

■ 研究紹介

Belle II シリコン崩壊点検出器 (SVD)

東京大学 Kavli IPMU(WPI)

森井 友子 / 樋口 岳雄

tomoko.iwashita@ipmu.jp / takeo.higuchi@ipmu.jp

2016年8月19日

1 はじめに

Belle II 実験における崩壊点検出器は、図1に示すようにビームパイプを囲うように2層からなるPixel Detector (PXD) と、これから紹介する4層のSilicon Vertex Detector (SVD) の2種類計6層からなる[1]。Belle II SVDはBelle実験におけるSVDのアップグレードであり、検出器の大型化、新たに導入されたスラント構造やオリガミコンセプトといった新しい構造が取り入れられている。大量の信号読み出しのためのフレキシブル基板の改良やその結線など、多数の解決すべき課題を乗り越え、2016年4月から各層が検出器の量産体制に入ったのでここで報告することとする。

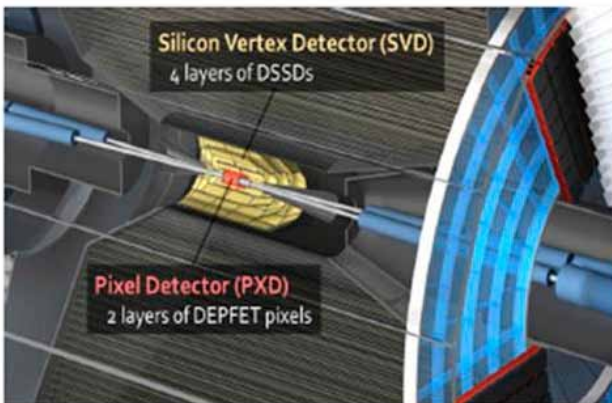


図1: Belle II 検出器におけるPXDとSVDの構造。最内層の赤い(濃い)部分がPXD, 黄色い(薄い)部分がSVDを表している。PXDとSVDがビーム衝突点及びビームパイプを囲うように設置される。

2 Belle II の崩壊点検出器

崩壊点検出器はビーム衝突点から一番近い位置に配置されており、粒子の崩壊点を測定するものである。Belle II 実験でも重要となるCP対称性の破れの測定においては、 B^0 と \bar{B}^0 の精密な崩壊点測定が必要であり崩壊点検出器の担う役割は大きい。Belle 実験と Belle II 実験における測定の基本的な原理は同じである。先に述べたように崩壊点検出器はビームパイプを囲うように複数の層にわたって配置されており、 B^0 や \bar{B}^0 の崩壊などによって生成された荷電粒子は各

層のシリコンセンサーを突き抜ける。そしてこのときの通過位置の2次元情報が測定される。この通過位置情報とSVDの外側に位置するドリフトチェンバーを用いて粒子の飛跡を測定する。モンテカルロシミュレーションによると、 $p_T = 3 \text{ GeV}/c$ の運動量の粒子に対してインパクトパラメータの分解能は $15\mu\text{m}$ 程度になると見積もられている。

SVDに使用される検出器はDSSD (Double-Sided Silicon Detector)と呼ばれるシリコンセンサーである。DSSDの構造を図2に示す。このセンサーは名前の通りセンサーの各

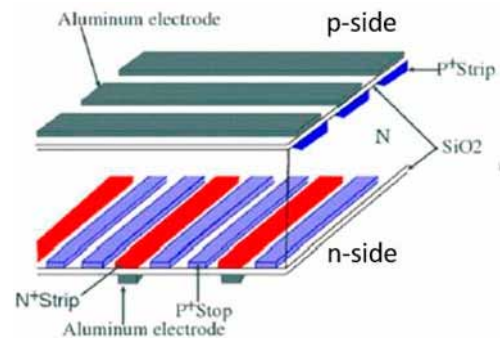


図2: DSSDの構造。

面にBelle II検出器における ϕ 方向にn型半導体のストリップ、これと直行するz方向に沿ってp型半導体のストリップがそれぞれ刻まれており、この2層が中央のn型半導体を挟んだ形でpin接合の半導体検出器となっている。また、ストリップ間の電氣的接続状態を防ぐためにn型半導体のストリップとストリップの間にはp型半導体が配置されている。図3に示すように崩壊点検出器は6層からなり、各

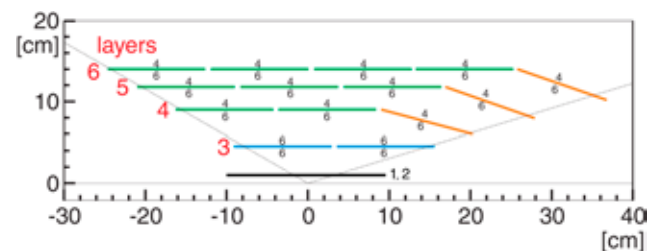


図3: SVDを横から見たときのセンサーの配置の断面図。最内層(1,2)がPXDを、その外の層(3,4,5,6)がSVDを表している。

表 1 : SVD で使用する各形状のセンサーの仕様。

| | small rectangular DSSD | large rectangular DSSD | trapezoidal DSSD |
|----------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| Layer | 3 | 4,5,6 | |
| # of strips (n-side) | 768 | 512 | |
| # of strips (p-side) | 768 | | |
| Pitch (n-side) | 160 μm | 240 μm | |
| Pitch (P-side) | 50 μm | 75 μm | 75-50 μm |
| Thickness | 320 μm | | 300 μm |
| Company | HPK | | Micron |

層がビームパイプを覆うように配置されている。PXD がそのうちの内側 2 層を構成し、SVD が外側 4 層を構成する。SVD では、3 つの形状のセンサー、小型長方形 (small rectangular)、大型長方形 (large rectangular)、および台形 (trapezoidal) が層構造の形状に応じて使い分けられており、最内層 (PXD から数えて 3 層目) では小型長方形センサーが使用され、他の層 (4 層目 から 6 層目) ではバレル部に大型長方形センサーが、フォワード部に台形センサーが使用されている。長方形センサーは浜松ホトニクス社製、前方部用センサーは Micron 社製である。各センサーの仕様を表 1 に示す。3 層目は衝突点からの距離が近いので、ストリップ間のピッチが狭くなっている。

3 シリコン崩壊点検出器

3.1 シリコン崩壊点検出器の設計

Belle 実験における崩壊点検出器では PXD は使われず、strip 型の SVD が用いられた。SVD はアップグレードにより形状が変更され、初期型は SVD1 [2]、後期型は SVD2 [3] と呼ばれた。SVD1 では 3 層構造を用いており衝突点からの半径は最外層で 60.5mm、検出器の長さは最大で 365mm、有効検出角は $23^\circ < \theta < 139^\circ$ であった。SVD2 は 4 層構造で衝突点からの半径も 88.0mm (最外層)、最長 662mm と SVD1 に比べ一回り大型化している。このとき最内層は衝突点に近づき最外層がより外側になったことにより、SVD2 は SVD1 に比べて崩壊点の位置分解能が 20%ほど向上した。また有効検出角が $17^\circ < \theta < 150^\circ$ まで拡張されたほか、読み出し集積回路の放射線耐性の強化についても行われた。

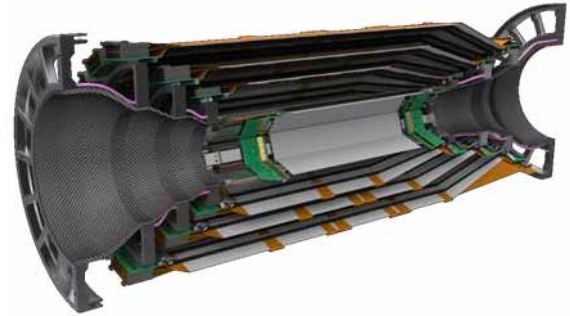


図 4 : SVD の断面図。内層から各検出器が円筒状に配置されている様子を表す。

Belle II SVD のそれぞれの層は、センサーを長く配列した「ラダー」と呼ばれる構造対から構成されており、ラダーは図 4 のように円筒形に配置されている。ラダーは内側の層から 7, 10, 12, 16 本配置されている。また、有効検出角は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ と Belle 実験時と同様のままだが、SVD はドリフトチェンバーの内径が大きくなったことに伴い、衝突点からの距離が最外層で 135mm と Belle 実験時に比べ大型化している。ラダーの長さは 3 層目から順に 350mm, 509mm, 629mm, 749mm で、SVD の 4, 5, 6 層目は大型化に伴い有効検出角を維持しつつも全長を抑えるためスラント構造と台形センサーがフォワード側に導入されている。

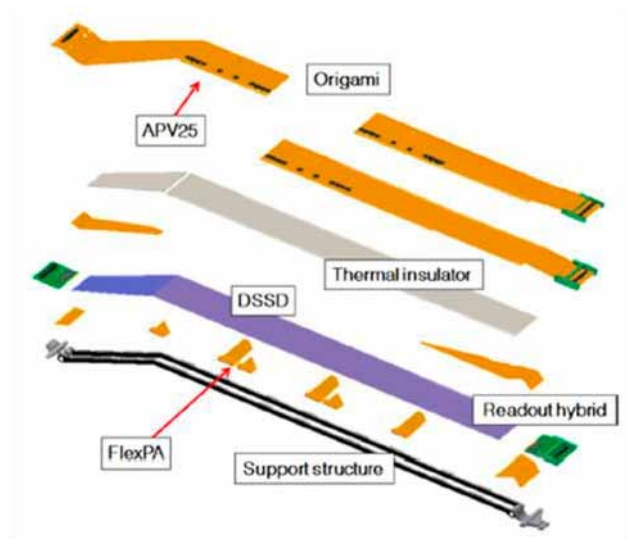


図 5 : ラダーの構成要素図。DSSD と各部品はエポキシ系接着剤で接着されラダーの形状となる。

各層の検出器は、層ごとに多少の大きさと部品の違いはあるが、図 5 に示すような DSSD、断熱材(AIREX)、読み出し基板、アダプタ用フレキシブル基板、オリガミフレキシブル基板、およびサポートリブから構成されている。読み出しには APV25[4]と呼ばれる ASIC を使用しており、これは読み出し基板およびオリガミフレキシブル基板上に設

置されている。これらの部品はエポキシ系接着剤（アラルダイト 2011）で接着される。センサーの信号はアダプタ用フレキシブル基板を経由して APV25 によって読み出されるが、各要素はワイヤーボンドによって結線されている。

APV25は先に述べたように読み出しハイブリッドおよびオリガミフレキシブル基板上に設置されている。これは信号経路を最小化することで APV25 の容量性ノイズの低減を図ったものである。DSSD の裏側(p-side)とアダプタ用フレキシブル基板をいったん結線し、図 6 に示すようにアダプタ用フレキシブル基板を曲げて DSSD 表側(n-side)の直上にある APV25 と結線することからこの方式を「オリガミコンセプト(chip on sensor)」と呼んでいる。

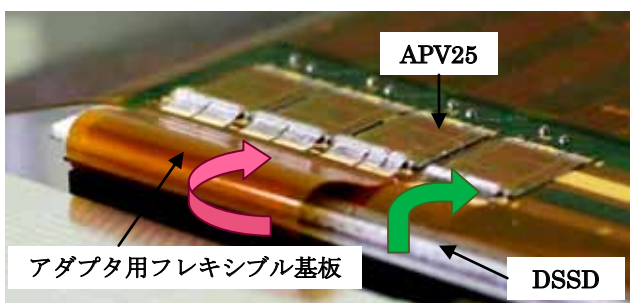


図6: オリガミコンセプト。アダプタ用フレキシブル基板はDSSD裏面(p-side)に接着され、ワイヤーボンディングでDSSDと結線されている。これを折り曲げて上面のオリガミフレキシブル基板と接着し、APV25とアダプタ用フレキシブル基板を結線することでp-sideの信号を読み出す。図中の左側の矢印はp-sideとの結線を、右側の矢印はn-sideとの結線を表す。

3.2 シリコン崩壊点検出器の読み出し

Belle II SVD ラダーの読み出しに使用している APV25 は、LHC の CMS 実験用に開発されたものであり、十分な実績から Belle II SVD への投入が決まったものである。オリガミフレキシブル基板上に載った APV25 は、物質量の低減のために厚さが 300 μm から 100 μm に薄くされている。

APV25は、その特性としてシェーピングタイムが短く(50 ns)、耐放射線性が強い(>1MGy)。チップに実装された 192 個のアナログパイプラインセルによって、トリガーレーテンシは一定値に抑えられる。APV25 の出力は VME 9U 上の 48 のフラッシュ ADC(FADC)ボードへ伝達される。FADC ボードは信号のデジタル化、ペDESTAL除去、コモンモード補正、ゼロサブプレッション、およびデータフォーマッティングを行う。ファーストレベルトリガーが FADC コントローラボードに通知されると、成形されたデータは FADC 背面に取り付けられたデータ転送ボード(FTB)から COPPER (COmmon Pipeline Platform for Electronics Readout) ボード上のデータレシーバーカードへ光ファイバーを通して伝達される。COPPER ボードは LinuxOS を搭載してい

て、さらなるデータ処理を行ったのち、高レベルトリガーシステム・データストレージへの転送を行う。

4 製作上の工夫と難所

Belle II SVD では、製作期間を短縮するため、各層およびフォワードモジュール・バックワードモジュールの製作をサイトごとに分担して並行に進めている。フォワードモジュール・バックワードモジュールは INFN Pisa (イタリア)が、第3層から第5層はそれぞれ Melbourne 大学(オーストラリア)、TIFR (インド)、HEPHY (オーストリア)が製作している。また第6層は日本チームに慶北大学(韓国)を加えたグループが、東大・Kavli IPMU のクリーンルームを拠点として製作している。なお第4層のラダー製作も同じクリーンルームで進められている。フォワード・バックワードのモジュールは完成され次第各サイトに送られ、各ラダーに組み付けられていく。

SVD ラダーは、その大型で複雑な構造のため、製作するうえでの難所が多く存在する。他方、SVD はビームパイプを囲む構造であることから、ラダーは予備も含めて複数本を製作する必要がある。このため「大量生産」の思想に基づいて、技術的難所もできる限りマニュアル化することで、作業の効率化と完成したラダーのスペックの均質化を図っている。

例えば、センサーを精度よく設置するための3次元測定機による測定や、センサーと各フレキシブル基板を結線するための大量の信号線をつなぐワイヤーボンディングについては装置を扱う人の技術によるところの多い作業工程であるが、プログラム化やラダー製作用治具の工夫により、均一な品質を維持しながら操作時の事故を防ぎ、かつ円滑に作業が進むようにされている。

ラダーのスペックをあらゆるパラメーターのひとつがセンサーの組立位置精度である。組み立てられたラダー内のセンサー位置は、設計値から 100 μm 以下(鉛直方向は 200 μm 以下)のズレの範囲に収まることが理想とされる。精密なラダーを製作するため、ラダーの製作には 20 を超える様々なラダー製作用治具が使われる。ラダー製作上で特に重要な箇所では、治具の加工精度は 50 μm 以下に抑えられている。また、治具本体はアルミニウムを用いて作られているが、センサーと触れあう箇所にはデルリンが用いられていたり、APV25 と干渉しうる箇所では治具が削られていたり、安全に部品が取り扱えるように工夫されている。センサーや各フレキシブル基板は一旦アライメント用の製作治具上にセットされると、後は接着用の製作治具や精密なアライメント用の製作治具に真空吸着を用いて移動され、最初のアライメント以降センサーや各フレキシブル基板に人の手が触れることはほとんどない。なお、治具から治具へのセンサーの受け渡しによるセンサー位置の変化



図7: APV25とアダプタ用フレキシブル基板のワイヤーボンディング結線箇所。図の枠線で囲まれた部分に APV25 とフレキシブル基板をつなぐワイヤーボン드가打たれる。

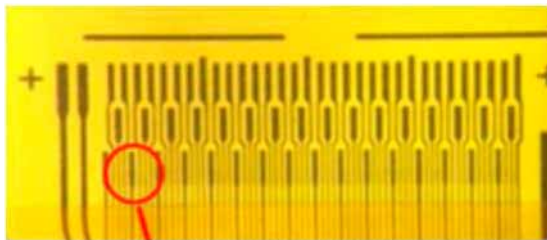


図 8: アダプタ用フレキシブル基板の 3 列デザインの部分。丸い枠線が 3 列目のボンディングパッドであり、パッドは信号線と信号線の間配置されている。このため、パッド幅は、十分なボンド強度が確保されるよう広くされつつも隣の信号線とは短絡しないように設計されている。

は $10\mu\text{m}$ 程度以下であることも確認されている。この製作治具により複雑な工程の再現性も確保されており、だれが作業を行っても同じスペックのラダーが製作できるようになっている。

ワイヤーボンディングにも工夫が施されている。図 7 に示す APV25 と結線する箇所のアダプタ用フレキシブル基板のワイヤーボンディングパッドのデザインは図 8 に示すような三列の千鳥構造となっている。APV25 のサイズは $7\text{mm}\times 8\text{mm}$ となっており、その一辺に 64×2 列のチャンネルが並んでいる。元々のアダプタ用フレキシブル基板のデザインは APV25 のデザインに合わせて、64 のボンディングパッドが二列に並んでいるものであった。しかし、この場合ボンディングパッドがワイヤーボンドの直径程度よりも狭くなってしまいワイヤーの強度を保てないことがわかり、2 列目の一部のパッドをずらして 3 列目にするすることで $30\mu\text{m}$ 以上の十分なパッド幅を確保し、ワイヤーの強度を保てるようにした。

APV25 の載ったオリガミフレキシブル基板と断熱材や、センサーと APV25 間のアダプタ用フレキシブル基板の接着の仕方にも工夫がされている。開発を進めるうちに、接着剤にはカートリッジによって粘性の個性があることがわかり、粘性次第では硬化するまでの間に接着剤がフレキシ

ブル基板のボンディングパッド下まで十分に広がらないといった事態や、逆に接着剤がボンディングパッド上に広がるといった事態が起こりうるということがわかった。そこで、ラダーの組立工程では、接着剤を部品に塗布する直前に接着剤の粘性を簡易的に試験する手順を入れている。具体的には使用する接着剤でテストパターンに沿った塗布を行い、そのパターンのカスレの有無から接着剤の粘性を担保している。

このようにラダーの大量生産のために様々な工夫がされているが、製作において技術的に難しい作業も避けられない。特に難しいのが Belle II SVD でも肝であるオリガミコンセプトの部分である。先に述べたように、APV25 はセンサーの直上にあるオリガミフレキシブル基板上に設置されており、センサー裏側(p-side)の信号はアダプタ用フレキシブル基板を裏側(p-side)から引き出し表側(n-side)で折り曲げることで APV25 と結線するようになっている。この構造ではセンサー表側(n-side)のボンディングワイヤーを壊さないようにアダプタ用フレキシブル基板を折り曲げ、アダプタ用フレキシブル基板と APV25 の間をワイヤーボンディングで結線できるような状態で接着する。これをわれわれは「ラッピング」と呼んでいる。しかし、接着剤が十分に広がらなければアダプタ用フレキシブル基板がはがれ、逆に接着剤が広がりすぎればワイヤーボンディング用のパッドを侵してしまつて p-side の信号線を APV25 とワイヤーボンディングで結線できなくなる。また、ラッピング部の接着剤はごく微量で接着剤の広がりも 1mm 程度以下の精度で制御しなければならぬ一方、接着剤の粘性を完全に制御することはきわめて難しく、ラッピング部については前述の簡易的な試験では不十分である。このためこの作業は作業者の経験にたよるざるをえない工程で、これまでの試作品ラダーにおいてもラッピング工程での失敗によってセンサー裏側(p-side)の信号読み出しができなくなったものがいくつかある。この問題の解決のため、接着剤の塗布量や塗布パターンの微調整を繰り返し行い、手動微調整・目視確認は残しつつも再現性の確かめられた接着剤塗布の方法を組み合わせることでラッピング作業の成功率を向上させた。

5 ラダーの性能評価

組み立てられたラダーは、前述のとおりセンサーの組立位置の精度と、電気的に稼働するストリップ数によって評価される。

センサーの組立位置精度の評価のためラダーの後端部には絶対的な原点が設定されている。またセンサーの 4 つの角には位置を測定するための F 字形のマークが刻まれており、この位置を 3 次元測定機で光学的に測定することでセンサーの位置を割り出している。第 6 層のあるラダーの位

置精度を図 9 に示す。ビーム軸方向の組立精度の典型的な値は $50\mu\text{m}$ 程度であり、全長が約 80cm のラダーであることを考え合わせると極めて高い精度でラダーが組み立てられていることがわかる。

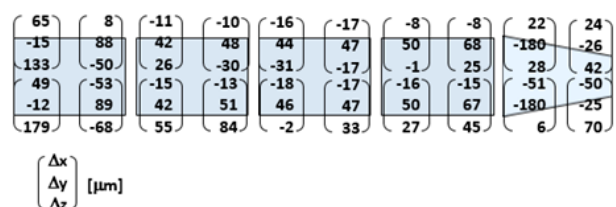


図 9: 第 6 層試作ラダーの各 F マークの位置精度。数字は上から順に x, y, z 方向の設計値からのずれ(単位は μm)を表す。図右側がフォワード側である。ラダー製作では、x 軸をビーム軸方向 (ラダーの長手方向), z 軸を鉛直方向, y 軸をこれらと直交する方向と定義している。フォワードモジュールセンサーの y 方向以外はずれは理想的レンジに入っており、それ以外も許容範囲内である。

ラダーの電気的な性能評価としては、まずシリコンセンサーに $\pm 100\text{V}$ (台形センサーでは $\pm 50\text{V}$) の逆バイアス電圧をかけて漏れ電流がおおむね $10\mu\text{A}$ 以下であることを確認している。また、センサーの電気的な応答の確認としてレーザーをセンサーのストリップにあてる方法か放射線をストリップにあてる方法のいずれかを、各組立サイトの判断によって採用している。たとえば第 6 層の電気的な性能評価ではストロンチウム 90 からの β 線を使用している。 β 線をセンサーに照射しながらこの β 線をプラスチックシンチレーターでトリガーして APV25 を読み出している。この試験によって、組立工程中に APV25 が壊されていないことやワイヤーボンドがはずれたりショートしていたりしないことが確認できる。これまでのラダーでは、典型的には 99% 以上の高いセンサーの読み出し効率が実現できている。

このようにして性能が確認されたラダーは金属製のコンテナにしまわれ、空輸または陸送によって KEK に運ばれた後、Belle II 構造体にインストールされるまでデシケーター内に保管される。

6 さいごに

Belle II SVD は以上のような複雑な構造のためその製作は容易ではなかったが、2016 年 3 月までには全組立サイトが電気的に稼働するラダーを組み立てることに成功した。2 層分の PXD とともに 4 月には DESY でビーム試験も行い、電子ビームの飛跡も無事に得ることができた上、99% 以上の荷電粒子の検出効率も確認できた。そして 2016 年 4 月からは全組立サイトがそれぞれの量産体制に突入した。

現在、SVD のラダーはその製作が着々と進められているところである。

今後、2017 年内に全ラダーの製作が完了する見通しである。製作したラダーは順次 SVD の構造体に取り付け、PXD と合体して、順調であれば 2018 年初めまでには、崩壊点検出器として宇宙線データを収集する予定である。そして 2018 年中期にはビームライン上の Belle II 検出器に組み込み、2018 年後期から崩壊点検出器も含めた物理ランを開始する予定である。

参考文献

- [1] K. Adamczyk *et al.* [Belle II SVD collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **824**, 406 (2016).
- [2] A. Abashian *et al.* [The Belle Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **479**, 117 (2002).
- [3] H. Aihara *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **568**, 269 (2006).
- [4] M. French *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **466**, 359 (2001).