

2016年度 修士論文

Belle II実験に用いる  
シリコンストリップ型崩壊点検出器の  
冷却による変形に関する研究

東京理科大学大学院 理工学研究科 物理学専攻  
修士課程2年 学籍番号 6215604

神原直也

指導教員 伊藤領介  
副指導教員 千葉順成

平成29年3月6日

## 概要

Belle II 実験とは、茨城県つくば市で 1999～2010 年まで行われていた Belle 実験の後継実験であり、現在 2018 年に行われる予定となっている。Belle 実験では 3.5 GeV の陽電子と 8 GeV の電子を衝突させ、生成される大量の  $B$  中間子対の崩壊の精密測定を行った。その結果、小林・益川理論の実験的な裏付けをすることができたが、新たな物理現象の発見には至らなかった。そのため Belle II 実験ではビーム電流を 2 倍にし、また、ナノビーム方式を取り入れるなどし、Belle 実験の約 40 倍に相当するルミノシティで実験を行う。それに伴い、高ルミノシティに対応でき、また、測定精度を向上させるために各検出器のアップグレードが現在行われている。Belle II 実験では  $B$  中間子対の崩壊の精密測定を行うため、崩壊後の粒子の再構成が必要になってくる。崩壊後の粒子の軌跡をトラッキングするために、Belle II 実験では Vertex Detector(VXD) を用いる。VXD は 6 層構造になっており、内側 2 層は Pixel Detector(PXD) と呼ばれるピクセル型の検出器で、外側 4 層は Silicon Vertex Detector(SVD) と呼ばれるストリップ型の検出器で構成されている。VXD の各層はセンサーを直線上に置いたラダー構造をしており、それを円筒形に並べることで形成される。SVD ではストリップ型のセンサーである DSSD(Double-sided Silicon Strip Detector) を用いている。また、Belle 実験では長方形の DSSD を一直線上に配置していた。アップグレードに伴い、Belle II 実験では前方領域の DSSD に角度をもたせたスラント構造を採用し、荷電粒子の入射角による位置分解能低下を抑えると共にコスト削減を実現した。また、検出器上に APV25 と呼ばれる読み出し用 ASIC(Application Specific Integrated Circuit) を配置し、配線の引き回しによる容量性ノイズの低減を狙った Origami chip-on-Sensor Concept を導入している。

前述したように Belle II 実験では chip-on-Sensor の構造のために APV25 が DSSD の直上に配置されており、読み出しに際して APV25 は最大約 0.4 W で発熱する。そのため APV25 の発熱によって SVD ラダー自体が変形してしまう可能性が示唆される。また、発熱に伴い APV25 自体の熱ノイズが増加する可能性もあり、熱ノイズの増加を抑制するために APV25 上に  $-20^{\circ}\text{C}$  の気液二層  $\text{CO}_2$  を流した冷却用の冷却パイプを配置している。本論文では、冷却による SVD ラダーの変形の構造及び変形の温度依存性を調べ、Belle II 実験中のトラッキングへの影響を考察した。

# 目次

<b>第 1 章 Belle II 実験</b>	<b>10</b>
1.1 Belle II 実験の目指す物理	10
1.2 SuperKEKB 加速器	12
1.3 Belle II 実験に用いられる検出器	14
1.3.1 PiXcel Detector (PXD)	14
1.3.2 Silicon Vertex Detector (SVD)	14
1.3.3 Central Drift Chamber (CDC)	15
1.3.4 Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter (ARICH)	15
1.3.5 Time Of Propagation (TOP)	15
1.3.6 Electromagnetic Calorimeter (ECL)	15
1.3.7 $K_L$ and Muon counter (KLM)	16
<b>第 2 章 Silicon Vertex Detector(SVD)</b>	<b>17</b>
2.1 SVD の概要と役割	17
2.2 SVD の構造	18
2.3 SVD ラダーの構造と特徴	19
2.3.1 DSSD(Double sided Silicon Strip Detector)	20
2.3.2 APV25 によるフロントエンド読み出し	22
2.3.3 APV25 の発熱量	24
2.3.4 Origami chip-on-Sensor Concept	24
2.3.5 Hybrid 基板	25
2.3.6 Airex®	26
2.3.7 リブ	26
2.3.8 SVD ラダーの固定方法	27
2.3.9 VXD の位置分解能	28
2.4 SVD の冷却システム	29
2.4.1 冷却系に要求される条件	29
2.4.2 冷却のコンセプト	30
2.4.3 Origami 部の冷却	31
2.4.4 Hybrid 部の冷却	33
2.5 Open CO <sub>2</sub> System	34
2.6 冷却における問題点と本研究の意義	36

<b>第 3 章</b>	<b>SVD ラダーと冷却パイプのセットアップ</b>	<b>37</b>
3.1	三次元測定機	39
3.2	赤外線サーモカメラ	40
3.3	座標系の設定	42
3.4	測定位置と F マークについて	43
3.5	冷却試験の流れと変形量の定義	44
3.6	Open CO <sub>2</sub> System の設定	45
3.6.1	事前試験のセットアップ	46
3.6.2	温度及び圧力の定義	47
3.6.3	Open CO <sub>2</sub> System を用いた流量及び圧力 (温度) 制御	47
3.6.4	本測定用の流量値の決定	52
<b>第 4 章</b>	<b>CO<sub>2</sub> 冷媒温度 -20℃での SVD ラダーの変形の研究</b>	<b>54</b>
4.1	冷却試験結果	54
4.1.1	冷却パイプの温度、圧力、流量	54
4.1.2	位置の不確かさの見積もり	55
4.1.3	DSSD での変形と Origami での変形の関係	55
4.1.4	各方向の変形量	56
4.1.5	温度分布	62
4.2	考察	67
4.2.1	温度シミュレーションとの比較	67
4.2.2	変形のメカニズム	71
4.2.3	最大変形量の算出	74
<b>第 5 章</b>	<b>変形の温度依存性の研究</b>	<b>77</b>
5.1	冷却試験結果	77
5.1.1	冷却パイプの温度、圧力、流量	77
5.1.2	各方向の変形量	77
5.1.3	温度分布	82
5.2	考察	84
5.2.1	温度シミュレーションとの比較	84
5.2.2	冷却パイプの温度と変形量の相関	86
5.2.3	Origami の温度と変形量の相関	92
5.2.4	トラッキングに対する影響と要求精度	96
<b>第 6 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>100</b>

付録 A 発熱量の変化による影響	102
A.1 発熱量と変形量の相関	102
A.2 発熱量の影響	104

# 表 目 次

2.1	各 Layer 毎の Ladder、Sensor、APV25 の枚数 . . . . .	19
2.2	SVD ラダーの各パーツの組成と厚さ . . . . .	20
2.3	DSSD の主なパラメータ . . . . .	22
2.4	各 Layer 毎の Origami 部と FW 及び BW センサー部における発熱 量の比較 . . . . .	24
2.5	Origami 部の各パーツの厚さ . . . . .	33
3.1	Dry Cap[12] の仕様 . . . . .	38
3.2	レンズの使用 [13] . . . . .	40
3.3	三次元測定機の精度 . . . . .	40
3.4	赤外線サーモカメラの仕様 . . . . .	41
4.1	モデルの熱伝導率 . . . . .	67
4.2	冷却パイプ、Origami、Airex、DSSD の熱膨張の計算 . . . . .	72
4.3	Fitting によって得られた各パラメータ . . . . .	75
5.1	それぞれの測定の温度、圧力、流量 . . . . .	77
5.2	シミュレーションと赤外線サーモカメラの温度の比較。 $T_s$ はシミュ レーションによる温度、 $T_c$ は赤外線サーモカメラによる温度を示す。	86
5.3	Fitting によって得られた各パラメータ . . . . .	87
A.1	Origami 上の温度と発熱量の相関 . . . . .	103

# 目次

1.1	ユニタリー三角形	11
1.2	$b \rightarrow s\gamma$ 遷移のファイマンダイアグラム	11
1.3	SuperKEKB 加速器	12
1.4	ナノビーム方式による交差	13
1.5	Belle II 実験で用いられる検出器	14
2.1	SVD の崩壊点決定の概略	18
2.2	左 : SVD の外観 右 : Layer6 SVD ラダーの外観	18
2.3	Layer 毎の SVD ラダーの配置。青色は L3 用の、緑色は L4~L6 用の長方形型のセンサー、橙色は L4~L6 用の台形型のセンサーを示す。各センサーの上下に書かれている数字は上が N-side の、下が P-side の APV25 の枚数を示す。また、黒線内は物理領域 ( $17^\circ \sim 150^\circ$ ) を示す。	19
2.4	L6 SVD ラダーの構造	20
2.5	台形型と長方形型の DSSD	21
2.6	L6 の DSSD の名称	21
2.7	DSSD の構造	22
2.8	APV25	23
2.9	APV25 のブロック図	23
2.10	VA1TA、APV25、multi-peak mode の比較	24
2.11	Origami chip-on-Sensor Concept の概略図	25
2.12	Hybrid 基板の写真。写真下の 6 枚のチップは APV25 である。	25
2.13	Airex の写真	26
2.14	リブの写真	26
2.15	L6 エンドリングの写真 [5]	27
2.16	FW 側エンドマウントの写真。左が表面、右が裏面を表している。	28
2.17	BW 側エンドマウントの写真。左が表面、右が裏面を表している	28
2.18	エンドマウントの固定方法	28
2.19	Belle II 実験に用いる VXD と Belle 実験に用いた SVD の位置分解能 ( $z$ 方向) の比較 [9]	29

2.20	CO <sub>2</sub> の相図。縦軸が圧力、横軸がエントロピーを示す図中の赤、青、緑の実線が温度が -20 °C のラインであり、緑が液体の状態、赤が気液二相混合状態、青が気体の状態を示す。図から分かるように気液二相混合状態では圧力（縦軸）を 20 Bar で一定に保てば、温度を一定に保つことができる。	31
2.21	Origami 部の冷却の概略図	32
2.22	Origami 部の冷却の写真	32
2.23	Hybrid 部の冷却の概略図	33
2.24	IBBelle の外観図 [11]	35
2.25	Open CO <sub>2</sub> System[11]	35
2.26	Open CO <sub>2</sub> System の配管図 [11]	36
3.1	冷却試験のセットアップ	38
3.2	Dry Cap[12] の写真	38
3.3	三次元測定機	39
3.4	赤外線サーモカメラ	41
3.5	赤外線サーモカメラと PT100 での温度の比較	42
3.6	座標系の決定	43
3.7	ラダーの測定点	44
3.8	三次元測定器で見た F マーク	44
3.9	冷却試験の流れ	45
3.10	冷却試験概略図	46
3.11	事前試験セットアップ（全体図）	47
3.12	冷却対象（拡大図）	47
3.13	auto mode による測定 (流量 2.0 g/s)	48
3.14	auto mode による測定 (流量 3.0 g/s)	49
3.15	auto mode による測定 (流量 4.0 g/s)	50
3.16	manual mode による測定	51
3.17	炭酸ボンベ交換による流量の変化	52
3.18	流量のグラフ	53
3.19	発熱前後での $T_1$ と $T_2$ の温度差	53
4.1	冷却パイプの温度のグラフ	54
4.2	冷却パイプの圧力のグラフ	54
4.3	流量のグラフ	55
4.4	$x$ 方向の変形の比較	56
4.5	実際の SVD ラダー。赤の点線は各センサー部の境界を示している。	58
4.6	各測定点における $x$ 方向の変形量（発熱無し）	58

4.7	$x$ 方向の変形量の断面図 (発熱無し)	58
4.8	各測定点における $x$ 方向の変形量 (発熱有り)	59
4.9	$x$ 方向の変形量の断面図 (発熱有り)	59
4.10	各測定点における発熱前後での変形量の比較	59
4.11	各センサー部における F マークの $y$ 方向の変形量	60
4.12	各センサー部における F マークの $z$ 方向の変形量	61
4.13	+Z センサー部における温度分布	63
4.14	CE センサー部における温度分布	64
4.15	-Z センサー部における温度分布	65
4.16	BW センサー部における温度分布	66
4.17	温度分布シミュレーションのモデル	68
4.18	温度シミュレーションのモデルの断面図	68
4.19	シミュレーションとの比較	68
4.20	新しいモデル。右側の図上の黄色の部分が追加した銅線である。	69
4.21	新しいモデルでの比較1	70
4.22	新しいモデルでの比較2。左がサーモカメラの画像、右がシミュレーションの画像を表している。	70
4.23	Origami の分類	71
4.24	SVD ラダーの断面図	71
4.25	変形の流れ。図中の黒矢印は熱収縮の方向を示している。	72
4.26	三次元測定機で見た冷却パイプの目印。黒色に写っている部分が目印である。	73
4.27	冷却パイプの熱収縮	74
4.28	-Z センサー部における $x$ 方向の Fitting 結果 (発熱無し)	76
4.29	-Z センサー部における $x$ 方向の Fitting 結果 (発熱有り)	76
5.1	$x$ 方向の変形量の温度依存性	79
5.2	$y$ 方向の変形量の温度依存性	80
5.3	$z$ 方向の変形量の温度依存性	81
5.4	-Z センサー部における4通りの温度分布 (表面)	82
5.5	-Z センサー部における4通りの温度分布 (裏面)	83
5.6	各設定温度における温度分布の比較。左側がシミュレーション結果、右側がサーモカメラの画像を示している。	85
5.7	温度の比較場所。赤丸が比較した場所で、数字がそれぞれの場所の測定番号に対応している。	86
5.8	-Z センサー部における $T_{\text{set}} = -10$ °C の $x$ 方向の Fitting 結果	88
5.9	-Z センサー部における $T_{\text{set}} = -15$ °C の $x$ 方向の Fitting 結果	89
5.10	-Z センサー部における $T_{\text{set}} = -20$ °C の $x$ 方向の Fitting 結果	90

5.11	-Z センサー部における $T_{\text{set}} = -25$ °C の $x$ 方向の Fitting 結果 . . .	91
5.12	冷却パイプの温度と $x$ 方向の変形量の相関 . . . . .	92
5.13	Origami の温度決定の手順 . . . . .	94
5.14	Origami の温度 . . . . .	95
5.15	Origami の温度と $x$ 方向の変形量の相関 . . . . .	96
5.16	DSSD の位置の変化によるトラッキングのズレ . . . . .	97
5.17	温度の要求精度を求めるための簡易モデル . . . . .	98
A.1	Origami 上の温度の測定点。赤丸が測定点でそれぞれの場所を $P_1 \sim P_6$ として表現している。 . . . .	102
A.2	Origami 上の温度の発熱量の相関 . . . . .	103
A.3	発熱量と $x$ 方向の変形量の相関 . . . . .	104

# 第1章 Belle II 実験

## 1.1 Belle II 実験の目指す物理

現在の素粒子物理学における現象の多くは素粒子標準模型により説明することができる。標準模型は”電磁相互作用”、”弱い相互作用”、”強い相互作用”の3つの相互作用を記述する理論である。この標準模型では3世代から成るフェルミオンのクォーク及びレプトン、相互作用を媒介するゲージ粒子、スピン0であるヒッグス粒子により構成される。1964年に  $K$  中間子における CP 対称性の破れが観測された [1] が、1973年にこれを標準理論の枠組み内で理論的に説明したのが小林・益川理論 [2] である。この理論が提唱されるまでは  $u$ 、 $d$ 、 $s$  の3種類のクォークしか発見されていなかったが、この理論では3世代6種類以上のクォークが存在することにより、CP 対称性が破れることを予言した。3世代6種類のクォークの弱い相互作用の固有状態と質量固有状態の世代間混合を表す Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 行列 [3] は (1.1) 式で表される。

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

行列の各成分の  $V_{ij}$  は添字のクォーク間遷移の結合定数である。 $V_{\text{CKM}}$  はユニタリ行列であるので、

$$V_{\text{CKM}}^\dagger V_{\text{CKM}} = 1 \quad (1.2)$$

を満たす。(1.2) 式の3行×1列成分に着目すると、

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (1.3)$$

を満たしている。これを複素平面上に図示すると図 1.1 のようになる。

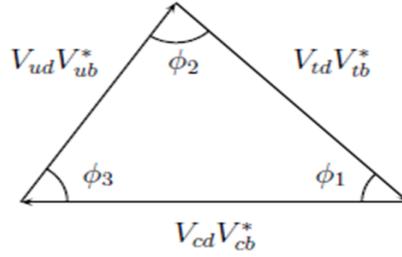


図 1.1: ユニタリー三角形

このとき (1.3) 式が複素成分をもつ。すなわち CP 非対称性があると閉じた三角形を形成する。この三角形をユニタリー三角形と呼ぶ。Belle 実験では  $b$  クォークと  $\bar{b}$  クォークで構成される  $\Upsilon(4S)$  中間子の崩壊によって生成される  $B$  中間子の崩壊を観測することで、このユニタリー三角形の内角のひとつである  $\phi_1$  の測定を行った。生成された  $B_0\bar{B}_0$  中間子対は  $B_0\bar{B}_0$  中間子混合により時間に依存して崩壊率が変化する。これを時間依存の CP 対称性の破れという。標準模型からの理論計算では  $\sin 2\phi_1 = 0.679 \pm 0.020$  である。一方、Belle 実験の結果では  $B \rightarrow J/\psi K_0^S$  の崩壊から  $\sin 2\phi_1 = 0.667 \pm 0.023$  (統計誤差)  $\pm 0.012$  (系統誤差) [4] が得られた。

Belle 実験の結果は小林・益川理論の CP 対称性の破れの実験的根拠となったが、その一方で統計誤差の大きさから理論計算からのズレによる新物理への有意な手がかりを得ることはできなかった。このような背景のもと、Belle 実験の約 50 倍の統計を取得するため、2018 年から SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器 [5] を用いて Belle II 実験が開始する予定である。SuperKEKB 加速器により最高ルミノシティ ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) は Belle 実験の約 40 倍となることが期待されるが、単にルミノシティを増加させるだけでなく検出器の性能をあげることが必要である。

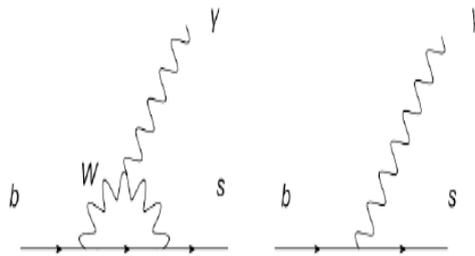


図 1.2:  $b \rightarrow s\gamma$  遷移のファイマンダイアグラム

新物理の探索には多くの崩壊モードのうち、特に  $b \rightarrow s\gamma$  遷移は新物理探索に有力なモードの 1 つである [6]。図 1.2 に示すように、標準模型ではツリーダイアグラムでの  $b \rightarrow s\gamma$  遷移は禁止されているため、 $b \rightarrow s\gamma$  遷移が起こるとすればループ

を介して遷移が起こりうる。このとき、標準模型においてはこの過程で出てくる  $\gamma$  はほぼ左巻きである。しかし、新物理による右巻きカレントの寄与があった場合には時間に依存した CP 非対称度が現れると考えられている。従って、この  $b \rightarrow s\gamma$  遷移のようなループ中に新物理が寄与しうる崩壊モード、例えば  $B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$  や  $B \rightarrow K^{*0} \gamma$  などを精密測定することで標準模型から計算される CP 非対称度からのズレを発見することを Belle II 実験で目指す。また Belle 実験では  $B^0$  中間子と  $\bar{B}^0$  中間子の崩壊時間差を精密測定したが、さらに精度をあげて測定することで標準模型の示唆する CP 非対称度からのズレを観測することも期待される。

## 1.2 SuperKEKB 加速器

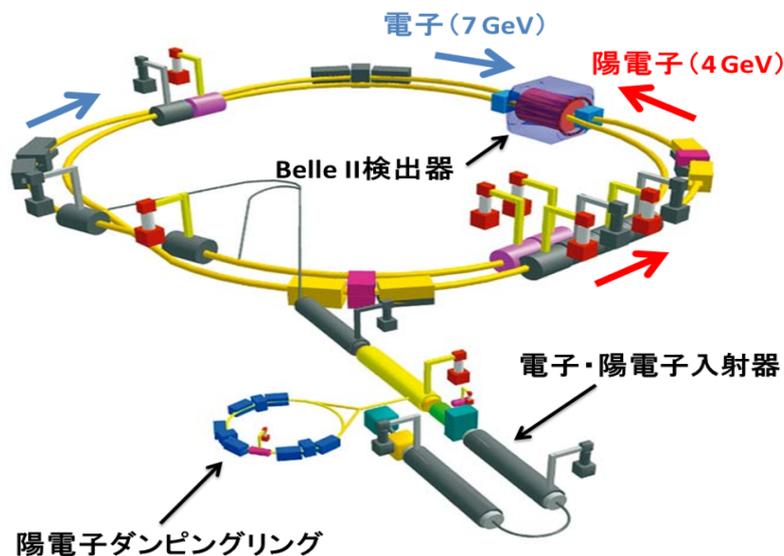


図 1.3: SuperKEKB 加速器

Belle II 実験では図 1.3 にあるように SuperKEKB 加速器を用いて実験を行う。SuperKEKB は LINAC と呼ばれる全長約 600 m の入射線形加速器と周長約 3 km の円形加速器から構成される。LINAC では、電子を 7 GeV、陽電子を 4 GeV まで加速させ電子は電子リングに陽電子は陽電子リングに移される。その後、検出器が置かれた場所で電子と陽電子を衝突させる構造になっている。Belle II 実験では Belle 実験の約 40 倍のルミノシティを達成することを目標にしている。

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \left( \frac{R_L}{R_{\xi y}} \right) \quad (1.4)$$

(1.4) 式はルミノシティの計算式で、 $\gamma$ 、 $e$ 、 $r_e$  はそれぞれローレンツ因子、電荷、古典電子半径である。また  $\pm$  はそれぞれ陽電子 (+)、電子 (-) の場合を示している。

$R_L$  はそれぞれビームの交差角と砂時計効果によるルミノシティの減衰因子、 $R_{\xi y}$  は beam-beam parameter である。目標を達成するために Belle II 実験では大きく 2 つの変更を行った。1 つはナノビーム方式を採用したことである。図 1.4 はナノビーム方式の衝突概略図である。Belle II 実験では電子と陽電子を正面衝突させるのではなく、83 mrad の交差角で衝突させる。その結果、正面衝突よりも水平方向のビームサイズを小さくすることで  $\beta_y$  の値を  $\frac{1}{20}$  倍小さくすることを可能にした。2 つ目はビーム電流を上げたことである。Belle 実験では陽電子、電子のビーム電流はそれぞれ 1.64 A、1.19 A だったが、Belle II 実験では約 2 倍の 3.6 A、2.6 A に変更した。この 2 つの変更によりルミノシティを約 40 倍向上させている。

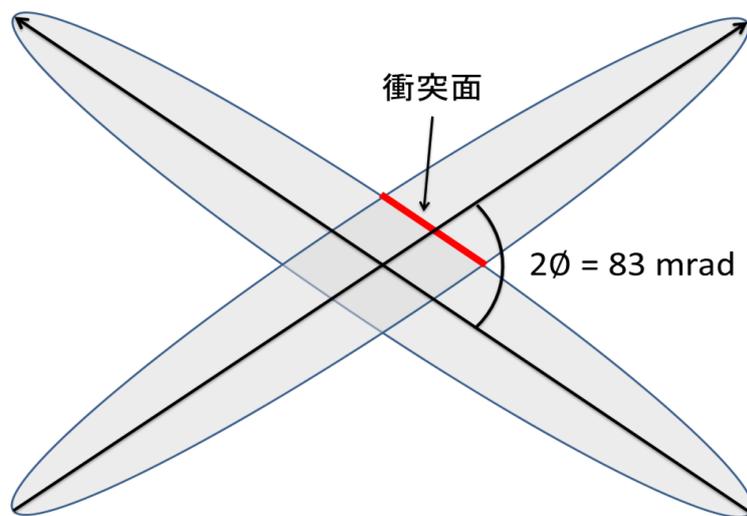


図 1.4: ナノビーム方式による交差

### 1.3 Belle II 実験に用いられる検出器

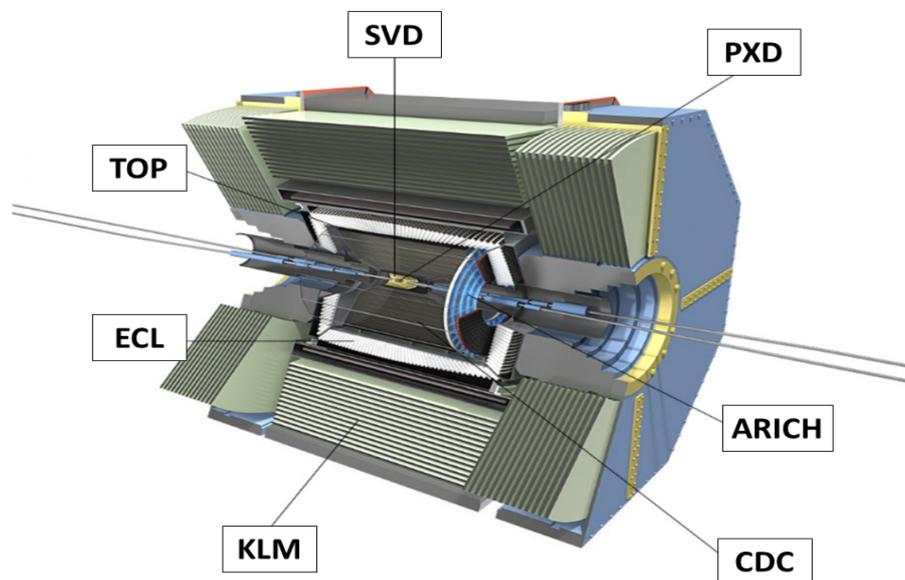


図 1.5: Belle II 実験で用いられる検出器

図 1.5 は Belle II 実験で用いる検出器の外観である。Belle II 実験では、粒子のエネルギー、運動量、崩壊点などを測定するために 7 種類の検出器を用いる。以下でその 7 種類の検出器について記述していく。

#### 1.3.1 PiXcel Detector (PXD)

PXD は 7 種類の検出器の中で最内層の検出器で、衝突点から  $17^\circ \sim 150^\circ$  の角度を覆っており、ピクセル型のセンサーが 2 層用いられる。PXD の役割としては崩壊した粒子の軌跡をトラッキングし、粒子の崩壊点を測定することである。しかし第 1 章 2 節で述べたようにルミノシティ増加に伴い、崩壊点に最も近い PXD の占有率が最も上がる。Belle II 実験では後述する SVD で粒子の軌跡を大まかにトラッキングしたデータをもとに、PXD でトラッキングを行い、PXD のトラッキングに必要なデータサイズを小さくする。

#### 1.3.2 Silicon Vertex Detector (SVD)

SVD は PXD の外層部に当たり、SVD は 4 層分配置され、ストリップ型のシリコンセンサーを用いる。SVD の役割としては PXD と同様に崩壊した粒子の軌跡をトラッキングし、粒子の崩壊点を測定することである。Belle II 実験では PXD

と SVD を合わせて VXD(VerteX Detector) と呼んでいる。SVD に関しては本論文の主題であるので、2 章で詳しく説明する。

### 1.3.3 Central Drift Chamber (CDC)

CDC は SVD の外層部分に配置されるドリフトチェンバーである。CDC 中に He - C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ガスが満たされており、荷電粒子がそのガスと衝突し、イオン化させる。イオン化した粒子は CDC 内に張り巡らされているワイヤーに集められ、エネルギー損失を測定することができる。また、1.5 T の磁場がワイヤーと平行にかけられており、粒子の軌跡をたどることにより曲率半径を求めることができ、それにより粒子の運動量を得ることができる。

### 1.3.4 Aerogel Ring Imaging CHerenkov counter (ARICH)

ARICH はエンドキャップ部に配置され、粒子識別に用いられる。輻射体である Aerogel に入射した粒子が光速を超えると入射した粒子の速度に応じた角度にチェレンコフ光が発生する。それを HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) と呼ばれる光検出器で検出することでリング像を再構成し、その半径を比較することにより  $K$  中間子と  $\pi$  中間子の識別を行う。Belle II 実験では ARICH による  $K$  中間子と  $\pi$  中間子を  $4\sigma$  での識別を目標にしている。

### 1.3.5 Time Of Propagation (TOP)

TOP はバレル部に配置され、ARICH と同様にチェレンコフ光を用いた粒子識別に用いられる。輻射体は人口石英を用い、輻射体内で発生したチェレンコフ光を輻射体内で反射させ、端部に設置された MCP-PMT(Micro Channel Plate Photo Multiplicir Tube) と呼ばれる光検出器で観測し、チェレンコフ光の放射角の違いから起きる伝搬経路の差と到達時間を用いて粒子識別を行う。

### 1.3.6 Electromagnetic Calorimeter (ECL)

ECL は光子のエネルギーを測定するのに用いられる。Belle II 実験では、光子は 20 MeV~4 GeV の幅広いエネルギー領域で生成される。従って、高いエネルギー分解能を持った検出器が必要になる。そのため ECL ではシンチレータとして発光出力の高い CsI 結晶を用いている。また CDC で測定した運動量  $P$  と ECL で測定したエネルギー  $E$  の比で定義される  $E/P$  を用いることで電子及び陽電子を他の荷電粒子と識別することができる。

### 1.3.7 $K_L$ and Muon counter (KLM)

KLM は  $K_L$  と  $\mu$  粒子を識別するための検出器で最外層に配置される。KLM の構造は鉄とプラスチックシンチレータまたは RPC(glass-electrode resistive plate chambers) のサンドイッチ構造になっている。 $\mu$  粒子は物質中で電磁相互作用のみ受ける。対して荷電ハドロンは強い相互作用も受けるので、 $\mu$  粒子よりも多重散乱が大きくなる。この差を利用して  $\mu$  粒子の識別が行われる。また  $K_L$  に関しては検出器内では特に反応せず、鉄内で相互作用することによって検出される。これらの相互作用の違いを用いて  $K_L$  と  $\mu$  粒子を識別する。

## 第2章 Silicon Vertex Detector(SVD)

### 2.1 SVD の概要と役割

Belle II 実験における SVD の役割は、 $B$  中間子対の崩壊点を求めることで mixing による CP 対称性の破れを測定することである。また、 $D$  中間子や  $\tau$  レプトンの崩壊を伴う他の崩壊モードの測定や低運動量の荷電粒子の飛跡再構成にも重要な役割を担っている。図 2.1 は SVD による崩壊点決定の概略と生成された  $B$  中間子対の崩壊時間差の測定原理を示している。 $B$  中間子の崩壊によって生成された粒子がセンサーに入射することで 2 次元的に粒子の通過位置を決定できる。その 2 次元位置情報を各層で求めることによって 3 次元的に粒子の軌跡をトラッキングすることができる。この飛跡を辿ることで  $B$  中間子対の崩壊点を求めることができる。その情報から  $B$  中間子対の崩壊点位置の差の分布を調べることで寿命を決定し、それらを比較することで CP 対称性の破れを観測することができる。Belle II 実験では  $\beta\gamma = 0.28$  であり、 $B$  中間子の寿命は約 1.5 ps なので崩壊するまでに約 100  $\mu\text{m}$  程度進む。SVD でも崩壊点の決定はできるが、最終的には、より位置分解能の良い PXD のデータを用いる。しかし、ルミノシティを 40 倍にしたことにより PXD の占有率が上がり、バックグラウンドイベントとの区別が難しくなる。そこで SVD のトラッキング情報と組み合わせることで余分なデータを削減することを可能にしている。

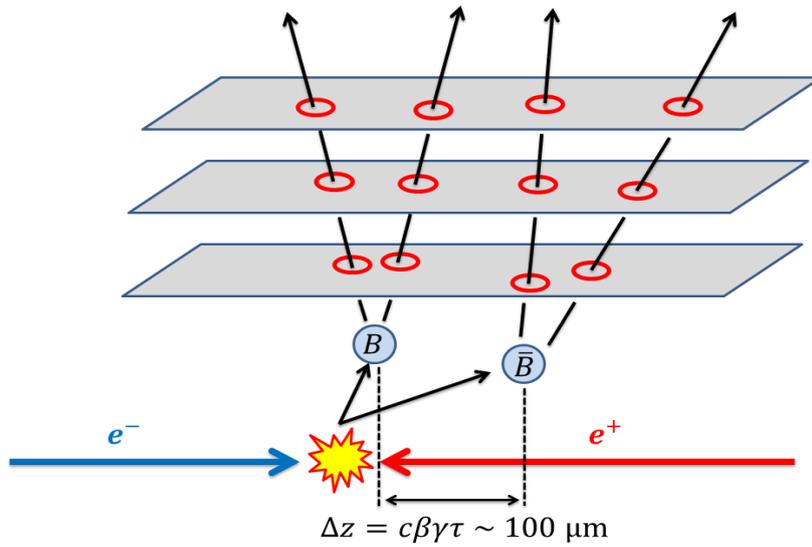


図 2.1: SVD の崩壊点決定の概略

## 2.2 SVD の構造

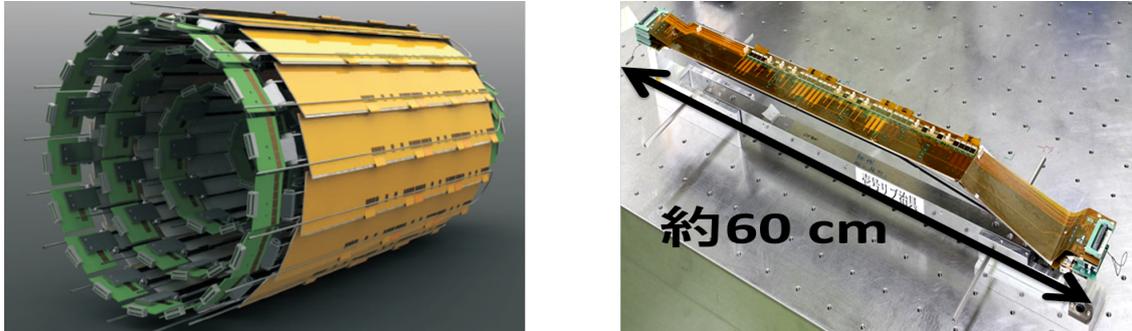


図 2.2: 左 : SVD の外観 右 : Layer6 SVD ラダーの外観

図 2.2 に SVD の外観を示す。また、図 2.3 にあるように内側から Layer 3~Layer 6(以降、Layer のことを L と表記する) の 4 層分配置される。図 2.2 に示すように SVD はラダー構造の検出器を円筒形に配置することで構成されている。L4~L6 に用いられる SVD ラダーにはスラント構造が用いられている。この構造を用いることにより、粒子の通過距離を減らすことができ、多重散乱の影響を低くすることができる。また、一直線の系で同様の角度範囲を占有するよりも使用するセンサーの枚数を減らすことができ、コストの面でも費用を削減することができる。以下の図 2.3 と表 2.1 に Layer 毎の衝突点からの距離やセンサーの構成や位置を示す。

表 2.1: 各 Layer 毎の Ladder、Sensor、APV25 の枚数

Layer	Radius [mm]	Ladders	Sensors / Ladder	Sensors	APV25 / Sensor	APV25
6	135	16	5	85	10	850
5	104	12	4	56	10	560
4	80	10	3	30	10	300
3	39	7	2	16	12	192
合計		49		187		1902

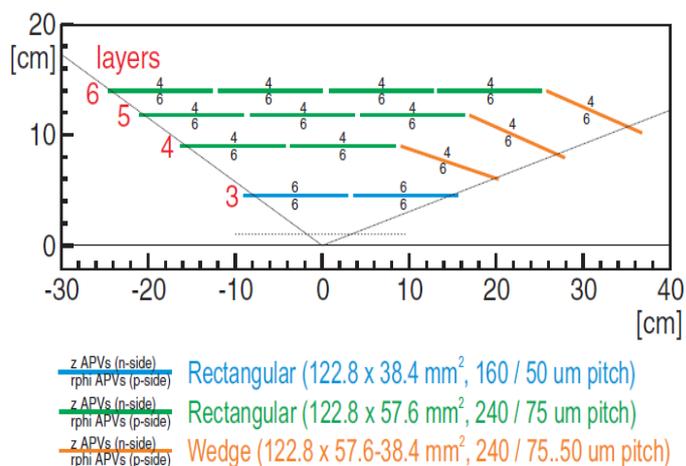


図 2.3: Layer 毎の SVD ラダーの配置。青色は L3 用の、緑色は L4~L6 用の長方形型のセンサー、橙色は L4~L6 用の台形型のセンサーを示す。各センサーの上下に書かれている数字は上が N-side の、下が P-side の APV25 の枚数を示す。また、黒線内は物理領域 ( $17^\circ \sim 150^\circ$ ) を示す。

## 2.3 SVD ラダーの構造と特徴

第 2 章 2 節でも触れたように SVD はラダー構造をしている。図 2.4 に実際の L6 の SVD ラダーの構造と表 2.2 にそれぞれのパーツの主な組成と厚さを示す。以下で SVD ラダーの構造と特徴について説明していく。

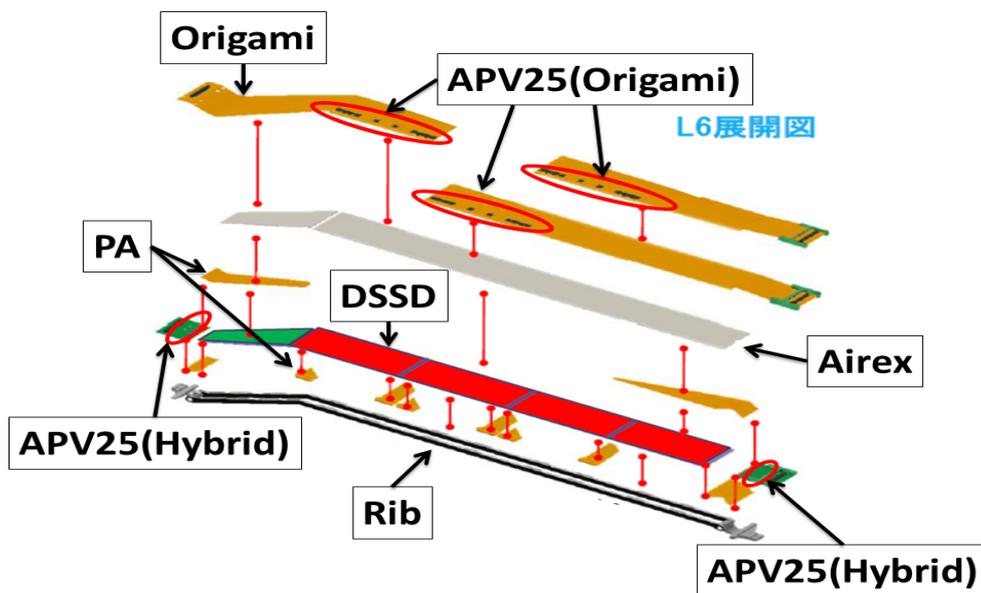


図 2.4: L6 SVD ラダーの構造

表 2.2: SVD ラダーの各パーツの組成と厚さ

名称	主な組成	厚さ [mm]
Origami	ポリイミド	0.24
APV25	シリコン	0.10
DSSD	シリコン	0.32
Airex	ポリマー素材	1
PA	ポリイミド	0.08
Rib	CFRP + Airex	3.3

### 2.3.1 DSSD(Double sided Silicon Strip Detector)

SVD ではストリップ型のシリコンセンサーである DSSD を用いる。図 2.5 にあるように DSSD は長方形型と台形型の 2 種類ある。また、図 2.6 に L6 における各 DSSD の名称と用いられる DSSD の種類を示す。台形型の DSSD は L4~L6 のスラント部分 (FW) に用いられる。図 2.7 にあるように DSSD は片面に p 型半導体 (p-side) のストリップ、もう片面に n 型半導体 (n-side) のストリップが 90° 違う方向に配置されている。荷電粒子が DSSD 内を通過すると粒子の軌跡に沿って電子正孔対が生成される。生成された電子は n-side のストリップ側に、正孔は p-side のストリップ側に集められ、収集した電荷を用いて 2 次元的に粒子の通過位置を求めることができる。なお、n-side の n<sup>+</sup> ストリップ間の p<sup>+</sup> ストリップは、n<sup>+</sup> ス

トリップ同士が電氣的に接続するのを防ぐ役割をしている [7]。以下の表 2.3 に各 DSSD の主要なパラメータを示す。

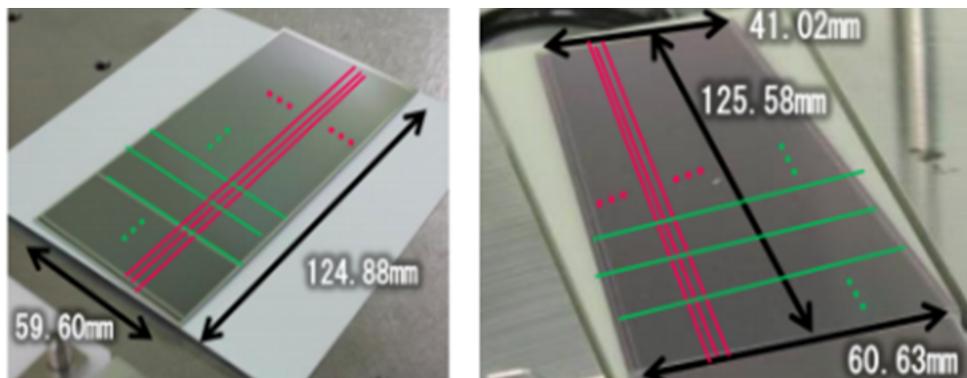


図 2.5: 台形型と長方形型の DSSD

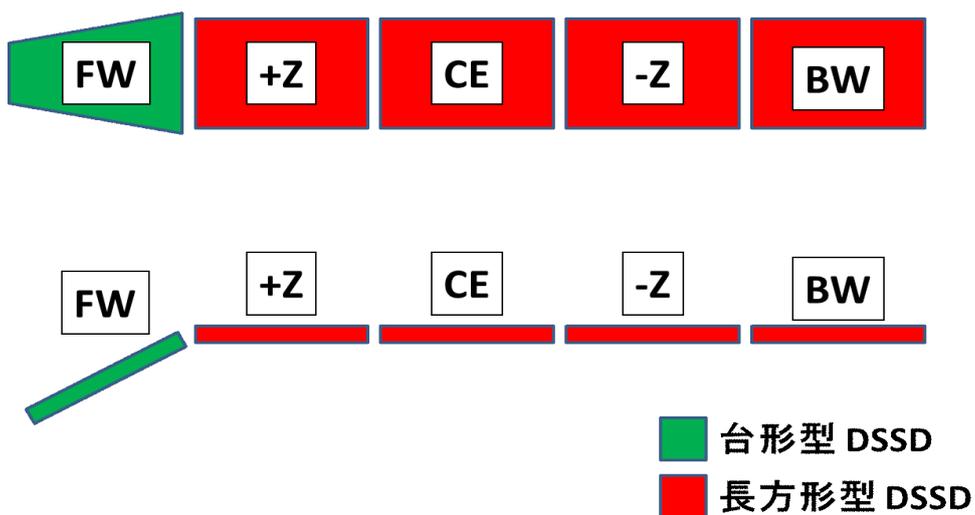


図 2.6: L6 の DSSD の名称

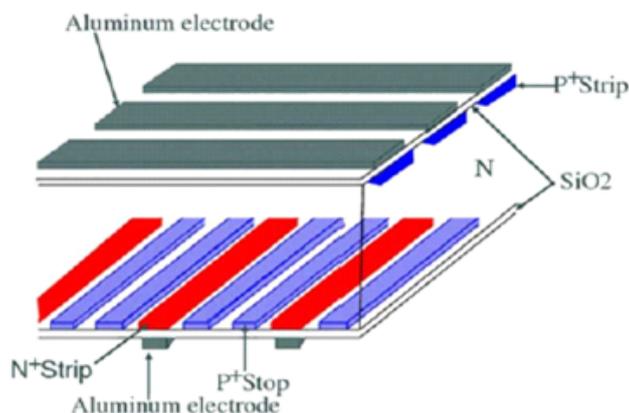


図 2.7: DSSD の構造

表 2.3: DSSD の主なパラメータ

	Barrel Sensors		Foward Sensors
Layer	3	4 to 6	4 to 6
#Strips p-side	768	768	768
#Strips n-side	512	512	768
Pitch p-side [ $\mu\text{m}$ ]	50	75	75...50
Pitch n-side [ $\mu\text{m}$ ]	160	240	240
Area(total) [ $\text{mm}^2$ ]	5048.90	7442.85	6382.6
Area(active) [ $\text{mm}^2$ ]	4737.80	7029.88	5890
Thickness [ $\mu\text{m}$ ]	320	320	300

### 2.3.2 APV25 によるフロントエンド読み出し

読み出し用 ASIC として APV25 [8] を用いる。図 2.8 及び図 2.9 に APV25 とそのブロック図を示す。もともと APV25 は CERN の CMS 実験用に開発されたもので低ノイズのフロントエンドチップである。1 枚の APV25 で 128 ch の信号を読み取ることができ、それぞれのチャンネルに 192 個のリングバッファがついており、40 MHz の rate でデータを蓄積することができる。また、shaping time を 50 ns~200 ns まで調節することができるなど実績のある ASIC である。Belle 実験で使っていた読み出し用 ASIC は VA1TA と呼ばれるもので shaping time が 800 ns で noise のスレッシュホールド時間が 2000 ns だった。しかし、APV25 に変えることで shaping time を 50 ns、noise のスレッシュホールド時間を 160 ns にでき、占有率を 1/12.5 にすることを可能にし、占有率が最も高いと考えられる L3 でもシミュレーション結果では 6.7% に減少させることができ、Belle II 実験で要求されている占

有率 10 %以下を達成できている。しかし、あくまでシミュレーションなので、その占有率を超える可能性がないとは言い切れない。そこでさらに占有率を下げるため APV25 の ” multi-peak mode ” と呼ばれる機能を用いる。multi-peak mode は波高だけでなく、波形を観測することにより、実質的な shaping time を 3 ns にすることができ、占有率を 1/100 にすることができる。この概略図を図 2.10 に示す。

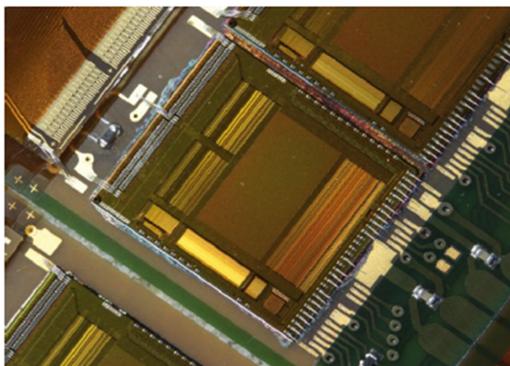


図 2.8: APV25

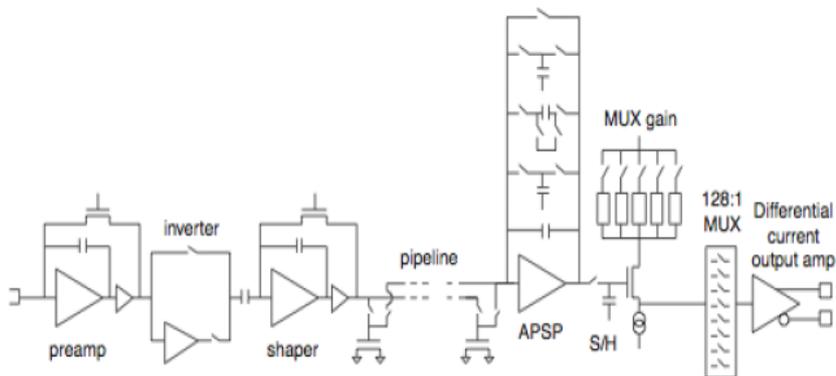


図 2.9: APV25 のブロック図

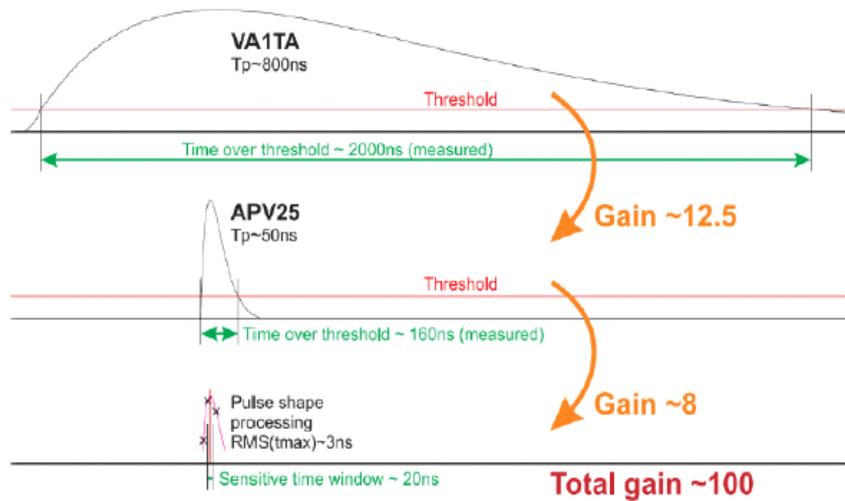


図 2.10: VA1TA、APV25、multi-peak mode の比較

### 2.3.3 APV25 の発熱量

APV25 は最大約 0.4 W で発熱するので、SVD 全体では最大約 700 W で発熱することになる。表 2.4 に各 Layer 毎の Origami 部 (+Z、CE、-Z センサー部) と FW 及び BW センサー部における発熱量を示す。

表 2.4: 各 Layer 毎の Origami 部と FW 及び BW センサー部における発熱量の比較

Layer	Origami 部		FW 及び BW センサー部		合計	
	APV の数	発熱量 [W]	APV の数	発熱量 [W]	APV の数	発熱量 [W]
6	480	192	320	128	800	320
5	240	96	240	96	480	192
4	100	40	200	80	300	120
3	0	0	320	168	168	67.2
合計	820	328	928	371.2	1748	699.2

### 2.3.4 Origami chip-on-Sensor Concept

通常フロンドエンドチップは物理領域 (図 2.3) には入らず、物理領域外に配置される。しかしこの APV25 は shaping time を小さくしたことにより、容量性ノイズが大きくなってしまった。そこで SVD では FW 及び BW センサー部以外の +Z、CE、-Z センサー部に "Origami chip-on-Sensor Concept" を採用した。図 2.11 に "Origami chip-on-Sensor Concept" の概略図を示す。これは DSSD の直上に APV25 を配置することで DSSD から APV25 までの配線を短くし、配線の引き回しによ

る容量性ノイズの低減を狙ったものである。実際、DSSD 表面の n-side は Origami 基板 (以降、Origami 基板のことを Origami と表記する) と呼ばれるフレキシブル基板上の端にある APV25 とつながった部分に直接ワイヤーボンディングをすることで APV25 と接続される。裏側の p-side は PA(Pitch Adaptor) と呼ばれるフレキシブル基板を折り曲げ、同様にワイヤーボンディングで APV25 と接続される。また、APV25 は物理領域に入ってしまうので、放射耐性や物質量増加による多重散乱の問題がある。そのため Origami 上の APV25 の厚さは約 300  $\mu\text{m}$  から約 100  $\mu\text{m}$  に薄くした物を用いる。APV25 は放射耐性が 100 Mrad 以上であるため、Belle II の可動予定期間を十分に耐えうると考えられる。

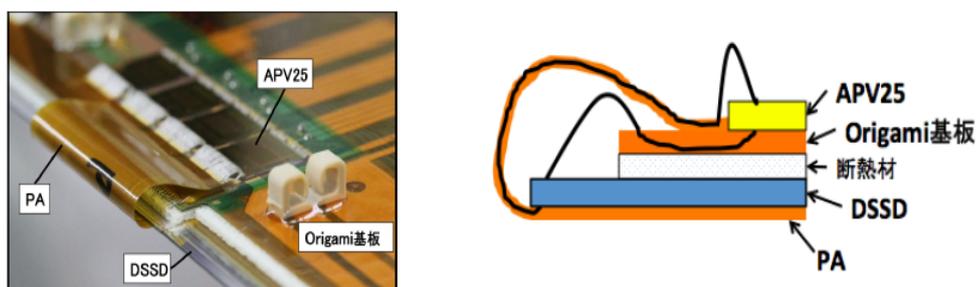


図 2.11: Origami chip-on-Sensor Concept の概略図

### 2.3.5 Hybrid 基板

+Z、CE、-Z センサー部では基板として Origami を用いたが、FW 及び BW センサー部では Hybrid 基板と呼ばれるガラスエポキシ基板上に APV25 が設置される。図 2.12 に Hybrid 基板の写真を示す。読み出しの流れは Origami と同様で、DSSD からの信号を PA を介して APV25 に送られる。

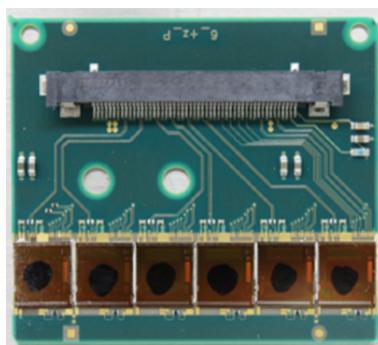


図 2.12: Hybrid 基板の写真。写真下の 6 枚のチップは APV25 である。

### 2.3.6 Airex®

Origami chip-on-Sensor Concept の導入により APV25 の発熱が Origami 等に伝わることを予想される。これらの温度変化による影響や電氣的接続による DSSD へのノイズ増加を防ぐために DSSD と Origami の間に Airex® という断熱材を挟んでいる。図 2.13 に Airex の写真を載せておく。図 2.13 の上側の台形型の Airex は FW センサー部、下側の長方形型の Airex は +Z、CE、-Z、BW センサー部に用いられる Airex である。

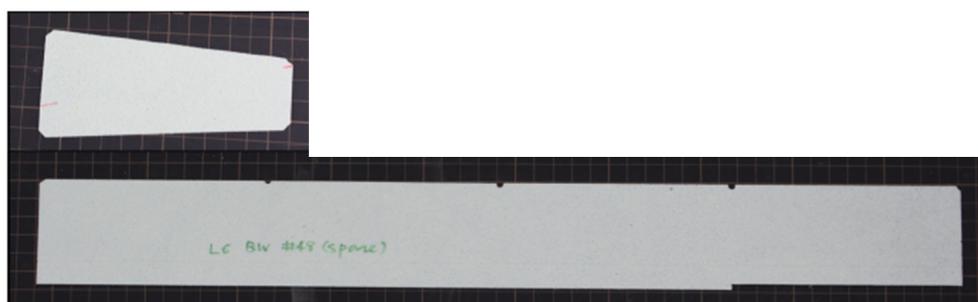


図 2.13: Airex の写真

### 2.3.7 リブ

ラダー全体を支えているのがリブである。リブは Airex を CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) で挟み込んだ形になっており、ラダー 1 本につき 2 本のリブによって支えられる。図 2.4 で書かれているリブはデザイン初期の段階のもので、量産にはさらに強度及び剛性を増加させたトラス構造のリブを使用する。図 2.14 に量産用のリブの写真を示す。

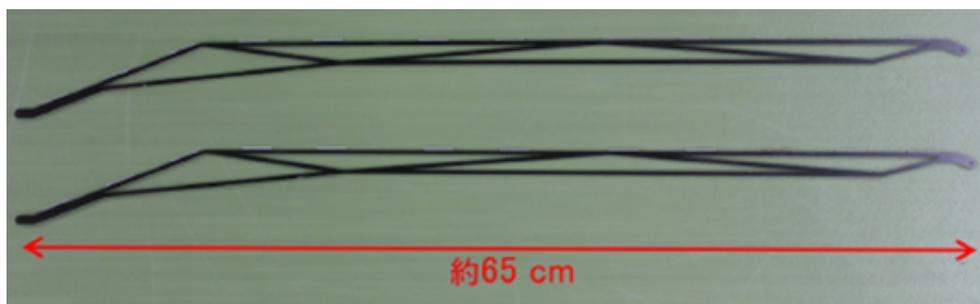


図 2.14: リブの写真

### 2.3.8 SVD ラダーの固定方法

SVD ラダーを設置する際の設置用構造体をエンドリングと呼び、磁性が低いステンレス SUS316 で作られる。図 2.15 にエンドリングの写真を示す。SVD ラダーには両端にエンドマウントと呼ばれる部品がついており、エンドリング上に固定するために用いられる。図 2.16 に FW 側、図 2.17 に BW 側のそれぞれのエンドマウントの写真を示す。FW 側のエンドリングの固定部はスライドするようになっており、SVD ラダー及びエンドリングの熱膨張などによる SVD ラダーへのストレスを軽減する機構を備えている。これらのエンドマウントをエンドリング上に固定するために、「コケシ型ピン」という部品を用いる。図 2.18 にコケシ型ピンと止めネジによるエンドマウントの固定方法の断面図を示す。エンドリング上の穴にコケシ型ピンを挿入し、エンドリングの後方から止めネジを締めることで、コケシ型ピンの窪み部分が押さえつけられエンドマウントが固定される。なお、本研究では Belle II 実験本番と同様に FW 側のスライド機構を用いて測定を行っている。

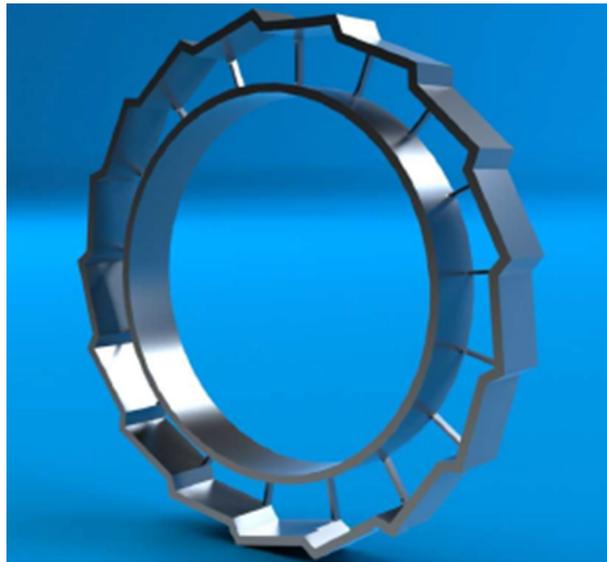


図 2.15: L6 エンドリングの写真 [5]

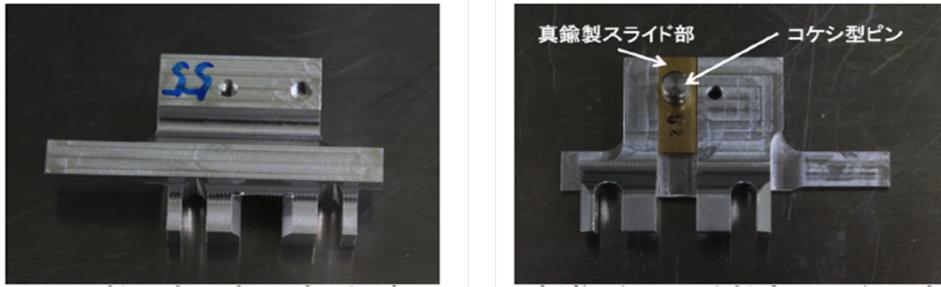


図 2.16: FW 側エンドマウントの写真。左が表面、右が裏面を表している。



図 2.17: BW 側エンドマウントの写真。左が表面、右が裏面を表している

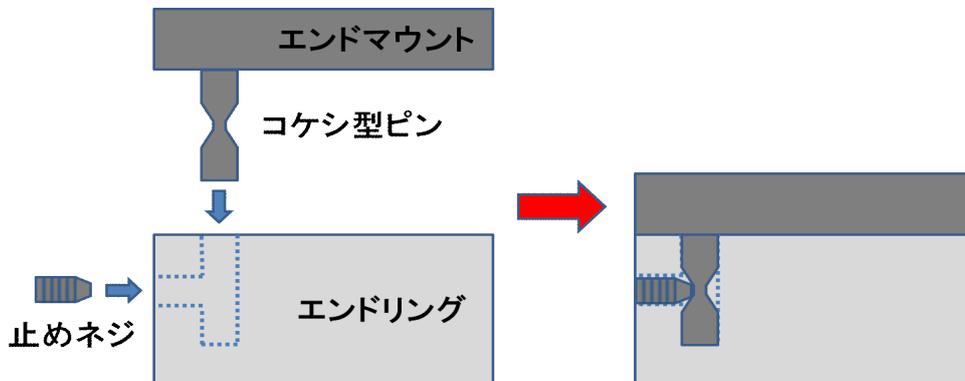


図 2.18: エンドマウントの固定方法

### 2.3.9 VXD の位置分解能

図 2.19 に Belle II 実験に用いる VXD と Belle 実験に用いた SVD の位置分解能 ( $z$  方向) の比較結果を示す。図 2.19 は多重散乱による角度変化を考慮したグラフで、縦軸は  $z$  方向における位置分解能で、横軸は検出粒子の  $z$  方向における粒子

の運動量を示している。図から分かるように PXD と SVD を組み合わせることによって Belle 実験よりも位置分解能を約 2 倍程度向上させることができる。

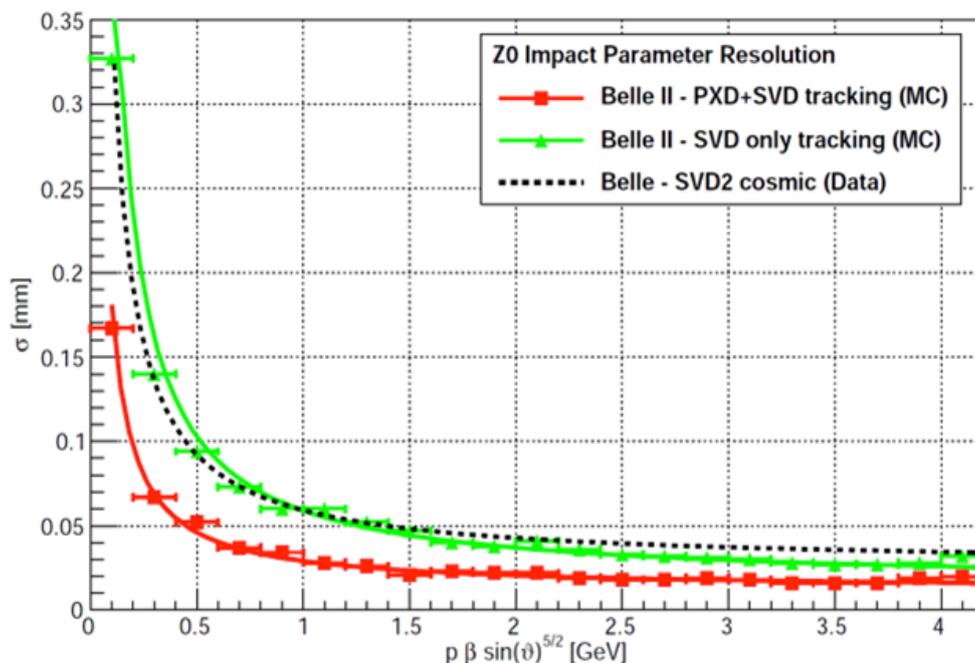


図 2.19: Belle II 実験に用いる VXD と Belle 実験に用いた SVD の位置分解能 ( $z$  方向) の比較 [9]

## 2.4 SVD の冷却システム

Belle II 実験のアップグレードに伴い、SVD では Origami-chip-on-Sensor Concept を導入した。APV25 は DSSD の直上に位置しているため、APV25 により発生する発熱が ASIC の SNR(Signal to Noise Ratio) を悪化させたり、ラダー全体に悪影響を及ぼすことが考えられる。そこで SVD ではそれらを抑制するために  $\text{CO}_2$  による冷却システムを導入した。Origami 部 (+Z、CE、-Z センサー部) では、APV25 は Origami 上に配置されており物理領域に含まれている。しかし FW 及び BW の Hybrid 部 (FW、BW センサー部) では Hybrid 基板上に配置されており、こちらは物理領域に含まれていない。この APV25 の配置の違いのために、SVD では Origami 部と Hybrid 部の 2 つに分けて冷却を行う。以下で冷却に関する詳細を述べていく。

### 2.4.1 冷却系に要求される条件

冷却を行うに当たって以下の条件が要求される。

- APV25 の発熱を十分に除去できる冷媒と機構

- 冷却温度に対する温度耐性
- 冷却機器の耐圧性
- 冷却パイプの放射耐性
- 腐食などの化学的な耐性及び安定性
- 物理領域に入る冷却機器の物質量
- 冷却機器の長期的な安定性

#### 2.4.2 冷却のコンセプト

上記の条件を満たすものとして、Belle II SVD では冷却溶媒としてはCO<sub>2</sub>を用い、気液二相冷却を行う。気液二相冷却とは液体が気体に変化する際の気化熱を利用した気液混合型の冷却システムで、大きな潜熱を利用するため、少ない流量で効率よく冷却できる。さらに流入熱が相変化にのみ使用されるために冷媒温度が圧力だけで決まり、圧力を一定に保つことで温度を一定に保つことができる。特にCO<sub>2</sub>を用いた気液二相冷却は、潜熱が比較的大きい(-20 °Cで300 J/g)ため、少ない流量で大きな冷却効率が期待される。また、高い圧力で使用することができるので蒸気体積が小さく、配管に沿った圧損による温度変化も少ないため、細い配管でも高い冷却効率を得ることが可能になる。図2.20にCO<sub>2</sub>の相図を示す。Belle II SVD では第2章3節4項で述べたように、Origami-chip-on-Sensor ConceptによりAPV25がOrigami上に配置されており、物理領域(図2.3)に入っている。そのため冷却用の配管等の物質量はできる限り抑える必要がある。その点で、配管を細くすることができ、また温度操作も比較的容易に行うことのできるCO<sub>2</sub>を用いた気液二相冷却は、非常に有用である。実際に冷却用配管に用いられる物としてはSUS304のステンレス製のパイプを用い、外形1.6 mm、内径1.4 mm、肉厚0.1 mmという非常に細い配管で冷却を行う。また、冷却パイプを直接APV25に接触させるのではなく、それらの間にSoftterm®(以降、Softtermのことをケラタームと表記する)と呼ばれる熱伝導性絶縁シートを挟み、そこからAPV25を冷却することになっている。これらの冷却の構造の詳細に関しては第2章4節3項及び第2章4節4項で後述する。

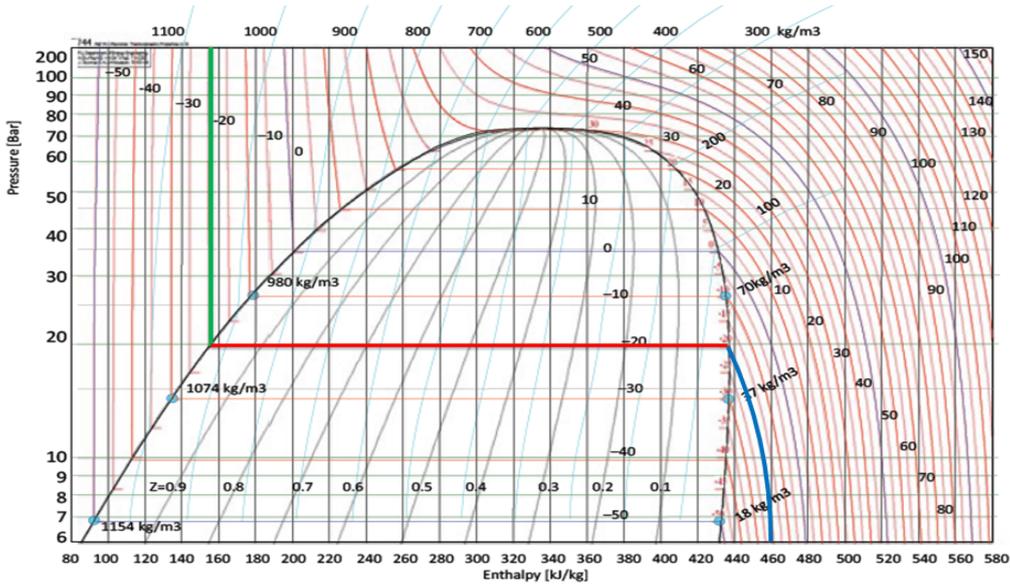


図 2.20: CO<sub>2</sub> の相図。縦軸が圧力、横軸がエンタルピーを示す図中の赤、青、緑の実線が温度が -20 °C のラインであり、緑が液体の状態、赤が気液二相混合状態、青が気体の状態を示す。図から分かるように気液二相混合状態では圧力（縦軸）を 20 Bar で一定に保てば、温度を一定に保つことができる。

### 2.4.3 Origami 部の冷却

図 2.21 に Origami 部の冷却の構造の概略図、図 2.22 に実際の写真を載せる。冷却パイプを用いて APV25 を冷却するには接触面積を十分に確保できない。また、直接冷却パイプと APV25 を接触させる場合、APV25 を破損させてしまうなどの問題がある。そこで、前述したがケラタームを冷却パイプと APV25 の間に挟み、ケラタームを通して熱を伝導させる。また、冷却パイプは CO<sub>2</sub> クリップで挟み込まれ、パイプの落下によるワイヤーボンディングの破壊等の防止をしている。表 2.5 に Origami 部における各パーツの厚さを示す。

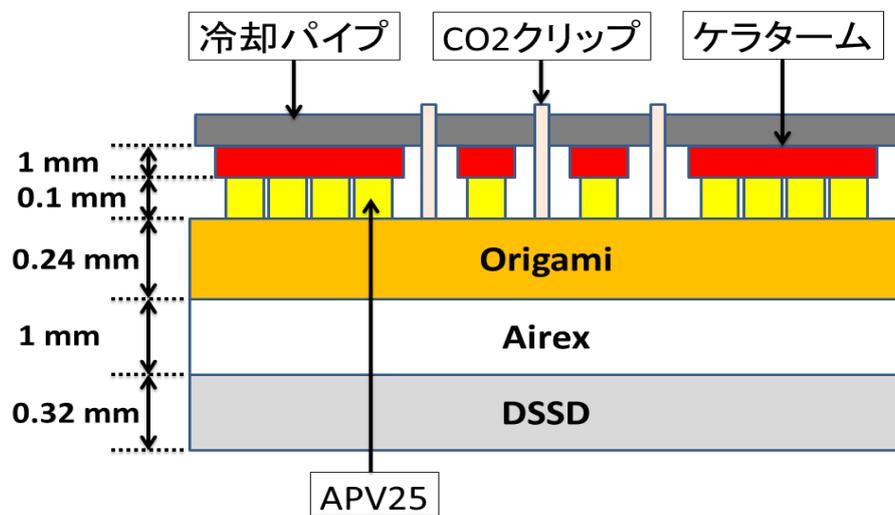


図 2.21: Origami 部の冷却の概略図

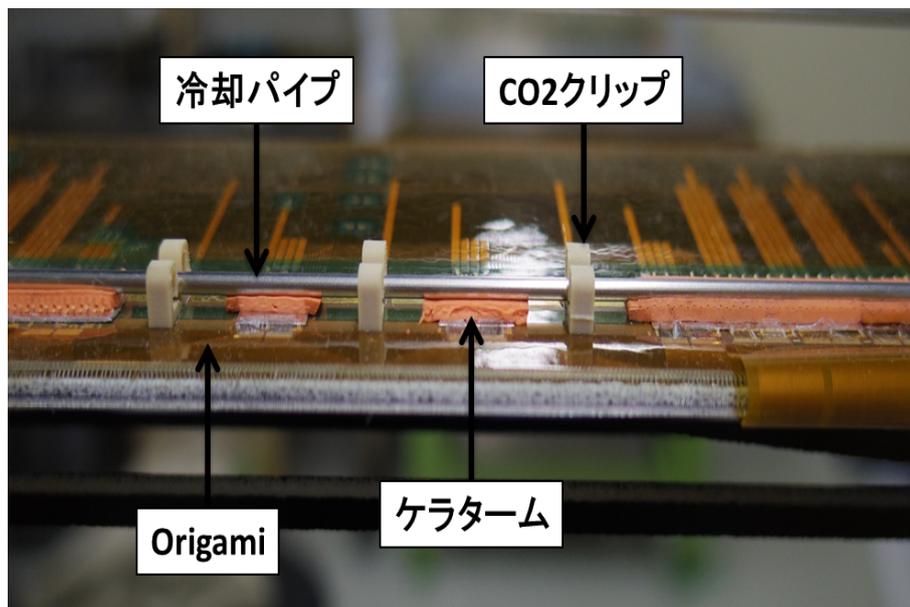


図 2.22: Origami 部の冷却の写真

表 2.5: Origami 部の各パーツの厚さ

名称	厚さ [mm]		
	+Z	CE	-Z
ケラターム	1.5		1.0
APV25	0.1		
Origami	0.24		
Airex	1		
DSSD	0.32		

#### 2.4.4 Hybrid 部の冷却

Hybrid 部は Origami 部とは違い、APV25 が物理領域外にあり、SVD ラダーをマウントするエンドリングを利用して冷却される。図 2.23 に Hybrid 部の冷却の外観図を示す。Hybrid 部では APV25 の配置が Origami 部のように一直線上に配置されるわけではなく、p-side と n-side で上下に分けられる。冷却の流れとしては、まずエンドリング内に冷却パイプを通しておきエンドリングを冷却する。そこからエンドマウント、ケラタームを媒介して p-side 用の APV25 (図 2.23 の下側の APV25) を冷却する。そこから Hybrid を経由し反対側の n-side 用の APV25 (図 2.23 の上側の APV25) を冷却する。

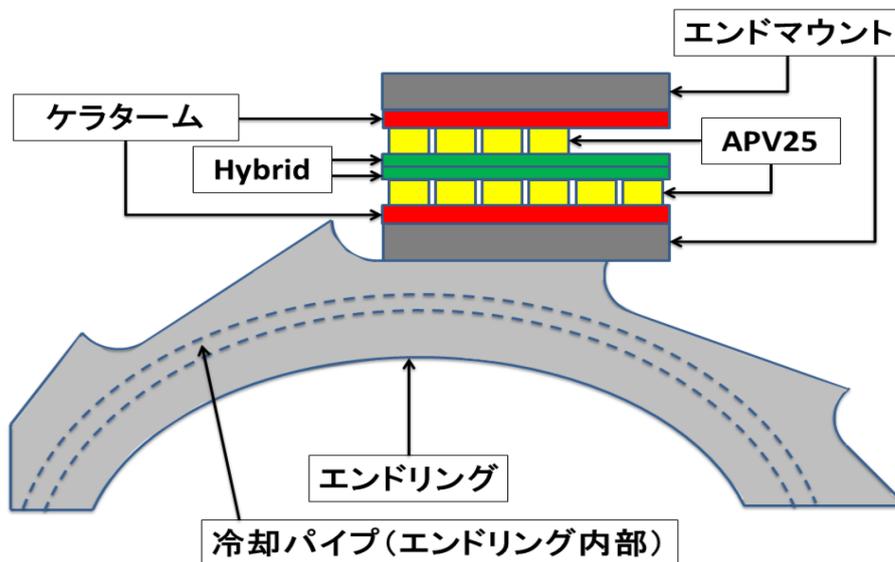


図 2.23: Hybrid 部の冷却の概略図

## 2.5 Open CO<sub>2</sub> System

Belle II 実験では IBelle [10] という CO<sub>2</sub> の冷却システムを用いて SVD 及び PXD を冷却する。図 2.24 に IBelle の写真を示す。現在、KEK では IBelle のインストール作業とテスト運用が行われている。図から分かるように IBelle は大きな冷却システムである。そのため、IBelle を用いて SVD ラダー単体やセンサーモジュール等のスケールの小さい冷却試験を行うには適していない。そこで、より単純でコンパクトな Open CO<sub>2</sub> System が開発された。図 2.25 に Open CO<sub>2</sub> System の外観図、内観図、配管図を示す。Open CO<sub>2</sub> System は通常の液取り CO<sub>2</sub> ボトルに接続することで使用できる。IBelle と比較しても Open CO<sub>2</sub> System はコンパクトな冷却システムであり、取扱いや移動等が容易である。また、Open CO<sub>2</sub> System では CO<sub>2</sub> を循環させず、冷却後の CO<sub>2</sub> は排気している。図 2.26 から分かるように、Open CO<sub>2</sub> System 内には 4 つの温度計、3 つの圧力計、4 つの露点計、1 つの流量計が内蔵されている。冷却対称部となるのが図 2.26 上の "Heat Load" の部分で、この部分が本研究では SVD ラダーに相当する。よって、SVD ラダーに流れる前の CO<sub>2</sub> の温度  $T1$  及び圧力  $P1$  と SVD ラダーに流れた後の CO<sub>2</sub> の温度  $T2$  及び圧力  $P2$  の値を得ることができる。また、2 つのモーターバルブ (以降、これらのバルブを MV1 及び MV2 と表記する) をそれぞれ独立に開け閉めすることによって流れる CO<sub>2</sub> の流量と圧力を調節することができる。これらの開け閉めは 0~10 V の間の電圧によって制御されており、0 V ではバルブが完全に閉じている状態、10 V ではバルブが完全に開いている状態になり、これらは Open CO<sub>2</sub> System とつながった PC によって操作をすることが可能である。冷却する領域には乾燥空気を充填させることで露点を下げ、CO<sub>2</sub> 冷却による結露を防いでいる。Open CO<sub>2</sub> System 内の運転中は流量及び圧力は 1 秒毎に、温度、露点、相対湿度は 5 秒毎に PC 上に記録される。本研究では、SVD ラダー 1 個に対する測定を行ったため、この Open CO<sub>2</sub> System を用いて測定を行った。

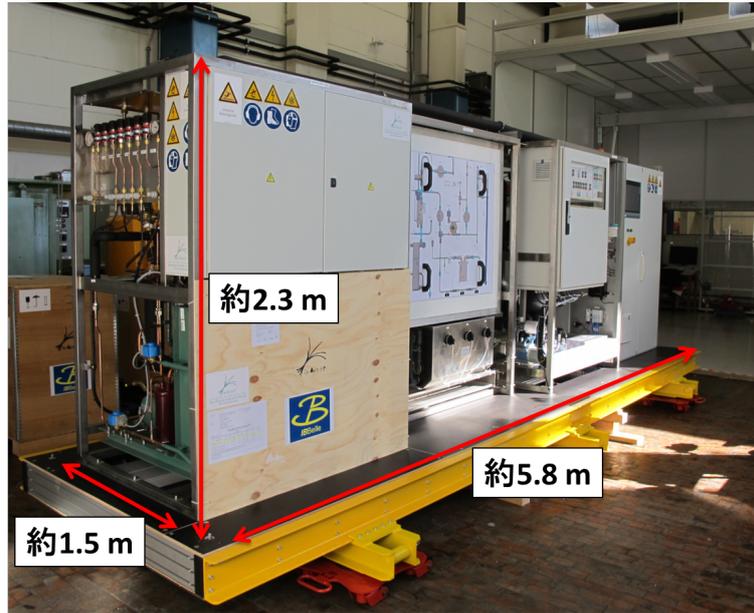
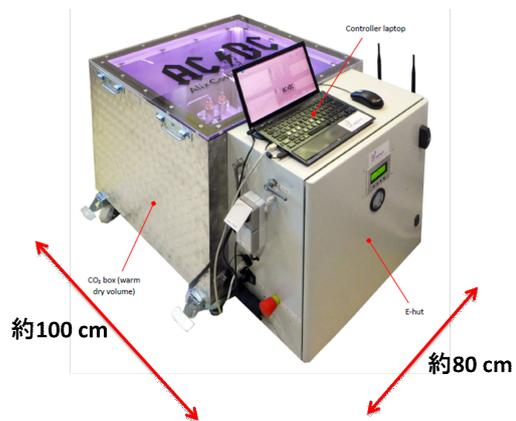
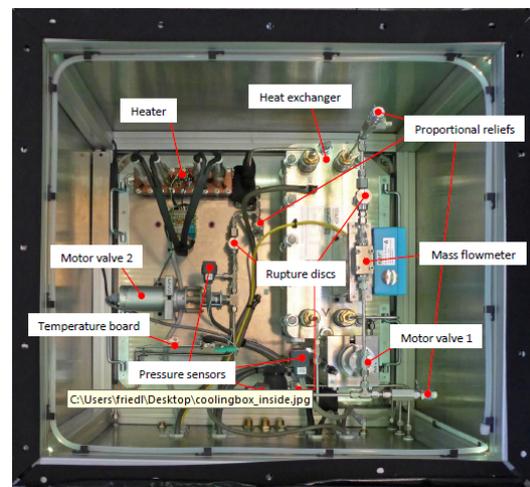


図 2.24: IBBelle の外観図 [11]



(a) Open CO<sub>2</sub> System の外観図



(b) Open CO<sub>2</sub> System の内観図

図 2.25: Open CO<sub>2</sub> System [11]

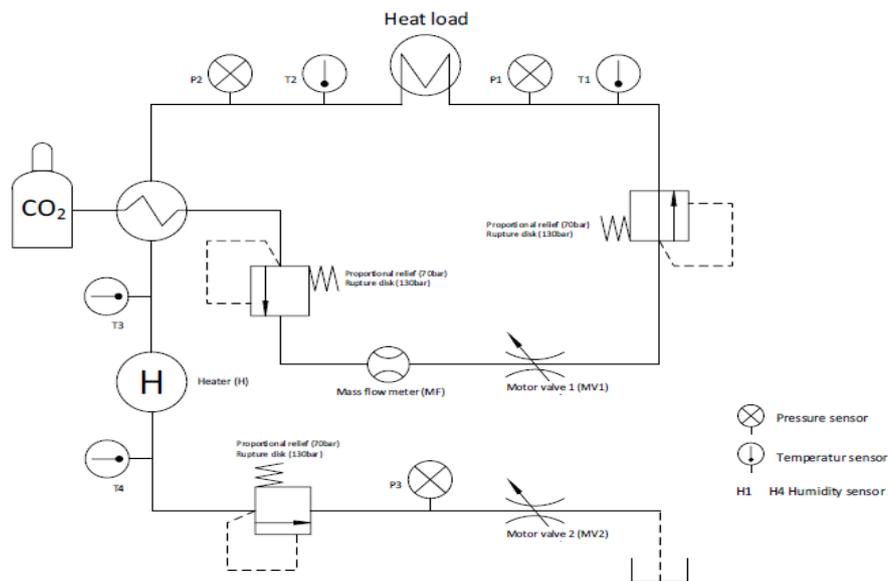


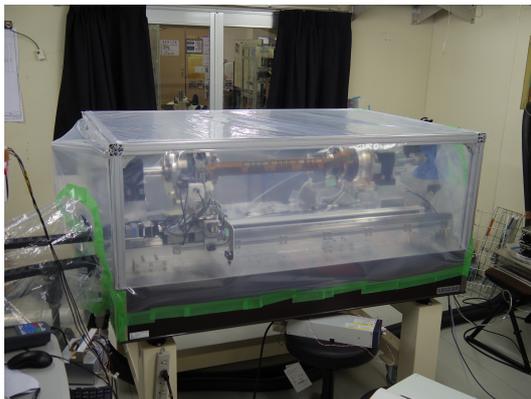
図 2.26: Open CO<sub>2</sub> System の配管図 [11]

## 2.6 冷却における問題点と本研究の意義

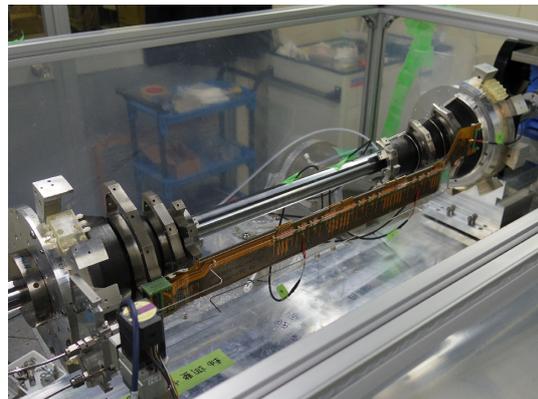
前述してきたように、Origami-chip-on-Sensor concept の導入によって、APV25 の直上に冷却パイプを設置することにより APV25 の熱ノイズを減らすことができ、SNR を向上させることができる。しかし、CO<sub>2</sub> により局所的に SVD ラダーを冷却することになり、ラダー形状への影響の評価が極めて重要になる。変形をしても SVD ラダーにはスライド機構が搭載されており、スライドによって変形が緩和されれば問題ないが、緩和されないような変形が起こると、SVD ラダーに余計なストレスがかかり、最悪の場合、SVD ラダーが壊れてしまう。また、Belle II 実験で SVD を用いたデータ解析を行う際には、あらかじめ宇宙線を用いて得たデータを解析し、tracking した軌跡とヒット位置からのズレを用いて DSSD の位置座標を校正しておく。そのため、Belle II 実験中で SVD ラダーの変形によって DSSD の位置情報が変わってしまうと tracking がズレてしまい、これは大きな問題になる。その変形には冷却温度の変化による熱変形も含まれている。現在、IBBelle の冷却温度の変化により、どの程度ラダーが変形するのかは分かっていない。従って本研究では、冷却により SVD ラダーがどのような機構で変形するのか、また冷却温度の変化に対して SVD ラダーの変形量がどの程度変化するのかを調べた。そこから、冷却温度の変化による Belle II 実験中のトラッキングへの影響を考察した。

### 第3章 SVD ラダーと冷却パイプのセットアップ

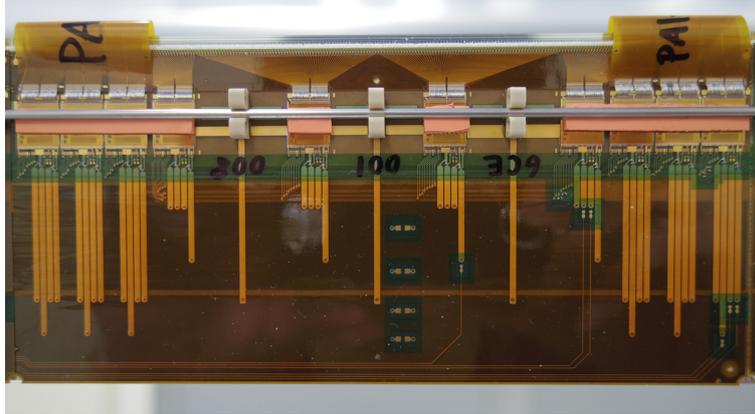
-20℃で冷却を行うために通常の空気の露点では結露してしまい、結露による水滴がSVD ラダーのワイヤーボンディングや接着剤等の破損を及ぼしかねない。そのため、SVD 検出器を取り巻く空気の露点を約-40℃まで下げる必要がある。乾燥空気をSVD ラダーの周りに循環させ、露点を下げ、結露を防止する。図3.1に本研究における測定のセットアップの写真を示す。本測定ではSVD ラダーをアルミフレームとポリエチレンシートで密封した乾燥箱で囲い、その内部に乾燥空気を流し入れ続けて、露点を約-40℃付近まで下げている。なお、露点の測定にはヴァイサラ社のDry Cap[12]を使用した。それらの写真と仕様を図3.2及び表3.1に示す。また本研究を行うにあたり、冷却による変形が最も大きいと考えられるのは、Origami部の冷却箇所が最も多く、構造的にSVD ラダーの位置が最も揺らぎやすいL6のSVD ラダーである。そこで、図3.1(b)にもあるように本研究では1本のL6のSVD ラダーに関して冷却試験を行った。以下で使用した測定機器と設定について説明していく。



(a) 外観



(b) 内観



(c) SVD ラダーのセンサー 1 枚分の拡大図

図 3.1: 冷却試験のセットアップ



図 3.2: Dry Cap[12] の写真

表 3.1: Dry Cap[12] の仕様

メーカー	ヴァイサラ株式会社
型番	DMT143 露点変換器
露点計測範囲	-70 °C ~ +60 °C
測定精度	± 2 °C

### 3.1 三次元測定機

SVD ラダーの位置座標は、図 3.3 に示すような光学式の三次元測定機を用いて測定した。図 3.3 で示すように三軸方向に独立に駆動し、PC 上でどの方向にどの程度動かすのかを指定することができる。また図 3.3 に示すようにレンズが  $x$  方向を向いており、レンズの焦点が合う位置を  $x$  方向の位置として測定している。使用したレンズの仕様を表 3.2 に示す。一般的に測定機には”精度”と”正確度”の二つの観点の不確かさがある。”精度”とは、ある値を複数回測定した際に、どの程度その値がばらつくかを表す尺度である。”正確度”は、測定値が真値にどれだけ近いかを表す尺度である。本研究では、SVD ラダーが冷却前後でどの程度変形するのかを測定している。つまり、相対的な変化量を測定しているため、本研究においては”精度”に関してのみ重要になってくる。表 3.3 に各方向における精度を示しておく。

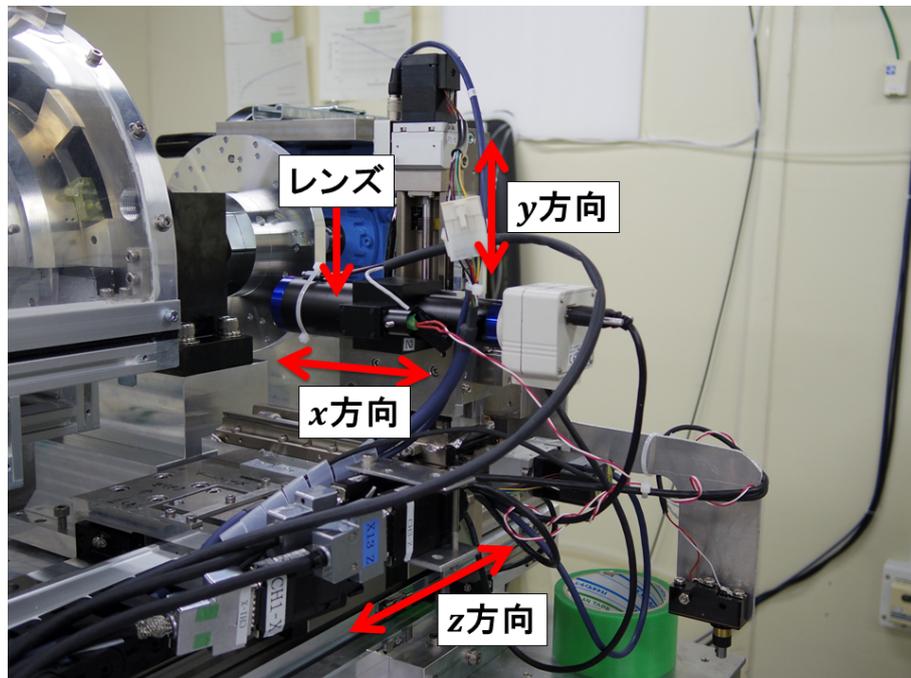


図 3.3: 三次元測定機

表 3.2: レンズの使用 [13]

型式	SOD-10X
倍率	10
WD [cm]	55.2
分解能 [ $\mu\text{m}$ ]	1.5
被写界深度 [ $\mu\text{m}$ ]	17
NA	0.23
有効 FNO	22
CCD サイズ [インチ]	2/3

表 3.3: 三次元測定機の精度

	精度 [mm]
$x$ 方向	0.001 mm
$y$ 方向	0.001 mm
$z$ 方向	0.003 mm

### 3.2 赤外線サーモカメラ

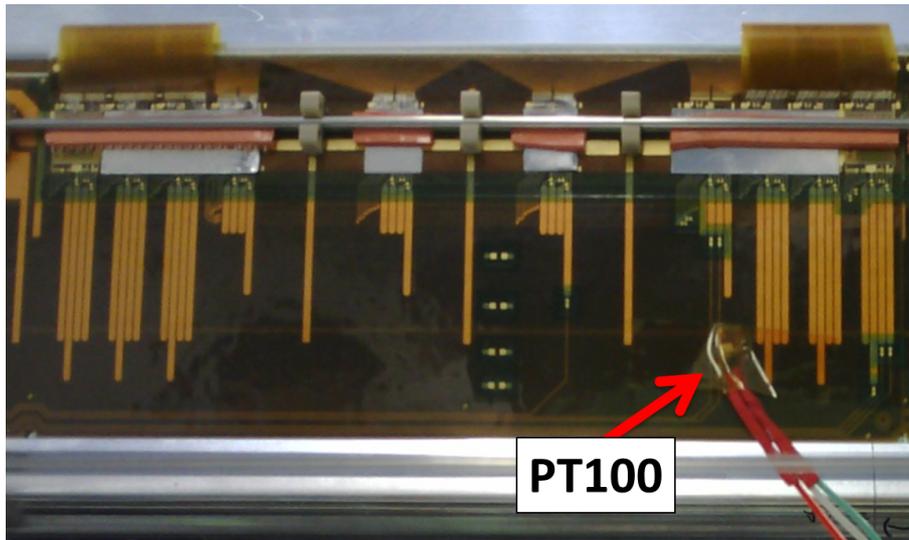
冷却後等の SVD ラダーの温度を測定するため、赤外線サーモカメラ [14] を用いた。図 3.4 に使用したサーモカメラの写真と表 3.4 に型番等を示す。物体から放出される赤外線を用いて測定を行っているため物体毎の反射率が重要になってくる。今回の測定では主に ” Origami ”、” PA ”、” DSSD ”、” APV25 ”、” 冷却パイプ ” の温度を赤外線サーモカメラで測定した。Origami、PA に関しては主な組成がポリイミドなので放射率が高く温度が良く見える。また APV25 も組成自体はシリコンだが、表面にポリイミドのパッシベーション膜で覆われているため同様に見える。しかし、DSSD は主な組成は APV25 同様にシリコンだが、アルミ とシリコンのストリップ構造のため、放射率が高く、付近の赤外線を反射してしまい、周りの物体等の温度が見えてしまう。冷却パイプも SUS304 を用いているため、同様に正しい温度が測定できていない。また、赤外線サーモカメラでの温度と PT100 を用いた実際の Origami 上の温度の比較結果を図 3.5 に示す。このことから、赤外線サーモカメラの測定精度である  $\pm 2$  °C の範囲内で温度が一致しており、赤外線サーモカメラによる温度は信頼できることが分かる。

表 3.4: 赤外線サーモカメラの仕様

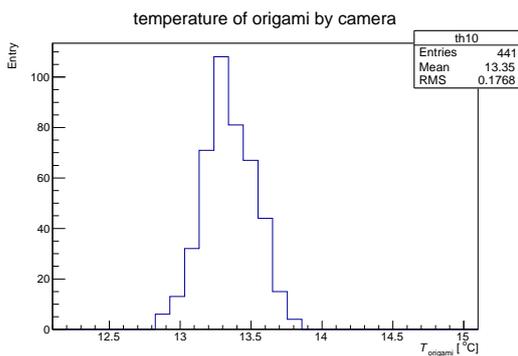
品名	testo882-赤外線サーモグラフィ
型番	0560 0882
画素数	320 × 240 画素
測定精度	±2 °C



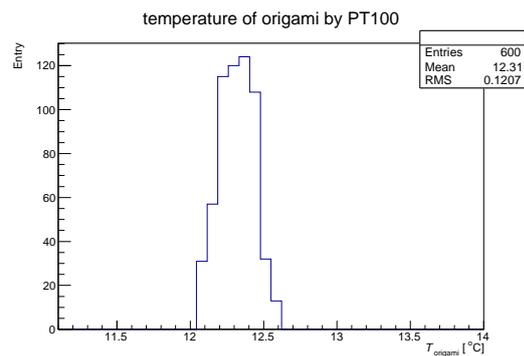
図 3.4: 赤外線サーモカメラ



(a) Origami 上の温度の測定点



(b) 赤外線サーモカメラによる Origami 上の温度



(c) PT100 による Origami 上の温度

図 3.5: 赤外線サーモカメラと PT100 での温度の比較

### 3.3 座標系の設定

図 3.6 に測定の座標系とセンサー部の名称を示す。左手系の座標になっているが、これは三次元測定器の座標系に従っているためである。以降、全ての測定においてこの座標系、名称に従って表記していく。

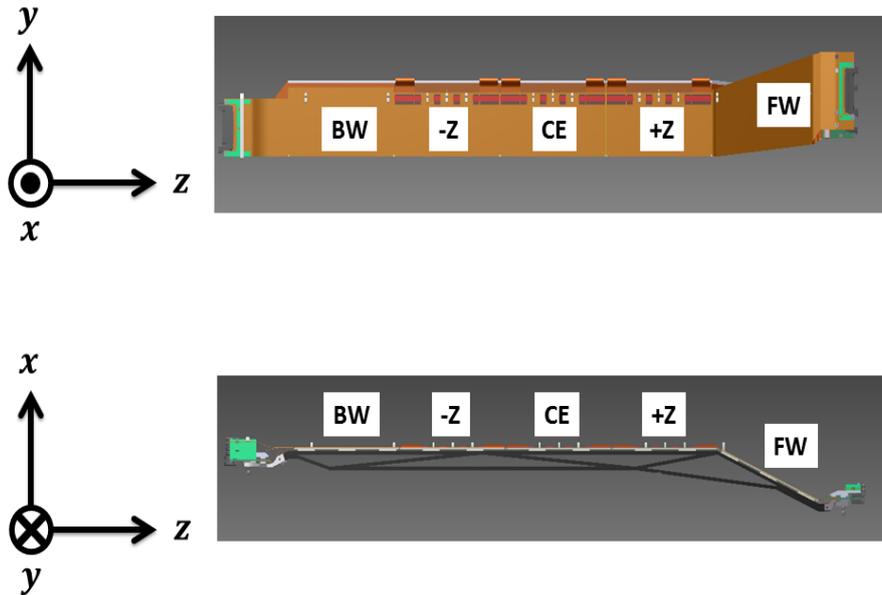


図 3.6: 座標系の決定

### 3.4 測定位置と F マークについて

各センサー部の測定位置は図 3.7 に示す。なお、図 3.8 にあるように、DSSD の 4 つ角に F マークと呼ばれる位置測定用の目印があり、三次元の座標を測定することができる。それ以外の測定点に関しては、特に目印があるわけではないので、 $y$  及び  $z$  方向の変形に関しては F マークの結果のみで議論し、 $x$  方向に関しては全ての測定点を用いて議論していく。以降では各センサー部における 4 つの F マークの場所を図 3.7 のように a、b、c、d を用いて表記していく。

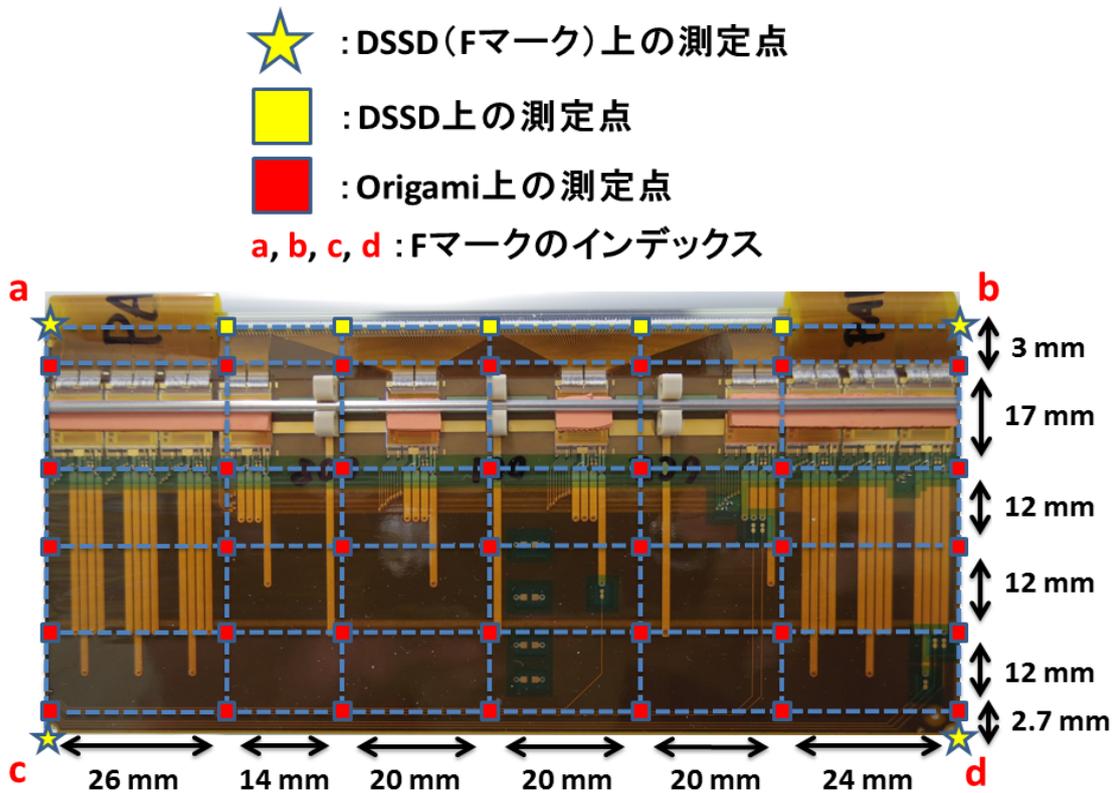


図 3.7: ラダーの測定点

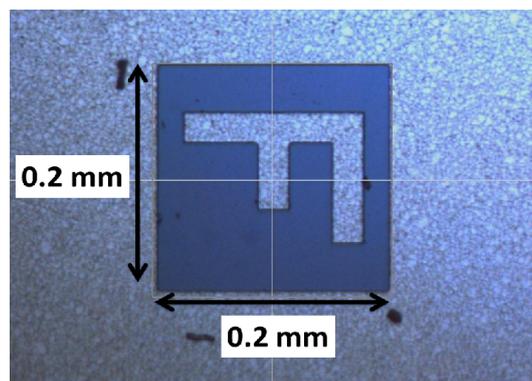


図 3.8: 三次元測定器で見た F マーク

### 3.5 冷却試験の流れと変形量の定義

冷却試験の流れを図 3.9 に示す。APV25 を発熱させるために Low Voltage(以降、LV と表記する) を印加している。図 3.9 から分かるように、1 回の冷却試験で

計4回、三次元測定機で位置座標を測定をしている。なお、それぞれのタイミングでの測定をM1～M4として表記する。冷却を行っていない状態での測定をM1とM4で行って2回行っており、これらの測定値を冷却無しでの位置座標として扱うことができる。しかし、SVD ラダーをエンドリングにマウントした直後やパイプをマウントした直後ではSVD ラダーに余計なストレスがかかり、冷却による変形とは別にこのストレスを緩和しようとする変形してしまう可能性がある。そこで、冷却無しでの位置座標としてはM4の値を用いる。以降、各方向の変形量を以下のように定める。

$$(\text{LV無しでの変形量}) = (\text{M2の測定値}) - (\text{M4の測定値})$$

$$(\text{LV有りでの変形量}) = (\text{M3の測定値}) - (\text{M4の測定値})$$

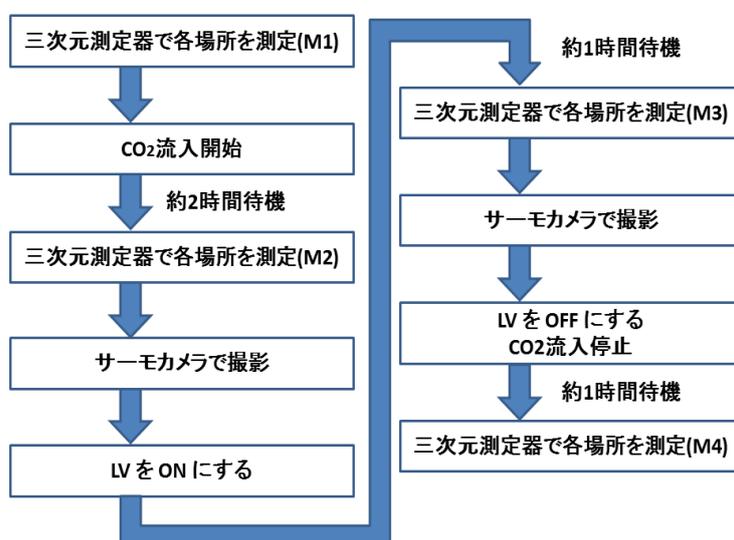


図 3.9: 冷却試験の流れ

### 3.6 Open CO<sub>2</sub> System の設定

第2章5節で記述した通り、Open CO<sub>2</sub> System を用いて冷却を行う際 MV1 及び MV2 の締め具合で冷却の圧力 (温度) 及び流量が決定する。また、後述するが Open CO<sub>2</sub> System には auto mode と manual mode の2種類の動作モードがある。以下では冷却試験に向けた事前試験の研究結果について記述する。主な研究項目は以下の2点である。

項目 1 : Open CO<sub>2</sub> System を用いた流量及び圧力制御

項目 2 : 本測定に最適な流量値

### 3.6.1 事前試験のセットアップ

事前試験では試験負荷用ヒーター付き冷却パイプのみを冷却対象として冷却試験を行った。図 3.10 及び図 3.11 に冷却試験の概略図と事前試験のセットアップ図を載せる。図 3.10 の赤矢印は CO<sub>2</sub> の流れを表しており、冷却対象が事前試験では”冷却パイプ”に相当する。なお、Open CO<sub>2</sub> System と冷却対象間は 10 m の Swagelok 製のフレキシブルチューブで繋がっており、AIROFLEX® と呼ばれる断熱材で覆っている。また、項目 2 の研究を行う際に冷却パイプを発熱させ測定を行った。その際に発熱を冷却パイプに全て吸収させるために事前試験ではフレキシブルチューブと同様に内径 6 mm、肉厚 13 mm の AIROFLEX で覆い、熱が空气中に拡散しないようにしている。図 3.12 に AIROFLEX で覆った冷却パイプの写真を示す。

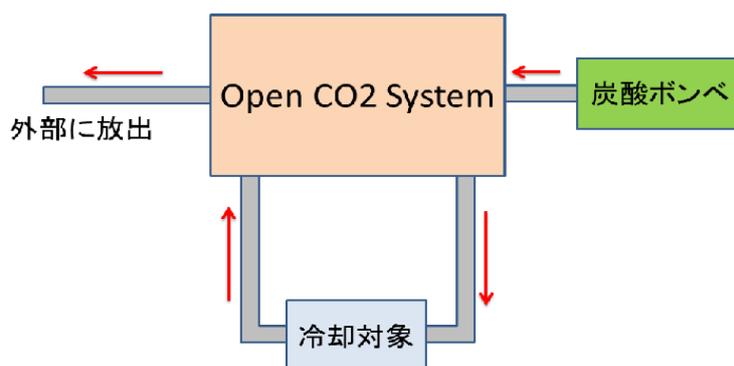


図 3.10: 冷却試験概略図



図 3.11: 事前試験セットアップ (全体図)

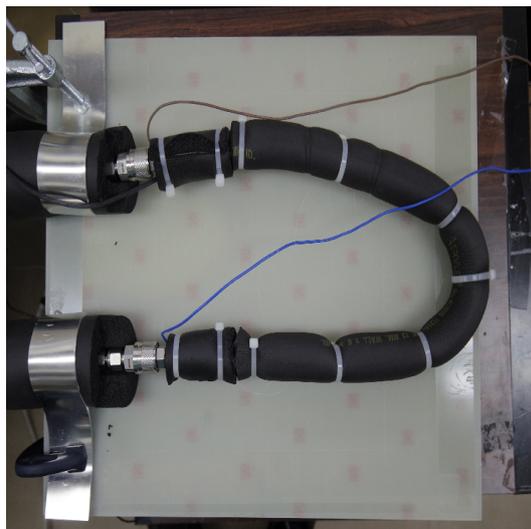


図 3.12: 冷却対象 (拡大図)

### 3.6.2 温度及び圧力の定義

第2章5節にもあるように Open CO<sub>2</sub> System では冷却対象部に流れる前の CO<sub>2</sub> の温度  $T_1$  及び圧力  $P_1$  と冷却対象部に流れる後の CO<sub>2</sub> の温度  $T_2$  及び圧力  $P_2$  を測定している。そこで測定対象に接触させている冷却パイプ内の CO<sub>2</sub> の温度  $T_{\text{pipe}}$  及び圧力  $P_{\text{pipe}}$  を以下のようにして定義する。

$$T_{\text{pipe}} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.1)$$

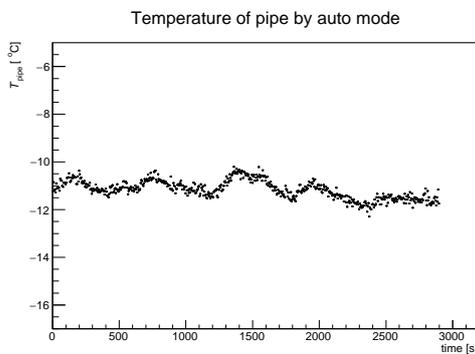
$$P_{\text{pipe}} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (3.2)$$

### 3.6.3 Open CO<sub>2</sub> System を用いた流量及び圧力 (温度) 制御

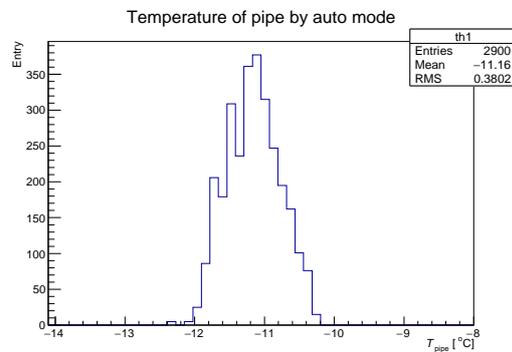
Open CO<sub>2</sub> System では ” auto mode ” と ” manual mode ” の2種類の動作モードがある。 ” auto mode ” は流量計の値が設定した流量値となるように、システムがフィードバックをかけながら MV1 及び MV2 を自動調整する。現状では、 auto mode のソフトウェアの制約上 MV1 = MV2 としてバルブを開閉するので、流量と圧力 (温度) を独立に調整することができない。 ” manual mode ” では MV1 及び MV2 の値をオペレーターが手動で調整しながら、流量と圧力 (温度) を制御する。以下で auto mode と manual mode での冷却試験結果を示す。

## auto mode

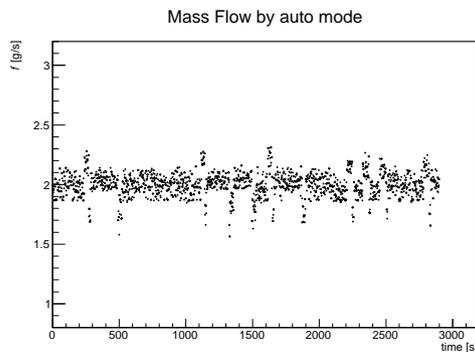
auto mode の測定では流量を 2.0、3.0、4.0 g/s に設定し、系全体が平衡状態になった際の温度及び流量がどのようになっているかを確認した。なお温度及び流量等の不確かさは測定値の RMS で評価していく。その結果を図 3.13～図 3.15 に示す。これらの結果より、auto mode では約  $\pm 0.2$  g/s の精度で流量を一定に保つことができているが、平衡温度が約  $-10$   $^{\circ}\text{C}$  になっており、本測定での  $-20$   $^{\circ}\text{C}$  の冷却には適していないことが分かる。また、流量値の揺らぎが大きいのが、これはソフトウェア上の問題で、実際の流量が設定値から離れてしまった場合に、バルブの開け閉めをに 0.5 V ずつでしか調節できていないためである。



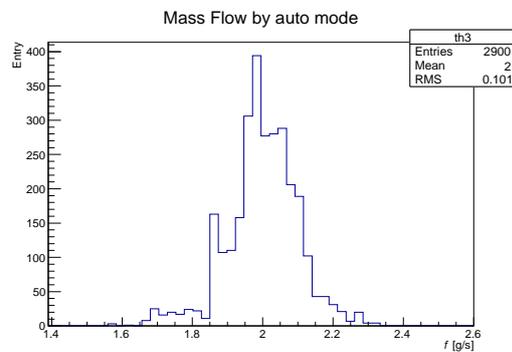
(a) 流量 2.0 g/s の設定の時の平衡温度



(b) 流量 2.0 g/s の設定の時の平衡温度のヒストグラム

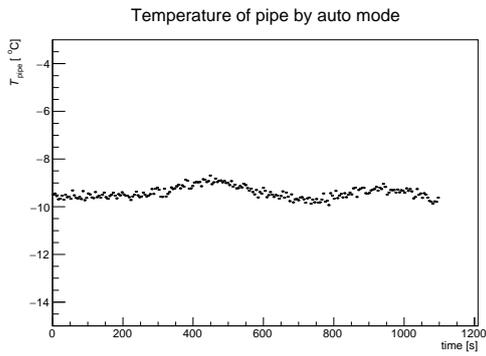


(c) 流量 2.0 g/s の設定の時の実際の流量

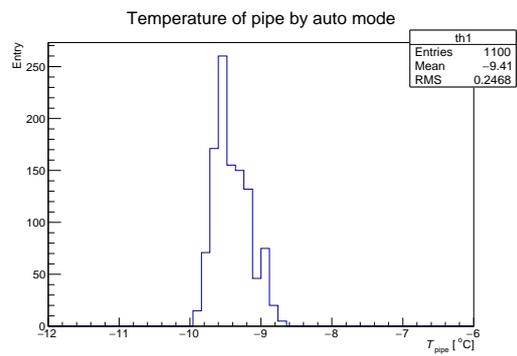


(d) 流量 2.0 g/s の設定の時の実際の流量のヒストグラム

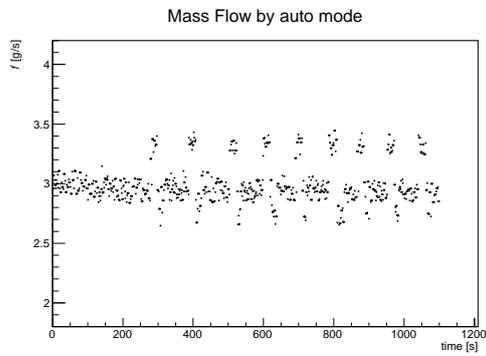
図 3.13: auto mode による測定 (流量 2.0 g/s)



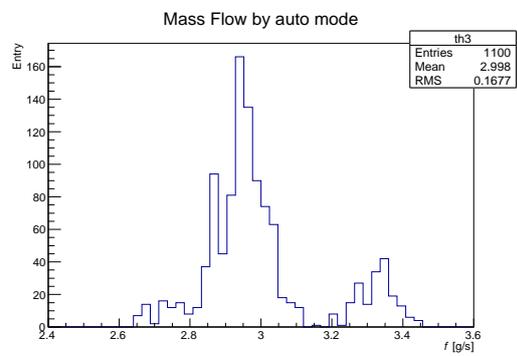
(a) 流量 3.0 g/s の設定の時の平衡温度



(b) 流量 3.0 g/s の設定の時の平衡温度のヒストグラム

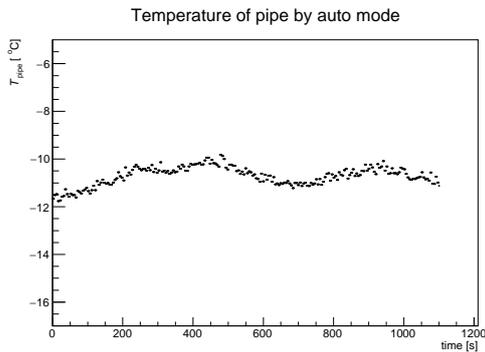


(c) 流量 3.0 g/s の設定の時の実際の流量

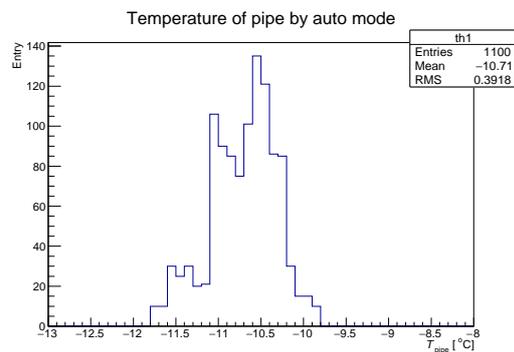


(d) 流量 3.0 g/s の設定の時の実際の流量のヒストグラム

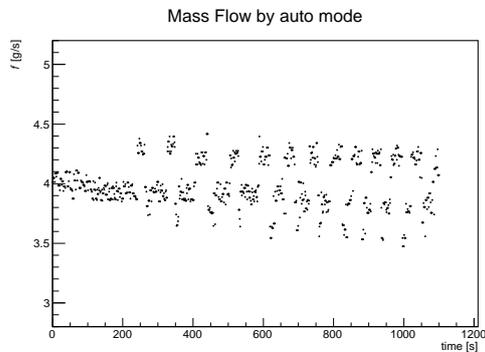
図 3.14: auto mode による測定 (流量 3.0 g/s)



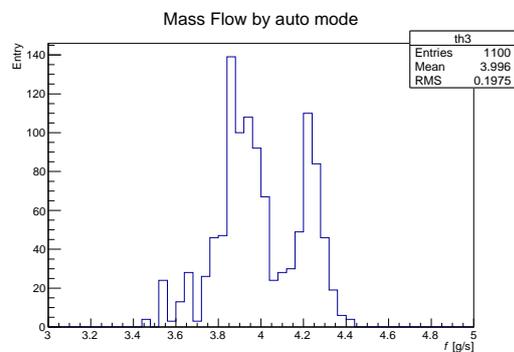
(a) 流量 4.0 g/s の設定の時の平衡温度



(b) 流量 4.0 g/s の設定の時の平衡温度のヒストグラム



(c) 流量 4.0 g/s の設定の時の実際の流量



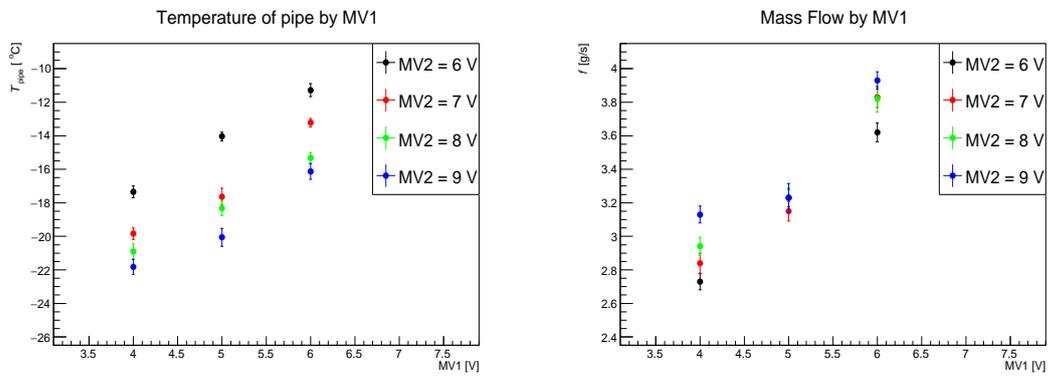
(d) 流量 4.0 g/s の設定の時の実際の流量のヒストグラム

図 3.15: auto mode による測定 (流量 4.0 g/s)

### manual mode

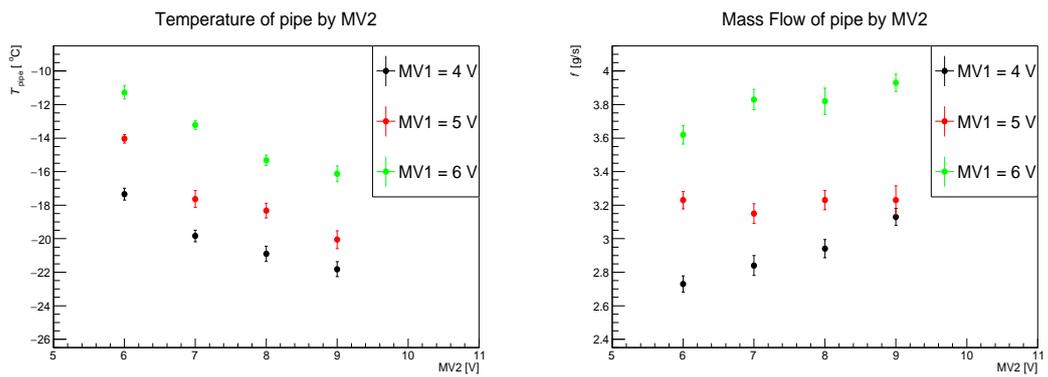
manual mode の測定では MV1 の値を 4.0、5.0、6.0 V、MV2 の値を 6.0、7.0、8.0、9.0 V に設定し、auto mode と同様に系全体が平衡状態になった際の温度及び流量がどのようなようになったかを確認した。図 3.16 に MV1 及び MV2 の温度及び流量の相関のグラフを示す。図 3.16 より MV1 は温度 (圧力) 及び流量に対して正の相関があり、MV2 は温度 (圧力) へのみ負の相関があり、流量にはほとんど相関はない。また、図 3.16(d) において MV1 = 4.0 V の測定結果において MV2 の値が下がると流量の値も下がっているように見えるが、これは使用している炭酸ガスボンベの残量が時間と共に低下し、ボンベ内の内圧が低下したため、結果的に流量が低下している。図 3.17 にボンベ開封直後とボンベ 10 kg 使用後の流量の比較の図を示しておく。以上の事から、auto mode では  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  での冷却はできないため、以降の測定では全て manual mode を用いて測定を行った。また、manual mode の

結果から流量は MV1 のみで調節できるため、オペレーション手順としてはまず、MV1 を調節し適切な流量を確保した後、温度が  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  になるように MV2 を用いて圧力を調節する。



(a) MV1 と冷却パイプの温度の相関

(b) MV1 と流量の相関



(c) MV2 と冷却パイプの温度の相関

(d) MV2 と流量の相関

図 3.16: manual mode による測定

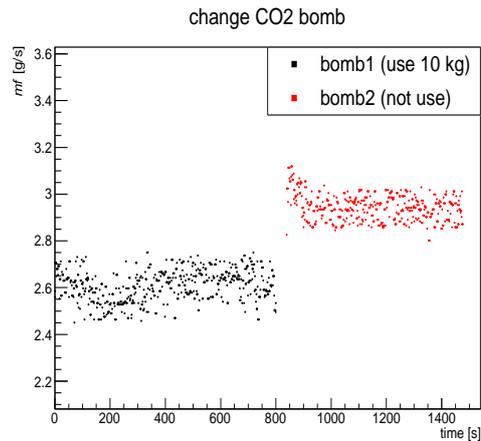


図 3.17: 炭酸ボンベ交換による流量の変化

### 3.6.4 本測定用の流量値の決定

第2章3節2項でも述べたようにL6のSVDラダー1本のOrigami部では最大 $0.4 \text{ W/chip} \times 10 \text{ chips/sensor} \times 3 \text{ sensors} = \text{約} 12 \text{ W}$ で発熱する。その熱量を全て $\text{CO}_2$ が吸収するために適切な流量が必要になってくる。事前試験では冷却パイプを約12Wで発熱させ、発熱前後で冷却パイプに入る前の $\text{CO}_2$ の温度 $T1$ と入った後の $\text{CO}_2$ の温度 $T2$ の温度差 $\Delta T (= T1 - T2)$ を確認した。図3.18及び図3.19に設定した流量と冷却前後の温度変化の結果を示す。流量が十分確保できていない場合、 $\text{CO}_2$ の気化熱だけでは全ての発熱を吸収できない。そのため、冷却パイプ以降の冷媒の温度 $T2$ が上がり、結果的に発熱前よりも $\Delta T$ の値が下がることになる。しかし、流量約 $1.4 \text{ g/s}$ において発熱前後で温度差 $\Delta T$ の分布に変化は見られない。つまり、流量約 $1.4 \text{ g/s}$ でも12Wの発熱を吸収できており、本測定でもオペレーション可能であることが分かった。本測定では十分余裕をもって流量を多めにした約 $2.5 \text{ g/s}$ でのオペレーション行った。

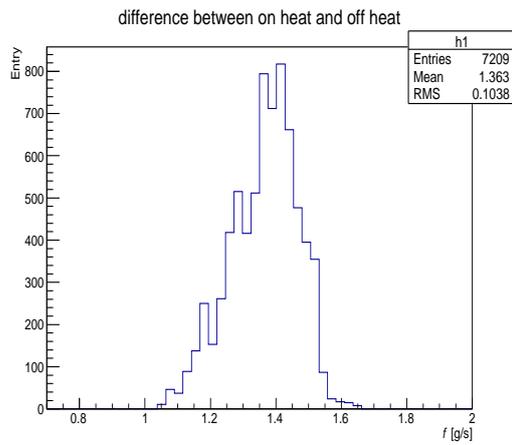


図 3.18: 流量のグラフ

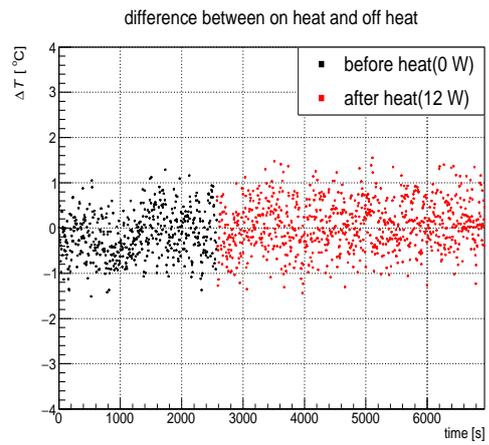


図 3.19: 発熱前後での  $T_1$  と  $T_2$  の温度差

## 第4章 CO<sub>2</sub>冷媒温度 -20℃でのSVD ラダーの変形の研究

第2章6節でも述べたが -20℃での冷却によってSVD ラダーが変形することが予想される。しかし、実際に冷却による変形がどのようになっているのか分かっていない。従って、本章では -20℃における冷却によってSVD ラダーがどのように変形し、またどの程度変形するのかについての結果とそれについての議論を行う。

### 4.1 冷却試験結果

#### 4.1.1 冷却パイプの温度、圧力、流量

class-C ラダーを用いた測定において、図4.1～図4.3に冷却パイプの温度  $T_{\text{pipe}}$ 、圧力  $P_{\text{pipe}}$ 、流量  $f$  のグラフを示す。また、図4.1～図4.3よりそれぞれの値は以下のようになった。

$$T_{\text{pipe}} = -19.70 \pm 0.60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{pipe}} = 18.66 \pm 0.35 \text{ bar}$$

$$f = 2.47 \pm 0.12 \text{ g/s}$$

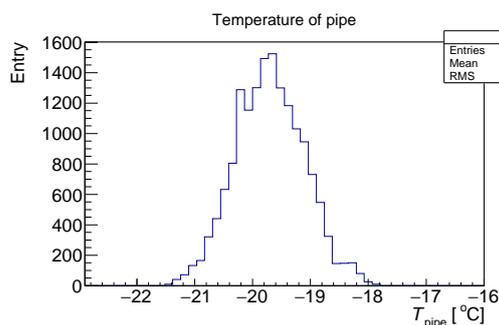


図 4.1: 冷却パイプの温度のグラフ

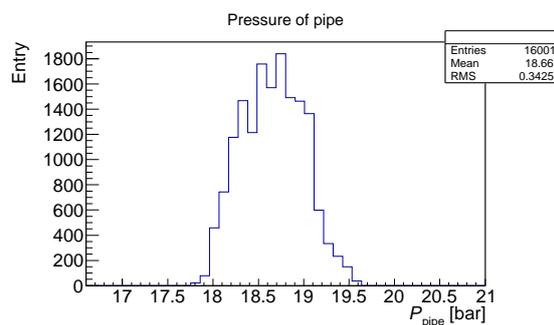


図 4.2: 冷却パイプの圧力のグラフ

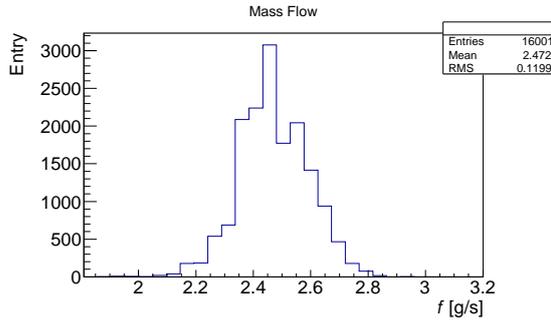


図 4.3: 流量のグラフ

#### 4.1.2 位置の不確かさの見積もり

位置の不確かさの見積もりとして、以下の2点を考慮した。

1. 測定によるラダーの位置の再現性による不確かさ  $\sigma_{\text{rep}}$
2. 三次元測定機の測定精度による不確かさ  $\sigma_{\text{sys}}$

1に関しては、各Fマークの冷却前後（発熱無し）の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の変形量の揺らぎを再現性による不確かさ  $\sigma_{\text{rep}}$  として定義した。2に関しては三次元測定機で同じ場所を複数回測定した際の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の値の揺らぎを三次元測定機による不確かさ  $\sigma_{\text{sys}}$  として見積もった。これらにより位置の不確かさ  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  は以下のように定まった。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\sigma_{x\text{rep}}^2 + \sigma_{x\text{sys}}^2} = \sqrt{0.012^2 + 0.001^2} = 0.012 \text{ mm} \\ \sigma_y &= \sqrt{\sigma_{y\text{rep}}^2 + \sigma_{y\text{sys}}^2} = \sqrt{0.012^2 + 0.001^2} = 0.012 \text{ mm} \\ \sigma_z &= \sqrt{\sigma_{z\text{rep}}^2 + \sigma_{z\text{sys}}^2} = \sqrt{0.006^2 + 0.003^2} = 0.007 \text{ mm}\end{aligned}$$

#### 4.1.3 DSSD での変形と Origami での変形の関係

SVD は DSSD を用いて粒子の通過位置を判断するため、DSSD の位置情報が正しくないと正確な粒子の通過位置を判断することができない。従って、冷却によって DSSD がどのように変形するのかを議論することが最も重要になってくる。しかし、今回のセットアップでは図 3.7 にあるように、直接 DSSD 上を測定できる場所は限られている。また、第2章3節でも説明したが、DSSD の上には Airex と Origami が乗っている。それぞれのパーツは接着剤が全面に塗られ、接着されている。従って、それぞれが独立して動くとは考えにくい。そこで DSSD 上の測定点と付近の Origami の  $x$  方向の動きを比較した。図 4.4 に DSSD と Origami の変

形の比較のグラフを示す。図 4.4 より、Origami 上の動きと DSSD 上の動きの振る舞いは一致していた。従って、DSSD の  $x$  方向の変形量は Origami の  $x$  方向の変形量で代用できるので、以降の結果では Origami の  $x$  方向の変形量も DSSD の変形量として記述していく。

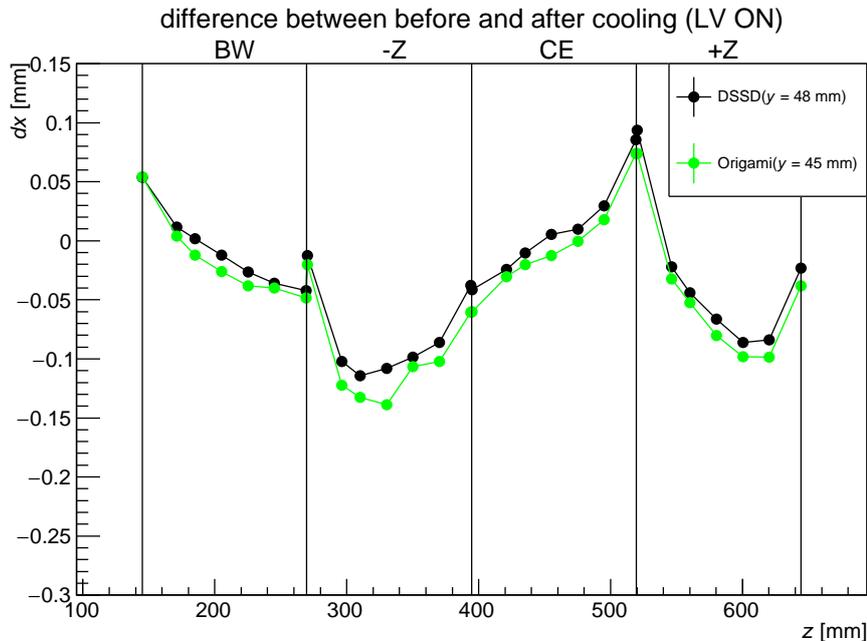


図 4.4:  $x$  方向の変形の比較

#### 4.1.4 各方向の変形量

##### $x$ 方向の変形量

図 4.5 に実際の SVD ラダーの写真、図 4.6~図 4.9 に  $x$  方向における変形量のグラフと断面図、図 4.10 に発熱前と発熱後の変形量の比較のグラフを示す。これらのグラフは SVD ラダーを図 4.5 のように見た形になっており、横軸が  $z$  方向の位置、縦軸が  $y$  方向の位置、グラフ上の  $z$  軸は  $x$  方向の変形量を示している。なお、図 4.6、図 4.8、図 4.10 上の赤い四角形の点は実際の測定位置を示しており、黒い縦線は各センサー部の境界を示している。また、LV OFF が発熱無しの状態、LV ON が発熱有りの状態を示している。発熱無し、有りのどちらの状態の結果に関しても +Z 及び -Z センサー部の中心部分が大きく変形している。また、+Z センサー部と CE センサー部の境界部で  $x$  方向に正の方向に変形していることが分かる。図 4.10 より、沈み込みが大きい +Z 及び -Z センサー部の中心の沈み込みが発熱によって大きく緩和しており、発熱無しに比べ、有りの状態では沈み込みが最大約  $80 \mu\text{m}$  程度緩和されている。これは APV25 の発熱が冷却パイプだけでなく、

APV25 が接触している Origami にも伝わってしまい、結果的に発熱無しの場合に比べ、発熱有りの方が全体の平衡温度が上がり、変形が緩和されたと考えられる。なお、変形の形に関しては第 4 章 2 節 2 項で議論する。また、 $x$  方向の変形は  $y$  方向に対して非対称で上半分の方がより大きく変形しているように見える。これは APV25 が  $y$  方向上部にあり、それに伴い冷却パイプも上部にあるため、 $y$  方向上部の方が冷却の影響が大きく、変形量が大きいのだと考えられる。

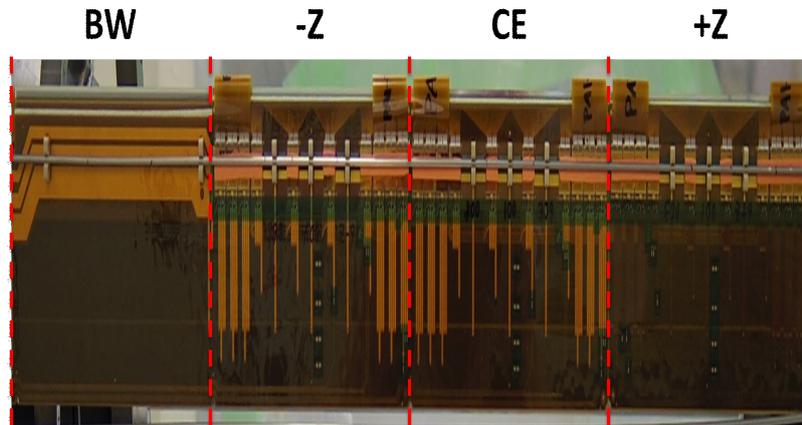


図 4.5: 実際の SVD ラダー。赤の点線は各センサー部の境界を示している。

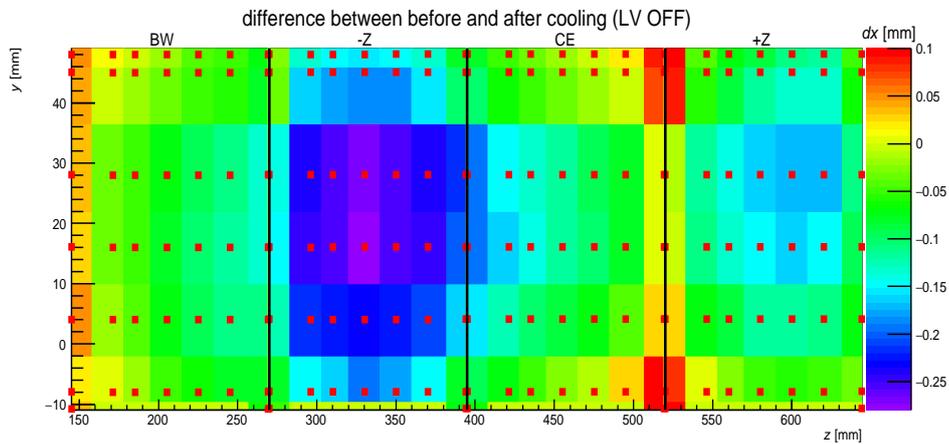


図 4.6: 各測定点における  $x$  方向の変形量 (発熱無し)

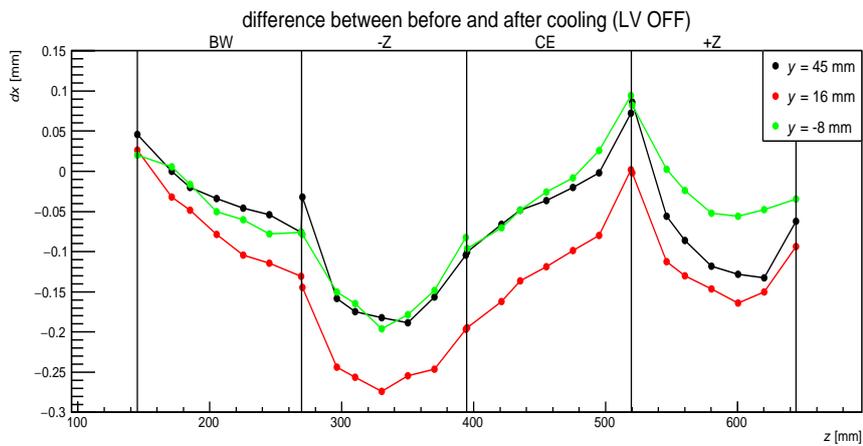


図 4.7:  $x$  方向の変形量の断面図 (発熱無し)

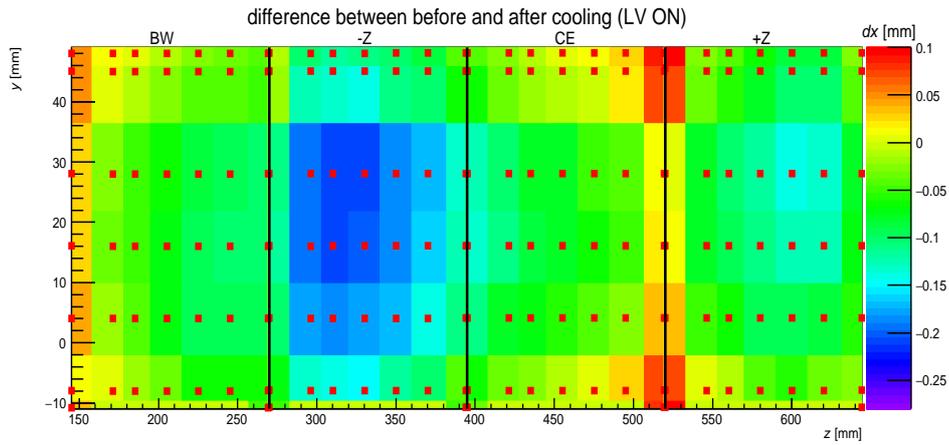


図 4.8: 各測定点における  $x$  方向の変形量 (発熱有り)

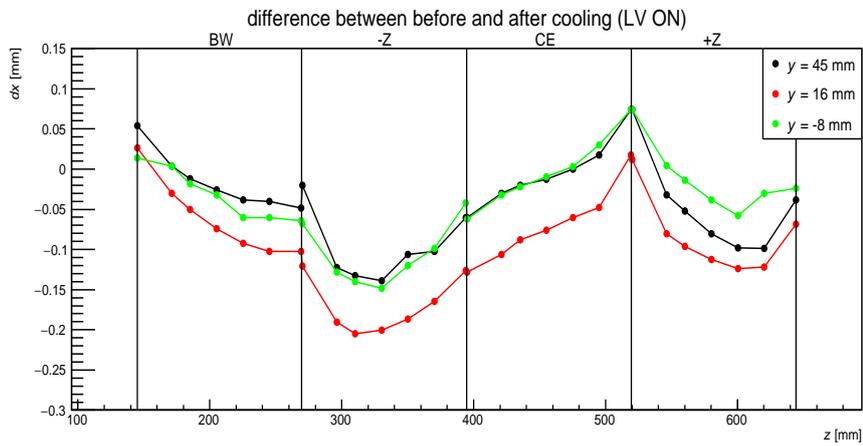


図 4.9:  $x$  方向の変形量の断面図 (発熱有り)

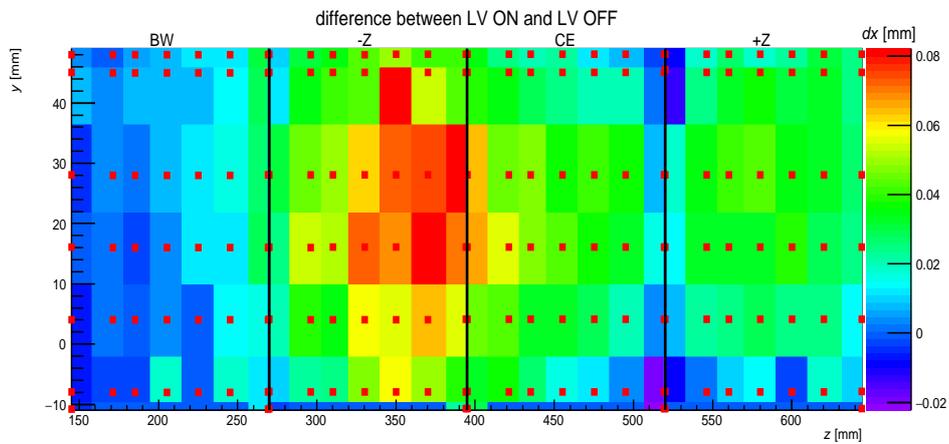


図 4.10: 各測定点における発熱前後での変形量の比較

### $y$ 及び $z$ 方向の変形量

図 4.11 に  $y$  方向における F マークの位置の変形量のグラフを、図 4.12 に  $z$  方向における変形量のグラフを示す。図 4.11 及び図 4.12 とも横軸の物理量はない。グラフ上の縦の実線でセンサー毎の結果を分けており、また点線の左側は”発熱無し”の状態、右側は”発熱有り”の状態の結果を示している。 $y$  及び  $z$  方向とも全体的に負の方向に変形しており、 $y$  及び  $z$  方向には最大約  $30 \mu\text{m}$  変形している。 $y$  方向に関しては、 $-Z$  センサー部に向かって大きく負の方向に変形している。 $z$  方向に関しては BW 側に向かうにつれて変形量が小さくなっている。また、 $y$  及び  $z$  方向とも発熱有無で変形量はあまり変わらない。

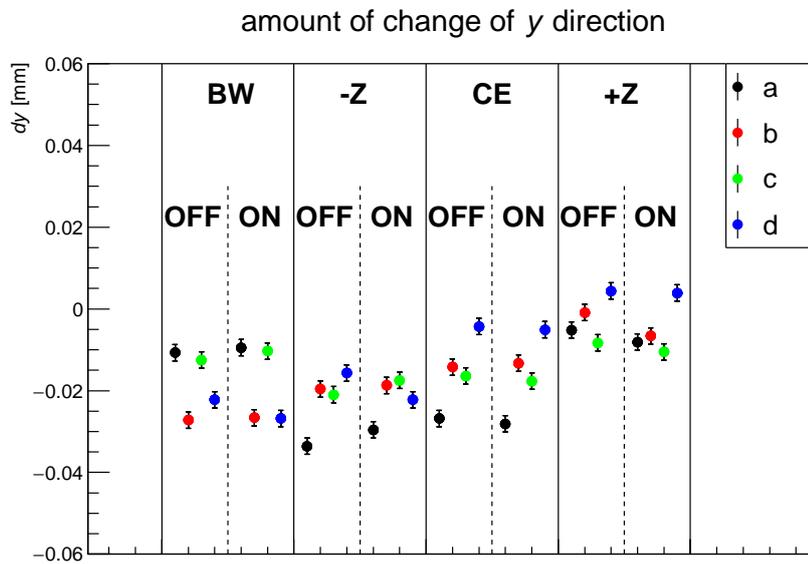


図 4.11: 各センサー部における F マークの  $y$  方向の変形量

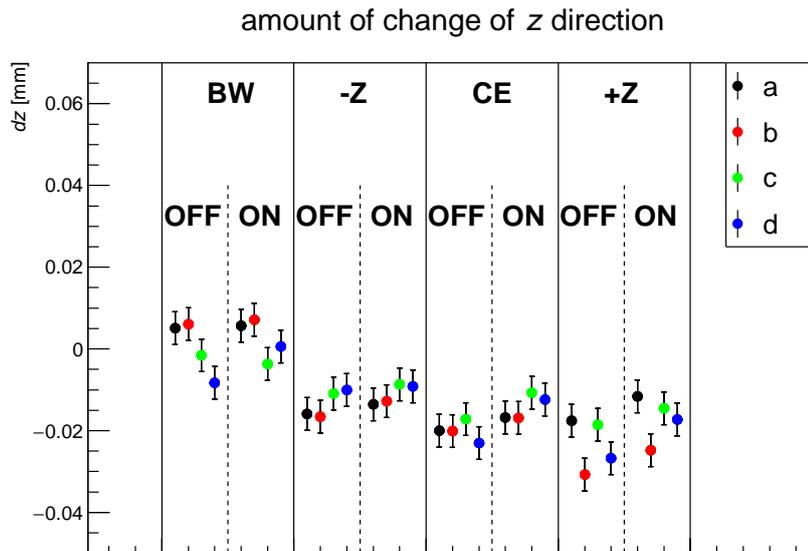
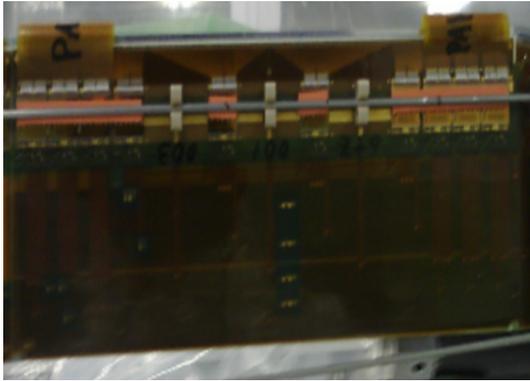


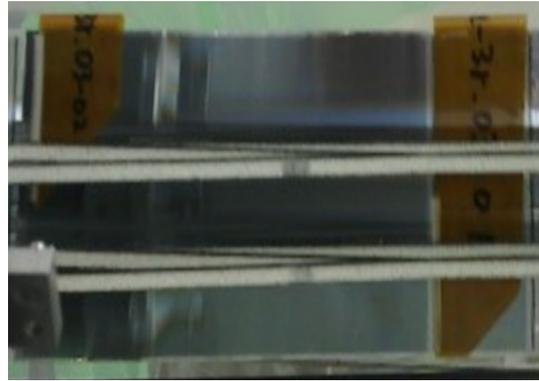
図 4.12: 各センサー部における F マークの  $z$  方向の変形量

#### 4.1.5 温度分布

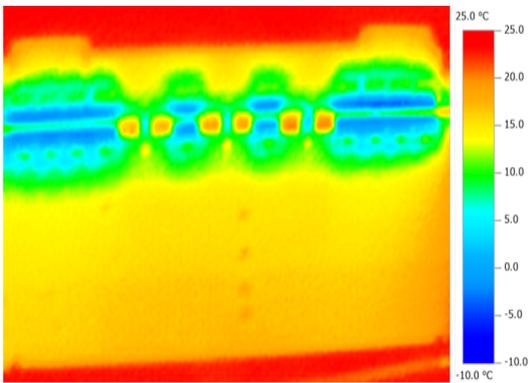
図 4.13～図 4.16 に発熱無しの状態と発熱有りの状態での各センサー部の表面及び裏面の温度分布を示す。発熱無しの温度分布に関しては、冷却パイプの直下が最も冷えているように見え、APV 付近（図 4.13(c) で言うと水色～緑色の付近）の温度は約 5～10 °C、Origami（図 4.13(c) で言うと黄色の付近）の温度は約 15 °C になっている。また、APV25 の発熱を加えると APV25 付近の温度の分布の広がりが変わっており、発熱に伴い温度が上がっていることが分かる。また、Origami の温度に関しても少し色が変わっており、約 2 °C 程度上がっているように見える。BW センサー部に関しては Origami 上に APV 及びケラタームがないために、発熱の有無に関わらず、温度分布がほとんど変わっていない。しかし、冷却パイプを固定する CO<sub>2</sub> クリップは Origami 上に存在する。図 4.16(c) 及び図 4.16(e) の左上の一部だけ温度が変わっている部分は CO<sub>2</sub> クリップによる熱伝導の影響だと考えられる。また、図 4.16(e) の下部分にも温度が変わっている部分があるが、これは冷却パイプが写っているだけである。また、それぞれのセンサー部の裏面に関しては DSSD と PA が主に見えている。第 3 章 2 節で述べたように DSSD はアルミとシリコンのストリップによって近くの物体等の赤外線を反射してしまい、正しい温度が評価できない。PA に関しては表面の Origami の温度とほぼ同じ温度になっていることが分かる。



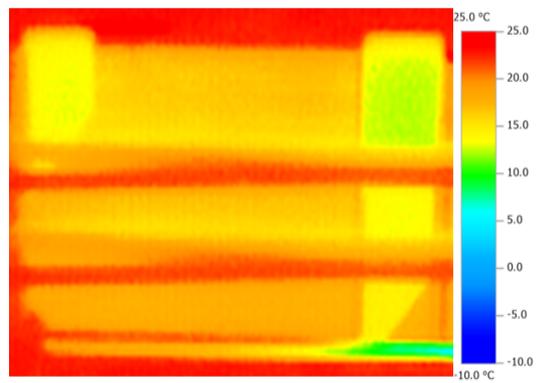
(a) +Z センサー部の表面の実際の写真



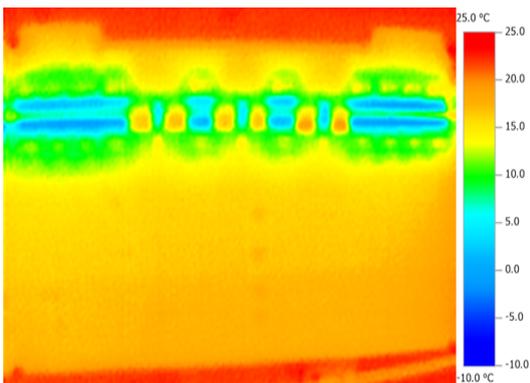
(b) +Z センサー部の裏面の実際の写真



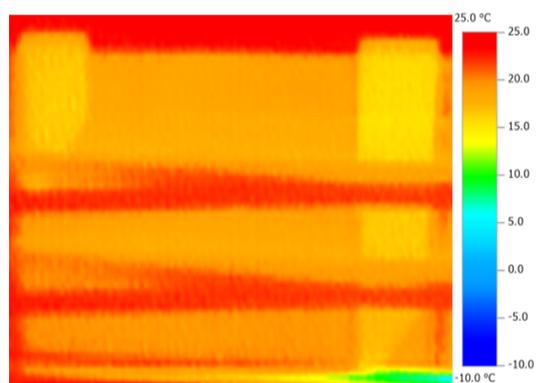
(c) +Z センサー部の表面における温度分布（発熱無し）



(d) +Z センサー部の裏面における温度分布（発熱無し）

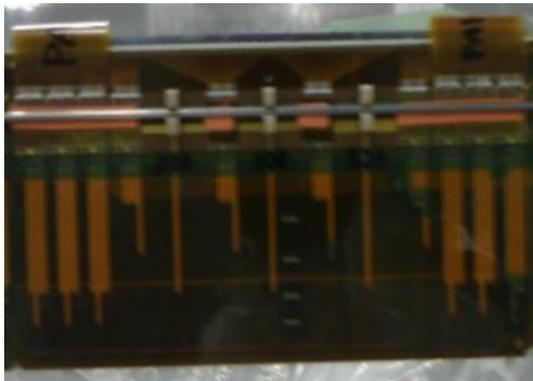


(e) +Z センサー部の表面における温度分布（発熱有り）

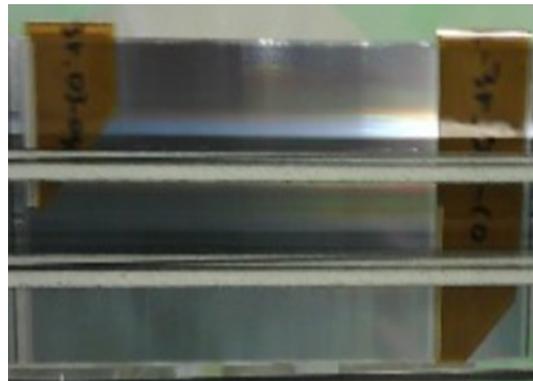


(f) +Z センサー部の裏面における温度分布（発熱有り）

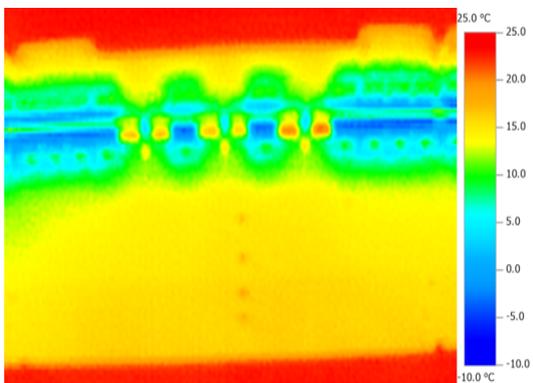
図 4.13: +Z センサー部における温度分布



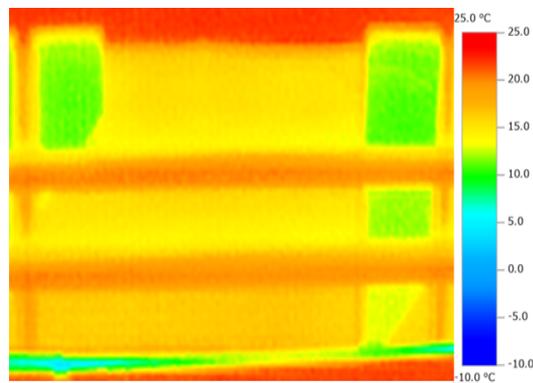
(a) CE センサー部の表面の実際の写真



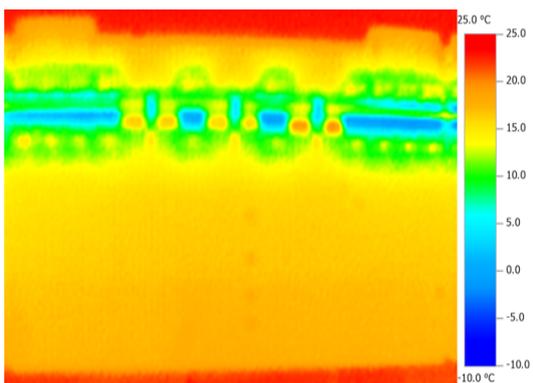
(b) CE センサー部の裏面の実際の写真



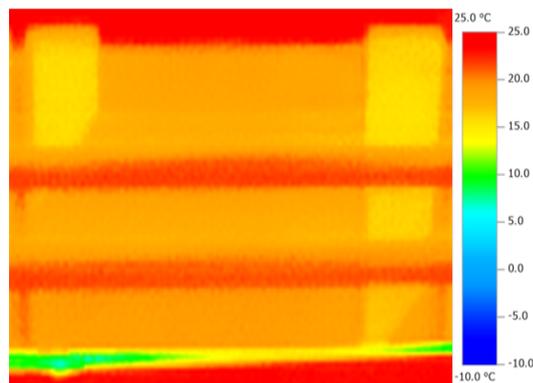
(c) CE センサー部の表面における温度分布（発熱無し）



(d) CE センサー部の裏面における温度分布（発熱無し）

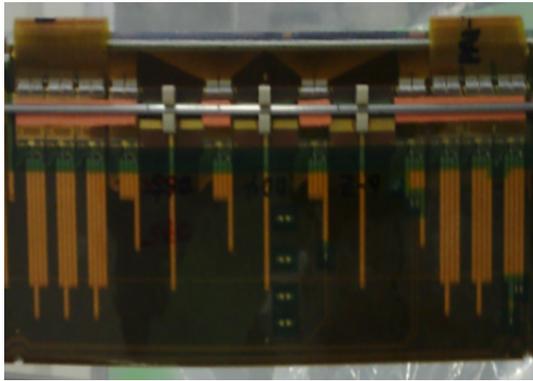


(e) CE センサー部の表面における温度分布（発熱有り）

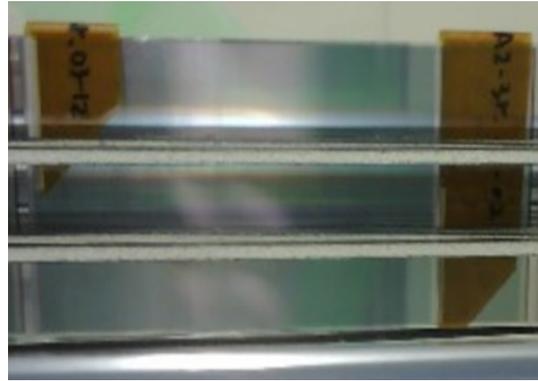


(f) CE センサー部の裏面における温度分布（発熱有り）

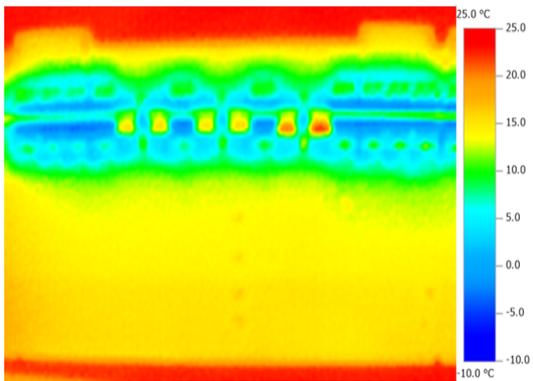
図 4.14: CE センサー部における温度分布



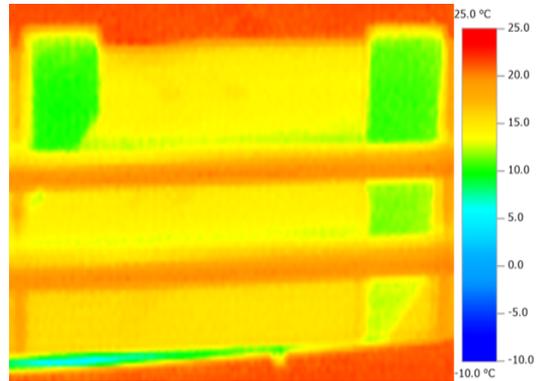
(a) -Z センサー部の表面の実際の写真



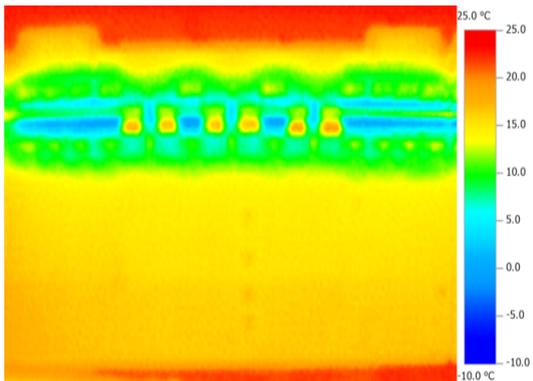
(b) -Z センサー部の裏面の実際の写真



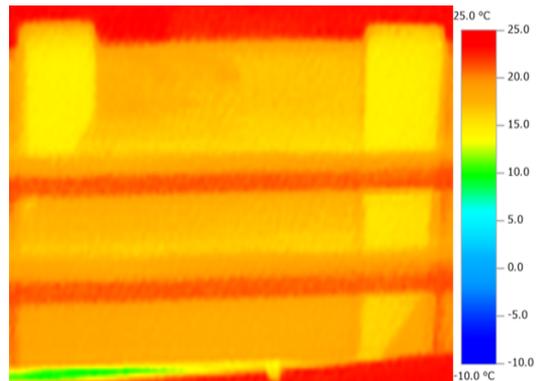
(c) -Z センサー部の表面の温度分布（発熱無し）



(d) -Z センサー部の裏面における温度分布（発熱無し）



(e) -Z センサー部の表面の温度分布（発熱有り）



(f) -Z センサー部の裏面における温度分布（発熱有り）

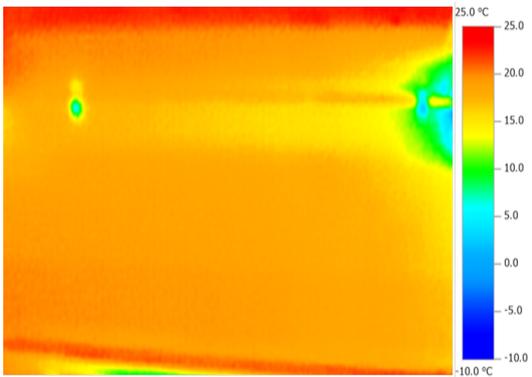
図 4.15: -Z センサー部における温度分布



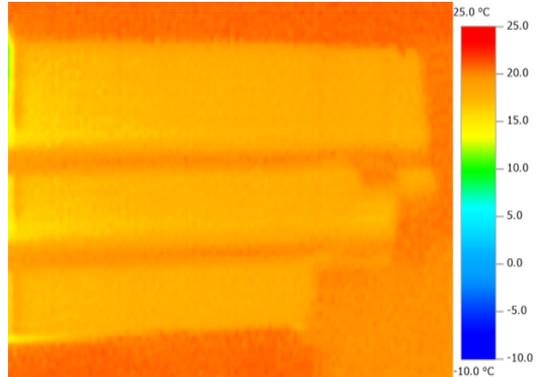
(a) BW センサー部の表面の実際の写真



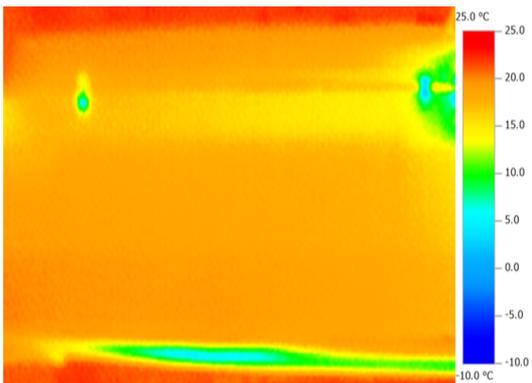
(b) BW センサー部の裏面の実際の写真



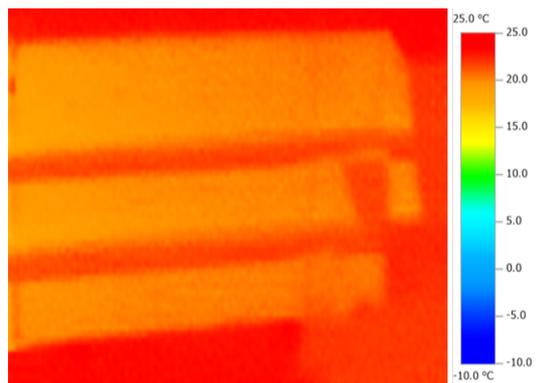
(c) BW センサー部の表面における温度分布（発熱無し）



(d) BW センサー部の裏面における温度分布（発熱無し）



(e) BW センサー部の表面における温度分布（発熱有り）



(f) BW センサー部の裏面における温度分布（発熱有り）

図 4.16: BW センサー部における温度分布

## 4.2 考察

### 4.2.1 温度シミュレーションとの比較

赤外線サーモカメラによる温度分布のメカニズムを理解するために、温度分布シミュレーションとの比較を行った。シミュレーションとしては Autodesk 社の Simulation CFD [15] というソフトウェアを用いて、有限要素法による熱伝導解析を行った。以下でシミュレーションの条件と比較結果を議論する。

#### 温度シミュレーションのモデルと境界条件

温度シミュレーションに関しては、センサー 1 枚分に関して行った。図 4.17 及び図 4.18 に温度シミュレーションのモデルとその断面図を示す。また、以下に温度シミュレーション条件と表 4.1 に設定した物性値を示す。なお、発熱量に関しては今回の冷却試験では APV25 は約 0.11 W で発熱していたため、シミュレーションでも発熱量を 0.11 W として扱う。

#### 境界条件

- 冷却パイプの温度： $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (恒温)
- 空気との熱伝達率： $8\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- APV25 の発熱量： $0.11\text{ W/chip}$ (体積当たり均一に発熱すると仮定)
- 空気の温度： $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

表 4.1: モデルの熱伝導率

物体名	熱伝導率 [W/mm · K]
冷却パイプ	0.016
セラターム	0.0015
APV25	0.19
Origami	$16 \times 10^{-5}$
Airex	$4 \times 10^{-5}$
DSSD	0.19

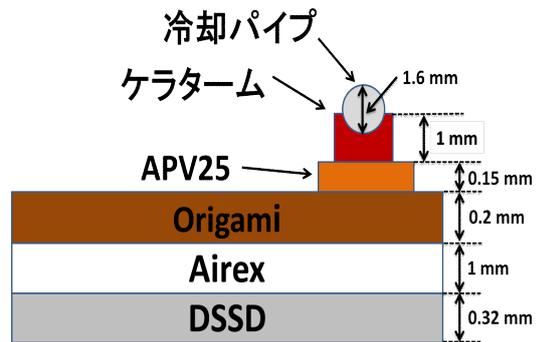
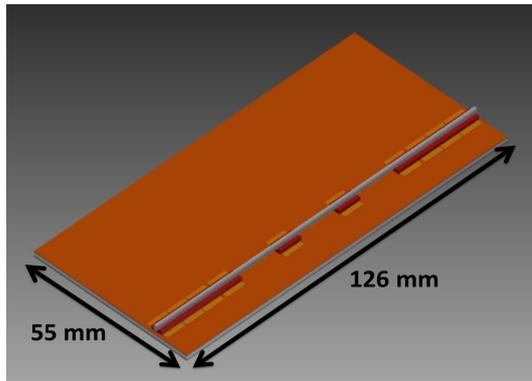


図 4.17: 温度分布シミュレーションのモデル 図 4.18: 温度シミュレーションのモデルの断面図

#### シミュレーション結果

図 4.19 にシミュレーション結果とサーモカメラの画像の比較の図を示す。図 4.19 より、シミュレーションとサーモカメラの画像では Origami の下部分の温度は約 5 °C 程度違っている。また、サーモカメラの画像では冷却パイプの直下の Origami の温度と Origami の下部とでは約 5 °C 程度温度差が生じているのにも関わらず、シミュレーションではほとんど Origami 上で温度の違いが見られない。冷却パイプに関してはサーモカメラでは赤外線が反射してしまい、正しく温度が測定できていないためシミュレーションと違っていると思われる。

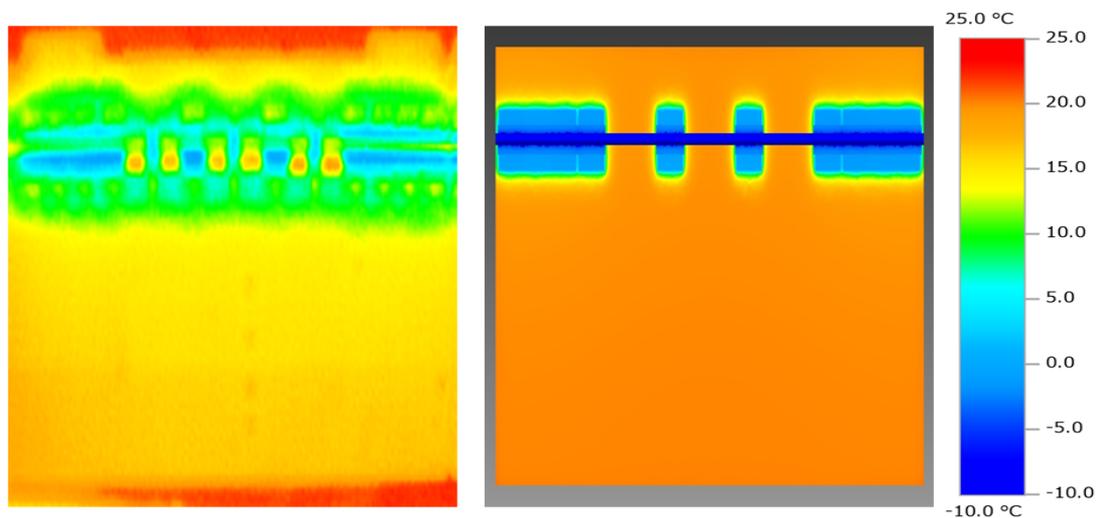


図 4.19: シミュレーションとの比較

実際の Origami 上には信号線として銅線が張り巡らされている。銅の熱伝導率はとても高いため、それによる熱伝導の寄与が大きいと考えられる。そこで銅線

を Origami 上に新たに追加してシミュレーションを行った。図 4.20 に変更したモデルの図を示す。

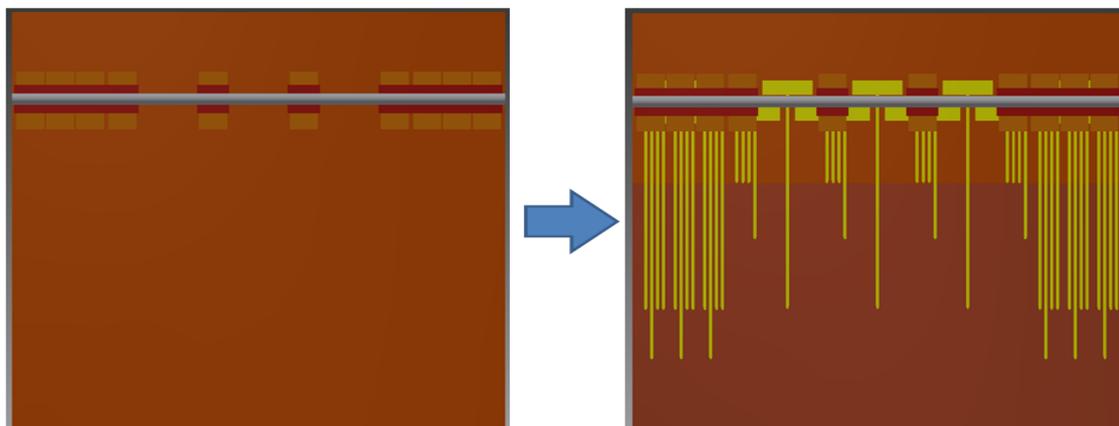


図 4.20: 新しいモデル。右側の図上の黄色の部分追加した銅線である。

これによるシミュレーション結果の比較の結果を図 4.21 に示す。図 4.21 から銅線による熱伝導の影響が大きいことが分かる。これでもまだ、シミュレーションの Origami の上の黒枠の部分が黄色ままで、サーモカメラの温度とは違うが、この上部分にも APV25 から PA 上の銅線へ配線されており、その銅線はこのモデルには追加していないためにこの差が生じたと考えられる。また、図 4.22 では CO<sub>2</sub> クリップもないため、その CO<sub>2</sub> クリップを通した熱伝導が生じず、赤枠の部分がサーモカメラの画像と比較してシミュレーション上では温度が高く（黄色に）なっていると思われる。PA 内の配線や CO<sub>2</sub> クリップなどの細かい違いはあるが、得られた温度分布は十分シミュレーションで再現出来ており、温度分布生成のメカニズムが理解できた。

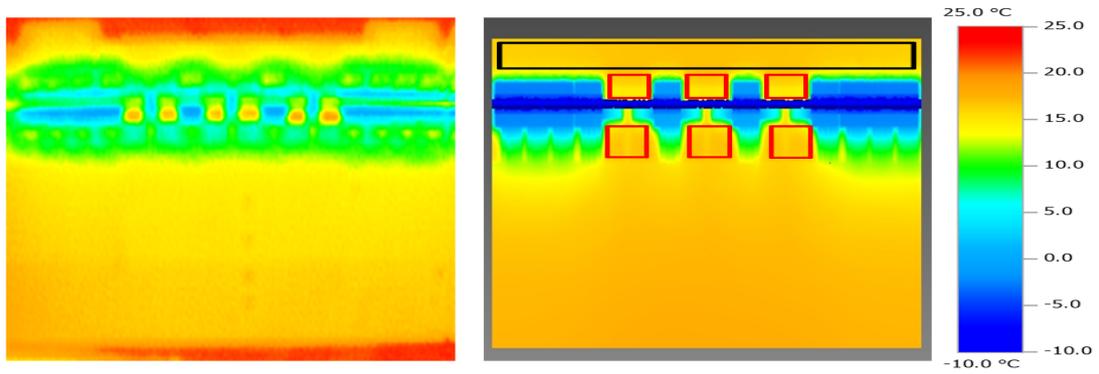


図 4.21: 新しいモデルでの比較 1

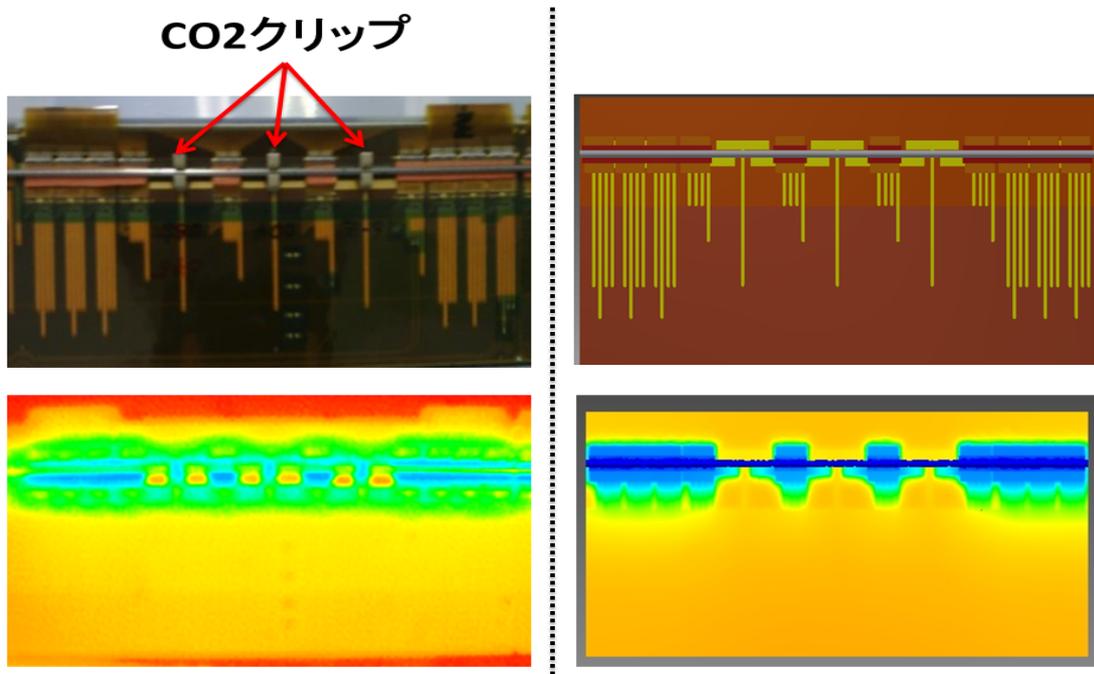


図 4.22: 新しいモデルでの比較 2。左がサーモカメラの画像、右がシミュレーションの画像を表している。

#### 4.2.2 変形のメカニズム

第4章1節4項の結果より、 $x$ 方向に発熱無しの場合最大  $280 \mu\text{m}$ 、発熱有りの場合最大  $200 \mu\text{m}$  程度変形しており、 $y$  及び  $z$  方向には発熱の有り無しに関わらず、最大  $30 \mu\text{m}$  程度変形していることが分かった。

図4.6及び図4.8より、 $x$ 方向に関しては+Z及び-Zセンサー部の中心で大きく沈み込んでいるように見える。Origamiは図4.23及び図4.24に示すようにCE、-Z、BW側(図4.23の赤枠側)と+Z及びFW側(図4.23の青枠側)の2つで分かれており、また、Airexに関しては+Z～BWセンサー部にまたがって配置されている。Origamiが2つに分かれているため、冷却によってBW、-Z、CE側のOrigamiと+Z及びFW側のOrigamiで独立で熱収縮するため、+Z側と-Z側のセンサー部の2ヶ所で大きく沈み込んでいるように見えると考えられる。

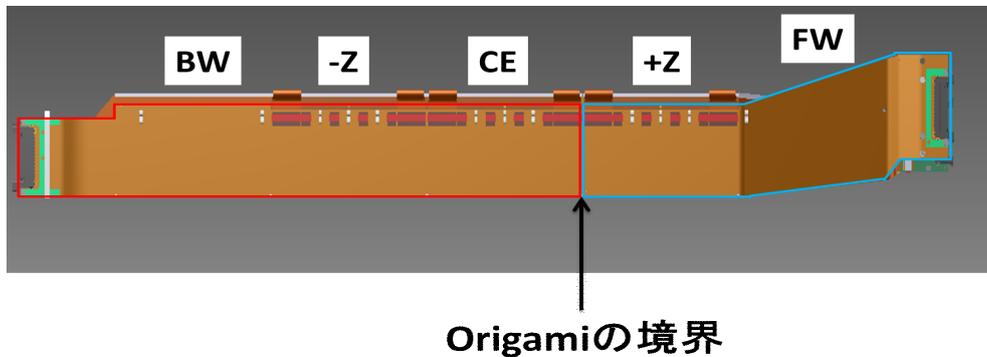


図 4.23: Origami の分類

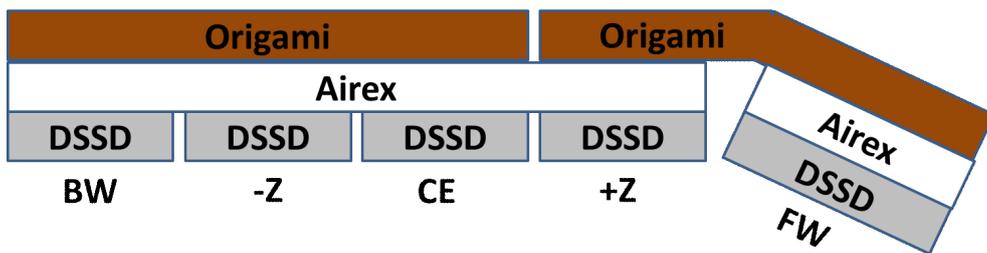


図 4.24: SVD ラダーの断面図

中心部が大きく変形している原因としては熱膨張係数と温度の違いによるものが原因だと考えられる。熱膨張による長さの変化は以下の(4.1)式で与えられる。

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (4.1)$$

$\Delta L$  は長さの変化量、 $\alpha$  は熱膨張係数、 $L$  は物体の長さ、 $\Delta T$  は温度差である。この式から熱膨張による長さの変化は、熱膨張係数、物体の長さ、変化した温度差に比例していることが分かる。また、表 4.2 に冷却パイプ、Origami、Airex、DSSD の熱膨張係数の値、シミュレーション結果による温度の平均の変化量、 $z$  方向の長さ、 $z$  方向の長さの変化量を示す。

表 4.2: 冷却パイプ、Origami、Airex、DSSD の熱膨張の計算

名称	$\alpha$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	$\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$L_z$ [mm]	$\Delta L_z$ [mm]	$\Delta L_z/L_z \times 10^{-4}$
冷却パイプ	17.3	-45	$0.55 \times 10^3$	-0.43	-7.8
Origami +Z 側	10~30	-8	125	-0.03~ -0.01	-2.4~ -0.8
Origami CE 側	10~30	-8	250	-0.06~ -0.02	-2.4~ -0.8
Airex	40	-7	375	-0.10	-2.6
DSSD	1~4	-3	125	-0.001~ -0.0003	-0.024~ -0.008

これより DSSD が最もこの測定においては熱膨張しにくいことが分かる。よって図 4.25 のように DSSD が温度によってほとんど収縮せず、上の Origami 及び Airex が冷却により収縮することによって結果的に下の DSSD を引っ張るような形になる。それが  $y$  方向でも同時に起こるため中心部分が沈むように見えていると考えられる。

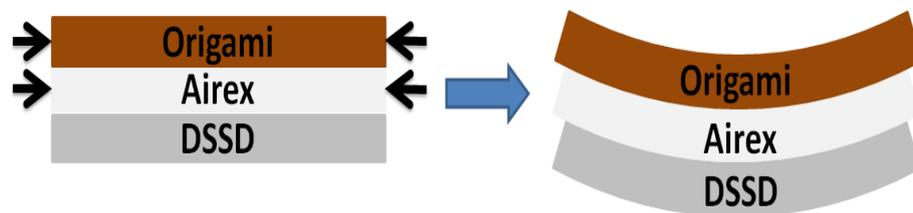


図 4.25: 変形の流れ。図中の黒矢印は熱収縮の方向を示している。

また、冷却パイプの熱収縮によっても同様にラダーが引っ張られている可能性も考えられる。これに関しては冷却試験の際に冷却パイプに目印を付けておき、冷却前後で  $z$  方向にどの程度移動するかを調べた。図 4.26 に三次元測定機で見た冷却パイプ上の目印の一例を示す。

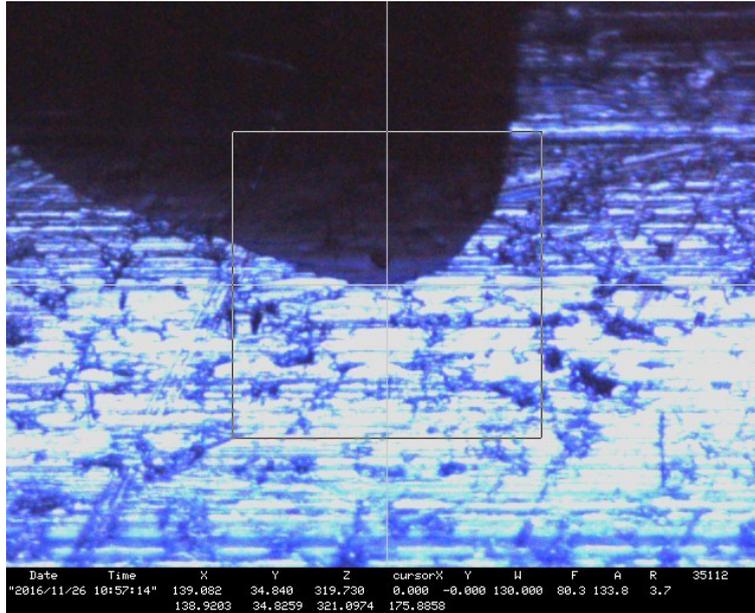


図 4.26: 三次元測定機で見た冷却パイプの目印。黒色に写っている部分が目印である。

冷却パイプの目印の  $z$  座標と  $z$  方向の変化量の関係は図 4.27 のような結果になった。Fitting 関数に関しては先ほどの (4.1) 式の文字を変え、変形させた (4.2) 式を用いた。

$$dz_{\text{pipe}} = \alpha(z_{\text{pipe}} - p_0)dT_{\text{pipe}} \quad (4.2)$$

ここで  $dz_{\text{pipe}}$  は冷却パイプの長さの変化量、 $\alpha$  は冷却パイプの線膨張係数、 $z_{\text{pipe}}$  は冷却パイプの  $z$  座標、 $p_0$  は  $dz_{\text{pipe}} = 0$  の時の  $z$  座標、 $dT_{\text{pipe}}$  は冷却パイプの温度差を示している。Fitting の際にパラメータ  $\alpha$ 、 $dT_{\text{pipe}}$  は以下の値に固定した。

$$\alpha = 17.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$dT_{\text{pipe}} = 25 - (-20) = -45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

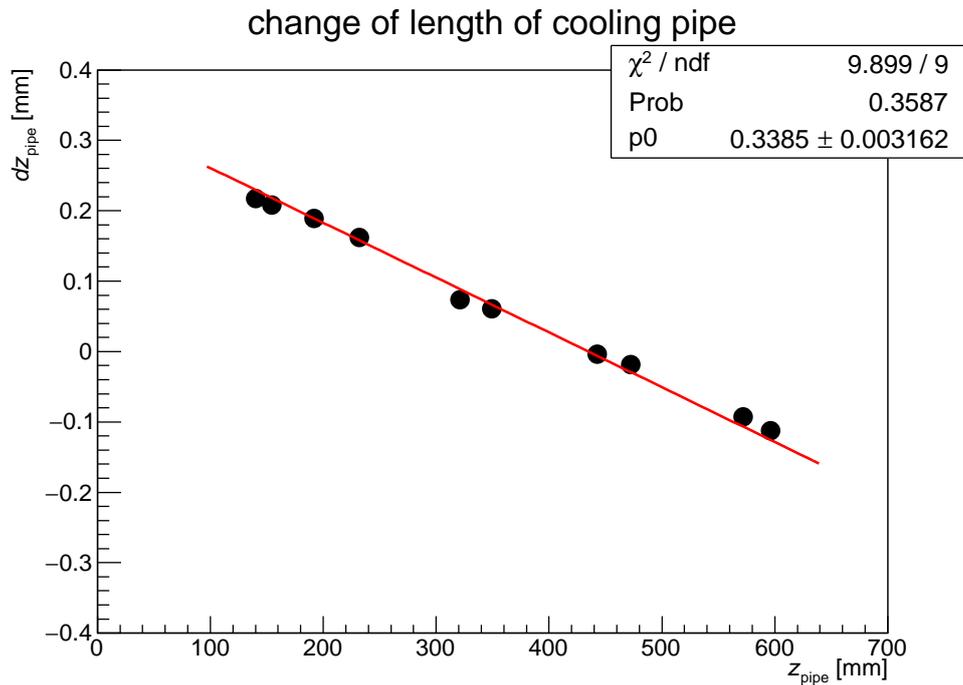


図 4.27: 冷却パイプの熱収縮

図 4.27 から、 $\chi^2/\text{ndf}$  の値が約 1.1 となっていることから、Fitting は妥当であると判断できる。この結果より、冷却パイプには接触している CO<sub>2</sub> クリップとケラタームの摩擦による冷却パイプの熱収縮の抑制がないことが分かる。つまり、冷却パイプは熱収縮する際に他と特に干渉せず、SVD ラダーの変形には影響がないと判断できる。

#### 4.2.3 最大変形量の算出

測定結果より、 $-Z$  センサー部の中央が最も変形していることが分かった。よって  $-Z$  センサー部における  $x$  方向の変形量の最大値を評価するため、二変数の二次関数で Fitting を行った。(4.3) 式に Fitting に用いた関数を記述する。

$$dx = p_0(z - p_1)^2 + p_2(y - p_3)^2 + p_4 \quad (4.3)$$

$p_0 \sim p_4$  の値がフリーパラメータである。この関数を用いて発熱無しの場合と発熱有りの場合の Fitting を行った際の各パラメータを表 4.3 に、グラフを図 4.28 及び図 4.29 に示す。表 4.3 より  $\chi^2/\text{ndf}$  の値がどちらの場合でも 1 に近い値を取っており、Fitting が妥当であると考えられる。Fitting 結果より発熱無しと発熱有りでは最大変形量は約 70  $\mu\text{m}$  程度違うことが分かる。また、最大変形量の  $y$  及び  $z$  座標に関しても数 mm のオーダーで一致しており、どちらもほぼ同じ場所で最大に

変形していることが分かる。実際の SVD の運用の際には APV25 を発熱させることなく冷却を行うことはないが、発熱無しの結果より冷却によって生じる SVD ラダーの最大変形値は約 280  $\mu\text{m}$  となることが求められた。

表 4.3: Fitting によって得られた各パラメータ

	$p_0$ [ $10^{-5}/\text{mm}$ ]	$p_1$ [mm]	$p_2$ [ $10^{-5}/\text{mm}$ ]	$p_3$ [mm]	$p_4$ [mm]
発熱無し	$2.18 \pm 0.13$	$331.2 \pm 1.1$	$10.20 \pm 0.59$	$17.88 \pm 0.48$	$-0.2092 \pm 0.0038$
発熱有り	$2.69 \pm 0.13$	$337.26 \pm 0.91$	$13.40 \pm 0.59$	$18.77 \pm 0.36$	$-0.2783 \pm 0.0038$

	$\chi^2/\text{ndf}$
発熱無し	40.214/39
発熱有り	42.014/39

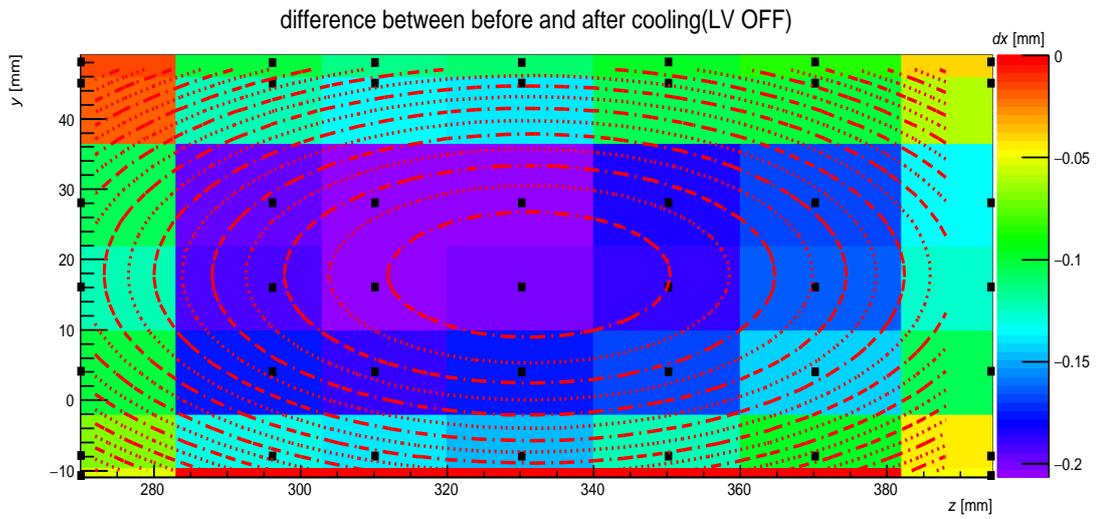


図 4.28: -Z センサー部における  $x$  方向の Fitting 結果 (発熱無し)

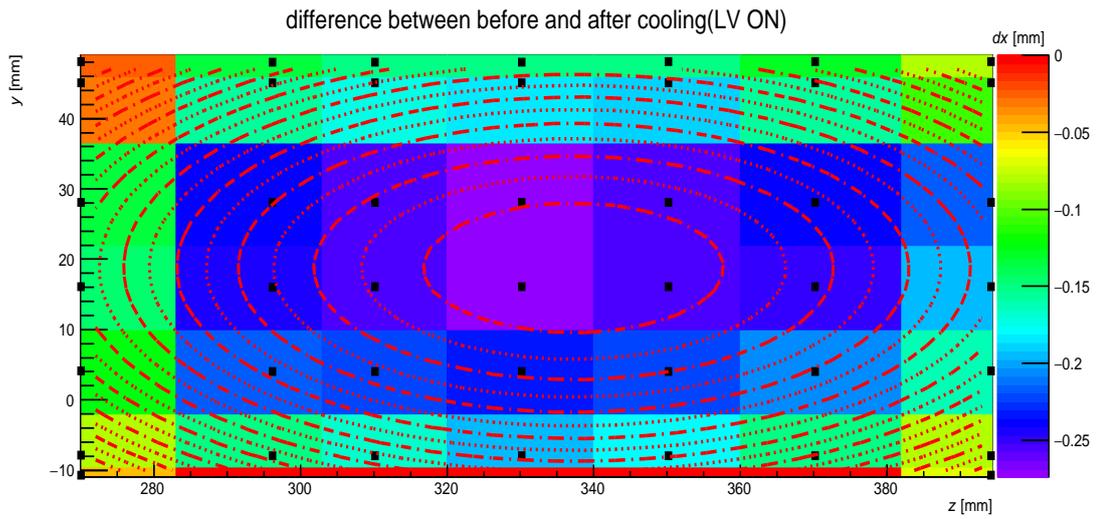


図 4.29: -Z センサー部における  $x$  方向の Fitting 結果 (発熱有り)

## 第5章 変形の温度依存性の研究

Belle II 実験では冷却温度を  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  にして冷却するが、温度変化によって変形量がどの程度変化するか分かっていない。この測定では冷却温度を4通りの温度設定 ( $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) で測定し、SVD ラダーの位置の変形量がどのように変化していくか、冷却温度と変形量の関係を調べた。なお、この測定では発熱有りの結果のみ議論していく。

### 5.1 冷却試験結果

#### 5.1.1 冷却パイプの温度、圧力、流量

それぞれの温度の測定における目標設定温度  $T_{\text{set}}$ 、冷却パイプの温度  $T_{\text{pipe}}$ 、圧力  $P_{\text{pipe}}$ 、流量  $f$  の値を表 5.1 に示す。なお  $T_{\text{set}} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  は第4章1節での測定の値を示している。

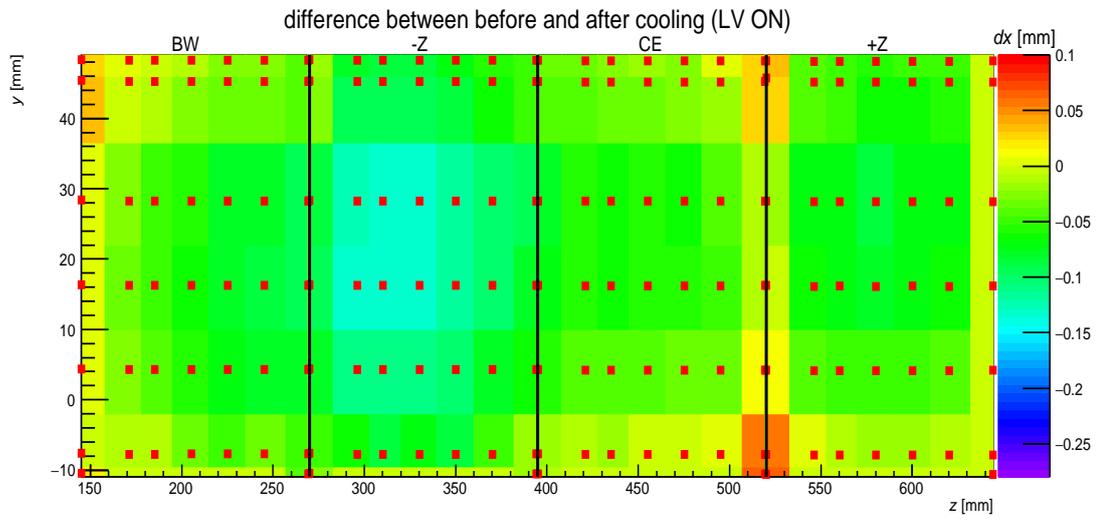
表 5.1: それぞれの測定の温度、圧力、流量

目標設定温度 $T_{\text{set}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{pipe}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$P_{\text{pipe}}$ [bar]	$f$ [g/s]
-10	$-9.85 \pm 0.38$	$26.14 \pm 0.20$	$2.33 \pm 0.08$
-15	$-15.36 \pm 0.47$	$22.04 \pm 0.28$	$2.24 \pm 0.08$
-20	$-19.70 \pm 0.60$	$18.66 \pm 0.35$	$2.47 \pm 0.12$
-25	$-24.99 \pm 0.52$	$14.73 \pm 0.15$	$2.35 \pm 0.05$

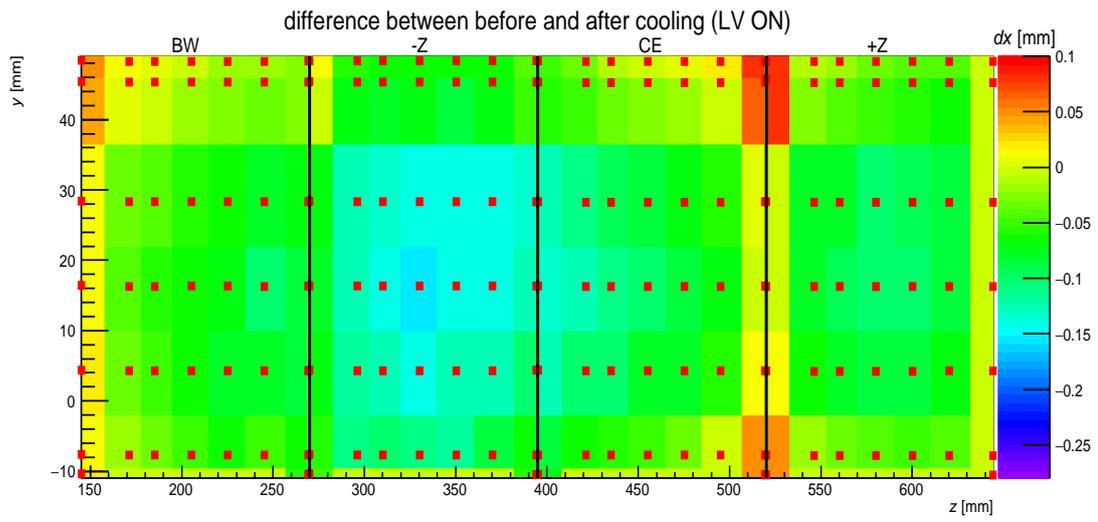
#### 5.1.2 各方向の変形量

##### $x$ 方向の変形量

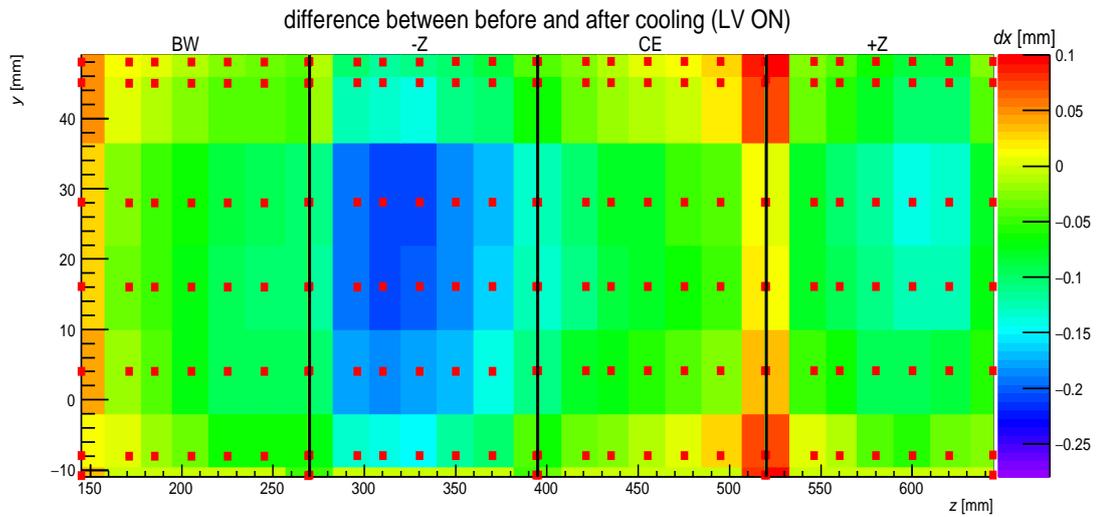
図 5.1 に  $x$  方向の変形量のグラフを示す。温度が下がると沈み込みの大きさも大きくなっていることが分かる。沈み込みは第4章2節で議論した通り、 $-Z$  及び  $+Z$  センサー部の中心で特に大きくなっている。また、温度を変えても変形の仕方は変わらないことが分かる。



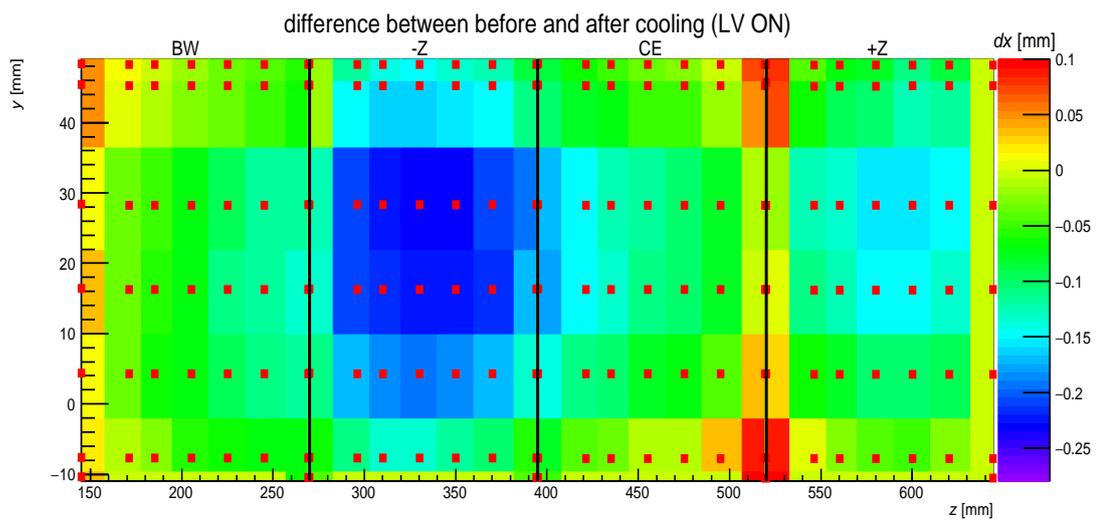
(a)  $T_{\text{set}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  における  $x$  方向の変形量



(b)  $T_{\text{set}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$  における  $x$  方向の変形量



(c)  $T_{\text{set}} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  における  $x$  方向の変形量

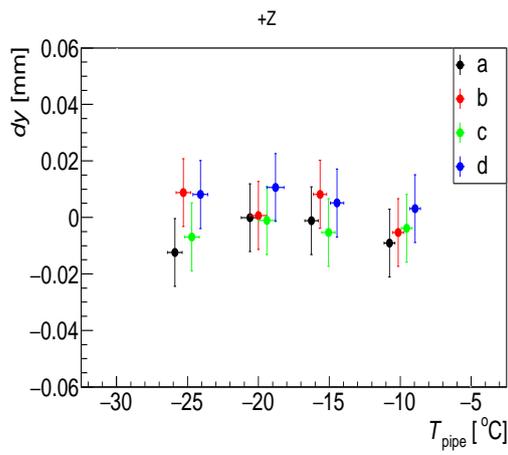


(d)  $T_{\text{set}} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$  における  $x$  方向の変形量

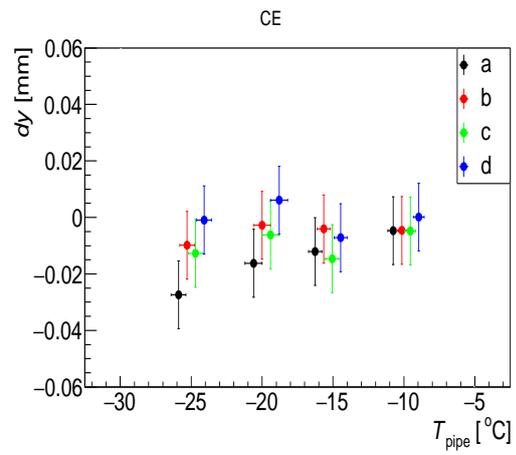
図 5.1:  $x$  方向の変形量の温度依存性

### $y$ 及び $z$ 方向の変形量

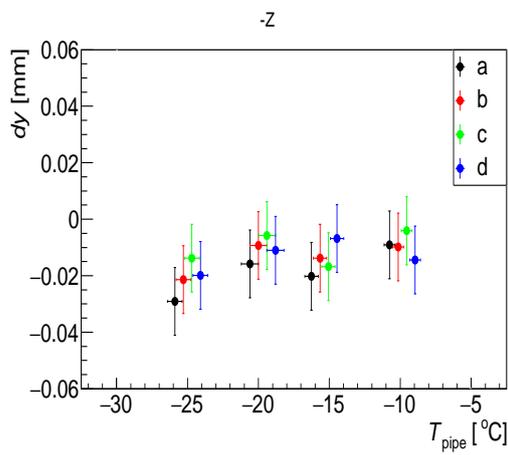
$y$  及び  $z$  方向の変形量のグラフを図 5.2 及び図 5.3 に示す。グラフから  $y$  及び  $z$  方向に関しては温度依存性は見られない。



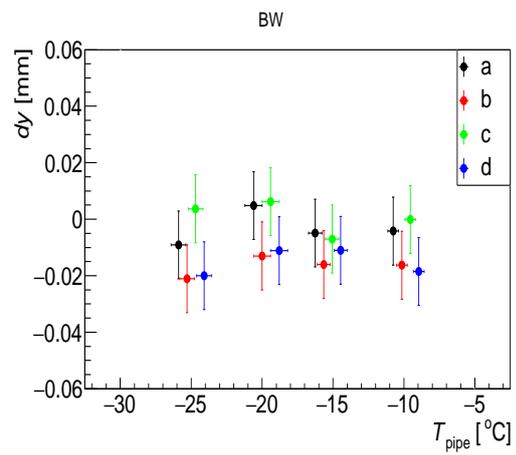
(a) +Z センサー部における  $y$  方向の変形量



(b) CE センサー部における  $y$  方向の変形量

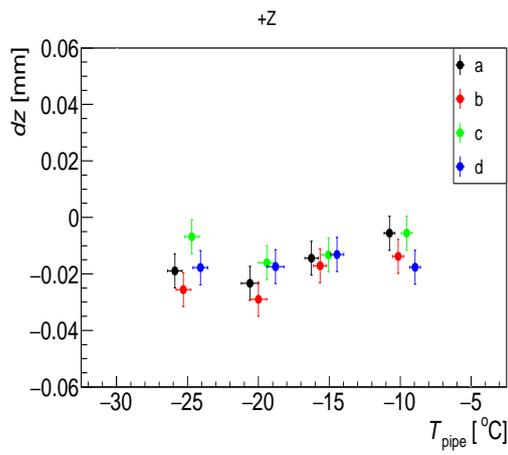


(c) -Z センサー部における  $y$  方向の変形量

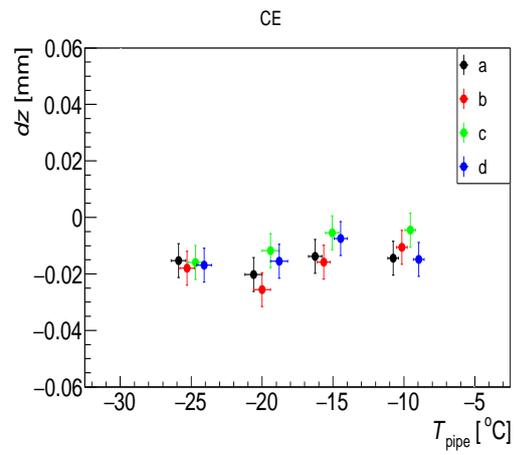


(d) BW センサー部における  $y$  方向の変形量

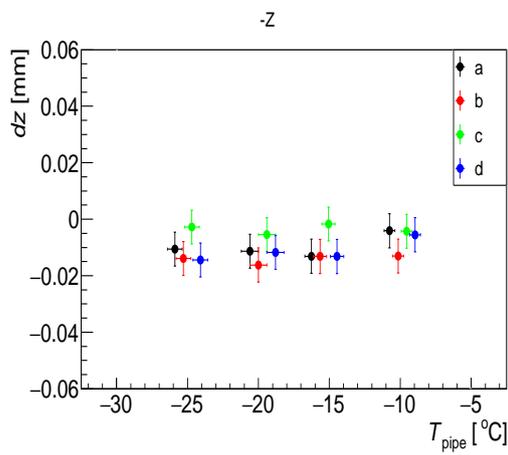
図 5.2:  $y$  方向の変形量の温度依存性



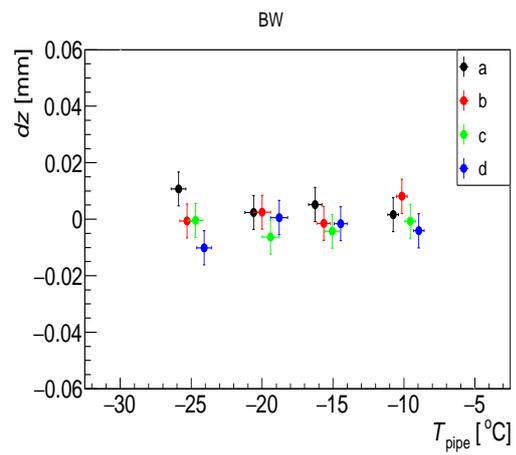
(a) +Z センサー部における  $z$  方向の変形量



(b) CE センサー部における  $z$  方向の変形量



(c) -Z センサー部における  $z$  方向の変形量



(d) BW センサー部における  $z$  方向の変形量

図 5.3:  $z$  方向の変形量の温度依存性

### 5.1.3 温度分布

第4章1節5項の結果より Origami 部である+Z、CE、-Z センサー部においては温度分布がほとんど変わらないため、以下では  $x$  方向の変形量が最も大きかった -Z センサー部における温度分布についてのみ議論していく。図 5.4 にそれぞれの目標設定温度  $T_{set}$  における -Z センサー部のサーモカメラの温度分布を示す。図から分かる通り、冷却温度が下がるにつれ全体的な温度も下がっている。また、図 5.5 に裏面の温度分布を示す。PA に関しては表面と同様に冷却温度が下がる毎に PA の温度も下がっている。

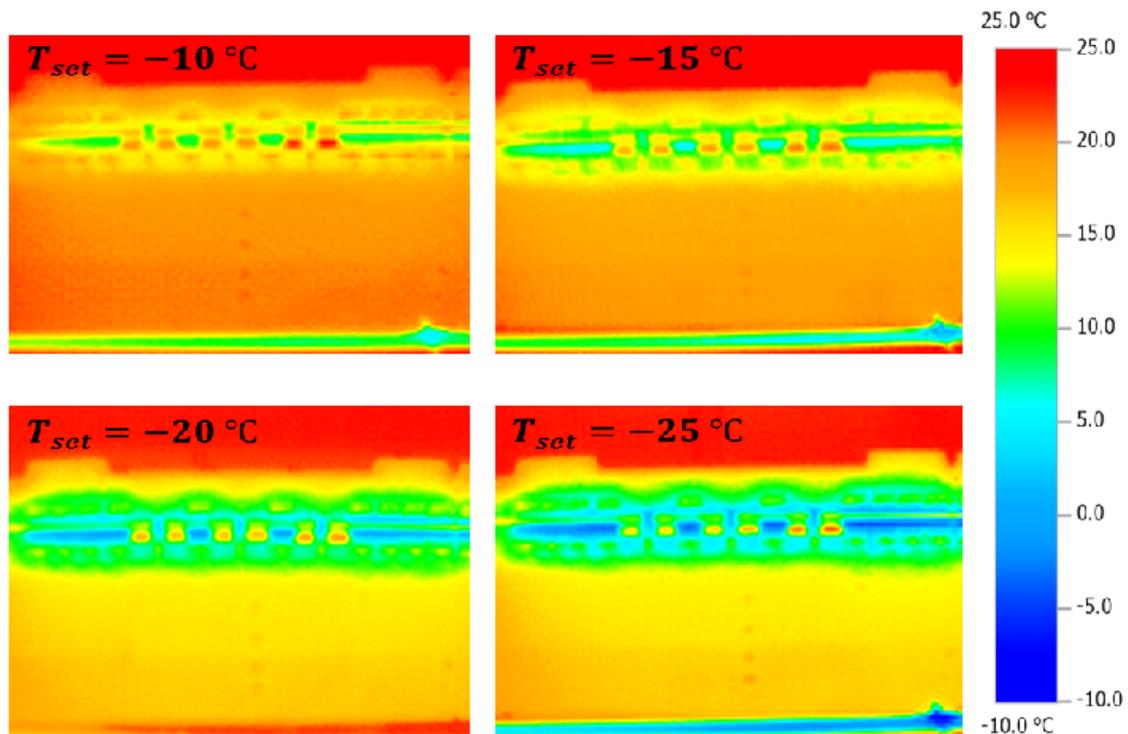


図 5.4: -Z センサー部における 4 通りの温度分布 (表面)

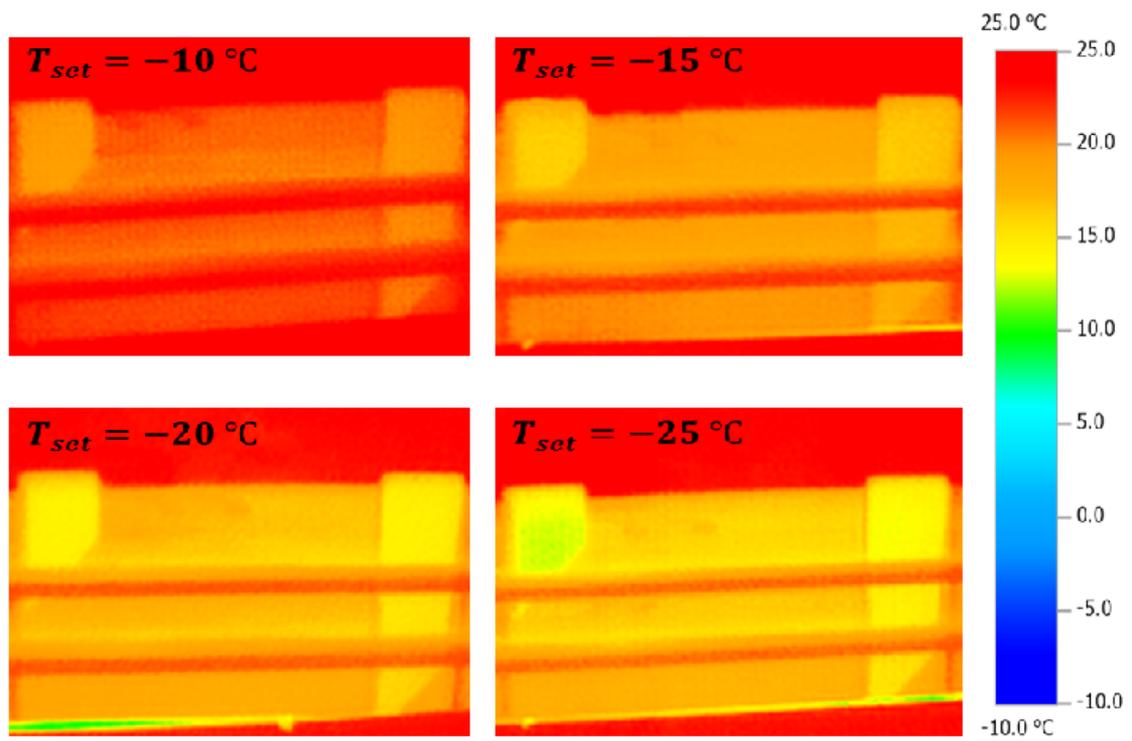
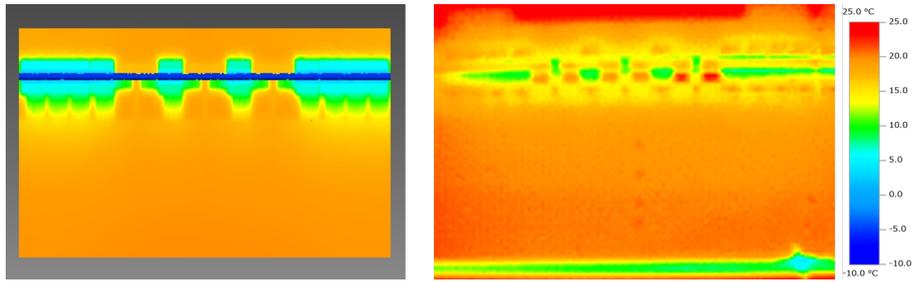


図 5.5: -Z センサー部における 4 通りの温度分布 (裏面)

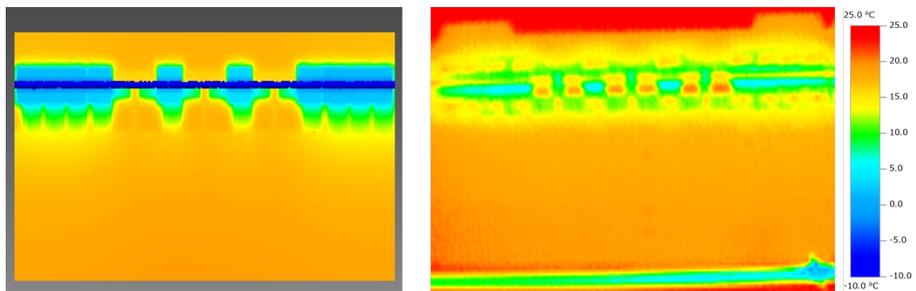
## 5.2 考察

### 5.2.1 温度シミュレーションとの比較

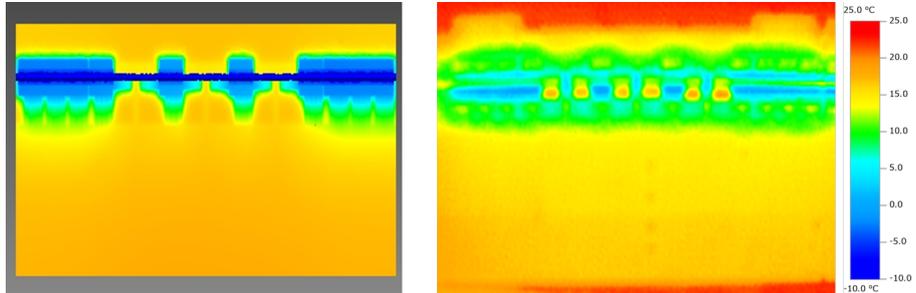
図 5.6 に温度シミュレーションとの比較の図を示す。図から冷却温度が下がるほど、全体の温度も下がることが分かる。第 4 章 2 節で議論したように、このモデルでは APV25 から PA に配線された銅線や CO<sub>2</sub> クリップがないために一部の温度分布は一致していない。また、シミュレーションと赤外線サーモカメラでの温度を図 5.7 にあるように Origami 上の 6 点で比較した所、表 5.2 のようになった。表から赤外線サーモカメラの不確かさである  $\pm 2$  °C 以内でシミュレーションと赤外線サーモカメラの温度を一致させることができた。



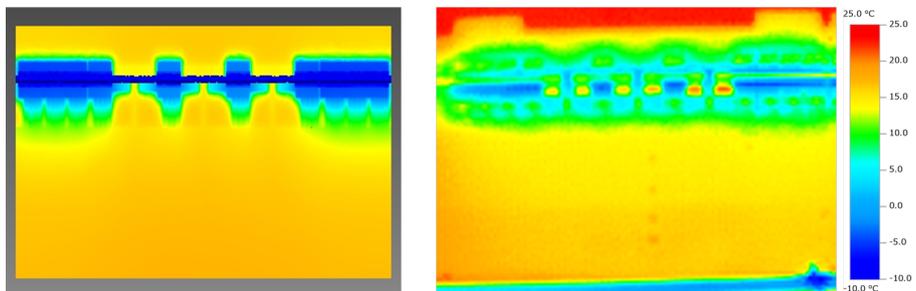
(a)  $T_{\text{set}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  における温度分布の比較



(b)  $T_{\text{set}} = -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  における温度分布の比較



(c)  $T_{\text{set}} = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  における温度分布の比較



(d)  $T_{\text{set}} = -25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  における温度分布の比較

図 5.6: 各設定温度における温度分布の比較。左側がシミュレーション結果、右側がサーモカメラの画像を示している。

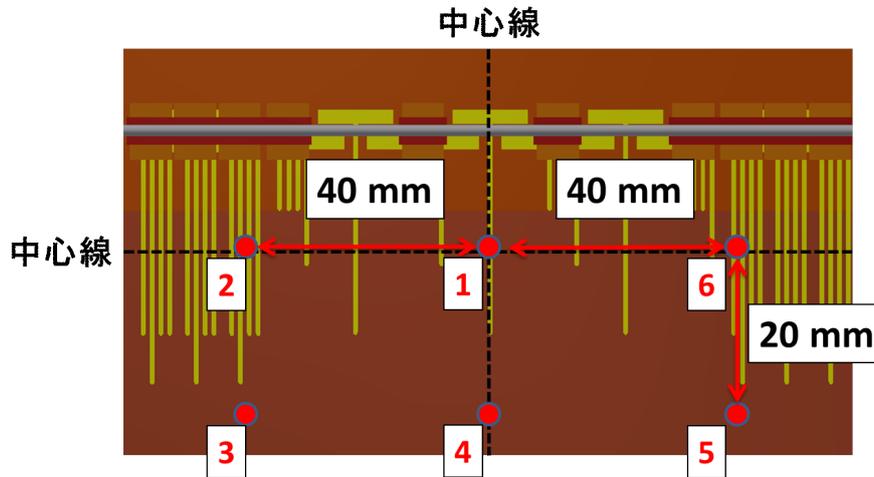


図 5.7: 温度の比較場所。赤丸が比較した場所で、数字がそれぞれの場所の測定番号に対応している。

表 5.2: シミュレーションと赤外線サーモカメラの温度の比較。 $T_s$  はシミュレーションによる温度、 $T_c$  は赤外線サーモカメラによる温度を示す。

測定番号	$T_{\text{set}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{set}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{set}} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{set}} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	$T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_c$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_c$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_c$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_c$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
1	18.4	19.6	17.3	18.0	16.2	15.3	15.0	14.5
2	17.9	19.6	16.7	17.7	15.5	14.8	14.3	14.7
3	19.1	20.4	18.1	19.2	17.1	16.4	16.1	16.5
4	19.2	20.2	18.3	19.1	17.3	16.5	16.3	16.3
5	19.1	20.6	18.1	19.2	17.1	16.5	16.0	16.3
6	17.9	19.5	16.7	18.1	15.6	14.7	14.4	14.5

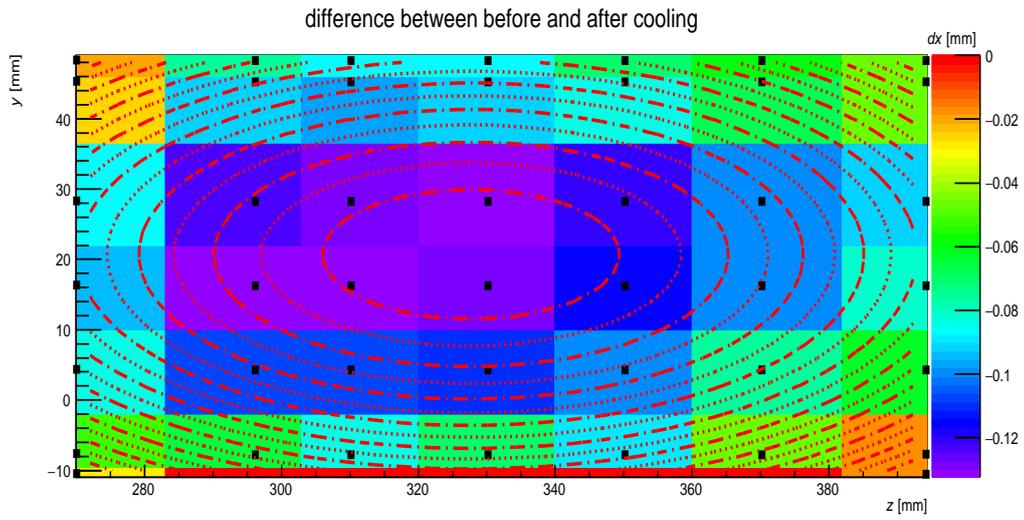
### 5.2.2 冷却パイプの温度と変形量の相関

第5章1節より  $y$  及び  $z$  方向に関しては温度依存性がないので、以降では  $x$  方向のみ議論していく。 $x$  方向に関しては第5章1節2項より、冷却温度が低いほど変形量が増えていることが分かる。この  $x$  方向の変形量の最大値と冷却温度の相関関係を調べた。第4章2節3項と同様に  $x$  方向の変形量の最大値を求めるために、二変数の二次関数で Fitting を行った。この関数を用いて実際に Fitting を行ったグラフを図 5.8～図 5.11 に、Fitting 結果の各パラメーターを表 5.3 に示す。

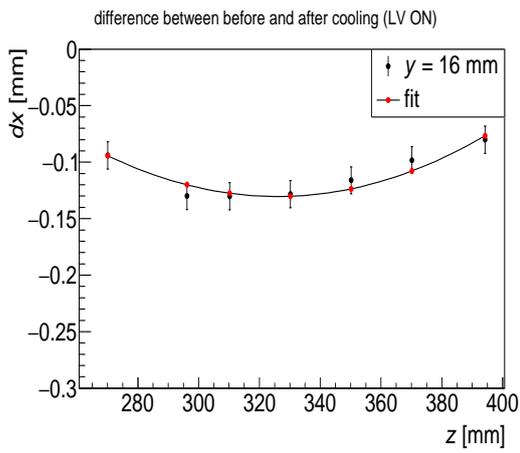
表 5.3: Fitting によって得られた各パラメータ

$T_{\text{set}}$ [°C]	$p0$ [ $10^{-5}/\text{mm}$ ]	$p1$ [mm]	$p2$ [ $10^{-5}/\text{mm}$ ]	$p3$ [mm]	$p4$ [mm]
-10	$1.18 \pm 0.10$	$327.7 \pm 1.6$	$6.59 \pm 0.45$	$20.73 \pm 0.54$	$-0.1319 \pm 0.0028$
-15	$1.27 \pm 0.11$	$340.8 \pm 1.7$	$7.65 \pm 0.48$	$15.62 \pm 0.59$	$-0.1524 \pm 0.0030$
-20	$2.18 \pm 0.14$	$331.2 \pm 1.1$	$10.21 \pm 0.60$	$17.87 \pm 0.49$	$-0.2092 \pm 0.0039$
-25	$2.10 \pm 0.16$	$338.1 \pm 1.4$	$12.40 \pm 0.69$	$20.88 \pm 0.44$	$-0.2367 \pm 0.0044$

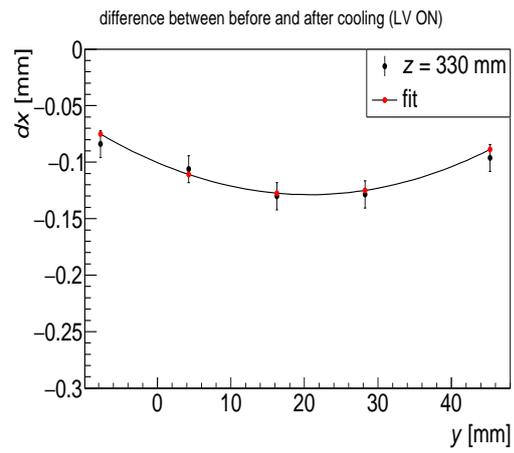
$T_{\text{set}}$ [°C]	$\chi^2/\text{ndf}$
-10	34.790/39
-15	42.014/39
-20	40.214/39
-25	43.479/39



(a)  $x$  方向の Fitting 結果 (全体)

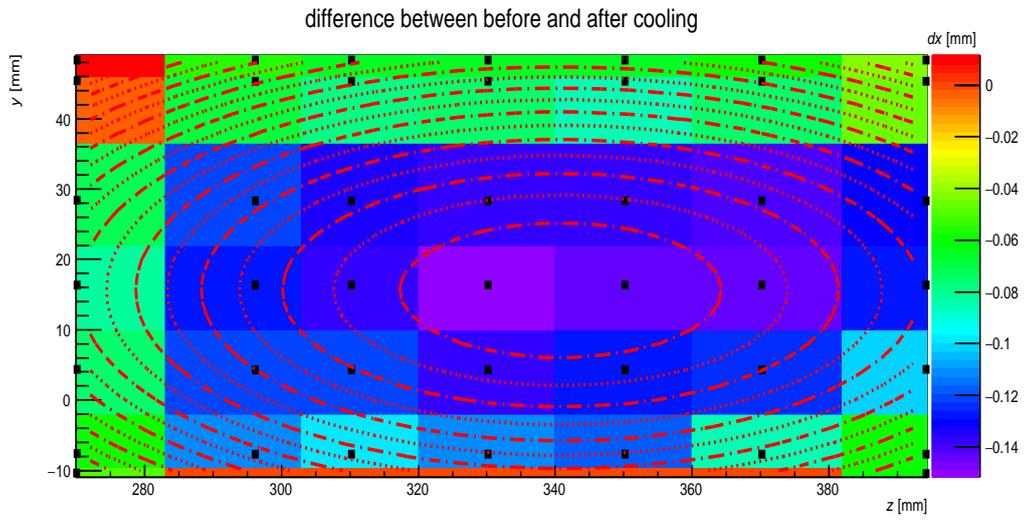


(b)  $y = 16$  mm の位置における Fitting 結果

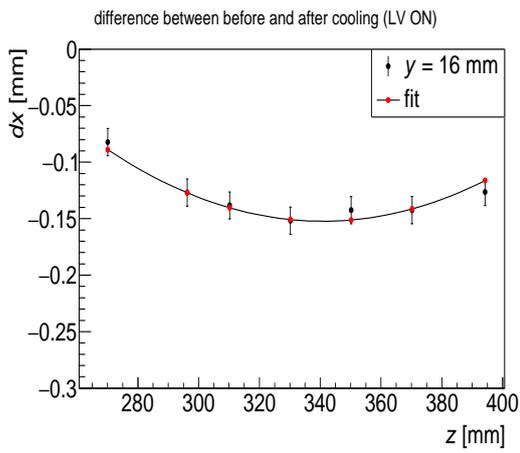


(c)  $z = 330$  mm の位置における Fitting 結果

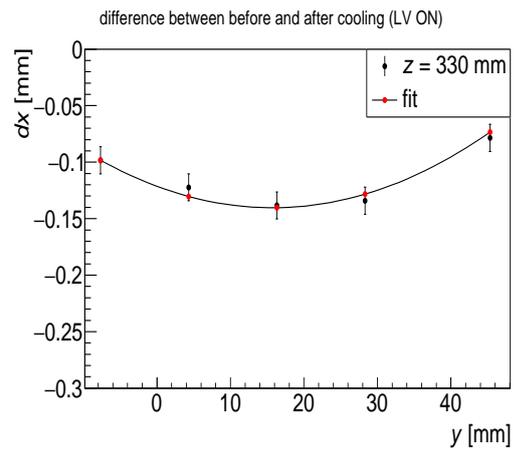
図 5.8:  $-Z$  センサー部における  $T_{\text{set}} = -10$  °C の  $x$  方向の Fitting 結果



(a)  $x$  方向の Fitting 結果 (全体)

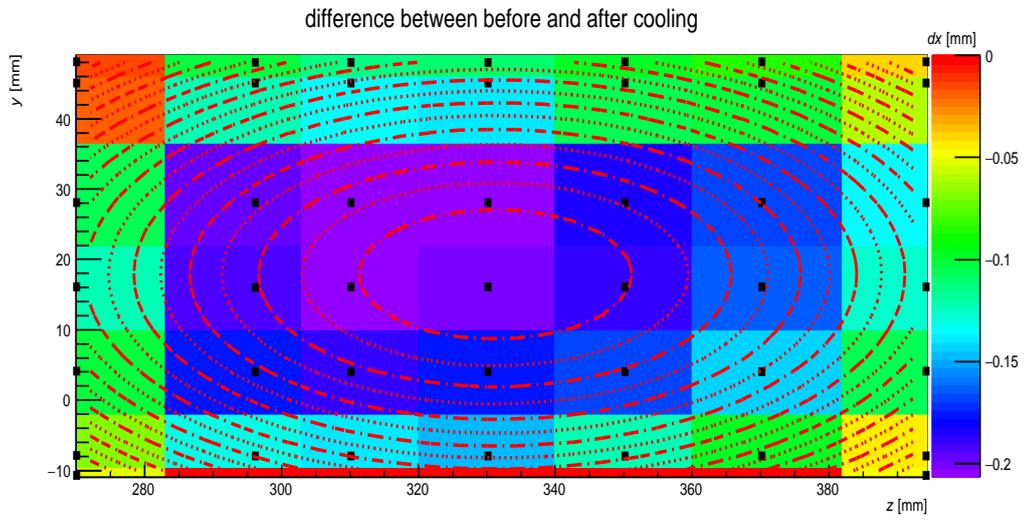


(b)  $y = 16$  mm の位置における Fitting 結果

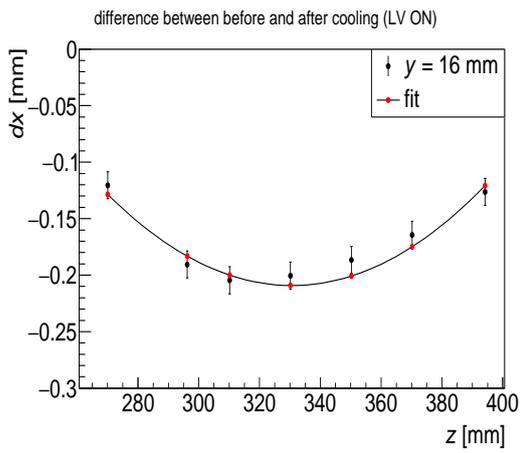


(c)  $z = 330$  mm の位置における Fitting 結果

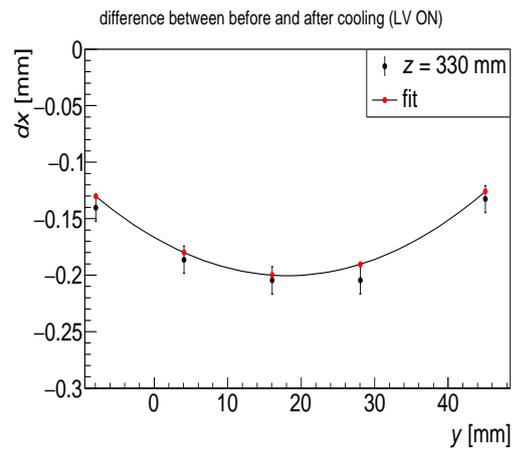
図 5.9:  $-Z$  センサー部における  $T_{\text{set}} = -15$  °C の  $x$  方向の Fitting 結果



(a)  $x$  方向の Fitting 結果 (全体)

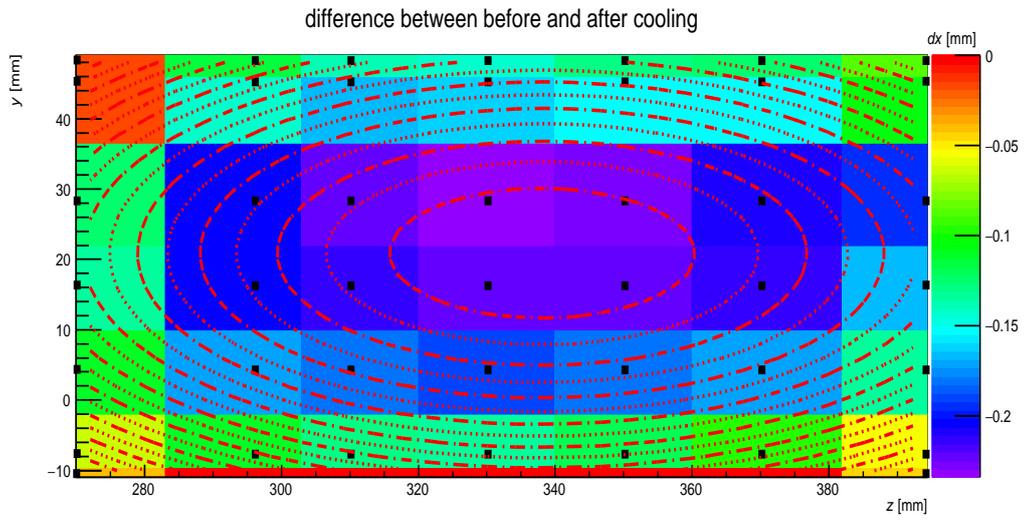


(b)  $y = 16$  mm の位置における Fitting 結果

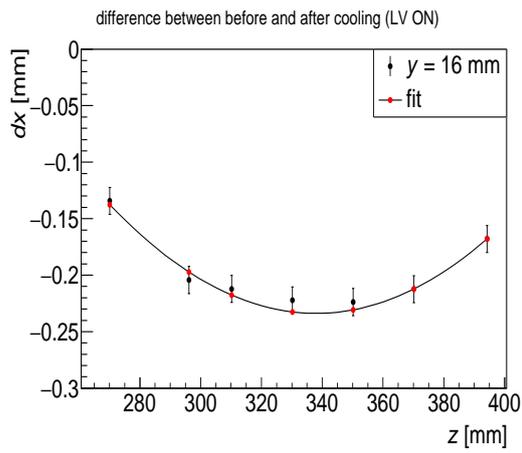


(c)  $z = 330$  mm の位置における Fitting 結果

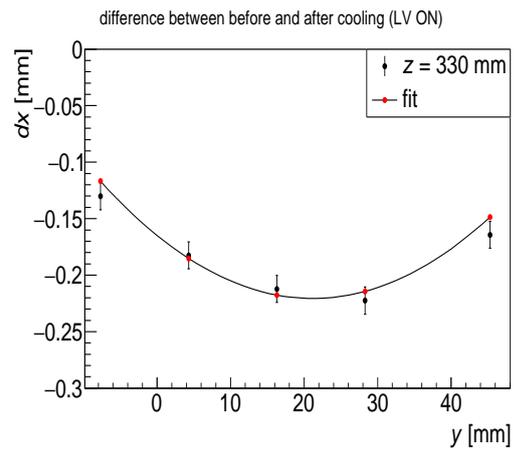
図 5.10:  $-Z$  センサー部における  $T_{\text{set}} = -20$  °C の  $x$  方向の Fitting 結果



(a)  $x$  方向の Fitting 結果 (全体)



(b)  $y = 16$  mm の位置における Fitting 結果



(c)  $z = 330$  mm の位置における Fitting 結果

図 5.11:  $-Z$  センサー部における  $T_{\text{set}} = -25$  °C の  $x$  方向の Fitting 結果

よって表 5.3 の  $p_4$  の値より、 $dx$  の最小値とそれぞれの温度の関係を求めると、図 5.12 のようになった。また、図 5.12 は線形 Fitting を行っており、Fitting 関数は以下の (5.1) 式で、 $p_0$  及び  $p_1$  がフリーパラメータである。

$$dx = p_0 + p_1 \times T_{\text{pipe}} \quad (5.1)$$

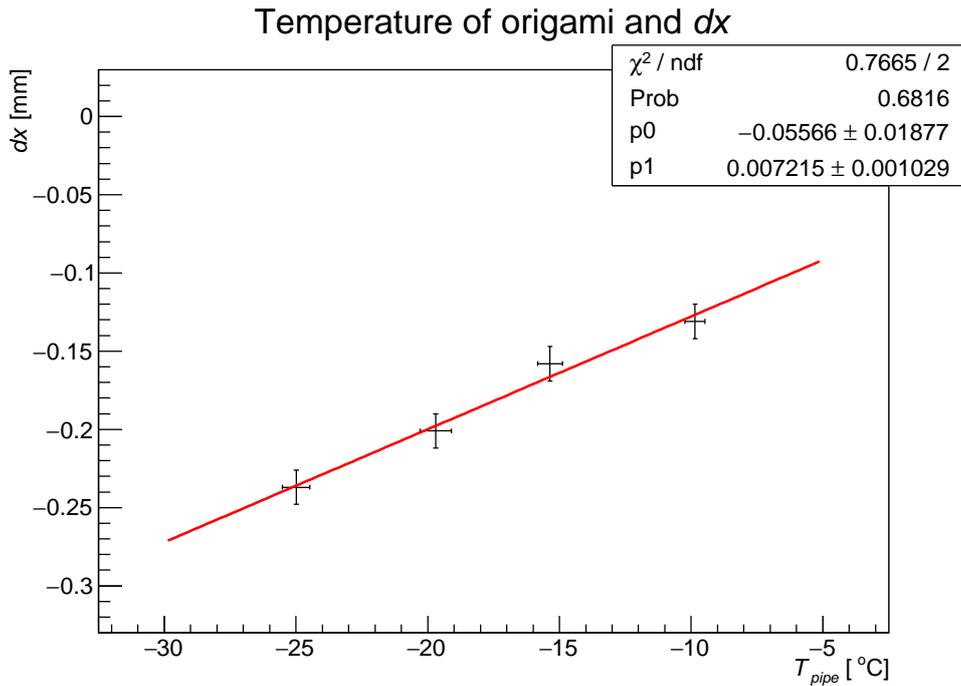


図 5.12: 冷却パイプの温度と  $x$  方向の変形量の相関

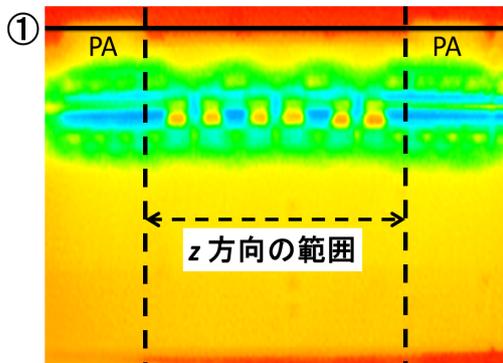
常温 (約 25 °C) を考慮すると線形性は成り立っていないが (線形性が成り立たない理由等については第 5 章 2 節 3 項で議論する)、この 4 点間では近似的に直線とみなして考える。この結果から、冷却パイプの温度変化に対する  $x$  方向の変形量の変化の値は約  $7 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$  ということが分かった。

### 5.2.3 Origami の温度と変形量の相関

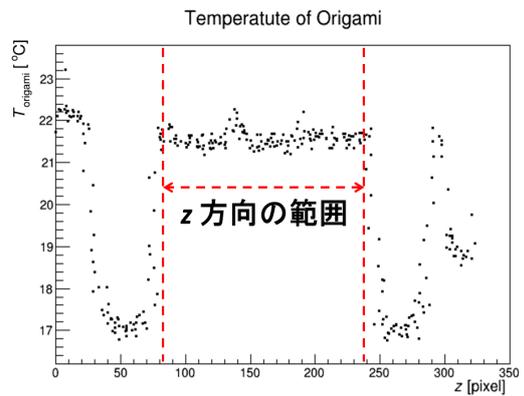
第 5 章 2 節 2 項より、冷却パイプと  $x$  方向の変形量の相関関係が分かった。Belle II 実験の際にも、SVD ラダーに入る前の  $\text{CO}_2$  の温度  $T_1$  及び入った後の  $\text{CO}_2$  の温度  $T_2$  等の値をモニターして冷却温度を評価する。つまり、第 5 章 2 節 2 項の結果が最も重要になってくる。しかし、図 5.12 より冷却パイプの温度が常温 (約 25 °C) 付近になるときに  $dx = 0 \text{ mm}$  とならず、 $dx \sim 0.23 \text{ mm}$  となってしまう。これは APV25 が発熱しているためだと考えられる。APV25 が発熱していなければ、

冷却パイプの温度変化に応じて線形的に APV25 や Origami 等の温度は変化していく。しかし、発熱を伴うと冷却パイプとの間の熱伝導方程式に発熱の項が足され、単純に線形で温度が決定しない。そのため、冷却パイプの温度が常温（約 25 °C）付近になるときに  $dx = 0$  mm とならないと考えられる。そこで、温度を冷却パイプの温度  $T_{\text{pipe}}$  から Origami の温度  $T_{\text{origami}}$  に変更して評価を行う。Origami の温度にはサーモカメラで撮影した温度を用いる。しかし、Origami 上では温度勾配があるため任意の場所の温度を取ってきてしまうと温度の値に差が出てしまう。そこで、以下のような手順で Origami の温度を定義した。

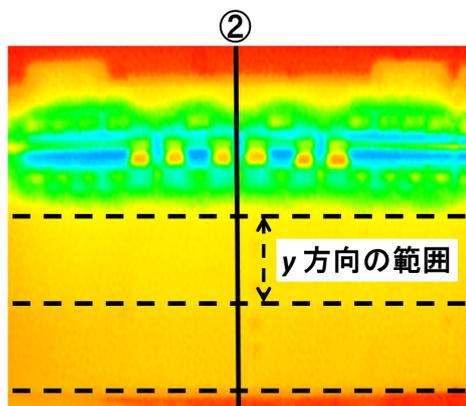
1. 図 5.13(a) 上の①の線上の温度分布を調べる
2. 図 5.13(b) のような①上の温度分布から PA 間を  $z$  方向の範囲を決定
3. 2 で決定した範囲の中間の  $z$  の位置 (図 5.13(c) 上の線②) を用いて、その線上の温度分布を調べる
4. Origami 上の温度の  $y$  方向の範囲を決定し、沈み込みが最も大きい部分の温度分布を得るために、得た  $y$  方向の範囲の前半分 (図 5.13(c) 及び図 5.13(d) 上の矢印の区間) を  $y$  方向の温度の範囲と決定
5. 2 及び 4 で得られた  $y$  及び  $z$  方向の範囲 (図 5.13(e) の青枠の領域) の温度をヒストグラムに出力し、平均値と RMS の値を用いて Origami の温度を評価



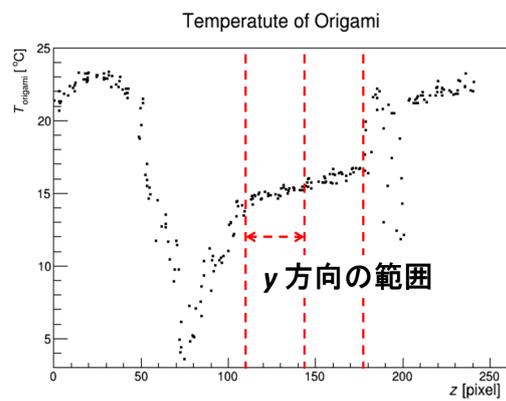
(a) 手順 1



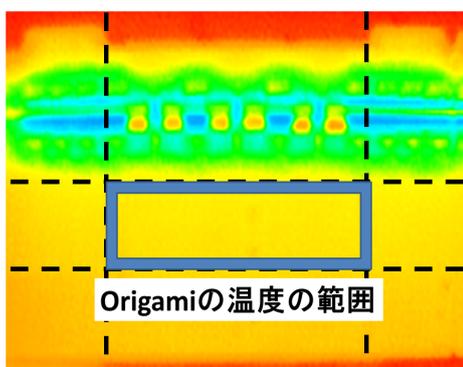
(b) 手順 2



(c) 手順 3



(d) 手順 4



(e) 手順 5

図 5.13: Origami の温度決定の手順

各測定番号における Origami の温度のヒストグラムの結果を図 5.14 に示す。

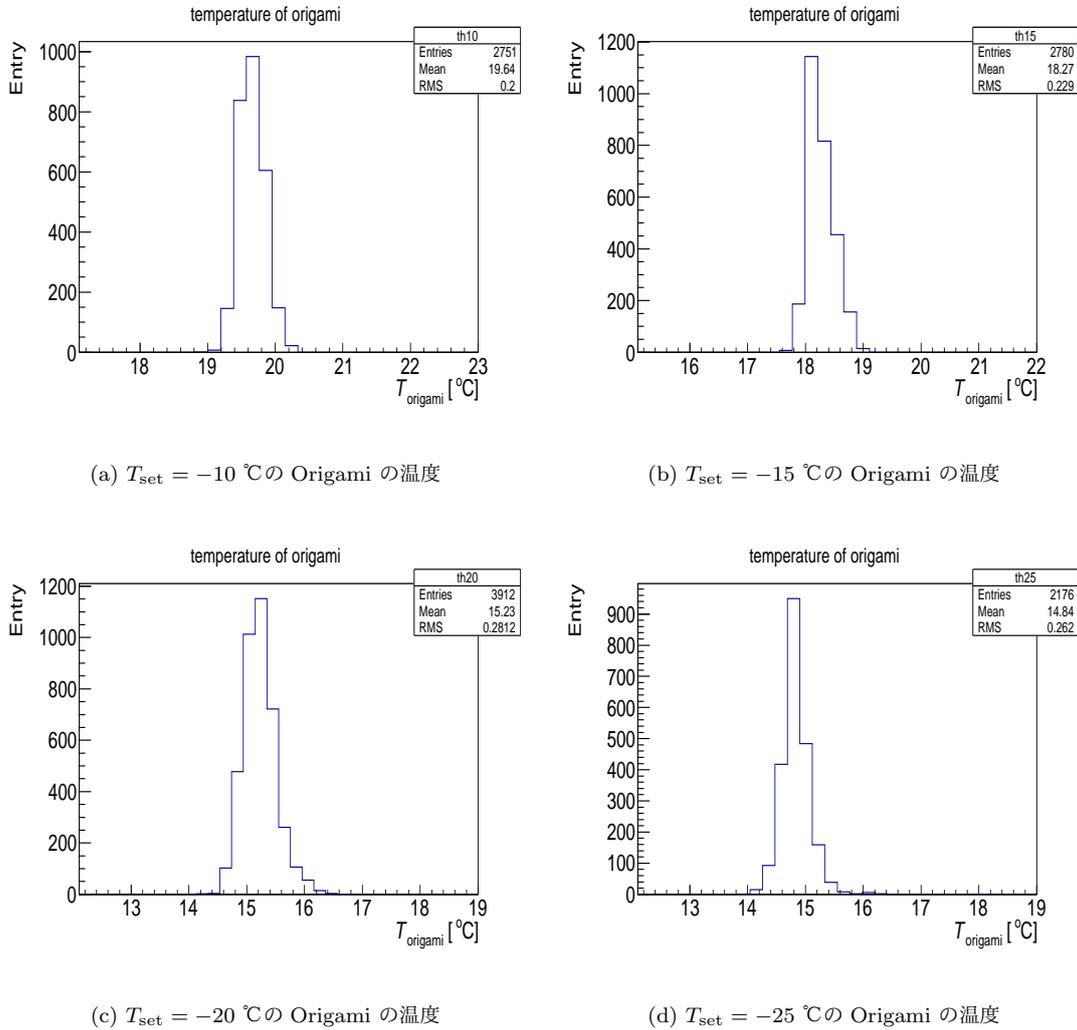


図 5.14: Origami の温度

これらよりそれぞれの目標設定温度における Origami の温度は以下のように定まった。

$$T_{set} = -10 \text{ °C} : T_{origami} = 19.52 \pm 0.28 \text{ °C}$$

$$T_{set} = -15 \text{ °C} : T_{origami} = 18.12 \pm 0.33 \text{ °C}$$

$$T_{set} = -20 \text{ °C} : T_{origami} = 15.05 \pm 0.38 \text{ °C}$$

$$T_{set} = -25 \text{ °C} : T_{origami} = 14.74 \pm 0.51 \text{ °C}$$

これらの値からも冷却パイプの温度と Origami の温度には線形性がないことが分かる。また、冷却温度が低くなるにつれて不確かさが大きくなっているのは、冷却

温度が低いほど、Origami 上で温度勾配が急になっているためであると考えられる。Origami の温度を用いて  $x$  方向の変形量との相関を求めると図 5.15 のようになった。Fitting に用いた関数は (5.1) 式と同様である。Fitting 結果から約 26 °C 付近で  $dx = 0$  mm になることが分かり、Origami の温度と室温の差と変形量  $dx$  は線形性があるように見える。

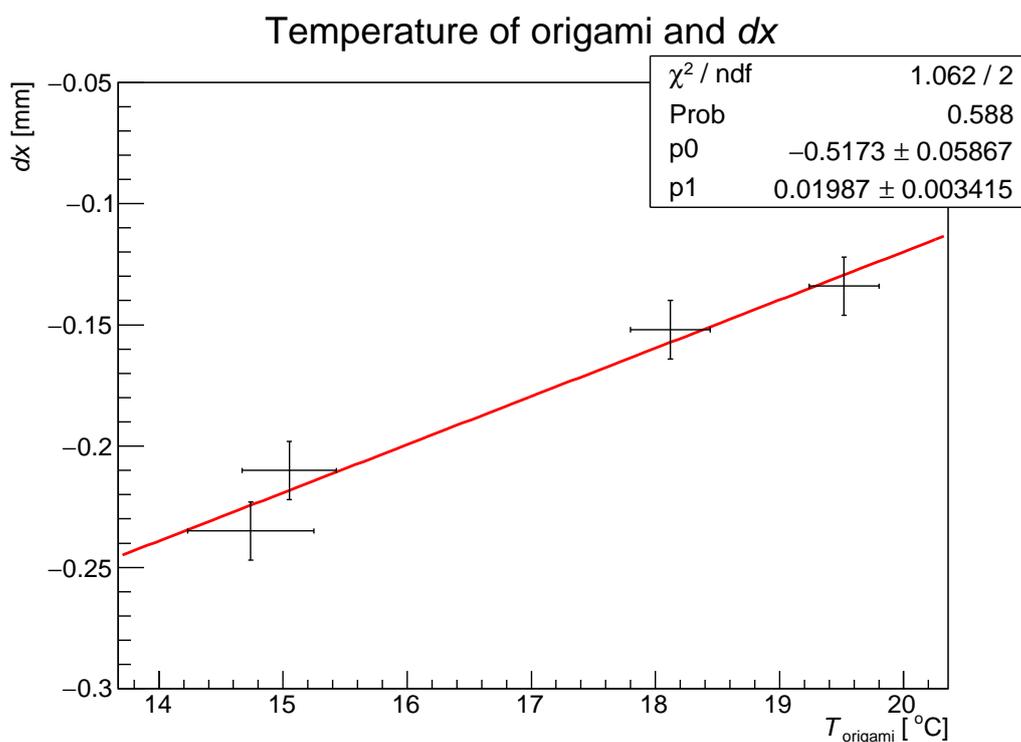


図 5.15: Origami の温度と  $x$  方向の変形量の相関

#### 5.2.4 トラッキングに対する影響と要求精度

DSSD の位置校正には、あらかじめ宇宙線を用いて、その通過位置を tracking した軌跡とヒット位置からのズレを用いて各 DSSD の動径方向の位置が決定される。これは宇宙線の分布により、動径方向の通過位置精度は DSSD 平面方向に比べ悪くなることが予想されるからである。従って、DSSD の位置が Belle II 実験中に変わってしまうとトラッキングがズレてしまい、分解能の悪化の原因になる。図 5.16 にトラッキングのズレの簡易図を示す。

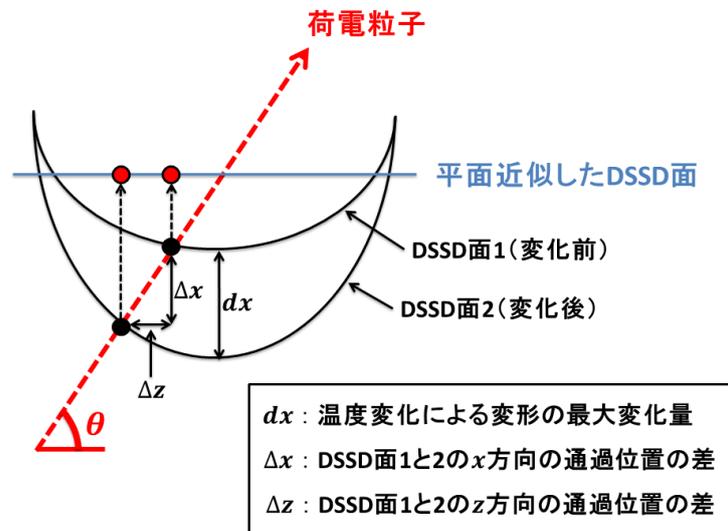


図 5.16: DSSD の位置の変化によるトラッキングのズレ

ここでは、位置校正に DSSD 面 1 の位置を平面近似した (図 5.16 上の青線) 場合を考える。DSSD 面 1 が温度変化によって DSSD 面 2 のような形に変形 (DSSD 面 1 の中央部が  $dx$  だけ変化) したとする。その場合、DSSD 面 1 及び 2 で荷電粒子の通過位置は  $x$  方向には  $\Delta x$ 、 $z$  方向には  $\Delta z$  だけズレる。この場合、(5.2) 式が成り立つ。

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{\tan\theta} \quad (5.2)$$

ここで、 $x$  方向の通過位置のズレに関しては  $\Delta x$  だが、ここでは簡易的に  $\Delta x \sim dx$  とみなし、変形の最大変化量の値を  $x$  方向の通過位置のズレとして計算を行っていく。

さらに、温度の要求精度を求めるために図 5.17 のようなモデルを考える。図 5.17 は実際の L6 SVD ラダーの +Z、CE、-Z センサー部と L1 PXD の配置を簡易的に示している。

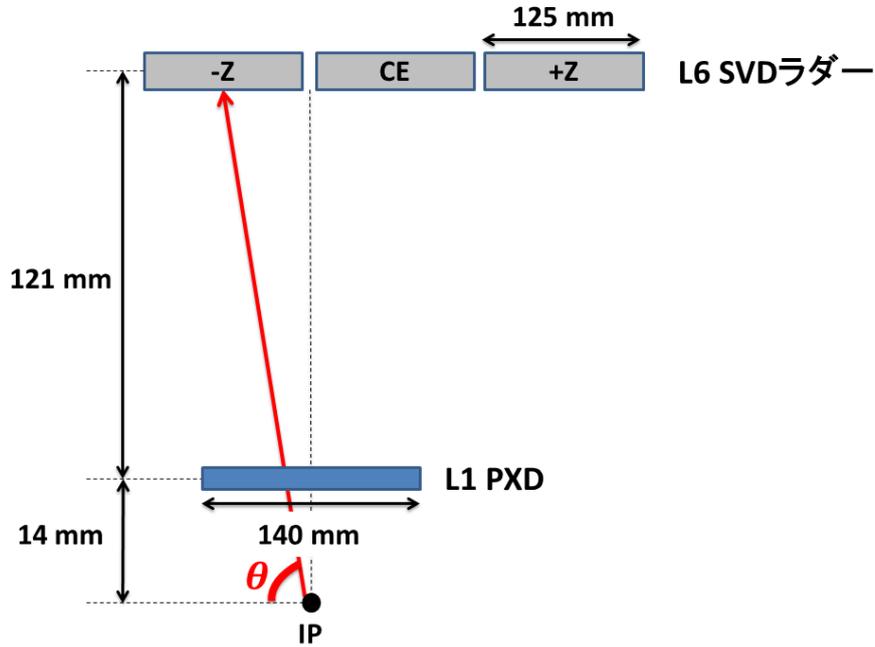


図 5.17: 温度の要求精度を求めるための簡易モデル

温度変化によって  $x$  方向の位置が変わると考えられるのは、Origami 部である +Z、CE、-Z センサー部であると考えられる。また、温度変化による  $x$  方向の位置の変形量が最も大きくなるのは L3~L6 の内、L6 SVD ラダーだと考えられる。そこで、最内層である L1 PXD と L6 SVD ラダーを用いて温度の要求精度を求める。 $\Delta z$  の目標精度としては、PXD の 1 ピクセルの大きさである  $50 \mu\text{m}$  以内とする。Belle II 実験ではビームの衝突点である IP から  $B^0$  中間子対は約  $100 \mu\text{m}$  程度移動した後、崩壊する。従って、今回のモデルではその移動距離を無視し、近似的に IP で崩壊したとみなして計算を行う。また、本研究では -Z センサー部の中心が最も変形していたので、IP から -Z センサー部の中心に向かった経路を考える。これらの情報をふまえると、(5.2) 式は (5.3) 式となる。

$$\begin{aligned}
 |\Delta z| &= \frac{|\Delta x|}{|\tan\theta|} \leq 50 \mu\text{m} \\
 \frac{|\Delta x|}{2.16} &\leq 50 \mu\text{m} \\
 |\Delta x| &\leq 108 \mu\text{m}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

これらを用いて冷却温度の変化によるトラッキングへの影響を考察する。温度依存性の結果から  $|\Delta x|/|\Delta T_{\text{pipe}}| = 7.2 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$  と分かったので、その値を用いて計算

を行うと、

$$\begin{aligned} |\Delta x| &\leq 108 \mu\text{m} \\ |\Delta T_{\text{pipe}}| &\leq 15 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \tag{5.4}$$

となる。つまり冷却温度の変化は約 $\pm 7 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内に収める必要があることが分かった。

## 第6章 まとめ

本論文は2018年から始まる Belle II 実験で用いる崩壊点検出器の1つである SVD 検出器の冷却による SVD ラダーの変形に関する研究結果を報告した。Belle II 実験では Origami chip-on-Sensor Concept の導入により配線の引き回しによる容量性ノイズの低減を可能にした。しかし、APV25 が Origami 基板上に配置されるために、物理領域内 (図 2.3) でも APV25 の発熱による熱ノイズの増加を抑制する機構が必要になってくる。そこで外形 1.6 mm、内径 1.4 mm、肉厚 0.1 mm の細いパイプを APV25 に沿わせ、気液二相 CO<sub>2</sub> を用いた冷却システムを導入した。冷却によって SNR を上げることができ一方、SVD ラダーが変形してしまうことが予想される。本研究では、 $-20^{\circ}\text{C}$  による冷却によって SVD ラダーがどのような機構でどの程度変形するのか、また冷却温度の変化によって変形量がどの程度変化するのかを調べ、Belle II 実験におけるトラッキングに対する影響を考察した。

本研究における冷却試験には Open CO<sub>2</sub> System を用いて測定を行った。まずは事前試験を行い、APV25 の発熱を全て吸収するのに適切な流量値と  $-20^{\circ}\text{C}$  で冷却するためのオペレーション手順の確立を図った。その結果、本研究における冷却試験では manual mode によるオペレーションで流量値は約 2.5 g/s で行えばよいことが分かった。

冷却試験ではまず、 $-20^{\circ}\text{C}$  による冷却でどのようにどの程度変形するのかを確認した。結果としては +Z 及び -Z センサー部の中央で  $x$  方向に大きく沈んでいた。特に -Z センサー部における沈み込みが大きく、発熱無しで約 270  $\mu\text{m}$ 、発熱有りでは約 200  $\mu\text{m}$  程度、冷却前後で変形していることが分かった。この変形のメカニズムとしては Origami が +Z と CE センサー部の境界で分かれていることと、線膨張係数の違いによる熱収縮の差によるものだと結論付けた。 $y$  及び  $z$  方向に関しては最大 -30  $\mu\text{m}$  程度変形しており、 $x$  方向に比べほとんど変形していないことが分かった。また、SVD ラダーの温度に関しては赤外線サーモカメラを用いて測定した。センサー1枚のモデルで温度シミュレーションを行い、Origami 上の銅線及び CO<sub>2</sub> クリップによる影響を考慮したところ、温度分布生成のメカニズムが理解できた。二変数の二次関数を用いて  $x$  方向の最大変形量を評価した所、SVD 運用の冷却による最大変形量は約 270  $\mu\text{m}$  と見積もることができた。

次に冷却温度を  $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-15^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-25^{\circ}\text{C}$  の4種類で測定を行った。冷却温度を下げるほど、 $x$  方向の変形量は大きくなっていったが、変形の形は変わらず、-Z 及び +Z センサー部の中央が大きく変形していた。また、 $y$  及び  $z$  方向に

関しては温度依存性は見られず、最大  $-30 \mu\text{m}$  程度変形していた。測定結果に関して、 $x$  方向の変形量が最も大きかった  $-Z$  センサー部のみ議論を行った。温度分布を比較したところ、赤外線サーモカメラの測定精度である  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  以内にシミュレーションと温度を一致させることができた。各冷却温度の変形量の最大点を同様に二変数の二次関数を用いて評価した。それぞれの冷却パイプの温度と  $x$  方向の変形量の最大値の相関を求めた所、約  $7 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$  で変化することが分かった。また、Origami 上の温度でも相関を求めた所、Origami の温度が室温（約  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ ）になるときに  $x$  方向の変形量が約  $0 \mu\text{m}$  になることが分かった。これらの結果から簡易的ではあるが、 $x$  方向におけるトラッキングへの影響を求めたところ、約  $\pm 7 \text{ }^\circ\text{C}$  以内であれば影響がほとんどないことが分かった。同様に、温度依存性が見られなかった  $y$  及び  $z$  方向に関しては、トラッキングへの影響がほとんどないことが分かった。

## 付 録 A 発熱量の変化による影響

### A.1 発熱量と変形量の相関

今回の測定においては APV25 の発熱量は 0.11 W だった。温度分布のシミュレーションを用いて発熱量を 0.2、0.3、0.4 W に変え、それぞれの Origami の温度と発熱量の相関を求めた。なお、冷却温度に関しては  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  に設定してシミュレーションを行った。図 A.1 にシミュレーションにおける Origami 上の温度の測定点を示す。また、それらの温度の平均値と発熱量の相関を表 A.1 と図 A.2 に示す。また、図 A.2 は線形 Fitting を行っており、Fitting 関数は (A.1) 式で、 $p_0$  及び  $p_1$  がフリーパラメータである。

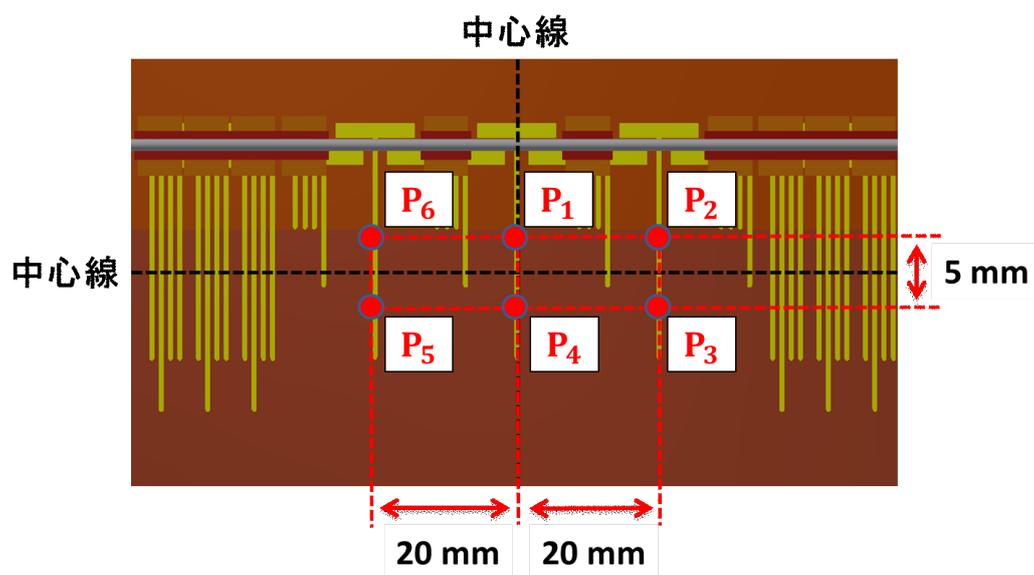


図 A.1: Origami 上の温度の測定点。赤丸が測定点でそれぞれの場所を  $P_1 \sim P_6$  として表現している。

表 A.1: Origami 上の温度と発熱量の相関

発熱量 H [W]	Origami 上の温度 $T_{\text{origami}}$ [°C]						平均
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	
0.11	15.86	15.61	16.16	16.36	16.19	15.57	15.96 ± 0.33
0.20	16.98	16.76	17.24	17.42	17.27	16.73	17.07 ± 0.28
0.30	18.23	18.04	18.45	18.60	18.47	18.02	18.30 ± 0.24
0.40	19.47	19.32	19.65	19.78	19.68	19.31	19.53 ± 0.20

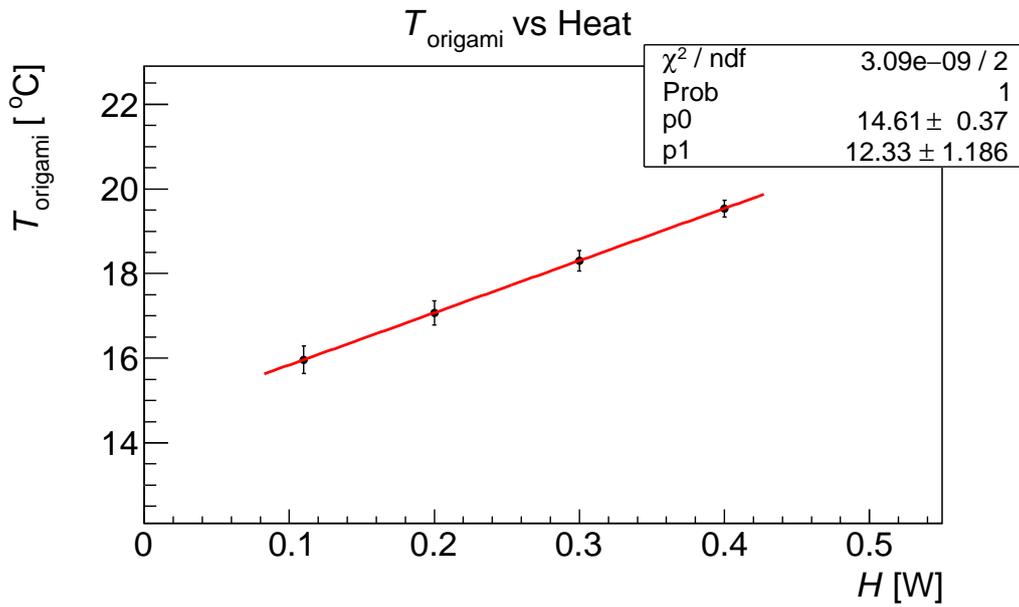


図 A.2: Origami 上の温度の発熱量の相関

$$T_{\text{origami}} = p_0 + p_1 \times H \quad (\text{A.1})$$

この Origami 上の平均温度と図 5.15 の結果から、発熱量と  $x$  方向の変形量の相関を求めると、図 A.3 のようになった。同様に、図 A.3 は線形 Fitting を行っており、Fitting 関数は (A.2) 式で、 $p_0$  及び  $p_1$  がフリーパラメータである。

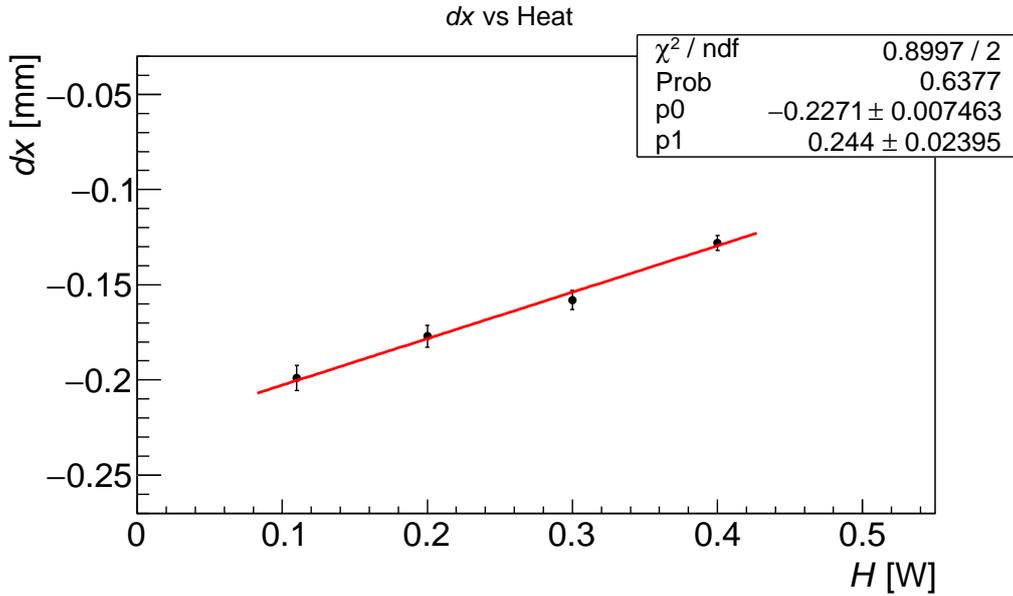


図 A.3: 発熱量と  $x$  方向の変形量の相関

$$dx = p_0 + p_1 \times H \quad (\text{A.2})$$

この結果から、APV25 の発熱量に対する  $x$  方向の変形量の変化の値は約 244  $\mu\text{m}/\text{W}$  ということが分かった。

## A.2 発熱量の影響

発熱量の揺らぎによるトラッキングへの影響を考察する。図 A.3 から  $|\Delta x|/|\Delta H| = 244 \mu\text{m}/\text{W}$  と分かっているので、その値を用いて計算を行う。なお、計算に関しては第 5 章 2 節 4 項と同様のモデルを用いると、

$$\begin{aligned} |\Delta x| &\leq 108 \mu\text{m} \\ |\Delta H| &\leq 0.44 \text{ W} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となる。つまり発熱量の揺らぎは約  $\pm 0.2 \text{ W}$  以内に収める必要があることが分かった。今回の測定では DSSD には電圧をかけておらず、APV25 は DSSD からの信号を読み込んでいなかった。つまり、今回の発熱量である  $0.11 \text{ W}$  をオフセットとして考えると、最大発熱量の  $0.4 \text{ W}$  まで約  $0.3 \text{ W}$  分の幅があり、 $\pm 0.2 \text{ W}$  の範囲内に収めることができない。実際、APV25 が DSSD の信号を読み込んだ場合、発熱量は今回の  $0.11 \text{ W}$  よりも上がると考えられる。しかし、それは単位時間あたりに入射してくる粒子数にも依存してくる。現在、Belle II 実験において APV25 が平

均でどの程度発熱するのか、また、その発熱量がどの程度揺らぐのか分かっていない。そのため今後、この発熱量の揺らぎに関する研究を行っていく必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、お世話になった全ての方々に謝辞を申し上げます。

指導教員であるの千葉先生には、学部4年生の頃から原子核・素粒子物理学の知識を教えて頂くだけではなく、Belle II 実験に関わらせて頂く貴重な機会を頂きました。本研究を行うことができたのは千葉先生のおかげです。ありがとうございました。

同研究室の助教である西村先生にも、学部4年生の頃から様々な実験に参加させて頂いたりなど、とても貴重な経験をさせて頂きました。また、研究以外の面でも様々なアドバイスをして頂くなど、大学院生活を行うに当たって多くの面でサポートをしてくださいました。本当にありがとうございました。

研究を行うにあたっては日本のSVDグループの皆様には、多大なるご協力を頂いたこと感謝いたします。特に原さん、坪山さん、中村さん、佐藤さんにはこの研究を行うにあたって、測定方法や解析など、様々な面でサポートして頂きました。貴重な研究を行わせて頂き本当にありがとうございました。

同研究室の同期である筈川くんには、KEKに行くことが多い私に替わり研究室の仕事や後輩の面倒などを見てくれるなど多くの面で助けてくれました。また、お互いの研究に関することや就職活動など、多くの苦楽を共にすることができ、同期の大切さを改めて学びました。ありがとうございました。

最後に、ここで表記できなかった方々も含めまして多くの方々の支えがあったからこそ今の私がいるのだと思っています。皆様に感謝の念を込めて謝辞とさせていただきます。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] J.H. Christenson, J. Cronin, V. Fitch, R. Turlay, Phys. Rev. Lett., 13 (1964) 138
- [2] M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Thor. Phys. 49,652 (1973)
- [3] Cabibbo, Phys. Rev. Lett. 10,531 (1963)
- [4] I. Adachi et al. (Belle Colaboration), Phys. Rev. Lett. 108,171802 (2012)
- [5] Belle II Technical Design Report, arXiv:1011.0352v1physics.ins-det.
- [6] Physics at Super B Factory
- [7] G.Batignani et al, NIM A326 (1993) 183
- [8] APV25 Users guide
- [9] Luigi Li Gioi, 6th VXD workshop, (2014)
- [10] Dimension IBBelle
- [11] Open CO<sub>2</sub> System User Manual
- [12] Dry Cap の仕様  
<http://www.vaisala.co.jp/jp/products/dewpoint/Pages/DMT143.aspx>
- [13] レンズの仕様 <https://www.moritex.co.jp/products/mvs/sod-10x01.php>
- [14] 赤外線サーモカメラの仕様 jp\_testo-882.IM
- [15] シミュレーションソフトの仕様  
<http://www.autodesk.co.jp/products/simulation/features/simulation-cfd>
- [16] 清水 信宏 東京大学理学研究科 平成 25 年度修士論文
- [17] 清野 義敬 新潟大学自然科学研究科 平成 26 年度修士論文
- [18] 佐々木 淳弥 東京大学理学研究科 平成 26 年度修士論文
- [19] 吉延 俊輝 東京理科大学理工学研究科 平成 27 年度修士論文
- [20] Annekathrin Frankenberger University of Vienna Master thesis(2013)