

Belle測定器の高度化へ向けた シリコンストリップ検出器の開発研究

東北大学 修士2年
素粒子実験研究室
松森 祥生



目次

- イントロダクション(p.3~)
 - 組み立て試験(p.11~)
 - 読み出し試験(p.21~)
 - まとめ(p.29~)
- } 研究内容

イントロダクション

- Belle実験とBelle II 実験
- 崩壊点検出器
- Origami Module
- 研究のモチベーション

Belle実験とBelle II 実験

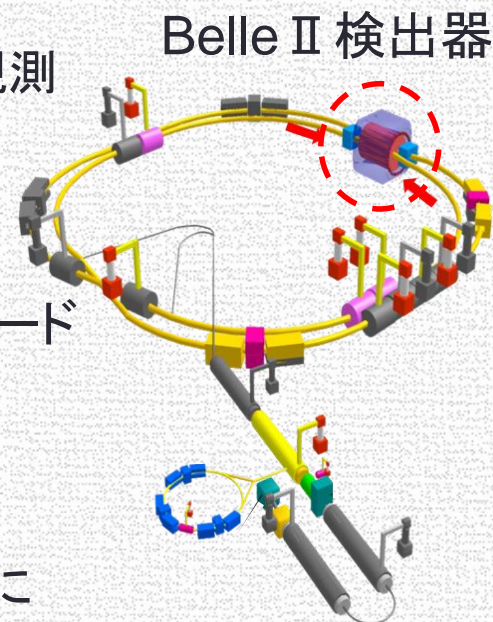
● Belle実験

- KEK(高エネルギー加速器研究機構)で1999年4月から2010年6月まで行われた電子陽電子非対称衝突型加速器実験
- 電子8.0 GeV、陽電子3.5 GeVの非対称エネルギー
- 重心エネルギー 10.58 GeV
- $B^0\bar{B}^0$ 対を生成し、崩壊時間差からCP対称性の破れを観測
- 世界一の積分ルミノシティ 1040 fb^{-1}

● Belle II 実験



- データ量を増やし、新物理を探索のためにアップグレード
 - 電子7.0 GeV、陽電子4.0 GeV
 - ルミノシティ~40倍
 - 積分ルミノシティ~ 50 ab^{-1}
- 膨大なバックグラウンドからシグナルを分離するために**検出器のアップグレード**が必要
- 2015年実験開始

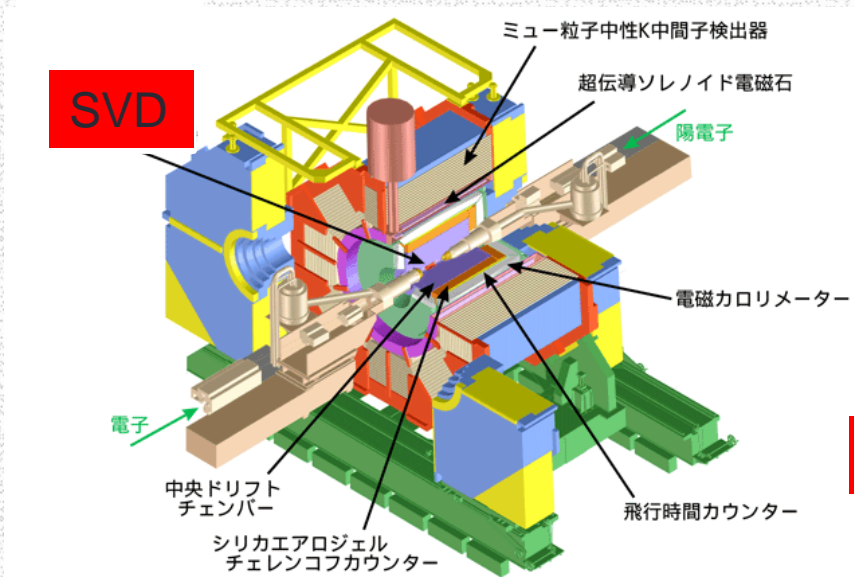


SuperKEKB加速器

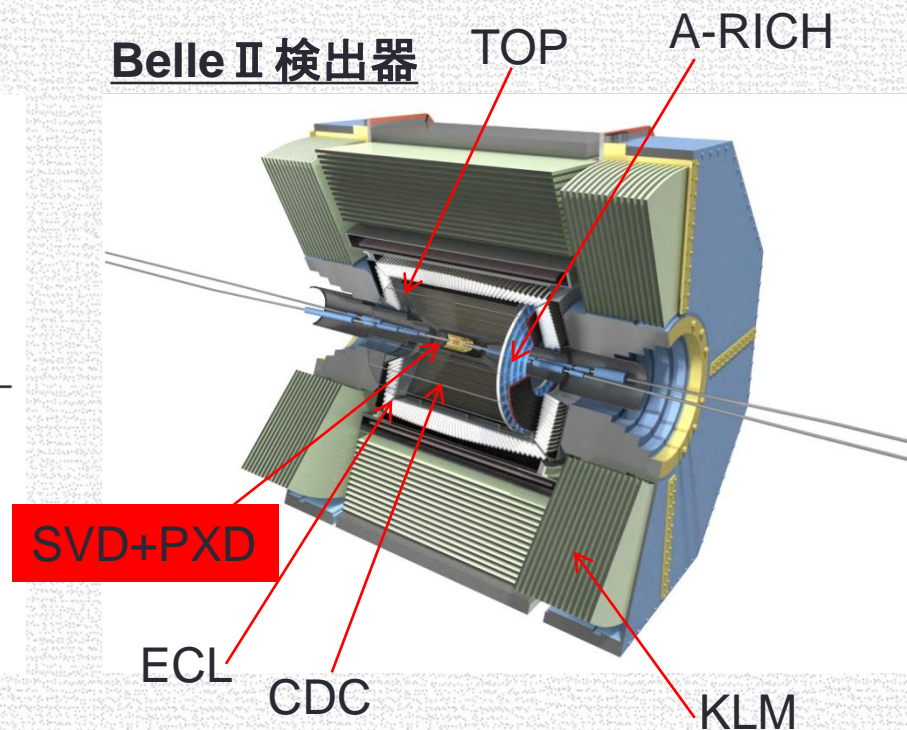
崩壊点検出器

-Belle検出器とBelle II 検出器-

Belle検出器



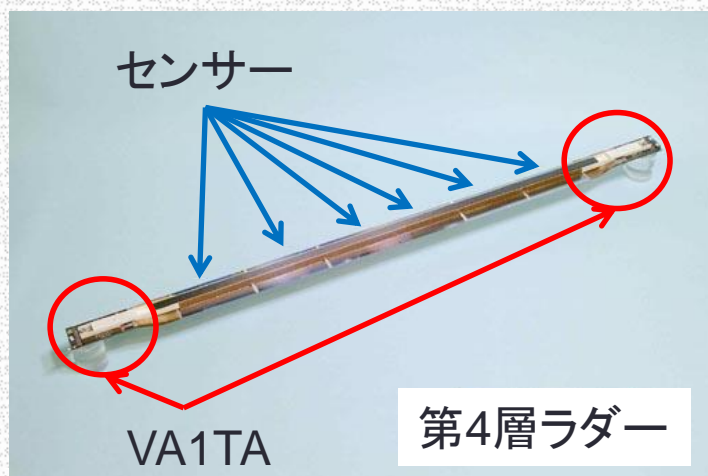
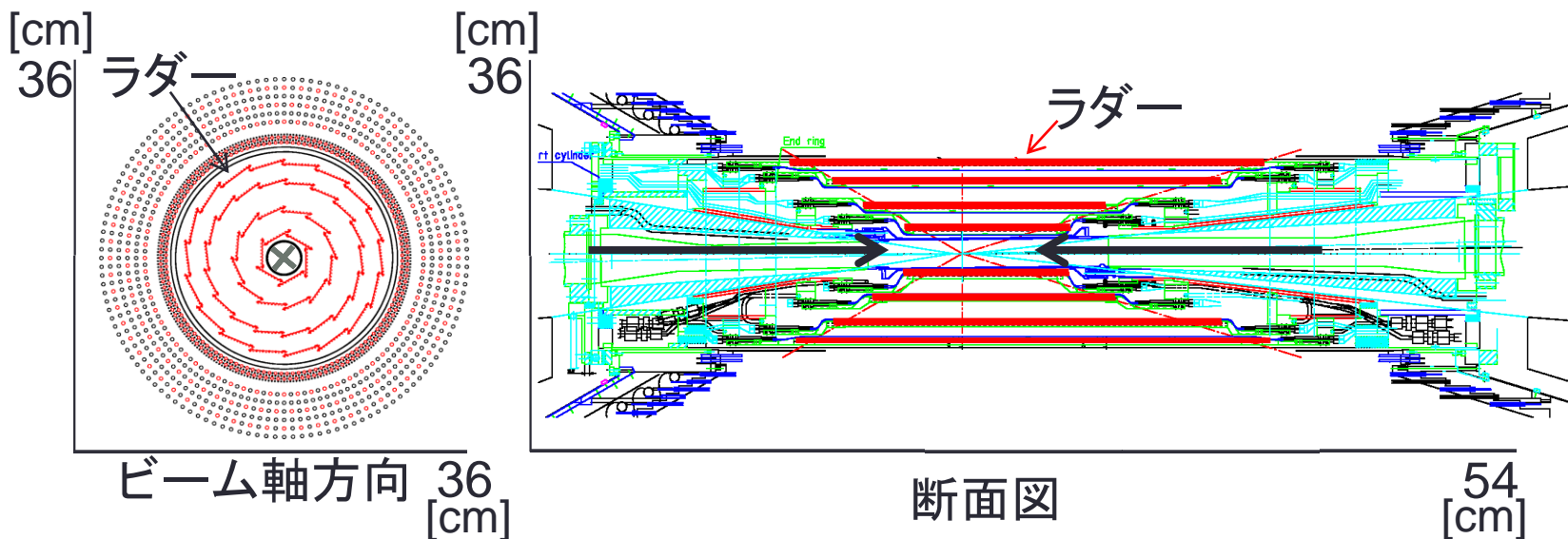
Belle II 検出器



SVD=Silicon Vertex Detector
 PXD=PiXel Detector

- 崩壊点検出器がBelle実験Belle II 実験において重要な役割を果たす
- B中間子の崩壊点測定のために65 μm 以上の分解能が求められる

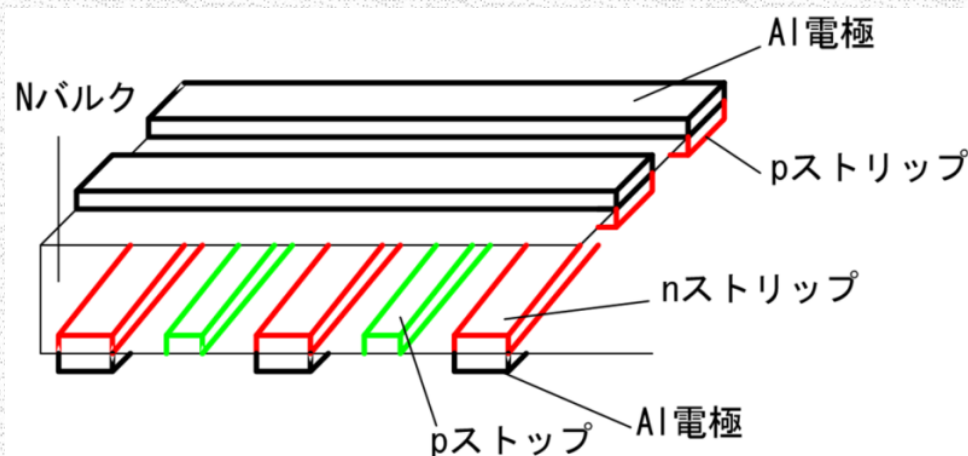
崩壊点検出器 -BelleSVD2.0-



- 検出器最内層の崩壊点検出器
- Si型半導体検出器
- B中間子対の崩壊点測定
- 全4層の円筒型
- 各層は直線状のラダーから構成
- センサー同士をつないでまとめてラダー端の読み出しチップ(VA1TA)へ信号を送信

崩壊点検出器 -センサー-

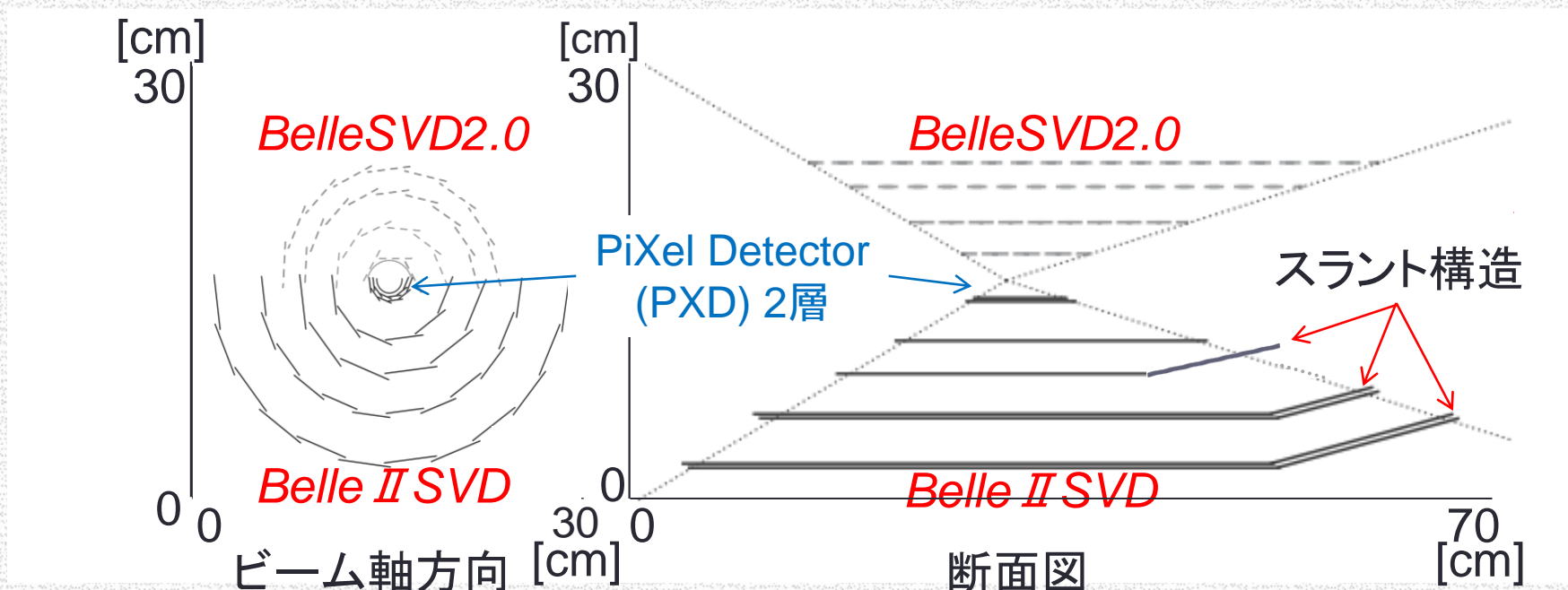
- DSSD(Double-sided Silicon Strip Detector)
- 両面型ストリップ半導体検出器
- 両サイドでストリップ方向を90° 変えることで粒子の通過位置を2次的に同定
- 両サイドにAl電極を設置
- 空乏層を広げるためにHV(High Voltage)を印加



	P-side	N-side
ストリップ数 (本)	768	512
ストリップ間隔 (μm)	75	240

崩壊点検出器

-BelleSVD2.0 とBelle II SVD-



SVDのアップグレード

● 読み出し

- 読み出しチップ VA1TA→APV25
- 新たな読み出し機構

Origami Module

- センサー個々に読み出す

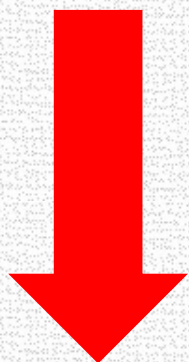
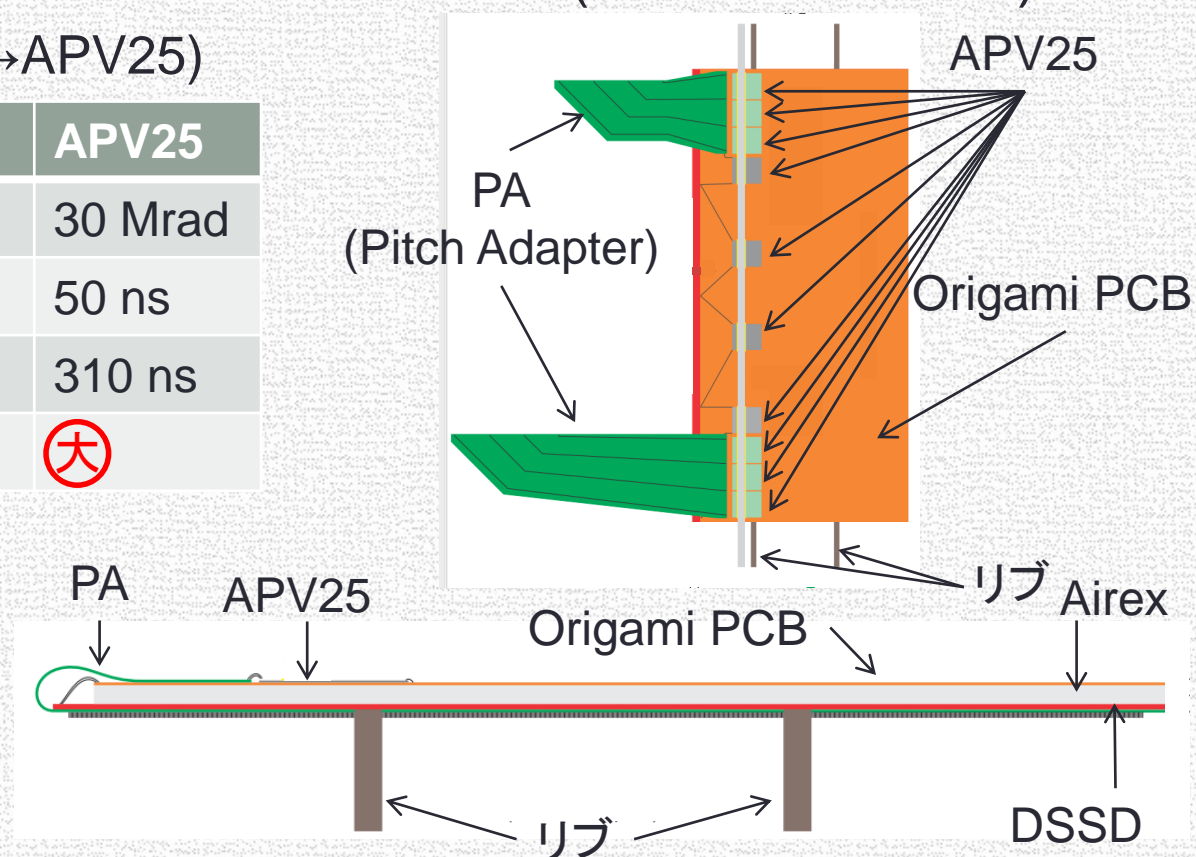
● 構造

- アクセプタンス17-150°
- 最内層:20 mm→38 mm(PXD:14 mm)
- 最外層:88 mm→140 mm
- 第4層、第5層、第6層にスラント構造
- CO₂ Cooling

Origami Module

- 加速器の要請からトリガーレートが30 kHz(500 Hz @ Belle)
 - チップの変更(VA1TA→APV25)

	VA1TA	APV25
放射線耐性	20 Mrad	30 Mrad
ピーキングタイム	800 ns	50 ns
パルス幅	5000 ns	310 ns
ノイズ	小	ⓧ



チップをセンサーの真上に置くChip-On-Sensor方式で信号線容量を減らす

Origami Module

研究のモチベーション

- Belle II SVD製造に向けて、複雑なOrigami Moduleの効率的な**組み立て方法**の確立が必要
- 組み立ての各工程で**読み出し試験**を行い、電気的な接続が正しくなされているかの確認試験が必要



Origami Moduleの組み立て試験、読み出し試験

組み立て試験

- 目的
- コンポーネント
- 組み立て工程
- 得られた成果
- まとめ

目的

- Belle II SVDにおいて、
大量のOrigami Moduleの組み立てが必要

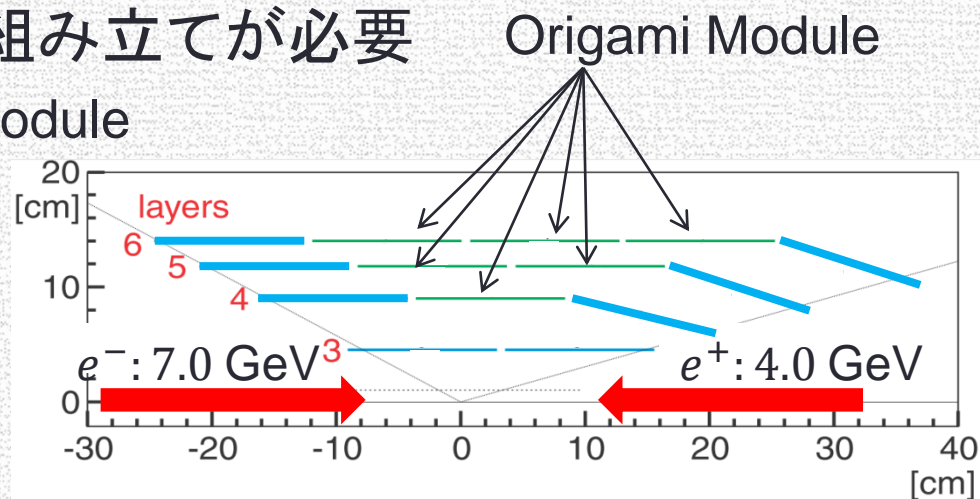
- SVD全層で86個のOrigami Module



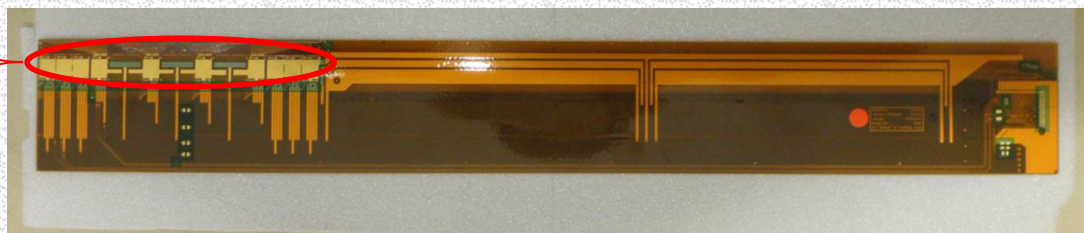
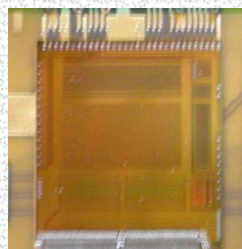
- 組み立て工程の確立
 - 治具を使用して精度を保証し、
かつ工程をスムーズに行う

- 第6層のOrigami Module組み立て試験

- 最も複雑な第6層の組み立て手法を実証し、
工程における**問題の洗い出し**
 - ワイヤボンディング、PAの接着法の確認に重点



コンポーネント



APV25

読み出しチップ
(8 × 7 mm)

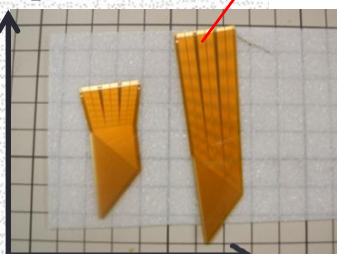
Origami PCB

信号線をラダー端へ導くための回路基板
(57 × 445 mm)

Airex

センサーと回路基板の絶縁
(60 × 125 mm)

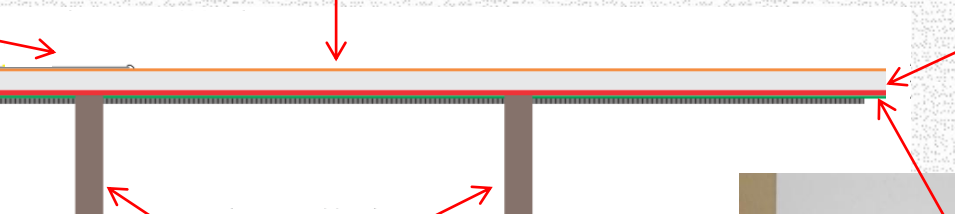
[mm]
80



80 [mm]

PA

ストリップピッチの調節
と信号線引き出し



リブ

Origami Moduleをラダーに
マウントするための構造
(3 × 18 × 6.5 mm)

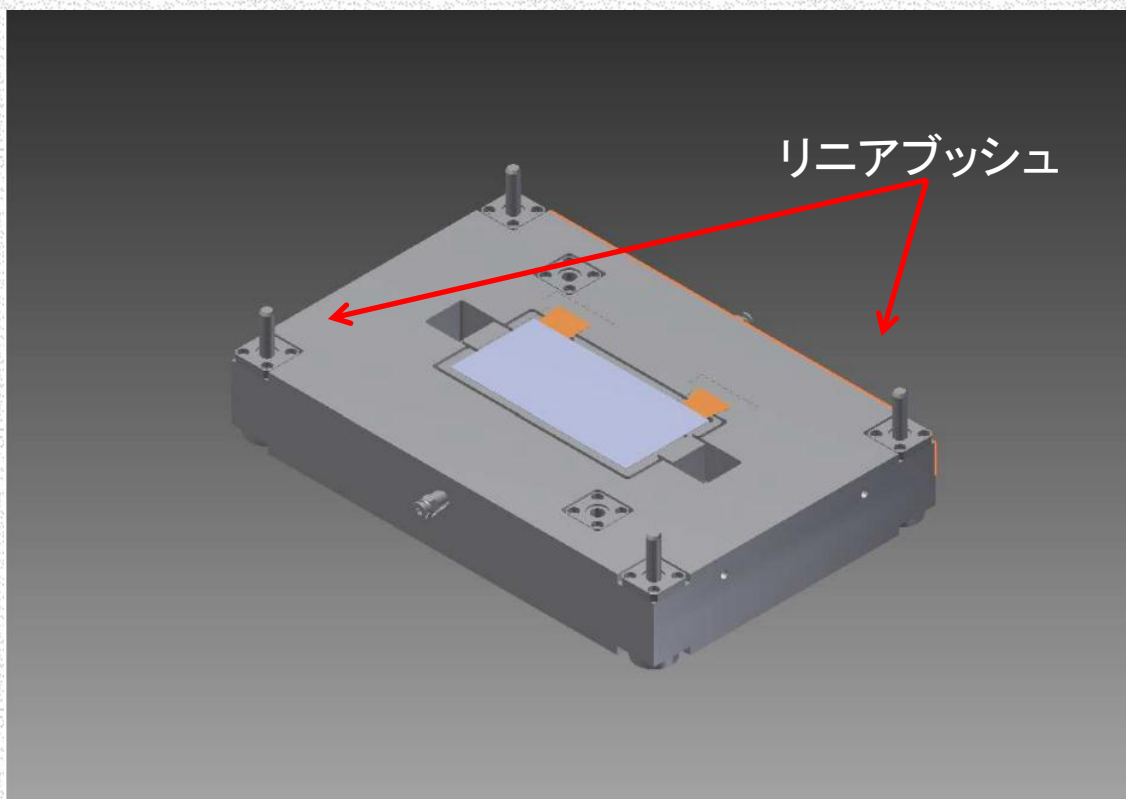


DSSD

センサー
(60 × 125 mm)

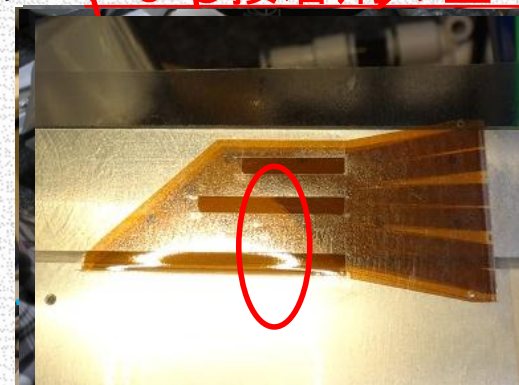
組み立て工程

I .DSSDとPAの接着



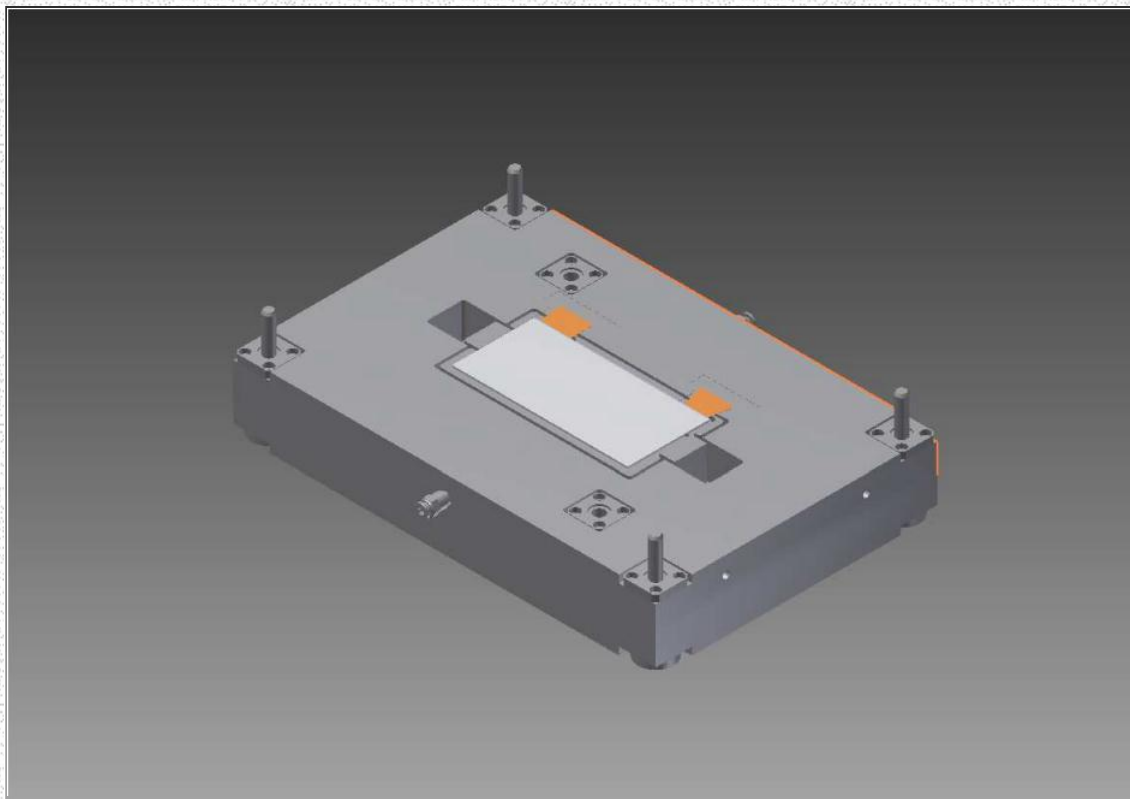
・マシンとリニアブッシュが接触

テープを用いたマスキング法
 ストップPA治具 DSSD アライメント治具
 (による接着剤の塗布)



⑥ 組立治具を取除き接着剤をPA面に塗布してPAとDSSDを接着固定

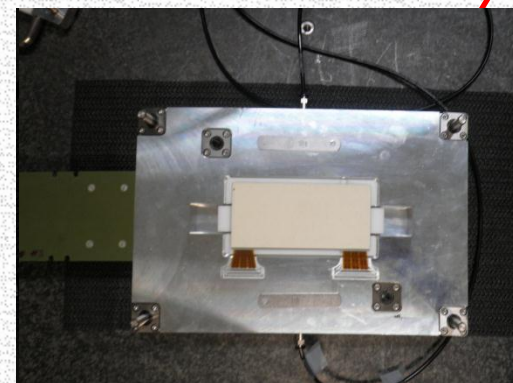
組み立て工程 II .Airexの接着



・スペースが合わないため、
スペーサを使用

ストッパー

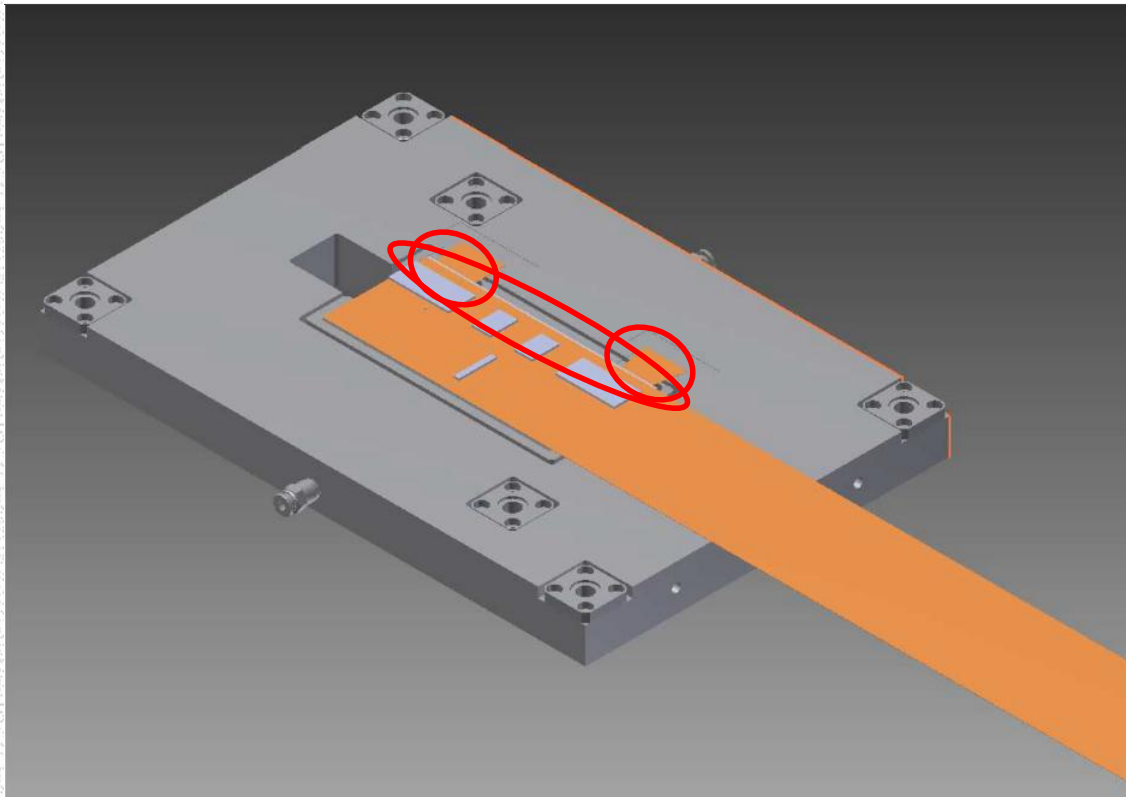
Airex



10. Airexに接着剤を塗り組み立て
Airexの位置決めをSS真空接着で固定する

組み立て工程

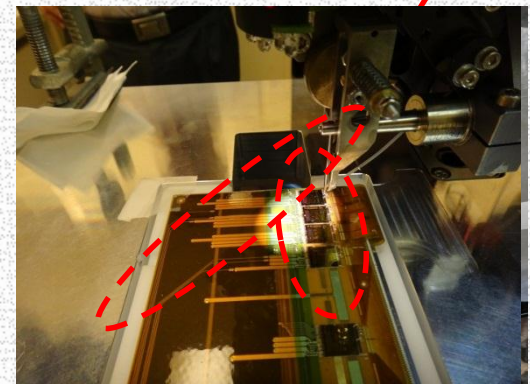
Ⅲ. Origami PCBの接着



18. 折り曲げ治具を使用してA面をB面にB返し、
ワイヤ樹脂液を塗布して接着させる

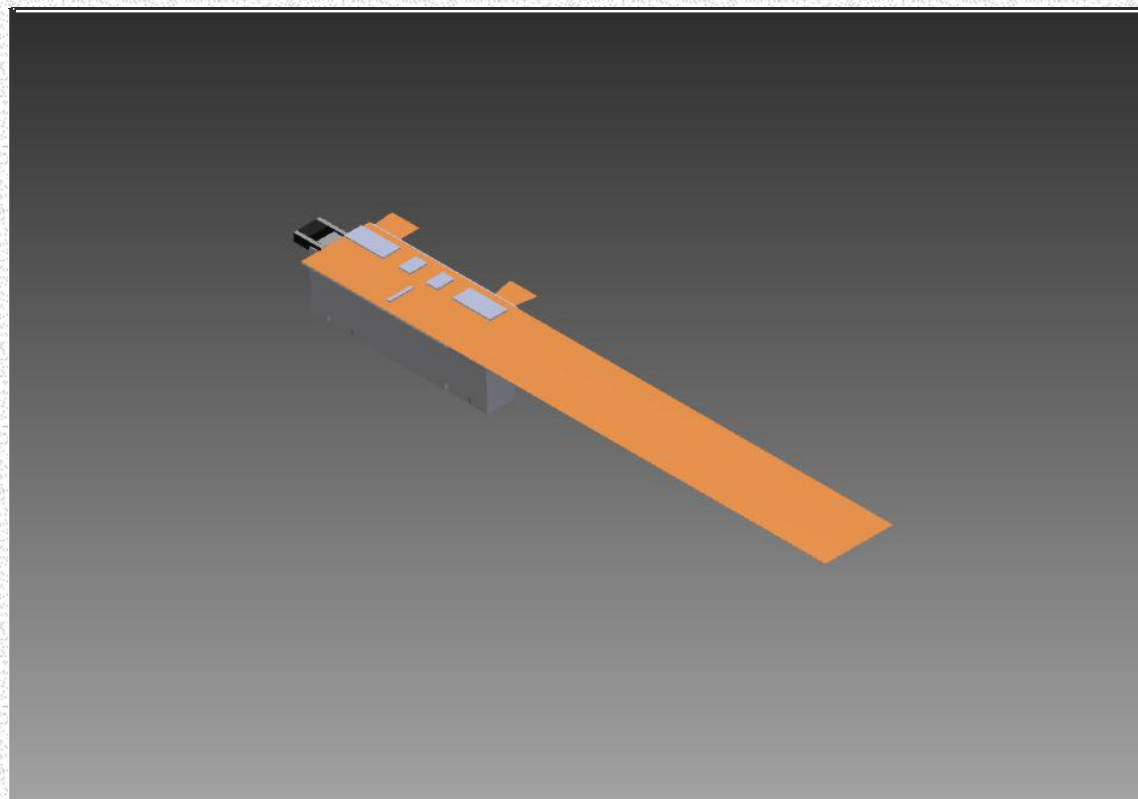
- ・折り曲げ治具の積層面をこの製法に活用することが必要
- ・真空吸着穴がずれていたため、真空漏れが起きた

Origami治具

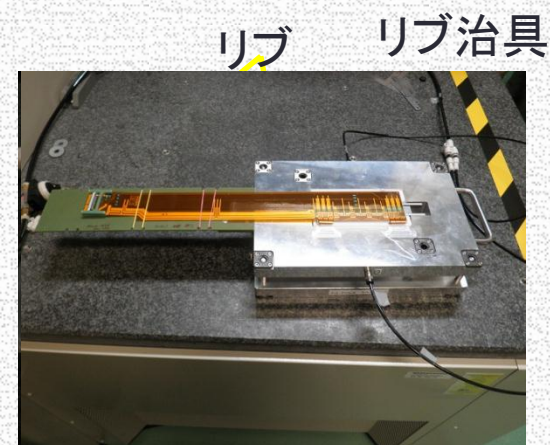


折り曲げ治具

組み立て工程 IV.リブの接着

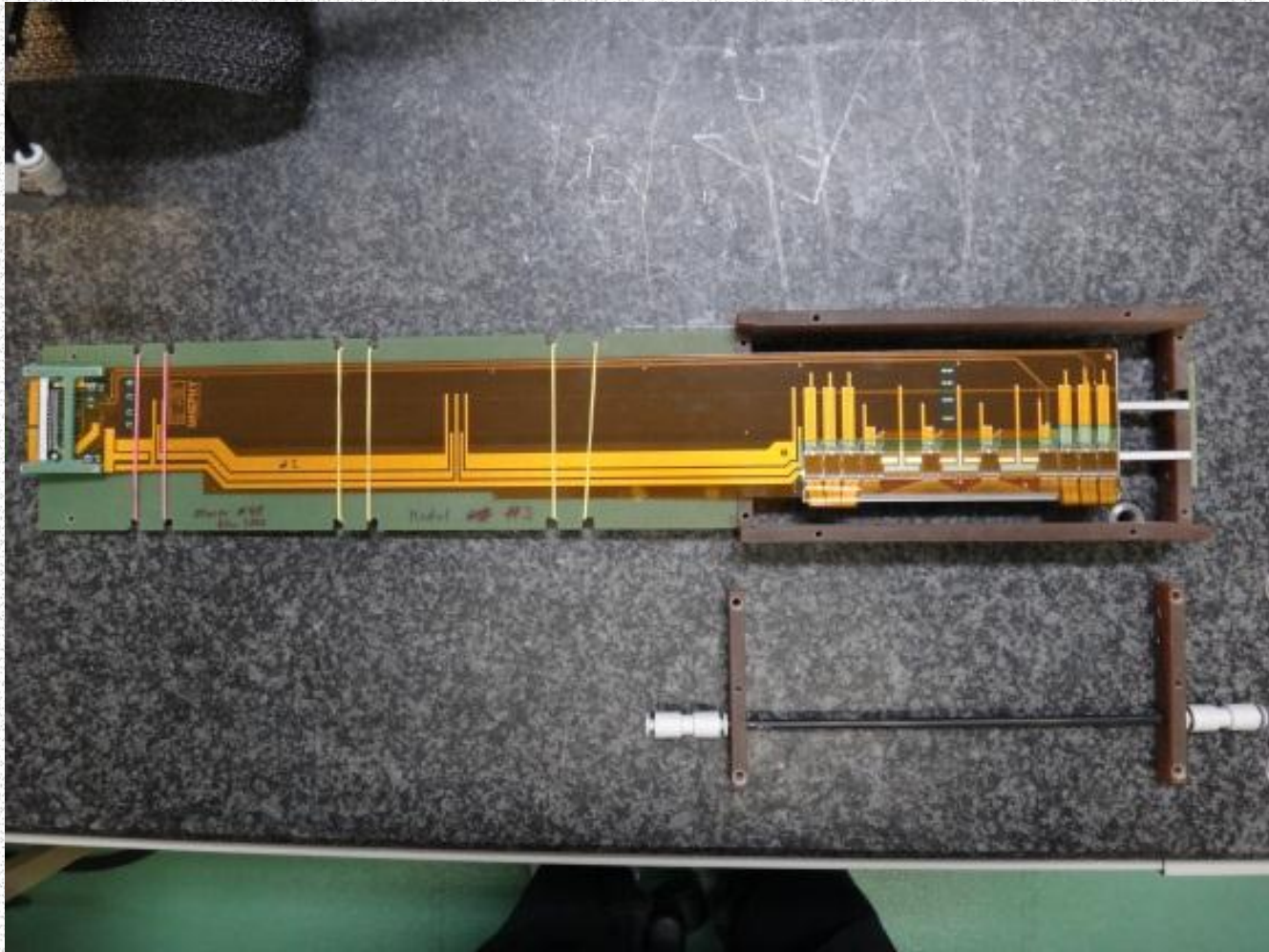


20. 組立治具に付いた物を該量に設置する
コンポーネントを取り付け接着する



組み立て工程

V.Origami Moduleの完成



23.Origami Moduleが完成

得られた成果

- 1) マスクング法の有用性
 - PAIに接着剤を塗る際に適用
- 2) ワイヤボンディングの際、
マシンのヘッドとリニアブッシュが接触
 - リニアブッシュを取り外し可能にする
- 3) 治具間のスペースがあっていないためスペーサを使用した
 - 治具の再設計or専用のスペーサーの作成
- 4) Origami PCBの位置決めに時間がかかった
 - Origami PCBとOrigami治具に位置決め用の構造を作る
- 5) Origami治具のOrigami PCB接触部分をテフロン製にする
 - Origami PCBに傷がつくのを防げる
- 6) Origami治具の真空吸着穴の位置がずれていて真空漏れが起きていた
 - Origami治具の真空吸着穴の位置の再考
- 7) 折り曲げ治具の高さを合わせるための台が必要

まとめ

組み立てへの要求

- Belle II SVD全体で86個のOrigami Moduleから構成
- Origami Moduleの大量生産のために精度を保証し、かつスムーズな組み立て工程が必要

第6層のOrigami Moduleの組み立て試験

- 治具を使用し、組み立て工程を実証
- 2週間で組み立てを行った
- マスキング法の有用性が証明できた
- いくつかの改善点が見つかり、今後改善することが必要

応用

- 今回の実証できた組み立て工程を、他層のOrigami Module組み立てに応用可能

読み出し試験

- 目的
- 読み出しチェーン
- 1.ペDESTALノイズ測定とテストパルス試験
- 2.顕微鏡でワイヤボンディングの確認
- まとめ

目的

- 組み立てたOrigami Moduleの電氣的接続が正常になされているか確認するための読み出し試験が必要
- **デッドチャンネルの確認と原因追及**
 - 目標:SVDの本格的生産時にモジュール単位での実行

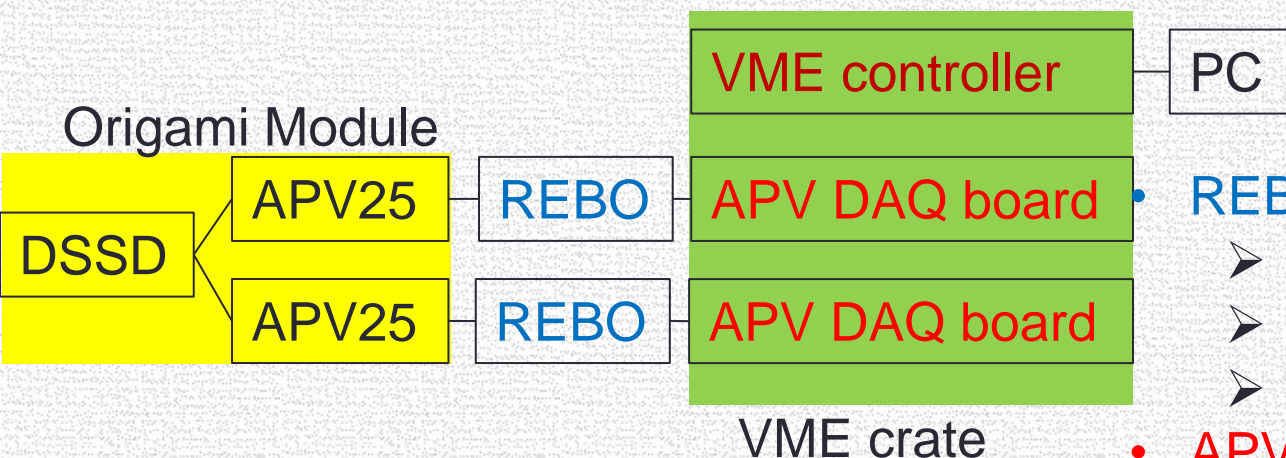
読み出し試験の流れ

1. ペDESTALノイズの測定とテストパルス試験
2. 顕微鏡でワイヤボンディングの確認
 - 1280チャンネル中読み出し可能な接続は1024チャンネル
 - P-side、N-side合わせて8枚のAPV25が電氣的に接続
 - 以上の項目をチャンネルごとに確認

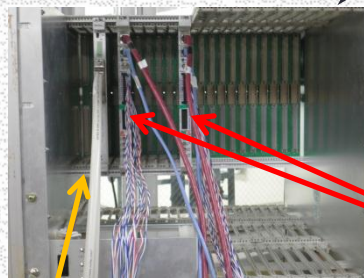
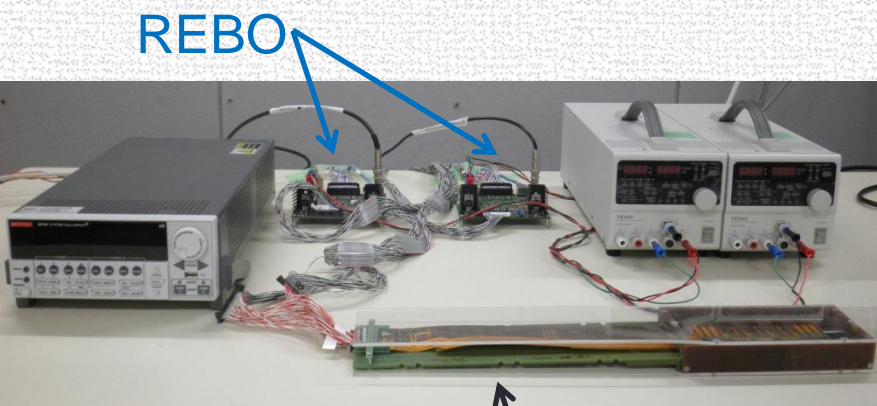
	P-side	N-side	合計
ストリップ数 (本)	512	(768) 512	(1280) 1024
対応する APV25(枚)	4	(6) 4	(10) 8

読み出しチェーン

- 実際にBelle II SVDで利用できる読み出しシステム



- REBO(REpeater Board)
 - DSSDにHV(High Voltage)
 - APV25にLV(Low Voltage)
 - 電圧レベルの変換
- APV DAQ board
 - アナログ信号→デジタル信号
- VME controller
 - APVDAQボードを使用するためのコントローラ



Origami Module

VME controller APV DAQ board

1.ペDESTALノイズ測定とテストパルス試験

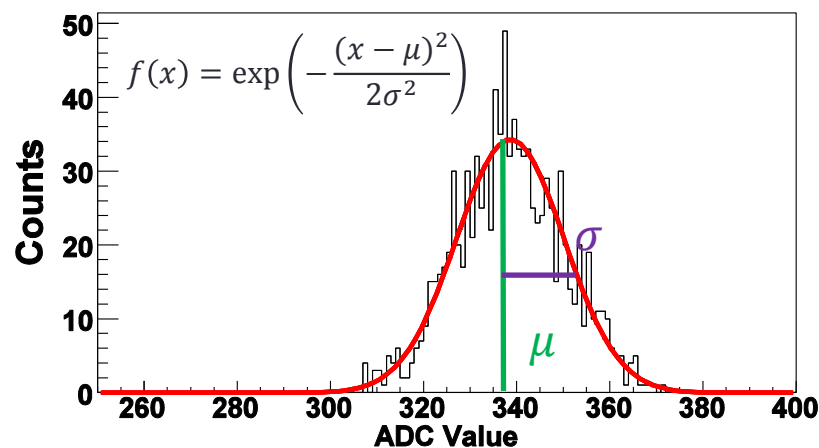
- 40 MHzのクロック周波数で各チャンネル毎のADC値を取得

ペDESTALノイズの定義

- 特定のチャンネルに注目
- ADC値のヒストグラムに対してガウシアンでフィット
- 中心値 μ をペDESTAL、標準偏差 σ をペDESTALノイズと定義

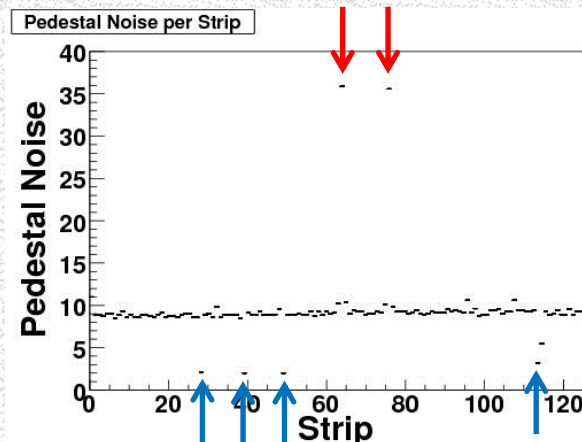
測定結果

Counts per ADC Value



イベント数6000に対してガウシアンでフィットした図(P-side APV0 #25)

- 大きい値、小さい値が測定された



各チャンネルに対するペDESTALノイズ (N-side APV2)

1.ペDESTALノイズ測定とテストパルス試験

- APV25からテストパルスを送り、各チャンネルのADC値を測定

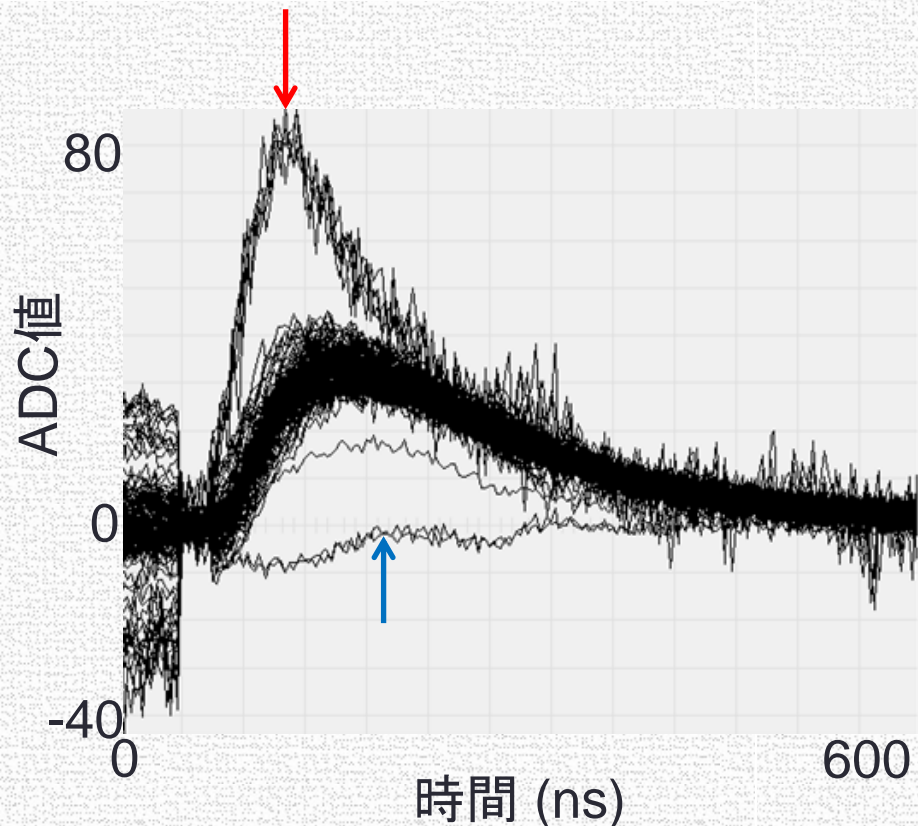
測定結果

- ADC値の**高いチャンネル**、**低いチャンネル**が観測された
- 1024チャンネル中異常値を示したのは40チャンネル

考察

- DSSDの製造段階で、2チャンネルはデッドチャンネル
- ADC値とペDESTALノイズの値の関係性に注目
- ADC値が**(高い、低い)**チャンネルはペDESTALノイズの値も**(高い、低い)**

→測定されたADC値とペDESTALノイズは同じ原因である可能性有り



テストパルス試験の結果
(P-side APV3 全128チャンネル)

2.顕微鏡でワイヤボンディングの確認

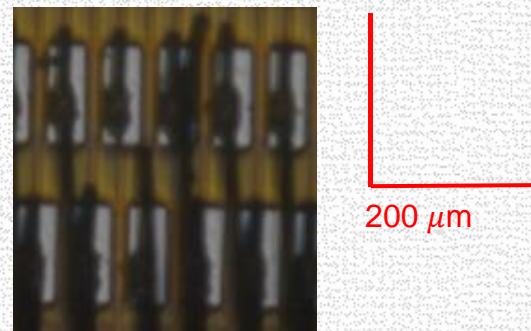
- ワイヤボンディングが正しくなされているかどうかで信号線容量が変化
→パルスに影響を与えている可能性
- 異常値を示したチャンネルをリスト化し、目視による確認
 - 異常値を示したチャンネルは全40チャンネル
 - DSSDの製造段階で、2デッドチャンネル
 - 顕微鏡を用いて38チャンネルを確認

ボンディング箇所

- APV25-PA間
- PA-DSSD間

結果

- 一箇所オープンになっている部分を発見



ワイヤボンディングが切れている部分
(P-side APV25-PA間 #105)



顕微鏡:

KEYENCE社

デジタルマイクロスコープ VHX-1000

レンズ:

ユニバーサルズームレンズ VH-Z20U

まとめ

- 組み立てたOrigami Moduleの読み出し試験
 - 電氣的接続は8枚のAPV25=1024本のストリップ
- ペDESTALノイズ測定、テストパルス試験
 - テストパルス試験でADC値が異常値を示したストリップはペDESTALノイズも異常値を示した
 - 同じ原因で異常値を示した可能性
- 顕微鏡でワイヤボンディングの確認
 - 40箇所中2箇所はDSSDが原因
 - 目視で1箇所のオープンな部分を発見
- デッドチャンネルの確認ができた
原因追及に関しては多角的な確認が必要
- この読み出し試験を含めた確認試験を、
組み立ての各段階で行うことが必要

まとめ

まとめ

- 2015年開始のBelle II 実験に向け、検出器のアップグレード
- Belle II SVDは新たな読み出し機構であるOrigami Moduleを採用
- Origami Moduleの組み立て試験、読み出し試験を実施
- 組み立て試験
 - 2週間で組み立てを行った
 - 治具を使用して第6層のOrigami Moduleの組み立て手法を確立
 - SVD他層のOrigami Moduleの組み立てに応用
- 読み出し試験
 - デッドチャンネル40箇所
 - 視覚的に一箇所オープンな部分を発見
 - 実際のラダー組み立ての際はこの読み出し試験を含めた確認試験が必要
- Origami Moduleの組み立てに、以上の組み立て工程、及び読み出し試験を応用

