

# 位相カメラ光学系検討

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/Kyoto3m/pcs4.html>

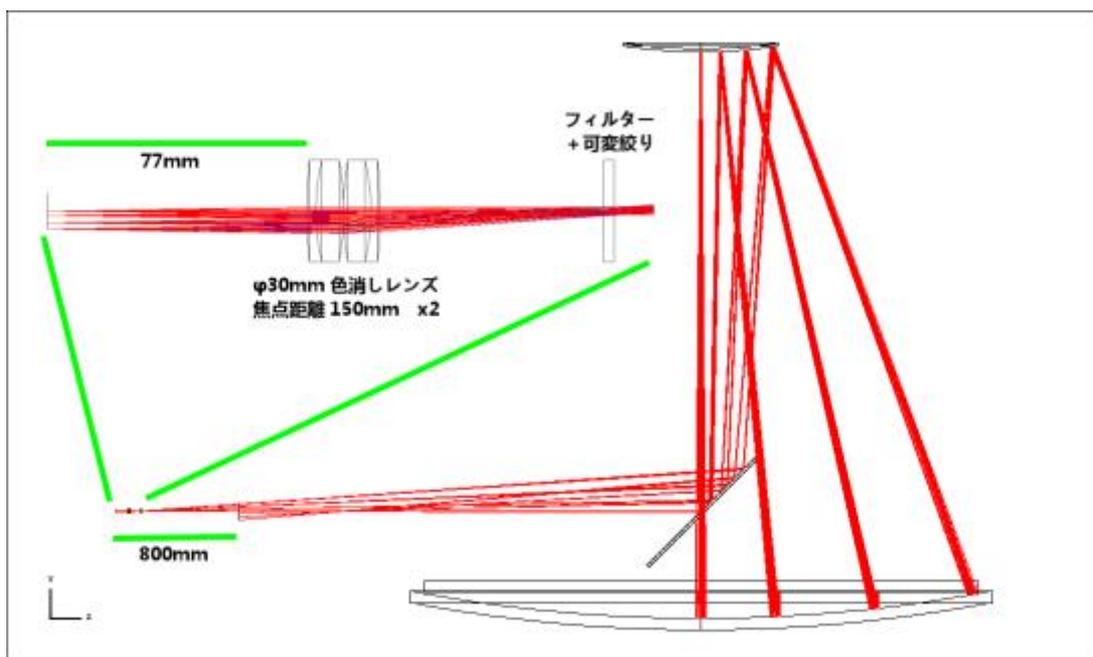
岩室 史英 (京大宇物)

## ●位相カメラ光学系

ハーフミラーホルダ固定試験の結果から得られる位相カメラの光学系に必要な条件は以下の通り。

- 焦点面の面積は 100mm<sup>2</sup>で、その中に最低 24個のスポットを配置  
(各スポットの像サイズは約1mm)
- 10:1 で縮小して、10mm<sup>2</sup> CMOS 上に結像させる
- 収差は回折像サイズ 100 $\mu$ m の 1/4 以下であること
- CCD のフォーカスを変えてもスポット位置が動かないようにテレセンにする

結果は以下の通り。

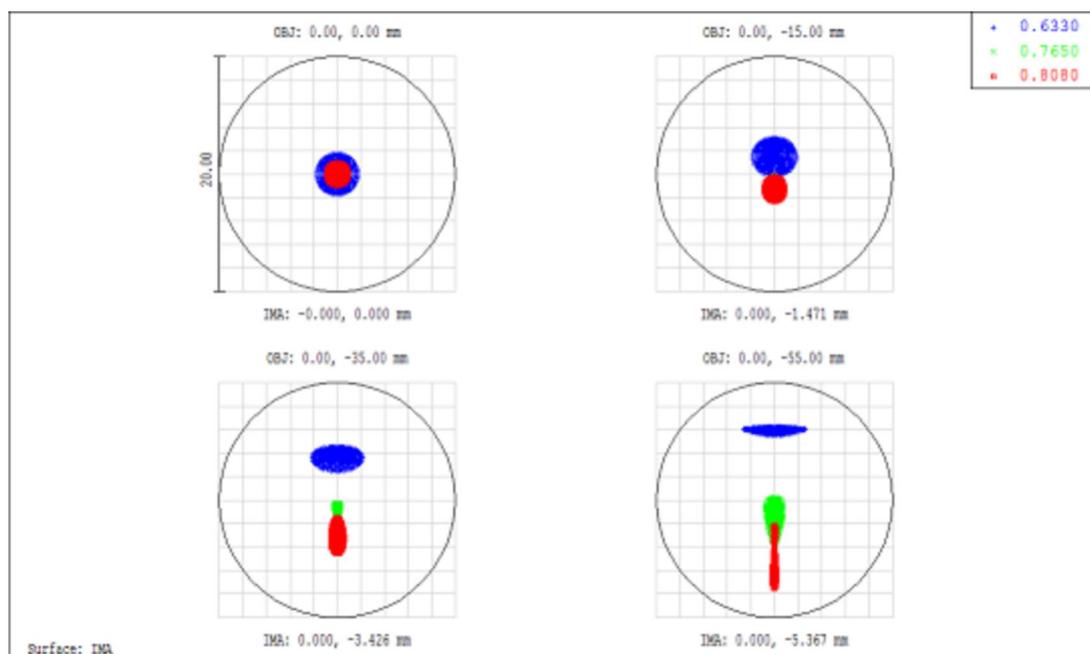


実際は、off axis 位置からファイバーで照射し、主鏡上のハーフミラーの向きを調整してカメラ視野内に光を戻すのだが、ここでは計算を簡易化するために、ハーフミラーの向きは望遠鏡光軸に対し全て垂直で、各ハーフミラーに対応する光線の入射位置を変えることで、ハーフミラーの角度調整を再現した。

焦点面位置の100mm範囲内に、視野端ほど主鏡外側からの光が入射するようにしたとき、ハーフミラーの瞳に相当する部分が焦点面の後ろ約600mmのところにある(望遠鏡光学系は F/6 なので、100mmの6倍)。これが CMOS のサイズである10mm程度に広がった所にレンズを置くことになるので、700mm 程度の所にレンズを置き、800mm 弱の所に結像させればよいと考えられる。

上図は、これを焦点距離150mmのレンズ2枚(合成パワーは焦点距離75mm相当)で再現したもので、凸レンズが内側になる配置が最も収差を減らすことができた。また、

焦点距離75mmのレンズでは収差が大きすぎることも確認した。ハーフミラーの瞳位置には、必要であればフィルターや遠隔操作できる絞りを配置することで、背景光を抑えることが可能。



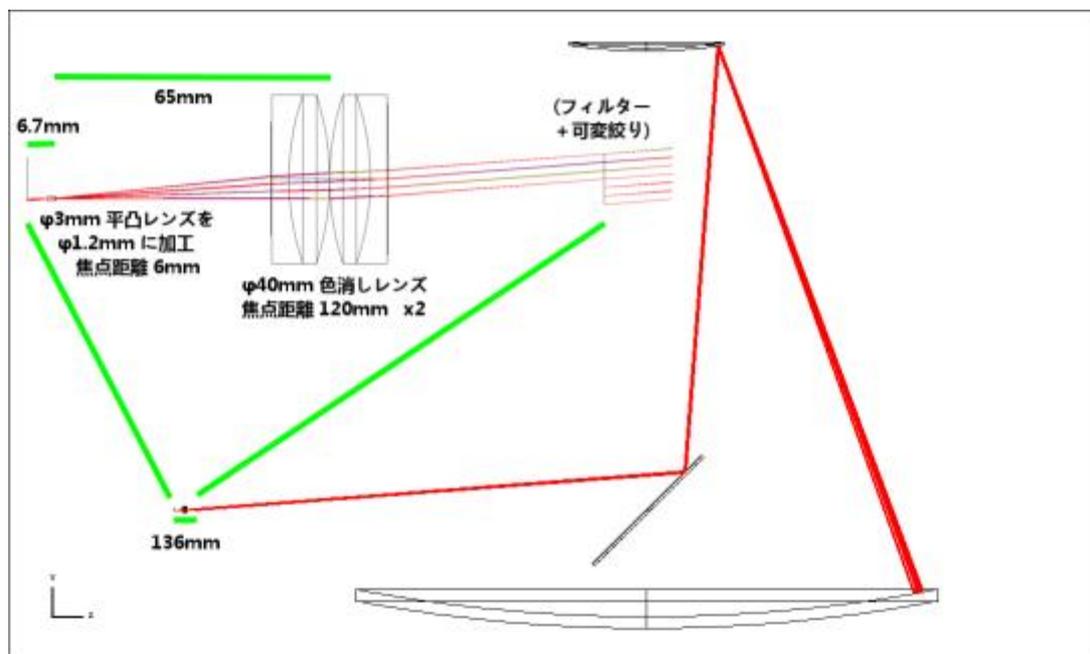
### [Zemax ファイル](#)

スポット図は、各波長の回折限界の 1/10 以下に収まっており、倍率色収差を考慮しても 1/6 程度となっている。倍率色収差が出る主な原因は、主鏡上のハーフミラーを2度透過する際に出るもので、特注レンズにすれば消せなくもないと思うが、波長スキャンによる重心位置の変化は1pixel (5.5  $\mu$ m)以下なので補正の必要はなさそう。

## ●位相カメラ光学系その2

上の設計案では、主鏡像がどこにも現れない設計だったので、 $\phi$  10mmの主鏡像を結像させてマイクロレンズで集光する通常のシャックハルトマンカメラ方式を考える。

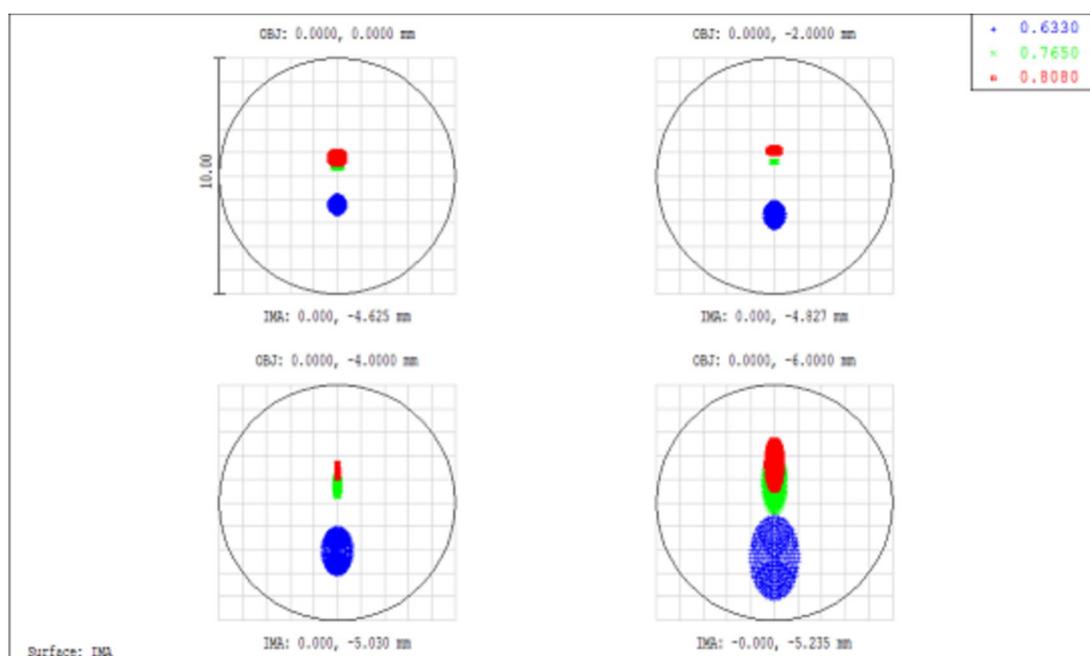
結果は以下の通り。



ここでは、主鏡端の光しか追っていないが、光軸に近づくほど倍率色収差が減る程度で、それ以外には大きな変化はない。また、ハーフミラーの向きがずれて、返ってくるスポット位置が 2mm, 4mm, 6mm ずれた時の結果も表示されている。

ビーム径がφ10mmになるのは、焦点面から60mmの場所なので、そこに色消しコーマレンズを置き(焦点距離120mmのアクロマティックレンズ2枚)、主鏡像ができる場所に焦点距離6mmのマイクロレンズを置く。色消しのマイクロレンズも存在するが、通常の平凸単レンズで問題なかったため、色消しの場合には計算していない。また、焦点距離6mmのレンズは市販されている平凸レンズでは最小直径がφ3mmだったため、このレンズに追加工して直径をφ1.2mmに減らす必要がある。

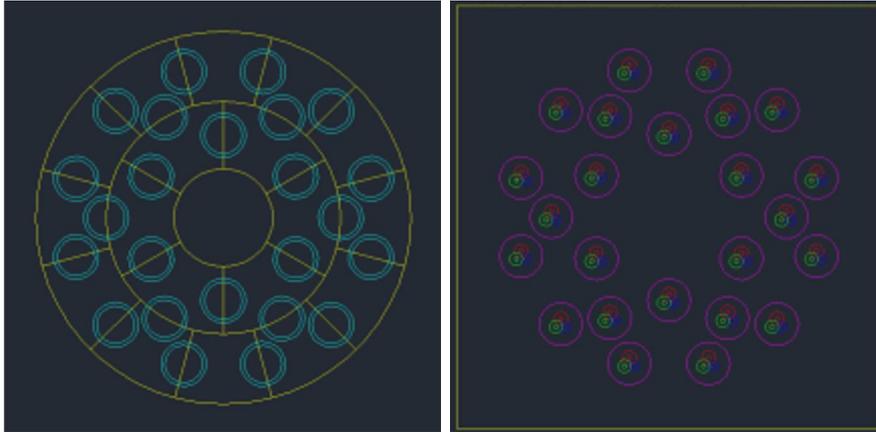
2枚のアクロマティックレンズの配置は、第1案と同じく凸レンズを内側に配置するのが最も収差が減る事は確認した。



[Zemax ファイル](#)

スポットサイズは第1案の約半分となっており、収差的には全く問題ない。

マイクロレンズの配置と、検出器上でのスポットの配置は以下の通り。



左図: 水色の2重丸は内側が  $\phi$  1mm、外側が  $\phi$  1.2mm。  
右図: 赤緑青の2重丸は内側が15mm $\square$ アパーチャの airy disc サイズ、  
外側がその3倍のサイズ。ピンクの丸はハーフミラーホルダの角度再現性範囲。  
各イメージは[こんな感じ](#)

右図に関しては、第1案でも状況は同じ。  
こうして見ると、5x5 グリッドに並べて...と考えた時に十分余裕があると思った検出器サイズが、結構厳しいという感じになってきた。2k x 2k 以上の CMOS は入手が難しくなるし、読み出しが大変になるのでできればこのサイズに収めたい。ハーフミラーの角度再現性をもう少し高める方法を考えるか...

第1案と第2案それぞれの難しい点は以下の通り。

第1案:

- ハーフミラーの向きがずれて、スポットが3mm以上離れた所に戻ってくると、急激に像が悪化する(レンズ径を大きくすると緩和されるはずだが確認はまだ)
- ピックオフミラーのサイズを140x200から160x230に拡大する必要がある。

第2案:

- マイクロレンズの位置が、焦点位置に対し 0.2mm 以上ずれてはいけない(副鏡位置にも制限が付くかも)。

どちらも難しい点はあるけれど、第2案の方が実現しやすいかな...

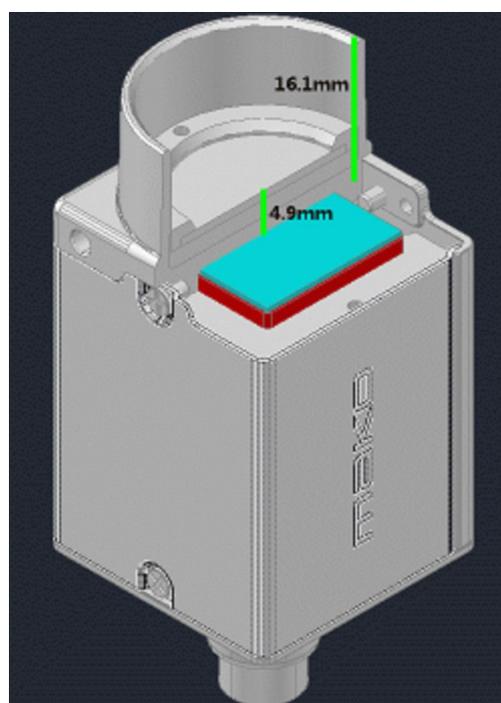
## ●どう作るか

使用予定の CMOS はこれ(5.5  $\mu$ m の 2k x 2k CMOS, GigE インターフェースで最安)。



第2案の場合気になるのはマイクロレンズのバックフォーカスで、エドモンドのレンズを使うと Zemax の結果では 4.86mm。入射窓から CMOS までの距離を2種類の方法で調べてみた。

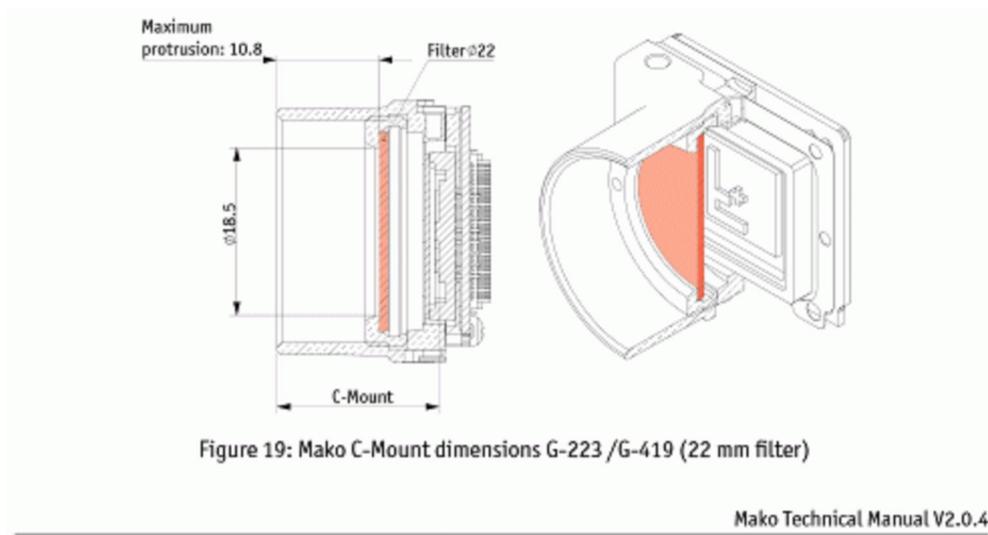
- CAD ファイルから読み取り



仕様では、C/CS mount となっていてそれぞれフランジバックが 17.5mm / 12.5mm。ネジ部が交換可能な作りになっているものと思われる。CAD 図面は、水色の面が CMOS だと思つとフランジバックが 16.1mm で C マウントには少し短く、赤色の面だとしても 16.6mm でまだ足りない。入射窓と思われる所から水色の面までは 4.9mm で、この面が CMOS 面だとしてもエドモンドのレンズではバックフォーカスが少し足りない。ガラスの屈折率を考えると実際の距離より光路長は長くなるので、特注でマイクロレンズを作るか、入射窓を除去するしかないかも。

その後の調査で、エドモンドはφ1.2mm にする追加工ができないことが判明し、結局レンズはシグマ光機になった。シグマ光機のレンズはバックフォーカスが 5.1mm で、少し条件が緩くなる。

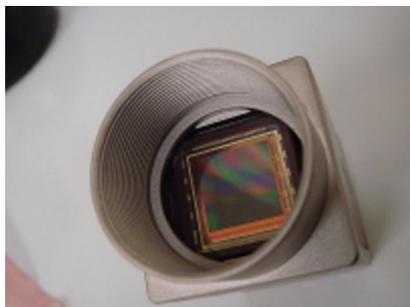
- 技術マニュアルを参照



入射窓はフィルタと書いてあり、どうやら簡単に取り外せそう。この資料の数値だと入射窓から CMOS までは  $17.5 - 10.8 = 6.7\text{mm}$  となり、これでは入射窓の除去は必須。入射窓を固定するリングを用いて、マイクロレンズホルダーを固定するという感じになるかな(フォーカスをどこで調整するかが問題になりそうだが...)

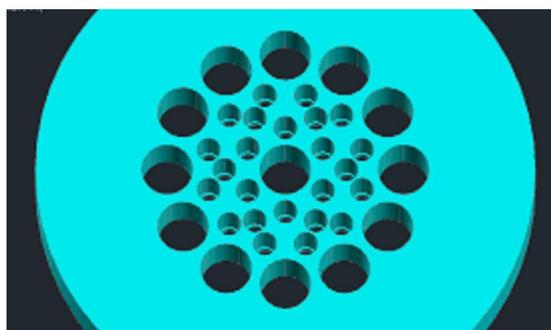
- 買ってみた

入射窓は無かったので、Cマウントのネジを使ってマイクロレンズホルダを直接固定できる。Cマウントのネジが一番奥から少し手前までしか切っていないが、CAD 図面だと CMOS 表面からネジ下端まで  $3.9\text{mm}$ 、技術マニュアルから読み取ると  $4.25\text{mm}$  だが、シグマ光機のレンズのバックフォーカスは  $5.1\text{mm}$  なので、大丈夫そうだ。



- 概念設計

$\phi 1.2\text{mm}$  と  $\phi 1.0\text{mm}$  のザグリ穴は単体の加工では無理かもしれないが、できない場合は別物で作って合わせるとして以下のような感じかと思う。ホルダー周囲は C マウントのネジにして、フォーカスが合ったところでネジリングで固定する。個々のマイクロレンズは、 $\phi 1.2\text{mm}$  よりも少し大きい C リングで固定する(バネ力が足りるかが心配だが...)。中心と周囲の穴は、ビームがずれた時に大体のずれ量を確認するためのもの。



## ●ホルダー製作

- レンズ固定テスト  
上図のような C リングで良い物がなかったので、バネを分解してリングを作ることにした。



左:  $\phi 1.3$ 引きバネ



右:  $\phi 1.2$  レンズと固定リング



左: 正面から見た所  
(レンズは中央上段)



右: 背面から見た所  
(レンズは中央下段)

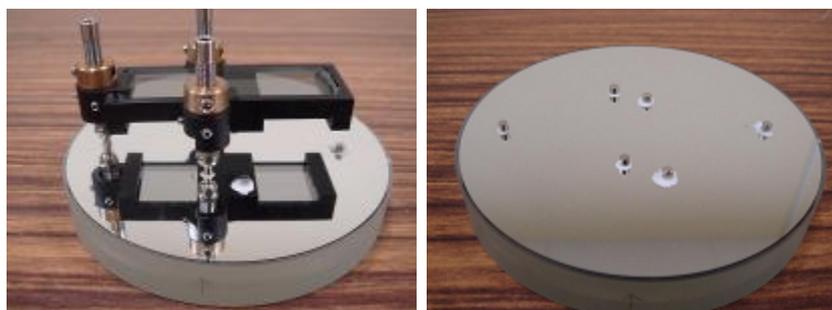
う～ん、あまりに小さくてちゃんと写真に撮れないが、一応針を使ってリングをレンズの周辺に押し付けたらちゃんと固定できたようだ。  
背面から押し出して外す際に結構抵抗があった。  
上右の写真にも写っているが、作業中のゴミには要注意。  
(レンズを入れた後に掃除するのはかなり困難で、直径1mmの綿棒が必要...)

## ハーフミラーホルダ固定試験

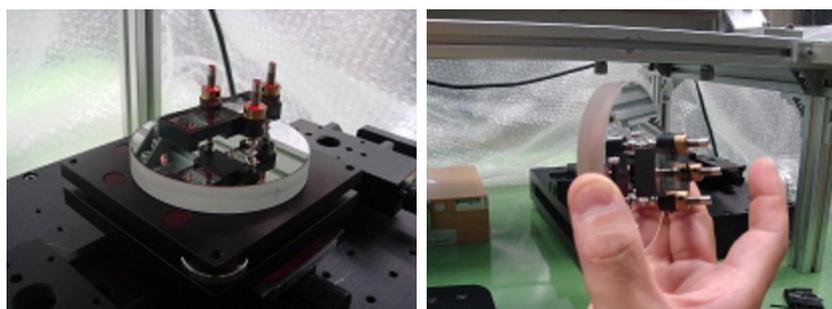
位相カメラのハーフミラーホルダを主鏡上に固定する方法として、メッキ処理した鉄ピースを使う方法とネオジム磁石を使う方法があるが、[ネオジム磁石 2φ x 2mm](#) を鏡面上に接着して固定する場合の安定性を調べた。

ネオジム磁石を鏡面上に接着すると、金属性のゴミが集まってしまうデメリットがあるが、鉄ピースに比べて入手しやすいことと、固定強度が高いことからとりあえずはネオジム磁石による固定を選択した。

φ80mm の平面鏡上に、ネオジム磁石を接着してハーフミラーホルダを固定したところ。先に磁石を置いてから周囲に接着剤を爪楊枝で塗る方法と、予め磁石の一端に接着剤を一滴付けてから鏡面上に置いたもの。後者の方が固定力が低いが鏡面を隠す面積は小さい。接着剤は、[接着剤調査](#) で用いた粉末+液体タイプのものを用いたが、今の所、固定力は後者の方法で十分そうな感触。

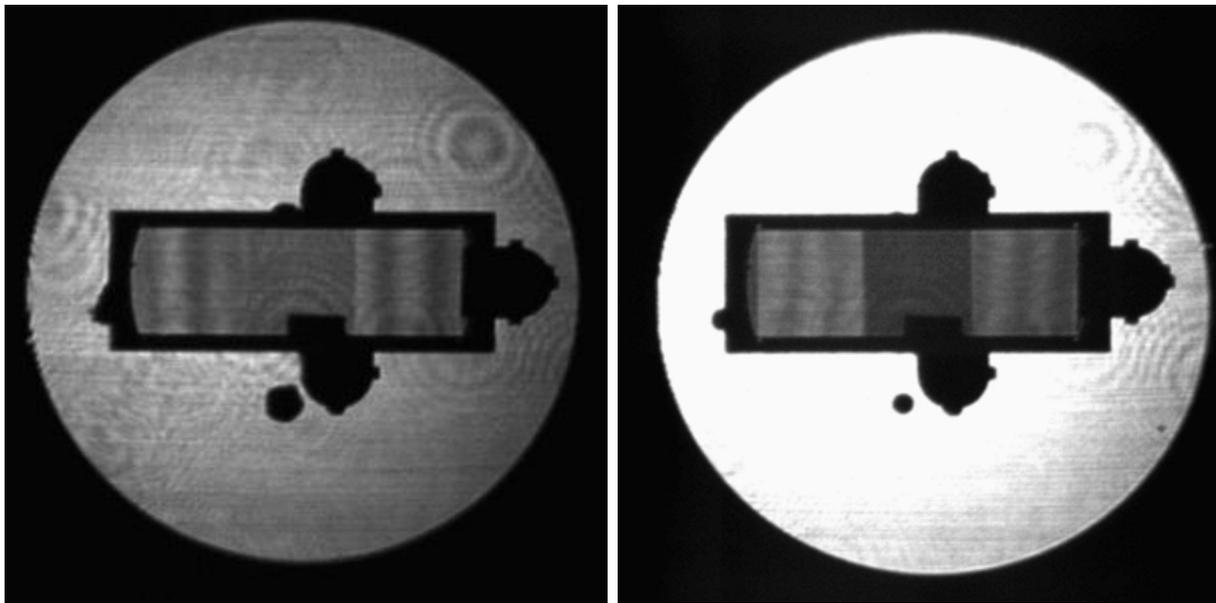


これを平面基盤を外した干渉計のビーム内に置き、鏡面とハーフミラーを平行にして(I-Fizeau の被験光と参照光は平行ではないので、正しくは平行ではないが)画像を取得し、手で全方向に90°傾けて少し振り、再度ビーム内の同じ位置になるように戻し、平行度の変化を調べる。2組の固定点それぞれに対し、連続で9回ずつこれを繰り返して変化を調べた。



結果は以下の通り。

[ハーフミラーホルダ](#)の調査にある通り、このハーフミラーには切断時の歪みがあるため、左右の開口の干渉縞の傾きに差があることに注意。



### 左の場合の最悪値 / 右の場合の最悪値

最悪値から傾きの変化を算出すると、15mm に対し6本程度の縞が入っているので、15mm 開口の回折像サイズの6倍

$$0.63e-3 \times 6 / 15 / \pi \times 180 \times 3600 = 52''$$

(焦点面では 5.7mm)程度、像位置が移動する事がわかる。実際は、各ホルダーの傾斜方向は常に同じなので、これよりは少ないことが予想される。各スポットの間隔を 15mm 程度離して 5x5 グリッドで配置すれば、少なくともハーフミラーホルダー角度の調整を行った高度角付近の角度では、問題なく測定可能となるものと思われる。

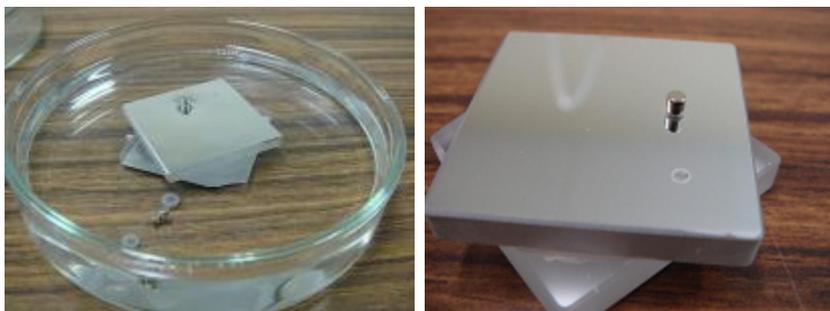
その場合、焦点部分の面積は約100mm<sup>2</sup>となり、10:1 光学系で縮小すれば、必要な CMOS の検出器サイズは 10mm<sup>2</sup> となる。

---

鏡面に対し、固定点を接着する際の接着剤に関して溶剤に対する特性を調査した。適当な30mm<sup>2</sup>のアルミ鏡上に、粉末+液体タイプの接着剤とゲル+ゲルタイプの接着剤を用いて固定点を2個ずつ接着し、24時間経過してからアセトン+アルコールの溶剤に浸して固定点が剥がれるかどうか確認した。



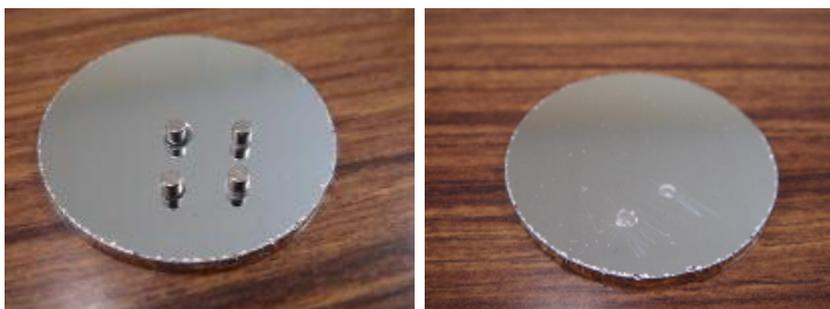
浸してから3時間後に確認した所、粉末+液体タイプの接着剤で固定したもの1つ以外は剥離していた。残った1つは24時間浸しても剥離しなかった。剥離後の状態は、ゲル+ゲルタイプのものは綺麗に取れているのに対し、粉末+液体タイプのものはアルミが侵食されていた。



爪で力をかけたら、接着剤部分が割れるように剥がれた。



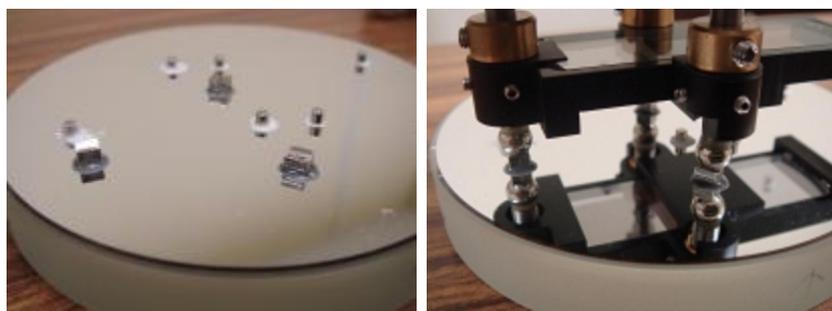
SiO<sub>2</sub> オーバーコートサンプルを用いても同様な試験をしてみた。  
上記試験と同様、アセトン+アルコールの溶剤に2~4時間浸すと  
ゲル+ゲルタイプのは綺麗に取れるが、粉末+液体タイプのは  
24時間浸しても取れず、爪で力をかけると剥がれた。残った部分を  
削り落とそうとしてみたが、結局コーティングが傷ついて広がってしまった。



極小のV溝ブロックを製作し、上記円柱形ネオジム磁石との固定精度の  
違いを調べた。V溝ブロックは底辺が一辺3mmの正方形、高さは2.4mm、  
V溝の頂角は120°で、直径5mmのネオジム磁石球とブロック1個あたり2点  
で接触する。材質は鉄で表面はニッケルメッキ処理がしてある。

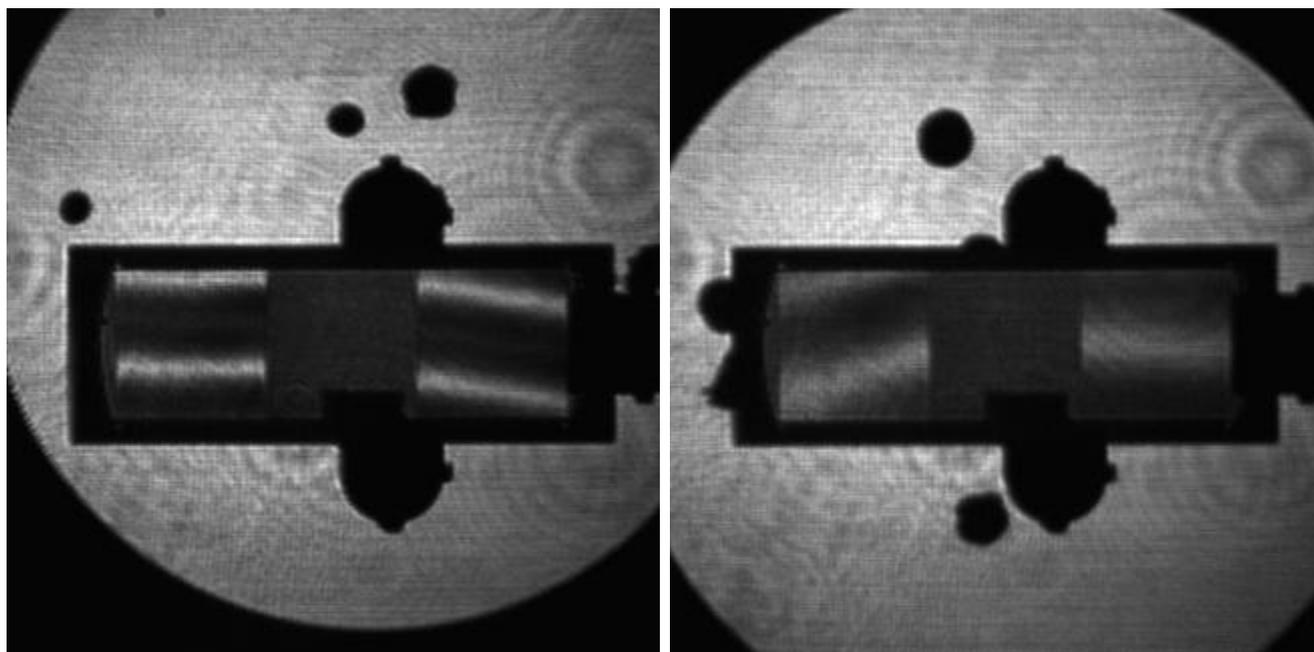


これを、ゲル+ゲルタイプの接着剤で固定。



上記の試験と同様に、干渉計でベースの鏡面とハーフミラーの平行度の安定性を調べた。

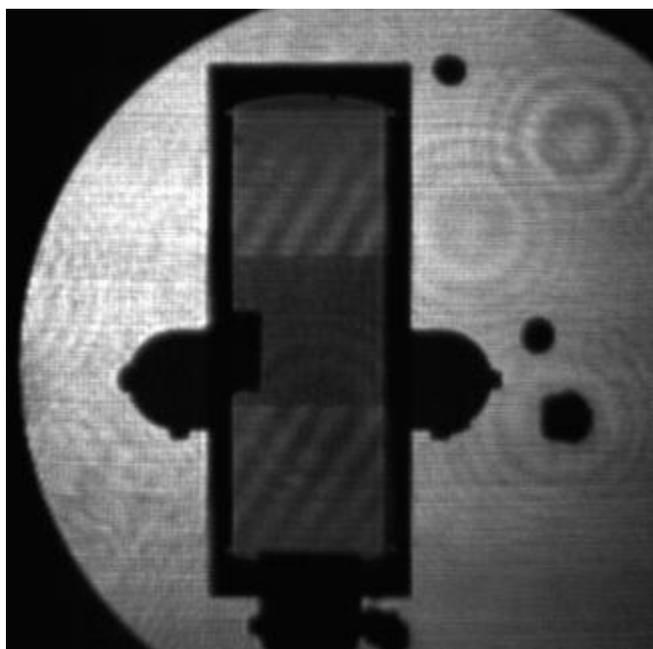
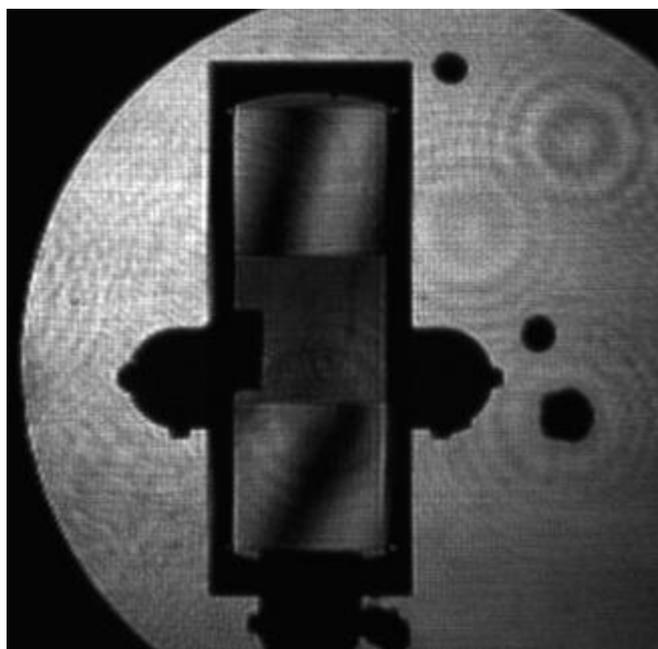
左がV溝ブロックで固定したもの。右が円柱形ネオジム磁石で固定したもの。V溝ブロックだと2倍以上固定精度が上がっている事がわかる。横方向のずれが無くなったことで接触点付近の凹凸の影響がほぼ無くなったものと思われる。



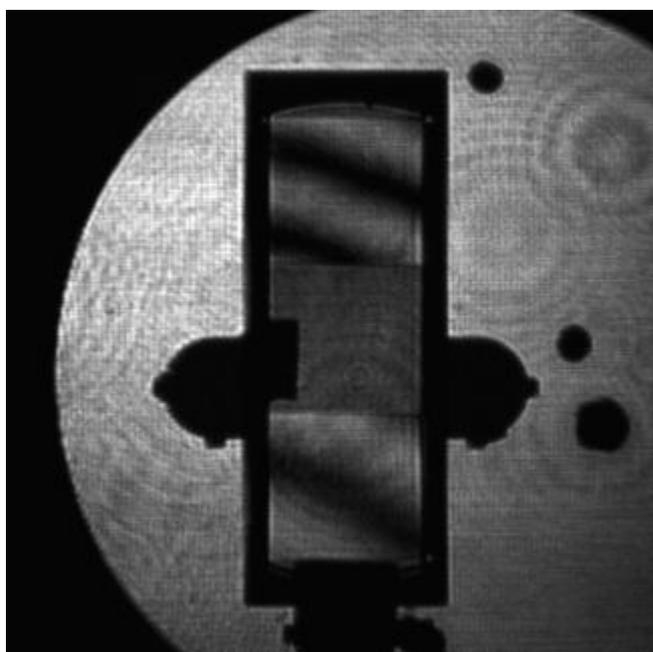
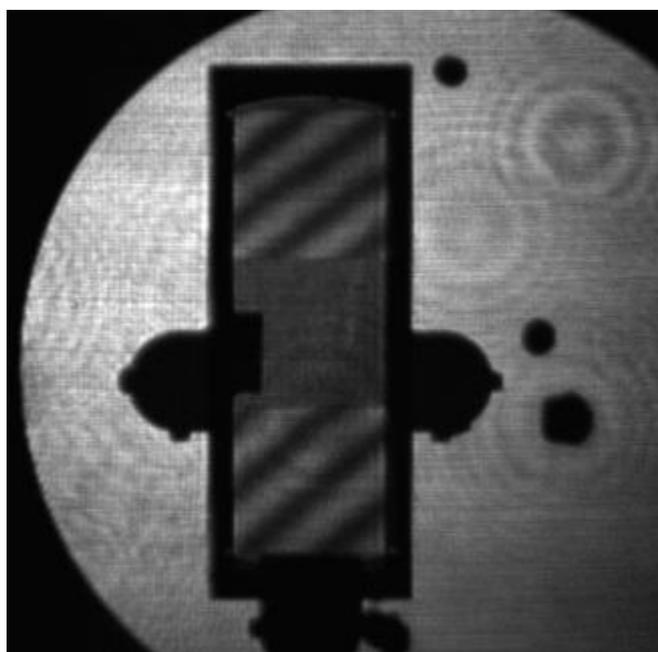
V溝ブロックで固定した場合について、温度変化に対する安定性の調査をした。普通の室内のエアコンを用いて冷風を干渉計下部に溜め、温度を変えた。



以下は、約0.5°Cおきに取り込んだ干渉縞画像。



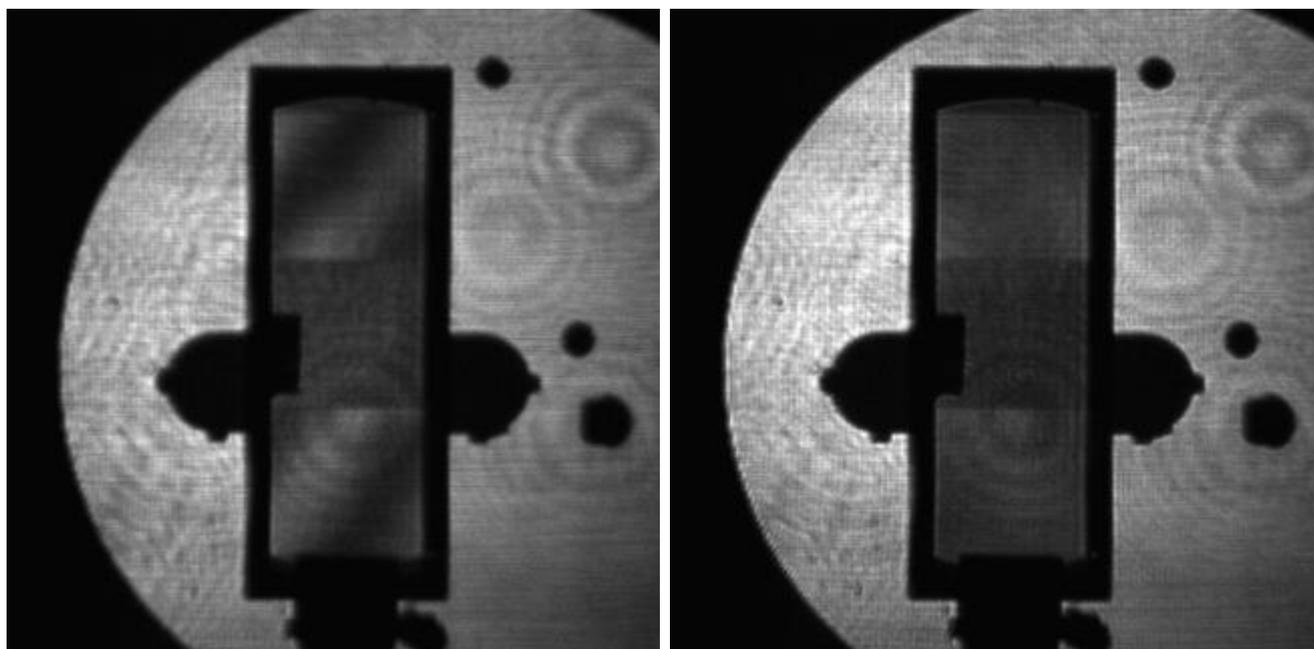
左:13.9°C → 25.3°C    右:29.5°C → 20.0°C



左:24.5°C → 16.0°C    右:10.0°C → 24.0°C (10日後)

温度が2°C変化すると、縞が1本増える。縞がない状態から±4本程度までは位相カメラの像が重ならずに使えそうなので、使用可能な温度範囲は±8°Cということになる。これ以外の温度では使えないというわけではないが、一部測定できない場所が出てくる可能性がある。また、2日程度は同じ状態が維持されるが、10日経過すると縞2本程度傾きが変化した(変化の様子は同じ)。低温から始めると表面に霜がついて見づらくなるので、今後は高温から始める。

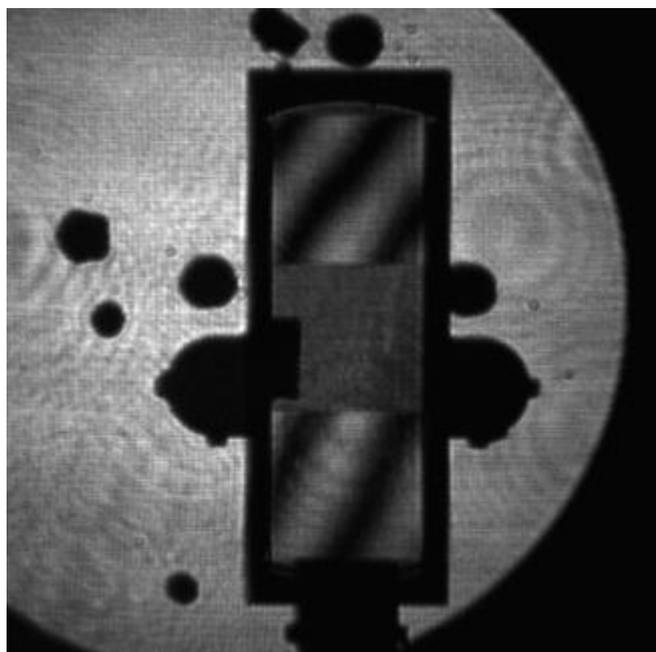
温度変動による傾き変化の原因がV溝にあるかどうかを確認するため、まずはネオジウム磁石球表面とV溝表面を良く拭いてゴミが挟まらないようにし、できるだけ高い温度から温度変化を大きくして始める事にした。



左:39.8°C → 10.0°C    右:36.0°C → 11.5°C

縞の増え方が3°C変化につき1本増加と緩和された。  
温度が高い時の振る舞いと低い時の振る舞いが少し違うように見えるが、前者の方がタイムスケールが早く、ホルダー内部での温度差が大きい事が予想されるため温度により挙動が変化しているとは断定はできない。

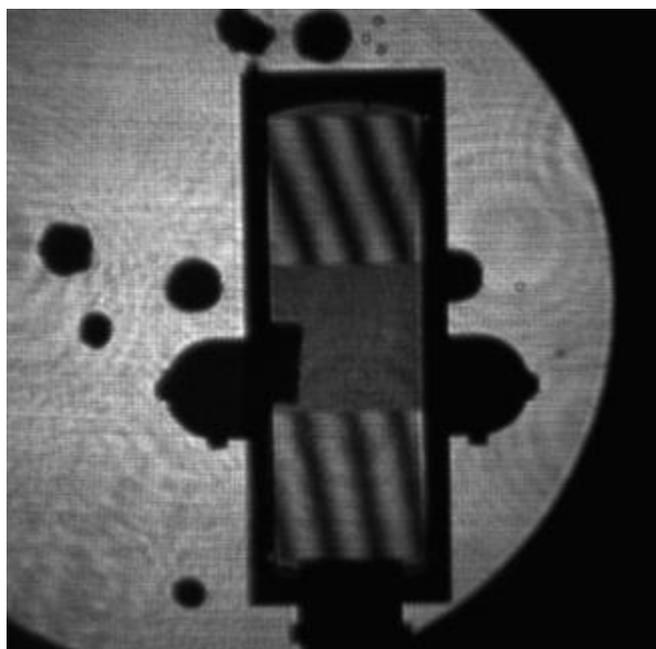
次に、鏡の上に直接乗せて挙動を調べた。鏡の上では少々横ずれしても縞の状態はほとんど変化しないことを確認した上で、試験を行った。



37.0°C → 11.0°C

縞の変化率がやや大きくなったが状況はほぼ同じなので、V溝上での動きではなくホルダーそのものに傾き変化の原因があるということになる。

次に変化の原因がネジ部にあるかどうか、ネジのユニットを左右交換して鏡面上に直接乗せて調べてみた。



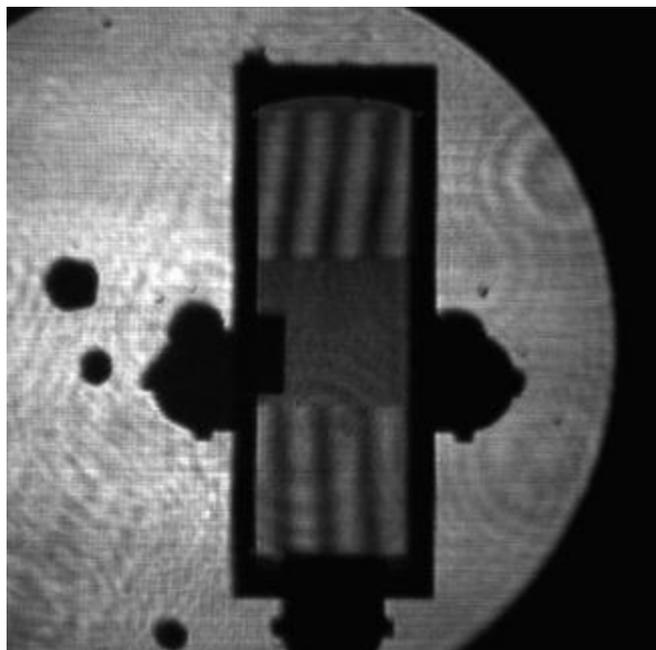
36.8°C → 14.0°C

症状が左右反転したので、ネジのユニット部分に違いがある事が判明した。怪しいのは、ネオジム磁石球の接着状態。下の写真左側の球は、一度くっつけ直しているが、その際ネジの軸と球の中心が少しずれており、隙間にエポキシが入り込んでいると思われる。この足は、上の干渉計画像では右側に位置しており(左右反転しているため)、この足にのみ問題がある場合は、縞の変化の方向とも合うので、これが影響している可能性が高い。



右の写真は問題のネオジム磁石球を外した所。写真ではわかりにくいですが、外れた球側にエポキシの挟み込みの跡が少し確認できる。また、先端の凹みの内部が全てエポキシで全て埋められており、2度目の接着の際に更に積み重なって球が浮いてしまった可能性もある。とにかく、内部のエポキシを除去し新しい磁石球を接着するのだが、その前にネオジム磁石球無しでどうなるか調べてみる。

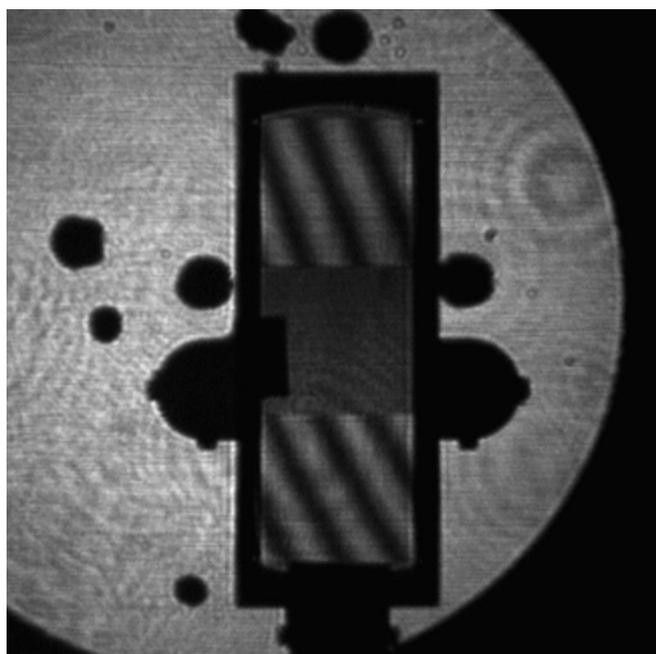




37.0°C → 14.0°C

縞の変化率は半分程度に下がったが、傾向としては同じ。平行度の変化は先端のネオジム磁石球の接着状況(もしくはネオジム磁石そのものの変形)だけでなく、ネジ部そのものにも原因がありそう。

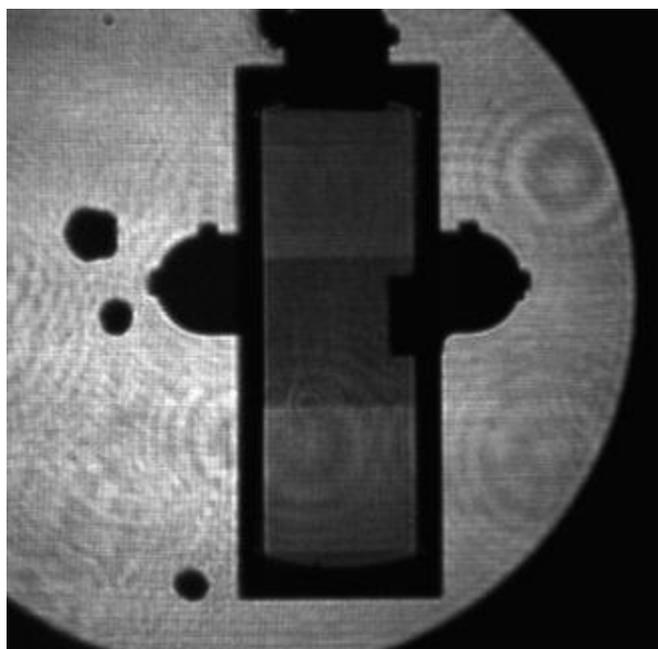
とりあえず、ネオジム磁石球をゲル+ゲル低膨張エポキシ接着剤で付け直し、再度鏡面上に直接乗せて温度変化を調べた。



39.0°C → 14.0°C

これまでで最も安定している(逆に左と下の足が良く縮んでいる感じ)。たまたま膨張率の変化がキャンセルするような付き方をしたのか？

最後に再び V溝ブロックに乗せて試験した。



39.5°C → 14.0°C

前の試験での平行度の調整が甘かったため、見た目の印象はちょっと変わった(ホルダーの向きが変わっていることにも注意)が、変化量としては縞が2本増えただけなので、上の結果とほぼ同じ。これなら温度変化は問題無さそうだ。

注意点としてわかったことは、

- エポキシで再接着をする際は、塗り重ねないこと
- 膨張率の低いエポキシを使うこと

と、当たり前の事を再認識させられる結果となった。

---

iwamuro@kusastro.kyoto-u.ac.jp