

作成年月日 1987年 2月 5日	場所 東京天文台講義室	番号 O T - 2 5 - T
作成者 渡辺正明		備考
題 目 鏡 面 変 形 : 支 持 力 ラ ン ダ ム 誤 差 の 影 響		
<p>メニスカス鏡とハニカム鏡の両方について、支持力にランダムな誤差がある場合の変形量と必要精度を、統計的考察とシミュレーションにより見積もった。この結果、次のことが分かった。</p> <p>(1) 統計的に見積もった特性は、シミュレーションの結果とほぼ一致する。</p> <p>(2) 支持力がランダムにばらついている場合の変形のパターンは、大きい(長波長)ものが多い。</p> <p>(3) 最終的な変形量で比較すると、達成可能な支持力精度が、0.06Kg(または、支持力の0.1%)以下の場合にはメニスカス鏡が、それ以上だとハニカム鏡の方が優れていると言える。</p>		

大型光学赤外線望遠鏡検討会

1. 基本的特性

今までに計算した、7.5m鏡の基本的特性をまとめると、表1のようになる。ここで示されている支持力の必要精度は、他の支持点に誤差がまったくない場合に、ある1点で要求される必要精度である（支持位置については、平均位置の必要精度）。

表 1 . 各ミラーの仕様と基本的特性

	20cm厚 メニスカス鏡	ハニカム鏡
直径	7.5m	7.5m
鏡厚	20cm	90cm (周囲)
F比	2.0	2.0
重量	19トン	13トン
必用支持点数	390点	90点
1点当たり支持力	50Kg	140Kg
支持力の必要精度 ¹⁾		
axial	0.14Kg	1.11Kg
transverse	2.68Kg	24.6Kg
transverse位置の 必要精度 ²⁾	0.05mm	0.55mm
理想的に支持した場合の変形量 (peak to valley)		
alt.=90° (水平)	0.06μm	0.42μm
alt.=60°	0.07μm	0.47μm
alt.=0° (垂直)	0.10μm	0.85μm

1) alt.=90° で、他の支持点に誤差がない場合に、0.1μmの変形を生ずる、ある1点での力誤差。

2) alt.=0° のとき、0.1μmの変形を生ずる、平均支持位置のずれ。

大型光学赤外線望遠鏡検討会

2. 統計的な見積もり

現実の鏡面支持では、支持誤差は統計的にばらついていて、あるまとまった範囲での総和、もしくは平均が鏡面の変形を起こすはずである。あるまとまった範囲は場合によって異なるが、3個の axial 固定点で分けられる 1/3 程度の範囲を考えるのが適当であろう。例えば、20cm厚メニスカス鏡の場合、全体で 390点ある支持点のうち 130点がまとまって誤差を生むとすると、1点あたりの許容誤差は、支持力については表1の値よりもほぼ1桁厳しくなり、支持位置については1桁ゆるくなる。このような統計的なばらつきを考慮した場合の1点ごとの必要精度は、表2のように推定される。

表2. 誤差が統計的にばらついている場合の1点ごとの必要精度 (表1から推定)

	20cm厚	
	メニスカス鏡	ハニカム鏡
まとまって作用する 支持点の数	130点	30点
支持力の必要精度		
axial	0.012Kg	0.20Kg
transverse	0.24Kg	4.49Kg
transverse位置の 必要精度	0.57mm	3.0mm

大型光学赤外線望遠鏡検討会

3. 乱数によるシミュレーション

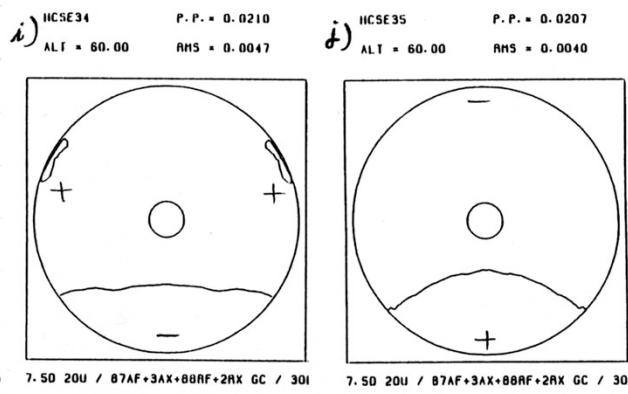
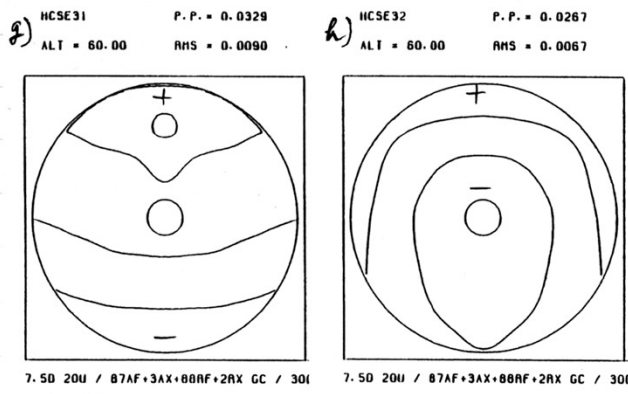
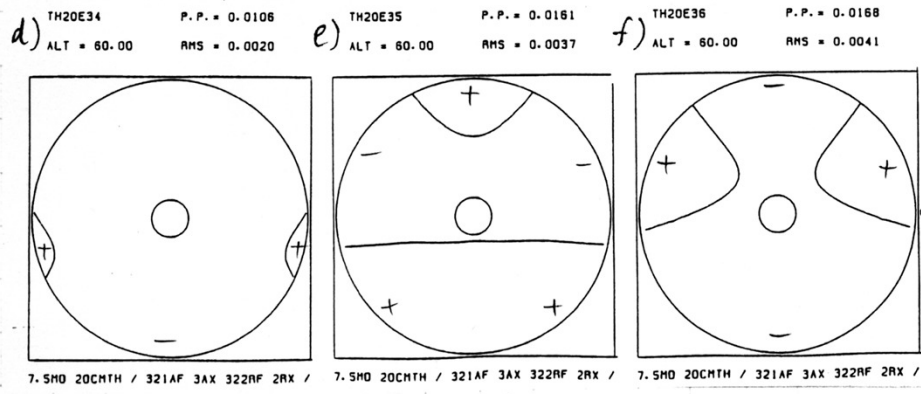
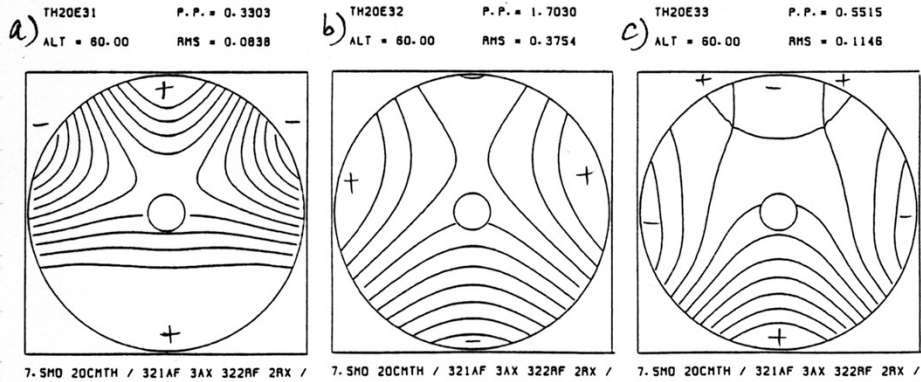
実際にランダム誤差があった場合、変形量が上記の推定通りになるかどうかを調べるためと、変形パターンの様子を見るために、乱数により支持力にガウス分布の誤差を与えて自重変形を計算した。結果は、図1と表3のようになった。ミラー変形計算はすべて計算時間節約のため、対称性を利用して片側だけのモデルで行なっているので、変形量はやや小さめに求まっているはずであるが、上記の推定とは矛盾しない結果を得た。また変形パターンとしては、いずれの場合も大きな（波長の長い）モードになっているので、ランダム誤差による変形をアクチュエーターで修正する場合には、その数は比較的少なくても良いものと思われる。

表3. ランダムに誤差がある場合の変形量（シミュレーション）

	20cm厚メニスカス鏡		ハニカム鏡	
	$\sigma=0.1\text{Kg}$ のガウス分布の (alt.=60°) 支持力誤差を与えた		$\sigma=1.0\text{Kg}$ のガウス分布の 支持力誤差を与えた	
axial 支持力:				
	変形量	対応必要精度	変形量	対応必要精度
乱数系列1	0.33 μm	0.030Kg	0.33 μm	0.30Kg
乱数系列2	1.70 μm	0.005Kg	0.27 μm	0.37Kg
乱数系列3	0.55 μm	0.018Kg		
平均	0.86 μm	0.018Kg	0.30 μm	0.34Kg
transverse 支持力:				
	変形量	対応必要精度	変形量	対応必要精度
乱数系列1	0.011 μm	0.91Kg	0.021 μm	4.8Kg
乱数系列2	0.016 μm	0.63Kg	0.021 μm	4.8Kg
乱数系列3	0.017 μm	0.59Kg		
平均	0.015 μm	0.71Kg	0.021 μm	4.8Kg

大型光学赤外線望遠鏡検討会

図1. 乱数により、ランダムな支持力誤差を加えた場合の変形。a)~f)は20cm厚メニスカス鏡の場合で、a)~c)は axialの場合、d)~f)は transverseの場合。g)~j)は20cm厚メニスカス鏡の場合で、g)~h)は axialの場合、i)~j)は transverseの場合。メニスカス鏡の場合は $\sigma=0.1\text{Kg}$ 、ハニカム鏡の場合は $\sigma=0.1\text{Kg}$ のガウス分布誤差を加えてある。



大型光学赤外線望遠鏡検討会

表4には、乱数によるシミュレーションを行なった時の、固定点反力の変化量をまとめてある。変形のパターンや変形量と固定点反力の関係は、十分理解出来るものとなっているが、誤差の分布にいろいろなパターンがあるため、固定点反力の変化の大きさと鏡面の変形量は、必ずしも比例しているわけではない。

表4. ランダム誤差時の固定点反力の変化量

20cm厚 メニスカス鏡： 変形量		axial 上固定点	axial 下固定点	transverse 固定点
axial :				
乱数系列1	0.33 μm	1.873Kg	0.742Kg	0.000Kg
乱数系列2	1.70 μm	-0.521Kg	-0.077Kg	0.000Kg
乱数系列3	0.55 μm	-1.601Kg	-1.166Kg	0.000Kg
transverse :				
乱数系列1	0.011 μm	-0.010Kg	0.005Kg	1.884Kg
乱数系列2	0.016 μm	0.033Kg	-0.017Kg	-0.336Kg
乱数系列3	0.017 μm	-0.021Kg	0.011Kg	-1.774Kg
ハニカム鏡： 変形量		axial 上固定点	axial 下固定点	transverse 固定点
axial :				
乱数系列1	0.33 μm	-9.603Kg	6.843Kg	0.000Kg
乱数系列2	0.27 μm	-0.293Kg	4.230Kg	0.000Kg
transverse :				
乱数系列1	0.021 μm	-0.144Kg	0.072Kg	2.000Kg
乱数系列2	0.021 μm	0.343Kg	-0.172Kg	5.133Kg

大型光学赤外線望遠鏡検討会

4. まとめ

表 1 によれば、20cm厚メニスカス鏡の場合には支持力にきわめて高い精度が要求される。一方、ハニカム鏡では、構造の非対称性により比較的大きな変形が残ると言う問題がある。しかし、いずれの場合も、鏡面精度に最も影響するのは、axial 支持力の精度であろう。現在考えているモデルでミラーを作り、30° に傾け (alt.=60°)、任意の精度のaxial支持力で支持した場合の最終的な変形量を見積もると、図 2 のようになる。これによれば、支持力精度が、0.06Kg (または支持力の 0.1%) 以下の場合にはメニスカス鏡の方が、それ以上だとハニカム鏡の方が優れていると言える。別の言い方をすれば、目標鏡面精度が0.5μm程度よりも大きくて良ければ、ハニカム鏡の方が支持力精度でほぼ 1桁楽に目標精度を実現出来るが、それよりも高い鏡面精度が要求される場合には、メニスカス鏡でなければ実現出来ないと言える。

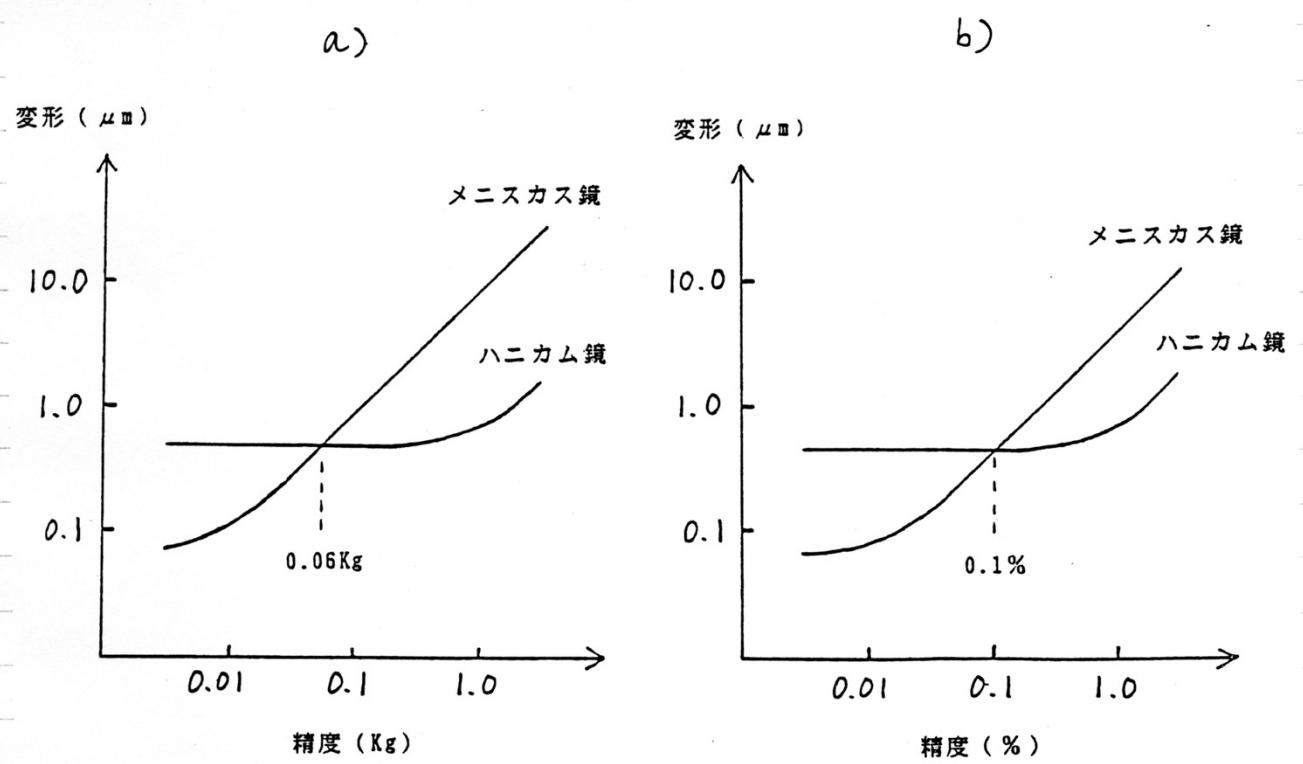


図 2. 表 1、2 の数値から推定した、任意の支持力精度に対する、最終的な変形量。a)は支持力精度そのもの(Kg)に対して、b)は支持力に対する支持力精度の割合(%)に対して、示してある。ハニカム鏡の限界精度は、内部構造、熱変形量などにより変わる可能性が残されている。