

京都教育大学
平成 29 年度 修士論文

HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた
新型 Pixel 検出器の組み立てに関する研究

2018 年 3 月 10 日

理科教育専修
基礎物理学研究室 修士 2 年

家田 晋輔

指導教員
高嶋 隆一
谷口 和成

概要

ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS) 検出器は、欧州原子核研究機構 (CERN) の保持する大型ハドロン衝突型加速器 LHC(Large Hadron Collider) に設置されている汎用検出器である。ATLAS 実験ではこの検出器を用いて新たな物理事象の探索を行い、新粒子や余剰次元の存在を明らかにすることを目的としている。

LHC は 2023 年 3 年間の Long shutdown 期間を経て、2026 年頃に HL(High Luminosity)-LHC にアップグレードされ、重心系エネルギーやルミノシティの大幅な向上が予定されている。LHC のアップグレードに伴い、ATLAS 内部の検出器もより位置分解能や放射線耐性の高いセンサーへの入れ替えが計画されている。

ATLAS の最内層に位置する内部飛跡検出器であるピクセル型検出器のアップグレードに際し、現在 日本グループが量産を計画している新型ピクセルセンサーは 2500module 程度であり、低コストで精度、品質の良いセンサーを組み立てる工程の開発が必要とされている。

ATLAS-Japan シリコングループでは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) を中心に九州大学、京都教育大学が Assembly Group として林栄精器株式会社と協力し組み立て工程の開発、研究を行った。

本論文では Assembly Group で組み立て工程の開発の一環として家田が中心に行った、ピクセルセンサー組み立て用ジグ開発のためのダミーモジュールの製作と、組み立てに使用する熱伝導性接着剤の評価、およびモジュール保護のためのパリレンコーティングが放熱に与える影響についての研究内容を記述する。

目次

1	序論	10
1.1	LHC/ATLAS 実験	10
1.2	ATLAS 検出器	11
1.3	ピクセル型検出器	12
1.4	シリコンセンサの原理	14
1.4.1	半導体の構造	14
1.4.2	エネルギー準位とバンドギャップ	15
1.4.3	n 型, p 型半導体のエネルギー準位	16
1.4.4	pn 接合	17
1.5	シリコンピクセル検出器	19
1.6	ASIC	20
1.7	FE-I4 Quad module	21
2	Pixel Module 測定	23
2.1	ASIC size	24
2.2	Sensor size	29
2.3	測定結果に関して	30
3	Dummy Module 製作	31
3.1	製作 1	31
3.1.1	dummy0, dummy1 の設計	31
3.1.2	製作 1 : dummy1	32
3.1.3	dummy0, 1 拡大写真	33
3.1.4	dummy0 精度測定結果	34
3.1.5	dummy0 製作精度に関して	34
3.2	製作 2	35
3.2.1	dummy2 の設計	35
3.2.2	製作 2 : dummy1 精度測定結果	36
3.2.3	dummy1 製作精度に関して	36
3.2.4	dummy2 製作工程	37
3.2.5	dummy2 精度測定	38
3.2.6	ASIC-dummy, Sensor-dummy 精度測定結果	39
3.2.7	dummy2 切り欠き部分の比率測定	41
3.2.8	dummy2 精度測定結果	43

3.3	Dummy Module 製作に関する結論	44
4	Thermal Glue Conductivity Test	45
4.1	本章における研究背景	45
4.2	実験環境とサンプル形状の決定	46
4.2.1	実験環境のセットアップ	46
4.2.2	サンプル形状	47
4.2.3	測定時間の決定根拠	48
4.2.4	比較対象を行ったサンプル	49
4.2.5	温度差の理論値計算	50
4.3	本節における結論	52
4.3.1	最終的な測定環境と解析条件	52
4.3.2	熱伝導率測定結果	53
4.3.3	温度差測定結果	55
4.3.4	F 検定と T 検定による統計処理と結論	57
5	Thermal Glue Irradiation Test	59
5.1	研究背景	59
5.2	CYRIC 照射試験	60
5.2.1	照射試験詳細	60
5.2.2	照射ボックス	61
5.2.3	結果としての照射量	63
5.3	熱伝導性接着剤サンプル	64
5.4	Thermal Glue strength の照射前後比較	67
5.4.1	Strength Test	67
5.4.2	Peel Test:SE4445CV	69
5.4.3	Peel Test:JT-MZ-03M	70
5.4.4	Peel Test:EG7655	71
5.4.5	Peel Test:EG7658	72
5.5	Peel Test Sample	73
5.6	Shear Test	76
5.7	Thermal Conductivity の照射前後比較	77
5.8	本節における結論	80
6	本研究における結論	81
7	付録	82
7.0.1	回転補正・二点間距離導出プログラム	82

7.1	Thermal conductivity test 測定環境設定	84
7.1.1	測定時の熱電対位置と風よけの必要性	84
7.1.2	PC の電源	87
7.1.3	サンプルの圧着測定と熱伝導率	89
7.1.4	接着剤の厚みと熱伝導率	91
7.1.5	サンプルの厚みコントロール	95
7.1.6	照射前後の熱伝導率測定データ詳細	96
7.1.7	EG7655 低温環境での測定	98
8	謝辞	100

図目次

1	LHC	10
2	ATLAS 検出器	11
3	Inner detector	11
4	現在 ATLAS に使用されている Pixel module	12
5	新型ピクセルモジュールとクーリングブロック	13
6	不純物半導体の型と電子	14
7	エネルギーバンドの成り立ち	15
8	バンドギャップとフェルミエネルギー	15
9	n, p 型半導体のエネルギー準位	16
10	pn 接合	17
11	pn 接合による整流作用	17
12	pn 接合された半導体の電流-電圧特性	18
13	n-in-p 型ピクセルセンサー	19
14	FE-I3, FE-I4A	20
15	Quad module	21
16	Sensor Type	22
17	KEK101	23
18	FE-I4B 測定位置	24
19	測定位置 1, 2	25
20	測定位置 3, 4	26
21	測定位置 5, 6	27
22	測定位置 7, 8	28
23	Sensor size 測定位置	29
24	dummy module 製作 1	31
25	dummy1 ドリル通過位置	32
26	製作した dummy1	32
27	dummy0, 1 拡大写真	33
28	dummy2(TypeA) 製作図面	35
29	製作した dummy2	35
30	dummy2 製作工程	37
31	ASIC-dummy, Sensor-dummy 測定位置	38
32	dummy2 測定位置	41
33	林栄精器に製作を依頼したアルミダミー	44
34	Quad module エッジ部の保護	45

35	実験環境	46
36	Thermal conductivity sample	47
37	Voltage current	48
38	熱伝導サンプル詳細	49
39	照射試験の様子	60
40	照射ボックス	61
41	照射ボックス内部	62
42	Irradiation sample	64
43	熱伝導接着剤照射サンプル	65
44	照射後 Peel sample	66
45	照射後 Thermal Conductivity sample	66
46	応力試験に使用した IMADA MX2-2500N, ZTA-50N	67
47	Peel Test	68
48	Shear Test	68
49	SE4445CV 照射前	69
50	SE4445CV 照射後	69
51	JT-MZ-03M 照射前	70
52	JT-MZ-03M 照射後	70
53	EG7655 照射前	71
54	EG7655 照射後	71
55	EG7658 照射前	72
56	EG7658 照射後	72
57	ID-235	73
58	ID-241	73
59	ID-242	74
60	ID-243	74
61	ID-247	75
62	ID-248	75
63	照射後 Shear Test 後	76
64	照射前後の熱伝導率比較	79
65	測定環境	84
66	熱電対位置変更前	85
67	熱電対位置と風による測定値への影響	85
68	熱電対位置変更後	86
69	熱電対位置変更後測定	86
70	熱電対の測定値ブレ	87
71	測定結果	87

72	測定結果 (180s 以降 PC アダプター無し)	88
73	Thermal conductivity sample 厚み測定位置	89
74	鉛ブロック無し 熱伝導率測定	92
75	接着剤圧着後 熱伝導率測定	93
76	鉛ブロック有り 熱伝導率測定	94
77	サンプル製作	95
78	厚みコントロール方法	95
79	測定環境	98
80	測定結果	99

表目次

1	HL-LHC のアップグレード	10
2	Quad Sensor Type	22
3	FE-I4B 設計値	24
4	測定位置 1 : Pad1 - Pad134	25
5	測定位置 2 : Edge - Edge	25
6	測定位置 3 : Pad - Edge	26
7	測定位置 4 : ASIC Edge - Sensor Edge	26
8	測定位置 5 : Pad - ASIC Edge	27
9	測定位置 6 : ASIC Edge - Sensor Edge	27
10	測定位置 7 : Pad - Pad	28
11	測定位置 8 : ASIC Edge - ASIC Edge	28
12	Sensor size 測定結果	29
13	dummy0 サイズ測定結果	34
14	dummy0 設計値との比較結果	34
15	製作した dummy1 のサイズ測定結果	36
16	dummy1 設計値との比較結果	36
17	Sensor-dummy 測定結果	39
18	Sensor-dummy 設計値との比較結果	39
19	ASIC-dummy 測定結果	40
20	ASIC-dummy 設計値との比較結果	40
21	dummy2-ASIC 定規による測定結果	42
22	dummy2-Sensor 定規による測定結果	42
23	dummy2-Sensor 測定結果	43
24	dummy2-ASIC 測定結果	43
25	サンプルに使用した材料と熱伝導率	50
26	解析サンプル数	52
27	Normal sample Thermal conductivity (n=13)	53
28	Parylene sample Thermal conductivity (n=12)	54
29	Masked Parylene sample Thermal conductivity (n=9)	54
30	Normal Sample ΔT (n=13)	55
31	Parylene Sample ΔT (n=12)	56
32	Masked Parylene Sample ΔT (n=9)	56
33	測定平均値	57
34	F 検定の結果 (p 値)	57

35	T 検定の結果 (p 値)	57
36	温度差の理論値と測定平均値	58
37	比較を行った熱伝導接着剤	59
38	照射ボックス Switch の動作と反応	61
39	実照射量	63
40	照射サンプル数	64
41	照射範囲	65
42	Shear test 結果	76
43	SE4445CV 熱伝導率測定結果	77
44	JT-MZ-03M 熱伝導率測定結果	77
45	EG7655 熱伝導率測定結果	78
46	EG7658 熱伝導率測定結果	78
47	熱伝導接着剤の放射線耐性評価	80
48	鉛ブロック無し 厚み測定	89
49	鉛ブロック有り 厚み測定	89
50	鉛ブロック無し 熱伝導率測定	90
51	鉛ブロック有り 熱伝導率測定	90
52	鉛ブロック無し 接着剤の厚みと熱伝導率測定結果	92
53	圧着後 接着剤の厚みと熱伝導率測定結果	93
54	圧着後鉛ブロック有り 接着剤の厚みと熱伝導率測定結果	94
55	SE4445CV 照射前後の熱伝導率比較	96
56	JT-MZ-03M 照射前後の熱伝導率比較	96
57	EG7655 照射前後の熱伝導率比較	97
58	EG7658 照射前後の熱伝導率比較	97
59	測定結果詳細	99

1 序論

1.1 LHC/ATLAS 実験

LHC は CERN(欧州合同原子核研究機構) の保持する大型ハドロン衝突型加速器である。全周 27km のこの円形加速器は、スイス-フランスの国境をまたぎ地下 100m に設置されている。数か所のポイントに ATLAS, CMS, ALICE などの検出器が設置されており、それぞれの目的に応じて実験、解析が行われている。

LHC は 2023 年 3 年間の Long shutdown 期間を経て、2026 年頃に HL(High Luminosity)-LHC にアップグレードされ、重心系エネルギーやルミノシティが以下の表 1 のように向上する予定である。それに伴い、ATLAS 内部の検出器が受ける放射線損傷も増加することが予想されているため、より放射線耐性の強いセンサーの開発が求められる。

表 1: $1\text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ は単位面積当たりの放射線損傷を 1MeV の中性子数に変換した単位である。

	LHC(2023)	HL-LCH
重心系エネルギー	14 TeV	14 TeV
最大瞬間ルミノシティ	$2 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$5\sim 7 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
積分ルミノシティ	300fb^{-1}	3000fb^{-1}
バンチあたりの衝突事象	60	140
Layer3, 4 での放射線損傷 (10years)	$5 \times 10^{14}1\text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$	$1.7 \times 10^{15}1\text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

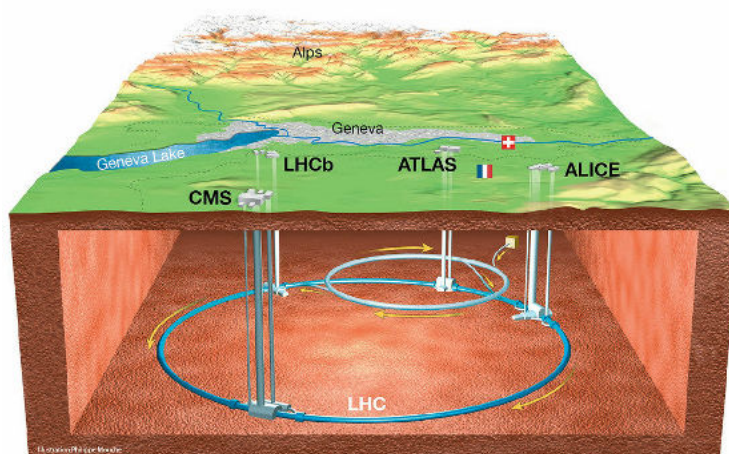


図 1: LHC

1.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は LHC の一か所に設置されている汎用検出器の一つであり、新物理の探索や新粒子、余剰次元の存在を明らかにすることを目的としている。全長 44m、高さ 22m からなる検出器で、内層から順にピクセル型検出器 (Pixel), シリコンストリップ型検出器 (SCT), ストロー型ガス検出器 (TRT) が設置されている。図 3 には描かれていないが、データ量の増加に伴い 2014 年にはピクセル型検出器のさらに内層に IBL(Insertable B-Layer) がインストールされた。HL-LHC へのアップグレードでは、内部検出器はシリコン検出器である Pixel と SCT のみとなり、TRT は撤去される予定である。

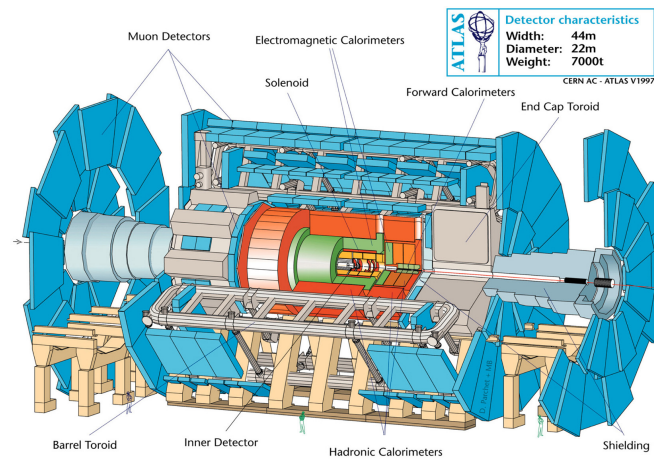


図 2: ATLAS 検出器

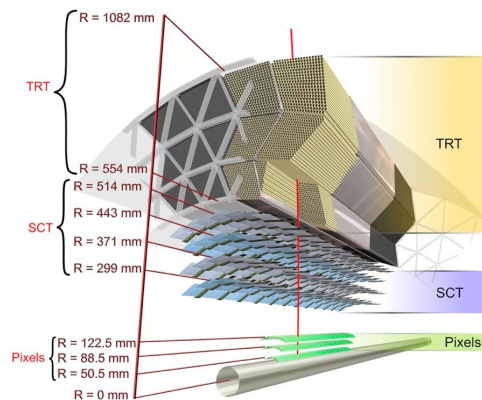


図 3: Inner detector

1.3 ピクセル型検出器

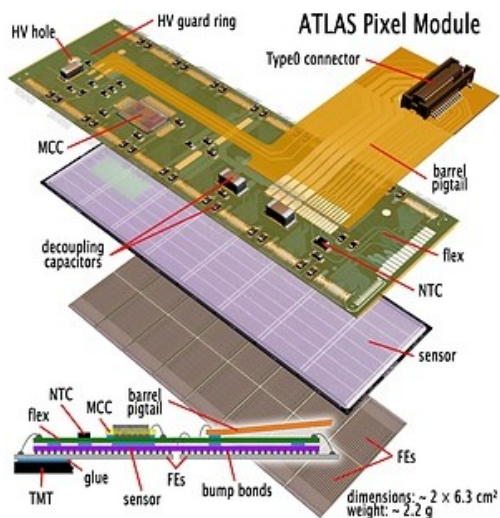
ピクセル型検出器とは ATLAS 検出器の最内層に位置するシリコン検出器であり, 名前の通りセンサー内にピクセル構造を持っている。センサーとフロントエンドチップ (FE-I3, I4) は, バンプボンディングと呼ばれる手法で電氣的に接続されており, これをベアモジュールと呼ぶ。

ベアモジュールのセンサー側にフレックス基板 (FPC) が固定される構造となっており, FPC-センサー間は接着剤で接着される。また ASIC-FPC 間は $25\mu\text{m}$ のワイヤーで接続される。

現在 ATLAS 検出器にインストールされている物は 1 ピクセルあたり $50 \times 400\mu\text{m}^2$, 長さ 60.8mm , 幅 16.4mm のピクセルセンサーと 16 枚の FE-I3 チップからベアモジュールが構成されている (図 4a)。

さらに内層にインストールされた IBL は, 1 ピクセルあたり $50 \times 250\mu\text{m}^2$, 1 モジュール当たり 2 枚の FE-I4 から構成されている。(図 4b)

FE-I3, FE-I4 については 1.6 章に記す。



(a) 現行 Pixel module

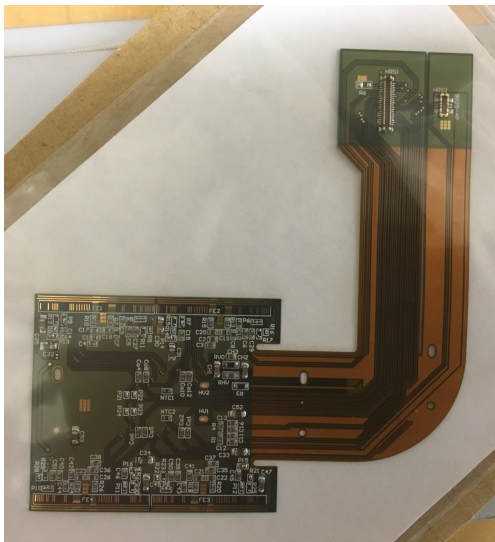


(b) 現行 IBL module

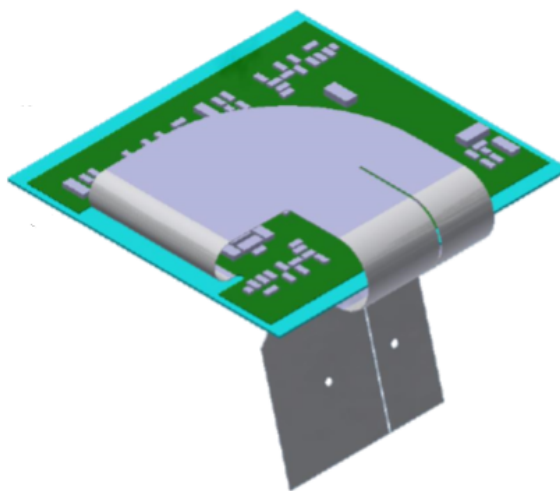
図 4: 現在 ATLAS に使用されている Pixel module

現在開発中の新型ピクセルセンサーは 1.7 章の Quad module と FPC から構成される。開発中の FPC は Pig-tail FPC(図 5a) と呼ばれており、インストールの際には図 5b のようにテール部分を折り曲げた状態となる。このときテール部分が ASIC-FPC 間のワイヤーと物理的に干渉することが懸念されているため、ポッティング等によるワイヤー保護が考えられている。

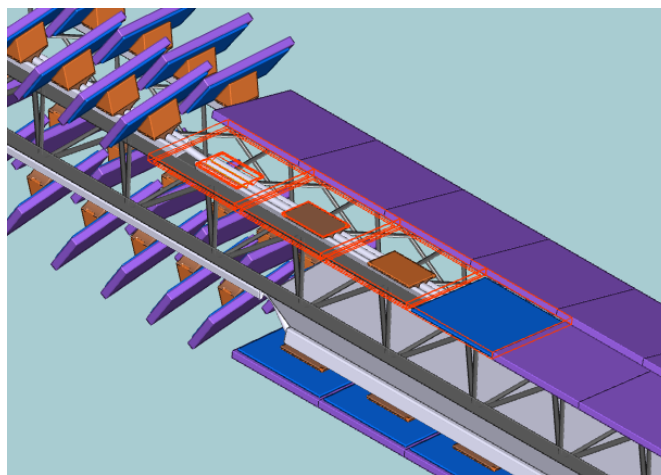
また検出器の稼働時には ASIC が発熱するため、テールの折り曲げられたモジュールは熱伝導性接着剤でクーリングブロックに固定される。



(a) Pig-tail FPC



(b) 新型ピクセルモジュールインストール時



(c) cooling block

図 5: 新型ピクセルモジュールとクーリングブロック

1.4 シリコンセンサの原理

1.4.1 半導体の構造

ATLAS 検出器内部のピクセル検出器とストリップ検出器は、シリコンを主な素材として作られた半導体検出器である。半導体とは、導電性と非導電性の中間の性質を示す物質のことであり、主に 4 族の元素から製造される。不純物を含まずに作られる真性半導体と、5 族の P(リン) などがドーピングされた n 型半導体、3 族の B(ホウ素) などがドーピングされた p 型半導体がある。n 型半導体、p 型半導体は不純物半導体と呼ばれる。

n 型半導体にドーピングされている 5 族元素は電子を供給するためドナーと呼ばれ、正に帯電する。これにより半導体内では電子が多い状態となるため、n 型半導体では電子がキャリアとなる。逆に p 型半導体にドーピングされている 3 族元素は正孔を形成するためアクセプタと呼ばれ、負に帯電する。半導体内では電子が不足している状態となるため、p 型半導体では正孔がキャリアとなる。

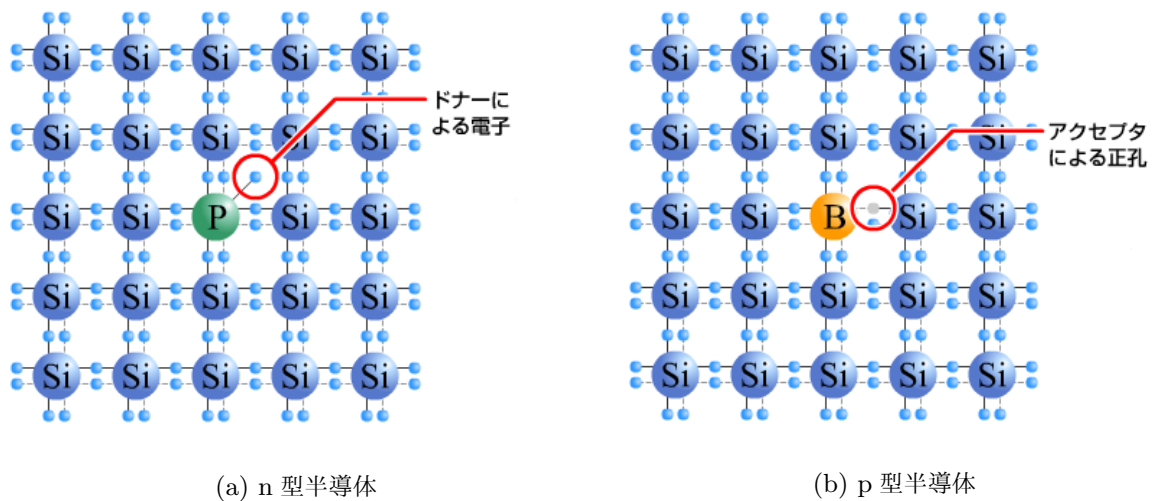


図 6: 不純物半導体の型と電子

1.4.2 エネルギー準位とバンドギャップ

物質のもととなる原子は、原子核と電子によって構成されている。電子が取ることのできるエネルギーの軌道をエネルギー準位と呼ぶ。分子では電子の波が干渉を起こしエネルギー準位は二つのレベルに分裂するが、分子の集合体である物質においてはエネルギー準位は帯状の幅を持つためエネルギーバンドと呼ばれる。このバンドはもともと電子のエネルギー準位で構成されているため電子が存在することが可能であるが、禁制帯と呼ばれるバンド外の部分においては電子は存在することができない。禁制帯はエネルギーギャップまたはバンドギャップとも呼ばれる。

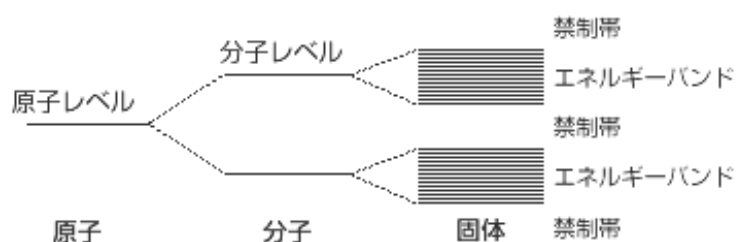


図 7: エネルギーバンドの成り立ち

電子はエネルギーレベルの低いバンドから詰まっていくが、この電子が絶対零度下で存在することができる最大のエネルギーをフェルミエネルギー (E_f) という。導体において、フェルミエネルギーはバンド内にあるため、電子は自由に動くことができる。

一方で半導体、絶縁体においては禁制帯のバンドギャップ (E_g) 中にフェルミエネルギーが存在するため、フェルミエネルギー以下のバンドは電子で満たされ、フェルミエネルギー以上のバンドは空となる。このときフェルミレベルより低いエネルギーを持つバンドは価電子帯、高いエネルギーにあるバンドは伝導帯という。

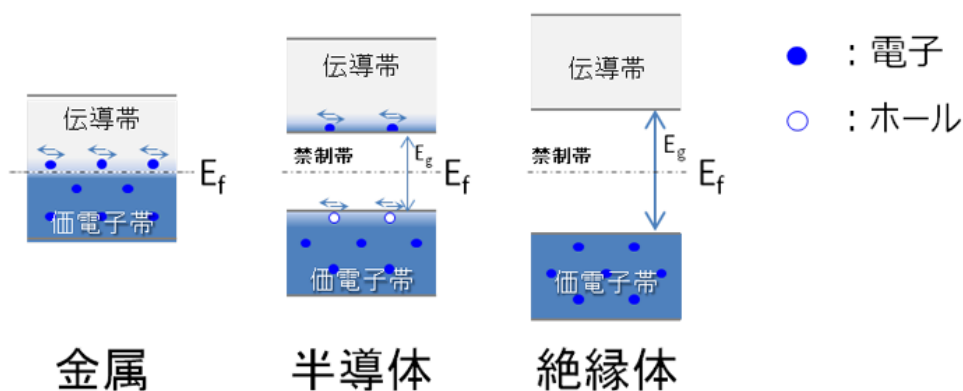


図 8: バンドギャップとフェルミエネルギー

1.4.3 n 型, p 型半導体のエネルギー準位

価電子にバンドギャップを超えるエネルギーが与えられ電子が価電子帯から伝導帯へ励起されると伝導体の電子は自由に動くことができるようになるため、電気伝導性を示すようになる。絶縁体においてはバンドギャップが価電子の運動エネルギーよりも大幅に大きく、価電子が伝導帯に励起されないため導電性を示さない。

1.4.1 章で述べたように、n 型半導体においてはドナーと呼ばれる不純物がドーピングされており、これは正に帯電している。ドナーのエネルギーレベルは伝導帯に近い位置、つまりエネルギーギャップの小さい位置 (E_d) にあるため、このエネルギーレベルにいる電子は容易に伝導帯まで励起され導電性を示すようになる。

p 型半導体においてはアクセプタと呼ばれる不純物がドーピングされており、これは負に帯電している。アクセプタのエネルギーレベルは価電子帯に近い位置にあり、価電子帯の電子がこのエネルギーレベルまで励起されることによって価電子帯に正孔が生じる。この正孔が電気伝導に寄与することで、導電性を示すようになる。

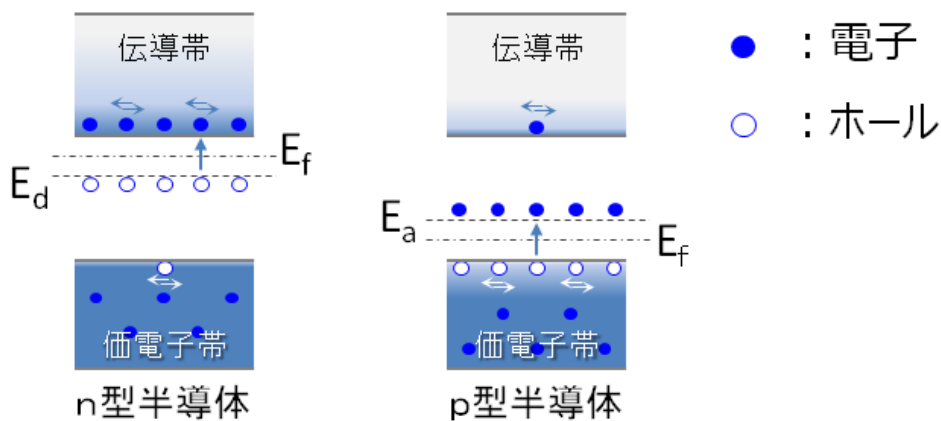


図 9: n, p 型半導体のエネルギー準位

1.4.4 pn 接合

先に述べたように、p 型半導体では正孔、n 型半導体では電子がキャリアとして多く存在する。p 型と n 型の半導体が接合すると、濃度の異なる電子及び正孔の拡散によって p 層の正孔は n 層へ、n 層の電子は p 層へ流れ込む。この結果電子とホールが再結合して消滅し、空乏層と呼ばれるキャリアが存在しない領域が生じる。空乏層が形成されるとそれ以上キャリアは動けず、最終的な平衡状態として両半導体のフェルミレベルは一致する。

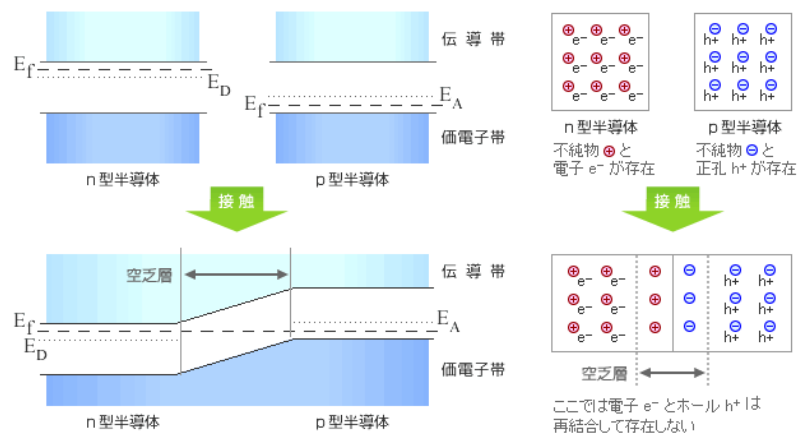
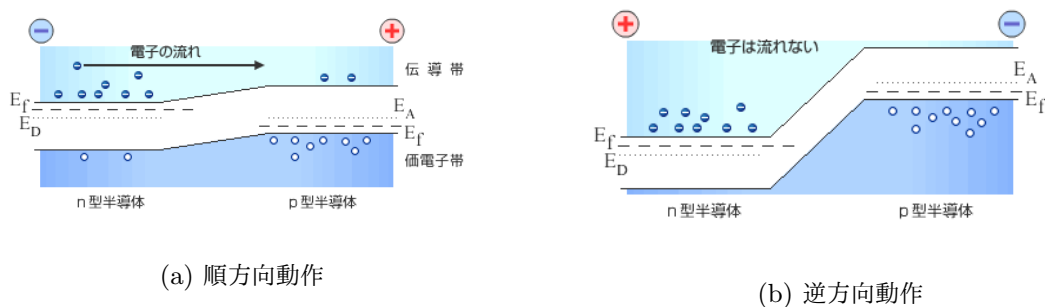


図 10: pn 接合

p 型の外部端子に正、n 型の外部端子に負の電圧を印加した場合を考える。順方向の電圧により接合面の拡散電位差が低くなり、空乏層が狭くなることで電流が流れる。このように電流が流れやすい電圧印加方向を順バイアスと呼ぶ。逆に p 型の外部端子に負、n 型の外部端子に正の電圧を印加した場合を考える。このとき逆方向の電圧によって空乏層が広がり、電流が流れにくくなる。このように電流の流れにくい方向を逆バイアスと呼ぶ。これがダイオードの原理であり、整流作用と呼ばれる。



(a) 順方向動作

(b) 逆方向動作

図 11: pn 接合による整流作用

pn 接合された半導体の電流-電圧特性を測定すると以下のようなになる。

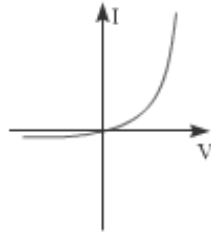


図 12: pn 接合された半導体の電流-電圧特性

この pn 接合ダイオードの特性曲線は

$$I = J_0(e^{qV/kT} - 1)$$

の式で表すことができる。この式において I は電流, V は電圧, J_0 は定数である。また q は電荷, k はボルツマン定数, T は絶対温度である。

このグラフからも電圧 V が正の時に電流が流れ, 負の時にはほぼ電流が流れないというダイオードの整流作用が確認できる。

1.5 シリコンピクセル検出器

現行の ATLAS 検出器に使用されているピクセルセンサーは n^+ -in-p 型ピクセルセンサーである。このセンサーは p 型半導体のバルクに n 型半導体のインプラントが埋め込まれる形で製造されている。ASIC 側は接地されており、逆電圧をかけることで pn 間の空乏層を広げる。センサー部を荷電粒子が通過することで空乏層中のシリコンがイオン化し、生成された電子正孔対を電気信号として検出することができる。この電気信号は Al 電極からバンプボンディングを通じて ASIC に送られる。 n^+ -in-p 型シリコンセンサーは空乏層の成長が ASIC の読み出し側から起こるため、部分空乏化でも信号の読み出しが可能であるということが特徴として挙げられる。

検出器の運転時には、放射線損傷によりバルク部に p 型不純物が増加するため、センサーを全空乏化させた状態を維持するためには通常時より高電圧で運転を行う必要がある。このとき ASIC-Sensor のエッジ部分においてマイクロ放電が起こることが確認されている。

現在 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ のセンサーが新たに開発されており、ピクセルの小型化による位置分解能の向上のみでなく、ノイズの低下やスレッシュホールドを下げることによる検出効率の上昇などが期待されている。

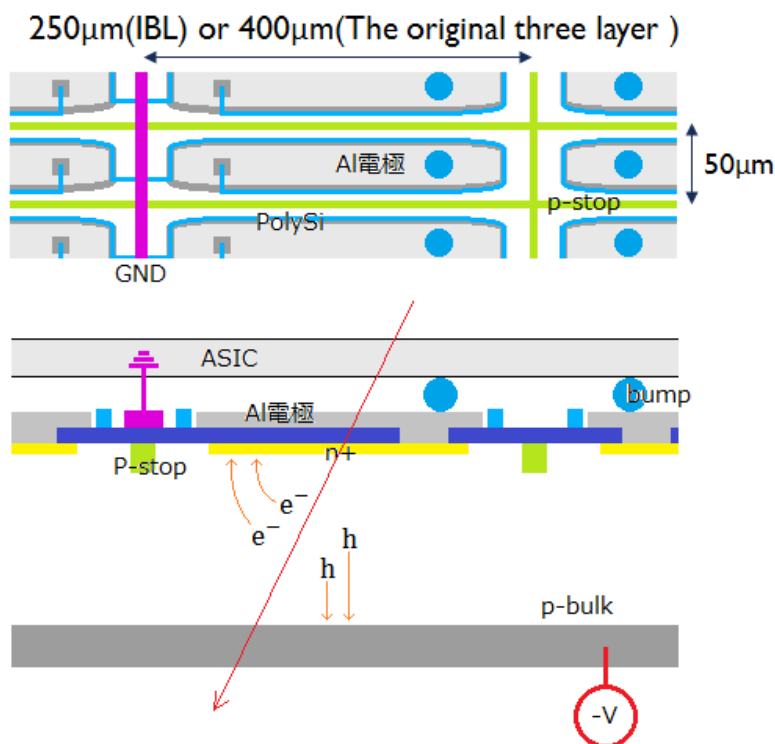


図 13: n^+ -in-p 型ピクセルセンサー

1.6 ASIC

現行ピクセルセンサーに使用されている ASIC は FE-I3 であり, IBL に使用されている物が FE-I4 である。ピクセルサイズは FE-I3 が $50 \times 400 \mu\text{m}^2$, FE-I4 が $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ であり, アップグレード後の ATLAS に使用される FE チップとしてピクセルサイズ $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ の RD53 が開発されている。

FE-I4 は 130nm CMOS プロセスで製造されており, 総ピクセル数は 80×336 個である。ワイヤーボンディングパッドの大きさや数, チップサイズなどの設計値は文献 [4] に記載されているが, ASIC 製造時のダイシングによる余白がどの程度残っているのか, 結果としてセンサーからどの程度飛び出ているのかは測定されていなかった。この値はモジュール組み立てジグ開発や, ポッティング手法の研究などに必要な値であるため, 本論文 2 章にて測定を行った結果を記録した。

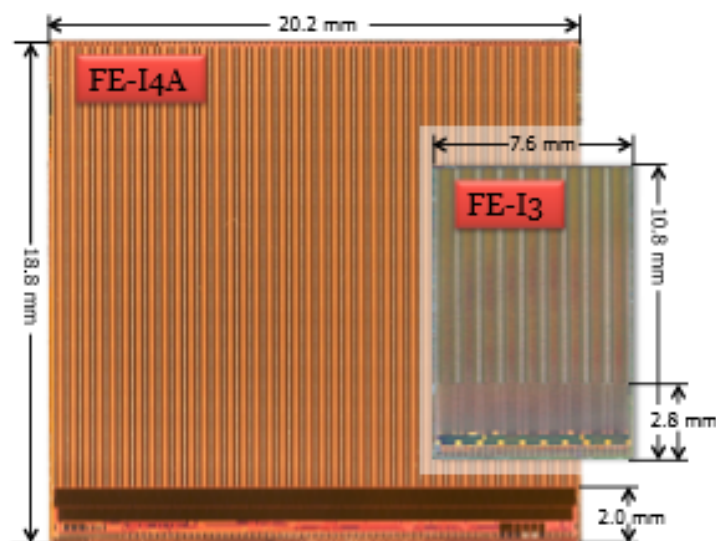


図 14: FE-I3, FE-I4A

1.7 FE-I4 Quad module

現在 FE-I4 Quad module の基本的な構造は図 15 のようになっている (文献 [1]) が, センサーのタイプに関しては TypeA, B, C の三種類が製造されておりそれぞれギャップ間の距離や構造等が異なる (図 16a, 16b, 16c)。タイプ別の構造とサイズを表 2 に記す。表 2 での Sensor Size は図面での値であり, ダイシング分は含まないため文献 [1] に記載されている値より $80\mu\text{m}$ 小さくなっている。

バンプボンディングによって電気信号の読み出しを行う FE-I4 Quad module では, FE-I4 のチップ間に位置する部分のピクセルを直接 ASIC に接続することができない。そのためチップ間においては, ギャング構造という特殊な構造を用いることで信号の検出を行う。直接バンプボンディングすることができないピクセルは, 図 16a, 16b, 16c の赤網掛け部分に接続され, そちらから信号を読み出すことができるような構造となっている。

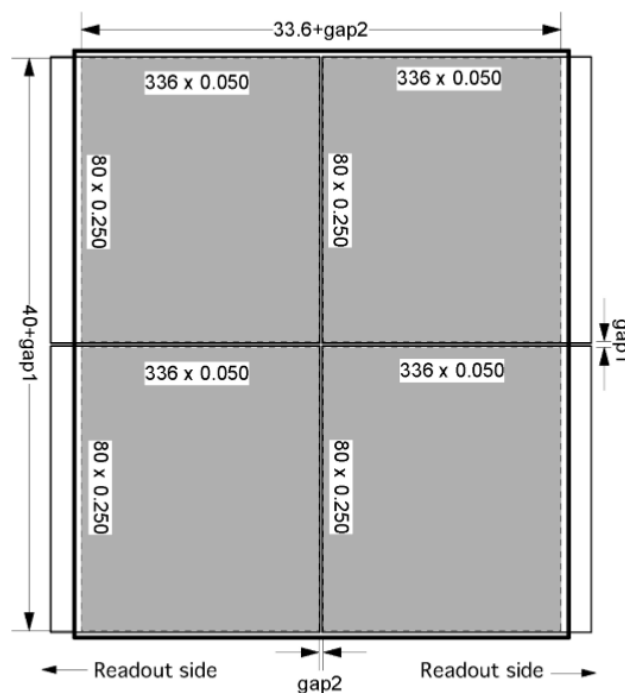
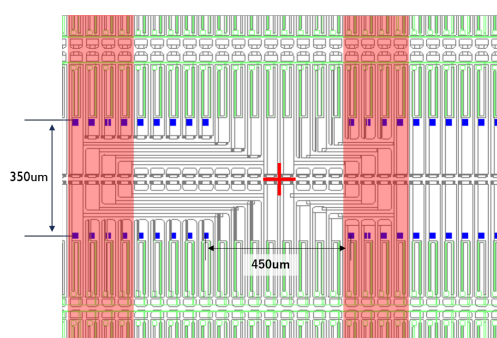


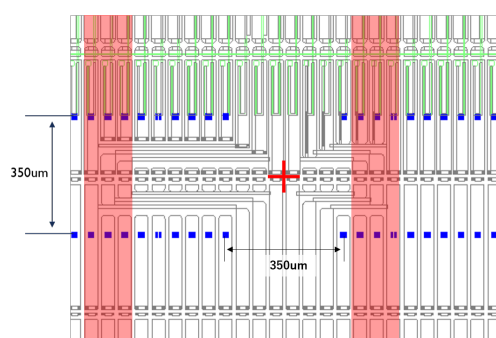
図 15: Quad module

表 2: Quad Sensor Type

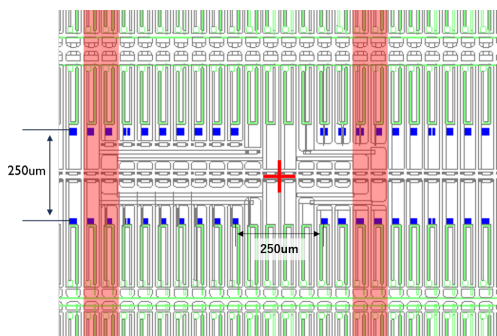
Quad Sensor Type	Type A	Type B	Type C
Sensor size [mm ²]	35.66 × 41.138	35.56 × 41.138	35.46 × 41.038
Ganged Pixel per ASIC	4/4	3/3	2/2
Gap btw bumps [μm] (short-/long-pixel dir.)	450/350	350/350	250/250
Gap btw ASICs [μm] (short-/long-pixel dir.)	290/190	190/190	90/90
Length of last pixel [μm]	400	400	350



(a) Type A



(b) Type B



(c) Type C

图 16: Sensor Type

2 Pixel Module 測定

新型ピクセル検出器の組み立てを進めるにあたって、KEK の三次元測定機を使用してベアモジュールのサイズ測定を行った。発注段階での図面值と、ダイシングカットされた実物とのサイズの差がどの程度あるのか、またどの程度の精度となっているのかを確認する目的である。

測定したモジュールは KEK101, 104 である。図 17 は測定した KEK101 であり、センサー裏面と上下に飛び出た FE-I4 のワイヤーボンディングパッドが見えている。またワイヤー保護用のクリアカバーが付けてあるが、測定時には取り外している。

記録ではどちらのセンサーも Type B とされているが、センサータイプはバンプ面に記載されているため確認はできなかった。

この章では測定座標から計算した各ポイントの長さについて記載する。



図 17: KEK101

2.1 ASIC size

ASIC 各部の測定結果について記述する。測定箇所は図 18 のように 1-4 番を定義する。測定値との比較対象として文献 [4] に記載されている FE-I4B の設計値の一部を表 3 として掲載する。

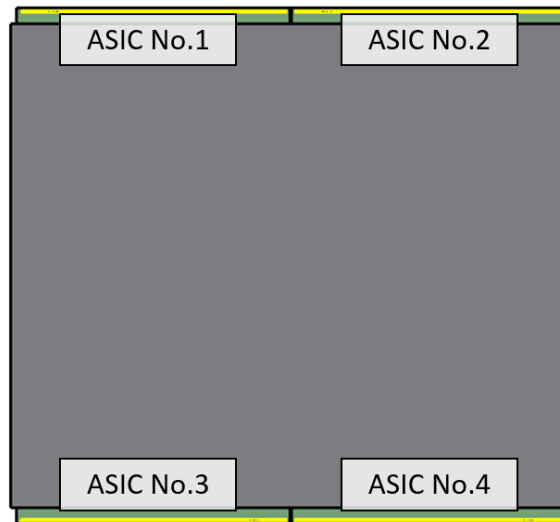


図 18: FE-I4B 測定位置

表 3: FE-I4B 設計値

	x[μm]	y[μm]
chip size	20030.16	18962.56
crack-stop	15.00	15.00
dicing road	270.00	270.00
chip to chip pitch	20330.16	19262.56

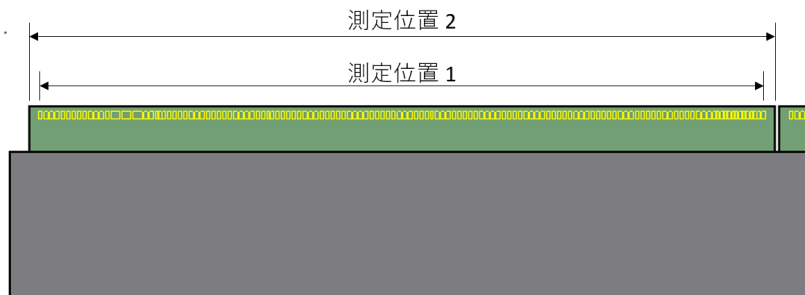


図 19: 測定位置 1, 2

表 4: 測定位置 1 : Pad1 - Pad134

ASIC No.	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1	19553	19548
2	19550	19553
3	19548	19549
4	19549	19548

表 5: 測定位置 2 : Edge - Edge

ASIC.No	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1	20155	20147
2	20155	20142
3	20148	20141
4	20149	20149

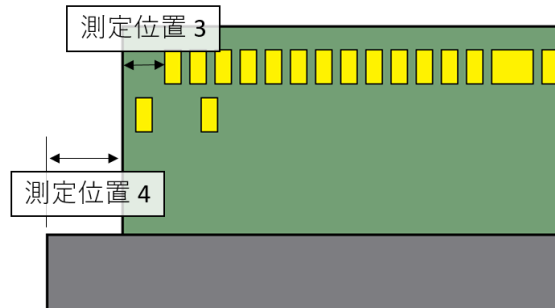


図 20: 測定位置 3, 4

表 6: 測定位置 3 : Pad - Edge

ASIC No.	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1(L)	245	245
1(R)	257	254
2(L)	246	236
2(R)	259	253
3(L)	248	237
3(R)	253	255
4(L)	242	243
4(R)	253	258

表 7: 測定位置 4 : ASIC Edge - Sensor Edge

ASIC.No	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1(L)	384	375
2(R)	385	373
3(L)	370	387
4(R)	396	373

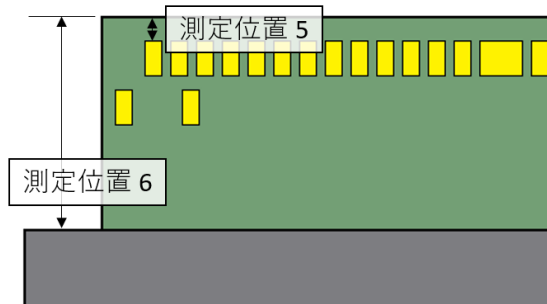


図 21: 測定位置 5, 6

表 8: 測定位置 5 : Pad - ASIC Edge

ASIC No.	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1(L)	137	138
1(R)	143	131
2(L)	146	147
2(R)	146	141
3(L)	140	141
3(R)	135	146
4(L)	135	142
4(R)	144	139

表 9: 測定位置 6 : ASIC Edge - Sensor Edge

ASIC No.	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1(L)	1248	1234
1(R)	1250	1247
2(L)	1256	1262
2(R)	1276	1250
3(L)	1247	1250
3(R)	1242	1268
4(L)	1250	1246
4(R)	1240	1256

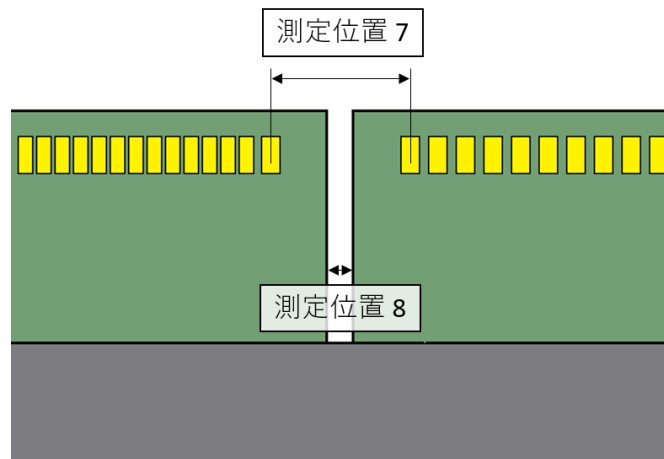


図 22: 測定位置 7, 8

表 10: 測定位置 7 : Pad - Pad

ASIC.No	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1(R)-2(L)	730	741
3(R)-4(L)	734	721

表 11: 測定位置 8 : ASIC Edge - ASIC Edge

ASIC.No	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1(R)-2(L)	127	153
3(R)-4(L)	139	124

2.2 Sensor size

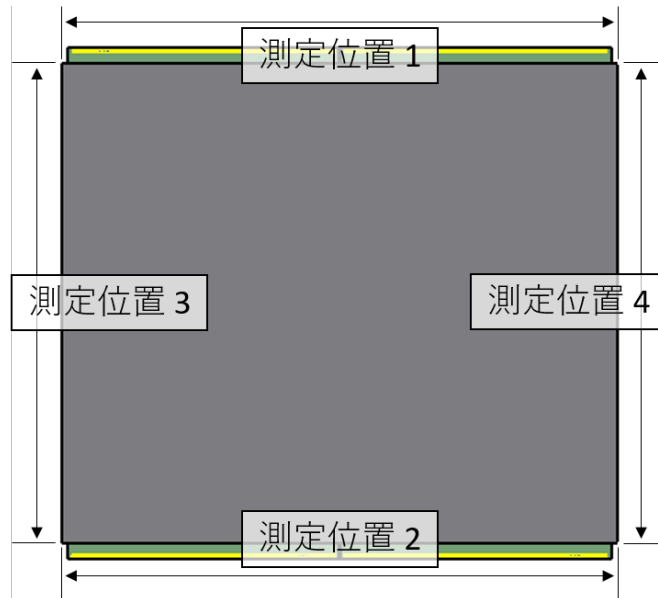


図 23: Sensor size 測定位置

表 12: Sensor size 測定結果

測定位置	図面上の長さ (Type B) [μm]	KEK101 [μm]	KEK104 [μm]
1	41140	41206	41188
2	41140	41198	41173
3	35560	35605	35708
4	35560	35614	35707

2.3 測定結果に関して

文献 [4] においては, Pad1-134 間の設計値は $19550\mu\text{m}$ と記されていた。表 19 より, ASIC の Pad 位置は設計値からほぼ $\pm 5\mu\text{m}$ の精度で製造されていることが確認できる。文献 [4] には記載されていない ASIC のダイシング後の大きさは, 測定 2 の結果より $20150\pm 10\mu\text{m}$ 程度となっていることが確認された。これらの測定値は, 3 章で述べるダミーモジュールの製作や, パッド周辺のポッティング手法の研究等に使用した。

また, 2.2 章に記載した表 12 より, KEK104 の測定位置 3, 4 が KEK101 に対し $100\mu\text{m}$ 程度大きい事が分かった。ダイシングによりセンサーサイズが $100\mu\text{m}$ 大きくなることは考え難い事, TypeA のセンサーの設計値において丁度測定位置 3, 4 にあたる部分が $100\mu\text{m}$ 大きい事から, KEK104 のセンサーが TypeA である可能性が示唆された。KEK104 が TypeA であるならば, KEK101, 104 共にの図面上の長さからは約 $50\mu\text{m}$ がダイシングによる余白として残っていることとなる。

海野氏 (KEK) に確認をお願いしたところ, KEK の保持する過去データより KEK104 は TypeA の様相を示していたことが判明した。また今回座標測定を行っていない KEK103 (TypeA) が TypeB の様相を示していたことから, KEK103, 104 のタイプラベルが逆になっていたという結論に至った。

3 Dummy Module 製作

モジュールの組み立てを行うにあたって、接着材の塗布状況や位置精度等の確認に使用するダミーモジュールの製作を行った。基板加工機を用いてガラスエポキシ板 (G10 板) から切り出したダミーモジュールに関して、製作精度の測定を行った結果を記載する。

基板加工機で読み込む gerber 形式の図面は、gEDA の PCB というフリーソフトを使用して製図を行った。

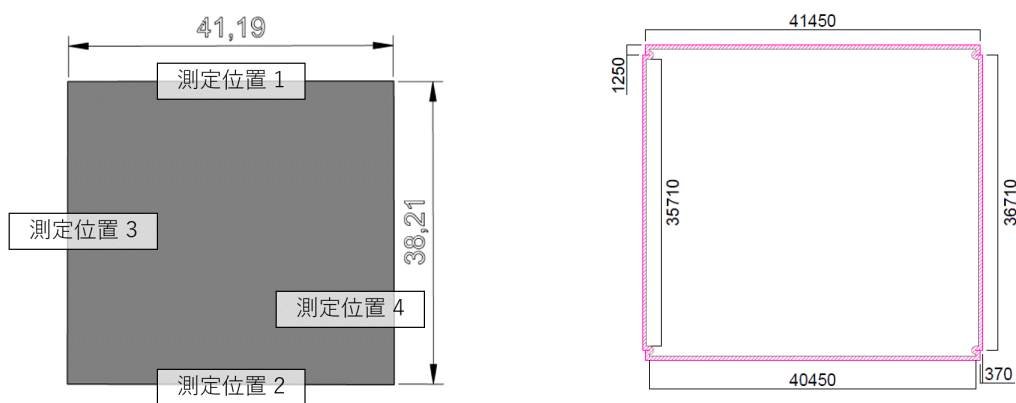
3.1 製作 1

3.1.1 dummy0, dummy1 の設計

KEK の保持する基板加工機 (LPKF E33) を使用してダミーモジュールを製作した。センサーのタイプごとでモジュール全体のサイズが異なるが、本製作では TypeA を想定し製作を行った。

まず dummy0 として最もシンプルな形である長方形のダミーを 6 枚製作し、三次元測定機を用いて精度測定を行った。また、角部分をモジュール組み立て時の位置出しに使用する可能性を考慮し、Sensor-ASIC の角の切り欠き部分を再現することを目的としたデザインを dummy1 とした。図 24b のピンク色の外枠は基板加工機上でエンドミルが通過することにより削られる範囲を想定している。

センサー部分の大きさは表 12 の測定結果より、図面上の長さ + ダイシング分の余白 $50\mu\text{m}$ と設定した。また測定結果より、角部分の切り欠きは $1250 \times 370\mu\text{m}$ (エンドミル通過により削れる半円部分は含まない) とした。dummy0, dummy1 の製作に使用した G10 板の厚みは $500\mu\text{m}$ であった。



(a) dummy0(TypeA) 設計値

(b) dummy1(TypeA) 設計値

図 24: dummy module 製作 1

3.1.2 製作1: dummy1

角部分の切り欠きを再現した dummy1 の製作では、図 25 の黄色部分がエンドミルが通過する位置として処理されたため、緑色線で示されている図面通りに切り欠きを再現することができなかった。3.2 章の製作 2 において、大阪大学の所有する MITS の基板加工機に同様の図面を使用した場合は角部分まで切ることができたため、基板加工機メーカーのソフトウェアによる問題ではないかと考えられる。製作 1 の dummy1 に関しては精度測定は行わなかった。



図 25: dummy1 ドリル通過位置

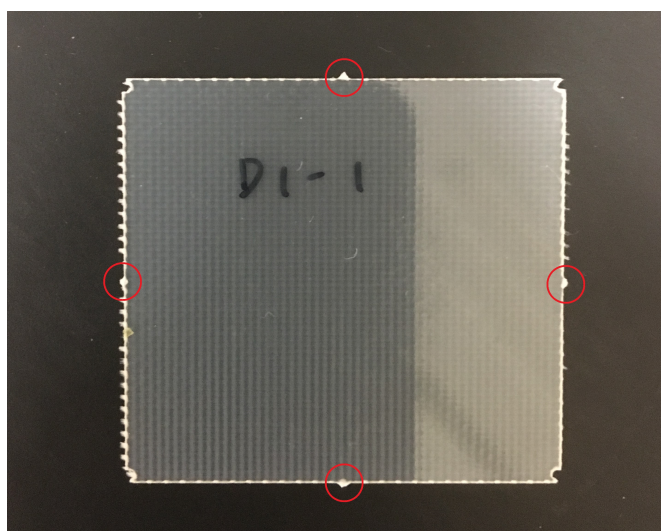


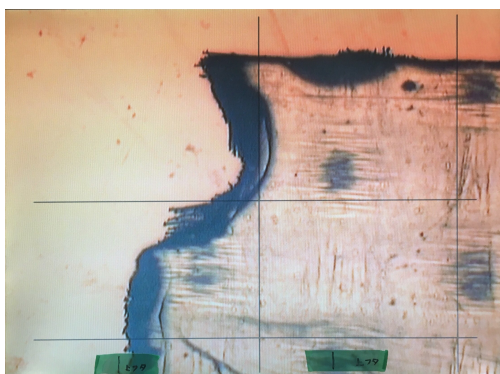
図 26: 製作した dummy1

3.1.3 dummy0, 1 拡大写真

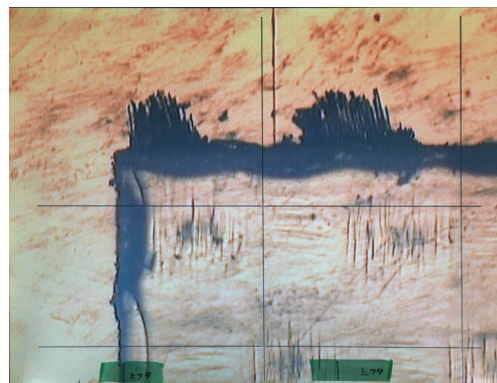
測定時の拡大写真を掲載する。角部分の奥までエンドミルが入らなかったこともあり、端部分はあまりきれいに切断できていないことが確認できる。(図 27a) このダミーにおいては ASIC にあたる部分, Sensor にあたる部分共にジグ開発時の位置出しに使用するのは難しいと思われる。

直線部分においては G10 のガラス繊維が残り, 300 μ m 程度飛び出している部分も見られた。(図 27b) この部分は繊維状であるため, ある程度はさみ等で処理することも可能である。

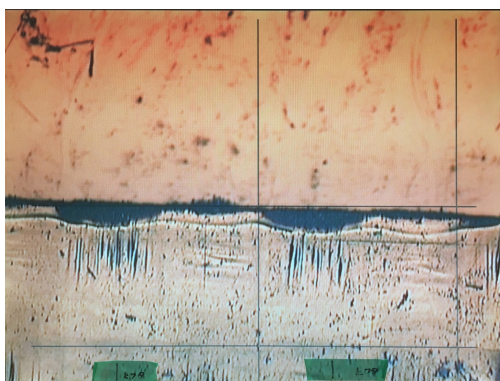
基板加工機での製作時にダミーの周囲全体を切り離す設定で加工を行うと, 角部分にバリが残ってしまうという問題が確認された。(図 27d) これは一周して戻ってきたエンドミルが, 切り出し始め位置まで通過しきらないことが原因である。辺にあたる位置に切り出し前の G10 との枝を残しておくことで, 角部分にバリが残る問題は解決することができた。前頁の図 26 においては, 赤丸部分の 4 箇所にも枝を残してダミーを切り出している。



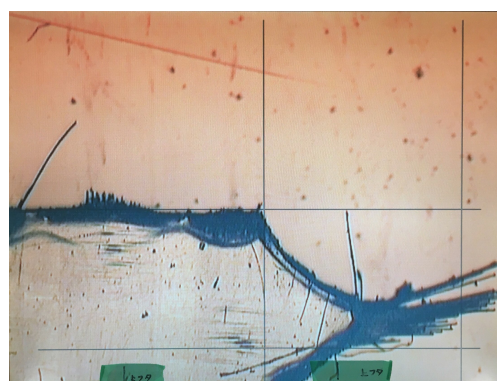
(a) dummy1 の角部分



(b) 黒くケバ立っている部分が G10 の繊維である。



(c) 部分によってはケバ立ちなく切断できていた。



(d) dummy0 の端部分に残るバリ

図 27: dummy0, 1 拡大写真

3.1.4 dummy0 精度測定結果

表 13: 製作した dummy0 のサイズ測定結果 : ID3-6 の製作時に, 基板加工機のエンドミル径設定ミスにより外周を $1000\mu\text{m}$ 小さく切ってしまった。補正として測定後の値に縦横 $1000\mu\text{m}$ 足した値を計算に用いた。

ID	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
1	41289	41290	38278	38275
2	41352	41409	38389	38442
3	41385	41364	38296	38381
4	41401	41408	38418	38348
5	41264	41293	38368	38450
6	41287	41334	38315	38428
Average	41330 \pm 57	41350 \pm 53	38344 \pm 56	38387 \pm 68

表 14: dummy0 設計値との比較結果

	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
設計値	41190	41190	38210	38210
測定値平均	41330	41350	38344	38387
設計値との差	+140	+160	+134	+177

3.1.5 dummy0 製作精度に関して

表 13 の測定結果より, 製作したダミーはおよそ $\pm 60\mu\text{m}$ 程度で製作できていることが確認できる。また表 14 より, 測定値平均と設計値との差が $+150\mu\text{m}$ となっていたことから, エンドミルの刃の削れ具合などからオフセットとして若干大きく切断されると考えている。精度を求めたダミーを製作するならば, このオフセット分を考慮した図面を使用することで $\pm 60\mu\text{m}$ 程度の G10 板によるダミーモジュールを製作することが可能であると考えられる。

3.2 製作 2

3.2.1 dummy2 の設計

南條氏 (大阪大学) の保持する基板加工機 (MITS AutoLab) を使用してダミーモジュールを製作した。製作 2 では dummy1(TypeA) と、改良版として Sensor 部と ASIC 部を別に切り出し、簡単なジグと位置出しピンを用いて貼り付けを行う dummy2(TypeA) デザインの図面を使用した。dummy2 の製作では $200\mu\text{m}$ の厚みの G10 板と両面テープ (ニチバン, ナイスタック一般タイプ) を使用した。また, 精度測定は最小目盛り $50\mu\text{m}$ のノギスを用いて行った。

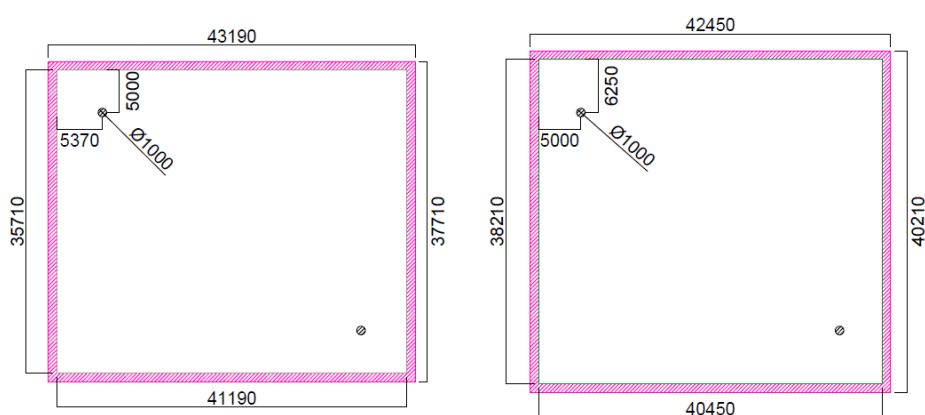


図 28: dummy2(TypeA) 製作図面



図 29: 製作した dummy2

3.2.2 製作 2 : dummy1 精度測定結果

表 15: 製作した dummy1 のサイズ測定結果

ID	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
1	41300	41250	38300	38300
2	41250	41250	38250	38250
3	41250	41250	38300	38250
4	41300	41250	38250	38300
5	41300	41250	38300	38350
6	41300	41250	38250	38300
7	41250	41300	38250	38300
8	41250	41250	38300	38200
Average	41275 \pm 27	41256 \pm 18	38275 \pm 27	38281 \pm 46

表 16: dummy1 設計値との比較結果

	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
設計値	41190	41190	38210	38210
測定値平均	41275	41256	38275	38281
設計値との差	+85	+66	+65	+71

3.2.3 dummy1 製作精度に関して

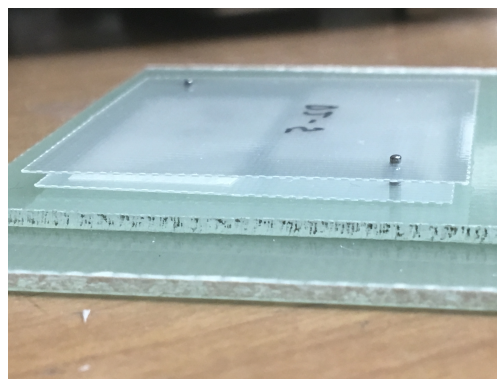
表 15 の測定結果より、製作したダミーは $50\mu\text{m}$ 以内で製作できていたことが確認できる。また表 16 より、設計値との差が $+80\mu\text{m}$ 程度となっていたことから、KEK で行った製作 1 と同様に、エンドミルの刃の削れ具合などからオフセットとして若干大きく切断されていると考えている。製作 1 の結果も踏まえて考えると、基板加工機に使用するエンドミルごとにオフセットが異なるはずである。精度の良いダミーを製作するためには、使用するエンドミルごとにオフセットを考慮した図面を用意する必要があると考える。

3.2.4 dummy2 製作工程

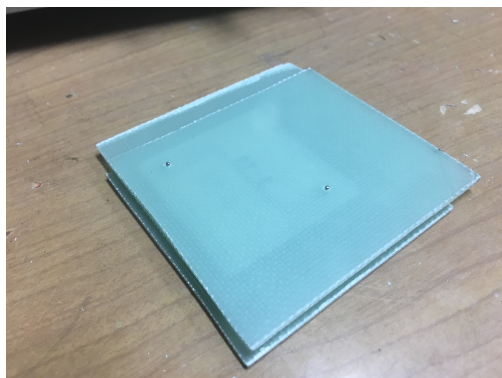
dummy2 の製作は簡単なジグと位置出しピンを用いて行った。位置出しピンは $\phi 1\text{mm}$ であり、ジグは $1.6\text{mm} \times 3$ 層の G10 板で製作を行った。最下層の G10 板のみ位置出しピンが固定されるよう $\phi 1\text{mm}$ の穴を空け、2, 3 層目には $\phi 1\text{mm}$ より少し大きめの穴を空けた。2 層目と 3 層目の間で ASIC-dummy と Sensor-dummy の接着を行い、ダミーを挟んだまま 2, 3 層目を引き抜くことにより接着された dummy2 を位置出しピンから取り外す。



(a) ジグ 2 層目の上に Sensor-dummy が乗っている状態



(b) Sensor-dummy に両面テープを貼り付け、ASIC-dummy を位置出しピンに通す



(c) 3 層目のジグを用いて全面を押さえつけ、ASIC-dummy と Sensor-dummy を接着



(d) 接着後、2 層目ごとダミーを位置出しピンから取り外す

図 30: dummy2 製作工程

3.2.5 dummy2 精度測定

貼り合わせ後の dummy2 において、四隅切り欠き部分の精度測定を行った。精度測定の方法は以下の通りである。

1. 切り出し後の ASIC-dummy, Sensor-dummy の四辺をノギスで測定
2. dummy2 製作 (貼り付け)
3. USB カメラを用いて同倍率でスクリーンショットを記録
4. PC の画面上スクリーンショットを全画面表示し、定規による測定を行う
5. ASIC 部, Sensor 部の四辺測定データと定規測定結果の比を用いて、角の切り欠き部分の精度を計算

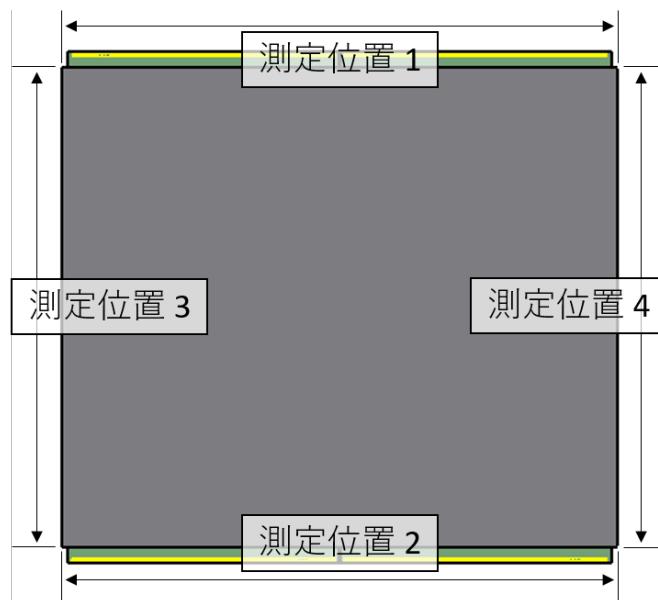


図 31: ASIC-dummy, Sensor-dummy 測定位置

3.2.6 ASIC-dummy, Sensor-dummy 精度測定結果

表 17: Sensor-dummy 測定結果

	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
1	41200	41150	35800	35750
2	41250	41250	35800	35800
3	41250	41250	35900	35900
4	41250	41250	35800	35800
5	41250	41250	35800	35800
Average	41240 \pm 22	41230 \pm 45	35820 \pm 45	35810 \pm 55

表 18: Sensor-dummy 設計値との比較結果

	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
設計値	41190	41190	35710	35710
測定値平均	41240	41230	35820	35810
設計値との差	+50	+40	+110	+100

表 19: ASIC-dummy 測定結果

	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
1	40550	40550	38200	38250
2	40550	40500	38300	38250
3	40600	40600	38300	38250
4	40550	40550	38300	38300
5	40550	40500	38300	38250
Average	40560 \pm 22	40540 \pm 42	38280 \pm 45	38260 \pm 22

表 20: ASIC-dummy 設計値との比較結果

	測定位置 1[μm]	測定位置 2[μm]	測定位置 3[μm]	測定位置 4[μm]
設計値	40450	40450	38210	38210
測定値平均	40560	40540	38280	38260
設計値との差	+110	+90	+70	+50

3.2.7 dummy2 切り欠き部分の比率測定

dummy2 の精度測定として、USB カメラにて拡大した切り欠き部分の PC の画面上の距離を定規で測定した。写真はすべて同じ倍率で、PC に全画面表示した状態で測定を行った。定規による測定の結果から、同じ辺に位置する上下左右の測定位置の比をとり、それぞれの位置がどの程度の長さとなっているのかを計算する。

例として、dummy2ID-1 測定位置 S1, S2 の計算方法を挙げる。図 31 において測定位置 1 の Sensor 部分の長さ (表 17 より) から ASIC 部分の長さ (表 19 より) を引くと、S1+S2 の合計の長さを計算できる。このとき S1:S2 は表 21 より 31:30 となっているはずである。この比を用いて S1, S2 を計算すると、表 23 のように $S1=330[\mu\text{m}]$, $S2=320[\mu\text{m}]$ という結果が得られる。

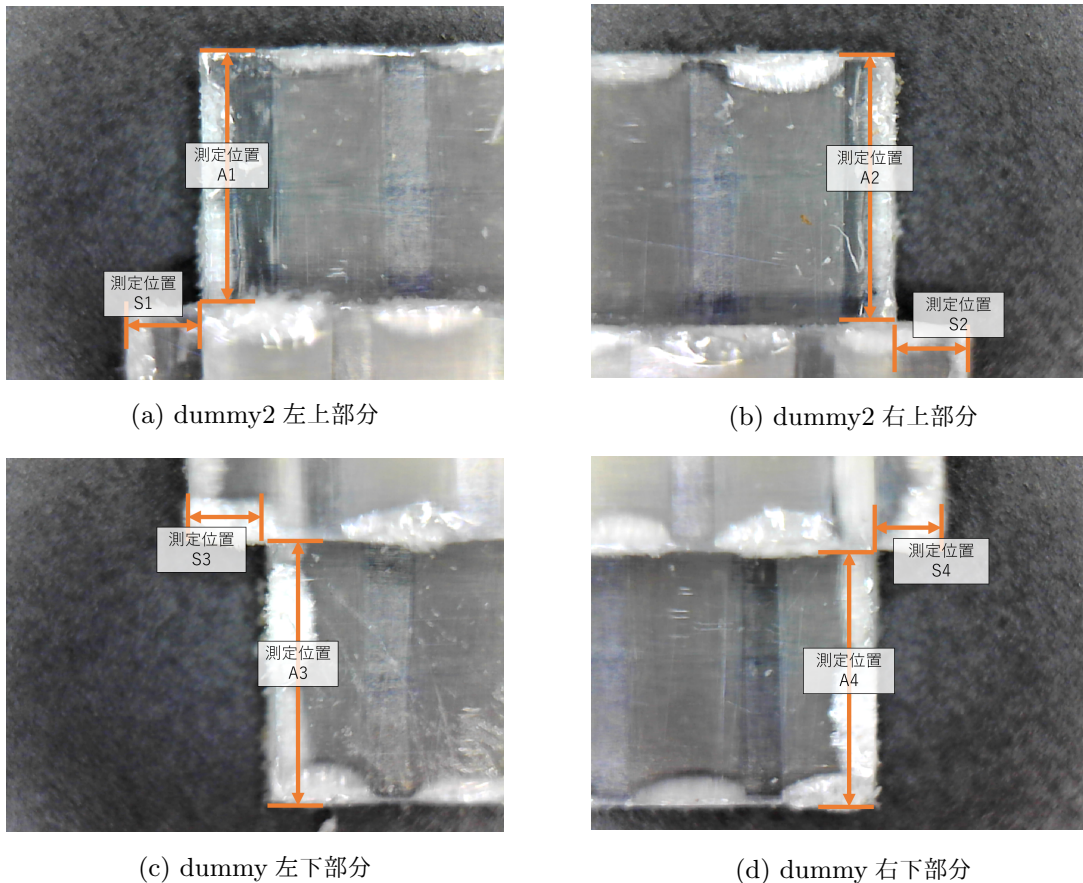


図 32: dummy2 測定位置

表 21: dummy2-ASIC 定規による測定結果

ID	測定位置 A1[mm]	測定位置 A2[mm]	測定位置 A3[mm]	測定位置 A4[mm]
1	107	110	113	108
2	104	109	111	106
3	109	105	114	108
4	106	108	112	106
5	111	105	111	107

表 22: dummy2-Sensor 定規による測定結果

ID	測定位置 S1[mm]	測定位置 S2[mm]	測定位置 S3[mm]	測定位置 S4[mm]
1	31	30	33	31
2	32	33	33	34
3	28	35	33	33
4	34	34	35	33
5	33	32	29	34

3.2.8 dummy2 精度測定結果

3.2.6 章, 3.2.7 章の測定結果より, 切り欠き部分の計算を行った。計算による精度測定の結果を以下に掲載する。

表 23: dummy2-Sensor 測定結果

ID	測定位置 S1[μm]	測定位置 S2[μm]	測定位置 S3[μm]	測定位置 S4[μm]	Average[μm]
1	330	320	309	291	313 \pm 17
2	345	355	369	381	363 \pm 16
3	289	361	325	325	325 \pm 29
4	350	350	360	340	350 \pm 8
5	345	355	345	405	363 \pm 29

表 24: dummy2-ASIC 測定結果

ID	測定位置 A1[μm]	測定位置 A2[μm]	測定位置 A3[μm]	測定位置 A4[μm]	Average[μm]
1	1167	1233	1161	1139	1175 \pm 40
2	1209	1291	1242	1208	1238 \pm 39
3	1173	1227	1158	1192	1188 \pm 30
4	1216	1284	1262	1238	1250 \pm 29
5	1250	1250	1213	1237	1238 \pm 17

3.3 Dummy Module 製作に関する結論

基板加工機でのダミー製作において、KEK での dummy0 製作、大阪大学での dummy1 製作では若干製作精度に差があったものの、エンドミルによるオフセット分を加味した図面を製作し使用すれば $\pm 50\mu\text{m}$ 程度の精度でダミーを製作することが可能であることが確認できた。dummy2 の切り欠き部分に関しては、設計値よりも若干小さくなっているが、こちらも $\pm 50\mu\text{m}$ 程度の精度で製作できていることが確認できた。これらのダミーは、現在 Quad module 組み立て手法の研究にあたって接着剤の塗布方法やポッティング手法の研究などに使用されている。

また、TypeA の図面でアルミニウムを材料としたダミーを林栄精器に依頼し、製作していただいた。このアルミダミーは切り欠き精度がより精密であり、基板加工機では製作できないアルミニウム素材で製作されていることが特徴である。このダミーは、より精度が必要とされる組み立てジグの精度測定に使用している。

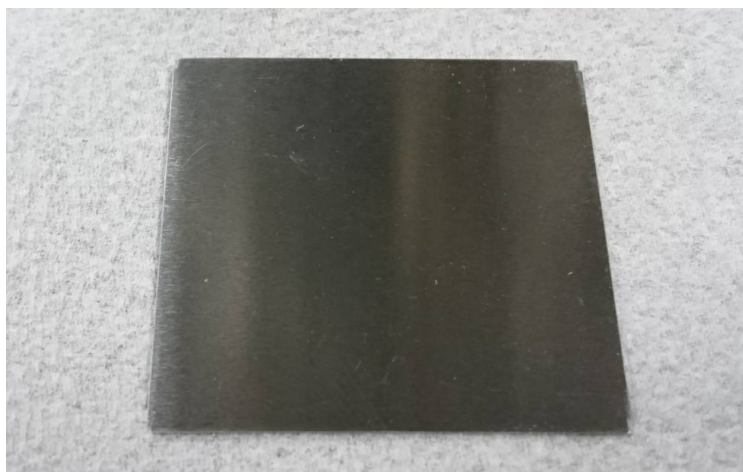


図 33: 林栄精器に製作を依頼したアルミダミー

4 Thermal Glue Conductivity Test

4.1 本章における研究背景

1.5 章で記述した通り、センサーに高電圧をかけ空乏化させることで、通過した粒子を電気信号として検出することができる。検出器の稼働時、センサーを全空乏化させた状態を保つために必要な電圧は、放射線損傷により時間とともに高くなる。高電圧での運転時、センサーと ASIC のエッジ部でマイクロ放電が起こることが確認されており、ATLAS 日本グループではモジュールに N-Parylene を蒸着させることで、スパークからの保護を行うべきであると考えている。パリレン成膜を用いてモジュールを保護することによる問題点として、成膜表面で接着剤がはがれやすいことや、ASIC の放熱への影響が懸念されている。

本章では、パリレンが熱伝導へ与える影響について調査を行った実験とその結果について記述する。

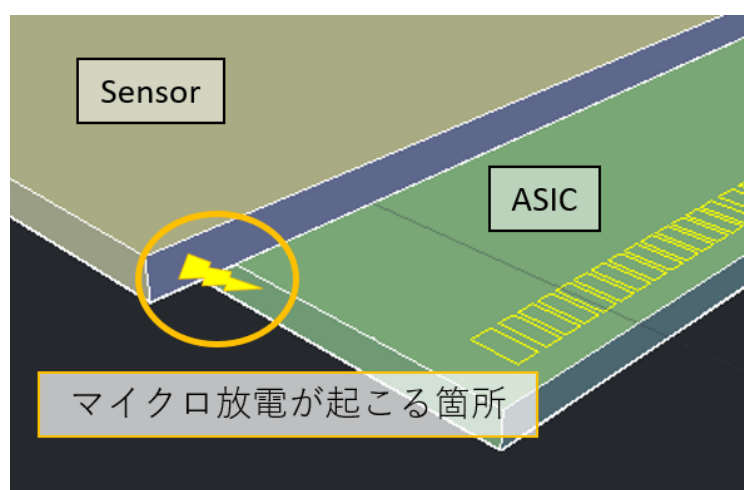


図 34: Quad module エッジ部の保護

4.2 実験環境とサンプル形状の決定

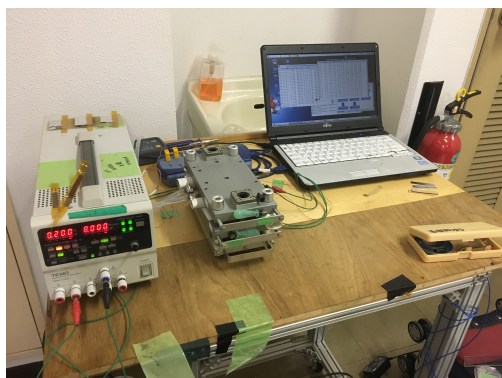
4.2.1 実験環境のセットアップ

熱伝導率の測定は京都教育大にて行った。電源装置を使用しヒーターに 8V の電圧をかけ、印加後 5 分経過時点での電流値を記録した。ヒーターにかける電圧を 8V としたのは、このときの電流値が 125mA 付近であり、発熱量が約 1W となるためである。

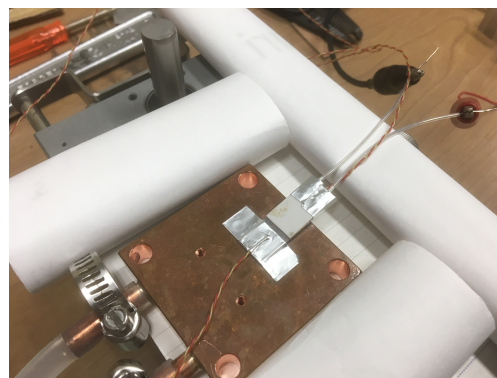
測定時のサンプル固定には SCT の組み立て用ジグと 25 × 10mm のアルミテープを使用し、アルミテープでヒーター、クーラーに固定したサンプルを、1084g の重り (SCT ジグの上側) で押さえながら測定を行った。このときジグ側に熱が逃げないように、ヒーターとジグの間には段ボールを挟んで実験を行っている。また、空気の対流による測定値のブレを少なくするため、ジグ間に丸めた紙を挟み陰による影響を受けにくくしている。

温度の測定は熱電対によって行い、使用した温度モニターである TC08 によって 1 秒間に 1 回、最大 8ch 分の温度データが PC に送られるようになっている。本章の実験では、冷却にはチラー (TAITEC ZL-100 20℃ に設定) を使用した。

また、測定温度のブレを少なくするため PC の AC アダプターを抜いた状態で実験を行った。詳細は 7.1.2 章に記載する。



(a) Thermal conductivity test setup



(b) サンプルとクーリングブロック

図 35: 実験環境

4.2.2 サンプル形状

物質に熱を伝導させたとき、熱伝導率は

$$C = \frac{W}{\Delta T} \times \frac{d}{s} [\text{W/mK}] \quad (1)$$

という式で表される。d は物質の厚み (熱の通過距離), s は熱の通過面積である。温度測定はアルミ部に熱電対を接着することで行うため、熱電対の接着位置のずれが測定温度の誤差に伝搬する。このことからアルミ部での温度変化を極力減らすことが測定精度を上げることにつながると考えた。

熱伝導率の式を以下のように変形すると、以下の式が得られる。

$$\Delta T = \frac{W}{C} \times \frac{d}{s} [\text{K}] \quad (2)$$

上式より、熱の流れる距離が短いほど温度差が小さくなることが分かる。よってアルミ部には 0.5mm の厚み方向に熱を流すことでアルミ部での温度変化を小さくできると考え、20 × 10 × 0.5mm のアルミ板を二枚、10 × 10mm の接着面積で接着したものを実験サンプルとした。実験サンプルの接着剤には SE4445CV を使用し、接着剤の厚みは 380 ± 50 μm でコントロールされているものを解析サンプルとした。接着剤の厚みコントロールの詳細に関しては 7.1.4 章に記載する。

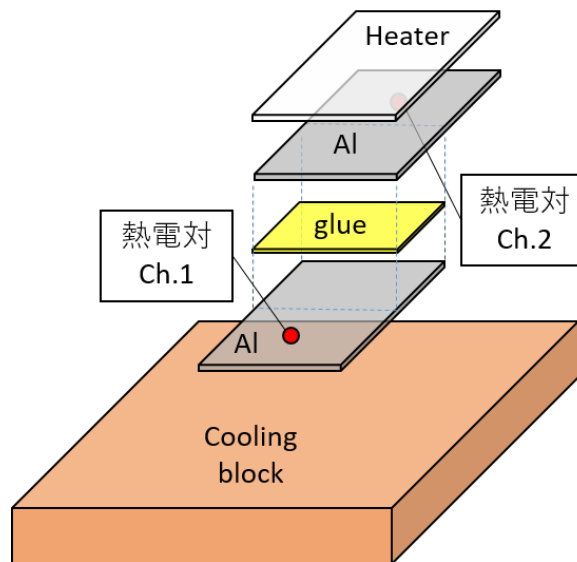


図 36: Thermal conductivity sample

4.2.3 測定時間の決定根拠

熱伝導測定では、サンプルにアルミテープで固定した抵抗に電圧をかけることでサンプルの加熱を行った。電圧をかけた直後は、抵抗に流れる電流値が低下することが確認されたため、熱伝導率の計算に使用する電流値をどの時間で決定するかを確認するための実験を行った。実験ではヒーターとして用いた抵抗に 8V, 11.5V, 15V, 18V の電圧をかけ、それぞれ 1 分ごとに電流値を記録した。電圧として用いた値は (8V, 11.5V, 15V, 18V) は、それぞれ電力を計算したときに 1W, 2W, 3W, 4W 程度となるように設定した値である。

実験結果として図 37 のグラフより電圧印加後 1.5 分程度で電流が安定し始め、3~5 分の間ではほぼ電流が変化しなくなることが確認できた。このことから熱伝導率の計算に用いる電流の値は、電圧印加 5 分経過後の値を用いることとした。

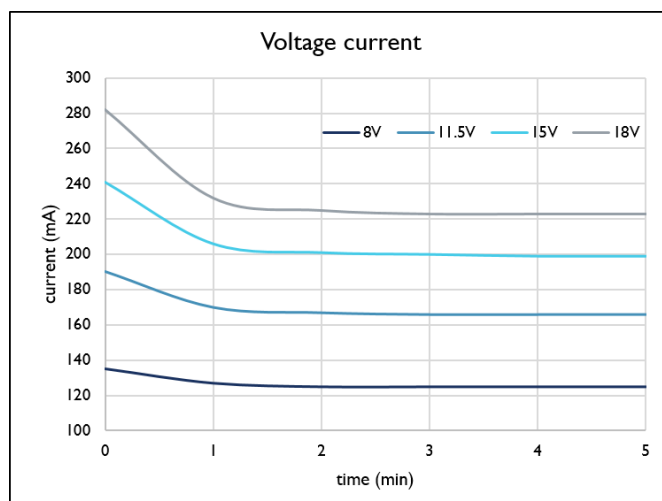


図 37: Voltage current

4.2.4 比較対象を行ったサンプル

熱伝導率を比較するサンプルとして、片面に N-Parylene を蒸着したアルミニウムを一部のサンプルに使用した。アルミニウムに蒸着されているパリレンは $7\pm 2\mu\text{m}$ の厚みである。

比較を行ったサンプルは以下の三種類である。

- Normal sample
パリレンを使用しないアルミニウムと接着剤のみのサンプル。
- Masked Parylene sample
10 × 10mm の接着面に 8 × 8mm のマスクを行いパリレン蒸着を行ったアルミニウムを使用したサンプル。成膜上に接着剤が付かず熱伝導測定が行えない可能性を懸念し、製作したものである。下側のアルミ板の接着部分がマスクされる位置にあたり、下側アルミの接着面周囲 1mm 程度にパリレンが蒸着されている状態となっている。
- Parylene sample
サンプル下部アルミニウムの上側が全面パリレンコーティングされている。

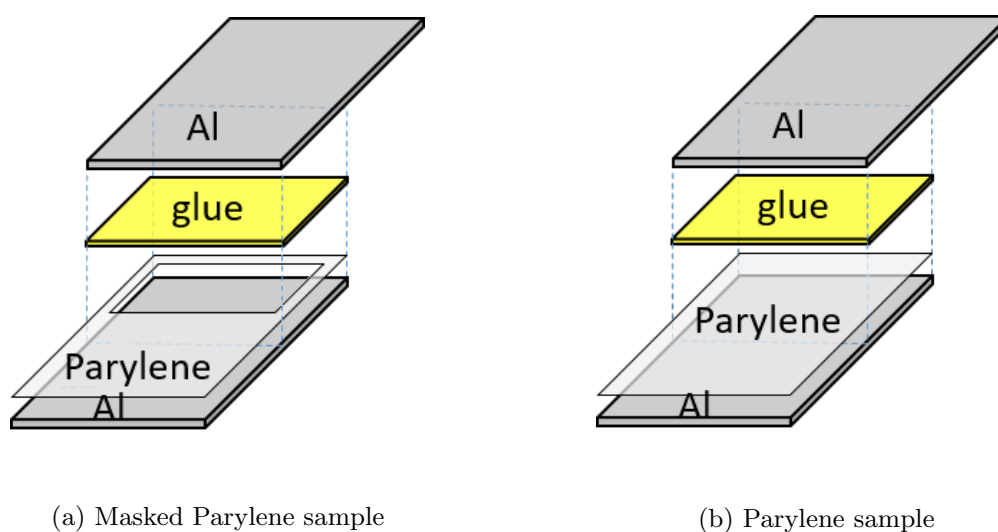


図 38: 熱伝導サンプル詳細

4.2.5 温度差の理論値計算

熱電対間の温度変化 ΔT の実験値との比較とのために、上部アルミと下部アルミ間で予想される温度差の値を計算した。温度差 ΔT は

$$\Delta T = \frac{W}{C} \times \frac{d}{s} [\text{K}] \quad (3)$$

という式で表すことができる。計算に使用した熱伝導率はそれぞれ以下の表の通りである。

表 25: サンプルに使用した材料と熱伝導率

	熱伝導率 [W/mK]
Al	236
SE4445CV	1.34
N-Parylene	0.126

計算条件として、アルミニウムは $500\mu\text{m}$ 、接着剤は $400\mu\text{m}$ 、N-Parylene は $7\mu\text{m}$ に設定した。それぞれ Z 方向に 1W の熱をかけたときの温度変化を $\Delta T(\text{Al})$ 、 $\Delta T(\text{glue})$ 、 $\Delta T(\text{Parylene})$ とすると

$$\Delta T(\text{Al}) = \frac{1}{236} \times \frac{5.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-2} \times 2.0 \times 10^{-2}} = 0.011[\text{K}] \quad (4)$$

$$\Delta T(\text{glue}) = \frac{1}{1.34} \times \frac{4.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-2} \times 1.0 \times 10^{-2}} = 2.99[\text{K}] \quad (5)$$

$$\Delta T(\text{Parylene}) = \frac{1}{0.126} \times \frac{7.0 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-2} \times 2.0 \times 10^{-2}} = 0.28[\text{K}] \quad (6)$$

となる。またパリレンの厚み誤差 $\pm 2\mu\text{m}$ を考えると

$$\Delta T(\text{Parylene}5\mu\text{m}) = \frac{1}{0.126} \times \frac{5.0 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-2} \times 2.0 \times 10^{-2}} = 0.20[\text{K}] \quad (7)$$

$$\Delta T(\text{Parylene}9\mu\text{m}) = \frac{1}{0.126} \times \frac{9.0 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-2} \times 2.0 \times 10^{-2}} = 0.36[\text{K}] \quad (8)$$

であり、 $5\sim 9\mu\text{m}$ の N-Parylene の影響は $0.20\sim 0.36[\text{K}]$ となることが予想される。

それぞれのサンプル全体での温度差を考える。

- Normal Sample

Normal sample にはアルミニウム板 2 枚と $400\mu\text{m}$ の接着剤が使用されているため、上部アルミと下部アルミ間の温度差は

$$\Delta T(\text{Al}) \times 2 + \Delta T(\text{glue}) = 0.011 \times 2 + 2.99 \simeq 3.01[\text{K}] \quad (9)$$

- Masked Parylene Sample

Masked Parylene のサンプルでは、パリレンの熱電導率が接着剤よりかなり小さいため、 $400\mu\text{m}$ の接着剤を A : $10 \times 10 \times 0.39\text{mm}$ と B : $8 \times 8 \times 0.01\text{mm}$ として考えると、上部アルミと下部アルミの温度差は

$$\Delta T(\text{Al}) \times 2 + \Delta T(\text{glueA}) + \Delta T(\text{glueB}) = 0.011 \times 2 + 2.93 + 0.08 \simeq 3.032[\text{K}] \quad (10)$$

- Parylene Sample

Parylene sample では、Normal sample に $7\mu\text{m}$ の N-Parylene による温度差が加わると考えられるため、

$$\Delta T(\text{Al}) \times 2 + \Delta T(\text{glue}) + \Delta T(\text{Parylene}) = 0.011 \times 2 + 2.99 + 0.28 \simeq 3.291[\text{K}] \quad (11)$$

が上部アルミと下部アルミ間の温度差として測定されることが予想される。

4.3 本節における結論

4.3.1 最終的な測定環境と解析条件

パリレンサンプル比較のために制御する実験条件を以下のように絞り込んだ。

- SE4445CV を接着剤に使用している
- おもり無しで測定 (ジグによる圧着のみ, 1084g)
- 1 サンプルにつき 3 回測定を行っている
- ヒーター側からは 1W 程度の熱をかけて測定
- 接着剤の厚みが $380 \pm 50 \mu\text{m}$ で制御できている

以上の条件から、解析を行ったサンプル数 (n) は以下の通りである。

表 26: 解析サンプル数

	サンプル数 (n)
Normal Sample	13
Masked Parylene Sample	9
Parylene Sample	12

4.3.2 熱伝導率測定結果

それぞれのサンプルについて、熱伝導率の測定結果を記載する。

表 27: Normal sample Thermal conductivity (n=13)

Sample ID	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	Average	
	Conductivity [W/mK]	Conductivity [W/mK]	Conductivity [W/mK]	Glue Thickness [μm]	Conductivity [W/mK]
31	0.686	0.710	0.699	360	0.698 \pm 0.012
33	0.714	0.764	0.753	352	0.744 \pm 0.026
37	0.735	0.720	0.715	371	0.723 \pm 0.010
38	0.765	0.752	0.771	398	0.762 \pm 0.010
39	0.668	0.673	0.674	381	0.672 \pm 0.003
100	0.652	0.726	0.743	405	0.707 \pm 0.049
101	0.678	0.728	0.680	430	0.696 \pm 0.028
102	0.656	0.660	0.650	352	0.656 \pm 0.005
103	0.667	0.673	0.707	425	0.682 \pm 0.022
104	0.747	0.689	0.685	399	0.707 \pm 0.034
106	0.723	0.705	0.732	394	0.720 \pm 0.014
107	0.684	0.737	0.683	423	0.701 \pm 0.031
109	0.689	0.669	0.696	395	0.685 \pm 0.014

表 28: Parylene sample Thermal conductivity (n=12)

Sample ID	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	Average	
	Conductivity [W/mK]	Conductivity [W/mK]	Conductivity [W/mK]	Glue Thickness [μm]	Conductivity [W/mK]
40	0.633	0.608	0.667	351	0.636 \pm 0.029
41	0.605	0.585	0.646	346	0.612 \pm 0.031
81	0.720	0.694	0.741	406	0.719 \pm 0.023
82	0.682	0.682	0.628	369	0.664 \pm 0.031
83	0.697	0.668	0.639	370	0.668 \pm 0.029
84	0.719	0.727	0.749	401	0.732 \pm 0.016
85	0.722	0.741	0.727	420	0.730 \pm 0.010
86	0.708	0.686	0.684	368	0.692 \pm 0.013
87	0.755	0.717	0.727	421	0.733 \pm 0.019
88	0.684	0.660	0.662	403	0.668 \pm 0.013
89	0.665	0.668	0.673	426	0.669 \pm 0.004
90	0.652	0.607	0.629	401	0.629 \pm 0.023

表 29: Masked Parylene sample Thermal conductivity (n=9)

Sample ID	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	Average	
	Conductivity [W/mK]	Conductivity [W/mK]	Conductivity [W/mK]	Glue Thickness [μm]	Conductivity [W/mK]
34	0.763	0.789	0.780	388	0.777 \pm 0.013
35	0.661	0.649	0.664	357	0.658 \pm 0.008
36	0.650	0.611	0.652	349	0.638 \pm 0.023
75	0.717	0.702	0.703	395	0.707 \pm 0.008
76	0.722	0.740	0.749	407	0.737 \pm 0.014
77	0.666	0.645	0.671	355	0.661 \pm 0.014
78	0.736	0.700	0.719	392	0.718 \pm 0.018
79	0.720	0.676	0.667	382	0.688 \pm 0.028
80	0.679	0.724	0.709	375	0.704 \pm 0.023

4.3.3 温度差測定結果

それぞれのサンプルについて、温度差の測定結果を記載する。

表 30: Normal Sample ΔT (n=13)

Sample ID	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	Average	
	ΔT [K]	ΔT [K]	ΔT [K]	Glue Thickness [μm]	ΔT [K]
31	5.35	5.12	5.27	360	5.24 \pm 0.12
33	5.03	4.73	4.83	352	4.86 \pm 0.15
37	5.21	5.40	5.36	371	5.32 \pm 0.10
38	5.42	5.43	5.40	398	5.41 \pm 0.02
39	5.79	5.89	5.92	381	5.86 \pm 0.07
100	6.42	5.76	5.56	405	5.91 \pm 0.45
101	6.53	6.03	6.53	430	6.36 \pm 0.29
102	5.50	5.47	5.56	352	5.51 \pm 0.05
103	6.58	6.50	6.18	425	6.42 \pm 0.21
104	5.53	5.97	6.03	399	5.84 \pm 0.27
106	5.66	5.77	5.55	394	5.66 \pm 0.11
107	6.33	5.82	6.31	423	6.15 \pm 0.29
109	5.87	5.97	5.79	395	5.88 \pm 0.09

表 31: Parylene Sample ΔT (n=12)

Sample ID	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	Average	
	ΔT [K]	ΔT [K]	ΔT [K]	Glue Thickness [μm]	ΔT [K]
40	5.71	5.94	5.51	351	5.72 ± 0.22
41	5.86	6.17	5.63	346	5.89 ± 0.27
81	5.82	6.05	5.62	406	5.83 ± 0.21
82	5.48	5.58	6.06	369	5.71 ± 0.31
83	5.49	5.77	6.02	370	5.76 ± 0.26
84	5.78	5.74	5.57	401	5.70 ± 0.11
85	6.08	5.93	6.03	420	6.01 ± 0.08
86	5.43	5.60	5.64	368	5.56 ± 0.11
87	5.84	6.15	6.06	421	6.02 ± 0.16
88	6.12	6.34	6.34	403	6.26 ± 0.12
89	6.60	6.61	6.52	426	6.58 ± 0.05
90	6.37	6.83	6.59	401	6.60 ± 0.23

表 32: Masked Parylene Sample ΔT (n=9)

Sample ID	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	Average	
	ΔT [K]	ΔT [K]	ΔT [K]	Glue Thickness [μm]	ΔT [K]
34	5.21	5.11	5.19	388	5.17 ± 0.05
35	5.50	5.68	5.52	357	5.57 ± 0.10
36	5.52	5.91	5.41	349	5.61 ± 0.26
75	5.76	5.81	5.85	395	5.81 ± 0.04
76	5.88	5.74	5.67	407	5.76 ± 0.11
77	5.53	5.71	5.48	355	5.58 ± 0.12
78	5.53	5.83	5.70	392	5.69 ± 0.15
79	5.50	5.86	5.96	382	5.78 ± 0.25
80	5.75	5.43	5.54	375	5.57 ± 0.16

4.3.4 F 検定と T 検定による統計処理と結論

熱伝導率の測定結果と温度差の測定結果に関して、それぞれの測定平均値は以下の通りである。

表 33: 測定平均値

	Glue Thickness [μm]	Thermal Conductivity [W/mK]	ΔT [K]
Normal Sample	391 \pm 27	0.704 \pm 0.029	5.73 \pm 0.45
Parylene Sample	390 \pm 28	0.679 \pm 0.042	5.97 \pm 0.34
Masked Parylene Sample	378 \pm 20	0.699 \pm 0.043	5.61 \pm 0.19

4.3.2 章の熱電導率測定結果に関して、T 検定を行った。まず T 検定を行うため、Normal - Masked Parylene sample, Normal - Parylene sample の母集団間がそれぞれ等分散であるかを判断する F 検定を行った。

表 34: F 検定の結果 (p 値)

	Normal - Masked Parylene	Normal - Parylene
F test(p)	0.199	0.212

F 検定の結果から、どちらの集団間においても両側確率 >0.05 であることが確認された。このことから、どちらも等分散であるという前提で T 検定を行った。

表 35: T 検定の結果 (p 値)

	Normal - Masked Parylene	Normal - Parylene
T test(p)	0.730	0.098

T 検定の結果より、Normal Sample - Masked Parylene Sample 間においては有意確立 0.730 より、母集団の差は有意ではないと考えられる。

また、Normal Sample - Parylene Sample 間においては有意確立 $p=0.098 > 0.10$ より、このサンプル間の母集団の差は有意傾向にあると推定される。このことから本実験サンプルと測定環境にて、パリレンによる熱伝導への影響を有意に測定できたと考えられる。

これらのサンプル間で実際に測定された温度差について考える。測定平均値と計算値は以下の通りである。

表 36: 温度差の理論値と測定平均値

	$\Delta T(\text{理論値})[\text{K}]$	$\Delta T(\text{測定平均値})[\text{K}]$
Normal Sample	3.01	5.73 ± 0.45
Parylene Sample	3.29	5.97 ± 0.34

実験値では、計算値より 2.7[K] 程度大きく温度差が測定されていることが確認できる。これは接着剤を圧着する強さや接着面積のコントロールなど、測定環境によるオフセットが乗っていると考えている。本実験では実験結果に大きく影響を及ぼす条件を制御しているため、両測定において測定結果を差し引きすることで、実験環境による同程度のオフセット分を相殺できると考える。

Parylene Sample - Normal Sample での測定平均値を差し引きすると、パリレンの影響としては 0.24[K] の温度差が測定されている。パリレンの蒸着誤差 $\pm 2\mu\text{m}$ を考えると、理論値からは 0.20~0.36[K] がパリレンによる影響として考えることができ、実験での測定値はこの誤差の範囲に収まっていることが確認できる。

以上のことから $7\mu\text{m}$ の N-Parylene による熱伝導への影響は、理論計算した通り十分に小さいことが確認された。

5 Thermal Glue Irradiation Test

5.1 研究背景

組み立てたモジュールはクーリングブロック及びステーブに固定し, ATLAS 検出器にインストールされる。ATLAS 実験に使用する熱伝導性接着材には, module-FPC 間の接着剤と同様に $1.0 \times 10^{16} \text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の放射線耐性が要求される。現状で候補として以下の 4 種類の熱伝導性接着剤が挙がっており, これらの接着材に対し放射線照射試験前後のサンプルの引き剥がし試験を行い強度を評価することで, 熱伝導性接着剤の選定を行った。

表 37: 比較を行った熱伝導接着剤

Name	Material	Viscosity[mPas]	Thermal Conductivity[W/mK]
SE 4445 CV	Silicon	15025	1.34
JT-MZ-03M	Silicon	40000	3
EG7655	Epoxy	300000	1.7
EG7658	Epoxy	305000	3.6

5.2 CYRIC 照射試験

5.2.1 照射試験詳細

2017年11月5日～9日、東北大学 CYRIC にてプロトン照射試験を行った。陽子のエネルギーは 70MeV であり、本照射試験の目的は以下の通りである。

1. エポキシ接着剤コニシ E セットの放射線耐性評価
2. 熱伝導接着剤の放射線耐性評価
3. ポッティング材の放射線耐性評価 + LoopBack test への影響
4. 放射線損傷による誘電率に対する影響

本論文では、特に 2 の熱伝導接着剤の放射線耐性評価について記述する。

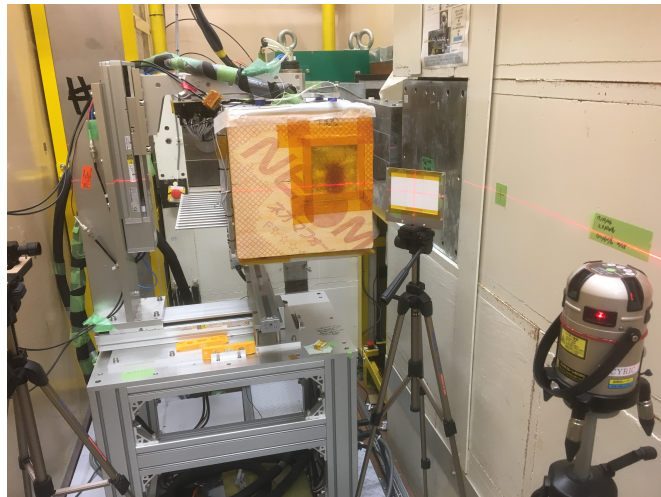


図 39: 照射試験の様子

5.2.2 照射ボックス

照射試験は、専用の照射用ボックスを用いて遠隔操作で行う。照射ボックス内にはコマンドによって格納、照射の位置操作を行うことができるスロットが 15 個設置されている。図 40 において Beam Set と記している位置が照射位置であり、ボックス外側のバーをコマンドで出し入れすることで内部スロットの位置を変更することができる。バーには sw-A, sw-B の ON-OFF を切り替えるための切り欠きがあり、各スイッチが押されている状態が ON, バーの切り欠き部分と一致し各スイッチが押されていない状態が OFF である。遠隔操作を行っているタブレットには、スイッチの状態によって以下の表のように表示される。本照射実験において照射ボックスが一部破損したため、現在は $sw(A, B) \neq (1, 0)$ であれば Target 表示されるようにファームウェアの書き換えられている。

表 38: 照射ボックス Switch の動作と反応 : Target は格納位置, Beam Set は照射位置, No Target はエラーを表している。

Switch A	Switch B	Result
OFF	OFF	No Target
OFF	ON	Target
ON	OFF	Beam Set
ON	ON	No Target

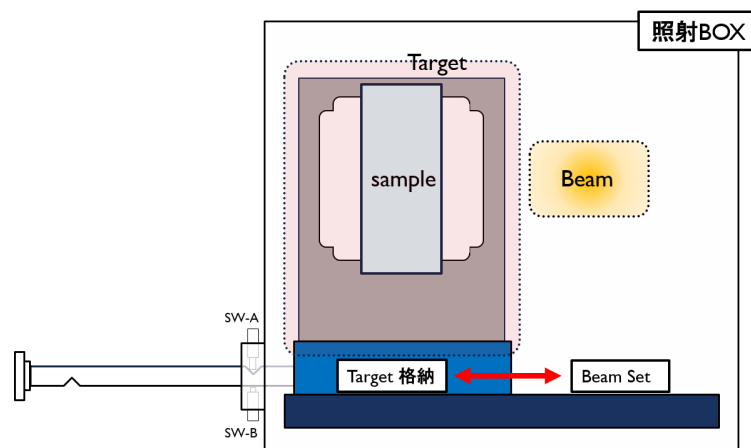


図 40: 照射ボックス

ジグを用いて各スロットにサンプルを固定し、遠隔操作でコマンドを送ることによってサンプルを照射位置に移動させ、目的の照射量になる時間までプロトンを照射する。またボックス内部には熱電対が設置されており、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上を検知している場合液体窒素によって照射ボックス内が冷却される。

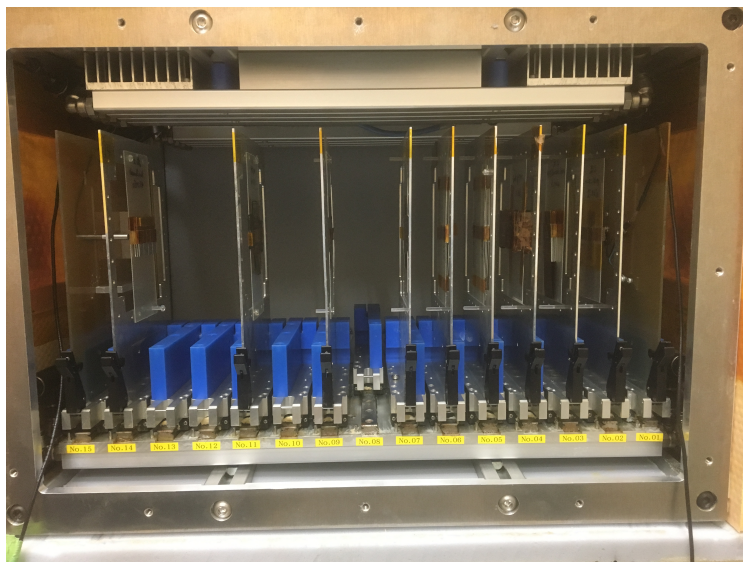


図 41: 照射ボックス内部

5.2.3 結果としての照射量

本実験の予定照射量は $1.0 \times 10^{16} \text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ であった。照射試験後、サンプル前後に貼り付けていた照射量評価用 $10 \times 10 \text{mm}$ アルミニウムのスペクトルを測定を行った。アルミニウムは、プロトン照射によって以下のように ^{24}Na を生成する。



^{24}Na は半減期 15 時間で 1368.6KeV の γ 線を放射するため、Ge 検出器にて ^{24}Na の生成量を測定することにより実照射量を算出することができる。

表 39: 実照射量

slot No.	sample	target flux	actual flux
3	Peel sample 上流	1e16	7.29E+15
3	Peel sample 下流	1e16	1.32E+15
5	Shear sample 上流	1e16	8.07E+15
5	Shear sample 下流	1e16	6.21E+15
6	Shear sample 上流	1e16	8.12E+15
6	Shear sample 下流	1e16	5.45E+15
12	Thermal Conductivity sample 上流	1e16	4.25E+15
12	Thermal Conductivity sample 下流	1e16	1.71E+15

表 39 に掲載したドシメトリ測定の結果より、予定照射量の 4~8 割程度しか照射できていなかったことが判明した。

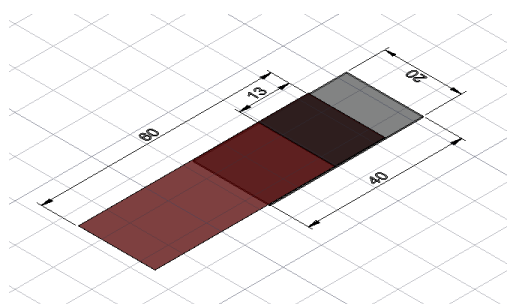
原因として、本照射試験において overscan を行わなかったことがまず挙げられる。照射面積を接着部分の面積のみで照射した場合、ビームの広がり分が照射されず約 8 割程度の照射量となってしまうことが照射試験後に判明した。

また特に低い値を示した Peel sample 下流, Thermal Conductivity sample 下流のアルミ照射量は、原因としてサンプルおよび照射量評価用アルミの位置がずれてしまっていたこと、同時に照射するサンプルが多く、上流から下流にかけてビームが減衰してしまったことなどが考えられている。

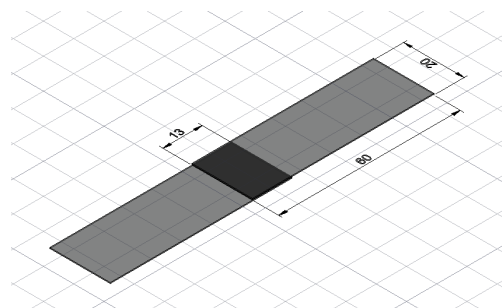
以上の要因から実照射量は予定照射量に満たなかったが、HL-LHC 実験において ATLAS 検出器 Layer3, 4 が 10 年間に受ける放射線量は $1.7 \times 10^{15} \text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 程度と言われているため、予想される放射線量程度は照射できていると考える。

5.3 熱伝導性接着剤サンプル

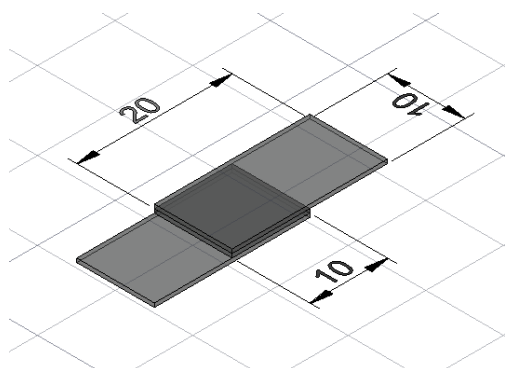
熱伝導接着剤の照射用サンプルはそれぞれ図 42a, 42b, 42c のような形状, サイズで製作した。Peel, Shear sample は未照射, 照射後のサンプルを同数用意し, それぞれ応力試験を行った。Thermal Conductivity sample は一度熱伝導率を測定したものを照射し, 照射前とほぼ同様の環境で再度熱伝導率の測定を行った。



(a) Peel strength sample



(b) Shear strength sample



(c) Thermal Conductivity sample

図 42: Irradiation sample

表 40: 照射サンプル数

	照射前サンプル	照射後サンプル
Peel strength sample	4 × 3	4 × 3
Shear sample	4	4
Thermal Conductivity sample	4 × 3	

以下は照射用に G10 板に固定した熱伝導接着剤のサンプルである。中心部分に照射量測定用のアルミを貼り付けるが、以下の写真には含まれていない。Peel sample は G10 板の前後に 6 サンプルずつカプトンテープで貼り付け、照射を行った。Shear sample は G10 板 1 枚につき 6 サンプル貼り付け、照射ボックスの 2 スロット分を使用した。Thermal Conductivity sample は G10 板 1 枚に、4 サンプルを 3 層積み上げて計 12 サンプルが貼り付けてある。

表 41: 照射範囲

	1 サンプルあたりの接着面積 [mm]	照射範囲 [mm]
Peel sample	20 × 10	20 × 10
Shear sample	20 × 13	20 × 13
Thermal Conductivity sample	10 × 10	40 × 10

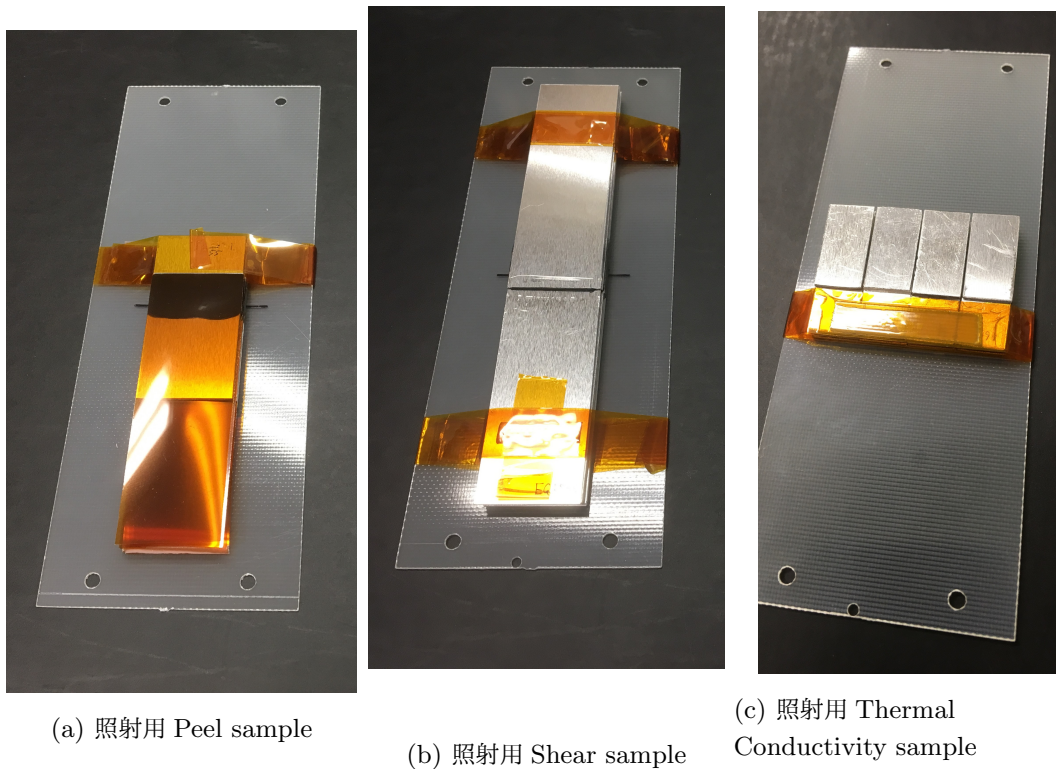


図 43: 熱伝導接着剤照射サンプル

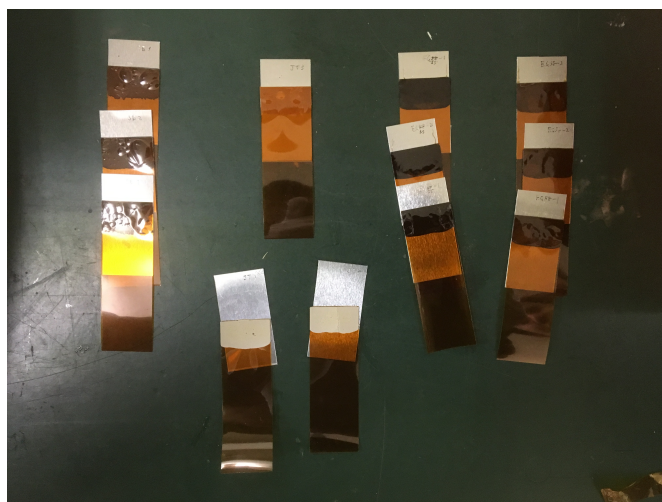


図 44: 照射後 Peel sample : 左から順に SE4445CV, JT-MZ-03M, EG7655, EG7658 の照射後サンプル。JT-MZ-03M のサンプルは測定前に 2/3 が破損してしまっていた。

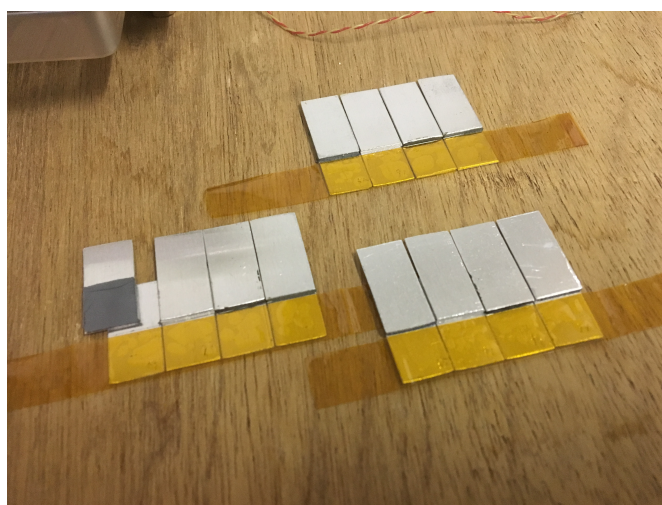


図 45: 照射後 Thermal Conductivity sample : SE4445CV のサンプルが測定前に 1 つ破損していた。また測定準備の段階でもう 1 サンプルが剥がれてしまったため、SE4445CV は 1 サンプルのみの測定となった。

5.4 Thermal Glue strength の照射前後比較

5.4.1 Strength Test

熱伝導接着剤の放射線耐性評価として、未照射サンプルと照射後サンプルの応力試験を行った。測定には九州大学が所持する株式会社 IMADA のフォースゲージ (ZTA-50N) と計測スタンド (MX2-2500N) を使用した。測定中のデータはフォースゲージから 100 回/秒のレートで USB メモリに保存される。また、引き剥がし速度は 60mm/min であった。



図 46: 応力試験に使用した IMADA MX2-2500N, ZTA-50N

接着剤の強度試験として、Peel Test, Shear Test の二種類を行った。

- Peel Test

Peel Test は図 47 のように Peel sample から 90 度方向にカプトンシートを引き剥がす試験である。測定時には下側のアルミを応力試験機に固定して行った。

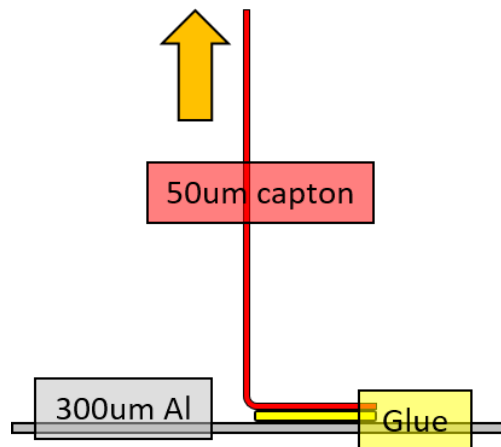


図 47: Peel Test

- Shear Test

Shear Test は図 48 のように Shear sample を 180 度方向に引く試験である。本実験時にはフォースゲージの測定値が 50N までであったため、30N 程度までサンプルを引っ張り様子を見るという試験を行った。

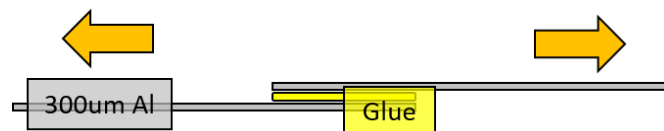


図 48: Shear Test

5.4.2 Peel Test:SE4445CV

SE4445CV の Peel Test の結果を記載する。グラフ横軸の Data はフォースゲージから送られたデータの数であり、1 秒間に 100 個記録される。

- 測定サンプル ID:225, 226, 227, 239, 240, 241

照射前の接着剤は硬化後もゴムのように弾性があり、引き剥がし後もある程度接着が可能であった。また引き剥がし試験では、接着剤はすべてカプトンシート側に残り、強度としては 0.1N/mm 程度を記録した。

照射後の SE4445CV は照射前とは異なり、弾性を失い、ひび割れている様子が見られた。引き剥がし試験ではアルミ、カプトンシート両側に接着剤が残っており、強度としては 0.02N/mm 程度であった。

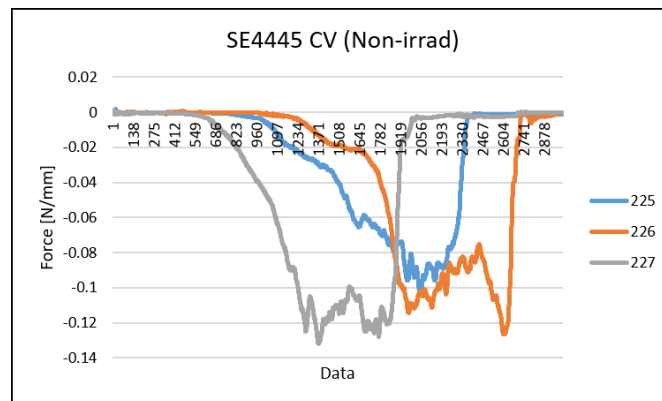


図 49: SE4445CV 照射前

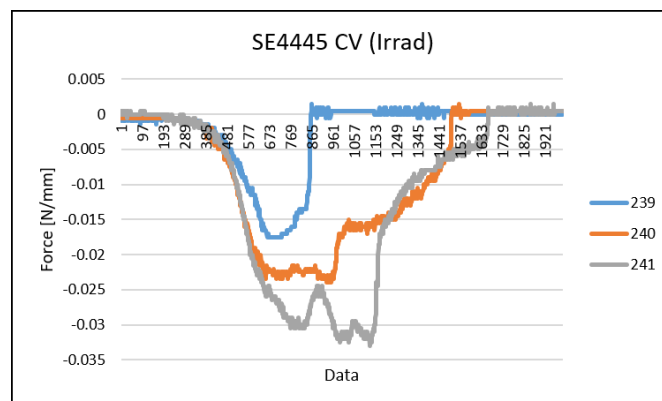


図 50: SE4445CV 照射後

5.4.3 Peel Test:JT-MZ-03M

JT-MZ-03M の Peel Test の結果を記載する。

- 測定サンプル ID:228, 229, 230, 242

照射前の接着剤は硬化後、一度剥がれた接着剤は再接着不可であった。また引き剥がし試験では、接着剤はすべてアルミ側に残り、強度としては 0.005N/mm 程度であった。

照射後の JT-MZ-03M は引き剥がし前に 2 サンプルが破損しており、残り 1 サンプルのみの結果を記載している。強度としては 0.01N/mm 程度であった。

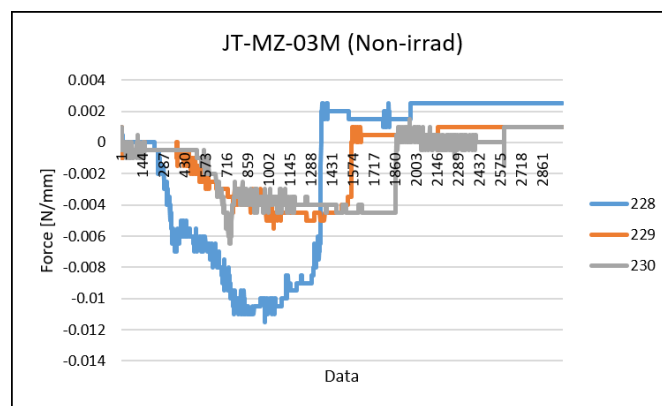


図 51: JT-MZ-03M 照射前

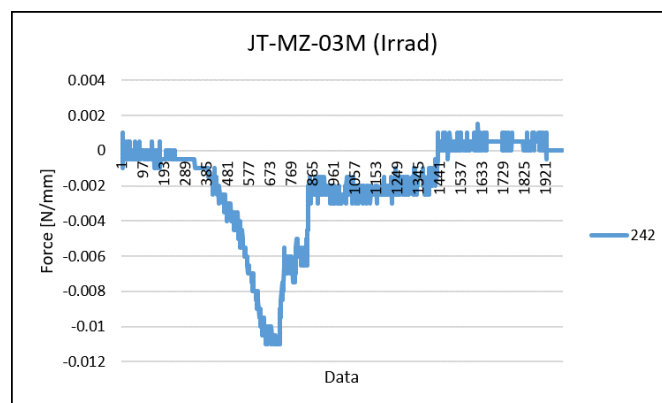


図 52: JT-MZ-03M 照射後

5.4.4 Peel Test:EG7655

EG7655 の Peel Test の結果を記載する。

- 測定サンプル ID:232, 233, 235, 243, 244, 245

照射前の接着剤は硬化後、一度剥がれた接着剤は再接着不可であった。また引き剥がし試験では、接着剤は基本的にカプトンシート側に残り、強度としては 0.25N/mm 程度であった。ID:235 のみ 1.2N/mm 程度の値を記録しているが、このサンプルにおいては接着材の剥がれ方が他とは異なった。

照射後の接着剤は 0.3N/mm(剥がれ始め部分で判断) 程度の強度であった。

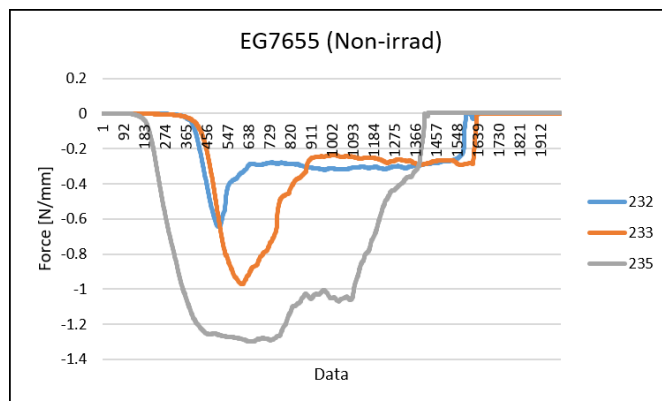


図 53: EG7655 照射前

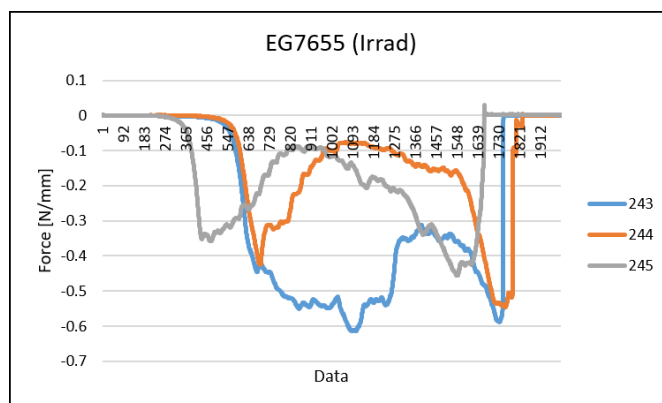


図 54: EG7655 照射後

5.4.5 Peel Test:EG7658

EG7658 の Peel Test の結果を記載する。

- 測定サンプル ID:236, 237, 238

照射前の接着剤は硬化後、一度剥がれた接着剤は再接着不可であった。また引き剥がし試験では、接着剤は基本的にアルミ側に残り、強度としては 0.6N/mm 程度であった。

照射後の接着剤は 0.3~0.4N/mm(接着剤がきれいに剥がれている部分で判断) 程度の強度であった。

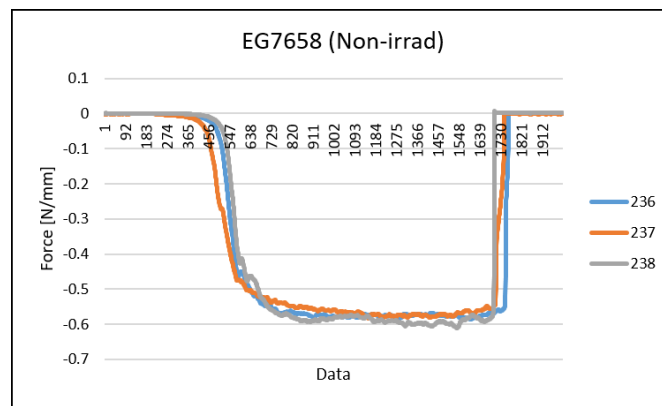


図 55: EG7658 照射前

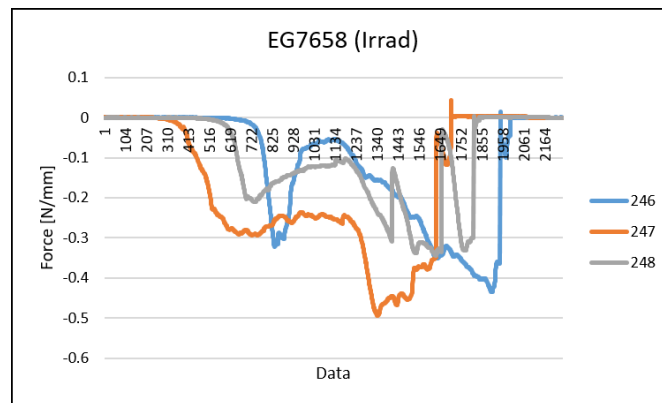


図 56: EG7658 照射後

5.5 Peel Test Sample

Peel Test 後のサンプル写真を ID 順に掲載する。

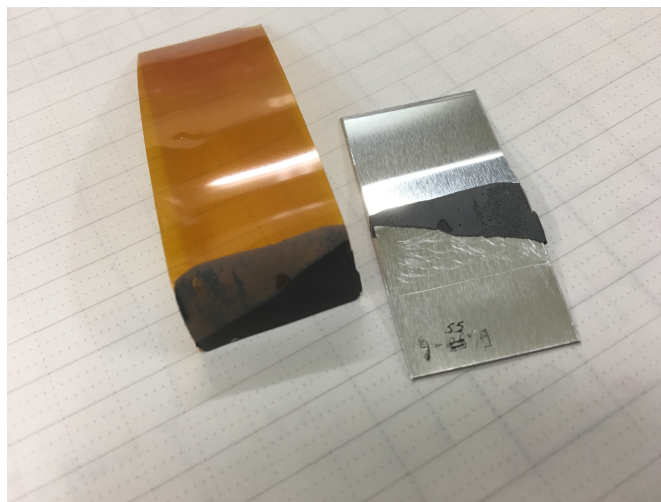


図 57: ID-235 : 照射前 EG7655 のサンプルで、このサンプルのみ 1.2N/mm と、かなり強い値を記録した。他の EG7655 サンプルは接着剤が完全にカプトンシート側に残った状態であったが、このサンプルのみ接着剤が斜めに切り裂かれ、アルミ、カプトン両側に残るような形で引きはがされている。

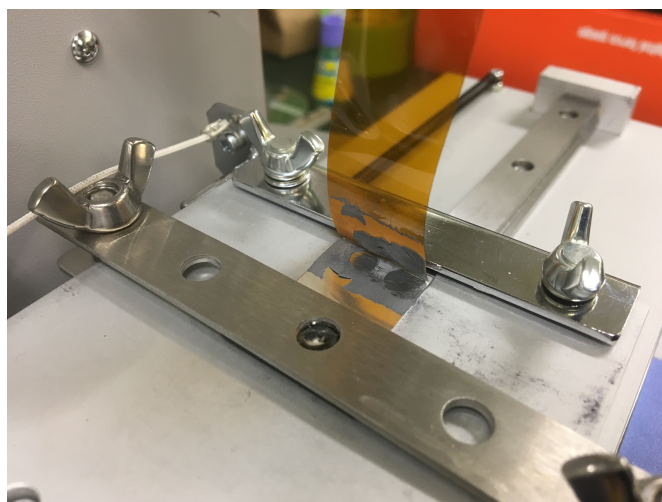


図 58: ID-241 : SE4445CV の照射後サンプル。照射前はゴム状であったが、照射後は接着剤が乾燥したようにひび割れており、引き剥がし時には写真のような残り方となった。

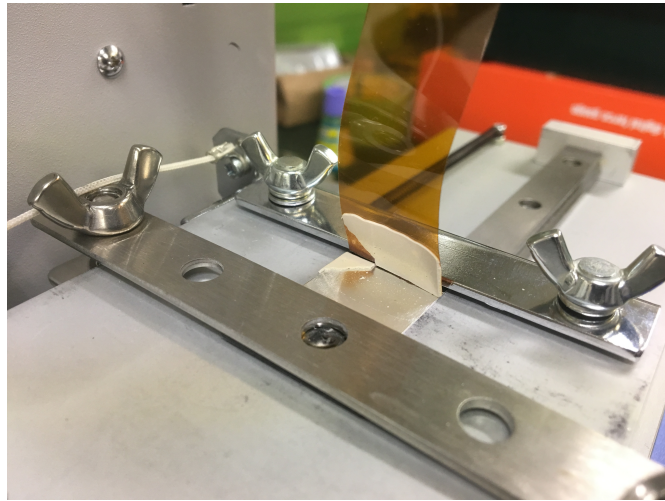


図 59: ID-242 : JT-MZ-03M の照射後サンプル。接着剤が斜めに切れるような形ではがれた箇所があったため、その部分と重ならない剥がし始め部分で接着強度 0.01N/mm と評価した。



図 60: ID-243 : EG7655 の照射後サンプル。照射前はカプトン側に残っていたが、照射後は接着剤が両側に残っていた。

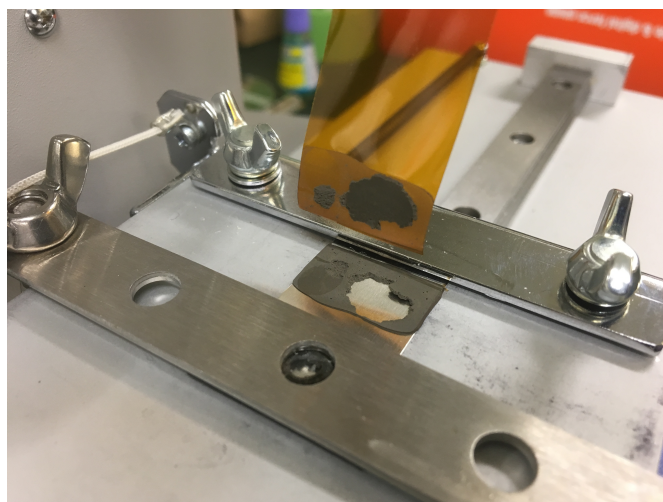


図 61: ID-247 : EG7658 の照射後サンプル。接着剤は図のように剥がれたため、全体がアルミ側に残っている剥がし終わり部分から接着強度は 0.45N/mm 程度と評価した。

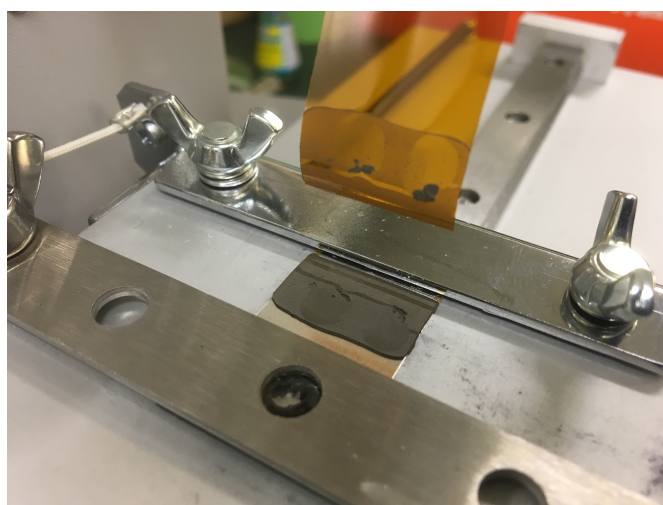


図 62: ID-248 : EG7658 の照射後サンプル。図の接着剤に見える縞模様は、引き剥がし時の力が急に低下している部分と対応している。

5.6 Shear Test

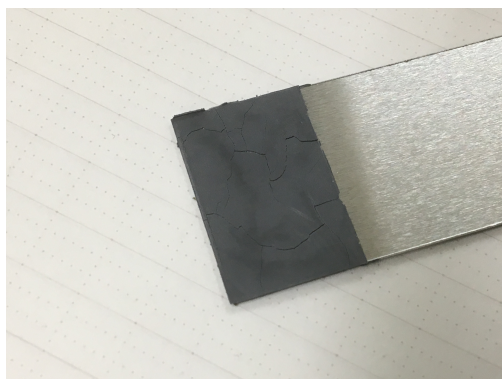
未照射, 照射後のそれぞれのサンプルに対し, Shear Test を行った結果を記述する。

5.4.1 章で述べたように, 行った引き剥がしの強さは 30N までである。Shear Test は以下のような結果となった。

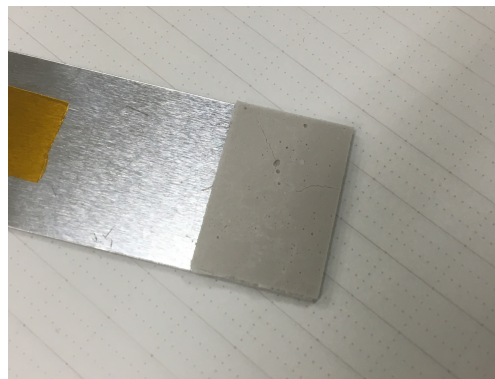
表 42: Shear test 結果

	未照射サンプル [N]	照射後サンプル [N]
SE4445CV	30(max)	12
JT-MZ-03M	30(max)	10
EG7655	30(max)	30(max)
EG7658	30(max)	30(max)

EG7655, EG7658 は 30N まで問題なく耐えたが, SE4445CV, JT-MZ-03M に関しては 10N 程度で破損したことから, この二つの接着剤に関しては放射線による劣化が起きていると考えられる。



(a) SE4445CV 照射後 Shear Test



(b) JT-MZ-03M 照射後 Shear Test

図 63: 照射後 Shear Test 後 : 特に SE4445CV に関してはひび割れが見られ, 放射線照射によって接着剤が変質していることが確認できる

5.7 Thermal Conductivity の照射前後比較

熱伝導接着剤の熱伝導率を照射試験前後で比較した。照射前サンプルの測定は京都教育大, 照射後サンプルの測定は高エネルギー加速器研究機構 富士実験棟にて行った。実験環境のセットアップは 4.2.1 章のものと同様であるが, 本章の実験においては準備物の関係から水冷を使用して実験を行っている。また 1 サンプルにつき 3 回同様の測定を行っている。SE4445CV の照射後サンプル 56, 57 は照射後測定前に破損してしまっていたため, 照射後の熱伝導率は未測定である。

表 43: SE4445CV 熱伝導率測定結果

Sample ID	未照射 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
55	0.850±0.018	0.738±0.007
56	0.759±0.008	-
57	0.743±0.008	-

表 44: JT-MZ-03M 熱伝導率測定結果

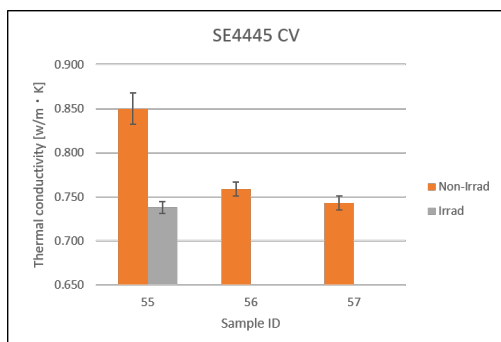
Sample ID	未照射 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
91	0.963±0.052	0.874±0.007
92	0.955±0.007	0.859±0.031
93	1.002±0.005	0.937±0.078

表 45: EG7655 熱伝導率測定結果

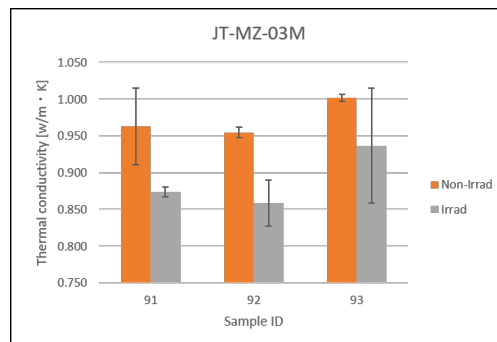
Sample ID	未照射 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
94	0.669±0.014	0.661±0.016
95	0.697±0.020	0.657±0.010
96	0.711±0.021	0.645±0.003

表 46: EG7658 熱伝導率測定結果

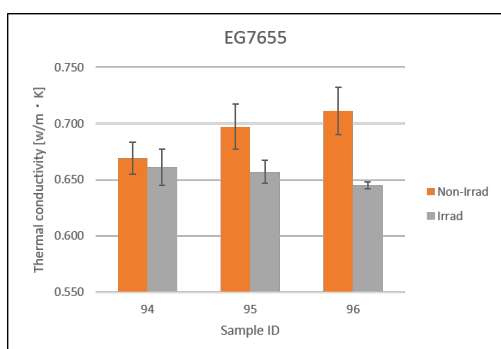
Sample ID	未照射 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
97	0.818±0.005	0.820±0.047
98	0.781±0.007	0.782±0.012
99	0.789±0.034	0.785±0.023



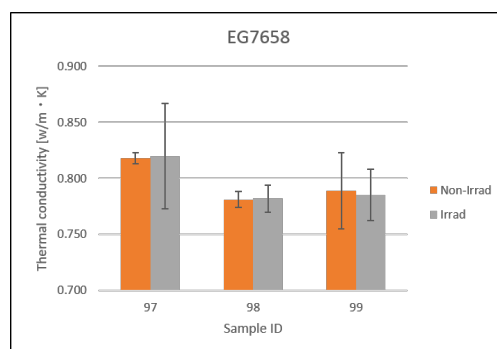
(a) SE4445CV



(b) JT-MZ-03M



(c) EG7655



(d) EG7658

図 64: 照射前後の熱伝導率比較

測定結果より、SE4445CV、JT-MZ-03M は 0.05~0.1W/mK 程度熱伝導率が低下していることが確認できる。EG7655 のサンプルに関しては、最大で 0.05W/mK 程度熱伝導率が低下しているものが見られたが、熱伝導率の低下は全体的な傾向ではないことも確認できる。EG7658 のサンプルに関しては、熱伝導率の低下は見られなかった。

5.8 本節における結論

Strength Test においては EG7655, EG7658(Epoxy 系熱伝導接着剤) は放射線耐性があることが明らかになった。JT-MZ-03M の Peel Test は △ としているが、これはもともとの接着剤の強度が低い事、Sample が測定前に破損しており 1 サンプル分のデータしかとることができなかったことなどから、Peel Test の数値として放射線耐性の評価が出来なかったためである。照射後の Shear Test において SE4445CV, JT-MZ-03M の接着力が低下していることが確認されたため、この二つの接着剤 (Silicon 系熱伝導接着剤) に関しては放射線耐性を持たないと結論付けた。

Thermal Conductivity の評価からは最大でも熱伝導率の低下が 0.1W/mK 程度であったことから、放射線照射が直接熱伝導率に影響することは無く、接着剤自体の低下や接着剤の変質などの影響から間接的に熱伝導率低下を引き起こしていると考えている。

以上の結果から、熱伝導性接着剤においてはエポキシ系の EG7655, EG7658 が放射線耐性があるといえる。EG の熱伝導接着剤に関して、低温環境下で熱伝導率を測定すると -20 °C 付近で熱伝導率が急激に低下するという情報が報告されたが、7.1.7 章にて確認を行った結果、熱伝導率の低下は見られなかった。以上の結果から、熱伝導性接着剤 EG7655, EG7658 は ATLAS アップグレード時に使用する接着剤として有力であると考えられる。

表 47: 熱伝導接着剤の放射線耐性評価

	SE4445CV	JT-MZ-03M	EG7655	EG7658
Peel Strength Test	×	△	○	○
Shear Strength Test	×	×	○	○
Thermal Conductivity Test	△	△	○	○

6 本研究における結論

HL-LHC 実験 ATLAS 検出器のアップグレードに向けた新型 Pixel 検出器の組み立てに関する研究として、以下の内容を本論文の結論とする。

- 組み立て手法開発のためのダミーモジュールを基板加工機を用いて製作した。エンドミル径によるオフセットを調節した図面を使用することで $\pm 50\mu\text{m}$ 程度の精度のダミーモジュールを製作できることが分かった。
- 新型ピクセルモジュールの放電保護に使用する $7\mu\text{m}$ のパリレン成膜が、計算での見積もり通り ASIC の放熱にほとんど影響を及ぼさないことを明らかにした。
- ATLAS アップグレードに使用する熱伝導性接着剤として、エポキシ系熱伝導性接着剤である EG7655, EG7658 は放射線耐性があり、有力な候補であることを明らかにした。

7 付録

7.0.1 回転補正・二点間距離導出プログラム

Pixel Module の各店の座標の測定結果から長さを計算するにあたって、Microsoft Visual Studio を用いて回転角の補正と二点間の距離を計算するプログラムを作成した。付録としてソースコードを記載する。

```
////////////////////////////////////  
////      回転補正・二点間距離の導出  
////////////////////////////////////  
  
#include "stdafx.h"  
#include <iostream>  
#include <math.h>  
using namespace std;  
  
#define PI 3.141592  
  
int main()  
{  
    int a, b;  
    double rad, deg, L;  
    double x, y, x1, y1, x2, y2;  
    rad = 0;  
    b = 0;  
  
    cout << "回転補正:1, 二点間距離:0 を入力してください" << endl;  
    cin >> a;  
  
    switch (a)  
    {  
    case 1:  
        clear:  
        rad = 0;  
        cout << "回転角を計算します" << endl;  
        //(0,0) から (x,y) までの回転角を計算  
        cout << "P1 x=?" << endl; cin >> x;  
        cout << "P1 y=?" << endl; cin >> y;  
  
        rad = atan(y / x);  
        deg = rad*(180 / PI);  
        cout << "rad=" << rad << endl;  
        cout << "deg=" << deg <<"° " << endl;
```

```

cout << "この値で回転角を設定します。" << endl;

//計算した回転角を使用して(x1,y1)を補正
redo :
cout << "補正したい座標を入力してください。(0, 0)で回転角を初期化します。" << endl;
cout << "x1=?" << endl; cin >> x1;
cout << "y1=?" << endl; cin >> y1;

if (x1 == 0 && y1 == 0) {
goto clear;
}else{
x2 = (x1*cos(rad)) + (y1*sin(rad));
y2 = -(x1*sin(rad)) + (y1*cos(rad));
cout << "補正後 x は" << x2 << "です" << endl;
cout << "補正後 y は" << y2 << "です" << endl;
goto redo;
}
case 0:
cout << "二点間距離を求めます" << endl;
cout << "P1 x=?" << endl; cin >> x1;
cout << "P1 y=?" << endl; cin >> y1;
cout << "P2 x=?" << endl; cin >> x2;
cout << "P2 y=?" << endl; cin >> y2;

L = sqrt(pow(x2 - x1, 2) + pow(y2 - y1, 2));

cout << "二点間距離は" << L << "です." << endl;
switch (b) {
cout << "初期化する場合は0を, 続行する場合はそれ以外の数字を入力してください。" << endl;
case 0:
goto clear;
default:
goto redo;
}
}
return 0;
}

```

7.1 Thermal conductivity test 測定環境設定

7.1.1 測定時の熱電対位置と風よけの必要性

熱伝導率の測定手法の研究として、熱電対の位置と風よけの必要性を確認する実験を行った。本実験においては図 65 のような測定環境で実験を行い、14 分経過時点で風よけ用の段ボールを取り去った。また 20 分経過時点で 10 秒程度風を送った。図 66 のように熱電対 (熱電対間の間隔は 1cm) とヒーター、クーリングブロックを配置し測定を行ったところ、図 67 のような結果が得られた。

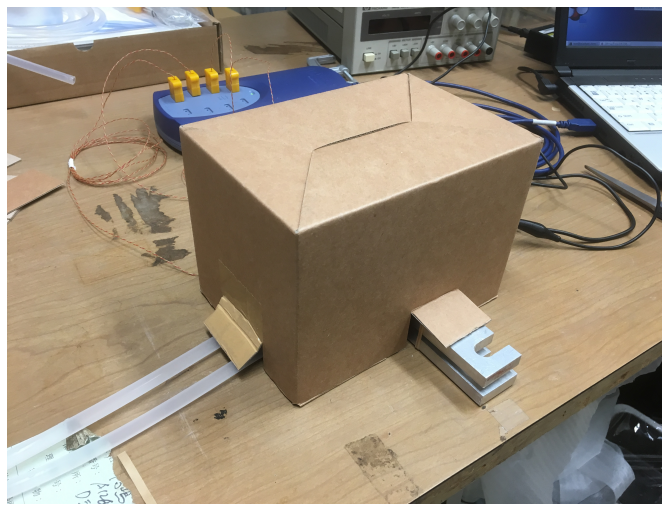


図 65: 測定環境

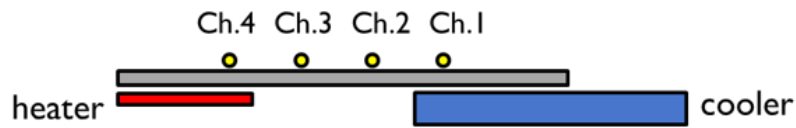


図 66: 熱電対位置変更前

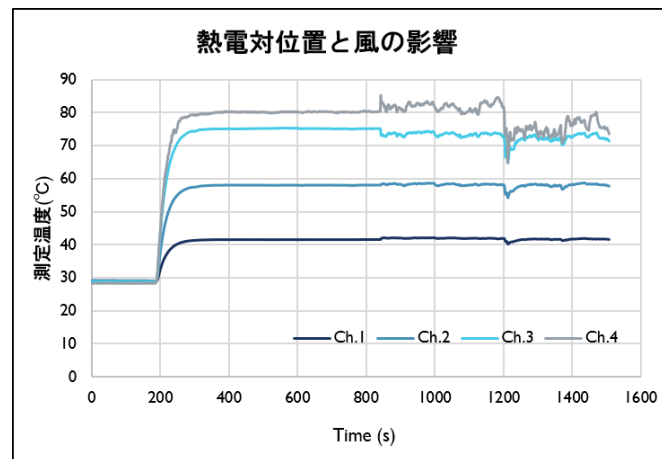


図 67: 熱電対位置と風による測定値への影響

実験結果より、熱電対を等間隔に配置したにもかかわらず Ch.4 と Ch.3 間の温度差が他の熱電対間と異なり等間隔でないことが確認できる。これは Ch.4 の位置がヒーターの上に乗っていたため、Ch.4 と Ch.3 の温度差がヒーター先端から Ch.3 までの温度差として測定されてしまったことが原因と考えられる。

風よけ用段ボール撤去後の 14 分経過時点以降、20 分経過時点では測定値に大きなブレが見られた。このことから、測定時の風よけは測定値を安定させるために必要であると考えられる。

また図 68 のように熱電対位置を変更し測定を行ったところ、図 69 ような結果が得られた。

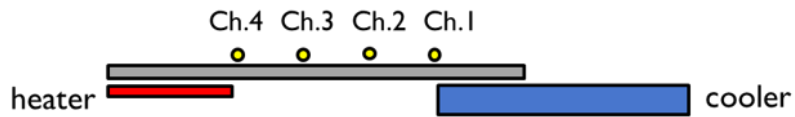


図 68: 熱電対位置変更後

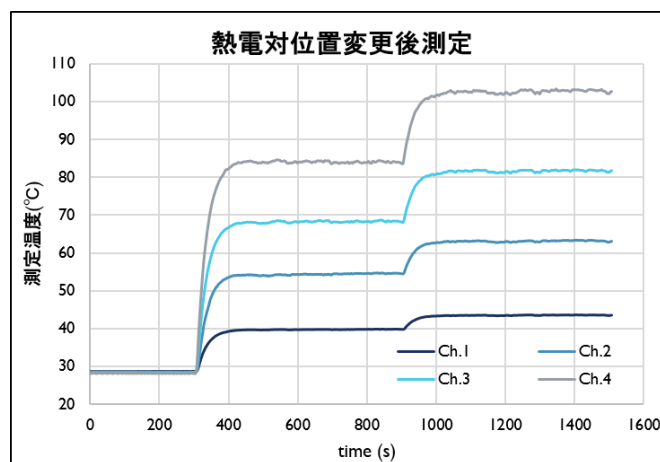


図 69: 熱電対位置変更後測定

図 67 とは異なり、各熱電対間の温度差がほぼ一定の間隔で測定出来ていることが確認できる。このことからヒーター逆側部分 (図 68 ヒータ側のアルミ端から Ch.4 まで) では温度が一定となっていると考えられる。

7.1.2 PC の電源

熱電対での温度測定中、測定値が波打つという現象が数度見られた。熱電対自体の問題かと考え、図 fig:ac 測定のように熱電対を設置し、熱電対の先端をこより直し、コネクタ部分のねじ止め直し、異なる熱電対の使用などを改善し測定を行ったが、どれも測定ブレが改善する様子は見られなかった。

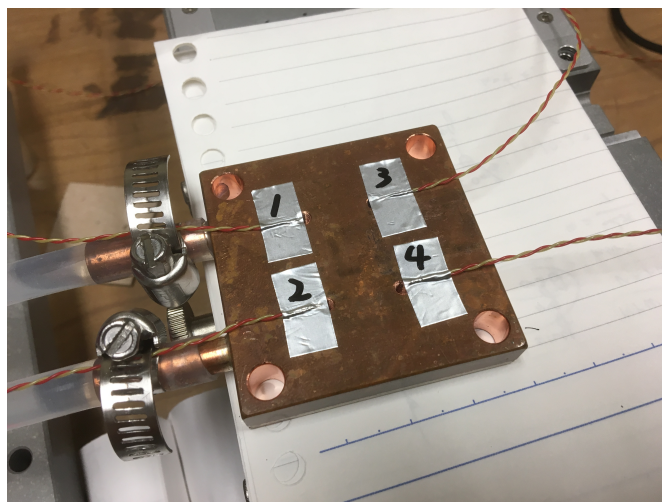


図 70: 熱電対の測定値ブレ

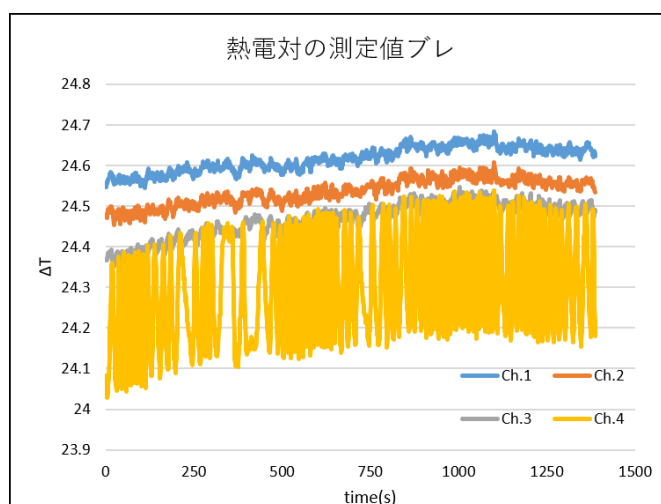


図 71: 測定結果

測定値ブレの改善方法として、PCのACアダプタを抜いて測定を行う方法を試みたところ、図72のような結果となった。この実験では、測定開始から180秒時点でPCのACアダプタを抜いて測定を行っている。多少のブレはまだ見られるものの、図71で見られたような大きな測定値のブレは改善された。原因として、温度モニターであるTC08がPCからUSBを通じて電源供給を行っているため、PCのACアダプタ経由を経由したノイズが測定値に影響を及ぼしたと考えている。この実験以降、熱伝導率の測定はすべてPCのACアダプタを抜いた状態で行うこととした。本論文における熱伝導率の測定は、すべてACアダプタを抜いた状態で行っている。

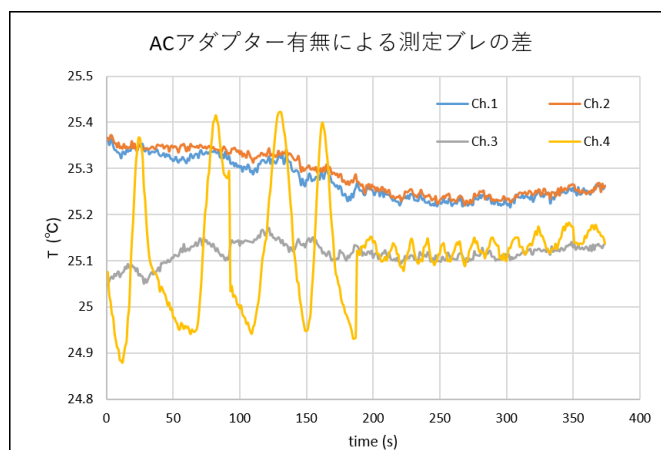


図 72: 測定結果 (180s 以降 PC アダプター無し)

7.1.3 サンプルの圧着測定と熱伝導率

SE4445CV の測定に関しては、硬化後も接着剤が柔らかいため圧着が強すぎると厚さが変わってしまうことが懸念される。また、圧着の強さによって熱伝導率の測定値が異なることが分かっている。熱伝導率の測定条件を決定するために、これらの内容がどの程度測定値に影響するのかを確認する実験を行った。本論文においては 73 の赤丸部分を 1 回ずつ、計 5 回厚みの測定を行い、計算には平均値を使用している。四隅の測定時にはアルミの切断面が盛り上がっている可能性があるため、マイクロメータでの測定箇所が切断面に乗り上げないように注意しつつ測定を行った。

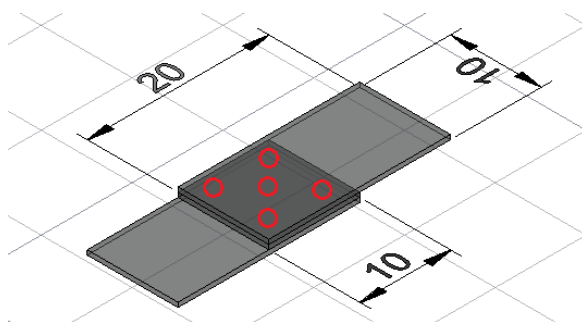


図 73: Thermal conductivity sample 厚み測定位置

表 48: 鉛ブロック無し 厚み測定

Sample ID	測定前 Glue Thickness [μm]	3 回測定後 Glue Thickness [μm]
18	416	418
19	442	440
20	410	405

表 49: 鉛ブロック有り 厚み測定

Sample ID	測定前 Glue Thickness [μm]	1 回目測定後 Glue Thickness [μm]	2 回目測定後 Glue Thickness [μm]	3 回目測定後 Glue Thickness [μm]
18	418	381	279	269
19	440	324	286	273
20	405	394	301	252

表 50: 鉛ブロック無し 熱伝導率測定

Sample ID	1 回目 熱伝導率 [W/mK]	2 回目 熱伝導率 [W/mK]	3 回目 熱伝導率 [W/mK]	Average [W/mK]
18	0.82	0.81	0.79	0.81 ±0.02
19	0.88	0.94	0.87	0.90 ±0.04
20	0.81	0.79	0.80	0.80 ±0.01

表 51: 鉛ブロック有り 熱伝導率測定

Sample ID	1 回目 熱伝導率 [W/mK]	2 回目 熱伝導率 [W/mK]	3 回目 熱伝導率 [W/mK]	Average 熱伝導率 [W/mK]
18	1.04	1.14	1.13	1.10 ±0.06
19	1.22	1.08	1.14	1.15 ±0.07
20	1.22	1.11	1.00	1.11 ±0.11

測定される熱伝導率は、ジグ上にさらに鉛ブロックを乗せ強く圧着したものの方が大きく、SE4445CV の文献値 1.34[W/mK] に近い値が出るようであった。しかし表 49 のように、接着剤の厚みが一回ごとに変わってしまうこと、標準偏差が鉛ブロック無しの測定の方が小さく、安定した測定が行えていることが結果から確認できたため、本論文においては鉛ブロックでの圧着無しを測定条件とした。

また表 48 の結果より鉛ブロックを用いない場合、3 回熱伝導率の測定を行った後でも厚みはほぼ変わらないことが確認できた。

7.1.4 接着剤の厚みと熱伝導率

熱伝導性接着剤の厚みは熱伝導率の計算に使用され、理想的な測定環境と理想的なサンプルであれば接着剤の厚みが異なった場合でも熱伝導率は同様の結果が計算される。しかしいくつか実験を行った結果、サンプルの熱伝導性接着剤が厚くなるほど熱伝導率が上がる傾向が確認された。

Sample21~30 は、それぞれ異なる厚みとなるように製作したサンプルであり、結果として200~400 μm の接着剤の厚みを持つサンプルを製作することができた。これらのサンプルについて、以下のような測定を行った。

1. サンプル製作、接着剤硬化後厚みを測定
2. 鉛ブロック無しで熱伝導率測定、熱伝導率測定後の厚みを測定
3. 接着剤の厚みが200 μm 程度となるように厚みをコントロールしつつ接着剤を圧着、厚み測定
4. 圧着後鉛ブロック無しで熱伝導率を測定、熱伝導率測定後の厚みを測定
5. 圧着後のサンプルに鉛ブロック有りで熱伝導率測定、熱伝導率測定後の厚みを測定

実験の結果を次ページ以降に記載する。実験結果の散布図より、接着剤の厚みが厚いほど熱伝導率が高く測定されている傾向が確認できる。

Sample29 は鉛ブロック無しの測定において、他のサンプルとは異なり接着剤の厚みの割に低い熱伝導率が測定された。鉛無しの測定で厚みが変わっていること、圧着後の測定では他サンプルと同程度の熱伝導率が測定されていることから、サンプルの接着時に気泡が混入し、圧着によって気泡が抜けたのではないかと考えている。

また圧着によってほぼ同程度の厚さにした後の測定では、熱伝導率はほぼ同程度の値であることが確認できる。

表 52: 鉛ブロック無し 接着剤の厚みと熱伝導率測定結果

Sample ID	鉛ブロック無し 測定前 [μm]	鉛ブロック無し 測定後 [μm]	鉛ブロック無し 熱伝導率測定 [W/mK]
21	270	270	0.58
22	200	200	0.43
23	216	214	0.55
24	224	221	0.51
25	246	249	0.55
26	243	244	0.55
27	222	219	0.51
28	312	321	0.72
29	394	369	0.47
30	345	343	0.78

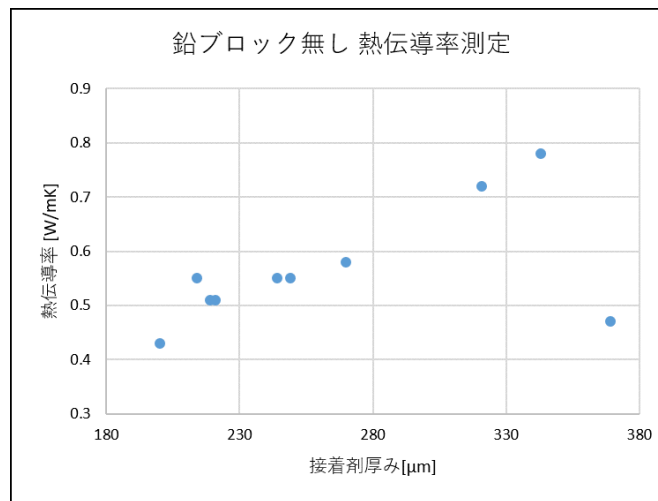


図 74: 鉛ブロック無し 熱伝導率測定

表 53: 圧着後 接着剤の厚みと熱伝導率測定結果

Sample ID	圧着後 測定前 [μm]	圧着後 測定後 [μm]	圧着後 熱伝導率測定 [W/mK]
21	196	195	0.46
22	187	188	0.33
23	187	193	0.48
24	207	213	0.50
25	224	221	0.50
26	220	217	0.53
27	213	214	0.50
28	208	211	0.42
29	190	192	0.46
30	191	193	0.51

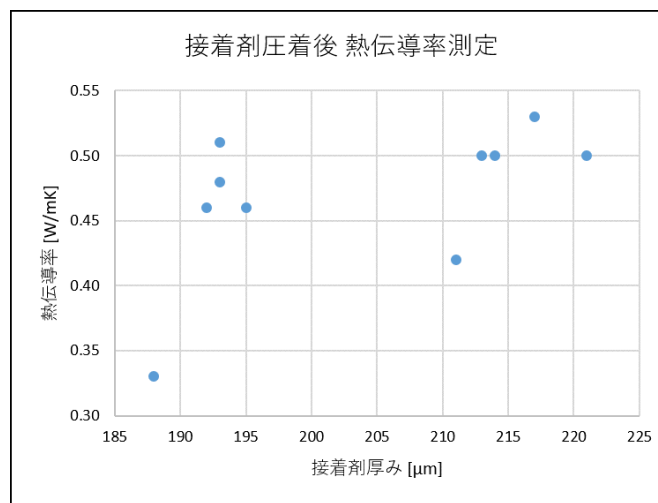


図 75: 接着剤圧着後 熱伝導率測定

表 54: 圧着後鉛ブロック有り 接着剤の厚みと熱伝導率測定結果

Sample ID	鉛ブロック有 測定後 [μm]	鉛ブロック有 熱伝導率測定 [W/mK]
21	173	0.82
22	183	0.91
23	182	0.84
24	139	0.66
25	169	0.70
26	170	0.84
27	178	1.09
28	178	0.78
29	195	1.01
30	176	0.84

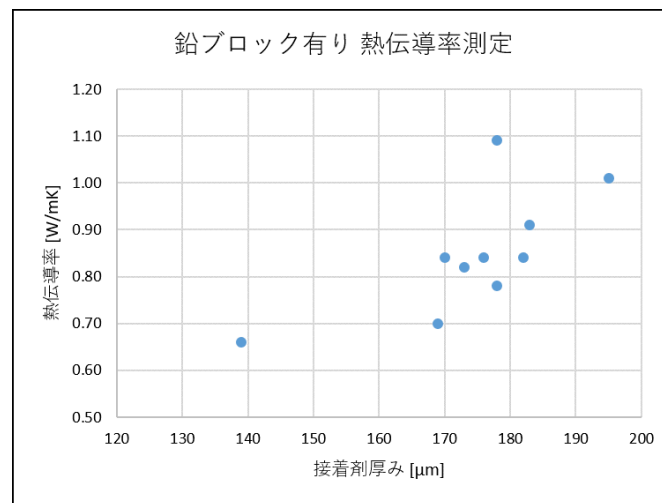


図 76: 鉛ブロック有り 熱伝導率測定

7.1.5 サンプルの厚みコントロール

理想的なサンプルと測定環境であれば、厚みは熱伝導率の計算式に含まれているため、接着材の厚みの違いは熱伝導率に影響しないはずである。しかし 7.1.4 章の実験より、本実験サンプルと環境においては接着剤の厚みが熱伝導率に影響することが確認された。そのためサンプル製作の段階で接着剤の厚みをコントロールし、目標値 (380 μm) から $\pm 50\mu\text{m}$ の範囲に収まっている物を解析対象サンプルとした。

接着には SCT 組み立てジグとマスキングテープ、G10 板 (200 μm , 500 μm) を用いた。接着剤がサンプルの下に入り込まないように下部アルミ下部分を広めにマスキングし、G10 板をマスキングテープで上部アルミの高さを調整することで接着剤の厚みをコントロールする。設置後 SCT ジグ上部 (1084g) でサンプルを押しさえつつ、12 時間以上接着剤を硬化させた。

この方法により、ほとんどのサンプルの接着材厚みを $380\pm 50\mu\text{m}$ の範囲でコントロールすることができた。

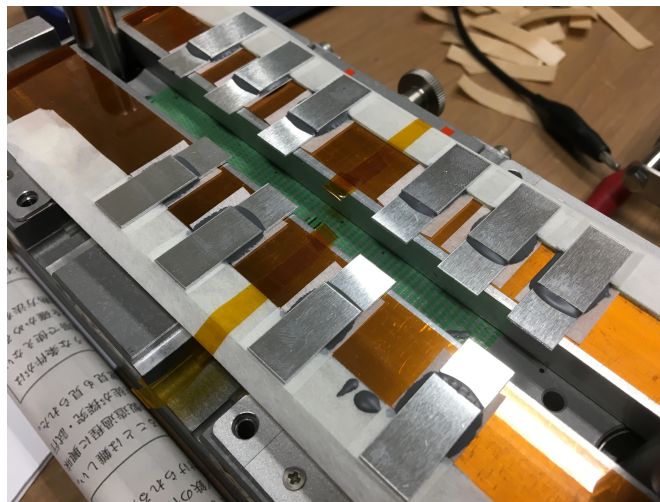


図 77: サンプル製作

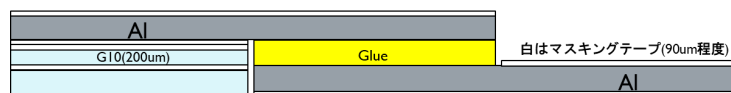


図 78: 厚みコントロール方法

7.1.6 照射前後の熱伝導率測定データ詳細

照射前後の熱伝導率測定データの詳細を掲載する。SE4445CV の sample56, 57 は照射後測定前に破損していたため、照射後の熱伝導率測定は行うことができなかった。また EG7655 照射前熱伝導率測定時, sample96 の一回目測定値のみ他の値より大きな値が出ているが、これは測定時にヒーター、ジグ間の段ボールを挟み忘れていたのではないかと考えており、解析には使用していない。

表 55: SE4445CV 照射前後の熱伝導率比較

sample no	照射前 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
55	0.871	0.746
55	0.839	0.737
55	0.840	0.732
56	0.755	-
56	0.754	-
56	0.768	-
57	0.748	-
57	0.734	-
57	0.748	-

表 56: JT-MZ-03M 照射前後の熱伝導率比較

sample no	照射前 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
91	1.022	0.872
91	0.936	0.868
91	0.929	0.882
92	0.947	0.896
92	0.959	0.841
92	0.959	0.842
93	0.998	1.024
93	1.002	0.914
93	1.007	0.873

表 57: EG7655 照射前後の熱伝導率比較

sample no	照射前 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
94	0.685	0.644
94	0.666	0.662
94	0.656	0.676
95	0.676	0.647
95	0.702	0.666
95	0.714	0.658
96	1.189	0.642
96	0.726	0.644
96	0.696	0.648

表 58: EG7658 照射前後の熱伝導率比較

sample no	照射前 Thermal Conductivity [W/mK]	照射後 Thermal Conductivity [W/mK]
97	0.823	0.827
97	0.814	0.864
97	0.816	0.770
98	0.773	0.771
98	0.785	0.781
98	0.786	0.795
99	0.767	0.767
99	0.827	0.810
99	0.772	0.777

7.1.7 EG7655 低温環境での測定

EG系熱伝導接着剤を使用した際、 -20°C 付近で熱伝導率が急激に低下するという情報が報告されたため、確認のため恒温槽を用いた実験を行った。EG7655を使用した sample43~45 を使用し、恒温槽内に SCT ジグとクーリングブロック、ヒーターを設置して環境温度を変化させた。測定は他の熱伝導率測定の実験と同様、SCT ジグによりサンプルを上から押さえた状態で行っている。恒温槽内の温度は 20°C 、 0°C 、 -20°C 、(sample44 のみ -40°C) と測定した後、 20°C に戻し再度熱伝導率の測定を行った。

次頁に実験結果を掲載する。どのサンプルにおいても -20°C での熱伝導率の低下は見られず、 -40°C まで環境温度を低下させた sample44 も大きな変化は見られなかった。

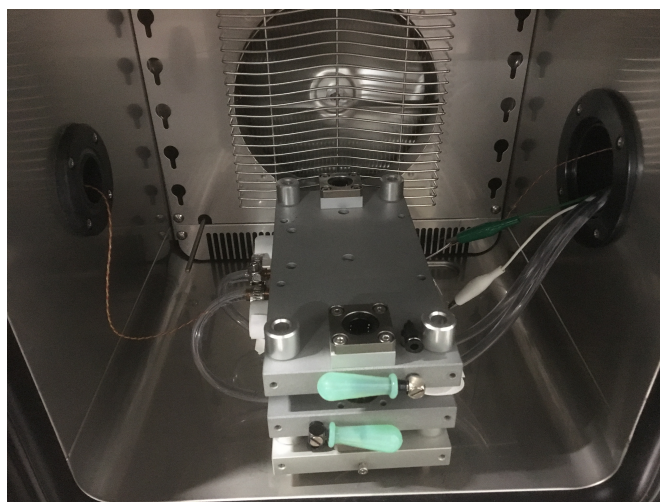


図 79: 測定環境

表 59: 測定結果詳細

Sample ID	Thermal Conductivity [W/mK]				
	20 °C	0 °C	-20 °C	(-40 °C)	20 °C
Sample 43	0.70	0.73	0.69		0.68
Sample 44	0.74	0.74	0.80	0.75	0.68
Sample 45	0.64	0.71	0.73		0.68

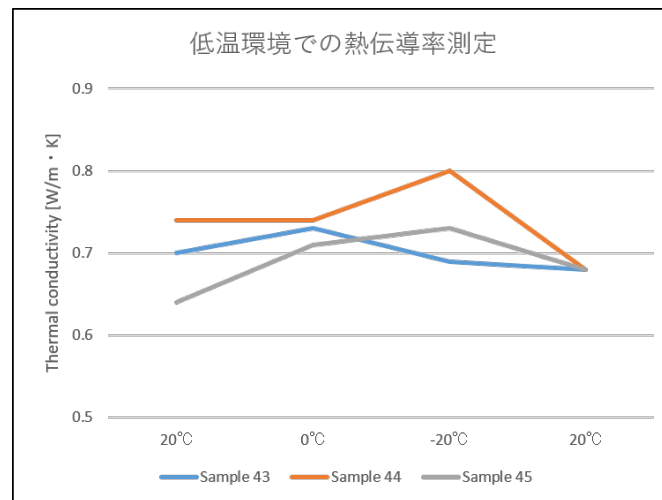


図 80: 測定結果

8 謝辞

大学院での研究活動を行うにあたって、基礎物理学研究室の高嶋隆一教授には ATLAS グループでの研究活動を勧めていただき、助言を頂きつつ自由に研究活動をさせて頂きました。

ATLAS-J シリコングループスタッフの東城順治准教授 (九州大学), 外川学准教授 (KEK), 博士研究員の小林 大氏 (九州大学) にはお忙しい中本当にお世話になりました。要領を得ない質問にも親切に対応していただき、このような形で修士論文をまとめることができました。

九州大学の山口尚樹君, 藤野主一君には同じ Assembly group として研究活動をする上で相談に乗っていただくこともあり、大変心強かったです。また九州大学素粒子実験研究室の皆様のおかげで、九大滞在時には非常に楽しい時間を過ごさせて頂きました。

ATLAS-J シリコングループの中村浩二先生 (KEK), 池上陽一先生 (KEK) には照射試験をはじめ、色々な場面でお世話になりました。ダミーモジュール製作では南條創准教授 (大阪大学) に基板加工機をお借りし、使い方から丁寧に教えていただきました。また ATLAS-J シリコングループスタッフの皆様, 学生の皆様にもワークショップやミーティング等で大変お世話になりました。

最後になりましたが、大学院生活を共にし時には助けて下さった京都教育大学理科教育専修の皆様, 基礎物理学研究室の皆様, 大学生活の半分以上お世話になった京都医療センター和田啓道先生はじめ展開医療研究部の皆様, 学部含め 6 年間もの間大学生活を支えてくれた家族には本当に感謝しています。

皆様がそれぞれの分野でご活躍されることを願います。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Y.Unno 『Development of n^+ -in-p planar pixel sensor flip-chip modules with quad FE-I4 readout ASICs』
- [2] 半導体/電子デバイス物理 2017/11/21 閲覧
http://kccn.konan-u.ac.jp/physics/semiconductor/top_frame.html
- [3] 半導体の部屋 2017/11/22 閲覧
<https://www.hitachi-hightech.com/jp/products/device/semiconductor/index.html>
- [4] 『The FE-I4B Integrated Circuit Guide』
- [5] SE4445CV specsheet 2017/12/31 閲覧
<http://www.dowcorning.com/DataFiles/090276fe80260420.pdf>
- [6] JT-MZ-03M specsheet 2017/12/31 閲覧
<http://www.widework.co.jp/page14#ttl-navi16>
- [7] EG7655 specsheet 2017/12/31 閲覧
<https://www.aitechnology.com/uploads/pdf/products/nasa/eg7655t.pdf>
- [8] EG7658 specsheet 2017/12/31 閲覧
<https://www.aitechnology.com/uploads/pdf/products/dieattach/eg7658t.pdf>
- [9] 『SCS PARYLENE PROPERTIES』