一露出型偏光撮像器HOWPolのCCD冷却用新デュワーの開発

広島大学理学部物理科学科
高エネルギー宇宙可視赤外線天文学研究室
B135222
松場祐樹
指導教官　深澤泰司　主査　川端弘治　副査　志垣賢太

2017年2月

概 要

広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台のかなた望遠鏡は口径 1.5m の望遠鏡であるが１ m 級の望遠鏡の中でトップクラスの指向速度を持っている。また可視光、赤外線において測光、分光、偏光の観測が可能であり、指向速度を生かし、天体の突発現象にすばやく対応できるという特徴を持つ。

このかなた望遠鏡での偏光観測を可能にしている観測装置の一つに、一露出型可視広視野偏光撮像器（HOWPol）がある。これは広い観測視野を持つ直線偏光装置で、最大の特徴は一度の露出で 4 方位の偏光像を得ることができ、直線偏光のパラメータをすべて得ることができる点にある。

しかしこの HOWPol が抱える課題の一つに CCD の冷却問題がある。HOWPol では、入射した光信号を電気信号に変換する CCD をデュワー内のマザーボードに設置し、冷却することで、観測天体からの信号に悪影響を及ぼす暗電流（熱ノイズ）を減少させている。この半年間でデュワー内部を冷却する冷却器の機能が低下し、CCD の目標冷却温度の 173K を維持できず、外気温によって 173K〜190K の範囲で変動している。これ以上、老朽化が進むとノイズが観測データに影響を与える可能性がある。また現在使用している冷却器は、低温となるコールドヘッドとコールドヘッドに圧縮ガスを送るコンプレッサーが分離しており、望遠鏡の設置場所がナスミス台に限られるという問題がある。

今回の研究では、HOWPol にコールドヘッドとコンプレッサーが一体の新しいスターリング式冷却器を導入することで、冷却問題と設置に関する問題を解決し、することを目標として冷却デュワーを再設計した。設計は、主として 3D CAD SolidWorks を用いて独立に行った。導入に伴う設計項目は以下が挙げられる。

1. デュワー本体の再設計
2. 新冷却器と既存マザーボードとの間のコールドパスの設計
3. 新冷却器の荷重を補償する冷却支持台の設計

1. デュワー本体の再設計では、デュワー内部の真空度を保つため、冷却器のフランジ規格に合うポートを実現させると共にデュワーと冷却器の位置関係を固定するアームを設けるようにしたをした。

2. 新冷凍器のコールドパスの設計では、冷却時のデュワー内部の熱パス計算を行い、過不足ない冷却が実現されるかどうか見積もると共にデュワー本体を望遠鏡に取り付けた状態でも冷凍器の脱着が可能となるような内部構造の実現を目指した。

3. 新冷凍器の荷重増加（2kg → 16kg）を補償する冷却支持台の設計では、重量増加でデュワーを保持するステージの許容負荷限界を超えないように、冷却器を支える台を設計した。この設計では 、望遠鏡の仰角と方位角の変化による観測器の回転を考慮する必要があり、回転に伴う高さの変位に対応できるようにした。また冷凍器のメンテナンス時に安全に重い冷凍器の脱着が出来るように支持台と冷却器の構造を工夫した。

今回の論文では主に HOWPol への取り付けを可能にしたこれらの設計を述べてゆく。

目 次

第 1 章　研究の背景 **4**
1.1　東広島天文台とかなた望遠鏡 4
1.2　一露出型可視広視野偏光撮像器 HOWPol 7
1.2.1　HOWPol の構成 7
1.2.2　CCD と冷却デュワー 10
1.2.2.1　CCD 10
1.2.2.2　CCD の冷却とデュワー 10
1.2.3　現状の冷却デュワーの問題点 11
1.3　本研究の目的 12

第 2 章　新冷却デュワーの設計 **13**
2.1　冷凍機 13
2.1.1　新冷凍機の特徴と従来機との比較 13
2.2　新冷却器導入に伴う課題点 15
2.3　新冷却デュワーの設計方針 17
2.3.1　冷却器の重量対策 17
2.3.2　装置ローテータの回転対策 18
2.3.3　冷凍器とデュワー間の位置決定 20
2.3.4　熱流入計算とコールドパス 20
2.4　新冷却デュワーの設計 25
2.4.1　三次元 CAD SolidWorks について 25
2.4.2　デュワー本体 25
2.4.3　コールドパス 27
2.5　冷却器支持台 31
2.5.1　真空シールのための位置関係固定機構の設計 31
2.5.2　高さ変位に対応した駆動支持機構の設計 32

第 3 章　まとめと今後の課題 **40**

図 目 次

1.1 かなた望遠鏡 [6] 5
1.2 望遠鏡焦点図 5
1.3 HONIR 6
1.4 高速分光器 [7] 6
1.5 HOWPol[10] 6
1.6 HOWPol の光学系概観図 [10] 7
1.7 HOWPol の機械系構成図 [10] 7
1.8 フィルターと波長透過率 [10] 9
1.9 CCD 量子効率 [4] 10
1.10 デュワー内部図 11

2.1 新冷凍機内部図 [16] 13
2.2 PCC[15] 14
2.3 2s102K 14
2.4 従来器の外観図 15
2.5 新冷凍器の外観図 15
2.6 回転による高さ変位図 16
2.7 仰角・方位角図 17
2.8 実験の様子 1 18
2.9 実験の様子 2 18
2.10 ダイアルゲージ [14] 19
2.11 デュワーの高さ変位 19
2.12 従来器の外観図 20
2.13 新冷凍器の外観図 20
2.14 デュワー内部のコールドパス図 21
2.15 マザーボード固定機構外観図 22
2.16 冷却伝達部 24
2.17 SolidWorks 25
2.18 デュワー蓋 26
2.19 デュワー蓋寸法図 26
2.20 デュワー外観図 26
2.21 設計前デュワー 27
2.22 再設計デュワー 27

2.23 延長機構部品 1 28
2.24 延長機構部品 2 28
2.25 延長機構寸法図 28
2.26 再設計後のデュワー内部寸法図 29
2.27 冷却機構外観図 29
2.28 固定機構寸法図 30
2.29 マザーボード寸法図 30
2.30 位置固定アーム 1 外観図 31
2.31 位置固定アーム 1 寸法図 31
2.32 位置固定アーム 2 外観図 32
2.33 位置固定アーム 2 寸法図 32
2.34 高さ調整プレート 32
2.35 高さ調整プレート寸法図 32
2.36 円筒部品 1 33
2.37 円筒部品 2 33
2.38 カムフォロワ外観図 33
2.39 カムフォロワ寸法図 33
2.40 支持台 1 外観図 34
2.41 支持台 1 寸法図 34
2.42 支持台 2 外観図 34
2.43 支持台 2 寸法図 34
2.44 ばね設置台図 35
2.45 支持支柱 35
2.46 駆動機構断面図、外観図 35
2.47 高さ寸法図 36
2.48 ナスミス台視線方向寸法図 36
2.49 圧縮駆動機構を用いた HOWPol 外観図 37
2.50 支持機構部 38
2.51 駆動支持機構部 39

第1章　研究の背景

1.1　東広島天文台とかなた望遠鏡

広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台は、広島大学東広島キャンパスから東南東 8 キロメートル、海抜 503 メートルの国内でもトップクラスに良好なシーイング環境を持つ山頂に建てられている。この天文台の主力となる望遠鏡のかなた望遠鏡は、1.5 メートルの口径を持ち、国内に建つ大学所有のもので二番目に大きい光学赤外望遠鏡である。このかなた望遠鏡は一秒間に方位角 5 度という、1 メートル級の望遠鏡では最高クラスの移動速度を備えており、ガンマ線バースト（GRB）といった突発現象に対し、素早く観測ができる。突発現象に早く対応できる望遠鏡は世界に多数存在するが、多くが 0.5 メートル以下の小口径であるため、偏光や測光といった、光量が多く必要とする観測手法をとることができていない。かなた望遠鏡は、ある程度の大きさの口径、早い駆動力、豊富な観測手法を有しているため、突発現象に対し多様なアプローチができる優位性を持つ。

かなた望遠鏡はカセグレン焦点を 1 つとナスミス焦点を 2 つ有しており、それぞれに多彩な観測法を備えた、3 つの観測装置がある。

一つ目はカセグレン焦点についた HONIR である。カセグレン焦点とは凹面の主鏡で反射した光を凸面の副鏡で反射させ、その光が集まる部分をそのように呼び、通常は主鏡の直下にくる。この部分に取り付けられた HONIR（広島大学可視赤外線同時観測装置）は可視 1 チャンネル、近赤外で 2 チャンネル、計 3 チャンネルでの観測を同時に行うことができる珍しい機能を持つ。撮像のほかに分光、偏光撮像、偏光分光といった観測方法をとることができる多機能的な観測装置である。

二つ目はナスミス焦点に取り付けられた、高速分光器である。ナスミス焦点とは主鏡、副鏡で反射した光を高度軸上に設けられた第三鏡で入射光に対し 90 度方向に反射させた光の焦点である。京都大学によって開発された高速分光器の最大の特徴は最小露出時間、30 ミリ秒での高速撮像、分光が可能な点である。これにより時間変動の激しい現象に対し、短いタイムスケールでのデータを得ることができ、より細かい変動を知ることができる。

三つ目はこの研究で取り扱う観測装置の HOWPol（一露出型可視広視野偏光撮像器）で、これは高速 CCD カメラとは別のナスミス焦点がある。この観測装置は撮像で直径 $15'\phi$ の広い観測視野を持ち、撮像の他に分光撮像、偏光撮像、偏光分光を行うことができる。最大の特徴は一度の露出で 4 方向の偏光データを得られる点である。従来偏光観測で偏光データを得るためには、少なくとも 4 方向の偏光成分の観測が必要で数回の露出を 行わなければならなく、この方法ではＧＲＢといった時間変動の激しい突発現象に対し、時間分解能で精度が下がってしまう。そのため 1 露出のみで良い HOWPol は、偏光観測で大きな優位性を持っている。

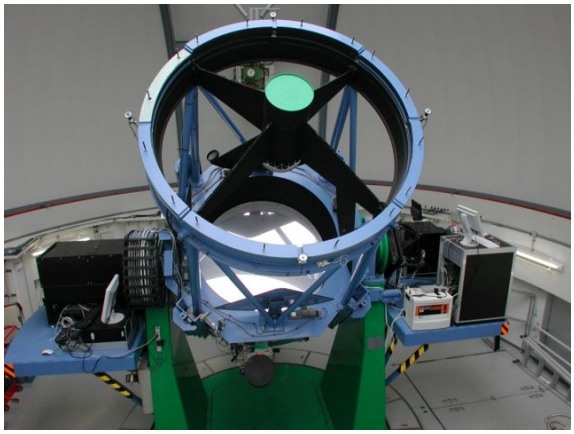

図 1.1: かなた望遠鏡 [6]

項目	仕様
光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	1500mm
分解能	1.1〜1.2”（FWHM in R-band）
視野	ϕ 15’
架台	経緯台
	最大速度（方位軸 5°/秒　高度軸 2°/秒）
焦点系	カセグレン焦点×１　ナスミス焦点×２
総重量	約 17 トン
搭載可能重量	カセグレン 0.5 トン　ナスミス焦点 1.0 トン

表 1.1: かなた望遠鏡データ

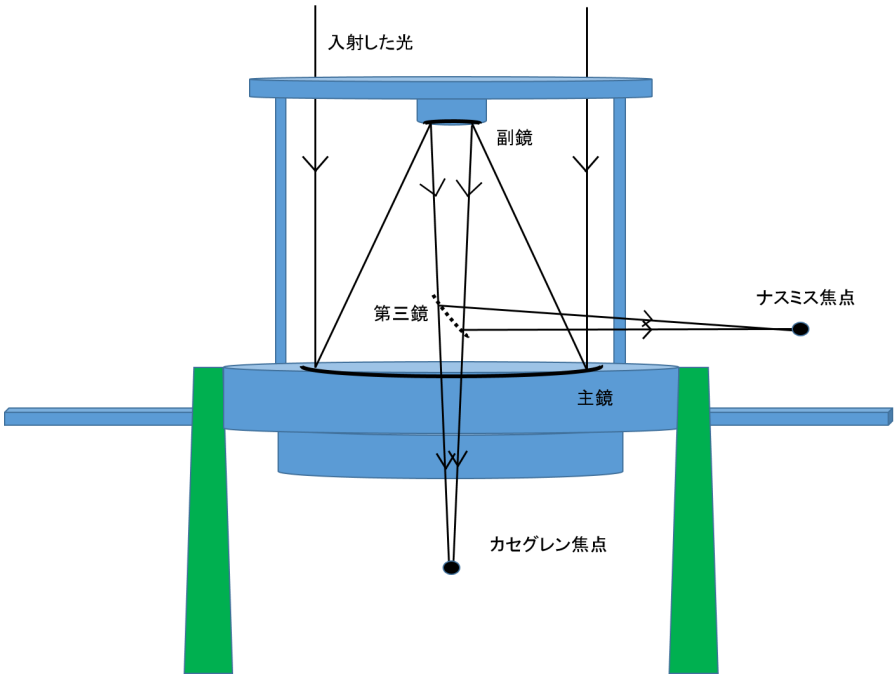

図 1.2: 望遠鏡焦点図

図 1.3: HONIR

項目	仕様
観測可能範囲	可視　近赤外
観測モード	撮像　分光　偏光撮像　偏光分光
搭載焦点	カセグレン焦点
CCD	完全空乏背面照射型 CCD
搭載フィルター	B V Rc Ic Y J H Ks
限界等級	OPT(R_c:0.65μm)=20.4mag
	IR(K_s:2.2μm)=15.4mag

表 1.2: HONIR データ

図 1.4: 高速分光器 [7]

項目	仕様
観測可能波長	2 素子プリズム　可視（360nm-1000nm）
	グリズム　可視（430nm-690nm)
観測モード	撮像　分光
搭載焦点	ナスミス焦点
CCD	背面照射型 CCD
露出時間	27.1msec 〜　10sec
限界等級	2 素子プリズム　15.7mag
	グリズム　12.4mag

表 1.3: 高速分光器データ

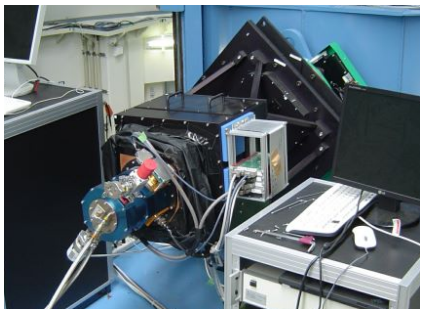

図 1.5: HOWPol[10]

項目	仕様
観測可能波長	可視（450nm-1100nm）
搭載焦点	ナスミス焦点
観測モード	撮像　分光　偏光撮像
観測視野	撮像　ϕ 15’
	偏光（広視野）7’ × 7’
	偏光（狭視野）15’ × 1’
	分光　2.3” × 15’
CCD	完全空乏背面照射型 CCD
搭載フィルター	B,V,R,I,z’
限界等級	撮像　R=19.2　偏光撮像　R=16.0

表 1.4: HOWPol データ

1.2 一露出型可視広視野偏光撮像器 HOWPol

1.2.1 HOWPol の構成

全長 748.63mm の HOWPol の光学系はコリメータ、カメラの再結像光学系となっており、その中の平行光部に様々な光学素子を出し入れできるレイアウトとなっており、内部の構成を組み変えることで観測モードを切り替えるようになっている。HOWPol の機械系構成図と光学系概観図を図 1.6 に示す。

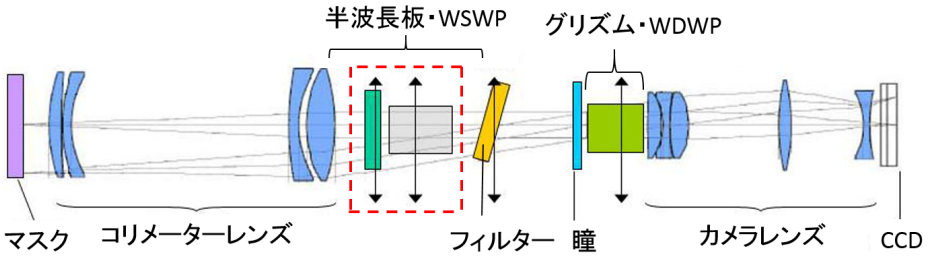

図 1.6: HOWPol の光学系概観図 [10]

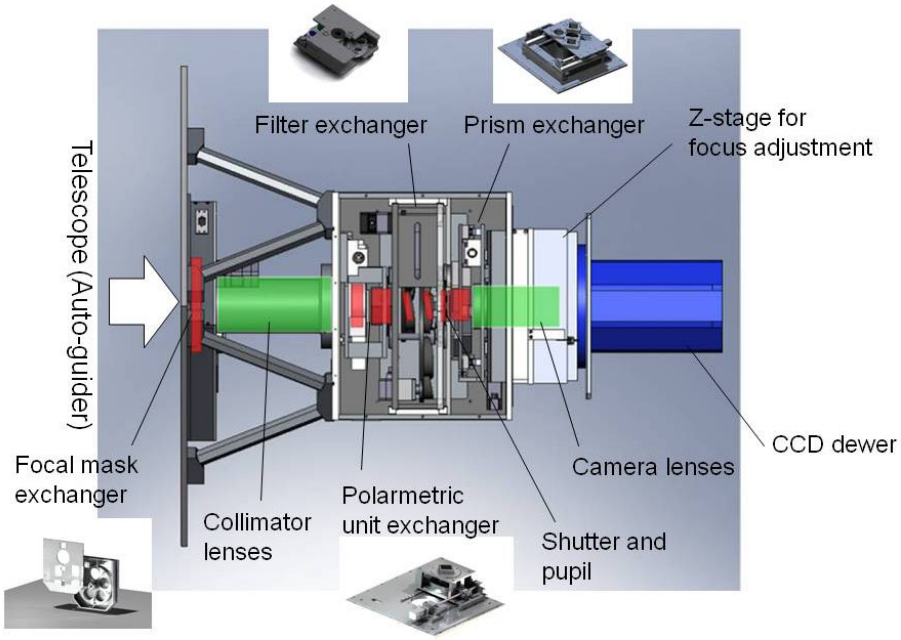

図 1.7: HOWPol の機械系構成図 [10]

- マスクターレット
  最初に光はマスクターレットを通過する。マスクとは分光、偏光など観測方法によって異なる像の写り方それぞれに適した光のみを取り込むために、それ以外の光を除く光学素子である。それゆえ観測

手法それぞれにマスクが存在する。この部分は五種類の瞳マスクを回転駆動で切り替えることで適したものに交換する。HOWPol には以下のマスクが搭載されている。

1. 撮像観測用マスク
2. 広範囲偏光撮像用マスク
3. 狭範囲偏光撮像用マスク
4. 偏光分光用マスク
5. 像のゆがみを確認するためのマスク

- コリメータレンズ

  マスク部分を抜けた光は、次にコリーメータレンズ部に入射する。ここでは 4 枚のレンズによって、光は屈折を起こし、平行な光となる。またコリメータレンズにより入射瞳像が平行光部に結像するようになっており、そこに後述の光学瞳絞りが設置されている。

- 半波長板・シングルウォラストン

  この機構部は、偏光分光の際に使用される。半波長版とは直行する二つの偏光成分のうち、一方の偏光位相を半波長分ずらすことができる素子である。シングルウォラストンプリズムは、入射した光を 2 つの偏光成分に分離する働きを持つ。このシングルウォラストンプリズムの前で、半波長版を回転させることで、違う方位の偏光データを取得できるようになる。つまり観測に必要な 4 方位の偏光データを取得するには、4 回露出し、そのたびに半波長板を回転する必要がある。その後この機構部よりあとに設置されたグリズムによって分光され、偏光分光観測が可能になる。

- フィルターターレット部

  次に光が通過する場所は、フィルターターレット部である。ここでは、特定の波長の光にみを透過するフィルターに通すことで、その光だけのデータを得ることができる。マスクターレットと同様に回転駆動で特定のフィルターに交換する。またこの機構部には 5 つフィルターが搭載できるターレットが 2 つついており、フィルターを重ねて使用することも可能である。現在、搭載されているフィルターは、B,V,R,I,z' の 5 種類である。それぞれのフィルターの透過波長は以下の図 1.8 のようになっている。

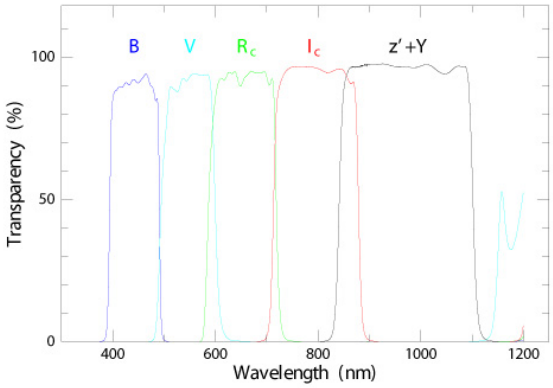

図 1.8: フィルターと波長透過率 [10]

- 光学瞳・シャッター部

  この部分では、フィルターによって特定の波長に制限された天体の光以外の光（装置からの迷光）が検出器に入らないようにするための機構部である。これは瞳部分に瞳の位置での光束の直径と同じ大きさの絞りを置くことで可能となる。またここにシャッターも設置して露出を管理している。

- グリズム・ダブルウォラストンプリズム部

  光はこの機構部を通過して、特定の観測方法に適した形に変化する。ここでは、分光観測で使用されるグリズムと 1 露出偏光観測で使用されるダブルウォラストンプリズムが XY ステージによって切り替えられ使用される。グリズムとは透過形回折格子（グレーティング）とプリズムと組み合わされた分散素子のことで、入射した光の中心波長を進行方向を変えず、その他の波長を分散することができる。もう 1 つのダブルウォラストンプリズムは HOWPol の最大の特徴である一露出偏光を可能にするプリズムである。光軸の違うウォラストンプリズムを 2 つ配置することで、一度の露出で 4 方向の偏光データを取得できる。この装置には広視野観測で広い範囲で突発天体に対応したもの、狭視野で偏光精度を高める二種類のダブルウォラストンプリズムが導入されている。

- カメラレンズ部

  ここでは入射した光を 5 枚のレンズで屈折させ、CCD に像ができるようにしている。

- デュワーと検出器焦点調整機構

  光を検出する CCD はデュワー内にあり、ノイズを抑えるためここでは真空低温になっている。デュワーは焦点調整用大型ステージに取り付けられており、10mm の範囲で数ミクロン精度で焦点距離を調整できるようになっている。このステージの許容荷重はステージを上向きに用いる場合は 30kg であるが、水平方向に用いる場合は 10kg 程度である。

1.2.2 CCD と冷却デュワー

1.2.2.1 CCD

CCD は入射した光信号を電気信号として変換する撮像デバイスである。

HOWPol には浜松ホトニクスと国立天文台の共同開発された完全欠乏背面入射型 CCD を二枚並べて使用している。この CCD の 1 ピクセルは 1 辺が 15μm の正方形で、それぞれの全ピクセル数は 2048×4096 個である。2 つ使用することで、かなた望遠鏡の観測可能視野（FOV）$\phi 15'$ 全体を検出できる大きさになっている。

検出波長領域の特徴として、従来より 9000 11000$\AA$ の可視光内で比較的長い波長ででの量子効率を高めている。図 1.9 に波長による CCD の量子効率を記す。

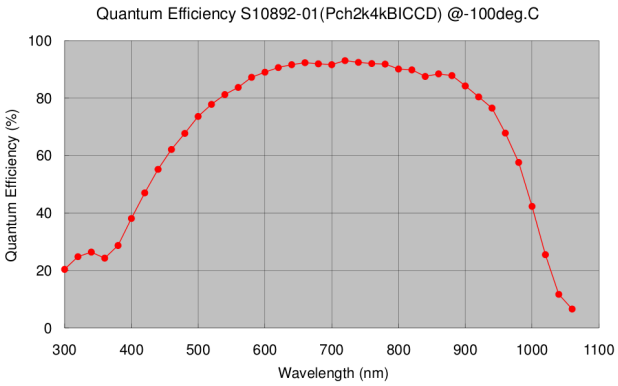

図 1.9: CCD 量子効率 [4]

1.2.2.2 CCD の冷却とデュワー

CCD が変換する電気信号は、ノイズと呼ばれる、観測信号以外の電気信号が存在する。その原因の一つに、CCD 温度による熱ノイズであり、HOWPol では、真空にしたデュワー内の CCD を 173K に冷却し、維持することで、このノイズを無視できる程度に抑えている。また CCD の最適温度 173K はノイズと CCD の信号伝達速度の両面で適した温度となっている。ノイズを抑制することは、観測効率や観測可能な星の明るさの範囲が広がるといった利点があり、観測装置にとって重要な対策項目である。

現在、HOWPol はコンプレッサーとコールドヘッドが分離した Brooks 社製の PPC Compact Cooler 冷凍機を利用し、デュワー内を真空にしたコールドパスで CCD の冷却を行なっている。これは空冷式の冷凍器で冷却性能は、6W(86K)、ヘッド部分はデュワーとボルトで固定されている。デュワー内は真空と冷却が共に行われ、それらは相互に影響しあい、両者を行うことで両方の効率を上げている。

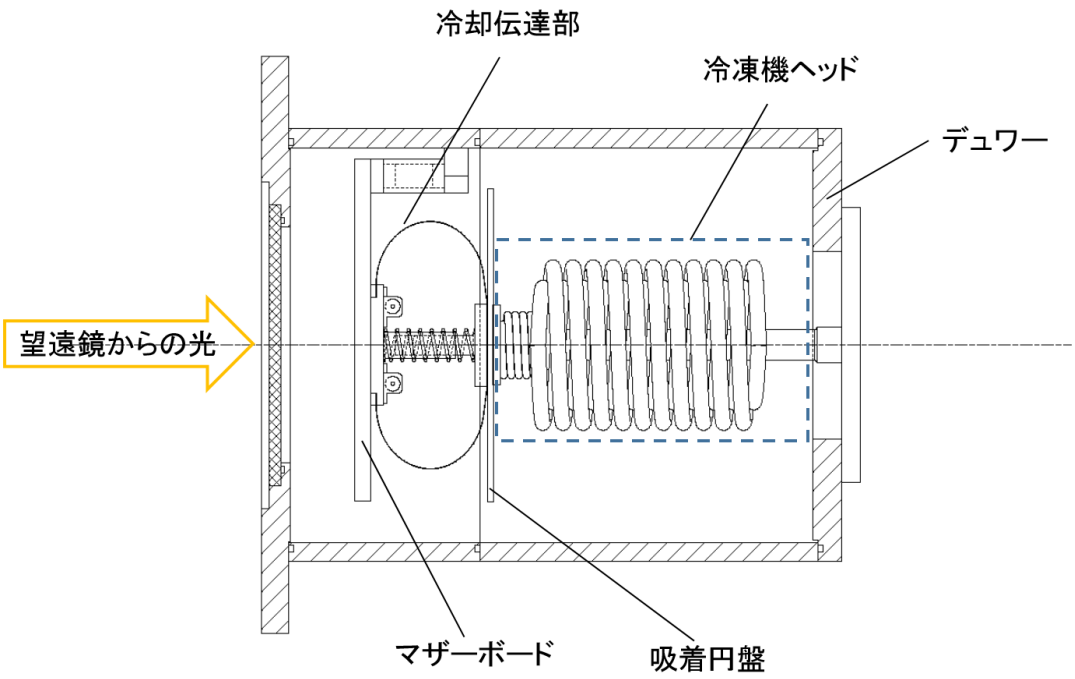

図 1.10: デュワー内部図

- 冷却構造
  低温になった冷凍器のヘッド部分はデュワー内部に差し込まれ、内部の部品と固定されている。冷却はヘッドから冷却伝達部となる銅製の曲がった部品を介して、CCD が取り付けられたマザーボードを冷却している。またマザーボードには抵抗ヒーターが取り付けられており、目標温度以上に冷却されないような仕様となっている。

- 真空構造
  デュワー内部は通常 $10^{-5}Torr$ のオーダーの真空下にある。 冷凍機のヘッドとデュワー間など、外部と内部との接続面では、真空度を維持するために O-ring を間に設置し、アウターガスの発生を防いでいる。デュワー内部には吸着材を格納したケースが取り付けられた銅製の円盤があり、冷却されたその表面上で内部の粒子を吸着させ、真空度を上げている。

1.2.3 現状の冷却デュワーの問題点

2016 年夏季より HOWPol では冷凍器性能低下が確認されており、外気温による影響でデュワー内の CCD が目標温度 173K を維持できず、173K〜190K の範囲での変動している。冬季の間は変動が小さく、無視可能なレベルであるが、これから夏季に向けて外気温が上昇することに加え、冷却器の性能のさらなる劣化も懸念されることから早急な対応が必要である。
また現用の冷却器はコールドヘッドとコンプレッサーが分離しており、望遠鏡輸送時や今後 HOWPol を別

の望遠鏡へ搭載する際、設置場所の点で汎用性が低い。分離型の冷凍機はコンプレッサーが大きく、非常に重くなっているため観測装置に取り付けはヘッドのみで行うのが通常である。しかしコンプレッサーとヘッドはガスラインとよばれるフレキシブル配管で繋がっているため、観測装置が広い範囲で移動し、サイズと重量面で制限が大きいカセグレン焦点では使用できない。また従来 HOWPol のような偏光観測を行う観測装置は、ナスミス焦点の器械偏光を避け、カセグレン焦点に設置するのが最も良いとされており、今後の他より大型の望遠鏡に供して使用するという展望向けて冷凍機をコンプレッサー一体型のものにしておくことが望ましい。

1.3 本研究の目的

本研究では HOWPol が抱える問題である、冷凍機の冷却機能低下により CCD の目標温度 173K に維持できないこと、望遠鏡の設置場所がナスミス焦点に限られてしまうこと対し、コンプレッサー一体型のスターリング新冷凍機を導入することで解決を目指す。この冷凍器は従来使用していた冷却器に比べ、形式が大きく異なり導入にあたり様々な課題があり、これを克服する設計を行うことで HOWPol への設置を可能にした。

1 つ目に、冷凍機との固定にはフランジのみと、真空度を維持するための密着した接続としては弱いものであるため、この規格に合うポートをデュワーに実装すると共に互いの位置関係を決める固定機構としてアームを設計をした。

2 つ目として、冷却デュワー内部の熱パス計算を行うことで、冷却が過不足なく実現できることを見積り、デュワー本体を望遠鏡に取り付けたままでも安全に脱着できる内部構造を目指し、設計をした。

最後に従来器より観測装置にかかる荷重が大きいことを補償する支持機構の設計を行った。この支持機構には望遠鏡の仰角、方位角変化による観測装置の回転、冷却器のメンテナンス時に重い冷凍機を安全に着脱するための工夫を行った。

これらにより HOWPol で安定した冷却を行え、一体型冷凍機を導入することを目的とする。

第2章　新冷却デュワーの設計

2.1　冷凍機

2.1.1　新冷凍機の特徴と従来機との比較

- 新冷凍機の特徴

  新冷凍機導入にあたって、QDRIVE 社製のコンプレッサー一体式冷凍機「2s102K cryocooler」を選定した。この製品は acoustic stirling 式の冷凍機で、対称に設置されたピストンにより振動を抑え、メンテナンスフリーという特徴を持つ。冷凍能力は空冷式で６ W（@７７ K）で冷凍媒体としてヘリウムを使用している。（図 2.1）は冷凍機の内部図である。

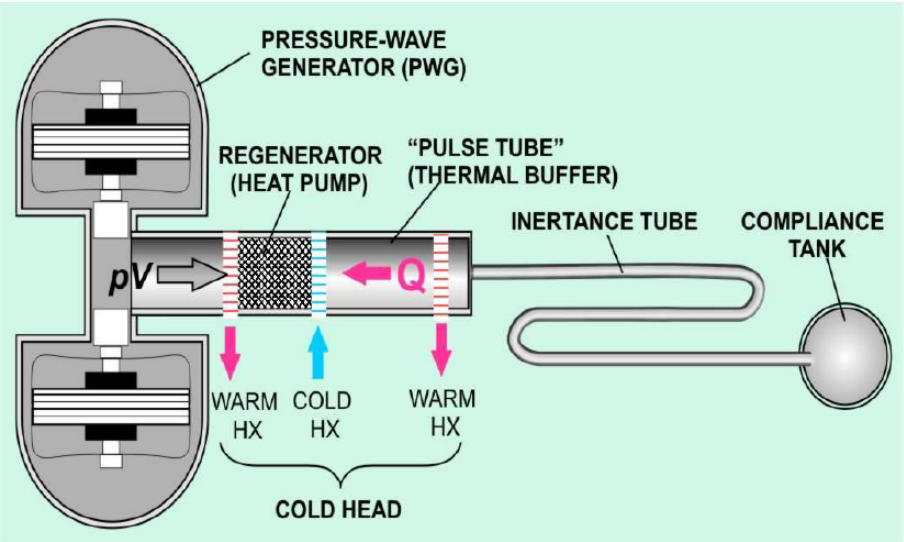

図 2.1: 新冷凍機内部図 [16]

- acoustic stirling 式冷凍機「2s102K cryocooler」の冷却原理

  1. PWG と呼ばれる機構部のピストンにより、圧縮されたヘリウムガスが「warm heat exchanger」部を通る。その際圧縮によって上がった熱をこの機構部で放出する。

  2. 「warm heat exchanger」部を通った、ガスは「regenerator」部まで移動し、「cold heat exchanger」部に達する前にここでプレクーリングされる。

3. 圧縮されたヘリウムガスが「cold heater exchanger」に進んでいるとき、「thermal buffer tube」部のヘリウムガスもまた同じ方向に移動しており、圧縮されたガスが止まっても、この部のガスは「inertance tube」部まで高速で進んでゆく。その際ピストンはそれ以上ガスを圧縮できない状態になる。

4. 「thermal buffer tube」部のヘリウムガスが「inertance tube」部まで移動するため、「cold heater exchanger」部のヘリウムガスは膨張され、周りの熱を奪う。

5. その後ピストンは返り始め、ヘリウムは「regenerator」部を通って戻る。その際、「thermal buffer tube」部のガスは自身の慣性により遅れながら戻り、サイクルがまた行われる。

6. サイクルが何度も行われることで、「cold heater exchanger」部は低温となり、そこから熱パスが通ったヘッドの先端部が冷却される。

- 従来機との比較

使用していた冷凍器は、Brooks 社製の PCC Compact Cooler でこれは冷却ヘッド部とコンプレッサーが分離している。新冷凍機と従来機の性能と構造比較を以下の表 2.1、2.2、図 2.2、2.3 に示す。

図 2.2: PCC[15]

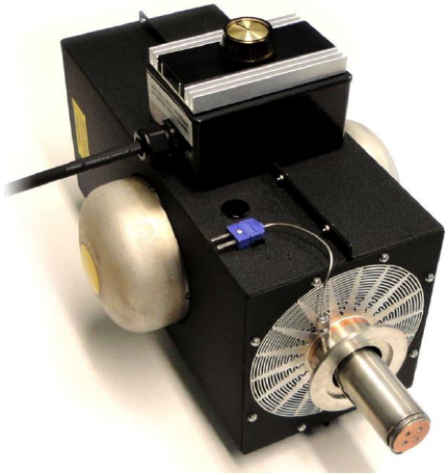

図 2.3: 2s102K [16]

項目	仕様
質量	ヘッド　1.5kg
	コンプレッサー　31.1kg
冷却方式	空冷式
冷却能力	6W(@86K)
ヘッドの長さ	145.3mm
接続部	JIS 規格 M5 ボルト

表 2.1: PCC データ

項目	仕様
質量	ヘッド＋コンプレッサー 16kg
冷却方式	空冷式
冷却能力	6W(@77K)
ヘッドの長さ	60.2mm
接続部	DN50 フランジ

表 2.2: 2s102K データ

表を見ると、新冷凍機は従来機に比べてコンプレッサーと一体になることで総重量が小さくなっているが、一体型のためデュワーへの取り付けには、従来機よりも大きな荷重が発生してしまう。またこの冷却器はヘッド部が短くなり、接続が DN フランジと異なる機構になっているため設計の際に注意が必要である。

2.2　新冷却器導入に伴う課題点

1. 新冷却器の特徴による課題

- **一体型冷凍器による冷却デュワーの重量化**

前のセクションでも述べたが、分離型に比べ一体型冷凍機の総重量は小さいが、実際、デュワーに新冷凍機を直接取り付けるため、質量は分離型のヘッド（1.5kg）から新冷凍機全体の質量（16kg）に増える。この荷重の増加は、デュワーが取り付けられている可動型焦点調節用ステージの耐久重量 10kg の制限を超えるため、そのままでは取り付けられない。何らかの方法で対策する必要がある。

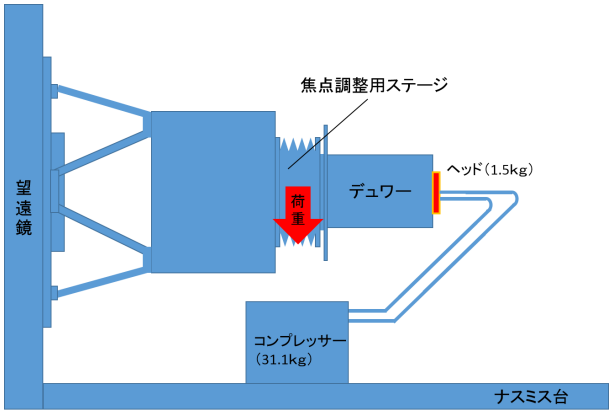

図 2.4: 従来器の外観図

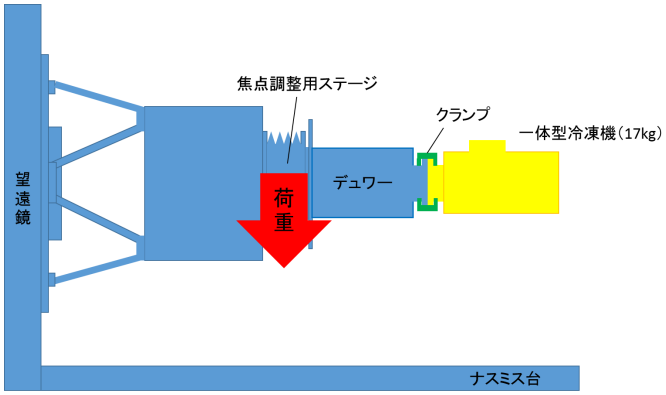

図 2.5: 新冷凍器の外観図

- **デュワーと冷凍器間の固定**

従来の冷凍機とデュワー間は JIS 規格 M5 サイズのボルト 8 本で強固に固定されており、内部が真

空となったデュワーとの真空シールが保たれる仕組みになっていた。しかし導入する新冷凍器は DN 規格のフランジをクランプで固定する方法のみで、両間の位置関係を保てず、ある程度隙間が生まれる可能性がある。そのためそこからガス流出が起きてしまい内部を真空度を維持できず、冷却できない恐れが考えられる。それぞれの位置関係を固定する何らかの方法が必要である。

・ヘッド部分の長さとデュワーの大きさ

新冷却器は従来器に比べ、デュワー内部に挿入されるヘッド部分が短く、1/3 程度の長さになっている。それゆえ現在のままではデュワー内の機構部までと届かず、冷却を行えない。デュワーや内部部品を再設計する必要がある。

2. 望遠鏡による課題

・ナスミス台に設置された観測装置の回転

ナスミス台に取り付けられた観測装置はたわみなどなく、望遠鏡からこの台に対し平行な状態でとりつけられているのが理想であるが、実際には装置自身の重さによってある程度のたわみが発生している。また観測装置は望遠鏡の仰角と方位角の変化に伴って回転するため、そのたわみが回転角によって変化する。それゆえ、デュワーに設置した新冷凍器をナスミス台からの支える場合、台からの高さ変位に対応した支持機構を考える必要がある。また支持機構には装置自体の回転も考慮する必要がある。

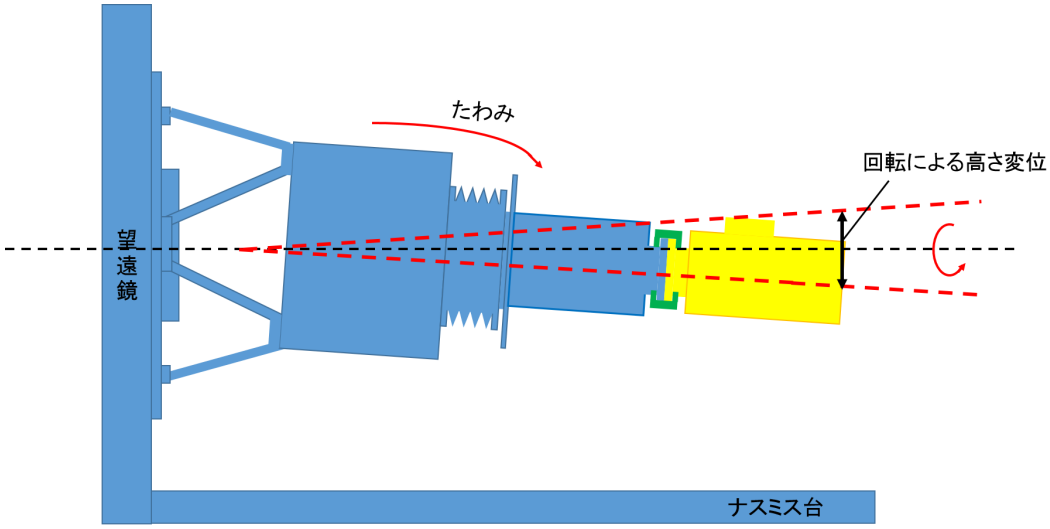

図 2.6: 回転による高さ変位図

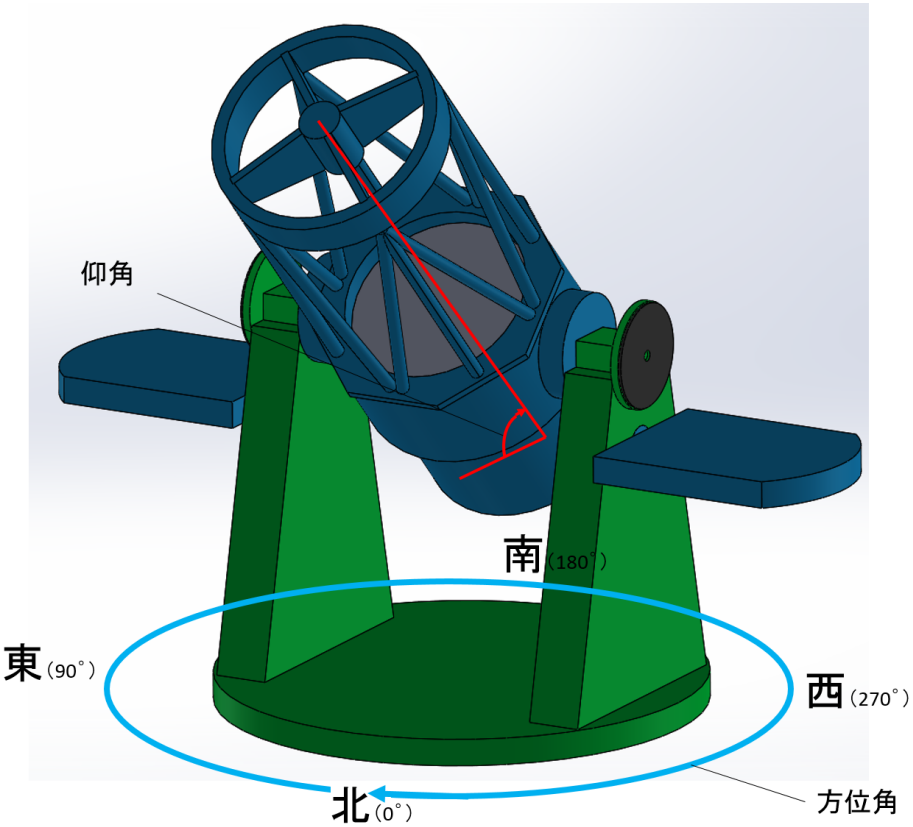

図 2.7: 仰角・方位角図

望遠鏡にはその姿勢を表す指標として仰角と方位角がある。仰角は水平方向からどの程度望遠鏡が上を向いているか表す座標で真上の時、仰角は最大の 90°なる。方位角は北を 0°として時計回りに回転座標をとったもので、東は 90°、北西は 315°で表される。

2.3 新冷却デュワーの設計方針

2.3.1 冷却器の重量対策

新冷却器による重量対策としてナスミス台からの支持機構を製作し、導入する。高さの変位に対応した他の支持方法に、観測装置から冷却器とデュワーをトラス構造で固定し、支える方法があるが、この方法では可変式ステージの重量限界の考慮や支持機構を導入による HOWPol 構造の再設計が必要であり、大規模な導入になるため今回は削除した。

2.3.2　装置ローテータの回転対策

・回転対策の設計方針

支持機構にバネを使用することで任意の回転角による高さの変位に対し、常に支えられるようにする。そのため高さ変位の最大点と最小点の高さの差で発生する、バネの力の差を考慮する必要がある。この力の差はバネ定数で決まるため、バネ選定にはこの差が可動型ステージの限界重量以下の応力差になるようにする。また、現在のナスミス台に支持機構を設置できる場所が 300mm（現在の装置のデュワーとナスミス台の端までの距離）と限られてるため、大きさもある程度のものにする必要がある。

回転によって支持する冷凍器の面が変化するため、冷凍器を円筒のようなもので囲い、固定することで回転しても常に同じ面となるようにする。

・HOWPol の回転による高さ変位の測定

適切なバネ定数のバネを支持機構に導入するため、HOWPol のデュワーで発生するナスミス台からの高さの変位を測定した。測定方法としてはダイアルゲージと呼ばれる測定器具を使用し、図 2.8、2.9 のようにデュワーとナスミス台の高さを測った。結果を以下の図 2.11 に示す。

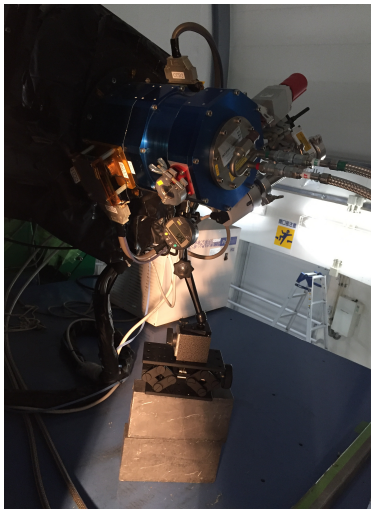

図 2.8: 実験の様子 1

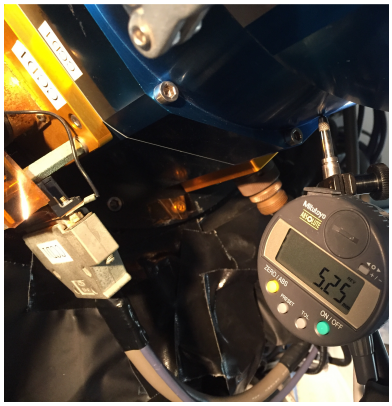

図 2.9: 実験の様子 2

図 2.10: ダイアルゲージ [14]

先端部の稼動機構の長さが変化することで、任意の位置からの変位を測定する機器である。この測定機器にはデジタル式とアナログ式があり実験ではデジタル式を使用した。

・実験結果

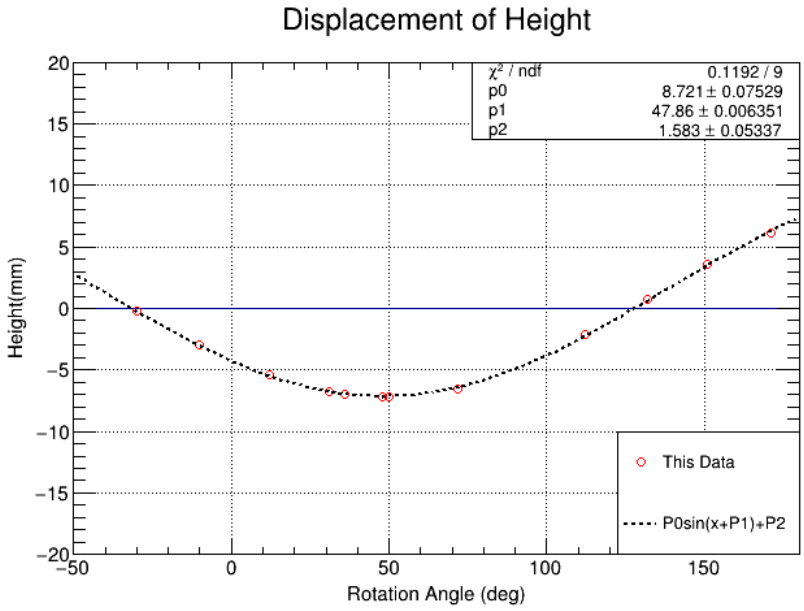

図 2.11: デュワーの高さ変位

デュワーに取り付けられた配線の関係で、実験ではすべての回転角を調べることができなかったが、この高さは $\sin\theta$ で変化するため、実験で得たデータを元にフィッティングし、最大点と最小点の差、17.4mm を得た。この値から適したバネ定数を持つバネを選定し、支持機構に導入する。

2.3.3　冷凍器とデュワー間の位置決定

冷凍器とデュワー間はフランジ同士をクランプで固定するのみで、回転によって高さが変化するとわずかに隙間が生まれる可能性ある。デュワー内は真空引きされているためこの僅かな隙間からガス流入が発生し、真空を維持できない問題が起こる。この問題に対しデュワーと冷凍器の位置関係を固定する機構を導入することで解決する。この場合、冷凍器の荷重がデュワーに加わらないよう、ナスミス台からの支持機構を設置する必要がある。

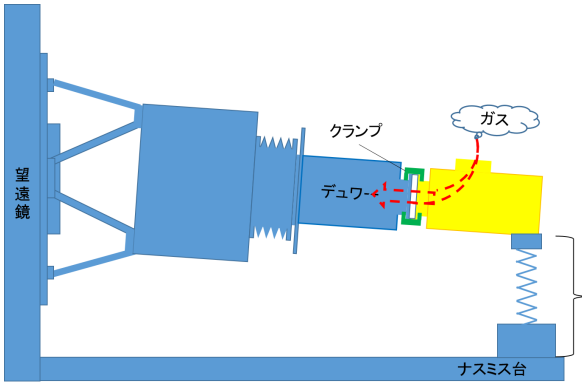

図 2.12: 従来器の外観図

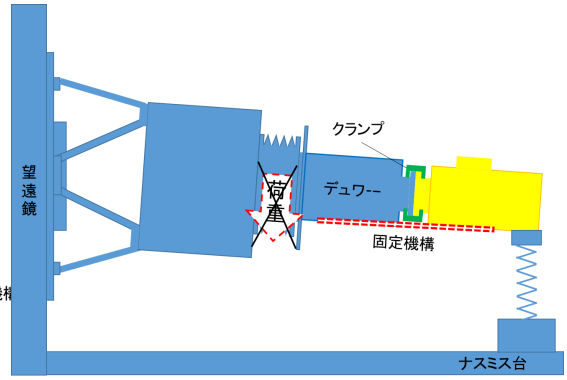

図 2.13: 新冷凍器の外観図

2.3.4　熱流入計算とコールドパス

従来器と比べ、新冷凍器はヘッド部分が短くなっている。この問題は、デュワー内を冷却するためデュワーと寸法を変更し、またヘッドと内部の冷却部の間に熱伝導率の良い機構を取り入れることで解決する。

設計とは別にコールドパスの計算を行う必要がある。コールドパスとは、冷却を行う際、冷凍機と目標冷却部（CCD）間で、どのような熱の流出、流入といったエネルギーの交換が行われているのか示したもので、計算することでどの程度の冷却が行われているか確認する。この計算には W（J/s）を使用する。

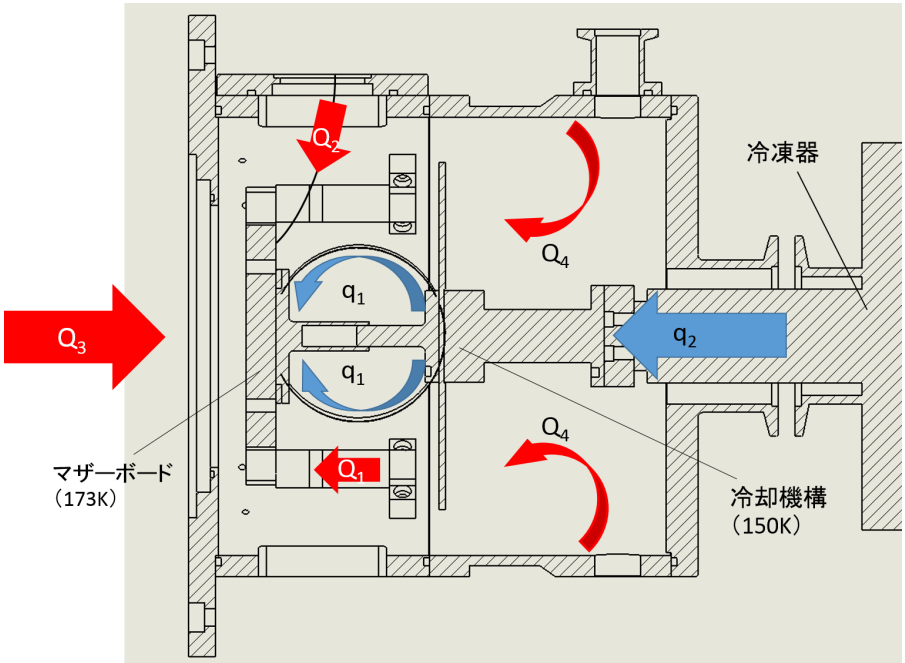

図 2.14: デュワー内部のコールドパス図

・マザーボード固定機構からの熱流入（Q_1）

熱の流出、流入は物質に温度勾配が存在することで発生する。その量は温度勾配に比例し、フーリエの法則で以下の式のように表される。

$$dQ = -\lambda \frac{d\theta}{dx} dA \tag{2.1}$$

λ:熱伝導率 (W/m·K)　$\frac{d\theta}{dx}$:温度勾配 (W)　dA:熱の通過微小面積 (m^2)

フーリエの式は単位時間に微小面積を通過する熱量を表す。また熱伝導率は物質固有の値である。この方程式では熱の流入を正にするため、符号は負になっている。

フーリエの法則を使用し、この固定部の熱流入を計算する。初期条件として、冷却を行うマザーボードを目標温度の 173K、支持機構の温度を 300K とする。この温度勾配での単位時間あたりの熱量を調べることで、最大の熱量をもつ熱流入でも冷却可能か調べることができる。

また図 2.15 よりこの固定機構は断面積は $\pi 14^2$ で厚さは 53mm、材料はエポキシガラス（G10/FR4）で熱伝導率は 0.471[W/m·K](@273K) この値と（2.1）式より熱流入を求めると

$$dQ = -\lambda \frac{d\theta}{dx} dA \quad = -0.471[W/m \cdot K] \times \frac{(173-300)[K]}{53 \times 10^3 [m]} \times \pi 14^2 [m^2] = 0.695[W]$$

固定機構は 4 つ使用しているため、

$$0.695[W] \times 4 = 2.78[W]$$

よって、マザーボード固定機構からの熱流入量 Q_1 は 2.78[W] とわかった。

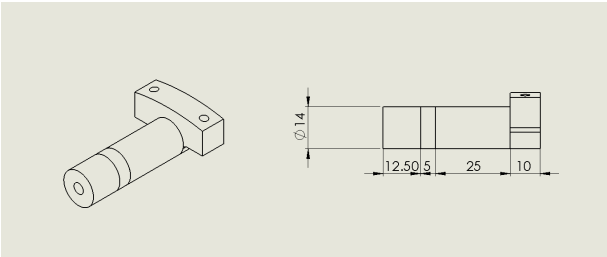

図 2.15: マザーボード固定機構外観図

・CCD からデュワー外部に伸びる電気配線からの熱流入（Q_2）

電気配線には２８番と呼ばれる、断面積が $0.0804mm^2$、熱伝導率が 403[W/m·K(@273K)] の電線を 10 本使用している。長さを 100mm とし、熱流入を計算すると
式（2.1）より

$$dQ = -\lambda \frac{d\theta}{dx} dA$$

$$Q = -0.471[W/m \cdot K] \times \frac{(173-300)[K]}{0.1[m]} \times 0.0804 \times 10^6[m^2] = 0.041[W]$$

$$Q_2 = 10 \times Q = 0.41[W]$$

よって、CCD からデュワー外部に伸びる電気配線からの熱流入は 0.41[W] である。

・ウィンドウから CCD への熱放射（Q_3）

物体はその表面から様々な波長の光を放出している。この放射される波長はその物体の温度に依存した、範囲やエネルギー量を持つ。この光、すなわち電磁波を他の物質が吸収することで、放射した物質との間で熱が伝わるのである。この熱の伝達を熱輻射といい、物質によって特定の波長に対する光の吸収量が異なるため、伝達量も変化する。

この熱パス計算でもこの熱輻射を考慮する。今回は望遠鏡からの光をデュワー内に取り込むためのウィンドウの熱輻射を計算する。初期条件として 300K の物体が放射する総エネルギーがピーク波長の 10μm で放射されるとする。またウィンドウと CCD がついたマザーボードの距離が CCD の大きさに比べかなり小さいため、この大きさのウィンドウから放射する電磁波のみが伝達に影響をすると考えるとする。
このとき、CCD の大きさ分のウィンドウの放射エネルギー量 E は、ステファン・ボルツマンの法則より、以下の式で表される。

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma S T^4 [W] \tag{2.2}$$

$$E = \epsilon E b = \epsilon \sigma S T^4 [W] \tag{2.3}$$

λ:波長 [m]　T:物体の温度 [K]　S:物体の表面積 $[mm^2]$　σ:ボルツマン定数 $[\mathrm{W}/m^2K^4]$　ϵ:吸収率（放射率）

この式（2.3）を使い、ウィンドウからの熱輻射を計算する。放射を行うウィンドウの面積は、30mm ×60mm の CCD の 2 つ分とするので、$3.6 \times 10^{-3}[m^2]$、温度は 300K とし、またフッ化カルシウムできたウィンドウの放射率は、0.87 である。ボルツマン定数は、5.67 × $10^{-8}[W/m^2K^4]$。

$$Q[W] = 0.87 \times 5.67 \times 10^{-8}[W/m^2K^4] \times 3.6 \times 10^{-3}[m^2 \times 3.6 \times 10^{-3}[m^2]$$

$$= 1.44[W]$$

この結果、ウィンドウからの熱輻射が 1.44[W] と求められた。この放射を CCD（シリコン）が吸収するので、シリコンの 10μm の吸収率 $\epsilon_s = 0.01$ とすると

$$Q_3 = E \times \epsilon_s = 0.01 \times 1.44[W]$$

$$= 0.0144[W]$$

計算の結果、ウィンドウからの熱流入は 0.014[W] となる。

・デュワー表面からの熱放射 (Q_4)

熱輻射はウィンドウの他にデュワー内表面からも発生している。この輻射をマザーボードが吸収すると考え、ウィンドウの場合と同様に計算する。デュワー内の表面積は 0.347$[m^2]$、温度を 300K、デュワーの放射率を 0.057 とすると、式（2.3）より

$$Q = \epsilon Eb = \epsilon \sigma S T^4 [W]$$

$$Q = 9.08[W]$$

これをマザーボード吸収するので、この素材であるインバーの吸収率から熱流入量が求まる。
300K でのインバーの吸収率は、文献から求めることができなかったため、インバーの組成が、10μm での吸収率が 0.10 の鉄約 63% と 0.04 のニッケル約 36% であることを考慮して、吸収率を 0.08 %とする。この値より

$$Q_4 = 9.08 \times 0.08[W]$$

$$Q_4 \approx 0.73[W]$$

デュワー表面からの熱放射は、0.73[W] とわかった。

・冷却機構からマザーボードへの熱流入（q_1）

冷却機構から CCD へのコールドパスは、図 () の部品を曲げ、使用している。この部品の表面積は 5.2[mm^2]、CCD までの長さは 86.5[mm]、素材は無酸素銅 C1020、熱伝導率は 391$[W/mK]$。この機構は二箇所で接続されているため、表面積を 2 倍として考え、式（2.1）より

$$q_1 = -391[W/mK] \times \frac{(173 - 150)[K]}{86.5 \times 10^{-3}[m]} \times 2 \times 5.2 \times 10^{-6}[m^2]$$

$$q_1 \approx -1.08[W]$$

冷却機構からマザーボードへの熱流入は、-1.08[W] となった。

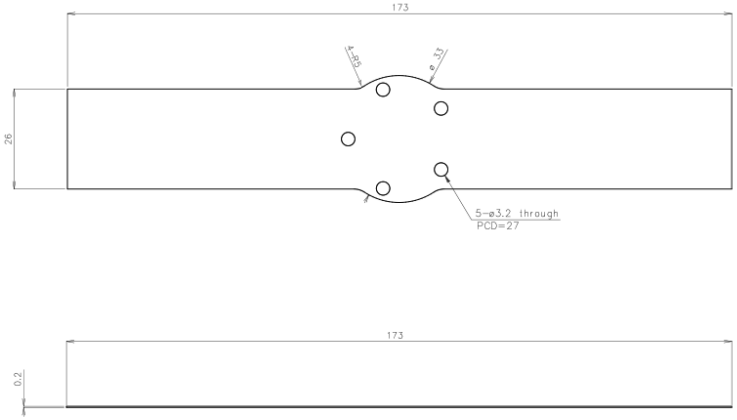

図 2.16: 冷却伝達部

・冷凍器から冷却機構への熱流入（q_2）

冷凍機の冷却出力は、データシートに記入されているが、空冷式の能力は 6W(@77K) のみしか書かれていなかった。そのため詳しく書かれている水冷式のデータ、8W(@77K) と 6W(@150K）この二点のデータを使用し、空冷式の 150K での冷却能力をスケーリングして求めた。

$$q_2 = \frac{-8[W]}{-6[W]} \times (-28)[W]$$

$$q_2 = -21[W]$$

よってこの値を空冷式の 150K での冷却性能とする.

・単位秒あたりの CCD 冷却能力（q_1）

Q_1、Q_2、Q_3、Q_4、q_1、q_2 の計算結果より、

$$2.78[W] + 0.41[W] + 0.014[W] + 0.73[W] + (-1.08[W]) + (-21[W])$$

$$= -18.146 \approx -18.1[W]$$

この結果、CCD の目標冷却温度 173K での冷却性能は－ 18.1[W] とわかり、どの程度冷却が行われるか確かめられた。

・冷却機構部に設置されたヒーターによる熱供給

デュワー内の冷却は機構部に取り付けられた抵抗加熱をヒーターとして使用することで、温度制御を行なっている。このヒーターは最大で 1 [A] の電流を出力でき、使用する抵抗を変えることで供給する最大熱量（上限 50[W]）を変えることが出来る。現在デュワー内では 10[Ω] の抵抗を直列に 2 つ使用しており、この値より最大供給熱量は 20[W] であるとわかる。

この値が冷却能力の－ 18.1[W] より大きいため、目標温度以上に冷却されないよう熱を供給することが出来る。また万が一冷却が 20[W] より大きくなったとしても抵抗の値を変えれば供給熱量も増えるため、問題はない。

2.4 新冷却デュワーの設計

2.4.1 三次元 CAD SolidWorks について

設計では主に三次元 CAD SolidWorks を使用した。これは windows で動作する 3 次元設計ソフトウェアであり、三次元に視覚化して設計を行え、制作したものをコンピュータ内で組み合わせることもできる作業効率が非常に高いものである。現在、ミスミといった大手の部品メーカーや製品メーカーで自社の製品の三次元データをこのソフトで使用出来るデータとして公開しており、ダウンロードすれば既製品の部品は自身で作ることなく、そのまま使用出来る。またこの SolidWorks では材料指定、材料を基にした質量計算、製作したものを簡単に設計図としてデータ化することも可能でかなり利便性がよいものである。図（2.17）は SolidWorks のスナップショットである。

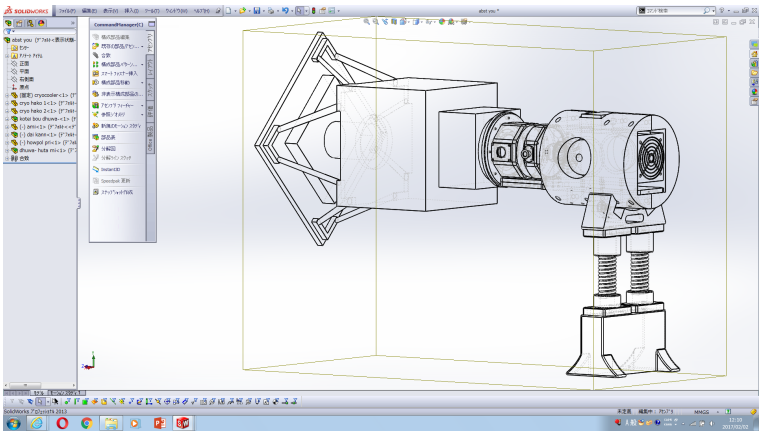

図 2.17: SolidWorks

2.4.2 デュワー本体

新冷凍機のヘッド部分が短くなったこと、接続の規格がフランジに変わったことに対応して従来使用していたデュワーの一部を再設計した。

まずデュワーと冷凍器を接続するデュワーの蓋の部分にフランジを導入した。フランジの規格は DN50 と呼ばれるもので、冷凍機のフランジと、クランプを使用することで固定する。またフタとデュワーが接続する部分には真空度を維持するための O-ring を挿入する必要があり、その部分にはその規格にあった溝を作っている。

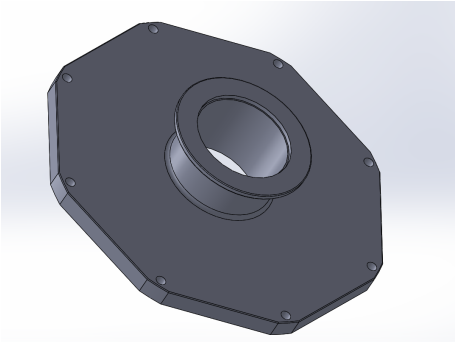

図 2.18: デュワー蓋

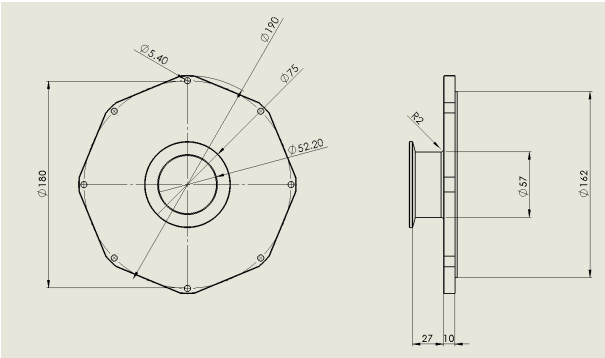

図 2.19: デュワー蓋寸法図

デュワー本体は、図 2.19 のように加熱抵抗や CCD の信号を読み取るための電気配線とデュワー外部の電源からの配線とをつなぐ接続部がついたデュワー 1、先ほど紹介した蓋が付けられ、真空引きを行う機器と接続されるフランジのついたデュワー 2、それら 2 つがボルトによって固定され冷却デュワーとして使用している。今回の設計では、冷凍機のヘッドが短くなったこと、ナスミス台に支持機構を設置する場所に限りがあることに対し、デュワー 2 を小型化した。デュワー 1 も再設計することで、より課題に適した冷却デュワーとなるがデュワー 1 の方には CCD がついたマザーボードが固定されており、この高価で繊細な CCD を取り外し、再び設置することは手間のかかる作業なため、今回は現在使用しているものをそのまま使用することとした。

まずデュワー 2 の設計では従来のデザインの寸法を変更した。図 2.21 のようにフランジが固定される部分の寸法は以前のままで、それ以外の二箇所の長さを 25mm づつ変え、計 50mm 短くした。またデュワーの内面にメートル規格の M3 のネジ穴を 8 箇所作成した。これは内部機構に設置される温度計の電気配線を固定する際に使用する。

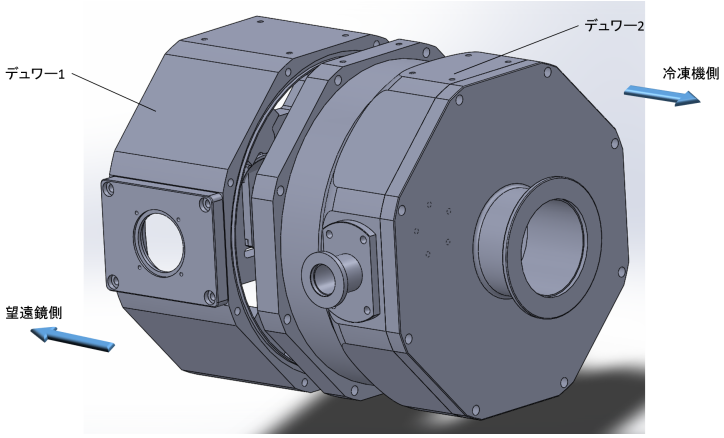

図 2.20: デュワー外観図

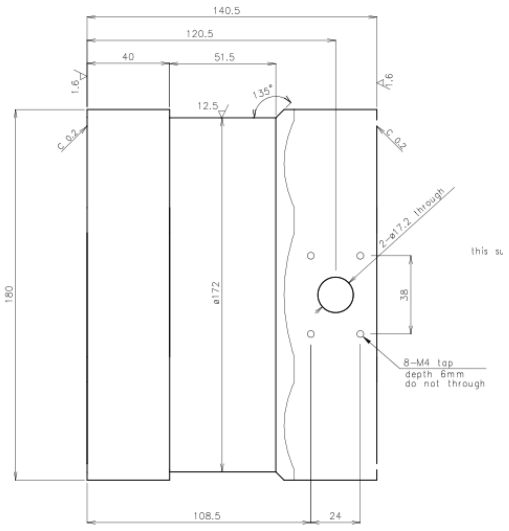

図 2.21: 設計前デュワー

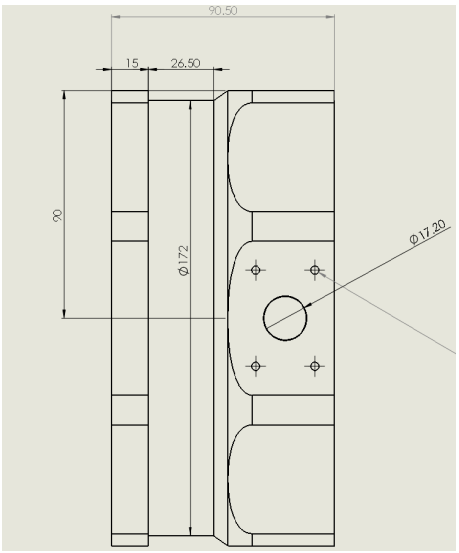

図 2.22: 再設計デュワー

2.4.3 コールドパス

冷却器のヘッドが短くなった課題に対し、デュワーを小型化しただけではまだ不十分である。そのためヘッド部分に熱伝導率の良い延長機構を導入し、この課題を解決する。現在、ヘッドの長さ、接続機構の違いから 119mm 従来器と比べ、短くなっており、デュワーの寸法を 50mm 変更したので, 延長機構には 69mm の長さが必要である。またこの図 1.10 の冷却機構部とマザーボード間の固定を安定させるため 2mm、以前のものより長くする必要があり、この機構に必要な寸法は 71.0mm である。

まず延長部品には熱伝導率の良い無酸素銅 C1020 を使用した。延長機構は 2 つの部品から構成される。まず一つ目は冷凍機のヘッドと接続される部品である。この部品は中心にインチネジの 1/4 サイズのキャップ穴を開け、両間を固定する。そして外側に円に沿うようにメートル規格の M3 サイズのタップ穴が 5 つ開けられている。この M3 サイズのネジ穴は延長機構のもう一方の部品と固定するために使用されるネジ穴である。

もうひとつの部品（図 2.23）は一方を図 2.22 の部品ともう一方を図 1.10 の吸着円盤部と固定するために、それぞれにメートル規格の M3 サイズのキャップ穴、タップ穴が開けられている。この両部品の寸法は合計で 71mm となるように設計を行い、冷凍機のヘッドの課題を完了した。

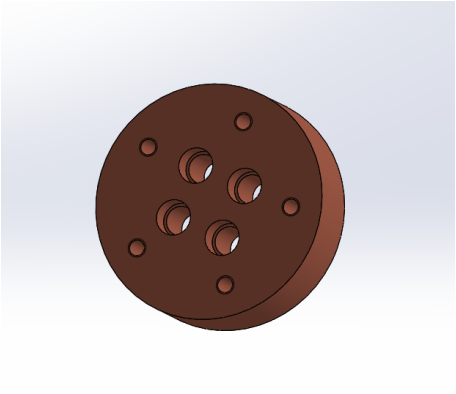

図 2.23: 延長機構部品 1

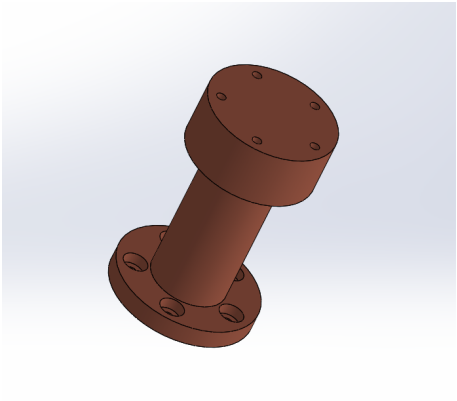

図 2.24: 延長機構部品 2

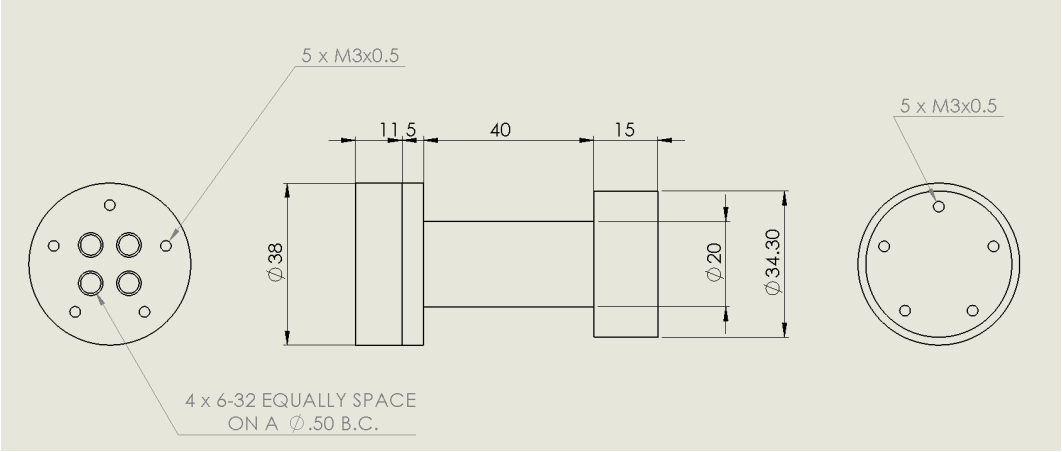

図 2.25: 延長機構寸法図

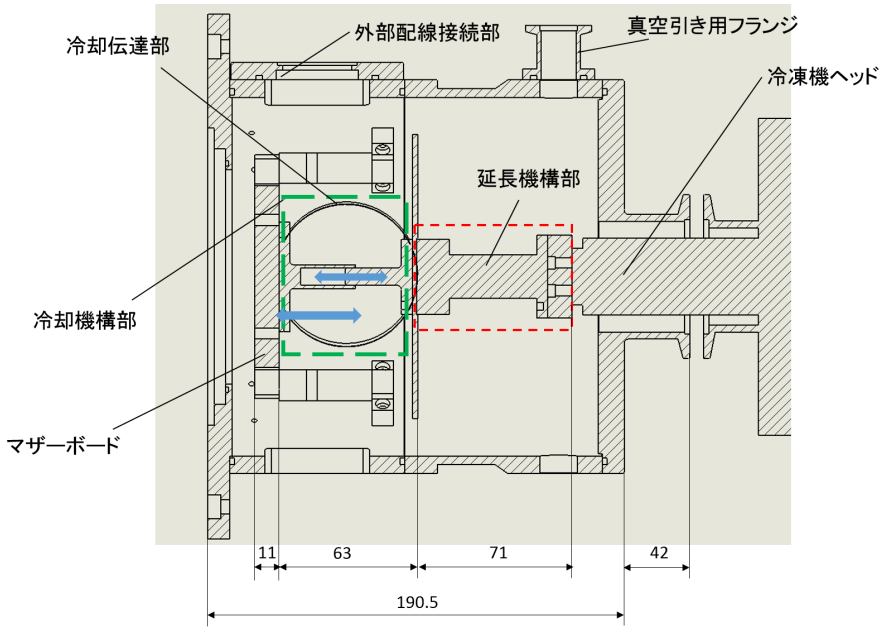

図 2.26: 再設計後のデュワー内部寸法図

冷却機構部は図中の矢印部分で駆動する機構になっている。その部分は適切なはめ合わせで、マザーボードに対して押し付ける形で固定されている。今設計で従来より 2mm 長くしたのはこの固定をより安定させるためである。

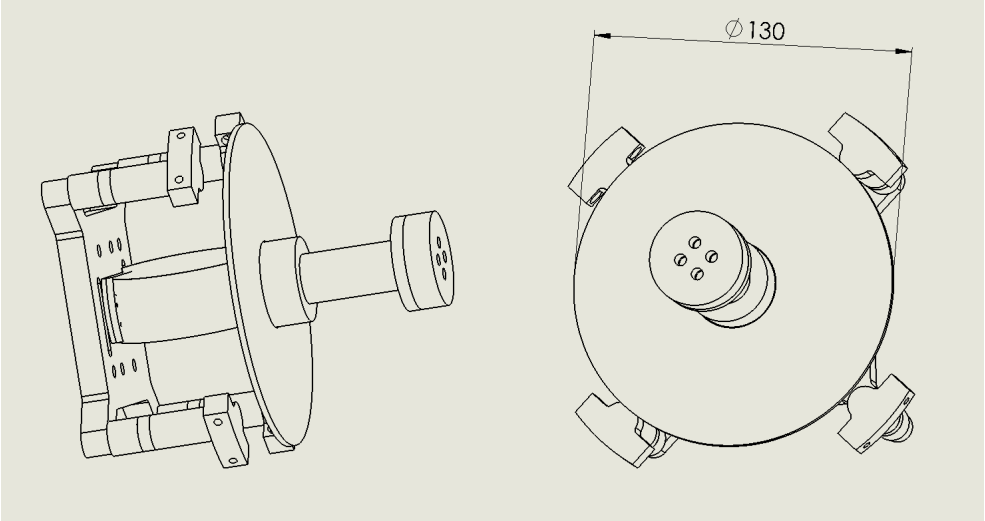

図 2.27: 冷却機構外観図

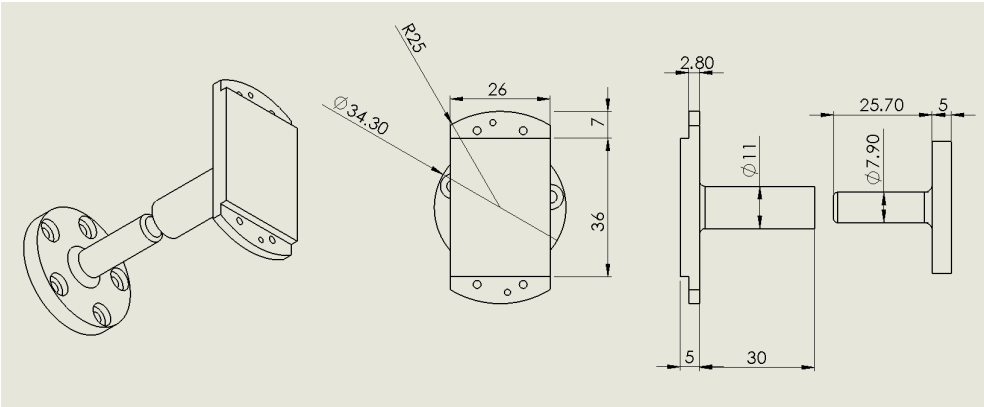

図 2.28: 固定機構寸法図

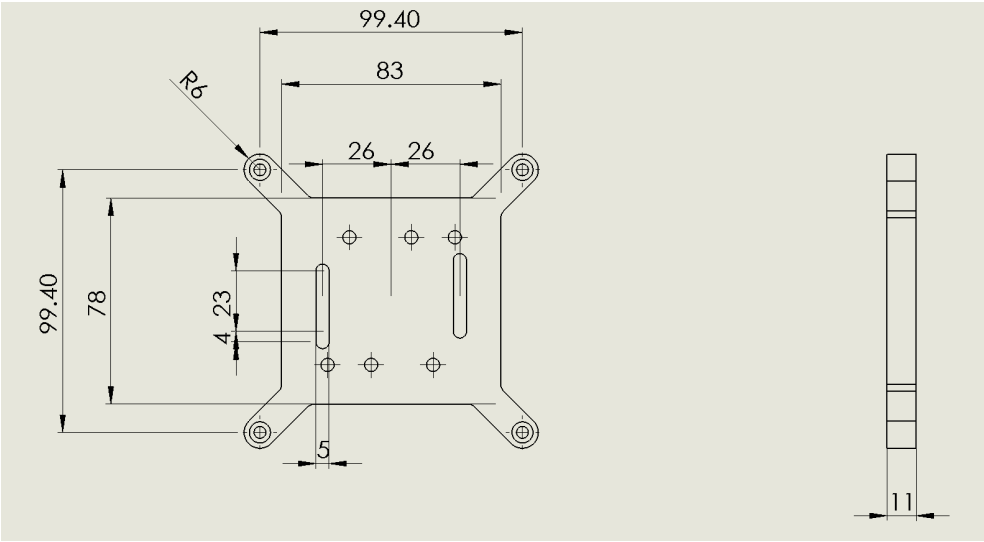

図 2.29: マザーボード寸法図

2.5　冷却器支持台

冷凍器による荷重の増加により冷却デュワーを固定するステージの耐荷重を大幅に超えてしまう。そこで、冷却デュワーへの導入にはそれを支える支持機構の設計が必要である。支持機構製作には、観測装置の回転による高さ変位に対応した駆動機構と変位に伴うデュワーと冷凍器間のズレによる真空シールの破壊を防止するための位置固定機構を取り入れる必要がある。

今研究では 2 つの駆動支持機構を設計した。それぞれ駆動支持機構 1、駆動支持機構 2 とし、その支持機構にはそれぞれに適した部品や機構を設計した。後述する、これらの部品や機構の番号は駆動支持機構の番号に対応したものとなっている。

2.5.1　真空シールのための位置関係固定機構の設計

クランプのみで固定されたデュワーと冷凍器は回転による高さ変位でその位置関係が変化する可能性が考えられる。この位置関係の変化は真空となったデュワー内部の真空シールの破壊を引き起こし、CCD の冷却を妨げるだけでなく、結露により CCD を破壊する危険性も高い。そのためデュワーと冷凍器にアームを固定し、距離関係を決定する。

図 2.30、図 2.32、に 2 種の駆動支持機構それぞれに適した位置関係決定機構のアームの外観図を示す。このアームは 2.4.2 のデュワー 1、2 それぞれに開けられたネジ穴と、冷凍機に取り付けられたスペーサーのネジ穴を使用し、固定する。この機構のネジ穴の位置関係は図 2.26 のようにコールドパスを接続した時のデュワーと冷凍器の位置関係で、アームを導入することで常にこれを保つことが出来る。

このアームは後述する 2 種類の駆動支持機構それぞれに適したものを設計した。

図 2.34 の高さ関係調整用版は、デュワーのネジ穴と冷凍機のスペンサーとの高さの差を補償するもので、これをデュワーとアームの間に取り付けることで冷凍機との固定を可能にした。またこの調整機構はアームとの接触面積を増やし摩擦によって両者の固定を強固にするためこのような形とした。この高さ関係調整用は両方の支持機構に同じ物を使用する。

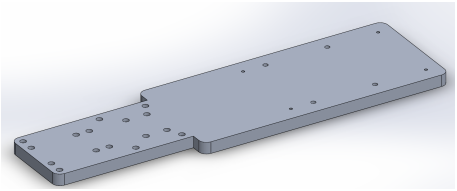

図 2.30: 位置固定アーム 1 外観図

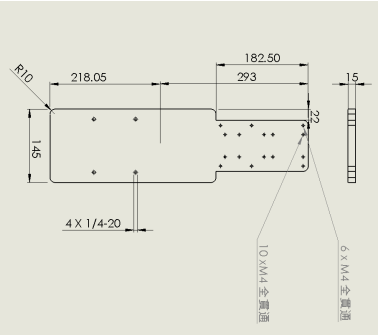

図 2.31: 位置固定アーム 1 寸法図

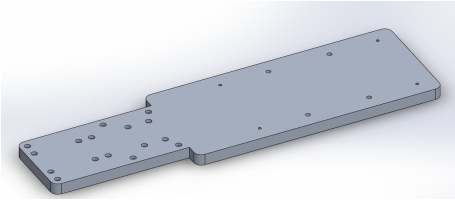

図 2.32: 位置固定アーム 2 外観図

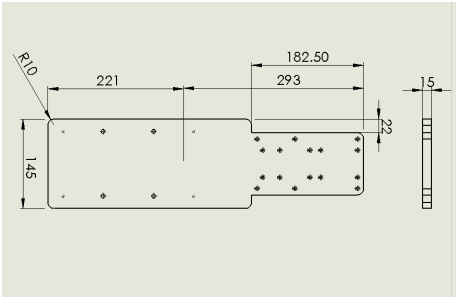

図 2.33: 位置固定アーム 2 寸法図

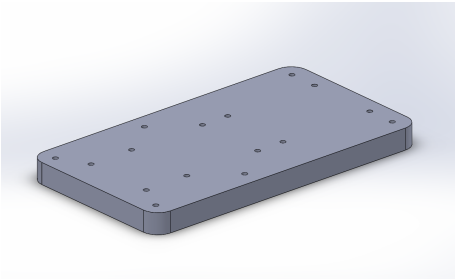

図 2.34: 高さ調整プレート

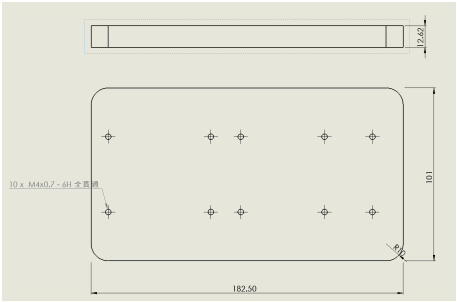

図 2.35: 高さ調整プレート寸法図

2.5.2 高さ変位に対応した駆動支持機構の設計

・回転による影響を考慮した部品の導入　冷凍機をデュワーと固定すると装置ローテータの回転に伴い、冷凍器自身も回転をする。この冷凍器をナスミス台から支持するとき、冷凍器は図 2.9 のように直方体に近く構造物もあるため、その回転角により支持する面が常に変化し、支えることが困難である。そのため冷凍器を図 2.36、図 2.37 のように円筒に覆うことで常に同じ形の面を支持できるようにした。冷却器を円筒で覆う部品は、図のように 2 つの半周分の部品から成り、前設計項目での位置関係固定機構が冷却器についた状態で固定する。そのため、この部品の下部は位置関係固定機構とボルトで固定され、直接冷凍機には固定されていない。また上部はもう一方の円筒部品との固定に利用している。図 2.36、2.37 のようにこの円筒部品は後述する二種の駆動機構それぞれに適した形にし、それぞれの円筒の半径を 155mm とした。

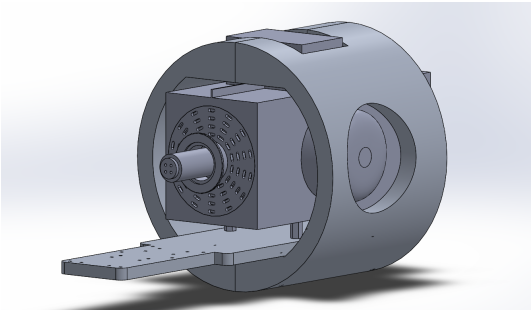

図 2.36: 円筒部品 1

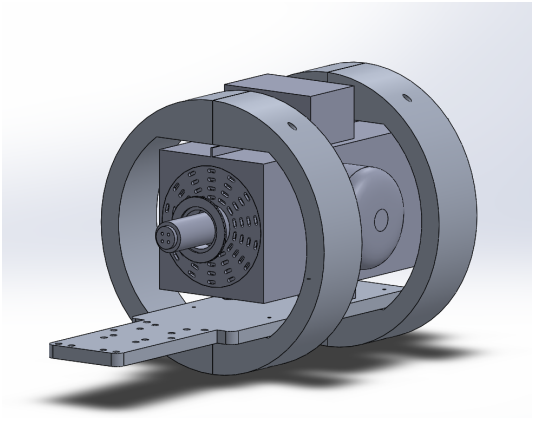

図 2.37: 円筒部品 2

次に考慮する項目として、回転による摩擦である。運動している物体に触れている物の面には常に摩擦が発生し、その運動を妨げている。この支持機構には金属を使用するためこの摩擦による影響は特に大きく、観測装置の様々な箇所で負荷を与え、装置の故障の原因となる可能性もある。そのため支持機構と冷凍機が接する箇所にはこの摩擦を最大限抑えた機構としてカムフォロワと呼ばれる回転機構を取り入れた。カムフォロワは回転物体の回転方向に自身も回転することで、この物体との摩擦を抑え、支持することが出来る。導入するカムフォロワは大手の部品メーカーのミスミで販売しているものを使用し、図 2.38 のように円筒となった冷凍器の曲率に合わせて形造られた支持台に設置して円筒の冷却器を支えるようにした。支持台は後述する駆動支持機構に合わせ、2 種類のものを設計した。

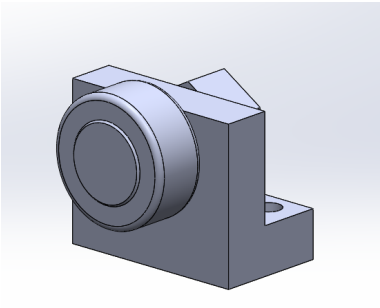

図 2.38: カムフォロワ外観図

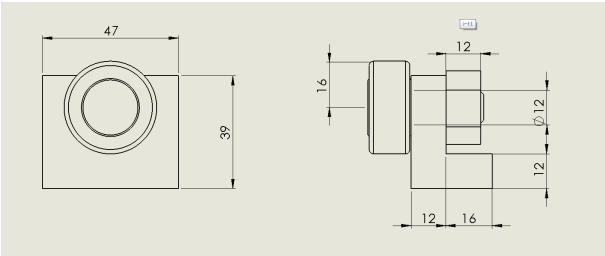

図 2.39: カムフォロワ寸法図

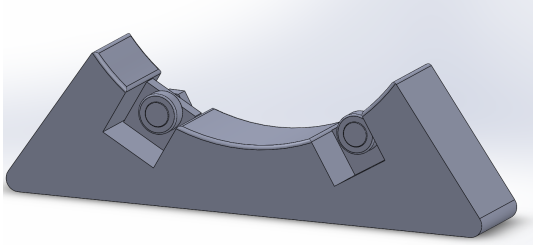

図 2.40: 支持台 1 外観図

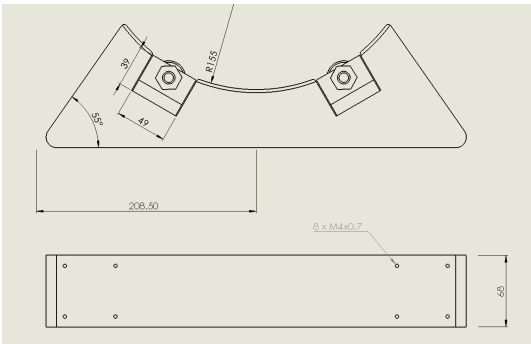

図 2.41: 支持台 1 寸法図

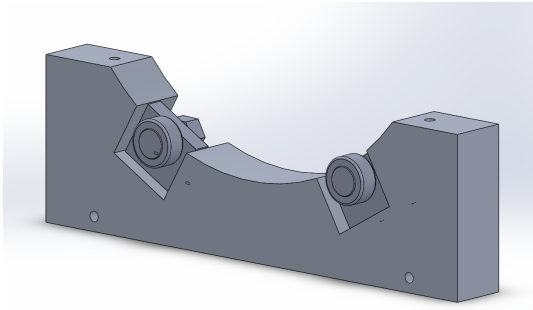

図 2.42: 支持台 2 外観図

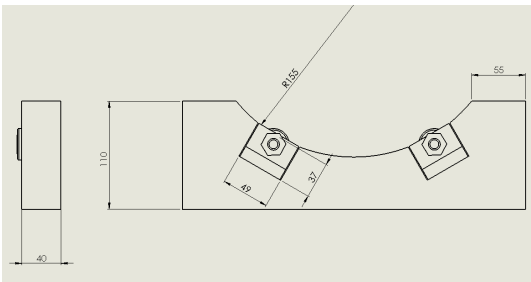

図 2.43: 支持台 2 寸法図

・支持機構案 1: 圧縮ばねを使用した駆動支持機構

まず、一つ目に圧縮ばねを使用した駆動機構を設計した。圧縮ばねとは一般的によく使用されるばねで、

ばねに対する圧縮荷重よって自然長から変位した長さ分に比例した力を発生させるもので、駆動部に度々使用される。今回の設計では回転による高さの変位に対し、圧縮ばねを使うことで支持機構自身が変位と同じだけ高さが変化し、冷凍器の荷重を常に支えられるようにした。

冷凍機の荷重を補償するばねのばね定数は HOWPol の回転による高さの変位 $\pm 9mm$ の範囲での応力変位が $\pm 3kg \times 9.81m/s^2(N)$ 程度であるものを使用する。これはデュワーを支える焦点調節用ステージの耐荷重 10kg を考慮したものである。支持機構には圧縮ばねを 2 つ使用するため、この条件に適したばね定数は $1.47N/mm$ 程度である。またこのばね定数で冷凍器、円筒部品 1、支持台の総重量、約 34kg をばねが支えることとなるためこの重量を支えるには自然長からの 110mm 以上変位するバネが必要であるが、この大きさのバネは量販されていないため、自ら設計を行い、特注する。

条件を満たすばねは、ばね定数 1.71N/mm、外径 54.9mm、材料系 3.9mm、横弾性係数 78500N/mm^2、自由高さ 186.6mm、密着高さ 45.6mm、ピッチ 12mm、有効巻き数 10 回のものを使用する。この圧縮ばねは自由高さが高いため、座屈と呼ばれるバネが外側に曲がる現象を考慮した駆動機構の設計が要求される。

駆動支持機構には図 2.44 のような円筒のばね設置機構にばねと図 2.45 の支持支柱を組み込んだものを設

計した。図 2.46 のようにばねに対し支持支柱が冷凍機の荷重を与え支持するしくみとなっており、回転による高さの変位にも対応できる。設置機構内部の大きさをばねの外形程度することでばねが座屈することを防いでいる。またこの機構に開けられた 4 つの穴は支持支柱にあけられたネジ穴と同じ幅となっており、その穴にネジをはめ込み、支持支柱に固定することで、高さが変化する支持支柱が穴の大きさ以上の範囲に移動し、ばねのたわみが一定以上に戻らないようにしている。両端の蓋となる部分には内部のばねには支持機構に加わる冷凍機や支持台の荷重を補償できるほどの応力が発生しているため、M5 サイズのネジをそれぞれ８つずつ使用した。

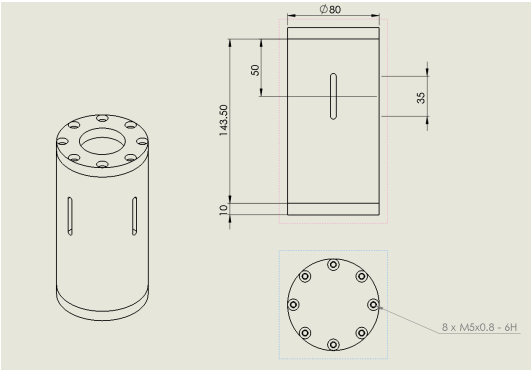

図 2.44: ばね設置台図

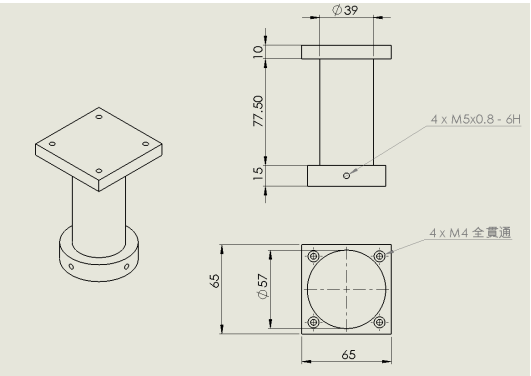

図 2.45: 支持支柱

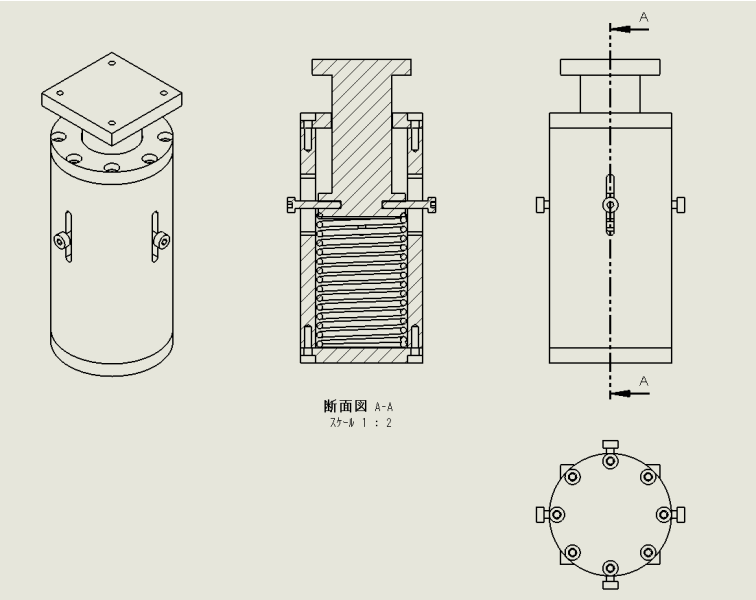

図 2.46: 駆動機構断面図、外観図

次に冷凍機をナスミス台から適した高さから支持するため、支持機構の全体の高さを考慮した設計を

行った。この高さを適切なものとすることで、ばねによる応力が常に理想的なものし、安定して支えることが出来る。図 2.47 のように冷凍器のヘッド中心部分の高さは、670mm でこの中心から支持台までの距離は 227.6mm であった。つまり支持機構の高さは、497.4mm であれば良い。カムフォロワがついた回転支持台は 55mm、1 冷凍機の回転による高さの変位が 0 であるときに、その重さでばねが 100.5mm 縮むと考えると、飛び出た支柱部分は 35mm で、ばねを入れる設置台は 163.5mm である。そのため、243.9mm の高さを補完する機構を製作すれば良い。またこの補完機構には、ナスミス台の設置範囲限界を考慮する必要がある。現在の設置されている光軸方向の冷却デュワーの端からナスミス台の端までの距離は最大で 370mm で、これに冷凍機の大きさを加味した大きさの支持台を置く必要がある。デュワーの寸法や冷凍器の支持箇所などにより、図 2.48 のように支持台中心部からナスミス台の端までは 82.4mm の範囲内に設置できるようにしなければならない。

この設計にはミスミ（株）で販売されている、1 辺が 40mm のアルミフレームを使用して、設計した。これは欲しい長さのものを注文でき、溝を使用することで任意の場所にナットを設置することができ、アルミフレーム用のブラケットやジョイントで簡単に組み立てることが出来る。このアルミフレームを使用し、図 2.47、図 2.48 のような設置台を設計した。これは高さ 230.9mm とし、駆動支持台を挟み込み、固定できるような形にした。固定部とは逆の部分をナスミス台のデュワー側に置くことで設置場所を確保し、かつこの支持台全体が傾く場合にはこの部分にウェイトを置けば安定して支持できる。また冷凍機を支持する中心部から設置台の端までの距離は 80mm となり、この圧縮ばねを使用した駆動支持機構が設置できる。この圧縮ばねを使った支持機構を使うことで高さの変位が生じる冷凍機を支持し、HOWPol への導入を可能とした。図 2.49 は HOWPol に設計した機構すべてを取り付けた場合の外観図である。

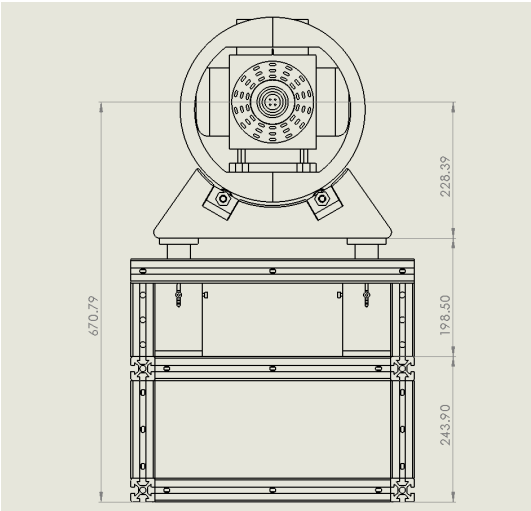

図 2.47: 高さ寸法図

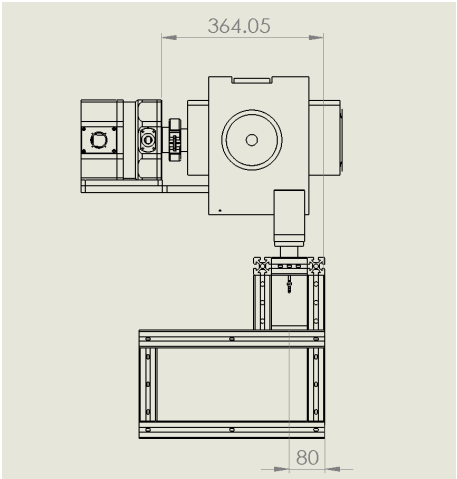

図 2.48: ナスミス台視線方向寸法図

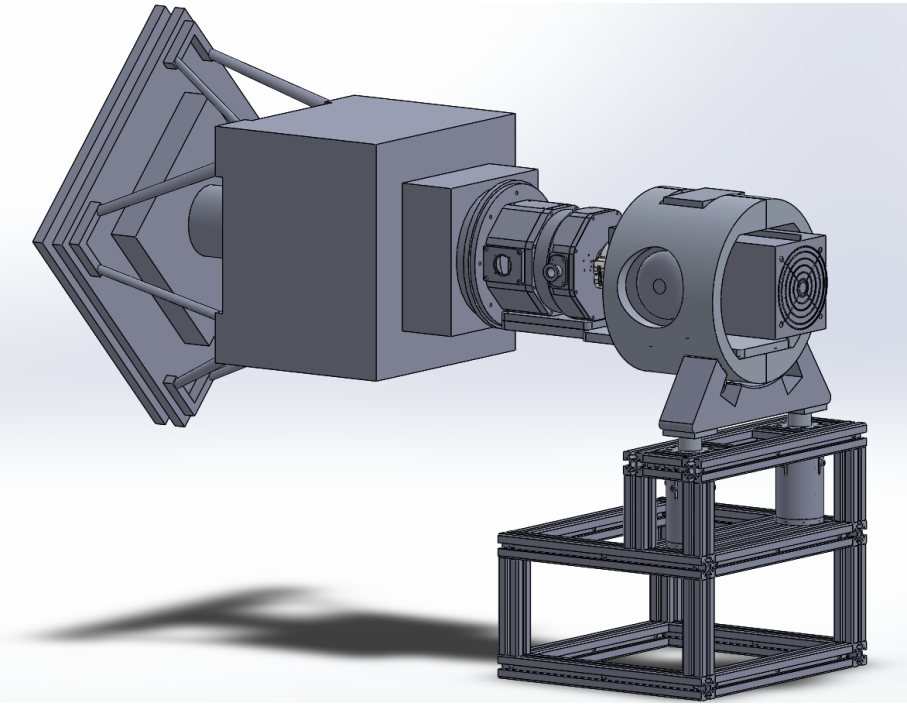

図 2.49: 圧縮駆動機構を用いた HOWPol 外観図

・支持機構案 2: 引っ張りバネと滑車を使用した駆動支持機構

回転の高さ変位を考慮した支持方法のもう一案として、引っ張りばねと滑車、およびワイヤーとカウンターウェイトを使用し、上から吊り下げる設計を行った。カムフォロワを設置した図 2.43 の支持台 2 と圧縮ばねを使用した支持機構で挙げたアルミフレームを使い、冷凍機の回転を考慮した支持機構を、滑車と引っ張りばねを使用することで図引っ張りバネと滑車を使用した駆動支持機構のような駆動支持機構を設計する。

この支持駆動機構は滑車を使用することで冷凍機の横側に設置し、上から支持するため、ナスミス台からの冷凍器までの高さ、端までの距離といった設置場所に関して、その大きさの制限が少ない。また高さの変位によって吊り下げる力が変化しないこともメリットである。

支持機構部は図 2.50 のように一部円筒状にした冷凍機を支持できる大きさとした。また、任意の位置にナットを設置できるアルミフレームの利点を使用し、上部のフレーム 4 箇所からワイヤーを伸ばし、冷凍機の前面の 2 本、後面の 2 本をそれぞれ 1 本として接続し、これら同士をつなぎあわせて一本としたものを上から支持することで重心位置で冷凍機を支持できるようにする。

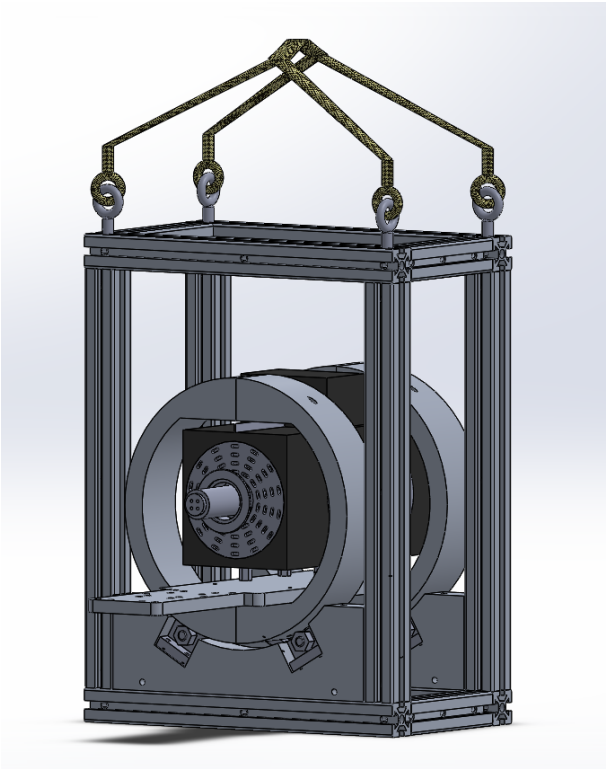

図 2.50: 支持機構部

駆動支持機構は図 2.51 のように冷凍機を上からワイヤーで吊るし、その一方の端を支持する質量程度のおもりを載せる機構と接続された引っ張りばねで支えている。この引っ張りばねは、圧縮ばねと同様に応力変位が $\pm 3kg \times 9.81m/s^2(N)$ 程度であればよいので、ばね定数は、3.0N/mm 程度のものを使用する。引っ張りばねは、このばね定数を満たすばねは多く販売されているが、この支持駆動機構で必要な荷重に耐え

ることができるものは無く、圧縮ばねと同様に設計し、製作を依頼する必要がある。許容荷重などを考慮して設計を行った結果、外径 50mm、材料径 5mm、ばね定数 2.97N/mm、巻き数 16.5 回、自由高さ 75.9mm のものを使用する。またこの引っ張りばねは両端をねじ込みフックにすることで、このばねが破損原因となるフック部の応力集中を考慮する必要がなく、耐久度の高いものとなっている。図 2.51 はまだ設計が完了しておらず、イメージ図である。今後滑車の規格やばねと冷凍器を吊り下げるためのおもりを載せる機構を開発していく。

図 2.51: 駆動支持機構部

第3章　まとめと今後の課題

本研究では、HOWPol の冷凍機の性能低下による CCD 冷却問題と今後、他の望遠鏡に導入する可能性に対してスターリング式の新冷凍機を冷却デュワーに導入することで解決することを目指し、それに伴う、荷重増加問題、装置ローテータの回転による高さの変位、冷凍器とデュワー間の固定問題、新冷凍器と従来機の相違問題といった課題を克服する設計を 3D CAD を用いて行った。新冷凍器と従来機の相違問題では、冷凍機のヘッドの長さが短くなったことや冷却性能が高いことに対してデュワーの内部の冷却機構とデュワーそのものを再設計することで新冷凍機でも冷却を可能にし、また内部の熱パスの計算を実際に行い、不可避となる熱流入が 3.9W あり、CCD 目標温度 173K での冷却が-18.1W と、使用している抵抗ヒーターの出力範囲内（0 − 20W）で行われ、目標温度を維持できることを確認した。荷重増加問題と装置ローテータの回転による高さの変位に対しては、それぞれの支持法に適したばねを使用した駆動支持機構を設計することでどの高さでも冷凍機の荷重程度の支持を行え、かつナスミス台に設置できる大きさとした。

今後の予定としては、滑車と引っ張りばねを用いた支持機構の設計を完成させ、圧縮ばねを用いた支持機構とどちらが設置に適し、費用や耐久性などの面で優れているか選定する。選定後、本研究で行った設計の最終確認を行い、それが終わり次第業者に製作を依頼する。部品の納品後は新冷却デュワーと支持駆動機構の組立を行い、デュワー内部で真空引きの際に真空漏れが発生せず、冷却が行われるか確かめる。その後、CCD 冷却の評価を行い HOWPol へ実装する。

謝辞

本装置の開発にあたり、ご指導して下さった川端先生をはじめとする広島大学宇宙科学センターの皆様に感謝いたします。また日常の議論を通じて、かなた望遠鏡の知識を多く頂いた中岡様、森様、支持駆動機構の設計の際にアドバイスをくださった、西村製作所の関様に感謝いたします。日常の研究の指導から締め切りギリギリまでの添削をしてくださった川端先生には大変お世話になりました。これからの研究ではそのようなことが内容日々計画的に行動していきます。

参考文献

[1] Koji S. Kawabata ; Osamu Nagae ; Shingo Chiyonobu ; Hiroyuki Tanaka ; Hidehiko Nakaya, et al. 2008 Proc. SPIE,7014

[2] 秋田谷　洋　「線スペクトル偏光分光装置 CCD dewar 真空冷却実験報告（1）」（2000）

[3] 千代延　真吾　「かなた望遠鏡用 1 露出型偏光撮像装置 HOWPol の筐体及び駆動機構の開発」（広島大学　修士論文　2007）

[4] 浜松ホトニクス株式会社、及び国立天文台、2008, private communication

[5] 小西克享　伝熱工学講義ノート（第 8 版）http://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/Lecture/HeatTransfer/HeatTransfer

[6] 広島大学宇宙科学センター　施設・装置紹介　https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/institution

[7] 高速分光装置　http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/ nogami/HSspec/index.html

[8] 先本清志　「可視赤外線同時カメラ HONIR の開発」http://www.naoj.org/Projects/newdev/instws201202/proc/0222_0

[9] 可視近赤外線同時カメラ HONIR　http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/honir/index-j.html

[10] Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter HOWPol http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/howpol/

[11] 東洋バネ工業　バネ技術工業　http://www.tokaibane.com/tech/index.html

[12] バネの総合メーカー　フセハツ工業株式会社　ばね材料の弾性係数

[13] INFICON 社　センターリングステンレス 303　http://products.inficon.com/ja-jp/nav-products/Product/Detail/Centering-Ring-Stainless-Steel-303?path=Products%2Fpg-VacuumComponents

[14] 「ミスミ　カタログ 2016」(ミスミ　2016)

[15] Brooks 社　PCC　コンパクトクーラー　PCC データシート

[16] QDRIVE 社製　2s102K Cryocooler Data sheet http://files.chartindustries.com/2S102K-H%209.pdf

[17] 吉田　道利　広島大学かなた望遠鏡の観測装置開発　http://www.naoj.org/Projects/newdev/instws201202/proc/0222_

[18] 国立天文台　「理科年表　平成 28 年」（丸善出版　2016）