

SFU 搭載用宇宙赤外望遠鏡 (IRTS) の低温ハルトマンテスト

八木豊児*・芝井 広・尾中 敬**・河野嗣男*

(1990年11月16日受理)

Hartmann Test of the Infrared Telescope in Space (IRTS) at Low Temperature

By

T. YAGI, H. SHIBAI, T. ONAKA AND T. KOHNO

Abstract: A Ritchy-Cretien telescope consisting of metallic mirrors which was developed for the IRTS, was optically tested to investigate the feasibility of metallic mirrors in the application to the optical system at low temperature for space use. The Hartmann Test was performed at the LN_2 temperature and the effects of the temperature on the optical support were examined. The results indicated that the optical performance was within the requirement ($\sim 1''$) even at the LN_2 temperature. The observed aberrations were investigated by several methods and possible improvements of the aberrations were discussed.

1. はじめに

IRTS (Infrared Telescope in Space) は、1994年に打ち上げられる小型プラットフォーム SFU に搭載され、大気圏外から宇宙を観測する赤外望遠鏡であり、赤外線全域をカバーする4つの赤外線観測機器を備えている。

この IRTS の特徴は全体が液体ヘリウムにより冷却され、雑音源となる望遠鏡自身の熱放射が極限まで減り、赤外線放射に対し非常に高い感度の望遠鏡となることである[1]。しかし、冷却を必要とするため、望遠鏡を構成する鏡やミラーセルなどに冷却の影響および、光学系の収差増加などが起こることが予想される[2]。

低温下での周辺支持との熱収縮率の差による歪みを最少限に抑えること、及びロケット打上げ時の衝撃を考慮し、IRTS の鏡は金属鏡とされ、広い視野という観測要求を満たすため、その金属鏡は主鏡、副鏡とも非球面とされた。これらは NC ダイアモンド切削で整形され

* 東京都立科学技術大学

** 東京大学理学部

ているが、このような非球面の超精密加工技術は完全に確立されておらず、光学系に金属鏡の形状誤差による収差が存在することも考えられる。また、実際の切削の際には、電解ニッケルメッキをして行なうため、その低温下でのふるまいを調べることも必要である。

以上のことを調べるため、常温及び低温での IRTS 金属鏡の光学評価をハルトマンテストにより行なった。冷却には取り扱いが比較的容易で、安価な液体窒素を用いた。液体窒素温度 (77K) までは金属材料の物性が既知であり、実験結果の解析が行い易く、その温度では液体ヘリウム温度 (4K) に達するまでの70%以上の収縮が起きるので、低温での結像性能を調べるには、液体窒素温度で光学系への影響を調べるのが適当であると考えた。

ハルトマンテストは光を光線として扱う幾何光学的な測定法であり、ここでは、光源に He-Ne レーザを使用し、従来の乾板の代わりに固体撮像素子 (CCD) を用い、計算機でただちに解析結果が得られるようにした。

2. 金属鏡について

(a) 金属鏡の設計

望遠鏡は主鏡、副鏡からなり、それぞれミラーセルにネジによって固定されている。望遠鏡は有効口径150mm、合成焦点距離600mmのF/4であり、視野は約2度である。そして、IRTSの焦点面観測装置は主に広がった成分を観測の対象としており、焦点面に幅0.5mm (8分)のスリットを持つことから、像精度は視野±1度において、1分程度を目標としている。

ここでは仕様に基づく光学系の主な設計値を表1に、その光学系の配置を図1に示す。

(b) 金属鏡の製作

金属鏡は、アニールされたアルミニウム合金をNCダイヤモンド切削により整形し、その反射表面に電解ニッケルメッキを行ない、さらにこれをNCダイヤモンド切削によって切削し、最後に研磨仕上げしたものである。

表1. 設計値

光 学 系		リッチクレチエン系
有 効 口 径		150 mm
合 成 焦 点 距 離		600 mm (F/4)
使 用 画 角		1 度 ± 15 分
目 標 分 解 能		1 分以内
主 鏡	面 形 状	双 曲 凹 面
	口 径	154 mm (有効径 150 mm)
副 鏡	面 形 状	双 曲 凸 面
	口 径	52 mm
材 質		アルミニウム合金 (A5086)
面精度	粗さ (Rmax)	20 nm
	うねり	0.1 μm / 2 mm ピッチ
	形 状	± 5 μm
反 射 膜 質		Au (0.2 μm) + SiO ₂ (0.1 μm)

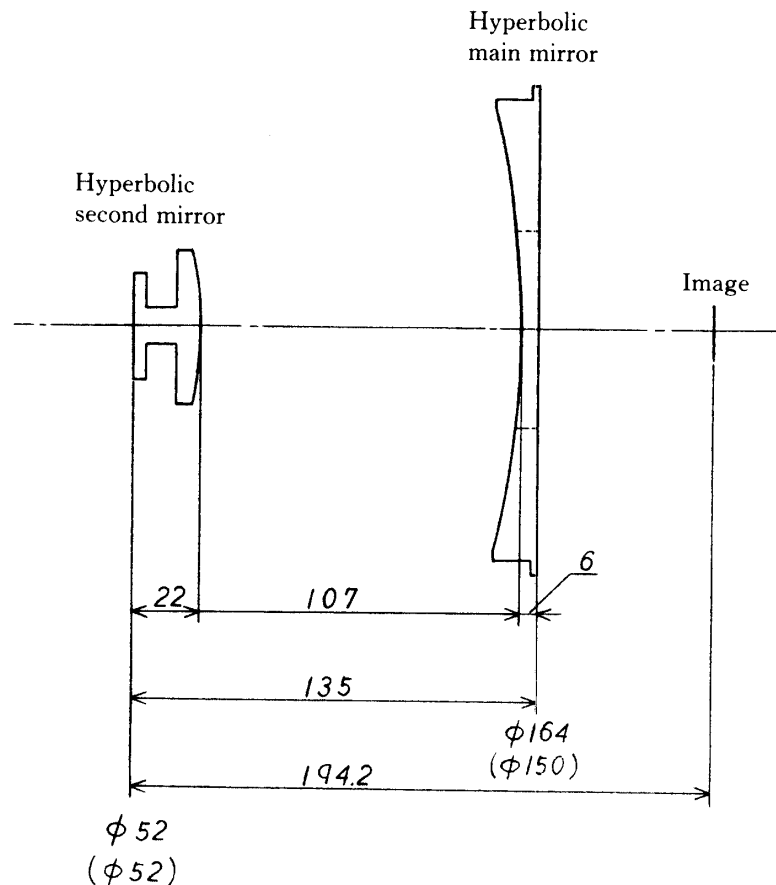


図1. 光学系配置図

二次曲面形状表示を切削量 (sag 量) z , 光軸からの距離を x として表わすと鏡面形状は次式になる.

$$z = \frac{Cx^2}{1 + \sqrt{1 - KC^2x^2}} \quad (1)$$

ここで, $C = -1/R$, $K = 1 - e^2$ (R : 曲率半径, e : 離心率) である.
最適化によって得られたパラメータは, 主鏡については

$$C = -3.3317756 \times 10^{-3} (\text{mm}^{-1}), \quad K = -0.0511$$

副鏡については

$$C = 8.7053742 \times 10^{-3} (\text{mm}^{-1}), \quad K = -2.2025$$

である.

このようにして製作された金属鏡をミラーセルに組み合わせた望遠鏡全体の写真を図2に示す.

以上の設計値を基に IRTS 望遠鏡の光線追跡を行ない, スポットダイアグラムを計算したものが図3である. ここでは入射角が +1, +0.5, 0 度のそれぞれの場合において, 設計値焦点面から主鏡側 1.2mm までの位置のスポットダイアグラムを計算した. 図3の縦軸, 横軸の長さは 0.4mm である.

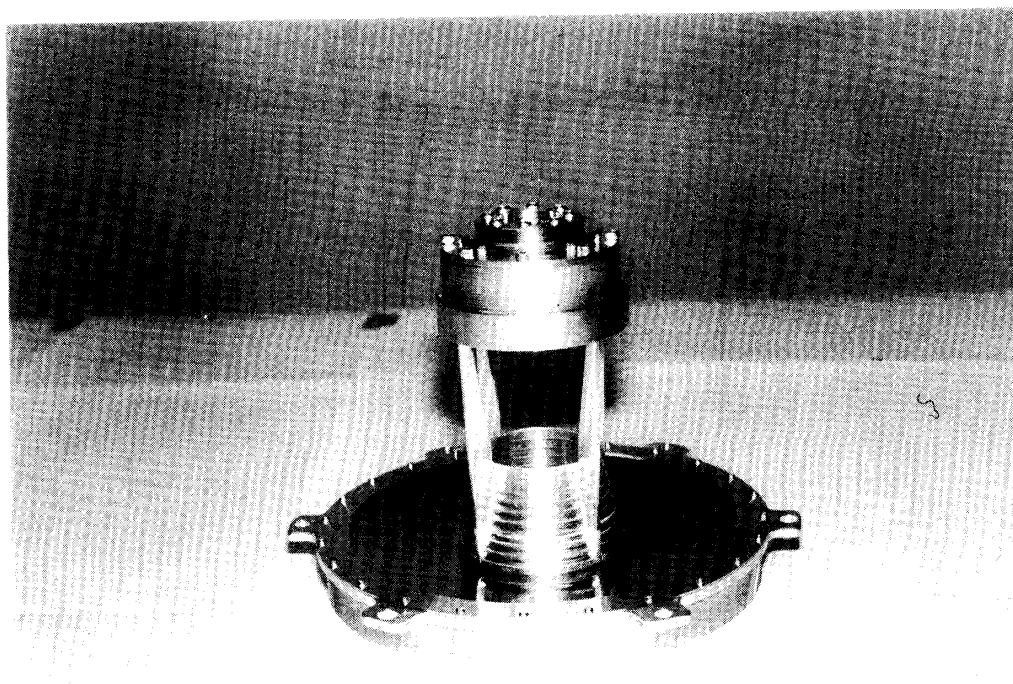


図2. 望遠鏡

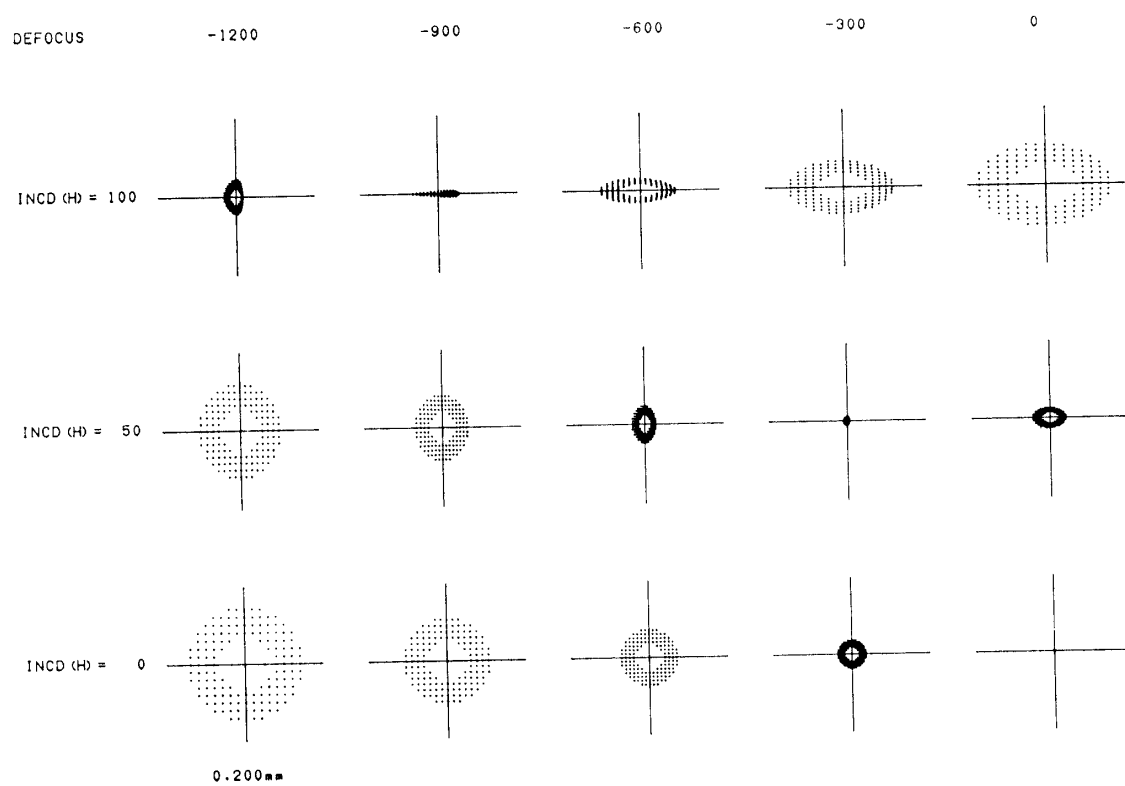


図3. 光学設計に基づくスポットダイアグラム

(c) 金属鏡の加工精度測定

(株)ニコンによって金属鏡の室温での加工精度測定が行なわれ、その結果を表2に示す。表2のうねりの測定では、測定器の分解能以下となっている。

この検査結果によると設計値を十分満たしている。

触針表面粗さ計による主鏡、副鏡の形状測定の結果をそれぞれ図4、図5に示す。これらも設計値を満たしている結果となった。

主鏡、副鏡の形状測定結果をそれぞれ最小二乗法近似により非球面の式(2)に近似し、非球面係数(A_2, \dots, A_{10})および C, K をそれぞれ求め、その結果を基に光線追跡を行ない、製作形状のシミュレーションとして図6のスポットダイアグラムを計算した。この図6は、図3と同様の入射角及び設計焦点位置でのスポットダイアグラムである。

このシミュレーションでは入射角+1度での目標値は満足している。

$$z = \frac{Cx^2}{1 + \sqrt{1 - KC^2x^2}} + A_2x^2 + A_4x^4 + A_6x^6 + A_8x^8 + A_{10}x^{10} \quad (2)$$

(A_2, \dots, A_{10} : 非球面係数, z, x, C, K は式(1)と同意)

表2. 鏡面加工精度検査結果

	設 計 値	測 定 値	
		主 鏡	副 鏡
粗 さ (R_{\max})	20 nm	7.2 nm	7.2 nm
う ね り	0.1 μm / 2 nm ピッチ	0.02 μm 以下	0.02 μm 以下
形 状 誤 差	$\pm 5 \mu\text{m}$	0 ~ +1.13 μm	-0.07 ~ +0.22 μm
裏面の平面度	1 μm 以下	1 μm	0.2 μm
反 射 膜 厚		Au (0.2 μm) + SiO ₂ (0.1 μm)	

測定温度：室温

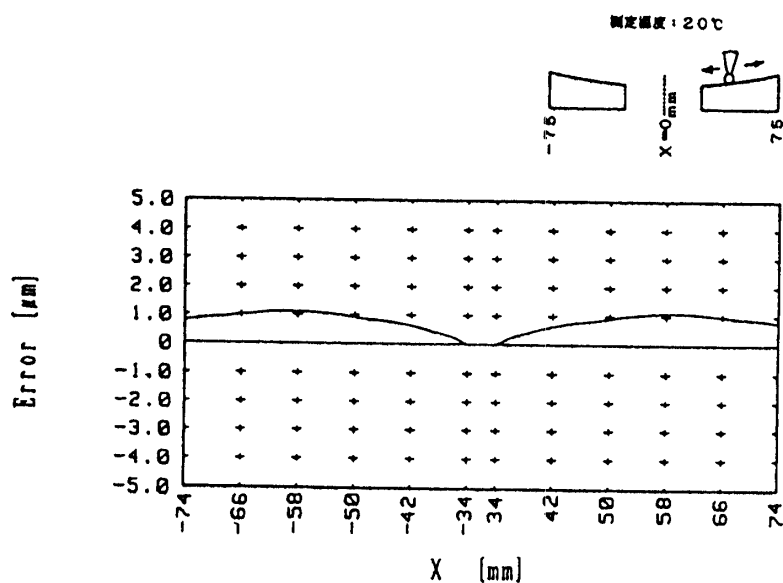


図4. 主鏡形状誤差

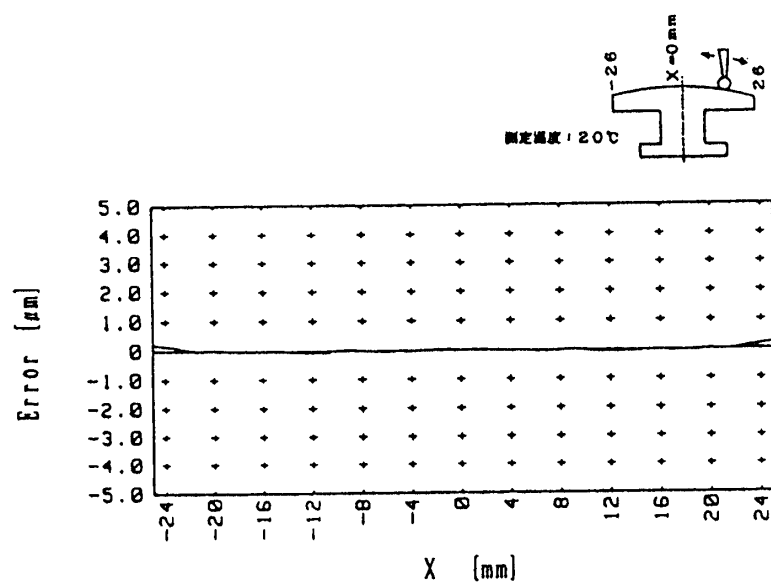


図5. 副鏡形状誤差

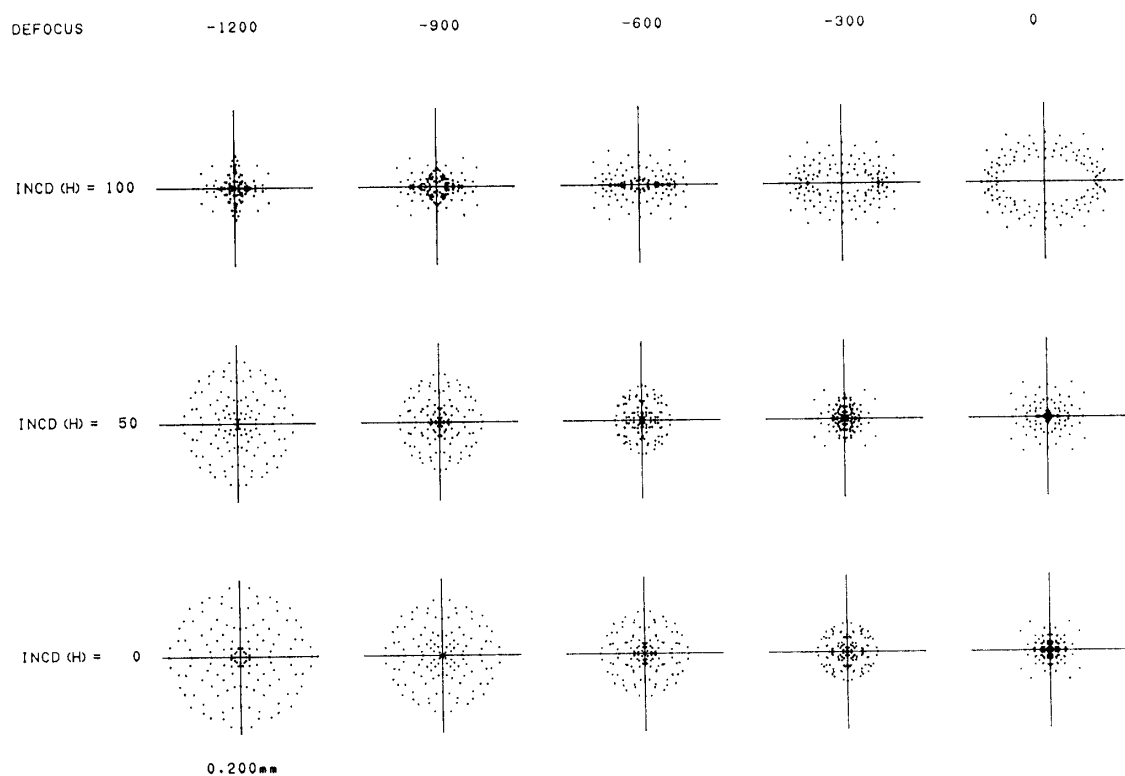


図6. 製作金属鏡形状によるスポットダイアグラム

3. 実験方法

実験は、He-Ne レーザ（波長 $\lambda=0.633\mu\text{m}$ ）を光源とし、長焦点距離球面鏡（ $f=7\text{m}$ ）を

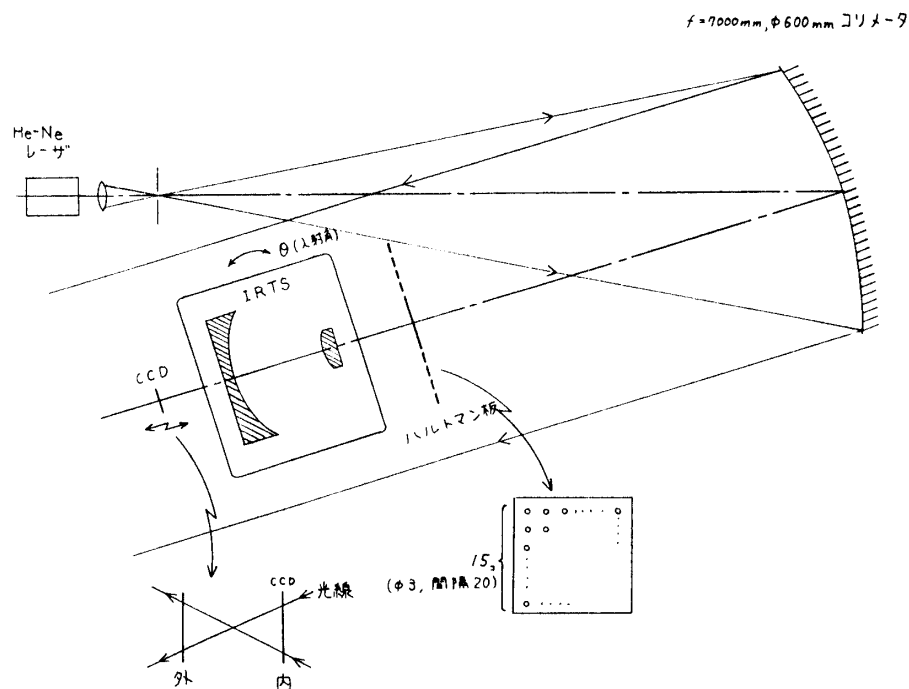


図7. ハルトマンテスト実験光学系配置図

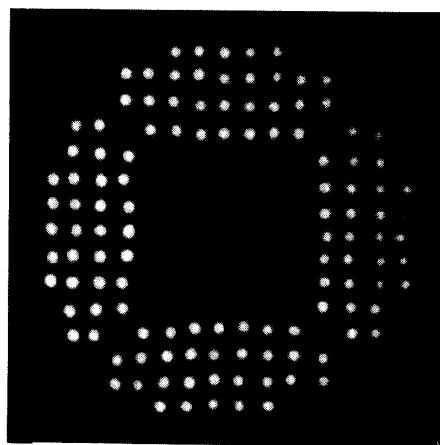


図8. 光線群のスポット像の一例

コリメータとして用いた。レーザ光をレンズ・ピンホール系により発散光にし、そのコリメータにより高精度の平行光束を取り出し、図7の配置により2次元ハルトマンテストを行った。

ここでのIRTSの光軸合わせは、副鏡裏平面鏡による反射光が光源に戻るよう調整し、このときの入射角を0度とした。

ハルトマン板は、格子状に10mm間隔でφ3mmのピンホールが開いており、これによって平行光束から多数の光線を取り出し、クライオスタット内のIRTSに入射させる。IRTSから出射した光線群はクライオスタットの外で焦点を結ぶ。その焦点前後約20mmの位置に順にCCDカメラを置き、その光線群のスポット像をCCDにより直接撮影し(図8)、パーソナルコンピュータ(PC9801)で処理、解析を行なった。

また IRTS の使用画角が ± 1 度であるため、 $+1$ 度、 $+0.5$ 度、光軸上、 -0.5 度、 -1.0 度の計5つの画角を与え、光線群の内像及び外像を撮影した。このときの入射角はクライオスタットの回転支持台を回転させて得たものである。

以上の実験を常温及び、低温の条件下で行なった。低温では、まずクライオスタット内を真空にし、次に液体窒素を注入後、主鏡裏面、IRTS 基盤、クライオスタットのシールドの3ヶ所に付けた半導体温度計が平衡に落ち着いた状態の後に、測定を行なった。この状態になるまでには、液体窒素注入開始から約6時間かかり、主鏡温度は100K 程度まで冷却できた。

また、これらの条件に加え、金属鏡固定用ネジを緩めた状態及び、締めた状態（主鏡側 M2 のネジは2 kgf·cm、副鏡側 M3 のネジは6 kgf·cm のトルクで締めた）においてそれぞれ測定した。

4. 実験結果

測定条件は次の4つである。

- 1) 常温、常圧かつ金属固定ネジを緩めた状態
- 2) 低温、真空かつ金属固定ネジを緩めた状態
- 3) 常温、常圧かつ金属固定ネジを強く締めた状態
- 4) 低温、真空かつ金属固定ネジを強く締めた状態

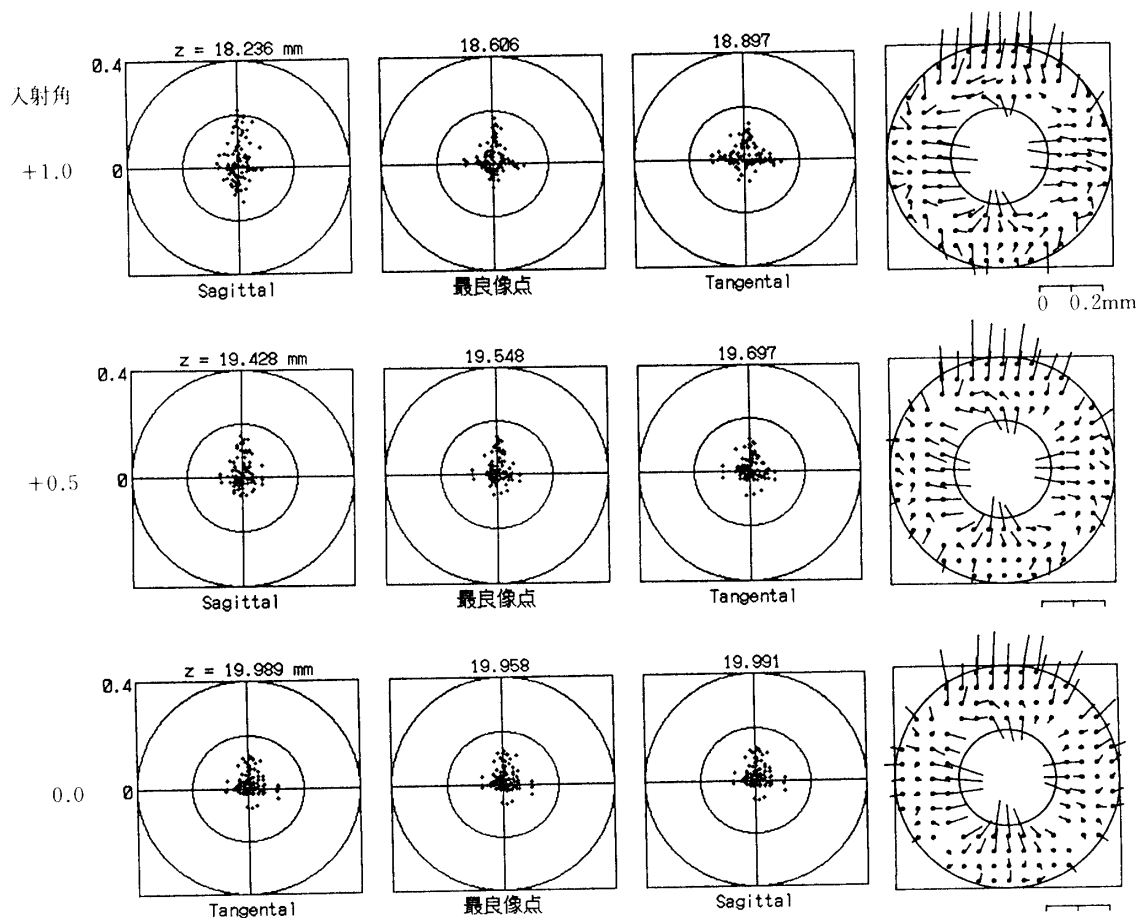


図9. 常温でのスポットダイアグラム（固定ネジを緩めた状態）

1) から 4) までの測定条件において, 入射角を変化させ (± 1 , 0 , ± 0.5 度) ハルトマンテストを行なった結果の一部を以下に示す.

(a) スポットダイアグラム

CCD により撮影した図 8 のような光線群の内像および外像を, 計算機で処理し, 各スポットの座標を計算し, 各座標を幾何学的に結んで光線追跡を行ない[3], 最良像面, 子午的像面 (Tangential Plane), 球欠的像面 (Sagittal Plane) [4]を計算した. ここではその位置

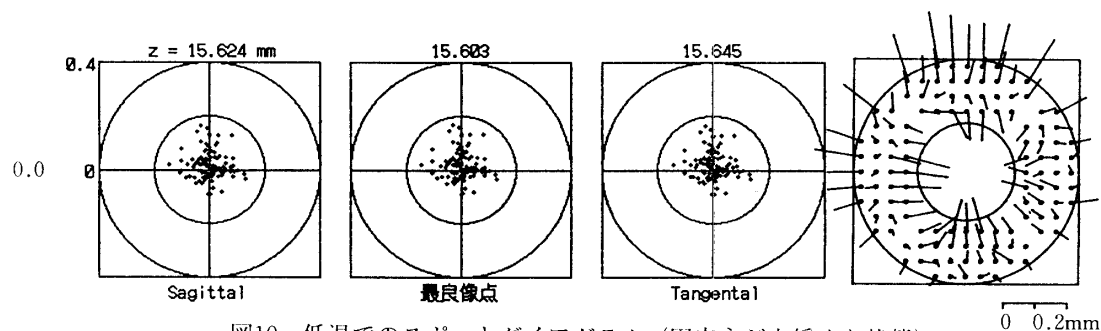


図10. 低温でのスポットダイアグラム (固定ネジを緩めた状態)

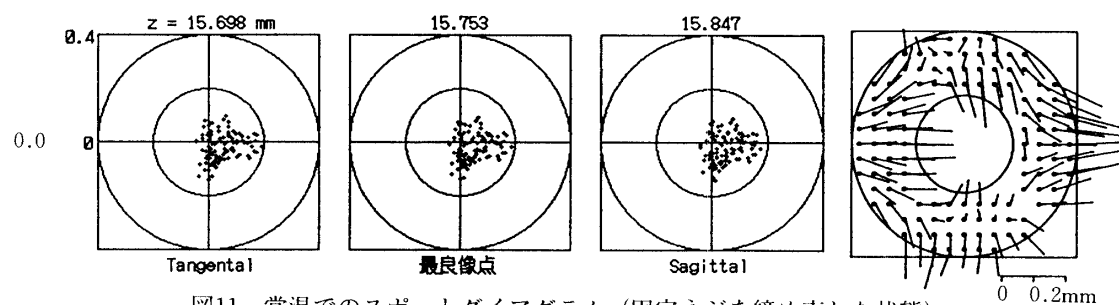


図11. 常温でのスポットダイアグラム (固定ネジを締め直した状態)

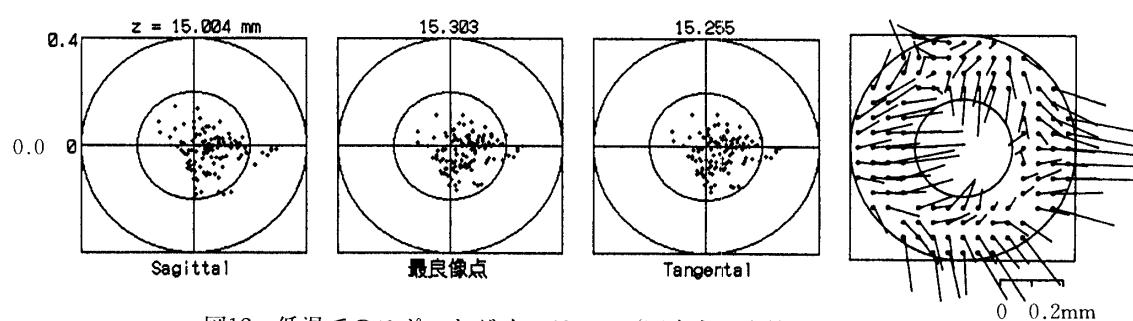


図12. 低温でのスポットダイアグラム (固定ネジを締め直した状態)

表 3. ハルトマン定数 (入射角 0 度)

測定条件		最小錯乱円径(mm)	ハルトマン定数(秒)
固定ネジ トルク弱	常 温	0.244	13.3
	低 温	0.283	19.0
固定ネジ トルク強	常 温	0.276	22.1
	低 温	0.381	28.5

でのスポットダイアグラムを示す。またそれぞれの右端の図は、最良像面での主鏡に投影した横方向の球面収差を、収差ベクトル[6]として表わしたものである。これらの図において一辺の長さは0.8mm、 z は光軸上の位置であり、内像の位置を $z=0.0\text{mm}$ とした場合のそれぞれの光軸上の位置である。

実際の光線群はクライオスタットの窓（厚さ3mm、直径50mmの平行平面ガラス）を通過してきたものである。このように収束光が平行平面を通過する場合、厚さに比例する球面収差などを含んでしまう。したがって、この平行平面の影響をスネルの法則により補正し、平行平面が存在しない場合の光線を計算している。

この測定の測定精度はCCDによって撮影された光線群の座標検出精度によるが、その座標を計算するときは、重心座標を求めているため、検出時のピクセルの大きさ（ $27 \times 26 \mu\text{m}$ ）の数十分の一まで検出可能であると考えられる。一般にハルトマンテストの精度は $\lambda/20$ であり、今回のテストでは以上のことを考慮すると $\lambda/10 \sim \lambda/30$ の精度であると思われる。

図10, 11, 12はそれぞれの条件における光軸上（入射角0度）のスポットダイアグラムのみを示す。

また、以上の条件での最小錯乱円径、ハルトマン定数を表3にまとめる。

図9の場合（常温、固定ネジを緩めた場合）のハルトマンテストによる結果から、図3、図6と同様の条件でスポットダイアグラムを計算したものが図13である。ここでの焦点位置は入射角0度ときの最良像点位置（ z 方向）を基準にし、入射角 $+1$ 、 $+0.5$ 度の各位置でのスポットダイアグラムを求めた。

以上の結果から予想されたように、冷却により像が悪化しているが、固定ネジを強く締め

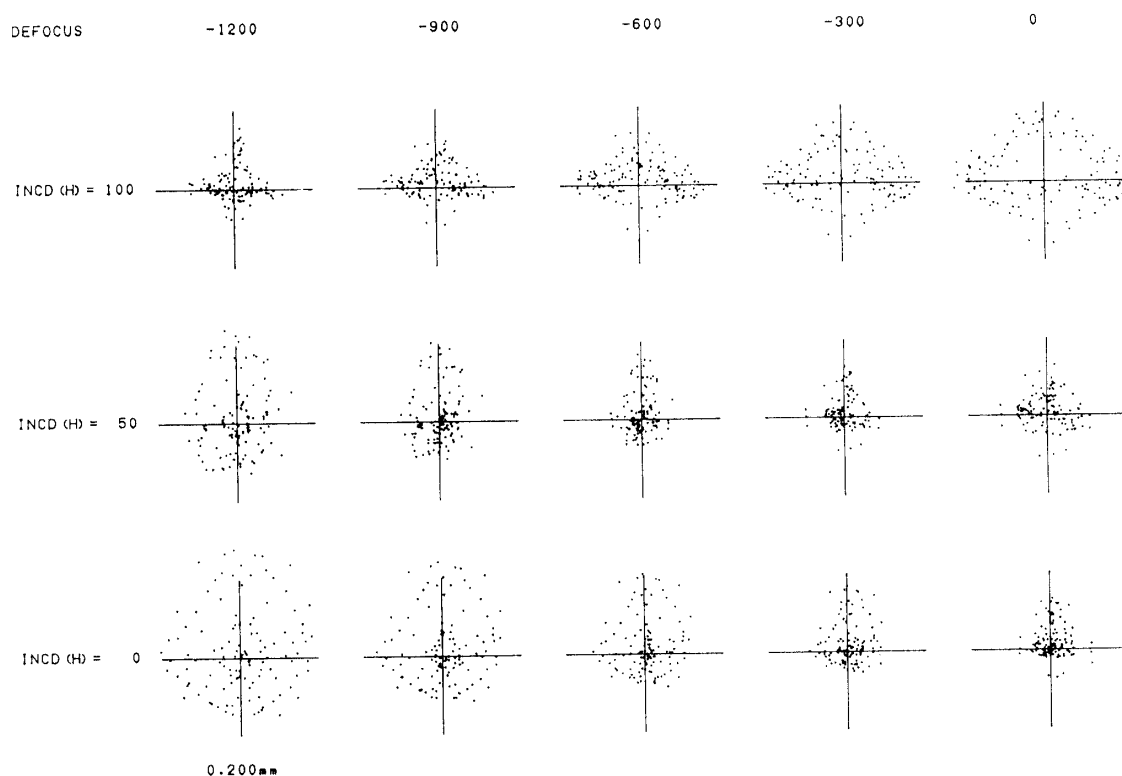


図13. 図6と等価のスポットダイアグラム（常温、固定ネジを緩めた状態）

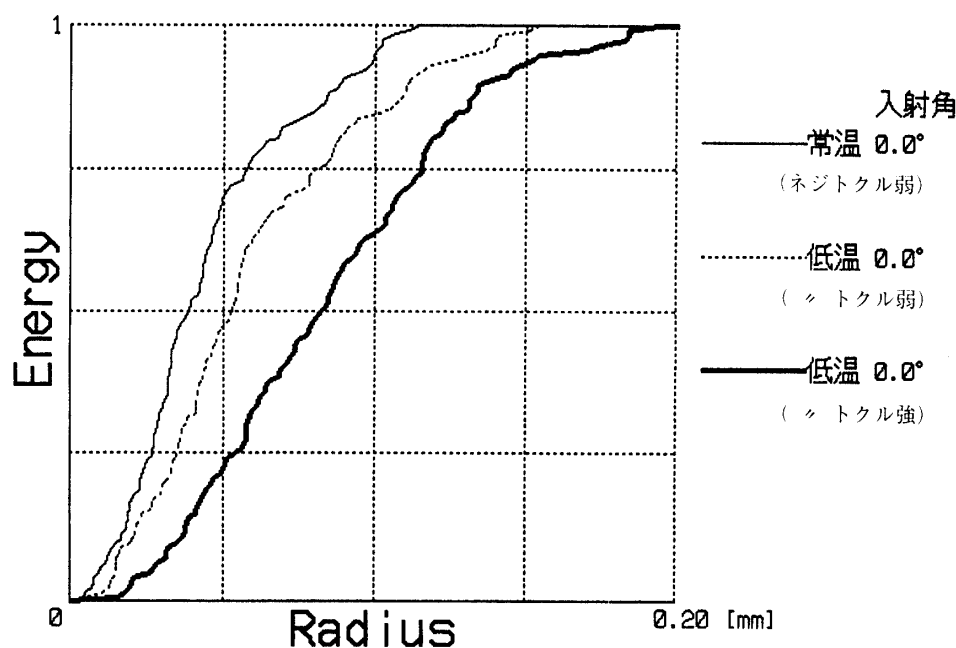


図14. エンサークルドエネルギー

直したことによる像への影響の方が、顕著に現われている。また収差ベクトルには方向性があることがわかる。表3より IRTS の焦点面での分解能は約13～30秒であり、低温での測定の場合クライオスタットの入射側に厚さ40mm の平面ガラスを取り付けているため、この窓による収差を考慮すると、望遠鏡自身の分解能は25秒以下であると考えられ、最悪の場合でも設計時の要求を満足している。

図13では入射角0度を基準として計算したものであり、図6の条件に一致するものではないが、スポットダイアグラム全体は、図6の作製後のシミュレーションが示す傾向に似ている。

(b) エンサークルドエネルギー

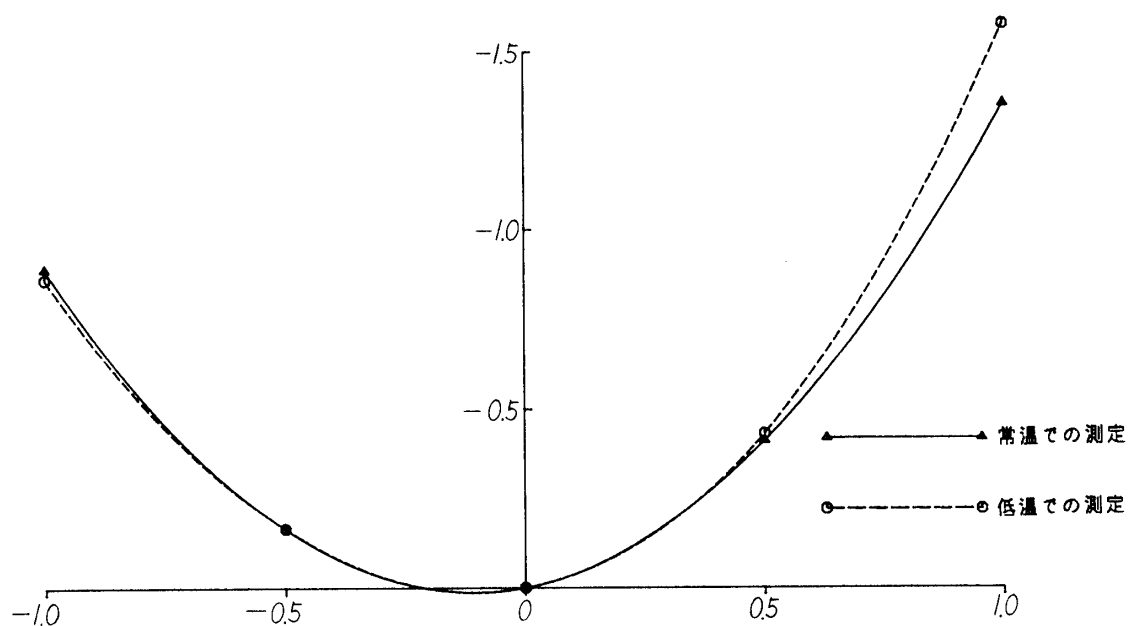
2次元ハルトマン板を用いたため、1つの光線が占める主鏡投影面積は等しく、その光線はそれが占める面積を代表した光であると考えられる。そのため光線数と光量は比例しているといえる。したがって、最良像面における任意の円内に入る光線数と、全光線数の比較から図14のエンサークルドエネルギーを求めた。ここでの任意の円の中心は各スポットの重心座標とした。幾何光学的な結果から計算しているため滑らかな曲線とはならないが、それでもそれぞれの状態を評価することができる。

このグラフの立ち上がり曲線が鋭いほど結像性能が良いことを示すが、やはり冷却により結像性能が低下しており、また結像性能に対する固定ネジの締めつけの影響の大きさがわかる。

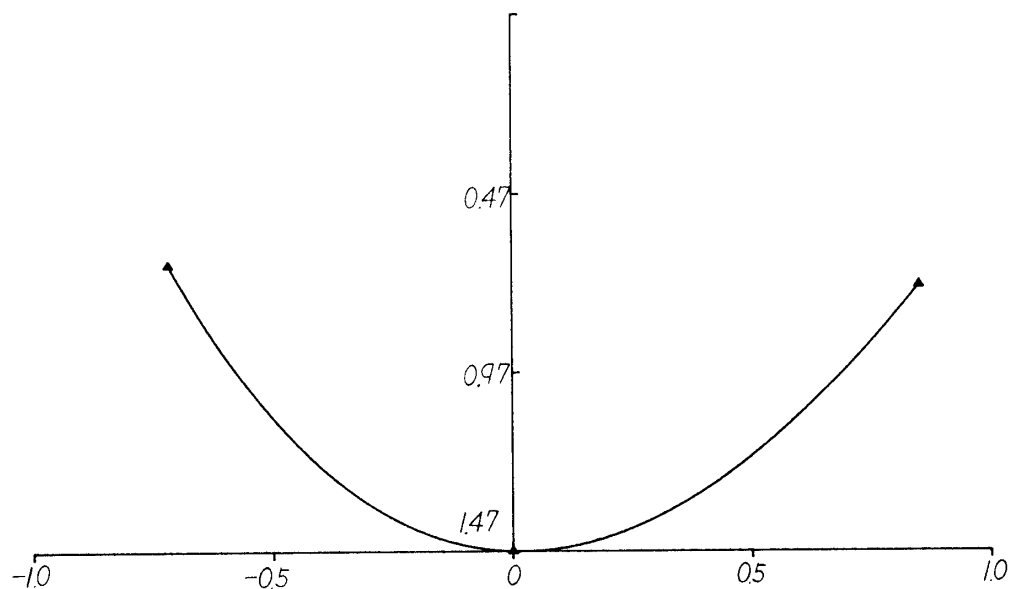
(c) 像面湾曲

図15では、入射角が0°の場合の最良像面位置 (z 方向) 及び、他の入射角の最良像面位置との差を縦軸に、その入射角を横軸にとり像面湾曲とした。このとき— (負) は主鏡側であり、各入射角の像面湾曲を3次曲線近似により結んでいる。

Focus shift

図15. 像面湾曲（入射角0度の場合の最良像点位置を $z=0$ ）

Focus shift

図16. 像面湾曲（設計での焦点を $z=0$ ，常温）

これまでの測定は，CCD 撮像面を正確に焦点位置から20mm に置くことができず，最良像面等の絶対位置を求めることは不可能であった。

そこで，常温での正確な焦点位置を求めるため，設計値の焦点前後20.0mm の位置にスリガラスを移動配置できる治具を製作し，等倍撮影用レンズを CCD カメラに付けそのスリガラス上に映る光線群を撮影し，同様の光線追跡を行なった。こうして設計値の焦点位置を0

とし、 $\pm 0.5^\circ$ の入射角及び光軸上のハルトマンテストを行ない、図15と同様に主鏡側を－(負)とし、像面湾曲を求めた(図16)。

図15における入射角の変化に対する焦点の変動は、常温及び低温の場合においてほぼ一致し、これらの結果は理論的なものの結果とほぼ一致している。

図16から分かるように実際の焦点位置が、設計値のものより1 mm 以上主鏡側にあり、冷却しても誤差が存在するという結果になったが、今回の実験ではこの値をもとに再調整、再確認するまでには至らなかった。

低温の場合、上で述べたスリガラスを移動できない。そこで、 5×5 mm のマスクを付けたスリガラスを焦点前20mm に置いたまま冷却し、そのマスクの大きさとスリガラス上に映るスポット像の大きさの比較により、冷却時の光線群の内像の大きさを求め、さらにそれから焦点位置を計算した。その結果を表4に示す。

表4. 焦点位置

測定条件	内像の大きさ(%)	焦点距離(mm)
常 温	100.0*	601.5
低 温	95.20	600.5

*この大きさを基準(100%)にした

冷却すると像は95%の大きさになり、焦点位置が1 mm 程度変化していることになる。これは主鏡、副鏡間にして0.06mm 変化したことになり、アルミニウムの熱膨張率 ($2.9 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$) と主鏡、副鏡間距離 (107mm) より主鏡、副鏡の温度差が 30°C の場合にあたり、温度ムラによることが考えられる。

(d) 波面収差

像面上の幾何光学的な収差が知れていれば、それを積分することにより波面収差(3)を求めることができる[2]。したがって、最良像面での縦方向の球面収差を台形法により数値積分し、さらにその結果を最小二乗法によりツェルニケ多項式[2]に近似し、波面収差を求めた。

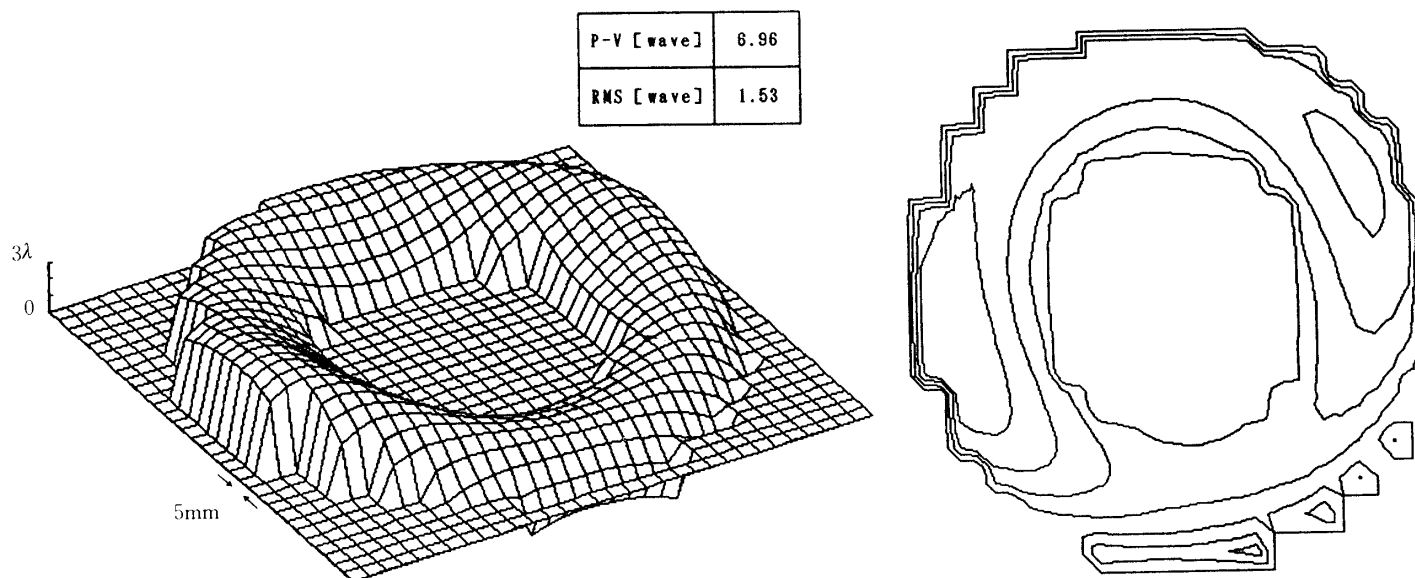
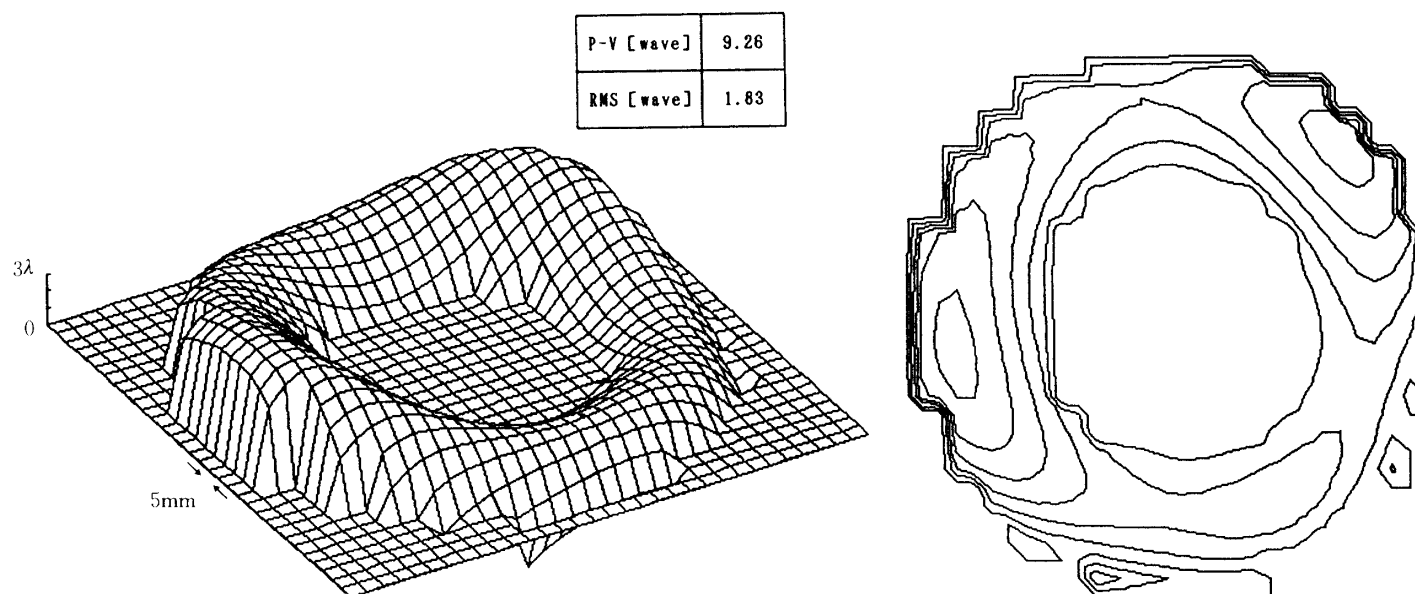
$$W = \frac{1}{f} \left\{ \int_0^\xi \delta x d\xi + \int_0^\eta \delta y d\eta \right\} \quad (3)$$

(η, ξ : ここではハルトマン板上のピンホールの座標)
($\delta x, \delta y$: 縦の球面収差)

ツェルニケ多項式(4)は波面収差を表わす近似式であり、それぞれの項は波面の振動成分を表わし、その係数は長さの次元(ここではレーザの波長を単位とした。)をもち、その振動成分の振幅を示す。したがって、ツェルニケ係数の各値は、各収差をどれだけ含んでいるのかを知るときに便利である。

$$W = Z_0 + Z_1 x + Z_2 y + 2Z_3 xy + Z_4 (-1 + 2y^2 + 2x^2) + \dots + Z_{14} (y^4 - 6x^2 y^2 + x^4) \quad (4)$$

$$\left(\begin{array}{l} W: \text{波面収差}, Z_i: \text{ツェルニケ係数} \\ x = \xi/S, y = \eta/S, S: \text{波面収差を定義する開口の半径} \end{array} \right)$$

図17. 常温での波面収差 (固定ネジを緩めた状態), 等高線間隔: $\lambda=0.633\mu\text{m}$ 図18. 低温での波面収差 (固定ネジを緩めた状態), 等高線間隔: $\lambda=0.633\mu\text{m}$

ここでは台形法による数値積分であり、積分の過程において高次の項を無視しているため、ツェルニケ多項式を高次の項まで近似することはあまり意味がなく、4次の項(係数は15個)までの近似とした。また数値積分による累積誤差を防ぐため、それぞれ独立な積分経路(4方向)により計算し、その結果の平均をとっている[5]。

以上の結果を図17～図19に、そして表5に各図の主なツェルニケ係数の値を示す。

図17の波面収差の形状は、図4の主鏡形状誤差に傾向がよく一致しており、副鏡は図5よりほぼ理想的に製作できていることから、常温での収差(像のボケ)は、主に主鏡形状誤差によるものであると思われる。この波面収差の大きさは形状誤差の数倍あるが、これは望遠

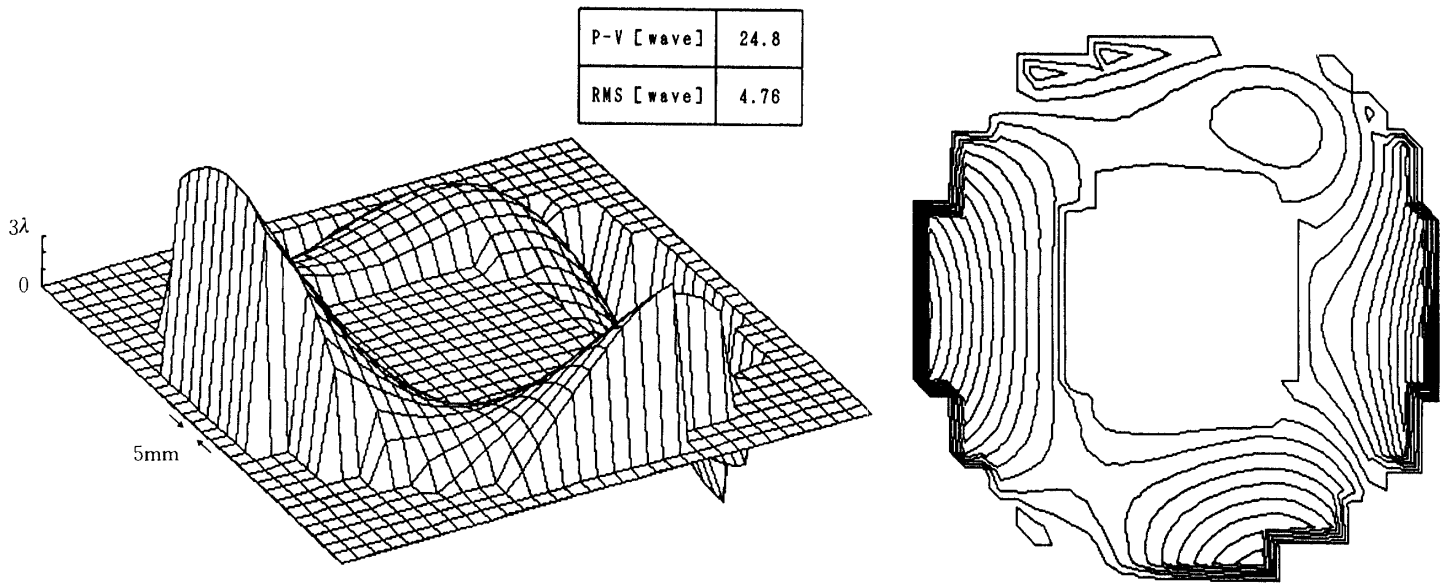
図19. 低温での波面収差 (固定ネジを強く締め直した状態), 等高線間隔: $\lambda=0.633\mu\text{m}$

表5. ツェルニケ係数

Degree		Meaning	Coefficient [wave]		
			Fig. 17	Fig. 18	Fig. 19
0	0	Contant term	1.80	1.84	2.01
1	0	Tilt in x	-0.750	-1.49	-6.03
	1	lite in y	-1.56	-1.12	1.53
2	0	Astigmatism with $\pm 45^\circ$	-0.720	-0.650	3.56
	1	Focus shift	1.79	2.31	2.77
	2	Astigmatism with 0 or 90°	-1.47	-1.47	-0.580
3	1	3rd order coma x	-0.0258	0.801	-2.42
	2	3rd order coma y	-1.44	-1.77	1.51
4	2	3rd order spherical aberration	-2.20	-2.78	-3.20

鏡が反射鏡から成り, 形状誤差による光路差が2倍(往路と復路)となることが主な原因であると考えられ, その他の残りは表5の傾き成分(Tilt in x, Tilt in y)が他のものより大きいことから, IRTSの光軸が完全には実験光学系の光軸と一致していないことによるものであろう。

そして低温にした図18では, 波面収差は全体が膨張した形状を示しており, 主鏡形状が冷却によってその方向に変形した結果が, 主要要因と思われる。この形状変化により表5では, 焦点のシフト及び3次コマ収差が増加している。

固定用ネジを締めつけ直し冷却した場合の図19では, 複雑な波面収差の形状となっており, ネジ締めつけ力の不均一による望遠鏡全体の歪みを表わしているようである。

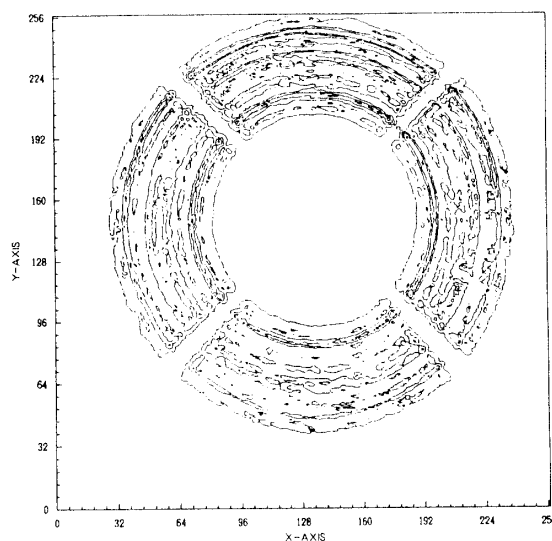


図20. ハルトマン板を取り除いた時の内像

5. まとめ

予想された液体窒素冷却による収差の増大は、金属鏡面の形状精度による収差より少ないことが分かったが、金属鏡固定ネジの締めつけ力が不均一であることにより、冷却時以上の収差増加を招いたようである。

したがって、IRTSのように冷却を必要とする光学系においても、常温における測定により十分その結像性能を評価できることが分かる。また、IRTSのように主鏡、副鏡とも非球面から構成される光学系は正確なアライメントを必要とし、これが少しでもずれると収差の増大を引き起こすことが確認された。

また、金属鏡材料と反射膜の熱膨張率の違いから、低温時に鏡面の変形が予想されたが、今回の測定では認められなかった。

以上のことから IRTS において冷却による影響は、金属鏡面の形状精度や、歪みによる影響よりも小さいことが分かる。

今回の測定では、幾何光学的方法による結果であり、光の回析を無視したものである。実際の測定では赤外光を対象とするため、光の回析の影響が大きく、測定結果のような金属鏡表面形状誤差や、冷却などによる影響はかなり少なくなり、分解能の点では問題ないであろう。

基本的には、現段階の問題としては

- ① 形状誤差の影響
- ② 金属鏡の保持方法
- ③ 切削の送りパターンによる影響

がある。

②については、IRTS を宇宙空間でしかも超低温という環境で用いるため、地上の望遠鏡のように保持できず、今回のようにネジの締め具合によって収差が増加してしまう結果となった。③についての定量的な測定はできなかったが、実験光学系のハルトマン板を取り除き、

CCD で内像を見たところ図20のような画像を得た。これは光強度を等高線表示したものであり、それが同心円状であることから切削による送りパターンによるものであると思われる。

さらに良い結像性能を得るならば、①を改善すれば十分であろうが、将来的には②及び、③の解決が必要であろう。

6. おわりに

NC ダイヤモンド切削により製作された今回の金属鏡は、非球面であるにもかかわらず、ほぼ設計通りのものができ、赤外線光学系として用いることが可能であることが確認できた。NC 切削による鏡面の製作が可能となれば、より複雑な面形状の鏡も製作可能となる。

そのような面形状測定に光の干渉を利用したものが盛んに研究されているが、ここで用いたハルトマンテストのような幾何光学を利用した測定法も有効であると思われる。これは雰囲気の影響が少なく、測定原器を必要としないなどの長所をもつため、加工現場での使用が可能である。このシステムにハルトマン板のかわりにファイバーステレーティング (光ファイバーを単層に並べたもので、光の回折を利用し多数の発散光線が得られる) を用い小型化し、オンマシン計測さらにはインプロセス計測に組み込むことにより、高精度の加工を実現することが研究されている [7]。

7. 謝 辞

宇宙科学研究所の奥田治之教授をはじめ奥田研の皆様には、実験装置その他の面で大変お世話になった。そして金属鏡の製作や、その検査結果のデータを提供して頂いた(株)ニコンの関係者の方々、またミラーセルの設計、製作にあたられた三鷹光器(株)の方々に深く感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- [1] 宇宙科学研究所 (SFU 計画室), 「Supace Flyer Unit」, p 10, 1989.
- [2] 大島 紀夫, 他, 「軽量反射鏡の低温テスト」, 東京天文台報告, 20, 1, 1983.
- [3] 岩井 智昭, 「鏡面形状の精密測定に関する研究」, 金沢大学修士論文, 1989.
- [4] 久保田 広, 「光学」, 岩波書店, p 206, p 300-301, 1964.
- [5] Daniel Malacala, 「Optical Shop Testing」 John Wiley & Sone, Inc., p 323-349, p 489-511, 1978.
- [6] 中桐 正夫, 他, 「ロケット S520-8CN 号機搭載用望遠鏡の金属鏡について」, 東京天文台報告, 21, 1, 1987.
- [7] 河野 嗣男, 他, 「高精度鏡面形状測定法—非球面測定を目指して—」, (株)オプトロニクス社, p 17-22, 1988.