



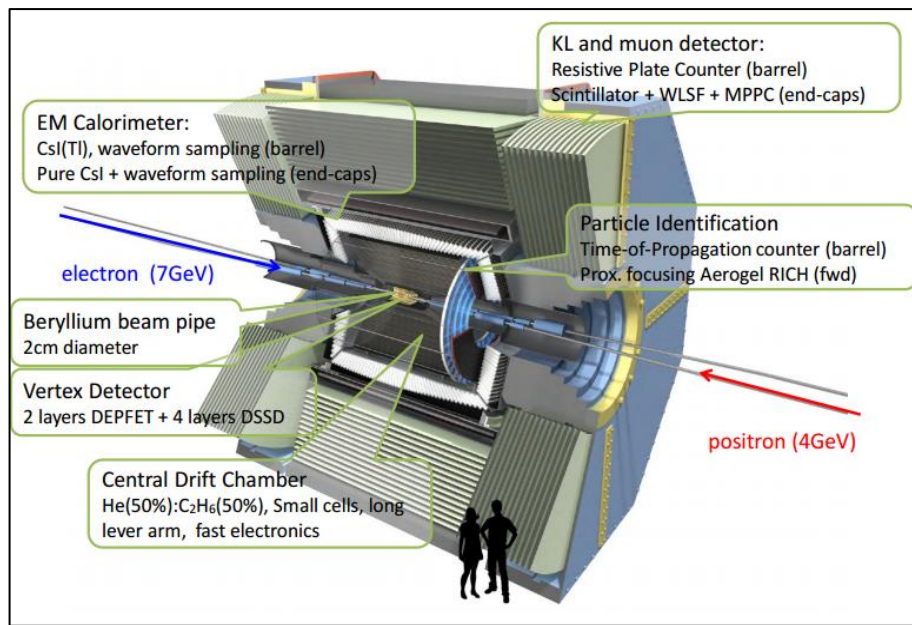
# Belle II SVD 組み立てのための フレキシブル基板の折り曲げ手法確立

2015年10月8日  
Flavor Physics Workshop

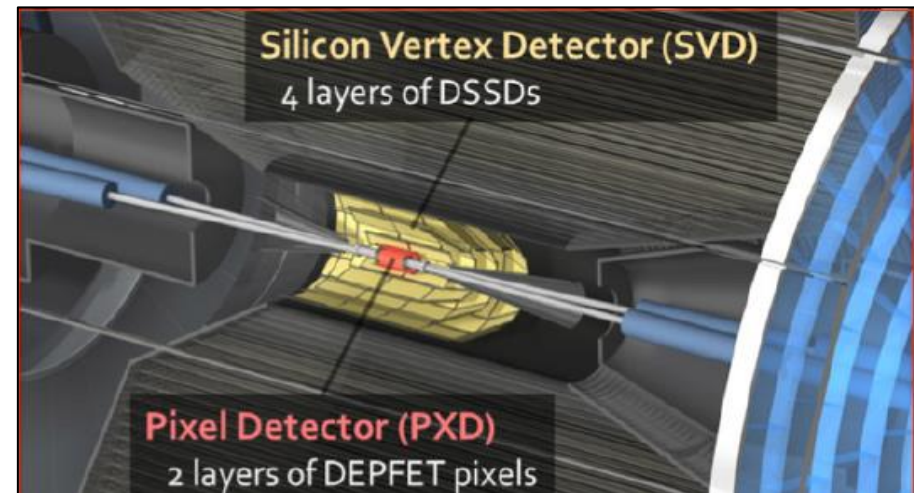
東北大学 堀口朋裕

## ● Belle II 実験@KEK

- 重心系エネルギー : 10.58 GeV (Y(4S)閾値, 4 GeV (e+)/7 GeV (e-))
- 目標ルミノシティ :  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ~ Belle実験の約40倍
- 大量のB中間子や  $\tau$  粒子生成による希崩壊事象の研究
- 2018年物理run開始予定

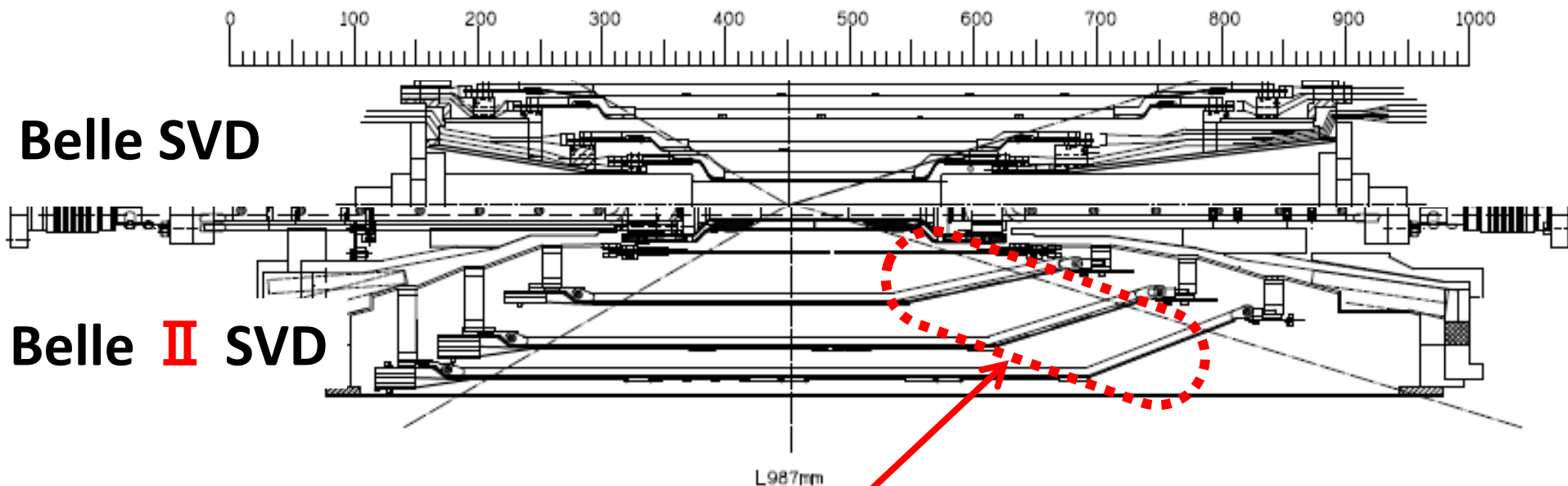


### Belle II 検出器



## ● Belle II VXD

- シリコンピクセル 2層 + シリコンストリップ(SVD)4層構造
- 衝突径数分解能 :  $\sigma_z \sim 20 \mu\text{m}$
- 高い放射線耐性(300 kGy)  
✓ 最内層で10-20 kGy/yr

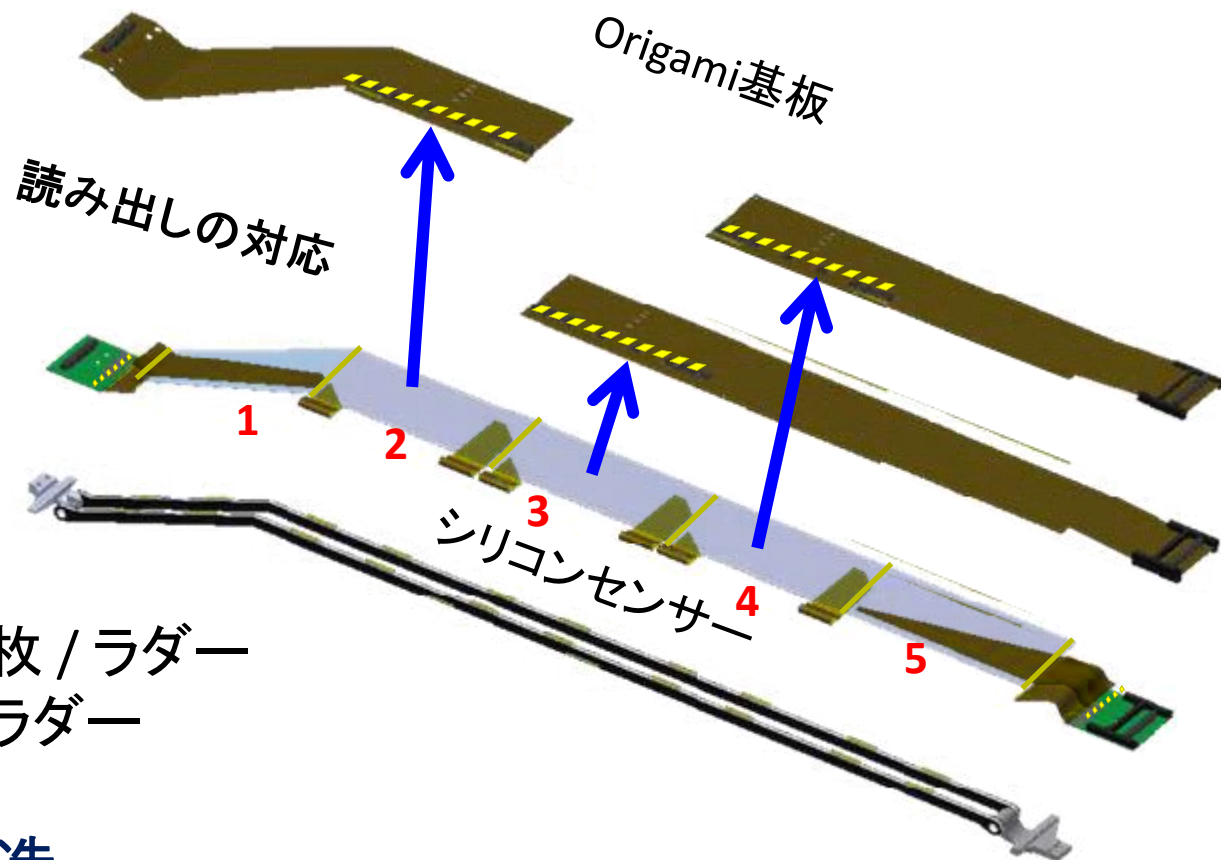


## ● Belle / Belle II VXDの構造

- 4 → 6層
- 最外層のラダー
  - ✓ ビームパイプの中心から  
86 mm → 140 mm
  - ✓ 長さ: 701 mm

## ● スラント構造(4~6層で採用)

- 崩壊点検出器の増大に対応
- 多重散乱の抑制による低運動量粒子の分解能向上
- コストとデータサイズの削減  
(直線の時センサー6枚@6層目)



## ● SVD最外層

- 16+4 (スペア) 本
- シリコンセンサー: 5 枚 / ラダー
- Origami基板: 3 枚 / ラダー

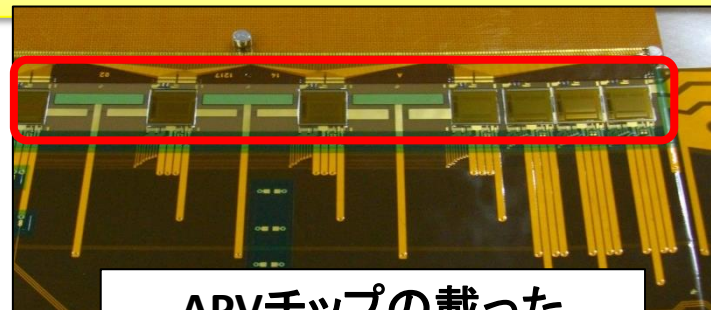
## ● Origamiの折り曲げ構造

- 両端センサーは端から直接、中央 3枚はフレキシブル基板経由で読み出し
- 最外層第2センサーはスラント側から読み出し
- 高い精度の組み立てには折り曲げ加工工程(**pre-bend**)の確立が必須

# Origami基板

## ● チップオンセンサー方式

- 最大500Hzから最大30kHz へのイベントレートの増加に対応するため、APVチップによる高速読み出し
  - ✓ shaping time 50ns (Belle SVD の16倍)
  - ✓ 読み出しノイズ大
- ⇒ フレキシブル基板の上に直接APVを置き、信号線を短くして解決



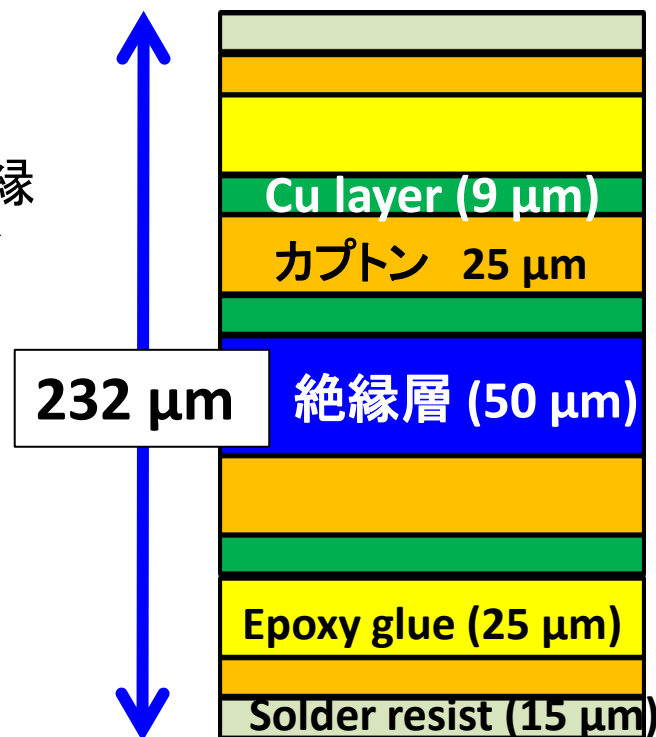
APVチップの載った  
Origami基板

## ● Origamiの構造

- 銅めっき層・カプトン層・接着剤層・絶縁層・レジスト層からなる厚さ 232  $\mu\text{m}$  の多層基板
- 厚いのであまりフレキシブルではない  
⇒ 折り曲げ癖を付ける必要がある



Origami基板



Origami基板の断面図

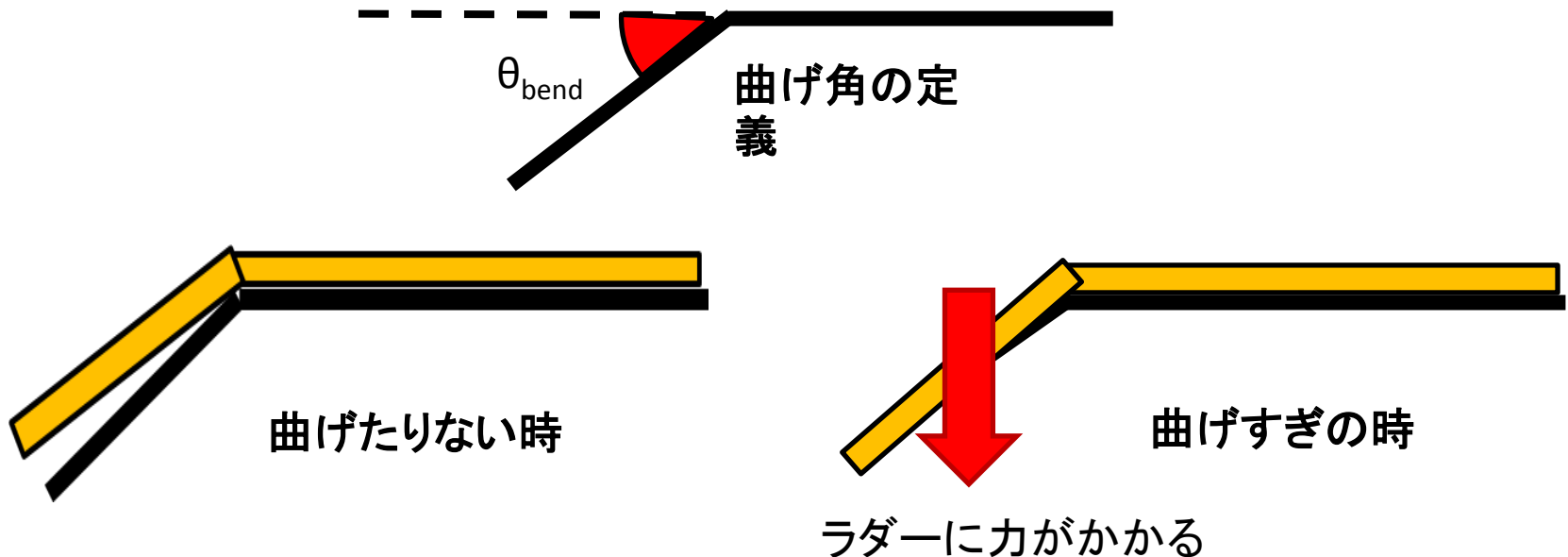
## ● 設計値( $21.1^\circ$ )に近い曲げ角

### 折り曲げ手法の開発

- 組み立て精度を上げる
  - ✓ 曲げたりない: 接着困難
  - ✓ 曲げすぎ: ラダー変形
- 角度コントロールができる方法を見つける

### 経時変化

- 折り曲げ後はケースで保管
- フレキシブル基板の復元力により折り曲げ角が戻る。
- 経時変化後の曲げ角  
 $\theta_{\text{bend}} = (21.1 \pm 3)^\circ$  が目標



# Pre-bend の課題-1/2

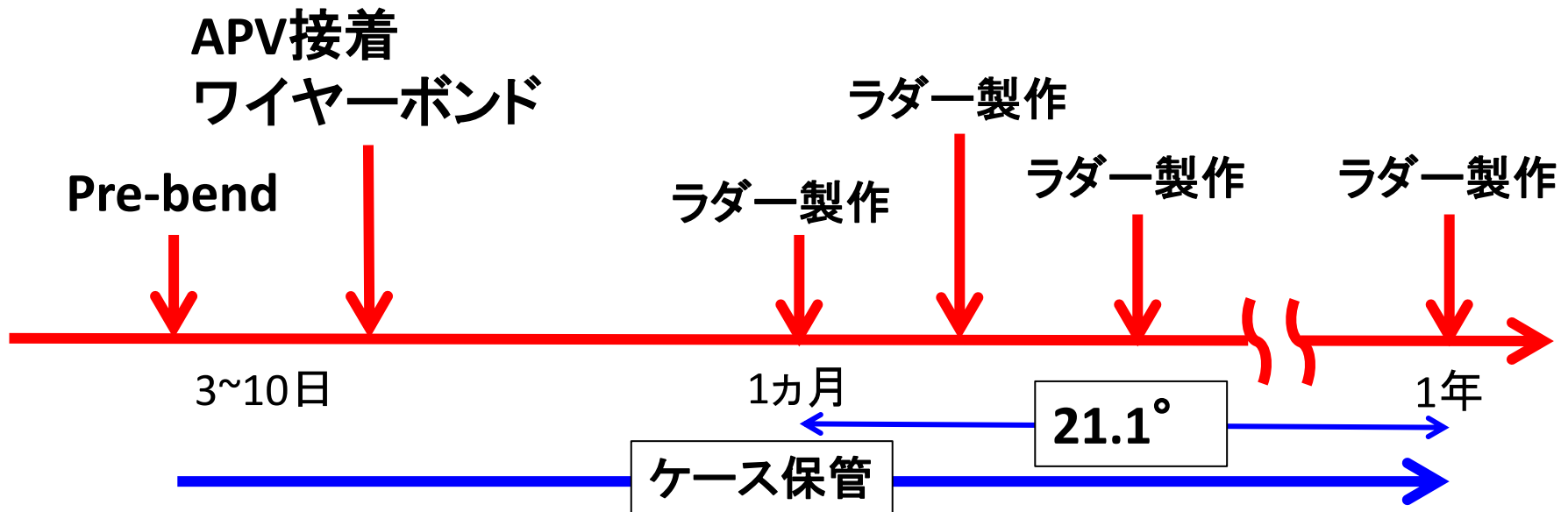
## ● 設計値( $21.1^\circ$ )に近い曲げ角

### 折り曲げ手法の開発

- 組み立て精度を上げる
  - ✓ 曲げすぎ: ラダー変形
  - ✓ 曲げたりない: 接着困難
- 角度コントロールができる方法を見つける

### 経時変化

- 折り曲げ後はケースで保管
- フレキシブル基板の復元力により折り曲げ角が戻る。
- 経時変化後の曲げ角  
 $\theta_{\text{bend}} = (21.1 \pm 3)^\circ$  が目標

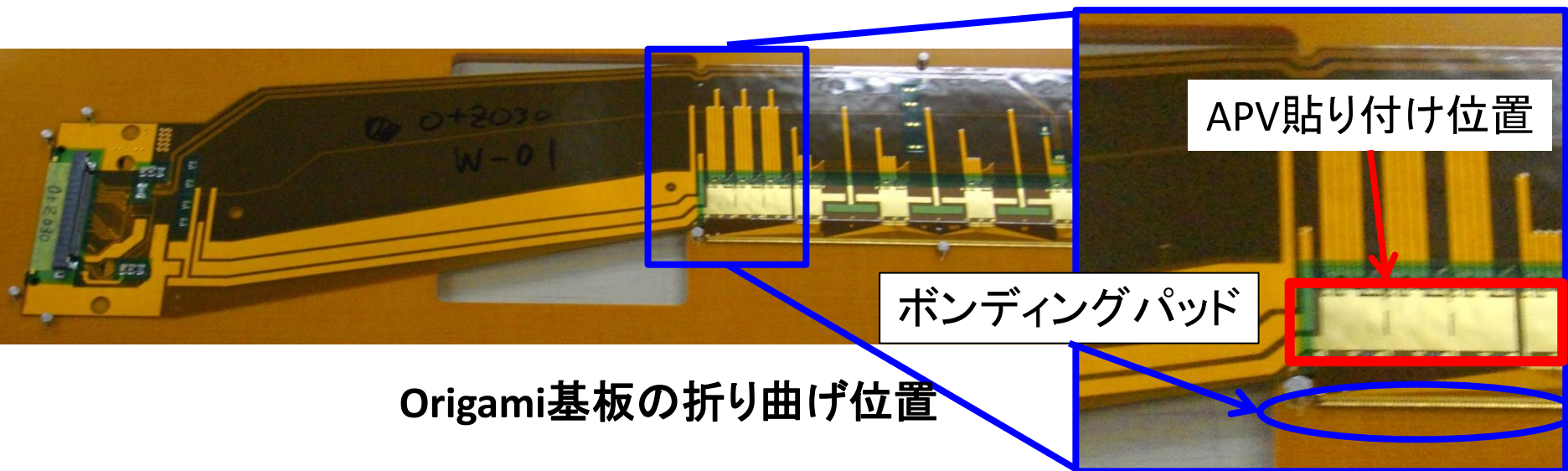


Pre-bendから組み立てまでのスケジュール

# Pre-bend の課題 -2/2

## ● 折り曲げ位置

- 壊れやすい部分避ける
  - ✓ APV貼り付け位置にある金パッド
  - ✓ ボンディングパッド
- 組み立て精度を維持する
  - ✓ センサーの境界近くで曲げる



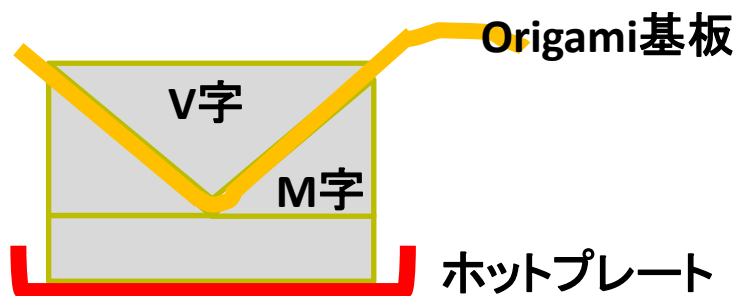


# 折り曲げ角のstudy

## 曲げ角をコントロールできる折り曲げ手法を試した

### 熱変形

アルミニウム製の治具で挟み、  
ホットプレートで加熱  
⇒熱処理工程等の理由で断念

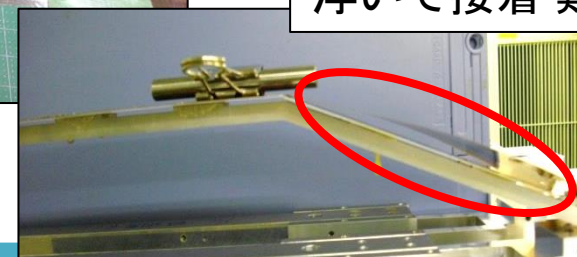


### 鉄ブロックと定規で挟んで折り曲げ

⇒曲げ角が足りなかった等の理由で断念

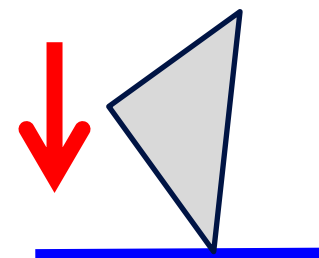
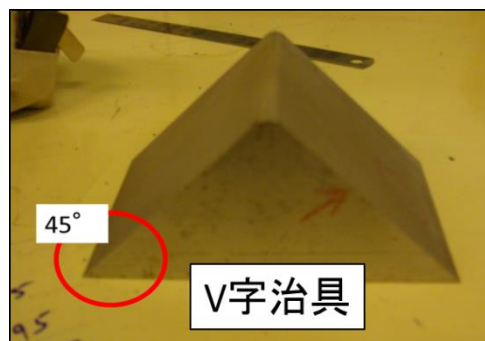


浮いて接着 難



### ● 鉄ブロック+定規の手法を改良

- 鉄ブロック(90°)で折り曲げ  
⇒曲げたりない
- V字治具の底角(45°)を使用
- 角度のコントロール可能



折り曲げのイメージ図

## ● 折り曲げ器具

- Bending jig
  - ✓ カメラ三脚 + 頂角45度のV字に加工したアルミニウム(A5052)
  - ✓ カプトンテープの枚数で曲率を最適化。ここでは75 $\mu$ mを5枚
- 体重計: 押す力の把握
- Bending cushion
  - ✓ Origamiと体重計の間に敷く
  - ✓ 力が伝わりやすく逃げにくい素材
  - ✓ 天然ゴム系スポンジ (厚さ2cm)
  - ✓ 表面実装部品を守るため低摩擦化のためのテープ加工
  - ✓ NRS-11 (WAKI産業)



Bending cushion

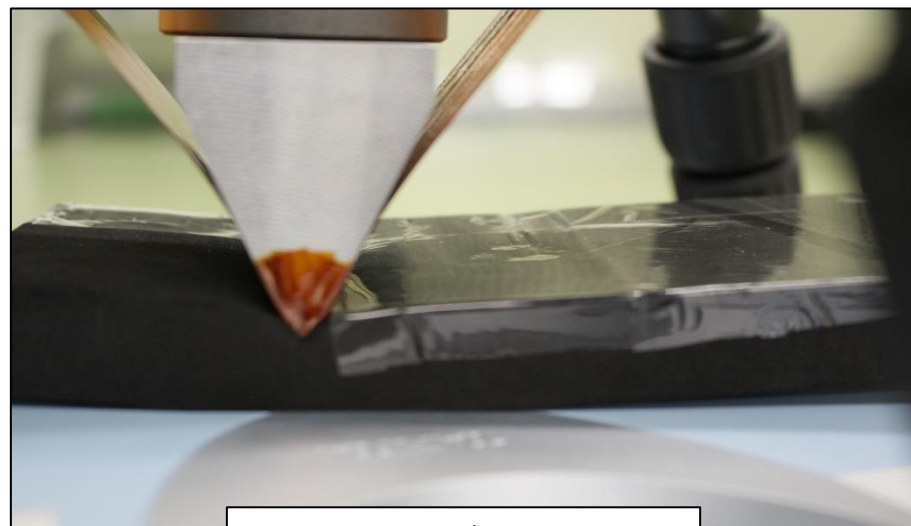
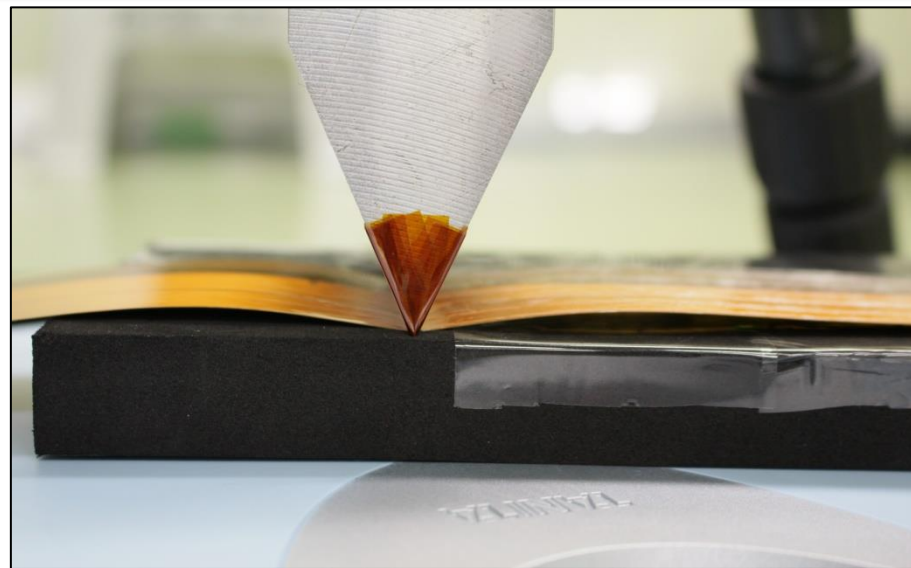


Bending jig

# 折り曲げのセットアップ



折り曲げの様子



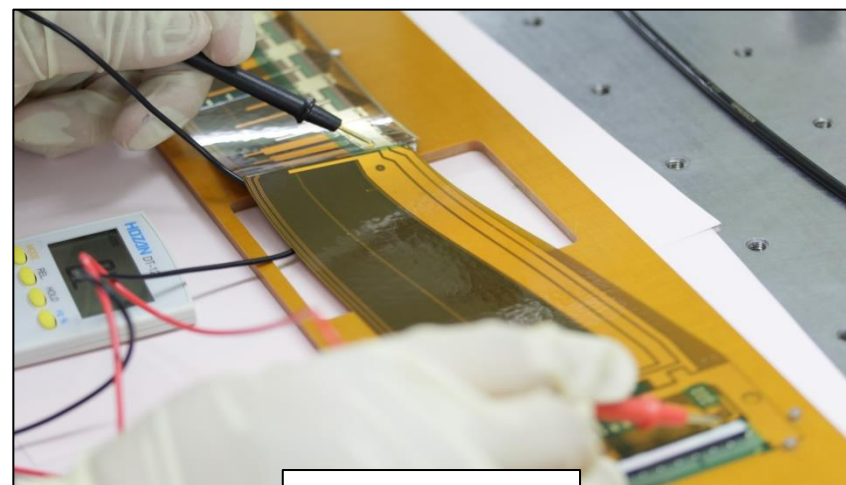
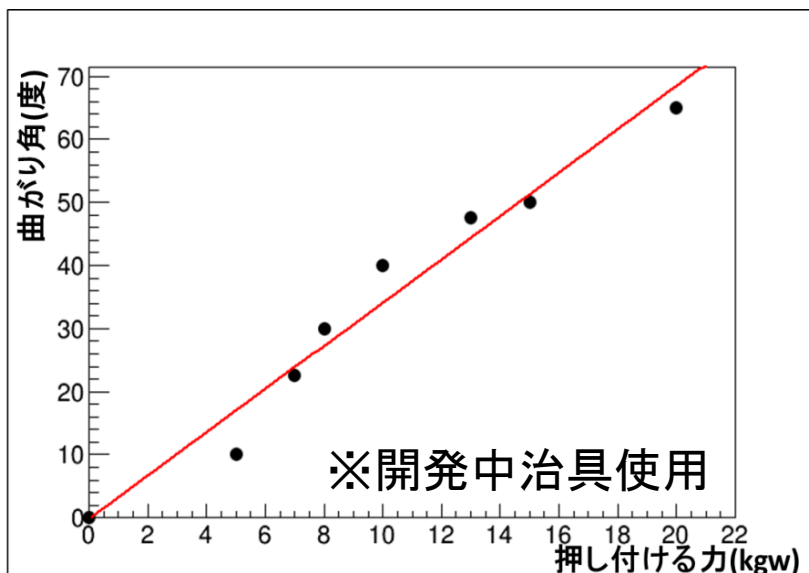
折り曲げ部拡大

## ● 曲げ角のコントロール

- 押す力を変えて曲げ角を調べた
- 時間コントロール
- 押す力と曲げ角は比例関係にあることが判明

## ● 通電試験

- テスターでsignalラインの断線がないか検査
- 50kgw(本番の約4倍)の折り曲げでも断線はなかった



通電試験

# 折り曲げ角のstudy(経時変化)

## ● Origami基板保管ケース

- 1~15 カ月保管
- 曲げ角を保持するための隙間あり

## ● 検証方法

- 折り曲げた後のOrigamiをケースに保管し、一定時間ごとに角度を分度器にあてて目視で測定

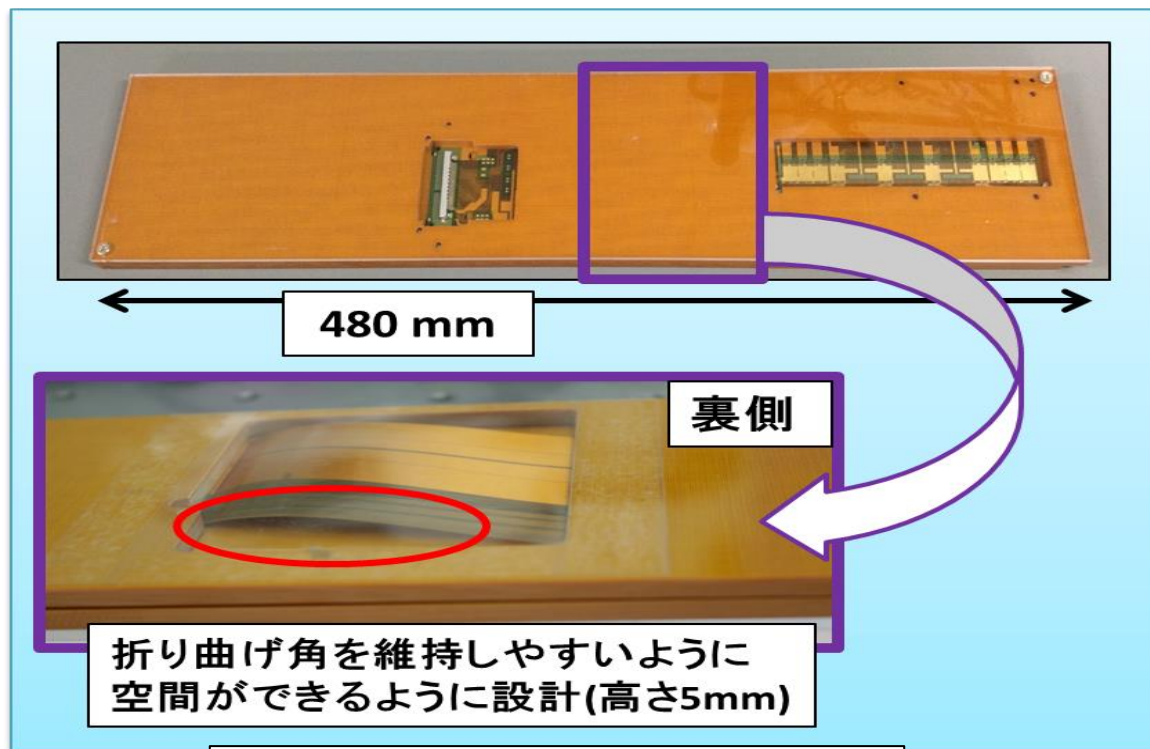


図1 Origami基板保管ケース

# 折り曲げ角のstudy(経時変化)

## ● 結果

- **4日**で経時変化が終わる(図1)
- $\theta_{\text{bend}}$  が**約45度**の時に設計値に近くなる(**13kgw**)  
⇒ **3秒で13kgw、7秒キープ**を採用

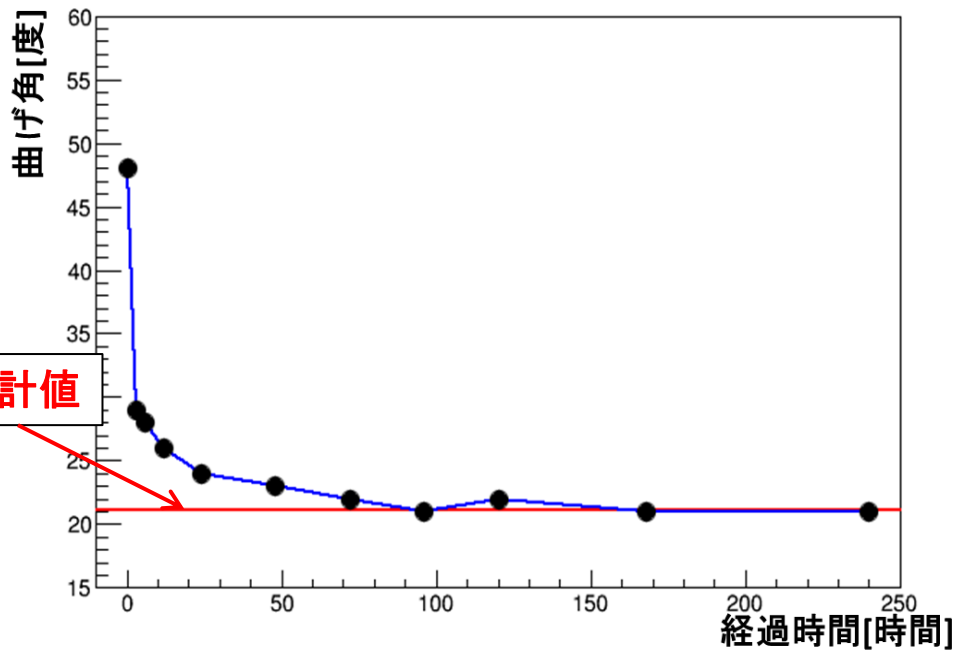
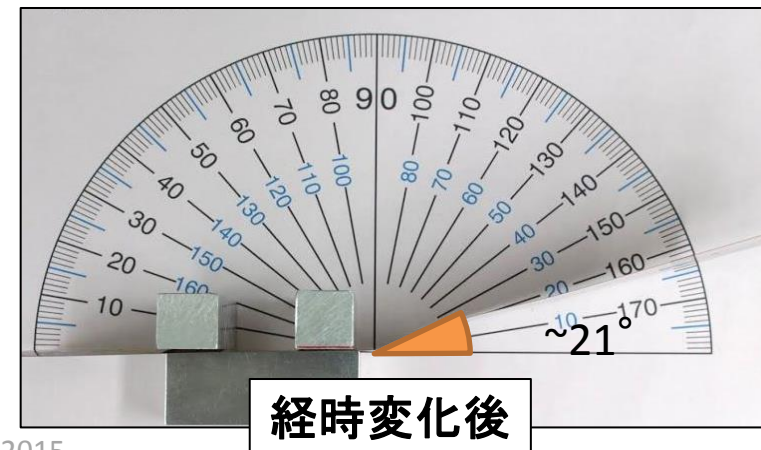
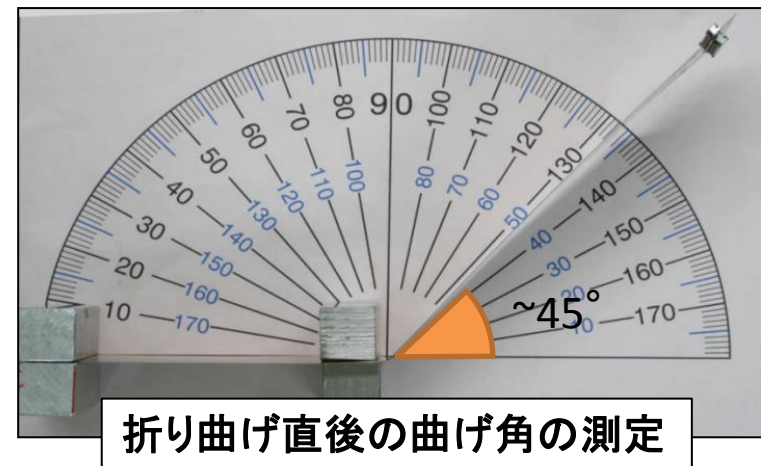


図1 曲げ角の経時変化



# 曲げ位置決め方法

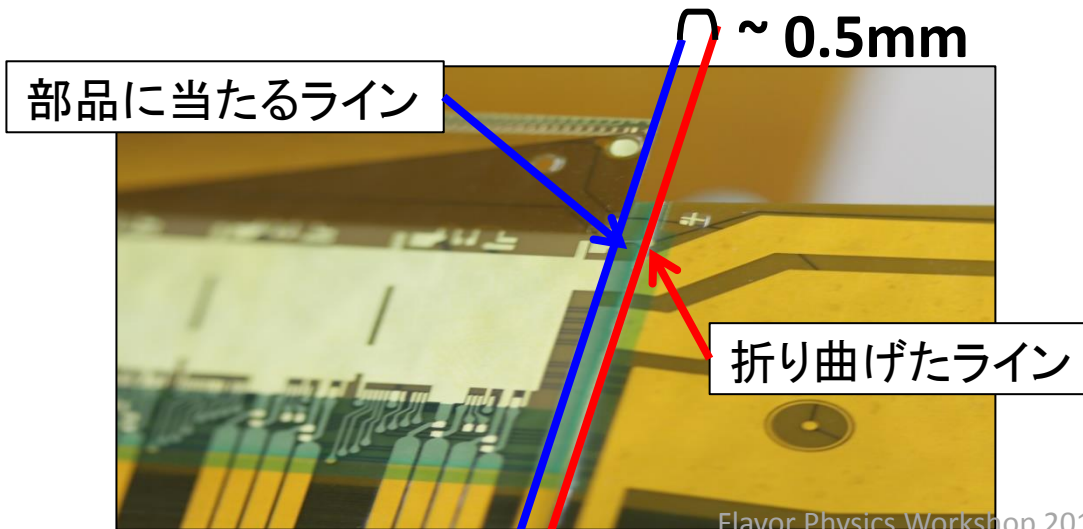
部品を破壊せず、組み立て精度を上げる位置決め手法を探求

- 折り曲げ位置の決定
  - 金パッド、ボンディングパッドに触れない
  - 0.5 mm 離れれば安全に折り曲げ可能
- 折り曲げ位置決め治具の考案
  - Origami基板を囲む『コ』の字の治具
  - bending jigの先端を密着させ位置合わせ

治具の性能: パーツから0.5mm の位置で曲げることができた。



位置決め治具



Origamiの位置合わせ

# テストラダーでのPre-bendの評価

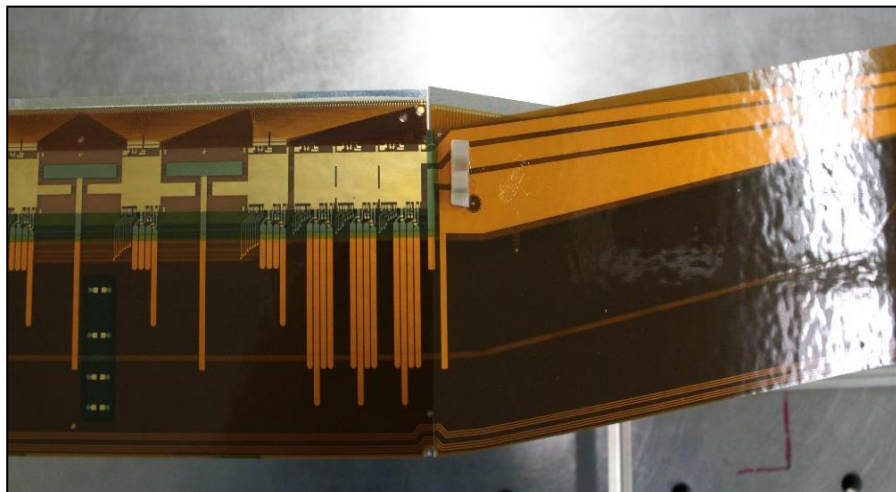
## テストラダーにOrigamiを貼り付け、pre-bendの評価

### ● 評価方法

- ① 折り曲げ位置を目視で確認
- ② テストラダーにOrigamiを接着し、Origamiにあるセンサー位置確認用のぞき穴から、センサーが見えるかどうかを確認  
⇒ 組み立てにおける最低限の要求を満たす

### ● 結果

- ① 正しい位置で折り曲げることができセンサーへの接着も成功している



折り曲げ位置の確認



フレキシブル基板が浮きなく  
接着ができているか確認



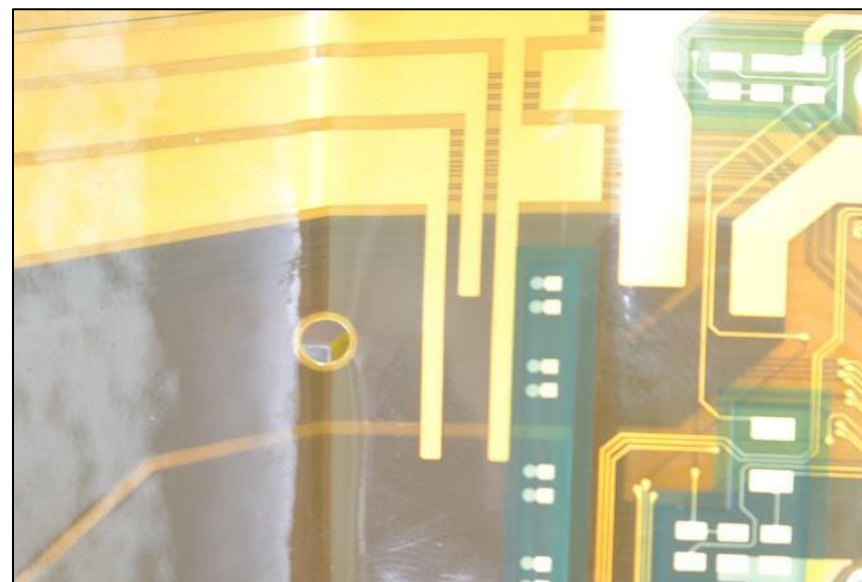
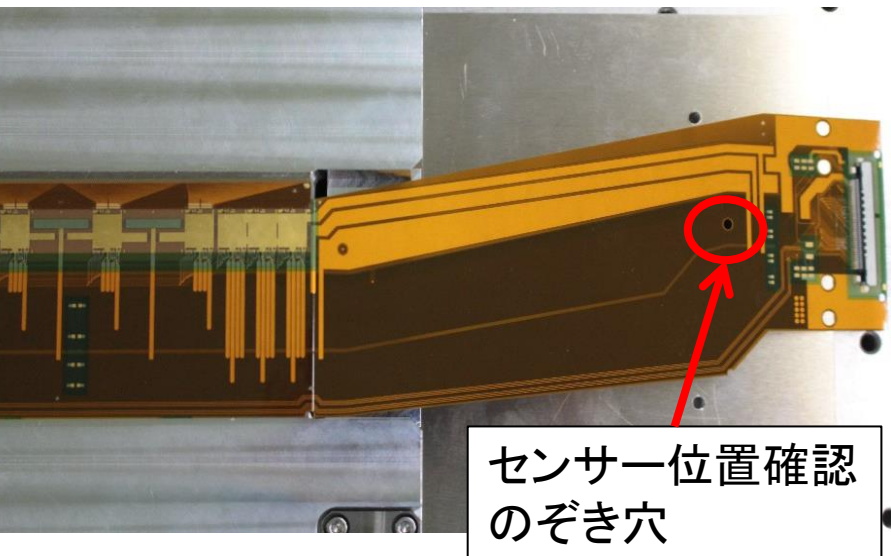
## テストラダーにOrigamiを貼り付け、pre-bendの評価

### ● 評価方法

- ① 折り曲げ位置を目視で確認
- ② テストラダーにOrigamiを接着し、Origamiにあるセンサー位置確認用のぞき穴から、センサーが見えるかどうかを確認  
⇒ 組み立てにおける最低限の要求を満たす

### ● 結果

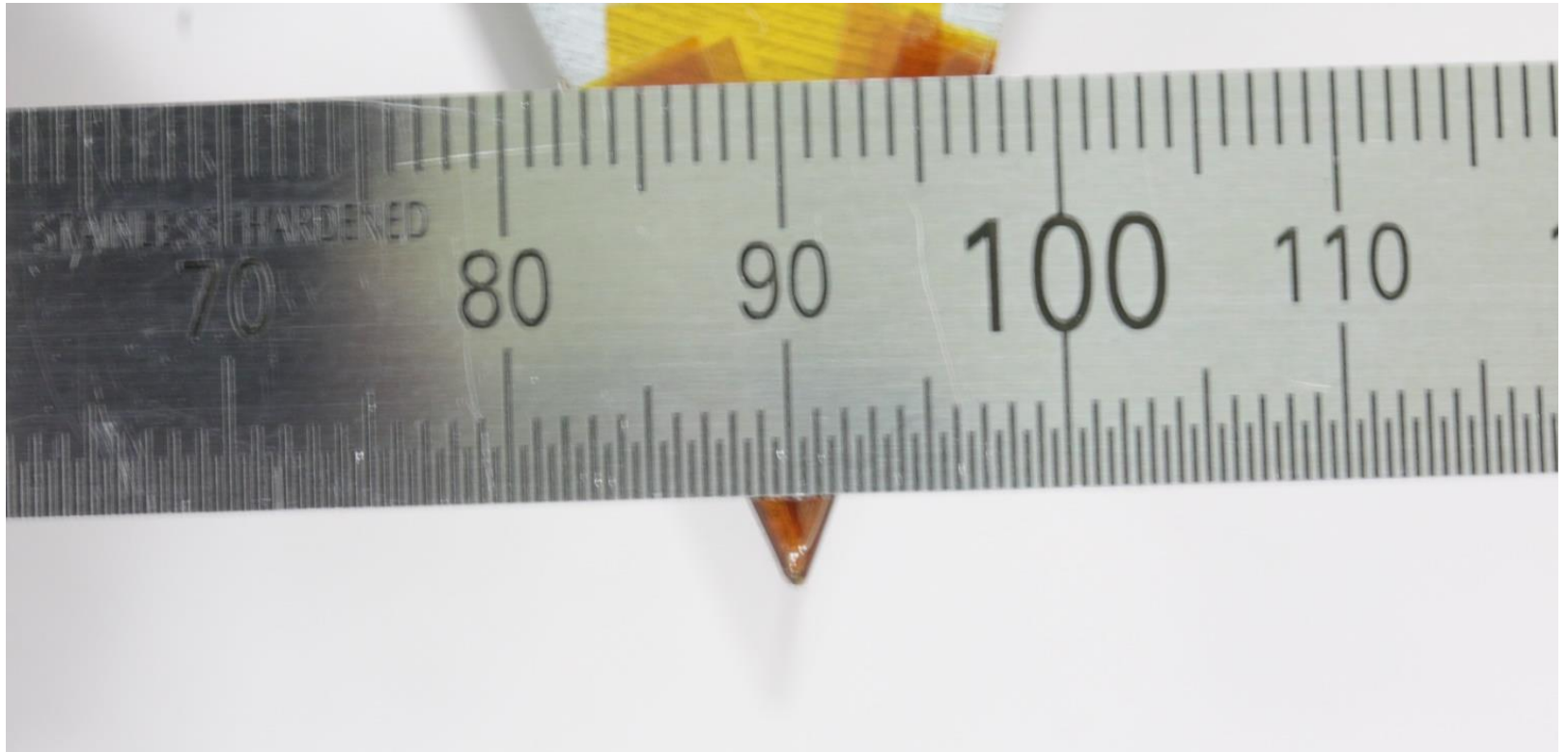
- ② センサー位置が確認できた。  
本手法によるOrigami基板の折り曲げ加工が有効であることがわかった



のぞき穴からセンサーの確認

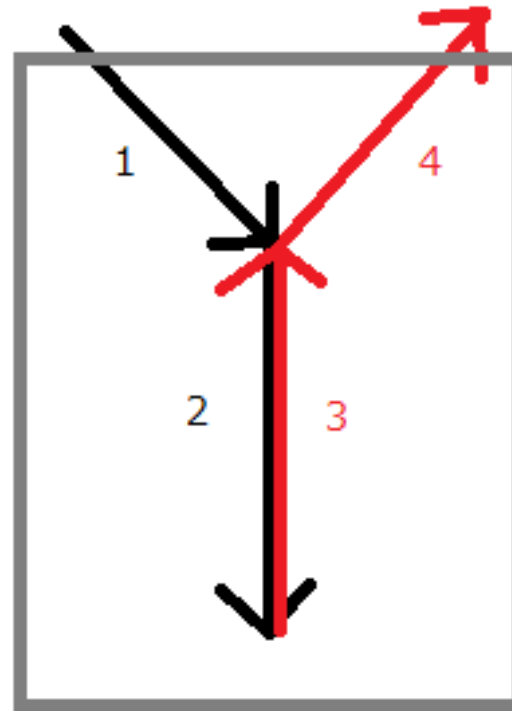
- SVD第6層ではスラント側から中央センサーの読み出しも行うため、フレキシブル基板の折り曲げ加工手法の確立は重要である。
- フレキシブル基板の固定と折り曲げのための新治具を開発し折り曲げ手法を確立した。
- 本研究により開発した手法を用いて折り曲げたフレキシブル基板は、テストタイプラダーに接着でき、のぞき穴からセンサーの端を確認することができた。  
⇒ 本発表の折り曲げ手法が有効であることが示せた。
- 今後は実機用 Origami基板 の折り曲げ(20枚)を開始する。

# バックアップ



# V字治具の加工

- 先端の曲率を出すためにV字に切るのではなくY字にカット

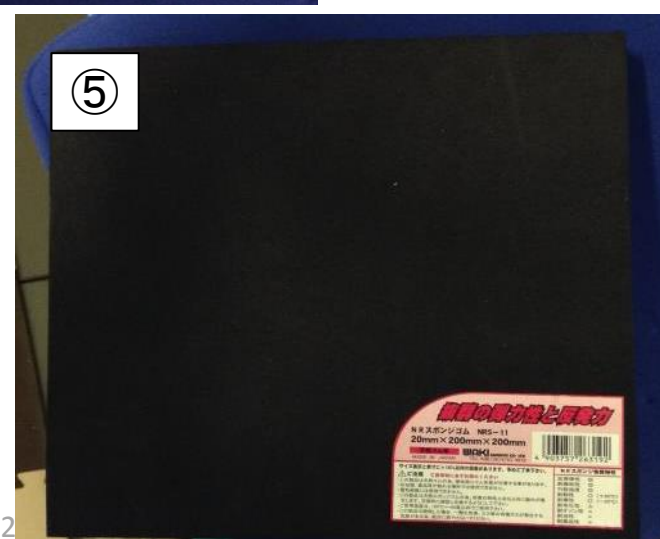
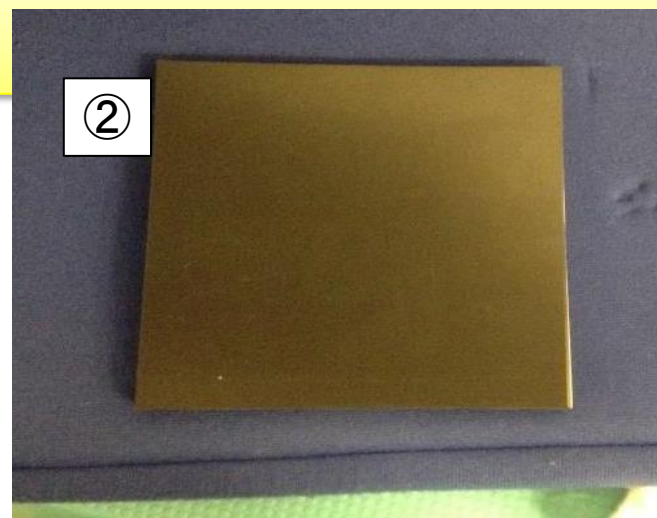


- 表面実装(抵抗の接着など)の前に折り曲げると、表面実装時に行われる熱処理で曲げ癖が付かない
- 表面実装後に曲げ癖を付けようとする抵抗チップがあるので
- Belle II SVDの製作工程に適さなかっただけで、フレキシブル基板の折り曲げ事態には試す価値あり

# 下敷き素材の検証

ホームセンターで売っている商品から使えそうなものをピックアップ  
それぞれの素材を下敷きに同じ条件でOrigami基板を折り曲げ、評  
価した

素材	コメント (検証は旧治具で行っているのでかけた力と曲がり角は一致しない)
①ハードラバー	40 kgw の力で40° に曲がった。これ以上は断線の恐れがあることと力のコントロールが難しいのでこの素材は向かないと思われる。
②ソフトクッション	30 kgw の力で60° に曲がった。力が分散している気がする。もう少し小さい力で曲げたい
③棚の下などにしく緩衝材	17kgwで60° 。ソフトクッションより手応えあるがまだ力が分散しやすい
④コーナースポンジ(緩衝材)	18kgw で65° 。手ごたえはあるが位置決めが難。
⑤天然ゴム系スポンジ	14kgの時62.5° 。最も手ごたえあり。力の分散がなくコントロールもしやすいので採用





## テストラダーにOrigami+Zを接着し、pre-bendの評価

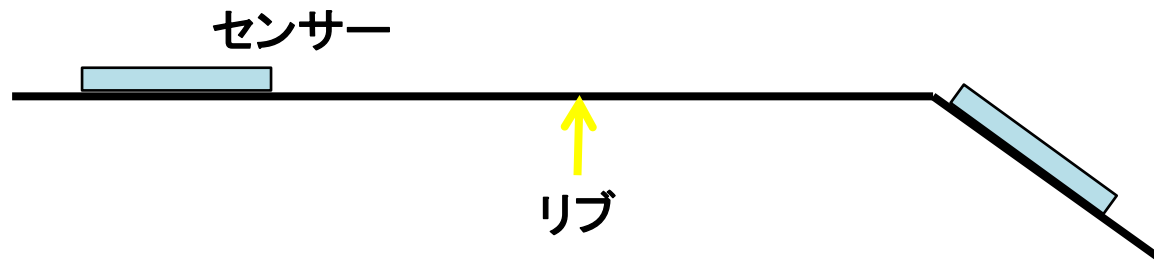
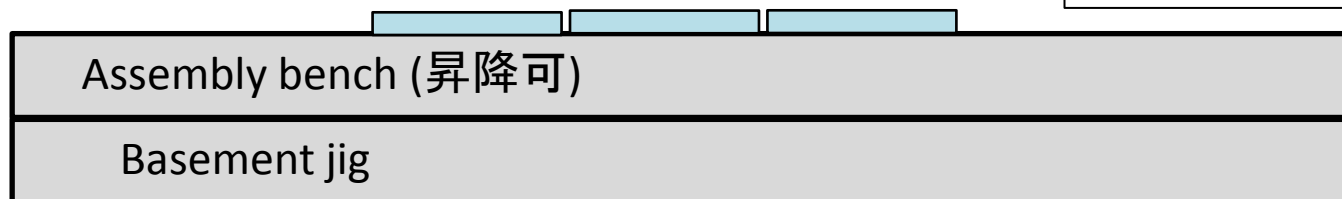
### ● 評価方法

テストラダーに、Origami+Zを接着し、目視と3次元測定器でアライメントマークが見えるかどうか確認

### ● 貼り付け工程概要

#### ① 貼り付け工程開始の状態

- ✓ 中央部センサーはAssembly 上にアライメント済み
- ✓ 前方、後方センサーはリブに接着済み



## テストラダーにOrigami+Zを接着し、pre-bendの評価

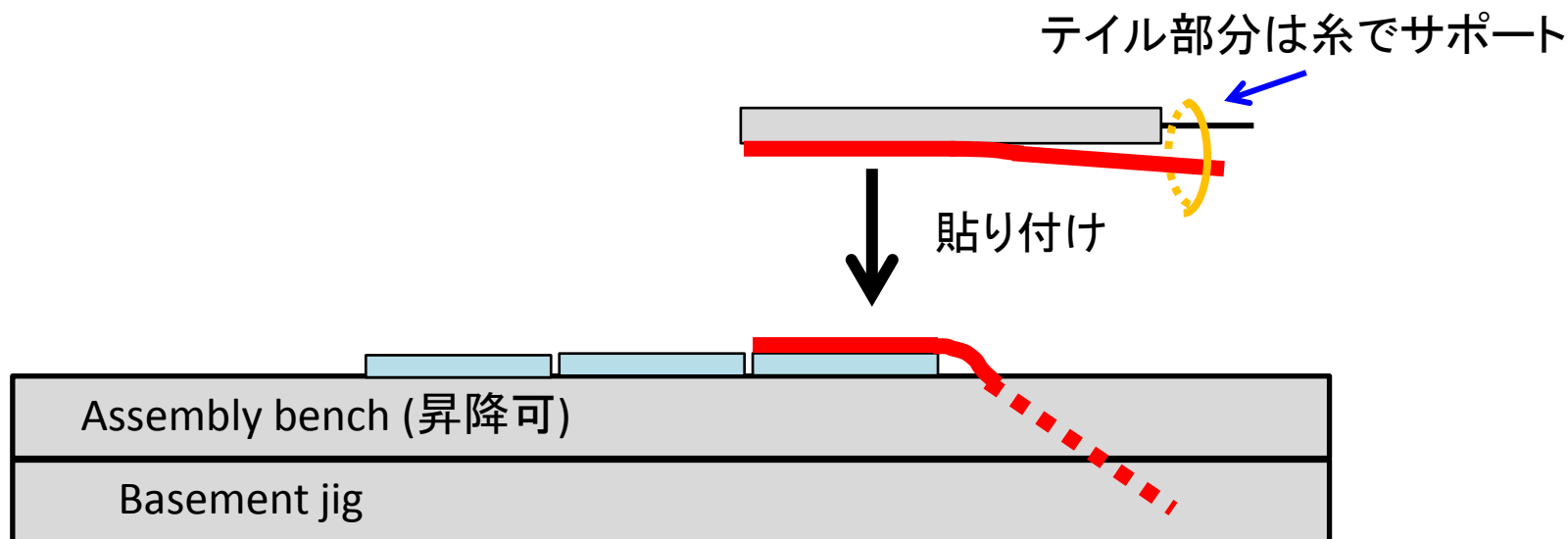
### ● 評価方法

テストラダーに、Origami+Zを接着し、目視と3次元測定器でアラインメントマークが見えるかどうか確認

### ● 貼り付け工程概要

#### – ② Origami+Zの接着(非スラント部)

- ✓ Origami+Z を治具に吸着させ接着剤を塗布
- ✓ Origami+Z に塗布し貼り付け



## テストラダーにOrigami+Zを接着し、pre-bendの評価

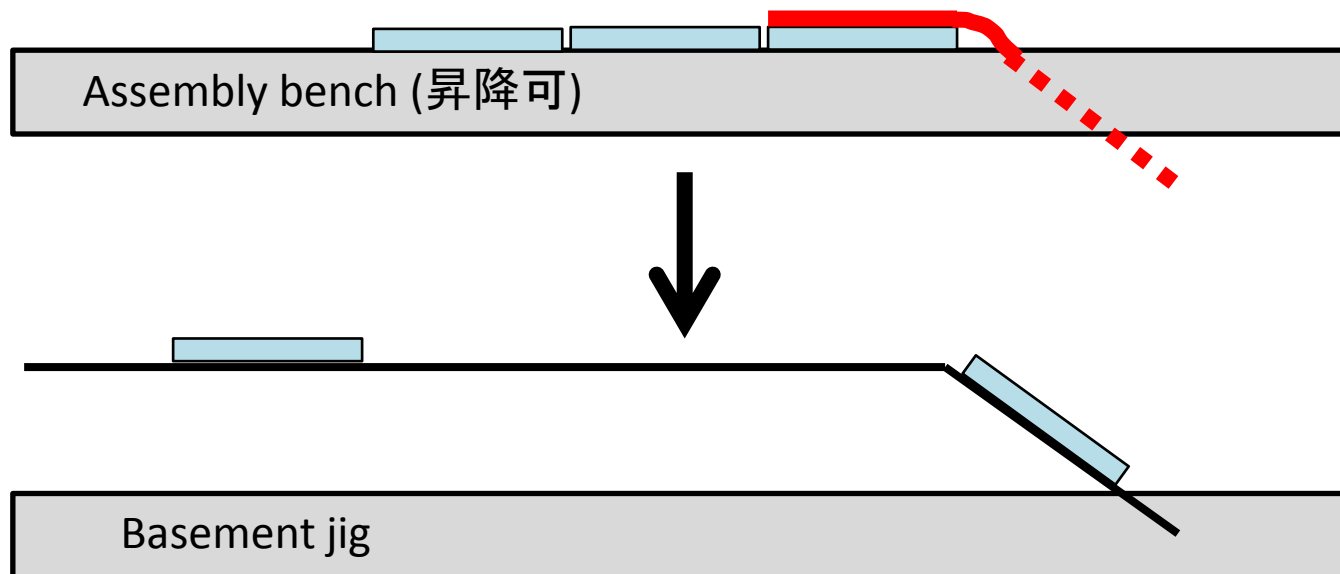
- 評価方法

テストラダーに、Origami+Zを接着し、目視と3次元測定器でアラインメントマークが見えるかどうか確認

- 貼り付け工程概要

- ③ Origami+Zの接着(スラント部)

- ✓ Assembly benchを上昇させる
- ✓ スラントセンサーに接着済みの断熱材に接着剤を塗布する
- ✓ リブをセットし、Assembly benchをおろして貼り付ける



# テストラダーでの検証

## テストラダーにOrigami+Zを接着し、pre-bendの評価

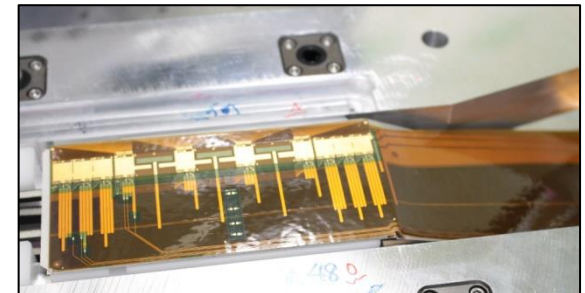
### ● 評価方法

テストラダーに、Origami+Zを接着し、目視と3次元測定器でアラインメントマークが見えるかどうか確認

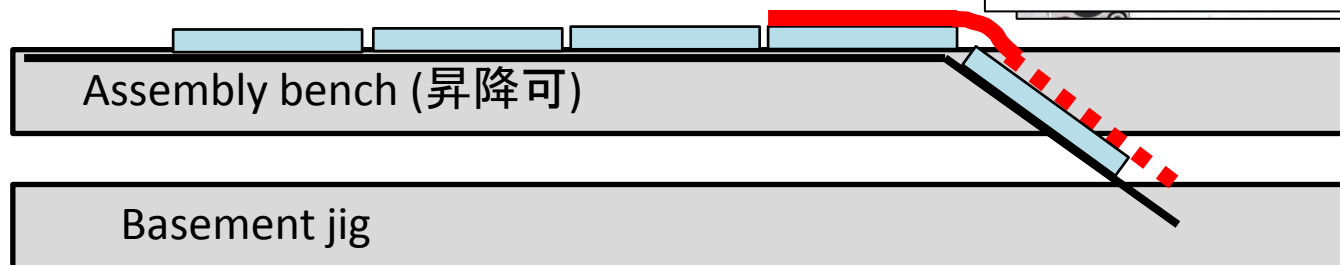
### ● 貼り付け工程概要

#### – ③ Origami+Zの接着(スラント部)

- ✓ Assembly benchを上昇させる
- ✓ スラントセンサーに接着済みの断熱材に接着剤を塗布する
- ✓ リブをセットし、Assembly benchをおろして貼り付ける



センサーに接着後のOrigami+Z

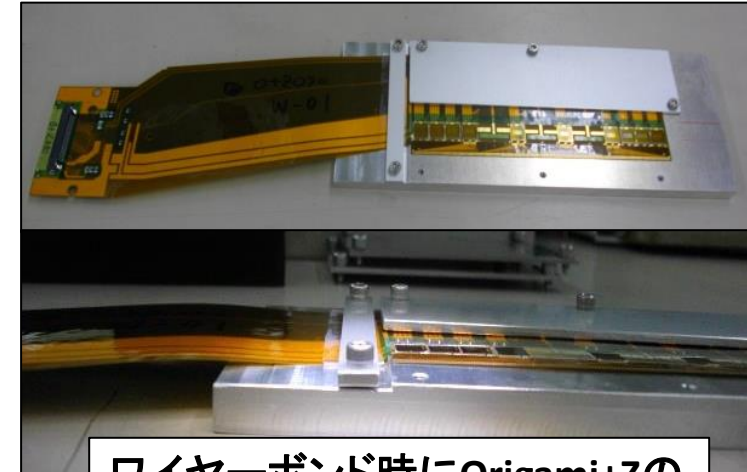


# Pre-bend 後の工程へのケア

## Origami基板折り曲げ後の作業工程でも曲げ角を維持できるようにする

### ● 読み出しチップの接着

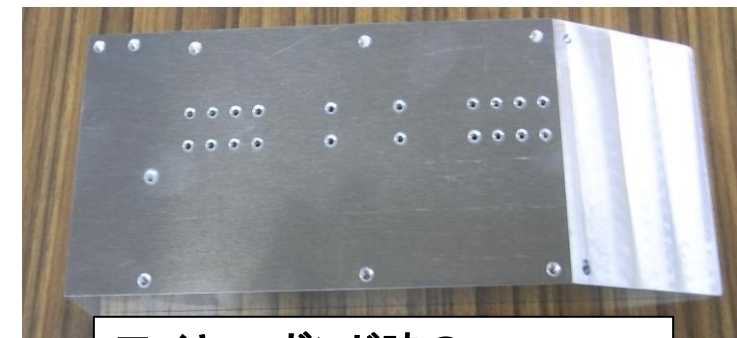
- 作業安定のためテープと鉄ブロックで固定  
⇒同条件で検証し、問題ないことがわかった。



ワイヤーボンド時にOrigami+Zの固定に使う旧治具

### ● ワイヤーボンド

- 旧手法  
ボンディング箇所が浮くので、正確にボンディングするため金具で固定 (図1)。曲げ角が小さくなることを確認。
- 新治具の考案  
設計値と同じ傾斜をつけ、曲げ角の戻りを抑える。



ワイヤーボンド時のOrigami+Z固定の新治具

ワイヤーボンド後はラダーに貼り付けるまでケースで保管

## ● Slant ありなしの比較

Belle II review in 2011  
Tsuboyama-san

Without slanted sensors  
With slanted sensors

