

JNLT の 基 本 光 学 設 計

成 相 恭 二*

1. 望遠鏡の概要

望遠鏡の主鏡の直径は 7.5 m で、焦点距離は 15 m である。焦点は、主焦点、カセグレン焦点、ナスミス焦点、クーデ焦点の 4 つを持つ。

7.5 m という主鏡の直径によって、波長 $10\ \mu\text{m}$ での干渉限界がマウナケアでのよい時のシーイング 0.2 秒と同じになる。主鏡の焦点距離 15 m によって主焦点でのスケールは角度の 1 秒が $73\ \mu\text{m}$ になり、0.2 秒は現在の CCD のピクセルの大きさとはほぼ一致している。主焦点では実際には補正系を使うので焦点距離が伸びるがこれについては後で述べる。

主焦点では補正系を使う。コーティングおよび収差補正の条件から青用、赤用 2 つの補正系を使用する。赤外

線の主焦点補正系の必要性も検討中である。

副鏡としては光学用 F/12.5、赤外線用 F/13 および F/35 を設ける。この副鏡はカセグレン焦点とナスミス焦点の両方に使い、焦点の切り替えは光軸と高度軸の交点に置いた平面鏡（ナスミス第 3 鏡）によって行う。

クーデ焦点は将来他の望遠鏡との干渉観測を行う時のためのもので、ナスミス焦点から鏡（赤外）かレンズ（光学）によるリレー系でドーム下部に光を導き、そこから更に相手の望遠鏡との中間点にある観測室へ送り出す。

2. カセグレン副鏡の F 比

JNLT では主鏡の曲率半径 (=30 m) は決まっているので、副鏡の位置と曲率半径が与えられれば焦点距離と

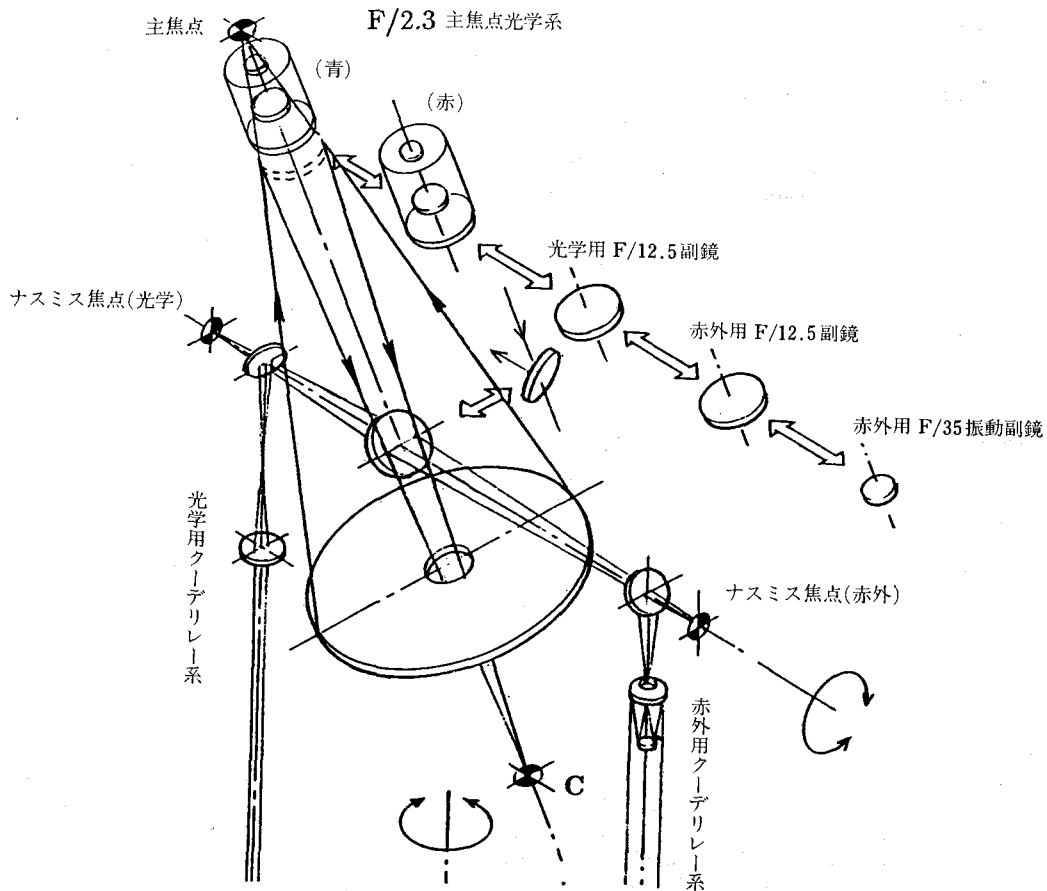


図 1 光学系概念図

* 国立天文台 Kyoji Nariai: Basic Optical Design of JNLT

焦点位置が決まる。逆に言えば、F比（焦点距離/口径）とバックフォーカス（主鏡面から焦点までの距離、BFと省略する）を与えれば副鏡の位置と曲率半径が求まる。バックフォーカスは鏡筒および架台の構造、カセグレン焦点用観測器のサイズから3.4mとなっている。

副鏡位置はおおまかに言えば主鏡の焦点の少し手前から副鏡から焦点までの距離は約16m位である。これをF比で割れば副鏡の大きさが概算できる。主鏡の口径が7.5mなので副鏡と言えども口径1.3m~2mという巨大なものになり、これを下向きに支持するのは技術的にも大変難しい。F/12.5と言う値は副鏡の大きさを抑えることに主眼をおいて決められた。副鏡位置をきちんと与え、また視野（角度の6分）を考慮して正確に計算すると副鏡の口径は1.32mとなる。

赤外線の観測をする場合には副鏡のサイズを少し小さくして副鏡が瞳になるようにする。焦点から副鏡を見た場合に主鏡を通した空以外のものが見えないようにするためである。副鏡の位置、曲率半径、非球面係数は光学用のものとまったく同じで、口径だけが小さい。口径は1.26mとなり、F/13に相当する。

3. リッチー・クレティエン光学系

カセグレン焦点で考慮しなくてはならない収差はおもに3次収差の球面収差とコマで、それぞれ画角の0次と1次に比例する。画角の2次に比例する非点収差と像面湾曲は視野を小さくすれば無視できるし、歪曲は像位置だけに影響し結像には関係ないので考えなくてもよい。

主鏡が放物面で副鏡が双曲面の古典的カセグレン望遠鏡は光軸上で点像を結ぶ。つまり球面収差は0である。ところで主鏡の非球面係数が与えられた場合に副鏡の非球面係数を適当にとればいつでも球面収差を0にすることはできる。つまり球面収差が0の解は ∞^1 ある。古典的カセグレン望遠鏡はその解のうちの一つに過ぎない。

この解の中から球面収差が0で、しかもコマも0になるようにしたのがリッチー・クレティエン系である。このようにして決められたJNLTの主鏡の非球面係数は1.0106667である。視野を決めるのは非点収差と像面湾曲で、JNLTの場合はこれらの収差のFWHMが0.2秒になるのは視野半径3分である。

4. ナスミス焦点

口径7.5m、F/2と言う光学系は予期していない設計上の困難をもたらした。望遠鏡の不動点、つまり光軸と高度軸の交点から鏡面の中心までは2.5m、そこから焦点までは3.4mあり、不動点から焦点までの距離は計5.9mある。不動点にナスミス斜鏡を置いて高度軸内に光を導くと焦点は鏡の端から2.15mの所にあるわけだが、実はこれでは十分でない。鏡筒を支えるセンターピースは厚みを持っており、高度軸を支える軸受けの場所も必要である。また観測器を設定するためには高度軸の端面から1m位のスペースは欲しい。ということで焦点位置をもう2mほど伸ばさなければならなかった。

この問題は主鏡のアクティブ支持を利用して次のように解決してある。副鏡位置をずらすと焦点位置は副鏡位置移動の6.25²倍だけずれるので、副鏡移動によって焦点位置をナスミス焦点で便利な場所に移動させる。このために球面収差ができるが、主鏡のアクティブ支持機構の力の配分を変えて主鏡面を約1 μ mほど変形させてやると球面収差は消える。コマは0ではないが無視できるほどである。

5. 主焦点補正系

口径7.5m、F/2の光学系のコマが0.2秒（FWHM）になるのは焦点面上で光軸を中心とした僅か3mmの円内に過ぎない。だから視野を大きく取ろうと思うと主焦点補正系が必要になる。JNLTでは主鏡が双曲面になっ

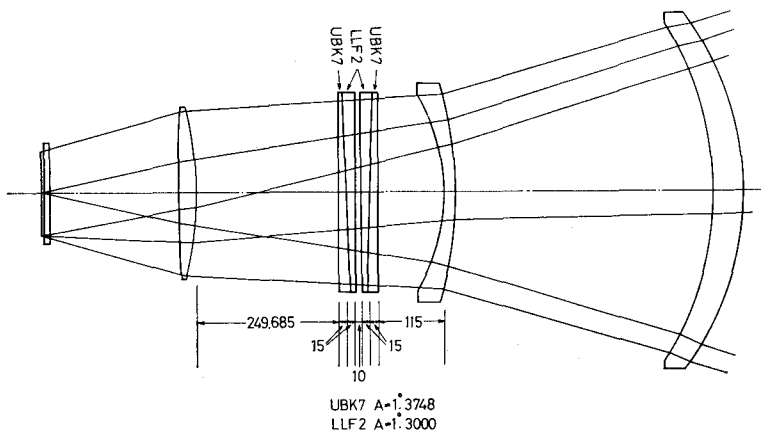


図2
主焦点補正系(青)の断面図。
大気分散補正系を組み込んである。

model No.8. first lens at 13900 mm
 radius of field : 15 min of arc
 distance between 1st and 2nd lenses : 450 mm

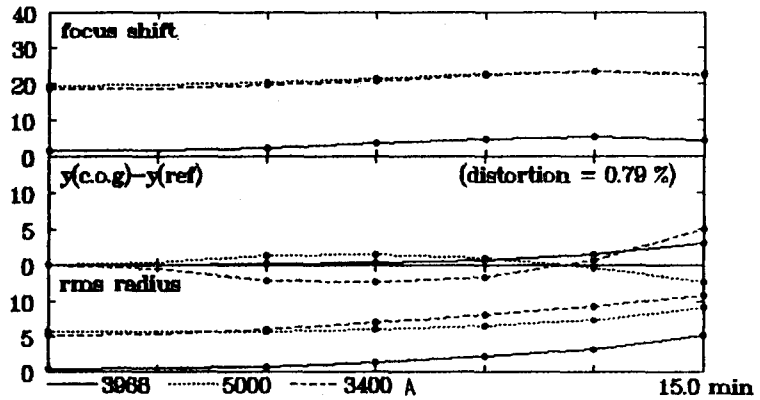


図 3
 平坦化された焦点面を持つ主焦点補正系の波長別結像性能.
 上: 焦点移動量, 中: 歪曲,
 下: 平均自乗半径

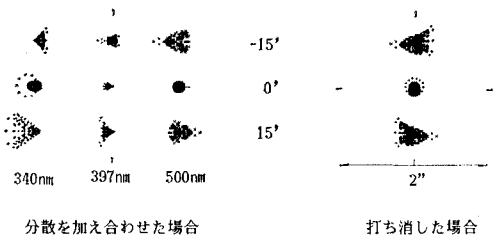


図 4a 大気分散補正系を組み込んだ主焦点補正系のスポット図

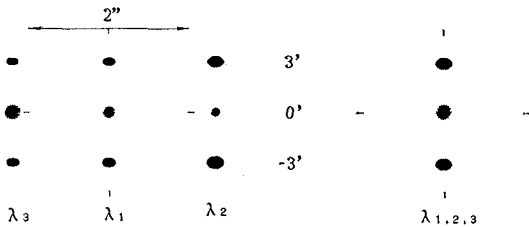


図 4b リッチー・クレチエン系における大気分散補正

の他に, 焦点面近くに窓材, 第 2 第 3 レンズの間に大気分散補正系が組み込まれている。

軸上色収差, 倍率色収差については波長の一次の係数が 0 になっている。球面収差は標準波長で 0 になっている。球面収差の色収差は残っている。光線追跡による焦点面上での収差を使って最適化を行うのでコマ, 非点収差, 像面湾曲は同時に評価されてしまうが, よく解析すると, 3 次収差のコマと 5 次収差のコマが同時に 0 になる解は存在せず, 2 つが打ち消すようになっていることが分かる。非球面を第 2 レンズの後面と第 3 レンズの前面に使うことにより, 球面収差の色収差と残存コマの両方を小さくしている。JNLT はリッチー・クレチエン焦点が F/12.5 であるため主鏡は比較的放物面に近く, そのために非球面 2 枚が必要だった。像面湾曲は 3 次収差 (2 次の項) だけでなく 5 次収差 (4 次の項) まで除去できている。

6. 大気分散補正系

大気による屈折のために星像は虹になって見える。マウナケア山頂でこの量は高度 30 度のとき波長域 300 nm ~ 500 nm で約 2 秒に達する。これは直視プリズム 2 対を使えば補正できる。主焦点補正系では光束が比較的平行に近くなる第 2 レンズと第 3 レンズの間に組み込んである。カセグレン焦点ではプリズム 2 対を焦点の前方に置くだけでよい。

ていて主焦点は大きな球面収差を持っているので, 補正系はこれも補正しなければならない。非球面 2 面を含むレンズ 3 枚の補正系で, 直径 30 分の視野について FWHM 0.2 秒以内に結像するものが設計されている。波長域は 340 nm ~ 500 nm である。長い波長域についても同様な設計が可能である。補正系には収差補正レンズ 3 枚