

2018 年度 修士論文

ATLAS 検出器のアップグレードに向けた
Pixel 検出器のプロトタイプ製作に関する研究

2019 年 3 月 25 日

京都教育大学 理科教育専修
基礎物理学研究室 修士 2 年

山下 将暉

1 概要

LHC(Large Hadron Collider)とは欧州合同原子核研究機構(CERN)が保持するスイスとフランスの国境間にある地下100m、円周が27kmの加速器である。この加速器を用いて様々な実験が行われており、ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS)検出器もLHCに設置されている検出器の1つとなっている。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、新粒子などの存在を明らかにすることを目的としている。

LHCは2023より3年間のロングシャットダウン期間を経て、2026年からHL(High Luminosity)-LHCへとアップグレードされる。HL-LHCへアップグレードされることにより、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を予定されている。このアップグレードにより重心系エネルギー、ルミノシティが大幅に向上する予定となっている。

ATLAS検出器の内層に設置される内部飛跡検出器であるPixel検出器も低コストで大量生産できるモジュールへ改良することとなっている。

本論文では九州大学、高エネルギー加速器研究機構、京都教育大学が参加しているATLAS-Japan Sillicone GroupのAssembly Groupとして、デモンストレーター製作と山下が中心に行った組み立ての際に使用する熱伝導接着剤の評価について記述する。

目次

1	概要	1
2	はじめに	8
3	序論	10
3.1	LHC/ATLAS 実験	10
3.2	ATLAS 検出器	11
3.3	シリコンピクセル型検出器	13
3.4	シリコンセンサの仕組み	14
3.4.1	半導体の種類	14
3.4.2	エネルギー準位とバンド構造	15
3.4.3	p 型,n 型半導体のバンドギャップ	16
3.4.4	pn 接合	17
3.4.5	シリコンピクセル検出器の仕組み	19
3.5	ASIC	20
4	デモンストレーターモジュールの組み立て	21
4.1	デモンストレータ製作の目的	21
4.2	組み立ての流れ	22
4.2.1	Flex 基板	23
4.2.2	FEI4 Quad module	24
4.2.3	Cooling Cell	25
4.2.4	組み立て治具	26
4.3	Module の接着	29
4.3.1	ステンシル	30
4.3.2	Cooling Cell の接着	31
4.3.3	熱伝導接着剤の塗布	32
4.3.4	読み出しと封止	38
4.4	接着精度の繰り返し測定	41
5	熱伝導接着剤の新型熱伝導率測定装置の製作	49
5.1	新型の熱伝導率測定器の試作	49
5.2	試作器を用いたコイン挟み込み試験	52
5.3	熱伝導測定に用いるパラメータ出し	55
5.4	新型熱伝導測定器の製作	56

5.5	熱電対の接着方法	59
6	低温環境における熱伝導率試験	61
6.1	set up	61
6.1.1	恒温槽が作り出せる温度測定	61
6.1.2	コインが熱平衡に達するまでの時間測定	62
6.1.3	熱電対の貼り付け位置	64
6.2	低温環境における SE4445CV の熱伝導率測定	65
6.3	SE4445CV の熱伝導率の変化に関する考察	70
6.4	低温環境における EG7655 の熱伝導率測定	73
6.5	EG7655 の熱伝導率の変化に関する考察	74
6.6	結論	81
7	謝辞	82

図目次

1	LHC の全体像 [4]	10
2	ATLAS 検出器 [12]	11
4	Inner Detector[12]	12
6	Pixel Detector[12]	12
8	ATLAS Pixel Module[4]	13
10	シリコンの n 型半導体 [4]	14
11	シリコンの p 型半導体 [4]	14
12	物質のエネルギーバンド [4]	15
13	p 型,n 型半導体のバンドギャップ [4]	16
14	半導体のバンド構造	16
15	pn 接合 [13]	17
16	キャリアー状態 [4]	18
17	順方向動作 [4]	18
18	逆方向動作 [4]	18
19	pn 接合 [4]	19
20	FE-I3,FE-I4[4]	20
21	RD53A[2]	20
22	module assembly[9]	22
24	Flex 基板設計図 [9]	23
25	Flex 基板裏面	23
26	FE-I4 Quad typeB	24
28	Cooling Cell	25
29	Longclon	25
31	フリップチップモジュールと FPC の接着	26
32	フリップチップモジュールと Cooling Cell の接着	27
33	Module base[9]	27
34	Flex base[9]	27
35	Cell base[9]	28
36	Stensil mask	30
37	FPC 裏面に塗布した接着剤	30
38	電子天秤と遠心脱泡機	33
39	ディスペンサー	33
40	Compressor	33
41	塗布パターン [9]	33

42	KEK146 塗布結果 [8]	34
44	KEK146 の接着精度測定	35
45	KEK147 の塗布結果 [8]	36
46	KEK147 の接着精度測定	37
47	module cover	38
48	module board	38
50	KEK145 Analog scan[8]	39
51	KEK145 Digital scan[8]	40
52	3次元測定器による原点測定	41
53	3次元測定器によるダミー対角点測定	41
54	FPC 上における測定点	42
55	測定結果の見方	43
56	1回~4回目の測定結果 [17]	44
57	5~8回目の測定結果 [17]	44
58	9~12回目の測定結果 [17]	45
59	フリップチップダミーの右下エッジ	46
60	13~15回目の測定結果 [17]	47
61	繰り返し測定結果	48
62	コインの厚み測定結果	49
63	試作 coin に生じた隙間	50
64	CERN っで使用されている熱伝導率測定器の図面	50
65	CERN での作成されているコインの図面	51
66	熱伝導測定試作器の setup	52
67	使用したペルチェ素子の規格 [15]	53
68	使用した電源装置の規格 [14]	54
69	Plate 設計図	56
70	クーラーのセットアップ	57
71	Pillar 設計図	57
72	Pole 設計図	58
73	完成した測定器	58
74	アルミテープの貼り付け方	59
75	貼り付け方 2 で熱電対を貼り付けた様子	60
76	恒温槽の冷却時間	61
77	測定 Set up の模式図	62
78	Set up を横から見た図	62
79	サンプル測定時間	63
80	改良前のセットアップ	64

81	改良後のセットアップ	64
82	25 °Cにおける温度-時間の変化	66
83	0 °Cにおける温度-時間の変化	66
84	-10 °Cにおける温度-時間の変化	67
85	-20 °Cにおける温度-時間の変化	67
86	-30 °Cにおける温度-時間の変化	68
87	-40 °Cにおける温度-時間の変化	68
88	SE4445CV の温度-熱伝導率の変化	69
90	放熱対策用シリコーンゴムの熱伝導率 [10]	72
91	EG7655 に 8V を印可したときの温度-熱伝導率の変化	75
92	EG7655 に 12V を印可したときの温度-熱伝導率の変化	76
93	EG7655 に 16V を印可したときの温度-熱伝導率の変化	77
94	EG7655 に 22V を印可したときの温度-熱伝導率の変化	78
95	EG7655 の温度-熱伝導率の変化	78

表目次

1	標準模型におけるフェルミオン	8
2	標準模型におけるボゾン	8
3	ASIC サイズ	20
4	フリップチップセンサー寸法	24
5	KEK146 モジュールの位置測定	35
6	KEK147 の位置測定	36
7	試作器を用いた測定結果	52
8	加えるべき電流値測定	55
9	熱電対の貼り付け方による温度差測定	60
10	SE4445CV の熱伝導率測定平均値	65
11	SE4445CV の熱伝導率実験値	65
12	SE4445CV の温度差の比	70
13	EG7655(8V) の熱伝導率測定結果	73
14	EG7655(22V) の熱伝導率測定結果	73
15	EG7655(8V) の温度差の比率	74
16	EG7655(22V) の温度差の比率	74
17	EG7655(8V) の熱伝導率測定結果	75
18	EG7655(12V) の熱伝導率測定結果	75
19	EG7655(16V) の熱伝導率測定結果	76
20	EG7655(22V) の熱伝導率測定結果	77
21	EG7655 の熱伝導率測定結果	79
22	EG7655 の熱伝導率測定誤差	79

2 はじめに

素粒子物理学の標準模型では表 1 にある 12 種類のフェルミオンと表 2 にある 5 種類のボゾンで現象を記述する。フェルミオンは物質を構成し、ボゾンは強い力、電磁気力、弱い力を媒介する 4 種類のゲージボゾンと質量の起源とされるヒッグス粒子からなる。

フェルミオンはクォークとレプトンに分けることができ、第一世代から第三世代まで分類することができる。クォークの質量は世代が上がるにつれて増加し、不安定となる。クォークはどの粒子も電荷を持ち、クォーク同士で結合して複合粒子を形成する。クォークはそれぞれアップ (u)、ダウン (d)、チャーム (c)、ストレンジ (s)、トップ (t)、ボトム (b) という。レプトンは電荷をもつ電荷レプトンと電荷をもたない中性レプトンに分けることができ、単体で存在する。電荷レプトンはそれぞれ電子 (e^-)、 μ 粒子 (μ^-)、タウ粒子 (t^-) という。中性レプトンはそれぞれ電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_t) という。

2012 年には欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突加速器 (LHC: Large Hadron Collider) において ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) 実験と CMS (Compact Muon Solenoid) 実験により標準模型において未発見であったヒッグス粒子の存在が間接的に確認された。

表 1: 標準模型におけるフェルミオン

	第一世代	第二世代	第三世代	スピン	電荷
クォーク	u	c	t	1/2	+2/3
	d	s	b	1/2	-1/3
レプトン	ν_e	ν_μ	ν_τ	1/2	0
	e^-	μ^-	τ^-	1/2	-1

表 2: 標準模型におけるボゾン

	記号	スピン	電荷	相互作用
ゲージボゾン	r	1	0	電磁相互作用
	g	1	0	強い相互作用
	W^\pm	1	± 1	弱い相互作用
	Z^0	1	0	弱い相互作用
ヒッグス粒子	h	0	0	質量の起源

しかし、これらの粒子だけでは宇宙に多く存在していると言われているダークマターの存在などの現象について説明をすることができない。これらの現象を解明することがエネルギー物理学の大き

な課題であり、今後の物理の進路を大きく左右するものとなっている。そこで、標準理論を超える超対称性粒子というものの存在が予想されている。現在ある世界最大の加速器でさえこれらの粒子を発見することは困難であるために、2023年から3年間のロングシャットダウン期間を経て、HL(High Luminosit)-LHCへとアップグレードされる。このアップグレードによってルミノシティが5倍に増加し高輝度での実験が可能となり、超対称性粒子の発見や標準理論が予測する全領域でヒッグス粒子を発見することが求められている。それに伴い ATLAS 検出器の内層に設置される内部飛跡検出器である Pixel 検出器も低コストかつ大量生産可能な位置分解能や放射線耐性の高いセンサーへアップグレードすることが予定されている。

また、検出器は-15℃という低温環境で使用されるので検出器に使用する熱伝導接着剤は低温環境においても高い熱伝導率があり、放射線によって接着強度が変化しない接着剤の選定が必要である。

本研究は九州大学、高エネルギー加速器研究機構、総合研究大学院大学と共同研究を行い、CERNで性能試験を行うためのデモンストレータ製作に参加したことや新型の熱伝導率試験器の開発、熱伝導接着剤の低温環境における熱伝導率の変化に関する研究を行った。

3 序論

3.1 LHC/ATLAS 実験

LHC(Large Hadron Collider)とは欧州合同原子核研究機構(CERN)が保持するスイスとフランスの国境間にある地下100m、円周27kmの大型ハドロン衝突型加速器である。LHCにはATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS)、ALICE(A Large ion Collider Experiment)、CMS(Compact Muon Solenoid)などの検出器が設置されており、それぞれの目的で実験や解析が行われている。LHCは2013年から3年間のロングシャットダウン期間を経て2026年頃にHL(High Luminosity)-LHCへアップグレードされる。アップグレードにより重心系エネルギーやルミノシティが向上する予定であるが、放射線損傷も大きくなるので、より高い放射線耐性のある検出器の開発が求められる。

ATLAS実験とは、世界最高エネルギーの加速器であるLHCで陽子同士を高エネルギーで正面衝突させたときに生じる粒子を観測し、新しい現象の発見を目指しているものである。この実験では標準理論が予測する全領域でヒッグス粒子が発見されることや超対称性粒子の発見、余剰次元の発見などが期待されている。

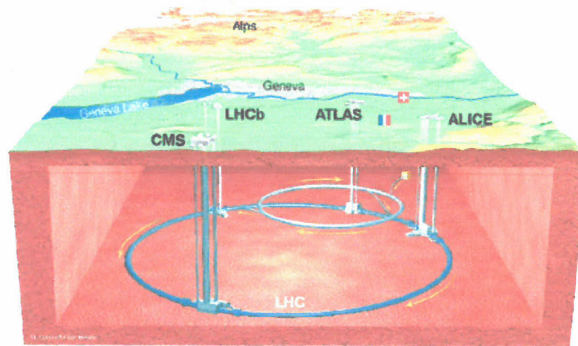


図1: LHCの全体像 [4]

3.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は全長 44m、高さ 22m からなる検出器であり、3 層のパレル、3 層のエンドキャップから成っており、パレルの呼び方は内側から B-Layer、Layer-1、Layer-2 と呼ばれている。検出器には内側からピクセル型検出器、ストリップ型検出器、ストロー型ガス検出器が設置されている。HL-LHC に伴いアップグレードが行われるのはピクセル型検出器とストリップ型検出器である。ストロー型ガス検出器は撤去される予定となっている。

ATLAS 検出器の中でアトラスジャパンが担当しているものは、シンギャップチェンバー、内部飛跡検出器、超伝送ソレノイド電磁石、ミューオン検出器の電子回路であり、京都教育大学が参加しているアトラスジャパンのシリコングループは主に内部飛跡検出器のアップグレードについて研究を行っている。

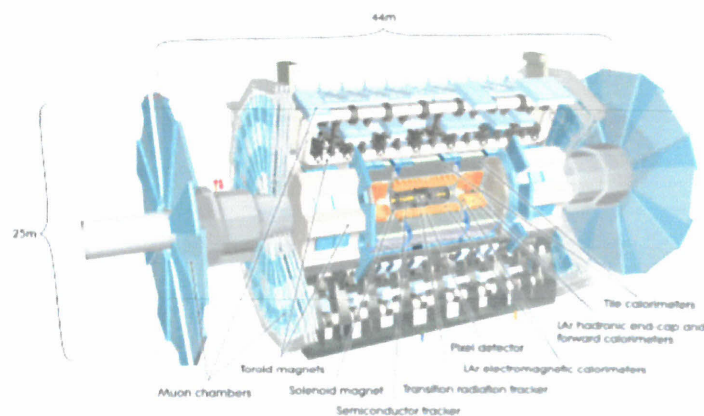


図 2: ATLAS 検出器 [12]

(a) ミューオンチェンバーの内側に 3 層のパレル、3 層のエンドキャップからなる検出器が設置されている

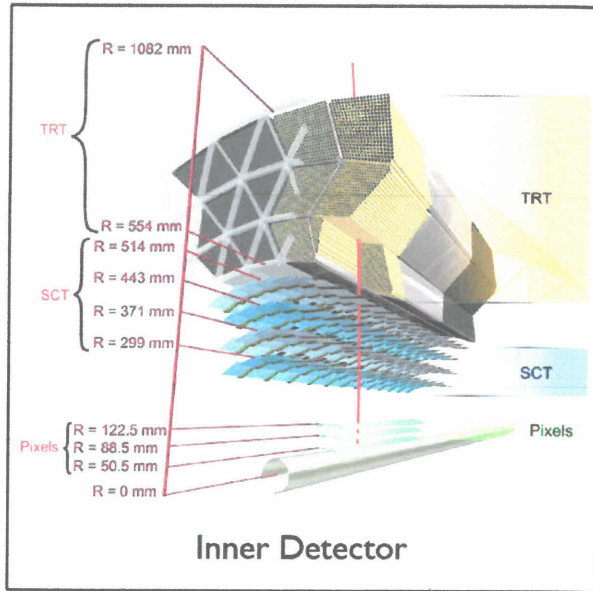


図 4: Inner Detector[12]

(a) Inner Detector は内側からピクセル検出器、ストリップ検出器、ストローガス検出器となっている

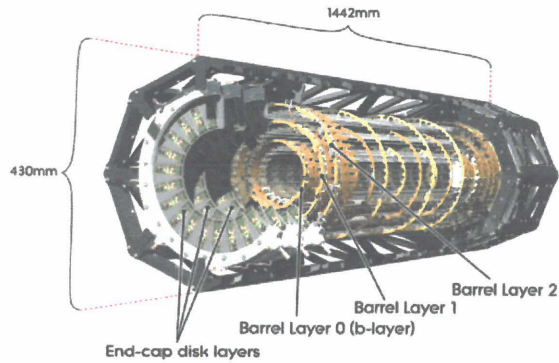


図 6: Pixel Detector[12]

(a) バレルは最内層から B-layer、Layer-1、Layer-2 という。エンドキャップは内側から End-cap inner、End-cap middle、End-cap outer という

3.3 シリコンピクセル型検出器

シリコンピクセル型検出器は ATLAS 検出器の中でも最内層に設置され、ビーム衝突付近のトラッキング検出精度に最も影響を与える検出器となっている。ピクセル検出器のチャンネル数は 92M となっており、この数は ATLAS の読み出しチャンネル数の約 9 割となっている。

ピクセル型検出器はセンサー内にピクセル構造を持っており、ピクセルサイズは $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ 、センサーの厚みは $250 \mu\text{m}$ となっている。センサーとフロントエンドチップ (FEs) は、バンプボンディングという手法によって電氣的に接続されており、センサーで発生した電荷をバンプボンドを通してフロントエンドチップである ASIC(Application Specific Integrated Circuit) へ送る。これをハイブリッドモジュールという。1つのモジュールには 16 個の FE チップが載っており、モジュールサイズは $6.08 \times 1.64\text{cm}^2$ である。

ハイブリッドモジュールのセンサー側にはフレキシブルプリント基盤 (FPC) が接着剤によって固定されており、ASIC と FPC 間は $25\mu\text{m}$ のワイヤーで接続される。このワイヤーにより ASIC で受け取った電気信号を FPC へ伝え、FPC で信号の処理が行われる。

2014 年には High Luminosity に対応するために新たにピクセル最内層に IBL(Insertable B-Layer) がインストールされ位置分解能が向上した。IBL に設置されたピクセル検出器は 2014 年以前のピクセル検出器とは区別して扱われている。IBL に設置された検出器のピクセルサイズは $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ となり、2014 年以前のピクセル検出器の約 60% 程の大きさとなっている。

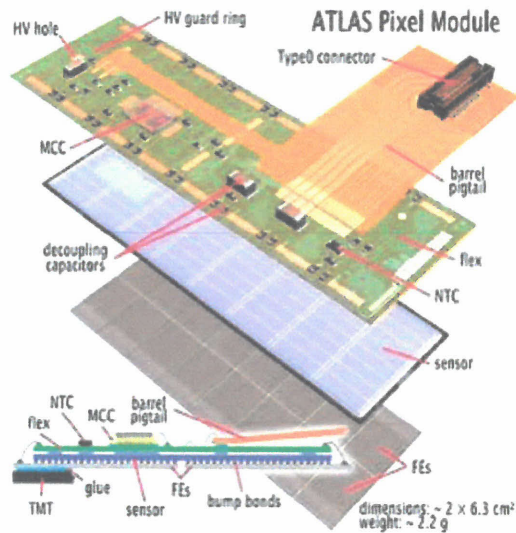


図 8: ATLAS Pixel Module[4]

(a) 現行のシリコンピクセル型検出のデザイン

3.4 シリコンセンサの仕組み

3.4.1 半導体の種類

物質は電気を通す導体、電気を通さない不導体、その中間的な性質を持つ半導体に分類される。半導体は周囲の電場や磁界、温度によって電気的特性が変化する性質を持っている。

微小な不純物を添加した場合、不純物の種類によって特異な性質を示す。不純物を含まない半導体を真性半導体といい、この真性半導体に特定の不純物（ドナー）を極少量添加（ドーピング）した n 型半導体、p 型半導体がある。

n 型半導体と p 型半導体を接合した場合、電流を一定に流す性質を持っている。現行の IBL に設置されているセンサーに使用されている ASIC である FE-I4 は p 型半導体の中に n 型半導体を添加した構造を取っている。

n 型半導体は真性半導体にケイ素より価電子が 1 つ多い 5 価の元素の添加物をドーピングすることにより、結晶中に原子同士の結合に使われずに余った自由電子が生まれる。これが移動することによって電流が流れるようになる。この負 (Negative) の電荷を持つ電子が電気伝導を担うキャリアとなるので、n 型半導体と呼ばれる。

p 型半導体は真性半導体にケイ素より価電子が 1 つ少ない 3 価の元素の添加物（アクセプタ）をドーピングすることにより、結晶内に電子の欠落した部分ができ、正の電荷を持った粒子のように振る舞うことから、この粒子は正孔と呼ばれこれが移動することにより電流が流れるようになる。この正 (positive) の電荷をもつ正孔が電気伝導を担うキャリアとなるので、p 型半導体と呼ばれる。

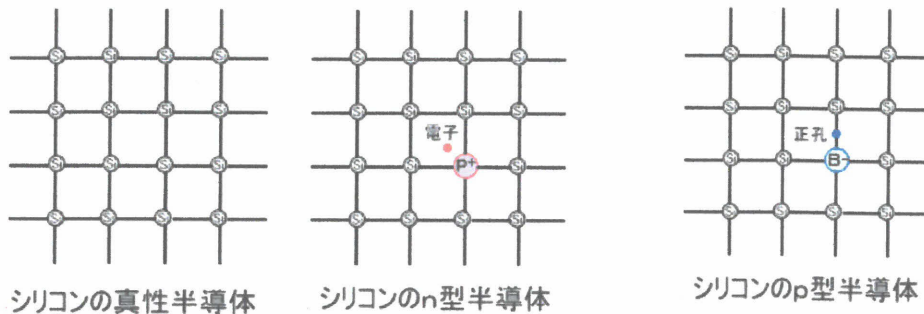


図 10: シリコンの n 型半導体 [4]

図 11: シリコンの p 型半導体 [4]

3.4.2 エネルギー準位とバンド構造

原子は原子核とその周りの起動上の電子で構成されており、それぞれの電子が取ることのできるエネルギーをエネルギー準位という。原子が多数集まって結晶を構成すると、このエネルギー準位が連続的に分布し、帯状の準位を作る。この帯状の準位をエネルギーバンドと呼ぶ。このバンドは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は可能であるが、禁制帯と呼ばれるバンド以外の部分には電子は存在できない。この禁制帯をバンドギャップと呼ばれる。

電子はエネルギーレベルの低いバンドから詰まっていき、この電子が絶対零度のいて取ることの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に、電子は自由に動くことができる。

図 12 のように金属では、バンド中にフェルミ準位があり、価電子を含むバンド内に空き準位があるため、金属では価電子がそのまま自由電子となる。

半導体や絶縁体では伝導帯と価電子帯のバンドギャップ中にフェルミ準位が存在するために、価電子にバンドギャップ (E_g) を超えるエネルギーを与えると価電子帯から伝導帯へ励起することで自由電子が得られる。

半導体では、常温状態で電子の運動エネルギーによって電子の一部が伝導帯に励起され、電流が流れることがある。励起した電子の抜け殻にはホール（正孔）が発生し、正の荷電粒子のように振る舞う。しかし、絶対零度状態においては電子は伝導帯に励起されず、電流は流れなくなっている。

絶縁体で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いために伝導帯に電子が励起されず、電流が流れることがない。

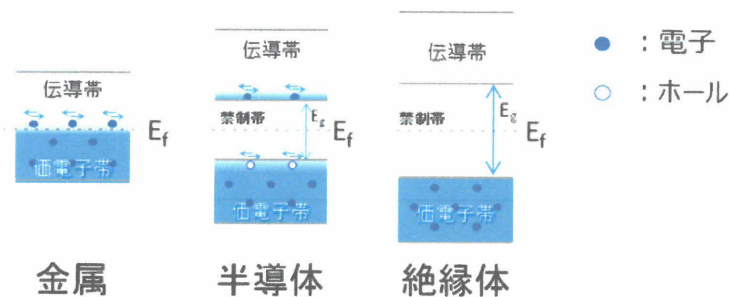


図 12: 物質のエネルギーバンド [4]

3.4.3 p型,n型半導体のバンドギャップ

n型半導体に5価の不純物がドーピングされている。ドナーのエネルギー準位は伝導帯に近い位置(E_d)にあるので、このエネルギー準位にいる電子は容易に伝導帯まで励起されることになる。

一方、p型半導体には3価の不純物がドーピングされている。アクセプタのエネルギー準位は伝導帯に近い位置(E_a)にあり、価電子が1つ少ない状態となっているので、価電子帯から電子が励起してくる。すると、価電子帯に正孔が発生し、あたかも正孔が自由電子のような振る舞いをしている。

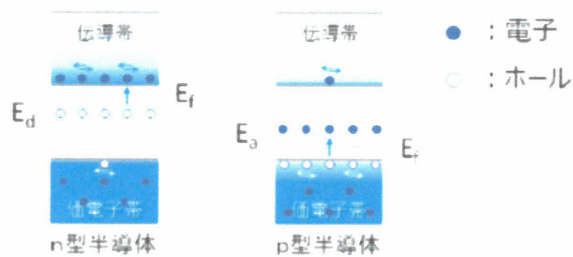


図 13: p型,n型半導体のバンドギャップ [4]

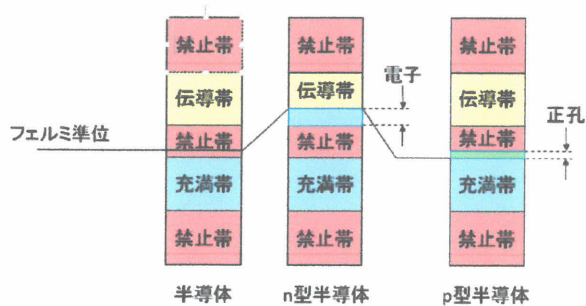


図 14: 半導体のバンド構造

3.4.4 pn 接合

p 型半導体と n 型半導体を接合することにより、p 型半導体の正孔と n 型半導体の自由電子が結びつき接合部が絶縁体と同じような状態となる。この接合部分はキャリアがないことから空乏層と呼ばれている。接合がある程度進んだところで正孔と電子の拡散が止まる。このとき、接合の両側には電位差が生じており、pn 接合では n 型の方が p 型よりも電位が高くなっている。このエネルギーの差をエネルギー障壁という。

pn 接合の電圧をかけると、それによりエネルギー障壁の高さが変化する。そのため、かける電圧によって電流が流れたり流れなかったりする。このことに注目して、拡散の終了した pn 接合に電圧をかけたとき、電流が流れる方向を順バイアス、電流が流れない方向を逆バイアスと呼ばれている。キャリアの様子は図 19 に示してある通りである。

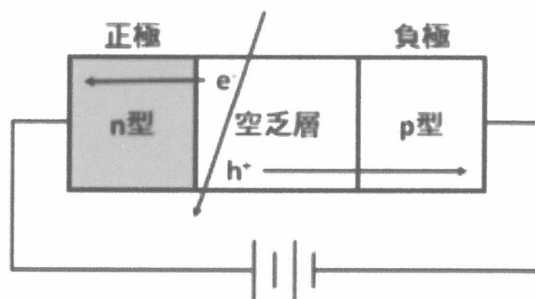


図 15: pn 接合 [13]

このpn接合をエネルギーバンドを用いて説明する。図16はpn接合付近のエネルギーバンドを示したものである。p型半導体とn型半導体の接合部分は遷移領域といい、エネルギーバンドが曲がっている。この部分では電子や正孔の拡散を妨げる障壁が生じる。このため電圧をかけていない場合は電子の移動は起こらない。

順バイアスと逆バイアスの場合は図17、18のようになっており、順バイアスのときは障壁が小さく電流が流れるが、逆バイアスでは障壁が大きくなるために電流は流れないということになる。

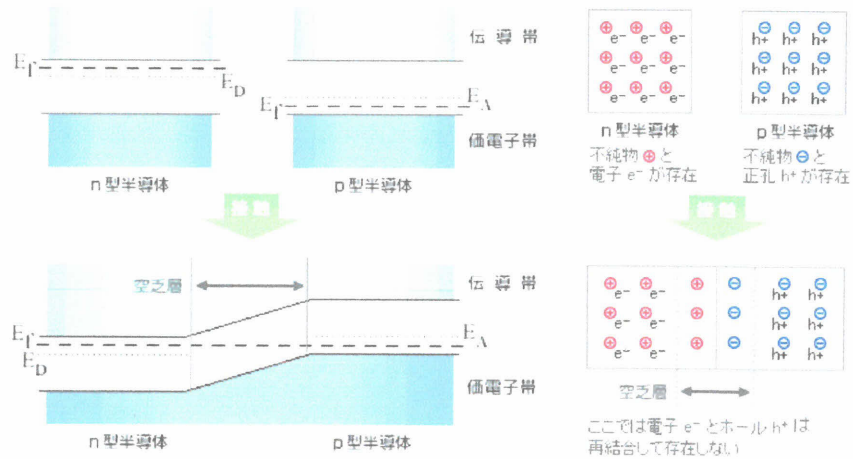


図16: キャリアー状態 [4]

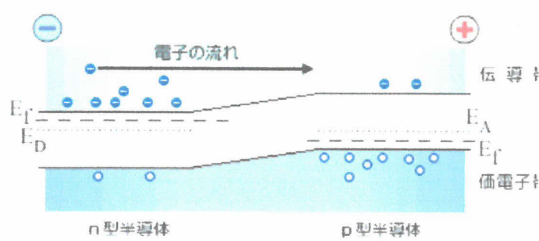


図17: 順方向動作 [4]

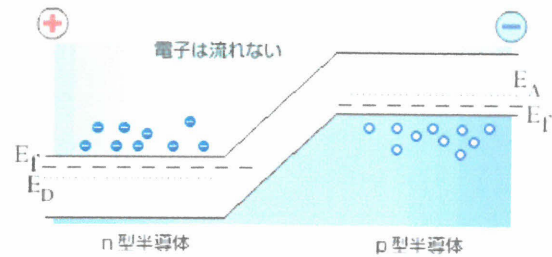


図18: 逆方向動作 [4]

3.4.5 シリコンピクセル検出器の仕組み

現在 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て pn 接合を作るように製造されている。ASIC 側は接地されており、電圧を加え逆バイアスがかかることで空乏層を広げている。センサー部分を荷電粒子が通過することにより、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に、部分空乏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通常よりは高電圧で運転を行う必要がある。そのため ASIC と 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ので、パリレンでコーティングしてマイクロ放電が起こらないようにしている。他にもピクセルの小型化による一分解能の向上だけでなく bias-rail 領域の SiO_2 への帯電を防いで検出効率を上げる研究などが行われている。

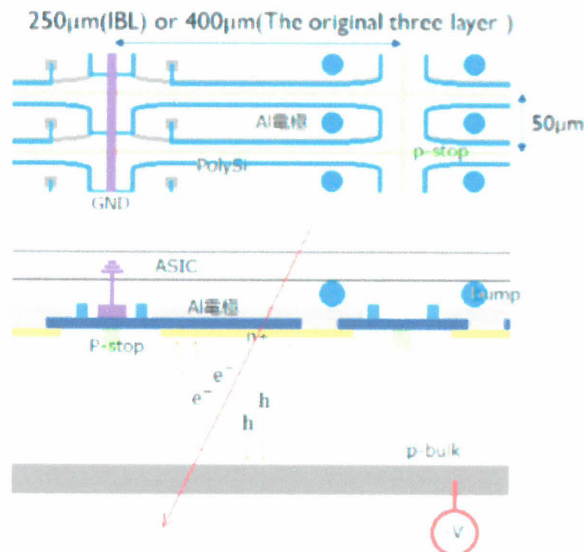


図 19: pn 接合 [4]

3.5 ASIC

現行の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 ASIC は FE-I4 である。次回のアップグレードでピクセル検出器に設置される ASIC は RD53B を改良したものが予定されている。ピクセルセンサーのサイズは表 3 の通りである。それぞれの ASIC の詳細は文献 [1]、[2]、[3] に記載されている。

現在では総ピクセル数が 400×192 個の RD53A について研究が行われているが、実機では RD53A の 2 倍のピクセル数である 400×384 個ピクセル数を持つ RD53B を用いることが予定されている。

表 3: ASIC サイズ

	FE-I3	FE-I4	RD53A	RD53B
ASIC demension	7.6mm × 10.8mm	17mm × 20mm	11.8mm × 20mm	23.6mm × 20mm
Pixel size	$50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$

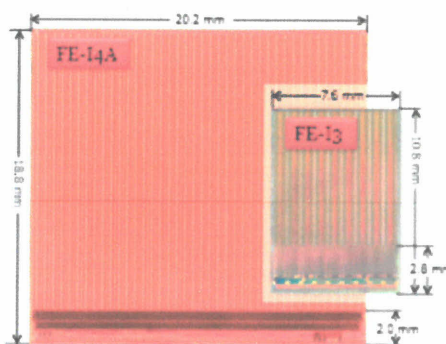


図 20: FE-I3,FE-I4[4]

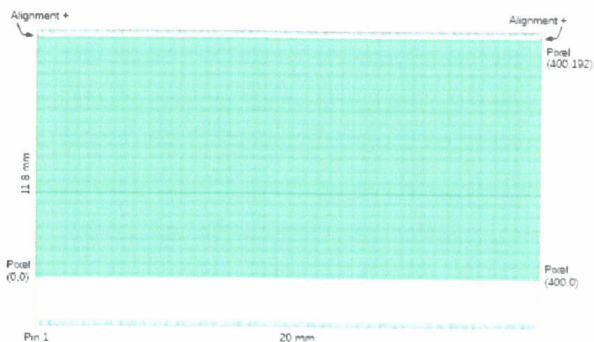


図 21: RD53A[2]

4 デモンストレーターモジュールの組み立て

4.1 デモンストレータ製作の目的

章 2 でも述べたように HL-LHC のアップグレードへ向けて内部に設置するピクセル検出器のアップグレードを行う必要がある。そのためにデモンストレータを製作し、CERN で動作試験などを行い改善点などを明らかにする目的がある。改善点として考えられる部分は、FPC の形や使用する ASIC をどのような設計にするか、使用する接着剤、データの読み出し方法など多岐にわたる。

実機は-15℃で高い放射線を浴びる環境で動作するので、その環境において検出効率などが落ちることが無いようなものを製作する必要がある。

4.2 組み立ての流れ

デモンストレータの組み立てには大きく分けて4つの工程がある。1つ目は Flex 基板とフリップチップモジュールを接着剤で接着する工程。2つ目はセンサー、FE-I4 という ASIC が bumps ボンディングで金属的に接着されたフリップチップモジュール (今回の組み立てでは FE-I4 というフロントエンドチップを4枚用いているのでクアッドモジュールとも呼んでいる) と Flex 基板をワイヤーで接続するワイヤーボンドの工程。3つ目が Thermal Pyrolytic Graphite (TPG)、Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP) が接着された Cooling Cell をフリップチップモジュールに接着する工程。4つ目がワイヤーボンディングで接続されたワイヤーを保護するために行うエンキャプレーションという工程である。これらの組み立てを行い、組み立ての途中で正しく接着できているか確認するためにチップの読み出し試験も行っている。各組み立て工程については後述する。

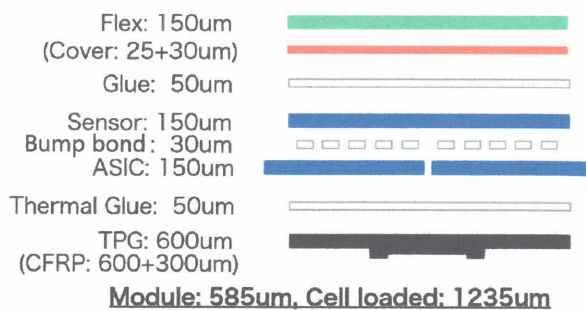


図 22: module assembly[9]

(a) 組み立て概略図

4.2.1 Flex 基板

ASIC からの信号を処理する部分である Flex 基板はポリイミド基材の両面基盤となっており、寸法は図 24 に示す通りである。この FPC は Pig-tail FPC と呼ばれており、インストールの際にはテールを折り曲げられるのでテールがワイヤーに接触してワイヤーが破損しないようにワイヤーの封止が行われる。

また、検出器を稼働させたときに ASIC が発熱するので熱を逃がすためにモジュールはクーリングセルに熱伝導接着剤を用いて接着される。

今回の組み立て時にはセンサーとの絶縁性の確保をすること、スルーホールから Araldite2011 という接着剤の染み出しを防ぐという目的で図 25 のように裏面に厚さ 25um のポリイミドシートを両面テープで接着し、セルフカバーレイとしている。図 25 の赤枠で囲った部分には高電圧をかける必要があるのでカバーを切り取っている。

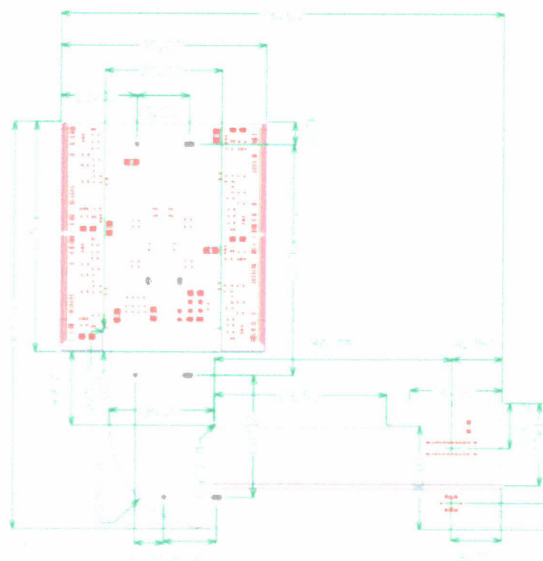


図 24: Flex 基板設計図 [9]

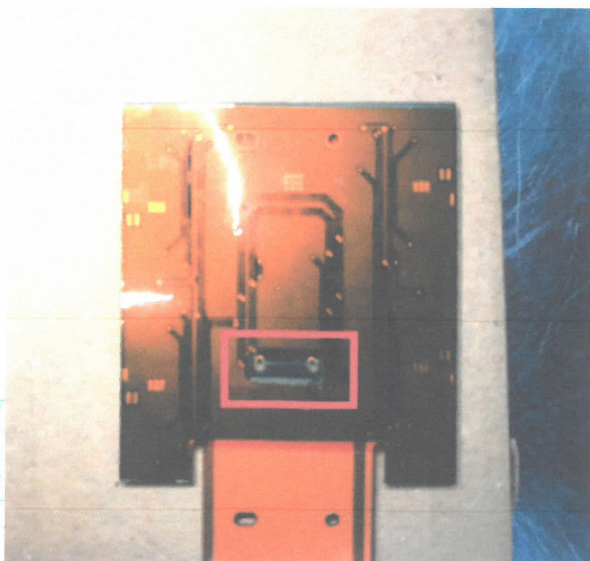


図 25: Flex 基板裏面

4.2.2 FEI4 Quad module

FE-I4 Quad module は1枚のセンサーと4枚のFE-I4がバンプボンディングという金属的な接着によって接続されている。現在のFE-I4の寸法は表4のようにになっているが、ダイシングカットとう回転刀を用いた手法により加工が行われているため、ダイシングの精度により寸法値と比べて個体差が生じている。今回使用するFE-I4 Quadはtype Bのものを用いる。moduleはバンプボンディングによってFlexと接続されるのでセンサーはFE-I4 4枚よりも少し小さな寸法となっている。

バンプボンディングにより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読み出すことができないので、ギャング構造という構造を取りピクセルを読み出すようになっている。

表4: フリップチップセンサー寸法

Name	Material	Thickness[μ m]	xLength[mm]	yLength[mm]
Pixel Sensor	Silicon(n+in-p type)	150	35.61	41.19
FEI4-B Quad	Silicon	150	38.11	40.45

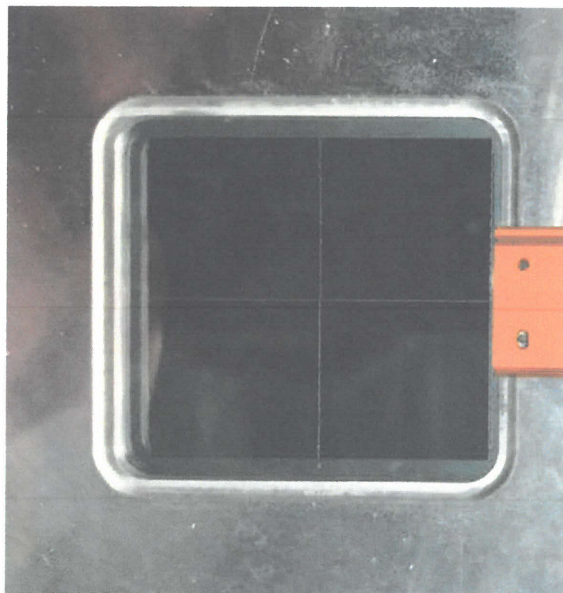


図 26: FE-I4 Quad typeB

(a) フリップチップモジュールにFlex基板を接着した後Flex baseに吸着された様子。FE-I4 typeBの裏面が見えている

4.2.3 Cooling Cell

Cooling CellはTPG(Thermal Pyrolytic Graphite)とCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)から構成されており、ASICで発生した熱を取る目的で設置される。このときASICとCooling Cellを接着するために熱伝導性接着剤を使用する。今回の組み立てで使用した熱伝導接着剤は2液混合のstycastというものをを用いている。接着剤の選定に関しては4.3.2章にて記述する。TPGのサイズは $40 \times 40 \times 0.6$ [mm]、CFRPのサイズは $20 \times 11.5 \times 0.9$ [mm]となっている。Cooling CellとASICを接着する際には、TPGの加工精度が低くなっているためCFRPの突起部分を基準として接着を行う。Cooling Cellは図30aに示した冷却システムを持ったLongelonに設置される。緑色で表されている部分がモジュールとなっている。TPGはgraphiteを材料としているので層状に剥離するので取り扱う際は素手などでは持たないように注意が必要である。

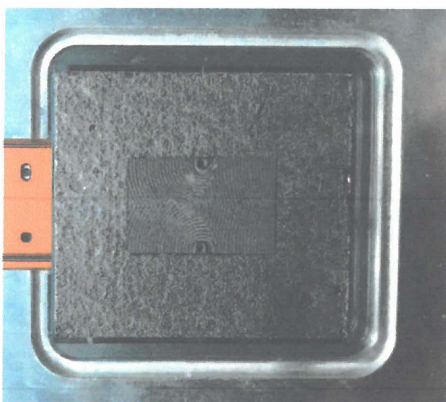


図 28: Cooling Cell

(a) 前頁のASICにCooling Cellを接着した様子。
上面にあるものがCFRPであり、下面にあるものがTPGとなっている

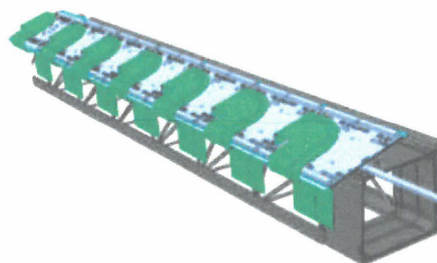


図 29: Longelon

(a) Cooling Cellは冷却システムを持っているLongelonに設置される

4.2.4 組み立て治具

組み立て治具には Module base と Flex base の 2 種類の治具を用いる。

Module base は治具にあげられた穴 4 箇所のアライメントピンを挿すことによりフリップチップモジュールの位置出しをできるようになっている。また、真空吸着もできるので真空をひく際にはフリップチップモジュールの 2 辺が両方ともピンに接するように力を加えた状態で真空固定を行うようにしている。Module base 治具には Flex base 治具と重ね合わせる時に用いるポールが立っている。このポールによってフリップチップモジュールと Flex 基板の相対位置が決まり、接着が行われる。他にも 4 箇所のスペーサーがあり、微調節が可能となっている。

Flex base は Flex 基板とフリップチップモジュールを接着するときの相対位置を合わせるために、Module base のポールを挿すベアリング構造を取っている穴がある。接着の際には Flex 基板のテール部分に空いている 4 つの穴にピンを挿し、真空吸着をすることで固定している。Flex base には裏面から Flex 基板の様子が観察できるように Flex 基板の表面実装をかわすような座繰りのあるアクリルの窓があいている。この窓を通して、非接着における接着精度の繰り返し測定も行った。(4.4 章参照)

モジュールの組み立て以外にセルの接着のために Cell base という治具を用いた。Cell base は TPG と CFRP が接着されたものであり、ASIC と TPG を熱伝導接着剤を用いて接着するとき使用する。そのため CFRP の突起部分で位置出しをするための座繰りが空けてあり、真空固定もできるようになっている。接着する際にはフリップチップモジュールと Flex 基板を接着したときに Module base のポールに治具を差し込むことで位置合わせができるようになっている。

他にも、ワイヤーボンディングを行う際にはワイヤーボンディング用に治具を用いてワイヤーボンディングを行っている。

FPCとフリップチップモジュールの接着

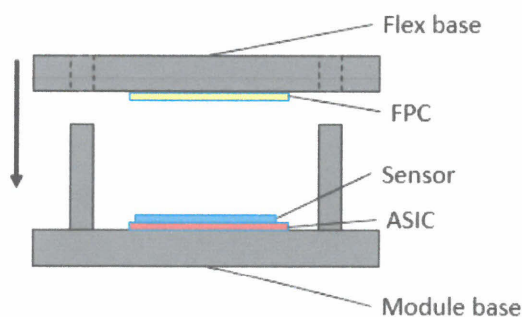


図 31: フリップチップモジュールと FPC の接着

フリップチップモジュールとCooling Cellの接着

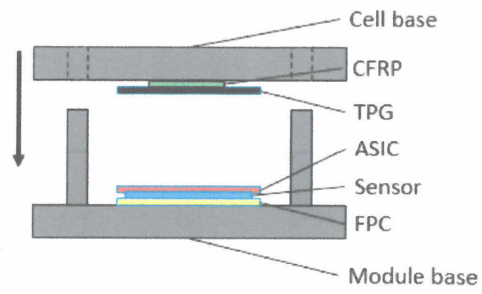


図 32: フリップチップモジュールと Cooling Cell の接着

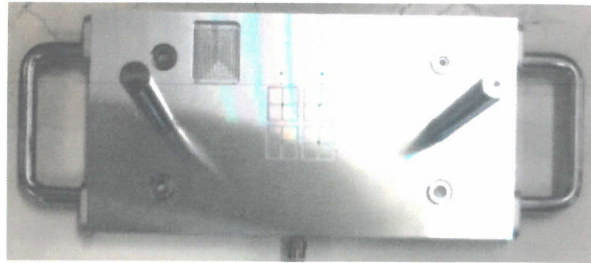


図 33: Module base[9]

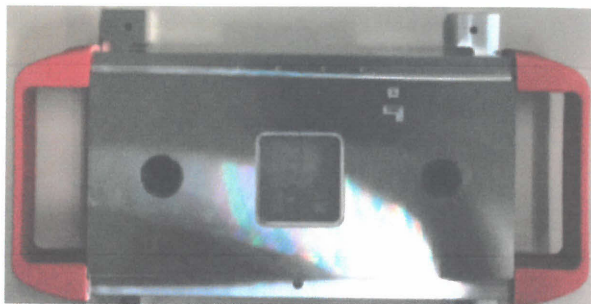


図 34: Flex base[9]

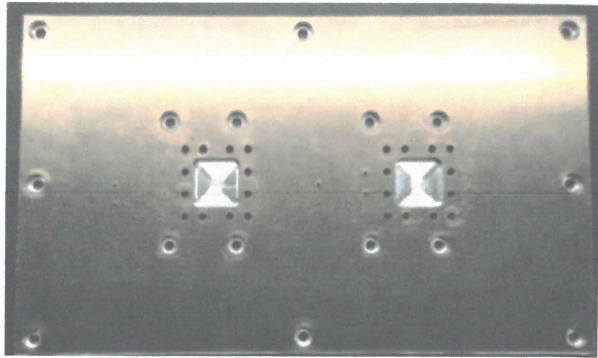


图 35: Cell base[9]

4.3 Module の接着

組み立ては 4.2 で示したようになっており、1 つ目の Module の接着について述べる。

初めに Flex 基板を Flex base のアクリル板にある座繰りに合わせて置き、FPC のテール部分に空いている穴にアライメントピンを挿し位置出しを行う。アライメントピンを挿した後に真空吸着を行い、真空固定が行われたことを確認してからアライメントピンを抜く。次にフリップチップセンサーを Module base に置き、Module base に空いている穴に挿しこむ。このときピンが奥まで挿しこまれていることを確認し、センサーの 2 辺をピンにあてながら真空吸着をし、真空固定されてからピンを抜く。次に FPC とフリップチップセンサーを接着するためにステンシルという手法を用いて Araldite2011 を FPC に塗布する。Araldite2011 はエポキシ系の 2 液混合型の接着剤である。ステンシルについては 4.3.1 で記述する。塗布が終わってから Flex base に空いているベアリング構造の穴を Module base のポールに挿しこむ。Araldite2011 の硬化時間は 10 時間となっているので、硬化するまで待つ。硬化後は Flex base 側の真空を外し、接着剤がはみ出していないか確認する。

4.3.1 ステンシル

Flex 基板とフリップチップセンサーを接着するときには、Araldite2011 というエポキシ系の接着剤を用い、ステンシルマスクという方法で接着を行った。ステンシルマスクとは、金属板の上にあらかじめ穴をあけておき、穴の上を通るようにスパチュラブロックで接着剤をこそぐことにより、一定量で決まったパターン of 接着剤を塗布することができる手法である。ステンシルにスペーサーをかませることによってスパチュラブロックで接着剤をこそいだときに、金属のたわみにより一度基板とステンシルが接しても基板と接し続けず定量の塗布が可能となっているというものである。

塗布のパターンは図 36 のようになっており、FPC の真空吸着穴や HV がかかる場所を避けてステンシルパターンを接着の際につぶしたときにワイヤーボンドを行う部分において直線になるようにデザインされている。

FPC に塗布を行う際にはステンシルマスクの表裏に注意し、スペーサーを取り付け、Flex base に空いている穴にステンシルマスクをはめ込むようにして塗布を行う。

塗布は図 36 の上部から下部に向けて行う。スパチュラブロックは少しマスクに押し付けるようにして行う。

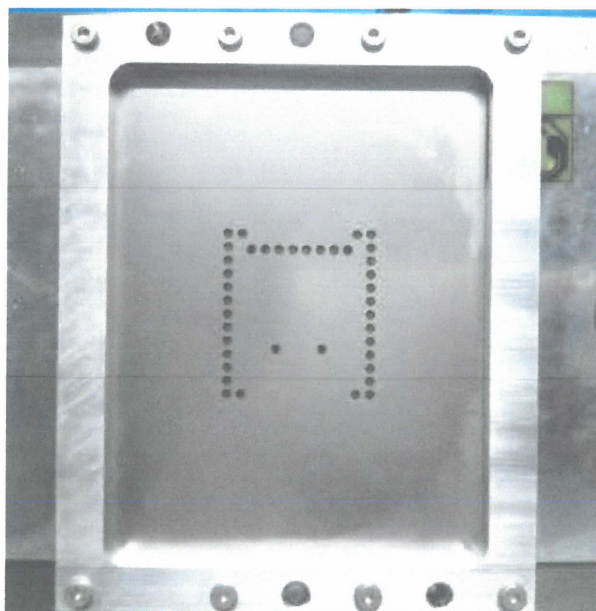


図 36: Stencil mask

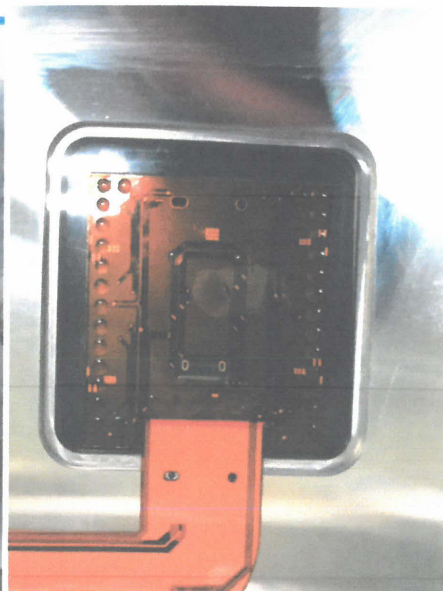


図 37: FPC 裏面に塗布した接着剤

4.3.2 Cooling Cellの接着

Cooling Cell はジュネーブ大学において TPG と CFRP が接着されたものを用いる。Cooling cell は ASIC で発生した熱をクーリングパイプで効率的にとることが必要なので、熱伝導性のあるエポキシ系で 2 液混合の stycast 2M という接着剤を用いている。接着剤の塗布方法に関しては 4.3.3 章に記述する。

Colling Cell とモジュールの接着には Cell base を用いて Module assembly のときと同様に治具のベアリングとポールを用いて接着を行う。接着方法としては塗布が終わった Cooling Cell の CFRP 突起を Cell base の穴に入れて位置だしをし、真空固定を行う。モジュールも Flex base の上でピンを用いて位置出しを行った後に真空固定を行う。今回の接着では Module base、Flex base、Cell base の順に治具を設置する。Module の組み立てのときにはアクリル窓から接着の様子が確認できたが、今回は窓がないので接着の様子を確認することはできない。

4.3.3 熱伝導接着剤の塗布

TPG とフリップチップセンサーを接着するときには stycast 2950FTJ と catalyst 9M という 2 液を混合する接着剤を用いた。混合比は stycast:catalyst=100:3.5 となっており、必要分を正確に取ることが難しい。また、混合後に粘度が変化するのでポットタイムは 30 分である。よって混合を始めた時間を記録し 30 分以内に塗布を終える必要がある。混合の際には図 38 の電子天秤を用い、竹串で接着剤を絡め取って混合を行った。

混合を行い脱泡機で 1 分間脱泡を行った後にディスペンサーにセットした。ディスペンサーのノズルは 20 番のものを用いた。塗布の圧力はコンプレッサーを用いて調節していた。

TPG とセンサーを接着したときに接着剤が TPG からはみ出すことなく、FEI4 のチップ間の隙間に入らず熱伝導性を最大限に良くするためには TPG に一様に接着剤が広がる必要があるため、小林 [16] の研究により塗布のパターンは図 41 のような形で行った。理論的に求められている接着剤の重さは、スノーパターンを 4 つ描いて 130mg となっている。

dispensor で塗布を行うときには dispensor に動きのパターンをプログラムし、自動で塗布を行うようにした。塗布を始めるときのノズルの先と TPG の距離が 100 μ m となる必要があるため、ダミーの TPG とスペースゲージを用いて高さ調節を行った後に左上のパターンから塗布を開始した。

接着剤は可使用時間が 30 分であり徐々に粘性が高くなるため、吐出圧力とノズルの移動速度の適切なパラメーターを求める必要がある。

1 つのスノーマークを描くために移動する距離は 89.376mm であり、ディスペンサーの移動速度を 6mm/s とすると、1 つのスノーマークを塗布にかかる時間は 14.896s となる。そして圧力を 0.6kPa に設定し、G10 の上に 40mm の直線を 2 本描いて塗布を行ったが、接着剤の混合開始から 15 分後あたりの測定では 95mg の吐出量となっていた。これは 1 つあたりのスノーパターンの理論値である 43.3mg よりも大幅に多い量となっている。これは移動速度が遅いことにより、接着剤が多く塗布されている可能性があるため、移動速度を上げて塗布される量を減らそうとした。

吐出の圧力は 0.6kPa で一定とし、移動速度を 10mm/s に変更して塗布を行ったが、移動速度が速すぎることが原因と考えられる塗布の線のかすれが生じたため、移動速度を 8mm/s に変更した。移動速度を 8mm/s で塗布を行ったが、混合から 20 分ごろまでは塗布重量が 200mg 前後であり、25 分を過ぎたころから本番推定量が 110mg となった。これにより、混合直後は圧力を 0.6kPa 以下に設定して実験を行ってみた。

混合後 7 分に吐出圧力 0.4kPa で実験を行ったところ、推定量が 120mg となった。よって混合直後は 0.4kPa あたりから吐出圧力をはじめ、時間経過に伴い圧力を上げていけば良いということがわかった。これらの実験は約 27℃ で一定に保たれている室内で行っている。

よって Cooling Cell に塗布を行うときには塗布の直前に吐出の圧力を調整しながら接着剤を 80mmG10 の上に塗布し、本番推定量に近い値が出るパラメーターを探りながら実験を行い、近い値がでたときに TPG に塗布を行った。塗布を行った後に重さが足りない場合はスノーマークの線が細いような場所にディスペンサーを移動させ、手動で規定量に達するまで塗布を行った。



図 38: 電子天秤と遠心脱泡機



図 39: ディスペンサー



図 40: Compressor

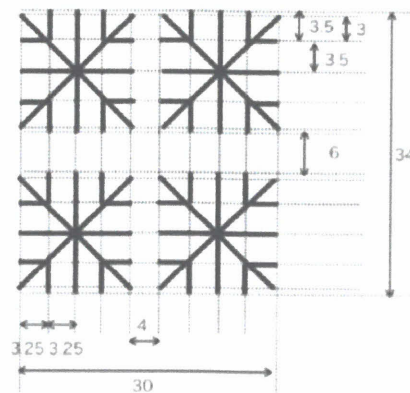


図 41: 塗布パターン [9]

2018年8月22日に KEK で TPG に塗布をし、モジュールに接着を行ったが接着剤が少しはみ出てしまい、治具に接着剤がついた状態で硬化した。これにより、治具からモジュールを外す際にセンサー一部を損傷してしまう結果になった。原因としては接着剤の量が少し多かったことが考えられる。また、治具に窓がないために接着後の様子がわからず修正ができなかったので、接着後の様子を確認するために治具にアクリルの窓などを取り付けるという改善点も見つかった。以後8月22日に製作したモジュールを KEK145 と呼ぶ。

2018年8月23日に行った塗布では接着剤を混合してから12分後に0.55kPa、ディスペンサーの移動速度8mm/sで塗布を行った結果113mgの塗布量となったので、足りない量は圧力0.1kPaで少しずつ塗布を行い、図43aのように128mgの量に調整してから接着を行った。塗布されたスノーパターンに接着剤の汚れがついているが、塗布を始めた直後に不具合が生じたことにより、接着剤をすべてふき取ってからやり直したことが原因である。この汚れは接着に大きな影響はない。以後8月23日に製作したモジュールを KEK146 と呼ぶ。

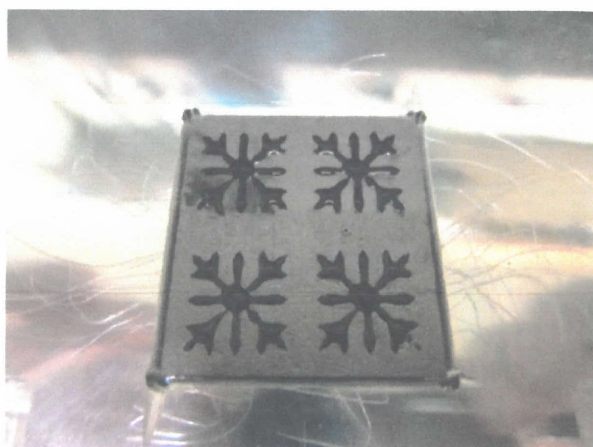


図 42: KEK146 塗布結果 [8]

(a) TPG に熱伝導接着剤を塗布した様子

接着後に cooling cell とセンサーが正しく接着できているか確認するために測定顕微鏡を用いてセンサー、TPG の上下左右の角の位置と CFRP の突起の位置を測定した。測定結果は表5のようになっている。

表 5: KEK146 モジュールの位置測定

[mm]	左上	左下	右上	右下
Sensor	-12.152,20.621	-12.067,-20.617	23.585,20.699	23.672,-20.529
TPG	-12.152,19.972	-12.186,-19.980	23.732,20.065	23.822,-19.929
CFRP	0,0		11.620,0.066	

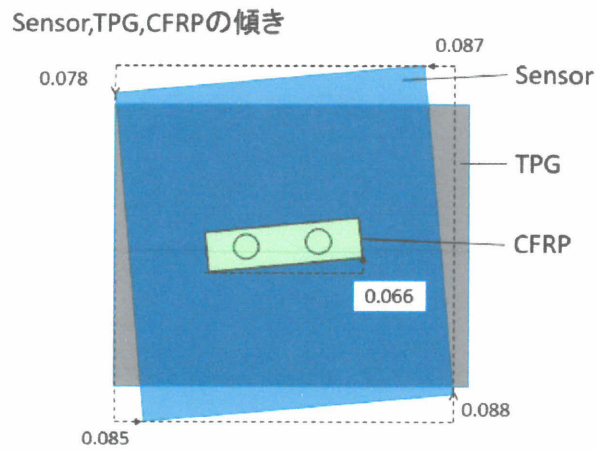


図 44: KEK146 の接着精度測定

位置測定結果より、TPG と Sensor の位置を比較すると回転して接着されているように思われるが、TPG は製作精度が低いので CFRP と Sensor の位置から接着精度を考察する。図??より Sensor と CFRP はお互い左下を中心に左回りに回転している。これは測定頭微鏡で測定を行うときに位置出しを行っていないからである。Sensor と CFRP の回転を補正して考えると、Sensor と CFRP は $30 \mu\text{m}$ 以下の精度で接着が行われていることがわかる。これは接着精度 $50 \mu\text{m}$ 以下となっているので、正しく接着が行われていると結論付けられる。

2018年8月24日に行った塗布では、混合してから26分後に圧力0.6kPa、移動速度8mm/sで塗布を行った結果図45のように125mgの量を塗布できた。以後8月24日に製作したモジュールをKEK147と呼ぶ。

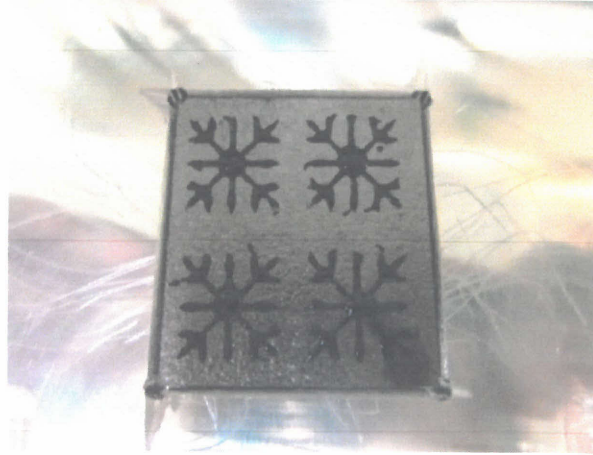


図 45: KEK147 の塗布結果 [8]

接着後は8月23日のように接着精度を顕微鏡で測定した。結果は表6のようになった。

表 6: KEK147 の位置測定

[mm]	左上	左下	右上	右下
Sensor	-11.916,20.756	-12.243,-20.467	23.824,20.462	23.495,-20.764
TPG	-12.092,20.106	-12.352,-19.890	24.001,19.793	23.495,-20.764
CFRP	0,0		11.622,-0.058	

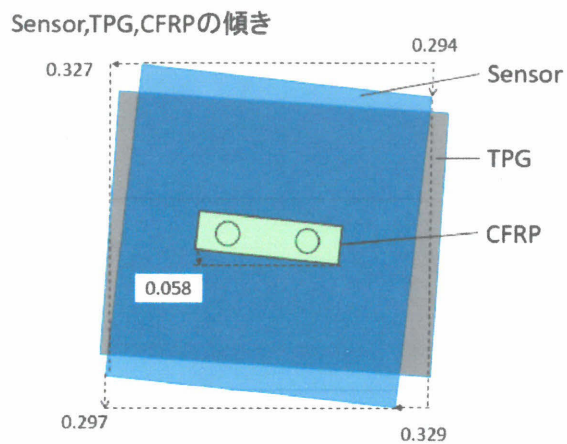


図 46: KEK147 の接着精度測定

このモジュールの接着精度も KEK146 と同様に考察を行う。KEK147 は Sensor と CFRP の右下を中心に右回りに回転していることがわかる。CFRP の回転を補正して考察すると、Sensor は CFRP に対して $250 \mu\text{m}$ 程度回転していることとなる。これは接着精度 $50 \mu\text{m}$ 以下を満たしていないので、接着精度が低いモジュールといえる。

4.3.4 読み出しと封止

TPG と CFRP の接着が終わるとワイヤーボンドを行い、正しくワイヤーが打てているか読み出し試験を行う。読み出し試験が正常に行われると、ワイヤーを保護するために封止を行う。ワイヤーを打つとき治具の上に置いて作業を行うが、ASIC の端の部分が座繰り部分と重なっているのでワイヤーを打つときに力が加わりすぎると ASIC が破損する恐れがあるため、ASIC の端を支えるためにゴムのスペーサーを製作した。設計図は図 47 のようになり、ゴムのスペーサー自体にべたつきがあるので図 49a のように、アルミニウムのシートでカバーを付けた。この工程を KEK と九州大学の 2 サイトで行い、合計で 18 個のモジュールを製作した。CERN で試験を行ったデモンストレーターのうち 3 つを日本に持ち帰り、様々な試験に使用している。アセンブリ過程で破損した KEK145 は CERN に納品せず日本での試験用として使用している。

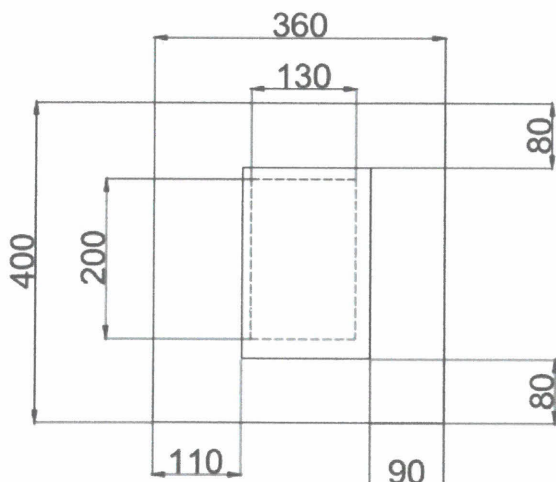


図 47: module cover

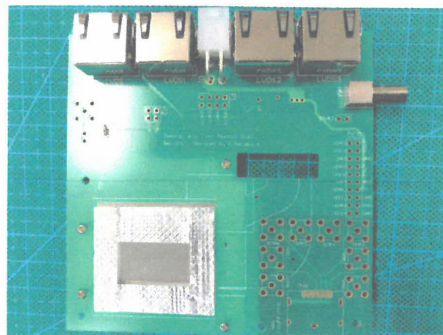


図 48: module board

(a) 銀色の部分がボードカバーになっている

KEK145 の Analog scan と Digital scan は図 50、51 のようになっている。図 50、51 は使用した 4 枚の ASIC の応答を示しているものであり、黄色く表示されている部分は ASIC から反応が正しく返ってきていることを示している。反応が返ってきていない場合は欠損している部分が青く表示されるようになる。Digital scan は ASIC のデジタル処理部分のテストでディスクリミネータ後の部分に試験パルスを入力し応答を見るものとなっている。今回は USBPix を用いて試験を行っているので、試験電荷を 200 個入力している。一方、Analog scan は bump pad の直後のアナログ処理部分に同様の試験電荷を打ち込み応答を見る試験となっている。今回の試験では FE-I4 の出力部分が 1 枚分欠損している結果となっているが、Cooling Cell を接着したときに接着剤が溢れて治具と固着してしまい、取り外すときに損傷してしまったからである。

よってこれらの結果より損傷した ASIC 以外は正しく反応が返ってきているので、パンプボンディングやアセンブリ過程での問題がなかったということがわかる。

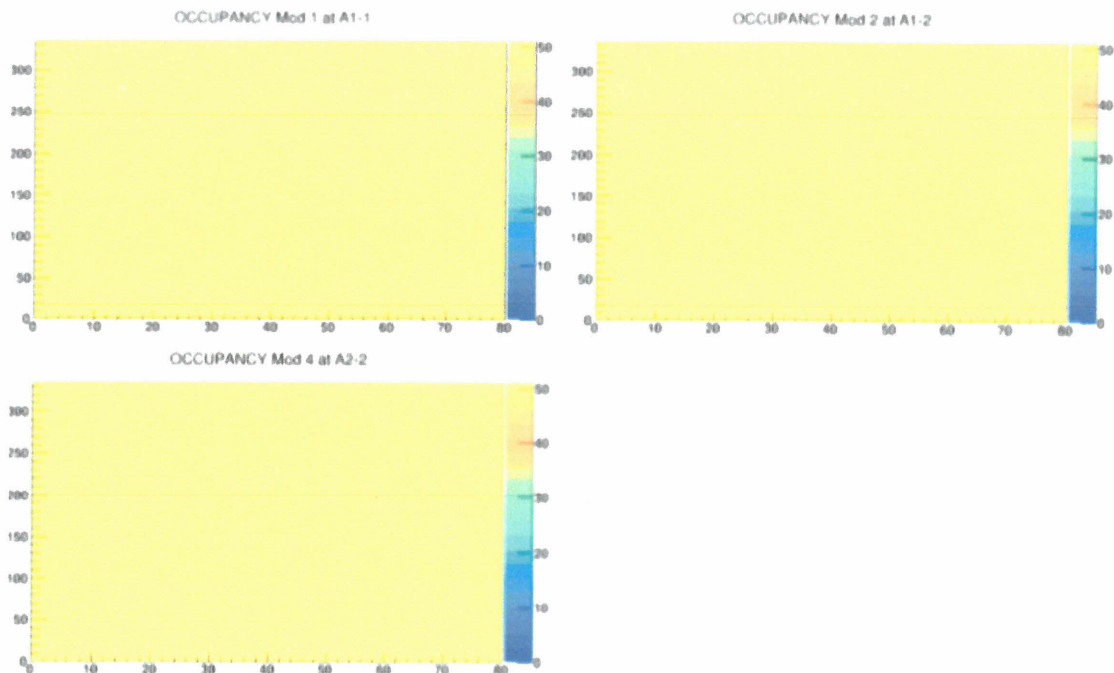
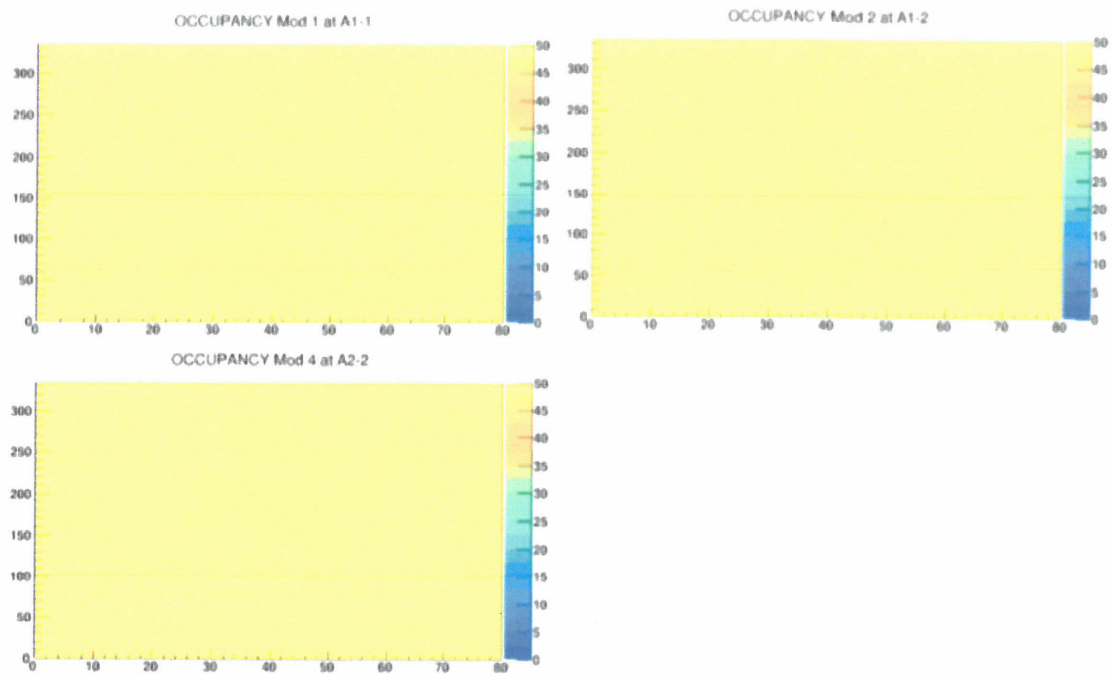


図 50: KEK145 Analog scan[8]



☒ 51: KEK145 Digital scan[8]

4.4 接着精度の繰り返し測定

Flex base と Module base を使い、接着を行わないで組み立てを繰り返し行っても FPC とフリップチップモジュールの相対位置が正しく出せるか KEK の三次元測定機を用いて測定を行った。組み立ての際に実際に使用するフリップチップモジュールの代わりにアルミニウムで製作されたフリップチップモジュールのダミーを用いて計測を行った。測定は Flex base のアクリル窓から上側にある FPC の 4 隅のパッドと下側にあるダミーの左下端の相対位置を出すことによって、FPC がダミーに対してどれだけ回転などを行っているか測定している。モジュールを組み立てた時に全体として 50 μ m 以内の誤差で組み立てるの必要があり、モジュールを量産したときに繰り返し接着を行っても問題がないか確かめるためである。

FPC の上側にはパターンが実装されており、その実装のパッドに合わせて測定点を取った。基準点は図 52 のようにして三次元測定機の明暗の分かれ目の座標を明暗による測定で出している。同様にダミーの原点から見て対角点に当たる部分の座標も明暗による測定で座標を出した。このとき、暗から明で点フィットを行うよりも、明から暗の設定で点フィットを行うと点が取りやすい。また、高倍率においてはライトの照射輝度を測定物に対して上から光を当てる落射というモードにし、数値を 18 に設定するとよい。点フィットをするときに基準線を描いた場所と検出された場所が異なることがあるが、画面に表示されている赤い十字を測定点に合わせれば正しい測定位置で測定を行ってくれる。また、x 軸、y 軸をセンサーのエッジの部分で直線フィットによって低倍率で出した。軸となる直線を出すときには 5 点以上の点が測定できているものを採用した。この x 軸、y 軸によって算出される原点の位置が先ほど明暗の分かれ目から出した原点と大きく異なる場合は軸によって出される原点に近い値になるように値を取り直した。測定場所 1 か所につき 2 点測定値を取っているのは 1 点のみでは誤差が生じる可能性があり、測定値を用いて直線を出したときに正しい測定結果を得られない可能性があるからである。測定点は図 54 の赤点を取っている。FPC の外側のパッドではなく内側のパッドの座標を測定する理由としては、外側より内側のパッドの方がパッドのゆがみが少なかったからである。

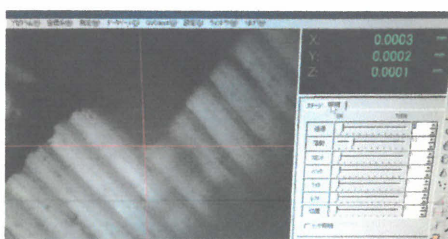


図 52: 3次元測定器による原点測定

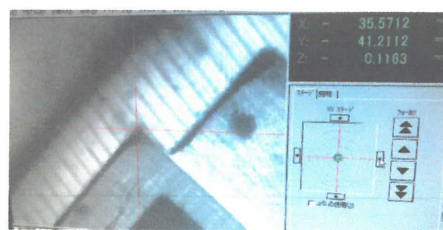


図 53: 3次元測定器によるダミー対角点測定

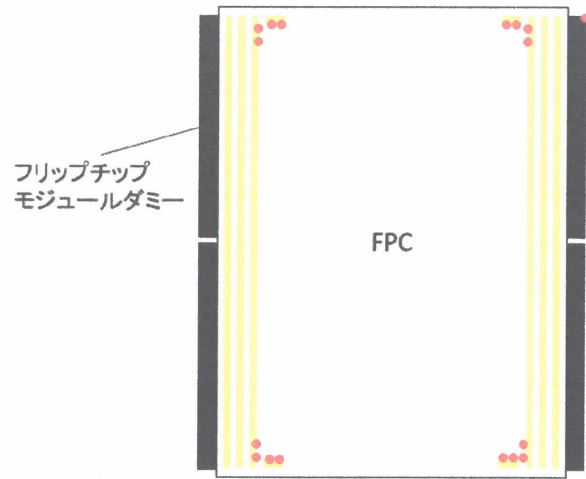


図 54: FPC 上における測定点

測定は15回行っており、1～12回目までは接着を行わず、13～15回目は両面テープを用いて測定を行った。測定結果は図56、図57、図58、図60のようになった。グラフの単位はすべてmmである。1回目と5回目の測定では実測値よりダミーが大きく回転しているということが分かった。その原因として考えられるものとしては、ダミーの位置出しをするときに、アライメントピンを奥まで正しく挿せていないことによってダミーの初期の位置が回転しているというものである。

測定する全ての点で測定を取り終わった後には原点の座標を打ち込み、正しく原点に戻ってくるか確認を行った。これらの一連の作業を1回行うのに15分ほどかかった。15分かかった原因としては3次元測定器のカメラと治具のポールが接触しやすく、治具の設置場所の調整やカメラを動かすときなどに注意が必要であったことと、3次元測定器での点フィットを正しく使用できていなかったからである。

測定結果の見方としては図55のようにになっている。FPCのパッド位置は1隅に対して4点測定を行っており、1隅ごとに同じパッド上の2点を結ぶ直線同士の交点を測定点として考察を行っている。

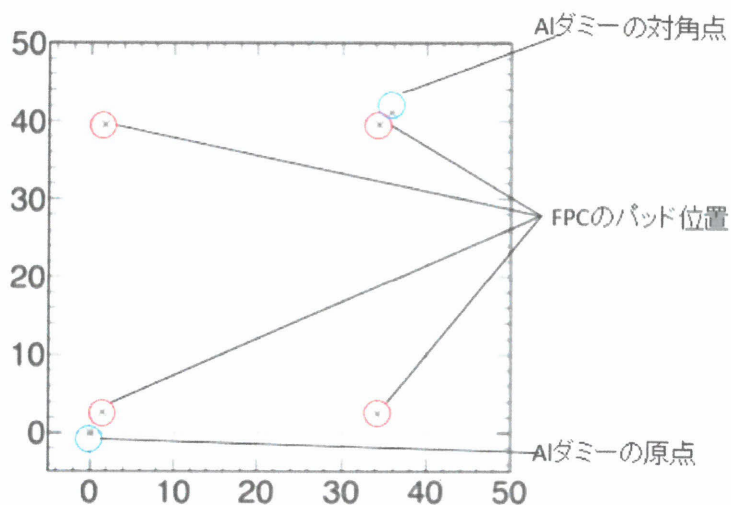


図 55: 測定結果の見方

1 - 4 th

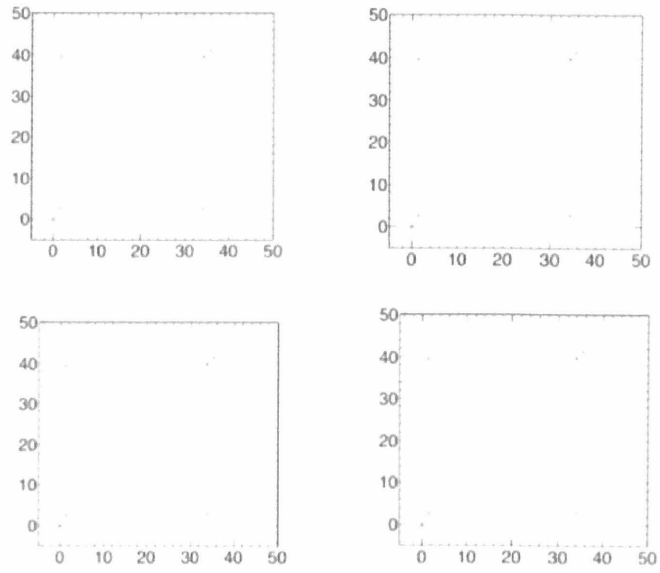


図 56: 1 回~4 回目の測定結果 [17]

5 - 8 th

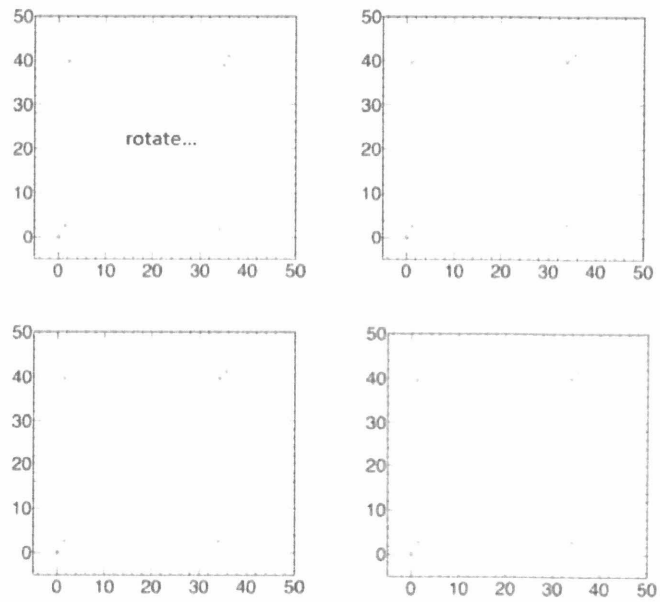


図 57: 5~8 回目の測定結果 [17]

9 - 12th

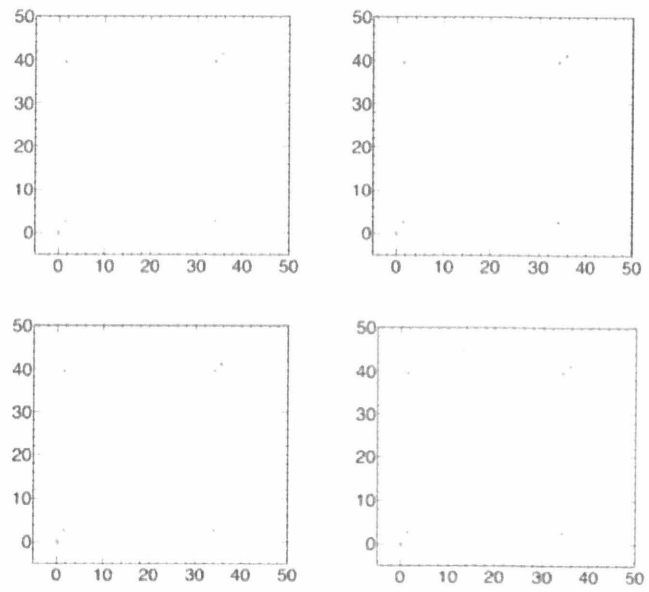


図 58: 9~12 回目の測定結果 [17]

1回の測定に15分ほどかかることを踏まえて、治具のポールとカメラが接触することがないようにFPCとダミーを両面テープで固定し、ダミー側が上にくるようにフリップチップモジュールを設置し真空吸着をして測定を行った。

この条件では、ダミーのエッジ部分でx、y軸を測定し、軸の交点を原点として数式的に処理した。他にも軸が正しく取れているか確認するために1~12回目で測定している点に加えてエッジの4隅の点も測定した。図59はフリップチップダミーの右下の点を測定しているものであり、赤丸で囲った部分の点を測定している。この点を測定する目的は、ダミーのエッジ部分を用い設定した軸が正しくとれているか確認する目的がある。軸を測定するときには取りたい軸にエッジ検出の線を合わせてから、明から暗でエッジを検出するようにすると測定が行いやすい。また、パッドの座標を測定するときには治具のポールがカメラに接触することがないので座標移動のコマンドを使うことで早く移動ができるようになる。これらの方法を用いて測定を行うと、1回の測定は8分程度で行うことができるようになった。もう少し時間を短縮するために作業を効率化して1回の測定を5分程度で終わらせるようにすることが今後の課題として挙げられる。

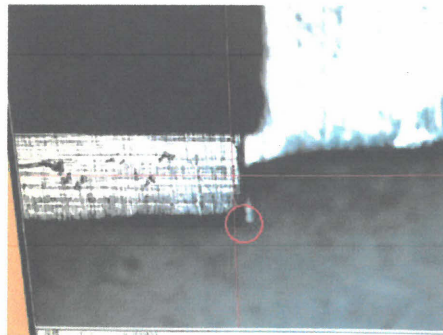


図 59: フリップチップダミーの右下エッジ

13 - 15th

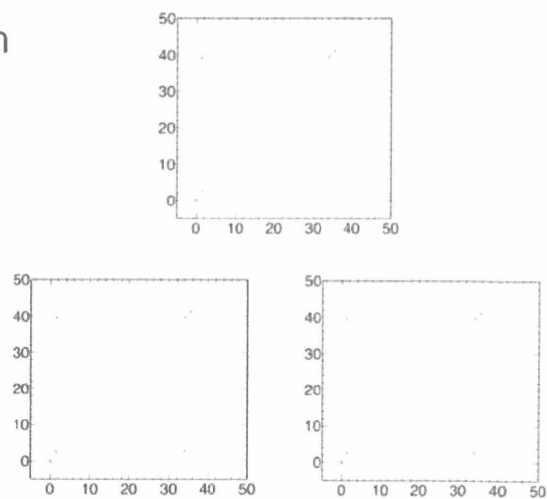


図 60: 13~15 回目の測定結果 [17]

今回の測定では接着の精度を検証しているため、全 19 イベントのうち次のような人為的なエラーが考えられる 6 イベントは排除して処理を行っている。

- イベント 4:軸の設定ミスと思われる大きな回転
- イベント 6:AI ダミーが正しく設置できていなかったと考えられる全体の左ずれ
- イベント 12:原点の設定時、正確な角をとれていなかった可能性がある
- イベント 16-18:測定方法が異なる

ダミーの理論的な座標は (35.61,41.19) であるため、各イベントのダミーの対角点の座標と FPC の測定値を補正して表すと図 61 のようになる。

本章の結論としては、繰り返し精度としては FPC はダミーに対して $30\ \mu\text{m}$ 以下の精度、測定誤差 $20\ \mu\text{m}$ で回転しているということがわかった。この値はモジュールの接着制度の $50\ \mu\text{m}$ 以下を満たしているため、大量生産のときにも精度に問題なく接着を行うことができるということが確認できた。

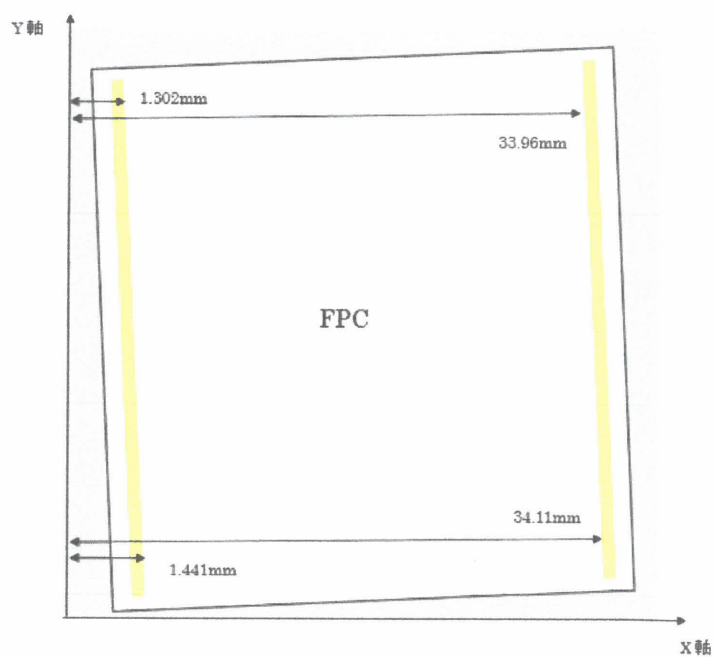


図 61: 繰り返し測定結果

5 熱伝導接着剤の新型熱伝導率測定装置の製作

5.1 新型の熱伝導率測定器の試作

TPG と CFRP を接着する際に熱伝導接着剤を用いなければならず、実機では-15℃という環境で使用されるために低温下でも熱伝導率が低下しないことを確認しなければならない。エポキシ系熱伝導接着剤である EG7655 は常温・高温下で熱伝導率が変化しないことは家田 [4] の実験より分かっているので、EG7655 の低温環境における熱伝導率の変化を測定するために、図 64、65 に示す CERN が公開している熱伝導測定装置を参考とし、装置の試作を行った。CERN で使われている装置はコイン状のサンプルを使用しているので、試作器も同様にアルミニウムの円柱を用いて製作を行った。試作器は直径 12mm のアルミニウムの円柱を 20mm の長さ为目标としてバンドソーを用いて切断し、断面を金やすりで研磨することで断面の平坦性を出そうとした。また、同様の手法で 2 枚のコインも作成し、マイクロメータを用いてコインの厚みを測定した。測定結果は図 62 のようになっている。しかし金やすりではそれぞれの平坦性が確保できていないことによって図 63 のようにコインを重ねたときに最大 20 μ m の隙間が生じた。

[mm]	中心	測定点1	測定点2	測定点3	測定点4
コイン1	2.54	2.55	2.56	2.55	2.54
コイン2	2.26	2.25	2.25	2.25	2.25




図 62: コインの厚み測定結果

次にアルミニウム柱に熱を加えた場合、アルミニウム柱の温度を測定する 2 点間におけるアルミニウムの熱伝導率によって生じる温度差を考慮する必要があるか熱伝導率の式より考察する。

熱伝導率の式は次のように表される

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

(W は加えた熱量、 ΔT は測定点における温度差、d は物質の厚み、s は熱の通過面積を表している)

式 (1) を用いてアルミニウム柱の上面と下面に発生する温度差について考察する。アルミニウムの熱伝導率は 236[W/mK] であり、今回用いているアルミニウム柱の長さは 20mm なのでアルミニウム柱によって発生する温度差は次の式にこれらの値を代入したものとなる。

$$C_{Al} = \frac{W}{\Delta T_{Al}} \times \frac{d}{s} [\text{W/mK}] \quad (2)$$

この式より熱を 1W 加えたときの温度差は $0.750\text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、1W を加えたときのアルミニウム柱の上面の温度約 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ と比べて小さいのでアルミニウムの厚さによって生じる温度変化については考慮しないとする。

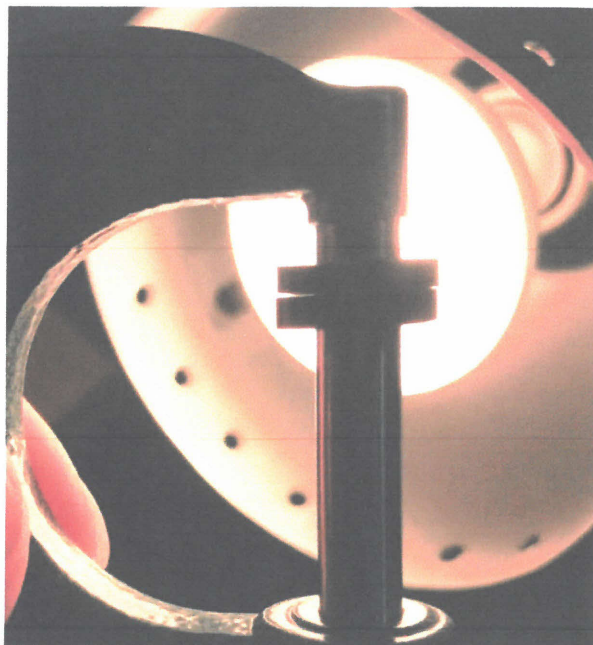


図 63: 試作 coin に生じた隙間

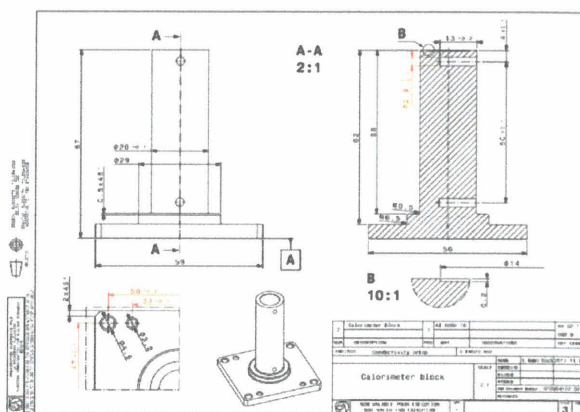


図 64: CERN っで使用されている熱伝導率測定器の図面

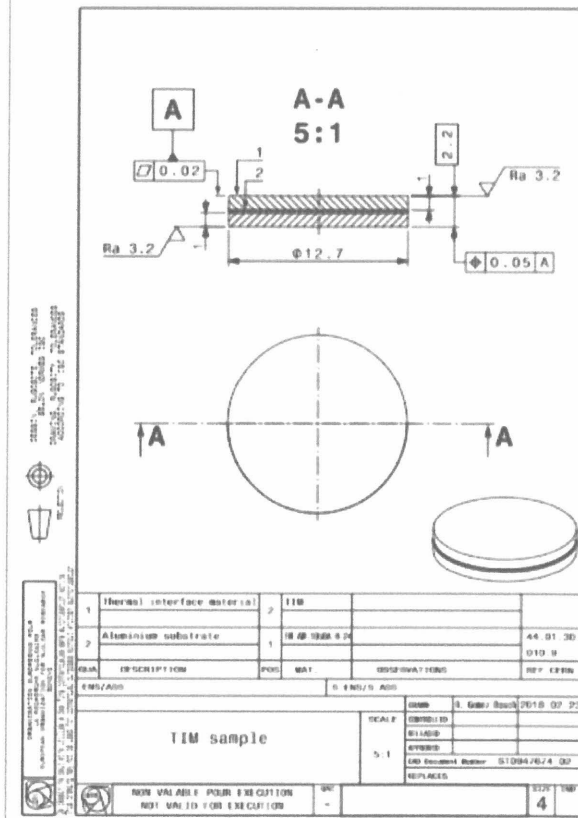


図 65: CERN での作成されているコインの図面

5.2 試作器を用いたコイン挟み込み試験

この試作した測定器を用いてコインに SE4445CV の接着剤を塗布して SE4445CV の熱伝導率を測定した。ここでは接着剤の厚みはコントロールしていない。測定の Set up としてはクーラー側に 15℃ に設定したチラー、ヒーター側に約 1W の熱を加えたセラミックヒーター、グルーの厚みを 258 μm を用いて熱伝導率の実験を行った。ヒーターとアルミニウム柱、チラーとアルミニウム柱はそれぞれアルミニウムテープを用いて固定した。その結果 3 回測定を行った平均値は 0.340[W/mK] であった。この値は SE4445CV の理論的な熱伝導率 1.26[W/mK] と大きく離れていることがわかる。アルミニウムの熱伝導率は 236[W/mK] であり、アルミニウムによって温度差は考慮しないと 5.1 章で分かっているので、原因として考えられることはヒーター、クーラーの密着性が低いことやアルミニウムの平坦性が低いので熱が理論的に伝わっていないということが考えられる。

他にも、ヒーターなどの密着度を上げるために円柱の上に 108g の重しを乗せるて実験を行うと、熱伝導は 0.513[W/mK] となった。また、さらに密着性を上げるためにチラー、アルミニウム柱、コインをすべてクランプで挟み込んで実験を行うと熱伝導率が 0.667[W/mK] となった。このことよりヒーターなどの密着度を上げることにより熱伝導率がよくなるということがわかった。

また、低温環境で実験を行うにあたり、チラーでは求めている低温値まで温度を下げる事ができないのでペルチェ素子を 2 枚重ねて低温環境を作りだす実験を行った。低温環境における実験は 6 において記述する。ペルチェの冷却には DC ファンを用いて空冷で冷却をしている。

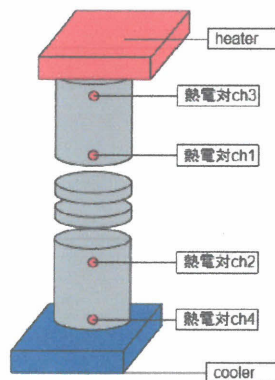


図 66: 熱伝導測定試作器の setup

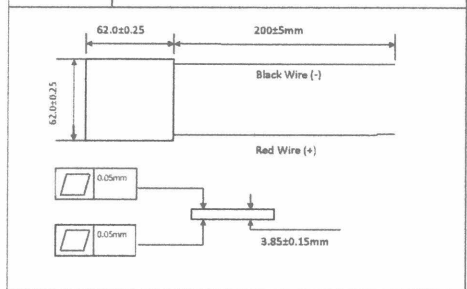
表 7: 試作器を用いた測定結果

	重しなし	重しあり	クランプで挟み込み
熱伝導率 [W/mK]	0.340	0.513	0.667

用いたペルチェ素子、電源は図 67、図 68 のように秋月電子のものを用いている。ペルチェ素子間には熱伝導グリースを用いている。

Product Specifications 参考資料

Part No	TEC1-12730
Dimensions	Refer to Technical Drawing below
Lead Standard	16AWG UL 1674 maximum temperature 105°C standard tin-plated copper lead, PVC insulated wire, length 200±5mm
Resistance	Ambient temperature of 20°C, 1KHZ vacuum state 0.3 – 0.4 ohm
Packaging	Foam box packing of 30 pieces per box



Details:

TYPE	Couples	I _{max} (A)	U _{max} (V)	Q _{max} (w)		ΔT _{max} °C			R Ω
				ΔT=0	QC=0	T _h =27°C			
				L	M	H			
TEC1-12730	127	25	15.4	266	67	62	62	3.85 (±0.15)	0.3- 0.4

1. Operating temperature range : -55°C to +80°C
2. Assembly under pressure : 150 lbs/sq in

図 67: 使用したペルチェ素子の規格 [15]

出力電圧2.3V~12V可変 出力電流最大6A
可変スイッチング電源キット
MPD7K019S使用 高効率96.5%

■キット仕様■

ハイブリッドIC、コイルをケース内に内蔵したMPD7K019Sを使用した可変電圧電源キットです。
 同期整流型回路採用で、高効率96.5%(入力24V 出力12V 6A時)で発熱が少なくて済みます。

- ★出力電圧可変範囲 DC2.3V~12V
- ★入力電圧 DC17V~40V
- ★出力電流 最大6A(24V入力、12V出力の場合)

■部品表■

記号	品名	数	備考
U1	MPD7K019S	1	
C1	1500 μ F 50V	1	電解コンデンサ 1000 μ F~3300 μ Fの場合有
C2, C3	1000 μ F 35V	2	電解コンデンサ 1000 μ F~3300 μ Fの場合有
C4, C5	0.1 μ F 50V	2	積層セラミックコンデンサ 表示104
CN1,2	2P端子台	2	
R1	抵抗470 Ω 1/4 W	1	表示 黄紫茶金
VR1	注 半固定抵抗500 Ω	1	多回転旋盤型
VR1	注 可変抵抗500 Ω	1	B500 Ω
	専用基板	1	

注 VR1は、用途により、取り付け方法を選んでください。詳しくは、■製作■をごらんください。

■回路図■

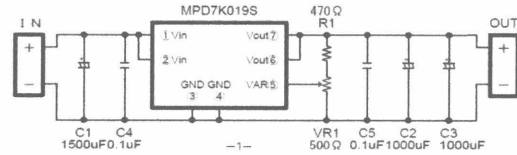


図 68: 使用した電源装置の規格 [14]

5.3 熱伝導測定に用いるパラメータ出し

熱伝導率試験を行う際には接着剤を冷却する必要がある。本実験では接着剤の温度を氷点下以下にする必要があるためにチラーを用いて水冷で冷却を行うのではなく、ペルチェ素子を用いて冷却を行う必要がある。なぜならば使用しているチラーは 15℃以下に温度設定ができないため、氷点下以下の環境を作り出すときには冷却を目的としているチラーが熱源をなってしまうため冷却を行えないからである。ペルチェ素子を 1 枚用いたときよりも 2 枚重ねて使用したときの方が低い温度をつくりだすことができるので、低温環境を作り出すときにはペルチェ素子を 2 枚重ねて使用することとする。

ペルチェ素子に加えた電流値などから理論的に作り出せる温度を計算する方法もあるが、用いているファンの冷却能力が分からないので、上下のペルチェ素子に加える電流値を変化させ、最も大きな温度差が出る値を実験的に測定した。なぜならば上下のペルチェ素子の温度差が最も大きくなる時、上面の温度が最も低くなるからである。その結果は表 8 のようになった。上面のペルチェ素子よりも下面のペルチェ素子に流す電流値が大きくなっている理由は上側のペルチェ素子で発生した熱を取るために、上側のペルチェ素子よりも下側のペルチェ素子に大きな電流を流す必要があるからである。測定環境は空調設備のある 28℃で行った。

使用している電源は最大 6A の電流を流すことができ、上下の素子に加える電流値に差を出すために下の素子には電流値を 2.5A から流してみた。

表 8: 加えるべき電流値測定

加えた電流値 [A] 下側/上側	ペルチェ上面温度 [°C]	ヒートシンク温度 [°C]	温度差 [°C]
4/2.5	10.35	31.5	21
5/2.5	9.1	33.2	24
6/2.5	8.5	36.1	28
4/3	10.8	32.3	22
5/3	9.1	34.3	25
6/3	8.3	35.5	27
4/3.5	9.6	34.3	25
5/3.5	9	35.3	26
6/3.5	7.5	36.9	29

ペルチェ素子の下面に 3.5A、上面に 6A の電流を流したときに素子の上面と下面で 29℃の温度差が生じ、最も低い上面温度を作り出せるということがわかった。このパラメータを用い、恒温槽内の温度を-40℃に設定して上面温度の測定を行ったところ-47.46℃まで冷却することができた。

よって以後の実験は最も大きな温度差を作り出せる上側の素子に 3.5A、下側の素子に 6A の電流を加えるパラメータを用いて実験を行うこととした。

5.4 新型熱伝導測定器の製作

新型熱伝導測定器の試作よりも精度の高い実験を行うため、5.1章で示した CERN で行われている熱伝導測定の図面に合わせた測定器を作成した。測定器は九州大学の工場で plate、pillar、pole、林レピックで接着剤を塗布するコインの作成を依頼した。plate、pillar はアルミニウム、pole はアクリルを用いて作成されている。このセットアップを 2 組作成し、1 つは接着剤の熱伝導率測定について研究を行っている京都教育大学に置きもう 1 つはバックアップの実験を行う環境が整っている九州大学に置き測定を行う。九州大学と京都教育大学のセットアップを揃えるために、ヒーターは misumi の 20×15 [mm] のセラミックヒーターを用い、クーラーには 30×30 [mm] のペルチェ素子を 2 枚重ねて使用することになっている。ペルチェ素子の冷却には DC ファンを使用して空冷で行う予定である。下側の plate とペルチェ素子を接着させるために、図 70 のようにアルミ板で素子を挟み込んで使用する予定である。

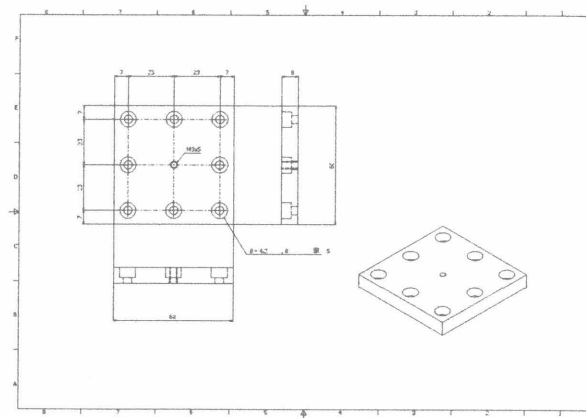


図 69: Plate 設計図

plate の中央に pole、四隅に pillar を挿しこむようになっており、残りの 4 点ではヒーターやクーラーを固定するための穴となっている。

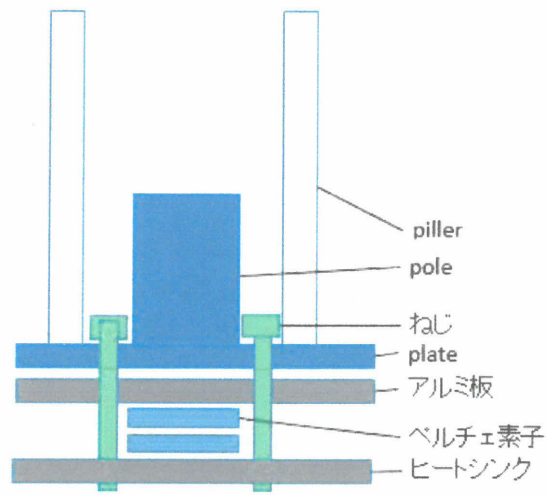


図 70: クーラーのセットアップ

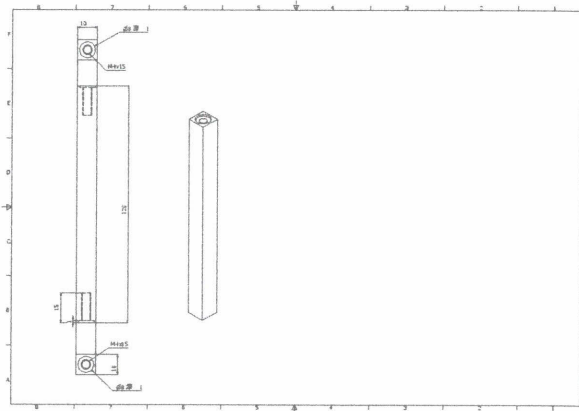


図 71: Pillor 設計図

当初は piller はアルミニウムできており、ヒーターとクーラーと接触してるために熱パスとなるが、pole に 2 点熱電対を設置して計測を行うので熱伝導率の計算には影響ないと考えられるが、熱パスがないほうがよいのでアルミニウムよりも熱が伝わりにくいアクリルで作成しなおした。

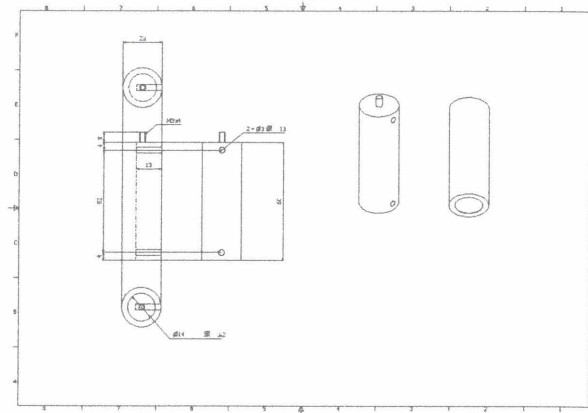


図 72: Pole 設計図

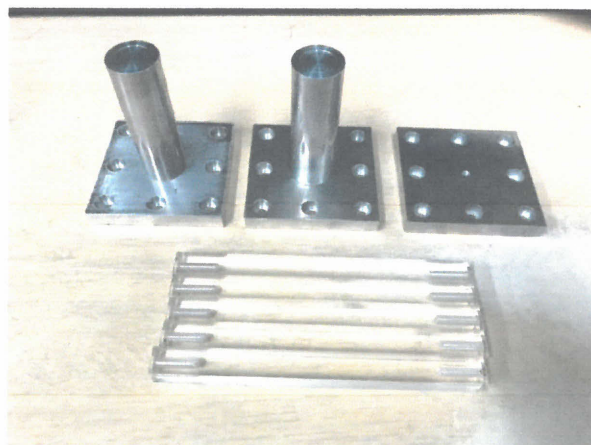


図 73: 完成した測定器

測定器は完成したが、コインはまだ作成できていない。なぜならば作成するコインの厚みは 1mm であり、精度が求められるものであるのでレーザーや打ち抜きなどの加工が必要であるためまだサンプルの製作には至っていない。また、コインに塗布する接着剤の厚みコントロールについても今後の課題となっている。

5.5 熱電対の接着方法

新型熱伝導測定器で実験を行う際の温度測定方法としては、pole の 2 点に穴をあけ熱電対を固定することで温度を測定する。そこで pole の設計図と同じ 3mm の大きさの穴をアルミニウム柱にあけて熱電対の接着方法に関する実験を行った。使用したアルミニウム柱は 5.2 で使用したアルミ柱を用いている。アルミ柱の上部から 1cm ほどの位置に直径 3mm の穴をボール盤であけ、熱電対を 1 つ設置し、もう 1 つはアルミニウム柱の上面に設置しこれらの熱電対が計測する温度差についての実験を行った。

現在熱電対の固定方法にははんだを用いる場合とアルミテープを用いる場合が検討されている。アルミテープを用いた接着方法として図??2 種類の方法を検討しており、1 つめの方法は熱電対に直接アルミテープを貼り付ける方法であり、2 つめは熱電対の先にアルミホイルを巻き付け、穴の中に筒状にしたアルミテープを入れ、熱電対を貼り付ける方法である。はんだを用いた接着方法としては、はんだと熱電対を一緒にアルミ柱につける方法を取っている。それらの結果は表 9 のようになっている。

貼り付け方1.熱電対に直接アルミテープを貼る



貼り付け方2.熱電対にアルミテープを巻いてから貼る

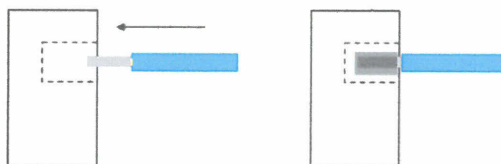


図 74: アルミテープの貼り付け方



図 75: 貼り付け方 2 で熱電対を貼り付けた様子

表 9: 熱電対の貼り付け方による温度差測定

	はんだでの温度差 [°C]	貼り方 1 での温度差 [°C]	貼り方 2 での温度差 [°C]
1 回目	2.462	5.035	2.513
2 回目	3.017	3.862	2.525
3 回目	0.423	4.274	2.004
平均値	1.997	4.390	2.347
測定誤差	0.808	0.343	0.171

表 9 の結果よりアルミニウム上面とアルミニウム柱にあけた穴の中の温度を熱電対を用いて測定するときにははんだを用いて熱電対を接着すると最も温度差を小さく測定できるということがいえるが、はんだと貼り方 2 での温度差は $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、測定誤差の差 0.637 であることを考慮すると貼り方 2 で熱電対を接着する方法が最も良いと考えられる。他にも、はんだを用いて熱電対を接着した場合ははんだで穴の内部が汚れてしまうので接着をやり直しにくいというデメリットもある。よって熱電対はアルミテープを用いた貼り方 2 で接着する方法を採用する。

これらの set up を用いた実験はまだ行っていないので、コイン挟み込み試験器を用いて熱伝導率試験をすることが今後の課題として挙げられる。

6 低温環境における熱伝導率試験

6.1 set up

6.1.1 恒温槽が作り出せる温度測定

低温下における接着剤の熱伝導率の変化を調べるために NETSUDENSHI の THC-150S という恒温槽を用いて冷却を行った。接着剤は実機では -15°C で使用されるものではあるが、0000 を保証するために -50°C まで温度を下げて接着剤の挙動を調べる。用いた恒温槽のスペックとしては -30°C ～ 80°C となっているので -50°C まで冷却する能力はないが、恒温槽によって作り出せる温度の限界を調べるために 15 分おきに温度測定を行った結果図 76 のように 255 分後に -40°C を示した。 -50°C を目指さず、 -40°C を測定した時点で測定を中止した理由としては、 -30°C から -40°C に温度を下げるのに 2 時間以上かかっており、 -40°C から -50°C まで温度を下げるためにはさらに 2 時間以上の時間がかかると予想できる。よって実際に熱伝導率を測定するときに 4 時間以上恒温槽で冷却を行ってから測定を開始することは現実的はないと判断したからである。

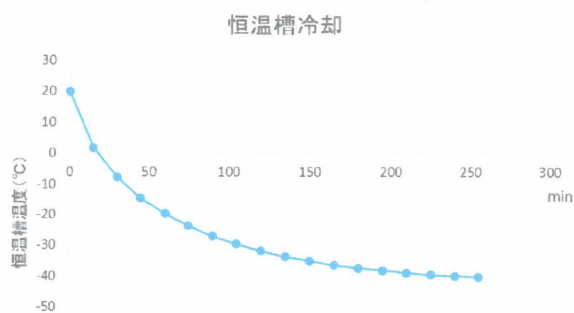


図 76: 恒温槽の冷却時間

6.1.2 コインが熱平衡に達するまでの時間測定

サンプルに加えた熱がどれくらいの時間で熱平衡に達するかを試験をするための set up を整えた。試験のときにペルチェ素子に加えた電流値は 5.2 でも述べたように、上側の素子に 3.5A 下側の素子に 6A の電流を流すようにした。ヒートシンクの放熱には 18V 印可できる DC ファンを用いて空冷で行い、ヒーターには 6A まで安定して印可できる電源を用いて実験を行った。環境温度は 28 °C で測定した。測定の Set up は図 77、78 のようになっている。

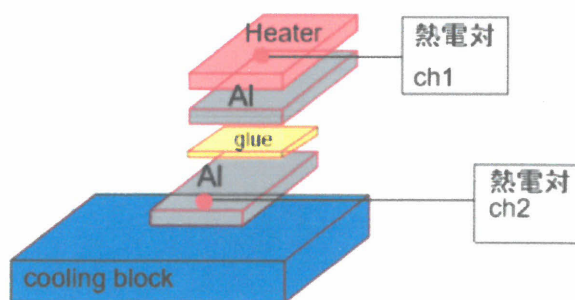


図 77: 測定 Set up の模式図

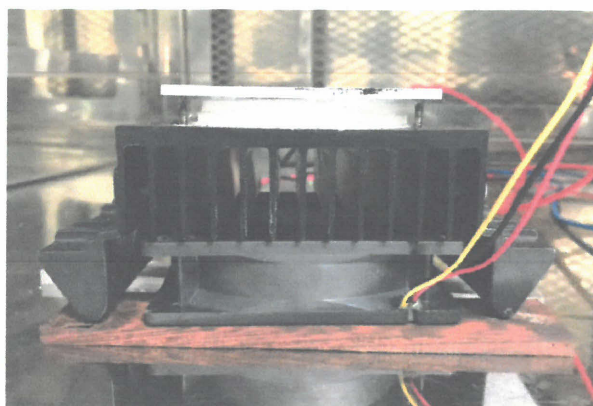


図 78: Set up を横から見た図

次に実験値が安定するまでにかかる時間を測定するために厚さ 100 μm の熱伝導両面テープを用い、ペルチェ素子を使って測定を行った。ここで使用したサンプルは SE4445 を塗布したコイン状のサンプルではなく、家田 [4] が熱伝導率試験で使用した板状のサンプルを使用している。なぜならば SE4445CV はゲル状に硬化するのでサンプルとヒーターなどの密着度を高めるためとコインに圧力をかけるとコインの隙間から接着剤が出てきてしまい厚みを一定にコントロールし辛いからである。

実験では文献 [4] で述べられているように、熱電対に恒温槽内の風が直接当たることによりサンプルの正しい温度を測定できないので本実験では装置に段ボールを被せて恒温槽内の風が直接サンプルに当たらないようにして実験を行った。

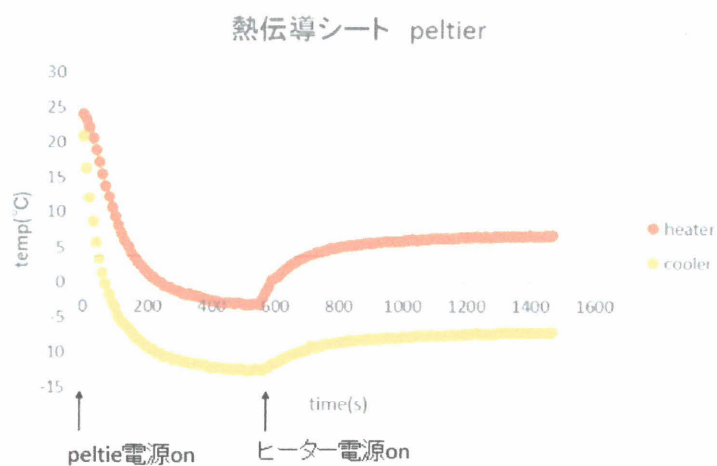


図 79: サンプル測定時間

測定結果は温度の測定値を 5 秒ごとにプロットしたところ、図 79 のようにペルチェ素子の電源を入れてから 580 秒程で実験値が安定し、ヒーターの電源を入れてから 900 秒程で実験値が安定しているので、それぞれの実験値はヒーターの電源を入れてから 900 秒経ったデータを用いることとする。

6.1.3 熱電対の貼り付け位置

実験のセットアップや測定に必要な時間がわかったので、家田の作成した No.103 のサンプルを用いて常温で実験をしたところ、 $0.326[\text{W}/\text{mK}]$ となった。この値は家田の測定値である $0.706[\text{W}/\text{mK}]$ や理論値である $1.34[\text{W}/\text{mK}]$ と比べてかなり低い値となっている。

この原因として考えられることは、家田 [4] が実験で使用していたよりも大きな吸熱と熱を与えていたからであり、ヒーター側が加えている熱に比べてクーラー側で取っている熱の量が多いので、ヒーターが加えた熱が接着剤に届いておらず、正しいヒーターの温度が測定できていないと考えられるからである。よって図 81 のようにヒーター側に設置している熱電対の位置をヒーターの下ではなく、接着剤の真上に設置して実験を行ってみたところ、熱伝導率は $0.779[\text{W}/\text{mK}]$ となった。この値は家田 [4] が測定した実験値と似ているため、以降の実験ではこのセットアップを用いて実験を行った。

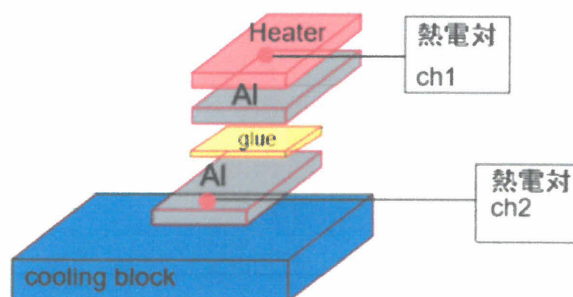


図 80: 改良前のセットアップ

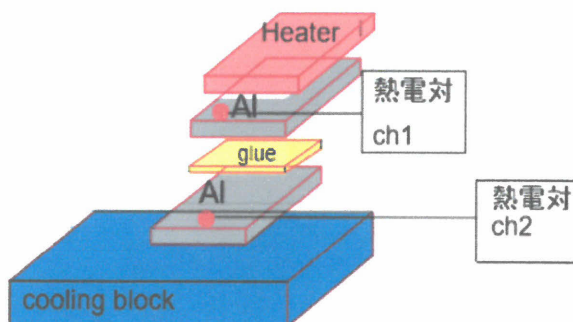


図 81: 改良後のセットアップ

6.2 低温環境における SE4445CV の熱伝導率測定

SE4445CV は熱伝導接着剤としての候補から外れているが、EG7655 の実験を行う前に試験的に低温環境における熱伝導率の測定を行った。実験では 6 で示したセットアップを用いて恒温槽の設定温度を 0 °C、-20 °C、-30 °C、-40 °C に設定し、冷却側であるペルチェ素子の側には 3.5A、下側には 6A の電流を流し、ヒーターには 1W の熱を与えて実験を行った結果は表 10 のようになった。結果は測定を 3 回行った平均値を取っている。各設定温度での温度変化の様子を 10 秒ごとにプロットしたものは図 82、83、84、85、86、87 のようになっている。

表 10 において接着剤の温度と示してあるものは図 81 における熱電対 ch1 と熱電対 ch2 の温度の平均値である。図 82 においては glue と示してある温度である。

表 10: SE4445CV の熱伝導率測定平均値

恒温槽の設定温度 [°C]	接着剤の温度 [°C]	熱伝導率 [W/mK]	測定誤差
25	18.172	0.861	0.0479
0	-5.698	0.77	0.0652
-10	-12.488	0.820	0.00850
-20	-23.842	0.8056	0.0452
-30	-31.458	0.846	0.0766
-40	-38.05	1.019	0.0688

表 11: SE4445CV の熱伝導率実験値

設定温度	測定 1 回目 [W/mK]	測定 2 回目 [W/mK]	測定 3 回目 [W/mK]	平均値 [W/mK]	測定誤差 [W/mK]
25	0.779	0.945	0.86	0.861	0.0479
0	0.883	0.771	0.657	0.77	0.0652
-10	0.82	0.812	0.829	0.82	0.00850
-20	0.89	0.792	0.735	0.805	0.0452
-30	0.992	0.815	0.732	0.846	0.0766
-40	1.067	1.108	0.884	1.019	0.0688

この結果に対する考察は 6.3 章で述べるが、結果からわかることは接着剤の温度が下がるにつれて熱伝導率がよくなっているということである。

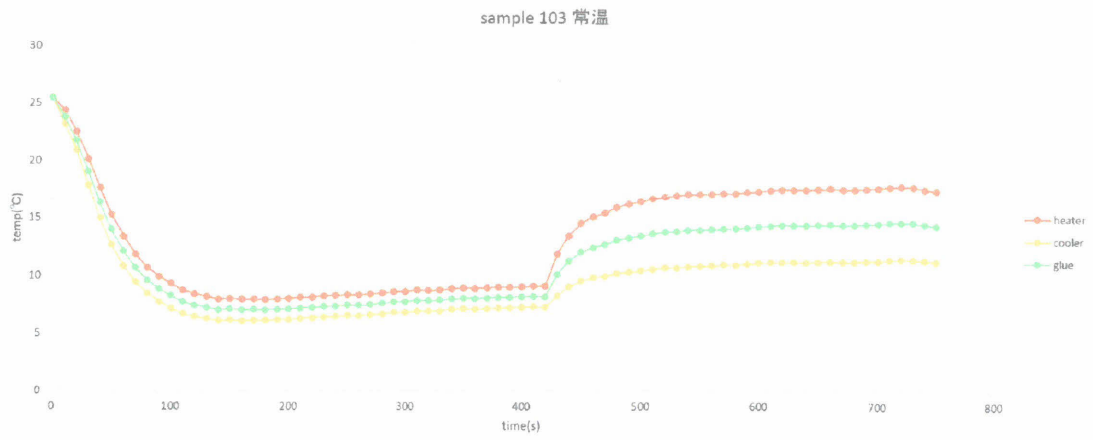


図 82: 25 °Cにおける温度-時間の変化

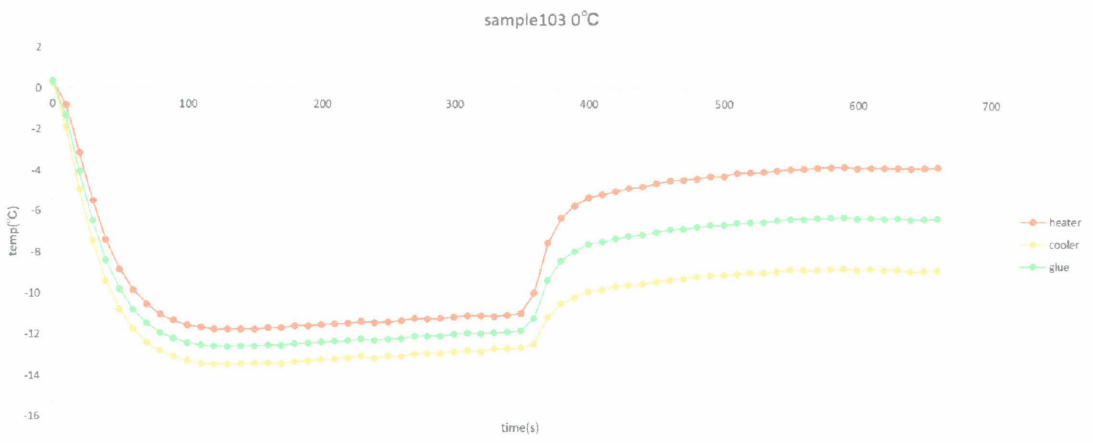


図 83: 0 °Cにおける温度-時間の変化

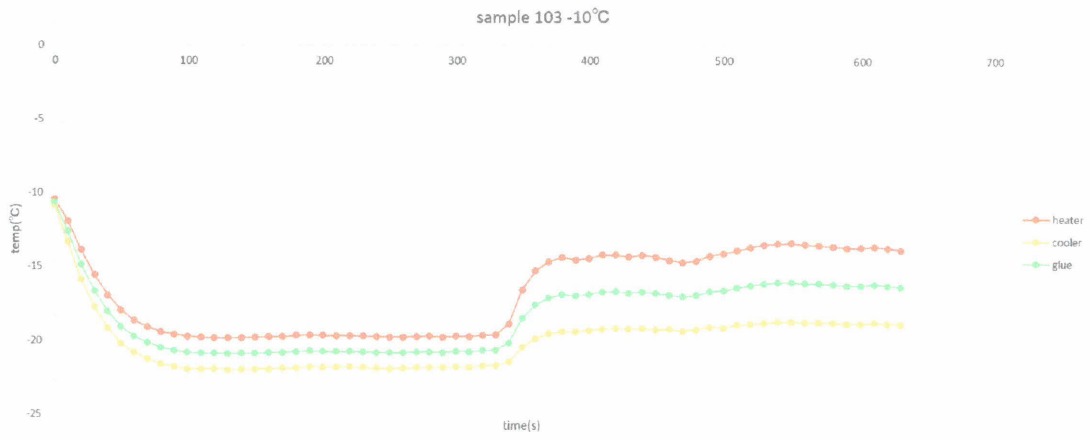


図 84: -10 °Cにおける温度-時間の変化

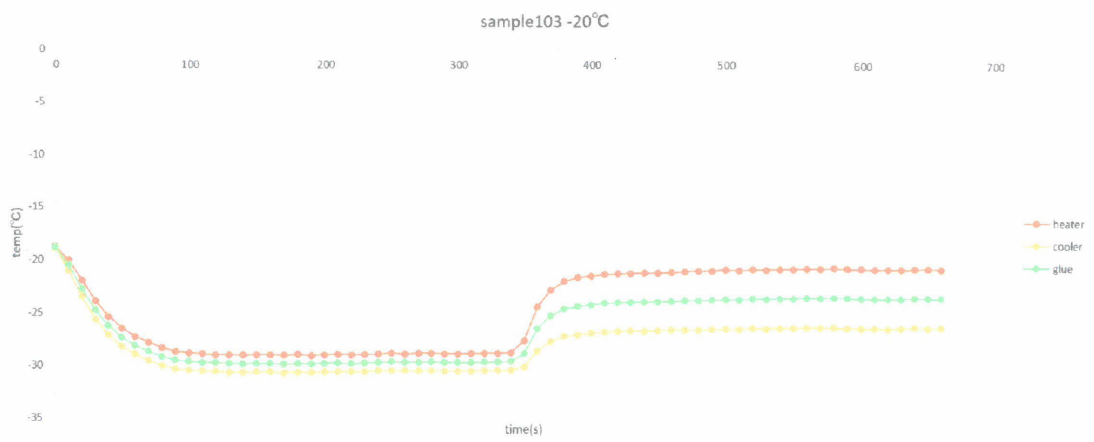


図 85: -20 °Cにおける温度-時間の変化

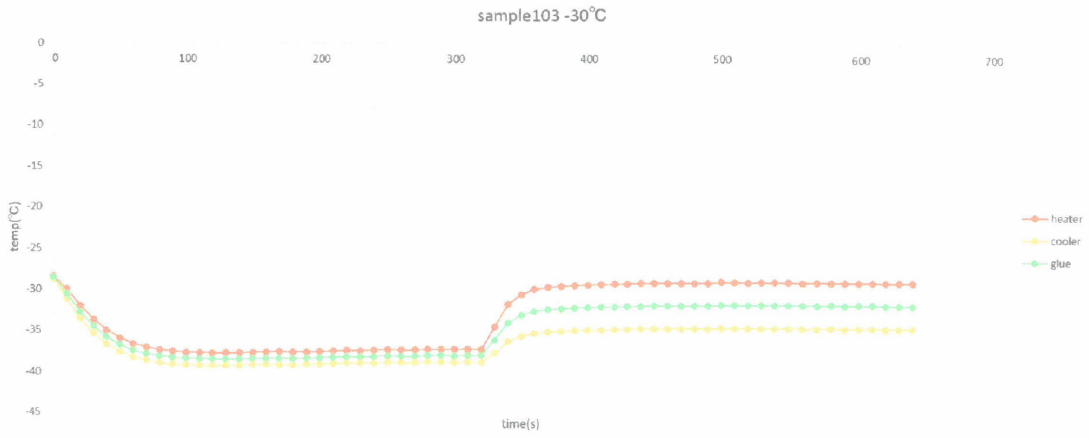


図 86: -30 °Cにおける温度-時間の変化

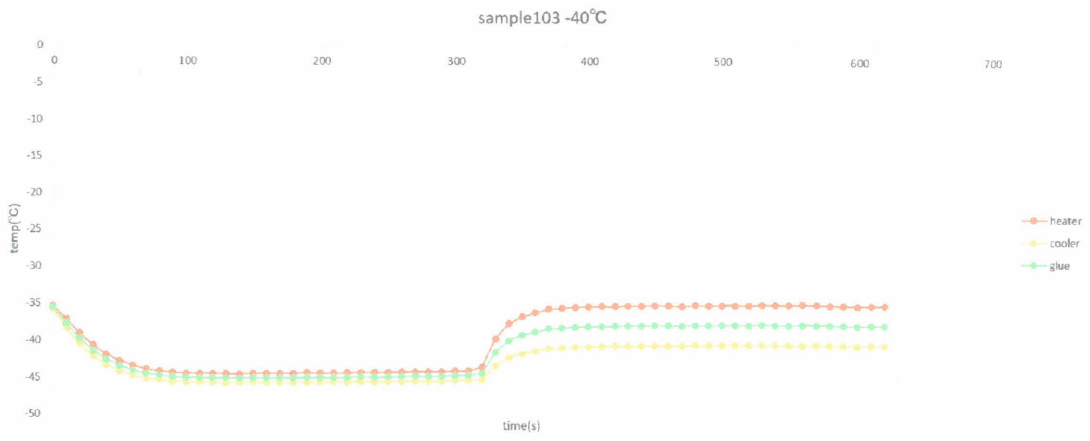


図 87: -40 °Cにおける温度-時間の変化

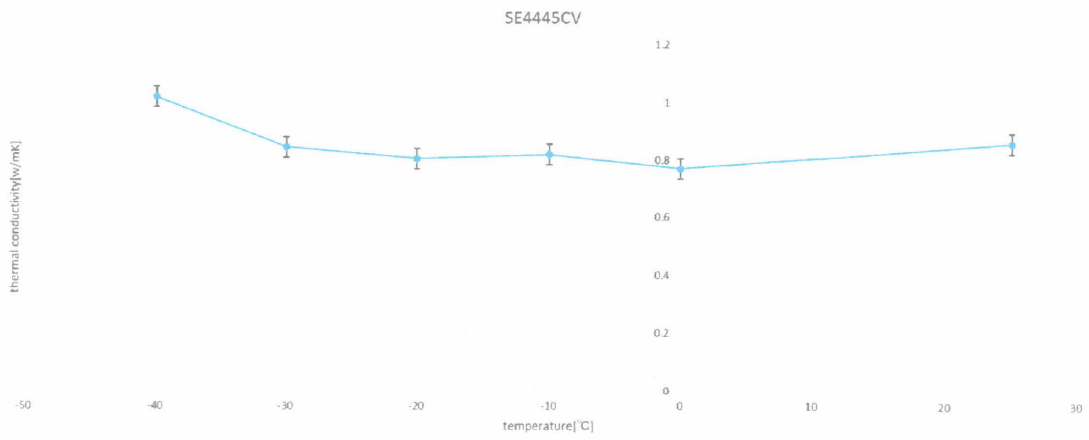


図 88: SE4445CV の温度-熱伝導率の変化

(a) 接着剤の温度が下がるにつれて熱伝導率がよくなっていることがわかる

6.3 SE4445CV の熱伝導率の変化に関する考察

??章で述べたように SE4445CV の常温時の熱伝導率が $0.861[\text{W}/\text{mK}]$ であり、低温時の熱伝導率は $1.019[\text{W}/\text{mK}]$ となっているので、常温時の熱伝導率に比べて低温時の熱伝導率は 1.18 倍ほどに変化している。この変化量は常温時と低温時の SE4445CV の熱伝導率の誤差範囲内に入っておらずどのような要因で変化が起こっているのか考察する。

熱伝導の式より、常温時と低温時におけるヒーター側とクーラー側の温度差の違いによって熱伝導率に差が出てきていると仮定する。常温時と低温時におけるヒーター側とクーラー側の温度差の比は表 12 のようになっている。

熱伝導率を求める式

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

(W は加えた熱量、 ΔT は測定点における温度差、d は物質の厚み、s は熱の通過面積を表している)

表 12: SE4445CV の温度差の比

回数	$25^\circ\text{C} \Delta T / -40^\circ\text{C} \Delta T$
1 回目	1.111
2 回目	1.068
3 回目	0.981
平均値	1.053
標準誤差	0.0382

この結果より、恒温槽の温度を 25°C に設定したときにできるクーラー側とヒーター側の温度差と -40°C に設定したときにできる温度差の比は 1.053 であり、熱伝導率の変化 1.18 倍よりも小さなものとなっている。よって温度差が熱伝導率の変化に大きな影響を与えるとは考えにくい。

次に温度差によって熱伝導率が変化しているのではなく、温度変化により接着剤の厚みが増えたことで熱伝導率が変化したと仮定する。低温環境において接着剤の厚みが薄くなっていると仮定すると、熱伝導率は低くなる計算となるが実験値では低温環境において熱伝導率が高くなっているため接着剤の厚みが薄くなったとは考えにくい。

また、低温環境において接着剤の厚みだけでなく接着面積も小さくなっていると仮定する。このとき接着剤の厚みと接着面積が同様に縮んだと過程する。常温における接着剤の厚みを x とし低温時における接着剤の厚みを x' とすると、接着剤の厚みの変化は x'/x のようになり、接着面積の変化は $x'^2/\pi/x^2$ となる。低温環境において接着剤が縮んでいると仮定しているため x' は x よりも小さな値を

取ることになる。ここで熱伝導率の式と比較して考えると、低温環境において接着剤の厚みだけでなく、接着面積も小さくなった場合においても熱伝導率は大きくなると考えられる。

接着面積の変化がどれほど熱伝導率の変化に影響を及ぼすか考察しようとしたがSE4445CVの仕様書に線膨張率などの記載がなかったので定量的な考察はできなかった。計算上では-40℃環境において接着剤の厚みが360 μmとなっていれば接着剤の厚み変化によって熱伝導率が変化したといえる。よって-40℃環境における接着剤の厚みの測定は今後の課題となる。

参考として、図 90 の住化分析センターの放熱対策用シリコーンゴムも実験値と同じような変化を取っている。

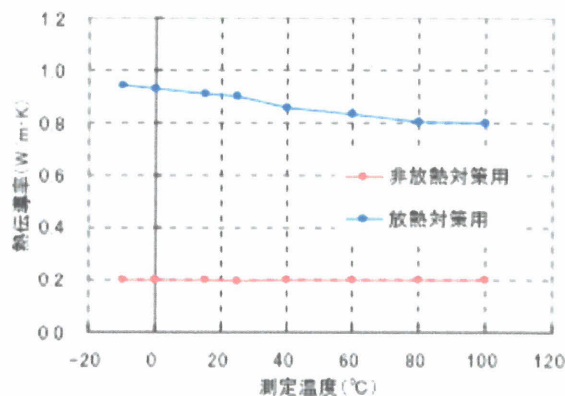


図 3 : シリコーンゴムの熱伝導率の温度依存性

図 90: 放熱対策用シリコーンゴムの熱伝導率 [10]

他にも低温環境において熱伝導率が変化することを格子の熱低効率の観点から考察する。
文献 [11] を引用すると次のようにある。

非調和相互作用の熱抵抗に対する効果の理論はきわめて複雑である。1 は $1/T$ に比例し、これは多くの実験によく一致する。この温度依存性は着目するフォノンと相互作用できるフォノンの数によって理解することができる。すなはち、高温では励起されたフォノンの全数は T に比例する。着目するフォノンの平均自由行程は、それと衝突するほかのフォノンの数に逆比例するべきなので、 $l \propto 1/T$ である。

つまり低温環境においては格子振動が小さくなり、熱伝導が妨げられ、格子の励起による熱の拡散が妨げられると考えられる。

これらの結果より本節における結論としては、SE4445CV は低温環境においては熱伝導率が上がるという結論に至る。

6.4 低温環境における EG7655 の熱伝導率測定

実機で使用される可能性のある EG7655 の低温環境における熱伝導率を測定するために sample103 を用いて SE4445CV の熱伝導率を測定したときと同様に家田 [4] の作成した sample61,62,63 を用いて EG7655 の低温環境における熱伝導率測定を行った。測定は SE4445CV のときの測定条件に加えて、与えた熱量によって熱伝導率が変化するかどうかという条件も加えて測定を行った。実験では恒温槽を 25℃、0℃、-10℃、-20℃、-30℃、-40℃に設定し、それぞれの設定温度において電源装置を用いてヒーターに 8V、22V の電圧をかけて実験を行った。測定はサンプルによるばらつきを減らすために各サンプルで 3 回測定を行った平均値の平均を取っている。

ヒーターに 8V を加えたときの結果は表 13、22V を加えたときの結果は表 14 のようになっている。EG7655 の熱伝導率の理論値は 1.7[W/mK] となっている。

表 13: EG7655(8V) の熱伝導率測定結果

恒温槽の設定温度 [°C]	接着剤の温度 [°C]	熱伝導率 [W/mK]	測定誤差
25	14.521	0.732	0.0306
0	-68.035	0.785	0.0459
-10	-16.866	0.817	0.0491
-20	-24.94	0.801	0.0930
-30	-35.303	0.889	0.0504
-40	-40.038	0.894	0.0685

表 14: EG7655(22V) の熱伝導率測定結果

恒温槽の設定温度 [°C]	接着剤の温度 [°C]	熱伝導率 [W/mK]	測定誤差
25	35.116	0.973	0.0561
0	15.510	1.081	0.0630
-10	6.890	1.195	0.0656
-20	-1.903	1.139	0.0749
-30	-9.321	1.146	0.0772
-40	-14.408	1.159	0.0885

測定結果に関する考察は 6.5 章で述べるが、実験結果からわかることとしては接着剤の温度が低くなれば熱伝導率がよくなり、与えた熱量が大きいほど熱伝導率がよくなるという傾向がみられる。

6.5 EG7655 の熱伝導率の変化に関する考察

EG7655 も SE4445CV のように低温時の熱伝導率の方が常温時の熱伝導率の方がよくなるという結果になっている。ヒーターに 8V の電圧を加えたときの常温時の熱伝導率は 0.732[W/mK]、低温時の熱伝導率は 0.894[W/mK] となっている。この結果より低温時の熱伝導率が常温時の熱伝導率の 1.22 倍になるという実験結果になっている。同様にヒーターに 22V の電圧を加えた場合においても低温時の熱伝導率の方が常温時の熱伝導率よりも 1.19 倍になっている。これらの変化は SE4445CV のときと同様にどのような要因によって熱伝導率が変化しているのかを考察する。

熱伝導率が変化した要因が常温時のヒーター側の温度とクーラー側の温度の差と低温時の温度差が変化したことによると仮定する。低温時と常温時の ΔT の比は次の表ようになる。

表 15: EG7655(8V) の温度差の比率

	$\Delta T(25\text{ }^{\circ}\text{C})/\Delta T(-40\text{ }^{\circ}\text{C})$
1 回目	0.986
2 回目	1.045
3 回目	0.994
平均値	1.008
測定誤差	0.0183

表 16: EG7655(22V) の温度差の比率

	$\Delta T(25\text{ }^{\circ}\text{C})/\Delta T(-40\text{ }^{\circ}\text{C})$
1 回目	0.957
2 回目	0.988
3 回目	0.952
平均値	0.966
測定誤差	0.011

EG7655 に 8V を加えた場合、22V を加えた場合それぞれで ΔT の変化量は熱伝導率の変化と比べると小さいものとなっているので温度差によって熱伝導率が変化したとは考えられにくい。

EG7655 に 8V と 22V をかけた場合はこのような結果となったが、与えた熱量を変化させた場合でも同様の結果となるのか調べるために、ヒーターに 12V、16V の電圧をかけた場合を追加して実験を行った。

表 17: EG7655(8V) の熱伝導率測定結果

恒温槽の設定温度 [°C]	接着剤の温度 [°C]	熱伝導率 [W/mK]	測定誤差
25	14.521	0.732	0.0306
0	-68.035	0.785	0.0459
-10	-16.866	0.817	0.0491
-20	-24.94	0.801	0.0930
-30	-35.303	0.889	0.0504
-40	-40.038	0.894	0.0685

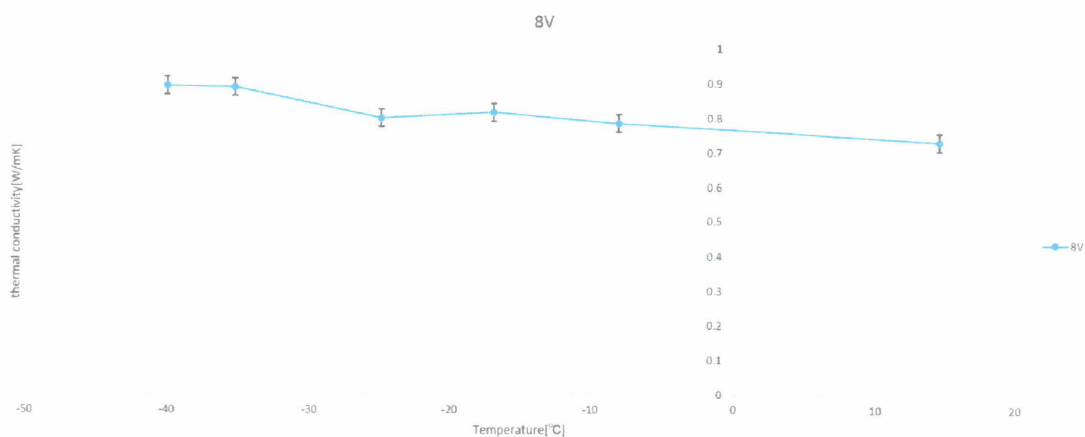


図 91: EG7655 に 8V を印可したときの温度-熱伝導率の変化

表 18: EG7655(12V) の熱伝導率測定結果

恒温槽の設定温度 [°C]	接着剤の温度 [°C]	熱伝導率 [W/mK]	測定誤差
25	20.091	0.947	0.0429
0	-1.385	1.027	0.0378
-10	-11.549	1.006	0.0590
-20	-20.957	1.149	0.0355
-30	-28.430	1.077	0.0689
-40	-33.882	1.0496	0.0794

ヒーターに 12V 印可した場合でも低温時の方が常温時の時に比べて熱伝導率がよくなっている。

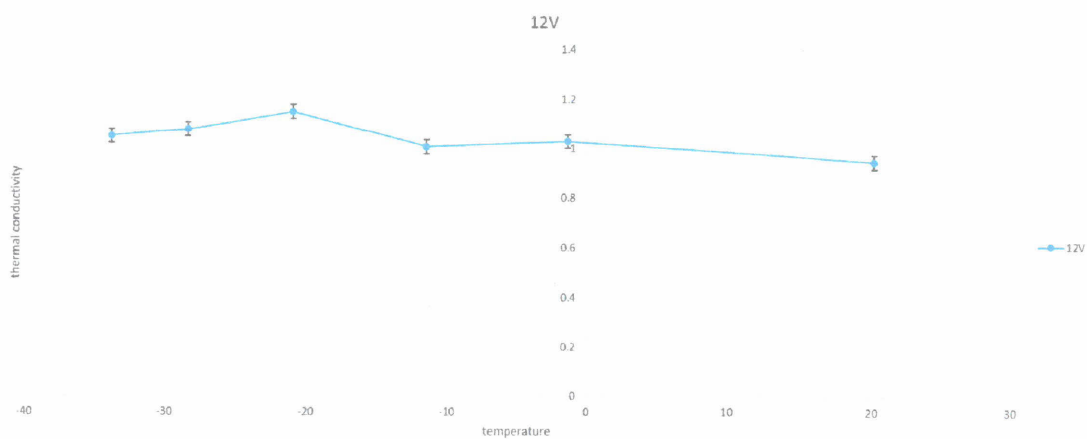


図 92: EG7655 に 12V を印可したときの温度-熱伝導率の変化

表 19: EG7655(16V) の熱伝導率測定結果

恒温槽の設定温度 [°C]	接着剤の温度 [°C]	熱伝導率 [W/mK]	測定誤差
25	24.396	1.022	0.0567
0	1.227	1.119	0.109
-10	-7.795	1.081	0.0647
-20	-16.293	1.109	0.0684
-30	-24.113	1.098	0.0590
-40	-29.071	1.141	0.0802

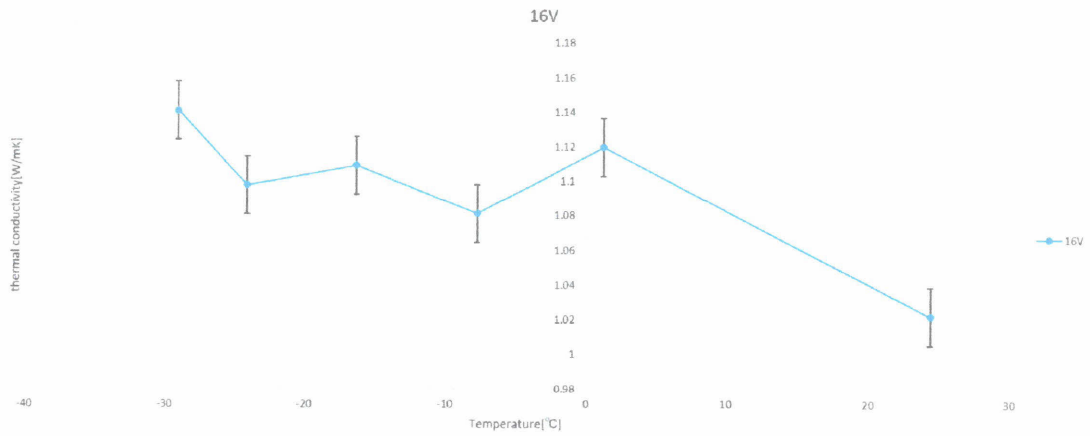


図 93: EG7655 に 16V を印可したときの温度-熱伝導率の変化

ヒーターに 16V 印可した場合でも低温時の方が常温時の時に比べて熱伝導率がよくなっている。

表 20: EG7655(22V) の熱伝導率測定結果

恒温槽の設定温度 [°C]	接着剤の温度 [°C]	熱伝導率 [W/mK]	測定誤差
25	35.116	0.973	0.0561
0	15.510	1.081	0.0630
-10	6.890	1.195	0.0656
-20	-1.903	1.139	0.0749
-30	-9.321	1.146	0.0772
-40	-14.408	1.159	0.0885

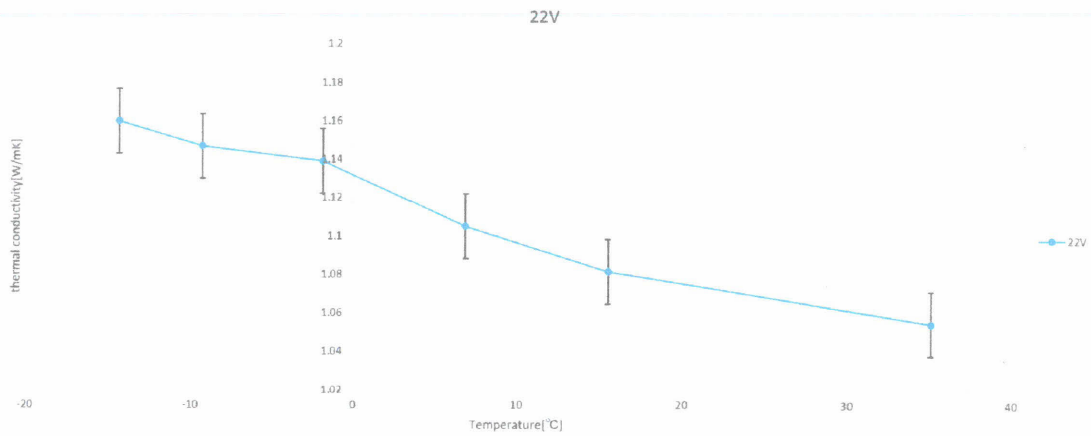


図 94: EG7655 に 22V を印可したときの温度-熱伝導率の変化

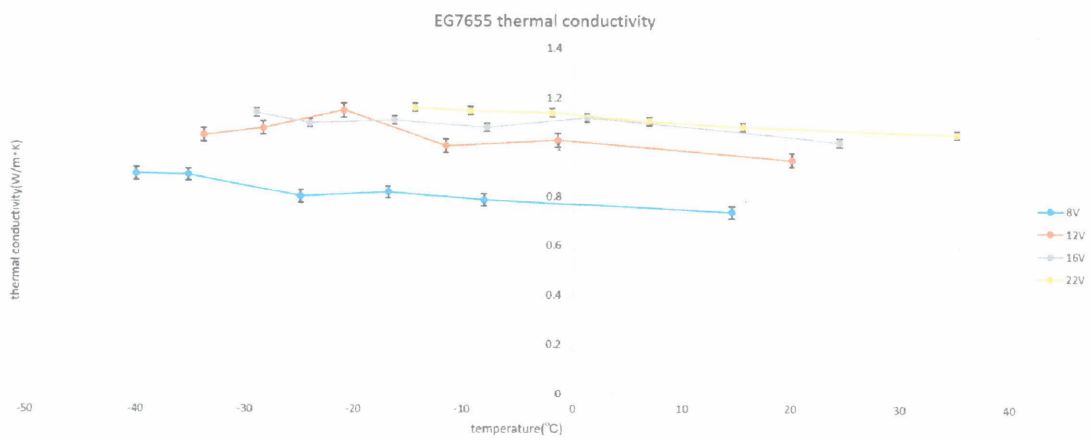


図 95: EG7655 の温度-熱伝導率の変化

表 17、18、19、20 より加える熱量を変化させても低温環境において熱伝導率が良くなるという傾向が出ていることがわかる。これらの結果をまとめた表は 21a のようになる。

表 21: EG7655 の熱伝導率測定結果

(a) 温度の単位は [°C]、熱伝導率の単位は [W/mK] となっている

恒温槽の設定温度	8V 熱伝導率	12V 熱伝導率	16V 熱伝導率	22V 熱伝導率
25	0.732	0.947	1.022	0.973
0	0.785	1.027	1.119	1.081
-10	0.817	1.006	1.081	1.195
-20	0.801	1.149	1.109	1.139
-30	0.889	1.077	1.098	1.146
-40	0.894	1.049	1.141	1.159
平均値	0.819	1.042	1.095	1.115

表 22: EG7655 の熱伝導率測定誤差

恒温槽の設定温度 [°C]	8V 誤差	12V 誤差	16V 誤差	22V 誤差
25	0.0360	0.0429	0.0567	0.0561
0	0.0459	0.0378	0.109	0.0630
-10	0.0491	0.0590	0.0647	0.0656
-20	0.0930	0.0355	0.0684	0.0749
-30	0.0504	0.0689	0.0590	0.0772
-40	0.0685	0.0794	0.0802	0.0885
平均値	0.0571	0.0539	0.0566	0.0708

ここでは最も熱伝導率がよくなる 22V を加えた場合と与えた熱量が小さい 8V を加えた場合について考察する。

熱伝導率が変化した原因はヒーター側の温度とクーラー側の温度の差 ΔT が小さくなったことであると仮定する。常温のときと -40 °C のときの温度差の割合は表 15、表 16 で述べたようになっている。ヒーターに 8V を加えたときの低温時の温度差と高温時の温度差の割合は変化していない。また、22V を加えた場合においては常温時の方が低温時に比べて温度差が小さくなっており、低温時の方が常温時より熱伝導率が高くなるという実験結果と異なっているので温度差によって熱伝導率が変化しているとは考えにくい。

次に温度によって接着剤の厚みが変化したことによって熱伝導率が変化したと仮定する。

寸法値の変化は (線膨張係数) × (元の長さ) × (温度変化量) で求められ、体積膨張率は (線膨張率) × 3 で求められる。EG7655 の線膨張率は 140 [ppm/°C] となっており、8V 設定のときの温度変

化を 53 °C、接着剤の厚みを 558 μm とすると、物体の伸びは 4.1 μm となり体積変化量は 12.3 μm となる。冷却されたことにより接着剤の接着面積と厚みが変わるので、接着剤が一様に変わったとすると厚みの変化量は 2.3 μm となる。常温状態において接着剤の厚みが 2.3 μm 薄くなったときの熱伝導率は 0.794[W/mK] となるので、厚みの変化によって熱伝導率が変化したとは考えにくい。

理論的な側面からの考察は 6.3 節に示したように本研究における低温環境において格子振動が小さくなり熱伝導が妨げられ、格子の励起による熱のバックアップが妨げられるということになっている。

よって本節における結論としては、EG7655 の熱伝導率は低温環境においては上がると結論づけられる。今後の課題としてはコイン状のサンプルを作成し、新型の熱伝導試験器を用いて接着剤の温度を -50 °C にして熱伝導率の測定を行うことが挙げられる。

6.6 結論

ATLAS 検出器のアップグレードに向けた Pixel 検出器のプロトタイプ製作に関する研究として、以下の内容を本論文の結論とする。

- デモンストレータの製作に参加し、3つのデモンストレータを作成した。そのうち2つは問題なく製作できたが、1つは破損してしまった。
- デモンストレータの組み立て精度の再現性について、50 μ m 以内で組み立てることができることを確認した。
- CERN で使用されている熱伝導試験器を参考とし、新型の熱伝導試験器を設計、作成した。
- SE4445CV、EG7655 の熱伝導率は低温環境において高くなる。

今後の課題として挙げられることは次のようになっている

- モジュールを組み立てる際に Cooling Cell に接着剤を塗布する方法の改善。
- 接着精度を測定する際に1モジュールにつき5分程度で測定を終わらせる方法の確立。
- 新型熱伝導試験器を用いて-50 $^{\circ}$ CにおいてEG7655の熱伝導率の測定を行う。

7 謝辞

大学院での研究活動を行うにあたり、基礎物理学研究室の高嶋隆一教授には熱心に助言をいただき指導をしていただきました。

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。分からないことも丁寧に説明してくださり、このような形で修士論文をまとめることができました。

九州大学の藤野圭一君、宮崎祐太君、彌吉拓哉君、総合研究大学院大学の古市歩君には研究に関して相談に乗っていただき、大変心強かったです。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ともに切磋琢磨する仲間であ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大川賢悟君、村田大樹君、大学生活を支えてくださった家族には大変感謝しております。

参考文献

- [1] FE-I4 Collaboration 『The FE-I4B Integrated Circuit Guide』
- [2] 『The RD53A Integrated Circuit』
- [3] 『RD53B Design Requirements』
- [4] S.Ieda 京都教育大学 2017 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』
- [5] SE4445CV specsheet
<http://www.dowcorning.com/DataFiles/090276fe80260420.pdf>
- [6] EG7655 specsheet
<https://www.aitechnology.com/uploads/pdf/products/nasa/eg7655t.pdf>
- [7] K.Nakamura 『ITK Pixel sensor/module の現状』 2018 年 AJ シリコンワークショップ (於九州大学)
- [8] M.Togawa 『Demonstrator @ KEK』 2018 年 9 月 3 日 Assembly Meeting
- [9] D.Kobayashi,S.Fujino,A.Furuichi 『アセンブリマニュアル』
- [10] 放熱材料の熱伝導率測定
<https://www.scas.co.jp/technical-informations/technical-news/pdf/tn373.pdf>
- [11] 第 5 版 キッテル 個体物理学入門 (上)
- [12] T. A. Collaboration et al., 『The atlas experiment at the cern large hadron collider, Journal of Instrumentation 3, S08003 (2008)』
- [13] N.Yamaguchi 九州大学 2017 年度修士論文 『ATLAS 実験用 新型シリコンピクセル検出器の組立手法の研究』
- [14] 秋月電気通商 可変スイッチング電源キット
<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-05758/>
- [15] 秋月電子通商 ベルチエ素子 30A タイプ
<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gI-00487/>
- [16] D.Kobayashi 『Pixl Assembly Weekly Meeting』
- [17] Y.Miyazaki 『Pixel-assembly』