

ドローン搭載型標準光源を用いた TA大気蛍光望遠鏡の較正

関 皓月

稲富大地, 富田孝幸, 多米田裕一郎*, 齊藤保典,
他 Telescope Array Collaboration

信州大学, *大阪電通大

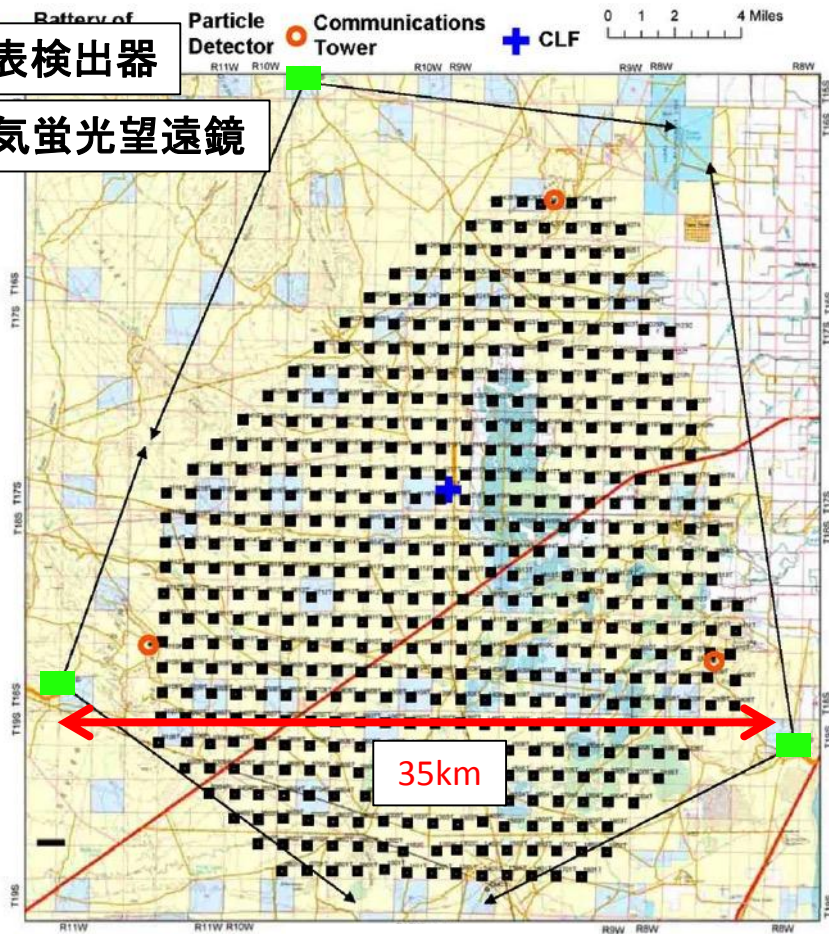
目次

- 背景・目的
- ドローン搭載型標準光源 (Opt-copter)
- 光源の仕様
- 高精度GPSによる測位
 - 地上での測位精度試験
 - 空中での測位精度試験
- 大気蛍光望遠鏡の較正
- まとめ・今後の予定

- 超高エネルギー宇宙線観測
- 米国ユタ州ミラード郡南西部砂漠地帯

■ 地表検出器

■ 大気蛍光望遠鏡



TA実験サイト

地表検出器 (SD)

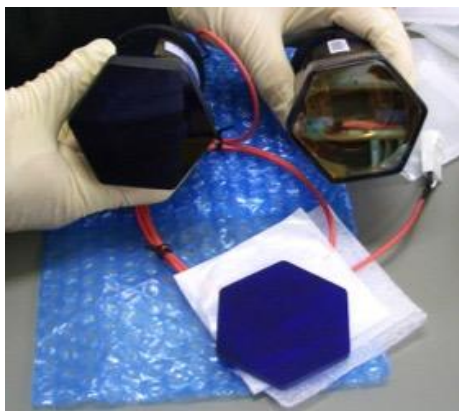
- 荷電粒子を観測
- 1.2km間隔
- 507台



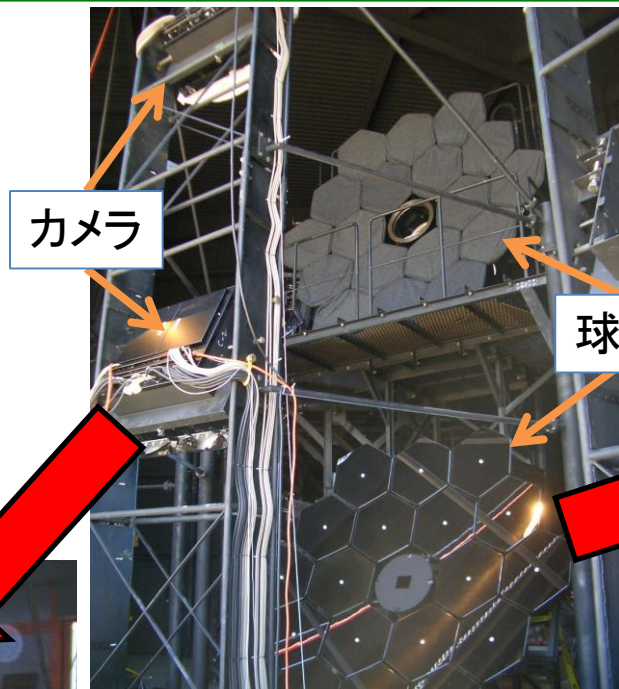
大気蛍光望遠鏡 (FD)

- 大気蛍光を観測
- 3箇所でのステーションに計38台



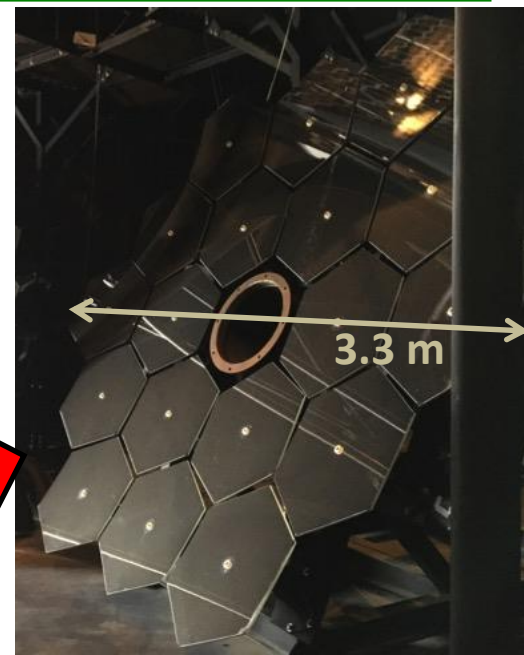


光電子増倍管 (PMT)
と
紫外線透過フィルター



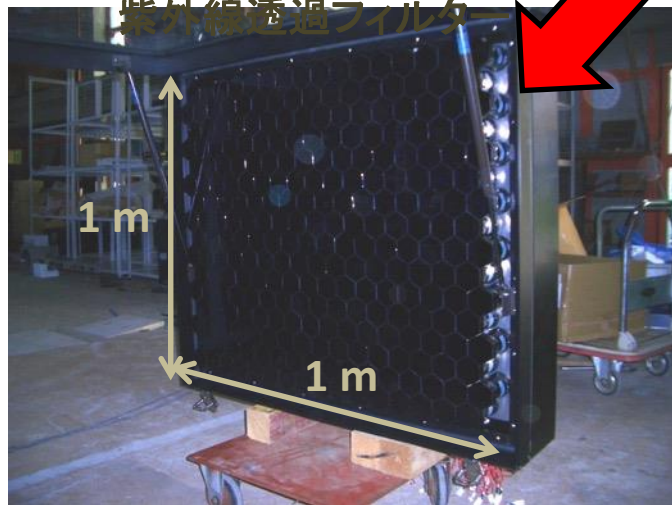
カメラ

球面鏡

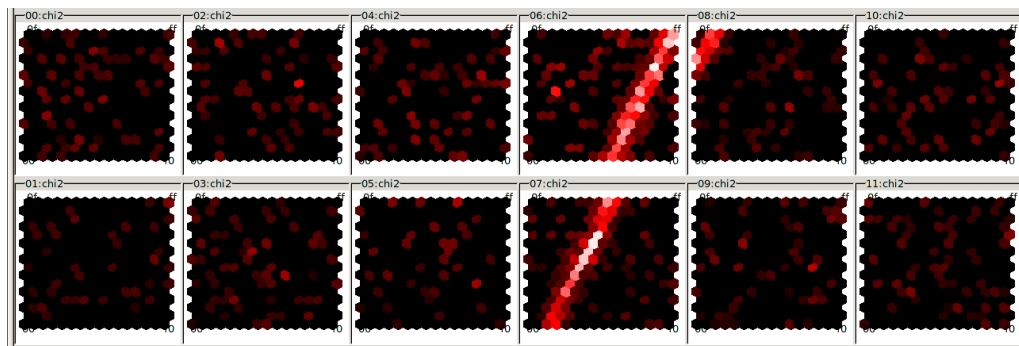


口径3.3 mの球面鏡

FDは上下に設置されている



16 × 16 計256本のPMTが
ハニカムアレイ状に並ぶ



実際にFDで観測された、観測視野内を通る空気シャワー

TA実験におけるFD較正方法

受光感度

- CRAYS: 標準PMTの較正
- YAP: 標準PMTのゲイン値モニタ
- Xe flasher: 各FDの全PMT相対ゲイン値モニタ

ジオメトリ

- 星の軌跡追尾(視野内に既知の星がないと較正できない)

課題

- 2ヶ所のFDステーション間のゲイン値差
- FDのより高精度なジオメトリ

2ヶ所のFDステーション間でのゲイン値比較と
能動的なジオメトリ理解には新規の較正装置が必要



ドローン搭載型標準光源の開発と運用

ドローン

+

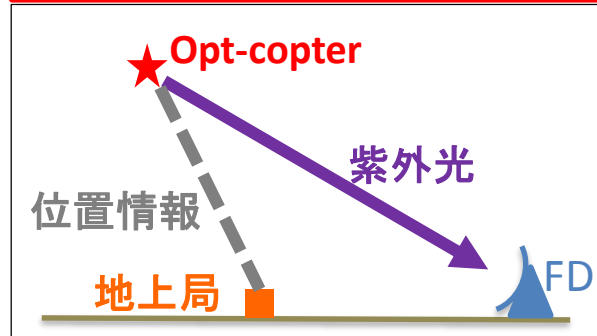
標準光源

+

高精度GPS

=

Opt-copter



観測イメージ



飛行の様子



Opt-copterから見たFDのイメージ

- 本体重量 : 4.4 kg
- 最大積載量 : 6.6 kg
- 飛行時間 : 11 分 (@16000mAh)

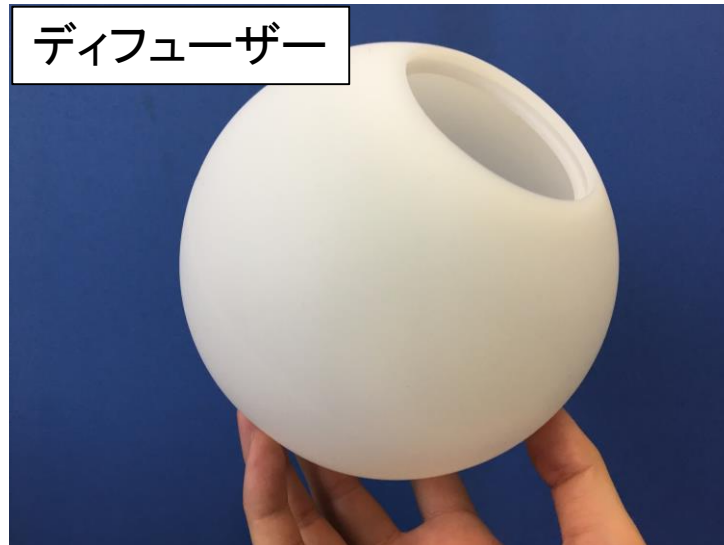
光源の構成要素

- ディフューザー・固定パーツ
 - 市販のペンダントライトの外装を使用
- UV-LED × 12
 - シリコン拡散レンズを持つUV-LED
- 12面体光源マウント
 - CADデータから3Dプリントして作成
- 駆動回路

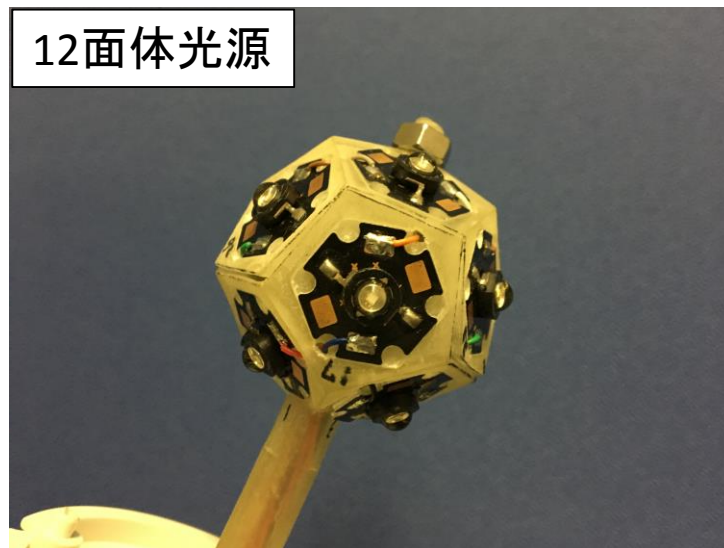
光源の性能

- ピーク波長 : 375 nm
- パルス幅 : 10 μ sec.

ディフューザー



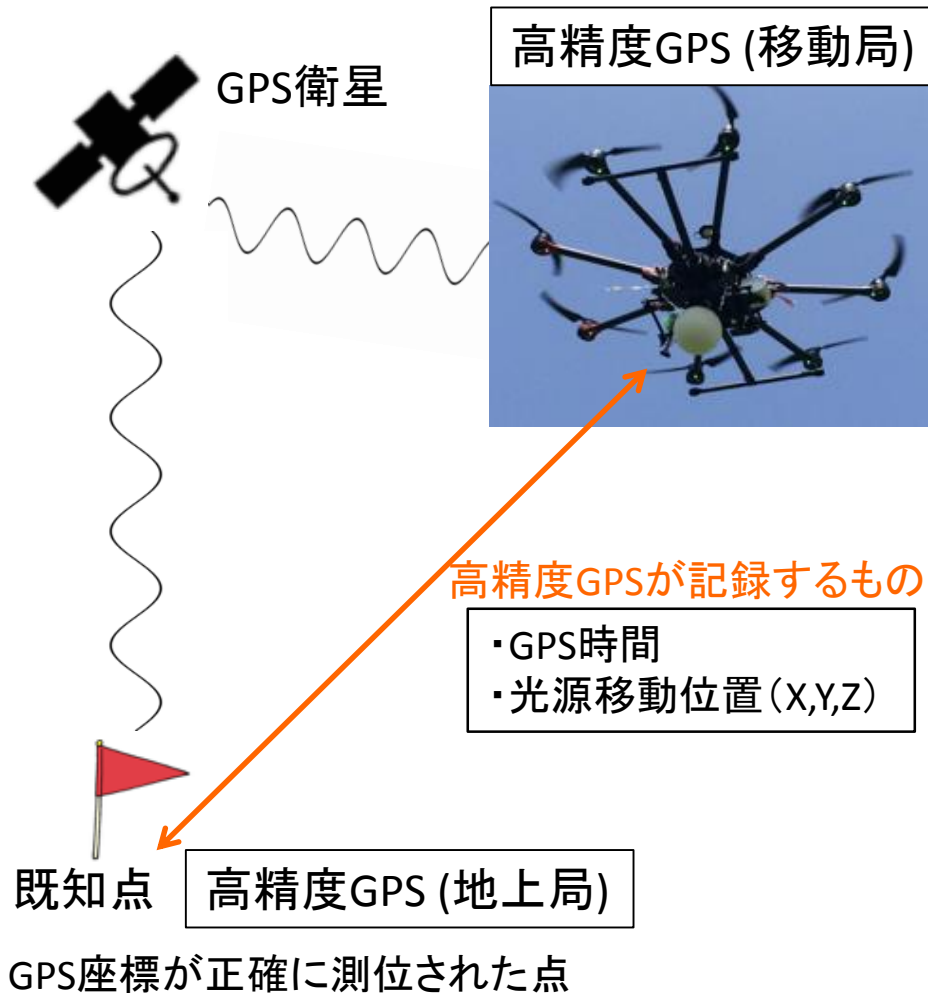
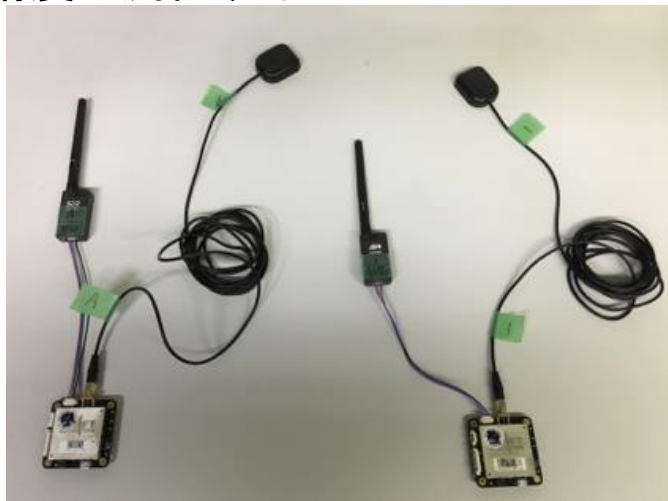
12面体光源



高精度GPS

- ・ RTK(Real Time Kinematics)測量
を利用した高精度GPS
- ・ GPSモジュール × 2(地上局、移動
局)

の相対的位置関係を±0.1 mの
精度で測位する



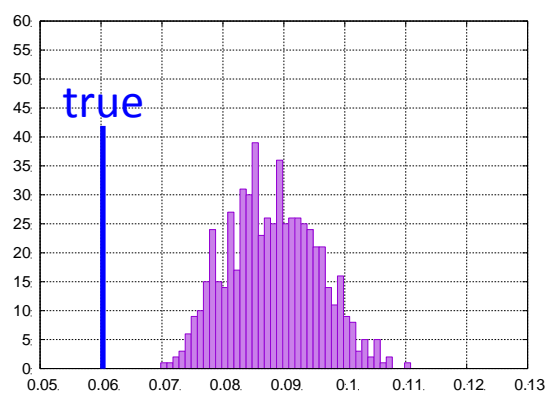
水平方向の試験



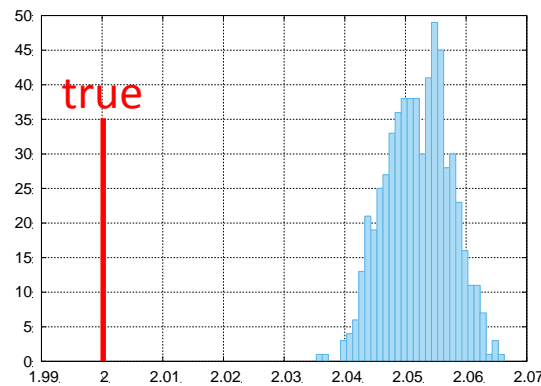
移動
➔



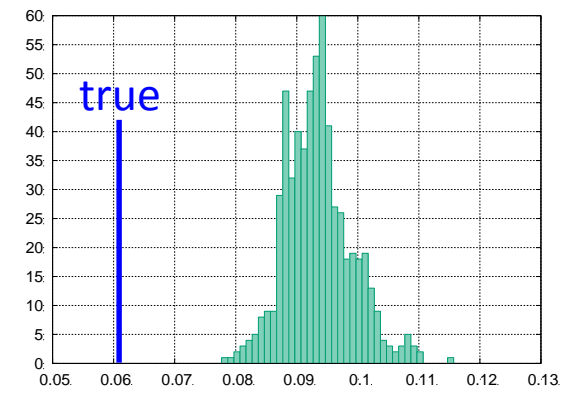
移動
➔



True	: 0.06 m
Average	: 0.09 m
Standard dev.	: 0.007 m
Maximum	: 0.11 m
Minimum	: 0.07 m



True	: 2.00 m
Average	: 2.05 m
Standard dev.	: 0.005 m
Maximum	: 2.07 m
Minimum	: 2.04 m



True	: 0.06 m
Average	: 0.09 m
Standard dev.	: 0.005 m
Maximum	: 0.12 m
Minimum	: 0.08 m

水平方向の精度試験結果

	true	Ave.	σ	Max / Min	true - Ave.	true - (Max or Min)
移動前	0.06	0.09	0.007	0.11 / 0.07	-0.03	-0.04
移動先	2.00	2.05	0.005	2.07 / 2.04	-0.05	-0.07
移動後	0.06	0.09	0.005	0.12 / 0.08	-0.03	-0.06

垂直方向の精度試験結果

	true	Ave.	σ	Max / Min	true - Ave.	true - (Max or Min)
移動前	0.01	0.00	0.02	0.05 / -0.05	+0.01	-0.04
移動先	0.24	0.28	0.01	0.32 / 0.24	-0.04	-0.08
移動後	0.01	-0.02	0.01	0.02 / -0.06	+0.03	-0.07

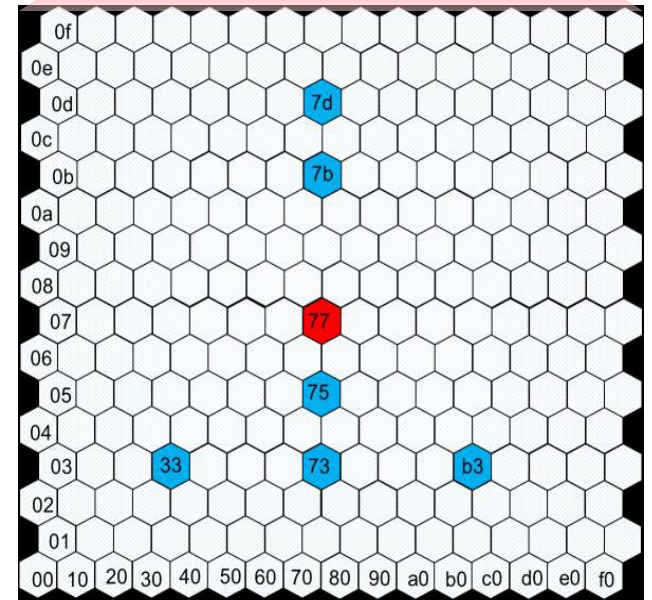
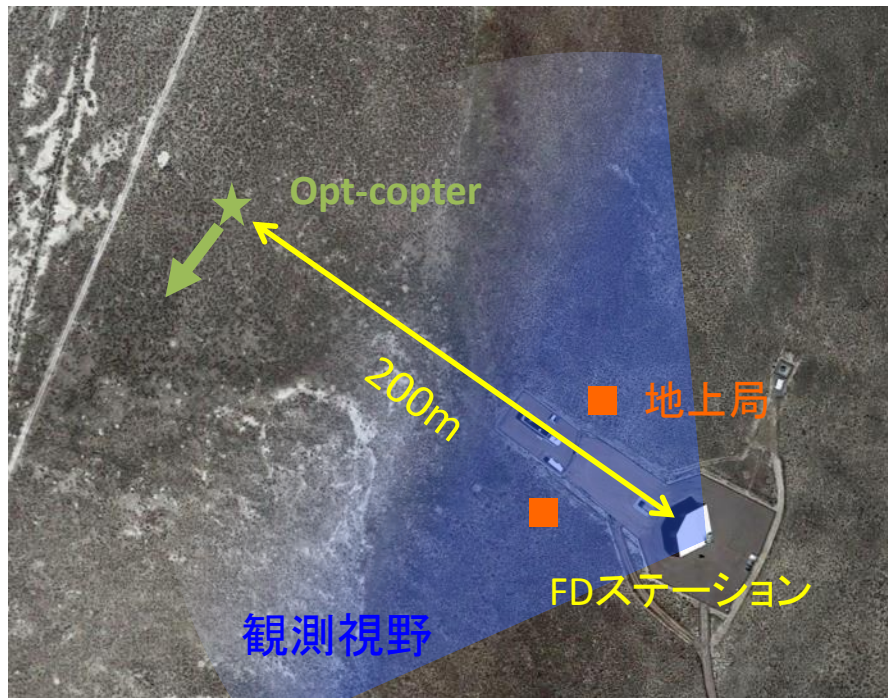
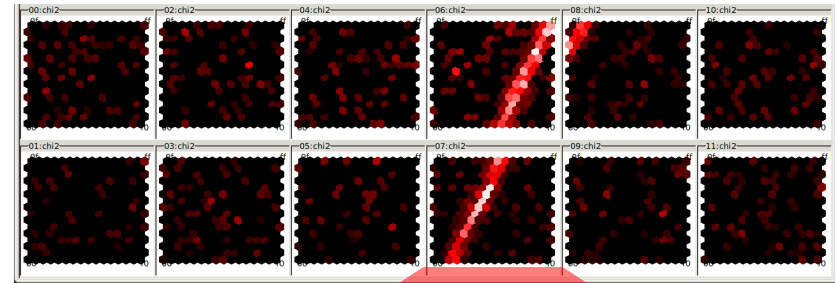
結果

- 水平方向の精度：±0.07 m
- 垂直方向の精度：±0.08

SHINSHU UNIVERSITY 空中での測位精度試験

- 日時：2017年1月
- 場所：アメリカユタ州TA実験サイト
(Black Rock Mesaステーション)
- 内容：
 - ❖ Opt-copterが発した紫外光をFDで観測
 - ❖ 飛行位置を高精度GPSで記録

FDステーションが持つ観測視野(FD × 12)

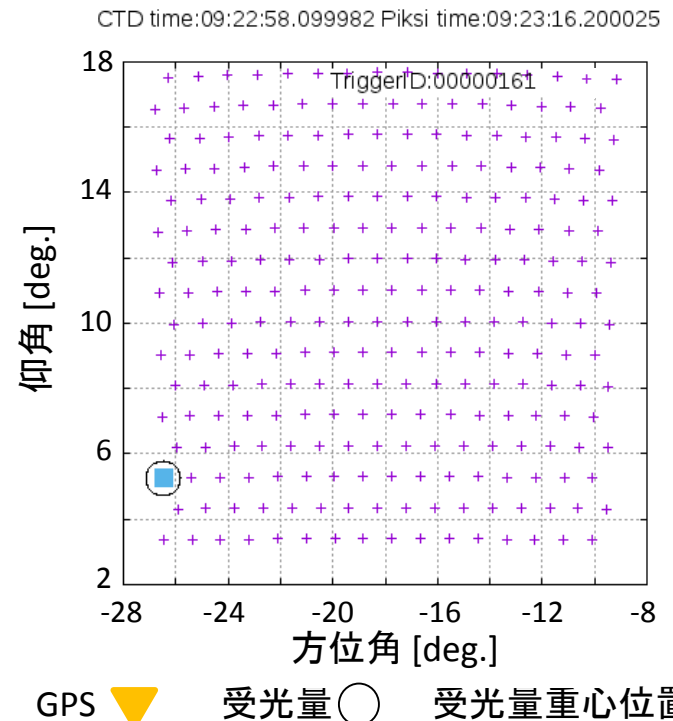
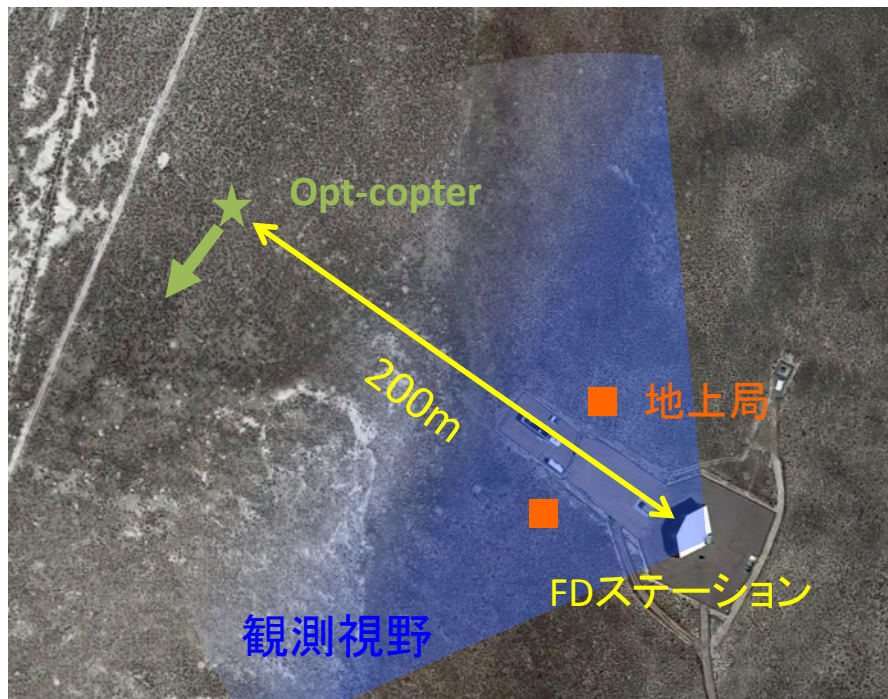
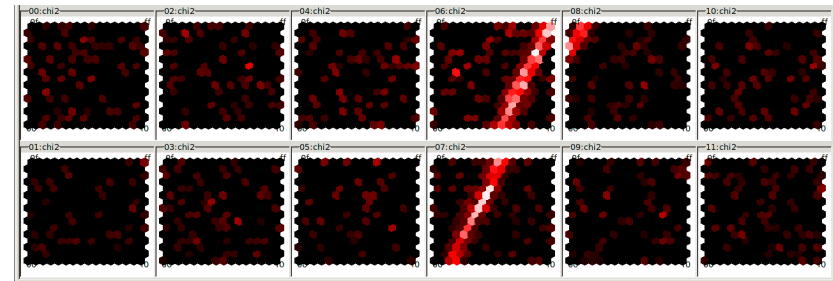


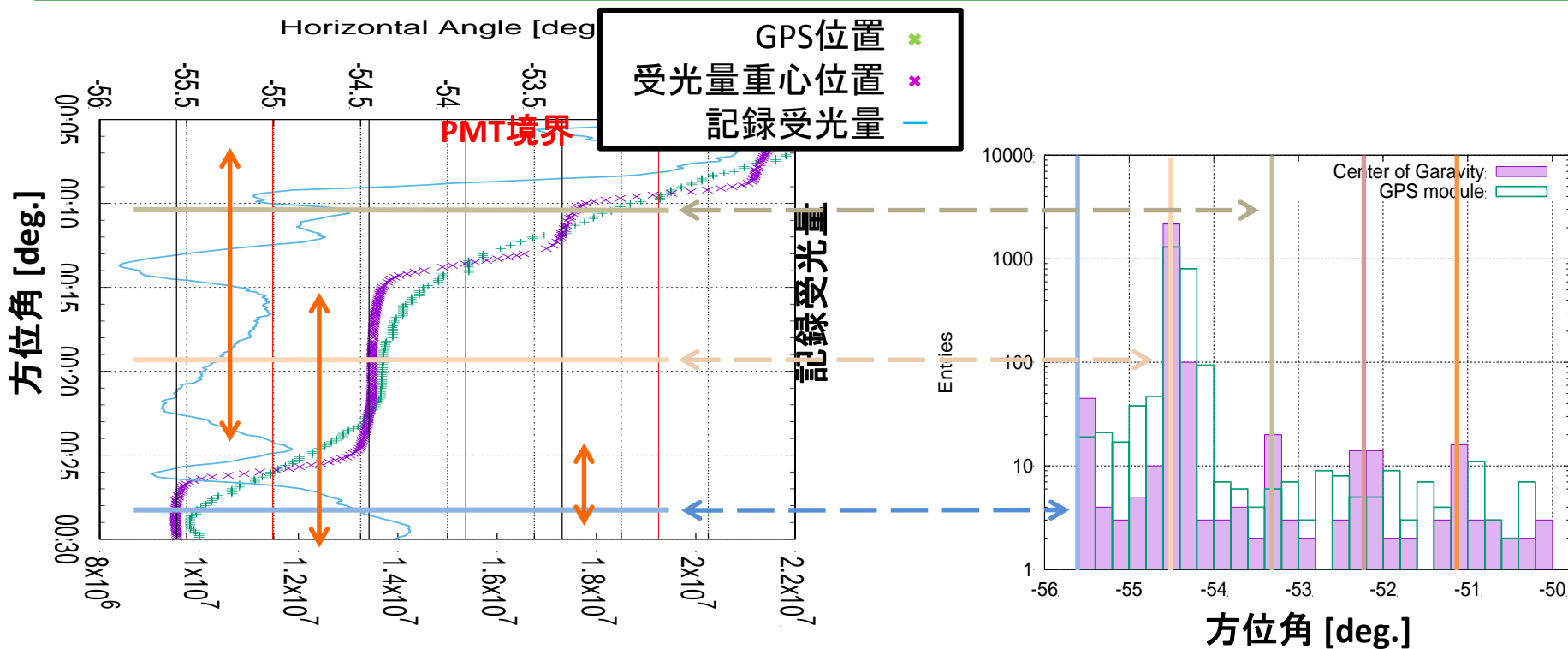
ハニカムアレイ状に並ぶ256本のPMT

SHINSHU UNIVERSITY 空中での測位精度試験

- 日時：2017年1月
- 場所：アメリカユタ州TA実験サイト
(Black Rock Mesaステーション)
- 内容：
 - ❖ Opt-copterが発した紫外光をFDで観測
 - ❖ 飛行位置を高精度GPSで記録

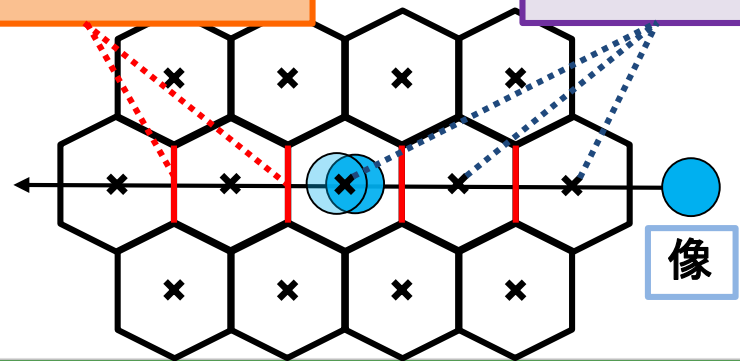
FDステーションが持つ観測視野(FD × 12)



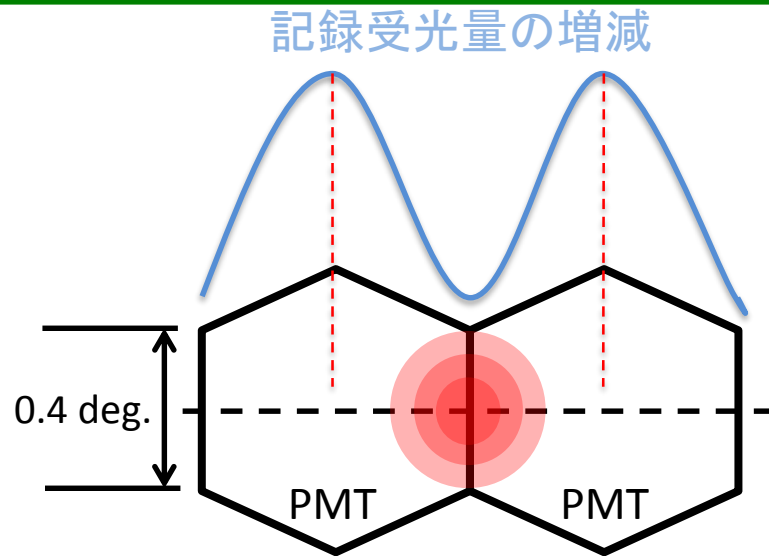
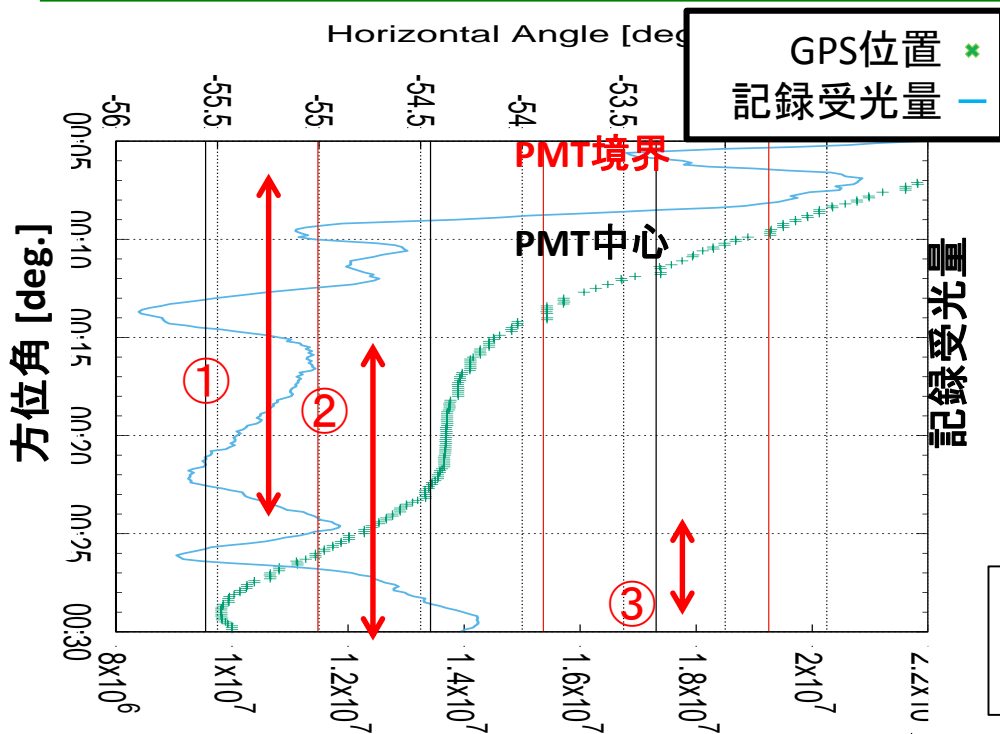


像がPMT境界を通過する時、記録受光量低下

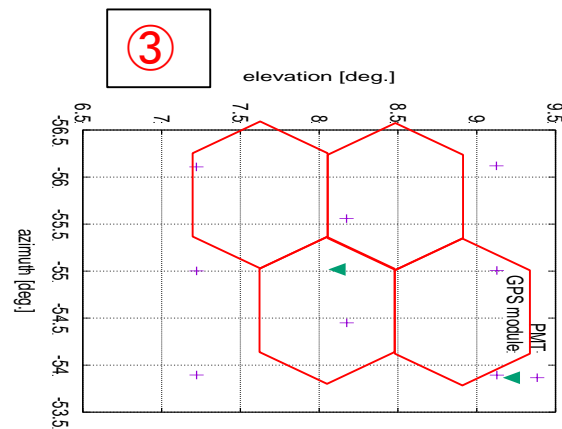
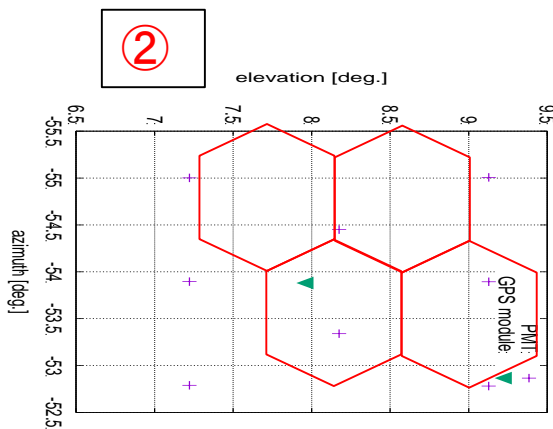
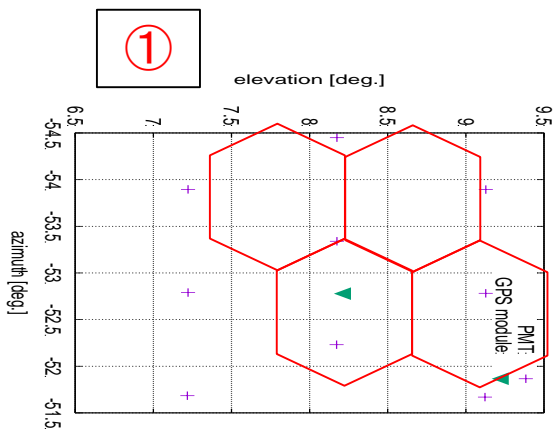
受光量重心はPMT中心付近に記録



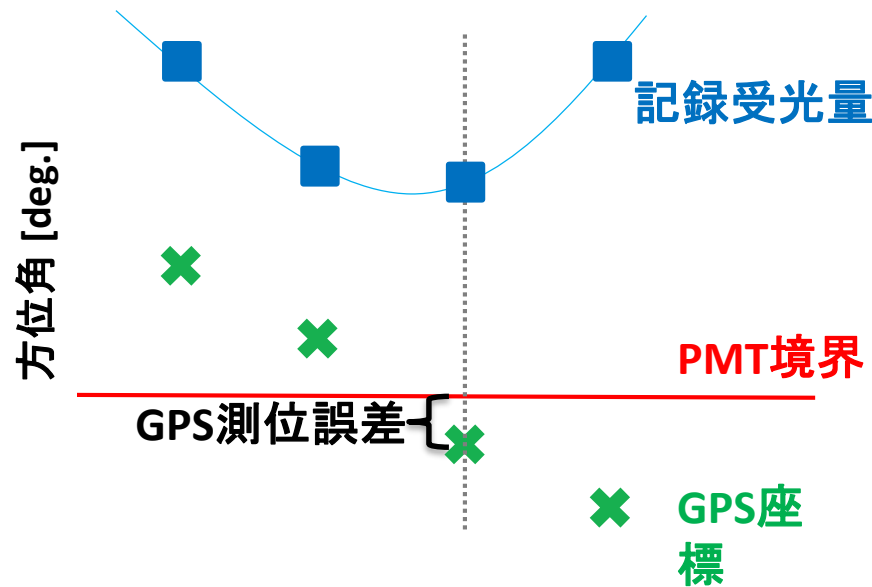
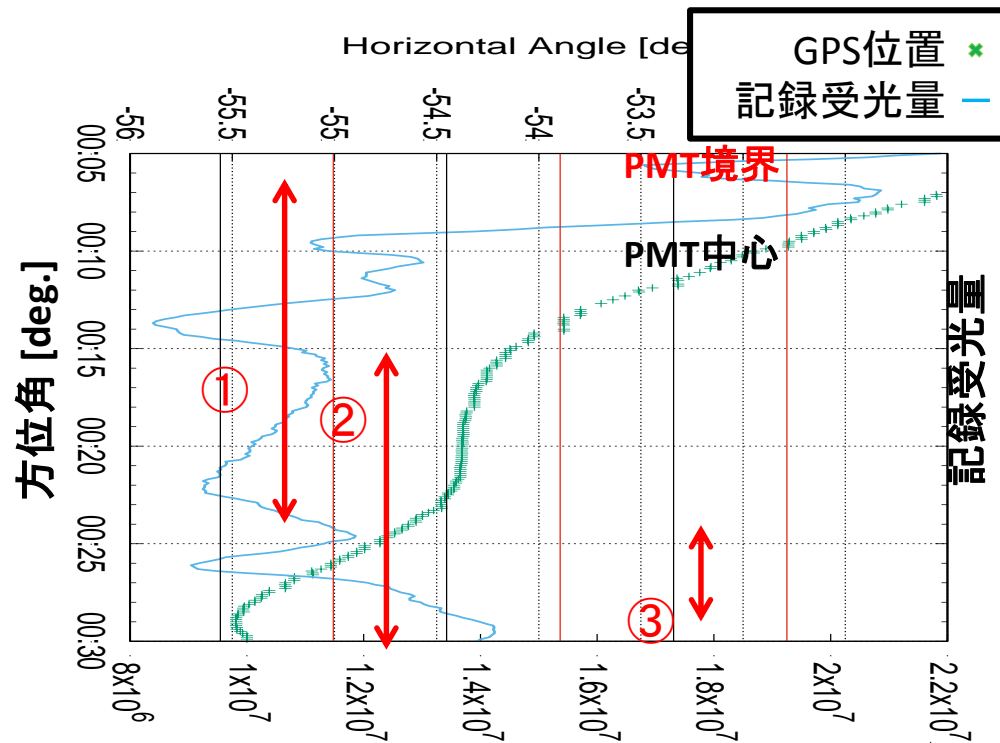
GPS位置と記録受光量の関係



- スポットサイズはPMT感面より小さい
- 各PMTの表面感度がー様



記録受光量が低下 ⇒ 像がPMT境界上に存在



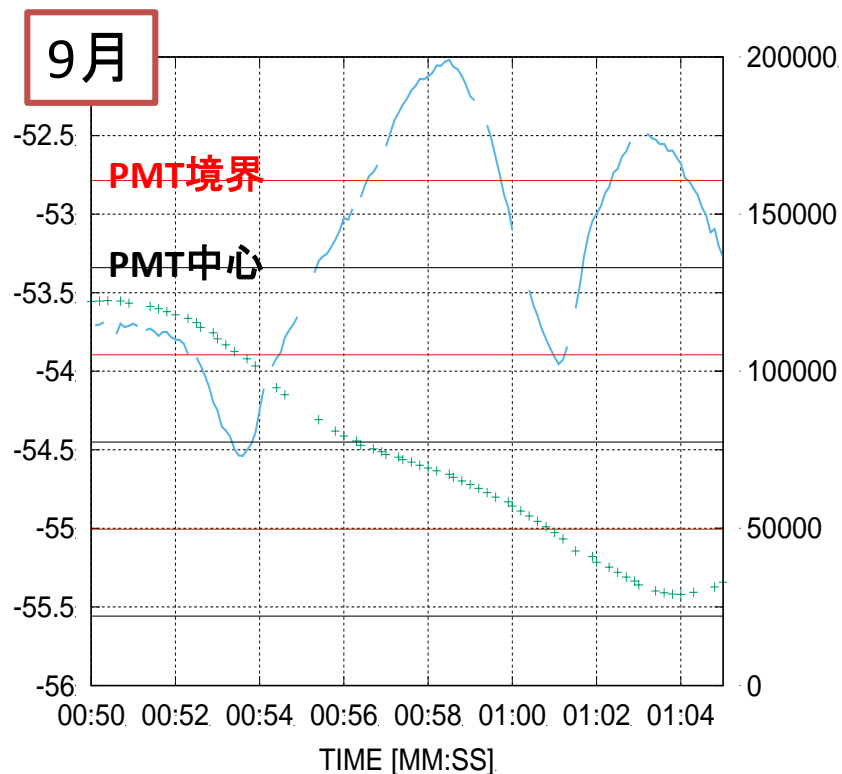
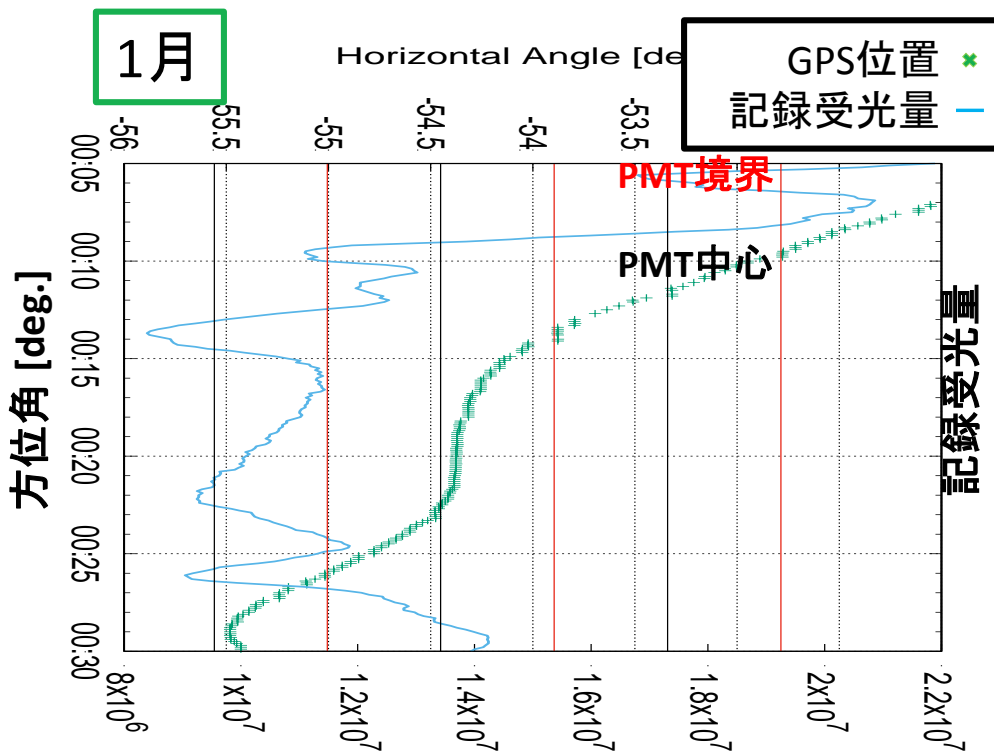
1月	測位誤差[deg.]
①	0.017
②	0.005
③	0.016

空中でのGPS測位精度 $0.017^\circ \Rightarrow \pm 5.9 \text{ cm}$ (200 m)
 $\Rightarrow \pm 8 \text{ cm}$

地上でのGPS測位精度

空中でも高精度で光源位置を測位できている

冬(2017.1)と夏(2017.9)のデータを比較



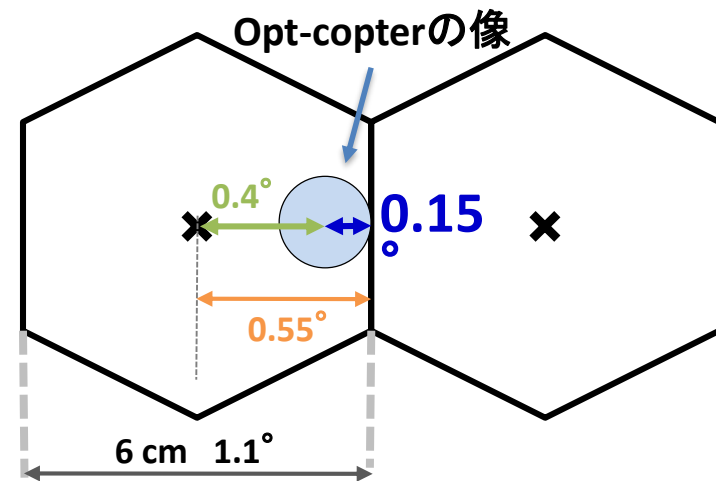
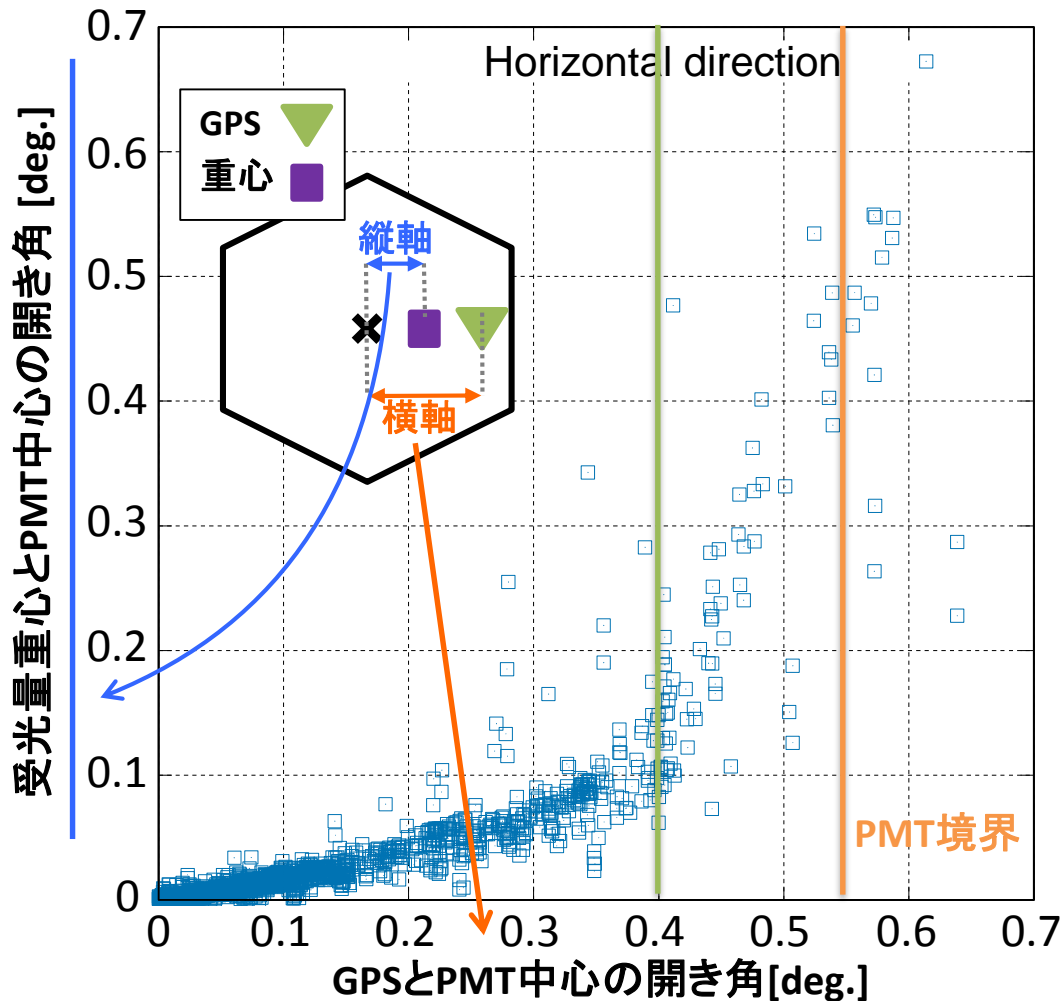
1月	測位誤差[deg.]	9月	測位誤差[deg.]
①	0.017	①	0.020
②	0.005	②	0.028
③	0.016		

1月 : $0.017^\circ \Rightarrow \pm 5.9 \text{ cm (200 m)}$

9月 : $0.028^\circ \Rightarrow \pm 14 \text{ cm (300 m)}$

季節によらず高精度測位可能

望遠鏡で記録された光源重心位置を用いてスポットサイズを算出



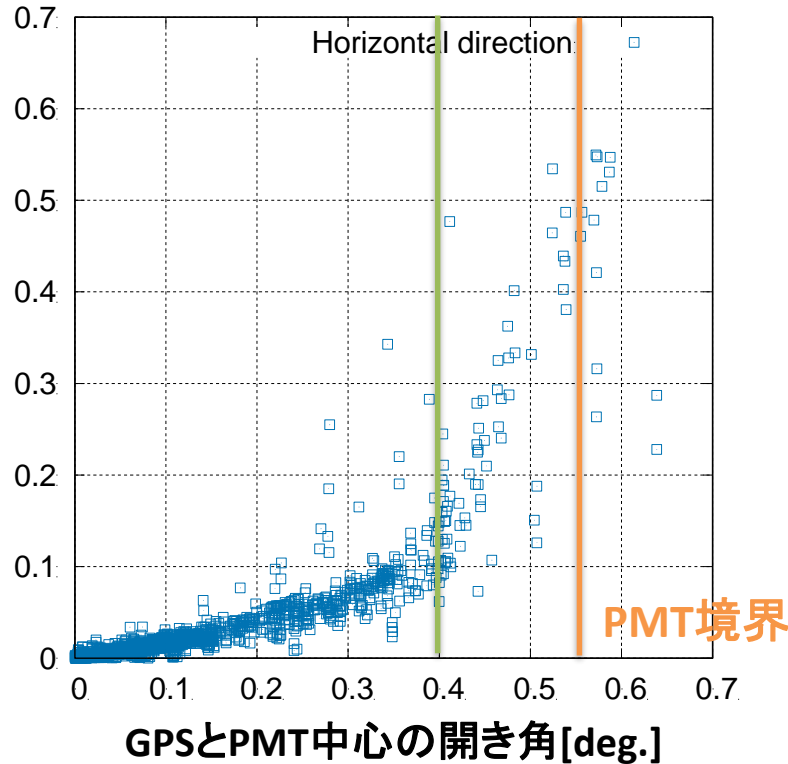
スポット半径 = 0.15°

$$6 \text{ cm} : 1.1^\circ = \Phi \text{ cm} : 0.3^\circ$$

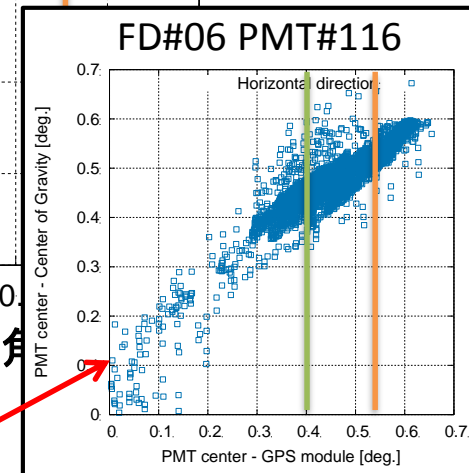
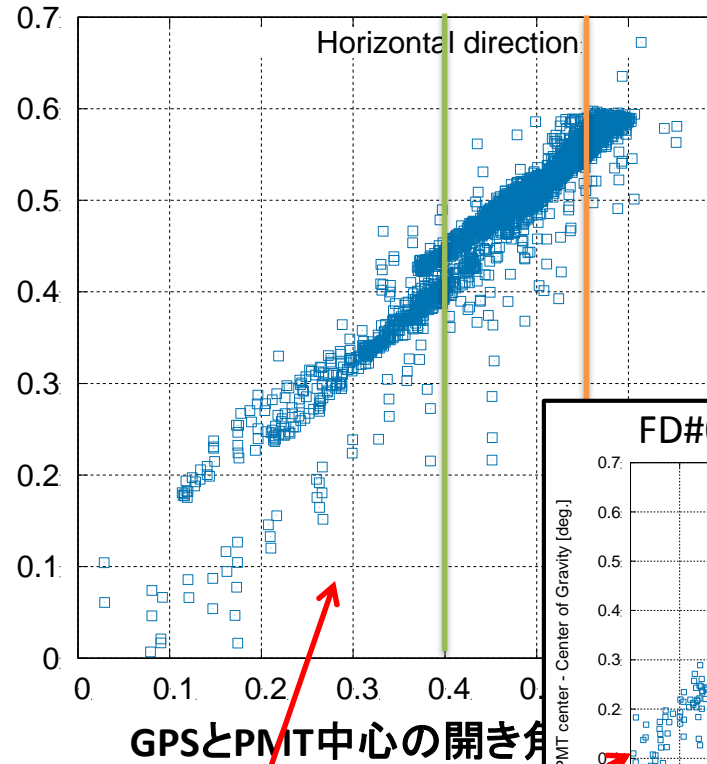
$$\Phi = 1.6 \text{ cm}$$

受光量重心とPMT中心との開き角 [deg.]

FD#07 PMT#117



FD#06 PMT#132



FD#06 では同傾向

- FD#07 と FD#06 の集光の違いが示唆された
→ 集光特性の理解が深まる

- Opt-copterを用いたTAFDの較正
 - 測位精度の評価
 - 冬: ± 5.9 cm (200 m) 夏: ± 14 cm (300 m)
→ **季節によらず高精度の測位が可能**
- 大気蛍光望遠鏡の較正
 - Opt-copterによるスポットサイズの算出
 - スポットサイズ: **1.6** cm (@FD#07 PMT#117)
 - 望遠鏡毎の集光の違いを示唆
 - **望遠鏡のジオメトリ理解に使用できる可能性**

今後について

- Opt-copterの発光100%取得を目指す
 - 外部トリガーモジュールの開発
- Opt-copter観測データのさらなる解析