

宇宙X線観測を目指したSOIピクセル検出器の センサー内における信号電荷損失の原因調査

志賀文哉

東京理科大学 創域理工 修士課程2年

藤田紗弓, 土居俊輝, 幸村孝由, 安齋俊晟, 佐藤光, 中谷萌乃(東京理科大学), 内田悠介(ISAS/JAXA), 倉知郁生(D&S), 萩野浩一 (東京大学),
鶴剛, 内田裕之, 松田真宗, 成田拓仁, 上林暉, 上村悠介 (京都大学), 森浩二, 武田彩希, 鈴木寛大, 西岡祐介, 淵田悠太, 吉田大雅,
角谷昂亮, 鎌田信壱, 黒木瑛介, 齊藤悠人, 佐々木悠任, 犬童真衣人, 坂本翼 (宮崎大学), 信川久実子, 栞野慧, 松井怜生 (近畿大学),
松橋裕洋, 佐藤璃輝 (東京大学), 深沢泰司, 須田祐介, 橋爪大樹 (広島大学), 田中孝明 (甲南大学), 上ノ町水紀 (東京科学大学), 新井康夫(KEK)

SOIPIX量子イメージング研究会2025 石川県政記念 しいのき迎賓館@金沢 12/1~12/2

X線SOIピクセル検出器“XRPIX”

*Silicon On Insulator
2/14

SOI*技術で、Siのセンサー層とCMOS回路層が一体となったピクセル型検出器

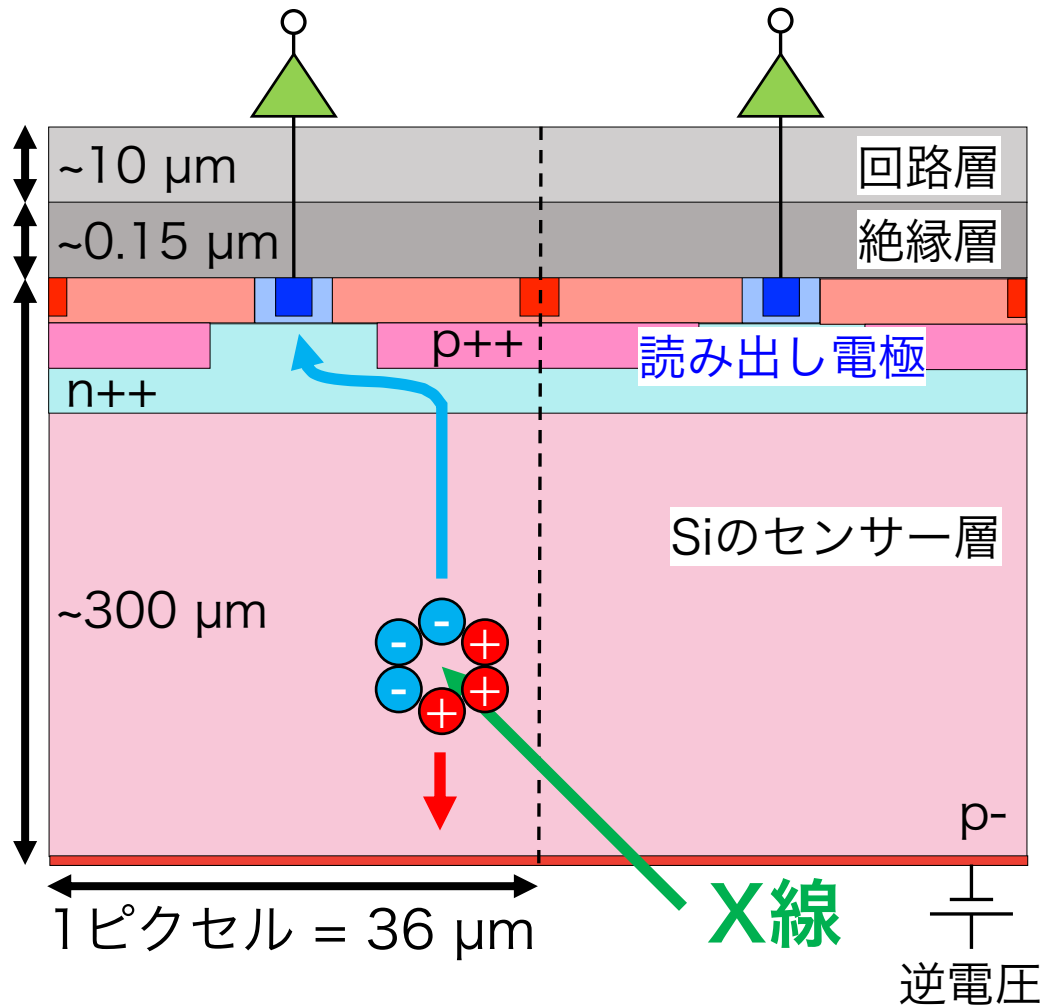


図1. XRPIXの断面図

- ✓ 300 μmの厚い空乏層
→ **0.7-20 keV**のX線が検出可能
- ✓ 各ピクセルにトリガー回路
→ **時間分解能10 μ秒以下**
- ✓ X線CCDに匹敵する分光性能を目指す

XRISM衛星搭載X線CCDの
エネルギー分解能は
FWHM~170 eV@6.4 keV

(Uchida et al. 2025, PASJ)

次世代X線衛星への搭載を目指して開発中

XRPIXの分光性能のさらなる向上への課題

3/14

X線の照射面や照射位置によって、X線スペクトルのピーク位置にずれが生じる。

先行研究：光電検出器のピクセル境界に照射した際に、

- ✓ 特定の1ピクセルにのみ信号が検出される
- ✓ ピクセル電極が信号を正確に検出する

何らかの理由で
ピーク位置がシフトする

裏面照射した際に、

何らかの理由で
ピーク位置がシフトする

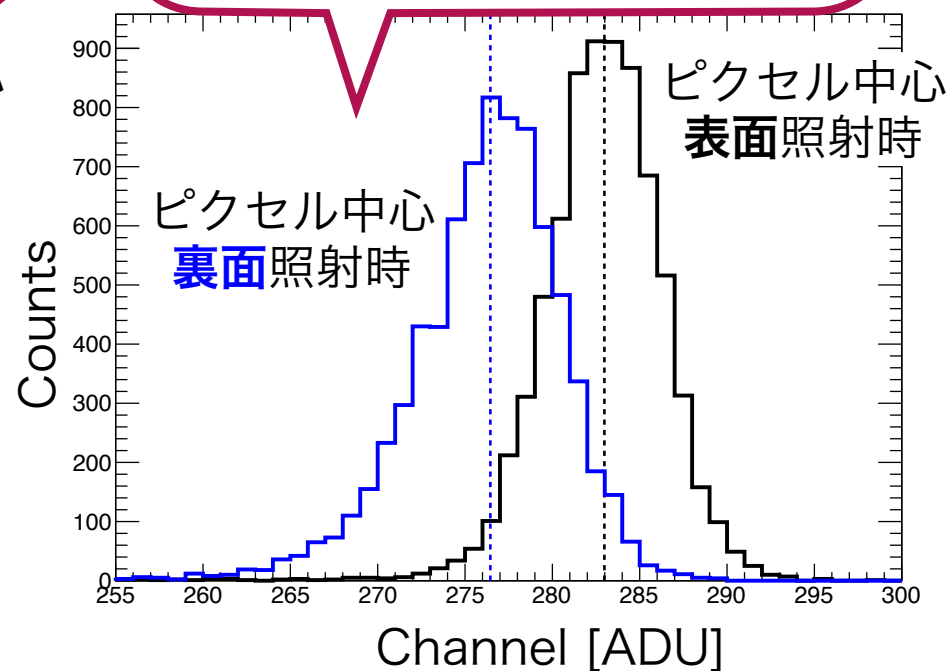
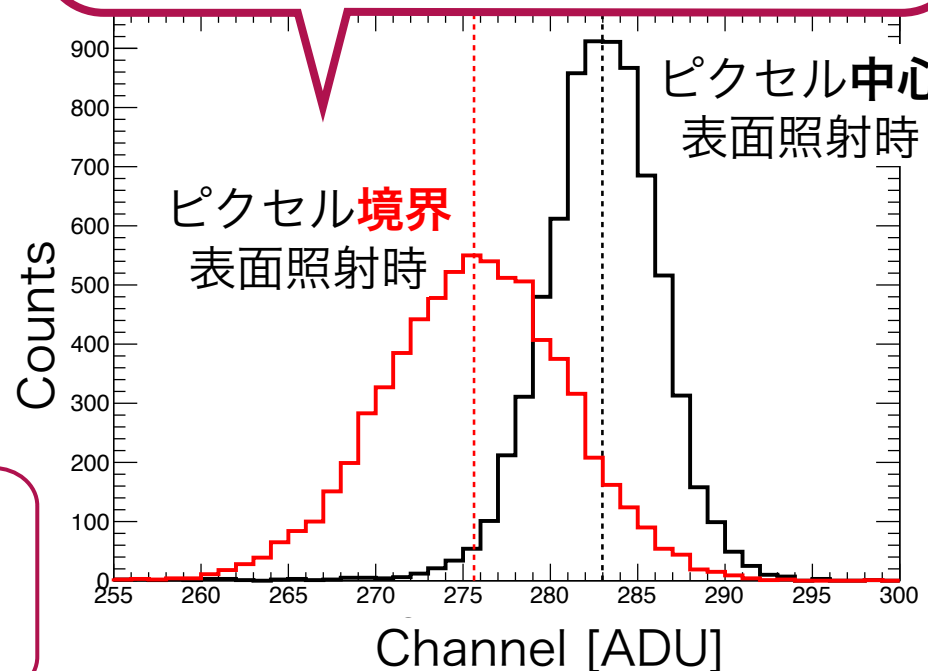
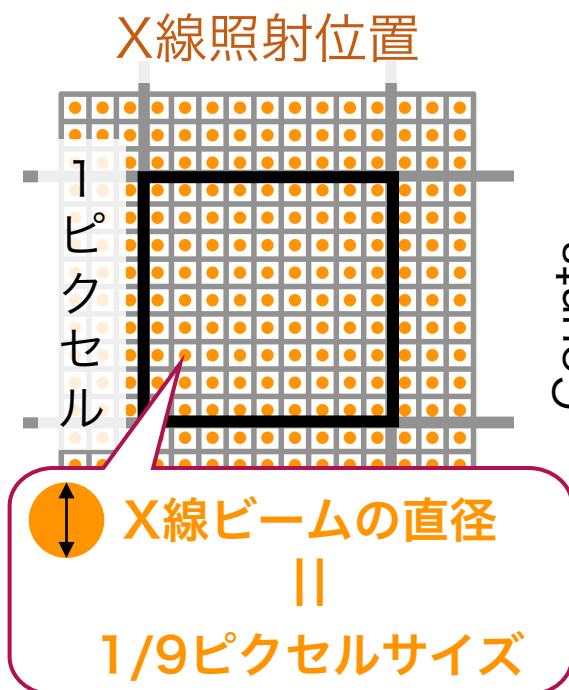


図2. 照射位置ごとのX線スペクトル

X線

<課題>

- ピクセル**境界**に照射した際
- **裏面**照射した際

に、何らかの理由で**ピークシフト**が生じる。

これらを解決することは**分光性能の向上**につながる。

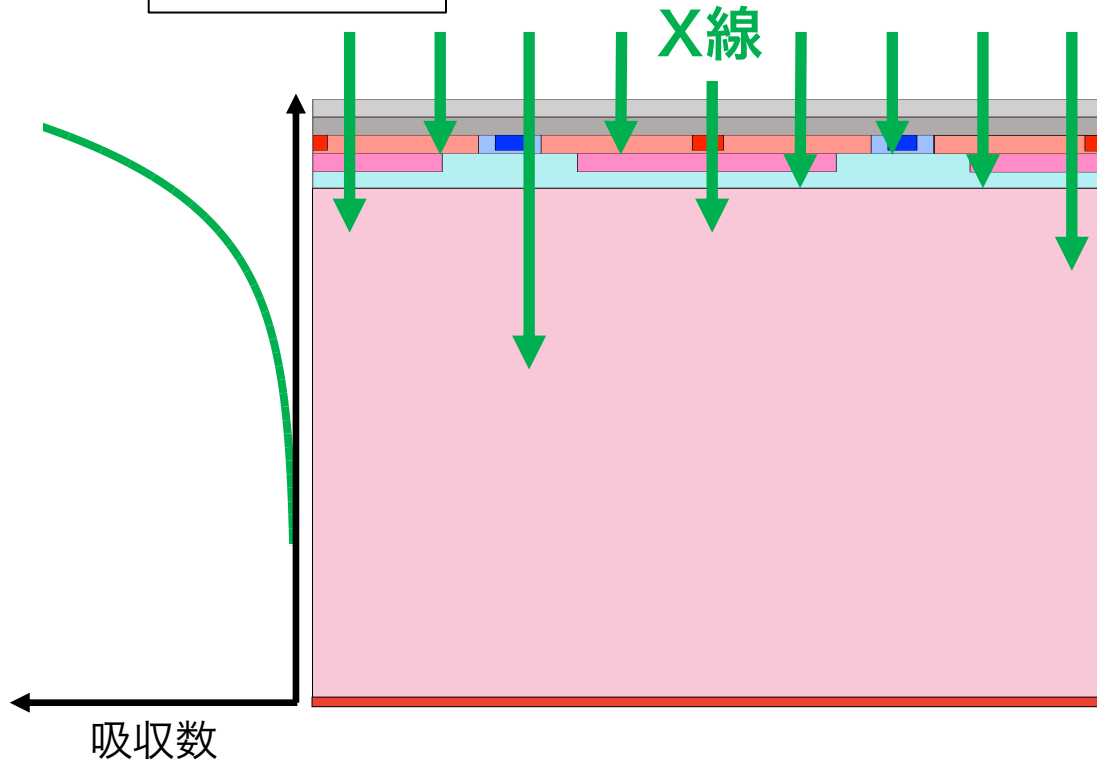
<本研究>

裏面側やピクセル境界でのピークシフトの原因を解明する。

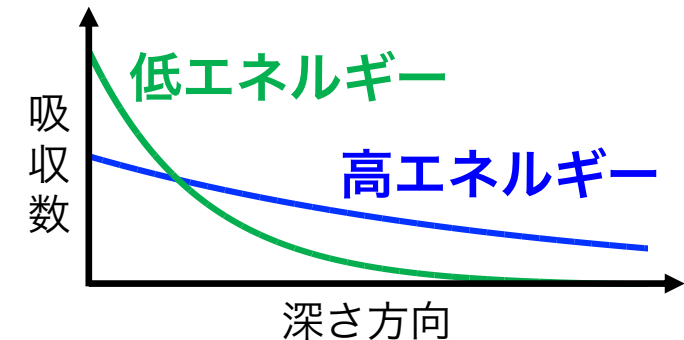
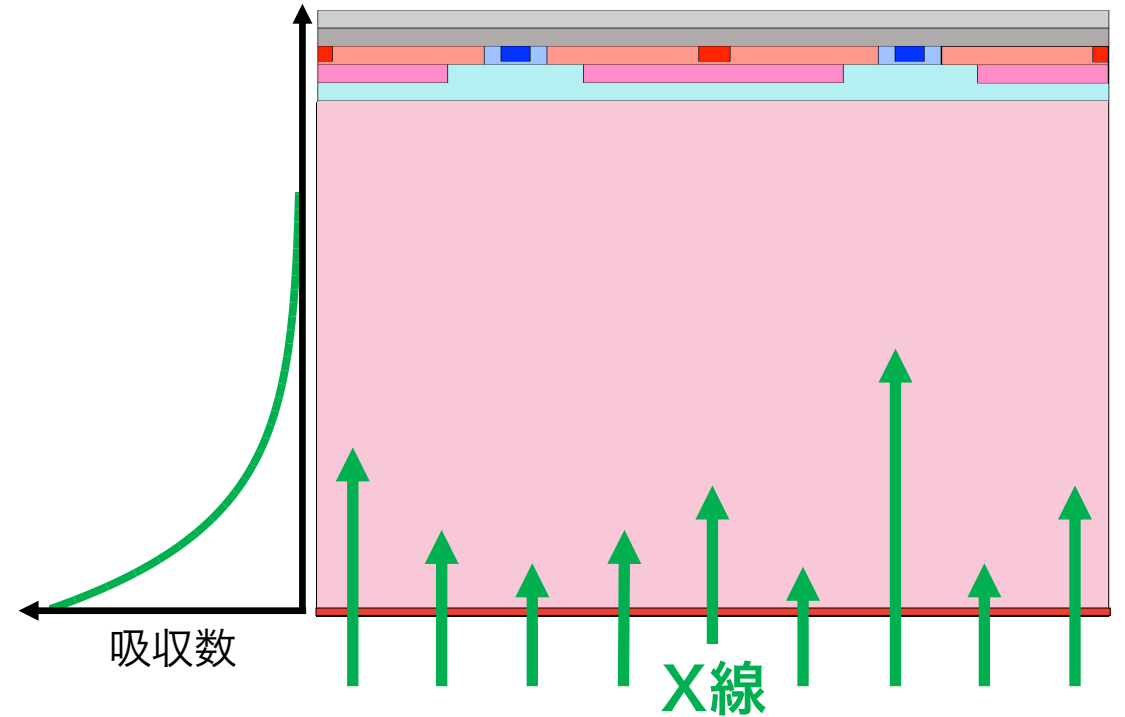
照射面による光電吸収深さの違い

5/14

表面照射



裏面照射



- ✓ 表面照射と裏面照射では、X線の**光電吸収深さの分布**が異なる。
- ✓ エネルギーが高くと、入射面から平均的に**深い領域**まで進める。
- ✓ 軟X線の検出効率を考えると、**回路層がない裏面照射型**が良い。

ピークシフトのエネルギー依存性検証実験

6/14

- ✓ **複数のエネルギー**で、表面・裏面照射時のピーク位置の違いを比較した。
- ✓ 完全空乏化に十分な逆電圧を印加した。
- ✓ 電荷の拡散が1ピクセル内で収まったと判定されたイベントのみを解析に使用した。

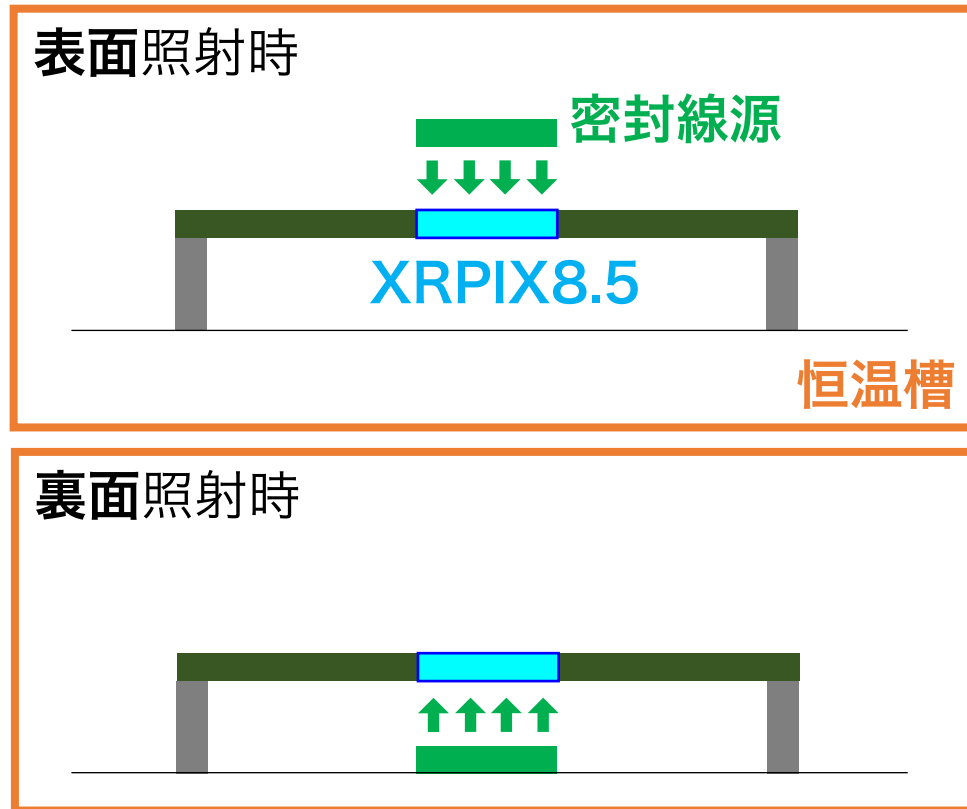


表1. 測定条件

エネルギー	5.9, 8.0, 13.9, 17.8 keV
温度	-15.0 °C
逆電圧	-300 V
照射方向	表面・裏面照射
読み出しモード	フレーム全面

図3. 実験の概略図

結果：ピークシフトのエネルギー依存性

7/14

表面照射

裏面照射

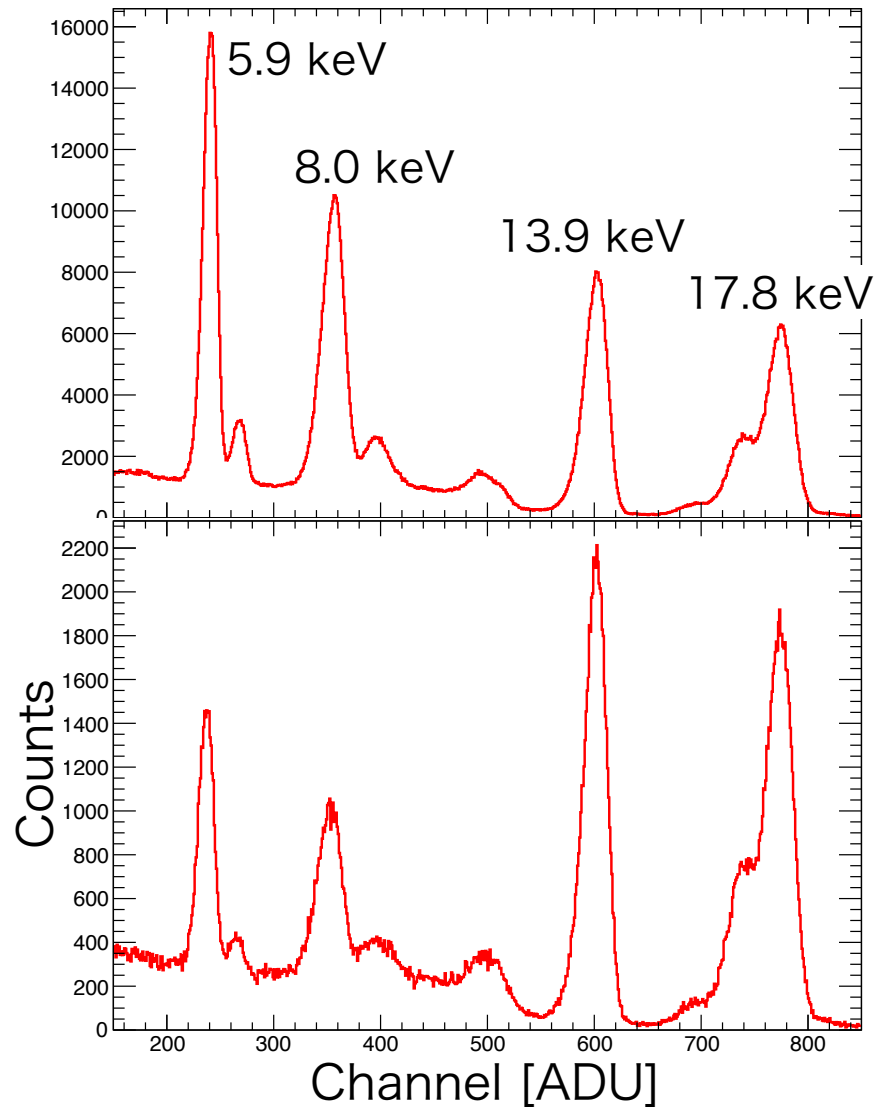


図4. 取得したX線スペクトル

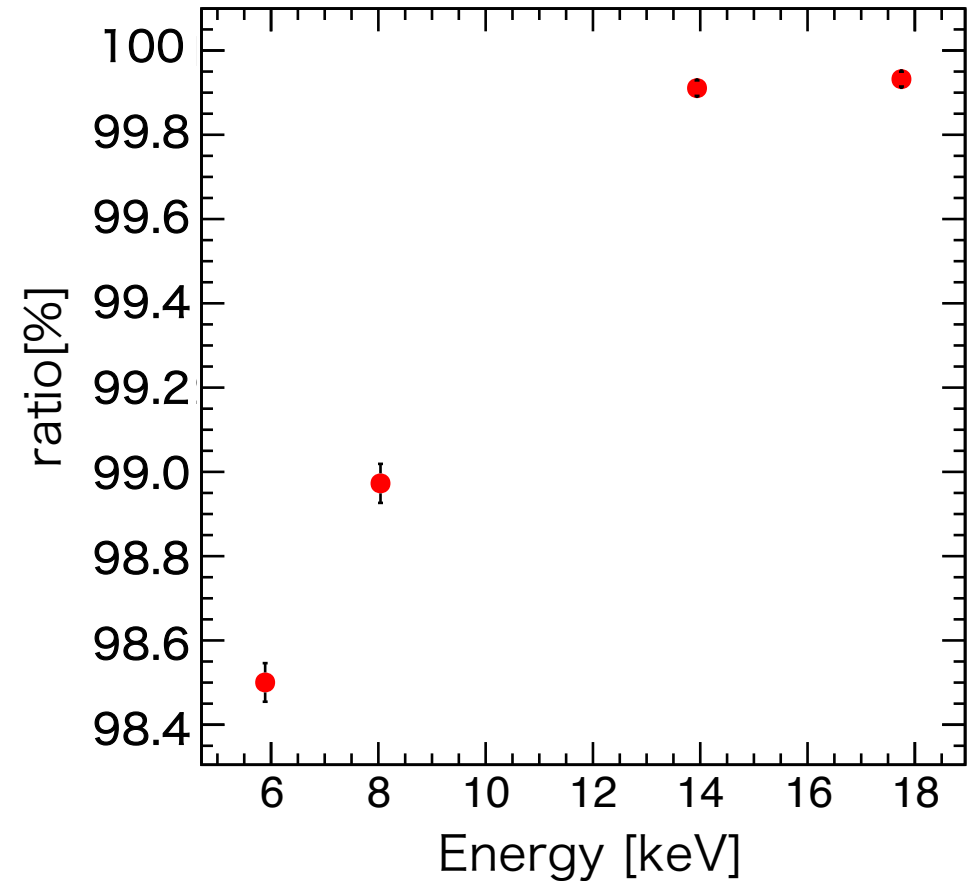


図5. ピーク位置の比 (=裏面照射/表面照射)

✓ 低エネルギーでピークシフト率が高く、
5.9 keVでは裏面照射で~1.5%の差がある。

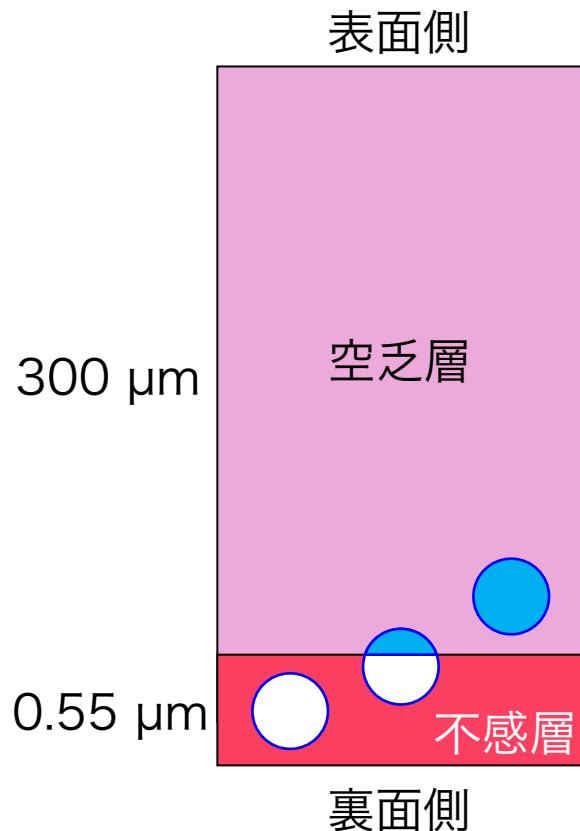
裏面不感層での電荷損失の影響

8/14

以下の方法で、裏面不感層で電荷の一部を失う影響を見積もった。

1. 指数分布に従う乱数を用いて、光電吸収深さを出す。
2. 光電吸収深さで、電荷の回収率を変えて、スペクトルを作成。

電子の飛程の経験式を用いて、
 $\sigma = 0.0818 \times (5.9 \text{ keV})^{1.75} / 2$
 $\sim 0.2 \mu\text{m}$

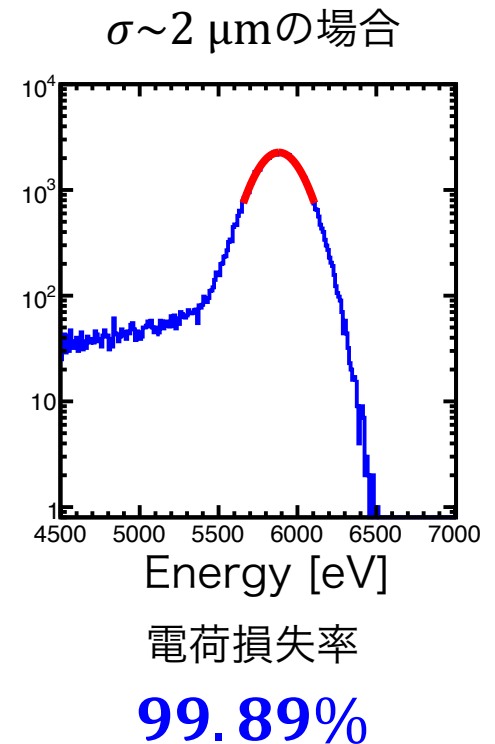
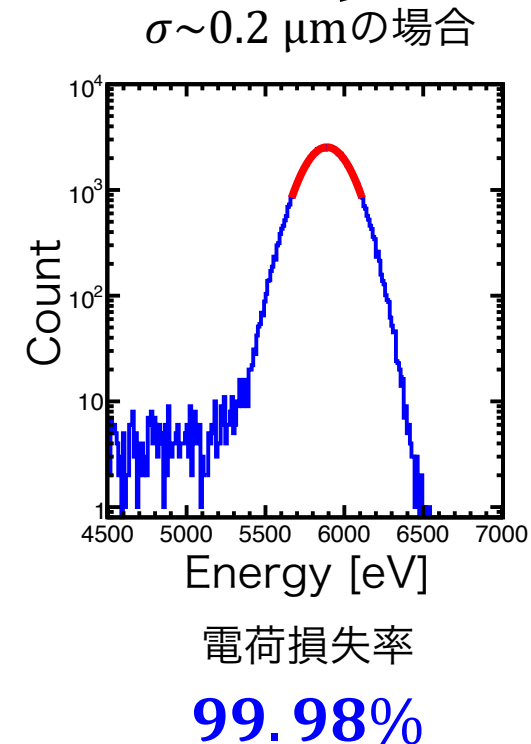


＜吸収位置ごとの回収率＞

- 空乏層→100%回収
 - 不感層→0%回収
 - 境界付近→空乏層に入った分
- 5.9 keVで電荷雲の広がり
はガウス分布を仮定。



スペクトルを作成

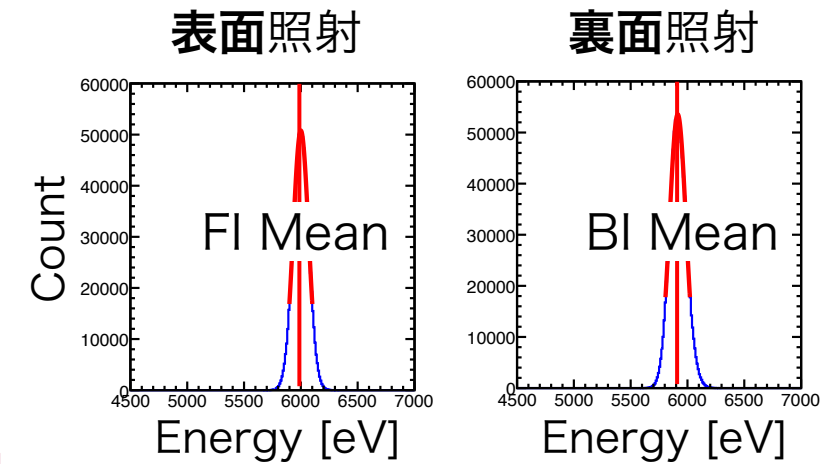
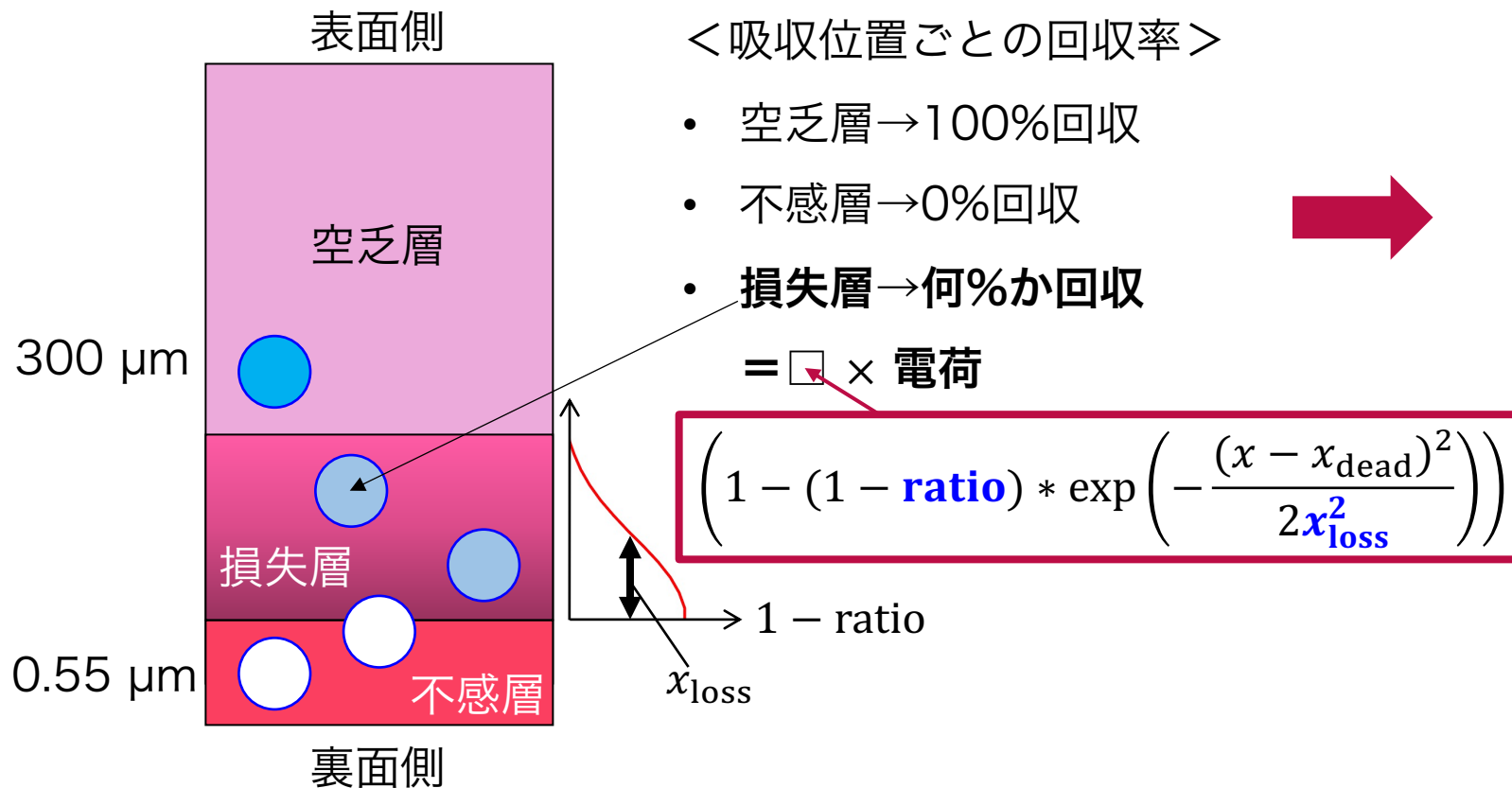


✓ 裏面不感層では失ったとしても**~0.1%**と考えられる。

裏面側で電荷損失をしやすい領域の影響

9/14

前ページと同様の方法で、**裏面側に電荷損失層があると仮定した場合**に、
実験結果を説明し得る損失層の厚さ、損失率を見積もった。



(x_{loss} , ratio)を変えて、

$\frac{\text{BI Mean}}{\text{FI Mean}}$ の実測とモデルの差を
計算した。

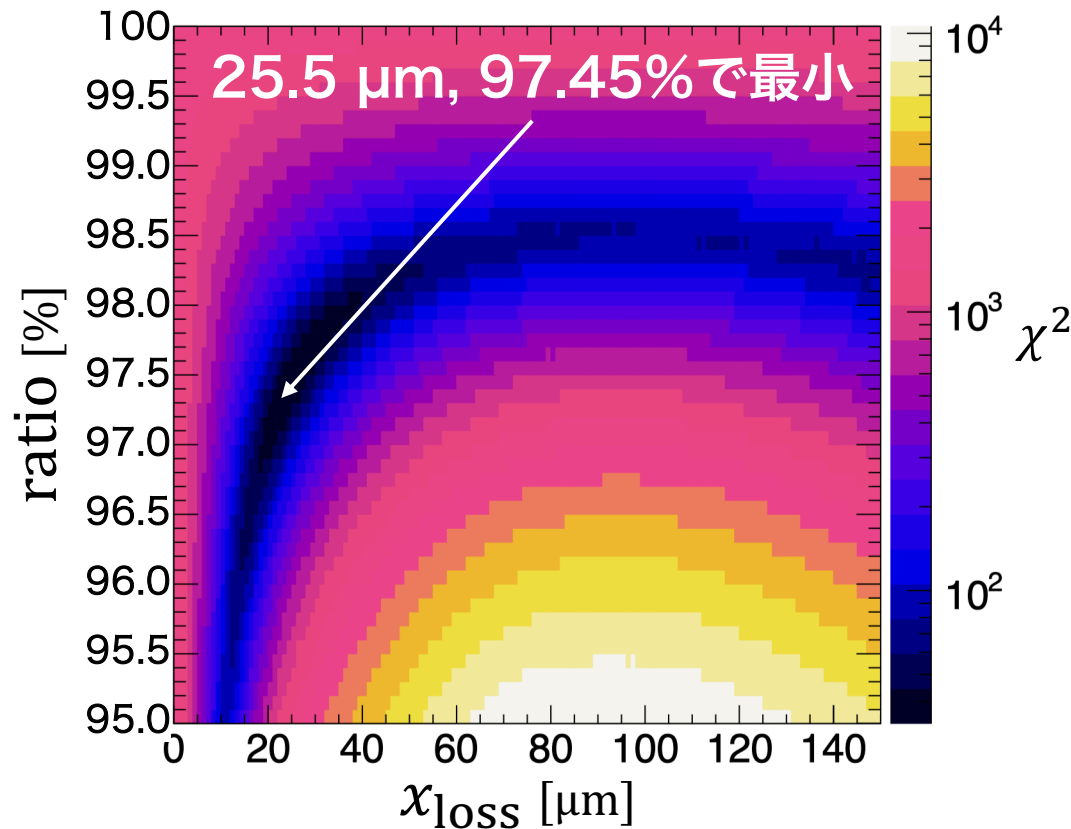


図7. 各パラメータセットでの χ^2

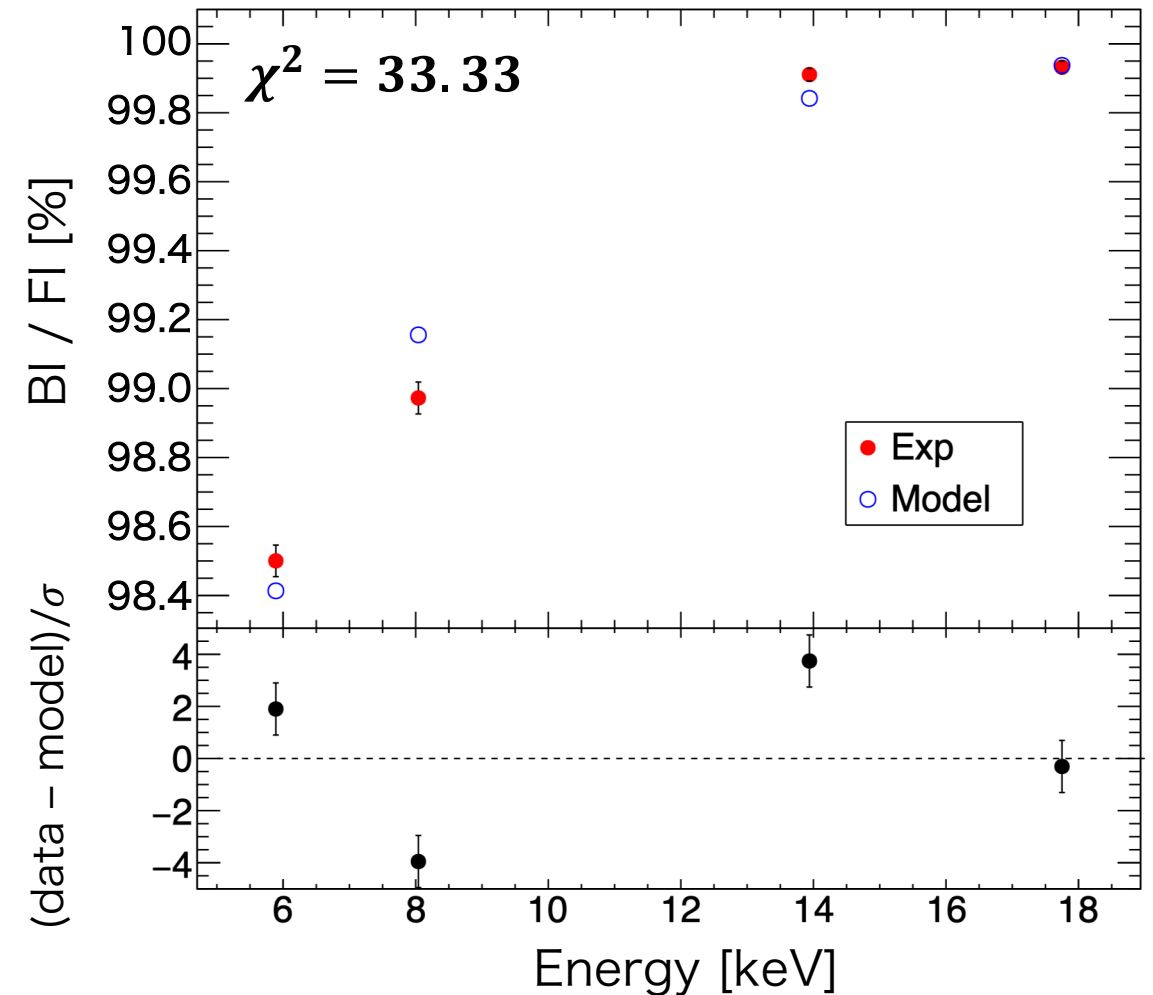


図8. χ^2 が最小になるパラメータでの実測とモデルの比較

✓ 仮定したモデルだと、このパラメータセットのときに**実測とモデルが1番近くなる。**

暗電流の逆電圧依存性検証実験

11/14

- ✓ ピコアンメータに流れる暗電流が**バルク中のトラップによる電流**と仮定し、逆電圧を徐々に上げて、空乏層を広げたときの暗電流の増え方から**トラップ密度の深さ方向の分布**を見積もる。

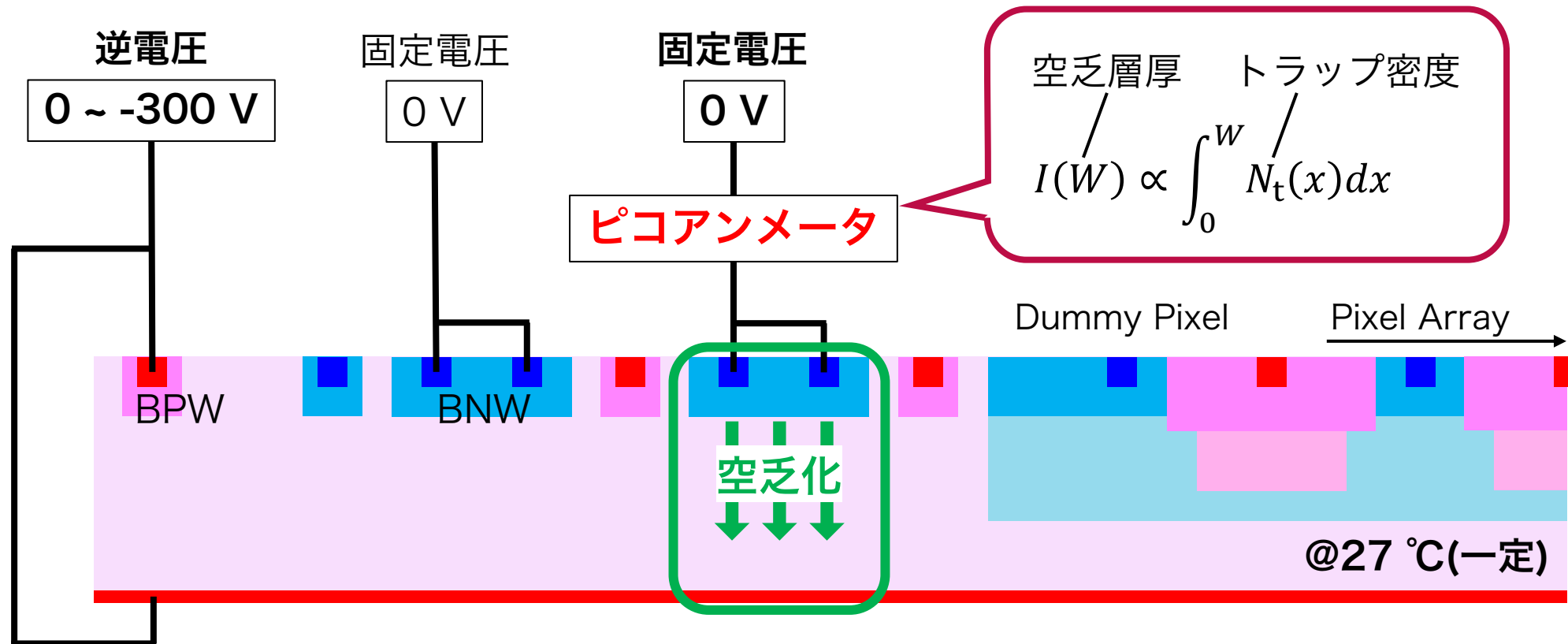


図9. 暗電流測定の概略図

結果：暗電流の逆電圧依存性

12/14

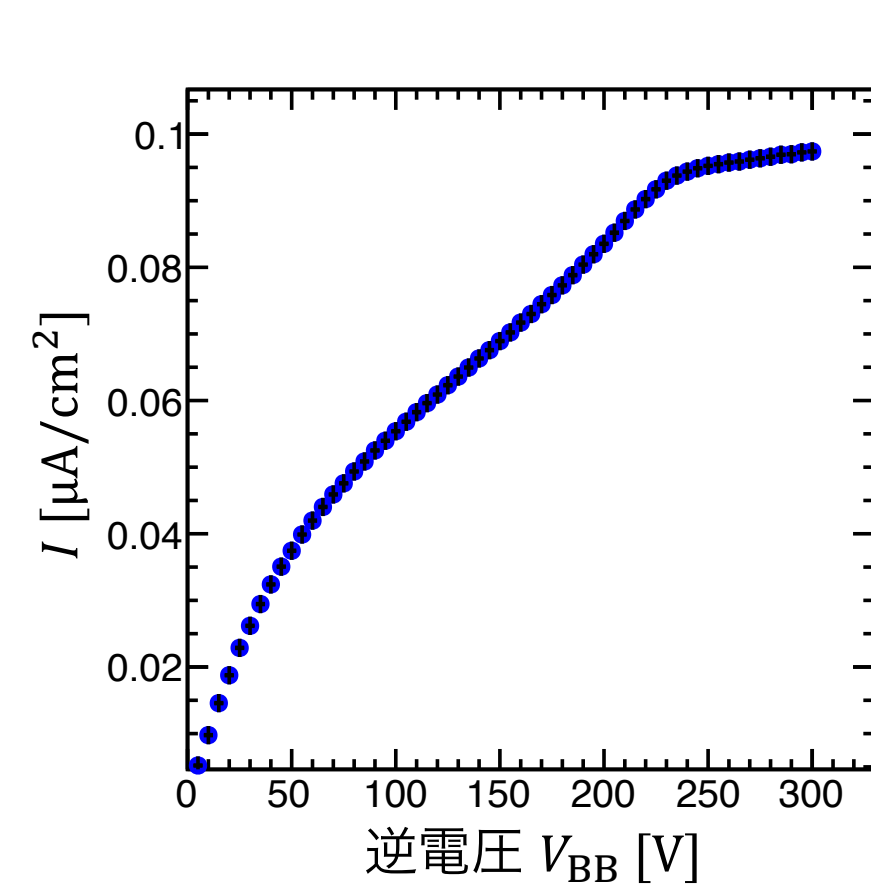
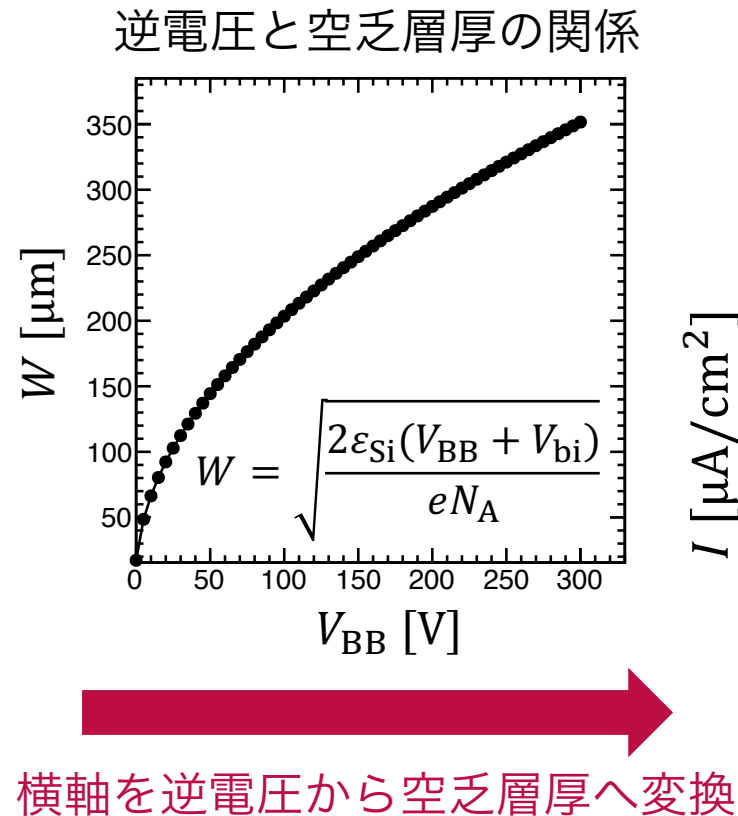


図10. 暗電流の測定結果



横軸を逆電圧から空乏層厚へ変換

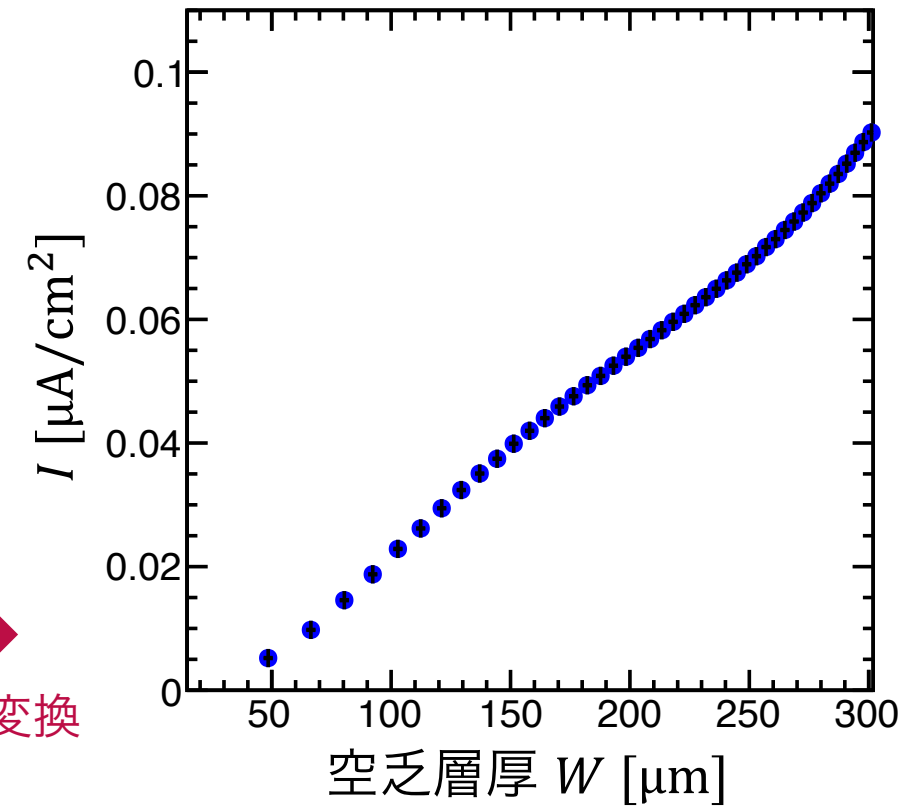


図11. 横軸変換後の暗電流の測定結果

$I(W) = Aen_i\sigma_t v_{th} \int_0^W N_t(x)dx$ に従うと仮定し、 N_t を算出する。

- 面積 A
- 真性キャリア密度 n_i
- 電子の熱速度 v_{th}
- 素電荷 e
- トラップ捕獲断面積 σ_t

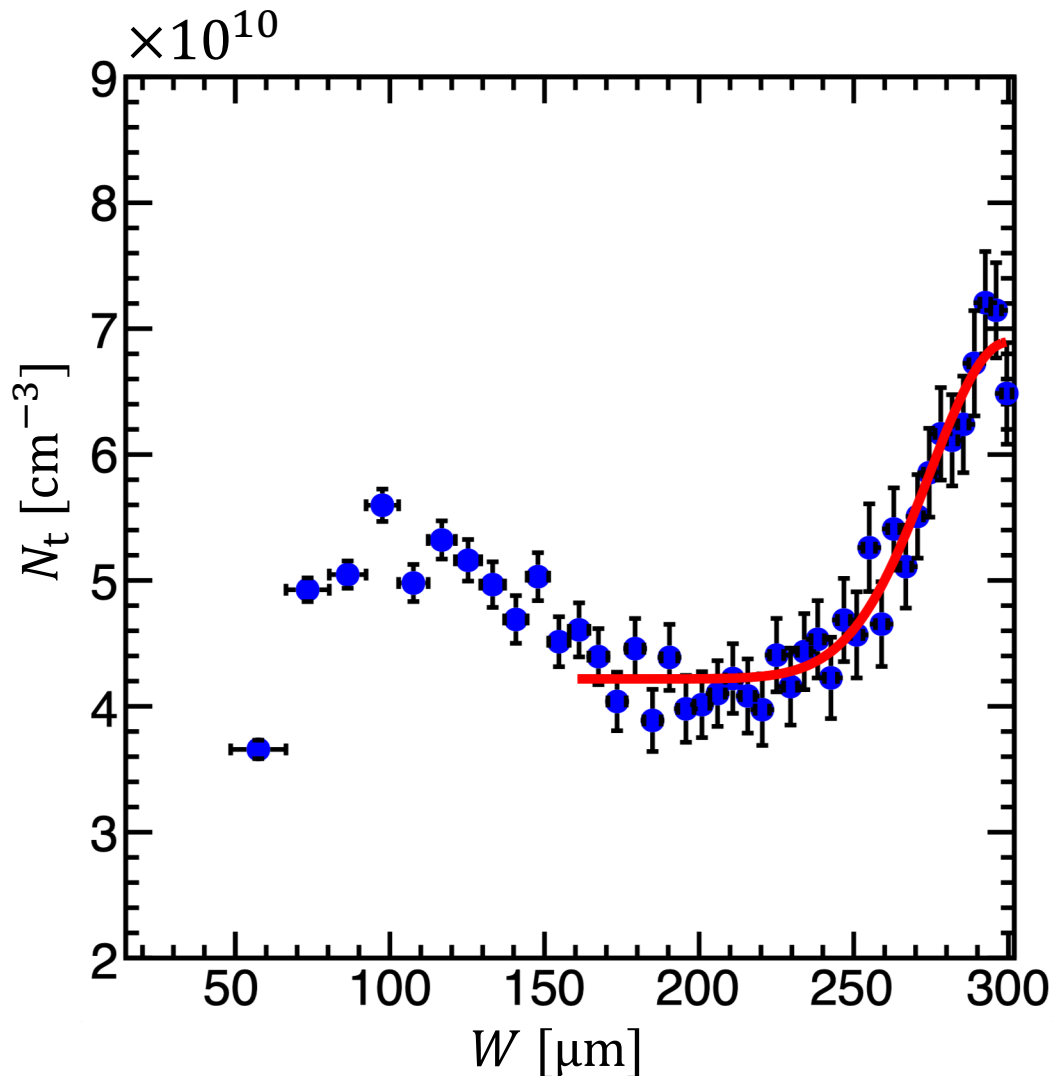


図12. 算出した深さ方向のトラップ密度分布

✓ 裏面側に**トラップ密度が高い領域がある**と考えられる。

✓ 算出した $N_t(x)$ を

$$N_t(x) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(300\mu\text{m} - x)^2}{4Dt}\right) + N_{t0}$$

で近似すると、

- $\sqrt{2Dt} = 25.6 \pm 2.2 \mu\text{m}$
- $N_{t0} = (4.2 \pm 0.07) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

今後：

このトラップ密度分布で、ピークシフトのエネルギー依存性の実験結果をどれくらい再現できるか確認する。

- 次世代X線天文衛星への搭載を目指すXRPIXは、裏面側やピクセル境界でX線が光電吸収されると、ピーク位置が低エネルギー側にシフトするという課題がある。
- X線の入射位置によって、求められるエネルギーの値にズレが生じることは、エネルギー分解能の低下を招く。
→ピークシフトの原因を明らかにすることは、分光性能の向上につながる。
- ピークシフトのエネルギー依存性を評価し、軟X線ではピークシフト率が高い結果となった。
- 暗電流の逆電圧依存性測定から、空乏層内のトラップ密度分布を見積もった結果、裏面側にトラップ密度の高い領域が存在する可能性があることがわかった。
- ピークシフトは、この領域で電荷の一部が捕獲されるためだと推測している。