

GRAINE2018年気球フライト の詳細およびコンバータフィルム 解析状況報告

名古屋大学 中村悠哉

他 GRAINE Collaboration

自己紹介

- ・ 中村悠哉 名古屋大学(F研)M2

○F研の研究紹介

GRAINE(γ 線)

ミュオンラジオグラフィー

NINJA(加速器ニュートリノ)

NEWSdm(ダークマター)

その他(超冷中性子,アクシオン)

- ・ 気球実験のために

2018年2月~5月の3ヶ月間

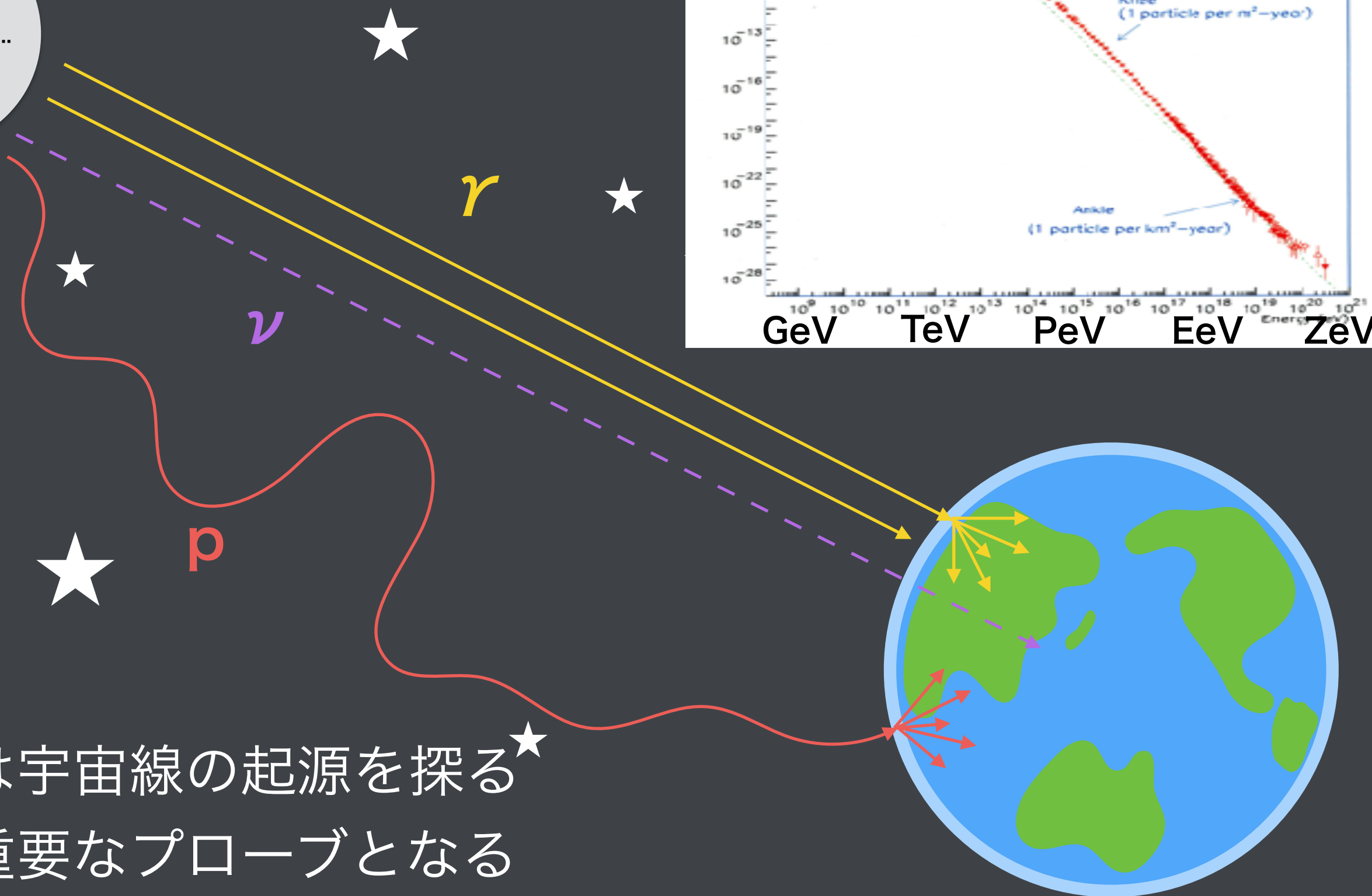
オーストラリアに滞在

(観光VISAが切れる日に帰国)



@オーストラリア エアーズロック(ウルル)

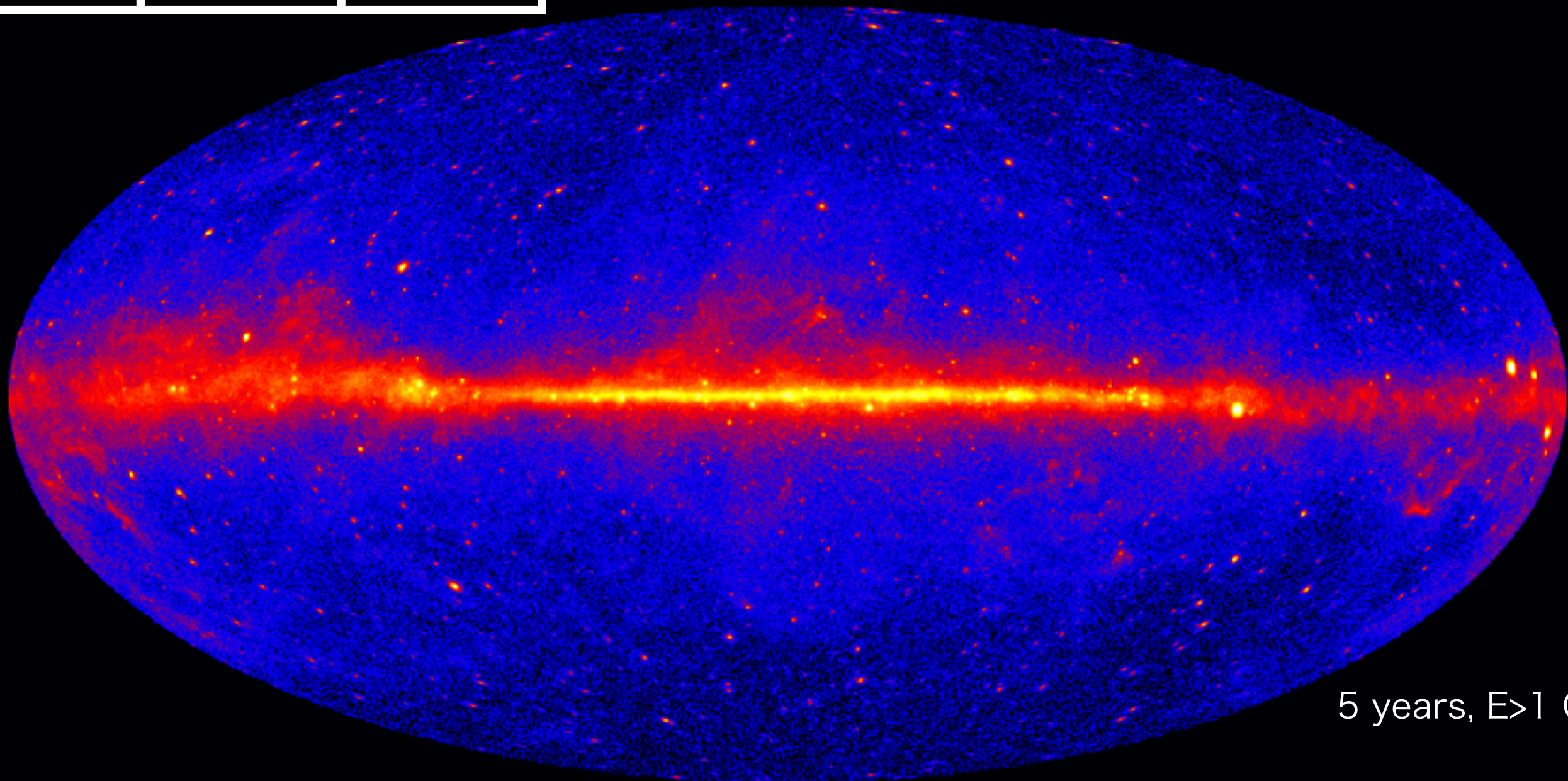
SNR,GRB,AGN...



γ 線は宇宙線の起源を探る★
上で重要なプローブとなる

γ 線天文学

	Telescope	detected sources
1990-2001	EGRET	271
2008-	Fermi-LAT	>3000

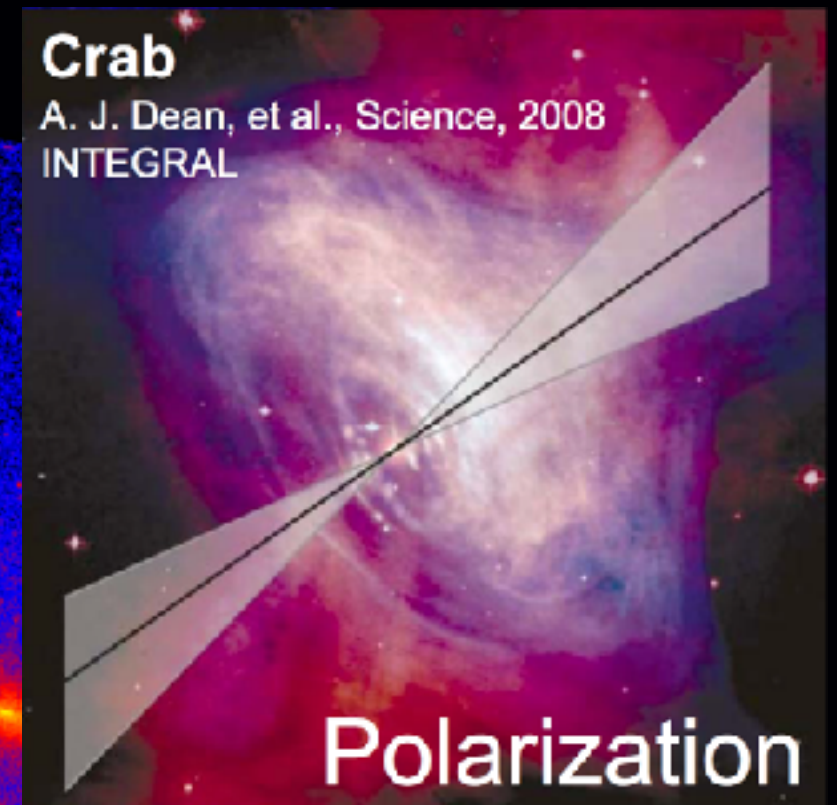
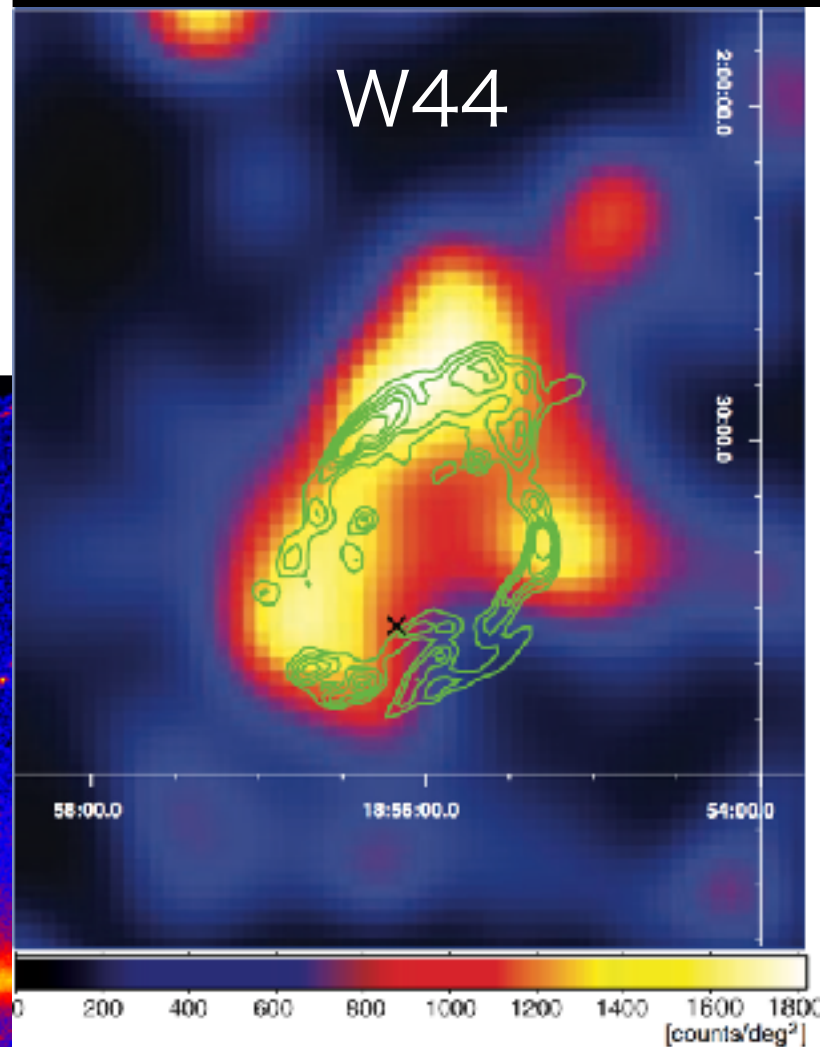
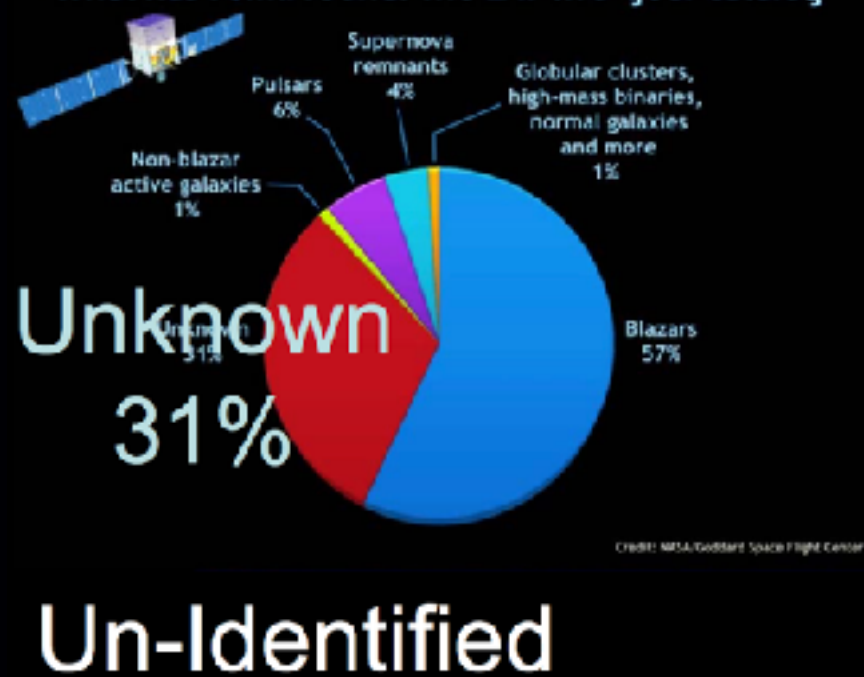


5 years, $E > 1$ GeV

γ 線天文学

	Telescope	detected sources
1990-2001	EGRET	271
2008-	Fermi-LAT	>3000

What has Fermi found: The LAT two-year catalog



5 years $E > 1$ GeV

大統計観測から精密観測への転換が必要！！

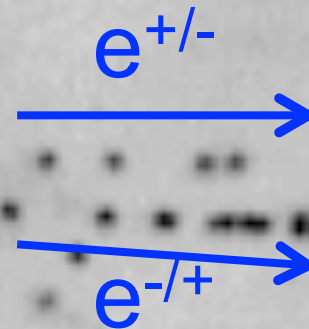
原子核乾板(エマルションフィルム)

顕微鏡画像

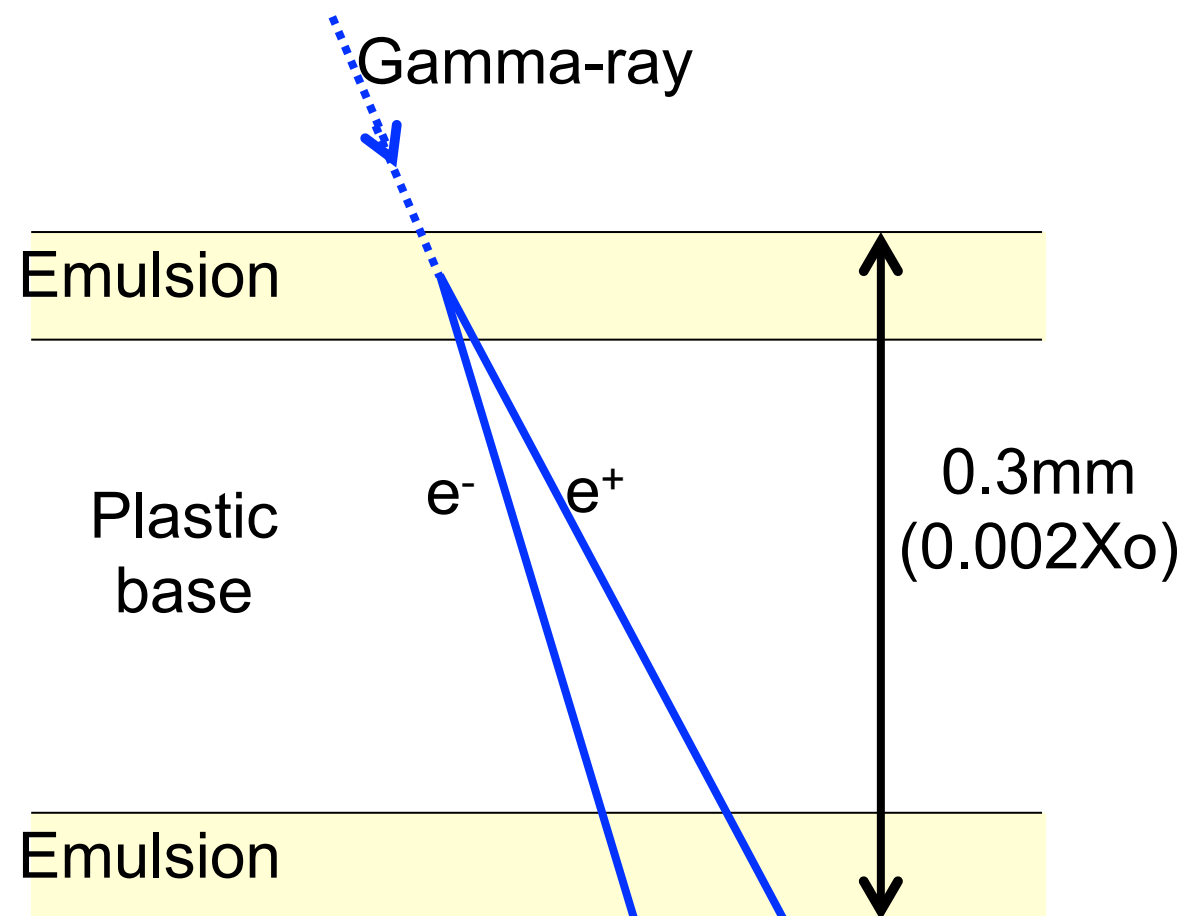
10 μ m



Gamma-ray

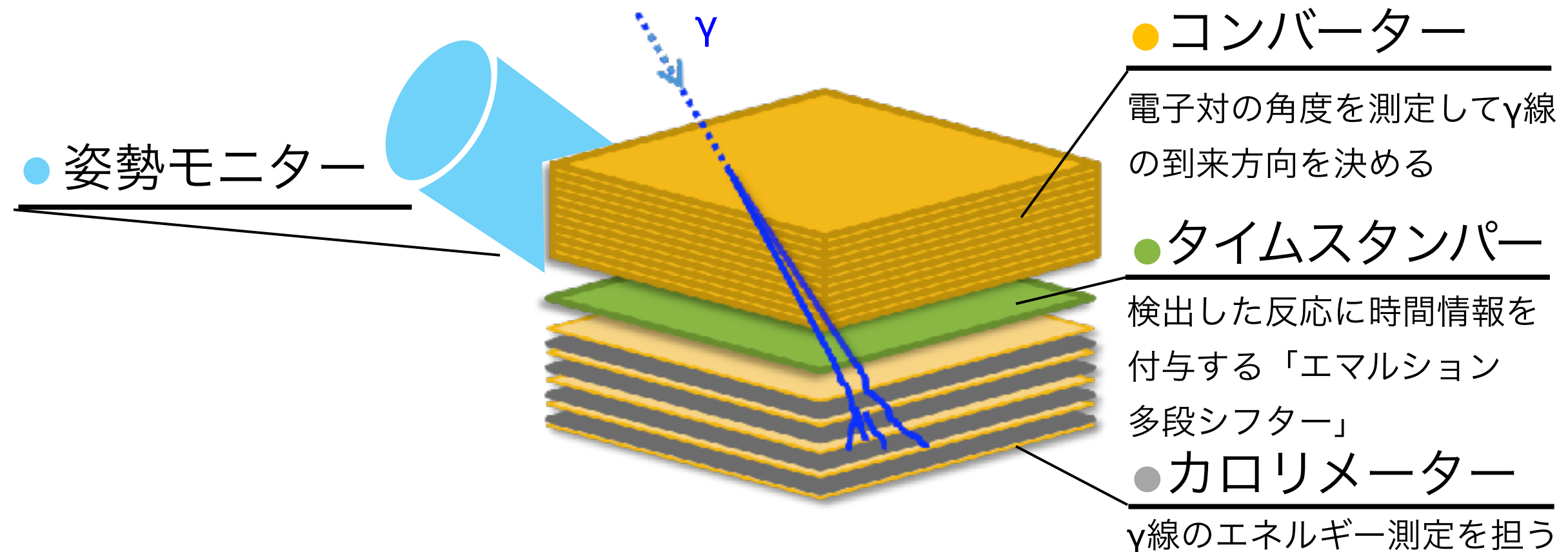


エマルションフィルムの断面図



宇宙 γ 線精密観測実験：GRAINE

エマルションガンマ線望遠鏡



	Fermi-LAT	GRAINE
角度分解能@100MeV	6.0°	1.0°
角度分解能@1GeV	0.90°	0.1°
偏光感度	-	あり
有効面積@100MeV	0.25m ²	2.1m ² *
有効面積@1GeV	0.88m ²	2.8m ² *

*10m²の場合

世界最高角度分解能
世界初偏光有感
世界最大口径

GRAINE計画

2004年- 地上での技術開発

2011年6月 JAXA国内気球実験

- ・ 気球高度において観測コンセプトを実証

2015年5月 JAXA国際気球実験

- ・ 海外サイトでの実験スキーム確立
- ・ 中口径望遠鏡(0.38m²)のフライト性能実証
 - イメージング性能の実証
 - 時間分解能の更新(10ミリ秒)
- ・ 天体検出には至らず(部分的な不具合により)

2018年4月 JAXA国際気球実験

- ・ **天体検出による総合性能実証**
 - vela pulsarを100MeV帯域(角度分解能1.0度)で優位に検出することを目指す

2021年~

大面積望遠鏡による科学観測開始



GRAINE 2011

- ・ 2011年6月8日
- ・ 北海道 TARF
- ・ 口径面積：0.013m²
- ・ 1.6時間@35km

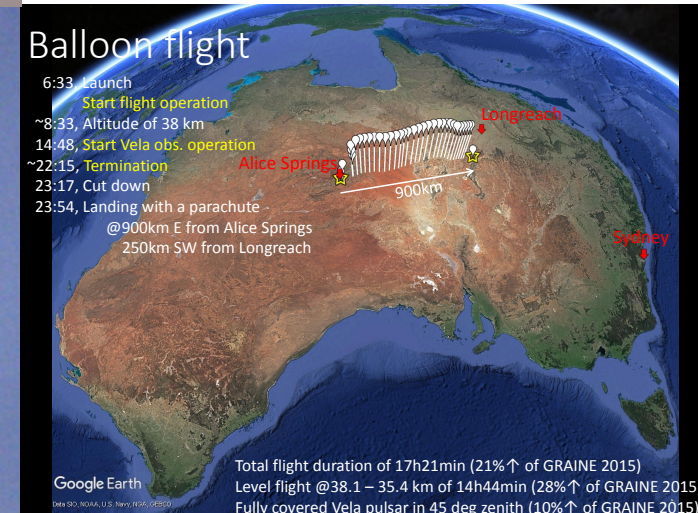
GRAINE 2015

- ・ 2015年5月12日
- ・ オーストラリア ABLS
- ・ 口径面積：0.38m²
- ・ 11.5時間@36-37km



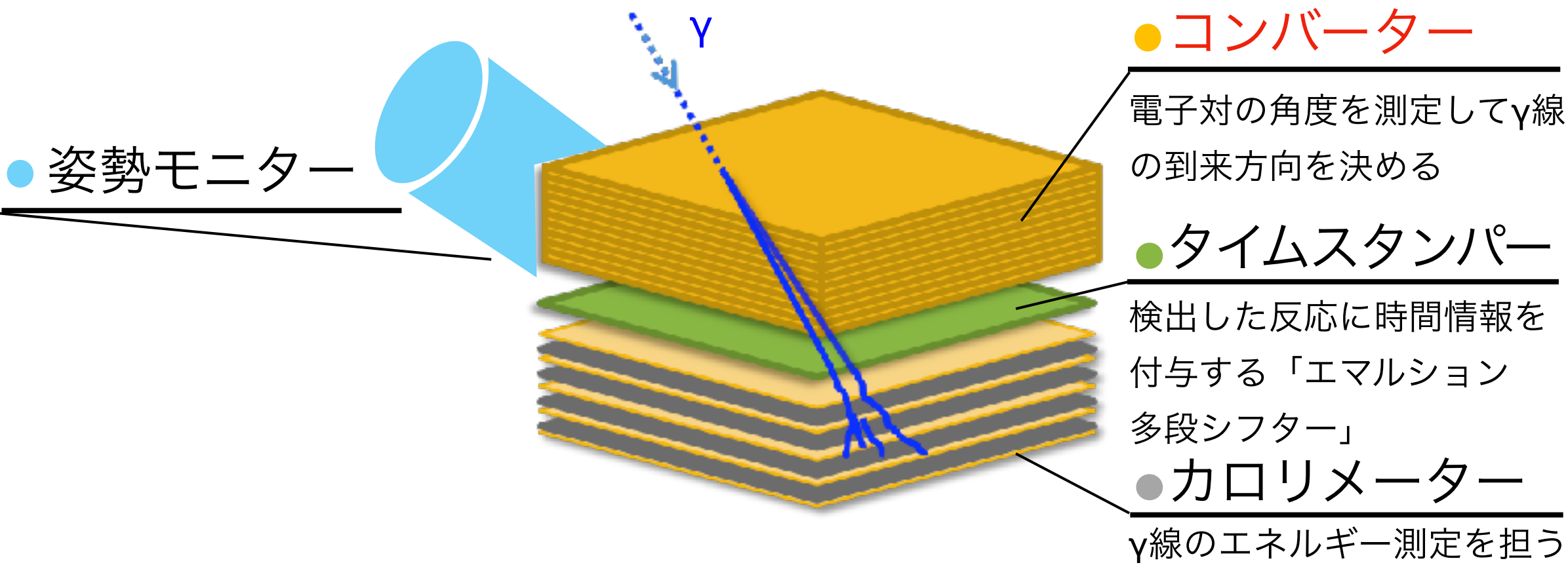
GRAINE 2018

- ・ 2018年4月26日
- ・ オーストラリア ABLS
- ・ 口径面積：0.38m²
- ・ 14.7時間@36~38km



宇宙 γ 線精密観測実験：GRAINE

エマルションガンマ線望遠鏡



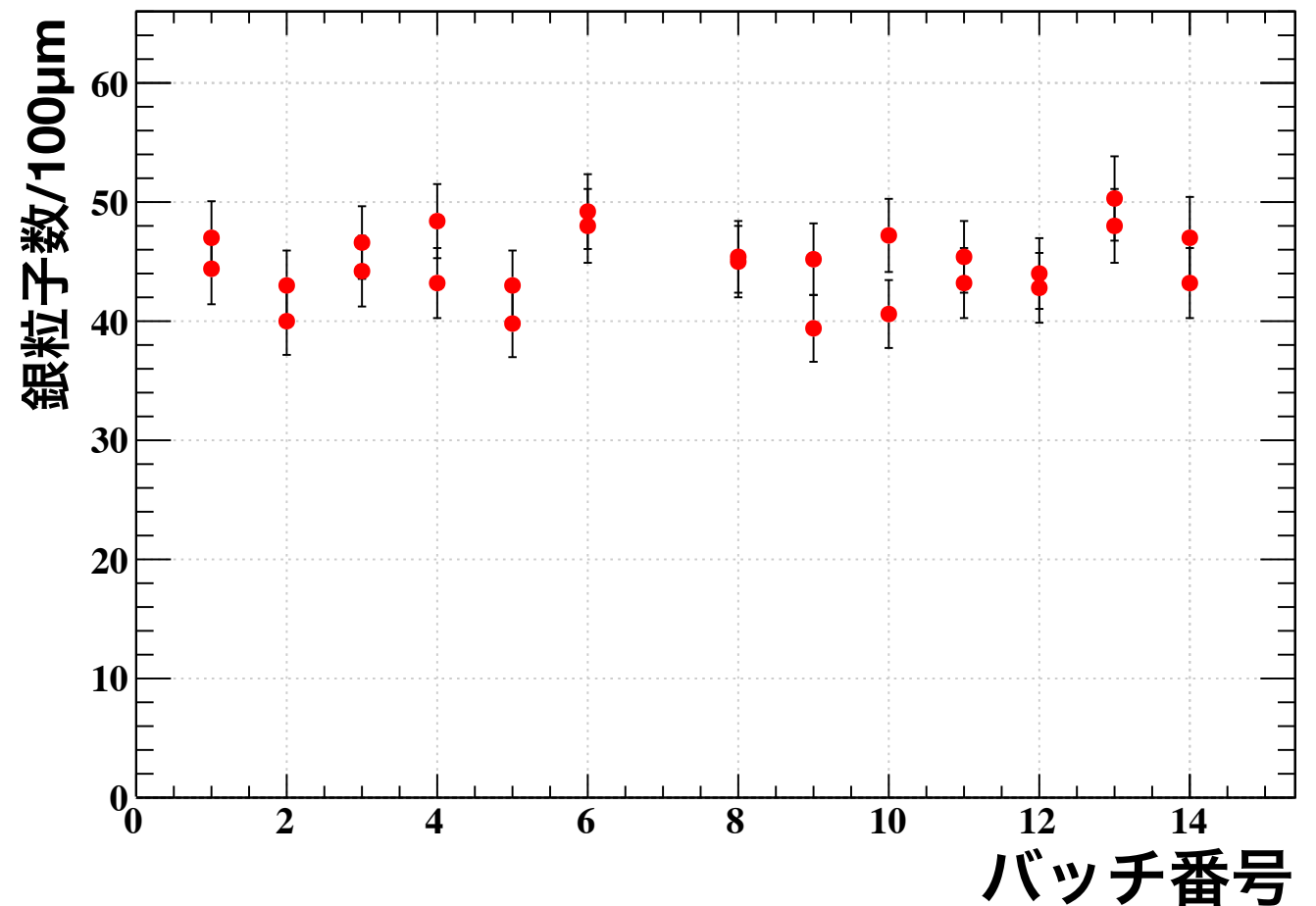
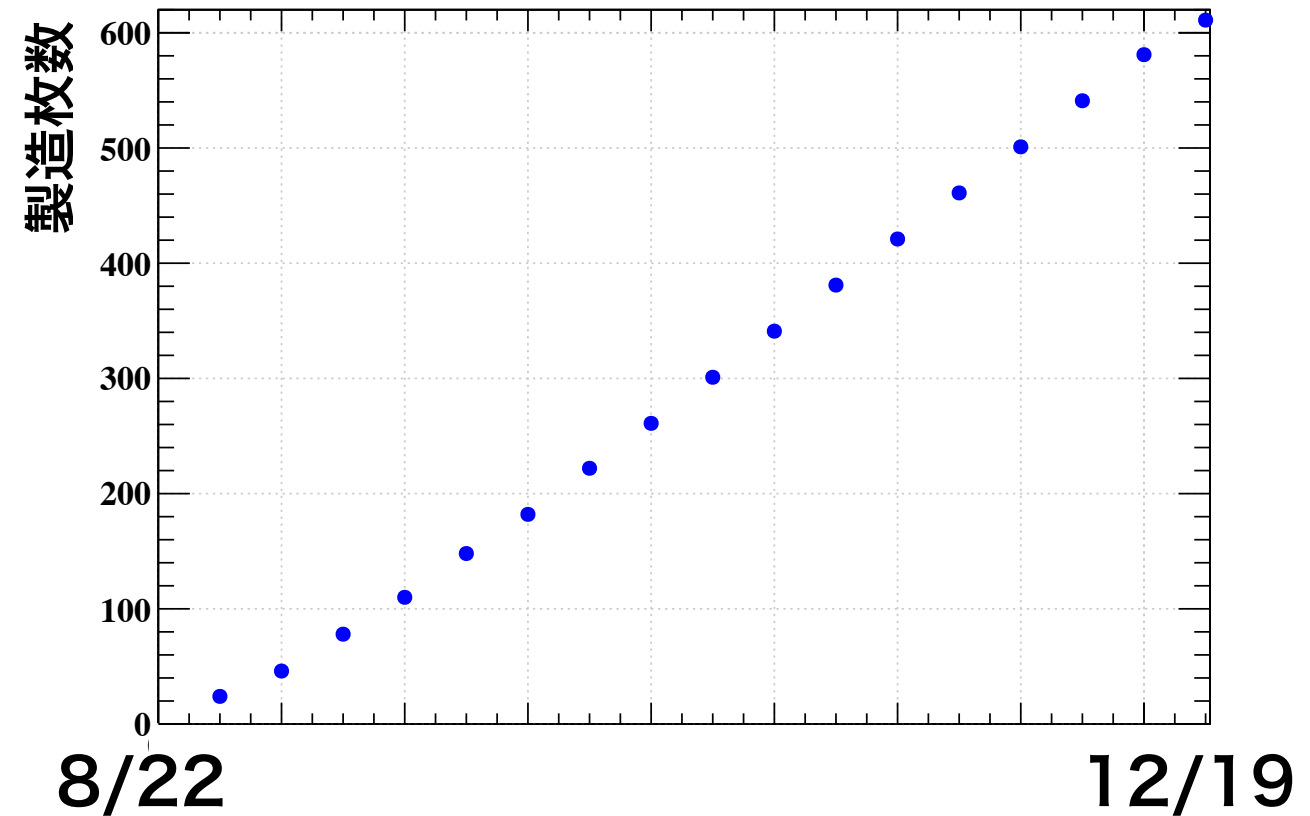
	Fermi-LAT	GRAINE
角度分解能@100MeV	6.0°	1.0°
角度分解能@1GeV	0.90°	0.1°
偏光感度	-	あり
有効面積@100MeV	0.25m ²	2.1m ² *
有効面積@1GeV	0.88m ²	2.8m ² *

*10m²の場合

世界最高角度分解能
世界初偏光有感
世界最大口径

フィルム製造(2017年8月末~)

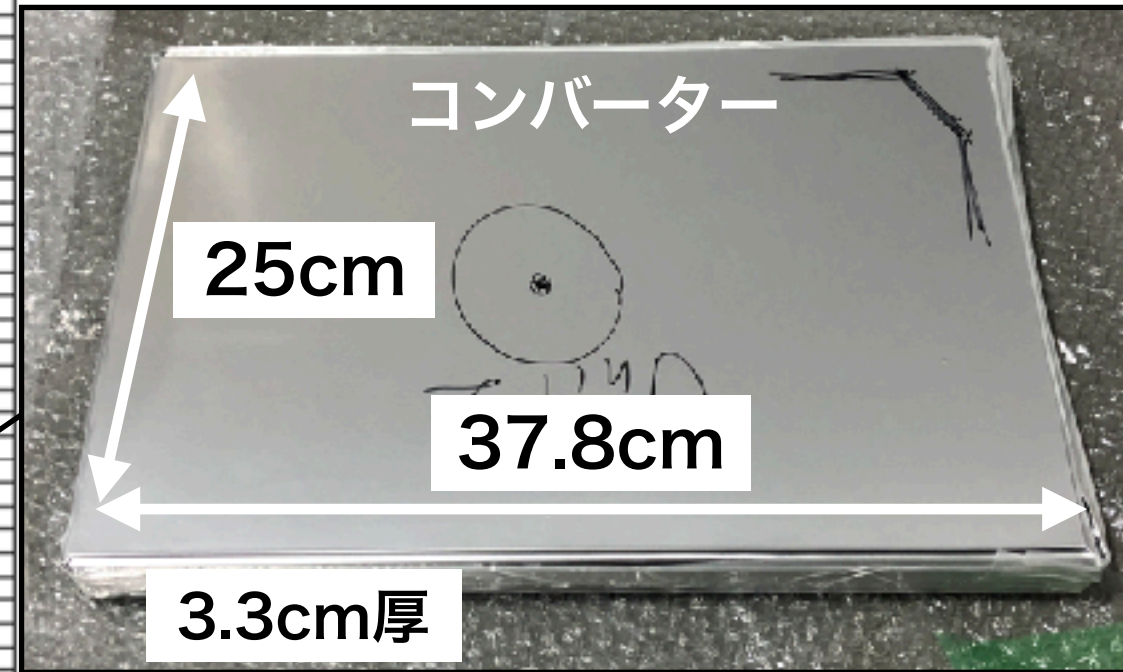
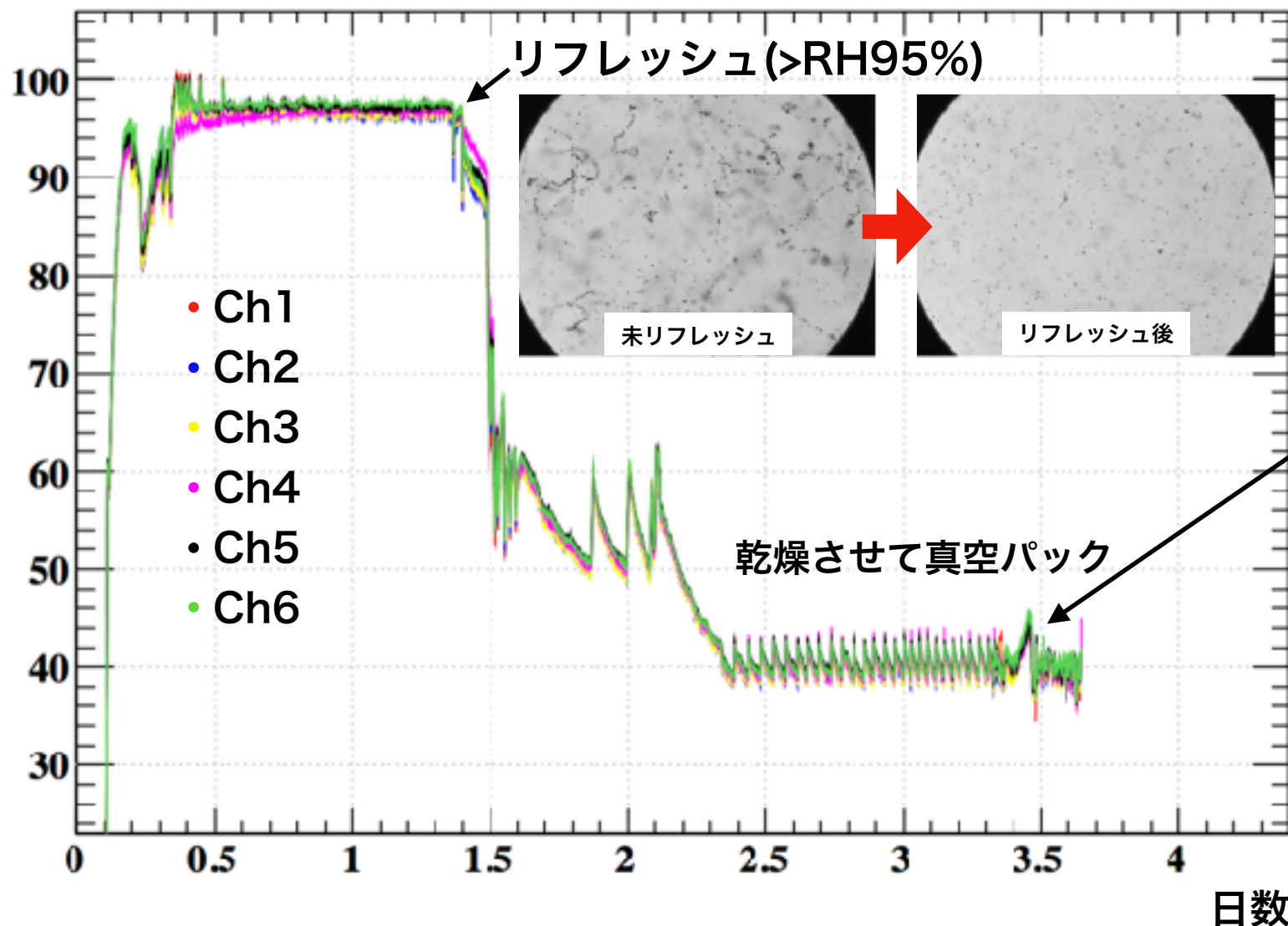
- 2018年実験に向けてより感度の安定性に優れたフィルムに改良、試験を行いデザインを確定(2017年秋の研究会報告)
- 名古屋大学にて手塗り製造、8月末から4ヶ月かけて611枚(~58m²)を製造
- 製造バッチ毎に電子線ビームを照射して感度をチェック



明室での塗布試験(※本番は暗室)

コンバーター製作(2018年1月~)

リフレッシュメント内湿度

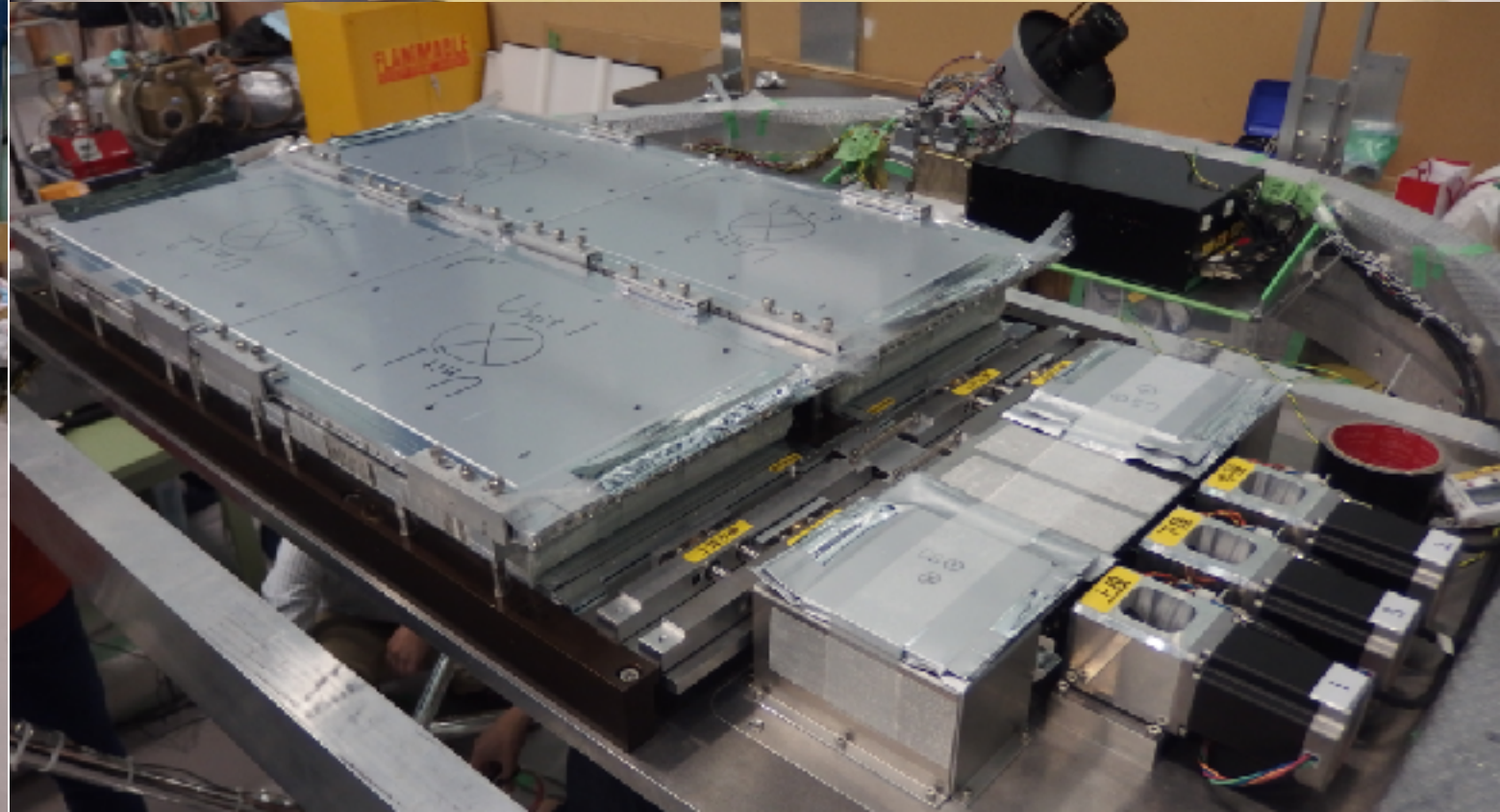
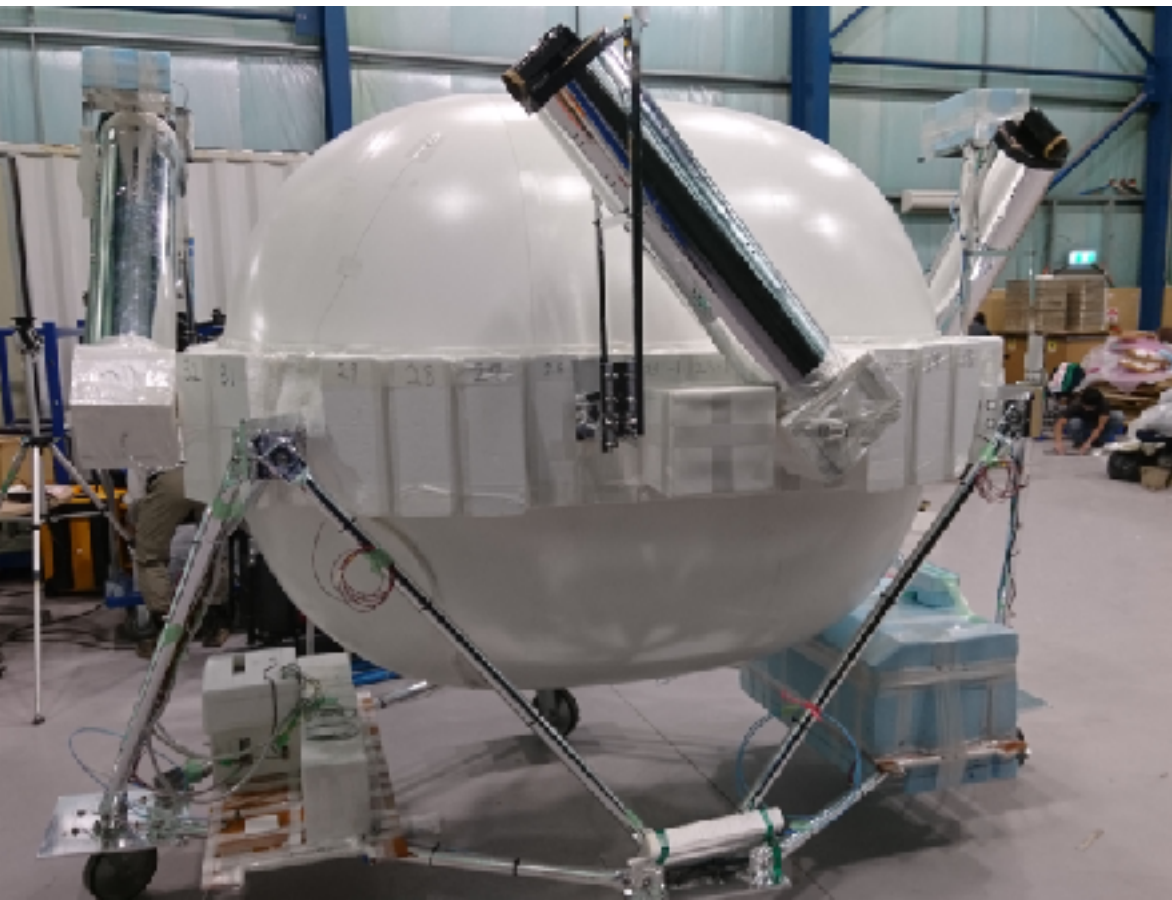
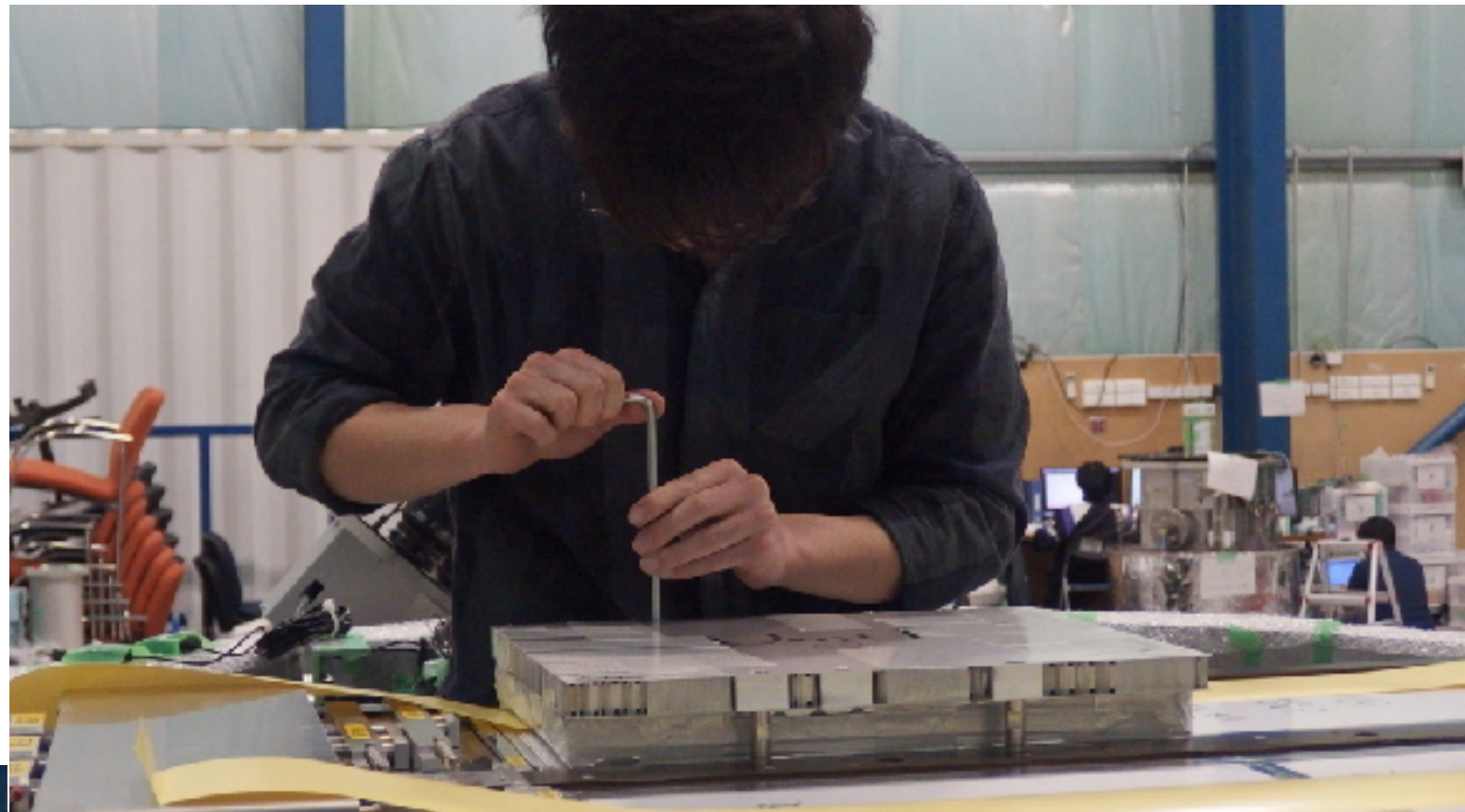


4ユニット製作し、
オーストラリアへ冷蔵輸送

- 2015年実験ではこの処理をオーストラリアで実施したが、乾燥不良が原因で一部フィルム(~5.7%)が部分的に解析不可能となった(有効面積25%ロス)
- 2018年実験ではフィルムの長期安定性改善の効果もあり、日本で実施可能となった

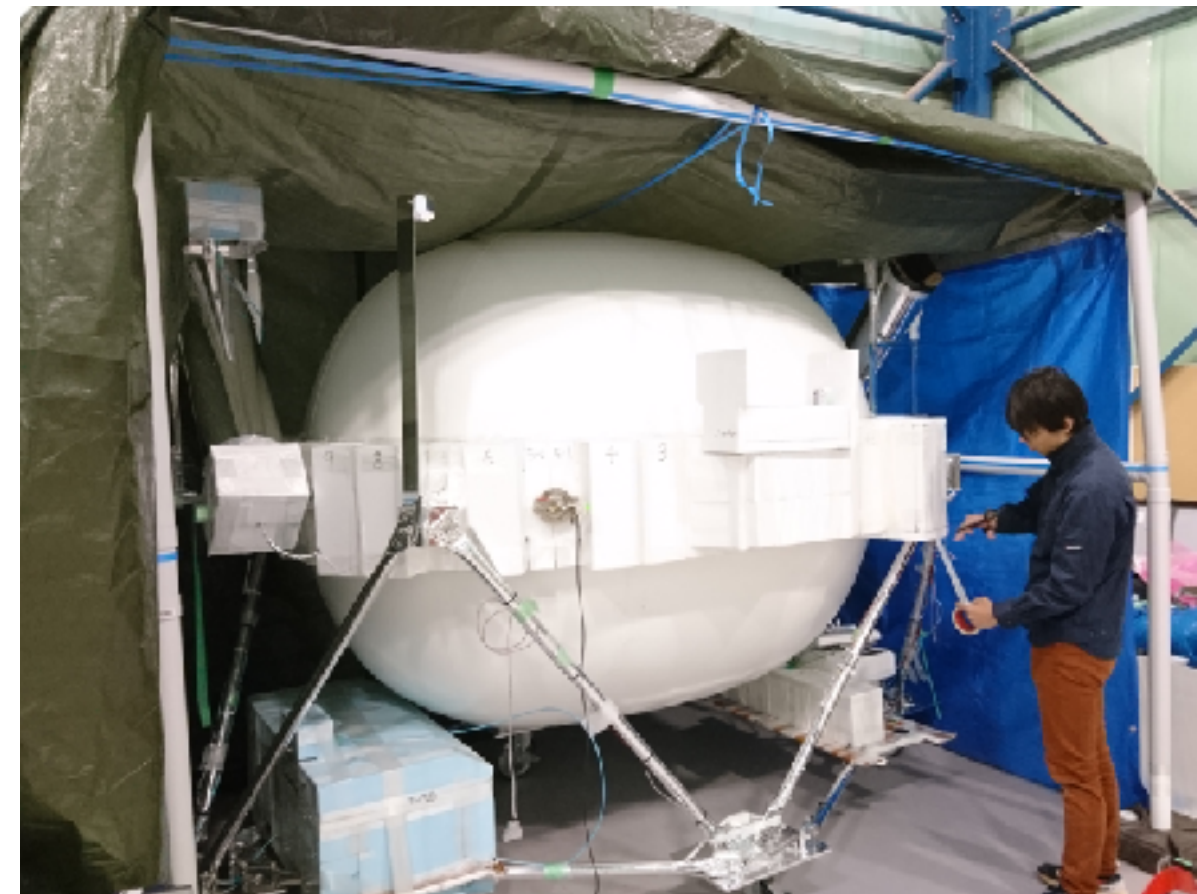
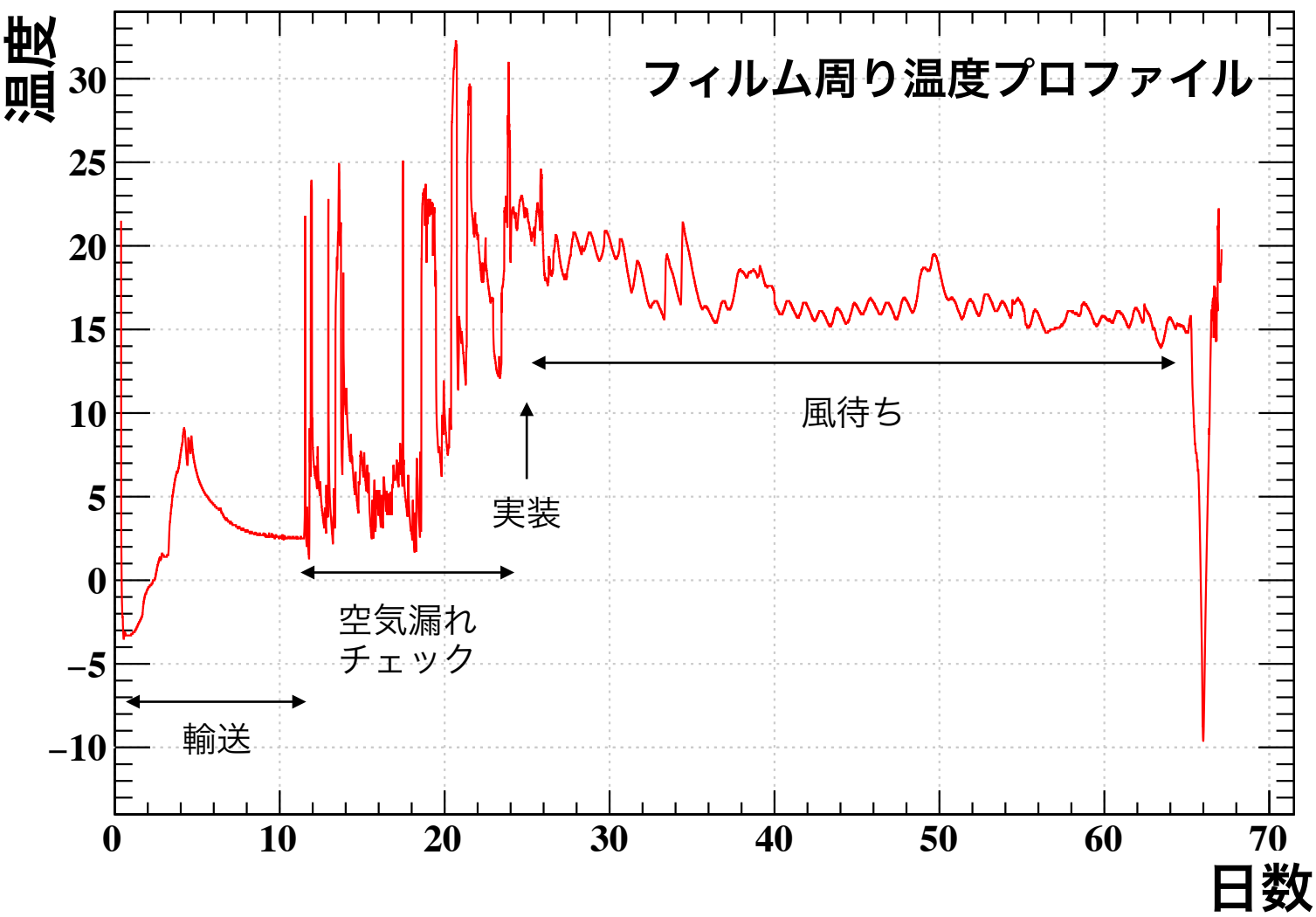
与圧容器ゴンドラへの実装(2018年3月~)

- 放球基地のある
アリススプリングスで
コンバーターを受け取り
- 空気漏れをチェックした後
与圧容器ゴンドラへ実装



フライト実施までのフィルムの冷却

- フライトに適した気象条件が整うまでテント内でゴンドラごとフィルムを冷却しながら待機



放球に至るまで

- 3/30 全ての確認作業を終えてFlight Readyとなった
- 4/7 SMILEが放球
- 4/16 上層風の条件が整い放球に臨んだ



放球に至るまで

- 3/30 全ての確認作業を終えてFlight Readyとなった
- 4/7 SMILEが放球
- 4/16 上層風の条件が整い放球に臨んだ



放球に至るまで

- 3/30 全ての確認作業を終えてFlight Readyとなった
- 4/7 SMILEが放球
- 4/16 上層風の条件が整い放球に臨んだ
→ 直前に地上風が強くなり断念
- 4/24 上層風の条件が整い放球に臨んだ
→ 直前に地上風が強くなり断念
- 4/26 上層風の条件が整い放球に臨んだ

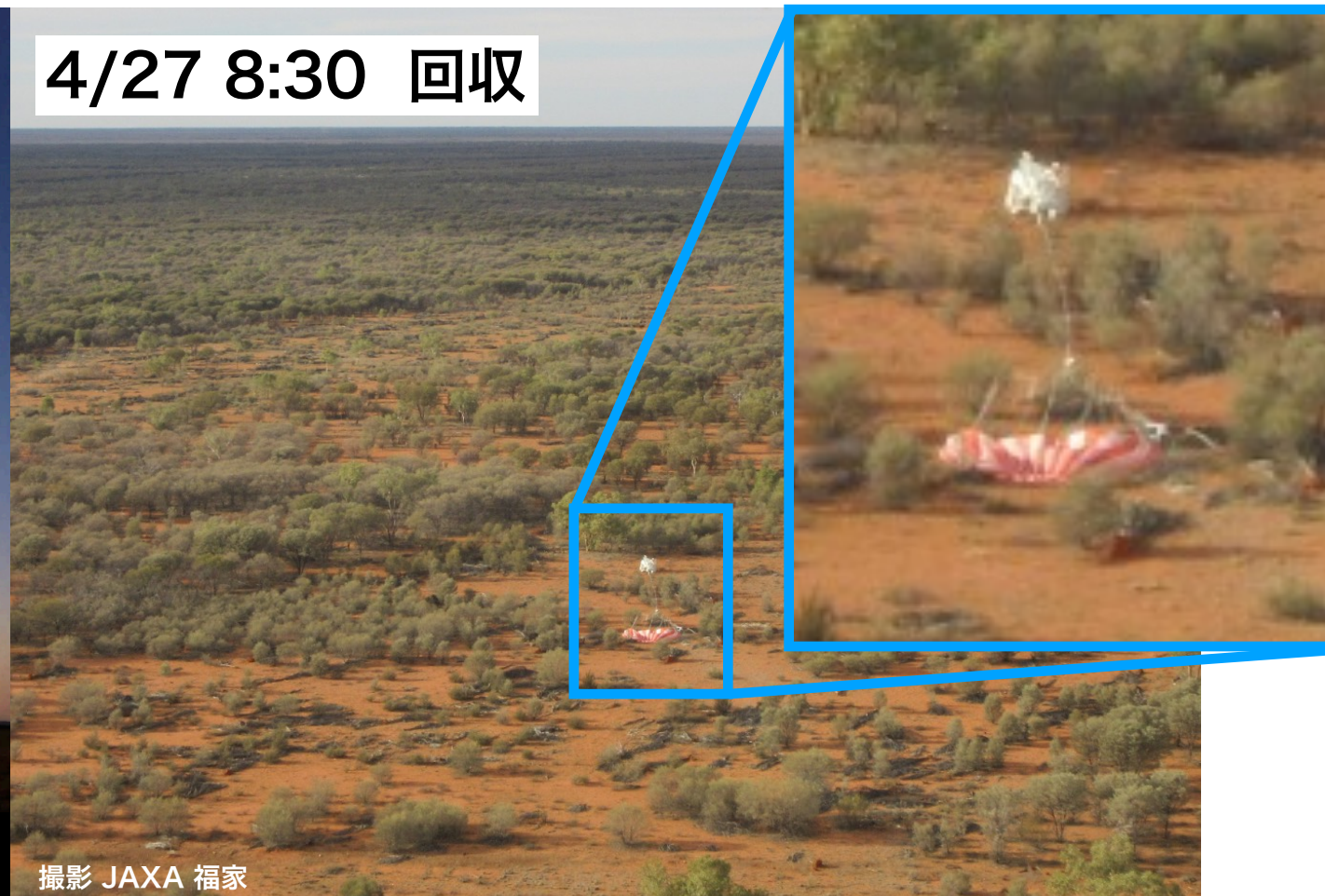




フライト、回収

4/26 6:33 放球

4/27 8:30 回収



撮影 JAXA 福家

Balloon flight

6:33, Launch
Start flight operation
~8:33, Altitude of 38 km
14:48, Start Vela obs. operation
~22:15, Termination
23:17, Cut down
23:54, Landing with a parachute
@900km E from Alice Springs
250km SW from Longreach

総飛翔時間:17h21m
水平浮遊時間:14h44m

Google Earth

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
Image Landsat / Copernicus

Total flight duration of 17h21min (21%↑ of GRAINE 2015)
Level flight @38.1 – 35.4 km of 14h44min (28%↑ of GRAINE 2015)
Fully covered Vela pulsar in 45 deg zenith (10%↑ of GRAINE 2015)

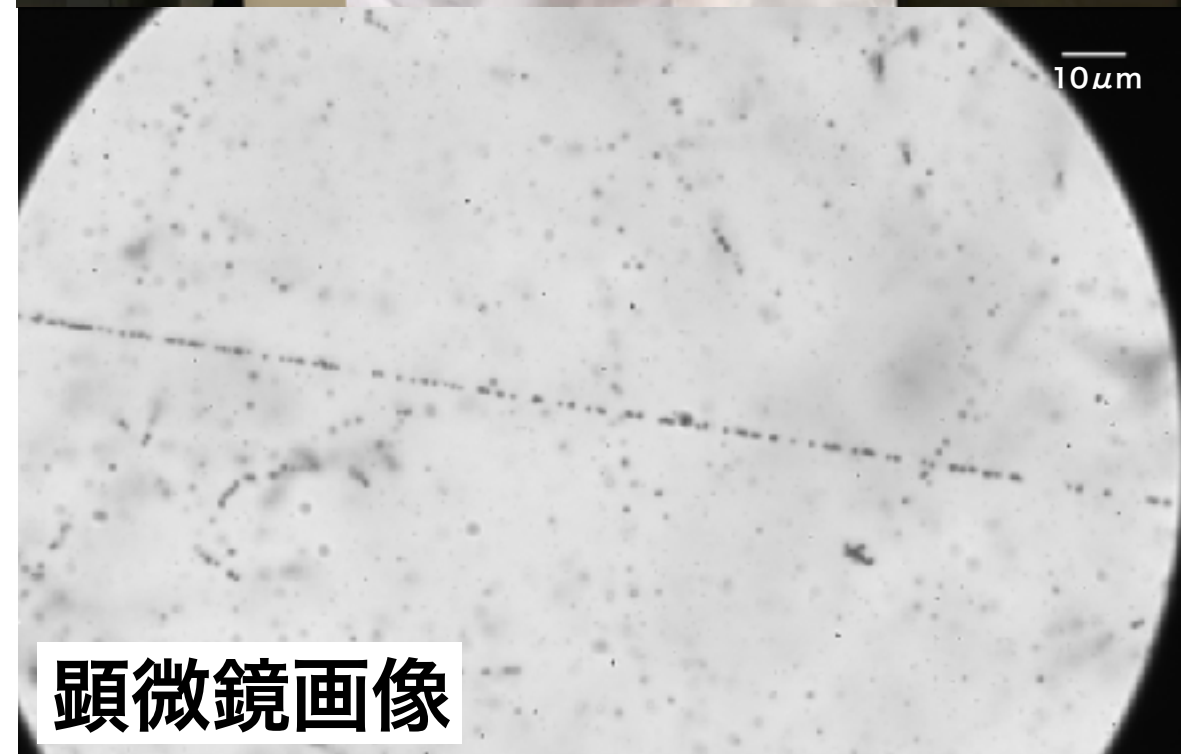


現像

- 回収したフィルムをシドニー大学へ輸送し現像処理を進めた
- のべ12日間,489枚(~44m²)を現像
- リフレッシュ時の乾燥不良による解析不能なフィルムはなかった
(1枚の現像エラーのみ)



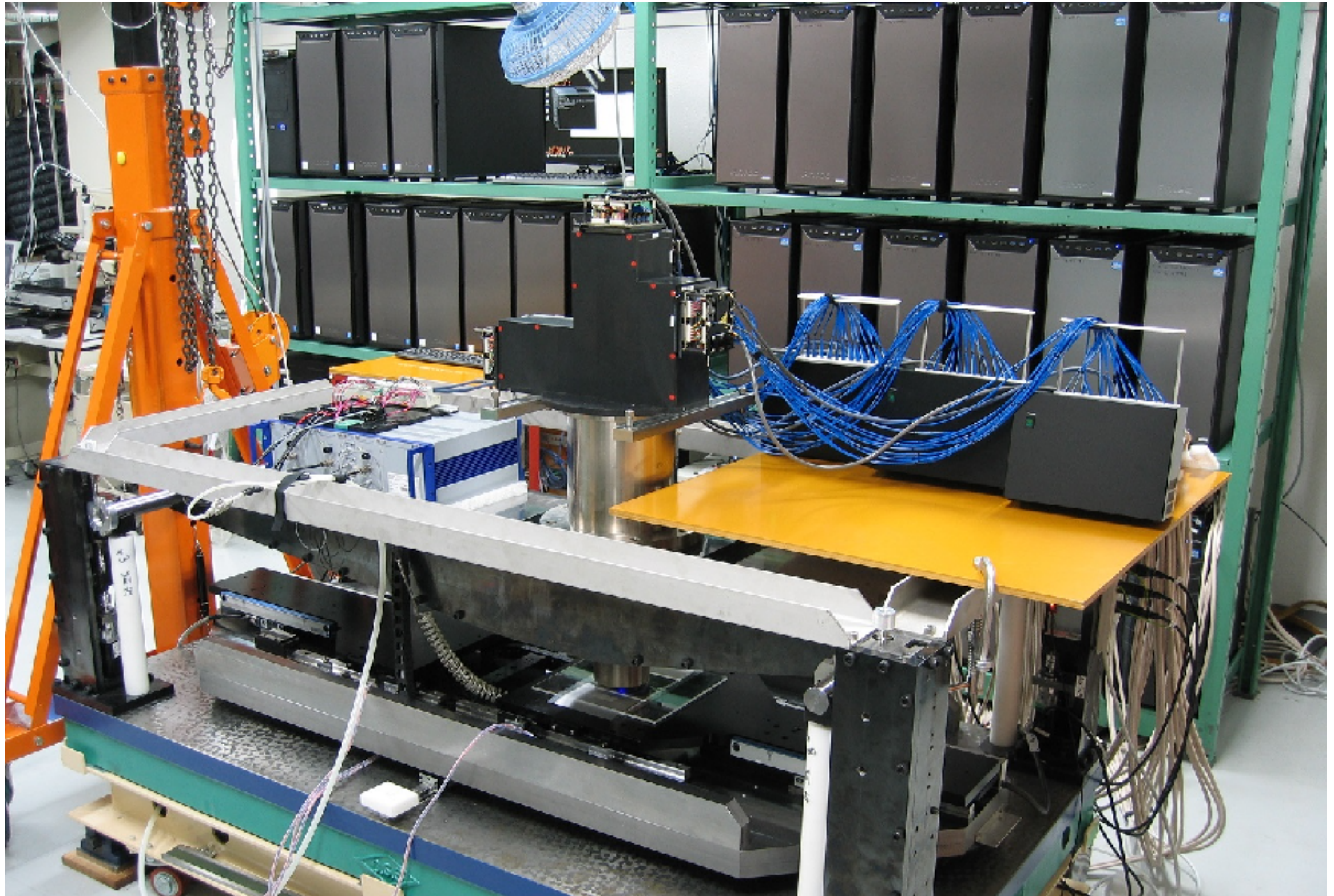
現像後のフィルム



顕微鏡画像

フライト成功！！フィルムを日本に持ち帰り解析を開始

飛跡の読み取り



名古屋大学で開発した超高速自動飛跡読取装置(HTS)

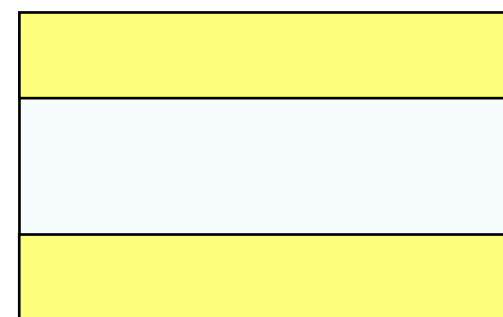
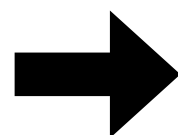
飛跡の自動読み出し

読み取りに適した
厚みに膨らませる

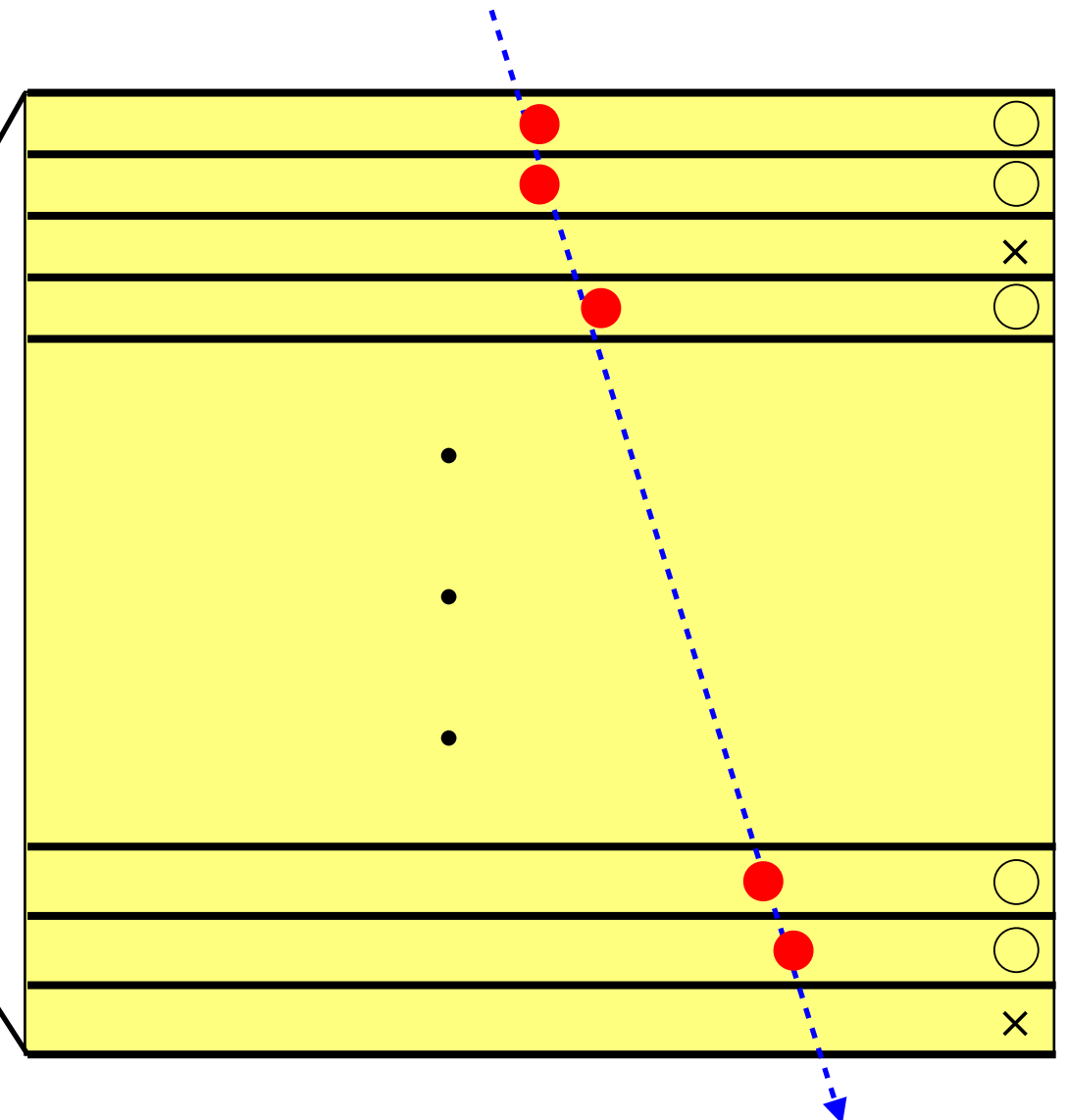
膨潤



現像後のフィルム
断面図



膨潤後のフィルム



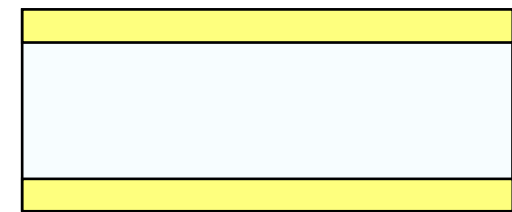
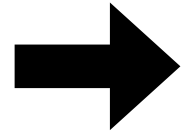
乳剤層を16層の断層画像で撮影

パルスハイト(ph) : 16層の内のヒットレイヤー数
ph閾値を越えたものを飛跡として出力

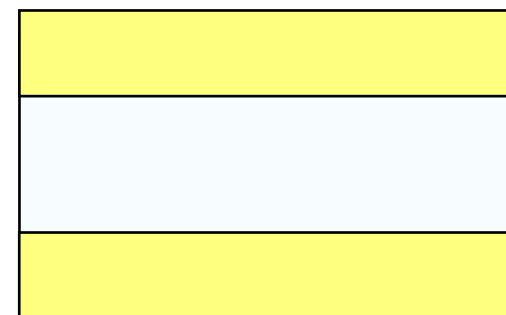
飛跡の自動読み出し

読み取りに適した
厚みに膨らませる

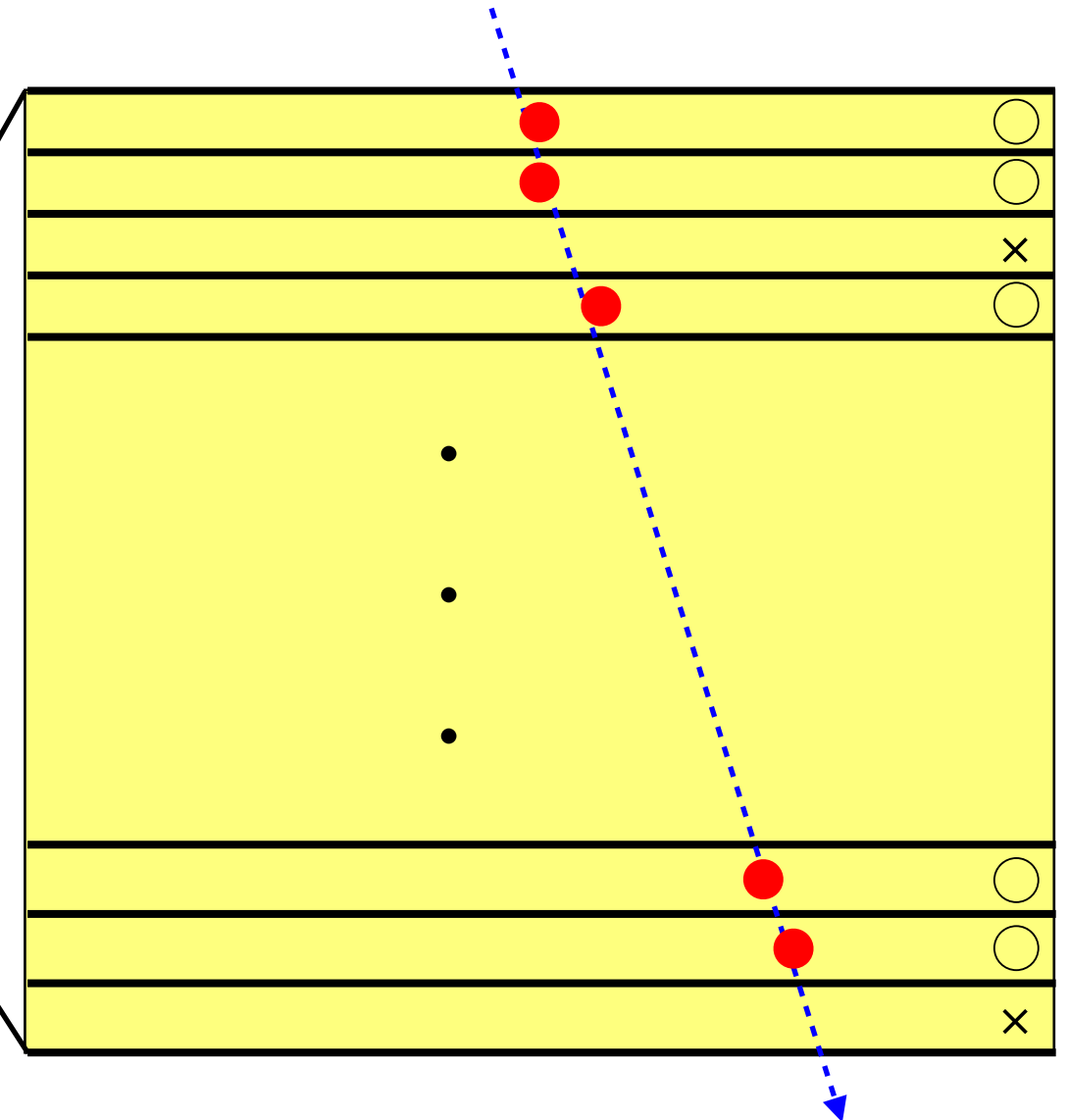
膨潤



現像後のフィルム
断面図



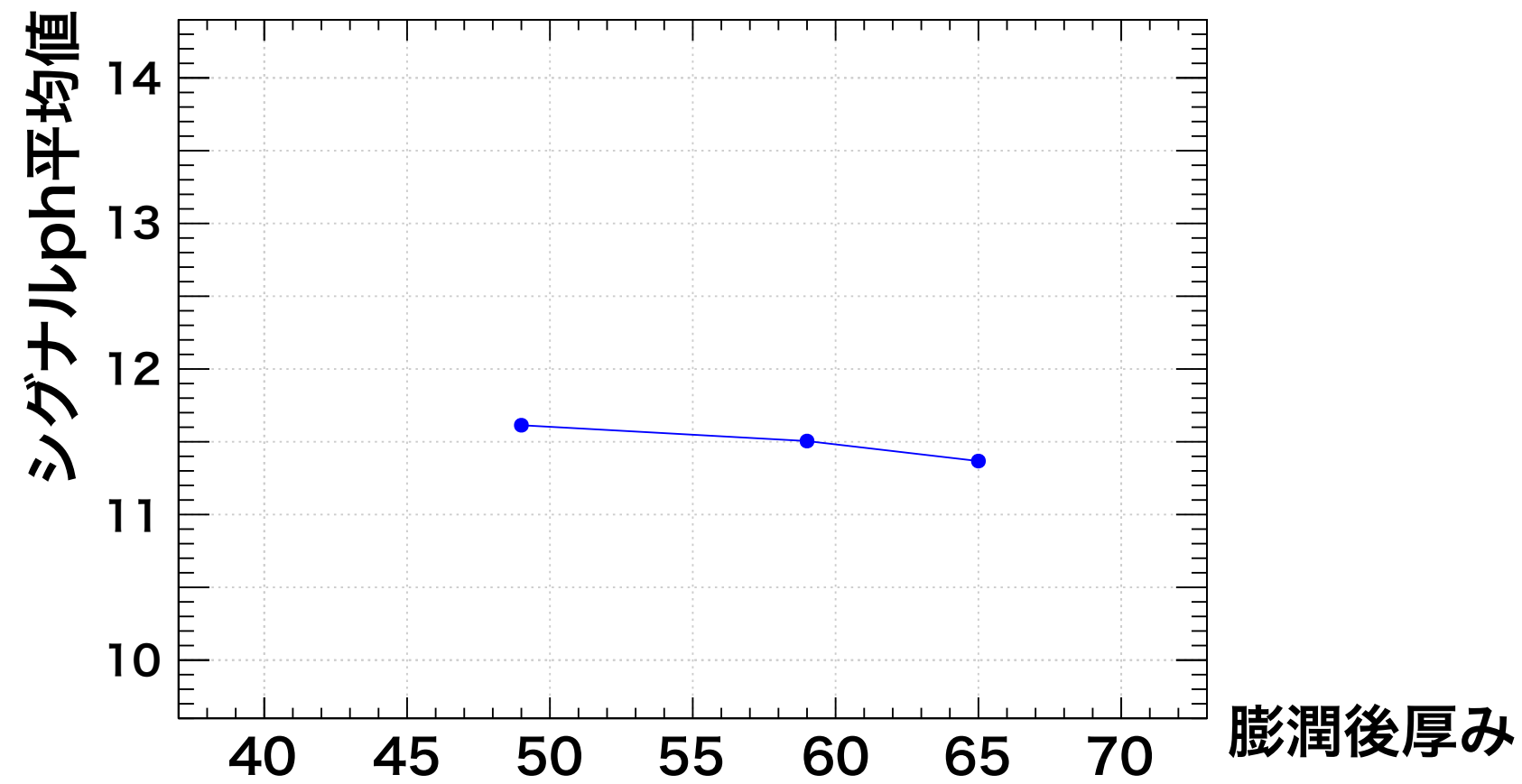
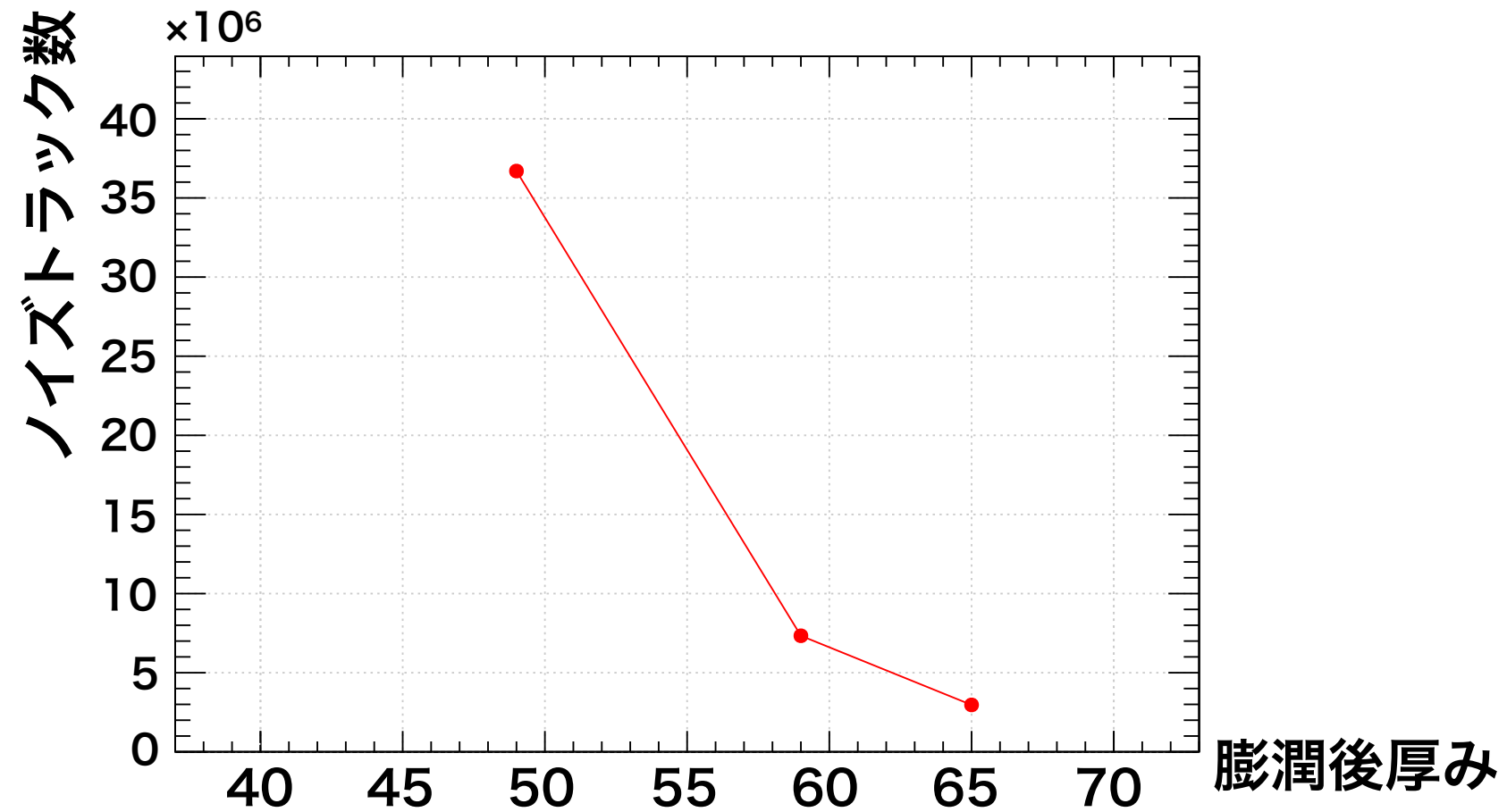
膨潤後のフィルム



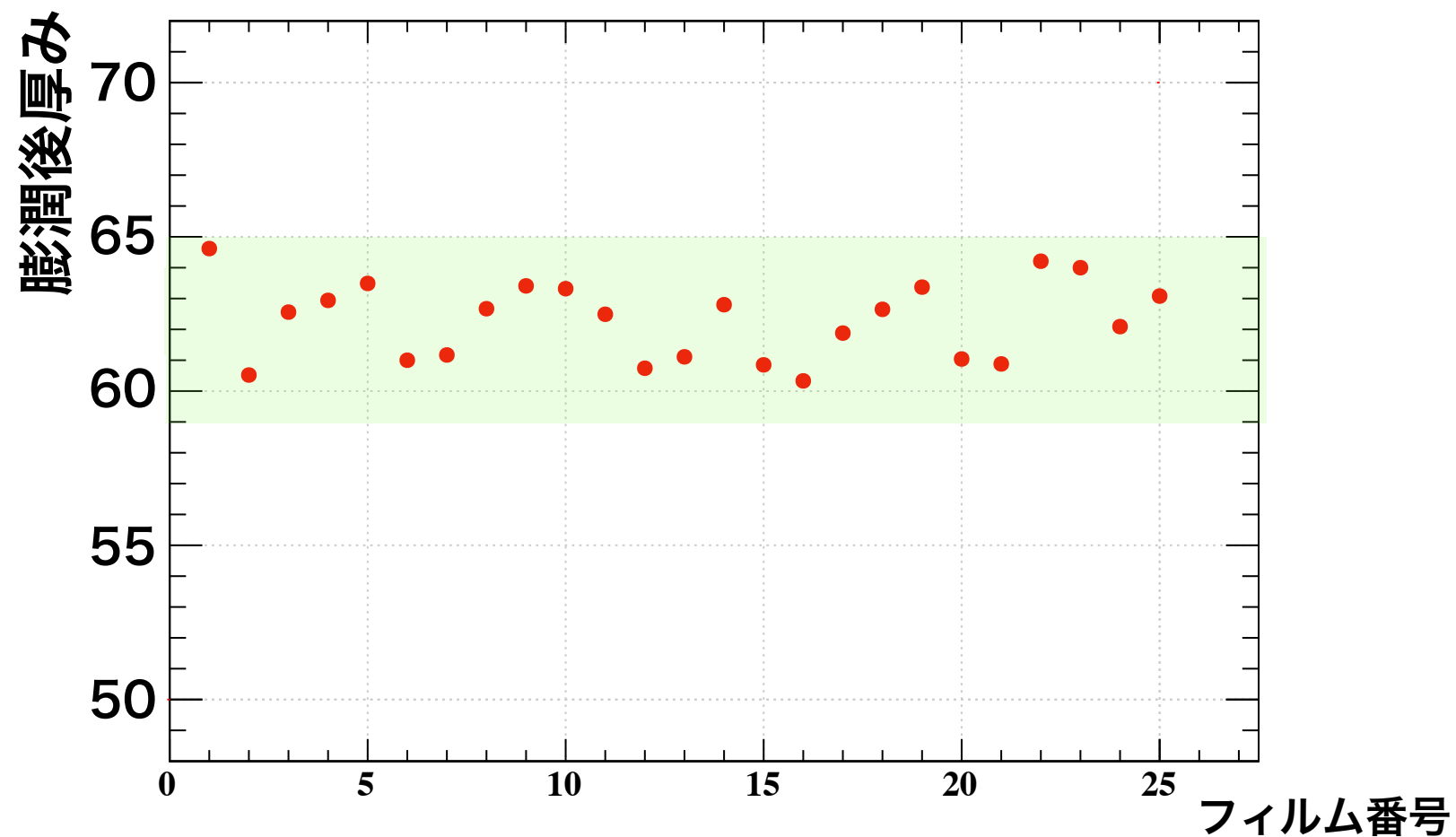
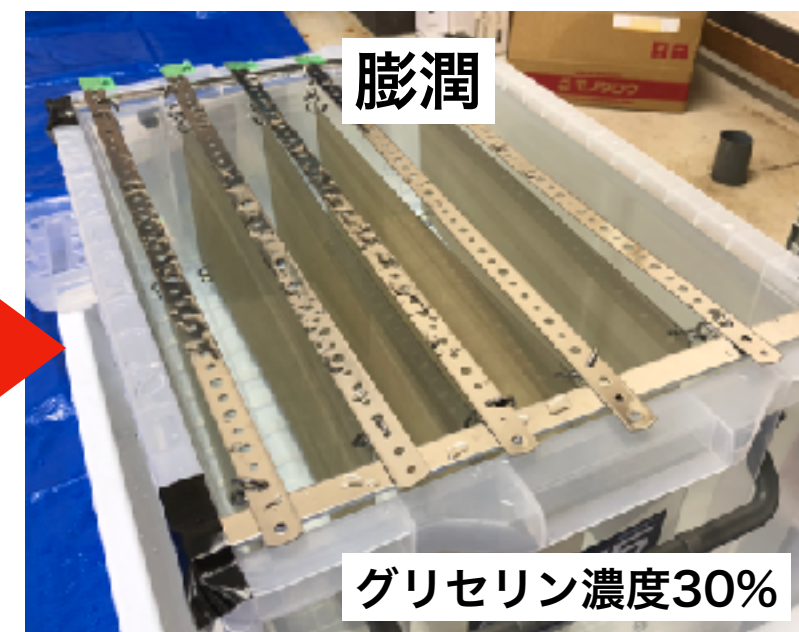
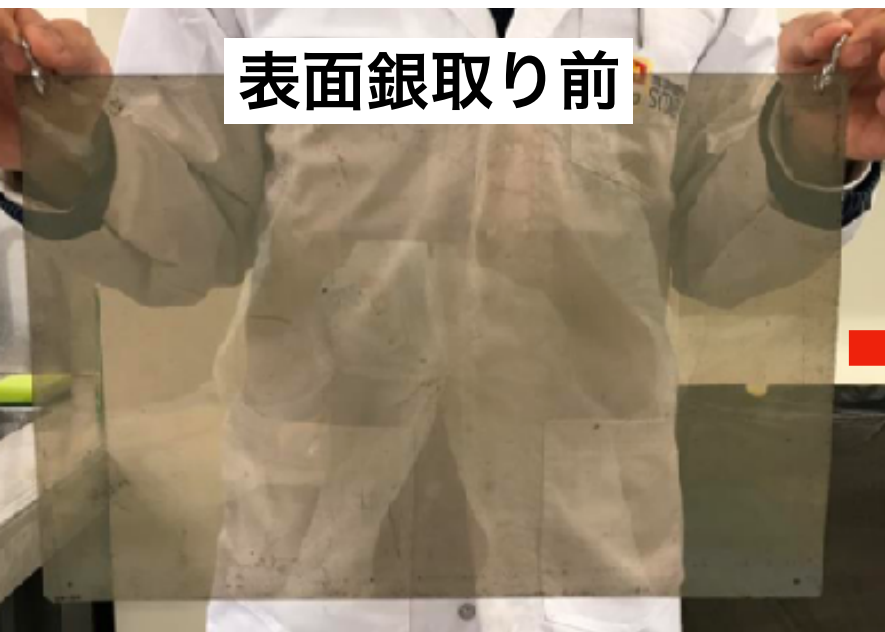
乳剤層を16層の断層画像で撮影

パルスハイト(ph) : 16層の内のヒットレイヤー数
ph閾値を越えたものを飛跡として出力

最適な膨潤厚みの検討



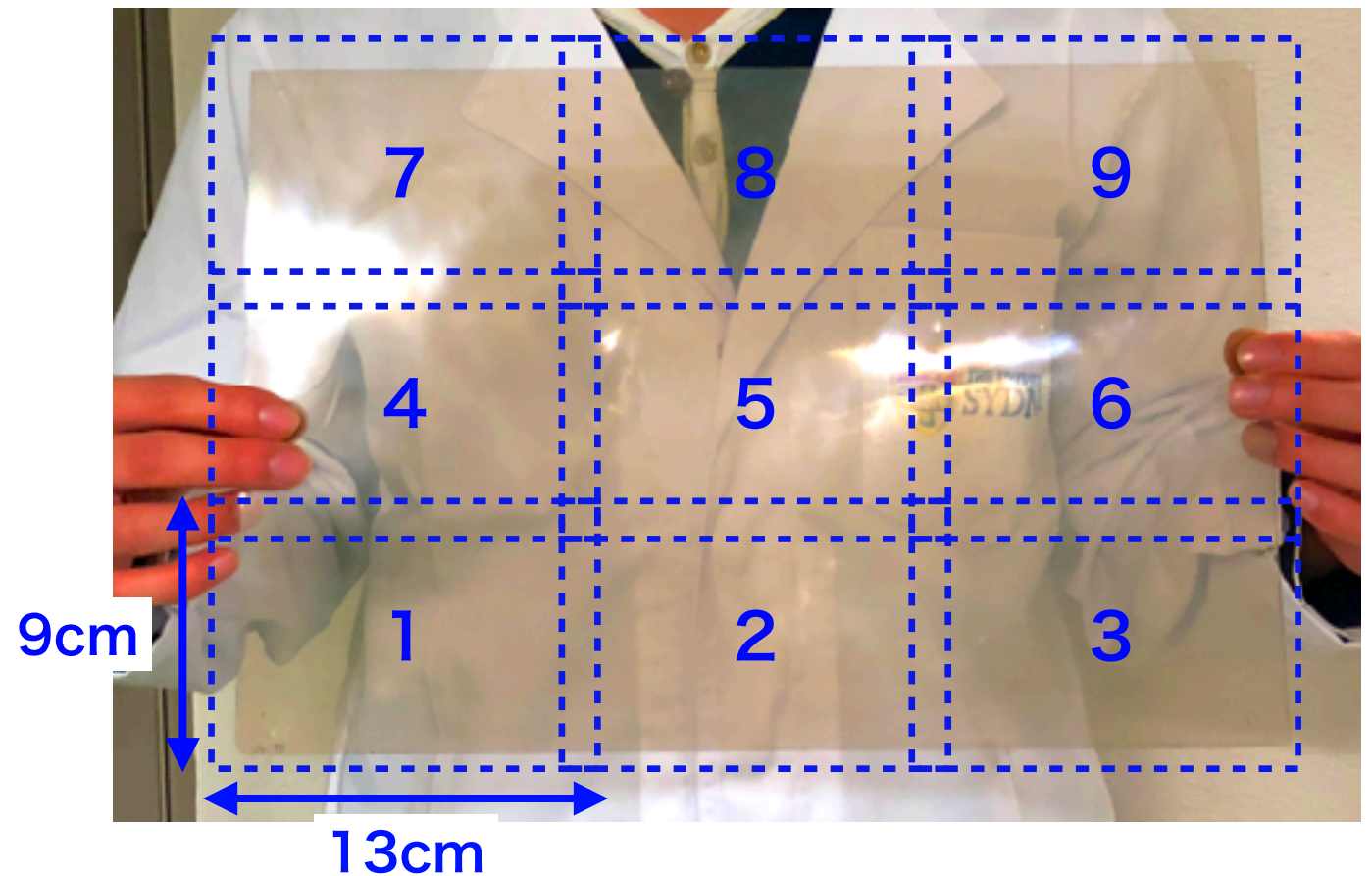
フライトフィルム膨潤処理



狙い通りの厚みに仕上げることができる

コンバーターフィルムの全面スキャン

- ・ コンバーターフィルム400枚を
全面スキャン($|\tan \theta_{x,y}| < 1.26$)
- ・ 1枚のフィルムを9areaに
分割してスキャン
- ・ スキャンデータの性能評価
をしながら全面スキャン
 - **フィルム毎の飛跡検出効率**
 - フィルム間の飛跡接続精度
(位置、角度)

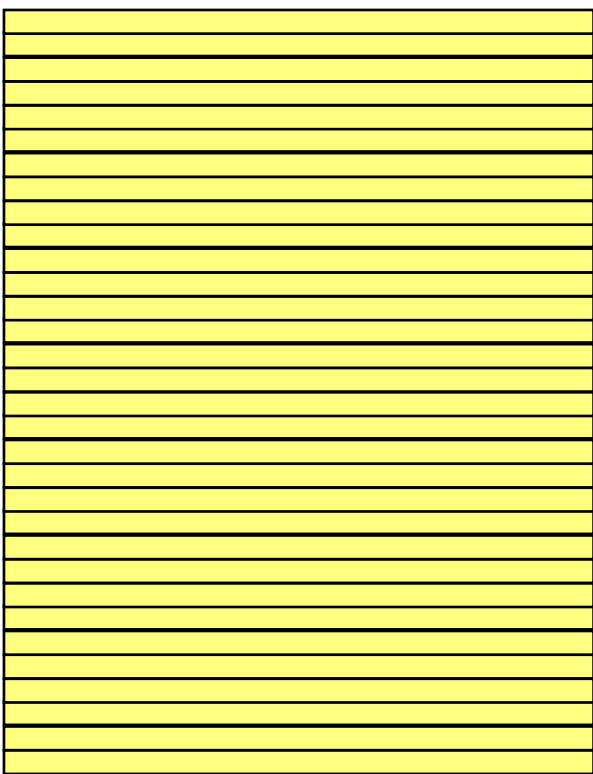


9areaに分割スキャン

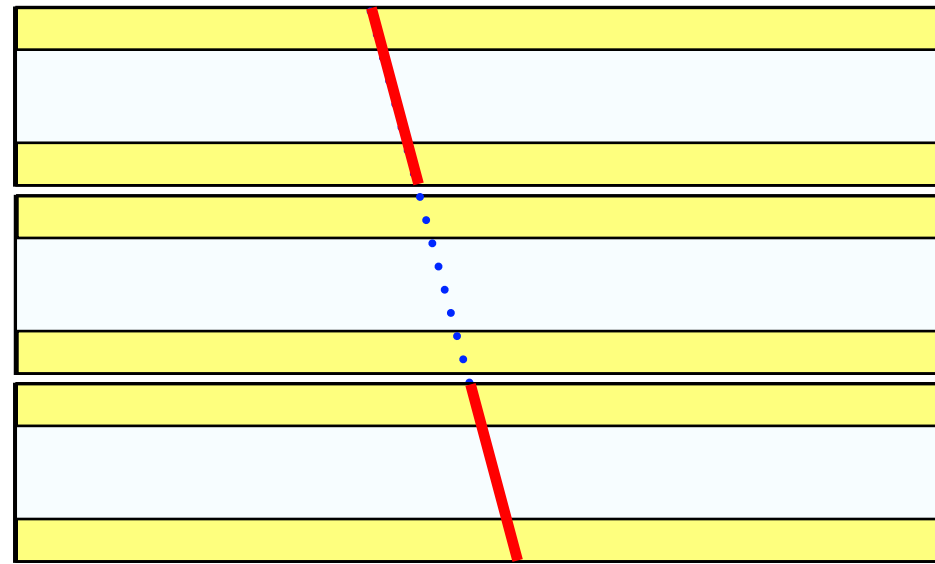
飛跡検出効率の求め方

$$\text{飛跡検出効率} = \frac{\text{トリガー\&評価フィルムでの接続本数}}{\text{トリガーフィルムでの接続本数}}$$

コンバーター100枚



連続した3枚のフィルム

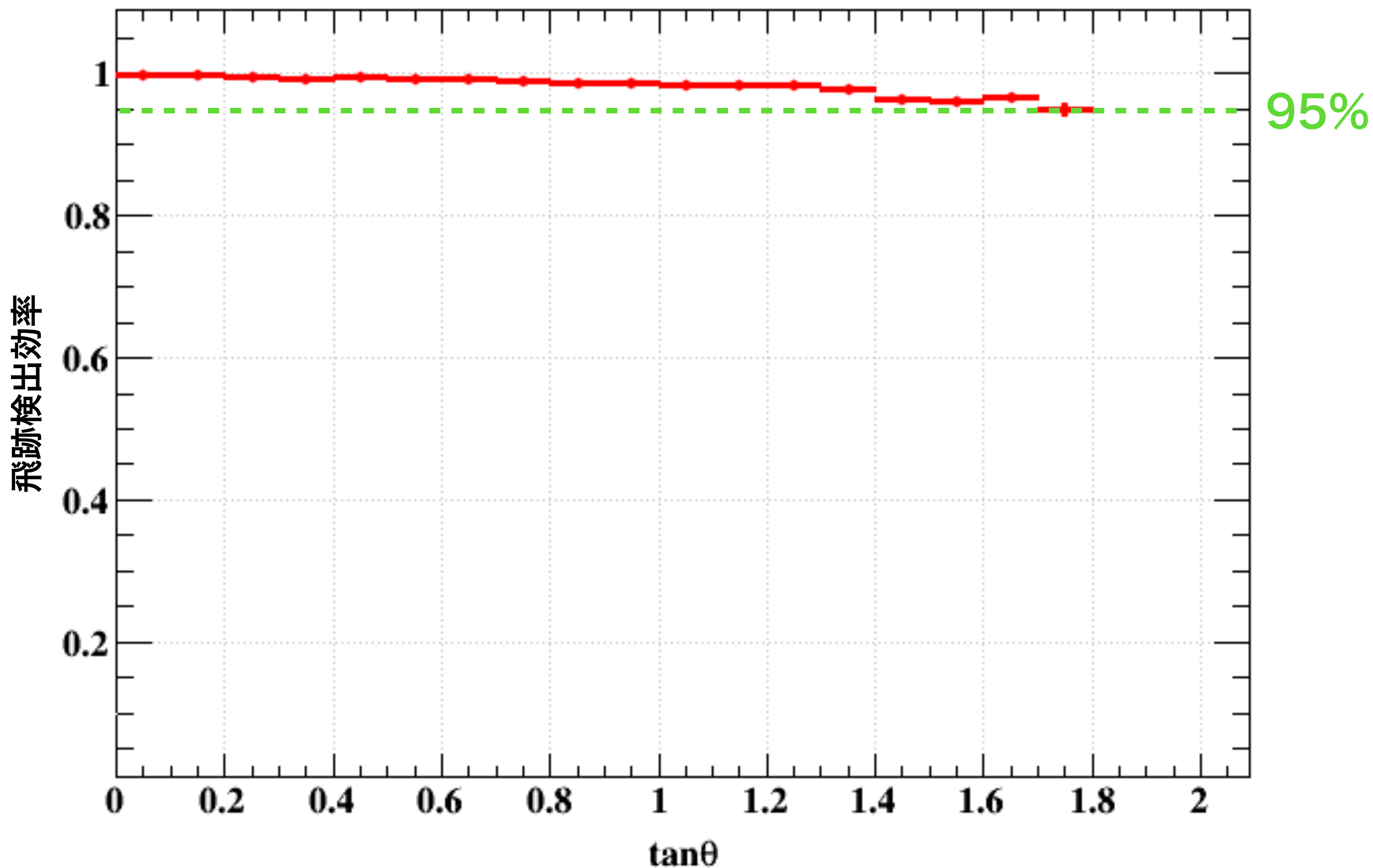


○トリガーフィルム

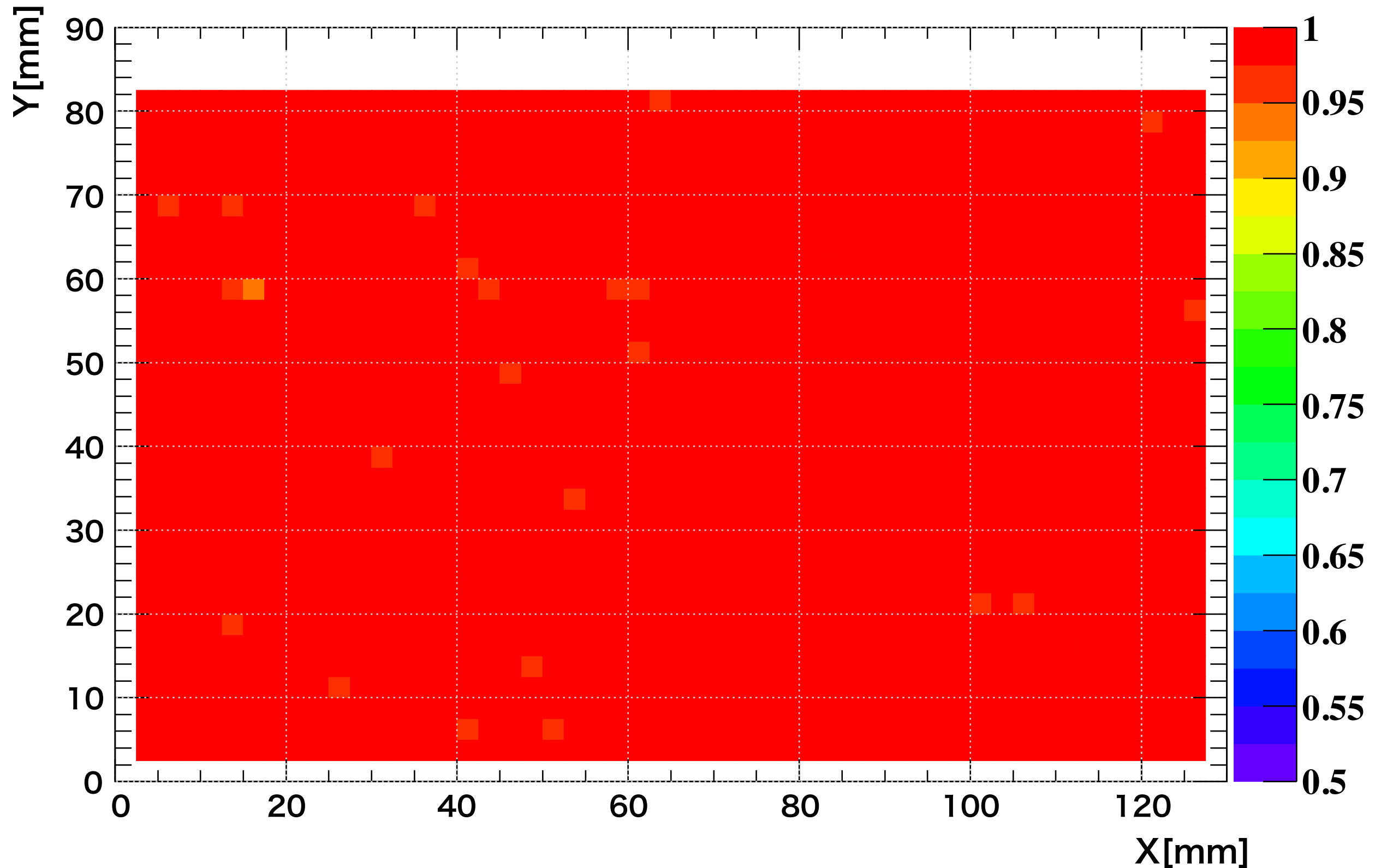
? 評価フィルム

○トリガーフィルム

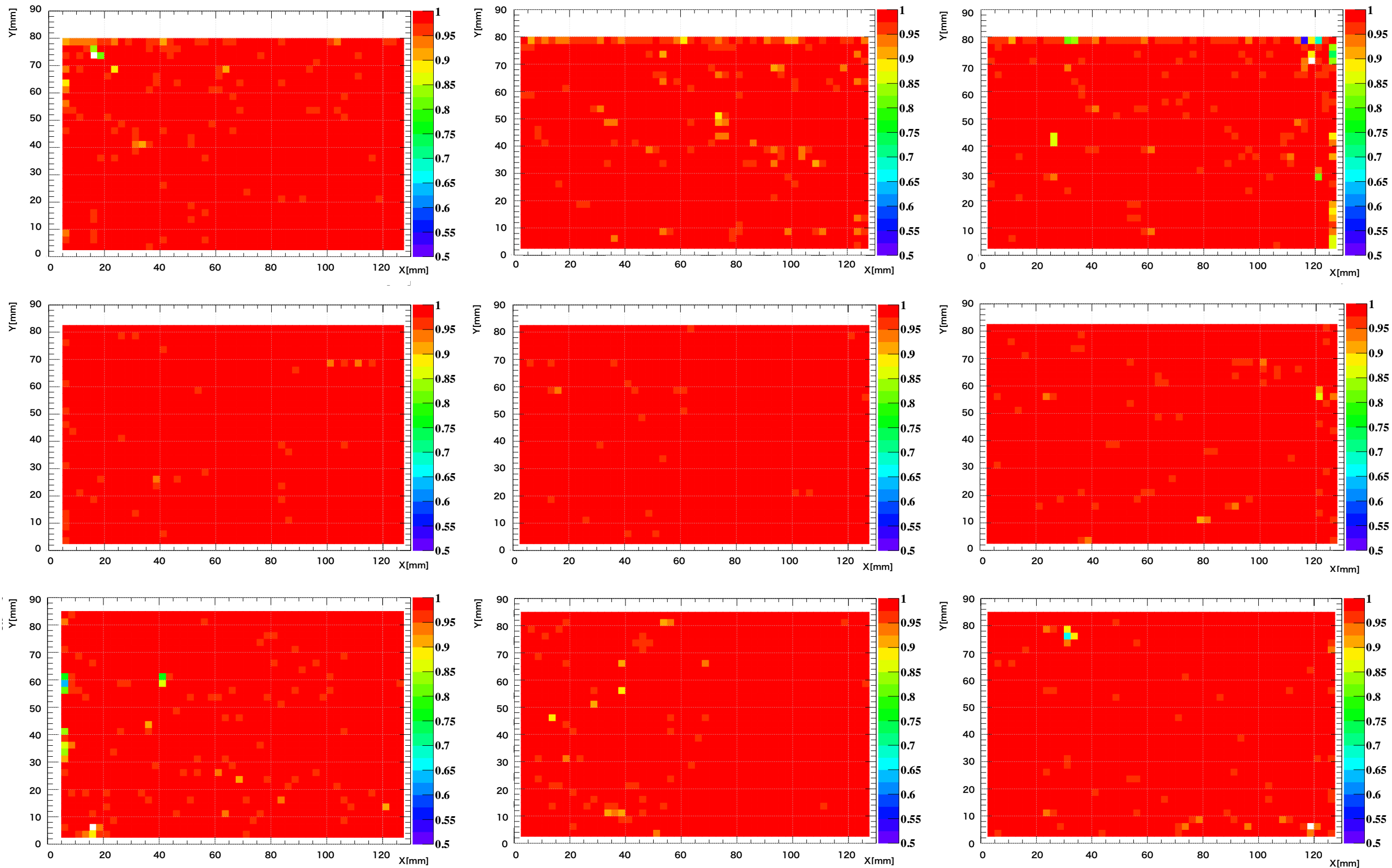
1 areaでの飛跡検出効率の角度依存性



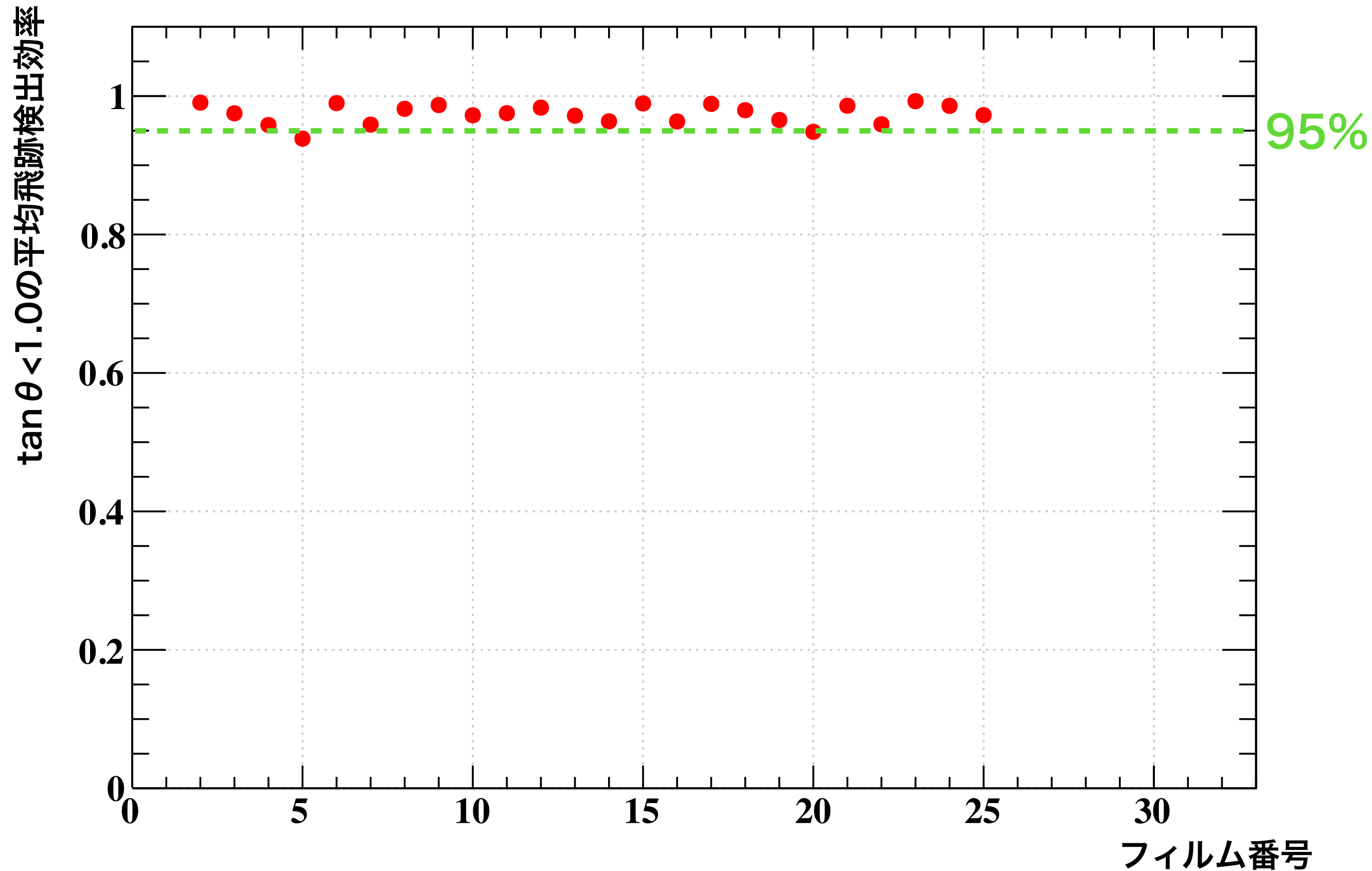
1 areaでの飛跡検出効率の位置依存性

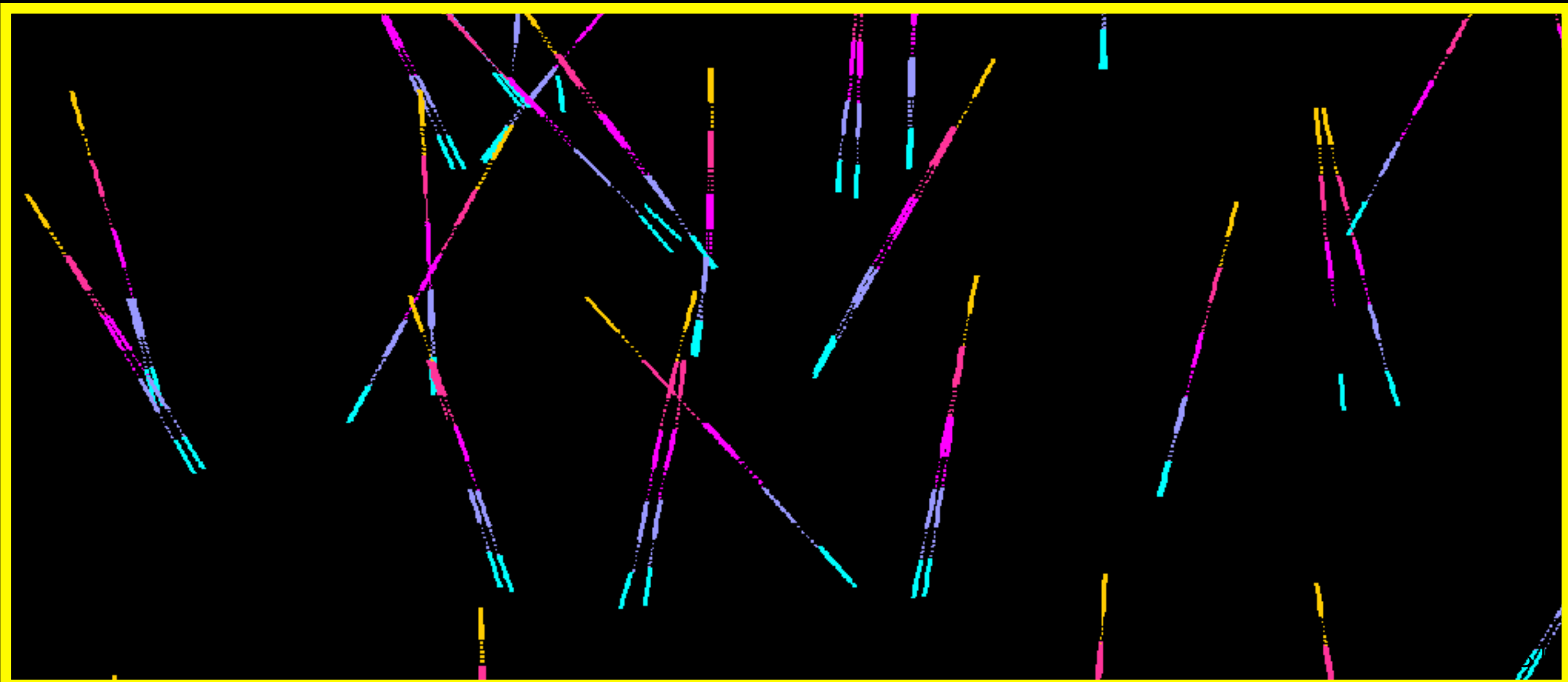
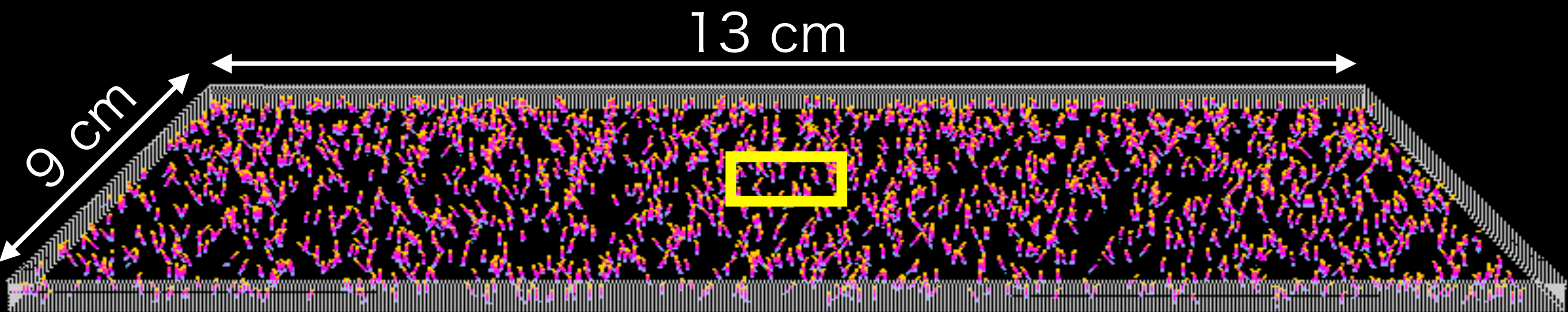


1枚のフィルムの飛跡検出効率の位置依存性



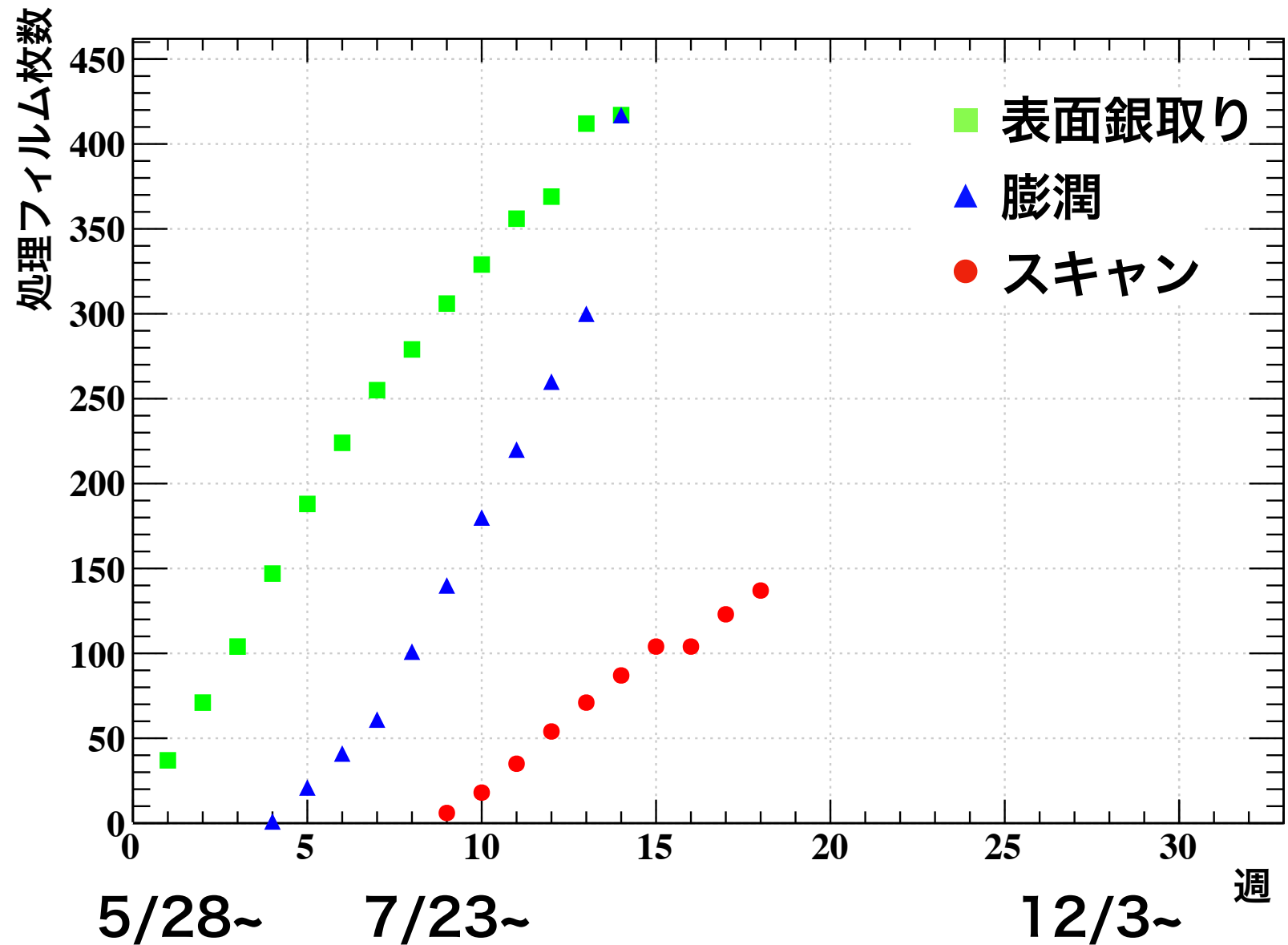
フィルム毎の飛跡検出効率





コンバーターフィルムスキャン状況

- 5月末にフィルムを日本に持ち帰ってから表面銀取り、膨潤を進めてきた
- 並行してスキャンの条件出しを進め、7月末より全面スキャンを開始
- 12月中に全て終了予定

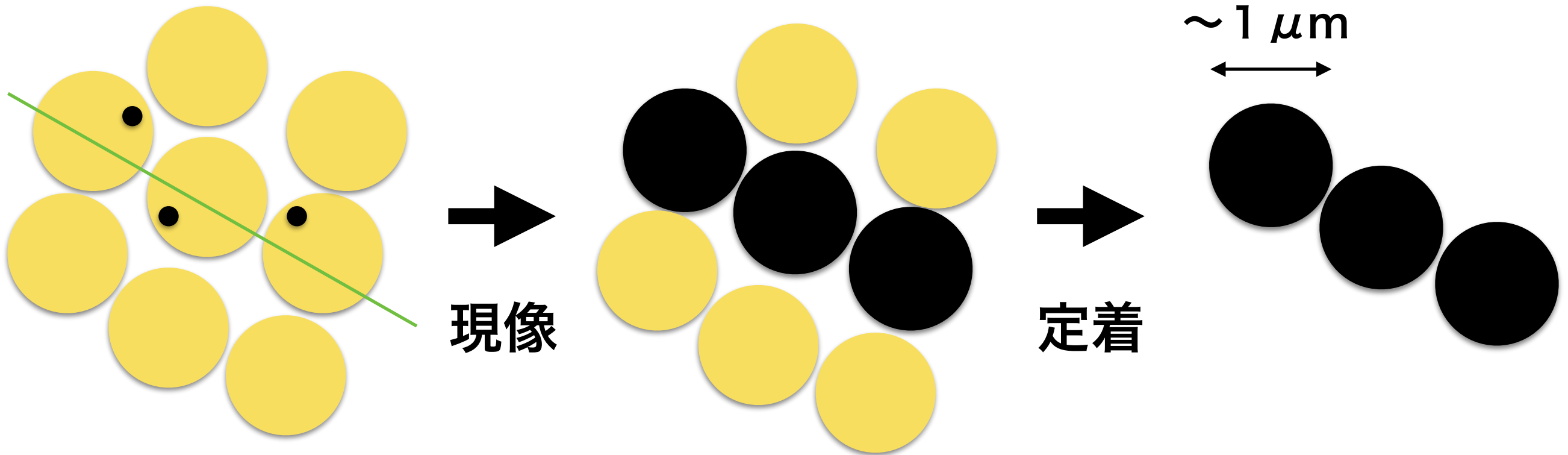


まとめ

- GRAINE計画：気球搭載型エマルション γ 線望遠鏡による宇宙 γ 線精密観測
- 2018年4月気球実験実施(目的：望遠鏡の総合性能実証)
 - フィルム製造、コンバーター製作(@名古屋大学)
611枚($\sim 58\text{m}^2$)を製造、リフレッシュ,乾燥後コンバーター4ユニットを製作
 - フィルム実装(@アリススプリングス放球基地)
与圧容器ゴンドラへのフィルム実装後はテントで**フィルムを冷却しながら待機**
 - フライト、回収
総飛翔時間17h21mで目標天体の観測可能時間を確保、**翌日に迅速な回収**
 - 現像(@シドニー大学)
12日間で489枚現像、**リフレッシュ時の乾燥不足によるエラーフィルムなし**
- フィルムの解析を開始
 - 最適な膨潤厚みを検討($59\sim 65\mu\text{m}$)、表面銀とり、膨潤は全て完了
 - 解析した25枚のフィルムほぼ全てで**飛跡検出効率95%以上を達成**($\tan \theta < 1.0$)
 - 全面スキャンを継続中、1/3程度が終了。12月中に全フィルム完了予定

原子核乳剤(エマルション)

ゼラチン中にAgBr
結晶を充填



荷電粒子の電離作用によりできた電子が銀イオンを還元し銀核が生成

一定数以上の銀核を持つ結晶のみを選択的に還元させ銀粒子を成長させる

未反応のAgBr結晶を溶かし出す

高い空間分解能を持ち、3次元の飛跡情報を記録できる

顕微鏡画像

10micron



Gamma-ray



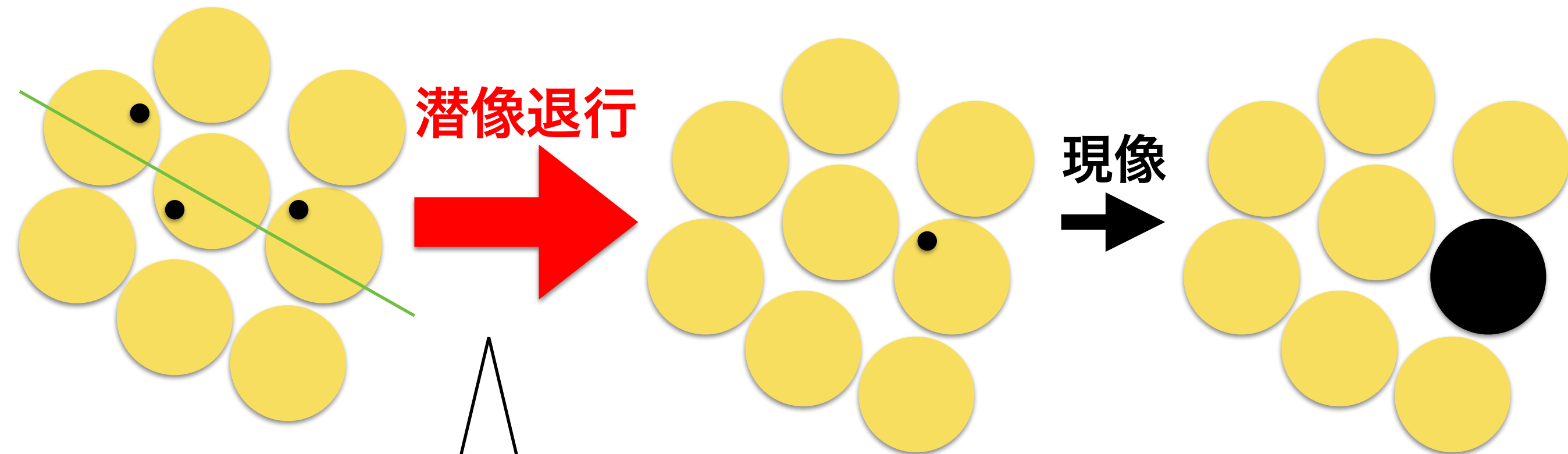
$e^{+/-}$



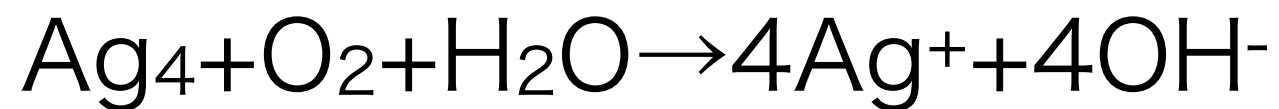
$e^{-/+}$



潜像退行(フェーディング)

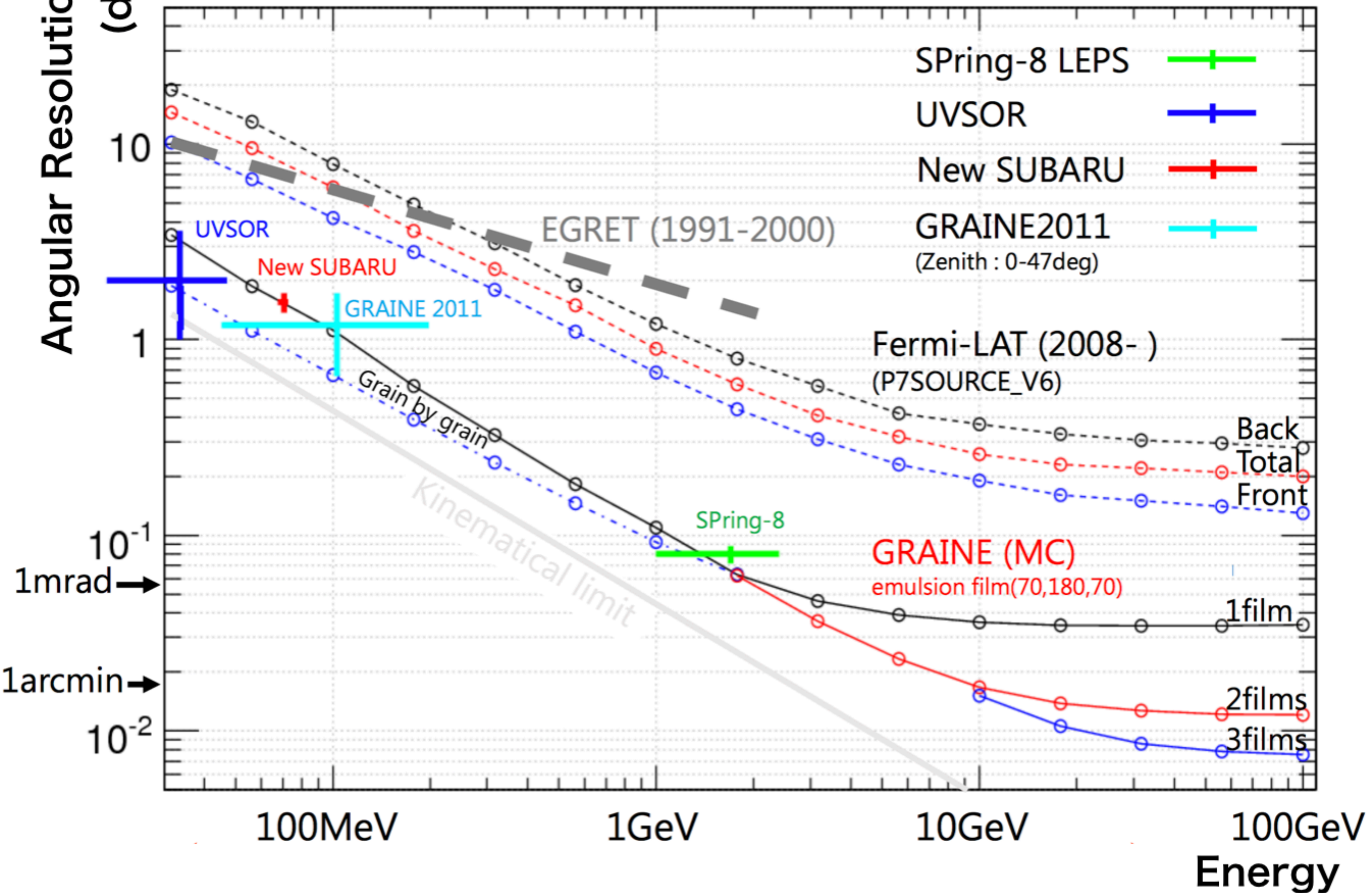


現像までに潜像が酸化作用で消えてしまう現象

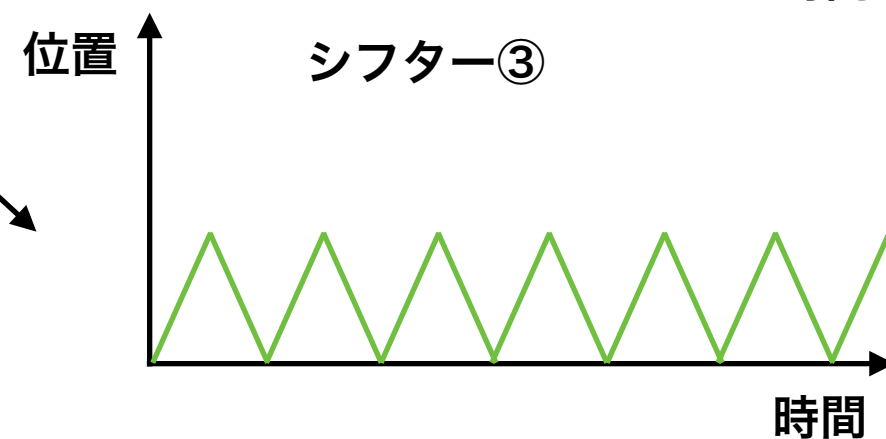
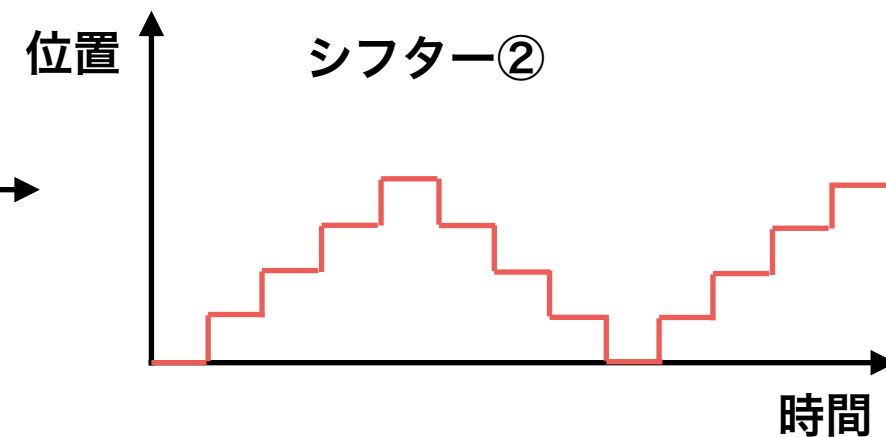
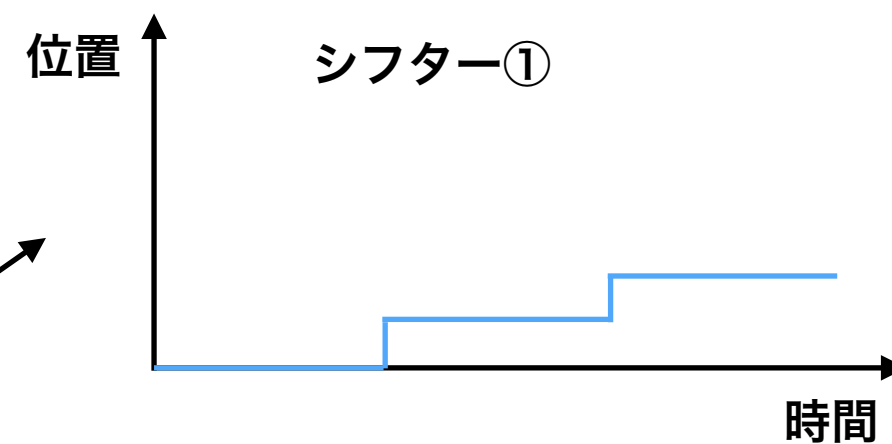
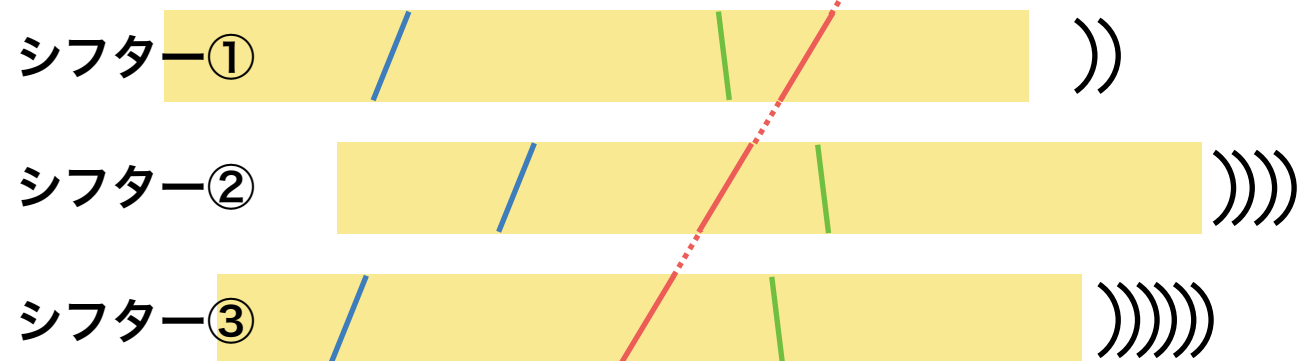
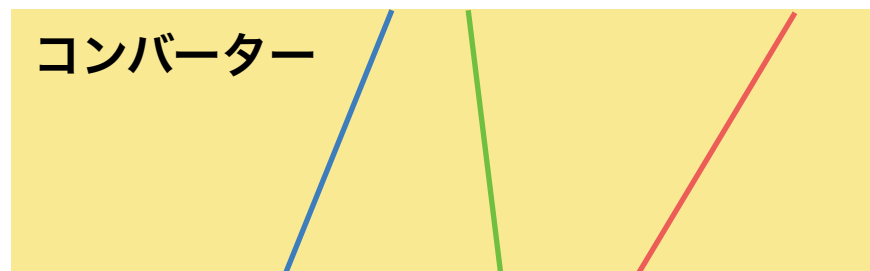


高温 & 水分含有量が多いほど起こりやすい

Angular resolution



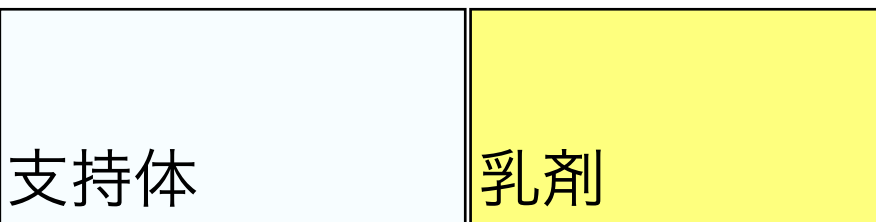
多段シフター



膨潤

- ・ 現像後に縮んだフィルムをスキャンに適した厚みに膨らませる

観測中

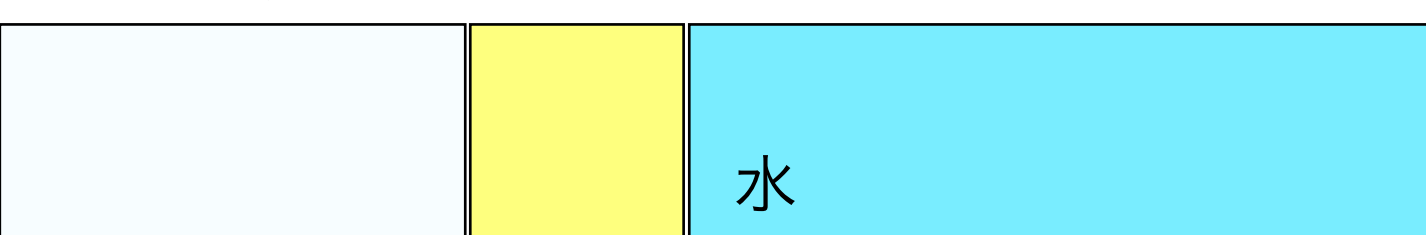


現像後



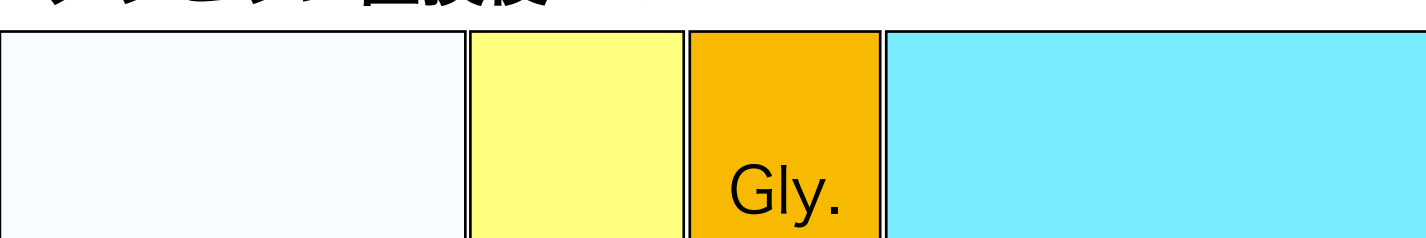
荷電粒子の通過に関与しなかった
臭化銀は定着処理によって流される

水膨潤



フィルムを水につけて膨らませる

グリセリン置換後

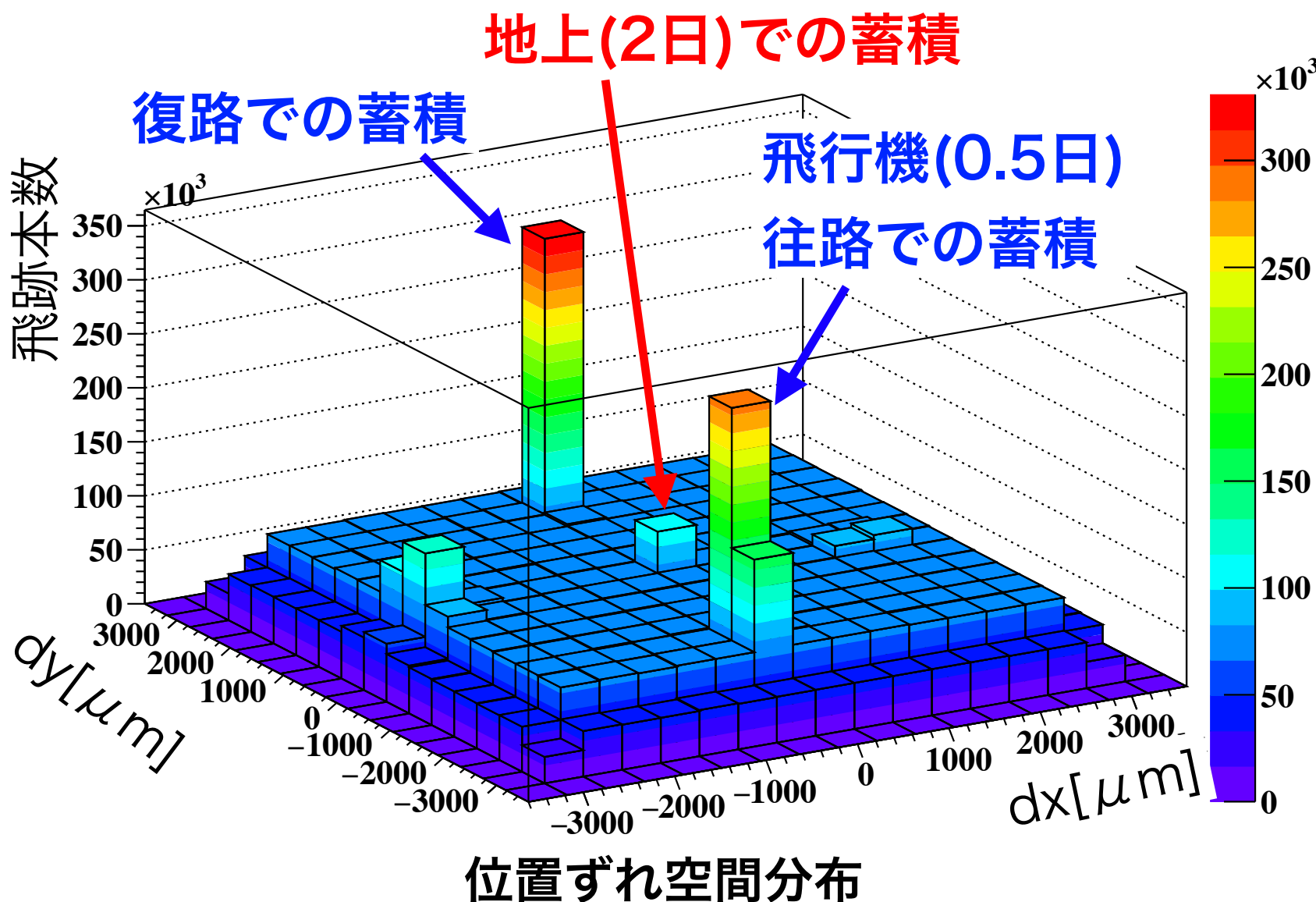


グリセリン溶液の濃度によって
仕上がり厚みを調整できる

輸送(日本→豪州)時の飛跡蓄積量の実測

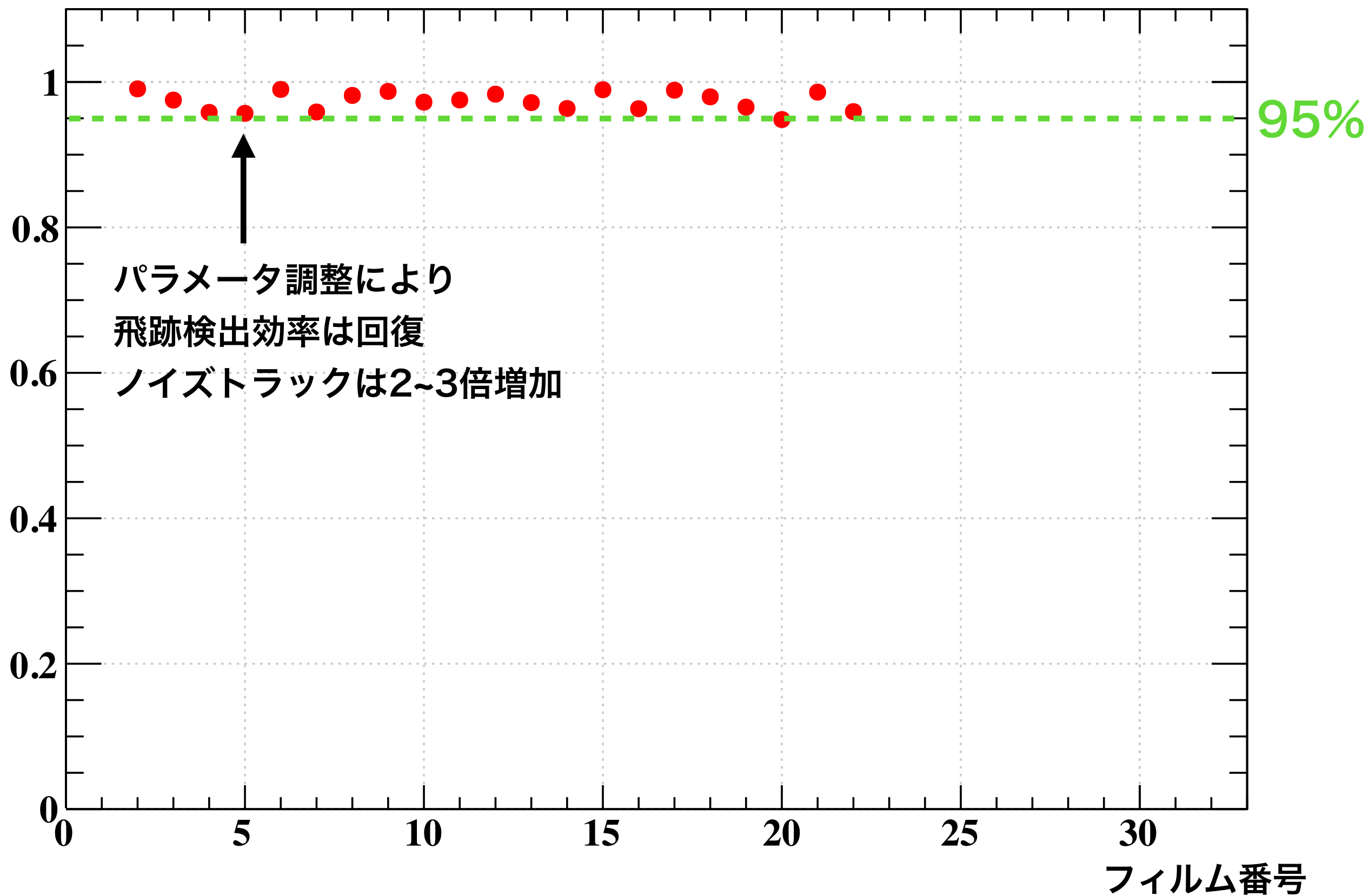
10月,シドニー大学訪問時にエマルジョンフィルムを携帯

シフター機構により入射タイミングを識別



- ・ 空輸(0.5日)時は全蓄積の1/10程度
 - ・ 陸路輸送時は全蓄積の数分の1程度
- **フライトデータ**
解析に支障はない

$\tan \theta < 1.0$ の平均飛跡検出効率

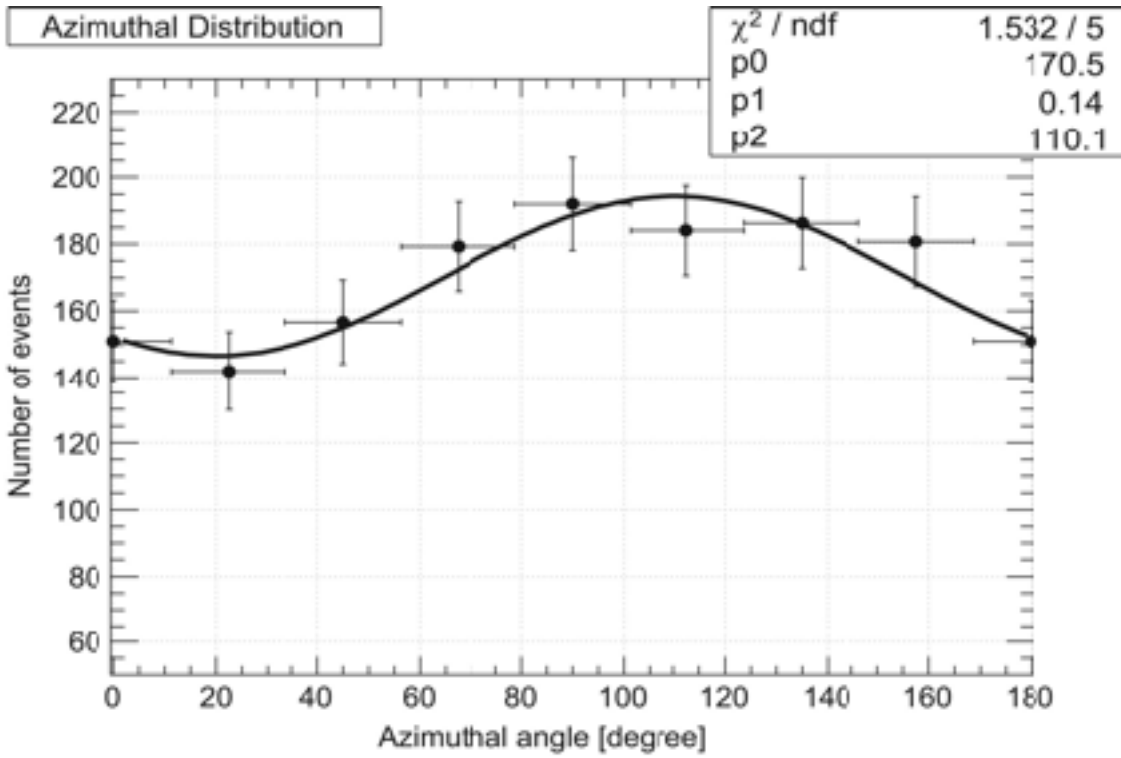
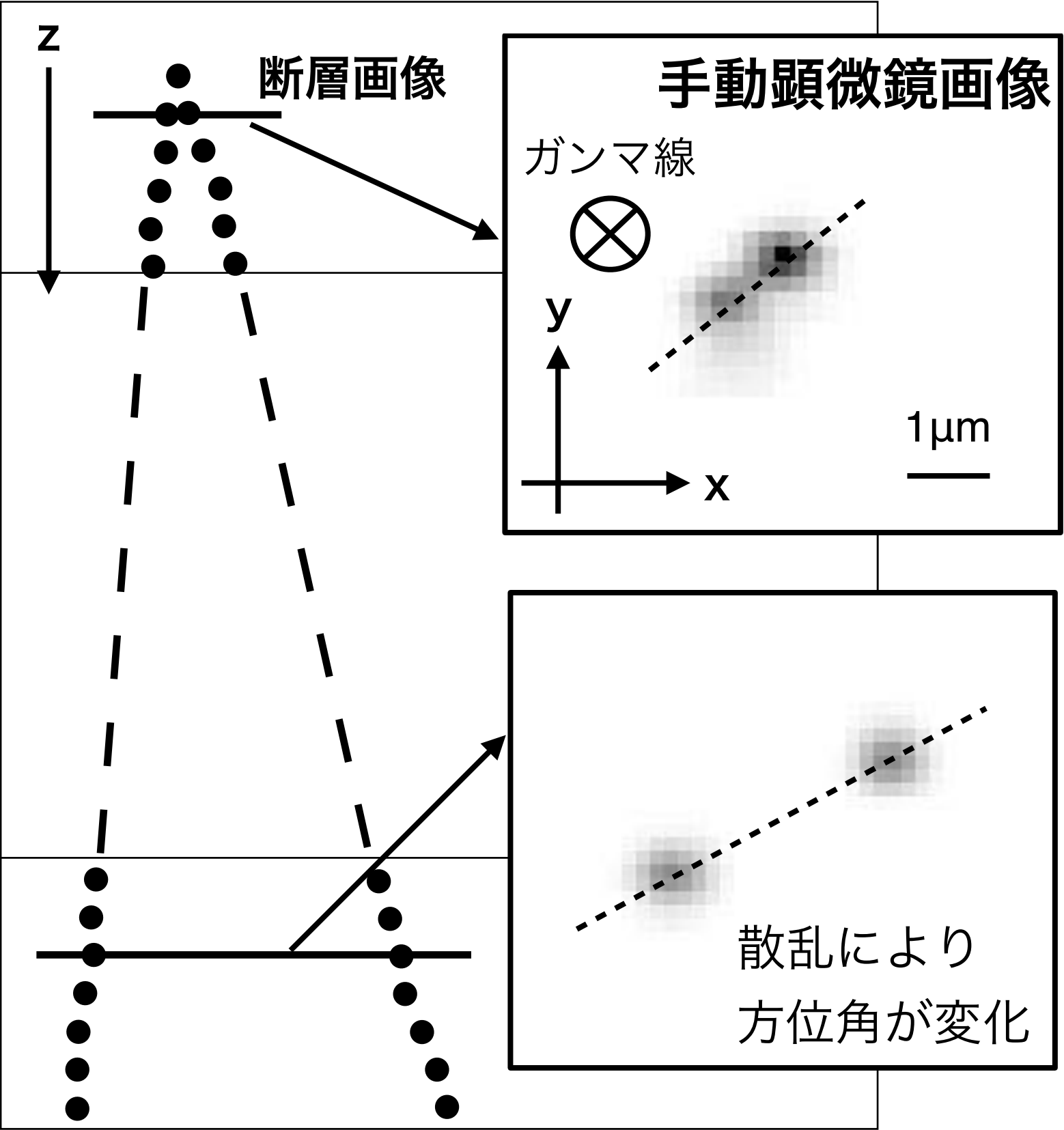


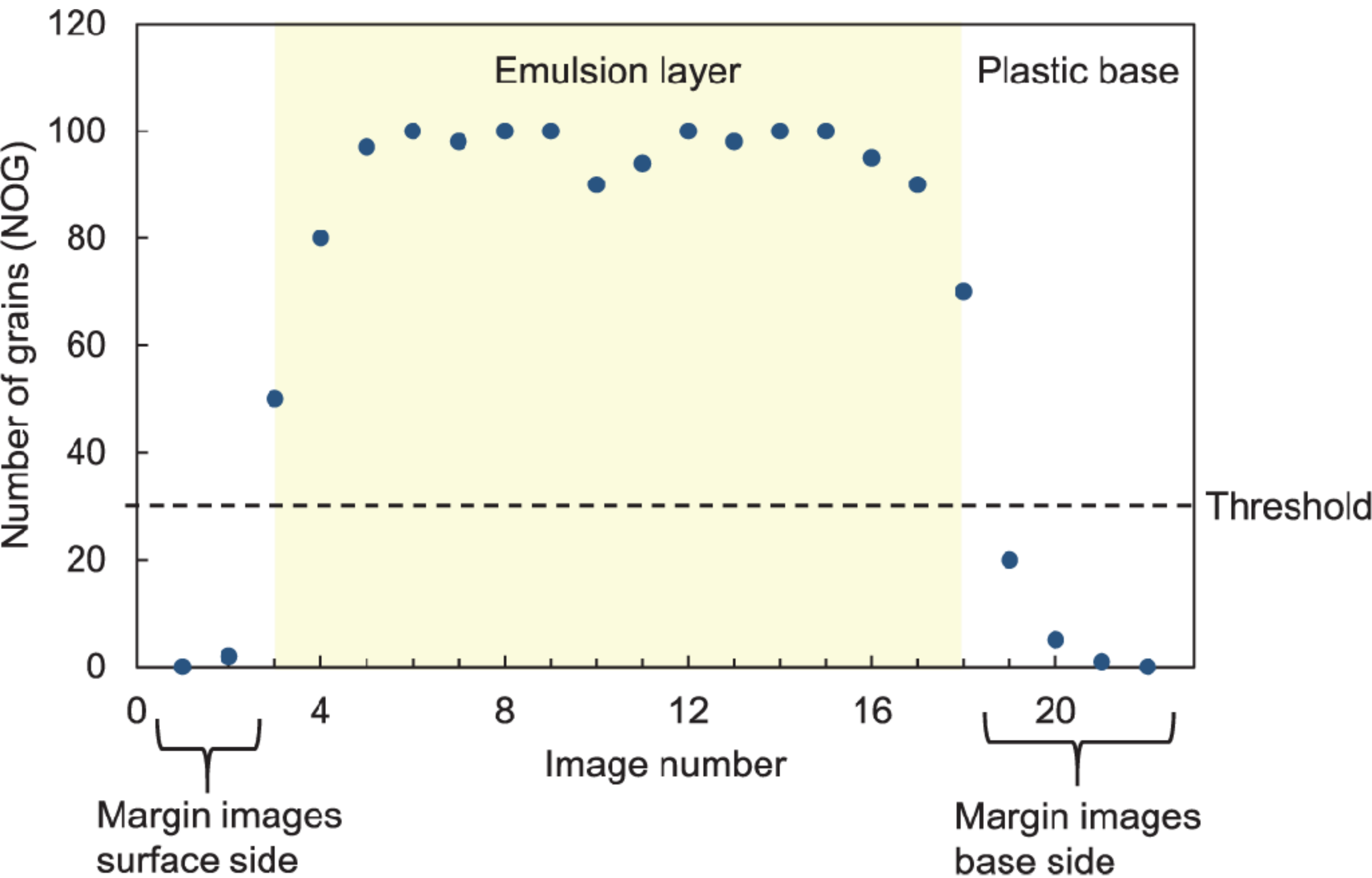
国際情勢 (sub-GeV – GeV mission)

	Fermi-LAT	GRAINE	eASTROGAM	ComPair	HARPO
Converter & Tracker	W (0.03/0.18Xo) & SSD	Emulsion	両面読みSSD	両面読みSSD	ガスTPC
Energy Range	20 MeV – 300 GeV	10 MeV – 100 GeV	10 MeV – 3 GeV (pair)	10 MeV – 0.5 GeV(pair)	MeV – GeV
角度分解能 @100MeV	6.0°	1.0°	1.5° (requirement)	1.5°	0.4°
角度分解能 @1GeV	0.9°	0.1°	0.2° (requirement)		
偏光感度		有り			有り
有感面積	1.96m ² (有効面積0.25m ² @100MeV)	10m ² (有効面積2.1m ² @100MeV)	0.9m ²	0.9m ²	未定 (有効面積0.03m ² w/ 10kg Ar)
観測開始	2008	2021	未定 (早くて2029)	未定	未定
打ち上げ	NASA	JAXA (気球)	ESA?	NASA?	未定

原子核乾板技術でのみ実現可能



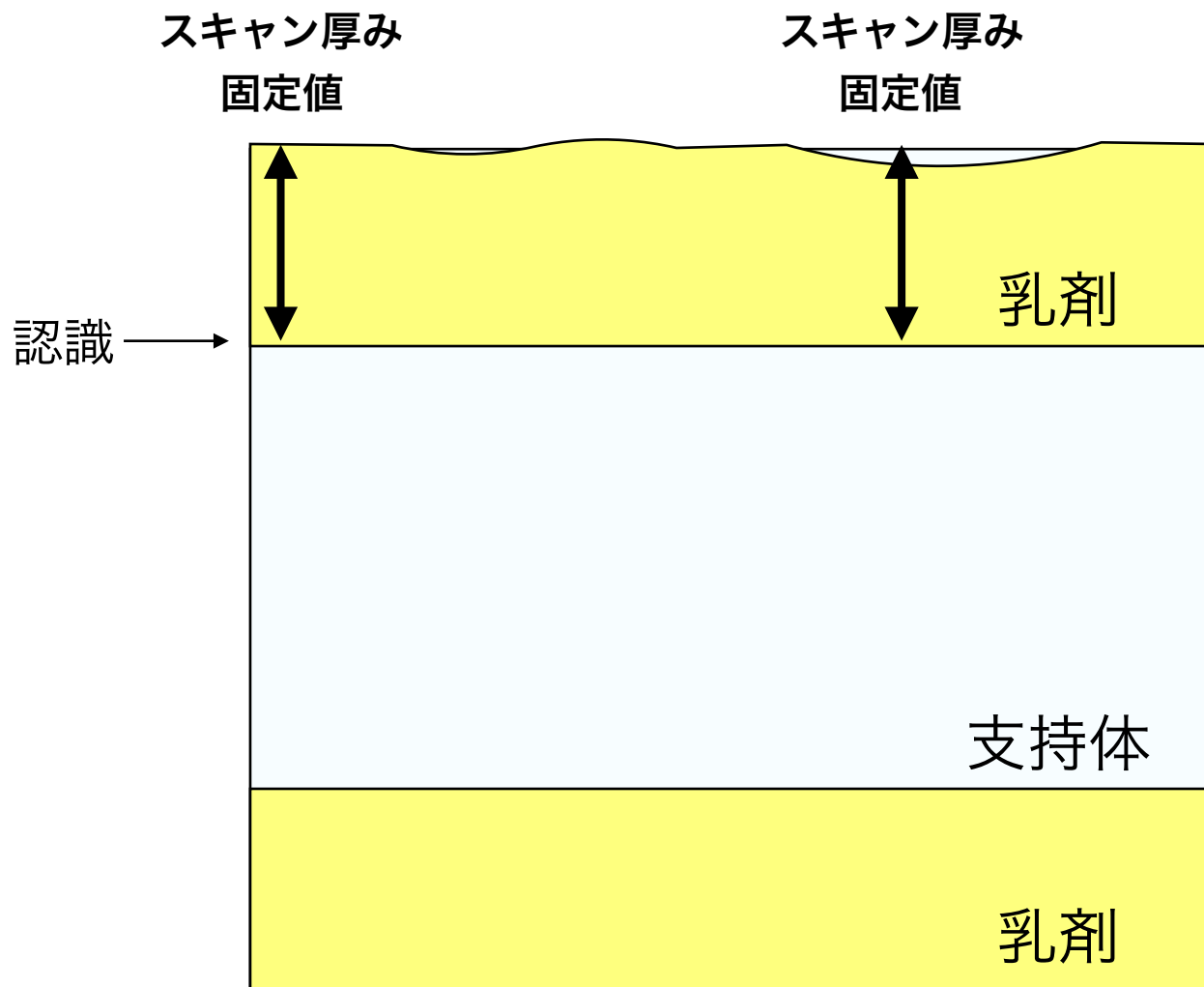
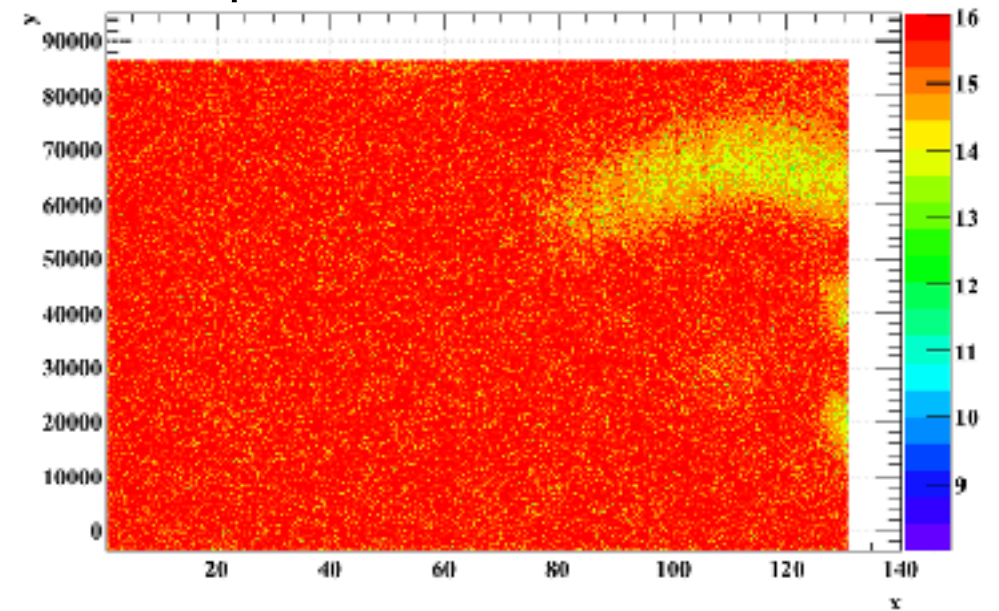




スキャン厚み自動判定モードの導入

厚み固定値モード(従来)

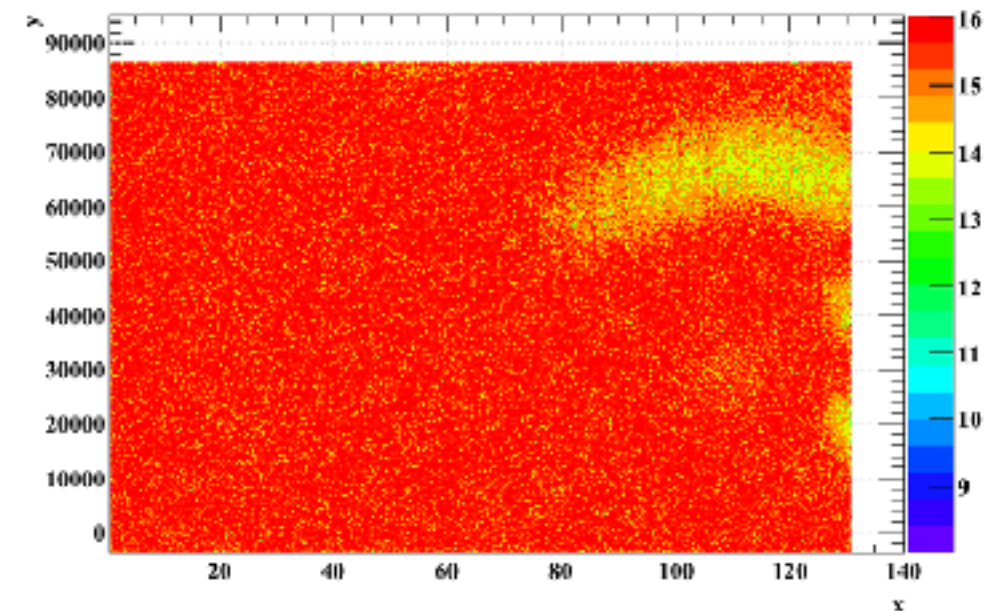
ph最大値の位置分布



スキャン厚み自動判定モードの導入

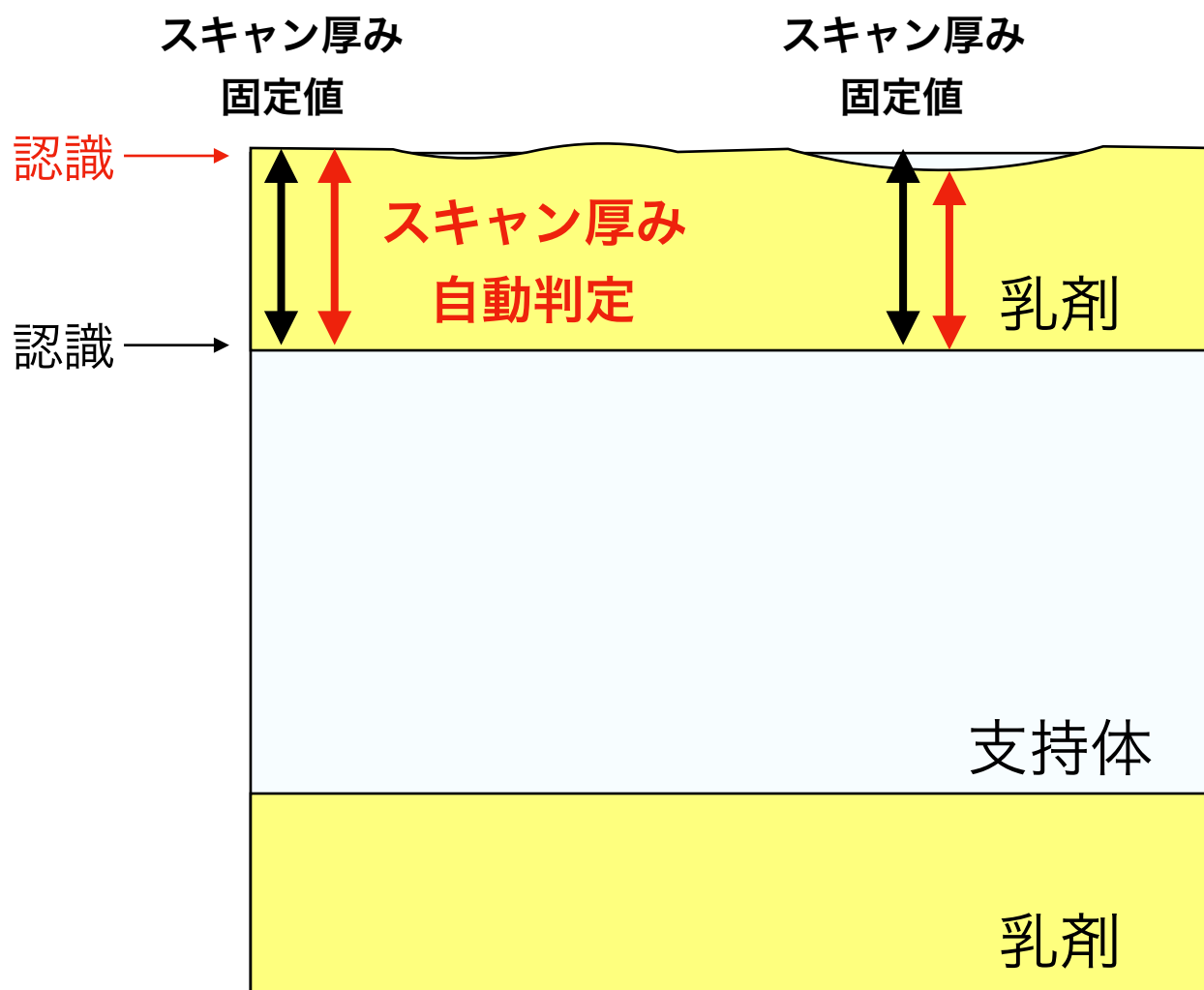
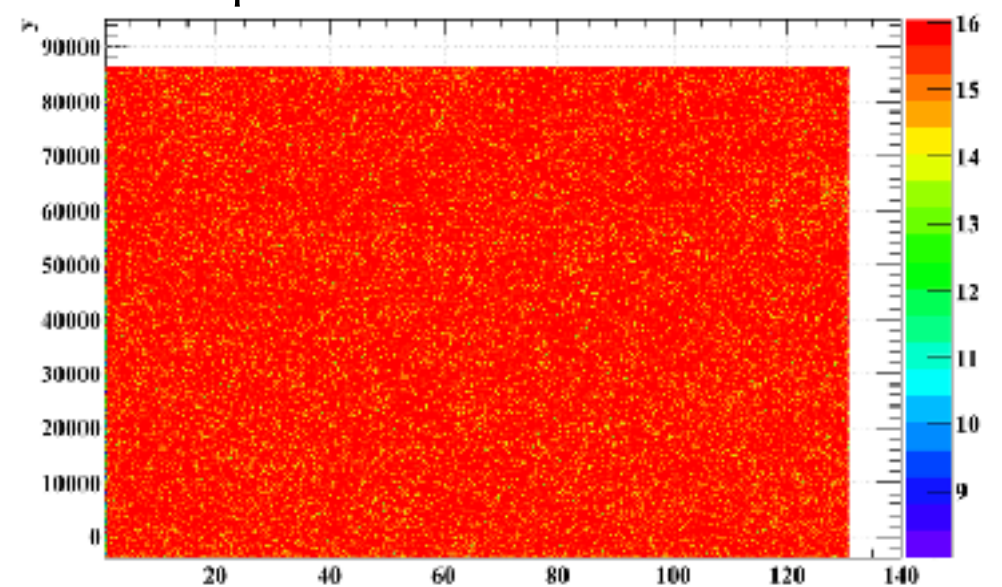
厚み固定値モード(従来)

ph最大値の位置分布

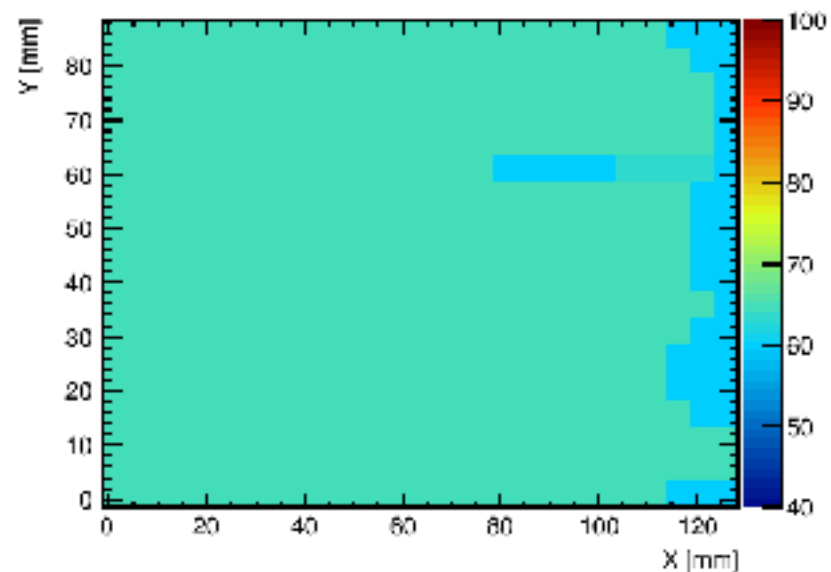


厚み自動判定モード

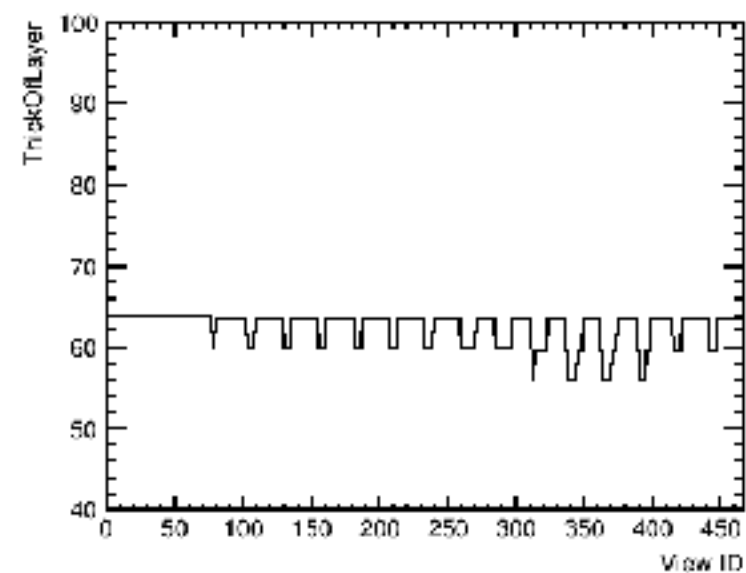
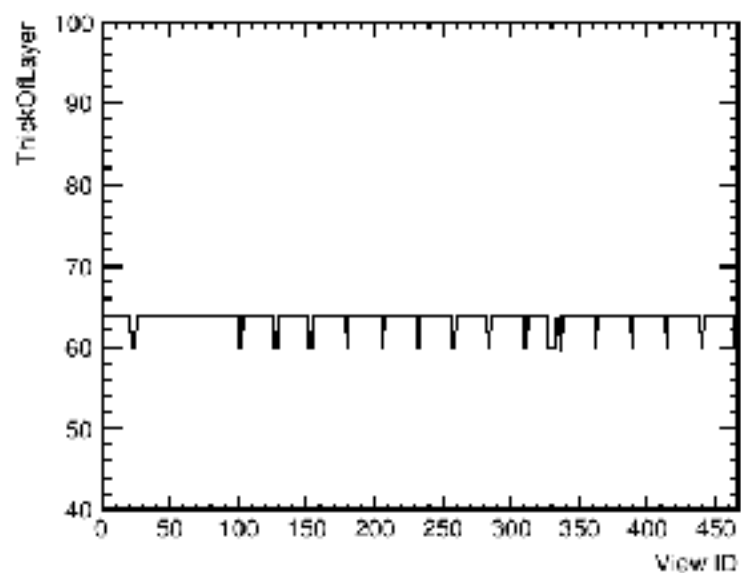
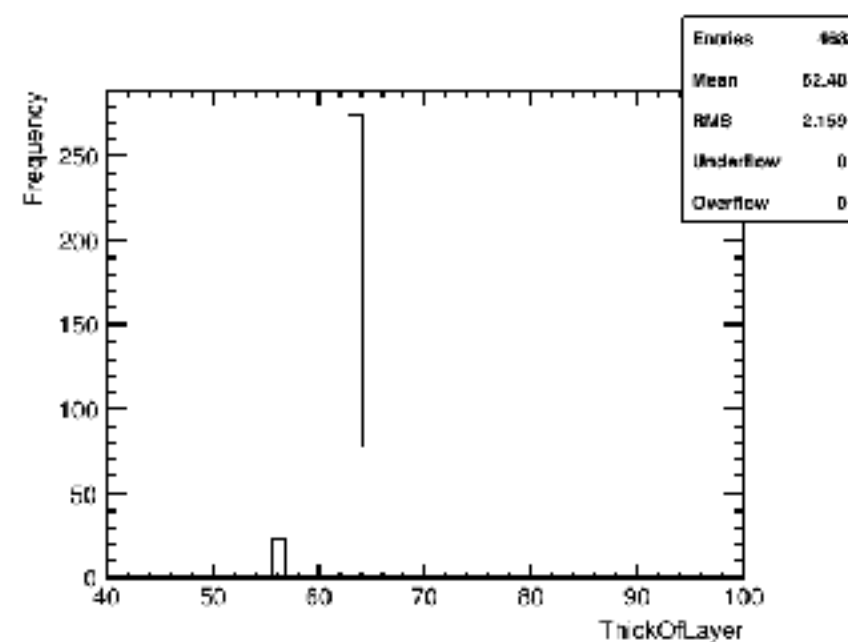
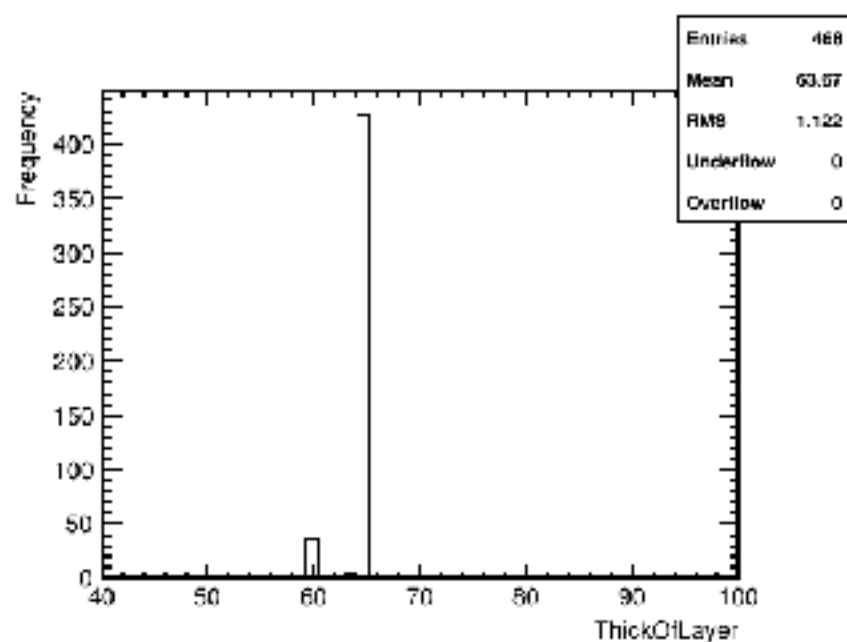
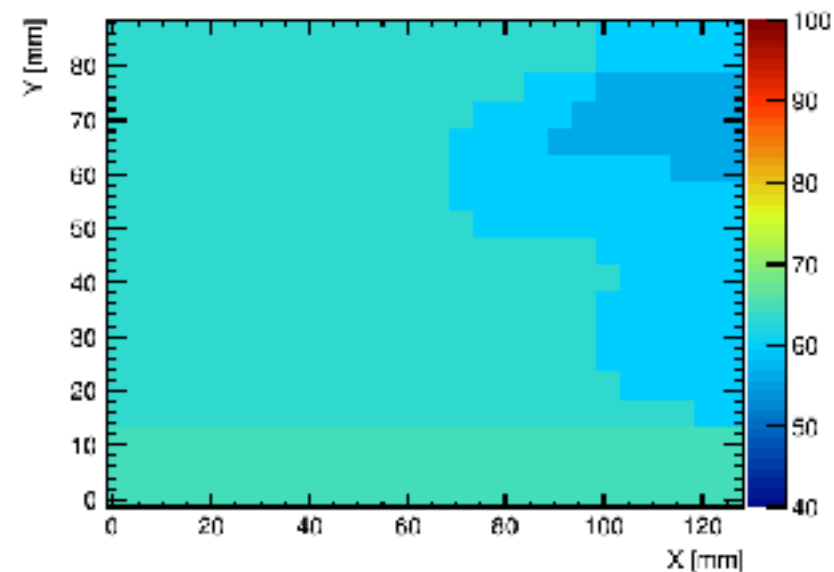
ph最大値の位置分布



ScanEachLayerParam ThickOfLayer Layer 0

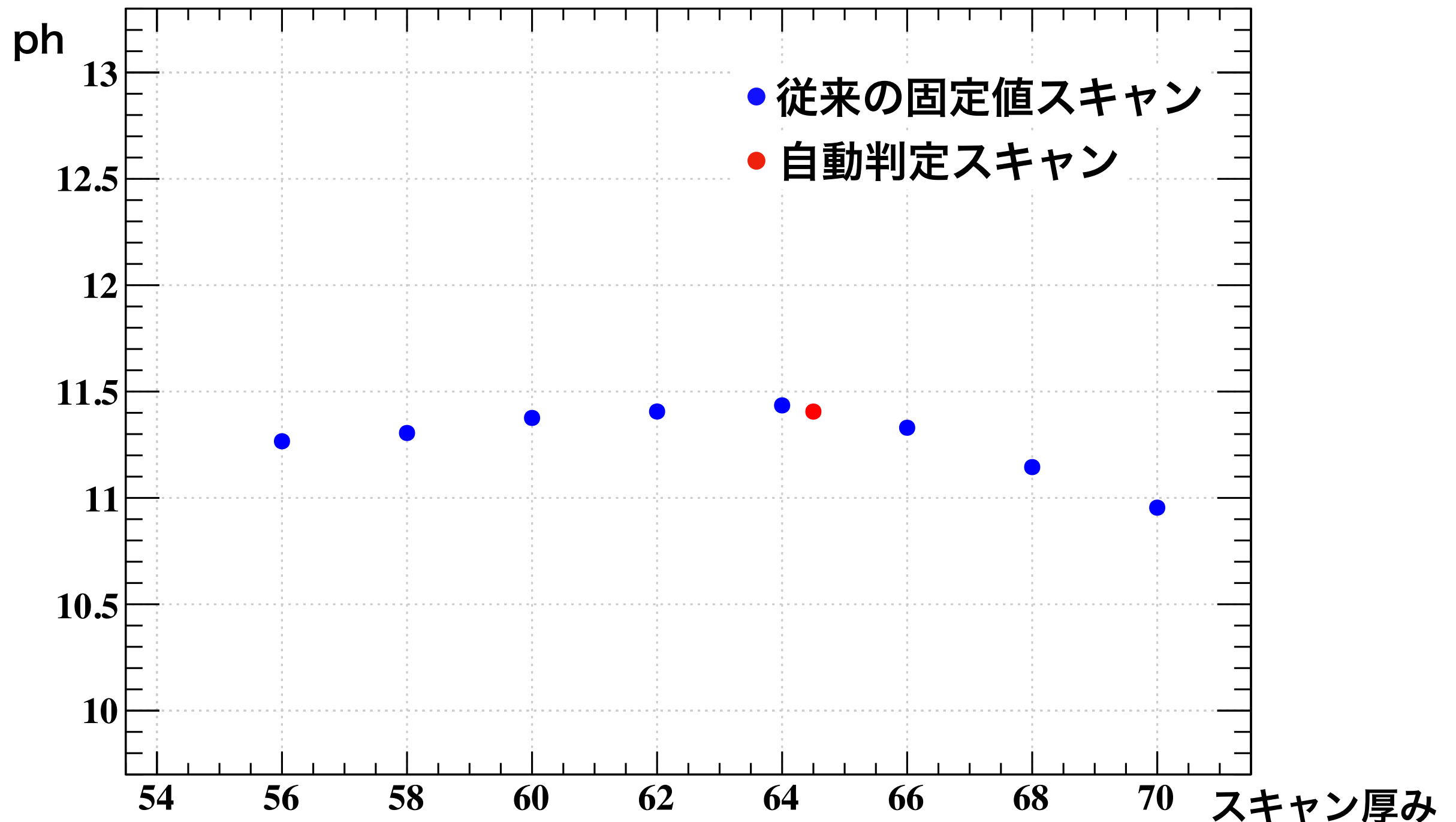


ScanEachLayerParam ThickOfLayer Layer 1



自動厚み判定の妥当性の評価

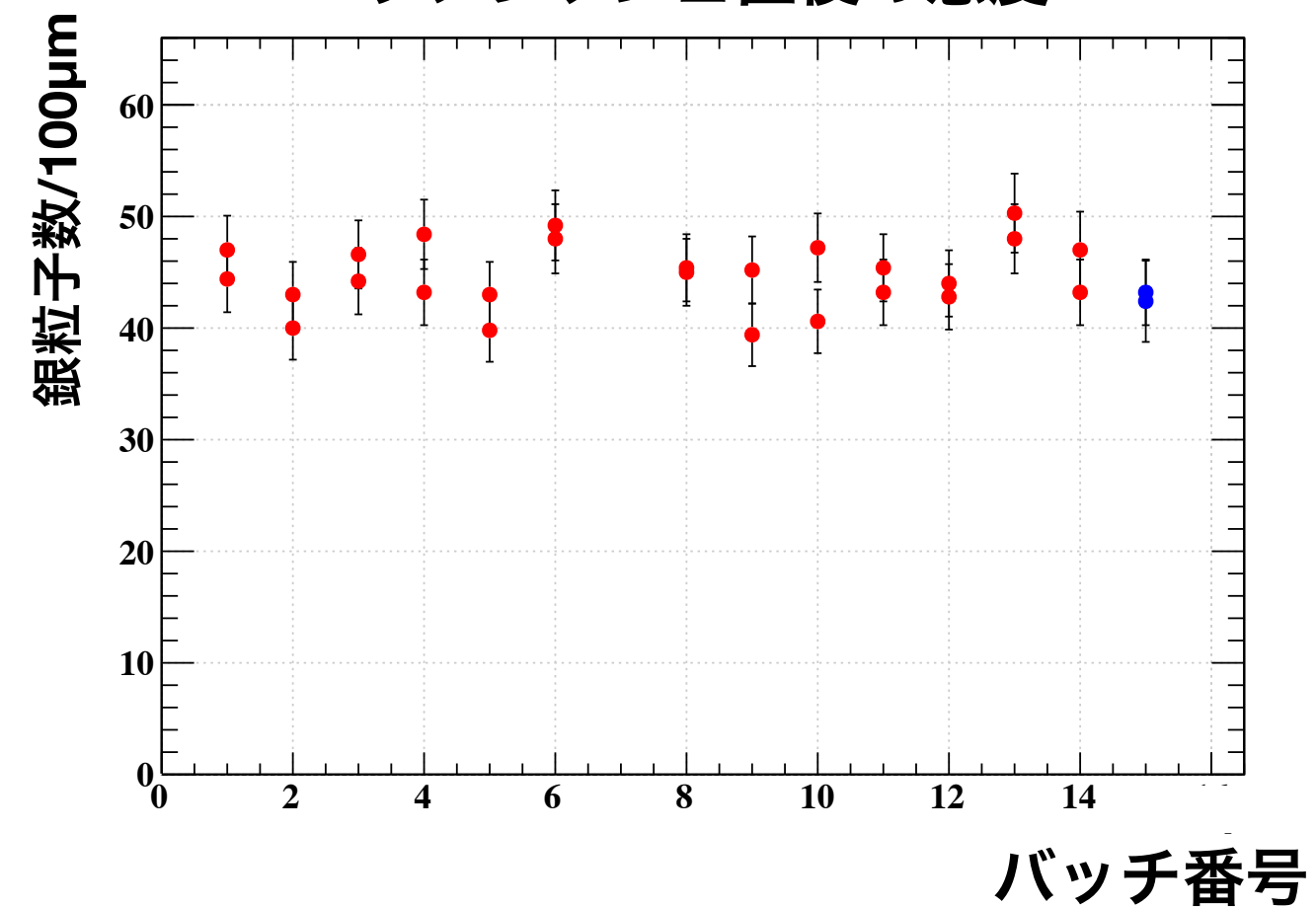
スキャン厚みに対するphの相関



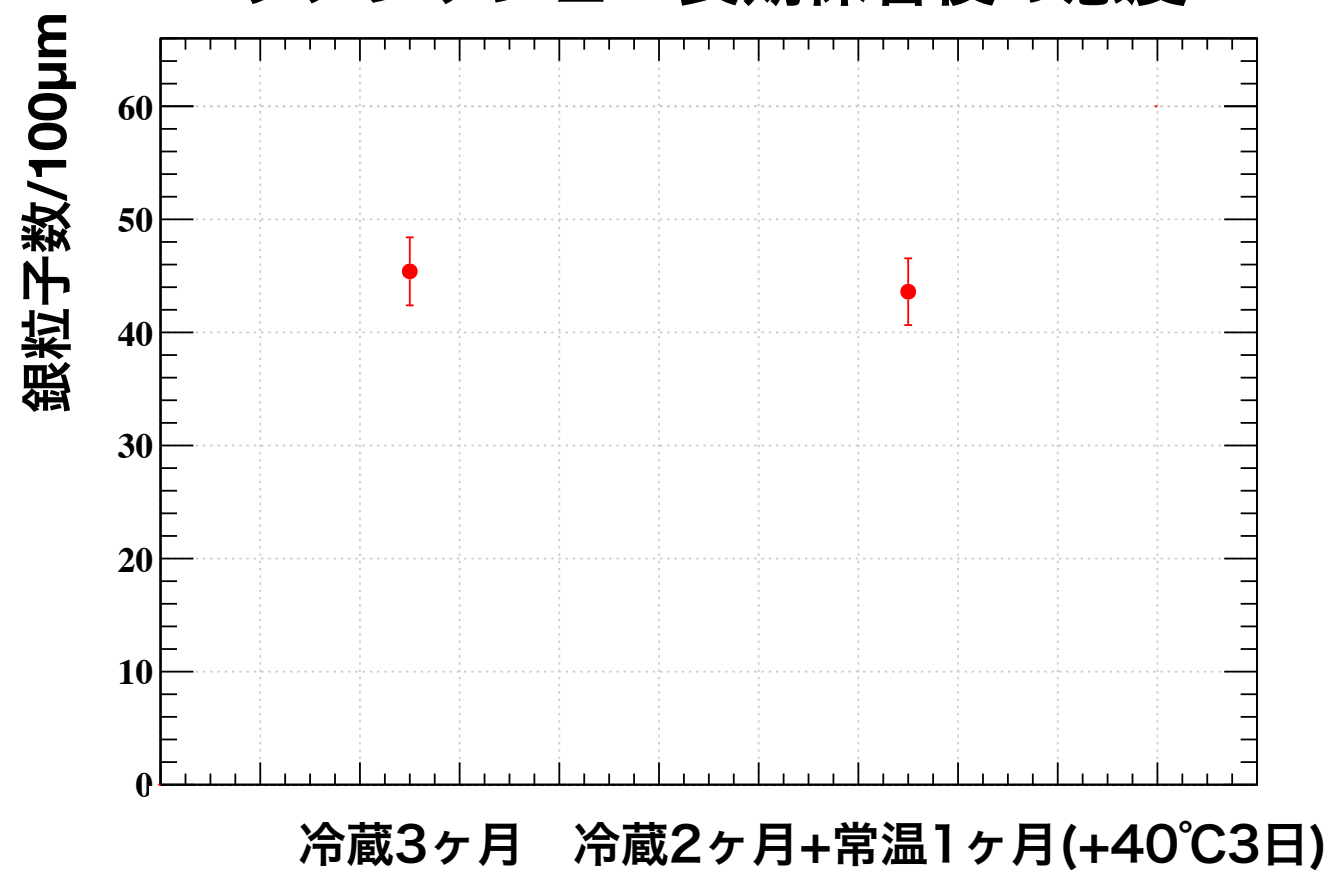
適切なスキャン厚みを判定できている

GRAINE2018年実験に向けたフィルム開発

リフレッシュ直後の感度

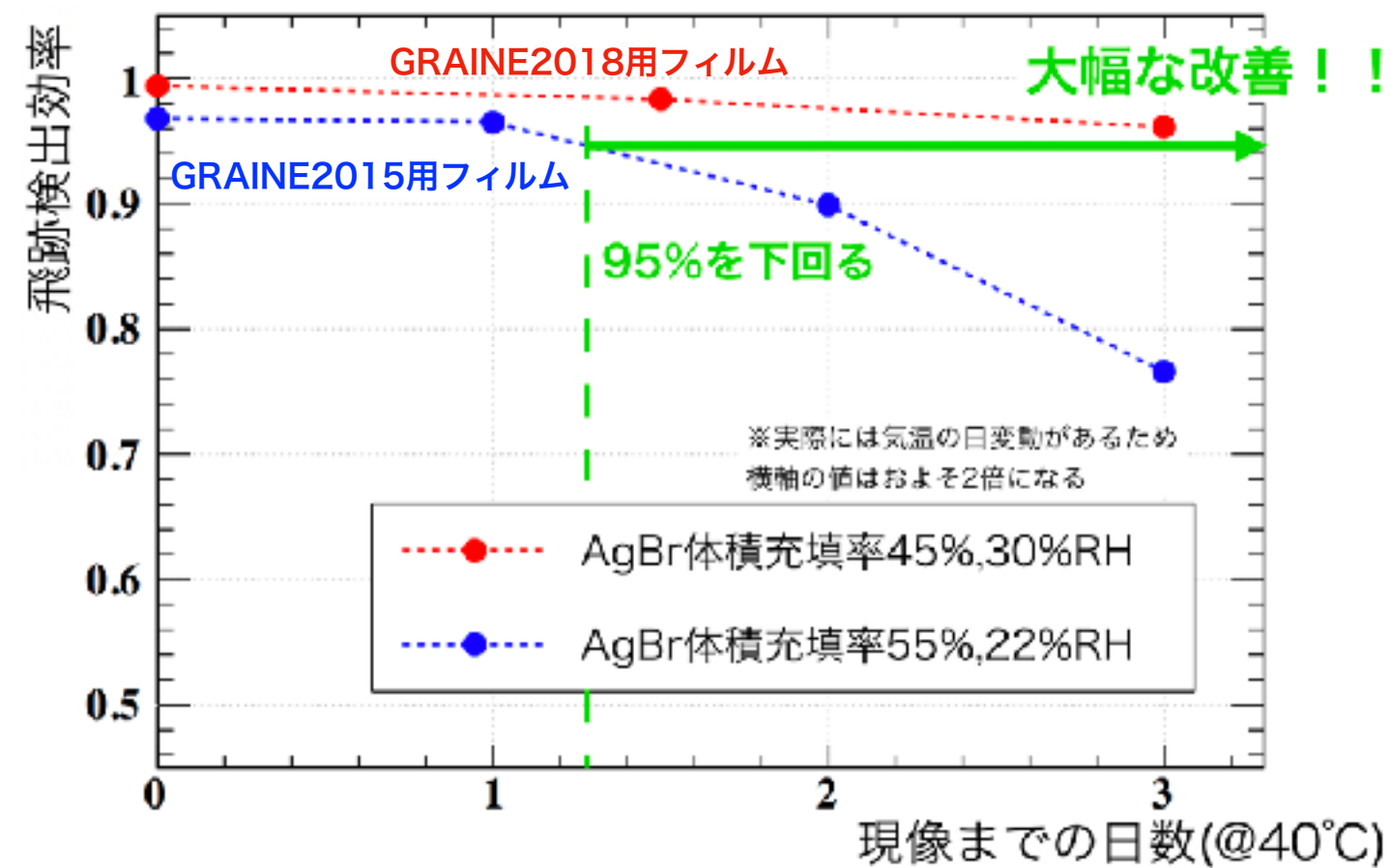


リフレッシュ→長期保管後の感度

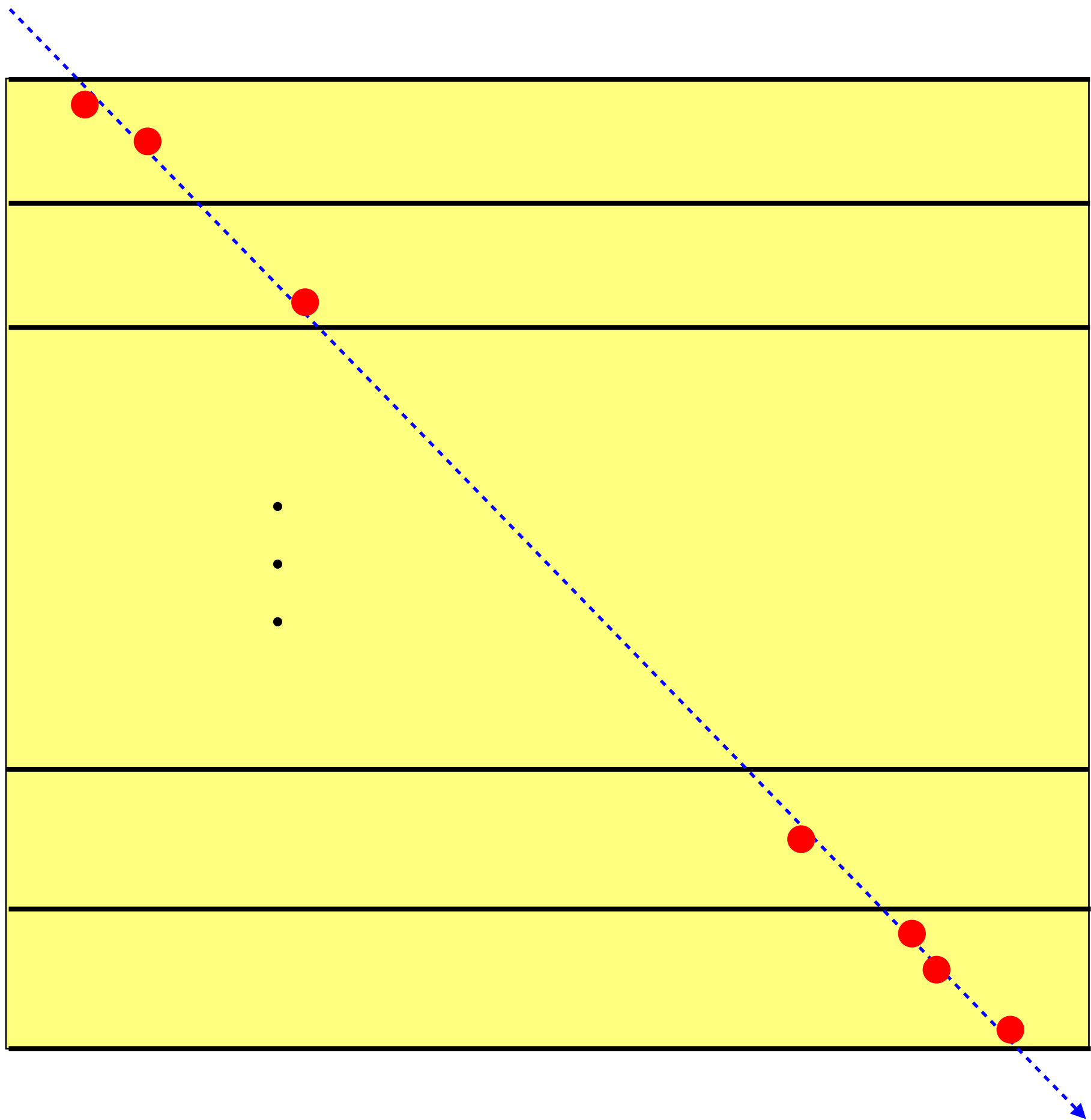


GRAINE2018年実験に向けたフィルム開発

- 2015年実験で乳剤中の臭化銀結晶の体積重点率=55%と従来の2倍程度にした高感度フィルムを開発
- 高い飛跡検出効率を達成した一方で、潜像退行による検出効率の大幅な低下、長期的な感度の不安定性を伴った
- 2018年実験に向けて体積重点率を見直し、55%→45%に変更
- 高い検出効率を維持しつつ潜像退行特性を改善、フライト終了後の回収まで猶予日数が2倍以上になった



日本物理学会2017年秋季大会にて報告



Sensitivity to transient sources

