

コーデッドマスク型ガンマカメラによる 放射線源の可視化と定量

©定本真明^A、根本龍男^A、久保信^A、
松浦貢^A、山口明則^A、米徳大輔^B

A:クリアパルス株式会社、B:金沢大学



目次

1. 会社紹介
2. 福島を除染とガンマカメラの要求
3. ガンマカメラ各種方式の解説と選定
 - ピンホール方式
 - コンプトン方式
 - コーデッドマスク方式
4. クリアパルス製ガンマカメラ
5. 実測結果
 - 感度評価
 - 定量評価
 - 実地測定例
6. アプリケーション提案

クリアパルス社紹介



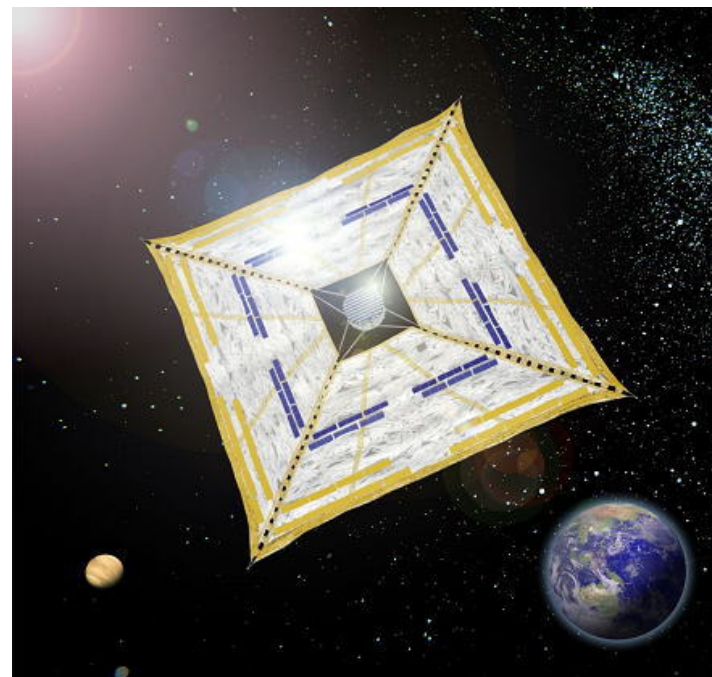
放射線計測に関するアナログ回路の設計・製造
人工衛星・探査機の搭載機器の設計・製造

主要取引先

- JAXA（宇宙航空研究開発機構）
- JAEA（日本原子力研究開発機構）
- SPring-8
- 東京大学
- 京都大学
- 東北大学 など



Mr.Gamma
(空間線量計)



IKAROS探査機©JAXA

放射線事業で培った技術を福島復興に活かしたい

福島除染の現状

◎除染基準◎

0.23 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m を多くの自治体が基準に採用。

◎測定方法◎

基本的には数十mをメッシュ状に測定。

雨垂れなど、ホットスポットが

予想される場合のみ追加測定。

⇒ ホットスポットの測定には時間がかかる。

◎除染方法◎

地面は重機にて一面剥ぎ取り。

⇒非汚染箇所まで剥ぎ取ることは、

廃棄物の増加・作業時間の長期化を招く。



詳細な汚染分布を把握し、効率的な除染が必要 = **ガンマカメラの需要**

除染用途ガンマカメラの重要性能

◎福島で要求されるガンマカメラの性能◎

- ・ 除染基準値 $0.23 \mu\text{Sv/h}$ @ 1m 以上の汚染を発見可能
- ・ 短時間で広範囲を詳細に測定可能
- ・ 運搬可能 ※人が持ち運ぶ必要はない

可搬な**超高感度ガンマカメラ**が要求されている

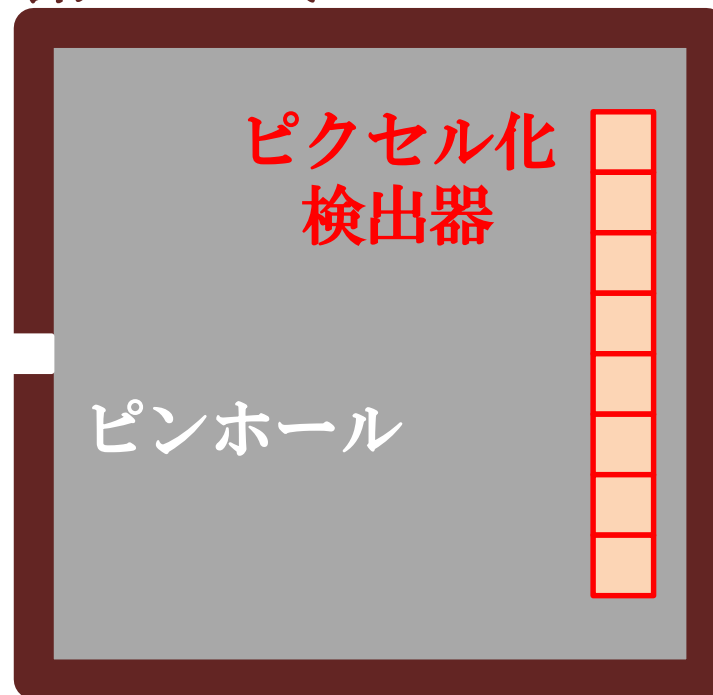
それに加えて、単純な構造・原理の方が開発製造保守コストの低減となる。

開発着手

ピンホール方式の構造

ピンホール方式

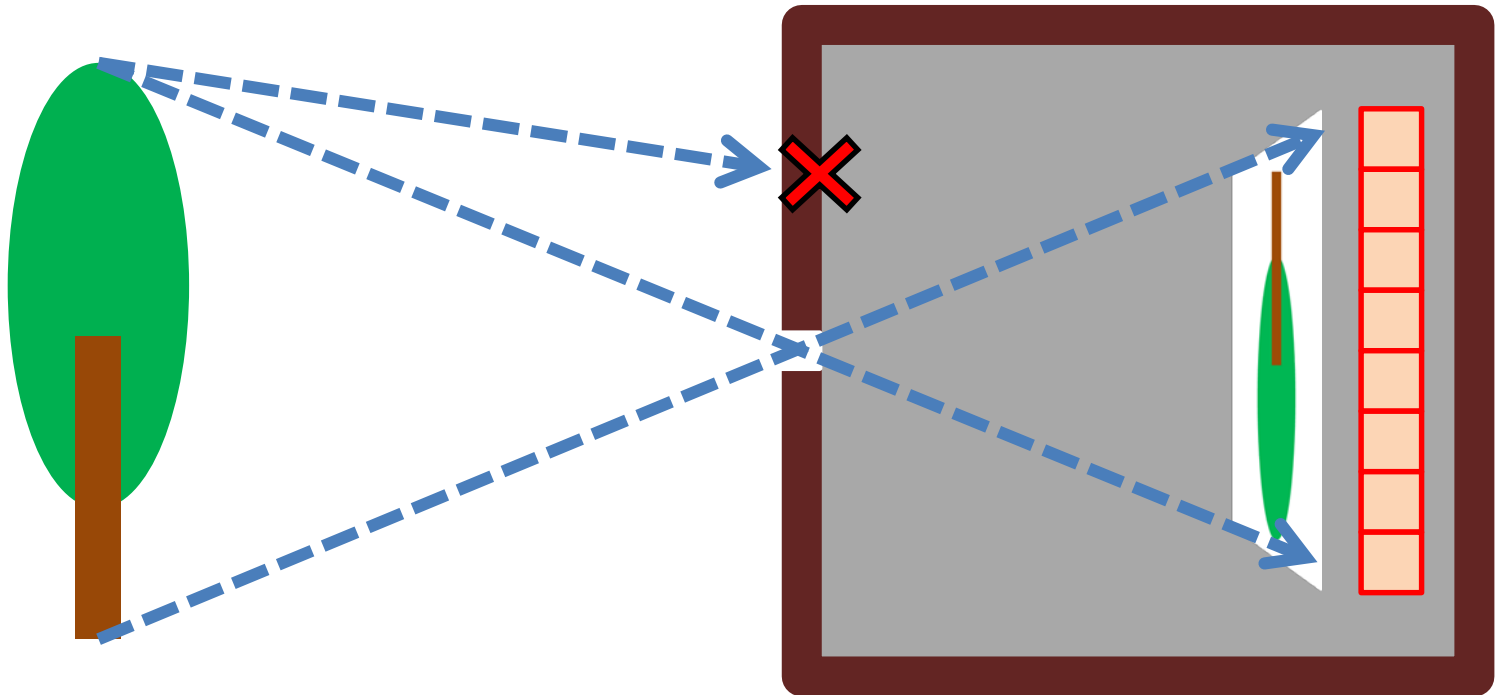
鉛シールド



ピンホールを空けた鉛のシールドの中に、ピクセル化された検出器を配置。非常に簡単な構造の為、開発・保守が容易。

ピンホール方式の原理

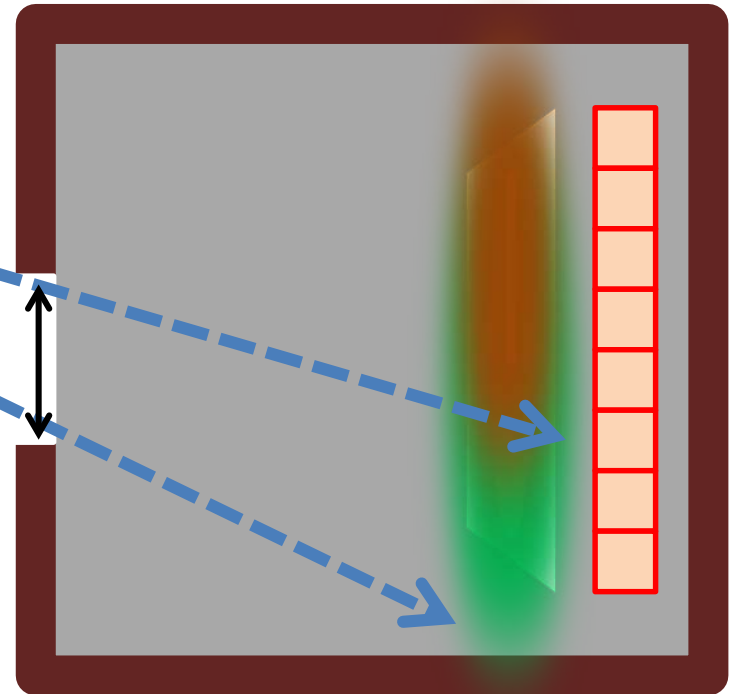
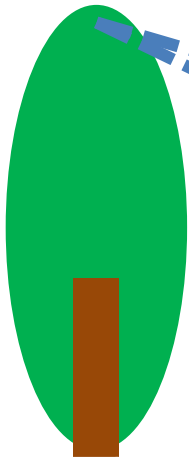
ピンホール方式



ピンホールを通ったガンマ線のみ検出部に到達。
検出部には反転した放射線強度マップが映し出される。
ピクセル毎のカウント数がそのまま強度であるため、**処理が非常に簡単**。

ピンホール方式の感度と視野角

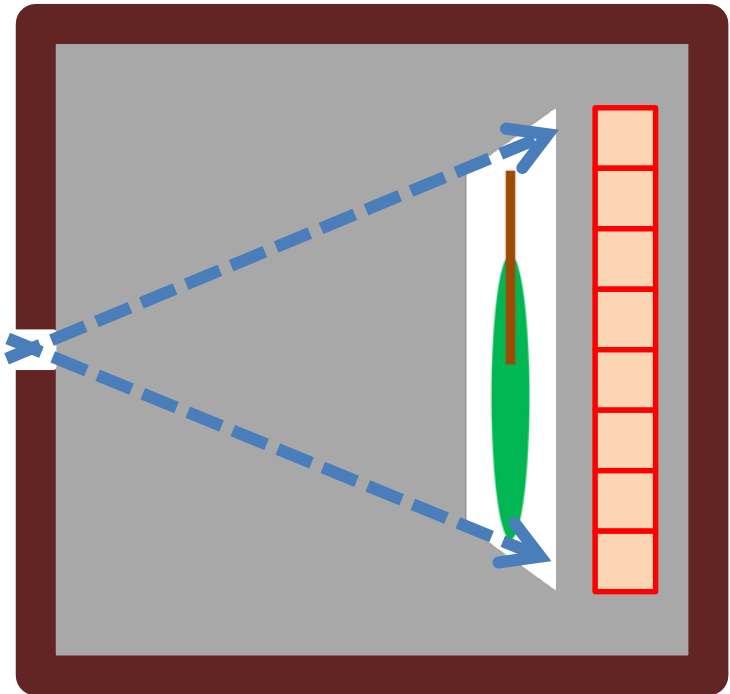
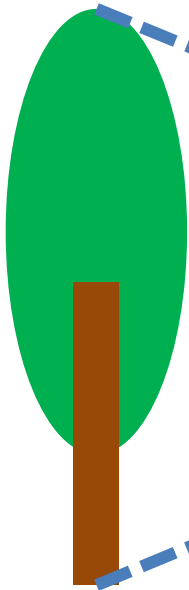
ピンホール方式



項目	決定用素
感度	ピンホールサイズ
位置分解能	ピンホールサイズ 検出器ピクセルピッチ
視野角	検出器サイズ

ピンホール方式まとめ

ピンホール方式

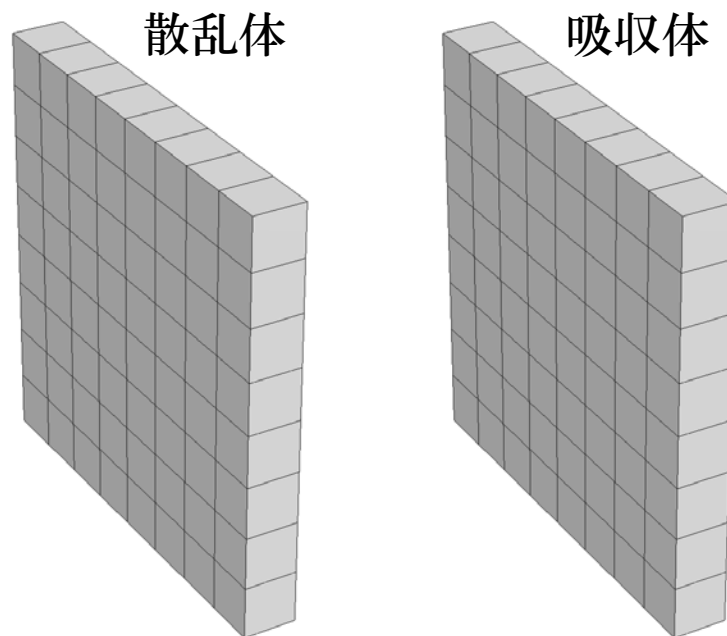


実空間への再構成が容易。
構造も簡単な為、開発・保守も容易。

感度が低い。
ピンホール大 ⇒ 感度高、位置分解能悪
ピンホール小 ⇒ 感度低、位置分解能良

コンプトン方式の構造

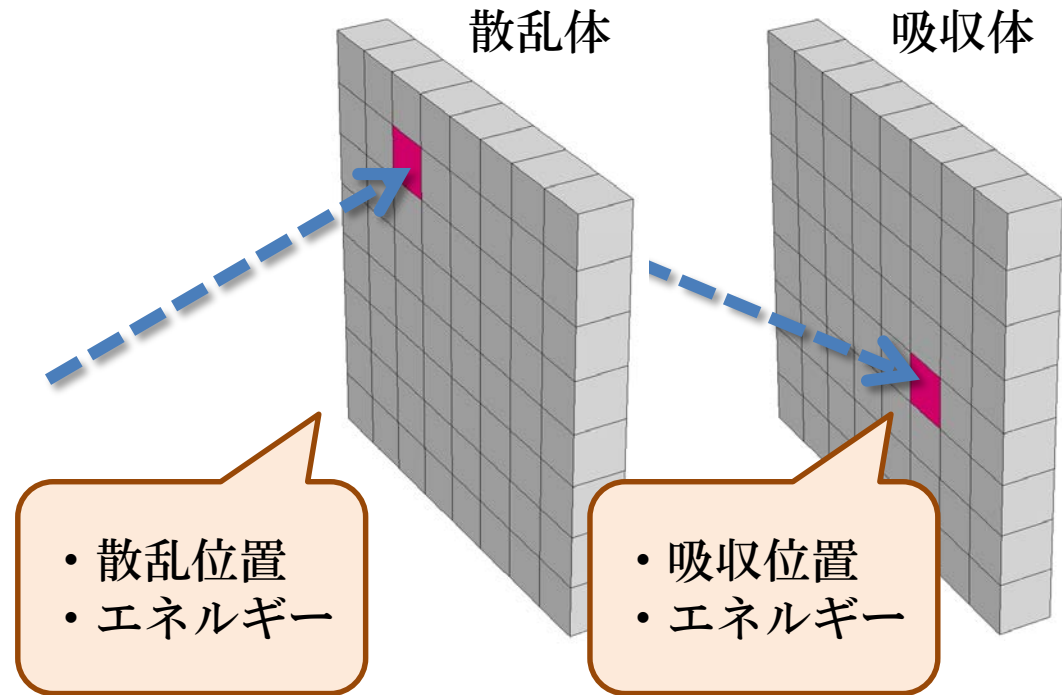
コンプトン方式



ピクセル化した検出器を二層（以上）配置し、一方を散乱体、他方を吸収体とする。鉛シールドは不要。

コンプトン方式の原理

コンプトン方式



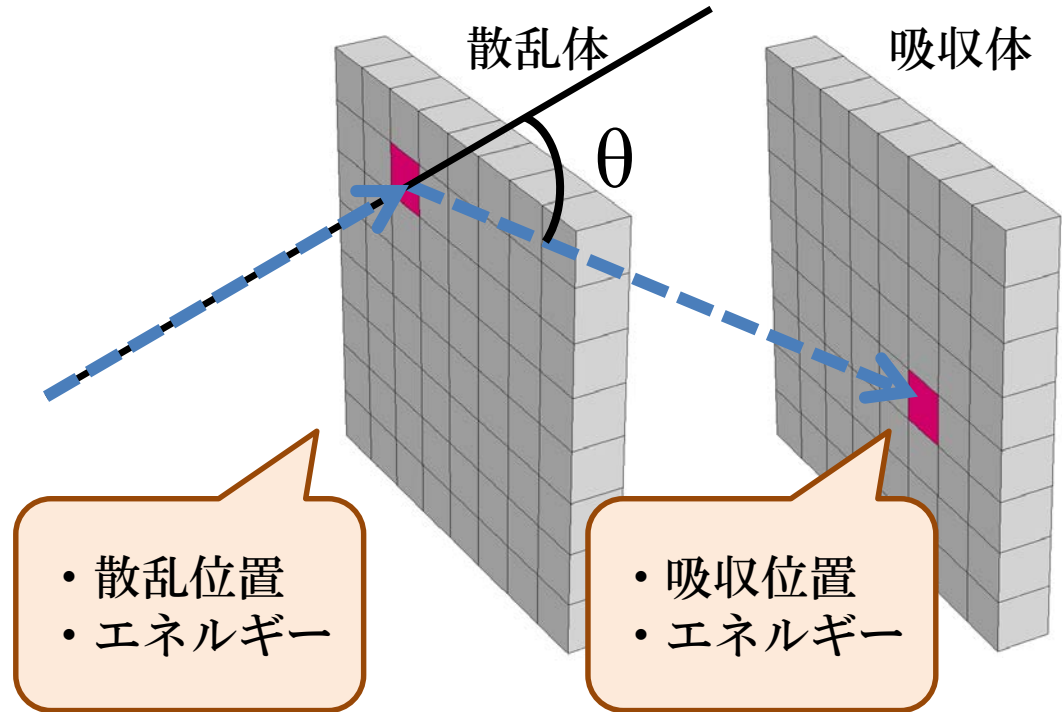
散乱体にてコンプトン散乱し、かつ吸収体にて光電吸収したイベントを抽出。
散乱位置、吸収位置、各位置での付与エネルギーを取得。
上記条件に当てはまれば、**ガンマ線の入射方向は選ばない。**

コンプトン方式の原理

コンプトン方式

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$= \frac{E_\gamma}{1 + 1.96 E_\gamma (1 - \cos \theta)}$$



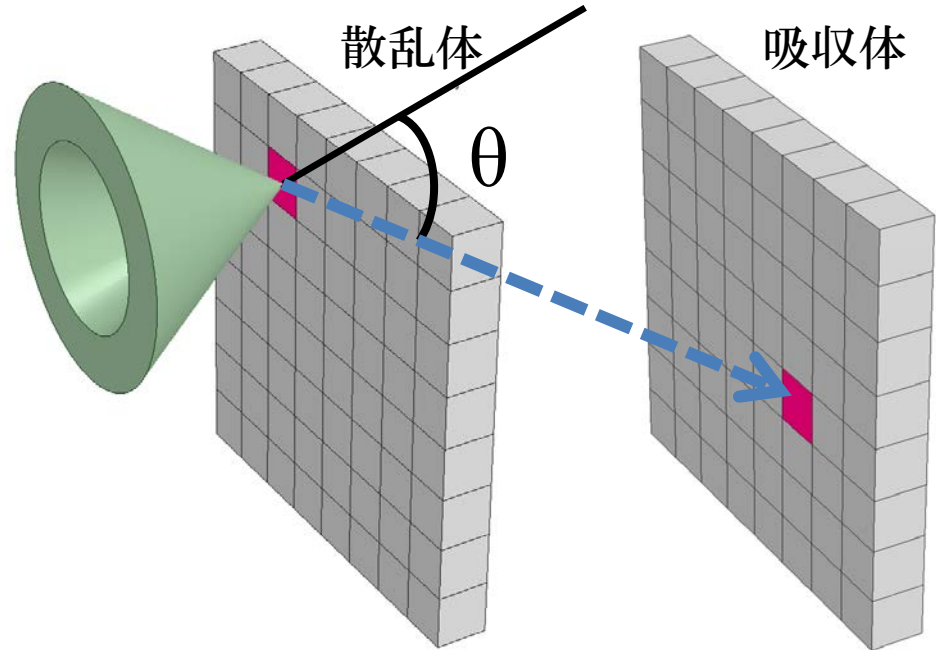
コンプトン散乱では、散乱角度 θ に依存したエネルギーが生じる。
両位置でのエネルギーから逆算し、散乱角度を算出。

コンプトン方式の原理

コンプトン方式

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$= \frac{E_\gamma}{1 + 1.96 E_\gamma (1 - \cos \theta)}$$



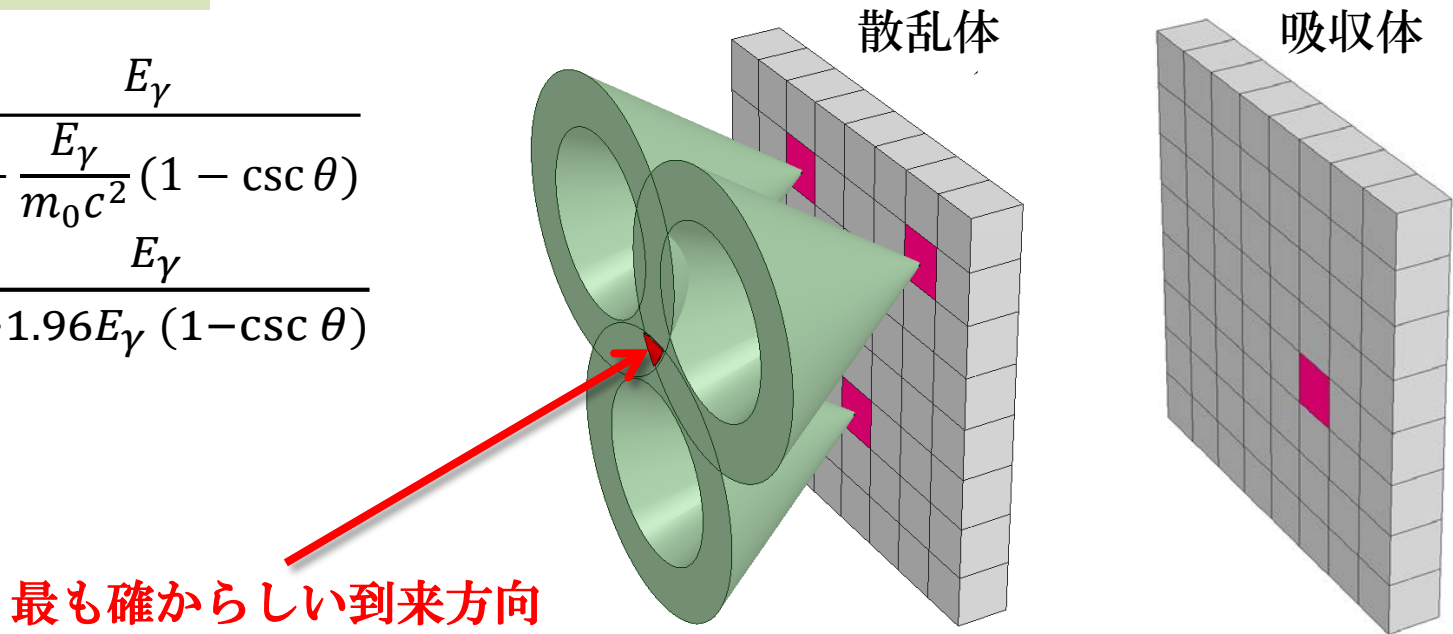
散乱角度は散乱方向を軸に360度とり得る為、
 ガンマ線の到来方向はコーン上のいずれかの場所として得られる。
 ⇒ 1イベントでは特定不可。

コンプトン方式の原理

コンプトン方式

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

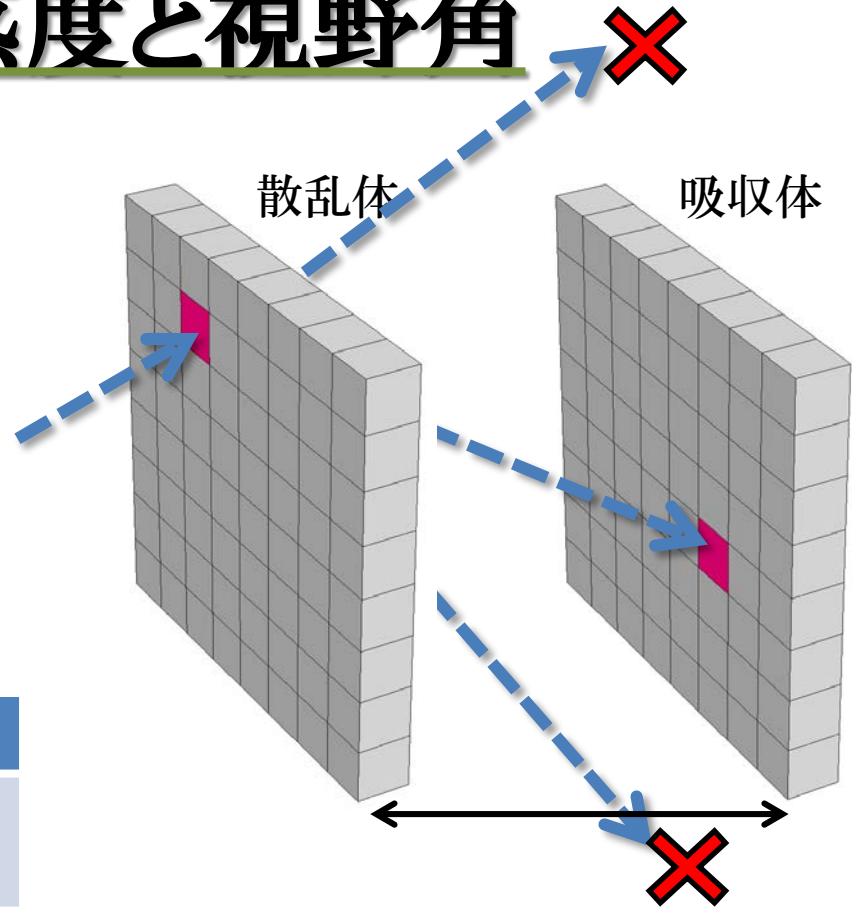
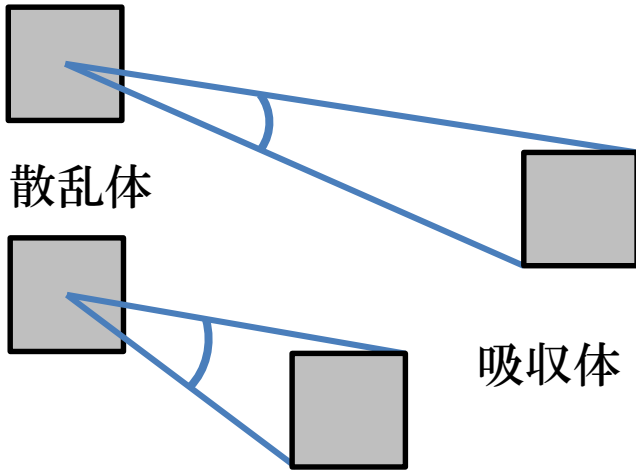
$$= \frac{E_\gamma}{1 + 1.96 E_\gamma (1 - \cos \theta)}$$



多数のイベントを解析し、コンプトンコーンを重ね合わせることにより、ガンマ線の到来方向を特定する。

コンプトン方式の感度と視野角

コンプトン方式



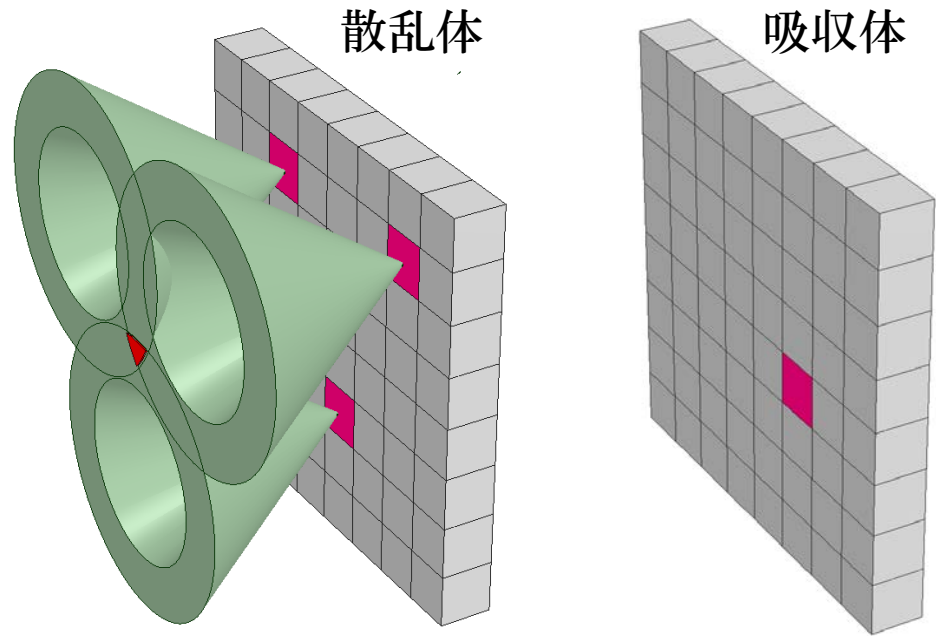
項目	決定用素
感度	散乱体の組成 吸収体の位置
位置分解能	散乱角度の不定性
視野角	吸収体の位置

コンプトン方式のまとめ

コンプトン方式

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$= \frac{E_\gamma}{1 + 1.96 E_\gamma (1 - \cos \theta)}$$



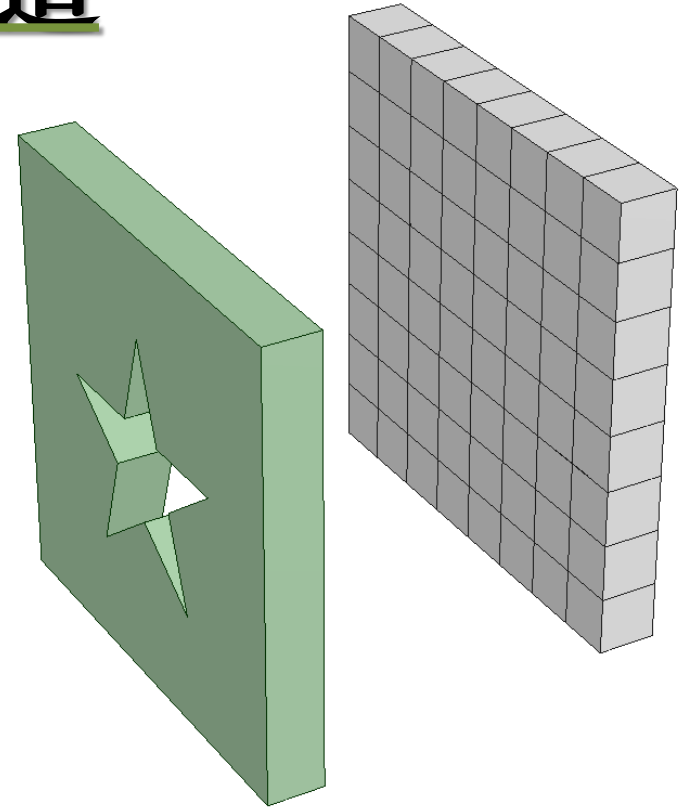
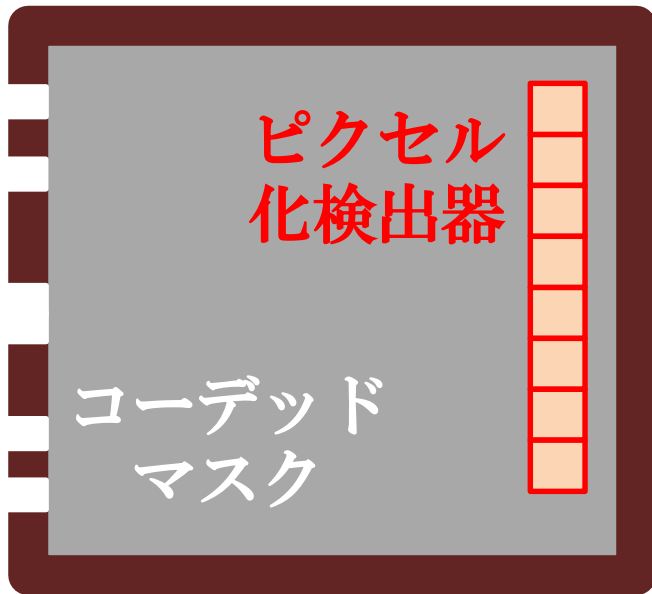
鉛シールドが不要 = 軽量
理想的には視野角の制限無し (4π)

コンプトンイベントのみの利用
コーンの重ね合わせが必要
⇒ 感度低

コーデッドマスク方式の構造

コーデッドマスク方式

鉛シールド



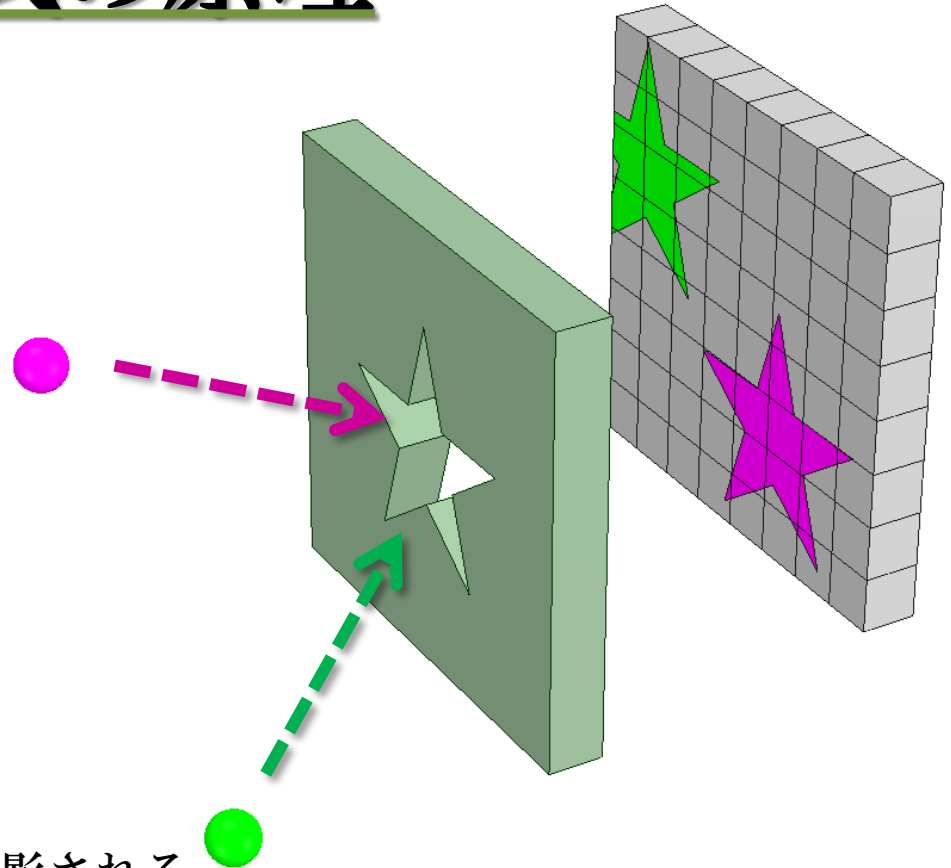
ピンホール部以外はピンホール方式と同じ構造。
ピンホールの代わりに鉛でできた符号化マスクを搭載。

コーデッドマスク方式の原理

コーデッドマスク方式



実際のコーデッドマスク
鉛と空隙が50%ずつのランダム配置

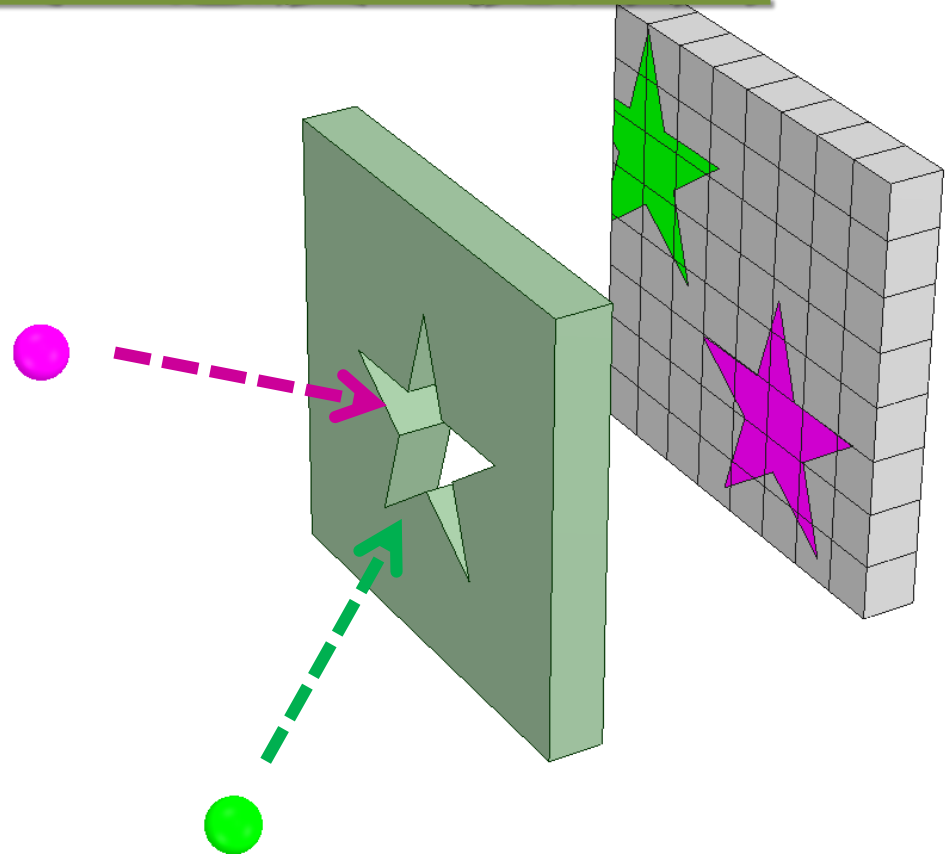


マスクの形に沿った影が検出器に投影される。
その影の形とマスクの形をマッチングすることで、
投影方向を逆算することが可能。⇒ **パターンになるだけのイベントが必要**

コーデッドマスク方式の感度と視野角

コーデッドマスク方式

項目	決定用素
感度	マスク面積 検出器ピクセル数
位置分解能	マスクと検出器の ピクセルピッチ
視野角	マスクと検出器の ピクセル比



装置の大型化により位置分解能はそのままに、感度と精度を向上可能

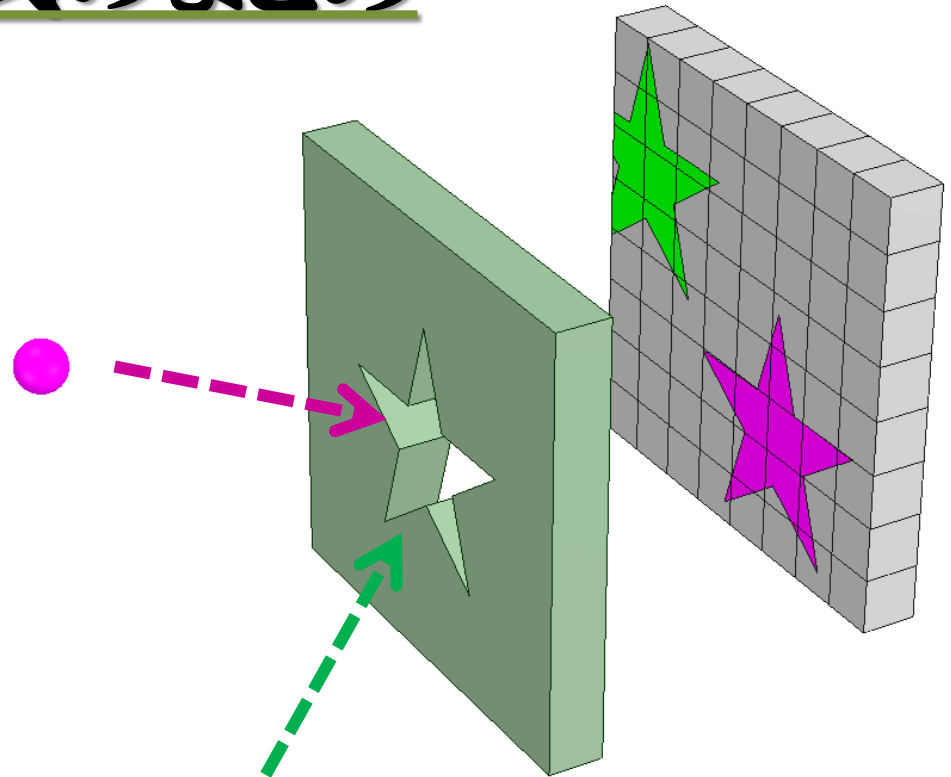
コーデッドマスク方式のまとめ

コーデッドマスク方式



実際のコーデッドマスク
鉛と空隙が50%ずつのランダム配置

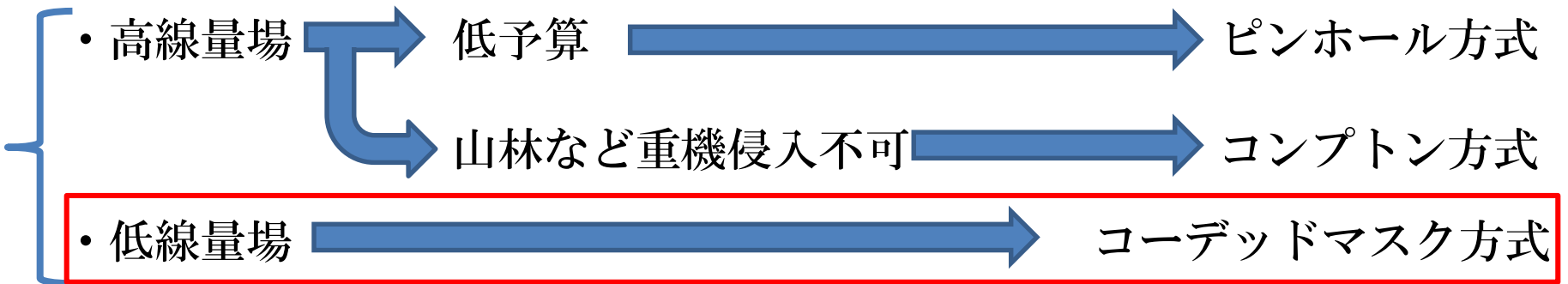
単純な大型化で感度、精度が向上
位置分解能も維持



パターンになるだけのイベントが必要
※大型化による感度向上でカバー可能

検出方式のまとめと選択

	メリット	デメリット
ピンホール方式	安価	重量 感度
コンプトン方式	軽量 広視野角	感度
コーデッドマスク方式	巨大化による 高感度化、高精度化	重量



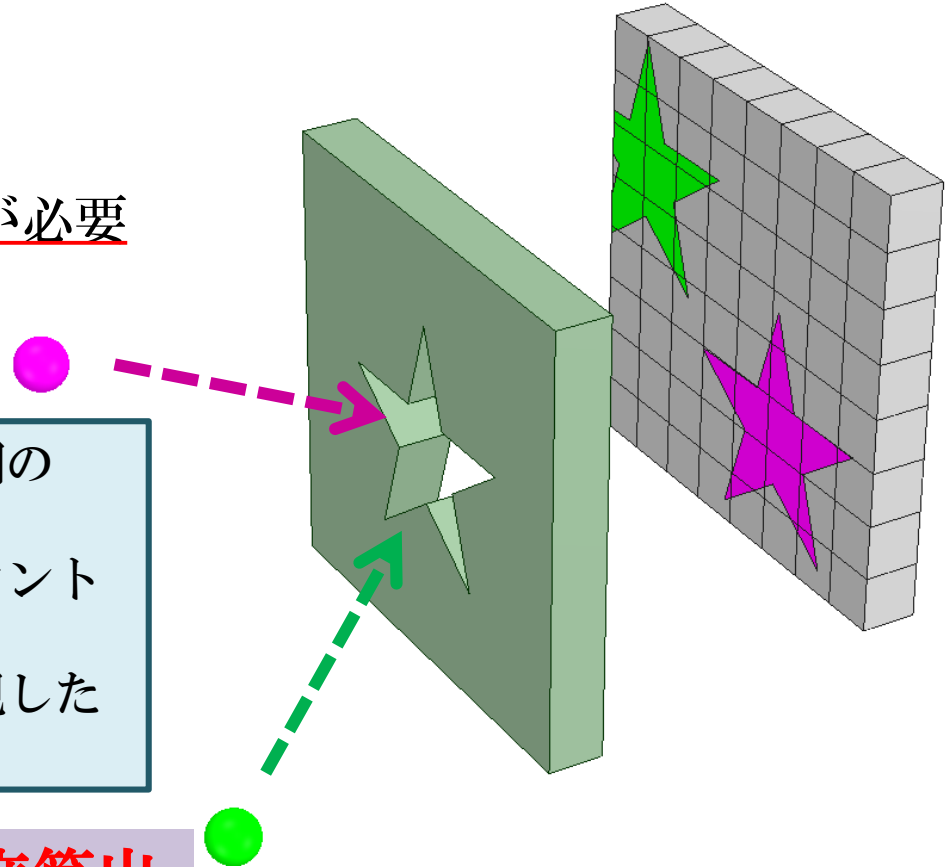
コーデッドマスク方式における定量

検出器とマスクとのマッチング
⇒ 一致度の相対的な評価のみ

除染効率の向上には絶対的な評価が必要

1. 検出器のカウントマップから実空間の強度分布を予想
2. 予想した強度分布から検出器のカウントマップを取得
3. 最も検出器のカウントマップを再現した強度分布を採用

±20% 程度の精度で絶対強度算出



CP社製ガンマカメラ



検出器	CsI(Tl) + PhotoDiode 1.27cm x 1.27cm x 2.0cm 12 x 8 個使用 = 0.31 L
動作原理	コーデッドマスク方式
エネルギー範囲	0.2 – 1.5 MeV
視野角	40度
感度	300cpm / (0.1uSv/h @ ¹³⁷ Cs)
サイズ	650(D) x 1,000(W) x 1,300(H) mm
重量	約 650 kg (初期型1500kg)

感度評価

※0.061 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m ~ 500 kBq

0.05 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m の空間で、 ^{137}Cs 密封線源 0.061 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m を10分間測定



感度評価

※0.061 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m ~ 500 kBq

0.05 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m の空間で、 ^{137}Cs 密封線源 0.061 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m を10分間測定



感度評価

※0.061 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m ~ 500 kBq

0.05 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m の空間で、 ^{137}Cs 密封線源 0.061 $\mu\text{Sv/h}$ @ 1m を10分間測定



定量評価

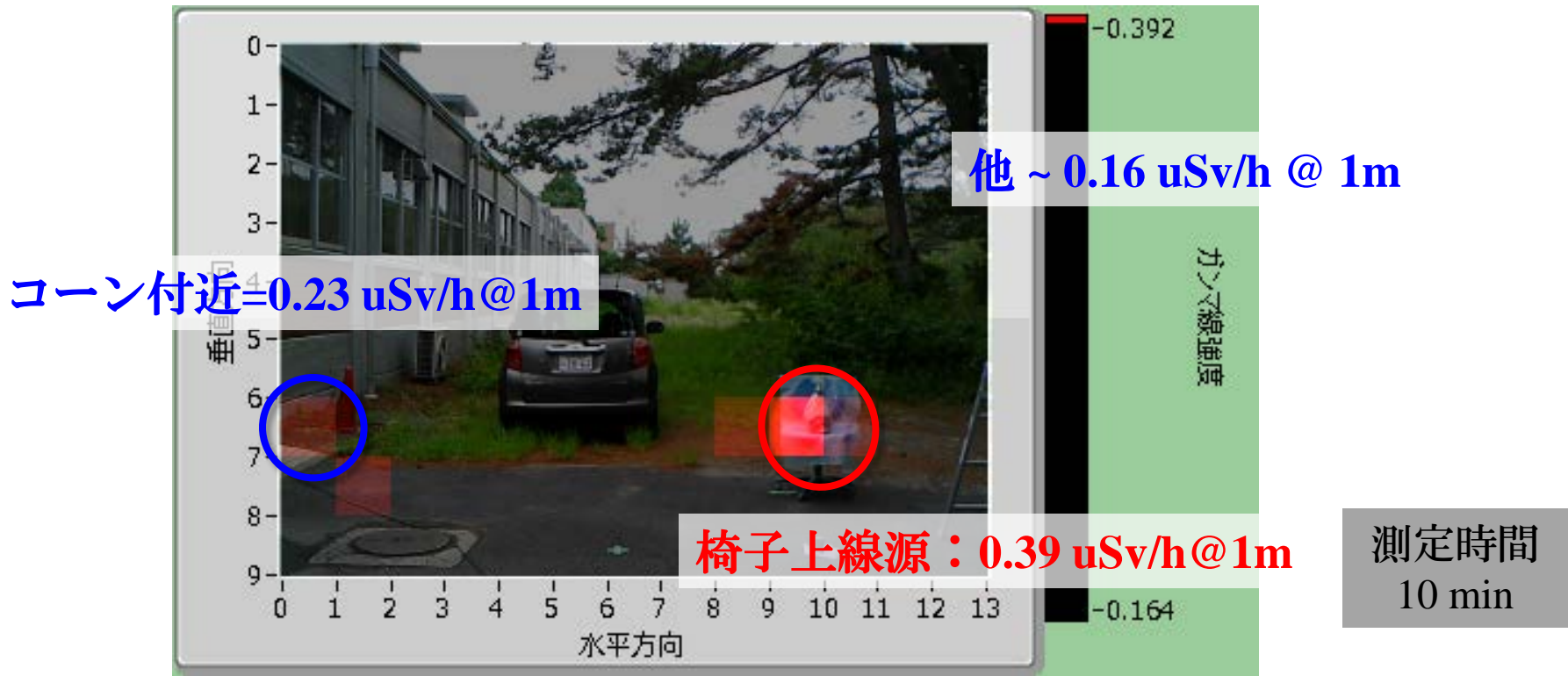
地面 = 0.15 uSv/h @ 1m、コーン付近 = 0.20 uSv/h @ 1m
椅子上の線源 = 0.4 uSv/h @ 1m



測定時間
10 min

定量評価

地面 = 0.15 uSv/h @ 1m、コーン付近 = 0.20 uSv/h @ 1m
椅子上の線源 = 0.4 uSv/h @ 1m

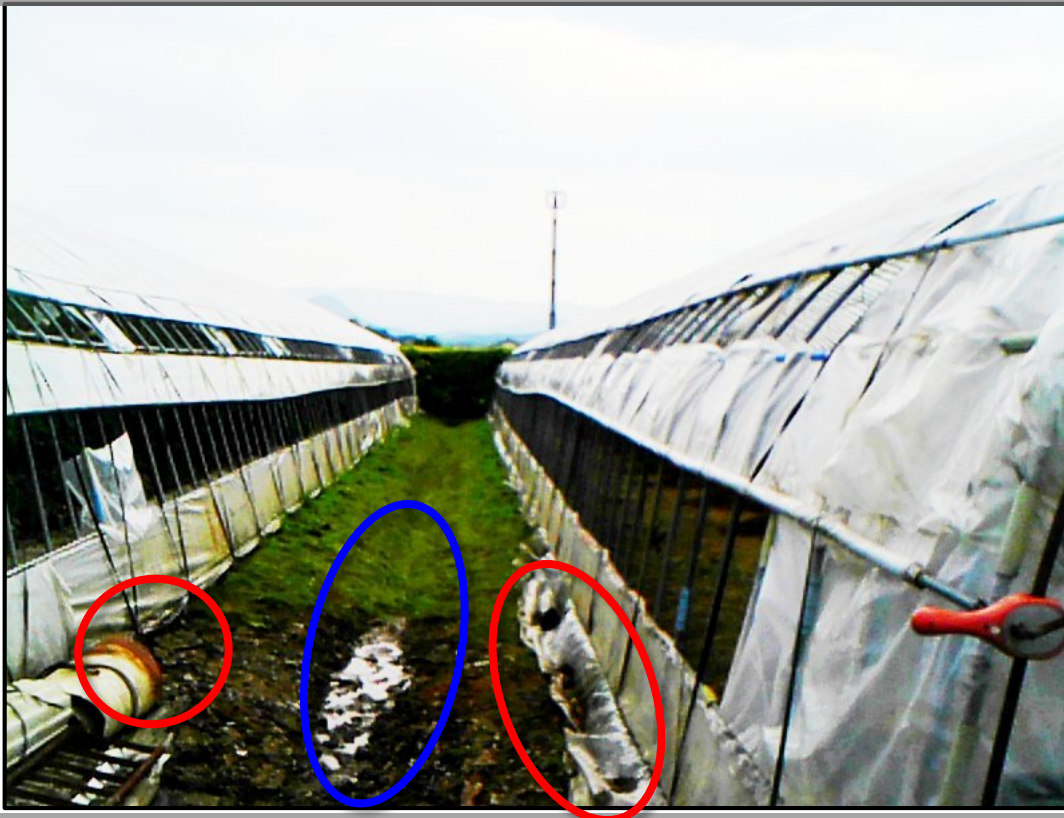


2つの線源を精度よく検出

実地測定例(ハウス横の溝)

空間線量 0.05 ~ 0.07 uSv/h @ 1m

ハウスの終端 = ~ 0.20 uSv/h@1m、 中心の溝 = 0.10 uSv/h@1m



福島県内
2014年夏

測定時間
10 min

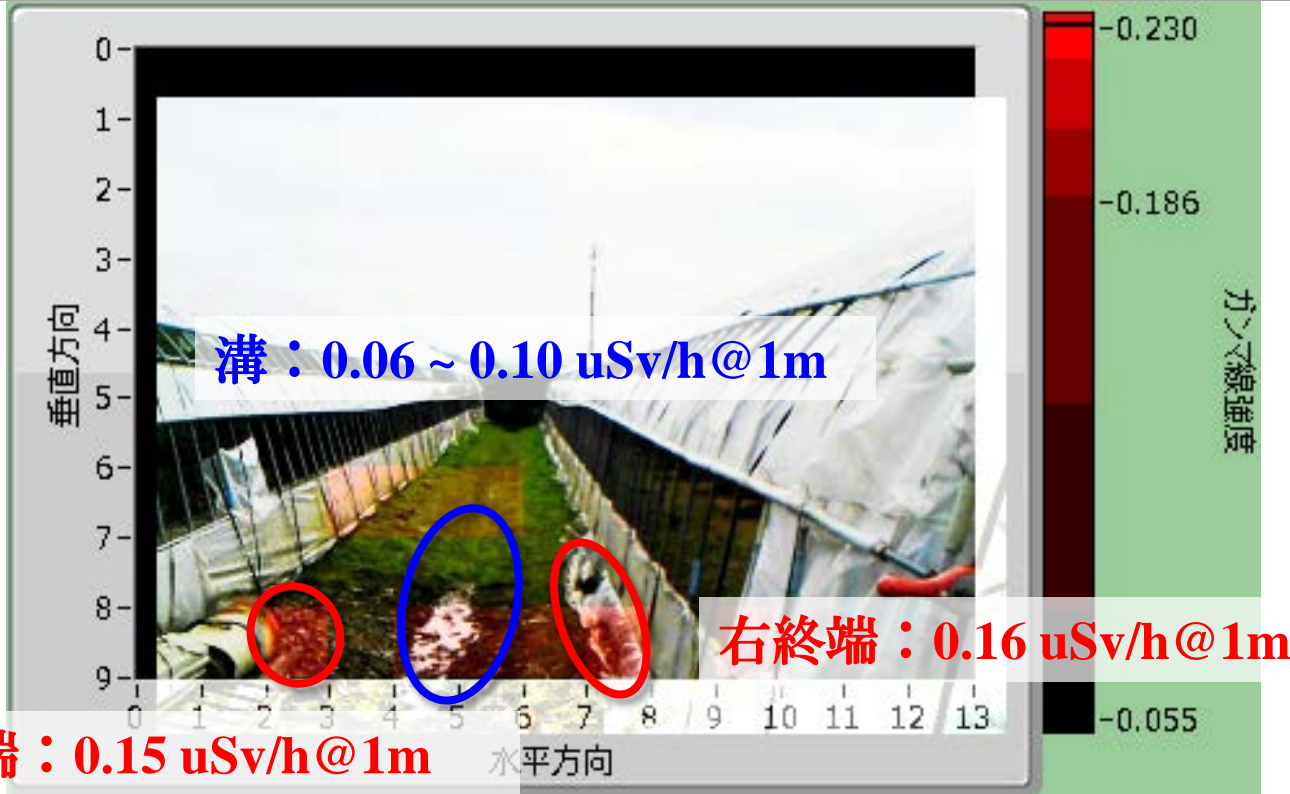
溝よりもハウスと地面境界の方がより強い空間

実地測定例(ハウス横の溝)

※光学カメラ取り付け位置ずれ

空間線量 0.05 ~ 0.07 uSv/h @ 1m

ハウスの終端 = ~ 0.20 uSv/h@1m、 中心の溝 = 0.10 uSv/h@1m



福島県内
2014年夏

測定時間
10 min

0.1 uSv/h@1mの差を検出、測定に成功

実地測定例(未除染エリア)

枯草を中心に 0.42 uSv/h@1m (空間線量)



枯草

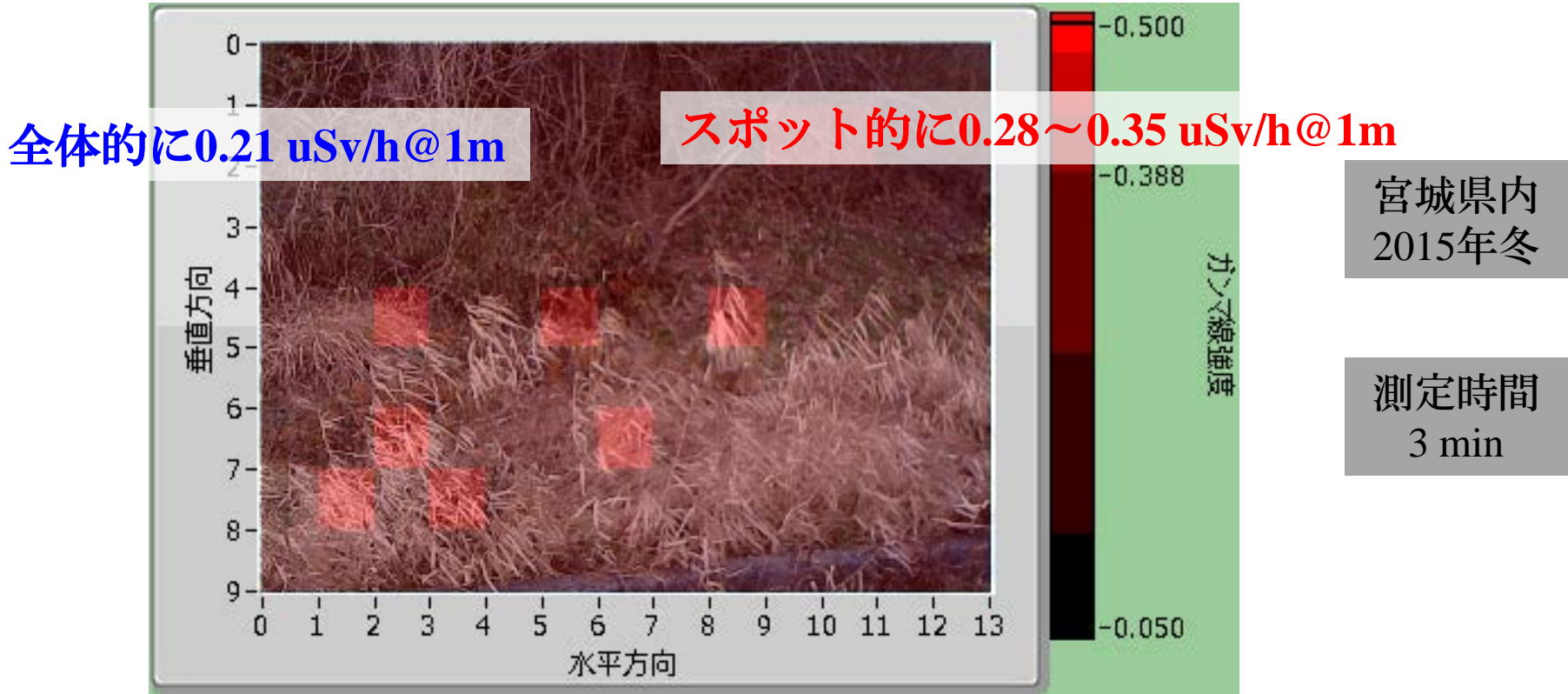
宮城県内
2015年冬

測定時間
3 min

0.1 uSv/h@1m の差を検出、測定に成功

実地測定例(未除染エリア)

枯草を中心に 0.42 uSv/h@1m (空間線量)



枯草を中心に除染基準を上回るスポットの洗い出しに成功

アプリケーション提案

感度

・

絶対
測定

速度



除染、再除染



遠距離・短時間撮影
被曝低減

距離



ガンマビデオカメラ
テロ対策