

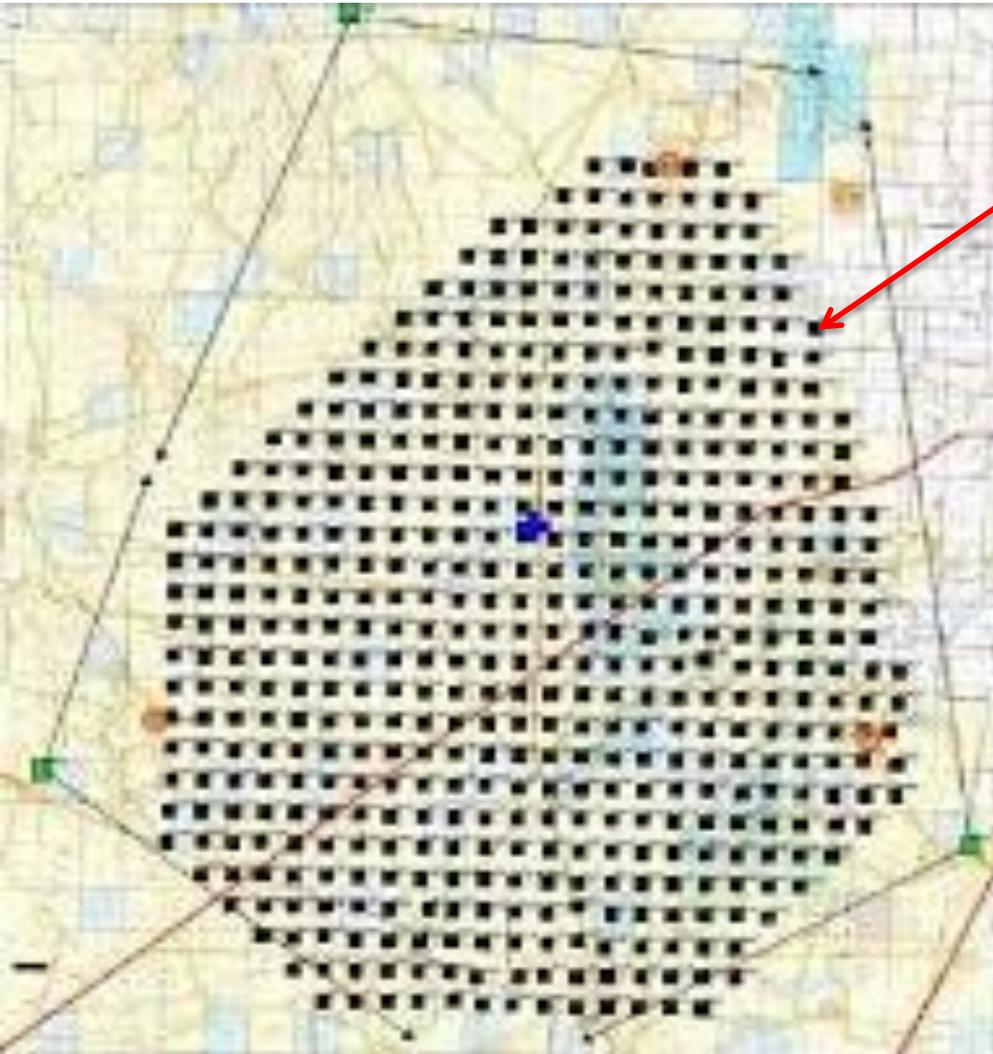
TA SD Shower Front

高木芳紀(大阪市立大学)

Outline

- TA 地表検出器(SD)とは
 - TA SDの構成
- 空気シャワー観測
 - SDを用いた空気シャワー観測
 - シャワー粒子の到来時刻、粒子数の計算
- 空気シャワーフロントの構造研究
 - シャワー軸からの距離と粒子の到来時刻の遅れの関係
 - 距離ごとの到来時刻の遅れの様子
- まとめと今後

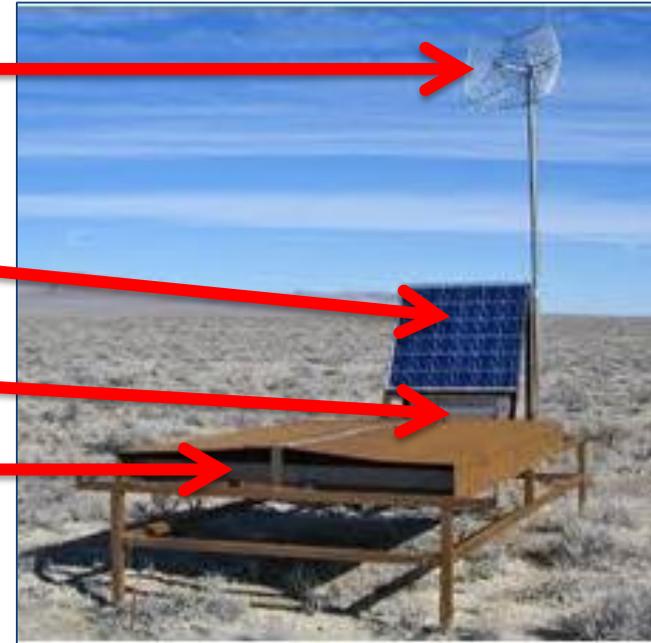
Telescope Array実験



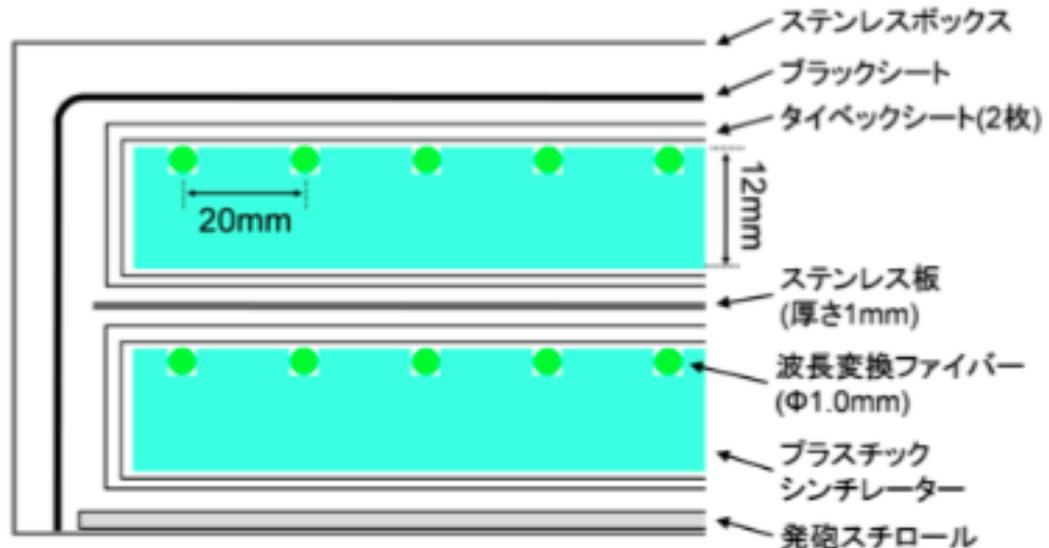
- 米国ユタ州
- 2008年5月～
- 507台の地表検出器(SD)
- 38台の大気蛍光望遠鏡(FD)

TA 地表検出器(SD)の構成

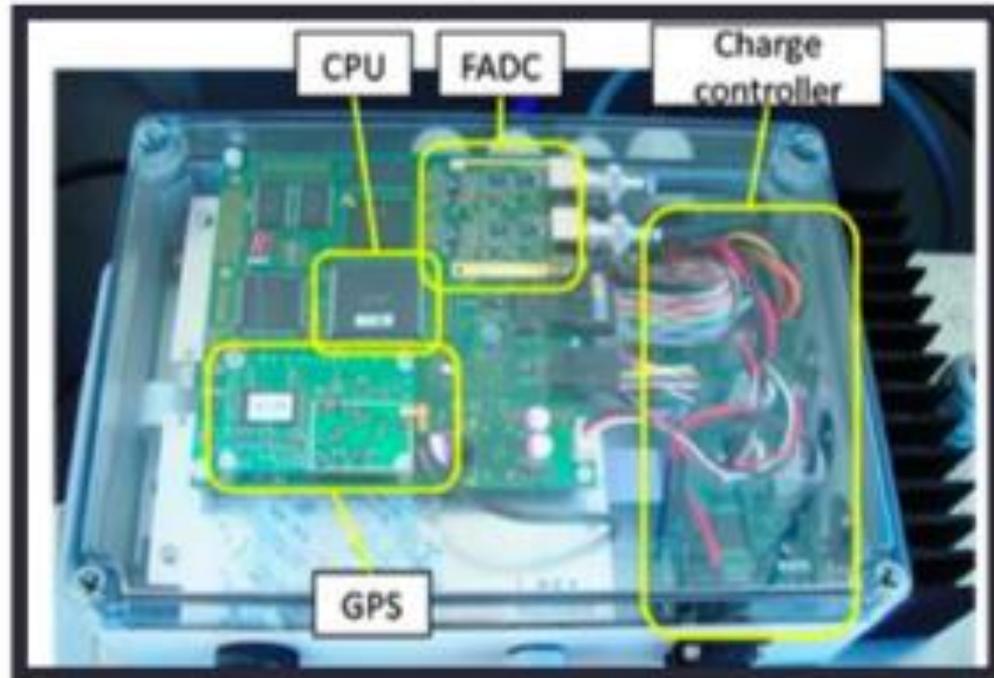
無線通信アンテナ
ソーラーパネル
エレクトロニクスボックス
シンチレーター用
ステンレスボックス



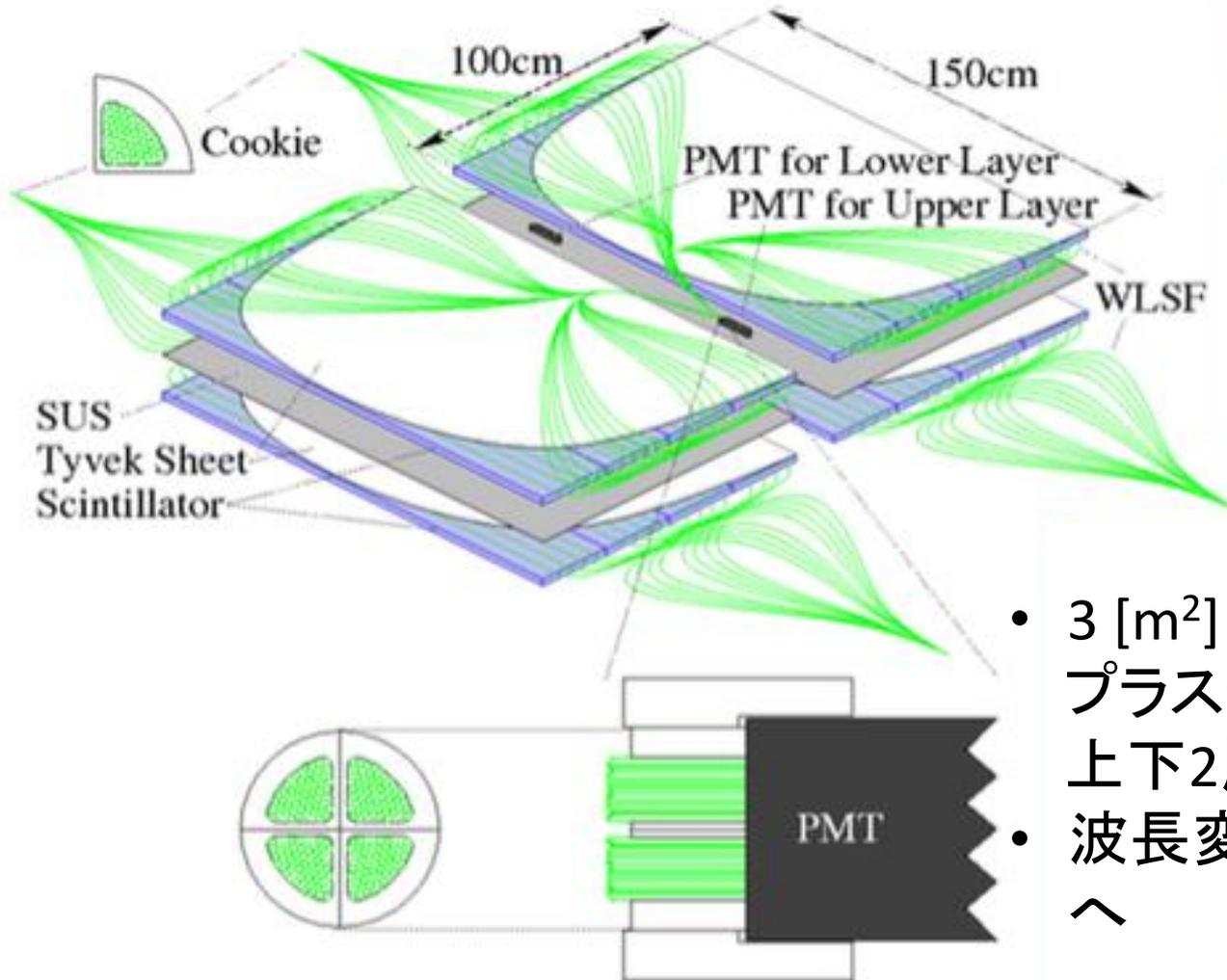
- ブラックシート
- タイベックシート(2枚)
- シンチレーター
- ステンレス板(1mm)
- シンチレーター
- タイベックシート(2枚)
- 発泡スチロール



TA 地表検出器(SD)の構成



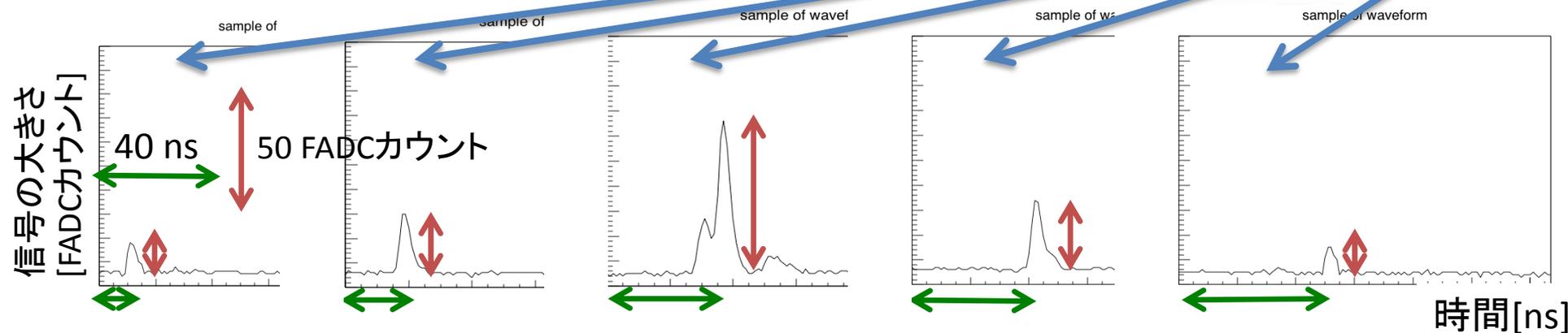
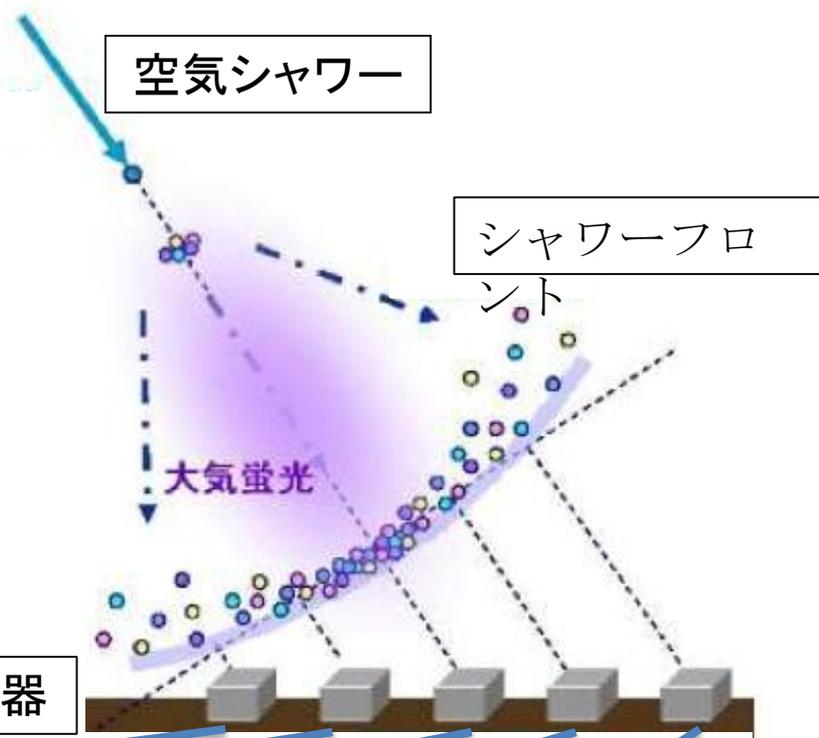
TA 地表検出器(SD)の構成



- 3 [m²] × 1.2 [cm]のプラスチックシンチレーター
上下2層
- 波長変換ファイバーでPMTへ

SDを用いた空気シャワーの観測

シャワーの中心(シャワーコア)に近いほど
 粒子が多いので信号が大きくなる \updownarrow □
 →信号の大きさからコア位置が分かる
 シャワーが傾いていると、検出器に粒子が
 入射する時間に差ができる \leftrightarrow □
 →タイミングのズレから到来方向が分かる



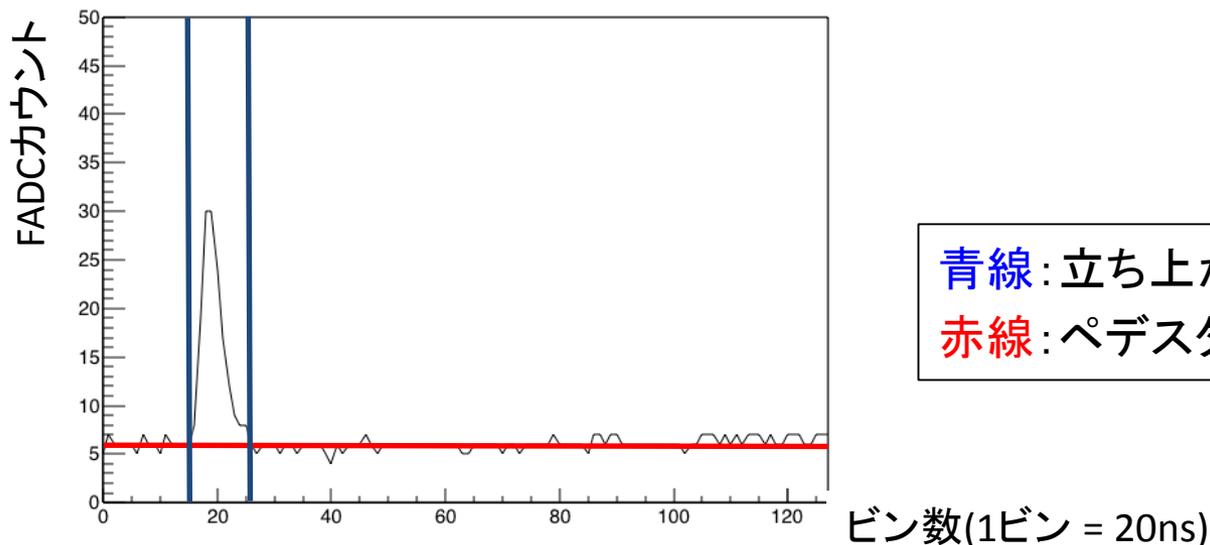
各SDでのシャワー粒子の到来時刻と粒子数の計算

到来時刻の計算

FADC値からペDESTAL値を引いた値が8ビン連続してペDESTALの 1.5σ を超えたときを立ち上がり(到来時刻)、8ビン連続して下回ったときを立ち下がりとする

粒子数の計算

立ち上がり時間～立ち下がり時間までFADC値を積分
FADC値から粒子数へ変換係数を用いて変換



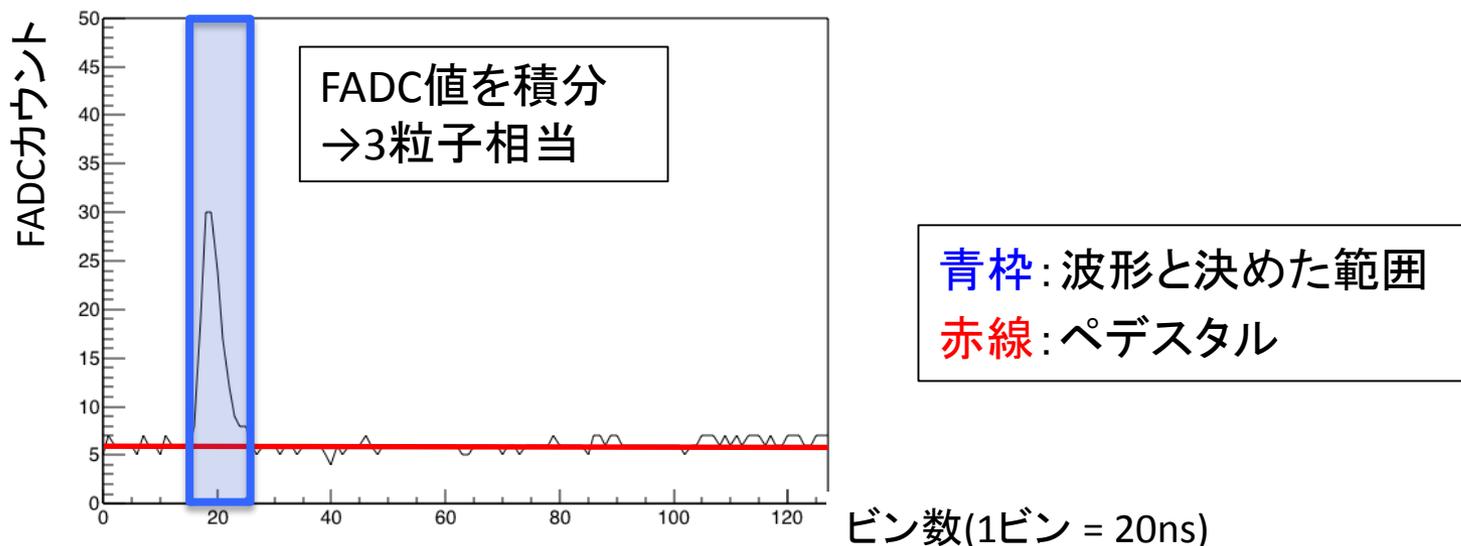
各SDでのシャワー粒子の到来時刻と粒子数の計算

到来時刻の計算

FADC値からペDESTAL値を引いた値が8ビン連続してペDESTALの 1.5σ を超えたときを立ち上がり(到来時刻)、8ビン連続して下回ったときを立ち下がりとする

粒子数の計算

立ち上がり時間～立ち下がり時間までFADC値を積分
FADC値から粒子数へ変換係数を用いて変換



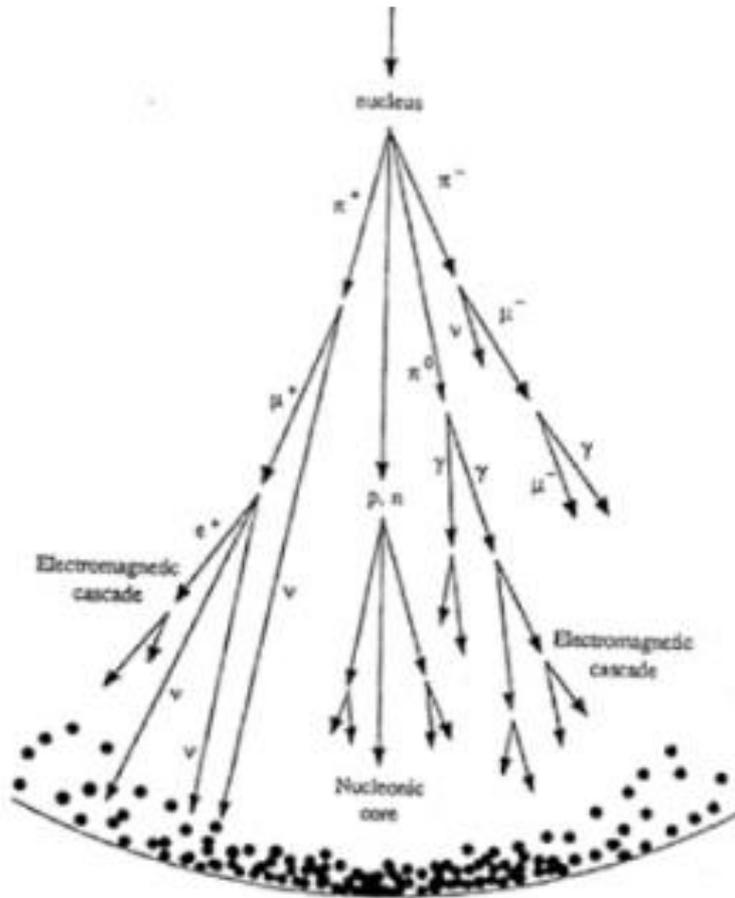
研究のモチベーション

空気シャワーフロントの構造がシャワー軸からの距離によってどのように変化するかをTASDのデータを用いて調べる

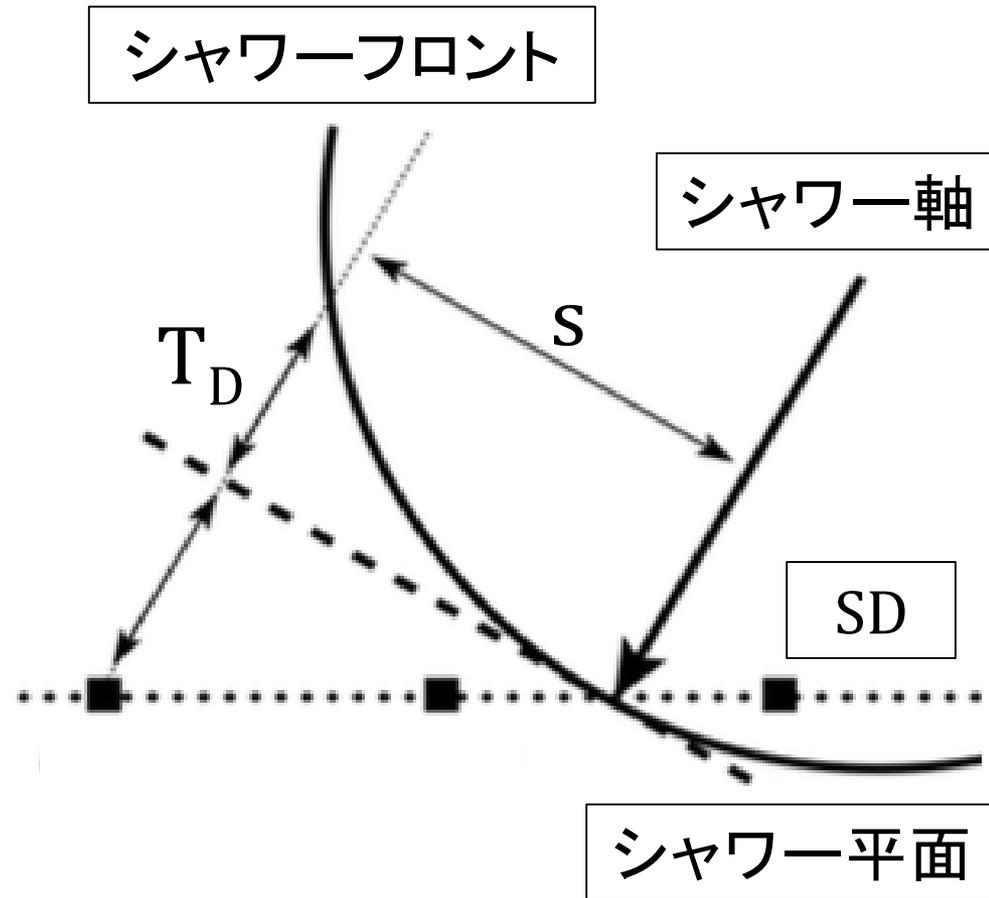
宇宙線の到来方向を計算する際に用いているシャワーフロントの構造を表す関数をTASDのデータを反映したものに変更する

シャワー軸からの距離と粒子の到来時刻の遅れの関係性を調べる

パラメーターに関して



シャワーフロント



シャワー平面

s : シャワー軸からの距離
 T_D : シャワー平面からの遅れの時間

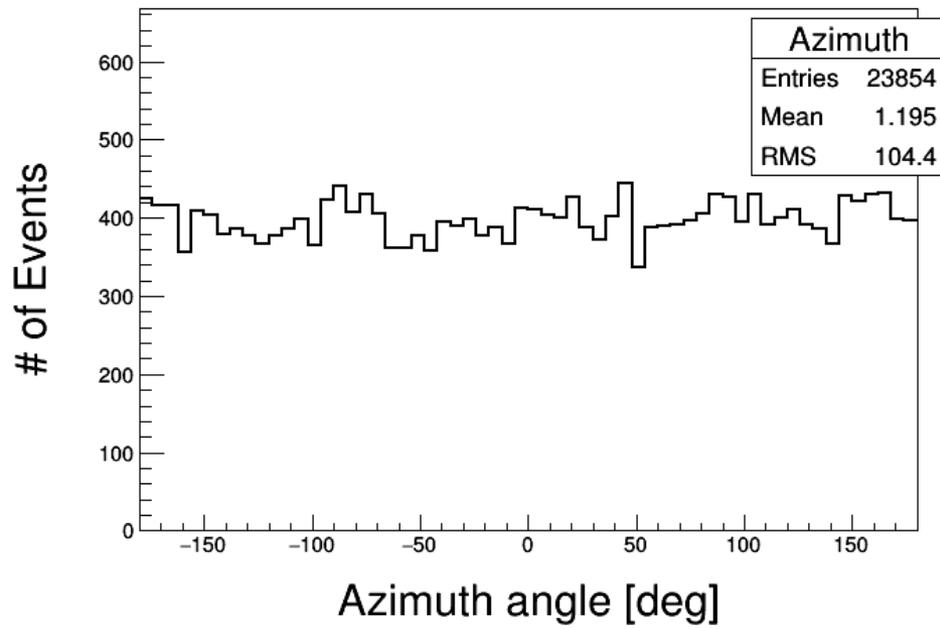
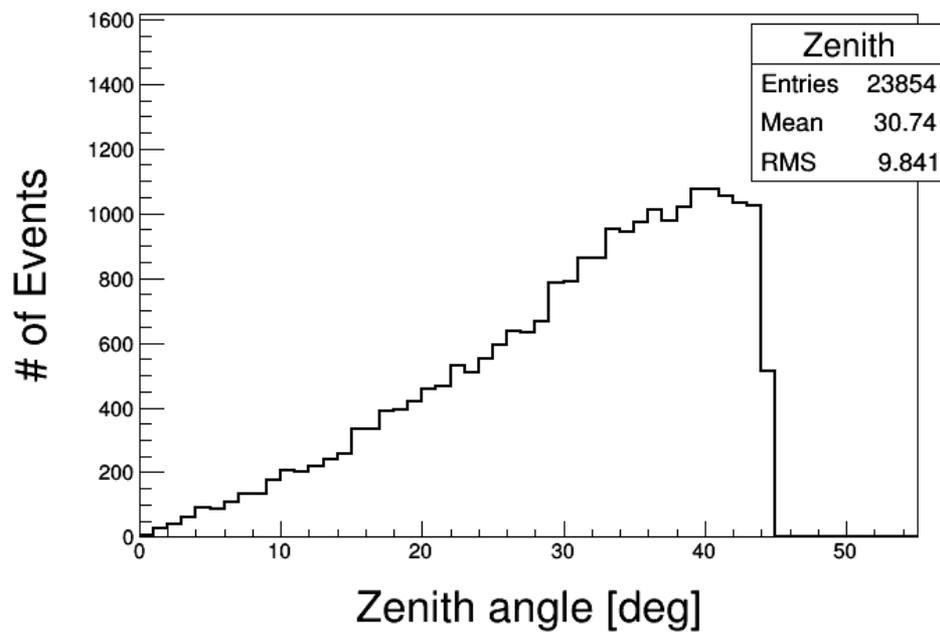
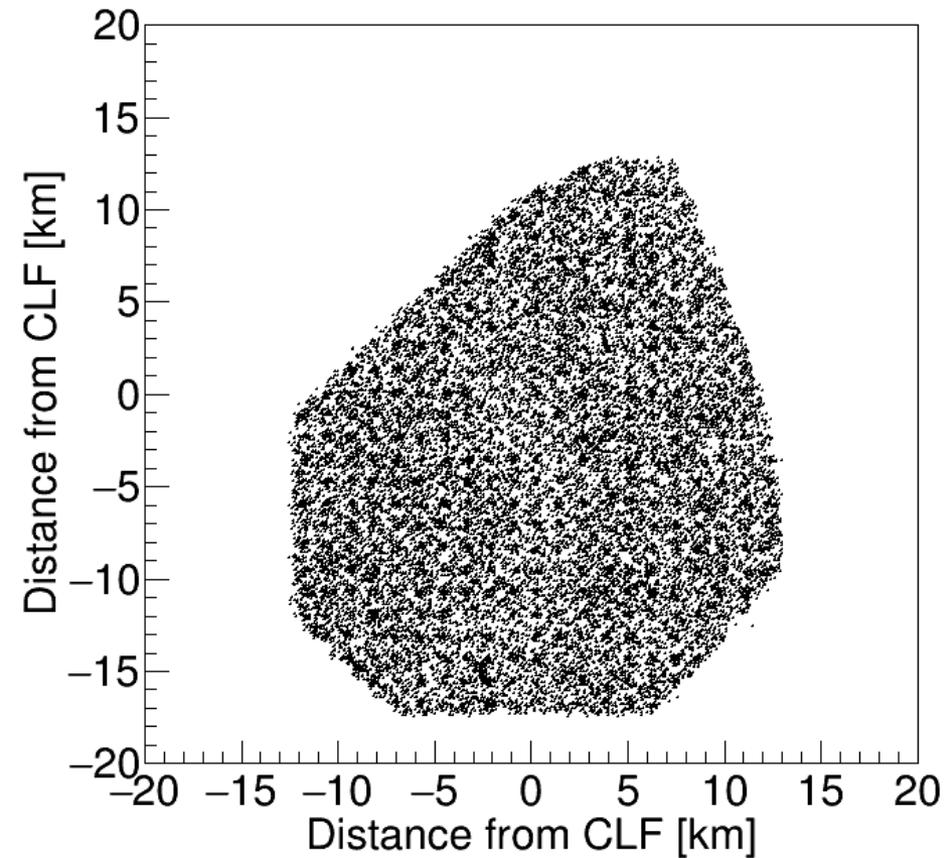
今回用いたデータセットに関して

TASD7年分(2008/05/11 ~ 2015/05/11)のデータを使用
イベントセレクションとして以下の選別条件を用いた。

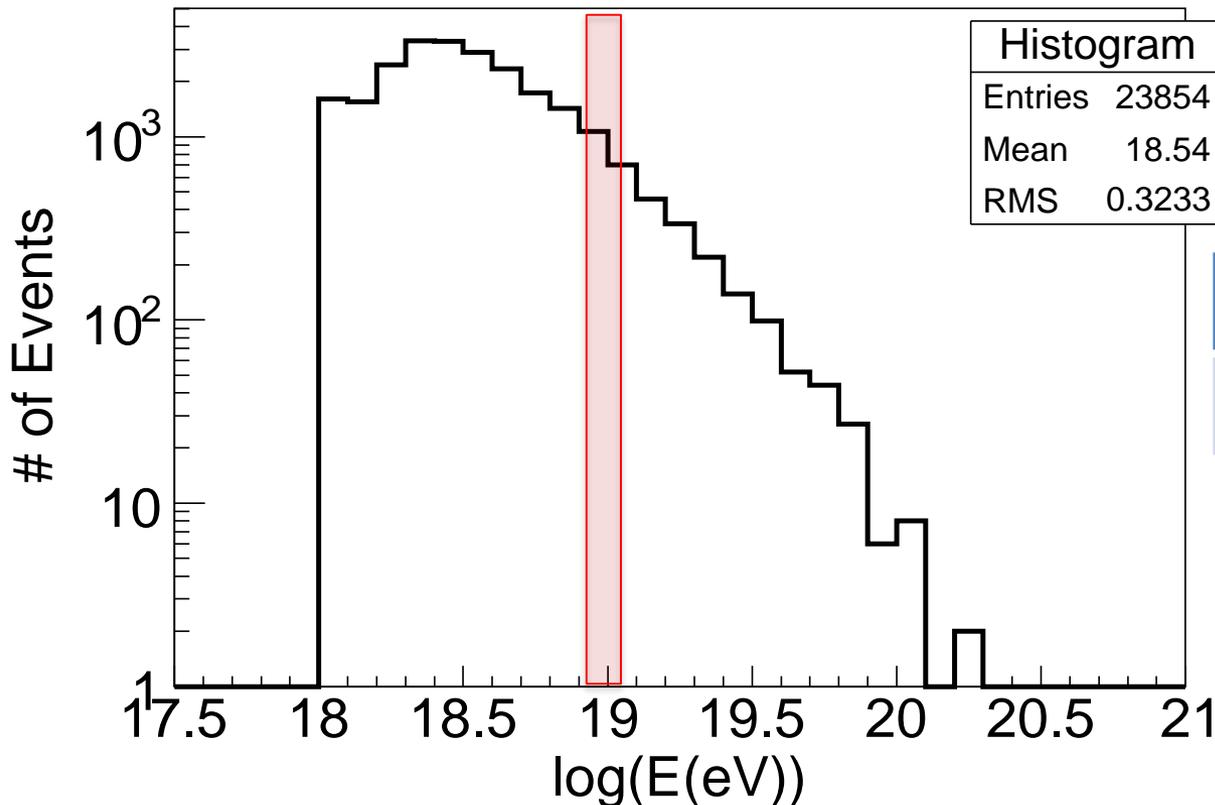
ApJ 768:L1 (2013)

- $\text{energy} > 1 \text{ EeV}$
- $\theta < 45 \text{ degree}$
- $X^2 / \text{ndf} < 4$
- $\sigma_{s800} / s800 < 0.25$
- # of SD > 5
- $\theta_{\text{err}} < 5^\circ$
- core position $> 1200 \text{ m}$ from edge of array
- # of events : 23854

All Dataset energy > 1 EeV



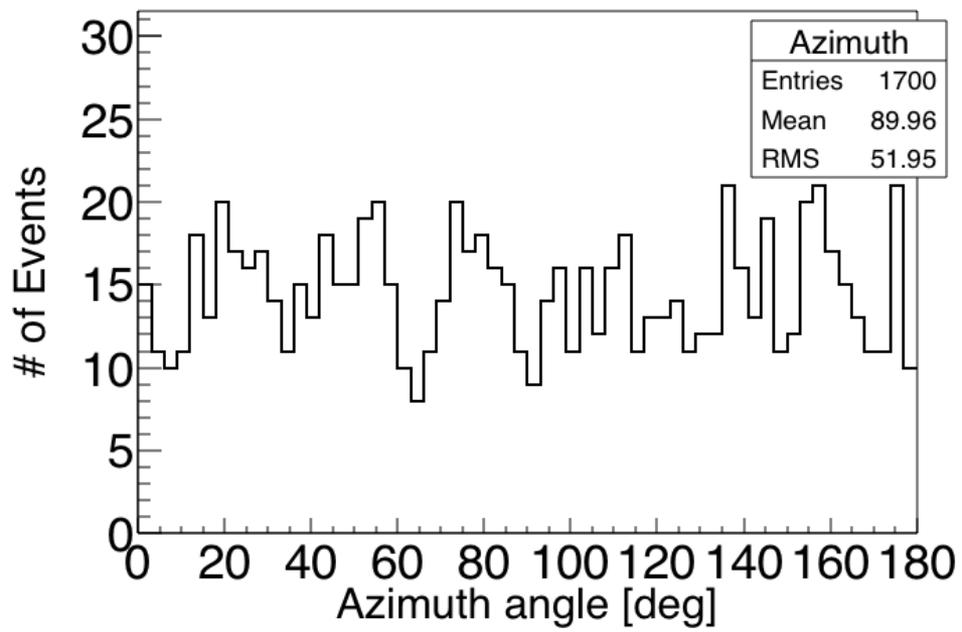
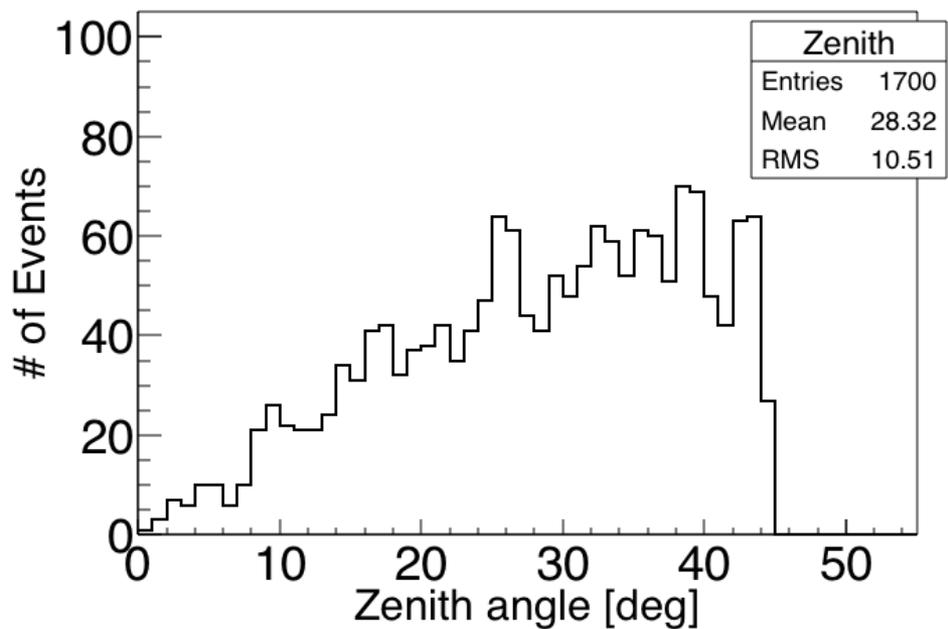
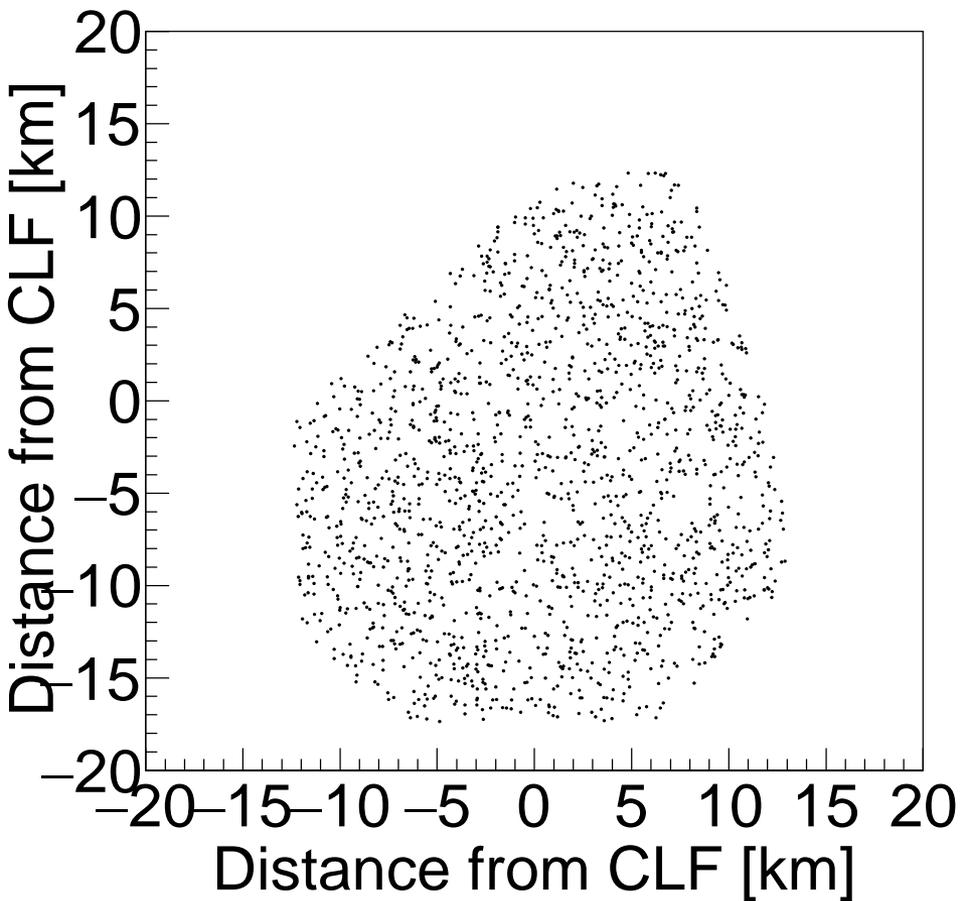
エネルギー分布



logE (eV)	# of events
19.0	1700

logE (eV) = 19.0のイベントに関して考える。
 ただし、SDのエネルギー決定時の不確かさ±21%を
 もたしている。

$E = 10^{19} \text{ eV}$



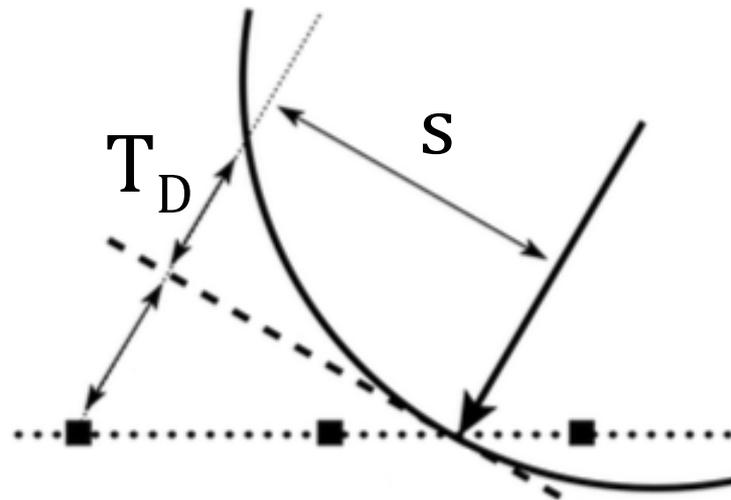
シャワー軸からの距離 s と遅れ T_D の関係

シャワー軸からの距離 s とシャワー平面からの遅れの時間 T_D をそれぞれ計算し、シャワー軸からの距離が0 ~ 2 kmの範囲で横軸にシャワー軸からの距離、縦軸に遅れの時間を取りプロットする。

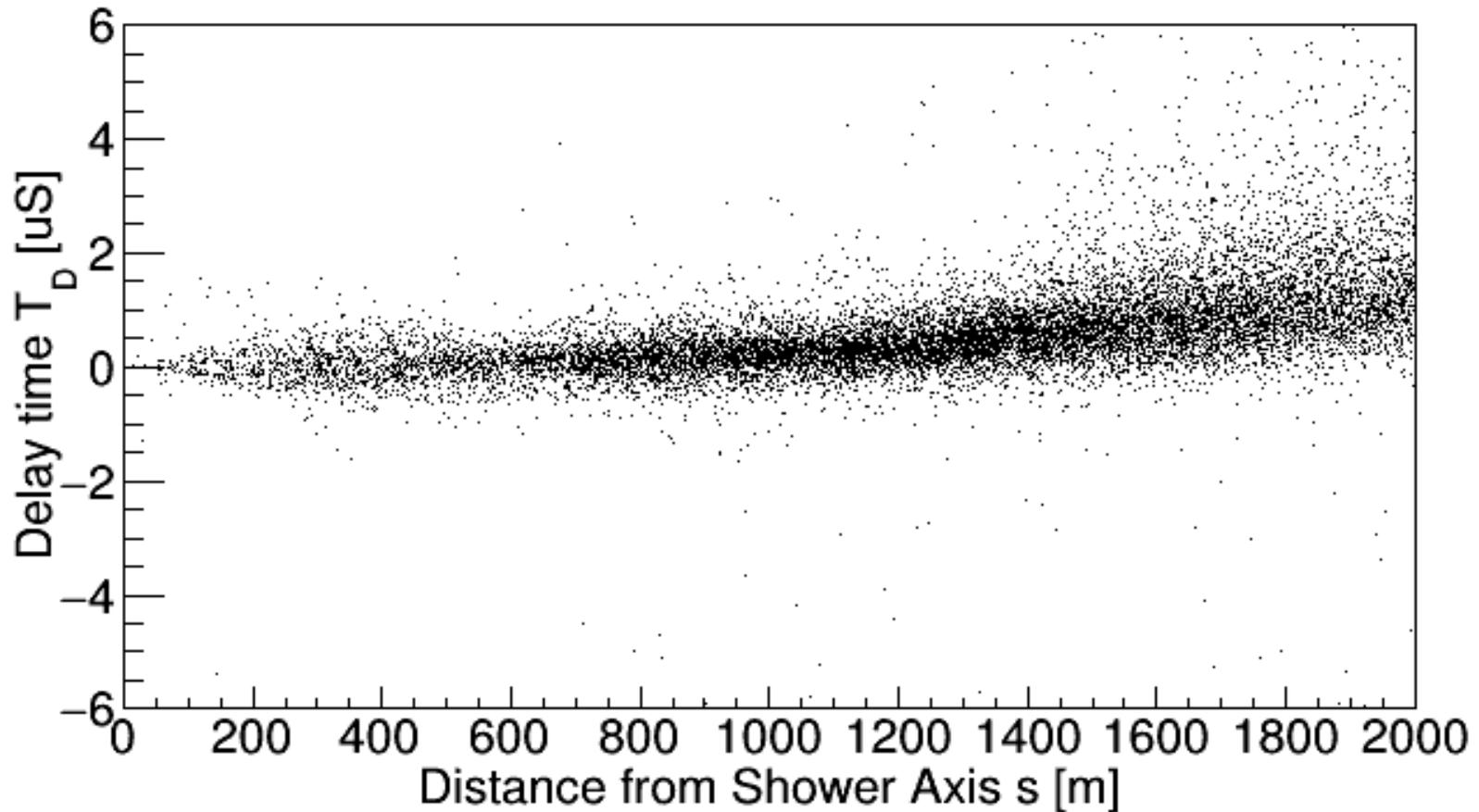
天頂角でイベントをセレクトする。

$1.0 \leq \sec\theta < 1.1$, $1.1 \leq \sec\theta < 1.2$, $1.2 \leq \sec\theta < 1.3$,
 $1.3 \leq \sec\theta$

以後# of SDsとしてSDの数で
事象数を表す。



シャワー軸からの距離 s と遅れ T_D の関係

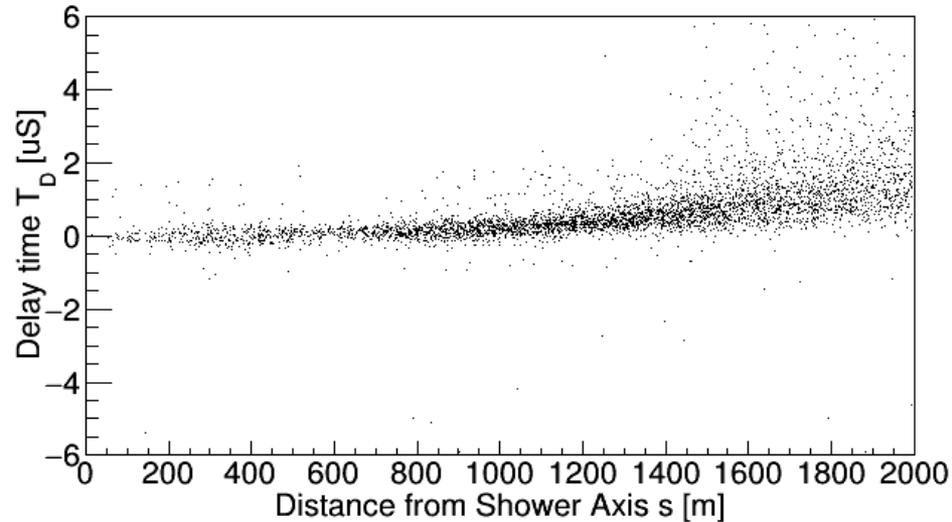


$E = 10^{19.0}$ eV , $\sec\theta = \text{ALL}$

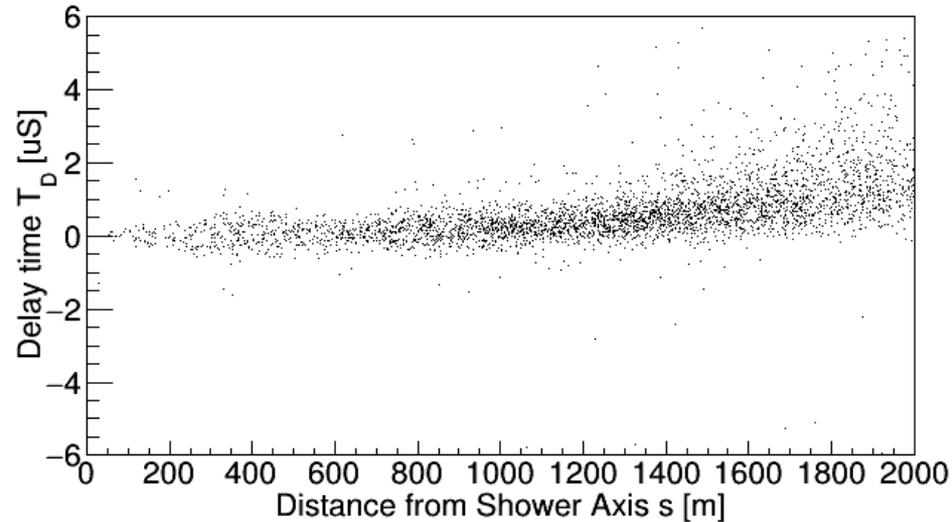
of SDs = 14655

シャワー軸からの距離 s と遅れ T_D の関係

$E = 10^{19.0}$ eV
 $1.0 \leq \sec\theta < 1.1$
of SDs = 4664

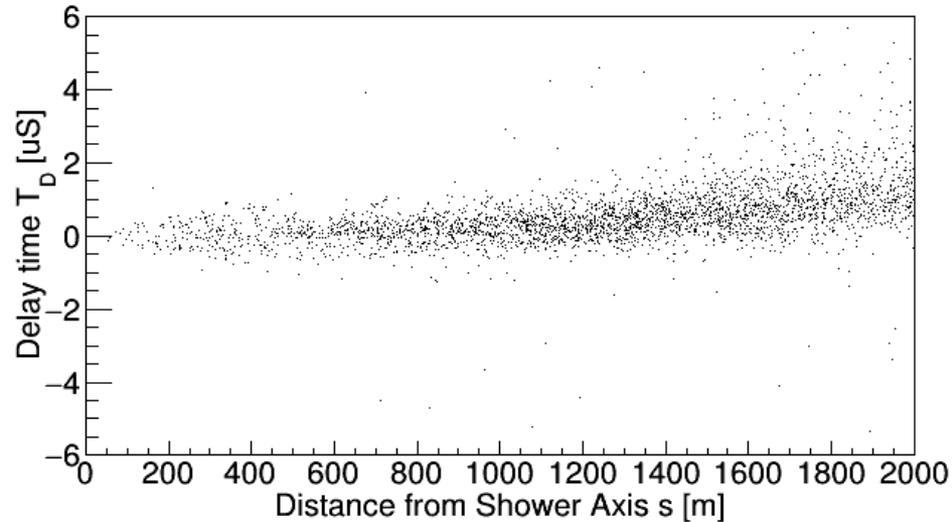


$E = 10^{19.0}$ eV
 $1.1 \leq \sec\theta < 1.2$
of SDs 4007

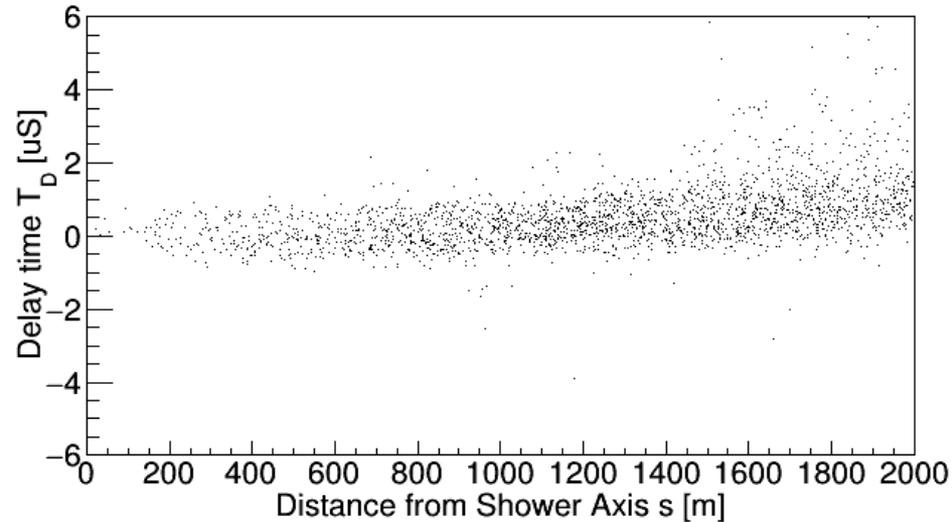


シャワー軸からの距離 s と遅れ T_D の関係

$E = 10^{19.0}$ eV
 $1.2 \leq \sec\theta < 1.3$
of SDs = 3421



$E = 10^{19.0}$ eV
 $1.3 \leq \sec\theta$
of SDs = 2563



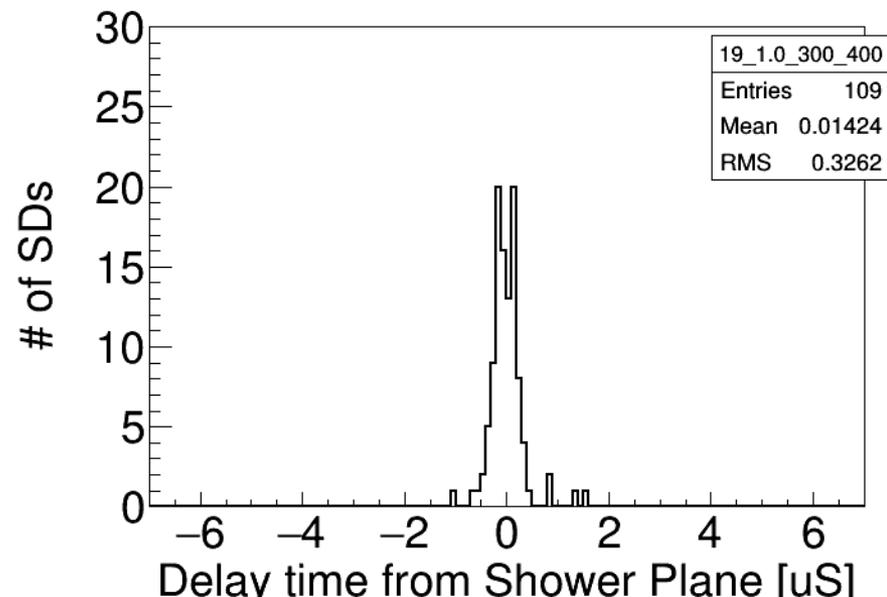
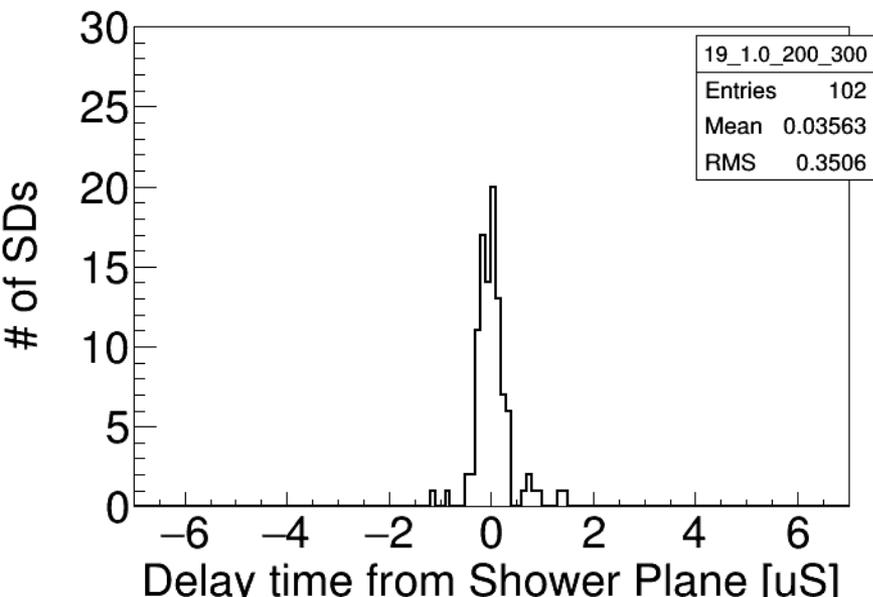
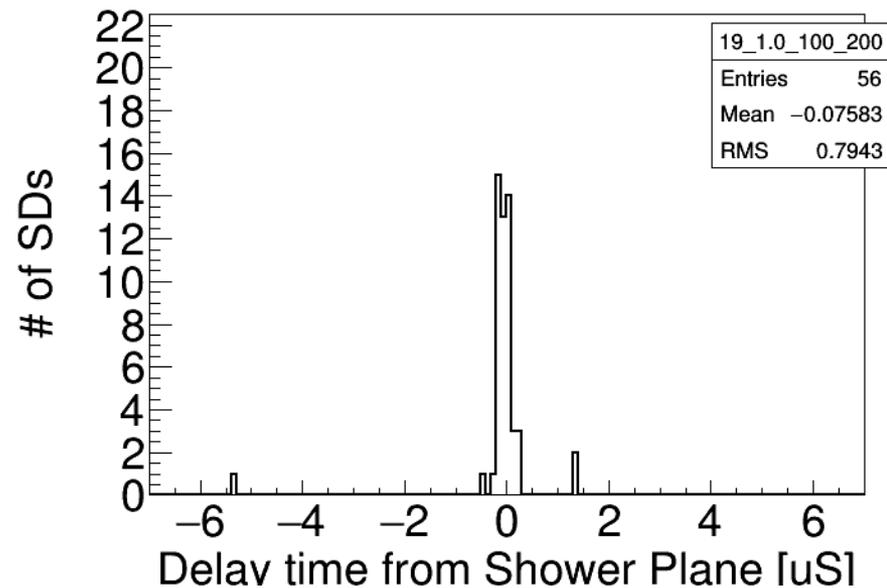
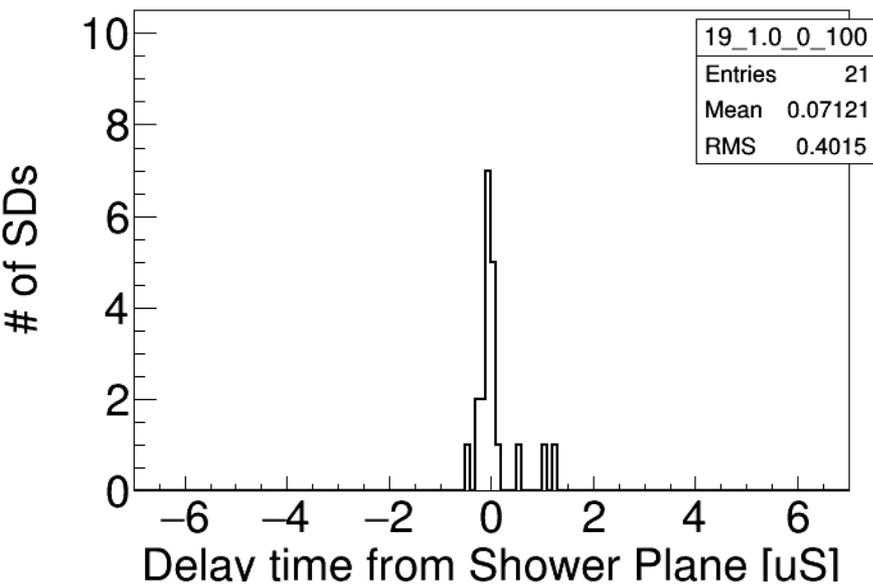
シャワー軸からの距離ごとの遅れ

シャワー平面からの遅れ T_D を、シャワー軸からの距離
0~2 kmまで100 mごとに
ヒストグラムを描き、ヒストグラムの形を調べた

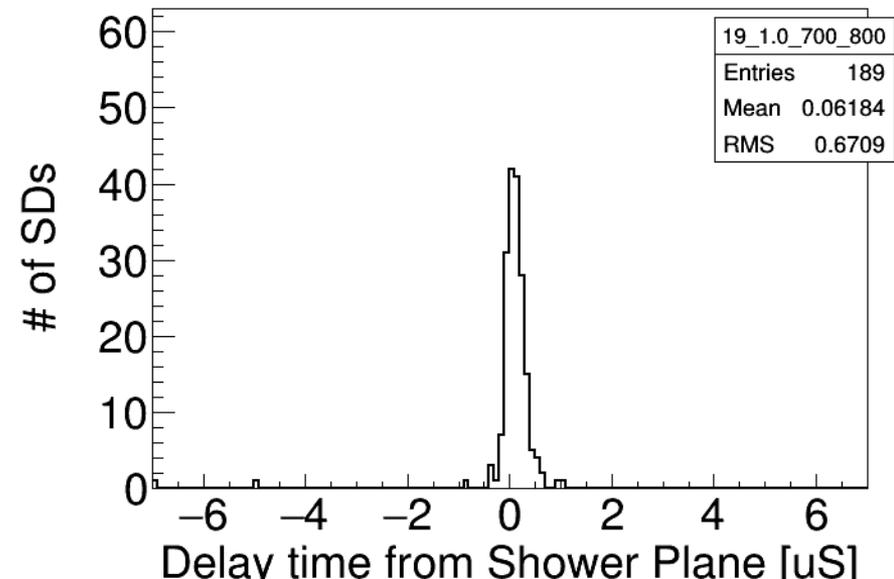
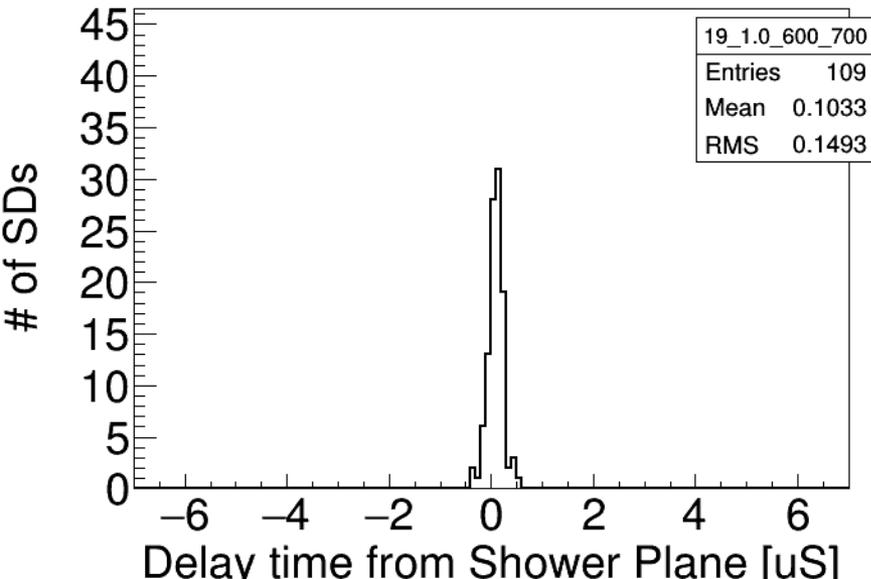
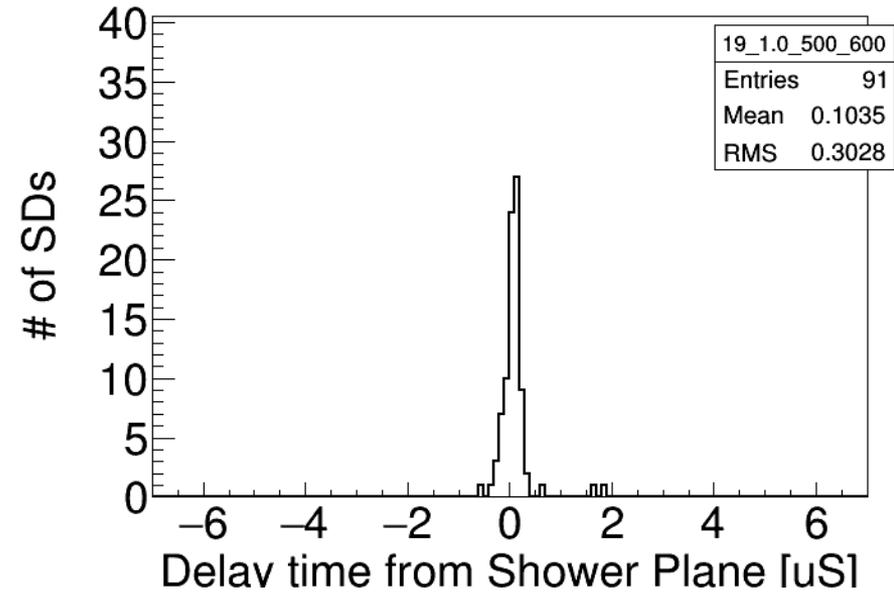
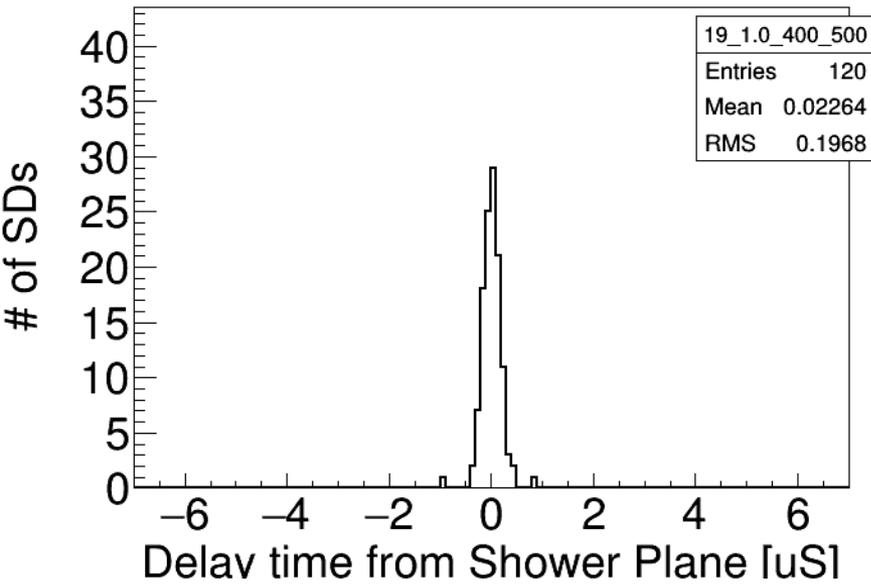
条件

$$E = 10^{19.0} \text{ eV}, 1.0 \leq \sec\theta < 1.1, \text{ \#of SDs} = 4664$$

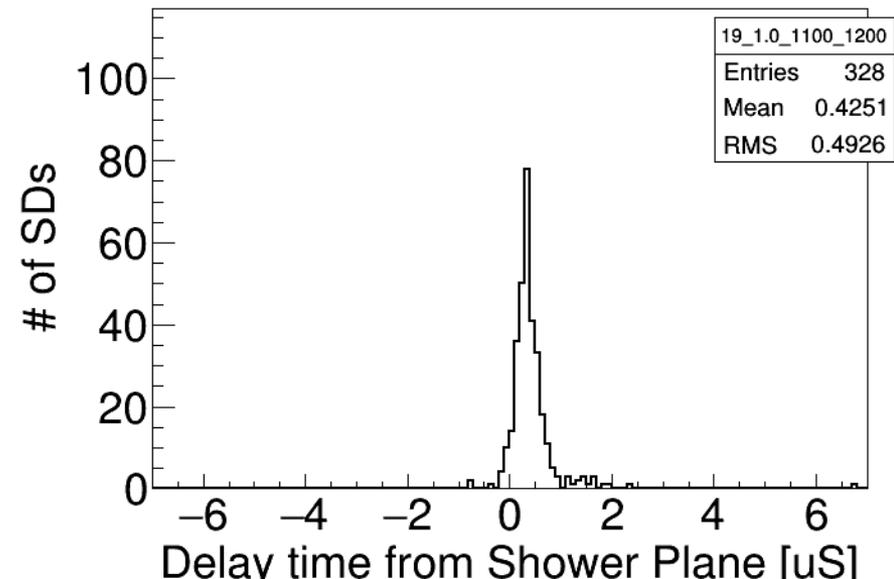
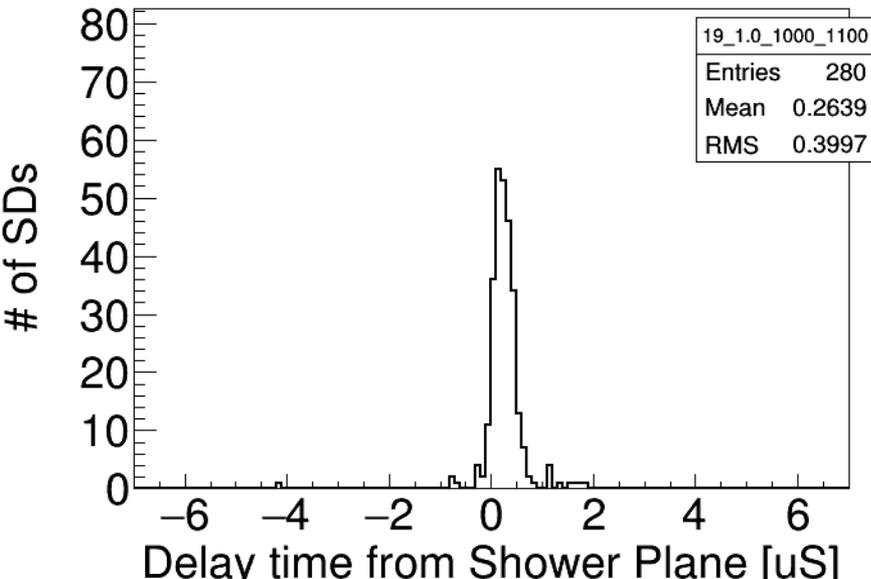
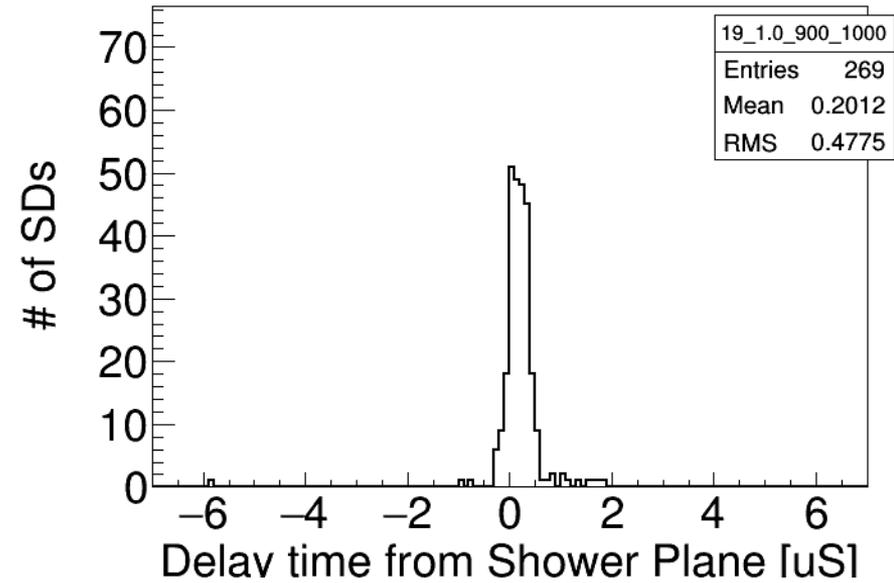
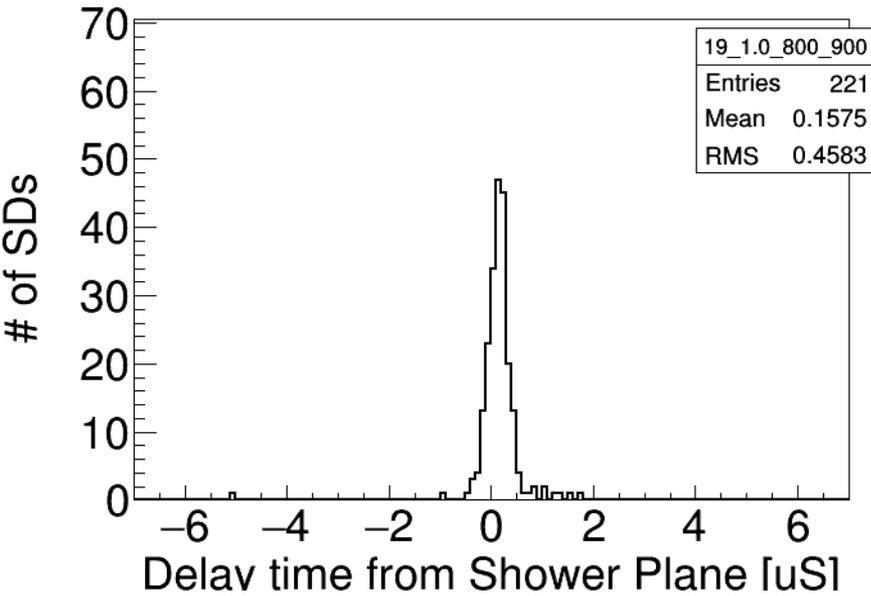
シャワー軸からの距離ごとの遅れ



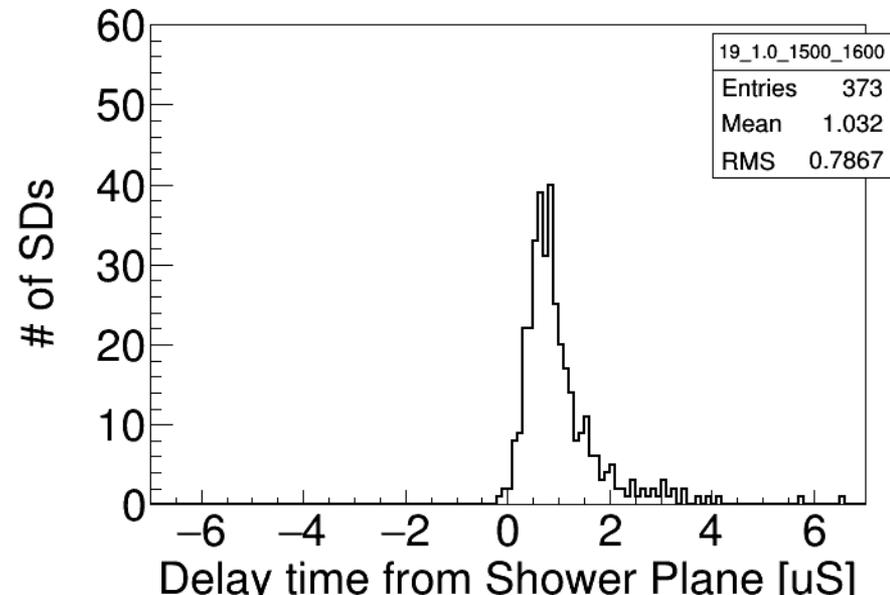
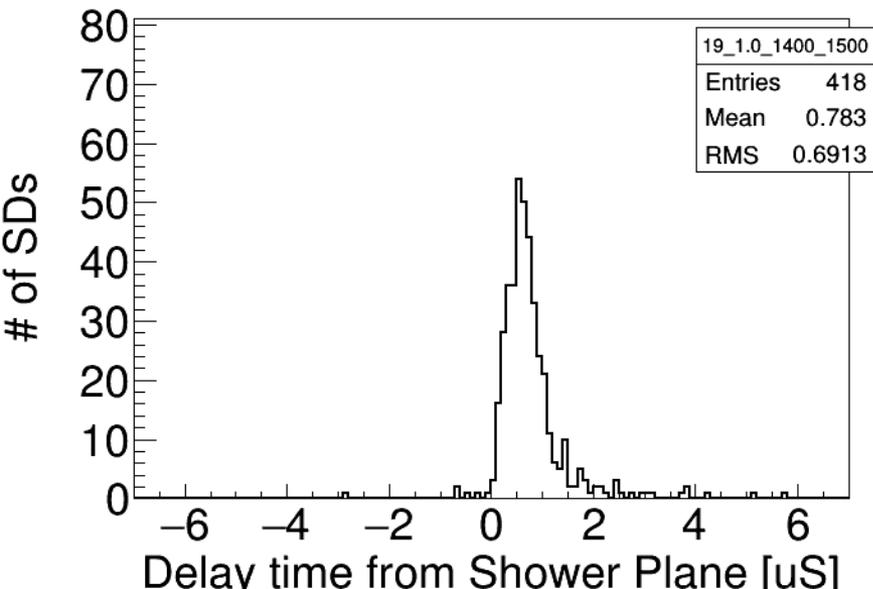
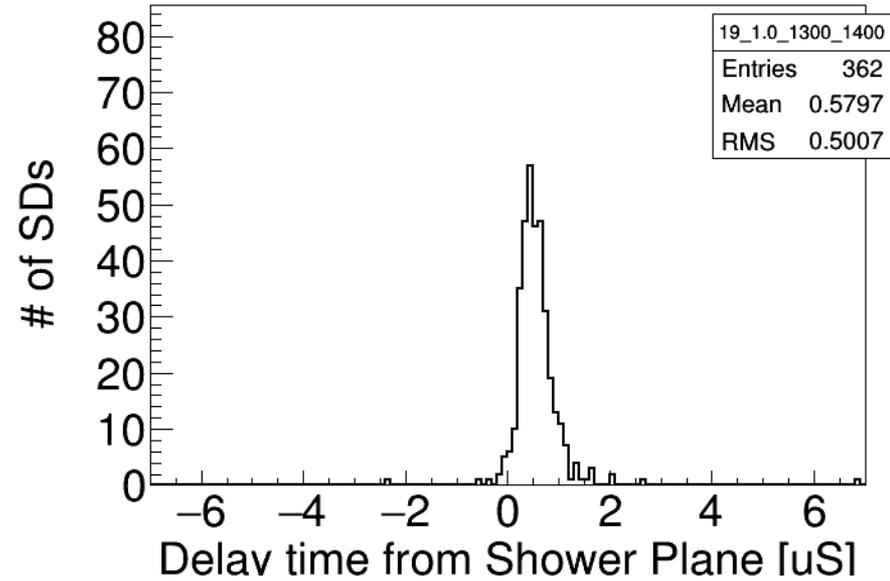
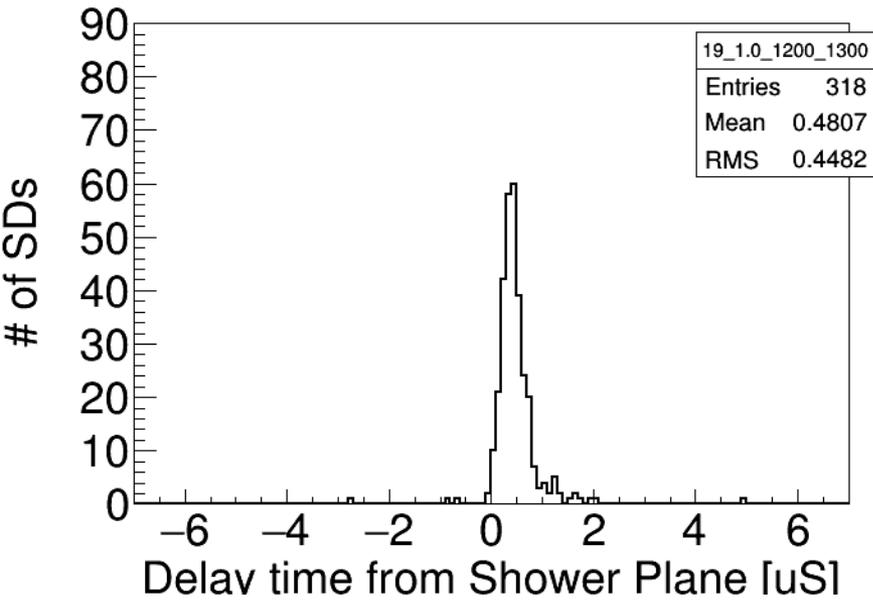
シャワー軸からの距離ごとの遅れ



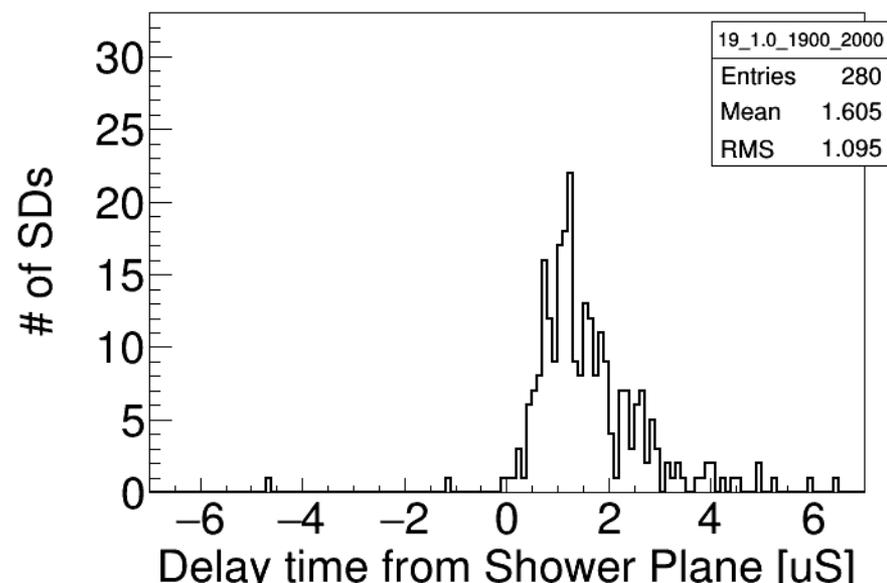
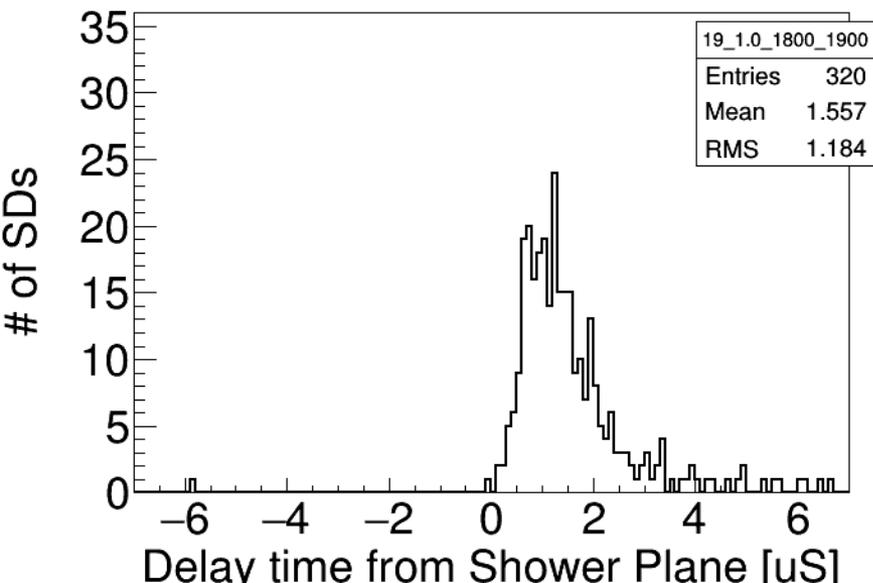
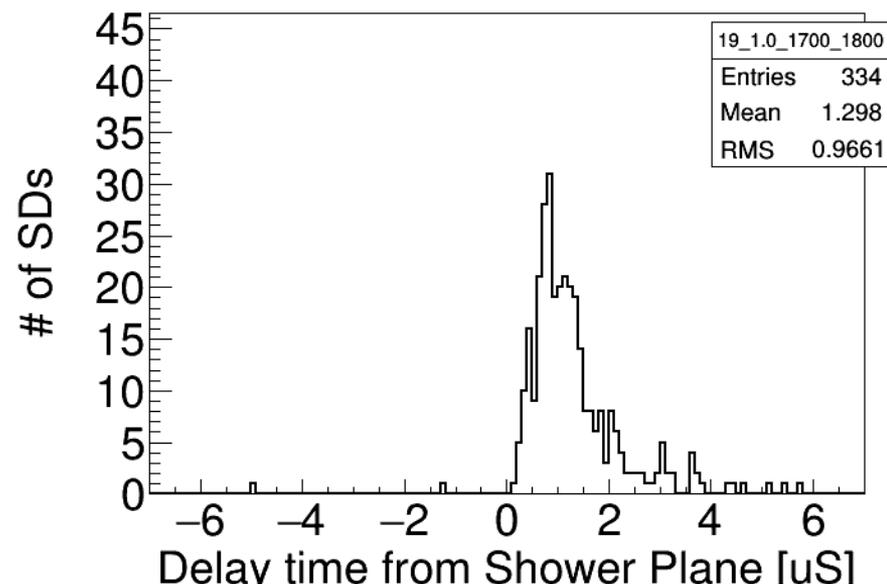
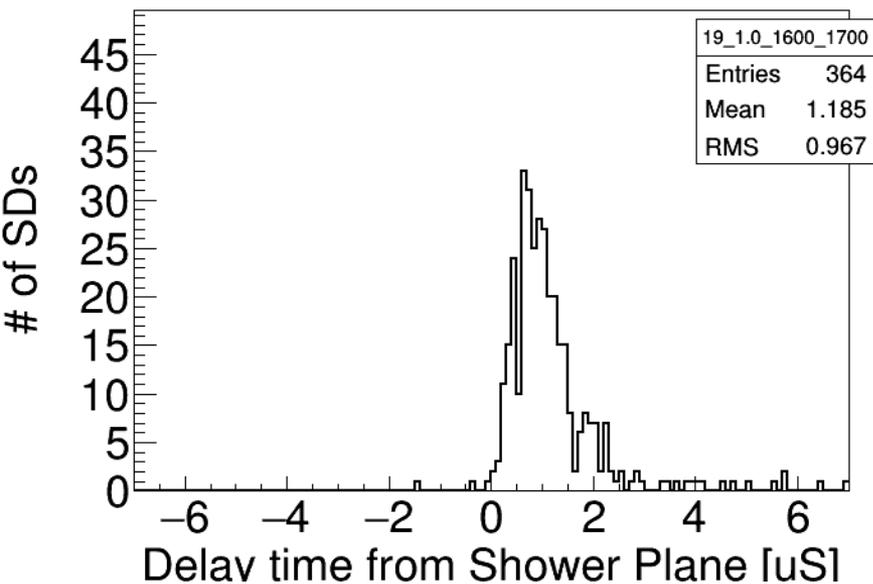
シャワー軸からの距離ごとの遅れ



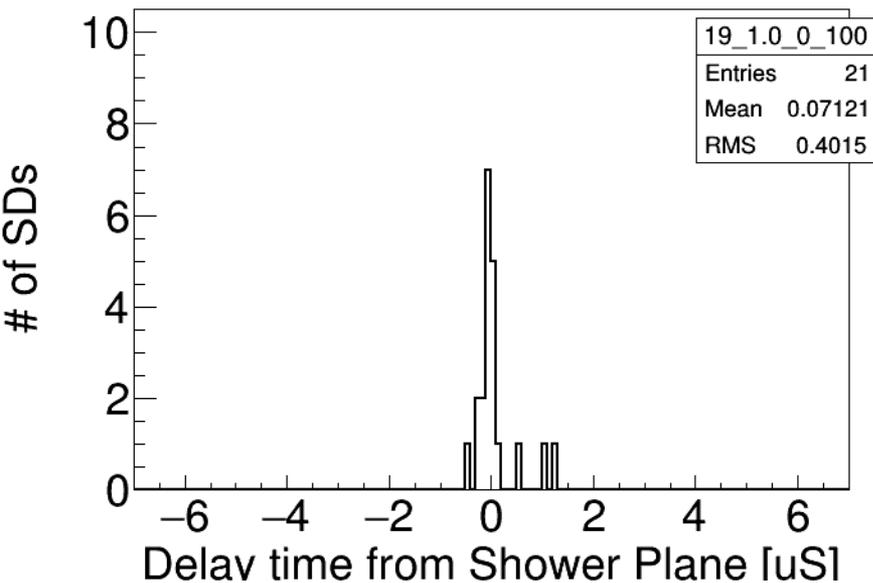
シャワー軸からの距離ごとの遅れ



シャワー軸からの距離ごとの遅れ



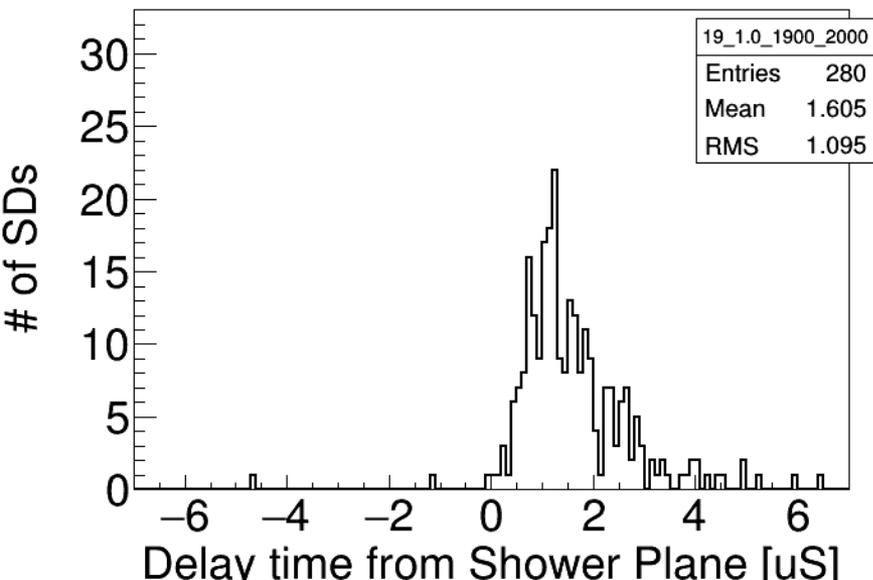
シャワー軸からの距離ごとの遅れ



上図は0~100 m

下図は1900~2000 m

シャワー軸からの距離が遠くなるにつれて遅れる方にtailを引いている



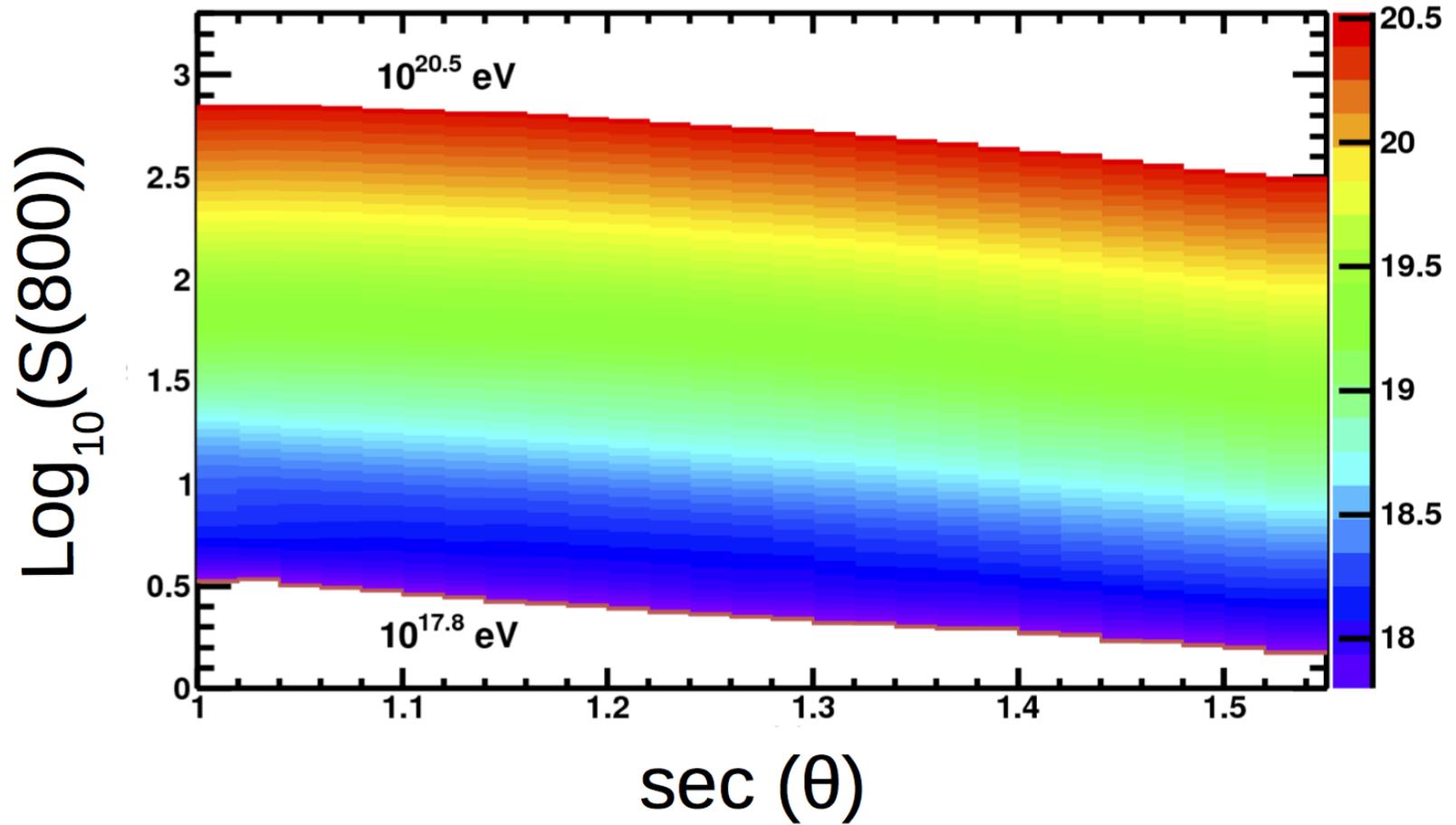
SD条件でのカットが必要

まとめと今後

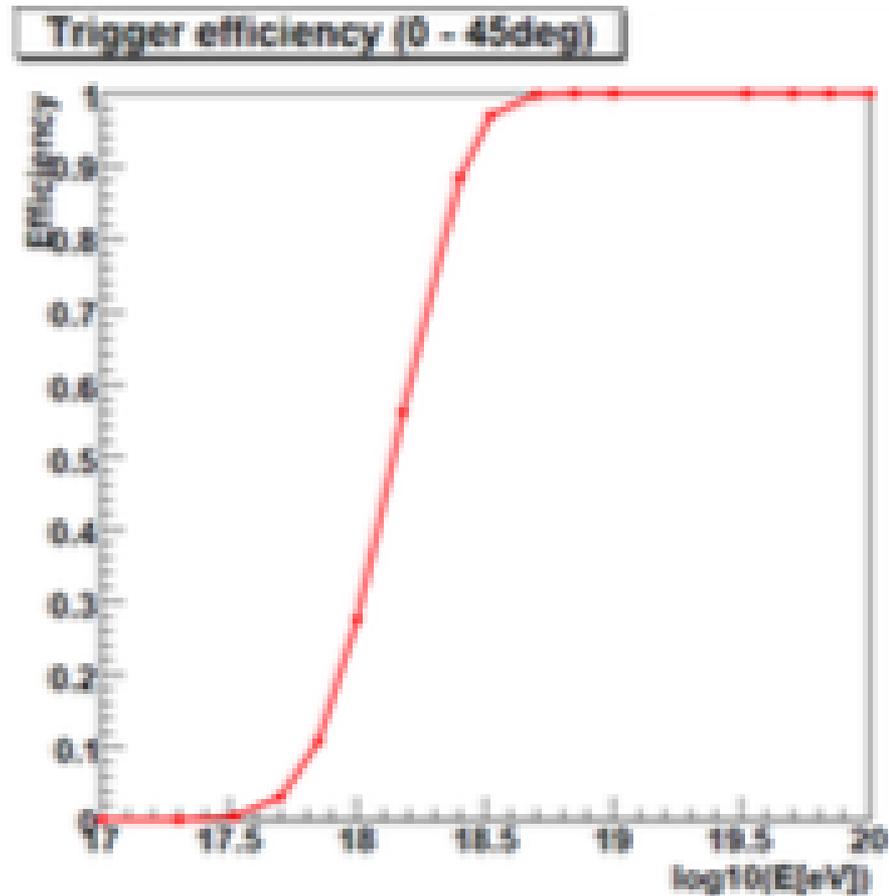
- シャワー軸からの距離とシャワー平面からの遅れの関係について天頂角ごとにプロットしてシャワーフロントの構造を調べた
- シャワー軸からの距離100 mごとに遅れのヒストグラムを描き、その様子を調べた
 - シャワー軸からの距離が遠くなるにつれて遅れる方に tailを引くようになる
 - SDでのカットをかける必要がある
- 実データを反映したシャワーフロントの構造を表す関数を考えていく

Back Up

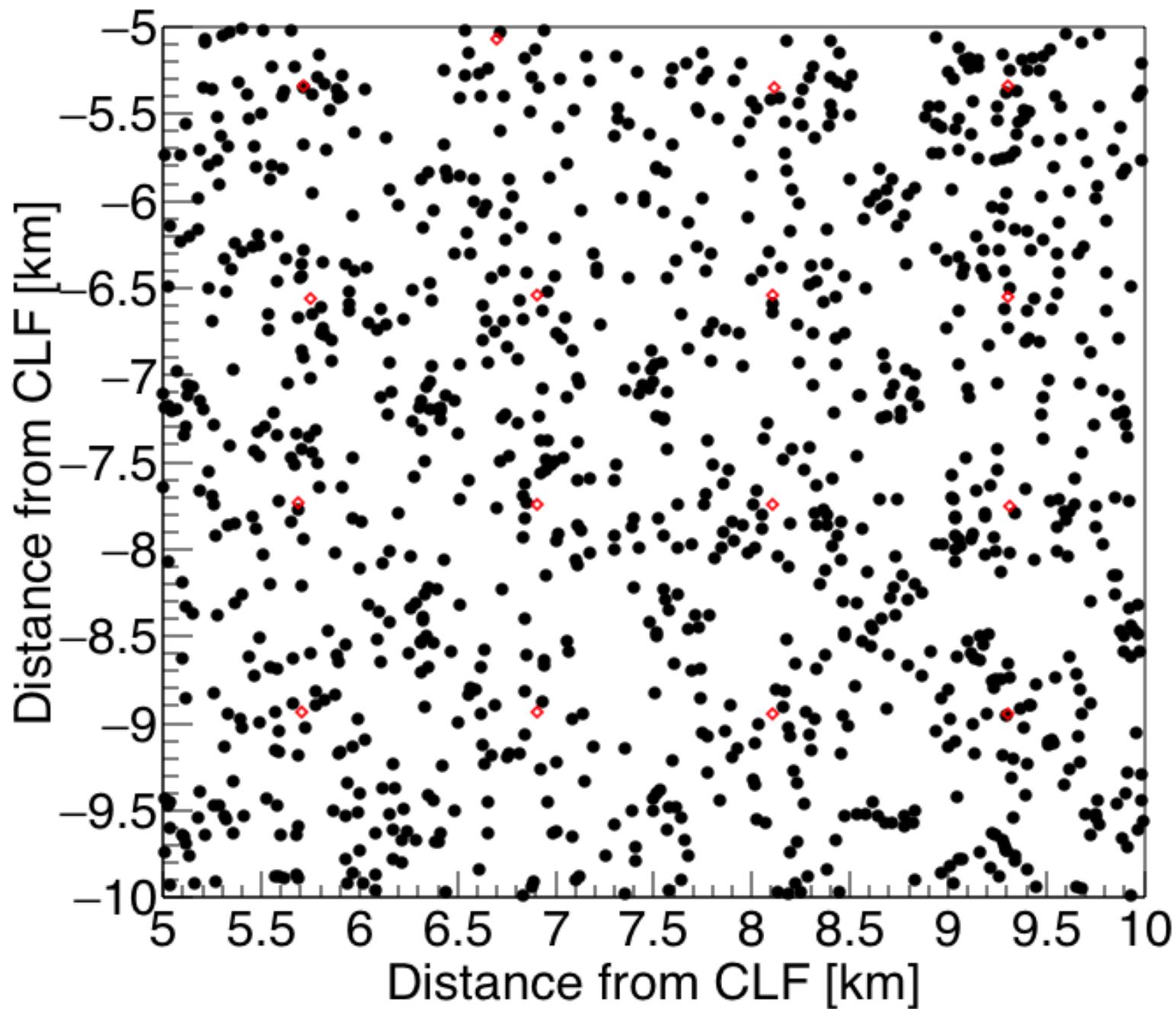
エネルギー計算



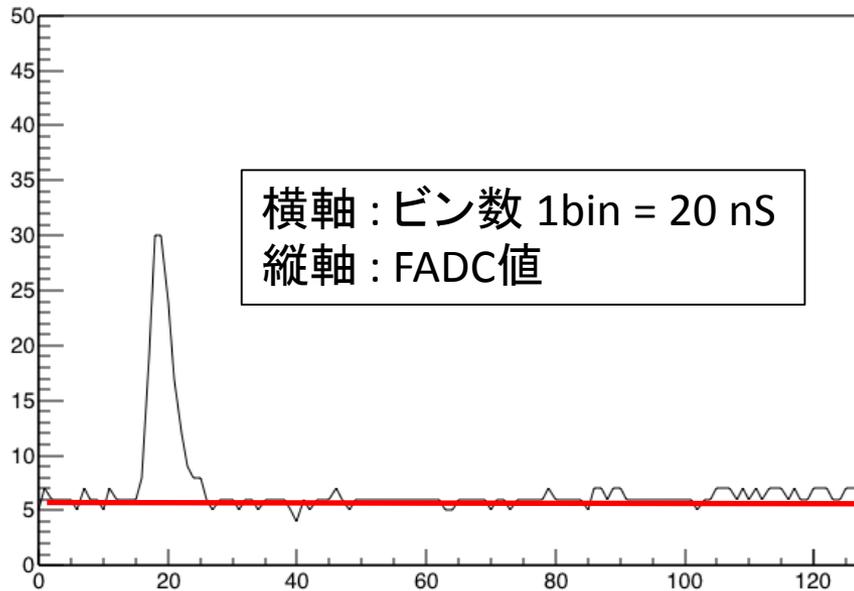
トリガー効率のエネルギー依存性



N. Sakurai, et al., Proc. of 30nd ICRC., vol.5,1159(2007).



イベントトリガーの判定



8ビンごとに移動和を計算し、
ペDESTAL (赤線)を引いた値が
15 FADC値以上か判定

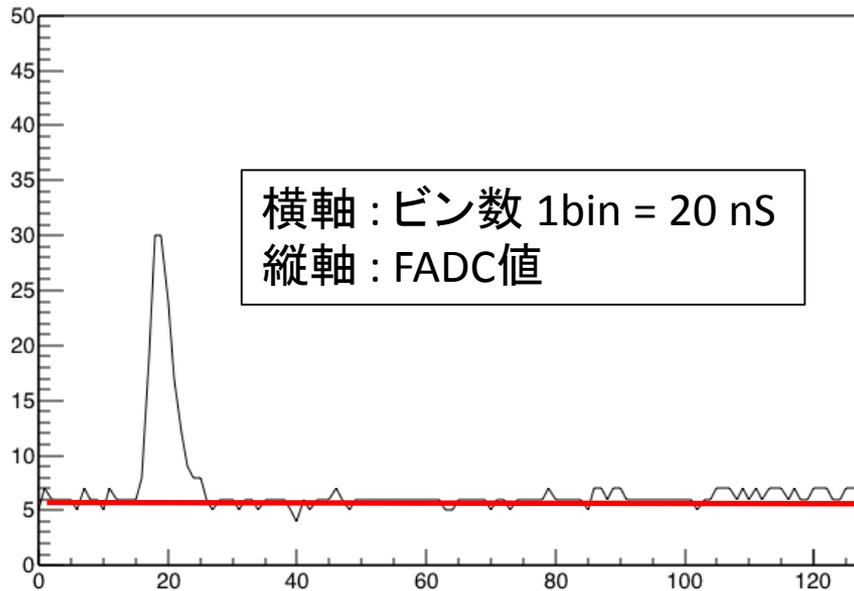


Lv.0トリガーを発行
トリガーの前640nSから
以後1920nSの波形を記録し、
Lv.0トリガーテーブルを作成



波形の2560nSの和から
ペDESTALを引いた値が
150 FADC値以上か判定

イベントトリガーの判定



Lv.1トリガーを発行
波形の時刻(μ S)、波形の積分値
の上下層の平均を記録し、
Lv.1トリガーテーブル作成



Lv.1トリガーが 8μ S以内に
隣接3台のSDで見つかる



Lv.2トリガーを発行
 $\pm 64\mu$ S内に存在するLv.0
トリガーテーブルを収集、記録

APJ 768:L1 セレクション条件に関して

天頂角 θ 、方位角 φ をFittingで計算する際にMINUIT package というものを用いている。

計算した際に不確かさとして σ_θ 、 σ_φ が得られる。

$$q_{err} = \sqrt{S_q^2 + \sin^2 q S_j^2}$$

AGASAのLateral Distribution Functionを用いて $S800$ を計算 (上記同様にMINUIT packageを使用)した際に不確かさ σ_A が得られる (A はAGASA LDFの規格化定数)

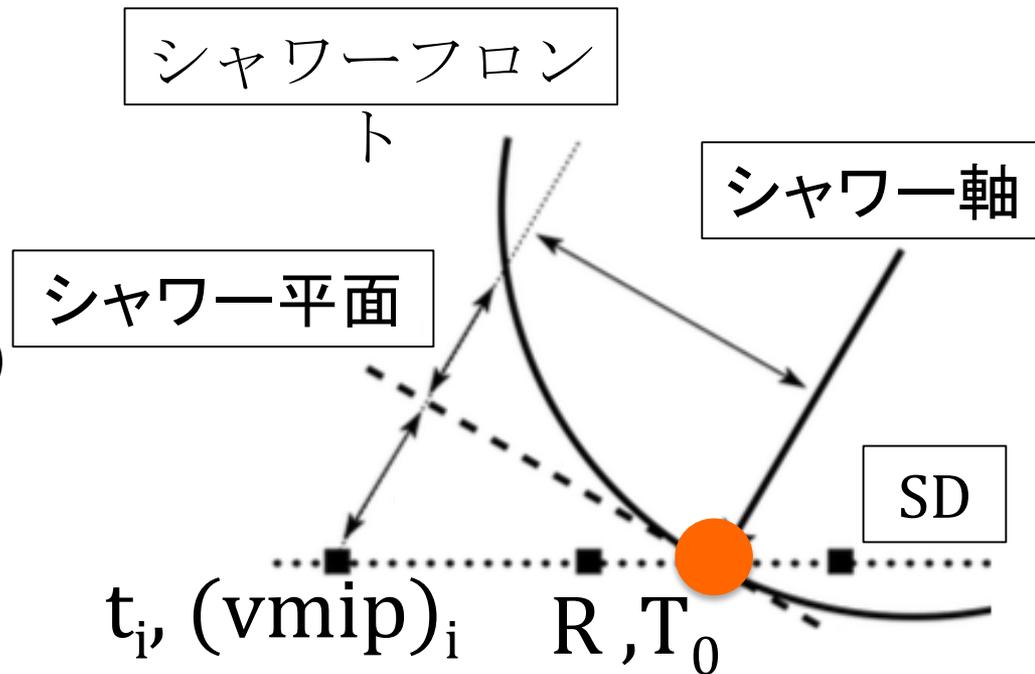
この σ_A 、 A を用いて $\sigma_{S800}/S800 = \sigma_A/A$ を計算している

解析時の座標系について

コア位置や、コアの到来時刻、天頂角、方位角を計算する際、座標系としてはCLFのZ座標を0としたX-Y平面で考えている。

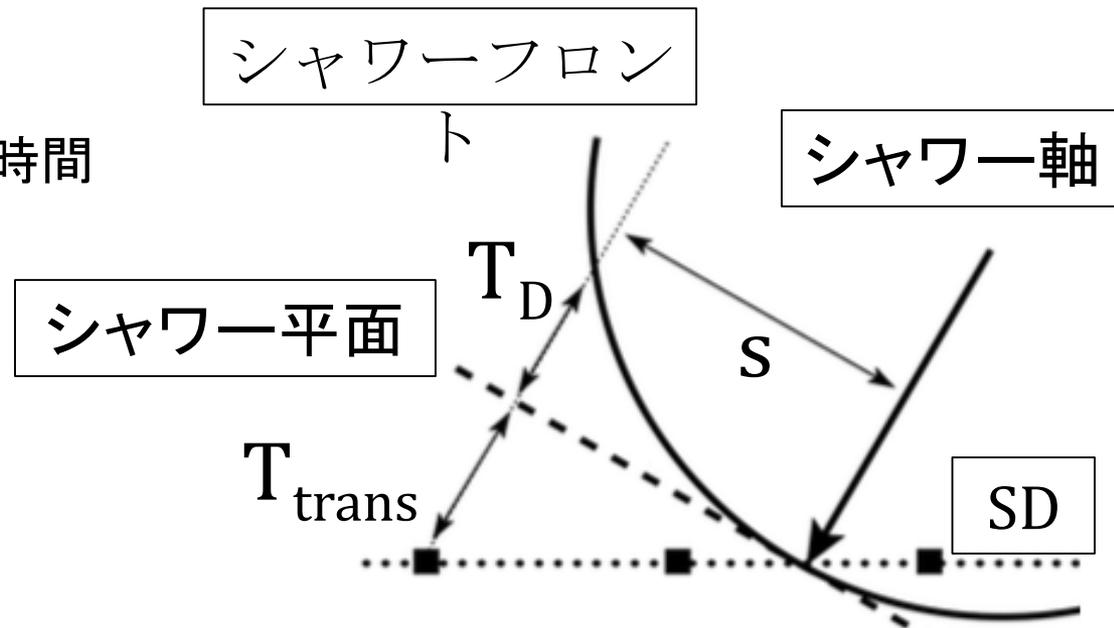
パラメーターに関して

- シャワー軸
 - 宇宙線の到来方向
- コア位置 : $R = (R_x, R_y, 0)$
 - シャワー軸と地面の交点
- $R_{\text{COG}} = ((R_{\text{COG}})_x, (R_{\text{COG}})_y, 0)$
 - 重心の座標
- T_0
 - コアの到来時刻
- t_i
 - SDに粒子が到来した時刻
- $(vmip)_i$
 - SDに到来した粒子数



パラメーターに関して

- T_{trans}
- SDからシャワー平面までの時間
- S
- シャワー軸からの距離
- T_D
- シャワー平面からの遅れ



ジオメトリの計算

重心 R_{COG} を計算する

$$(R_{COG})_k = \frac{\sum_{i=0}^N \mathring{a}(r_i)_k (vmip)_i}{\sum_{i=0}^N \mathring{a}(vmip)_i}, (k = x, y)$$

r_i = 各検出器の位置、 $(vmip)_i$ = 各検出器の粒子数

ジオメトリの計算

$$c_G^2 = \dot{a} \frac{(t_i - t_i^{FIT})^2}{\sqrt{S_e^2 + S_t^2}} + \frac{(R - R_{COG})^2}{(170[m])^2}$$

$$t_i^{FIT} = T_0 + t \pm T_{trans}$$

$$t = 8 \cdot a \cdot \left(1 + \frac{S}{30[m]}\right)^{1.5} \cdot vmip^{-0.5} \cdot 10^{-10}$$

$$S_t = 7 \cdot a \cdot \left(1 + \frac{S}{30[m]}\right)^{1.5} \cdot vmip^{-0.3} \cdot 10^{-10}$$

$$a = \begin{cases} 3.3836 - 0.01848q, & (q < 25) \\ c_3 q^3 + c_2 q^2 + c_1 q + c_0, & (25 < q < 35) \\ \exp(-3.2 \cdot 10^{-2} q + 2), & (q > 35) \end{cases}$$

$$c_0 = -7.76168 \cdot 10^{-2}, c_1 = 0.299113$$

$$c_2 = -8.79358 \cdot 10^{-3}, c_3 = 6.51127 \cdot 10^{-5}$$

1. χ_G^2 を左式のように定義する。
ここで、パラメーター α は
空気シャワーフロントの構造を
表すパラメーター
2. χ_G^2 を計算して最小になるときの
天頂角、方位角、 T_0 を選ぶ

式中の τ はAGASAの経験式をTA用
に変形したもので σ_τ は標準偏差

ジオメトリの計算

$$c_G^2 = \dot{a} \frac{(t_i - t_i^{FIT})^2}{\sqrt{s_e^2 + s_t^2}} + \frac{(R - R_{COG})^2}{(170[m])^2}$$

$$t_i^{FIT} = T_0 + t \pm T_{trans}$$

$$t = a \cdot \left(1 - \frac{c \cdot T_{trans}}{12 \cdot 10^3 [m]}\right)^{1.05} \cdot \left(1 + \frac{s}{30 [m]}\right)^{1.35} \cdot r^{-0.5}$$

$$s_t = (1.56 \cdot 10^{-3}) \cdot \left(1 - \frac{c \cdot T_{trans}}{12 \cdot 10^3 [m]}\right)^{1.05} \cdot \left(1 + \frac{s}{30 [m]}\right)^{1.5} \cdot r^{-0.3}$$

1. χ_G^2 を上式のように定義する(ここで α はフリーパラメーター)
2. χ_G^2 を計算して最小になるときの天頂角、方位角、 T_0 を選ぶ

コア位置の計算

$$c_L^2 = \dot{a} \frac{(vmip_i - r_i)^2}{s_{r_i}^2} + \frac{(R - R_{COG})^2}{(170[m])^2}$$

$$s_r = \sqrt{0.56r + 6.3 \cdot 10^{-3} r^2}$$

$$r = A \left(\frac{s}{91.6[m]} \right)^{-1.2} \left(1 + \frac{s}{91.6[m]} \right)^{-(h-1.2)} \left(1 + \frac{\dot{e}}{\hat{e}} \frac{s}{10^3[m]} \frac{\dot{u}^2}{\hat{u}} \right)^{-0.6}$$

$$h = 3.972 - 1.792(\sec q - 1)$$

1. 横方向分布にLinsleyの式を用いた χ_L^2 を上記のように定義する。(Aはフリーパラメーター)
2. χ_L^2 を計算して最小になる時のコア位置Rを選ぶ