

TA実験における バイスタティックライダーを用いた 大気透明度測定

信州大学
M1 上濱孝文

名前

上濱孝文

所属

信州大学大学院 総合理工学研究科
修士 1年

研究内容

・LIDAR

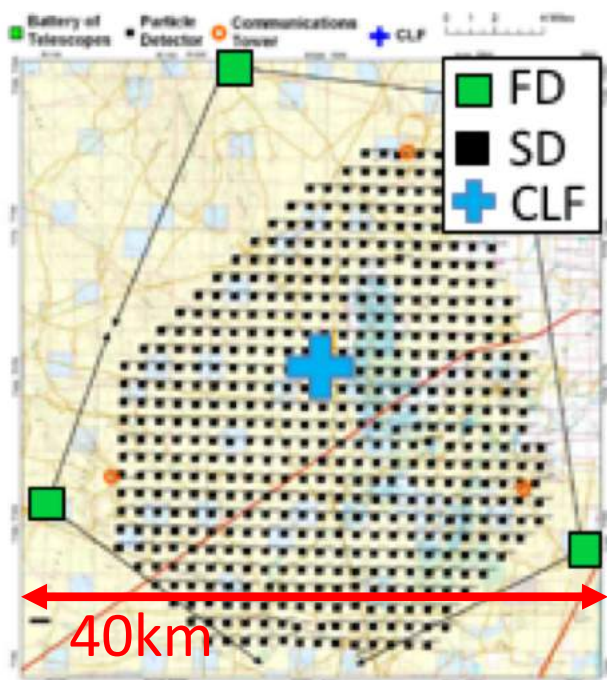


- TA実験 (Telescope Array)
 - 超高エネルギー宇宙線観測
 - 大気蛍光望遠鏡
- CLFシステム (Central Laser Facility)
- 大気透明度解析
 - 大気透明度算出手順
 - 別LIDARシステムとの大気透明度比較、評価
- まとめ

TA実験

目的： **超高エネルギー宇宙線 (10^{18}eV 以上)** の起源解明

観測サイト： 米国ユタ州ミラード郡デルタ（砂漠地帯）



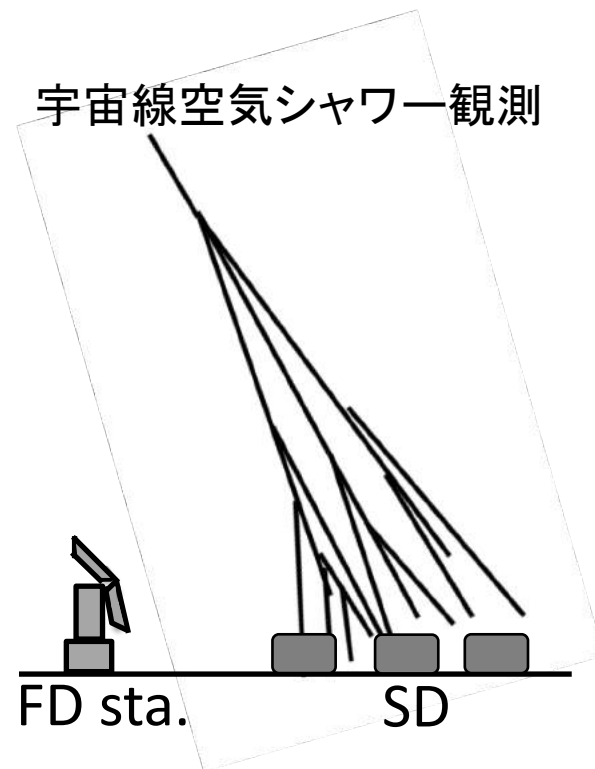
TA実験サイト



大気蛍光望遠鏡(TA-FD)

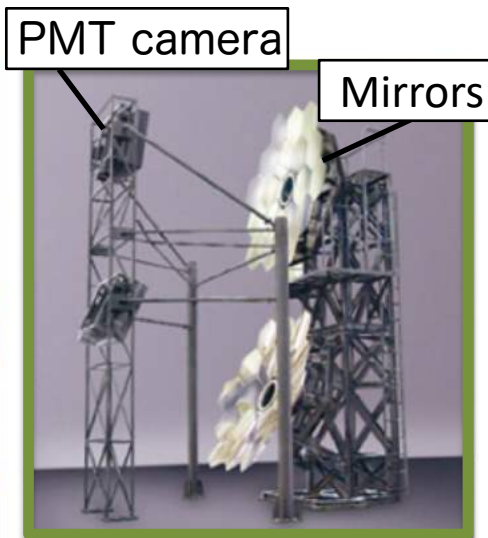


地表検出器(TA-SD)



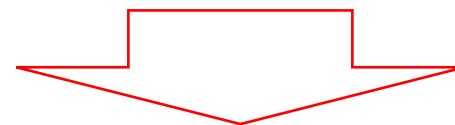


FDステーション
(FD12～14台)



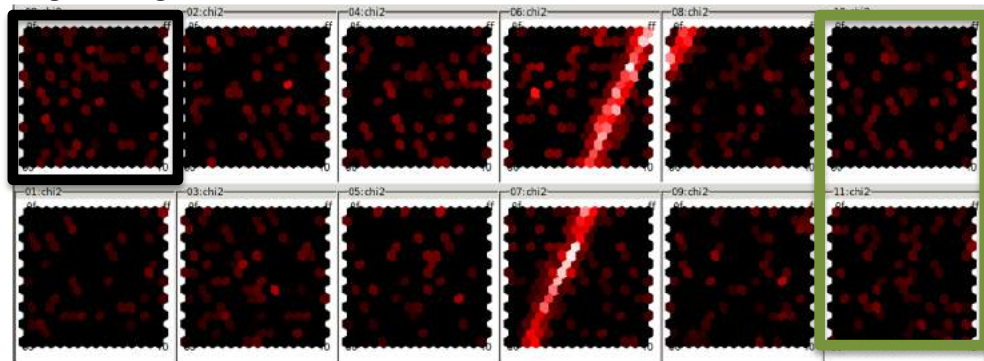
FD上下2台

大気蛍光法
宇宙線が大気に侵入
→窒素分子を励起
蛍光(300～400nm)を発光



FDで大気蛍光を集光
▶間接的に宇宙線観測

16PMTs



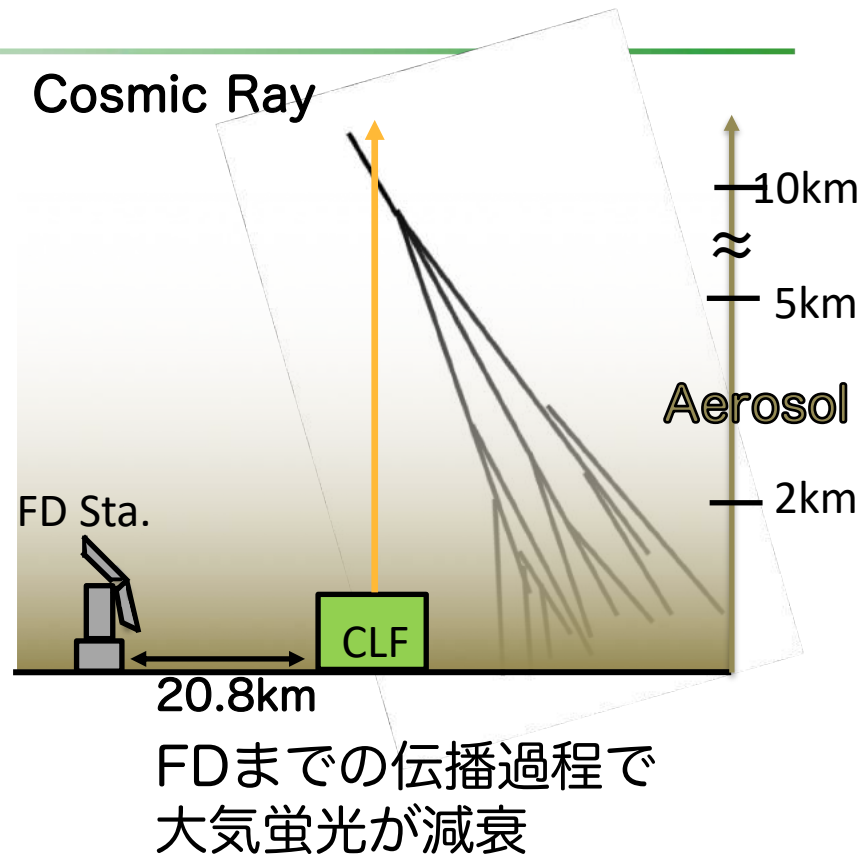
宇宙線観測例

FD1台

- ・複合球面鏡 (口径 約3m)
- ・PMT256本 (16×16)

× 12台 (FD sta.)

夏に最短3時間,冬に最長14時間観測



広大な砂漠地帯 (35km×35km)

さらに...大気は風によって短時間で変化

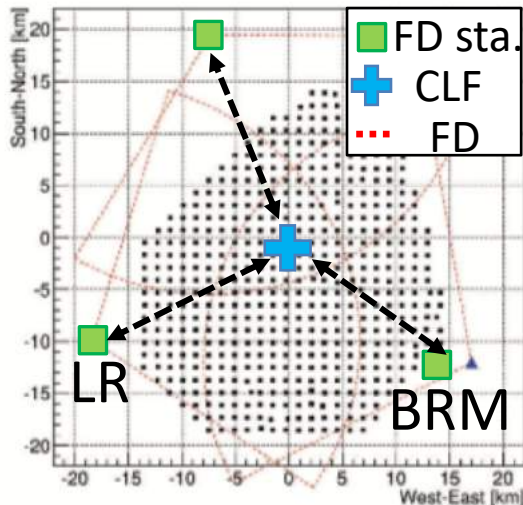
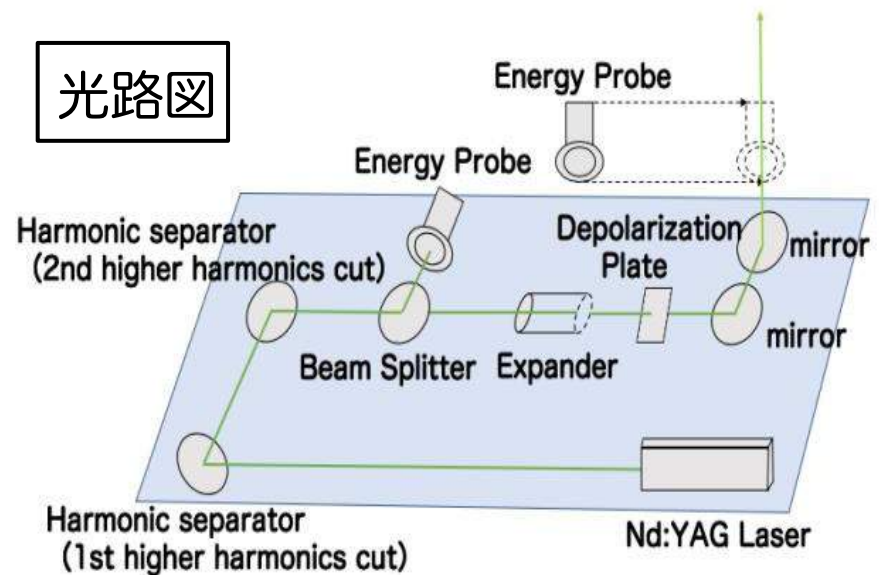
▶FD観測における宇宙線エネルギーの決定精度に影響

大気の変化をモニターし、FD解析に補正が必要！！

▶CLFシステムにおける大気透明度解析



光路図

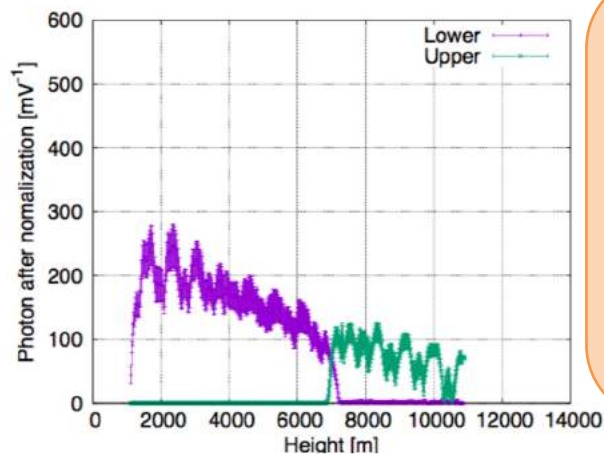
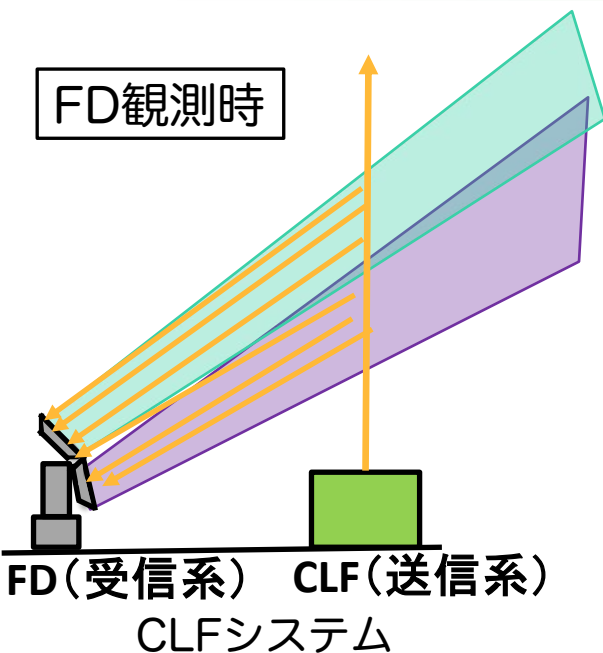


CLF配置図

- ・ 水冷式YAGレーザーで蛍光波長域光を垂直に射出
▶ 標準光源としての役割
- ・ 3箇所のFDステーションの中心の視野範囲内に配置
- ・ 射出したレーザーの側方散乱光をFDで受光
▶ 3台のFDsta.でVAOD（大気透明度）解析が可能

VAOD (Vertical Aerosol Optical Depth) :エアロゾルによる光学的厚さ, 消散係数を積分

FD観測時



FD受光量の時間分布

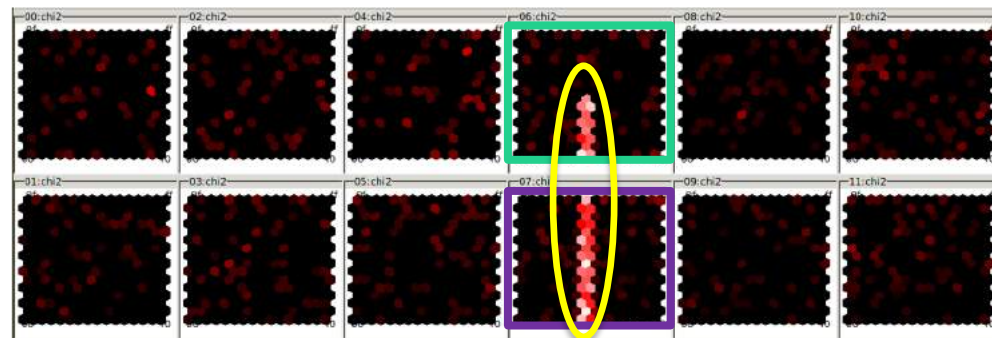
時間：30分おき

ex) 04:00 , 04:30...

shot数：300shots (30秒間)

周波数：10Hz

波長：355nm



FD光量の高さ分布

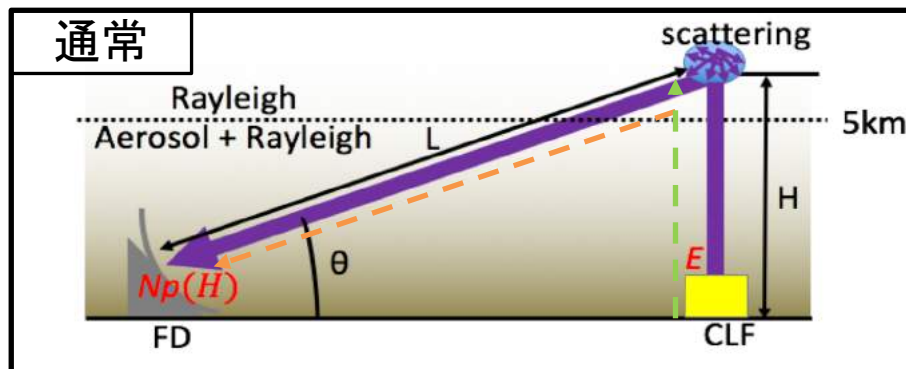
取得データ

CLFレーザー側方散乱光の受光量
(20.8km先の高度, 時間分布)

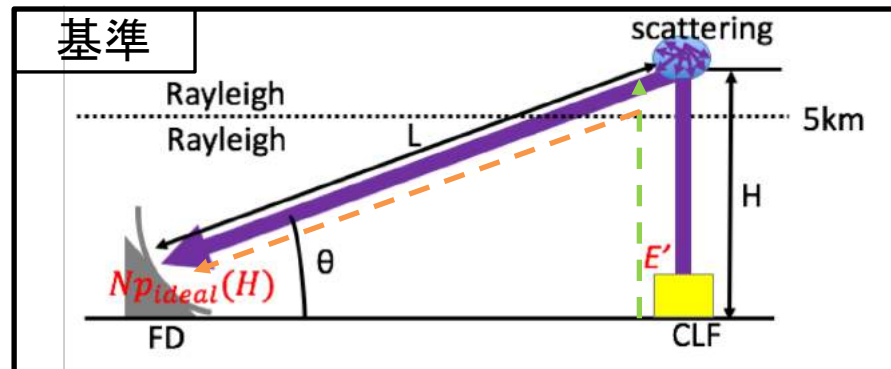


大気透明度解析が可能

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

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

$$T = \exp[-\tau]$$

$$T_{AS}(L) = T_{AS}(H) / \sin\theta$$

- 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)¹⁾

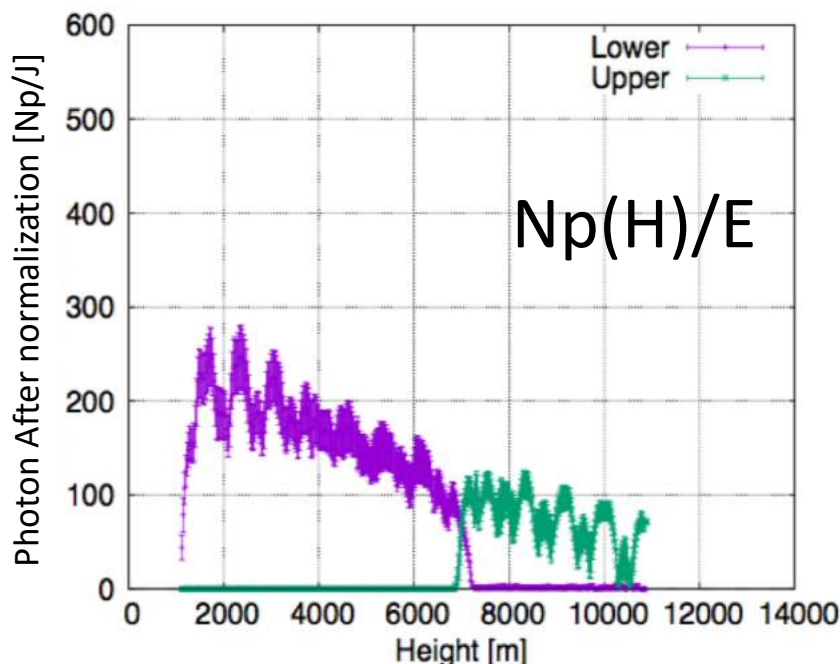
$$\frac{N_p(H)}{N_{p_{ideal}}(H)} = \frac{E}{E'} \exp \left[-\tau_{AS}(H) \frac{\sin\theta + 1}{\sin\theta} \right]$$

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

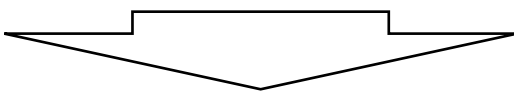
¹⁾T. Tomida, "宇宙線望遠鏡計画における大気透明度の研究", PhD thesis, University of Yamanashi, 43- 45(2012).

$$\tau_{AS}(H) = -\frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} \log \left(\frac{Np(H)/E}{Np_{ideal}(H)/E'} \right)$$

2015/09～2016/09の
1年間の742イベントで解析



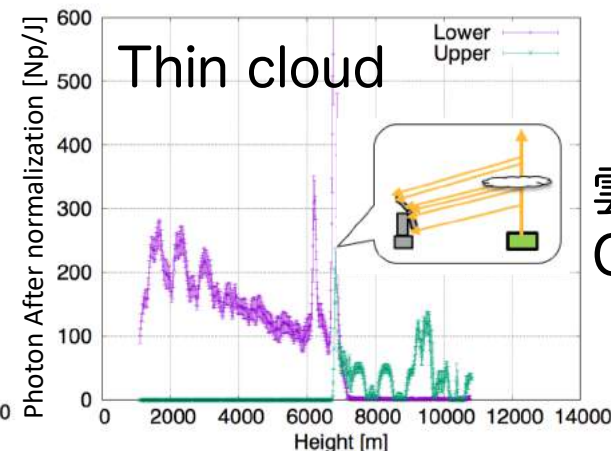
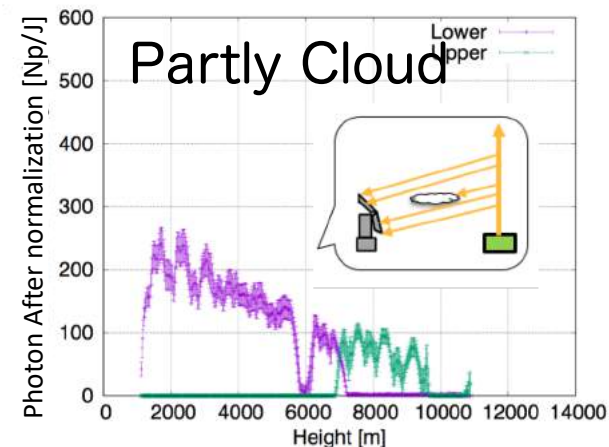
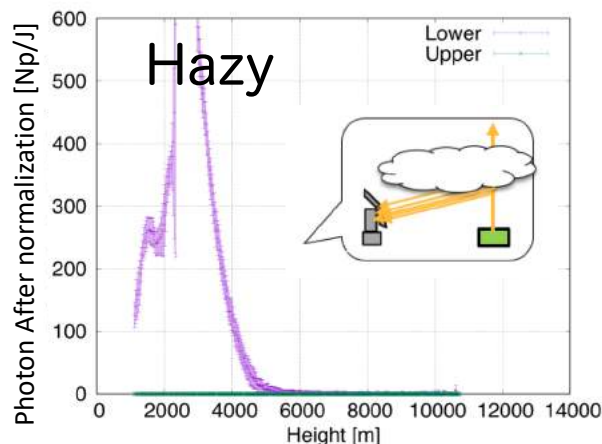
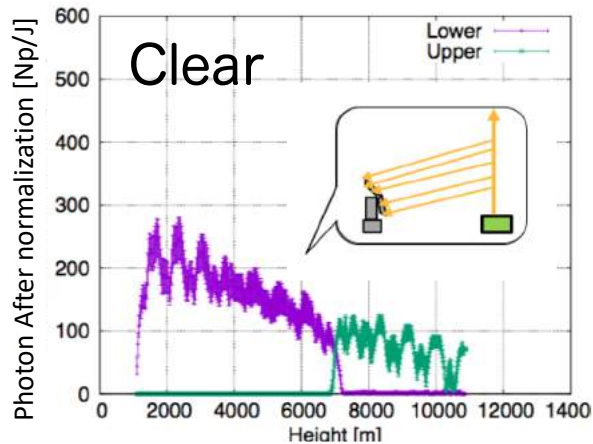
- 300shotsの積算波形をエネルギーで割る
▶ ノーマリゼーション
- 受光時間から散乱高度を導出


 基準大気イベント
 $Np_{ideal}(H)/E'$ の選定

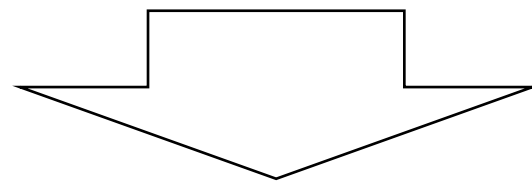
(基準大気) エアロゾルによる散乱を受けていない
5km以上の高度においても受光量が高い

▶ ノーマリゼーション後の受光量が高いイベントを基準大気と選定

雲によって受光量が影響を受けた例



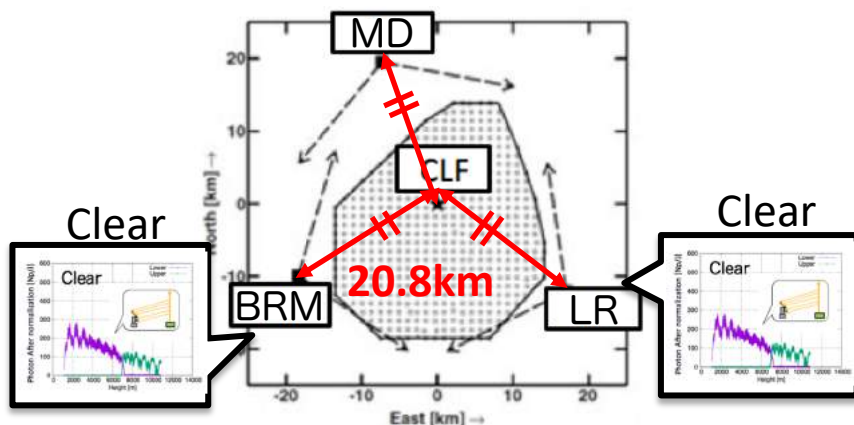
- 散乱点から伝搬途中の雲
▶ 遮蔽され光量小
- 光軸上の雲
▶ 散乱し光量大



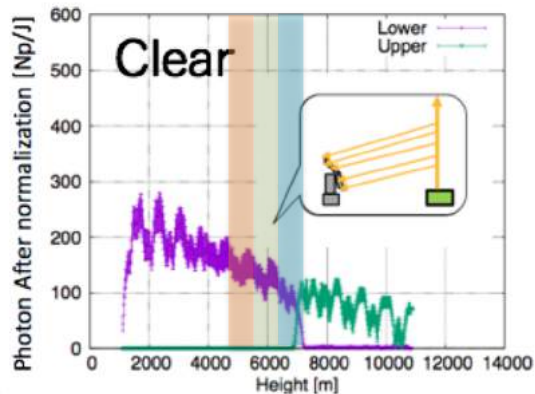
雲による影響を受けていない
CLF受光量データを抽出

アルゴリズム

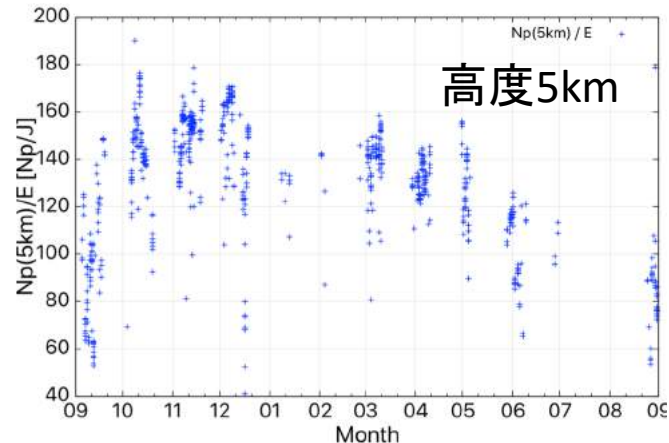
①別のFDステーションで受光量が高い



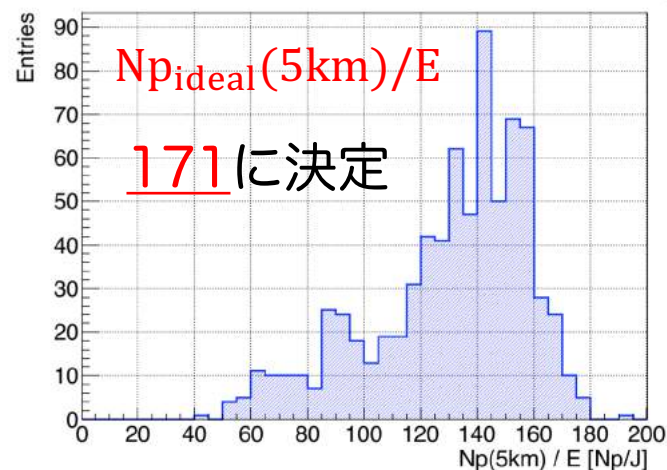
②別の高度でも受光量が高い



解析期間 1 年の $N_p(5\text{km})/E$ の分布

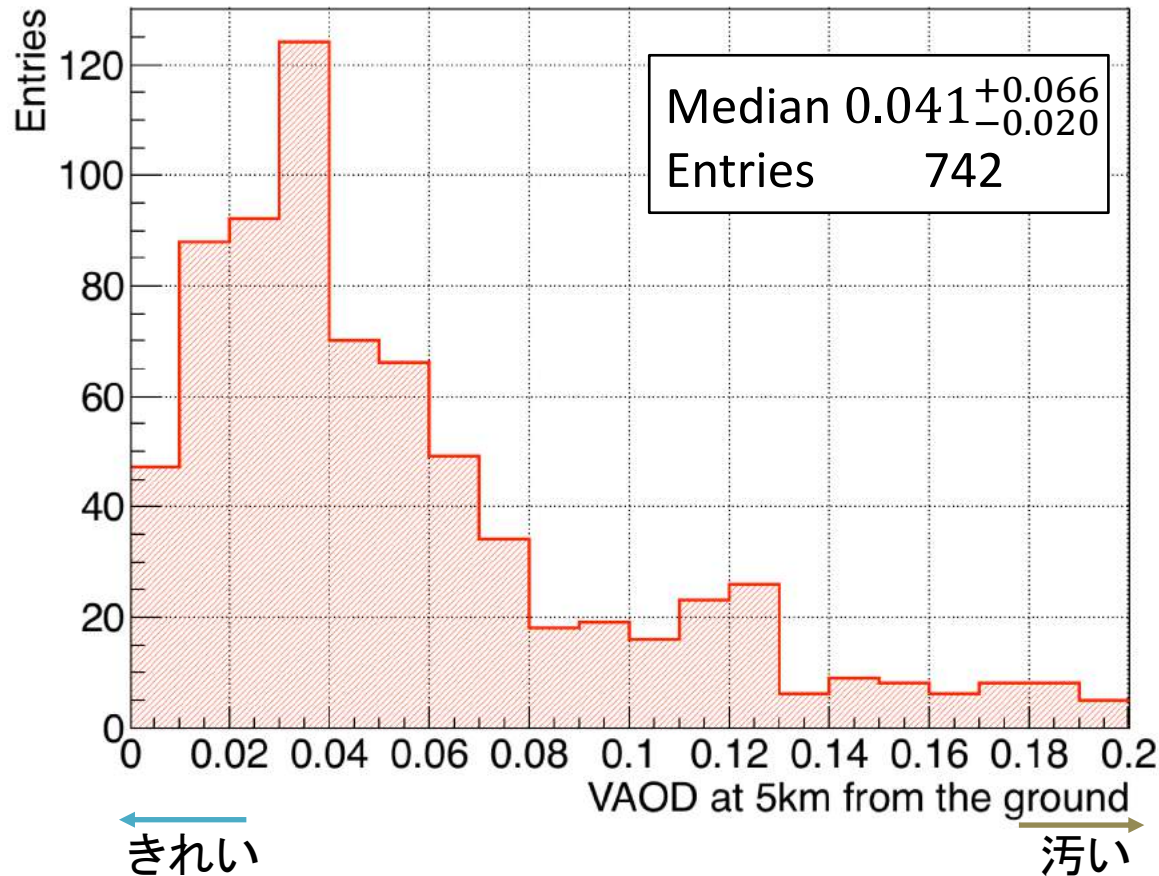


アルゴリズム



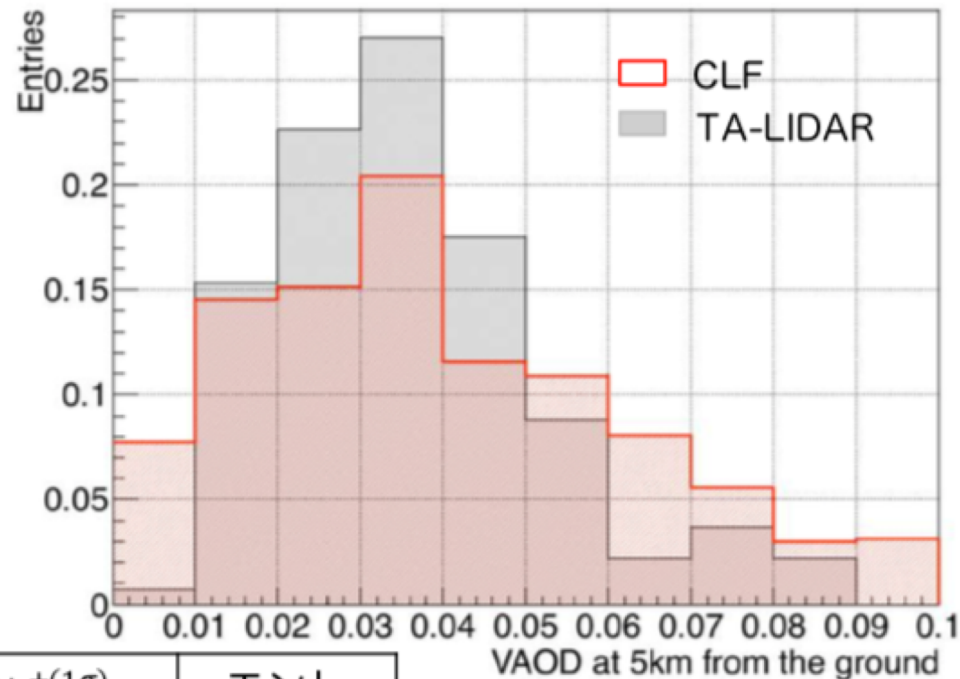
VAODの1年の分布

2015年9月～2016年9月
BRM 高度5km地点におけるVAOD分布



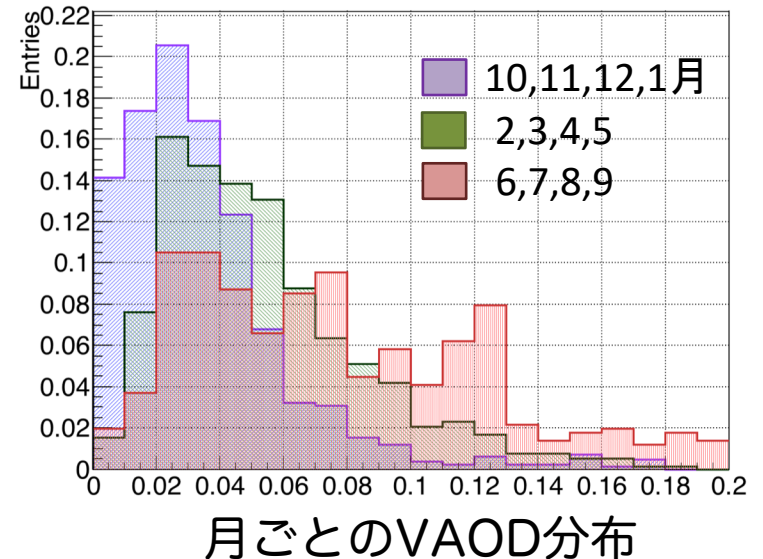
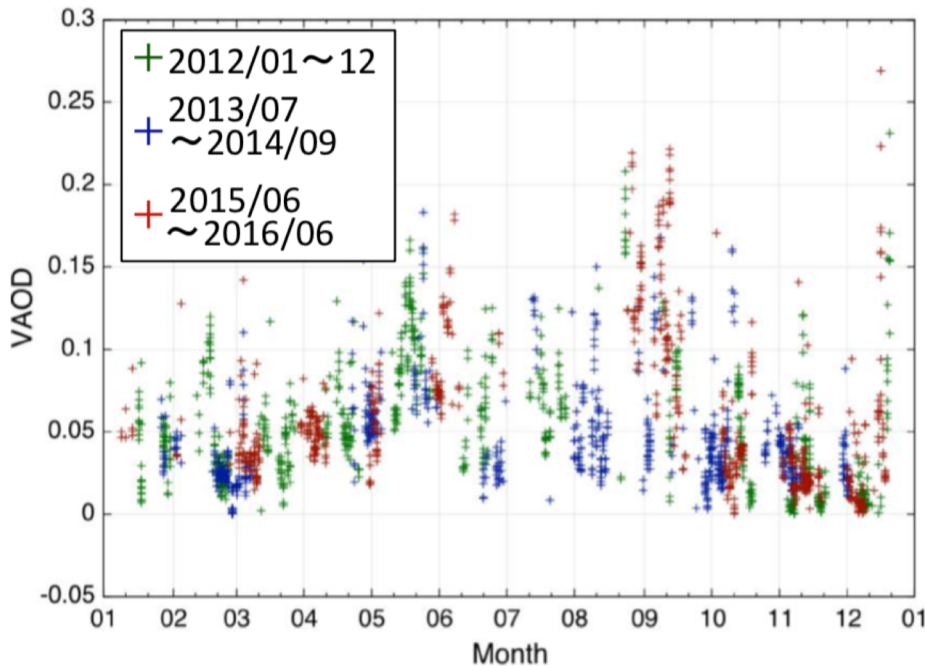
最頻値から山なりに密にVAOD分布を形成している

ヒストグラムを規格化 (VAOD<0.1)
vs. 現FD大気校正ライダーデータ (TA-LIDAR at BRM)
VAOD distribution of 1 year (VAOD < 0.1)



	中央値 ^{+(1σ)} _{-(1σ)}	エントリー数
CLF	0.036 ^{+0.027} _{-0.017}	742
TA-LIDAR	0.035 ^{+0.019} _{-0.013}	137

別の2つの解析期間, 計3年分のVAODの算出を行った



冬にVAODが低く, 夏にVAODが高い傾向
 ►今後, モデリングによる大気補正を検討

Telescope Array実験における バイスタティックライダーを用いた大気透明度測定

まとめ

目的：FD解析における宇宙線エネルギー決定精度の向上

▶ CLFシステムにおける大気透明度(VAOD)を算出,解析

VAOD解析：CLFシステムでのVAODは大気透明度として機能する値

- 現行のVAOD算出装置TA-LIDARの分布と相関

今後の展望

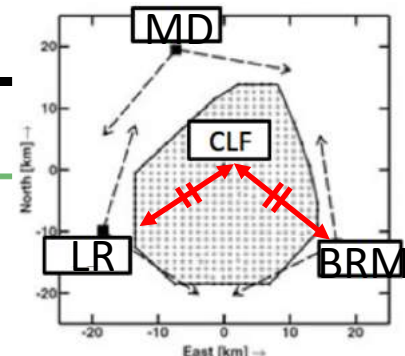
VAODによるFD宇宙線データに大気補正を行い,
宇宙線解析での大気影響における宇宙線エネルギーの
系統誤差の算出

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).

Back up

Vertical Aerosol Optical Depth(VAOD)

エアロゾルによる大気透明度(光学的厚さ)

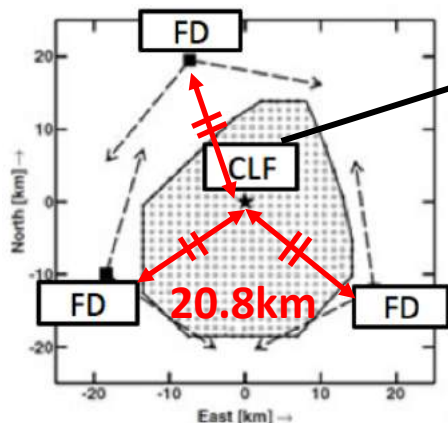


TA-LIDARシステム		CLFシステム FD配置図	
測定手法	現在 2年分の平均データを使用	研究対象 30分ごとのVAODが算出可能	
観測対象	後方散乱光	側方散乱光	
射出時間	2度(観測直前,観測直後)	観測時間内30分ごと	
観測方式	モノスタティック方式	バイスタティック方式	
観測域	FD1台	3台のFDで観測可能	



ここで、 $L_0 = \frac{L_G}{\sin 3^\circ}$ 、 $H_0 = L_G \tan 3^\circ$ なので

受光時間から
散乱位置Hが導出できる！



TA実験サイト

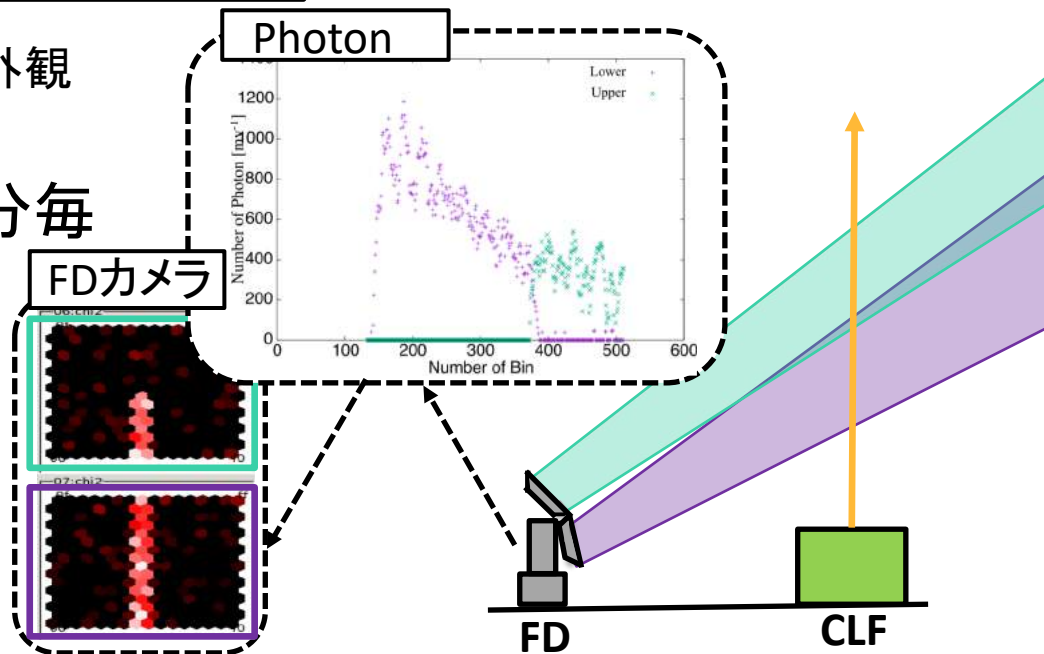


CLF外観

- ・各FDステーションから等距離に設置
- ・完全自動化
- ・バイスタティックライダー
(Observer->CLF, Receiver->FD)

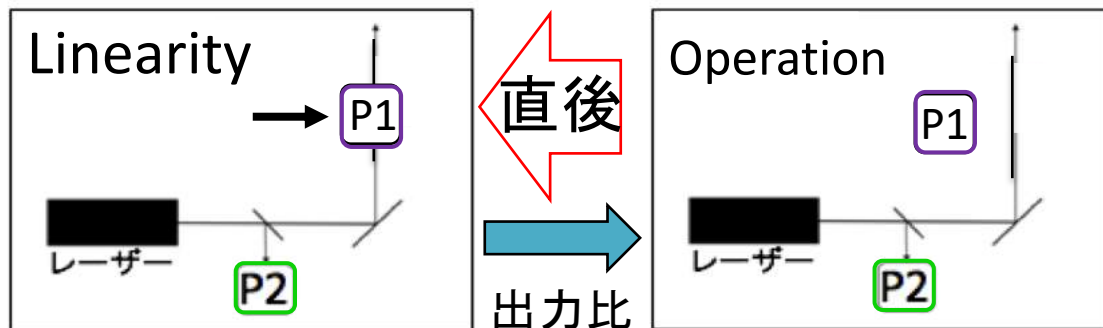
- ・遠隔操作により,FD観測中30分毎地面から垂直にレーザー射出

- ・30分毎、大気透明度測定
→ 気候の変化に対応可能



レーザーエネルギーの推定

$$\tau_{AS}(H) = -\frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} \log \left(\frac{Np(H)/E}{Np_{ideal}(H)/E'} \right)$$

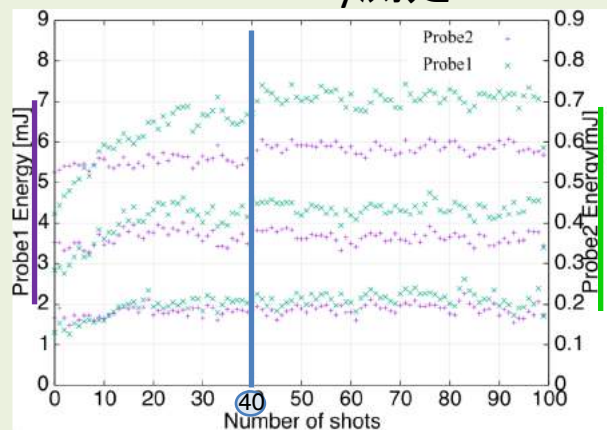


オペレーション時の
出力が不明

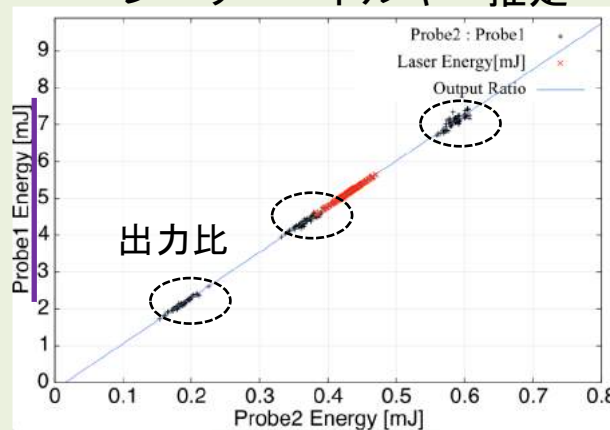
直後に2つのプローブ
出力比測定

オペレーション時の
Probe2の値から
エネルギーの推定

Linearity測定



レーザーエネルギー推定



出力比 = Prob1 / Probe2
レーザーエネルギーE(赤)
出力比 × Probe2(mJ)

レイリー散乱のみの大気は存在していない

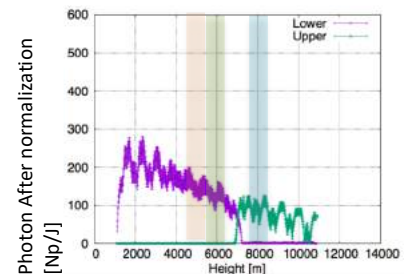
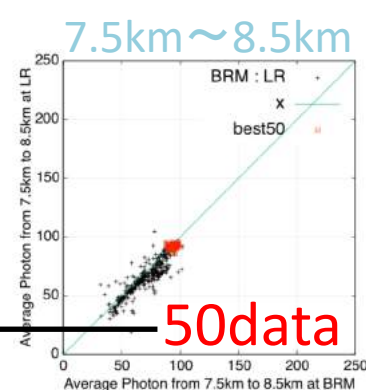
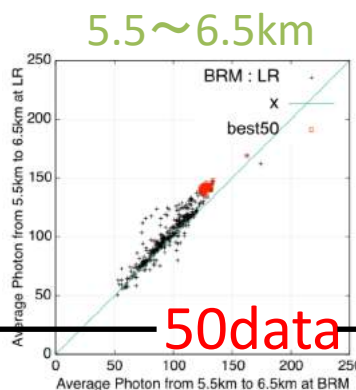
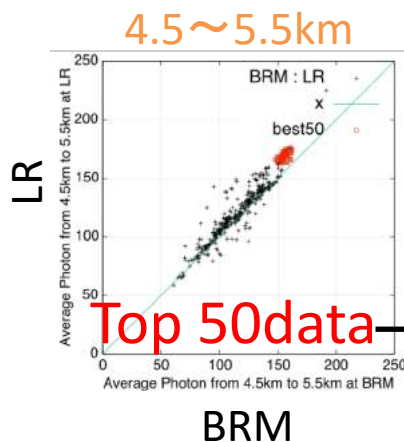
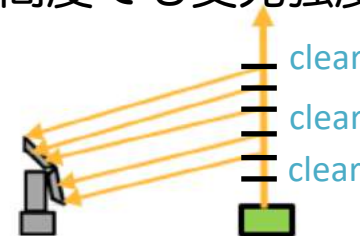
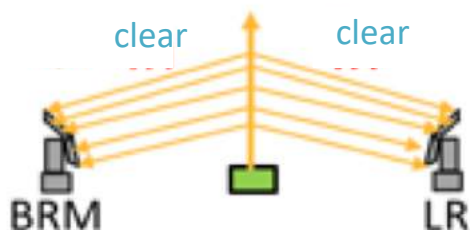
→CLFイベント中から基準大気の ($N_{pideal}(H)/E'$) の選定

1, BRM, LRともに大気が綺麗

▶ BRM, LRでともに受光強度が高い

2, 別の高度でも大気が綺麗

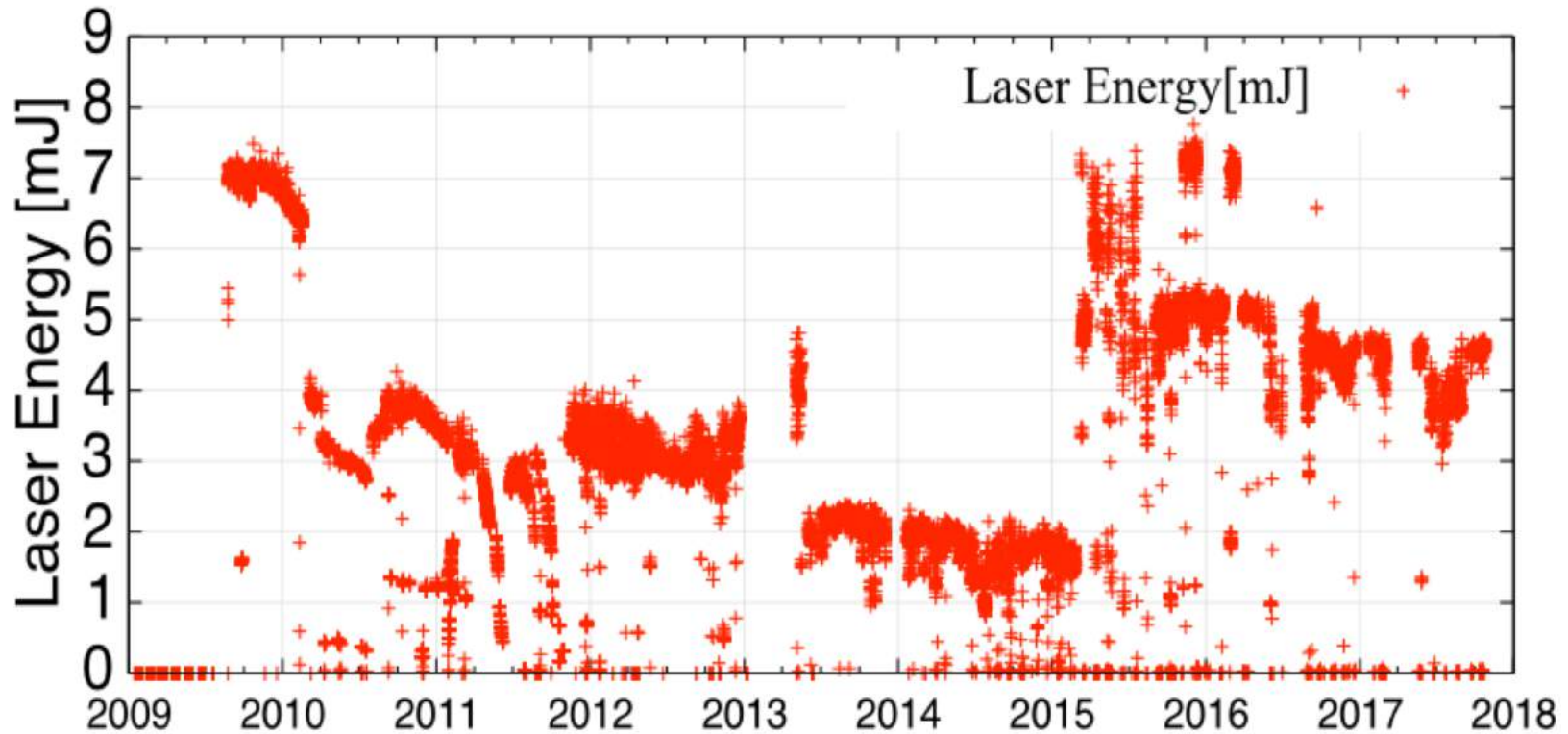
▶ 別高度でも受光強度が高い



抽出

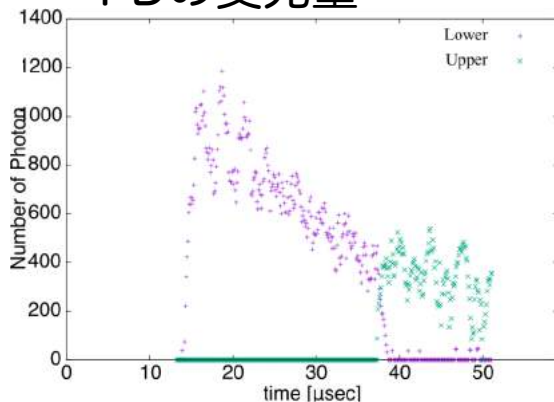
抽出データの中の N_p/E の上位10dataの中心値を $N_{pideal}(H)/E'$ とする

300shotsのレーザー出力の平均値分布

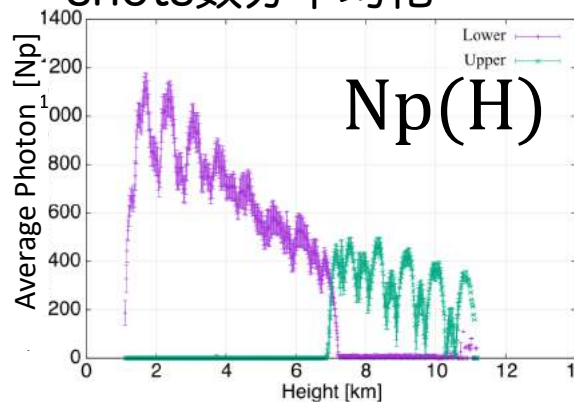


$$\tau_{AS}(H) = -\frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} \log \left(\frac{N_p(H)/E}{N_{p_{ideal}}(H)/E'} \right)$$

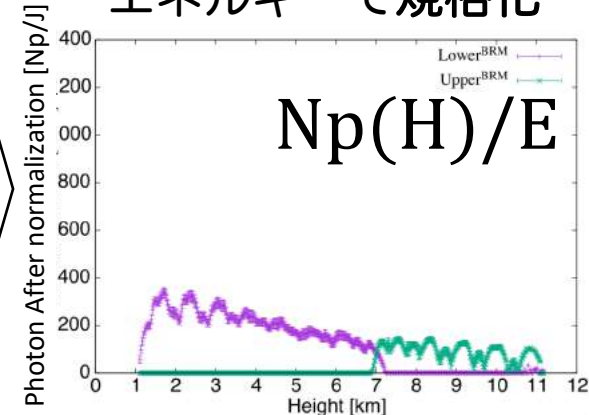
CLF1shotにおける
FDの受光量



FDで受光したCLFイベント
shots数分平均化



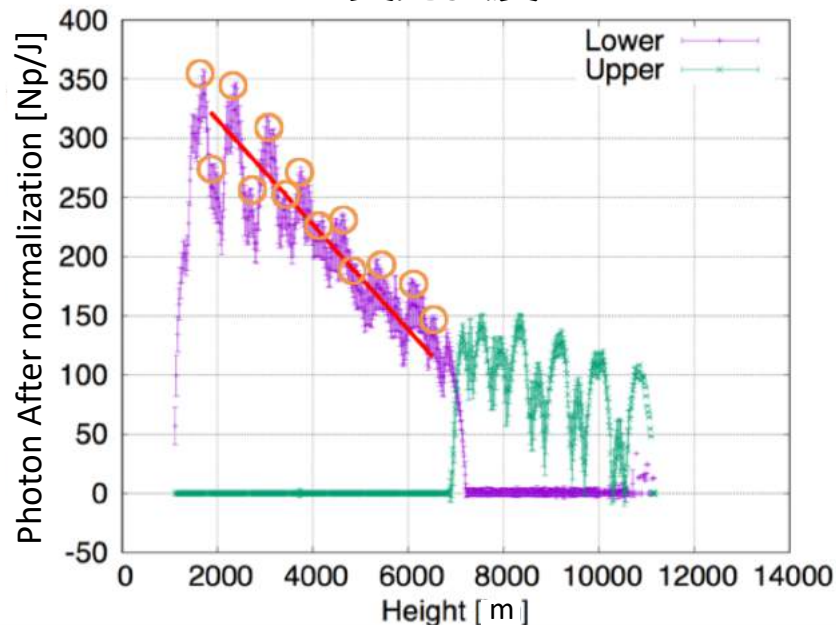
CLF射出時の
エネルギーで規格化



解析期間、全CLFイベントに対して、 $N_p(H)/E$ （全ての大気状態）を算出
比較の基準となる $N_{p_{ideal}}(H)/E$ （綺麗な大気状態）を選定

1mJあたりのFD受光量が高い ➡ エアロゾルの影響が少ない
基準となる大気 $N_{p_{ideal}}(H)/E$ とする

受光強度



Overcast , Cloud選別

特異な受光強度を判定

- ・ 受光強度の波形の立ち上がり
maxより大きい
→Overcast
- ・ 受光強度が0続く
→Cloud

Hazy , Partly cloud選別

- ・ ○ PMTを通った箇所(山)でフィッティングし、得られたフィッティング線に対する。受光強度、割合から薄雲を見つける。

選別結果例

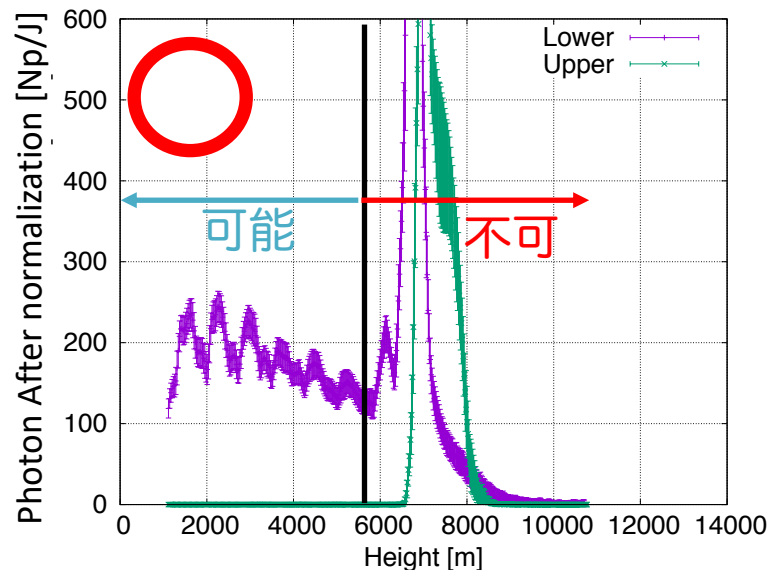
5km地点 解析可能CLFイベント

2012/01 BRM 1107data 755data 68%
 ~2013/01 LR 797data 541data 67%

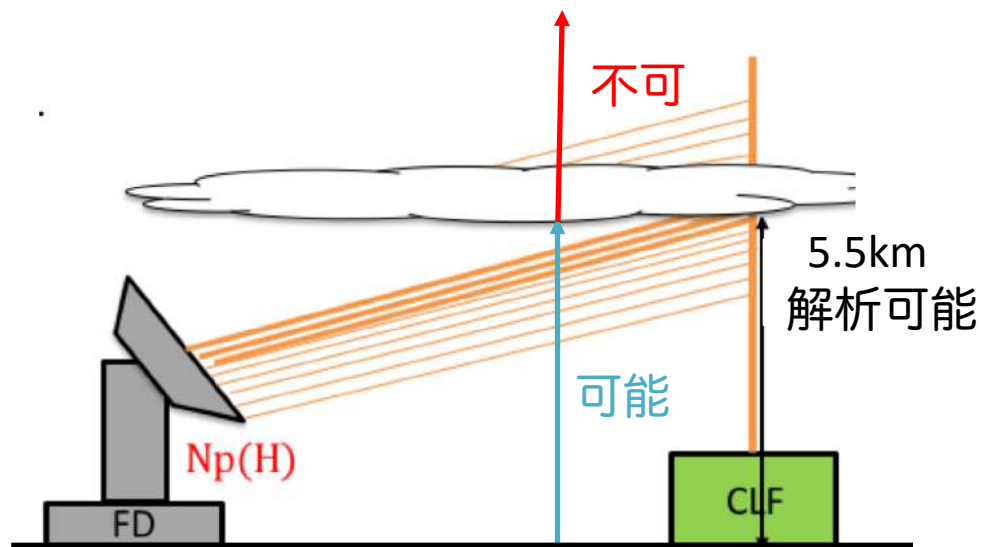
2015/09 BRM 1235data 780data 68%
 ~2016/09 LR 1352data 940data 70%

7割程度解析可能

光軸上に雲が存在する(Hazy)



例.高度6km付近に雲が存在

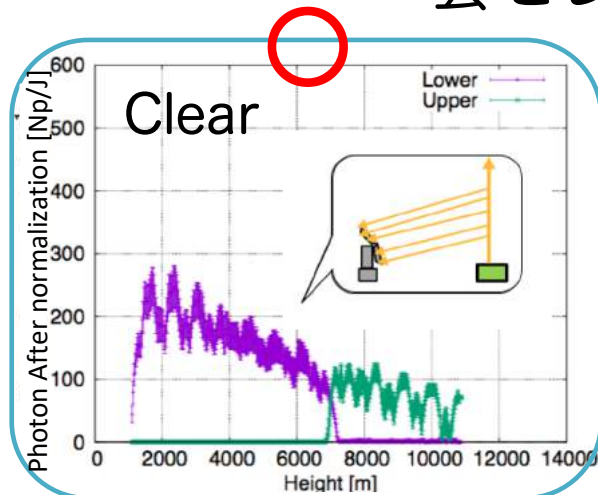


5.5kmまでは雲の影響を受けていない

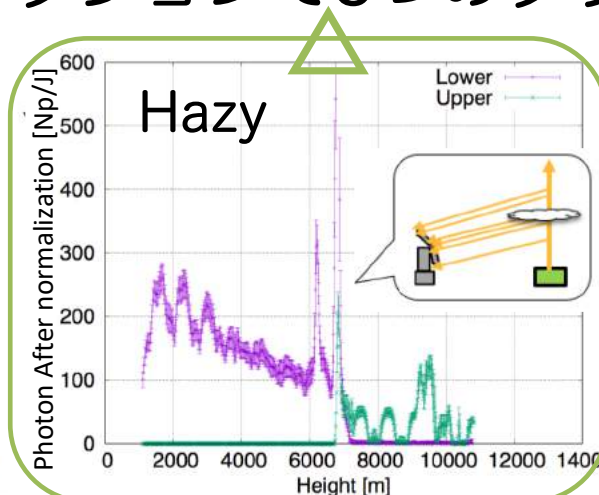
大気透明度によるFD大気校正を可能な限り行いたい

→受光強度から雲が存在する高さを記録し、
VAOD算出に使えるデータを抽出

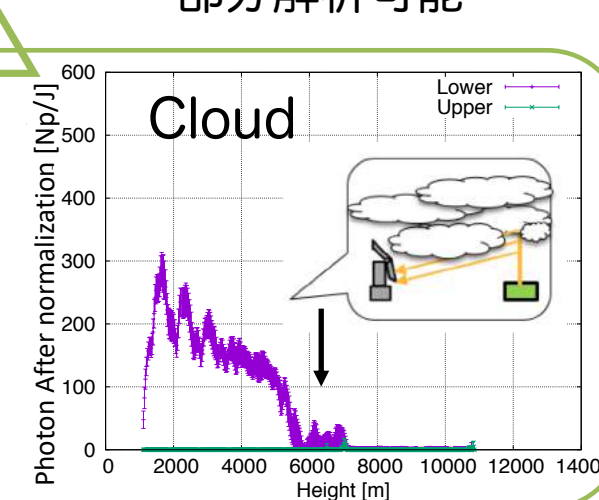
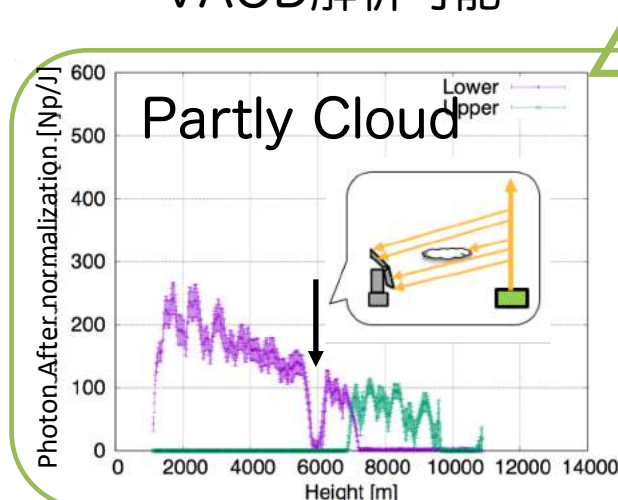
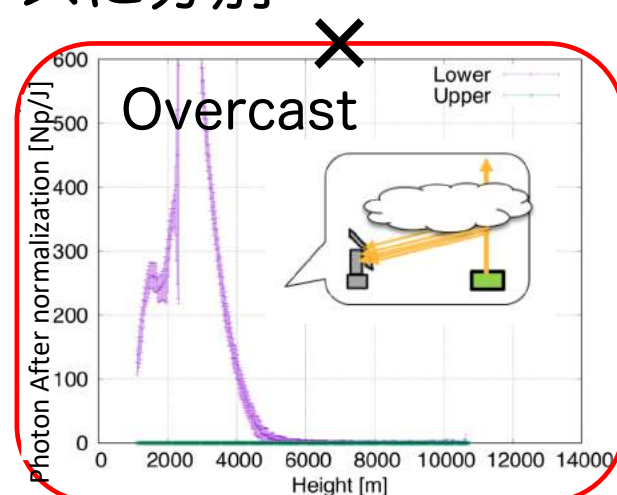
雲セレクションで5つのクラスに分別



VAOD解析可能



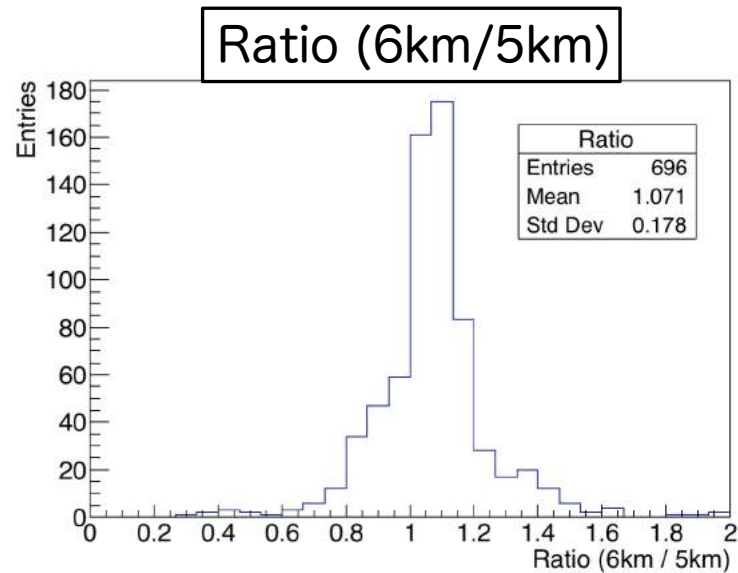
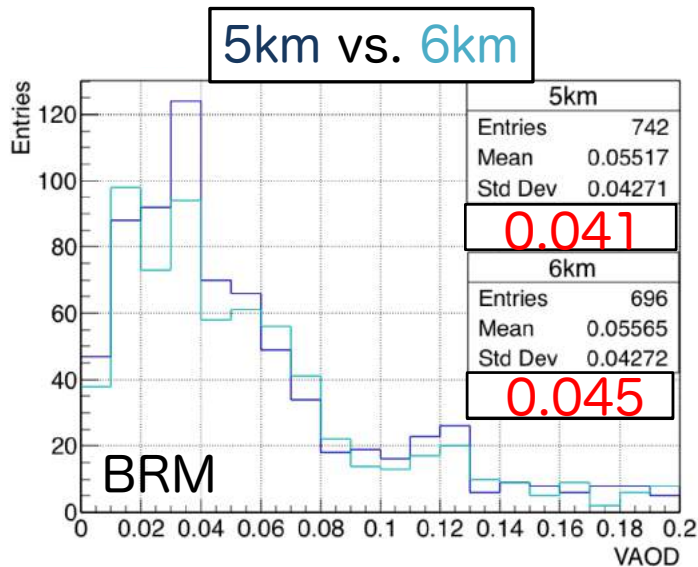
部分解析可能



部分解析可能

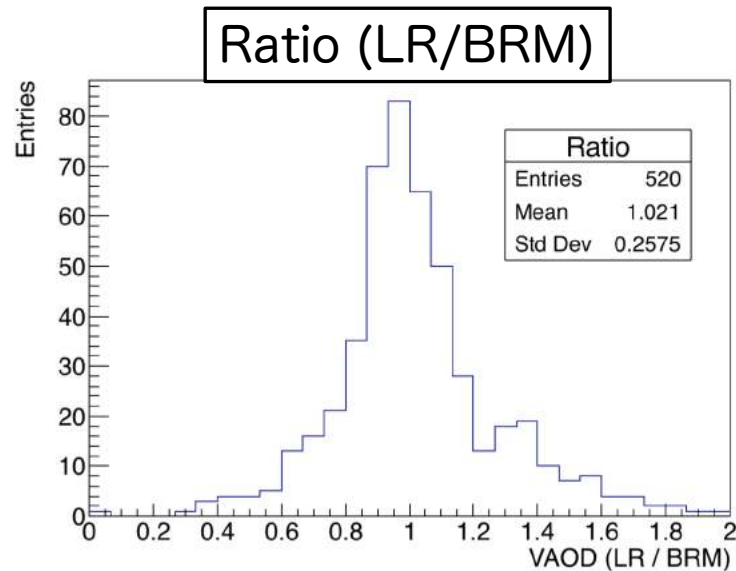
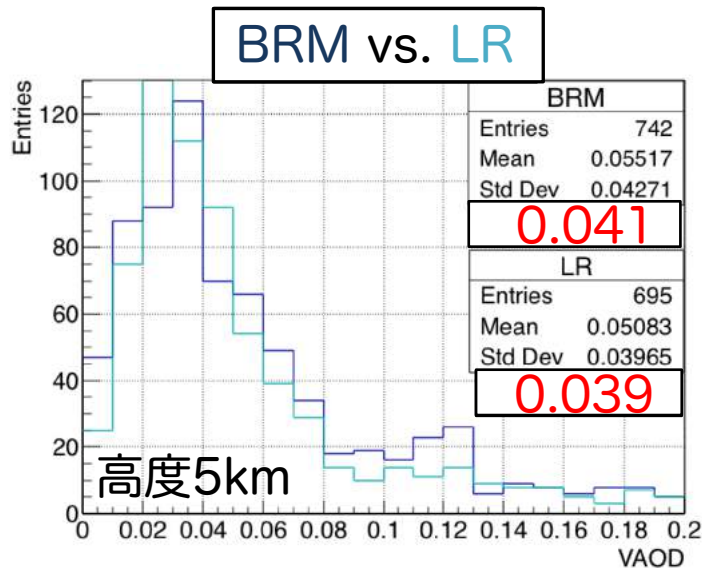
←VAODとしては汚い
観測環境が悪いことを
示すことができる。
有意な情報では??
VAOD算出を行う

高度5km以上において、大気分子の分布が支配的（TA-LIDAR）
 ▶5km以上の別高度でもVAODは同量である



別高度（ $H > 5\text{km}$ ）で同量程度のVAODが得られた

CLFから等距離に配置された3台のFD (BRM,LR,MD)
 ▶別ロケーションでもVAODは同量程度である

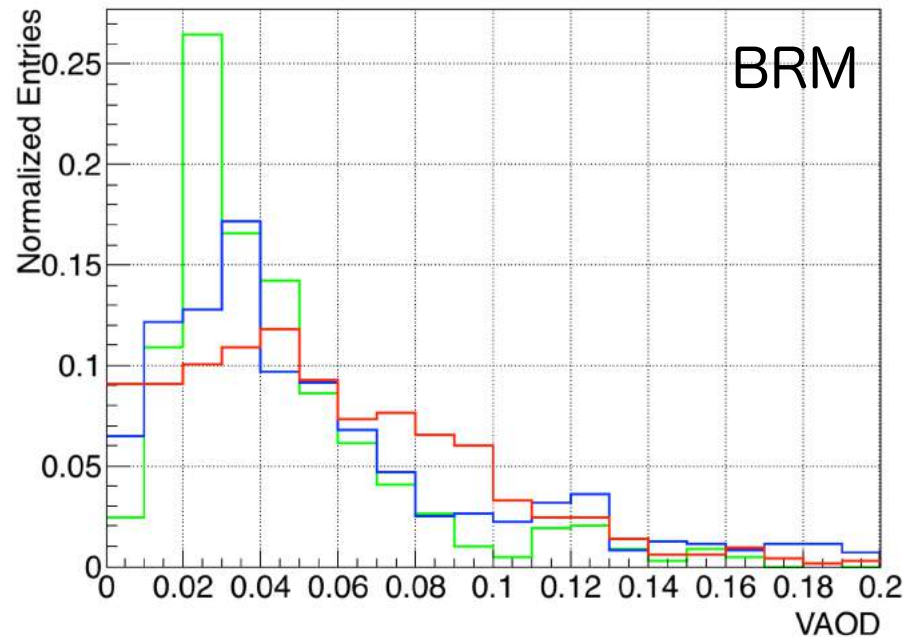


別ロケーションにおいて同量程度のVAOD

term2	5km	6km
BRM	0.048	0.053
LR	0.049	0.057

term3	5km	6km
BRM	0.035	0.041
LR	0.041	0.051

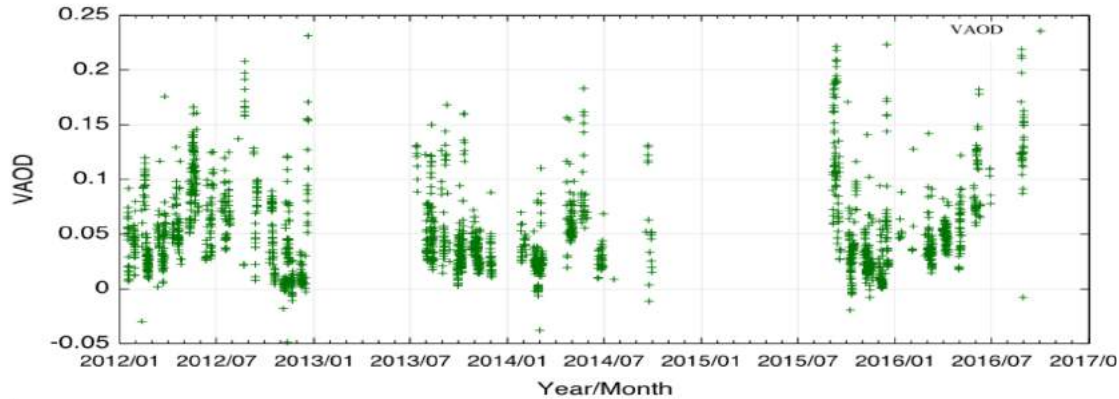
1年の解析期間でそれぞれ基準大気の値を選定
 ► 3年分のVAODを算出



BRM(5km)	VAOD中央値 ±分布幅 (1σ)	エントリー数
2012/01~2013/01	$0.048^{+0.011}_{-0.028}$	780
2013/07~2014/09	$0.035^{+0.007}_{-0.015}$	697
2015/09~2016/09	$0.041^{+0.011}_{-0.021}$	742

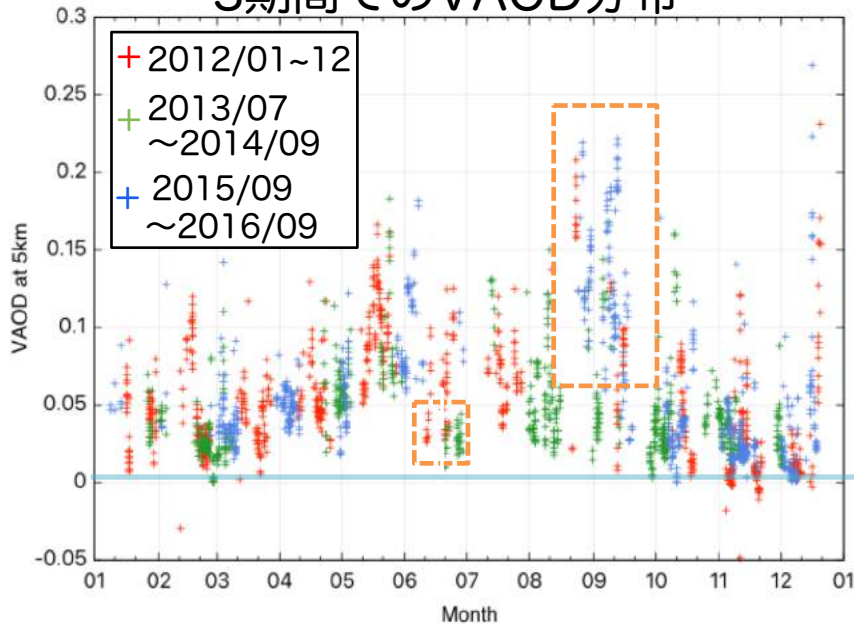
別解析期間でのVAODの
 最頻値,分布幅,分布の形に相関

1年でのVAODの遷移

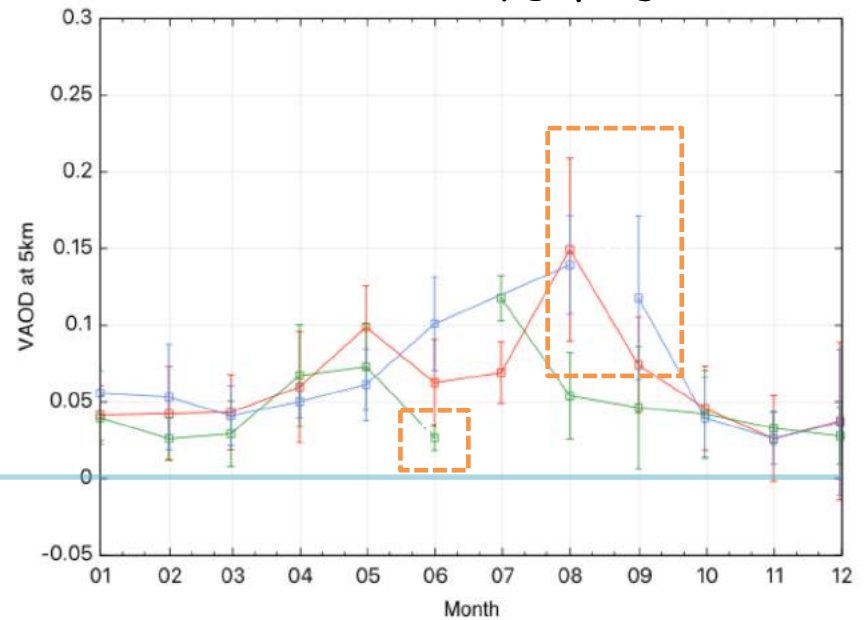


冬：低 夏：高
▶VAODの季節依存を示唆

3期間でのVAOD分布

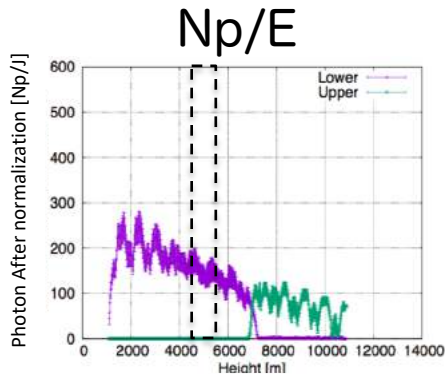


VAOD月平均



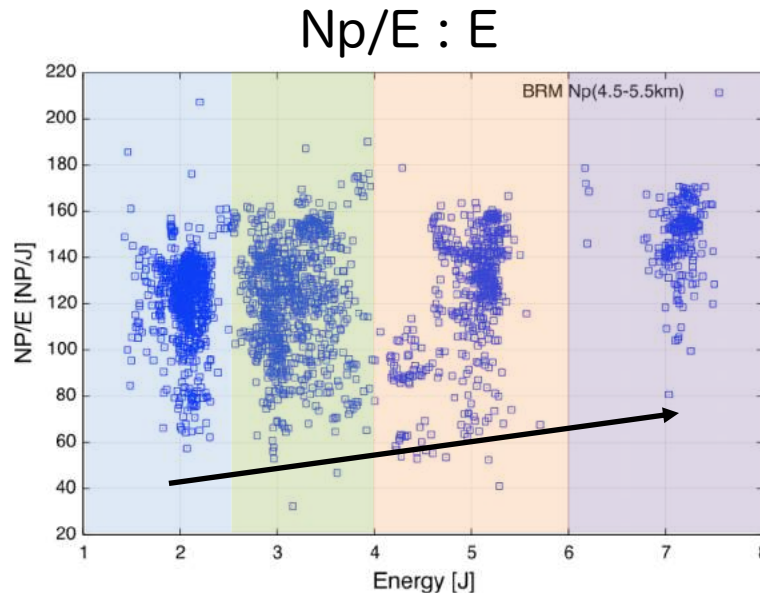
□ 本当に大気だけの影響のVAODなのか？

$$\text{VAOD } \tau_{AS}(H) = -\frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} \log \left(\frac{N_p(H)/E}{N_{pideal}(H)/E'} \right)$$



解析期間
3年分

受光強度(Np/E)を
4.5~5.5kmで平均



レーザーエネルギーの大きさによって
Np/Eが変化している
→確認が必要 (to do)

