

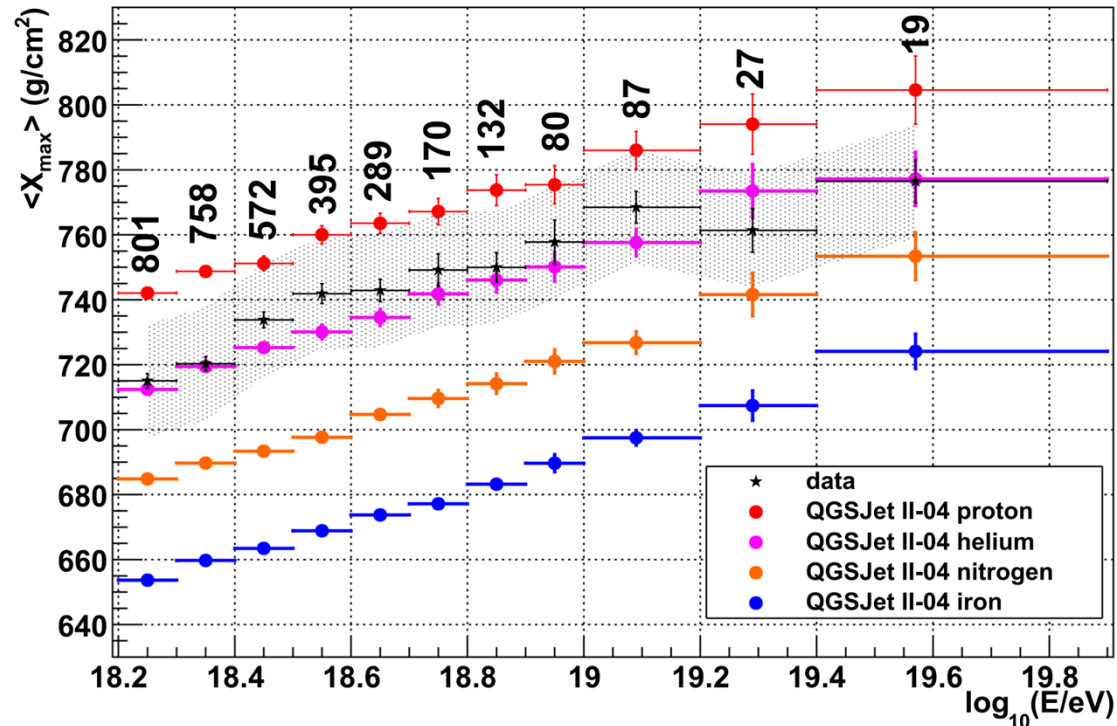
CONEX を用いた TAFD シミュレーション

大阪電気通信大学

多米田研究室

小森康平

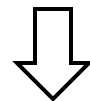
研究背景



TA の BR/LR ハイブリッドモードでの
質量組成の結果 [1]

- TAFD は空気シャワーの X_{\max} を測定できる
- X_{\max} から宇宙線の質量組成が判別できる!
- 左のグラフは TA の質量組成の結果
 - データは軽い原子核の方によっている

- 左のグラフのシミュレーションで使われている既存の空気シャワー生成プログラム CORSIKA よりも良いのがある



“CONEX” という空気シャワー生成プログラム

両ソフトウェアの特徴およびメリットデメリット

CORSIKA

空気シャワーの発達を 3 次元で
詳細にシミュレート

メリット:

- ・ **情報量 (パラメータ) が多い**
 - FD 以外の検出器でも使用可能

デメリット:

- ・ **シャワーを生成するのに時間がかかる**
 - 任意のシャワーを生成するのが困難

CONEX

空気シャワーの発達を 1 次元で
簡略にシミュレート

メリット:

- ・ **シャワーを生成するのに時間がかからない**
 - 任意のシャワーを生成することが可能

デメリット:

- ・ **情報量 (パラメータ) が少ない**
 - FD 以外の検出器では使用不可能

シャワー生成時間の比較

	10^{18} eV	10^{19} eV	10^{20} eV
CORSIKA	1233 sec/shower	1633 sec/shower	3850 sec/shower
CONEX	6.01 sec/shower	10.88 sec/shower	23.52 sec/shower

両ソフトウェアの特徴およびメリットデメリット

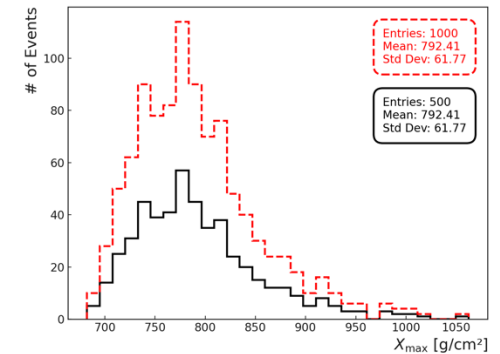
CORSIKA

空気シャワーの発達を 3 次元で

CONEX

空気シャワーの発達を 1 次元で

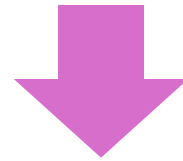
- TA 実験では CORSIKA のシャワー情報はデータベースに格納している
- 時間がかかるため 1 つのデータベースに 500 個しか格納されていない
- シミュレーションでは統計を増やす際に使いまわす
 - X_{\max} などの**結果に偏りが生じる**



	10^{18} eV	10^{19} eV	10^{20} eV
CORSIKA	1233 sec/showers	1633 sec/showers	3850 sec/showers
CONEX	6.01 sec/showers	10.88 sec/showers	23.52 sec/showers

研究目的

CORSIKA よりも高速な空気シャワー生成プログラム
CONEX を TAFD のシミュレーションに実装する



より精度の高く複雑な質量組成解析を実現するための
解析手法を確立する

研究手順

1. 空気シャワー生成プログラム CONEX の検証
2. TAFD のシミュレーションに CONEX を実装
3. 実装した CONEX を使用して、TAFD の再構成の動作確認
4. 両ソフトウェアは、同様に X_{\max} 解析ができるか確認

空気シャワー生成プログラム CONEX の検証

目的

両ソフトウェアで生成した空気シャワーの各パラメータを比較し、どの程度違いが生じるのか確認する

↳ CONEX ソフトウェアが与える系統誤差への影響を確認できる。

方法

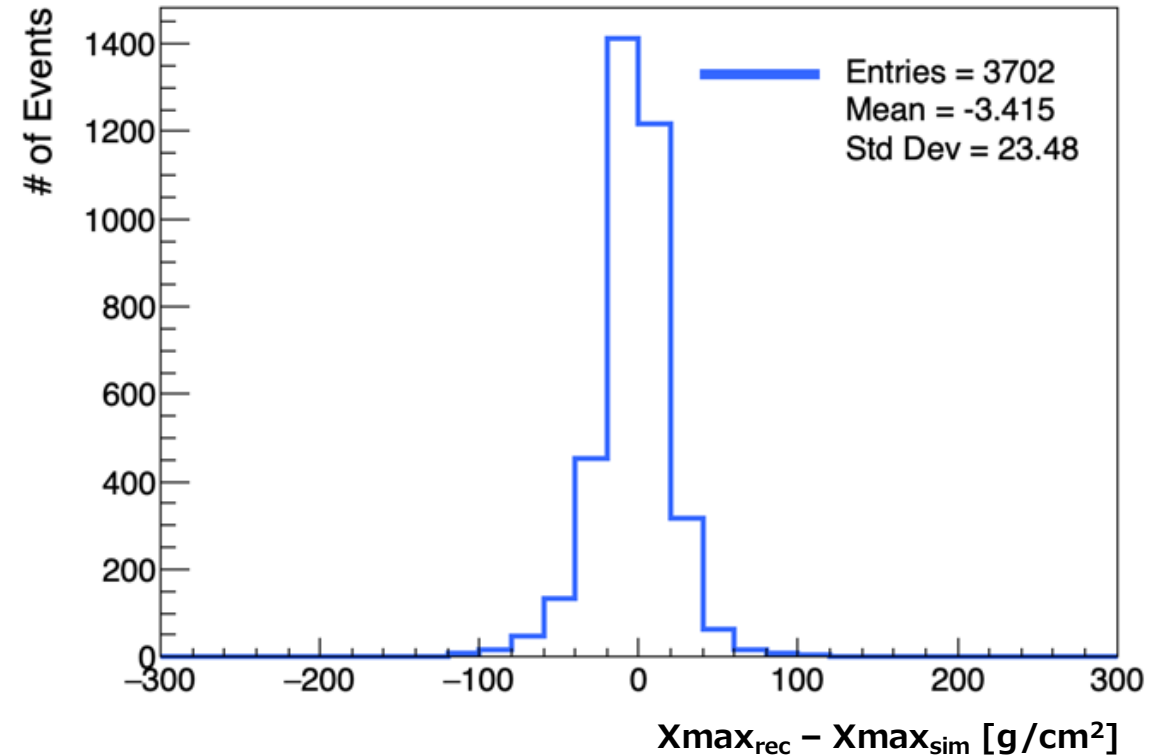
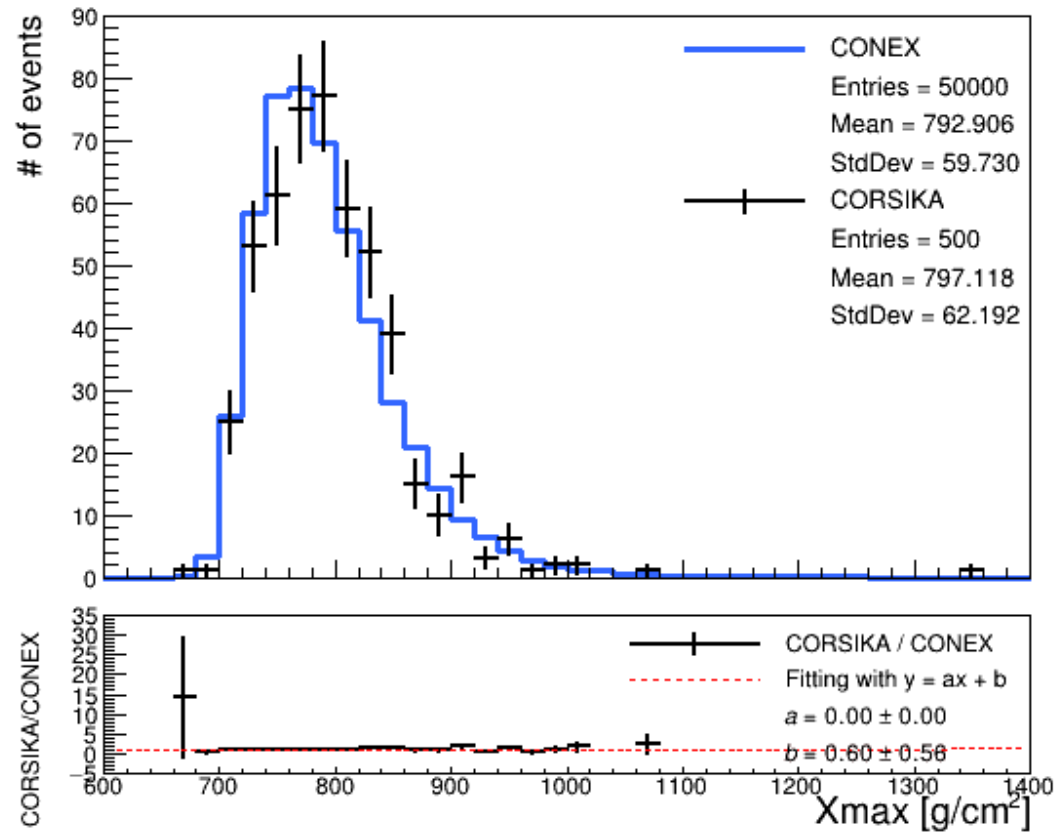
両ソフトウェアでシャワーを生成し、各パラメータの分布の平均を比較する。

シャワー生成の条件

シャワー生成プログラム	CONEX	CORSIKA
粒子種	陽子	陽子
イベント数	50000	500
エネルギー	$10^{19.0} \sim 10^{19.1}$ eV	$10^{19.0} \sim 10^{19.1}$ eV
天頂角	0 ~ 65°	0 ~ 65°
方位角	0 ~ 360°	0 ~ 360°
ハドロン相互作用モデル	QGSJET-II-04	QGSJET-II-04

- CORSIKA では 500 イベントで検証
シャワー生成に時間がかかるため
- CONEX では 50,000 イベントで検証
分布に偏りが無いことも確認するため

空気シャワー生成プログラム CONEX の検証結果

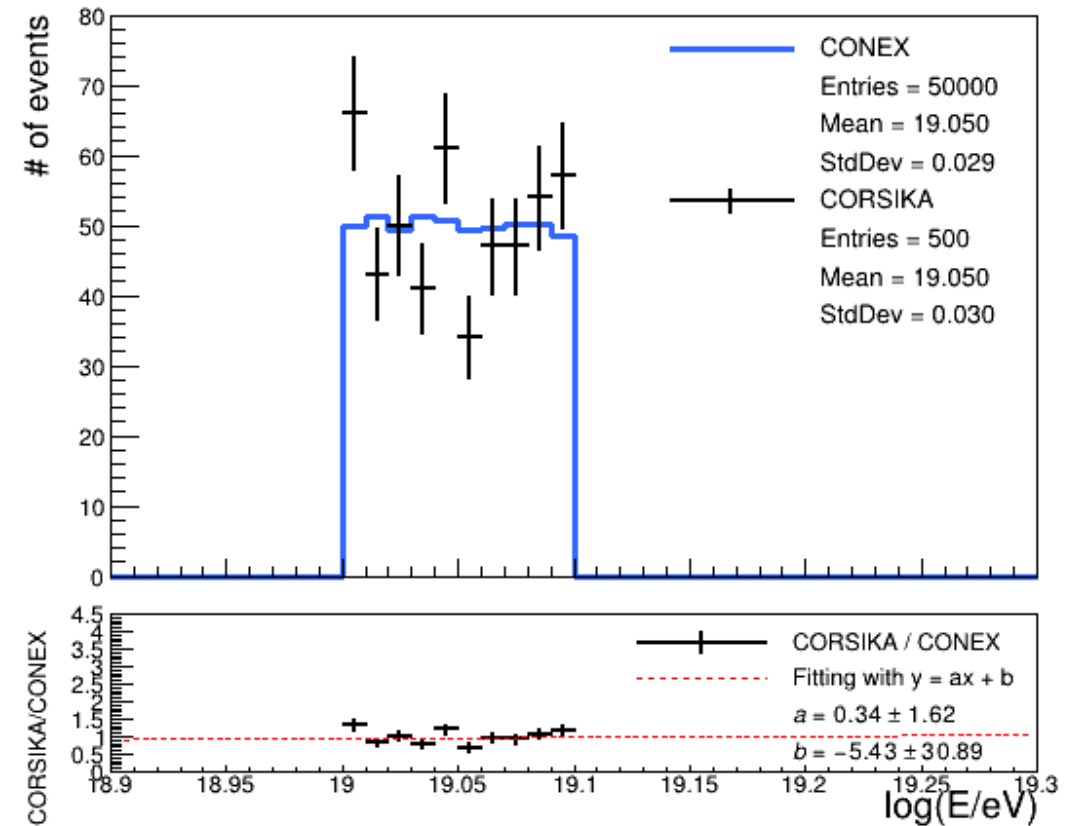
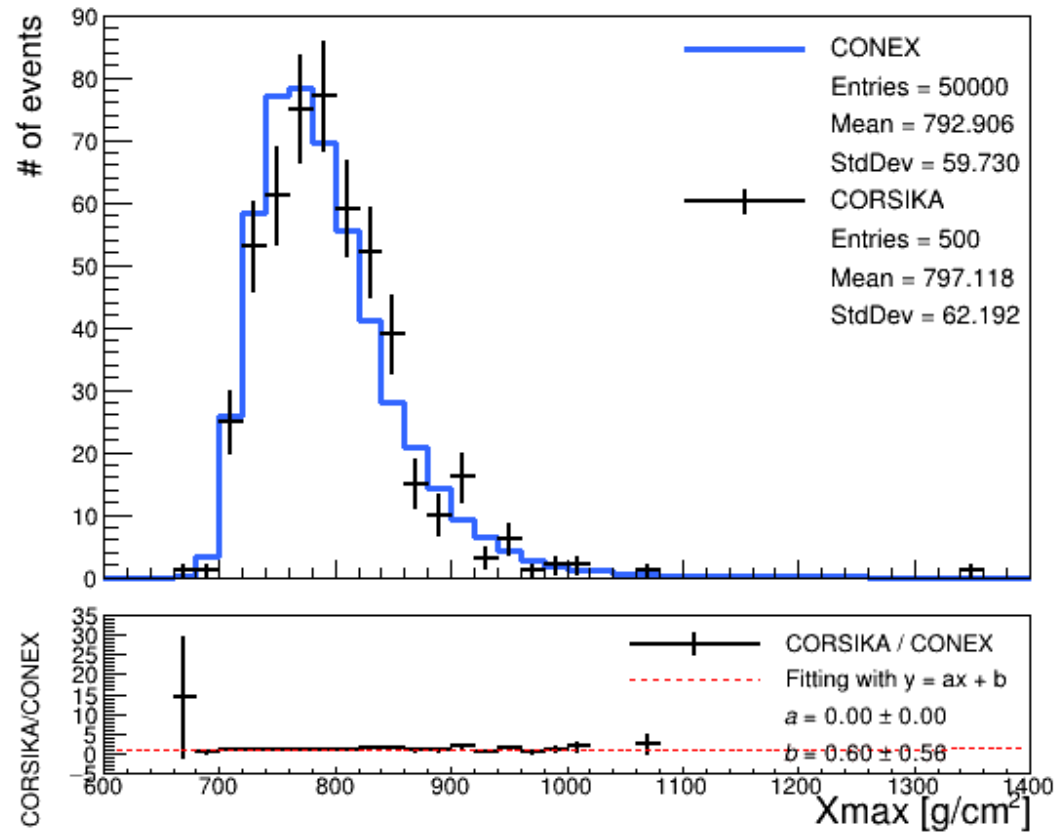


X_{\max} : 平均 \pm 標準偏差は $793 \pm 60 \text{ g/cm}^2$ と $797 \pm 62 \text{ g/cm}^2$ となり、

平均は 5 g/cm^2 程度違う。

この 5 g/cm^2 は X_{\max} の誤差の分布の分解能に比べると小さい。

空気シャワー生成プログラム CONEX の検証結果



Energy: 平均±標準偏差は、**ほとんど同じ**

- TA では CORSIKA の場合、データベースを使い回すので、データ点のバラつきはそのままで統計量が増える一方、CONEX は統計量を増やしても分布が滑らか。
- 統計量を増やすとエラーバーが小さくなり、2つの差は有意な差と見て取れる

CONEX を使用した TAFD の再構成の動作確認

目的

TAFD のシミュレーションに CONEX の実装を行った
実装した CONEX を使用した TAFD の再構成の動作確認を行う

↳ 実装した CONEX にバグが存在しないか確認できる

方法

CONEX を使用した TAFD のシミュレーションおよび再構成を行い、再構成された各パラメータの分布を比較する

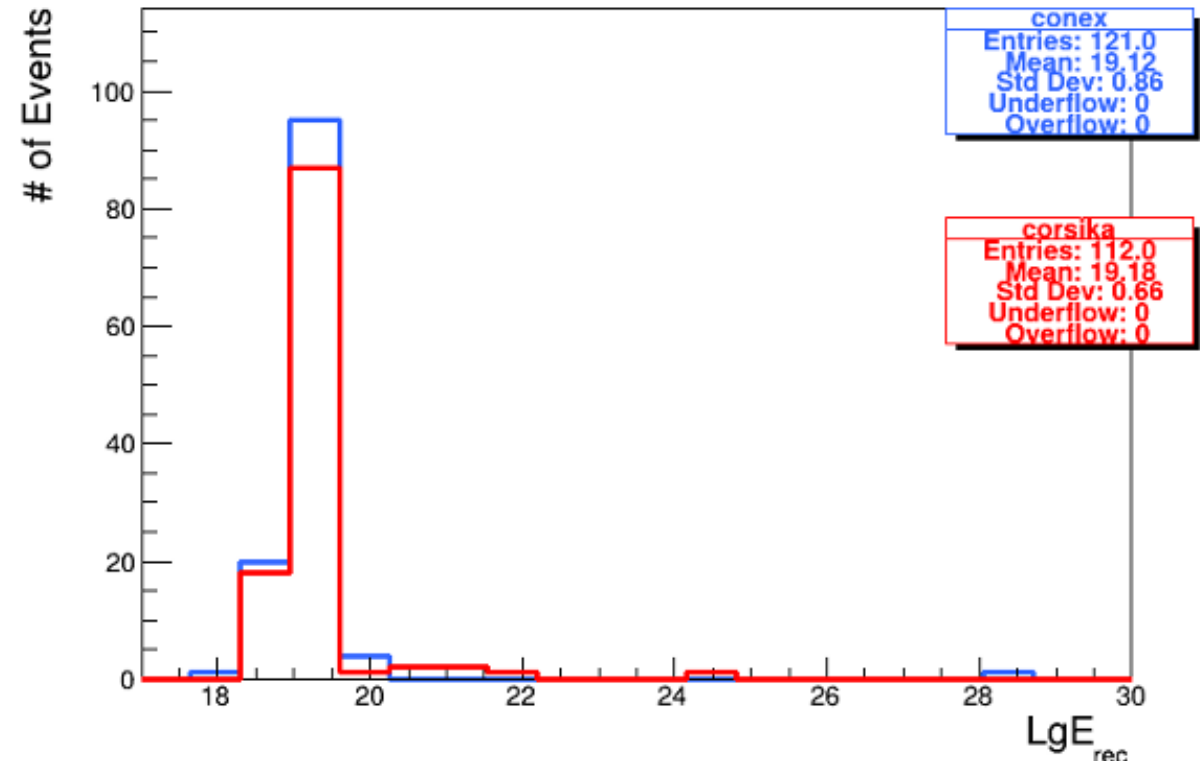
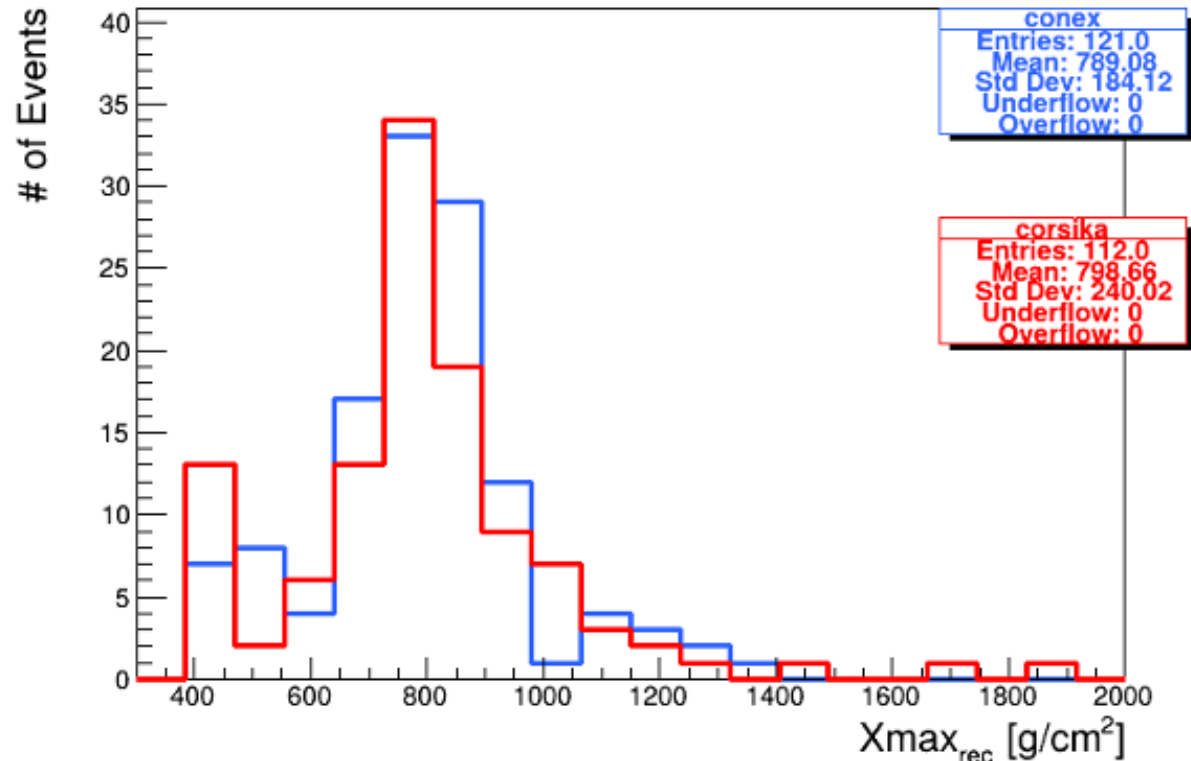
シャワー生成の条件

シャワー生成プログラム	CONEX	CORSIKA
粒子種	陽子	陽子
イベント数	500	500
エネルギー	$10^{19.0} \sim 10^{19.1}$ eV	$10^{19.0} \sim 10^{19.1}$ eV
天頂角	0 ~ 65°	0 ~ 65°
方位角	0 ~ 360°	0 ~ 360°
ハドロン相互作用モデル	QGSGE-II-04	QGSGE-II-04
使用する FD	BR	BR

・ 動作確認をするだけのため、イベント数はどちらも 500

・ イベントセレクションは適用していない

CONEX を使用した TAFD の再構成の動作確認の結果



- X_{\max} の平均は、ほとんど違いが生じなかった。
 - エネルギーの平均も、ほとんど違いが生じなかった。
 - 他のパラメータでも同様に、ほとんど違いが生じなかった。
- ↳ 正しく CONEX の実装ができています。

CONEX を使用した TAFD の再構成の各パラメータの分布比較

目的

両ソフトウェアは同様に X_{\max} 解析ができるか確認する

方法

実装した CONEX を使用して、TAFD のシミュレーションおよび TA 実験の標準的な再構成を行い、各パラメータの再構成分布の比較を行う

シャワー生成の条件

シャワー生成プログラム	CONEX	CORSIKA
粒子種	陽子	陽子
イベント数	100,000	100,000(500使い回し)
エネルギー	$10^{19.0} \sim 10^{19.1}$ eV	$10^{19.0} \sim 10^{19.1}$ eV
天頂角	$0 \sim 65^\circ$	$0 \sim 65^\circ$
方位角	$0 \sim 360^\circ$	$0 \sim 360^\circ$
ハドロン相互作用モデル	QGSJET-II-04	QGSJET-II-04
使用する FD	BR	BR

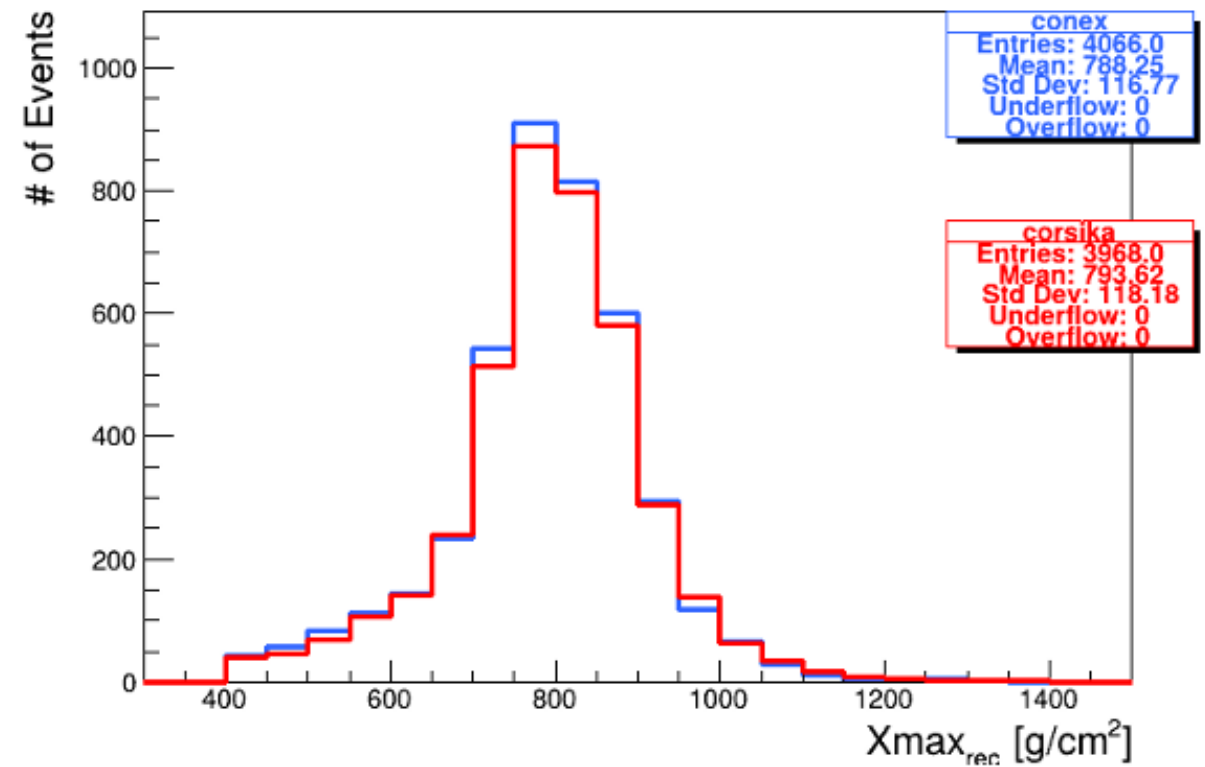
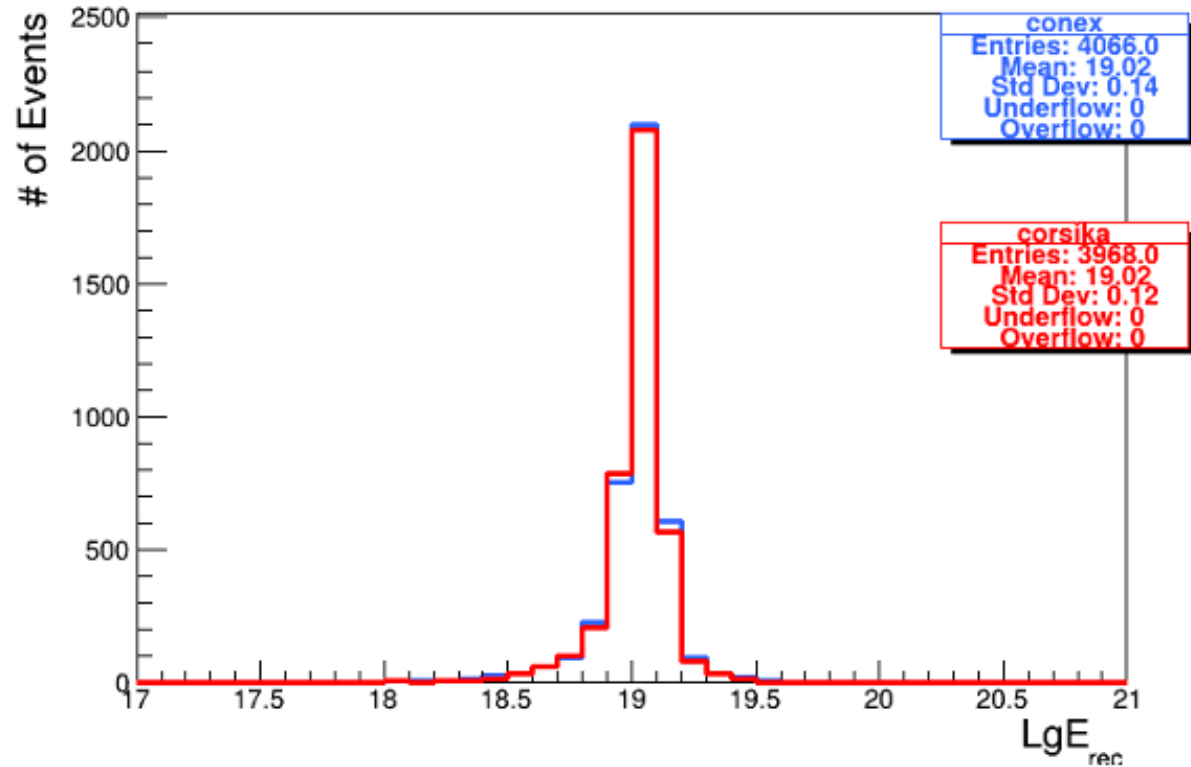
- 今回は精度が必要なため、CONEX も CORSIKA も 100,000。
- CORSIKA は 500 のシャワーを使い回して、イベント数を 100,000 にしている。

CONEX を使用した TAFD の再構成の各パラメータの分布比較

セレクション条件および適用させていった際のイベント数 [2]

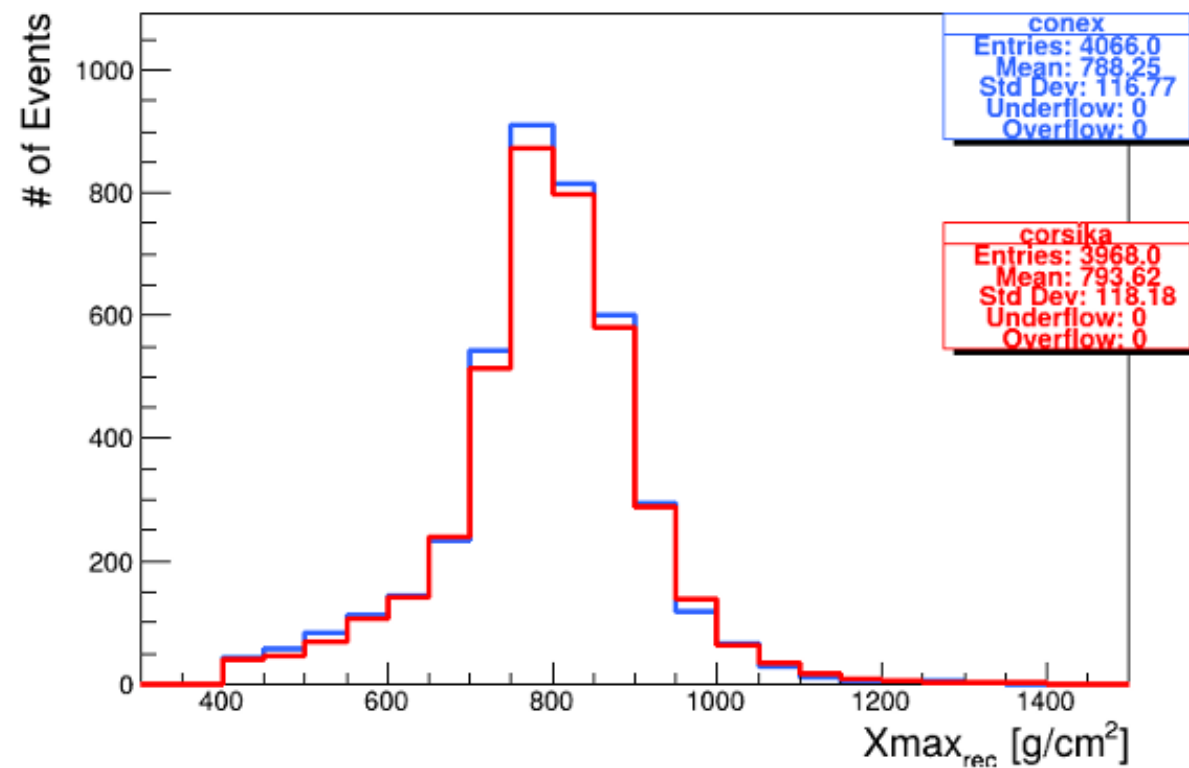
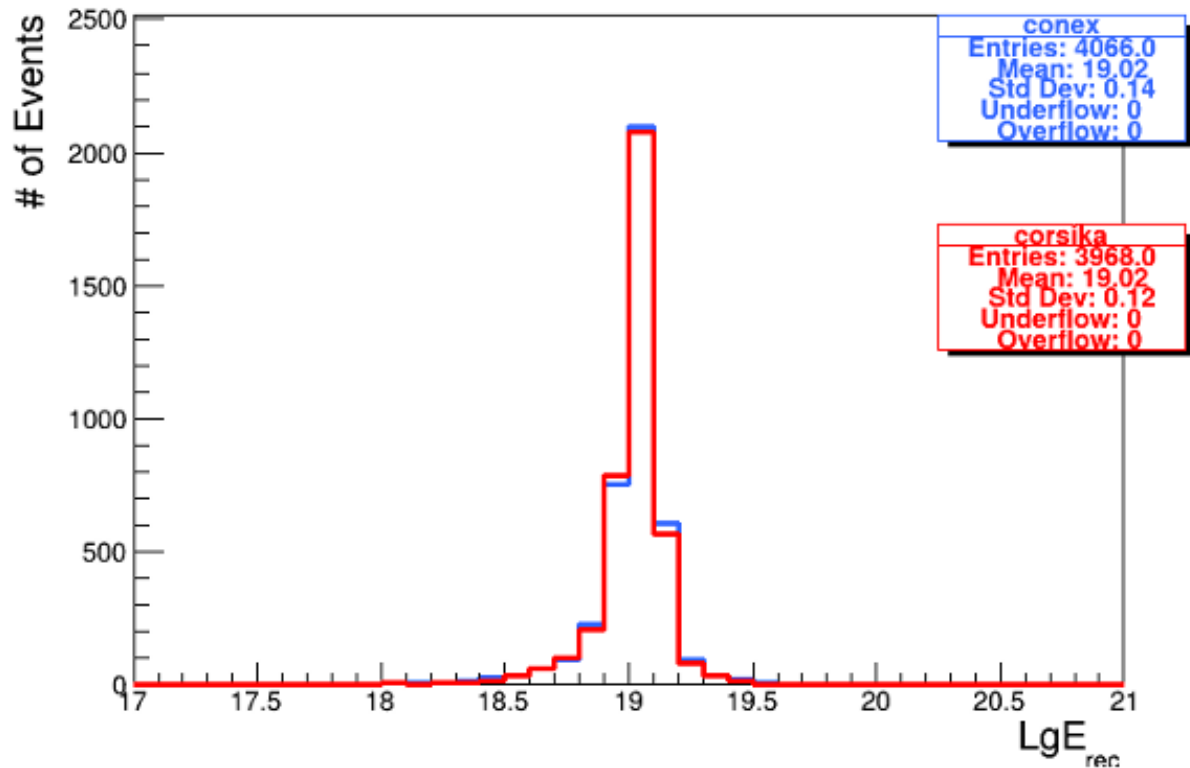
Quality cuts	Events (CONEX)	Events(CORSIKA)
Reconstructed events	7644	7569
Number of PMTs > 10	7508	7457
Track length > 10°	7190	7161
Time extent > 2 μs	7178	7154
$R_p > 0.5$ km	7178	7153
Minimum viewing angle > 20°	6598	6516
ψ angle < 120°	6242	6197
Geometrical $X^2/ndf < 10$	5893	5756
X_{max} inside FOV	4709	4598
Zenith angle < 55°	4104	4005
Core distance from CLF < 25 km	4066	3968
Energy > $10^{17.2}$ eV	4066	3968

CONEX を使用した TAFD の再構成の各パラメータの分布比較の結果



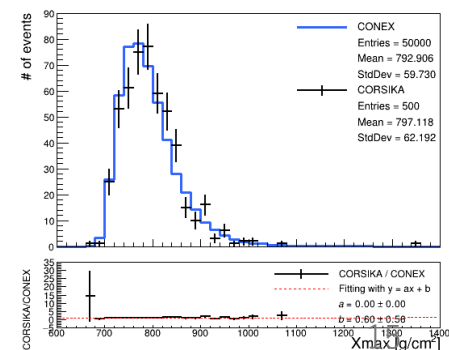
- エネルギーは平均で、違いが生じなかった。
 - 他のパラメータでも、違いはほとんど生じなかった。

CONEX を使用した TAFD の再構成の各パラメータの分布比較の結果



- X_{\max} は平均で、 5 g/cm^2 の違いが生じた。
 - この違いは、空気シャワーのパラメータの比較のときとコンシステント。
 - このことから、この違いは CONEX を実装した際のバグではなく、CONEX ソフトウェアが与える系統誤差への影響であることが確認できた。

よって、両ソフトウェアは同様に X_{\max} 解析ができる。



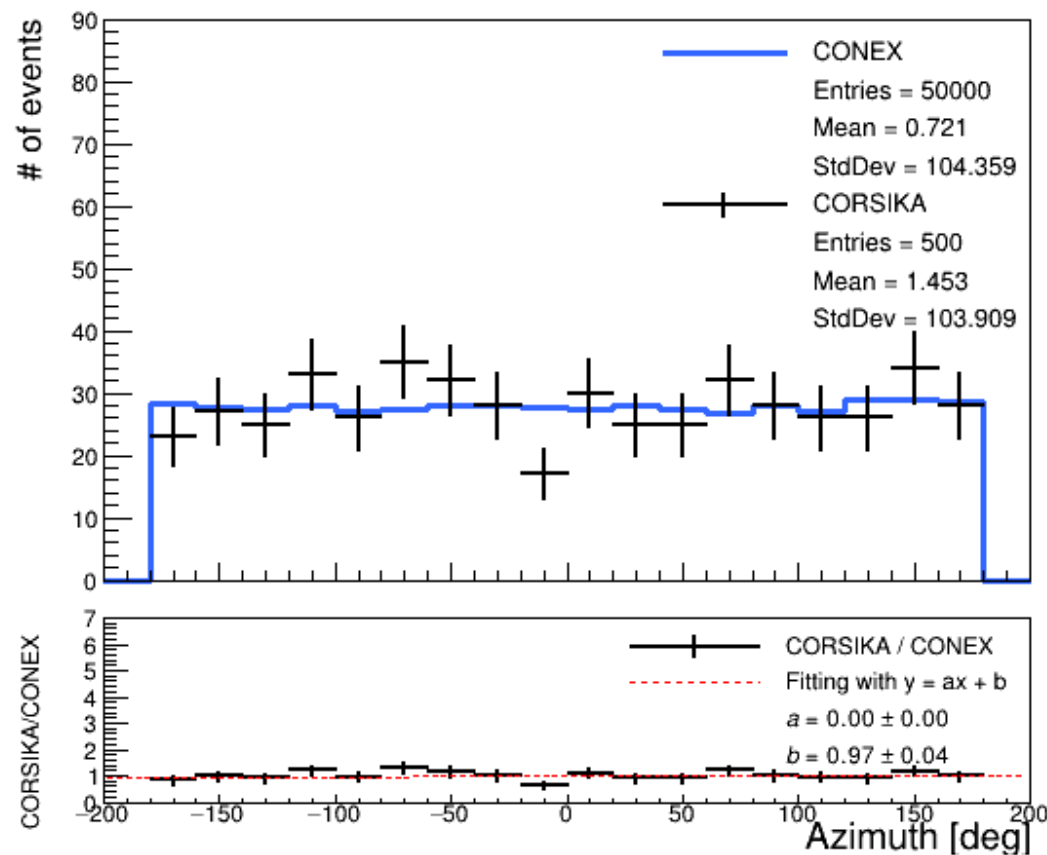
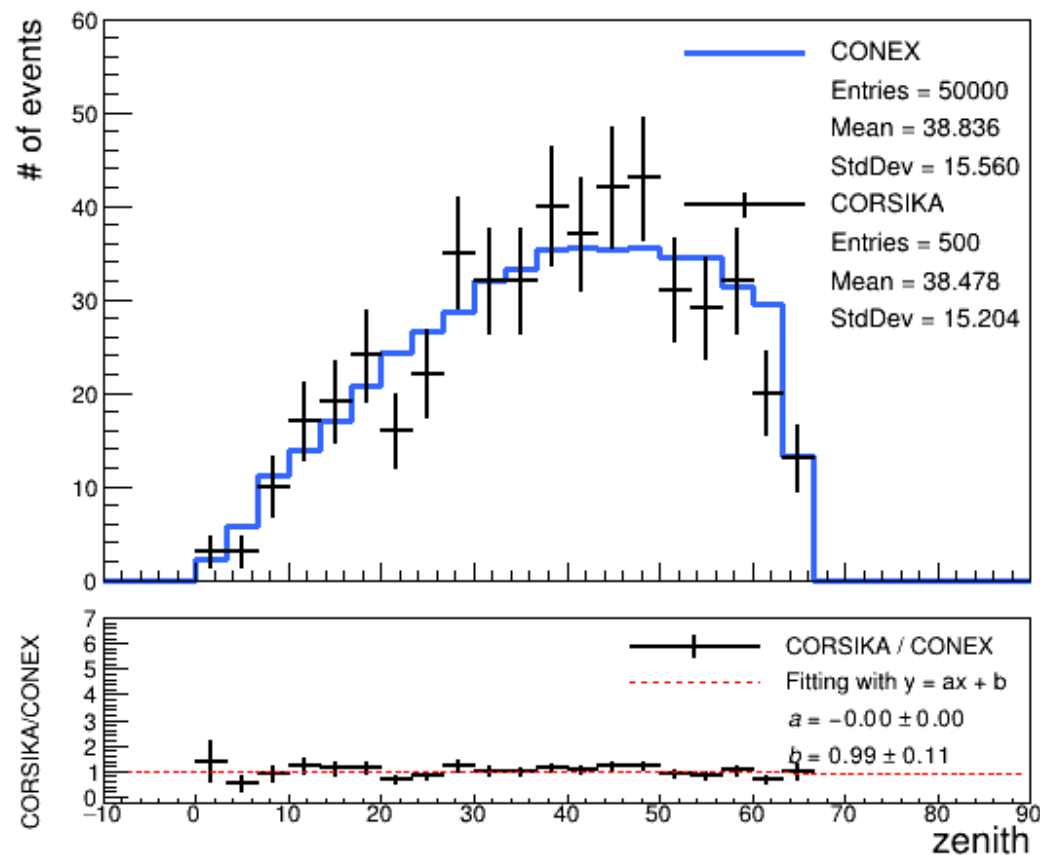
CONEX を使用した今後の展望

- 大量の異なるシャワーイベントによる従来より精度の高く、様々な宇宙線核種を想定した複雑な質量組成解析
- 大量の異なるシャワーイベントによるより精度の高いエネルギースペクトル測定
- 今後、CRAFFT のような拡張実験で実データの統計量が増えていく。
 - 実データ解析をする際に、比較相手のシミュレーションは偏りがなく、統計量の多い結果を使いたい。今後、CONEX がスタンダードになる可能性がある

まとめ

- CONEX と CORSIKA で生成した空気シャワーパラメータの比較を行った
 - エネルギーは、ほとんど同じであった
 - X_{\max} は、平均で 5 g/cm^2 程度違う
 - X_{\max} の誤差の分布の分解能に比べると小さいため問題ない
- TAFD シミュレーションに CONEX の実装を行った
 - 動作の確認を行なった結果、正しく実装できていた
- 両ソフトウェアは同様に X_{\max} 解析ができるか確認を行なった
 - X_{\max} は平均で 5 g/cm^2 の違いが生じた
 - これは、空気シャワーパラメータの比較の際の違いと
コンシステントであった
 - よって、両ソフトウェアは同様に X_{\max} 解析できる

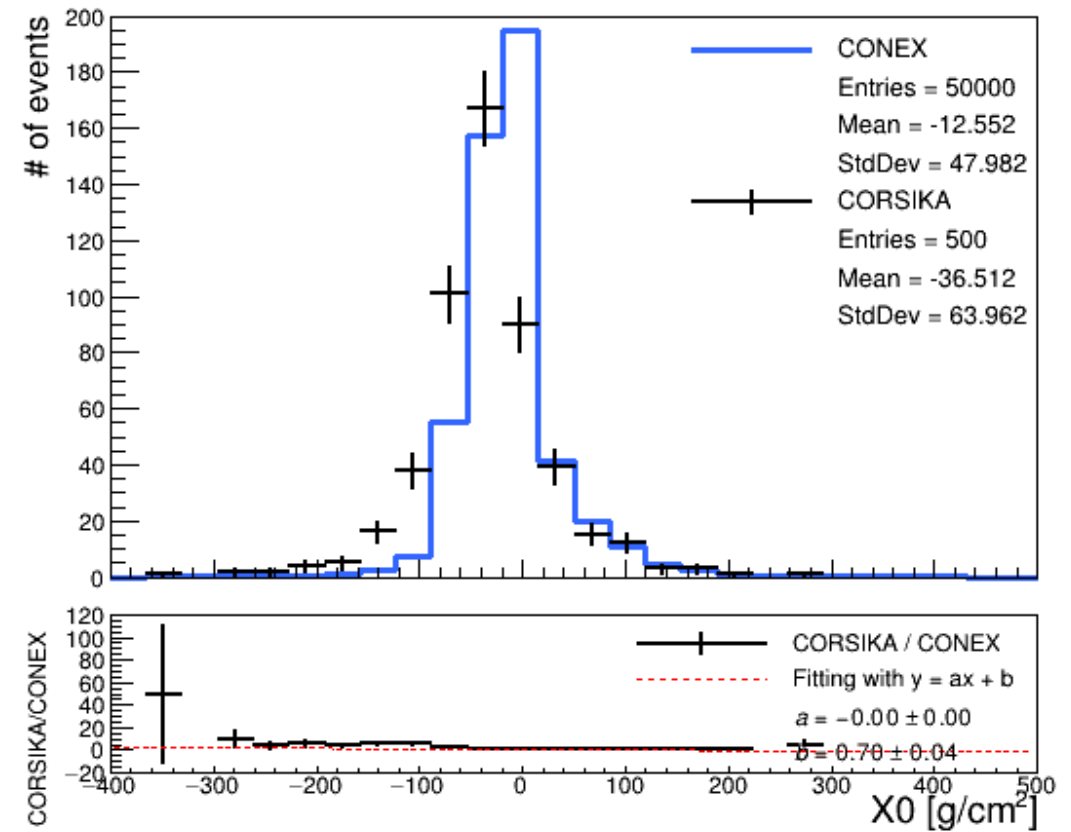
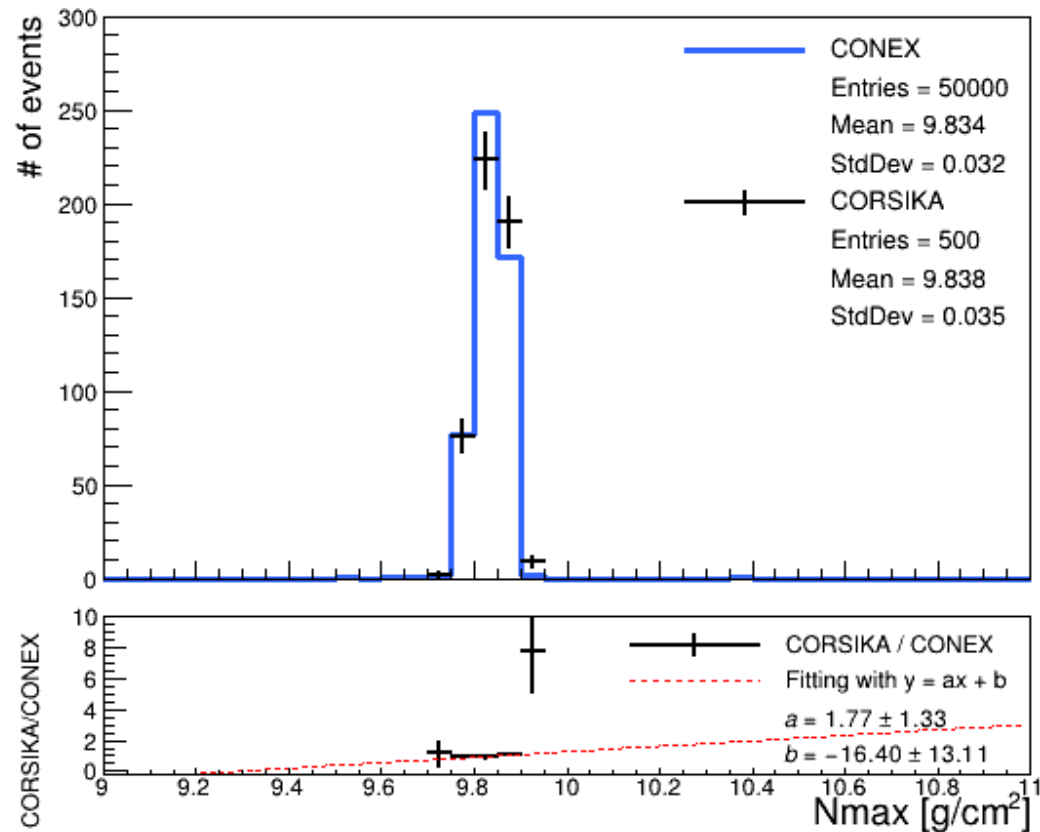
空気シャワー生成プログラム CONEX の検証結果



Zenith: 平均±標準偏差は 39 ± 16 [deg] と 39 ± 15 [deg] となり、ほとんど同じ

Azimuth: 平均±標準偏差は 1 ± 104 [deg] と 2 ± 104 [deg] となり、ほとんど同じ

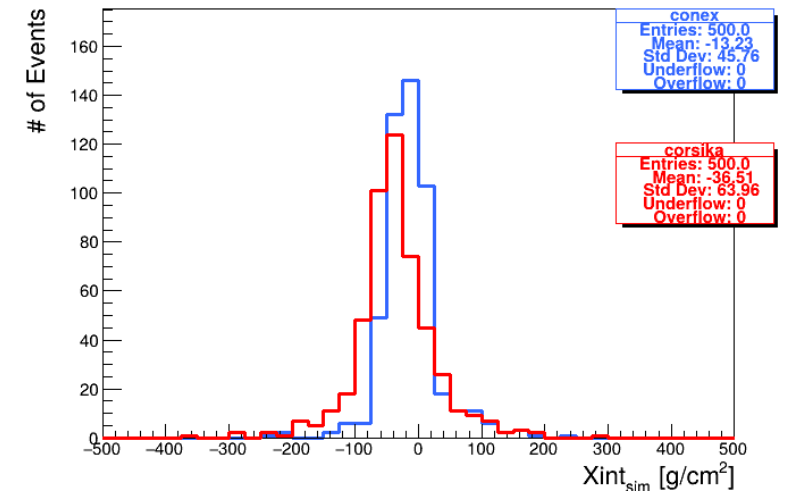
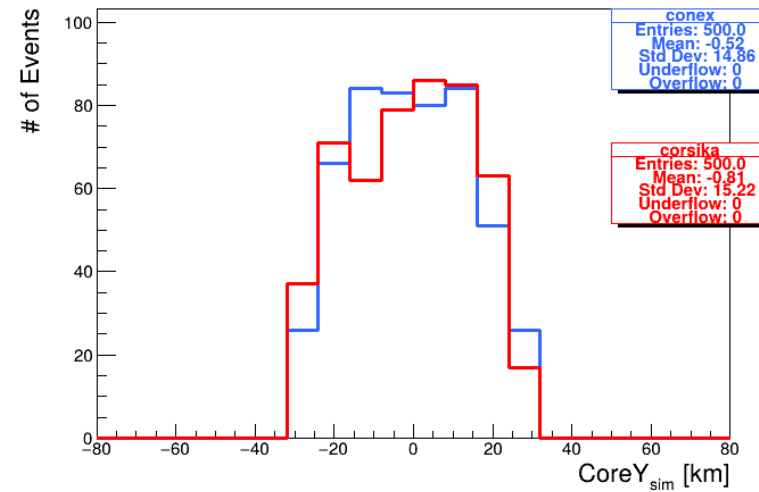
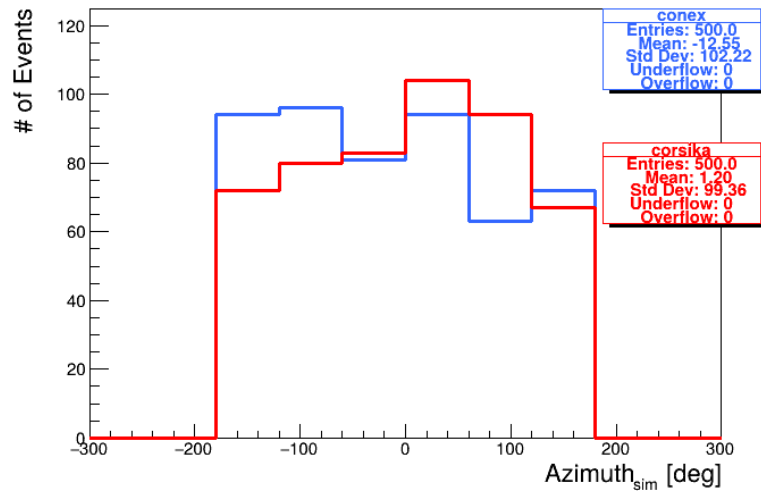
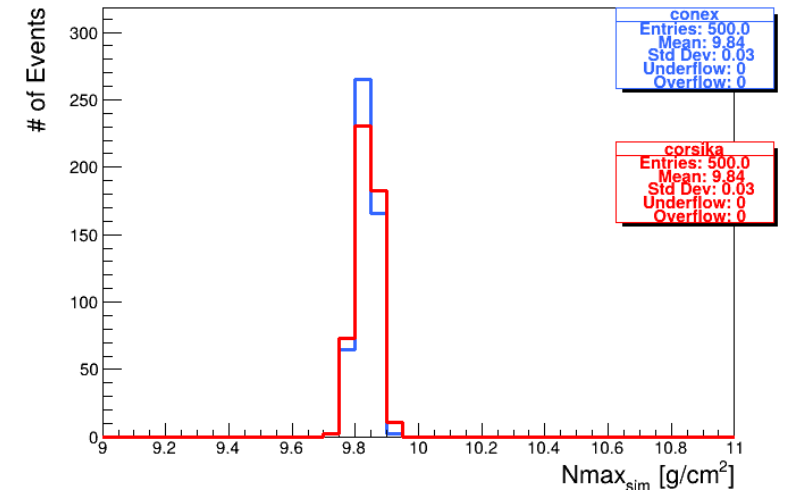
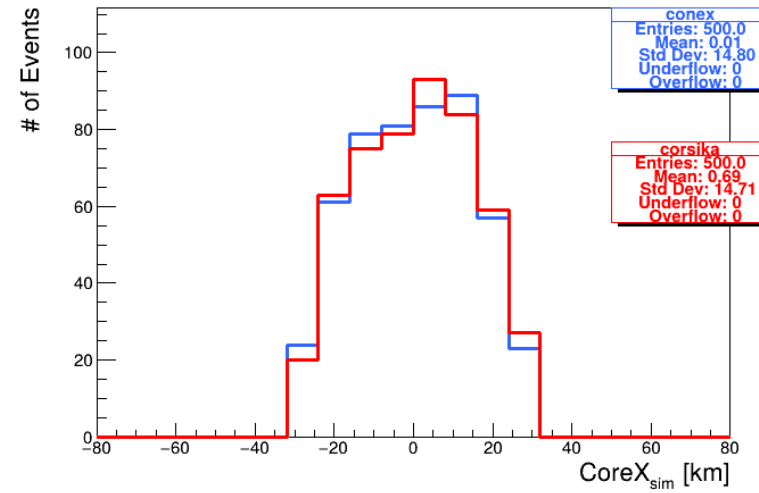
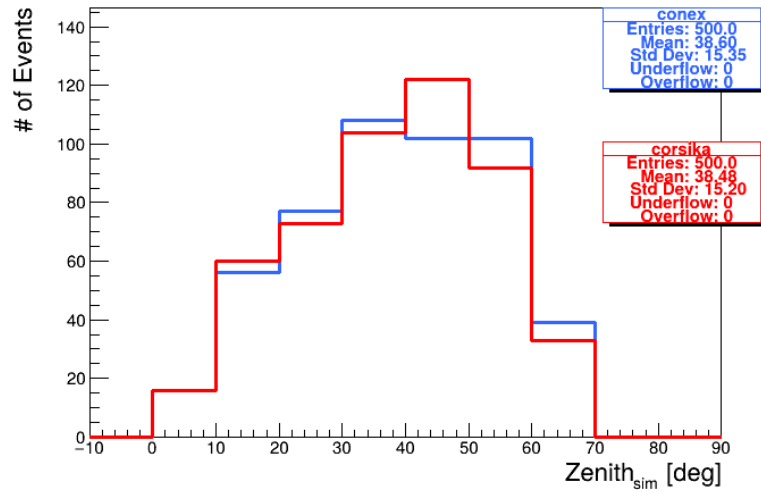
空気シャワー生成プログラム CONEX の検証結果



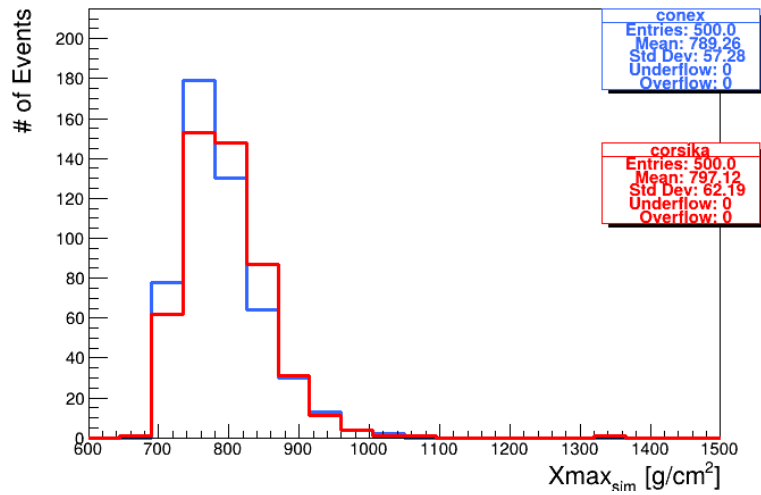
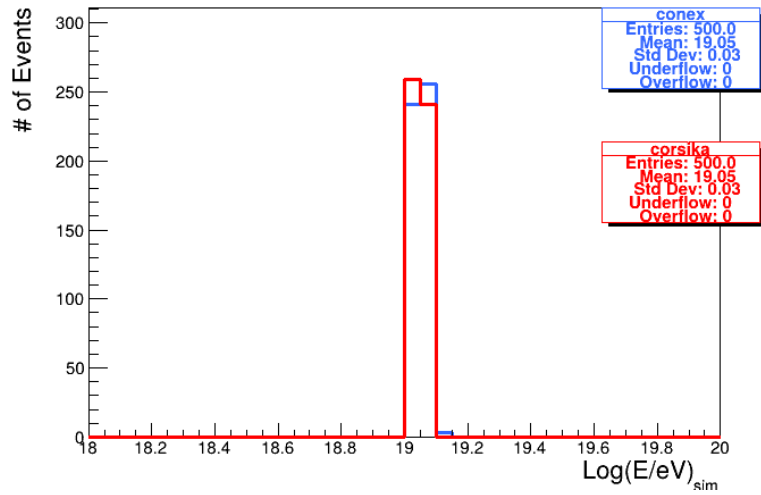
N_{max} : 平均±標準偏差は 9.8 ± 0.0 [g/cm²] ・ 9.8 ± 0.0 [g/cm²] となり、ほとんど同じ

X_0 : 平均±標準偏差は -13 ± 48 [g/cm²] と -37 ± 64 [g/cm²]となり、平均は 24 g/cm² 程度違う

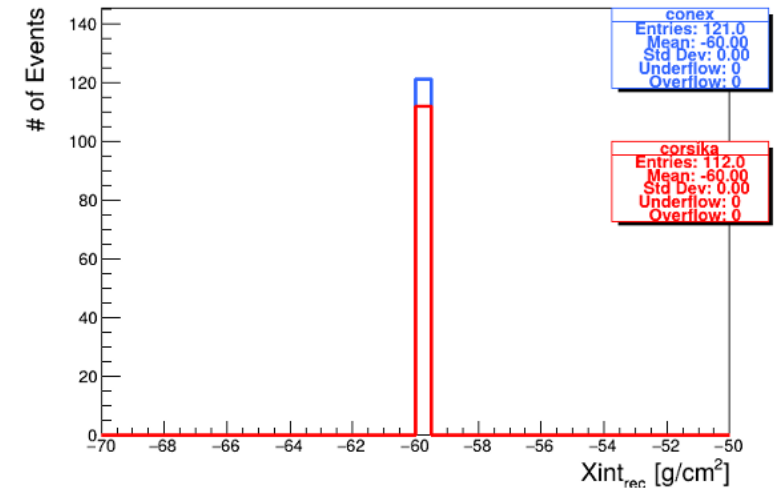
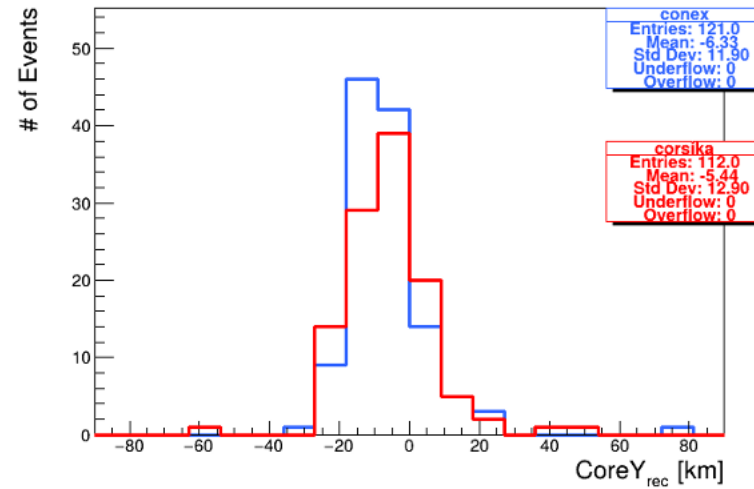
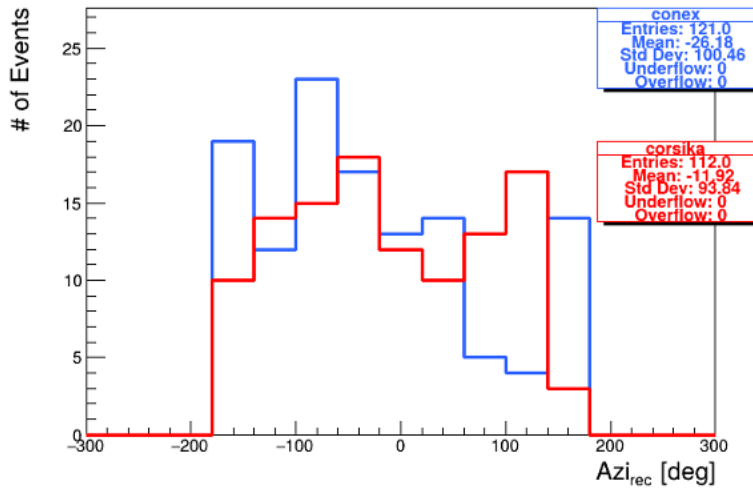
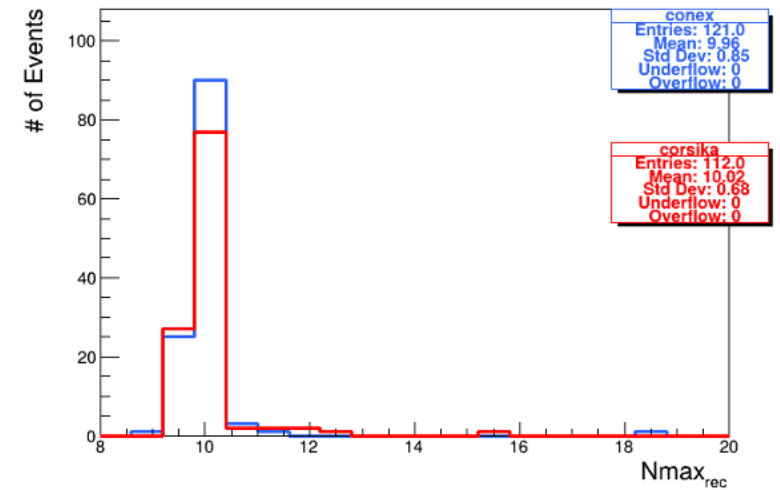
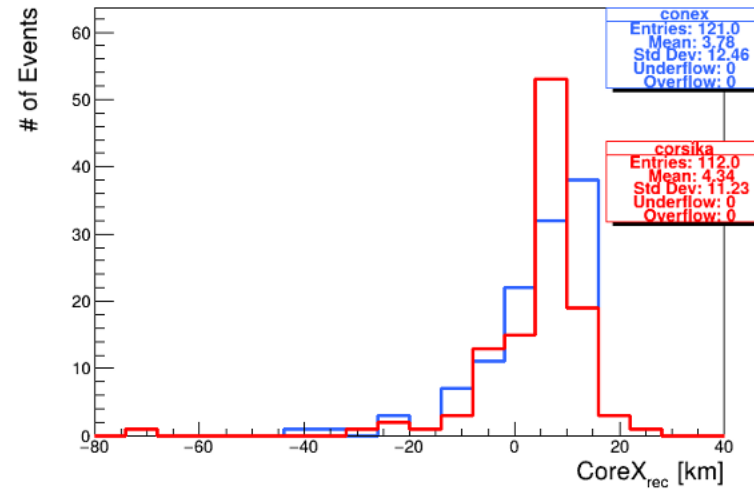
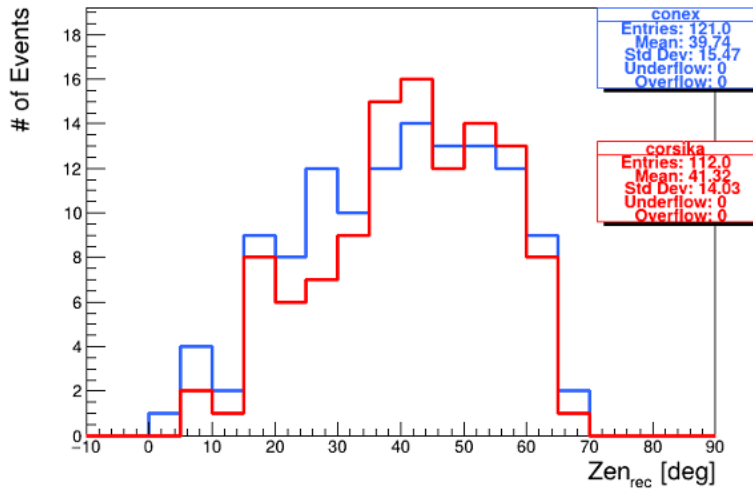
CONEX を使用した TAFD のシミュレーションの動作確認の結果



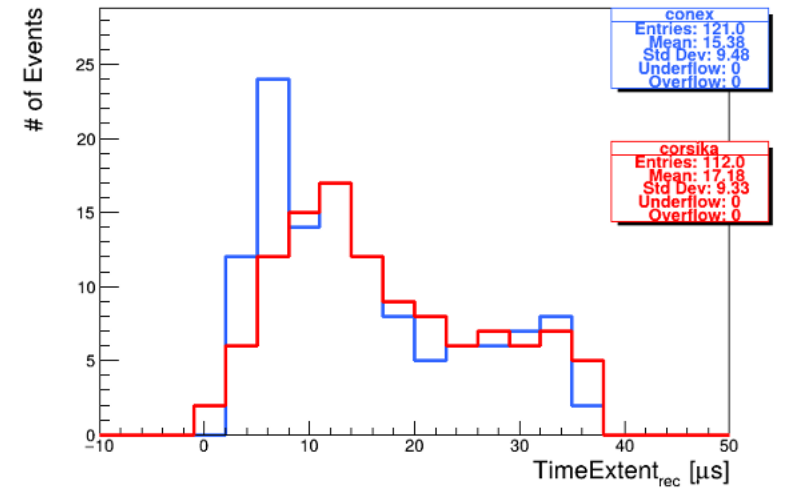
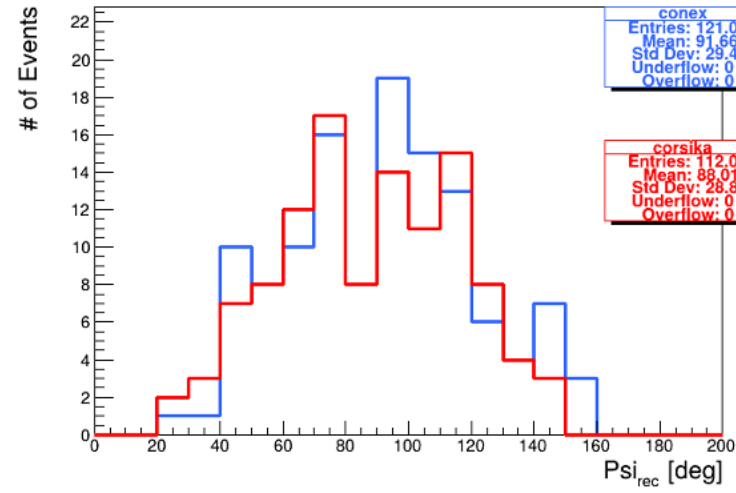
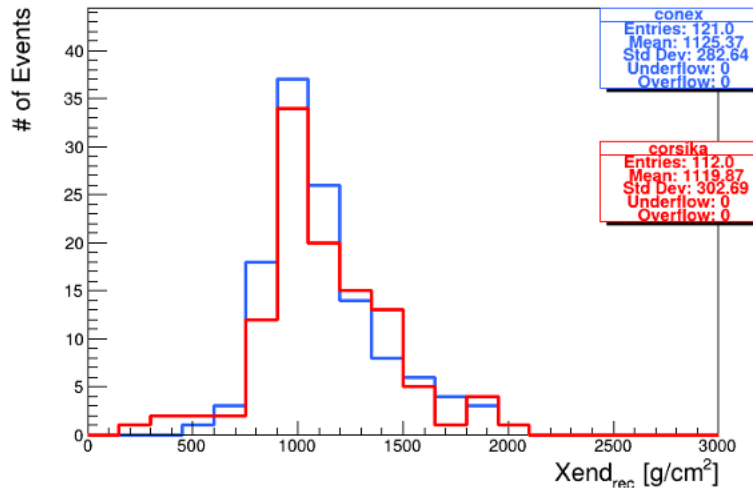
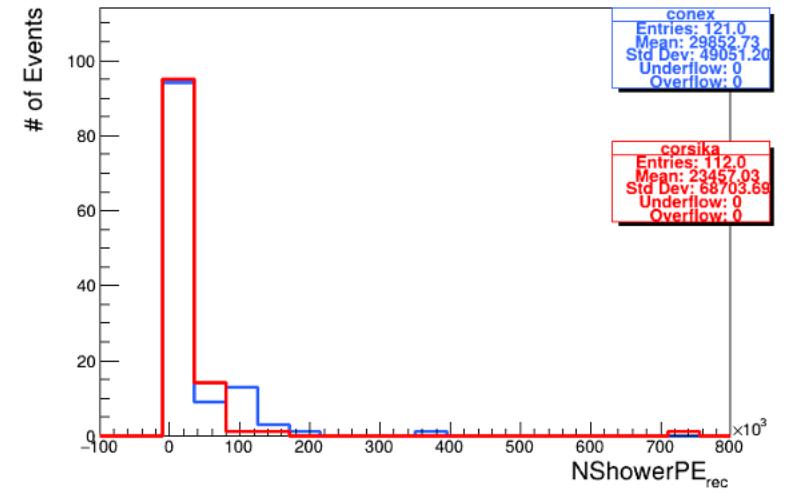
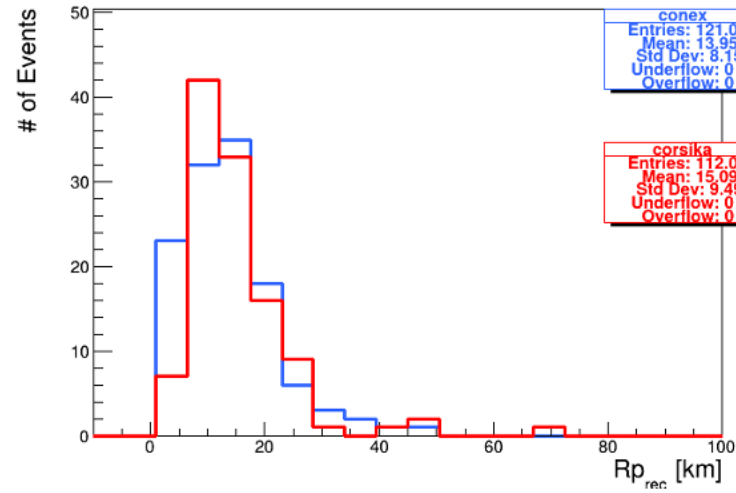
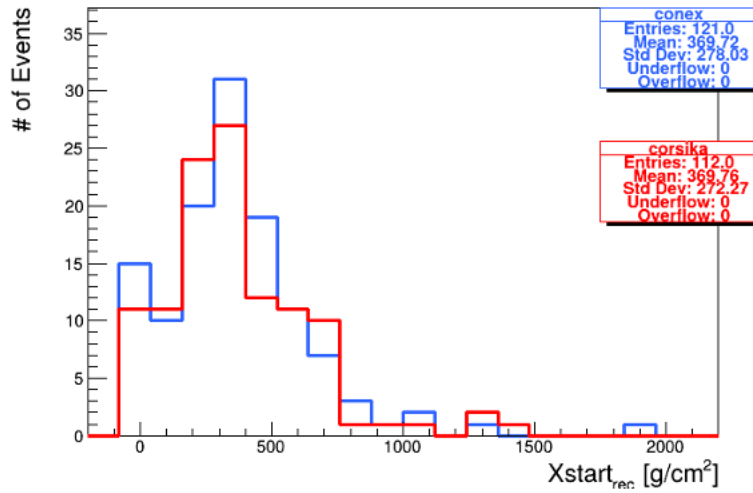
CONEX を使用した TAFD のシミュレーションの動作確認の結果



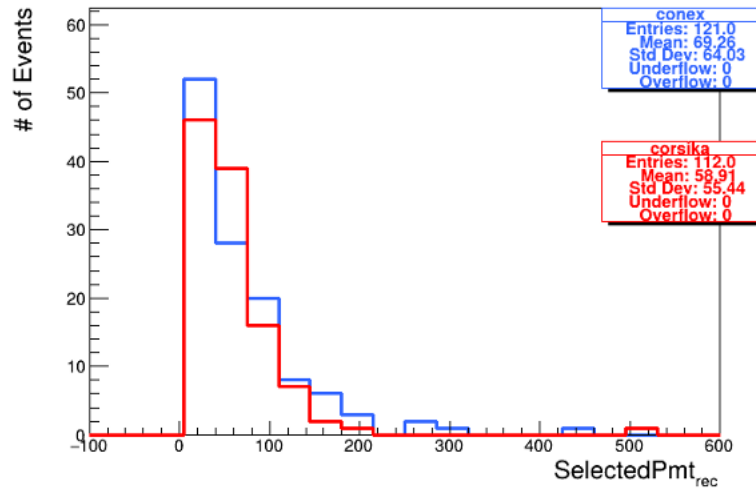
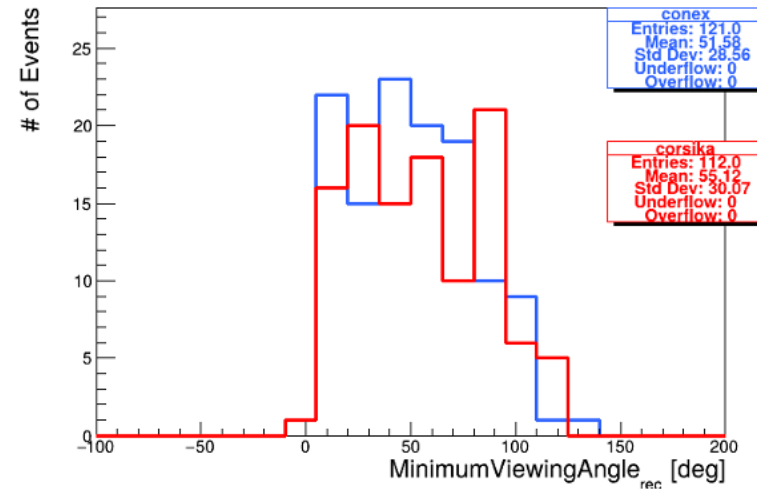
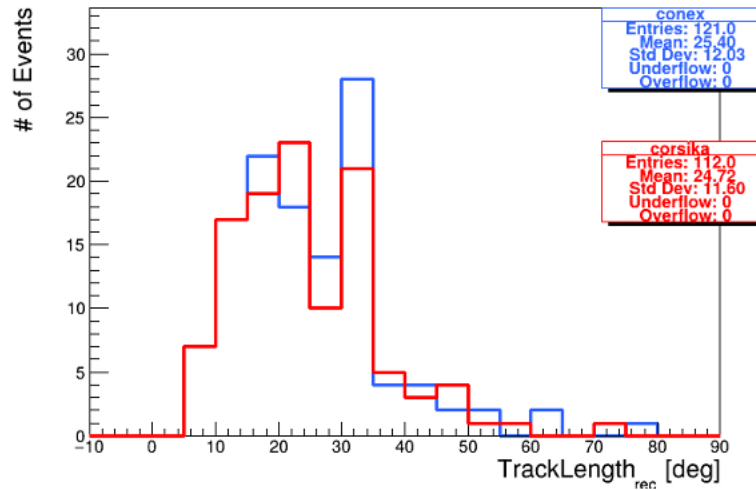
CONEX を使用した TAFD の再構成の動作確認の結果



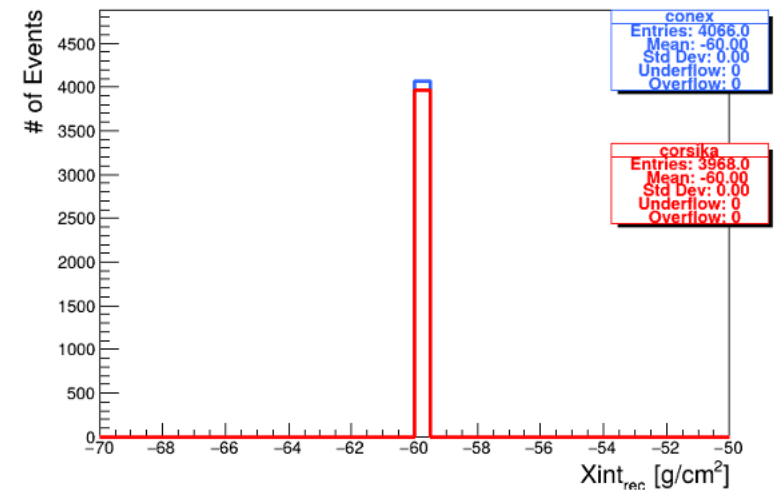
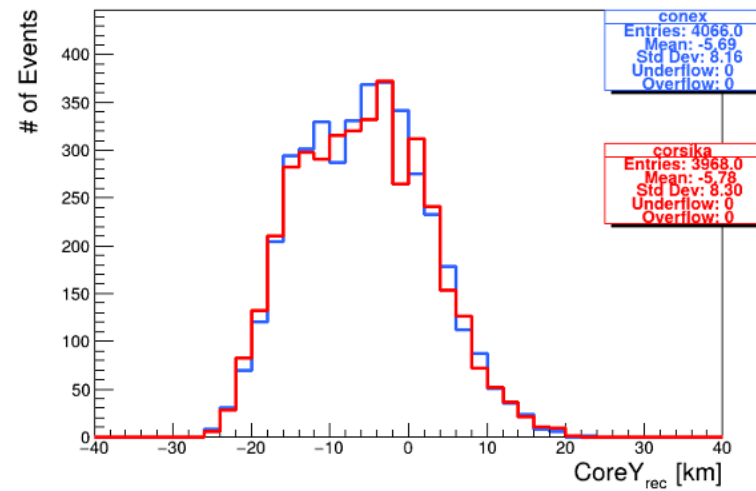
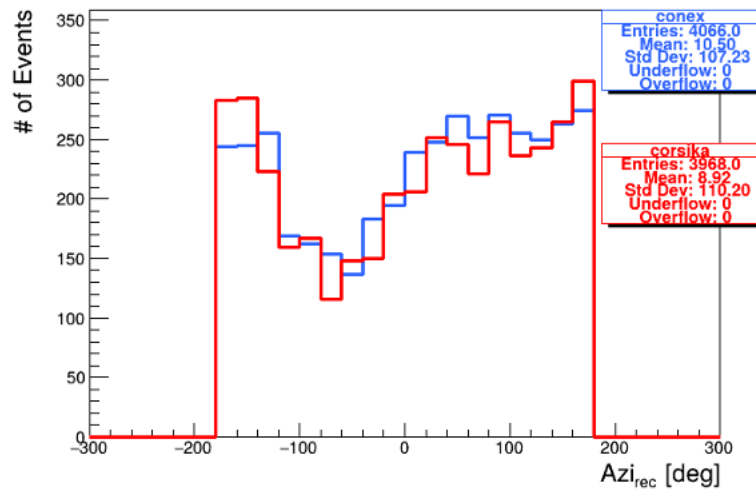
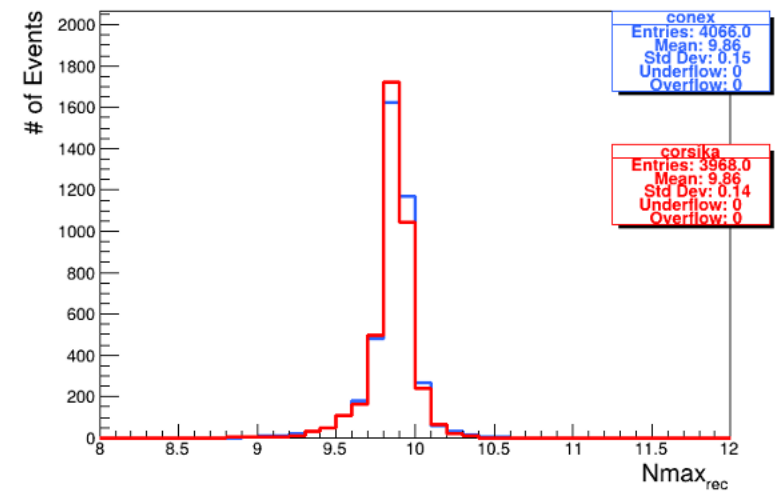
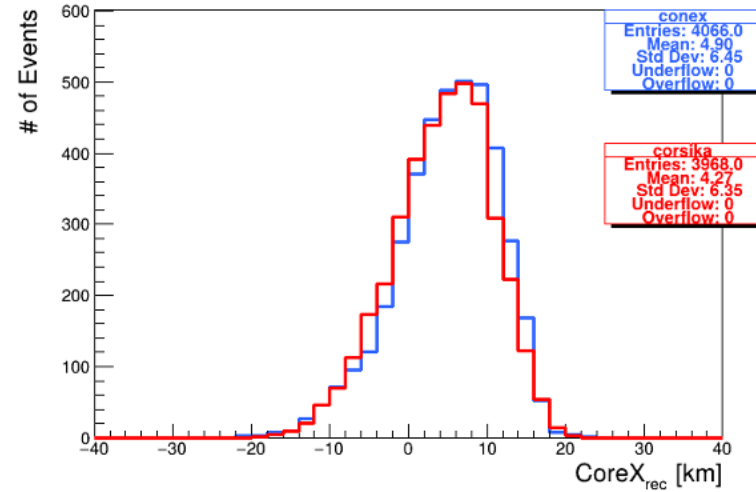
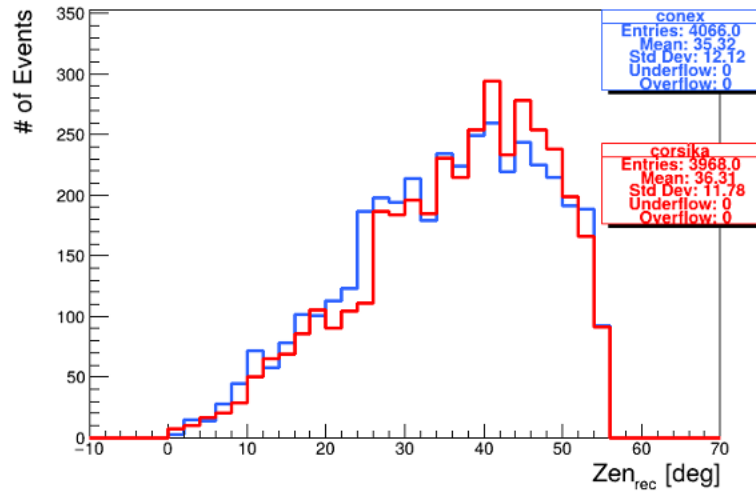
CONEX を使用した TAFD の再構成の動作確認の結果



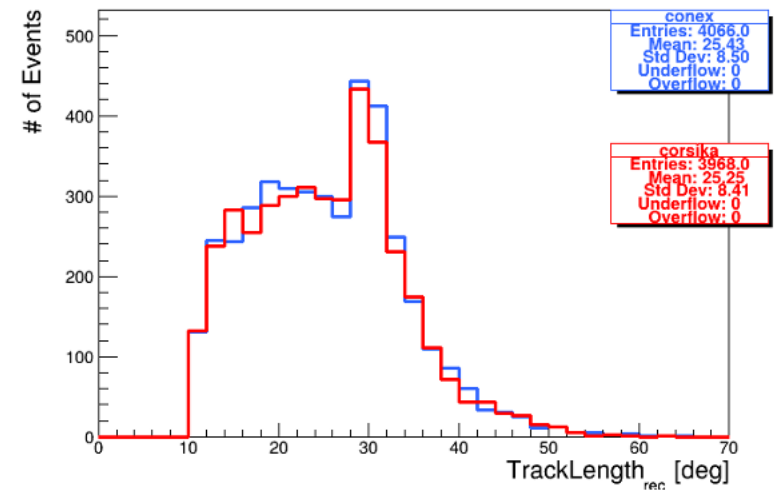
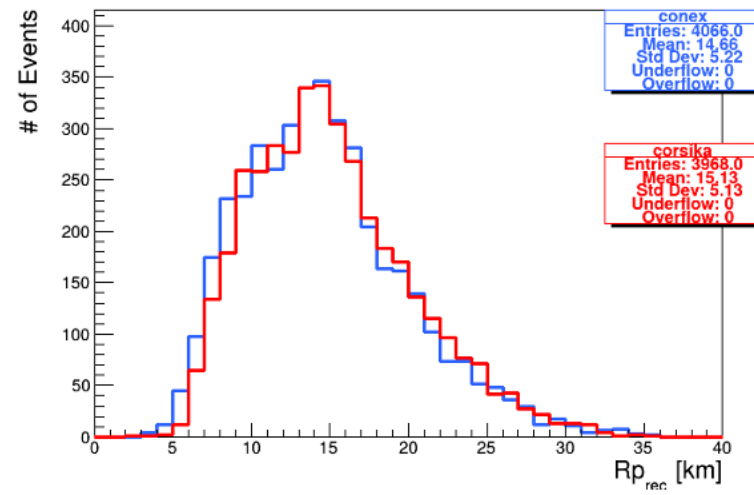
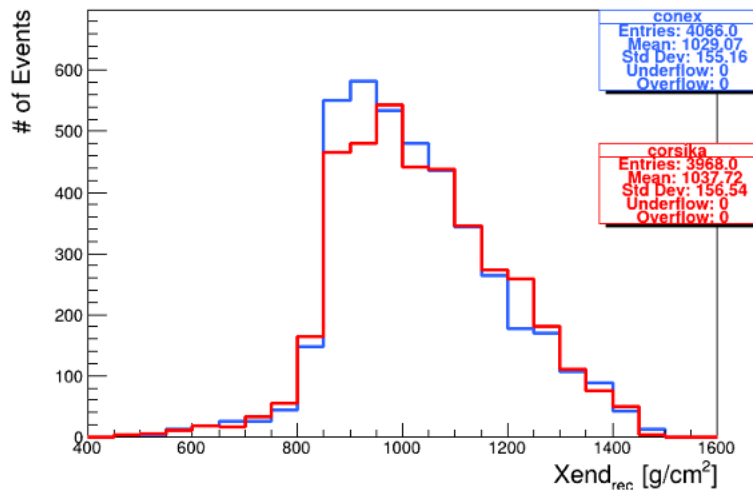
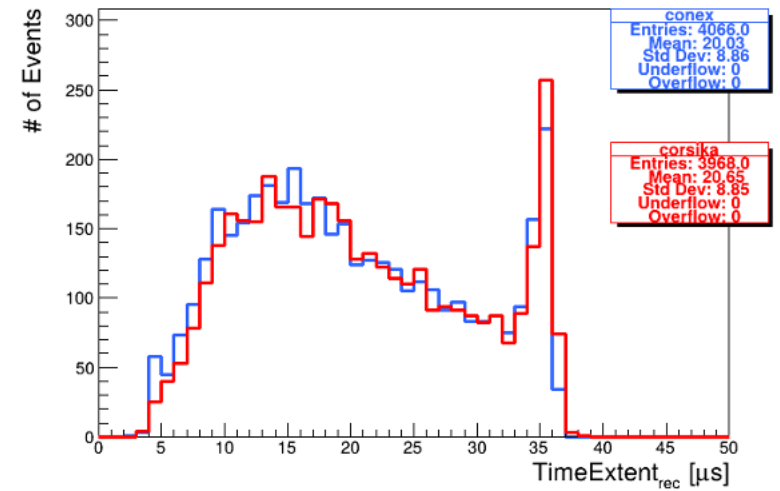
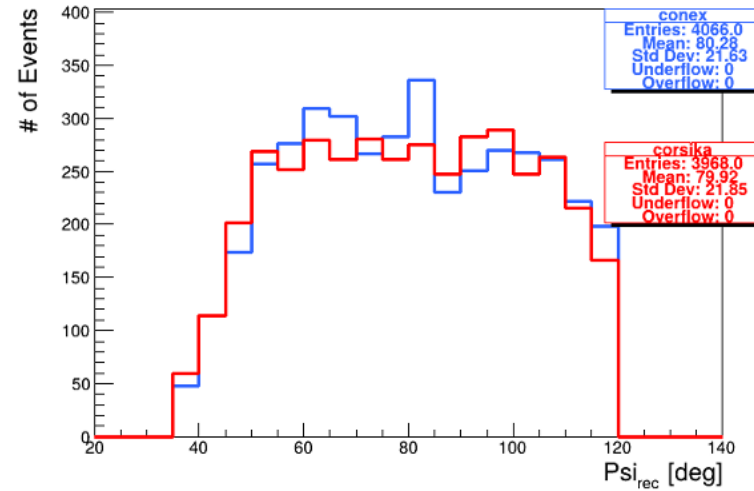
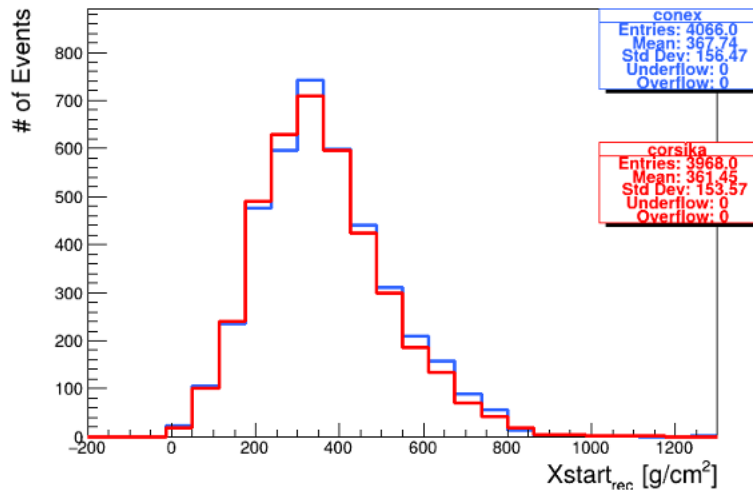
CONEX を使用した TAFD の再構成の動作確認の結果



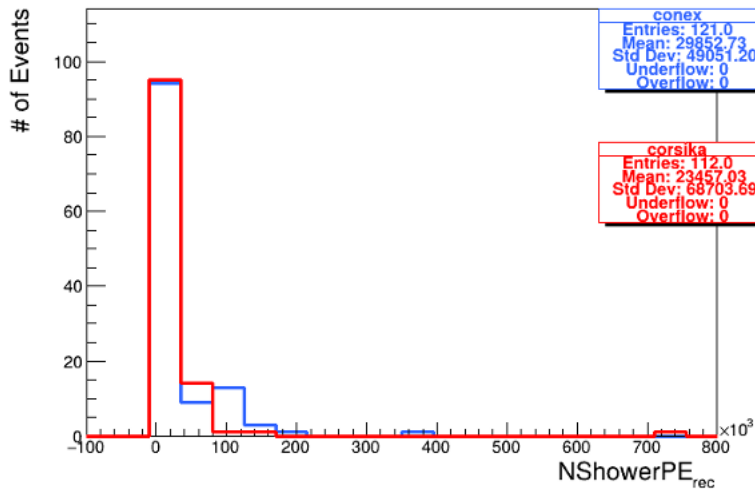
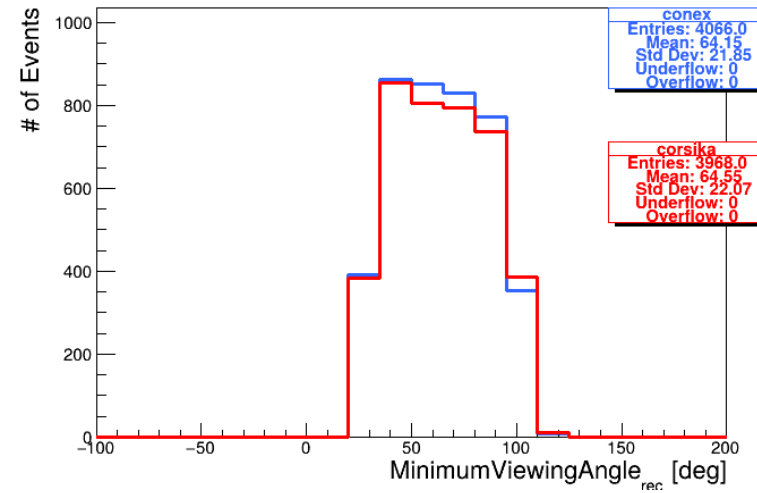
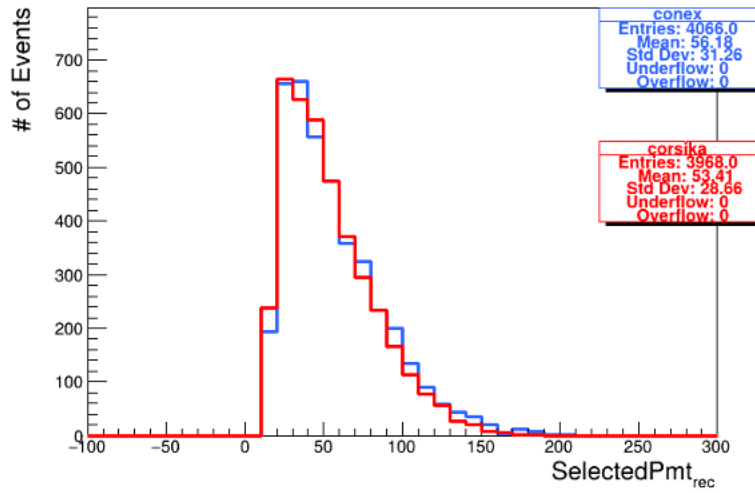
CONEX を使用した TAFD の再構成の各パラメータの分布比較の結果



CONEX を使用した TAFD の再構成の各パラメータの分布比較の結果



CONEX を使用した TAFD の再構成の各パラメータの分布比較の結果



参考文献

[1] “Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode”, R. U. Abbasi et al 2018 ApJ 858 76.

<http://telescopearray.org/images/papers/2018/Abbasi%20et%20al%20%20Depth%20of%20UHECR%20Shower%20Maxima.pdf>

[2] “The energy spectrum of cosmic rays above $10^{17.2}$ eV measured by the fluorescence detectors of the Telescope Array experiment in seven years”, R. U. Abbasi et al 2016 July.

[https://web.physics.utah.edu/~bergman/publications/2016%20Abbasi%20et%20al%20APP-80-131%20\(arXiv%201511.07510\).pdf](https://web.physics.utah.edu/~bergman/publications/2016%20Abbasi%20et%20al%20APP-80-131%20(arXiv%201511.07510).pdf)