

# 位相カメラ製作と試験

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/Kyoto3m/pcs5.html>

岩室 史英 (京大宇物)

## ●ホルダ製作

- 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...)

- ホルダ製作  
実際にホルダを製作し、24個のレンズをはめてみた。  
実際に作業してわかったことは、
  - 作業前に有機溶剤につけてホルダ表面の油を完全に取るべきだった。固定リング挿入時にリングが回転してレンズ表面に触れ、レンズ表面が汚れるという事が頻発した。
  - 装着後のレンズ表面のクリーニングは不可能。色々試したが、ブローアでの吹き飛ばしと、針先での繊維くずの処理以外の事は、全て事態を悪化させた。レンズを外して表面を拭き、再度装着の繰り返しが無難。
  - 内周から作業を始めて外側に進む内に装着スキルが上がり、最終的には1個3分程度ではめられるようになったが、最後の1つ前のレンズの再装着作業中に、ピンセットでレンズ端を挟む際に力を入れすぎ、ピンセット先端のギザギザに円筒状の

側面がカチッと噛み合う際の衝撃でレンズ表面が欠けてしまった。余分は製作しなかったため、3個だけ追加でレンズを発注した。

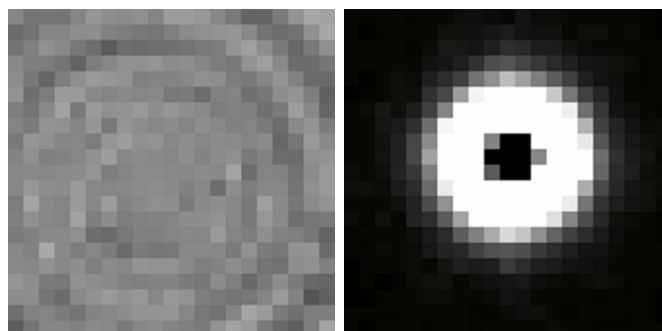
以下、完成後のレンズホルダの確認試験の様子。



ホルダ表面の黒い汚れは、レンズをはめていく際に油性ペンで付けた印の跡。初めの写真の右端と最後の写真の左端の穴にはレンズが入っていない(表面が欠けたため入れなかった)。

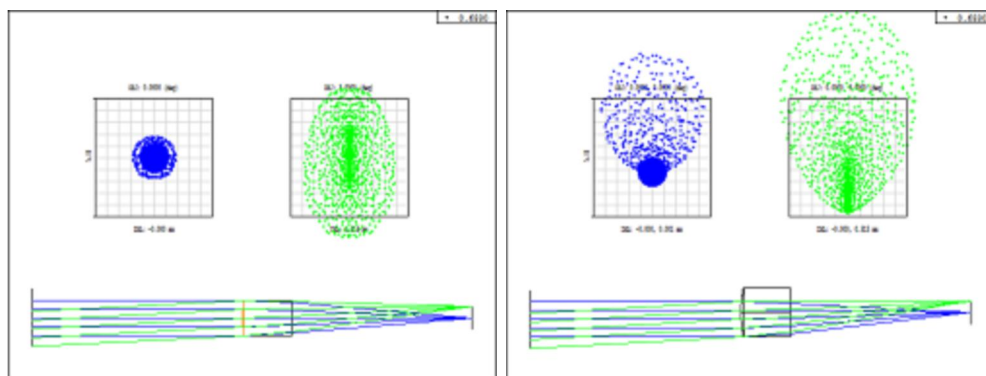
黒い筒の中には焦点距離500mmのレンズが入っていて、平行光にしている。

取得された画像は以下の通り(画像クリックで CMOS 全体画像になります)



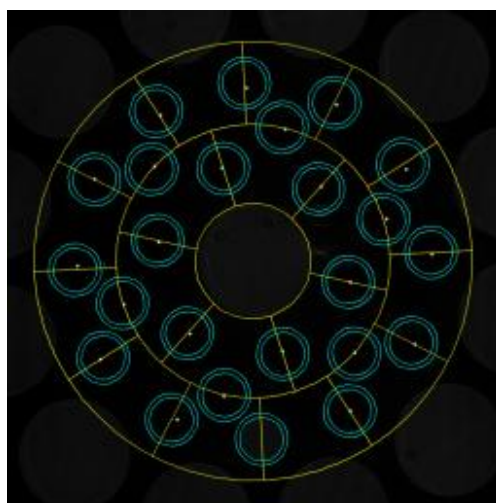
左)フォーカス合わせ 右)合焦後の明るさ変化

フォーカス合わせ中の全体画像でわかるが、非点収差の大きいものと、レンズ端にゴミがあるもの(PCGS の機能には問題ない)がそれぞれ2つずつある。これだけの非点収差は、レンズの軸ズレや傾きでは説明できない(Zemax での計算は以下)ので、周辺部を削る加工の際にレンズが変形したものと考えられるが、その他は大体問題ない状態で結像している。フォーカスが2番目にぼけている状態での像サイズが、位相カメラでの1つのレーザーの像サイズと大体一致。

左)レンズが $50\ \mu\text{m}$ 傾いた場合右)軸が $200\ \mu\text{m}$ ずれている場合

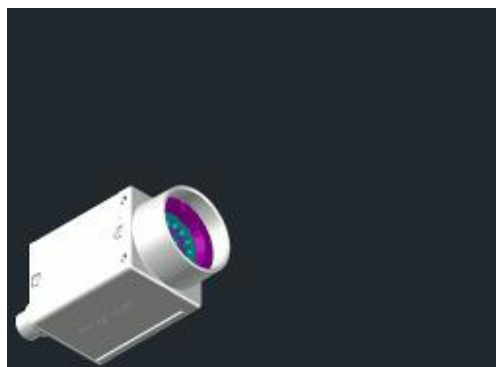
Zemax での計算結果は、ホルダー内で想定される最大の傾きである $50\ \mu\text{m}$ の傾きや、 $200\ \mu\text{m}$ の軸ズレがあったとしても、影響は1pixel強で問題ない事が確認できる。

フォーカス合わせ中は像が回転するので、画像取得後に回転中心を回転角度を調整して大体の位置合わせを行ったため、フォーカス中の軸の傾きの情報は取り出せていないが、スポット位置の理想位置とのずれを見ると、 $100\ \mu\text{m}$ 程度の軸ズレはありそう。非点収差は軸ズレとは関係ないこともわかる。



#### ● コリメータ部設計

これを、光学設計通りに2枚組の**コリメータレンズ**と合わせる必要がある。Cマウントとの接続フランジとチューブ、レンズ間のスペーサを製作し、シグマ光機の $\phi 40$  **ネジリング・樹脂リング**で固定することにした。レンズ間の隙間の目視確認兼空気穴をチューブ側面に、Cマウント接続フランジねじ込み用兼レンズ-カメラ間空気穴を接続フランジに、それぞれ2個ずつ空けた。

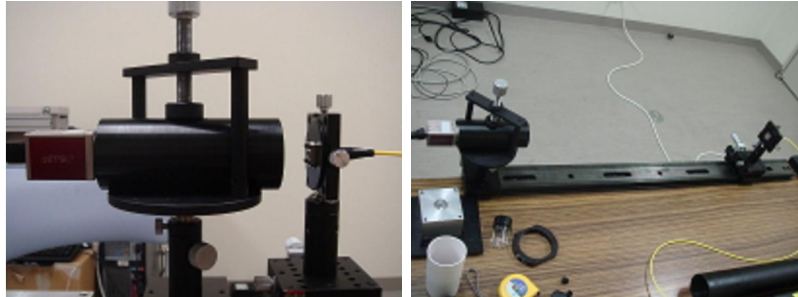


CAD 図面

## ● コリメータチューブ/ソフトウェア製作

### ● チューブ製作と試験

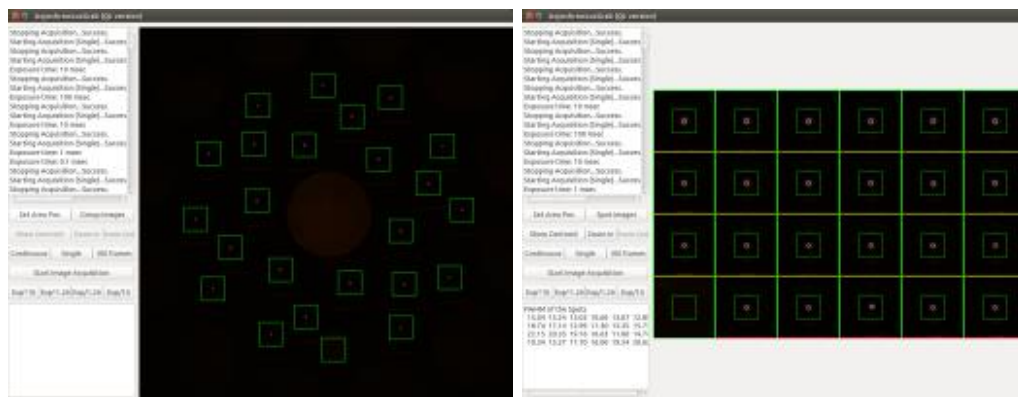
チューブにレンズ2枚を入れ、反対側から変換フランジを入れて CMOS カメラを固定した。その際、コリメータが作る望遠鏡瞳位置にレンズアレイが来る必要があるが、レンズアレイホルダ中心の穴を通してコリメータレンズのみで CMOS 上に結像する光源位置を計算しておき、CMOS 上でコリメータレンズによる直接像を確認することでレンズアレイのホルダ+CMOS カメラの位置を決定した(写真右)。



### ● 表示ソフト

この CMOS カメラには、C++ と Qt によるソフトウェアライブラリがあり、ソースが全て公開されているため、その中の非同期連続露出のサンプルを元にソースを改造した。現在のソフトの機能は、

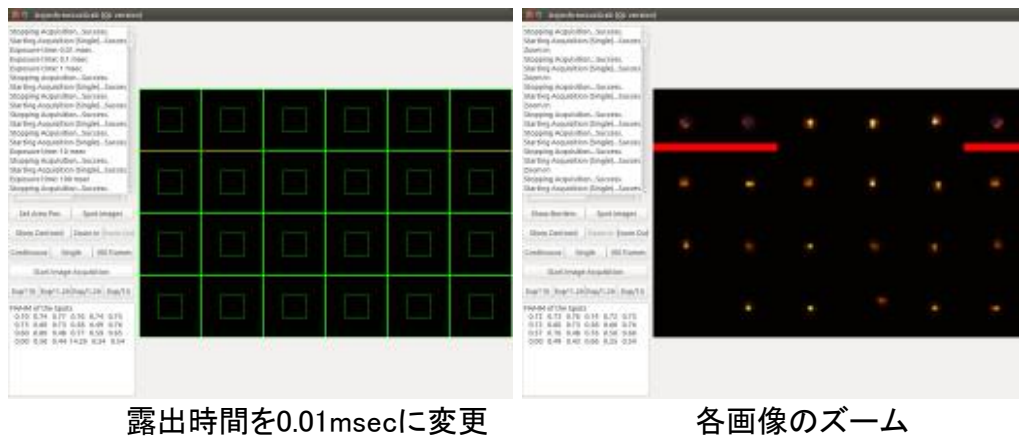
- 12bit での画像取得(2k x 2k 画像を 12.6 frames/sec)
- 露出時間切り替え(0.01msec ~ 10000msec)
- 連続露出 / 1枚露出 / 100枚露出(この枚数は暫定的)切り替え
- 全画面 / 24グループ分割画面 / 72スポット分割画面切り替え
- 分割画面時の個々の画像のズーム
- マウスによる各グループと各スポットのフレーム位置の決定
- 重心の自動計算と、各グループと各スポット中心位置合わせ



全画面(口は24グループ位置)      24グループ分割画面(口はスポット位置)

右図で、3つのスポット用フレームは今は全て重ねてある。また、サチュレート(4095カウント)している部分は青で表され、かつ各分割画像の下に赤線が表示される。左下に、FWHM値が表示される。左図で、内周上から時計回りに1~6番、その外側も同様に7~12番、最外周は13~24番とした。





露出時間を0.01msecに変更

各画像のズーム

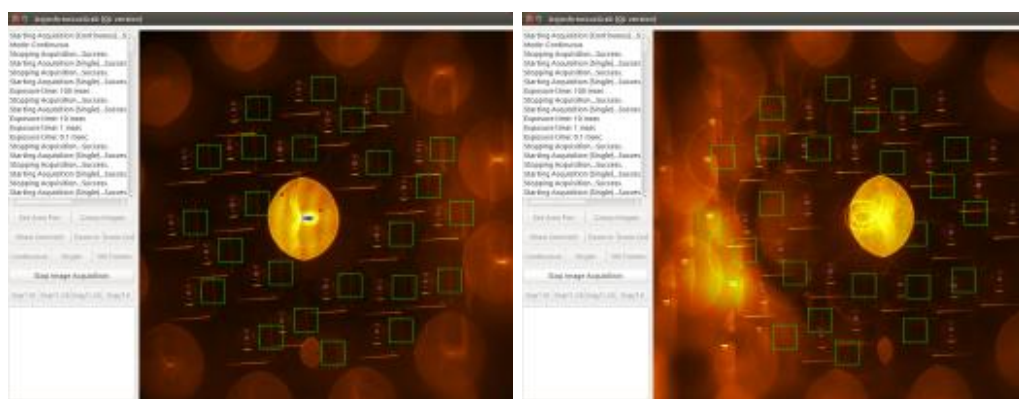
ND フィルターが1枚しか見当たらないため、ファイバーをコネクタ部で緩めて光量を減らしたがそれでもまだ明るすぎて3つのスポットは中心がサチっている。また、19番の位置にはまだレンズが入っていない。また、非点収差が大きいレンズは14番と16番。



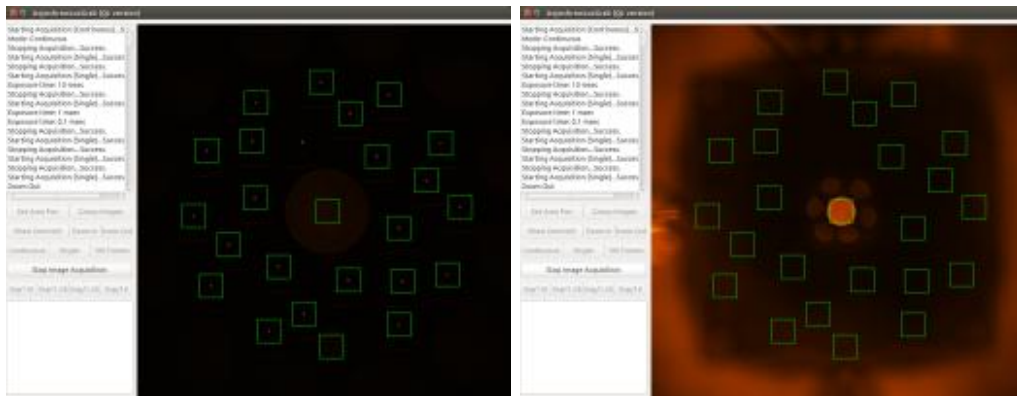
72スポット分割画面

全画面で露出時間100msec

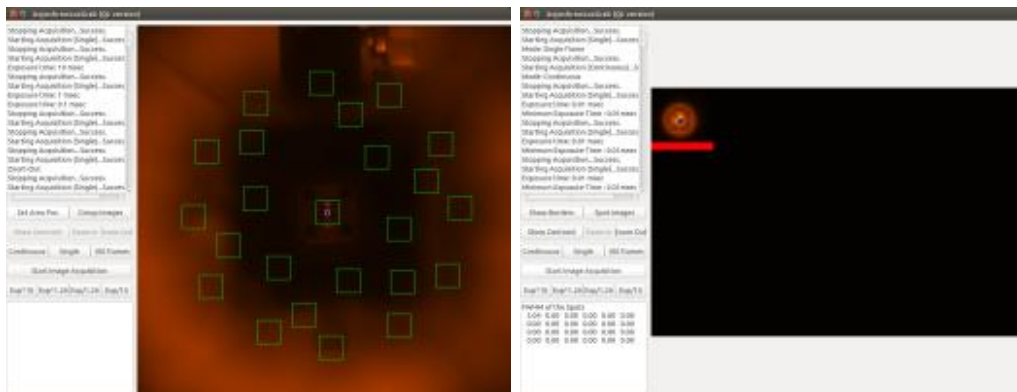
1つのグループには3つの波長のスポットができるため、最終的には左図のモードで72個のスポットの位相判定をすることになる。今のところは単なる点光源の像が各グループに1個ずつしかないので、3つのスポット用フレーム位置は全て重ねてあり、縦に3個ずつ同じ画像が表示されている。



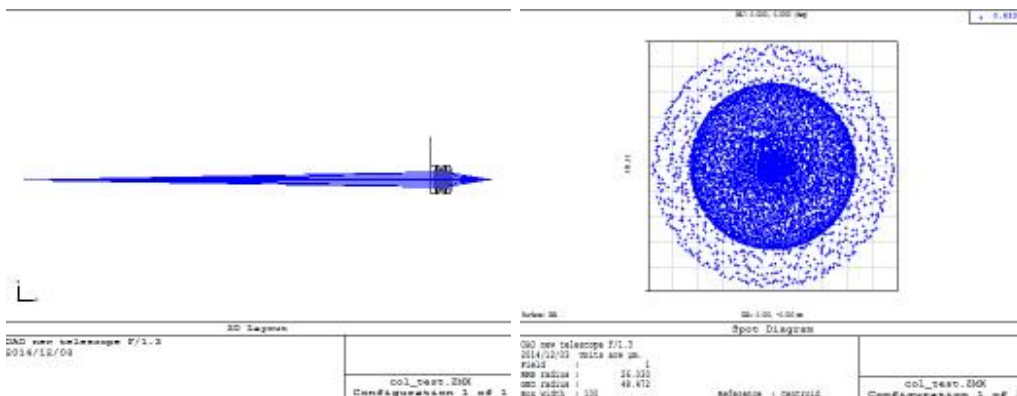
全画面モードで見ながら、ファイバー位置をステージの限界まで左右にずらしたが、レンズアレイはコリメータの作る瞳位置に置かれているため、ちゃんと光は入っている。ファイバーをコネクタ部で緩めて光量を減らしているため、ファイバー端からの射出光が中心付近に集中し、中心に比べて周辺部はかな暗い。



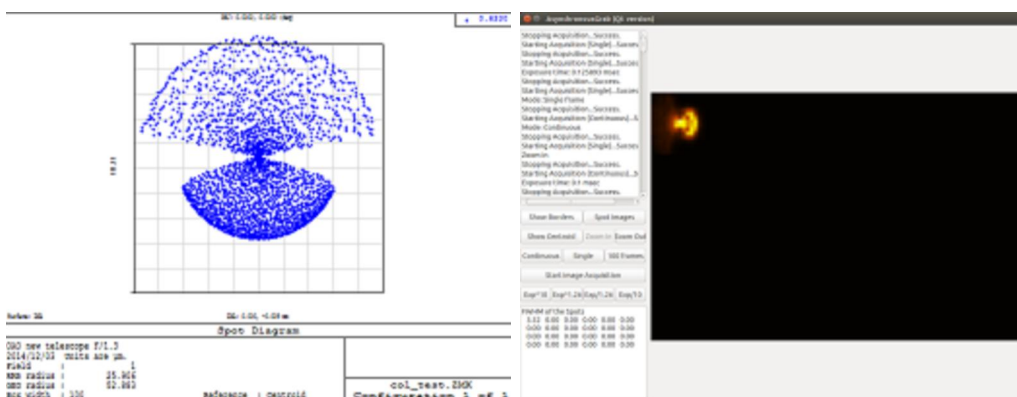
1番のグループ用フレームを中央に移動させ、ファイバー位置をカメラから遠ざけていく。



521mm ファイバーを後退させると、中央や周囲の穴を通してコリメータレンズによる直接像が写る。



コリメータレンズにより像が直接結像している状況。右のスポット図が、上の拡大画像に対応(外側のハロー状部分は露出時間を伸ばすと見えてくる)。



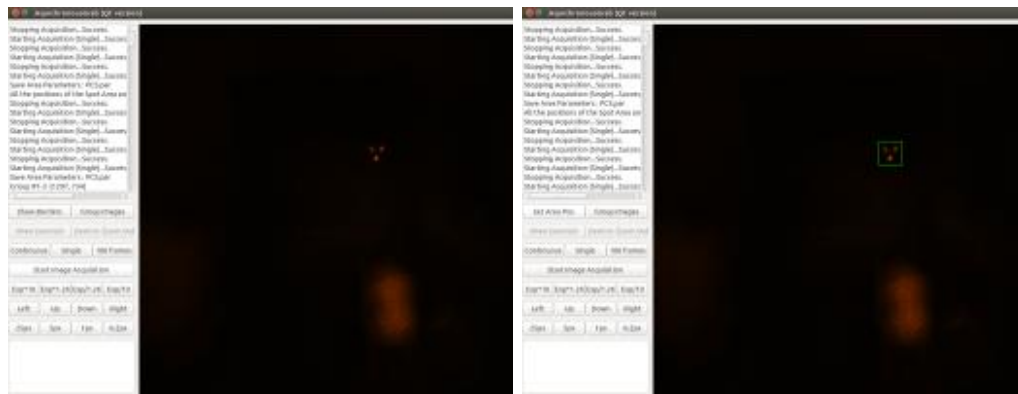
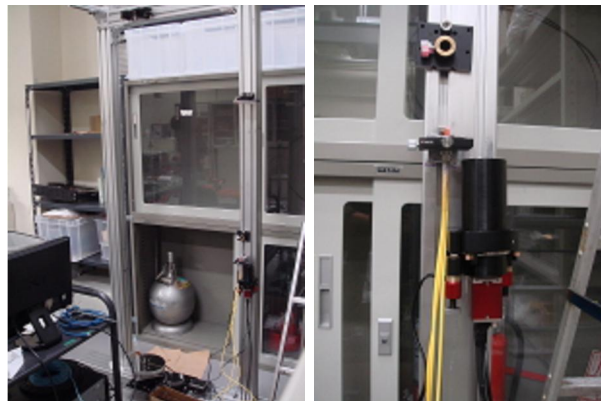
コリメータレンズを半分と少し隠した状態。コリメータレンズと検出器は正しい位置関係に

あり、球面収差の出方まで一致していることが確認できる。

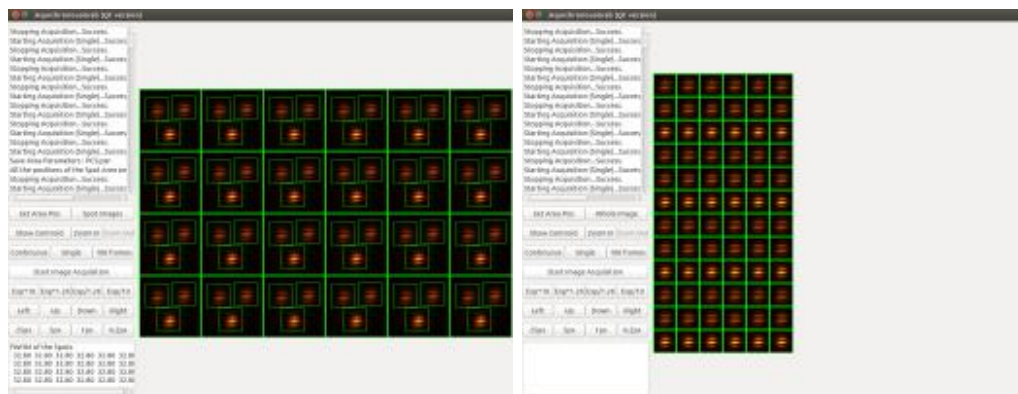
## ●望遠鏡シミュレータとの結合試験

### ● 取り付けと調整

レンズチューブは  $\phi 45\text{mm}$  なので、 $\phi 51\text{mm}$  のリングを付けてから2インチレンズマウント用のピコモータステージを用いて取り付けた。ステージは、同じ画像取得ソフトから駆動できるようにした。望遠鏡シミュレータの光学調整の後、3種類のレーザーからの光をレンズのない中央の穴を通して受け、その後、ステージを駆動して右上の内周セグメント境界用のレンズの中心に入れた。レンズ穴の端は、ステージ駆動により光がケラれることで判別した。



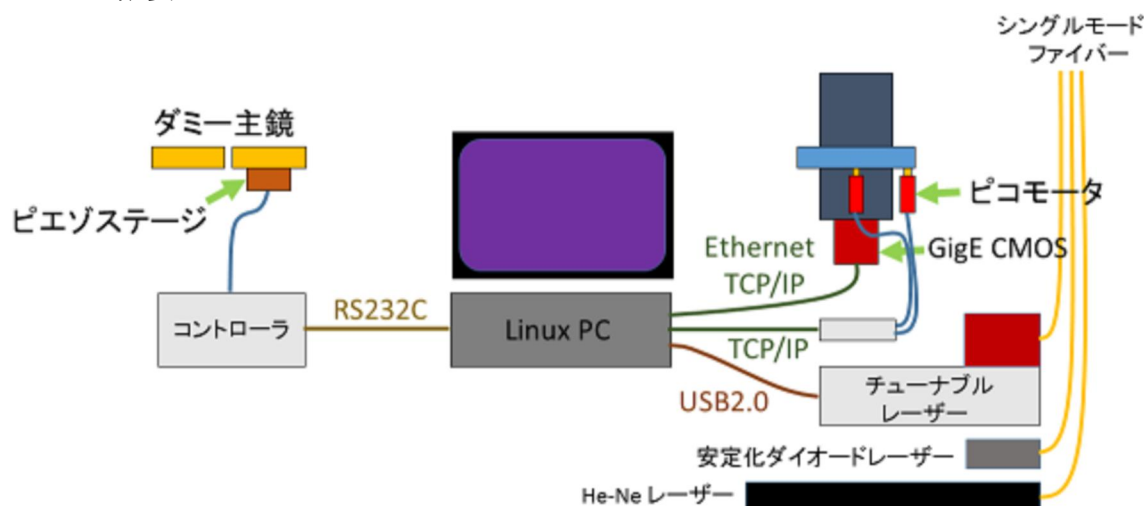
真上の蛍光灯以外は点灯しているので、迷光が写っている。  
24グループ領域を1つに重ねた。



次は、右の状態での位相判定がどの程度の速さでできるか、ということになる。

## ● 段差計測試験

### ● システム概要



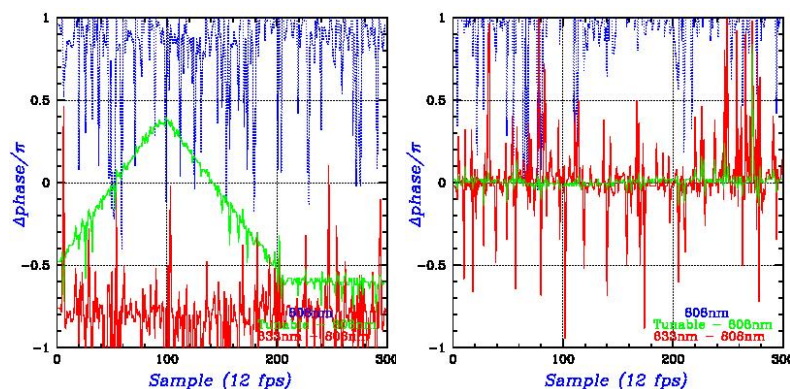
制御対象は、

- 2k x 2k CMOS カメラ (GigE 専用ドライバあり)
- チューナブルレーザー (USB2.0 ドライバなし)
- ピエゾステージ (RS232C)
- ピコモータアクチュエータ (Ethernet TCP/IP)

で、画像を見ながらピコモータアクチュエータで角度を調整し(ほぼ初回のみ)、画像の切り出し部分を決定した後、ピエゾステージで鏡位置を調整、チューナブルレーザーでスキャンを開始すると同時に300フレーム読み出し。12.7fps で約24秒で1回の計測を終了する。GUI のみでは長時間試験が困難であるため、Tcp のサーバ機能を追加して外部からのコマンド入力にも対応させた。

### ● 計測性能試験

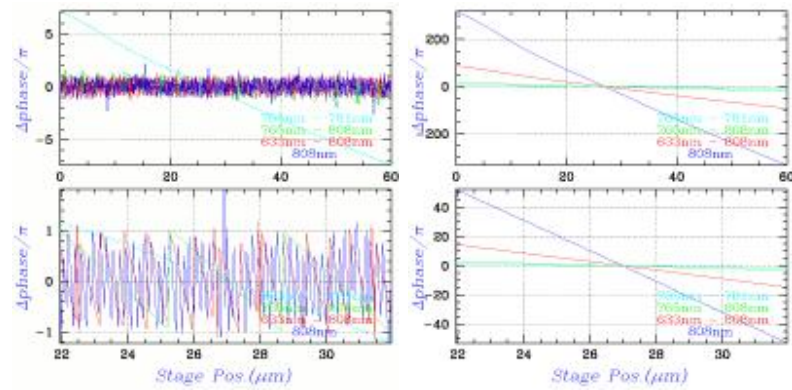
計測性能試験は、ピエゾステージのフルストロークの半分程度に相当する  $60\mu\text{m}$  を  $50\text{nm}$  ずつ 1200 ステップで移動させて PCS で計測した。以前の結果(スポット)と比べてかなりノイズが大きいが、画素が大きくなった分読み出しレートが  $1/5$  になったことと、恒温槽が常に動いている事が影響していると考えられる。



- 緑: チューナブル像の位相 (808nm を基準とした相対値)
- 赤: He-Ne 633nm 像の位相 (808nm を基準とした相対値)
- 青: 安定化 808nm 像の位相

鏡の段差が 0 の場合(上右図の状態)は、808nm 像の位相も 0 になるはずだが、長時間の測定でスポット位置が少し動いて位相判定に影響が出たのではないかと考えられる(要調査)。クリックで前後の変化の様子がわかるが、ピエゾステージの動きも結構不安定であることがわかる。





水:チューナブル波長最大時の像の位相 (波長最小時を基準とした相対値)  
 緑:チューナブル波長最小時の像の位相 (808nm を基準とした相対値)  
 赤:He-Ne 633nm 像の位相 (808nm を基準とした相対値)  
 青:安定化 808nm 像の位相

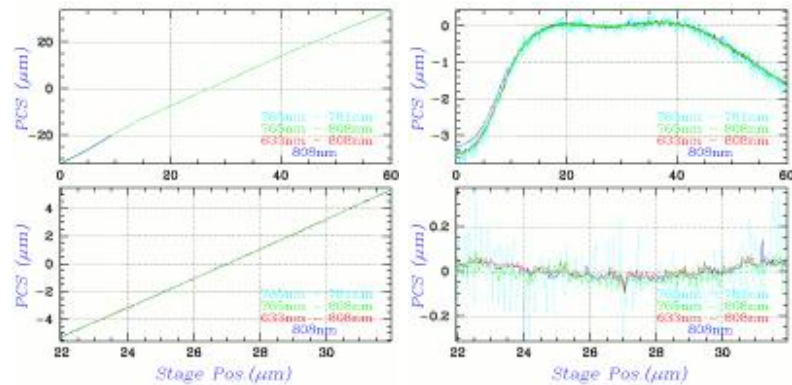
左は位相接続前、右は位相接続後。傾きの比は、

緑/水 = 2.543269  
 赤/緑 = 4.880419  
 青/赤 = 3.600979

ここから、レーザーの波長の比が決まり、He-Ne レーザーの波長を与えると全ての波長が決まる。

He-Ne レーザー : 632.800 nm  
 チューナブルレーザー(最小時) : 765.000 nm  
 チューナブルレーザー(最大時) : 781.545 nm  
 安定化ダイオードレーザー : 808.530 nm

全て仕様通りの値であることが確認できた。



上記波長を用いて、位相情報から位置情報に変換したもの。右は中央付近で直線近似した成分を引いたもの。どの波長でも変化が揃っているところは、実際にステージがうまく動かなかつた所と考えられる(中央など)。また、長時間の測定中にスポット中心が数ピクセル移動し、測定位相値が実際の位相から若干ずれたと思われる現象が見られた。相対位相の場合はこの効果はほぼキャンセルするが、808nm の絶対位相値はその影響を受けるため、グラフにプロットする際に 808nm の絶対位相値には  $0.8\pi$  (ステージ移動量 80nm に相当) だけ加算した。