

# 近赤外3色同時サーベイ用カメラ SIRIUSの開発

名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻  
光・赤外線天文学研究室 (Z研)

長嶋 千恵

1999年2月1日

## abstract

近赤外の3波長(1.2, 1.6, 2.2 $\mu\text{m}$ )で同視野を同時に観測できる広視野カメラ「SIRIUS」で、南天サーベイ観測の計画を進めている。観測には専用の南アフリカ1.4m光学赤外線望遠鏡を使用する。

近赤外域のサーベイとしては、DENISや2MASSという全天サーベイ計画がすでに実施されている。しかし、SIRIUSがめざしているのは、全天ソースのカタログの作成ではなく、マゼラン星雲、銀河中心、分子雲・星形成領域など“興味深い領域に絞った、細かく深いサーベイ”である。画素スケールは0.45"/pixelで、Ksバンドが17等以上(15分積分)の深さで、サーベイを行う。これは、DENISや2MASSのサーベイより約5倍細かく、約2等深い。

私はこの装置の真空系、冷却系と光学系の設計・製作を担当している。現在までに以下のことを行った。

- ・ 真空容器の力学的な構造解析を行い、その結果をもとに軽くて丈夫な真空容器を製作した。
- ・ 24時間以内に装置の冷却が完了するように、熱設計を行った。光学系以外の部品の冷却試験で、これが達成できていることを確かめた。
- ・ 3つの波長域の視野全面で星像が $\sim 1''$ (=南アフリカ天文台でのシーイングサイズ)以内に収まる光学系を設計した。

今後は、1999年秋までにSIRIUS本体を完成させ、国内外でのテスト観測を経て2000年春には南ア1.4m望遠鏡でのサーベイ観測を開始する予定である。



# 目次

1	序論	1
2	装置の概要	2
2.1	おもな仕様	2
2.1.1	検出器	4
2.1.2	光学系	4
2.1.3	真空冷却系	5
3	光学系	6
3.1	各部の説明	7
3.1.1	Offner 式反射リレー光学系	7
3.1.2	F 変換レンズ	7
3.1.3	ダイクロイックミラー	9
3.2	SIRIUS 光学系の全体としての性能	9
3.2.1	スポットダイアグラム	9
3.2.2	透過率	10
3.3	限界等級の概算	10
4	真空容器	13
4.1	真空容器に必要な強度	13
4.2	真空容器側壁の強度計算	14
4.2.1	はりの強度計算式	14
4.2.2	強度計算の結果	15
4.3	ふたの強度計算	17
4.4	実測値との比較	18
5	装置の冷却	19
5.1	冷却目標温度の決定	19
5.1.1	OH 夜光によるバックグラウンド光子	19
5.1.2	大気の熱輻射によるバックグラウンド光子	20
5.1.3	望遠鏡の熱輻射によるバックグラウンド光子	21
5.1.4	装置の熱輻射によるバックグラウンド光子	22

5.1.5	冷却温度の決定	23
5.2	熱流入量の見積もり	23
5.2.1	入射窓からの熱流入量	24
5.2.2	真空容器内壁からの熱流入量	24
5.2.3	断熱支持板からの熱流入量	25
5.3	冷凍機	27
5.3.1	使用する冷凍機の選定	27
5.3.2	冷凍機の冷却能力	28
5.4	冷却時間と到達温度	28
5.4.1	冷却による温度推移の計算モデル	28
5.4.2	温度推移の計算結果	31
5.4.3	冷却実験の結果との比較	33
<b>6</b>	<b>今後に向けて</b>	<b>35</b>
6.1	開発スケジュール	35
6.2	観測計画	35
<b>7</b>	<b>謝辞</b>	<b>37</b>
<b>A</b>	<b>SIRIUS 光学系データ</b>	<b>38</b>
<b>B</b>	<b>リッチークレチアン式望遠鏡専用 F 変換レンズ</b>	<b>39</b>
<b>C</b>	<b>設計図面</b>	<b>41</b>

# 目 次

2.1	SIRIUS 構成図	3
3.1	SIRIUS 光学系配置図	6
3.2	Offner 系の構成	7
3.3	F 変換レンズなし	8
3.4	F 変換レンズ通過後	8
3.5	SIRIUS のスポットダイアグラム	9
3.6	限界等級 ( J-Band )	11
3.7	限界等級 ( H-Band )	12
3.8	限界等級 ( Ks-Band )	12
4.1	SIRIUS 真空容器側壁	14
4.2	大気圧を受ける様子	14
4.3	等分布荷重を受ける、両端固定支持のはり	14
4.4	真空容器側壁 ( 横 ) の強度計算の結果	16
4.5	真空容器側壁 ( 前 ) の強度計算の結果	16
4.6	SIRIUS 真空容器のふた	18
5.1	バックグラウンド光子数 ( Ks-Band )	23
5.2	Cold-Box 支持方法 ( 上から見た図 )	25
5.3	Cold-Box 支持方法 ( 横から見た図 )	25
5.4	SIRIUS における熱の流れ	27
5.5	2 段式冷凍機による冷却	28
5.6	RD204 の冷却能力特性 ( 60Hz )	29
5.7	RD204 の 1 段目ヘッドの冷却能力 ( 60Hz )	29
5.8	冷却の様子の計算モデル	30
5.9	予想冷却曲線 ( ケース 1 : アルミの放射率 0.08、光学系なし )	32
5.10	予想冷却曲線 ( ケース 2 : アルミの放射率 0.02、光学系なし )	32
5.11	予想冷却曲線 ( ケース 3 : アルミの放射率 0.02、光学系あり )	33
5.12	冷却試験の結果	34
5.13	予想冷却曲線と冷却実験の比較 ( A 点 )	34

6.1	銀河系の球状星団の個数密度	36
6.2	球状星団の分布(銀河座標)	36
A.1	SIRIUS 光学系のパラメーター	38
A.2	F 変換レンズのパラメーター	38
B.1	F 変換レンズのパラメーター	39
B.2	F 変換レンズなし	40
B.3	F 変換レンズ通過後	40
B.4	スポットダイアグラム	40
C.1	SIRIUS 全体図(上から見た図)	42
C.2	SIRIUS 全体図(横から見た図)	43
C.3	Cold-Box 断熱支持具(前方)の構造	44
C.4	Cold-Box 断熱支持具(後方)の構造	45
C.5	ColdBox 横壁の構造	46
C.6	検出器カセット取付部の構造	47
C.7	検出器冷却口の構造	48
C.8	Offner 系全体図	49
C.9	Offner 主鏡セルの構造	50
C.10	Offner 副鏡セルの構造	51
C.11	冷凍機取付部の構造	52
C.12	真空容器(上から見た図)	53
C.13	真空容器(横から見た図)	54
C.14	真空容器(前から見た図)	55
C.15	真空容器(後ろから見た図)	56

# 表 目 次

1.1	近赤外サーベイの比較 . . . . .	1
2.1	SIRIUS のおもな仕様 . . . . .	2
2.2	HAWAII アレイのスペック . . . . .	4
3.1	F 値による画素スケールの変化 . . . . .	8
3.2	SIRIUS 光学系の効率 . . . . .	10
3.3	各バンドの波長域と 0 等星からの光子数 . . . . .	11
4.1	使用した金属材料の種類と諸性質 . . . . .	14
4.2	$a/b=1.5$ のときの $\alpha$ 、 $\beta$ の値 . . . . .	17
4.3	たわみ量の計算値と実測値 . . . . .	18
5.1	OH 夜光の明るさ . . . . .	20
5.2	OH 夜光によるバックグラウンド光子の数 . . . . .	20
5.3	大気の放射率 . . . . .	20
5.4	大気の熱輻射によるバックグラウンド光子の数 . . . . .	21
5.5	望遠鏡の熱輻射計算で仮定した値 . . . . .	21
5.6	望遠鏡の熱輻射によるバックグラウンド光子の数 . . . . .	21
5.7	Cold-Box の熱輻射によるバックグラウンド光子の数 . . . . .	22
5.8	入射窓からの熱流入量計算の条件 . . . . .	24
5.9	真空容器内壁からの熱流入量計算の条件 . . . . .	25
5.10	支持板からの熱流入量の計算の条件 . . . . .	26
5.11	Cold-Box に流入する熱量 . . . . .	27
5.12	熱伝導の計算に使った値 . . . . .	31
5.13	比熱と熱伝導率 . . . . .	31

# 1 序論

赤外線は、可視光に比べてダストによる吸収を受けにくいので、銀河中心方向や星形成領域などダストの多いところに埋もれている天体を観測することができる。また赤外線では、可視光を出さない低温の天体を検出することもできる。

だが赤外線の検出器は可視のものに比べて高価であり、2次元化も遅れていたため、今までは広い領域を高解像度で観測することは難しかった。

しかし近年、技術が大幅に進歩し、近赤外の大フォーマット2次元検出器が比較的簡単に手に入るようになってきた。そこで私たちは近赤外の3波長で同視野を同時に撮影できる広視野カメラ

SIRIUS(Simultaneous-color InfraRed Imager for Unbiased Survey)

を開発し、専用の望遠鏡で南天高解像度サーベイ観測を行う計画を開始した。

近赤外3色同時サーベイとしては、

- ・ DENIS(Deep Near-Infrared Southern Sky Survey)
- ・ 2MASS(Two Micron All Sky Survey)

という2つの大規模(全天レベル)な計画がすでに始まっている。これに対し SIRIUS では、対象を“興味深い領域”に絞ることで、より細かく深いサーベイを行いたいと考えている。

	DENIS			2MASS			SIRIUS		
観測波長 [ $\mu\text{m}$ ]	0.8	1.25	2.15	1.25	1.65	2.16	1.25	1.65	2.15
(バンド名)	I	J	Ks	J	H	Ks	J	H	Ks
画素数(1辺)	1024	256	256	256	256	256	1024	1024	1024
画素スケール	0.7"	3"	3"	2"			0.45"		
視野	12'			8.5'			7.8'		
積分時間	1.22sec $\times$ 9			1.3sec $\times$ 6			total 15min		
限界等級 ( $5\sigma$ )	18.0	16.1	13.5	16.5	15.8	15.0	20.6	19.4	19.1
望遠鏡	ESO 1m			Mt.Hopkins 1.3m CTIO 1.3m			南アフリカ 1.4m		
観測対象領域	赤緯+2°以南の全天			全天			興味深い領域のみ		
観測開始時期	1995.12			1997.4			2000.3		

表 1.1: 近赤外サーベイの比較

本論文ではこの SIRIUS の概要とサーベイ計画を紹介し、とくに光学系・機械系の開発について詳しく述べる。



## 2 装置の概要

### 2.1 おもな仕様

SIRIUS は、近赤外の 3 波長 ( 1.2, 1.6, 2.2 $\mu\text{m}$  ) で同視野を同時に観測できる広視野カメラである。南アフリカ 1.4m 光学赤外線望遠鏡 ( 以下南ア 1.4m 望遠鏡と表現 ) に取り付けて、南天の高解像度サーベイ観測を行う。

SIRIUS は次の 2 点を重視して設計された。

1. 高解像度サーベイ用に最適化  
大フォーマットアレイと専用南ア 1.4m 望遠鏡との組み合わせで、シーイングリミットの高解像度サーベイを効率よく行える装置をめざす。
2. 優れた可搬性  
シンプルな光学系を採用し、装置の小型化をはかる。さらに、真空低温下に駆動部分がほとんどない機構にし、輸送時の振動に耐えられるようにする。

SIRIUS のおもな仕様と構成を表 2.1、図 2.1 に示す。なお、画素スケール・視野などは専用南ア 1.4m 望遠鏡に取り付けたときの値である。

画素スケール	0".45
画素数	1024 × 1024
視野	7'.8
観測波長 (バンド名)	1.2、1.6、2.2 $\mu\text{m}$ ( J、H、Ks )
本体重量	~ 100 kg
大きさ	~ 800 × 450 × 300 mm <sup>3</sup>
駆動部分	コールドシャッターのみ

表 2.1: SIRIUS のおもな仕様

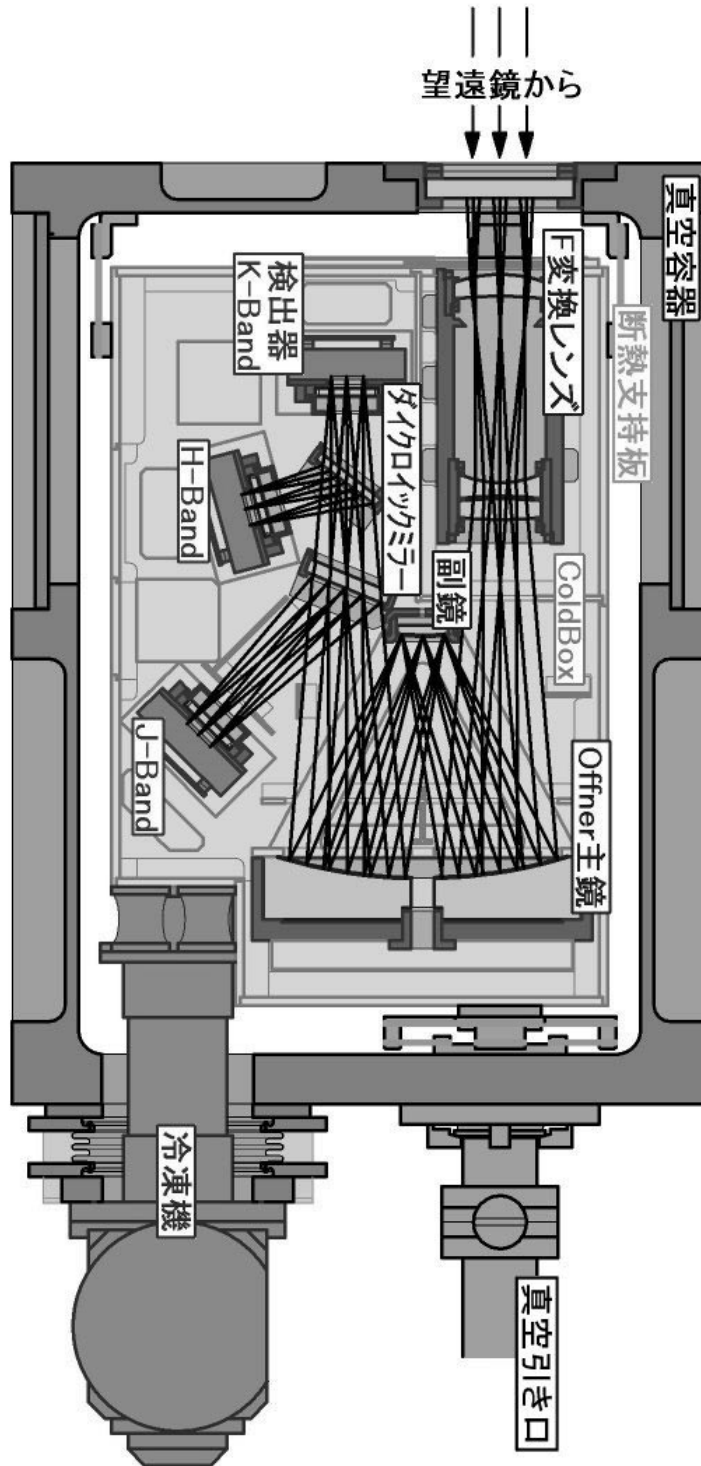


図 2.1: SIRIUS 構成図

### 2.1.1 検出器

SIRIUSでは、Rockwell社の近赤外  $1024 \times 1024$  画素検出器 HAWAII を 3 台使用する。この検出器は、現在手に入れることができる近赤外検出器の中でも最大クラスのものである。これを 3 台同時に使用することで、3 バンドでのサーベイを効率よく行うことができる。

検出素子	HgCdTe
画素数	$1024 \times 1024$
画素サイズ	$18.5 \mu\text{m} \times 18.5 \mu\text{m}$
量子効率	$1.25 \mu\text{m}$ (J-band) 39% $1.65 \mu\text{m}$ (H-band) 57% $2.15 \mu\text{m}$ (K-band) 51%
有感波長域	$0.85 \sim 2.5 \mu\text{m}$
読み出しノイズ	$< 15 e^-$
暗電流	$< 0.8 e^-/\text{s}$
最適動作温度	$\sim 60 \text{ K}$

表 2.2: HAWAII アレイのスペック

### 2.1.2 光学系

SIRIUS の光学系は、“Offner 式反射リレー光学系”を基本としたシンプルな構造である。Offner 系の凸面鏡を “Cold-Stop” として利用し、検出器から常温部分が見えないようにしている。また、Offner 系の直前に F 変換レンズを挿入し、光線の F 値を  $10 \rightarrow 6$  に変換している。これにより画素スケールはシーイングサイズの半分 ( $\sim 0''.5$ ) となる。これは測光精度を上げ、かつ広視野を確保するために、もっとも都合の良い値である。

SIRIUS を南ア 1.4m 望遠鏡に取り付けたとき、3 つの波長域の視野全面で星像は  $\sim 1''$  (= 南アフリカ天文台でのシーイングサイズ) 以内に収まる。また、SIRIUS の光学系は南ア 1.4m 望遠鏡用に最適化されているが、F 変換レンズを取り替えることで、他の望遠鏡に取り付けることも可能となる。

光学系については、第 3 章でさらに詳しく述べる。

### 2.1.3 真空冷却系

SIRIUSのような近赤外の観測装置では、装置自身の熱輻射がバックグラウンド光子として検出器に入射し、その量が無視できない。また近赤外域の検出器は一般に、冷却すると暗電流が少なくなる。バックグラウンド光子と検出器の暗電流を減らすために、SIRIUSでは、光学系全体と検出器を冷却している。

冷却部分は真空容器の中に入れて断熱する。SIRIUSでは、光学系へのアクセスのしやすさや装置の小型化を重視して、直方体の真空容器を採用した。力学的な構造解析を行い、必要な強度を満たしてなおかつ軽い真空容器を製作した。

真空容器の強度計算については、第4章で詳しく述べる。

SIRIUSの光学系全体と検出器は、真空容器内の“Cold-Box”の中に配置されている。真空容器の壁(常温)からの熱流入量を少なくするために、Cold-Boxは熱伝導率の小さいガラスエポキシの薄板で支持されている。

SIRIUSでは冷却に2段式の冷凍機を使用している。1段目でCold-Box全体を冷却し、より低温まで冷却できる2段目で検出器を冷却している。冷却温度は

- ・ Cold-Box 全体：～100K
- ・ 検出器：～60K

である。冷却に要する時間は24時間程度を目標としている。

SIRIUSの熱設計については、第5章で詳しく述べる。

### 3 光学系

SIRIUSの光学系には、以下のことが要求される。

1. 近赤外の観測装置なので、検出器が常温部分を見ないように、冷却部分の中に“ヒトミ ( cold stop ) ” を作ること
2. 測光精度を上げ、かつ広視野を確保するため、専用南アフリカ 1.4m 望遠鏡に取り付けたときの画素スケールは、シーイングサイズ ( ~ 1" ) の約半分とすること
3. 視野全般にわたって、シーイングサイズ以下の像を結ぶこと
4. 可搬性を持たせるため、できるかぎり小型で、輸送時の振動による微小変動にも強い光学系にすること

今回、“Offner 式反射リレー光学系” を利用することで、これらの要求を満たす光学系を設計できた。配置を図 3.1 に示す。

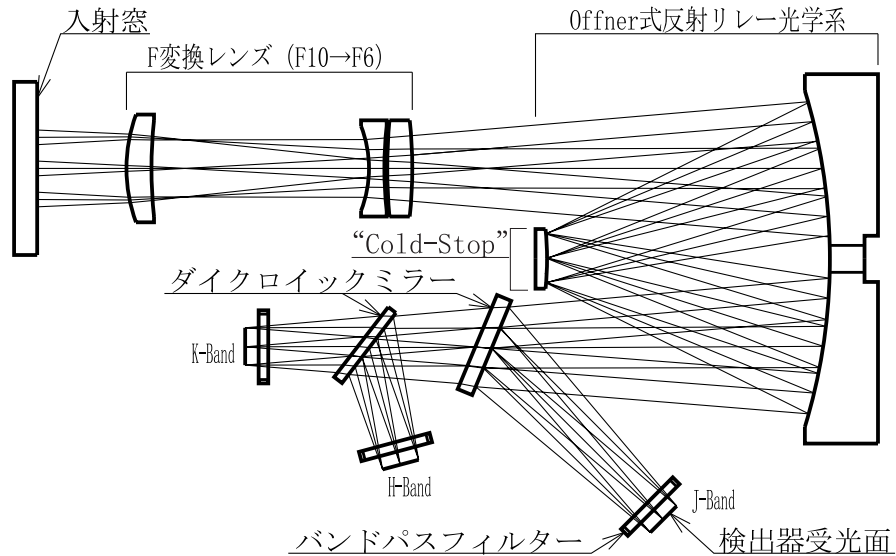


図 3.1: SIRIUS 光学系配置図

この章では、まず SIRIUS 光学系の各要素についての説明を行い、そのあと光学系の全体としての性能について述べる。そして最後に、限界等級の計算を行う。

## 3.1 各部の説明

### 3.1.1 Offner 式反射リレー光学系

SIRIUS 光学系の大きな特徴は、Offner 式反射リレー光学系（以下“Offner 系”と表記）を利用していることである。

Offner 系は、2 枚の同心の球面鏡で構成されている。図 3.2 の A から出た光は、凹面鏡、凸面鏡、凹面鏡、の順に反射され、A' に等倍の像を結ぶ。

凸面鏡の位置が Offner 系の“絞リ”になっている。図の A のところに望遠鏡の焦点面を持ってくると、凸面鏡の位置は望遠鏡の絞リ（赤外線望遠鏡の場合は副鏡）の像、つまり“ヒトミ”になる。Offner 系全体を冷却し、“ヒトミ”の位置で、光束を副鏡の像の大きさ以下に絞ると、図の A' のところにある検出器には副鏡から出た光しか届かない。つまり、常温部分からの熱放射が検出器に入射するのを防ぐことができる。このように“ヒトミ”を冷却して熱輻射の遮断に利用する方法は、赤外の観測装置に特徴的なものであり、この場合の“ヒトミ”のことを“Cold-Stop”と呼ぶ。

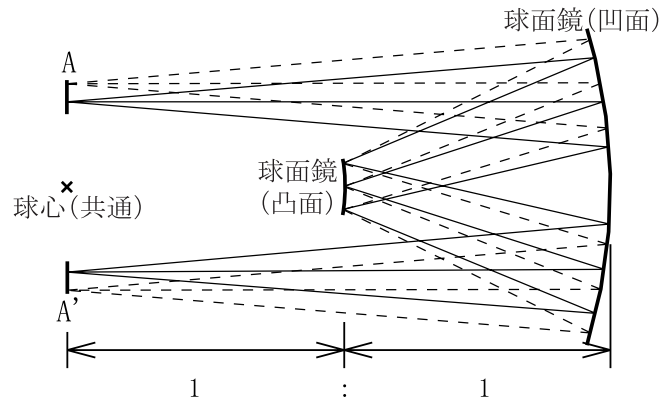


図 3.2: Offner 系の構成

Offner 系は、対称形であるためコマ収差などが打ち消されており、非常に収差が少ない光学系である。また、鏡はともに球面鏡なので放物面鏡などに比べて製作が容易であり、同軸光学系なので光学調整も比較的簡単である。さらに、鏡の位置が多少ずれても像の悪化が少ないので、運搬時の振動にも強い、可搬性に優れた光学系であると言える。

### 3.1.2 F 変換レンズ

表 3.1 より、SIRIUS を南ア 1.4m 望遠鏡 (F10) に取り付けたときに画素スケールをシーイングサイズの約半分 ( $\sim 0''.5$ ) にするためには、最終 F 値を 6 程度する

必要がある。

最終 F 値	F10	F6
画素スケール	0".27	0".45
視野	4'.7	7'.8

表 3.1: F 値による画素スケールの変化

Offner 系だけでは、F 値を変えることができない。そこで、望遠鏡と Offner の間に、F を 10 から 6 に変換するレンズ系 ( F 変換レンズ ) を挿入する。

また、SIRIUS が使う南ア 1.4m 望遠鏡はクラシカルカセグレン式なので、視野中心は良像だが、視野周辺には大きなコマ収差・非点収差が残っている。そこで、F 変換レンズには望遠鏡の収差を補正する役割も持たせる。

南ア 1.4m 望遠鏡のスポットダイアグラムと、F 変換レンズを通した直後 ( Offer 系に入射する前 ) のスポットダイアグラムを図 3.3、3.4 に示す。ただし実際には F 変換レンズから射出する光線は発散光線なので、図 3.4 は F 変換レンズによる“虚像”である。F 変換レンズにより、望遠鏡のコマ収差がよく補正されていることがわかる。

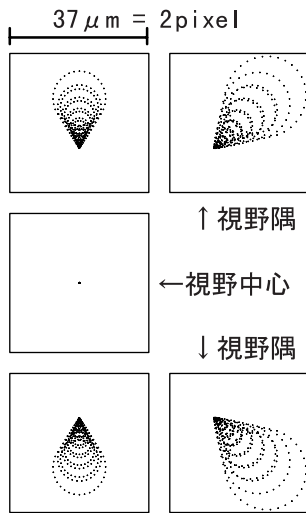


図 3.3: F 変換レンズなし

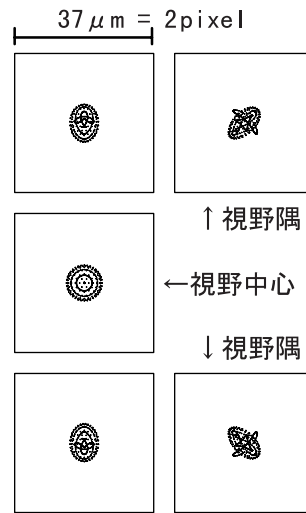


図 3.4: F 変換レンズ通過後

ところで、SIRIUS は主に南ア 1.4m 望遠鏡で使用する予定であるが、場合によっては他の望遠鏡に取り付けることもあり得る。南ア 1.4m 望遠鏡はクラシカルカセグレン式であるが、大口径の望遠鏡には、リッチークレチアン式のものが多い。リッチークレチアン式の場合、コマ収差はほとんどないが、像面湾曲という収差が残っている。リッチークレチアン式の望遠鏡に取り付ける場合には、像面湾曲を補正する機能を持った F 変換レンズに取り替える必要がある。

### 3.1.3 ダイクロイックミラー

SIRIUS は、ダイクロイックミラーで波長分割を行う。SIRIUS の光学系には平行光線部分が存在しないので、ダイクロイックミラーは集光光線中に挿入することになる。

集光光線中の平行平面ガラスは、非点収差を発生させる。ガラスに対する角度が光線によって違うので、光線ごとに光学的距離が違う値になってしまうからである。この非点収差は、2つの平面を平行からわずかにずらす (Wedge をつける) ことで、打ち消すことができる。

SIRIUS のダイクロイックミラーも、非点収差を減らすために Wedge をつけている。

## 3.2 SIRIUS 光学系の全体としての性能

### 3.2.1 スポットダイアグラム

SIRIUS を専用南ア 1.4m に取り付けたときのスポットダイアグラムは図 3.5 のようになる。像の大きさは、3つの Band の視野全面にわたって、南アフリカ天文台のシーイング ( $\sim 1'' \cong 2\text{pixel}$ ) 以内に収まっている。

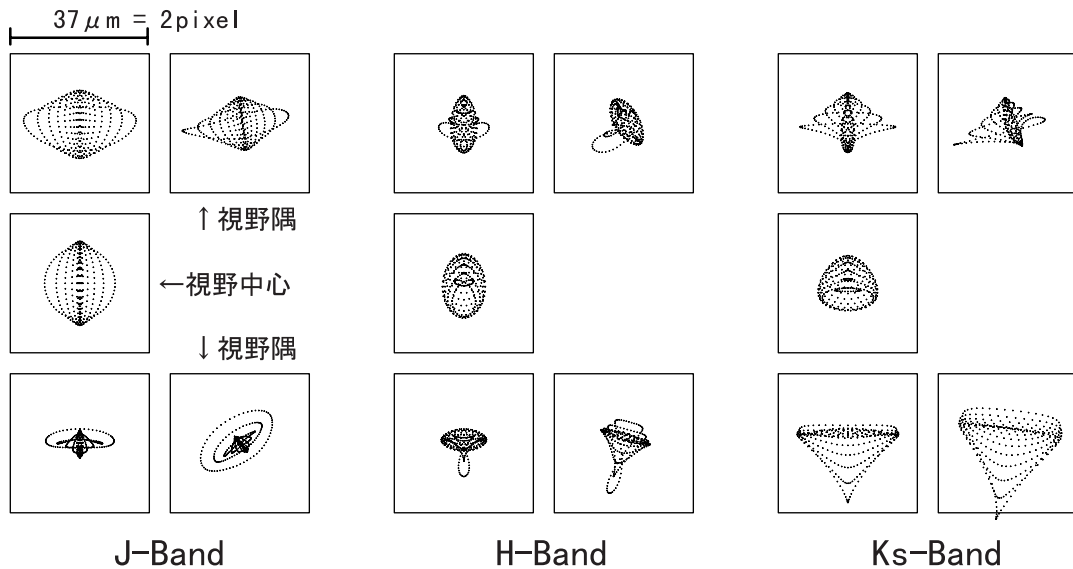


図 3.5: SIRIUS のスポットダイアグラム



### 3.2.2 透過率

ここでは SIRIUS の光学系の透過率を計算する。

SIRIUS で使用する光学素子の透過面には、反射防止コートを施す。通常、反射防止コートは、波長を限定すれば 99%以上の透過も可能だが、SIRIUS はカバーする波長範囲が広いので、全波長域にわたって高性能な反射防止コートを施すのは難しい。最悪の場合を考え、1 面あたり 97%として計算する。

反射面にはアルミメッキを施す。反射率は ~ 95%として計算した。

ダイクロイックミラーは反射側 >90%、透過側 >85%として計算した。フィルターの透過率には、メーカーの実測値を使用した。

以上をまとめると、表 3.2 のようになる。

	J-Band	H-Band	Ks-Band
望遠鏡 ( 反射 × 2 )	~ 90%	~ 90%	~ 90%
入射窓 ( 透過 × 2 )	> 94%	> 94%	> 94%
F 変換レンズ ( 透過 × 6 )	> 83%	> 83%	> 83%
Offner ( 反射 × 3 )	~ 86%	~ 86%	~ 86%
ダイクロイックミラー 1	> 90%	> 85%	> 85%
ダイクロイックミラー 2	—	> 90%	> 85%
バンドパスフィルター	85%	84%	92%
SIRIUS のみ	≥ 51%	≥ 43%	≥ 45%
望遠鏡 + SIRIUS	≥ 46%	≥ 39%	≥ 40%

表 3.2: SIRIUS 光学系の効率

### 3.3 限界等級の概算

ここでは、観測の S/N を表す式から、南ア 1.4m 望遠鏡に SIRIUS を取り付けたときの限界等級の概算を行う。

観測の S/N は、次の式であらわせる。( 文献 [3] )

$$S/N = \frac{I_S t}{\sqrt{N_R^2 + (I_S + I_{BG} + I_{DC})t}} \quad (3.1)$$

$I_S$  : 信号の強さ [e/s]

$t$  : 積分時間 [s]

$N_R$  : 検出器のリードノイズ [e]

$I_{BG}$  : バックグラウンドノイズ [e/s]

$I_{DC}$  : 検出器の暗電流 [e/s]

ここで、 $I_{BG}$ はOH夜光、大気の熱輻射、望遠鏡の熱輻射の合計値である。SIRIUSで観測するときの $I_{BG}$ の値は、後の5.1で計算する。また、 $N_R$ 、 $I_{DC}$ の値は表2.2のとおり。これらを使って、式3.1で $S/N=5$ となる $I_{St}$ を求めると、図3.6~3.8の点線のようなになる。

これらのグラフに、10~22.5等星からの光を受けたときに検出器にたまる電荷の量を、細い実線で書き加える。なお、点光源の像は検出器上で4画素程度に広がるとし、バンドに関する値には表3.3を、光学系透過率には表3.2の値を、量子効率には表2.2の値を使用した。

	J-Band	H-Band	Ks-Band
中心波長 [ $\mu\text{m}$ ]	1.26	1.62	2.15
波長幅 [ $\mu\text{m}$ ]	0.31	0.28	0.35
0等星からの光子数 [photons/s · m <sup>2</sup> · $\mu\text{m}$ ]	$2.02 \times 10^{10}$	$9.56 \times 10^9$	$4.66 \times 10^9$

表 3.3: 各バンドの波長域と0等星からの光子数(文献[4])

図3.6~3.8のグラフで $S/N=5$ の線より上に来る等級の星が、 $S/N>5$ として受かることになる。具体的には、J-Bandにおいて、20等の光源は、積分時間が $10^2$ [s]では $S/N<5$ であるが、積分時間が $10^3$ [s]になると $S/N>5$ になる。このようにして、任意の積分時間における限界等級を読み取ることができる。

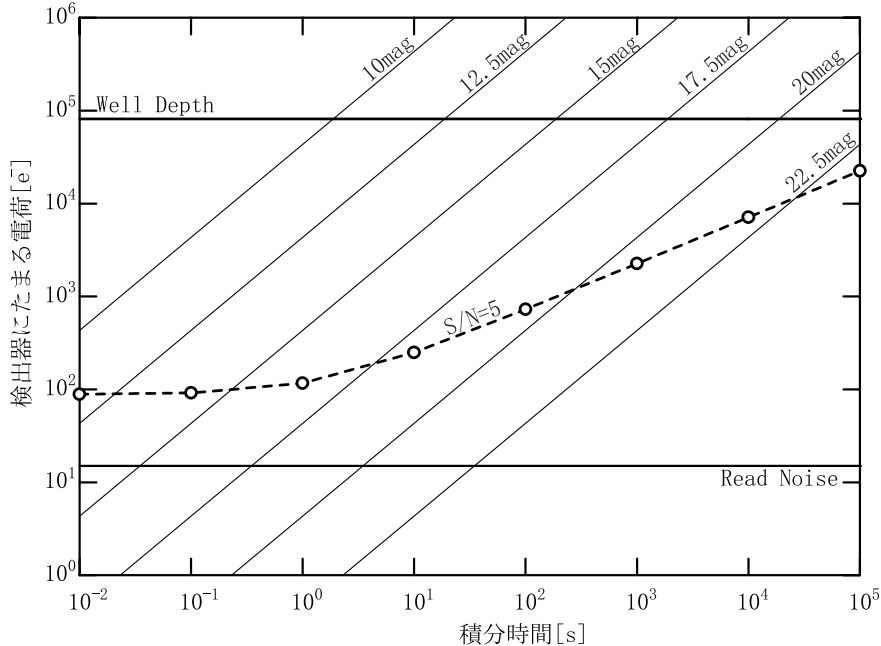


図 3.6: 限界等級 ( J-Band )

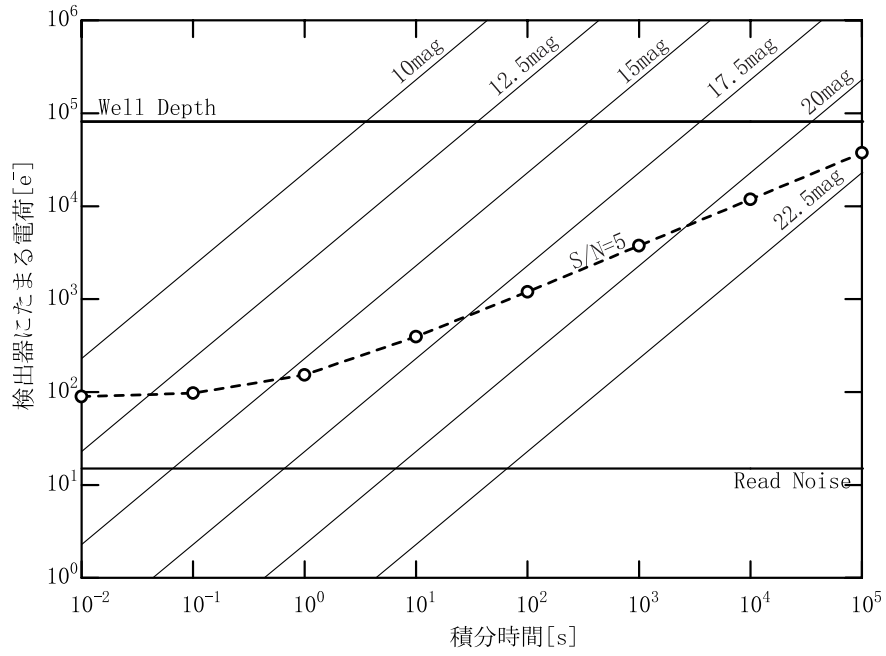


図 3.7: 限界等級 ( H-Band )

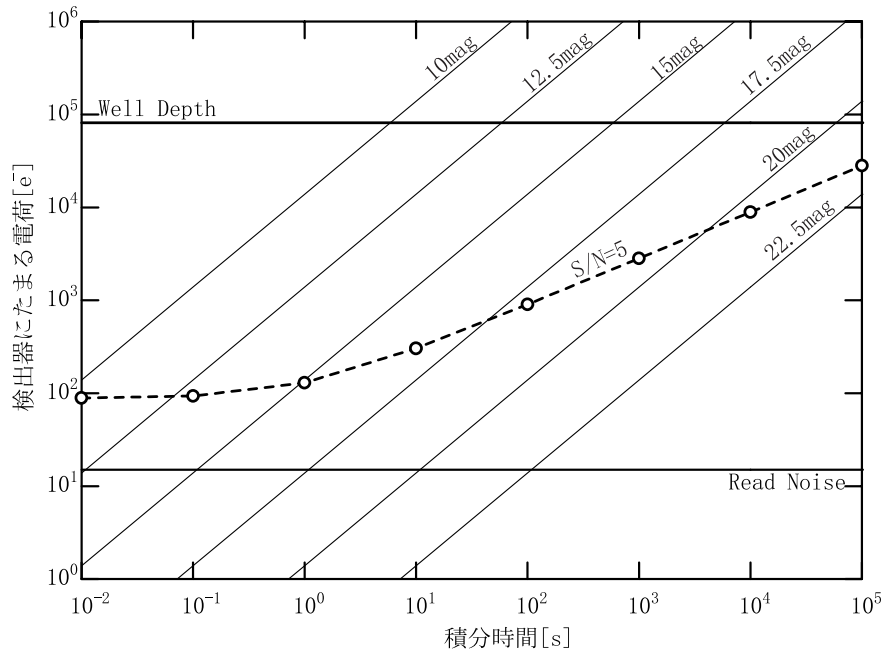


図 3.8: 限界等級 ( Ks-Band )

## 4 真空容器

SIRIUSの真空容器に求められるのは次のようなことである。

1. 中に入っている Cold-Box に、簡単にアクセスできること
2. 繰り返しの真空引きに耐えられるだけの強度があること
3. 可搬性を持たせるため、できるだけ軽くてコンパクトであること

1. の条件から、SIRIUSでは直方体の真空容器を採用した。しかし、直方体は円筒形などに比べて弱い構造であるため、必要な強度を持たせるために壁を厚くすると、全体が重くなってしまう。そこで側壁を、断面がコの字型になるように肉抜きし、構造解析を行って、必要な強度を満たした状態でできるだけ軽くなるように設計した。

この章では、真空容器の横壁・ふたが必要な強度を満たしていることを、構造解析の結果から示す。また構造解析からは、たわみ量も計算できるので、この章の最後で実際に真空を引いたときのたわみ量と計算値とを比較し、構造解析の計算の信頼性についても述べる

### 4.1 真空容器に必要な強度

一般に、金属に応力を加えると変形し、弾性変形の範囲内では、変形量は応力に比例する。この時の比例係数を縦弾性係数、あるいはヤング率と呼ぶ。

弾性変形の限界を超えると、金属は永久変形を起こす。この現象を降伏と呼び、このときの応力の大きさを降伏応力と呼ぶ。アルミニウムのように明確な降伏現象を示さない金属の場合は、降伏応力の代わりに、変形量が 0.2%になる応力の大きさ(0.2%耐力)を使う。

応力の最大値が降伏応力(または0.2%耐力)を超えないように設計すれば、金属の変形は弾性変形の範囲内に収まり、破断することはない。しかし荷重を繰り返し受ける場合は、金属に疲労がたまるので、通常より最大応力に余裕を持たせる必要がある。「繰り返し荷重」のかかる系では、最大応力が降伏応力(または0.2%耐力)の4~5分の1以下になるように設計するのが良いとされる(文献[6])

SIRIUSの真空容器は、真空中に排気することと常圧に戻すことを繰り返すので、「繰り返し荷重」がかかることになる。そこで、全面にわたって応力が0.2%耐力の1/4以下になるように設計した。

SIRIUS 真空容器の側壁・ふたに用いた材料の力学的諸性質は以下の通り。

	側壁	ふた
材質	KN500	A5052
0.2%耐力	$1.3 \times 10^8$ [Pa]	$0.7 \times 10^8$ [Pa]
縦弾性係数	$7.1 \times 10^{10}$ [Pa]	$7.1 \times 10^{10}$ [Pa]

表 4.1: 使用した金属材料の種類と諸性質

## 4.2 真空容器側壁の強度計算

### 4.2.1 はりの強度計算式

真空容器の側壁は、直方体のブロックから削り出した四角い枠であり、各辺がそれぞれ大気圧の荷重を受けている（図 4.2）。

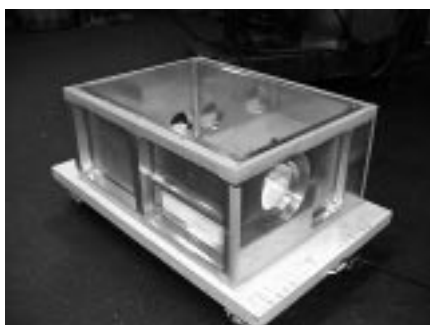


図 4.1: SIRIUS 真空容器側壁

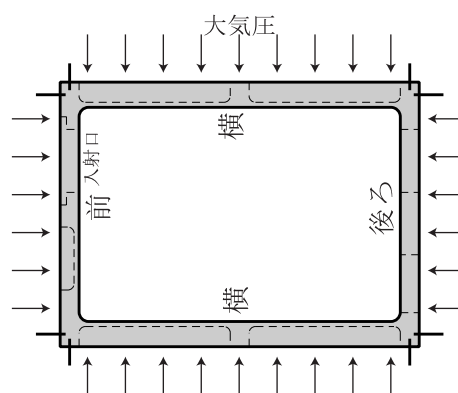


図 4.2: 大気圧を受ける様子

今回は簡単のため、隣の壁からうけるモーメントの影響は考慮に入れずに、側壁の4辺をそれぞれ“等分布荷重を受ける両端固定支持のはり”とみなして、計算することにする（図 4.3）。

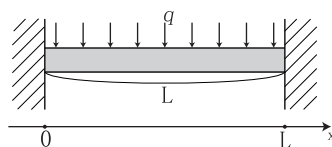


図 4.3: 等分布荷重を受ける、両端固定支持のはり

ここで、はりのたわみ量は次の微分方程式を解くことで得られる。

$$\frac{d^2 M(x)}{dx^2} = -q \quad (4.1)$$

$$\frac{d^2 \omega(x)}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI(x)} \quad (4.2)$$

- $q$  : 等分布荷重 [N/m]  
 $M(x)$  : 曲げモーメント [N・m]  
 $E$  : 縦弾性係数 [Pa]  
 $I(x)$  : 断面二次モーメント [m<sup>4</sup>]  
 $\omega(x)$  : たわみ量 [m]

また、はりの断面内での最大応力  $\sigma(x)$  [N・m] は、中立軸から断面の端までの距離を  $h_t$  とすると、

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{I(x)} h_t \quad (4.3)$$

と書ける。

はりの断面が一定、つまり  $I(x) = I$  であれば、式 4.1 ~ 4.3 は解析的に解けて、両端固定支持の場合、

$$\omega_{max} = \omega\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{qL^4}{384EI} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{max} = \sigma(0, L) = \frac{h_t qL^2}{I 12} \quad (4.5)$$

となる。応力ははりの両端で最大となり、その大きさははりの長さ  $L$  の 2 乗に比例する。

#### 4.2.2 強度計算の結果

SIRIUS 真空容器の側壁は、断面形状が一定ではないので、差分法を用いて式 4.1 ~ 4.3 を数値的に計算した。なお、真空容器の後ろ側の壁には肉抜き部分がなく、前の壁に比べて十分強いので、ここでは横・前の壁についてのみ計算した。また、肉抜き部分の角の丸みや、前の壁の入射口などは簡単のため省略した。計算結果を図 4.4、図 4.5 に示す。グラフより、真空容器側壁の全面にわたって、最大応力は 0.2%耐力の 1/4 以下を満たしていることがわかる。したがって 4.1 で述べたように、SIRIUS の真空容器は繰り返し荷重にも耐えられるだけの強度を持っている。

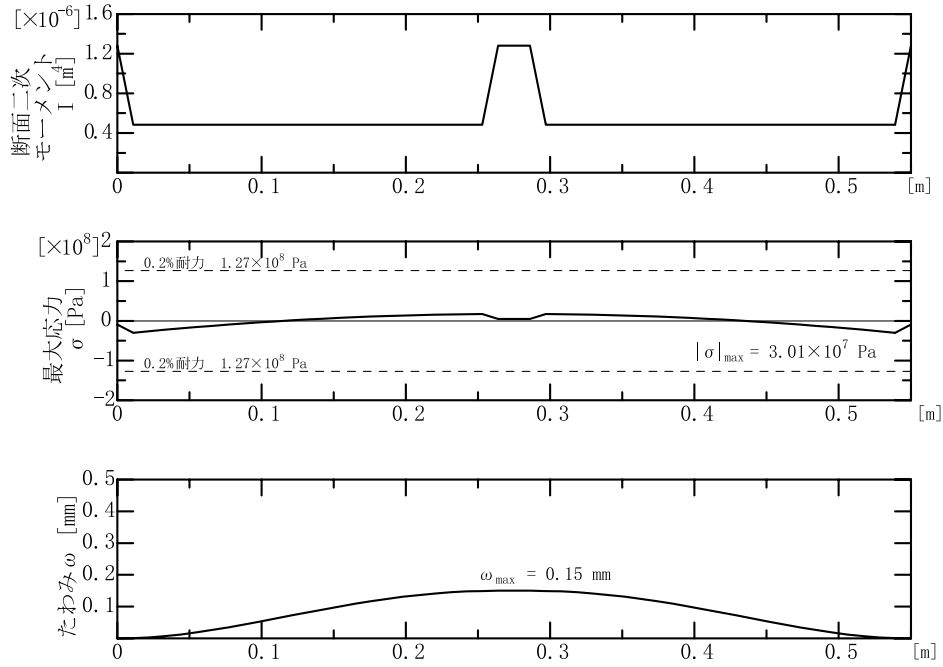


図 4.4: 真空容器側壁 (横) の強度計算の結果

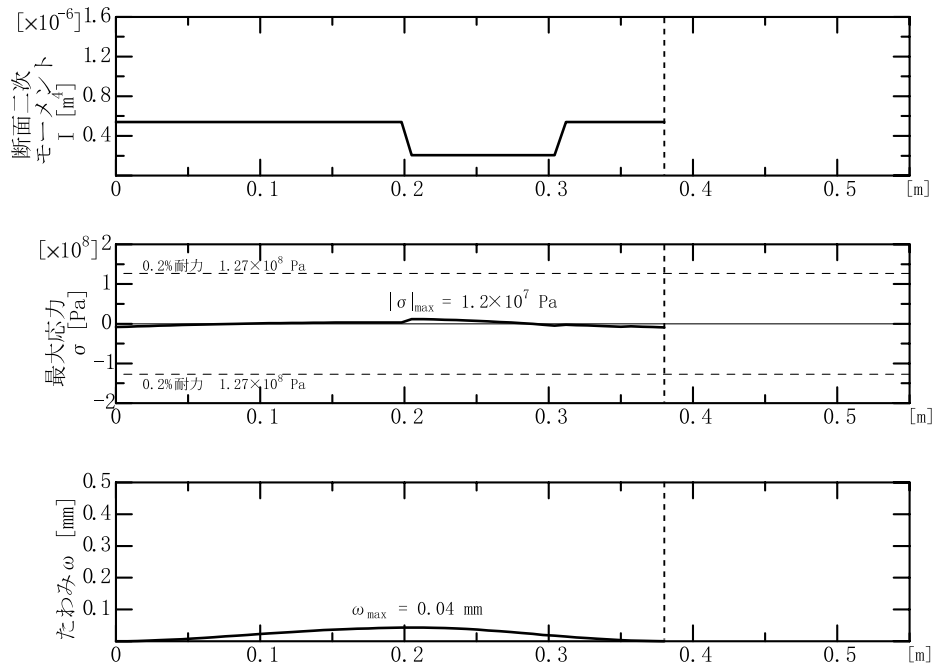


図 4.5: 真空容器側壁 (前) の強度計算の結果

なお、現在 Z 研で製作中の装置 TRISPEC の真空容器は SIRIUS と同様の直方体型であり、軽量化のための肉抜きも施されている。材料は SIRIUS と同じ KN500 で、側壁の 1 辺の長さは SIRIUS の約 2 倍、断面形状はほぼ同じである。そこで、強度計算の結果を比較してみると、TRISPEC の側壁にかかる最大応力は、KN500 の 0.2% 耐力と同程度の大きさになっている (文献 [7]) のに対し、SIRIUS の側壁にかかる最大応力は、KN500 の 0.2% 耐力の 1/4 以下である。このことは、式 4.5 で  $L$  の値を 2 倍すると  $\sigma_{max}$  が 4 倍になることに対応している。

### 4.3 ふたの強度計算

真空容器のふたは、4 辺を固定されて等分布荷重をうける長方形の板である。板が比較的薄く、たわみ量も小さい場合、荷重を受ける長方形板の最大たわみ量  $\omega_{max}$  と最大応力  $\sigma_{max}$  は、次の式で表せる。

$$\omega_{max} = \alpha \frac{qb^4}{Et^3} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{max} = \beta \frac{qb^2}{t^2} \quad (4.7)$$

$q$  : 等分布荷重 [Pa]

$b$  : 長辺の長さ [m]

$E$  : 縦弾性係数 [Pa]

$t$  : 板の厚さ [m]

ここで  $\alpha \cdot \beta$  は、周辺条件と短辺・長辺の長さの比  $a/b$  によって変わる係数である。SIRIUS 真空容器のふたの場合  $a/b \sim 1.5$  で、 $\alpha$ 、 $\beta$  の値は表 4.2 のようになる。

周辺固定支持		周辺単純支持	
$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
0.0238	0.4776	0.0838	0.4851

表 4.2:  $a/b=1.5$  のときの  $\alpha$ 、 $\beta$  の値 (文献 [6])

なお、応力は周辺単純支持の場合は板の中央 (図 4.6 の O 点) で最大となり、周辺固定支持の場合は、長辺の中央 (図 4.6 の B 点) で最大となる。

SIRIUS の真空容器のふたの寸法は図 4.6 のとおり。ふたの 4 辺はボルト留めであり、これは固定支持と単純支持の間の状態だと考えられるので、両方の周辺条件で式 4.6、4.7 を計算すると



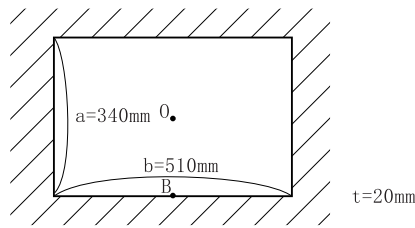


図 4.6: SIRIUS 真空容器のふた

周辺固定支持の場合、

$$\sigma_{max} = 0.08mm$$

$$\omega_{max} = 1.38 \times 10^7 \text{ Pa}$$

周辺単純支持の場合、

$$\sigma_{max} = 0.32mm$$

$$\omega_{max} = 1.40 \times 10^7 \text{ Pa}$$

となる。どちらの場合でも、最大応力は 0.2%耐力 (表 4.1 参照) の 1/5 以下になっており、繰り返し荷重に耐えられるだけの強度があることがわかる。

## 4.4 実測値との比較

SIRIUS 真空容器を実際に真空中に排気し、たわみ量を測定した。たわみ量の測定値と、4.2、4.3 での計算値との比較を、表 4.3 に示す。

	計算値	実測値
横壁 (横)	0.15mm	0.18mm
横壁 (前)	0.04mm	<0.04mm
ふた	0.08~0.32mm	0.22mm

表 4.3: たわみ量の計算値と実測値

側壁のたわみ量は、計算値と実測値がほぼ一致している。ふたのたわみ量の実測値は、周辺条件を固定支持とした場合の計算値 (0.08mm) と、単純支持 (0.32mm) とした場合の計算値との間に収まっている。

このことより、4.2、4.3 での構造解析の結果—SIRIUS の真空容器は繰り返し荷重に耐えるだけの強度を持っている—は、信頼できるものであると言える。

## 5 装置の冷却

SIRIUSのような近赤外の観測装置では、装置自身の熱輻射による光子がバックグラウンド光子として検出器に入射し、その量が無視できない。そこで SIRIUS は、バックグラウンド光子を減らすために光学系全体を冷却して使用する。

この章では、バックグラウンド光子の量から装置の冷却目標温度を導き、さらに、冷却に必要な時間と到達温度の見積もりを行う。最後に、実際の冷却試験との比較を行う。

### 5.1 冷却目標温度の決定

赤外線観測におけるバックグラウンド光子の起源として、次の4つが挙げられる。

- 1.) OH 夜光
- 2.) 大気の熱輻射
- 3.) 望遠鏡の熱輻射
- 4.) 観測装置自身の熱輻射

地上の望遠鏡を使う限り、この中で減らせるのは 4.) だけである。そこで、装置を冷却して 4.) のバックグラウンド光子を 1.) ~ 3.) に比べて無視できるほど小さくすることが目標となる。ここではまず 1.) ~ 4.) の量を計算し、バックグラウンド光子を減らすためには装置をどの程度冷却すればよいかを見積もる。

#### 5.1.1 OH 夜光によるバックグラウンド光子

地球大気の上層部では、OH 結合の振動が励起されている。これによる発光は波長  $1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$  であり、OH 夜光と呼ばれている。文献 [4]、[8] によると、OH 夜光の明るさの平均値は表 5.1 のとおりである。

ここから、各バンドの検出器で検出される光子数を計算する。各バンドのフィルターの波長域と 0 等星からの光子数に表 3.3 の値を、光学系の透過率には表 3.2 の値を使い、検出器 1 画素あたりの視野を  $0.45 \times 0.45 [\text{arcsec}^2]$  とすると、各バンドに入射する OH 夜光の光子数は、表 5.2 のようになる。

	J-Band	H-Band	Ks-Band
OH 夜光 [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	15.6	13.8	15.5
文献	[4]	[4]	[8]

表 5.1: OH 夜光の明るさ

	J-Band	H-Band	Ks-Band
光子数 [photons/s]	$5.1 \times 10^2$	$9.8 \times 10^2$	$1.3 \times 10^2$

表 5.2: OH 夜光によるバックグラウンド光子の数

### 5.1.2 大気の熱輻射によるバックグラウンド光子

近赤外の観測に用いられる各バンドは、大気の“窓”にあたる。よってそれぞれのバンドの波長内では大気はほぼ透明であるが、それでも数%の放射率を持つ。(表 5.3)

	J-Band	H-Band	Ks-Band
放射率	0.01	0.01	0.03

表 5.3: 大気の放射率

このような放射率を持ち、望遠鏡の主鏡に相当する面積である物体からの熱輻射が、検出器に入射することになる。

ここで、黒体輻射のエネルギー  $B_\lambda$  は、プランクの式

$$B_\lambda = 2hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} [\text{W}/\text{m}^3 \cdot \text{sr}] \quad (5.1)$$

で表される ( $T$  は黒体の温度、 $\lambda$  は波長)。これより、放射率  $\varepsilon$ 、面積  $S$  の物体から放出される波長  $\lambda$  の光子の数  $N_\lambda$  は、

$$N_\lambda = \frac{\varepsilon S B_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}} \quad (5.2)$$

$$= 2c\varepsilon S \frac{\lambda^{-4}}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} [\text{photons}/\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{sr}] \quad (5.3)$$

となる。

検出器にはバンドパスフィルターを透過した光のみが入射するので、各バンドの中心波長を  $\lambda_n$ 、透過波長幅を  $\Delta\lambda$  とし、検出器 1 画素が見込む立体角を  $\Omega$  とすると、各バンドの検出器 1 画素に入射する光子の数は

$$N = 2c\varepsilon S\Omega \frac{\lambda_n^{-4} \delta\lambda}{e^{\frac{hc}{k\lambda_n T}} - 1} [\text{photons/s}] \quad (5.4)$$

となる。

大気の温度を 220K、望遠鏡主鏡の直径を 1.4m、検出器 1 画素が見込む視野を  $0.45 \times 0.45 [\text{arcsec}^2]$  とすると、各バンドの検出器 1 画素に入射する大気の熱放射の光子数は、表 5.4 のようになる。

	J-Band	H-Band	Ks-Band
光子数 [photons/s]	$7.1 \times 10^{-11}$	$2.0 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^{-2}$

表 5.4: 大気の熱輻射によるバックグラウンド光子の数

### 5.1.3 望遠鏡の熱輻射によるバックグラウンド光子

望遠鏡の主鏡・副鏡も、数パーセントの放射率を持つ。また、副鏡を支えるスパイダーや、主鏡中央のカセグレン穴の周りも、面積としては狭いが放射率が高いので、熱輻射の量は無視できない。

望遠鏡に関するパラメータを表 5.5 のように仮定し、5.1.2 での計算と同様に、望遠鏡からの熱輻射の計算を行った。結果は表 5.6 のとおり。

望遠鏡の温度	280 [K]
主鏡・副鏡の放射率	0.08
望遠鏡主鏡の面積	$\pi \times 0.7 \times 0.7 [\text{m}^2]$
スパイダーの放射率	1
スパイダーの面積	$10 \times 500 \times 4 \text{ 本} [\text{mm}^2]$
カセグレン穴の放射率	1
カセグレン穴の面積	$\pi \times 150 \times 150 [\text{mm}^2]$

表 5.5: 望遠鏡の熱輻射計算で仮定した値

	J-Band	H-Band	Ks-Band
光子数 [photons/s]	$1.0 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-1}$	$2.5 \times 10^2$

表 5.6: 望遠鏡の熱輻射によるバックグラウンド光子の数

### 5.1.4 装置の熱輻射によるバックグラウンド光子

装置自身からの熱輻射は、次の2つに分けられる。

1. 検出器を取り囲む壁の熱輻射（フィルターを通らずに流入）
2. Cold-Boxからの熱輻射（フィルターを通して流入）

#### 検出器を取り囲む壁の熱輻射

この熱輻射はフィルターを通らずに検出器に流入する。表 2.2 より、SIRIUSで使用する検出器は、波長  $0.85\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$  の光に対して感度を持つ。波長範囲が広いので、今回は式 5.3 は波長で積分して使用する。また各画素が見込む立体角は、ほぼ  $2\pi$  ステラジアンとなる。結局、検出器を取り囲む壁からの熱輻射による光子の数  $N_d$  を求める式は、次のようになる。

$$N_d = 2c\varepsilon S \times 2\pi \int_{0.85\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} \frac{\lambda^{-4}}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} d\lambda \text{ [photons/s]} \quad (5.5)$$

ただし、 $T$  は検出器を取り囲む壁の温度、 $\varepsilon$  は検出器を取り囲む壁の放射率、 $S$  は検出器 1 画素の面積である。SIRIUS の場合、使用する検出器の最適動作温度は約 60K なので、検出器とその周りの壁をすべて 60K に冷却する。そこで、 $T = 60\text{K}$ 、 $\varepsilon = 1$ 、 $S = 18.5\mu\text{m} \times 18.5\mu\text{m}$  として式 5.5 を計算した結果は

$$N_d = 1.6 \times 10^{-27} \text{ [photons/s]} \quad (5.6)$$

である。検出器を取り囲む壁の熱輻射の影響は、他の原因によるバックグラウンド光子の数と比べて無視できるほど小さい。

#### Cold-Box の熱輻射

SIRIUS では、検出器からフィルターを見込む立体角は約 1.2 ステラジアンとなる。そこで、5.4 で  $\Omega = 1.2\text{sr}$ 、 $\varepsilon = 1$ 、 $S = \text{検出器 1 画素の面積} = 18.5\mu\text{m} \times 18.5\mu\text{m}$  として、Cold-Box の温度  $T$  を 150K ~ 250K の範囲で変化させると、各バンドの 1 画素に入射する光子の数は表 5.7 のようになる。

Cold-Box の温度	J-Band	H-Band	Ks-Band
150K	$2.6 \times 10^{-19}$	$1.9 \times 10^{-12}$	$5.0 \times 10^{-6}$
200K	$4.8 \times 10^{-11}$	$5.1 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-1}$
250K	$4.4 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^2$

表 5.7: Cold-Box の熱輻射によるバックグラウンド光子の数（単位 [photons/s]）

### 5.1.5 冷却温度の決定

5.1.1～5.1.4の結果から、Ks-Bandでのバックグラウンド光子の数は図5.1のようになる。

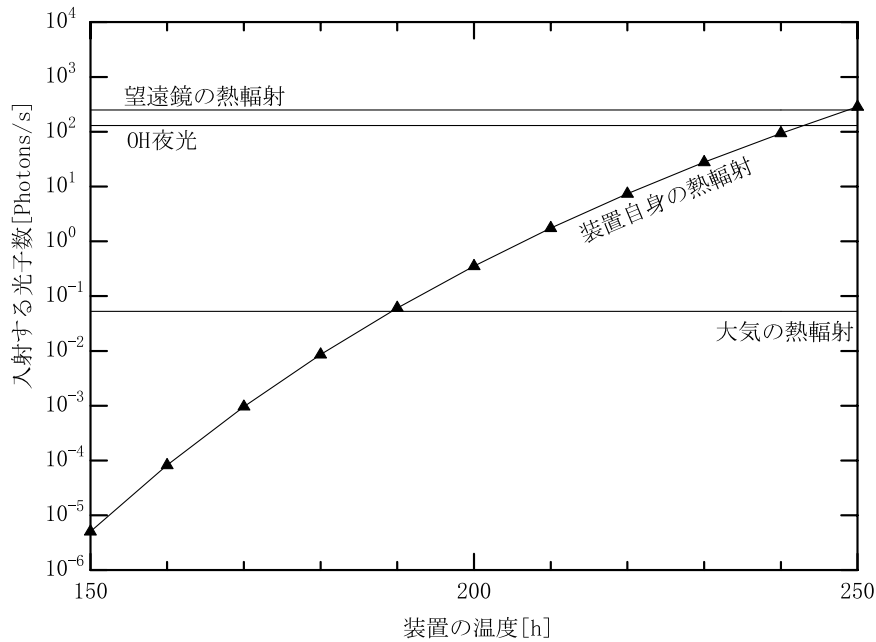


図 5.1: バックグラウンド光子数 ( Ks-Band )

図 5.1 より、Ks-Band の場合 Cold-Box を 200K 以下に冷却すれば、装置自身の熱輻射による光子の量は他のバックグラウンド光子の量より十分小さくなること  
がわかる。なお、J-Band、H-Band では、装置自身の熱輻射は Ks-Band よりず  
つと少ない。

以上の結果から、SIRIUS の Cold-Box の目標冷却温度は 200K 以下となる。

## 5.2 熱流入量の見積もり

SIRIUS の Cold-Box 冷却には冷凍機を使用する。どの程度の能力の冷凍機を使用するかを決めるために、Cold-Box への熱の流入量を見積もる必要がある。

Cold-Box への熱の流入経路は、

- ・ 入射窓から流入する熱輻射
- ・ 真空容器内壁の熱輻射
- ・ 断熱支持板の熱伝導

の 3 つである。

### 5.2.1 入射窓からの熱流入量

温度差のある物体間で、面積  $S$  をとって流入する熱量  $\dot{Q}$  は、高温側から低温側への流れを正として、次の式で計算できる。

$$\dot{Q} = \sigma S (T_1^4 - T_2^4) \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} \quad [\text{W}] \quad (5.7)$$

$\sigma$  : はシュテファンボルツマン定数

$T_1$  : 高温側の温度

$T_2$  : 低温側の温度

$\varepsilon_1$  : 高温側の放射率

$\varepsilon_2$  : 低温側の放射率

300K の大気から入射窓を通して Cold-Box に流入する熱量を考える場合、入射窓のガラスはすべての波長を透過するわけではないが、透過しない波長においては入射窓自身が熱を放射する。よって、すべての波長において高温側の放射率を 1 として計算すればよい。

入射窓の面積 $S$	$\pi \times 40 \times 40 \text{ [mm}^2\text{]}$
周囲・入射窓の温度 $T_1$	300 [K]
Cold-Box の温度 $T_2$	80 [K]
周囲・入射窓の放射率 $\varepsilon_1$	1
Cold-Box 内壁の放射率 $\varepsilon_2$	1

表 5.8: 入射窓からの熱流入量計算の条件

表 5.8 のように仮定して、入射窓からの熱流入量  $\dot{Q}_w$  を計算すると、

$$\dot{Q}_w = 2.3 \text{ W} \quad (5.8)$$

となる。

### 5.2.2 真空容器内壁からの熱流入量

真空容器内壁からの熱流入量は、5.2.1 と同様に、式 5.7 から計算することができる。この場合、パラメータは表 5.9 のようになる。

真空容器内壁と Cold-Box 外壁はアルミニウムを磨いた面であり、磨いた直後は放射率は低く 0.02 程度であるが、表面が曇ってくると放射率が高くなり、0.08 程度になる。そこで今回は、放射率を 0.02 と仮定した場合と、0.08 と仮定した場合の両方について、熱流入  $\dot{Q}_i$  を計算する。

真空容器内壁の面積 $S$	0.80 [m <sup>2</sup> ]
真空容器の温度 $T_1$	300 [K]
Cold-Box の温度 $T_2$	80 [k]
真空容器内壁の放射率 $\varepsilon_1$	0.02 ~ 0.08
Cold-Box 外壁の放射率 $\varepsilon_2$	0.02 ~ 0.08

表 5.9: 真空容器内壁からの熱流入量計算の条件

放射率が 0.02 の場合、

$$\dot{Q}_i = 3.7 \text{ W} \quad (5.9)$$

放射率が 0.08 の場合、

$$\dot{Q}_i = 15.5 \text{ W} \quad (5.10)$$

となる。

### 5.2.3 断熱支持板からの熱流入量

SIRIUS の Cold-Box は、図 5.2、5.3 のように、前方 4ヶ所、後方 1ヶ所で、真空容器とつながっている。

図 5.2、5.3 の斜線部分は熱伝導率の小さいガラスエポキシの薄板であり、

- ・ Cold-Box と真空容器とを断熱する
- ・ 光軸をずらさずに、Cold-Box の熱収縮分を吸収する

という 2つの役割を担っている。

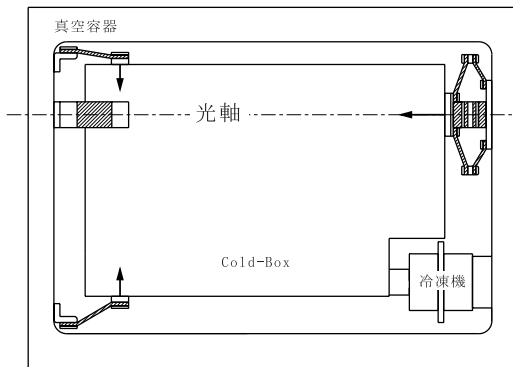


図 5.2: Cold-Box 支持方法  
(上から見た図)

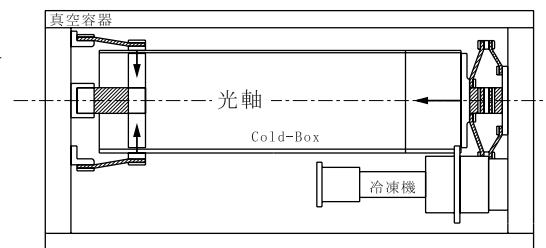


図 5.3: Cold-Box 支持方法  
(横から見た図)



ガラスエポキシの断熱板を伝わって流入する熱量は、式 5.11 で計算できる。

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \int_{T_2}^{T_1} k(T) dT \quad (5.11)$$

$T_1$  : 高温側の温度

$T_2$  : 低温側の温度

$A$  : 断熱板の断面積

$L$  : 断熱板の長さ

$k(T)$  : 物質の熱伝導率

今回は、条件を表 5.10 のように仮定する。

真空容器の温度 $T_1$	300 [K]
Cold-Box の温度 $T_1$	80 [K]
断熱材の断面積 $A$	$2 \times 30$ [mm <sup>2</sup> ]
断熱材の長さ $L$ (前方支持具)	40 [mm]
断熱材の長さ $L$ (後方支持具)	55 [mm]

表 5.10: 支持板からの熱流入量の計算の条件

また、文献 [9] より、 $k(T)$  の値には、

$$\int_{80\text{K}}^{300\text{K}} k(T) dT = 1.80 \times 10^2 \text{ [W/m]} \quad (5.12)$$

を使用する。(ただし、ガラスエポキシの  $k(T)$  の値はガラスの混入率により異なるため、掲載されていない。ここではガラスの値で代用している。)

これらの値を使い、式 5.11 を計算すると、

前方 1ヶ所あたり : 0.27 W

後方 1ヶ所あたり : 0.20 W

となる。前方・後方ともに 4ヶ所の支持板があるので、支持板からの熱流入量の合計値  $\dot{Q}_e$  は、

$$\dot{Q}_e = 1.9 \text{ W} \quad (5.13)$$

となる。

5.2.1~5.2.3 より、SIRIUS の Cold-Box に流入する熱量をまとめると、表 5.11 のようになる。また、SIRIUS における熱の流れは図 5.4 のようになる。

	アルミ放射率 0.02	アルミ放射率 0.08
入射窓から	2.3 W	2.3 W
内壁から	3.7 W	15.5 W
支持板から	1.9 W	1.9 W
合計	7.9 W	19.7 W

表 5.11: Cold-Box に流入する熱量

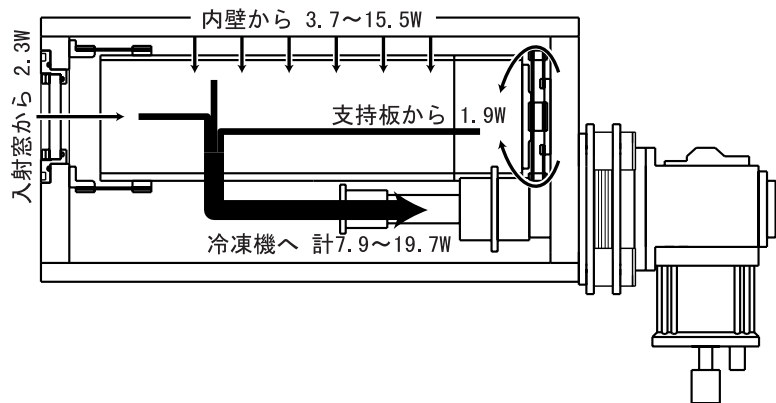


図 5.4: SIRIUS における熱の流れ

## 5.3 冷凍機

### 5.3.1 使用する冷凍機の選定

5.1 で見たように、バックグラウンド光子を減らすためには、検出器を取り囲む環境、つまり Cold-Box を 200K 程度まで冷却する必要がある。一方、SIRIUS で使用する検出器は温度によって感度が変わり、最適動作温度は約 60K である。検出器のみを、より低い温度まで到達させる必要があるため、冷凍機は 2 段式のもの望ましい。

Z 研では、2 段式の冷凍機を使って冷却する装置を他にも開発中である。このうち冷却広視野カメラ (文献 [10]) は、冷却目標温度や熱流入量・熱容量が SIRIUS に近い。そこで、冷却広視野カメラで使っている冷凍機、住友重機製 GM サイクル 2 段式冷凍機 RD-204 を、SIRIUS でも使用することにした。この冷凍機の 1 段目で Cold-Box を冷却し、より低温に達する 2 段目で検出器を冷却する。

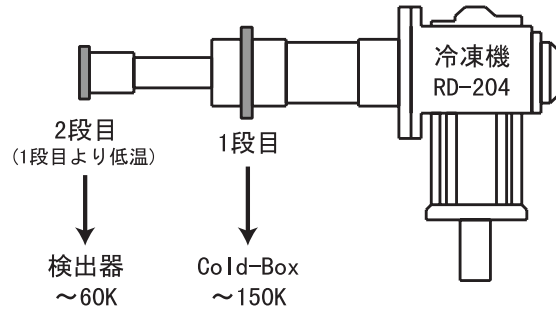


図 5.5: 2 段式冷凍機による冷却

### 5.3.2 冷凍機の冷却能力

冷凍機の冷却能力は、ヘッドの温度によって変化する。1 段目、2 段目のヘッドにそれぞれ熱量  $\dot{Q}_1$  [W]、 $\dot{Q}_2$  [W] が流入したときに、ヘッドの温度がそれぞれ  $T_1$  [K]、 $T_2$  [K] で平衡状態になったとすると、ヘッドの温度  $T_1$ 、 $T_2$  での冷却能力は  $\dot{Q}_1$ 、 $\dot{Q}_2$  であると言える。

SIRIUS で使用する冷凍機 RD-204 について、いくつかの熱流入量下でヘッドの平衡温度をプロットしたものが、図 5.6 である。また、この図から 1 段目のヘッドの温度  $T_1$  と冷却能力  $\dot{Q}_1$  の関係を抜き出してプロットすると、図 5.7 のようになる。

グラフからわかるように、1 段目の冷却能力  $\dot{Q}_1$  は、1 段目のヘッドの温度  $T_1$  によって決まり、2 段目への熱流入量  $\dot{Q}_2$  によってはほとんど変化しない。 $\dot{Q}_1$  と  $T_1$  の関係の近似式は次のとおり。

$$\dot{Q}_1(T_1) = 7.25\sqrt{(T_1 - 36.8)} - 13.7 \quad (5.14)$$

## 5.4 冷却時間と到達温度

### 5.4.1 冷却による温度推移の計算モデル

SIRIUS では、冷却能力の大きい 1 段目で Cold-Box を冷却し、より低温まで冷却できる 2 段目で検出器を冷却する。Cold-Box は熱容量・熱流入量ともに、検出器部分に比べてかなり大きいので、1 段目は 2 段目に比べて冷却の条件が厳しい。そこで、この節では 1 段目についてのみ冷却時間と到達温度を概算する。

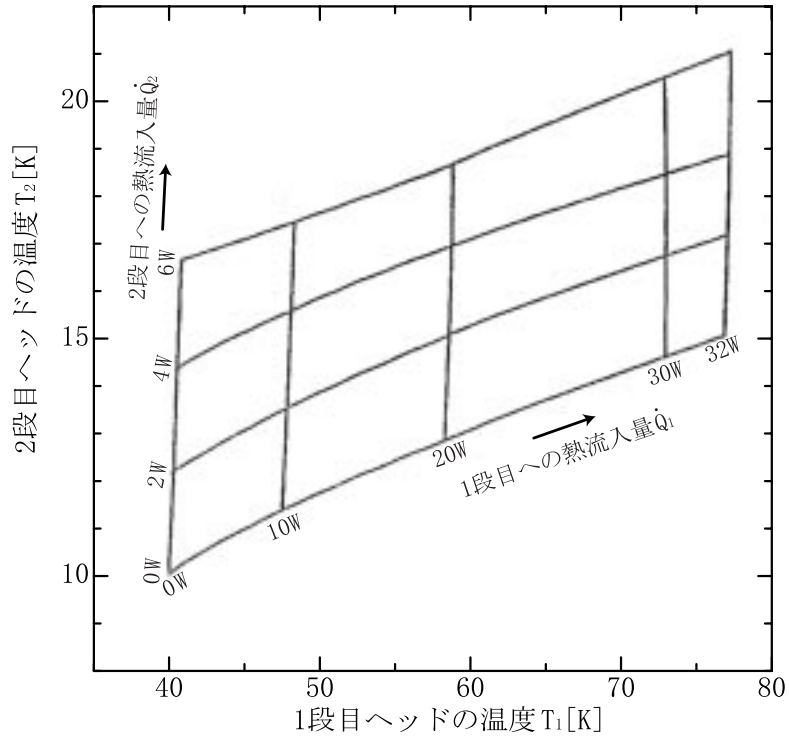


図 5.6: RD204 の冷却能力特性 ( 60Hz )

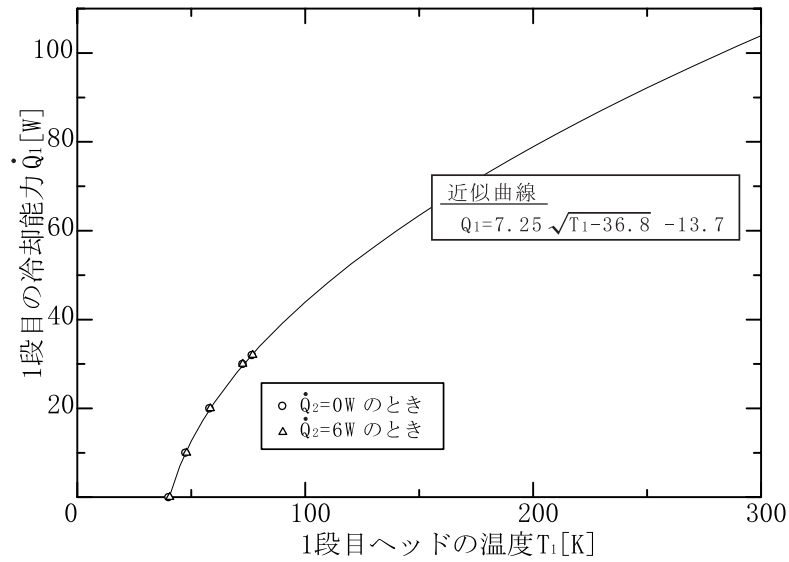


図 5.7: RD204 の 1 段目ヘッドの冷却能力 ( 60Hz )

一方向だけの熱伝導を考える場合、時刻  $t$  [s]、位置  $x$  [m] における熱流量  $\dot{Q}(x, t)$  [W] と温度  $T(x, t)$  [K] は、

$$\dot{Q}(x, t) = \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} A \lambda \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{C} \frac{\partial \dot{Q}(x, t)}{\partial x} + \frac{\omega}{C} \quad (5.16)$$

- $A$  [m<sup>2</sup>] : 断面積
- $\lambda$  [W/m·K] : 物質の熱伝導率
- $C$  [J/K·m] : 単位長さあたりの熱容量
- $\omega$  [W/m] : 単位長さあたりの外部からの熱流入量

と書くことができ、この2つの式をまとめると式 5.17 のようになる。

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{A \lambda}{C} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\omega}{C} \quad (5.17)$$

SIRIUS の Cold-Box は実際には複雑な形をしているが、簡単のため一定の断面積  $A_{Al}$ 、長さ  $L_{Al}$  のアルミニウムの棒、Cold-Box と冷凍機をつなぐ無酸素銅の“熱パス”部分を断面積  $A_{Cu}$ 、長さ  $L_{Cu}$  の無酸素銅の棒として、一方向のみへの熱の伝導の様子を計算する。

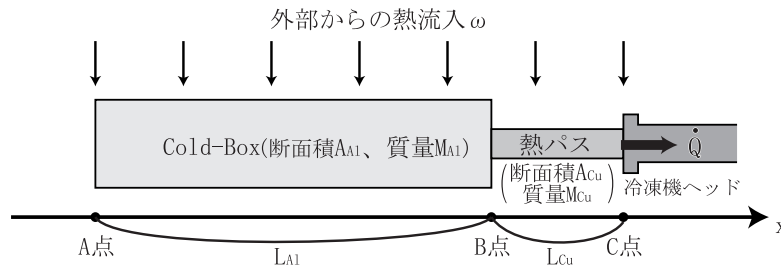


図 5.8: 冷却の様子 の計算モデル

SIRIUS では“熱パス”に断面積 38mm<sup>2</sup> 相当の平編み銅線を 4 本使っている。Cold-Box 部分の断面積には、今回の計算では Cold-Box 底板の厚みに幅を掛けた値を使う。また単位長さあたりの熱容量には、熱パスはすべて銅、Cold-Box はすべてアルミニウムできているとして、質量から熱容量を計算し、それを長さ ( $L_{Cu}$  または  $L_{Al}$ ) で割ったものを使用した。計算に使用した値を表 5.12 にまとめる。

なお、アルミニウムと銅の比熱と熱伝導率は温度により変化するが、今回の計算では簡単のため一定とし、次の値を使用した。

熱パスの断面積 $A_{Cu}$	$1.5 \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$
熱パスの長さ $L_{Cu}$	0.15 [m]
熱パスの質量	0.76 [kg]
Cold-Box の断面積 $A_{Al}$	$2.4 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$
Cold-Box の長さ $L_{Al}$	0.45 [m]
Cold-Box 質量:光学系を入れない場合	6.8 [kg]
光学系を入れる場合	12.6 [kg]
熱流入量 $\omega$ :アルミ放射率 0.08 の場合	$19.7/(L_{Al} + L_{Cu}) \text{ [W/m]}$
アルミ放射率 0.02 の場合	$7.9/(L_{Al} + L_{Cu}) \text{ [W/m]}$

表 5.12: 熱伝導の計算に使った値

アルミニウムの比熱 (200K)	$8.00 \times 10^2 \text{ [J/K} \cdot \text{kg]}$
無酸素銅の比熱 (200K)	$3.57 \times 10^2 \text{ [J/K} \cdot \text{kg]}$
アルミニウムの熱伝導率 (173K)	241 [W/m · K]
無酸素銅の熱伝導率 (173K)	420 [W/m · K]

表 5.13: 比熱と熱伝導率

#### 5.4.2 温度推移の計算結果

式 5.17 は解析的には解けないので、差分法をもちいて数値計算を行った。初期条件を  $T=300\text{K}$  とし、冷凍機の冷却能力には式 5.17 を使い、次の 3 つのケースについて冷却の様子を計算した。

1. アルミの放射率を 0.08 とし、熱容量に光学系を考慮しない場合
2. アルミの放射率を 0.02 とし、熱容量に光学系を考慮しない場合
3. アルミの放射率を 0.02 とし、熱容量に光学系を考慮した場合

結果を図 5.9 ~ 5.11 に示す。なお A · B · C の各点は図 5.8 中の点に対応している。

グラフから、どのケースでも目標到達温度 200K は十分達成できることがわかる。また、Cold-Box 内での温度勾配 (A 点と B 点との温度差) は 5K 程度である。ケース 1. とケース 2. を比較すると、アルミの放射率が小さくなる (熱流入量が減る) と到達温度は下がるが、平衡に達するまでの時間はほとんど変わらないことがわかる。また、ケース 2. とケース 3. の比較から、熱容量が増えても到達温度は変わらないが、平衡に達するまでの時間が長くなるということがわかる。ケース 2. (光学系なし) では 24 時間程度で平衡に達しているが、ケース 3. (光学系あり) では平衡に達するのに 2 倍近い時間がかかっている。

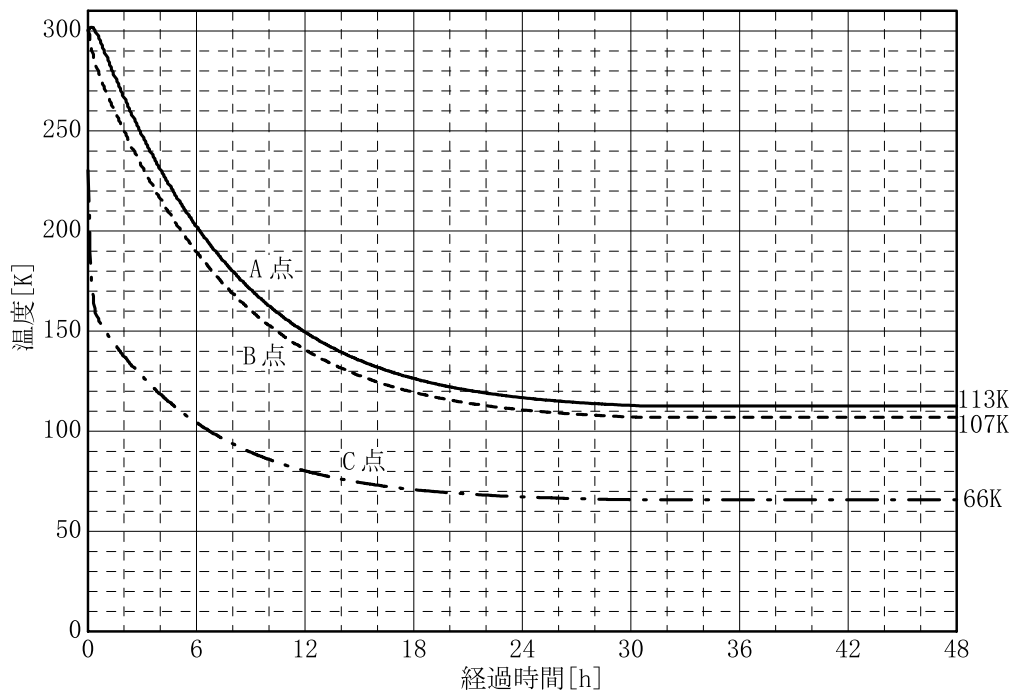


図 5.9: 予想冷却曲線 ( ケース 1. : アルミの放射率 0.08、光学系なし )

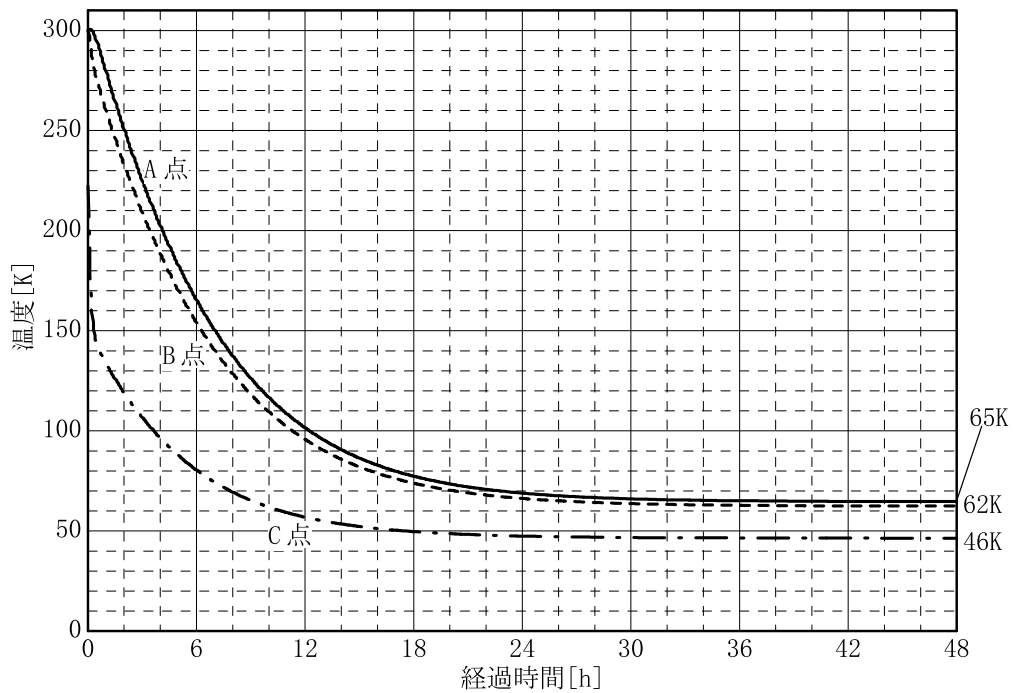


図 5.10: 予想冷却曲線 ( ケース 2. : アルミの放射率 0.02、光学系なし )

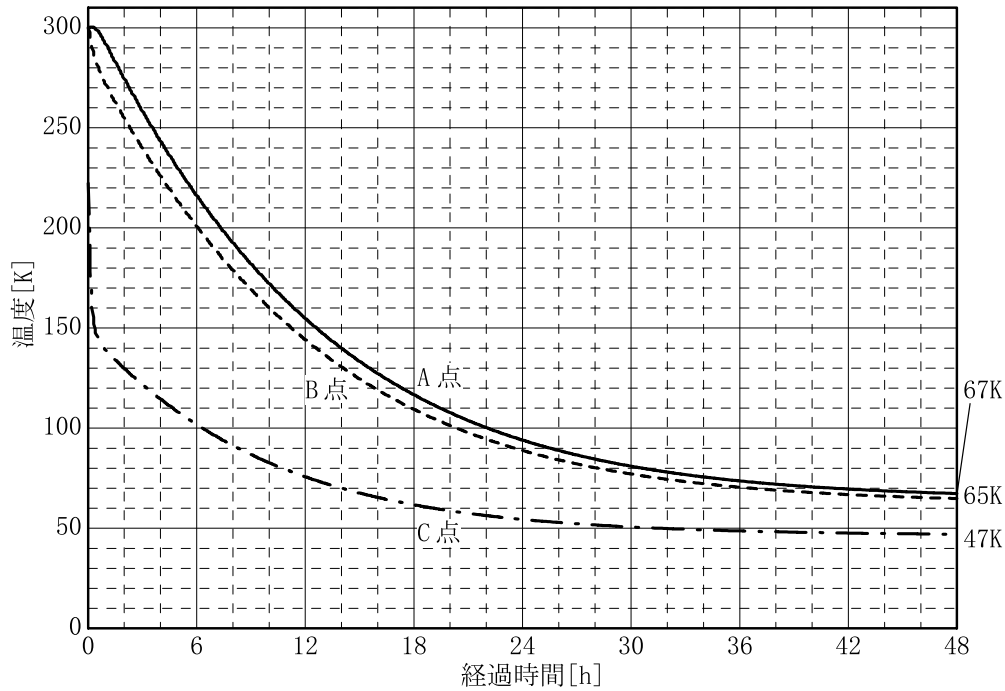


図 5.11: 予想冷却曲線 ( ケース 3. : アルミの放射率 0.02、光学系あり )

### 5.4.3 冷却実験の結果との比較

現時点 ( 1999 年 1 月 ) ではまだ光学系ができていないので、光学系を入れない状態で冷却試験を行った。結果を図 5.12 に示す。グラフより、検出器は 5 時間程度で平衡に達し約 30K に、Cold-Box は 20 時間程度で平衡に達し約 60K になることがわかる。また、Cold-Box 内での温度勾配は約 10K である。

5.4.2 で計算した 3 つのケースでの A 点の温度推移と、冷却実験での “Cold-Box 入射口付近” の温度推移を比較すると、図 5.13 のようになる。到達温度と平衡に達するの時間を見ると、冷却実験の結果はケース 2. の結果とよく合う。ただし、冷却曲線の途中の形はわずかに違う。この理由には、実際には比熱や熱伝導率に温度依存性があること、熱流入量は一定ではなく Cold-Box と外界との温度差によって変化すること、熱パスと Cold-Box の接触面では熱伝導率が悪いこと ( 接触抵抗 ) などが計算に入れられていないためである。

また、現段階では冷却に要する時間は 24 時間以内であるが、光学系を入れるとこの時間が 2 倍程度になることが予想される。今後は、熱パスを太くして熱伝導率を良くするなど、冷却時間を短縮するための工夫が必要となる。



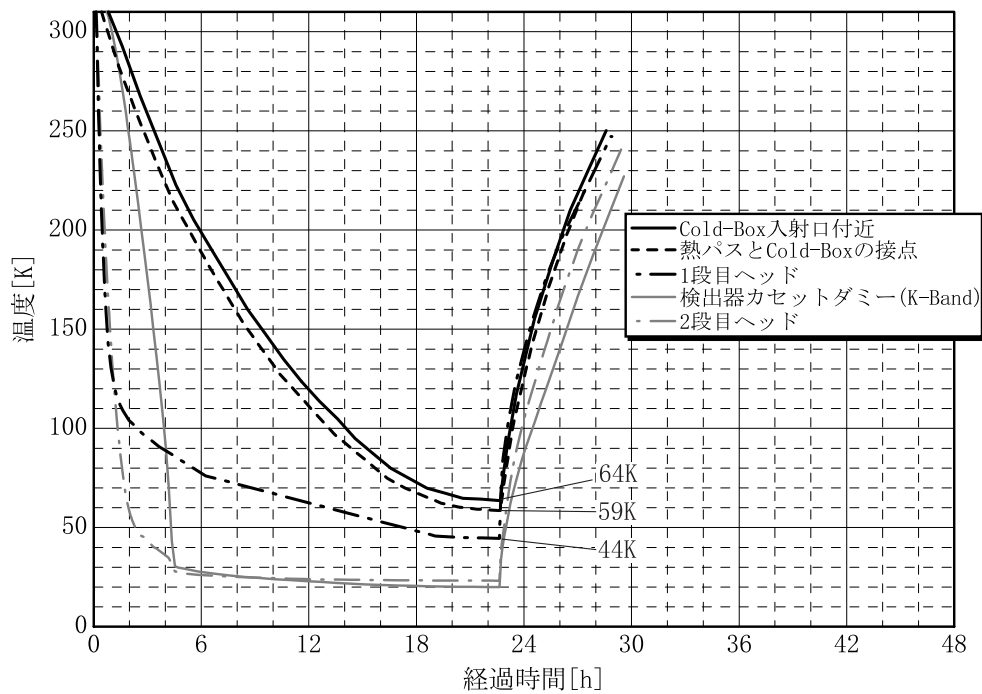


図 5.12: 冷却試験の結果

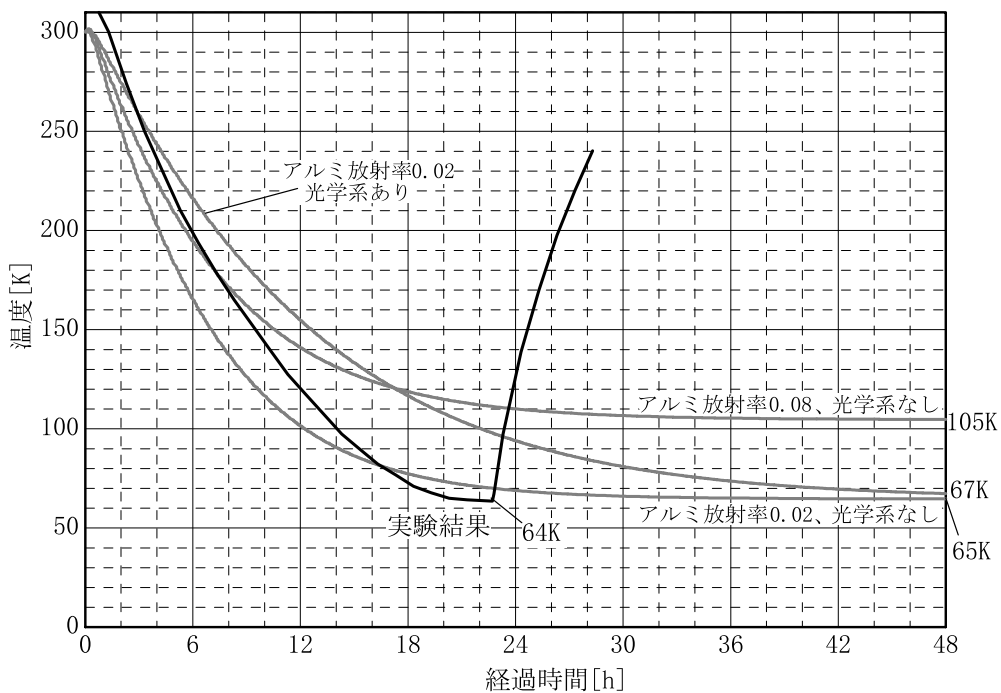


図 5.13: 予想冷却曲線と冷却実験の比較 (A 点)

## 6 今後に向けて

### 6.1 開発スケジュール

SIRIUS は現在、1999 年秋に本体を完成させることを目標として開発が進められている。完成後は、国立天文台の赤外シミュレーター、ハワイ大学 UH2.2m でテスト観測を行い、2000 年 3 月には南ア 1.4m 望遠鏡に取り付けて観測を開始する予定である。

### 6.2 観測計画

SIRIUS は、全天サーベイではなく、対象を興味深い領域（数～数十平方度）に絞り込んで深く細かいサーベイを行う。具体的には、

- ・ マゼラン雲
- ・ 銀河中心・銀河面
- ・ 星形成領域

などの近赤外 3 色ディープサーベイを計画している。

この中で私は、銀河中心方向での球状星団サーベイに集中して研究を進める。

銀河系では、現在 156 個の球状星団の存在が知られている（文献 [11]）。銀河系の中での球状星団の空間分布は球対称であり、その個数密度は中心に向かうほど高い。銀河中心からの距離  $r$  と球状星団の個数密度  $\rho$  の関係は表 6.1 のようになり、 $1\text{kpc} < r < 100\text{kpc}$  では球状星団の個数密度は順調に増加している。しかし、 $r < 1\text{kpc}$  では球状星団の個数密度は急激に減少する。実際、天球面上での球状星団の分布（図 6.2）を見ても、銀河中心から  $2^\circ$  以内には、球状星団が見つかっていないことがわかる。

この分布は、銀河系ができた当時は銀河系中心付近にも球状星団が存在したが、銀河系中心付近での強い潮汐力や力学的な摩擦により破壊され、消滅してしまった結果だと考えられる。Oort [12] は、潮汐力などによって破壊された球状星団の数を 50～100 個と見積もっている。

さらに Oort は、銀河中心近傍で壊されずに現在まで生き延びている球状星団の数を、銀河中心から  $3^\circ$  以内で約 20 個以上と見積もっている。しかし実際に  $3^\circ$  以内で見つかっている球状星団の数は、たった 3 個しかない。

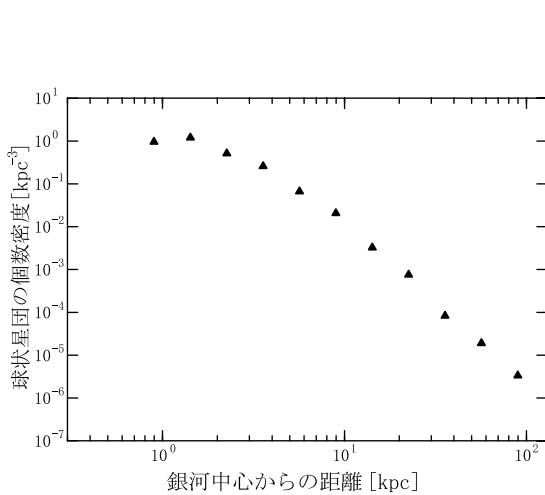


図 6.1: 銀河系の球状星団の個数密度

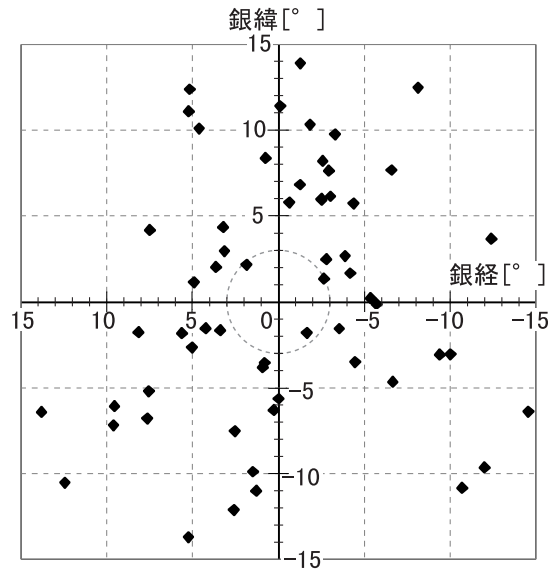


図 6.2: 球状星団の分布 (銀河座標)

銀河中心近傍はダストによる減光が非常に大きく、 $A_V \simeq 10 \sim 30 \text{ mag}$  となるため、可視光では見通すことができない。一方、近赤外はダストによる減光が少なく、 $A_K \simeq A_V/9$  である。にもかかわらず、銀河中心方向は、近赤外ではまだ狭い範囲でしか観測されていない。銀河中心近傍の球状星団を系統的に探す観測は、今まで行われていなかった。

SIRIUS と専用南ア 1.4m 望遠鏡を使えば、数平方度規模の近赤外ディープサーベイが可能となる。SIRIUS の Ks-Band での限界等級は約 19 等 (15 分積分) であり、銀河中心方向の K 型・M 型巨星を十分検出できる能力がある。銀河中心近傍に生き残った球状星団や今まさに壊れつつある球状星団があれば、見つけることができるかもしれない。

なお、SIRIUS の 1 視野は  $7'.8 \times 7'.8$  なので、1 視野あたり 15 分積分し、オーバーヘッド 2 倍、天気 1.5 倍を考慮すると、1 平方度を覆うのに約 45 時間 ( $\simeq 6$  夜) 必要となる。よって、銀河中心部の  $5^\circ \times 5^\circ$  を SIRIUS で観測するのに必要な日数は、約 150 日である。

銀河中心近傍には本当に球状星団がないのか、ダストに隠れていたものが見つかるのかを、SIRIUS を使って確かめてみたい。

## 7 謝辞

まず、このような研究の機会を与えてくださり、さまざまなことにおいて指導して下さった、Z研の佐藤修二教授、長田哲也助教授、平尾孝憲助手、国立天文台の田村元秀助教授に、深く感謝します。Z研の山室智康氏には、光学系の設計方法を1から指導していただきました。渡邊誠氏には、強度計算の手法を指導していただきました。安藤稔氏には、装置の設計段階や実験において、さまざまな助言をいただき、永山貴宏氏には冷却実験にて多大な協力をいただきました。そのほか、Z研大学院生の皆さんには、さまざまなことで協力していただきました。

SIRIUSには、Z研で製作中のTRISPEC、冷却広視野カメラでの経験が数多く取り入れられています。これらの装置があったからこそ、SIRIUSはここまで製作してこれました。

また、この装置の設計から機械加工にいたるまで、河合利秀氏をはじめとする物理金工室の方々に大変お世話になりました。特に、真空容器の製作にあたっては、導入されたばかりの装置を約2ヶ月も占有させていただきました。

その他、この研究を進めるにあたって、たくさんの方々にお世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。



## B リッチークレチアン式望遠鏡専用 F変換レンズ

SIRIUSの光学系は南ア 1.4m 望遠鏡用に最適化されている。ここで、南ア 1.4m 望遠鏡はクラシカルカセグレン式であるが、大口径の望遠鏡には、リッチークレチアン式のものが多い。SIRIUSがテスト観測で使用する予定の赤外シミュレータもリッチークレチアン式である。リッチークレチアン式の望遠鏡は、クラシカルカセグレン式と違ってコマ収差はほとんどないが、像面湾曲という収差が残っている。そこで、リッチークレチアン式の望遠鏡に取り付ける場合には、像面湾曲を補正する機能を持った F 変換レンズに取り替える必要がある。

ここでは、リッチークレチアン式 1.3m 望遠鏡に取り付ける場合を想定して設計した F 変換レンズの、パラメーターと性能について述べる。

### 光学系パラメーター

リッチークレチアン式 1.3m 望遠鏡用に設計した F 変換レンズのパラメーターは、次のとおり。

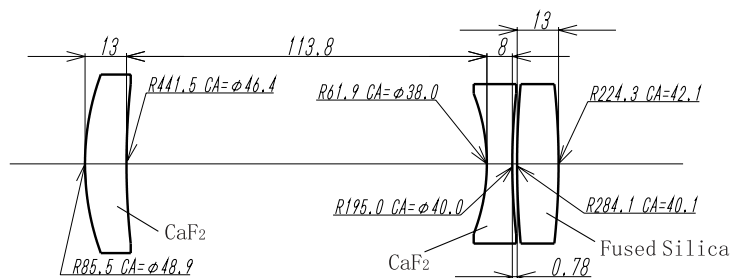


図 B.1: リッチークレチアン式望遠鏡用 F 変換レンズのパラメーター

### F 変換レンズによる望遠鏡収差の補正

リッチークレチアン式 1.3m 望遠鏡のスポットダイアグラムと、F 変換レンズを通した直後 (Offer 系に入射する前) のスポットダイアグラムを図 B.2、B.3 に示す。ただし実際には F 変換レンズから射出する光線は発散光線なので、図 B.3 は F 変換レンズによる“虚像”である。F 変換レンズにより、リッチークレチアン式望遠鏡の像面湾曲収差がよく補正されていることがわかる。

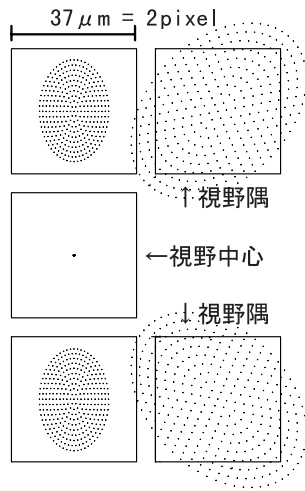


図 B.2: F 変換レンズなし

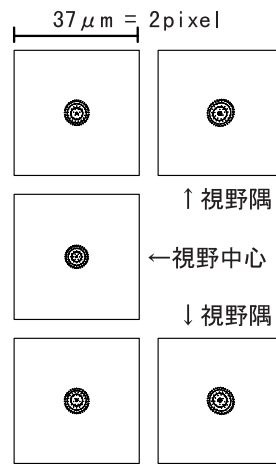


図 B.3: F 変換レンズ通過後

### スポットダイアグラム

リッチークレチアン式用の F 変換レンズに取り替え、SIRIUS をリッチークレチアン式 1.3m 望遠鏡に取り付けたときのスポットダイアグラムは図 B.4 のようになる。像の大きさは、3 つの Band の視野全面にわたって、 $2 \times 2$  pixel 以内に収まっている。

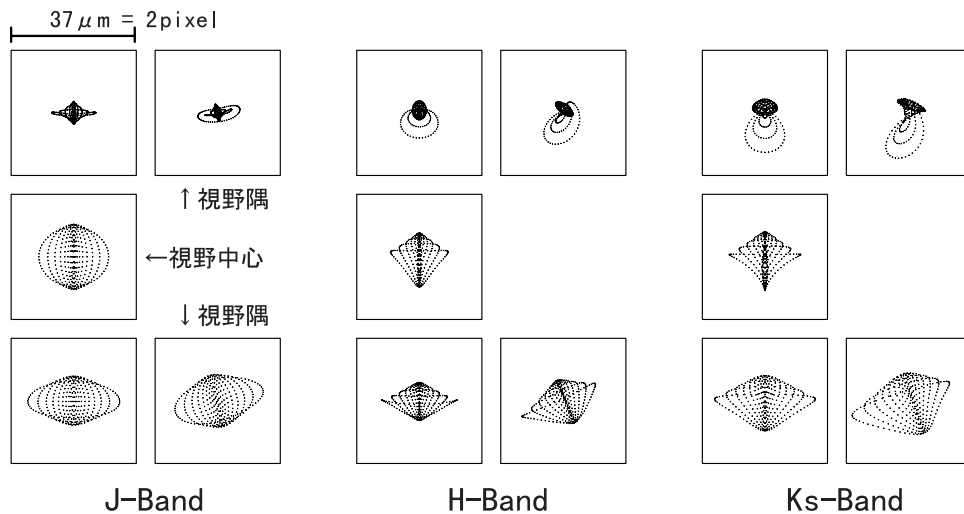


図 B.4: リッチークレチアン式 1.3m 望遠鏡に SIRIUS を取り付けたときのスポットダイアグラム

## C 設計図面

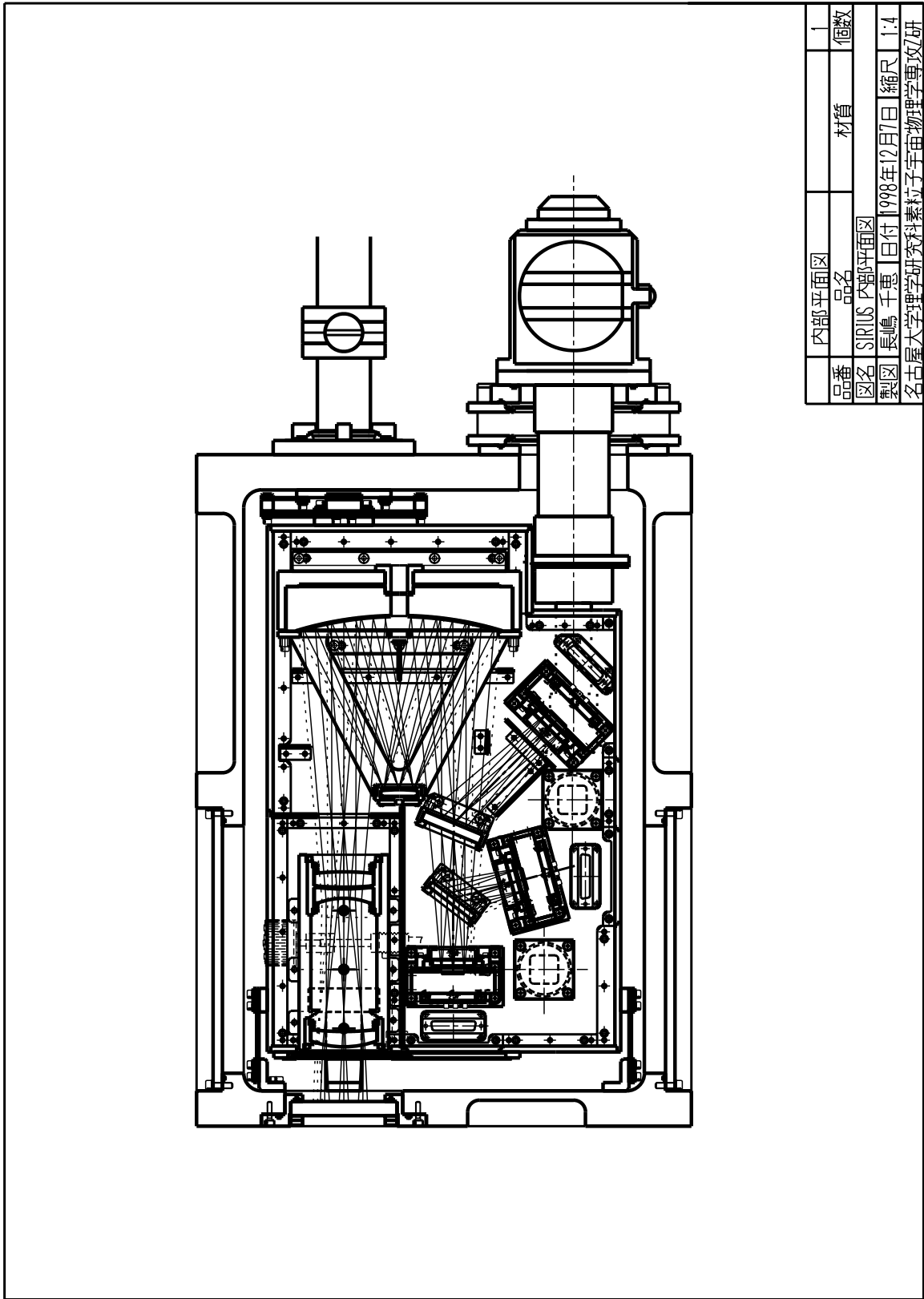
SIRIUSの図面を添付する。ただし、すべての図面を添付すると膨大な量になるので、おもなブロックごとの構造図を示す。

ここに添付した図の一覧は次のとおり。

- ・ SIRIUS 全体図
  - 上から見た図
  - 横から見た図
- ・ Cold-Box 断熱支持具
  - 前方支持具の構造
  - 後方支持具の構造
- ・ Cold-Box 関係
  - Cold-Box 横壁の構造
  - 検出器カセット取付部の構造
  - 検出器冷却口の構造
- ・ 光学系
  - Offner 系全体図
  - Offner 主鏡セルの構造
  - Offner 副鏡セルの構造
- ・ 冷凍機取付部の構造
- ・ 真空容器図面
  - 上から見た図
  - 横から見た図
  - 前から見た図
  - 後ろから見た図

なお、図面は縮小されているので、図面中の縮尺は実際のものとは異なっている。





内部平面図	1	個数
品番	材質	
図名	SIRIUS 内部平面図	
製図	長嶋 千恵	日付 1998年12月7日 縮尺 1:4
名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻研		

図 C.1: SIRIUS 全体図 (上から見た図)

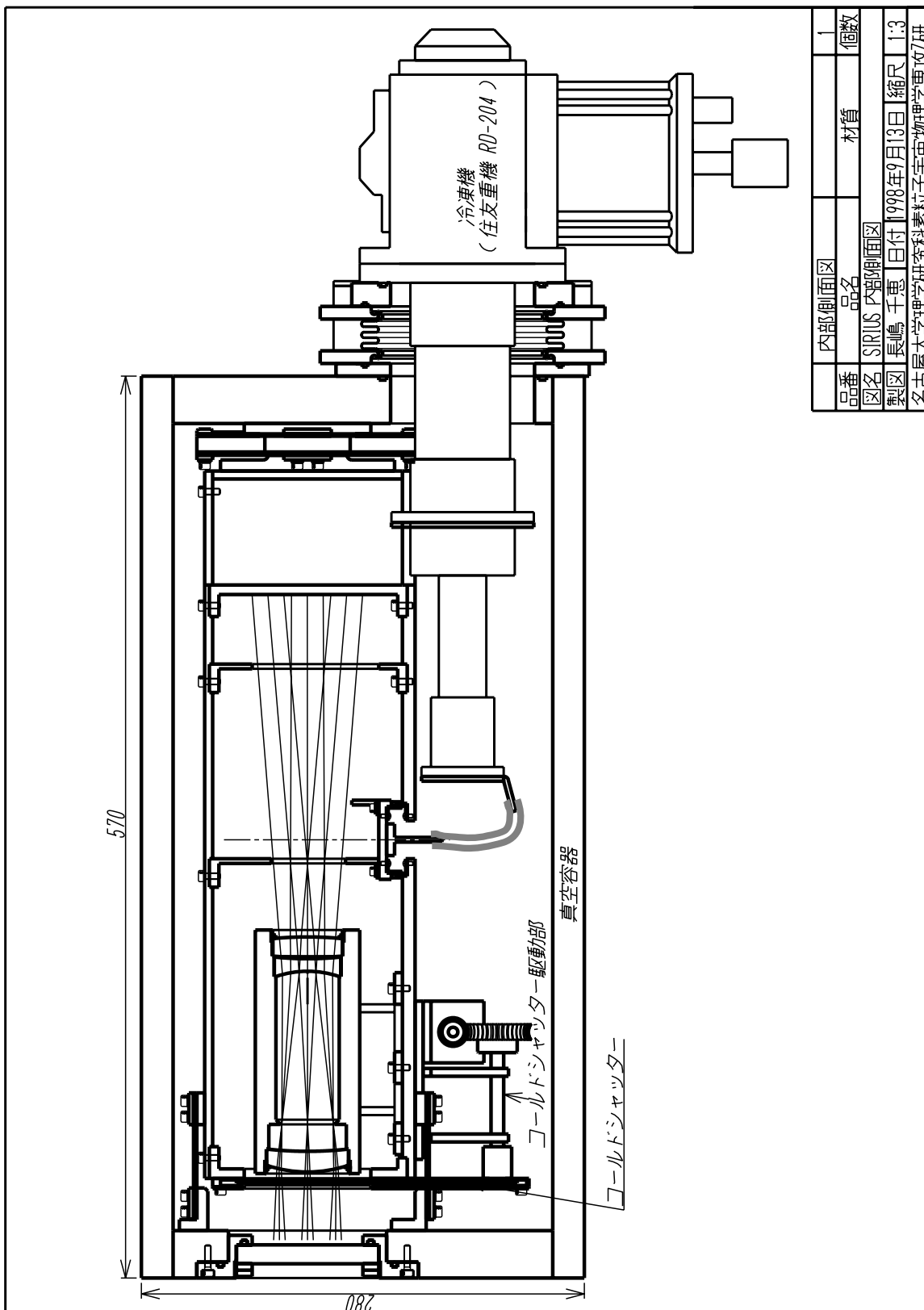
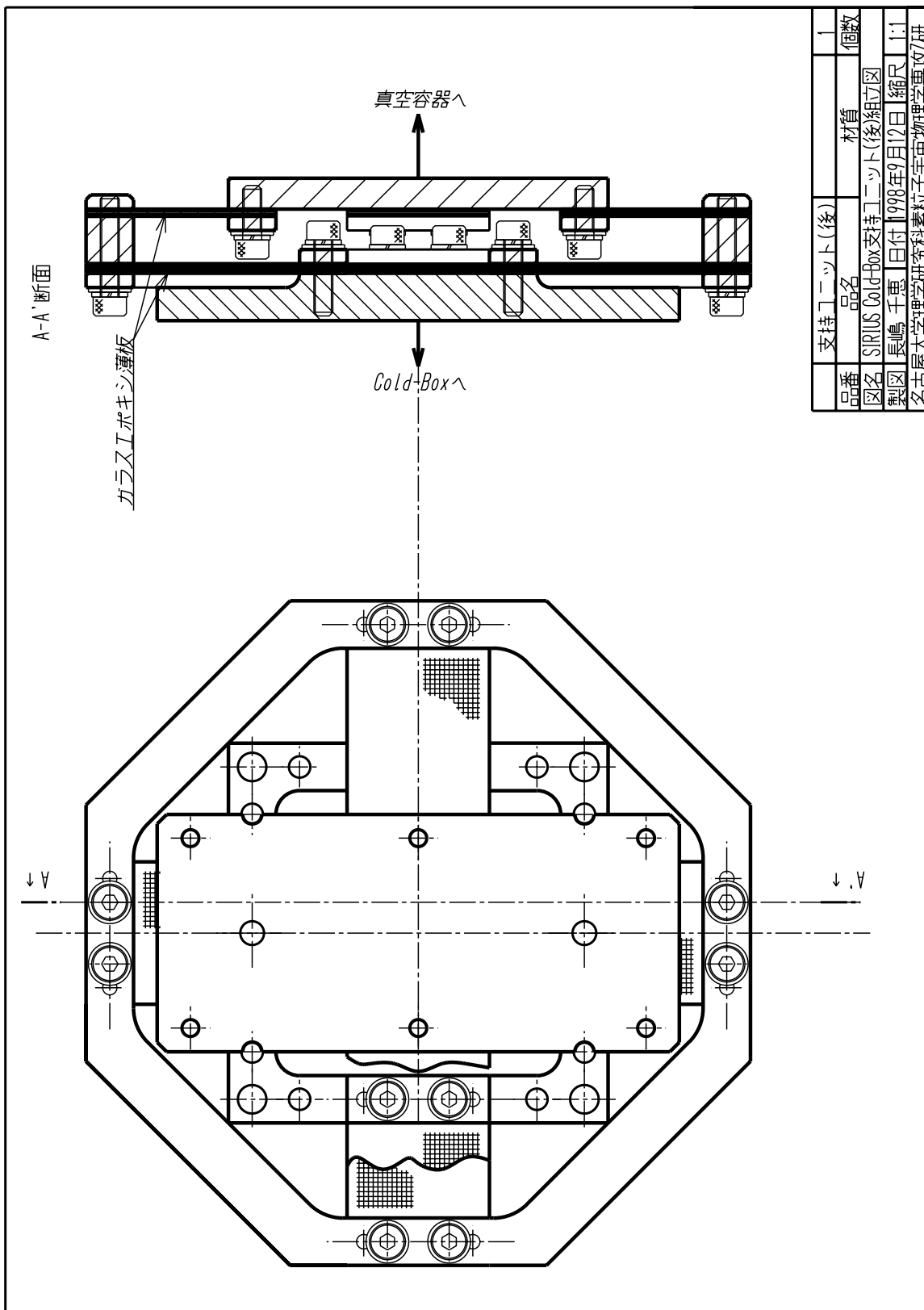
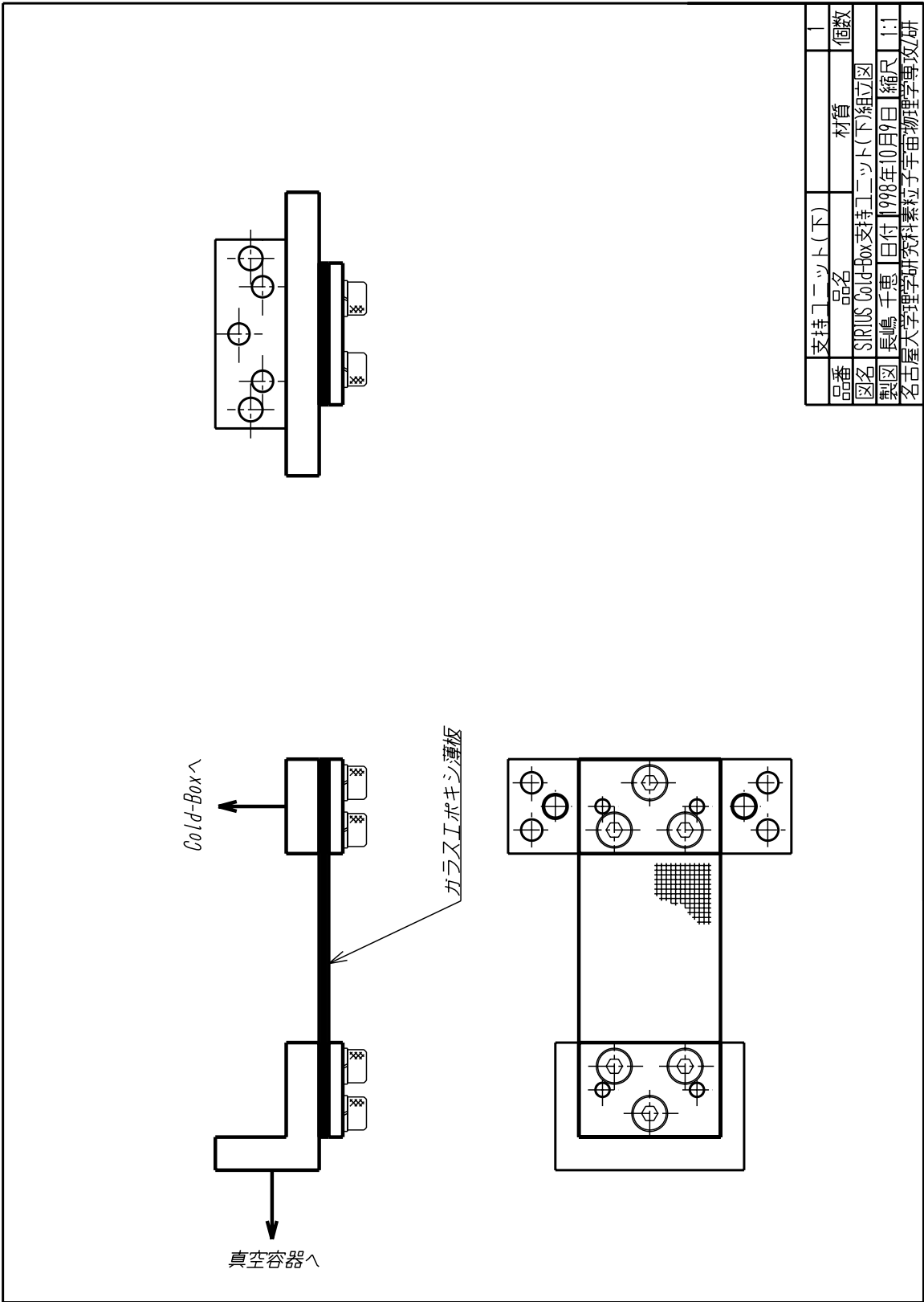


図 C.2: SIRIUS 全体図 (横から見た図)



支持ユニット(後)	1
品番	個数
図名	材質
製品名	SIRIUS Cold-Box支持ユニット(後)組立図
製図	長嶋 千恵 日付 1998年9月12日 縮尺 1:1
名古屋大学理学部素粒子宇宙物理学専攻	

図 C.3: Cold-Box 断熱支持具 (前方) の構造



品番	支持ユニット(下)	材質	1
図名	SIRIUS Cold-Box支持ユニット(下)組立図	個数	
製図	長嶋千恵	日付	1998年10月9日
名	名古屋大学理学部素粒子宇宙物理学専攻	縮尺	1:1

図 C.4: Cold-Box 断熱支持具 ( 後方 ) の構造

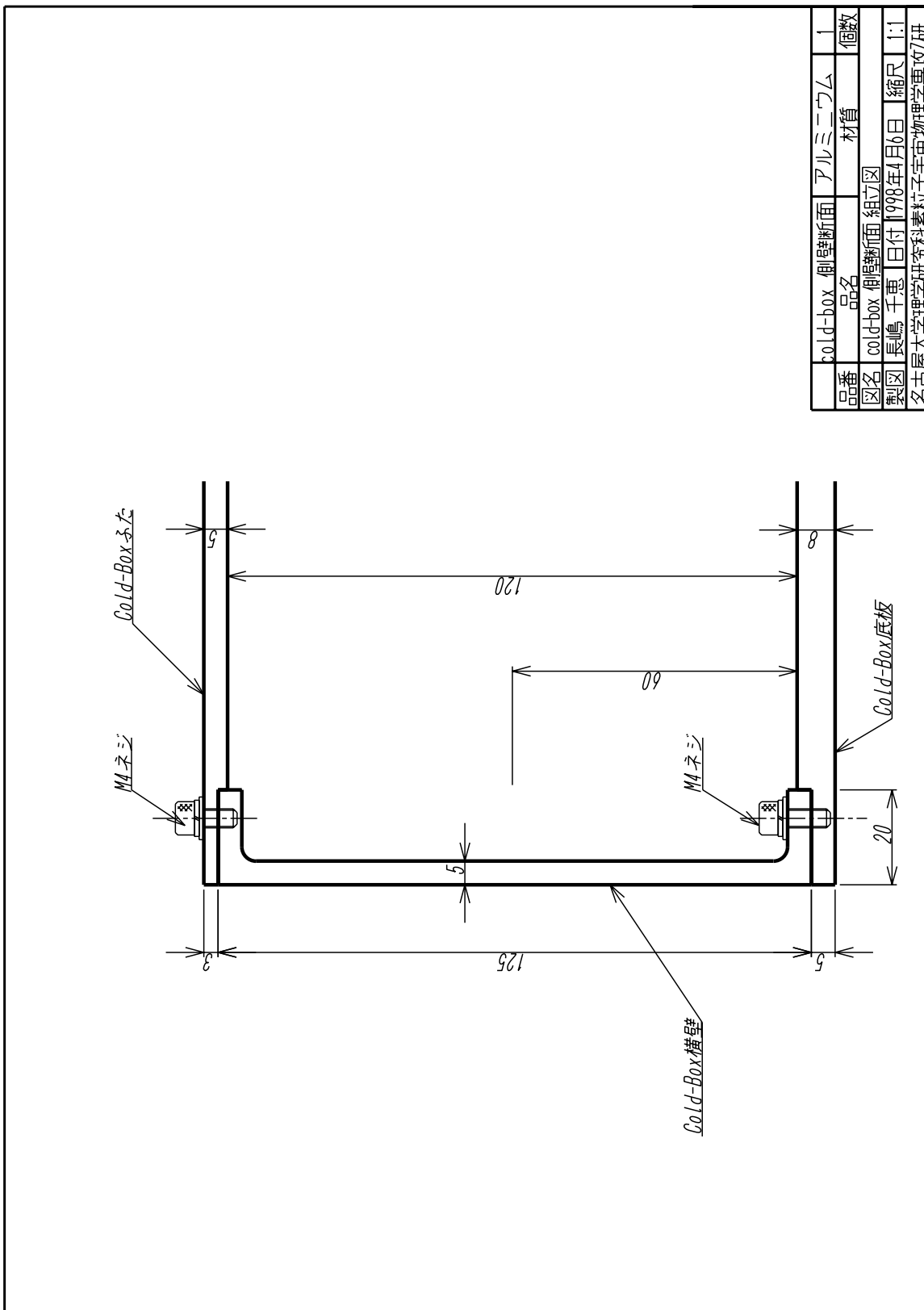


図 C.5: ColdBox 横壁の構造

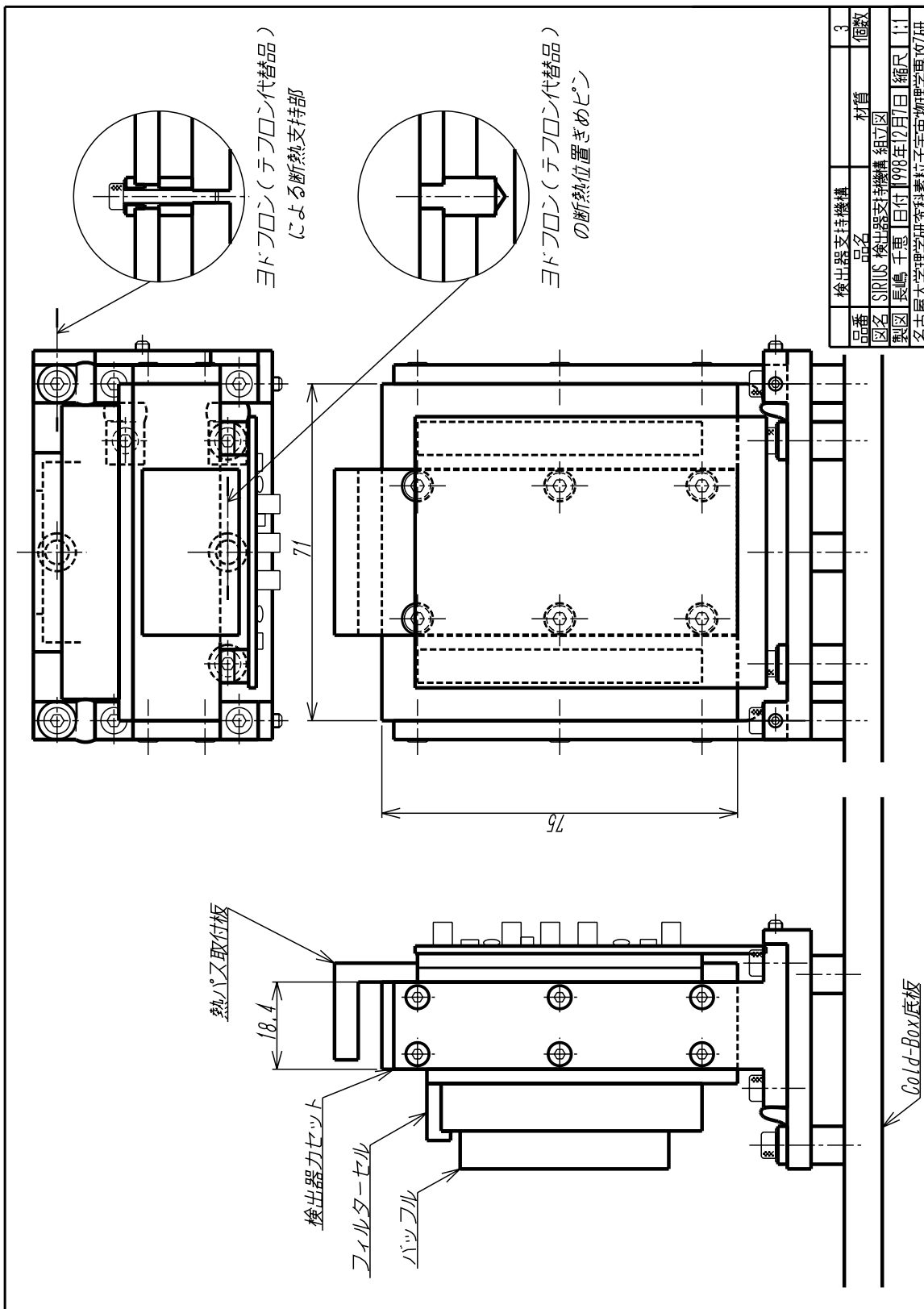


図 C.6: 検出器カセット取付部の構造

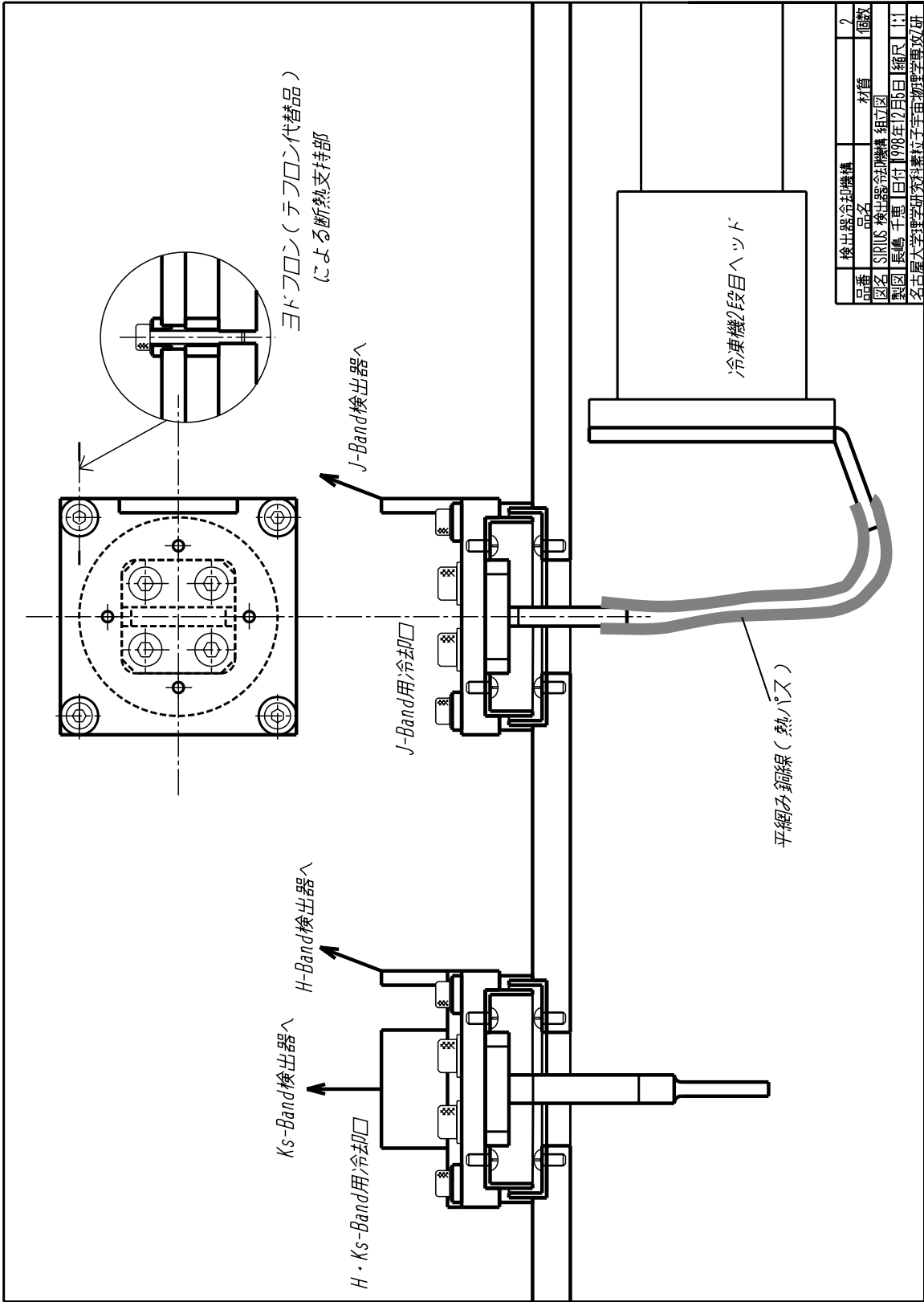


図 C.7: 検出器冷却口の構造

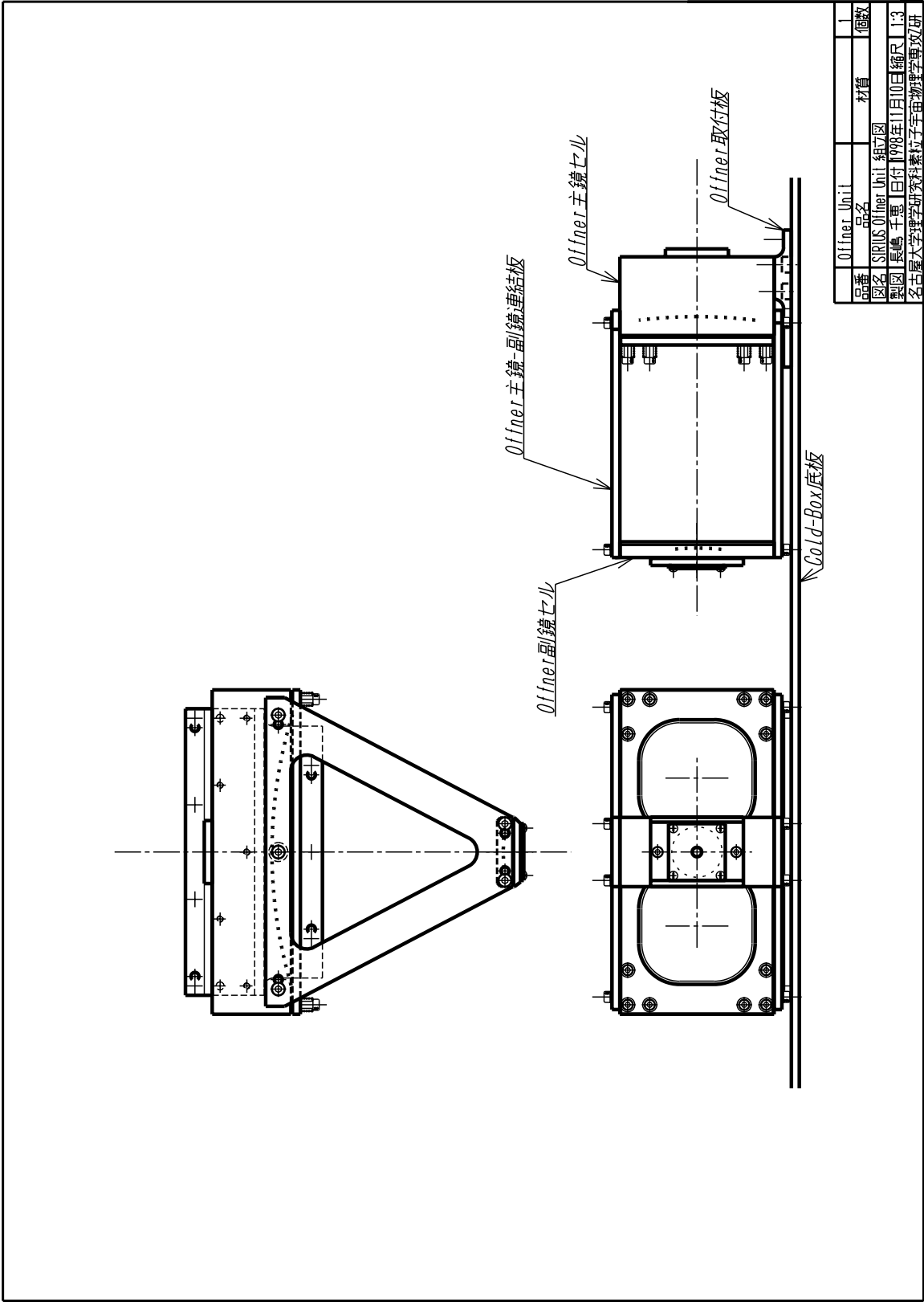
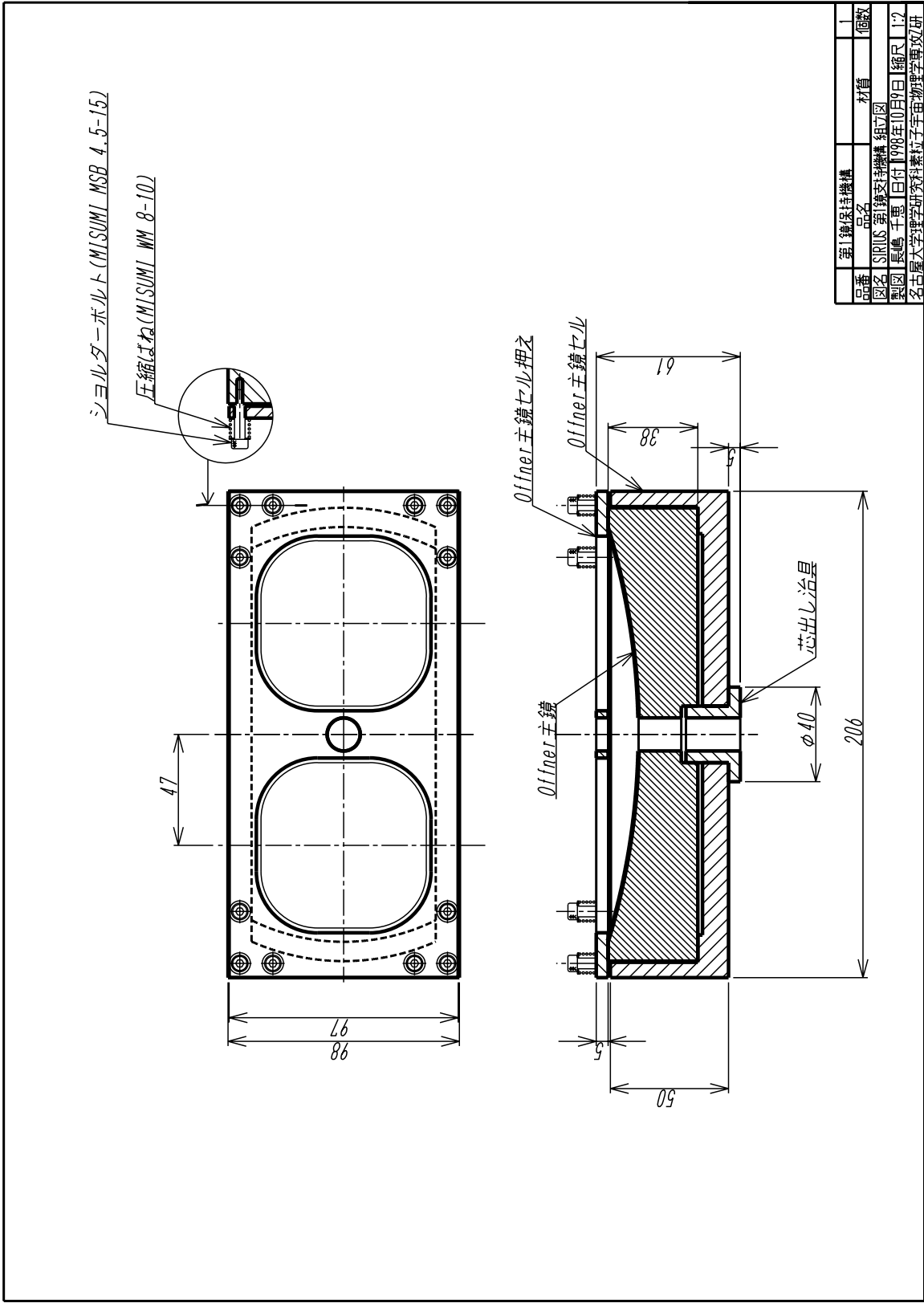


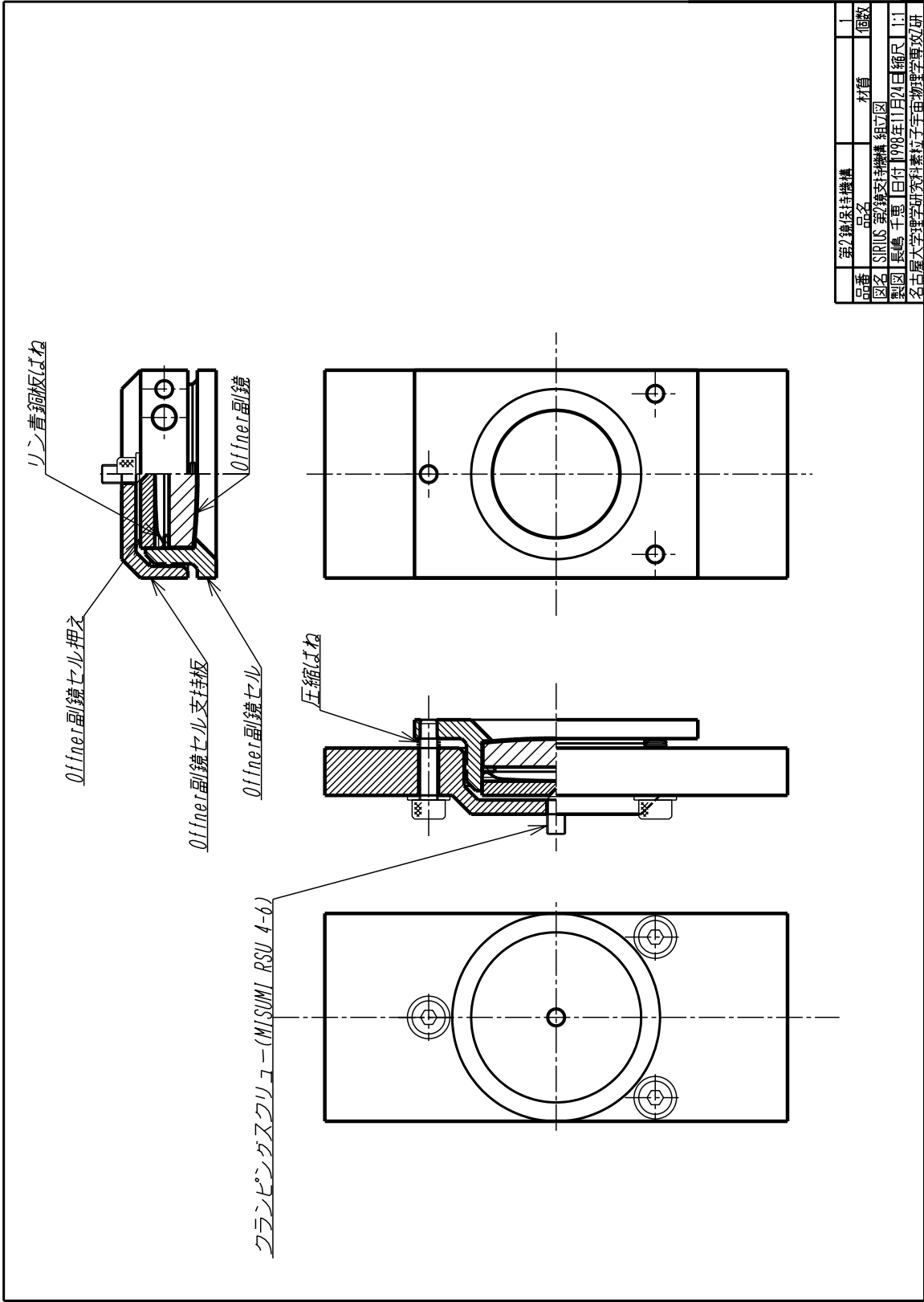
図 C.8: Offner 系全体図





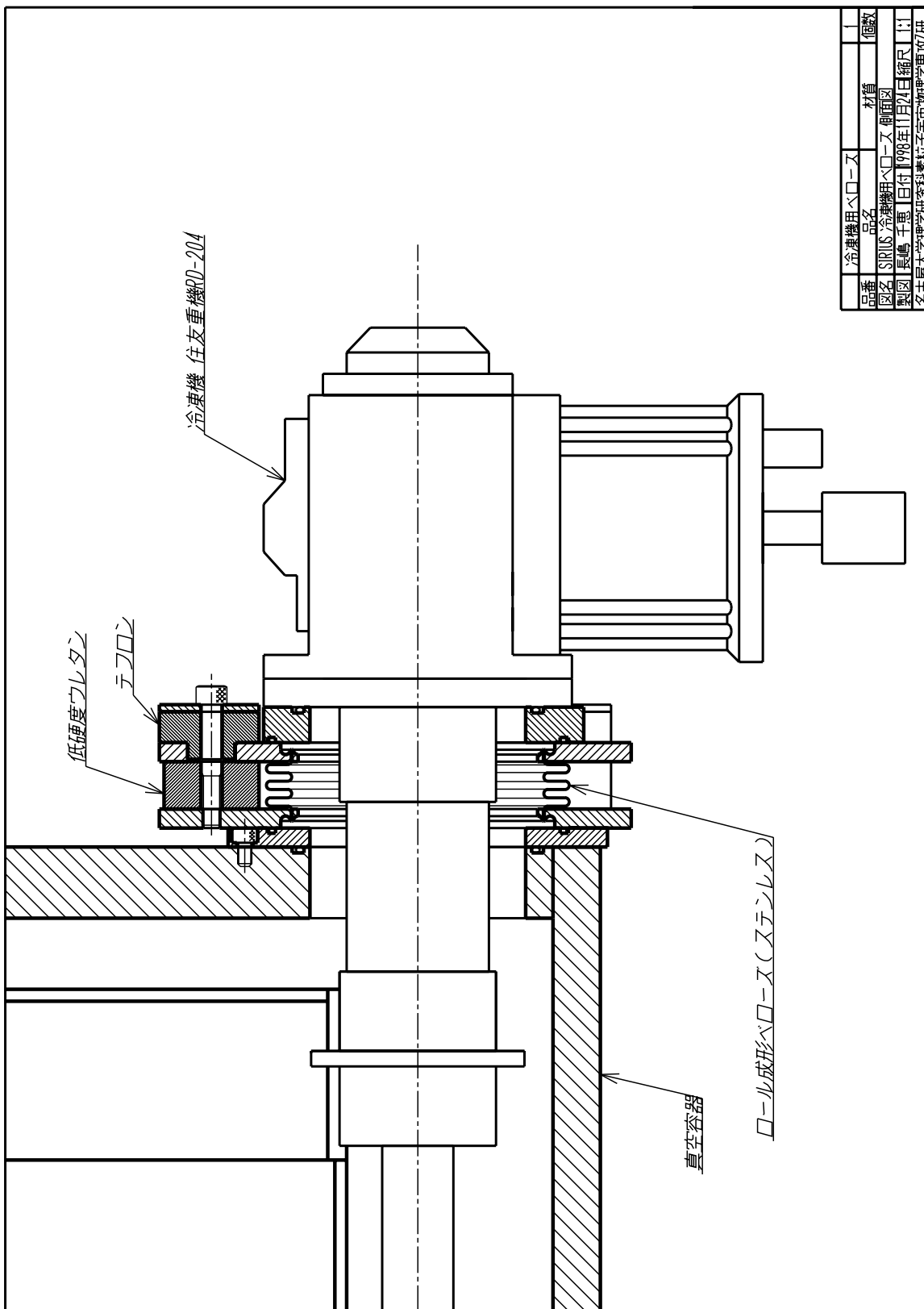
品番	第1鏡保持機構	材質	1
品名	SIRIUS 第1鏡支持機構 組立図		個数
図名	図名	日付	1998年10月9日
製図	長嶋 千恵	縮尺	1:2
名古屋大学理学部素粒子宇宙物理学専攻			

図 C.9: Offner 主鏡セルの構造



品番	品名	材質	個数
図名	SIRIUS 第2次支持機構 組立図		
製図	尺嶋 千重	日付	1998年11月21日 縮尺 1:1
名古屋大学理学部素粒子宇宙物理学専攻研			

図 C.10: Offner 副鏡セルの構造



品番	冷凍機用ベローズ	材質	個数
図名	SIRIUS 冷凍機用ベローズ 側面図		
製図	長嶋 千恵	日付	1998年11月24日
		縮尺	1:1
名古屋大学理学部素粒子宇宙物理学専攻研			

図 C.11: 冷凍機取付部の構造

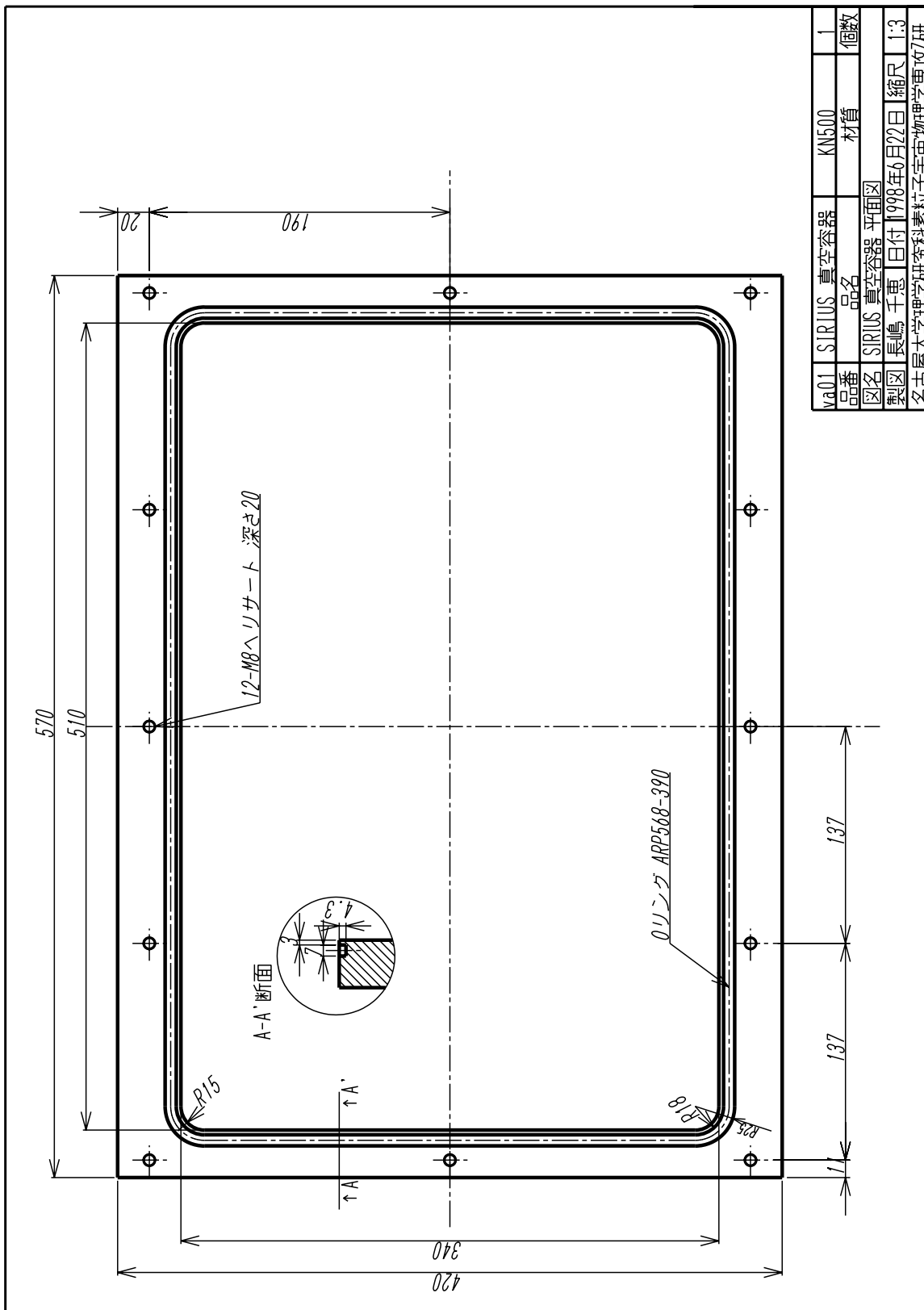
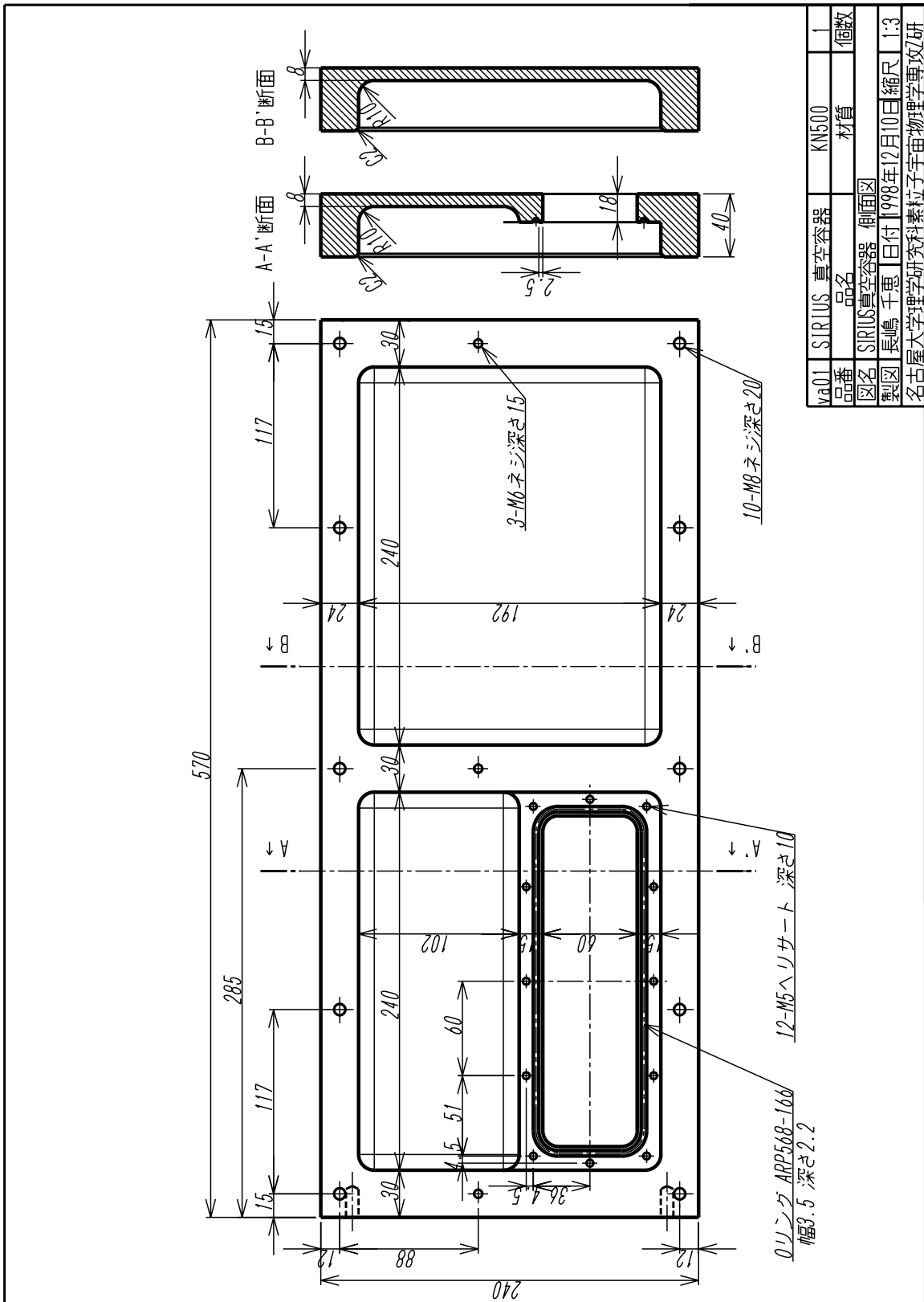


図 C.12: 真空容器 (上から見た図)



va01	SIRIUS 真空容器	KN500	1
品番	品名	材質	個数
図名	SIRIUS真空容器 側面図		
製図	長嶋 千恵	日付	1998年12月10日 縮尺 1:3
名古屋大学理学部素粒子宇宙物理学専攻研			

図 C.13: 真空容器 (横から見た図)

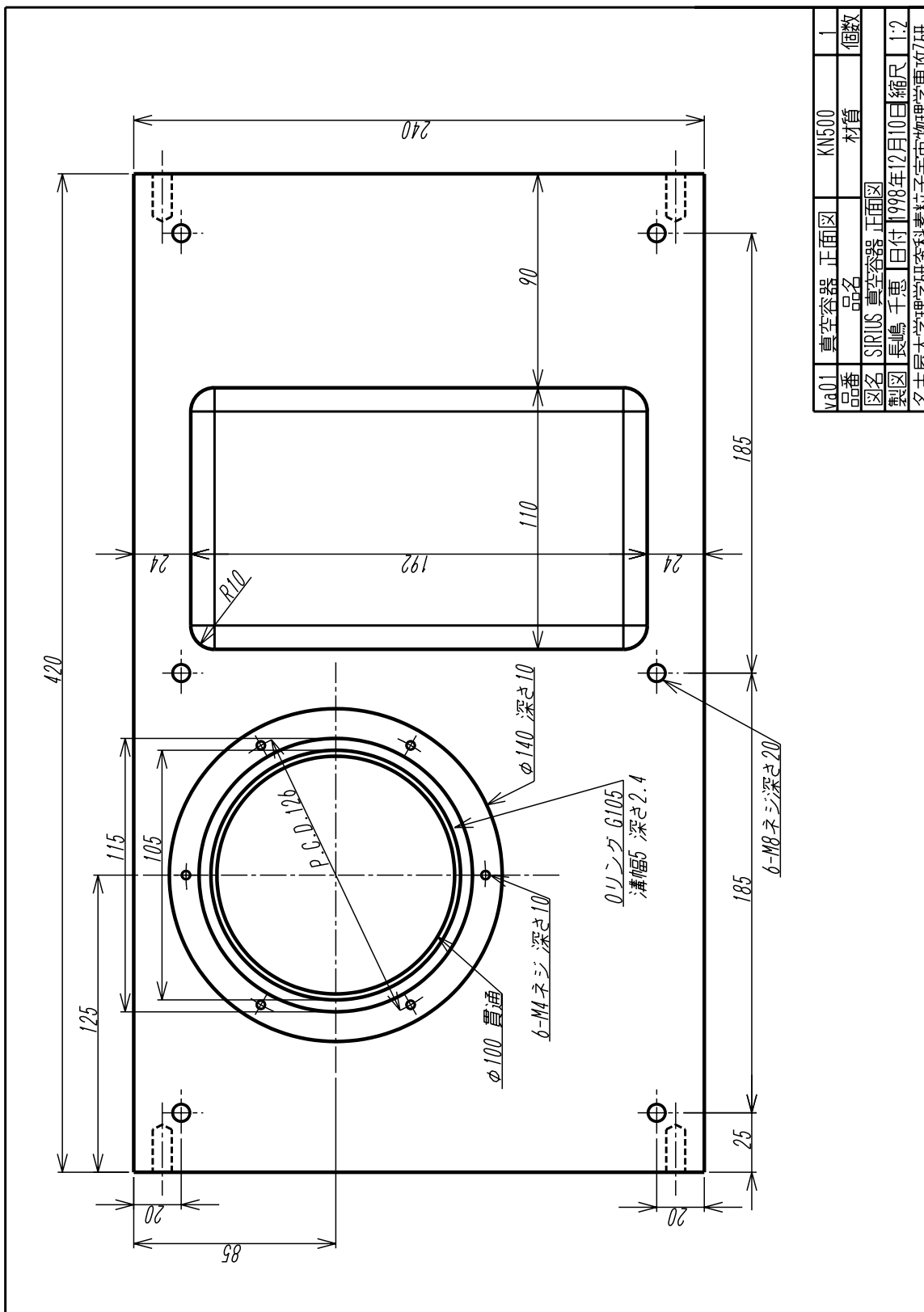
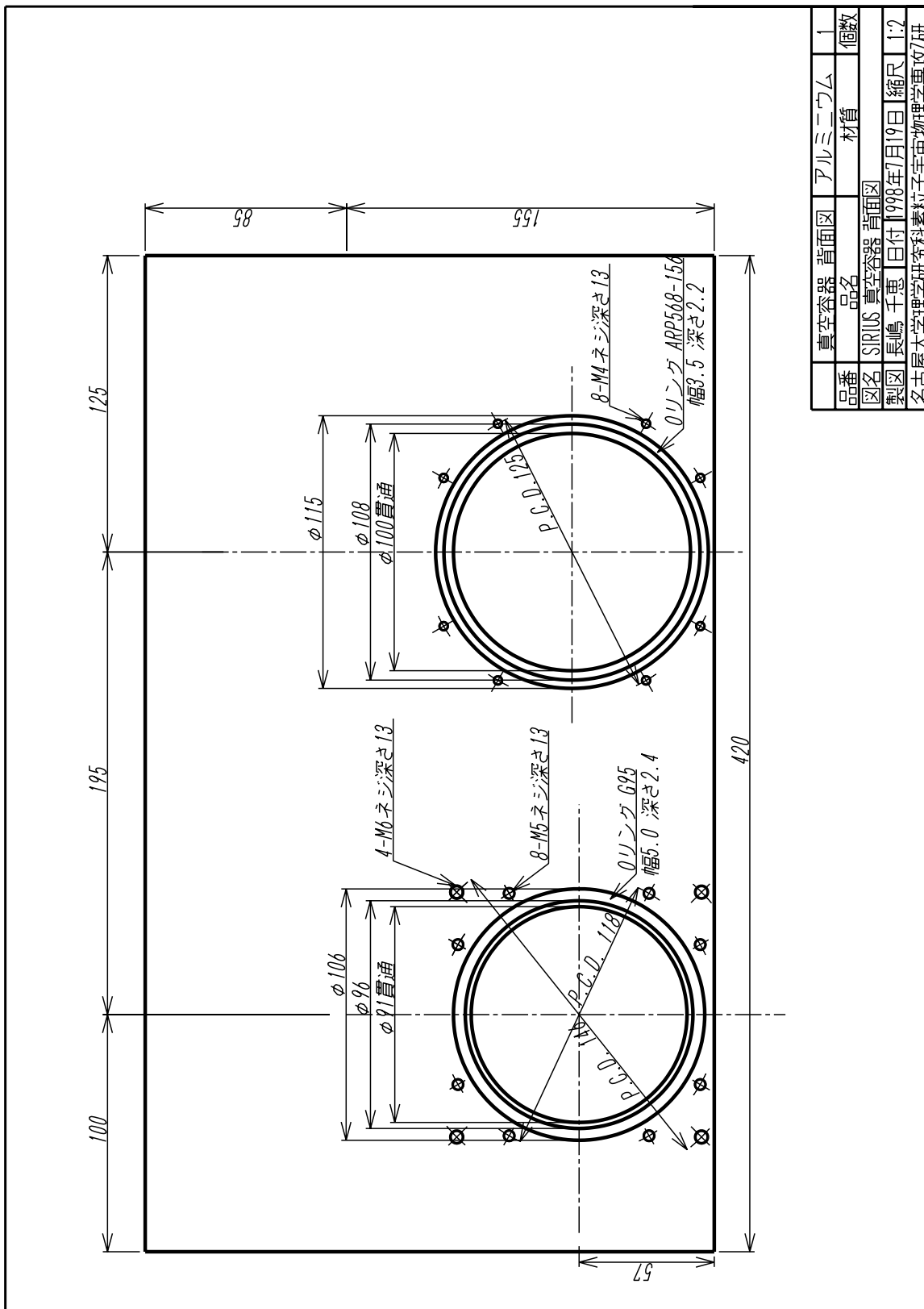


図 C.14: 真空容器 (前から見た図)



品番	真空容器 背面図	アルミニウム	1
品名	SIRIUS 真空容器 背面図	材質	個数
図名	長嶋 千恵 日付 1998年7月19日 縮尺 1:2		
製図	名古屋大学理学部素粒子宇宙物理学専攻研		

図 C.15: 真空容器 (後ろから見た図)

## 参考文献

- [1] Epcitein, “*The Deep Near Infrared Southern Sky Survey (DENIS):Progress Status and Scientific Achievements*”, F. Garzon, et al.(ed), *The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys*, (Kluwer,1997),p15-24
- [2] Skurutskie, “*The Two Microns All Sky Survey ( 2MASS):Overview and Status*”,F.Garzon, et al.(ed), *The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys*, (Kluwer,1997),p25-32
- [3] F.C.Gillett, “*Infrared arrays for Ground-Based Astronomy*”,C.G.Wynn-Williams & E.E.Becklin(ed.), *Infrared Astronomy with Arrays* (University of HAWAII,1987),p3-12
- [4] A.T.Tokunaga, “*Infrared Astronomy*”, A.Cox(ed.), “*Astrophysical Quantities,4th edition*” (AIP Press,1996)
- [5] KN500 カタログ ( 三菱化成株式会社 )
- [6] 渋谷寿一 他 著 『現代材料力学』( 朝倉書店,1986 年 )
- [7] 渡辺誠 『広波長域撮像分光装置の開発』( 修士論文,1998, 名古屋大学理学部 )
- [8] T.Matsumoto, et al. PASP,106,1217-1221(1994)
- [9] 小林俊一・大塚洋一著 『低温技術 [ 第 2 版 ] 』( 東京大学出版会,1987 年 )
- [10] 安藤稔 『冷却広視野カメラの開発』( 修士論文,1996, 名古屋大学理学部 )
- [11] “*The Astronomical Almanac 1998*” (U.S. Government Printing Office,1997)
- [12] Oort,J.H. 1977,ApJ,218,L97