修士論文

HL-LHC ATLASピクセル検出器量産 品質試験の温湿度管理システムの構築

早稻田大学先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻修士2年 寄田研究室 鈴木隆仁

2022年2月5日

世界最大の陽子陽子衝突型円形加速器である LHC は,2028 年頃から瞬間ルミノシティを増強 して High Luminosity LHC (HL-LHC) として稼働することが予定されている。HL-LHC では 10 年間の運転で現行の LHC の約 10 倍以上となる 3,000~4,000fb⁻¹ もの積分ルミノシティを得るこ とができ,ATLAS 実験では標準理論の測定精度や超対称性粒子探索の感度の向上などが見込まれ る。一方で,これまで以上に多くの粒子が生成されるため,検出器側もアップグレードすることが 求められる。ATLAS 実験では最内層にある現行の内部飛跡検出器を,全てシリコン製のピクセル 検出器とストリップ検出器からなる新型飛跡検出器 Inner Tracker(ITk) に入れ替える。特にピク セル検出器は約 10,000 台のモジュールで構成されるが,日本グループはその内 1,500 台の製作を 担当しており,余剰を含めて 2,200 台のモジュールを量産する予定である。

量産にあたり作製する全モジュールに対して品質管理試験を実施する。その中の一つである読み 出し試験では、実際に電圧を印加してモジュールの動作確認を行う。この試験は実働時を考慮して 最低 –35 ℃の低温での試験も含まれるため、モジュールの腐食などの原因となる結露の防止に向 けて、露点を充分に下げてそれを測定することが重要である。そこで、安全に読み出し試験を行う ために、これらの露点管理を行った。まず、試験環境下の露点を下げるために、乾燥空気発生装置 から生成される空気の露点が –60 ℃以下であることを測定し、試験環境内に流入した。また、露点 測定のために使用する温湿度センサ SHT85 の性能評価を行い、より精度よく低露点を測定するた めに較正関数を求めて読み出し試験系に実装した。そして、実際にプロトタイプ機である RD53A モジュール4台の読み出し試験を行い、露点管理の観点から大きな問題なく試験を実施することが できた。

目 次

1	$\mathbf{L}\mathbf{H}$	C-ATLAS 実験 1
	1.1	LHC 実験
	1.2	ATLAS 検出器
		1.2.1 内部飛跡検出器
		1.2.2 カロリメータ
		1.2.3 ミューオン検出器 5
	1.3	HL - LHC 計画
		1.3.1 ルミノシティの増強 6
		1.3.2 ATLAS 検出器のアップグレード 6
		1.3.3 Inner Tracker (ITk)
2	ITk	マピクセル検出器 9
	2.1	当 ば な が は は い の の の の の の の の の の の の の の の の の
	2.1	211 半導体 9
		212 m 接合 9
		21.3 粒子の検出 9
	22	新刊ピクセル検出器モジュール 10
	2.2	921 シリコンセンサ 11
		2.2.2 新型 ASIC
	23	■
	2.4	組み立てとサーマルサイクル試験、耐久試験 13
	2.5	品質管理試驗 (OC) 13
		2.5.1 読み出し試験 14
3	読み	x出し試験における露点管理 16
	3.1	露点
	3.2	クーリングボックス 17
	3.3	クーリングボックスにおける露点の測定 18
	3.4	低露点測定のためのセットアップ 19
	3.5	温湿度センサ SHT85 21
		3.5.1 仕様
		3.5.2 常温,低温における低露点の測定 21
		3.5.3 個体差 個体差 23
		$3.5.4 + \tau J J U - \vartheta = \vartheta $ 26
	3.6	実試験における露点管理29
		3.6.1 乾燥空気 29
		3.6.2 温湿度センサ 30
		$3.6.3 \pi^{\mathcal{A}} \nu - \vartheta = \mathcal{V} \qquad 30$
		3.6.4 改善点
	3.7	温湿度センサ HYT271 31
		3.7.1 仕様
		3.7.2 露点の測定 32
	3.8	温湿度センサへの X 線の影響 33
	3.8	温湿度センサへの X 線の影響333.8.1 X 線スキャンにおける X 線の照射34

	3.8.3 試験結果	35
4	プロトタイプ機 RD53A モジュールの読み出し試験	39
	4.1 読み出し試験の概要	39
	4.2 KEKQ18 IV $\exists \forall $	39
	4.3 KEKQ18 –15 ℃環境での各試験結果	40
	4.4 不具合が見られたモジュール	40
	4.5 浮遊容量によるスレショルド調整への影響	41
5	まとめ	45
6	考察と今後の展望	46
謝		47
Α	サーマルサイクル試験における	
	モレキュラーシーブを用いた露点管理	48
参	考文献	50

図目次

1.1	LHC 概略図	1
1.2	LHC のこれまでの稼働状況と今後の予定	1
1.3	ATLAS 検出器	2
1.4	ATLAS 検出器における各素粒子と各検出器との相互作用	3
1.5	内部飛跡検出器の断面図	4
1.6	現行のピクセル検出器モジュール	4
1.7	カロリメータ	5
1.8	ミューオン検出器....................................	5
1.9	クラブ空洞技術	7
1.10) シミュレーションにおけるシングルミューオンの ITk による再構成率	8
1.11	ITk レイアウト	8
1.12	? ! ITk ストリップ検出器モジュール	8
2.1	pn 接合における順バイアスと逆バイアスのときの電子とホールの動き	10
2.2	- クアッドモジュールのレイアウト	11
2.3	3D センサとプラナーセンサの電荷収集	11
2.4	RD53AのFEの配置	12
2.5	RD53A ベアモジュールと組み立て後のモジュール	13
2.6	ピクセル検出器モジュールの組み立て工程と品質管理試験	14
3.1	温度と飽和水蒸気量の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
3.2	IBL 製作時に見られた結露による腐食	17
3.3	各露点における温度と RH の関係	17
3.4	クーリングボックスのレイアウト図	18
3.5	クーリングボックスの写真	18
3.6	部屋での様々な温湿度センサを用いた温度と RH の測定結果	19
3.7	低露点測定のための実験セットアップ	20
3.8	真空度による霧点の見積もり	21
3.9	温湿度センサ SHT85	21
3.10) 室温における SHT85 を用いた低露点の測定結果	22
3.11	露点 –45 ℃環境で温度を下げながら取得した SHT85 の温度と RH. 露点	22
3.12	2 各低露点で固定したときの SHT85 の出力する温度と RH. 温度と露点の関係	23
3.13	SHT85 を 5 個使用した同時読み出しのセットアップ	24
3.14	常温, 低露点での SHT85 の個体差確認試験の結果	24
3.15	5 SHT85 の常温. 低露点における SN:327741 に対する BH とその相対誤差の関係	25
3.16	5 SHT85 の低温,低露点での個体差確認試験の結果	-0 25
3.17	⁷ SHT85 の理想と予想される BH の較正	25
3.18	A温度領域における固定した霰点と SHT85 の BH の関係とフィット結果	27
3 19) 較正関数のパラメータ a , b の温度依存性	28
3 20) 霰占 _35、 _45℃における較正関数の適田結果	28
3.21	SHT85の出力する温度 BHと較正関数を用いた霰占の関係	28
3.22	・ 第1100 ジョステン 0 温度, 101 C 秋王 (気をじ)、 2 国本の(気体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
3.22	・「「「」」」、「「」」、「」」、「」」、「」、「」、「」、「」、「」、「」、「」	29 20
3.24	レアルミ板に設置した SHT85	29
3.24	「 チジョール温度を 95 ℃から _ 15 ℃に変更したときの冬温度と RH と露占	30 21
0.20 2.96	, こ // 血反 e 20 0/2 9 = 10 0に 冬天 U に こ e の 台 血 反 C AH こ 路 A	ა1 აი
J.20	f = 2 + 2 f mm反と 20 $0 = 30$ $0 = 20$ $0 =$	J2

3.27	SHT85 と HYT271 の写真	33
3.28	常温,低露点における SHT85 と HYT271 の温度,RH,露点の比較	33
3.29	室温における HYT271 の低露点の測定結果..............	34
3.30	X 線スキャンのセットアップ	34
3.31	Mini-X2 とそのエネルギースペクトル (Ag 標的,50kV)	35
3.32	X 線照射試験の実験セットアップ	35
3.33	X 線照射試験の実験セットアップの概略図	36
3.34	SHT85 と HYT271 への X 線照射試験の結果	37
3.35	X 線照射による HYT271 の変色	37
3.36	HYT271 の読み出しにかかる最短時間とレジスタのデータの最長保持時間時間	38
3.37	X 線照射前後の HYT271 の照射をしていない個体との露点差........	38
4.1	読み出し試験項目	39
4.2	KEKQ18 の 30 ℃, 20 ℃, -15 ℃における IV スキャンの結果	39
4.3	KEKQ18 のデジタルスキャンとアナログスキャンの Occupancy Map	40
4.4	KEKQ18 のしきい値 2,000e に調整後のスレショルドスキャンの結果	41
4.5	KEKQ18の30℃, 20℃, —15℃におけるノイズ分布	41
4.6	KEKQ18 chip1 の X 線スキャンの結果	42
4.7	KEKQ16 の chip3 の X 線スキャンの結果	42
4.8	Differential FE におけるコア内の各ピクセルのシミュレーションによる浮遊容量値	
	と浮遊容量の影響が少ないピクセル..........................	43
4.9	TDAC=+15 または –15 またはその他ごとのスレショルドの分布	43
4.10	Differential FE 領域における TDAC のマップ	44
4.11	Differential FE 領域においてコア単位で見た (左)TDAC=+15, (右)-15 となるピ	
	クセル数	44
4.12	シミュレーションによる浮遊容量の値とコア単位で見た TDAC=+15,-15 となる	
	ピクセル数の関係.................................	44
A.1	モレキュラーシーブフィルター	48
A.2	MS フィルターを導入したサーマルサイクル試験の乾燥空気系	49
A.3	MS フィルターを導入したサーマルサイクル試験の乾燥空気系の概略図	49
A.4	サーマルサイクル試験時に MS フィルターを使用して測定した露点	49

表目次

1.1	現行の LHC と HL-LHC における加速器のパラメータの比較	6
2.1	現行と ITk のピクセルセンサの仕様..................	11
2.2	ATLAS で使用する FE-I4,RD53A,RD53B の仕様	12
3.1	各温湿度センサの仕様	19
3.2	個体差試験に使用した SHT85 のシリアル番号と初使用日	23
3.3	温湿度センサ SHT85 と HYT271 の仕様	32

1 LHC-ATLAS 実験

1.1 LHC 実験

Large Hadron Collider(LHC) は欧州原子核研究機構 (CERN) によって建設された全周 27km, 地下 100m に位置する世界最大の陽子陽子衝突型円形加速器である。超伝導磁石を用いて陽子を約 6.5TeV まで段階的に加速して衝突させることで,重心系エネルギーは 13TeV まで到達する。リン グには約 10¹¹ 個の陽子を束にしたバンチが約 2,500 個含まれ,40MHz の衝突により,瞬間ルミノ シティは $\mathcal{L} = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ となる。図 1.2 に示すように,LHC は 2009 年から運転を開始後, 重心系エネルギーや瞬間ルミノシティを増強しながら運転し,Run1 では積分ルミノシティ30fb⁻¹, Run2 では 140fb⁻¹ のデータを取得した。そして 2022 年からは Run3,2028 年以降は瞬間ルミノ シティを $\mathcal{L} = 5 \sim 7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで増強した高輝度 LHC(High Luminosity LHC; HL-LHC) と しての稼働が予定されている。



図 1.1: LHC 概略図 [1]



図 1.2: LHC の稼働状況と今後の予定。2018 年に Run2 を終え,2022 年から Run3,2028 以降は HL-LHC として運転する予定である [2]。

ATLAS 検出器 1.2

ATLAS 検出器は LHC の衝突点に設置された全長 44m, 直径 25m, 重さ 7.000t の汎用検出器で ある。ATLAS 検出器の全体像を図1.3 に示す。ビーム軸を覆うように円筒形をしており、内側か ら内部飛跡検出器,カロリメータ,ミューオン検出器で構成されている。最内層の内部飛跡検出器 では電子や荷電パイオンなどの荷電粒子の飛跡を測定する。カロリメータでは電子や光子、ハドロ ンのエネルギーを測定する。また、最外層のミューオン検出器では寿命の長いミューオンの飛跡を 測定する。飛跡は磁場によって曲げられており、その曲率から運動量を測定することができる。一 方で、これらの検出器は弱い相互作用のみのニュートリノなどは検出することができない。しかし、 生成した全粒子の横運動量の和は0であることに基づき、荷電粒子の全横運動量の和の符号を逆に したものを消失横運動量として定義することができる。各粒子の各検出器との相互作用を図1.4に 示す。

ATLAS 実験では検出器や粒子の位置は直交座標系などを用いて表す。x 軸は LHC の中心方向, y 軸は地上方向, z 軸はビーム軸方向と定義される。なお, 先に述べた横運動量は運動量を x-v 平 面に射影したものである。また,z軸からの距離r,z軸周りの方位角 (や z軸となす天頂角として θが用いられる。特にビーム軸方向に生成される粒子を均等な領域に表すために以下で定義する擬 ラピディティηもよく使用される。



1.2.1 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は図 1.5 に示すように内側から Pixel, SCT, TRT で構成され, $|\eta| < 2.5$ の領域 で荷電粒子の飛跡や電荷の測定を精密に行う。内部飛跡検出器を覆うように 2T の磁場の超伝導ソ レノイド磁石が設置されており、ローレンツ力により荷電粒子の軌道は曲げられる。その曲率から 粒子の運動量を測定することができる。

(1.1)



図 1.4: ATLAS 検出器における各素粒子と各検出器との相互作用 [4]

・ピクセル検出器 (Pixel Detector)

ピクセル検出器は内部飛跡検出器の再内層に位置するピクセル状のシリコン半導体検出器である。荷電粒子の飛跡や電荷を2次元で測定する。Run2以降,瞬間ルミノシティを増強して運転するために,新たに細いビームパイプと共に IBL(Insertable B-layer)をビーム軸から33mmのところに設置した。これにより,図1.5に示すように現行のピクセル検出器はIBLを含めて4層で構成される。IBLはピクセルサイズ50×250µm²で,センサ厚は主に200µmであり,バレル1層に224台のモジュールからなる。他3層のセンサは主にピクセルサイズ50×400µm²,センサ厚250µmでバレル領域に1,456台,エンドキャップ領域に144×2台のモジュールで構成される。

• SCT (SemiConductor Tracker)

SCT はストリップ状のセンサを使用したシリコンの半導体検出器である。80µm 間隔で 768 本 からなるストリップセンサを 40mrad ずらすことにより 2 次元読み出しが可能となる。バレル領域 4 層は 2,112 台,エンドキャップ領域 9 層は 1,976 台のモジュールで構成される。

• TRT (Transition Radiation Tracker)

TRT は直径 4mm のストローに Xe(70%), CO₂(27%), O₂(3%) の混合ガスを封入し,中心に直径 31µm の金メッキされたタングステンを陽極として使用したガス検出器である。荷電粒子の通過によってストロー内のガスが電離し,ドリフトした電子を読み出す。また,ストロー間のポリプロピレンファイバやフォイルにより,遷移放射を発生させることでパイオンと電子などの粒子の識別ができる。

1.2.2 カロリメータ

カロリメータは粒子のエネルギーや位置を測定する検出器である。|η| <4.9 の領域において,内 側から電磁カロリメータ,ハドロンカロリメータで構成される。エネルギーを精密に測定すること はジェットの再構成や消失横運動量の測定のために重要である。カロリメータの全体像を図 1.7 に 示す。







図 1.6: 現行のピクセル検出器モジュール [3]

・電磁カロリメータ

電磁カロリメータは吸収層として鉛,検出層として液体アルゴンを用いた位置分解能に優れたサ ンプリング型カロリメータである。鉛の層で制動放射と電子対生成が繰り返されてできる電磁シャ ワーを液体アルゴンで検出することで電子や光子のエネルギーを測定する。

・ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータは入射したハドロンの非弾性散乱で生成したハドロンシャワーを利用し てエネルギーを測定する。バレル領域では吸収層として鉄,検出層としてプラスチックシンチレー タを利用する。また,エンドキャップ領域では吸収層として銅,検出層として液体アルゴンを使用 する。



図 1.7: カロリメータ [3]

1.2.3 ミューオン検出器

ミューオン検出器は最外層に位置する検出器で、ミューオンの飛跡を測定する。バレル、エンド キャップ領域に設置された超伝導トロイド電磁石によりその飛跡が曲げられるため、曲率から運動量 を得られる。図 1.8 に示すように、トリガーに使用する TGC(Thin gap chambers), RPC(Resistive plate chambers) と飛跡の精密測定に使用する MDT(Monitored drift tubes), CSC(Cathode strip chambers) の 4 つの検出器で構成される。また、高輝度化に向けて、Run3 ではエンドキャップの トロイド磁石の内側に New Small Wheel などを導入することにより、衝突点からではない粒子に よるトリガーを削減することが期待されている。



図 1.8: ミューオン検出器 [3]

1.3 HL - LHC 計画

1.3.1 ルミノシティの増強

加速器を用いた素粒子物理学実験において単位時間あたりの粒子の衝突頻度を表す瞬間ルミノシ ティは重要なパラメータである。LHC において,瞬間ルミノシティは以下の式で表される [5]。

$$L = \gamma \frac{n_{\rm b} N^2 f_{\rm rev}}{4\pi \beta^* \epsilon_n} R \tag{1.2}$$

 n_b はバンチ数, Nは1バンチ当たりの陽子数, f_{rev} は回転周波数であり,これらの積はビーム 電流を表す。また、 β^* は衝突点でのベータ関数, ϵ_n は衝突点でのエミッタンスを表しており、2つ の積はビームサイズである。また、 γ はローレンツ因子, Rは幾何学的な損失係数である。

1 秒あたりの事象数 W は,式 (1.3) のように瞬間ルミノシティL と反応断面積 σ の積で表される。反応断面積は物理法則で決まった値であるため変えることができない。したがって,事象数を 増やすためにはルミノシティを上げることが重要である。

$$W = L \times \sigma \tag{1.3}$$

そこで,LHCは2028年以降,瞬間ルミノシティを増強して稼働する High-Luminosity LHC(HL-LHC) 計画を進めている。瞬間ルミノシティを現行のLHCの設計値の5~7.5倍となる $\mathcal{L} = 5 \sim 7.5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで増強し,10年間の稼働により積分ルミノシティとして3,000~4,000fb⁻¹もの統計をためることを想定している。これはRun3までの積分ルミノシティの10倍以上に匹敵する。

瞬間ルミノシティを増強するため,主にビーム電流の増加,ビームサイズの縮小という観点で改 良される。式 (1.2) で示した現行の LHC と HL-LHC それぞれの加速器のパラメータなどを表 1.1 で比較する。まず,入射器をアップグレードすることにより,1バンチ当たりの陽子数を約2倍に する。また,磁場が 12T の Nb₃Sn 製の強力な収束四極磁石を用いることで,ビームを絞りビーム サイズを小さくする。また,図 1.9 に示すクラブ空洞を導入し,衝突直前でビームを傾けてバンチ の重なる面積を大きくすることで,幾何学的損失を減らす。

パラメータ	現行の LHC(Nominal)	HL-LHC(目標値)
瞬間ルミノシティ£ [×10 ³⁴ cm ⁻² s ⁻¹]	1	$5 \sim 7.5$
1 バンチ当たりの陽子数 N[10 ¹¹]	1.15	2.2
バンチ数 <i>n</i> b	2,808	2,748
ビームカレント [A]	0.58	1.09
最小のベータ関数 β^* [m]	0.55	0.2
衝突点でのエミッタンス $\epsilon_n~[m \mu m]$	3.75	2.50
重心系エネルギー [TeV]	14	14

表 1.1: 現行の LHC と HL-LHC の加速器のパラメータの比較 [5]

1.3.2 ATLAS 検出器のアップグレード

LHC の高輝度化に対して検出器側もアップグレードすることが求められる。特に瞬間ルミノシ ティ $\mathcal{L} = 7.5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の環境では、1 バンチの衝突によるパイルアップ < μ > は現行の 40 に対して 200 になると予想されている。高輝度化により生成される大量の粒子に対して、検出器側 は主に (1) 高放射線耐性, (2) 高速読み出し, (3) 高位置分解能であることが求められる。

ATLAS 実験においても HL-LHC に向けた準備を進めている。例えば、トリガーシステムでは 前段のトリガーレートを現行の 100kHz から 1MHz,処理時間を 2.5µs から 10µs まで増強する [7]。 特にミューオントリガーでは New Small Wheel などを用いて背景事象によるトリガーレートを削



図 1.9: クラブ空洞技術 [6]

減する予定である。また、内部飛跡検出器は最内層にあるため粒子の増加に対する影響を受けやす く、現行の検出器では放射線損傷に耐えることができず、また TRT は HL-LHC の運転において 100%の占有率を占めるとされる。そこで、高輝度化に向けて現行の内部飛跡検出器を全てシリコ ン製の新型検出器 Inner Tracker(ITk) に刷新する。

1.3.3 Inner Tracker (ITk)

ITk は HL-LHC 運転時に ATLAS 検出器の最内層に位置し、荷電粒子の飛跡や電荷の測定を目 的とする検出器である。現行の内部飛跡検出器が $|\eta| < 2.5$ までに対して、ITk は $|\eta| < 4$ までの粒 子の飛跡を精密に測定することができる。図 1.10 に示すように、パイルアップ < μ >=200 の環境 においても現行の内部飛跡検出器と同等またはそれ以上の性能となるように設計されている。

ITk は全てシリコンの検出器であり,図 1.11 に示すように内側のピクセル検出器と外側のスト リップ検出器で構成される。ストリップ検出器は、1 次元読み出しのストリップが 75.5µm 間隔で 計 1,280 本に配置された大きさ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ のシリコン検出器である。両側のモジュールをバレルで は 52 mrad,エンドキャップで 40 mrad ずらして重ねることで 2 次元の読み出しが可能である。ス トリップ検出器は 4 層のバレル領域と 6 層のエンドキャップ領域からなり $|\eta| < 2.7$ までの粒子を測 定することができる。現行の SCT が 4,088 枚のモジュール数であるのに対して,ITk のストリッ プでは 17,888 枚のモジュールが搭載される予定であり、チャンネル数も現行の 6.3M から 60.2M まで増える。2021 年からセンサの量産が始まっており、日本でもその品質管理,品質保証試験が 行われる。一方,ピクセル検出器はストリップ検出器の内側にあり、荷電粒子の飛跡や電荷を 2 次 元で測定することが可能なシリコンの半導体検出器である。バレル領域とエンドキャップ領域とも に 5 層あり、バレル領域では約 7,000 枚台、エンドキャップ領域では約 3,000 台の計約 10,000 台の モジュールで構成される。ピクセル検出器モジュールの詳細は次章で述べる。



図 1.10: シミュレーションにおける p_t =1GeV, 10GeV のシングルミューオンの ITk による再構成 率 [8]。



図 1.11: ITk のレイアウト [8]。内側のピクセル検出器,外側のストリップ検出器で構成される。 ビーム軸に対してセンサ面が平行であるバレル領域と,垂直なエンドキャップ領域からなる。



図 1.12: ITk ストリップ検出器モジュール [9]

2 ITk ピクセル検出器

2.1 半導体検出器

以下で新型ピクセル検出器の詳細を述べるにあたり,この節では一般的な半導体検出器について 言及する。

2.1.1 半導体

半導体は導体と絶縁体の中間の性質を持つ物質である。一般的にシリコンやゲルマニウムなどの 4価の元素が半導体となる。半導体は電子が自由に動ける伝導帯と電子が束縛された価電子帯の間 のバンドギャップエネルギーが数 eV 程度であるため熱などのエネルギーを与えることで,価電子 帯の電子が伝導帯に励起して電流が流れる。

半導体は大きく真性半導体,n型半導体,p型半導体の3つに分けることができる。真性半導体 は不純物を何も加えない半導体である。n型半導体はリンやヒ素などの5価の元素を不純物として ドープした半導体である。不純物として加えた元素はドナーと呼ばれる。5価の元素は4価の元素 との共有結合において,余った電子は伝導帯のすぐ下のドナー準位に収まる。したがって,この電 子は4価の半導体のバンドギャップより小さいエネルギーで伝導帯に励起される。一方のp型半導 体はホウ素やガリウムなどの3価の元素を混ぜた半導体である。このとき加えた不純物をアクセプ タと呼ぶ。3価の元素は4価の元素との共有結合において電子が1つ少ないため,相対的に正の電 荷を持つホールを生成する。ホールは価電子帯のすぐ上のアクセプタ準位に収まる。

2.1.2 pn 接合

n型半導体とp型半導体の接着をpn接合と呼ぶ。2つの半導体が接することによりキャリア濃度を均一にするようにn(p)型半導体からp(n)型半導体へ電子(ホール)が拡散する。これにより p型半導体とn型半導体の接合部にはキャリアが存在しない領域が生まれる。この領域を空乏層と 呼ぶ。空乏層では正にイオン化したドナーと負にイオン化したアクセプタが存在する。これらによ る電位を拡散電位と呼ぶ。この拡散電位により、拡散とは逆の移動つまりp(n)型半導体からn(p) 型半導体へ電子(ホール)がドリフトする。キャリアの拡散とドリフトがつり合い、フェルミ準位 がそろうときにキャリアの移動は停止する。

pn 接合は電圧をかける方向によってそのふるまいが大きく異なる。図 2.1(左) に示すように pn 接合に順バイアスをかけると,拡散電位が下がることにより電子とホールが移動でき,電流が流 れる。このときに pn 接合部分で電子が伝導帯から価電子帯に落ち込むときにその半導体のバンド ギャップエネルギーに対応して光を放出する。この原理を応用したものが発光ダイオードである。 一方で図 2.1(右) に示すように逆バイアスをかけた場合,拡散電位は大きくなり,キャリアの拡散 が起こりにくくなる。つまり,電流は流れずに空乏層はさらに広がる。一般的に空乏層厚は逆バイ アス電圧の平方根に比例する。

2.1.3 粒子の検出

半導体検出器は pn 接合で逆バイアスをかけて広い空乏層を作ることで、そこを通過する荷電粒 子を検出することができる。荷電粒子が通過したときにベーテ・ブロッホの式に従って落とすエネ ルギーにより生成した電子とホールが各電極に引かれ、電流が流れることで粒子を検知する。生成 する電子ホール対は通過する荷電粒子が落としたエネルギーに比例するため、電荷の測定を行うこ とができる。1つの電子ホール対を作るのに必要なエネルギーはゲルマニウムで平均 3.0eV、シリ



図 2.1: pn 接合における (左) 順バイアスと (右) 逆バイアスのときの電子とホールの動き。e は電子, h はホールを表す。

コンで 3.8eV 程度である。1.6MeV·cm²/g の MIP(Minimum Ionizing Particle) がシリコンを通過 した場合,エネルギー損失は 3.8MeV/cm となり,厚さ 100µm では約 10,000 個の電子ホール対を 生成する [10]。したがって,ガス検出器などに比べて効率よく電荷を収集することが可能である。 また,数 10µm の電極を使うことで位置分解能の良い検出器を作ることができる。

2.2 新型ピクセル検出器モジュール

ITk ピクセル検出器モジュールは2次元読み出し可能なシリコンの半導体検出器である。図 2.2 に示すように,モジュールは主に FPC,センサ,バンプ,ASIC, Cell で構成される。それぞれの 役割は以下の通りである。

· FPC (Flexible Printed Circuit)

主に ASIC とセンサへの電源の供給や ASIC からのデータを DAQ(Data acquisition) に送信 するための基盤である。また,モジュール温度を測定するために NTC(Negative Temperature Coefficient) も設置されている。データ送信のために ASIC と FPC は 25µm 径のワイヤーで 繋がれており,特にバレル領域のモジュールはこのワイヤーを保護する CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 製のメカニカルプロテクションを載せる。

・センサ

荷電粒子が空乏層を通過してできる電荷を収集して信号を得る。詳細は後述する。

・バンプ

直径 10~20μm の Sn-Ag 製の球体であり、センサと ASIC それぞれの各ピクセル間を電気的 に接続する。バンプを通してセンサのアナログ信号は ASIC に伝送される。

· ASIC(Application Specific Integrated Circuit)

主にセンサからのアナログ信号の増幅・整形を行い,デジタル信号に変換する。ASIC からの 信号はワイヤーを通って FPC へ伝送される。現在 RD53 Collaboration により HL-LHC に 向けた新型 ASIC が開発されている [12]。新型 ASIC の詳細は後節に記す。

 \cdot Cell

Cell は冷却用のクーリングパイプとの良好な熱伝導を担保するために CFRP と TPG(Thermal Pyrolytic Graphite) でできた機構である。バレル領域のモジュールに取り付けられ, ASIC からの発熱を効率よくクーリングパイプに逃すことができる。



図 2.2: クアッドモジュールのレイアウト

2.2.1 シリコンセンサ

現行のピクセル検出器と ITk ピクセル検出器で主に使用されるセンサの仕様を表 2.1 にまとめる。ITk で使用するピクセルセンサは高輝度化に向けて様々な改良がされている。

現行のピクセル検出器のピクセルサイズは 50×400µm² や 50×250µm² であるのに対して, ITk では微細化した 50×50µm², 25×100µm² のセンサを使用する。また, センサ厚は現行より薄く主 に 100µm や 150µm のセンサを使用する。ピクセルサイズを小さくし, 薄くすることで, ヒットの 占有率が下がるため位置分解能が向上する。

またセンサタイプとして, p型バルクに電極としてドナー濃度の高い n⁺ 型半導体をインプラント した n⁺-in-p 型のセンサを使用する。n 型バルクを使用した現行の n⁺-in-n 型では空乏層がインプ ラント電極の反対から広がるため, 読み出しのために全空乏化する必要があった。しかし, n⁺-in-p 型では電極側から空乏層が広がるため, 放射線損傷により全空乏電圧が上昇した後でも部分空乏化 で電荷を収集することができる。また, p型バルクは放射線損傷で型変換は起こらないという利点 もある。

ピクセル検出器は全5層からなるが,最内層とそれ以外の層で使用するセンサの種類が異なる。 最内層では放射線損傷が大きいことから3Dセンサを使用する。3Dセンサは電極をセンサ面に対 して垂直に配置するため,電極間が狭く,低いHVで稼働できる。一方で,その他の層ではセンサ 面と平行に電極が並ぶプラナーセンサを使用する。3Dセンサとプラナーセンサの電荷収集の違い を図 2.3 に示す。また,1枚のセンサに4枚のASICをバンプで接合したモジュールをクアッドモ ジュールと呼ぶ。なお,図 2.2 で示したレイアウトはクアッドモジュールである。

パラメータ	現行のピクセル検出器	ITk ピクセル検出器	
ピクセルサイズ $(\phi imes z) \; [m \mu m^2]$	$50 \times 250, 50 \times 400$	50×50, 25×100	
センサ厚 [µm]	200, 250	100, 150	
センサタイプ	n ⁺ -in-n	n ⁺ -in-p	
	particle		
Active edge ~4μm 3D n ⁺ p ⁺ n ⁺ p ⁺ n ⁺ p ⁺ n ⁺ p ⁺ n ⁺ p ⁺	n* unt ope	PLANAR p ⁺ ~ 500	
50 μm		n ⁺	

表 2.1: 現行と ITk のピクセルセンサの仕様 [3][8][11]

図 2.3: (左)3D センサの電荷収集。センサ面と同じ方向に電荷を収集する。(右) プラナーセンサの 電荷収集。センサ面に対して垂直方向に電荷を収集する [8]。

2.2.2 新型 ASIC

RD53 Collaboration は ATLAS と CMS が HL-LHC に向けて共同で次世代のピクセル読み出し ASIC を開発する取り組みである [12]。2013 年に設立され、プロトタイプ用の RD53A、それを改 良したデモ生産用の RD53B などが開発されている。ATLAS 実験で使用する RD53A と RD53B, IBL で使用している FE-I4 の仕様を表 2.2 にまとめる。RD53 Collaboration で開発する ASIC は 現行と比べて読み出しが速いという特徴を持ち、クアッドモジュールの場合 1 枚のセンサに 4 枚 の ASIC を用いるため、5.12 Gb/s での読み出しが可能となる。また、総線量 500Mrad の放射線 を受けた後でもその仕様を満たすように設計されている。

RD53A は実機の半分の Column×Row = 400×192 pixels の読み出しができる新型 ASIC である。 シリコンセンサの各ピクセルと ASIC の各ピクセルが対応している。図 2.4 に示すように, RD53A では試験的に左から, Synchronous, Linear, Differential の 3 種類のフロントエンド (FE) が使用 されており, 各 FE ごとでアナログ波形をデジタル波形に変換する方法が異なる。

RD53B はデモ生産用の ASIC であり, ATLAS では Differential FE を使用し,実機と同様の Column×Row = 400×384 pixels の読み出しが可能である。一方の CMS では Linear FE が使用さ れ,チップサイズやピクセル数も ATLAS と比較して少し異なる [13]。

	FE-I4	RD53A	RD53B
チップサイズ [mm ²]	20.2×18.8	$20.0\ \times 11.6$	20.1×21.1
ピクセル数	$80{\times}336$	400×192	400×384
ピクセルサイズ $(\phi imes z) \; [\mu \mathrm{m}^2]$	$50{\times}250$	50×50	50×50
ヒットレート $[MHz/cm^2]$	400	3,000	3,000
トリガーレート [kHz]	200	1,000	1,000
読み出し速度 [Mb/s]	160	$1,\!280$	1,280

表 2.2: ATLAS で使用する FE-I4, RD53A, RD53B の仕様 [14][15][16]



図 2.4: RD53A の FE の配置。左から Synchronous FE, Linear FE, Differential FE で構成される [17]。

2.3 量産

ピクセル検出器には全体で約 10,000 台のモジュールを搭載する。各国の ITk Pixel グループが 分担してその開発と製作を進めている。特に日本グループは 150µm 厚のプラナーセンサを使用す る外側 3 層のアウターバレル領域の約 900 枚,アウターエンドキャップ領域の約 600 枚を担当し, 余剰も併せて約 2,200 枚のクアッドモジュールを作る予定である。2022 年現在,プロトタイプと して RD53A を使用した RD53A モジュールやより実機に近い RD53B を搭載した試験機である ITk-Pixel v.1 モジュールの製作と評価試験が行われており,今年からデモ生産,2023 年から約 2 年間かけて本量産を行う予定である。

2.4 組み立てとサーマルサイクル試験,耐久試験

モジュールの組み立て過程を図 2.6 に示す。まずセンサと ASIC をバンプで接合してベアモジュー ルにする。次に接着剤で FPC と Cell の貼り付けを行った後, FPC と ASIC 間をワイヤーで接続 する。そして, HV による放電や腐食の防止のためにパリレン樹脂でモジュール全体をコーティン グする。このとき ASIC とセンサ間もパリレンで埋まることから, バンプ剥がれの防止も期待され ている。最後に CFRP 製のワイヤー保護を接着して完成する。

完成後はサーマルサイクル試験と耐久試験が行われる。サーマルサイクル試験は運用時の温度変 化のストレスを考慮して –45 ℃~40 ℃を 10 回, –55 ℃~60 ℃を 1 回の温度サイクルを行う試験 である。日本グループは恒温槽を用いて温度サイクルを行う。この試験でセンサと ASIC の熱膨張 率の違いからバンプ剥がれが起きた不良モジュールは取り除く。耐久試験はモジュール温度を稼働 時と同様の –15 ℃に保ち 1 時間ごとに後述のデジタルスキャンを行い,組み立て後のモジュール が安定して動作することを確認する試験である。プロトタイプの RD53A モジュールでは連続 8 時 間の試験をする。





図 2.5: (左)RD53A ベアモジュール。クアッドモジュールのため1枚のセンサに4枚の ASIC が付いている。(右) 組み立て後の RD53A クアッドモジュール。

2.5 品質管理試験 (QC)

全モジュールの生産過程において,モジュールの質を担保するために品質管理試験 (Quality Control; QC) が行われる [18]。その過程を図 2.6 に示す。試験項目にはメトロロジー,外観検査,読み 出し試験などが含まれる。生産する全台数に対して行うため,歩留まりをよくするために試験環境 や人員をそろえて効率よく試験を行うことが重要である。以下,主な試験について述べる。



図 2.6: ピクセル検出器モジュールの組み立て工程と品質管理試験

・メトロロジー

顕微鏡を用いてモジュールの辺の長さや高さ,たわみなどを測定する。接着剤による FPC や Cell の貼り付けに問題がないことを確認できる。

·外観検査

顕微鏡を用いてモジュールの外観を撮影し,モジュール上の傷やよごれ,ワイヤーの断線な どを目視で確認する。

・読み出し試験

モジュールの ASIC とセンサに電圧をかけて動作を確認する。ワイヤーをつけた後は各工程 間で行われる。詳細は後述する。

2.5.1 読み出し試験

読み出し試験ではモジュールに実際に通電し動作確認を行う。主にセンサが正しく信号を検知し、 ASIC が受け取った信号を正しく処理することを確認する。読み出し試験の主な項目を以下に示す。

・デジタルスキャン

ASIC のデジタル回路に試験電荷を 100 個入れてその応答を確認する。正常なモジュールで あれば応答率は 100%となる。

・アナログスキャン

ASIC のアナログ回路に試験電荷を100 個入れてその応答を確認する。正常なモジュールで あれば応答率は100%となる。アナログ回路はデジタル回路の前段にあるため、このスキャ ン結果に不具合がある場合、デジタルスキャンの結果の確認を先に行う。

・スレショルドチューン

ASIC のアナログ回路に調整したい電荷量をもつ試験電荷を入れながらしきい値を決めるレジスタを調整する。

・スレショルドスキャン

ASIC のアナログ回路にあらかじめ電荷量が既知の試験電荷を入れてしきい値の測定を行う。

・X 線スキャン

モジュールに X 線を照射し,そのヒット応答を見ることでセンサの動作確認を行う。バンプ 剥がれがある場合はセンサからの情報が ASIC に送られずヒットが見られないため,このス キャンによりバンプ剥がれの確認も行うことができる。各ピクセルで 50 以上のヒット数が 要求されている。

・レギュレータ起動試験

レギュレータ起動試験では低温度で ASIC の動作を確認する。ASIC の電源を切った状態で モジュールを –35 ℃にし、ASIC に電源を入れた直後にデジタルスキャンを行う。正常に起 動しない場合は 15 ℃ずつ温度を上げて再度試験を行う。

これらの読み出し試験は実際の運転を考慮し,モジュールの電源を付けた状態でモジュール温度 を 30 ℃,20 ℃,-15 ℃,また電源を落とした状態で-35 ℃に一定に保って試験を行う。したがっ て,ASIC などからの発熱をうまく対処しながら,モジュール温度を一定にできる試験環境が必要 である。また,低温時の試験ではモジュールを結露から防ぐために露点に注意を払わなければなら ない。読み出し試験における露点管理は本文の主題であり次章で詳しく述べる。

読み出し試験における露点管理 3

500

400

露点 3.1

露点とは空気中の水蒸気が水になる温度である。空気中の水蒸気量が飽和水蒸気量を上回ったと き,水蒸気としていられない水分が液体として表出し結露が起こる。特に氷点下以下では霜が付 く。つまり、露点は気体中に含まれる水蒸気量が飽和水蒸気量となるときの温度であり、水蒸気量 と露点は一対一の関係である。一般的に日本での露点は 5~20 ℃ほどである。

飽和水蒸気圧は温度の関数で表すことができる。様々な理論式があるが、一例として Tetens の 式を以下の式 (3.1) に示す [19]。また,飽和水蒸気量は飽和水蒸気圧と温度を用いて式 (3.2) で表 される [19]。これらをもとに計算した温度と飽和水蒸気量の関係を図 3.1 に示す。また、気体の温 度と相対湿度 (Relative Humidity: RH) が既知のとき、気体に含まれる水蒸気量が分かるため、露 点を得ることができる。温度と RH から露点を得る理論式の例として式 (3.3) に示し,それを用い て計算した様々な露点における温度と RH の関係を図 3.3 に示す [20]。露点つまり水蒸気量が一定 の場合,温度を下げることで,飽和水蒸気量は減少するのでRHは増加する。同じ温度では露点が 上がるにつれて RH も増加する。

読み出し試験はモジュールを最低 –35 ℃などの低温にして行うため,通常の空気下では結露が 起こる。結露によりモジュール上に生じた水分はショートや腐食などの原因となる。実際に IBL の作製時に結露による水とアルミのワイヤーが反応して腐食した事例も確認されている [21]。した がって、試験中は結露を防ぐために露点を下げることが重要である。

飽和水蒸気圧
$$e(T[^{\circ}C])$$
 [hPa] = 6.1078 · 10 ^{$\frac{1.3 \cdot 1}{T+237.3}$} (3.1)

飽和水蒸気量
$$a(T[^{\circ}C], e[hPa]) [g/m^3] = \frac{217 \cdot e}{T + 273.15}$$
 (3.2)



図 3.1: 温度と飽和水蒸気量の関係。気体に含まれる水蒸気量が飽和水蒸気量となる温度が露点と なる。

Dewpoint(
$$RH[\%], T[^{\circ}C]$$
) $[^{\circ}C] = T_n \cdot \frac{\ln(\frac{RH}{100\%}) + \frac{m \cdot T}{T_n + T}}{m - \ln(\frac{RH}{100\%}) - \frac{m \cdot T}{T_n + T}}$
 $T_n [^{\circ}C] = 243.12, \ m = 17.62 \ (0 \sim 50^{\circ}C)$
 $T_n [^{\circ}C] = 272.62, \ m = 22.46 \ (-40 \sim 0^{\circ}C)$

$$(3.3)$$



図 3.2: IBL 製作時に見られた結露による腐食。アルミと水が反応し、ワイヤーの付け根の部分に 腐食が見られる [21]。





3.2 クーリングボックス

読み出し試験はモジュール温度を 30 ℃などに一定に保って行う。また,最低 –35 ℃などの低温 で試験を実施するため,結露防止の観点から露点を下げることが重要であり,試験中はモジュール 温度よりも露点を 10 ℃以上低く保つことが要求されている。したがって,モジュール温度を一定 にでき,かつ低露点を保てる試験環境が必要である。これらを満たすために,読み出し試験は図 3.4 に示すクーリングボックスを用いて行う。クーリングボックスは主に PID 制御によりペルチェ 素子の電圧を調整しながらモジュールの吸熱を行うことで,モジュール温度を一定に保つことがで きる試験装置である [22]。以下,クーリングボックスの主な構成を述べる。

内部は上から真空チャック,ペルチェ素子,ヒートシンクで構成されており,モジュールを真空 チャックに載せて吸着することで良好な熱接触を保ちながら吸熱を行う。ヒートシンクは外部のチ ラーを用いて不凍液を常に循環させることで低温を保つことができる。これらの構造物は気密性を 保つためにポリアセタール樹脂で覆われている。また,その外側はさらに発泡スチロールで囲まれ ており,断熱性能が良い。

また,試験環境内を低露点に保つための工夫もされている。モジュールはキャリアと呼ばれる持ち運びのためのアルミ製の構造物で保持されており,キャリアと共に真空チャックに載せて試験を行う。試験の際はモジュールを覆うように厚さ0.5mmのアルミ板を被せ,この中に乾燥ガスを流入することで露点を下げる。アウトガスによる水分の増加を防ぐために,材質としてアルミを選定した。また,アルミ板を被せてモジュール周辺の体積を約48×48×5mm³と小さくすることで,効率よく露点を下げることができる。また,キャリアの周辺はポリアセタール樹脂によって気密性が保たれているため,クーリングボックス内部の低露点環境を保持できる。そして,乾燥ガスが停止して露点が急激に上昇することなどによりモジュール温度と露点の温度差が10℃以下になった場合,ペルチェ素子の印加電圧を反転させてモジュールを加熱することが可能なソフトウェアベー

スのインターロック機能も備えている。



図 3.4: クーリングボックスのレイアウト図



図 3.5: クーリングボックスの写真。(左) 発泡スチロールとポリアセタール樹脂のカバーを開けてモ ジュールを設置している。モジュールはアルミ製のキャリアにより保持されている。(右) モジュー ル設置後,全てのカバーを閉めた後。

3.3 クーリングボックスにおける露点の測定

露点に対してモジュール温度を安全に保つために,試験中はモジュール周辺の露点をモニターすることが重要である。そこで,図 3.4 に示したように,キャリアとアルミ板で囲まれたスペースに 温湿度センサを設置して露点の測定を行う。露点の測定に使用する温湿度センサは使用環境を考慮 すると,大きく以下の条件を満たす必要がある。

(1) 高性能

モジュール温度を –35 ℃にするとき, 露点はそれより 10 ℃以下の –45 ℃以下まで下げ, そ れを測定しなければならない。図 3.3 に示したように露点 –45 ℃の環境は非常に乾燥してお り, 温度 20 ℃のときに RH は約 0.5%程度である。温湿度センサはそのような環境でも露点 を精度よく測定できる必要がある。

(2) 小型

露点の測定を行うモジュール周辺はキャリアとアルミ板で囲まれており,体積は48×48× 5mm³程度で非常に狭い。このため温湿度センサは小型でなければならない。

(3) 低価格

約2,200 台のモジュールの量産試験は同時に8台のクーリングボックスを用いて実施する予 定であり,温湿度センサも8個必要である。また,2年間にわたる試験において経年劣化や 故障により交換することも考えられる。したがって温湿度センサは比較的安価なことが求め られる。

これらの要求を満たすような温湿度センサをいくつか選定し,部屋で温度と RH の測定を行った。使用した温湿度センサの仕様や価格を表 3.1 に,測定結果を図 3.6 に示す。各センサの温度と RH の測定範囲や精度はほとんど同じであるが,価格が高いセンサであるほど精度は良い。測定結 果において温度はどのセンサも概ね同じ値を示したが,RH では約 20%のばらつきが見られる。また,複数のセンサの中でも SHT85 は他のセンサと比較して固体差が小さいことが分かった。

SHT85 は他と比べて精度が良く,個体差が小さいことや,ATLAS ITk グループにおいても使用 する温湿度センサの候補として挙げられていたことから,実際の使用に向けてさらに低露点環境で 詳細な試験を行った。SHT85 の仕様については後述する。

表 3.1: 各温湿度センサの仕様

	SHT85	BME280[23]	am2322[24]	PmodHYGRO[25]
温度測定範囲 [°C]	$-40{\sim}105$	$-40{\sim}85$	$-40 \sim 80$	$-40{\sim}125$
精度 [°C]	± 0.1	± 1	± 0.3	± 0.2
RH 測定範囲 [%]	$0 \sim 100$	$0 \sim 100$	$0 \sim 99.9$	$0 \sim 100$
精度 [%]	± 1.5	± 3	± 3	± 2
価格 [円]	4,165	1,080	700	$1,\!950$
大きさ [mm ³]	$17.8 \times 4.9 \times 2.1$	$16 \times 10 \times 1.2$	$7.8 \times 11.3 \times 4$	$32 \times 20 \times 13$



図 3.6: 部屋での様々な温湿度センサを用いた温度と RH の測定結果。青系の SHT85 は他のセン サに比べて個体差が小さい。

3.4 低露点測定のためのセットアップ

SHT85 の低露点環境における性能評価を行うために,任意の露点環境を一定時間固定できる実験セットアップを構築した。セットアップの概略図と写真を図 3.7 に示す。実験系は主に,密閉性が高く,アウトガスによる水分の流入が少ないステンレスチェンバー,真空引きによりチェンバー内の水分を取り除ける真空ポンプ,気圧の調整のための窒素ボンベで構成されており,チェンバー内の露点をコントロールすることができる。チェンバーの底にはフィードスルーがあり,温湿度セ

ンサをチェンバーの中に入れ,密閉性を保ちながら Raspberry Pi で読み出しを行った。また,温 湿度センサをチェンバーの内側に貼り付け,チェンバーの外側からその部分にドライアイスを当て ることで温湿度センサの温度を下げることができる。





図 3.7: 低露点測定のための実験セットアップの (左) 概略図と (右) 写真。主にステンレスチェン バーと窒素ボンベ,真空ポンプで構成される。

空気に含まれる水分量はその気圧に比例することに基づき,チェンバー内の真空度から水分量を 見積もることで露点を調整した。低露点測定の手順は以下の通りである。

・チェンバー内の真空引き

チェンバー内に含まれる水分やチェンバーの内壁のアウトガスを除去するために 3~4 時間 ほど真空引きを行う。

・窒素コーティング

後に入れる空気がチェンバーの内壁に付くことを防ぐため、チェンバー内が正圧になるまで 乾燥窒素を満たす。

・水分の流入

20~30kPa ほど真空引きをした後、大気圧に戻るまで空気を入れる。空気に含まれる水分量 によりチェンバー内の露点は上昇する。

・真空度による露点の見積もり

図 3.8 に示すように固定したい露点に対応する水分量をもとに除去する水分量を見積もり,真 空引きにより水分量を減らす。その後,乾燥窒素を入れてチェンバー内を大気圧に戻し,測 定を開始する。

図 3.8: 真空度による露点の見積もり。例として露点 –14 ℃から露点 –25 ℃に変更するときの見積 もりを示す。0.35 気圧まで真空引きをすることで水分量を 624.4ppm まで減らし露点 –25 ℃にす ることができる。

3.5 温湿度センサ SHT85

3.5.1 仕様

SHT85 はセンシリオン社が販売する温湿度センサである [26]。サイズは 17.8×4.9×2.1 mm³ と 小型であり,温度と RH をそれぞれ 16bit の値で出力する。16bit の生データ S_T , S_{RH} を以下の式 (3.4) で変換することにより温度と RH が得られる [27]。露点は前述の式 (3.3) を使用して SHT85 が 出力する温度と RH から計算して求める。通信規格は Inter-Integrated Circuit (I²C) であり, VDD, VCC, SDA, SCL の計 4 本の線を用いて Raspberry Pi や Arduino で読み出しを行うことができる。 なお,全ての SHT85 のアドレスは 0x44 で統一されており変更することはできないため,同時読 み出しを行う際はマルチプレクサ等を用いる必要がある。

図 3.9: 温湿度センサ SHT85[26]

$$T [^{\circ}C] = -45 + 175 \cdot \frac{S_T}{2^{16} - 1},$$

$$RH [\%] = 100 \cdot \frac{S_{RH}}{2^{16} - 1}.$$
(3.4)

3.5.2 常温,低温における低露点の測定

SHT85 をチェンバーの中に入れて露点を –15 ℃, –25 ℃, –35 ℃に順に固定して, 常温で測定 を行った。結果を図 3.10 に示す。露点 –15 ℃の時は比較的精度よく測定できているが, 露点 –25 ℃の測定では真の露点よりも約5 ℃低い露点を出力した。真の露点よりも低い値を示すのは結露を 防ぐという観点から適切でない。また, 露点 –35 ℃に固定したときは RH が 0%となり, 式 (3.3) を用いて数学的に露点を計算できなかった。つまり,SHT85 は常温において読み出し試験で要求 される露点 –45 ℃の測定はできないということが分かった。

図 3.10: 室温における SHT85 を用いた低露点の測定結果。赤破線は固定した露点 –15 ℃, –25 ℃, –35 ℃を示している。

次にドライアイスを用いて徐々に温度を下げながら露点の測定を行った。固定した露点は 3.6, -6, -14, -20, -25, -30, -35, -40, -45 ℃である。露点 -45 ℃での測定結果を図 3.11 に示 す。先ほどの結果と同様に常温では RH が 0%を示したため,露点を得ることはできなかった。し かし,温度を下げることで飽和水蒸気量は下がるため,露点つまり水蒸気量を一定にした状況では RH は上昇した。それに伴い,図 3.11(右) で示すように露点を計算できるようになり,徐々に正確 に露点の測定ができるようになった。

また,各露点における温度と RH の関係,温度と露点の関係を図 3.12 に示す。この結果では急激な温度変化を取り除くため,1秒間に温度が 0.1 ℃以上変化したデータ点は除いている。これらの結果から,SHT85 を用いて低露点を精度よく測定するためには温度を下げて,RH を上げる必要があることが分かった。

なお,図 3.12(右)の低温度領域において測定した露点が固定した露点よりも低く見積もられて いる。ドライアイスで温度を下げるときにチェンバー内で最も温度が低い部分が温湿度センサでは なく,その周辺となる可能性があり,そこの温度が露点を下回ることで結露が生じ,その分の水蒸 気量が減少したため露点が低く測定されたと考えられる。温湿度センサの温度を最低にするように 実験系を組むことが今後の課題の一つである。

図 3.11: 露点 –45 ℃に固定した環境で温度を下げながら取得した SHT85 の (左) 温度と RH, (右) 露点。徐々に温度を下げることで RH が上昇し,比較的に正しい露点を示す。

図 3.12: 各低露点で固定したときの SHT85 の出力する (左) 温度と RH, (右) 温度と露点の関係。 破線は (左) 理論線,(右) 固定した露点を示す。

3.5.3 個体差

複数の SHT85 を使用することを考慮して,低露点における個体差を確認した。図 3.13 のよう にマルチプレクサを用いて5つの SHT85 を同時に読み出し,ブレッドボードと共に上述のチェン バーの中に入れて同一環境下で露点の測定を行った。使用した SHT85 のシリアル番号と初使用日 を表 3.2 に示す。なお,上述の測定で使用した個体は SN:327741 である。露点を下げるために真空 引きを行い,その後空気を入れて大気圧に戻して測定を始めた。時間が経つにつれて主にブレッド ボードからのアウトガスによりチェンバー内の水分量は増加し,露点は上昇する。

結果を図 3.14 に示す。各図の下の段には SN:327741 との差を示している。低露点環境において も個体差は温度 ±0.1 ℃以下, RH±1%以下であり, ともにデータシートに記載された精度に収ま る。ただし,式(3.5)で定義する SN:327741 に対する RH の相対誤差を確認すると,図 3.15 に示し たように低 RH 領域で相対誤差は大きくなり,特に RH が 3%未満では相対誤差が 50%以上となっ た。それに伴い,実際の露点よりも低い露点を示す RH=0%付近の領域では露点の個体差は 40 ℃ 以上と大きい。

さらに、低温時における個体差の確認も行った。SN:524424の個体を用いて、前述の方法で露 点を固定し温度を下げながら露点の測定を行った。ドライアイスで2個以上のSHT85を同時に冷 やすのは難しいため、それぞれの個体の測定は同時には行っていない。結果を図 3.16 に示すが、 SN:524424 も SN:327741 と同様なふるまいを示した。したがって、低 RH 環境において真の露点 よりも低い値をが出力するのは SHT85 固有の描像であると言える。この原因は、図 3.17 に示すよ うに読み出し試験で必要とする低 RH の領域では SHT85 のキャリブレーションのペデスタルがや や低くなっているからであると考えられる。

シリアル番号	初使用日
327741	2020/4/14
327736	2020/4/14
524424	2021/2/25
524394	2021/6/15
590064	2021/6/15

表 3.2: 個体差試験に使用した SHT85 のシリアル番号と初使用日

Relative error of RH $[\%] = \frac{\text{RH of other SN - RH of SN:327741}}{\text{RH of SN:327741}} \times 100$

(3.5)

図 3.13: SHT85 を 5 個使用した同時読み出しのセットアップ。SHT85 の他にマルチプレクサとブ レッドボードをチェンバーに入れて測定を行った。

図 3.14: 常温,低露点での SHT85 の個体差確認試験の (左上) 温度,(右上)RH,(下) 露点の測定 結果。各図の下の段は SN:327741 との差を表す。

図 3.15: SHT85 の常温,低露点における SN:327741 に対する RH とその相対誤差の関係。斜線部 は RH<3%の領域で,相対誤差が 50%以上となる。

図 3.16: SN:327741 と SN:524424 を用いた低温での個体差試験の結果。各露点で固定したときの SHT85 の出力する温度と露点の分布を表す。破線は固定した露点を示す。

図 3.17: SHT85 の理想と予想される RH の較正。読み出し試験で測定する RH=0%の近傍では真の RH よりも低い値を出力するように較正されていると考えられる。

3.5.4 キャリブレーション

SHT85 は常温において露点 –20 ℃以上は精度よく測定できるが,それ以下では,実際の露点よりも低い露点を出力する。真の値よりも低い露点を示すのは結露防止の観点から適切ではない。そこで低露点をより精度よく測定するための較正を行った。

較正には図 3.12(左)の各露点における温度と RH の分布を利用した。まず図において –34 $\mathbb{C}~20 \mathbb{C}$ の温度領域を 2 \mathbb{C} ずつに分割して,領域ごとに固定した各露点での SHT85 の出力する RH の 一次元分布を求める。そして温度領域ごとに,それぞれ固定した露点と RH の関係を得る。この 結果を図 3.18 に示す。RH の値は,RH の一次元分布の中心値を使用した。次に,相対湿度と露点 の関係を $a\sqrt{RH} + b$ でフィットする。フィット結果を図 3.18 に示したが,全ての温度領域で概ね 良いフィットができている。最後にフィット関数のパラメータである a, b の温度依存性を求めた。 結果を図 3.19 に示す。温度に対して,パラメータ a はほぼ一定の値を示し,パラメータ b には線 形な関係がみられた。その形を考慮して,それぞれフィットを行い,パラメータ a, b を温度の関 数で表した。

得られた SHT85 の較正関数を式 (3.6) に示す。

$$Dewpoint_{calib}(RH, T) [^{\circ}C] = a\sqrt{RH} + b$$

$$a = 5.64, b = 0.861 \times T - 46.4$$
(3.6)

この較正関数は SHT85 の示す温度と RH をインプットとして比較的に正しい露点を出力する。 露点 – 35, –45 ℃での較正前後の露点の値を図 3.20 に示す。較正前は常温において,実際の露点よ りも低い値を示していたが,較正関数を利用することで比較的正しい露点を求めることができた。 また,常温で RH が 0%の領域についても実際の露点よりも高い露点を出力する。この較正関数は 精度よく露点を表すものではないが,結露防止の観点から考えると,真の露点よりも高い露点を出 力するのは安全方向である。したがって,読み出し試験での使用では問題なく使うことができる。

参考として,ある RH(または温度) における温度 (または RH) と較正された露点の関係を図 3.21 に示す。また、上述した常温での個体差試験の結果に対しても較正関数を適用した。RH に対する SN:327741 との露点の差を図 3.22(右) に、参考として較正前の結果も左に示す。この較正関数を 用いることで 0%付近においても、露点の個体差を小さくすることを確認した。ただし、RH が 3% 以下では個体差が大きいことから、図 3.21 と図 3.22 の斜線部に示すように、RH が 3%以上のとき にのみこの較正関数を使用することを推奨している。

図 3.18: -34 °C ~20 °C 各温度領域における Dewpoint = $a\sqrt{RH} + b$ でのフィット結果。データ点 のエラーは、RH(横) はデータシートにおける精度 ±1.5%またはその領域での RH の一次元分布の RMS の値のうち大きい方を利用した。露点 (縦) は時間経過による水分量の増加に対する露点の変 化を保守的に誤差としている。

図 3.19: フィット関数のパラメータ *a*(左), *b*(右) の温度依存性。*a* は定数, *b*は1次関数でフィットした。

図 3.20: (左) 露点 -35 ℃, (右) 露点 -45 ℃時の較正関数の使用前後の比較。

図 3.21: (左)RH=0, 10, 20, 30, 40, 50%のときの温度と較正関数による露点の関係。(右) 温度 =-30, -20, -10, 0, 0, 20°C のときの RH と露点の関係。網部は較正関数の使用を推奨しない RH が 3%以下の領域を表している。

図 3.22: (左)SHT85 の生の露点,(右) 較正関数を適用した後の露点の SN:327741 との差

3.6 実試験における露点管理

2022 年現在プロトタイプ機の製作が進められており,同時に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の富士実験棟内のクリーンルームにおいて読み出し試験を実施している。以下では試験を実施する に当たり,実際に行った露点管理の詳細について述べる。

3.6.1 乾燥空気

読み出し試験では、コンプレッサと吸着式圧縮空気除湿装置を通して得られる乾燥空気を使用 し、試験環境の露点を下げた。コンプレッサと除湿装置はクリーンルームの外に置かれており、ナ イロンチューブや SUS 管を通して、クリーンルーム内に入り、クーリングボックスへと流れる。 クリーンルーム内で測定した露点を図 3.23 に示す。測定には露点 -60 ℃まで精度よく測定できる TED-2 を使用し、露点は -60 ℃ 以下まで下がっていることを確認した [28]。なお、読み出し試験 中は乾燥空気の流量を約 1.5L/min に保つ。また、乾燥空気の流れを止めた場合アウトガスによる 水分の流入により、次の使用時に露点が充分下がるまでに時間を要するため、乾燥空気を常に一定 量流すことが推奨される。

図 3.23: クリーンルーム内で測定した乾燥空気の露点

3.6.2 温湿度センサ

露点測定のための温湿度センサ SHT85 は図 3.24 に示すようにキャリアの上のアルミ板に設置 した。ピンソケットはアラルダイトで接着しているが, SHT85 は取り外し可能である。精度よく 低露点を測定するために SHT85 を冷やす必要があるため, アルミ板と SHT85 の間にはシリコン グリス (サンハヤト社, SCH-20)を塗布した。アルミ板には幅 1mm のスリットがあり, 読み出し ケーブルをそこに通すことで, キャリア内の密閉性を保ちながら露点の読み出しを行うことができ る。これまでの試験ではアルミ板の表と裏に SHT85 を取り付けたが, 今後は裏側 (モジュール側) だけに取り付ける方針である。

図 3.24: (左) アルミ板に設置した SHT85。(右)SHT85 を付けたアルミ板をキャリアの上から被せ た様子。

3.6.3 オペレーション

試験中,モジュール温度や露点は常にモニターされており,データ可視化ツール Grafana を用い て確認することができる [29]。実際にモジュール温度を 25 ℃から –15 ℃に変えたときの過程を図 3.25 に示す。露点は較正関数を使用した SHT85 で測定している。初め RH=0%のとき,露点は保 守的に計算されるため –28 ℃を示しているが,温度を下げることで,最終的に –49 ℃となった。 結露を防ぐためのインターロックが適用される温度は較正露点+10 ℃に設定されている。このよ うに露点を充分に下げた状態で,モジュールを 25 ℃から –15 ℃にして読み出し試験を実施した。

これらの露点管理を行い,これまでプロトタイプ機の RD53A モジュール 4 台の読み出し試験を 実施し,露点管理の観点からは大きな問題なく試験を終えることができた。これらの試験結果につ いては次の章で詳しく述べる。

3.6.4 改善点

今後の量産時の試験に向けて、より良い露点管理のために改善点を2点述べる。

・設定温度をすぐに下げることができない問題

モジュール温度を -35℃にして実施するレギュレータ起動試験に向けて,20℃からASICの電源 を落とした後,-35℃にモジュール温度を変化させた過程を図 3.26 に示す。設定温度が直ちに -35 ℃にならず,時間の経過に連れて設定温度が徐々に下がっている。これは20℃のときに RH=0% であるため,較正関数が保守的に高い露点を出力していることが原因である。モジュールは較正露 点+15℃以上の温度に設定できるが,較正露点が -50℃よりも高いため,設定温度を -35℃以下

図 3.25: モジュール温度を 25 ℃から –15 ℃に変更したときのモジュール温度,インターロック適 用温度,SHT85 の値

まで下げることができていない。徐々に温度が下がることで露点も下がり,約5分後に –35℃に 設定できている。それに伴って,モジュール温度が –35℃になるのにおよそ15分要している。

今後 2,200 台のモジュールの読み出し試験をすることを考慮すると、僅かな時間でも短縮することで品質管理試験全体の時間短縮に繋がると考えられる。この問題は SHT85 より性能が良いとされる後述の温湿度センサ HYT271 を用いることで解決する。

・SHT85 の故障

約1年間の使用でSHT85が故障し,露点の読み出しが不可能になった。アルミ板の表と裏に1 個ずつSHT85を貼っていたが,それぞれ別のタイミングで故障した。表のSHT85は読み出しが できるときとできないときがあり,できる場合でも常に同じ温度とRHが表示された。一方,裏の SHT85はアドレスの確認や読み出しが全くできなくなった。正常な読み出しケーブルを用いても 症状は変わらなかったため,SHT85本体の故障と考えられる。

現時点で明確な原因は分かっていない。しかし,表の SHT85 のピン間抵抗を測定したところ全 てのピン間で抵抗値が返ってきたため、ショートによる故障と考えられる。また、読み出し試験の 一つである X 線スキャンでは、モジュールの真上にある温湿度センサにも X 線が当たるため、X 線による故障も可能性として考えられた。そこで、実際に X 線の照射を行ってその影響を確認し た。詳細は後述する。

温湿度センサは比較的に安価なものを使っているため、故障したときは交換をすればよい。しか し、安定した露点管理のために故障した原因を理解することは重要であり、今後も調査を続ける。

3.7 温湿度センサ HYT271

SHT85 は比較的精度よく露点を測定できるが,極低 RH の環境では真の露点よりも低い露点を 示すため,較正関数を導入して読み出し試験に使用した。しかし,温湿度センサ HYT271 は常温 においても露点 –40 ℃まで精度よく露点を測定できるという報告があった [30]。そこで,読み出 し試験での使用に向けて HYT271 の性能評価を行った。

図 3.26: モジュール温度を 20 ℃から –35 ℃に変更したときのモジュール温度,インターロック適 用温度,SHT85 の値。設定温度は露点の低下に従って徐々に下がっている。

3.7.1 仕様

HYT271 は Innovative Sensor Technology 社が販売する温湿度センサである [31]。測定範囲や精 度などを表 3.3 にまとめる。SHT85 と比較して,温度と RH の測定範囲や精度,価格などに大きな 相違点はない。SHT85 と同様に I²C 通信で読み出しを行えることから,SHT85 から HYT271 に 変更する際に大きな手間をとらない。図 3.27 に SHT85 と HYT271 を示すが,大きさも特に違い はない。

	SHT85	HYT271
温度測定範囲 [°C]	$-40{\sim}105$	$-40 \sim 125$
精度 [°C]	± 0.1	± 0.2
RH 測定範囲 [%]	0~100	$0 \sim 100$
精度 [%]	± 1.5	± 1.8
通信規格	I^2C	I^2C
出力 bit 数	16	14
大きさ [mm ³]	$17.8 \times 4.9 \times 2.1$	$20.7{\times}5.1{\times}1.8$
価格 [円]	4,165	3,796

表 3.3: 温湿度センサ SHT85 と HYT271 の仕様 [27] [32]

3.7.2 露点の測定

SHT85 による測定と同様のセットアップで露点の測定を行った。HYT271 と SHT85 をチェン バーの中にいれて同時読み出しを行い,真空引きにより徐々に露点を下げながら測定を行った。結 果を図 3.28 に示す。両センサとも温度は同様の値を示しているが,徐々に RH が下がるにつれて, HYT271 は SHT85 に比べて高い RH を出力した。さらに露点を下げて,SHT85 が RH=0%を示 してもなお HYT271 は 0%でない値を示した。

次に HYT271 を1個だけチェンバーの中に入れ,常温の様々な低露点環境で測定を行った。そ

図 3.27: SHT85 と HYT271 の写真

の結果を図 3.29 に示す。HYT271 は露点 –55 ℃以上は精度よく測定できることが分かった。した がって,図 3.10 に示したように常温において露点 –20 ℃までしか精度よく測定できない SHT85 と比べて,HYT271 は性能が良い温湿度センサであると言える。

今後の読み出し試験では HYT271 を使用する予定であり,経年劣化や低温でのふるまいの精査 がこれからの課題である。

図 3.28: 常温, 低露点における SHT85 と HYT271 の温度, RH, 露点の比較。常温において HYT271 は SHT85 より低露点を測定することができる。

3.8 温湿度センサへの X 線の影響

読み出し試験の一つである X 線スキャンでは,モジュールに X 線を照射してセンサの動作確認 を行う。その際にモジュールの真上に設置した温湿度センサにも X 線が照射される。したがって, X 線の照射は SHT85 が約1年間の使用で故障した原因の一つとして考えられた。そこで,温湿度 センサに対して X 線照射試験を行い,照射時の温湿度センサのふるまいや照射し続けることによ

図 3.29: 室温における HYT271 の低露点の測定結果。常温においても露点 –55 ℃までは精度よく 測定できる。

る影響などの調査を行った。

3.8.1 X線スキャンにおける X線の照射

ここでは KEK での X 線スキャンの試験環境について簡単に述べる。まず, X 線スキャンにおけ るX線管とクーリングボックスの位置関係を図 3.30 に示す。遮蔽体と X 線管は一体となっており, それらをクーリングボックスに被せて試験を実施する。X 線管はクーリングボックスの真上に設置 され,照射口から温湿度センサまでの距離はおよそ 75mm となる。ただし,照射口と温湿度セン サの間には 5cm 厚の発泡スチロールと 2mm のポリアセタール樹脂ケース, 0.5mm のアルミ板が ある。

X 線管は AMPTEK 社の Mini-X2 を使用しており,標的は Ag で主な特性 X 線は 22keV,25keV である [34]。Mini-X2 とそのエネルギースペクトルを図 3.31 に示す。X 線スキャンでは管電圧は 50kV,管電流は 80µA で使用し,1回のスキャンあたり3分間の照射を行う。なお,SHT85 が故 障するまでにおよそ X 線スキャン約 650 回に相当する 1,960 分間の照射が行われた。

図 3.30: X 線スキャンのセットアップ。温湿度センサに対して約 75mm の高さから X 線を照射する [33]。

図 3.31: (左)X 線スキャンに使用する Mini-X2。(右)Ag 標的, 管電圧 50kV のときの X 線のエネ ルギースペクトル [34]。

3.8.2 X 線照射試験

温湿度センサに対する X 線照射試験のセットアップとその概略図をそれぞれ図 3.32,図 3.33 に 示す。X 線源から 7.4cm 離れた照射口,41cm 離れた地点,X 線が照射されない遮蔽箱の外の 3 か 所に SHT85 と HYT271 を 1 個ずつ設置した。マルチプレクサを用いて温度と RH の測定を行い ながら X 線の照射を行った。照射口での照射は KEK での X 線スキャン時と同程度の距離とみな せる。X 線管はトーレックス社の TRIX-150LEO を使用し,50kV,2.8mA で 30 分+30 分の計 60 分間の照射を行った [35]。KEK での管電流値 80µA と簡単に比較をすると,35 倍の強度での照射 となる。したがって,照射口で 60 分間の照射は,KEK で 2,100 分間の照射に相当する。

図 3.32: X 線照射試験の実験セットアップ

3.8.3 試験結果

X 線照射試験の結果を図 3.34 に示す。図中において 60sec~1,860sec, 3,000sec~4,800sec の間 に照射をしている。両温湿度センサともに照射開始直後に,温度の急激な上昇や読み出しが不安定 になることはなかった。照射中にやや温度が上がっているが,これは X 線発生装置自体の温度上 昇であると考えられる。また,SHT85 は 60 分間の照射により読み出しに問題は起こらなかった。 この結果に基づくと,1 年間の使用で故障したのは X 線の照射が原因ではないと考えられる。一方 で,44 分間の照射により照射源に近い HYT271 で露点の測定ができなくなった。読み出し自体は

図 3.33: X 線照射試験の実験セットアップの概略図

できたが,常に温度 125 ℃, RH=100%を示した。44 分間の照射は X 線スキャンでの照射に換算 すると 1,540 分である。さらに,故障した HYT271 は,遠くに設置した HYT271 と比較して徐々 に露点が低下した。また,照射試験後の HYT271 の裏面の写真を図 3.35 に示したが,総線量が多 いほど褐色に変色した。SHT85 については特に変化は見られなかった。

X 線照射試験後, HYT271 がレジスタにデータの書き込みを始めてから正しい温度と RH を示 すまでの最短時間とレジスタにその情報が保持される最長時間を測定した。なお,書き込みをした 直後に読み出しをした場合や,レジスタのデータ保持時間を過ぎて読み出しをした場合は常に温度 125 ℃, RH=100%が返ってくる。結果を図 3.36 に示す。参考として,X 線照射試験に使用してな い個体の測定も行った。この結果から分かるように,適切な露点の測定が不可能になった HYT271 は書き込みは正しくできているが,レジスタのデータ保持時間が他の個体と比較して一桁短いこと が分かった。したがって,露点を得るためには RH の書き込みが終わった直後に読み出しを行う必 要がある。X 線照射試験では書き込みと読み込みの間の時間を 0.1sec としていたが,照射中に保 持時間が短くなり,正しい読み出しができなくなったと考えられる。X 線を照射してない個体の保 持時間は,各個体間でばらつきがあるものの,およそ1 秒程度である。

レジスタの読み込み間の時間を調整して室内で露点を測定し,露点の経年劣化の確認を行った。 その結果を図 3.37(右) に示す。図 3.37(左) には照射前の結果を示す。SHT85 については特に変化 は見られなかったが,照射源に近い HYT271 は照射をしていない個体と比べて,0.6 ℃ほど露点の 低下が見られた。露点は RH から温度情報を除いたパラメータで,温湿度センサに吸着した水分量 の情報を表す。したがって露点の低下は HYT271 に使用されるポリマーの構造が変化した可能性 を示唆している。露点 0.6 ℃の低下は読み出し試験における露点の測定に大きな影響を与えること はないが,照射を続けることでさらに露点が低下する可能性もあるため注視する必要がある。

今後,線量の見積もりを行った上で X 線を照射し,レジスタのデータ保持時間の劣化や露点の 低下の推移を確認することが今後の課題である。あらかじめ不具合が起きる時期を把握すること で,読み出し試験に影響を与えることなく,HYT271の交換を行うことができる。また,2年間に わたって安定して露点を管理するために,温度変化や湿度などによる経年劣化の調査も今後の課題 である。

図 3.34: X 線照射試験における SHT85 と HYT271 が示した温度, RH, 露点。白の領域である 60sec~1,860sec, 3,000sec~4,800sec の間に照射をした。照射源に近い HYT271 は徐々に露点が低 下し,また 3,832sec 以降,常に温度 125 ℃, RH100%を示した。SHT85 には特に変化は見られな かった。

図 3.35: X 線照射による HYT271 の変色。左から照射なしの個体,照射源から 41cm,照射源から 7.4cm に設置した個体。

図 3.36: HYT271 の読み出しにかかる最短時間とレジスタのデータの最長保持時間。それぞれ 10 回 測定を行い,その平均値を示す。誤差棒は最大値と最小値を表す。照射源の近くに設置した HYT271 のデータ保持時間が他と比べて一桁短い。

図 3.37: X 線照射前後の HYT271 の照射をしていない個体との露点差。線源から 7.4cm で照射した HYT271 の露点が 0.6 ℃ほど低下した。その他の個体と SHT85 には顕著な変化は見られなかった。

4 プロトタイプ機 RD53A モジュールの読み出し試験

4.1 読み出し試験の概要

第3章で述べた露点管理を行った上,プロトタイプ機である RD53A モジュール4台 (KEKQ15 ~ KEKQ18)の耐久試験後の読み出し試験を実施した。主な試験項目を図4.1 に示す。まず,30℃ と20℃で IV 測定,デジタルスキャン,アナログスキャン,スレショルドスキャンを行った。次 にレギュレータの試験をまず -35℃で実施した。ASIC が正しく動作しない場合は15℃ずつ温度 を上げて実施し,動作確認できるまで行った。その後,-15℃で先述の各スキャンに加え,最後に X 線スキャンを行った。4台の試験を実施し,その内2台 (KEKQ17,KEKQ18)は良好な結果であった。この章では、良好な結果であった KEKQ18のモジュールに関して,各温度での IV スキャンと,-15℃環境での試験結果について簡単にまとめる。

図 4.1: 読み出し試験項目

4.2 KEKQ18 IV スキャン

センサに HV を 0~-200V まで 5V ステップでかけて,各電圧での漏れ電流を測定した。30 ℃, 20 ℃,-15 ℃における測定結果を図 4.2 に示す。漏れ電流は空乏層において熱励起により発生す る電荷であり,温度が高いほど電流値が大きい。また,漏れ電流の値は HV の平方根に概ね比例し ていることが分かる。パリレンコーティング,サーマルサイクル試験,耐久試験の前後で大きな違 いは見られなかった。またブレークダウンも見られず,良好な結果である。

図 4.2: KEKQ18 の 30 ℃, 20 ℃, -15 ℃における IV スキャンの結果

4.3 KEKQ18 –15 ℃環境での各試験結果

・デジタルスキャンとアナログスキャン

デジタルスキャンでは ASIC のピクセルごとのデジタル回路に大きな試験電荷を 100 個入れて その応答を確認する。同様にアナログスキャンではアナログ回路に試験電荷を入れて応答を確認す る。クアッドモジュールには 1 枚のセンサに対して 4 枚の ASIC が付いているが,ここでは 1 枚の ASIC の各ピクセルの応答数 (Occupancy Map) を図 4.3 に示す。RD53A モジュールのため実機の 半分である 400×192 pixels の読み出しとなる。デジタルスキャンでは全てのピクセルで 100 個の 試験電荷に対して 100 個の応答があることを確認できた。またアナログスキャンでもほとんどのピ クセルで 100 個の応答があることを確認できた。

図 4.3: KEKQ18 の (左) デジタルスキャン,(右) アナログスキャンの Occupancy Map

・スレショルドスキャン

スレショルドスキャンでは ASIC の各ピクセルのしきい値に相当する電荷量を測定する。まず, 少しずつ入射する電荷量を変えながら電荷を入射し,全ピクセルの応答率を表す曲線を得る。この 曲線に対して入射した電荷量 *Q_{in}* を含む式 (4.1) でフィットを行い,しきい値 *Q_{th}* とノイズ σ を求 める。しきい値 2,000 e に調整した後のスレショルドスキャンの結果を図 4.4 に示す。左図は各ピ クセルのしきい値,右図はその分布を表しており,しきい値が 2,000e に調整されていることが分 かる。また,ノイズ分布を図 4.5 に示す。参考として 20 ℃,30 ℃での結果も示しているが,温度 が上がるにつれてノイズ量も増える。

$$P(Q_{in}) = \frac{1}{2} Erf(\frac{Q_{in} - Q_{th}}{\sqrt{2}\sigma}), Erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{x}^{\infty} \exp(-t^{2}) dt$$
(4.1)

・X 線スキャン

モジュールに X 線を照射し、ピクセルごとのヒット数を確認した。結果を図 4.6 に示す。要求さ れるヒット数である 50 Hits を最大値として示している。ほとんどの領域で 50 Hits の確認ができ たが、キャパシタンスなどの表面実装がある部分ではヒット数の低下が見られた。また、モジュー ルの真上に設置された温湿度センサの下の領域もヒット数が少ないことが分かっている [36]。

4.4 不具合が見られたモジュール

RD53A モジュール 4 台の試験を実施し,その内 2 台に問題が見られた。KEKQ15 は chip4 の 一部領域でノイジーなピクセルがあり,他の領域においても正常な応答数が見られなかった。その ためノイジーなピクセルがある領域のみをマスクして試験を行う必要があった [37]。KEKQ16 は chip3 において ASIC とセンサ間のバンプ剥がれが見られた。chip3 の X 線スキャンの結果を図 4.7

図 4.4: KEKQ18 のしきい値 2,000e に調整後のスレショルドの (左) マップと (右) 分布

図 4.5: KEKQ18 の 30 ℃, 20 ℃, −15 ℃におけるノイズ分布。ガウシアンでフィットを行ってい る。

に示す。図の左上にほとんどのピクセルでヒットを残してない領域が確認でき,バンプ剥がれにより読み出しができないことを示している。このバンプ剥がれはモジュール製作直後から見られており,サーマルサイクル試験や耐久試験によって生じたものではない。

4.5 浮遊容量によるスレショルド調整への影響

RD53AのFEは8×8 pixelsのコアで構成されており,コア単位で読み出しを行う[17]。400×192 pixelsで構成される RD53A は全部で1,200 個のコアを持つが,Differential FE ではコア内の各ピ クセルでアナログ波形をデジタル波形に変換するコンパレータとデジタル回路の間にキャパシタン スがあるという不具合が報告されている[38]。コア内の各ピクセルにおけるキャパシタンスの値を 図 4.8(左)に示す。このことを考慮して,キャパシタンスの影響がほとんどない良好なピクセルが 図 4.8(右)のように定義されている。このキャパシタンスによるスレショルド調整への影響を確認 した。

スレショルドの調整は大きく2つ手順で行われる [39]。まず,全ピクセルの設定を一括に行 う VTH1_DIFF と VTH2_DIFF と呼ばれる2つのレジスタの調整を行う [40]。VTH1_DIFF と VTH2_DIFF はそれぞれ10bit の値を持ち,VTH1_DIFF が大きいほどスレショルドは高く調整さ れる。各ピクセルに試験電荷を100 個入れながらレジスタの値を変更し,各ピクセルの応答数の 平均が50 になるようにレジスタの調整を行う。次にピクセルごとのレジスタ (TDAC)を調整し, 各ピクセルのスレショルド微調整する。TDAC は5bit で, -15~+15の値をとる。正のときはス

図 4.6: KEKQ18 chip1 の X 線スキャンの結果

図 4.7: KEKQ16 の chip3 の X 線スキャンの結果。左上にバンプ剥がれが見られる。

レショルドを上げ,負のときは下げるように調整する。絶対値はその調整幅を表し,15のときに 最大の調整となる。特にTDAC=±15となるピクセルはうまく調整をできなかったピクセルが多 い。図 4.4 で示したスレショルドスキャンの結果をTDAC=-15または+15またはそれ以外で分類 した結果を図 4.9 に示す。TDAC=-15の一部のピクセルが目標のスレショルドよりも大きいとこ ろに分布していることが分かる。これはTDACでの調整でスレショルドが充分に下がってないか らである。反対にTDAC=+15のときはスレショルドが充分に上がってない。また,Differential FE 領域における TDAC のマップを図 4.10(左)に示す。特にTDAC=±15となったピクセルを図 4.10(右)に示す。コア単位でパターンがあり、特に、コラム上に17列のコアが見られる。

次にコア単位で TDAC=±15 となるピクセルを確認した。Differential FE の全 408 個のコアのう ち,各コアの座標 (0,0)~(7,7) ごとに TDAC=+15 または -15 となったピクセル数を図 4.11(左), (右) に示す。例として (0,0) の座標には 408 個のピクセルの内 TDAC=+15 となったピクセルが 16 個,TDAC=-15 となったピクセルが 1 個であることを示している。また、シミュレーションによ るキャパシタンスの値と TDAC=±15 となるピクセル数の関係を図 4.12 に示す。図から浮遊容量が 大きいピクセルは TDAC=-15 となるピクセルが多く、浮遊容量が小さいピクセルは TDAC=+15 となるピクセルが多いことが分かる。これは、浮遊容量が大きいピクセルは波形がなまり、応答率 が悪くなるため、スレショルドをより下げる方向に TDAC を調整する必要があるからである。ま た、全ピクセルを一括に調整するレジスタは、浮遊容量があるピクセルの影響により、スレショル ドが低くなるように調整されていると考えられる。よって、浮遊容量の影響がないピクセルはスレ

図 4.8: (左)Differential FE におけるコア内の各ピクセルのシミュレーションによる浮遊容量値 [38]。 (右) 浮遊容量による影響が少ない良好なピクセル [40]。参考文献の値をもとに筆者が作成した。

図 4.9: TDAC=+15 または -15 またはその他ごとのスレショルドの分布

ショルドを上げるように TDAC の調整が必要となり, TDAC=15 となるピクセルが多く見られていると考えられる。なお,この浮遊容量の問題は RD53B では改善される。

図 4.10: Differential FE 領域における TDAC のマップ(左)と TDAC=±15 のマップ(右)

図 4.11: Differential FE 領域においてコア単位で見た (左)TDAC=+15, (右)-15 となるピクセル 数

図 4.12: シミュレーションによる浮遊容量の値とコア単位で見た TDAC=+15, -15 となるピクセル数の関係

5 まとめ

LHCは2028年頃から瞬間ルミノシティを増強してHL-LHCとして稼働する。高輝度化に向け て、ATLAS実験では現行の内部飛跡検出器をInner Tracker(ITk)に総入れ替えする。そこで日本 グループはITkを構成する新型ピクセルモジュール2,200台の量産をする。量産に当たり、全ての モジュールに対して品質管理試験を行う。試験項目の一つである読み出し試験は、実際に通電して モジュールの動作確認を行う試験であり、実働時を考慮してモジュールを最低 –35℃などの低温 にして行う試験も含まれる。したがって、試験環境下の露点を充分に下げ、結露からモジュールを 防ぐことが重要である。そこで、読み出し試験における露点管理を行った。

まず露点を充分に下げるために,使用する乾燥空気の露点が –60 ℃以下であることを測定し,試 験環境下に流入した。また,露点の測定には温湿度センサ SHT85 を使用した。このセンサは個体 差が小さく,露点 –20 ℃以上を精度よく測定できることがわかった。しかし,常温において低露 点を測定した場合,実際の露点よりも低い値を示した。そこで,露点較正関数を算出し,読み出し 試験系に実装した。これらの露点管理を行い,実際にプロトタイプ機である RD53A モジュール 4 台の読み出し試験を行った。露点の観点から大きな問題なく試験を終えることができ,露点管理シ ステムを万全に整備することができた。

今後の量産時の読み出し試験に向け,より精度よく低露点を測定するために温湿度センサ HYT271 の性能評価を行い,常温において露点 –55 ℃付近まで精度よく測定できることを確認した。また, 読み出し試験では X 線スキャンを実施することを考慮し,温湿度センサに対する X 線の影響を確 かめた。SHT85 には X 線照射による影響は見られなかったが,HYT271 はレジスタのデータ保持 時間が短くなることや露点がやや低下することを確認した。

6 考察と今後の展望

日本 ITk グループは 2023 年から新型ピクセルモジュール 2,200 台の量産を開始する予定である。 量産時には品質管理試験を約2年間にわたって実施するため,露点管理も長期的に行うことが求め られる。そのため,温度や湿度,X線による温湿度センサの経年劣化を詳細に調べることは重要で ある。特に今後使用する HYT271 はX線の照射によって露点の低下やレジスタの不具合が見られ た。そこで再現性の確認や不具合を詳細に理解するために,試験個体を増やして再びX線照射試 験を実施する予定である。試験結果に基づきあらかじめ許容線量を設定することで,実際の試験 においてそれを超えた場合,不具合が起こる前に HYT271 の交換を行うことが可能である。また クーリングボックスにおいて, HYT271 は低温環境で使用されることから,測定露点の温度依存性 の調査も今後の課題の一つである。

また,これまで RD53A モジュール数台の読み出し試験は KEK 内で行ってきたが,量産時の試 験では別の環境で行われる予定である。したがって,その環境で乾燥ガスの配管系を整備すると共 に,露点の測定を行い,要求値を満たしていることを確認することが重要である。満たさない場 合,モレキュラーシーブを用いた露点管理も視野に入れている。

これらの長期的な露点管理を万全に整備した上で、モジュールの品質管理試験を滞りなく実施 し、ITk を予定通りインストールすることが重要である。そして HL-LHC の稼働により、ヒッグ ス粒子とフェルミオンの結合定数の精密測定や超対称性粒子の発見など素粒子物理学の発展を期待 している。

謝辞

この研究は多くの方の数えきれないサポートがあって進めることができました。お世話になりま した全ての方に感謝致します。ありがとうございました。

まず,研究の場を用意していただきました寄田浩平教授に多大なる感謝を申し上げます。物事に 対する取り組み方や,他者への伝え方など研究に関する多くのことを学びました。また寄田先生の 言葉は人としてどのように生きるべきかを深く考えるきっかけにもなりました。3年間の研究室で の経験は今後の人生の礎になると信じています。また,田中雅士准教授にも研究に関して多くのア ドバイスをいただきました。実験をうまく進めることができましたのもひとえにまささんのおかげ です。駒宮幸男上級研究員には特に B4 のときの理論ゼミでお世話になりました。たまに学食でお 会いし,研究の相談に乗っていただいたのも良い思い出です。また,蛯名幸二招聘研究員にはシス テム係の作業で何度も助けていただきました。秘書の坂本敦子さんには出張手続き等で大変お世話 になりました。

また、研究室の多くの先輩方にも感謝を申し上げます。助手の加地俊瑛さんには研究室ミーティ ングや発表会で多くのコメントをいただきました。愛媛県の話もよくしました。また、博士課程 の青山一天さんには実験のことやシステム係のことなどざっくばらんに相談をさせていただきま した。他愛のない話も楽しかったです。同じく博士課程の伊藤紘貴さんにもお世話になりました。 KEK の加速器の上を自転車で一周したのは良い思い出になりました。また、三谷貴志さんには本 論文の推敲を何度もしていただきました。ありがとうございました。研究室の後輩である M1 生 や B4 生の方々にも感謝をしています。特に中曽根太地くんにはシステム係として大変お世話にな りました。システム関連は分からないことが多い中、OS の入れ直しなど色々な場面で助けてもら いました。そして、研究室での苦楽を共にしました同期にも感謝を申し上げます。秋山大也くんと は実験のセットアップを一緒に組み、実験について多くの議論を交わしました。何度か徹夜をして データを取得したことは忘れることはないでしょう。また、山際美由希さんとは学食で研究室の話 をよくしました。

日本 ITk グループの様々な方にもお世話になりました。特に東京工業大学の生出秀行さん,大阪大学の廣瀬穣さん,南條創さんにはミーティングにおいて貴重な助言をいただきました。また,KEK の出張の際は池上陽一さん,中村浩二さん,外川学さんに現場での作業をサポートしていただきました。コロナ禍で人との接触がはばかられる中,QCの現場に行き多くの方と直接話ができたことは良い経験になりました。

そして,お食事処「鳥はる」の店主である花田実様にも感謝を申し上げます。いつも美味しい定 食を作っていただきました。

最後になりますが,精神面,金銭面でいつも支えていただいた家族に感謝を述べたいと思いま す。ありがとうございました。

A サーマルサイクル試験における

モレキュラーシーブを用いた露点管理

モジュールを組み立てた直後にサーマルサイクル試験を実施する。実働時の熱サイクルを考慮し, 恒温槽の中にモジュールを入れて -45 ℃~40 ℃のサイクルを 10 回, -55 ℃~60 ℃のサイクルを 1 回行う。結露を防ぐために -45 ℃~40 ℃のサイクルでは露点をモジュール温度より 10 ℃低く保 つこと, -55 ℃~60 ℃のサイクルでは露点を -60 ℃以下に保つことが要求されている [18]。そこ でサーマルサイクル試験の際は,読み出し試験でも使用する露点 -60 ℃の乾燥空気を恒温槽内に 流入して露点を充分に下げる。このような露点管理を行い,これまで実際に RD53A モジュールの サーマルサイクル試験を実施してきた。

使用している乾燥空気は露点の要求値を満たしているが,夏季などの湿度が高い日に乾燥空気の 露点が上がる可能性がある。そこで,露点 –60 ℃以下の乾燥空気を安定して利用するために乾燥剤 であるモレキュラーシーブを用いたフィルターを作製し,サーマルサイクルの試験系に実装した。

モレキュラーシーブ (Molecular Sieve; MS) は結晶性アルミノケイ酸塩の一種で,その多孔質性 により様々な分子を吸着することができ,主に乾燥剤として使用される。その乾燥能力はシリカゲ ルや活性アルミナよりも高く,露点 –80 ℃まで乾燥させることが可能である [41]。また,200 ℃以 上に加熱し,脱水作業を行うことで繰り返し使えるという特徴を持つ。

図 A.1 のようにステンレス容器に MS を詰めて MS フィルターの作製を行った。MS はユニオン 昭和社の 4A XH-5(8×12) を約 1.5L 使用した [42]。配管系には MS フィルターを迂回するバイパ スも設けた。そしてフィルター作製後, MS の吸水性を高めるためにリボンヒータ等を用いてフィ ルターを 400 ℃以上まで熱し脱水作業を行い,約 57g の水を収集した。

図 A.1: (左) ステンレス容器に詰めたモレキュラーシーブ。(右) モレキュラーシーブフィルター。 MS フィルター導入後のサーマルサイクル試験の乾燥空気系とその概略図をそれぞれ図 A.2, 図 A.3 に示す。MS フィルターを使用しないときは,乾燥空気発生装置からの空気はバイパスを通り, 恒温槽内へそのまま流入する。一方で,MS フィルターを使用するときは,MS の吸水性を劣化さ せないために,まずフィルターに入る乾燥空気の露点がある程度下がっていることを露点計で確認 した後,バルブの開閉を行う。実際に KEK で MS フィルターを使用したときの露点の測定結果を 図 A.4 に示す。露点の測定には TED-2 を使用した。MS フィルターにより露点が –78 ℃まで下が ることを確認できた。なお,測定に用いた露点計 TED-2 の精度保証範囲は露点 –60 ℃以上である ことに注意されたい。

図 A.2: MS フィルターを導入したサーマルサイクル試験の乾燥空気系。MS フィルターまたはバ イパスを通過した乾燥空気は TED-2 で露点の測定をした後,恒温槽に流入する。

図 A.3: MS フィルターを導入したサーマルサイクル試験の乾燥空気系の概略図

図 A.4: サーマルサイクル試験時に MS フィルターを使用して測定した露点。2/9 13:00 に MS フィ ルターからバイパスへ切り替えた。

参考文献

- [1] 東京大学素粒子物理国際研究センター, ATLAS EXPERIMENT, http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/research/atlas.html
- [2] High Luminosity LHC Project, The HL-LHC project, https://hilumilhc.web.cern.ch/ sites/default/files/inline-images/HL-LHC-plan-2020-Plan-2.pdf
- [3] The ATLAS Collaboration et al, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, 2008, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08003/pdf
- [4] C Kourkoumelis and S Vourakis, HYPATIA—an online tool for ATLAS event visualization, 2014, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/49/1/21/pdf
- [5] High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC), 2017, https://cds.cern.ch/record/2284929/files/40-39-PB.pdf
- [6] Iva Raynova, Crab cavities: colliding protons head-on, 2017, https://home.cern/news/ news/accelerators/crab-cavities-colliding-protons-head
- [7] 三野裕哉,高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた TGC 検出器によるミューオントリガーアル ゴリズムの研究, ICEPP シンポジウム, 2020, https://indico.cern.ch/event/872673/ contributions/3680272/attachments/1988295/3313926/mino_ICEPP.pdf
- [8] The ATLAS Collaboration, ATLAS Inner Tracker Pixel Detector Technical Design Report Technical Design Report, 2018, https://cds.cern.ch/record/2285585/files/ ATLAS-TDR-030.pdf
- [9] Science and Technology Facilities Council, ATLAS Inner Tracker Upgrade (ITk), https://www.ppd.stfc.ac.uk/Pages/ATLAS-SLHC-Upgrade.aspx
- [10] 高エネルギー粒子衝突型加速器とその衝突点に置かれる検出器,2020, https://indico.cern.ch/event/917221/contributions/3858981/attachments/ 2035579/3408094/SemiconductorTracker.pdf
- [11] ATLAS IBL Community, Insertable B-Layer Technical Design Report, 2010, http://cds.cern.ch/record/1291633/files/ATLAS-TDR-019.pdf
- [12] RD Collaboration Proposal : Extension of RD53, 2018, https://cds.cern.ch/record/2637453/files/LHCC-SR-008.pdf
- [13] Flavio Loddo, RD53 pixel chip developments for the ATLAS and CMS High Luminosity LHC, 2021, https://indico.cern.ch/event/1007887/contributions/4229673/ attachments/2188205/3703957/Trento2021_Loddo.pdf
- [14] FE-I4 Collaboration, The FE-I4B Integrated Circuit Guide, 2012, https://indico.cern.ch/event/261840/contributions/1594374/attachments/ 462649/641213/FE-I4B_V2.3.pdf
- [15] RD53 status and plans., 2018, https://indico.cern.ch/event/726320/contributions/ 3005309/attachments/1658484/2656006/LHCC_status_report_2018_open.pdf

- [16] RD53 Status ans Plans, 2019, https://indico.cern.ch/event/835603/contributions/ 3502836/attachments/1905560/3147006/LHCC_status_report_2019_open-v3.pdf
- [17] Maurice Garcia-Sciveres, The RD53A Integrated Circuit, 2017, https://cds.cern.ch/record/2287593/files/RD53A_Manual_V3-51.pdf
- [18] Lingxin Meng, RD53A Module Testing Document, 2019, https://cds.cern.ch/record/2702738/files/ATL-COM-ITK-2019-045.pdf
- [19] Michell Japan,相対温度・絶対温度とは?空気&湿度の基礎と換算式を解説,2021, https://www.michell-japan.co.jp/blog/blog4_calculate_humidity/
- [20] Sensirion, Datasheet SHT1x, https://sensirion.com/media/documents/BD45ECB5/ 61642783/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT1x_Datasheet.pdf
- [21] A.Rozanov, Pixel/IBL status and plans, 2013, https://indico.cern.ch/event/275609/ contributions/1618504/attachments/499388/689862/rozanov_ibl.pdf
- [22] 池亀遥南, HL-LHC ATLAS ピクセル検出器の量産時試験で用いる環境制御筐体の開発と性能評価,東京工業大学修士論文,2021, https://cernbox.cern.ch/index.php/s/ nFhPAmoNaESyS6y
- [23] 秋月電子通商, BME280使用 温湿度・気圧センサモジュールキット, https://akizukidenshi. com/download/ds/akizuki/AE-BME280_manu_v1.1.pdf
- [24] 秋月電子通商, 温湿度センサ モジュール AM2322, https://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-10880/
- [25] Digilent, PmodHYGRO, https://digilent.com/reference/pmod/pmodhygro/start? redirect=1
- [26] Sensirion, SHT85, https://sensirion.com/jp/products/product-catalog/SHT85/
- [27] Sensirion, Datasheet SHT85, https://sensirion.com/media/documents/4B40CEF3/ 61642381/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT85_Datasheet.pdf
- [28] テレマックス, オンライン露点計 TR-TA, http://www.tele-max.co.jp/gyomu/cat1/trta. php
- [29] Grafana Labs, https://grafana.com/
- [30] Ankush Mitra, Humidity Sensor Review, 2020, https://indico.cern.ch/event/927528/contributions/4100714/attachments/ 2144599/3615801/HumiditySensorReview_17Nov20.pdf
- [31] Innovative SensorTechnology, PRODUCTS&SERVICES(HUMIDITY), https://www.ist-ag.com/en/products-services/humidity-modules-sensors
- [32] Innovative SensorTechnology, Application Note Humidity Modules HYT, https://www.ist-ag.com/sites/default/files/ahhytm_e.pdf
- [33] H. Oide, 2nd-stage Testing Qualification @KEK, 2021, https://indico.cern.ch/event/1006217/contributions/4224232/attachments/ 2187037/3695518/20210209_2ndQCQual_Japan.pdf

- [34] AMPTEK, Mini-X2 X-Ray Tube, https://www.amptek.com/products/mini-x2-x-ray-tube
- [35] トーレック株式会社,インバータ式 X 線発生装置 TRIX-150LE/SE, 2019, https://toreck.co.jp/industrial/TRIX-150LESE_catalog.pdf
- [36] Kazushi Iwata, Evaluation of bump bond quality in QC test of ITk pixel detector, AJ Silicon WS, 2021, https://kds.kek.jp/event/39990/contributions/202207/ attachments/150378/188654/iwata_AJWS_1215.pdf
- [37] Shiwen An, Thin & Thick RD53A Quad Module Testing, 2021, https://indico.cern.ch/event/1080840/contributions/4546312/attachments/ 2318418/3947238/ITk_Module_Testing_Meeting.pdf
- [38] M.Standke, UPDATE ON DIFFERENTIAL FRONT END MEASUREMENTS, https://indico.cern.ch/event/718706/contributions/2953808/attachments/ 1626299/2591589/2018_03_27-RD53_testing.pdf
- [39] 山家谷昌平,高輝度 LHC ATLAS シリコンピクセル検出器用読み出し ASIC の閾値調整機構の性能評価,大阪大学修士論文,2020, http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/theses/ master/2019/MasterThesis2019_Yamagaya.pdf
- [40] M. Standke, Guide to the RD53A Differential Front End, 2018, https://twiki.cern.ch/twiki/pub/RD53/RD53ATesting/Diff_userguide.pdf
- [41] ユニオン昭和 Q&A, http://www.uskk.co.jp/faq_item/faq_1002/
- [42] ユニオン昭和 製品情報, http://www.uskk.co.jp/products/molecularsieve/shape/

学籍番号: 5320 A038-3

研究活動の不正行為定義確認書

2022年 1月 17日

早稻田大学大学院先進理工学研究科長 殿

早稲田大学大学院先進理工学研究科

物理学及应用物理学 專攻 二年

本人氏名 鈴木隆仁

(自署)

私は、裏面に記載のある研究活動の不正行為に関する定義を理解し、修士論文提出にお いて、不正行為または不正行為と疑われる行為を一切行っていないことを誓約します。 なお、当該行為を行なうと、厳重な処分(無期停学・当該学期成績無効・修士論文不合 格等)を受けること、学位取得後であっても学位取消となることを十分に認識した上で、 論文を執筆しました。

	研究倫理教育受講確認書	
	2.022年 1月 本人氏名 旅 木 隆 仁	17日
私は、修士	▲文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。 GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講	
以は、修士	 ▲文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。 GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講 専攻設置科目の受講 科目名()

※受講証明を添付すること。

研究活動の不正行為(捏造、改ざん、盗用、剽窃)について

修士論文を作成するに当たっては、以下の点に十分留意してください。

◆既存の文書・資料や自ら取得したデータ等に関し、「捏造・改ざん」は絶対に行ってはいけません。 これらの行為は、社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

※捏造:事実でないことを事実のように仕立て上げること。でっちあげること。

- ※改ざん:文書やデータ等の全部あるいは一部を、故意に本来のものでない内容・形式・時期等に変更 すること。悪意の有無は問わない。
- ◆学問の体系に新たな知見を加えるとき、その信頼性は命です。学術研究でも、そのための対応が求められます。そこでは上記に加え、資料・データ等の適切な利用と管理、情報取得に当たってのインフォームドコンセントの適用、取得した個人情報の保護等に配慮しなければなりません。

他人の著作物(書籍や論文などに加え、講演での発言やインターネットに掲載された文章・図表・デ ータ等も含む)を活用する場合には、「盗用・剽窃」に十分配慮してください。

盗用・剽窃は、著作権法で禁止された行為です。社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくて はならないルールです。

※盗用・剽窃:引用元を適切に記載せずに、他人の文章、結果、意見、アイデア、理論、学説などを自 分のものとして発表すること。

◆学問の発展は独創性・独自性が基盤です。初めにそれを公表した人のオリジナリティを尊重し、敬意を払うことは学問の府に身を置く者の当然の責務です。学術論文においても、自分の考えと他人の意見を明確に区別し、表現しなければなりません。

このためには、適切な「引用」が重要です。学術論文では、他人の意見・アイデア・理論などを参照・ 参考にした箇所ごとに番号を付け、巻末や脚注で、その出所を明らかにすることが一般的です。学会 等によって、その記載順序が若干異なりますが、以下を標準にします。

・論文・総説:著者、題名、掲載誌名、巻号、ページ、発表年(月)等

・国際会議・シンポジウム・ロ頭発表:著者、題目、シンポジウム等の名称、場所、年月、巻号、 ページ、出版元、出版年等

・著書:題目、著者、ページ、出版元、出版年等

インターネットのからの引用では、以下の通りとします。

・著者、タイトル、URL、検索日

◆プレゼンテーション用のパワーポイントでは、上記の引用方法を簡略化して用いることを認めます。 簡略化の原則は確認・参照の容易性です。例えば、論文からの引用では、著者、掲載誌名、発表年月 のみの記載を認めます。著書や論文、インターネットなどの文章をそのまま記載する場合は、「」を付 け、その文章を誰が公表しているかを明示するのが一般的です。