

HL-LHC 計画のための ATLAS 実験用
新型シリコンピクセル検出器の熱耐久性に関する研究

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻
高エネルギー物理実験研究室

博士前期課程 2 年 19844427
三宅 響

2021/01/08

概要

標準模型は素粒子物理学において確立されたモデルであり、現在見つかっている自然現象に対して多くの事柄が無矛盾である。2012年に標準模型最後の粒子であるヒッグス粒子が発見され完成した。しかし標準模型だけでは説明できない事象が多数存在することから標準模型を超えた物理の探索が世界中で進められている。

ATLAS 実験は欧州原子核研究機構 (CERN) が運営する大型ハドロン加速器 Large Hadron Collider(LHC) を用いた陽子・陽子衝突実験である。2012年に同じく LHC で行われている CMS 実験の結果とあわせてヒッグス粒子を発見した。2027年より LHC を High Luminosity LHC(HL-LHC) にアップグレードし積分ルミノシティを LHC の 10 倍取得し更なる新物理の探索を進める。LHC のアップグレードに伴い ATLAS 検出器もアップグレードが予定されており、内部検出器 (Inner Detector) をすべてシリコン検出器を用いた内部飛跡検出器 (ITk:Inner Tracker) に取り換える予定である。ITk で用いられるシリコン検出器はピクセル検出器とストリップ検出器であり両検出器の開発が進められている。

ITk で使用するシリコンピクセル検出器モジュールは運転の過程で -40°C から 40°C の広範囲な温度変化 (熱サイクル) にさらされる可能性がある。この熱サイクルは検出器モジュールに応力を加え悪影響を及ぼす。一例として、検出器モジュールに使用する各部材の熱膨張係数 (CTE:Coefficient of Thermal Expansion) が異なることで反りが生じ、センサーと読み出し回路を繋ぐバンプボンディングが損傷し信号読み出しが不可能になる (バンプオープン)。先行研究より、バンプオープンを起こすピクセルが熱サイクルを繰り返すと増加することが確認されている。また、検出器モジュールに使用している接着剤が熱サイクルによって剥がれてしまうことも懸念されており対策が必要である。

本研究ではこの検出器モジュールの熱サイクル問題について、3つの研究を行った。まず CTE の不一致による反りの変形について理解するために CTE の異なる部材を張り付けたサンプルのひずみの測定とシミュレーションから理解を深めた。次にシミュレーションをもちいて検出器モジュールのバンプ層の応力分布を調べ、応力分布から電気接点の損傷について評価した。3つ目にグルー層における熱サイクルによる応力について接着剤の塗布パターンの違いの影響についてシミュレーションを用いた研究を行った。

目次

第 1 章	序論	8
1.1	標準模型	8
1.1.1	ヒッグス粒子	9
1.2	標準模型を超える物理	9
1.2.1	超対称性粒子 (SUSY 粒子)	10
1.3	コライダー物理	10
1.3.1	加速器実験	10
1.3.2	エネルギーフロンティア実験とルミノシティフロンティア実験	11
第 2 章	ATLAS 実験	12
2.1	LHC 加速器	12
2.2	ATLAS 検出器	13
2.2.1	粒子衝突実験で用いられる検出器の構成	13
2.2.2	ATLAS 検出器の概要	15
2.2.3	Inner Detector	16
2.2.4	カロリメータ	18
2.2.5	ミューオン検出器	19
2.3	HL-LHC 計画と ATLAS 検出器のアップグレード	20
2.3.1	HL-LHC 計画	20
2.3.2	ATLAS 検出器のアップグレード	22
第 3 章	ITk 用シリコンピクセル検出器	24
3.1	半導体検出器	24
3.1.1	半導体とは	24
3.1.2	半導体検出器の動作原理	25
3.2	ITk 用新型シリコンピクセル検出器モジュール	26
3.2.1	ITk 用新型シリコンピクセルセンサー	27
3.2.2	読み出しチップ (ASIC: Application Specific Integrated Circuit)	28
3.2.3	バンプ	28

3.2.4	フレキシブル基板回路 (FPC:Flexible Printed Circuits)	29
3.2.5	ワイヤーボンディングとその保護機構 (メカニカルプロテクション)	29
3.2.6	冷却システムとクーリングセル	30
3.2.7	モジュールに使われる接着材	31
3.3	検出器モジュールにおける温度変化	32
3.3.1	温度変化による検出器モジュールへの影響	33
3.4	本研究の概要	34
第 4 章	熱ひずみ測定と有限要素法によるシミュレーション	35
4.1	ひずみゲージ	35
4.1.1	ひずみとは	35
4.1.2	ひずみと応力の関係	37
4.1.3	金属ひずみゲージ	38
4.1.4	ひずみゲージの測定原理	39
4.2	熱ひずみ測定	40
4.2.1	2 ゲージアクティブ法を用いた曲げひずみ測定	40
4.2.2	測定サンプル	41
4.2.3	測定セットアップ	43
4.2.4	測定結果	44
4.3	ANSYS シミュレーション	44
4.3.1	有限要素法	45
4.3.2	ANSYS について	46
4.4	熱ひずみのシミュレーション	46
4.4.1	熱ひずみシミュレーションのサンプルモデル	47
4.4.2	測定結果との比較	47
4.4.3	CTE の違いによるひずみの評価	49
第 5 章	検出器モジュールのバンプ層の熱応力シミュレーション	51
5.1	検出器モジュールのシミュレーションモデル	51
5.2	FEI4 モジュール (旧型プロトタイプモジュール) のバンプ層の応力	52
5.3	RD53A モジュールのバンプ層の熱応力とメカニカルプロテクションの有無による影響	55
第 6 章	グルー層の熱応力シミュレーション	59
6.1	現在のグルーパターンの問題点	59
6.2	グルーパターンによる応力分布の違いに関する研究	61
6.2.1	簡素モデルとその妥当性の検証	62
6.2.2	応力分布の確認 (ドット)	64

6.2.3	フチのパターン	66
6.2.4	中央のパターン	71
6.3	熱応力軽減パターンのまとめ	73
第 7 章	結論	76
参考文献		79

目次

1.1	標準模型における素粒子	8
1.2	ヒッグス粒子が初めて発見された時の質量分布 $H \rightarrow \gamma\gamma$	9
1.3	エネルギーフロンティアとルミノシティフロンティア	11
2.1	LHC 加速器	13
2.2	素粒子実験で用いられる検出器の概念図	14
2.3	ATLAS 検出器	15
2.4	Inner Detector	16
2.5	Inner Detector の断面図	16
2.6	現行のピクセルモジュール	17
2.7	ATLAS 検出器のカロリメータ	18
2.8	ATLAS 検出器のミューオン検出器	19
2.9	LHC の運転計画	21
2.10	ITk の断面図	22
3.1	順バイアス	25
3.2	逆バイアス	26
3.3	新型シリコンピクセル検出器モジュールの概略図	26
3.4	ITk 用シリコンセンサーの概略図	27
3.5	バンプボンディング	28
3.6	RD53A 用 FPC:中央にケーブル用のコネクタ、左右にはワイヤーボンディング用のパッドが用意されている	29
3.7	メカニカルプロテクション	30
3.8	メカニカルプロテクションを取り付けたモジュールの断面図	30
3.9	クーリングシステム	30
3.10	クーリングセル	31
3.11	FEI4 モジュール用ステンシルマスク	32
3.12	RD53A モジュール用ステンシルマスク	32
3.13	100 サイクル後のバンプオープン	33

3.14	CTE の異なる材料を貼り合わせた時の熱変形	34
4.1	引っ張ったときの板の変形	36
4.2	せん断ひずみ	36
4.3	一般的な材料の応力ひずみ曲線	37
4.4	ひずみゲージの構造	38
4.5	ひずみゲージ	38
4.6	ブリッジ回路	39
4.7	曲げひずみ測定のためのひずみゲージの貼り方	40
4.8	2 ゲージアクティブ法のブリッジ回路	41
4.9	ダミーサンプルのイメージ図	42
4.10	測定サンプルのガラス側から撮影した写真	42
4.11	ひずみ測定セットアップ	43
4.12	左:ひずみゲージ測定用アンプ。右:恒温槽内の様子	43
4.13	曲げひずみ測定結果	44
4.14	有限要素法静的構造解析のイメージ	45
4.15	熱ひずみシミュレーション用 CAD モデル	47
4.16	熱ひずみシミュレーション用 CAD モデルの断面図	47
4.17	BaseA 貼り付けサンプルの変位	48
4.18	ひずみの測定結果とシミュレーション結果の比較	48
4.19	ベースの厚さ 100 μ m, 銅の厚さ 12 μ m での熱ひずみシミュレーション結果	49
5.1	検出器モジュールシミュレーションの CAD モデルの概念図	52
5.2	モジュールシミュレーションの CAD モデルの断面図。ここには写っていないが TPG の下側にクーリングセルの CFRP パーツがついている。	52
5.3	バンプ層の CAD モデル	53
5.4	上側:バンプ実装のイメージ図。下側:シミュレーションでのバンプ層モデルのイメージ図。	53
5.5	-55 $^{\circ}$ C の時 FEI4 モジュールのバンプ層の相当応力分布	54
5.6	-55 $^{\circ}$ C の時 FEI4 モジュールのバンプ層の ASIC チップの境目付近の相当応力分布	54
5.7	メカニカルプロテクションあり RD53A モジュールの CAD モデル	55
5.8	メカニカルプロテクションなし RD53A モジュールの CAD モデル	55
5.9	-55 $^{\circ}$ C の時のメカニカルプロテクションなし RD53A モジュールのバンプ層の相当応力分布	56
5.10	-55 $^{\circ}$ C の時のメカニカルプロテクションあり RD53A モジュールのバンプ層の相当応力分布	56
5.11	-55 $^{\circ}$ C の時のメカニカルプロテクションなし RD53A モジュールの FPC 層の変位	57

5.12	—55℃の時のメカニカルプロテクションあり RD53A モジュールの FPC 層の変位。メカニカルプロテクションがない時と比べて変位が小さくなっている。	57
5.13	—55℃の時のメカニカルプロテクションなし RD53A モジュールの bump 層の変位	58
5.14	—55℃の時のメカニカルプロテクションあり RD53A モジュールの bump 層の変位。メカニカルプロテクションがない時と比べて変位が小さくなっている。	58
6.1	—55℃の時のグルー層の現在のパターンでの応力分布	60
6.2	—55℃の時のグルー層の全ての領域を覆った場合の応力分布	60
6.3	New Glue Pattern を用いた際の —55℃での RD53A モジュールグルー層の応力分布	61
6.4	RD53A モジュール簡素モデルの概念図	62
6.5	簡素モデルの断面図	62
6.6	—55℃の時の簡素モデルにおけるグルー層の応力分布	63
6.7	—55℃の時の RD53A モデルにおけるグルー層の応力分布	63
6.8	—55℃の時の簡素モデルのグルー層の応力分布	64
6.9	—55℃における内側のドットを取り除いたパターンの応力分布	65
6.10	—55℃における中央のドットを取り除いたパターンの応力分布	65
6.11	—55℃のグルー層におけるフチをすべて覆った時の応力分布	66
6.12	—55℃のグルー層でワイヤーボンディングパッドの下だけを抑えた時の応力分布 .	67
6.13	図 6.12 のパターンに横に接着剤を増やした時の —55℃での応力分布	67
6.14	角を L 字に覆ったときの —55℃での応力分布	68
6.15	—55℃の L 字で覆った内側にドットを追加した時の応力分布	69
6.16	角を L 字に覆い内側に線状のパターンを配置した時の —55℃での応力分布	69
6.17	図 6.16 のパターンから x 方向の線を伸ばしたパターンでの —55℃における応力分布	70
6.18	図 6.16 のパターンの x 方向の線を L に近づけたパターンでの —55℃における応力分布	70
6.19	—55℃での L 字に覆い内側を x 方向の線で埋めたパターンの応力分布	71
6.20	—55℃での L 字に覆い内側を y 方向の線で埋めたパターンの応力分布	72
6.21	—55℃での L 字に覆い内側を 4 × 4 個のドットで埋めたパターンの応力分布	72
6.22	各パターンでの —55℃における応力の最大値まとめ	73
6.23	—55℃での図 6.18 のパターンを RD53A モデルに使用したときの応力分布	74
6.24	熱応力を軽減するグルーパターンのポイント	74

表目次

2.1	LHC と HL-LHC の比較	20
3.1	RD53A の仕様	28
4.1	各 FPC ダミーの厚さ,CTE, ヤング率	42
4.2	各サンプルの 1 °Cあたりのひずみの変化量	45
4.3	シミュレーションに用いた各物性値	47
4.4	Base の厚さ 100 μm ,Cu の厚さ 12 μm での 1 °Cあたりのひずみの変化量 [シミュレーション]	50
5.1	モジュールシミュレーションの物性パラメータ	53

第 1 章

序論

素粒子物理学とは、最も小さい物質の構成要素である素粒子を対象とした研究分野である。素粒子物理学を探索する手法の一つとして粒子衝突実験があり、現在世界最高の衝突エネルギーで ATLAS 実験が行われている。本章では素粒子物理学において優れたモデルである標準模型とその問題点について記述し、その探索手法である粒子衝突実験について紹介する。

1.1 標準模型

標準模型は素粒子物理学において自然現象や相互作用を記述する為に作られたモデルである。現在見つかっている自然現象の多くの事柄が標準模型に対して無矛盾であり、今まで行われてきた素粒子物理学の実験結果は標準模型を裏づける結果を示してきた。標準模型では 4 つの基本的な相互作用のうち、「強い相互作用」「弱い相互作用」「電磁相互作用」の 3 つの相互作用を記述する。このモデルでは、物質を構成する「クォークとレプトン」、相互作用を媒介する「ゲージボソン」、質量を与える「ヒッグス粒子」など 17 種類の素粒子がある。

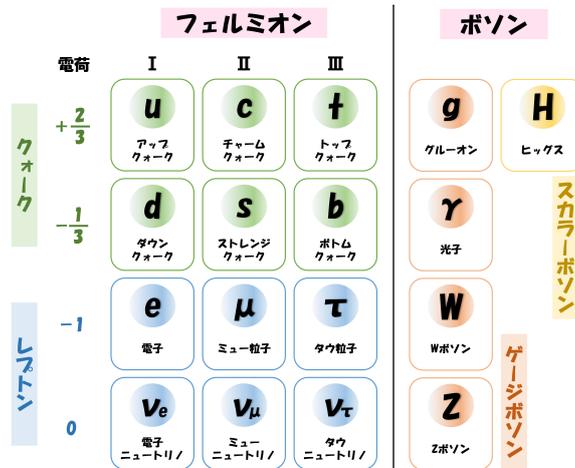


図 1.1 標準模型における素粒子

1.1.1 ヒッグス粒子

素粒子の質量の起源は真空中に潜んでいるヒッグス場である。クォークや荷電レプトンなどのフェルミ粒子と質量をもつゲージ粒子 W^\pm, Z^0 は、ヒッグス粒子と相互作用し質量を獲得する。逆に、光子などの W^\pm, Z^0 以外のゲージ粒子はヒッグス粒子と相互作用をしないため質量をもたない。ヒッグス粒子は質量が 125GeV 程度の寿命が短い粒子であるため、すぐに他の粒子に崩壊してしまう。そのため崩壊で放出されたとされる粒子対を捉えてその 4 次元運動量を精密に測定し、そのベクトル和から不変質量を計算することでヒッグス粒子を探索する。2012 年に複数の崩壊モードからヒッグス粒子と思われる新粒子の発見に至り [1]、その後の測定でその新粒子がヒッグス粒子であることが確定し、標準模型最後のピースが見つかった。

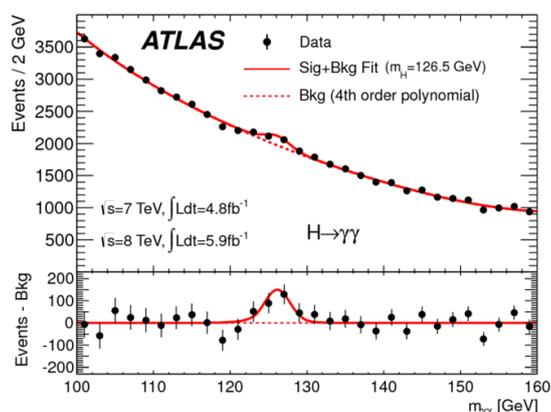


図 1.2 ヒッグス粒子が初めて発見された時の質量分布 $H \rightarrow \gamma\gamma$ [1]

1.2 標準模型を超える物理

標準模型は素粒子物理学において確立されたモデルであるが、それだけでは説明できない現象が存在している。例えば、重力相互作用については記述されていない。また宇宙初期では物質と反物質は同じ数あったと考えられているが、現在の宇宙には物質のみが残り、反物質が消えてしまった物質優勢の宇宙となっている。他にも標準模型ではニュートリノの質量が 0 であると考えられているが、ニュートリノ振動の発見によりニュートリノは質量を持つことが分かっている。またダークマターの存在など標準模型だけでは説明できない現象が多数存在する。それらを解決するために標準模型を超える物理として様々な理論やモデルの構築・検証が行われている。

1.2.1 超対称性粒子 (SUSY 粒子)

代表的な標準模型を超える物理として、超対称性粒子 (SUSY 粒子) について説明する。超対称性は、標準模型の粒子に対して電荷は同じでスピンの $1/2$ だけずれている、つまり標準模型のフェルミオンにはボソンの、標準模型のボソンにはフェルミオンの超対称性粒子が存在すると考えられている。この超対称性粒子は相互作用を統一できる可能性やダークマターの候補とされており、その発見が期待され世界各国の加速器実験を中心に探索が進められている。

1.3 コライダー物理

素粒子物理学を探索する手法の一つとして粒子衝突実験がある。高エネルギーで粒子を衝突させ崩壊過程を観測することで新物理の探索を行う。

1.3.1 加速器実験

荷電粒子を高エネルギーに加速し衝突させ、その崩壊過程を測定することで新粒子や新物理の探索を行うのが加速器実験である。加速器実験において単位時間あたりの反応数 dN/dt は以下の式であらわされる。

$$\frac{dN}{dt} = \sigma(E) \times L \quad (1.1)$$

ここで $\sigma(E)$ は反応断面積、 L はルミノシティである。反応断面積とは入射した粒子が標的と反応を起こす確率のことであり、それぞれの物理現象ごとに決まっている。この反応断面積は衝突エネルギーに依存する。一方ルミノシティは単位時間・単位面積あたりの粒子が衝突する回数である。加速器を用いて物理現象を観測する場合、新粒子の生成にはその粒子の質量より大きな重心エネルギーが必要であるため、探索できる領域はビームのエネルギーに依存する。一方でルミノシティは加速器の性能によって決まり、ルミノシティが高ければより稀な事象を測定をすることができるため、新粒子を探索できる領域はルミノシティに依存する。そのため衝突エネルギーを高くすることで新粒子の発見を目指すエネルギーフロンティア実験と、ルミノシティを向上させ間接的に生成された粒子を精密測定することによって新物理の探索を目指すルミノシティフロンティア実験がある。

また全反応数 N は

$$N = \sigma(E) \times \int L dt \quad (1.2)$$

である。 $\int L dt$ は積分ルミノシティとよばれ、ルミノシティを実験期間で積分した量でありデータの総量に比例する。

衝突粒子として多く用いられるのは電子や陽電子の荷電レプトンまたは陽子や反陽子などのハドロンである。電子や陽電子などの荷電粒子を用いる場合、素粒子であるため衝突で生じるバックグ

ラウンドが比較的少なく精度の高い実験が行える。一方、円型加速器で加速する場合、粒子が曲げられる時に発生する制動放射によってエネルギーが失われてしまうため、高エネルギーで実験することが難しい。逆にハドロンはクォークで構成される粒子であるため、衝突で生じるバックグラウンドがとても多い。しかしハドロンは重く制動放射によるエネルギー損失が小さいため、より高エネルギーで実験が行えるという利点がある。

1.3.2 エネルギーフロンティア実験とルミノシティフロンティア実験

より高いエネルギーで粒子を衝突させ発生した粒子を直接観測し、新物理を探索するのがエネルギーフロンティア実験である。過去の実験では様々な粒子を発見し標準模型を裏づける成果を上げてきた。現在では、CERN の LHC を用いた ATLAS 実験や CMS 実験で SUSY 粒子などの新粒子の発見を目指し標準模型を超える新物理の探索を行っている。

ルミノシティフロンティア実験は、稀な崩壊現象を精密に測定し、その崩壊過程での標準模型からのズレを観測することで間接的に新物理の発見を目指す。茨城県つくば市の KEKB 加速器で行われていた Belle 実験では B 中間子の崩壊過程を精密に測定することでクォークの CP 対称性の破れを発見し小林・益川理論を裏づけた。現在は SuperKEKB 加速器にアップグレードした Belle II 実験が行われ、ルミノシティフロンティアから標準模型を超えた物理の探索を行っている。

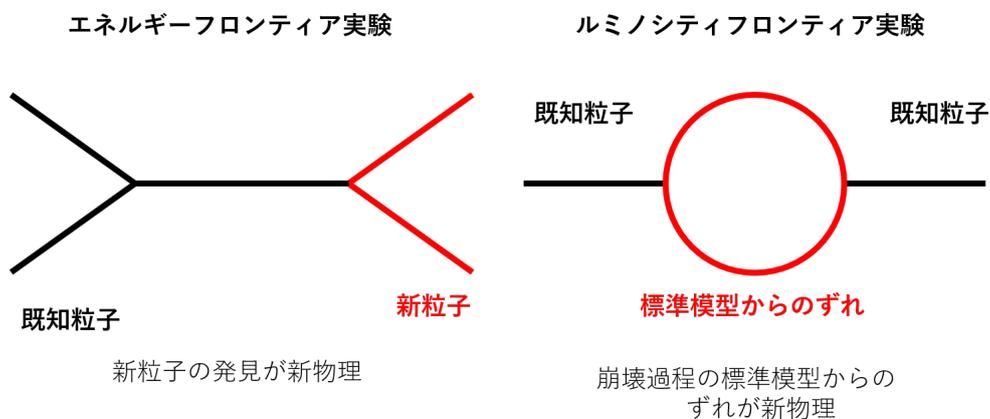


図 1.3 エネルギーフロンティアとルミノシティフロンティア

第 2 章

ATLAS 実験

ATLAS 実験はスイスにフランスとの国境にまたがって設置されている大型加速器 Large Hadron Collider(LHC) を用いた陽子・陽子衝突実験である。国際共同実験であり、およそ世界 180 の研究機関から約 3000 名の研究者が参加している。日本からは現在 15 の研究機関から 150 名程度の研究者が参加し、内部飛跡検出器やミュオン検出器、超電導磁石など ATLAS 実験において重要な部分を担当している。

ATLAS 実験では、最大で 7TeV の陽子ビーム用いて 14TeV の重心エネルギーで陽子を衝突させ、その崩壊過程で発生する粒子を汎用複合検出器「ATLAS 検出器」で測定しそのエネルギーや運動量を求めることで新粒子や新物理の探索を行っている。ATLAS 検出器については次の第 2.2 章で詳しく記述する。LHC では粒子を衝突させて実験を行っている運転期間を Run、運転をせずに各装置の点検やアップデートを行っている期間を Long Shutdown(LS) 期間と呼ぶ。今までの実験では 2011 年から始まった Run1 では最終的に 8TeV、2015 年からの Run2 では 13TeV の衝突エネルギーでデータ取得を行い、ヒッグス粒子の発見や性質の探索が行われてきた。2022 年ごろから予定されている Run3 では衝突のエネルギーを 14TeV まで引き上げる。Run3 の運転が終わったあと LHC は LS3 に入り、その間に High Luminosity LHC(HL-LHC) にアップグレードされ、さらなる新物理の探索が進められていく予定である。HL-LHC では現在の LHC と比べてイベント数が大きく増加し、検出器に対してより高い位置分解能や放射線耐性が要求されるため ATLAS 検出器もアップグレードが予定されている。ATLAS 検出器のアップグレードの一環として、現在の内部飛跡検出器を新型シリコン検出器に入れ替えることが予定されており、検出器の開発が進められている。

2.1 LHC 加速器

LHC 加速器はスイス・ジュネーブにフランスとの国境に跨って設置されている、欧州原子核研究機構 (CERN) が運用する円型の大型ハドロン加速器である。陽子・陽子衝突型の加速器で設計上、最大 14TeV の重心系エネルギー衝突させることができる。2018 年までの運転では衝突エネルギー 13TeV を達成している。一周約 27km で深さ約 100 m にある直径 3m の地下トンネルに設置

されている。

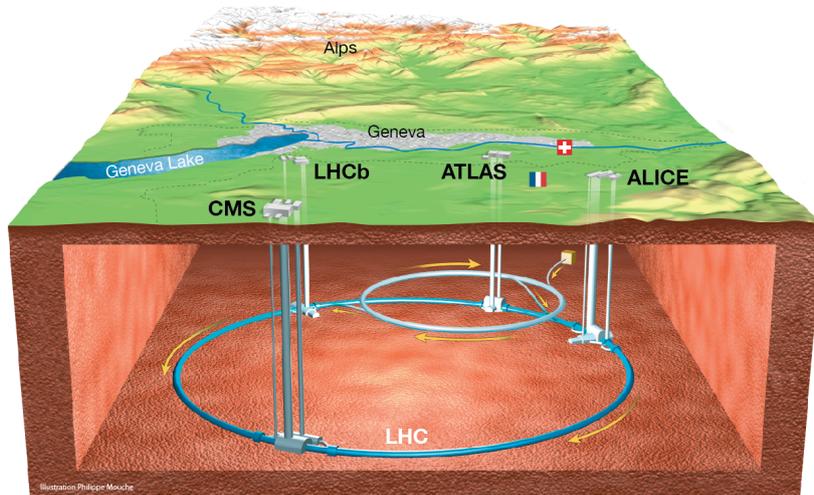


図 2.1 LHC 加速器 [2]

加速器は 1/8 周の円弧と直線が交互に組み合わさって構成されており、円弧の部分が合計で 18km, 直線部分が 9km の長さとなっている。直線部分で陽子の加速を行い、円弧部分では強い磁場をかけて陽子を曲げている。衝突点は 4 か所あり、それぞれで特徴のことなった検出器が設置され様々な目的で実験が行われている。LHC 加速器では、高エネルギーの陽子を衝突させることによって標準模型を検証し標準模型を超える物理を探索することが目的である ATLAS 実験と CMS 実験、B 中間子の崩壊過程を測定し CP 対称性の破れの研究が目的である LHCb 実験、重イオンの衝突によって生じるクォーク・グルーオンプラズマの研究を行う ALICE 実験など様々な実験が行われている。

2.2 ATLAS 検出器

この節では ATLAS 検出器について述べる。まず一般的な粒子衝突実験に使われる検出器の特徴について述べ、ATLAS 実験で使用される検出器について詳しく述べていく。

2.2.1 粒子衝突実験で用いられる検出器の構成

LHC 加速器は粒子を加速するための装置であり粒子衝突実験では、粒子を捉えるための検出器が必要である。粒子衝突実験で用いられる検出器は様々な粒子検出器から構成される複合検出器であり基本的な構造はどの検出器で共通である。その概念図を図 2.2 に示す。

一番内側にあるのが飛跡検出器である。vertex の検出や、磁場をかけて電荷をもった粒子を曲げ

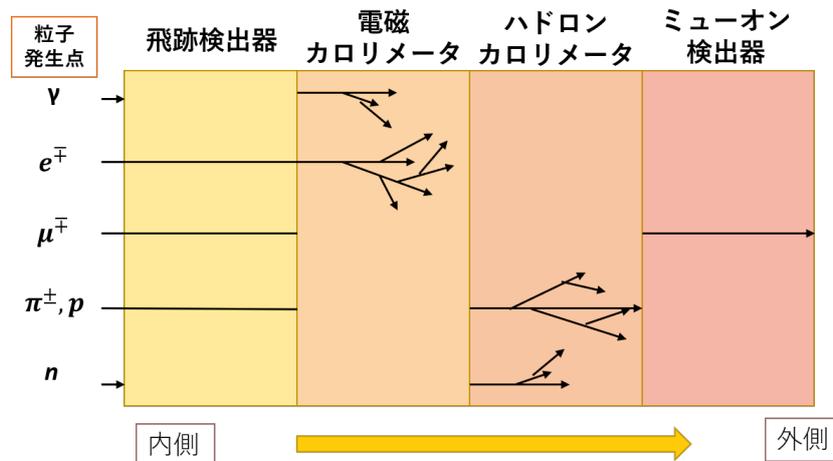


図 2.2 素粒子実験で用いられる検出器の概念図

その飛跡を検出することで曲率から粒子の運動量を求める。飛跡から運動量を求めるため飛跡検出器には適切な位置分解能が必要である。高運動量の荷電粒子を強い磁場をかけて飛跡を捉える場合には細かい位置分解能が求められる。また飛跡検出器は最も衝突点に近くあらゆる粒子が通過するため高い放射線耐性も要求されている。

飛跡検出器の次の層にあるのが電磁カロリメータである。電磁カロリメータの主な役割は光子や電子のエネルギー測定である。光子を物質と相互作用させ電磁シャワーを発生させ光子のエネルギーを測定する。光子や電子は電磁カロリメータでほとんどのエネルギーを落とし、やがて物質に吸収される。光子と相互作用させる物質はその検出器の目的によって異なるが、無機シンチレータや半導体、液体アルゴンや希ガスなどさまざまである。

電磁カロリメータを通過した粒子が次にやってくるのがハドロンカロリメータである。ハドロンカロリメータでは電磁カロリメータを通過してきたハドロン(陽子や中性子など)のエネルギーを測定する。ハドロンは電磁シャワーを起こさずに、物質の原子核と相互作用しハドロンシャワーを起こす。その結果放出された2次粒子(パイオン)などをシンチレータで捉え、エネルギーを測定する。そのため、ハドロンと相互作用させる物質とシンチレータが交互に配置されているサンドイッチ構造になっている。ハドロンシャワーは電磁シャワーに比べて反応断面積が1桁ほど小さいため、ハドロンシャワーを止めるためには電磁シャワーを止める時と比べ10倍の物質質量が必要である。

そして検出器の最も外側に配置されるのがミューオン検出器である。ミューオンは今まで通過してきた検出器に使われている物質とシャワーのような大きな相互作用をしないため、最外層に飛跡検出器を設置して検出する。

2.2.2 ATLAS 検出器の概要

ATLAS 実験における検出器の詳細について記述する。ATLAS 検出器は衝突点から Inner Detector、荷電粒子を曲げるための超電導ソレノイド磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミュオン検出器の順に構成されている。ATLAS 検出器の全体図を図 2.3 に示す。ATLAS 検出器はバランスを追求した検出器であり、どの粒子に対しても同じような検出効率を出している。一方、同じく LHC で行われている CMS 実験の CMS 検出器は電子や光子のエネルギー測定に若干特化している。

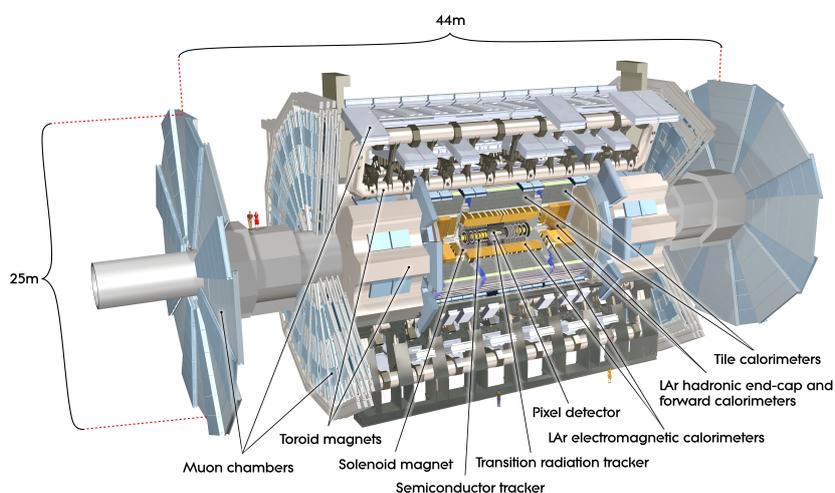


図 2.3 ATLAS 検出器

ここで ATLAS 検出器で用いられる座標系について説明する。ATLAS 検出器では衝突点を原点とした直交座標系と円筒座標系の二つが用いられる。まず直交座標系は、加速器リングの中心方向に x 軸、垂直な方向に y 軸、ビーム軸方向を z 軸とする。 x 軸をリングの中心に向かう向きを正にとって右手系を成すように各軸の正の向きをとる。円筒座標系では直交座標系と同じようにビーム軸を z 軸と定義し、動径方向を R 、 R と x 軸の成す角を ϕ 、 z 軸から y 軸の仰角を θ とする。また擬ラピデティ η を以下の式で定義する。

$$\eta = -\ln \tan \theta / 2 \quad (2.1)$$

ATLAS 検出器はビームパイプを中心に同心円柱状に配置された検出器 (バレル部) とその両側 ($\pm z$ 方向) を円形の検出器 (エンドキャップ部) で蓋をした構造をしている。バレル部の検出器は擬ラピデティ $|\eta|$ が 0 付近の領域を、エンドキャップ部の検出器はそれ以外の $|\eta|$ が大きい領域をそれぞれ受け持つ。

2.2.3 Inner Detector

Inner Detector は衝突によって生じる粒子が通過する最初の検出器であるため、非常にコンパクトで高い位置分解能を持つ。ビーム軸に平行な向きに磁場がかけられ、ピクセル検出器、半導体ストリップ検出器、遷移輻射検出器の異なる 3 つの検出器から構成されており、荷電粒子の飛跡、運動量、電荷を測定する。Inner Detector の全体図を図 2.4, その断面図を図 2.5 に示す。ピクセル検出器とストリップ検出器で荷電粒子の飛跡を決め、遷移輻射検出器で荷電粒子の飛跡検出と粒子識別を行っている。

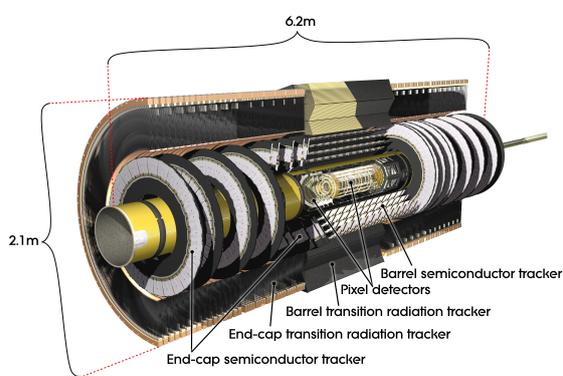


図 2.4 Inner Detector

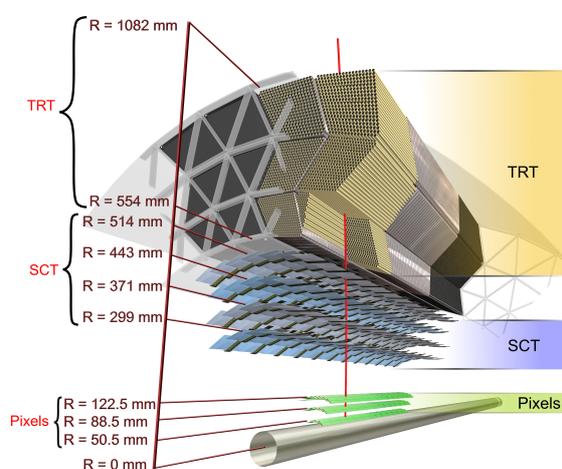


図 2.5 Inner Detector の断面図

ピクセル検出器 (Pixel Detector)

ピクセル検出器はバレル部に 3 層、エンドキャップ部に片側 3 層ずつ設置されている。半導体がピクセル状に配置された検出器で動作原理などは後述する。ここで使われているピクセル検出器はピクセルサイズ $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 全部で 8000 万チャンネルのピクセルを用いて粒子の位置を検出する。

また LS1 期間中にピクセル検出器の最内層のさらに内側に新たにピクセル検出器をインストールした。この層は IBL と呼ばれ、ピクセルサイズは $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ で、新たに 1200 万チャンネルのピクセルを追加した。ILB で使われている信号読み出し用 ASIC は FE-I4 と呼ばれ HL-LHC におけるピクセル検出器を視野に開発された。

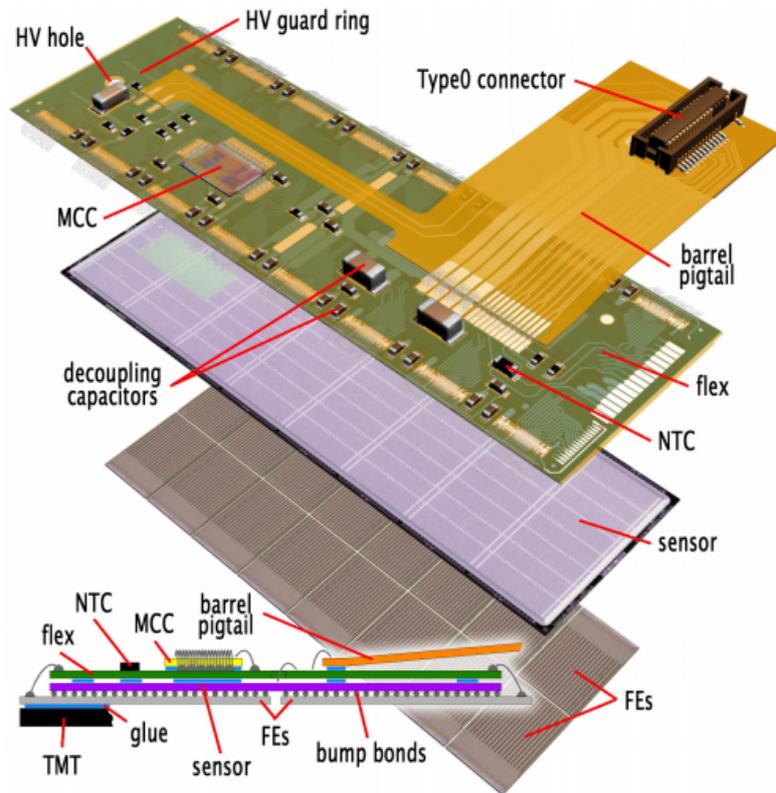


図 2.6 現行のピクセルモジュール [3]

半導体ストリップ検出器 (Semiconductor Tracker)

ピクセル検出器の外側のバレル部に 4 層、エンドキャップ部に片側 9 層ずつ配置されているのが半導体ストリップ検出器である。幅 $80\ \mu\text{m}$ 、長さ 12.8cm の棒状のシリコン半導体を並べてある。これを 40mrad ずらして二枚貼り合わせることで二次元な位置情報を得ることができる。

遷移輻射検出器 (Transition Radiation Tracker)

Inner Detector のなかで最も外側にあるのがこの検出器である。直径 4mm 、長さ 1.4m のストローチューブチェンバーが約 30 万本束ねられている。チューブの中には Xe と CO_2 の混合ガスが充填されており、その中を荷電粒子が通過するとガスをイオン化させるためそれを信号としてとらえる。この検出器の役割は荷電粒子の飛跡検出とその種類の判別である。ストローチューブチェンバーの間にはポリプロピレンが配置されており通過した粒子が起こす遷移輻射の強さによって荷電粒子の識別を行う。

2.2.4 カロリメータ

ATLAS 検出器で使用しているカロリメータを図 2.7 に示す。液体アルゴンカロリメータ (Liquid Argon(LAr) Calorimeter) とタイルカロリメータ (Tile Calorimeter) の 2 種類のカロリメータを使用しており、電磁カロリメータとして LAr カロリメータ、ハドロンカロリメータとして LAr カロリメータとタイルカロリメータを使用している。ターゲット粒子の観点から電磁カロリメータとハドロンカロリメータについて以下に記述する。

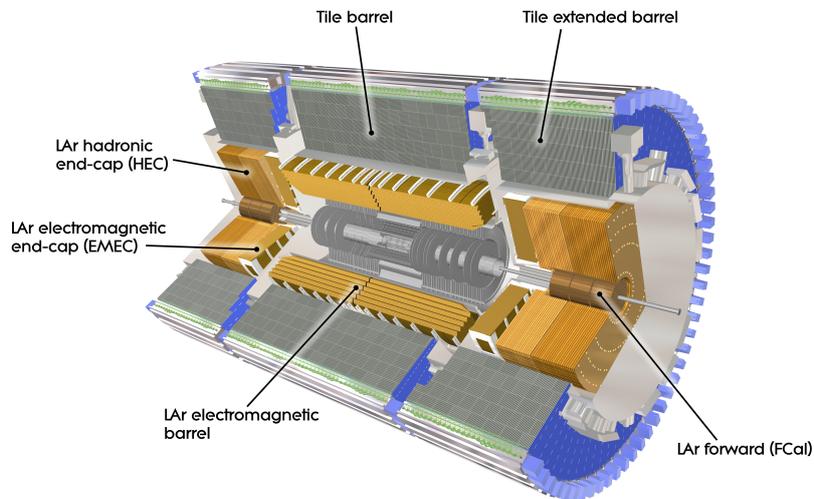


図 2.7 ATLAS 検出器のカロリメータ

電磁カロリメータ

電磁カロリメータ (LAr カロリメータ) は、アコーディオン構造をした電極と薄い鉛が何層にもなっており、その隙間を液体アルゴンで満たしている。Inner Detector を通過してきた高いエネルギーを持った電子や光子は鉛に衝突することで電磁シャワーを起こす。電磁シャワー生成された粒子は液体アルゴンをイオン化し信号として検出されエネルギーを測定する。

ハドロンカロリメータ

バレル部のハドロンカロリメータは鉄とシンチレータで構成されている (タイルカロリメータ)。鉄の間にプラスチックシンチレータを設置し、ハドロンシャワーで生成された粒子の数を測定しハドロンのエネルギーを求める。エンドキャップ部のハドロンカロリメータは液体アルゴンを使用したもの (LAr カロリメータ) である。電磁カロリメータではシャワーを吸収する物質 (吸収材) として鉛を使用した。ハドロンカロリメータでは吸収材に銅が使用されている。

2.2.5 ミューオン検出器

ATLAS 検出器の最も外側に配置されているのがミューオン検出器である (図 2.8)。4 種類の荷電粒子を検出するためのガス検出器とトロイド磁石から構成されている。検出器は飛跡を検出する用の Monitored Drift Tube (MDT) と Cathode Strip Chamber (CSC)、トリガー用の高速読み出しが可能な Resistive Plate Chamber (RPC) と Thin Gap Chamber (TGC) が使用されている。

飛跡を検出する MDT はバレル部、エンドキャップ部両方に設置されており、直径 3cm の Ar と CO_2 , H_2O の混合ガスを封入したチューブチェンバーを多数束ねた構造をしている。また同じ飛跡検出が目的の CSC はエンドキャップ部の MDT より内側の高レートな場所に設置されている。複数の読み出しワイヤーをもった Ar と CO_2 の混合ガスが充填された高い係数率に耐えることができるガス検出器である。RPC はバレル部、TGC はエンドキャップ部のトリガー生成に用いられている。

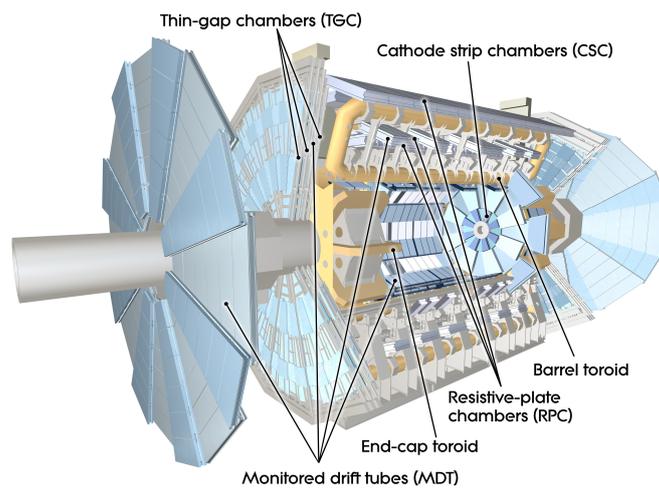


図 2.8 ATLAS 検出器のミューオン検出器

2.3 HL-LHC 計画と ATLAS 検出器のアップグレード

2.3.1 HL-LHC 計画

LHC の運転スケジュールを図 2.9 に示す。現在 (2021 年) は 13TeV で運転していた Run2 が終わり LS2 の時期である。LS2 が終わると LHC の設計上最高出力となる 14TeV での運転期間である Run3 が予定されている。Run3 が終わると LS3 に入り、この期間に LHC 加速器を高輝度化し陽子の衝突頻度をあげ、2027 年ごろから High Luminosity LHC(HL-LHC) として運転を行う。HL-LHC は 10 年間の運転が予定されており、その期間で LHC の Run3 までで取れたデータの 10 倍の積分ルミノシティを達成する予定である。HL-LHC によって TeV スケールでより精密な測定を行うことで、ヒッグス粒子の性質のさらなる追及や未知の粒子の発見を目指し標準模型を超える物理の探索を行う。

HL-LHC は積分ルミノシティを 3000fb^{-1} 、瞬間最大ルミノシティを $7.5 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、衝突事象数/ビーム交差 ~ 200 となる。LHC との比較を表 2.1 に示す。HL-LHC では一回のバンチ衝突での陽子の衝突回数が増えるため、放射線による検出器へのダメージの増加、粒子数の増加に伴うトラック数の増加、イベント数増加によるトリガー数の増加などが問題になる。そのため現在 LHC で行われている実験に使用している検出器もアップグレードが必要である。

表 2.1 LHC と HL-LHC の比較

	LHC	HL-LHC	
重心エネルギー	14TeV	14TeV	
積分ルミノシティ	300fb^{-1}	3000fb^{-1}	10 倍
瞬間最大ルミノシティ	$2 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$7.5 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	3.75 倍
衝突事象数/ビーム交差	40	200	5 倍

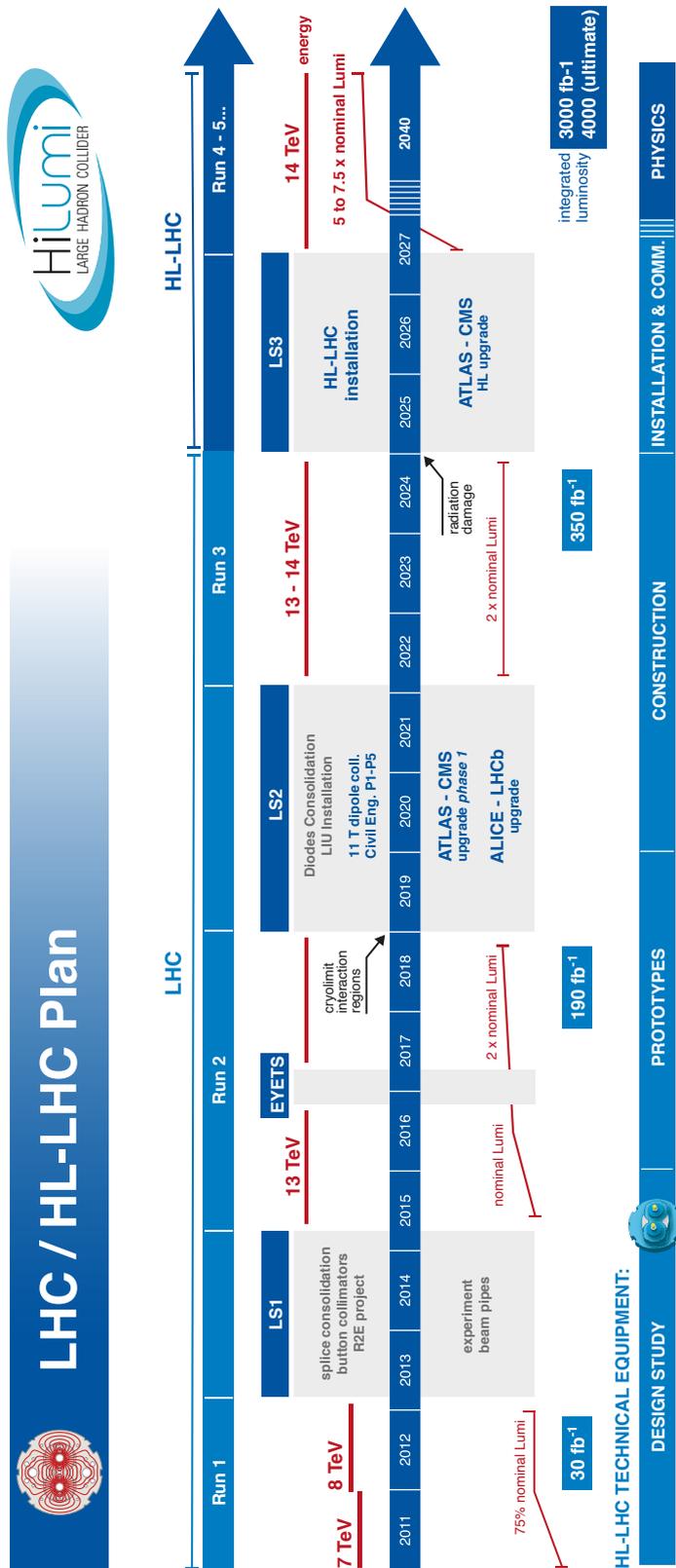


図 2.9 LHC の運転計画 [4]

2.3.2 ATLAS 検出器のアップグレード

HL-LHC に備えて ATLAS 検出器はアップグレードされる。先ほど述べたように HL-LHC 計画において現行の ATLAS 検出器を使い続けるにはルミノシティの増加により以下の問題が予想される。

- 検出器の放射線耐久性の問題
- トラック数の増加による位置分解能の不足
- トリガー数の増加による読み出し速度の不足

これらの問題を解決する為に ATLAS 検出器のアップデートを行う。カロリメータやミュオン検出器はトリガーシステムなどの工夫で対処するが、Inner Detector は半導体シリコンを用いた検出器「Inner Tracker(ITk)」に総取り換えする。

Inner Tracker(ITk)

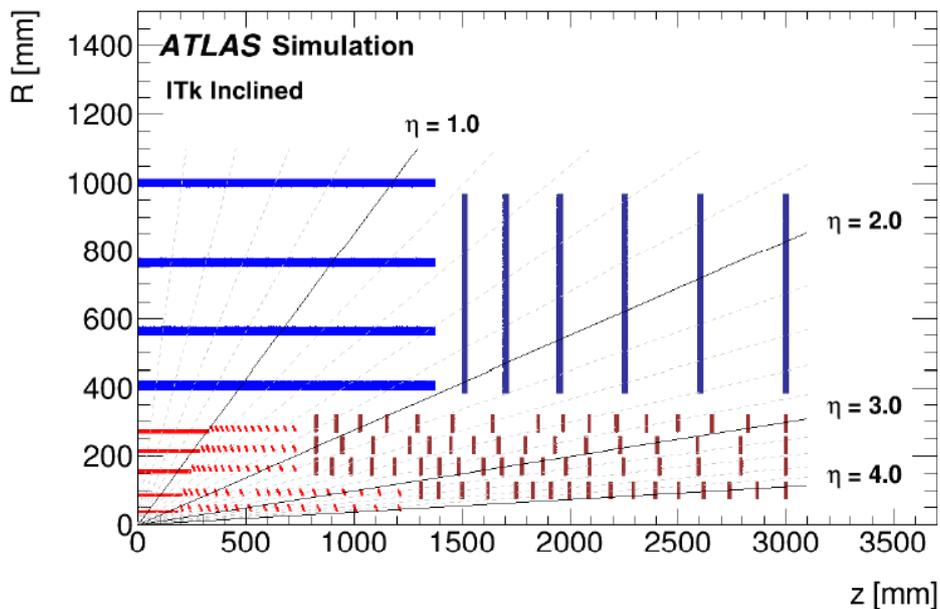


図 2.10 ITk の断面図 [5]

ITk の断面図を図 2.10 に示す。ITk は半導体シリコンを用いた、ピクセル検出器とストリップ検出器から構成される。赤色で示されているのがピクセル検出器、青色で示されているのがストリップ検出器である。ITk ではバレル部に 4 層、エンドキャップ部の片側 6 層、もう片側に 6 層の計 12 層にピクセル検出器 (赤)、バレル部に 5 層、エンドキャップ部に片側 7 層ずつストリップ検

出器 (青) が設置されている。現在の Inne Detector では 4 層のピクセル検出器に 5 層のストリップ検出器が使用されているが、ITk では 5 層のピクセル検出器と 4 層のストリップ検出器が使用される。これにより大きく粒子の飛跡再構成の精度が向上する。現在 ITk 用の新型シリコンピクセル検出器の開発に日本グループが携わっており本研究はその開発に関わる研究である。ピクセル検出器モジュールの要求性能については後述する。

第 3 章

ITk 用シリコンピクセル検出器

本章では ITk に用いられるシリコンピクセル検出器について記述する。第 2 章で述べたように HL-LHC のアップグレードに伴い ATLAS 検出器の Inner Detector を、すべてシリコン検出器で構成される ITk に入れ替える。本研究は ITk で用いられるシリコン検出器のうちピクセル検出器の開発に関わるものである。半導体検出器の原理から ITk 用新型シリコンピクセル検出器について、および検出器モジュールにおける熱耐性に関わる問題について紹介する。

3.1 半導体検出器

シリコンピクセル検出器は半導体検出器の一種である。3.1 章では一般的な半導体検出器について説明する。

3.1.1 半導体とは

半導体検出器に使用されている半導体の性質について説明する。半導体とは、電氣的に導体と絶縁体の中間の性質をもつ物質である。原子の中で電子がとることのできるエネルギーを「エネルギー準位」と呼び、結晶を構成するとエネルギー準位は帯状のとびとびの値をとる。これをエネルギーバンドと呼び、電子がとることのできないエネルギー領域をバンドギャップと呼ぶ。エネルギーバンドには電子で満たされている「価電子帯」と自由電子が動くことのできる「導電帯」が存在する。導体はバンドギャップがとても小さく、価電子帯の電子が導電帯に移動し電流を流すことができる。一方絶縁体はバンドギャップが大きいため価電子帯の電子が導電帯に移動できず電流を流すことができない。半導体は物質に不純物を混ぜることでバンドギャップの幅をコントロールし導体と絶縁体の中間的な性質をもった物質である。半導体には混ぜる不純物によって p 型半導体と n 型半導体がある。

n 型半導体は電荷を運ぶキャリアが自由電子の半導体である。シリコンなどの 4 価の元素の結晶にリンやヒ素などの 5 価の元素を微量混ぜることで電子が多く生じる。n 型半導体をつくるための不純物はドナーと呼ばれ、ドナーによって余剰に発生した電子はドナー準位に収まる。ドナー準位

と導電帯のバンドギャップはとても小さいため、ドナー準位の電子を励起することで導電帯へ移動しキャリアである自由電子になり導体の性質を持つようになる。

また p 型半導体はキャリアが正孔 (ホール) の半導体である。4 価の元素の結晶に 3 価のホウ素やアルミニウムなどの元素を不純物として混ぜる。そうすると電子が不足するため正の電荷を帯びたホールが生じる。ホールを励起すると周りの電子を一つ取り込みその電子があった場所にホールが生じる。このようにしてホールが移動することで電流が生じる。p 型半導体をつくる為に添加される不純物をアクセプタと呼ぶ。

3.1.2 半導体検出器の動作原理

半導体検出器は基本的に pn 接合された半導体に逆バイアス電圧をかけたものをセンサーとしている。pn 接合とは半導体の中で p 型の半導体と n 型の半導体が接していることをいう。pn 接合された半導体の p 型半導体側に正電圧、n 型半導体側に負電圧をかけることを順方向バイアスと呼び、この時電流が流れる (図 3.1)。順方向バイアスと逆向きに電圧をかけることを逆バイアスと呼び空乏層を広げるだけで電流は流れない。

空乏層は p 型と n 型の半導体の接合面で互いのキャリアであるホールと電子が再結合することで生じる接合部にキャリアの存在しない領域のことである。空乏層の n 型側では本来存在するはずの電子が不足するので正に帯電し、p 型側ではホールが不足するため負に帯電する。これにより空乏層に電位 (内部電位) が生じる。半導体検出器ではこの逆バイアス電圧を印加したことによって生じる空乏層を利用する。空乏層に荷電粒子が入射すると電子が導電帯に励起され、シリコンの場合、荷電粒子のエネルギー損失 3.6[eV] あたり電子・ホール対を 1 対生成する。空乏層の両端に電極を取り付けることで電子・ホール対は電極に移動し (図 3.2) 信号として検出され荷電粒子の通過時刻、位置、エネルギーなどの情報が分かる。これが半導体検出器の原理である。センサーの厚みと空乏層の厚みが一致することを完全空乏層化といい、この時に必要な逆バイアス電圧のことを完全空乏層化電圧という。

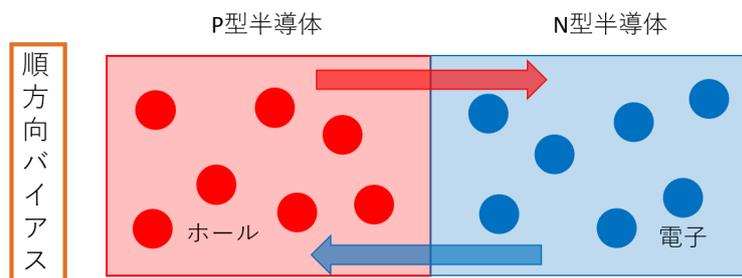


図 3.1 順バイアス

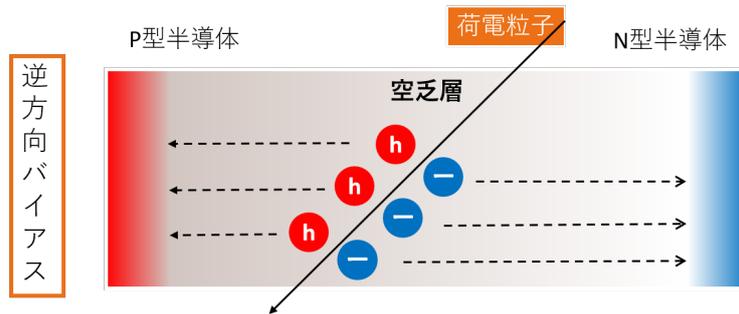


図 3.2 逆バイアス

3.2 ITk 用新型シリコンピクセル検出器モジュール

HL-LHC のアップグレードにより、ルミノシティの増加に伴い 2.3.2 章で紹介したような問題が発生する。それを解決するために ITk 用新型シリコンピクセル検出器では以下のような性能が検出器に要求されている。

- 1 MeV の中性子換算で $1.4 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$ の放射線耐久性
- ピクセルサイズ $50\mu m \times 50\mu m$
- 読み出し速度 5.12Gb/s

ITk シリコンピクセル検出器ではおよそ 1 万個のモジュールから構成される。3.2 章では主に ITk に用いられるピクセル検出器モジュールについて記述する。

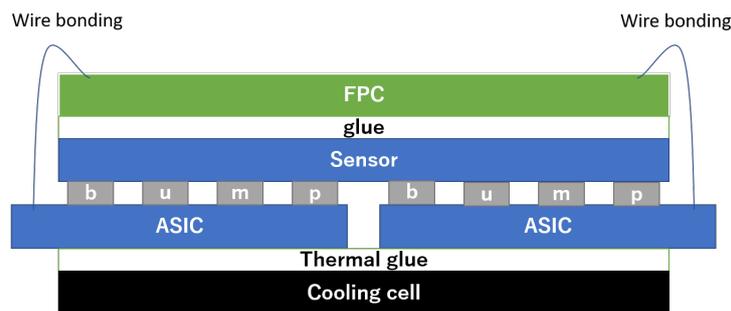


図 3.3 新型シリコンピクセル検出器モジュールの概略図

ITk 用新型シリコンピクセル検出器モジュールの概略図を図 3.3 に示す。シリコン検出器モジュールは搭載される読み出し ASIC の枚数によって分類されており、本研究で扱う検出器モジュールは読み出し ASIC が 4 枚搭載されているクアッドモジュールである。モジュールの基本的な構成要素は荷電粒子を検出するピクセルセンサー、センサーからの信号を増幅、整形、デジタル化して読みだすための ASIC、電源供給や ASIC からの信号を DAQ システムに送るために必

要なフレキシブル基板回路 (FPC)、検出器モジュールの冷却システムの一部の Cooling Cell である。さらにピクセルセンサーと ASIC を電氣的に接続する bumps ボンディング、ASIC からの信号を FPC に送るワイヤーボンディング、ワイヤーボンディングを物理的に保護する機構、FPC とベアモジュールと接着するための接着剤、ベアモジュールと Cooling Cell を接着する熱伝導接着剤がある。ATLAS ITk グループではセンサーと ASIC を bumps ボンディングで接続したものを便宜上ベアモジュールと呼んでいる。

3.2.1 ITk 用新型シリコンピクセルセンサー

シリコンピクセル検出器は、半導体であるシリコンをピクセル状に区切ったセンサーを用いた検出器である。ITk 用の新型シリコンピクセル検出器では p 型半導体の塊 (バルク) に、より多くの不純物 (ドナー) をドーピングした n^+ 型の半導体を電極としてインプラントした $n^+ - in - p$ 型のプラナーピクセルセンサーを用いている。逆バイアス電圧を印加し完全空乏層化したセンサーに荷電粒子が入射するとインプラントされた n^+ からアルミニウムを伝わり bumps を経由して信号読み出しチップ (ASIC) に信号が送られる。

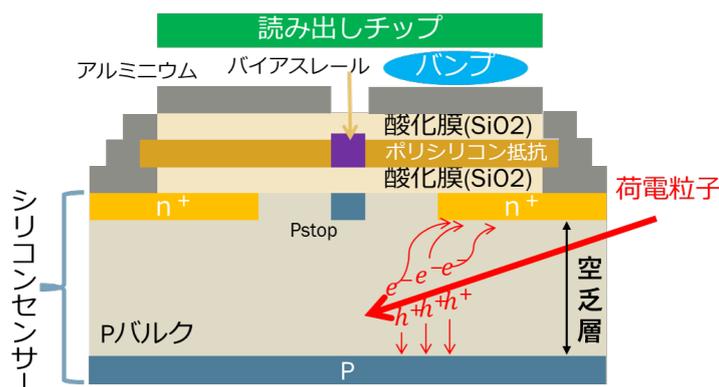


図 3.4 ITk 用シリコンセンサーの概略図

現在 ATLAS 検出器で使われているピクセルセンサーは n 型のバルクに n^+ をインプラントした $n^+ - in - n$ 型のプラナーピクセルセンサーを用いている。ITk のピクセルセンサーで $n^+ - in - p$ 型のプラナーピクセルセンサーを用いている理由は主に放射線耐性の観点からである。シリコンセンサーが受ける放射線損傷の一種にバルク損傷がある。バルク損傷が起こると p 型の不純物が増えてしまう。そのためバルク損傷によって n 型の半導体が p 型の半導体へ変化してしまう。これを防ぐためにははじめから p 型のバルクを用いたピクセルセンサーを使用する。

3.2.2 読み出しチップ (ASIC:Application Specific Integrated Circuit)

センサーで検出された信号はバンプボンディングを通して ASIC へ送られる。ASIC では、センサーで検出されたアナログ信号を増幅、整形、デジタル化し後段の DAQ システムに送る。現在 ITk 用新型シリコンピクセル検出器のための ASIC が開発中であり、試作機の最新バージョンのものが RD53A と呼ばれる ASIC である。RD53A の仕様を表 3.1 に示す。RD53A は現在開発されているが、入手できるようになったのは最近であり現在 RD53A を搭載したモジュールの組み立てが進められている。

表 3.1 RD53A の仕様 [6]

	RD53A
チップサイズ [mm ²]	20.0 × 11.6
ピクセルサイズ [μm ²]	50 × 50
ピクセル数 [行 × 列]	400 × 192
データ転送レート [Mb/s]	5120
放射線耐性 [Mrad]	500 以上
動作温度範囲 [°C]	-40 から 60

3.2.3 バンプ

ピクセルセンサーと ASIC を電気的に接続するのがバンプである。バンプはハンダ球の一種でシリコンピクセル検出器では SnAg を用いている。ピクセルセンサーと ASIC をバンプボンディングしたものをベアモジュールと呼んでいる。

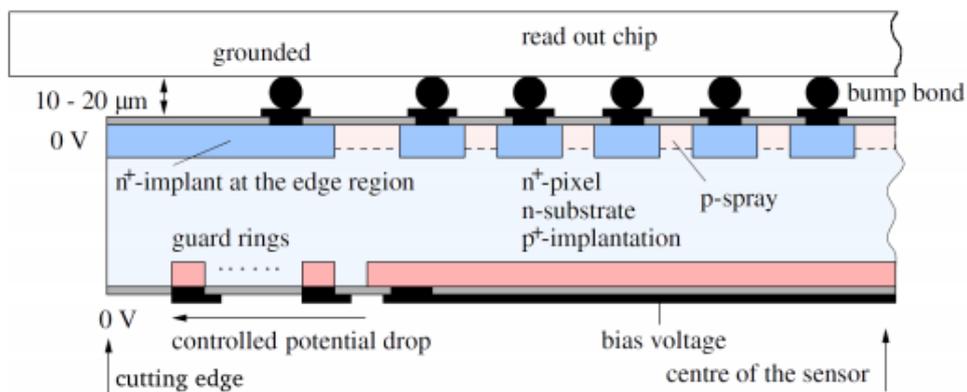


図 3.5 バンプボンディング [7]

3.2.4 フレキシブル基板回路 (FPC:Flexible Printed Circuits)

フレキシブル基板回路の主な役割は、検出器モジュールへの電源供給と温度監視、センサーからの信号を DAQ システムへ転送することである。FPC には外部機器と接続するコネクタがついており、そこから電源を供給したり信号を外部機器に出力する。FPC と ASIC はワイヤーボンディングで電氣的に接続され、電源や信号のやり取りを行う。RD53A モジュール用 FPC の写真を図 3.6 に示す。中心にコネクタがついており、表面には電気抵抗や温度センサーなどが実装されている。また周りにフレームがついておりモジュール組み立て時のアライメント用のものである。このフレームは組み立てが終了し実際に運用される際には切り落とされる。

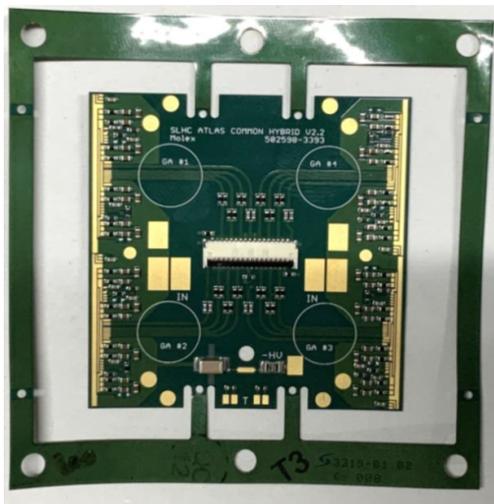


図 3.6 RD53A 用 FPC:中央にケーブル用のコネクタ、左右にはワイヤーボンディング用のパッドが用意されている

3.2.5 ワイヤーボンディングとその保護機構 (メカニカルプロテクション)

FPC と ASIC を電氣的に接続し、電源供給や信号のやり取りをするためのアルミワイヤーをワイヤーボンディングと呼んでいる。使用されているワイヤーは $25\ \mu\text{m}$ で、アルミニウムに約 1% シリコンが含まれている。ワイヤーはウェッジボンディング法と呼ばれる超音波でワイヤーとパッドを合金化して接合される。1 モジュールあたり約 500 本のワイヤーボンディングが施され、それぞれが ASIC に電源供給や信号のやり取りを行う。

ワイヤーボンディングには細いワイヤーを用いているため、力が加わると外れてしまう可能性がある。最も懸念されているケースは検出器のインストールの際にモジュールのケーブルがワイヤーに触れて外れてしまうというものである。そのためワイヤーを保護する必要がある、樹脂による封止によって保護する予定であった。しかし、放射線耐性や熱膨張の問題で適切な封止材の候補が見つかっていない。そのため現在ワイヤー保護機構として炭素系の素材である CFRP を用いた

構造体でワイヤー保護を行うことを検討している。CFRP は炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic) であり炭素繊維と樹脂の複合材で軽く丈夫であるという特徴がある。ATLAS ITk グループではこの保護機構をメカニカルプロテクションと呼んでおり、本研究ではメカニカルプロテクションがモジュールに与える影響もシミュレーションした。

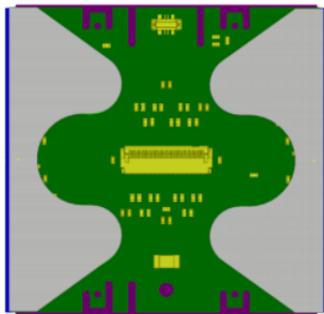


図 3.7 メカニカルプロテクション [8]

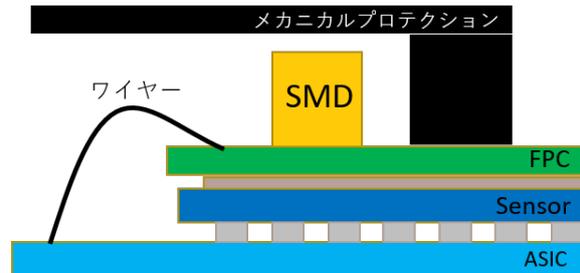


図 3.8 メカニカルプロテクションを取り付けたモジュールの断面図

3.2.6 冷却システムとクーリングセル

ITk では検出器の冷却のために CO₂ を用いた冷却システムを採用している。低温の CO₂ を流したクーリングパイプに検出器を取り付けることで検出器モジュールの冷却を行う。CO₂ は潜熱が大きいので、少ない流量で冷却することができる。そのため冷却システムの体積を減らすことができる。また CO₂ は放射線耐性もあり、安価に入手することができるため検出器の冷却材にふさわしい。

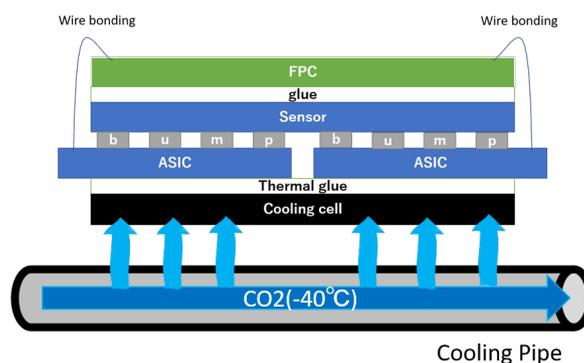


図 3.9 クーリングシステム

検出器モジュールをクーリングパイプに接続するのがクーリングセル (図 3.10) である。クーリングセルは熱伝導の良い炭素系の素材を用いている。大きな四角いパーツが TPG、真ん中の円形のパーツが CFRP である。TPG は熱伝導性熱分解グラファイト (Thermal Pyrolytic Graaphite)

のことでその熱伝導率は $1000\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ と非常に熱伝導性能が良い。TPG を熱伝導率の高い接着剤を用いて ASIC と接着し、CFRP 部をクーリングパイプに取り付ける。

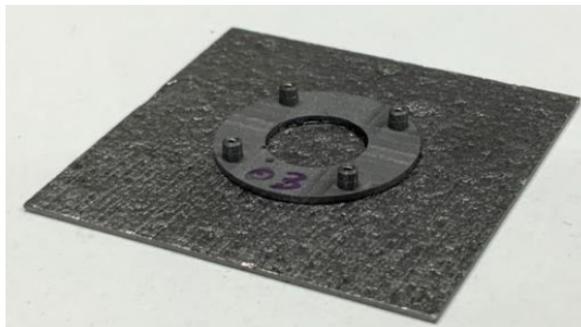


図 3.10 クーリングセル

3.2.7 モジュールに使われる接着材

モジュールに使われている接着剤は FPC とセンサーを接着するための物とクーリングセルと ASIC を接着するための 2 種類である。

接着剤 (アラルダイト 2011)

FPC とセンサーを接着するために用いられる接着材はアラルダイト 2011 である。アラルダイト 2011 はエポキシ系工業接着剤で主剤と硬化剤を混合して使う。接着剤の塗布についてはステンシル法を用いる。接着剤の塗布パターンに穴がけられたメタルマスク (ステンシル) に接着剤を設置し、へらブロックで擦切ること対象物に接着剤を塗布する手法である。

接着剤を塗布する際にパターンを使用している理由について述べる。接着剤の層に気泡などの空気の閉じ込めを防ぐためと安定した品質で塗布を行うためである。接着剤の層に空気を閉じ込めてしまった場合、モジュールの温度変化の際に結露などが発生してしまい悪影響を及ぼす可能性があるため防ぐ必要がある。また一面に接着剤を塗布する場合、厚みのコントロールが困難であったり、接着領域からはみ出しの危険性がある。以上の理由から FPC とベアモジュールの接着には塗布パターンを採用している。RD53A モジュール用塗布パターンの要求としては以下のようになっている。

- ワイヤーボンディングパッドの固定
- フレームタブの付け根の固定
- コネクターと NTC サーミスタ直下の固定
- 真空吸着パッドの固定
- 空気の閉じ込め禁止



図 3.11 FEI4 モジュール用ステンシルマスク

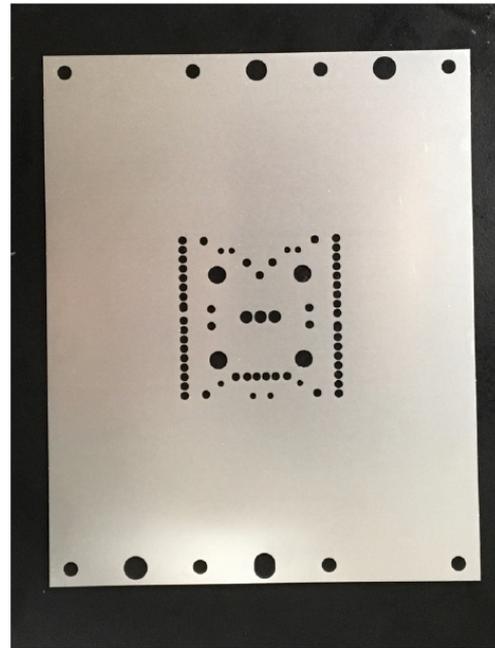


図 3.12 RD53A モジュール用ステンシルマスク [9]

熱伝導接着剤

AISC とクーリングセルを接着するための接着剤はエポキシ系のスタイキャスト 2850FT に硬化剤を混ぜて使用する。熱伝導率を高めるため、スタイキャストに酸化アルミニウムを混合している。塗布パターンはクーリングシステムと熱の受け渡しを効率良く行うために大きな面積となっている。

3.3 検出器モジュールにおける温度変化

検出器モジュールは ASIC の発熱を冷却するためにクーリングシステムに接続されている。運転時は ASIC の発熱とクーリングシステムの冷却のバランスが取れた状態になるが、ASIC が発熱している状況でクーリングシステムが機能していない状態や、ASIC が発熱していないにもかかわらずクーリングシステムが機能してしまい過冷却になってしまうことが運転の切り替え時に起こる可能性がある。そのため検出器は -40°C から 40°C の温度変化にさらされる可能性があり、運転の切り替えが年間 10 回で 10 年間の運転を想定すると 100 回の熱サイクルにさらされる可能性がある。品質仕様として -55°C から 60°C の熱サイクルを 100 回耐えることが要求されている。本研究はピクセル検出器モジュールの熱サイクルに関する研究がメインである。

3.3.1 温度変化による検出器モジュールへの影響

熱サイクル試験に関する先行研究 [10][9] によって熱サイクルを繰り返すと、センサーと ASIC をつなぐバンプが剥がれ信号が読みだせなくなること (バンプオープン) が確認されており、その原因はモジュールに使用されている部材の熱膨張係数 (CTE:Coefficient of Thermal Expansion) の不一致だと結論付けられた。

旧型の読みだしチップ FEI4 を用いて組み立てられた旧プロトタイプモジュールである QU-10 モジュールを熱サイクルを 100 回した後のバンプオープンと思われるピクセルの分布を図 3.13 示す。QU-10 はセンサー、ASIC、FPC、クーリングセルと全ての部材がアッセンブルされたモジュールにワイヤー保護の封止がされているモジュールである。図 3.13 で白い部分は異常のないピクセル、赤で示されているのがバンプオープンとみられる信号が読み出せないピクセルである。バンプオープンは中央部分に十字に広がり、モジュールの角に広がっている様子が見れる。中央の十字は 4 枚の ASIC のチップの境目に相当し、左右の辺はワイヤーが封止されている部分に対応する。この結果を受け、封止を行わなかったモジュールとベアモジュールのみの熱サイクルが実施された [9]。その結果、封止材が角のバンプオープンに寄与し、FPC とセンサーや ASIC(シリコン) の CTE の違いが ASIC の境目のバンプオープンに寄与していると結論付けた。

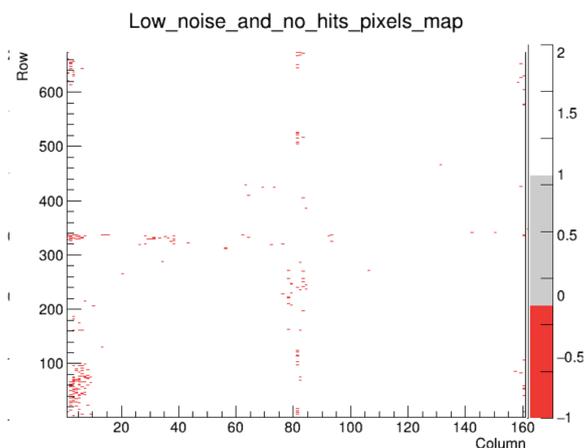


図 3.13 100 サイクル後の QU-10 のバンプオープン [9]

CTE の不一致がどのようにしてバンプオープンを引き起こすか説明する。CTE の異なる部材を常温で張り付け、熱負荷をかける。そうすると常温ではおなじ長さだった二つの物質がある温度では、CTE の違いによって長さが変わってしまう。しかし二つの物質は接着されているので反りという形で変形し長さの違いを逃がす。例えば常温で CTE の大きな素材を上、CTE の小さな素材を下側にして 2 種類の物質を張り付けたとする。温度を下げた場合 CTE が大きい素材は良く縮むが CTE が小さい素材は余り縮まない。そのため下に凸のように反る。逆に温度を上げた場合 CTE が大きい素材はよく伸び、CTE が小さい素材はあまり伸びないので上に凸のように反る。



図 3.14 CTE の異なる材料を貼り合わせた時の熱変形

検出器モジュールでは CTE の大きな素材が FPC、小さな素材がセンサー (シリコン) である。FPC とセンサーの CTE の違いから熱負荷が加わると反りが生じ、バンプを引きはがすような力が加わってしまいバンプオープンが起こると考えられる。

また CTE の不一致によって FPC とセンサーが反ってしまうことにより、FPC とベアモジュールの接着に使用しているアラルダイト 2011 が剥がれてしまうことも懸念されている。そのためグルー層において接着剤塗布の領域を増やすことや、熱応力を軽減することができる塗布パターンを検討する方針となっている。

3.4 本研究の概要

本研究では 3.3.1 章で述べた熱サイクル問題に対して 3 つの研究を行った。

4 章では、バンプオープンは FPC とシリコンセンサーの CTE の不一致によって引き起こされていると考えられているため、FPC に使用するベースと呼ばれるプラスチックシートの CTE の違いによって反りに対してどのような違いが表れるかをセンサーと FPC のダミーサンプルを用いてひずみ測定及びシミュレーションを行い評価した研究について述べる。

旧型のプロトタイプモジュールで熱サイクル試験を行った際にバンプオープンが確認されているが、バンプ層にどのような力が加わっているかなど、メカニズムが理解できていない。また新型の RD35A 搭載プロトタイプモジュールではセンサーの読み出しを行える領域が制限されているため、熱サイクル試験ではバンプオープンが確認できない可能性がある。5 章では検出器モジュールのシミュレーションを行いバンプ層に加わる応力分布からバンプオープンについて評価を行った研究について述べる。

検出器モジュールの熱サイクルによってバンプ層のみでなく、FPC とベアモジュールを接着しているグルー層においても強い応力がかかることで剥がれてしまうことが懸念されている。6 章では、熱サイクルによる応力の観点から最適なグルーパターン作成の指針を示すことを目標にシミュレーションを用いた研究について述べる。

第 4 章

熱ひずみ測定と有限要素法によるシミュレーション

CTE の異なる素材を張り合わせた時に生じる反りについて理解を深めるために「ひずみ」という量を用いて測定を行い、有限要素法を用いたシミュレーションと比較した。バンプオープンには FPC とシリコンセンサーの CTE の不一致によってセンサーが反りバンプを引きはがすことで起こると考えられている。FPC に使用するベースと呼ばれるプラスチックシートの CTE の違いによって反りに対してどのような違いが表れるかひずみを測定した。測定とシミュレーションにはガラスと FPC ダミーを貼り合わせた、センサーと FPC を模したダミーサンプルを作成した。ガラス板はシリコンと CTE が近いので ATLAS ITk グループではシリコンのダミーとして用いられる。シミュレーションソフトには ANSYS[11] の静的構造解析を用いた。

4.1 ひずみゲージ

まず、今回測定した「ひずみ」とひずみの測定器具「金属ひずみゲージ」について説明する。

4.1.1 ひずみとは

物体に力を加えると内部応力が発生し、内部応力に比例した伸縮が発生する。力を加える前の物体の長さ L から ΔL だけ伸びる (縮む)。このときの伸縮の比率をひずみ ϵ と呼び、ひずみは

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.1)$$

であらわされる。ひずみは変化の比率であるため無次元量であり、一般的にとっても小さい値であることからマクロストレイン、あるいは % ひずみを単位として表す。例えば $\epsilon = 10 \times 10^{-6}$ の場合 10 マイクロストレイン、あるいは 0.001% ひずみと表す。

荷重 W を板にかけ引っ張って伸ばす場合を考える (図 4.1)。荷重 W をかけた板の方向を長さ L 、荷重 W に対して垂直な板の方向を幅 d とする。変形後の長さを L' 、幅を d' とすると、 L に対

するひずみは $\epsilon = \Delta L/L$ ($\Delta L = L - L'$), d に対するひずみは $\epsilon' = \Delta d/d$ ($\Delta d = d - d'$) である。この時 L に対するひずみを縦ひずみ、 d に対するひずみを横ひずみという。また横ひずみと縦ひずみの比をポアソン比 ν という。

$$\nu = -\frac{\epsilon'}{\epsilon} \quad (4.2)$$

ポアソン比は材料の種類によって固有であり、一般的な材料であれば 0.3 付近の値になっている。この様に物体の面に対して垂直に力が働いたときに発生するひずみを垂直ひずみという。

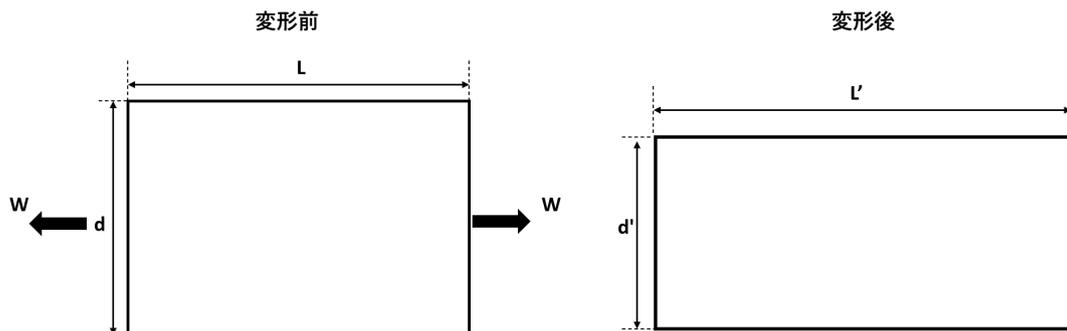


図 4.1 引っ張ったときの板の変形

一方、物体の面に対して平行な方向 (せん断方向) に応力が掛かったときに発生するひずみをせん断ひずみと言う。せん断方向に荷重 W が掛かったときの変形を図 4.2 に示す。高さが h 、せん断方向に δ ずれたとするとせん断ひずみは、

$$\gamma = \frac{\delta}{h} \quad (4.3)$$

であらわされる。

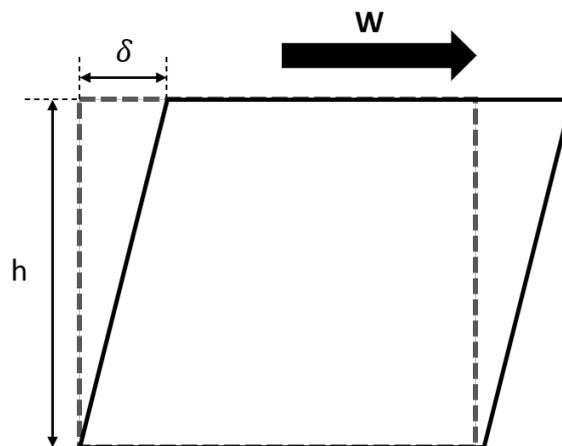


図 4.2 せん断ひずみ

4.1.2 ひずみと応力の関係

一般的な材料の応力ひずみ曲線を図 4.3 に示す。金属などの試験片を引っ張る場合、ひずみが小さい間は引っ張ることをやめると試験片は元の形に戻る。この時フックの法則で表されるようにひずみと応力は比例関係にある。フックの法則が成り立つ領域を弾性域といい弾性域の限界点 (点 A) を降伏点と呼ぶ。フックの法則が成り立つときの応力 σ は、ヤング率 E とひずみ ϵ を用い以下の式であらわされる。

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (4.4)$$

降伏点を超えると材料は元の形に戻なくなってしまいます。この領域のことを塑性域と呼ぶ。降伏点を超えてひずみを大きくしていくと点 B までは応力が小さくなる。点 B を下降伏点と呼びそこからまた応力は大きくなっていく。やがて応力は最大になり (点 C) この点を引張強度という。さらにひずみを大きくしていくと破断する (点 E)。

基本的にひずみ測定は弾性域で行われ、材料のヤング率は既知であることが多いため、ひずみ測定は応力測定と同義である。

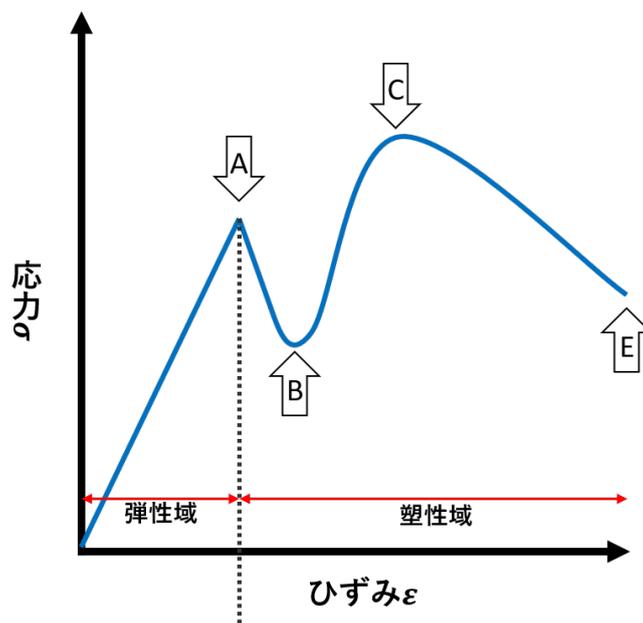


図 4.3 一般的な材料の応力ひずみ曲線

4.1.3 金属ひずみゲージ

ひずみゲージは金属が伸縮するとそれに比例して電気抵抗が変化することを利用した測定素子である。一般的に金属線の電気抵抗の大きさは長さに比例し、断面積に反比例する。金属線を引き延ばすと断面積が減少し長さが増加するため電気抵抗値は増加する。逆に金属線を縮めた場合、断面積が増加し長さが減少するので抵抗値は減少する。測定物に金属線を接着すると、測定物の伸縮にしたがって金属線も伸び縮みするのでその電気抵抗の変化を測定することでひずみを測定することができる。図 4.4 にひずみゲージの構造、図 4.5 に共和電業製の金属ひずみゲージの写真を示す。絶縁体の樹脂ベース (黄色) の上に金属抵抗線と引出線であるゲージリードが取り付けられている。このゲージを測定物に接着剤で貼り付け、専用のブリッジ回路とアンプを使用し、ひずみを読みだす。

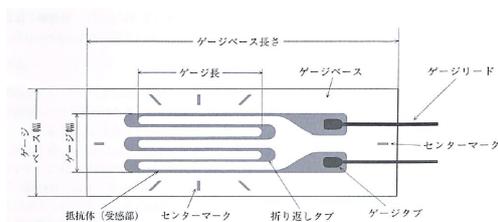


図 4.4 ひずみゲージの構造 [12]



図 4.5 ひずみゲージ

ひずみゲージの原理を説明する。長さ L 、断面積 A の抵抗線を考える。この時の電気抵抗値 R は、

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.5)$$

である。 ρ は電気抵抗率と呼ばれ、物質に固有な単位面積単位長さあたりの抵抗である。この抵抗線を引き延ばしたとき、抵抗線は長さが ΔL だけ長くなり、断面積は ΔA だけ小さくなる。抵抗線が長く、細くなることから抵抗値は ΔR 増加し $R + \Delta R$ となる。このとき抵抗線の断面積の減少率は、長さの増加率に比例するため抵抗値の変化率 $\Delta R/R$ は長さの変化率 $\Delta L/L$ に比例する。比例定数を K とすると、 $\Delta L/L$ はひずみ ϵ だから

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (4.6)$$

となる。すなわち抵抗値の変化率を測定することでひずみを測定することができる。

4.1.4 ひずみゲージの測定原理

ひずみゲージを測定物に接着剤で貼り付け、ゲージをブリッジ回路に接続し専用のアンプで抵抗値を読みだすことでひずみの測定を行う。ひずみ測定におけるブリッジ回路とはホイートストンブリッジのことである。まずひずみゲージ測定に用いるブリッジ回路について説明する。一般的なブリッジ回路を図 4.6 に示す。 R_1, R_2, R_3, R_4 の 4 つの抵抗から構成されている。向かいあう頂点 A, C に入力電圧 E を印加し、もう一方の向かいあう頂点 B, D を出力端子としている。

ブリッジを構成する抵抗が $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ または $R_1 R_3 = R_2 R_4$ の時、入力電圧 E がいくつであっても、出力電圧 ρ はゼロである。この状態をブリッジが平衡状態にあると言う。この平衡状態から抵抗値が微小に変化しそれぞれが $R_1 + \Delta R_1, R_2 + \Delta R_2, R_3 + \Delta R_3, R_4 + \Delta R_4$ になった時の出力電圧 ρ は以下の式であらわされる。

$$\rho = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) E \quad (4.7)$$

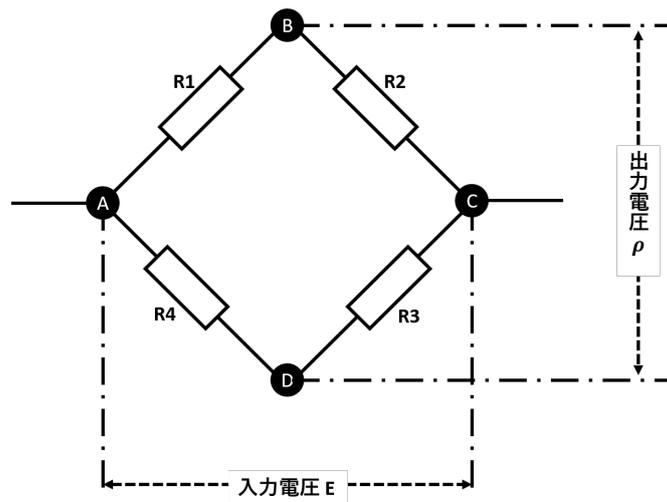


図 4.6 ブリッジ回路

ここで R_1 にひずみゲージを取り付け、ひずみ ϵ が生じたとする。このとき他の抵抗値は変化しないとすると、 $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ だから、

$$\rho = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} E = \frac{E}{4} \epsilon K \quad (4.8)$$

となる。入力電圧は回路固有の値、ゲージ率 K はひずみゲージ固有の値であるため、出力電圧 ρ を測定することで、ひずみ ϵ を求めることができる。このひずみ ϵ を等価ひずみと呼び、ゲージ率 K は一般的に 2 である。またひずみゲージを用いた測定は電気抵抗を使用しているため、抵抗の温度依存性の問題から測定時における温度変化はひずみ測定に大きな影響を与える。

4.2 熱ひずみ測定

CTE の異なる部材を張り付け熱負荷をかけた時の反りを理解するために、ダミーサンプルを作成し恒温槽を用いてサンプルの温度を $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ の間の温度変化にさらしたときのひずみを測定した。ダミーサンプルと測定方法について説明する。

4.2.1 2 ゲージアクティブ法を用いた曲げひずみ測定

今回の測定では 2 ゲージアクティブ法と呼ばれる方法でひずみを測定した。この方法を採用した理由は、ひずみゲージの温度変化による影響を打ち消すことができる点と曲がりが生じるサンプルのひずみ、すなわち曲げひずみの測定に適しているからである。

ここで、図 4.7 のように板状の測定物の表面に R_1 のひずみゲージ、裏面に R_2 のひずみゲージを貼り付け、板を曲げた時のひずみを測定することを考える。

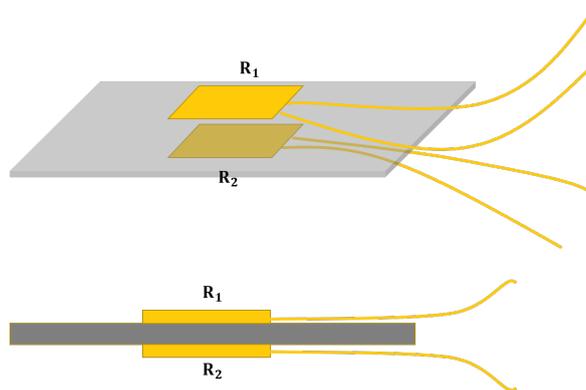


図 4.7 曲げひずみ測定のためのひずみゲージの貼り方

この時、ブリッジ回路にひずみゲージを図 4.8 の R_1 と R_2 のように接続する。この場合、 R_3 と R_4 は変化しないので、ブリッジ回路の出力電圧 ρ は

$$\rho = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \quad (4.9)$$

R_1 と R_2 につないだひずみゲージのひずみをそれぞれ ϵ_1, ϵ_2 , ゲージ率を K とすると、

$$\rho = \frac{E}{4} K (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (4.10)$$

となる。

この場合、表面で発生するひずみと裏面で発生するひずみは符号の異なる絶対値の同じ値の曲げひずみと、同じ符号で同じ量の引っ張りひずみである。式 4.10 より、曲げひずみは本来の 2 倍の値が出力され、引っ張りひずみは打ち消される。

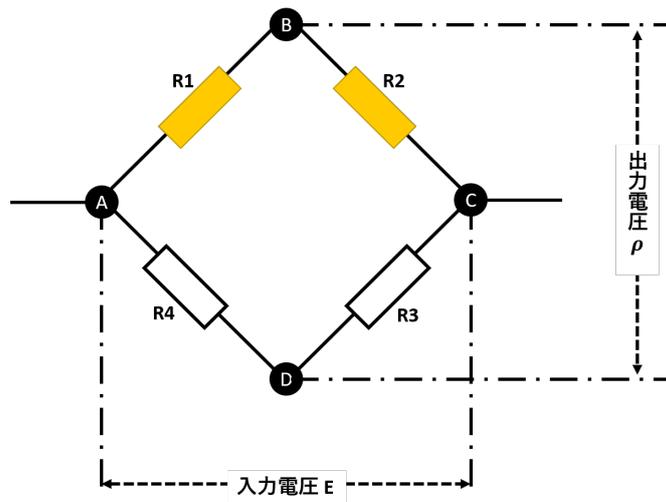


図 4.8 2 ゲージアクティブ法のブリッジ回路

4.2.2 測定サンプル

今回測定に用いたサンプルのイメージ図と写真を図 4.9 と図 4.10 示す。ガラスに FPC のダミーを貼り付けたサンプルである。ガラスと FPC ダミーの貼り付けにアラルダイト 2011 を FEI4 モジュール用のグルーパターンで使用し実機に近い状況を再現した。FPC ダミーはベースと呼ばれるプラスチックシートを銅でサンドウィッチした構造となっている。今回 FPC のベースに用いるプラスチックシートの CTE が異なるサンプルを 4 種類用意した。ガラスと FPC ダミーのサイズは以下の通りである。

- ガラス 35.6mm × 41.2mm × 150 μ m
- FPC ダミー 34mm × 40mm

それぞれの FPC ダミーについて、ベースと銅の厚さやベースの CTE やヤング率を表 4.1 にまとめた。このサンプルを 2 アクティブゲージ法を用いて曲げひずみを測定するにあたって、 R_1 のひずみゲージをガラス側、 R_2 のひずみゲージを FPC ダミー側に張り付けた。今回の測定では共和電業の KFLB-5-120-C1-11 R3M3 という型番のひずみゲージを使用した。



図 4.9 ダミーサンプルのイメージ図:ガラスをセンサーダミーとして、ベースと銅の層を FPC ダミーとしてサンプルを作成した。

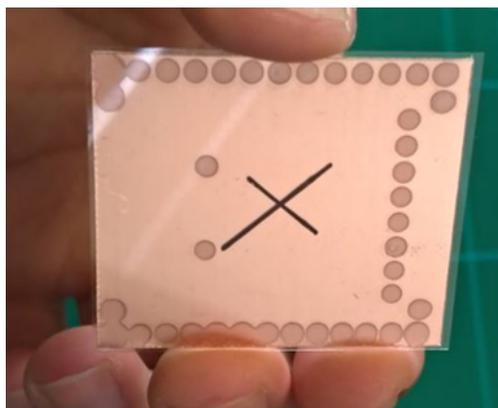


図 4.10 測定サンプルのガラス側から撮影した写真:×印の中央が曲げひずみの測定点である。またグルーパターンは FEI4 モジュールと同じである。

表 4.1 各 FPC ダミーの厚さ,CTE, ヤング率

ベースの種類	ベースの厚さ [μm]	銅の厚さ [μm]	CTE[ppm/K]
A	100	12/12	5 ~ 7
B	60	18/18	3
C	60	12/12	9
D	100	12/12	10

4.2.3 測定セットアップ

ここで測定に用いたセットアップについて説明する。ひずみゲージを貼り付けたサンプルを恒温槽 (ESPEC SH-240) の中にいれ温度を $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ に下げる。そこから $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 刻みで $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで温度を上げていき、それぞれの温度でのひずみを記録した。ひずみを読み出す際には、ひずみゲージを専用のブリッジ回路に接続し、読み出し用のアンプを介しデジタルマルチメータ (DMM) で電圧を読む。その電圧の値をひずみに変換し記録する。恒温槽内は風があるため、その影響を受けないようにカバーをかけている。また結露防止のために窒素ガスを恒温槽内に充満させている。

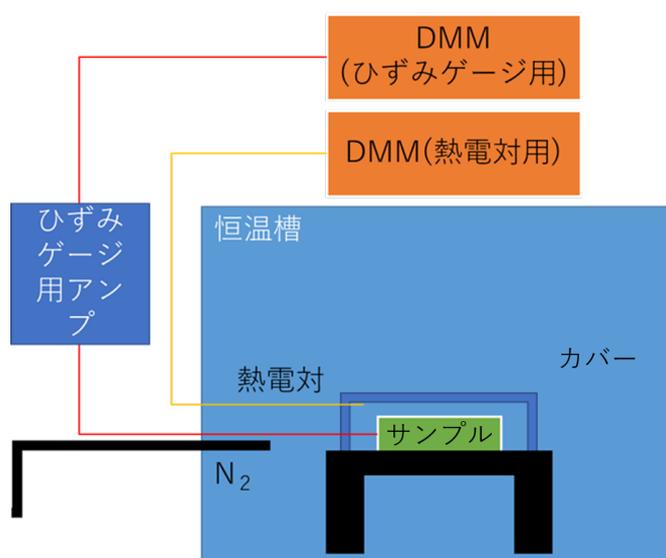


図 4.11 ひずみ測定セットアップ

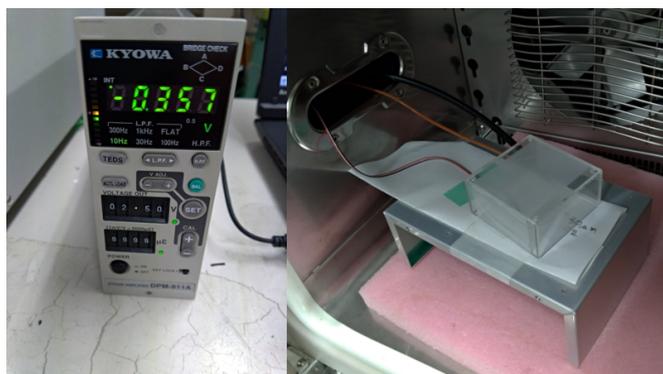


図 4.12 左:ひずみゲージ測定用アンプ。右:恒温槽内の様子

4.2.4 測定結果

測定結果を横軸温度、縦軸ひずみのグラフにプロットしたものを示す。ひずみゲージが貼り付けられているサンプル中央 (図 4.10 の×印) のひずみである。サンプルの温度が 25℃ の時ひずみ 0 の基準としている。どのサンプルも温度が上がるとマイナス方向、下がるとプラス方向にひずみが増える。これはサンプルの反りの向きによるもので、常温 (25℃) でサンプルの貼り付けを行い、曲げた時ガラス面が上に凸に反るとひずみが正の方向に増え、ガラス面が下に凸になるとひずみが負の方向に増えるようにひずみゲージを貼り付けているからである。

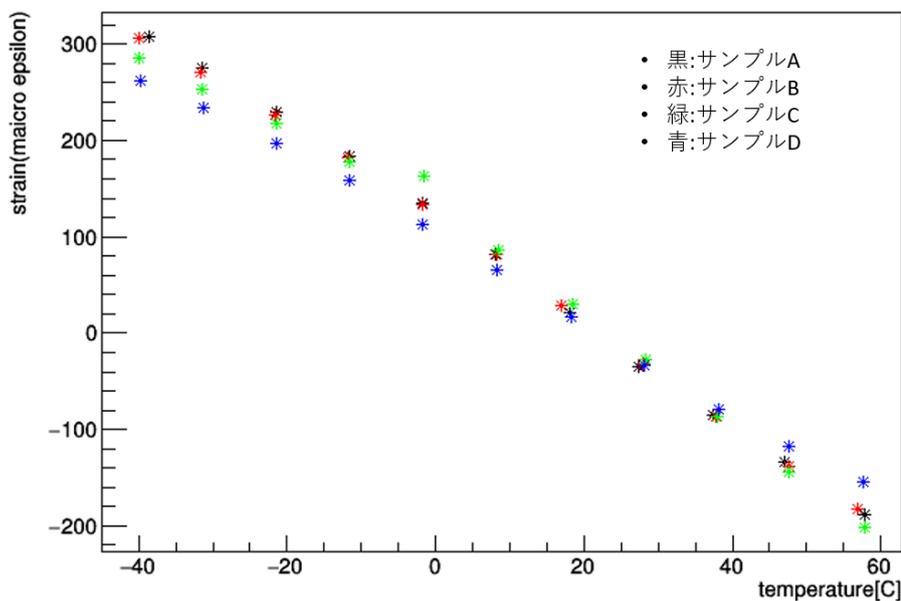


図 4.13 曲げひずみ測定結果

それぞれのサンプルの違いによるひずみの変化を評価するために、1℃あたりのひずみの変化量を表 4.2 にまとめた。今回作成した測定サンプルの FPC ダミーは製造した企業が異なるため、ベースや銅の厚さが異なる。CTE の異なる部材を張り付けたときの反りは、各部材の CTE, ヤング率, 厚さに依存していることが知られており、今回作成したサンプルでは定性的な評価が難しい。そのため有限要素法を用いたシミュレーションを用いて更なる理解を深める。

4.3 ANSYS シミュレーション

熱ひずみ測定の理解を深めるために ANSYS ソフトを使用し有限要素法を用いた構造解析を行った。ここでは有限要素法と ANSYS ソフトについて説明する。

表 4.2 各サンプルの 1℃あたりのひずみの変化量

ベースの種類	ベースの厚さ [μm]	銅の厚さ [μm]	CTE[ppm/K]	1℃あたりのひずみの変化量 [$\times 10^{-6}/\text{K}$]
A	100	12/12	5 ~ 7	5.24 ± 0.07
B	60	18/18	3	5.14 ± 0.08
C	60	12/12	9	5.05 ± 0.21
D	100	12/12	10	4.42 ± 0.07

4.3.1 有限要素法

有限要素法とは、物体や空間を単純な形状の要素に分割し各要素点で方程式を解き、物体に対して様々な解析を行うことである。単純な形状に分割することをメッシングと呼ぶ。様々な方程式を解くことで、機械的な構造解析や電磁場解析、熱伝導解析、流体解析などを行うことができる。

一般的な有限要素法の手順を説明する。まず解析を行う領域 (物体や空間) を要素に分解する。一般的に要素の大きさが細かい程解析結果の精度が良くなる。しかし要素の大きさが細かければその分同じ領域内の要素点が多くなるため方程式を解く数が多くなるため解析に時間がかかるというデメリットもある。各要素点に対して、与えられた境界条件と方程式を解き、その要素の領域内を平均的に満足させる解を導き出す近似的計算を行う。

本研究では静的構造解析を用いている。静的構造解析とは構造物や物体に対して静的な荷重、つまり荷重に対する応答に時間変化が無い場合の変形や応力などの解析を行うことである。この解析では解析対象に負荷 (熱荷重や外力など) を加えると、物体を構成している各要素点に変位することで要素が変形し、物体全体の変形を再現している。この時、力のつり合いや変形、材料の構造についての方程式を解く。

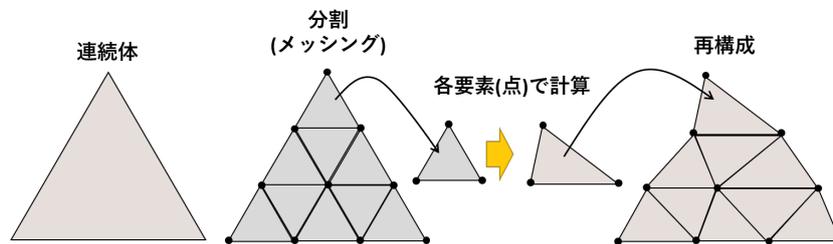


図 4.14 有限要素法静的構造解析のイメージ

4.3.2 ANSYS について

ANSYS は有限要素法を用いた解析ソフトである。ANSYS では静的構造解析をはじめ、熱伝導解析や電磁場解析、流体解析など様々な解析を行うことができる。また熱伝導解析の結果で得られた温度分布を静的構造解析の熱負荷にするなど、複合的な解析を行うことも可能である。

ANSYS で解析を行う際のユーザー側の手順について簡単に説明する。まずはじめに、シミュレーションをジオメトリを CAD ソフトを用いて作成する。次に ANSYS を起動し、解析の種類を選ぶ(本研究では静的構造解析)。使用する材料の物性パラメータ (CTE やヤング率、密度など) を入力し、CAD モデルを ANSYS に読み込ませる。そのあと、材料の指定や、物体の接触条件、メッシング(構造体を分割する作業)、荷重の決定、出力結果の選択など解析の設定を行う。この際、設定が実際の状況を再現することができるかどうか注意深く確認する必要がある。設定が完了したら解析を行い結果の確認を行う。以下に ANSYS 出の解析の流れをまとめた。

1. 解析を行うジオメトリを CAD ファイルで作成する。
2. ANSYS を起動し、解析の種類を選ぶ。
3. 使用する材料の物性パラメータを入力する。
4. ジオメトリの CAD ファイルを ANSYS に読み込む。
5. 解析の設定を行う。(メッシュ、荷重、出力結果など)
6. 解析を行い結果を出力する。

静的構造解析の設定を行う際に注意すべき点をいくつかまとめる。まず一点目はメッシュすなわち分割された要素のサイズである。メッシュサイズは小さければ小さいほど計算を行う要素点が増えるため正確な値を求めることができるが、その分計算の回数が増えてしまい解析に時間がかかる。逆にメッシュサイズを大きくすると計算時間を早くすることができるが、シミュレーションの結果の精度が良くないことがある。本研究で使用したソフトはアカデミック版であり、メッシュや構造物の数に制限があったため適切なメッシュサイズで解析を行うことが重要であった。

二点目は物体同士の接触条件である。ANSYS では接触条件を摩擦などを考慮して設定することができる。そのため接触条件の違いで解析結果が大きく変わってしまう。そのため適切な接触条件が設定できているかどうか注意深く確認する必要がある。

4.4 熱ひずみのシミュレーション

熱ひずみ測定の理解を深めるために ANSYS を用いて静的構造解析シミュレーションを行った。シミュレーションを行うにあたって作成したサンプルモデル、シミュレーションの妥当性の評価、CTE の違いによる熱ひずみの評価について記述する。

表 4.3 シミュレーションに用いた各物性値

物質	CTE[ppm/K]	ヤング率 [GPa]
ガラス	3.3	64
グルー (アラルダイト 2011)	85	1.9
銅	16	129

4.4.1 熱ひずみシミュレーションのサンプルモデル

シミュレーションを行う為に作成したサンプルモデルを図 4.15 その断面図を図 4.16 に示す。上からガラス、グルー、銅、ベース、銅の順に積層している。各層のサイズについては、4.2.2 章と同様である。またグルー層はパターンを簡略化しコの字状にしている。またシミュレーションに用いた各物性値について表 4.3 にまとめる。各ベースについては図??の値を使用している。これらのセットアップで 25℃を基準に 60℃から -40℃までを 10℃刻みで熱負荷のみを加えた条件で静的構造解析を行った。

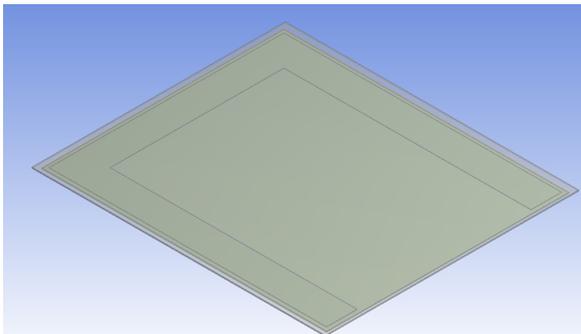


図 4.15 熱ひずみシミュレーション用 CAD モデル

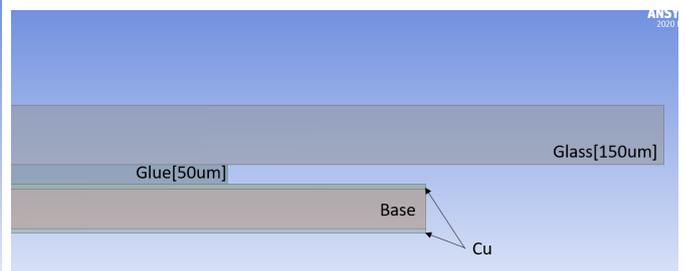


図 4.16 熱ひずみシミュレーション用 CAD モデルの断面図

4.4.2 測定結果との比較

ガラスにベース A の PCB を張り付け -40℃にしたときの変位を図 4.17 に示す。上側がガラス、下側が FPC になっている。CTE はガラスの方が小さく、温度を下げているため CTE の不一致によりガラス面を基準に上に凸になる様子がシミュレーションでも再現できる。

実際にひずみゲージを用いて測定した 4 種類の PCB が異なるサンプルについて各温度でのひずみについて、測定とシミュレーションの結果を図 4.18 に示す。縦軸がひずみ、横軸が温度である。青のプロットが測定結果、ピンクのプロットがシミュレーションの結果である。シミュレーションでのひずみはサンプルガラス面中央の相当ひずみである。相当ひずみは測定点のひずみの大きさを

表すスカラー量である。変形の形状に応じてプラスとマイナスを付けている。

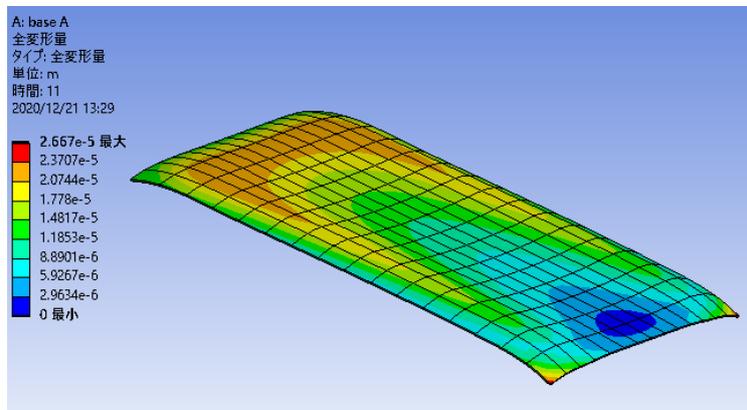


図 4.17 BaseA 貼り付けサンプルの変位

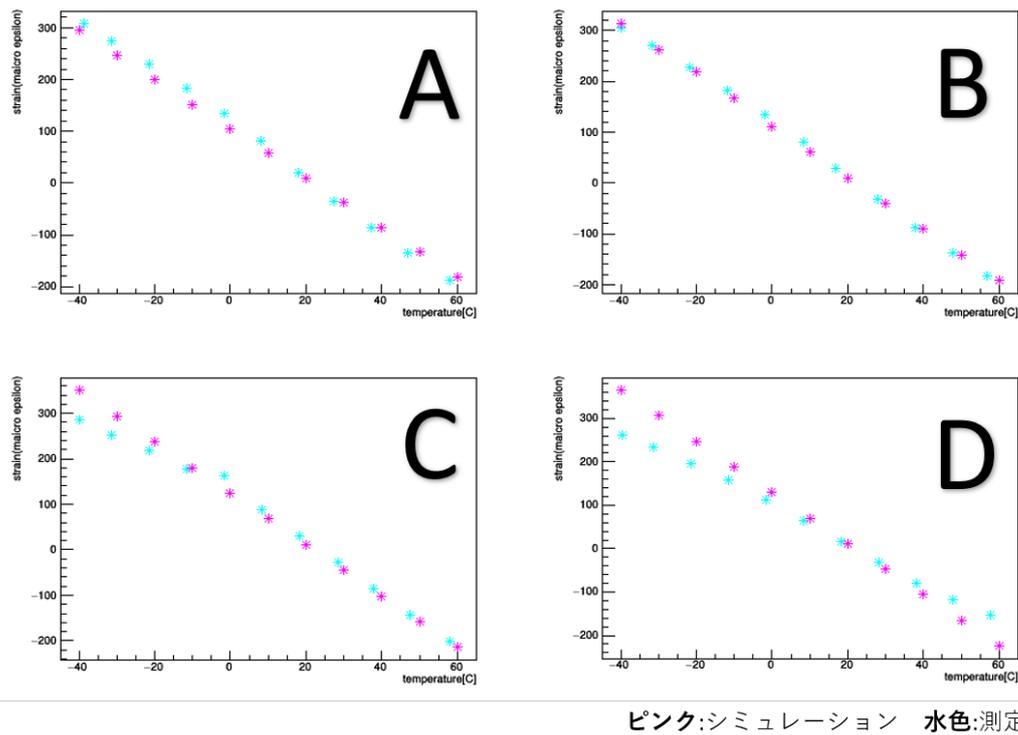


図 4.18 ひずみの測定結果とシミュレーション結果の比較

どのサンプルもシミュレーションと測定で得られたひずみはオーダーで一致している。とくに、CTE の低い A と B のサンプルではシミュレーションと測定がほぼ一致している。この結果からこのシミュレーションセットアップ妥当性があると判断し、FPC ダミーの厚みを揃えたサンプル

でシミュレーションを行い、ベースの CTE の違いによるひずみの評価を行った。

4.4.3 CTE の違いによるひずみの評価

測定サンプルでは CTE だけでなく厚みも異なる FPC サンプルしか用意できなかったため、ベースの CTE の違いによる評価ができなかった。そのため、全ての FPC サンプルの厚さをベース 100 μm , 銅 12 μm の厚さに統一してシミュレーションを行い CTE の違いによる評価を行った。つまり A と D の FPC サンプルには変更を加えず、B はベースを 60 μm から 100 μm , 銅を 18 μm から 12 μm に、C はベースを 60 μm から 100 μm へ変更した。ベースの厚さ 100 μm , 銅の厚さ 12 μm でのシミュレーションによるひずみを図 4.19 に示す。

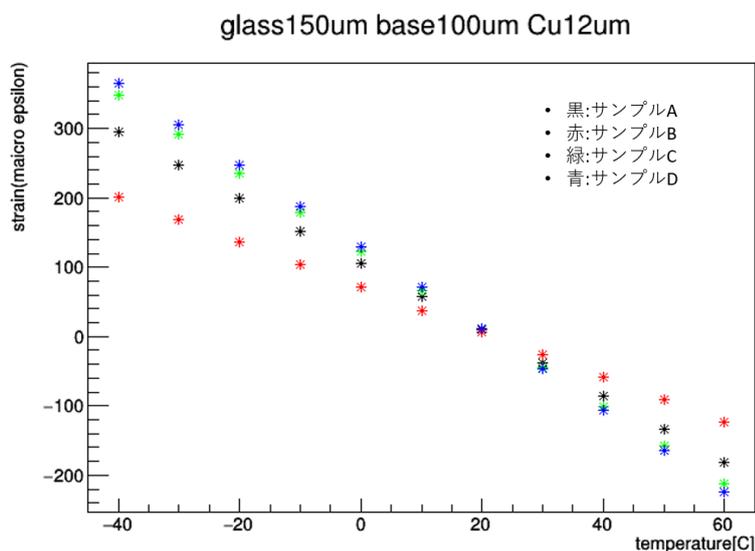


図 4.19 ベースの厚さ 100 μm , 銅の厚さ 12 μm での熱ひずみシミュレーション結果

CTE の違いから熱サイクルによるひずみの変化を評価するために 1 $^{\circ}\text{C}$ あたりのひずみの変化量を表 4.4 にまとめた。CTE が低い順に B, A, C, D であり、1 $^{\circ}\text{C}$ あたりのひずみの変化量が小さい順とおなじである。この結果から FPC のベースに CTE が低いものを使用するとひずみ、すなわち変形を抑制できることが期待できる。

表 4.4 Base の厚さ 100 μm , Cu の厚さ 12 μm での 1 $^{\circ}\text{C}$ あたりのひずみの変化量 [シミュレーション]

ベースの種類	CTE[ppm/K]	1 $^{\circ}\text{C}$ あたりのひずみの変化量 [$\times 10^{-6}/\text{K}$]
A	5 ~ 7	4.75 ± 0.02
B	3	3.24 ± 0.01
C	9	5.60 ± 0.01
D	10	5.88 ± 0.01

第5章

検出器モジュールのバンプ層の熱応力シミュレーション

4.4章では、ひずみゲージを測定したダミーサンプルに対してシミュレーションを行ったが、本章では実際の新型シリコンピクセル検出器モジュールに対してのシミュレーションを行った。検出器モジュールのシミュレーションでは ANSYS の静的構造解析を用いた。本章で議論するのは熱負荷を加えた時の相当応力である。相当応力とは垂直応力とせん断応力から計算されるスカラー量で物体の降伏応力と単純に比較できるため強度の評価によく用いられる。

まずバンプオープンが確認されている FEI4 モジュールのシミュレーションを行い実際にバンプオープンが起こる箇所との比較を行い、このシミュレーションセットアップにおける、バンプオープンが起こる応力値の目安を確認した。

3.2.5章で述べたように、検出器モジュール上のワイヤー保護のためにメカニカルプロテクションを取り付けることになっている。メカニカルプロテクションは CFRP と呼ばれる炭素系の素材で作られている。新たに構造物を取り付るため、熱サイクルを行った際に CTE の不一致による反りがメカニカルプロテクションの有無によって変わる可能性がある。メカニカルプロテクションの有無によるバンプ層に対する影響を RD53A モジュールに対してシミュレーションした。

5.1 検出器モジュールのシミュレーションモデル

本研究で用いたシミュレーションのモデルは先行して検出器モジュールのシミュレーションを行っていた共同研究者と共通のものを使用した。検出器モジュールシミュレーション用の CAD モデルの概念図と断面図を図 5.1 と図 5.2 に示す。上から銅、基材、銅、カバーレイの 4 層で構成される FPC の層、グルー層、センサー層、バンプ層、ASIC 層、熱伝導接着剤層、TPG 層、CFRP 層となっている。CAD モデルの寸法については、それぞれのモデルに使用される予定のものを使用した。また FPC のモデル化において、大まかな銅のパターンとして上層の銅の層は実装したが、実際のコネクターや抵抗などの部品や細かな銅線のパターンは再現していない。またバンプ層については本来であれば大量のハンダ球が並んでいる構造であるがモデルとしての実装が不可能だった

ため、簡略化し 4 枚の ASIC それぞれに対応する 4 枚の板として図 5.3 のようにシミュレーションモデルに実装した。実際のバンプとシミュレーションでのモデルとの違いを図 5.4 に示す。実際のバンプに少しでも近づけるために、シミュレーションではバンプ層に平行な方向の CTE は 0 に設定している。これは実際のハンダ球がとて小さく、厚み方向にしか熱膨張で変位しないと仮定しているためである。このモデルの簡素化によるシミュレーション結果の妥当性に関して、実測とシミュレーションの傾向が一致していることが共同研究者によってすでに確認されている [9]。しかしモデルを簡素化しているため、シミュレーションによって計算された応力などの結果の絶対値を信用することは難しく、あくまでも絶対値は比較のために使用する。シミュレーションに用いた物性値を表 5.1 に示す。CAD モデルと同様に共同研究者と同じセットアップを行っているため、一部実際の物性値と異なるものがある。

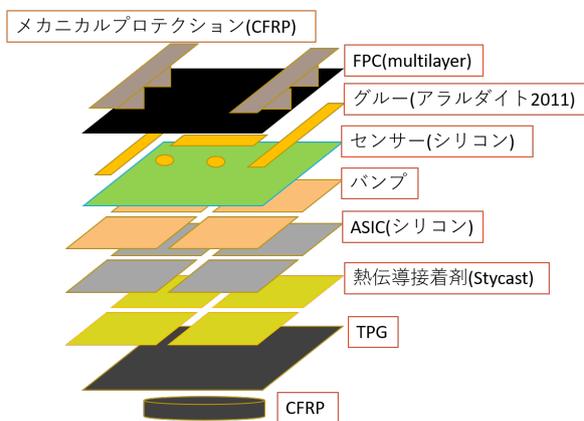


図 5.1 検出器モジュールシミュレーションの CAD モデルの概念図

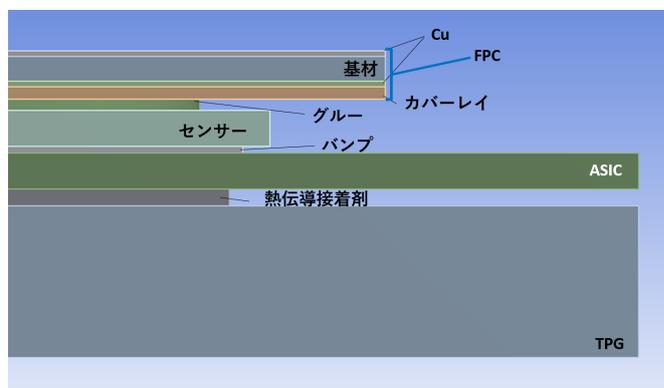


図 5.2 モジュールシミュレーションの CAD モデルの断面図。ここには写っていないが TPG の下側にクーリングセルの CFRP パーツがついている。

5.2 FEI4 モジュール (旧型プロトタイプモジュール) のバンプ層の応力

まずはじめに 3.3.1 で示した、バンプオープンが確認されている ASIC に旧型の FEI4 が搭載されている QU10 モジュールでのバンプ層の応力をシミュレーションした。このシミュレーションでは封止材は再現していない。22 °C を基準の温度とし、熱サイクル試験の上限と下限である 60 °C と -55 °C の熱負荷をモジュール全体に加えた。基準の温度から離れており熱による変形が大きく応力も大きくなる -55 °C のバンプ層の相当応力の結果を比較する。図 5.5 に -55 °C での FEI4 モジュールのバンプ層の応力分布を示す。また図 5.6 に図 5.5 の ASIC の境目付近を拡大した分布を示す。図 5.5 において赤い点線で囲まれた ASIC のチップの境目に対応する箇所での応力が高くなっている。これは図 3.13 の熱サイクル 100 回を行った QU10 モジュールでバンプオープンが確

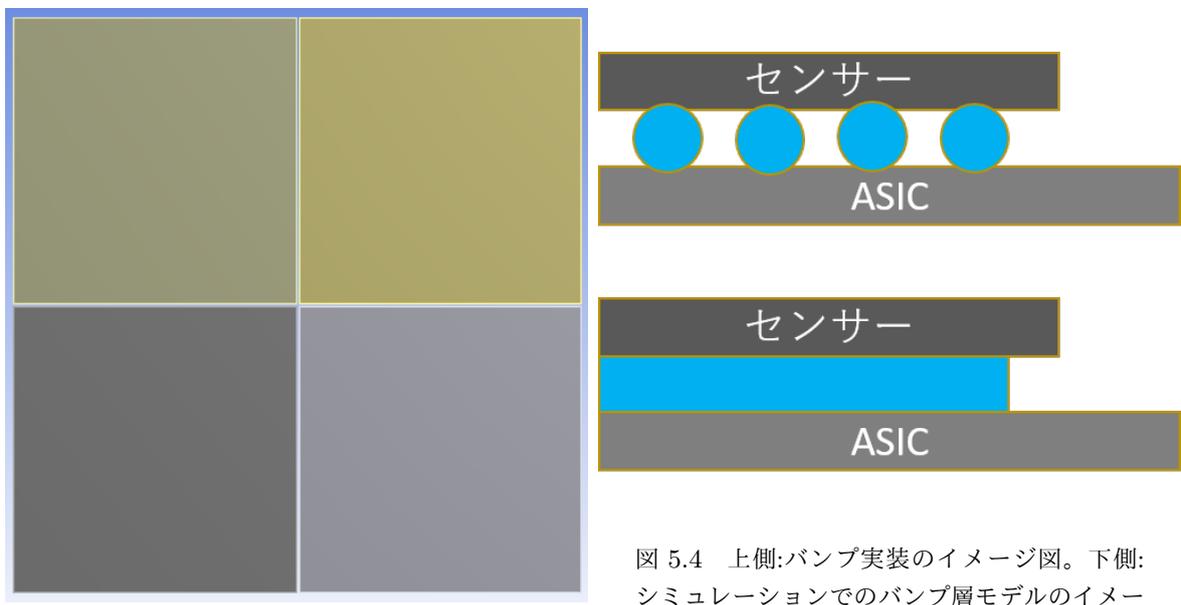


図 5.3 バンプ層の CAD モデル

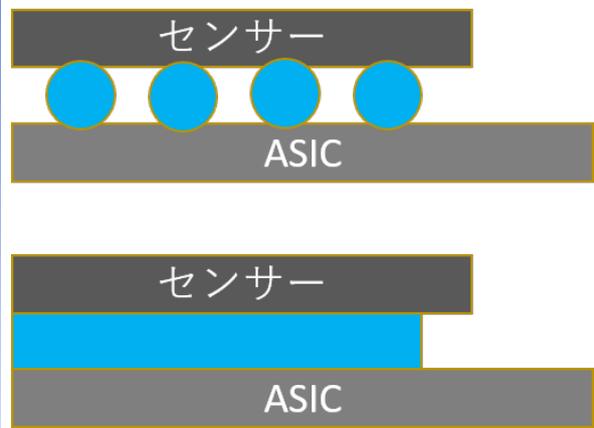


図 5.4 上側:バンプ実装のイメージ図。下側:シミュレーションでのバンプ層モデルのイメージ図。

表 5.1 モジュールシミュレーションの物性パラメータ

	材料	CTE[ppm/K]	ヤング率 [GPa]
メカニカルプロテクション	CFRP	-0.5	220
FPC	銅	18	110
FPC(ベース)	ポリイミド	27	3.6
グルー	アラルダイト 2011	85	1.9
センサー	シリコン	2.6	190
バンプ	-	⊥ 21, 0	10
ASIC	シリコン	2.6	190
サーマルグルー	スタイクキャスト	36	8.6
TPG	-	⊥ 25, 1.0	25
CFRP	-	-0.5	110

認されている箇所に対応しており、応力が 10 MPa 以上の高いところでバンプオープンが発生していることが分かる。また最大で 34.4 MPa の応力がかかっていることが確認できる。

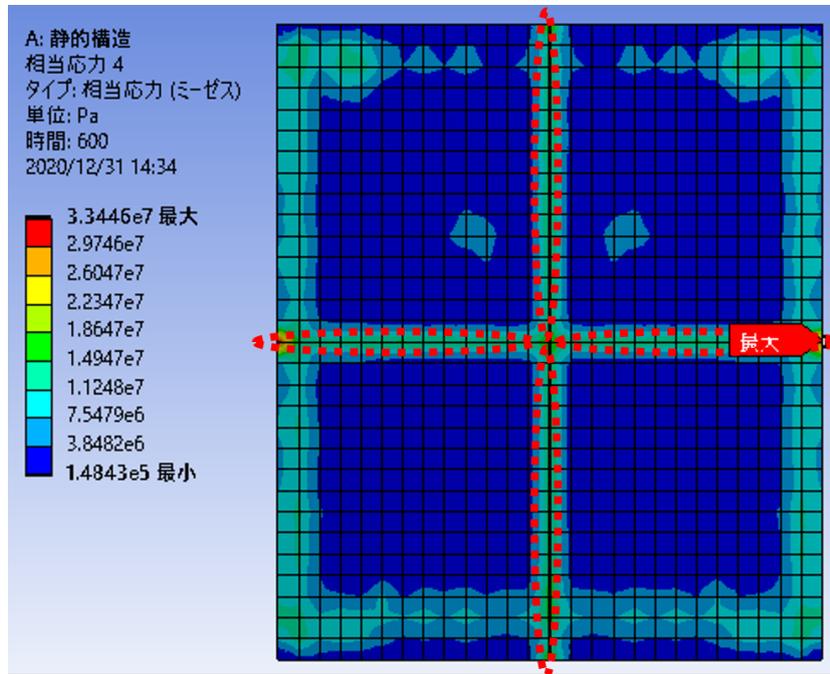


図 5.5 -55 °C の時 FEI4 モジュールのバンプ層の相当応力分布

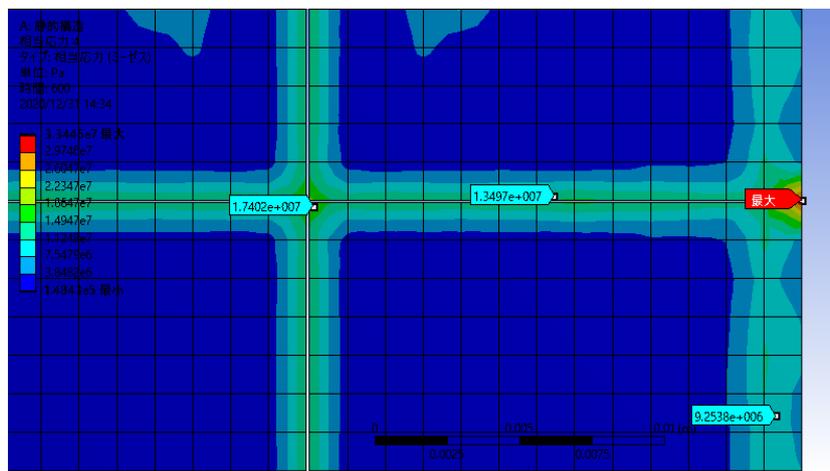


図 5.6 -55 °C の時 FEI4 モジュールのバンプ層の ASIC チップの境目付近の相当応力分布。ASIC の境目では 10MPa 以上の応力がかかっている。

5.3 RD53A モジュールのバンプ層の熱応力とメカニカルプロテクションの有無による影響

メカニカルプロテクションがついているモジュールとついていないモジュールの CAD モデルをそれぞれ図 5.7 と図 5.8 に示す。本章ではこの二つのモデルの違いを検証していく。

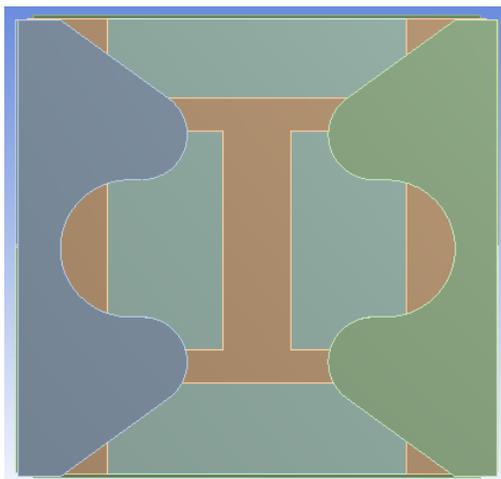


図 5.7 メカニカルプロテクションあり RD53A モジュールの CAD モデル

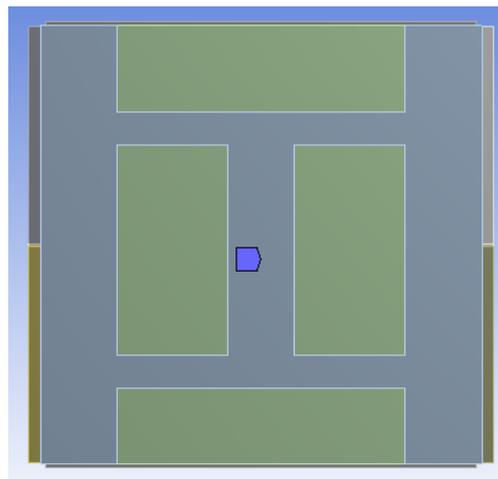


図 5.8 メカニカルプロテクションなし RD53A モジュールの CAD モデル

メカニカルプロテクションなし RD53A モジュールの -55°C の時の相当応力分布を図 5.9、メカニカルプロテクションありの RD53A モジュールの -55°C の時の相当応力分布を図 5.10 に示す。どちらの応力分布もカラーバーは最大値が 10 MPa, 最小値が 1.8 MPa としている。メカニカルプロテクションありの相当応力の最大値は約 8.1 MPa、なしの応力の最大値は約 9.8 MPa である。5.2 章で確認した、FEI4 モジュールでバンプオープンが起こっている箇所は 10 MPa 以上であり、RD53A モジュールのバンプ層ではそれよりも低い応力であるため、FEI4 モジュールよりバンプオープンは起こりにくいと考えられる。これは FPC とセンサーを接着する際のグルーパターンの違いによるもので、3.2.7 章で述べたように、RD53A モジュールの方が接着剤が塗布されている領域が多いため、バンプ層の応力が分散していると考えられる。

またメカニカルプロテクションを取り付けることで応力の最大値を 82% に軽減できることが分かる。また分布の様子を比較するとメカニカルプロテクションありの方で外側の応力が軽減されていることが確認できる。メカニカルプロテクションを取り付けることで、熱サイクルによる応力を下げることができる。

メカニカルプロテクションを取り付けることで応力が低下することの要因は、CTE が高い FPC の層の上に CTE が低く変形しづらい構造体が追加されたことである。CTE が低い構造体が上層

にとりつけられることで、CTE が高い FPC 層の温度変化による変形が無い場合と比べて小さくなり (図 5.11, 図 5.12)、バンプ層の変位も小さくなり (図 5.13, 図 5.14) 応力が軽減される。

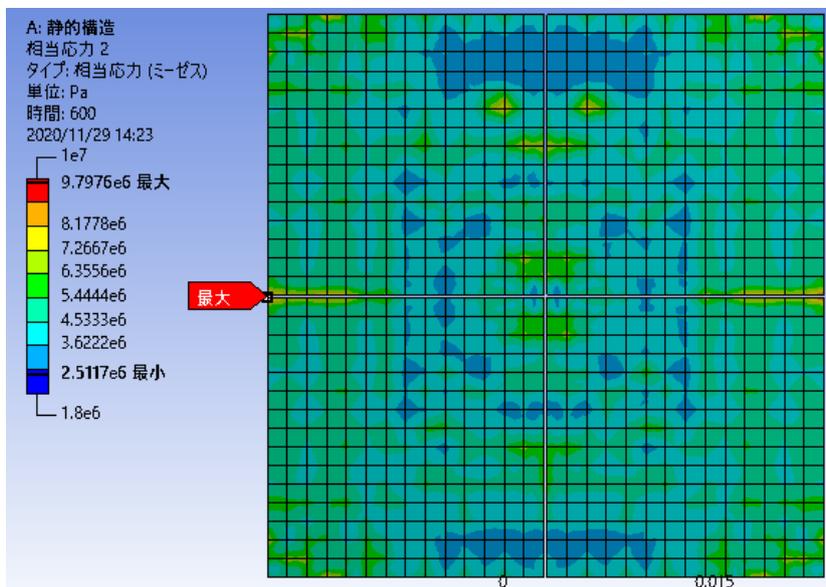


図 5.9 -55 °C の時のメカニカルプロテクションなし RD53A モジュールのバンプ層の相当応力分布

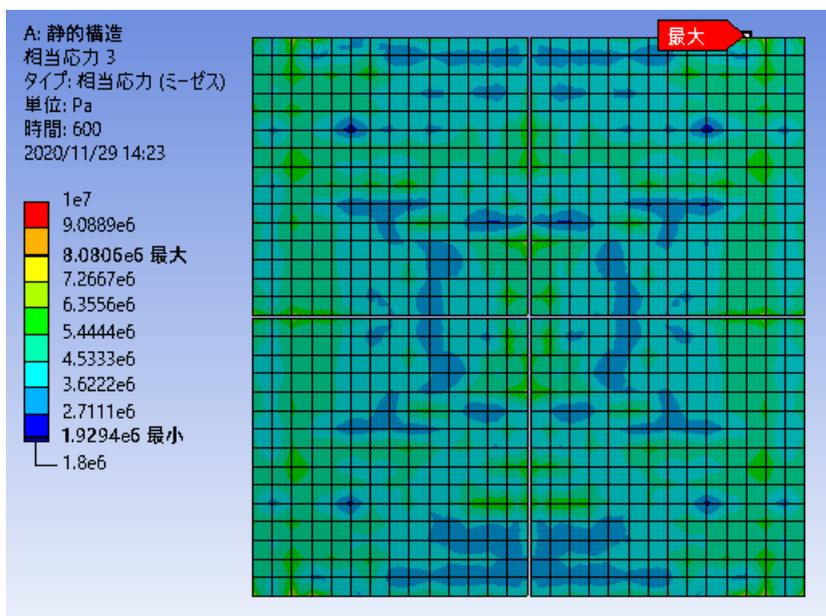


図 5.10 -55 °C の時のメカニカルプロテクションあり RD53A モジュールのバンプ層の相当応力分布

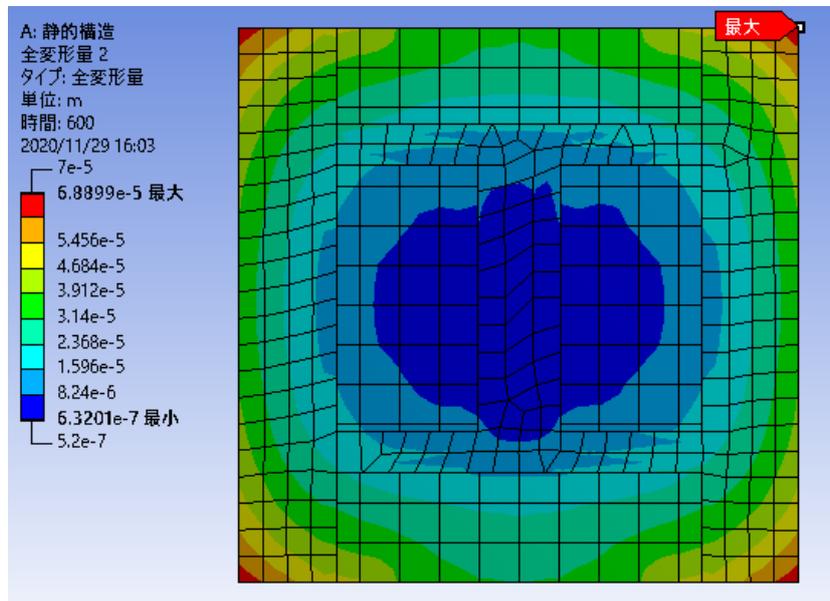


図 5.11 -55 °C の時のメカニカルプロテクションなし RD53A モジュールの FPC 層の変位

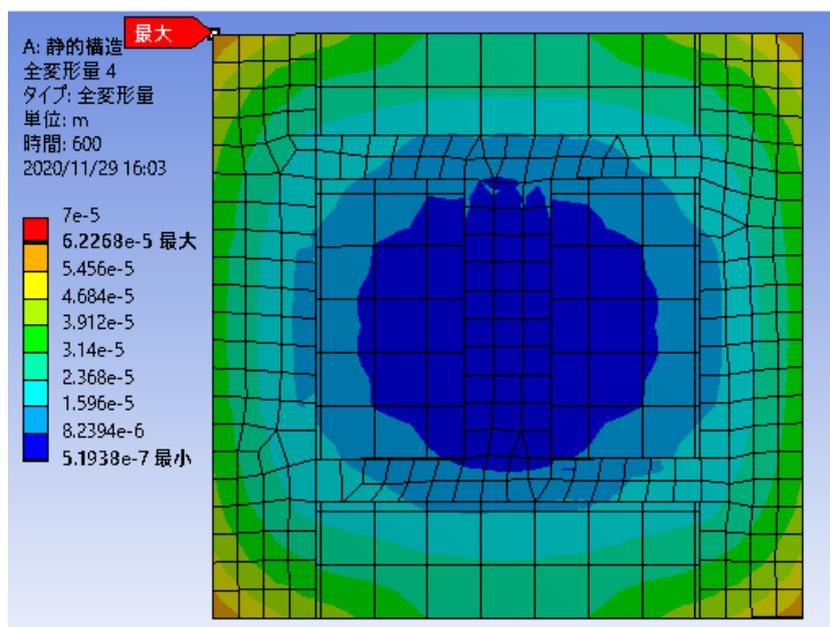


図 5.12 -55 °C の時のメカニカルプロテクションあり RD53A モジュールの FPC 層の変位。
 メカニカルプロテクションがない時と比べて変位が小さくなっている。

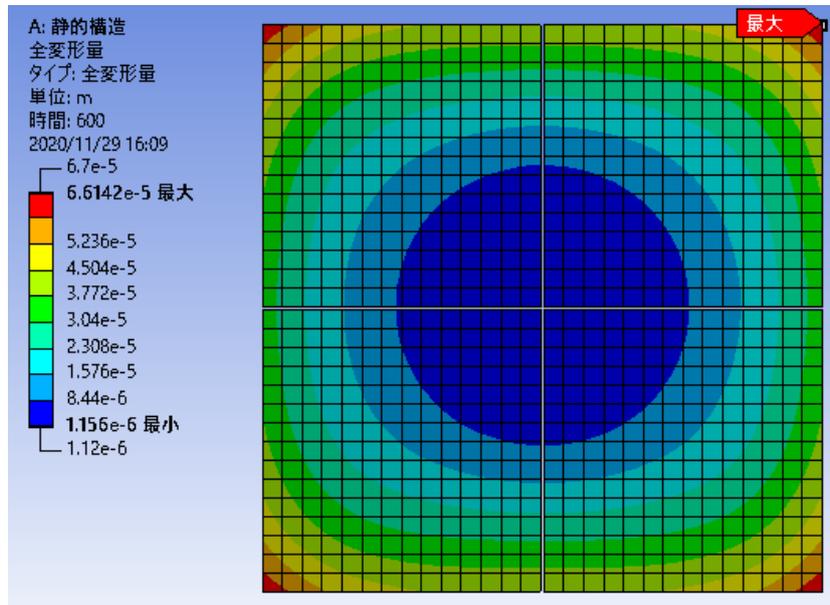


図 5.13 -55 °Cの時のメカニカルプロテクションなし RD53A モジュールの bump 層の変位

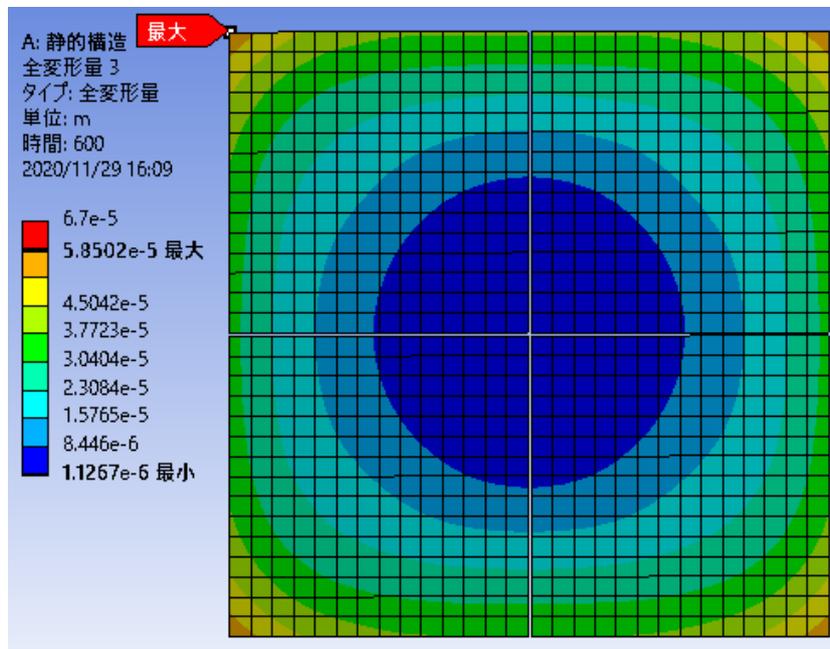


図 5.14 -55 °Cの時のメカニカルプロテクションあり RD53A モジュールの bump 層の変位。
 メカニカルプロテクションがない時と比べて変位が小さくなっている。

第 6 章

グルー層の熱応力シミュレーション

検出器モジュールの熱サイクルによってバンプ層のみでなく、FPC とベアモジュールを接着しているグルー層においても強い応力がかかることで剥がれてしまうことが懸念されている。本章では熱サイクルによる応力の観点から最適なグルーパターン作成の指針を示すことを目標にシミュレーションをもちいて行った研究について記述する。

6.1 現在のグルーパターンの問題点

5.3 章と同様に基準の温度を 22 °C とし、-55 °C におけるメカニカルプロテクションを取り付けていない RD53A モジュールでの、現在使用されているグルーパターンでのグルー層の応力分布を図 6.1, グルー層の全ての領域を接着剤で覆った場合の応力分布を図 6.2 に示す。グルー層すべて覆った場合のことを、Full covered と表現する。図 6.1 のグルーパターンはグルー層のおよそ 30% の領域を接着剤でカバーしている。このパターンでの応力の最大値は 49.2 MPa、Full covered では 36.4 MPa となっており、現在のグルーパターンでは接着剤に強い応力がかかり一部が剥がれてしまう可能性がある。万が一剥がれてしまった場合、30% の領域しかカバーできていないため、モジュールが剥がれてしまう危険性がある。そのため、接着剤にかかる最大の応力を減らせるパターンや接着剤で覆う領域を増やす必要がある。

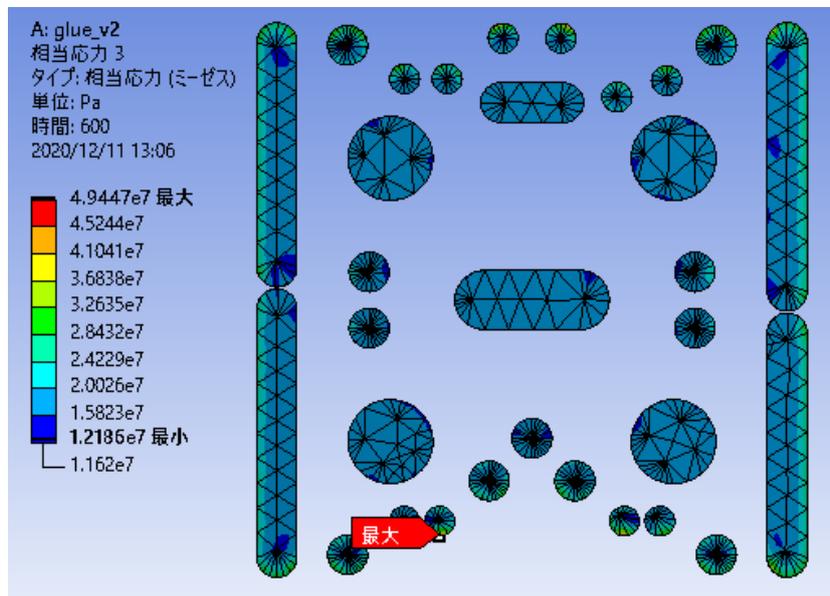


図 6.1 -55 °Cの時のグルー層の現在のパターンでの応力分布。応力の最大値は 49.4MPa。

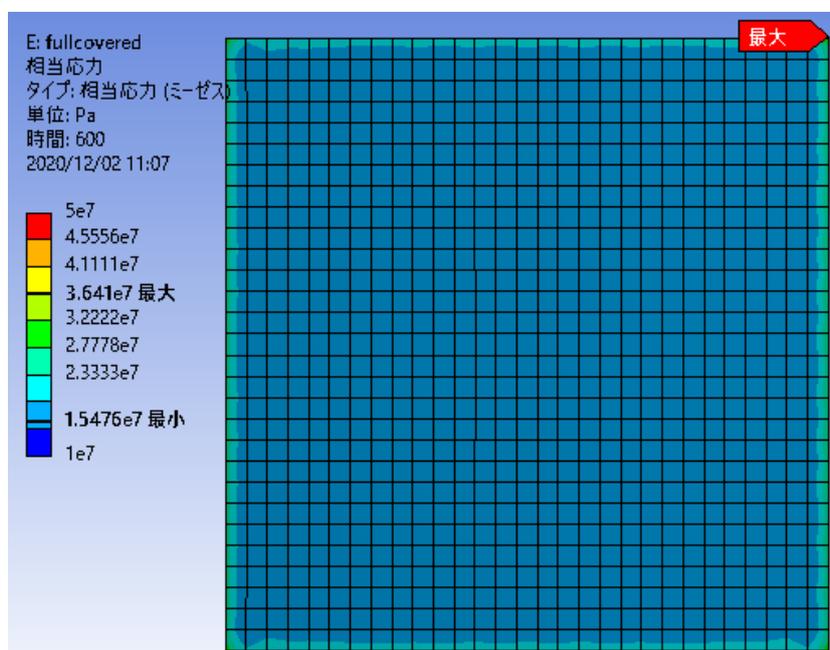


図 6.2 -55 °Cの時のグルー層の全ての領域を覆った場合の応力分布応力の最大値は 36.4MPa。

モジュールが剥がれることを防ぐには、全ての領域を接着剤で覆う Full covered が理想であるが、3.2.7 章でも述べたように、グルー層に空気を封じ込める危険性や、接着剤塗布時の塗布量や厚みのコントロールが困難である。そのため、接着剤の塗布量が Full covered に近く、より多くの領域を接着剤でカバーするグルーパターンを制作する方針になった。図 6.3 に RD53A モジュールにおいて、接着剤で覆った領域が 100% に近いグルーパターンでの -55°C における応力分布を示す。このパターンは共同研究者が作成したもので、グルー層に大きな応力が加わり一部が剥がれてしまっても接着剤の領域が大きいためモジュールが剥がれることを防ぐことができる。図 6.3 のパターンを New Glue Pattern と呼ぶことにする。New Glue Pattern での応力の最大値は 46.4 MPa であり、大半を占めている水色の領域はおよそ 16 MPa から 18 MPa である。図 6.2 の Full covered グルーでの応力の最大値 36.4 MPa を基準とすると New Glue Pattern の応力の最大値は 127%(27% の上昇) である。現在使用されている図 6.1 のパターンの最大値は 137%(37% の上昇) であるから、およそ 10% 応力の最大値を軽減することができている。しかし New Glue Pattern は接着剤塗布の精度の問題や、FPC の変更によってグルーパターンが変更される可能性がある。本研究ではグルーパターンを変更する際の、熱応力の観点から指針を作成することを目的に単純なグルーパターンを用いてシミュレーションを行った。

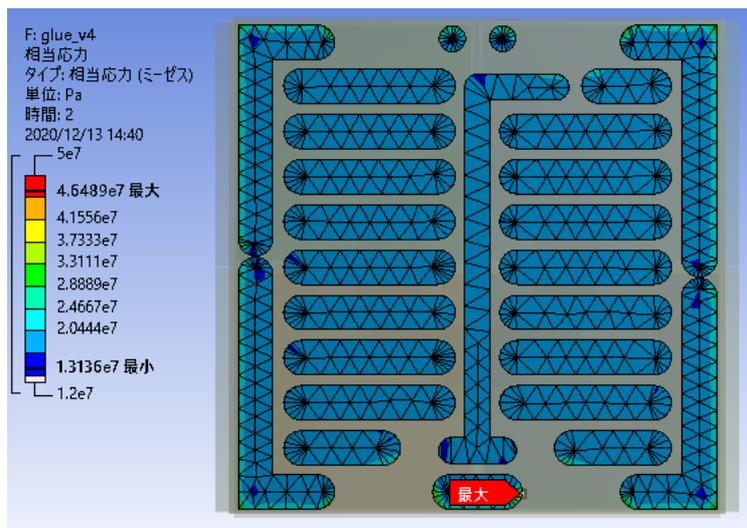


図 6.3 New Glue Pattern を用いた際の -55°C での RD53A モジュールグルー層の応力分布。応力の最大値は 46.4MPa。

6.2 グルーパターンによる応力分布の違いに関する研究

グルーパターンによる熱応力の違いを模索する為に、モジュールのモデルを簡素化したモデルでシミュレーションを行った。接着剤が剥がれる応力が分かっていないため応力の最大値をある値より低くするという目的ではなく、応力の最大値がより低いパターンを探すことが目的である。また

本章では、シミュレーションに使用したモデルが 6.1 章のものとは違うため、6.1 章でシミュレーションを行った際の応力の最大値との絶対値の比較ではない。

6.2.1 簡素モデルとその妥当性の検証

グルーパターン模索のために使用した RD53A モジュールを簡素化した CAD モデルと概念図を図 6.4, 図 6.5 に示す。それぞれの層を簡素化し、FPC の層はポリイミド 1 層、センサーとパンプと ASIC はまとめてベアモジュール層とした。熱伝導接着剤の層は RD53A モジュールのモデルでは ASIC それぞれに対応する 4 枚の板で実装していたが、簡素モデルでは一枚の板としている。クーリングセルに関しては TPG のみ実装し、CFRP の部分は省略した。グルー層以外は $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ の板として実装しそれぞれの厚さは FPC 層が $200\ \mu\text{m}$, グルー層が $50\ \mu\text{m}$, ベアモジュール層が $325\ \mu\text{m}$, 熱伝導接着剤層が $100\ \mu\text{m}$, TPG 層を $600\ \mu\text{m}$ とした。物性値としては図 ?? を用いており、FPC 層にはポリイミド、ベアモジュール層にはシリコンの値を使用しそのほかの層は RD53A モデルと同じである。



図 6.4 RD53A モジュール簡素モデルの概念図

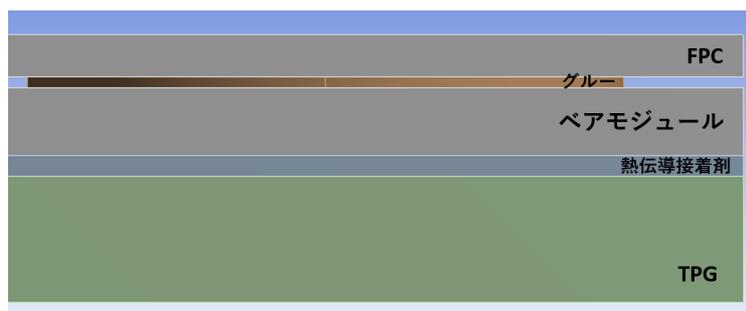


図 6.5 簡素モデルの断面図

この簡素モデルが RD53A モジュールと応力の傾向が異なることの確認を行った。比較に用いたモデルは 5.1 章で用いたメカニカルプロテクションなしの RD53A モデルの FPC 層を $200\ \mu\text{m}$ の厚さのポリイミド 1 層にし、クーリングセルの CFRP パーツを外したモデルである。比較に使用したグルーパターンは直径 4 のドットを 5×5 個配置したものである。図 6.6 に $-55\ ^\circ\text{C}$ での簡素モデルでのグルー層の応力分布を、図 6.7 に RD53A モデルでの応力分布を示す。簡易モデルでの応力の最大値は $38.0\ \text{MPa}$, RD53A モデルでは $33.1\ \text{MPa}$ である。応力の最大値や分布に若干の違いはあるが、大まかな分布の傾向は同じであるため、簡素モデルでのグルー層の検証は妥当であると判断した。

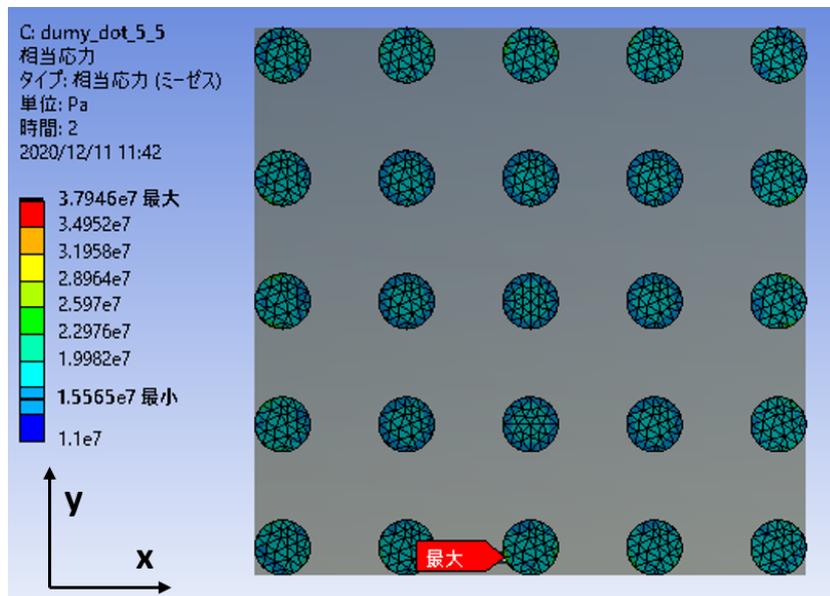


図 6.6 -55 °C の時の簡素モデルにおけるグルー層の応力分布。応力の最大値は 38.0 MPa である。

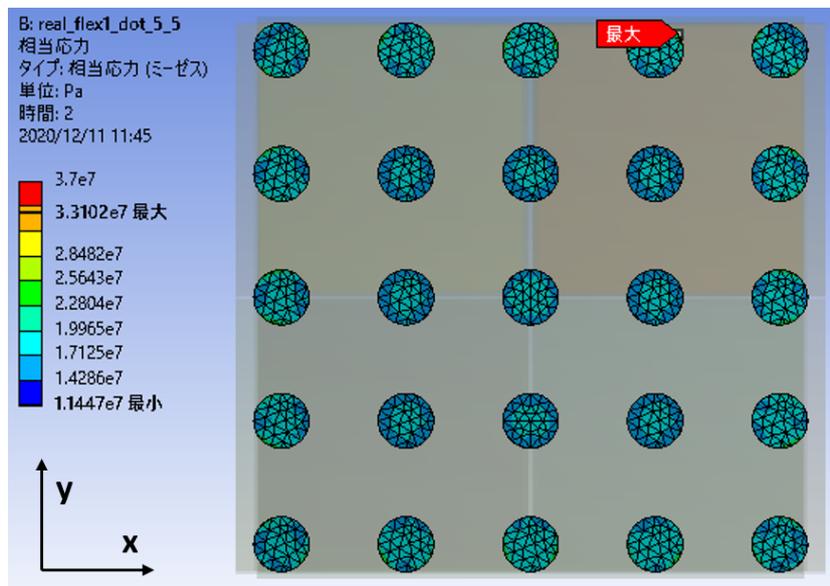


図 6.7 -55 °C の時の RD53A モデルにおけるのグルー層の応力分布。応力の最大値は 33.1 MPa である。

6.2.2 応力分布の確認 (ドット)

グルー層の熱サイクルによる応力分布の傾向を確認するために、 4mm のドットを 6×6 個配置したパターンを用いてシミュレーションを行った。その応力分布を図 6.8 に示す。応力の最大値は 31.5 MPa である。応力分布の傾向としては、一番外側のフチを覆っているドットの応力が高く、内側の 4×4 個のドットの応力はフチのドットよりも小さくどれも同じような分布になっている。

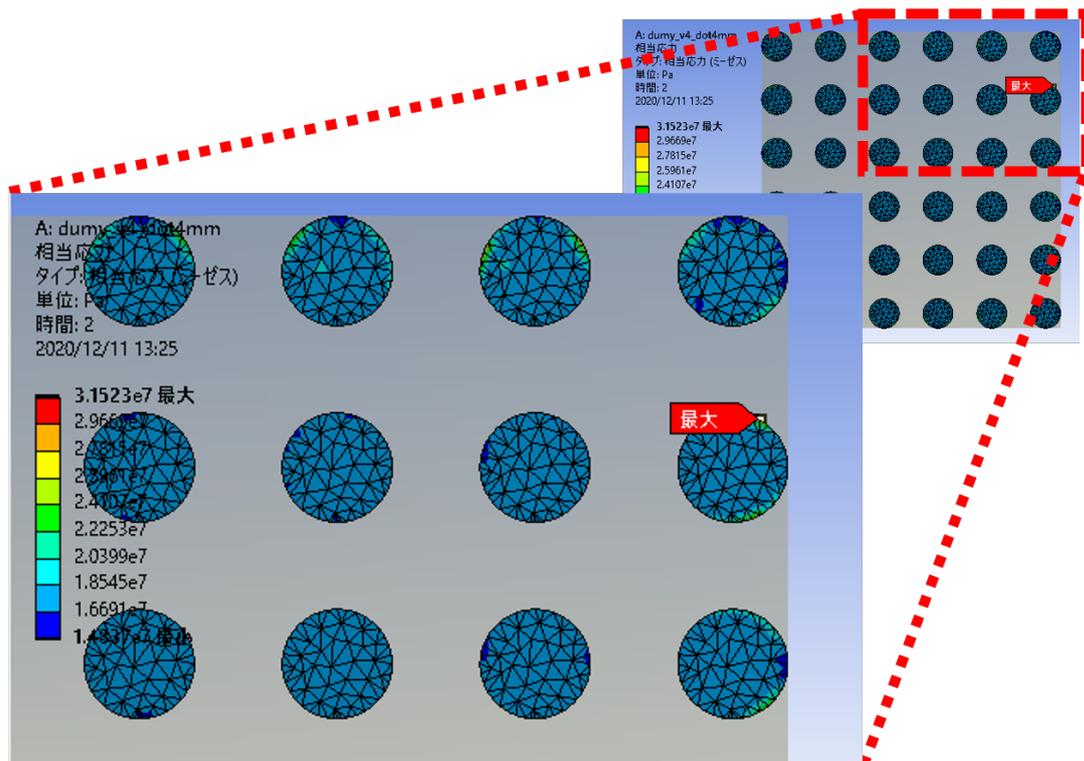


図 6.8 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ の時の簡素モデルのグルー層の応力分布。応力の最大値は 31.5MPa である。

図 6.8 から、内側のドットを取り除いたパターンでの $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ の応力分布を図 6.9 に、中央のドットを取り除いたパターンでの応力分布を図 6.10 に示す。どちらのパターンにおいても応力の最大値は 31.5 MPa で強い応力がかかっているドットの分布は変わっていない。このことから、一番強い応力がかかるのは外側のフチの部分であり、内側のグルーパターンはあまり影響しないことが分かる。

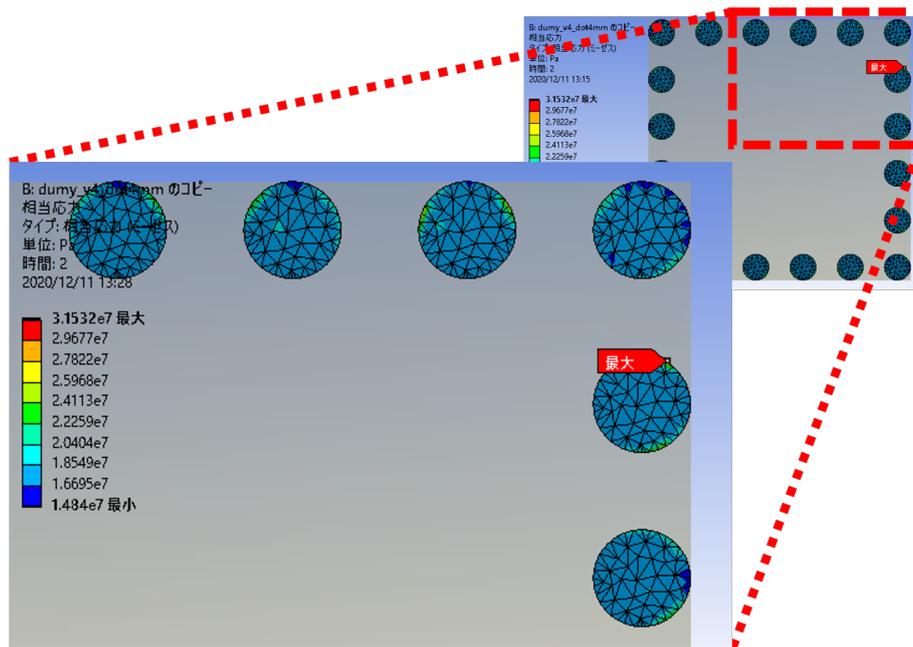


図 6.9 -55℃における内側のドットを取り除いたパターンに応力分布。応力の最大値は31.5MPaである。

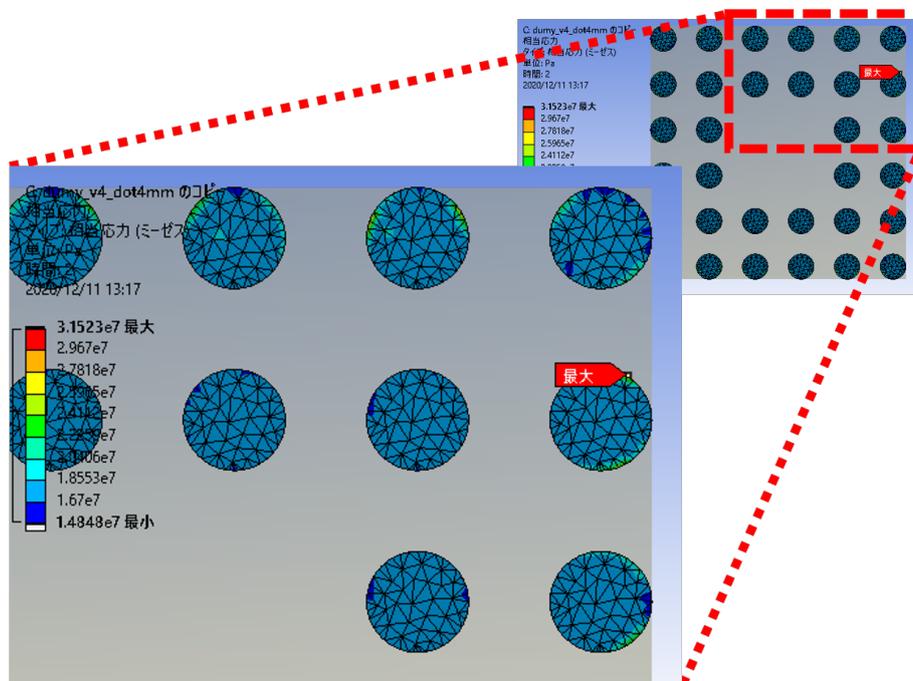


図 6.10 -55℃における中央のドットを取り除いたパターンに応力分布。応力の最大値は31.5MPaである。

6.2.3 フチのパターン

6.2.2 章より、応力の最大値を減らすにはフチのパターンを最適化すれば良いことが分かった。まず図 6.11 にフチをすべて覆ったパターンでの -55°C における応力分布を示す。このときフチを覆っている接着剤の幅は 6.2.2 章で確認したドットの直径と同く 4mm で応力の最大値は 25.4 MPa である。また応力の分布を見ると大半がおよそ 17 MPa である。このフチをすべて覆えた時が一番応力を低くできると考えると、接着剤の幅を 4mm としたとき、フチの最適化で目指す応力の最大値はこの値になる。しかし実際には空気の混入の危険性などを考慮して隙間を空けたパターンが必要になる。

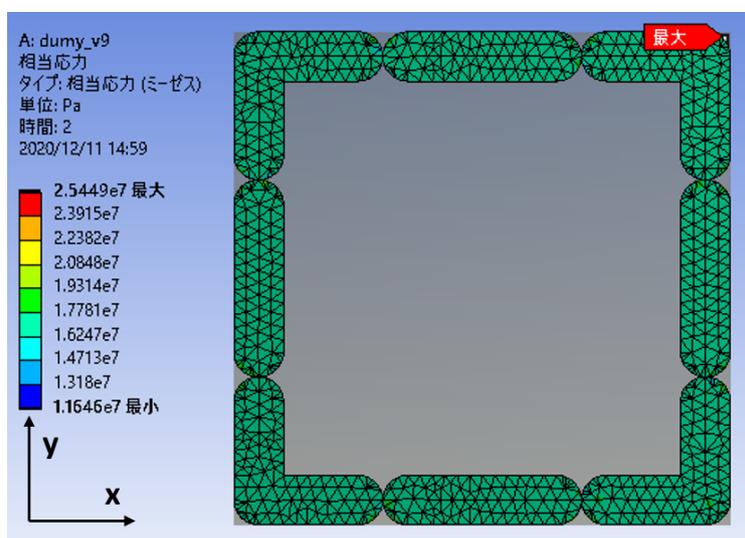


図 6.11 -55°C のグルー層におけるフチをすべて覆った時の応力分布。応力の最大値は 25.4MPa である。

-55°C における応力の最大値を 25.4MPa に近づけるようにフチの覆い方を考える。グルー層を密閉することを防ぐために、図 6.12 はワイヤーボンディングパッドの下である y 方向の辺だけを抑えたパターンを、図 6.13 に y 方向の辺に加え接着剤を繋げないように x 方向の辺にも配置したパターンを、図 6.14 に角を L 字に抑えたパターンをそれぞれ示す。それぞれの -55°C での応力の最大値は図 6.12 では 81.3 MPa, 図 6.13 では 72.1 MPa, 図 6.14 では 37.9 MPa となっている。角を L 字に覆うことで大きく応力の最大値を減らすことができることが分かる。また応力の強い箇所は、x 方向の辺の接着剤の境目に近い領域である。グルー層に応力が加わるメカニズムは、CTE の高い FPC 層の熱変形に対して、CTE の低いベアモジュール層の熱変形が小さいため、FPC 層の変形が妨げられその影響がグルー層に強い応力となって現れる。これらのパターンでは y 方向の辺に接着剤がしっかりとついており、x 方向の辺には接着剤が少ない。FPC 層やベアモジュール層が等方的に熱変形する場合、y 方向の変形に対しては、y 方向の辺に多くの接着剤がついているため応力が分散するが、x 方向の変形については接着剤が一部しかついていないため応力が集中する。

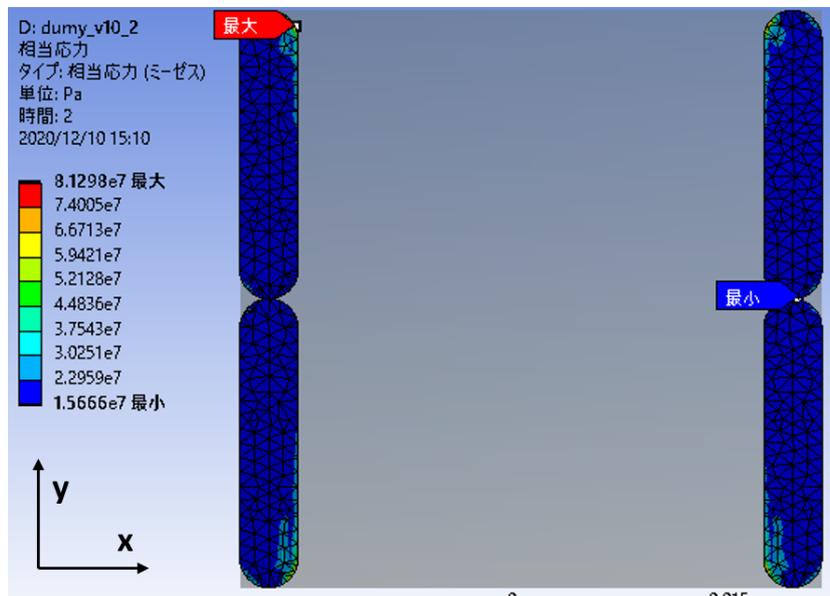


図 6.12 -55°C のグルー層でワイヤーボンディングパッドの下だけを抑えた時の応力分布。応力の最大値は 81.3MPa である。

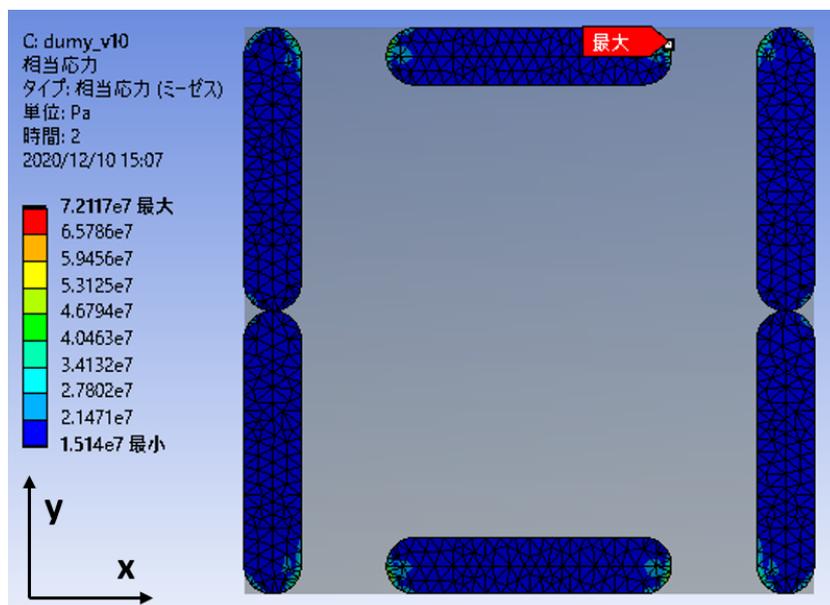


図 6.13 図 6.12 のパターンに横に接着剤を増やした時の -55°C での応力分布。応力の最大値は 72.1MPa である。

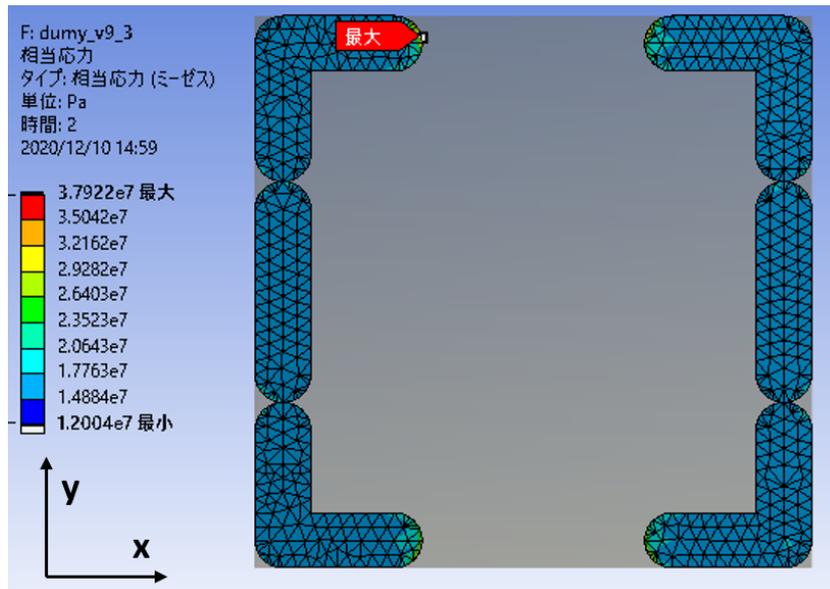


図 6.14 角を L 字に覆ったときの -55°C での応力分布。応力の最大値は 37.9MPa である。

角を L 字に覆い、内側に接着剤を増やすことでさらに応力を減らすことを考える。図 6.15 に L 字の内側に横向きの隙間を埋めるようにドットを配置したパターンでの -55°C における応力分布を示す。この時の応力の最大値は 28.9 MPa で L 字だけで抑えていた時と比べ、この簡素モデルにおいてはおよそ 9 MPa 小さくなっている。これは x 方向にあいた隙間を埋めることで外枠を埋めるという観点から接着剤の無い領域がなくなったことでドットの部分に応力が分散しているためだと考えられる。

図 6.16 に図 6.15 のパターンの内側のドットを繋げたパターンでの -55°C での応力分布を示す。図 6.16 でのパターンの -55°C における応力の最大値は 28.0 MPa でドットを繋げる前と比べるとわずかに低くなっている。このことから繋げた方が応力は小さくなるが、L 字にした時に覆えていない領域を内側で覆うことが応力を下げることに重要であるということが言える。

図 6.16 のパターンから内側の x 方向に配置している線の配置で応力を減らすために、図 6.17 に線を伸ばしたパターン、図 6.18 に線を L に近づけたパターンでの -55°C の時の応力分布をそれぞれ示す。図 6.17 では 27.9MPa, 図 6.18 では 26.8MPa と図 6.16 のパターンの 27.9MPa よりも応力の最大値を下げる事ができている。この結果から線の長さよりも L との距離が短い重要であることが分かる。しかしながら角を L 字に覆い、その内側で x 方向の足りない部分に接着剤を配置することで、応力の最大値が 26 MPa から 28 MPa、分布の平均的な値がおよそ 17 MPa に抑えられる。

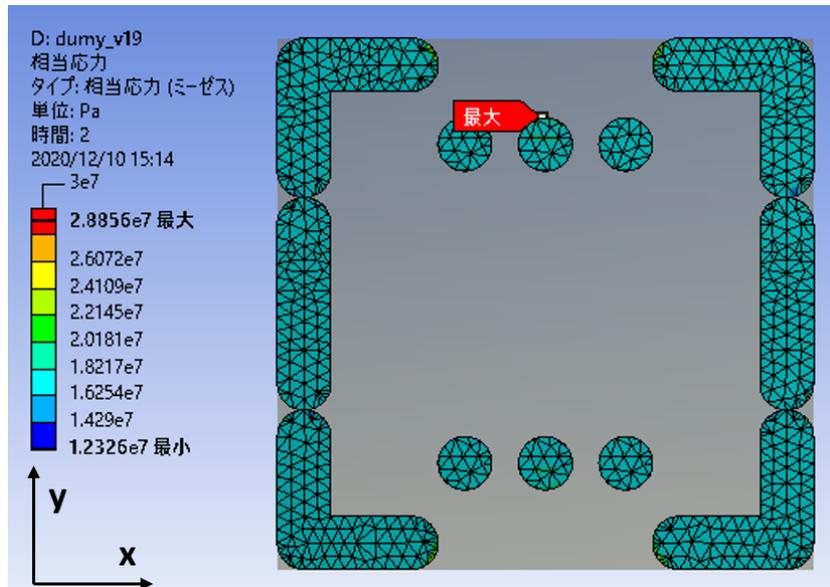


図 6.15 -55℃のL字で覆った内側にドットを追加した時の応力分布。応力の最大値は28.9MPaである。

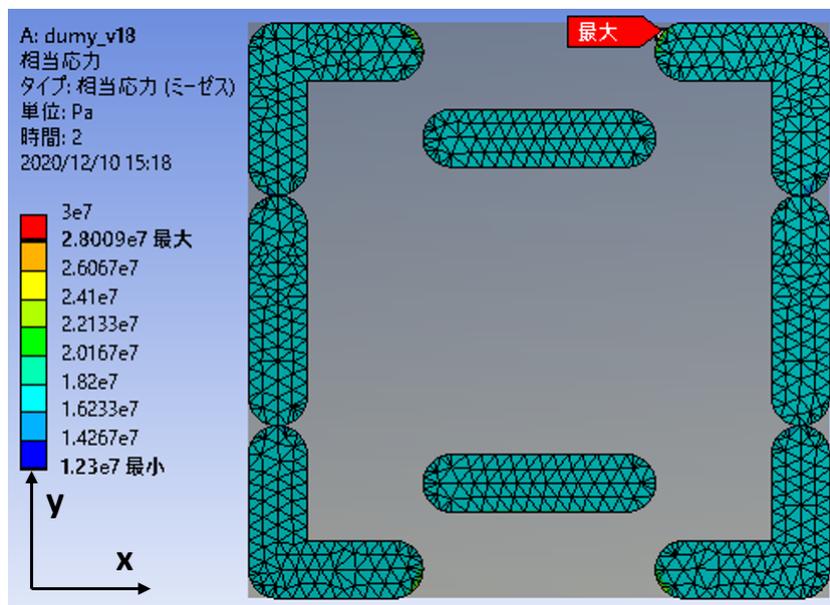


図 6.16 角をL字に覆い内側に線状のパターンを配置した時の-55℃での応力分布。応力の最大値は28.0MPaである。

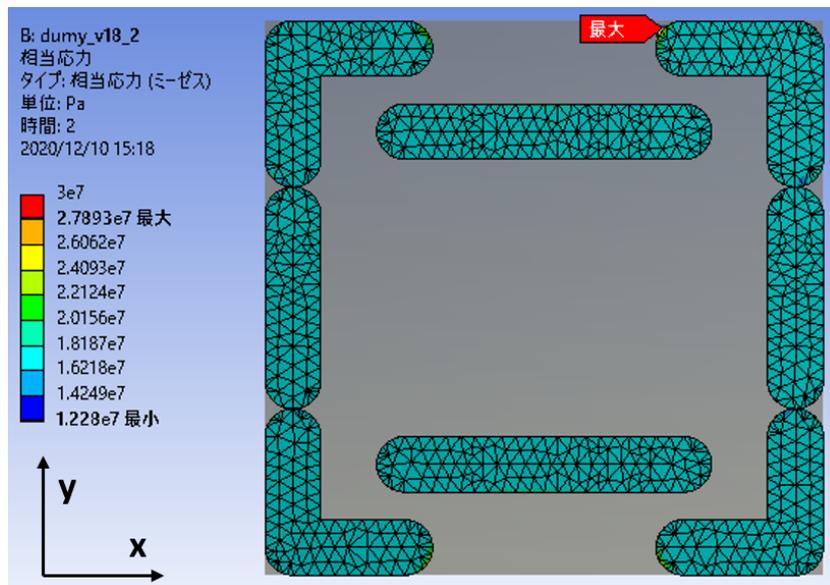


図 6.17 図 6.16 のパターンから x 方向の線を伸ばしたパターンでの $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ における応力分布。お威力の最大値は 27.9MPa である。

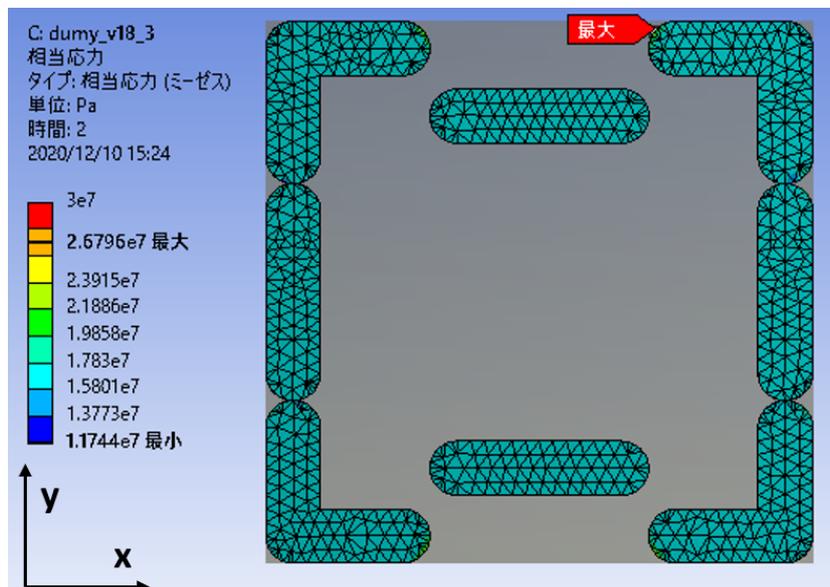


図 6.18 図 6.16 のパターンの x 方向の線を L に近づけたパターンでの $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ における応力分布。応力の最大値は 26.8MPa である。

6.2.4 中央のパターン

フチのパターンについては角を L 覆い、その内側で足りない部分に接着剤を配置することで応力を低減させる事ができることが分かった。6.2.2 章でフチをドットで覆った場合では内側の接着剤の配置によって応力の最大値に影響がないことが分かっているが、角を L 字に覆った場合での内側の接着剤の配置による影響をシミュレーションした。

−55℃での応力分布について、図 6.19 に L 字に覆い中央の部分に x 方向の線で埋めたパターンを、図 6.20 に中央を y 方向の線で埋めたパターンを、図 6.21 に中央を 4 × 4 個のドットで埋めたパターンをそれぞれ示す。応力の最大値は図 6.19 では 27.9 MPa, 図 6.20 では 28.6 MPa, 図 6.21 では 28.9 MPa となっている。

図 6.19 のパターンでは xz の断面で見た時に隙間が存在しないため応力の最大値が他の 2 つのパターンと比べて抑えられており、図 6.20 や図 6.21 のパターンは xz の断面で見た時に隙間が存在するため、その影響で図 6.19 のパターンと比べて大きな応力がかかっている箇所があると考えられる。

図 6.19 のパターンは図 6.17 のパターンの内側に 2 本 x 方向に線を足したパターンで、応力の最大値に変化がないため、応力の最大値についてはフチの覆い方に依存し内側の覆い方でほとんど変わらないことが改めて分かる。

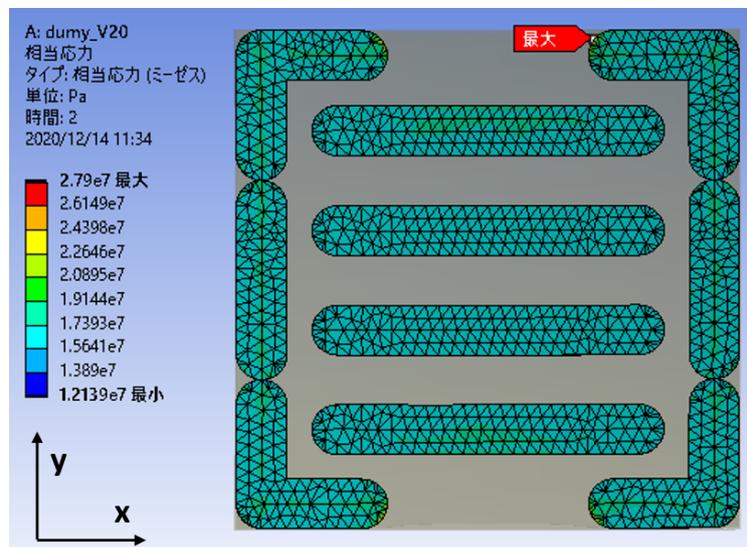


図 6.19 −55℃での L 字に覆い内側を x 方向の線で埋めたパターンの応力分布。応力の最大値は 27.9MPa である。

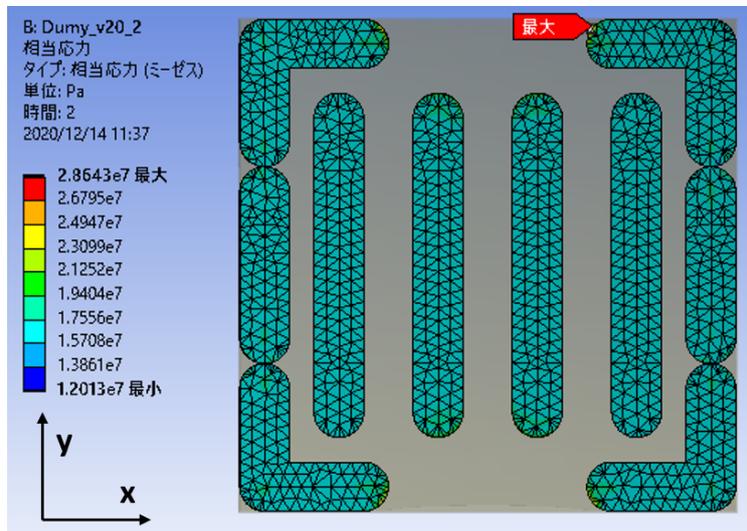


図 6.20 -55°C での L 字に覆い内側を y 方向の線で埋めたパターンへの応力分布。応力の最大値は 28.6MPa である。

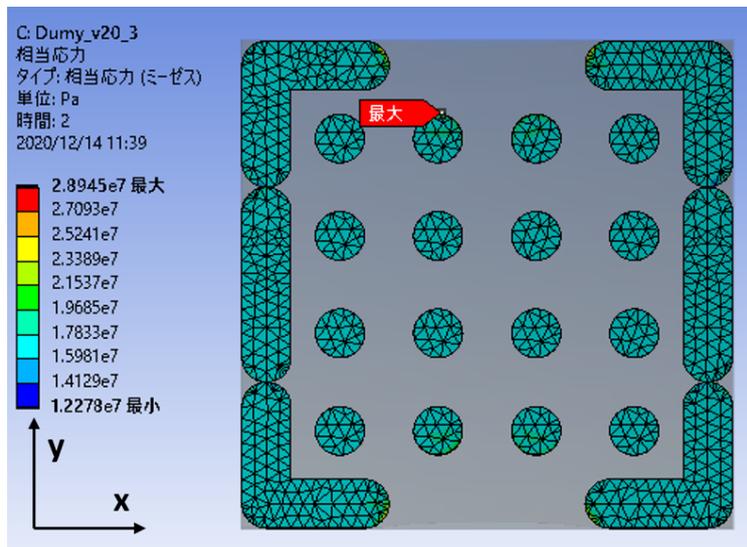


図 6.21 -55°C での L 字に覆い内側を 4×4 個のドットで埋めたパターンへの応力分布。応力の最大値は 28.9MPa である

6.3 熱応力軽減パターンのまとめ

図 6.22 に 6.2 章の結果である、簡素モデルにおいて接着剤の幅を 4mm として塗布した場合、 -55°C におけるそれぞれのパターンでの応力の最大値をまとめる。角を L 字に覆うことで応力の最大値を大きく下げることができ、さらにその内側に接着剤を配置することで、簡素モデルではグルー層の応力の最大値を 26.8 ~ 28.9 MPa に抑えることができる。内側を抑える際にはドットを使うと塗布する 1 つあたりの接着剤の面積が小さく、少し応力が高くなるため、ドットを繋げて 1 つの接着剤の面積を大きくすると応力を小さくできる。

パターン			
図番号	6.12	6.13	6.14
応力の最大値 [MPa]	81.3	72.1	37.9

パターン				
図番号	6.15	6.16	6.17	6.18
応力の最大値 [MPa]	28.9	28.0	27.9	26.8

パターン			
図番号	6.19	6.20	6.21
応力の最大値 [MPa]	27.9	28.6	28.9

図 6.22 各パターンでの -55°C における応力の最大値まとめ

図 6.23 に最も応力が低い図 6.18 のパターンを RD53A モジュールに使用した場合の -55°C の応力分布を示す。応力の最大値は、45.2 MPa と簡素モデルを用いていたときより大きくなっているがこれは FPC 層の構造の違いによる影響が大きい。RD53A モジュールでの Full covered の応力の最大値が 36.4MPa であるから図 6.18 のパターンでは 124%(24%の上昇)に抑えられ、図 6.1 の現在使用しているグルーパターンから応力の最大値を約 13% 軽減することができる。

これまでの結果から熱応力を軽減できるグルーパターンの指針をまとめる。熱応力を軽減するためには図 6.24 において

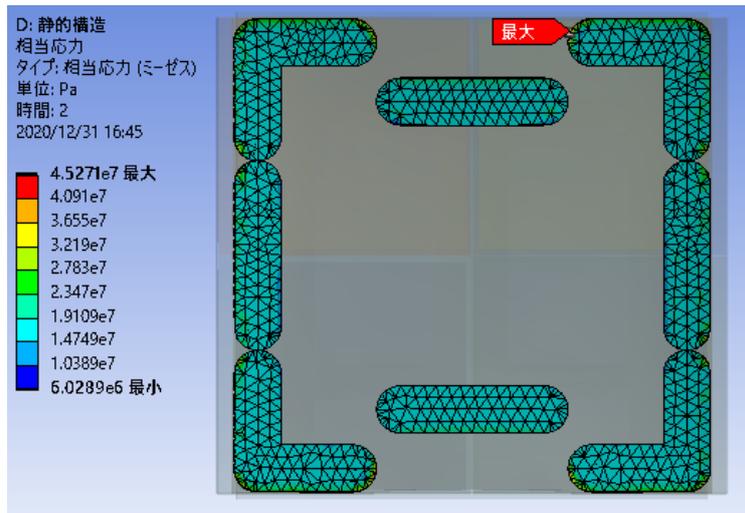


図 6.23 -55°C での図 6.18 のパターンを RD53A モデルに使用したときの応力分布。応力の最大値は 45.2MPa である。

1. 黒い線のように角を L 字に覆うことで大きく応力を下げることができる。
2. 赤い点線で囲まれた領域に接着剤を配置することでさらに応力の最大値の低下を見込むことができる。
3. 赤い点線で囲まれた領域に配置する際には、L 字の短い部分との距離を近づけることでさらに応力の最大値を減らすことができる。
4. 青い点線で囲まれた中央部分については、どのようなグルーの配置をしても応力の最大値に大きな変化は無い。

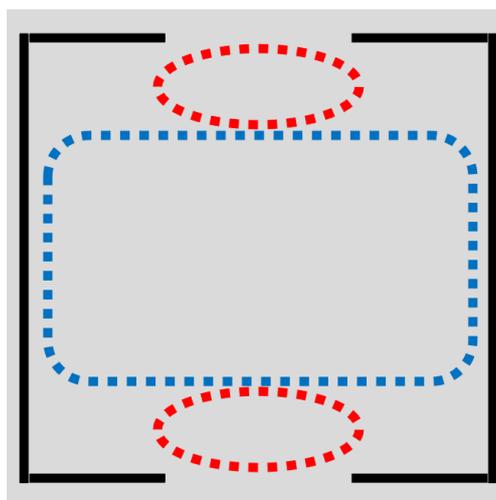


図 6.24 熱応力を軽減するグルーパターンのポイント

上記の点を熱応力から見たグルーパターンの制作方針とし、実際のパターンの変更が成されるときは FPC のデザインからの要請を加味してグルーパターンの変更が行われる。

第 7 章

結論

ATLAS 実験はスイスにフランスとの国境に跨って設置されている CERN が運営する LHC 用いた陽子・陽子衝突型の加速器実験である。世界最高の衝突エネルギーで標準模型の精密測定や標準模型を超える物理の探索が行われている。

2027 年に LHC は HL-LHC にアップグレードが予定されており、積分ミノシティを 10 倍取得し更なる新物理の探索を目指す。HL-LHC 計画に伴い検出器に放射線耐性の向上や高い位置分解能、高速読み出し速度などが要求されるため ATLAS 検出器でもアップグレードが予定されている。ATLAS 検出器のアップグレードの一環として Inner Detector をすべてシリコン検出器を用いた ITk に総取り換えする。ITk でシリコンピクセル検出器とシリコンストリップ検出器が使用される予定で現在両検出器の開発が進められている。本研究ではシリコンピクセル検出器において、熱サイクルによるバンプや接着剤が剥がれてしまうことが懸念されておりそれに対する研究を行った。

本研究ではまずバンプオープンの原因とされている CTE の不一致による変形について、金属ひずみゲージによる測定と静的構造解析シミュレーションから FPC に用いる部材の CTE の違いについて評価を行った。その結果 CTE が低い部材を FPC に使用することでひずみを抑えることができることが分かった。

次にシミュレーションを用いて検出器モジュールのバンプ層の熱応力について研究を行った。旧型の FEI4 モジュールと比べ、新型の RD53A モジュールではバンプ層に加わる応力が小さくなるため、バンプオープンが起りづらいことが期待できる。また検出器モジュールには新たな構造物としてメカニカルプロテクションの取り付けが検討されており、メカニカルプロテクションが熱サイクル時にバンプ層に与える影響をシミュレーションした。モジュールにメカニカルプロテクションを取り付けた場合、 -55°C での応力の最大値が取り付けしていない時の 82% に抑えられることがシミュレーションから分かった。これによりメカニカルプロテクションは熱サイクルの観点からも効果があると考えられる。

グルー層に加わる熱応力についてシミュレーションを用いた研究を行った。まず現在使用が検討されている開発段階のグルーパターン (New Glue Pattern) に対し熱応力シミュレーションを行った結果、現在のグルーパターンから応力の最大値を 10% 削減できることを確認した。また簡略化

されたモデルを作成しグルー層の熱応力についてシミュレーションを行い、グルーパターンを作成する際に熱応力を軽減するための指針を作成した。角をL字に覆い、図 6.24 の赤点線で囲まれた領域に接着剤を配置することで応力を軽減することができる。このシミュレーション結果をもとに、最終的なグルーパターンが作成され、実機で試験が行われる予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたって多くの方々のご指導ご支援頂きましたこと感謝いたします。まず角野秀一教授には本研究に携わる機会を与えて頂き、ご指導頂きましたこと感謝申し上げます。汲田哲郎助教には同じ ATLAS グループとして本研究に関して様々のご支援、ご協力頂きましたこと感謝申し上げます。私が東京都立大学高エネルギー物理実験研究室で ATLAS グループ初めての学生でありながら研究活動を続けてこれたのは汲田助教のおかげです。ありがとうございました。住吉孝行先生にはミーティングで沢山のご指摘を頂き自身の研究の理解を深めることができました。同期の在原君、鶴藤君とは共に切磋琢磨し、違う研究グループでありながら互いの研究について議論することで様々な知見を得ることができ研究生生活がとても充実したものになりました。東京都立大学高エネルギー物理実験研究室の皆さんに感謝申し上げます。

ATLAS グループの皆さんには他研究機関所属である私の研究活動に様々のご支援を頂きました事感謝いたします。KEK の外川学准教授にはミーティングや KEK での実験でお世話になりました。九州大学の小林大特任助教には本研究を進めるにあたって多大なるご支援頂きましたことを感謝いたします。東京工業大学の陣内修教授、生出秀行助教をはじめとする陣内研究室の皆さまには実験施設を貸して頂き感謝しています。ATLAS グループの皆さんのおかげでより充実した研究生生活を行うことができました。ありがとうございます。

最後に、2年間の研究生生活を様々な面で支えて頂いた家族に感謝申し上げ、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] G. Aad and ATLAS Collaborators. Measurements of higgs boson production and couplings in diboson final states with the atlas detector at the lhc. *Physics Letters B*, Vol. 726, No. 1, pp. 88 – 119, 2013.
- [2] LHC Design Report Vol.1: The LHC Main Ring. 6 2004.
- [3] Markus Keil. Operational Experience with the ATLAS Pixel Detector at the LHC. *Phys. Procedia*, Vol. 37, pp. 907–914, 2012.
- [4] High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report V. 0.1. Vol. 4/2017, , 11 2017.
- [5] Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Strip Detector. Technical Report CERN-LHCC-2017-005. ATLAS-TDR-025, CERN, Geneva, Apr 2017.
- [6] Mauricio Garcia-Sciveres. RD53A Integrated Circuit Specifications. Technical Report CERN-RD53-PUB-15-001, CERN, Geneva, Dec 2015.
- [7] S. Altenheiner, C. Gossling, J. Jentsch, R. Klingenberg, T. Lapsien, D. Muenstermann, A. Rummler, G. Troska, and T. Wittig. Planar slim-edge pixel sensors for the ATLAS upgrades. *JINST*, Vol. 7, p. C02051, 2012.
- [8] 莊司大志. Lhc の高輝度化計画に向けた atlas 実験用シリコンピクセル検出器のワイヤー保護用 cfrp 構造体を用いた試作機制作と性能評価. 日本物理学会 2020 年秋季大会 講演.
- [9] 彌吉拓哉. ATLAS 実験用新型シリコンピクセル検出器の組み立て工程と熱耐久性の研究. Master's thesis, 九州大学大学院 理学府 物理学専攻, 2020.
- [10] 藤野主一. ATLAS 実験に用いる新型シリコンピクセル検出器の組み立てと品質保証の研究. Master's thesis, 九州大学大学院 理学府 物理学専攻, 2019.
- [11] <https://www.ansys.com/ja-jp>.
- [12] 日本非破壊検査協会（編）. ひずみ測定 I. 日本非破壊検査協会, 2007.