

# 小型スターリング冷凍機を用いた可視CCDカメラの開発

○満田和真, 土居守, 酒向重行, 橋場康人, 小久保充(東京大学), 美濃和陽典, 早野裕(国立天文台), 菅井肇, 下農淳司(東京大学), 松林和也, 服部堯, 鎌田有紀子, 尾崎忍夫(国立天文台)



kazuma@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

CCDの高感度化, 特に完全空乏型の赤感CCDの登場などにより, 新規装置に搭載する目的に加え, 既存装置のカメラのアップグレードが行われるようになり, 大型望遠鏡ならびに小望遠鏡においても, 可視CCDカメラの開発は近年ますます盛んに行われるようになってきた。

我々は, 西はりま天文台なゆた望遠鏡に搭載されている可視撮像分光装置LISSにおいて, 小型で安価なスターリング冷凍機(ツインバード社 SC-UD08)を用いた可視CCDカメラを開発した。その経験を活かし, すばる望遠鏡に搭載されている可視面分光装置Kyoto 3DIIのCCDアップグレード(完全空乏CCD搭載)を行った。これらのカメラ開発過程において, 特に真空が維持できないという問題が起きた。そこでヘリウムガスとリークディテクタを用いて試験を行い, Oリングに原因があることを特定した。Oリングの材質を見直したところ, 真空は問題なく維持できるようになった。また, 補償光学を用いて高解像度の観測を行うKyoto 3DII用に開発したカメラでは冷凍機の振動が結像性能に影響しないよう振動吸収機構を搭載した。結果, CCD上に結像される多瞳像の大きさに冷凍機の電源を入れているときと切っているときで有意な違いが見られないことが確認できた。これらのカメラと同様の機構は, なゆた望遠鏡に搭載されている可視分光装置MALLSのCCDアップグレード, また同望遠鏡に搭載予定の15色同時撮像装置DMCのCCDアップグレードでも用いられる予定である。本講演では, この冷凍機を用いる際の真空の切り方, またその際の注意点を中心に, Kyoto3DII用のカメラを開発した際の真空試験, 振動試験の内容を報告する。

## ① 小型スターリング冷凍機



Fig.1. SC-UD08の全体像(ツインバード社のカタログより)

### ● ツインバード社 SC-UD08

LISS(Line Imager and Slit Spectrograph; なゆた望遠鏡で運用中), Kyoto 3DII(すばる望遠鏡で運用中), MALLS(Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph; なゆた望遠鏡で運用中)の新デューワー(開発中), DMC(Dichroic Mirror Camera; なゆた望遠鏡に搭載予定)の新デューワー(開発中)ではツインバード社のスターリング冷凍機SC-UD08を用いる。

この冷凍機は小型(ヘリウム配管不要)で安価(1台10万円程度)ながら, 可視CCDには十分な冷却能力(-100°Cで15W程度)がある。24V直流電源で動作する。

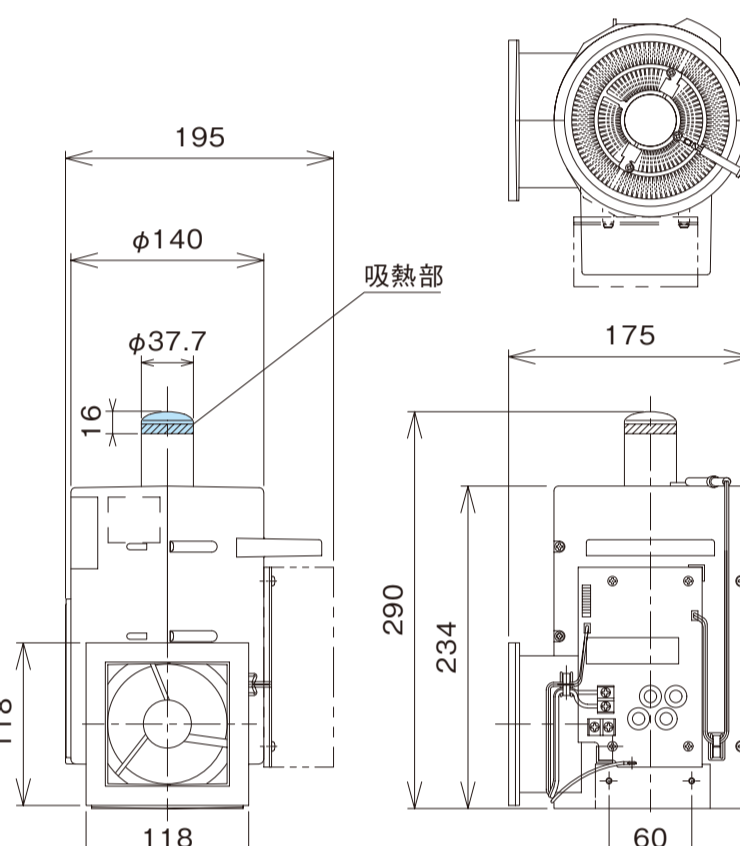


Fig.2. ツインバード社のカタログより転載。(左) SC-UD08の図面と各部分のサイズ(mm)。質量は3.5kgである。(右) SC-UD08の性能曲線。-100°Cでも15W程度の冷却能力があることがわかる。2k x 4kのCCD1枚を冷やす場合, -110°Cから-120°C程度までは冷却することができた。

## ② デューワーへの搭載



Fig.3. Kyoto 3DII用デューワーの全体像。浜松ホトニクス 2k x 4k 完全空乏型CCDを搭載する。また, 高解像度で面分光を行う装置であり冷凍機の振動の結像への影響を防ぐため振動吸収機構(下写真)を搭載している。

### ● デューワーへの搭載例

左図および右図にKyoto 3DIIおよびLISSで用いられたデューワーへ冷凍機を搭載した例を示す。冷凍機ヘッドをデューワーの内側へ差し込むような構造になっている。

また, Kyoto 3DII ではデューワーと冷凍機の間に蛇腹管とウレタンゴムを用いた振動吸収機構を搭載した。振動の試験については④に記述する。LISSではこの機構は搭載していない(Oリング抑え板と冷凍機本体の間にゴムの輪を挟んでいるだけ)が, 問題は起きていない。

### ● 真空を切る部分の設計

SC-UD08には真空用のフランジがないため, 専用のアダプターを設計製作した。デューワー側にNW63規格のフランジを用意しておき, チェーンクランプで接続する。

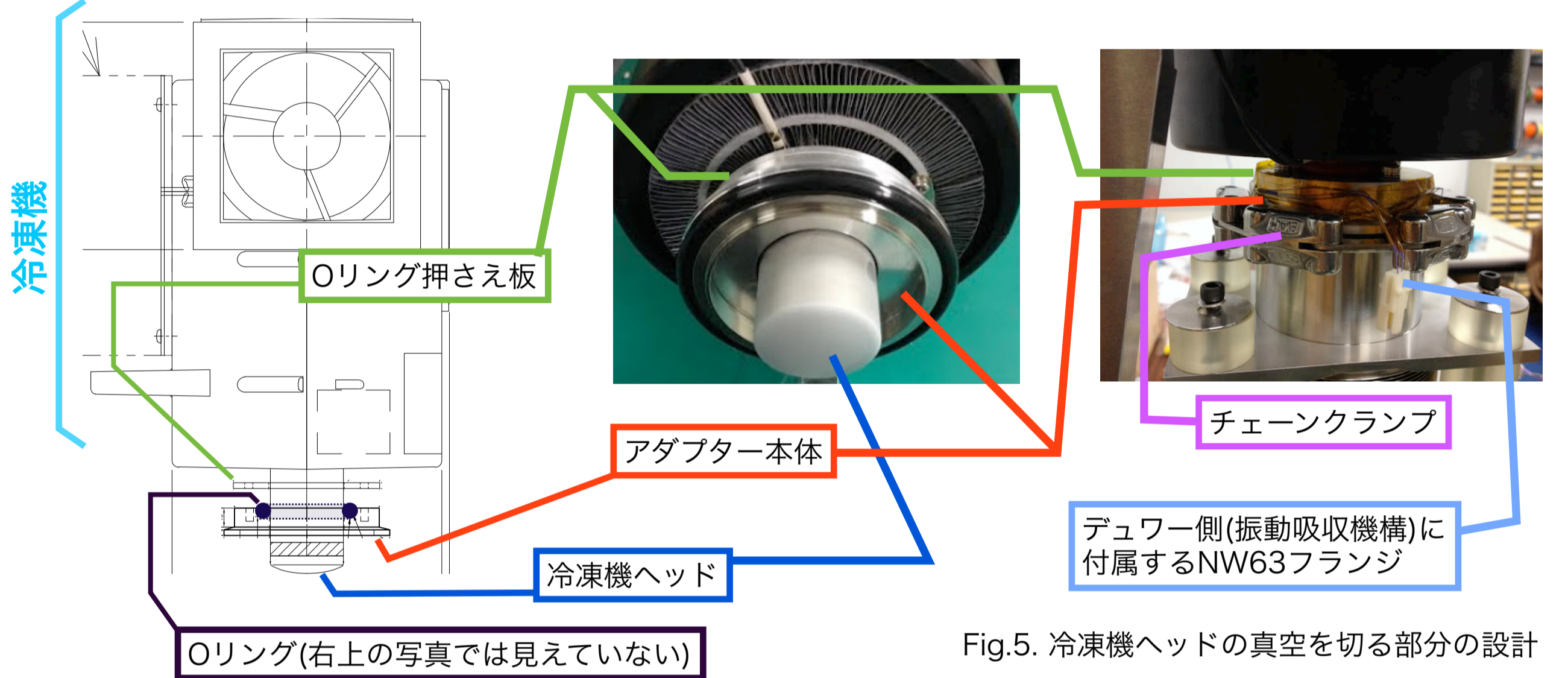


Fig.5. 冷凍機ヘッドの真空を切る部分の設計



Fig.4. LISS用デューワーの様子。浜松ホトニクス 2k x 4k 完全空乏型CCDを搭載する。振動吸収機構を搭載していないためコンパクトである。

## ③ 真空試験について

### ● 真空漏れ問題

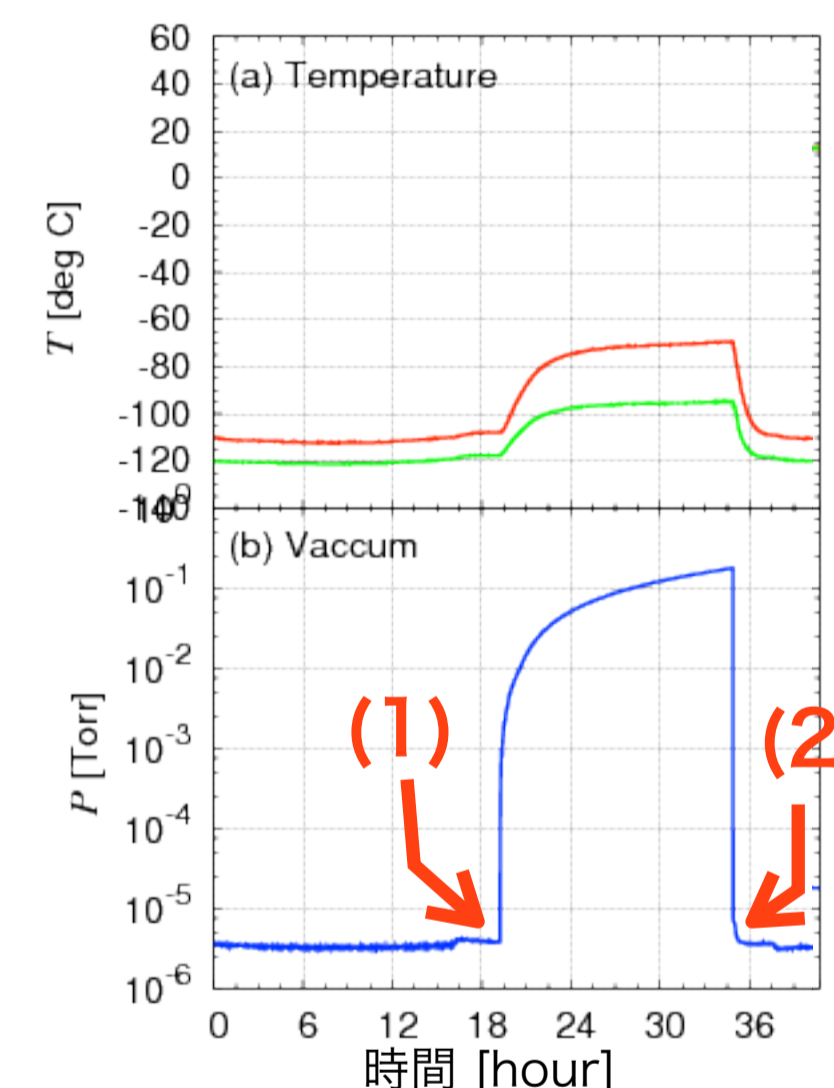


Fig.6. 真空漏れが起きていたときの真空試験の結果。(a) 温度の変化(赤がCCD, 緑が冷凍機ヘッドの温度), (b) デューワー内の真空度の変化。(1)の時点でバルブを閉じて真空維持の試験に入り, (2)の時点で再度バルブを開き, ポンプで真空を引なおした。

Kyoto 3DII 用デューワーを開発した際の初期の真空試験では, 真空ポンプを用いて $10^{-6}$  Torr台まで引けるものの, バルブを閉じてポンプを切り離すと真空度が悪化する, すなわち真空の維持ができない症状が見られた。

左図は真空冷却試験におけるCCDおよび冷凍機ヘッドの温度変化(上段, a)とデューワー内の真空度の変化(下段, b)の様子である。(1)の時点でバルブを閉じ, 真空維持の試験に入って, 2-3時間程度で $10^{-2}$  Torr程度にまで真空度が悪化し, 同時にCCDと冷凍機ヘッドの温度も上がっている。運用温度の-100°Cに到達していないため, この問題を解決する必要があった。

### ● 解決: Oリング材質の見直し

リーク試験によって冷凍機部分でリークしていることがわかった。さらに, ATCの岡田氏の助言を受け, Oリングをシリコンからニトリル製のOリングに交換した。その上で再度リーク試験を行ったところ, リークは見られなくなり, 真空漏れの問題は解決した。ただし, まだアウトガスはあったため, これについてはKyoto3DIIでは冷却部に接着した活性炭で吸着することで解決した。

ところで, それまでシリコンOリング(もちろん真空用である)を使っていたのは耐寒性能が良いためで, ニトリルOリングの使用可能温度が-30°C以上に対して, シリコンは-50°C以上である。また, ゴムの性質を失うガラス遷移点はニトリルが-85°Cに対してシリコンが-125°Cである。このOリングを使用する箇所は冷凍機ヘッドに近く冷やされる可能性があったため, 念のためシリコンを用いていたが, 現在ではニトリルでも問題がないことが確認できている。また, LISSではOリングを交換せず, そのままシリコンOリングを用いているが, イオンポンプをで真空度を保っている。



Fig.8. (左)シリコン製Oリング。(右)ニトリル製Oリング



Fig.9. ニトリル製Oリングに交換後に再度リーク試験を行う様子。Oリング部分にピンポイントにヘリウムガスを吹きかけている。

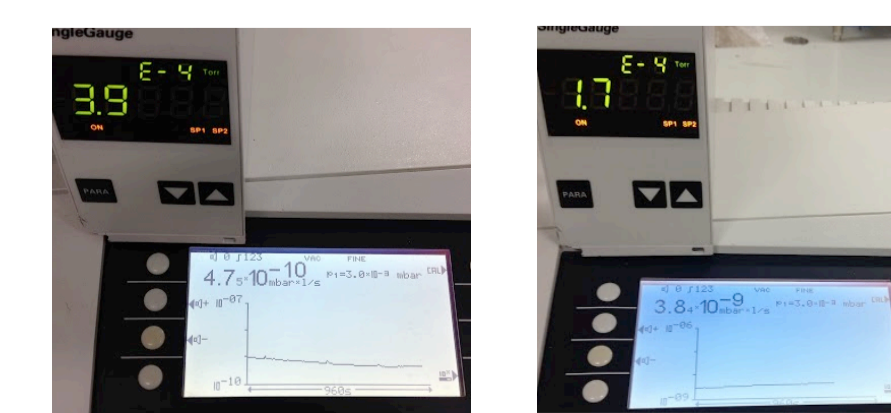


Fig.10. (左)ヘリウムガスを吹きかける前のリークディテクタと, 別に設置した真空センサーの様子。(右)ヘリウムガスをかけて3時間ほど待機した後, 3時間待ってもディテクターに有意な変化はなかった。

### ● リーク試験

Kyoto 3DII用デューワーの真空漏れ問題の解決のため, 国立天文台先端技術センター(ATC)においてヘリウムガスとリークディテクタを用いたリーク試験を行った。右図のようにデューワー部分と冷凍機部分に分離してからそれぞれ試験を行った(右図aとb)。冷凍機部分にヘリウムガスを吹きかけた際のみ, リークディテクタの真空度グラフが上昇した(c)。また, ディテクタとは別に設置していた真空センサーの値には有意な変化は見られなかったため, この試験にはリークディテクタが不可欠であった。

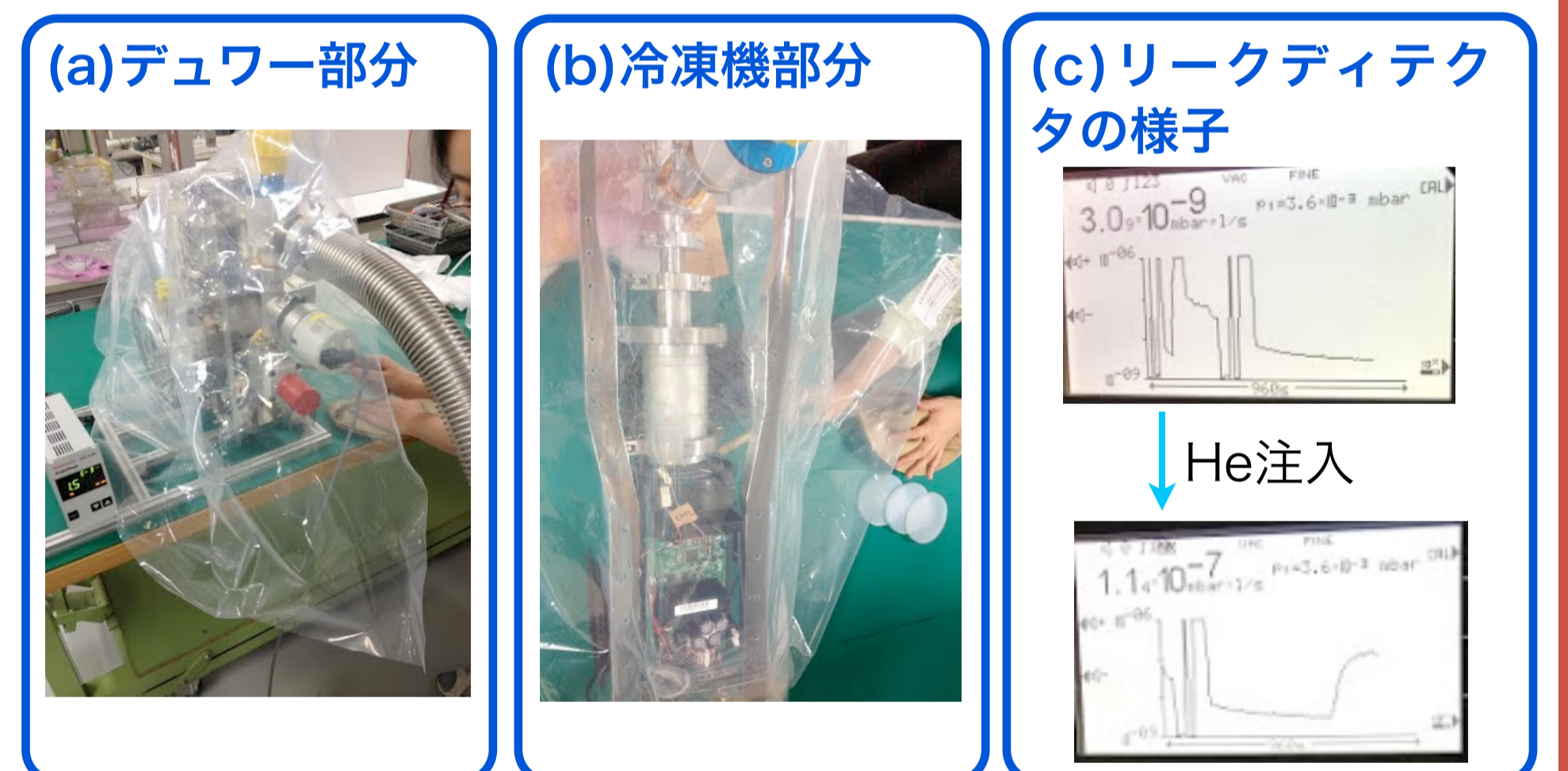


Fig.7. リーク試験の様子。(a) デューワー部分にヘリウムガスを吹きかけている様子。(b) 冷凍機部分(専用アダプターで真空を切っている箇所)にヘリウムガスを吹きかけている様子。(c) 冷凍機部分にヘリウムガスを吹きかけた際のリークディテクタの反応。冷凍機部分に吹きかけたときに真空度が上がった様子(3.0x10<sup>-9</sup> Torr → 1.1x10<sup>-7</sup> Torr)。

## ④ 振動試験について

### ● レーザー変位計を用いた試験

右図のようにレーザーでCCD面に面の振動を測った。3軸それぞれで, 振動吸収機構なしでは数10um(peak-peak)だったが, 機構ありでは2um以下に抑えられており, 1pixel(15um)より十分小さい。また, 測定された周波数~80Hzは冷凍機のピストンの周波数と一致している。

さらに, この試験ではデューワーの固定が不十分であり, また作業台も振動していたため測定された振動は上限値であると考えられる。実際, 振動吸収機構を搭載していないLISSでは星像などに振動の影響は見られない。

### ● 装置に取り付けた後の試験

Kyoto 3DIIはlensletタイプの面分光装置であり, 分光素子を光路上に入れないことで, 右図(a)のような多瞳像を取得できる。この多瞳像のサイズは装置内部の結像性能で決まるため, 冷凍機をONにした際とOFFにしたときで多瞳像のサイズを比較し冷凍機の振動の影響を調べた。

右図(b)のように, サイズ分布に有意な差異は見られず, 冷凍機の振動の影響が結像性能に影響していないことが確認できた。

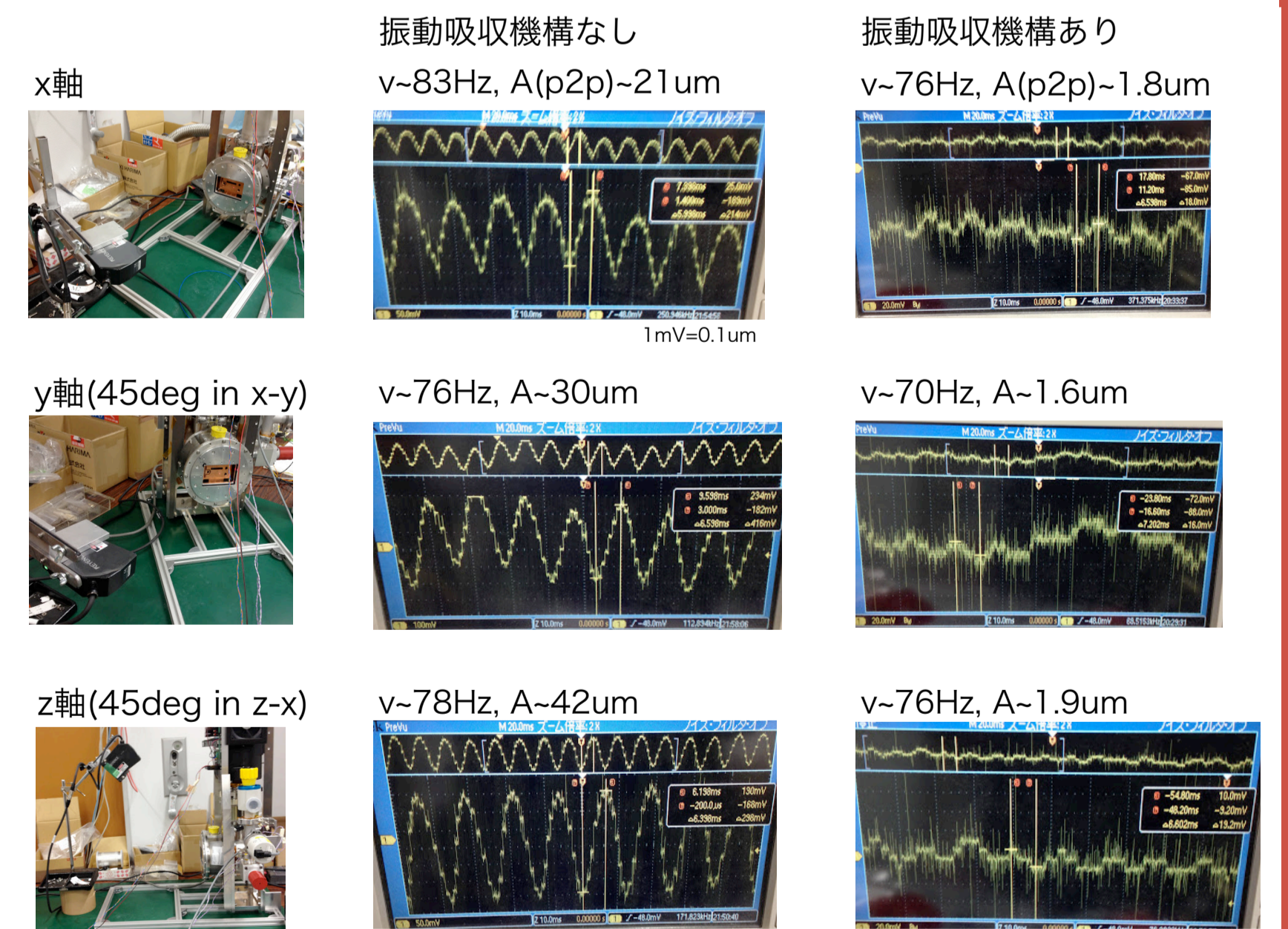


Fig.11. 振動試験の様子。上, 中, 下段はそれぞれレーザーの入射方向を変えて実験したものである。(左) レーザー変位計のセッティング。(中央)振動吸収機構なしでの振動の様子(上の数値は周波数vとpeak-to-peak振幅)。(右) 振動吸収機構ありでの振動の様子。

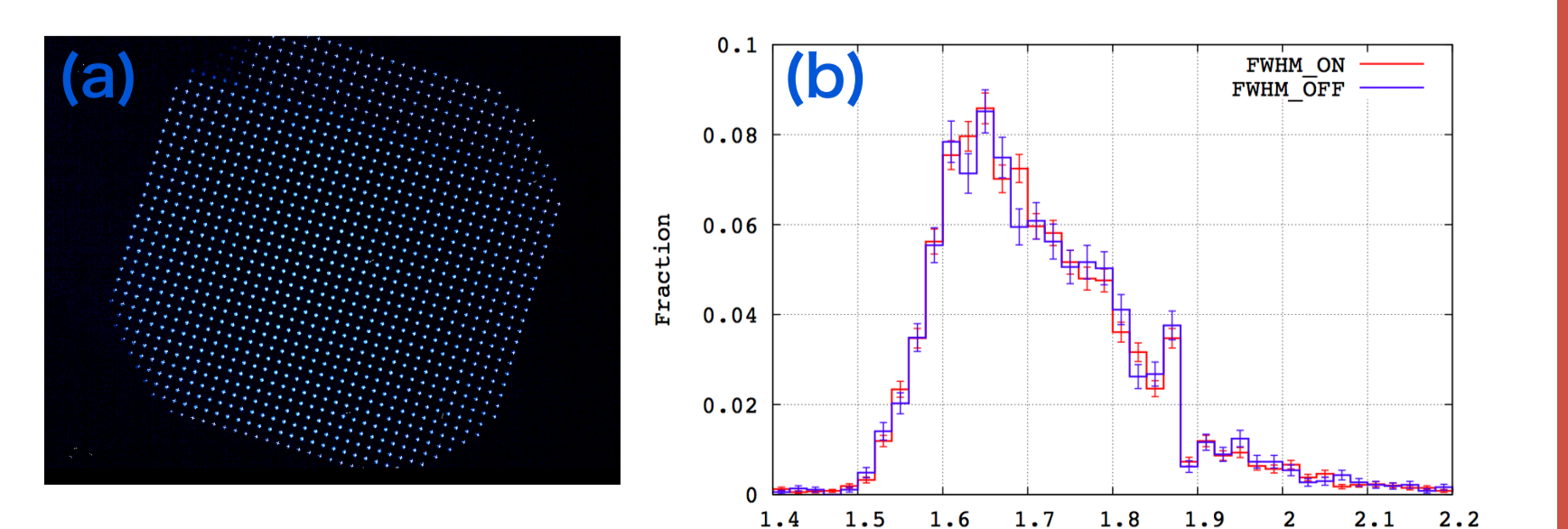


Fig.12. (a)人工光源を用いた多瞳像の例。約1000個の多瞳像が映っており, サイズは装置内部の結像性能で決まる。(b) 冷凍機をONにした際(赤)とOFFにした際(青)の多瞳像のFWHM分布。エラーバーはボソソン統計を仮定してつけた。2つの分布に有意な差異はみられない。

References: H. Sugai et al., 1998, Proc. SPIE, 3355, 655; H. Sugai et al., 2000, Proc. SPIE 4008, 558; H. Sugai et al., 2010, PASP, 122, 103; H. Sugai et al., 2004, ApJ, 615, L89; H. Sugai et al., 2005, ApJ, 629, 131; T. Goto et al., 2008, MNRAS, 386, 1355; K. Matsubayashi et al., 2009, ApJ, 701, 1636; K. Matsubayashi et al., 2012, ApJ, 761, 55; H. Sugai et al., 2007, ApJ, 660, 1016; K. Matsubayashi et al., 2016, PASP, 128, 5003; Y. Kamata et al., 2010, proc. SPIE, 7742, 774229; Hashiba et al., 2014, proc. SPIE, 9147, 91472J; S. Sako et al., 2008, proc. SPIE, 7021, 702128; S. Sako et al., 2012, proc. SPIE, 8446, 8446L; Mitsuda et al., 2016, proc. SPIE, 9908, 99.