を長くする (3) 背景ノイズの小さい観測地で観測することが同等な比重が必要であると言える。

## 1.4 赤外線観測を妨げるもの

赤外線波長域で天体観測を妨げるものとして地球大気の影響がある。地球大気により天体からの電磁波は少なからず吸収・散乱される。また地球大気によって発生する熱的・非熱的な放射とその散乱によって夜空が明るくなる。

可視光においては黄道光や星夜光が地球大気中で散乱し散乱ノイズ (夜空の明るさ) の原因となる。また酸素分子による吸収もある。しかしその影響は赤外線に比べると小さい。

赤外線の場合は次に述べる背景光や大気吸収によって天体からの赤外線放射は大きく妨げられる。

## 1.4.1 OH 輝線

近赤外線波長域の中でも特に  $0.8\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$  では大気上層部の OH ラジカルから放射される多数の輝線放射が夜空の明るさのほとんどを占める。これを OH 夜光、または airglow と呼ぶ。OH 夜光は非熱的放射で上空 80km 程度の高度に存在する OH ラジカルが太陽風に含まれる高エネルギー電子で励起され、後に輝線を放射して輝くというものであり、J バンドで 50 本、H バンドで 70 本、K バンドで 30 本程度と多数の輝線が観測されている (Maihara et al. 1993 [47], Ramsay&Mountain&Geballe 1992 [52])。

図 1.4、図 1.5 はマウナケア山で観測された OH 夜光のスペクトルである。波長毎の単位時間、単位立体角あたりの光子数が示されている。

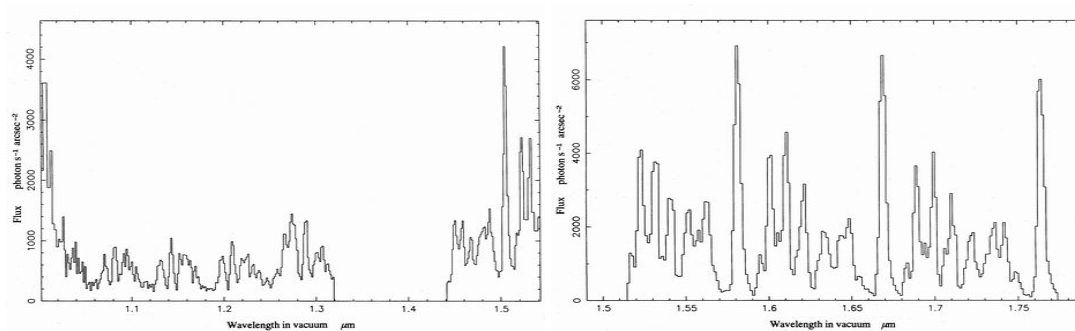


図 1.4 J(左)、H(右) バンドにおける OH 夜光。横軸は波長で縦軸は単位時間・単位立体角あたりの光子数 (フラックス) を表す。(Ramsay&Mountain & Geballe 1992 [52])

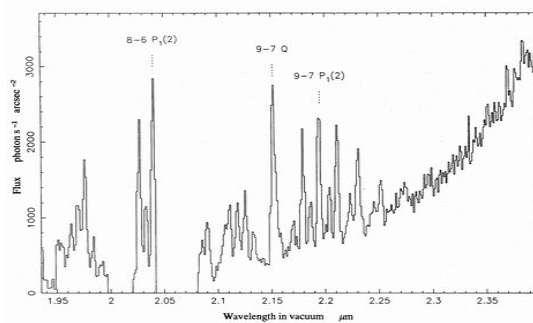


図 1.5 K バンドにおける OH 夜光。縦軸・横軸は図 1.4 と同様である。(Ramsay&Mountain&Geballe 1992 [52])

### 1.4.2 大気赤外線放射

地球大気（およそ 250K）の熱放射が赤外線観測の妨げとなる。黒体放射のピーク波長  $\lambda_{max}[\mu\text{m}]$  はウィーンの変位則から温度  $T$  [K] の関数として

$$\lambda_{max} = 2898T^{-1}$$

と書ける。その為地球大気の黒体放射のピーク波長は  $11\mu\text{m}$  程度前後となり、赤外線波長域で地球大気は光っていることになる。この地球大気の赤外線放射がおおよそ  $3\mu\text{m}$  より長い波長での赤外線背景ノイズとなる。図 1.6 にマウナケア山頂での大気放射のモデル計算結果を示す（家正則 他 2007 [1]）。 $3\mu\text{m}$  より長波長側の太い実線は大気放射モデル、細かい実線は望遠鏡からの熱放射の例（273K、放射率 8%）であり、中間赤外線域で大気の熱放射が背景ノイズの主要な成分であることがわかる。

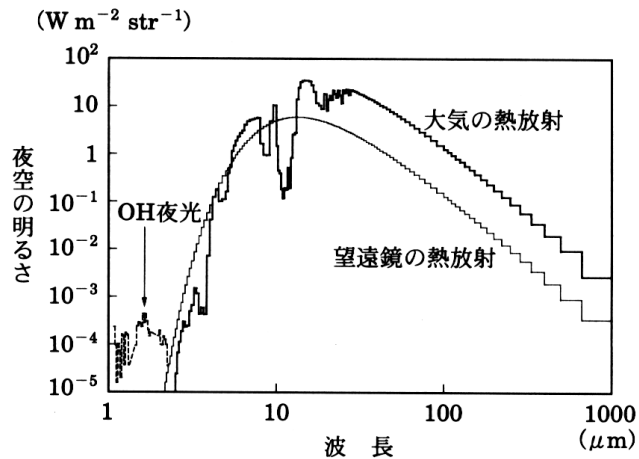


図 1.6 マウナケア山頂での大気放射のモデル計算結果。太い実線は大気放射モデル、細かい実線は望遠鏡からの熱放射の例（273K、放射率 8%）である。（家正則 他 2007 [1]）

### 1.4.3 望遠鏡からの赤外線放射

常温の物体は可視光をほとんど放射しないが  $2\mu\text{m}$  程度より長い波長では常温の物体から無視できない量の赤外線が放射される。その為赤外線観測装置は装置全体を冷却して熱放射によるノイズを極限まで減少させて用いている。

しかし望遠鏡やドームは観測地の気温（およそ 270K）のままであり、望遠鏡やドームからの熱放射が観測の障害となる。大気からの熱放射と同様に望遠鏡からの熱放射は中間赤外線域での背景ノイズの主要成分となる。

## 1.4.4 水蒸気の吸収

これまでの3つは主に背景ノイズであった。赤外線ではこの明るい背景ノイズとは別に大気中の水蒸気やメタンガスによる吸収も受ける。

図 1.7 はマウナケア山頂の PWV(可降水量、単位面積当たり地上から上空までの水蒸気をすべて凝結させた時の降水量) を 1mm と仮定した時の赤外線の大気透過率の標準大気モデルの計算結果である。(家正則 他 2007 [1]) また主な吸収を起こしている分子とその吸収の中心波長を表 1.3 に示す (Cox 1999 [32])。

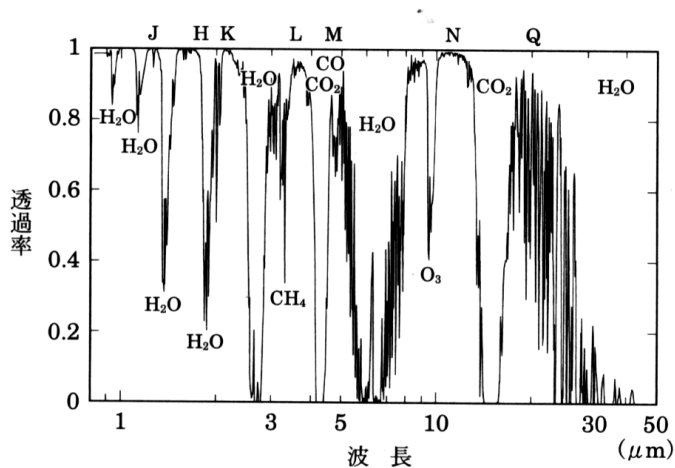


図 1.7 PWV=1mm と仮定した時のマウナケア山頂での大気透過率モデル (家正則 他 2007 [1])

| 分子               | 波長 ( $\mu\text{m}$ ) | 分子              | 波長 ( $\mu\text{m}$ ) |
|------------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| H <sub>2</sub> O | 0.94                 | CO <sub>2</sub> | 4.3                  |
|                  | 1.12                 |                 | 15                   |
|                  | 1.37                 | CO              | 4.7                  |
|                  | 1.87                 | CH <sub>4</sub> | 3.3                  |
|                  | 2.7                  |                 | 6.5                  |
|                  | 3.2                  |                 | 7.7                  |
|                  | 6.3                  | O <sub>3</sub>  | 4.5                  |
|                  | >25                  |                 | 9.6                  |

表 1.3 近・中間赤外線域での気体分子による吸収 (Cox 1999 [32])

モデル計算結果から大気中の気体分子によって所々に大きな吸収があることが判る。天

体を観測する際はこの吸収の少ないところを観測することになる。実際に赤外線観測に用いられるフィルターの透過特性はこの大気による吸収を考慮して設定されている。

大気吸収は主に大気中の水蒸気によって引き起こされている。その為観測地の標高(高度)が上昇するに従い弱くなる。これは気温が下がり飽和水蒸気量が減る効果と高度が高くなることで大気量が減ることによる。よって赤外線観測に適した大気吸収の少ない場所とは(1)できるだけ高度が高く、(2)できる限り乾燥している所である。

## 1.5 回折限界とシーイング

赤外線観測に限らず、天体を観測する場合「どこまで暗いものを見ることができるか」という検出限界は重要な観測の指標となる。これと同様「どこまで細かい構造を見分けることができるか」という能力も観測に重要である。この「細かい構造を見分ける」能力は空間分解能と呼ばれ、回折限界とシーイングで決まる。

### 1.5.1 回折限界

光は電磁波であり波である。その為回折現象によって望遠鏡の空間分解能には理論的な限界がある。これを回折限界と呼ぶ。波長  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ]、望遠鏡の口径の直径  $D$  [m] とすると回折限界  $\theta$  [arcsec] は

$$\theta \sim 0.252 \times \left( \frac{\lambda}{D} \right) \quad (1.4)$$

と表される(家正則 他 2007 [1])。式(1.4)を見るとわかるように、同じ望遠鏡を用いても回折限界は波長が長くなると悪くなる。表 1.4 に 2m 望遠鏡での主な波長の回折限界を示す。

| バンド | 波長 [ $\mu\text{m}$ ] | 回折限界 [arcsec] |
|-----|----------------------|---------------|
| J   | 1.215                | 0.15          |
| H   | 1.654                | 0.21          |
| K   | 2.179                | 0.27          |
| L   | 3.547                | 0.45          |
| M   | 4.769                | 0.60          |
| N   | 10.47                | 1.3           |
| Q   | 20.13                | 2.5           |

表 1.4 2m 望遠鏡の各波長帯での回折限界

## 1.5.2 シーイング

地上から天体を観測すると大気の大乱流によって屈折率が時間的・空間的に変動し、天体からの光の強度や入射角が光路ごとにわずかに揺らぎその結果星像の位置が揺らぐ。この星像の位置の揺らぎをシーイングと呼び、星像輝度分布の FWHM [arcsec] で表す。大気の揺らぎによって星像の位置が揺らぐ為、シーイングより細かい構造を分解することはできない。その為近年はシーイングの良い場所に天文台が建設されている。表 1.5 に主な観測地でのシーイングを示す。観測波長は  $0.5\mu\text{m}$  である。

| 観測地        | シーイング [arcsec]  |
|------------|-----------------|
| 岡山天体物理学観測所 | $1.21 \pm 0.23$ |
| 東京大学木曾観測所  | 2.3 ~ 3.2       |
| すばる望遠鏡     | 0.6             |
| TAO 建設予定地  | 0.68            |
| 南極ドーム C    | 0.27            |

表 1.5 各地のシーイング (千代延真吾 2005 [15], Lawrence et al. 2004 [42])

シーイングはコロモゴロフの乱流理論によると波長  $\lambda$  の-0.2 乗に比例する。その為長波長ほどシーイングの影響を受けにくい。図 1.8 は 2m 望遠鏡の回折限界とシーイングを波長毎に示したものである。

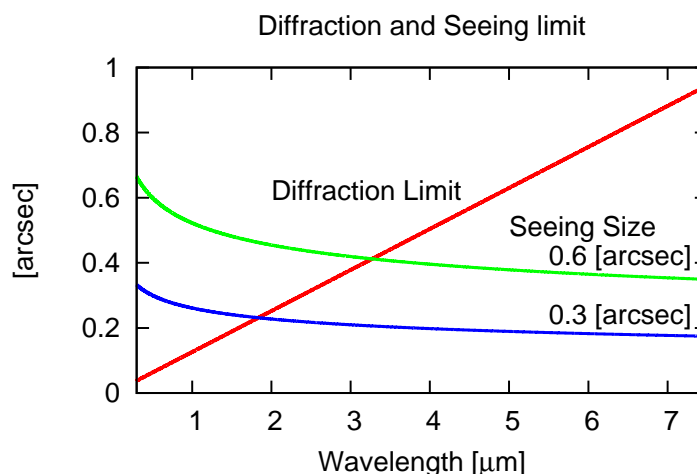


図 1.8 2m 望遠鏡の回折限界とシーイングの波長依存性

望遠鏡の分解能を決めるものは短波長側でシーイング、長波長側で回折限界となる。図 1.8 より非常にシーイングの良い観測地では口径 2m 前後で近赤外線域から理論分解能を達成することがわかる。

## 1.6 赤外線天文学

可視光観測に比べ赤外線観測は地球大気の影響によって困難である。しかし赤外線でのみ調べる事ができる天体や、赤外線で観測した方が良いというものもある。以下、観測対象毎に赤外線観測の意義を簡単に述べる。

### 1.6.1 遠方銀河

宇宙は 136 億年前に誕生したが、いつ・どのように銀河が誕生し、進化して現在の形となったかわからない。銀河の進化の歴史を調べるためには近傍の銀河だけでなくより遠方の銀河も観測する必要がある。しかし遠方銀河を観測する場合、宇宙膨張によるドップラー効果によって銀河から発せられた光は波長が伸ばされる。この波長の伸びを赤方偏移  $z$  といい

$$z \equiv \frac{\lambda_{int} - \lambda_{obs}}{\lambda_{obs}}$$

と定義される。一般に遠方銀河までの距離は赤方偏移  $z$  で表される。但し  $\lambda_{int}$  を元々の波長、 $\lambda_{obs}$  を観測される波長とする。

よって距離  $z$  にある銀河から発せられた光の波長は元々の波長から  $(1+z)$  倍伸びた波長で観測される。その為近傍銀河で見られた可視光での構造を遠方銀河でも観測しようとする場合、波長のより長い赤外線域で観測することが必要になる。

ただし高赤方偏移天体の場合、天体の表面輝度  $I_{obj}$  [mag/arcsec<sup>2</sup>] は宇宙膨張の効果により  $(1+z)^4$  に反比例して急激に暗くなるため観測は困難になる (谷口義明 他 2007 [13])。その為赤外線観測では可視光に比べ、より大型の望遠鏡を用いて長時間にわたる観測が必要になる。

### 1.6.2 近傍銀河・天の川銀河

宇宙空間に存在する星間ダストなどの微粒子によって天体からの光は吸収・散乱され弱められる。これを減光という。可視光から近赤外線では波長が長くなるほど減光の効果を受けにくい。これは減光がダストの大きさと同程度の波長で最大となることが原因である。その為近赤外線では減光による影響を比較的受けることがなく近傍銀河や天の川銀河では詳細にその内部構造を観測することができる。

また比較的温度の低い星の黒体放射のピークは近赤外線にあり、可視光に比べ赤外線で低温度星の観測が容易になる。低温度星は質量が小さく寿命が長いことから銀河内の恒星分布や進化の歴史を調べるのに適している。



### 1.6.3 太陽系惑星と太陽系外惑星

太陽系外惑星はその主星と比べて表面温度が低い。その為黒体輻射のピーク波長は主星は可視光、系外惑星は赤外線となる。トランジット法で系外惑星探査を行う場合、赤外線では可視光より高いコントラストで観測が可能で検出が容易となる(村田千紘 2009 [20])。

また惑星大気は地球大気と同様、赤外線帯に  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等の分子の強い吸収帯を持つ。その為トランジット法等で検出されている太陽系外惑星を赤外線で精密に観測することで太陽系外惑星の大気に含まれる分子の情報を調べることも可能となる。

さらに Lundock et al. 2009 [46] によると複数の赤外線フィルターで惑星を観測することで簡単に地球型惑星、ガス惑星、氷惑星を分類する事ができる。これを応用して太陽系外惑星の種類を調べることもできると期待される。

## 1.7 地上望遠鏡と宇宙望遠鏡

これまでに述べてきたように、地上で赤外線観測をするのは高い背景ノイズとシーイングによる星像悪化があり精密な観測は困難である。ところが宇宙空間に設置された望遠鏡であればこれらの問題は回避できる。これまでに IRAS やあかり、ハーシェルといった赤外線専用の宇宙望遠鏡が打ち上げられ、それまでにない波長帯で深い検出限界での観測が行われた。

しかし宇宙望遠鏡も万能というわけではない。ロケットによる打ち上げの為に大きさに制限があり、また観測期間は一般に短くさらに開発・維持コストは莫大なものとなる。

これに対し地上に設置された望遠鏡は大口径のものを比較的安価に作ることができ、改修を加えることで半永久的に観測を継続できる。つまり地上望遠鏡と宇宙望遠鏡は相補的な役割を果たし、相互の発展があって赤外線天文学は発展すると言える。

この事を踏まえ、今後のジェームスウェップ宇宙望遠鏡等による精密観測が開始される時には今以上に地上望遠鏡でのフォローアップや長期間の連続観測等が必要となり、より赤外線観測に適した場所に天文台を建設し観測を行う必要があると言える。そこで注目されているのが南極である。次章では赤外線観測の最適地の一つと考えられている南極についてその概要を述べる。



## 第2章

# 南極

### 2.1 南極大陸の概要

南極大陸は地球上で最も南に位置する大陸である。大陸の98%が南極氷床と呼ばれる分厚い氷河に覆われており大陸全土が氷雪気候、気温は低く水蒸気の供給が少ない為ほとんど降水もない。平均標高は2,200mと大部分が高地である(「新詳高等地図」[16])。南極大陸のほとんどの地域が南緯66.5度より高緯度に位置し、太陽が一日中沈まない日と太陽が一日中昇らない日がある。南半球に位置する為南極の夏は12月初旬から1月中旬で冬期は2月中旬から10月下旬頃となる(神沼克伊 2009 [6])。

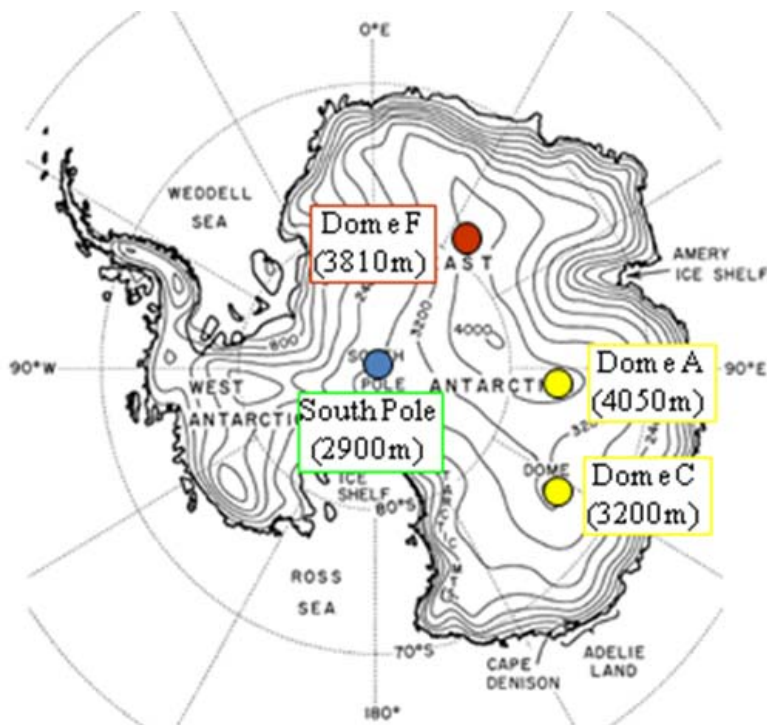


図 2.1 南極大陸の概観と内陸高原の観測基地 (村田千紘 2009 [20])

南極大陸はその全域が分厚い氷河に覆われている為元々住民はおらず、基地 (station) と呼ばれる拠点を中心に科学観測が行われている。人以外の生物もペンギン、アザラシ等が沿岸地域に生息するだけでほとんどいない。

なお南極大陸は 1959 年に日本を含む 12 カ国によって採択された南極条約によって、どの国家にも属さずいかなる軍事利用も禁止されている。資源開発に関しても 50 年間凍結することが定められている。現在では大陸の各地に科学観測の為に基地が建設され、おおよそ冬期 1,000 人から夏期 5,000 人程度が基地の維持・科学観測に従事している。

## 2.2 南極観測の歴史

南極大陸は 1820 年に発見された。しかし発見者については論争があり、ベリングスハウゼン (ロシア)、エドワード・ブランスフィールド (イギリス)、ナサニエル・パーマー (アメリカ) の 3 人のうちの誰かだと言われている。

1839 年から 1843 年にかけてジェームズ・クラーク・ロス (イギリス) は南磁軸極 (方位磁石の磁針の俯角が  $90^\circ$  となる点) を求め南極大陸を探検した。ロスの観測隊は南緯 78 度まで達し、ロス棚氷やエレバス山、テラー山などを発見した。

そして南極点到達は 1911 年 12 月 14 日でロアール・アムンセン (ノルウェー) によって成し遂げられた。なお南極点到達を争ったロバート・スコット (イギリス) はアムンセンに遅れること約 1 ヶ月の 1912 年 1 月 18 日に史上 2 番目に南極点に到達したが、帰路遭難し全滅した。

日本の南極探検の歴史は 1912 年 1 月 16 日に南極大陸に上陸した白瀬矗が最初である。白瀬の南極探検は困難を極め南極点到達を断念、到達地点一帯を「大和雪原」と命名し帰国した。その後は 20 世紀半ば頃までに航空機による探査等が行われ、地図の作成などが行われた。

1957 年から 1958 年にかけて実施された国際地球観測年 (IGY) によって世界各国が本格的に南極大陸の観測を開始した。これらの観測は気象、地磁気、オーロラ、夜光、宇宙線、電離層などの地球物理学の分野で主に行われた。大陸内陸部では南極点にアムンセン・スコット基地 (アメリカ)、南磁軸極にポストーク基地 (旧ソ連) が置かれ大陸沿岸部や近海の諸島部に各国の基地が設けられた。日本の昭和基地もこの時、東オングル島に建設され、以降気象観測やオーロラの観測が行われている。

初期の南極観測は沿岸部の調査が中心であったが、次第に氷床にその関心が向けられた。氷床は南極大陸全体に広がり平均で 2,450m、最も熱いところでは 4,000m 超あり、ゆっくりではあるが標高が高いところから低いところへ移動する。氷床は地表付近と深部では一般にその動きが一定ではないが、深部までほとんど氷床が移動しない場所が 3 カ所確認されている。これらはドームと呼ばれ、それぞれ「ドーム A」「ドーム C」「ドームふじ」である。

氷床を掘削し、得られる氷の柱状試料 (アイスコア) を解析する事でその氷の元となった雪が降った時代の空気を調べることができる。その為各国により氷床掘削が進められた。日本ではドームふじに「ドームふじ基地」を建設し、深度 3,028.52m、およそ 72 万年分のアイスコアの採取に成功した。

これまでの南極観測は主に地球物理学の分野で行われていた。しかし近年では極低温環境という南極の特殊な環境を生かした生物学や工学等の分野でも関心が持たれている。次節以降に詳細に述べていくが天文学にとっても南極の環境は魅力であり、今後世界各国によって天文台の建設が進むものと考えられている (小野延雄、柴多鉄治 編 2006 [3])。

## 2.3 南極観測基地

南極各地には科学観測の為に基地が建設されている。南極大陸ではその過酷な自然環境から有史以来住民はおらず、科学者やそのサポート要員が基地 (station) と呼ばれる拠点で一時的に滞在するのみである。

沿岸部にある主な基地を表 2.1 に挙げる。

| 基地      | 建設国     | 建設年  | 備考          |
|---------|---------|------|-------------|
| マクマード基地 | アメリカ    | 1956 | 南極最大の基地     |
| ミールヌイ基地 | ロシア     | 1956 |             |
| 昭和基地    | 日本      | 1958 |             |
| ケーシー基地  | オーストラリア | 1959 | ドーム C の補給拠点 |
| 中山基地    | 中国      | 1989 |             |

表 2.1 主な南極観測基地

また現在天体観測が行われている、もしくは今後行われる予定のある内陸高原に位置する基地を表 2.2 に挙げる。

| 基地           | 建設国       | 建設年  | 場所    |
|--------------|-----------|------|-------|
| アムンゼン・スコット基地 | アメリカ      | 1957 | 南極点   |
| ドームふじ基地      | 日本        | 1995 | ドームふじ |
| コンコルディア基地    | フランス/イタリア | 2005 | ドーム C |
| 崑崙基地         | 中国        | 2009 | ドーム A |

表 2.2 南極大陸内陸高原に位置する天文観測を行う (予定を含む) 基地の一覧

## 2.4 南極の気候

南極の気候は大陸沿岸・諸島部と内陸高原で大きく異なる。南極大陸といえばブリザードと呼ばれる猛吹雪のイメージが強いが、実際はそうではない。以下にそれぞれの地域の特徴を挙げる。

### 2.4.1 大陸沿岸地域

南極大陸沿岸地域では斜面下降風 (katabatic wind, カタバ風) と呼ばれる風が吹く。大陸内陸部において氷床に冷やされ重くなった空気が重力により氷床の斜面を流れ下ることが原因で生じる。最も斜面下降風の強いデニソン岬では年間を通じて風速 20m/s、瞬間最大風速 100m/s にも達する。南極大陸から約 4km 離れた東オングル島にある昭和基地でも平均 10m/s 程度の風が吹く。カタバ風の特徴は突然吹き出し突然終わる、風速が大きく風向はほぼ一定、そして毎日のように吹き一度吹き出すと持続することである (神沼克伊 2009 [6])。

大陸沿岸地域の気温は比較的暖かく、夏期には 0°C 程度まで上昇する。東オングル島に位置する昭和基地の年平均気温は -10.6°C、過去の最高気温 10.0°C (1977 年 1 月 21 日)、最低気温 -45.3°C (1982 年 9 月 4 日) である (理科年表 2006 [8])。

### 2.4.2 内陸高原地域

南極大陸の内陸高原地域では上空の空気が冷やされ下降気流となり、常に高気圧が卓越した気圧配置となる。極高圧帯と呼ばれ降水量は非常に少ない。極地砂漠や雪氷砂漠とも呼ばれ、1 年を通じて快晴が続く。

また高原地域の為カタバ風は吹かずほぼ無風である。高度 6km から 10km の対流圏や成層圏では極渦 (polar vortex) と呼ばれる地球を一周する強い風が安定して存在する。

気温は 1 年を通じて非常に寒冷で、南磁軸極付近のボストーク基地で観測された -89.2°C (1983 年 7 月 21 日) が地球上で観測された最も低い温度である。ドームふじ基地の年平均気温は -54.4°C、過去の最高気温 -18.6°C、最低気温 -79.4°C である。

## 2.5 南極での天文学

南極で天文学を行う事には以下の多くのメリットが存在する。

まず第 1 章 赤外線天文学で述べたように赤外線観測の妨げとなるものは (1) 大気 80km 上空からの OH 輝線、(2) 大気が発する赤外線放射、(3) 望遠鏡が発する赤外線放射、(4) 大気中の水蒸気による吸収であるが、(1) を除き極寒できわめて乾燥した南極大陸内陸高原でこれらは最小となる。

(1) の OH 夜光は 800nm から 2.4 $\mu$ m までの近赤外線波長において高度 80 から 90km

の OH ラジカルが太陽光を受けて励起状態になりその後多数の輝線を放出するというものであるが、人工衛星からのデータに基づくシミュレーションでは冬期の南極で温帯に比べ約 30% 放射強度が強くなると予想されている (Saunders et al. 2009 [55])。

しかしながら (2) 地球大気からの赤外線放射はシミュレーションから近赤外線波長域でおよそ 20 分の 1 のバックグラウンドであると試算されている (Burton et al. 2005 [31], 市川隆 2008 [2])。これは南極大陸高原部の高い標高と寒冷な大気によるものである。

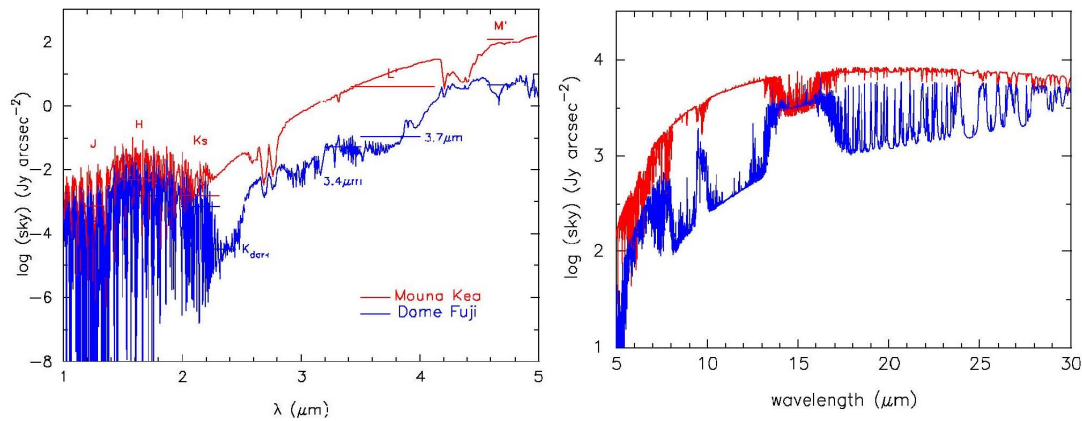


図 2.2 大気放射のシミュレーション結果。青:ドームふじ基地、赤:マウナケア山頂。横軸は波長で縦軸は単位立体角当たりの電波強度 [Jy] を表す。(市川隆 [2])

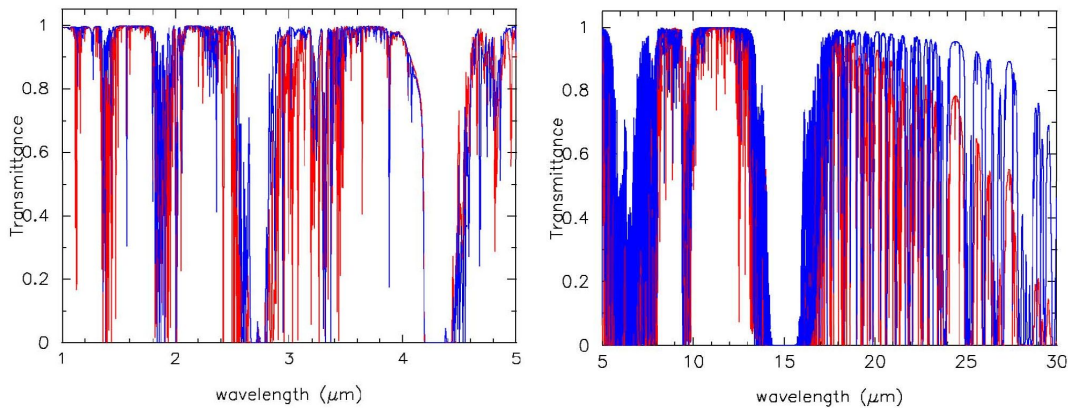


図 2.3 大気透過率のシミュレーション結果。青:ドームふじ基地、赤:マウナケア山頂。横軸が波長で縦軸は大気の透過率である。(市川隆 [2])

また (3) 望遠鏡の発する赤外線放射に関しては、温度  $T$  の黒体から放射される電磁波の単位面積、単位立体角、単位波長あたりの放射エネルギーはプランクの法則によると

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

であるから波長  $2.2\mu\text{m}$  において南極 ( $-73^{\circ}\text{C}$ ) での望遠鏡の赤外線放射は温帯 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) に設置された望遠鏡の約 5,000 分の 1 となる。

さらに(4)の水蒸気に関しては可降水量(PWV, Precipitable Water Vapour)と呼ばれる単位面積当たり地上から上空までの水蒸気をすべて凝結させた時の降水量は南極大陸内陸高原の極寒・乾燥という環境から極めて低く0.2mm以下と推定されている(Saunders et al. 2009 [55])。この値はハワイ島・マウナケア山頂の1.0mm、南米チリ・アタカマ高原の0.5mmを下回るもので、水蒸気による吸収の影響を最も受けにくいと言える。

これらの事から南極大陸内陸高原は地球上で最も赤外線観測に適した場所だと言える。水蒸気量が非常に少ないことから中間赤外線からサブミリ波における大気の透明度も非常に高く、サブミリ波においても地球上で最も適した場所だと言える。

また天体観測においてシーイング値が小さいことも重要である。シーイングとは大気の屈折率分布が不規則に変動する事によって生じる大気揺らぎによって星像がぼやけてしまうことで、大型望遠鏡の場合空間分解能の上限となる。南極大陸内陸部はカタバ風が吹かず常に安定した下降気流が吹く為良いシーイングが予想され、シミュレーションの結果やドームCでのサイト調査からもそれが証明されている。(Swain & Gallee 2006 [60], Saunders et al. 2009 [55], Lawrence et al. 2004 [42])。

ところで地表面付近は接地境界層と呼ばれる乱流層がある為、望遠鏡は接地境界層より上に建設する必要がある。しかし南極大陸内陸高原では接地境界層も低く、最も低いドームふじでは僅か18mと予想されている。これは望遠鏡の建設に有利であると言える。

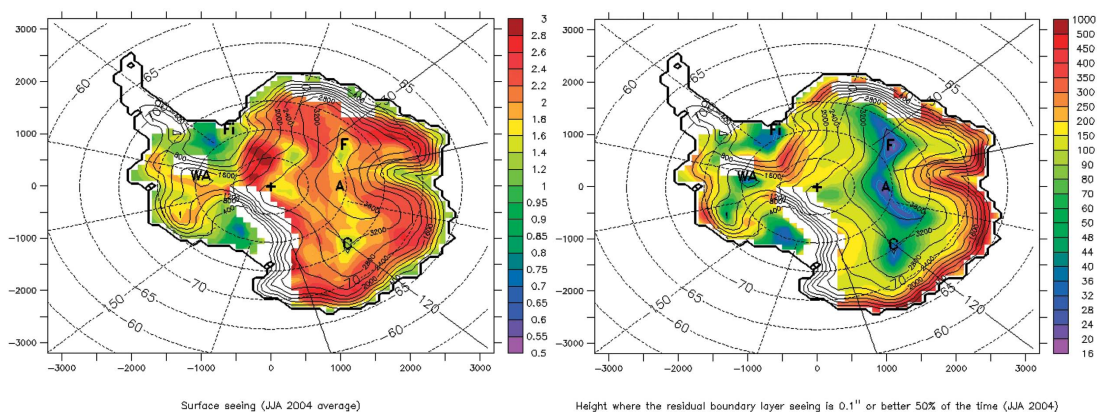


図 2.4 地表面でのシーイング(左)と接地境界層の高さ(右)のシミュレーション結果 (SwainSwain & Gallee 2006 [60])

さらに南極大陸内陸高原のドームふじ基地は南緯77度に位置し、1年のうちおよそ3ヶ月間は太陽が全く昇らない日が続く。この為最大で2,000時間に渡って天体を継続して観測することができる。図2.5はドームふじ基地の昼夜図であり、ここから5月から8月にかけて太陽が昇らない日があることが判る。これにより長期間のモニター観測が困難であった金星など内惑星の観測や1日周期の変光天体の探査が可能となる。

これらを総合すると南極大陸内陸高原は赤外線放射や大気吸収が地球上で最も少なく、



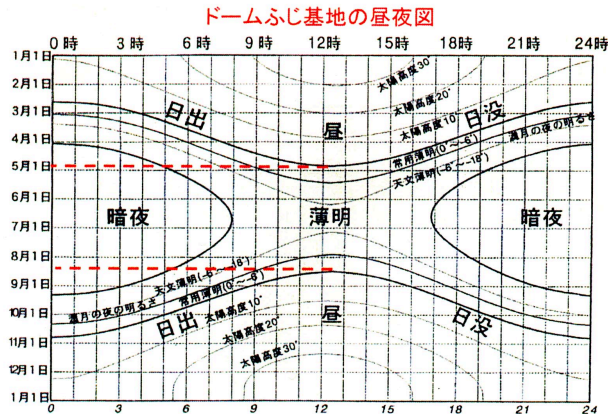


図 2.5 ドームふじ基地の昼夜図 (村田千紘 2009 [20])

また安定した大気による優れたシーイングが得られ、赤外線からサブミリ波において「深い検出限界」「高い空間分解能」「長期間の連続観測」が可能なユニークな観測地であると言える。

南極で天文学を行おうというアイデアは 1990 年頃から各国で検討されはじめ、内陸部の基地において調査が進められている。次節では天文学的に重要な基地毎にこれまでの取り組みとサイト調査および今後の計画について概説する。

## 2.6 南極点

南極点は文字通り南緯 90 度に位置し、緯度だけで表される地理学上の特異点である。ここにはアメリカによってアムンゼン・スコット基地が建設されている。建物は 2003 年に新設され、基地が埋もれないよう工夫がされている。1 年を通じて数百人が観測に従事しており、夏期は毎日 C130 輸送機によって物資を運び込むことができる。しかし冬期は他の基地と同様、外界と完全に孤立する。



図 2.6 アムンゼン・スコット基地 (アメリカ国立科学財団 HP)

### 2.6.1 南極点での天体観測の歴史

南極での天文学は南極点から始まった。1979年、小型の太陽望遠鏡が設置されたのが南極で最初の天体観測であった。120時間に渡って連続して太陽を観測した。南極での連続観測の成果を受けて、後に SOHO 衛星 (太陽観測衛星) の打ち上げへとつながった。



図 2.7 南極点に設置された太陽望遠鏡 (Indermuehle & Burton & Maddison 2005 [39])

また 1984 年から 1985 年にかけてアメリカとフランスのグループは EMILIE と呼ばれる 45cm のサブミリ波望遠鏡を設置し、銀河面の観測を行った。しかしこれらの観測は夏期のみ限定的な物であった。

南極点で 1 年を通じて定常観測が開始されたのはアメリカの大学連合等からなる CARA (the Center for Astrophysical Research in Antarctica) という組織によって設立された MAPO (Mountain A. Pomerantz Observatory)、いわゆる Dark Sector Laboratory ができてからである。1993 年に SPIREX (South Pole InfraRed EXplorer) と呼ばれる口径 60cm の赤外線望遠鏡が MAPO に設置され、2000 年に撤去されるまで観測を継続した。

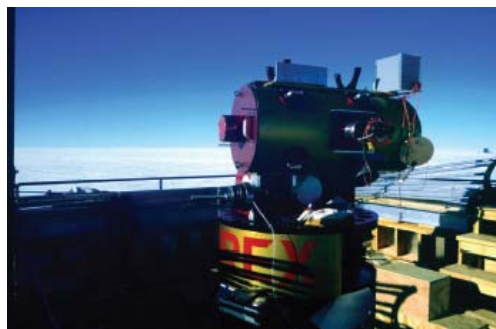


図 2.8 SPIREX (Indermuehle & Burton & Maddison 2005 [39])

奇しくも翌年の 1994 年にシューメーカー・レビー第 9 彗星の木星衝突があり、世界で唯

一週間に渡って連続観測を実施した (Indermuehle & Burton & Maddison 2005 [39])。

また AST/RO (the Antarctic Submillimeter Telescope and Remote Observatory) と呼ばれる 1.7m のサブミリ波望遠鏡も設置され、1995 年から 50 編以上の査読論文を生産した。

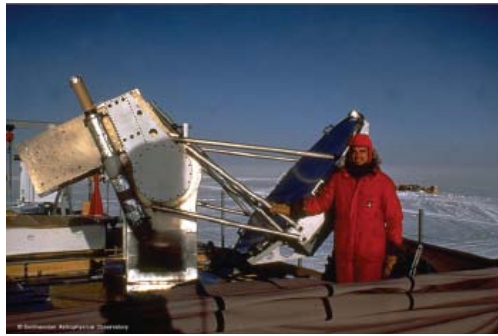


図 2.9 AST/RO (Indermuehle & Burton & Maddison 2005 [39])

南極点でサイト調査は 1994 年から SPIREX によって行われた赤外線背景ノイズの測定や気象タワー・気球に搭載した小型温度センサーによって行われた。この結果から  $2.3\mu\text{m}$  から  $5\mu\text{m}$  での背景ノイズは温帯域の 10 から 100 分の 1、またオーストラリアのグループの開発した AASTO (the Automated Astrophysical Site-Testing Observatory) によるサイト調査も 1997 年に行われた (Storey 1998 [56], Storey et al. 1999 [57], Harper 1999 [38])。



図 2.10 AASTO (Indermuehle & Burton & Maddison 2005 [39])

これらのサイト調査の結果は地上のシーイング  $1.73''$ 、接地境界層の高さ 270m、300m より上空のシーイング  $0.34''$  というもので、他の温帯の観測地と比べて南極点のシーイングは特に優れているわけではない事がわかった (Marks et al. 1999 [48], Travouillon et al. 2003 [63], Travouillon et al. 2003-2 [64])。

しかし南極点にあるアムンセン・スコット基地は南極大陸内陸部において最もインフラが整備されている基地である為、シーイングの影響のより少ないサブミリ波では引き続き

大型望遠鏡が建設され今に至る。また氷床を利用したニュートリノ検出装置の建設もされている。以下に南極点において運用もしくは計画されている望遠鏡の概要を示す。

### 2.6.2 South Pole Telescope

South Pole Telescope(SPT) は口径 10m のミリ波サブミリ波望遠鏡で 2007 年にファーストライトを迎えた。宇宙マイクロ波背景放射の精密観測を主目的としている。



図 2.11 SPT (アメリカ国立科学財団 HP)

### 2.6.3 IceCube

IceCube はニュートリノ検出装置で、南極氷床を巨大な検出器として利用するものである。氷床を掘削して地下 1,450m から 2,450m に 4,800 個の光電子増倍管を配置し、 $1\text{km}^3$  の体積を占める。2005 年から建設が始まり、一部の検出器を用いた観測が始まっている。最終的な完成は 2011 年の予定である。

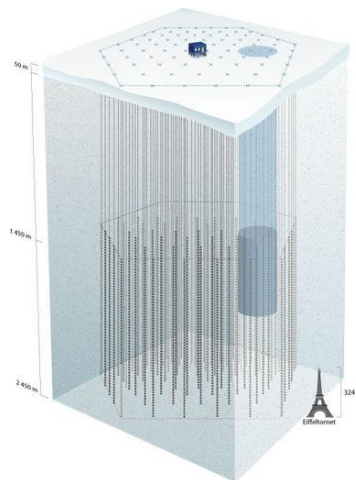


図 2.12 IceCube (アメリカ国立科学財団 HP)

## 2.7 ドーム C

ドーム C(Dome Circe) は東経 123 度 24 分、南緯 75 度 6 分に位置し標高は 3,280m である。ドーム C にあるコンコルディア基地は 1996 年から建設が開始され、2005 年から通年観測が行われるようになった内陸高原に位置する基地であり、フランスとイタリアの共同で運営されている。

年 2 回の雪上車による物資輸送とは別に観測隊員は夏期に航空機で移動する。なおアムンゼン・スコット基地、ロシアのポストーク基地と並び、コンコルディア基地でも越冬観測が行われている。もちろん冬期の補給、人員交代は不可能である。

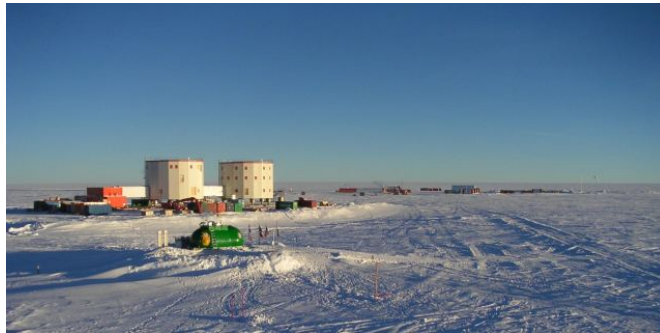


図 2.13 コンコルディア基地 (ニューサウスウェールズ大学 HP)

### 2.7.1 ドーム C におけるサイト調査

ドーム C におけるサイト調査は 2000 年から気球に取り付けた小型温度センサーによって行われた。この結果からはドーム C の風のプロファイルがほとんど一定で乱流の大部分は地表 100m までに発生しているということがわかった。(Aristidi et al. 2005 [28])。さらに DIMM<sup>\*1</sup>によるシーイング測定も 2002 年から行われた (Aristidi et al. 2003 [27], Aristidi et al. 2005 [29])。その結果、ドーム C の夏期のシーイングは地表 8 メートルで 0.54''、夕方に 0.4'' の極小値をとることがわかった。

しかしこれらの値は太陽の沈まない夏期の観測結果である。冬期を含む通年のデータは 2003 年 1 月から、AASTINO (Automated Astrophysical Site Testing INvincible Observatory) と呼ばれるオーストラリア・ニューサウスウェールズ大学のグループの開発したりモート天文台を用いるようになってからである (Lawrence et al. 2003 [41])。

AASTINO に搭載された SODAR(音波を大気中に発して乱流で散乱して帰ってくるエコーを受信して乱流強度・風向風速の高度プロファイルを測定する装置) と MASS(星の

<sup>\*1</sup> 付録 A DIMM を用いたシーイング測定を参照のこと



図 2.14 AASTINO (Lawrence et al. 2003 [41])

シンチレーションから乱流の高度プロファイルを得る装置) を用いたシーイング測定が行われた。その結果は 30m 上空でのシーイングが  $0.27''$  と地球上で最も良いものであった (Lawrence et al. 2004 [42])。

2005 年にコンコルディア基地が完成して越冬観測が可能になってからも DIMM によるシーイング測定と気球による大気のプロファイルの測定が継続して行われた (Agabi et al. 2006 [26]、Trinquet et al. 2008 [65])。これらの結果から接地境界層の高さがおよそ 30m であり、乱流のほとんどがそこで発生していることもわかってきた。

これに加え気象観測データから上空の大気の状態を調べる研究も行われた (Geissler & Masciadri 2006 [36]、Hagelin et al. 2008 [37])。この結果は冬期の 20km 上空の大気は夏期に比べていくぶん不安定というものであった。しかし他の温帯にある観測地に比べ、ドーム C は特に優れたシーイングを有する事が示される結果であった。

これらのサイト調査の結果から、ドーム C の優れたシーイングと極低温環境を生かした赤外線望遠鏡の建設が計画されている。またコンコルディア基地というインフラが既にあり、容易に天文台の建設が可能である。以下に運用もしくは計画されている望遠鏡の概要を示す。

### 2.7.2 sIRAiT

sIRAiT (small International Robotic Antarctic Infrared Telescope) はイタリアのグループが開発した口径 25cm の可視光望遠鏡で 2007 年から冬期観測を実施している。可視光 CCD カメラを搭載し、フィルターは U、B、V、R、I の 5 枚で視野は約 40 平方分である。 $-80^{\circ}\text{C}$  でも動作するように作られたフォーク式赤道儀に搭載され、地上 1m に設置されている。

sIRAiT はドーム C に於いてその低いシンチレーションを生かした変光天体の精密測



図 2.15 small IRART (AstroConcordia HP)

光および一日中太陽が昇らない「極夜」を生かした数週間の連続長期間の可能性の調査を目的として設置された。Strassmeire et al. 2008 [59] によると 243 時間の連続観測に成功し、V バンドにおける測光誤差が 0.003 等と 25cm の望遠鏡としては非常に高精度の測光が行われた。

### 2.7.3 IRAIT

IRAIT(International Robotic Antarctic Infrared Telescope) とは口径 80cm の中間赤外線望遠鏡で、2008 年から通年観測を開始したドーム C で最初の赤外線望遠鏡である。AMICA と呼ばれる赤外線観測装置を備え、K、L、M、N、Q バンドでの観測が可能である。

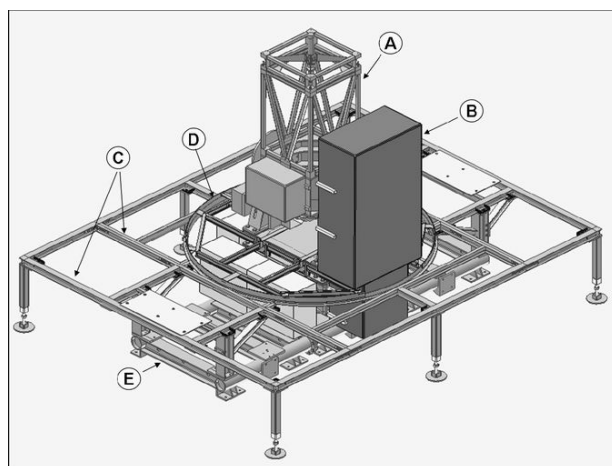


図 2.16 IRAIT (Tosti et al. 2006 [62])

#### 2.7.4 PILOT

PILOT(the Pathfinder for an International Large Optical Telescope) はオーストラリアのグループが中心となってドーム C に建設を計画している口径 2.4m の可視赤外線望遠鏡である (Burton et al. 2005 [31], Lawrence et al. 2009 [44], Storey 2009 [58])。接地境界層より高い 30m のタワーの上に望遠鏡を建設することで 0.3" の極めて良い南極の良シーイングを生かした観測を目指している。



図 2.17 PILOT (Lawrence et al. 2009 [44])



## 2.8 ドーム A

ドーム A(Dome Argus) は東経 77 度 6 分、南緯 80 度 25 分に位置し標高 4,093m と南極内陸高原で最も標高が高い地点である。このことから安定した大気と低い接地境界層が期待されている (Saunders et al. 2009 [55])

2005 年に中国の観測隊が初めてドーム A に到達し、アイスコアの採掘と天文学を目的として 2009 年崑崙基地が建設された。



図 2.18 崑崙基地 (新華通社 HP)

崑崙基地は 25 名の隊員を収容でき、将来は越冬観測も行う予定である。また 2008 年から中国とオーストラリアによる天体観測も開始され、今まさにサイト調査を行っている最中である。気象データによるシミュレーション (Saunders et al. 2009 [55]) からは、ドーム A は最も気温が低いと予想されサブミリ波観測に有利であるとされている。

以下に現在進行中のサイト調査で用いられている観測装置の概要を記す。

### 2.8.1 PLATO

PLATO (PLATeau Observatory) とはオーストラリア・ニューサウスウェールズ大学のグループによって開発されたサイト調査を行う全自動天文台である (Lawrence et al. 2008 [43], Yang et al. 2009 [66])。次小節に挙げる様々な観測装置を用いてサイト調査と南極の環境を生かした精密測光観測を行う。また 1 年間稼働し続けるエンジンモジュールを備え、無人となる冬期の観測に必要な電力を供給する。

### 2.8.2 CSTAR

CSTAR (Chinese Small Telescope ARray) とは中国が開発した口径 145mm の 4 連望遠鏡である (Yuan et al. 2008 [67], Yang et al. 2009 [66])。天体を追尾する機構は無く雪面に固定して天の南極付近を観測する。各望遠鏡には g、r、i フィルターが取り付け



図 2.19 PLATO (PLATO HP)

られ、もう 1 つはフィルター無しでそれぞれの望遠鏡は約 20 平方度の視野を有する。

無人となる冬期に変光天体の観測と大気吸収・大気背景放射の測定をリモートで行う。2008 年は 3 月から 8 月まで 115 日の連続観測が行われた。



図 2.20 CSTAR (Yuan et al. 2008 [67])

### 2.8.3 Gattini

Gattini は PLATO の屋根に取り付けられた可視光 CCD カメラで、狭視野カメラと全天カメラの 2 つの観測装置からなる (Moore et al. 2008 [49])。Gattini は (1) 空の明るさ、(2) 冬期の雲量、(3) オーロラの発生頻度、(4) OH 夜光の時間変化の観測を行うのが目的である。

### 2.8.4 DASLE

DASLE (Dome A Surface Layer Experiment) は接地境界層の高さを測定する観測装置で高さ 15m のタワーに取り付けられた 3 つの超音波風速計からなる。地表付近には一般に接地境界層と呼ばれる乱流層があり大気は不安定である。南極のきわめて安定した大気を生かす為にはこの接地境界層より高い場所に観測装置を設置する必要があり、DASLE はその高さを測定する観測装置の一つである。

### 2.8.5 Pre-HEAT

Pre-Heat (technological prototype for the High Elevation Antarctic Terahertz telescope) は口径 20cm の電波望遠鏡で 660GHz(=450 $\mu$ m) を観測し大気の不透明度 (Opacity) の測定を行う。装置は PLATO の側面に取り付けられ、装置全体を回転させることで地上から天頂まで動かすことができる。

### 2.8.6 Snodar

SNODAR(Surface layer NON-Doppler Acoustic Rader) は 5kHz の音響レーダーで上空 200m までの大気の流れを 1m の分解能で測定できる装置である (Bonner et al. 2009 [30])。SNODAR によって接地境界層の高さとその乱流の強度・時間変化を調べることができる。

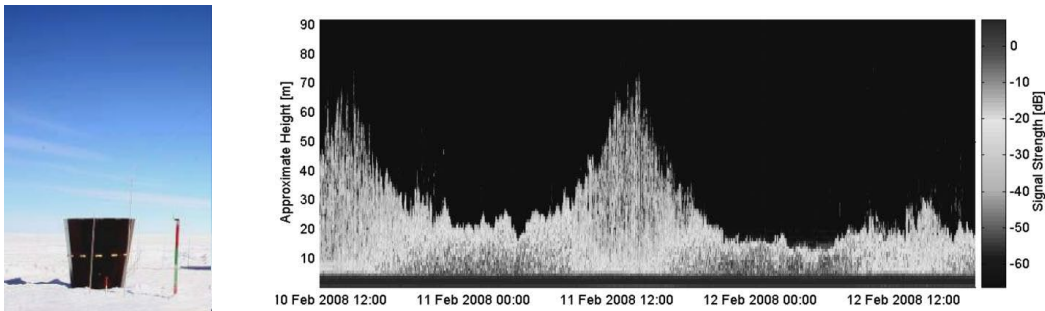


図 2.21 (左)SNODAR、(右)2008 年の観測結果の一例 (Yang et al. 2009 [66])

## 2.9 ドームふじ

ドームふじは東経 39 度 42 分、南緯 77 度 19 分に位置する高原のピークで標高は 3,810m である。1995 年に日本の観測隊によってドームふじ観測拠点が作られ、2004 年にドームふじ基地へと改称された。沿岸部 (正確には東オングル島) にある昭和基地から内陸におよそ 1,000km の地点にあり過去にアイスコアの掘削が行われた。アイスコア掘削中は越冬観測が行われたが現在は掘削したアイスコアの運搬と気象観測で夏隊が訪れる程度である。しかし南極内陸部へのさらなる科学的関心と要望から 2012 年以降に恒久基地を建設する事が決定しており将来は越冬観測も行われる計画である。

ドームふじはドーム A と同様、標高が高いことから安定した大気と低い接地境界層が期待されている (Saunders et al. 2009 [55])。この優れた条件を生かして天文台を建設しようと東北大学・筑波大学・名古屋大学・国立天文台・極地研究所等で南極天文コンソーシアムを結成して計画を推進している。



図 2.22 ドームふじ基地 (国立極地研究所 HP)

### 2.9.1 南極天文コンソーシアムの取り組み

南極天文コンソーシアムは東北大学・筑波大学・名古屋大学・国立天文台・極地研究所等の有志によってドームふじ基地に協力して天文台を建設する事を目的に 2005 年に結成された。代表は中井直正教授 (筑波大学) である。この南極の極低温できわめて乾燥した内陸高原の特徴を生かして、東北大学を中心とする赤外線グループでは近・中間赤外線観測を目的とする 2m クラスの望遠鏡、筑波大学をはじめとするテラヘルツグループでは 10m 級テラヘルツ望遠鏡の建設を計画している。

2006 年度には第 48 次南極観測隊に付託してドームふじに様々な装置を設置、観測を行った。赤外線グループは SODAR と呼ばれる音波を大気中に発して乱流で散乱して帰ってくるエコーを受信し、乱流強度、風向風速の高度プロファイルを観測した。(高遠和尚 2008 [12])。テラヘルツグループは 220GHz 帯の大気の透過率を測定するラジオメーターを設置し観測を行った。併せて輸送中の振動測定も行った。



図 2.23 (左)SODAR、(右)ラジオメーター (高遠和尚 2008 [12], 筑波大学 HP)

またこの頃から各グループで試験観測用の小型望遠鏡の開発も始まった。赤外線グループは 40cm 光学望遠鏡、テラヘルツグループは 30cm 電波望遠鏡を開発しドームふじでの今後のサイト調査の準備を現在行っている。

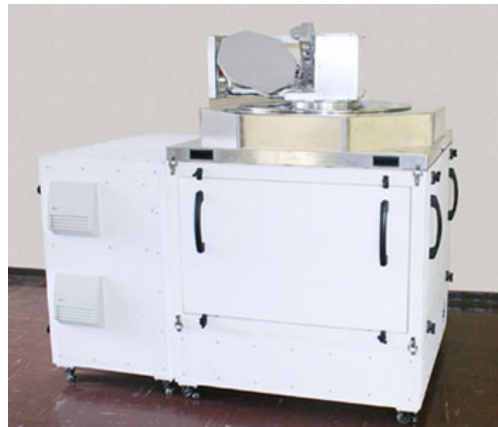


図 2.24 南極 30cm 可搬型サブミリ波望遠鏡 (筑波大学 HP)

2009 年度の第 51 次南極観測隊では筑波大学 瀬田益道市講師が同行してドームふじのサイト調査を行っている。赤外線グループは国立天文台ハワイ観測所 高遠徳尚主任研究員の開発した簡易赤外線分光器 (高遠徳和尚 2007 [11]) による大気水蒸気量の測定と東北大学の市川隆教授が開発した全天カメラを用いた雲量の連続観測、テラヘルツグループはラジオメーターによる大気透過率の測定を行う予定である。

そして 2010 年から 2011 年の第 52 次隊で、本修士論文で開発・性能評価を行った南極 40cm 赤外線望遠鏡を用いてドームふじのサイト調査と試験観測を行う計画である。また超音波風速計と SNODAR (Bonner et al. 2009 [30]) による接地境界層の高さの測定も平行して行い、ドームふじ基地における天文学的観測条件の調査を行う予定である。

## 2.10 南極特有の問題とその克服

これまで述べてきたように南極内陸高原は近赤外線からサブミリ波において地球上で最も良い環境であることはほぼ間違いない。しかしその特殊な環境故天文台の建設には大きく分けて 2 つの困難がある。

第 1 は南極の厳しい環境である。通常のグリスは  $-50^{\circ}\text{C}$  程度で成分の油脂が凍結し使用できない (村田千紘 [20]) が、冬期のドームふじの最低気温はこれを遙かに下回る  $-80^{\circ}\text{C}$  にもなる。その為通常のグリスは使用できず、潤滑や流体軸受け等の機構は凍結しない特殊な油を用いなければならない。また望遠鏡の部品や機械の製作・調整は常温 ( $20^{\circ}$ ) で行われるが、設置し観測するドームふじとでは温度差が最大で  $100^{\circ}$  もあり材質間の熱収縮率の違いを考慮した設計・収縮に耐えうる機構が必要となる。また低温下では金属がもろくなるとも言われる為、低温下での強度も考慮する必要がある。さらに冬期のドームふじの湿度は常に 100% であると言われ、その為に寒暖差によってダイヤモンドダストや霜が付着する可能性が非常に高い。光学系のみならず機械部品・稼働部分にこれらが付着した場合は最悪観測不能となる。これまでの (天文学ではない) 南極探査では加熱してダイ

ヤモンドダストや霜の付着に対応してきたが赤外線観測では熱はノイズ源となる為観測装置を暖めるといった事は極力避けなければならない。

第2は輸送・通信の問題である。南極点のアムンゼン・スコット基地は例外的に航空機による大量の資材搬入や人員移動が可能であるが、南極大陸内陸部に位置するコンコルディア基地やドームふじ基地では雪上車による地上輸送のみであり、大きさ・重量共に大きな制限を受ける。その為搬入できる資材は最小限でかつ軽量でなければならない。またドームふじ基地への物資搬入や人員交代は年1回しか実施されない為、冬期観測を実施する場合には越冬隊員の確保や万が一の事態への対処に問題がある。加えて通信は短波無線の他にインマルサット通信衛星やイリジウム衛星携帯電話が利用できるがいずれも回線が細く、大量の観測データを送信するには現時点では不可能である。

南極で天文学を行う為にはこれらの諸問題を克服しなければならない。しかし技術開発や政治的な努力によってこれらは必ず解決することができるはずである。なにより今後ますます精密かつ緻密になると予想される赤外線からサブミリ波での天文学を推進する上で、最も観測条件の優れた南極で観測を実施することは本質的に重要である。さらに最大2,000時間に及ぶ連続観測ができるのは宇宙空間を含めて南極しか存在しない。この利点を生かした新しい天文学の開拓も期待され、困難を克服するに値するものである。

このようなモチベーションから本修士論文ではドームふじ基地でのサイト調査および試験観測を行う為南極40cm赤外線望遠鏡を開発し、その性能評価を行った。次章からその詳細について論じていく。

## 第3章

# 南極 40cm 赤外線望遠鏡

前章までで述べてきたように、地球上で赤外線観測を行う為には地球大気の影響が最も少ない南極大陸内陸高原で行うのが最善である。しかし南極の極低温環境では普通に望遠鏡を設置しただけでは動作せず観測できない。また小型・軽量の構造の望遠鏡でなければ設置することは出来ない。そこで小型・軽量で $-80^{\circ}$ でも動作する特別仕様の望遠鏡の開発が南極天文学実現の鍵となる。

南極 40cm 赤外線望遠鏡 (AIRT40, the Antarctica InfraRed Telescope with a 40cm primary mirror) は IK 技研株式会社と共同で開発した口径 40cm の小型赤外線望遠鏡である (村田千紘 2009 [20])。厳冬期は $-80^{\circ}\text{C}$ まで下がるドームふじでの使用を前提とした様々な寒冷地対策が施されている。

### 3.1 仕様

表 3.1 に南極 40cm 赤外線望遠鏡の仕様を示す。

特徴としては、まずドームふじ基地までの雪上車による輸送を考慮し、構造体はアルミニウムを用いてできる限り軽量化している点である。通常の 40cm 反射望遠鏡の場合重量は 1t 近くあるが南極 40cm 赤外線望遠鏡ではおよそ 5 分の 1 の 200kg しかない。次に駆動部分は $-80^{\circ}\text{C}$ でも動作するように熱収縮を計算に入れた設計がなされている。さらに赤外線観測に特化する為、鏡筒はなくトラス構造で副鏡中央に円錐コーンが取り付けられ、またバッフルもない点が挙げられる。

この特別仕様望遠鏡を用いてドームふじ基地のサイト調査および試験観測を 2010 年の第 52 次南極地域観測隊で実施する計画である。このサイト調査・試験観測を通じて将来の大型望遠鏡建設の技術やノウハウを蓄積する予定である。

図 3.2 は南極 40cm 赤外線望遠鏡の各部の構成である。上から「トッピング」「トラス」「Dec 軸ユニット」「フォーク」「脚部」「極軸調整プレート」の 6 つに簡単に分解できる。またトッピングとトラス、Dec 軸ユニットの一部を「鏡筒」(光学系を構成する部品)、フォーク下部を「RA 軸ユニット」(RA 軸モーターと RA 軸受け部分)とも呼ぶ。



図 3.1 南極 40cm 赤外線望遠鏡

|        |                      |
|--------|----------------------|
| 光学形式   | カセグレン式               |
| 有効口径   | 400 mm               |
| 焦点距離   | 4775 mm (設計値)        |
| 口径比    | F11.8                |
| 最大視野   | $\phi 30$ arcmin     |
| ピント調整  | 副鏡移動方式               |
| 架台形式   | フォーク式赤道儀             |
| 減速機構   | ウォームホイール + ウォームギヤ    |
| 最大駆動速度 | 対恒星時 120 倍 (-80°C 時) |
| 制御     | PC による遠隔制御           |
| 大きさ    | 540mm×830mm×2270mm   |
| 重量     | 200 kg               |
| 動作温度   | -80 °C               |
| 分割     | 6 分割して輸送可能           |

表 3.1 AIRT40 仕様



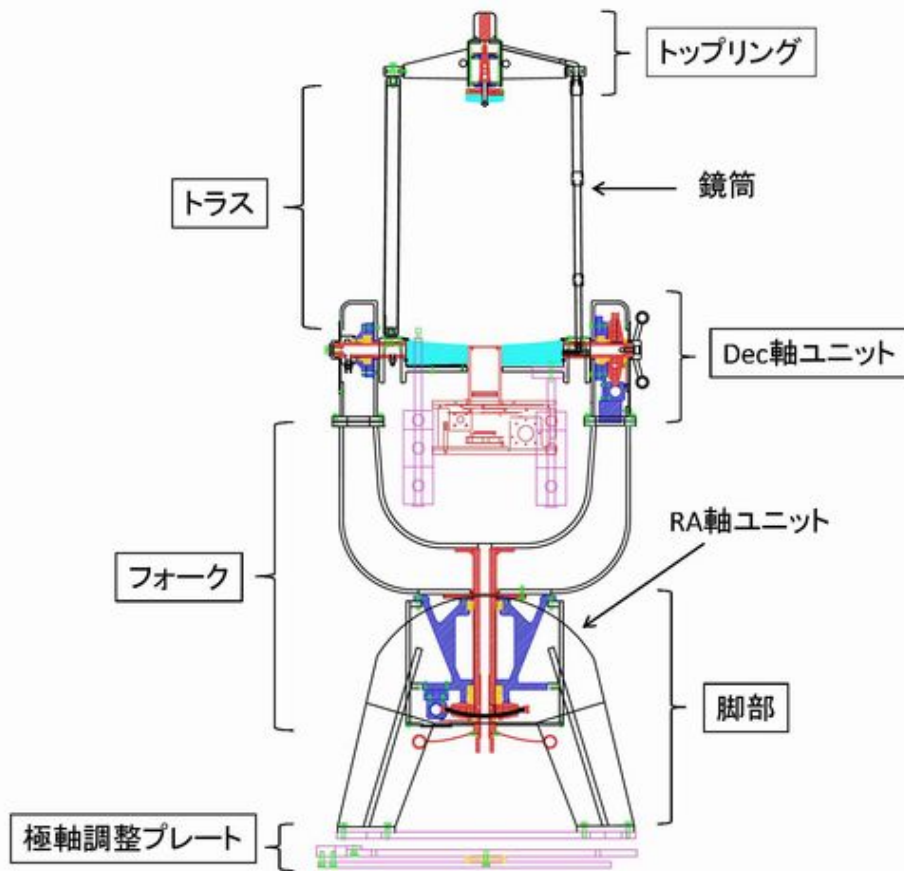


図 3.2 南極 40cm 赤外線望遠鏡構成図

## 3.2 鏡筒

表 3.2 に IK 技研株式会社より示された南極 40cm 赤外線望遠鏡の鏡材の諸元を記す。鏡面はフォーコテスト・ゾーンテストにより  $\lambda/16$  の精度を達成している (村田千紘 2009 [20])。

|    | 材質    | コーティング | 有効直径  | 中央穴  | 焦点距離      | 離心率 |
|----|-------|--------|-------|------|-----------|-----|
| 主鏡 | Sitar | Al     | 400mm | 95mm | 798.0mm   | 1   |
| 副鏡 | UEL   | Al     | 100mm | 12mm | -176.72mm | 1.4 |

表 3.2 鏡材の諸元

光学レイアウトはカセグレン式と呼ばれる光学系で構成されている。凹放物面の主鏡と、凸双曲面の副鏡を共通の光軸上に組み合わせた光学系である。主鏡・副鏡を適切に配

置すると光路長一定の条件を満たし球面収差の無い光学系となる (吉田正太郎 1988 [24])。カセグレン式の光学レイアウトを図 3.3 に示す。

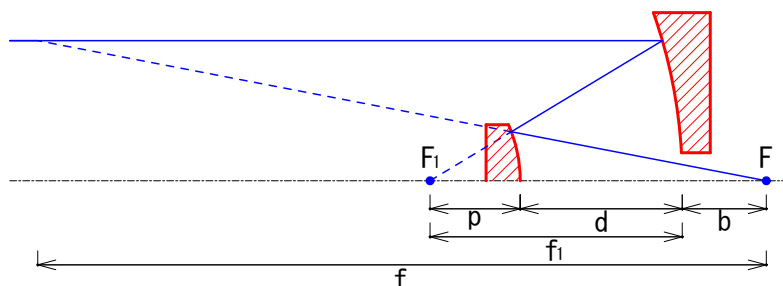


図 3.3 カセグレン式光学レイアウト。 $f_1$  は主鏡焦点距離で  $f$  が合成焦点距離となる。

ここで合成焦点距離  $f$  は

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d} \quad (3.1)$$

と計算される (吉田正太郎 1988 [24])。但し  $f_1$ 、 $f_2$  はそれぞれ主鏡、副鏡の焦点距離である。

南極 40cm 赤外線望遠鏡の設計上の光学配置は表 3.3 の通りである。

|           |     |          |
|-----------|-----|----------|
| 主焦点-副鏡間距離 | $p$ | 147.19mm |
| 副鏡-主鏡間距離  | $d$ | 650.81mm |
| バックフォーカス  | $b$ | 230.00mm |

表 3.3 鏡材配置

よって南極 40cm 赤外線望遠鏡の合成焦点距離は

$$f = 4775.3[\text{mm}] \quad (3.2)$$

となる。ただし実際の合成焦点距離はピント調整や観測日の外気温の変化などによって光学配置が変わることで変化する。

またピント調整は副鏡の位置を前後に動かすことで行う。これは観測装置を望遠鏡に固定するのに好都合であるが、副鏡の位置が動く事によって光路長一定の条件から外れ球面収差が生じる。しかしその影響は十分に小さく観測に支障はない。

また図 3.4 にあるように、南極 40cm 赤外線望遠鏡は赤外線観測に特化した望遠鏡で鏡筒がなくトラス構造で副鏡を支え、また副鏡中央には円錐コーンが取り付けられさらにバツフルもない。

まずトラス構造を採用した理由は赤外線観測では第 1 章で議論したように望遠鏡からの熱放射が背景ノイズの大部分を占める為、トラス構造の方が鏡筒より熱源面積を小さくでき望遠鏡からの熱放射を少なくできるからである。またトップリングやトラスはアルミニ



図 3.4 南極 40cm 赤外線望遠鏡の鏡筒

ウムで作られ、表面は研磨またはメッキが施されている。これは研磨面でのアルミニウムの放射率が  $\epsilon=0.02 \sim 0.1$  と小さく、望遠鏡からの熱放射を少しでも抑えられるように工夫した結果である。なお可視望遠鏡の場合は散乱光を防ぐ為、つや消しの黒色塗装が施されておりこの場合放射率は 100%、赤外線観測には適さない。

南極 40cm 赤外線望遠鏡にバツフルがないのもこれと同様の理由で熱源面積を減らし望遠鏡からの赤外線放射を少しでも抑える工夫である。

円錐コーンは検出器自身から放射される熱放射を望遠鏡の外に反射する為に取り付けられたもので赤外線観測の場合必須の装備である。

ところで鏡面のコーティングは主鏡・副鏡共にアルミニウムで反射率は近赤外線で約 96% である。これは南極 40cm 赤外線望遠鏡では主に Tohoku DIMM<sup>\*1</sup>等の可視光の観測が予定されている為であって本来は赤外線でより反射率の高い金 (赤外線全域で反射率 98%) のコーティングが望ましい。アルミニウムは可視光から赤外線でよい反射率を維持するが、赤外線では金に比べ若干反射率が低い。物体に入射した光は反射・透過・吸収のいずれかでその全量を消費する為、反射率の低い鏡に入射した光はその多くが吸収され鏡の熱放射の元となる。熱放射は背景ノイズとなることからこれを抑えるという意味でも、少しでも高い反射率のコーティングのほうが赤外線観測には良いのである。

### 3.3 架台

南極 40cm 赤外線望遠鏡の架台はフォーク式赤道儀である。赤道儀とは地球の自転軸と平行な軸 (赤経軸/RA 軸/極軸) とそれに直交した軸 (赤緯軸/Dec 軸) によって構成され

<sup>\*1</sup> 付録 A DIMM によるシーイング測定を参照の事

た望遠鏡の架台で、赤経軸を地球の自転角速度と同一速度で回転させることで天体を追尾することができるものである。フォーク式とは赤経軸が U 字型のアームとなり、鏡筒を左右の赤緯軸が挟み込む構造である。この利点は天体の子午線通過に伴う鏡筒の位置変更が必要無く、長時間安定して観測が行える点である。また RA 軸のバランスをとるためのバランスおもりが不要で比較的軽量である。しかし Dec 軸と光軸の直交を得にくいと言った欠点も有する。

表 3.4 に南極 40cm 赤外線望遠鏡の駆動系仕様を示す。

|                |                   |
|----------------|-------------------|
| 架台形式           | フォーク式赤道儀          |
| RA モーター        | CSK564AP-T20      |
| 減速             | ウォームホイール + ウォームネジ |
| RA ウォームホイール直径  | 240mm             |
| RA ウォームホイール歯数  | 360               |
| Dec モーター       | CSK564AP-T20      |
| 減速             | ウォームホイール + ウォームネジ |
| Dec ウォームホイール直径 | 200mm             |
| Dec 歯数         | 300               |
| 副鏡モーター         | CSK523AP-M30      |
| 副鏡移動           | M3 ネジによる直接駆動      |

表 3.4 AIRT40 駆動系仕様

CSK564AP-T20、CSK523AP-M30 とはオリエンタルモーター株式会社製のステッピングモーターである (オリエンタルモーター総合カタログ [4])。

南極 40cm 赤外線望遠鏡の架台は $-80^{\circ}\text{C}$ でも動作するよう様々な工夫が施されている。第5章や付録 D で詳細に述べるが、 $-80^{\circ}\text{C}$ でも粘性を維持する FOMBLIN グリースの使用や熱収縮を考慮に入れた設計がなされている。また試験観測を行う仙台 ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ) から実際に設置するドームふじ ( $-40^{\circ}\text{C} \sim -80^{\circ}\text{C}$ ) では温度差が  $100^{\circ}\text{C}$  もあるが、どちらでも正しく動作できるように熱膨張率の違う素材を組み合わせよううまく動作するよう作られている。

なお南極 40cm 赤外線望遠鏡の架台には望遠鏡の絶対位置を測定するアブソリュートエンコーダが搭載されていない。これは村田千紘 2009 [20] によるとエンコーダは $-60^{\circ}\text{C}$ 付近で凍り、物理的に使用できなくなった為採用を見送った為である。そのため南極 40cm 赤外線望遠鏡ではアブソリュートエンコーダの変わりに望遠鏡の向きを把握する装置として磁気センサーを用いた原点検出センサーが搭載されている。これは磁気センサーの ON、OFF が切り替わる位置を原点とするもので、半月状の薄鉄板が望遠鏡に合わせて回転することで ON、OFF が切り替わる。図 3.5 はその模式図である。

半月板では望遠鏡の原点位置を検出することはできるが絶対位置を検出することはでき

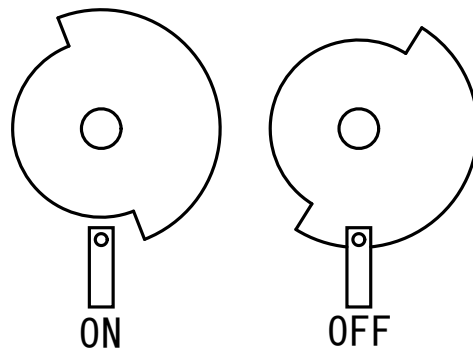


図 3.5 原点検出の原理。半月板の角度によりセンサーの ON、OFF が切り替わることで原点を検出する。

ない。その為望遠鏡はステッピングモーターに送ったパルス数で望遠鏡の位置を類推し制御することになる。これは何らかの不調がありモーターが回転しない(脱調)が生じた場合問題である。南極 40cm 赤外線望遠鏡ではモーターが脱調しないよう極めて低速で指向させることで対応しており観測に支障はないが、将来の大型望遠鏡設置にあたっては望遠鏡の位置把握の為の技術開発が必要となる。

### 3.4 コントローラー

南極 40cm 赤外線望遠鏡の RA 軸・Dec 軸・副鏡モーターおよびリミットスイッチの制御は株式会社エックス電子設計の開発した南極用望遠鏡コントローラー R2-2009-SV を使用する (R2-2009-SV 取扱説明書 [25])。R2-2009-SV は USB ケーブルを介して PC から操作し望遠鏡は PC 画面上またはハンドボックスから指示を出すことで動かすことができる。

表 3.5 に R2-2009-SV の仕様を記す\*<sup>2</sup>。

南極 40cm 赤外線望遠鏡を遠隔操作するパッケージは AIRTReCS (AIR-T Remote Control System) と呼ばれ、東北大学の吉川智弘助教が開発中である。

### 3.5 観測装置

南極 40cm 赤外線望遠鏡に搭載する観測装置は主に赤外線カメラである。現在東北大学で開発が進められている観測装置について簡単にまとめる。

\*<sup>2</sup> GD-5410 は株式会社メレック、SD5103P3 はオリエンタルモーター株式会社のステッピングモータードライバである

|             |                      |
|-------------|----------------------|
| RA コントローラー  | GD-5410              |
| Dec コントローラー | GD-5410              |
| 副鏡コントローラー   | SD5103P3             |
| 対応 OS       | Windows Me, 2000, XP |
| 電源電圧        | AC100V               |
| 動作電流        | 0.49A (追尾時)          |
| 最大電流        | 0.85A (導入時)          |
| 大きさ         | 165mm×360mm×275mm    |
| 重量          | 7 kg                 |
| 動作温度        | 常温域                  |

表 3.5 R2-2009-SV 仕様

### 3.5.1 TONIC-II

TONIC-II(TOhoku university Near InfraRed Camera II) は東北大学の市川隆教授を中心として開発が進められている赤外線カメラである。その特徴はコールドストップを持たない直接カメラで簡単な機構ながら南極の低い背景ノイズによって十分な性能を発揮できるものと考えられ開発が進められている。

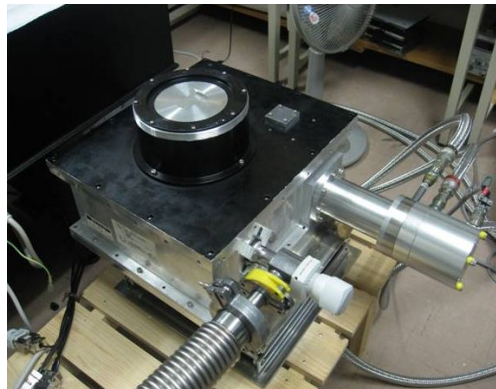


図 3.6 TONIC-II

表 3.6 に TONIC-II の仕様を記す。

TONIC-II はドームふじ基地に設置する南極 40cm 赤外線望遠鏡に用いる最初の赤外線カメラを予定しており、現在急ピッチで開発が進められている。また金星観測用に多数のフィルターの搭載可能なフィルターホイールの開発も検討されている。

|          |                            |
|----------|----------------------------|
| 受光素子     | HgCdTe                     |
| 画素数      | 2048×2048                  |
| ピクセルサイズ  | 20×20 [ $\mu\text{m}$ ]    |
| ピクセルスケール | 0.86 [ $''/\text{pixel}$ ] |
| フィルター    | J、H、K、 $K_{dark}$ から 3 枚   |
| 有効視野     | 29'×29'                    |

表 3.6 TONIC-II 仕様

### 3.5.2 AIR-C

AIR-C (Antarctic Infra-Red Camera) は東北大学の大学院生 Ramsey Guy Lundock らを中心として開発が進められている赤外線カメラである。その特徴はダイクロミックミラーと呼ばれる特定の波長のみを反射または透過するフィルターを用いることで波長毎に光を 3 つに分割し、それぞれを同時に撮像できる点である。その為 AIR-C には 3 つの検出器が搭載される。また TONIC-II とは異なりコールドストップを有し、背景ノイズを極限まで排除した観測を目指す。

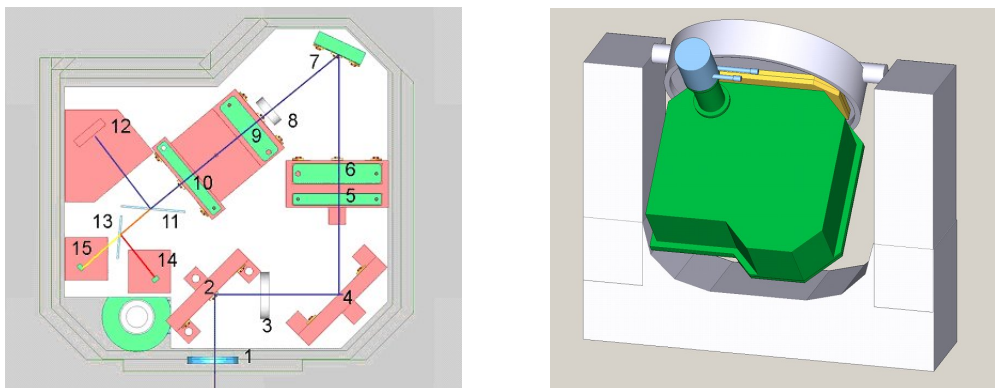


図 3.7 (左)AIR-C 光学レイアウト、(右)AIR-C 完成図 (Lundock 2008 [45])

表 3.7 に AIR-C に搭載予定の検出器とそれぞれの観測波長を示す。HgCdTe とは日本語で水銀カドミウムテルルと呼び  $0.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$  に感度を有する半導体である。同様に InSb は日本語でインジウムアンチモンであり  $0.6 \sim 5 \mu\text{m}$  に感度がある。A バンドとは南極の低い可降水量及び極低温による低い背景ノイズからから観測が可能と考えられる波長帯で Lundock が命名したものである。

表 3.8 に各バンド毎の有効視野とピクセルスケール、見込まれる検出限界を示す。但し検出限界は  $S/N=1$ 、露出時間 3600sec、効率  $\tau_\lambda \cdot \eta_\lambda=0.5$  として計算した。

AIR-C は 2012 年冬から行われる予定の越冬 (リモート) 観測で使用する計画で、現在は設計が終了しこれから製作が開始される予定である。

| 波長帯        | 中心波長 [ $\mu\text{m}$ ] | 受光素子   | 画素        | ピクセルサイズ [ $\mu\text{m}$ ] |
|------------|------------------------|--------|-----------|---------------------------|
| $K_{dark}$ | 2.36                   | HgCdTe | 2048×2048 | 20×20                     |
| A          | 3.4                    | InSb   | 256×256   | 30×30                     |
| L'         | 3.7                    | InSb   | 256×256   | 30×30                     |

表 3.7 AIR-C 観測波長と検出器

| 波長帯        | 有効視野       | ピクセルスケール    | 検出限界                         |
|------------|------------|-------------|------------------------------|
| $K_{dark}$ | $\phi 30'$ | 2.7 "/pixel | 19.1 mag/arcsec <sup>2</sup> |
| A          | 9          | 4.0         | 19.4                         |
| L'         | 9          | 4.0         | 23.7                         |

表 3.8 AIR-C の有効視野、ピクセルスケール、検出限界

### 3.5.3 Tohoku DIMM

Tohoku DIMM は南極 40cm 赤外線望遠鏡を用いてシーイングを測定する装置である。footnote 付録 A DIMM を用いたシーイング測定を参照のこと。。可視光のインターレース式 CCD カメラで明るい星 (主にカノープス) を観測し、その星像揺らぎからシーイングを求める装置である。



図 3.8 Tohoku DIMM 全体像。鏡筒前方に取り付けられているのは DIMM 板である。

2010 年のドームふじ基地での試験観測では TONIC-II を用いた試験観測とこの To-



hoku DIMM を用いたシーイング測定が予定されている。

またこれらとは別に、仙台の試験観測・性能評価では Canon EOS Kiss Digital(デジタル一眼レフカメラ)、Apogee ALTA U9000(冷却 CCD カメラ)、SBIG ST-7XME-D(冷却 CCD カメラ)等を使用した。いずれも可視光に高い感度を有し、望遠鏡の性能評価に必要なデータを比較的短時間で取得可能であった。

### 3.6 その他

南極 40cm 赤外線望遠鏡は地上数 m のステージの上に設置する予定である。これはできるだけ高い場所に設置して接地境界層による乱流の影響を少しでも回避する為である。(但し南極 40cm 赤外線望遠鏡の空間分解能は  $2.2\mu\text{m}$  で  $1.4''$  程度であり南極の良いシーイングを生かすことはできない。) ステージの高さや大きさはまだ検討中であるが、現地で簡単に組み立てられるトラス構造で高さ 5m 程度のもの、または輸送に使う 20ft コンテナ ( $2.4\text{m}\times 6.1\text{m}\times 2.6\text{m}$ ) を積み重ねてその上に設置する事を計画している。

望遠鏡を格納するドームも整備や急な悪天候に対応する為に必要であると考えている。ただしドームふじでは雪は降らず、風も穏やかなため簡単な構造のもので良い。まだ検討段階ではあるが図 3.9 のようなクラムシェルーフタイプの簡易ドームを計画している。アルミ材でドーム外壁を作るとその低い放射率から放射冷却で霜が付く為、放射率の高くて  $-80^{\circ}\text{C}$  でも柔軟性・耐久性の高いテフロンで外壁を作る予定である。

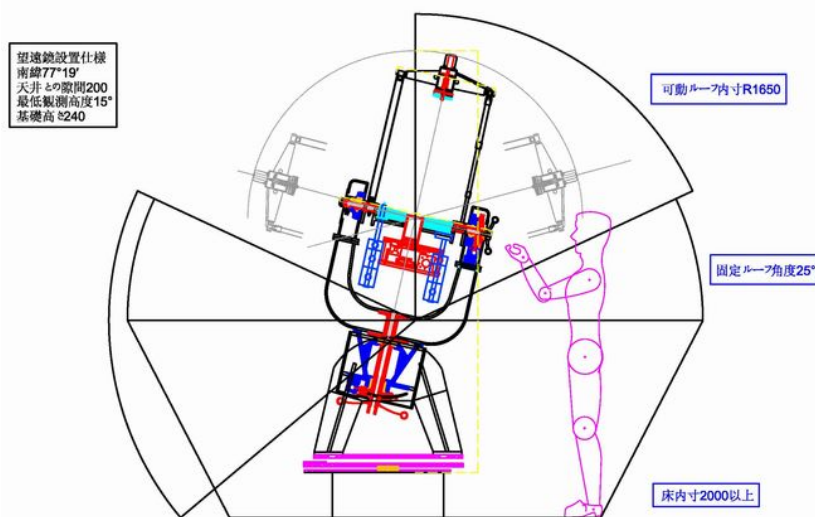


図 3.9 クラムシェルーフタイプのドーム (案)



## 第 4 章

# 南極 40cm 赤外線望遠鏡の評価実験と改良

第 1 章～第 3 章までで赤外線天文学の特徴と重要性、南極という観測地の利点、そして南極 40cm 赤外線望遠鏡の仕様を述べてきた。これらを踏まえ、本章から本研究で取り組んできた南極 40cm 赤外線望遠鏡の開発と性能評価について詳しく論じていく。

本研究の最終目的は南極 40cm 赤外線望遠鏡を用いた南極ドームふじ基地におけるサイト調査・試験観測である。ドームふじ基地での円滑な観測を実現する為、南極 40cm 赤外線望遠鏡の納品後も様々なところを改造し、開発を継続した。

第 4 章ではまず望遠鏡としての基本性能の評価実験について述べる。次に追加した観測補助装置の詳細を説明する。そしてこれらの評価実験と改良によって観測が円滑に行えることを示す。

### 4.1 コントローラーの評価実験

南極 40cm 赤外線望遠鏡は赤道儀である為、天体の追尾は RA 軸のみの回転で行われるが以前の試験観測から原因不明の追尾エラーが確認されていた(村田千紘 [20])。この追尾エラーは天体の追尾が「遅れる」といった形で観測された。

そこでこの追尾エラーの原因が何であるのか調べる為、南極 40cm 赤外線望遠鏡コントローラーから正しく信号が送られているかどうか評価実験を行った。具体的にコントローラーが正しく動作していないとすると

- モーターに送られるパルスの周期が正しくない
- パルスが抜ける

ことが観測されるはずである。そこで以下 2 通りの方法でこれら进行评估した。

### 4.1.1 パルス周期の測定

#### 実験原理

赤道儀で天体を追尾する時 RA 軸モーターの回転数は一定である。南極望遠鏡の RA 軸モーターは 5 相ステッピングモーターであるので、RA 軸モーターの回転数が一定であればステッピングモーターに入力されるパルスの周期も一定のはずである。そこでこのパルスが「正しい周期」で送られているのかどうかを確かめる。

まず RA 軸が 1 回転する為に必要なパルス数を計算する。RA 軸モーターは CSK564AP-T20 という 5 相ステッピングモーターで 1 回転に 500 ステップを要し、さらに 1:20 の減速ギヤが組み込まれている (オリエンタルモーター総合カタログ [4])。また RA 軸には歯数 360 枚のウォームギヤで回転が伝達されるので RA 軸が 1 回転する為に  $500 \times 20 \times 360 = 3,600,000$  ステップ必要となる。

表 4.1 に各追尾モード毎の 1 回転に必要な時間、1 秒間に出力されるパルス数を示す (R2-2009-SV 取扱説明書 [25])。

| 追尾モード      | 1 回転に必要な時間 [sec] | 1 ステップに要する時間 [ms] |
|------------|------------------|-------------------|
| Sidereal   | 86,164.1         | 23.9345           |
| Kings Rate | 86,200.3         | 23.9445           |
| Lunar      | 89,428.3         | 24.8412           |
| Solar      | 86,400.0         | 24.0000           |

表 4.1 各追尾モード毎の 1 ステップに要する時間

なお 5 相ステッピングモーターをフルステップ駆動させる場合 1 つの相にかかる電圧 (パルス) の周期は 10 ステップに相当する。よって実際に測定するのは 10 ステップに必要な時間となる。

#### 実験方法

南極 40cm 望遠鏡コントローラー R2-2009-SV から出力される RA 軸モーターケーブルを外し代わりにオシロスコープのプローブを当てその波形を観察する。オシロスコープは LeCroy 9350A を用い、RA 軸モーターコネクタの 1 番にプローブを、2 番にグランドを接続しそれぞれの追尾モードで波形を観察しその周期を測定した。LeCroy 9350A では period、width、rise、fall、delay のそれぞれ平均値、最小値、最大値、標準偏差を表示させることができる。1 つの追尾モードにつきおよそ 100 回測定し周期の平均値と標準偏差を読み出した。

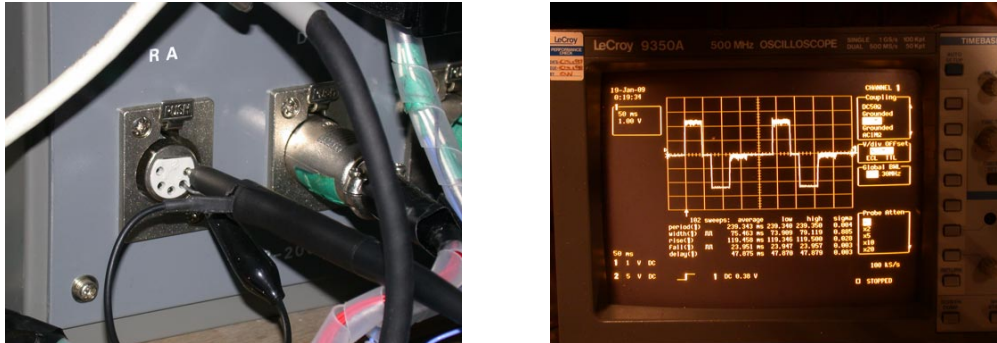


図 4.1 (左)RA 軸モーターコネクタの 1 番にプローブを、2 番にグラウンドを接続しオシロスコープで波形を観察する、(右)LeCroy 9350A オシロスコープに表示される波形

### 実験結果

表 4.2 にオシロスコープで測定した各追尾モードの period(周期) を示す。なお測定値の誤差は  $1\sigma$  である。

| 追尾モード      | 10 ステップに要する時間 [ms] | 測定値 [ms]      |
|------------|--------------------|---------------|
| Sidereal   | 239.345            | 239.343±0.005 |
| Kings Rate | 239.445            | 239.444±0.005 |
| Lunar      | 248.412            | 248.411±0.002 |
| Solar      | 240.000            | 239.999±0.002 |

表 4.2 各追尾モード毎の 10 ステップに要する時間と測定結果

### 考察

表 4.2 より望遠鏡コントローラーから出力されるパルスは誤差の範囲で十分に「正しい周期」であると言える。よってパルス周期は正しいことが確認できた。

#### 4.1.2 パルスカウント

##### 実験原理

赤道儀で天体を追尾する時 RA 軸モーターの回転数は一定である。南極望遠鏡の RA 軸モーターは 5 相ステッピングモーターであるので RA 軸モーターの回転数が一定であればステッピングモーターに入力される単位時間あたりのパルス数も一定になるはずである。しかしもしパルスに「抜け」が生じているのであれば天体は正しく追尾できない。そこで一定時間に出力されるパルス数をカウントし「パルス抜け」があるかどうか確かめる。

表 4.3 に各追尾モード毎の 1 回転に必要な時間と 1 秒間に出力されるパルス数を示す (R2-2009-SV 取扱説明書 [25])。

| 追尾モード      | 1 回転に必要な時間 [sec] | 1 秒間に出力されるパルス数 |
|------------|------------------|----------------|
| Sidereal   | 86,164.1         | 4.17807        |
| Kings Rate | 86,200.3         | 4.17632        |
| Lunar      | 89,428.3         | 4.02557        |
| Solar      | 86,400.0         | 4.16667        |

表 4.3 各追尾モード毎の 1 秒間に出力されるパルス数

#### 実験方法

南極 40cm 望遠鏡コントローラー R2-2009-SV から出力される RA 軸モーターケーブルを外し、代わりにユニバーサルカウンターのプローブを当て単位時間あたりに出力されるパルス数をカウントする。カウンターは Agilent 53131A ユニバーサルカウンターを用い、RA 軸モーターコネクタ部の 1 番にプローブを、2 番にグランドを接続しパルス数をカウントした。

今回の実験はパルスの抜けがあるかどうかの測定であり、精度良い測定を行う為にカウンターで測定できる最長時間間隔でパルス数を測定することとした。この方法では時間を長くするだけカウントするパルス数が増える為、単位時間あたりに来るパルス数の誤差を小さくできる。Agilent 53131A では最長 1000 秒までパルス数をカウント可能なので 1000 秒あたりのパルス数を測定する。測定は各追尾モード毎に 3 回ずつ行った。



図 4.2 Agilent 53131A ユニバーサルカウンターを用いてパルス数を測定する。

#### 実験結果

1000 秒間でカウントしたパルス数を表 4.4 に示す。なお平均値の誤差は  $1\sigma$  である。

| 追尾モード      | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 平均           | 理論値     |
|------------|------|------|------|--------------|---------|
| Sidereal   | 4178 | 4178 | 4178 | 4178±0.00    | 4178.08 |
| Kings Rate | 4176 | 4177 | 4176 | 4176.33±0.47 | 4176.32 |
| Lunar      | 4025 | 4025 | 4026 | 4025.33±0.47 | 4025.57 |
| Solar      | 4167 | 4167 | 4166 | 4166.67±0.47 | 4166.67 |

表 4.4 パルスカウント実験結果

### 考察

表 4.4 より得られた値と理論値は誤差の範囲で良く一致しておりパルスは正しく送られている事がわかった。よってパルス抜けは生じていないことを確認できた。

以上 2 つの実験から南極 40cm 赤外線望遠鏡コントローラーは正しく動作しており、追尾エラーの原因ではないと結論づけることができた。

## 4.2 スリップ機構評価実験と RA 軸ユニットの改良

IK 技研株式会社の製作する天体望遠鏡は「スリップ機構」と呼ばれる機構がある。これは具体的には望遠鏡に不意に大きな力が加わった場合、ウォームホイールがスリップして望遠鏡を守る機構である。ウォームホイールは自動車のディスクブレーキのように上下からディスクで挟まれて与圧され固定されている。

図 4.2 は CAD 設計図で見た RA 軸と圧ディスクとウォームホイールの関係である。

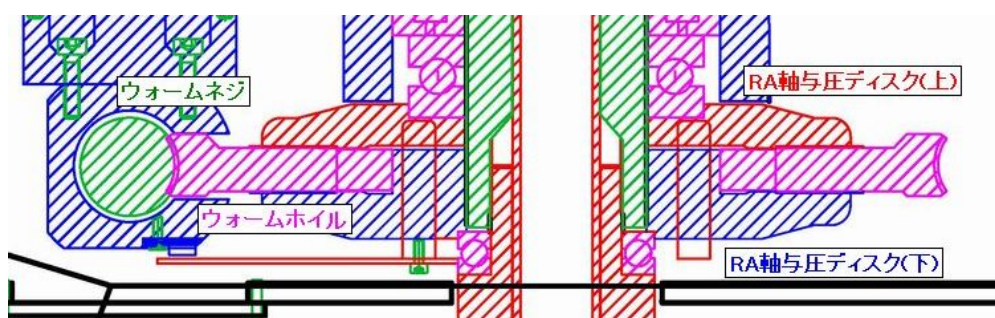


図 4.3 RA 軸と圧ディスクとウォームホイール (スリップ機構)

しかしこのスリップ機構は安全機構であると同時に追尾不良を引き起こす、意図しないスリップの原因ともなりうる。これまでに製造された IK 技研株式会社製望遠鏡では意図しないスリップは生じていない。しかし南極 40cm 赤外線望遠鏡の場合は特殊グリスと材質変更した材料でスリップ機構を製作した為モーターの回転を正しく RA 軸に伝達でき

ているかはどうか分からない。そこで以下で述べるスリップ機構の評価実験を行ってスリップの有無を確かめた。また剛性向上も兼ねてRA軸ユニットに改良を施した。

#### 4.2.1 (旧)RA軸ユニット

図4.2.1に(旧)RA軸ユニットを示す。RA軸を支えるベアリング軸受けは15mm厚のアルミ板を溶接で接合した筐体に上下に分割したホルダーを介して固定されている。筐体はアルミ溶接で作られている為、熱的なたわみやゆがみが生じており軸受けは完全に平行であるとは言えない構造である。その為に回転にムラが生じ、RA軸回転にムラが生じ、モーターが脱調する可能性がある。

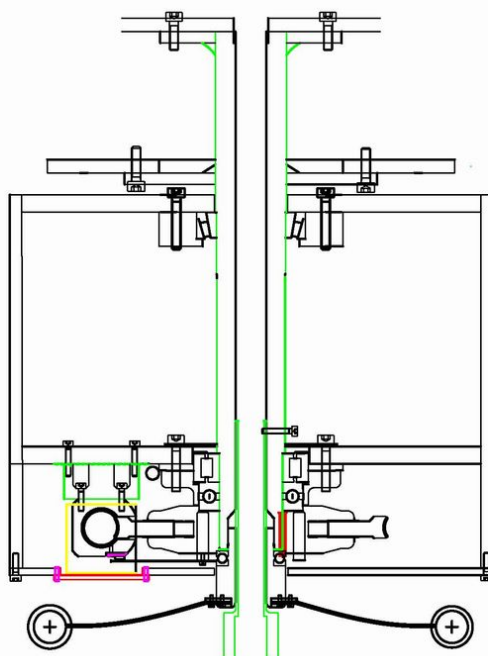


図4.4 (旧)RA軸ユニット。軸受けは上下に分かれて取り付けられている。

また(旧)RA軸ユニットのスリップ機構にはグリスを一切使用せず、代わりにRA軸と圧ディスクとウォームホイールの間にテフロン板が挿入されている。テフロンはフッ化炭素樹脂であり、柔らかく摩擦係数が小さい事からグリスの代替と考えられ使用されているが、その小さい摩擦係数から滑る可能性があると言える。テフロン板を挿入したスリップ機構は他のIK技研製の望遠鏡に見られない「新機構」であり、正しく機能するかどうか評価もされていない。



### 4.2.2 スリップ実験 (旧ユニット)

#### 実験方法

スリップ機構が正しく機能しているかどうか実験的に確かめる。図 4.2 のように RA 軸と圧ディスクとウォームホイール双方に CAD で作図した副尺付のケント紙製の目盛りをセロハンテープで貼り付け、RA 軸を回転させてその位置を読み取る事でズレを測定する。副尺は 1/20mm まで測定できる。測定範囲は時角で 19 時~5 時の範囲を東西方向にそれぞれ 1 時角ずつそれぞれ 3 回測定した。

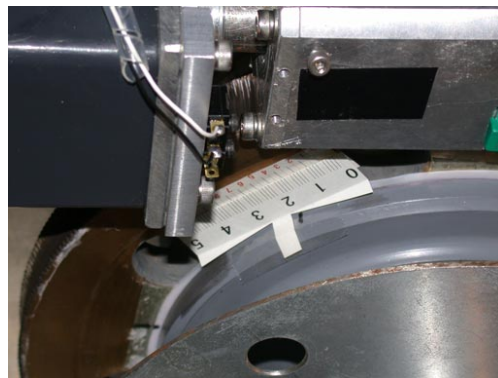


図 4.5 RA 軸と圧ディスクとウォームホイールに取り付けた目盛り

#### 実験結果

表 4.6 に測定結果を示す。クラッチとウォームホイール双方に取り付けた目盛りで示された位置のズレ量を mm 単位で示す。数値が大きくなる時はウォームホイールが先行しクラッチが遅れる状態を表し、小さくなる時はその逆の状態を意味する。

#### 考察

から西から東、東から西双方の青色 (2 回目の測定結果)・紫色 (3 回目の測定結果) の測定点がよく一致しており、緑色 (1 回目の測定) の測定点のみ離れた値を示すことが読み取れる。これは目盛りが紙製で、さらにセロハンテープで取り付けている事による初期の「たわみ」が望遠鏡の回転運動によって解放され、その結果 1 回目の測定は他の測定と違った結果を示しているのだと考えられる。

よって 2 回目・3 回目の測定結果がクラッチ部のスリップを示すものとも言える。2 回目、3 回目の測定結果からスリップは望遠鏡の向いている方向にかかわらず望遠鏡の運動した角度に比例して増大することが分かる。また西から東、東から西の測定どちらでもウォームホイールが先行し、クラッチ板が遅れる (= 恒星時追尾の場合、追尾が遅れる) ことが分かった。

| 時角  | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 時角  | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 |
|-----|------|------|------|-----|------|------|------|
| 5h  | -    | -    | -    | 19h | -    | -    | -    |
| 4h  | 0.15 | 0.05 | 0.00 | 20h | 0.00 | 0.00 | 0.05 |
| 3h  | 0.25 | 0.15 | 0.10 | 21h | 0.00 | 0.05 | 0.10 |
| 2h  | 0.35 | 0.15 | 0.15 | 22h | 0.05 | 0.10 | 0.15 |
| 1h  | 0.35 | 0.20 | 0.15 | 23h | 0.10 | 0.20 | 0.15 |
| 24h | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 24h | 0.10 | 0.20 | 0.20 |
| 23h | 0.45 | 0.25 | 0.30 | 1h  | 0.15 | 0.25 | 0.25 |
| 22h | 0.50 | 0.30 | 0.30 | 2h  | 0.20 | 0.25 | 0.25 |
| 21h | 0.50 | 0.40 | 0.35 | 3h  | 0.20 | 0.30 | 0.30 |
| 20h | 0.50 | 0.40 | 0.40 | 4h  | 0.30 | 0.35 | 0.40 |
| 19h | 0.55 | 0.40 | 0.40 | 5h  | 0.30 | 0.40 | 0.40 |

図 4.6 スリップ実験 (旧ユニット)。望遠鏡を (左) 西から東、(右) 東から西へ動かした時のズレ量 [mm]。

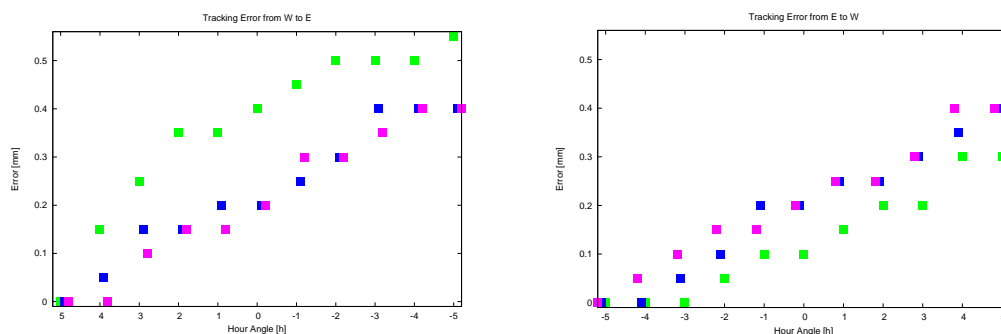


図 4.7 スリップ実験 (旧ユニット)。横軸が時角 [h] で縦軸がズレ量 [mm] を意味する。(左図) 西から東、(右図) 東から西。

### 4.2.3 RA 軸ユニットの改造

スリップ実験 (旧ユニット) の測定実験の結果からテフロン板を挿入したスリップ機構は正しく機能しておらず、追尾エラーの原因であると考えられる。また (旧)RA 軸ユニットの構造は軸受けとしての強度不足と上下ベアリングが非平行に設置される事に由来する RA 軸の回転ムラ・RA 軸モーターの脱調も危惧され南極での使用に耐えない可能性がある。

そこで 2009 年 5 月に IK 技研株式会社にて改造作業を行った。この作業では RA 軸モーターユニットのアルミ筐体をくり抜き、そこに  $\phi 380\text{mm}$ 、 $t=290\text{mm}$  のジュラルミン (A2017) 無垢材から削り出しで製作した上下一体軸受け (通称: 植木鉢) を取り付けた。図 4.8 はこの作業で製作した新 RA 軸受けの CAD 図である。この作業では沖田自身も大

阪へ赴き IK 技研株式会社にて改造作業に携わった。

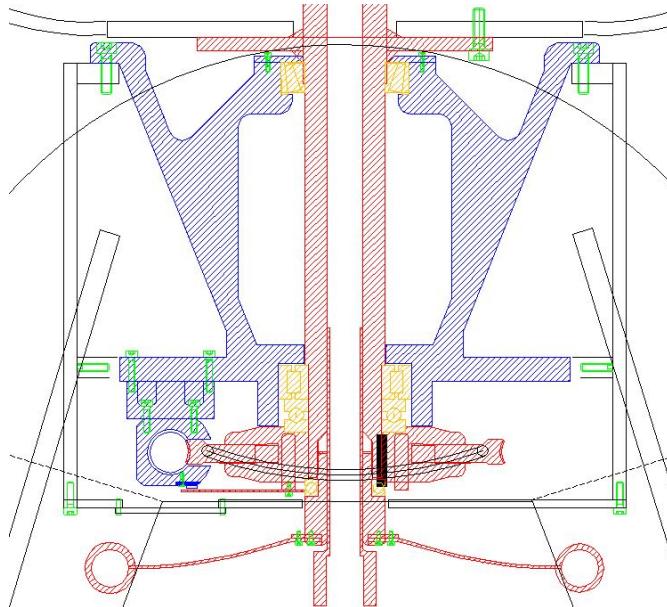


図 4.8 新 RA 軸受けの CAD 図。赤色が RA 軸シャフト、青色が軸受けホルダー、黄色がベアリングである。



図 4.9 新 RA 軸受け (通称：植木鉢) の組み立て前の写真。上下にベアリングが装着され一体の軸受けとなり望遠鏡の荷重を支える。上部に見えている金色の歯車は RA 軸ウォームホイールである。

また新 RA 軸ユニットのスリップ機構では RA 軸と圧ディスクとウォームホイールの間にテフロン板は入れず、替わりに $-80^{\circ}$ でも使用可能な「FOMBLIN GREASE 特殊環境用グレード ZLHT<sup>\*1</sup>」グリスを用いた。IK 望遠鏡との相違点はグリスの種類の変更のみで、基本的には他の IK 技研の望遠鏡と全く同じ構造となった。

<sup>\*1</sup> 付録 D 脱脂・グリスアップについてを参照のこと

この改造によって納品時に比べ RA 軸モーターの脱調回数は大幅に低減した。また強風による望遠鏡の振動も以前より小さくなる傾向が見られた。第5章で詳しく述べるが、この新 RA 軸受けは-80°C でも正しく機能することが確かめられ、南極での使用に十分耐えうると考えられてる。

#### 4.2.4 スリップ実験 (新ユニット)

改良した RA 軸ユニットのスリップ機構が正しく機能するかスリップ実験を行った。測定範囲は時角 19 時~5 時の範囲を東西方向にそれぞれ 2 回ずつ測定した。

##### 実験結果

表 4.10 に測定結果を示す。クラッチとウォームホイール双方に取り付けた目盛りで示された位置をそのまま示す。数値が大きくなる時はウォームホイールが先行しクラッチが遅れる状態を表し、小さくなる時はその逆の状態を意味する。

| 時角  | 1 回目 |      | 2 回目 |      |
|-----|------|------|------|------|
|     | W    | E    | E    | W    |
| 5h  | 5.15 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |
| 4h  | 5.15 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |
| 3h  | 5.20 | 5.30 | 5.25 | 5.25 |
| 2h  | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.30 |
| 1h  | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |
| 24h | 5.20 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |
| 23h | 5.25 | 5.20 | 5.25 | 5.25 |
| 22h | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |
| 21h | 5.25 | 5.30 | 5.25 | 5.25 |
| 20h | 5.30 | 5.25 | 5.25 | 5.20 |
| 19h | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 |

図 4.10 スリップ測定結果。目盛りで示された位置をそのまま記した。

##### 考察

図 4.10 について、1 回目 W E の 5h から 3h までその値が大きく変化しているのは目盛りが紙製で、さらにテープで RA 軸と圧ディスク・ウォームホイールに固定されている為に生じた「初期のたわみ」が望遠鏡の回転運動によって解放され動いたと考えられる。そこでこの初期たわみの影響を除外して、1 回目 W E の 5h から 3h 以外のデータを使ってスリップがあるかどうか検証する。

結果は 5.20 が 3 回、5.25 が 34 回、5.30 が 4 回測定されその平均は 5.251、標準偏差

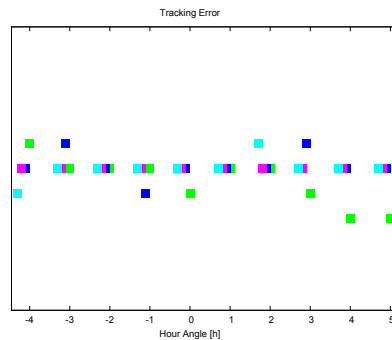


図 4.11 スリップ実験 (旧ユニット)。横軸が時角 [h] で縦軸が取り付け目盛りの指し示した値 [mm] を意味する。2 回分全データを一つの図にプロットしてある。

0.002 である。RA 軸と圧ディスクの位置は 5.25 でほぼ常に一定、スリップは起こっていない。よってスリップ機構は正しく機能し意図しない追尾の遅れは生じないことが確認できた。

#### 4.2.5 まとめ

南極 40cm 赤外線望遠鏡には原因不明の追尾エラーが存在することが分かっていた。この原因を追及する為に「スリップ機構」に目盛りを取り付け実験的にスリップが生じているかどうか測定した。その結果スリップが生じており、これが原因不明の追尾エラーの原因であると考えられた。また RA 軸ユニットはその構造から強度不足と回転にムラが生じる可能性が示唆されており、これと併せて RA 軸を大幅に改造することにした。改造後に行ったスリップ実験の結果からはスリップは生じないことが実験的に示された。よって南極 40cm 赤外線望遠鏡の「スリップ機構」は不意に大きな力が生じた時のみ望遠鏡がスリップする機構として正しく機能し、村田千紘 [20] で示されていた原因不明の追尾エラーは生じない事が示された。

### 4.3 極軸調整プレート

南極 40cm 赤外線望遠鏡は赤道儀式架台である為正しく設置しないと追尾誤差や導入誤差が生じる。そこで南極 40cm 赤外線望遠鏡を正しく設置する為のプレートを製作した。製作のポイントとしては

- 物理 A 棟屋上の小ドームでの設置が前提
- 南極でそのまま使える
- 出来るだけ軽く
- 簡単に極軸調整が可能

を心がけた。



図 4.12 製作した極軸調整プレート

極軸調整プレートは上板・中板・下板の3枚構造とし、それぞれの板を相互に動かすことで水平方向の角度調整と垂直方向の角度調整を可能としている。

ここで極軸調整プレートの厚みは材料力学を用いて強度の解析を行って求めた。材料力学に関しては「新機械工学シリーズ 材料力学 [5]」「図解入門 よくわかる材料力学の基本 [7]」「材料力学 考え方解き方 (第3版) [18]」「機械現場の基礎物理 1 初めて学ぶ材料力学 [22]」等の教科書を参考にした。また設計は「初心者のための機械製図 (第2版) [19]」を参考にした。

以下その計算を示す。

#### 4.3.1 モデル化

今回設計した固定プレートの形状は複雑で実際に解析する為にはFEM(有限要素法)を用いて数値的に解くしかない。しかし固定プレートの形状をモデル化し簡単にすると解析的に解く事が出来る。そこで今回は固定プレートを図 4.13 のような梁とモデル化した。この梁は長さ  $l$  であり、単位長さあたり  $w$  の梁の自重に加え両端で下向きに  $W$  の荷重が掛かるとし、両端からそれぞれ  $a$  の位置にある2つの単純支点がこれらの荷重を支える。この梁の端 A と中央部 E のたわみ量を求める。

たわみの式

梁の全たわみ量  $\Delta$  は曲げ応力によるたわみ  $\Delta_b$  とせん断応力によるたわみ  $\Delta_s$  の足しあわせで表現できる。

$$\Delta = \Delta_b + \Delta_s \quad (4.1)$$

なお一般にせん断応力によるたわみは曲げ応力によるたわみに比べ非常に小さい為、材料力学の教科書等では無視して良いとされる事が多い(ようだ)。今回はせん断応力によるたわみ成分も計算した。

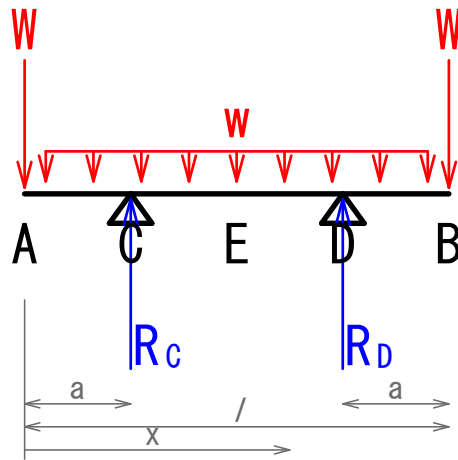


図 4.13 梁モデル。梁左端 A 点を原点とし、点 C と点 D で梁は支えられていると考える。

#### 4.3.2 せん断力 $F$ と曲げモーメント $M$

曲げ応力によるたわみ  $\Delta_b$ 、せん断応力によるたわみ  $\Delta_s$  を求める為にまずせん断力  $F$  及び曲げモーメント  $M$  を求める。

反力  $R_C$ 、 $R_D$

図 4.13 の C 点、D 点に生じる反力  $R_C$ 、 $R_D$  をもとめる。A 点周りのモーメントの釣り合いより

$$R_C \cdot a + R_D \cdot (l - a) = -W \cdot l - \int_0^l w \cdot x dx$$

力の釣り合いより

$$R_C + R_D = -2W - \int_0^l w dx$$

これらから

$$\begin{aligned} R_C &= W + \frac{1}{2}wl \\ R_D &= W + \frac{1}{2}wl \end{aligned} \quad (4.2)$$

せん断力  $F$

反力  $R_C$ 、 $R_D$  を用いて各区間のせん断力  $F$  を求める。

(i) A ~ C のとき

$$F_{A \sim C} = -W - \int_0^x w dx$$

(ii)  $C \sim D$  のとき

$$F_{C \sim D} = F_{A \sim C} + R_C$$

(iii)  $D \sim B$  のとき

$$F_{D \sim B} = F_{A \sim C} + R_C + R_D$$

であるので値を代入して

$$F_{A \sim C} = -W - wx$$

$$F_{C \sim D} = \frac{1}{2}(l - 2x) \tag{4.3}$$

$$F_{D \sim B} = W + w(l - x)$$

である。図 4.14 は今回のモデルでのせん断力線図である。横軸は梁左端からの距離で縦軸がせん断力  $F$  である。

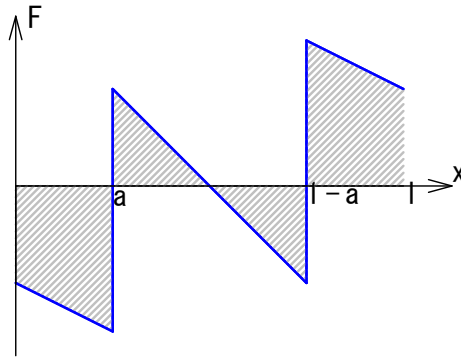


図 4.14 せん断力線図 (S.F.D.)。横軸は梁左端からの距離で縦軸がせん断力  $F$  を表す。

曲げモーメント  $M$

反力  $R_C$ 、 $R_D$  を用いて各区間のせん断力  $F$  を求める。

(i)  $A \sim C$  のとき

$$M_{A \sim C} = -W \cdot x - \int_0^x w \cdot x' dx'$$

(ii)  $C \sim D$  のとき

$$M_{C \sim D} = M_{A \sim C} + R_C \cdot (l - a)$$

(iii)  $D \sim B$  のとき

$$M_{D \sim B} = M_{A \sim C} + R_C \cdot (l - a) + R_D \cdot (x - l - a)$$



値を代入して

$$\begin{aligned} M_{A\sim C} &= -Wx - \frac{1}{2}wx^2 \\ M_{C\sim D} &= -Wa - \frac{1}{2}w(x^2 - lx + la) \\ M_{D\sim B} &= W(x-l) - \frac{1}{2}w(x^2 + 2la - l^2) \end{aligned} \quad (4.4)$$

図 4.15 は今回のモデルでの曲げモーメント線図である。横軸は梁左端からの距離で縦軸が曲げモーメント  $M$  である。

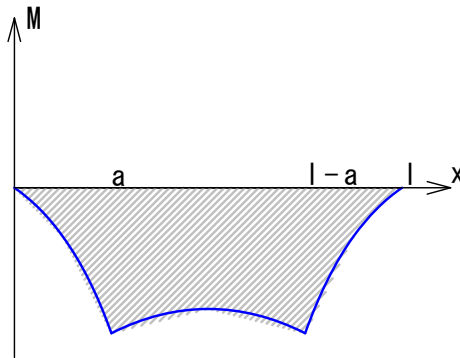


図 4.15 曲げモーメント線図 (B.M.D.)。横軸は梁左端からの距離で縦軸が曲げモーメント  $M$  を表す。

### 4.3.3 曲げ応力によるたわみ $\Delta_b$

曲げ応力は曲がった梁の内側と外側でそれぞれ圧縮応力と引張応力が発生することで生じる。詳細は前述の教科書に譲るとして、梁の位置  $x$  におけるたわみ量  $\Delta_b$  は以下の 2 階の微分方程式で表される。

$$\frac{d^2 \Delta_b}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (4.5)$$

ここで  $M$  は曲げモーメント、 $E$  は縦弾性係数 (=ヤング率)、 $I$  は断面二次モーメントである。代入して

(i)  $A \sim C$  のとき

$$\frac{d^2 \Delta_{b;A\sim C}}{dx^2} = -\frac{1}{EI} \left( -Wx - \frac{1}{2}wx^2 \right)$$

(ii)  $C \sim D$  のとき

$$\frac{d^2 \Delta_{b;C\sim D}}{dx^2} = -\frac{1}{EI} \left[ -Wa - \frac{1}{2}w(x^2 - lx + la) \right]$$

(iii)  $D \sim B$  のとき

$$\frac{d^2 \Delta_{b;D \sim B}}{dx^2} = -\frac{1}{EI} \left[ W(x-l) - \frac{1}{2}w(x^2 + 2la - l^2) \right]$$

これを以下の境界条件で解く。これは  $x = a$  でたわみ角が等しくたわみ量は0、 $x = l/2$  でたわみ角が0 ということである。

$$\begin{aligned} \Delta_{b;A \sim C} \Big|_{x=a} &= \Delta_{b;C \sim D} \Big|_{x=a} = 0 \\ \frac{d\Delta_{b;A \sim C}}{dx} \Big|_{x=a} &= \frac{d\Delta_{b;C \sim D}}{dx} \Big|_{x=a} \\ \frac{d\Delta_{b;C \sim D}}{dx} \Big|_{x=l/2} &= 0 \end{aligned}$$

なお梁は対称であるから  $D \sim B$  間のたわみ量  $\Delta_{b;D \sim B}$  は  $\Delta_{b;A \sim C}$  と等しくなる。ここから  $A \sim C$  間は

$$\begin{aligned} \Delta_{b;A \sim C} &= \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{24}wx^4 + \frac{1}{6}Wx^3 \right) + C_1x + C_2 \\ C_1 &= \frac{1}{2} \frac{W}{EI} a(a-l) + \frac{1}{24} \frac{1}{EI} wl(l^2 - 6al + 6a^2) \\ C_2 &= \frac{1}{6} \frac{W}{EI} a^2(3l - 4a) - \frac{1}{24} \frac{1}{EI} wa(l^3 - 6al^2 + 6a^2l + a^3) \end{aligned}$$

$C \sim D$  間

$$\begin{aligned} \Delta_{b;C \sim D} &= \frac{1}{EI} \left[ \frac{1}{24}wx^4 - \frac{1}{12}wlx^3 + \frac{1}{4}(wla + 2Wa)x^2 \right] + D_1x + D_2 \\ D_1 &= -\frac{1}{2} \frac{W}{EI} al + \frac{1}{24} \frac{1}{EI} wl(l^2 - 6al) \\ D_2 &= \frac{1}{2} \frac{W}{EI} a^2(l - a) - \frac{1}{24} \frac{1}{EI} wa(l^3 - 6al^2 + 4a^2l + a^3) \end{aligned}$$

よって A 点のたわみ量は  $x = 0$  を代入して、

$$\Delta_{b,A} = \frac{1}{6} \frac{W}{EI} a^2(3l - 4a) - \frac{1}{24} \frac{w}{EI} a(l^3 - 6al^2 + 6a^2l + a^3) \quad (4.6)$$

E 点のたわみ量は  $x = l/2$  を代入して、

$$\Delta_{b,E} = -\frac{1}{8} \frac{W}{EI} a(l - 2a)^2 + \frac{1}{384} \frac{w}{EI} (5l^4 - 40al^3 + 96a^2l^2 - 64a^3l - 16a^4) \quad (4.7)$$

となる。

#### 4.3.4 せん断応力によるたわみ $\Delta_s$

梁の位置  $x$  におけるせん断応力によるたわみ量  $\Delta_s$  は以下の1階の微分方程式で表される。

$$\frac{d\Delta_s}{dx} = \frac{F}{AG} \quad (4.8)$$

ここで  $A$  は位置  $x$  における梁の断面積、 $G$  は横弾性係数、 $F$  はせん断力である。代入して、

(i)  $A \sim C$  のとき

$$\frac{d\Delta_{s,A\sim C}}{dx} = \frac{1}{AG}(-W - wx)$$

(ii)  $C \sim D$  のとき

$$\frac{d\Delta_{s,C\sim D}}{dx} = \frac{1}{AG} \left[ \frac{1}{2}(l - 2a) \right]$$

(iii)  $D \sim B$  のとき

$$\frac{d\Delta_{s,D\sim E}}{dx} = \frac{1}{AG} [(W + w(l - x))]$$

これを以下の境界条件で解く。 $x = a$ 、 $x = l - a$  でたわみ量は 0 であるから、

$$\begin{aligned} \Delta_{s;A\sim C}|_{x=a} &= 0 \\ \Delta_{s;C\sim D}|_{x=a} &= 0 \\ \Delta_{s;C\sim D}|_{x=l-a} &= 0 \\ \Delta_{s;D\sim E}|_{x=l-a} &= 0 \end{aligned}$$

これを解いて、 $A \sim C$  間

$$\begin{aligned} \Delta_{s,A\sim C} &= -\frac{1}{AG} \left( \frac{1}{2}wx^2 + Wx \right) + H_1 \\ H_1 &= \frac{1}{AG} \left( \frac{1}{2}wa^2 + Wa \right) \end{aligned}$$

$C \sim D$  間

$$\begin{aligned} \Delta_{s;C\sim D} &= -\frac{1}{2} \frac{1}{AG} (wx^2 - wlx) + J_1 \\ J_1 &= \frac{1}{2} \frac{1}{AG} wa(a - l) \end{aligned}$$

よって A 点のたわみ量は  $x = 0$  を代入して、

$$\Delta_{s,A} = \frac{1}{AG} \left( \frac{1}{2}wa^2 + Wa \right) \quad (4.9)$$

E 点のたわみ量は  $x = l/2$  を代入して、

$$\Delta_{s,E} = \frac{1}{8} \frac{w}{AG} (l^2 - 4al + 4a^2) \quad (4.10)$$

となる。これらから全たわみ量  $\Delta = \Delta_b + \Delta_s$  を求める事が出来た。

#### 4.3.5 安全率

今回考えている梁には荷重  $W$  及び自重  $w$  が掛かっている為梁は多かれ少なかれたわむ。構造物として問題になるのは梁が荷重を支えられるかどうかである。そこで梁が弾性変形する最大の荷重を調べて実際にかかるであろう荷重の予定の何倍があるか、すなわち

何倍までの荷重に耐えられるかを調べておく必要がある。この倍数の事を「安全率」と呼び(実際の定義は若干違うが)、一般に安全率が3~10になるように設計する必要がある。

安全率は梁に掛かる曲げモーメント  $M$  の最大値  $M_{max}$  を許容最大曲げモーメント  $M_{P;max}$  で割ることで求める。

$$\frac{M_{max}}{M_{P;max}} \quad (4.11)$$

最大曲げモーメント  $M_{max}$  はこの場合図 4.15 より

$$M_{max} = |M_{x=a}| = |M_{x=l-a}| = Wa$$

許容最大曲げモーメント  $M_{P;max}$  は許容曲げ応力  $\sigma$ 、断面係数  $Z$  とすると以下の式で与えられる。

$$M_{P;max} = \sigma Z$$

また JIS B8265 より、

$$\text{許容曲げ応力} = \text{許容引張応力} \times 1.5$$

と計算でき、また許容引張応力とはこの場合耐力(一般に降伏応力、アルミニウム等の場合は0.2%耐力)であるので

$$M_{P;max} = \text{耐力} \times 1.5 \times Z \quad (4.12)$$

となる。よって安全率を求める事が出来る。

#### 4.3.6 その他

断面二次モーメント

今回のモデル化では梁は単純な厚板を想定している。よって断面二次モーメント  $I$  は幅  $b$ 、厚さ  $h$  として以下で示される。

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (4.13)$$

断面係数

同様に断面係数も以下のように与えられる。

$$Z = \frac{1}{6}bh^2 \quad (4.14)$$

#### 4.3.7 まとめ

図 4.13 のような梁において、式 (4.6)、式 (4.9) より端のたわみ量は

$$\Delta_A = \frac{1}{6} \frac{W}{EI} a^2 (3l - 4a) - \frac{1}{24} \frac{w}{EI} a (l^3 - 6al^2 + 6a^2l + a^3) + \frac{1}{AG} \left( \frac{1}{2} wa^2 + Wa \right) \quad (4.15)$$

式 (4.7)、式 (4.10) より中央のたわみ量は

$$\Delta_E = -\frac{1}{8} \frac{W}{EI} a(l-2a)^2 + \frac{1}{384} \frac{w}{EI} (5l^4 - 40al^3 + 96a^2l^2 - 64a^3l - 16a^4) + \frac{1}{8} \frac{w}{AG} (l^2 - 4al + 4a^2) \quad (4.16)$$

また最も構造上大きな曲げモーメントが生じるのは支点部分  $x = a = l - a$  であり、この箇所での安全率は

$$\frac{M_{max}}{M_{P,max}} = \frac{Wa}{\text{耐力} \times 1.5 \times Z} \quad (4.17)$$

である。なお  $E$  は縦弾性係数 (=ヤング率)、 $G$  は横弾性係数、 $A$  は断面積、 $I$  は断面二次モーメント、 $Z$  は断面係数である。

#### 4.3.8 材質について

|                                | アルミニウム<br>(A5052) | ジュラルミン<br>(A2017) | 鉄<br>(SS400) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 縦弾性係数 $E$ [N/mm <sup>2</sup> ] | 72,000            | 74,000            | 206,000      |
| ポアソン比 $\nu$                    | 0.3               | 0.3               | 0.3          |
| 横弾性係数 $G$ [N/mm <sup>2</sup> ] | 27,000            | 27,000            | 79,000       |
| 密度 $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 2.7               | 2.7               | 7.9          |
| 引張応力 [N/mm <sup>2</sup> ]      | 195               | 425               | 400          |
| 耐力 [N/mm <sup>2</sup> ]        | 90                | 280               | 245          |
| せん断応力 [N/mm <sup>2</sup> ]     | 125               | 125               | 200          |

表 4.5 各金属の特性

表 4.5 にアルミニウム、ジュラルミン、鉄の材質特性を示す。ここで注目すべきはジュラルミンの縦弾性係数と引張応力、密度であろう。ジュラルミンは縦弾性係数がアルミニウムとほぼ同じでありアルミと同程度・鉄の 1/3 程度の「柔らかい金属」であると言える。しかし密度は鉄の 1/3 にも関わらず引張応力は鉄以上である。つまり「軽く柔らかいけれど引っ張っても簡単にはちぎれない」という性質を持っているのである。

南極望遠鏡の固定プレートの材質としては「軽い」事が求められるのでアルミかジュラルミンで製作する。より高強度のジュラルミンを、と当初考えていたがアルミとジュラルミンは縦弾性係数=たわみ量がほぼ同じであるので十分な安全率が確保出来るのであればアルミで作っても差し支えないことが表 4.5 より分かる。

また固定プレートは押しネジ・引きネジによって方位・高度を調整する構造とするのだが、たとえジュラルミンを用いたとしてもネジのあたる部分は鉄やステンレス等、縦弾性係数が大きい素材を用いる必要があることも分かる。

### 4.3.9 考察と最適化

表 4.5 で示したように、アルミニウムとジュラルミンの相違点は引張応力でありこれはすなわちジュラルミンの方がおよそ 3 倍大きい安全率を得る事が出来るという事になる。よってジュラルミンで製作する方が薄く=軽く出来ると言う事になる。しかしジュラルミンとアルミニウムの縦弾性係数はほぼ同じであるからジュラルミンで薄く作ると固定プレートは大きくたわむ事になる。製作予定の固定プレートは極軸調整を行った後は全く動かさない部品ではあるがたわむとこの調整が困難になることが予想される。また軽量化できたとしても全体で 10kg 程度であり、ジュラルミンで製作するのはコスト面でも不利と言える。

よって材質をアルミニウム (A5052) として十分な安全率・少ないたわみ量の板厚となるよう設計する。望遠鏡は 200[kg]~ 2000[N] であるので固定プレート上・中・下それぞれの板厚を計算する。

まず安全率  $\geq 10$  を満たす最も薄い板厚を表 4.6 に示す。

|    | 最小厚み   | 最大たわみ量 |
|----|--------|--------|
| 上板 | 15.0mm | 1.30mm |
| 中板 | 14.5mm | 1.34mm |
| 下板 | 11.6mm | 0.78mm |

表 4.6 安全率が 10 以上となる最も薄い板厚とその時の最大たわみ量

また、最大たわみ量  $\Delta \leq 1mm$  を満たす最も薄い板厚を表 4.7 に示す。

|    | 最小厚み   | 安全率  |
|----|--------|------|
| 上板 | 16.4mm | 12.1 |
| 中板 | 16.1mm | 12.4 |
| 下板 | 10.7mm | 8.6  |

表 4.7 最大たわみ量が 1mm 以下となる最も薄い板厚とそのときの安全率

よってこれらの結果から、今回製作する固定プレートはアルミニウム (A5052) 製で上板・中板の厚みを  $h=18mm$ 、下板の厚みを  $h=15mm$  とするのが最適であると考えられる。なおこの場合の板の質量はそれぞれ 19.0kg、22.4kg、26.4kg となり十分 1 人で運搬・設置可能な重さである。

### 4.3.10 実際の設計

Auto CAD, AR\_CAD を用いて極軸調整プレートの設計を行った。極軸調整プレートは土台に固定するプレート (下板)、方位方向調整のプレート (中板)、上下方向調整のプレート (上板) の 3 枚からなる。極軸調整プレートの可動範囲が方位方向に  $\pm 7.5^\circ$ 、上下方向に  $\pm 4^\circ$  となるよう設計した。また調整ネジは M12 ネジで統一し、ねじ穴はヘリサートタップとして強度を確保した。なお最初に示した図 4.12 は今回製作した極軸調整プレートの写真である。

|    | 調整範囲            | ネジ 1 回転の移動量 |
|----|-----------------|-------------|
| 方位 | $\pm 7.5^\circ$ | 14.2 arcmin |
| 上下 | $\pm 5^\circ$   | 8.72 arcmin |

表 4.8 極軸調整ネジの調整範囲と移動量

図 4.16 は設計した極軸調整プレート (上板) の設計図である。一例として載せる。設計図の詳細はウェブページ<sup>\*2</sup>を参照されたい。

## 4.4 Dec 軸モーターユニット改造

南極 40cm 赤外線望遠鏡の Dec 軸モーターは納品時 Dec 軸モーターユニット西側の狭い筐体の中に格納されていた。この構造では Dec 軸モーターは Dec 軸モーターユニットとフォークを切り離し、その隙間から取り外さなければ外せない。これは望遠鏡を分解しないと Dec 軸モーターが取り外せないことを意味し、不慮のトラブルでモーターが故障した場合容易に修理することができない。

通常の望遠鏡の場合はモーターは一度組み付けると滅多に取り外す必要はない。しかし南極 40cm 赤外線望遠鏡の場合はウォームネジとウォームギヤの隙間調整やグリスアップ、モーターのメンテナンス等で頻繁に取り外す必要があり、仙台における試験観測でも何度も分解を必要とした。

そこで望遠鏡を組み立てた状態のまま Dec 軸モーターのみを取り外せるように Dec 軸モーターに改造を施した。図 4.17 は Dec 軸モーターの改造前 (左) と改造後 (右) である。

モーターを取り付ける位置を  $90^\circ$  回転させ、モーター固定金具を新規に製作することで望遠鏡側面から取り外しができるようになった。これによってモーターの取り外しは望遠鏡を組み立てたまま容易に行えるようになり、南極での調整も容易に行えると考えられる。

\*2 沖田博文の公式サイト <http://terra.astr.tohoku.ac.jp/~h-okita/index.html>

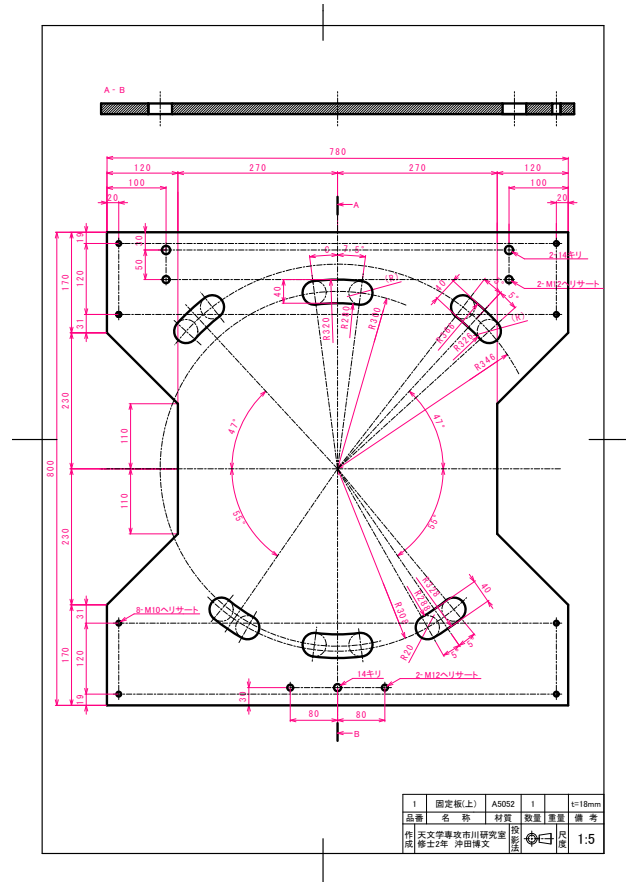


図 4.16 極軸調整プレート(上板)設計図

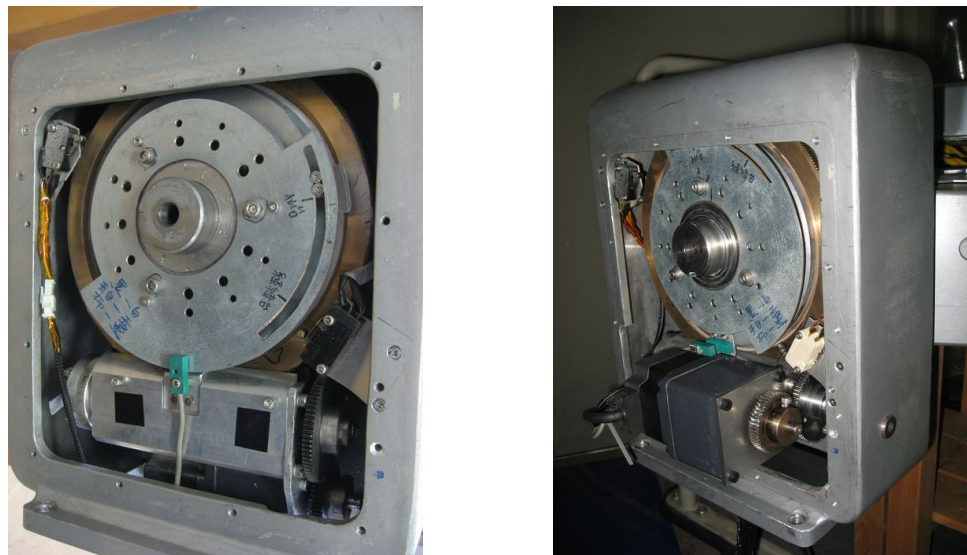


図 4.17 Dec 軸モーター。(左) 改造前、(右) 改造後。改造前は筐体に隠れて Dec 軸モーターはほとんど見えないが、改造後は飛び出るような形でモーターが取り付けられ、側面から容易に脱着が可能となった。



なお実際は Dec 軸モーターはむき出しなのではなく、アルミ板で作ったカバーで風雪に直接さらされないようになっている。

## 4.5 極軸望遠鏡

南極 40cm 赤外線望遠鏡は赤道儀である為 RA 軸を正確に点の北極に向ける必要がある。その為方位方向、上下方向の調整が行えるよう前述の極軸調整プレートを用いて調整する。この調整作業は最終的に第 6 章で示す天体を長時間追尾して補正量を求めて行うがこの観測は非常に時間がかかるため別の方法でおおざっぱに極軸を合わせておくほうが効率的な試験観測が実施できる。その為の装置が極軸望遠鏡である。極軸望遠鏡は口径 50mm 倍率 7 倍の望遠鏡で接眼部には十字線が張ってある。極軸望遠鏡はフォークユニット東側に取り付けられ、RA 軸を回転させることで極軸望遠鏡の光軸と RA 軸を平行にしている。北天の場合は北極星、南天の場合ははちぶんぎ座の 5 等星を用いて天の北極・天の南極と RA 軸の延長線が一致するよう極軸調整プレートを動かして極軸を合わせることになる。

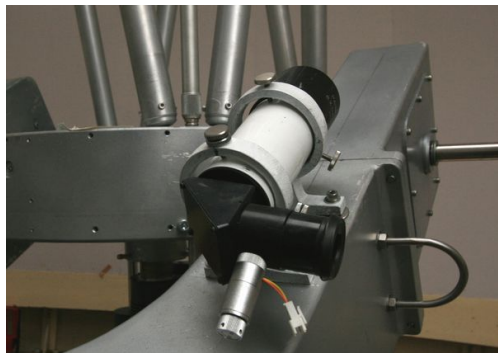


図 4.18 極軸望遠鏡。フォーク東側に取り付けられ、RA 軸を回転させることで容易に極軸望遠鏡と RA 軸の平行調整が可能な構造となっている。

## 4.6 Dec 軸バランス

南極 40cm 赤外線望遠鏡の Dec 軸方向のバランスは TONIC-II および AIR-C を取り付けた時に合うよう設計されている。その為 Tohoku DIMM や仙台での試験観測ではバランスが合わず導入エラーや追尾エラーまたはモーターの脱調を引き起こす。

そこでバランスを合わせるための「おもり」を設計した。おもりを追加することによって望遠鏡にたわみを生じさせず、観測装置の取り付けに支障を来さないように設計した。図 4.19 は Dec 軸バランスおもりの写真である。おもりは  $\phi 20\text{mm}$  のシャフトを介して望遠鏡に取り付けられている。観測装置毎におもりを最適な位置に移動させることで安定した観測が実施できる。



図 4.19 Dec 軸バランスおもり。4本のシャフトを介して望遠鏡に取り付ける。

## 4.7 運搬ハンドル

南極 40cm 赤外線望遠鏡は全部で 6 つに分割することで輸送を容易にできるように工夫されている。しかし望遠鏡の運搬や組み上げは夏期とはいえドームふじ基地では $-30^{\circ}\text{C}$ であり、また標高が高いことから気圧も低く作業は重労働となる。これらを考慮し、より容易に運搬・組み立てができるよう運搬ハンドルを製作し南極 40cm 赤外線望遠鏡に取り付けた。



図 4.20 運搬ハンドル。RA 軸ユニットに 4 個、鏡筒にも運搬時 4 個取り付けが可能。

2008 年 2 月に実施した北海道足寄郡陸別町での寒冷地実験ではこの運搬ハンドルによって運搬、組み立てが 2 人でできる事を確認し運搬ハンドルの必要性和重要性を再認識した。

## 4.8 バッフル

第3章で述べたように、南極40cm赤外線望遠鏡は赤外線望遠鏡である為バッフルがない。赤外線観測においてはこれで問題ないが、仙台での試験観測やドームふじでのシーイング測定は可視光で行う為バッフルがないと散乱光が多く観測に支障が出る。そこで簡単に取り付けられるバッフルを開発した。

バッフルは $\phi 55\text{mm}$ ,  $t=2\text{mm}$ のアルミパイプから加工し、Tohoku DIMM<sup>\*3</sup>の視野に合わせてその長さを決めた。バッフルの取り付けは接眼部とし、TONIC-II等の赤外線観測装置を取り付ける際に簡単に外せるよう工夫した。

図4.21は南極40cm赤外線望遠鏡にバッフルを取り付けたものである。接眼レンズを用いた可視光の目視観察ではコントラストが上がる事を確認できた。



図 4.21 南極 40cm 赤外線望遠鏡に取り付けたバッフル。写真中央の黒い筒状のものがバッフルである。

ここまでで示してきたように、南極40cm赤外線望遠鏡は納品後も評価実験と多くの改良を加える事で考え得るすべてのハードウェア面の問題を解決することができた。また望遠鏡の設置調整をより容易に行う為の様々な機構も併せて開発し追加した。その結果、南極40cm赤外線望遠鏡は南極での使用に十分対応できる望遠鏡になったと言える。

\*3 付録 A DIMM を用いたシーイング測定 を参照のこと



## 第5章

# -80°C 冷却実験

南極 40cm 赤外線望遠鏡は南極観測隊がドームふじに滞在する間 (夏期) のサイト調査に用いるだけでなく無人となる冬期においても科学的データの取得を行う予定である。その為ドームふじの最低気温-80°C でも確実に動作する構造が必要である。南極 40cm 赤外線望遠鏡は熱収縮を考慮した設計や耐寒性能の高い部品を用いて製作されたが実際に-80°C で動作する確証はない。村田千紘 2009 [20] によると部品単位では-80°C でも問題ないことが確かめられているが、それらを組み合わせた「機械」になると熱収縮の問題が生じて機能しなくなる可能性がある。

そこで-80°C まで冷却可能な大型冷凍庫に南極 40cm 赤外線望遠鏡の一部を分解して入れて実際に-80°C で動作するかどうか実験を行った。冷凍庫の大きさから望遠鏡全体を入れることは不可能であった為であるが、望遠鏡の一部とは言えその機能全体を構成する部品を組み立てた「機械」の状態で冷凍して実験を行ったので望遠鏡全体を冷却実験したものと同一結果が得られると考えられる。

### 5.1 実験装置

冷却実験では以下の装置を用いて実験を行った。

#### 5.1.1 冷凍庫

冷凍庫は日本フリーザー株式会社 CLN-70C 冷凍庫を用いた。この冷凍庫は-85°C まで冷却することが可能で常温から-80°C に概ね 12 時間で冷却できる。内寸は W1490mm×D640mm×H735mm である。

#### 5.1.2 温度計

温度計は Pt100 規格の白金温度計を株式会社キーエンス USB 対応 PC カード型データ収集システム NR-1000 に繋いでディスプレイに表示される温度をリアルタイムに測定した。白金は温度によってその抵抗値が線形に変化することが知られており、Pt100 とは



図 5.1 日本フリーザー (株) 社製 CLN-70C 冷凍庫。冷凍庫内には RA 軸ユニットが入れられている。



図 5.2 データ収集システム NR-1000。株式会社キーエンス HP

白金測温抵抗体の規格 JIS C1604 で定義されたもので 0°C で 100.00Ω となるように作られたものである。

## 5.2 RA 軸・Dec 軸モーターユニット冷却実験

南極 40cm 赤外線望遠鏡に使用されているステッピングモーターはドームふじ基地の最低気温である -80°C でも確実に動作する事が求められるが -60°C 以下では常温と同じように駆動しないことが確認されている。具体的には天体の追尾程度の低速回転は可能だが導入時に必要な高速回転が低温環境では不可能となるというものである。この時モーターは入力されたパルス数 (= 同期速度) に回転が追従出来ず「脱調」と呼ばれる現象が起こっている。ひとたび脱調が起こると自力で同期速度に復帰する事はほぼ不可能であるため、脱調しない速度でモーターを回転させる事が低温下でモーターを駆動する為の絶対条件となる。しかしモーターの回転を落とせば天体の導入に必要な時間が増え観測効率が低下する。

そこで温度・入力パルス数を変えてステッピングモーターを含む RA・Dec モーターユ

ユニットがどのような条件であれば駆動するのか、今回の実験で調べる事にする。

### 5.2.1 モーターユニットの構造

南極 40cm 赤外線望遠鏡に使用している RA 軸・Dec 軸駆動用モーターはオリエンタルモーター (株) 社製「CSK564AP-T20」である。これは 5 相ステッピングモーターで 1/20 に減速するギヤード (ギヤ Box) がモーターに直に取り付けられており、フルステップ駆動の場合 10,000 パルスで 1 回転する。(オリエンタルモーター総合カタログ [4])

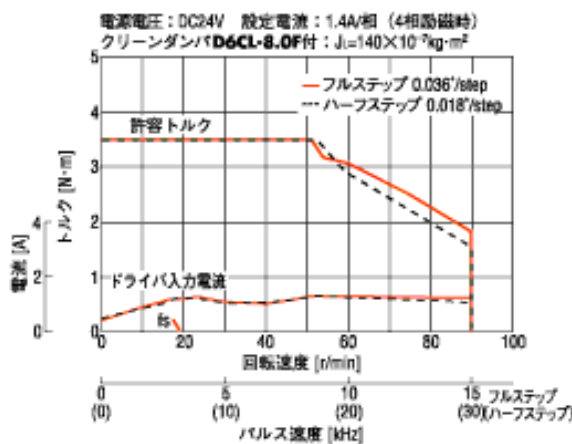


図 5.3 CSK564AP-T20 の回転速度-トルク特性。横軸が回転速度で縦軸がトルクである。(オリエンタルモーター総合カタログ [4])

モーター + ギヤ Box は IK 技研株式会社の製作したウォームネジホルダーに、RA 軸は直接・Dec 軸は 2/3 に減速する平ギヤを介して回転を伝達する構造となっている。

なお以降「モーター + ギヤ Box + ウォームネジホルダー」を「モーターユニット」と呼ぶ。

### 5.2.2 脱調の原理

常温で正常に動作するモーターユニットが低温では脱調してしまう原因として以下のものが考えられる。

1. モータートルクの減少
2. モーターの内部抵抗の増加
3. ギヤ Box の内部抵抗の増加
4. ウォームネジホルダーの内部抵抗の増加

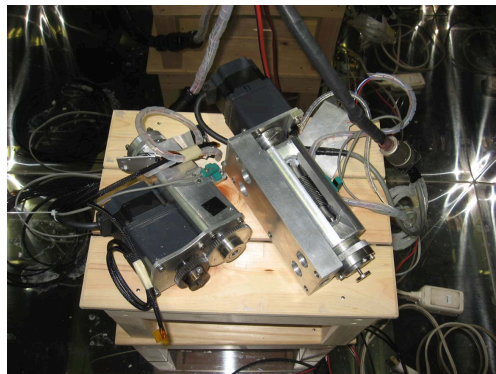


図 5.4 写真左が Dec 軸モーターユニットで 2/3 減速ギヤが見える。写真右は RA 軸モーターユニットでモーターは直接ウォームネジホルダーに接続されている。

まず 1 のモータートルクの減少であるがモーターカタログによると温度変化によってトルク特性が変化する旨の記載が無く詳細は不明である。

次に 2~4 の内部抵抗の増加であるがこれは

- 熱収縮率の違いから来るギヤ・ベアリング等の隙間の減少
- グリスの粘性の増加

によるものと考えられ、内部抵抗の増加によって回転に必要なトルクも増加し、それがモーターのトルクよりも大きくなったとき脱調すると考えられる。

そこで 2、3 の内部抵抗をすべて 1 つの「内部抵抗」として扱い、モーターに必要なトルクが温度と回転数 (パルス数) に依存する内部抵抗の関数として表せるとして以下計算していく。

ここで温度と回転数に依存する内部抵抗として「粘度」を考える。「粘度」は厚さ  $h$  の液体をはさんだ面積  $S$  の 2 枚の板が相対速度  $v$  で運動する時に板と液体にかかる力  $F$  と定義され

$$F = \mu \frac{S}{h} v \quad (5.1)$$

である。ここで  $\mu$  は粘度である。

これを今回のモーターユニットに適用する。板と液体の相対速度  $v$  は単位時間に  $n$  回転する半径  $r'$  の軸の接線の速度だと言え、1 回転に必要なパルス数を  $P_c$ 、単位時間あたりの入力パルス数を  $P$  とすると

$$v = 2\pi r' \frac{P}{P_c}$$

と書き直すことができる。

ところで粘度  $\mu$  は絶対温度  $0K$  で  $\infty$  になる事が予想されるので

$$\mu = \mu(T) = C_\mu T^{-\alpha}$$



軸受けと軸の間隙  $h$  はある温度  $T_C$  で  $h = 0$  となるとすると  $C_\mu$  と  $C_h$ 、 $\alpha$  を比例定数として

$$h = h(T) = C_h(T - T_C)$$

と書ける。

よって式 (5.1) で与えられた力  $F$  は温度とパルス数の関数として

$$\begin{aligned} F = F(T, P) &= 2\pi r' \mu(T) \frac{S}{h(T)} \frac{P}{P_c} \\ &= 2\pi r' \frac{S}{P_c} \frac{C_\mu}{C_h} T^{-\alpha} (T - T_C)^{-1} P \end{aligned}$$

また (単位時間あたりの) トルクは  $N = F \times r'$  であるので

$$\begin{aligned} N(T, P) &= |F(T, P) \times r'| \\ &= 2\pi r'^2 \frac{S}{P_c} \frac{C_\mu}{C_h} T^{-\alpha} (T - T_C)^{-1} P \\ &= CT^{-\alpha} (T - T_C)^{-1} P \end{aligned}$$

ただし比例定数をまとめて  $C = 2\pi r'^2 S C_\mu / P_c C_h$  とした。

ここである温度  $T$  でパルス数が  $P$  の時にモーターが脱調した、というのは内部トルク  $N(T, P)$  がモーターの許容トルク  $N_a(T, P)$  を超えた時であると考えられ、式で書くと

$$N(T, P) > N_a(P)$$

ここから脱調するパルス数  $P$  を温度  $T$  の関数で書くと

$$P(T) = \frac{N_a(T, P)}{C} T^\alpha (T - T_C) \quad (5.2)$$

様々な温度で脱調パルス数を測定する事で許容トルク  $N_a(T, P)$ 、粘性  $\mu$  の温度依存性、熱収縮によって軸受け間の隙間が無くなる温度  $T_C$  を求める事が出来る。

### 5.2.3 実験方法

RA 軸、Dec 軸それぞれのモーターユニットを  $-80^\circ\text{C}$  まで冷却し、その後冷凍庫のスイッチを切って冷凍庫内の温度上昇にあわせて脱調するパルス数を測定する。なおモーターの駆動パルス数は望遠鏡コントローラーのパラメータを  $500[\text{パルス}/\text{sec}]$  単位で変更し、例えば  $4,000$  パルスで回転したが  $4,500$  パルスでは脱調した場合、「脱調パルス =  $4,000$ 」と定義しその温度で回転することのできる最大スピードであるとする。

### 5.2.4 実験結果

実験から得られた測定温度毎の脱調パルス数を表 5.1 に示す。なお Dec パルス数ではモーターの定格最大パルス数 =  $15,000[\text{パルス}/\text{sec}]$  に達したものもあり、この場合はそれ以上のパルス数でモーターを回転させることができない為測定結果は脱調しない下限値を意味する。

| 温度 [°C] | 温度 [K] | RA パルス数 | Dec パルス数 |
|---------|--------|---------|----------|
| -79.7   | 194.75 | 4000    | 5000     |
| -74.6   | 198.55 | 5000    | 7500     |
| -70.2   | 202.95 | 5500    | 8500     |
| -65.3   | 207.85 | 8000    | 10500    |
| -58.4   | 214.75 | 8500    | 11000    |
| -55.0   | 218.15 | 9500    | 12500    |
| -49.8   | 223.35 | 11000   | 15000    |
| -45.2   | 227.95 | 11000   | 15000    |

表 5.1 測定温度毎の RA 軸・Dec 軸モーターユニットの脱調パルス数。モーターの定格最大パルス数は 15000 である為、測定結果 15,000 とは脱調しない下限値を意味する。

### 5.2.5 考察

図 5.5 は温度に対する脱調しない最大のパルス数をプロットしたものである。

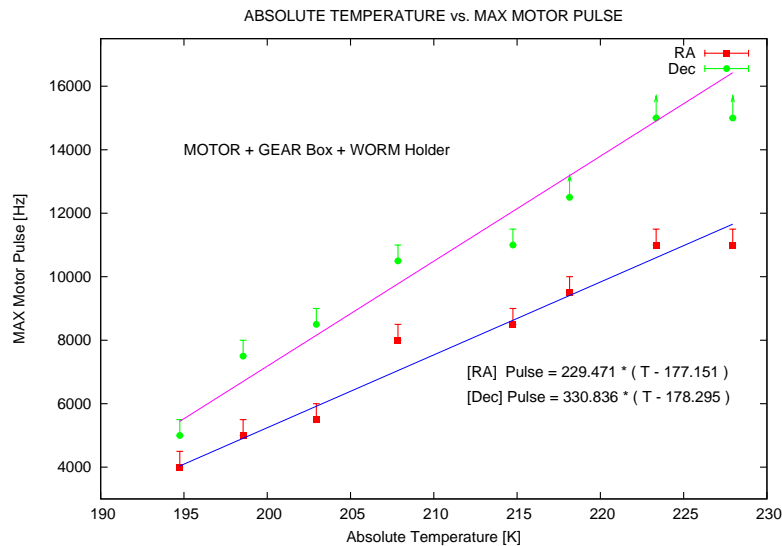


図 5.5 脱調しない最大パルス数と温度の関係。横軸が測定温度で縦軸が脱調パルス数を表す。

この結果から脱調しない最大パルス数は温度の一次関数であることが見て取れる。これは式 (5.2) より今回の実験の温度域 (-80°C ~ -45°C) では粘度やモーターの許容トルクは一定であり、抵抗の増大による脱調の原因はすべて軸受けの隙間の減少によるものと言える。測定結果からは脱調パルス数が 0 となるのは RA 軸モーター・Dec 軸モーター共におよそ -100°C であり、これは RA 軸・Dec 軸の軸受けの隙間が同程度であるというこ

とを意味する。

ところで RA 軸モーターユニットと Dec 軸モーターユニットで値が大きく違うのは Dec 軸モーターユニットと RA 軸モーターユニットの構造の違いに起因するものと考えられる。Dec 軸モーターユニットには減速ギヤが有るためウォームホルダーを回転させるトルクは RA 軸と比べ小さくなる。

観測結果を外挿すると RA 軸モーターユニットは $-80^{\circ}\text{C}$ ではおよそ 3,700[パルス/sec]、Dec 軸モーターユニットでは 4,900[パルス/sec] で脱調することになる。よって南極 40cm 赤外線望遠鏡を $-80^{\circ}\text{C}$  で使用する場合、モーターの駆動速度はこれら以下、具体的には 3,500[パルス/sec] 程度に設定すると問題なく使えるといえる。

よって $-80^{\circ}\text{C}$ でも問題なく RA 軸モーターユニット・Dec 軸モーターユニットが使用できることを確認できた。

## 5.3 RA 軸ユニット冷却実験

南極 40cm 赤外線望遠鏡はドームふじ基地の最低気温、 $-80^{\circ}\text{C}$ でも確実に動作する事が求められているが実際にその環境での動作テストは行われていない。これは組み上げた状態で $-80^{\circ}\text{C}$ まで冷却することのできる大型冷凍庫(冷凍室)がないからである。しかし RA 軸ユニットのみであれば実験室の冷凍庫にぎりぎり入る。そこで今回の実験では RA 軸ユニットに RA 軸モーターユニットを取り付けてできる限り南極で使用する時と同じように部品を組んだ状態で $-80^{\circ}\text{C}$ で正しく動作するか調べる。

### 5.3.1 RA 軸ユニットの構造と実験の概要

南極 40cm 赤外線望遠鏡の RA 軸ユニットは 2009 年 5 月に IK 技研株式会社で行った軸受け改良により図 5.6 のような構造となっている。材質は表 5.2 の通り、RA シャフトが鉄 S45C、軸受けホルダーがジュラルミン A2017、本体(箱)がアルミ A5052、ベアリングが鉄 SUJ2、ウォームホイールが砲金、ウォームネジが鉄 S45C である。

常温( $20^{\circ}\text{C}$ )から $-80^{\circ}\text{C}$ へ冷却した場合、図 5.6 の垂直方向と水平方向でそれぞれ収縮が起こる。垂直方向は RA 軸シャフトで約 0.28mm、RA 軸受けホルダーは約 0.68mm の収縮が生じる。その差およそ 0.4mm は下部の円柱ころ軸受けが RA 軸受けホルダー内を下方向へ動くことで影響をキャンセルする。

また水平方向は同様に RA 軸シャフトとベアリングの間で最大 0.01mm 隙間が減少し、回転が渋くなる。またウォームホイールとウォームネジのかみ合わせは約 0.11mm 減少しバックラッシュ<sup>\*1</sup>の再調整が必要となる。このため RA 軸は $-80^{\circ}\text{C}$ ではうまく回転しない可能性がある。

そこでまず RA 軸モーターユニットをつけない状態で RA 軸ユニットを $-80^{\circ}\text{C}$ に冷却し、垂直方向・水平方向の収縮に対して設計通り正しく回転するかどうか調べる。次に

\*1 第 7 導入誤差の評価を参照のこと

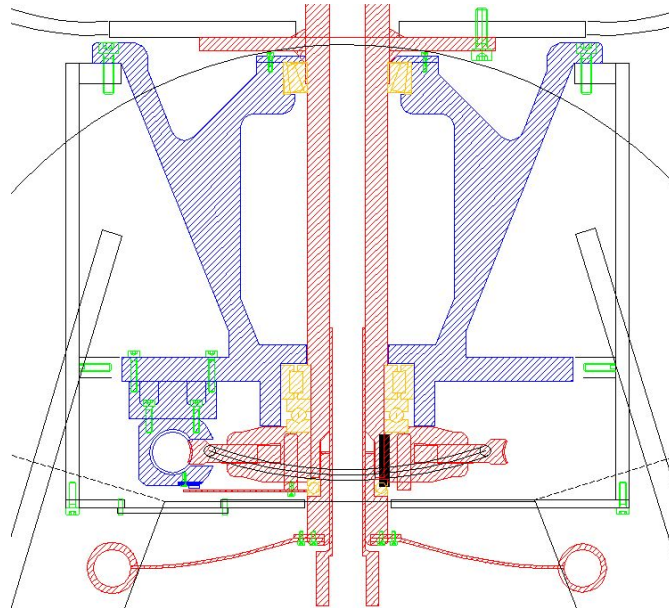


図 5.6 RA 本体ユニット。赤色が RA シャフト、青色が軸受けホルダー、黄色がベアリングである。

RA 軸モーターユニットを取り付け、冷却環境下でウォームホイールとウォームネジのかみ合わせの変化に対してモーターが正しく回転するかどうか調べる。

|          | 材質     | 種類     | 熱膨張率 |
|----------|--------|--------|------|
| RA シャフト  | 鉄      | S45C   | 11.2 |
| ウォームネジ   | 鉄      | S45C   | 11.2 |
| ベアリング    | 鉄      | SUJ2   | 12.8 |
| 軸受けホルダー  | ジュラルミン | A2017  | 27.3 |
| 本体 (箱)   | アルミニウム | A5053  | 23.9 |
| ウォームホイール | 砲金     | -      | 18   |
| (参考)     | ステンレス  | SUS304 | 17.3 |
|          | ステンレス  | SUS430 | 10.4 |

表 5.2 各構成部品の材質と熱膨張率 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

### 5.3.2 実験方法

南極 40cm 赤外線望遠鏡の RA 軸ユニットを丸ごと冷凍庫に入れ-80°C まで冷却し実験を行った。実験は以下の 3 通り行った。

実験 A RA 軸ユニット (RA 軸モーターユニット無し) を冷却し、軸が回転できるかどうか

か調べる

実験 B RA 軸ユニットに RA 軸モーターを取り付け、その時ウォームネジとウォームホイールを「きつく」かみ合わせた状態で冷却し、低温下で RA 軸モーターが回転するかどうか調べる

実験 C 実験 B とは逆に、ウォームネジとウォームホイールを「最大限離れた状態」で冷却し、RA 軸モーターが低温下で回転するかどうか調べる

### 5.3.3 実験結果

以下に実験 A～C の結果を示す。RA 軸ユニット単独の場合 (実験 A) は手で回した時の間隔を記録し、RA 軸モーターユニットを取り付けた場合 (実験 B、実験 C) では脱調パルス数を測定した。

| 温度 [°C] | 状態・回転するかどうか                 |
|---------|-----------------------------|
| +17     | 軽い力で回転 (スラスト方向に 1mm 程度ガタ有り) |
| -79     | 少し重いが手で十分回転可能 (ガタは無くなった)    |

表 5.3 実験 A(RA 軸ユニット単体) の実験結果

| 温度 [°C] | 最大パルス数 | コメント               |
|---------|--------|--------------------|
| -75.3   | < 50   | カチ、カチ、カチ、カチという音    |
| -66.6   | < 50   | カッ、カッ、カッ、カッ、突っ掛かる音 |
| -39.4   | 6000   |                    |

表 5.4 実験 B(ギヤをきつく噛み合わせた状態) の脱調パルス数

### 5.3.4 考察

まず実験 A の結果である表 5.3 より RA 軸ユニットの軸受けは $-80^{\circ}\text{C}$ でも回転し機能することがわかった。ベアリングも軸に対し計算上約 0.01mm 収縮するはずであるが問題なく回転することが確認できた。実験 A で「少し重くなった」原因はおそらくこのベアリングの収縮だろうと考えられる。

次に実験 B・実験 C の結果である表 5.4、表 5.5 より、常温でウォームネジとウォームホイールをきつくかみ合わせた状態では $-80^{\circ}\text{C}$ ではモーターは回転せず、緩く噛み合わせた状態では $-78.5^{\circ}\text{C}$ でも 5,500 パルスで回転させることができることがわかった。これは異種金属の熱収縮率の違いによって冷却環境でギヤ間の隙間 (バックラッシュ) が減少する事を意味している。よって異種金属を用いる場合は $-80^{\circ}$ でのバックラッシュが最適に

| 温度 [°C] | 最大パルス数 | コメント                         |
|---------|--------|------------------------------|
| -78.5   | 5500   | W 方向のみ周期的なこすれる音              |
| -72.8   | 7500   |                              |
| -68.2   | 7500   |                              |
| -63.5   | < 5500 | 金槌で隙間調整をすると回転しなくなった          |
| -30.4   | < 500  | トツ、トツ、トツ、トツ、という音             |
| -15.7   | < 500  | 少し動いてカッ、カッ、カッ、カッ             |
| -5.8    | < 500  |                              |
| 1.1     | 1000   | たまに引っかかって脱調                  |
| 8.1     | 2000   |                              |
| 30.1    | -      | W 方向のみ 5000 可、E 方向は 2000 で不可 |

表 5.5 実験 C(ギヤを最大限離した状態)の脱調パルス数

なるように調整しなければならないと言える。また今回の実験からはバックラッシュ調整さえ適切に行えば-80°Cでも回転することが示せたとも言える。

なお表 5.5 では-60°C前後から異音がしてモーターが回らなくなったと記録された。そこで RA 軸モーターユニットを分解し点検したところ、ウォームネジの軸受け(砲金製)と軸が異物混入により固着していた。この固着によって-60°C以降、RA 軸モーターが回転しなくなったと考えられる。

いずれにせよ、今回の実験結果からバックラッシュ調整さえうまく行えば-80°Cでも問題なく RA 軸ユニットは回転し、RA 軸モーターユニットと合わせて-80°Cでも使える事が確認できた。

また熱収縮によるバックラッシュの温度変化が生じないようにする為にはウォームネジホルダーの固定面をウォームホイールと同一の材質で作し、軸受けの固定端付近にウォームホイールを取り付けるような構造で作れば良いということになる。

## 5.4 副鏡ユニット冷却実験

南極 40cm 赤外線望遠鏡のピントは副鏡を光軸に対して前後に移動させる事で調整する構造となっている。この装置はステッピングモーターによって駆動させている為、ドームふじ基地の最低気温-80°Cで正しく動作するかどうか確認する必要がある。ピント位置は観測装置を変えない限り殆ど動かない箇所であるので追尾モーターと比べて高速で回転させなければならない事は無い。しかし滅多に動かさないところであるだけに、必要な時に必ず動作してもらわなければ観測は成り立たない。そこで今回の実験は副鏡ユニットが-80°Cで正しく機能しピント調整が可能かどうかを調べる。

### 5.4.1 副鏡モーターユニットの構造

南極 40cm 赤外線望遠鏡の副鏡モーターはオリエンタルモーター (株) 社製「CSK523AP-M30」である。これは 5 相ステッピングモーターで 1/30 に減速するギヤード (ギヤ Box) がモーターに直に取り付けられており、フルステップ駆動の場合 15,000 パルスで 1 回転する。(オリエンタルモーター総合カタログ [4])

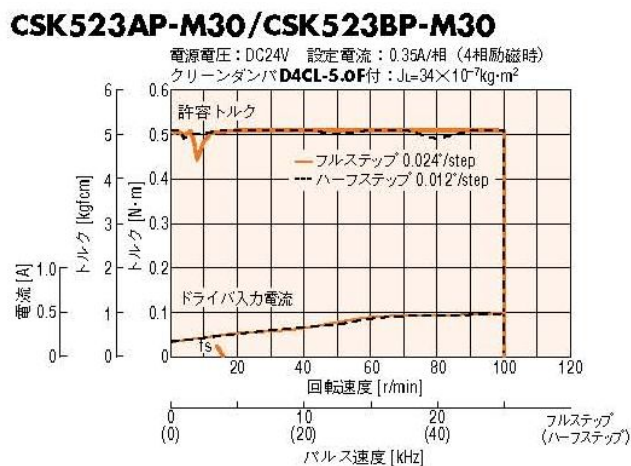


図 5.7 CSK523AP-M30 の回転速度-トルク特性。横軸が回転速度で縦軸がトルクである。(オリエンタルモーター総合カタログ [4])

図 5.8 が副鏡ユニットの構造である。副鏡ユニット上部に取り付けられたモーター + ギヤ Box は、M3 ネジ (ピッチ 0.5) を介して上下動ユニットを支えている。上下動ユニットはバネによって下方向に常にテンションがかかっている。モーターの回転に伴って上下動ユニットが上下に動き、ピント位置が変わる仕組みである。また可動範囲を超えて動かないよう安全装置が組み込まれている (村田千紘 2009 [20])。

### 5.4.2 実験方法

南極 40cm 赤外線望遠鏡のトップリングを丸ごと  $-80^{\circ}\text{C}$  まで冷却し、その後冷凍庫のスイッチを切って冷凍庫内の温度上昇に合わせて様々な温度で副鏡モーターユニットが機能するかどうか調べた。副鏡ユニットの上下動を目視で測定するのは困難な為、Mitutoyo CD-15CP 電子ノギスで副鏡ユニットと本体の隙間の変化を測定した。

なお低温時に動かなくなる原因を調べる為、納品状態と脱脂・再グリスアップした状態\*2の両方の冷却実験を行った。さらに上下動ユニット単独・モーター単独でも納品状態と脱脂・再グリスアップ状態で動作実験を行った。この場合は手で押して上下動ユニット

\*2 付録 D 脱脂・グリスアップについて を参照のこと

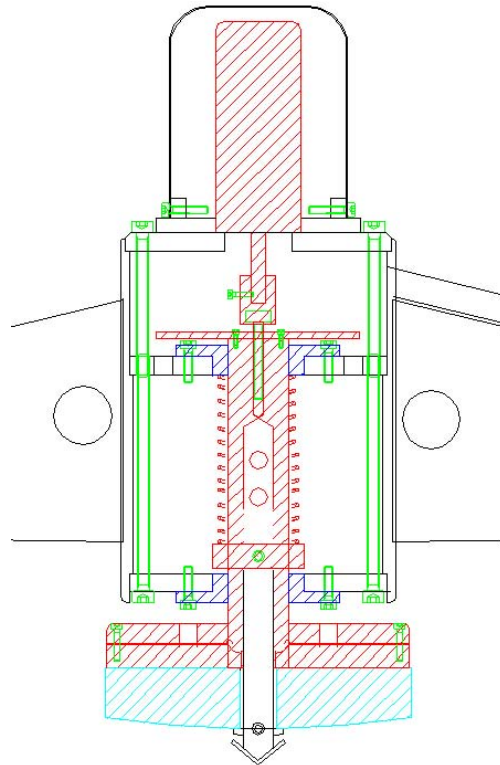


図 5.8 副鏡ユニット。赤色がモーターと上下動ユニット、中央の緑色のネジが M3 ネジ、青色が上下動ユニットを支える軸受け (プッシュ) である。

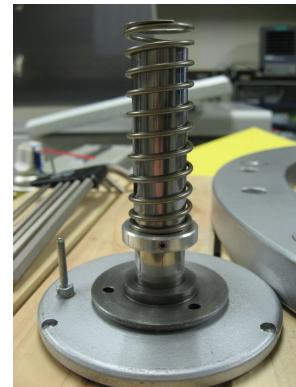


図 5.9 (左) モーターユニットを外した状態。中央のネジで上下動ユニットを上下させる。(右) 上下動ユニット。下から 2 枚目の板がプッシュで、上下動ユニットはグリス潤滑で動く。

が動くかどうか、モーターが単独で回るかどうかを調べた。但しモーター単独の実験は脱脂・再グリスアップ状態のみで実施した。





図 5.10 Mitutoyo CD-15CP 電子ノギス。器差  $\pm 0.02\text{mm}$  である。

### 5.4.3 実験結果

実験結果を表 5.6、表 5.7 に示す。はうまく動作し、×は動作しなかった場合を表す。は動作するが非常に硬い場合を意味する。

| 温度 [°C] | 副鏡の上下動 | 温度 [°C] | 副鏡の上下動 |
|---------|--------|---------|--------|
| +21.3   |        | +24.7   |        |
| -82.2   | ×      | -83.0   |        |
| -72.1   | ×      | -77.4   |        |
| -61.2   | ×      | -71.9   |        |
| -55.2   | ×      | -63.4   |        |
| -48.4   |        | -58.2   |        |
| -42.8   |        | -52.2   |        |

表 5.6 副鏡ユニットを組み立てた状態で、副鏡モーターが回転し上下動ユニットが上下するかどうかが調べた。(左) 納品状態、(右) 脱脂・再グリスアップ後。

### 5.4.4 考察

納品状態では-50 以下では副鏡モーターは回転せず、手動でも上下動ユニットを動かすことはできなかった。これは表 5.7 より上下動ユニットの軸受け(ブシュ)が固着したことが原因だと考えられる。(しかしモーターは単独で納品後の状態で-80°Cで回転するか実験をしていない為モーターに原因がまったく無かったのかと言われればわからない。)上下動ユニットを構成するブシュ・軸は共にモリブ鉄 SMC で作られており冷却しても隙間が無くなることはなく単にグリスの凍結が上下動ユニット不動の原因と思われる。FOMBLIN GREASE を用いてグリスアップし直したところ硬いが問題なく手動で動き、副鏡モーターを取り付けた状態では問題なく動くことを確認できた。

| 温度 [°C] | 上下動ユニット | 温度 [°C] | 上下動ユニット | モーター |
|---------|---------|---------|---------|------|
| +25.1   |         | +25.3   |         |      |
| -79.5   | ×       | -77.7   |         |      |
| -70.7   | ×       | -71.4   |         |      |
| -59.8   | ×       | -65.8   |         |      |
| -47.5   | ×       | -54.2   |         |      |
| -38.1   | ×       | -47.7   |         |      |
| +17.0   |         | -41.5   |         |      |

表 5.7 副鏡モーターを取り外した状態で上下動ユニットが単独で動くかどうか手で押して調べた。またモーターも単独で回転するかどうか調べた。(左) 納品状態、(右) 脱脂・再グリスアップ後。

よってこれらの実験結果から副鏡ユニットは-80°Cでも問題なく機能することがわかった。また同一の材質で軸・軸受けを作った場合、温度変化を生じても問題なく機能することも示せた。

## 5.5 Dec 軸ユニットと冷却実験のまとめ

Dec 軸ユニットはその大きさから冷凍庫に入れることが不可能である。しかし Dec 軸ユニットの構造は RA 軸ユニットとほぼ同じである為、分解・FOMBLINE グリスによる再グリスアップ、さらにバックラッシュ調整を行えば-80°Cでも回転可能であると考えられる。

よって Dec 軸ユニットも-80°Cで使用可能であり、南極 40cm 赤外線望遠鏡はドームふじの最低気温-80°Cでも問題なく使用可能、要求される耐寒性能を満たしていると結論づけることができる。

また今回実施した南極 40cm 赤外線望遠鏡の冷却実験から以下のことがわかった。

1. バックラッシュ調整は重要であり、-80°Cでモーターを回転させる為にはあらかじめ計算して調整しておく必要がある
2. 動かなくなる原因は主にグリスの凍結であるが FOMBLINE グリスを用いれば-80°Cでもこの問題は解決する
3. 熱収縮を考慮して作れば-80°Cでも問題なく機能する
4. 可動部分は軸・軸受け・筐体も含めすべて同じ材質で作れば温度変化の影響を無視することが出来る

冷却実験で得られたこれらのノウハウと今後実施されるドームふじ基地での試験観測によって、-80°C環境での駆動技術確立ができるものと期待する。

## 第 6 章

# 追尾誤差の評価

第 5 章では南極 40cm 赤外線望遠鏡が $-80^{\circ}\text{C}$ でも使用可能かを検証し、使用できることを確認した。しかしこれだけではドームふじ基地での観測が成功するとは言えない。追尾誤差や導入誤差、光軸誤差等の様々な誤差が観測で必要とする精度以下であるかどうか検証しなければならない。そこで本章以降ではこれらの検証を行う。

南極 40cm 赤外線望遠鏡には仙台での試験観測から追尾誤差が存在することが確認されている。追尾誤差が大きいと観測装置上での天体の位置は定まらず、撮像すると天体はその位置をはじめ形や明るさも正しく記録することはできない。そこで観測を成功させる為にはある程度 (回折限界やシーイング) 以上の追尾精度が必要となる。追尾精度は観測の長さにもよる為この章では単位時間あたりの誤差量として評価することにする。

ところで追尾誤差の原因として

1. 極軸が不一致 (望遠鏡の設置誤差)
2. 大気差 (地球大気の影響)
3. ピリオディックモーション (望遠鏡の加工精度)
4. その他

が考えられ、4. を除いてその発生原理と誤差の量は定量的に求めることができる。そこでこの章ではまず計算によって追尾誤差を定量的に求め、次に天体を観測して実際に南極 40cm 赤外線望遠鏡の追尾誤差の評価を行う。

なお本章では薩摩川内市せんだい宇宙館 早水勉館長 HP <sup>\*1</sup>、および天文年鑑 2009 [17]、「宇宙を見る II -現代天文学実験」(横尾武夫 編 1991 [23]) を大変参考にさせて頂いた。

---

<sup>\*1</sup> [http://www2.synapse.ne.jp/haya/zeus/zeus\\_tech.html](http://www2.synapse.ne.jp/haya/zeus/zeus_tech.html) (赤道儀、経緯台の汎用自動化システム ZEUS プロジェクト技術資料)

## 6.1 座標系

天体の位置を表す座標として(時角, 赤緯) $= (H, \delta)$ を用いる。時角  $H$  とは地方恒星時  $LST$ 、天体の赤経  $\alpha$  を用いて

$$H = LST - \alpha$$

と定義され、ある観測時刻の天体の位置を子午線からの角度で表したものである。よって  $(H, \delta)$  とは天の赤道と子午線の交点を原点  $(0, 0)$  とし、時角は西が  $+$  で東が  $-$  で  $-180^\circ \leq H \leq 180^\circ$ 、赤緯は北を  $+$ 、南を  $-$  としその範囲を  $-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$  と定義されている。

なお天体にはその位置を表す固有の座標(赤経, 赤緯)  $= (\alpha, \delta)$  があるが、天体は日周運動により天球上での位置が時々刻々し、望遠鏡の向きを表すものとして  $(\alpha, \delta)$  は使いにくい。それに対して(時角, 赤緯)  $= (H, \delta)$  は単純に天球上での位置を表す座標であるので望遠鏡の向きを表すものとして便利な座標である。

## 6.2 赤道儀の設置誤差

極軸とは赤経軸もしくは RA 軸の事であり、赤道儀はこの極軸を正しく天の赤道に向け一定速度で回転させる事で天体を追尾する装置である。よって極軸がズれていると正しく天体を追尾しない。

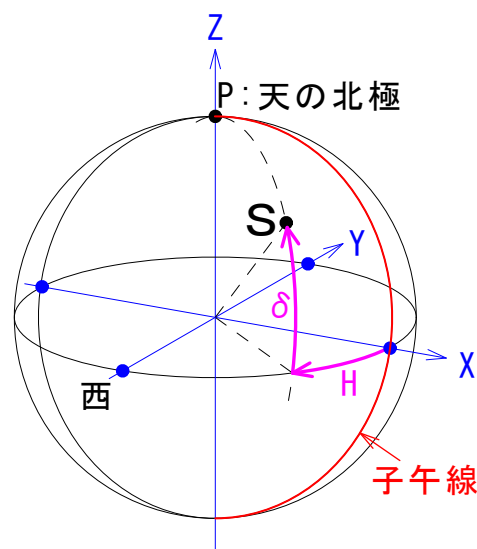


図 6.1  $(H, \delta)$  座標系と  $(x, y, z)$  座標系で天体  $S$  の位置を表す

ある天体  $S$  の位置 (時角, 赤緯) =  $(H, \delta)$  を図 6.1 で示した座標系  $(x, y, z)$  では

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cos H \\ -\cos \delta \sin H \\ \sin \delta \end{pmatrix}$$

と書ける。

ここで望遠鏡の極軸が点  $P'(H_p, \pi/2 - \epsilon_p)$  を向いていたとすると、ある天体  $S(H, \delta)$  は望遠鏡では  $(H', \delta')$  と表示される事になる。これを真の座標  $(H, \delta)$  で表すにはまず  $z$  軸を中心に ( $z$  軸正の方向から見て) 時計回りに  $H_p$  回転し、さらに  $z$  回転後の座標系の  $y$  軸を中心に反時計回りに  $\epsilon_p$  回転し、最後に子午線で  $H' \equiv 0$  (時角の定義) となるよう再度  $z$  軸を中心に  $-H_p$  回転する必要がある

$z$  軸を中心に  $H_p$  回転を行列  $A$  と定義すると

$$A \equiv \begin{pmatrix} \cos H_p & -\sin H_p & 0 \\ \sin H_p & \cos H_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$y$  軸を中心に  $-\epsilon_p$  回転を行列  $B$  と定義すると

$$B \equiv \begin{pmatrix} \cos \epsilon_p & 0 & -\sin \epsilon_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \epsilon_p & 0 & \cos \epsilon_p \end{pmatrix}$$

よって

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = A^{-1}BA \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 H_p \cos \epsilon_p + \sin^2 H_p & \sin H_p \cos H_p (1 - \cos \epsilon_p) & -\cos H_p \sin \epsilon_p \\ \sin H_p \cos H_p (1 - \cos \epsilon_p) & \sin^2 H_p \cos \epsilon_p + \cos^2 H_p & \sin H_p \sin \epsilon_p \\ \cos H_p \sin \epsilon_p & -\sin H_p \sin \epsilon_p & \cos \epsilon_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$\epsilon_p \ll 1$  であるので  $\cos \epsilon_p \sim 1$ 、 $\sin \epsilon_p \sim \epsilon_p$  と近似すると

$$\begin{pmatrix} \cos \delta' \cos H' \\ -\cos \delta' \sin H' \\ \sin \delta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\epsilon_p \cos H_p \\ 0 & 1 & \epsilon_p \sin H_p \\ \epsilon_p \cos H_p & -\epsilon_p \sin H_p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \cos H \\ -\cos \delta \sin H \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

### 6.2.1 単位時間あたりの時角 $H'$ 方向のズレ $(\partial H'/\partial t)_{pol}$

式 (6.1) の 1 行目を  $H$  で微分する。

$$\frac{\partial(\cos \delta' \cos H')}{\partial H} = -\cos \delta \sin H \quad (6.2)$$

ところで

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\cos \delta' \cos H')}{\partial H} &= \frac{\partial H'}{\partial H} \frac{\partial(\cos \delta' \cos H')}{\partial H'} \\ &= \frac{\partial H'}{\partial H} \left[ \cos H' \frac{\partial \cos \delta'}{\partial H'} + \cos \delta' \frac{\partial \cos H'}{\partial H'} \right] \end{aligned}$$

であり、 $\delta'$  と  $H'$  は直交しているので

$$\frac{\partial \cos \delta'}{\partial H'} = 0$$

よって

$$\frac{\partial(\cos \delta' \cos H')}{\partial H} = -\frac{\partial H'}{\partial H} \cos \delta' \sin H' \quad (6.3)$$

とも書ける。式 (6.2) と式 (6.3) を比較して、

$$\frac{\partial H'}{\partial H} = \frac{\sin H \cos \delta}{\sin H' \cos \delta'} = \frac{\sin H \cos \delta}{\cos \delta \sin H - \epsilon_p \sin \delta \sin H_p} \quad (6.4)$$

となる。なお途中の式変形で式 (6.1) の 2 行目を用いた。

ところで星が視野中心から西の方向に動く早さを  $dH'/dt$  とすると時角  $H$ [rad] は時間  $t$ [min] に対応し、

$$H[\text{rad}] = \frac{2\pi}{23h56m04s} t[\text{min}] \sim 4.37527 \times 10^{-3} t[\text{min}]$$

また radian は arcsec に変換すると

$$1[\text{rad}] = \frac{180}{\pi} \times 3600[\text{arcsec}]$$

であるので式 (6.4) 単位を [arcsec/min] と書き直すと

$$\left( \frac{\partial H'}{\partial t} \right)_{\text{pol}} = 902.465'' \times \frac{\sin H \cos \delta}{\cos \delta \sin H - \frac{\pi}{180 \times 3600} \epsilon_p'' \times \sin \delta \sin H_p} [\text{arcsec/min}] \quad (6.5)$$

となる。但し  $\epsilon_p''$  は [arcsec] 単位。なお係数の  $902.465''$  は上記の単位変換で出てきたがこれは恒星時 (Sidereal rate) の 1 分間の天体の移動量に等しい。

## 6.2.2 単位時間あたりの赤緯 $\delta'$ 方向のズレ $(\partial \delta' / \partial t)_{\text{pol}}$

式 (6.1) の 3 行目を  $H$  で微分する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sin \delta'}{\partial H} &= -\epsilon_p \sin(H - Hp) \\ &= \frac{\partial \delta'}{\partial H} \frac{\partial \sin \delta'}{\partial \delta'} \\ &= \frac{\partial \delta'}{\partial H} \cos \delta' \end{aligned}$$

と書ける。片々比較して、

$$\frac{\partial \delta'}{\partial H} = -\frac{\cos \delta}{\cos \delta'} \epsilon_p \sin(H - Hp) \sim -\epsilon_p \sin(H - Hp)$$

ここで  $\epsilon_p \ll 1$  より  $\cos \delta \simeq \cos \delta'$  とした。単位を [arcsec/min] にすると

$$\left(\frac{\partial \delta'}{\partial t}\right)_{pol} = -4.37527 \times 10^{-3} \epsilon_p'' \times \sin(H - Hp) [\text{arcsec/min}] \quad (6.6)$$

となる。但し  $\epsilon_p''$  は [arcsec] 単位。

### 6.3 大気差による追尾誤差

大気差とは地球の大気によって地平線付近の天体が浮かび上がって見える現象のことである。これは地球大気の屈折率やその高度依存性によって天体の位置がずれて見えることからくる。これにより天体の（天球上での見かけの）運動は一定ではなく天体は地上からの高度に応じて微妙に動く速度が違ってくる。

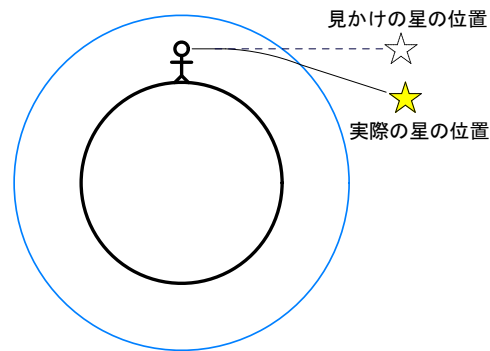


図 6.2 大気差の模式図。大気差とは地球大気の影響によって天体が浮かび上がる現象である。

#### 6.3.1 大気差の近似

実際の大気差の大きさは大気の状態（気温、気圧、水上気圧、観測波長）によって変わり、またその推定は困難である。しかし Radau 1889(理科年表 2006 [8]) によると近似的に星の高度  $h$  の関数として大気差  $R$  は以下のように書ける。

$$R = R_0 \tan\left(\frac{\pi}{2} - h\right) = R_0 \frac{1}{\tan h} [\text{arcsec}] \quad (6.7)$$

$$R_0 \simeq 58''.3$$

よって本来の位置（時角、赤緯） $= (H, \delta)$  にある天体は大気差により  $(H', \delta') = (H + R_H, \delta + R_\delta)$  の位置で観測されることになる。ここで  $R_H$ 、 $R_\delta$  はそれぞれ時角方向、赤緯方向の大気差と定義する。

#### 6.3.2 大気差の向きと大きさ

大気差は高度  $h$  の関数で記述される。そこでこれを時角  $H$  方向と赤緯  $\delta$  方向に分解してそれぞれその量を見積もる。図 6.3 のように、（時角、赤緯） $= (H, \delta)$  の天体  $S$  を緯度

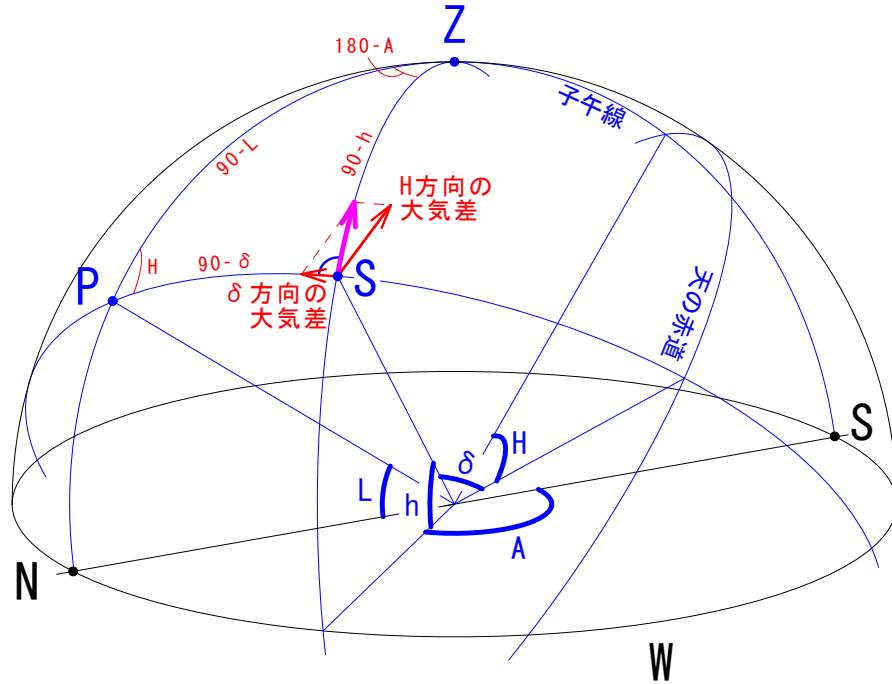


図 6.3 球面三角  $\triangle ZPS$

$L$  の観測地点で観測したとする。この時天体  $S$  の位置を (高度, 方位角) =  $(h, A)$  と書き、また  $\angle ZSP = S$  と書くと時角  $H$  方向、赤緯  $\delta$  方向の大気差のはそれぞれ

$$R_H = -R \sin S = -\frac{R_0}{\tan h} \sin S$$

$$R_\delta = R \cos S = \frac{R_0}{\tan h} \cos S$$

と書ける。ここで球面三角  $\triangle ZPS$  より正弦法則を用いて

$$\frac{\sin S}{\sin(90^\circ - L)} = \frac{\sin H}{\sin(90^\circ - h)}$$

計算して

$$\sin S = \frac{\sin H \cos L}{\cos h}$$

また球面三角  $\triangle ZPS$  より余弦法則を用いて、

$$\cos(90^\circ - L) = \cos(90^\circ - h) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - h) \sin(90^\circ - \delta) \cos S$$

計算して

$$\cos S = \frac{\sin L - \sin h \sin \delta}{\cos h \cos \delta}$$

よって時角  $H$  方向の大気差の大きさは

$$R_H = -R_0 \frac{\sin H \cos L}{\sin h}$$



赤緯  $\delta$  方向の大気差の大きさは

$$R_\delta = R_0 \left( \frac{\sin L}{\sin h \cos \delta} - \tan \delta \right)$$

となる。ところで球面三角  $\triangle ZPS$  より

$$\cos(90^\circ - h) = \cos(90^\circ - \delta) \cos(90^\circ - L) + \sin(90^\circ - \delta) \sin(90^\circ - L) \cos H$$

より

$$\sin h = \sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H$$

よって

$$R_H = -R_0 \frac{\sin H \cos L}{\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H} \quad (6.8)$$

$$R_\delta = R_0 \left( \frac{\sin L}{\sin \delta \cos \delta \sin L + \cos^2 \delta \cos L \cos H} - \tan \delta \right) \quad (6.9)$$

### 6.3.3 単位時間あたりの時角 H 方向の大気差 $(\partial R_H / \partial t)_{atm}$

式 (6.8) を  $H$  で微分する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_H}{\partial H} &= -R_0 \cos L \frac{\partial}{\partial H} \left( \frac{\sin H}{\sin h} \right) \\ &= -R_0 \cos L \left[ \frac{1}{\sin h} \cos H + \sin H \frac{\partial}{\partial H} \left( \frac{1}{\sin h} \right) \right] \\ &= -R_0 \frac{\cos L}{\sin^2 h} \left[ \sin h \cos H - \sin H \frac{\partial(\sin h)}{\partial H} \right] \end{aligned} \quad (6.10)$$

ところで球面三角  $\triangle ZPS$  より

$$\cos(90^\circ - h) = \cos(90^\circ - \delta) \cos(90^\circ - L) + \sin(90^\circ - \delta) \sin(90^\circ - L) \cos H$$

より

$$\sin h = \sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H$$

微分して

$$\frac{\partial(\sin h)}{\partial H} = -\cos \delta \cos L \sin H \quad (6.11)$$

これらを代入して式 (6.10) を書き改めると、

$$\frac{\partial R_H}{\partial H} = -R_0 \frac{\sin \delta \sin L \cos L \cos H + \cos \delta \cos^2 L}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H)^2}$$

となる。 $R_0$  を代入して単位を [arcsec/min] にすると

$$\left( \frac{\partial R_H}{\partial t} \right)_{atm} = -0''.255078 \times \frac{\sin \delta \sin L \cos L \cos H + \cos \delta \cos^2 L}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H)^2} [\text{arcsec/min}] \quad (6.12)$$

### 6.3.4 単位時間あたりの赤緯 $\delta$ 方向の大気差 $(\partial R_\delta / \partial t)_{atm}$

式 (6.9) を  $H$  で微分する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_\delta}{\partial H} &= \frac{\partial h}{\partial H} \frac{\partial R_\delta}{\partial h} \\ &= \frac{\partial h}{\partial H} \times \left( -R_0 \frac{\sin L \cos h}{\cos \delta \sin^2 h} \right) \end{aligned} \quad (6.13)$$

ここで式 (6.11) と

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\sin h)}{\partial H} &= \frac{\partial h}{\partial H} \frac{\partial(\sin h)}{\partial h} \\ &= \frac{\partial h}{\partial H} \cos h \end{aligned}$$

より、

$$\frac{\partial h}{\partial H} = -\frac{\cos \delta \cos L \sin H}{\cos h}$$

よって

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_\delta}{\partial H} &= -\frac{\cos \delta \cos L \sin H}{\cos h} \left( -R_0 \frac{\sin L \cos h}{\cos \delta \sin^2 h} \right) \\ &= R_0 \frac{\sin L \cos L \sin H}{\sin^2 h} \\ &= R_0 \frac{\sin L \cos L \sin H}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H)^2} \end{aligned}$$

$R_0$  を代入して単位を [arcsec/min] にすると

$$\left( \frac{\partial R_\delta}{\partial t} \right)_{atm} = 0''.255078 \times \frac{\sin L \cos L \sin H}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H)^2} [\text{arcsec/min}] \quad (6.14)$$

## 6.4 ピリオディックモーションによる追尾誤差

ピリオディックモーションとは望遠鏡を駆動するウォームネジの偏芯によって発生する RA 軸の周期的な回転のむらの事である。回転のむらは  $\sin$  カーブに近似できる。南極 40cm 赤外線望遠鏡の RA 軸は歯数 360 枚のウォームホイールが取り付けられている。よって RA 軸を 1 回転させるにはウォームネジを 360 回転させる必要がある。天体は 23h56m04s(恒星時) で回転しているので、ウォームネジは

$$23\text{h}56\text{m}04\text{s} \div 360 \simeq 3.98907[\text{min}]$$

で 1 回転する計算となる。よってピリオディックモーション  $P$  の周期は 3.98907 分であり、ピリオディックモーションの大きさは

$$P_{HA}(t) = P_0'' \times \left\{ \sin \left( \frac{2\pi}{3.98907} t + \phi \right) - \sin \phi \right\} [\text{arcsec/min}]$$

と書ける。但し  $P_0$  はピリオディックモーションの振幅、 $\phi$  は位相を表し、 $t = 0$  で  $P_{RA}(0) = 0$  となるよう  $\sin \phi$  を引いた。

計算して書き直すと

$$P_{HA}(t) = P_0'' \times \{\sin(1.57510t + \phi) - \sin \phi\} [\text{arcsec/min}] \quad (6.15)$$

なおピリオディックモーションは RA 軸の偏芯によるものなので Dec 軸方向にその誤差は生じない。

## 6.5 追尾誤差の見積もり

前章までで極軸エラー・大気差によるエラー・ピリオディックモーションを定量的に見積もった。観測される追尾エラーはこれらの足しあわせで表せる。

式 (6.5)、式 (6.12)、式 (6.15) より望遠鏡にカメラを取り付け追尾しながら周期的に天体を撮影して追尾エラーを測定する場合、観測開始から  $t[\text{min}]$  後に生じる時角 H 方向、すなわち RA 方向の追尾誤差  $\Delta_{RA}$  は

$$\Delta_{RA} = \int_0^t dt \left( \frac{\partial H'}{\partial t} \right)_{pol} + \int_0^t dt \left( \frac{\partial R_H}{\partial t} \right)_{atm} + P_{HA}(t) - 902.465''t \quad (6.16)$$

式 (6.6)、式 (6.14) より Dec 方向の追尾エラー  $\Delta_{Dec}$  は

$$\Delta_{Dec} = \int_0^t dt \left( \frac{\partial \delta'}{\partial t} \right)_{pol} + \int_0^t dt \left( \frac{\partial R_\delta}{\partial t} \right)_{atm} \quad (6.17)$$

となる。ただし望遠鏡は天体を追尾している為、RA 方向の追尾誤差から  $902.465''t$  を引いた。

ここで観測時間はせいぜい 10 分間程度 (ピリオディックモーション 2 周期程度) であると仮定し、その間の時角  $H$  の変化が無視できるとみなすと式 (6.16)、式 (6.17) の積分は 1 次式に近似することができる。その場合の RA 方向、Dec 方向の追尾エラーは

$$\begin{aligned} \Delta_{RA}'' = & \left\{ 902.465'' \times \left( \frac{\cos \delta \sin H_0}{\cos \delta \sin H_0 - 4.84814 \times 10^{-6} \epsilon_p'' \sin H_p \sin \delta} - 1 \right) \right. \\ & \left. - 0''.255078 \times \frac{\sin \delta \sin L \cos L \cos H_0 + \cos \delta \cos^2 L}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H_0)^2} \right\} t \\ & + P_0'' \times \{\sin(1.57510t + \phi) - \sin \phi\} \end{aligned} \quad (6.18)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{Dec}'' = & \left\{ -4.37527 \times 10^{-3} \epsilon_p'' \sin(H_0 - H_p) \right. \\ & \left. + 0''.255078 \times \frac{\sin L \cos L \sin H_0}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H_0)^2} \right\} t \end{aligned} \quad (6.19)$$

となる。但し

|                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| $(H_0, \delta)$ | 観測開始時刻の天体の座標 (時角, 赤緯)    |
| $L$             | 観測地の緯度                   |
| $H_P$           | 望遠鏡の極軸のズレの時角             |
| $\epsilon_p$    | 極軸ズレの大きさ [arcsec]        |
| $P_0$           | ピリオディックモーションの振幅 [arcsec] |
| $\phi$          | ピリオディックモーションの位相          |
| $t$             | 観測開始時刻からの経過時間 [min]      |

である。

## 6.6 追尾誤差の測定

前節の計算で求めた追尾誤差を南極 40cm 赤外線望遠鏡に適用し観測でその量を見積もる。観測は 2009 年 10 月 27 日、10 月 29 日の両日に、南極 40cm 赤外線望遠鏡の接眼部に取り付けた SBIG 社製冷却 CCD カメラ ST-7XME-D を用いて行った。いろいろな位置の天体を 3 秒間露出を 15 秒間隔で 50 回撮像を行い追尾状態を記録して追尾誤差を求める。

表 6.1 に観測装置の各種パラメーターを示す。

| 望遠鏡     | 南極 40cm 赤外線望遠鏡             |
|---------|----------------------------|
| 口径      | 400 [mm]                   |
| 焦点距離    | 4800 [mm]                  |
| カメラ     | ST-7XME-D                  |
| ピクセルサイズ | 9 [ $\mu\text{m}$ ]        |
| 冷却温度    | -20 [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
| フィルター   | V                          |
| 露出時間    | 3 [sec]                    |
| 露出間隔    | 15 [sec]                   |

表 6.1 観測装置の各種パラメーター

観測した恒星の詳細を表 6.2、表 6.3 に示す。但し # 印のあるものは雲やドーム回転の震動によって観測星が写らなかつたりぶれてしまって解析に使用できない画像があることを表している。

またこれとは別にピクセルサイズの測定・カメラの取付角度 (CCD チップの  $xy$  軸と時角  $H \cdot \text{Dec}$  方向の角度) を測定する為、前者は離角の判っている二重星を、後者は明るい恒星を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止するといった観測でそれぞれ求めて観測データの補正に用いた。

| 観測天体            | V-Mag. | Seeing | RA   | $\delta$   | $H_0[rad]$ |
|-----------------|--------|--------|--|------------|------------|
| $\iota$ -Aur #  | 2.7    | 5".8   | 04 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup> .4 | +33°10'56" | -1.08      |
| $\iota$ -Aur    | 2.7    | 6".6   | 04 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup> .4 | +33°10'56" | -1.00      |
| $\eta$ -Ori     | 3.4    | 6".6   | 05 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup> .1 | -02°23'07" | -1.00      |
| $\theta$ 2-Ori  | 5.0    | 6".8   | 05 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup> 53 <sup>s</sup> .6 | -05°24'24" | -0.978     |
| SAO80909        | 6.3    | 1".7   | 09 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup> 33 <sup>s</sup> .4 | +23°24'32" | -0.543     |
| SAO59866 #      | 4.9    | 2".7   | 07 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> .5 | +38°18'09" | -0.107     |
| SAO59866 #      | 4.9    | 2".6   | 07 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> .5 | +38°18'09" | -0.0619    |
| SAO59866        | 4.9    | 2".1   | 07 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 21 <sup>s</sup> .5 | +38°18'09" | 0.00       |
| $\delta$ -Cap # | 2.8    | 6".5   | 21 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> .2 | -16°04'50" | 0.417      |
| SAO11092        | 5.6    | 2".7   | 03 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> .6 | +04°23'41" | 0.610      |
| $\pi$ -Pis      | 5.5    | 4".3   | 01 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 39 <sup>s</sup> .4 | +12°11'43" | 1.12       |
| $\iota$ -And    | 4.3    | 5".5   | 23 <sup>h</sup> 38 <sup>m</sup> 39 <sup>s</sup> .1 | +43°19'40" | 1.75       |

表 6.2 2009 年 10 月 27 日の観測対象星

| 観測天体            | V-Mag. | Seeing | RA   | $\delta$   | $H_0[rad]$ |
|-----------------|--------|--------|--|------------|------------|
| SAO110921       | 5.6    | 5".2   | 03 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> .6 | +04°23'41" | 0.760      |
| SAO110266       | 5.9    | 5".5   | 02 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> 41 <sup>s</sup> .9 | +03°08'53" | 1.13       |
| $\theta$ 2-Ori  | 5.0    | 3".9   | 05 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup> 53 <sup>s</sup> .6 | -05°24'24" | 0.276      |
| SAO94043        | 5.8    | 3".1   | 04 <sup>h</sup> 38 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup> .3 | +16°03'18" | 0.627      |
| SAO13298        | 4.6    | 3".1   | 04 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 06 <sup>s</sup> .2 | +66°21'27" | 0.6270     |
| $\alpha$ -Can # | 4.6    | 4".7   | 08 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup> 02 <sup>s</sup> .2 | +11°49'11" | -0.337     |

表 6.3 2009 年 10 月 29 日の観測対象星

### 6.6.1 データ解析

天体の位置測定は IRAF の imexamine コマンドを用いた。天体の CCD 上での位置を測定し、後述のカメラの取付角度・ピクセルサイズを補正してさらに横軸を時角方向 (+ が西、- が東)、縦軸を赤緯 (+ が北、- が南) となるように変換した。

またカメラの取付角度、すなわち CCD チップの y 軸と時角方向のなす角度を恒星 (8 日は  $\alpha$ -And、10 日は  $\gamma$ -Reg) を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止することで求めた。解析は ds9 に撮影した画像を表示させ、x 軸方向 50[pixel] 毎に位置を記録してそれらを直線でフィッティングし傾きを求めた。

図 6.4 は 27 日、29 日に測定したカメラの取付角度の解析結果である。

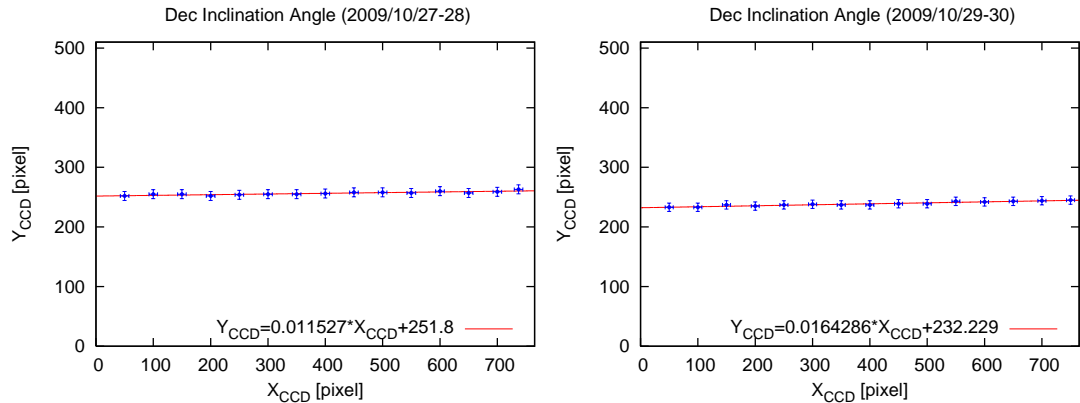


図 6.4 取付角度の測定。(左)10月27日、(右)10月29日。横軸、縦軸ともに CCD の座標を示す。

この結果から CCD チップの x 軸と時角方向のなす角は 27 日は  $0.0115[\text{rad}]$ 、29 日は  $0.0164[\text{rad}]$  であることが判った。

さらにピクセルサイズは 27 日、29 日とも  $\theta 1\text{-Ori}$ 、 $\theta 2\text{-Ori}$  の離角から求めた。この天体の離角は  $135.07 [\text{arcsec}]$  であることが判っている。そこで 2 つの天体の CCD のチップ上の位置を測定し、位置の差からピクセルサイズを求める。

シーイングの影響を除く為に観測日毎に 50 フレームについて位置の測定を行った。結果は以下である。誤差は  $1\sigma$ 。

$$\text{Pixel Size}_{10/27} = 0.400 \pm 0.001 [\text{arcsec/pixel}]$$

$$\text{Pixel Size}_{10/29} = 0.398 \pm 0.000 [\text{arcsec/pixel}]$$

## 6.6.2 理論曲線とのフィッティング

大気差による時角・赤緯方向の追尾誤差は観測時の天体の時角  $H_0$ 、赤緯  $\delta$ 、観測地の緯度  $L$  で一意に求まる為あらかじめ差し引く。設置誤差は式 (6.19) の第 1 項より単位時間 (1 分間) あたりの赤緯方向の天体の移動は時角  $H_0$  の  $\sin$  関数として表れる。27 日、29 日の観測データから単位時間あたりの赤緯方向のエラーを時角を横軸に示したものが図 6.5 である。誤差は観測天体の FWHM(シーイング値) を観測回数の平方根で割ったもので評価した。

この結果から遠鏡の設置誤差は  $\epsilon_p = 146 \pm 22[\text{arcsec}]$ 、 $H_p = -0.122 \pm 0.096[\text{radian}]$  であると見積もることができる。極軸は観測前に恒星を用いておおざっぱに合わせておいたので\*2、 $H_p = -0.122 \pm 0.096[\text{radian}]$  という設置誤差は妥当な値だと言える。次にこれを用いてペリオディックモーションの見積もりとその他エラーのフィッティングを行う。

\*2 付録 B 極軸調整方法を参照のこと

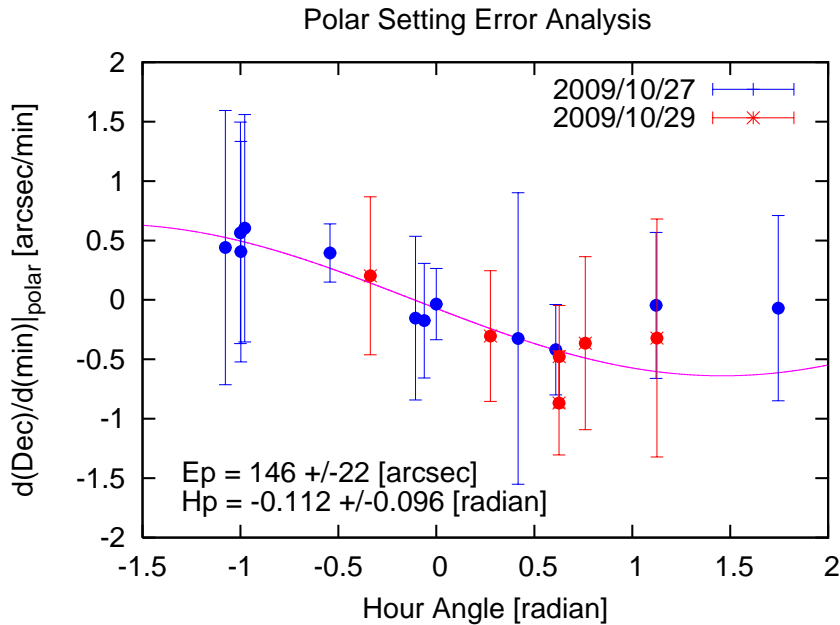
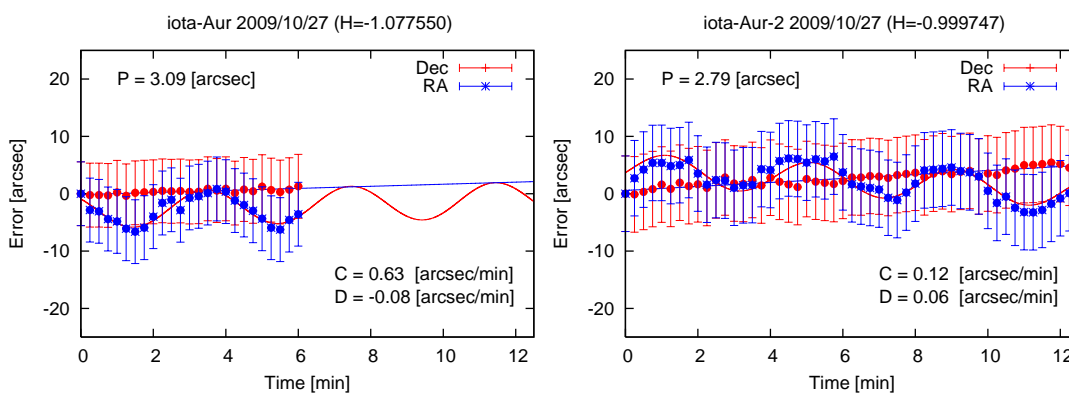
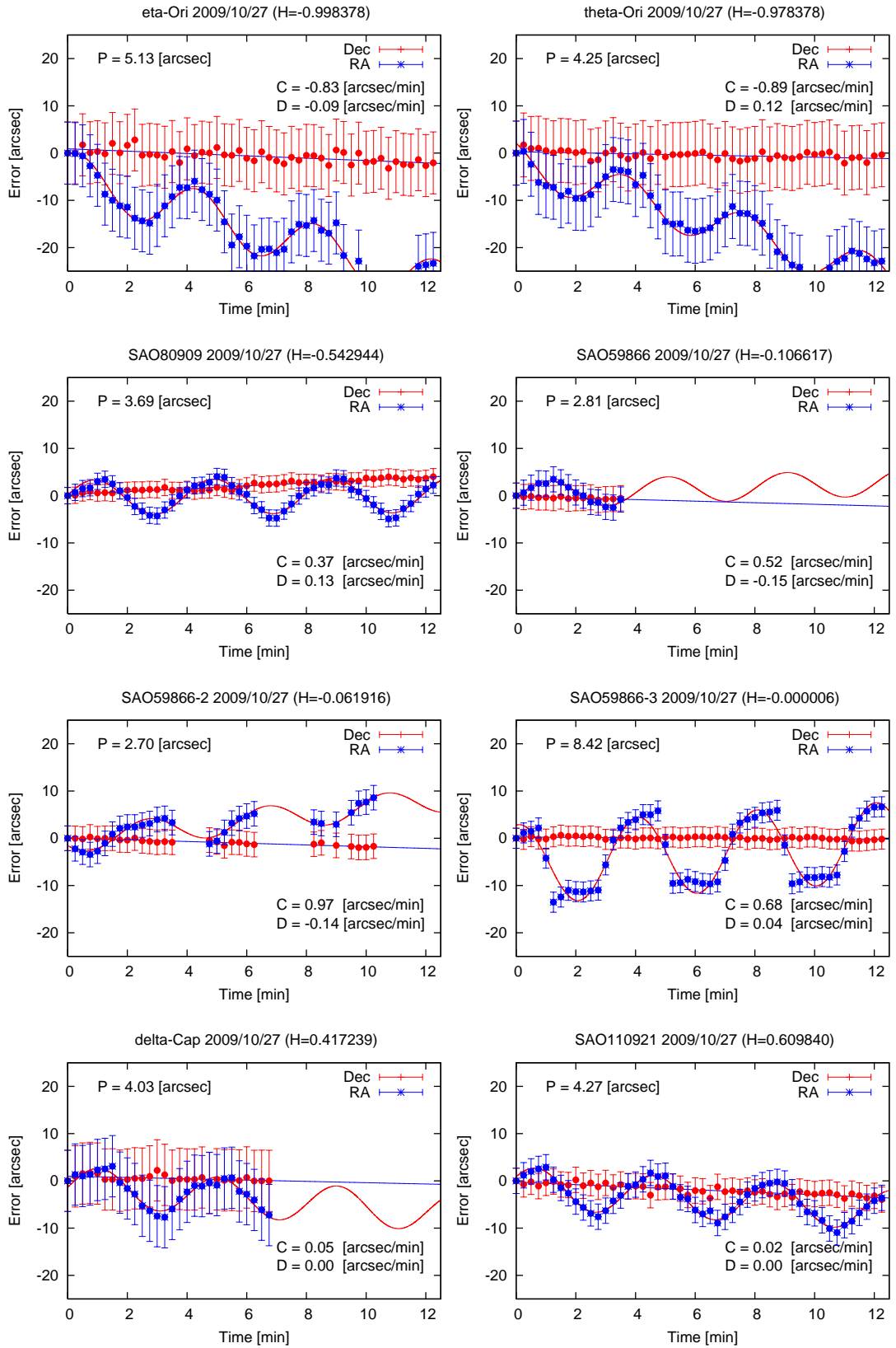


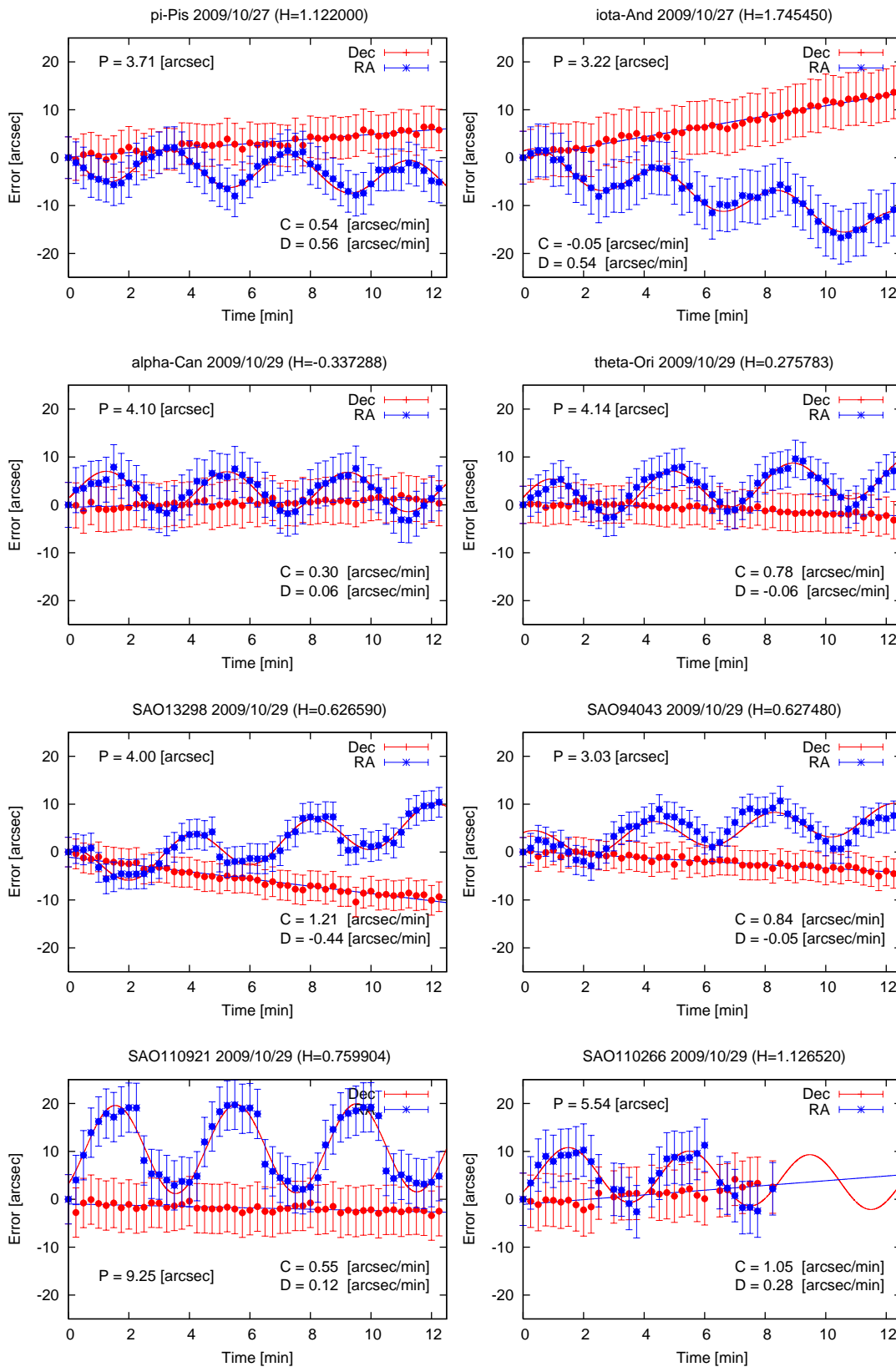
図 6.5 天体の時角に対する単位時間あたりの赤緯追尾誤差。横軸が時角で縦軸が単位時間あたりの赤緯追尾誤差である。

次にあげる図は横軸を観測開始時刻からの経過時間で縦軸が追尾誤差量とした観測結果である。但し大気差はあらかじめ計算し差し引いてある。青は RA 軸、赤は Dec 軸の追尾誤差を表し、 $P$  はピリオディックモーションの振幅 [arcsec]、 $C$  と  $D$  はそれぞれ後述の時角方向の原因不明のエラー [arcsec/min] と赤緯方向の原因不明のエラー [arcsec/min] を表す。なお近似曲線は  $H_p$ 、 $\epsilon_p$ 、 $P$ 、 $C$ 、 $D$  それぞれ代入して得られたものである。









### 6.6.3 考察

ピリオディックモーションの大きさは観測対象星によって大きく異なる。これはウォームネジとウォームホルダーの「あたり」が時角毎に違う為と考えられる。

図 6.6 に今回の観測で得られたピリオディックモーションの大きさの分布 (ヒストグラム) を示す。

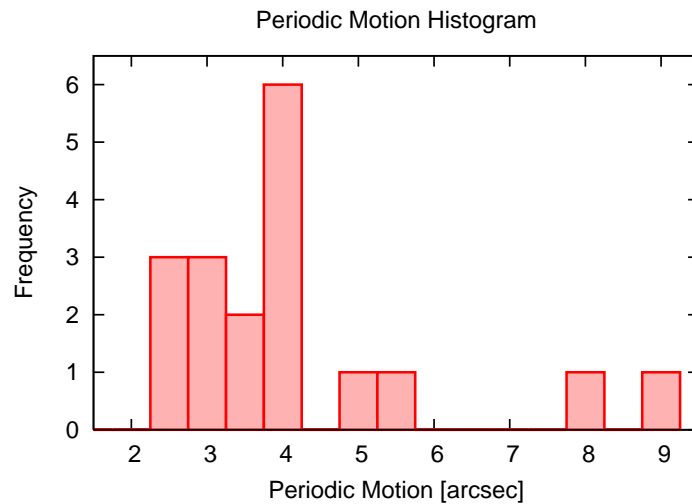


図 6.6 ピリオディックモーションの大きさの頻度図

今回の観測で得られたピリオディックモーションの平均値は  $4.3 \pm 1.8$  [arcsec] (誤差は  $1\sigma$ ) で、ヒストグラムの形からも概ね 4 秒角前後であると言える。

### 6.6.4 原因不明の追尾誤差

今回の観測結果を説明する為には赤経・赤緯方向それぞれに  $C \times t$ 、 $D \times t$  という「原因不明の追尾誤差」の項を加える必要があった。

この原因不明の追尾誤差は平均値は時角方向が  $+0.38 \pm 0.58$  [arcsec/min]、赤緯方向が  $+0.05 \pm 0.24$  [arcsec/min] (誤差は  $1\sigma$ ) であるが観測対象星によってその向きと大きさがまちまちである。

図 6.7、図 6.8 にそのヒストグラムを示す。

ここで赤緯方向は 0 付近に分布しており測定誤差と考えて良からう。時角方向の方は広く分布していて概ねプラス側＝追尾が見かけ上早くなるといった追尾誤差が生じており、これは測定誤差とは考えにくい。このような見かけ上追尾が早くなるような追尾誤差は「望遠鏡のたわみ」が原因と考えられる。望遠鏡のたわみは望遠鏡の向く方向に依存し時角  $H$  が負の時  $-H$  方向にたわむ。それが天体の追尾に合わせて子午線を通過し、時角  $H$  が正となると今度は逆に  $+H$  方向にたわむ。よって追尾が見かけ上早くなる。

このことから原因不明の追尾誤差は望遠鏡のたわみが原因だと考えられる。その大きさ

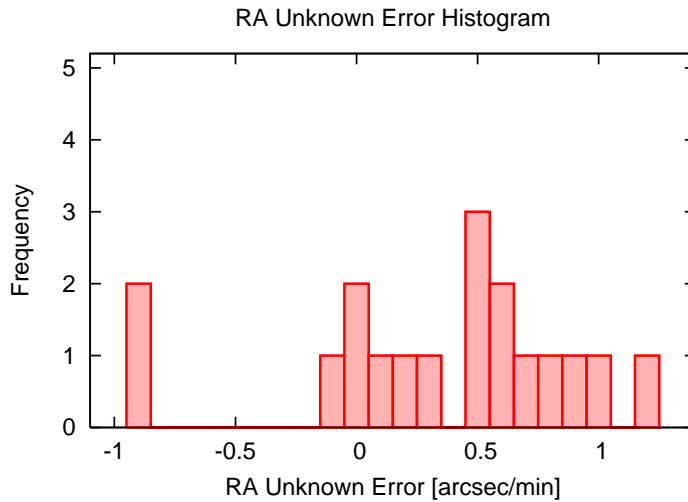


図 6.7 赤経方向の原因不明の追尾誤差の大きさの頻度図

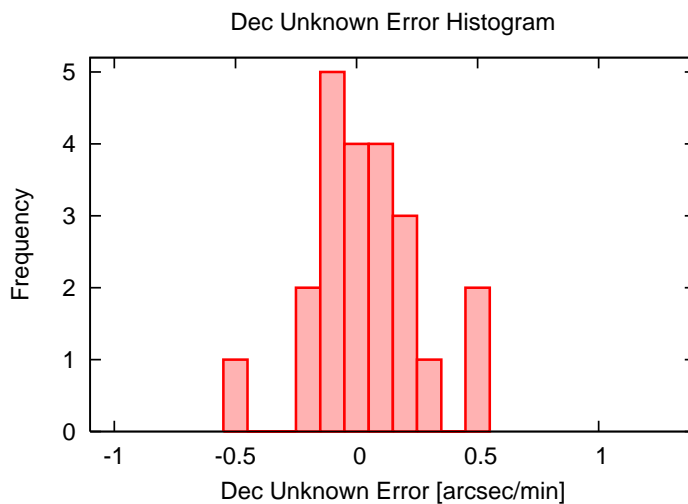


図 6.8 赤緯方向の原因不明の追尾誤差の大きさの頻度図

の平均は時角方向が  $+0.38 \pm 0.58$  [arcsec/min]、赤緯方向が  $+0.05 \pm 0.24$  [arcsec/min] (誤差は  $1\sigma$ ) である。

これらの観測結果を総合すると、望遠鏡のたわみ成分による追尾誤差があったものの概ね南極 40cm 赤外線望遠鏡は理論通り天体を追尾していることがわかった。たわみによる追尾誤差は今回、RA 軸方向の原因不明の追尾誤差という形で出てきたがドームふじに設置した場合は観測地が高緯度に位置する為、天体の高度はほとんど変わることが無く、常に一定方向に生じその時間変化は少なくなると考えられる。また Dec 方向の原因不明の追尾誤差がたわみによるものでなく単に測定誤差であるとする、RA 方向の原因不明の追尾誤差も相当量測定誤差が含まれていると考えられる。これらを総合すると実際は観測に影響が出るほどたわみによる追尾誤差は生じないと考えられる。さらにたわみによる追

尾誤差はピリオディックモーションの振幅  $4.3 \pm 1.8[\text{arcsec}]$  と比較して十分小さく、短時間の観測では問題ない程度であるとも言える。

ところで南極 40cm 赤外線望遠鏡の回折限界は第 1 章より  $2.2\mu\text{m}$  でおよそ  $1.4''$  であった。星像を点に写す為の許容追尾誤差を回折限界の 20% と仮定すると、今回測定されたピリオディックモーションの振幅では最短で 5.3 秒間、最長で 29 秒間の露出が可能である。この追尾精度は決して良いとは言えない。しかし 2010 年度のサイト調査及び試験観測(金星の連続観測\*<sup>3</sup>)では夏期ということもあり短時間露出の観測しか行わない為この精度でも十分観測は可能である。

よって南極 40cm 赤外線望遠鏡の追尾精度は 2010 年度の観測に必要とされる精度を有しており、十分使用に耐えうると結論づけることができる。

---

\*<sup>3</sup> 第 10 章 将来計画 を参照のこと

## 第7章

# 導入誤差の評価

南極 40cm 赤外線望遠鏡には観測から導入誤差が存在することが確認されている。

天体の導入は望遠鏡制御ソフトに天体の座標を与えるとそれをソフトがモーターの回転数に変換して実際に望遠鏡を動かし、任意の天体へ望遠鏡を向ける<sup>\*1</sup>。しかし実際は様々な誤差によって望遠鏡は指示した方向を向かない。これを導入誤差と呼ぶ。導入誤差がある場合観測装置の視野内に天体が導入できず手動で補正する必要が生じ、観測効率の低下もしくは最悪の場合観測失敗となる。よって観測に支障のない程度の導入精度が必要であるといえる。

ところで導入誤差の原因として、

1. 極軸の不一致 (設置誤差)
2. 大気差 (地球大気の影響)
3. RA 軸と Dec 軸の直交誤差 (加工・調整誤差)
4. Dec 軸と光軸の直交誤差 (加工・調整誤差)
5. ピリオディックモーション (ギヤの加工誤差)
6. バックラッシュ (ギヤのかみ合わせ)

といったものが考えられる。そこでまずこれらの導入誤差の発生原理とその量を定量的に求め、次に観測から南極 40cm 赤外線望遠鏡の導入誤差の評価を行う。

なお天体の位置を表す座標系は引き続き第 6 章の (時角, 赤緯) =  $(H, \delta)$  を用いて以下計算していく。

### 7.1 赤道儀の設置誤差

南極 40cm 赤外線望遠鏡はフォーク式赤道儀で天体を導入・追尾する。赤道儀とは日周運動を追尾する為に特別に作られた架台 (カメラ用語で言う「雲台」に相当) で、天の北極 (もしくは天の南極) に赤経軸の方向を一致させることで赤経軸のみの回転で天体の追尾を

---

<sup>\*1</sup> 第 3 章 南極 40cm 赤外線望遠鏡望遠 を参照のこと

行う。その為赤道儀の赤経軸が天の北極からズレて設置された場合、導入誤差が生じる。

### 7.1.1 モデル化

図 7.1 はモデル化の概要である。RA 軸は点の北極  $P$  から、時角  $H_p$  の方向に大きさ  $\epsilon_p$  だけズレた点  $P'$  を向いているとする。但し  $\epsilon_p \geq 0$ 、 $-180^\circ \leq H_p \leq 180^\circ$  である。

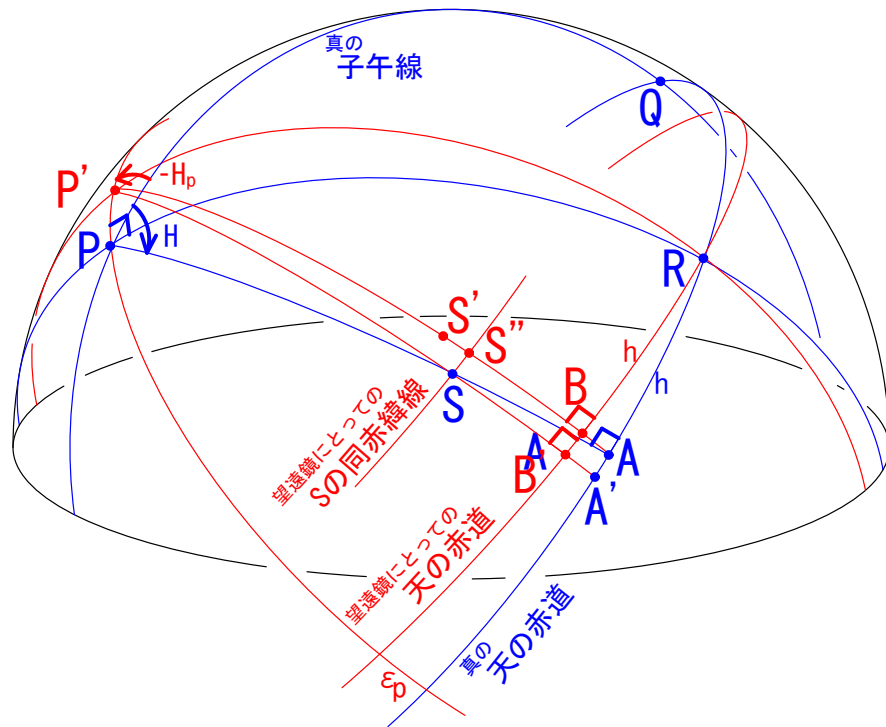


図 7.1 設置誤差による導入誤差

RA 軸が点の北極を向いていない為、天体の座標  $(H, \delta)$  を入力しても望遠鏡は天体の方向に向かず結果導入ができない。

図 7.1 で望遠鏡は点  $R(\text{時角}, \text{赤緯}) = (H_p + 90^\circ, 0)$  で望遠鏡の座標と天体の座標を一致させたとする。なおこの作業を「アライメント」と呼ぶ。

次に点  $S(H, \delta)$  にある天体を導入することを考える。望遠鏡は点  $R$  を向いているので、RA 軸を  $h$ 、Dec 軸を  $\delta$  だけ回転させれば導入は完了するはずである。しかし実際は RA 軸は点の北極  $P$  を向いていない為望遠鏡は点  $S'$  を向く。望遠鏡を点  $S(H, \delta)$  に向ける為には点  $S'$  から  $\Delta\delta_{set}$  だけ (南に) Dec 軸を回転させて点  $S$  と同じ (望遠鏡での) 赤緯上の点  $S''$  に向け、さらに RA 方向のズレ  $\Delta\alpha_{set}$  だけ (西に) 回転させなければならない。なお CCD の視野上に写る RA 方向のズレは  $\Delta\alpha_{set} \cos \delta$  である。

7.1.2 Dec 方向のズレ  $\Delta\delta_{set}$

図 7.1、図 7.2 より設置誤差  $\epsilon_P \ll 1$  であるので天球上の三点  $P, P', P''$  は非常に接近している。よって天球上の円弧  $PP'$  を直線と見なすことができる。すると三角形  $\triangle PP'P''$  と球面三角形  $\triangle PP'S$  から、Dec 方向のズレ  $\Delta\delta_{set}$  は近似的に

$$\Delta\delta_{set} = \epsilon_p \cos(H - H_P) \tag{7.1}$$

となる。

7.1.3 RA 方向のズレ  $\Delta\alpha_{set} \cos \delta$

図 7.1 から見て取れるように、天の北極  $P$  と RA 軸の方向  $P'$  はほとんど同じ方向 (ズレは  $\epsilon_P$  程度) だと言える。よって両者にとっての天の赤道は「ほぼ」一致していると見なせる。そこで天の赤道が同一であると考え、点  $A = 点 B$ 、点  $A' = 点 B'$  と見なす。

図 7.2 は図 7.1 を拡大し、近似を行った後の図である。

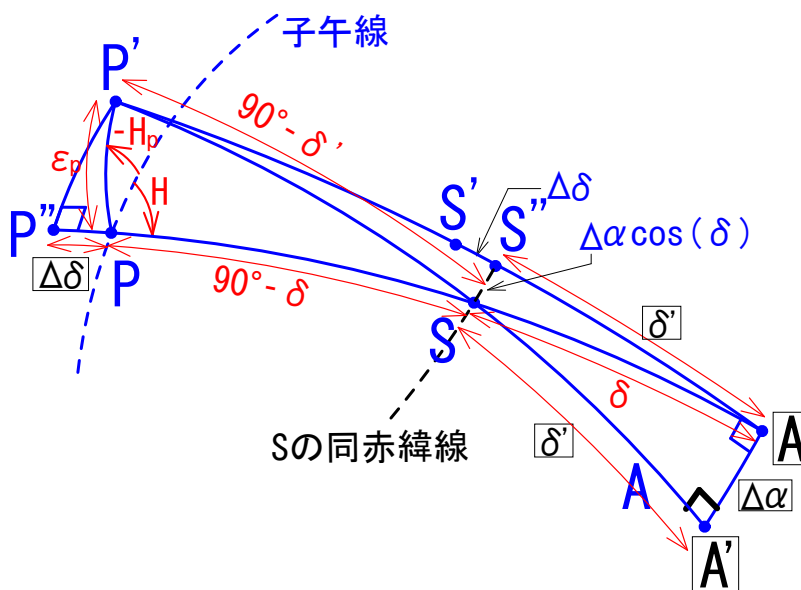


図 7.2 設置誤差による導入誤差 (拡大図)

大円を青線で示し、その長さを赤色で、球面三角法の概念に基づき球の中心角で表した。黒線は小円である。で囲んだ文字は特に近似をして得られた長さ (角度) を表している。ここで球面三角形  $\triangle PP'S$  について、

$$\frac{\sin \epsilon_p}{\sin \angle PSP'} = \frac{\sin(90^\circ - \delta')}{\sin(H - H_p)}$$

計算して

$$\sin \angle PSP' = \sin(H - H_p) \frac{\sin \epsilon_p}{\cos \delta'}$$

ところで「近似」球面三角形  $\triangle SAA'$  について、

$$\frac{\sin \delta}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin \Delta\alpha_{set}}{\sin \angle ASA'}$$

また

$$\sin \angle PSP' = \sin \angle ASA'$$

より計算して

$$\sin(\Delta\alpha_{set}) = \sin(H - H_p) \sin \epsilon_p \times \frac{\sin \delta}{\cos \delta'}$$

$\Delta\alpha_{set} \ll 1$ 、 $\epsilon_p \ll 1$  であるので  $\sin(\Delta\alpha_{set}) \sim \Delta\alpha_{set}$ 、 $\sin \epsilon_p \sim \epsilon_p$ 、 $\sin \delta / \cos \delta' \sim \tan \delta$  と近似すると

$$\Delta\alpha_{set} = \epsilon_p \sin(H - H_p) \tan \delta \quad (7.2)$$

最終的に弧  $S''S$  の長さ、つまり CCD 上に写る = 観測される RA 方向のエラーは

$$\Delta\alpha_{set} \cos \delta = \epsilon_p \sin(H - H_p) \sin \delta \quad (7.3)$$

となる。

#### 7.1.4 設置誤差の向きと大きさ

設置誤差  $\epsilon_p = 1'$ 、 $H_p = -30^\circ$  の時、 $(H_p + 90^\circ, 0)$  でアライメントしたと仮定して天体の時角  $H$  ごとの  $\Delta\alpha_{set} \cos \delta$ 、 $\Delta\delta_{set}$  を図 7.3、図 7.4 に示す。

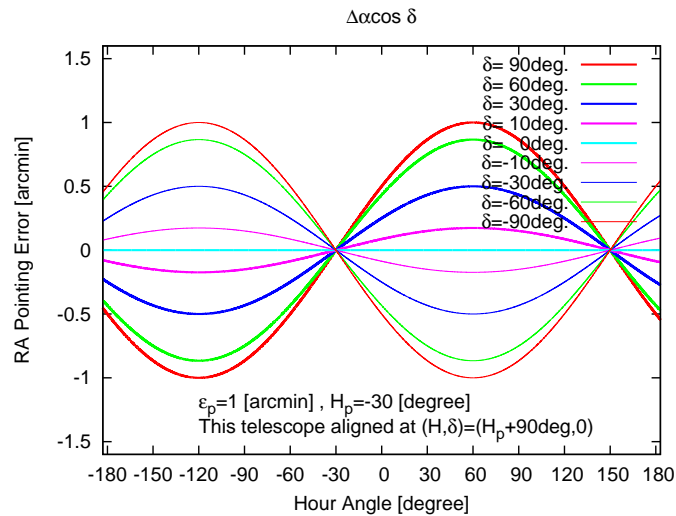


図 7.3 設置誤差による RA 軸方向の導入誤差。天体の赤緯によってその大きさが異なる。横軸が時角で縦軸が導入誤差。



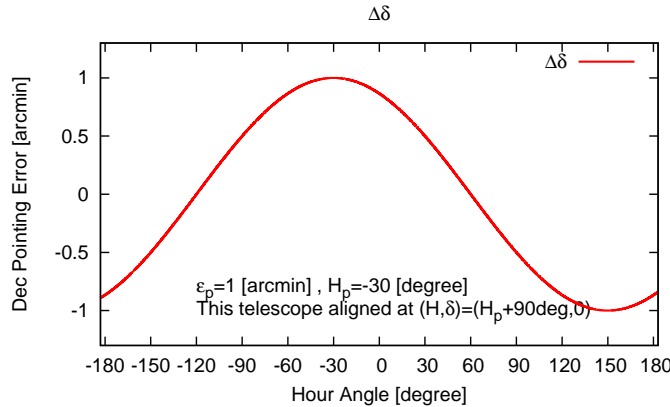


図 7.4 設置誤差による Dec 軸方向の導入誤差。天体の赤緯によらず誤差量は一定となる。横軸が時角で縦軸が導入誤差。

設置誤差がある場合 RA 軸方向・Dec 軸方向共に導入エラーが表れる。特に Dec 軸方向は赤緯  $\delta$  の値に関係なく生じる。また RA 軸方向は  $\delta = 0$  で時角  $H$  の値に関係なく 0 となる。さらに RA 軸・Dec 軸方向共に、導入誤差の最大値は設置誤差  $\epsilon_p$  と等しいこともわかる。

## 7.2 大気差によるエラー

大気差は第 6 章で述べたとおり、とは地球の大気によって地平線付近の天体が浮かび上がって見える現象のことである。RA 軸方向、Dec 軸方向の大気差の大きさは前節で求めたとおり式 (6.8)、式 (6.9) であり、これがそのまま大気差による導入誤差となる。

式 (6.8)、式 (6.9) をここにもう一度書くと

$$R_\delta = R_0 \left( \frac{\sin L}{\sin \delta \cos \delta \sin L + \cos^2 \delta \cos L \cos H} - \tan \delta \right)$$

$$R_H = -R_0 \frac{\sin H \cos L}{\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H}$$

ここで天体の時角  $H$  ごとの  $R_H$ 、 $R_\delta$  を図 7.5、図 7.6 に示す。但し観測地の緯度  $L=40^\circ$  で計算してある。RA 軸方向の導入誤差は時角によって誤差の向きが変わるが Dec 軸方向の導入誤差は時角に対してその大きさは変化するものの誤差の向きは変わらないことが読み取れる。なお天体の赤緯値によってその大きさが異なるが、これは観測地の緯度にもよるもので一般的な振る舞いというわけではない。

なお実際の観測ではアライメントした天体においても大気差は RA 軸方向、Dec 軸方向にそれぞれ生じているはずである。その為大気差による導入エラーを正しく見積もるにはアライメント時の大気差を差し引かなければならない。 $(H_p + 90^\circ, 0)$  でアライメントした後に任意の天体  $(H, \delta)$  を向けた場合の大気差による導入誤差は以下の式となる。

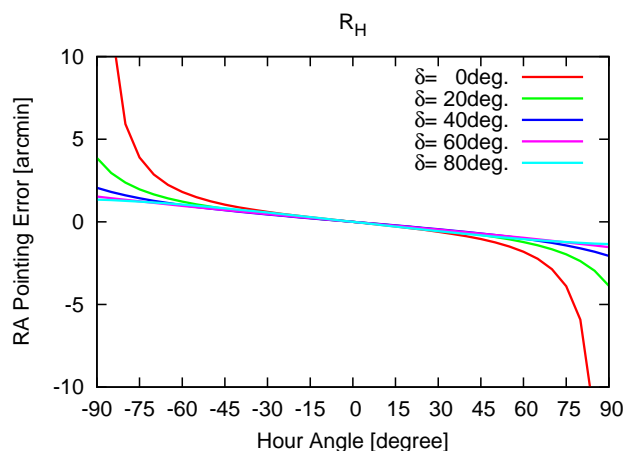


図 7.5 大気差による RA 軸方向の導入誤差。横軸が時角で縦軸が導入誤差である。

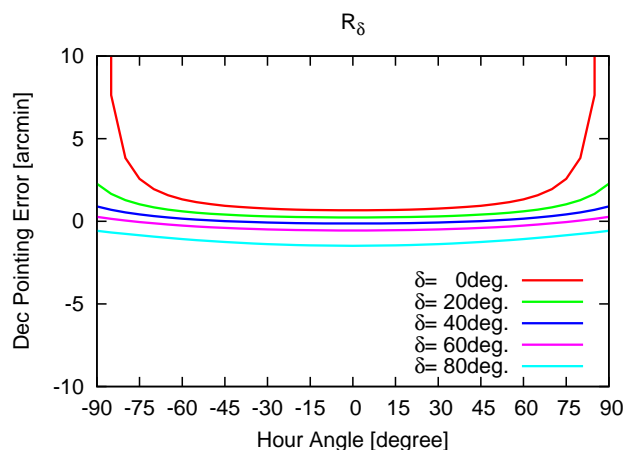


図 7.6 大気差による Dec 軸方向の導入誤差。横軸が時角で縦軸が導入誤差である。

$$\Delta\alpha_{atm} = -R_0 \left( \frac{\sin H \cos L}{\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H} + \frac{1}{\tan H_p} \right) \quad (7.4)$$

$$\Delta\delta_{atm} = R_0 \left( \frac{\sin L}{\sin \delta \cos \delta \sin L + \cos^2 \delta \cos L \cos H} - \tan \delta + \frac{\tan L}{\sin H_p} \right) \quad (7.5)$$

なおここで議論した RA 方向の大気差は、赤緯  $\delta$  の位置で赤経軸が描く小円の弧の長さを求めた。よって第 7.1 章 赤道儀の設置誤差 の式 (7.3) のように観測される RA 方向のエラーに  $\cos \delta$  を乗じる必要はない。

### 7.3 RA 軸と Dec 軸の直交誤差

天体の位置を表す座標系である (赤経, 赤緯) は球座標系であり、2 つの軸は直交している。しかしながら赤道儀は工業製品である為、赤経軸と赤緯軸は必ずしも直交していると

は限らない。特に南極 40cm 赤外線望遠鏡の場合は赤緯軸と赤経軸の間は多くの部品を組み合わせた作りとなっている為 2 つの軸が直交となるには以下の加工精度が重要となるが、天体観測で必要な精度を機械加工で出すことは難しい。

- RA 軸と上部フランジの直交精度
- フォーク部下面と上面の平行精度
- 左右 Dec 部の Dec 軸-底面の距離精度

図 7.7 に赤経軸と赤緯軸が直交していない場合の概略を示す。

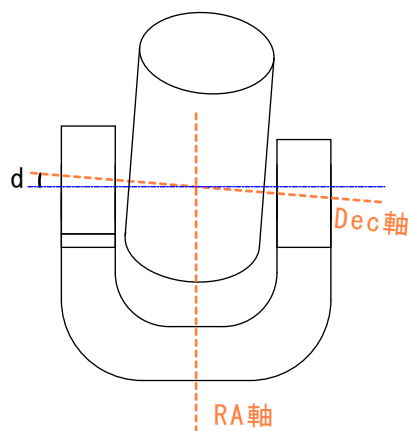


図 7.7 望遠鏡が向いている方向から見てフォーク西側が左手側になるように望遠鏡を向けた時 RA 軸と Dec 軸に時計回り正の方向に直交誤差  $d$  がある場合。

### 7.3.1 モデル化

図 7.8 はモデル化の概要である。赤道儀は模式的に図 7.8 では緑色の線として描いている。紫色の矢印は望遠鏡の向いている方向を表し、図 7.8 では望遠鏡は東の地平線 (E 地点) を向いている。

ここで図 7.7 のように望遠鏡が向いている方向から見てフォーク西側が左手側になるように望遠鏡を向けたとき、RA 軸と Dec 軸に時計回り正の方向に直交誤差  $d$  があると考え。すると Dec 軸を回転させて北天に望遠鏡を向けようとしても直交誤差の影響から望遠鏡は点  $P$  (天の北極) を通らず、点  $P'$  を向くことになる。その為天体の座標 (赤経, 赤緯) を入力しても望遠鏡は天体の方向に向かず、結果導入ができない。

なおこの誤差は「RA 軸の回転に伴って Dec 軸の指す天球上の軌跡 = 大円が傾く」事に起因して生じる。

ここでまず東の地平線である  $E$  点 (時角, 赤緯) =  $(-90^\circ, 0)$  で望遠鏡の座標と天体の座標を一致させたとする。(この作業を特に「アライメント」と呼ぶ。) なおアライメントは天の赤道上  $\delta = 0^\circ$  であればどこでも良く必ずしも  $E$  点である必要はない。

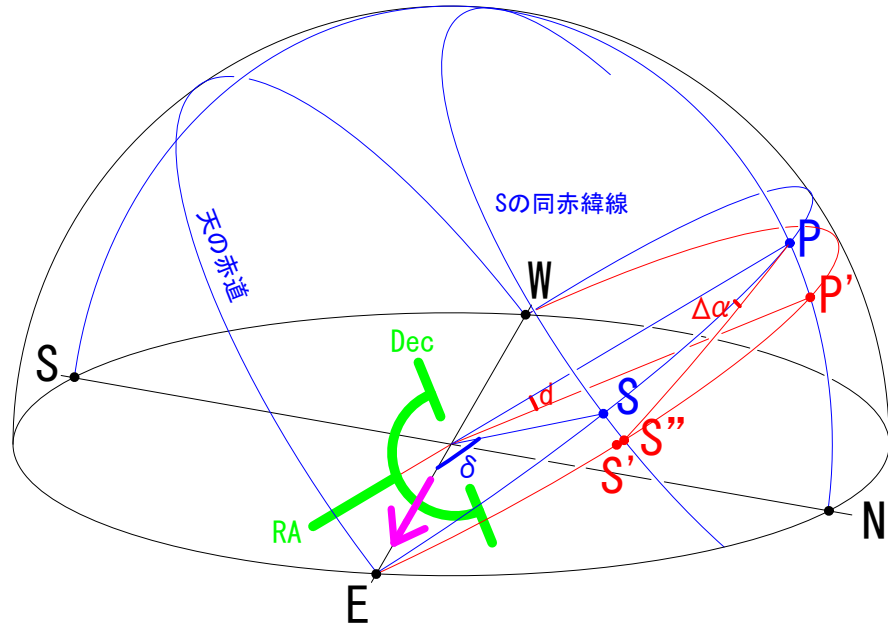


図 7.8 RA 軸と Dec 軸の直交誤差による導入誤差

次に  $S$  点  $(-90^\circ, \delta)$  にある天体を導入することを考える。RA 軸と Dec 軸が直交しているのであれば Dec 軸を  $\delta$  だけ回転させれば導入は完了するが実際は直交誤差  $d$  があるので望遠鏡は  $S'$  を向く。 $(S''$  ではない。)

望遠鏡を点  $S$  に向ける為にはそこで  $S'$  からさらに  $\Delta\delta_{rd}$  だけ Dec 軸を (北に) 回転させて  $S$  と同じ赤緯上の点  $S''$  に向け、さらに RA 方向のズレ  $\Delta\alpha_{rd}$  だけ (西に) 回転させなければならない。

図 7.8 を拡大したものが図 7.9 である。辺の長さは球面三角法に基づき球の中心角で表してある。図には大円を青線で示した。具体的には弧  $EP$ 、 $EP'$ 、 $PP'$ 、 $PS''$  が大円である。

### 7.3.2 Dec 軸のズレ $\Delta\delta_{rd}$

赤緯のズレとは、 $\Delta\delta_{rd} \equiv \delta' - \delta$  である。球面三角形  $\triangle PP'S''$  について

$$\cos(90^\circ - \delta) = \cos d \cos(90^\circ - \delta')$$

計算して

$$\sin \delta' = \frac{1}{\cos d} \sin \delta \tag{7.6}$$

よって赤緯軸のズレ  $\Delta\delta_{rd}$  は

$$\Delta\delta_{rd} = \arcsin \left( \frac{\sin \delta}{\cos d} \right) - \delta \tag{7.7}$$

ここで  $d$  が微小であるとする  $\Delta\delta_{rd} \sim 0$  となり、Dec 方向のズレはほとんど無い。

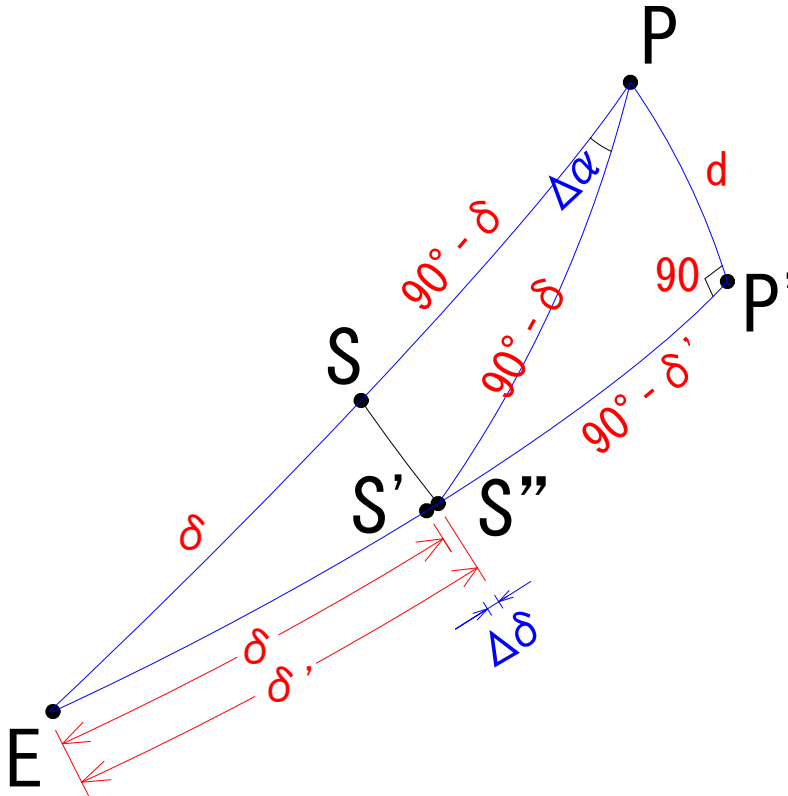


図 7.9 RA 軸と Dec 軸の直交誤差による導入誤差 (拡大図)

7.3.3 RA 方向のズレ  $\Delta\alpha_{rd} \cos \delta$ 

CCD 上に写る RA 方向のズレとは図 7.9 の  $S$  の同赤緯線 (小円) 上の弧  $S''S$  である。しかし  $S''S$  は小円であるので直接求めることはできない。そこで  $S''S = \Delta\alpha_{rd} \cos \delta$  の代わりにまず球面三角形  $\triangle EPS''$  の  $\angle EPS'' = \Delta\alpha_{rd}$  を求める。

球面三角形  $\triangle EPS''$  について

$$\cos \delta' = \cos(90^\circ - \delta) \cos 90^\circ + \sin(90^\circ - \delta) \sin 90^\circ \cos \Delta\alpha_{rd}$$

計算して

$$\begin{aligned} \cos \Delta\alpha_{rd} &= \frac{\cos \delta'}{\cos \delta} \\ &= \frac{1}{\cos \delta} \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \delta}{\cos d}\right)^2} \end{aligned}$$

よって赤経軸のズレ  $\Delta\alpha_{rd}$  は

$$\Delta\alpha_{rd} = \frac{\delta}{|\delta|} \frac{d}{|d|} \arccos \left\{ \frac{1}{\cos \delta} \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \delta}{\cos d}\right)^2} \right\} \quad (7.8)$$

ただし赤経軸のズレの方向を表す為  $\delta/|\delta|$ 、 $d/|d|$  を書き加えた。なお  $\sqrt{\quad}$  内は  $90^\circ \leq \delta' \leq 90^\circ$  より常に正となる。

式 (7.8) は厳密な解である。これを数値的に近似すると

$$\Delta\alpha_{rd} \simeq d \tan \delta \quad (7.9)$$

と書ける。

最終的に弧  $S''S$  の長さ、つまり CCD 上に写る = 観測される RA 方向のエラーは

$$\Delta\alpha_{rd} \cos \delta \simeq d \sin \delta \quad (7.10)$$

となる。

### 7.3.4 RA 軸と Dec 軸の直交誤差の向きと大きさ

RA 軸と Dec 軸の直交誤差を  $d = 1'$  とし、赤緯  $\delta = 0^\circ$  でアライメントしたと仮定して天体の赤緯値ごとの  $\Delta\alpha_{rd} \cos \delta$ 、 $\Delta_{rd}\delta$  を図 7.10 に示す。Dec 軸方向にはほとんど直交誤差による導入誤差は生じないが、RA 軸方向は赤緯値に応じてその大きさと向きが単調に変化することがわかる。

なお導入誤差の最大値は RA 軸と Dec 軸の直交誤差  $d$  に等しい。

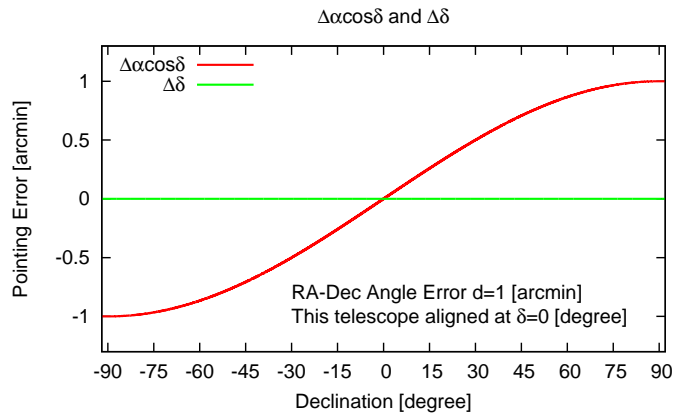


図 7.10 RA 軸と Dec 軸の直交誤差による導入誤差。横軸は天体の赤緯値、縦軸は導入誤差を表す。

## 7.4 Dec 軸と光軸の直交誤差

天体の位置を表す座標系である (赤経, 赤緯) は球座標系であり 2 つの軸は直交している。しかしながら赤道儀は工業製品である為赤緯軸と光軸は必ずしも直交しているとは限らない。また南極 40cm 赤外線望遠鏡の場合は主鏡を動かして光軸調整をする構造の為、光軸調整を行うと必然的に赤緯軸との直交が崩れる。

図 7.11 に赤緯軸と光軸が直交していない場合の概略を示す。

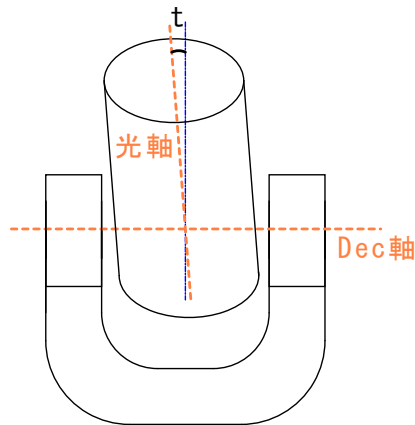


図 7.11 望遠鏡が向いている方向から見てフォーク西側が左手側になるように望遠鏡を向けた時 Dec 軸と光軸に反時計回り正の方向に直交誤差  $t$  がある場合。

7.4.1 モデル化

図 7.12 はモデル化の概要である。望遠鏡は天の赤道上の点  $A$  を向いているとする。

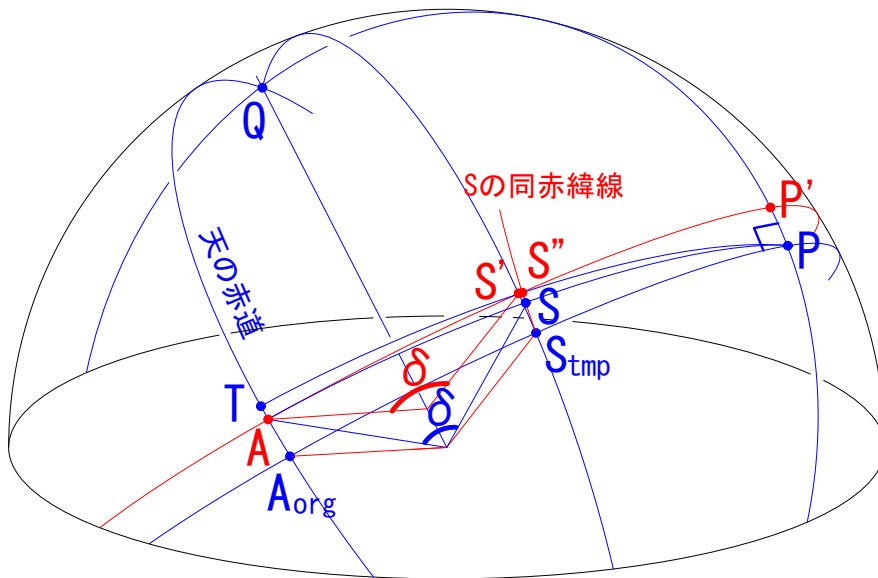


図 7.12 Dec 軸と光軸の直交誤差による導入誤差

ここで図 7.11 のように望遠鏡が向いている方向から見てフォーク西側が左手側になるように望遠鏡を向けたとき、Dec 軸と光軸に反時計回り正の方向に直交誤差  $t$  があると考え。すると Dec 軸を回転させて北天に望遠鏡を向けようとしても直交誤差の影響から望遠鏡は点  $P$ (天の北極) を向かず点  $P'$  を向くことになる。その为天体の座標 (赤経, 赤

緯)を入力しても望遠鏡は天体の方向に向かず、結果導入ができない。

なおこの誤差は「Dec 軸の回転に伴って光軸の指す天球上の軌跡が、本来は大円であるはずが小円となる」事に起因して生じる。

ここで図 7.12 より、望遠鏡は天の赤道上の任意の点  $A(H_A, 0)$  で望遠鏡の座標と天体の座標を一致させたとする。(この作業を「アライメント」と呼ぶ。) 次に点  $S(H_A, \delta)$  にある天体を導入することを考える。望遠鏡は点  $A$  を向いているので、Dec 軸を  $\delta$  だけ回転させれば導入は完了するはずである。しかし実際は Dec 軸と光軸に直交誤差  $t$  があるので望遠鏡は点  $S'(H_A - \Delta\alpha_{do}, \delta')$  を向く。望遠鏡を点  $S(H_A, \delta)$  に向ける為には点  $S'$  から  $\Delta\delta_{do} = \delta - \delta'$  だけ (北に) Dec 軸を回転させて点  $S$  と同じ赤緯上の点  $S''$  に向け、さらに RA 方向のズレ  $\Delta\alpha_{do}$  だけ (東に) 回転させなければならない。なお CCD の視野上に写る RA 方向のズレは  $\Delta\alpha_{do} \cos \delta$  である。

以下、実際に RA、Dec のズレ量を求める。

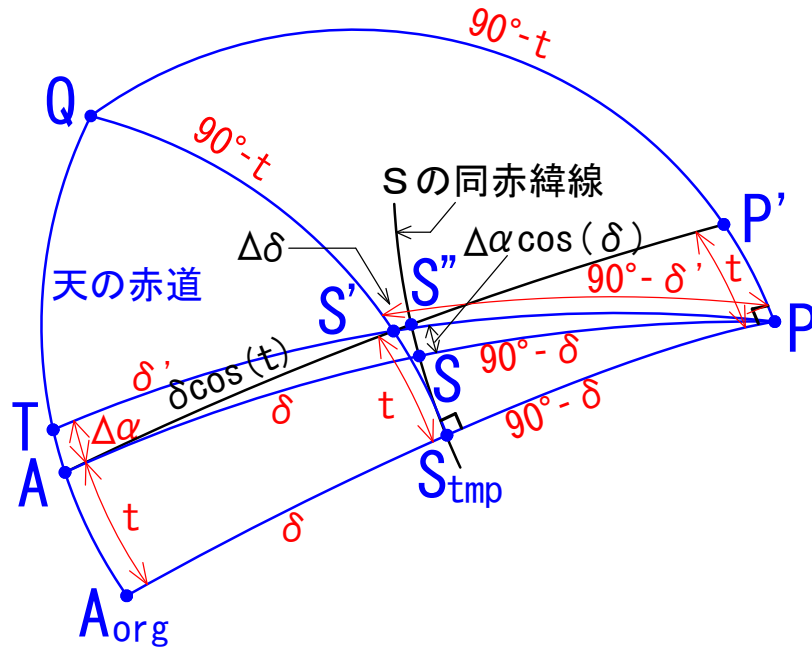


図 7.13 Dec 軸と光軸の直交誤差による導入誤差 (拡大図)

図 7.12 を拡大したものが図 7.13 である。大円を青線で示し、その長さ赤色で、球面三角法の概念に基づき球の中心角で表した。黒線は小円で、その長さ (半径 1 の単位球の表面に張った弧の長さ) も黒色で表した。

点  $Q$  は天の赤道上にあって、点  $A_{org}$  から  $90^\circ$  西にある点で、点  $S_{tmp}$  は点  $Q$ 、点  $S'$  を通る大円と点  $A_{org}$ 、点  $P$  を通る大円の交点と定義する。

よって  $QA_{org} = QS_{tmp} = QP = 90^\circ$ 、  
 $\angle QTS' = \angle QAS = \angle QA_{org}P = \angle A_{org}PQ = \angle PQA_{org} = \angle S'S_{tmp}P = 90^\circ$  である。



7.4.2 Dec 方向のズレ  $\Delta\delta_{do}$ 

Dec 方向のズレとは  $\Delta\delta_{do} \equiv \delta - \delta'$  である。球面三角形  $\triangle PS'S_{tmp}$  について

$$\cos(90^\circ - \delta') = \cos(90^\circ - \delta) \cos t$$

計算して

$$\sin \delta' = \sin \delta \cos t$$

よって Dec 方向のズレ  $\Delta\delta_{do}$  は

$$\Delta\delta_{do} = \delta - \arcsin(\sin \delta \cos t) \quad (7.11)$$

となる。

ここで  $t$  が微小であるとする、 $\Delta\delta_{do} \sim 0$  となり、Dec 方向のズレはほとんど無い。

7.4.3 RA 方向のズレ  $\Delta\alpha_{do} \cos \delta$ 

CCD 上に写る RA 方向のズレとは図 7.13 の S の同赤緯線 (小円) 上の弧  $S''S$  である。しかし  $S''S$  は小円であるので直接求めることはできない。そこで  $S''S = \Delta\alpha_{do} \cos \delta$  の代わりにまず  $TA = \Delta\alpha_{do}$  を求める。

球面三角形  $\triangle QPS'$  について、

$$\cos(90^\circ - t) = \cos 90^\circ \cos(90^\circ - \delta') + \sin 90^\circ \sin(90^\circ - \delta') \cos(\angle QPS')$$

計算して

$$\cos(\angle QPS') = \frac{\sin t}{\cos \delta'}$$

ところで図 7.13 より  $\angle QPS' = QT$  である。よって

$$TA = 90^\circ - QT - AA_{org}$$

計算して

$$\Delta\alpha_{do} = 90^\circ - t - \arccos\left(\frac{\sin t}{\cos \delta'}\right) \quad (7.12)$$

ここに式 (7.6) で求めた  $\sin \delta'$  から  $\cos \delta'$  を計算して式 (7.12) を計算すると RA 軸方向のエラーが求まる。

なおここまでは厳密な解であるが近似的にもう少し計算できる。前小節の結果  $\Delta\delta_{do} \sim 0$  という近似を用いると式 (7.12) は

$$\cos(90^\circ - \Delta\alpha_{do} - t) = \frac{\sin t}{\cos \delta}$$

計算して

$$\sin(\Delta\alpha_{do} + t) = \frac{\sin t}{\cos \delta}$$

ここで  $\Delta\alpha_{do} \ll 1$ 、 $t \ll 1$  であるとする  $\sin(\Delta\alpha_{do} + t) \sim \Delta\alpha_{do} + t$ 、 $\sin t \sim t$  と近似できるので、

$$\Delta\alpha_{do} + t = \frac{t}{\cos \delta}$$

よって RA 方向のズレ  $\Delta\alpha_{do}$  は

$$\Delta\alpha_{do} \simeq \left(1 - \frac{1}{\cos \delta}\right) \times t \quad (7.13)$$

ただし赤経軸のズレの方向を表す為、符号  $-$  を書き加えた。

最終的に弧  $S''S$  の長さ、つまり CCD 上に写る = 観測される RA 方向のエラーは

$$\Delta\alpha_{do} \cos \delta \simeq -(1 - \cos \delta) \times t \quad (7.14)$$

となる。

#### 7.4.4 Dec 軸と光軸の直交誤差の向きと大きさ

Dec 軸と光軸の直交誤差を  $t = 1'$  とし、赤緯  $\delta = 0^\circ$  でアライメントしたと仮定して天体の赤緯  $\delta$  ごとの  $\Delta\alpha_{do} \cos \delta$ 、 $\Delta_{do}\delta$  を図 7.14 に示す。Dec 軸方向にはほとんど直交誤差による導入誤差は生じないが、RA 軸方向は赤緯値に応じて大きさが変化するが向きは常に一定であることが判る。

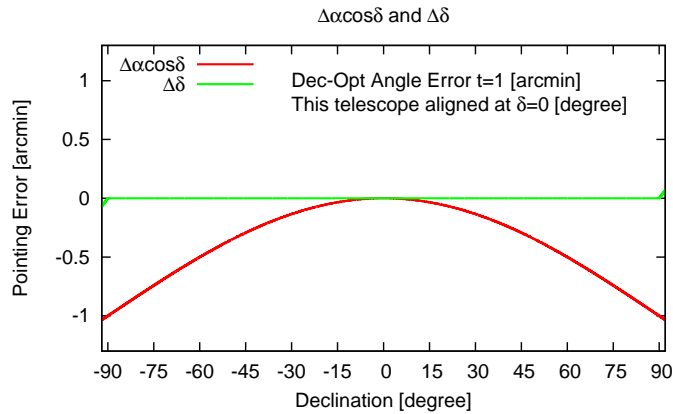


図 7.14 Dec 軸と光軸の直交誤差による導入誤差。横軸が天体の赤緯を表し縦軸が導入誤差量を表す。

## 7.5 ピリオディックモーションによる測定誤差

ピリオディックモーションとは望遠鏡を駆動するウォームネジの偏芯によって発生する RA 軸の周期的な回転のむらの事である。第 6 章 式 (6.15) によるとピリオディックモーションは

$$P_{RA}(t) = P_0'' \times \left\{ \sin \left( \frac{2\pi}{3.98907} t + \phi \right) - \sin \phi \right\} [\text{arcsec}/\text{min}]$$

であった。

よってピリオディックモーションによる天体の位置測定誤差は

$$\Delta\alpha_{pm} \leq |P_0| \quad (7.15)$$

程度あると言える。

なおピリオディックモーションは RA 軸の偏芯によるものなので Dec 軸方向にその誤差は生じない。

## 7.6 バックラッシュによる測定誤差

南極 40cm 赤外線望遠鏡にはいわゆる「ガタ」が存在し望遠鏡のコントローラーを押したときに数秒間反応しない現象がある。これにはソフトウェアとハードウェア双方に問題が考えられるが、ハードウェアの問題と考えた場合「バックラッシュ」と呼ばれるギヤの遊びが原因ととらえることができる。

バックラッシュとは歯車などの機械要素で運動方向に意図して設けられた隙間の事でこの隙間によって歯車は回転することができる。しかしある方向に回転していたものを逆方向に回転させた場合このバックラッシュの分だけ回転が伝達しない。

図 7.15 はバックラッシュの模式図である (KHK 総合カタログ [9])。

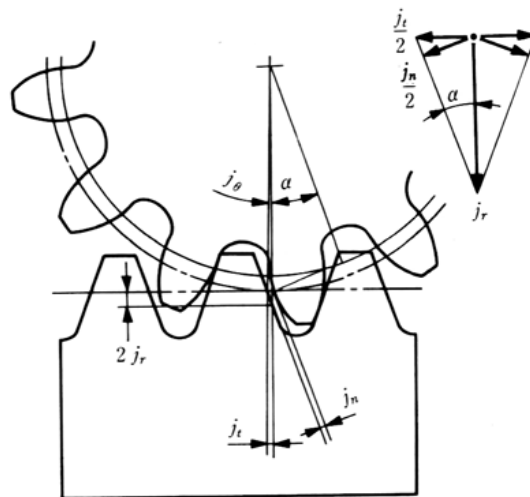


図 4.1 バックラッシュの種類と方向

図 7.15 バックラッシュの模式図 (KHK 総合カタログ [9])

ギヤとギヤの隙間を調整することでバックラッシュ量は変化する。しかしギヤは所定のバックラッシュを与えた上で設計製造されている為、むやみにギヤの調整を行いバックラッシュを減らそうとするのは間違いである。

ここで  $B_{RA}$  を RA 軸方向のバックラッシュ量を  $B_{RA} \pm \Delta B_{RA}$ 、Dec 方向のそれを

$B_{Dec} \pm \Delta B_{Dec}$  とするとバックラッシュによる天体の位置測定誤差は

$$\Delta\alpha_{bl} \leq |B_{RA} \pm \Delta B_{RA}| \quad (7.16)$$

$$\Delta\delta_{bl} \leq |B_{Dec} \pm \Delta B_{Dec}| \quad (7.17)$$

程度あると言える。

## 7.7 導入誤差の見積もり

前章までで設置誤差・大気差・ピリオディックモーション・バックラッシュ・RA 軸と Dec 軸の直交誤差・Dec 軸と光軸の直交誤差を定量的に見積もった。よって任意の天体 (時角, 赤緯) =  $(H, \delta)$  で観測される導入誤差はこれらの足し合わせで表すことができる。

### 7.7.1 (時角, 赤緯) = $(H_p + 90^\circ, 0)$ でアライメントした場合の導入誤差

(時角, 赤緯) =  $(H_p + 90^\circ, 0)$  でアライメントした場合の導入誤差は単純に足し合わせで表すことができる。

式 (7.3)、(7.4)、(7.10)、(7.14)、(7.15)、(7.16) より、CCD 上に写る=観測される赤経方向の導入誤差  $\Delta\alpha \cos \delta$  は

$$\begin{aligned} \Delta\alpha \cos \delta &\equiv \Delta\alpha_{set} \cos \delta + \Delta\alpha_{atm} + \Delta\alpha_{rd} \cos \delta + \Delta\alpha_{do} \cos \delta \pm (\Delta\alpha_{pm} + \Delta\alpha_{bl}) \cos \delta \\ &\simeq \epsilon_p \sin(H - H_p) \sin \delta - R_0 \left( \frac{\sin H \cos L}{\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H} + \frac{1}{\tan H_p} \right) \\ &\quad + d \sin \delta - t(1 - \cos \delta) \pm (|P_0| + |B_{RA} \pm \Delta B_{RA}|) \cos \delta \end{aligned} \quad (7.18)$$

赤緯方向の導入誤差  $\Delta\delta$  は式 (7.1)、(7.5)、(7.7)、(7.11)、(7.17) より

$$\begin{aligned} \Delta\delta &\equiv \Delta\delta_{set} + \Delta\delta_{atm} + \Delta\delta_{rd} + \Delta\delta_{do} \pm \Delta\delta_{bl} \\ &\simeq \epsilon_p \cos(H - H_p) + R_0 \left( \frac{\sin L}{\sin \delta \cos \delta \sin L + \cos^2 \delta \cos L \cos H} - \tan \delta + \frac{\tan L}{\sin H_p} \right) \\ &\quad \pm |B_{Dec} \pm \Delta B_{Dec}| \end{aligned} \quad (7.19)$$

となる。

### 7.7.2 任意の天体でアライメントした場合の導入誤差

実際の観測では (時角, 赤緯) =  $(H_p + 90^\circ, 0)$  でアライメントをすることは不可能である。そこで任意の天体  $A(H_A, \delta_A)$  でアライメントし、次に任意の天体  $B(H_B, \delta_B)$  を導入したときに生じる導入誤差を考える。

図 7.16 は RA 軸と Dec の直交誤差  $d$  のみある場合に任意の天体でアライメントした場合の導入誤差を示した模式図である。図 7.16 のように、まずある天体 A でアライメント

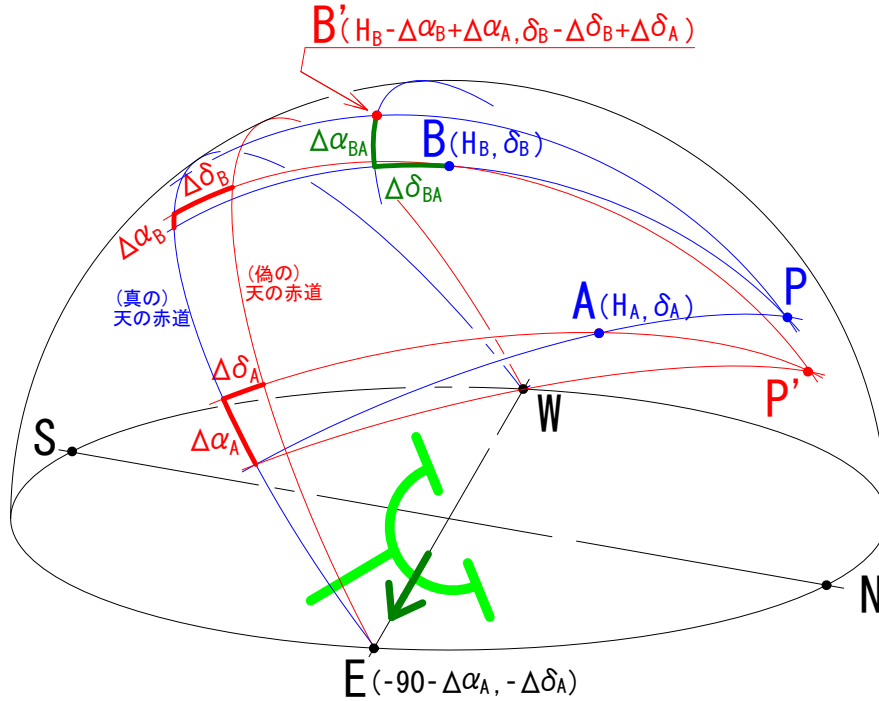


図 7.16 天体 A でアライメントし天体 B を向けた際の導入誤差

し次に他の天体 B を向けたとすると望遠鏡は  $(\alpha_B + \Delta\alpha_B - \Delta\alpha_A, \delta_B + \Delta\delta_B - \Delta\delta_A)$  を向くことになる。

同様に設置誤差、Dec 軸と光軸の直交誤差、大気差、ピリオディックモーション、バッククラッシュがある場合に任意の天体でアライメントした場合に CCD 上に写る赤経方向の導入誤差は

$$\begin{aligned}
 \Delta\alpha_{obs} &\equiv (\Delta\alpha_B - \Delta\alpha_A) \cos \delta_B \\
 &\simeq \left\{ \epsilon_p \{ \sin(H_B - H_p) \tan \delta_B - \sin(H_A - H_p) \tan \delta_A \} + d (\tan \delta_B - \tan \delta_A) \right. \\
 &\quad \left. - t \left( \frac{1}{\cos \delta_B} - \frac{1}{\cos \delta_A} \right) \right\} \cos \delta_B \\
 &\quad - R_0 \left( \frac{\sin H_B \cos L}{\sin \delta_B \sin L + \cos \delta_B \cos L \cos H_B} - \frac{\sin H_A \cos L}{\sin \delta_A \sin L + \cos \delta_A \cos L \cos H_A} \right) \\
 &\quad \pm (|P_0| + |B_{RA} \pm \Delta B_{RA}|) (\cos \delta_A + \cos \delta_B)
 \end{aligned} \tag{7.20}$$

赤緯方向の導入誤差は

$$\begin{aligned}
 \Delta\delta_{obs} &\equiv \Delta\delta_B - \Delta\delta_A \\
 &\simeq \epsilon_p \{ \cos(H_B - H_p) - \cos(H_A - H_p) \} \\
 &+ R_0 \left\{ \frac{\sin L}{\sin \delta_B \cos \delta_B \sin L + \cos^2 \delta_B \cos L \cos H_B} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\sin L}{\sin \delta_A \cos \delta_A \sin L + \cos^2 \delta_A \cos L \cos H_A} - (\tan \delta_B - \tan \delta_A) \right\} \\
 &\pm 2|B_{Dec} \pm \Delta B_{Dec}|
 \end{aligned} \tag{7.21}$$

なおピリオディックモーションとバックラッシュによる位置測定誤差はアライメントした天体 A でも生じる為これらによって生じる誤差は式 (7.20) の形となる。但し

|                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| $(H_A, \delta_A)$            | アライメントする天体の座標 (時角, 赤緯)  |
| $(H_B, \delta_B)$            | 追尾誤差を測定する天体の座標 (時角, 赤緯) |
| $L$                          | 観測地の緯度                  |
| $H_p$                        | 設置誤差の時角                 |
| $\epsilon_p$                 | 設置誤差の大きさ                |
| $d$                          | RA 軸と Dec 軸の直交誤差        |
| $t$                          | Dec 軸と光軸の直交誤差           |
| $R_0$                        | 大気差定数                   |
| $P_0$                        | ピリオディックモーション (RA 軸) の振幅 |
| $B_{RA} \pm \Delta B_{RA}$   | RA バックラッシュ量             |
| $B_{Dec} \pm \Delta B_{Dec}$ | Dec バックラッシュ量            |

である。

## 7.8 望遠鏡の調整箇所と調整量

望遠鏡の各所調整ネジを調整して設置誤差  $\epsilon_p$ 、 $H_p$ 、直交誤差  $d$ 、 $t$  をできる限り小さく  
なるよう調整する。表 7.1 に各量の調整箇所と調整ネジ 1 回転の調整量を示す。

| 調整量                   | 調整箇所          | 距離 [mm] | ネジ (ピッチ)   | ネジ 1 回転 |
|-----------------------|---------------|---------|------------|---------|
| $\epsilon_p \sin H_p$ | 極軸プレート (左右)   | 425     | M12 (1.75) | 14'.2   |
| $\epsilon_p \cos H_p$ | 極軸プレート (上下)   | 690     | M12 (1.75) | 8'.72   |
| $d$                   | フォークと Dec の隙間 | 808     | — (1.0)    | 4'.25   |
| $t$                   | 主鏡調整ネジ        | 187.5   | M4 (0.7)   | 12'.8   |

表 7.1 調整箇所と調整量

なお RA 軸と Dec 軸の直交誤差は調整ネジではなく、フォークユニットと Dec 軸ユニットの隙間にシムを入れることで調整する。表 7.1 では 1mm のシムを挿入した場合の移動量を示した。

## 7.9 バックラッシュの測定観測

これまでの計算で求めた導入誤差を南極 40cm 赤外線望遠鏡に適用し観測でその量を見積もる。

まずバックラッシュの測定観測 2009 年 11 月 3 日に実施した。南極 40cm 赤外線望遠鏡の接眼部に SBIG 社製冷却 CCD カメラ ST-7XME-D を取り付け行った。観測対象星を視野に入れて 15 秒インターバルで 3 秒間の露出を 25 回撮像することを 1 セットとして、赤経方向に +4(もしくは -4)[sec angle]、赤緯方向に 60(もしくは -60)[arcsec] 動かして再度観測し(2 セット目)、さらに望遠鏡を動かして観測(3 セット目)、・・・とこれを繰り返しカメラの視野から天体が外れるまで観測を行った。入力した望遠鏡の移動量と観測した天体の移動量を比較しバックラッシュ量を見積もる。

表 7.2 にバックラッシュ測定観測での観測装置の各種パラメーターを示す。

| 望遠鏡     | 南極 40cm 赤外線望遠鏡             |
|---------|----------------------------|
| 口径      | 400 [mm]                   |
| 焦点距離    | 4800 [mm]                  |
| カメラ     | ST-7XME-D                  |
| ピクセルサイズ | 9 [ $\mu\text{m}$ ]        |
| 冷却温度    | -30 [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
| フィルター   | V                          |
| 露出時間    | 3 [sec]                    |
| 露出間隔    | 15 [sec]                   |

表 7.2 観測装置の各種パラメーター

また観測した恒星の詳細を表 7.3 に示す。

| 観測天体        | V-Mag. | Seeing | RA  | $\delta$    | $H_0[\text{rad}]$ |
|-------------|--------|--------|---|-------------|-------------------|
| $\eta$ -Ari | 5.23   | 2''.9  | 02 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 23.4 <sup>s</sup> | +21°15'38'' | -0.196            |
| $\eta$ -Ari | 5.23   | 2''.5  | 02 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 23.4 <sup>s</sup> | +21°15'38'' | -0.0310           |
| SAO75203    | 5.96   | 2''.4  | 02 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 13.3 <sup>s</sup> | +24°13'03'' | 0.152             |
| SAO132270   | 5.92   | 3''.9  | 05 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup> 53.8 <sup>s</sup> | -05°24'25'' | 0.240             |

表 7.3 2009 年 10 月 3 日の観測対象星

さらにバックラッシュの測定観測とは別にピクセルサイズの測定・カメラの取付角度 (CCD チップの  $xy$  軸と時角 HA・Dec 方向の角度) を測定する為、前者は離角の判っている二重星を、後者は明るい恒星を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止してそれぞれ求めて観測データの補正に用いた。

### 7.9.1 データ解析

天体の位置測定は IRAF の imexamine コマンドを用いた。天体の CCD 上での位置を測定し、後述のカメラの取付角度・ピクセルサイズを補正してさらに横軸を時角方向 (+ が西、-が東)、縦軸を赤緯 (+ が北、-が南) となるように変換した。

またカメラの取付角度、すなわち CCD チップの  $y$  軸と時角方向のなす角度を恒星 ( $\kappa$ -Ari、5.03 等) を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止することで求めた。解析は ds9 に撮影した画像を表示させ、 $x$  軸方向 50[ $\text{pixel}$ ] 毎に位置を記録してそれらを直線でフィッティングし傾きを求めた。

図 7.17 は測定したカメラの取付角度の解析結果である。

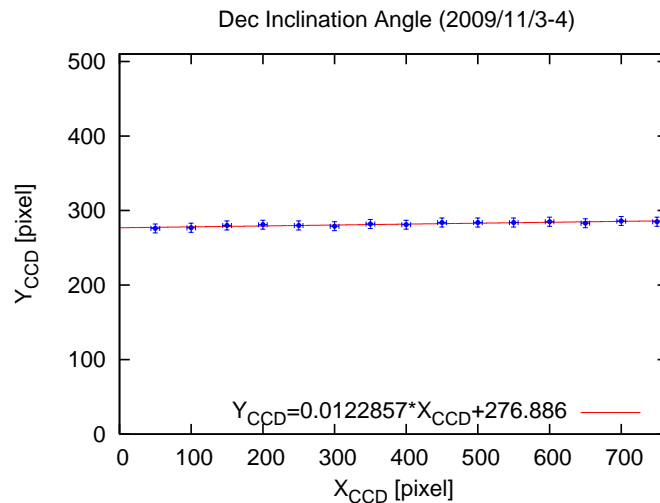


図 7.17 取付角度の解析結果。横軸・縦軸共に CCD の座標を表す。

この結果から CCD チップの  $x$  軸と時角方向のなす角は  $0.0123[\text{rad}]$  であることが判った。

さらにピクセルサイズの測定は  $\theta 1$ -Ori、 $\theta 2$ -Ori の離角から求めた。この天体の離角は  $135.07[\text{arcsec}]$  であることが判っている。そこで 2 つの天体の CCD のチップ上の位置を測定し、位置の差からピクセルサイズを求める。

シーイングの影響を除く為に 50 フレームについて位置の測定を行った。結果を以下に



示す。誤差は  $1\sigma$ 。

$$\text{Pixel Size} = 0.399 \pm 0.001 \text{ [arcsec/pixel]}$$

### 7.9.2 理論曲線とのフィッティング

まずバックラッシュ測定観測で得られた CCD 上での天体の位置を図 7.18 に示す。望遠鏡を動かし露出を繰り返した為天体はとびとびの位置に写っている。また天体の位置が一定で無いのはピリオディックモーションによる追尾誤差によるものである。

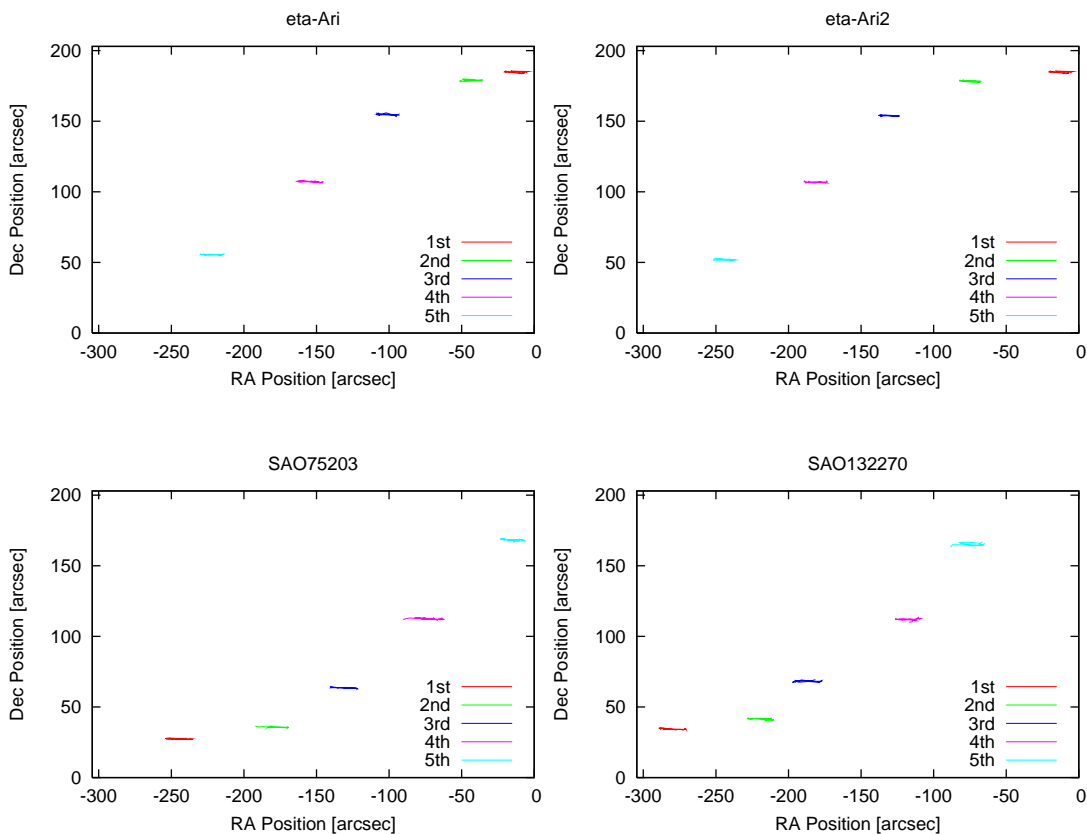
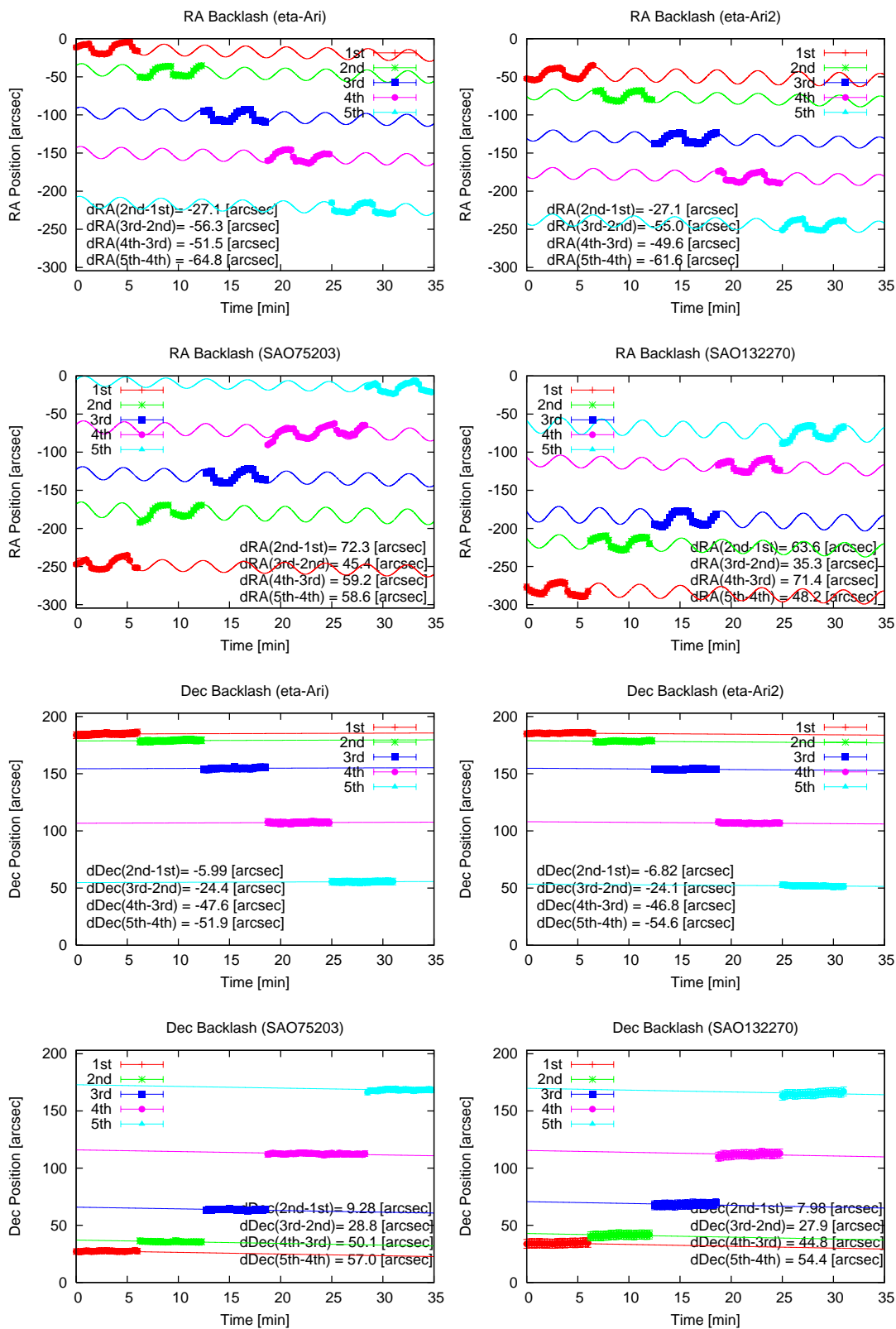


図 7.18 バックラッシュ測定観測で得られた天体の位置。望遠鏡を動かし露出を繰り返した為天体はとびとびの位置に写っている。横軸が RA 方向で縦軸が Dec 方向。天体の位置が一定で無いのはピリオディックモーションによる追尾誤差によるものである。

ここで第 6 章 式 (6.18)、式 (6.19) を理論曲線として観測結果をフィッティングさせて天体の位置を正しく見積もる。設置誤差は  $\epsilon_p = 146 \pm 22$  [arcsec]、 $H_p = -0.122 \pm 0.096$  [radian] として計算し、観測結果に合うようピリオディックモーションの振幅をフィッティングしたものが次頁にあげた図である。



なお上 4 枚の図は観測天体の RA の相対位置、下 4 枚の図は Dec の相対位置を横軸を  
観測開始時刻からの経過時間として表したものである。また図中の 1st、2nd、・・・5th

は1セット~5セット目を表す。

### 7.9.3 観測結果

RA 方向の測定結果を表 7.4 に、Dec 方向の測定結果を表 7.5 にそれぞれ示す。なおこれらの表では観測結果から予定移動量をさし引いた値を表した。すなわちその値が 0 [arcsec] であれば望遠鏡は指示した通りの方向に向いた事を意味し、+ であれば移動量が大きすぎ、- であれば移動量が小さすぎることを意味する。予定移動量は RA の場合  $\pm 4[\text{sec angle}] = \pm 60 \times \cos \delta[\text{arcsec}]$ 、Dec の場合 60[arcsec] である。

|         | $\eta$ -Ari |       | $\eta$ -Ari |       | SAO75203 |       | SAO132270 |       |
|---------|-------------|-------|-------------|-------|----------|-------|-----------|-------|
|         | SE          | NW(1) | SE          | NW(2) | NW       | SE(1) | NW        | SE(2) |
| 2nd-1st | -28.8       |       | -28.8       |       |          | 17.6  |           | 3.9   |
| 3rd-2nd | 0.4         |       | -0.9        |       |          | -9.3  |           | -24.4 |
| 4th-3rd | -4.4        |       | -6.3        |       |          | 4.5   |           | 11.7  |
| 5th-4th | 8.9         |       | 5.7         |       |          | 3.9   |           | -11.5 |

表 7.4 RA 方向の観測結果。単位は arcsec。+ であれば移動量が大きすぎ、- であれば移動量が小さすぎることを意味する。

|         | $\eta$ -Ari |       | $\eta$ -Ari |       | SAO75203 |       | SAO132270 |       |
|---------|-------------|-------|-------------|-------|----------|-------|-----------|-------|
|         | SE          | NW(1) | SE          | NW(2) | NW       | SE(1) | NW        | SE(2) |
| 2nd-1st | -54.0       |       | -53.2       |       |          | -50.7 |           | -52.0 |
| 3rd-2nd | -35.6       |       | -35.9       |       |          | -31.2 |           | -32.1 |
| 4th-3rd | -12.4       |       | -13.2       |       |          | -9.9  |           | -15.2 |
| 5th-4th | -8.1        |       | -5.4        |       |          | -3.0  |           | -5.6  |

表 7.5 Dec 方向の観測結果。単位は arcsec。+ であれば移動量が大きすぎ、- であれば移動量が小さすぎることを意味する。

### 7.9.4 考察

まず、RA 方向のバックラッシュ量の平均値は表 7.4 より

$$B_{RA} \pm \Delta B_{RA} = -3.6 \pm 14 [\text{arcsec}] \quad (7.22)$$

であった (誤差は  $1\sigma$ )。また観測結果をヒストグラムにしたものを図 7.19 に示す。

RA 方向について、本来は天体追尾の為ギヤは常に西側で噛み合った状態となりバックラッシュによる天体導入誤差は原理的に生じないはずである。しかし観測によって大きな

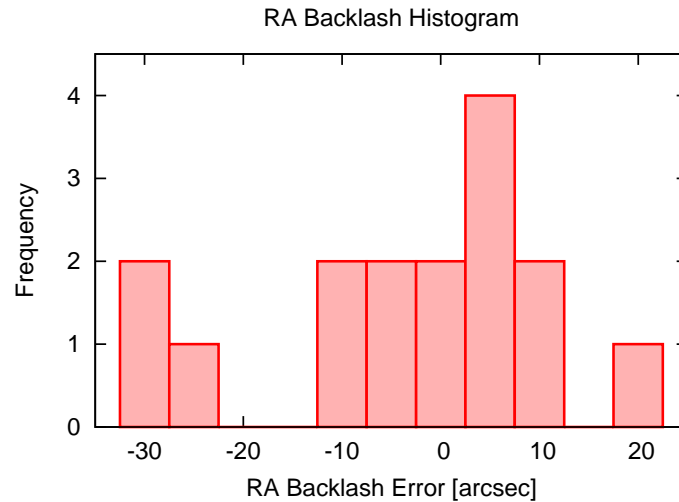


図 7.19 RA 方向のバックラッシュ量の頻度図

ばらつきのある導入誤差があることが示された。

これは RA 方向の導入誤差がプラス・マイナスの値を交互に繰り返していることから、バックラッシュによる導入誤差ではなく当初は考慮していなかった望遠鏡の指向に関するソフトウェアの問題であり、具体的には解像度不足と考えられる。望遠鏡制御ソフトでは天体位置をラジアン単位に変換してデータのやりとりをしているが、この時に桁落ちすることで精度が出ていないものと考えられる。

次に Dec 方向のバックラッシュ量は表 7.4 より、2nd-1st ではほとんど動かず 3rd-2nd でも半分程度しか動いていないことがわかる。このことから Dec バックラッシュ量は 60[arcsec] より大きいと考えられる。よってギヤが噛み合っていない時の Dec 方向のバックラッシュ量は 3rd-1st の値であると言え、その平均値は

$$B_{Dec} \pm \Delta B_{Dec} = -86 \pm 3.8 \text{ [arcsec]} \quad (7.23)$$

であるといえる (誤差  $1\sigma$ )。

観測結果をヒストグラムにしたものを図 7.20 に示す。

図 7.20 で  $-10$ [arcsec] 付近にあるものがギヤが噛み合っている状態で、 $-90$ [arcsec] 付近が噛み合っていない状態である。噛み合った状態でも導入誤差は予定移動量より小さくその分散が大きい。これも原因は望遠鏡の指向に関するソフトウェアの解像度不足であると考えられる。

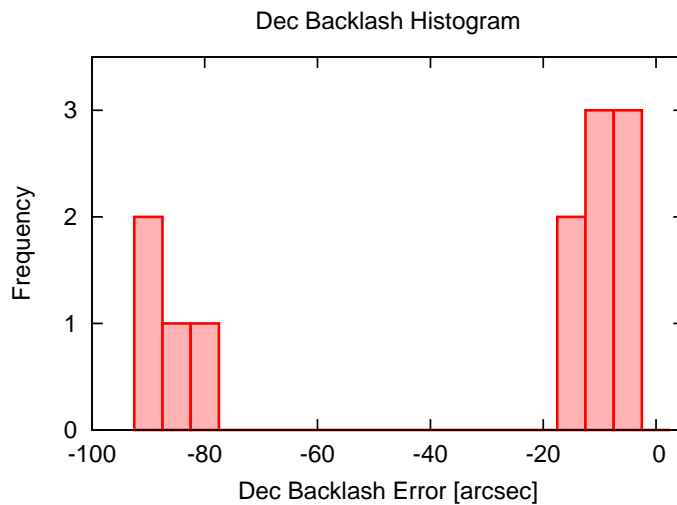


図 7.20 Dec 方向のバックラッシュ量の頻度図

## 7.10 直交誤差の測定観測

直交誤差の測定を行う為 2009 年 12 月 8 日、12 月 10 日の両日に観測を行った。この観測に先立ち、極軸調整を行い設置誤差をほとんど無くした。そこで今回は  $\epsilon_p \sim 0$  と仮定して観測・解析を行った。

観測は南極 40cm 赤外線望遠鏡の接眼部に Apogee 社製冷却 CCD カメラ ALTA U9000 を用いた。まずある天体で望遠鏡のアライメントし、その位置を撮影・記録する。次に望遠鏡を操作し別の天体を導入、その位置を撮影・記録する。これを繰り返して導入される天体の位置を記録し解析することで導入誤差を求める。

表 7.6 に観測装置の各種パラメーターを示す。

| 望遠鏡     | 南極 40cm 赤外線望遠鏡          |
|---------|-------------------------|
| 口径      | 400 [mm]                |
| 焦点距離    | 4800 [mm]               |
| カメラ     | ALTA U9000              |
| ピクセルサイズ | 12 [ $\mu$ m]           |
| 冷却温度    | -20,-30 [ $^{\circ}$ C] |
| フィルター   | なし                      |
| 露出時間    | 1,2,4 [sec]             |

表 7.6 観測装置の各種パラメーター

観測した恒星の詳細を表 7.7、表 7.8 に示す。\*印の天体でアライメントを行った。またこの観測とは別にピクセルサイズの測定・カメラの取付角度 (CCD チップの xy 軸

| 観測天体            | RA  | $\delta$    | HA [rad] | Seeing |
|-----------------|---|-------------|----------|--------|
| $\gamma$ -Gri   | 21 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 32.2 <sup>s</sup> | -37°19'10'' | 0.178    | 12''   |
| $\alpha$ -PsA   | 22 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 12.6 <sup>s</sup> | -29°34'12'' | 0.117    | 7.5''  |
| 88-Aqu          | 23 <sup>h</sup> 09 <sup>m</sup> 59.5 <sup>s</sup> | -21°07'07'' | 0.179    | 7.2''  |
| $\lambda$ -Aqu  | 22 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup> 08.8 <sup>s</sup> | -07°31'32'' | 0.370    | 6.4''  |
| $\alpha$ -Aqu * | 22 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup> 18.2 <sup>s</sup> | -00°16'11'' | 0.234    | 7.6''  |
| $\epsilon$ -Peg | 21 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 40.8 <sup>s</sup> | +09°55'24'' | 0.343    | 8.6''  |
| $\iota$ -Peg    | 22 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup> 28.6 <sup>s</sup> | +25°23'52'' | 0.257    | 5.5''  |
| $\eta$ -Peg     | 22 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> 28.7 <sup>s</sup> | +30°16'41'' | 0.109    | 6.9''  |
| $\alpha$ -And   | 23 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> 23.4 <sup>s</sup> | +42°23'07'' | 0.0376   | 5.1''  |
| $\alpha$ -Lac   | 22 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> 42.2 <sup>s</sup> | +50°20'23'' | 0.181    | 5.0''  |
| $\zeta$ -Cep    | 22 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 11.7 <sup>s</sup> | +58°15'24'' | 0.278    | 6.6''  |
| $\beta$ -Cep    | 21 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 45.0 <sup>s</sup> | +70°36'37'' | 0.474    | 6.0''  |
| $\gamma$ -Cep   | 23 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 46.6 <sup>s</sup> | +77°41'41'' | -0.0854  | 5.4''  |
| SAO3816         | 22 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 14.1 <sup>s</sup> | +84°24'23'' | 0.126    | 4.5''  |

表 7.7 2009 年 12 月 08 日の観測対象星

| 観測天体        | RA  | $\delta$    | HA [rad] | Seeing |
|-------------|---|-------------|----------|--------|
| SAO163107   | 19 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 58.6 <sup>s</sup> | -19°16'01'' | 1.03     | 11''   |
| SAO163245   | 20 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 38.3 <sup>s</sup> | -11°34'15'' | 0.978    | 6.2''  |
| SAO125429 * | 20 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 50.7 <sup>s</sup> | +00°29'02'' | 0.834    | 2.2''  |
| SAO105615   | 20 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup> 57.0 <sup>s</sup> | +16°03'41'' | 0.861    | 3.2''  |
| SAO69562    | 20 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 17.8 <sup>s</sup> | +30°49'20'' | 0.846    | 2.6''  |
| SAO49105    | 20 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> 03.7 <sup>s</sup> | +44°09'01'' | 0.898    | 3.4''  |
| SAO32016    | 19 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> 24.0 <sup>s</sup> | +59°27'05'' | 0.974    | 3.5''  |
| SAO9631     | 20 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup> 13.4 <sup>s</sup> | +73°56'31'' | 0.916    | 2.9''  |
| SAO3332     | 19 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 31.1 <sup>s</sup> | +84°41'59'' | 0.960    | 3.4''  |

表 7.8 2009 年 12 月 10 日の観測対象星

と時角 HA・Dec 方向の角度) を測定する為、前者は離角の判っている二重星を、後者は明るい恒星を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止するといった観測でそれぞれ求めて観測データの補正に用いた。

### 7.10.1 データ解析

まず天体の位置測定は IRAF の imexamine コマンドを用いた。天体の CCD 上での位置を測定し、後述のカメラの取付角度・ピクセルサイズを補正してさらに横軸を時角方向 (+ が西、- が東)、縦軸を赤緯 (+ が北、- が南) となるように変換した。

次にカメラの取付角度、すなわち CCD チップの y 軸と時角方向のなす角度を恒星 (8 日は  $\alpha$ -And、10 日は  $\gamma$ -Reg) を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止することで求めた。解析は ds9 に撮影した画像を表示させ、x 軸方向 50[pixel] 毎に位置を記録してそれらを直線でフィッティングし傾きを求めた。

図 7.21 は 8 日および 10 日に測定したカメラの取付角度の解析結果である。

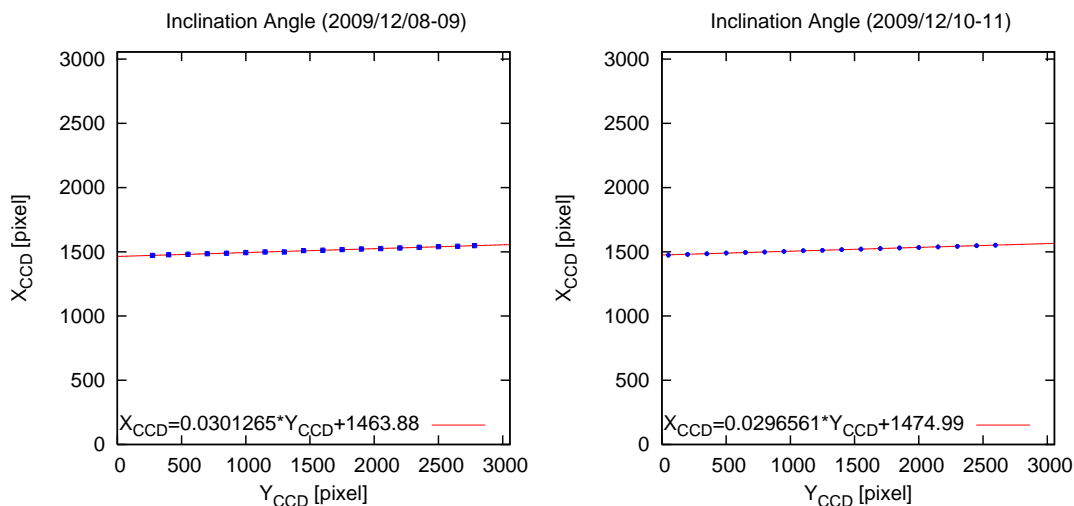


図 7.21 取付角度の測定。(左) 12 月 8 日、(右) 12 月 10 日。横軸・縦軸共に CCD の座標を表す。

この結果から CCD チップの x 軸と時角方向のなす角は 8 日は  $0.0301[\text{rad}]$ 、10 日は  $0.0297[\text{rad}]$  であることが判った。

さらにピクセルサイズの測定は 12 月 7 日に観測した  $\theta 1\text{-Ori}$ 、 $\theta 2\text{-Ori}$  の離角から求めた。この天体の離角は  $135.07[\text{arcsec}]$  であることが判っている。そこで 2 つの天体の CCD のチップ上の位置を測定し、位置の差からピクセルサイズを求める。

シーイングの影響を除く為に 10 フレームについて位置の測定を行った。結果は以下である。誤差は  $1\sigma$ 。

$$\text{Pixel Size} = 0.518 \pm 0.000 [\text{arcsec/pixel}]$$

なおピクセルサイズは本来であれば観測日毎に測定するべきであるが、今回の観測では天候の変化によって 8 日・10 日共にピクセルサイズの測定が行えなかった為、12 月 7 日に行った観測のデータを用いることにした。なおカメラは望遠鏡から取り外していないので焦点距離の変化は気温変化程度でありピクセルサイズの変化は十分無視できる量と考えられる。

### 7.10.2 観測結果と理論曲線とのフィッティング

今回の観測ではほぼ同じ時角  $H$  の天体を赤緯  $\delta$  を変えてその位置を測定したため時角の変化に対する導入誤差のデータが無い。そこで RA 方向の導入エラーのみから直交誤差  $d$ 、 $t$  を求めた。

観測前に実施した極軸調整作業により設置誤差によるエラーは小さく無視できると仮定する。大気差は観測時の天体の時角  $H_A$ 、 $H_B$  と赤緯  $\delta_A$ 、 $\delta_B$ 、観測地の緯度  $L$  で一意に求まる為、あらかじめ差し引く。ピリオディックモーションは第6章から  $4.3 \pm 1.8$ [arcsec]、RA 方向のバックラッシュ量も式 (7.22) より  $-3.6 \pm 14$ [arcsec] と求まっている。よってこれらを差し引いて観測対象天体の赤緯に対する赤経方向の導入エラーを図 7.22 に示す。誤差はピリオディックモーションとバックラッシュの最大値に観測時のシーイングを足したもので評価した。

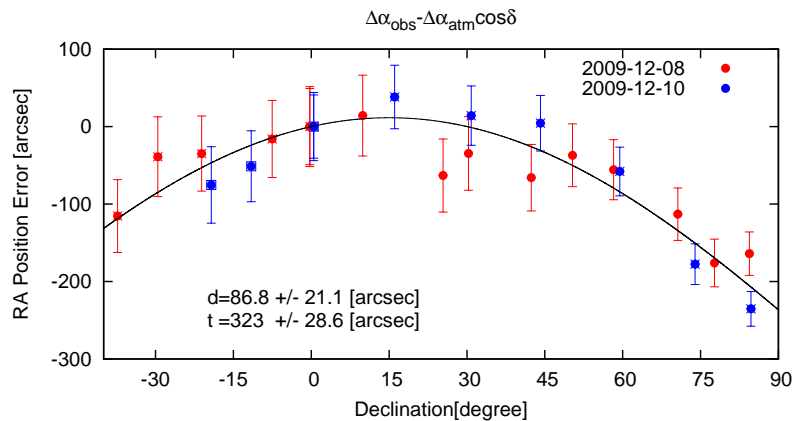


図 7.22 大気差の影響を除いた天体位置の変化

この結果から RA 軸と Dec 軸の直交誤差  $d = 87 \pm 21$ [arcsec]、Dec 軸と光軸の直交誤差  $t = 320 \pm 29$ [arcsec] であると見積もることができる。

### 7.10.3 考察

観測結果はピリオディックモーションやバックラッシュによって誤差が非常に大きいと言えるが赤緯値の違う天体を多数観測したことで良い精度で理論曲線をフィッティングできたと考えられる。

観測結果である  $d = 87 \pm 21$ [arcsec] と言うのは南極 40cm 赤外線望遠鏡の設計の段階で要求した精度「赤経軸と赤緯軸の直交誤差は  $1'$  角以内」という値に極めて近いものであり、このことから今回の測定結果は妥当なものであると考えられる。Dec 軸ユニットとフォークの間にシムを挿入してこの直交誤差は取り除くことができる。

これに対して  $t = 320 \pm 29$ [arcsec] に関しては元々南極 40cm 赤外線望遠鏡には光軸を Dec 軸との直交を考慮した設計はされていなかった為、比較的大きな値となったと考えら



れる。光軸と Dec 軸の直交を崩さずに光軸調整を行うことは事実上不可能であり\*<sup>2</sup>、また光軸は振動で簡単に狂いが生じる為、観測地毎にその調整を行う必要がある。よって今回求めた直交誤差がそのまま南極に輸送した後での直交誤差とはならない。しかし今回得られた 5' という直交誤差を典型的な値とすれば、観測装置の視野  $\phi 30'$  に比べて十分小さく観測に支障が出るとは考えにくい。

よってこれまでの観測を総合すると、南極 40cm 赤外線望遠鏡は RA 軸・Dec 軸・光軸の直交誤差や設置誤差、バックラッシュやピリオディックモーションによる導入誤差が生じていることを確認したが、これらは理論的に予想されるものであった。今回の観測結果から考え得る最大の導入誤差はおよそ 8' というものであった。しかしこれに対して 2010 年度の試験観測で用いる TONIC-II の視野は  $\phi 30'$  あり、十分に視野内に導入可能である。よって南極 40cm 赤外線望遠鏡の導入精度は観測に必要な十分な精度があると結論づけることができる。

---

\*<sup>2</sup> 付録 C 光軸調整方法を参照のこと



## 第 8 章

# 光学系の評価

南極 40cm 赤外線望遠鏡の光学系は IK 技研株式会社によると鏡材は  $\lambda/16$  の精度を有する。これはほぼ理想的な鏡面であると言え、光学系を適切に配置・保持すれば理論的な回折限界に達する性能を有している (吉田正太郎 1988 [24])。しかし実際に観測する時は光軸のズレや鏡にたわみが生じていたり、様々な悪条件で光学性能は低下する。光学性能が悪いと星がシャープに見えずその位置や大きさ、明るさを正確に測定できない。

そこでこの章ではまず光軸ズレによる星像悪化について光学シミュレーションソフトを用いて検証し、次に天体を観測することで実際の星像について評価を行い南極 40cm 赤外線望遠鏡が観測に必要な光学性能を有しているかどうか確かめる。なお光軸調整法については付録 C 光軸調整方法 を参照されたい。

### 8.1 光学シミュレーション

南極 40cm 赤外線望遠鏡は主鏡・副鏡にそれぞれ付けられた調整ネジを回すことでその位置と傾きを調整できるように作られている。しかし南極 40cm 赤外線望遠鏡の場合は光軸調整は作業者の目視で行われ、作業者の経験で追い込める範囲に調整される。その為理論的に完璧な光軸状態は期待できない。そこで光軸が合っていない状態を光学シミュレーションソフトで再現し、それが星像の悪化にどのぐらい影響を及ぼすか評価する。

なおここは南極 40cm 赤外線望遠鏡の「カセグレン光学系のみ」の性能評価を行う。また次節のハルトマンテストでは視野中心における星像を観測的に評価するので、これに対応付ける為光学シミュレーションも視野中心を見ていくことにする。なおカセグレン光学系は周辺視野でコマ収差による星像悪化がみられるが、実際の撮像においては観測装置内の補正レンズによって補正されるので問題ない。但しこれもカセグレン光学系の光軸が合っていることが前提であり、光軸が狂っていると観測装置内で正しく星像を結ばない結果となる。

## 8.1.1 ZEMAX

ZEMAX とは米国 ZEMAX Development Corporation の提供する光学シミュレーションソフトである。このソフトに第 3 章で述べた各種パラメーターを入れ、スポットダイアグラムを描きその大きさから星像を評価する。スポットダイアグラムとは単一物点から光学系を通して多くの光線を追跡し、これらの光線の焦点面上での位置をプロットしたものでレンズの結像性能を評価するものである。

図 8.1 は光軸が完全に合っている時のスポットダイアグラムである。左上から右下にかけて入射視野角  $0'$ 、 $1'$ 、 $2'$ 、 $4'$  でのスポットダイアグラムを示している。なお図中のスケール棒の長さは  $200\mu\text{m}$  である。図 8.1 からは視野周辺部に行くに従い星像が大きくなるのがわかるがこれはカセグレン光学系のコマ収差によるものである。

なお波長  $3\mu\text{m}$  で光線追跡したがカセグレン式は反射系なのでスポットダイアグラムに波長依存性はなく、他波長でも同じ結果が得られる。

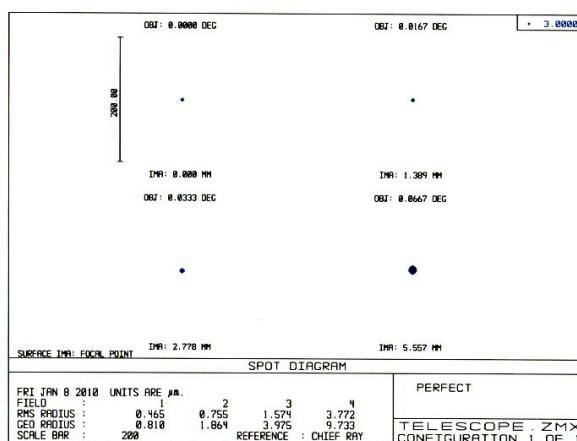


図 8.1 光軸が合っている時のスポットダイアグラム。左上から視野角  $0'$ 、 $1'$ 、 $2'$ 、 $4'$  でスケールは  $200\mu\text{m}$ 。

また表 8.1 に光軸が完全に合っている時のスポットダイアグラムの二乗平均平方根 (Root Mean Square, RMS) 半径  $R_{RMS} ['']$  を示す。

| 視野角 $[']$ | $R_{RMS} ['']$ |
|-----------|----------------|
| 0.0       | 0.0254         |
| 1.0       | 0.0413         |
| 2.0       | 0.0860         |
| 4.0       | 0.206          |

表 8.1 光軸が完全に合っている時の  $R_{RMS} ['']$

図 8.1、表 8.1 より光軸が合っている場合、南極 40cm 赤外線望遠鏡に取り付けた SBIG 社の ST-7XME-D カメラ (ピクセルスケール  $0.4''/\text{pix}$ 、視野  $3.4' \times 5.1'$ ) では視野周辺まで十分に 1 ピクセル内に星が結像することがわかる。よって光軸ズレが無い理想的な光学配置の場合、視野中央では天体からの情報を正しく記録することができる。

### 8.1.2 光軸誤差がある場合のスポットダイアグラム

次に光軸に誤差がある場合のスポットダイアグラムを示す。図 8.2 は主鏡の中心が光軸に対して  $0.5\text{mm}$  ズれている場合、図 8.3 は鏡が光軸に対して  $1\text{arcmin}$  傾いている場合を表し、図 8.4 では副鏡の中心が光軸に対して  $0.5\text{mm}$  ズれている場合、図 8.5 副鏡が光軸に対して  $1\text{arcmin}$  傾いている場合を表す。各図とも、左上から右下にかけて入射視野角  $0'$ 、 $1'$ 、 $2'$ 、 $4'$  でのスポットダイアグラムを表し、スケール棒の長さは  $200\mu\text{m}$  である。

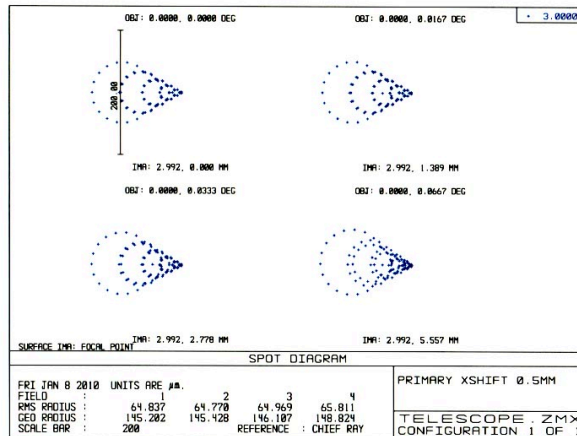


図 8.2 主鏡中心が光軸に対して  $0.5\text{mm}$  ズれている場合のスポットダイアグラム

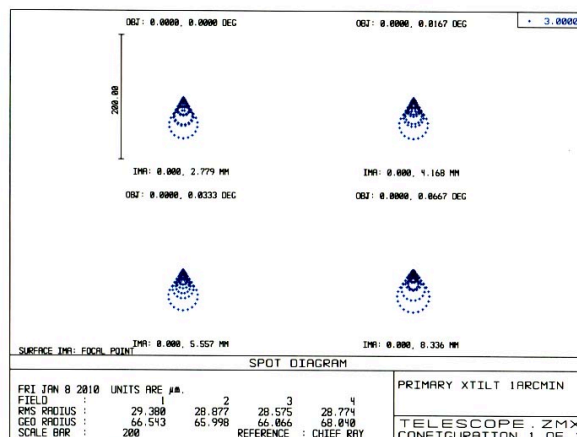


図 8.3 主鏡が光軸に対して  $1\text{arcsec}$  傾いている場合のスポットダイアグラム

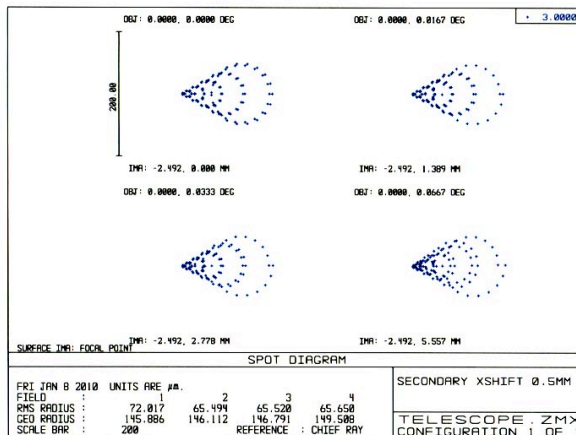


図 8.4 副鏡中心が光軸に対して 0.5mm ずれている場合のスポットダイアグラム

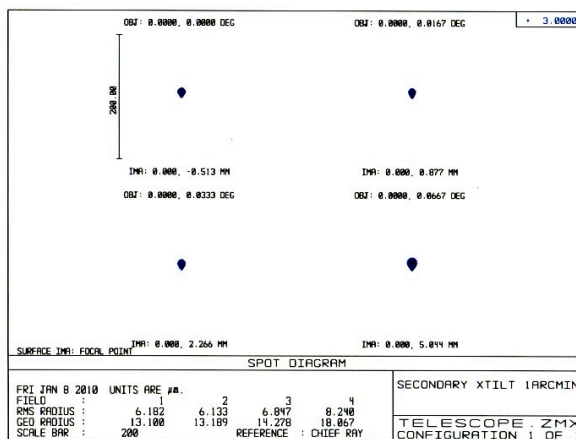


図 8.5 副鏡が光軸に対して 1arcsec 傾いている場合のスポットダイアグラム

これらシミュレーション結果から、光軸に誤差がある場合星像は極めて大きくなる事がわかる。

また表 8.2 に図 8.2 ~ 図 8.5 に示した光軸誤差がある場合の星像の  $R_{RMS} ["]$  を示した。

| 視野角 ['] | 主鏡ズレ 0.5mm | 主鏡傾き 1' | 副鏡ズレ 0.5mm | 副鏡傾き 1' |
|---------|------------|---------|------------|---------|
| 0.0     | 3".54      | 1".61   | 3".93      | 0".338  |
| 1.0     | 3".54      | 1".83   | 3".58      | 0".335  |
| 2.0     | 3".55      | 1".66   | 3".58      | 0".374  |
| 4.0     | 3".60      | 1".74   | 3".59      | 0".450  |

表 8.2 各光軸誤差での星像の RMS 半径。単位は [arcsec]

表 8.2 から、主鏡の傾き誤差による星像悪化は副鏡のそれに比べ 3 倍程度大きい事がわ

かる。これに対して主鏡の位置誤差による星像悪化は副鏡のそれと同程度で傾き誤差による星像悪化に比べて大きいことも見て取れる。

この結果から光軸誤差がある場合、視野中心においても星像は ST-7XME-D の 1 ピクセル以下に結像しないことがわかる。これは天体を観測した時に星がぼやけて写ることを意味する。よって光学シミュレーション結果から、光軸の誤差は深刻に光学性能を悪化させる事がわかった。

## 8.2 ハルトマンテスト

ハルトマンテストは前節の光学シミュレーションソフトで行ったような光線追跡を実験的に実際の天体で行うものであると捉えることができる。具体的には鏡筒の先端に多数の小孔を開けた板 (ハルトマン板) を置き、ピント位置を内側と外側それぞれずらして恒星を撮像する。得られた画像にはハルトマン板のパターンが写っており焦点内像と焦点外像のそれぞれの小孔の位置を測定し対応関係を調べることで光線が焦点面でどのように集まるか調べることができる。図 8.6 はハルトマンテストの原理を表した図である。

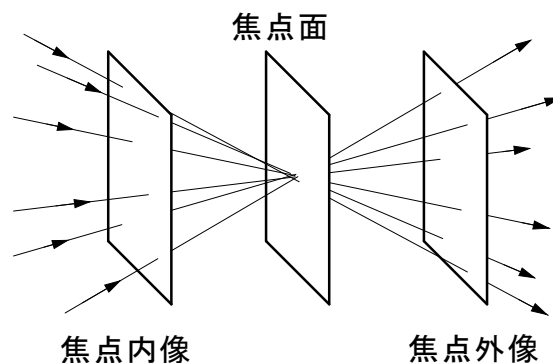


図 8.6 ハルトマンテストの原理。焦点内外像の光線の位置を検出してその位置から焦点面での結像を類推する。

焦点面には各小孔からの光線の位置が示されることから、スポットダイアグラムの実験的な測定であるとも言える。なお焦点面とは光線が集束して最も小さい星像を作る場所で、最小錯乱像面とも呼ばれる。焦点面でのスポットの広がり の平均値をハルトマン定数  $T$  と定義することで望遠鏡の結象性能を定量的に求めることができる。

### 8.2.1 ハルトマン板の製作

南極 40cm 赤外線望遠鏡でハルトマンテストを行う為のハルトマン板の製作を行った。幸い南極 40cm 赤外線望遠鏡の鏡筒には Tohoku DIMM<sup>\*1</sup>を取り付ける為の部品がある

\*1 付録 A Tohoku DIMM を参照のこと

為ハルトマン板はそのまま鏡筒に取り付け可能である。ハルトマン板の小孔の直径は小さすぎるとシーイングの影響を受けて正確な位置測定ができなくなる為小孔の直径を 40mm とした。口径 40mm の望遠鏡の理論分解能は可視光でおよそ 3" 程度なのでシーイングが 3" 未満であれば正確に位置測定が可能である。

ハルトマン板は 3mm のアルミ板で製作した。隣り合う小孔の位置を最適化することで 30 個の小孔を設けた。



図 8.7 南極 40cm 赤外線望遠鏡のトップリングに取り付けた状態のハルトマン板

### 8.2.2 観測方法の検証

本来のハルトマンテストは望遠鏡の光学系に対して検出器を焦点位置の前後に動かして観測しなければならない。しかしこの方法では視野回転が発生して測定誤差が増大する。そこで今回の観測では副鏡を光軸方向に動かす方法で観測する。この場合、副鏡が正しい位置でなくなる為に球面収差が生じてハルトマンテストの結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで ZEMAX を用いてその影響を見積もった。

副鏡を  $\pm 0.6\text{mm}$  動かすことによって焦点位置はおよそ  $\pm 20\text{mm}$  動く。副鏡を 0.61mm 内側へ動かした時と 0.59mm 外側へ動かした時の横収差図を図 8.8 に示す。

3 次関数のように見えるのは球面収差によるものである。しかし焦点内外像を比較すると球面収差の横収差が光軸からの距離に対して反対称であることがわかる。その為焦点面で球面収差が相殺されることになる。よって球面収差の影響は無視できる (表泰秀 他 1998 [10])。



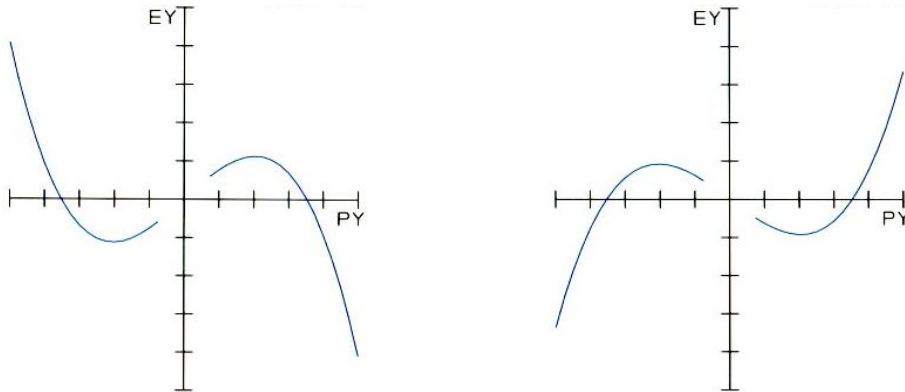


図 8.8 南極 40cm 赤外線望遠鏡の横収差図。横軸が光軸からの距離 (入射高) を表し、縦軸は球面収差の横収差量を表す。線が原点付近で切れているのは副鏡の影による。なお縦軸は 1 目盛り  $20\mu\text{m}$ 。(左) 焦点内像、(右) 焦点外像

### 8.2.3 ハルトマン定数 T

以下で具体的にハルトマン定数  $T$  を導出する。なおこの計算では横尾武夫 (1991) [23] 及び表泰秀 他 (1998) [10]、田中済 他 (1995) [14]、村田千紘 (2009) [20] を参考にした。

焦点内像に写ったスポットの位置を観測装置 (CCD) の座標  $(x_{1i}, y_{1i})$  で表すとスポットの平均位置  $(\bar{x}_1, \bar{y}_1)$  は焦点内像面における光軸の位置を表す。

$$(\bar{x}_1, \bar{y}_1) = \left( \frac{1}{N} \sum x_{1i}, \frac{1}{N} \sum y_{1i} \right)$$

よって光軸を原点とした座標系  $(\hat{x}_{1i}, \hat{y}_{1i})$  で各スポットを書き直すと

$$(\hat{x}_{1i}, \hat{y}_{1i}) = (x_{1i} - \bar{x}_1, y_{1i} - \bar{y}_1)$$

同様に焦点外像に写ったスポット位置を  $(x_{2i}, y_{2i})$  で表すと平均位置  $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ 、光軸を原点とする座標系で  $(\hat{x}_{2i}, \hat{y}_{2i}) = (x_{2i} - \bar{x}_2, y_{2i} - \bar{y}_2)$  と書ける。

ここで光軸を  $z$  軸とし、焦点内像面を  $z=0$ 、焦点外像面を  $z=1$  とすると  $0 \leq z \leq 1$  の像面における光線  $i$  の座標は

$$\begin{aligned} x_i &= (\hat{x}_{2i} - \hat{x}_{1i})z + \hat{x}_{1i} \\ y_i &= (\hat{y}_{2i} - \hat{y}_{1i})z + \hat{y}_{1i} \end{aligned}$$

で表される。よって位置  $z$  における光線  $i$  の光軸からの距離  $r_i$  は

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

となる。これが像面  $z$  におけるスポットの位置であり、様々な光線の位置をプロットしたものはスポットダイアグラムとなる。

ところで焦点面とは光線が集束して最も小さい星像を作る場所であった。スポットダイヤグラムが最小になる像面  $z_{min}$  は  $r_i$  を  $z$  で微分して

$$z_{min} = - \frac{\Sigma\{(\hat{x}_{2i} - \hat{x}_{1i})\hat{x}_{1i} + (\hat{y}_{2i} - \hat{y}_{1i})\hat{y}_{1i}\}}{\Sigma\{(\hat{x}_{2i} - \hat{x}_{1i})^2 + (\hat{y}_{2i} - \hat{y}_{1i})^2\}}$$

と求まる。 $z_{min}$  つまり焦点面における光線  $i$  が光軸からどれだけズレているか (=収差量) を  $(\delta x_i, \delta y_i)$  と書くと

$$\begin{aligned} \delta x_i &= (\hat{x}_{2i} - \hat{x}_{1i})z_{min} + \hat{x}_{1i} \\ \delta y_i &= (\hat{y}_{2i} - \hat{y}_{1i})z_{min} + \hat{y}_{1i} \end{aligned} \quad (8.1)$$

となる。 $\delta x_i$ 、 $\delta y_i$  をハルトマン板の各小孔の位置を基点としてベクトルで描いたものを収差ベクトルと呼ぶ。

そして収差ベクトルの大きさの平均値をハルトマン定数  $T$  と定義する。

$$T = \frac{1}{N} \Sigma \left( \sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2} \right) \quad (8.2)$$

但しここまでの計算ではすべて CCD の座標で計算していた為、ハルトマン定数  $T$  はピクセルサイズ  $\theta$  [arcsec/pixel] をかけて [arcsec] 単位に変換する必要がある。

#### 8.2.4 観測

ハルトマン定数  $T$  を測定する為、2010 年 1 月 13 日に観測を行った。観測は南極 40cm 赤外線望遠鏡の接眼部に取り付けた SBIG 社製冷却 CCD カメラ ST-7XME-D を用いた。焦点内外像は副鏡を動かすことによって得る。シーイングによる測定誤差を減らす為、天頂付近の適当に明るい星を用いて 10 秒の露出を与え、焦点内外像はそれぞれ 20 回撮影した。

表 8.3 に観測装置の各種パラメーターを示す。

| 望遠鏡     | 南極 40cm 赤外線望遠鏡 |
|---------|----------------|
| 口径      | 400 [mm]       |
| 焦点距離    | 4800 [mm]      |
| カメラ     | ST-7XME-D      |
| ピクセルサイズ | 9 [ $\mu$ m]   |
| 冷却温度    | -30 [°C]       |
| フィルター   | V              |
| 露出時間    | 10 [sec]       |

表 8.3 観測装置の各種パラメーター

またこれとは別に焦点面でのピクセルサイズを測定する為、離角の判っている二重星 ( $\theta$ 1-Ori、 $\theta$ 2-Ori) を観測して求めた。

### 8.2.5 データ解析

焦点内外像はそれぞれ 20 回撮影したがシーイングや風の影響で星像がぶれているものも含まれていた為、実際には焦点内像は 11 回分、焦点外像は 15 回分の観測結果を用いる。

天体の位置測定は SExtractor で各スポットの CCD 上での位置を検出し、それらの平均位置から収差ベクトルとハルトマン係数、RMS 半径を求めた。

なおピクセルサイズは  $\theta_1$ -Ori、 $\theta_2$ -Ori の離角から求めた。この天体の離角は  $135.07[\text{arcsec}]$  であることが判っており 2 つの天体の CCD のチップ上の位置を測定、位置の差からピクセルサイズを求める。なおシーイングの影響を除く為 50 回撮像し位置の測定を行った。結果は以下である。誤差は  $1\sigma$ 。

$$\text{Pixel Size} = 0.390 \pm 0.001 [\text{arcsec/pixel}]$$

### 8.2.6 測定結果

今回の観測で得られたハルトマン定数  $T$  は

$$T = 0.59 [\text{arcsec}] \quad (8.3)$$

二乗平均平方根 (Root Mean Square, RMS) 半径  $R$  は

$$R_{rms} = 0.64 [\text{arcsec}] \quad (8.4)$$

である。また図 8.9、図 8.10 に今回の観測で得られた焦点面でのスポットダイヤグラム (に相当する図) と収差ベクトルを示す。

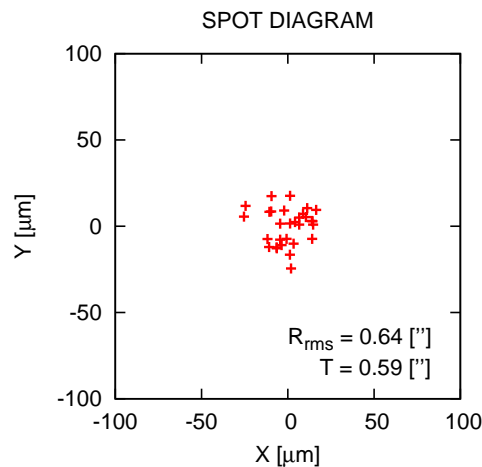


図 8.9 観測結果から得られた焦点面でのスポットダイヤグラム (に相当する図)。横軸・縦軸は焦点位置における実スケールを表す。

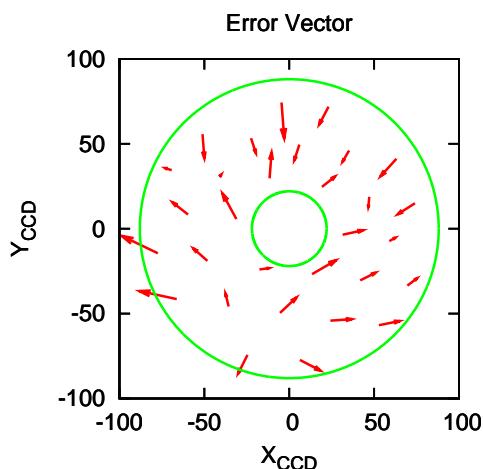


図 8.10 収差ベクトルの観測結果。ベクトルは 20 倍に拡大して表示した。収差ベクトルの形からコマ収差の傾向が見られる (横尾武夫 1991 [23])。

### 8.2.7 考察

ハルトマンテストでは鏡の精度と光軸誤差の双方を合わせた望遠鏡の結象性能が観測される。ハルトマンテストは視野中心すなわち光軸での星像の結像を調べる為、鏡の精度が完璧で光軸誤差が 0 であれば図 8.1 のようなスポットダイヤグラムが得られるはずである。この場合 RMS 半径は  $0.03''$  となり、ハルトマン定数  $T$  もこれと同程度になると考えられる。

今回の観測結果ではハルトマン定数  $T=0.59''$ 、RMS 半径  $R_{rms}=0.64''$  という値が得られた。図 8.9 より観測で得られたスポットダイヤグラム (に相当する図) と前節の ZEMAX での各光軸誤差がある場合のシミュレーション結果を比較すると、南極 40cm 赤外線望遠鏡の主鏡・副鏡・観測装置の位置誤差によって光軸誤差が生じていて、今回得られたハルトマン定数程度の結象性能となっていると考えられる。

また収差ベクトルの観測結果の傾向から視野中心においてもコマ収差があることがわかる (横尾武夫 1991 [23])。これも主鏡・副鏡・観測装置の位置誤差によって ST-7XME-D の観測視野中心と光軸が一致していない事を示唆するものである。

ところで南極 40cm 赤外線望遠鏡に要求される光学性能を考える。今回得られたハルトマン定数  $T=0.59''$ 、RMS 半径  $R_{rms}=0.64''$  という結果から南極 40cm 赤外線望遠鏡は視野中心において  $0.6''$  程度の空間分解能を有すると考える事が出来る。ところで口径 40cm の望遠鏡の回折限界は J バンドで  $0.76''$ 、K バンドでは  $1.4''$  であった。これはつまり南極 40cm 赤外線望遠鏡の結象性能は観測波長域で十分に回折限界以下であると言える。また 2010 年度の観測で使用する TONIC-II のピクセルスケールは  $0.86''/\text{pixel}$  であるので星像は (理論的には) 1 ピクセル内に落ちると言うこともでき、必要十分な精度が

あると言える。

よって南極 40cm 赤外線望遠鏡の光学性能は光軸合わせの精度も含めて観測に必要な精度を有していることがわかった。



## 第9章

# 結論

本修士論文では南極 40cm 赤外線望遠鏡の開発と性能評価を行った。

南極 40cm 赤外線望遠鏡の開発では、まず南極 40cm 赤外線望遠鏡が正しく機能するかどうかハード/ソフト両面の評価実験を行い正しく機能することを確認した。次に望遠鏡の輸送・設置・観測を効率的に行えるよう運搬ハンドル、極軸調整プレート、極軸望遠鏡、Dec 軸バランス調整機構を開発した。そして南極での整備作業を効率良く行う為に Dec 軸モーターユニットの改造も行った。さらに望遠鏡の各ユニットを $-80^{\circ}\text{C}$ まで冷却した駆動実験を行い改良を施し、各ユニットが $-80^{\circ}\text{C}$ でも作動することを確認した。

これらの開発によって南極 40cm 赤外線望遠鏡はドームふじの最低気温 $-80^{\circ}\text{C}$ でも問題なく使用可能な装置として完成した。

南極 40cm 赤外線望遠鏡の性能評価では、まず追尾精度の評価を行った。設置誤差・大気差・ピリオディックモーションによる追尾誤差を見積もり観測からこれらを求めた。結果はピリオディックモーション  $4.3'' \pm 1.8''$  であり、追尾補正無しでも 5 秒程度の露出が可能であることがわかった。これは試験観測で計画されている露出時間 1 秒よりも十分に長く追尾精度は観測に十分な精度があると言える。次に導入精度の評価を行った。設置誤差・大気差・RA 軸と Dec 軸の直交誤差・Dec 軸と光軸の直交誤差・ピリオディックモーション・バックラッシュによる導入誤差を見積もり観測からそれらの量を求めた。結果は RA 軸と Dec 軸の直交誤差が  $87'' \pm 21''$ 、Dec 軸と光軸の直交誤差が  $320'' \pm 29''$ 、Dec 軸バックラッシュが  $-86'' \pm 3.8''$  であり導入誤差は最大で 8' 程度あることがわかった。しかしこれは試験観測で用いられる予定の TONIC-II の視野  $\phi 30'$  に比べて十分小さく、導入精度は観測に十分な精度があると言える。さらに光学性能の評価を行った。ハルトマンテストによる光学系の評価を観測的に行い、結象性能としてハルトマン定数  $0.59''$  という値を得た。これは TONIC-II のピクセルスケール  $0.86''/\text{pixel}$  に対して十分小さく、光学性能は観測に必要な精度を十分有していると言える。

よってこれらの性能評価から、南極 40cm 赤外線望遠鏡は 2010 年度に計画されているドームふじ基地でのサイト調査・試験観測に必要な精度を有する望遠鏡であることがわかった。





## 第 10 章

# 将来計画

2010 年 11 月～2011 年 3 月にかけて行われる第 52 次南極地域観測隊では 2011 年 1 月初旬から下旬にかけてドームふじ基地に滞在し、太陽の沈まない夏期において光学望遠鏡を用いた最初のサイト調査と試験観測を行う計画である。この第 52 次隊に沖田も同行者としてドームふじ基地に赴き観測に従事する予定である。ここではまず現段階で想定されているドームふじ基地での 2010 年度の観測計画を示し、次に数年後に予定されるリモート越冬観測と将来の南極 2m 赤外線望遠鏡計画について述べる。

### 10.1 シーイング測定

2010 年度の観測では夏期のみでの観測ではあるが、初めて本格的にドームふじ基地のシーイングの測定が可能である。以下に各装置毎の目標と観測計画を述べる。

#### 10.1.1 Tohoku DIMM

Tohoku DIMM<sup>\*1</sup>は南極 40cm 赤外線望遠鏡に取り付けてシーイングの測定を行う観測装置である。DIMM によるシーイング測定によってその絶対値を求める事が出来る。

観測はカノーパスまたはシリウスを用いて行う。南極での高い透過率によって日中でもこれらの星は観測可能である (Aristidi et al. 2003 [27], Aristidi et al. 2005 [29])。

Tohoku DIMM によるシーイング測定観測では最低でも 2 日以上にわたって連続観測を実施し、太陽高度の変化によるシーイングの変化を測定する。また数日をおいて観測することでシーイングの日変化も測定する。

#### 10.1.2 超音波風速計

東北大学大学院生の栗田健太郎が開発中の超音波風速計を気象タワーに取り付け気温の変化を測定、大気の擾乱を測定する。2010 年度の観測では 3 台の超音波風速計を用いて、

---

\*1 付録 A DIMM によるシーイング測定 を参照のこと

ドームふじ基地に設置された 10m 気象タワーを 5~10m 延長し、地上 15m~20m の大気の擾乱の測定を行う。

### 10.1.3 SNODAR

ドーム A 崑崙基地に設置された SNODAR と呼ばれる音響レーダーをオーストラリア・ニューサウスウェールズ大学との共同研究でドームふじ基地にも設置する。SNODAR は上空 200m までの大気の乱流を 1m の分解能で測定できる装置であり、接地境界層の高さを測定することができる。

## 10.2 金星の連続観測

金星はその大きさや太陽からの距離が地球と似ているにもかかわらず大量の二酸化炭素に包まれて灼熱の惑星である。また自転速度は 243 日と非常に遅いにもかかわらず高層大気は約 4 日で金星を 1 回転しており、その原因は未だ謎である。この高層大気の早い自転をスーパーローテーションと呼ぶ。

「あかつき」(PLANET-C) は 2010 年夏に打ち上げ、約半年かけて金星周回軌道に到達し 2 年間金星の大気を観測する日本の惑星探査機である。あかつきは金星の赤道面に近い長楕円の周回軌道から 2 時間おきに  $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$  で金星大気の撮像を行いスーパーローテーションの解明や金星の磁場測定などを行う計画である。

このあかつきの金星到着に合わせ、我々はドームふじ基地において金星観測を行うことを提案する。2011 年 1 月は金星が西方最大離角を迎え、太陽からの見かけの離角が最も大きく、最も少ない散乱光の元で観測できる。また南極の夏期に相当する 1 月は金星は一日中沈まず、24 時間連続した観測が可能な世界中で唯一の観測地である。少なくともスーパーローテーションの 2 周期分である 8 日間の連続観測を行うことで金星の大気構造の解明を目指す。

### 10.2.1 背景光の明るさの見積もり

1 月のドームふじでは一日中太陽は沈まない。そのため金星が観測可能かどうかは背景光の明るさで決まる。日中の背景光の明るさは測定データがない為、以下の方法で見積もる。

まず南極ではその高い透明度によって肉眼で  $m_{AB}=0$  の恒星が見えると仮定する。他に表 10.1 人間の目の特性を仮定する。<sup>\*2</sup>

この場合  $m_{AB}=0$  の星から来る単位時間当たりの人の目に入射する光子数は波長  $0.5\mu\text{m}$  では

$$S_{obj} = 6.2 \times 10^4 \text{ [e}^-/\text{sec]} \quad (10.1)$$

<sup>\*2</sup> 表中の記号の意味は第 1 章 赤外線天文学 を参照のこと

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 星が見える                               | S/N=1                                   |
| 目の透過特性                              | 0.4 $\mu$ m ~ 0.6 $\mu$ m に感度を有す        |
| 目の効率 $\tau_{\lambda}\eta_{\lambda}$ | 0.1                                     |
| 目の面積 $A_{eye}$                      | 2.83 $\times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> ] |
| 露出時間 t                              | 0.01 [sec]                              |
| 分解能                                 | 1 [arcmin <sup>2</sup> ] (視力 1 に相当)     |

表 10.1 人間の目の特性 (仮定)

となる。よって S/N=1 となるような背景の明るさは

$$S_{sky} = 3.8 \times 10^7 \text{ [e}^-/\text{sec]} \quad (10.2)$$

と計算される。光子数から表面輝度に変換すると

$$\begin{aligned} I_{sky} &= -7.0 \text{ [mag/arcmin}^2\text{]} \\ &= 1.9 \text{ [mag/arcsec}^2\text{]} \end{aligned} \quad (10.3)$$

となる。但し 1 分角の分解能を人間の視力で 1 と定義される為背景の明るさ (表面輝度) も 1 平方分あたりで感じるとした。なお単位を [Jy/arcsec<sup>2</sup>] で書き改めると

$$I_{sky} = 6.2 \times 10^2 \text{ [Jy/arcsec}^2\text{]} \quad (10.4)$$

となる。

### 10.2.2 赤外線での散乱光の明るさ

可視光における背景ノイズは大気の散乱光である。大気の散乱はレイリー散乱であり光の波長よりも小さいサイズの粒子によって引き起こされ、その程度は波長  $\lambda$  の 4 乗に反比例する。

また大気散乱の原因は太陽からの光である。太陽からの各波長毎のフラックスは表 10.2 の通りである (Cox 1999 [32])。太陽からのフラックスは長波長で弱くなることがわかる。

散乱光の主たる原因は太陽光であり、それを地球大気内の微粒子がレイリー散乱していると仮定するとその強度は太陽のフラックスに比例し、また波長の 4 乗に反比例することになる。よって散乱光は可視光に比べ赤外線で急激に弱くなると言える。

### 10.2.3 金星の明るさ

表 10.3 は各波長における散乱光の明るさと背景ノイズ、金星の表面輝度である。金星の表面輝度は 2011 年 1 月 1 日に予想されている  $m_{AB} = -4.5$  [mag]、視直径 27 [arcsec]、半球が太陽からの反射光 (bright) で残りの半球が金星大気の赤外線放射 (dark) としてそ

| 波長 [ $\mu\text{m}$ ] | フラックス [ $10^{-3}\text{W}/\text{m}^2/\text{\AA}$ ] |
|----------------------|---|
| 0.5                  | 192   |
| 1.0                  | 75  |
| 1.2                  | 52  |
| 1.6                  | 22.5  |
| 1.8                  | 16.9  |
| 2.0                  | 11.6  |
| 2.5                  | 5.2   |

表 10.2 各波長毎の太陽のフラックス (Cox 1999 [32])

の明暗の輝度差 100 倍として計算した。また金星の赤外域での明るさは Lundock et al. 2009 [46] から求めた。

| 波長 [ $\mu\text{m}$ ] | 散乱光  | 背景ノイズ | 金星 (bright) | 金星 (dark) |
|----------------------|------|-------|-------------|-----------|
| 0.5                  | 1.9  | -     | 1.5         | 6.5       |
| 1.2                  | 7.1  | 15.9  | 2.5         | 7.5       |
| 1.7                  | 9.7  | 13.4  | 2.5         | 7.5       |
| 2.2                  | 11.8 | 13.7  | 3.2         | 8.2       |

表 10.3 散乱光と背景ノイズ及び金星の表面輝度のフラックス。単位は  $[\text{mag}/\text{arcsec}^2]$ 。背景ノイズはマウナケア山頂での月のない夜間の実測値 (Cox 1999 [32]) で金星の明るさは Lundock et al. 2009 [46] から求めた。

夜間に赤外線観測を行う場合背景ノイズのほとんどは OH 夜光であった。これに対し昼間に赤外線観測を行う場合は表 10.3 より散乱光のほうが明るく主たる背景ノイズ源は散乱光ということになる。しかし可視光に比べると散乱光は小さく、十分に観測可能であるといえる。

#### 10.2.4 観測可能性

ここから南極 40cm 赤外線望遠鏡で  $2.2\mu\text{m}$  付近で金星を観測した場合の S/N を計算する。望遠鏡のパラメーターは表 10.4 のように仮定する。

これらを仮定して計算すると、

$$S_{\text{bright}} \sim 1.55 \times 10^8 [\text{e}^-/\text{d}\lambda/\text{sec}] \quad (10.5)$$

$$S_{\text{dark}} \sim 1.55 \times 10^6 [\text{e}^-/\text{d}\lambda/\text{sec}] \quad (10.6)$$

|                                       |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 中心透過波長                                | 2.2 $\mu\text{m}$            |
| フィルター波長幅                              | $d\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ] |
| 望遠鏡の効率 $\tau_{\lambda}\eta_{\lambda}$ | 0.5                          |
| 望遠鏡の面積 $A_{tel}$                      | 0.126 [ $\text{m}^2$ ]       |
| 露出時間                                  | $t$ [sec]                    |
| ピクセルサイズ                               | 0.86'' $\times$ 0.86''       |

表 10.4 金星観測の時の南極 40cm 赤外線望遠鏡の各種パラメーター (仮定)

$$S_{sky} \sim 5.85 \times 10^4 \text{ [e}^-/\text{d}\lambda/\text{sec}] \quad (10.7)$$

但し  $S_{bright}$  は金星の太陽光反射面で  $S_{dark}$  は金星の赤外線放射面、 $S_{sky}$  は散乱光と背景ノイズの和であり、1 ピクセルに入射する単位時間単位波長幅あたりの光子数になるよう計算した。なおピクセルサイズは 0.86'' $\times$ 0.86'' である。

よって S/N は

$$S/N_{bright} \sim \frac{S_{bright} \cdot d\lambda \cdot t}{\sqrt{(S_{bright} + S_{sky}) \cdot d\lambda \cdot t}} \sim 1.2 \times 10^4 \sqrt{d\lambda} \sqrt{t} \quad (10.8)$$

$$S/N_{dark} \sim \frac{S_{dark} \cdot d\lambda \cdot t}{\sqrt{(S_{dark} + S_{sky}) \cdot d\lambda \cdot t}} \sim 1.2 \times 10^3 \sqrt{d\lambda} \sqrt{t} \quad (10.9)$$

と計算される。実際の観測ではある波長幅のフィルターを用い、また S/N が少しでも良くなるようある程度長い露出時間をかけて撮像する。但し観測装置である TONIC-II の赤外線検出器 VIRGO-2K はおよそ 40,000ADU $\sim$ 136,000e $^-$  までリニアリティが保てると言われている為、1 回の露出時間は 1 ピクセルに落ちる光子数が 136,000 $^-$  程度より少ない時間でなければならない。

金星観測で使用が想定される狭帯域フィルターは波長幅が 0.01 $\mu\text{m}$  である。このフィルターを使用したとすると検出器がリニアリティを保てる範囲で且つ金星全体がサチらないよう露出した場合の許される最大露出時間は約 0.08 秒、 $S/N_{bright}=340$ 、 $S/N_{dark}=34$  となる。

なお露出時間は VIRGO-2K の読み出し時間に依存してその下限値が存在する為、実際の観測時には ND フィルターを用いて減光する必要がある。例えば 100 分の 1 に減光する ND フィルターを組み込んだ場合、SN はそのままに露出時間が 100 倍の 8 秒でも全体がサチらず十分な SN で撮像できる。

よって一日中太陽の沈まないドームふじ基地において金星の撮像観測は十分に可能であることが示された。

### 10.2.5 フィルターホイールの設計

TONIC-II の検出器のサイズはおよそ  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$  角で  $29 \times 29 \text{ arcmin}^2$  を 1 度に撮像可能である。しかし検出器の大きさからフィルターも大きいものが必要で、最大で 3 枚までしか搭載できない。

ところが金星の大きさは  $30[\text{arcsec}]$  程度と非常に小さく金星の観測に特化するのであればフィルターは  $\phi 25.4\text{mm} = \phi 18\text{arcmin}$  もあれば十分である。これだけの視野があれば赤外線観測に必須のスカイ引きの為にディザリングも十分行え、また望遠鏡の指向精度不足による導入誤差も観測に支障を来さない。フィルター径を  $\phi 25.4\text{mm}$  とした場合フィルターは 7 枚～8 枚搭載可能であり多波長の撮像が可能となる。

また TONIC-II の optical-window 前に ND フィルターを取り付け、簡単に露出時間の調整ができるような構造も検討していく。

### 10.2.6 コールドストップの設計 (検討)

TONIC-II はコールドストップを有さない直接カメラであり、冬期 (極夜) の観測では南極の極低温環境による低い熱放射からコールドストップが無くても十分に観測可能であると考えられているが、2010 年度の観測では太陽は沈まぬ夏期であり、強い散乱光による S/N の低下が心配される。そこで当初の予定には無い構造ではあるがコールドストップを TONIC-II に組み込み、散乱光や熱ノイズを排除する。幸い 2010 年度の観測では金星等の惑星の観測のみであるので視野が狭くなっても問題は生じない。南極 40cm 赤外線望遠鏡に搭載するという物理的な制約がある為、光学性能のみでなく構造も検討していく必要がある。

### 10.2.7 観測計画

撮像は数分おきに複数回ずつ行い、可能な限り長期間にわたってこれを継続する。また数時間おきにシリウスやカノープス等の観測可能な明るい星を基準星として撮像する。半自動で観測を制御し約 200 時間以上の連続観測を目指す。

## 10.3 太陽系惑星ライブラリ

Lundock et al. 2009 [46] によると太陽系の惑星は Rc-J vs J-Ks の color-color 図で簡単に岩石惑星・ガス惑星・氷天体に分類できることがわかった。これは赤外線観測によって簡単に惑星の種類を分類できる画期的な方法で、太陽系以外の系外惑星の分類に応用することができると考えられている。

そこで 2010 年度のドームふじでの試験観測ではこの太陽系惑星ライブラリの研究を継続・発展させる。具体的には長時間の連続観測によって惑星の自転を追いかけて、color-color

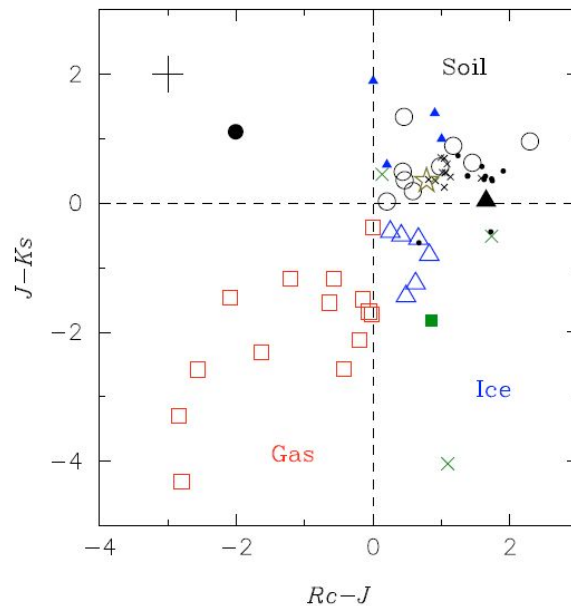


図 10.1 Rc-J vs J-Ks の color-color 図 (Lundock et al. 2009 [46])。横軸が Rc-J、縦軸が J-Ks の色指数 (ベガ等級) である。色指数 0 で岩石惑星・ガス惑星・氷天体に分類できることがわかる。

図での位置がどのように変化するか調べる。J バンド及び Ks バンドは TONIC-II に搭載したフィルターを用いて、また Rc バンドは南極 40cm 赤外線望遠鏡に同架した口径 10cm 程度の小型望遠鏡に搭載した CCD カメラで観測を行う。

表 10.5 に 2011 年 1 月 1 日における各惑星の等級、視直径、表面輝度、最大高度、最低高度、太陽との離角を示す。いずれも等級・表面輝度は V バンドで予想される値である。また最低高度が - のものはその惑星が地平線下に沈むことを意味する。これから観測可

|     | 等級   | 視直径  | 表面輝度       | 最大高度 | 最低高度 | 太陽との離角    |
|-----|------|------|------------|------|------|-----------|
|     | mag. | "    | mag/ "     | °    | °    | °         |
| 水星  | 0.1  | 7.8  | <u>3.4</u> | 33   | 7.7  | <u>21</u> |
| 金星  | -4.5 | 26.8 | <u>1.5</u> | 28   | 3.3  | <u>47</u> |
| 火星  | 1.2  | 3.9  | <u>3.9</u> | 36   | 11   | 8         |
| 木星  | -2.3 | 38.6 | <u>5.4</u> | 15   | -    | <u>76</u> |
| 土星  | 0.8  | 17.2 | <u>6.7</u> | 17   | -    | <u>28</u> |
| 天王星 | 5.9  | 3.5  | 8.4        | 15   | -    | <u>76</u> |
| 海王星 | 8.0  | 2.2  | 9.4        | 26   | -    | <u>46</u> |

表 10.5 2011 年 1 月 1 日の各惑星のプロファイル。等級、表面輝度は V バンドでの値。最低高度が - のものはその惑星が地平線下に沈むことを意味する。

能条件として V バンドでの表面輝度が  $7 \text{ [mag/arcsec}^2]$  より明るく太陽との離角が  $20 [^\circ]$  以上の惑星は水星、金星、木星、土星の 4 つである。また 24 時間の連続観測が可能な天体は水星と金星のみである。

表 10.6 に Rc、J、Ks バンドで見込まれる散乱光と各惑星の表面輝度を示す。散乱光の強度は前節と同じように太陽光を地球大気内の微粒子がレイリー散乱することで生じると仮定して求めた。これから水星・金星はすべての波長において散乱光より明るい事がわか

| 波長 [ $\mu\text{m}$ ] | 散乱光  | 水星          | 金星         | 木星  | 土星   | 天王星  | 海王星  |
|----------------------|------|-------------|------------|-----|------|------|------|
| 0.66 (Rc)            | 3.3  | 2.4         | <u>1.4</u> | 5.3 | 6.7  | 8.8  | 9.8  |
| 1.2 (J)              | 7.1  | <u>0.81</u> | 2.5        | 6.6 | 7.6  | 12.3 | 12.4 |
| 2.2 (Ks)             | 11.8 | <u>0.82</u> | 3.2        | 9.1 | 10.7 | 17.1 | 15.3 |

表 10.6 各フィルターを用いた時の背景散乱光の強度と各惑星の表面輝度。単位は  $[\text{mag/arcsec}^2]$ 。惑星の各フィルターでの強度は Lundock et al. 2009 [46] から求めた。

る。また J バンドや Ks バンドでは散乱光は惑星の表面輝度と同程度かそれより小さく、サチらないように観測すれば短時間に十分な SN で検出が可能だと言える。

### 10.3.1 観測可能性

実際に 2011 年 1 月にドームふじ基地で観測可能かどうか検証する。南極 40cm 赤外線望遠鏡 (J および Ks バンド) とそれに同架する 10cm 望遠鏡 (Rc バンド) の各種条件 (仮定) を表 10.7 に示す。

|                                    | AIRT40                     | 10cm 望遠鏡                            |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 望遠鏡の効率 $\tau_\lambda \eta_\lambda$ | 0.5                        | 0.5                                 |
| 望遠鏡の面積 $A_{tel}$                   | $0.126 \text{ [m}^2]$      | $7.85 \times 10^{-3} \text{ [m}^2]$ |
| 露出時間                               | t [sec]                    | t [sec]                             |
| ピクセルサイズ                            | $0.86'' \times 0.86''$     | $1'' \times 1''$                    |
| 飽和光子数                              | $136,000 \text{ [e}^{-1}]$ | $100,000 \text{ [e}^{-1}]$          |

表 10.7 南極 40cm 赤外線望遠鏡と同架する 10cm 望遠鏡の各種パラメーター (仮定)

ここで各フィルター毎に入射光子数を計算し、それが飽和光子数以下となる露出時間を表 10.8 に示す。

この結果から太陽系惑星の観測を行う為には光量を 10,000 分の 1 程度まで減らす ND



|    | 最大露出時間 [sec] | 最も明るい天体がサチらない露出時間 [sec]   |
|----|--------------|---------------------------|
| Rc | 0.04         | $6.9 \times 10^{-3}$ (金星) |
| J  | 0.09         | $2.9 \times 10^{-4}$ (水星) |
| Ks | 11           | $4.4 \times 10^{-4}$ (水星) |

表 10.8 各フィルター毎の最大露出時間 (背景が飽和しない最大露出時間) と最も明るい天体がサチらない露出時間。括弧内に具体的な天体名をあげた。

フィルターを用いることが必須であると言える。また Rc バンドや J バンドでは背景がサチらないように常に 100 分の 1 程度に減光する必要があるとも言える。

## 10.4 技術開発

今回の第 52 次南極観測隊での南極 40cm 赤外線望遠鏡による夏期ドームふじ観測では問題にならないが、今後の越冬観測では問題となりうる事象がある。これを解決する為以下の技術開発に取り組んでいく。

### 10.4.1 霜対策

太陽の沈まない夏期の観測では太陽からの放射熱によって望遠鏡に付着したの霜はすぐに気化し観測に支障が出ることはない。しかし太陽の昇らない冬期には放射冷却によって望遠鏡は冷え気温の変動によって容易に霜が付着、観測不能になると考えられている。霜は加熱により簡単に除去可能であるが望遠鏡を暖めてしまうと陽炎が立ちシーイングが悪化、また望遠鏡からの熱放射も大きくなり南極の好条件を生かせない。そこで熱を使わない霜対策技術の開発を行いこれに対処する。

### 10.4.2 オートガイダー

赤外線観測では高い背景ノイズから短時間露出で何回も撮像を繰り返すという観測方法の為、長時間にわたる天体の追尾機能は必要ない。しかし現状では追尾精度不足から 5 秒程度以上の露出では星が楕円に写ってしまう。そこで 2012 年からのリモート越冬観測までに追尾精度の根本的な改善を計る為オートガイダーを開発する。オートガイダーとは観測視野周辺の星の位置をリアルタイムで測定して位置のズレを検出、RA・Dec モーターを駆動し常に天体が一定の位置になるよう制御するものである。オートガイダーによって安定して追尾・撮像が可能となるよう仕様を決め、開発を行う予定である。

### 10.4.3 高視野ファインダー

南極 40cm 赤外線望遠鏡にはアブソリュートエンコーダが搭載されていない為望遠鏡の向きを正確に把握するのは困難である。また導入精度にも最大で 8 分角程度の誤差がある。これを根本的に解決するため、高視野ファインダーの開発を検討する。これは南極 40cm 赤外線望遠鏡と同一方向に向けた高視野カメラで視野内に写る星を自動で検出して恒星のカatalogと照合し現在向いている方向を割り出す装置である。リモート観測では望遠鏡の状態をいかに把握するかは大きな問題であり、高視野ファインダーによって正確な望遠鏡の制御が期待できる。

### 10.4.4 PLATO-Fuji(仮称)

オーストラリア・ニューサウスウェールズ大学との共同研究でドーム A に設置された PLATO\*<sup>3</sup>と同等のサイト調査装置を開発し、ドームふじに設置する計画である。PLATO-Fuji(仮称) は発電モジュールを含む全自動観測装置であり 2012 年からの越冬観測における最も重要な観測装置となる。製作はすでに開始され、2010 年 4 月以降に沖田もオーストラリアへ渡り共同で開発を進める予定である。

## 10.5 南極 2m 赤外線望遠鏡

南極 40cm 赤外線望遠鏡はあくまでもサイト調査・試験観測を行う為の望遠鏡であり、それ自身決してゴールではない。ドームふじが実際に地球上で最も優れた観測地であることが確かめられた後、我々はより大型の 2m 望遠鏡の建設を計画している(南極 2m 赤外線望遠鏡計画)。南極ではその低い背景ノイズから赤外線波長では 2m クラスの望遠鏡でもハワイ・マウナケア山頂のすばる望遠鏡(口径 8.2m)と同一観測時間で同等の検出限界を達成できると計算されている(市川 2008 [2])。また南極の優れたシーイングはマウナケア山頂を凌駕し、すばる望遠鏡より高い空間分解能の観測が可能である。さらに南極 2m 赤外線望遠鏡は専用望遠鏡となることから豊富な観測時間・連続観測が可能となるこれらから南極 2m 赤外線望遠鏡は「深い検出限界」「高い空間分解能」「豊富な観測時間」を有するユニークな観測装置となる。

南極 2m 赤外線望遠鏡計画は名古屋大学の栗田光樹夫助教の開発した軽量架台を用いた小型・軽量の高視野赤外線専用の望遠鏡を南極ドームふじ基地に設置する将来計画である。本研究で取り組んできた南極 40cm 赤外線望遠鏡開発の技術とノウハウ、観測テクニックを生かし、南極 2m 赤外線望遠鏡の 1 日も早い実現を目指す。

\*<sup>3</sup> 第 2 章 南極 を参照のこと

## 付録 A

# DIMM を用いたシーイング測定

ドームふじ基地においてサイト調査・試験観測を行う為に南極 40cm 赤外線望遠鏡を開発した。この望遠鏡に取り付けてシーイングを測定する装置として Tohoku DIMM を開発した。この章では DIMM の原理と仙台での試験観測結果をまとめる。なおシーイングについては第 1 章を参照されたい。

### A.1 DIMM

望遠鏡で星を長時間露光するとシーイング値は得られるがこの方法では瞬間のシーイング値がわからず、また高精度な追尾が必要であり小型望遠鏡では困難である。そこで移動可能な小型望遠鏡でシーイング値を求める方法として DIMM(Differential Image Motiron Monitor) と呼ばれる方法がサイト調査の一環として広く世界で行われている (Aristidi et al. 2005 [29], Motohara et al. 2004 [50], Sarazin & Roddier 1990 [54])。

DIMM は対物プリズムのついた 2 つの開口を持つ、望遠鏡の先端に取り付ける観測装置のことで、この装置を通してある星を観測すると対物プリズムによって同じ星から 2 つの星像を得られる。2 つの星像の相対的な位置の揺らぎを測定して、これを長時間露出したときに得られる星像輝度分布の FWHM に換算し、シーイング値を測定する。DIMM のメリットは小型の望遠鏡でシーイング値が測定可能で、多少の追尾精度の誤差や風による望遠鏡の震動をキャンセルできる点にある

なお DIMM では開口間方向に平行な方向を longitudinal 方向、それに垂直な方向を transverse 方向としてシーイング値はその方向毎に求めることになる。

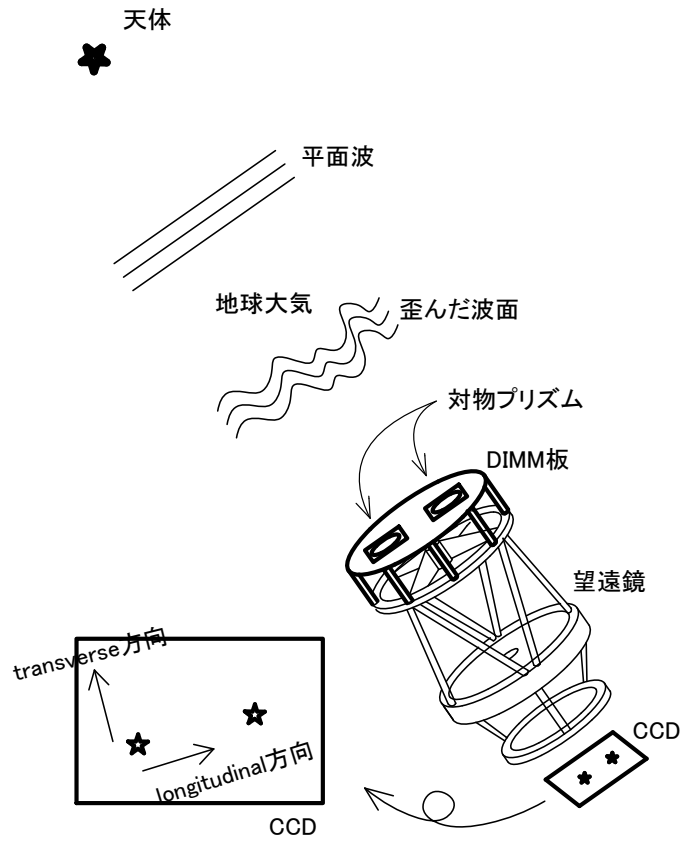


図 A.1 DIMM 観測概要

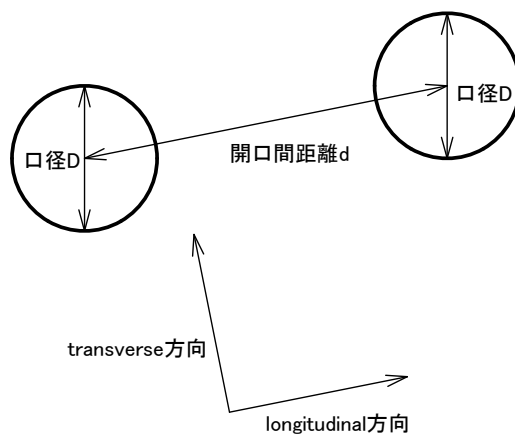


図 A.2 longitudinal 方向と transverse 方向

## A.1.1 原理

天体からの光が  $z$  軸に伝搬していると考える。

天体から出た光は宇宙空間では波面は平面波であるが、地上で天体を観測する時には地球の大気の攪乱によって平面波からずれた波面が観測される。そこで観測者に届く波形を  $z(x, y)$  とし、 $\phi(x, y)$  を位相誤差とすると波長  $\lambda$  の光は位相誤差分ずれて地上に到着するので

$$z(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi(x, y)$$

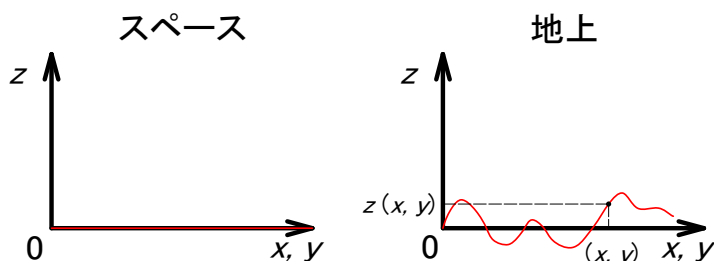


図 A.3 宇宙空間での波面と地上での波面

これを  $x$  軸方向の光の進行方向 ( $z$  軸方向) と波面の垂線とのズレの角度を  $\alpha$ 、 $y$  軸方向のズレを  $\beta$  とすると、式 (A.1) のように書ける。

$$\begin{aligned} \alpha(x, y) &= -\frac{\partial}{\partial x} z(x, y) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) \\ \beta(x, y) &= -\frac{\partial}{\partial y} z(x, y) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

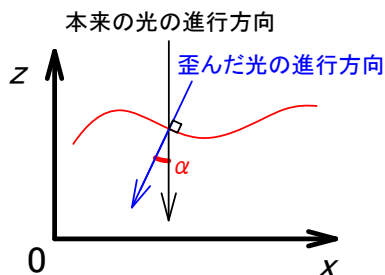


図 A.4 光の進行方向と波面の垂線とのズレ (角度)

ここで  $(\xi, \eta)$  だけ離れた点での  $\alpha$ 、 $\beta$  の相関を示す為到達角度の  $x$  軸方向のズレ  $\alpha$  の共

分散および  $y$  軸方向のズレ  $\beta$  の共分散をそれぞれ

$$B_\alpha(\xi, \eta) = \langle \alpha(x, y) \alpha(x + \xi, y + \eta) \rangle$$

$$B_\beta(\xi, \eta) = \langle \beta(x, y) \beta(x + \xi, y + \eta) \rangle$$

と書き、 $(\xi, \eta)$  離れた点での  $\phi$  の相関を示す位相  $\phi$  の共分散を

$$B_\phi(\xi, \eta) = \langle \phi(x, y) \phi(x + \xi, y + \eta) \rangle$$

と定義するとこれらは以下のように関連づけられる。

$$B_\alpha(\xi, \eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} B_\phi(\xi, \eta)$$

$$B_\beta(\xi, \eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} B_\phi(\xi, \eta)$$

また攪乱する大気を天体からの光が通過すると空間的に屈折率が違うため波面は無秩序に凹凸となる。この光の構造関数は Fried 1965 [34]、Fried 1975 [35] により  $D(r)$  と定義され、Roddier 1981 [53] により定義された位相構造関数  $D_\phi(r)$  によって  $D(r) \approx D_\phi(r)$  と近似される。位相構造関数  $D_\phi(r)$  は位相誤差の構造を定量的に示した物理量で以下のように定義されたものである。

$$D_\phi(r) = \langle |\phi(x+r) - \phi(x)|^2 \rangle \quad (\text{A.2})$$

これは開口面上で距離  $r$  離れた 2 点の位相の差の二乗平均である。これをよく見ると  $D_\phi(r)$  は 2 つのスポット (開口) 間の位相差  $\Delta\phi(r) = \phi(x+r) - \phi(x)$  の分散である事がわかる。位相の変動は式 (A.1) より光の進行方向  $(\alpha, \beta)$  の変動となるので、これから星の進行方向の角度差の二乗平均を同じ形で書き表すことができる。

式 (A.2) を計算する。  $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$  であるから

$$\begin{aligned} D_\phi(r) &= D_\phi(\xi, \eta) \\ &= \langle |\phi(x+r) - \phi(x)|^2 \rangle \\ &= \langle \phi(x+r)^2 - 2\phi(x+r)\phi(x) + \phi(x)^2 \rangle \\ &= \langle \phi(x+\xi, y+\eta)\phi(x+\xi, y+\eta) \rangle - 2\langle \phi(x+\xi, y+\eta)\phi(x, y) \rangle + \langle \phi(x, y)\phi(x, y) \rangle \\ &= 2B_\phi(0, 0) - 2B_\phi(\xi, \eta) \end{aligned}$$

また 2 点の星の進行方向の角度差の二乗平均は

$$\langle |\alpha(x+r) - \alpha(x)|^2 \rangle = 2B_\alpha(0, 0) - 2B_\alpha(\xi, \eta)$$

よって

$$\begin{aligned} B_\alpha(\xi, \eta) &= \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} D_\phi(\xi, \eta) \\ B_\beta(\xi, \eta) &= \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} D_\phi(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

ここで Tatarskii 1971 [61] より位相構造関数は Kolmogorov 乱流を仮定すると以下のよう書き表せる。

$$D_\phi(\xi, \eta) = 6.88 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{5/3} = 6.88 (\xi^2 + \eta^2)^{5/6} r_0^{-5/3} \quad (\text{A.4})$$

ここで  $r_0$  は Fried パラメータと呼ばれるパラメータである。

式 (A.4) を式 (A.3) に代入して

$$\begin{aligned} B_\alpha &= \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} D_\phi(\xi, \eta) \\ &= \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \times 6.88 \times r_0^{-5/3} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} [(\xi^2 + \eta^2)^{5/6}] \\ &= \frac{6.88}{8\pi^2} \times \lambda^2 r_0^{-5/3} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{5}{6} (\xi^2 + \eta^2)^{-1/6} \times 2\xi \right] \\ &= \frac{6.88}{8\pi^2} \times \frac{5}{6} \times \lambda^2 r_0^{-5/3} \left[ -\frac{1}{6} (\xi^2 + \eta^2)^{-7/6} \times 4\xi^2 + (\xi^2 + \eta^2)^{-1/6} \times 2 \right] \\ &= \frac{6.88}{8\pi^2} \times \frac{5}{3} \times \lambda^2 r_0^{-5/3} \left[ (\xi^2 + \eta^2)^{-1/6} - \frac{1}{3} (\xi^2 + \eta^2)^{-7/6} \right] \\ &= 0.145 \lambda^2 r_0^{-5/3} \left[ (\xi^2 + \eta^2)^{-1/6} - \frac{1}{3} \xi^2 (\xi^2 + \eta^2)^{-7/6} \right] \end{aligned}$$

ここで  $x$  軸方向のズレの共分散  $B_\alpha(\xi, \eta)$  について、 $(\xi, \eta) = (d, 0)$  の時 2 点  $(x, y)$ 、 $(x + \xi, y + \eta)$  を結ぶ直線と平行な方向、すなわち longitudinal 方向の  $x$  軸方向のズレの共分散  $B_l(d)$  は

$$\begin{aligned} B_l(d) &= B_\alpha(d, 0) \\ &= 0.145 \lambda^2 r_0^{-5/3} \left[ d^{-1/3} - \frac{1}{3} d^2 d^{-7/3} \right] \\ &= 0.145 \times \frac{2}{3} \times \left( \frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left( \frac{\lambda}{d} \right)^{1/3} \\ &= 0.0968 \left( \frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left( \frac{\lambda}{d} \right)^{1/3} \end{aligned}$$

また  $(\xi, \eta) = (0, d)$  の時 2 点  $(x, y)$ 、 $(x + \xi, y + \eta)$  を結ぶ直線と垂直な方向、すなわち transverse 方向の  $x$  軸方向のズレの共分散  $B_t(d)$  は

$$\begin{aligned} B_t(d) &= B_\alpha(0, d) \\ &= 0.145 \lambda^2 r_0^{-5/3} d^{-1/3} \\ &= 0.145 \left( \frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left( \frac{\lambda}{d} \right)^{1/3} \end{aligned}$$

となる。

transverse 方向の共分散は正確に longitudinal 方向の共分散より  $3/2$  倍大きく、2 点間の距離  $d$  の  $-1/3$  乗で減少する。なお原点  $(\xi, \eta) = (0, 0)$  では  $B_\alpha(0) \propto (d \rightarrow 0)$  と発

散してしまうが実際には「点」で共分散をとることはなく、ある開口径  $D$  で平均をとるので発散しない。 $d = 0$  での値は Fried 1965 [34]、Fried 1975 [35] と Tatarskii 1971 [61] によって以下のように書ける。

$$B_\alpha(0, 0) = 0.179 \left( \frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left( \frac{\lambda}{D} \right)^{1/3}$$

ここで  $D$  は口径の直径を表す。

光の進行方向の角度の変動 ([arcsec]) は結果的に星像の位置の変動 ([arcsec]) となるので、星の進行方向の角度差の二乗平均は星像の位置の分散、つまり 2 つの星像の相対的な揺らぎの分散  $\sigma^2$  となる。

$$\sigma^2(d) = \langle |\alpha(x+r) - \alpha(x)|^2 \rangle = 2[B(0) - B(d)]$$

よって longitudinal 方向、transverse 方向の星像の相対的な揺らぎをそれぞれ  $\sigma_l$ 、 $\sigma_t$  と書くと

$$\sigma_l^2(d) = 2[B_l(0) - B_l(d)]$$

$$\sigma_t^2(d) = 2[B_t(0) - B_t(d)]$$

となり、 $d \geq 2D$  のとき longitudinal 方向の分散  $\sigma_l^2$  は

$$\sigma_l^2 = 2\lambda^2 r_{0l}^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}]$$

$d \leq 2D$  の時 transverse 方向の分散  $\sigma_t^2$  は

$$\sigma_t^2 = 2\lambda^2 r_{0t}^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}]$$

よって longitudinal 方向と transverse 方向それぞれの Fried パラメーター  $r_{0l}$ 、 $r_{0t}$  を求めると

$$r_{0l} = \left[ 2\lambda^2 \sigma_l^{-2} (0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}) \right]^{3/5}$$

$$r_{0t} = \left[ 2\lambda^2 \sigma_t^{-2} (0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}) \right]^{3/5}$$

となる。

一方シーイングの測定で与えられる  $r_0$  と星像輝度分布の FWHM の間には Dierickx1988 [33] によって行われた長時間露光した場合の星像の数値シミュレーションから以下のような関係があることが知られている。

$$\theta = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} \quad (\text{A.5})$$

但しシーイングサイズを  $\theta$  と書いた。

また観測天体の高度が下がれば大気の厚みが増すのでシーイング値は天頂角補正をする必要がある。天頂角を  $\gamma$  として、これを補正したシーイング値を  $\theta'$  とすると

$$\theta' \propto \lambda^{-1/5} [\sigma^2 \cos \gamma]^{3/5}$$



これらから longitudinal 方向、transverse 方向の星像の相対的な揺らぎ  $\sigma_l^2$ 、 $\sigma_t^2$  から計算される天頂角を補正したシーイング値  $\theta'_l$ 、 $\theta'_t$  はそれぞれ

$$\begin{aligned}\theta'_l &= 0.98 \left[ 2 \times (0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}) \right]^{-3/5} \lambda^{-1/5} [\sigma_l^2 \cos \gamma]^{3/5} \\ \theta'_t &= 0.98 \left[ 2 \times (0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}) \right]^{-3/5} \lambda^{-1/5} [\sigma_t^2 \cos \gamma]^{3/5}\end{aligned}\quad (\text{A.6})$$

開口直径  $D$ 、開口間距離  $d$  は観測装置固有の値であり、また天頂角  $\gamma$  は観測時刻の天体の高度から求められる。よって DIMM の観測から星像の揺らぎ ( $\sigma_l, \sigma_t$ ) を求めることでシーイングを測定することが可能となる。

### A.1.2 Fried パラメーター $r_0$ の直感的解釈

式 (??) より理論分解能 (Rayleigh limit) は

$$L[\text{rad}] = 1.22 \times \left( \frac{\lambda}{D} \right)$$

また式 (A.5) より DIMM で得られるシーイング値は

$$\theta = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}$$

これら 2 つの式を見比べると、開口直径  $D$  と Fried パラメーター  $r_0$  は同じ次元を持つことがわかる。このことから直感的には  $r_0$  はあるシーイング値の時の典型的な乱流の大きさ (空気の塊の直径) を表していると言える。

| シーイング値 [arcsec] | 空気の塊の直径 [cm] |
|-----------------|--------------|
| 3               | 4.2          |
| 2               | 6.3          |
| 1               | 12.6         |
| 0.5             | 25.2         |

表 A.1 波長 500nm のとき、典型的な空気の塊の直径

ここで DIMM の開口直径  $D$  について議論する。 $D$  は入射する光量をできるだけ多くして限界等級を上げたいという観測的要請からできるだけ大きくしたいと考えるが、前述のようにシーイングが悪い時には開口直径  $D$  が空気の塊より大きくなってしまふことがある。開口直径  $D$  が空気の塊より大きいということは開口の中に複数の空気の塊が入っている状態ということであり、このとき天体からの光は空気の塊ごとに到達角度を持つことになるので開口全体では到達角度が平均化され、シーイング値が見かけ上良くなってしまう。このためシーイングの悪いサイトであれば開口直径  $D$  を絞る必要がある。

## A.2 Tohoku DIMM

南極 40cm 赤外線望遠鏡に取り付けてドームふじ基地でのサイト調査に用いる DIMM を Tohoku DIMM と名付け開発した。Tohoku DIMM は東京大学が推進する TAO 計画においてサイト調査用に開発された UT-DIMM とほぼ同じ構成で構築されている (Motohara et al. 2004 [50])。特徴は開口が 2 つでなく 4 つであること、市販の CCD カメラ・パソコンを使い比較的安価にシステムを構築していることであり東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター 本原顕太郎助教らが開発したものをほぼそのままコピーさせて頂いた。

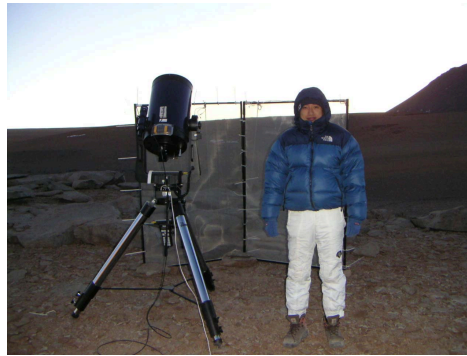


図 A.5 UT-DIMM と本原顕太郎助教 (東京大学 HP)

### A.2.1 DIMM 板

開口は 2 つでなく 4 つある。これは本原顕太郎助教が開発したソフトの仕様に寄るもので本質的に開口 2 つの DIMM と違いは無い。対角線上の 2 つを 1 セットとして DIMM の観測を行う。

DIMM 板は中心間距離  $d=250\text{mm}$ 、開口直径  $D=74\text{mm}$  でそれぞれの開口に頂角  $\sim 30''$  のウエッジプリズムが取り付けられている。DIMM 板は 5mm 厚のアルミ板、ウエッジプリズムはアルミブロックで保持し、スペーサーに 0.3mm 厚のテフロンを使用した。 $-80^\circ\text{C}$  でもウエッジプリズムに力が加わらないようアルミブロックを設計した。

|            |                    |
|------------|--------------------|
| 開口間距離 $d$  | 250 [mm]           |
| 開口直径 $D$   | 74 [mm]            |
| ウエッジプリズム頂角 | $\sim 30$ [arcsec] |

表 A.2 DIMM 板諸元



図 A.6 DIMM 板

### A.2.2 CCD カメラ

ワテック株式会社製の CCD カメラ WAT-100N を使用した。WAT-100N はインターレース型 CCD で出力はビデオ信号であり、NTSC 形式 (1 秒間 29.97 フレーム) で撮影される。このカメラの特徴は露出時間やゲイン、ガンマがマニュアルで設定できる点であり観測状況に応じて適切に調整できる。



図 A.7 WAT-100N

### A.2.3 ビデオキャプチャ

トムソン・カノーブス株式会社製 ADVC110 ビデオキャプチャを使用して。WAT-100N で取得したビデオ信号 (アナログ信号) を DV 形式のデジタル信号に変換し IEEE1394 ケーブルで制御パソコンに送る。



図 A.8 AV コンバーター

#### A.2.4 ソフトウェア

ソフトウェアは本原顕太郎助教の開発したものを利用した。このソフトウェアは IEEE1394 端子から取り込んだ DV ファイルから 1 フレームごとに 4 つの重心位置を検出し、これを 120 回繰り返し行ってそれぞれ対角線上の開口について  $\sigma_l$ 、 $\sigma_t$  を求め、そこからシーイング値を計算し出力するというものである。出力されたシーイング値は天頂角補正を行っていないので新たに補正するソフト DIMMZ.cpp を開発して正しいシーイングを得るようにした。

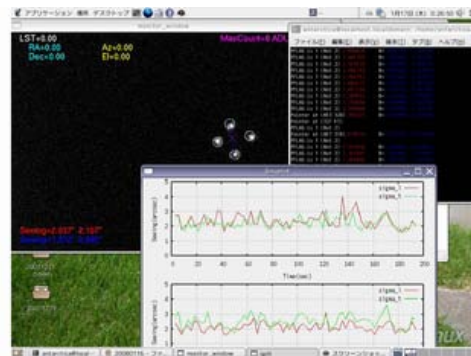


図 A.9 ソフトウェア実行中のディスプレイ

### A.3 Tohoku DIMM の性能評価

Tohoku DIMM によって得られたシーイング値が妥当かどうか検証する為に東広島天文台所有の広大 DIMM と同時比較観測を行い、シーイング値が正しく得られているのか検証を行った。比較観測で用いた広大 DIMM は岡山天体物理学観測所で運用されている京大 DIMM との同時観測において、得られたシーイング値が妥当であると結論づけられている (千代延真吾 2005 [15])。

### A.3.1 比較観測

広大 DIMM との比較は 2008 年 7 月 13 日、10 月 3 日、10 月 9 日、10 月 13 日の合計 4 夜行った。

Tohoku DIMM および広島 DIMM のスペックを表 A.3 に記す。なお Tohoku DIMM は物理 A 棟屋上の天体観測ドーム (小) の中に設置されている南極 40cm 赤外線望遠鏡に取り付けられており、広大 DIMM は天体観測ドーム (小) から西に 5m 程離れたところに、直接屋上に設置して観測を行った。

|                        | 東北 DIMM     | 広大 DIMM           |
|------------------------|-------------|-------------------|
| 望遠鏡                    | AIRT40      | Meade LX200GPS-20 |
| 口径 [mm]                | 400         | 203               |
| 焦点距離 [mm]              | 5190        | 2000              |
| 開口直径 D [mm]            | 74          | 50                |
| 開口間距離 d [mm]           | 250         | 144               |
| プリズム頂角 [arcsec]        | 30          | 50                |
| カメラ                    | WAT-100N    | WAT-100N          |
| ピクセルサイズ [arcsec/pixel] | 0.390×0.455 | 0.403×0.451       |
| 露出時間 [sec]             | 1/1000      | 1/1000            |

表 A.3 Tohoku DIMM および広島 DIMM の詳細。焦点距離は観測時に 2 重星を測定して求めた。

なおピクセルサイズの測定はこれらの観測に先立って、離角の判っている二重星を観測することで求めた。

### A.3.2 Tohoku DIMM データ解析

東大 TAO 計画で使用された UT-DIMM 用のシーイング解析ソフトをそのまま使用した。出力された結果は天頂角補正を行っていないので、DIMMZ.cpp を用いて天頂角を補正した。

### A.3.3 広大 DIMM データ解析

広大 DIMM は京大 DIMM のシーイング解析ソフト seemon2 でシーイング値を得ている。このソフトでは観測地の経度緯度の情報が必要で、観測地毎にコンパイルし直さないと正しい値を得ることができない。

広大 DIMM は借り物でありコンパイルし直すことはできなかった。そこで

DIMMCN.cpp というプログラムを書いて時刻・観測地を補正し、さらに天頂角も補正した。

### A.3.4 観測結果

観測結果を図 A.10~A.13 に示す。図上が Tohoku DIMM、図下が広島 DIMM で得たシーイングを示しており横軸は観測時刻 (JST)、縦軸がシーイングの大きさを表している。10 月の観測は長時間に及ぶ観測でありデータ解析の都合から 30 時間制で表してある。

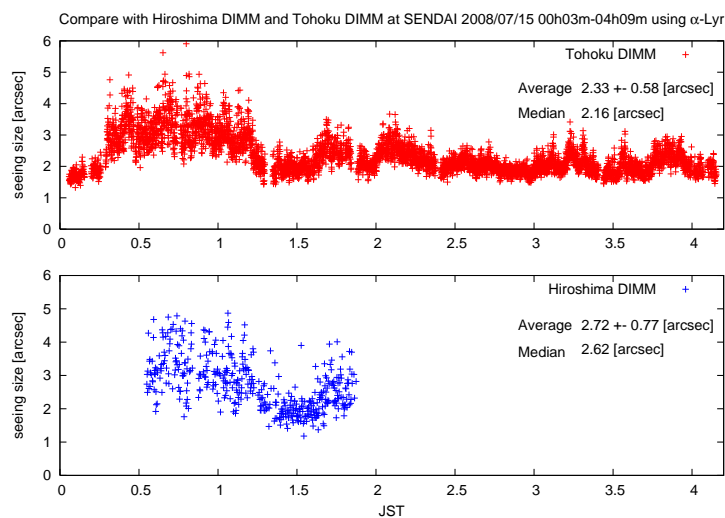


図 A.10 2008 年 7 月 13 日の観測結果。(上)Tohoku DIMM、(下) 広島 DIMM。横軸が時刻で縦軸がシーイングの大きさを表す。

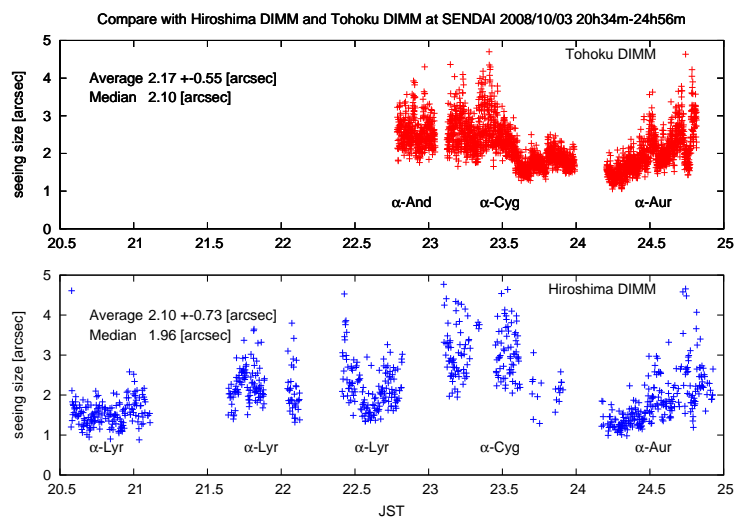


図 A.11 2008 年 10 月 3 日の観測結果

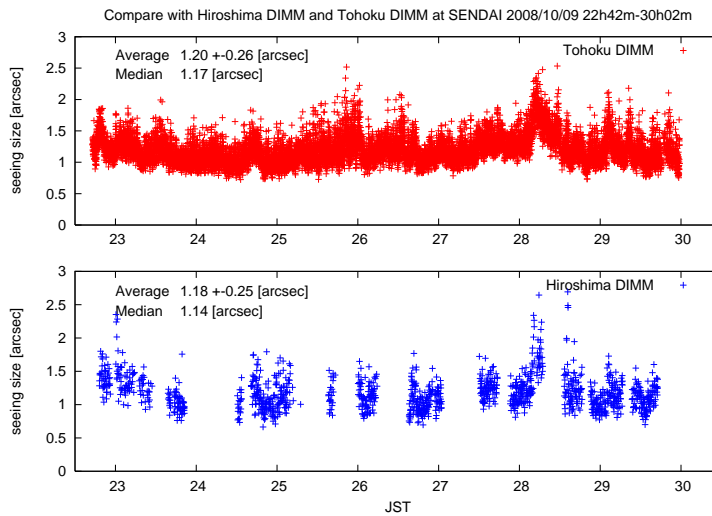


図 A.12 2008 年 10 月 9 日の観測結果

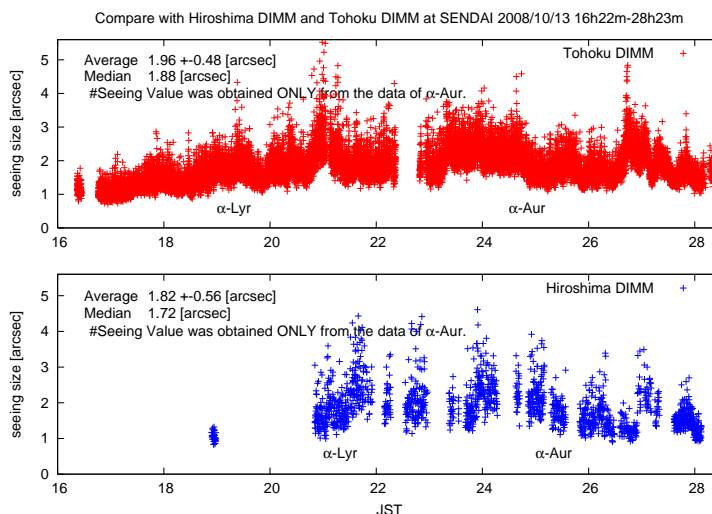


図 A.13 2008 年 10 月 13 日の観測結果

なお 10 月 13 日の観測結果に関しては広大 DIMM の時計が正しくないことが後に判った。その為この日の観測に限って Tohoku DIMM と広大 DIMM の観測結果を直接比較することはできない。しかし、シーイング値の統計量などの観測結果は観測時刻には依存しない為データとしては十分用いることができる。

### A.3.5 考察

図 A.14~図 A.17 が観測日毎の得られたヒストグラムである。表 A.4 に得られたシーイングの平均値、中間値 (Median) を示す。単位は arcsec である。

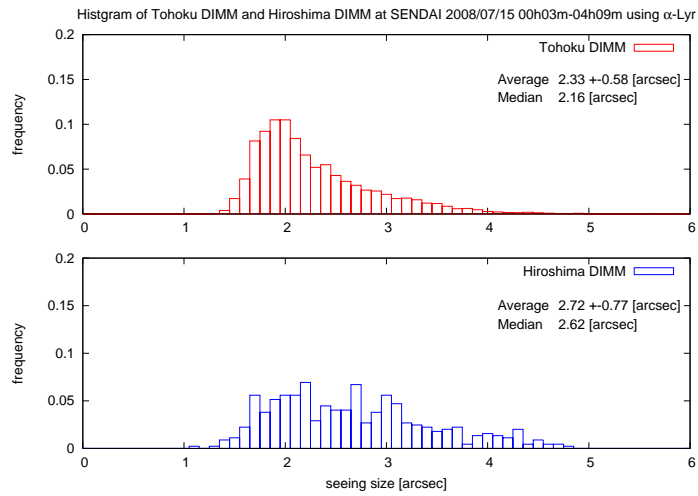


図 A.14 2008 年 7 月 13 日の測定結果ヒストグラム。横軸がシーイングの大きさと縦軸が頻度を表す。

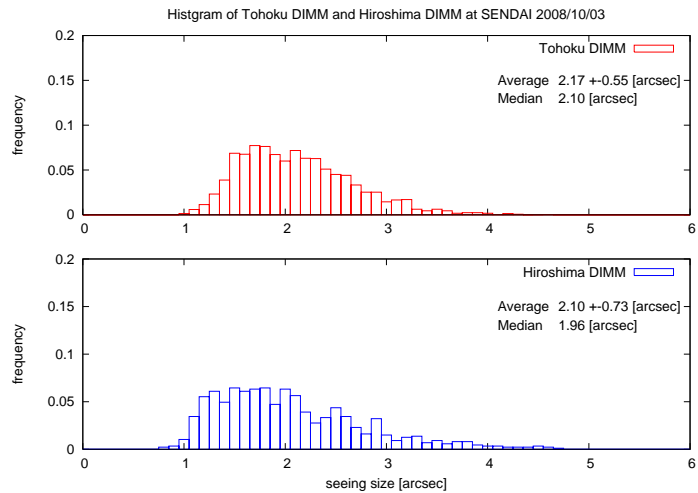


図 A.15 2008 年 10 月 3 日の測定結果ヒストグラム

|           | 東北              |        | 広島              |        |
|-----------|-----------------|--------|-----------------|--------|
|           | 平均値             | Median | 平均値             | Median |
| 7 月 13 日  | $2.33 \pm 0.58$ | 2.16   | $2.72 \pm 0.77$ | 2.62   |
| 10 月 3 日  | $2.17 \pm 0.55$ | 2.10   | $2.10 \pm 0.73$ | 1.96   |
| 10 月 9 日  | $1.20 \pm 0.26$ | 1.17   | $1.18 \pm 0.25$ | 1.14   |
| 10 月 13 日 | $1.96 \pm 0.48$ | 1.88   | $1.82 \pm 0.56$ | 1.72   |

表 A.4 シーイングの平均値と Median [arcsec]



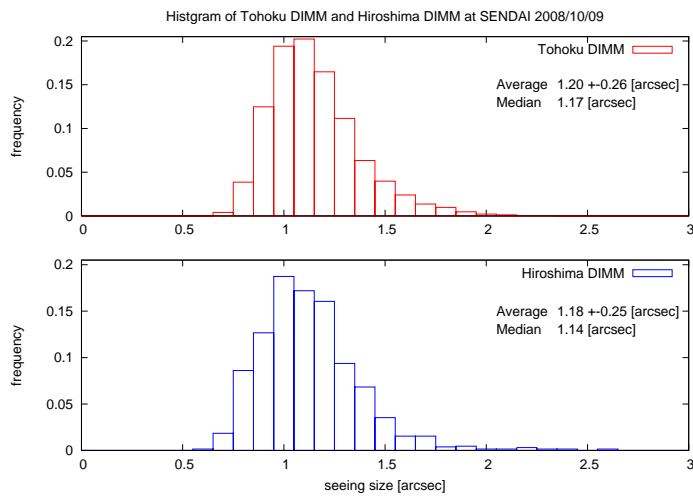


図 A.16 2008 年 10 月 9 日の測定結果ヒストグラム

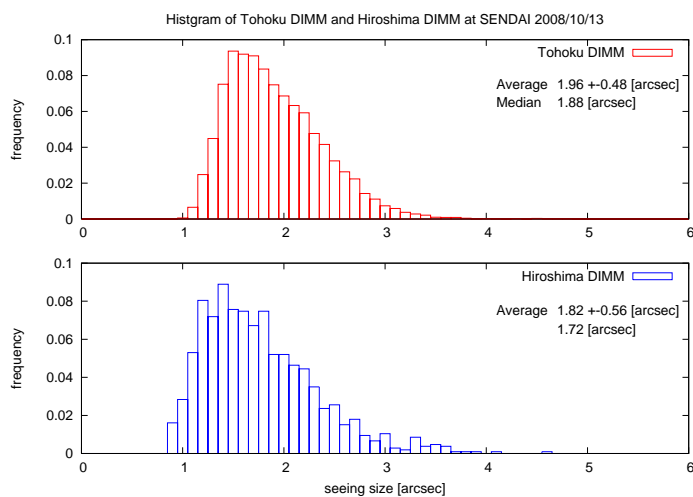


図 A.17 2008 年 10 月 13 日の測定結果ヒストグラム

観測結果から言えることは広大 DIMM で観測されたシーイングの変化は Tohoku DIMM でも検出でき、また両 DIMM の平均値・Median は誤差の範囲で一致するという事である。ヒストグラムはその日のシーイングの安定具合によって形が大きく変わることが読み取れるが、シーイングが安定している日は両 DIMM で差がほとんど見られない。このことから Tohoku DIMM はシーイング測定装置として正しく機能することと結論づけることができる。

よって南極 40cm 赤外線望遠鏡に取り付けた Tohoku DIMM を用いることでドームふじのシーイング測定は可能であることが示された。



## 付録 B

# 極軸調整方法

南極 40cm 赤外線望遠鏡は極軸調整プレートに据え付けられる<sup>\*1</sup>。極軸調整プレートを操作し、極軸つまり RA 軸をを正確に天の北極/天の南極と平行にするのが極軸調整である。この章では南極 40cm 赤外線望遠鏡の設置と、極軸望遠鏡を用いた目視による簡易的な極軸調整方法を述べる。これらの作業を行うことで効率的に設置誤差を求めることができる。

なお最終的には第 6 章で述べた追尾誤差から設置誤差の向きと大きさを定量的に求め、調整することになる。

### B.1 流れ

1. できる限り高精度に望遠鏡を設置
2. 赤経軸と極軸望遠鏡を平行にする (極軸望遠鏡を合わせる)
3. 極軸望遠鏡を使って極軸を合わせる
4. 恒星を動きを観測して極軸を合わせる

### B.2 準備

#### B.2.1 望遠鏡の設置

分度器、方位磁石を使ってできる限り望遠鏡の極軸を正しい方向に向ける。なお方位磁石の向く磁北の方向と実際の北の方向は偏角と呼ばれる角度だけズレる為補正する必要がある。表 B.1 に仙台 (物理 A 棟)、陸別 (2008 年に寒冷地実験を実施)、ドームふじでの値を示す。ただし方位磁石は鉄筋コンクリート内の鉄等の磁場にも影響し、局所的に大きく異なった方向を向く可能性があるので注意が必要。なお南極では GPS を使って方位と位置を確認することになる。

---

<sup>\*1</sup> 第 4 章 南極 40cm 赤外線望遠鏡の改良 を参照のこと

| 場所    | 経度       | 緯度      | 偏角 (西偏) |
|-------|----------|---------|---------|
| 陸別    | 143°46'E | 43°27'N | 8°58'   |
| 仙台    | 140°50'E | 38°16'N | 7°36'   |
| ドームふじ | 39°42'E  | 77°19'S | -       |

表 B.1 各地の経緯と偏角

### B.2.2 赤経軸と極軸望遠鏡の軸の一致

南極 40cm 赤外線望遠鏡の東側フォーク部に極軸望遠鏡が取り付けられている\*<sup>2</sup>。まずこの極軸望遠鏡を赤経軸と平行になるよう調整する。極軸望遠鏡は調整ネジ 6 本で固定されているだけなので振動等で狂いやすい為、極軸調整を行う前には必ず調整が必要である。



図 B.1 (左) フォーク東側に取り付けられた極軸望遠鏡。6 本の調整ネジによってその向きを調整する。(右) 極軸望遠鏡の十字線パターン。暗視野照明装置によって赤く照らし出される。

極軸望遠鏡の接眼レンズには図 B.1 のようなパターンの十字線があり、暗視野照明装置によって赤く照らし出されるよう作られている。

ここで極軸望遠鏡の中心、つまり十字線の交点が RA 軸の延長線上と一致すれば RA 軸と極軸望遠鏡は完全に平行になったといえる。

具体的な調整は、まず RA 軸クランプ (ハンドル) を緩め赤経軸が自由に回転できるようにしておく。

次に極軸望遠鏡の視野内の明るい恒星 (北極星) を見ながら手動で RA 軸を大きく回転させる。すると北極星は赤経軸の回転の軸を中心に回転する。この星の回転中心位置を目視で確認して、十字線とが一致するように 6 本の調整ネジを調整して極軸望遠鏡の向きを

\*<sup>2</sup> 第 3 章 南極 40cm 赤外線望遠鏡を参照のこと

変え十字線の交点を星の開店中真一と一致させる。何度か繰り返すことによって良い精度で合わせることができる。図 B.2 は極軸望遠鏡の調整作業のイメージである。



図 B.2 (左) 極軸望遠鏡がずれている状態。星の回転中心位置と十字線の交点が一致していない。(右) 極軸望遠鏡があった状態。

以上で極軸あわせの準備が整った。

### B.3 極軸望遠鏡と星図を見比べて極軸を合わせる

ここから実際に極軸を合わせる作業となる。

まずおおざっぱな極軸調整として、極軸望遠鏡の視野内に見える明るい恒星と星図を見比べ極軸調整プレートの調整ネジを回して目視で極軸を合わせる。

なお極軸望遠鏡はその光学系にプリズムが使われているので左右逆像となるので注意すること。



図 B.3 極軸調整プレート。写真手前に見えるネジが水平調整ネジでプレートに垂直に立っているのが高度調整ネジである。

## B.4 恒星の動きを観測して極軸を合わせる

次に恒星の動きを目視で観測することで極軸の向きを追い込む。南極 40cm 赤外線望遠鏡の接眼部に十字線入りのアイピースを取り付け星の位置変化を観測する。倍率は 300 倍程度が良い。

恒星を視野内に導入したらその位置を十字線の中心に、十字線の向きを東西南北の方向に合わせておく。

### B.4.1 方位軸の調整

南中前後、天の赤道付近 (南の高度  $50^\circ$  付近) の明るい恒星を導入する。極軸がずれていると星の動き (日周運動) の方向と望遠鏡の追尾運動の方向が一致しない。その為図 B.4 のように極軸が西にずれていると、10 分程度間隔を開けて望遠鏡を覗くと恒星が北へ動いて見える。(東にずれていると星は南に動く。) この動きを見て方位調整ネジを回して極軸を調整する。

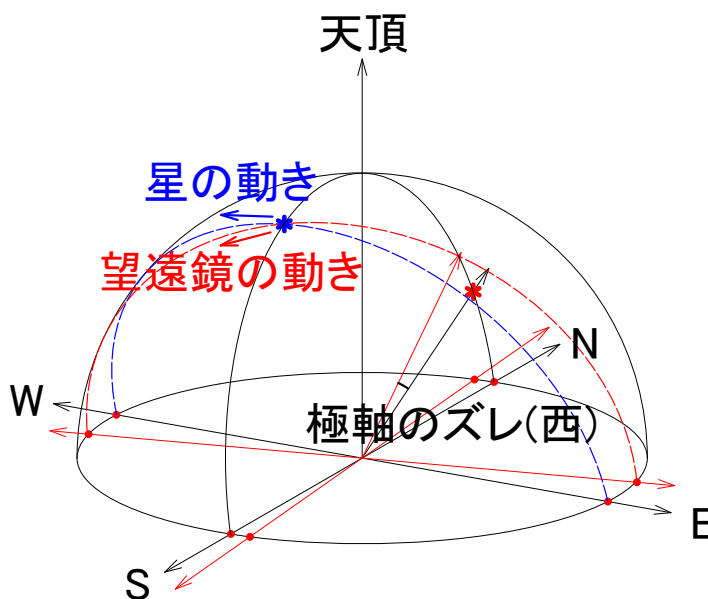


図 B.4 方位軸の調整。天の赤道と子午線の交点付近の恒星を用いて行う。

これを繰り返し行い、南北に動かなくなるまで行う。

### B.4.2 高度軸の調整

水平軸と同じ要領で行う。高度軸の検定を行う場合、東の地平線付近の恒星を用いる。もしくは東の地平線と北極星を結んだ直線上付近の恒星を用いても良い。極軸がズれてい

ると星の動き（日周運動）の方向と望遠鏡の追尾運動の方向が一致しないので、図 B.5 のように極軸が高すぎる場合、10 分程度間隔を開けて望遠鏡を覗くと恒星が北へ動いて見える。（低すぎると星は南へ動く。）この動きを見て高度調整ネジを回して極軸を調整する。

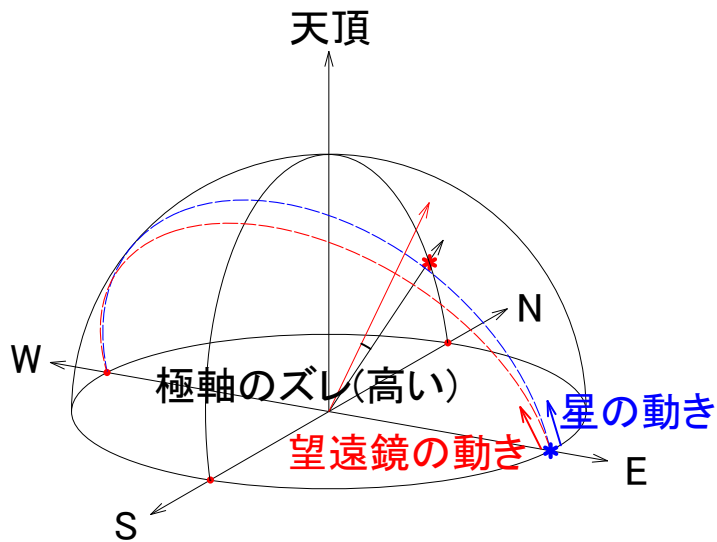


図 B.5 高度軸の調整。東または西の地平線付近の恒星を用いて行う。

| 調整する軸 | 望遠鏡を向ける方向 | 星の動き | 極軸ズレの向き | 修正       |
|-------|-----------|------|---------|----------|
| 水平軸   | 南中付近の天の赤道 | 北    | 西       | 極軸を東に向ける |
| 水平軸   | 南中付近の天の赤道 | 南    | 東       | 極軸を西に向ける |
| 高度軸   | 東の地平線付近   | 北    | 高       | 極軸を下げる   |
| 高度軸   | 東の地平線付近   | 南    | 低       | 極軸を上げる   |
| 高度軸   | 西の地平線付近   | 北    | 低       | 極軸を上げる   |
| 高度軸   | 西の地平線付近   | 南    | 高       | 極軸を下げる   |

表 B.2 極軸調整方向一覧

### B.4.3 注意

望遠鏡のハンドコントローラーで [S] を押すと望遠鏡視野内で星は「見かけ上」北に動く。つまりハンドコントローラーを押して動く方向と実際の方向は逆である。図 B.6 と図 B.7 はその概要である。この点に注意して、望遠鏡の操作を行う必要がある。

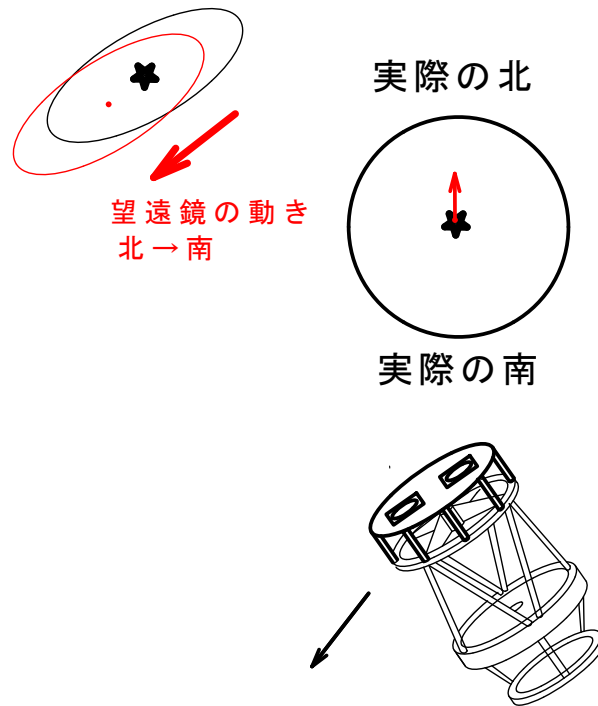


図 B.6 望遠鏡の動きと見かけの星の動き



図 B.7 ハンドコントローラーを押して動く方向と実際の方向。(左) コントローラーを押して動く方向、(右) 実際の方向。



## 付録 C

# 光軸調整方法

南極 40cm 赤外線望遠鏡の光学性能をフルに引き出す為には光軸調整が必要不可欠である。この章では光軸調整方法を詳しく解説する。なお南極 40cm 赤外線望遠鏡は赤外線望遠鏡である為に以下の点が通常の 40cm クラスの望遠鏡と異なる。

- 副鏡に取り付けられた円錐反射鏡
- 主鏡を鏡の外周で固定
- 主鏡バツフルが無い

これらの特徴をふまえ、光軸調整を行う必要がある。

なおこのレポートで言う光軸調整とは明るい時に主鏡や副鏡の位置・傾き調整を行うというもので、実際の観測に必要な精度を出す為には接眼部に焦点距離の短いアイピースを取り付けて高倍率で視野中心に導入した明るい恒星を目視で観測し、焦点内外像の形から追い込む作業が必要となる。この作業は熟練が必要な作業でありマニュアル化が難しい為本章の最後に簡潔に述べた。

### C.1 光軸合わせの原理

第 3 章で述べたように、南極 40cm 赤外線望遠鏡はカセグレン式反射望遠鏡である。図 C.1 に南極 40cm 赤外線望遠鏡の鏡筒部の模式図を示す。

ここで光軸合わせとは、「主鏡光軸」「副鏡光軸」「観測装置の光軸」を共通の軸上になるよう調整する作業のことである。主鏡光軸・副鏡光軸が傾いていたり共通軸上に無い場合、望遠鏡本来の性能を出すことができない。またザイデルの 5 収差 (球面収差・コマ収差・非点収差・歪曲収差・湾曲収差) のうちコマ収差は入射角度に比例して大きくなるので観測装置の光軸を主-副鏡共通の光軸と一致させると収差が最小となり都合がよい。

なお一般に主鏡・副鏡の光軸はそれぞれの中心を通っていると暗黙に仮定されてある。

ところで第 7 章によると一般に Dec 軸と光学系全体の光軸は直交していなければ天体の導入に誤差を生じるが、南極 40cm 赤外線望遠鏡には Dec 軸と光学系の直交を調整す

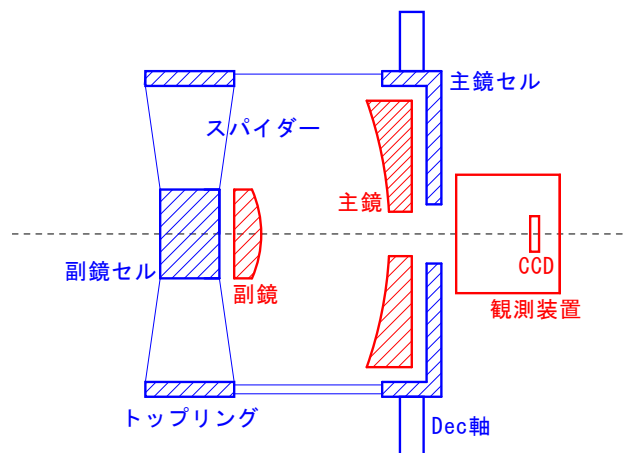


図 C.1 南極 40cm 赤外線望遠鏡の鏡筒部の模式図

る機構が搭載されていない。

ここで Dec 軸と光軸の直交誤差を 0 とするには Dec 軸と主鏡光軸が直交するように調整すれば良い事になるのだが、観測装置は主鏡セルに固定する為、この主鏡セルを基準として光軸合わせをする必要があり、その為主鏡のみ傾いてしまうことになる。主鏡が 1' 傾いてしまうと第 8 章の図 8.3 で示したスポットダイアグラムのようにその結象性能は大きく損なわれ観測が成り立たない。

直交誤差による観測への影響は導入精度が低下することであったが、第 7 章の結果から Dec 軸と光軸に直交誤差はあるものの、現在と同程度の誤差であれば 2010 年度のサイト調査・試験観測に支障の出る大きさではないと示されている。そこで Dec 軸と光軸の直交誤差が生じることを許して優先して光軸を合わせることにする。

## C.2 調整箇所

前述の通り、主鏡セルを基準に光軸を合わせる。これは観測装置を直接主鏡セルに取り付ける為である。よって南極 40cm 赤外線望遠鏡の光軸調整において調整するのは「主鏡の位置と傾き」「副鏡の位置と傾き」である。

## C.3 目視による光軸調整

明るいところで目視による光軸調整を行う。

まず主鏡・副鏡の中心がそれぞれ主鏡セル・トップリングの中心となるように望遠鏡を組み立てておく。この時第 8 章の図 8.2、図 8.4 で示したようにその中心が 0.5mm ズレていても主にコマ収差が生じて結象性能は大きく低下する。よって可能な限り精密に合わせる必要がある。

主鏡セルやトップリングは旋盤加工で製作されている為、その中心は良い精度で出てい

ると考えられる。そこでノギス等を使い可能な限り精密に中心となるよう調整する。

次に望遠鏡の接眼部から (アイピースなど何もつけず) 直接覗いて主鏡・副鏡の傾きを調整する。なおこの作業である程度光軸を追い込めないと後述の恒星を用いた光軸調整をいくら行っても光軸はまず合わない。

ところで実際は接眼部の中心に目を持って行くのが難しい。そこで図 C.2 に示したセントラリングアイピースと呼ばれるレンズが無くその代わりに中心に小さな穴が開いているアイピースを使用して接眼部の中心から望遠鏡を覗くことになる。



図 C.2 センタリングアイピース (大)(小)

### C.3.1 光軸が合っている時

まず光軸が合っている時、接眼部から直接 (接眼レンズや観測装置を外して) 望遠鏡を覗き込むと図 C.3 のように主鏡や副鏡等がすべて同心円に見える。具体的には、外側の円から

1. 接眼部の内壁
2. 直接見える「副鏡」
3. 直接見える副鏡に映った「主鏡」
4. 直接見える副鏡に映った主鏡に映っている「副鏡」
5. 直接見える副鏡の「円錐反射鏡」

である。但し 4 番 (直接見える副鏡に映った主鏡に映っている「副鏡」) は 5 番 (直接見える副鏡の「円錐反射鏡」) に遮られ見えない。

今後、望遠鏡をのぞき込んだときに見える「円」をこの番号で呼ぶ。

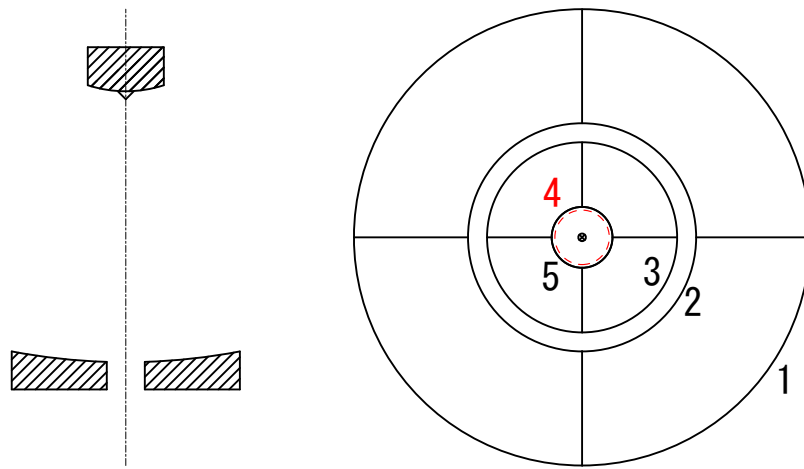


図 C.3 光軸が合っている時

### C.3.2 副鏡が傾いている時

副鏡光軸が主鏡セルを基準とする軸に対して副鏡位置で一致しているが傾いている場合の状態を図 C.4 に示す。この場合、3 番 (直接見える副鏡に映った「主鏡」)、4 番 (直接見える副鏡に映った主鏡に映っている「副鏡」) がズレて見える。

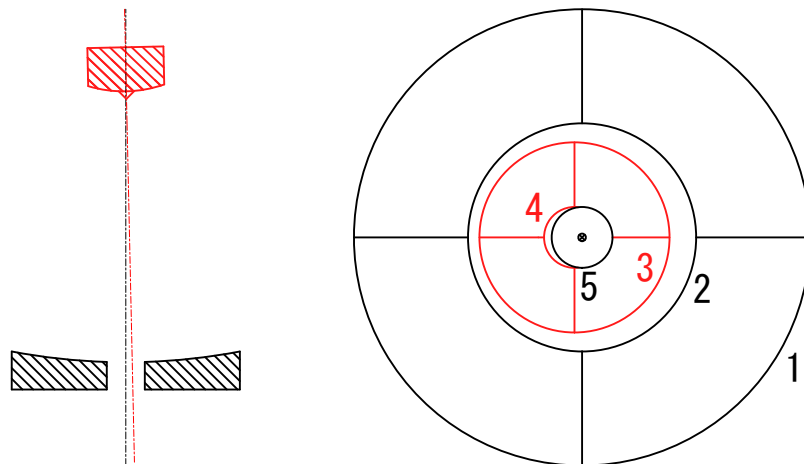


図 C.4 副鏡が傾いている時

### C.3.3 主鏡が傾いている時

主鏡光軸が主鏡セルを基準とする軸に対して主鏡位置で一致しているが傾いている場合の状態を図 C.5 に示す。この場合、本来見えないはずの 4 番 (直接見える副鏡に映った主鏡に映っている「副鏡」) がズレて見える。

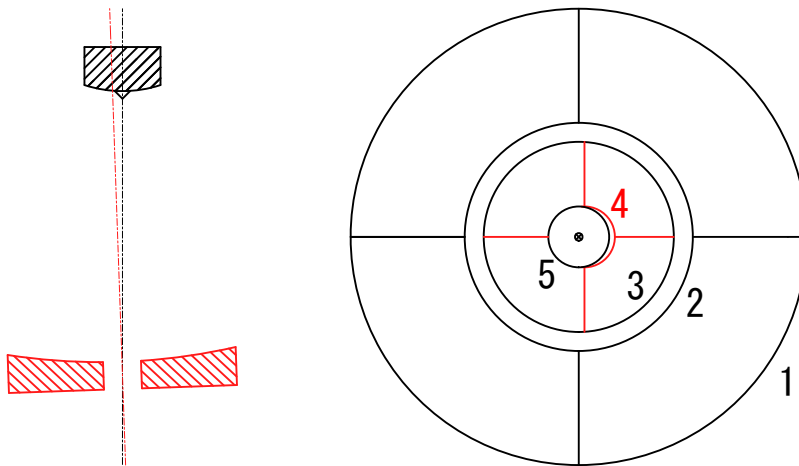


図 C.5 主鏡が傾いている時

実際の調整時は副鏡・主鏡共に傾いている可能性がある為、接眼部から覗いて図 C.3 になるように根気よく調整する必要がある。

## C.4 恒星を使った光軸の追い込み調整

望遠鏡の接眼部から覗いて 1 番～5 番まで同心円になるように調整するだけでは精度が足りない。そこで恒星を使って光軸の追い込み調整を行うことになる。

実際の流れとしては望遠鏡の接眼部に短焦点 (=高倍率) アイピースを取り付けて恒星を 視野中心に導入 しその星の「ピンぼけ」具合から判断する。視野中心に光軸中心があると仮定するとコマ収差の影響が無いのは視野中心のみの為、視野中心の恒星像を見て光軸調整する必要がある。

図 C.6 は焦点内像と焦点位置での星像を示した模式図である。光軸がズレている場合、焦点内像では中心の黒い穴 (=副鏡の影) が中心に見えず、また焦点位置でも尾を引いたように 1 点に集まらない。

よって焦点内像、焦点像、焦点外像を見て光軸が合っているかどうかどうか判断する。正しくない場合はまず主鏡調整ネジを「ほんの少し」回して焦点内像で副鏡の影が中心に見えるように調整し、その後副鏡調整ネジを「ほんの少し」回して図??となるよう微調整する。これは第 8 章 図 8.3、図 8.5 より、同じ傾き誤差であっても主鏡の傾き誤差の方が



図 C.6 焦点内像 (もしくは焦点外像) では副鏡の影が中心に見えない。また焦点像も「尾」をひいているように見える。(左) 光軸がズレている時の焦点内像と焦点像、(右) 光軸が合っている時の焦点内像と焦点像。

より星像を悪化させる原因となっているからである。

なおこの作業は熟練が必要である。表 C.1 に光軸調整ネジとその移動量を示す。

| 調整ネジ 1/8 回転 (45°) の角度変化 |       |
|-------------------------|-------|
| 主鏡調整ネジ                  | 0.94' |
| 副鏡調整ネジ                  | 2.1'  |

表 C.1 各光軸調整ネジの 1 回転での角度変化

表 C.1 より光軸調整ネジ 1/8 回転 (45°) に対する主鏡・副鏡の実際の角度変化はそれぞれ 0.94'・2.2' と比較的大きい。第 8 章 表 8.2 に示したように主鏡の傾き 1' での星の大きさ 1.61'' 程度であり、南極 40cm 赤外線望遠鏡の回折限界 (1.4'' @ 2.2 $\mu$ m) やドームふじ基地で予想されるシーイングサイズ (0.3'' @ 0.5 $\mu$ m) に対して大きい。よって主鏡は 1/16 回転 (22.5°) 程度の精度で慎重に調整しなければならないと言える。

また副鏡の傾き 1' に対する星の大きさは 0.338'' 程度であるから調整ネジ 1/8 回転 (45°) の精度でも十分良像範囲に調整可能であると言える。

なお恒星を使った光軸の追い込み調整は調整ネジを動かす人と望遠鏡を覗く人の 2 人で作業すると短時間に効率的に合わせることができる。作業ミスが減らす為にもできるだけ 2 人で作業することを推奨する。

## 付録 D

# 脱脂・グリスアップについて

南極 40cm 赤外線望遠鏡には天体の導入・追尾の為 RA 軸・Dec 軸共にステッピングモーター 減速ギヤ ウォームネジ ウォームホイールと回転運動を伝達している。またピント調整では副鏡ユニット内部にステッピングモーター 減速ギヤ 上下動ユニットによって副鏡位置を前後させる機構がある。これらの機構はドームふじ基地の最低気温-80でも確実に動作する事が求められているが通常のグレイスでは凍結し動作させることができない。グリスは油脂であり、ある温度を下回ると固体となりグリスとして機能しなくなるからである。

そこで-80 の環境で使用する為南極 40cm 赤外線望遠鏡ではソルベイソレクシス株式会社の「FOMBLIN GREASE 特殊環境用グレード ZLHT」を使用した。これは使用温度範囲目安 (°C): -80/200 の製品で、-80°C でもグリスとして機能することが確かめられている (村田千紘 2009 [20])



図 D.1 FOMBLIN GREASE (ソルベイソレクシス株式会社 HP)

このグリスの使用にあたっては、モーターやギヤ Box・ウォームネジホルダー内の汚れやグリス等を完全に除去しなければ 100% の性能を発揮できない。そこで脱脂・グリスアップについてまとめる。

## D.1 原理

グリスはモーター・ギヤ Box・ウォームネジホルダーを構成するベアリングとギヤに付着している。原理的にこれらの部品が完全に分解できればウエスで拭く、アセトンで溶かす等物理的・科学的に)に完全に除去可能である。しかし通常は分解できずその隙間から少しずつ除去しなければならない。

## D.2 方法と結果

表 D.1 は各種の方法でグリスを取り除こうと試行した結果である。

| 方法            | 結果                      |
|---------------|-------------------------|
| ガソリン + 歯ブラシ   | グリスは溶けず、歯ブラシで擦っても除去不能   |
| 灯油 + 歯ブラシ     | グリスは溶けず、歯ブラシで擦っても除去不能   |
| シンナー + 歯ブラシ   | グリスは溶けず、歯ブラシで擦っても除去不能   |
| エタノール + 歯ブラシ  | グリスは溶けず、歯ブラシで擦っても除去不能   |
| アセトン + 歯ブラシ   | グリスは溶けず、歯ブラシで擦っても除去不能   |
| 超音波洗浄機 (アセトン) | 内部に付着したグリスは除去不能         |
| ブレーキクリーナー     | グリスは溶けないが、ジェットでグリスは除去可能 |
| パーツクリーナー      | グリスは少し溶け、ジェットでグリスは除去可能  |

表 D.1 ベアリングに付着したグリスの洗浄方法とその結果。

なお表 D.1 中のブレーキクリーナーとは呉工業株式会社のブレーキクリーナー「ブレーキクリーン」、パーツクリーナーは同社金属パーツクリーナー「レクタクリーン」の事である。



図 D.2 ブレーキクリーンとレクタクリーン (呉工業株式会社 HP)



## D.3 考察

実験結果からベアリングの隙間等に付着したグリースは、ジェット（エア）で押し出す方法でのみ除去可能であることが判った。よって今後行う脱脂・再グリスアップ作業では、高圧エアを用いて旧グリスを完全に取り除けば良いことが判った。



## 付録 E

# 球面三角法

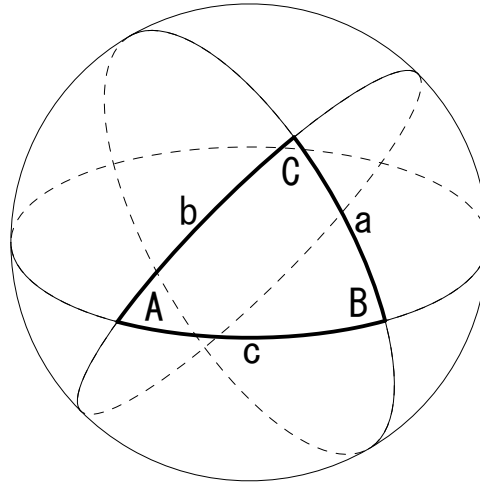
第 6 章、第 7 章で用いた球面三角法について簡単に説明する。球面三角法とは球面上の三角形の 3 つの辺と 3 つの角の関係を表したものである。平面三角法との最大の違いは 辺の大きさを長さではなく球の中心角によって表す ことである。これは考える球の直径を 1 とする単位球としていることに相当する。

なお球面三角法は天球面に存在する天体の位置や角度の計算などに利用されてきたが、現代ではコンピューターでより扱いが簡単な回転行列を用いた計算が一般となりあまり使われなくなった。

### E.1 球面三角形

球面三角形とは球面上の 3 点を結ぶ 3 つの大円の弧で囲まれた部分のことである。大円とはその弧を含む平面が球の中心を通るような円の事である。大円に対して小円と呼ばれる円も定義され、これはその弧が球の中心を通らないような円のことである。よって小円の弧を含む三角形は球面三角形とは言えず次節で示す定理は成り立たない事に注意が必要である。

なお球面三角では図 E.1 のようにそれぞれの角の大きさをアルファベット大文字で ABC、これに対応する辺の長さ (大きさ) を小文字でアルファベット abc と表すと約束する。

図 E.1 球面三角形  $\triangle ABC$ 

## E.2 球面三角法の各定理

球面三角形では余弦定理、正弦定理、正弦余弦定理が成り立つ。証明は専門書に譲るとして以下に各法則を示す。

余弦定理

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} \quad (\text{E.1})$$

正弦定理

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A \quad (\text{E.2})$$

正弦余弦定理

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A \quad (\text{E.3})$$

これらを用いることで天球上での天体の位置を計算することができる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって多くの人に助けていただきました。

まず指導教官の市川隆教授に感謝します。市川先生には装置開発を進める為に必要なあらゆる環境を与えていただきました。またハワイ観測所での MOIRCS を用いた遠方銀河観測、中国・南京天文光学技術研究所への訪問、陸別町での寒冷地試験観測等、様々な経験をさせていただきました。さらに 2010 年 11 月からの第 52 次日本南極地域観測隊では南極天文コンソーシアムから同行者として南極ドームふじ基地に赴くという、貴重なチャンスも与えて下さいました。日本の天文コミュニティから初めて南極に足を踏み入れる大学院生として、期待に応えられるよう存分に力を発揮したいと存じます。これからもよろしく申し上げます。

次に同研究室の皆様へ感謝します。実験や観測、ゼミ等で交わした多くの議論が本研究の基礎となったことは言うまでもありません。特に南極 40cm 赤外線望遠鏡の分解・実験ではいつも私の為に作業を手伝っていただきました。本当にありがとうございました。

天文学教室のスタッフ・学生の皆様へ感謝します。諸先生方には勉強面だけではなく様々な面で色々ご指導いただきました。先輩の皆様には至らぬ私を叱咤激励していただきました。同期の皆様とはいつも議論したり食事したり飲みに行ったりといつもつきあっていただきました。後輩の皆様には観測装置の分解や屋上での作業で、いつも笑顔で作業を手伝ってくれました。本当に感謝しています。

最後に家族、そして奏子に感謝します。小学 5 年生の時に見た百武彗星からもう今年で 14 年も経ちますが、未だに星は私を魅了してなりません。私はこれからも晴れた夜には出来る限り星空の下で過ごしていきたいと思えます。



## 参考文献

- [1] 家正則 他 2007, 宇宙の観測 I -光・赤外天文学, 日本評論社
- [2] 市川隆 2008, “*Astronomical Observatory at Dome Fuji*”, 南極ゼミ資料
- [3] 小野延雄、柴多鉄治 編 2006, 日本南極観測隊人間ドラマ 50年, 丸善株式会社
- [4] オリエンタルモーター総合カタログ 2007/2008, オリエンタルモーター株式会社
- [5] 加藤正名 他 1988, 新機械工学シリーズ 材料力学, 株式会社朝倉書店
- [6] 神沼克伊 2009, 地球環境を映す鏡南極の科学, 株式会社講談社
- [7] 菊池正紀、和田義孝 2004, 図解入門 よくわかる材料力学の基本, 株式会社秀和システム
- [8] 国立天文台 2006, 理科年表平成 18年, 丸善株式会社
- [9] KHK 総合カタログ 3009, 小原歯車工業株式会社
- [10] 表泰秀 他 1998, 国立天文台報, 第 3 巻, 99-115
- [11] 高遠徳尚 2007, 新型小型水蒸気量モニターの検討, 南極ゼミ資料
- [12] 高遠徳尚 他 2008, 南極資料, Vol.52, 特集号, 182
- [13] 谷口義明 他 2007, 銀河 I -銀河と宇宙の階層構造, 日本評論社
- [14] 田中濟 他 1995, 国立天文台報 Vol.2, No.3
- [15] 千代延真吾 2005, 広島大学 1.5m 望遠鏡移設シーイングのモニター装置開発と測定, 卒業論文 (広島大学)
- [16] 帝国書院編集部 1997, 新詳高等地図初訂版, 株式会社帝国書院
- [17] 天文年鑑編集委員会 2008, 天文年鑑 2009, 誠文堂新光社
- [18] 萩原国雄 1994, 材料力学 考え方解き方 (第 3 版), 東京電機大学出版局
- [19] 藤本元 御牧拓郎 監修 2005, 初心者のための機械製図 (第 2 版), 森北出版株式会社
- [20] 村田千紘 2009, 南極 40cm 赤外線望遠鏡の開発, 修士論文 (東北大学)
- [21] 本原顕太郎 1997, すばる OHS 用冷却赤外分光カメラ CISCO の開発, 修士論文 (京都大学)
- [22] 山田義昭 1995, 機械現場の基礎物理 1 初めて学ぶ材料力学, 技術評論社
- [23] 横尾武夫 編 1991, 宇宙を見る II -現代天文学実験, 株式会社恒星社厚生閣
- [24] 吉田正太郎 1988, 天文アマチュアのための望遠鏡光学・反射編, 誠文堂新光社
- [25] 株式会社エックス電子設計 2009, 南極用望遠鏡コントローラ R2-2009-SV, 株式会社エックス電子設計

- [26] A. Agabi et al. 2006, PASP, 118, 344
- [27] E. Aristidi et al. 2003, A&A, 406, L19
- [28] E. Aristidi et al. 2005, A&A, 430, 739
- [29] E. Aristidi et al. 2005, A&A, 444, 651
- [30] C.S. Bonner et al. 2009, Acoustics Australia, Vol.37, 2, 47
- [31] M.G. Burton et al. 2005, PASA, 22, 199B
- [32] A.N. Cox 1999, *Allen's Astrophysical Quantities Fourth Edition*, Springer
- [33] P. Dierickx et al. 1988, *Towards establishing specifications for large telescopes optics*, ESO conf., 1, 487
- [34] D.L. Fried 1965, J.Opt.Soc.Am. 55, 11, 1427
- [35] D.L. Fried 1975, Radio Science. 10, 1, 71
- [36] K. Geissler & E. Masciadri 2006, PASP, 118, 1048
- [37] S. Hagelin et al. 2008, MNRAS, 387, 1499
- [38] D.A. Harper & J. Bally 1999, APJ, 527, 1009
- [39] B.T. Indermuehle, M.G. Burton & S.T. Maddison 2005, PASA, 22, 73
- [40] Kurita, Mikio et al. 2004, Proc. SPIE, 5495, 518K
- [41] J.S. Lawrence et al. 2003, MSAIS, 2, 217L
- [42] J.S. Lawrence et al. 2004, Nature, 431, 278L
- [43] J.S. Lawrence et al. 2004, Proc. SPIE, 7012, 701227
- [44] J.S. Lawrence et al. 2009, PASA, 26, 379
- [45] R.G. Lundock 2008, *Anatrcctic Infra-Red Camera and Planetary Spectral Library*, Tohoku Univ.(Master's Thesis)
- [46] R. Lundock et al. 2009, A&A, 507, 1649
- [47] Maihara, T et al. 1993, PASP, 105, 940M
- [48] R.D. Marks et al. 1999, A&A, Suppl. ser. 134, 161
- [49] A. Moore et al. 2008, Proc. SPIE, 7012, 701226
- [50] Motohara, K. et al. 2004, SPIE, 5382, 648M
- [51] Murata, C. et al. 2008, Proc. SPIE, 7012, 701229
- [52] S.K. Ramsay, C.M. Mountain & T.R. Geballe 1992, MNRAS, 259, 751R
- [53] F. Roddier 1981, Prog. Optics, 19, 281
- [54] M. Sarazin & F. Roddier 1990, A&A, 227, 294
- [55] W. Saunders et al. 2009, PASP, 121, 976S
- [56] J.W.V. Storey 1998, ASPC, 141, 313S
- [57] J.W.V. Storey et al. 1999, PASP, 111,765
- [58] J.W.V. Story 2009, AAPPS, 19, 1
- [59] K.G. Strassmeier et al. 2008, A&A, 490, 287S
- [60] M.R. Swain & H. Gallee 2006, PASP, 118, 1190
- [61] V.I. Tatarskii 1971, *The effect of Turbulent Atmosphere on Wabe Propagation*,



I.P.S.T., Jerusalem

- [62] G. Tosti et al. 2006, Proc. SPIE, 6267E, 47T
- [63] T. Travouillon et al. 2003, A&A, 400, 1163
- [64] T. Travouillon et al. 2003, A&A, 409, 1169
- [65] H. Trinquet et al. 2008, PASP, 120, 203
- [66] Yang, H. et al. 2009, PASP, 121, 174
- [67] Yuan, X. et al. 2008, Proc. SPIE, 7012, 70124G