

宇宙の観測と技術

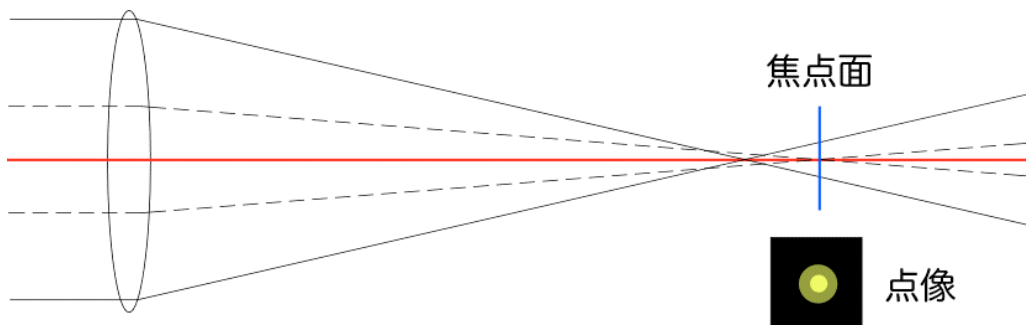
第6章 シャープな星像を得るために

1 1. ザイデルの5収差

望遠鏡には光を1点に集めるための対物レンズや主鏡が必要である。しかし光を一点に集めると言っても理想通りにはいかない。開口の形状によって光は回折を起こして回折像という広がりを持った分布に集まることは既に述べた。それ以外にもレンズや反射鏡に採用される曲面の性質から避けられない問題が存在する。そうしたレンズ、鏡による結像でボケや像の歪みを生じる要素を収差といい、大きく分けて5種類存在する。

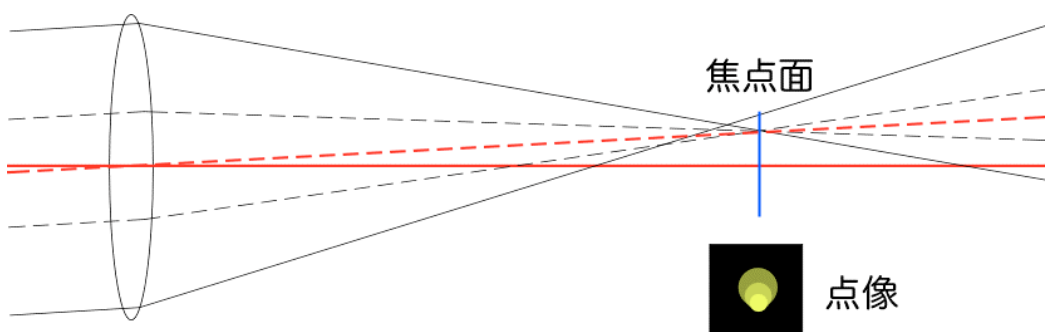
1) 球面収差

レンズや鏡の中心側と外周側とで焦点位置（距離）が違うことによって起こる収差のことである。球面収差は像のボケをつくり分解が悪くなる。像のコントラスト（明暗のメリハリ）を悪くする。F比の小さいレンズや球面鏡などに見られる。



2) コマ収差

屈折望遠鏡でも反射望遠鏡でも、レンズや鏡を直線上に正確に配列してあれば、その軸上（主軸）にある視野中心では光はきれいに集まって来る。しかし一定程度以上の範囲を見渡そうと視野を確保すると、斜め入射光線をつくる視野周辺部（焦点面と主軸が交わる点から外れた場所）では必ずしも入射方向の主軸・焦点面上に光は収束しない。このことによる視野周辺部での点像の歪みをコマ収差という。外側に尾を引いた像になる。

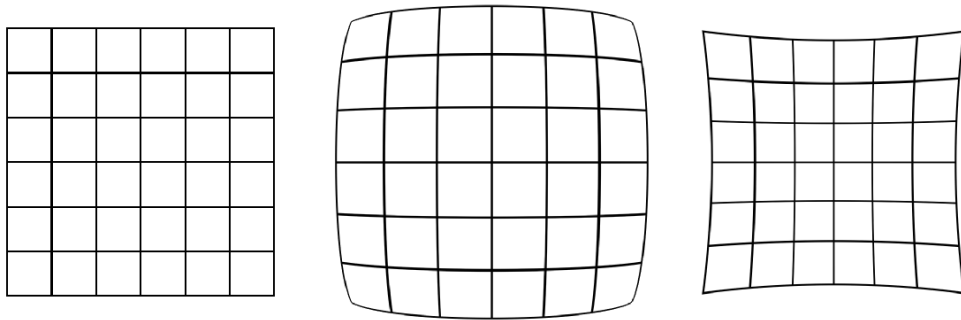


3) 非点収差

像面の縦方向と横方向で焦点位置が違う時に見られる。レンズや鏡の曲面形状が悪いと起こる(粗悪品、自重変形、圧力変形など)。点像が楕円に歪む。

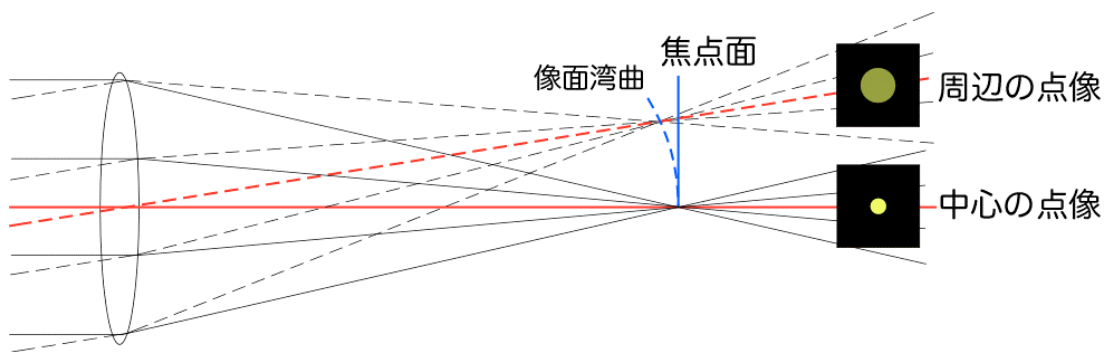
4) 歪曲収差

焦点面における縦横の直線が曲がってしまう収差。



5) 像面湾曲

焦点面が平坦でなく湾曲している状態。焦点面の場所毎に焦点位置が違ってしまふ。



光学設計の重要性

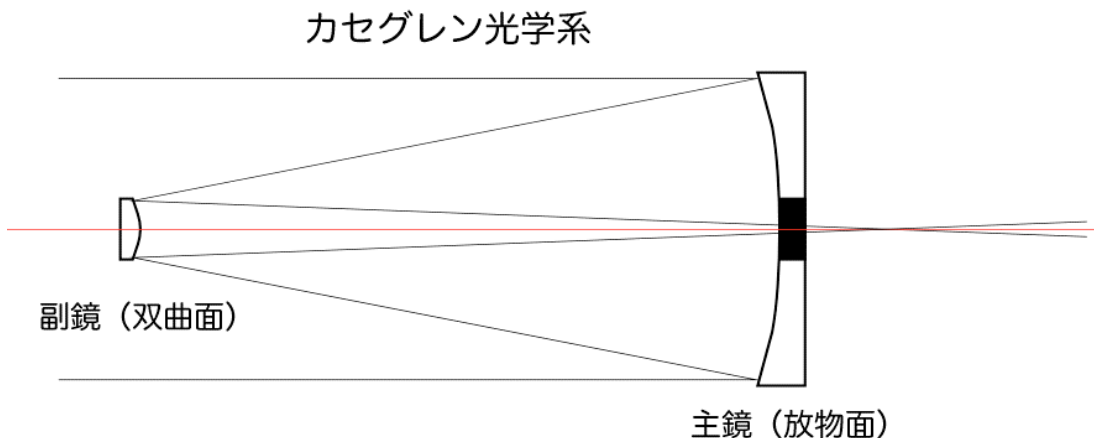
これらの収差を全て完全に消すことはできない。望遠鏡を企画する最初のステップは、その望遠鏡の使用目的(サイエンス)を決めることである。使用目的が決まれば、望遠鏡の口径(集光力)、焦点距離(像面サイズ)が決まる。観測で使う最大視野(有効視野)内で、どの収差をどの範囲でどの程度に抑えるかの目標を必要な観測精度に照らして定め、それを満たす光学的な解を見つけることになる。これが光学設計である。

1 2 . 大型反射望遠鏡の基本光学系

反射望遠鏡には用途によって様々な光学系がある。ニュートン式は最も簡単な光学系で、(回転) 放物面の凹面鏡 1 枚 (と収束光束を鏡筒外に取り出す斜鏡) という構成で、放物面の性質により球面収差のない光学系である。ここでは大型反射望遠鏡に多く用いられるカセグレン光学系と、その光学性能を高めたリッチー・クレチアン光学系についてのみ説明する。

1 2 - 1 . カセグレン光学系

ニュートン式反射望遠鏡に対して、鏡筒を短く、また観測装置 (接眼レンズ) を鏡筒の下部に取り付けられるように発案された方式がカセグレン光学系である。この光学系では放物面 (凹面) の主鏡とその前方に対面に設けた双曲面 (凸面) の副鏡を用いる。ニュートン光学系と同様に球面収差がない光学系である。

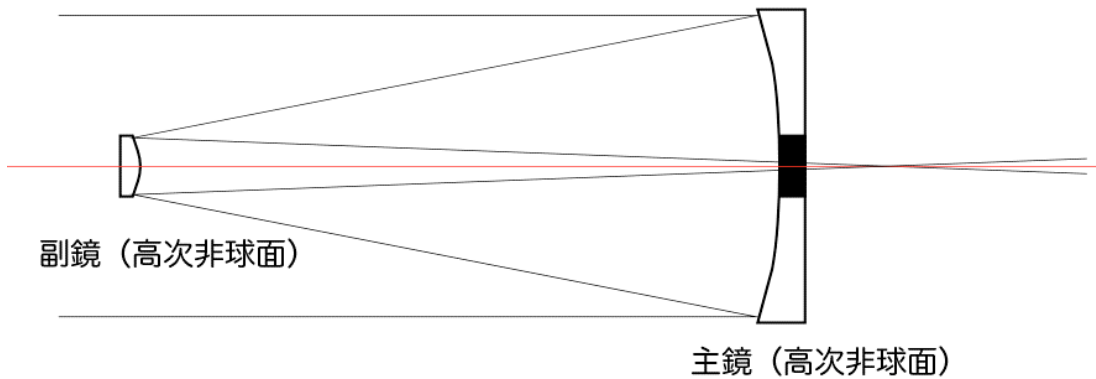


この光学系では光束を 1 8 0 度折り返すので鏡筒を短くできる。また主鏡の焦点距離を副鏡の凸面で引き延ばすことになるので、短焦点の主鏡を利用して、さらに鏡筒を短くすることができる。

1 2 - 2 . リッチー・クレチアン光学系

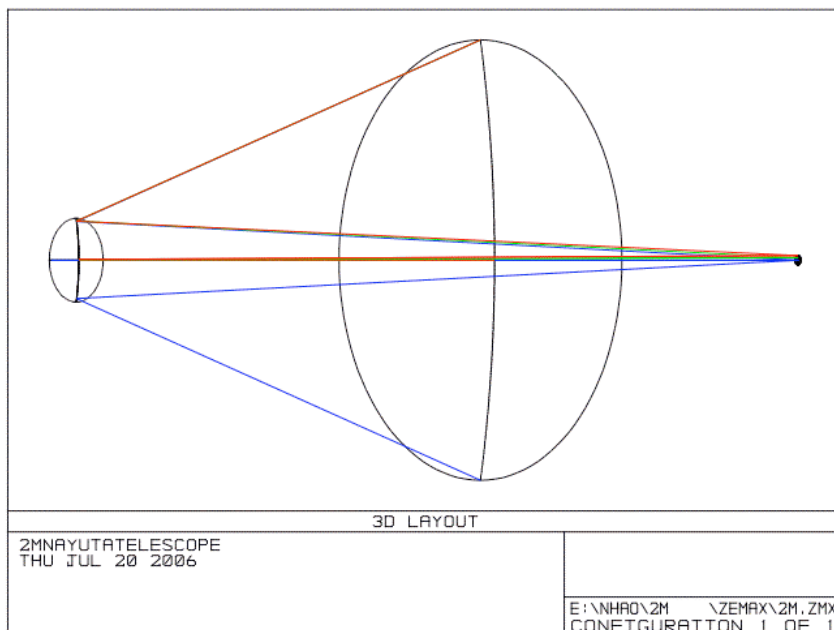
カセグレン光学系と同じ構成で球面収差と同時にコマ収差を取り除いたものがリッチー・クレチアン光学系である。主鏡の凹面、副鏡の凸面とも高次非球面であるが、その形状は双曲面に近いものとなっている。コマ収差がないためカセグレン光学系に比べてより広い視野を得ることができる。ただし像面湾曲が発生するため視野中心と周辺視野とで焦点が若干ズレてしまう。

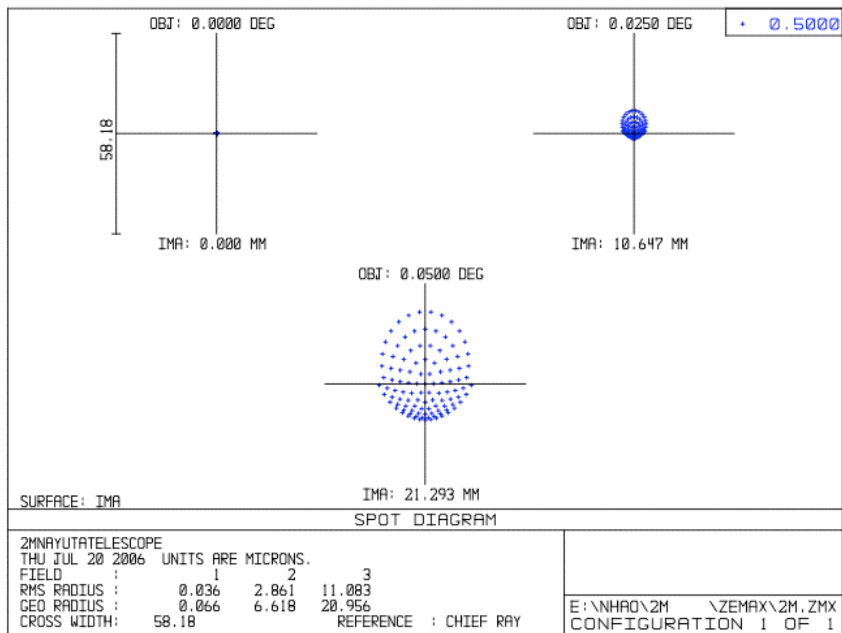
リッチー・クレチアン光学系



なゆた望遠鏡の光学系

なゆた望遠鏡はリッチー・クレチアン光学系を採用している。主鏡の口径2m に対し焦点距離は3m (F1.5)、副鏡で焦点距離を8倍に引き延ばし合成焦点距離24m (F12) にしている。非常に短焦点の主鏡を用いることにより鏡筒をかなり短くし軽量化させている。なゆた望遠鏡の光学系と収差像 (スポットダイヤグラム) を下図に示す。作図は西はりま天文台の坂元 誠 (主任研究員) による。

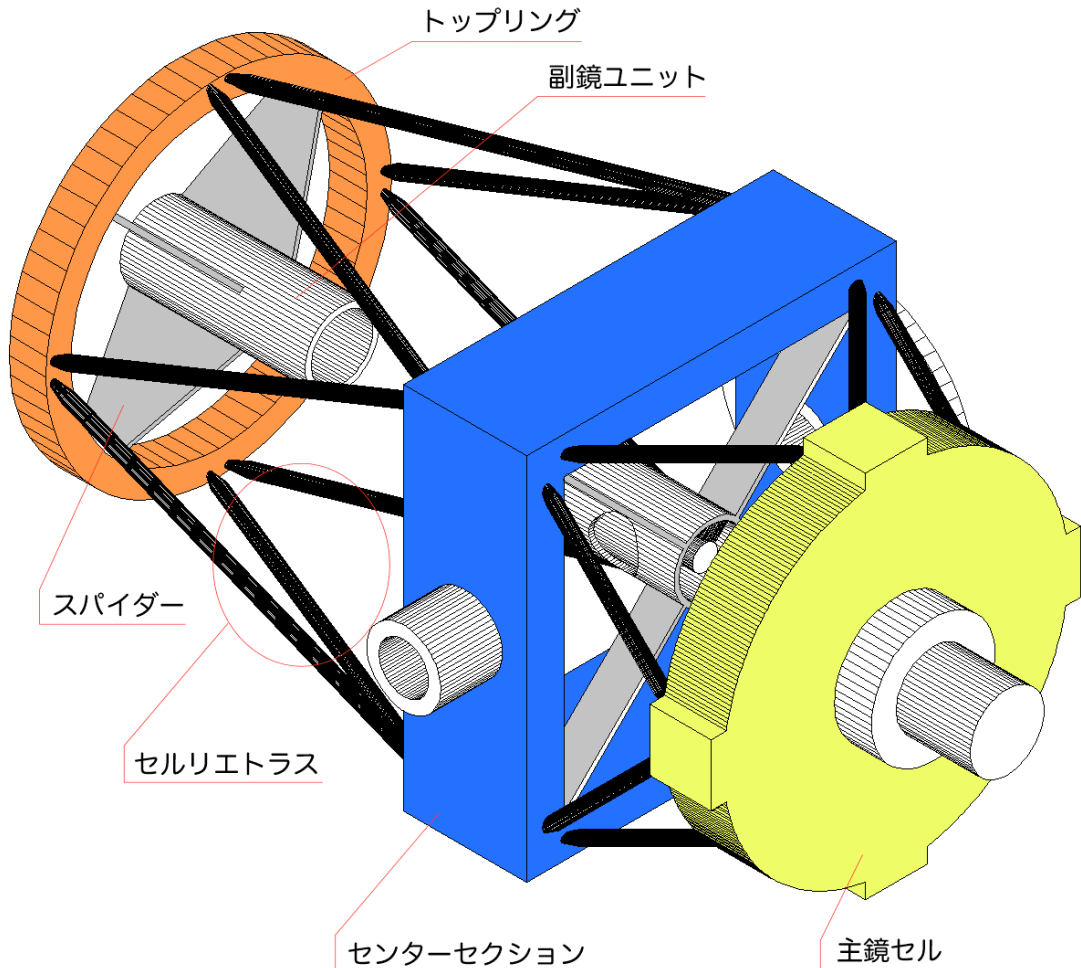




スポットダイヤグラムとは主鏡面の各点を通過する光線（光束）が焦点面のどこに集まるかを計算した幾何光学的な像の表し方で、光学系の収差の様子を知るのに有効である。図では視野中心（0.00 度，0.00 mm）から 0.05 度（21.3mm）離れた焦点面上で点像の半径が $11\mu\text{m}$ であることがわかる。これは直径 0.2 秒角に相当する。このように像面湾曲のピンぼけによって視野の外側に行くほど星像は大きくなるが、0.2 秒角は、大気揺らぎによるシーイングサイズ 1 秒角に比べて無視できるサイズである。なゆた望遠鏡の有効視野は 0.3 度となっている。

1 3 . 鏡筒の構造

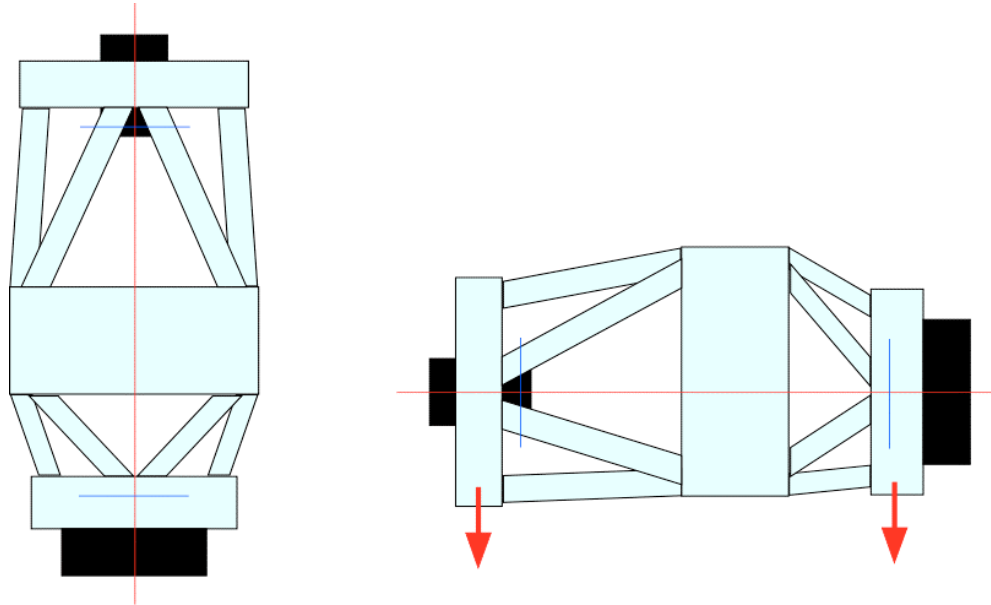
鏡筒の役割は望遠鏡の光学系を構成するレンズや鏡を適正な位置関係に保持することである。大型望遠鏡の一般的な鏡筒構造と角部名称を下図に示す。



1 3 - 1 . セルリエトラス

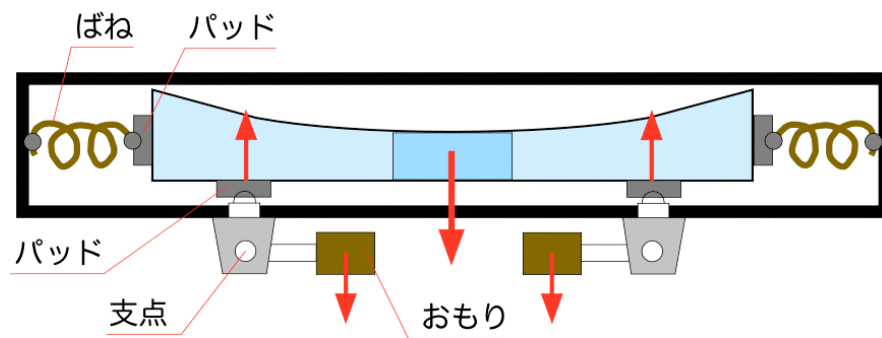
大型望遠鏡においてはいわゆる筒型の鏡筒を持つものは殆ど見られない。3角骨組み（トラス）によって、主要な光学系を保持するだけのものになっている。屋外で使用する望遠鏡では周囲の人工光が迷光として入り込むのを防ぐ意味で筒型も有効であるが、軽量化が必要な大型望遠鏡には不利である。また筒を使うと筒の中の空気が外気と馴染みにくいため筒内気流が発生して結像を乱す。迷光については大型望遠鏡は建物内に据え置きされるので外部からの人工光を防ぐことができる。大型望遠鏡の鏡筒に広く採用されている骨組みにセルリエトラスがある。これは3角の骨組みを巧みに使って、鏡筒

の自重変形が起こっても、主鏡と副鏡との位置関係が変わらないように計算された構造である。



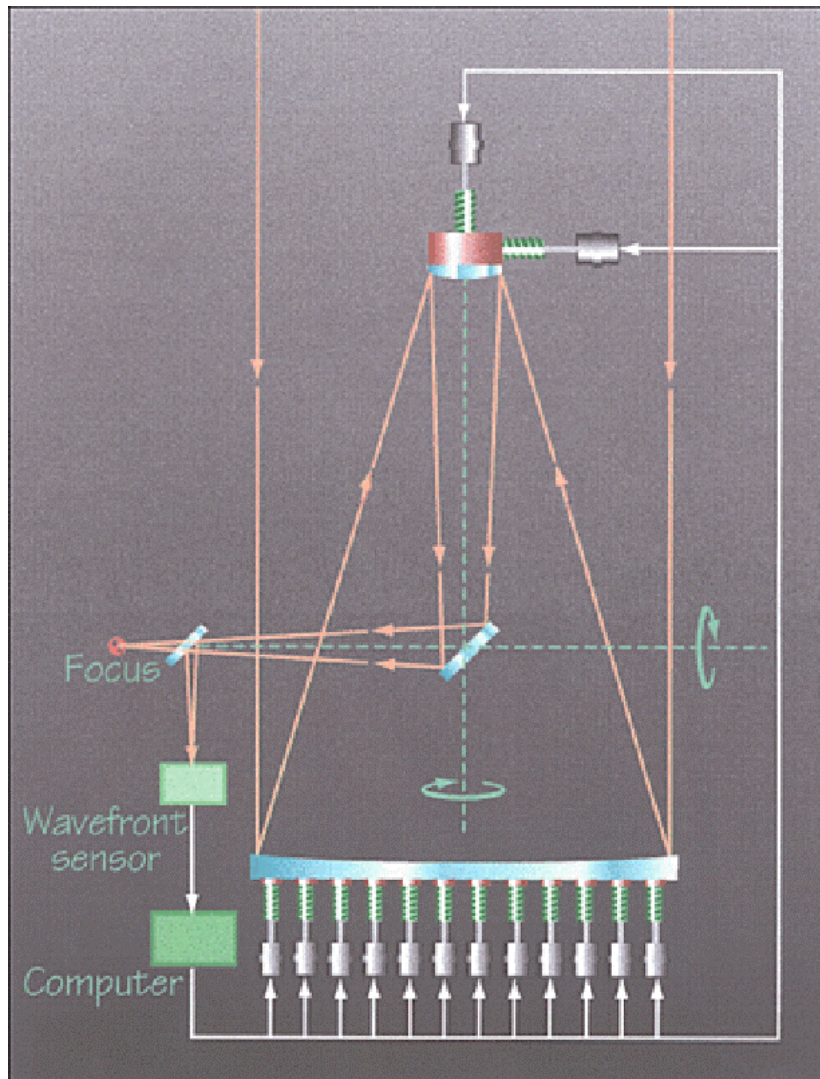
1 3 - 2. 主鏡セルと主鏡支持機構

主鏡を設置する容器が主鏡セルである。主鏡セルの中には主鏡支持機構が入っており主鏡はセルの中で浮かせるように支持されている。これをフローティングという。この支持機構は鏡筒が向きを変えても鏡面形状の変形を可能な限り小さく抑えるための工夫で、通常の主鏡（厚みを確保したガラス）には機械式の支持機構が採用される。



主鏡支持機構の各支持ユニットの配置や構造は望遠鏡の性能を左右する部分であるため製造メーカーや開発機関の秘密事項になっていることが多い。

一方、近年の世界最大級の望遠鏡では変形しやすい非常に薄い主鏡を裏から積極的に力を可変制御して鏡面精度を保つ能動光学系が採用されている。



ESO（ヨーロッパ南天天文台） VLT の能動光学系システム概念図
<http://www.vt-2004.org/gallery/v/ESOPIA/illustrations/phot-34b-99-normal.jpg.html>
より引用。

1 4. 大気揺らぎを避ける

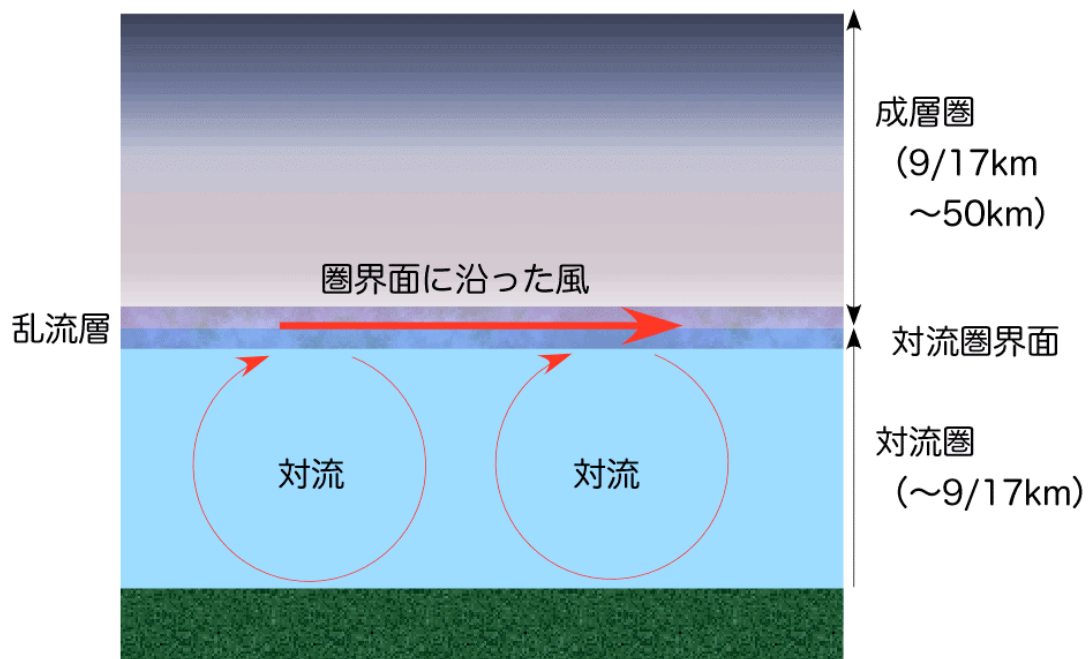
大気揺らぎが天体望遠鏡の結像に影響を与えることは既に述べた。これに対して天文学者ができる最初のことは、天体観測に条件の良い場所を探し出して、そこに望遠鏡を建設することである。天体観測に最適な条件とは

- 1) 晴天率が高い
- 2) 大気の吸収が少ない（空気が薄い）
- 3) 大気中の水蒸気が少ない（近赤外線や電波での観測）
- 4) 大気揺らぎが小さい

1)～3)は雲よりも高い山の上を選ぶことで満たされる。4)の大気揺らぎの小さい場所とはいったいどういうところであろうか。

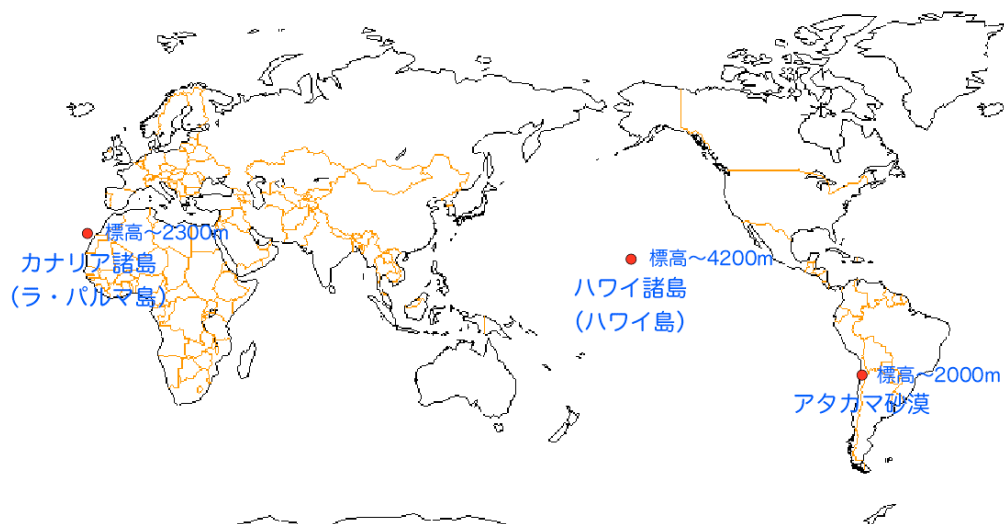
1 4-1. 上空10kmの乱流層

実は天体観測に影響する乱流が発生している大気層は分かっている。一つは高度10km（中緯度地域）の層にある。高度10kmは大気鉛直構造でいう対流圏と成層圏との境（対流圏界面）にあたる。



対流圏界面では対流の流れがコリオリ力の影響を受けながら圏界面に沿った風（偏西風や偏東風）を吹かせる。この風によって対流圏界面に乱流層が形成される。特に地球規模の大循環の境となる緯度ではジェット気流となる。

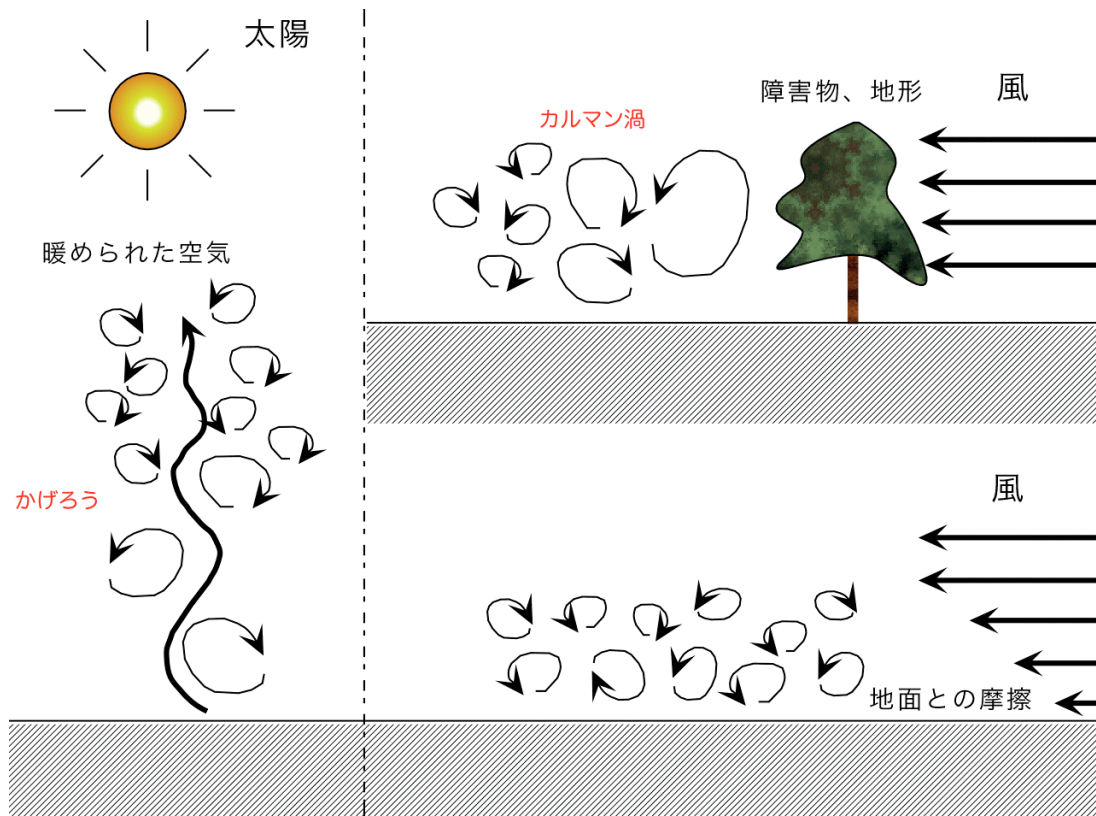
中緯度高圧帯に位置する日本はジェット気流の通り道となっているためシーイングが悪い。天体観測の適地を探すには、まず、この中緯度高圧帯から外れた場所を考えることである。現在、人類が見つけた世界3大観測適地を示す。いずれも中緯度高圧帯からは外れている。



これらはいずれも標高 2000m を越える乾燥した場所である。海に囲まれた高山を持つ島（火山島）、高い標高にある乾燥した盆地（砂漠）というところが興味深い。

14-2. 地表近くの乱流

地表付近で風が吹くと空気の流れが地面と摩擦を起こして乱流を発生させる。このような乱流が発生する地表層を接地境界層といい、地形の影響等も含めると最大100m程度の厚みがある。平地（裸地）では10m～50m未満である。

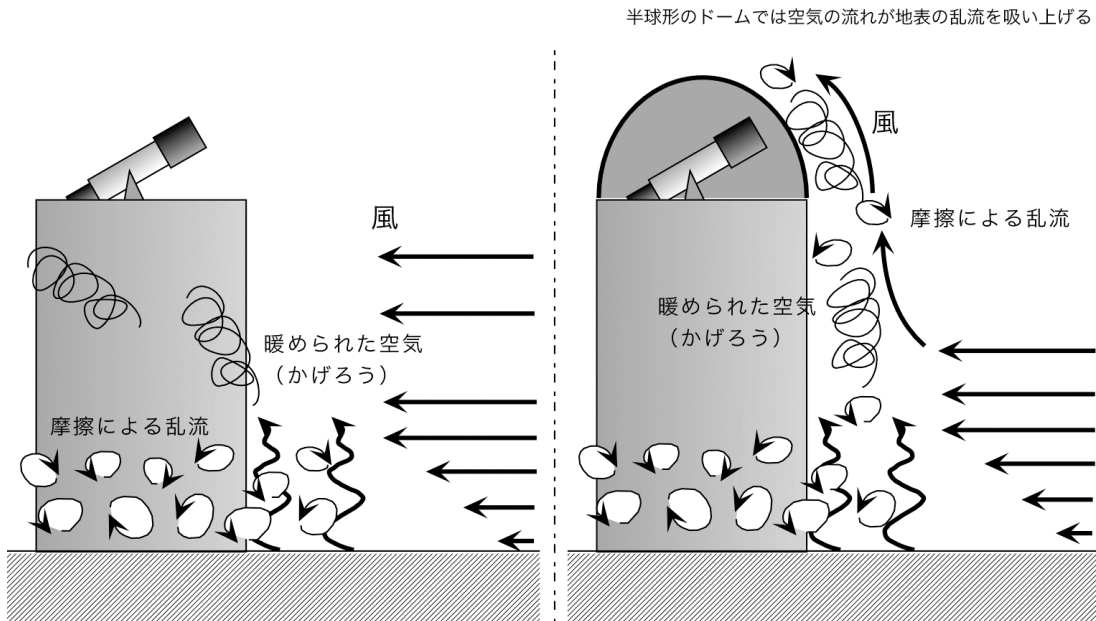


接地境界層内では風と地面との摩擦により風速に高さ方向の変化（ウインドシア）が起こって乱流となる。その他にも接地境界層内では障害物の風下が発生するカルマン渦や、局所的な熱対流（上昇気流）によるかげろうなどが乱流源となる。

14-3. 地表近くの乱流を避ける工夫

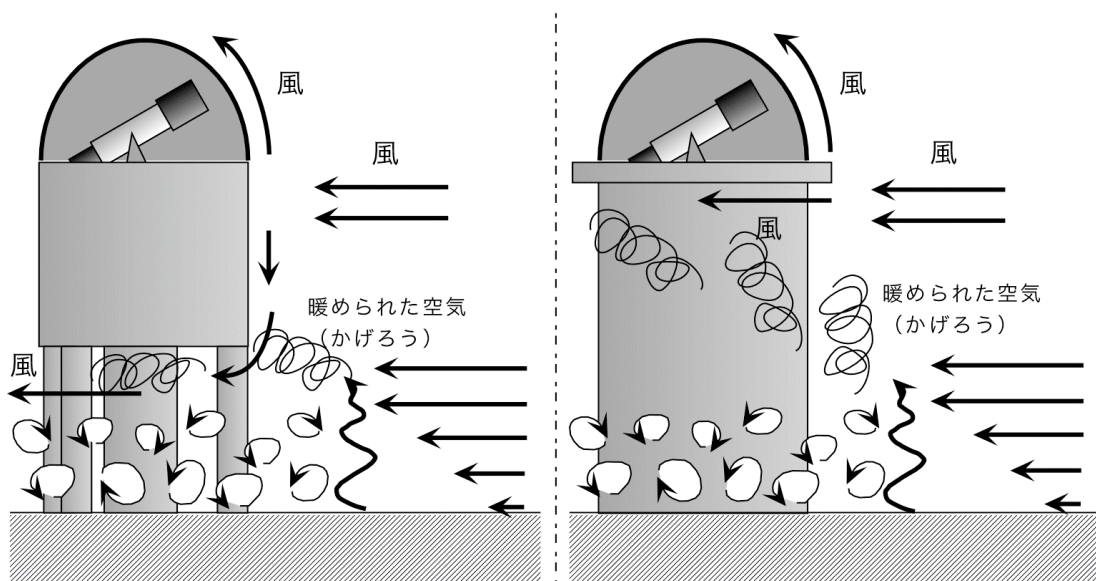
天文台の建設地として最適な場所を探すことは重要であるがそれができないこともある。いずれにせよ上空10kmの乱流に対しては人類は手も足も出ない。しかし地表の乱流源に関しては、天文台の建築デザインや土地の造成によってコントロールが可能である。ここでは地表近くの乱流の影響を避けるための工夫を紹介する。

工夫1：望遠鏡を高い場所に設置



まず第一に望遠鏡は周囲で一番高い位置に据え付けることが重要である。接地境界層での摩擦による乱流よりも高くするのが理想。地表から20mは欲しいところである。しかし望遠鏡を囲う屋根が従来の半球形だと、地表の乱流を含む空気を吸い上げる流れが生じてしまうことが判っている。

工夫2：空気の流れを考えた建物形状



半球形のドームによる気流の流れを抑制するためには建物に工夫をする必要がある。一つの方法は天文台を高床式の建物にすることである。気流がドームの影響で気流が壁に沿って上がっていくのを床下の風通しを良くすることによって抑制する。

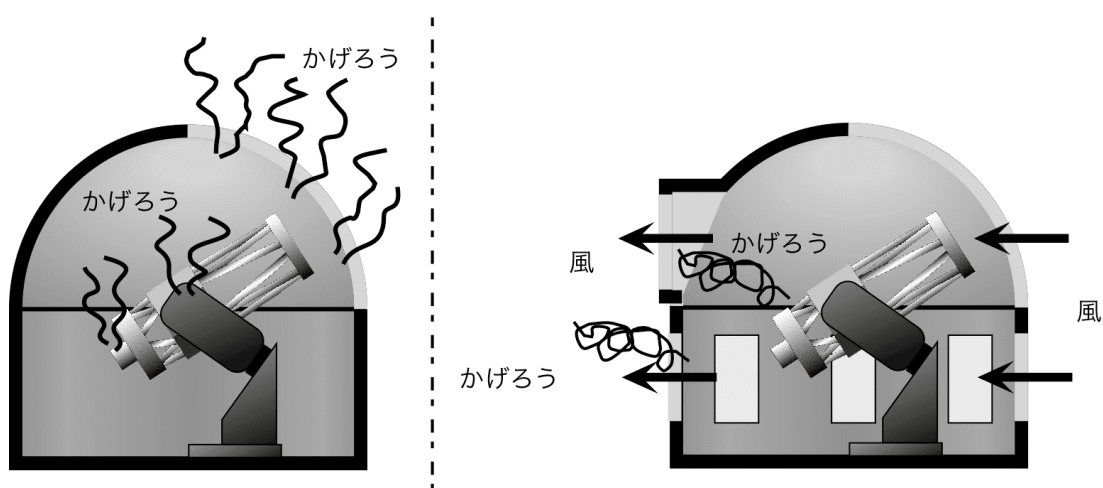
もう一つは建物の上部に整流板の役目をする構造を付加することである。ちょうど丸帽子のつばのようなになる。整流板を設けることで、気流はドームの上と下とで分かれるため地表から上がって来る乱流がドームを越えてくるのを遮ることができる。

ドームの形状に円筒のような鉛直な壁面を持った形を採用するのも有効な手段である。近年では半球形ではない形状が取り入れられるようになりドームという名称を使うのが不適當になりつつある。最近では望遠鏡を囲う屋根を形状に関係なくエンクロージャと呼ぶようになって来ている。

1 4 - 4 . 観測室の廃熱

天体観測で問題になる乱流は周囲の環境によるものだけではない。望遠鏡や観測装置は機械であり、沢山の電気・電子機器によって構成されている。乱流源としては、望遠鏡と付帯機器から出る熱によるかげろうも無視することはできない。この観測室内で発生する熱を外に逃がすために、外気をスムーズに室内に流す工夫が必要である。これをフラッシングという。

工夫3：ドーム内部の排熱





なゆた望遠鏡が設置されている西はりま天文台南館