

# 読み出し試験及び形状測定による HL-LHC ATLASシリコンピクセル検出器の バンブ<sup>o</sup>接合品質評価

2021年3月30日

宇宙史研究センターワークショップ

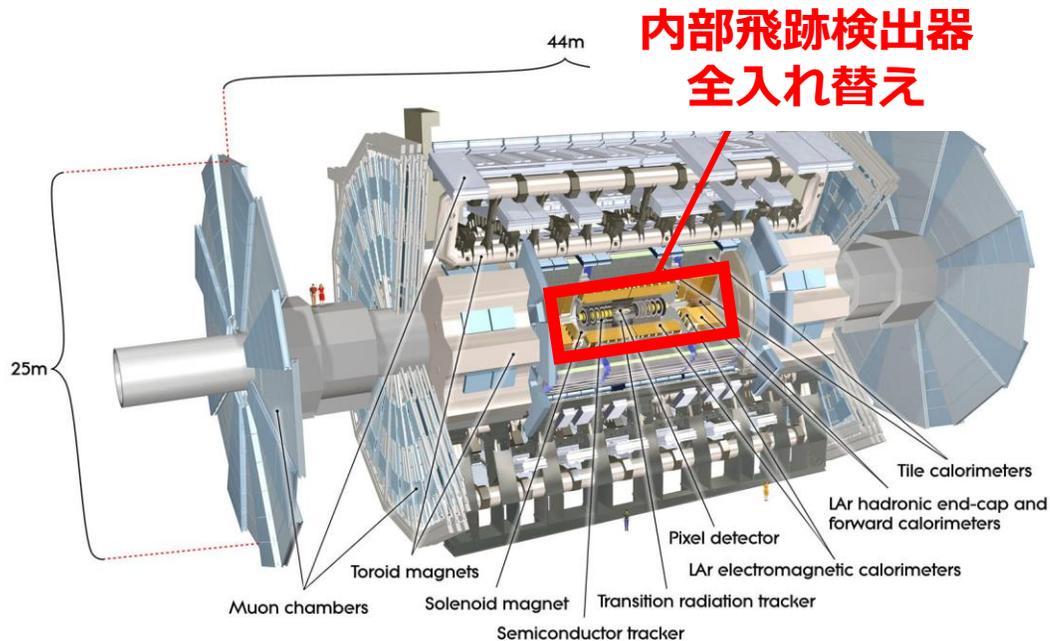
熊倉泰成、原和彦、廣瀬茂輝、中村浩二<sup>A</sup>、緑川晋平<sup>B</sup>、藤井翔也<sup>B</sup>、釣希夢<sup>C</sup>、  
前田実津季<sup>C</sup>、花垣和則<sup>A</sup>、外川学<sup>A</sup>、他ATLAS日本ピクセルグループ

筑波大、高工ネ研<sup>A</sup>、総研大<sup>B</sup>、お茶大<sup>C</sup>

# ATLAS検出器のアップグレード

## ➤ATLAS検出器

- 高輝度LHCに向けアップグレード  
→標準模型の精密測定、新粒子探索など
- 積分輝度10倍  
 $300 \text{ fb}^{-1} \rightarrow 4000 \text{ fb}^{-1}$

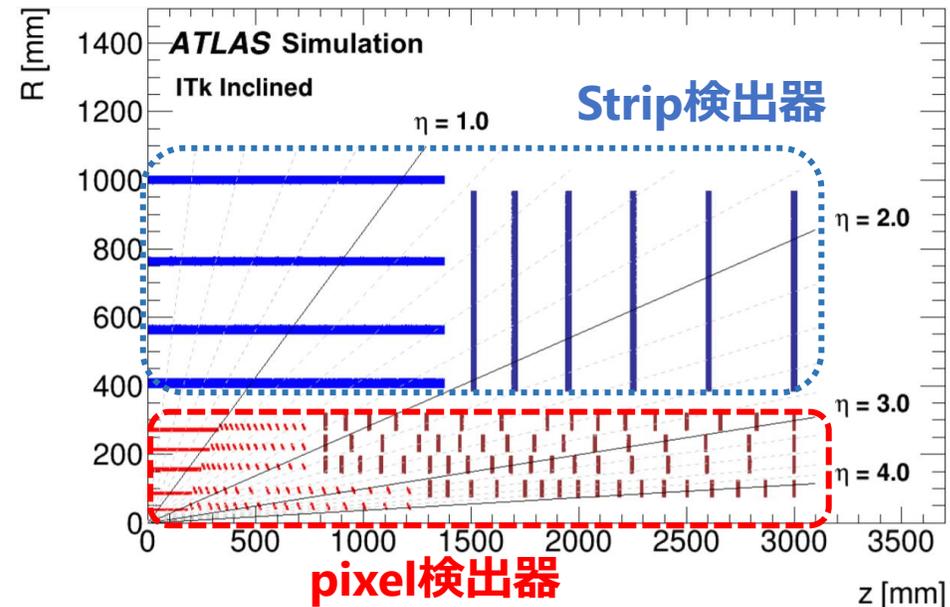


## ➤ITk(Inner Tracker)

アップグレード後の内部飛跡検出器  
全てシリコン検出器に

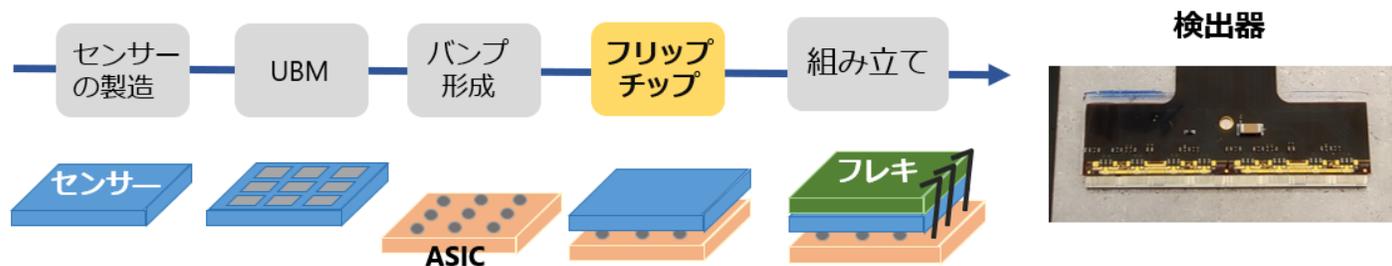
## →高位置分解能の新型ピクセル検出器の導入

- センサーの薄型化：センサー厚 $150\mu\text{m}$
- ピクセルサイズの小型化： $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$



# フリップチップ品質への要求

➤ フリップチップ：ASICとセンサーを bumps（金属球）で接合する工程

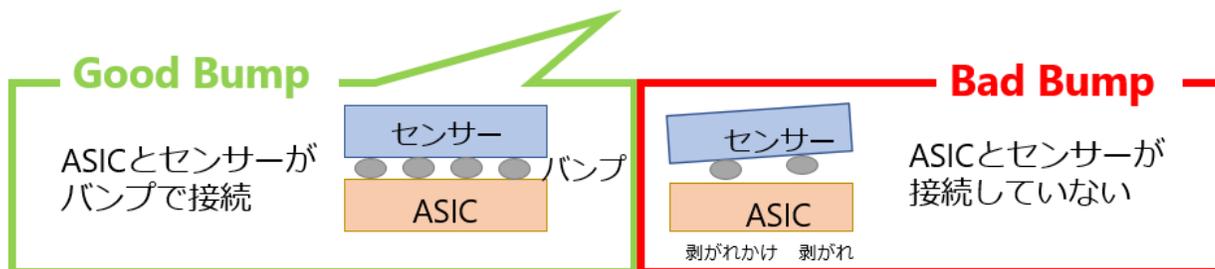


検出器製造の上で最も難しいプロセスがフリップチップ

➤ フリップチップ品質への要求

① 正常に接続している bumps (Good Bump) が全ピクセル中~99.2%以上  
1chip(76800ピクセル)あたり76200ピクセル

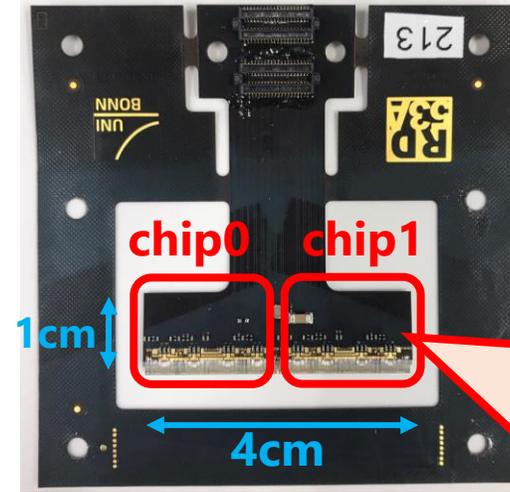
② bumps 剥がれが熱サイクルで悪化しないこと  
-40°Cから60°Cの温度変化20サイクル



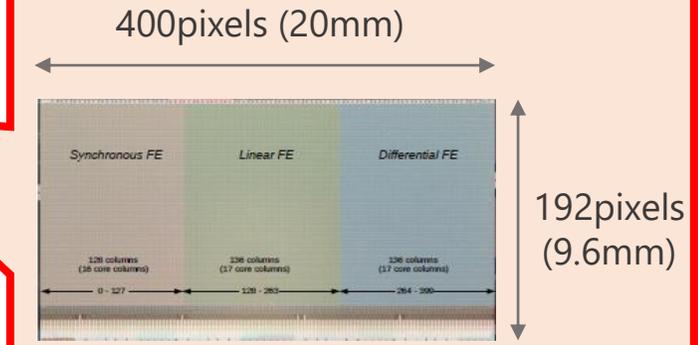
本研究では...  
測定から bumps 接合状態を判別する手法を確立し  
フリップチップ品質が要求を満たすかを評価

# 評価対象の検出器

- RD53A用Dual型ピクセル検出器：17台
  - フリップチップの品質評価用に開発された
  - 1つのセンサーに2つのASICをバンプ接続  
2つのchip(1chip：76800ピクセル)



- RD53A型読み出し回路  
HL-LHCに向けたASICの試作機  
3種類のフロントエンドを搭載



## ➤ 製造工程を担当した企業

センサー	UBM	バンプ形成	フリッチップ	検出器数
A社	A社	C社	A社	7
		B社		8
C社	B社	B社	B社	2

A社とB社の  
フリッチップ品質の評価

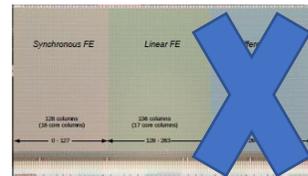
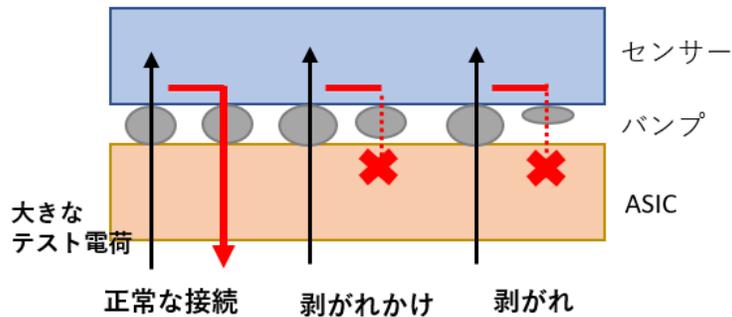
# バンプ状態評価の手法

この手法で全数評価  
→次ページ

## ①読み出し試験を用いた手法

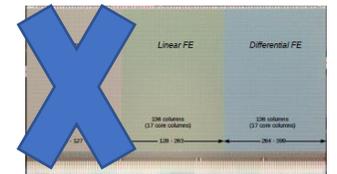
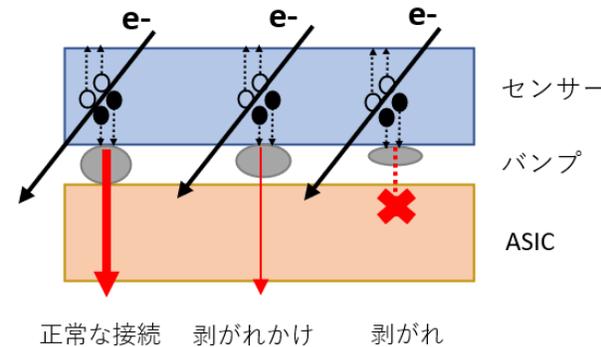
### クロストークの測定

- ピクセル間の静電容量によって信号の一部が隣のピクセルに逃げる現象を利用
- 一部領域が読み出せない



### 荷電粒子に対する応答

- 荷電粒子の通過で生成される電荷読み出し
- 剥がれかけ状態でも応答あり、評価できない
- 一部領域が読み出せない

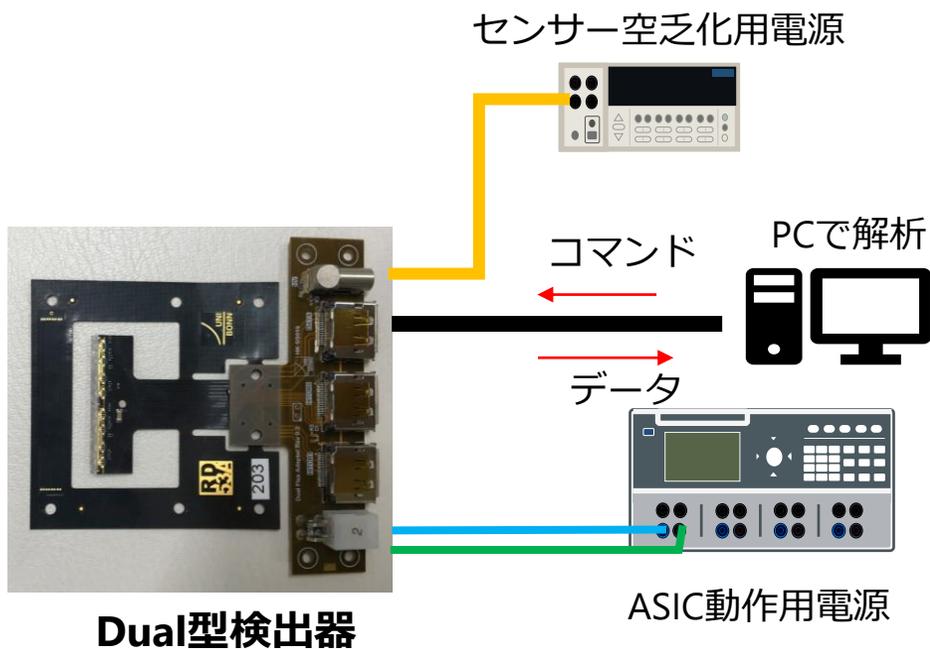


## ②形状測定を用いた手法

バンプが剥がれていると、形状が変わる → **ベアモジュールの厚み測定**からバンプ剥がれを判別する  
**メリット**：アセンブリ前に不良品判別が可能

# 読み出し試験と熱サイクルのセットアップ

## ▶ 読み出し試験のセットアップ

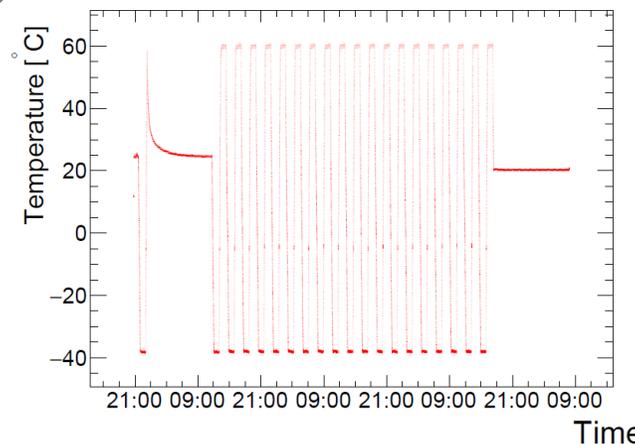


- ✓  $\beta$ 線源 (Sr-90, 3.3MBq)
- ✓ 遮光して測定
- ✓ 50kHzでトリガー発行
- ✓ 測定時間15min (各ピクセルで50ヒット以上を目安)

## ▶ 熱サイクルのセットアップ



恒温槽で温度変化



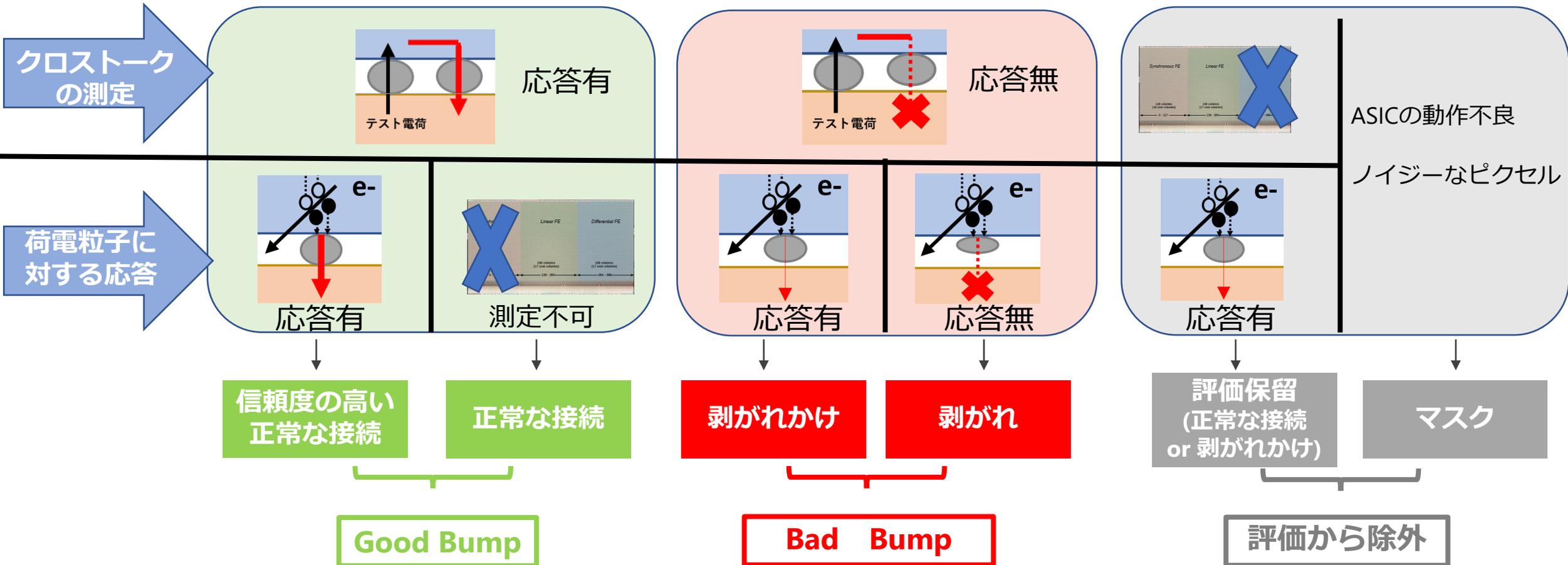
-40~60°Cの  
サイクル20回

温度変化によるバンプ接続状態の変化を確認する

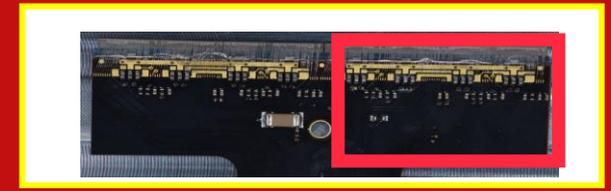
# バンプ状態の評価定義

✓ 全ピクセルを6つの状態に分類

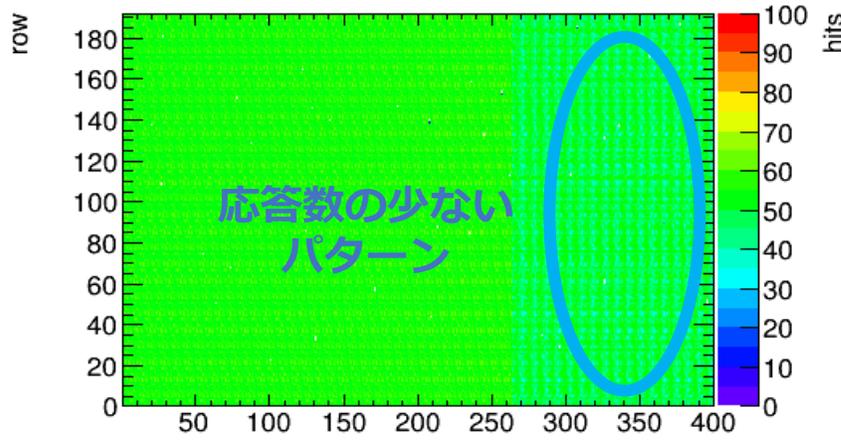
→ **Good Bump**、 **Bad Bump**、 評価から除外 の3つに分類



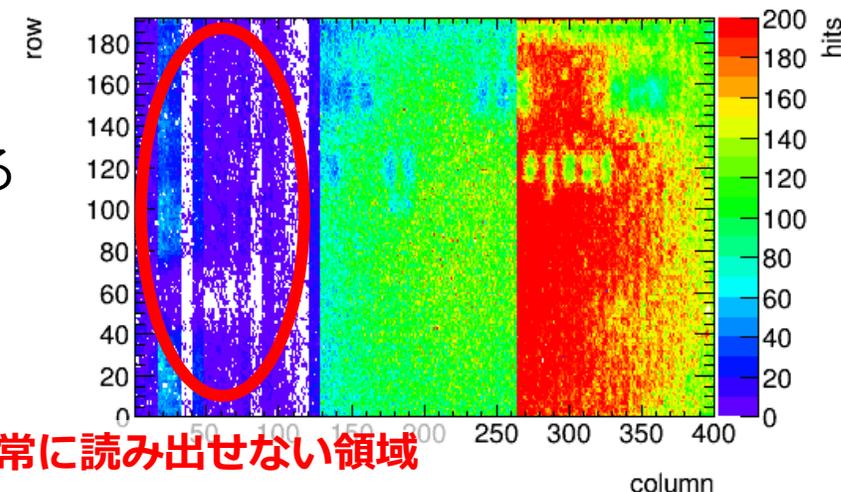
# 読み出し試験の結果



➤ A社がフリップチップした検出器の例



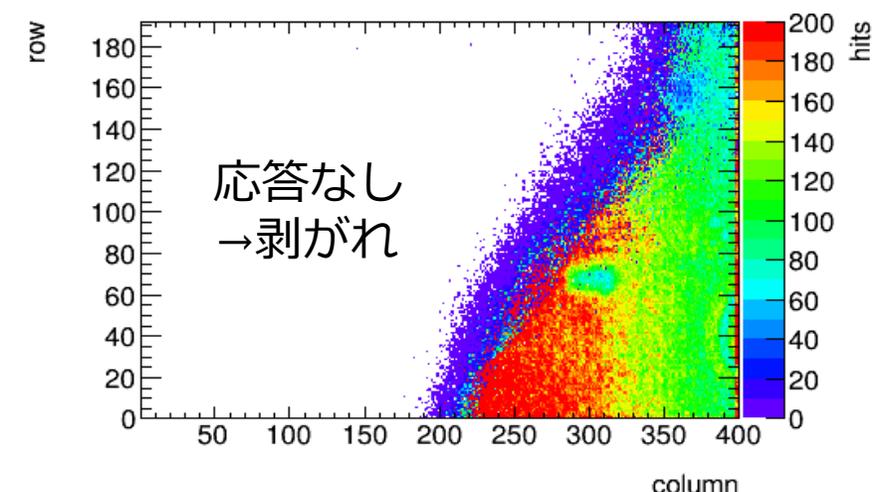
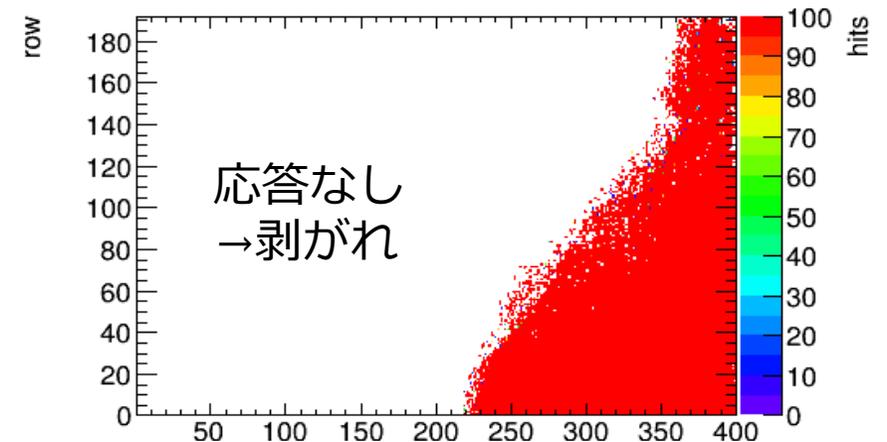
クロストークの測定



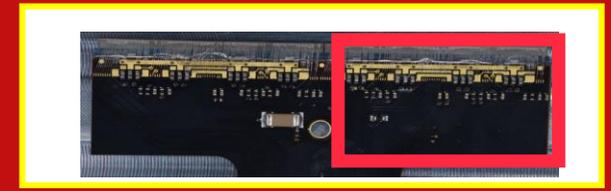
荷電粒子に対する  
応答

正常に読み出せない領域

➤ B社がフリップチップした検出器の例



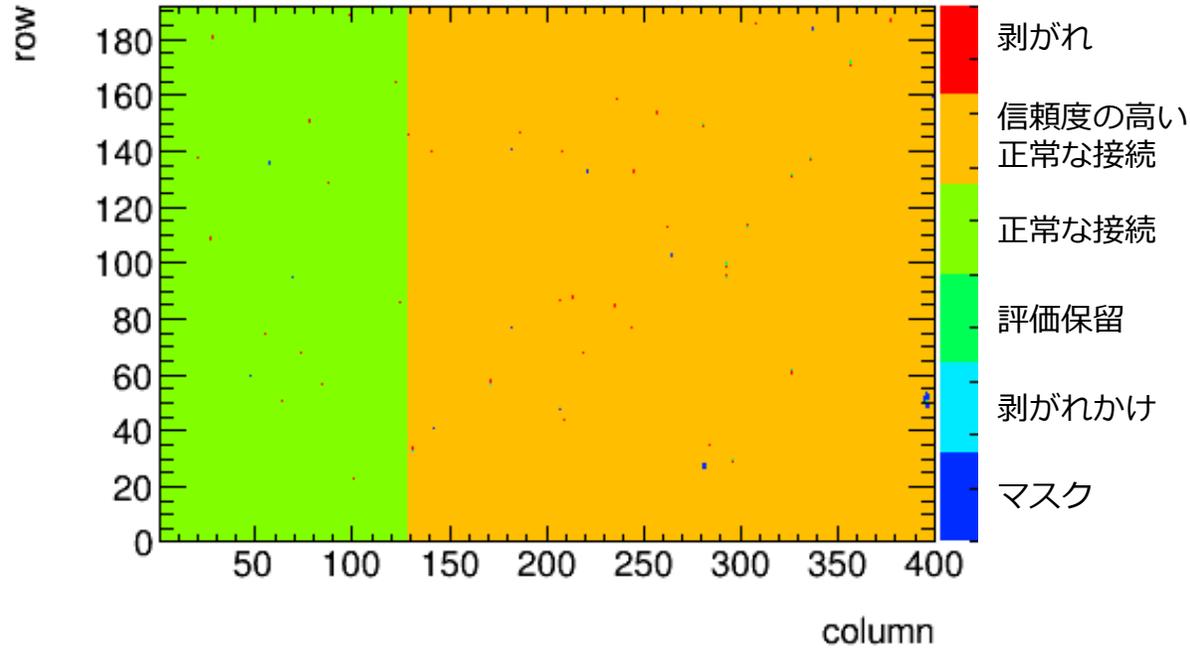
# バンブ状態評価の結果



➤ A社がフリップチップ  
した検出器の例

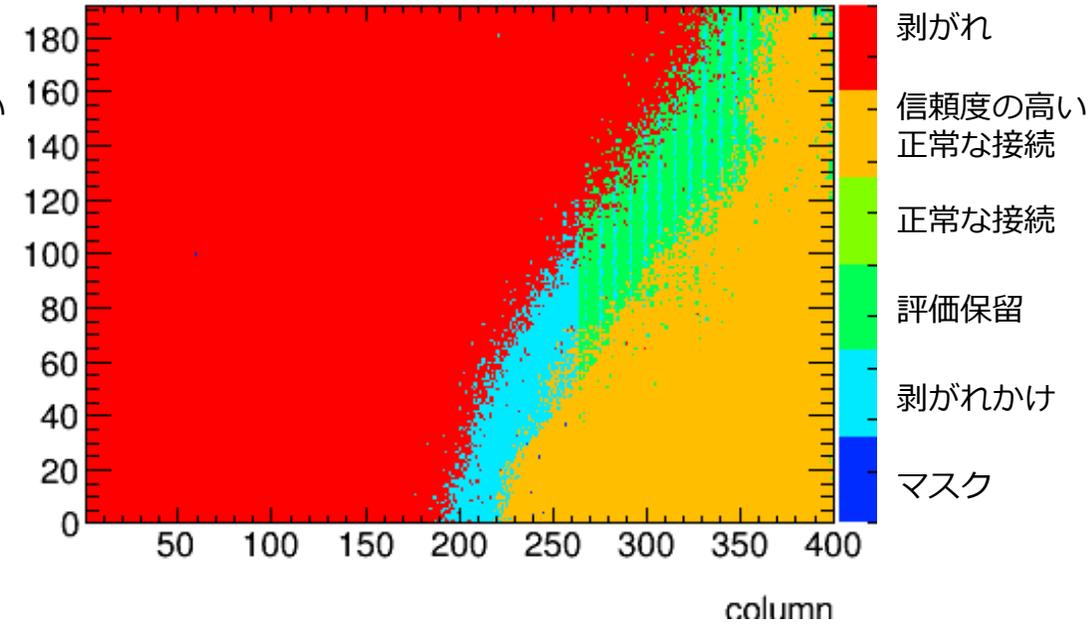
➤ B社がフリップチップ  
した検出器の例

バンブ状態



99.94%がGood Bump → **基準を満たす**

バンブ状態

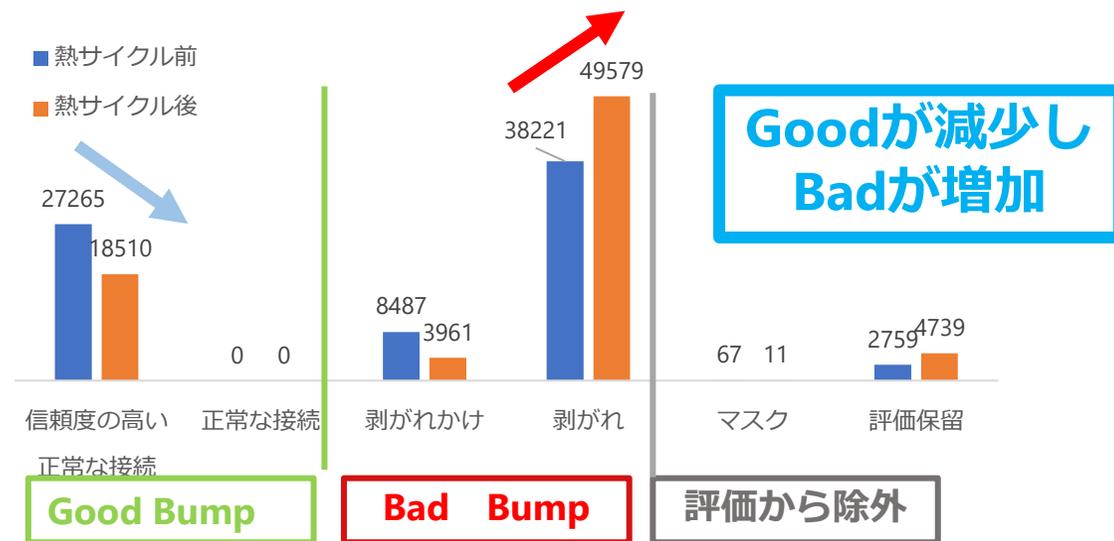
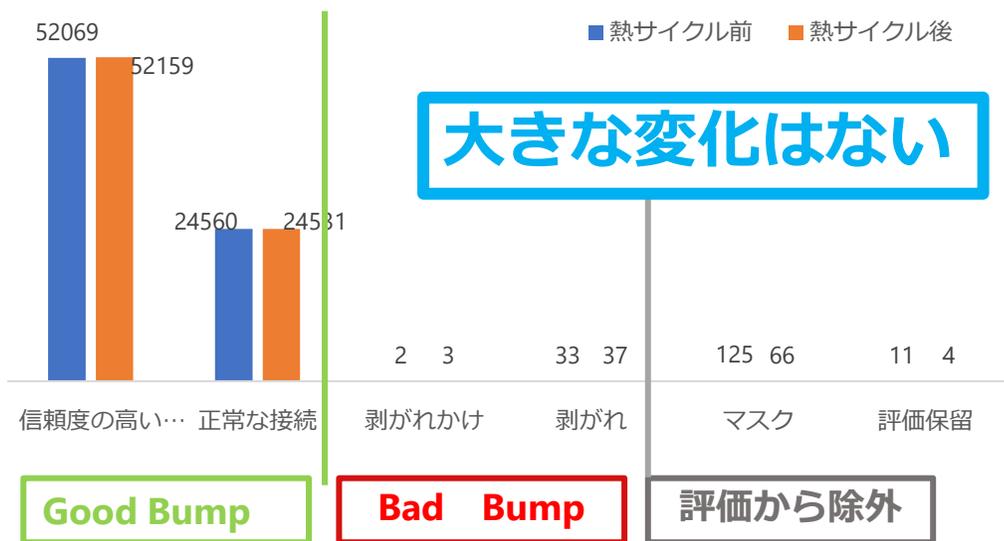
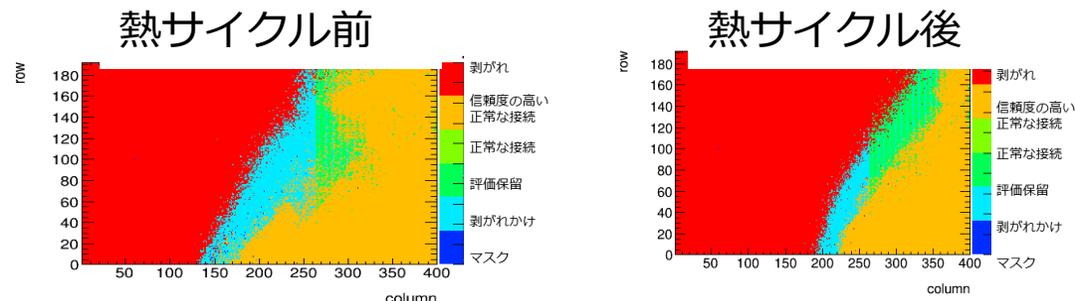
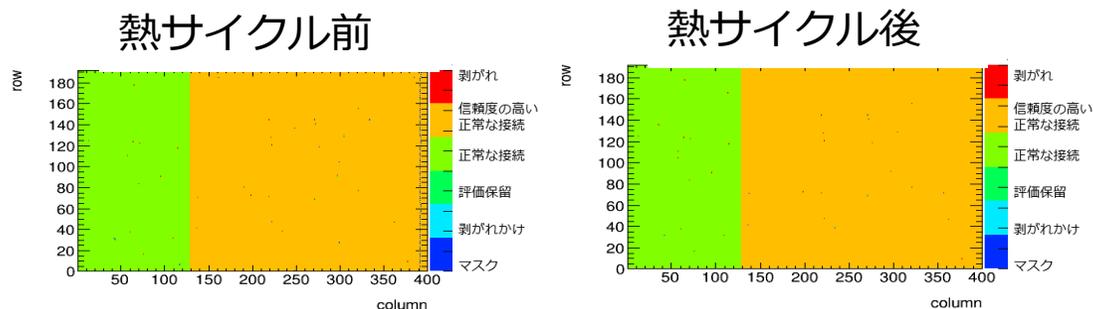


25.34%がGood Bump → **基準を満たさない**

# 熱サイクル前後の比較

➤ A社がフリップチップした検出器の例

➤ B社がフリップチップした検出器の例



# 読み出し試験からの結果

➤ クロストークの測定と荷電粒子に対する応答測定を相補的に用いた手法で全数評価 (要求99.2%)

- A社→15台のうち、正常に測定できた14台が**要求を満たした**
- B社→2台とも**要求を満たさなかった**

\* A07はASICの問題で読み出せなかった

フリップチップ	A社														B社	
検出器名	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10	A12	A13	A14	A15	B01	B02
Good Bumpの割合 (熱サイクル前)	99.99%	99.98%	99.8%	99.93%	99.73%	99.81%	-	99.99%	99.95%	99.73%	99.91%	99.95%	99.99%	-	40.59%	54.37%
Good Bumpの割合 (熱サイクル後)	100.0%	99.98%	99.64%	99.90%	99.60%	99.84%	-	99.98%	99.97%	99.89%	99.97%	99.95%	99.96%	99.95%	-	35.21%
熱サイクル前後の Good Bumpの変化	+0.01%	0%	-0.16%	-0.03%	-0.13%	+0.03%	-	-0.01%	+0.02%	+0.15%	+0.06%	0%	-0.03%	-	-	-20.16%
要求の可否	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	×	×

B社が  
フリップ  
チップ：  
剥がれの  
広がり  
が大きい

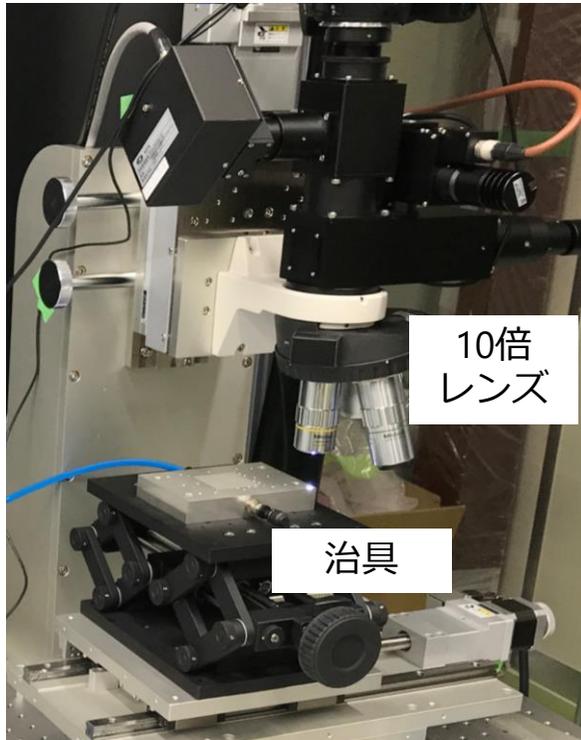
## 剥がれている検出器

バンプの大きさは~25μmなので、高い精度で検出器の厚みを測定をすれば剥がれを判別できるのではないかと →形状測定

# 形状測定の設定アップ

## ➤ セットアップ

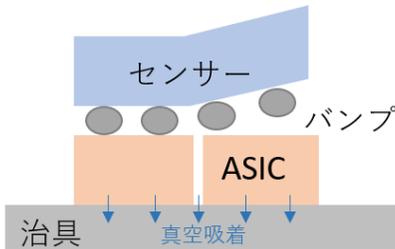
- ✓ 1mm間隔で測定
- ✓ 焦点を合わせることで高さを測定
- ✓ 測定精度~0.9 $\mu\text{m}$



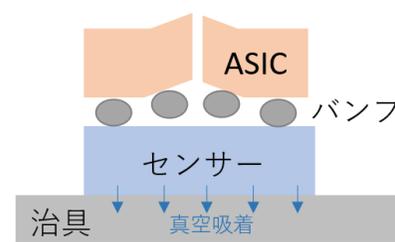
## ➤ たわみの指標の定義

2パターンの測定からたわみの指標を定義する

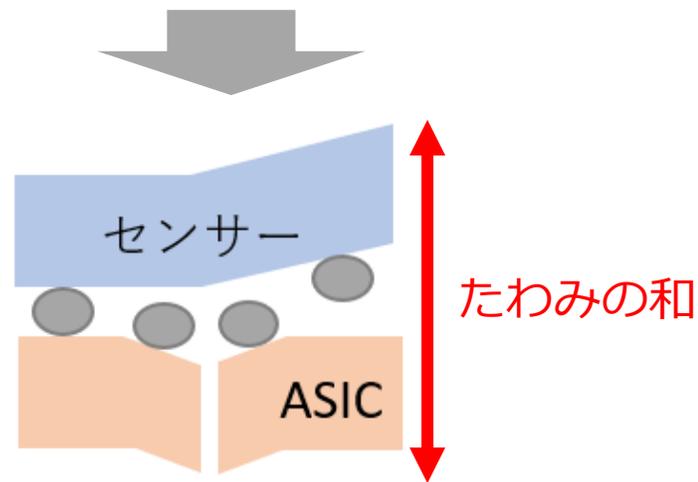
センサー上ASIC下



センサー下ASIC上



ASIC、センサー  
それぞれのたわみを  
求める



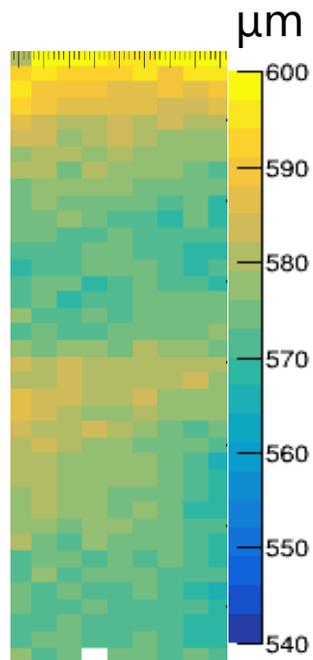
2つの測定の和  
(たわみの和)  
をたわみの指標とした

# 形状測定とセンサー表面状態の比較

## ➤ 形状測定の結果

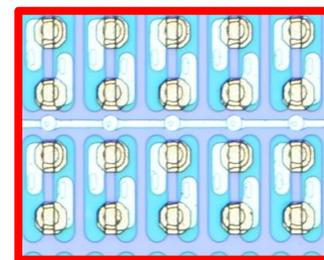
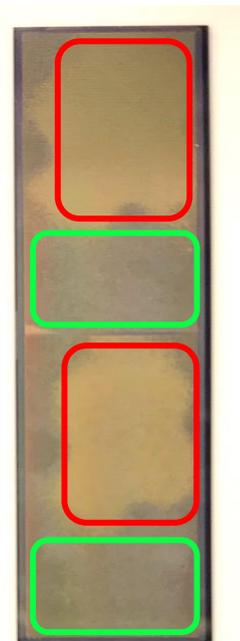
センサー側を吸着した時のたわみと  
ASIC側を吸着した時のたわみの和

✓ 黄色の部分がたわみの  
大きい位置を表す

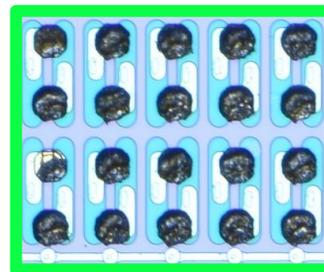


## ➤ センサー表面状態

センサーとASICを剥がし、  
センサー側の表面状態を顕微鏡で確認



UBMの金メッキ  
→接続されていない



バンプが接続  
されていた形跡

形状測定から剥がれ位置を示唆できる可能性がある

# 標準偏差による剥がれ判別

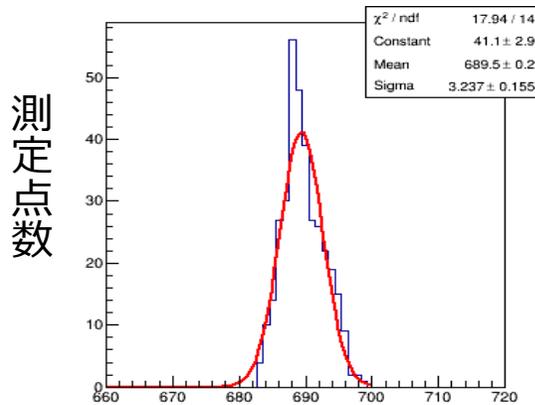
## ▶ 標準偏差による剥がれ判別

たわみの和を分布にし、平坦部の厚みをfit

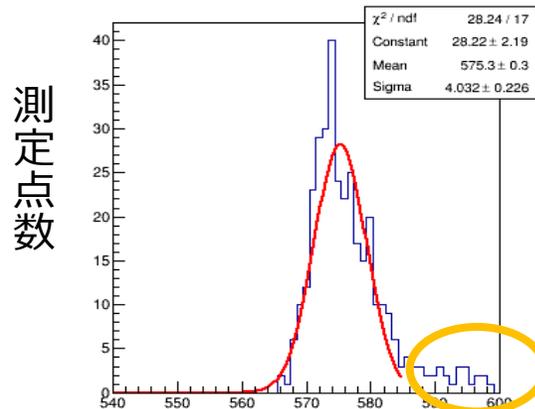


平坦部の平均の高さ(mean)から

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (z - \text{mean})^2} \quad \text{を求める}$$



剥がれの無い  
検出器の例



剥がれのある  
検出器の例

剥がれている部分

厚み測定の結果[μm]

	剥がれ無		剥がれ有	
検出器名	A1	A2	B1	B2
標準偏差 [μm]	3.05	3.19	9.46	6.91

剥がれのある検出器は標準偏差が大きい

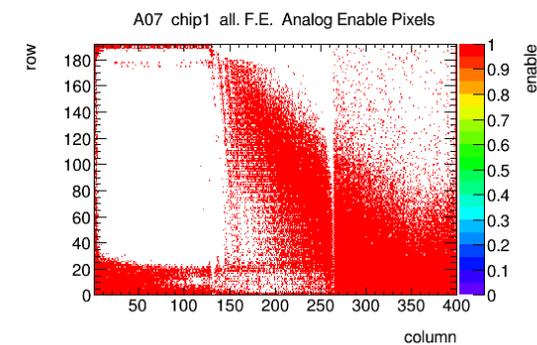
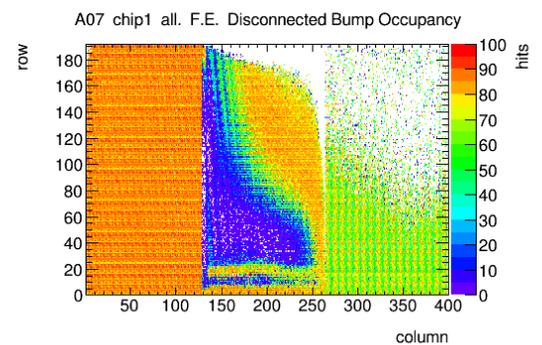
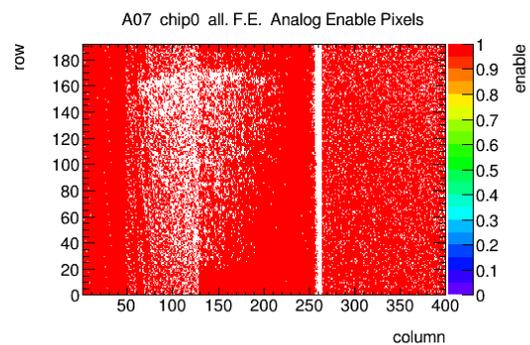
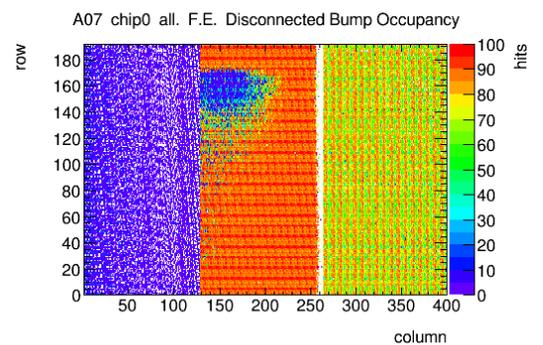
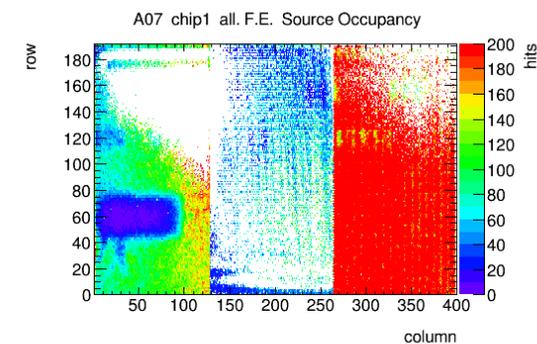
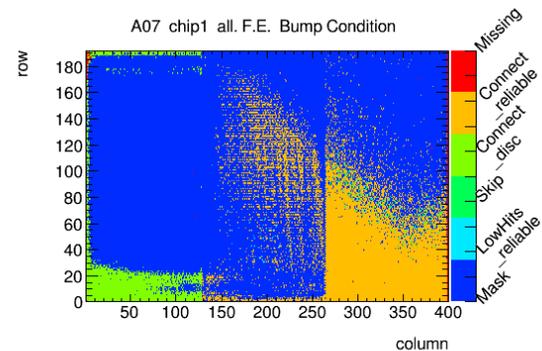
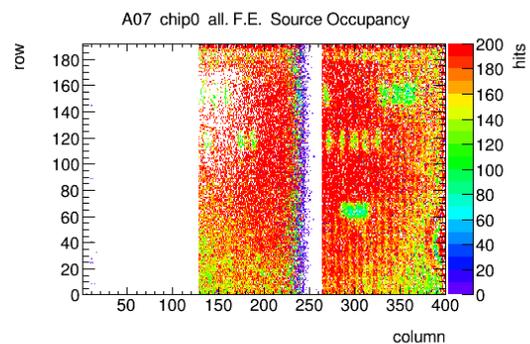
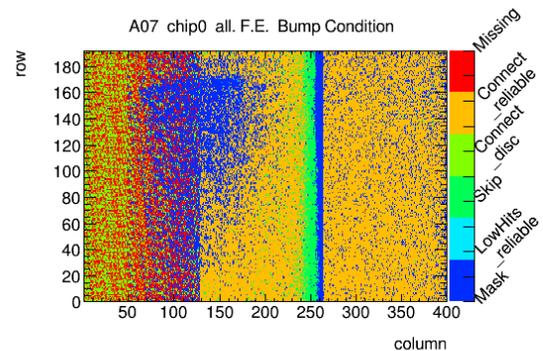
# 結論

- 読み出し試験を用いたバンプ状態判別法を確立し、要求される品質のフリップチップ製造が可能であることを明らかにした
  - クロストークの測定と荷電粒子に対する応答測定を相補的に用いた
  - 実機ではより安定した評価が行える（読み出しが行えない問題は実機で解決済のため）
- 形状測定によって、アセンブリ前のベアモジュールの剥がれの有無を判別できる
  - 標準偏差はバンプ剥がれを判別する良い指標といえる
  - たわみの和から剥がれのある位置を示唆できる可能性がある
  - 今後の方針：  
形状測定の結果と読み出し試験で求めた剥がれ位置の結果を比較し、より正確に剥がれ位置の対応を調べる  
検出器の端が少し剥がれている状況が予想されるので、それを検出できる手法を開発する

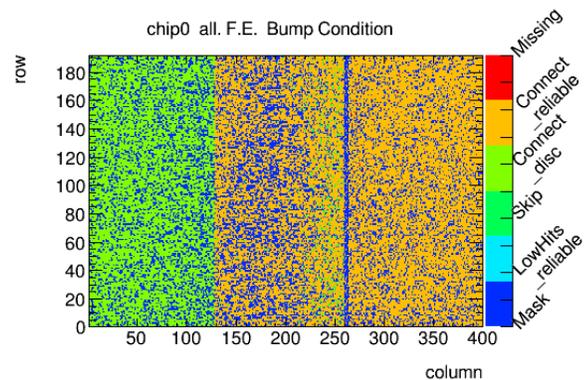
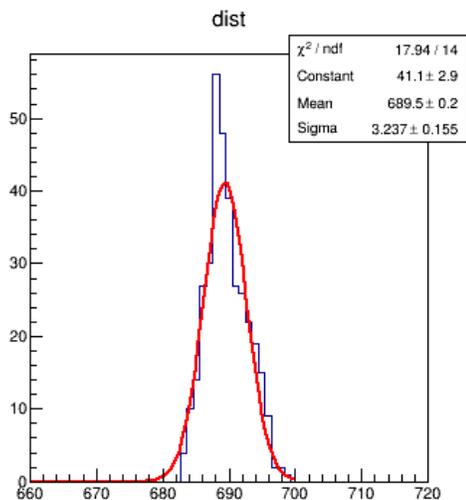
# Back up

# A07

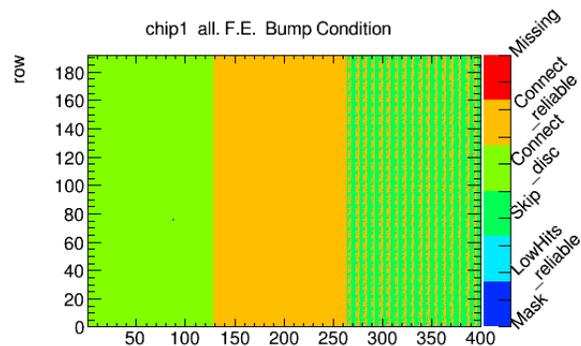
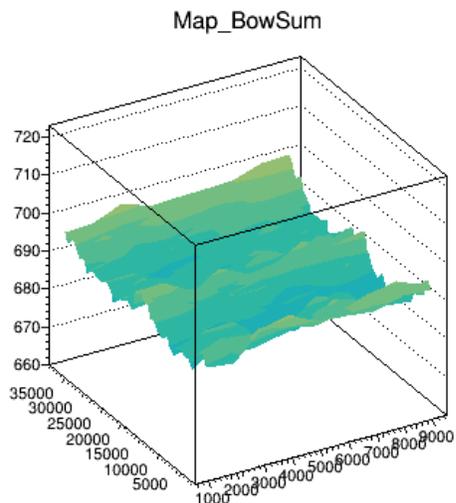
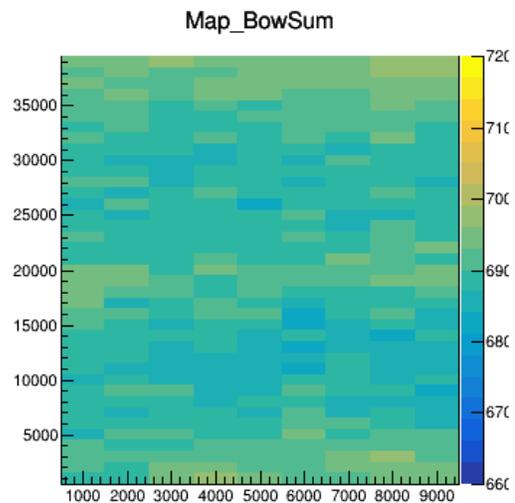
- ASICの異常により読めていない



# A16



Good Bump 99.87%

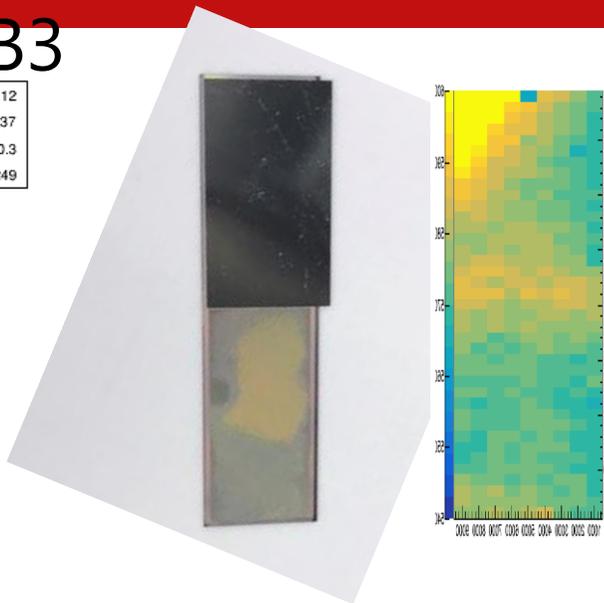
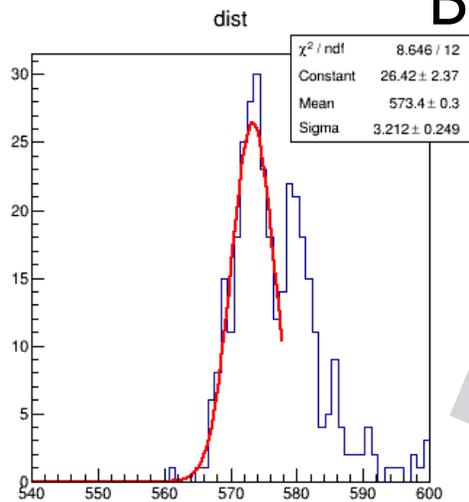


Good Bump 99.99%

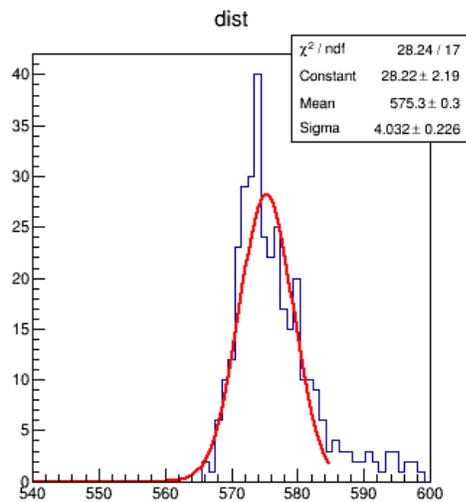
剥がれはなかった

# B3とB4

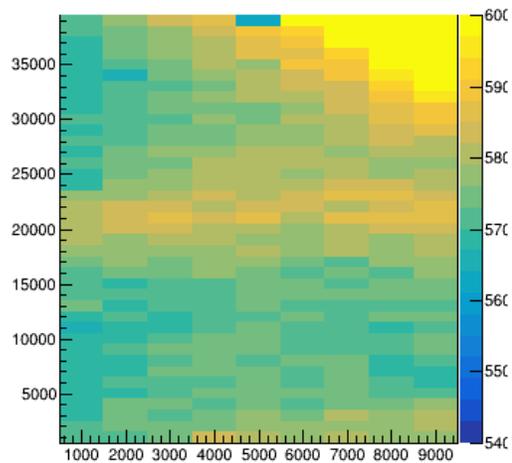
B3



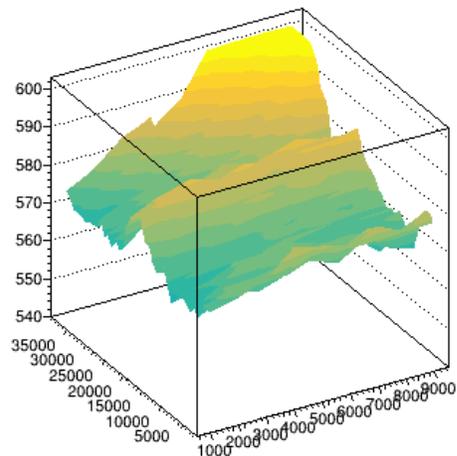
B4



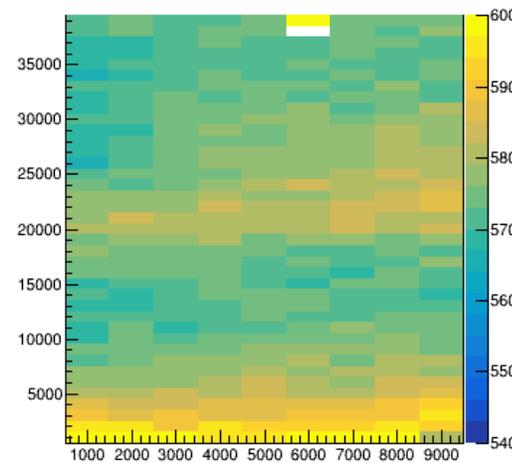
Map\_BowSum



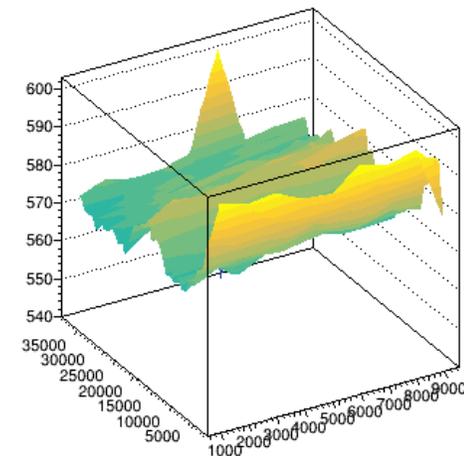
Map\_BowSum



Map\_BowSum



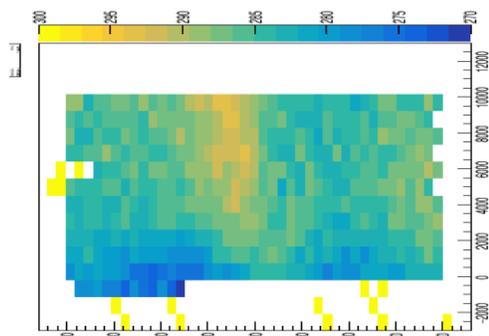
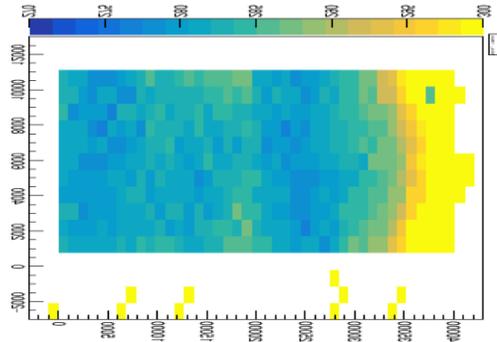
Map\_BowSum



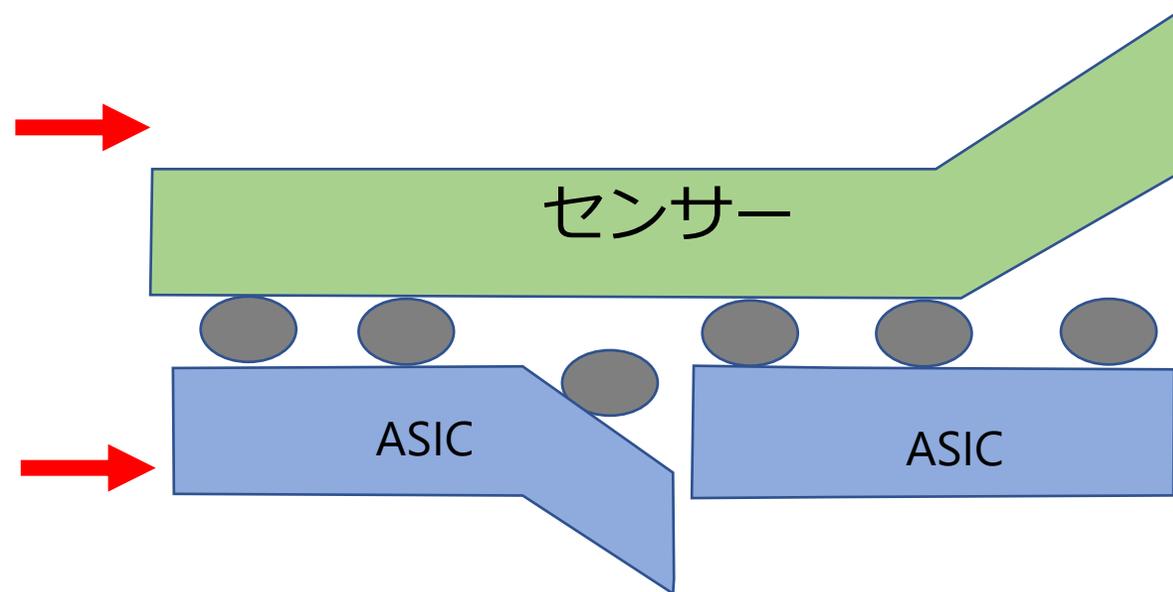
# B3の剥がれ予想

- メトロロジー結果からの予想

ASIC下るとき



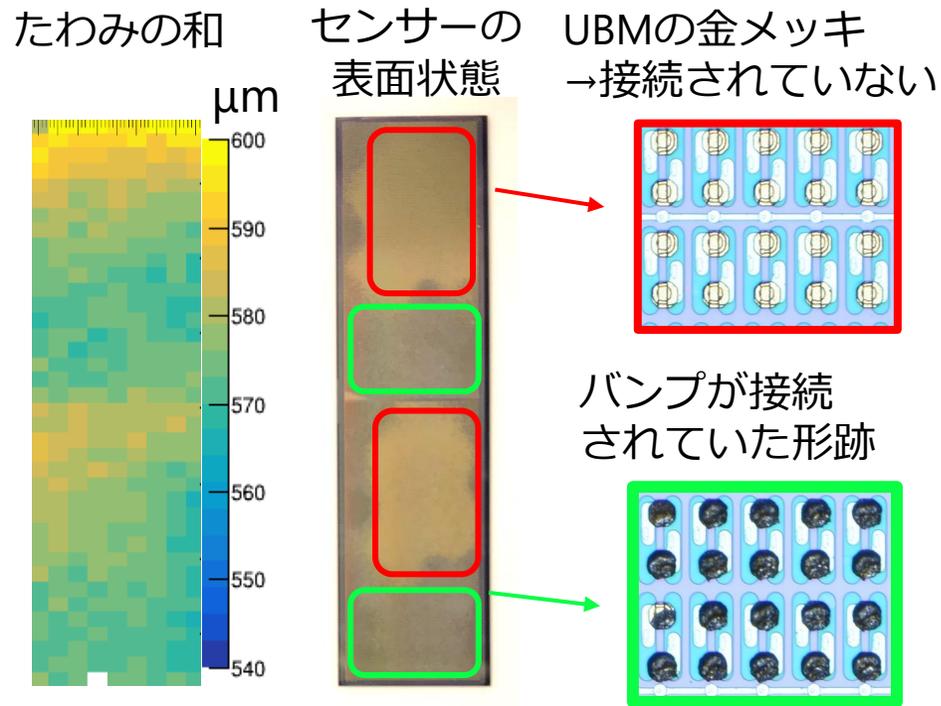
センサー下るとき



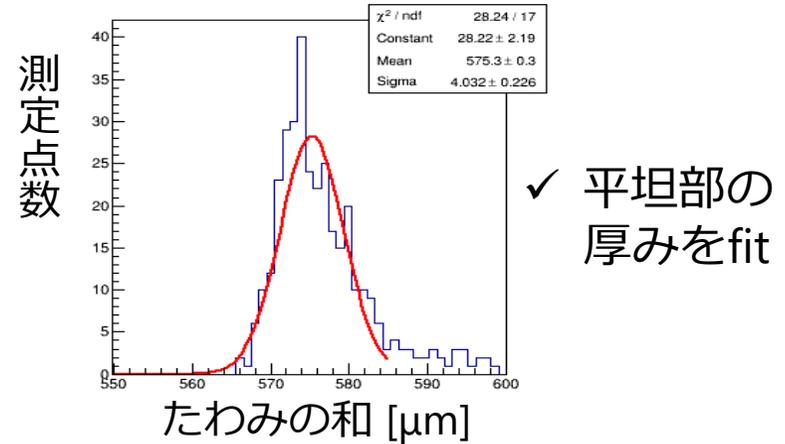
# 厚み測定を用いた剥がれの判別

## ▶ 厚み測定とセンサー表面状態の比較

センサー側を吸着した時のたわみと  
ASIC側を吸着した時のたわみの和



## ▶ 標準偏差による剥がれ判別



平坦部の平均の高さ(mean)から

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (z - \text{mean})^2} \quad \text{を求める}$$

	剥がれ無		剥がれ有	
検出器名	A16	A17	B3	B4
標準偏差 [μm]	3.05	3.19	9.46	6.91

厚み測定から剥がれ位置を示唆できる可能性がある

剥がれのある検出器は標準偏差が大きい

# 熱サイクル

## ➤目的

温度変化を与えてもバンプのはがれないフリップチップ品質であることを確かめる

ATLAS実験中に温度が一定に保てなくなる場合を想定  
温度変化によるバンプ接続状態の変化を確認する

## ➤手順

-40~60°Cのサイクル20回  
1サイクル：~1hour 40min

- 60°C→-40°C：1h
- -40°Cでの晒し時間：10min
- -40°C→60°C：~20min
- 60°Cでの晒し時間：10min

