

TA実験における CLFを用いた 大気透明度解析

信州大学 : 中村智行、富田孝幸、上濱孝文
中部大学 : 山崎勝也
神奈川大学 : 有働慈治

名前：中村智行

所属：信州大学 工学部 4年

出身：神奈川県 藤沢市

趣味：スキー、同人誌作り

お盆と大晦日の生息場所>



1. TA実験 (Telescope Array)

- 超高エネルギー宇宙線
- 大気蛍光望遠鏡

2. CLFシステム (Central Laser Facility)

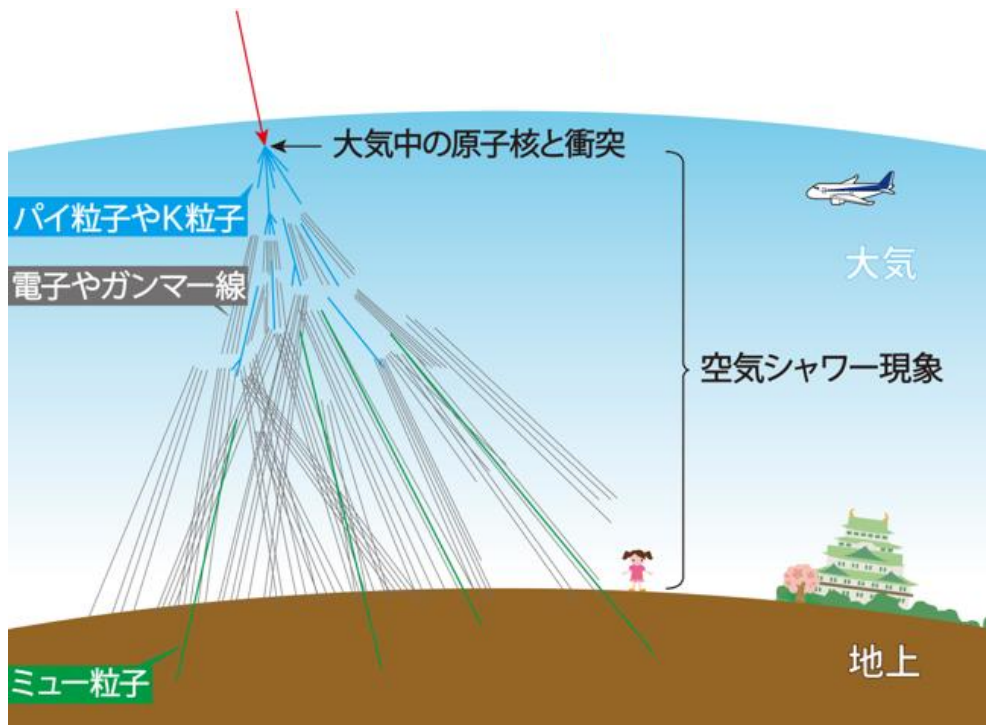
3. 大気透明度算出方法

4. 大気透明度解析

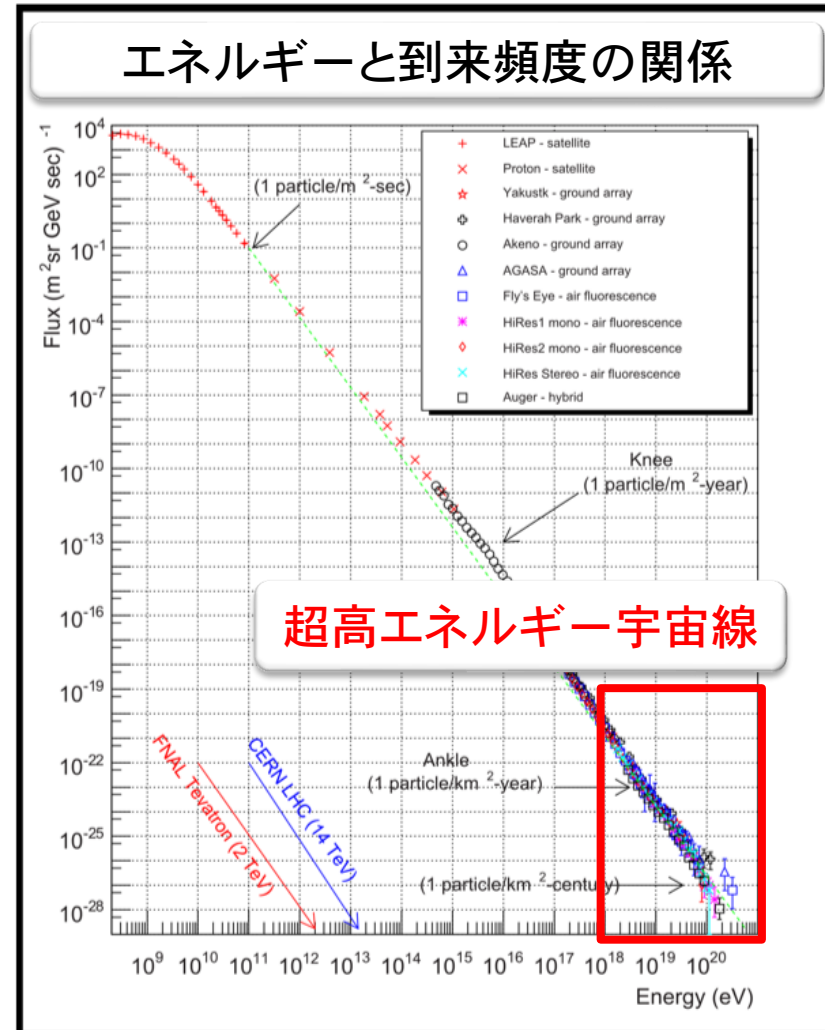
- 大気透明度分布
- 季節による依存

5. まとめ

- 10^{18} eV以上のエネルギーを持った宇宙線
- 大気に侵入することで
空気シャワー現象を起こす。

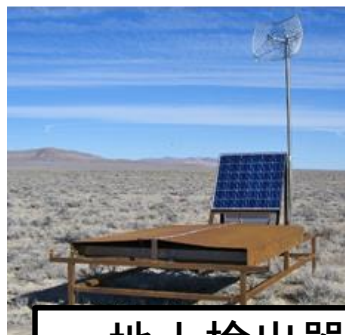
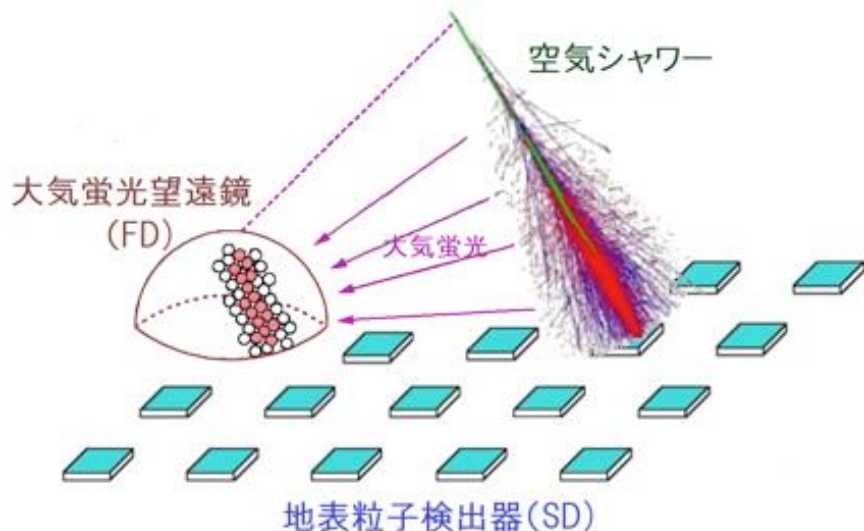


空気シャワー現象発達のイメージ

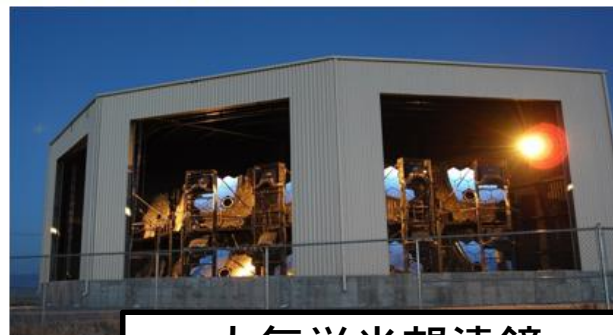


目的：超高エネルギー宇宙線の観測

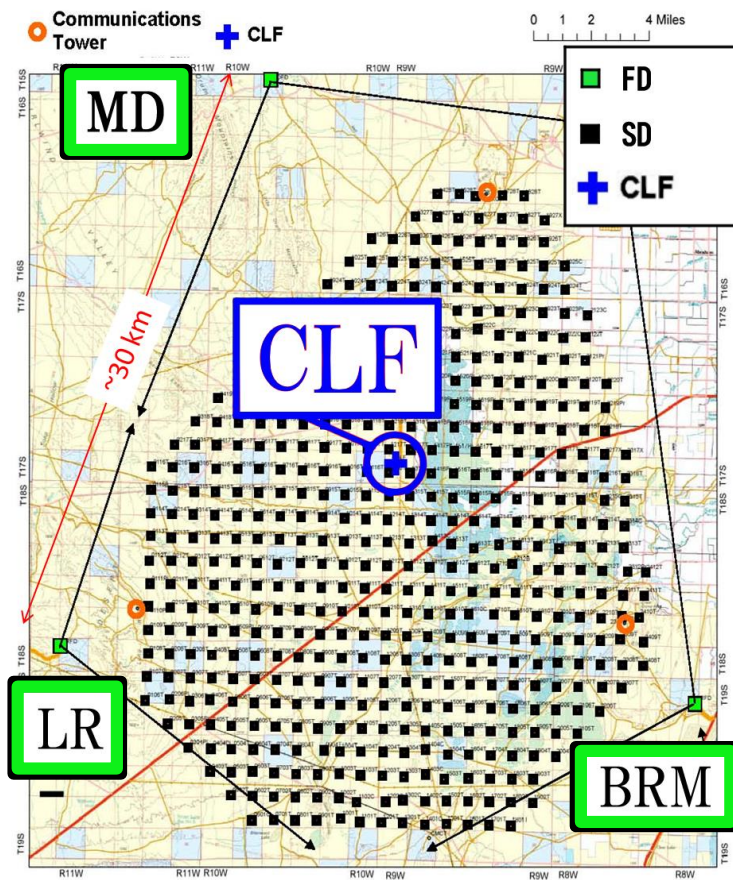
場所：アメリカ合衆国 ユタ州 ミラード郡



地上検出器 (SD) : 約500台



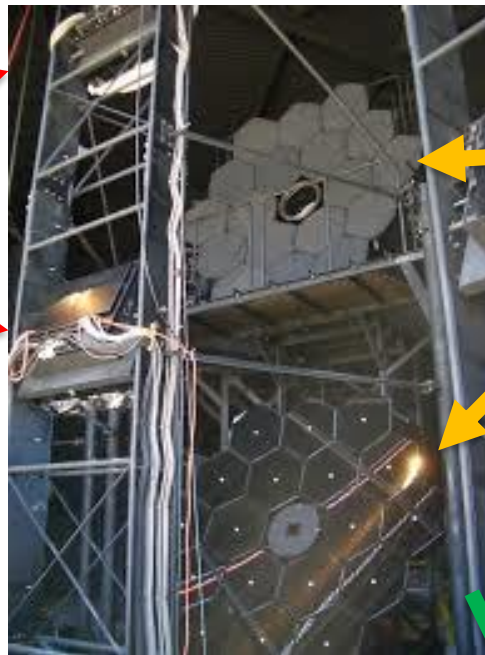
大気蛍光望遠鏡 (FD) : 3ステーション



大気蛍光望遠鏡 (LR、BRM)



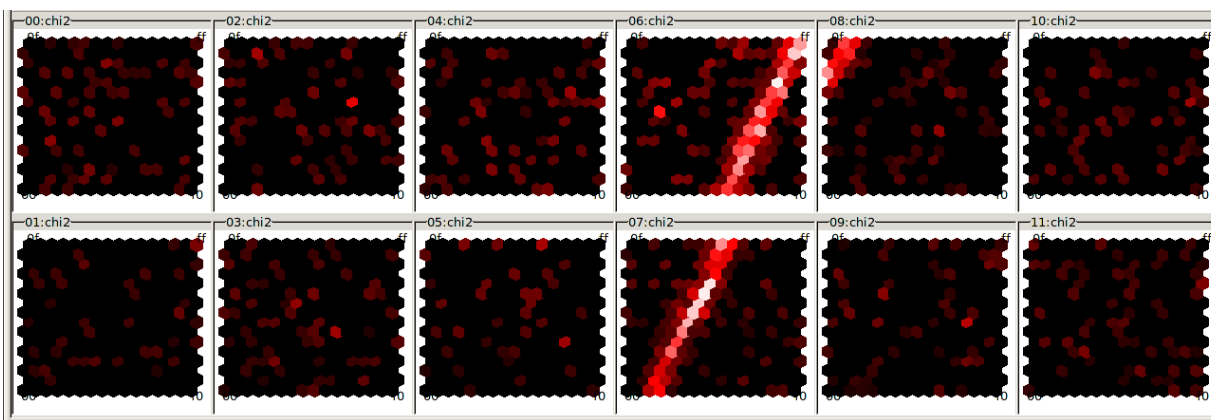
PMT256本
(16×16のハニカムアレイ状)



複合球面鏡
(口径 約3m)
蛍光光を反射集光



望遠鏡ステーション

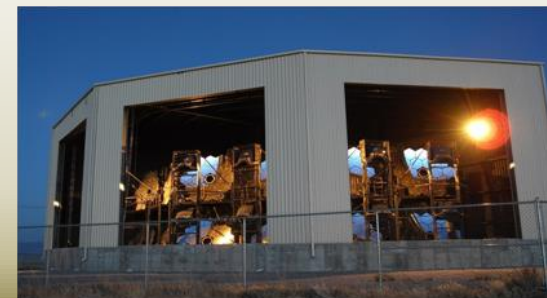


実際に観測された、FD視野内を通る空気シャワー

空気シャワー現象により
窒素分子が励起して蛍光を発する

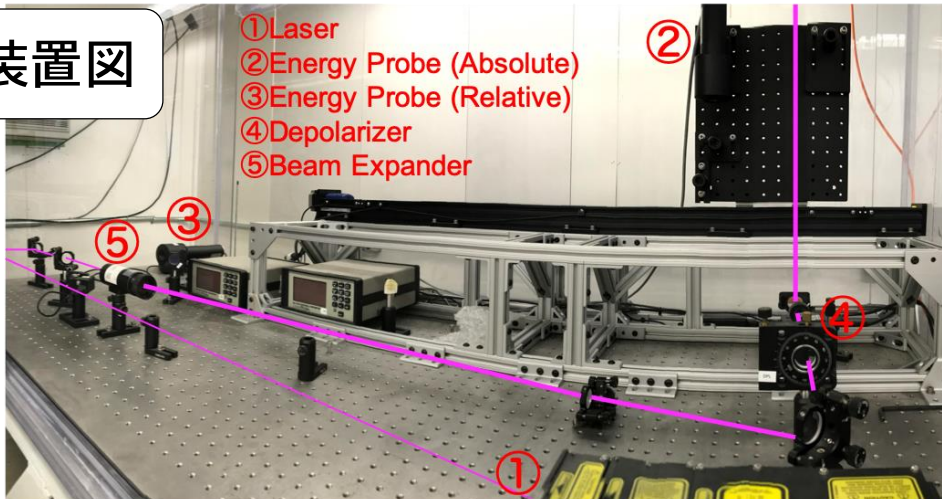
- 観測サイトは広大な砂漠地帯
- 大気中にエアロゾル(塵、埃)が存在
- エアロゾルの分布は風によって短時間で変化

伝搬過程で蛍光光が減衰



大気散乱における蛍光の減衰量の理解が必要

装置図

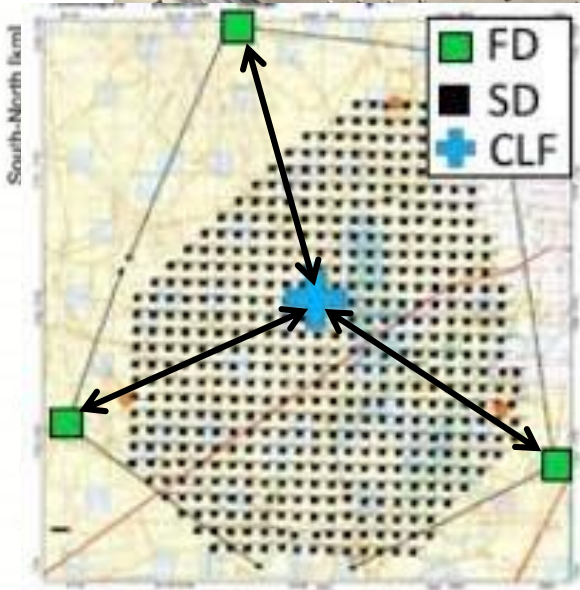


CLF 1イベント

時間：30分おき

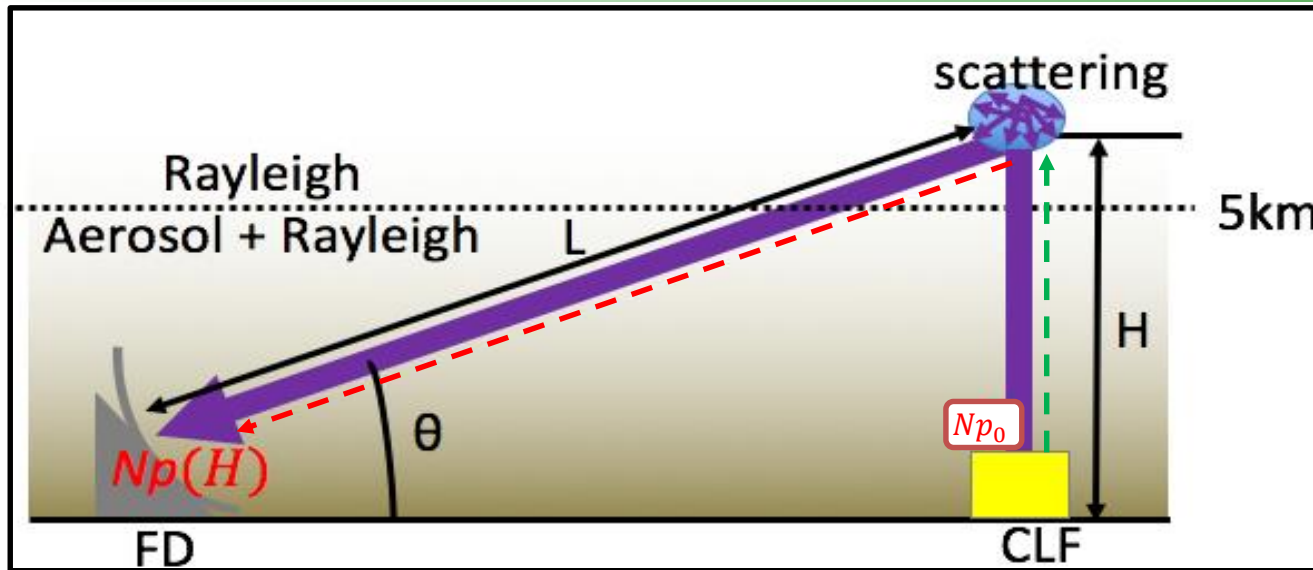
Shot数：300shots
(30sec)

波長：355nm



CLF配置図

- レーザーを垂直に射出
- レーザーの側方散乱光を望遠鏡で受光
 - 受光量とレーザーエネルギーから解析
- 望遠鏡3ステーションから等距離に配置
 - 3台の望遠鏡で大気透明度解析が可能



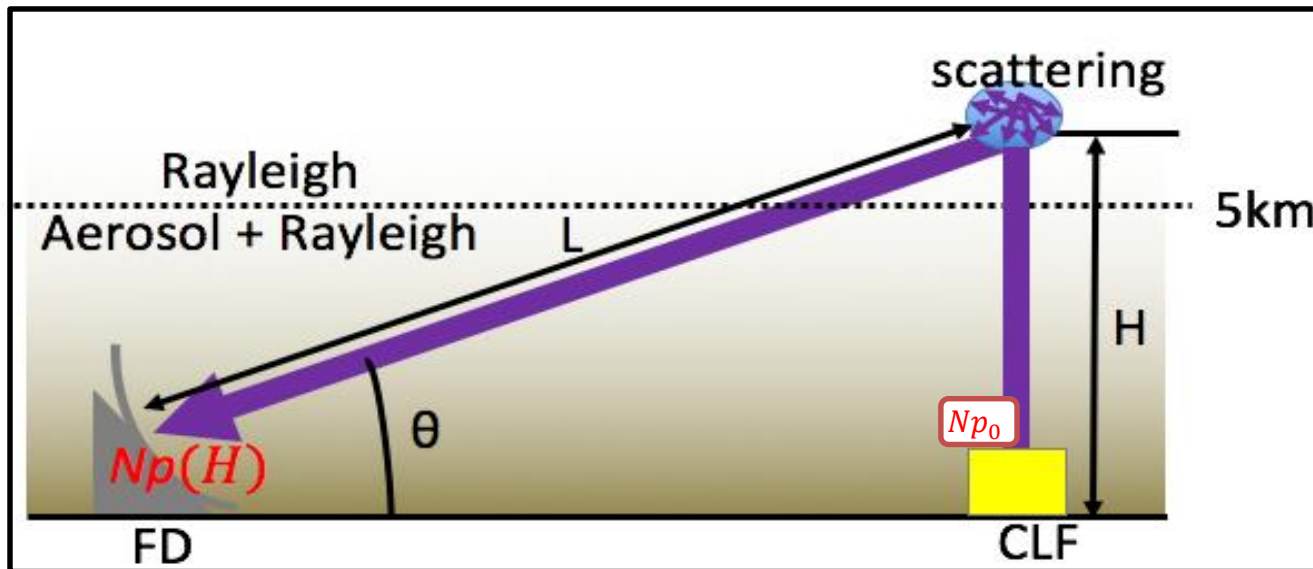
S : 微分散乱係数
 T : 大気透明度
 H : 散乱点の高さ
 L : 散乱点 - FD間距離
 τ : VAOD

通常
$$N_p(H) = N_{p0} T_{AS}(H) T_{Ray}(H) (S_{AS} + S_{Ray}) T_{AS}(L) T_{Ray}(L)$$

理想状態
$$N_{pideal}(H) = N_{p0'} T_{Ray}(H) S_{Ray} T_{Ray}(L)$$

$$\frac{N_p(H)}{N_{pideal}(H)} = \frac{N_{p0}}{N_{p0'}} T_{AS}(H) \left(1 + \frac{S_{Ray}}{S_{AS}}\right) T_{AS}(L)$$

VAODで
$$T = \exp[-\tau(h)]$$



S : 微分散乱係数
 T : 大気透明度
 H : 散乱点の高さ
 L : 散乱点 - FD間距離
 τ : VAOD

水平方向に対して大気状態が一定 $L = \frac{H}{\sin\theta}$

$$\frac{N_p(H)}{N_{pideal}(H)} = \frac{N_{p0}}{N_{p0'}} \exp[-\tau(H)] \left(1 + \frac{S_{AS}}{S_{Ray}}\right) \exp\left[-\tau(H) \frac{1}{\sin\theta}\right]$$

解析高度が5km以上（大気分子が支配的） (1)

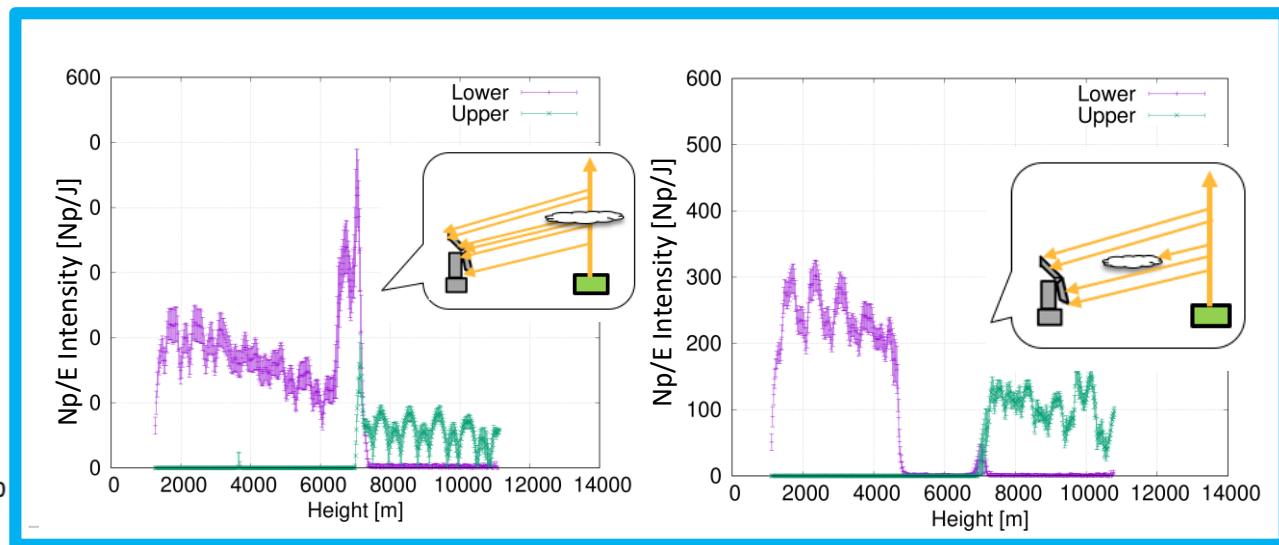
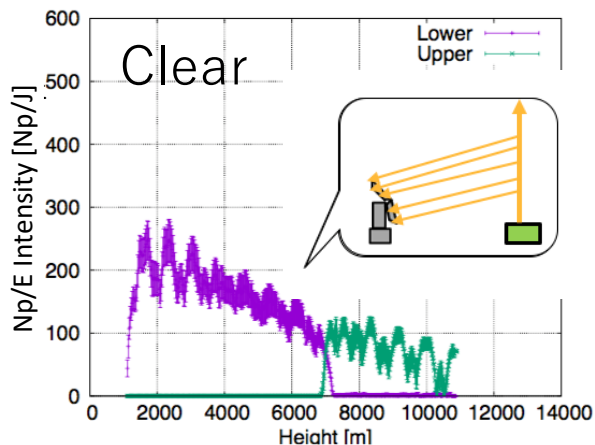
$$\frac{N_p(H)}{N_{pideal}(H)} = \frac{N_{p0}}{N_{p0'}} \exp\left[-\tau_{AS}(H) \frac{\sin\theta+1}{\sin\theta}\right]$$

(1 T. Tomida, "宇宙線望遠鏡計画における大気透明度の研究", PhD thesis, University of Yamanashi, 43-45(2012).

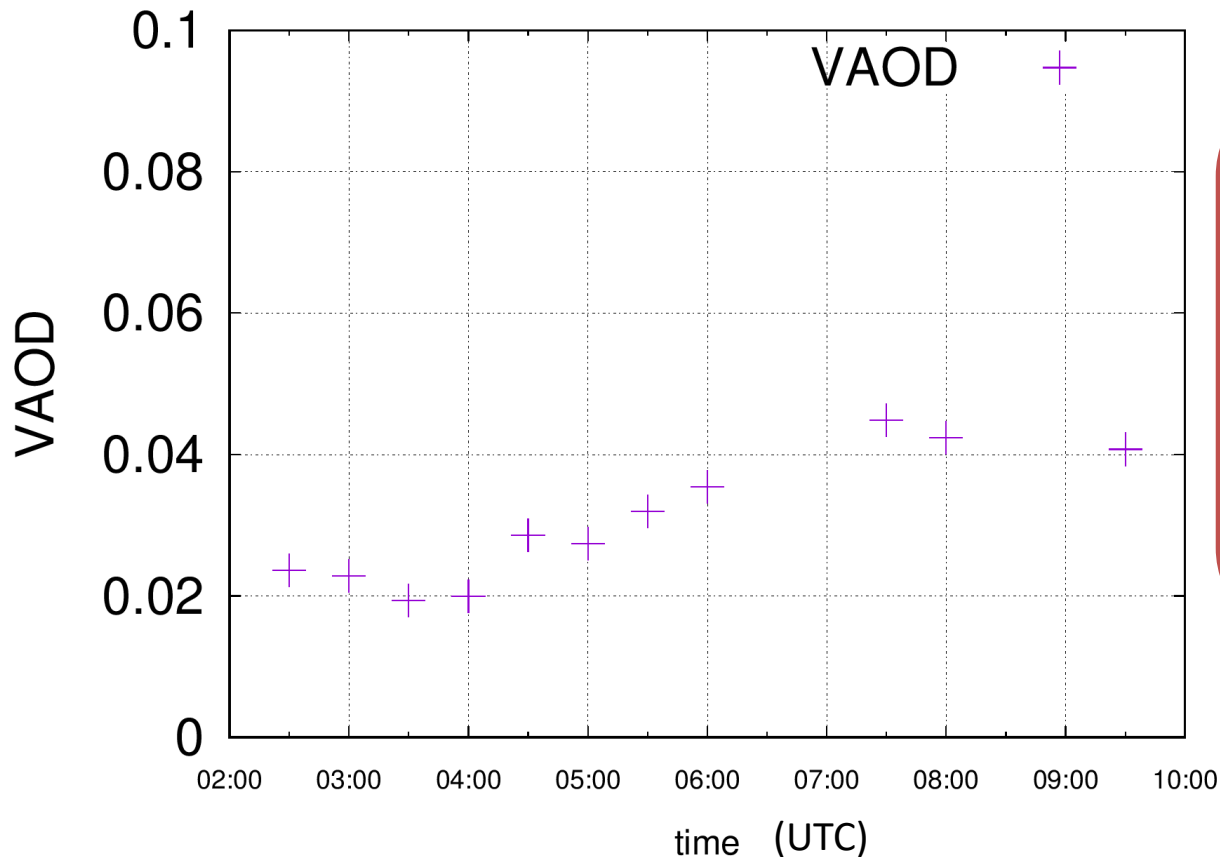
- 基準大気条件：エアロゾルが存在しない大気
 - 高度4.5~5.5kmの大気において
 - 複数のステーションで受光量が高い
 - 別高度でも受光量が高い

受光量の高い上位5%以上のデータの平均を基準大気として採用

天候による影響の無い
受光量データを抽出



2013年11月30日
宇宙線観測時間中のVAODの変化



VAODによる減衰

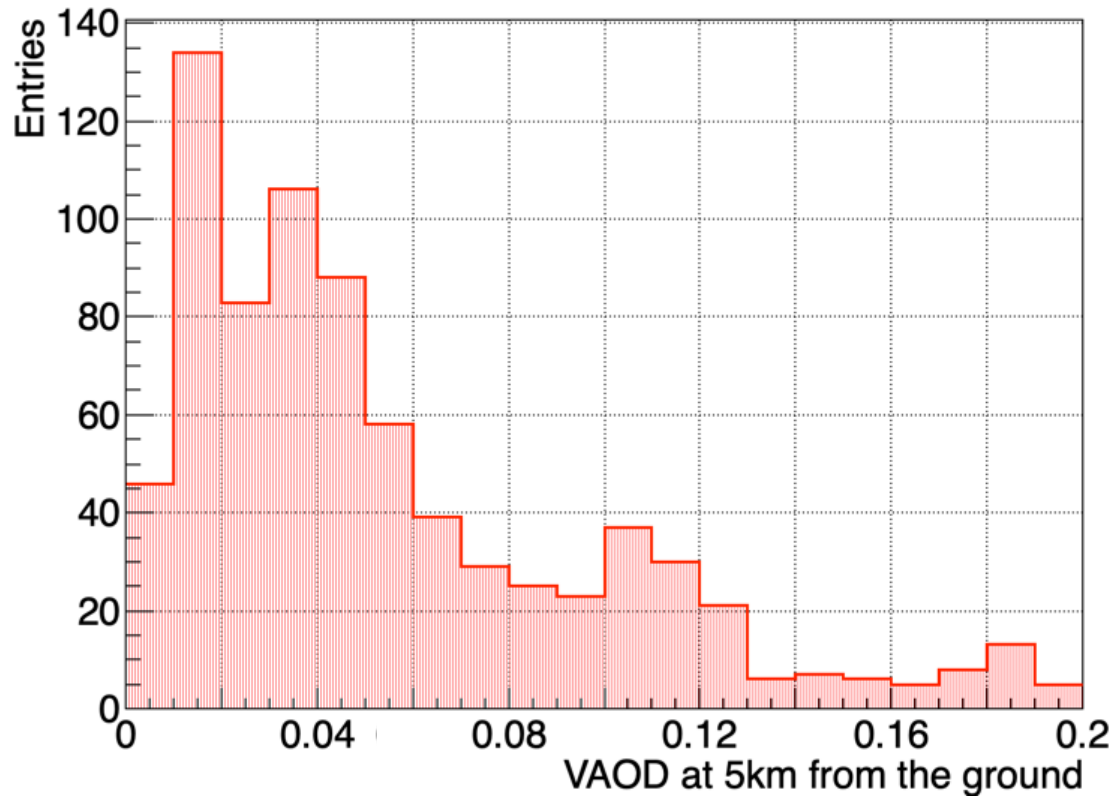
- 20km先
- 上空5km

VAOD : 減衰量

0.02 \Rightarrow 3.9%

0.04 \Rightarrow 7.3%

2015年9月～2016年9月 BRM 高度5kmにおけるVAOD分布

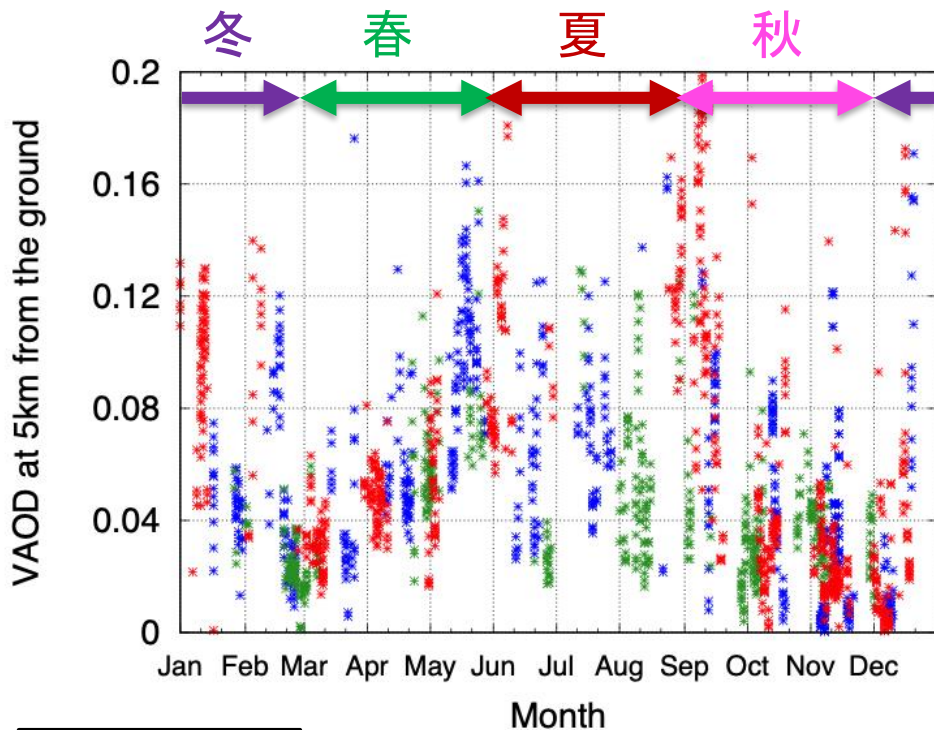


Median	$0.042^{+0.029}_{-0.016}$
Entries	769

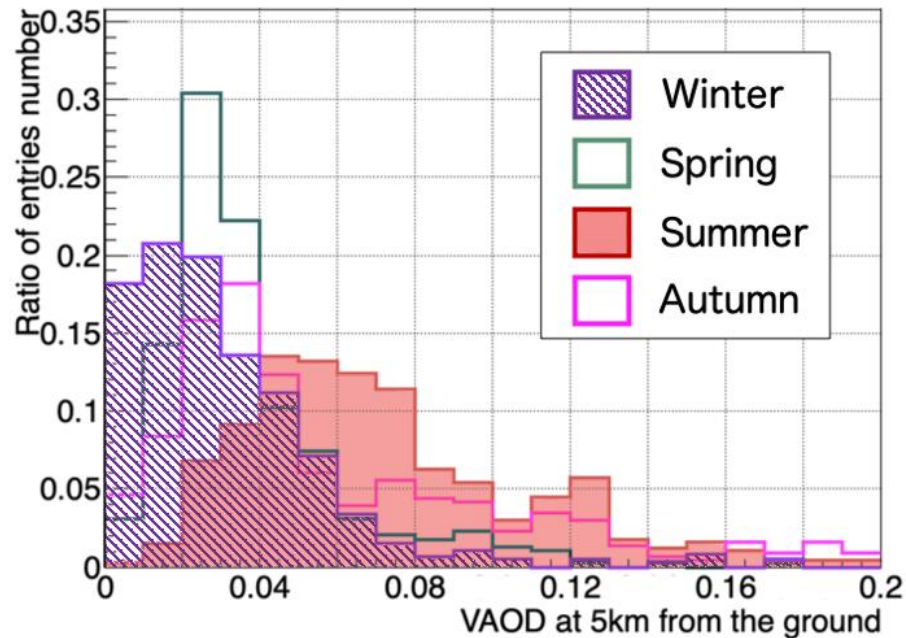
VAOD : 減衰量
 0.2 \Rightarrow 33.0%
 0.1 \Rightarrow 18.2%
 0.042 \Rightarrow 8.1%

先行実験とのVAOD比較

	Median($\tau_{AS} < 0.1$) $^{+1\sigma}_{-1\sigma}$	Entries
CLF	$0.036^{+0.027}_{-0.017}$	742
TA-LIDAR	$0.035^{+0.019}_{-0.013}$	137



冬にVAODが低く、
夏にVAODが高い傾向



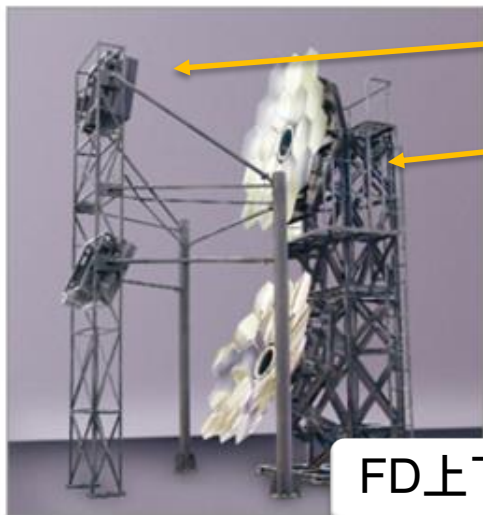
Median(VAOD<0.2)

Winter	0.029
Spring	0.037
Summer	0.074
Autumn	0.047

TA実験におけるCLFを用いた大気透明度解析

- 大気透明度（VAOD）解析
 - TA-LIDARの結果と中央値の分布幅で一致
 - VAODの季節依存性を示唆
- 今後の展望
 - 残るステーションにおけるVAOD解析
 - TA実験全期間のVAOD解析
 - 解析結果を望遠鏡への校正に適用

Back Up



PMT

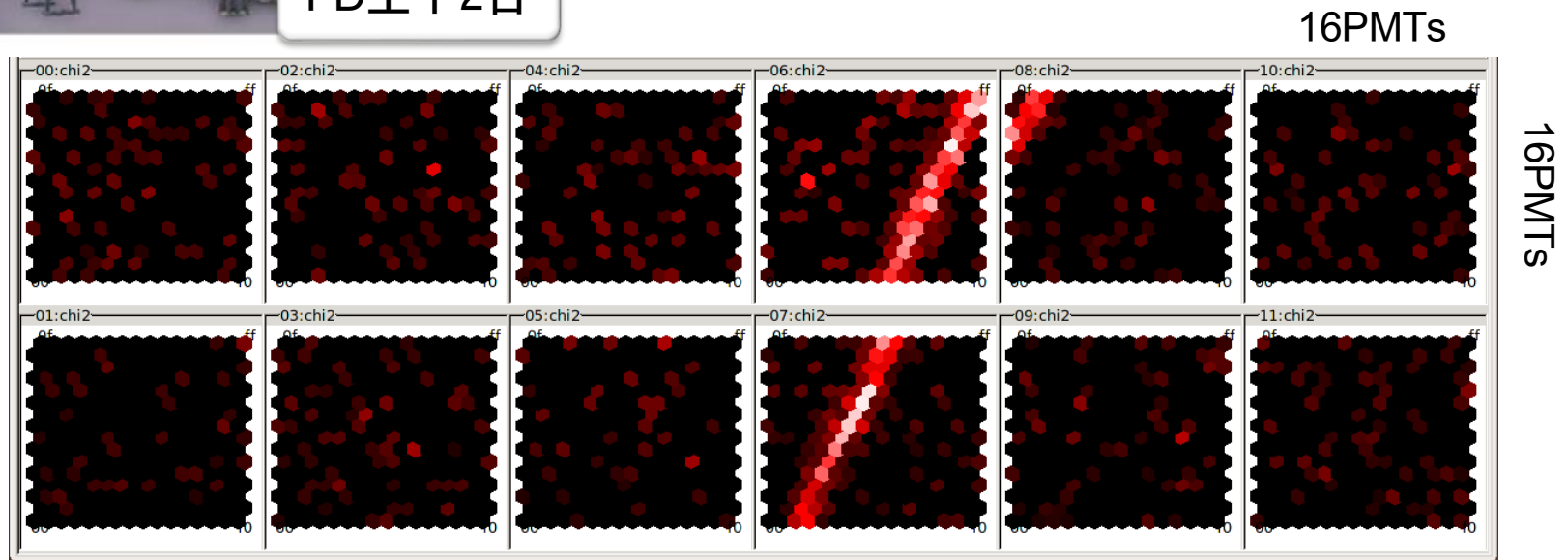
球面鏡

1ステーションに
FDは12台

FD上下2台

FD 1台

- ・ 複合球面鏡 (口径 約3m)
- ・ PMT256本
(16×16のハニカムアレイ状)



実際に観測された、FD視野内を通る空気シャワー

Vertical Aerosol Optical Depth(VAOD)

$$\tau_{AS}(H) = \int_0^H \alpha(h) dh$$

α 消散係数

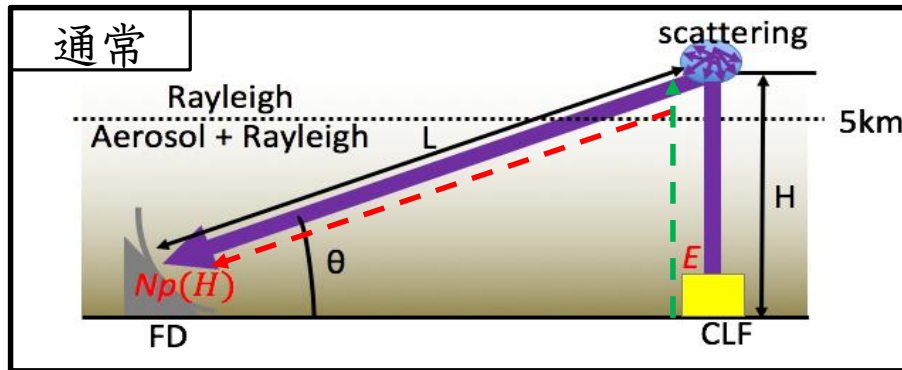
H 散乱高度

地表から高さHまで、消散係数を積分した値
→エアロゾルの光学的厚さ

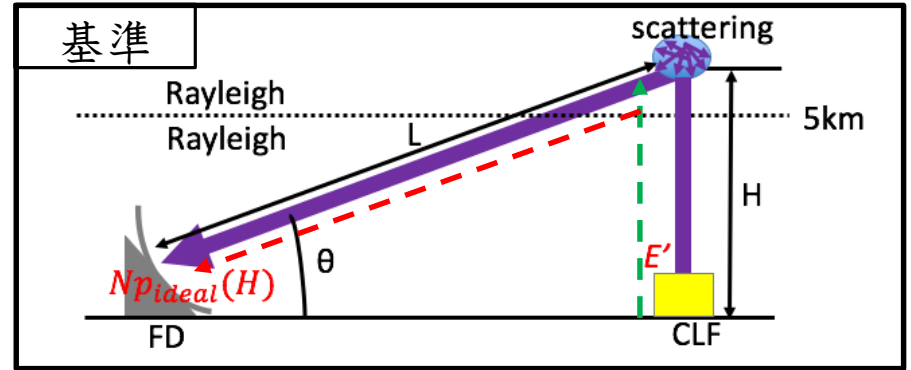
高度5km以上における大気透明度を算出

T. Tomida, "宇宙線望遠鏡計画における大気透明度の研究", PhD thesis, University of Yamanashi, 43-45(2012).

エアロゾルが浮遊している大気



エアロゾルが浮遊していない大気



通常

$$N_p(H) = \underbrace{E}_{\text{green dashed}} \underbrace{T_{AS}(H)}_{\text{green dashed}} \underbrace{T_{Ray}(H)}_{\text{blue dashed}} \underbrace{(S_{AS} + S_{Ray})}_{\text{red dashed}} \underbrace{T_{AS}(L)}_{\text{green dashed}} \underbrace{T_{Ray}(L)}_{\text{red dashed}}$$

基準

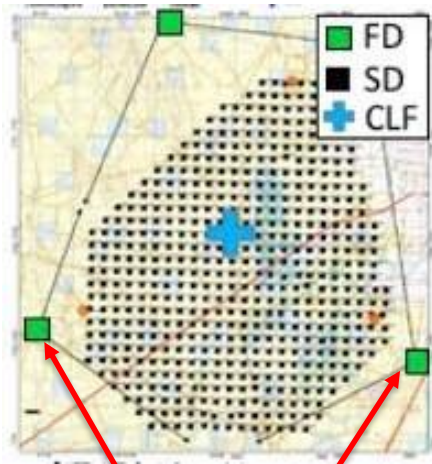
$$N_{p_{ideal}}(H) = \underbrace{E'}_{\text{green dashed}} \underbrace{T_{Ray}(H)}_{\text{blue dashed}} \underbrace{S_{Ray}}_{\text{red dashed}} \underbrace{T_{Ray}(L)}_{\text{red dashed}}$$

- ① 水平方向に対して大気状態が一定
- ② 解析高度が5km以上（大気分子が支配的）

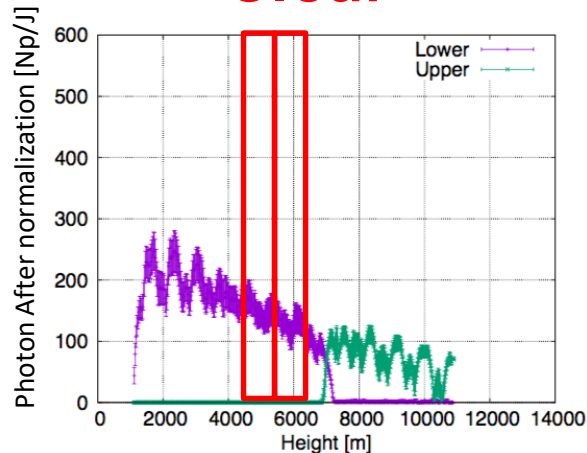
S : 微分散乱係数
 T : 大気透明度
 H : 散乱点の高さ
 L : 散乱点 - FD間距離
 τ : VAOD

$$\frac{N_p(H)}{N_{p_{ideal}}(H)} = \frac{E}{E'} \exp \left[-\tau_{AS}(H) \frac{\sin\theta + 1}{\sin\theta} \right]$$

- 基準大気条件：エアロゾルが存在しない大気
 - 観測した中で極めて綺麗な状態の大気を基準として設定



Clear



基準大気選択アルゴリズム

高度4.5~5.5kmの大気において

- 複数のFDステーションで受光量が高い
- 別高度でも受光量が高い
- このうち受光量の高い上位5%以上のデータの平均を基準大気として採用

- 基準大気の状態：エアロゾルが存在しない大気
 - 観測した中で極めて綺麗な状態の大気を基準として設定

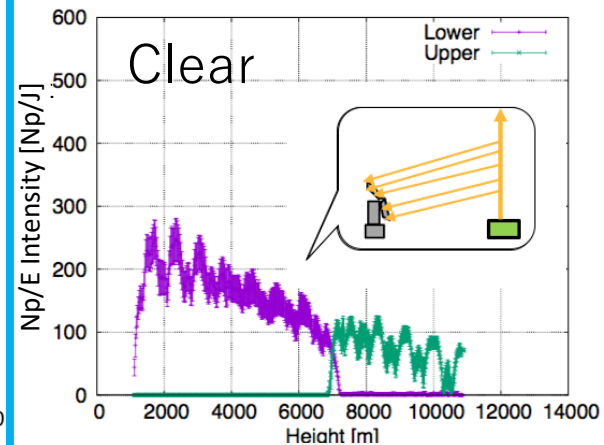
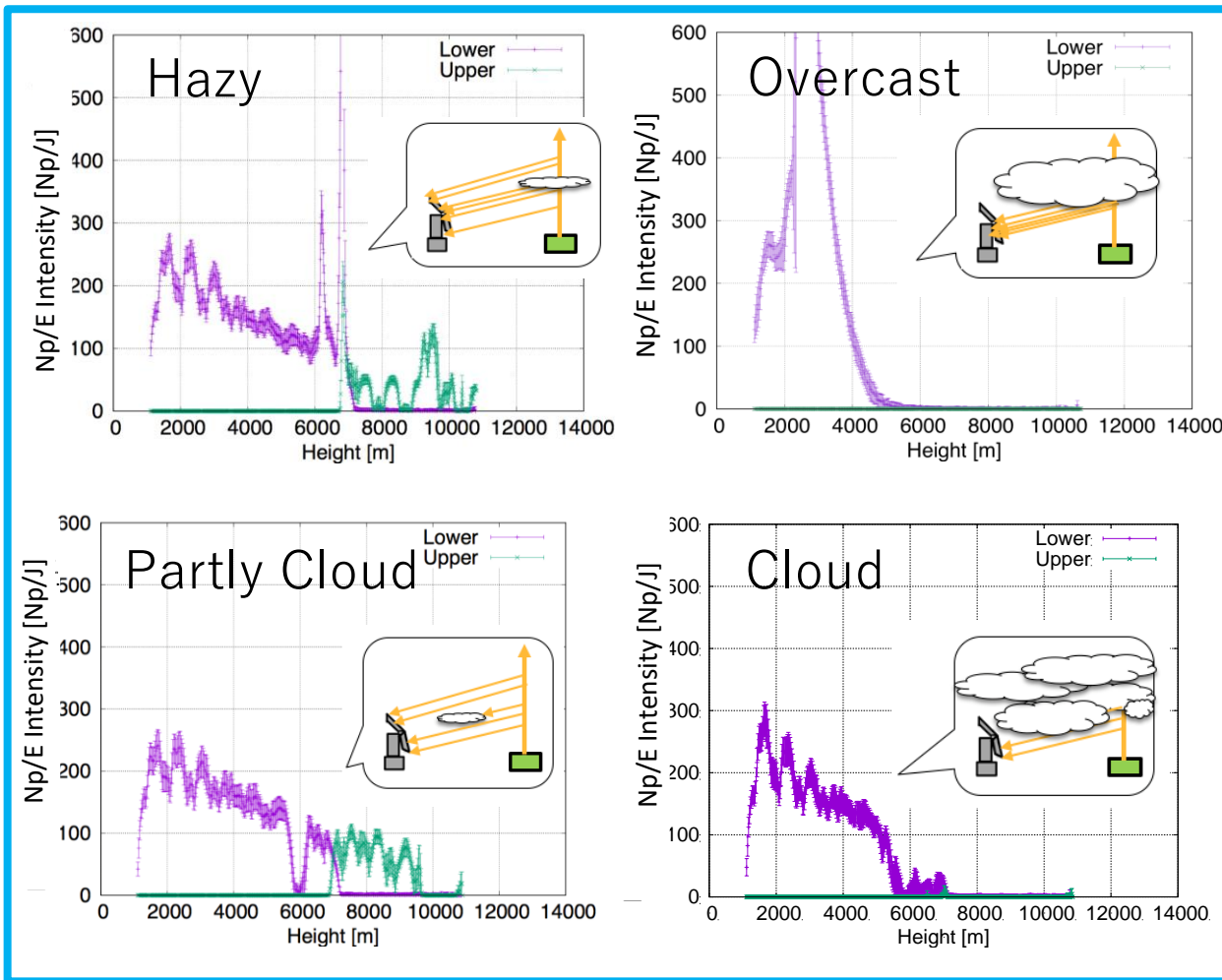
基準大気選択アルゴリズム

高度4.5～5.5kmの大気において

- 複数のFDステーションで受光量が高い
- 別高度でも受光量が高い
 - 大気が満遍なくきれいな状態

このうち受光量の高い上位5%以上のデータの平均を基準大気として採用

雲による受光量の影響例



光軸上の雲

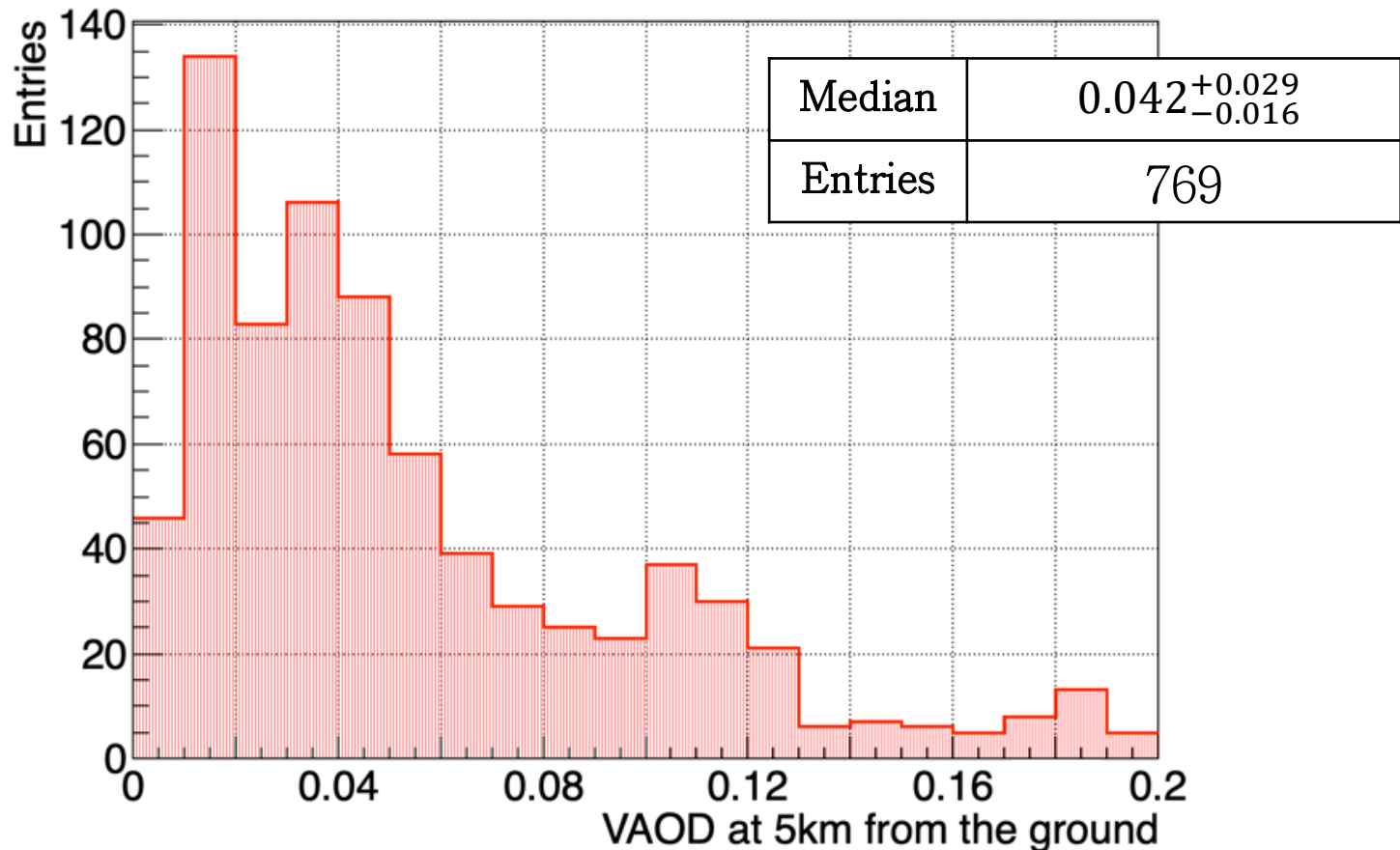
➤ 散乱により光量増

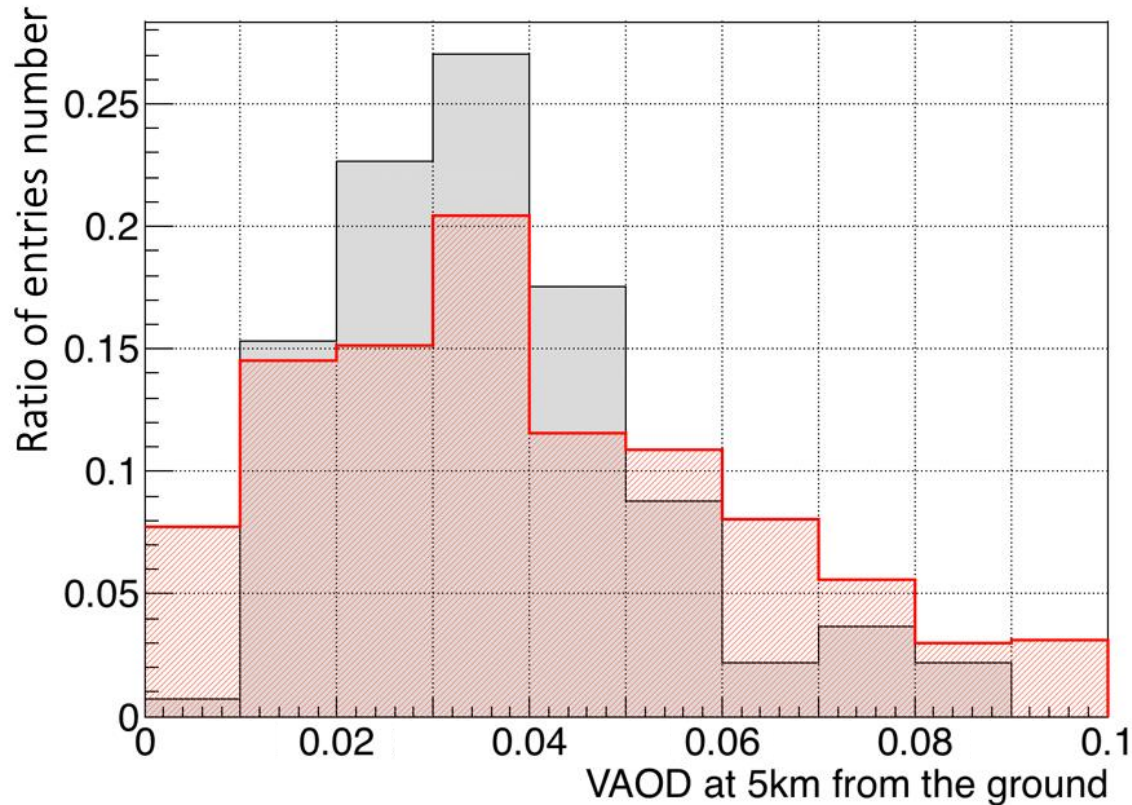
散乱点から伝搬中の雲

➤ 遮断され光量減

天候による影響の無い
受光量データを抽出

2015年9月～2016年9月 BRM 高度5kmにおけるVAOD分布

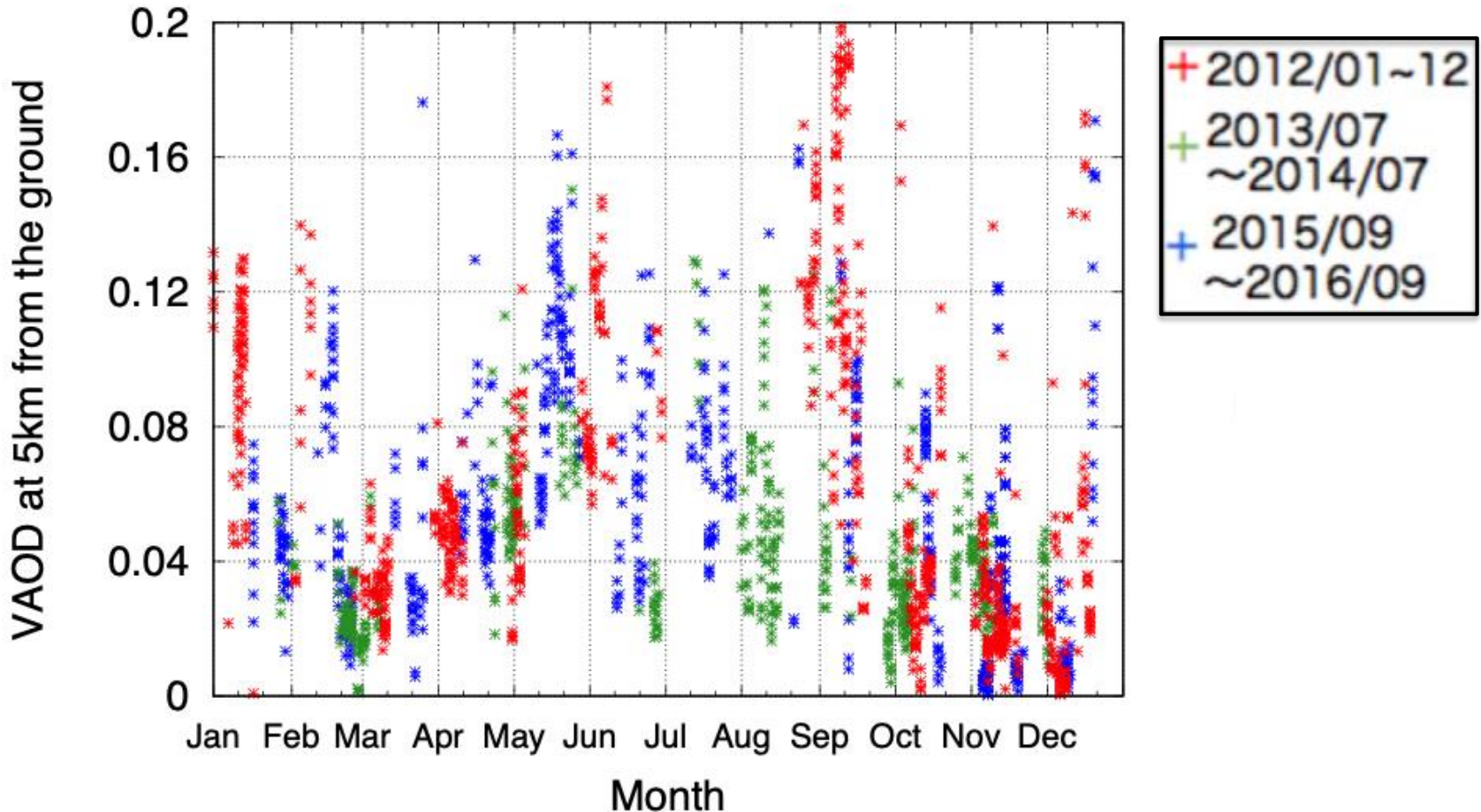




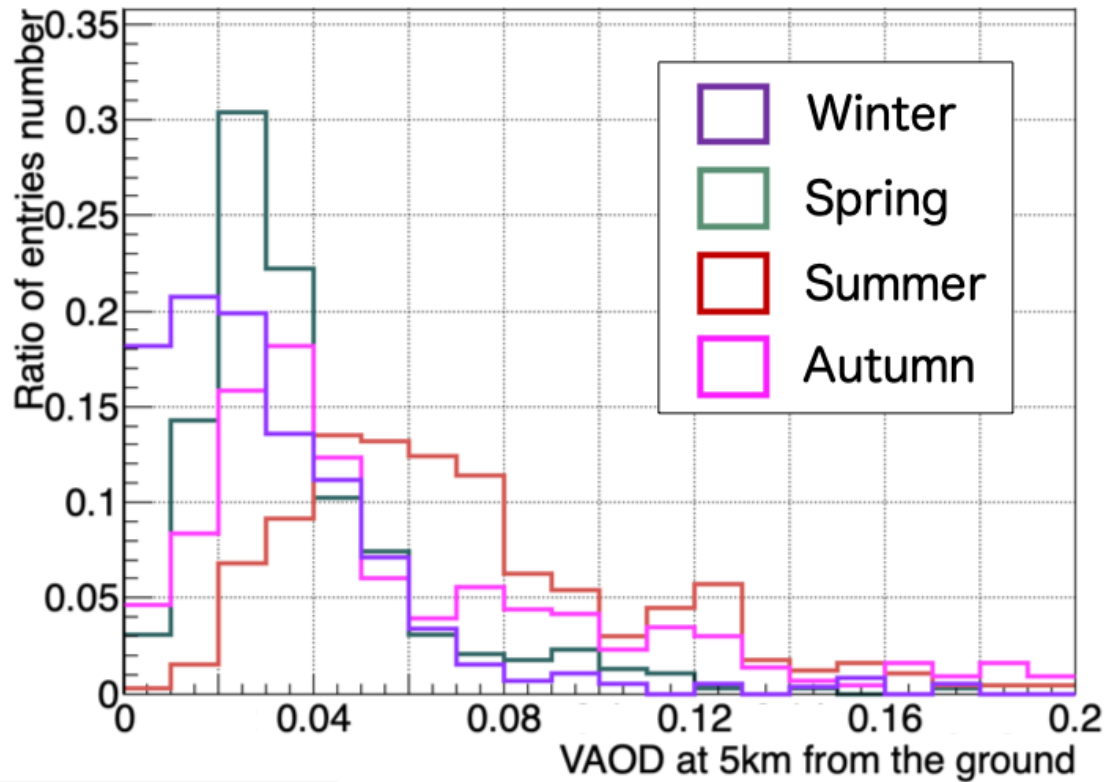
現在、FDの大気較正として用いられるTA-LIDERとの比較。

両システム共0.04に最頻値を持ち、近い分布を得られた。

	Median ($\tau_{AS} < 0.1$) $_{-1\sigma}^{+1\sigma}$	Entries
CLF	0.036 $_{-0.017}^{+0.027}$	742
TA-LIDER	0.035 $_{-0.013}^{+0.019}$	137



冬にVAODが低く、夏にVAODが高い傾向



Median(VAOD<0.2)

Winter	0.029
Spring	0.037
Summer	0.074
Autumn	0.047

季節依存性を示唆

