

極高エネルギー宇宙線 観測用の新型大気蛍光望遠鏡での 再構成プログラム開発と最新成果

大阪公立大学理学研究科

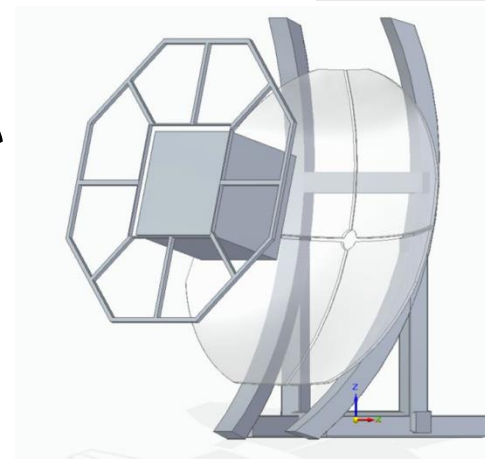
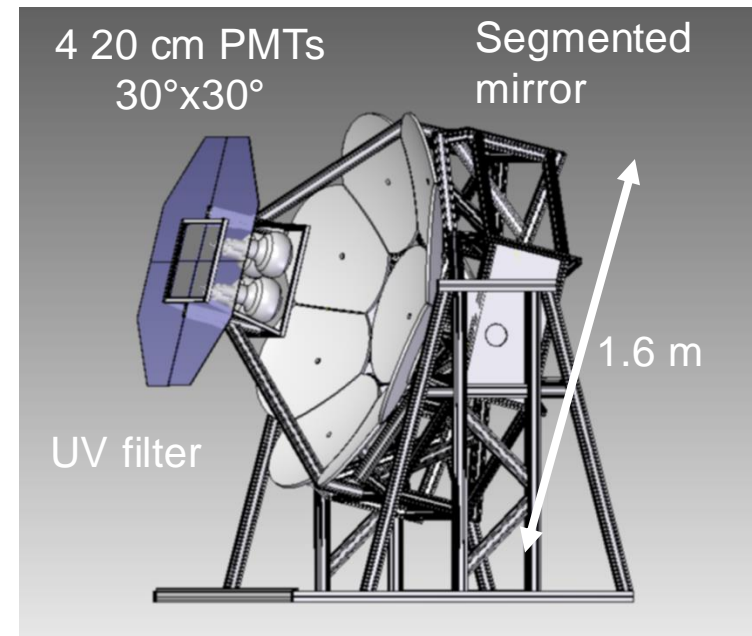
Fraser Bradfield

「宇宙線空気シャワー観測による
マルチメッセンジャー天文学の推進」研究会

The Fluorescence Array of Single Pixel Telescopes (FAST)

次世代の宇宙線実験、目的は $E > 10^{19}$ eV宇宙線の観測

- 安価、設置しやすい、自立望遠鏡を用いる
- 稼働中の試作機
 - Telescope Array (TA)には3台 (FAST@TA)
 - Pierre Auger Observatory (Auger)1台 (FAST@Auger)
- 2025年度にAugerに改良された新しい試作機を2台設置する予定



FASTの再構成手法

Top-down再構成

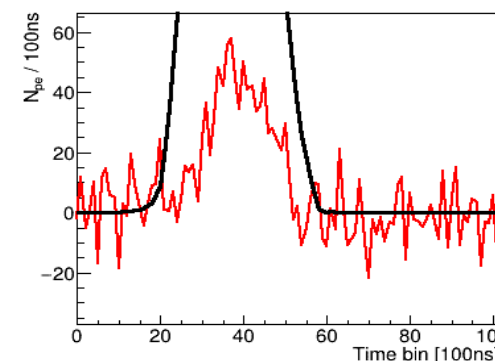
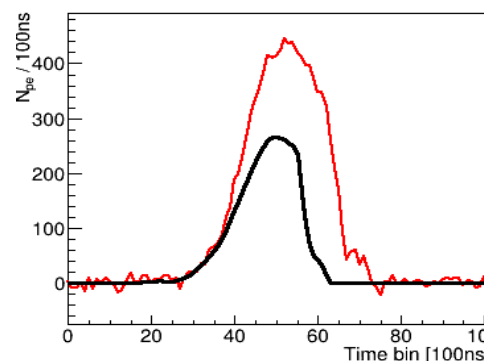
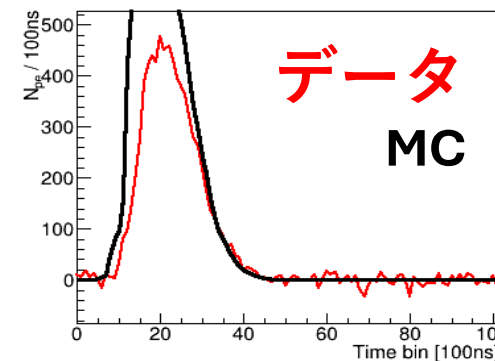
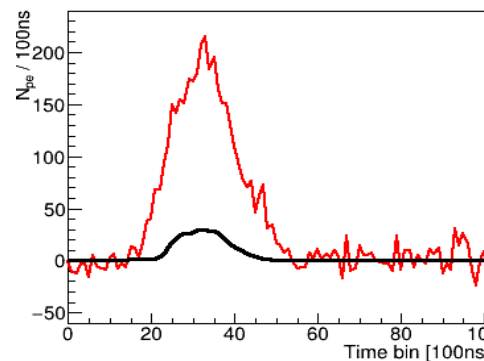
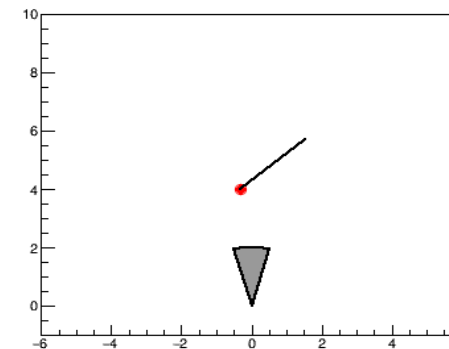
- 1) シミュレーションとデータのPMT traceを比べて、
- 2) 一番合っているシミュレーションのパラメータ ($E, X_{\max}, \theta, \phi, x, y$)が選ばれる

どうやって? Negative log-likelihoodの最小化

$$-2 \ln \mathcal{L}(\vec{x}|\vec{a}) = -2 \sum_k \sum_i \ln(P_k(x_i|\vec{a}))$$

PMT k , ビン i , シャワーパラメーター \vec{a} で、信号 x_i を測定する確率

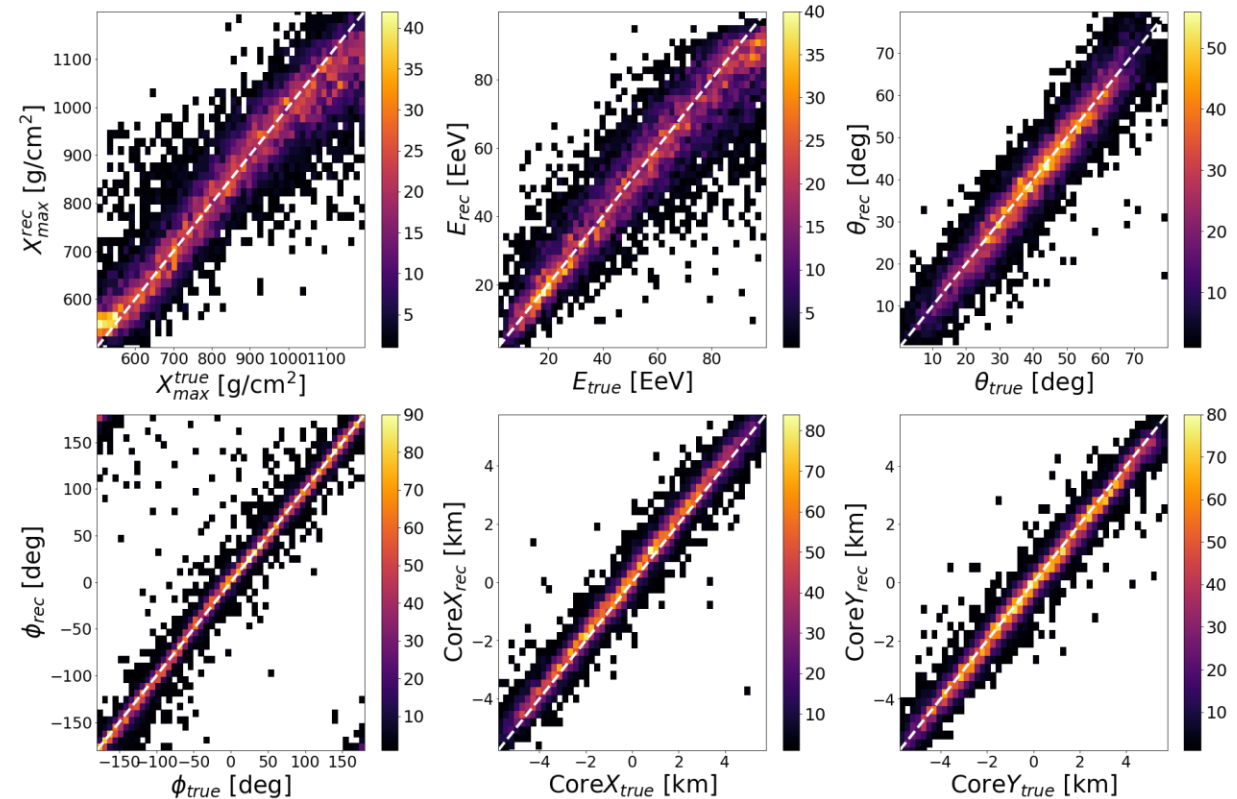
$X_{\max}/(\text{g cm}^{-2}) = 800$
 Energy/EeV = 10
 Zenith/ $^{\circ}$ = 38.68
 Azimuth/ $^{\circ}$ = 43.34
 CoreX/m = -308.43
 CoreY/m = 3991.3
 Likelihood = 53.74



Top-down再構成の初期値

- 以前の研究は**機械学習**を用いてTop-down再構成用のシャワーパラメータの初期値を推定していた（日本物理学会2023、FAST実験16）

- 機械学習のメリット・デメリット
 - 推定するのは速い（ \sim ms）
 - 複雑なパターンをモデルすることができる
 - 学習で使う望遠鏡の配置と異なる配置に適用できない
 - ブラックボックス構造

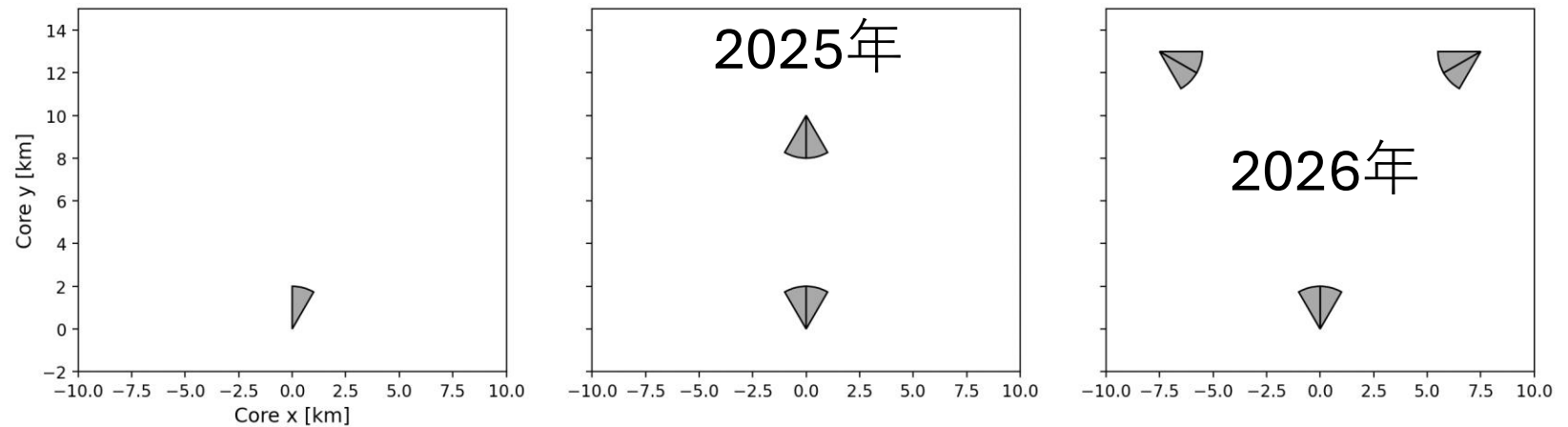


テンプレート方法：紹介

- ① FASTは試作機をどんどん設置しながら望遠鏡の**配置が何回も変わる**

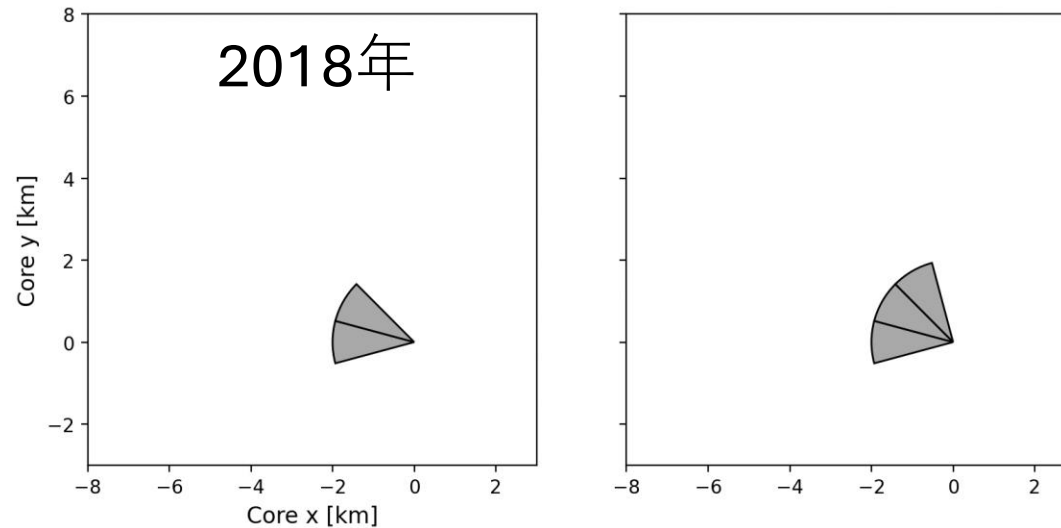
2020年-現在

FAST@Auger



2019年-現在

FAST@TA



テンプレート方法：紹介

② 推定手法の「透明度」と不定性が知りたい

この二つのことを対応する初期値のまとめる方法が欲しい

テンプレート方法

- シミュレーションで、1台の望遠鏡の「波形ライブラリー」、いわゆるテンプレートを作る
- データ波形とテンプレート波形を比較して、もっともデータ波形と合っているテンプレート波形のパラメータが初期値として使う

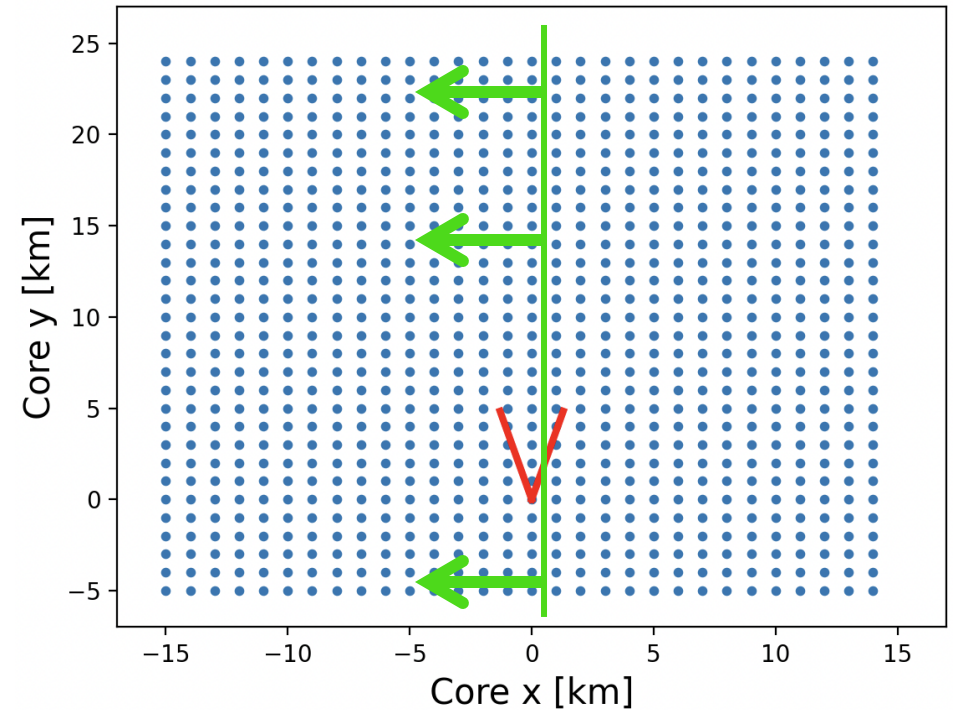
テンプレート方法：シミュレーション作成

シミュレーションのパラメータ

パラメータ	間隔	Range
天頂角 (θ)	5 deg	[0, 80] deg
方位角 (ϕ)	10 deg	[-170, 180] deg
X_{\max}	100 g/cm ²	[500, 1200] g/cm ²
Energy	Fixed	10 EeV

- エネルギーによる波形の絶対値だけ変わる
 - 異なるエネルギーでシミュレーションする必要はない
- CoreX = 0を中心に対称する
 - CoreX = (1, 2, ..., 15)のシャワーを作成する必要はない

コア位置



30 x 30グリッド (1 km間隔)

- テンプレートの数 = $(16 \times 30) \times 36 \times 17 \times 8 = 2,350,080$
 - 半分のイベントぐらいしか望遠鏡の視野に入らない → **~950,000テンプレート**

テンプレート方法：イベント選別

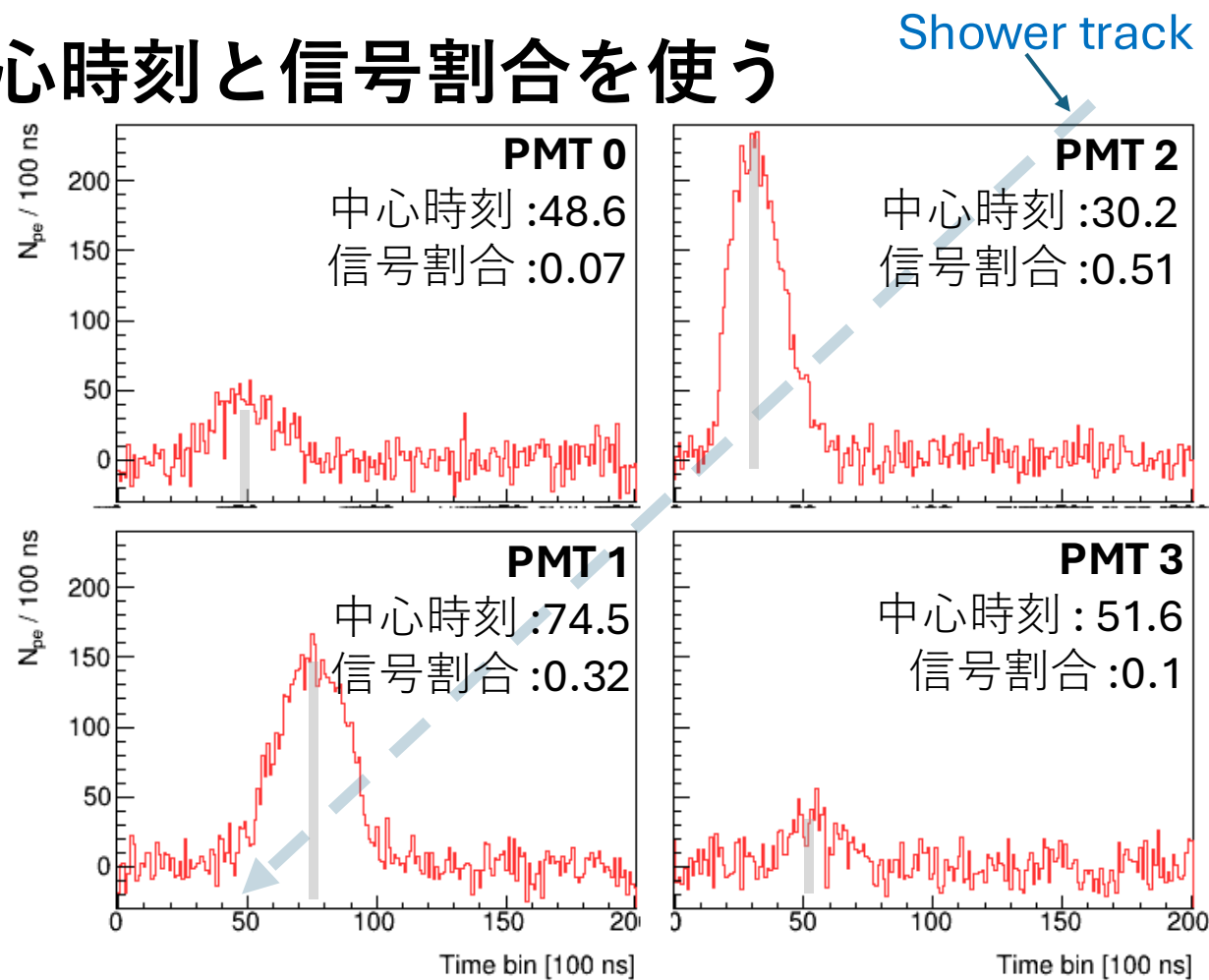
- 全てのテンプレートと比較しないようにイベントを選別する
- 信号が入ってるPMTの波形の中心時刻と信号割合を使う

	中心時刻の差 (100ns)	信号割合の差
PMT0 – PMT2	18.6	-0.44
PMT3 – PMT0	3	0.03
PMT1 – PMT3	22.9	-0.22

ある範囲に同じ時刻差と信号割合の差をもつテンプレートだけと比較する

時刻差：<math>< 1\mu\text{s}</math> (10bins)

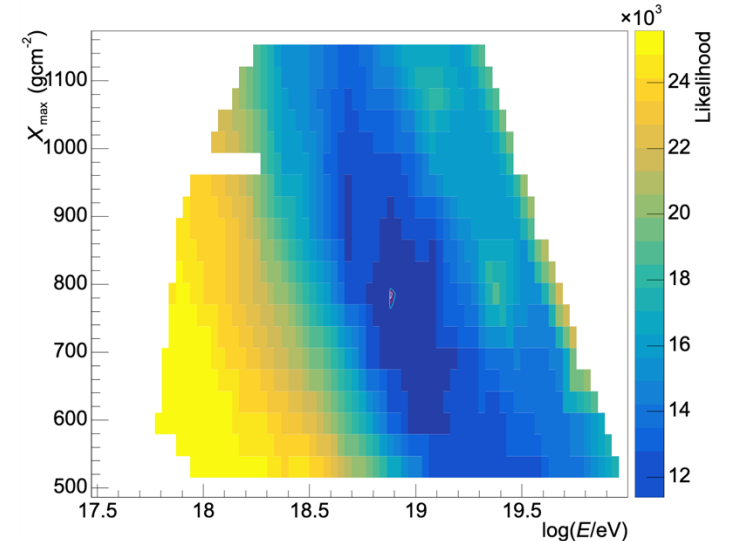
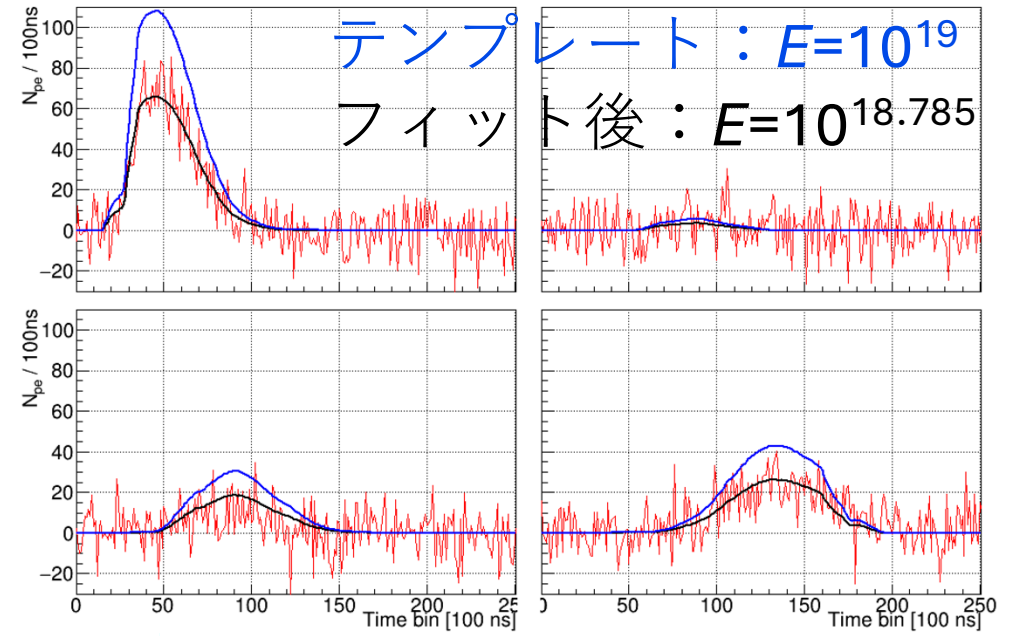
信号割合の差：<math>< 0.35</math>



このイベントは比較するテンプレート数が1,700,000→1,760!

テンプレート方法：比較

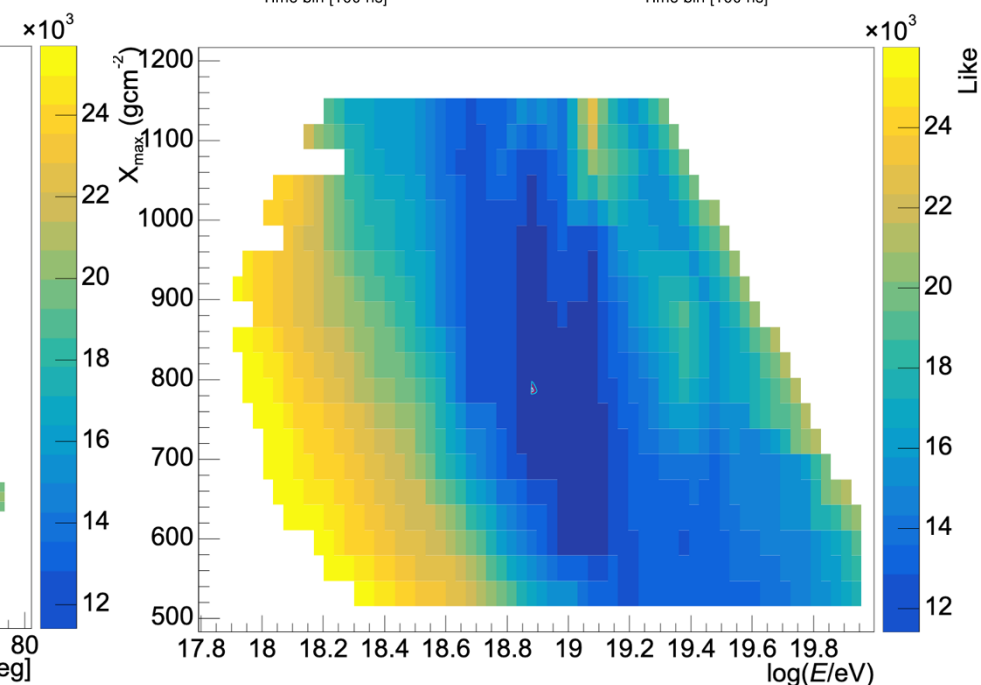
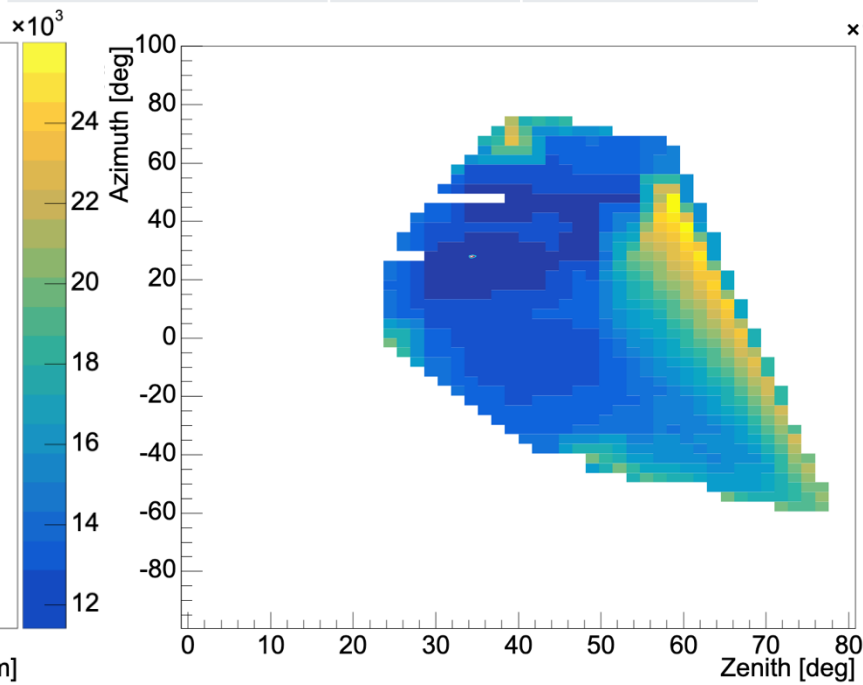
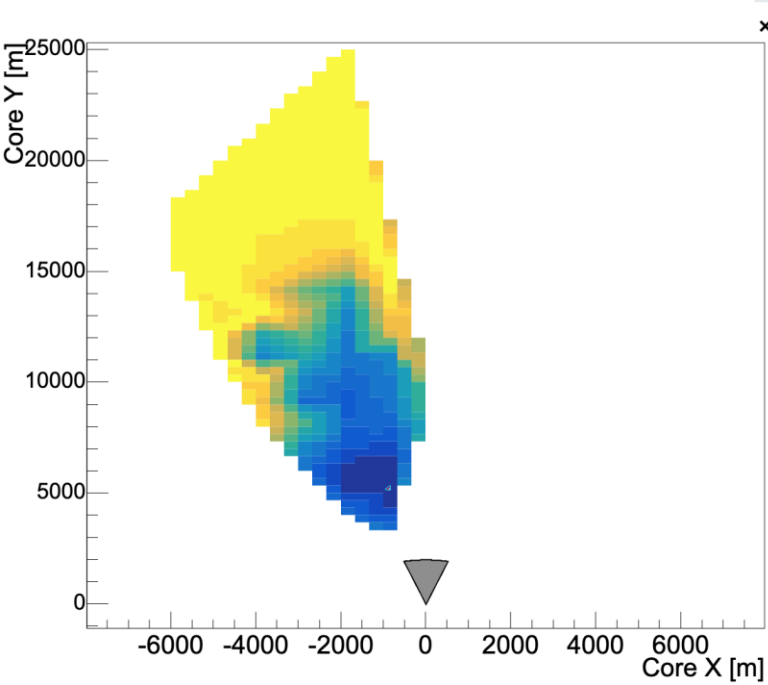
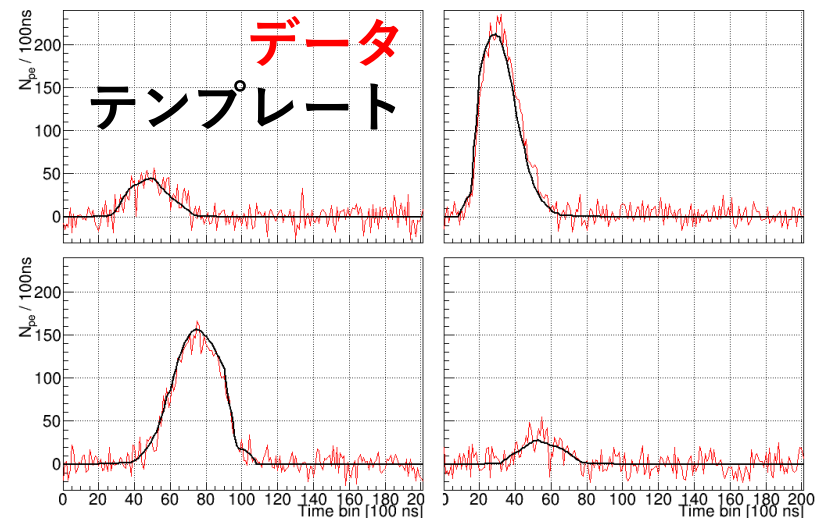
- Top-down再構成の尤度関数を使用する
- データ波形に一致するようにテンプレートの波形の絶対値を変えて、エネルギーをフィットする
- 初期値のまとめ方
 - 二次元ヒストグラム(θ, ϕ), (CoreX, CoreY), (X_{\max}, E)を作る
 - テンプレートの尤度を計算し、それぞれのヒストグラムに入れる
 - 各ビンには一番低い尤度だけを残す
 - それぞれのヒストグラムの最小値の場所は初期値になる



テンプレート方法：例

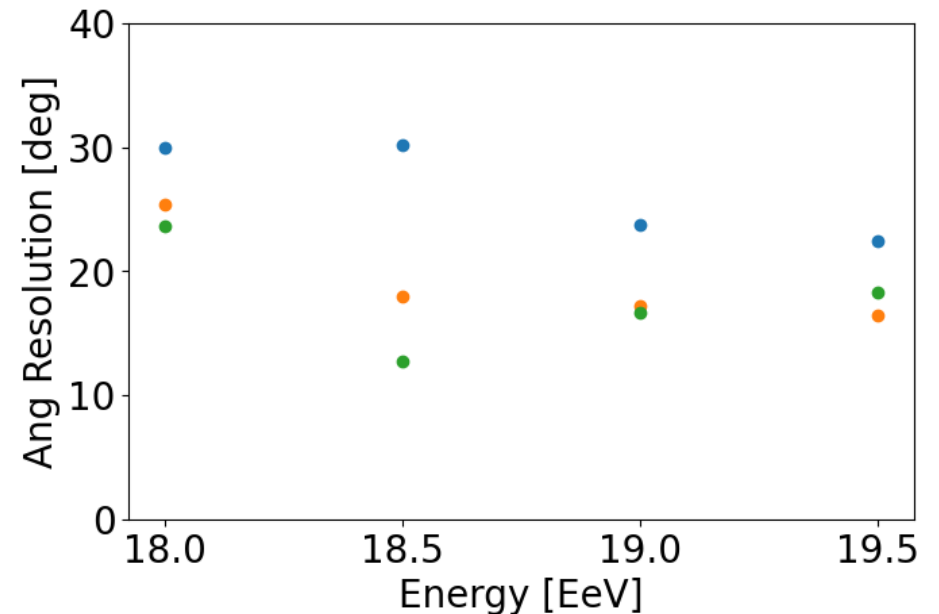
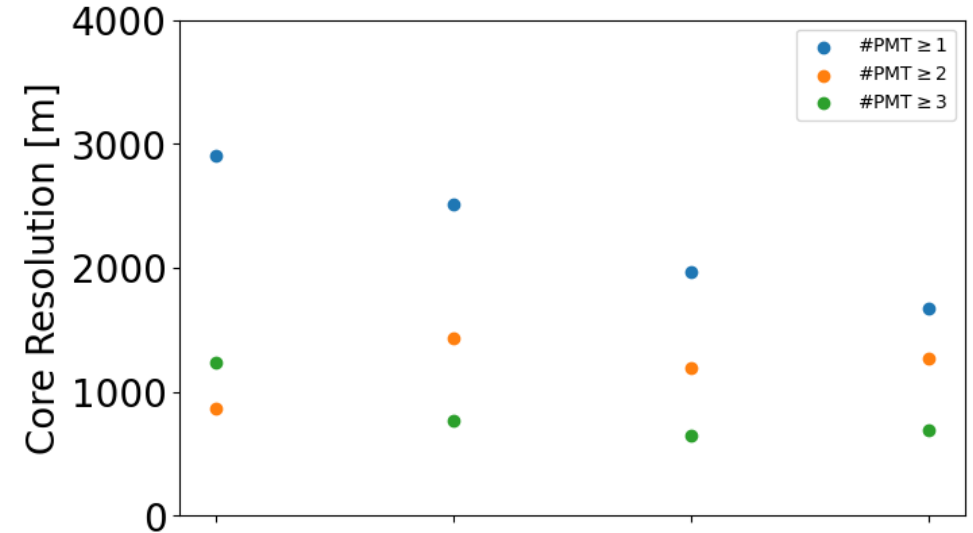
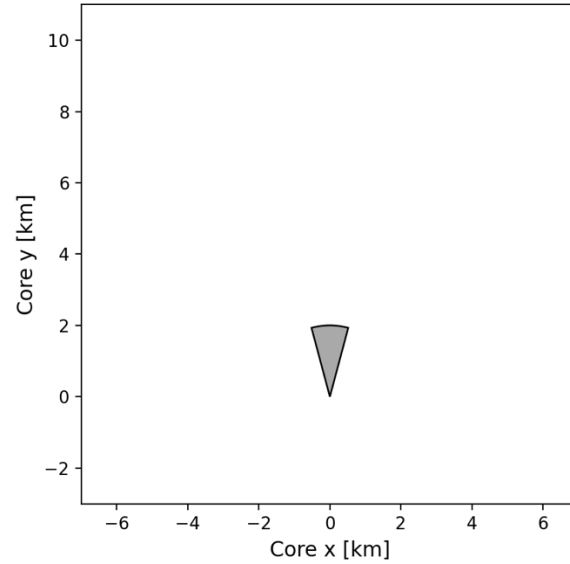
1台望遠鏡
4つのPMTトリガー

パラメータ	MC	初期値
$\log(E/eV)$	19	18.9
X_{\max} [gcm^{-2}]	770	800
θ [deg]	40	35
ϕ [deg]	45	30
CoreX [m]	-1200	-1000
CoreY [m]	5700	5000



テンプレート方法：性能評価

- 望遠鏡1台
FAST@Augerの配置



Resolution@30 EeV (≥ 2 PMT)

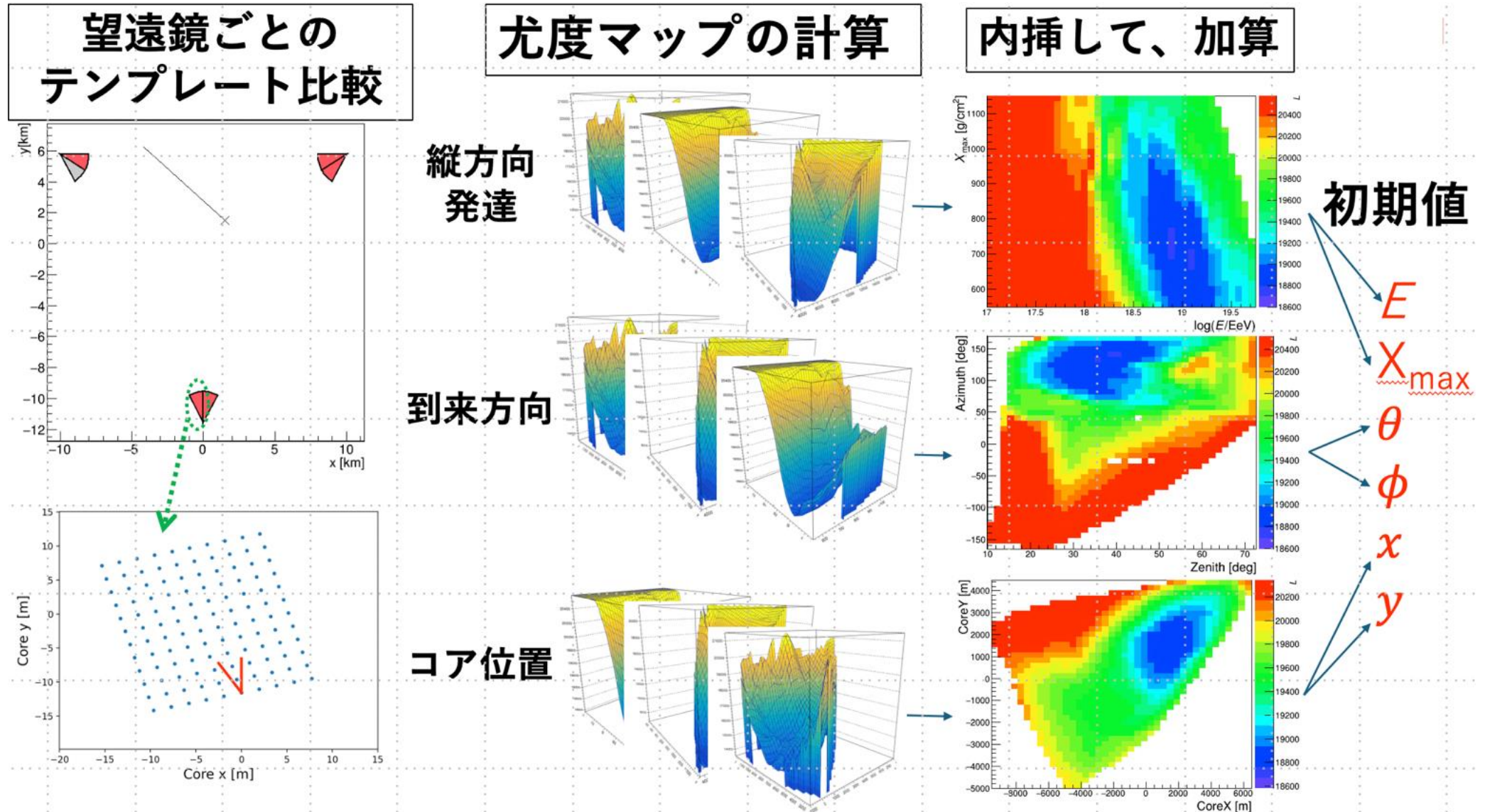
Angular : $\sim 18^\circ$

Core: ~ 1250 m

Energy: $\sim 80\%$

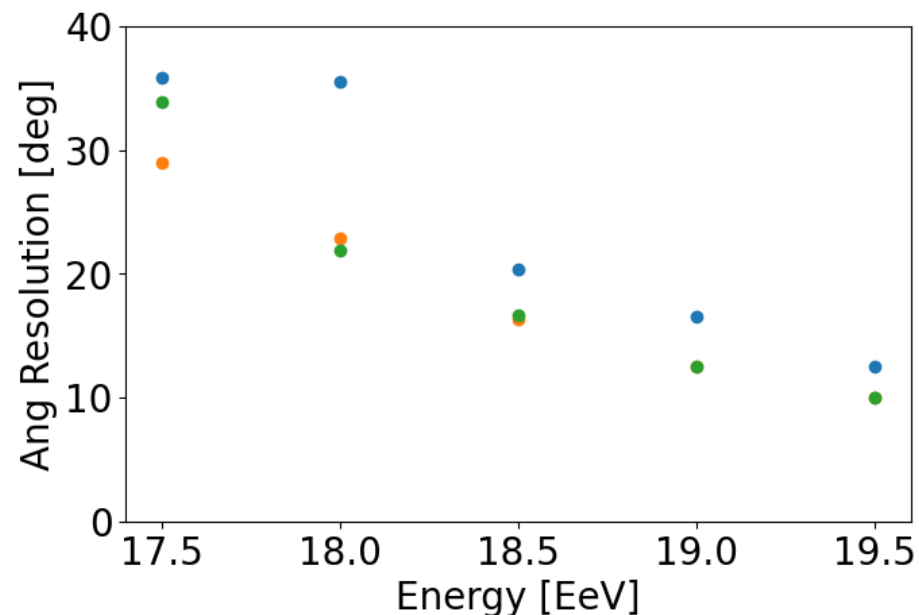
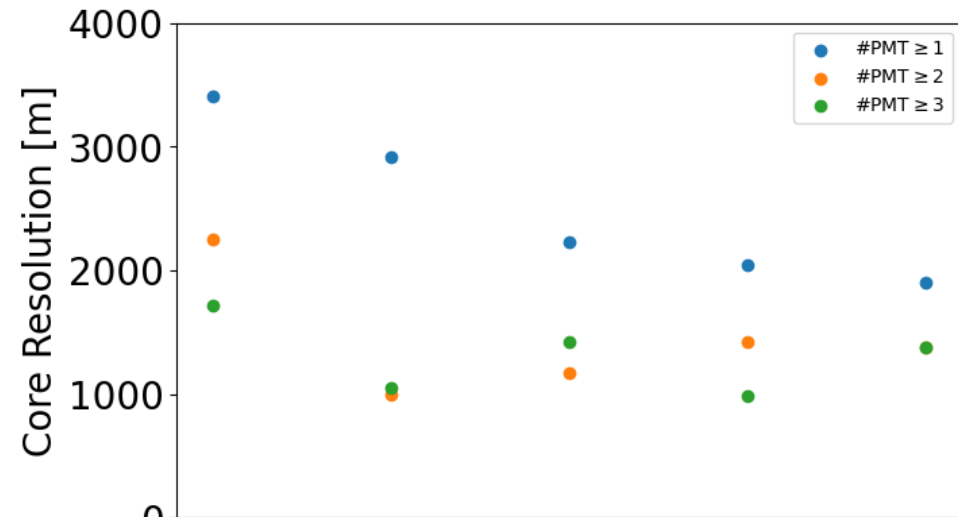
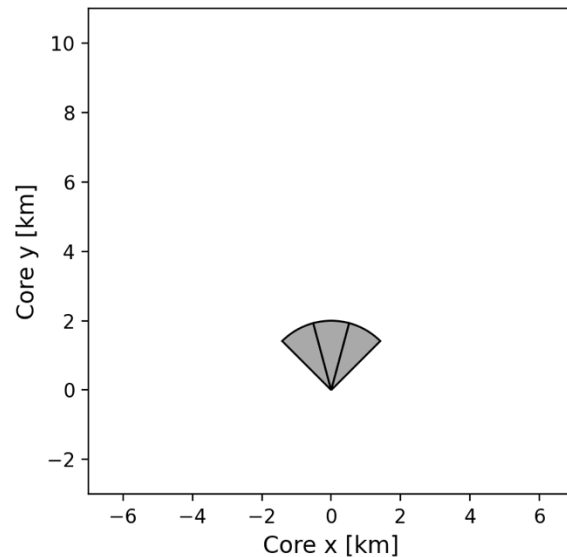
X_{\max} : ~ 180 gcm^{-2}

テンプレート方法：複数の望遠鏡



テンプレート方法：性能評価

- 望遠鏡3台、1ヶ所
FAST@TAの配置



Resolution@30 EeV (≥ 2 PMT)

Angular : $\sim 12^\circ$

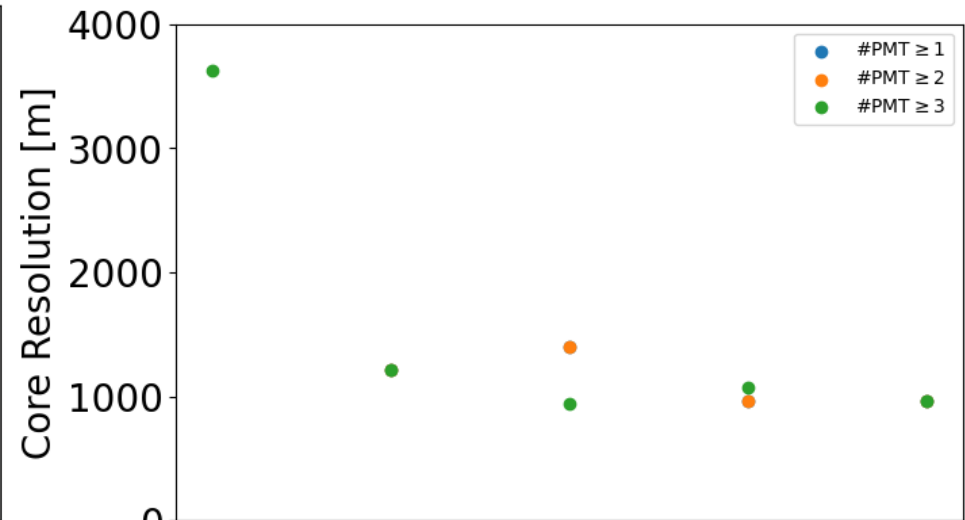
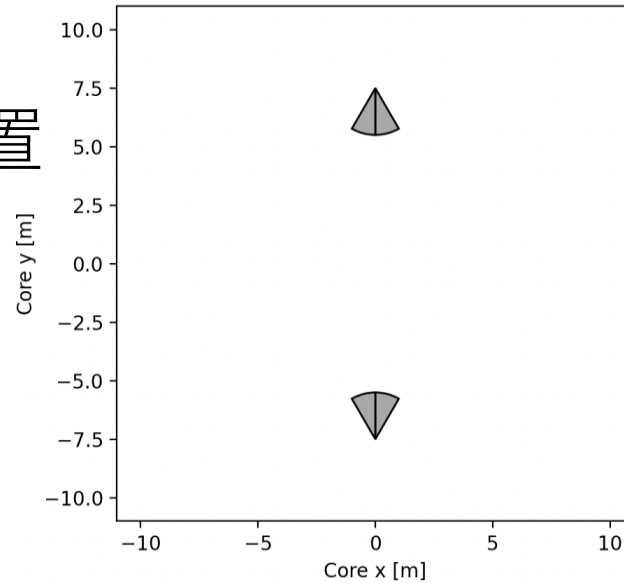
Core: ~ 1500 m

Energy: $\sim 60\%$

X_{\max} : ~ 170 gcm^{-2}

テンプレート方法：性能評価

- 望遠鏡4台、2ヶ所
FAST-mini arrayの配置



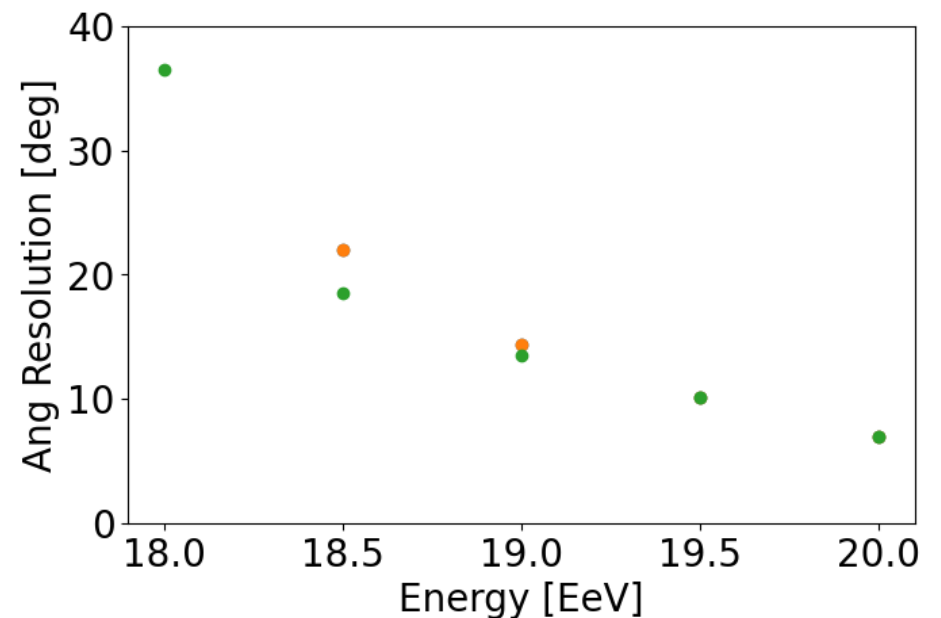
Resolution@30 EeV (≥2PMT)

Angular : ~10°

Core: ~1000 m

Energy: ~60%

X_{\max} : ~170 gcm⁻²

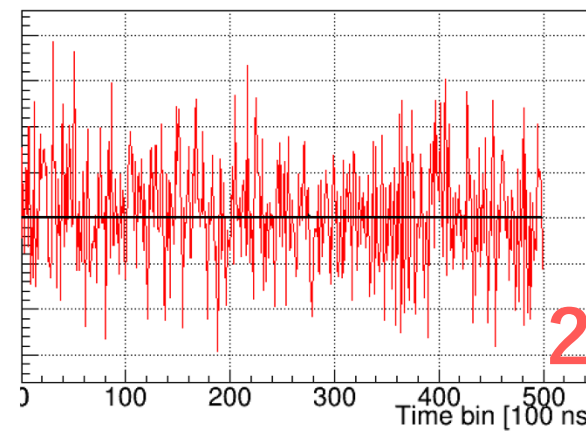
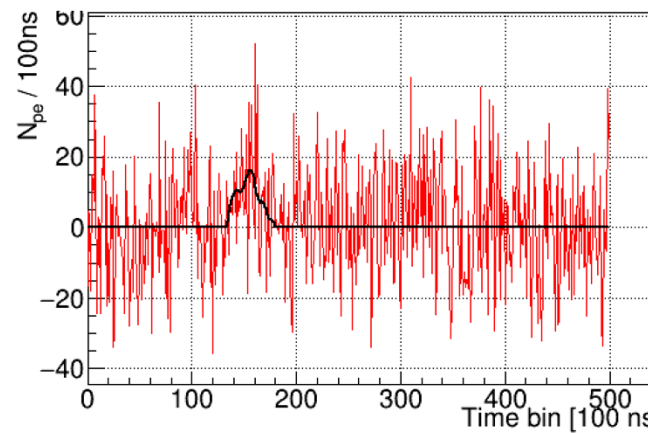
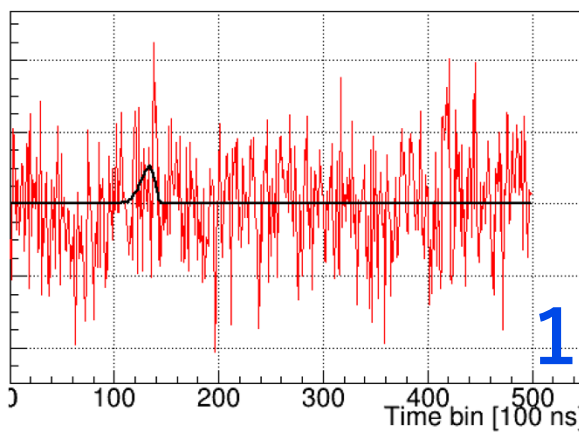
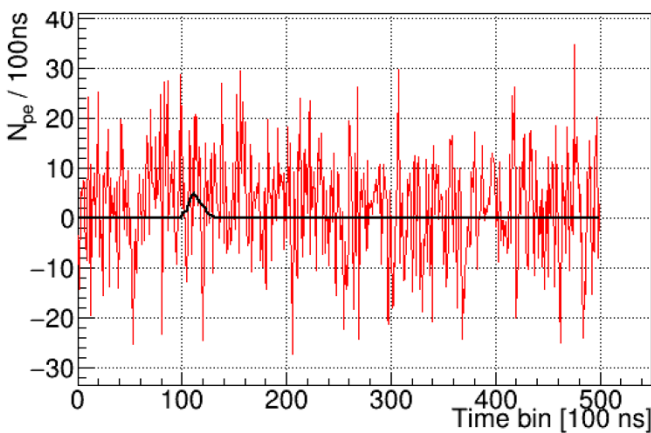
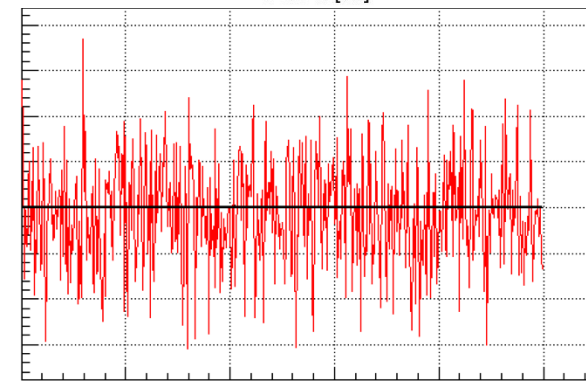
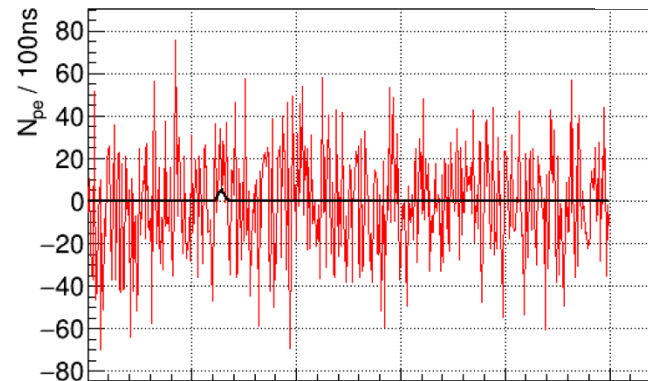
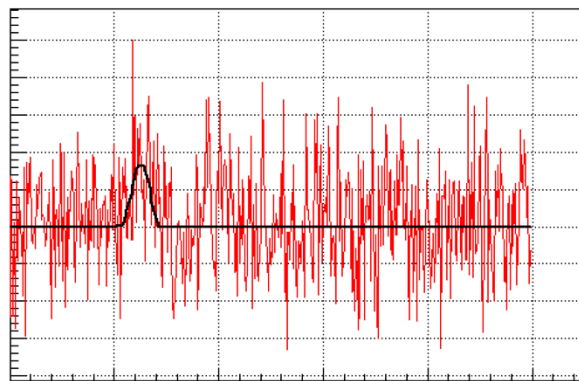
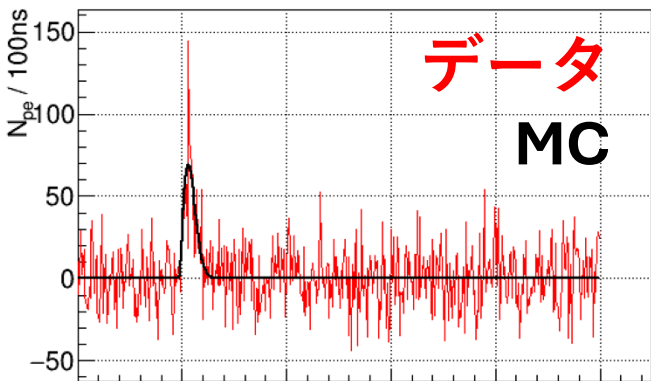
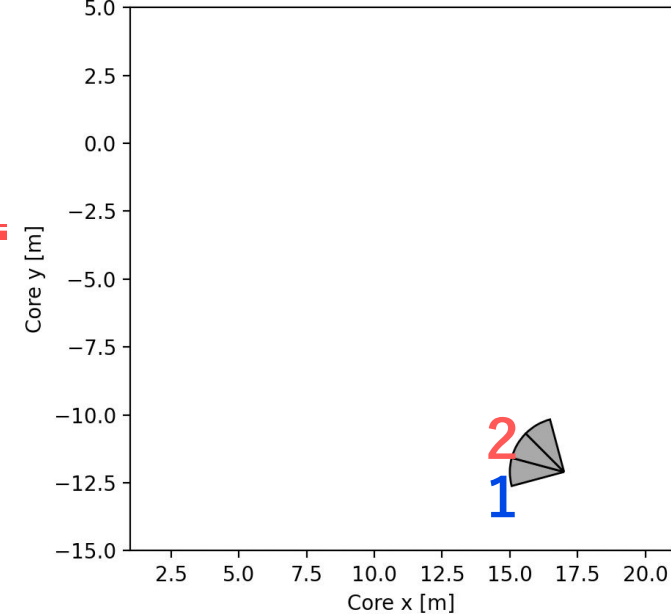


Coincidence events : 例

TAと同時にFAST@TAが観測したイベント：

FAST_2018_11_08_07h29m01s_trig0_1432

黒の実線：その望遠鏡のテンプレート手法によるベストフィット
ト波形

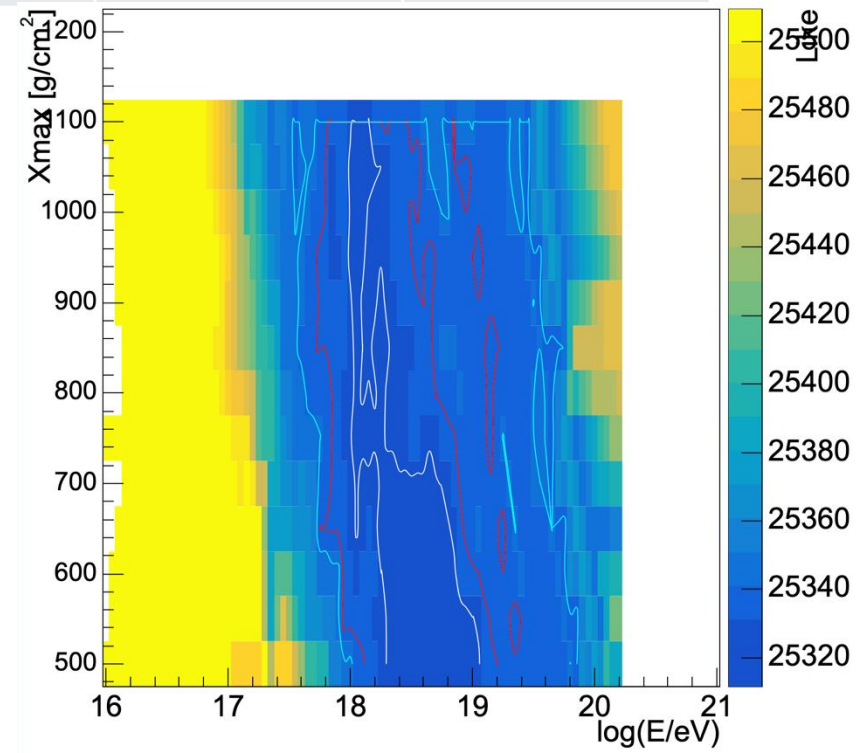
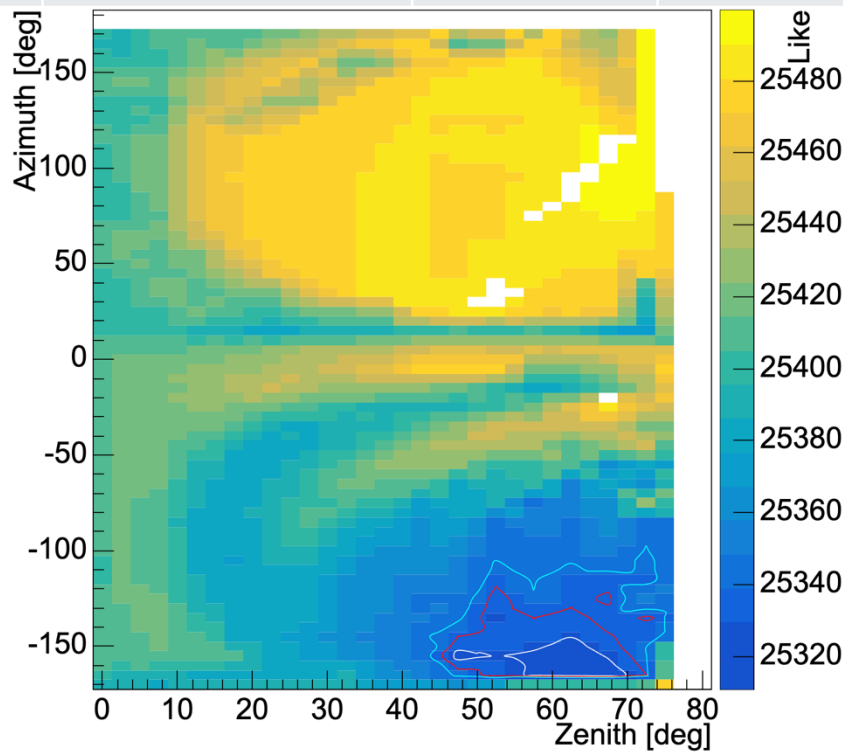
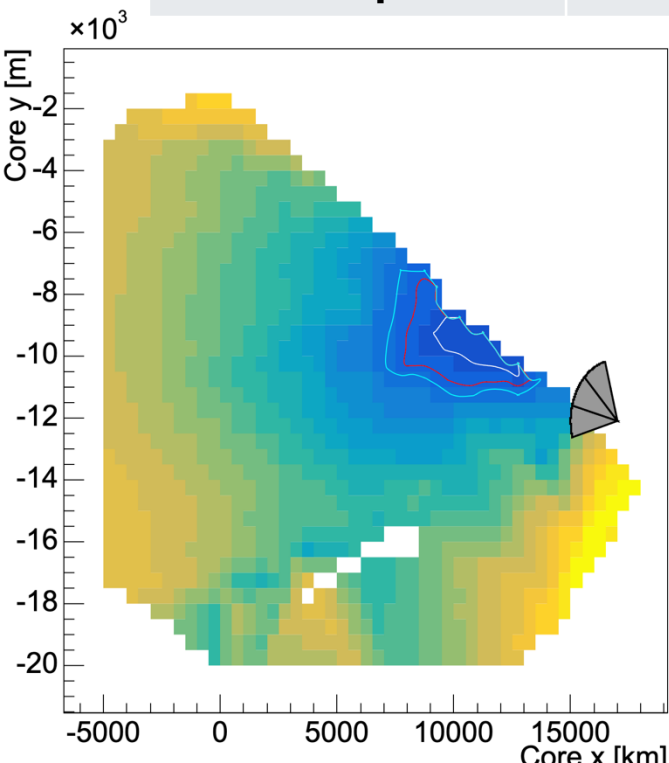


Coincidence events : 例

TAと同時にFAST@TAが観測したイベント :

FAST_2018_11_08_07h29m01s_trig0_1432

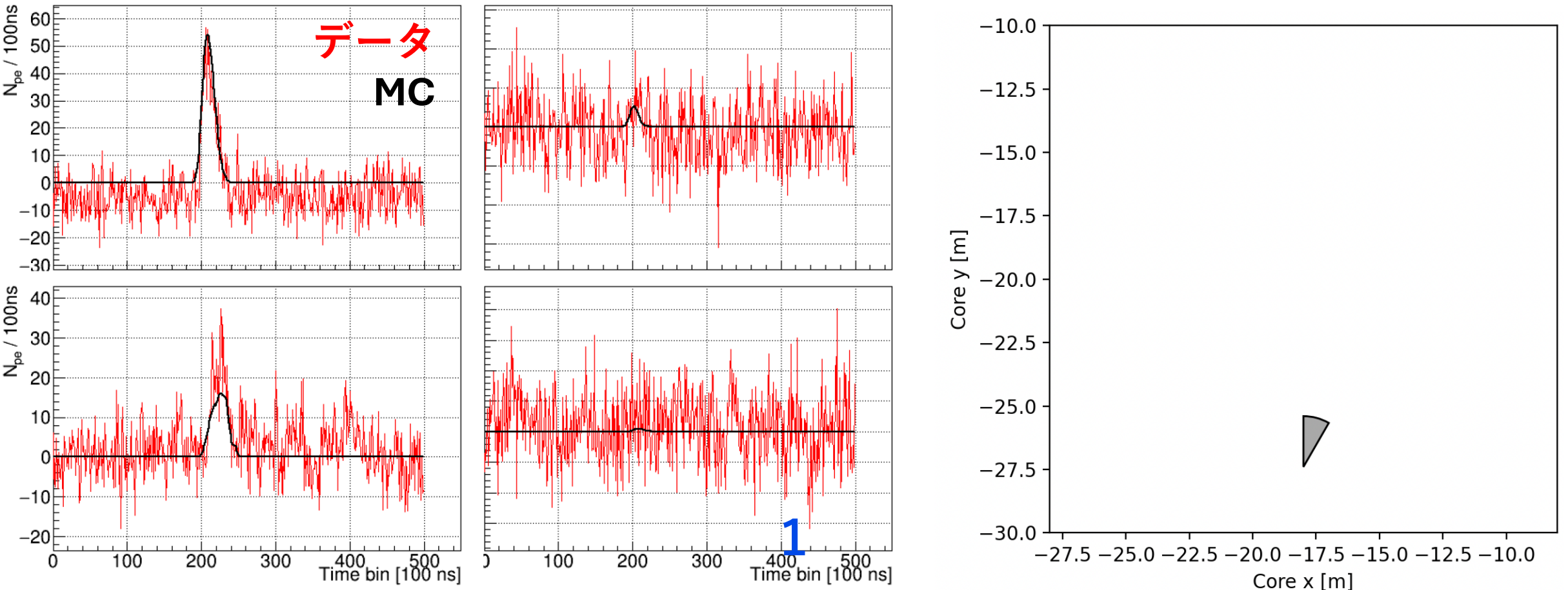
	log(E/eV)	Xmax [gcm ⁻²]	θ [deg]	ϕ [deg]	CoreX [m]	CoreY [m]
TA Mono Recon	1.26	671	54.0	-143.5	13820	-9530
FAST Template	1.17	1100	65	-150	14000	-9100



Coincidence events : 例

Augerと同時にFAST@Augerが観測したイベント :

FAST_2022_10_24_02h17m12s_ext_130

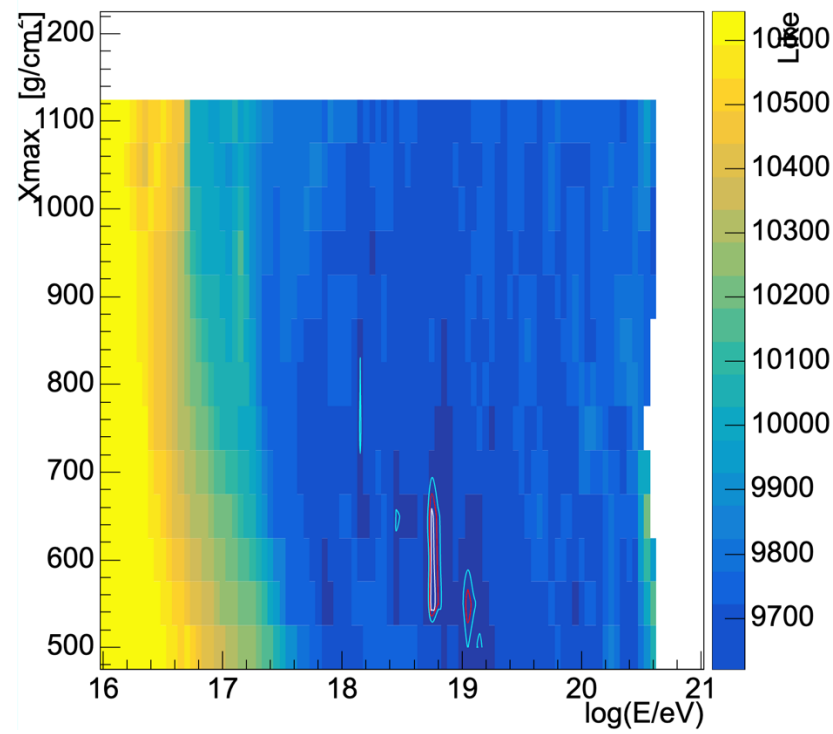
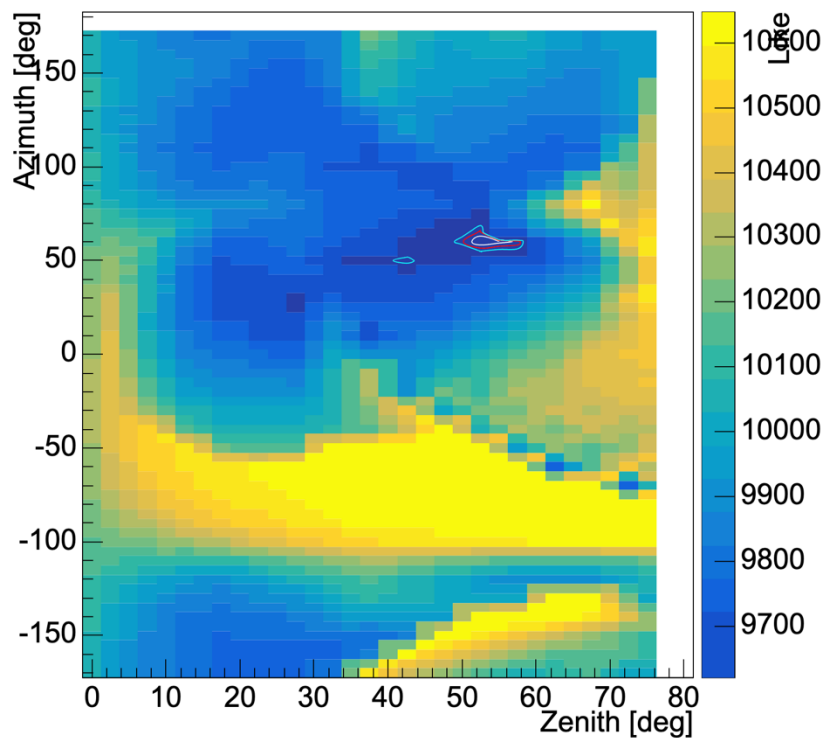
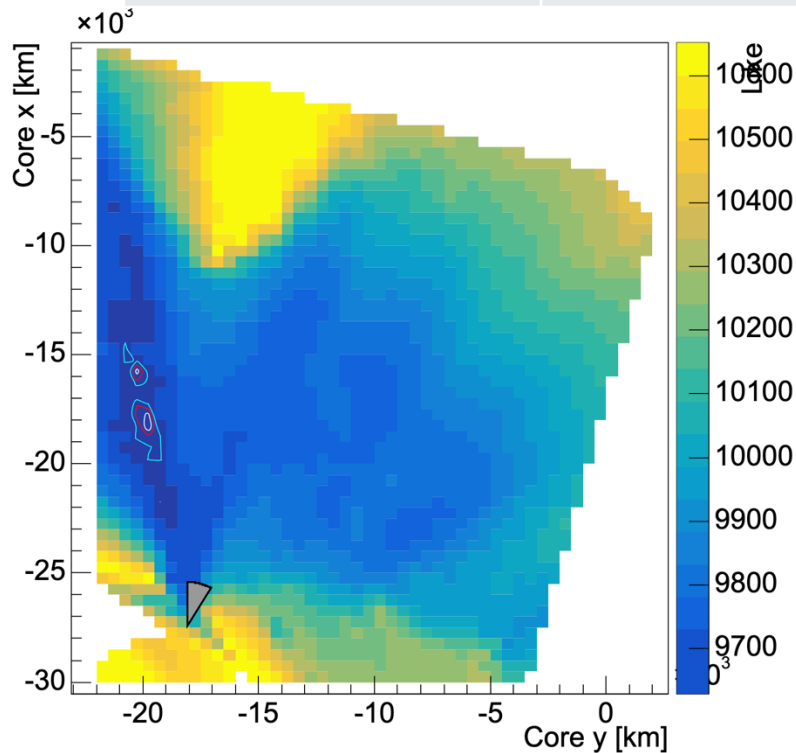


Coincidence events : 例

Augerと同時にFAST@Augerが観測したイベント :

FAST_2022_10_24_02h17m12s_ext_130

	log(E/eV)	Xmax [gcm ⁻²]	θ [deg]	ϕ [deg]	CoreX [m]	CoreY [m]
TA Mono Recon	2.049	693.66	39.182	64.1	-18426	-22571
FAST Template	5.62	550	52.5	60	-19750	-18250

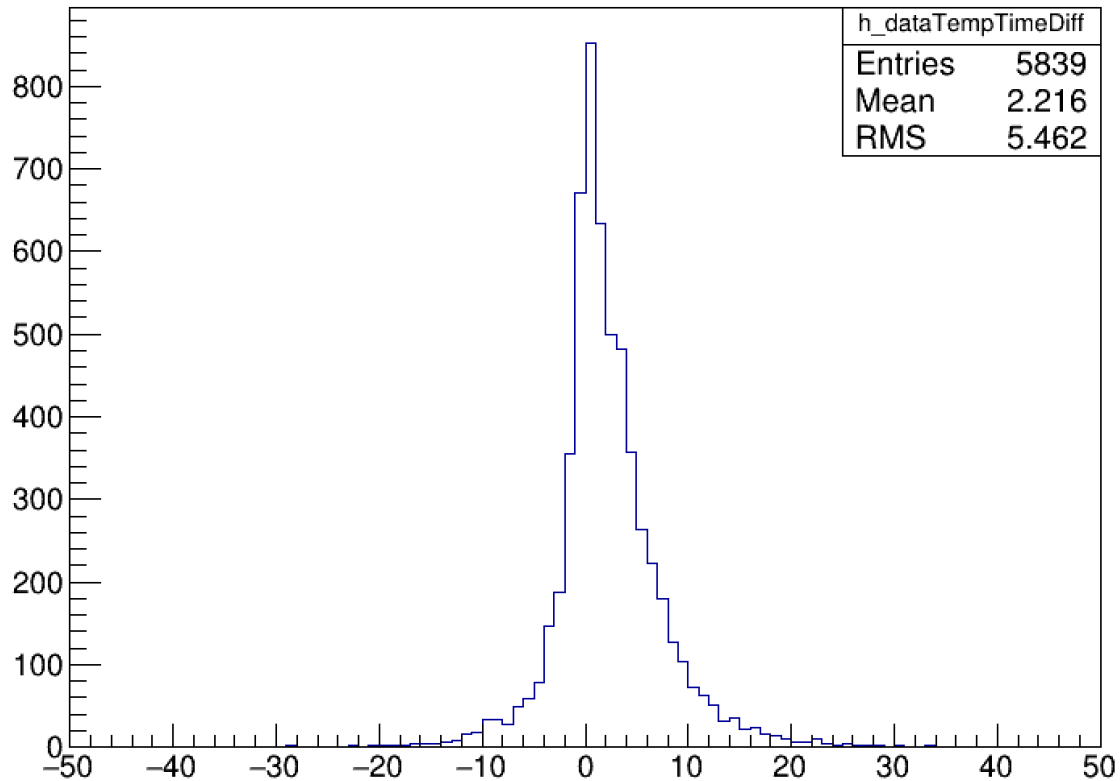


まとめと今後

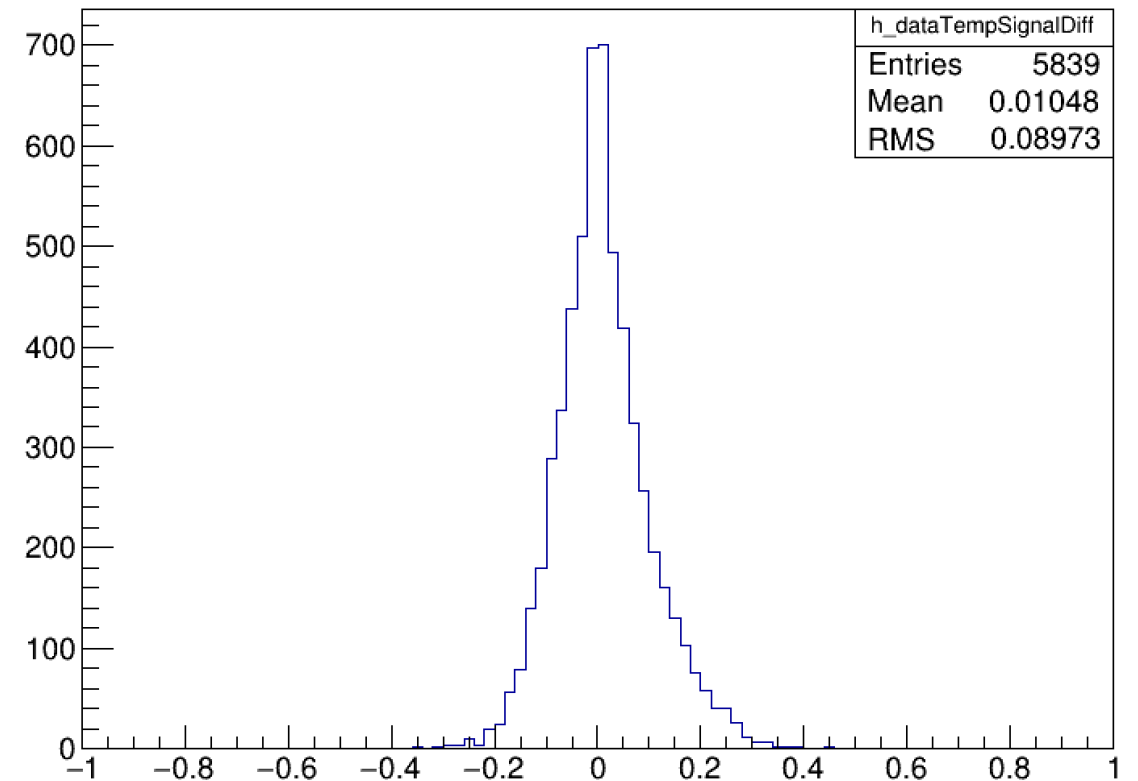
- FASTのTop-down再構成用の初期値をまとめるため、新たな手法を開発した：**テンプレート方法**
- FAST@TAの配置で、角度分解能 $\sim 10^\circ$ 、コア位置分解能 ~ 1500 m
- Top-down再構成と合わせて再構成プロセス全体の性能を評価する
- 実データに適応して、TAとAugerの初期値に比較する
- 多次元内挿を試す

Backup

範囲の決定



Difference in the time spacings of consecutive PMTs between template traces with and without noise (bins)



Difference in the signal ratios of consecutive PMTs between template traces with and without noise (bins)

PMT検出効率の非一様性の影響

現地較正試験によって検出効率に
予期せぬ非一様性が確認【第79回年次大会】

光線追跡シミュレーションで方向感度を
決定、再構成に導入して影響を調査
→ X_{\max} のバイアスで減少が確認*

実験室で再測定を予定

- 新型PMTの応答
- 磁気シールドの効果
(mu-metal, Fine-Met)

