

BelleII 実験における
Silicon Vertex Detector(SVD) 製作に関する研究

新潟大学 自然科学研究科
数理物質科学専攻 博士前期過程
高エネルギー物理学研究室
F13A013A 清野 義敬

平成 27 年 1 月 23 日

目次

第 1 章	序論	4
第 2 章	BelleII 実験	5
2.1	物理的動機	6
2.1.1	新物理による CP 非対称度への寄与	7
2.1.2	エキゾチックハドロン	9
2.2	SuperKEKB 加速器	11
2.3	BelleII 検出器	14
2.3.1	崩壊点検出器 (VXD:Vertex Detector)	16
2.3.2	中央ドリフトチェンバー (CDC:Central Drift Chamber)	16
2.3.3	Time Of Propagation (TOP)	21
2.3.4	ARICH	25
2.3.5	電磁カロリメーター (ECL)	28
2.3.6	K_L and Muon Detector(KLM)	29
第 3 章	崩壊点検出器 (VXD)	32
3.1	VXD の役割と基本的な測定原理	32
3.2	Belle 実験 (アップグレード前) における VXD	33
3.2.1	SVD1	33
3.2.2	SVD2	34
3.3	BelleII 実験で求められる VXD への要求	36
3.3.1	高ルミノシティへの対応	36
3.3.2	崩壊点の測定精度向上	36
3.3.3	K_s の再構成効率向上	37
3.4	BelleII 実験における VXD	38
3.4.1	BelleIISVD	38
3.4.2	PXD	48
3.4.3	BelleIISVD と PXD の連携によるの崩壊点検出性能	51
第 4 章	BelleIISVD のラダー組み立て	53
4.1	各層のラダーについて	53
4.2	Ladder6(L6) の構造と主なパーツ	55
4.3	治具を使用した組み立て	60

4.4	製作工程の概要	61
4.5	作業環境と使用機器	62
4.6	ラダーの組み立て手順	64
4.6.1	ミドルモジュールの製作	64
4.6.2	ミドルモジュールと SFW、SBW の MQA	65
4.6.3	オリガミモジュールの製作	68
4.6.4	RSA の製作	74
4.6.5	RSA と SFW、SBW の接着	74
4.6.6	RSA とオリガミモジュールの接着	76
4.7	Mechanical QA/QC	79
4.7.1	3次元測定器 (CMM)	80
4.7.2	MQC(Mechanical Quality Control)	81
4.7.3	MQA(Mechanical Quality Assurance)	83
4.8	EQA(Electric Quality Assurance)	85
4.9	ラダー組み立て工程についてのまとめ	87
第5章	接着とワイヤーボンディング	88
5.1	接着とワイヤーボンディングの製作要求	88
5.2	接着の作業工程	91
5.2.1	接着の共通工程	92
5.2.2	直交ロボット (SONY CAST PRO II) による精密塗布	94
5.2.3	試験塗布	97
5.2.4	水平多関節ロボット (JSR-4403N) による精密塗布	106
5.2.5	手塗り箇所	109
5.3	ワイヤーボンディング	111
5.3.1	PA1,2↔DSSD(p-side)	115
5.3.2	APV25↔PA0	116
5.3.3	PA0↔DSSD(n-side)	117
5.3.4	PA1,2↔APV25 (Wrapping)	118
5.4	接着工程とワイヤーボンディング工程のまとめ	119
第6章	量産にむけた試作ラダーの評価	120
6.1	試作ラダーの評価	120
6.2	接着とボンディングの評価	124
6.3	DSSD 位置精度の評価	126
第7章	本研究のまとめと今後の予定	128

概要

本論文では BelleII 実験で使用するストリップ型崩壊点検出器である Silicon Vertex Detector(SVD) の最外層ラダー (L6) の製作に関する研究について述べる。

1999~2010 年に日本の茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で電子・陽電子非対称衝突型加速器実験である Belle 実験が行われた。Belle 実験では世界最高ルミノシティとなる $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成し、約 10 年の稼働期間で $1000 [\text{fb}^{-1}]$ を超える世界最大のデータを収集した。そしてこの高統計量のデータを用いて、多くの実験成果を上げてきた。特に B 中間子と \bar{B} 中間子の精密な寿命測定による CP 対称性の破れの証明 [1] は 2008 年にノーベル物理学賞を受賞した小林・益川理論 [2] の実験的根拠にもなった。またその高統計量のおかげで新粒子の発見も相次ぎ、中でも新種のハドロン共鳴状態 (エキゾチックハドロン) と思われる粒子群の発見は新たな学術領域を開拓しつつある。しかしその一方で素粒子標準理論 (Standard Model) を超えた新物理 (New Physics) についての決定的な発見はなく、手がかりと見られる測定結果もいくつかあったが Belle 実験の統計量をもってしても統計誤差が大きく判断は難しかった。そのため新物理の測定を可能とする圧倒的統計量のデータを収集するために Belle 実験の後継実験である BelleII 実験が提案された。

BelleII 実験では加速器の高性能化とそれに対応した測定器の改良及び高度化で Belle 実験の約 40 倍となる $80 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のルミノシティを実現し、最終的には約 10 年の稼働期間において Belle 実験の約 50 倍となるデータを蓄積する計画である。BelleII 実験の稼働開始は 2017 年を予定しており、現在 (2015 年 1 月) は加速器と各種測定器のアップグレード中である。

その中で SVD は BelleII 検出器において崩壊点検出を担う装置であり、本論文では日本を中心としたグループ (製作拠点: 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)) が担当している最外層のラダー (L6) の量産 (予備を含め 19 本) に向けた研究について述べる。

量産したラダーの品質は BelleII 実験における解析の精度を大きく左右する。実験で要求される品質のラダーを安定的に量産するためには高いワイヤーボンディングの Yield とセンサーの位置精度を保つ必要がある。そのため本研究では量産時において実現可能性が十分に担保された再現性の高い組み立て工程を研究し、確立した手法によって試作ラダーを製作した。そしてその試作ラダーにおいて要求される品質が達成できることを確認した。

第1章 序論

BelleII 実験で使用する SVD ラダーの量産を開始するためには事前準備として毎回確実に要求された品質のラダーを組み立てることができる製作手順を確立する必要がある。

まず重要なことは考案したラダーの組み立て工程が量産時において実際に運用できるかの確認である。具体的にはラダーの製作で使用する治具や部品に不具合がないか、また作業員や治具、使用機材の動線に無理が生じていないかということなどである。また作業中においてラダーを破損せずに製作できるかも重要な確認要素となる。

そしてもう一つ重要なのは要求された品質のラダーを良い再現で製作することができる組み立て工程となっているかの確認である。まず第一に要求された品質を達成できる手法の確立が大事であるが量産するにあたってはそれがあまりに個人個人の技量やその時の環境に依存する工程では安全に安定した品質のラダーが生産できない。よってできるだけ誰が作業していても品質を満たしたラダーを製作できる手法の開発が必要となる。

本論文においては実験で要求される品質を満たすことができ、なおかつ再現可能な組み立て工程を考察した。そして量産時を想定してほぼ本番と同じ部品を使用した初の試作ラダーを製作、評価した。それによって上記で述べたような組み立て工程における問題点を洗い出し、特に重要な製作要求となっているワイヤーボンディングの Yield とセンサー位置精度についての品質を確認した。

本論文の構成としてはまず第2章で BelleII 実験について紹介する。そして第3章において BelleI 実験における SVD を含んだ崩壊点検出器の役割や特徴、性能を述べる。第4章、第5章において研究で確立し、実際の試作ラダー製作に使用した組み立て工程を説明する。第6章が製作した試作ラダーの評価結果であり、第7章で本研究のまとめと今後の予定について述べる。

第2章 BelleII実験

BelleII 実験はアップグレード前の Belle 実験と同様に日本の茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われる電子・陽電子非対称衝突型加速器実験であり、世界 23 の国と地域、94 の研究機関・大学 (2013 年 9 月時点) による国際共同実験である。Belle 実験で使用した KEKB 加速器を SuperKEKB 加速器へとアップグレードしてルミノシティを約 40 倍に向上させると共に Belle 検出器を高度化した BelleII 検出器によって以前よりも精度の高い測定が可能となる。BelleII 実験の稼働開始は 2017 年を予定しており約 10 年間の稼働期間で Belle 実験の約 50 倍となるデータの蓄積を目指す。図 2.1 に BelleII 実験で予定しているルミノシティ (Peak luminosity) と蓄積データ量 (Integrated luminosity) の推移スケジュールを示す。

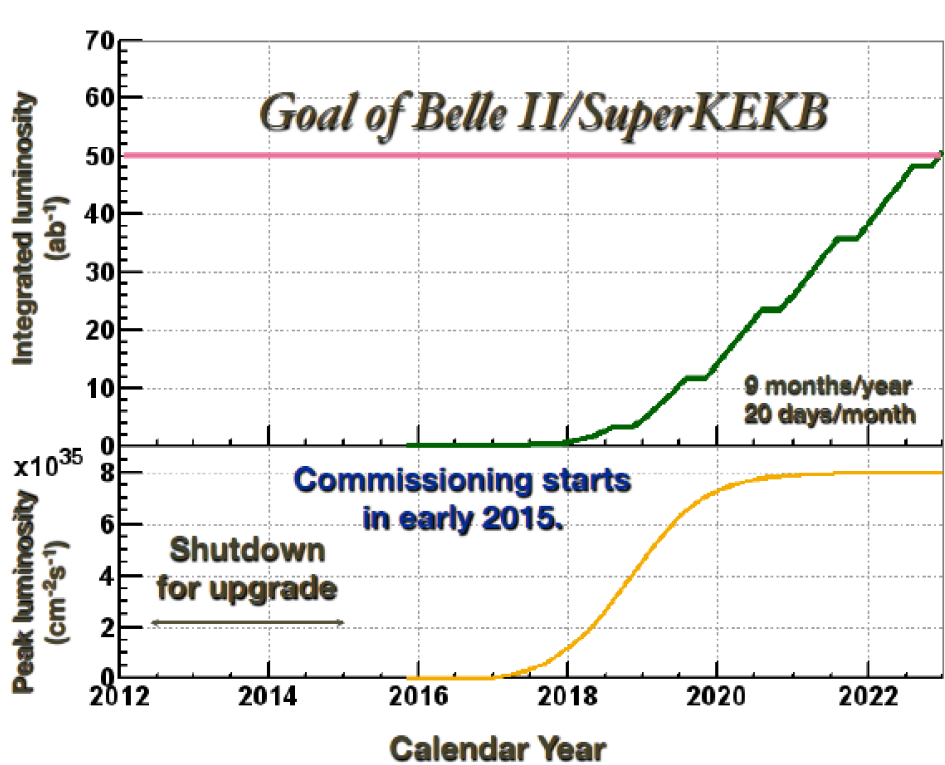


図 2.1: BelleII 実験で予定しているルミノシティと蓄積データ量の推移 [3]

2.1 物理的動機

BelleII 実験に期待される一番の成果は現在の素粒子物理学が到達している標準理論の枠組みを超えた新物理を発見することである。標準理論を用いればこれまでに素粒子実験で観測されたほとんどの実験結果を説明できるがまだこれが完全な理論であるとは考えられていない。標準理論ではニュートリノ振動や宇宙観測実験からのダークマター (暗黒物質) の存在示唆を説明できず、相互作用の統一もまだできていない。さらにはなぜ素粒子に階層性があるのか、重力はどう扱うのか、などまだ多くの謎が残されている状態である。現在ではこれらの謎を解決することができる理論として超対称性理論をはじめとする様々な提案がなされており、実験での検証が急がれている。

そして実験における新物理の探索方法にはエネルギーフロンティアとルミノシティフロンティアという2つの異なったアプローチがある。エネルギーフロンティアは新物理に対応した未知の素粒子 (超対称性粒子や荷電ヒッグスなどを想定) を高エネルギービーム (エネルギーフロンティアの代表格であるスイスの LHC 実験では TeV スケール) の衝突によって直接生成し、探索する方法である。もう一つのルミノシティフロンティアは未知の素粒子が媒介することによる標準理論からのズレを観測し、間接的に新物理を探索する方法である。

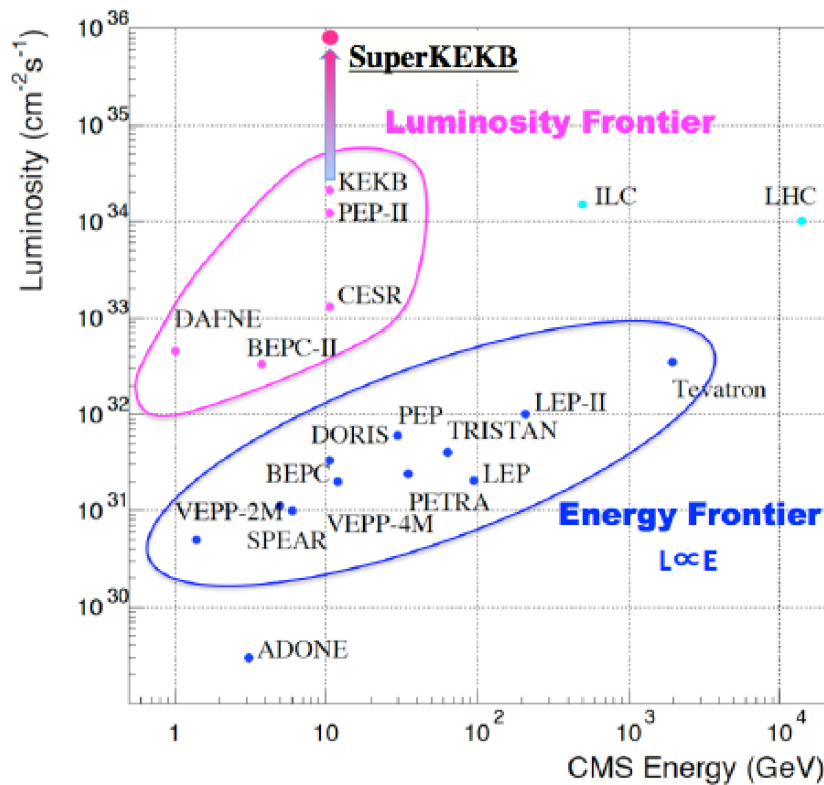


図 2.2: 主な加速器実験のルミノシティとエネルギー [9]

図 2.2 で主な加速器実験のルミノシティと重心エネルギーのプロット図を示す。BelleII 実験ではルミノシティフロンティアを採用しており、標準理論からの極めて微小な観測値のズレも検出できる精度の高い測定を目指している。BelleII 実験において新物理に感度が高いと思われる測定は複数あり、その他にも圧倒的統計量のデータを使用することで大きな実験成果が期待できる測定がいくつも考えられている。以下ではその代表的な測定について言及するがより詳しい内容については文献 [6][7] を参照してもらいたい。

2.1.1 新物理による CP 非対称度への寄与

BelleII 実験で重要な測定の一つは、Belle 実験と同様に CP 非対称度の測定である。Belle 実験では CP 非対称性 (CP 対称性の破れ) 自体を証明したが BelleII 実験ではその CP 非対称性の度合いをさらに精密に測定し、そこに新物理からの寄与があるかどうかを検証する。

以前、CP 対称性は物理学における普遍的な対称性の一つと考えられていた。しかし 1964 年に K 中間子の崩壊において CP 対称性の破れが発見 [8] されて以来多くの研究者がその起源の解明を模索してきた。そして 1973 年に小林・益川理論 [2] においてクォークの世代間混合の複素位相が CP 非対称性の起源であり、それが成り立つモデルとして 3 世代 6 種類のクォークが存在することを予言した。現在では 6 種類のクォークは全て発見され、このクォークモデルが現在の素粒子標準理論の大きな基礎の一つとなっている。

クォーク間における混合を表す CKM(Cabibbo Kobayashi Maskawa) 行列は以下のようなになる。

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

行列の各成分はクォーク間の遷移における結合係数であり、標準理論から V_{CKM} はユリタリ行列 ($V^\dagger V = 1$) であるので

$$V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud}^* & V_{cd}^* & V_{td}^* \\ V_{us}^* & V_{cs}^* & V_{ts}^* \\ V_{ub}^* & V_{cb}^* & V_{tb}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

と表記できる。そして式 (2.2) の 3 行 \times 1 列に注目すると

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (2.3)$$

が成り立っている。そのため式 (2.3) が複素成分をもつ (CP 非対称性がある) なら図 2.3 のように複素平面上でユリタリティ三角形を描くことができる。

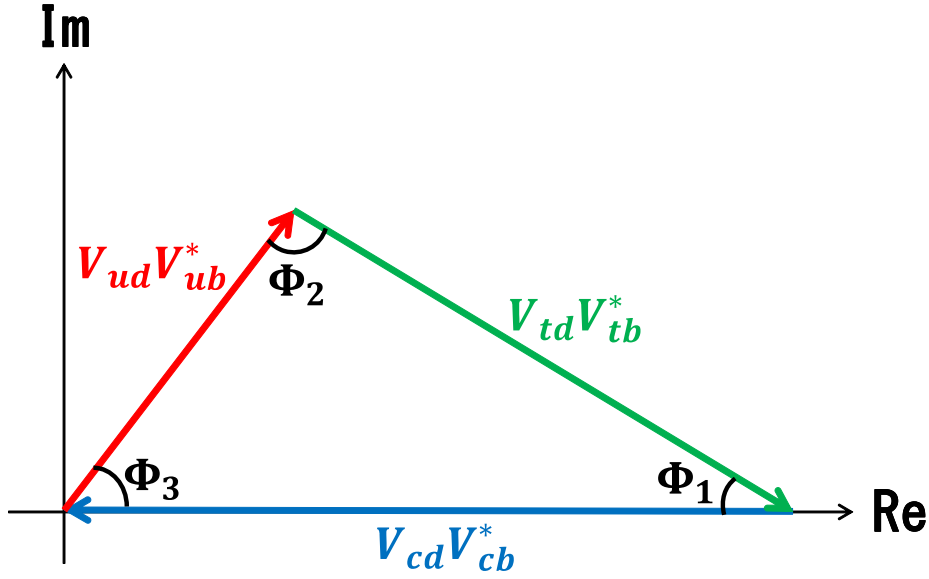


図 2.3: ユニタリティ三角形

現在では Belle 実験をはじめとする多くの実験においてこのユニタリティ三角形の角度が有限値であると測定され、実験的に CP 非対称性が証明されている。また現在の各角度の測定値 [10] は以下のようにになっている。

- $\phi_1 = (21.88^{+0.81}_{-0.71})^\circ$
- $\phi_2 = (91.7^{+2.6}_{-1.6})^\circ$
- $\phi_3 = (66.5^{+1.3}_{-2.5})^\circ$

Belle 実験では $\Upsilon(4S)$ という粒子から崩壊する B 中間子を利用して ϕ_1 を測定する。この $\Upsilon(4S)$ はほぼ 100 % の確率で $B\bar{B}$ のペアに崩壊し、そのうち 50 % が $B^0\bar{B}^0$ のペアに、残り 50 % が B^+B^- のペアになる。生成した $B^0\bar{B}^0$ のペアは $B^0-\bar{B}^0$ 混合により複素位相の影響で時間に依存して崩壊率が変化 (時間依存の CP 対称性の破れ) する。この観測により ϕ_1 が測定できる。

$$A(\Delta t) = \frac{\Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} = S \sin(\Delta m \Delta t) \quad (2.4)$$

$$S = -\eta_{CP} \sin 2\phi_1 \quad (2.5)$$

具体的には式 (2.4) と (2.5) により ϕ_1 が求まる。まず f_{CP} は B^0 と \bar{B}^0 で共通のある終状態を示す。 Δt は f_{CP} に崩壊した B 中間子ともう一方の B 中間子が崩壊した時刻の時間差 (f_{CP} に崩壊しなかった B 中間子が崩壊した時刻を $t = 0$ と定義) となっている。また $\Gamma(\Delta t)$ はそれぞれの経

路における Δt での崩壊率である。 ϕ_1 を含んだ S は CP 非対称度と呼ばれる因子で Δm は中性 B 中間子の質量固有状態における質量差である。そして η_{CP} は f_{CP} の CP 固有値となる。これより $\Upsilon(4S)$ から崩壊した B^0 と \bar{B}^0 の寿命差を精密に観測することで最終的に ϕ_1 の値が測定できることがわかる。

標準理論からの理論計算では $\sin 2\phi_1 = 0.67 \pm 0.02$ となっている。しかし新物理があればそこからの寄与が考えられるモード (理論的不定性が小さく探索に有効な崩壊モードとして $B \rightarrow \phi K_s, \eta' K_s, K_s K_s K_s$ などがある) での測定で理論値からのズレが観測されるはずである。しかし現在の測定結果ではまだ統計誤差が大きいためズレているかの判断ができない。そのため BelleII 実験では Belle 実験の約 50 倍のデータを蓄積することで統計誤差を小さくし、新物理を探索していく。

2.1.2 エキゾチックハドロン

BelleII 実験では新物理を探索する他にエキゾチックハドロンについての研究に大きな進展があることを期待されている。標準理論において素粒子であるクォークは単独では存在することができず、複数のクォークで構成されたハドロンの状態となっている。20 世紀の加速器実験で発見されてきたハドロンはそれぞれ一つのクォークと反クォークで構成されたメソン、3つのクォークで構成されたバリオンの2種類しか発見されてこなかった。量子色力学 (QCD) ではメソンとバリオン以外の配位 (エキゾチックハドロン) も存在することが許されているため、なぜエキゾチックハドロンが強く抑制されるのかが謎であった。しかしやっと 2003 年に Belle 実験において高い統計量を背景として $X(3872)$ というエキゾチックハドロンの可能性が高い新粒子が発見 [11] され、世界的にも大きな注目を集めた。その後も Belle 実験ではデータが蓄積していくにつれて $Y(3940)$ 、 $Y(4260)$ や $Z(4430)$ [12] などのエキゾチックハドロンと考えられる新粒子を次々と発見した。図 2.4 で Belle 実験の稼働期間における蓄積データ量 (Integrated luminosity) の推移とそれとともに発見された新しいハドロン共鳴状態の発見時期を示す。また特に $\psi \pi^+$ へ崩壊する $Z(4430)$ については少なくとも4つのクォークで構成されていることが明確であり、加えて 2014 年に LHC 実験でも同様に $Z(4430)$ と考えられる粒子が発見 [13] された。そのため現在ではエキゾチックハドロンの存在は確定的なものとなっている。

BelleII 実験では Belle 実験よりもさらに統計のデータを蓄積することにより、これまで発見されてきたエキゾチックハドロンについて量子数や崩壊分布などからの粒子の性質をより精密に測定できることに加えて、新たなエキゾチックハドロンの発見も期待できる。

現在でもまだクォークが量子色力学 (QCD) に従いハドロンが形成される際の質量生成やカイラル対称性の自発的破れといったメカニズムはまだ十分に解明されていないが BelleII 実験におけるエキゾチックハドロンに関する研究の進展によってこのメカニズムを解明する有益な情報を得られることが期待される。

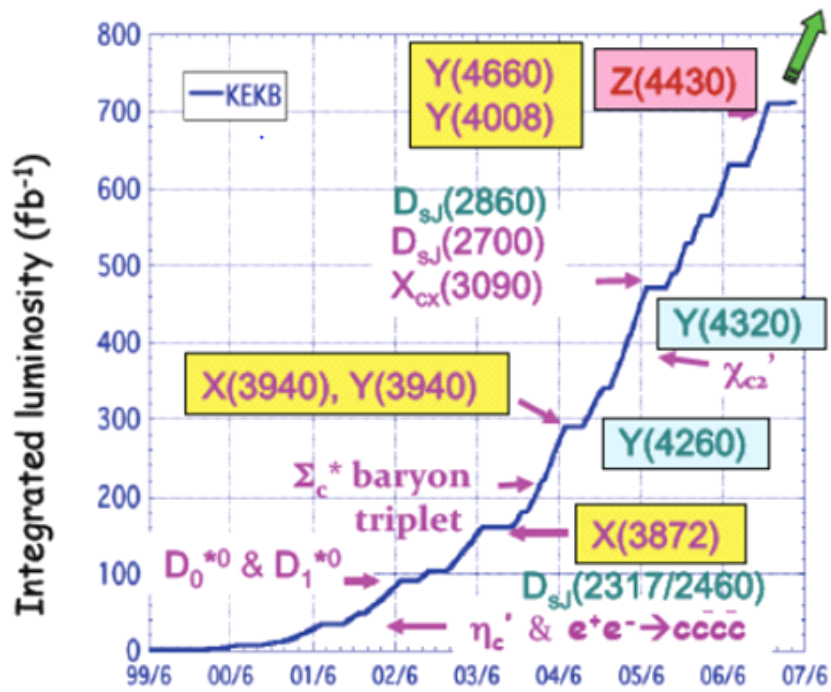


図 2.4: Belle 実験における蓄積データ量の推移と新しいハドロン共鳴状態の発見時期 [7]

2.2 SuperKEKB 加速器

図 2.5 が BelleII 実験で使用される SuperKEKB 加速器の概念図である。SuperKEKB 加速器は長さ約 600m の線形加速器 (Linac) と円周が約 3km となる二つの円形加速器 (蓄積リング) から成り立っている。まず線形加速器で電子が 7.0[GeV]、陽電子が 4.0[GeV] に加速され、その後それぞれが蓄積リングである電子リング (HER : High Energy Ring) と陽電子リング (LER : Low Energy Ring) に投入される。最後にリングの交差した地点にある BelleII 検出器内の衝突点付近 (IR) で加速された電子と陽電子が衝突する。

SuperKEKB 加速器へのアップグレードでは Belle 実験の時に使用した KEKB 加速器の資産 (加速器トンネルなど) をできるだけ再利用したうえでルミノシティ増加に必要な新しい要素 (新型 RF 電子銃やダンピングリングなど) を追加している。

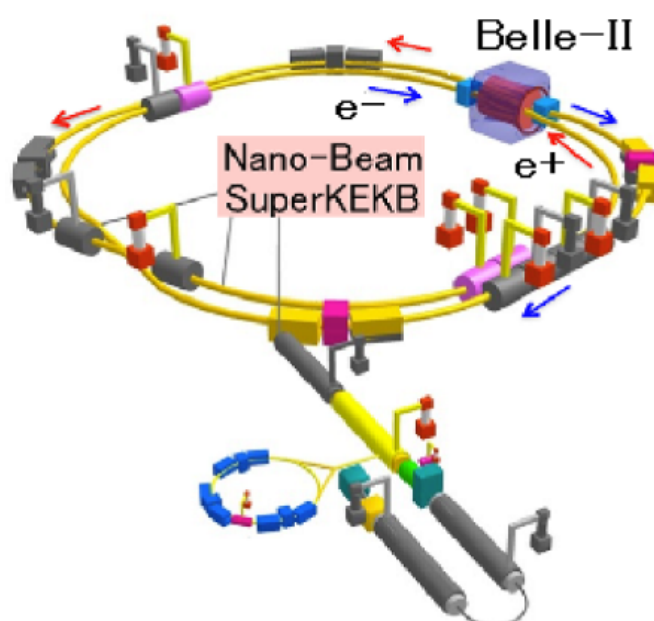


図 2.5: SuperKEKB 加速器の概念図

SuperKEKB 加速器では加速させる電子、陽電子のエネルギーをそれぞれ 7.0[GeV] と 4.0[GeV] と設定している。これにより衝突したときの重心エネルギーが 10.58[GeV] となるため前述した CP 非対称度の測定で利用する $\Upsilon(4S)$ が生成する閾値を満たせる。

時間依存の CP 対称性の破れを観測するためには $\Upsilon(4S)$ から生成する B^0 と \bar{B}^0 の寿命を精密に測定しなければならない。しかし B 中間子の寿命は 1.5[ps] と非常に短く直接測定することは困難である。そこで実際には B 中間子の崩壊点を再構成し、その飛距離を求めることで間接的に寿命を測定する。

しかしここで電子と陽電子の衝突エネルギーを対称に設定してしまうと B 中間子の不変質量は

5.28[GeV/c²]なので、 B 中間子対と $\Upsilon(4S)$ の不変質量の差は20[MeV]しかなく、生成した B 中間子対はほぼ静止した状態になる。この場合、 B 中間子が崩壊するまでの飛距離は約 $30\mu\text{m}$ 程度でしかない。この値では崩壊点の位置を測定して寿命を十分な分解能で計測することは難しい。

そこで衝突させる電子と陽電子のエネルギーを非対称に設定することで生成した B 中間子に運動量を与える。すると相対論的に寿命が延び、飛距離が長くなる(ブーストする)ため十分な分解能で測定できるようになる。

ルミノシティは加速器が単位時間あたりに提供可能な電子・陽電子衝突の頻度を示す値である。ルミノシティ \mathcal{L} は反応断面積 σ をもつ反応の発生頻度 R との間に、 $R=\mathcal{L}\sigma$ 、の関係がある。

Belle実験でのルミノシティは最終的に世界最高の $2.1\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ となった。しかし BelleII 実験ではさらなるデータの蓄積のため、この約40倍となる $80\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の達成を目指す。ここで衝突型加速器におけるルミノシティ \mathcal{L} は下のような式で表すことができる。

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_+\sigma_-} R_L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \left(\frac{I_{\pm}\zeta_{\pm y}}{\beta_y^*}\right) \left(\frac{R_L}{R_y}\right)$$

N_+ 、 N_- がバンチ当たりの e^{\pm} の数、 f は1秒当たりのバンチの交差頻度である。さらに γ_{\pm} はローレンツファクターで e は電子の電荷量、 r_e は古典電子半径ある。次に σ_+ 、 σ_- だがこれは水平・垂直方向のビームサイズ、 σ_y^*/σ_x^* は衝突点での x 方向と y 方向のビームサイズ比、 I_{\pm} はビーム蓄積電流値である。 $\zeta_{\pm y}$ は垂直方向のビーム・ビームパラメータ、 β_y^* は衝突点での垂直 β 関数、 R_L/R_y は交差角や砂時計効果による幾何学的な要因からくる補正係数である。*がついているものは衝突点での数値を表し、 \pm のうち+が陽電子、-が電子での数値を表している。

SuperKEKB 加速器のアップグレードではまず β_y^* を1/20程度にすることによりルミノシティを上げようとしている。このとき考慮しなくてはならないのはビームが交差する領域の幾何学的大きさより β_y^* を小さくしてもルミノシティが向上しないという砂時計効果である。これを解決するために SuperKEKB 加速器ではナノビーム・スキーム [4] という手法を用いる。この手法では図 2.6 のように有限角度衝突させ、ビームの一部のみが交差するように工夫することで交差領域の幾何学的大きさと同程度まで β_y^* を小さくすることができる。このナノビーム・スキームの採用に加えてビーム電流を2倍にすることでルミノシティを約40倍にすることができる。

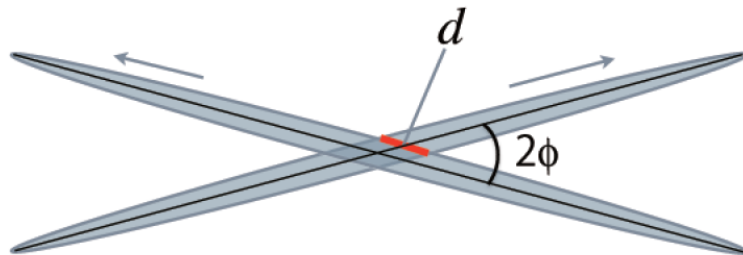


図 2.6: ナノビーム・スキーム [5]

ナノビーム・スキームを採用した場合には蓄積リング中での水平、垂直方向のビームサイズをアップグレード前よりもずっと小さくする必要があるためバンチ内の電子、または陽電子同士の Moller 散乱が顕著になる。これにより散乱された粒子のエネルギーが中心値を大きく離れることによりビーム力学口径から外れ、ビームの寿命が短くなるという事態が生じるようになってしまう。特にビームのエネルギーが低いほどこの問題が顕著になるためこの対策として SuperKEKB では陽電子のエネルギー設定を 3.5→4.0[GeV] に変更している。それに伴い電子のエネルギー設定も 8.0→7.0[GeV] にしてあるので $\Upsilon(4S)$ 生成のため必要な衝突時における重心エネルギーの値は変化していない。ただしこのエネルギー設定の変更で Belle 実験の時よりもブーストが小さくなり ($\beta\gamma = 0.425 \rightarrow 0.283$) B 中間子の飛距離が小さくなる。そのため B 中間子の寿命測定が難しくなるがこの分は BelleII 検出器のアップグレードで対処する。

最後に図 2.7 に KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器での基本的なパラメータの比較表を示す。

	KEKB Achieved	SuperKEKB
Energy (GeV) (LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
ξ_y	0.129/0.090	0.090/0.088
β_y^* (mm)	5.9/5.9	0.27/0.41
I (A)	1.64/1.19	3.60/2.62
Luminosity ($10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	2.11	80

図 2.7: KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器の基本パラメータ [5]

2.3 BelleII 検出器

BelleII 検出器はビーム衝突点に設置され、電子、陽電子ビームの衝突などによって生成、崩壊し、入射してきた各粒子を測定する。測定では荷電粒子の運動量やエネルギーだけでなく、粒子識別も重要なため BelleII 検出器はタイプの異なった複数の検出器から構成されている。複数の検出器から得られる情報を統合することにより BelleII 検出器では e^\pm 、 p^\pm 、 μ^\pm 、 K^\pm 、 π^\pm 、 γ^\pm 、 K_L^0 の粒子を直接検出し、識別することができる。

BelleII 実験ではルミノシティが Belle 実験の頃の約 40 倍になるため、それに検出器が耐えうる対策と検出精度のさらなる向上のため Belle 実験で使用した検出器から大幅なアップグレードが施されている。図 2.8 で BelleII 検出器の概観と主な検出器の役割を示す。BelleII 検出器ではビーム衝突点を原点として、電子ビームの進行方向を z 軸、鉛直方向を y 軸、この 2 方向から右手系になるように x 軸をとっている。また z 軸からの偏角を θ 、z 軸からの距離を r ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$) とする。また図 2.9 にアップグレード前後の検出器配置図を示す。図 2.9 の左半分が BelleII 検出器の断面図であり、右半分が Belle 検出器の断面図となっている。

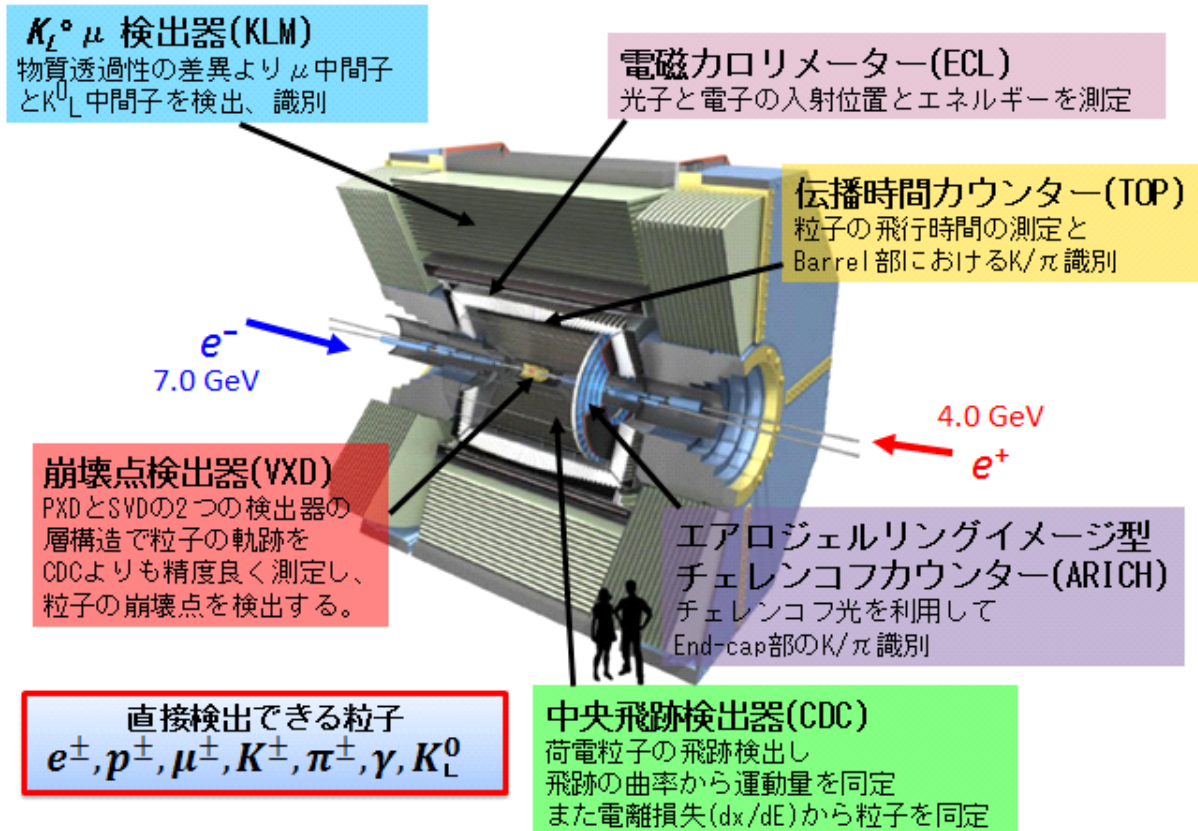
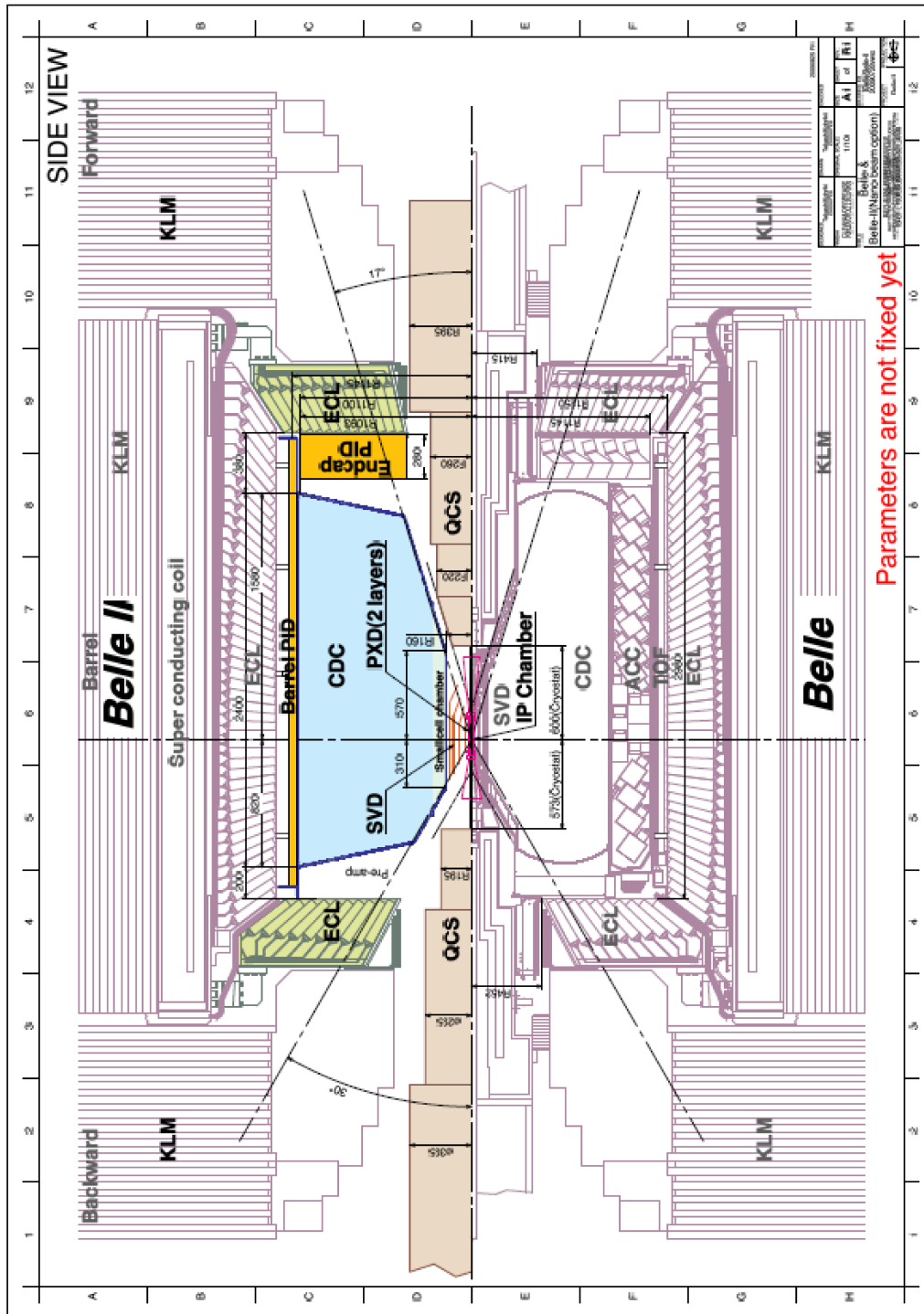


図 2.8: BelleII 検出器の概観と主な検出器の役割



Parameters are not fixed yet

図 2.9: 検出器配置図 (左半分 : BelleII 検出器、右半分 : Belle 検出器)[5]

以下から BelleII 検出器を構成する主な検出器について紹介する。パラメータ等の情報は基本的に BelleII TDR[5] を参照しているが研究状況により多くの変更が考えられるため注意してほしい。本論文の執筆時点 (2015 年 1 月) ですでに変更されているものについてはできる限り反映を行っている。

2.3.1 崩壊点検出器 (VXD:Vertex Detector)

崩壊点検出器 (VXD) は粒子の崩壊点検出や、後述する中央ドリフトチェンバー (CDC) の情報と合わせて荷電粒子の飛跡を検出し、運動量を精度良く測定する役割を担っている。VXD は図 2.10 のように BelleII 検出器の中心部に配置されており、1~2 層目の PXD(Pixel Detector) と 3~6 層目の SVD(Silicon Vertex Detector) の 6 層構造となっている。

VXD は本論文のテーマとなっている部分のため後述する 3 章で詳しく言及する。

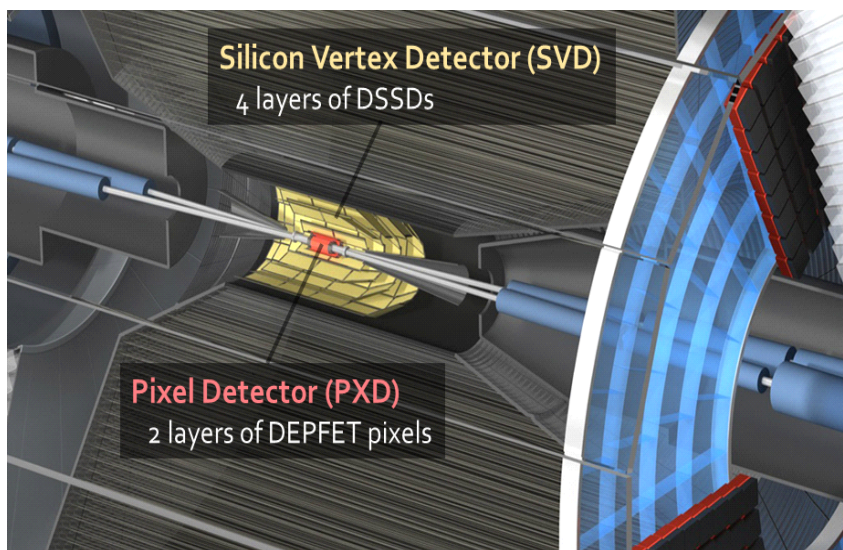


図 2.10: BelleII 検出器の中心部

2.3.2 中央ドリフトチェンバー (CDC:Central Drift Chamber)

中央ドリフトチェンバー (CDC) は荷電粒子の飛跡検出や、電離損失 (dE/dx) の情報を用いた粒子の同定を行う。

磁場中で運動する荷電粒子はローレンツ力を受け、運動量に応じた曲線を描く。よって p を運動量、 B を磁場、 ρ を軌道半径としたとき、 $p [\text{GeV}/c] = 0.3B[\text{T}] \rho[\text{m}]$ の式が成り立つため一定の磁場中 (BelleII 検出器内では $1.5[\text{T}]$) における荷電粒子の飛跡がわかれば運動量を測定することができる。

CDC のシリンダーが配置されるのは VXD の外側であり、内部が 1 気圧で $\text{He}(50\%):\text{C}_2\text{H}_6(50\%)$

%) のガスで満たされ、そこに多数の電極ワイヤーが張られる。電極ワイヤーにはセンスワイヤー (陽極) とフィールドワイヤー (陰極) の 2 種類あり、センスワイヤーは直径 30 μm の金メッキタングステン製のワイヤー、フィールドワイヤーでは直径 126 μm のアルミニウム製のワイヤーが使用されている。

以下で測定原理の説明をする。CDC のシリンダー中を簡略図で示すと図 2.11 のように一本のセンスワイヤーを 8 本のフィールドワイヤーで取り囲む配置 (ドリフトセル) の層が敷き詰められた構造となっている。充満したガス中を荷電粒子が通過することによってガス分子がイオン化される。このとき原子から電子が分離され、その電子が一番近くのセンスワイヤーに移動 (ドリフト) することでこのドリフトセル内を荷電粒子が通過したかが判断できる。さらにこのとき電子のドリフト速度は一定なため図 2.12 のように電子がドリフトしている時間を測ることによって荷電粒子の飛跡からセンスワイヤーまでの距離がわかり、図 2.11 のように荷電粒子の飛跡が円の接線として再構成できる。またワイヤーを張る方向を z 軸に平行なもの (アクシャルワイヤー) と少し斜めにしたもの (ステレオワイヤー) の 2 方向を用意することによって 3 次元での粒子の通過位置が測定できる。

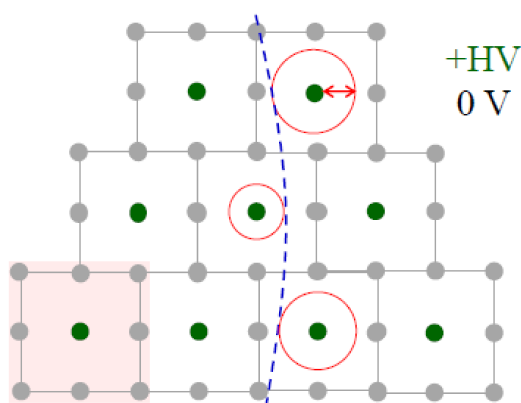


図 2.11: ワイヤー配置の簡略図

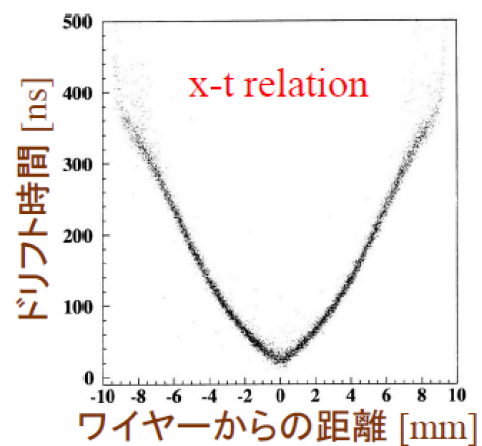


図 2.12: ドリフト時間と距離の関係

さらに、CDC では各粒子の電離損失の差異によって粒子を識別する情報を得ることが可能である。電離損失 (dE/dx) は

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right) \frac{4\pi N_A \rho Z}{m_e c^2 A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{\ln(2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2)}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$

という式で近似される。ここでは通過する物質の密度を ρ 、原子量を A 、原子番号を Z とし、アボガドロ数を N_A 、イオン化ポテンシャルを I 、そして β 、 γ をブーストパラメータとする。 (dE/dx) は β に依存しているのと同じ運動量であっても粒子の質量により β が異なるため (dE/dx) と運動量がわかれば粒子の識別が可能となる。主な粒子での運動量と (dE/dx) の関係を図 2.13 に示す。

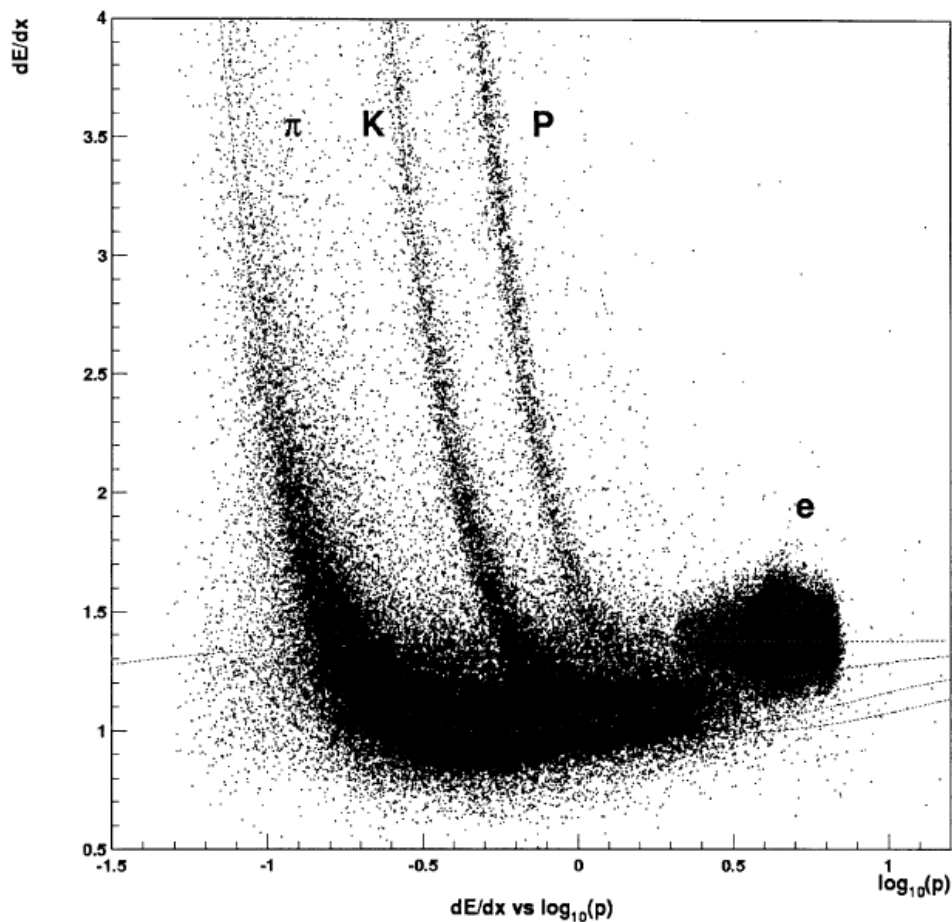


図 2.13: 主な荷電粒子における運動量と電離損失の関係 [14]

BelleII 実験ではルミノシティが以前の約 40 倍になるため、それに伴い物理イベントだけでなくビーム由来のバックグラウンドも増加する。よってこの高ヒットレートに対応するため CDC でも多くの箇所に改良がなされている。

図 2.14 に BelleII 実験のアップグレード前後における CDC の主なパラメータの比較を示す。図 2.14 から CDC のシリンダー内径、外径ともアップグレード後では大きくなっており、CDC 全体が外側に移動したことがわかる。これによりビーム衝突点から距離をとれるため全体的に占有率を下げるができる。

	Belle	Belle II
Radius of inner cylinder (mm)	77	160
Radius of outer cylinder (mm)	880	1130
Radius of innermost sense wire (mm)	88	168
Radius of outermost sense wire (mm)	863	1111.4
Number of layers	50	56
Number of sense wires	8,400	14,336
Gas	He-C ₂ H ₆	He-C ₂ H ₆
Diameter of sense wire (μm)	30	30

図 2.14: アップグレード前後での CDC の主なパラメータ [5]

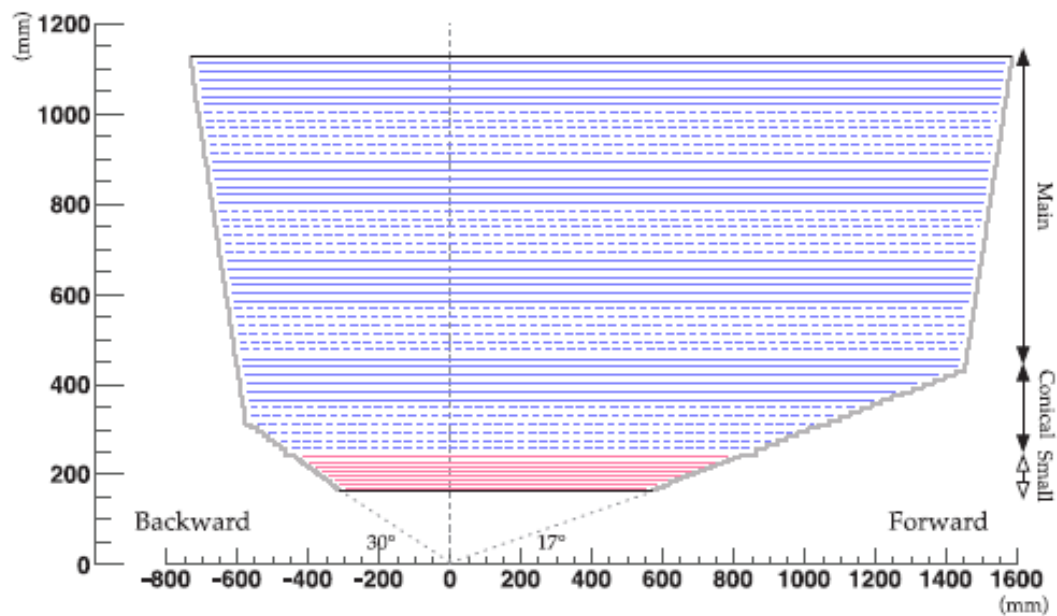


図 2.15: CDC の半断面図。ピンク色の領域がスモールセル [15]

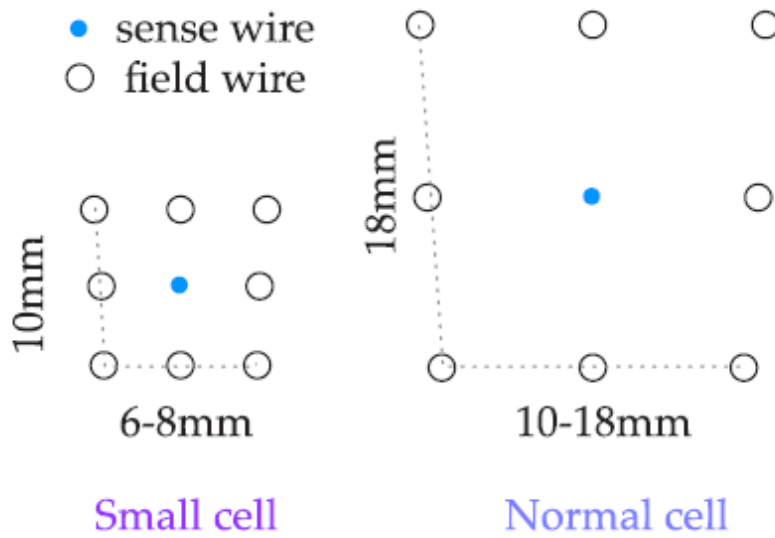


図 2.16: スモールセルとノーマルセル [15]

また CDC 最内層の 8 層ではさらに占有率を下げるためにそれより外側のセル (ノーマルセル) よりも半分程度の大きさのセル (スモールセル) を採用している。図 2.16 でスモールセルとノーマルセルを比較する。図 2.11 の簡略図ではセルを正方形で表現したが実際は図 2.16 のように扇型になっている。

最終的にこれらのアップグレード箇所に加えて読み出しの電子学も高ヒットレートに対応できるものに刷新することによって CDC は BelleII 実験のルミノシティにも耐えられる検出器となっている。

2.3.3 Time Of Propagation (TOP)

TOP は BelleII 検出器のバレル部における粒子識別 (特に K/π) を担っており、図 2.17 で示すような巨大な石英輻射体に新型の光検出器が片側に付いた構造のモジュールになっている。この TOP モジュールが CDC のシリンダー側面を囲うように全部で 16 個インストールされる予定である。

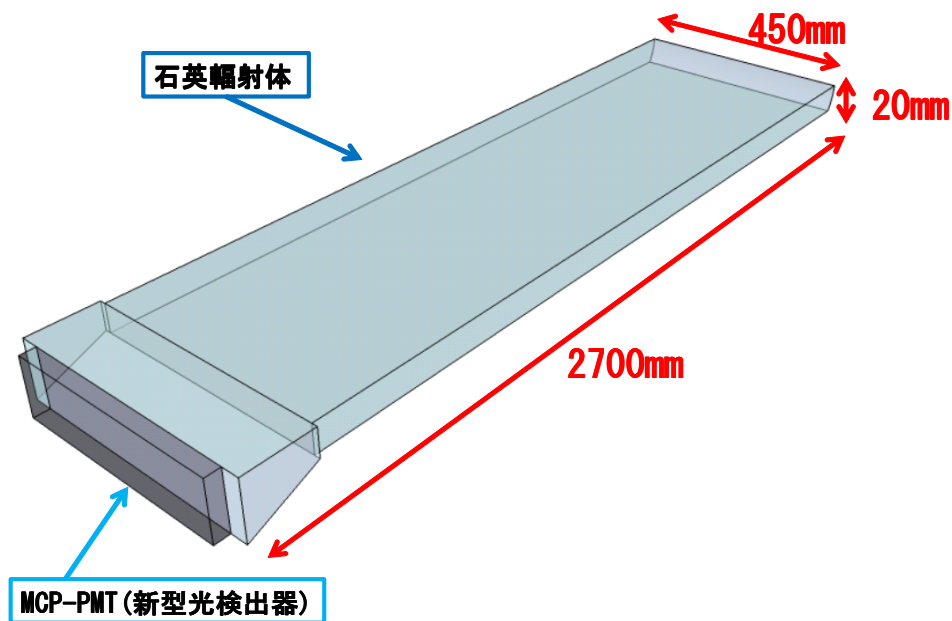


図 2.17: TOP モジュール

粒子のエネルギー E 、運動量 p 、質量 m は

$$E^2 = p^2 + m^2$$

の関係がある。さらに E と p は粒子の速度 v と光速の比である $\beta (=v/c)$ 、ローレンツ因子 $\gamma (=1/\sqrt{1-\beta^2})$ を利用して

$$E = m\gamma \quad p = m\gamma\beta$$

と表示することができるので式を整理すると粒子の質量 m は

$$m = \frac{p\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}$$

となる。よって p と β を測定できれば質量から粒子識別が可能となる。運動量 p の情報は CDC から得ることができる。そして TOP の役割が粒子の速度からくる β の測定となる。

TOPでは粒子の β を測定するのにチェレンコフ光を利用する。チェレンコフ光は荷電粒子の速度が物質中の光速よりも速い場合、つまり質量 m の荷電粒子が屈折率 n の物質を速度 v で通過するとき

$$v > \frac{c}{n}$$

という条件を満たしていると放出される。またこの条件は荷電粒子の運動量 p と β で整理すると

$$n > \frac{1}{\beta} = \sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2} \quad (2.6)$$

とも表記できる。

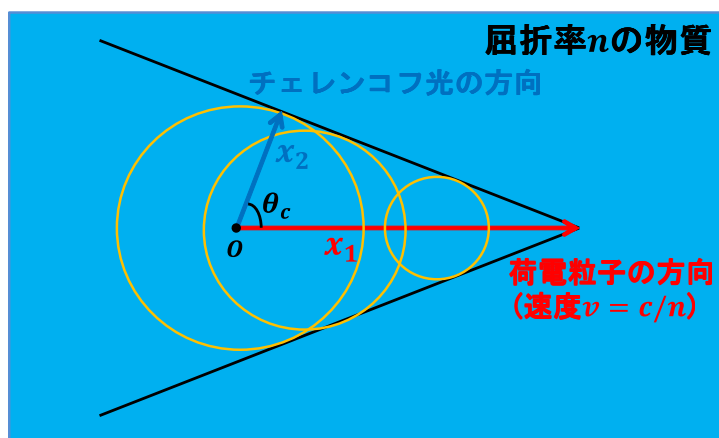


図 2.18: チェレンコフ光の概念図

図 2.18 は屈折率 n の物質中を通過する速度 v の荷電粒子が時刻 0 での位置である原点 O から時間 Δt の間に距離 x_1 進んだ様子を示している。このとき原点 O で放出されたチェレンコフ光は距離 x_2 進むのでチェレンコフ光が放出される角度 (チェレンコフ角) を θ_c とすると

$$\begin{aligned} x_1 &= v\Delta t = \beta c\Delta t \\ x_2 &= \frac{c}{n}\Delta t \end{aligned}$$

となり、これより

$$\cos \theta_c = \frac{x_2}{x_1} = \frac{1}{n\beta}$$

となる。この式からわかるようにチェレンコフ角を測定することで粒子の β を求めることができる。この原理を使用するのがリングイメージ型チェレンコフカウンターである。具体的に TOP の場合には図 2.19 のように石英輻射体内で発生したチェレンコフ光は全反射を繰り返しながら光検出器 (MCP-PMT) に到達する。光検出器によって得られた到達時刻、位置情報によってチェレンコフリングが再構成される。

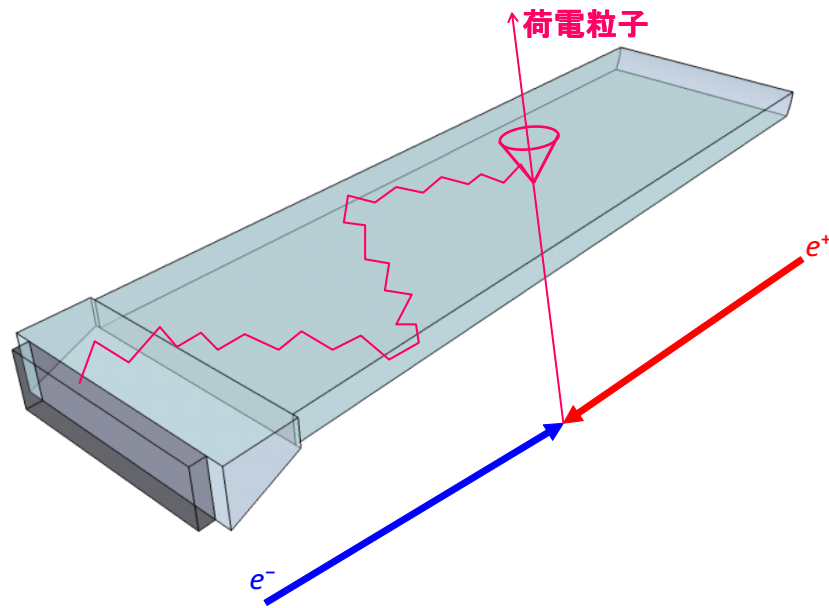


図 2.19: TOP モジュール内におけるチェレンコフ光の伝播

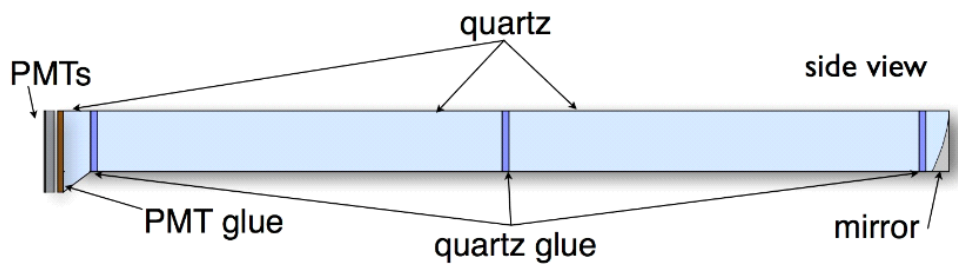


図 2.20: TOP モジュールの側面図 [16]

粒子識別の正確さのために TOP に求められることはリングイメージをなるべく歪めずに、多くのチェレンコフ光子を検出することである。そのため TOP モジュールには高い内部透過率と表面反射率を実現するために表面を $\sim 5\text{\AA}$ (約原子5個分)という超精密に磨き上げた石英ガラスが採用されている。図 2.20 に示すように TOP モジュールは2枚の大きな石英バーにミラー、そして光検出器が取り付けられるプリズム部から構成され、石英の間は UV 硬化型の光学接着剤が使用される。

光検出器には名古屋大学と浜松ホトニクス社で共同開発した MCP(Micro Channel Plate)-PMT が使用される。MCP-PMT は図 2.21 のような外形をしており、16ch で読み出しできる。BelleII

検出器内部で発生させている 1.5[T] の磁場でも使用できるようにマイクロチャンネルと呼ばれる極小の穴 (直径 $10\mu\text{m}$) がある構造 (開口率約 60%) になっている。また要求性能は QE(量子効率) が 24%以上で、Gain(増幅率) が $\sim 2 \times 10^6$ 、TTS(Transit Time Spread) が 40[ps] である。そしてこの MCP-MPT は一つの TOP モジュールに 32 個使用される。プリズム部への MCP-MPT の配置は図 2.22 のように 16×2 列で x 、 y ギャップともに 0.5mm となっている。

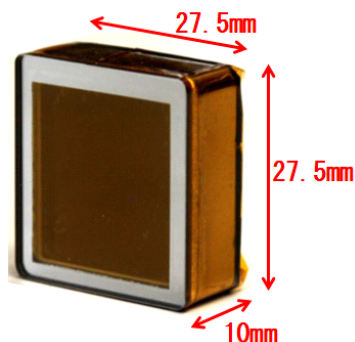


図 2.21: MCP-PMT の外形

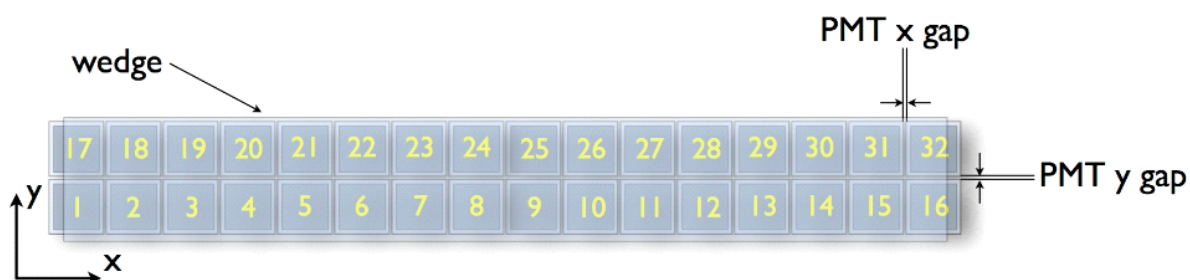


図 2.22: TOP モジュールにおける MCP-PMT の配置図 [16]

2.3.4 ARICH

アップグレード前の Belle 検出器においてエンドキャップ部の粒子識別は空間的制約上 ACC(Aerogel Chrenkov Counter)[14] と呼ばれる閾値型チェレンコフカウンターのみであった。そのため広い運動量領域に対応することができず、 B 中間子の同定 (フレーバータギング) を優先し、低運動量 ($0.5\sim 2.0[\text{GeV}/c]$) の粒子識別に特化していた。アップグレード後の BelleII 検出器では ACC の代わりにリングイメージ型の ARICH(Ring Imaging Cherenkov counter) と呼ばれる検出器をエンドキャップ部に導入し、 $0.5\sim 4.0[\text{GeV}/c]$ の広い運動量領域で 4σ 以上の K/π 識別を実現することになっている。

ARICH はアップグレード前に ACC(エンドキャップ部) が置かれていたスペースに設置され、図 2.23 のようなドーナツ状の形をしている。ARICH は輻射体となるシリカエアロジェルとそこから放出されるチェレンコフ光を捕える新型光検出器 HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) によって構成される。

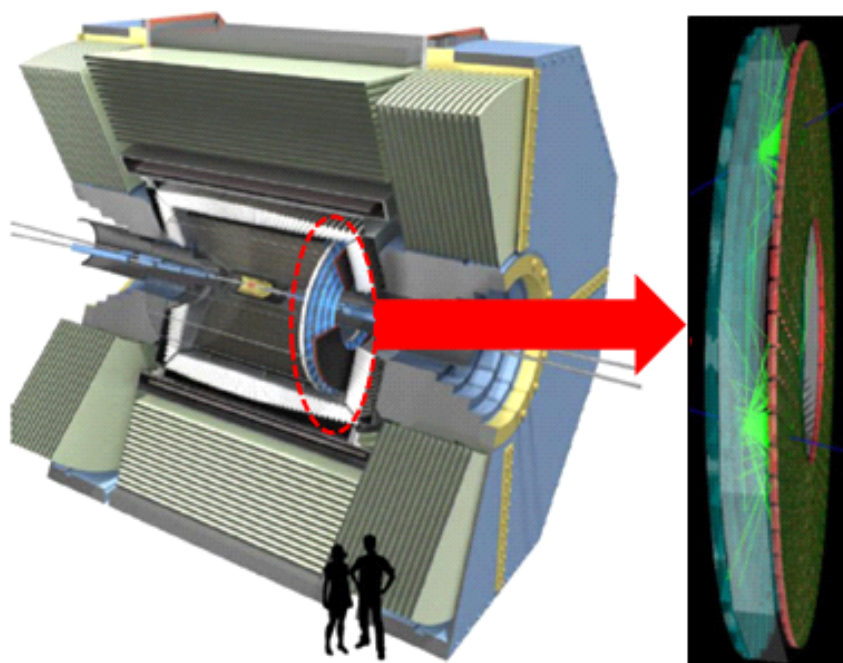


図 2.23: ARICH の全体像

図 2.24 に ARICH の原理図を示す。シリカエアロジェルに荷電粒子が入射することで発生するチェレンコフリングの放射角を精密の測定することで K/π 識別を可能とする。シリカエアロジェルと HAPD は 200mm 離れて設置されており、例として $4.0[\text{GeV}/c]$ の運動量をもった K と π が屈折率 1.05 のシリカエアロジェルに入射した場合だと $23[\text{mrad}]$ の角度差が生じる。

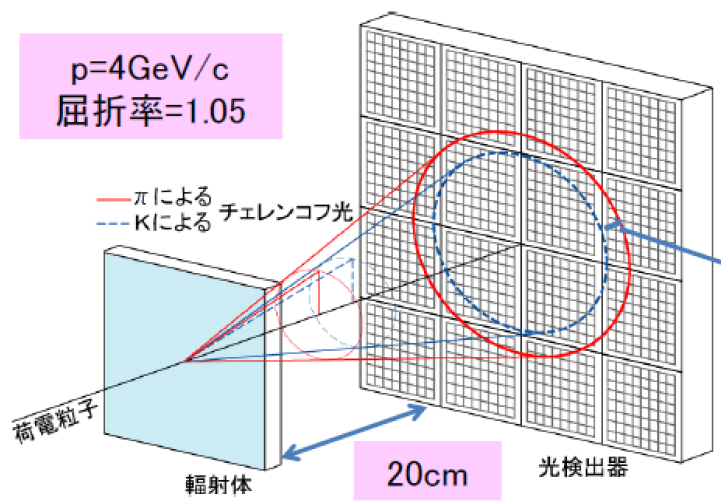


図 2.24: ARICH の原理図

ARICH は ACC があつた小さなスペースに収まるようにコンパクトな設計が可能な近接焦点型のリングイメージ型チェレンコフカウンターとなっている。粒子識別能力の向上のためには検出するチェレンコフ光子数を多くしなければならない。そのためには輻射体の厚みを大きくすれば良いが、一般的な近接焦点型では輻射体の厚みが図 2.25 の左図のように角度分解能が低下する原因となつてしまひ結果として粒子識別能力が低下する。そのため ARICH では屈折率の異なる 2 枚のシリカエアロジェルを使用してフォーカスするマルチレイヤー方式を採用した。マルチレイヤー方式だと図 2.25 の右図のようにシリカエアロジェルの厚さが一般的な近接焦点型と同じでも角度分解能の低下を抑えることができる。

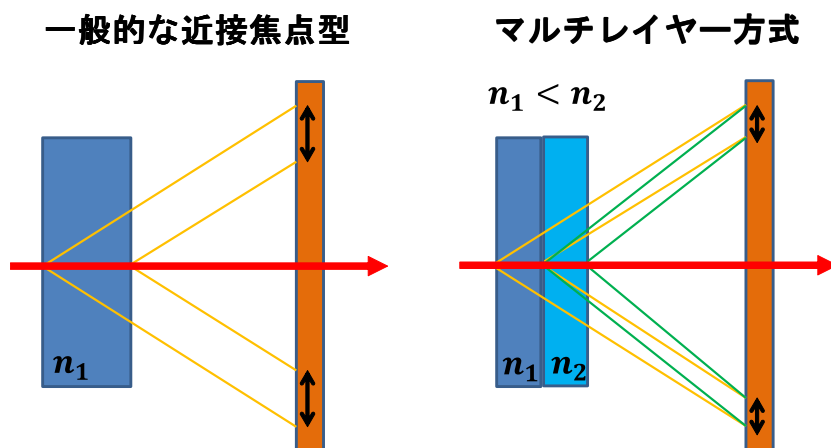


図 2.25: 一般的な近接焦点型とマルチレイヤー方式

シリカエアロジェルは新製法である『ピンホール乾燥法』により ACC で使用したものよりも高透過長になっており、図 2.26 のようなモジュール (厚さ 40mm) がドーナツ状に並べられる。マルチレイヤー方式のため前段の屈折率が 1.045 であり、後段は 1.055 となっている。

光検出器として採用された HAPD は首都大学東京、浜松ホトニクス、KEK で共同開発されたもので図 2.27 のような外見で外形寸法は $72 \times 72 \text{mm}^2$ で $4.9 \times 4.9 \text{mm}^2$ のピクセルが 12×12 ch ある。有感領域は 64% で QE (量子効率) は 30% が目標値となっている。HAPD 内部では 2 段階の増幅をしており、一光子の検出も可能である。図 2.28 は HAPD の断面図である。まず入射してきたチェレンコフ光子はフォトカソード面で光電子に変換された後で電子打ち込み増幅 ($G_{bom} = \sim 1700$) される。その後 APD (Avalanche Photo Diode) でさらに Avalanche 増幅 ($G_{ava} = \sim 40$) され、最終的な Gain は $G_{total} = G_{bom} \times G_{ava} = \sim 68000$ となる。

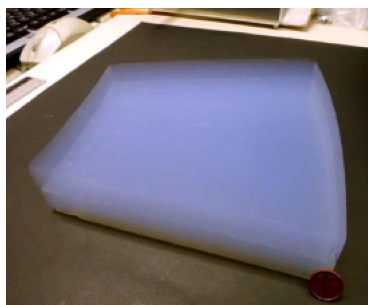


図 2.26: シリカエアロジェルのタイル

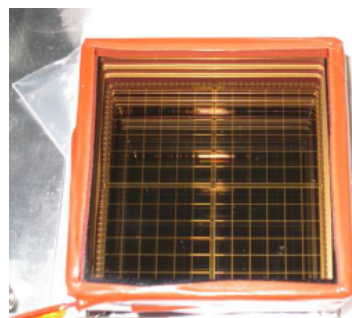


図 2.27: HAPD の外形 [5]

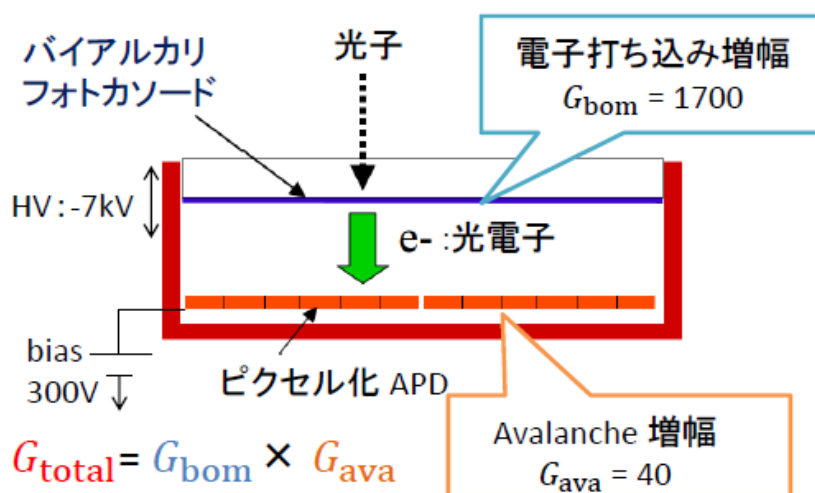


図 2.28: HAPD の断面図

2.3.5 電磁カロリメーター (ECL)

電磁カロリメータ (ECL:Electromagnetic Calorimeter) の主な役割は光子や電子、陽電子のエネルギーと入射位置を測定することである。

Belle 検出器で使用されていた ECL の素材は発光量の大きい CsI(Tl) の結晶である。一つのモジュール (CsI(Tl) 結晶カウンター) は図 2.29 のようなタワー型をしており、長さ 30 cm、衝突点側は 5.5×5.5 cm、読み出し側は 6.5×6.5 cm となっている。また読み出しにはピンフォトダイオードを使用している。図 2.9 に示されるように ECL は超伝導ソレノイドの内側に設置され外径 3.0 m、内径 1.25 m のバレル部と衝突点から前方 1.96 m、後方 1.02 m に設置されたエンドキャップ部からなっている。CsI(Tl) 結晶カウンターはバレル部に 6624 個、前方エンドキャップ部に 1152 個、そして後方エンドキャップ部に 960 個の合計 8736 個が使用され、総重量は約 43 トンにもなる。

ECL に入射した粒子はエネルギーを落としていくが特に光子や電子、陽電子の場合は電磁シャワーを形成するためエネルギーが ECL 中でほとんど失われる。そのためこれをシンチレーション光として読み出すことにより入射した光子や電子、陽電子のエネルギーを測定できる。

それに比べて他の荷電粒子の入射ではエネルギー損失は一部に過ぎないため CDC で測定された運動量 (P) と ECL で測定されたエネルギー (E) の比で定義される E/P 値は電子、または陽電子を他の荷電粒子と識別する重要な測定量となっている。ちなみに電子、陽電子以外の荷電粒子について細かくいうと μ は ECL で電弱相互作用しかおこさないためにエネルギー損失は ~ 200 MeV 程度であるのに対して、 p, π, K はハドロンより電弱相互作用に加えて強い相互作用もおこすため μ よりもエネルギーを多く損失することになる。

また ECL におけるエネルギー分解能は

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{0.066\%}{E}\right)^2 + \left(\frac{0.81\%}{\sqrt[4]{E}}\right)^2 + (1.34\%)^2}$$

となっていた。

BelleII 実験ではルミノシティの増加によって加速器由来のバックグラウンド γ も増加するが CsI(Tl) は発光時定数が大きい ($\tau \sim 1\mu s$) 素材なためこのままだとシグナルとバックグラウンドの識別が難しくなる。BelleII 実験では CsI(Tl) 結晶カウンターを再利用するが読み出しエレキのアップグレードにおいてこの問題に対処する。アップグレード後の読み出しでは取得した信号波形を 16 点で関数フィットすることで波形の振幅と時間を正確に測定する。これによりシグナルとバックグラウンドでは波形が異なることを利用して識別能力を向上させることができる。またオプションとして特にバックグラウンドが増加するエンドキャップ部において CsI(Tl) を pure CsI に入れ替えることが考えられている。pure CsI の発光時定数は $\tau \sim 30ns$ と CsI(Tl) と比べて約 $1/30$ と小さいためバックグラウンドの識別が容易になる。

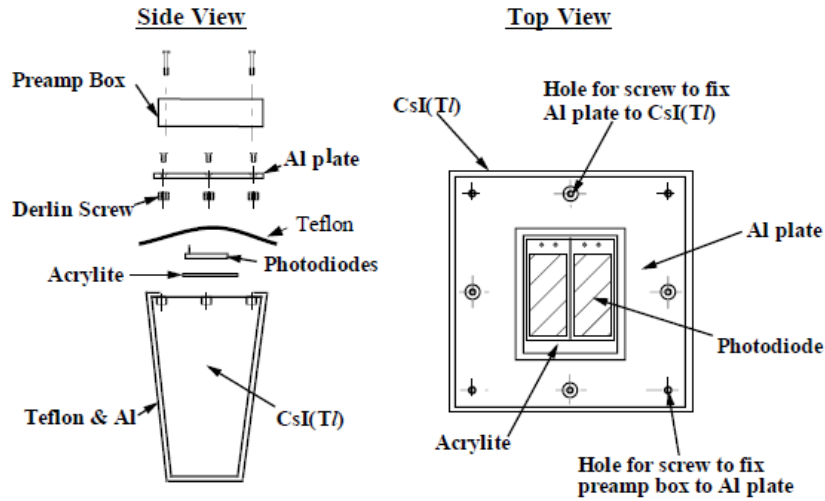


図 2.29: CsI(Tl) 結晶カウンターの側面図と上面図 [14]

2.3.6 K_L and Muon Detector(KLM)

KLM は BelleII 検出器における最外層の検出器で寿命の長い K_L^0 と μ を検出し、識別する役割を担う。それに加えて、超伝導ソレノイドの外側に位置し、磁場を検出器の外にももらさないフラックスリターンヨークの役割も兼ねている。

K_L^0 は寿命が長く、電気的に中性な粒子のため ECL や KLM における物質との相互作用で発生するハドロンシャワーにより初めて検出できる。そのため内側の VXD や CDC に軌跡が残っていない箇所において ECL や KLM に信号がでた場合 K_L^0 だと判断できる。KLM では $0.6[\text{GeV}/c]$ 以上の運動量をもつ K_L^0 の測定が可能である。

また μ は高い貫通力をもつためある程度高い運動量 ($0.6 \text{ GeV}/c$ 以上) ならば内部の検出器を貫通し、KLM の深部まで到達する。内部の検出器における質量に起因した同定方法では差異の小さい $\mu(105[\text{MeV}/c^2])$ と $\pi([140 \text{ MeV}/c^2])$ の識別は困難である。そこで KLM 内での荷電粒子の振る舞いに着目すると、 π や K などの荷電ハドロン粒子は電弱相互作用に加えてハドロン相互作用もするためほとんどが KLM に達すると大きくエネルギーを落としすぐに止まってしまう。一方で μ 粒子は電弱相互作用しかおこさないため、KLM の深部にわたって貫いた信号を残す。この性質から SVD、CDC で検出した飛跡を KLM に外挿し、対応する場所に KLM を深く貫く信号があれば μ 粒子と識別することができる。

KLM ではハドロンシャワーを引き起こすために設けられた吸収体の鉄プレート (幅 47mm) と検出器部分を担う検出器層 (幅 37mm) が交互に層を作る形をしている。バレル部では鉄プレート 14 層と検出器層 15 層で $45^\circ < \theta < 125^\circ$ の検出領域をカバーしている。そしてエンドキャップ部にも鉄プレート、検出器層ともに 14 層を配置し、全体としてカバーできる領域が $20^\circ < \theta < 155^\circ$ となっている。

検出器層の構造は図 2.30 のようになっており RPC(Resistive Plate Chamber) と呼ばれる検出器が使用される。RPC には電圧がかけられており、粒子が通過するとガスがイオン化されて増幅し、部分的に極板間が導通することで粒子の通過位置を測定できる。KLM の検出層は RPC モジュール 2 層で構成されているが、このようにすることで dead region をお互いにカバーし、検出効率が向上 (90%~95% → $\geq 98\%$) する。

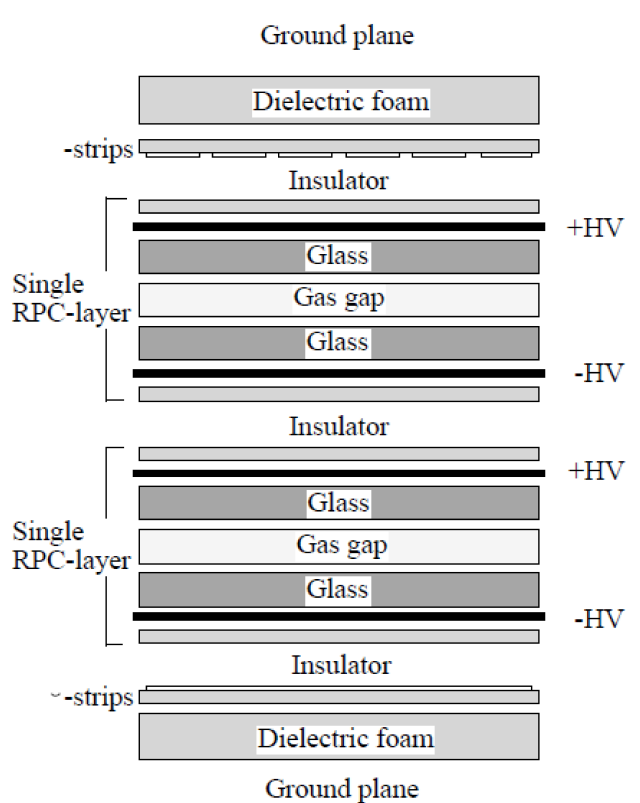


図 2.30: KLM の検出層における構造図 [14]

KLM においても他の検出器と同様に BelleII 実験でのルミノシティーに対応できるかが問題となってくる。RPC はその原理上粒子が入射してから再動作するのに約 2[s] 程度かかるためにルミノシティーの増加によるバックグラウンドが無視できなくなってしまう。図 2.31 は Belle の KLM を KEKB(Belle 実験) と SuperKEKB(BelleII 実験) の環境で使用した場合に、KLM 各層における検出効率の比較 (SuperKEKB での値は KEKB で測定したデータからの推定) である。ここからわかるように BelleII 実験においてビームパイプに近いエンドキャップ部は全層にわたってまったく機能しない。バレル部でも最内層の 2 層についてこのまま使用するには適さない水準まで検出効率が低下する。そのためアップグレードによってエンドキャップ部の全層とバレル部の最内層 2 層を BelleII 実験のルミノシティーに耐えうる検出器に入れ替えることになった。

Layer	Barrel		Endcap forward		Endcap backward	
	KEKB	SuperKEKB	KEKB	SuperKEKB	KEKB	SuperKEKB
0	0.91	0.70	0.91	0.0	0.90	0.0
1	0.94	0.81	0.93	0.0	0.90	0.0
2	0.96	0.87	0.94	0.0	0.90	0.0
3	0.98	0.91	0.94	0.0	0.90	0.0
4	0.98	0.94	0.94	0.0	0.89	0.0
5	0.99	0.95	0.92	0.0	0.88	0.0
6	0.99	0.95	0.93	0.0	0.89	0.0
7	0.99	0.96	0.92	0.0	0.87	0.0
8	0.99	0.94	0.92	0.0	0.86	0.0
9	0.99	0.96	0.90	0.0	0.85	0.0
10	0.99	0.98	0.87	0.0	0.82	0.0
11	0.99	0.97	0.82	0.0	0.80	0.0
12	0.99	0.96	0.78	0.0	0.81	0.0
13	0.99	0.97	0.77	0.0	0.76	0.0
14	0.99	0.96	N/A	N/A	N/A	N/A

図 2.31: KEKB と SuperKEKB における KLM 各層の検出効率 [5]

不感時間が短く、空間的な制約や磁場耐性が考慮された結果、アップグレードにより新たな検出器としてシンチレータストリップが採用された。図 2.32 の左図のように幅 40mm のストリップ状シンチレータが元あった検出器層の枠に収められる形となった。検出部は PTP(1.5%) と POPOP(0.01%) がドープされたプラスチックシンチレータである。また図 2.32 の右図のようにシンチレータの中央には WLS (Wave Length Shift) fiber という直径 1.2mm の光ファイバーが通っている。シンチレータに粒子が通過すると青いシンチレーション光が発光し、それが WLS fiber で緑色に変換される。それが磁場耐性に優れ、緑色に感度が高い光検出器である MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) に導かれる。

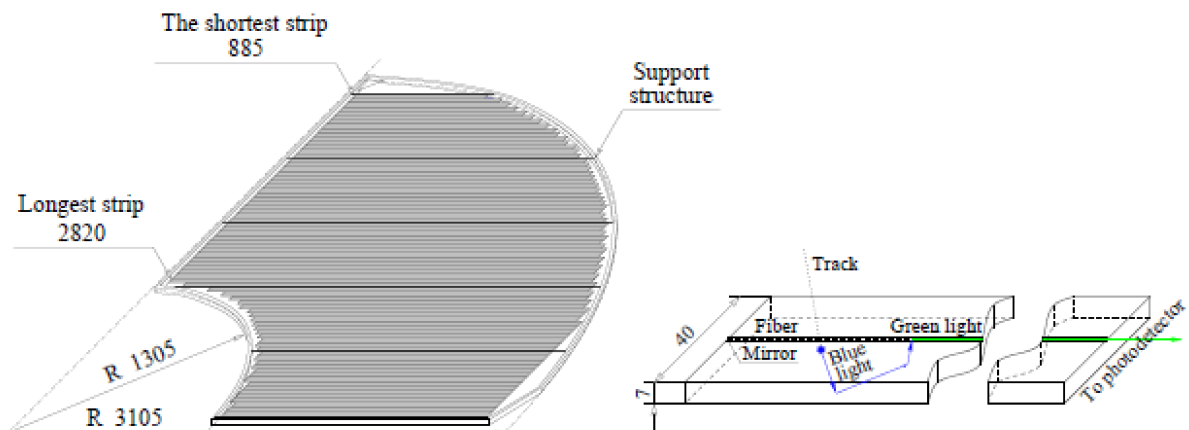


図 2.32: 左 : シンチレータストリップを配置したエンドキャップ部の検出層、右 : シンチレータストリップの内部構造 [5]

第3章 崩壊点検出器 (VXD)

3.1 VXD の役割と基本的な測定原理

VXD はビーム衝突点から一番近い位置に設置される検出器で粒子の崩壊点位置を測定する役割を担う。2.1.1 章でも言及したが BelleII 実験で重要な CP 非対称度の測定のためにはビーム衝突で生成した B^0 と \bar{B}^0 の精密な崩壊点位置の情報が必要である。また解析においても崩壊点の位置情報を使用して間違った粒子の組み合わせの再構成を減らすため VXD の役割はとても大きい。

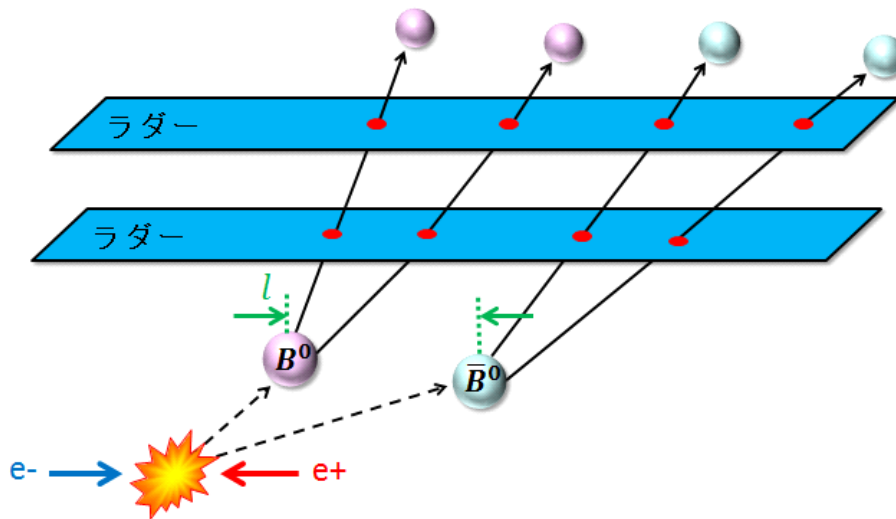


図 3.1: VXD の簡略的な原理図

Belle 実験、BelleII 実験ともに崩壊点位置の基本的な測定原理は同じである。図 3.1 に崩壊点測定原理の簡略図 (衝突点付近の一部) を示す。VXD はラダー構造となっており、ビーム衝突点の周囲を複数層にわたってラダーが取り囲んだ形になっている。ビームの衝突によって生じた B^0 と \bar{B}^0 は約 $1.5[\text{ps}]$ の寿命しかないため、検出器となるラダー部分に到達せず崩壊する。そして崩壊により生成した荷電粒子がラダーに入射する。ラダーでは荷電粒子の入射した位置を 2 次元情報として測定できる。そして荷電粒子が複数層のラダーを貫けば各ラダーの情報から粒子の 3 次元における軌跡が再構成できる。最後にこの軌跡を崩壊点付近に内挿し、複数の粒子の軌跡がもっともらしく交わった点が求めるべき崩壊点となる。

3.2 Belle 実験 (アップグレード前) における VXD

まずは Belle 実験で使用されていた VXD を簡単に紹介する。詳細については資料 [14][17] を参照してほしい。

Belle 検出器において VXD として設置されていたのはシリコンストリップ型崩壊点検出器に分類される SVD(Silicon Vertex Detector) である。SVD は Belle 実験稼働期間の途中で大幅なアップグレードが行われており、2003 年の夏まで使用されていた SVD を SVD1、それ以降にアップグレードして使用されたものを SVD2 と呼称している。

3.2.1 SVD1

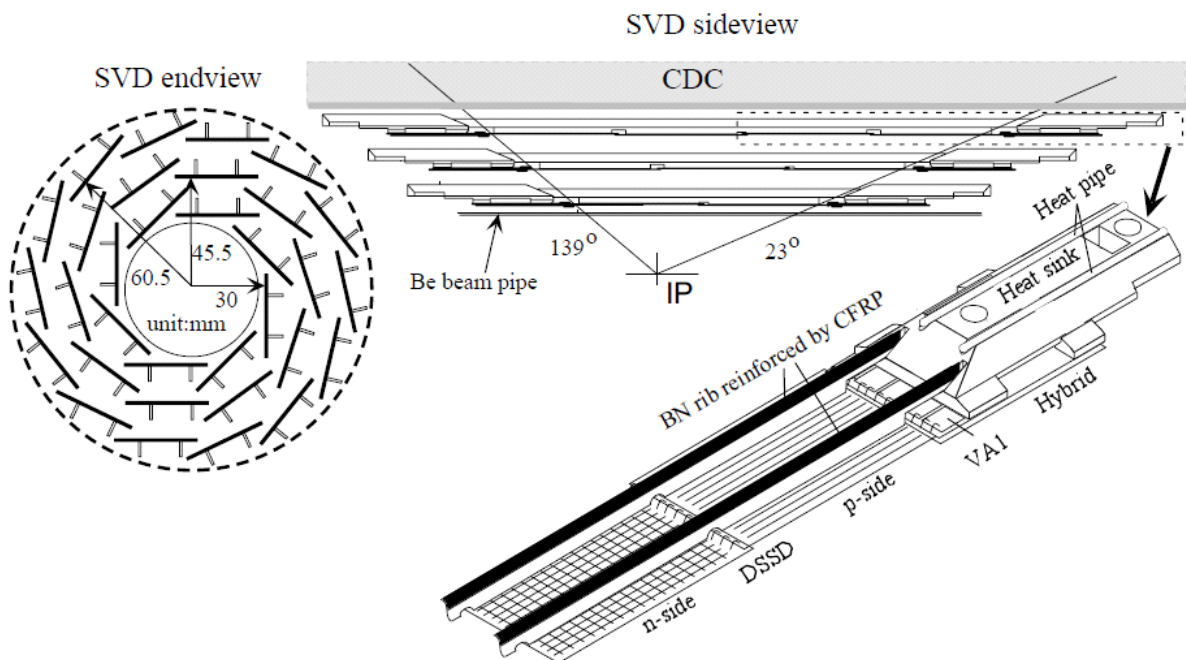


図 3.2: SVD1 の構造図 [14]

図 3.2 に SVD1 の構造図を示す。SVD1 は 3 層のラダー構造で各層の衝突点からの半径は内側のものから 30.0mm、45.5mm、60.5 mm となっており、各層がそれぞれ 8、10、14 個のラダーから構成されて衝突点を囲んでいる。また各層のラダーの長さは内側から順に 253mm、308mm、365mm となっており、これによって SVD1 は $23^\circ < \theta < 139^\circ$ の有効検出角となっている。これは全立体角の 86% に相当する。ラダーにおいて粒子を検出する部分には DSSD(Double-sided silicon detector) と呼ばれるシリコンセンサーが用いられている。詳細については後述するが 1 枚の DSSD には $r\phi$ 方向と z 方向にストリップが形成されており、2 次元での粒子の通過位置を測定可能であ

る。Belle 実験 ($\beta\gamma = 0.425$) における B^0 と \bar{B}^0 の飛距離が $\sim 200\mu\text{m}$ なのに対して SVD1 の z 方向 (ビーム軸) の分解能が $\sigma_z \sim 80\mu\text{m}$ となっているので十分な精度での測定が可能である。またフロントエンドの読み出しにはラダー両端の Hybrid に付属している VA1 チップ (Shaping time $2.5\mu\text{s}$) を使用している。

3.2.2 SVD2

Belle 実験では 2003 年の夏に放射線耐性の問題や測定精度のさらなる向上ため SVD1 は SVD2 に取り換えられアップグレードがなされた。図 3.3 に SVD2 の構造図を示す。SVD2 ではラダーを 4 層構造して検出点を増やしている。各層の衝突点からの半径は内側のものから 20.0mm、43.5mm、70.5mm、88.0mm と最内層が衝突点により近づき、最外層がより外側になっている。これにより各層のラダーは 6、12、18、18 個で構成され、検出器全体が一回り大きくなっており、各層のラダーの長さは内側から順に 329mm、423mm、580mm、662mm である。またフロントエンドの読み出しは SVD1 と同様にラダーの両端で行われ、VA1TA チップ (Shaping time $0.8\mu\text{s}$) が採用された。SVD2 での有効検出角は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ まで拡張され、全立体角の 92% をカバーする。図 3.4 に SVD1 と SVD2 の大きさを比較したものを示す。このアップグレードにより SVD2 の z 方向における分解能は SVD1 に比べて約 20% ほど向上し、放射線耐性も 100 倍近くになっている。

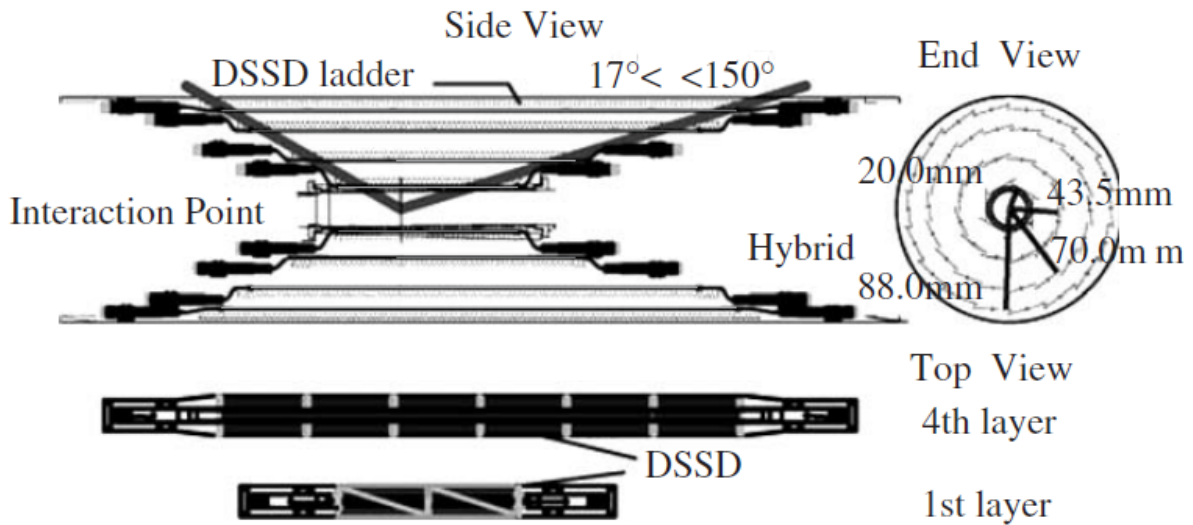


図 3.3: SVD2 の構造図 [17]

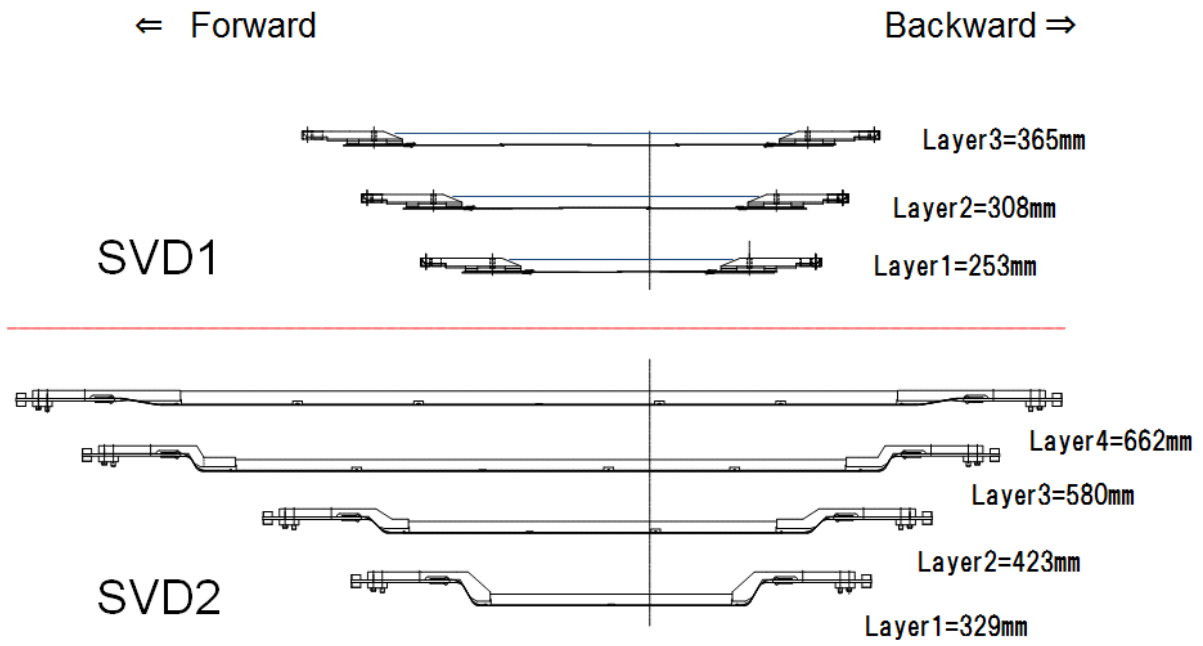


図 3.4: SVD1 と SVD2 の大きさ比較

3.3 BelleII 実験で求められる VXD への要求

3.3.1 高ルミノシティへの対応

BelleII 実験はアップグレード前の約 40 倍である約 $80 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のルミノシティで行われる予定である。それに伴いまず問題となるのは急増するバックグラウンドへの対策である。特に VXD が設置されるのはビームに一番近い部分であり、他の検出器よりも対策は難しくなる。

図 3.5 は BelleII 実験のルミノシティにおいて VXD をアップグレードせずに SVD2 をそのまま使用したと仮定した際の衝突点からの距離に対する DSSD のチャンネルの占有率を見積もった結果である。例として SVD2 の最内層が位置していた 20mm のところだと占有率が 100% を超えておりまったく実用に耐えないことがわかる。Belle 実験での経験から占有率を 10% 以下にまで下げるアップグレードが要求される。

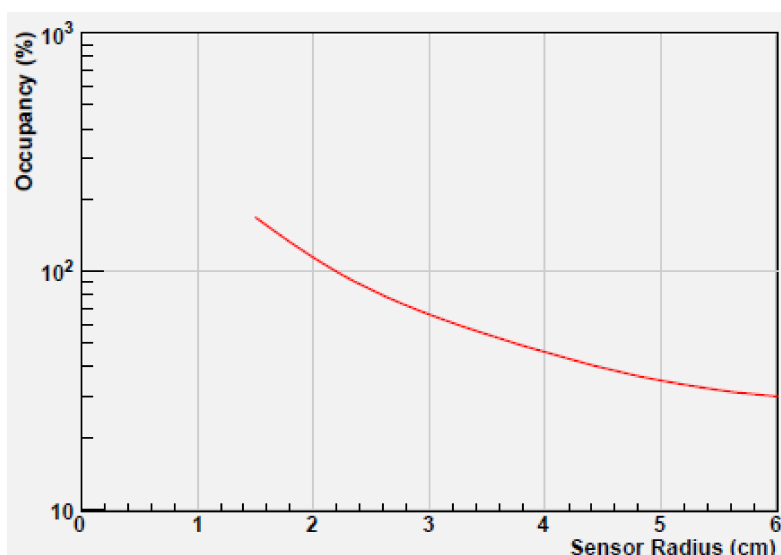


図 3.5: BelleII 実験時に予想される SVD2 の占有率 [5]

3.3.2 崩壊点の測定精度向上

第 2.2 章で述べたが BelleII 実験ではルミノシティを Belle 実験の 40 倍にするために衝突させる電子、陽電子のエネルギー非対称度を変更(電子ビーム: $8.0 \rightarrow 7.0$ [GeV]、陽電子ビーム: $3.5 \rightarrow 4.0$ [GeV])している。これによりローレンツブーストが約 2/3 程度に低下 ($\beta\gamma = 0.425 \rightarrow 0.283$) してしまうため結果的に B 中間子の飛行距離も $\sim 100 \mu\text{m}$ となってしまう。よって Belle 実験の時よりも崩壊点の位置分解能をあげなくては CP 非対称度の精密測定をすることができない。そのためにはまず各ラダーにおける粒子の入射位置分解能を高くすることが挙げられる。またそれと関連してラ

ダーの組み立て精度も高くなくてはならない。

構造的には特に最内層と最外層のラダーの衝突点からの距離が重要になってくる。図 3.6 に最内層と最外層の位置の違いによる崩壊点位置分解能の変化を簡略図で示す。図 3.6 でわかるように最内層をより崩壊点の近くに設置し、最外層をより衝突点から遠くするほど崩壊点の位置分解能は良くなる。ただし衝突点の近くにラダーを配置しようとするほど占有率の問題解決が困難になるし、最外層はより遠い位置が理想だが他の検出器との兼ね合いやラダーの大型化による製作難度やコストの増加も考える必要がある。

また低運動量の粒子は物質による散乱の効果が大いいため崩壊点の測定精度が悪化しやすいことにも注意しなければならない。

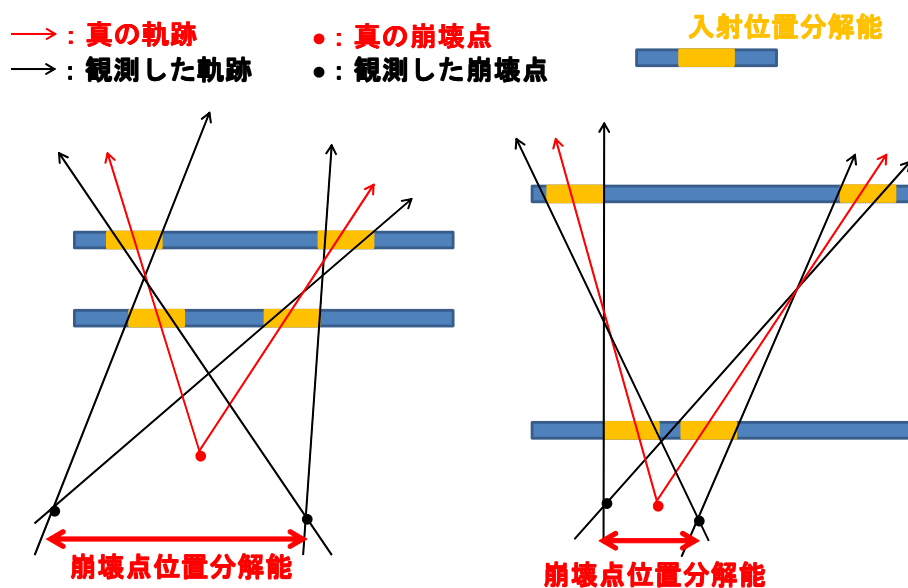


図 3.6: 最内層と最外層における崩壊点からの距離の違いによる位置分解能の差 (簡略図)

3.3.3 K_s の再構成効率向上

第 2.1.1 章で述べた BelleII 実験で重要となる CP 非対称度の測定において新物理探索に有効な崩壊モードに $B \rightarrow K^*\gamma$ や $B \rightarrow K_s K_s K_s$ などがある。このモードの解析で特徴的なのは比較的寿命の長い粒子である K_s ($\tau = 90[\text{ps}]$) の再構成が必要となってくる点である。 K_s は寿命から換算すると飛距離が $\sim 80\text{mm}$ 程度になり、そこから崩壊した 2 つの荷電 π 中間子がラダーに残した軌跡から崩壊点を特定し、崩壊点を再構成することになる。しかし K_s が最低でも最外層 2 層目よりも内側で崩壊した事象でなければ再構成をすることができない。アップグレード前において最外層 2 層目の衝突点からの距離は SVD1 で 45.5mm 、SVD2 で 70.0mm となっており、 K_s の再構成率は十分でなかった。このため BelleII 実験では最外層 2 層目をより外側に設置することで K_s を含んだ崩壊モードの再構成率を上げることが大きな狙いの一つとなっている。

3.4 BelleII 実験における VXD

図 3.7 に BelleII 実験に使用される予定の VXD の断面図を示す。アップグレードにより VXD は全 6 層のラダー構造となるが 1~2 層目と 3~6 層目で異なったタイプの検出器が使用されている。3~6 層目は Belle 実験でも使用していた SVD のアップグレードであり、この論文では BelleIISVD と称する。そして 1~2 層目にはピクセル型崩壊点検出器に分類される PXD(Pixel Detector) が新たに導入される。

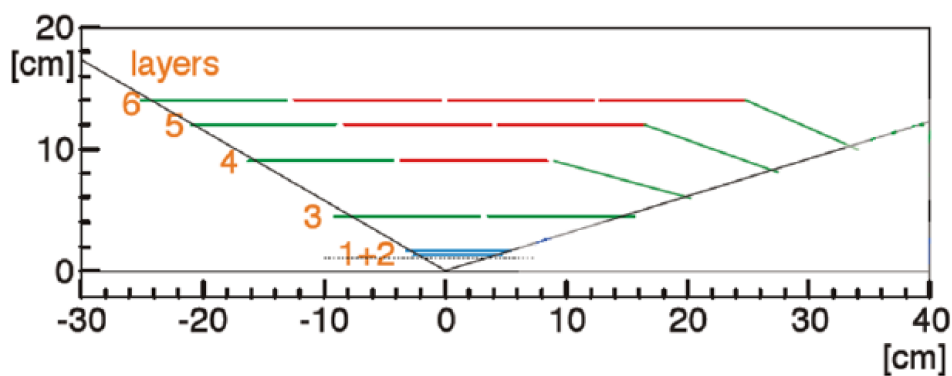


図 3.7: BelleII 実験における VXD のラダー断面図

3.4.1 BelleIISVD

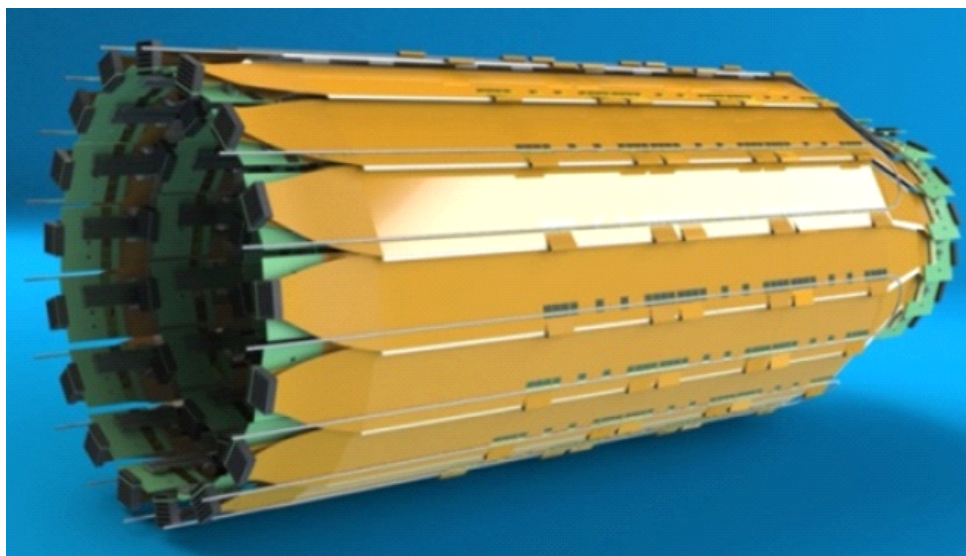


図 3.8: BelleIISVD の全体像 [18]

ラダー構造

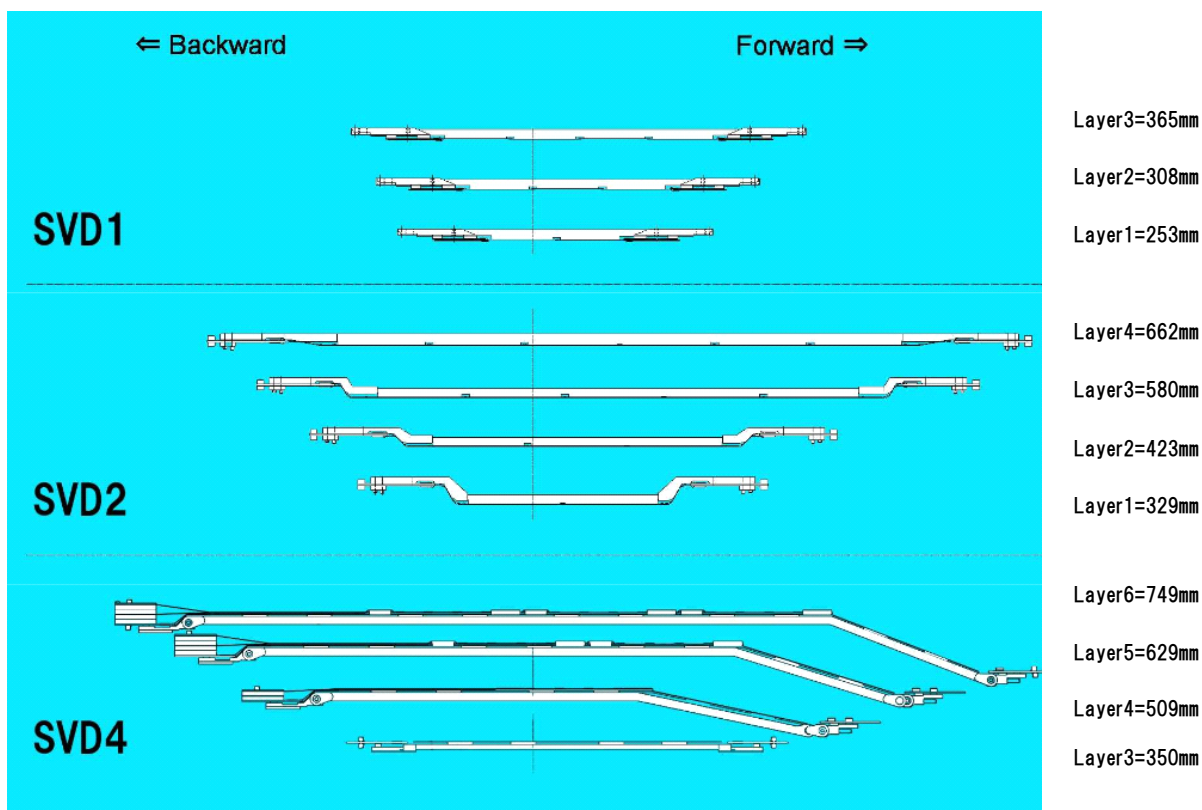


図 3.9: SVD1、SVD2、SVD4(BelleIISVD) の大きさ比較

第2章でも述べたように BelleII 検出器ではバレル部の粒子識別を担う検出器部分がコンパクトになった。その空いたスペースを利用して図 3.7 で示したように BelleIISVD の各ラダーの衝突点からの距離は最内層 (VXD 全体では 3 層目) から順に 38mm、80mm、104mm、135mm とより外側に拡張した。ただし有効検出角は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ と SVD2 のときと同等のままであるため図 3.9 で示すように (図 3.9 で SVD4 と示されているラダーが BelleIISVD) 検出器はまた一回り大型化している。ラダーの長さは 3 層目から順に 350mm、509mm、629mm、749mm となっている。また各層で使用するラダーは 3 層目から順に 7、10、12、16 個となっている。

アップグレードによるラダー構造上の大きな変更点としてスラント (斜め) 構造の採用が挙げられる。BelleIISVD の 4~6 層目の Forward 側にはそれぞれビーム方向から 11.9° 、 17.2° 、 21.1° にラダーを傾けている。これにより各ラダーでの多重散乱を抑制し、分解能を高める効果や有効検出角をより少ないセンサーでカバーできる効果が期待できる。

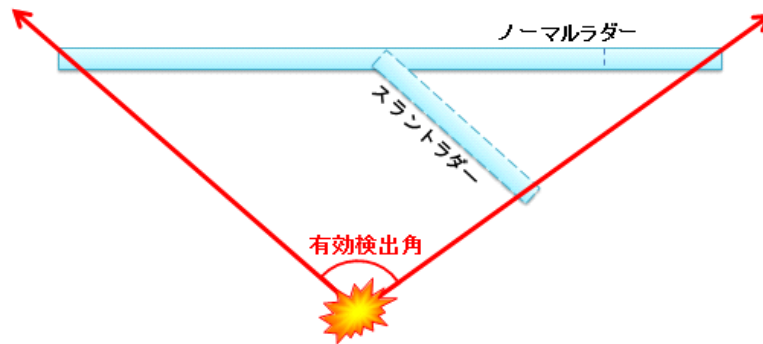


図 3.10: 有効検出角におけるスラント構造の有用性

例えば図 3.10 で示すように同じ有効検出角をカバーするときスラント構造を採用した方がラダーが短くて済むため BelleII SVD の大型化を抑え、少ないセンサーで製作することができるのでコスト抑制やノイズの低減に繋がる。

また図 3.11 でスラント構造を採用した場合に衝突点から同じ角度で入射してくる荷電粒子がどのようにラダーを通過するかを表している。ビーム方向からのなす角が小さい(衝突点から離れた位置に入射する)荷電粒子ではスラント構造の場合にラダーの通過距離が小さくなり多重散乱が抑制できることがわかる。例として Ladder6(21.1°) にビーム方向から 17.2° で荷電粒子が入射して来た場合にはセンサーの厚さが 300 μ なので通過距離は \sim 490 μ m となる。このときもし同じ条件でスラント構造を採用していなかった場合は \sim 1030 μ m にもなってしまう。

しかしこのようにスラント構造を採用することで多くに利点を得ることができるが一方で複雑な構造になるため SVD 1、2 に比べてラダーの製作の難易度がかなり高くなる。

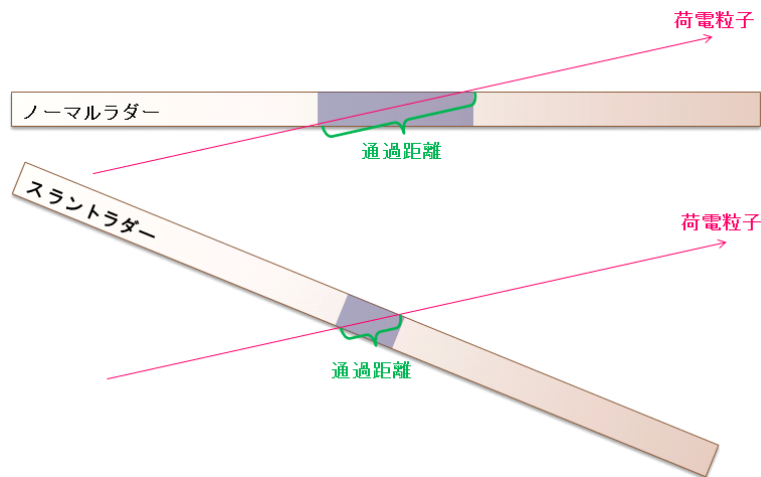


図 3.11: スラント構造ありとなしでの通過領域の違い

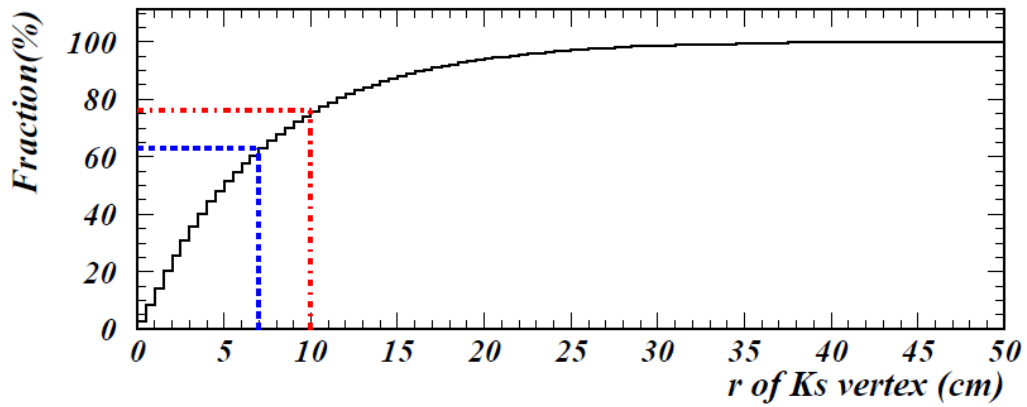


図 3.12: 衝突点からの崩壊点距離に対する K_s の崩壊率 [19]

外層のラダーの位置が衝突点からより外側になったことで K_s の再構成率も向上した。図 3.12 で衝突点からの崩壊点距離に対する K_s の崩壊率を示す。図の青、赤点線はそれぞれ SVD2 と Belle I SVD における最外層 2 層目のラダーが位置する衝突点からの距離である。 K_s の再構成率は SVD2 においては ~60% だったが Belle II SVD ではアップグレードにより ~75% にまで改善する。

DSSD

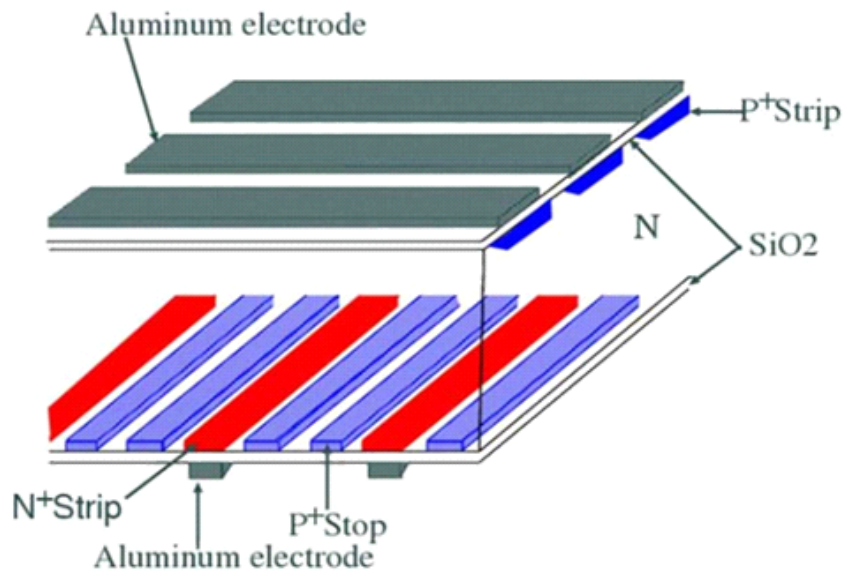


図 3.13: DSSD の構造

センサーには BelleII SVD でもアップグレード前と同様 (外形やストリップ数などの仕様は異なるが) に DSSD(Double-sided silicon detector) を使用する。DSSD では図 3.13 で示すように片面には p 型半導体 (p-side) のストリップ、もう片面には n 型半導体 (n-side) のストリップが直交に配置され、中央の n 型半導体 (バルク) を挟んだ pin 接合の半導体検出器となっている。これにより入射してきた荷電粒子の信号を直交した半導体ストリップに対応した電極で読み出して 2 次元の位置情報を得ることができる。n-side のストリップ間には p 型半導体が配置されているがこれはストリップ間が電氣的接続状態になることを防ぐ目的がある。

使用する DSSD には図 3.14 のようにラダーの直線部に配置される長方形型とスラント部に配置される台形型の 2 種類がある。表 3.1 に DSSD の主なパラメータをまとめた表を示す。各層のラダーで使用する DSSD の数は図 3.7 を見るとわかる。スラント構造がない 3 層目には長方形型を 2 枚使用しているがここに使用される DSSD は衝突点から比較的近いためストリップ間のピッチがより狭くなっているなど 4~6 層目とは DSSD の仕様が若干異なっている。4、5、6 層目はそれぞれ直線部に 2、3、4 枚の直方体型 DSSD が、スラント部には各層 1 枚ずつ台形型 DSSD が配置される。

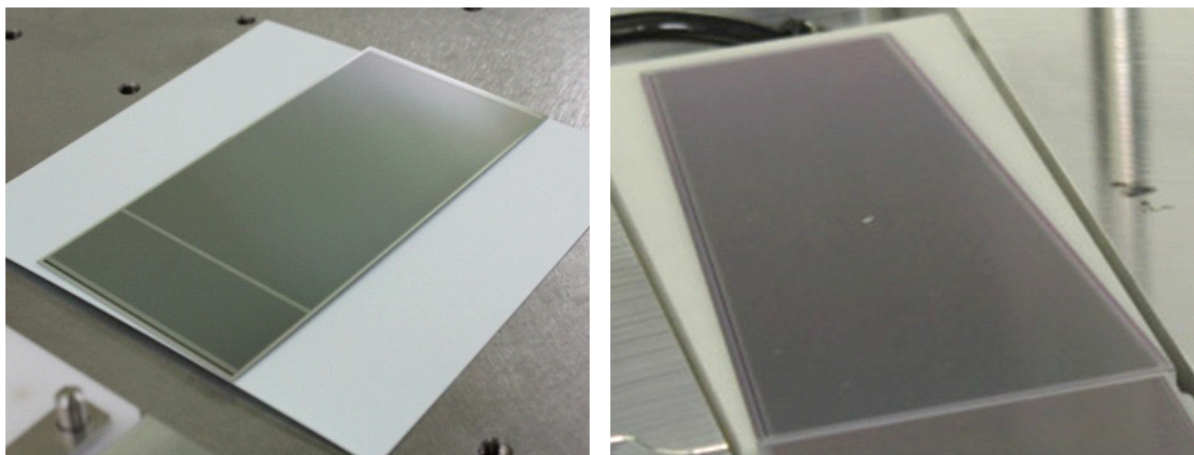


図 3.14: 左 : 長方形型 DSSD 右 : 台形型 DSSD

表 3.1: DSSD の主なパラメータ

	Barrel sensors		Forward sensors
Layer	3	4 to 6	4 to 6
Shape	Rectangular		Trapezoidal
# strips(p-side)	768	768	768
# strips(n-side)	768	512	512
Pitch(p-side)	$50\mu\text{m}$	$75\mu\text{m}$	$75\dots 50\mu\text{m}$
Pitch(n-side)	$160\mu\text{m}$	$240\mu\text{m}$	$240\mu\text{m}$
Area (Total)	5048.90mm^2	7450.23mm^2	6382.6mm^2
Area (Active)	4737.80mm^2	7029.88mm^2	5890mm^2
Thickness	$320\mu\text{m}$	$320\mu\text{m}$	$300\mu\text{m}$
By company	HPK		Micron

APV25(フロントエンドチップ) とオリガミコンセプト

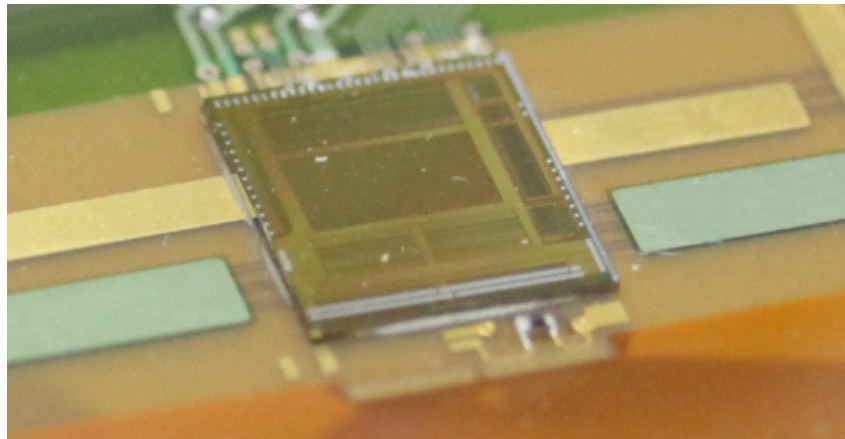


図 3.15: APV25(フロントエンドチップ)

BelleII SVD では占有率の問題を解決するためフロントエンドチップに図 3.15 で示すような APV25[20] を採用している。APV25 は元々 CERN の CMS 実験において開発されたものであり、十分な使用実績もある。APV25 は一つのチップにつき 128 チャンネルをもっており、Shaping time は $50\sim 200[\text{ns}]$ で調整できる。すべてのチャンネルそれぞれに 192 個のリングバッファがついており、信号を 40MHz の速度で蓄積することができる。図 3.16 に APV25 の読み出し回路図を示す。

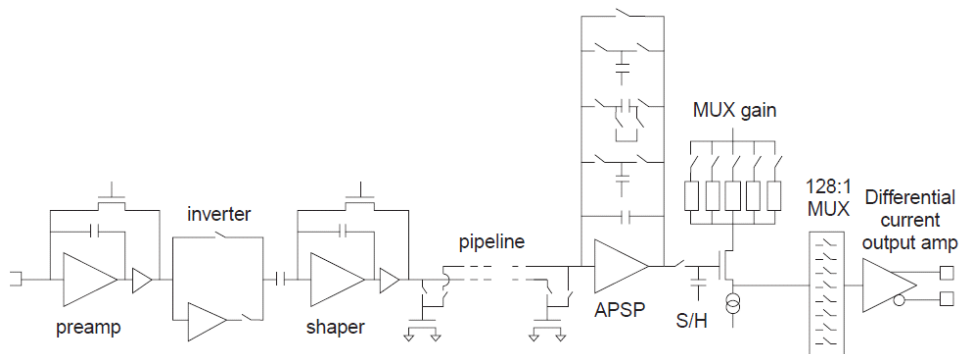


図 3.16: APV25 の読み出し回路図 [5]

アップグレード前に使用していたチップである VA1TA は Shaping time が 800[ns] で time over threshold が 2000[ns] だったのに対して APV では Shaping time が (最小で) 50[ns]、time over threshold が 160[ns] となり、Factor ~ 12.5 の改善ができています。シミュレーションではこの時点で最も占有率が高くなる最内層 (layer3) の占有率が約 6.7% まで低下するため BelleII 実験での要求である占有率 10% 以下を達成できている。しかしシミュレーションには不確定要素が大きいため実際の占有率はもっと高い可能性がある。そのためここからさらに占有率を下げる必要がある。そこで APV25 の機能である “multi-peak mode” を利用する。これにより 20[ns] も窓関数をかけて sensitive time を限定し、事実上 Shaping time を 3[ns] にしている。最終的には VA1TA から Factor ~ 100 の改善となっており、最終的な占有率は十分に BelleII 実験での要求を満たすと考えられる。ここまでの Shaping time の改善に関する概略図を図 3.17 に示す。

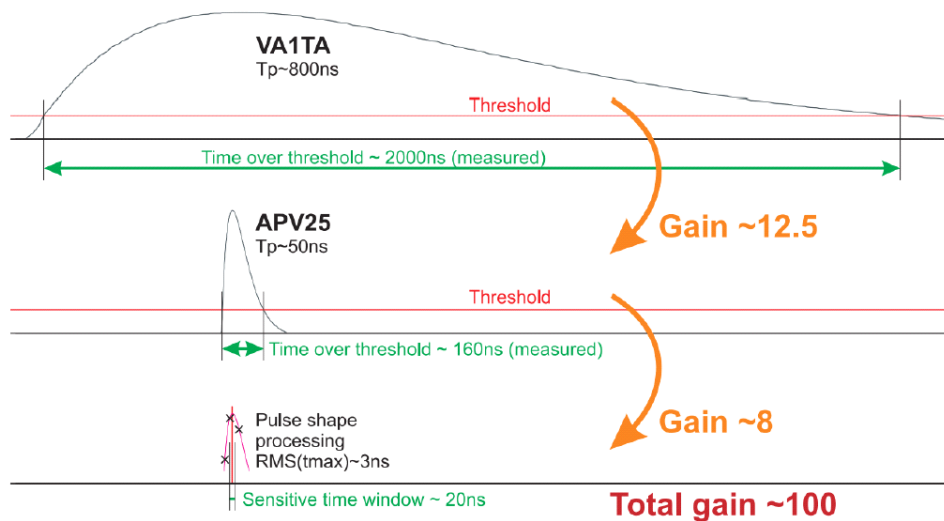


図 3.17: VA1TA、APV25、“multi-peak mode” を比較した概略図 [5]

このように APV25 は BelleII 実験に適したフロントエンドチップであるが shaping time が小さいことに対応して容量性ノイズが大きいという欠点がある。ラダーにおける荷電粒子の通過位置は各ストリップの残された信号の強度によって計算されるため信号とノイズの比である SNR(signal to noise ratio) はその位置分解能を決定する重要な要因となる。そのためできるだけ容量性ノイズを抑制して各ラダーにおける荷電粒子の通過位置分解能を高めるために BelleII SVD ではフロントエンドチップを信号を読み出す DSSD の直上 (アクセプタンス内) に配置するオリガミコンセプト (Origami chip-on-sensor concept) と呼ばれる手法が採用された。

一般的な崩壊点検出器ではフロントエンドチップはアクセプタンス外に配置される。アクセプタンス内にチップがあると余計に物質質量が大きくなってしまい多重散乱が増加し、チップの放射線耐性にもより考慮しなくてはならなくなるからである。そのためアップグレード前の SVD2 でも一般的な崩壊点検出器と同じようにアクセプタンス外であるラダー両端に VA1TA のチップが配置されていた。しかし同じ配置を APV25 で採用した場合、ラダー中央部からの配線の引き回しが長くなるため容量性ノイズが大きくなり、SNR が悪化する。またラダーの大型化により外側のラダー層ほど SNR の悪化が大きいと予想される。特に影響を受けるのは検出できるラダー層が必然的に少なく、かつ外側の K_s である。SNR に対策をしない場合でのシミュレーション [21] では K_s の検出効率が大きく低下してしまうことがわかった。これでは K_s の検出効率を上げるためにラダーを大型化した意味がなくなってしまう。その対策としてオリガミコンセプトにより APV25 を DSSD の直上に配置することで配線の引き回しを最小限に抑え、SNR が悪化するのを防いでいる。

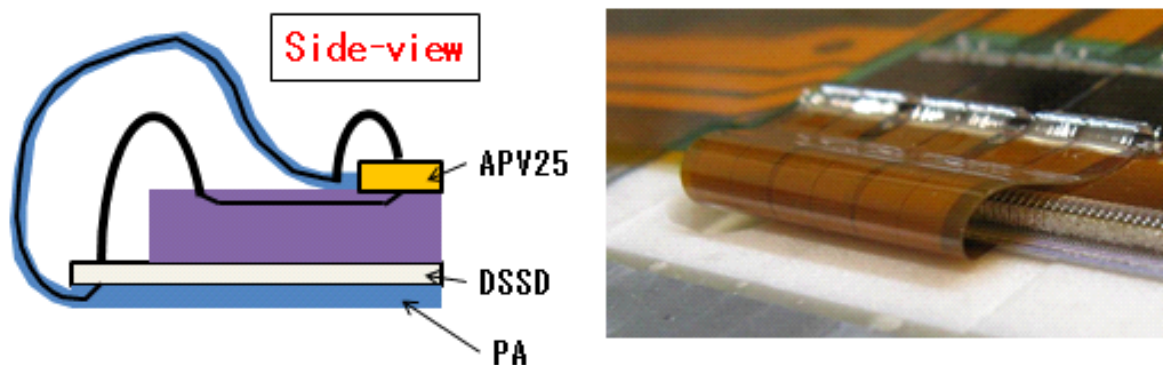


図 3.18: オリガミコンセプトの簡単な断面図と対応した写真

具体的にオリガミコンセプトは図 3.18 のようになっており、DSSD 表面 (APV25 が配置される面) の n-side ストリップ側は端にのぞいた部分から直接ワイヤーボンディングで APV25 に配線される。一方で DSSD 裏面の p-side ストリップ側は裏面から表面にラッピングして貼りつけた Pitch Adapter (PA) と呼ばれるフレキシブル基板を介して APV25 に配線をしている。

APV25 はアクセプタンス内に配置されるが余計な物質質量を増やさないために、APV25 の厚さは約 $300\mu\text{m}$ から約 $100\mu\text{m}$ へ加工されている。これによって APV25 の物質質量は $0.008\%X_0$ に抑えられ、最終的に 1 層のラダーの面平均は $0.57\%X_0$ となっている。また APV25 の放射線耐性につ

いては 30MRad 程度であり、BelleII 実験が予定している稼働期間を十分に耐えられる。

バックエンドエレキシステム

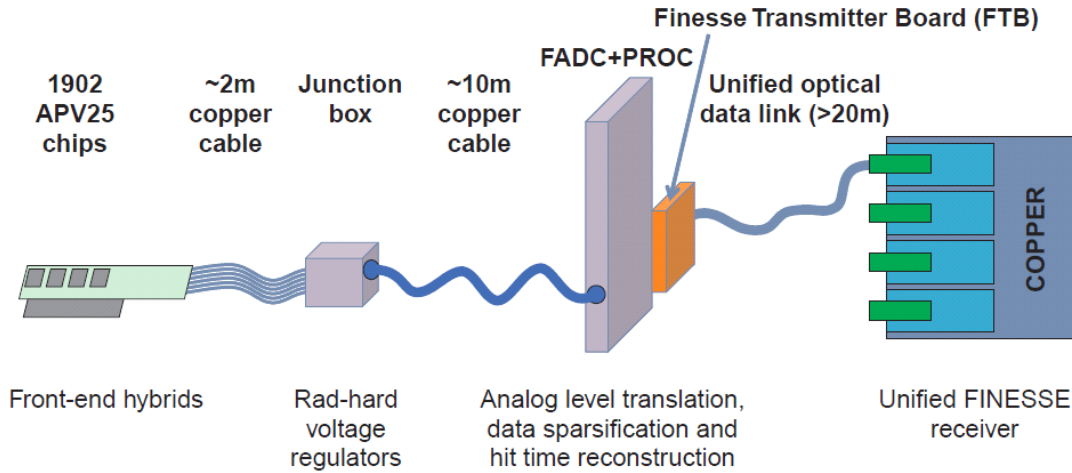


図 3.19: バックエンドエレキシステムの概略図 [5]

図 3.19 に APV25 以降のバックエンドエレキシステムの概略図を示す。APV25 の出力インピーダンスは十分低く、長い配線の引き回しが可能なため APV25 で増幅されたアナログ信号は約 12m 離れた場所 (BelleII 検出器の外) に設置する FADC+PROC (Flash Analog-to-Digital Converter and Processing) モジュールに直接接続できる。しかし BelleII SVD を BelleII 検出器にインストールするときあまりに長いケーブルでは作業を困難にするため APV25 から約 2m のところに Junction Box を設置して中継する。また Junction Box には APV25 や DSSD に電源を供給する役割も与えられている。FADC+PROC モジュールではまず FADC でアナログ信号をデジタル信号に変換した後、FPGA で波形整形やペDESTAL の除去、フィッティングのよるヒットタイムの決定などの処理をする。そして最終的にデータは COPPER システムに伝達される。

BelleII SVD の各ラダーにおける荷電粒子の入射位置分解能

BelleII SVD で最終的に測定したいのは粒子の崩壊点位置だがその分解能を良くするためにはラダーの各層における荷電粒子の入射位置分解能が十分担保されていなければならない。図 3.20 にシミュレーションにおいて 0.5[GeV] の μ 粒子が SVD4 に入射したときの各ラダーでの位置分解能を粒子の入射角 (ビーム方向からの) ごとにプロットした図を示す。左図が $r\phi$ 方向での分解能で右図が z 方向の分解能である。ここでは 1st layer が SVD4 での最内層 (VXD では 3 層目) となっている。図 3.21 では同じシミュレーションで粒子の入射角ごとにおいて粒子が信号を残したストリップ数をプロットした図である。先ほどと同様に左図が $r\phi$ 方向でみたストリップ数で右図が z

方向でみたストリップ数である。粒子の入射位置を精度良く測定するためには複数のストリップに残った電荷量の比率が重要であるためストリップの間隔とSNRが入射位置分解能を決める大きな要因となる。そのため粒子の入射位置がラダーに対して垂直となる $\theta=90$ においては信号が残るストリップがほぼ1つに限定されてしまうために入射位置分解能が低下していることがわかる。

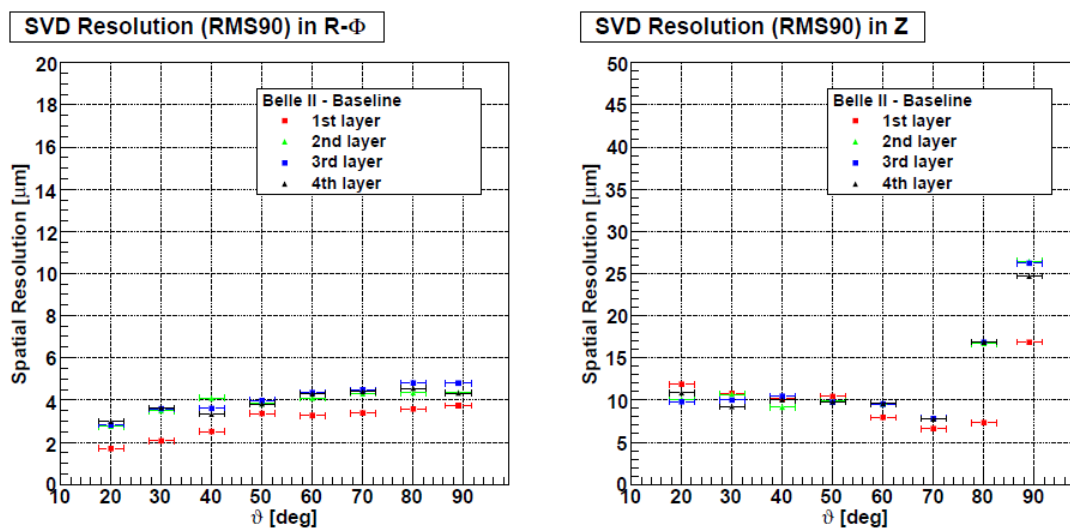


図 3.20: 粒子の入射角に対する各ラダーでの入射位置分解能 [5]

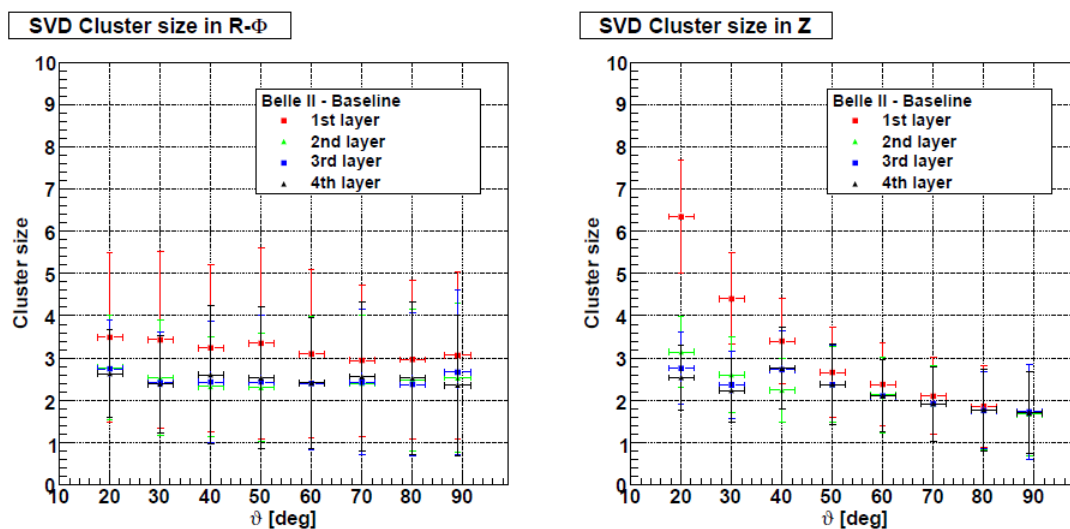


図 3.21: 粒子の入射角に対する信号が残るストリップの数 [5]

3.4.2 PXD

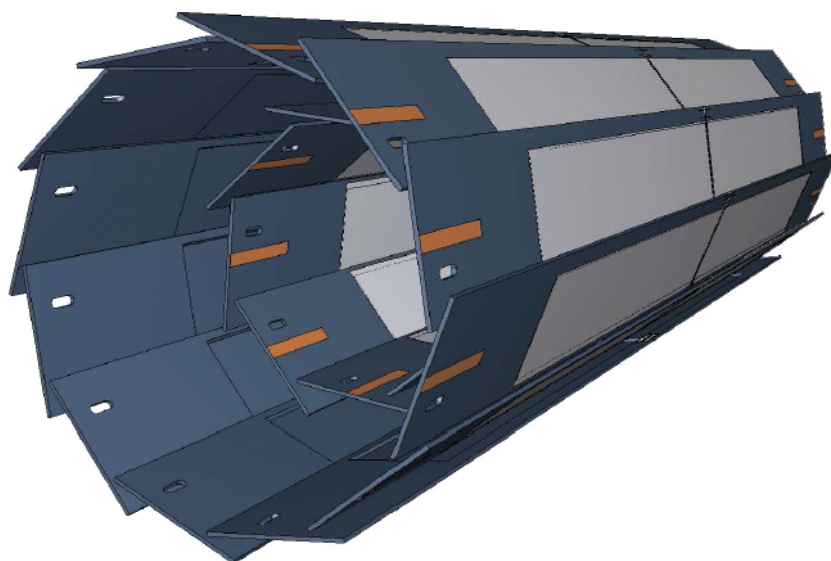


図 3.22: PXD の全体像 [5]

BelleII SVD ではフロントエンドチップを APV25 に変更することにより BelleII 実験の高ルミノシティ下においても SVD が問題なく使用できる占有率を達成している。しかしそれでも 3 層目 (衝突点から 38mm) より内側に SVD ラダーを配置できるほどの改善はできていない。そこで BelleII 検出器では新たにピクセル型半導体検出器である PXD (Pixel Detector) を VXD の 1、2 層目に導入することとなった。PXD は構造上ストリップ型半導体検出器である SVD に比べて占有率を小さく抑えることができるためルミノシティが約 40 倍になったとしても SVD2 の最内層 (衝突点から 20mm) より内側にラダーを設置することが可能である。

ラダー構造



図 3.23: PXD のラダー

PXD の全体像は図 3.22 のようになっており、図 3.23 で示すラダーで構成される。ラダーの中の薄紫色の部分の部分がピクセルである。表 3.2 に PXD の主なパラメータを示す。1、2 層目は衝突点から 14mm と 22mm の位置に設置され、それぞれ 8 個と 12 個のラダーからなる。有効検出角は BelleIISVD と同様に $17^\circ < \theta < 150^\circ$ である。

表 3.2: PXD の主なパラメータ

Layer	# Ladders	衝突点からの距離 (mm)	# Pixels $z \times r\phi$	Pixel size $z \times r\phi (\mu m^2)$	sensitive area $z \times r\phi (mm^2)$
Layer1	8	14	786 × 250	55 × 50 / 60 × 50	44.80 × 12.5
Layer2	12	22	786 × 250	70 × 50 / 85 × 50	61.44 × 12.5

DEPFET

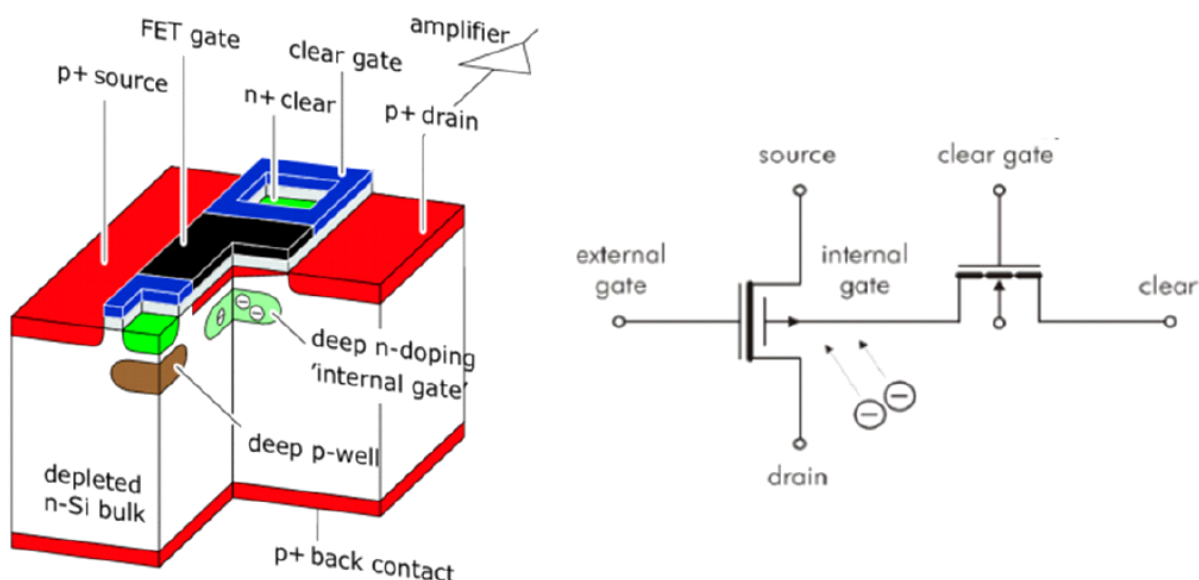


図 3.24: DEPFET の断面図 (左) と回路図 (右)[5]

PXD では DEPFET (DEPleted Field Effect Transistor) と呼ばれる半導体素子がピクセルを形成している。図 3.24 に DEPFET の断面図とその回路図を示す。DEPFET は MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) の動作原理を応用している。シリコンの部分は空乏層になっており、ここに荷電粒子が入射すると電子とホールの対が生成する。生成された電子は internal gate に蓄積され、FET gate が ON になると蓄積している電荷量に比例した電流が p-source

と p-drain 間を流れ、これが信号となり読み出される。

DEPFET の厚さは $75\mu\text{m}$ 程度で物質質量にすると $0.19\%X_0$ となり多重散乱を影響を十分に抑制できる。また DEPFET はゲートとドレインを別々に ON にして読み込む方式をとることができるため低消費電力で稼働できるのも特徴の一つである。

PXD の性能

PXD における 1 層目のラダーは衝突点からたった 14mm しか離れていない位置に設置される。しかしそれでもピクセル型という特徴のためシミュレーションによる占有率の見積もりは 0.5% 以下となっており、採用するのに十分な値であった。

PXD の各ラダーにおける粒子の入射位置分解能については信号を残したピクセルがたった一つだったとしても $\sim 15\mu\text{m}$ は期待できる。

PXD の読み出し

	#ch	occ. [%]	#link	/link [B/s]	#COPPER	ch size [B]	ev size [B]	total [B/s]	/COPPER [B/s]
PXD	8M	1	40	182M	—	4	320k	7.2G	—
SVD	243456	1.9	80	6.9M	80	4	18.5k	555M	6.9M
CDC	15104	10	300	0.6M	75	4	6k	175M	2.3M
BPID	8192	2.5	128	7.5M	8	16	4k	120M	15M
EPID	77760	1.3	138	0.87M	35	0.5	4k	120M	15M
ECL	8736	33	52	7.7M	13	4	12k	360M	30M
BKLM	21696	1	86	9.7M	6	8	2K	60M	10M
EKLM	16800	2	66	19.5M	5	4	1.4k	42M	8.4M

図 3.25: 各検出器における読み出しデータ容量の表 [5]

PXD を衝突点の近辺に設置できるのは占有率に強いというピクセル型の構造に起因しているが、逆にそれが欠点になっていることがある。図 3.25 に BelleII 検出器の各検出器が取得するデータの容量についての表を示す。PXD はピクセル型のため読み出すチャンネル数が他の検出器と比較して多く、それに伴い蓄積するデータ容量ももちろん大きい。そのため現実的に PXD が取得する全データを蓄積しておくことは難しい。なので BelleII 検出器では BelleIISVD が取得した情報を利用して PXD が保存するデータを選別している。図 3.26 に PXD と BelleIISVD の取得データの連携の流れの概略図を示す。BelleIISVD の飛跡情報から ROI(Region of interest) と呼ばれる領域を決め、PXD ではその領域に該当したピクセルのデータのみを保存する。このように BelleII 実験の VXD では PXD と BelleIISVD でうまく連携することで崩壊点の検出をしている。

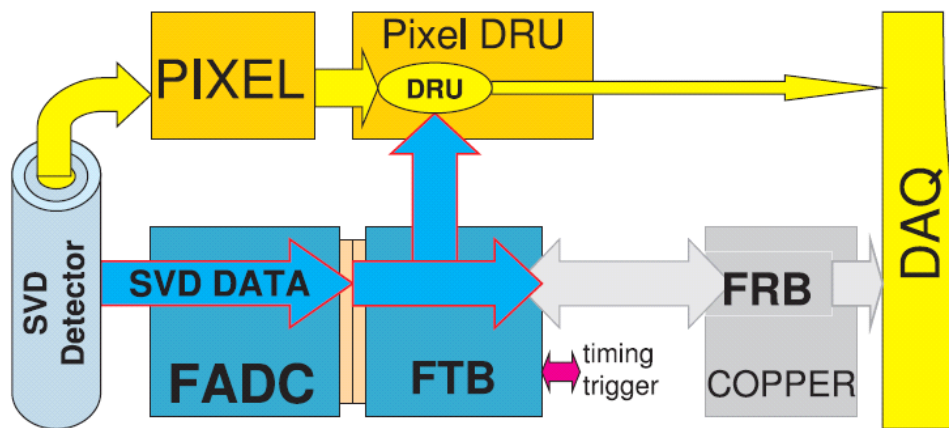


図 3.26: PXD と BelleII SVD のデータ取得の連携の流れ [5]

3.4.3 BelleII SVD と PXD の連携によるの崩壊点検出性能

最後に BelleII 検出器における VXD(SVD+PXD) の崩壊点検出性能を示す。図 3.27 がシミュレーションによる Belle 実験と BelleII 実験の崩壊点分解能 (z 方向) の比較である。縦軸は z 方向における崩壊点分解能で横軸は検出粒子の運動量、速度、入射角 (ビーム軸とのなす角) からなるファクター ($p\beta \sin \theta$) である。検出器での多重クーロン散乱を考慮すると検出粒子の $p\beta \sin \theta$ の違いで分解能が変化してしまうため横軸をこのファクターでとっている。図 3.27 からわかるように BelleII 検出器では広い範囲で Belle 実験よりも高い分解能が期待できる。

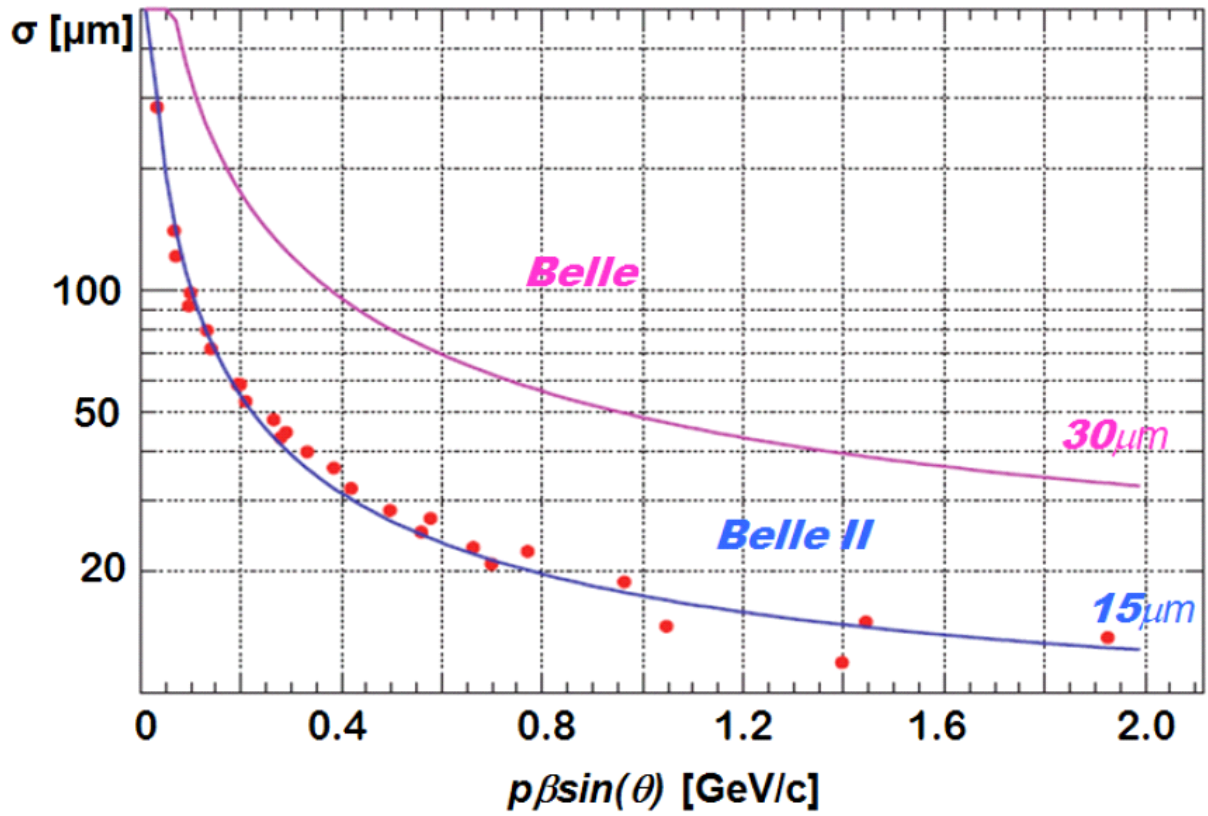


図 3.27: BelleII 検出器の VXD(SVD+PXD) における崩壊点分解能 (z 方向)

第4章 BelleII SVD のラダー組み立て

4.1 各層のラダーについて

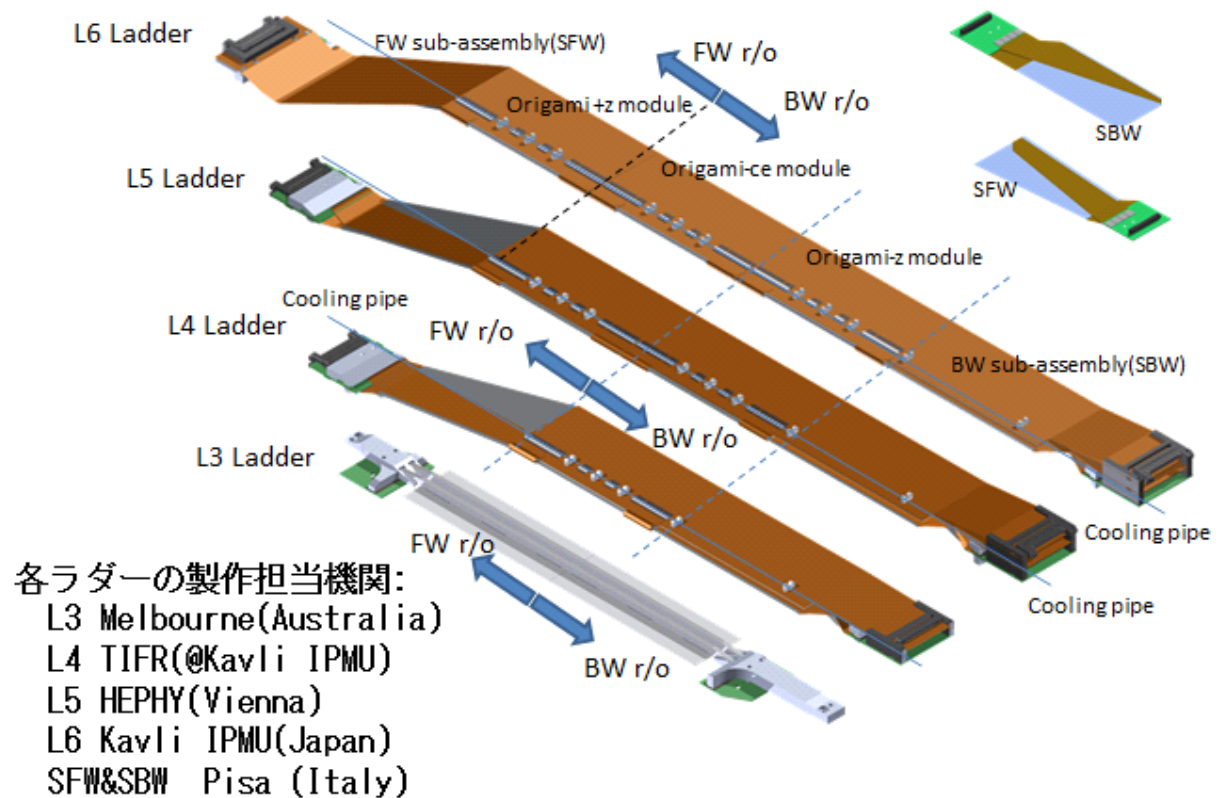


図 4.1: BelleII SVD における各層のラダーと担当機関

図 4.1 に BelleII SVD における各層のラダーの比較を示す。Ladder3(L3) は長方形型 DSSD が 2 枚のみで構成されており、それ以外は L4、L5、L6 と順にスラント部の台形型 DSSD 1 枚に加え、長方形型 DSSD が 2、3、4 枚で構成される。ラダーではスラント部側を FW(Forward)、その反対側を BW(Backward) と呼んでいる。そして L4~L6 のラダー最両端に位置する DSSD が構成するモジュールにおいてはスラント部の方を FW sub-assembly (SFW)、反対側の方は BW sub-assembly (SBW) と呼称している。SFW と SBW ではラダーの両端 (アクセプタント外) に配置した APV25

でデータを処理する形になっており、配線の引き回しが長くならないためオリガミコンセプトの構造になっていない。オリガミコンセプトになっているのは中央の DSSD 部分 (オリガミモジュール) であり、ここでは APV25 でいったん処理されたデータが図 4.1 で図示しているそれぞれのラダー端側に読み出される。また L4~L6 には CO2 クーリングパイプが這わせてあり、DSSD の上に配置された APV25 の冷却をする。

BelleIISVD のラダーは各層ごとに製作を担当する機関が割り振られており、L3 はオーストラリアのメルボルン大学、L4 はインドの TIFR (ただし製作場所は Kavli IPMU) L5 はオーストリアの HEPHY、そして L6 が日本の Kavli IPMU(千葉県柏市) となっている。ただし L4~L6 の SFW と SBW についてはイタリアの Pisa 大学が製作して各機関に配布し、ラダーに組み込むという体制となっている。

本論文の主題は日本の Kavli IPMU で担当する L6 を製作するための研究なので次節から L6 の詳細について述べていく。

4.2 Ladder6(L6) の構造と主なパーツ

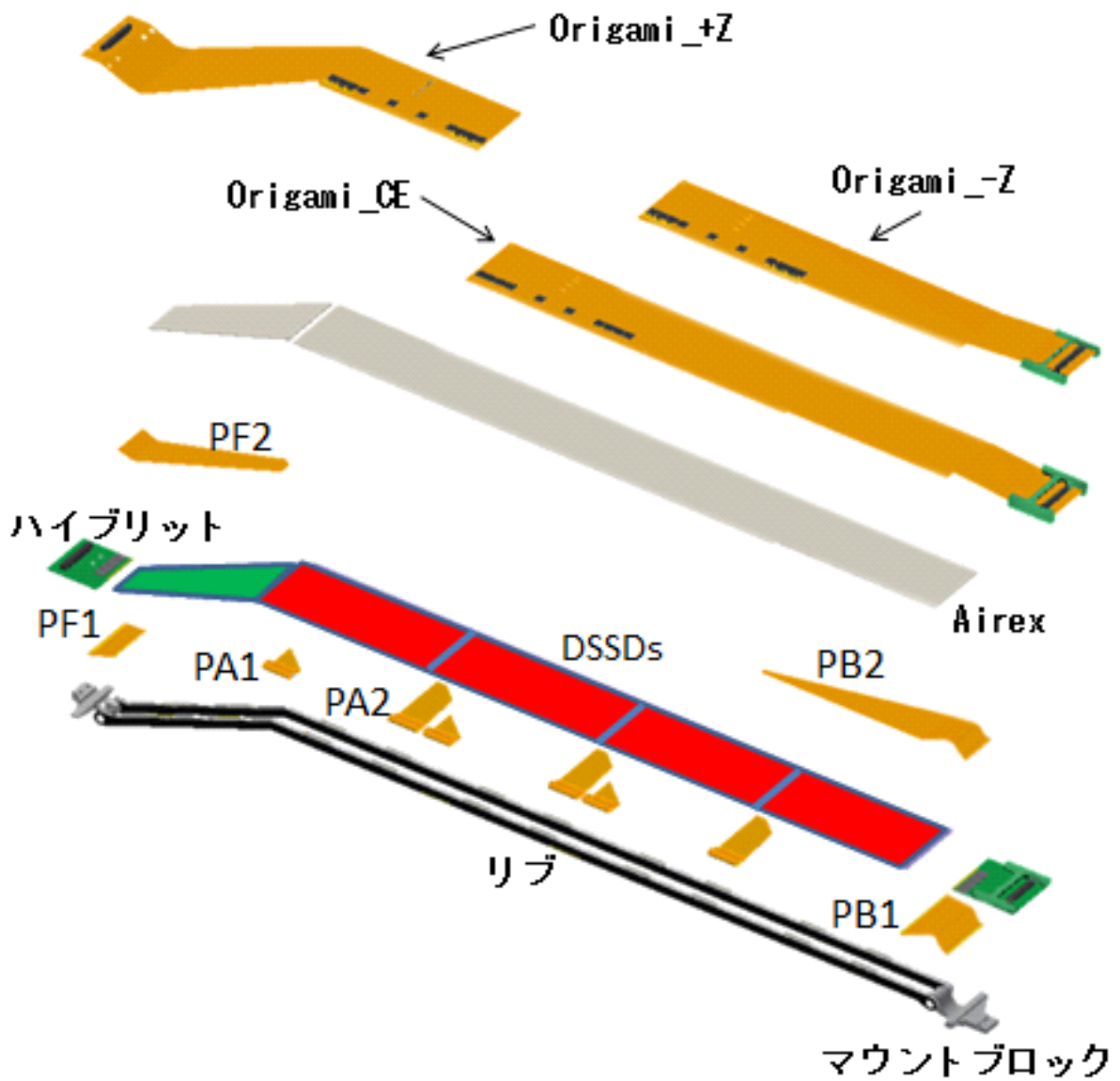


図 4.2: L6 の展開図

図 4.2 に L6 の展開図を示す。L6 のラダーにはセンサーである DSSD の他にも多くの部品から成り立っている。以下で主な部品について言及する。

リブ

リブは DSSD を直接支え、ラダーの骨格となる部品である。リブには多重散乱を抑えるためになるべく物質量の小さい素材が理想的だがそれと同時にラダーがたわむことのない丈夫さも求められる。図 4.3 に最新版のリブを写真を示す。素材のベースには Airex と呼ばれる発泡状のポリマー素材が使用されている。ただし Airex だけでは強度が弱いため CFRP (Carbon-Fiber-Reinforced Plastic) を Airex の両側に貼り補強している。図 4.3 のリブの形状は図 4.2 で示されているものと異なっているが図 4.3 の方が最新版 (2015 月 1 月現在) であり、強度を増すための変更がなされている。

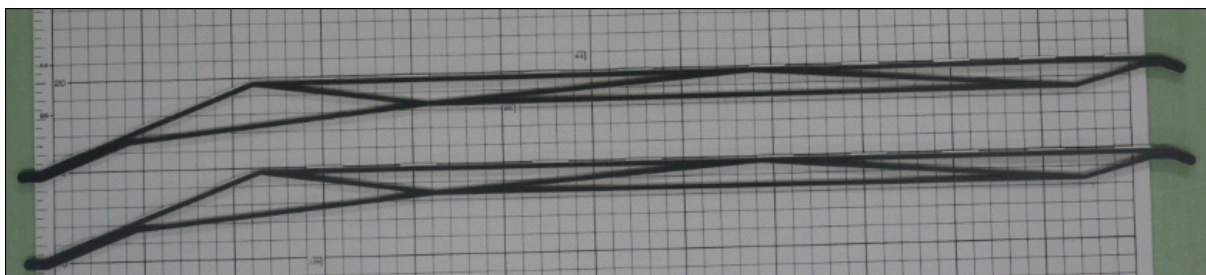


図 4.3: 最新版 (2015 月 1 月現在) のリブの写真

マウントブロック

リブの両端に取り付けられるマウントブロックはラダーをエンドリングに固定する役割を担っている。図 4.4 に FW 用 (左側) と BW 用 (右側) のマウントブロックの写真を示す。FW 用のマウントブロックには BW 用と異なりラダーをエンドリングに固定するピンがスライドする機構 (SLM) となっている。これにより FW 側は自由端になるためエンドリングの公差やラダーの熱膨張等による変位を吸収し、ラダーに無理な負荷がかからない工夫がされている。

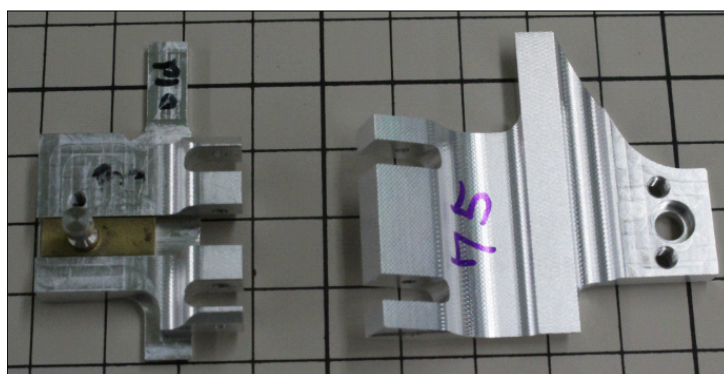


図 4.4: 左 : FW 用マウントブロック 右 : BW 用マウントブロック

PA (Pitch Adapters)

PA (Pitch Adapters) は DSSD の各ストリップを APV25 の対応したチャンネルに接続する経路を提供するフレキシブル基板である。PA の厚さは約 $80\mu\text{m}$ で銅回路をポリイミド膜で覆っており、パッド間隔は最小で約 $44\mu\text{m}$ となっている。図 4.5 に L6 で使用される 6 種類の PA の写真を示す。PA1 と PA2 はオリガミコンセプトになっている中央 3 枚の DSSD それぞれに 1 セットずつ使用される。オリガミコンセプトの説明のところでも述べたように PA1 と PA2 はラッピングされて DSSD 裏面である p-side の信号を表面に配置された APV25 に伝達する。PF1 と PF2 はそれぞれ SFW の DSSD における p-side と n-side に貼りつけられ、信号をラダー端にあるハイブリッドと呼ばれる部分に伝達する。PB1 と PB2 は SBW において同様の役割を担う。

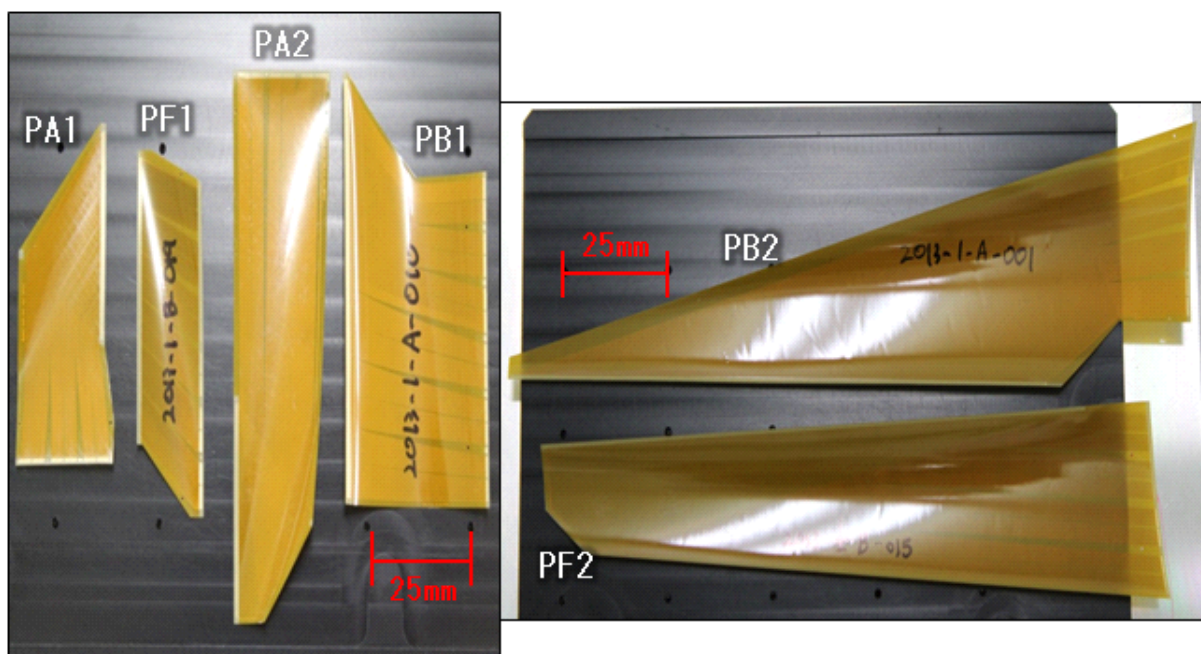


図 4.5: L6 で使用される 6 種類の PA

ハイブリッド

図 4.6 にハイブリッドの写真を示す。ハイブリッドはラダー両端にそれぞれ一つずつ付属し、SFW と SBW の DSSD の信号を読み出す APV25 が両面に設置されている。ハイブリッド上の APV25 はアクセプタンス外にあるため厚さがオリジナル (約 $300\mu\text{m}$) のままである。図 4.6 の写真の裏側にも表側と同じように APV25 と読み出しケーブルのためのコネクタがある。

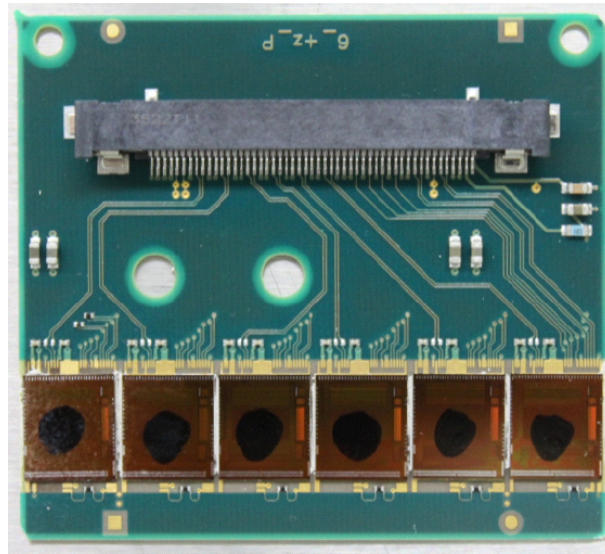


図 4.6: ハイブリッドの片面

Airex

ラダーにおいて後述するオリガミ基板と DSSD の間には Airex と呼ばれる材料のシートが挟み込まれる。リブにも Airex は使用されているがここでは APV25 の発熱を DSSD に伝えるのを防ぐ断熱材としての役割を担う。図 4.7 に Airex の写真を示す。スラント部分の Airex は DSSD と同じ台形に切って使用する。またそれ以外である 4 枚分の DSSD の上には大きな 1 枚の Airex が使用される。

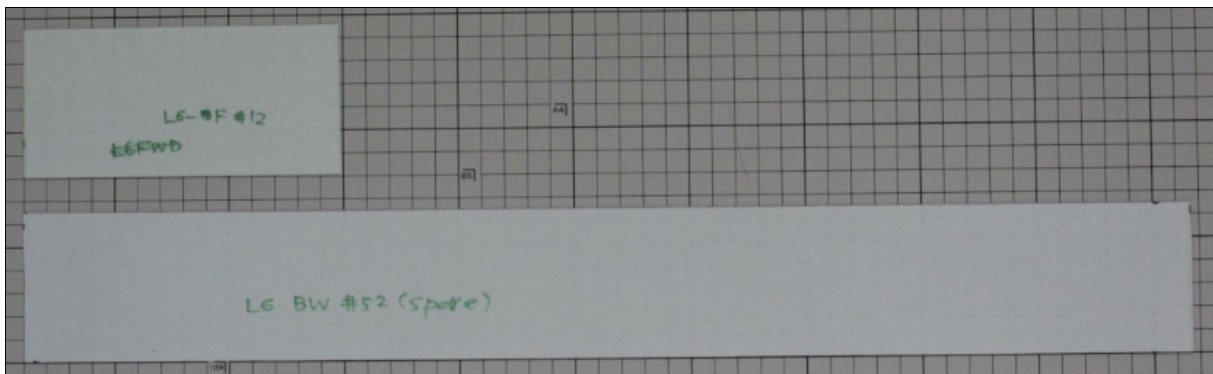


図 4.7: Airex(カット前)

オリガミ基板

オリガミ基板には APV25 に加えて、DSSD(n-side) と APV25 の信号経路の一部が刻まれた PA0 と呼ばれる部品が貼られている。また p-side は前述したように PA1、PA2 がラッピングされてオリガミ基板に貼られた APV25 に直接繋がる。図 4.8 で示すように中央部 3 枚の DSSD(オリガミモジュール) に対応して 3 種類のオリガミ基板があり、それぞれ Origami_+Z、Origami_CE、Origami_-Z となっている。また本番用のオリガミ基板にはそれぞれの片端に外部のケーブルと接続するためのコネクタとそれを保護するための H-シェープ、C-シェープと呼ばれる部品が付属する。

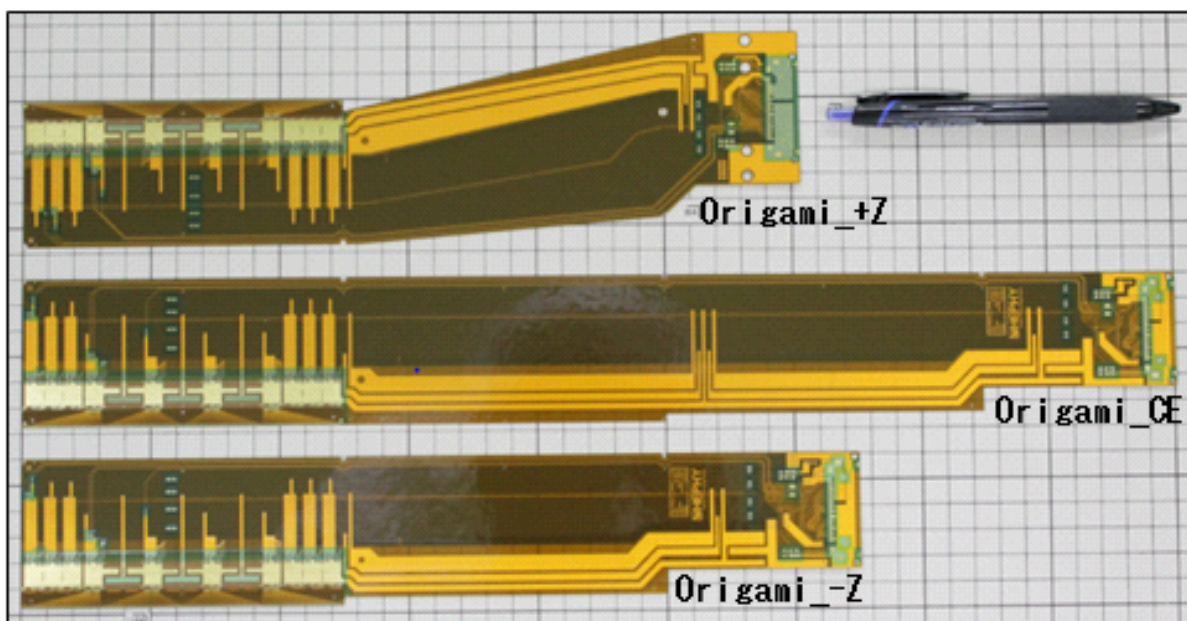


図 4.8: 3種類のオリガミ基板

4.3 治具を使用した組み立て

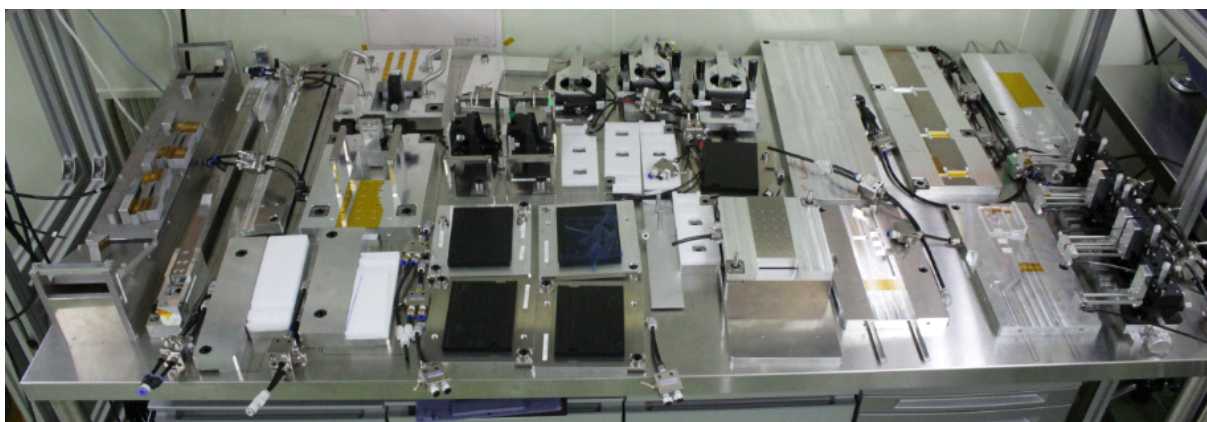


図 4.9: 組み立てに使用する多数の治具

基本的にラダーの組み立てには図 4.9 で示すような多くの治具を使用することにより再現性のある量産を可能にする。治具にはパーツを真空吸着できる機構がついており、治具同士を重ねてから真空を ON、OFF することによってパーツを治具間で精度良く ($\sim 100\mu\text{m}$) 移動させることができる。図 4.10 に治具間を移動する方法の概念図を示す。

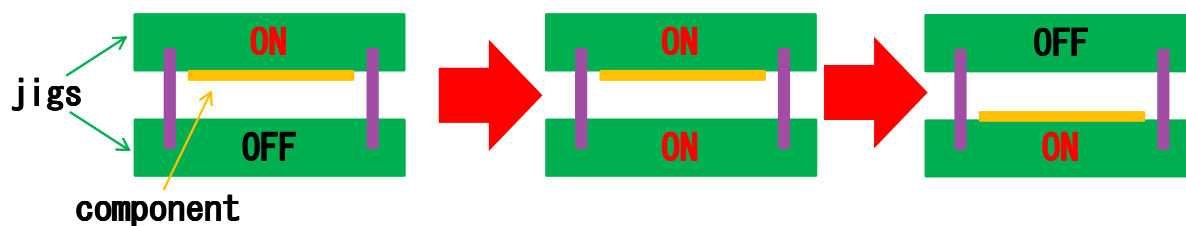


図 4.10: 真空吸着を利用した治具間の移動 (治具の隙間は約 $50\mu\text{m}$ 程度) ON/OFF は真空吸着

4.4 製作工程の概要

詳しくは後述するがラダー製作には主に以下の工程が組み込まれる。

接着

ラダーを組み立てる作業では接着剤をパーツの片方へ塗布し、もう片方と重ねることでしっかりと固定する。基本的には2種類の接着ロボを使用することで塗布していくが塗布精度が必要でない一部の箇所は手塗りにしてある。

ワイヤーボンディング

DSSDからの信号をAPV25まで導く経路を繋ぐために直径 $25\mu\text{m}$ のアルミ細線を結線する作業であるワイヤーボンディングが必要となる。製作要求としてYield(ワイヤーボンディングの成功率)は各ボンディング箇所において99%以上となっている。

EQA

電氣的品質保証(EQA: Electric Quality Assurance)としてDSSDの信号が正常に読み出せるかをラダー製作中でも確認できるようにするため小型の読み出しシステム(APVDAQシステム)を用意している。

Mechanical QA/QC

ラダー製作で最も精度が要求されるDSSD位置精度は $\sim 10\mu\text{m}$ が目標となっている。これを達成するために3次元測定器(CMM: Coordinate measuring machine)を導入している。正確なDSSDの位置をCMMにより把握し、微調整する機械的品質制御(MQC: Mechanical Quality Control)とラダー完成後の最終的なDSSD位置精度について測定する機械的品質保証(MQA: Mechanical Quality Assurance)が行われる。

4.5 作業環境と使用機器

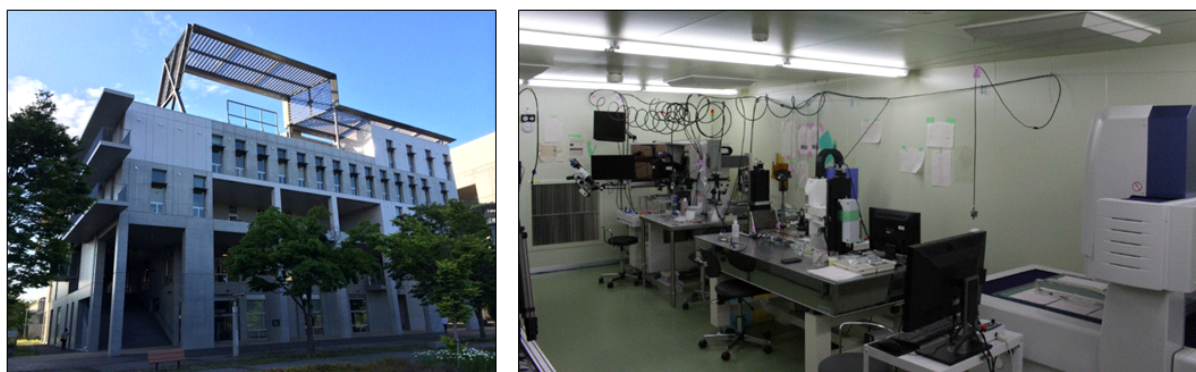


図 4.11: 左 : Kavli IPMU の外観 右 : クリーンルーム内

L6 のラダーを製作する場所は千葉県柏市にある Kavli IPMU(カブリ数物連携宇宙研究機構)のクリーンルーム (Class-1000) である。図 4.11 の右図に示すようにクリーンルームにはラダーの組み立てに必要な接着ロボ、ボンディングマシン、3次元測定器などが配置されている。クリーンルーム内は接着剤の硬化時間や各種機械の動作に関する再現性が担保されるように温度が $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度が $50\pm 3\%$ に保たれている。

ラダー組み立ての中心となるのは図 4.12 で示す光学定盤上である。定盤には Basement-jig に Assembly-banch が重なって配置されており、Assembly-banch は両脇の稼働ステージによってその場で上下することができる。



図 4.12: ラダー組み立ての中心となる光学定盤上

ラダーの組み立て工程ではパーツを治具で真空吸着をしたまま定盤から接着ロボやボンディングマシン、3次元測定器に移動させる。そのため治具に真空を供給する真空パイプが天井にはりめぐっていることが図 4.11 の右図を見るとわかる。このパイプに真空を供給するポンプがクリーンルームの外に設置されている。図 4.13 の右図に示したものが使用している真空ポンプ (DA-241S, ULVAC) で最低でも 16[kPa] の真空を供給できる。3 台あるうちの 2 台を常時利用しており、もう一台はバックアップ用となっている。また真空ポンプの他に図 4.13 の左図のような接着ロボやボンディングマシンに圧空を供給する圧空ポンプ (P4-PFE, IAC) も 2 台 (うち 1 台は予備) 設置されている。圧空ポンプには 0.4[MPa] の供給能力が求められる。

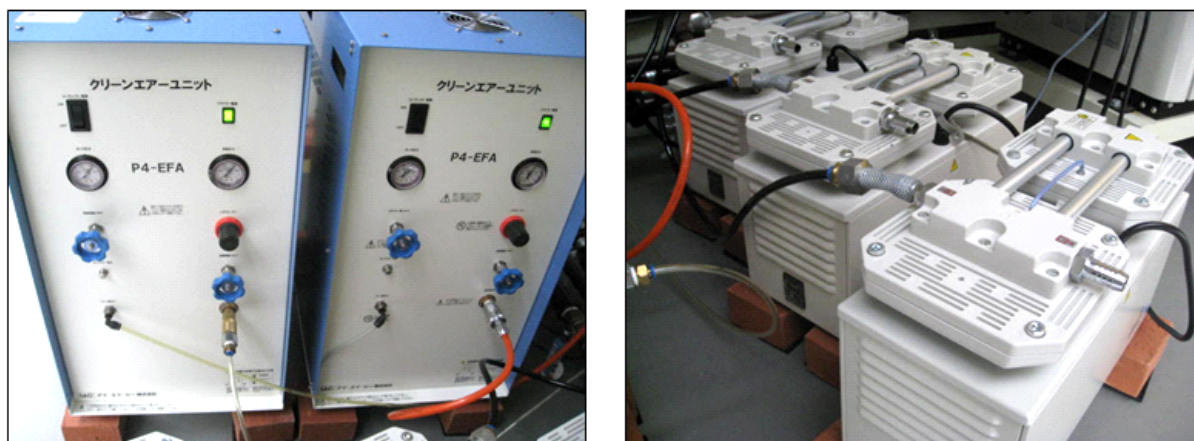


図 4.13: 左 : 圧空ポンプ (P4-PFE, IAC) 右 : 真空ポンプ (DA-241S, ULVAC)

4.6 ラダーの組み立て手順

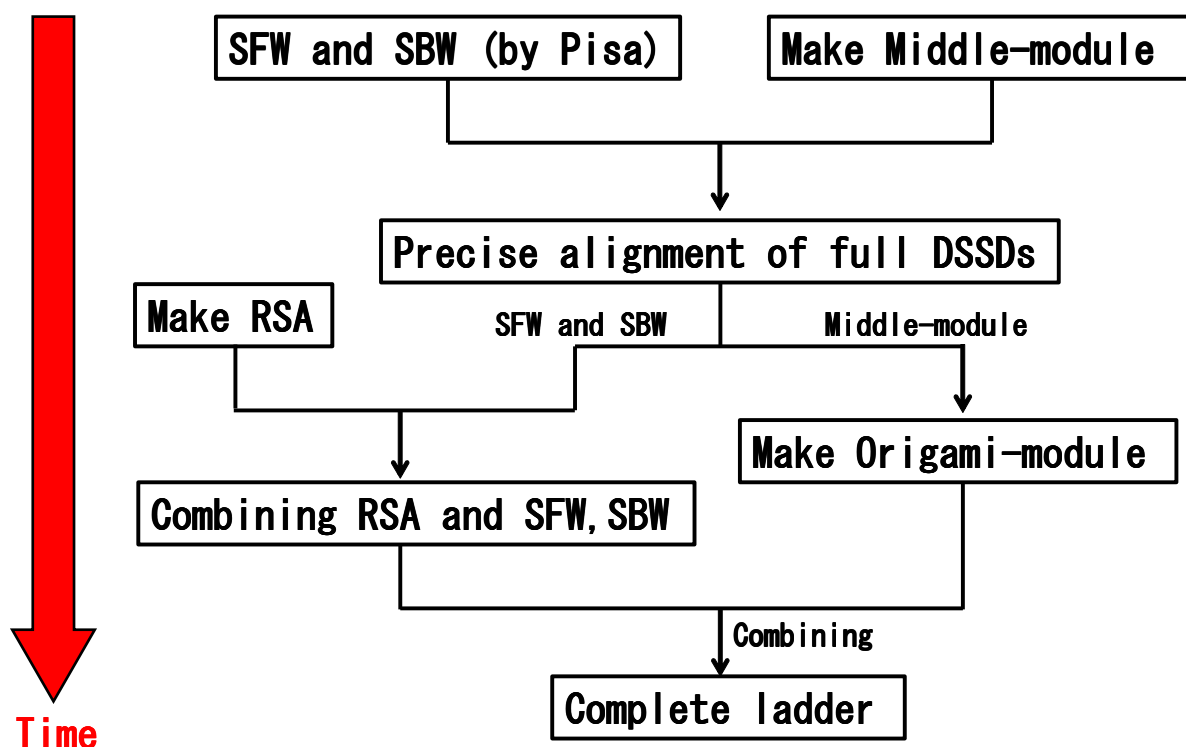


図 4.14: L6 ラダー組み立て手順のフローチャート

図 4.14 に後述する試作ラダーの製作に使用した組み立て手順のフローチャートを示す。以下ではこれに沿って L6 ラダーの組み立て手順を説明していく。

4.6.1 ミドルモジュールの製作

ミドルモジュールは長方形型 DSSD に PA1 と PA2 を貼りつけたものでラダー中央部に 3 セット必要となっている。図 4.15 に作業時の写真を示す。DSSD-jig に DSSD をセットし、真空吸着で固定する。PA1、2 の方は PA-jig に真空吸着で固定してから接着ロボで接着剤を塗布する。その後 DSSD-jig に PA-jig を重ねて PA-jig の真空吸着を OFF にする。1 分後に PA-jig を取りはずし接着剤が完全に硬化するまで 1 日待つ。最後に PA1、2 と DSSD(p-side) 間にワイヤーボンディングをしたらミドルモジュールの完成である。(ボンディングの箇所や詳しい様子については次章で紹介する。)

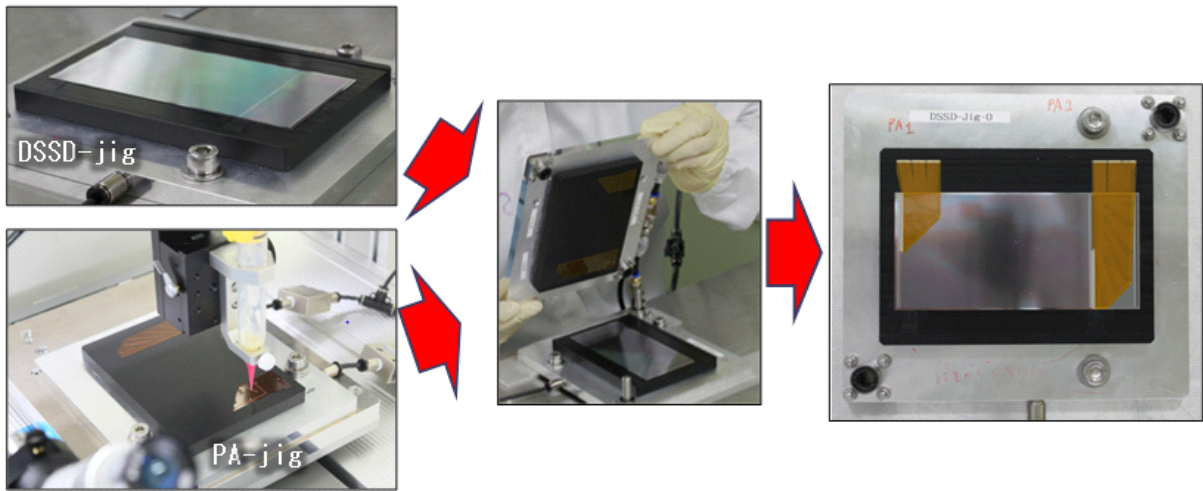


図 4.15: PA1、2 と DSSD の貼り付け

4.6.2 ミドルモジュールと SFW、SBW の MQA

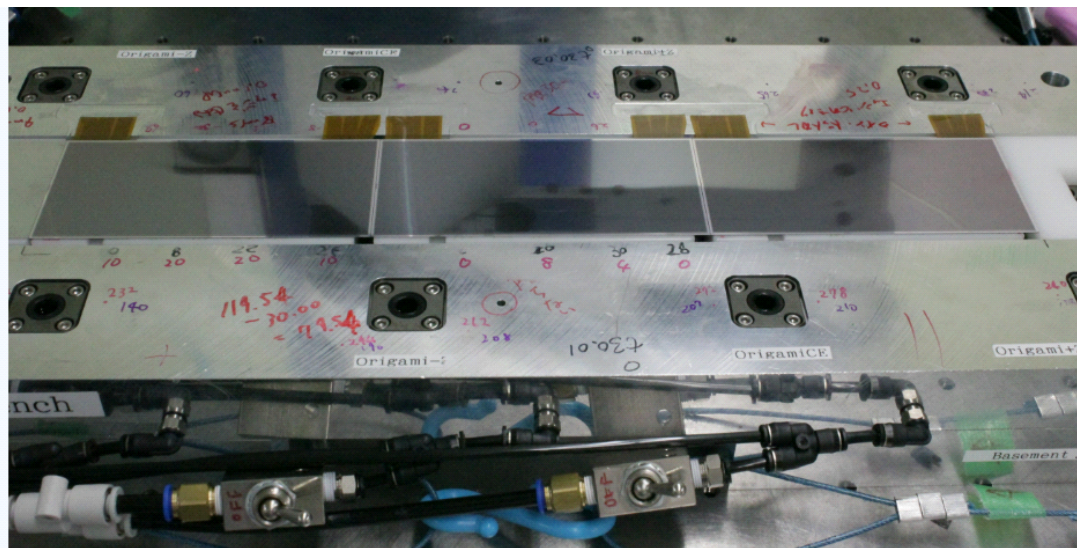


図 4.16: Assembly-bench に並べられたミドルモジュール ×3

完成した3つのミドルモジュールは DSSD-jig から Assembly-bench に図 4.16 のようにそのまま移して並べる。

次にSFW(FW sub-assembly)とSBW(BW sub-assembly)だが図4.17で示すような Multipurpose-chuck と呼ばれる治具(輸送ケースを兼ねる)によってイタリアのPisaから完成形で送られてくる。SFWとSBWのDSSDにはそれぞれp-sideにPF1、PB2がn-sideにPF2、PB2が貼りつけられている。またそれらがハイブリッドの両面にも貼りつけてあり、APV25のところでワイヤーボンディングされている。

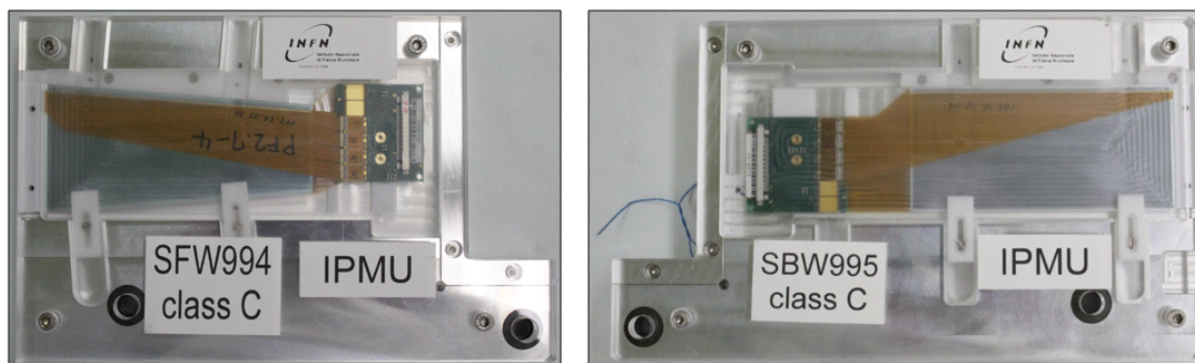


図 4.17: 左 : SFW 右 : SBW

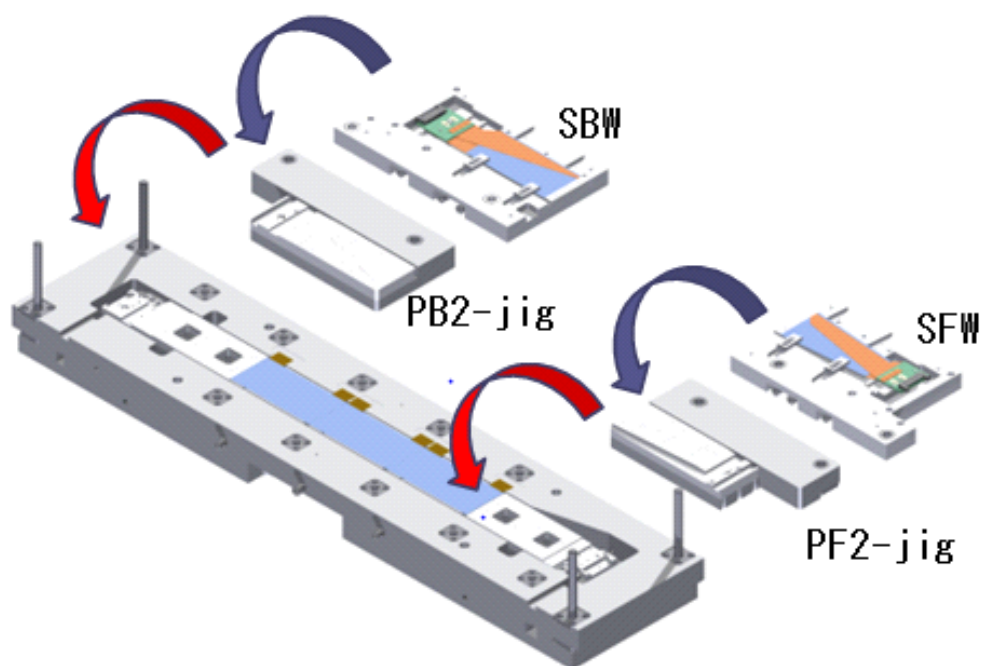


図 4.18: SFW と SBW の Assembly-bench への移動手順

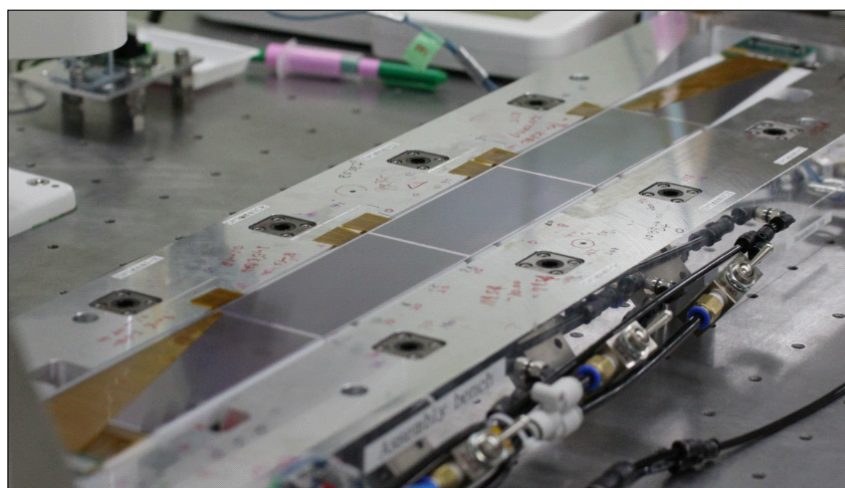


図 4.19: Assembly-bench に並べられた 5 枚の DSSD

SFW と SBW は図 4.18 のように Multipurpose-chuck から PF2-jig、PB2-jig を経由して Assembly-bench に並べられる。図 4.19 のように L6 を構成する 5 枚全ての DSSD が真空吸着され並べられた後 Assembly-bench を下の Basement-jig ごと 3 次元測定器に移動し、DSSD の位置を微調整 (MQC) する。詳しい内容は後述するがこの作業により DSSD の位置精度を $\sim 10\mu\text{m}$ まで高めることが期待される。

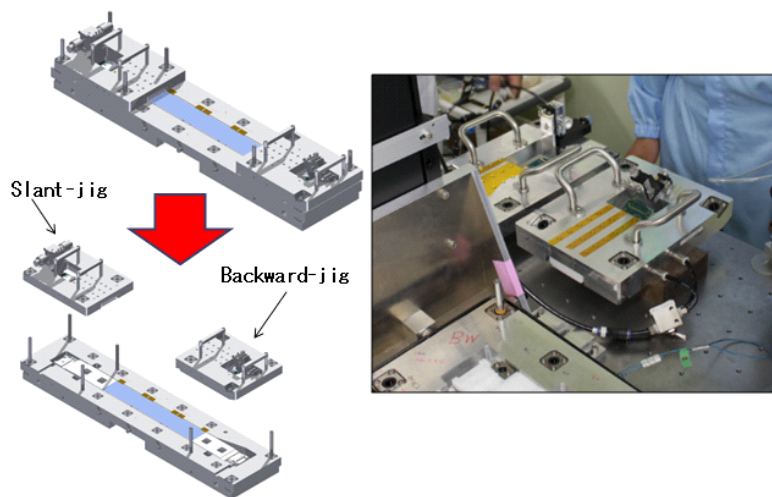


図 4.20: Assembly-bench からの SFW と SBW の取り外し

MQC の作業後は図 4.20 のように SFW と SBW を Slant-jig と Backward-jig に真空吸着して Assembly-jig から取り外し退避させる。

4.6.3 オリガミモジュールの製作

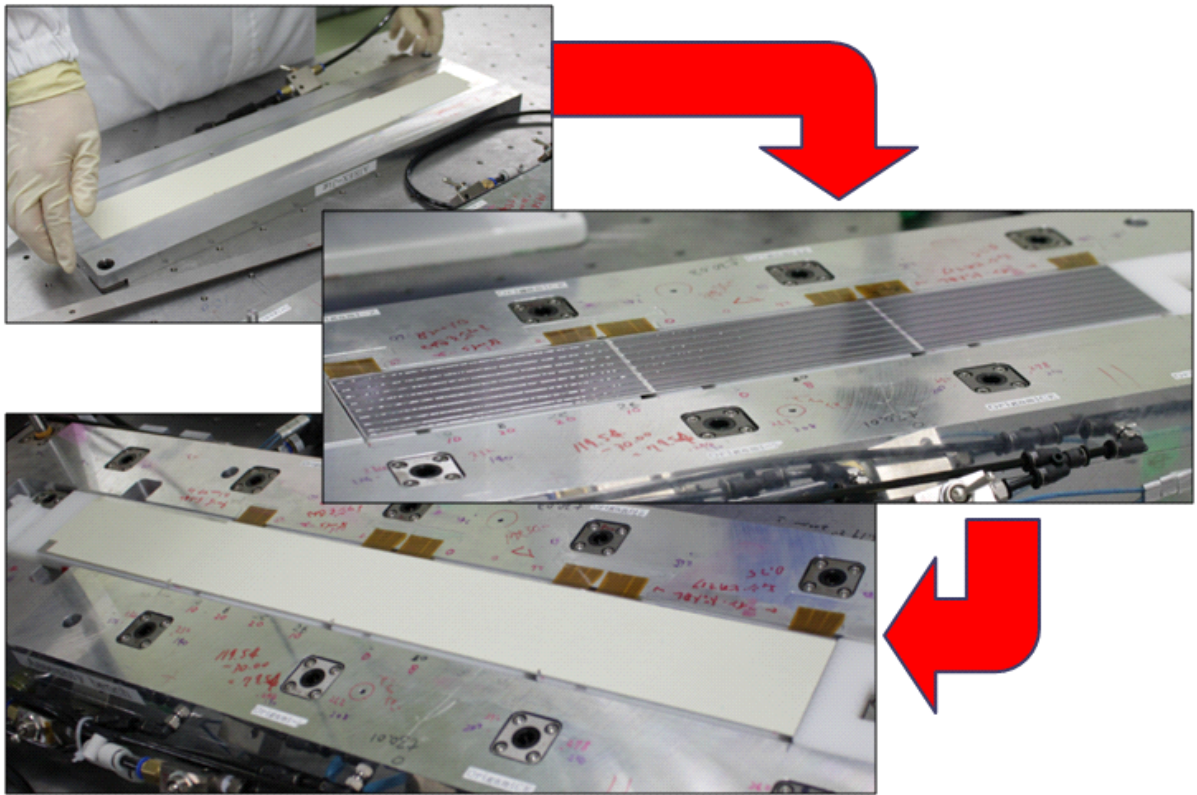


図 4.21: DSSD と Airex の接着

Assebbly-benchに残っている3セットのミドルモジュールでオリガミコンセプトの構造をもつオリガミモジュールを製作する。

まず図4.21のように3枚並んだDSSDに接着剤を直接塗布する。その後Airex-jigにBW用の長いAirexを真空吸着してからAssembly-jigに重ねてDSSDとAirexを接着する。

次にオリガミ基板を接着する工程にはいる。まずOrigami_CEを図4.22のようにOrigami-Alignment-jigに真空吸着してからOrigami_CE-jigに移し、接着剤を塗布する。それをAssembly-benchに重ねてすることでAirexとOrigami_CEを接着する。わざわざ一度Origami-Alignment-jigを経由するのはオリガミ基板にAPV25がむき出しで貼りつけてあるのでそれを壊さないように組み立てるためである。

同じ理由で図4.23のようにOrigami-ZもOrigami-Alignment-jigを経由してOrigami-Z-jigに移し、接着剤を塗布する。そしてOrigami-ZをOrigami_CEに接着する。

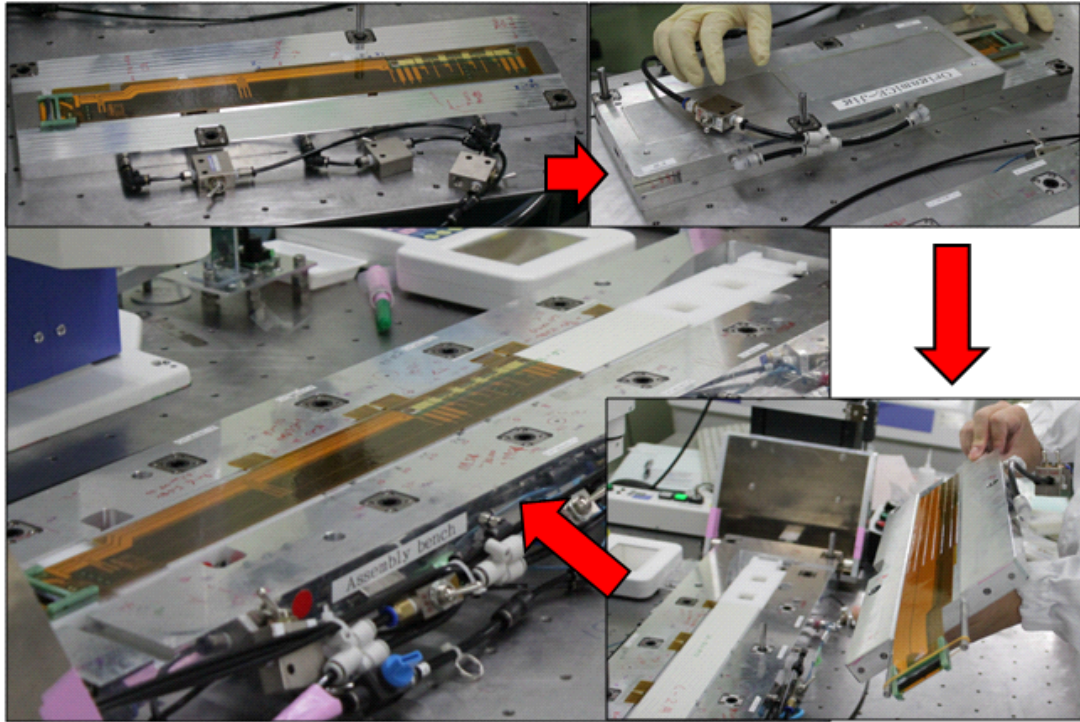


図 4.22: Origami_CE の接着手順

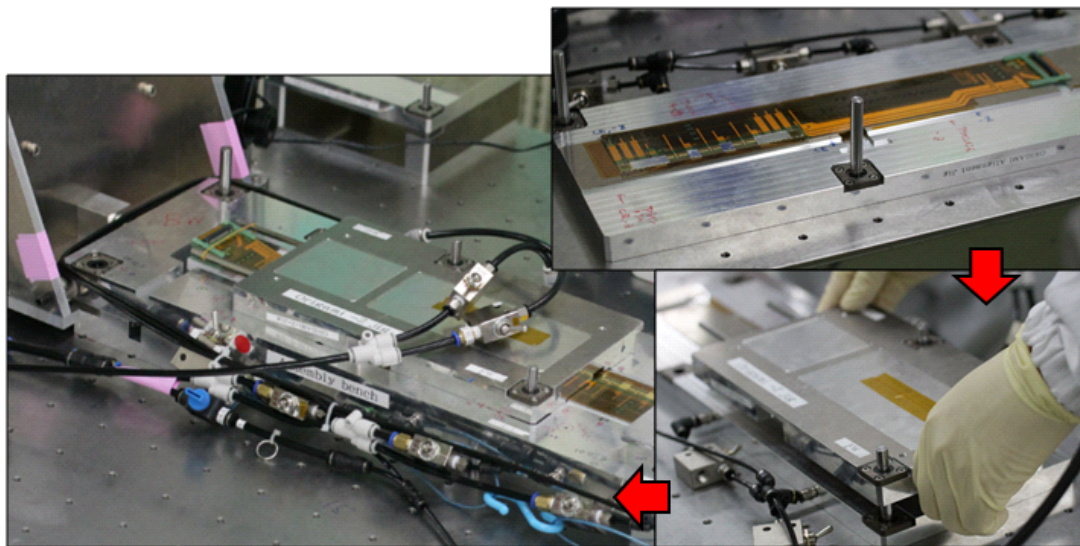


図 4.23: Origami_-Z の接着手順

Origami_+Zについてはスラント部分に接着するため曲げ癖がついており、Origami-Alignment-jigの代わりに図4.24で示すようなOrigami_+Z-Alignment-jigを使用する。そこからOrigami_+Z-jigに移すのだがこのときOrigami_+Zの片側を支えるために図4.24で示すようなアクリル製の器具を取り付ける。そして接着剤を塗布し、Assembly-benchに重ねてOrigami_+ZをAirexに接着する。

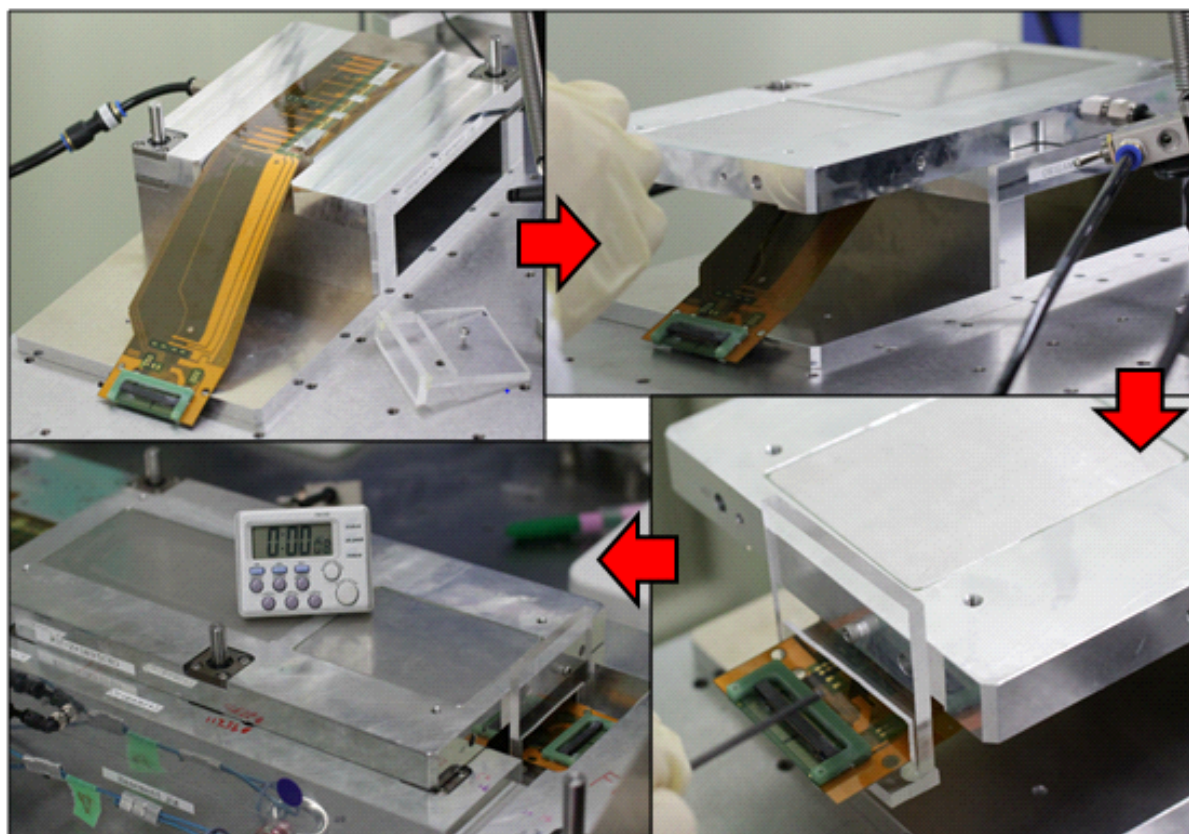


図 4.24: Origami_+Z の接着手順

3枚のオリガミ基板がすべて接着し終わったら図4.25のようにAssembly-banchごとボンディングマシンに移動してオリガミ基板上の該当箇所をワイヤーボンディングする。

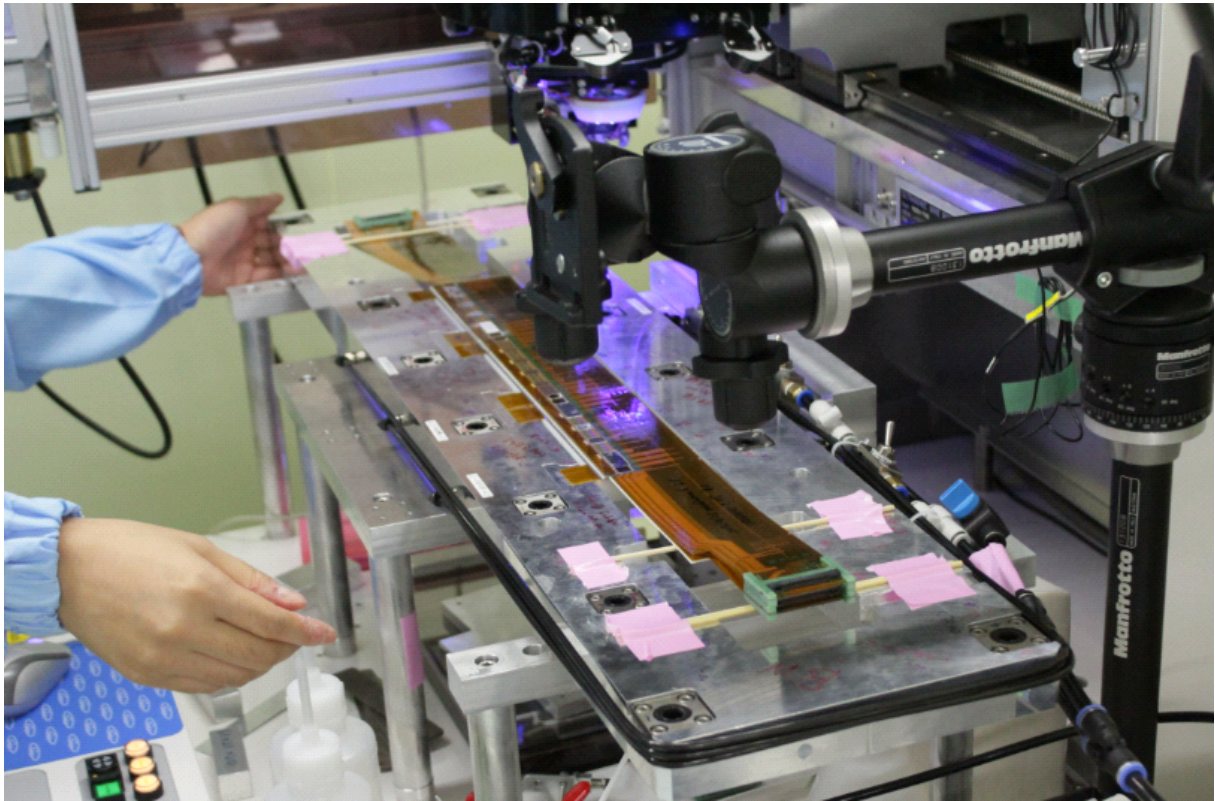


図 4.25: オリガミ基板上のワイヤーボンディング

その後 Assembly-bench をまた Basement-jig の上に戻し、PA1、PA2 のラッピング作業を図 4.26 のように行う。まず 6 台の PA-wrapping-jig をラッピングする各 PA1、PA2 の前に配置する。PA-wrapping-jig の突き出した部分には真空吸着ができる器具が付いており、PA1、PA2 の端に接着剤を塗布したらその裏を吸着し、ラッピングする。PA-wrapping-jig には 5 軸のマイクロメータにより x、y、z の 3 方向の他に前後、左右のあおりを調整できるのでこれによりラッピングの塗布箇所を正確な位置に押し付けることが可能となっている。接着剤が硬化するまで約 1 日の間治具で押しつけた後、またボンディングマシーンに Assembly-banch ごと移動してラッピング部分のワイヤーボンディングを行う。

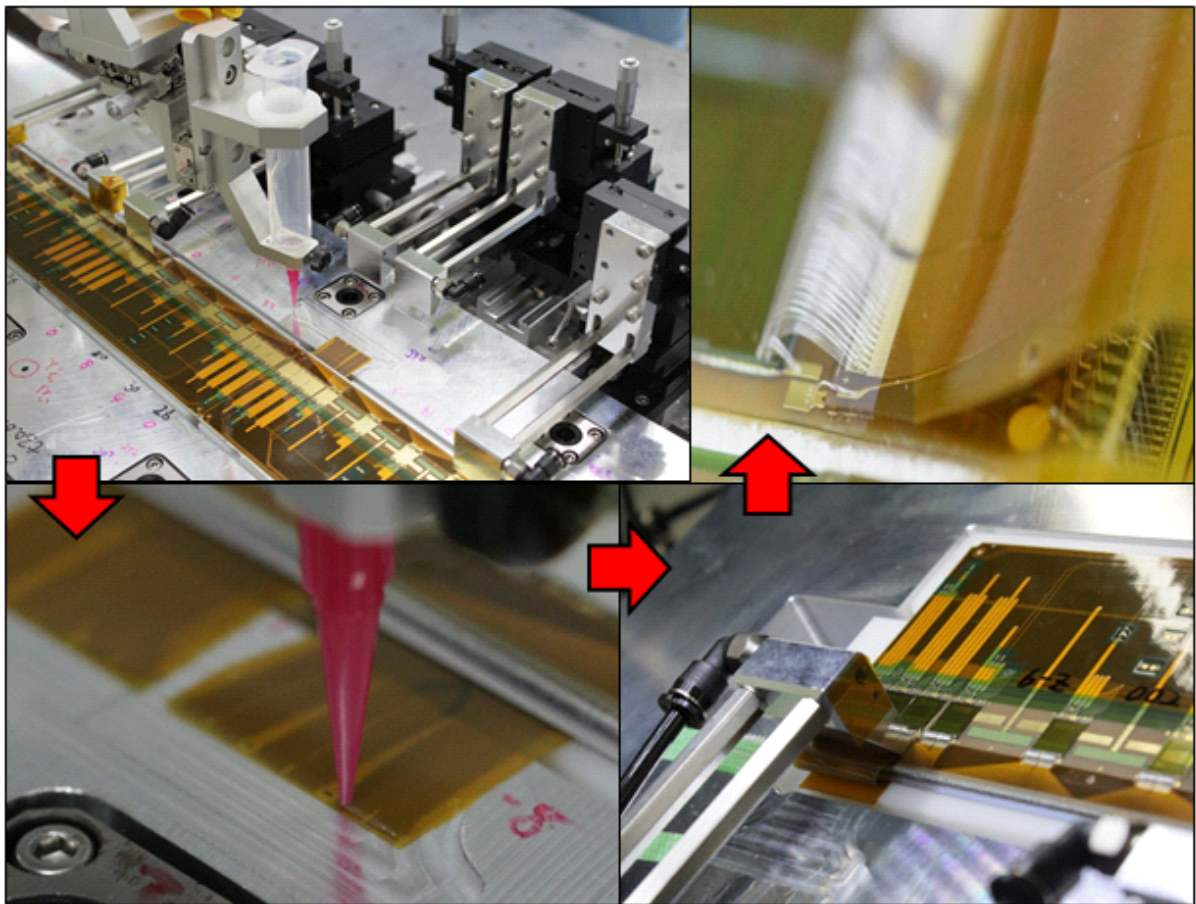


図 4.26: PA1、PA2 のラッピング手順

また Assembly-bench を Basement-jig に戻した後で今度は CO2 クリップをオリガミ基板に接着する。CO2 クリップは図 4.27 に示しているような約 1cm 程度の部品である。後々 AVP25 の上部に冷却のための CO2 クーリングパイプを配置しなければならないため CO2 クリップはそのパイプのガイドとなる。図 4.27 のように CO2 クリップを CO2-clip-jig に取り付けて接着剤を 2 点塗布する。そしてオリガミ基板に重ねて接着する。1 日待つて接着剤が完全に硬化した後 CO2-clip-jig を取り外せばオリガミ基板の上に CO2 クリップが残る。

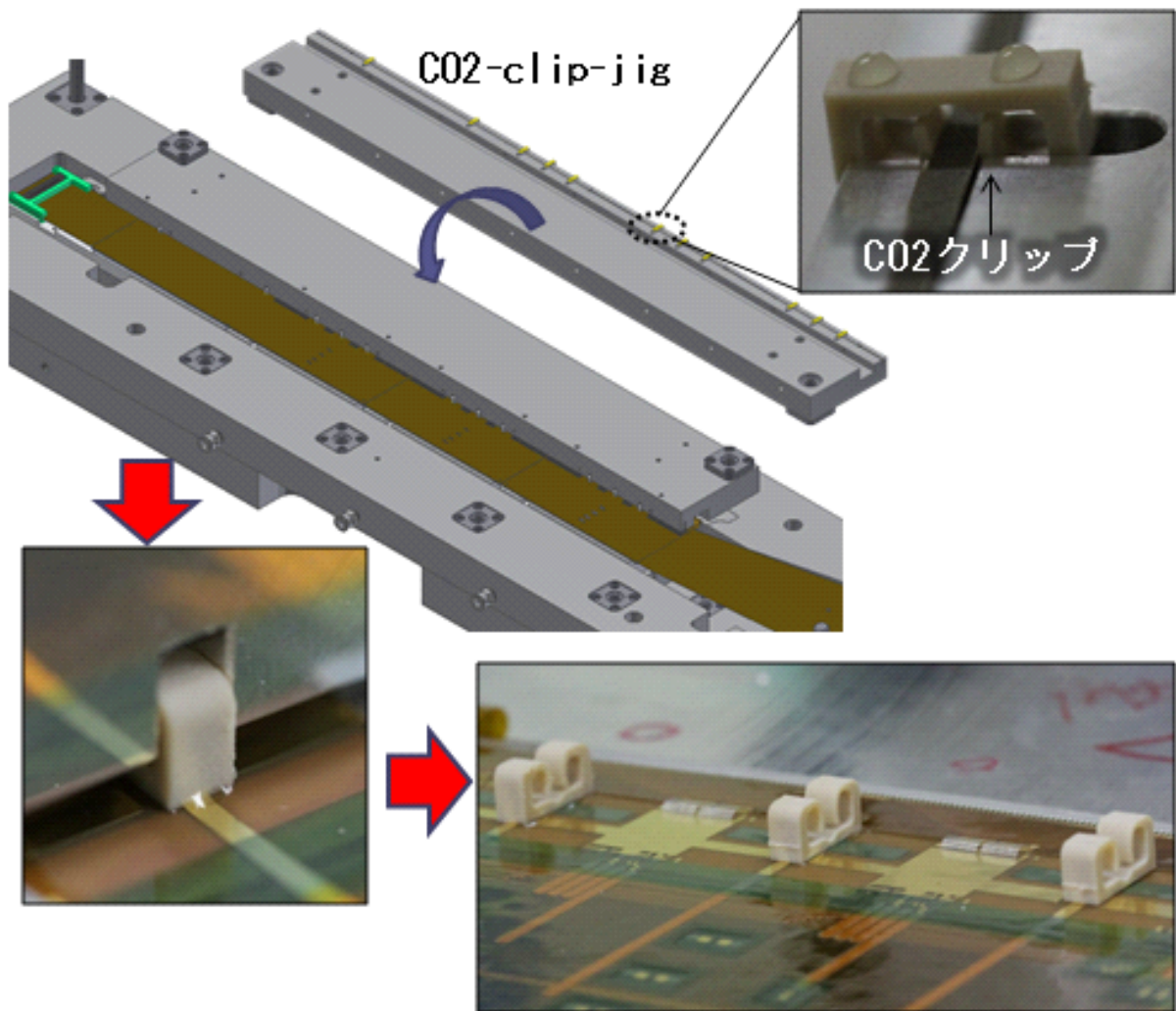


図 4.27: CO2 クリップの接着工程

4.6.4 RSA の製作

次にリブとマウントブロックから構成される RSA(Rib sub-assembly) を製作する。Rib-assembly-jig の両端にそれぞれ FW、BW 用のマウントブロックをネジで固定する。そして図 4.28 のようにリブを置いて (真空吸着で固定) マウントブロックとリブの間に接着剤を流し込むことで RSA を製作する。

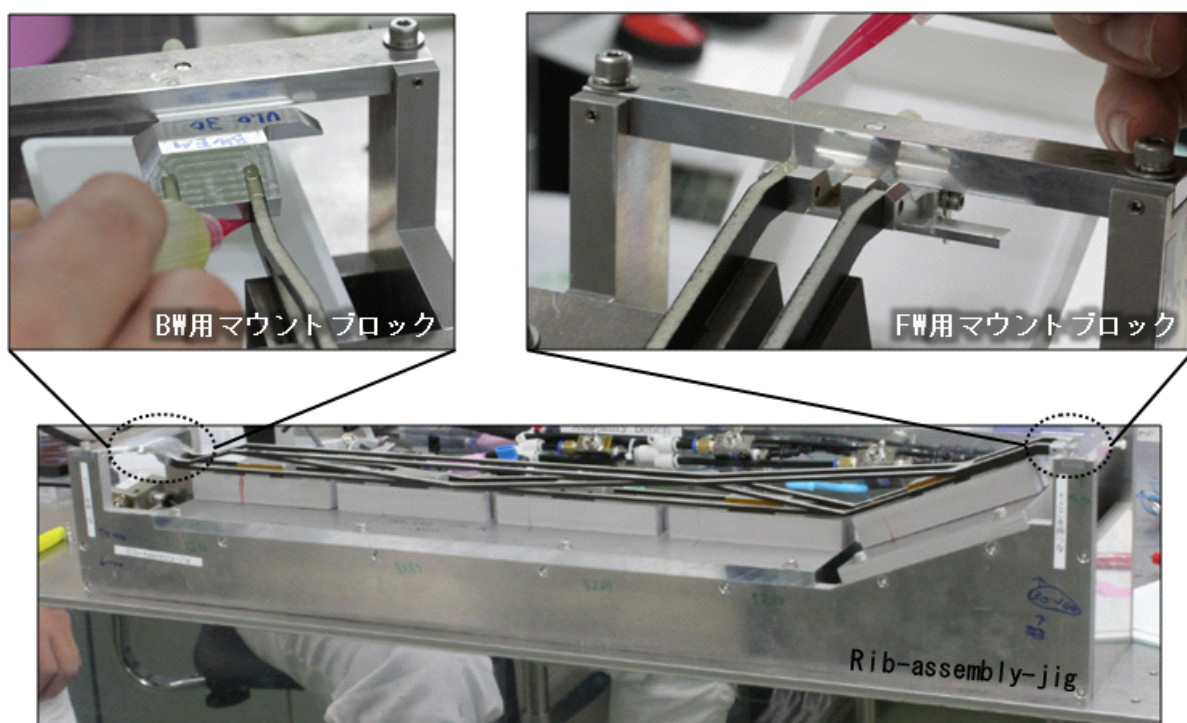


図 4.28: RSA の製作写真

4.6.5 RSA と SFW、SBW の接着

図 4.29 のように Assembly-banch を稼働ステージで持ち上げ、その下から引き抜いた Basement-jig の上に Rib-jig を固定する。その Rib-jig に製作した RSA を取り付けた後、Assembly-bench から取り外しておいた SFW と SBW を図 4.30 のように接着する。接着面はリブの枕部分に 5 点塗布となっている。

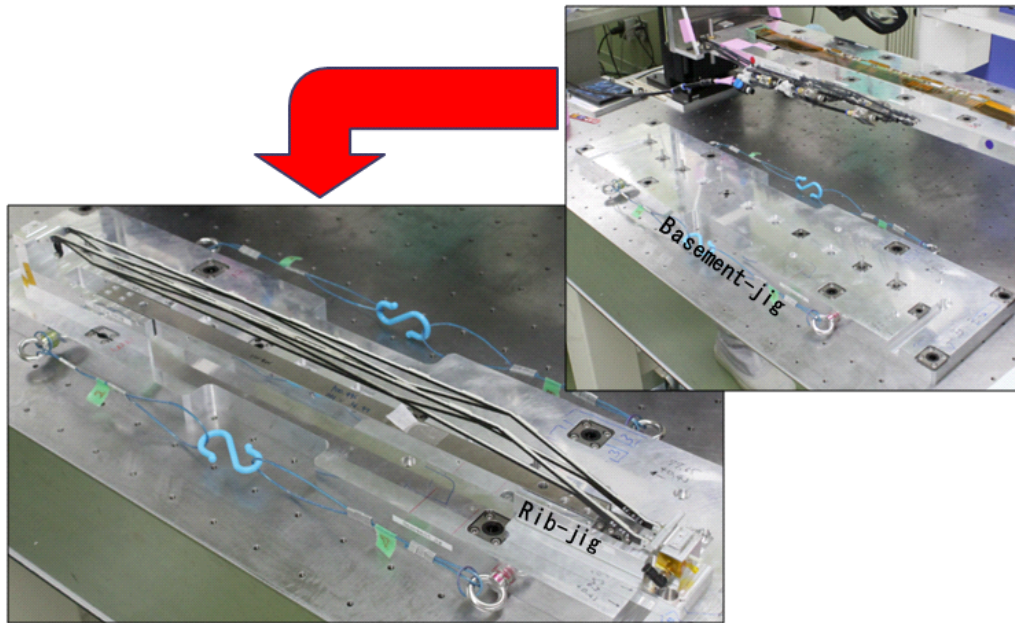


図 4.29: Basement-jig にのった Rib-jig

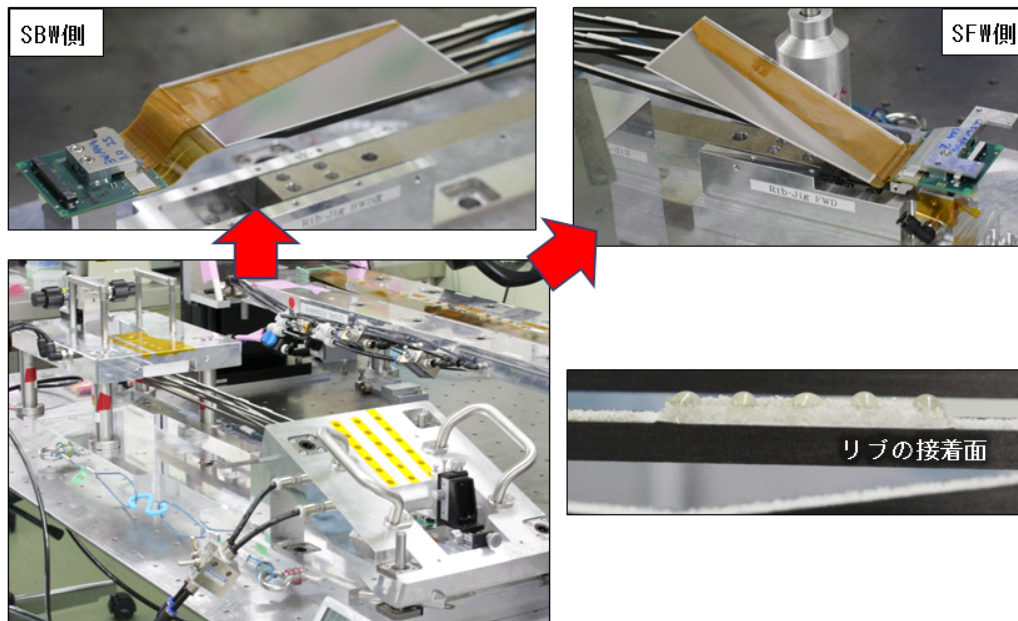


図 4.30: RSA への SFW と SBW の接着

RSA と SFW、SBW を接着した後で図 4.31 のように FW 用に加工した Airex の広い範囲に接着剤をまんべんなく点塗布をして SFW の上にのせる。この部分は接着精度を気にする必要がないので手作業となる。

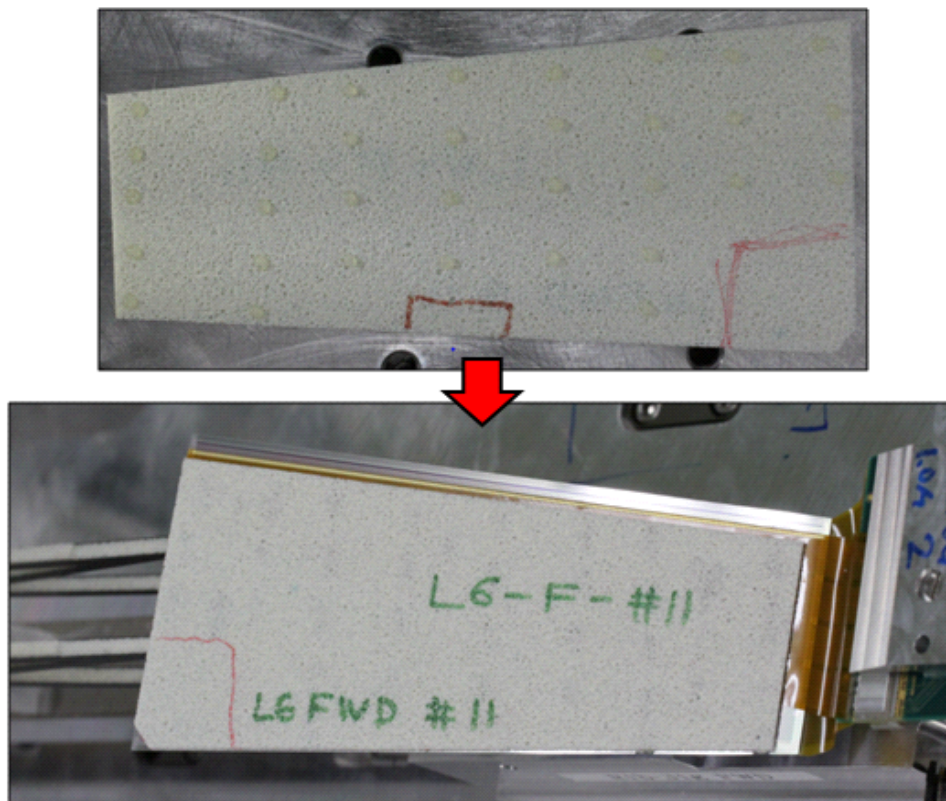


図 4.31: SFW と Airex の接着

4.6.6 RSA とオリガミモジュールの接着

RSA がのった Basement-jig を図 4.32 のように Assembly-bench の下に戻す。そして図 4.33 のように SFW と SBW、リブに点塗布で接着剤を塗布した後 Assembly-banch のステージを動かし、既定の位置まで下げて RSA とオリガミモジュールを接着する。その後残っている接着箇所である SBW 上の Airex と Origami_CE、Origami_CE と Origami-Z を図 4.34 のように適当に接着剤を塗布して接着する。最後に Assembly-bench を完全に下げれば図 4.35 で示すように L6 のラダーが完成する。その後、完成したラダーは 3 次元測定器に移動し、最終的な DSSD の位置精度を測定する MQA を行う。

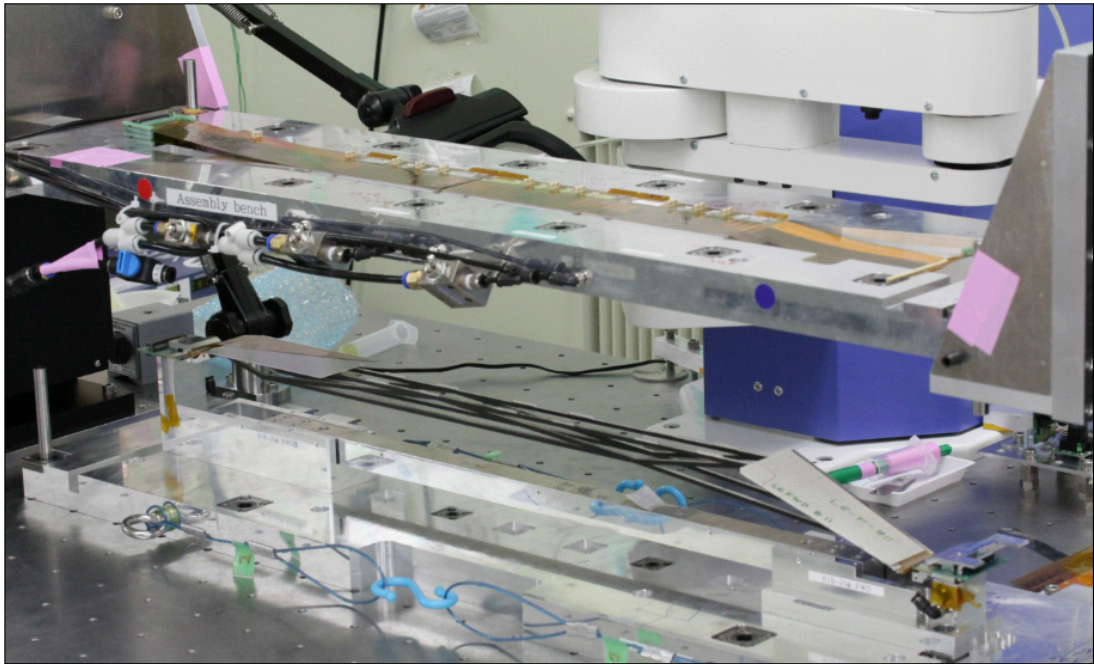


図 4.32: RSA とオリガミモジュールの接着

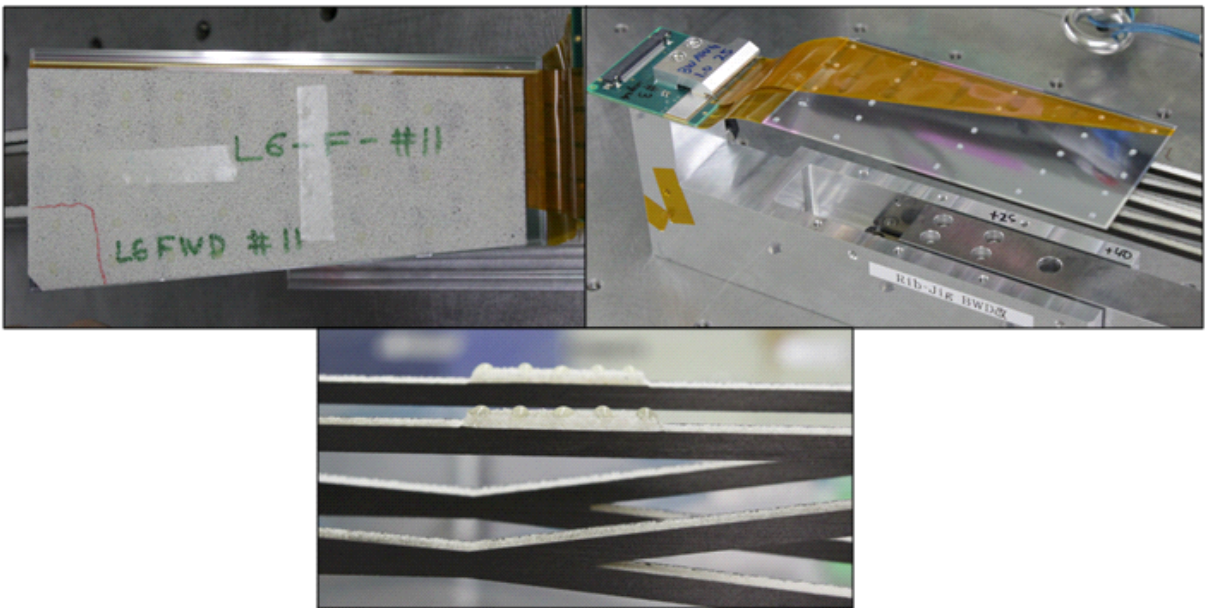


図 4.33: SFW と SBW、リブへの塗布

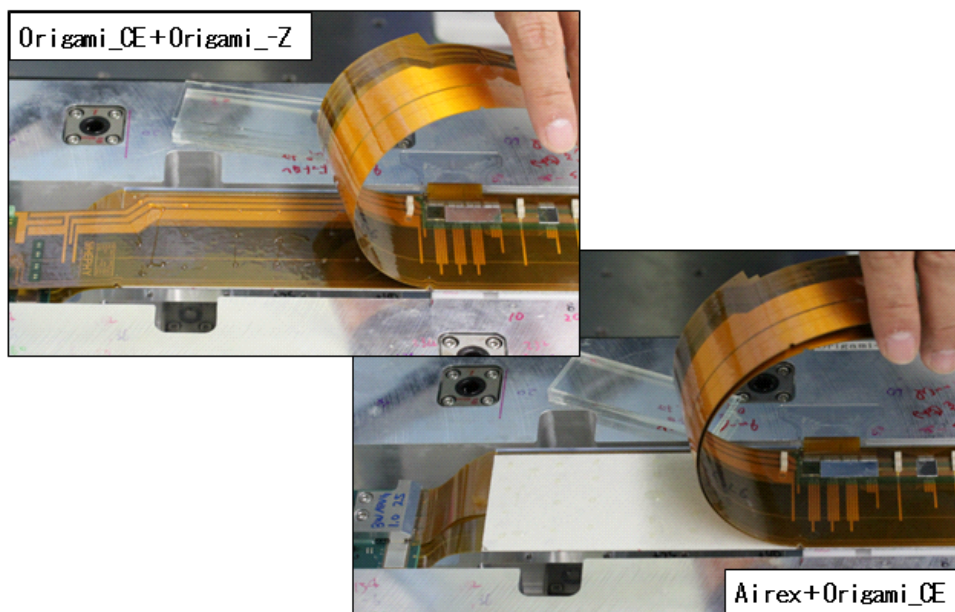


図 4.34: 最後に残った SBW 上における接着

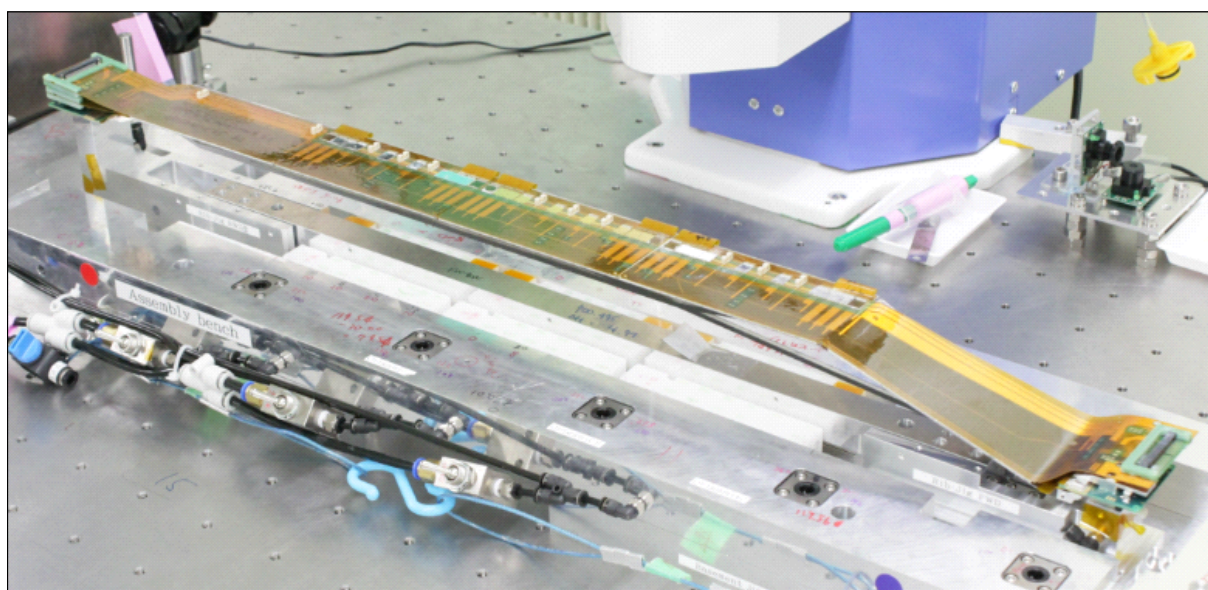


図 4.35: 完成した L6 の写真

4.7 Mechanical QA/QC

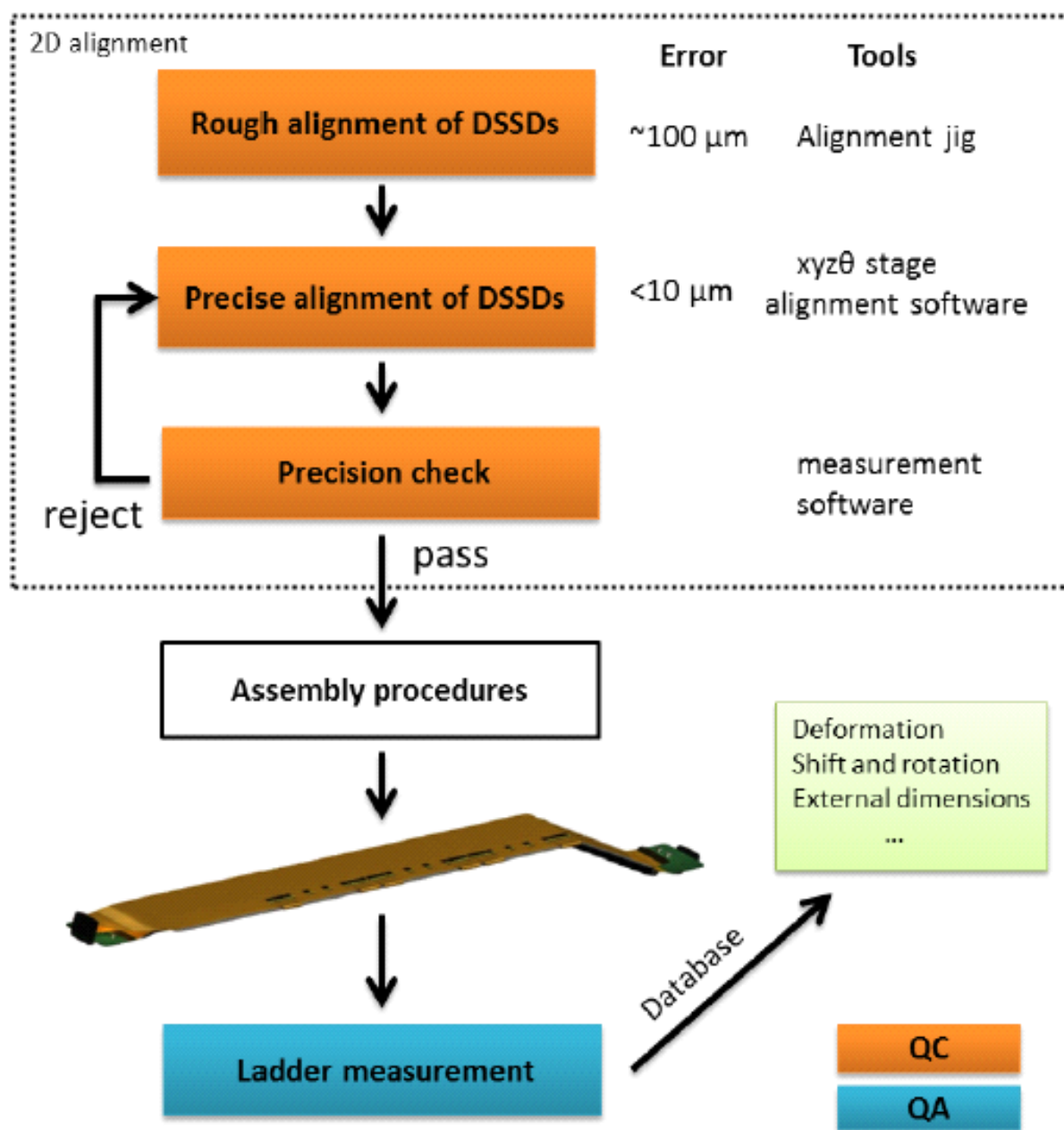


図 4.36: Mechanical QA/QC のフローチャート [22]

ラダー組み立てでの要求において DSSD を設計値 $\sim 10\mu\text{m}$ の精度で配置することを達成するために 3次元測定器 (CMM) を導入し、MQC(機械的品質制御) と MQA(機械的品質保証) を行う。

ラダー組み立てにおける MQC や MQA のフローチャートを図 4.36 に示す。4.6.2 章において Alignment-bench 上にただ配置された時点での DSSD の位置精度は $\sim 100\mu\text{m}$ ほどしかない。これを $10\mu\text{m}$ 以下の精度まで高めるために XYZ θ -jig と 3次元測定器を使用して MQC をする。ラダーが最後まで組み上がった後に、もう一度 3次元測定器を使用し、ラダーの組み立て中において DSSD 位置精度が $\sim 10\mu\text{m}$ に保たれていたかを確認する MQA を行うという製作の流れになっている。

またラダーにおける座標系は z 方向が図 4.37 のように設置時でのビーム方向と同じに定義している。

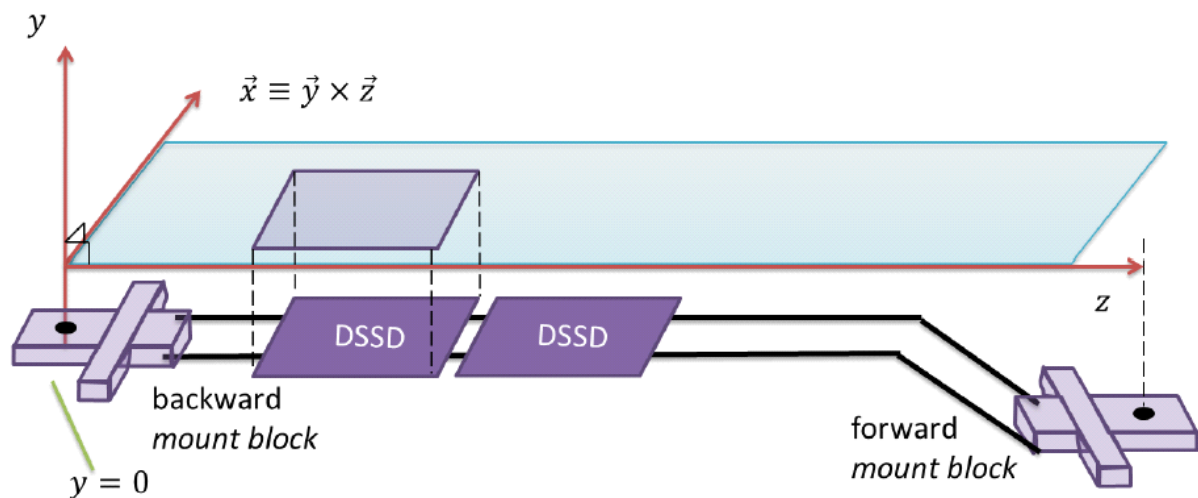


図 4.37: ラダーにおける座標系の定義 [22]

4.7.1 3次元測定器 (CMM)

図 4.38 の左図に使用する 3次元測定器 (Mitsutoyo, QV-X606P1L-C) の写真を示す。3次元測定器にはカメラが設置されており、そこから得られた画像を認識して 3次元の位置測定が可能である。3次元測定器の座標系は図 4.38 で示すようになっており、z 方向に関しては被写界深度の小さいレンズでフォーカスすることにより精度良く測定している。測定精度は $(x, y, z) = (1.0, 1.5, 1.5)\mu\text{m}$ である。3次元測定器は画像のコントラストを判断することができるためプログラムをあらかじめ作成しておけば図 4.38 の右図のように治具に空けられた穴のふちを自動的に判断して測定し、最終的に穴の中心位置を計算することも全自動で可能である。

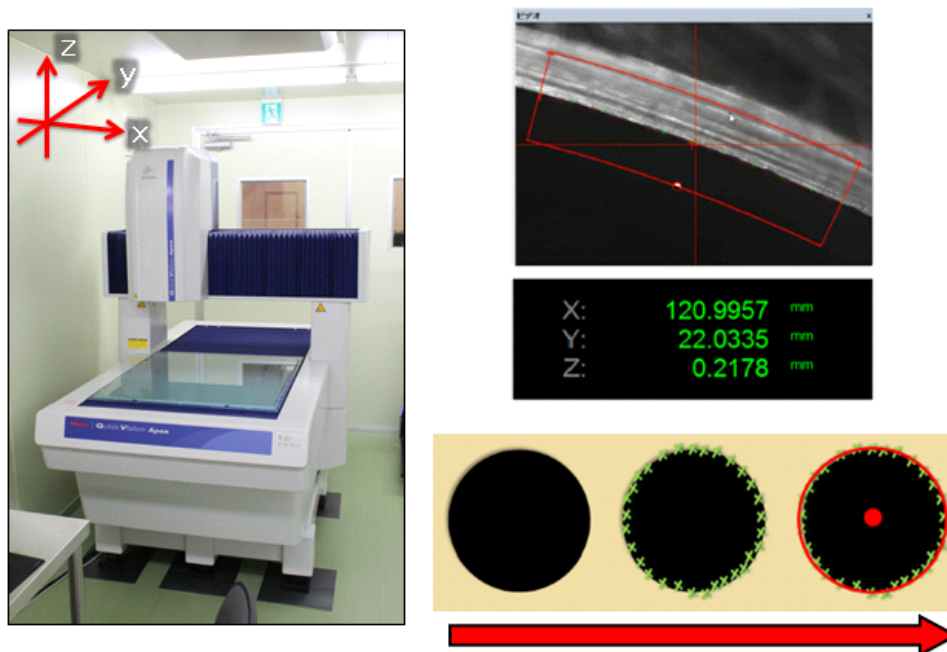


図 4.38: 左 : CMM の全体像 右 : 円中心の測定例 [22]

4.7.2 MQC(Mechanical Quality Control)

4.6.2 章で 5 枚の DSSD を全て Assembly-jig に並べたら、下の Basement-jig ごと 3 次元測定器に移動させる。DSSD の四隅には位置の基準となる F マークというものがそれぞれ印字されており、一方で 3 次元測定器には DSSD が正しく設計値にある場合における F マークの角の位置が赤い十字線で画面上に表記される。つまりは図 4.39 の右上図のように赤い十字線に F マークの角を合わせれば DSSD を設計値の位置にすることができるということである。

DSSD を微調整するのが図 4.40 で示す XYZ θ -jig である。図 4.40 の左がミドルモジュール (中央 3 枚) 用で中央と右がそれぞれ BW、FW 用の XYZ θ -jig である。図 4.39 の右下図のように XYZ θ -jig をセットした後で真空吸着により DSSD を吸い上げる。そしてからマイクロメータを動かすと DSSD を微調整することができる。すべての F マークを同時に設計値に合わせるための具体的な操作手順としては四隅の F マークをそれぞれ A、B、C、D としたとき、まずカメラを A にもっていき。そこで図 4.41 で示すように F マークの角を赤い十字線の交点に合うように DSSD を移動させる。その後、カメラを B にもっていき図 4.41 のような垂直二等分線をイメージして B をその線上にもってくるように回転させる。次にまた A にカメラをもっていくこの作業を A と B の F マーク両方が図 4.39 の右上図のようになるまで繰り返す。最後に C、D の位置も確認すればすべての F マーク位置を設計値に合わせることができる。これらの操作には図 4.39 の左図のような GUI が用意されており、これを 5 枚全ての DSSD に行えば MQC は終了となる。

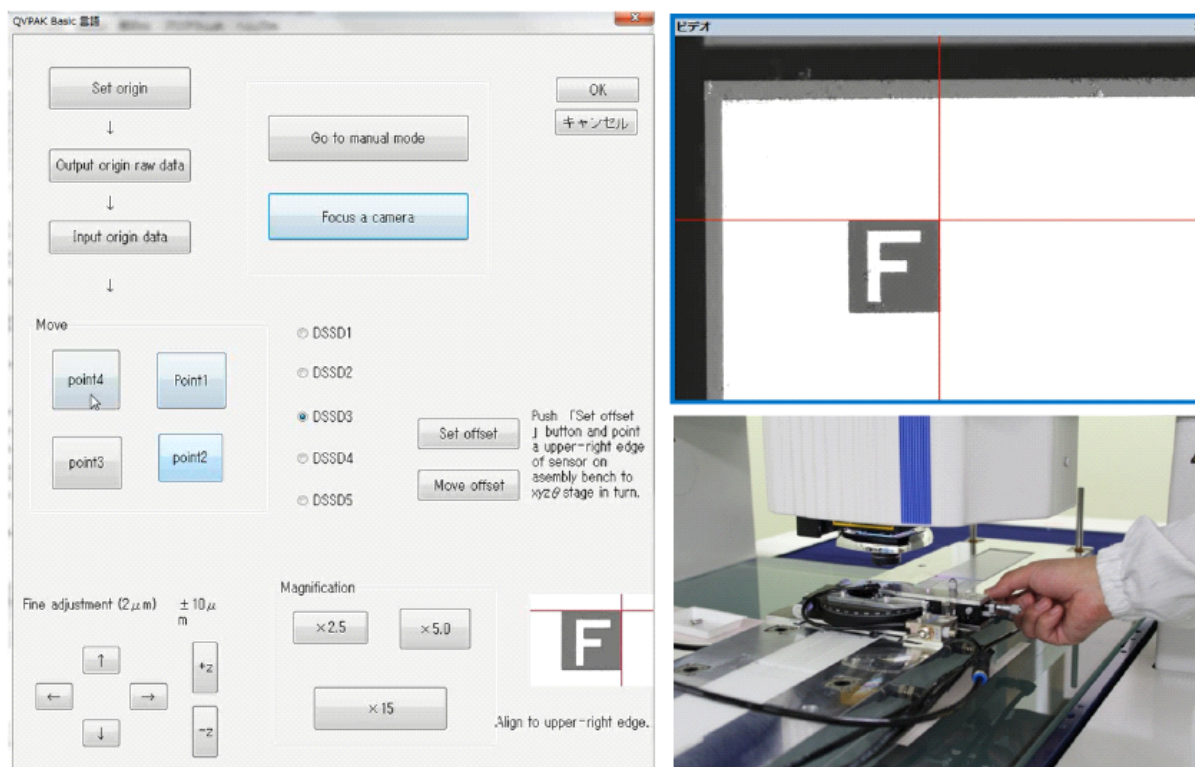


図 4.39: 左 : CMM の GUI 右上 : CMM の画面 右下 : DSSD の微調整 [22]

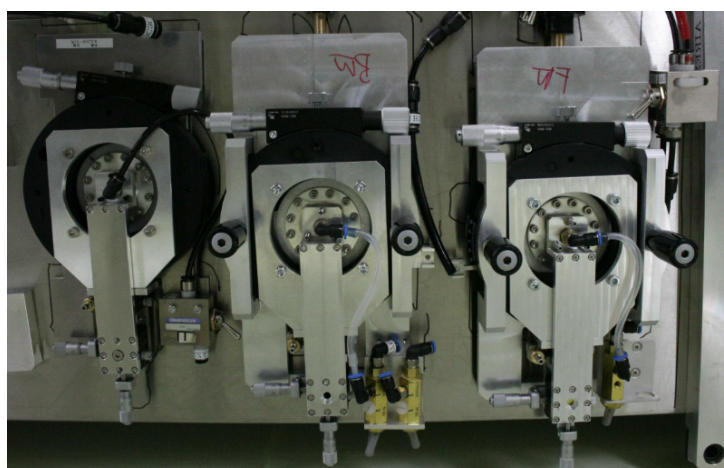


図 4.40: XYZθ-jig

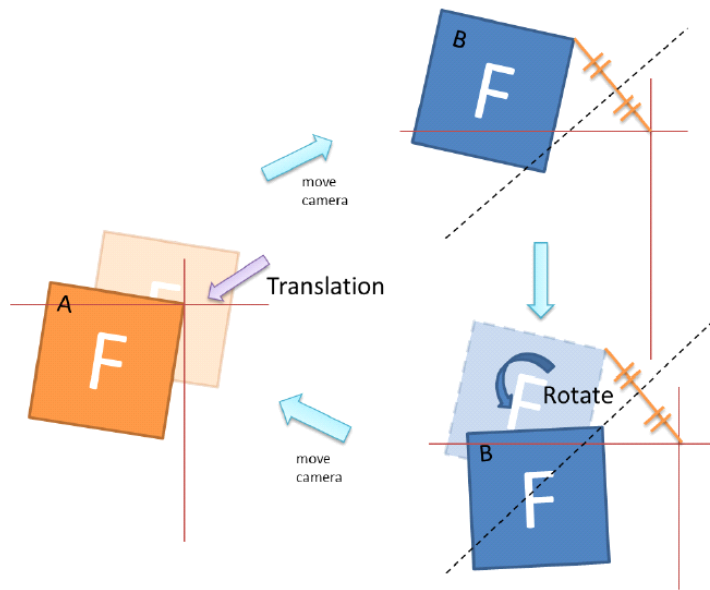


図 4.41: F マークの合わせ方 [22]

4.7.3 MQA(Mechanical Quality Assurance)

ラダーの組み立てが全て終了した後に行うのがMQA(Mechanical Quality Assurance)である。ここでラダー完成後のDSSDの位置精度を測定する。

4.6.6章においてラダーが完成した後、図4.42の左図のようにAssembly-bench、Basement-jigごと3次元測定器にラダーを移動させる。そして4点のFマークの位置測定によって各DSSDの設計値からのズレを計算する。3次元測定器では図4.42の右図のようにFマークの辺をコントラストによって認識して測定位置($x_{measure}, y_{measure}, z_{measure}$)を算出する。DSSDの設計値からのズレは図4.43の手順による並行移動、回転の6自由度である($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta, \varphi, \eta$)としてある。これらのズレに関するパラメータを以下の χ^2 フィッティングによって求める。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{\{x_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta, \varphi, \eta) - x_{i;measure}\}^2}{\sigma_x^2} + \frac{\{y_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta, \varphi, \eta) - y_{i;measure}\}^2}{\sigma_y^2} + \frac{\{z_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta, \varphi, \eta) - z_{i;measure}\}^2}{\sigma_z^2}$$

i は1枚のDSSDにおける4つの各Fマークを表し、 σ は各方向における3次元測定器の測定誤差である。

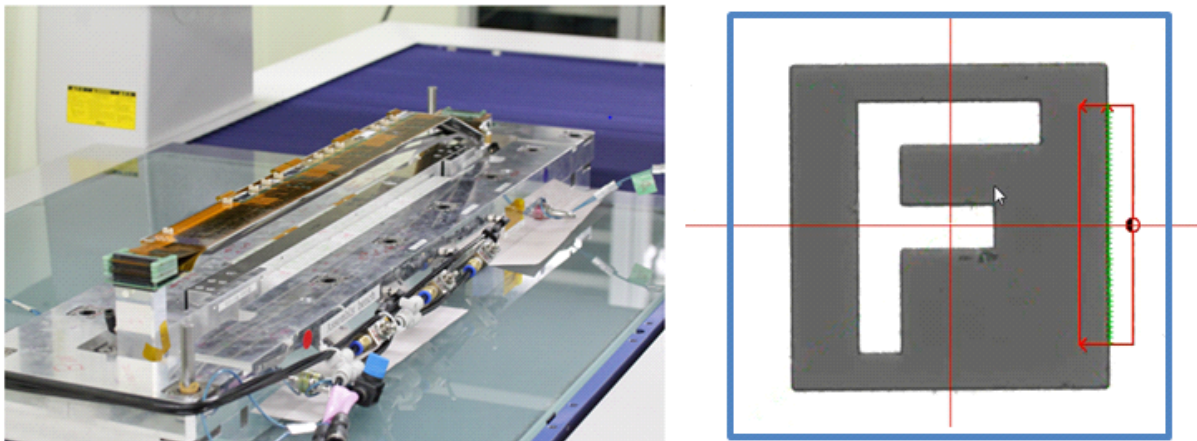


図 4.42: 左 : CMM にのせた完成後のラダー 右 : CMM による F マークの認識 [22]

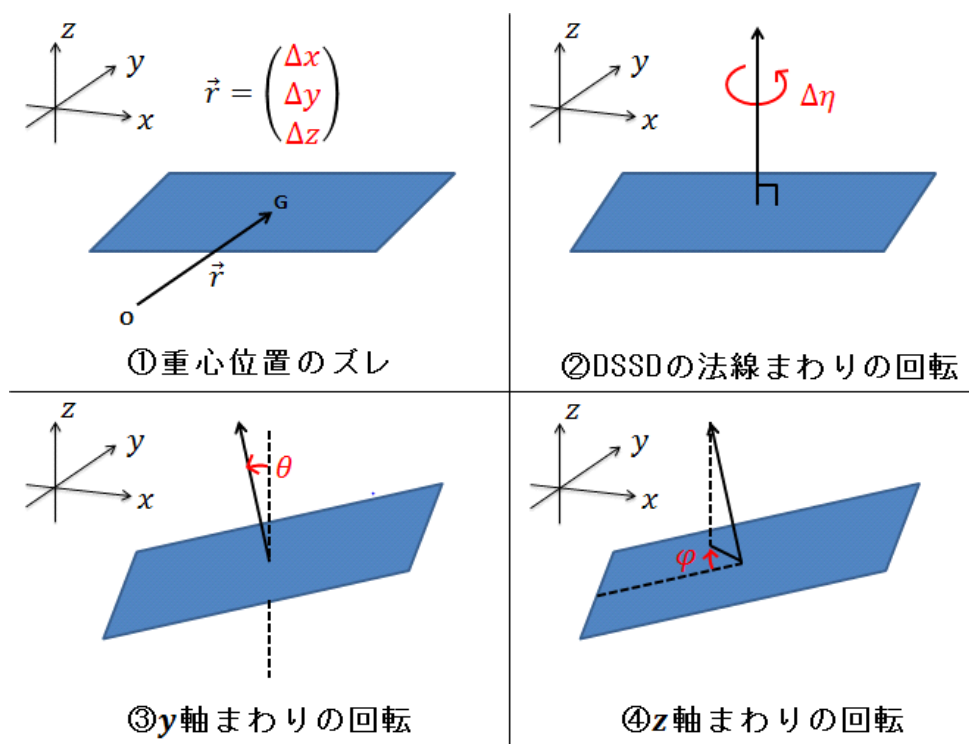


図 4.43: 設計値からのズレの自由度における順序

4.8 EQA(Electric Quality Assurance)

EQA(電氣的品質保証)はラダー製作において DSSD からの信号が正常に APV25 で処理され、ラダー外部にデータ転送できているかを確認する工程である。EQA には大きく分けてラダー組み立て前の部品レベルでの確認、組み立て中での確認、ラダー完成後の放射線テストによる確認の3つがある。ここではラダーの組み立て工程に大きく影響する組み立て中における EQA について説明する。他の EQA については資料 [23] を参照してもらいたい。

ラダー組み立て中における EQA の大きな役割は衝撃等によって壊れやすい APV25 の監視とワイヤーボンディングにおける Yield の向上である。オリガミコンセプトによりアクセプタンス内にある APV25 は厚さが約 $100\mu\text{m}$ しかなく、またカバー等で保護もされていないため組み立て中に壊れるリスクが高い。そのため APV25 に破損がないかどうかを EQA での読み出しによって監視する。また後述するワイヤーボンディングについては作業中に信号の読み出しをすることにより DSSD から APV25 まで正常に信号線が繋がっているかを判断できる。これにより目視では見逃してしまった繋がっていない、またはショートしているチャンネルを発見でき、即座に Repair¹ができるためワイヤーボンディングの Yield 向上が期待できる。

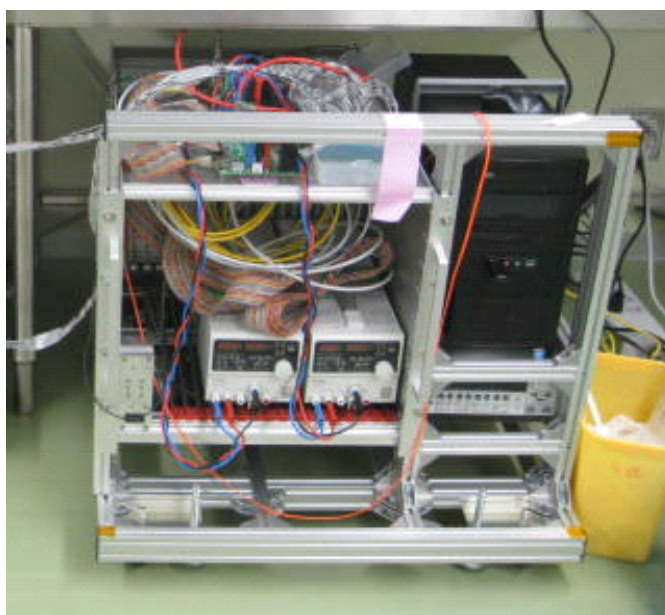


図 4.44: 移動式のラックに収納された APVDAQ システム

ラダー組み立て中に EQA をするための読み出しはオーストリアの HEPHY で開発された APV-DAQ システムを使用する。APVDAQ システムの機材一式は図 4.44 で示すような移動可能な小型のラックに搭載されています。このラックには APV25 や DSSD にバイアス进行かけるための電源

¹失敗しているチャンネルのワイヤーを取り除いて再度ワイヤーボンディングする作業

や FADC ののった APVDAQ ボード、インターフェイスとなる VME-PCI とそれに繋がった PC が格納されている。APVDAQ システムは図 4.45 のような GUI で操作することができて、各オリガミ基板やハイブリッドにケーブルを繋げることで対応した APV25 におけるチャンネルを読み出すことができる。図 4.45 に表示してあるのは APV25 のテストパルスに対する応答 (横軸が時間で縦軸が ADC カウントの波形) を 128 チャンネル (1 チップ分) 重ね書きしたグラフである。この画面において波形の形からいくつか正常ではないチャンネルがあることがわかる。

また図 4.46 は DSSD の p-side を APV25 から読み出したときのグラフであり横軸が各チャンネルで縦軸がノイズ値 (各チャンネルごとに計算した ADC 値の RMS) のグラフである。中央のへこみは APV25 が破損している箇所であり、逆に左側にあるノイズの高いチャンネルは検証のためにわざとワイヤーボンディングを失敗させたところに対応している。これによりノイズの測定でワイヤーボンディングや APV25 の異常を把握できることがわかる。

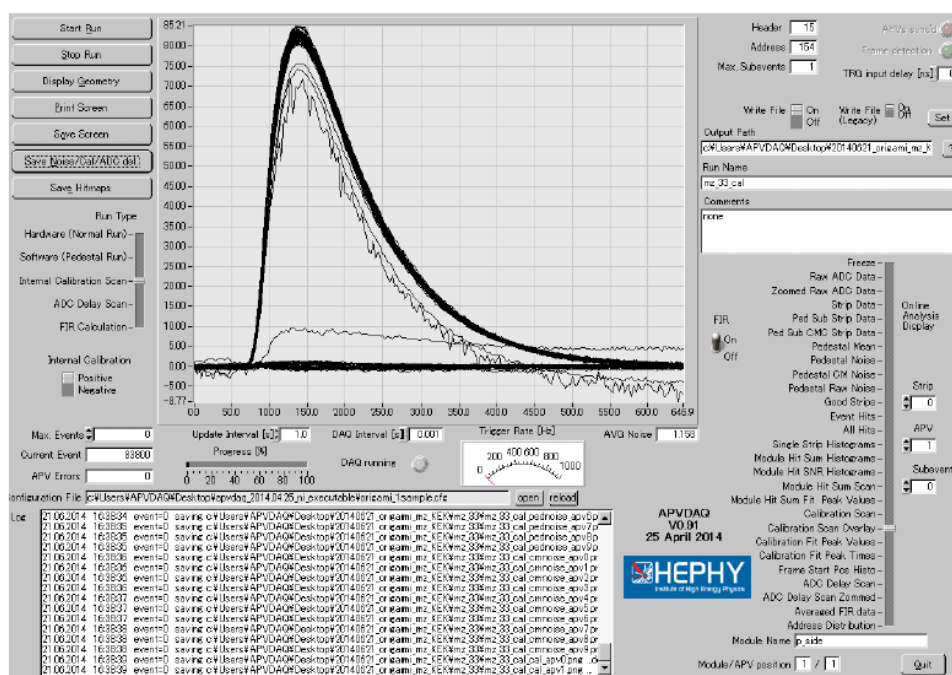


図 4.45: APVDAQ システムの GUI[23]

P-side : Noise Hist

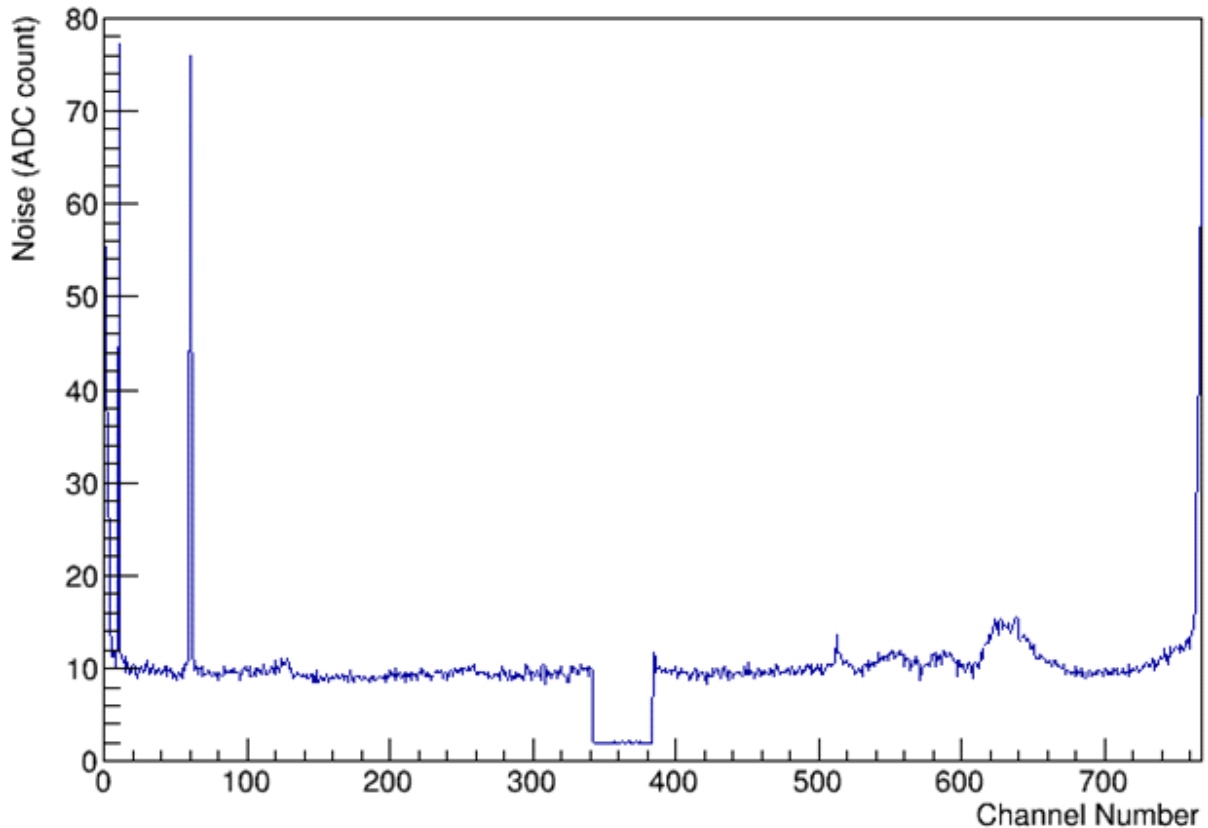


図 4.46: 横軸：各チャンネル 縦軸：ノイズ値 (DSSD の p-side まで信号線が繋がったとき)

4.9 ラダー組み立て工程についてのまとめ

この第4章で説明してきたようにラダーの組み立て工程はクリーンルームを使用することによる作業環境の安定性と治具を中心とした部品の組み上げによって量産時における再現性を担保している。またラダーの品質管理については組み立て中にEQAを行うことによってラダーの動作確認や作業中における損傷の有無をモニターすることができる。さらには各チャンネルをEQAによって細かくモニターすることでワイヤーボンディングのミスを見逃さず、要求されたボンディングYieldの達成を補助できる。またラダー完成後のMQAによりDSSDの位置精度を精密に測定できるようにしている。

第5章 接着とワイヤーボンディング

ラダー組み立て工程においてはボンディング Yield が全ボンディング箇所 で 99%以上という製作要求がある。この製作要求を達成するために接着工程とボンディング工程について行った研究を本章で詳しく説明していく。

5.1 接着とワイヤーボンディングの製作要求

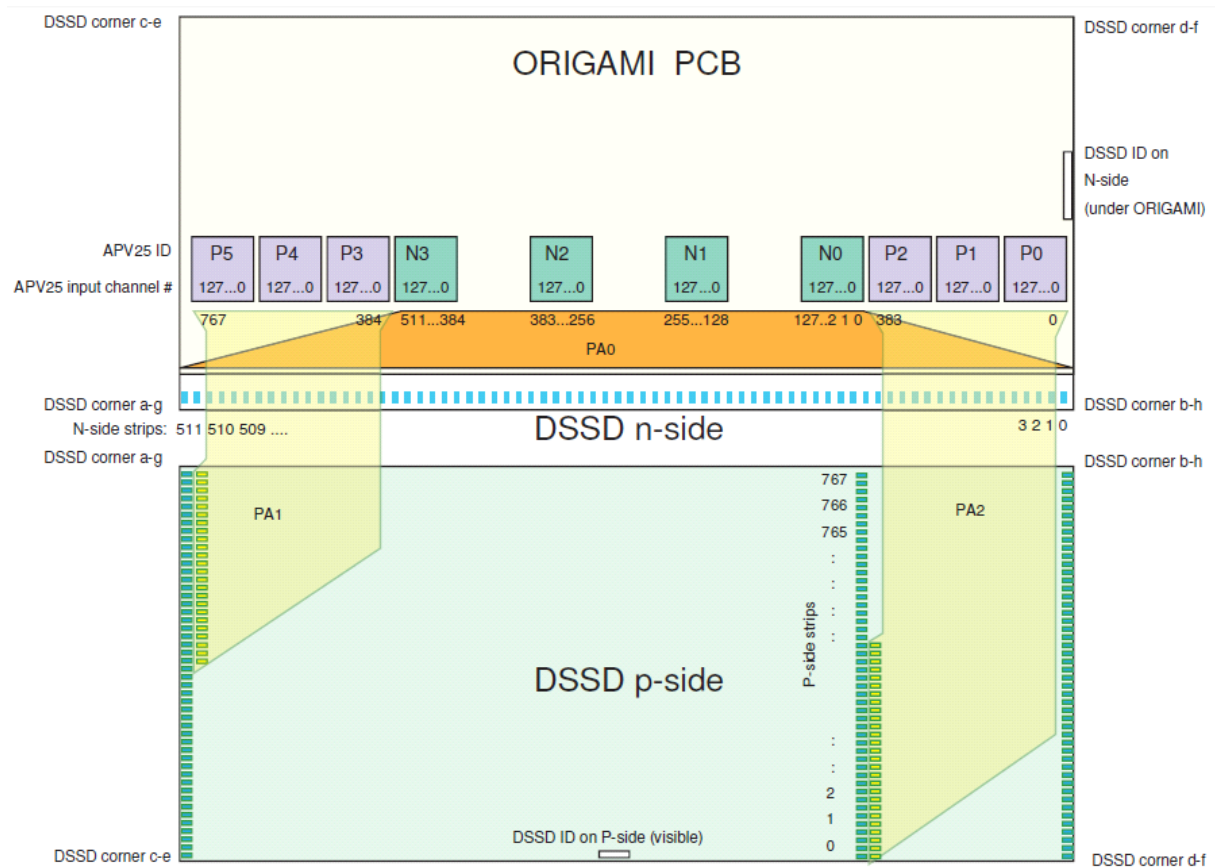


図 5.1: ボンディング箇所と各チャンネル数の概念図 [26]

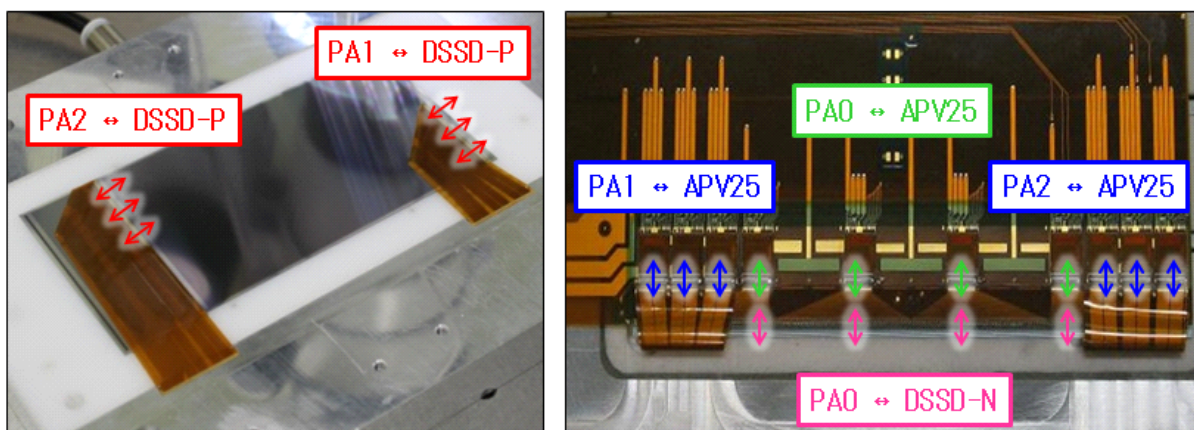


図 5.2: 左：オリガミモジュール裏面 右：オリガミモジュール表面

ラダー組み立て工程においてボンディングするのは DSSD から AVP25 までの信号経路と DSSD に電圧をかける電源パッドである。その他 (APV25 のコントロール配線など) のボンディング箇所についてはラダー組み立て前にすでにボンディングがなされている。DSSD から AVP25 までの信号経路はラダー裏面のストリップ (p-side) については PA1,2 を経由して APV25 に接続され、ラダー表面のストリップ (n-side) は PA0 を経由して APV25 に接続される。そのためワイヤーボンディングを行う箇所は図 5.2 で示すように各部品間の結合箇所計 6 箇所となっている。これをオリガミモジュール部分における 3 枚分の DSSD に対して行う。図 5.1 の概念図からわかるように DSSD の p-side(裏面) については半数ずつのストリップがそれぞれラッピングされた PA1 と PA2 を経由して APV25 に接続される。一方で DSSD の n-side (表面) はストリップからオリガミ基板に貼られた PA0 と呼ばれる部品を経由して APV25 に接続される。ラダーの製作要求ではこの各箇所において 99%以上の Yield が求められる。

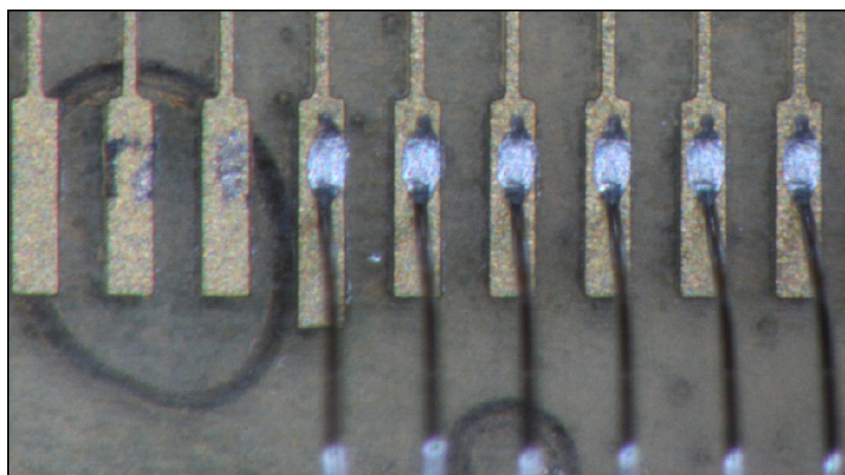


図 5.3: 気泡が混入した接着間におけるワイヤーボンディング

ワイヤーボンディングで使用するのは直径 $25\mu\text{m}$ のアルミワイヤー (Al : 99% Si : 1%) でボンディングマシンにはウェッジボンディング方式である REBO-7S(超音波工業製) を導入した。このマシンでは超音波によりワイヤーボンディングをするのでパッドの下地つまりは接着剤の塗布状態がボンディングの可否において重要な要因となってくる。図 5.3 は接着剤に気泡が混入した状態で硬化したときにおけるワイヤーボンディングの様子である。気泡つまりは接着剤が下になくパッドが安定しない状態でのワイヤーボンディングでは超音波のパワーが分散して弱くなってしまふため何度やってもワイヤーがパッドに接合しない。この例でもわかるように接着工程はボンディングにおける Yield に大きく影響してしまうため製作要求を満たすためには接着剤にも適切で精密な塗布が求められる。

まず接着工程に求められるのは図 5.3 のようにパッド下に気泡が混入しないようにすることが挙げられる。パッドの大きさは約 $30 \times 150\mu\text{m}$ 程度なのでボンディングに影響すると考えられる直径 $10\mu\text{m}$ 程度以上の気泡がパッド下に存在しないことが要求の一つとなる。またほとんどのボンディング箇所においてパッドが接着部品の端にあるため部品の際まで一様に接着剤が広がるようにしなければならない。しかし接着剤を部品の端すぎるところに塗布してしまうと図 5.4 で示すように部品の脇から接着剤が漏れてしまいパッドを汚してボンディングができない状態となってしまう。そのためパッド下における塗布位置は部品間から漏れないがパッド下には完全に広がるといふ接着条件を探さなくてはならなかった。

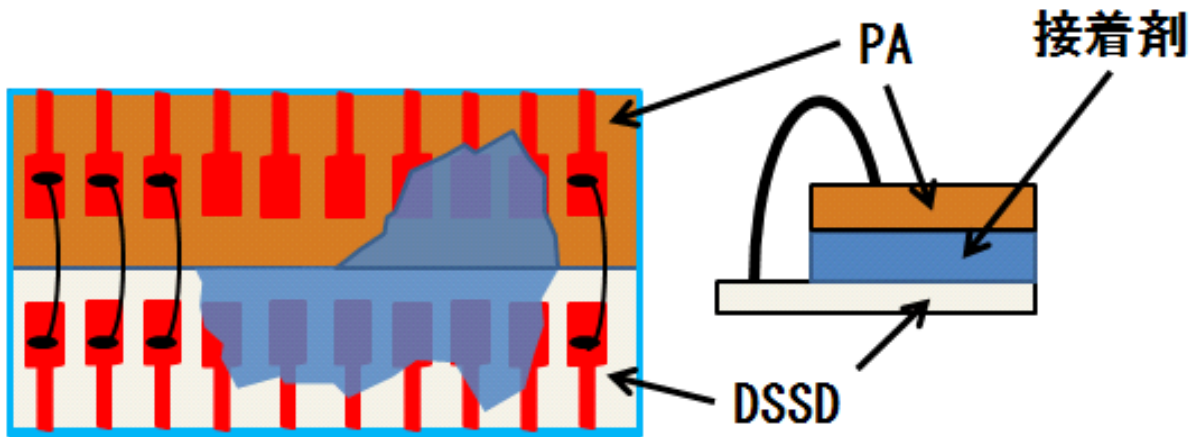


図 5.4: 接着剤の漏れによるボンディング失敗例の概念図

5.2 接着の作業工程

表 5.1: 接着箇所における接着方法の分類表

Method of glue	Position of glue
直交ロボ	PA1+DSSD
	PA2+DSSD
	Origami_-Z+Airex
	Origami_CE+Airex
	Origami_+Z+Airex
水平多関節ロボ	DSSD+Airex
	PA1+APV25 (Wrapping)
	PA2+APV25 (Wrapping)
手塗り	その他 (4.6 章を参照)

ラダー量産時においては簡単な訓練を受ければ誰が作業を行っても製作要求を満たした再現性のある接着ができるように、作業手順やそれに伴う各種適切なパラメータの確立が必要となってくる。以下ではまずどの接着箇所にも共通する作業工程を説明した後、使用する2種類の接着ロボットと点塗布(手塗り)で分類した各接着箇所(表 5.1)について詳しく説明する。

5.2.1 接着の共通工程

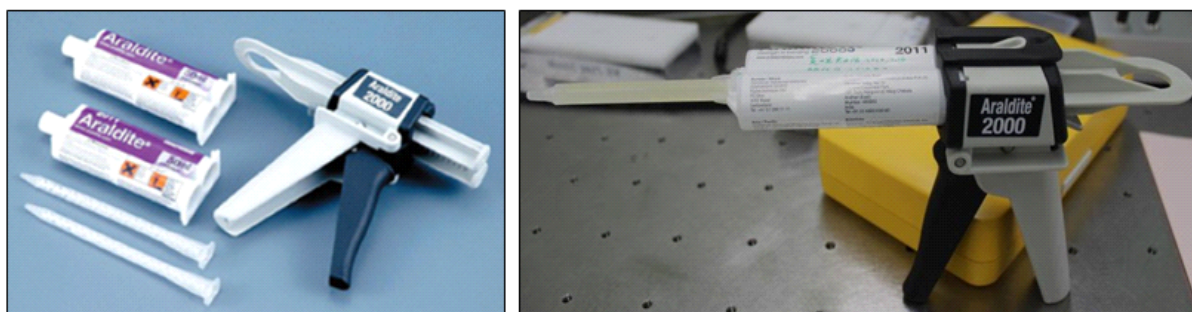


図 5.5: Araldite2011

ラダー製作では図 5.5 の左図で示すような 2 液混合エポキシ系接着剤である Araldite2011 という放射線耐性をもった製品を使用する。このカートリッジには主剤と硬化剤が分離して封入されており、実際に使用するときには図 5.5 の右図のようにカートリッジにミキサー (393-9511,HUNTSMAN JAPAN) と専用のガン装着する。このガンによりカートリッジ内の主剤と硬化剤がミキサーを通して絞り出される。主剤と硬化剤はミキサーを通過中に混合され、硬化が開始する。そのため毎回混合した時刻を測定し、各作業ごとの開始時間をパラメータの一つとして設定することで接着の再現性を確保している。

混合した接着剤は図 5.6 の左図のようなキャップを付けたシリンジ (PSY-10E,MUSASHI Engineering) に絞り出す。それを図 5.6 の右図で示す遠心脱泡器 (AW-20-3,rpm=2575/min) で 400 秒間脱泡する。これによりシリンジ内の接着剤に混入している気泡を排除することができる。

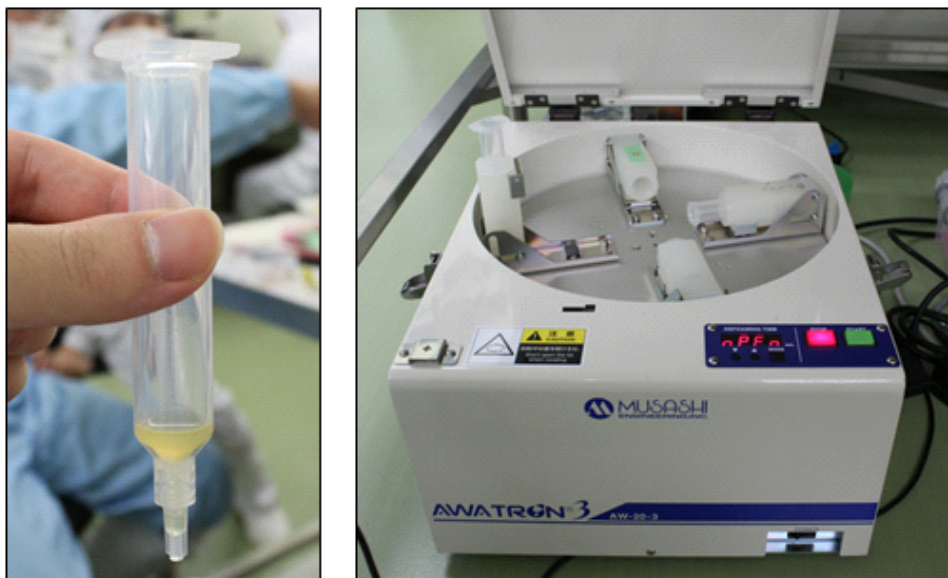


図 5.6: 左：キャップ付きシリンジにはいった接着剤 右：遠心脱泡器 (AW-20-3)

5.2.2 直交ロボット (SONY CAST PRO II) による精密塗布



図 5.7: 左 : 直交ロボ (SONY CAST PRO II) 右 : ディスペンサー (1500XL, EFD)

まず精密な塗布のために使用する接着ロボの一つに図 5.7 の左図で示すような直交ロボ (SONY CAST PRO II) を導入した。この直交ロボは図 5.7 の右図で示す吐出圧力を $0.4[\text{MPa}]$ に設定したディスペンサー (1500XL, EFD) と連動することで塗布位置 (位置分解能 $20\mu\text{m}$ 以下) や塗布速度 ($1\sim 99\text{mm/s}$) などをプログラミングすることができるため各接着箇所において最適な塗布パターンが確立できれば毎回再現性のある接着作業をすることが可能となる。

直交ロボで接着する箇所は表 5.1 で示したように 5 箇所あり、それぞれに対応した治具を図 5.8 の左図で示す接着ロボのベースに固定して塗布を行う。ベースには各接着箇所で使用する治具に対応したピン穴があり、図 5.8 の右図のようにピン位置を入れ替えて固定することができる機構に設計している。

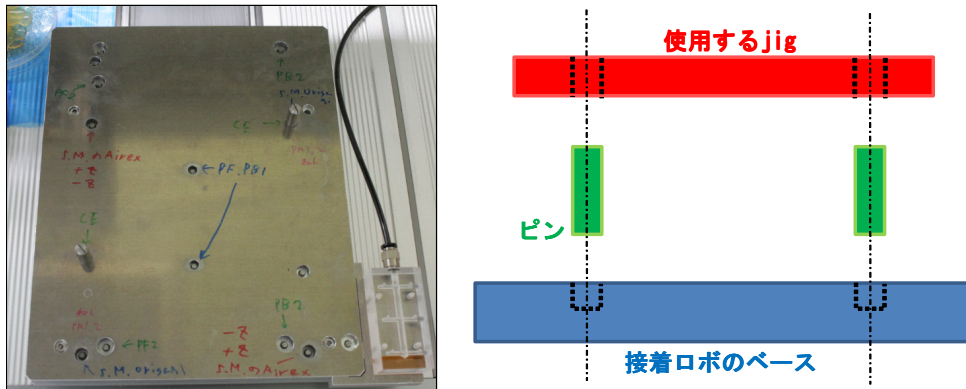


図 5.8: 左：直交ロボのベース 右：治具固定の断面図

5.2.1 章で接着剤のはいったシリンジに遠心脱泡の処理をした後、シリンジのキャップを外して図 5.9 の左図で示す内径 0.25mm のノズル (SH25TT-B(25G),SAN-EI TECH) に付け替える。このノズルはプラスチック製で柔軟性があるため使用する前にノズル口が潰れていないかのチェックをする作業が必要だがその代わりに塗布時に気泡を巻き込まないきれいな塗布が可能のため厳しい要求が求められているパッド下の接着に適している。また万が一ノズルが接着ロボの誤作動により治具に接触しても治具が破損しないというメリットもある。

ノズルを取り付けた後、図 5.9 の右図のようにシリンジにディスペンサーからの圧空チューブを付け、直交ロボに取り付ける。



図 5.9: 左：使用するノズル (SH25TT-B(25G)) 右：直交ロボへのシリンジ取り付け

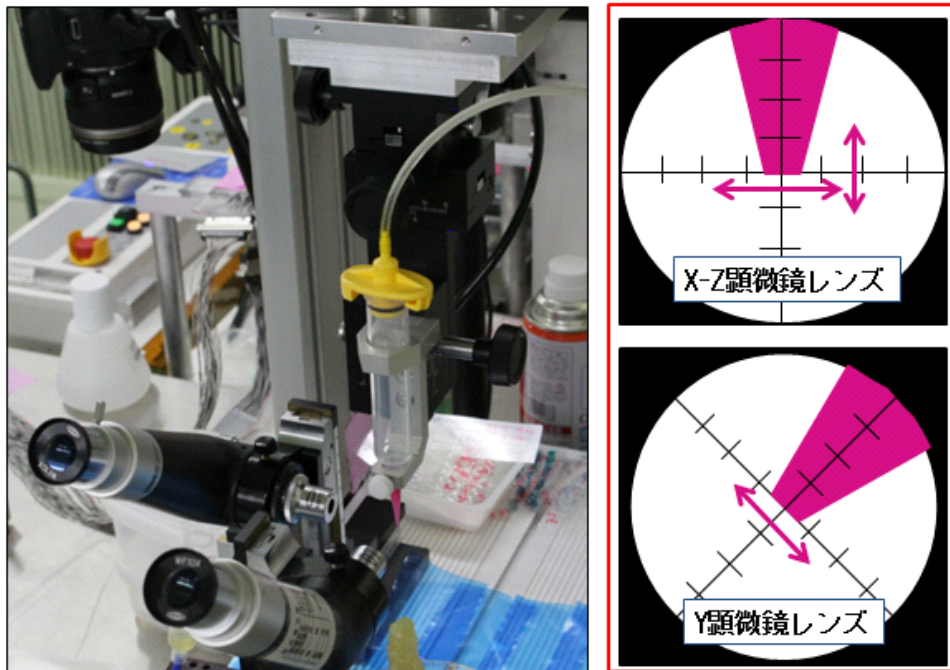


図 5.10: 左：ノズル先端補正システム 右：顕微鏡を覗いたときにおけるノズル先端の原点位置

ここでまず重要となってくるのはノズル先端の位置である。取り付け時におけるノズル先端の座標はシリンジへの取り付け方やノズル自体の個体差の影響により再現性がない。しかし塗布プログラムは直交ロボの機械原点を基準に設定するためノズル先端の位置に再現性がなければ塗布パターンの再現性も確保できない。そのためノズル先端を毎回基準となる同じ座標に合わせるため図 5.10 の左図で示すような x 軸、 y 軸、 z 軸に移動できる機構を持ったシリンジ固定器具とノズルの先端を覗き込む 2 台の顕微鏡を用意した。これによりシリンジ固定器具を動かしてノズル先端の x 、 y 、 z 方向を微調整し、図 5.10 の右図のように顕微鏡のレンズに刻まれた基準線に合わせればノズル先端を毎回同じ座標にもってこることができる。

最後に 5.2.3 章にて説明する試験塗布に合格すれば接着の共通工程は終了である。共通工程以降の作業については各接着箇所ごとに詳しく述べてゆく。

5.2.3 試験塗布

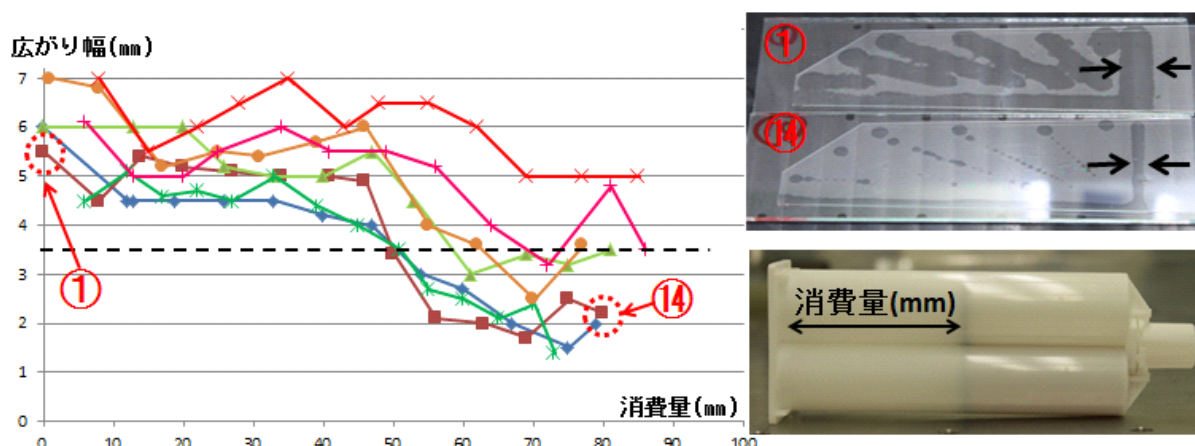


図 5.11: 左：接着剤の広がりについてのグラフ 右上：グラフに対応したサンプルと広がり幅の定義 右下：カートリッジにおける消費量の定義

接着剤を使用する際は必ず塗布前に試験塗布を行う。研究を進めていくうちに使用する接着剤の粘性自体が安定せず再現性が担保できないという問題が判明したためである。図 5.11 の左図にあるグラフは接着剤のカートリッジ 1 本分を使用して連続的にガラス板 (DSSD の代わり) と OHP シート (PA2 の代わり) を使った DSSD+PA2 の接着箇所 (詳細は後述) の再現を行った結果をまとめたものである。縦軸が図 5.11 の右上図で定義するような硬化後における接着剤の広がり幅 (mm) で横軸が図 5.11 の右下図で定義するような接着時におけるカートリッジ残量を表す消費量 (mm) である。このグラフから個々に差はあるがカートリッジを半分ほど使用したところから広がり幅が小さくなっていく傾向が多く見られた。特に違いがわかりやすいカートリッジの最初と最後の場合のサンプルが図 5.11 の右上図である。ただしサンプル数が少なく原因もわからないがカートリッジを開封した一回目で、すでに広がりが 2mm 程度たったというものも発見しており、完全な粘性の傾向をつかむことはできていない。またいくつかの原因を仮定 (製造時における個性、ガンで押し出すことによる圧力で接着剤の化学反応の速度が上がった、接着剤の劣化による影響など) し、検証したが明確な特定もできなかった。そのため接着剤の不安定性を改善するという解決方法の代わりに製作要求を満たすことが困難である場合 (図 5.11 の左図から接着剤の広がりが 3.5mm 以下と定義) を確実に除外できる試験方法の検討を行った。使用する接着剤は 2 液混合型のため主剤と硬化剤を混合した時点で硬化が始まってしまう。そのため時間経過の硬化によって接着剤の広がりに悪影響がでないうちに接着工程を終了する必要がある。他の作業時間を考慮すると接着剤の粘性確認試験にとれる時間は 3 分程度と要求された。

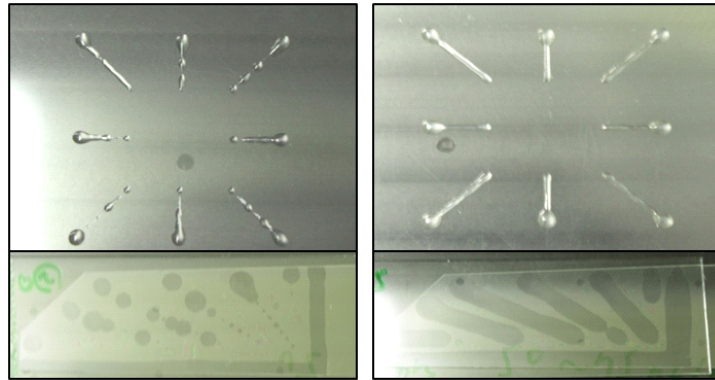


図 5.12: 左：試験塗布が不合格のときに対応したサンプル 右：試験塗布が合格のときに対応したサンプル

この短時間のうちに本塗布執行の可否を判断できる方法を検討した結果、最終的に図 5.12 のように粘性の変化によってノズルから塗布される接着剤がかすれる塗布パターンを作成し、実行することを試験方法として設定した。試験塗布パターンのクリアランス(ノズルと塗布地点の距離)は $150\mu\text{m}$ で図 5.12 のように※印のような塗布をする。縦、横、斜め方向に塗布するのはノズル口の傾きによるかすれの依存性をなくすためである。実際には図 5.8 でも示したベースの右下に試験塗布用の台が作成してあり、そこに OHP シートを固定した上で※印を 3 つ塗布する。3 つの※印のうち 2 つ以上でかすれが確認されたら試験塗布は不合格とみなして現在使用しているシリンジの接着剤を破棄し、最初から接着工程をやり直す。合格した場合は作業を続行して各接着箇所における部品への塗布を実行する。

PA1 と PA2+DSSD

まず 4.6.1 章におけるミドルモジュール作成に必要な PA1 と PA2 を DSSD に接着する箇所について詳しく説明する。

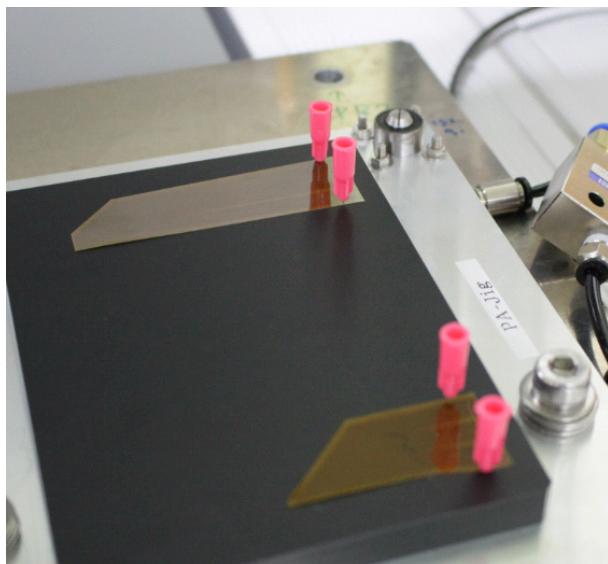


図 5.13: PA-jig における PA1、2 の仮止め

PA1 と PA2+DSSD の接着ではまず図 5.13 のように口径の小さい金属ノズルを直交ロボのベースにセットした PA-jig と PA1、2 に空けられたアライメントホールに刺すことで PA1 と PA2 を仮止めした後、真空吸着で固定する。その後、試験塗布に合格した接着剤を SH25TT-B(25G) のノズルで PA1、2 に塗布する。そして PA-jig を図 5.14 で示すように DSSD を固定した DSSD-jig に重ねてから PA-jig の真空吸着を OFF にする。1 分後に PA-jig を取り外して接着剤の硬化を待つ。治具は重ねたときに塗布した接着剤の頭が DSSD にふれる程度の間隙 (約 $50\mu\text{m}$) ができるように設計してあります。なので PA-jig の真空吸着を OFF にすると接着剤は PA の重みでゆっくりと広がっていくことになる。PA は柔らかい素材のため真空吸着したままだと接着剤の広がりが抑制されてしまうためすぐに PA-jig の真空吸着を OFF にするこの方式を採用した。

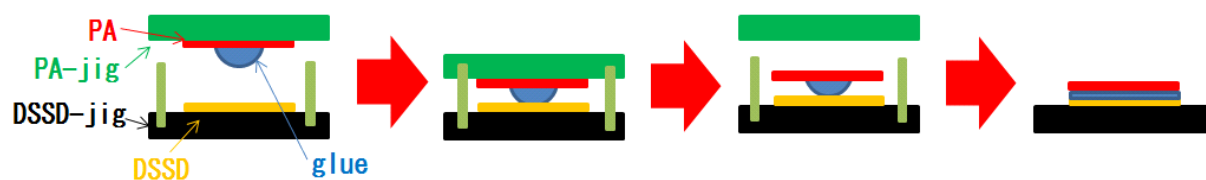


図 5.14: PA1 と PA2+DSSD の接着方式

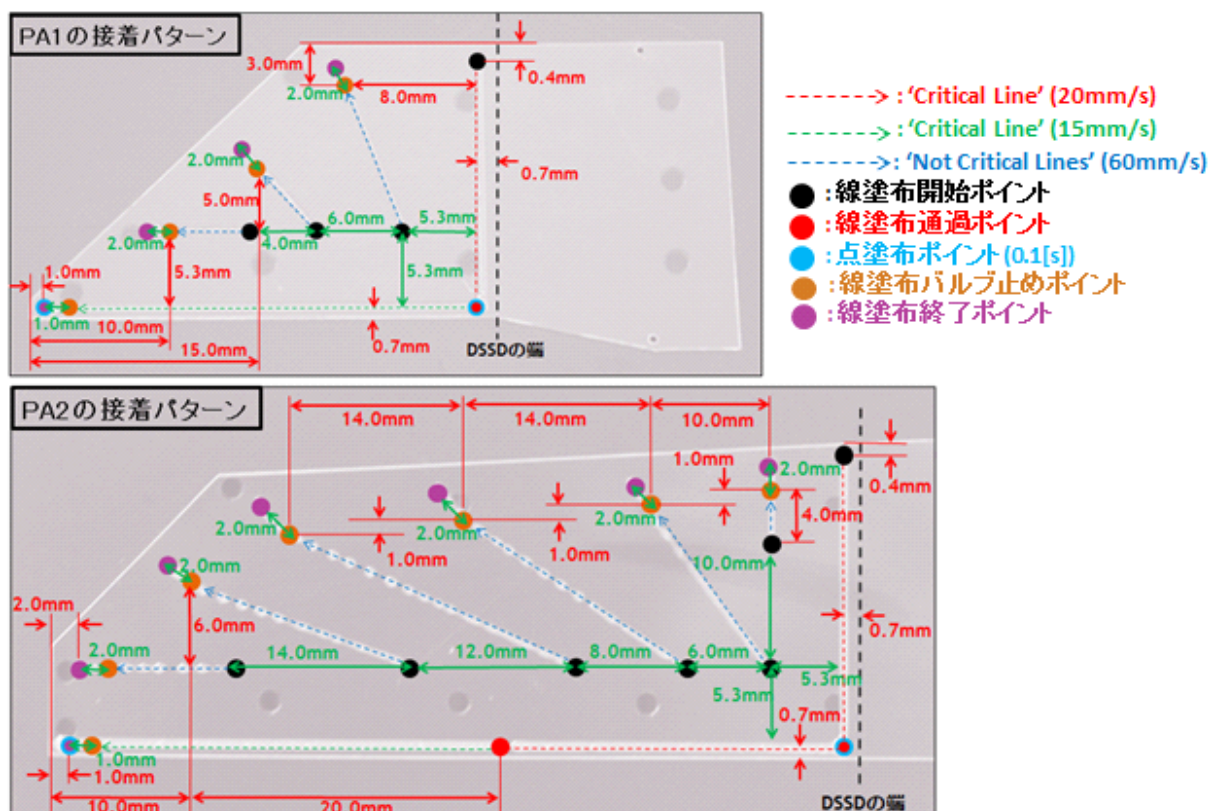


図 5.15: PA1 と PA2 の接着パターン

図 5.15 が研究の結果、最終的に製作要求を満たせることを確認した PA1 と PA2 への接着パターンである。線塗布する箇所は“Critical Line”と“Not Critical Lines”という定義をした 2 つに大きく分けた。“Critical Line”はその名の通り接着要求を満たすために塗布位置を精密に ($\sim 100\mu\text{m}$) 設定しなければならない箇所である。PA1 と PA2 においてパッド下以外では接着剤がしっかりとまわっていないと剥がれやすくなってしまふ DSSD の端部分にあたる箇所がこれに該当する。一方で“Not Critical Lines”はそこまで精密な塗布は必要ない部分だが部品を安定して貼りつけるために接着剤を部品にまんべんなく広げられ、かつ他の線塗布の広がりとは干渉して接着剤の広がりが制御できないということがない位置を考えて設定している。

“Critical Line”における 15[mm/s](緑点線矢印) の部分はパッド下にあたる部分である。PA1 と PA2 は製造上の都合で完全にフラットな部品ではなく若干の反り返りが存在する。特にパッド部分ではそれが強くでているため他の部分よりも接着剤を多く塗布する必要がある。

PA1 と PA2 において“Critical Line”の角の部分には 0.1[s] の点塗布を設定している。これは線塗布だけではどうしても角の端まで接着剤が広がらず接着要求を満たすことが困難だったため接着剤を追加する目的で設定している。

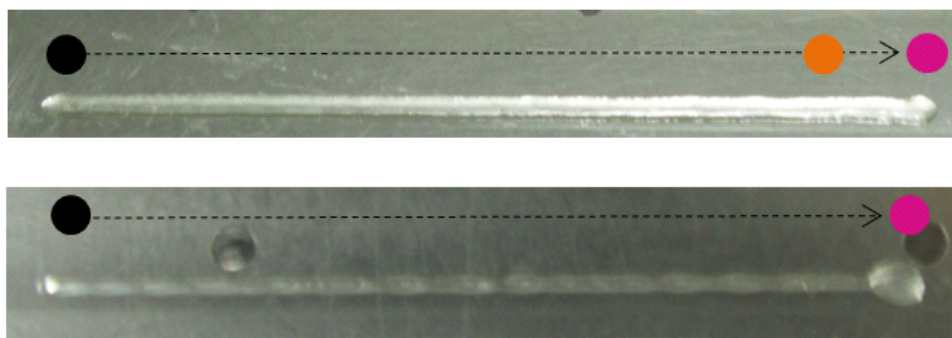


図 5.16: 上:「線塗布バルブ止めポイント」なしの線塗布 下:「線塗布バルブ止めポイント」ありの線塗布

線塗布ではノズル動作の終点である「線塗布終了ポイント」の手前に塗布のみを終了する「線塗布バルブ止めポイント」を設定した。図 5.16 からわかるように「線塗布バルブ止めポイント」を作らずにノズル動作の終了と塗布の終了を同時に行ってしまうと終点に余分な量の接着剤が垂れてしまう。

図 5.17 は接着後 (図 5.15 の接着パターン) に撮った PA1 と DSSD のある一部分における拡大写真である。接着剤の染み出しからパッド下は端までしっかりと接着剤が広がっていることがわかる。また接着剤がパッドを汚してボンディングができないという事例も確認されなかった。以上から接着条件を満たした接着パターンを確立できたと言える。

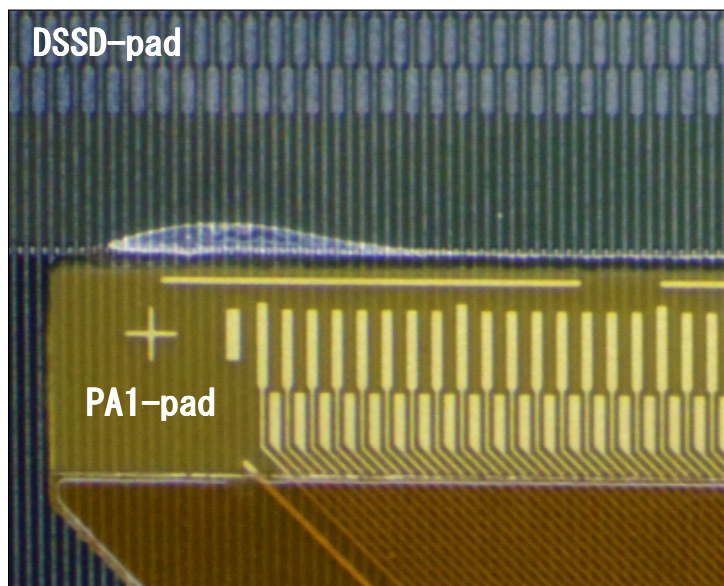


図 5.17: 接着後の PA1+DSSD のある一部における拡大写真

Airex+Origami_CE

4.6.3章のオリガミモジュール作成におけるオリガミ基板の接着からまず Airex+Origami_CE について詳しく述べる。4.6.3章にある手順で Origami_CE を真空吸着した Origami_CE-jig を直交ロボのベースに固定する。

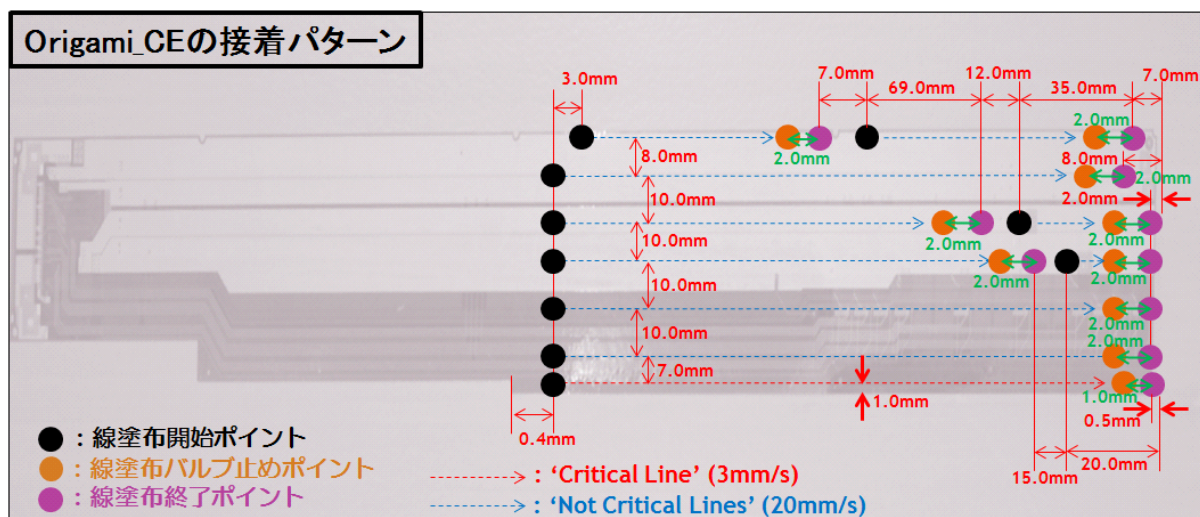


図 5.18: Origami_CE の接着パターン

図 5.18 が製作要求を満たせることを確認した Origami_CE の接着パターンである。オリガミ基板の接着において “Critical Line” は PA1、2 の接着と同様に SH25TT-B(25G) のノズルを使用するが “Not Critical Lines” は図 5.19 に示すような内径 1.06mm のノズル (PN17G-A, MUSASHI Engineering) に取り替えて使用する。オリガミ基板は PA 1、2 と比べて面積が大きいので精密な塗布を必要としない “Not Critical Lines” には内径の大きなノズルを使用することで塗布時間を短縮している。

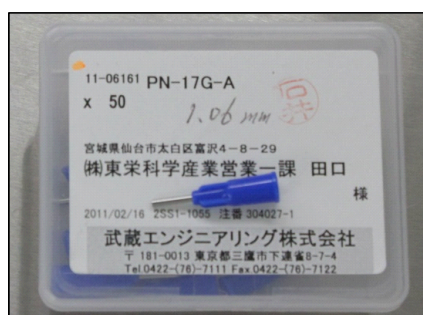


図 5.19: 内径 1.06mm のノズル (PN17G-A, MUSASHI Engineering)

Origami_CE を貼りつける Airex の表面はザラザラしており、PA1 と PA2+DSSD の接着箇所と比べて接着剤の広がりが小さくなる。よって接着パターンの塗布速度を比較的小さく設定することで塗布量を多くし、パッド下の全面に接着剤が広がるようにしている。

接着剤が塗布された Origami_CE は図 5.14 と同様な形で Assembly-banch にある Airex に重ねる。しかし PA1 と PA2+DSSD の場合とは違い真空吸着を OFF にしてから 2 時間待って Origami_CE-jig を取り外す。これはオリガミ基板の形状が理由である。図 5.20 からわかるようにオリガミ基板は製造上の理由から PA0 の貼られている部分 (パッドがある) が約 2mm 程反り返っている。そのため接着剤が硬化をする前に Origami_CE-jig をとってしまうと接着剤が反り返りに負けてパッド部分が Airex から浮いてしまうため接着要求を満たせなくなってしまう。また 2 時間の時間設定は治具を重ねたままだと万が一接着剤が漏れて治具に付着した場合にふき取ることができず治具が使用できなくなるのを防ぐためである。2 時間であれば硬化はしているがまだふき取れる程度であるため事故を防止できる。

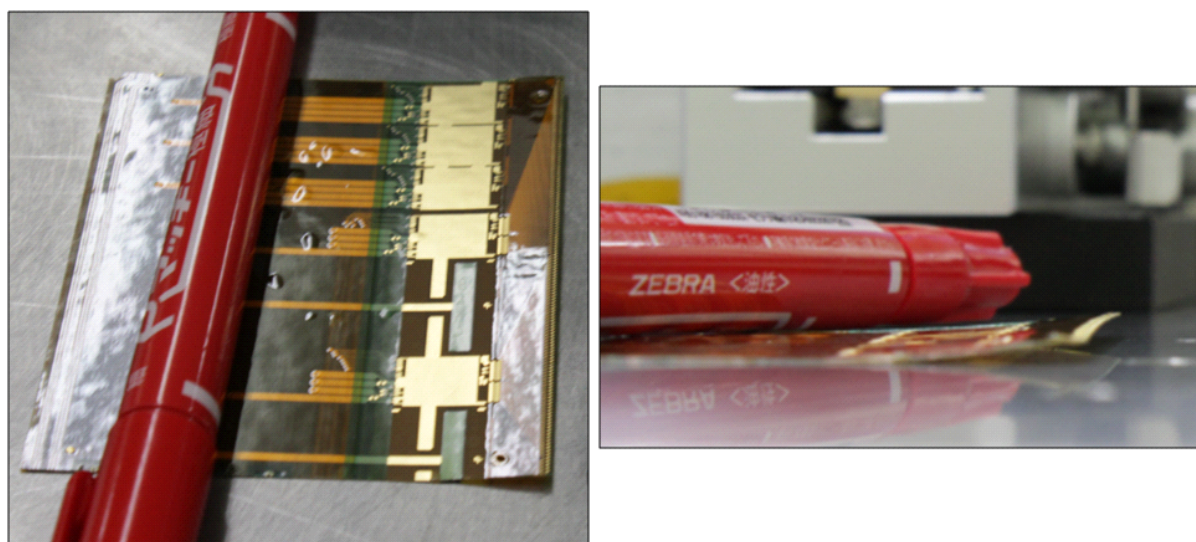


図 5.20: オリガミ基板における PA0 の反り返り

“Not Critical Lines”の線塗布において途中で途切れている箇所を設けている理由はスルーホールと呼ばれる穴がオリガミ基板に空いているためである。スルーホールの箇所に塗布してしまうと穴を通じて接着剤が治具に付着してしまう。

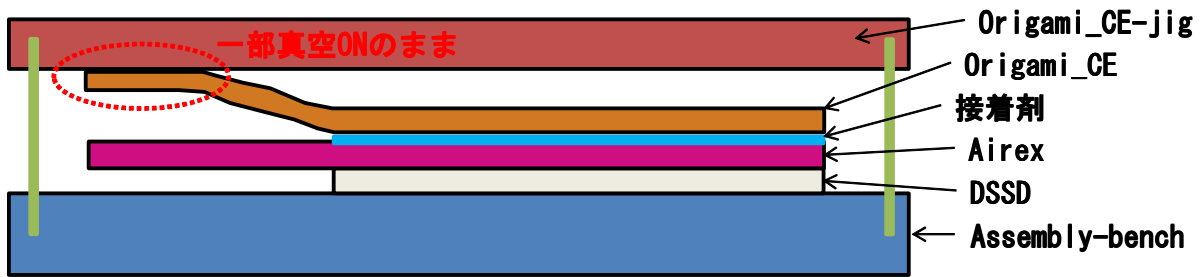


図 5.21: 接着中の Airex+Origami_CE における概略図

4.2 章でも説明したようにオリガミ基板の片側には外部ケーブルに接続するコネクタとそれを保護する H シェープ、C シェープといった部品が付属する。そのためオリガミ基板の片側には重量と容量が偏った部分が出てしまう。ラダー組み立ての検証においてこの部分が原因でオリガミ基板を貼りつけて真空吸着を OFF にした後、接着剤が硬化する前にオリガミ基板が Airex に対してズレてしまうという問題が確認された。そのための対策として図 5.21 の概略図のように Origami_CE の端の一部分 (パッドがなく精密な塗布を必要としない箇所) の塗布を取りやめ、代わりに治具を重ねている 2 時間は真空吸着を ON にし続けてみた。これにより接着剤がある程度硬化して Origami_CE が固定されるまでの間、真空吸着による固定が維持されるためズレを抑制することができるようになった。

Origami_CE+Origami_-Z

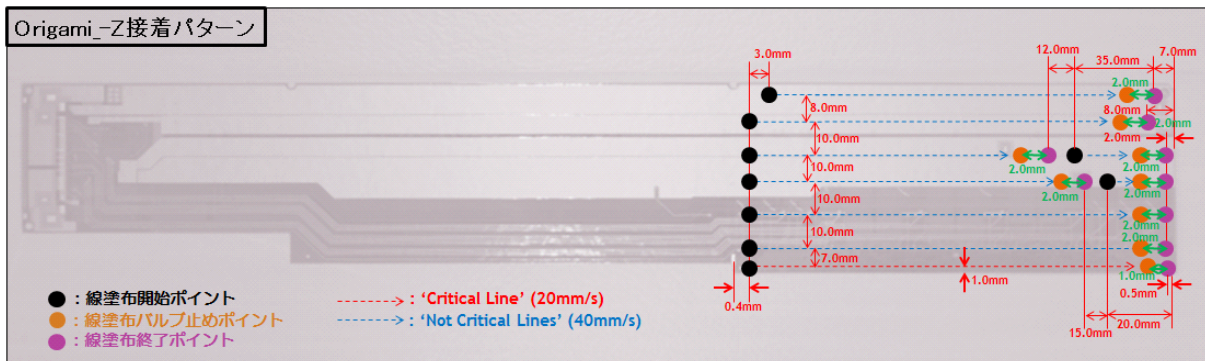


図 5.22: Origami_-Z の接着パターン

次に Origami_CE+Origami_-Z について述べる。ここの接着はほとんど Airex + Origami_CE の部分で述べたことと共通である。4.6.3 章にある手順で Origami_-Z を真空吸着した Origami_-Z-jig を直交ロボのベースに固定して塗布をする。図 5.22 が製作要求を満たせることを確認した

Origami_-Zの接着パターンである。Origami_CEの場合と違うポイントは塗布速度が大きく設定されていることである。これは接着部品が両方ともオリガミ基板であり表面がザラザラなAirexが絡まないため接着要求を満たす最適な塗布量がOrigami_CEに比べて少ないからである。

Airex+Origami_+Z

最後に Airex+Origami_+Z について述べる。4.6.3 章でも述べたように Origami_+Z はスラント部に貼りつけるための曲げ癖がつけられている点に注意して Origami_+Z-jig に真空吸着し、直交ロボのベースに固定して塗布をする。図 5.23 が製作要求を満たせることを確認した Origami_+Z の接着パターンである。

Origami_+Z は Origami_CE、Origami_-Z とは異なり、スラント部分があるせいでパッドがない一部分を真空吸着して位置を保持するという手法が適用できない。なのでその代わりに図 4.24 でも示したアクリル製の器具で重量のあるコネクタ部分を支えることで図 5.24 のように Origami_+Z の位置を保持する。

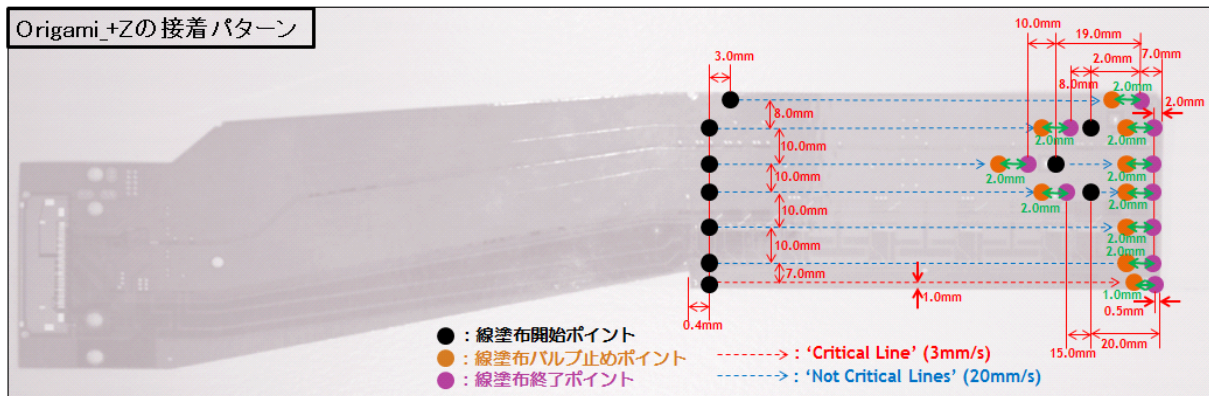


図 5.23: Origami_+Z の接着パターン

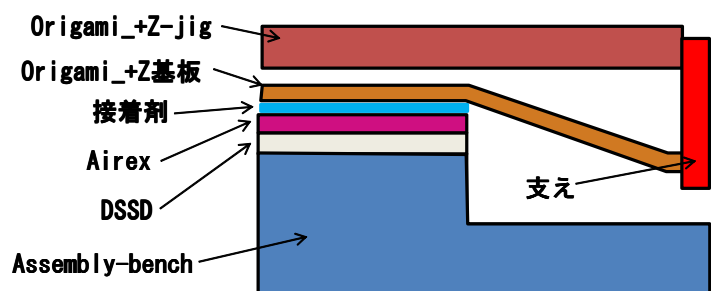


図 5.24: 接着中の Airex+Origami_+Z における概念図

5.2.4 水平多関節ロボット (JSR-4403N) による精密塗布

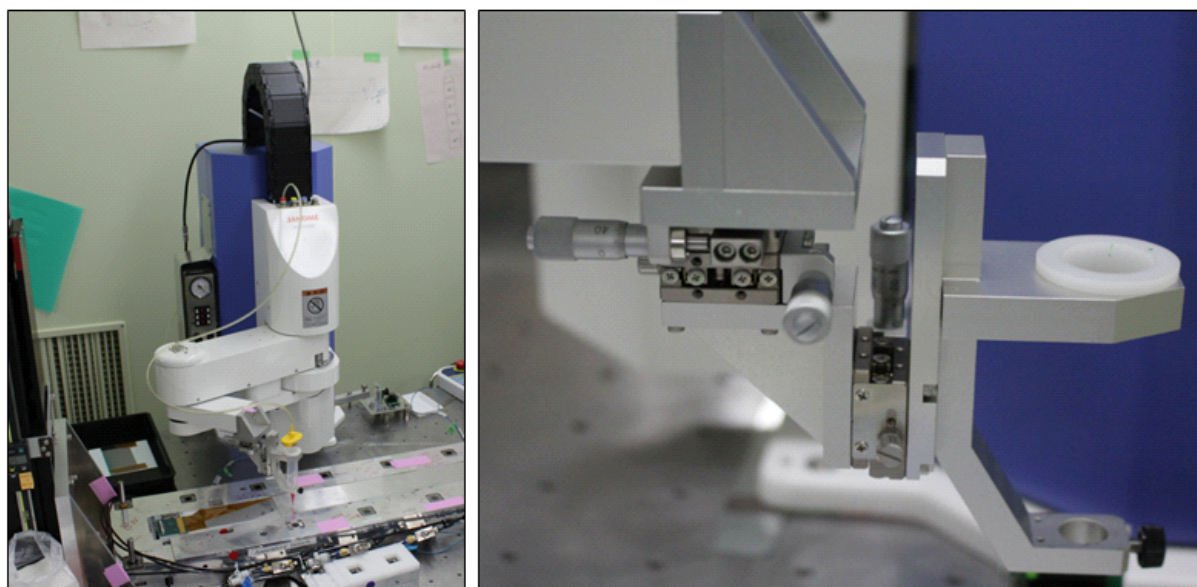


図 5.25: 左 : 水平多関節ロボ (JSR-4403N) の全体写真 右 : シリンジ固定器具

ラダー組み立てで使用するもう一種類の接着ロボは図 5.25 の左図に示す蛇の目マシン社製の水平多関節ロボ (JSR-4403N) である。仕様の詳細は [24] を参照してほしい。この水平多関節ロボは図 4.12 で示していたようにラダー組み立ての中心となる光学定盤の上に設置され、Assembly-banch の上に固定されたラダー構成部品に接着剤を直接塗布できる。連動させるディスペンサーには直交ロボと同じ機種を同じ吐出圧力 (0.4[MPa]) で使用している。

水平多関節ロボを使用する場合にはまず 5.2.2 章で述べた直交ロボによる試験塗布で合格したシリンジを用意する。これをロボのアーム先についている図 5.25 の右図で示すような x 軸、y 軸、z 軸に移動できる (直交ロボの場合と同様な) 機構を持ったシリンジ固定器具にセットする。その後、直交ロボの時と同様にノズル先端の原点を合わせる作業を行う。水平多関節ロボではマイクروسコープの代わりに原点合わせを図 5.26 の左図で示すような 2 台の Web カメラを使用する。そして図 5.26 の右図で示すように十字線のはいったカメラからの画像を PC に写してノズル先端位置を調整することでノズル原点の再現性を確保する。

以下において水平多関節ロボで塗布する DSSD+Airex とラッピング部分の接着箇所について述べていく。

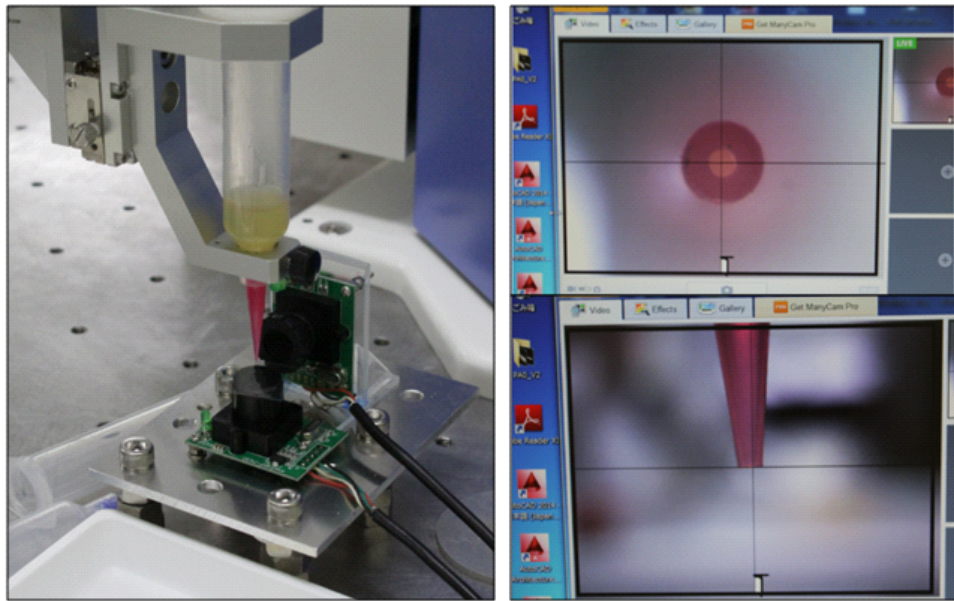


図 5.26: 左 : ノズル先端を覗く 2 台の Web カメラ 右 : PC に写した Web カメラからの画像

DSSD+Airex

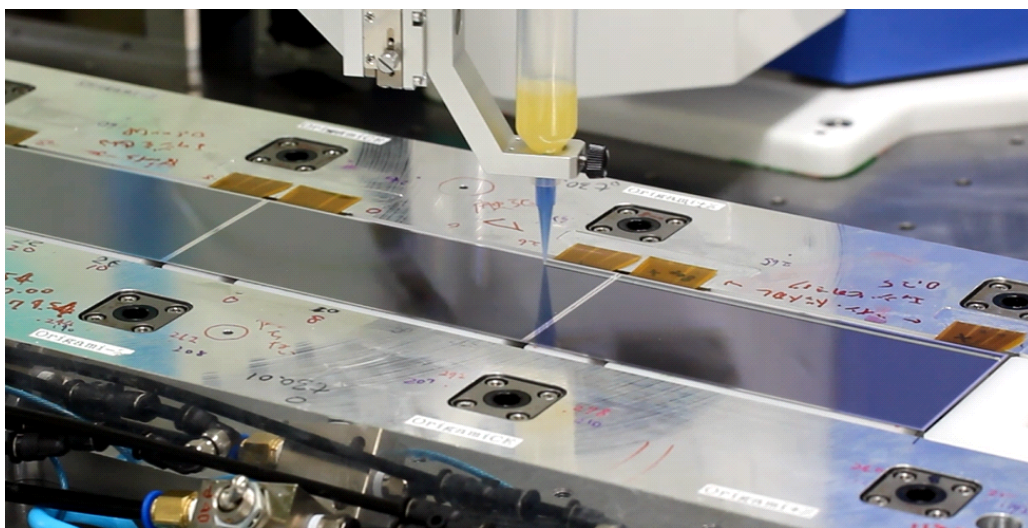


図 5.27: DSSD への接着剤塗布

水平多関節ロボで接着をする箇所の一つが4.6.3章でも述べたオリガミモジュール作成中における Airex+DSSD の部分である。図 5.27 のように DSSD に接着剤を直接塗布した後で Airex-jig に吸着した Airex を上から重ね、1 分待ってから治具を外す。図 5.28 に DSSD+Airex の確立した接着パターンを示す。



図 5.28: DSSD への接着パターン

この箇所はボンディングパッドが直接的に接着面とならないため “Not Critical Lines” と分類しているが念のためオリガミ基板のパッド面の下部分になる位置に接着剤を意図的に塗布している。この箇所は接着面積が大きいため使用するノズルは図 5.29 で示す内径が大きめ (0.41mm) のノズル (SH25TT-B(22G),SAN-EI TECH) を採用した。またプラスチック製のノズルなので万が一ノズルがシリンジから外れてしまったときに DSSD が損傷するリスクを抑えている。またその他のリスク軽減として DSSD にノズルが接触すること防ぐためにクリアランスを 1mm と他の接着箇所よりも大きく確保している。



図 5.29: SH25TT-B(22G)

ラッピング箇所

水平多関節ロボで接着するもう一つの箇所はオリガミコンセプトの要となるPA1とPA2のラッピング部分である。塗布する箇所はパッド下なので使用するノズルは他の接着箇所における“Critical Line”にも使用していたSH25TT-B(25G)である。図5.30にラッピング部分の確立した接着パターンを示す。この接着パターンをラッピング部分がある中央3枚のDSSDに対して行う。図4.26のようにAssembly-benchにのっているPA1とPA2に接着剤を塗布してからPA-Wrapping-jigで所定の位置に押し付ける。そしてから治具の真空吸着をOFFにし、接着剤が硬化するまで約1日治具を維持する。

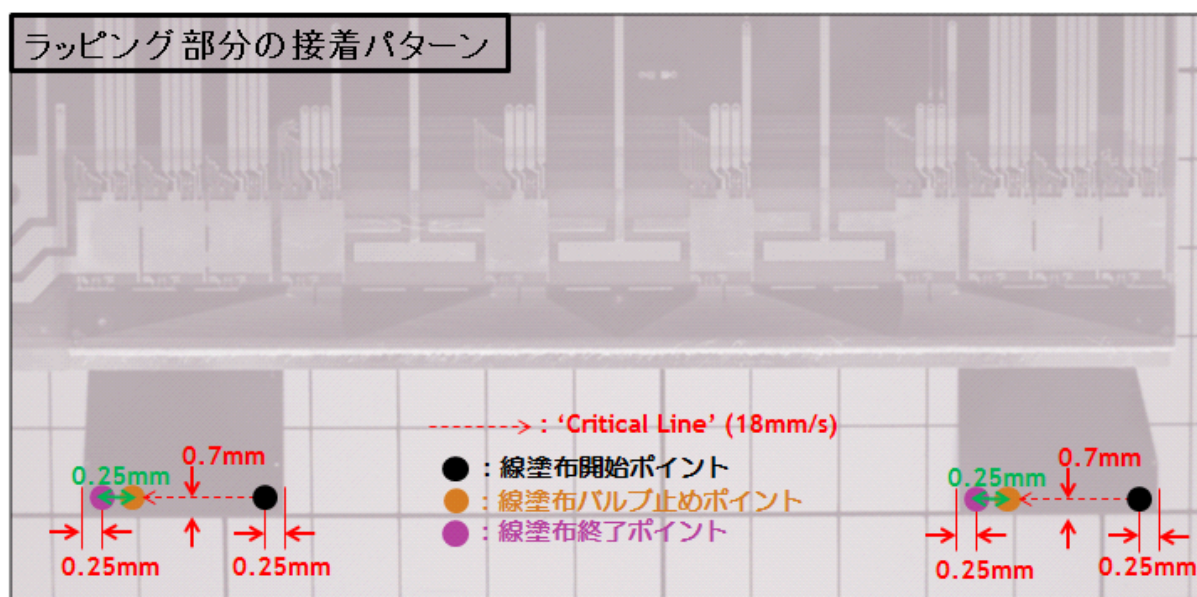


図 5.30: ラッピング部分の接着パターン

5.2.5 手塗り箇所

ラダー組み立てでは接着ロボを使用せずに手作業で塗布をする箇所もある。該当する箇所は塗布精度を必要とせず(部品間が剥がれなければ良い)、接着ロボを使用することが困難、もしくは労力がかかり過ぎるといった部分である。具体的な箇所については4.6章中でそれぞれ言及している。

使用する接着剤は接着ロボで使用するものと同様に試験塗布を実施し、合格した接着剤がはいったシリンジとSH25TT-B(25G)のノズルを使用する。それを図5.31で示すディスペンサー(ML-5000XII, MUSASHI Engineering)にセットし、接着ロボと同じ吐出圧力(0.4[MPa])に設定して使用する。RSAを製作するためリブとマウントブロックを接着する箇所については図4.28のように自分でシリンジをもって塗布スイッチを逐一押しながら塗布量を調整して作業する。それ以外の

手塗り箇所については点塗布を接着面にまんべんなくするのが基本(接着ロボでの作業と異なり、厳密な塗布パターンを定めてはいない)となる。使用するディスペンサーには塗布スイッチを一度押すと設定した時間だけ塗布し続けるモードがある。これを利用して点塗布一つにつき1.4秒を適切なパラメータとして設定し、ラダー組み立てにおける最低限の再現性を確保した。

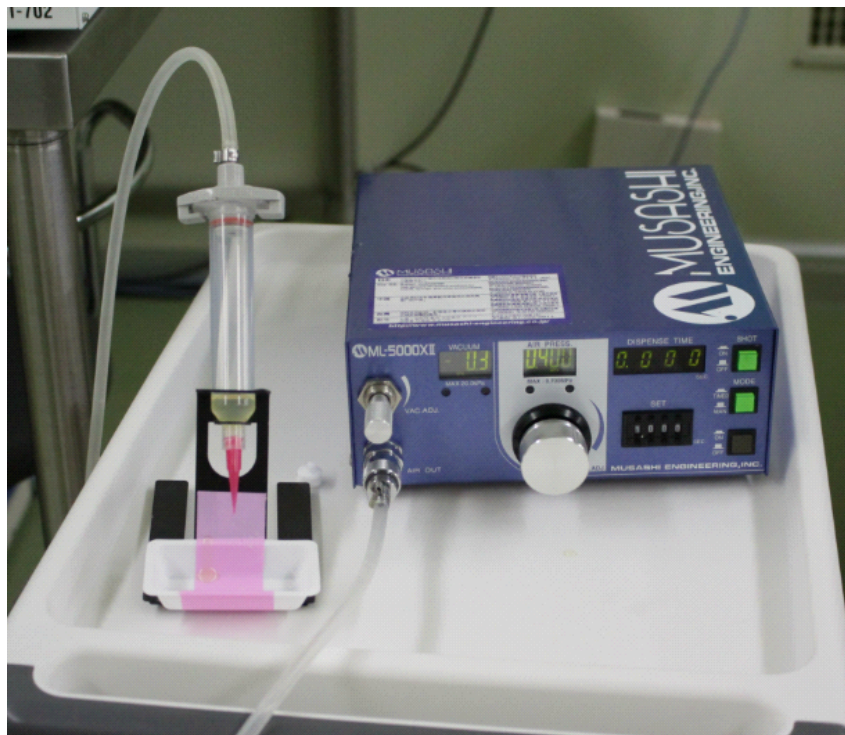


図 5.31: 手塗りで使用するディスペンサー

5.3 ワイヤーボンディング

図 5.32 の左図にワイヤーボンディングで使用するボンディングマシンの外形を示す。仕様の詳細は [25] を参照してほしい。

ボンディングの際には各ボンディング箇所に対応した治具をマシンにセットする。ボンディングマシンには各ボンディング箇所ごとにプログラムの型を用意してある。しかしボンディングする際にはオリガミ基板ごとにパッド位置の個性があるためプログラムの微調整が毎回必要となる。そのため実際にボンディングをするときにはマシンの画面に図 5.32 の右図のようなボンディングポイントがカメラからの画像と重なって表示されるのでポイントをパッドの位置に合わせることで調整する。

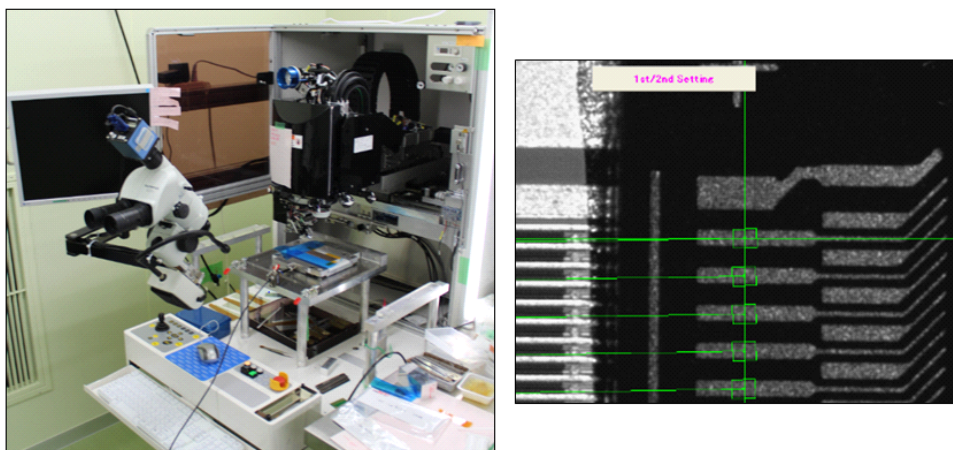


図 5.32: 左：ボンディングマシンの外形 右：ボンディングポイントの調整画面

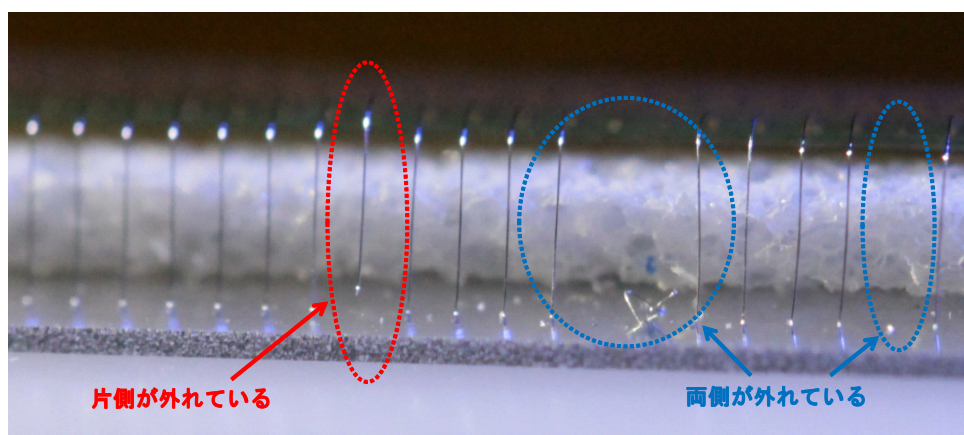


図 5.33: ボンディングの失敗例 (PA0 ↔ DSSD(n-side))

ボンディングは10本ほど打つごとに、ボンディングマシンでエラーがでない場合でも外付けのカメラで覗いて両側のパッドにワイヤーがついているかを確認する。この時、図5.33のように片側が外れていたり、まったく打てていなかった場合はRepairを行う。(失敗したワイヤーが残っていた場合はカメラを覗きながらピンセットで取り除き、再度ボンディングを行う。)

調整するボンディングパラメータで特に重要となるのはPower、Force、Loop-heightの3つである。まずPowerはボンディングを打ち付けるときの超音波の強さ、Forceはアルミ細線をパッドに押しつける強さに対応するパラメータである。この2つのパラメータの組み合わせでボンディングの安定度が変化する。最適なパラメータを見積もるためにまずはシリコンセンサー(DSSDと同じ素材のもの)にPowerとForceの組み合わせをそれぞれ変えたボンディングを各20サンプル打つ。それを図5.34で示すPullテスター(Dage 4000Plus,Nordson Ltd.)を使用してワイヤーがどのくらいの力でとれるか(引っ張り強度[gW])を測定し、安定度を確認する。

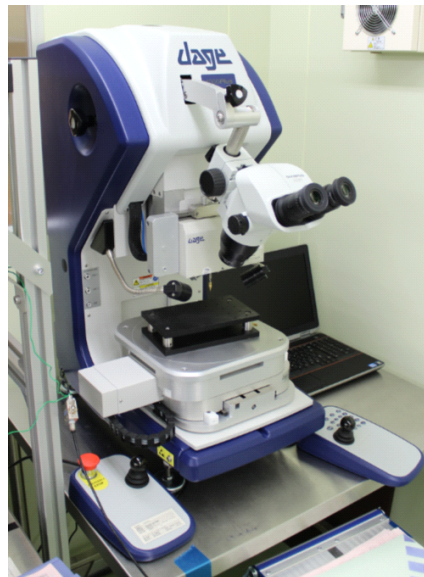


図 5.34: Pull テスター (Dage 4000Plus,Nordson Ltd.)

図5.35が測定した結果のヒストグラム(横軸が引っ張り強度[gW])である。このデータから引っ張り強度がなるべく高く、分散の少ないパラメータの組み合わせを候補として選ぶ。その値を参考に図5.36で示すようなDSSD1枚分でラダーの一部を再現したS.M.(Short-Module)を対象に実際に各ボンディング箇所にもボンディングを打って最終的なパラメータサーチを行った。パラメータサーチの結果において確立したパラメータは表5.2でまとめている。S.M.の製作に使用した接着パターンは5.2章で述べたものと同様にしている。

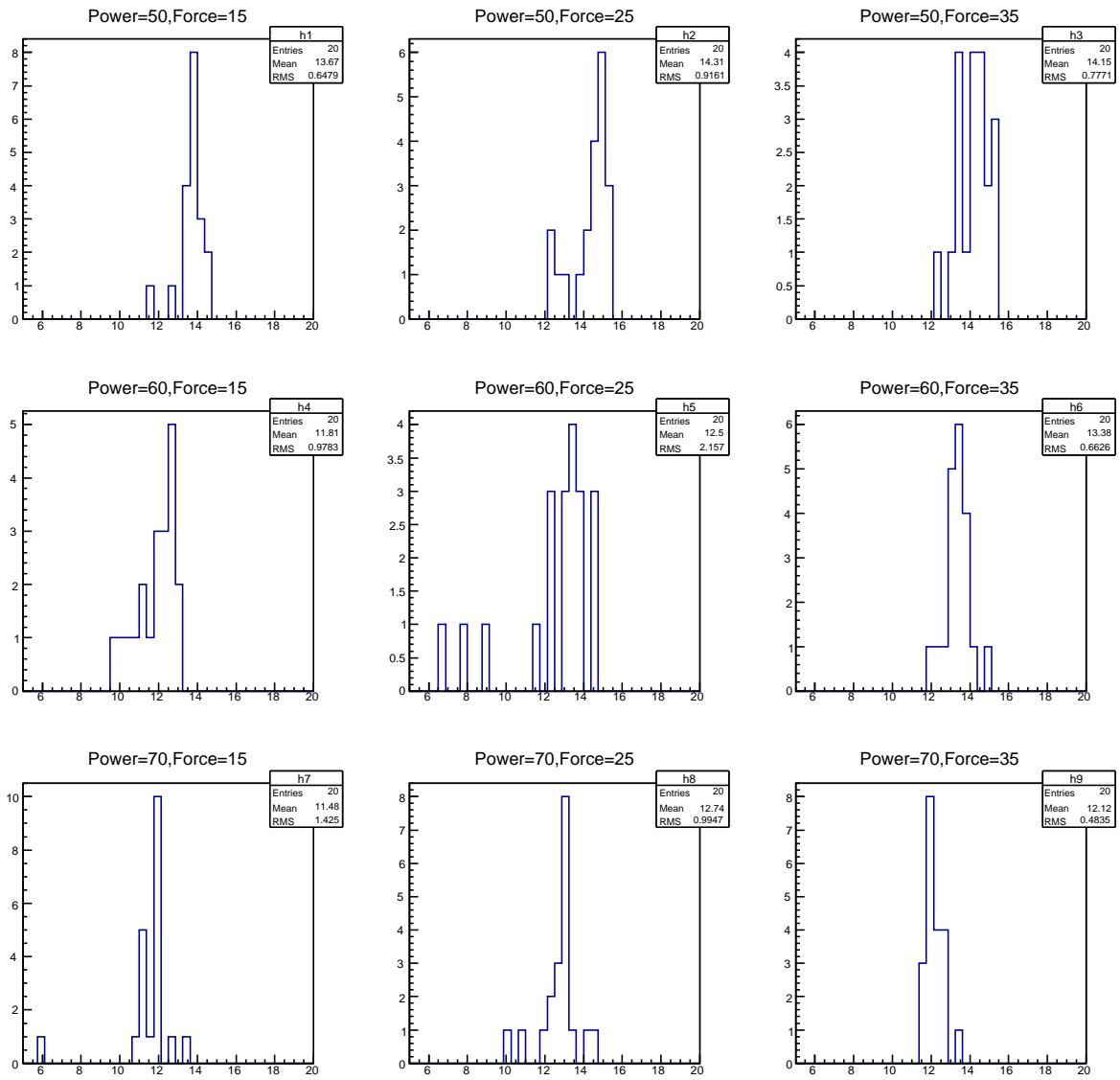


図 5.35: 各 Power と Force の組み合わせによる引っ張り強度 [gW] のヒストグラム (各組み合わせ条件につき 20 サンプル)



図 5.36: パラメータサーチのための S.M. へのボンディング

一方で Loop-height はボンディングしたワイヤーループの高さを決めるパラメータである。ボンディングする箇所には2列 (ループ内側から In-side、Out-side)、もしくは3列 (ループ内側から In-side、Middle-side、Out-side) でパッドが配置されている。そのため各列ごとにワイヤーループの高さを適切に調整し、図 5.37 のようなワイヤーループの形にしないと高密度のボンディングではワイヤ同士が接触し、ショートすることになってしまう。

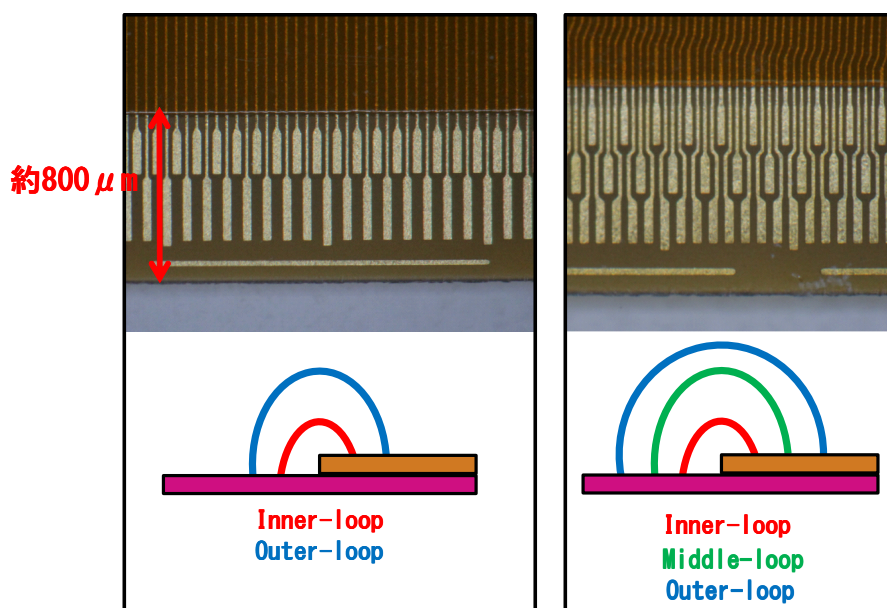


図 5.37: 左 : 2列パッドの例 (PA2 の DSSD 側) 右 : 3列パッドの例 (PA1 の APV25 側)

パラメータサーチをして決定した各ボンディング箇所における最適なパラメータ情報を表 5.2 にまとめる。

表 5.2: 各ボンディング箇所における最適なパラメータ

Position	Line of pad	Power	Force	Hight[μm]
PA1+DSSD(p-side)	In-side	60	20	300
	Out-side	60	20	600
PA2+DSSD(p-side)	In-side	60	20	300
	Out-side	60	20	600
APV25+PA0	In-side	70	15	300
	Out-side	70	15	600
PA0+DSSD(n-side)	In-side	70	20	1200
	Out-side	70	20	1400
APV25+PA1(Wrapping)	In-side	60	20	300
	Middle-side	60	20	600
	Out-side	60	20	900
APV25+PA2(Wrapping)	In-side	60	20	300
	Middle-side	60	20	600
	Out-side	60	20	900

次章から各ボンディング箇所について詳しく説明する。

5.3.1 PA1,2 \leftrightarrow DSSD(p-side)

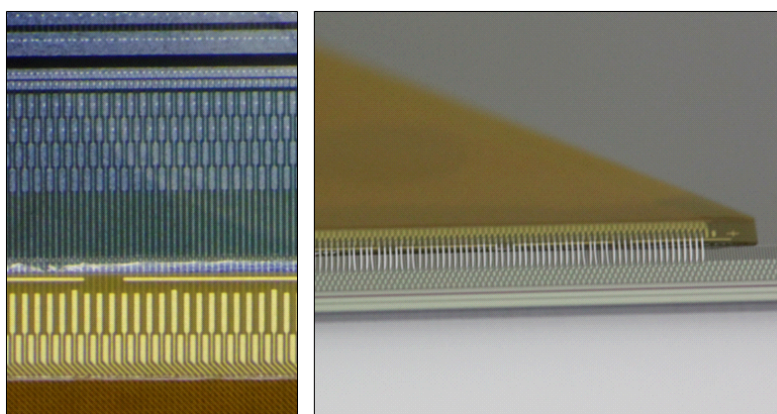


図 5.38: 左: ボンディング前の PA \leftrightarrow DSSD パッド拡大写真 右: 1 列をボンディングした後の写真

PA1 と PA2 は DSSD1 枚につきそれぞれで 384 チャンネルが DSSD の p-side とボンディングされる。図 5.38 の左図のように PA 側のパッドは 2 列 (1 列で 192 チャンネル) になっている。DSSD 側は 4 列に見えるが 1 本のストリップに 2 つのパッドが繋がっているため使用するのは PA 側に近い 2 列のみである。(近い 2 列を接着剤が汚してしまった場合に非常用として奥の 2 列を利用することが可能となっている。) 実際にボンディングを打つと図 5.38 の右図ようになる。また PA1 と PA2 には DSSD に電圧をかけるための Bias パッドが列の端に一か所ずつ設けてある。ここが導通していないと DSSD が動作しないため図 5.39 の概念図にあるように Bias パッドには 2~3 本のボンディングを打ち、導通をより確実にしている。

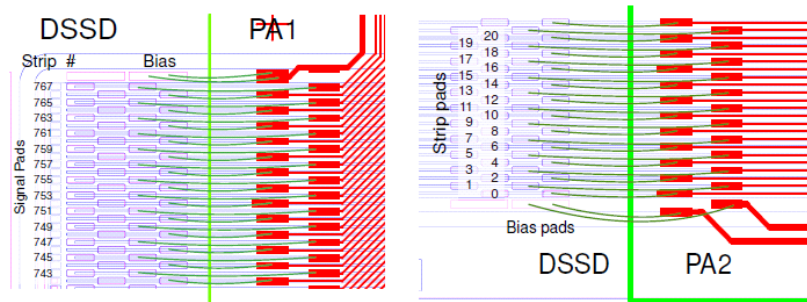


図 5.39: 左 : PA1 の端のボンディング概念図 右 : PA2 の端のボンディング概念図 [26]

5.3.2 APV25↔PA0

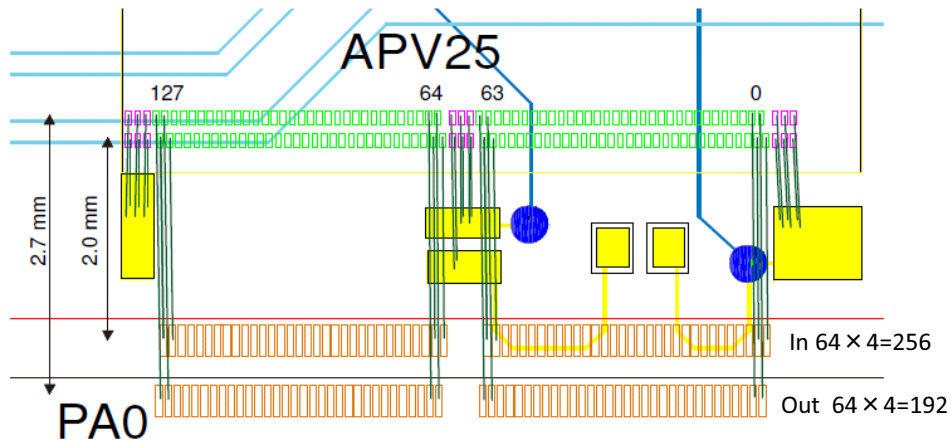


図 5.40: APV25↔PA0(1 チップ分) の概念図 [26]

APV25 \leftrightarrow PA0のボンディングはDSSD1枚につき APV25(128チャンネル)4チップ分を行う。図5.40の概念図のように1チップにつきパッドは2列(1列で64チャンネル)となっており、ボンディング後の拡大写真が図5.41である。



図 5.41: ボンディング後の APV25 \leftrightarrow PA0(1チップ分)の拡大写真

5.3.3 PA0 \leftrightarrow DSSD(n-side)

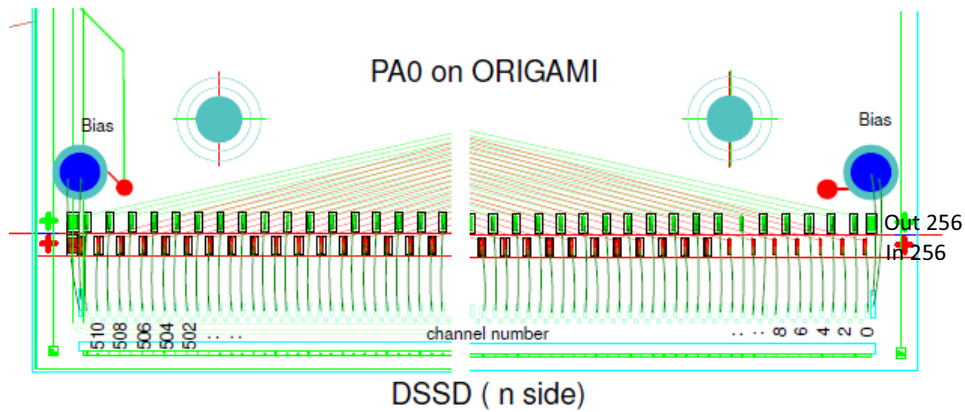


図 5.42: PA0 \leftrightarrow DSSD(n-side)の概念図 [26]

PA0 \leftrightarrow DSSD(n-side)のボンディング箇所は図5.33のように段差になっていて難易度の高い部分である。また両端部分は図3.18で示したようにPA1とPA2がラッピングされるためワイヤルー

プが接触しないように気を付ける必要がある。図 5.42 の概念図のように PA0 側は 2 列 (1 列は 256 チャンネル) だが DSSD 側は 1 列となる。両端に Bias パッドがあるためここも 2~3 本のワイヤーをボンディングして確実に導通させる。図 5.43 がボンディングした後に撮影した片端部分の拡大写真である。

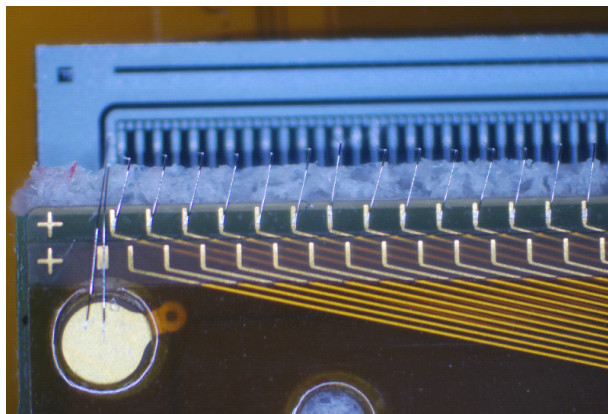


図 5.43: ボンディング後の PA0↔DSSD(n-side) の拡大写真

5.3.4 PA1,2↔APV25 (Wrapping)

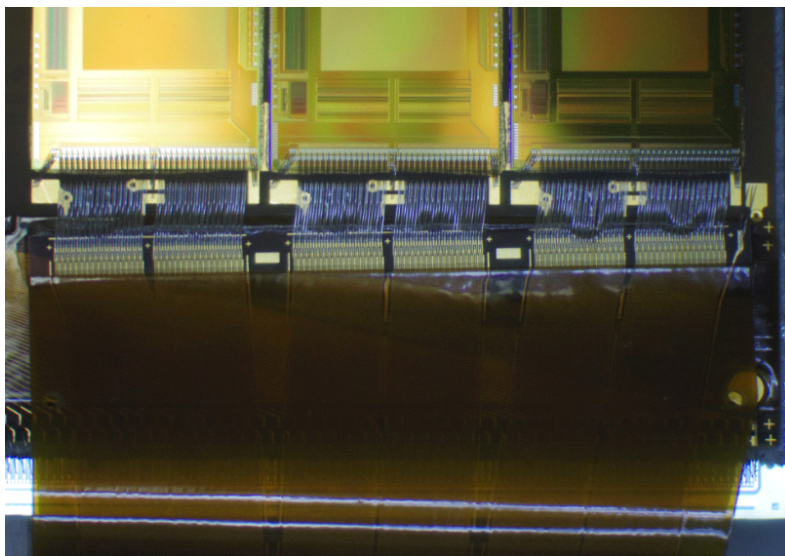


図 5.44: ボンディング後の PA1,2↔APV25 (Wrapping) の拡大写真

ラッピングをした PA1,2↔APV25 のボンディングは DSSD1 枚につき APV25 が 6 チップ分 (PA1,2 それぞれで 3 チップ) である。APV25 側は 2 列 (1 列で 384 チャンネル) だが PA 側は図 5.37 の右図でも示したように 3 列 (In : 384 チャンネル、Middle : 192 チャンネル、Out : 192 チャンネル) のパッドになっており非常にワイヤーが密集する難しい箇所である。ここにも片端に Bias パッドがあるので 2~3 本のワイヤーをボンディングしている。そして図 5.44 がボンディング後の拡大写真である。

5.4 接着工程とワイヤーボンディング工程のまとめ

ラダー製作要求の一つである全ボンディング箇所におけるボンディング Yield99%以上を達成するためにはボンディング工程だけでなく下地となる接着剤の塗布状態も大きく影響してくる。そのため接着工程についても多くの Study が求められる。接着工程において精密な塗布が要求される箇所に関しては接着ロボを導入し、塗布条件の最適化を行って毎回決まった箇所に再現性良く塗布ができるようにした。また使用する接着剤自体についての安定性を確保するために試験塗布を考案し、作業中に不測の事態が起こる可能性を最小化する工夫を行った。

またボンディング工程においても安定的に 99%以上の Yield を達成するために各ボンディング箇所それぞれについて Pull テストを行い、最適なボンディングマシンのパラメータをサーチした。

ここでの研究における最終的な成果は次章の試作ラダーの評価において述べる。

第6章 量産にむけた試作ラダーの評価

ラダーの量産において製作要求を満たしたものが安定的に組み立てられることを確認するために前章までで説明してきた工程によって初めて DSSD を使用した試作ラダーを 2 つ (Class D-1 Ladder と Class D-2 Ladder と呼称) 組み立てた。そしてこの 2 つの試作ラダーにおいて組み立て手順やボンディング Yield の確認による接着工程、ワイヤーボンディングの評価を行った。また DSSD の位置精度についても初めて本物の DSSD を使用して製作したラダーでの測定 (MQA) を行った。

6.1 試作ラダーの評価

Class D-1 Ladder

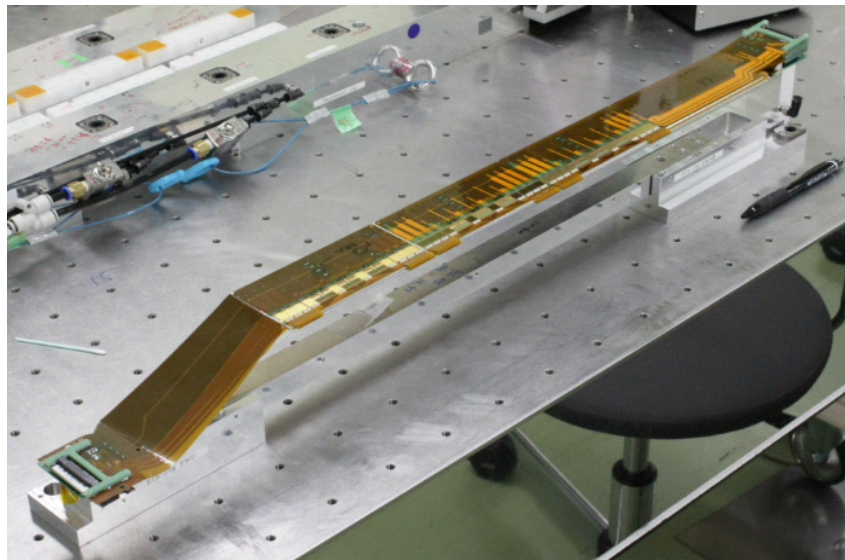


図 6.1: Class D-1 Ladder の完成写真

Class D-1 Ladder(図 6.1 が完成写真) の製作目的は量産時を想定し、組み立て工程を一つずつ確認していくこととボンディング Yield の評価である。Class D-1 Ladder はいくつかの点で最終的に BelleII SVD にインストールする L6 ラダーとは違っている。Origami_CE で読み出す DSSD については電気信号の読み出しを行うことにより、EQA の工程も確認する。また Origami_+Z と Origami_-Z には APV25 を貼りつけていないので APV25 \leftrightarrow PA0 と PA1,2 \leftrightarrow APV25 の APV25 側のボンディングはパッドの代わりに基板の金メッキ部分 (パッドと同位置) に打つ。ただし金メッキよりも APV25 の方がボンディングしやすいので金メッキにボンディングが打てれば APV25 にも問題なく打てると判断できる。

組み立て中に起こった大きな問題の一つは Origami_+Z における接着剤の漏れである。図 6.2 のように接着剤がパッドを汚してしまったために Origami_+Z における PA0 \leftrightarrow DSSD のボンディングが不可能となってしまった。これについては検証の結果、Origami_+Z-Alignment-jig の設計ミスにより Origami_+Z を貼りつける位置が 1mm 程度ずれていたことが原因とわかった。

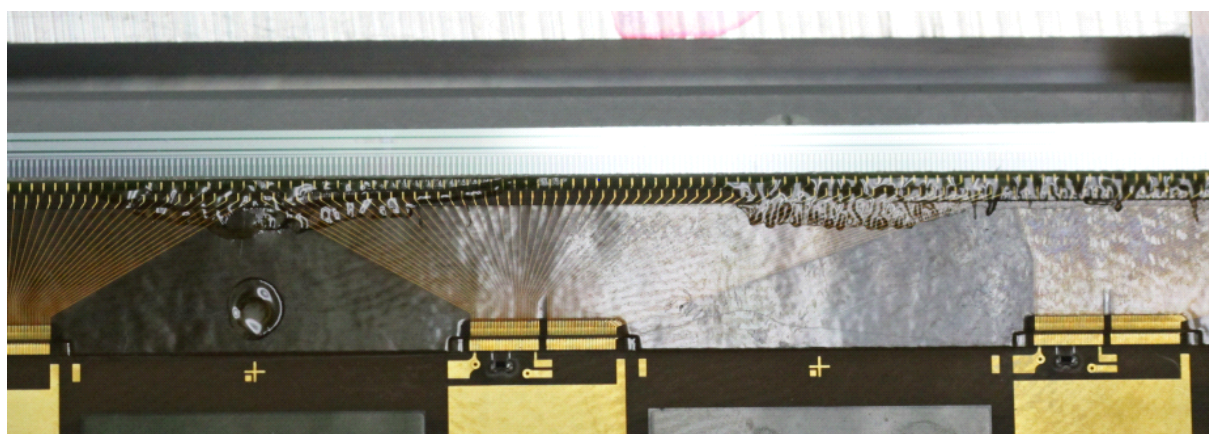


図 6.2: Origami_+Z 部分の接着剤漏れ

また EQA の工程において目視ではワイヤーがパッドについているはずの箇所において、EQA の方では導通していないと判断される箇所があまりに多く存在した。図 6.3 はボンディング工程が全て完了した後に取得した n-side(計 512 チャンネル) のノイズ値である。縦軸が ADC カウントで横軸がチャンネル番号となっている。150~250 番あたりのチャンネルは正常なノイズ値だがそれ以外の多くのチャンネルで異常に高いノイズが観測された。

N-side : Noise Hist

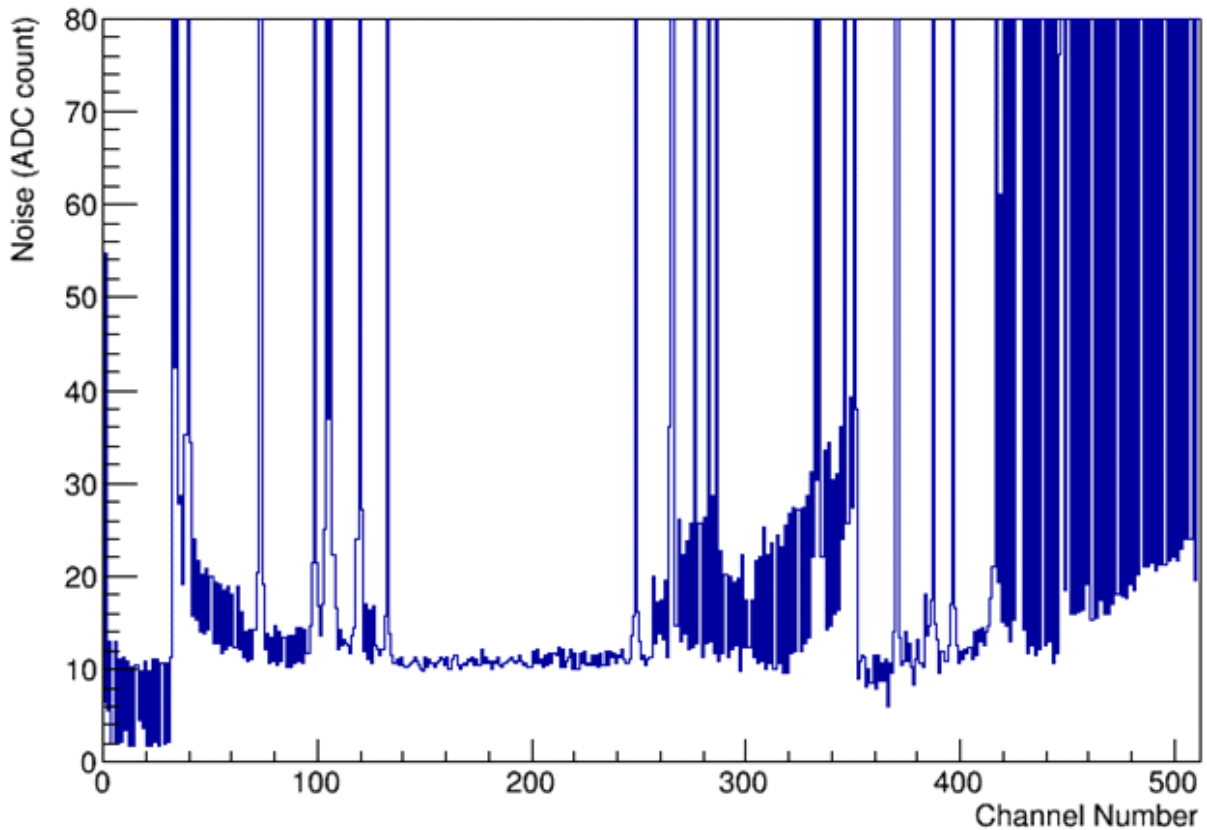


図 6.3: ボンディング後の各 n-side におけるチャンネルのノイズ値

異常なチャンネルが少数であれば目視では見逃していたボンディングの失敗ということが考えられるがあまりに数が多すぎるため可能性は低いと思われた。また異常なノイズが観測されたのは n-side のみで p-side のチャンネルでは観測されなかった。このことから Origami 基板における PA0 の配線が疑われて検証の結果、図 6.4 で示すように PA0 の DSSD 側パッド付近にクラックが多数発見された。クラックの上部と下部において導通していないことも確認され、EQA で測定された異常なノイズのチャンネルとクラックの発見されたチャンネルもほぼ一致したためボンディングのミスではなく部品の問題ということがわかった。この発見により PA0 の品質や製造工程の見直しが行われることになった。

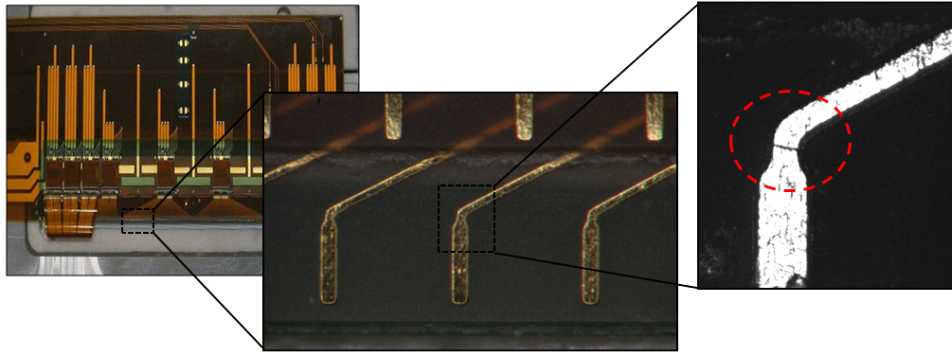


図 6.4: 発見されたクラック

Class D-2 Ladder

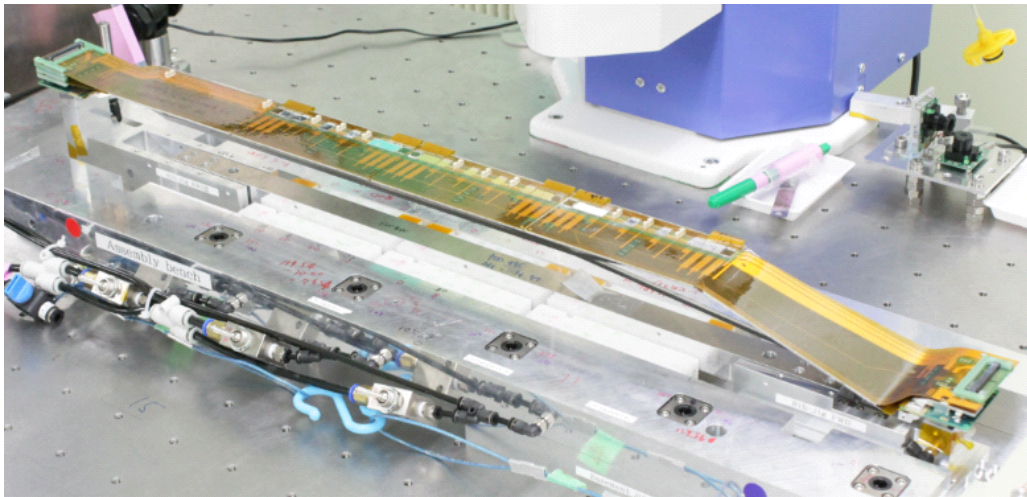


図 6.5: Class D-2 Ladder の完成写真

Class D-2 Ladder(図 6.5 が完成写真)には全ての DSSD に電氣的不良品を使用(つまりは EQA の工程なし)しており、主な製作目的は DSSD の位置精度測定である。それに加えて先に述べたような Class D-1 Ladder で発覚した問題点の修正も含めて¹組み立てをしている。

修正により Class D-1 Ladder で失敗した Origami_+Z の接着が成功したので PA0↔DSSD のボンディング Yield についてもここで評価を行った。組み立て全般においては新たに大きな問題も発生せず無事に DSSD の位置精度を測定することができた。

¹クラックについては部品の欠陥なためこの時点では修正できていない。

6.2 接着とボンディングの評価

Class D-1 Ladder と Class D-2 Ladder で行った各ボンディング箇所の Yield(Repair あり) を表 6.3(Origami_+Z)、表 6.2(Origami_CE)、表 6.1(Origami_-Z) で示す。結果として各オリガミ基板の全てのボンディング箇所において要求されていた 99%以上の Yield を達成した。これにより考察してきた接着工程とボンディング工程で量産時での要求を十分満たせるラダーを製作できることが確認できた。

表 6.1: Origami_+Z の各ボンディング箇所における Yield

Origami_+Z	Yield	Line of pad	Success loop/All loop
PA1+DSSD(p-side)	100%	Inner-loop	192/192
		Outer-loop	192/192
PA2+DSSD(p-side)	100%	Inner-loop	192/192
		Outer-loop	192/192
APV25+PA0 ²	99.60%	Inner-loop	250/252
		Outer-loop	252/252
PA0+DSSD(n-side)	100%	Inner-loop	256/256
		Outer-loop	256/256
APV25+PA1(Wrapping)	99.48%	Inner-loop	192/192
		Middle-loop	96/96
		Outer-loop	94/96
APV25+PA2(Wrapping)	100%	Inner-loop	192/192
		Middle-loop	96/96
		Outer-loop	96/96

²前述した Class D-1 Ladder における Origami_+Z の接着失敗時に In-side と Out-side がそれぞれ 4 パッドだけ汚れてしまったのでその分はカウントしなかった。

表 6.2: Origami_CE の各ボンディング箇所における Yield

Origami_CE	Yield	Line of pad	Success loop/All loop
PA1+DSSD(p-side)	100%	Inner-loop	192/192
		Outer-loop	192/192
PA2+DSSD(p-side)	100%	Inner-loop	192/192
		Outer-loop	192/192
APV25+PA0	100%	Inner-loop	256/256
		Outer-loop	256/256
PA0+DSSD(n-side)	100%	Inner-loop	256/256
		Outer-loop	256/256
APV25+PA1(Wrapping)	100%	Inner-loop	192/192
		Middle-loop	96/96
		Outer-loop	96/96
APV25+PA2(Wrapping)	100%	Inner-loop	192/192
		Middle-loop	96/96
		Outer-loop	96/96

表 6.3: Origami_Z の各ボンディング箇所における Yield

Origami_Z	Yield	Line of pad	Success loop/All loop
PA1+DSSD(p-side)	100%	Inner-loop	192/192
		Outer-loop	192/192
PA2+DSSD(p-side)	100%	Inner-loop	192/192
		Outer-loop	192/192
APV25+PA0	100%	Inner-loop	256/256
		Outer-loop	256/256
PA0+DSSD(n-side)	100%	Inner-loop	256/256
		Outer-loop	256/256
APV25+PA1(Wrapping)	100%	Inner-loop	192/192
		Middle-loop	96/96
		Outer-loop	96/96
APV25+PA2(Wrapping)	99.21%	Inner-loop	192/192
		Middle-loop	95/96
		Outer-loop	94/96

6.3 DSSD 位置精度の評価

表 6.4 が Class D-2 Ladder の各 DSSD における 4.7.3 章で述べた MQA の測定結果である。DSSD の番号はそれぞれ図 6.7 で定義している。 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\theta, \varphi, \eta$ は MQA のときに使用したフィットパラメータ (4.7.3 章を参照) で残りの Tilt angle、Normal angle、xy-projected rotation は図 6.6 にあるようにそれぞれ DSSD 長手方向の傾き ($\arcsin(n_y/\sqrt{n_y^2+n_z^2})$)、短手方向の傾き ($\arcsin(n_x/\sqrt{n_x^2+n_z^2})$)、DSSD を xy 平面に投射したときの回転となっている。

表 6.4: MQA による各 DSSD の位置精度測定の結果

	DSSD#1	DSSD#2	DSSD#3	DSSD#4	DSSD#5
Δx [mm]	-0.002	0.057	0.050	0.041	0.348
Δy [mm]	-0.010	0.004	-0.012	-0.014	0.145
Δz [mm]	-0.190	-0.181	-0.196	-0.171	-0.437
$\Delta\eta$ [deg]	-0.00100	-0.0100	-0.00998	-0.01000	-0.00100
$\Delta\theta$ [deg]	0.00041	0.00000	0.00000	0.00000	0.36612
$\Delta\phi$ [deg]	0.01051	0.00990	0.00000	0.00993	0.00873
Tilt angle [deg]	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.1919
Normal angle [mm]	0.0235	0.0000	0.0000	0.0000	20.9763
xy-projected rotation [deg]	0.02960	-0.0057	-0.0046	-0.0037	-0.1132

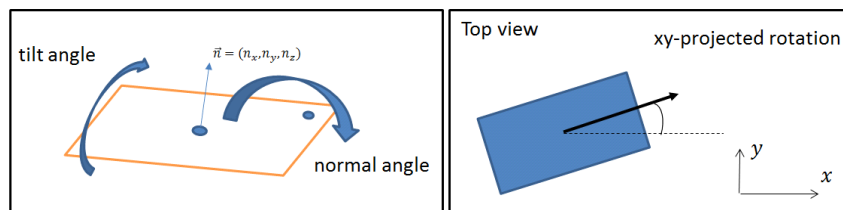


図 6.6: 左 : Tilt angle と Normal angle の定義 右 : xy-projected rotation の定義



図 6.7: 表 6.4 での DSSD 番号の定義

結果から長方形型 DSSD (#1~4) において xy 方向は $\sim 50\mu m$ となっており、量産時とほぼ同じ条件での初測定としては十分な精度を達成できた。ただし z 方向については $\sim 100\mu m$ と設計値からのずれが大きかった。この原因については現在 Assembly-bench の歪みを強く疑っており、治具の追加工を検討している。またスラント部の DSSD (#5) については全体的に大きくずれていることが判明した。(特に z 方向は約 $400\mu m$ もずれている。) これについては治具の設計値自体にミスがあることが判明したため次のラダー組み立てまでに修正する予定である。

第7章 本研究のまとめと今後の予定

本論文では2017年から始まる BelleII 実験において使用する崩壊点検出器の一つである Silicon Vertex Detector (SVD) の製作に関する研究を行った。担当したのは SVD 最外層 (L6) のラダーであり、実験で要求される品質のラダーを安定的に量産できる組み立て工程を研究し、最終的には DSSD を使用した試作ラダー (量産時とほぼ同じ条件) を初めて製作した。以下が今回の研究による成果である。

- 量産時を想定した試作ラダーの組み立てを行うことにより現時点における工程上の問題点を洗い出し、使用した治具の設計ミスや部品の不具合 (特にオリガミ基板における多数のクラック) を発見することができた。
- ラダーの組み立てにおいて接着工程の再現性を確保する手法の開発やパーツ間における最適な接着パターンの考案、各ボンディング箇所ごとにおける機械パラメータの最適化を行った。これにより製作した試作ラダーの評価からラダーの品質として要求されていた全ボンディング箇所における 99%以上のボンディング Yield が達成できることを確認した。
- 現時点で確立した組み立て工程において製作した試作ラダーを対象に本物の DSSD における初の位置精度測定を行った。長方形型 DSSD 部分については xy 方向に $\sim 50\mu\text{m}$ (DSSD によっては $\sim 10\mu\text{m}$) という十分な精度で組み立てることができた。しかし z 方向については $\sim 100\mu\text{m}$ のずれとなっていた。またスラント部の DSSD に関しては全体的に大きく (最大で約 $400\mu\text{m}$) 設計値からずれていることが判明した。

今回製作した試作ラダーの評価から判明した課題の解決が SVD 量産に向けた今後の予定となり、以下のことが挙げられる。

- DSSD の位置精度が十分でない部分に関してはラダー組み立て時に使用している治具の歪みや設計値のミスが原因の可能性が高いことが判明している。今回の試作ラダーで測定したデータを元に修正のための治具追加工や設計値の変更を行う。
- オリガミ基板で発見された多数のクラックについては最優先事項として解決に向けた協議を供給元の会社と行っている。

これらが解決できれば量産品と同等の品質 (予備として BelleII 検出器にもインストール可能な) となる試作ラダーを製作できることが期待される。それが成功すれば実際に BelleII 実験で使用するラダーの量産が開始できる。L6 についてはラダー 20 本 (このうち予備は 4 本) を約 1 年かけて製作する予定となっている。その後、2017 年の初頭までに L6 を含め、各研究機関でそれぞれ製作されたラダーをエンドリングに固定する予定である。

謝辞

ここにて本研究を行うにあたってお世話になったすべての方々に謝辞を申し上げます。

新潟大学の宮田教授、川崎準教授、遊佐助教には私が研究室に所属して以来、素粒子物理学や研究のことのみならず多くのことを指導していただき、また色々な面で研究生活のサポートをしていただいております。ありがとうございました。

IPMUの現場でお世話になったIPMUの樋口さん、森井さん、東大の小貫さん、高エネルギー加速器研究機構の原さん、坪山さん、中村さん、佐藤さん、慶北大学校(韓国)の魚住さんをはじめとしたSVDグループのスタッフの方々には研究のアドバイスや現場でのサポートで大変お世話になりました。また同じ学生として現場で研究した東大の清水さん、佐々木君、東北大の堀口さん、東京理科大の吉延君、神原君、慶北大学校のKangさんやJeonさんには多くのことで手助けをしていただきましてありがとうございました。

新潟大学の高エネルギー物理学研究室では同じBelleグループの先輩であるみのりさんや峻さんをはじめとする先輩方に多くのことを学ばせていただきました。また同期の伊藤君、北澤君、松田君には私があまり新潟大学にいない中で本来私がやるべきことを代わりにやっていただき大変感謝しています。片浦君や小林君をはじめとする後輩の皆さんにはあまり先輩としてのことを私が果たすことができない中でも色々と協力していただき感謝しています。

最後にここで表記できなかった方々も含めまして多くの人達のおかげでこの修論を完成させることができました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] K. Abe et al. (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 87,091802 (2001).
- [2] M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. 49,652 (1973).
- [3] Super KEKB official homepage
<http://www-superkekb.kek.jp/index.html>
- [4] P. Raimondi, talk given at the 2nd SuperB workshop, Frascati,
<http://www.lnf.infn.it/conference/superb06/talks/raimondi1.ppt>, 2006.
- [5] BelleII Technical Design Report
arXiv:1011.0352
- [6] “ Physics at Super B Factory ”, KEK Report 2009-12,
arXiv:1002.5012.
- [7] 飯島徹 中山浩幸 後田裕, 高エネルギーニュース, 29-4, 201 (2011).
- [8] J.H. Christenson, J. Cronin, V. Fitch, R. Turlay., Phys. Rev. Lett., 13 (1964) 138
- [9] 飯田直子, 高エネルギーニュース, 29-1, 20 (2010);
- [10] CKM fitter group main website
http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_moriond14/num/ckmEval_results.html
- [11] Belle Collaboration, S.K. Choi et al., Phys. Rev. Lett. 91, 262001 (2003).
- [12] Belle Collaboration, S.K. Choi, S. L. Olsen et al., Phys. Rev. Lett, 100 142001 (2008).
- [13] LHCb Collaboration, R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. 112, 222002 (2014).
- [14] The Belle Collaboration, “ The Belle detector ”, Nucl. Instr. and Meth. A479, 117 (2002)
- [15] 谷口七重, 高エネルギーニュース, 32-4, 241 (2014);
- [16] BelleII official homepage
<http://belle2.kek.jp/>
- [17] H. Aihara et al, “ Belle SVD2 Vertex detector ”, Nucl. Instr. and Meth. A580, 269 (2006).

- [18] M.Firedl et al. Pos VERTEX2011 (2011) 022
- [19] sBelle Design Study Report arXiv:0810.4084 [hep-ex]
- [20] M. French et al., Nucl. Instrum. Meth. A 466, 359 (2001).
- [21] 中川 聖 新潟大学自然科学研究科 平成 19 年度修士論文
- [22] 清水 信宏 東京大学理学系研究科 平成 25 年度修士論文
- [23] 佐々木 淳弥 東京大学理学系研究科 平成 26 年度修士論文
- [24] http://www.janome.co.jp/industrial/jpn/products/scara_robot/jsr4400n_series/spec.html
- [25] <http://www.cho-onpa.co.jp/japanese/product/bonder/auto.html>
- [26] BelleII Note 0008

目次

2.1 BelleII 実験で予定しているルミノシティと蓄積データ量の推移 [3]	5
2.2 主な加速器実験のルミノシティとエネルギー [9]	6
2.3 ユニタリティ三角形	8
2.4 Belle 実験における蓄積データ量の推移と新しいハドロン共鳴状態の発見時期 [7]	10
2.5 SuperKEKB 加速器の概念図	11
2.6 ナノビーム・スキーム [5]	12
2.7 KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器の基本パラメータ [5]	13
2.8 BelleII 検出器の概観と主な検出器の役割	14
2.9 検出器配置図 (左半分: BelleII 検出器、右半分: Belle 検出器)[5]	15
2.10 BelleII 検出器の中心部	16
2.11 ワイヤ配置の簡略図	17
2.12 ドリフト時間と距離の関係	17
2.13 主な荷電粒子における運動量と電離損失の関係 [14]	18
2.14 アップグレード前後での CDC の主なパラメータ [5]	19
2.15 CDC の半断面図。ピンク色の領域がスモールセル [15]	19
2.16 スモールセルとノーマルセル [15]	20
2.17 TOP モジュール	21
2.18 チェレンコ光の概念図	22
2.19 TOP モジュール内におけるチェレンコフ光の伝播	23
2.20 TOP モジュールの側面図 [16]	23
2.21 MCP-PMT の外形	24
2.22 TOP モジュールにおける MCP-PMT の配置図 [16]	24
2.23 ARICH の全体像	25
2.24 ARICH の原理図	26
2.25 一般的な近接焦点型とマルチレイヤー方式	26
2.26 シリカエアロジェルのタイル	27
2.27 HAPD の外形 [5]	27
2.28 HAPD の断面図	27
2.29 Csl(Tl) 結晶カウンターの側面図と上面図 [14]	29
2.30 KLM の検出層における構造図 [14]	30
2.31 KEKB と SuperKEKB における KLM 各層の検出効率 [5]	31

2.32	左：シンチレータストリップを配置したエンドキャップ部の検出層、右：シンチレータストリップの内部構造 [5]	31
3.1	VXD の簡略的な原理図	32
3.2	SVD1 の構造図 [14]	33
3.3	SVD2 の構造図 [17]	34
3.4	SVD1 と SVD2 の大きさ比較	35
3.5	BelleII 実験時に予想される SVD2 の占有率 [5]	36
3.6	最内層と最外層における崩壊点からの距離の違いによる位置分解能の差 (簡略図)	37
3.7	BelleII 実験における VXD のラダー断面図	38
3.8	BelleIISVD の全体像 [18]	38
3.9	SVD1、SVD2、SVD4(BelleIISVD) の大きさ比較	39
3.10	有効検出角におけるスラント構造の有用性	40
3.11	スラント構造ありとなしでの通過領域の違い	40
3.12	衝突点からの崩壊点距離に対する K_s の崩壊率 [19]	41
3.13	DSSD の構造	41
3.14	左：長方形型 DSSD 右：台形型 DSSD	42
3.15	APV25(フロントエンドチップ)	43
3.16	APV25 の読み出し回路図 [5]	44
3.17	VA1TA、APV25、“multi-peak mode” を比較した概略図 [5]	44
3.18	オリガミコンセプトの簡単な断面図と対応した写真	45
3.19	バックエンドエレキシステムの概略図 [5]	46
3.20	粒子の入射角に対する各ラダーでの入射位置分解能 [5]	47
3.21	粒子の入射角に対する信号が残るストリップの数 [5]	47
3.22	PXD の全体像 [5]	48
3.23	PXD のラダー	48
3.24	DEPFET の断面図 (左) と回路図 (右)[5]	49
3.25	各検出器における読み出しデータ容量の表 [5]	50
3.26	PXD と BelleIISVD のデータ取得の連携の流れ [5]	51
3.27	BelleII 検出器の VXD(SVD+PXD) における崩壊点分解能 (z 方向)	52
4.1	BelleIISVD における各層のラダーと担当機関	53
4.2	L6 の展開図	55
4.3	最新版 (2015 月 1 月現在) のリブの写真	56
4.4	左：FW 用マウントブロック 右：BW 用マウントブロック	56
4.5	L6 で使用される 6 種類の PA	57
4.6	ハイブリッドの片面	58
4.7	Airex(カット前)	58
4.8	3 種類のオリガミ基板	59
4.9	組み立てに使用する多数の治具	60

4.10	真空吸着を利用した治具間の移動 (治具の隙間は約 50 μ m 程度) ON/OFF は真空吸着	60
4.11	左: Kavli IPMU の外観 右: クリーンルーム内	62
4.12	ラダー組み立ての中心となる光学定盤上	62
4.13	左: 圧空ポンプ (P4-PFE, IAC) 右: 真空ポンプ (DA-241S, ULVAC)	63
4.14	L6 ラダー組み立て手順のフローチャート	64
4.15	PA1、2 と DSSD の貼り付け	65
4.16	Assembly-bench に並べられたミドルモジュール $\times 3$	65
4.17	左: SFW 右: SBW	66
4.18	SFW と SBW の Assembly-bench への移動手順	66
4.19	Assembly-bench に並べられた 5 枚の DSSD	67
4.20	Assembly-bench からの SFW と SBW の取り外し	67
4.21	DSSD と Airex の接着	68
4.22	Origami_CE の接着手順	69
4.23	Origami_-Z の接着手順	69
4.24	Origami_+Z の接着手順	70
4.25	オリガミ基板上のワイヤーボンディング	71
4.26	PA1、PA2 のラッピング手順	72
4.27	CO ₂ クリップの接着工程	73
4.28	RSA の製作写真	74
4.29	Basement-jig にのった Rib-jig	75
4.30	RSA への SFW と SBW の接着	75
4.31	SFW と Airex の接着	76
4.32	RSA とオリガミモジュールの接着	77
4.33	SFW と SBW、リブへの塗布	77
4.34	最後に残った SBW 上における接着	78
4.35	完成した L6 の写真	78
4.36	Mechanical QA/QC のフローチャート [22]	79
4.37	ラダーにおける座標系の定義 [22]	80
4.38	左: CMM の全体像 右: 円中心の測定例 [22]	81
4.39	左: CMM の GUI 右上: CMM の画面 右下: DSSD の微調整 [22]	82
4.40	XYZ θ -jig	82
4.41	F マークの合わせ方 [22]	83
4.42	左: CMM にのせた完成後のラダー 右: CMM による F マークの認識 [22]	84
4.43	設計値からのズレの自由度における順序	84
4.44	移動式のラックに収納された APVDAQ システム	85
4.45	APVDAQ システムの GUI [23]	86
4.46	横軸: 各チャンネル 縦軸: ノイズ値 (DSSD の p-side まで信号線が繋がったとき)	87
5.1	ボンディング箇所と各チャンネル数の概念図 [26]	88

5.2	左：オリガミモジュール裏面 右：オリガミモジュール表面	89
5.3	気泡が混入した接着間におけるワイヤーボンディング	90
5.4	接着剤の漏れによるボンディング失敗例の概念図	91
5.5	Araldite2011	92
5.6	左：キャップ付きシリンジにはいった接着剤 右：遠心脱泡器 (AW-20-3)	93
5.7	左：直交ロボ (SONY CAST PRO II) 右：ディスペンサー (1500XL, EFD)	94
5.8	左：直交ロボのベース 右：治具固定の断面図	95
5.9	左：使用するノズル (SH25TT-B(25G)) 右：直交ロボへのシリンジ取り付け	95
5.10	左：ノズル先端補正システム 右：顕微鏡を覗いたときにおけるノズル先端の原点位置	96
5.11	左：接着剤の広がりについてのグラフ 右上：グラフに対応したサンプルと広がり幅の定義 右下：カートリッジにおける消費量の定義	97
5.12	左：試験塗布が不合格のときに対応したサンプル 右：試験塗布が合格のときに対応したサンプル	98
5.13	PA-jig における PA1、2 の仮止め	99
5.14	PA1 と PA2+DSSD の接着方式	99
5.15	PA1 と PA2 の接着パターン	100
5.16	上：「線塗布バルブ止めポイント」なしの線塗布 下：「線塗布バルブ止めポイント」ありの線塗布	101
5.17	接着後の PA1+DSSD のある一部における拡大写真	101
5.18	Origami_CE の接着パターン	102
5.19	内径 1.06mm のノズル (PN17G-A, MUSASHI Engineering)	102
5.20	オリガミ基板における PA0 の反り返り	103
5.21	接着中の Airex+Origami_CE における概略図	104
5.22	Origami_-Z の接着パターン	104
5.23	Origami_+Z の接着パターン	105
5.24	接着中の Airex+Origami_+Z における概念図	105
5.25	左：水平多関節ロボ (JSR-4403N) の全体写真 右：シリンジ固定器具	106
5.26	左：ノズル先端を覗く 2 台の Web カメラ 右：PC に写した Web カメラからの画像	107
5.27	DSSD への接着剤塗布	107
5.28	DSSD への接着パターン	108
5.29	SH25TT-B(22G)	108
5.30	ラッピング部分の接着パターン	109
5.31	手塗りで使用するディスペンサー	110
5.32	左：ボンディングマシンの外形 右：ボンディングポイントの調整画面	111
5.33	ボンディングの失敗例 (PA0↔DSSD(n-side))	111
5.34	Pull テスター (Dage 4000Plus, Nordson Ltd.)	112
5.35	各 Power と Force の組み合わせによる引っ張り強度 [gW] のヒストグラム (各組み合わせ条件につき 20 サンプル)	113

5.36	パラメータサーチのための S.M. へのボンディング	114
5.37	左 : 2 列パッドの例 (PA2 の DSSD 側) 右 : 3 列パッドの例 (PA1 の APV25 側)	114
5.38	左 : ボンディング前の PA \leftrightarrow DSSD パッド拡大写真 右 : 1 列をボンディングした 後の写真	115
5.39	左 : PA1 の端のボンディング概念図 右 : PA2 の端のボンディング概念図 [26]	116
5.40	APV25 \leftrightarrow PA0(1 チップ分) の概念図 [26]	116
5.41	ボンディング後の APV25 \leftrightarrow PA0(1 チップ分) の拡大写真	117
5.42	PA0 \leftrightarrow DSSD(n-side) の概念図 [26]	117
5.43	ボンディング後の PA0 \leftrightarrow DSSD(n-side) の拡大写真	118
5.44	ボンディング後の PA1,2 \leftrightarrow APV25 (Wrapping) の拡大写真	118
6.1	Class D-1 Ladder の完成写真	120
6.2	Origami_+Z 部分の接着剤漏れ	121
6.3	ボンディング後の各 n-side におけるチャンネルのノイズ値	122
6.4	発見されたクラック	123
6.5	Class D-2 Ladder の完成写真	123
6.6	左 : Tilt angle と Normal angle の定義 右 : xy-projected rotation の定義	126
6.7	表 6.4 での DSSD 番号の定義	126

表 目 次

3.1	DSSD の主なパラメータ	43
3.2	PXD の主なパラメータ	49
5.1	接着箇所における接着方法の分類表	91
5.2	各ボンディング箇所における最適なパラメータ	115
6.1	Origami_+Z の各ボンディング箇所における Yield	124
6.2	Origami_CE の各ボンディング箇所における Yield	125
6.3	Origami_-Z の各ボンディング箇所における Yield	125
6.4	MQA による各 DSSD の位置精度測定の結果	126