

大気蛍光望遠鏡較正のための UAV搭載型標準光源の開発

林幹樹,

富田孝幸, 齊藤保典, 多米田裕一郎^A, 常定芳基^B, 本田建^C,
他 Telescope Array Collaboration

信州大工, 神奈川大工^A, 大阪市立大理^B, 山梨大工^C

※UAV : 無人航空機 (Unmanned aerial vehicle)

- 超高エネルギー宇宙線
- テレスコープアレイ実験
- 大気蛍光法
- 背景・目的
- UAV搭載型標準光源 (Opt-copter)
- Opt-copterの構成
- 光源の仕様
- ユタでの飛行試験
 - 飛行性能の評価
 - 観測データ
- まとめ・今後の予定

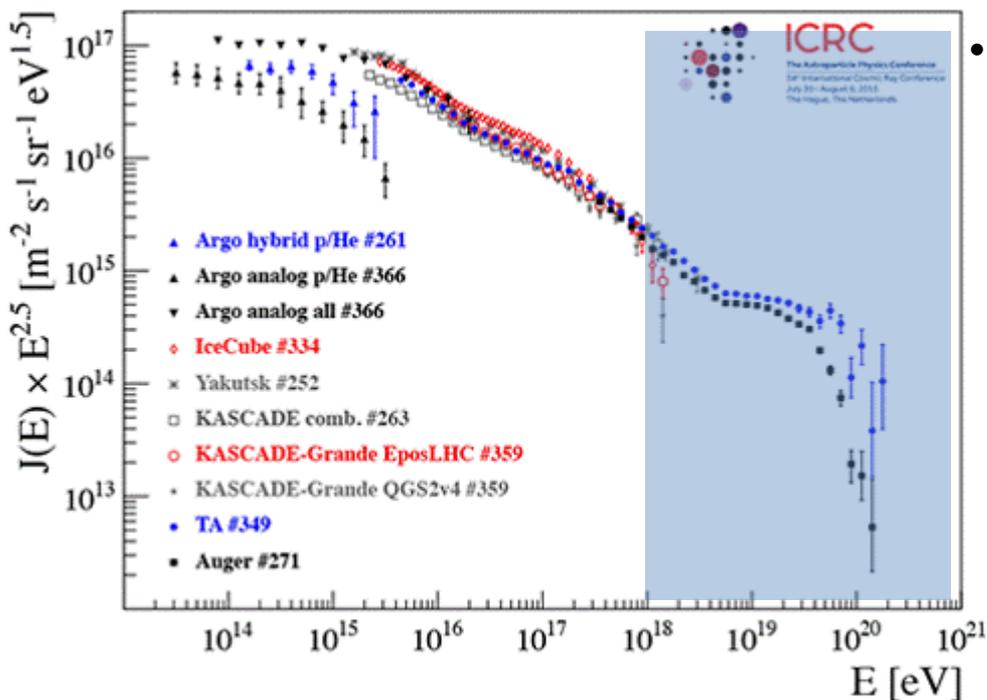


- 宇宙線

- 宇宙空間から到来する高エネルギー粒子
- エネルギーが高いほど、到来頻度が小さい

- 超高エネルギー宇宙線

- $\sim 10^{18}$ eVを超えるエネルギー
- 到来する宇宙線エネルギーには上限有?
- 磁場による影響が少なく、到来方向の同定が可能

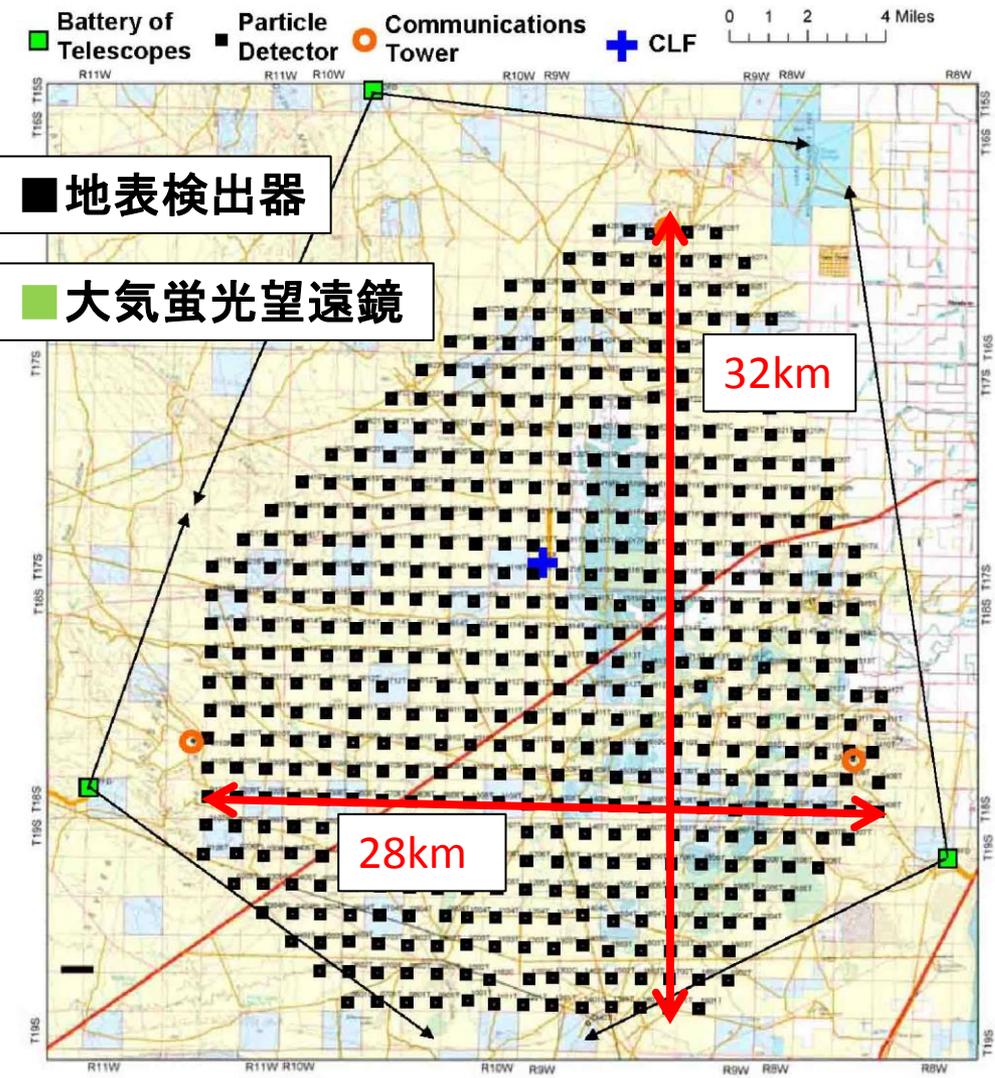


宇宙線の起源解明

エネルギースペクトル

質量組成

到来方向



Surface Detector (SD)



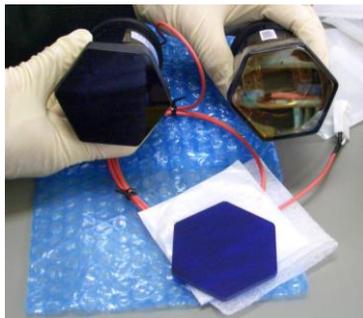
- 大きさ3m²
- ~700km²
- 1.2km間隔
- 約507台

Fluorescence Detector (FD)



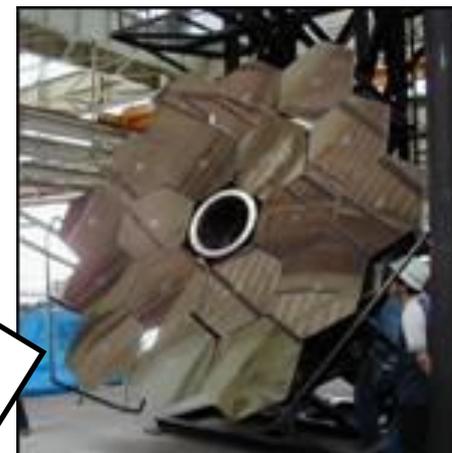
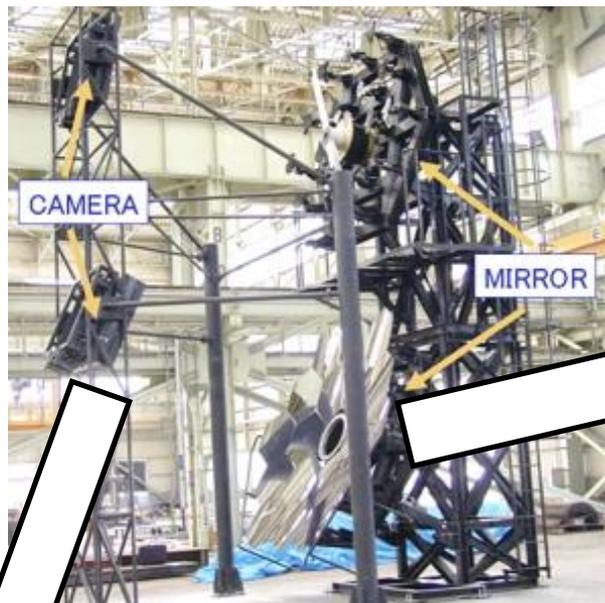
- 3台
- 方位角:108°
- 仰角:32°



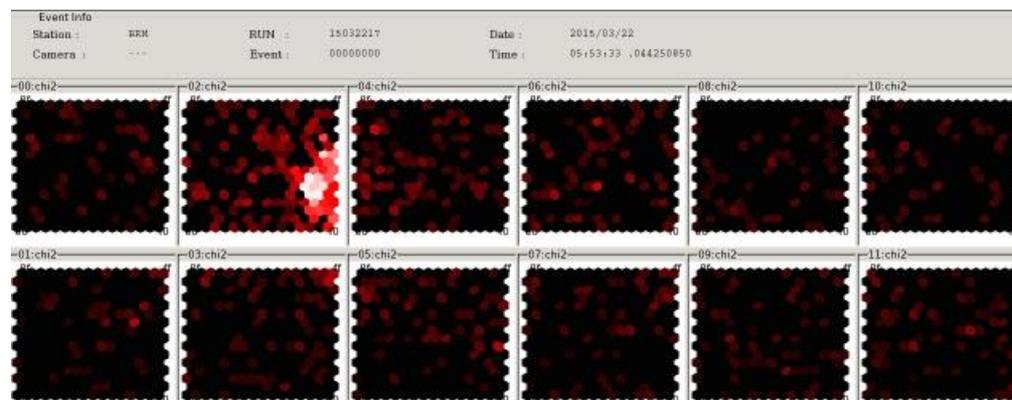


紫外線透過フィルター

16 × 16 計256本
光電子増倍管(PMT)カメラ

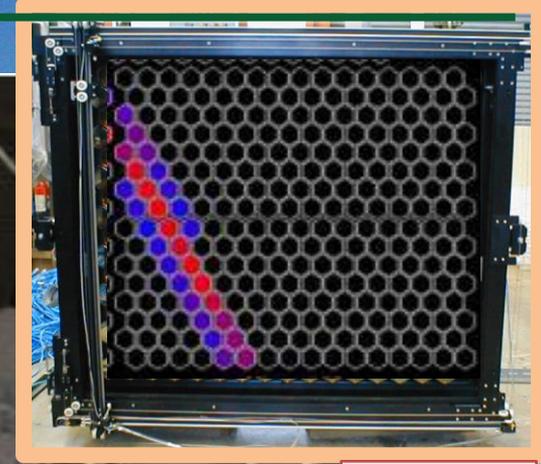


口径3mの球面鏡



宇宙線

空気シャワー



カメラ



球面鏡

TA実験における望遠鏡較正方法 感度測定

- CRAYS : 標準PMTの較正
- YAP : 標準PMTのゲインモニター
- Xe flasher : 望遠鏡毎に全PMTのゲインモニター
- ✓ 2ヶ所の大気蛍光望遠鏡間のエネルギー差の解明

アライメント測定

- 星を用いた測定
- ✓ 視野内に既知の星がないと測定できないため受動的

2ヶ所の大気蛍光望遠鏡でのエネルギー差の解明と能動的なアライメント測定には新規の光源が必要

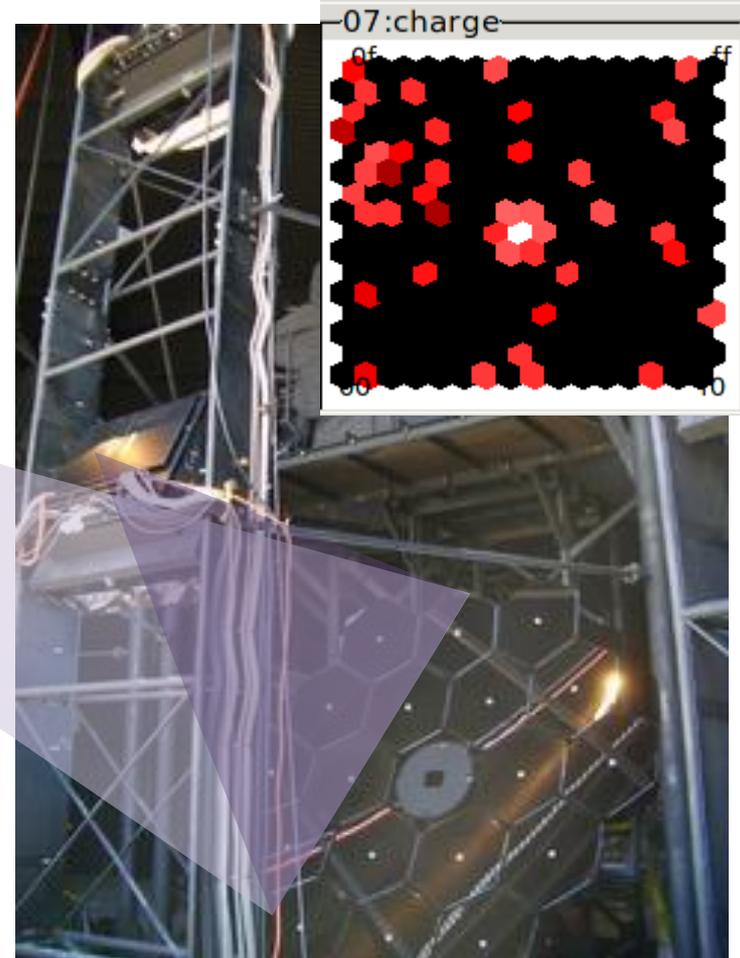
目的 : UAV搭載型標準光源の開発と試験

Optics + Octocopter = Opt-copter

※UAV : 無人航空機 (Unmanned aerial vehicle)



大気蛍光望遠鏡



マルチコプターを用いた較正の利点

- ・可搬なため様々な望遠鏡の較正を一つの光源で可能
- ・飛行性能があるため対象から任意の位置に設置可能
- ・能動的な望遠鏡のアライメントの測定も可能

Opt-copterの構成

高性能GPS用アンテナ

Opt-copter制御用
GPSアンテナ

	要求値	影響
光源の一様性	$\pm 1\% / \pm 15^\circ @ 2\pi sr$	$\pm 1\%$
位置測定の精度	$\pm 0.1m @ 100m$	$\pm 0.3\%$
目標の合計系統誤差		1~3%

- 高性能GPSによる相対的な位置測定により水平・垂直方向ともに精度 $\sim \pm 0.1 m$ を達成

光源駆動回路
+
高性能GPS

UV-LED光源
+
ディフューザー

- 本体重量 : 4.4 kg
- 最大積載量 : 6.6 kg
- 飛行時間 : 11分 (@16000mAh & 4Kg)

光源の構成要素

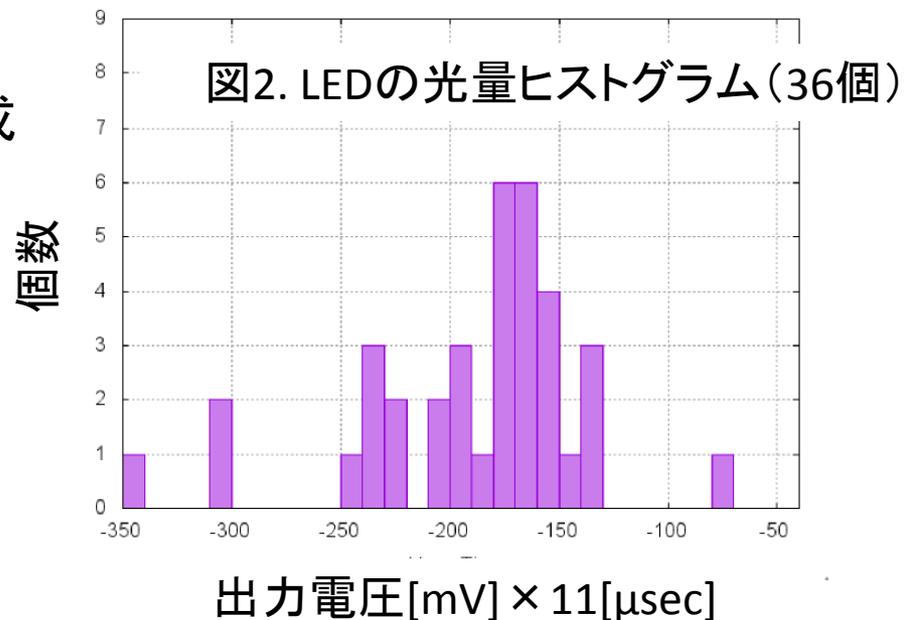
- Diffuser・固定パーツ
 - 市販のペンダントライトの外装を使用
- UV-LED
 - シリコン拡散レンズを持つUV-LED
 - 複数個から似た光量を持つLEDを選定
 - 電流と光量の特性の測定
- 12面体光源マウント
 - CADデータから3Dプリントをして作成
- 駆動回路



図1. 十二面体光源とディフューザー

光源の機能

ピーク波長 : 375 nm
 FWHM : 15 nm
 パルス幅 : 10 μ sec.



- 日時 : 2016/9/6 ~ 2016/9/9
- 場所 : 大気蛍光望遠鏡
Black Rock Mesaステーション

条件

- 反射鏡中心から距離200m
- 抵抗による減光
- 風速 < 5m/s
- 各カメラ60秒滞空
- PMT77
- 高性能GPSによる測量

各飛行計画

- カメラ7 → 2 → 0 → 1 → 3 → 7
- カメラ7 → 8 → 10 → 11 → 9 → 7
- カメラ7 → 6 → 4 → 5 → 7
- 各飛行の最初と最後にカメラ7を飛行し飛行中の光量の変化を測定

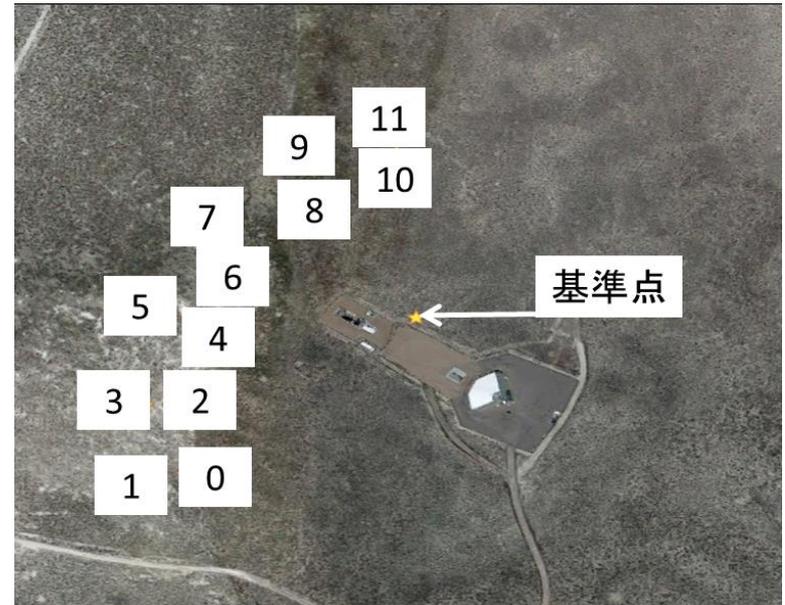
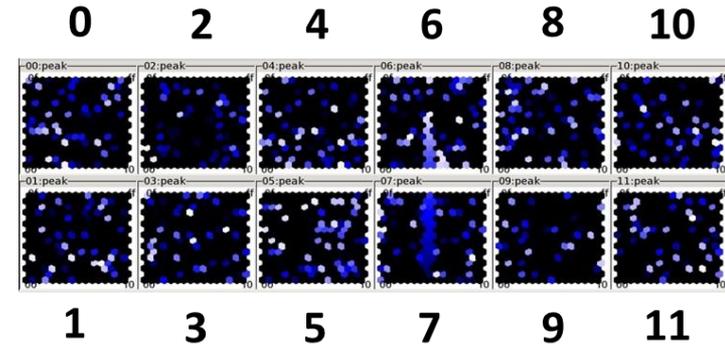


図1. 飛行点の航空写真と各カメラの視野

- 日時 : 2016/9/6 ~ 2016/9/9
- 場所 : 大気蛍光望遠鏡
Black Rock Mesaステーション

条件

- 反射鏡中心から距離200m
- 抵抗による減光
- 風速 < 5m/s
- 各カメラ60秒滞空
- PMT77(図1. 赤のPMT)
- 高性能GPSによる測量

各飛行計画

- カメラ7 → 2 → 0 → 1 → 3 → 7
- カメラ7 → 8 → 10 → 11 → 9 → 7
- カメラ7 → 6 → 4 → 5 → 7
- 各飛行の最初と最後にカメラ7を飛行し飛行中の光量の変化を測定

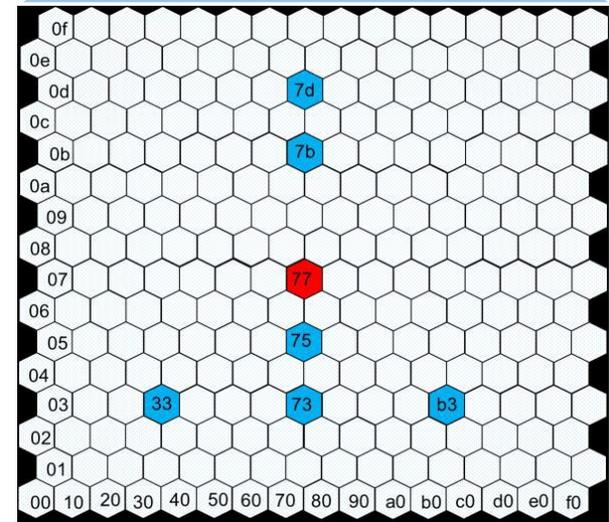
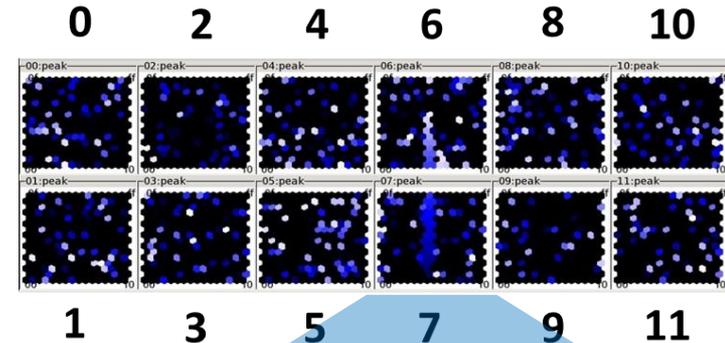


図1. PMTアドレス

- 日時 : 2016/9/6 ~ 2016/9/9
- 場所 : 大気蛍光望遠鏡
Black Rock Mesaステーション

条件

- 反射鏡中心から距離200m
- 抵抗による減光
- 風速 < 5m/s
- 各カメラ60秒滞空
- PMT77
- 高性能GPSによる測量

各飛行計画

- カメラ7 → 2 → 0 → 1 → 3 → 7
- カメラ7 → 8 → 10 → 11 → 9 → 7
- カメラ7 → 6 → 4 → 5 → 7
- 各飛行の最初と最後にカメラ7を飛行し飛行中の光量の変化を測定

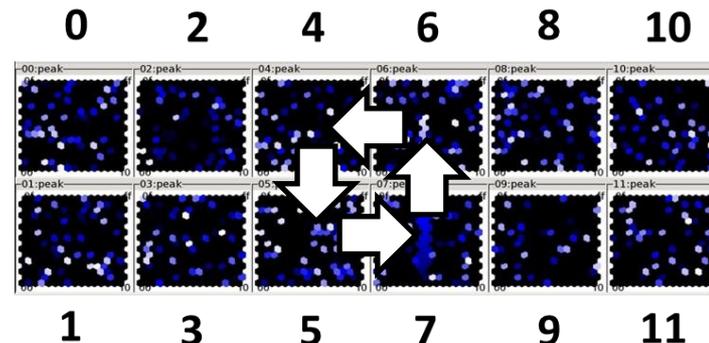
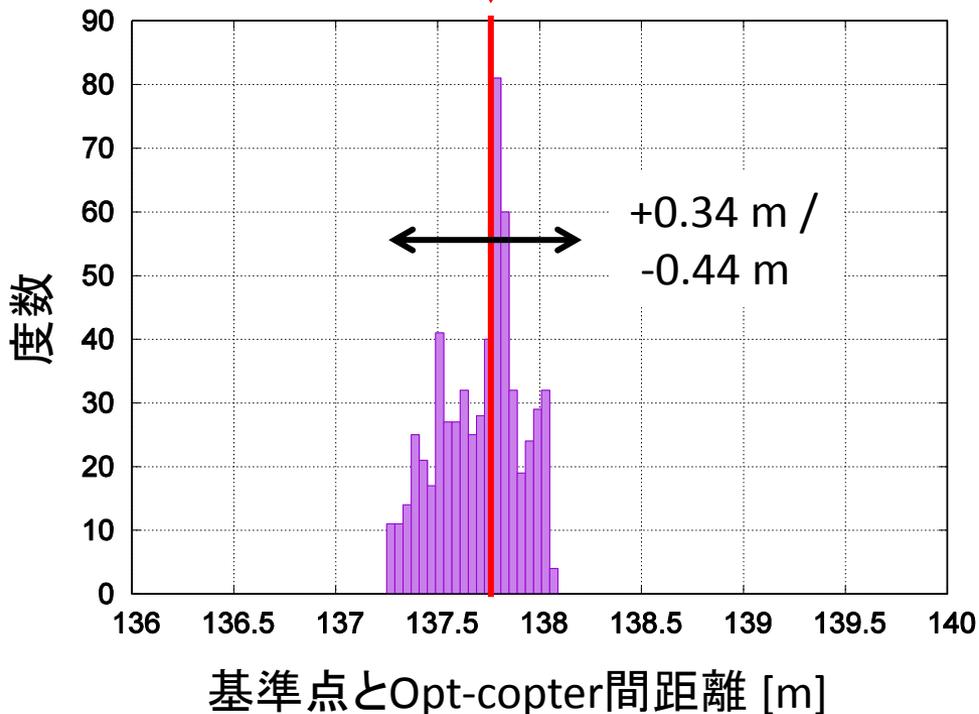


図1. 飛行点の航空写真と各カメラの視野

- ホバリング精度 : 垂直 ± 0.5 m
水平 ± 1.5 m 最大 ± 1.58 m
- 耐用風速環境 : < 8 m/s
- 自動飛行 : 緯度、経度、高度、方向、滞空時間

Opt-copterに入力した座標から計算した距離(基準点とOpt-copter間)
137.74 m



高性能GPSによる位置精度の評価
(風速 < 5 m/s)

データ数 : 600
平均 : 137.71 m
標準偏差 : 0.22 m
最大値 : 138.05 m
最小値 : 137.27 m

- 入力した座標と平均の差は0.03 m
- スペック値 ± 1.58 mに対し
実測値は+0.34 m/-0.44 m

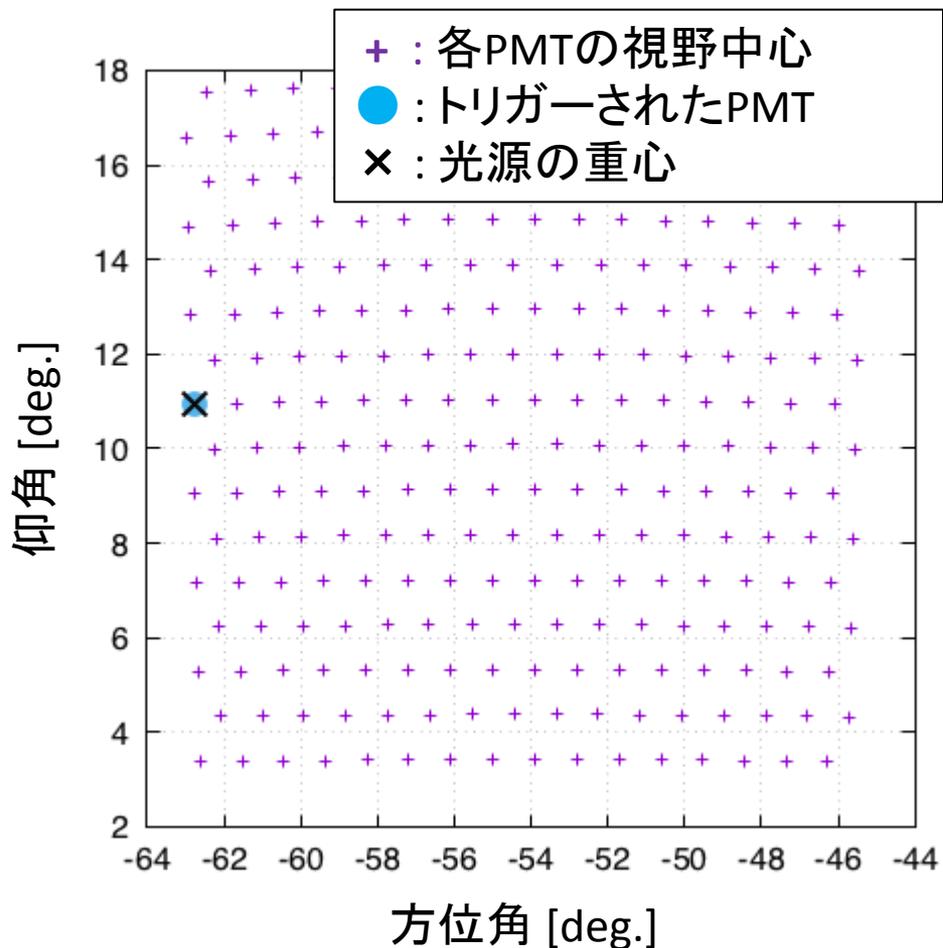
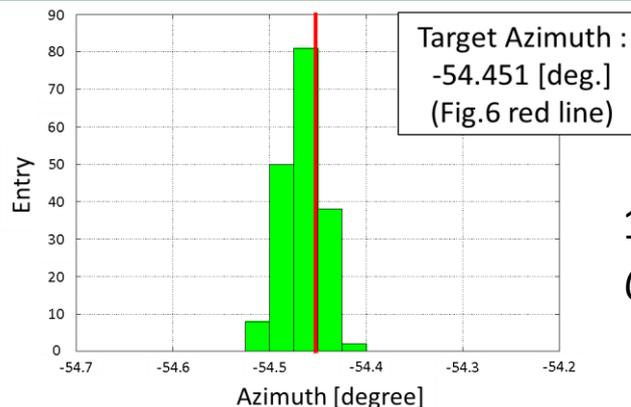


図1. チャージマップ(カメラ7)



1deg. = 3.5m
@200m

Fig.6 Start camera7 PMT77 azimuth histogram.

Number of data	: 179	
Average	: -54.467 [deg.]	-5.6cm
Standard Deviation	: 0.019 [deg.]	6.6cm

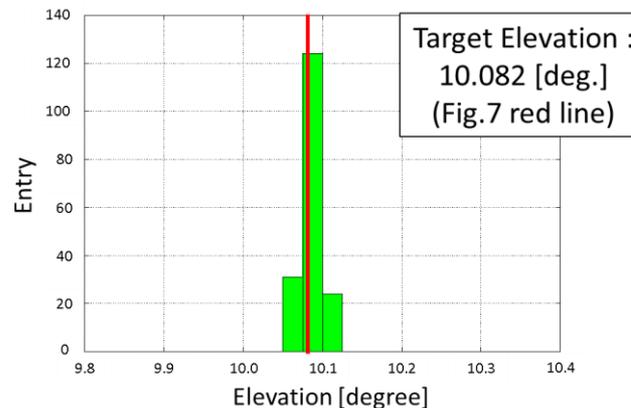


Fig.7 Start camera7 PMT77 elevation histogram.

Number of data	: 179	
Average	: 10.088 [deg.]	-2.1cm
Standard Deviation	: 0.014 [deg.]	4.9cm

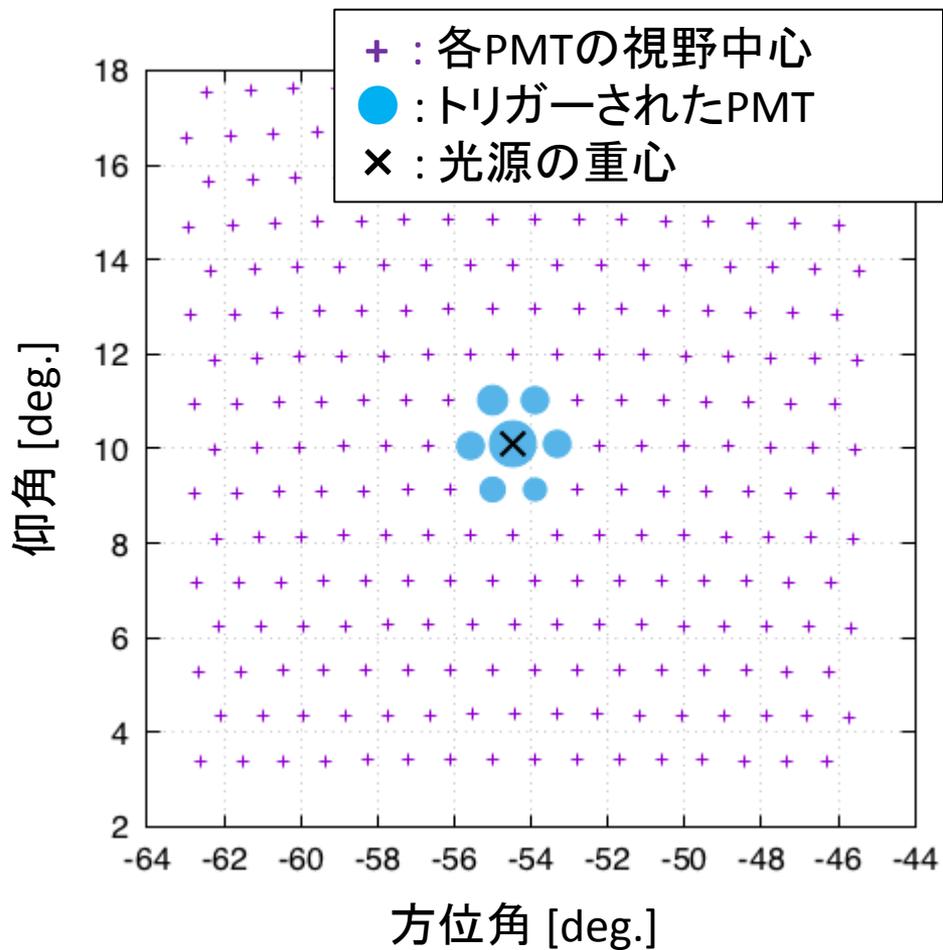


図1. チャージマップ(カメラ7)

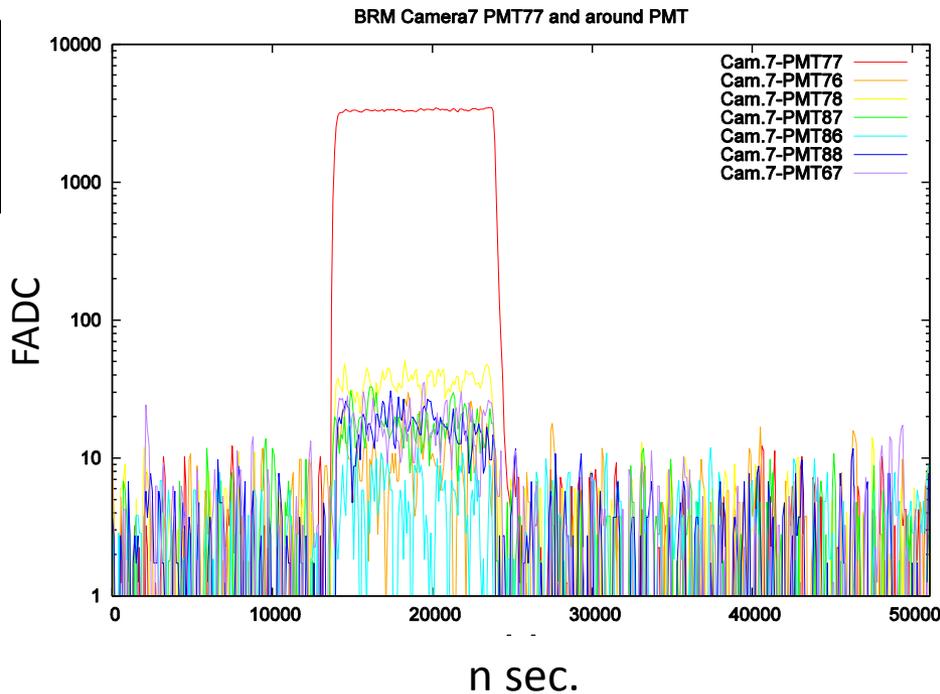
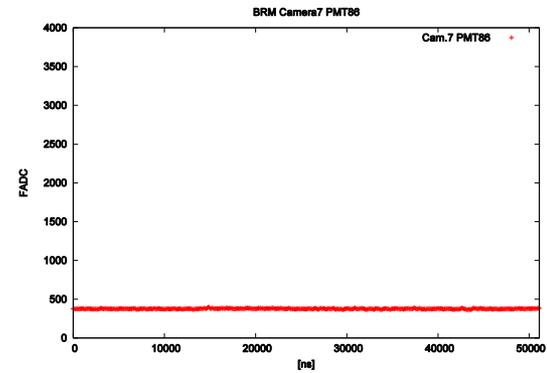
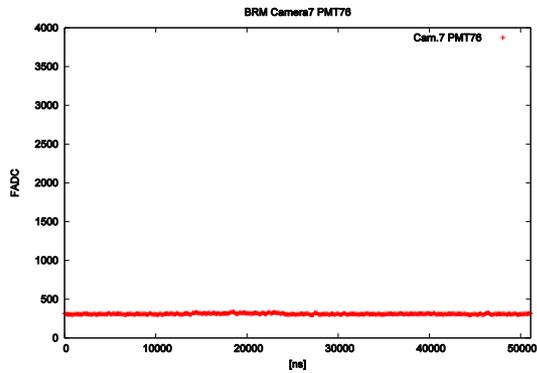
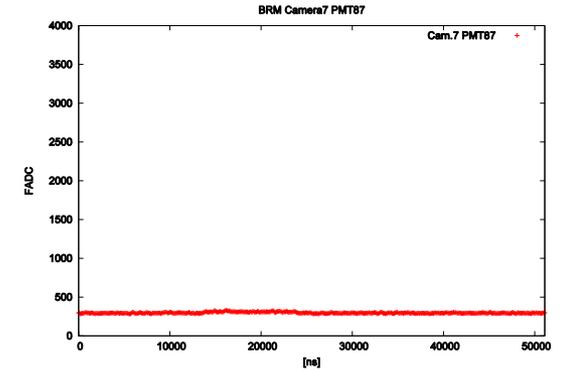
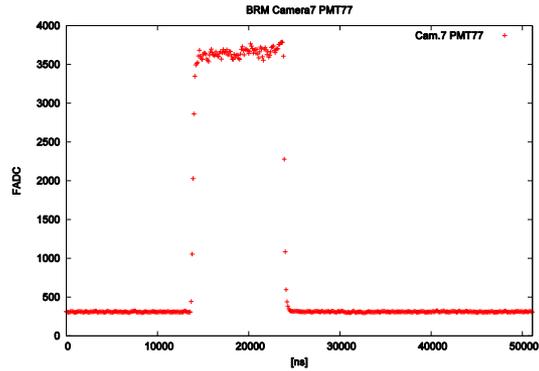
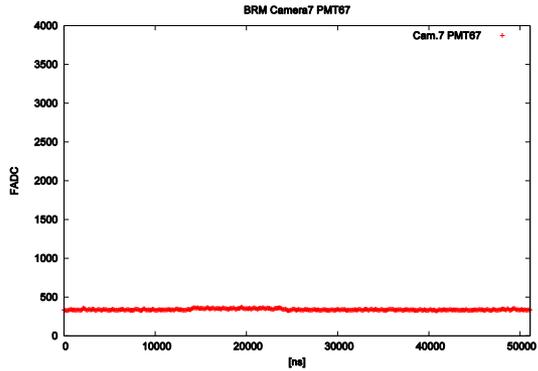
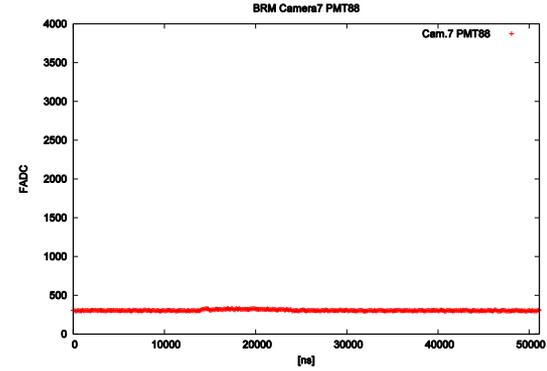
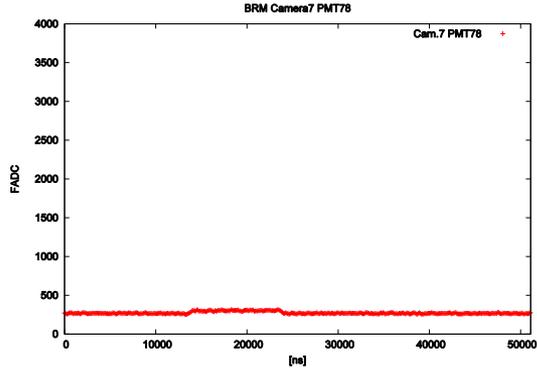


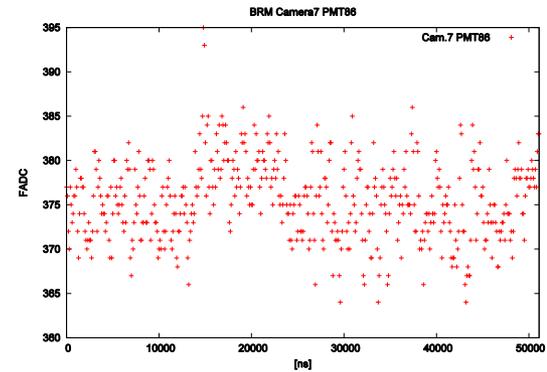
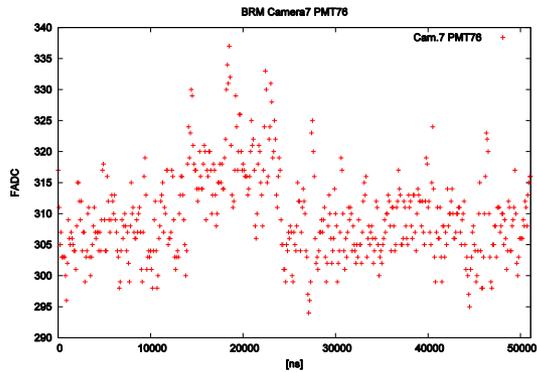
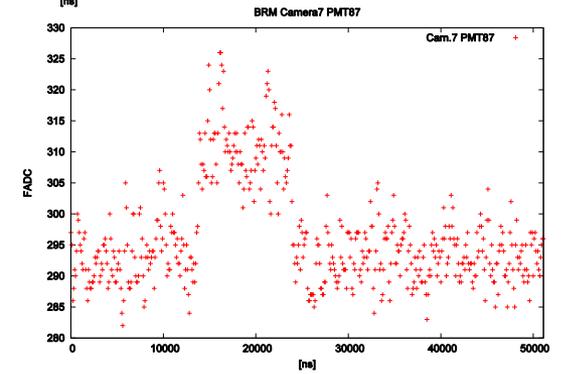
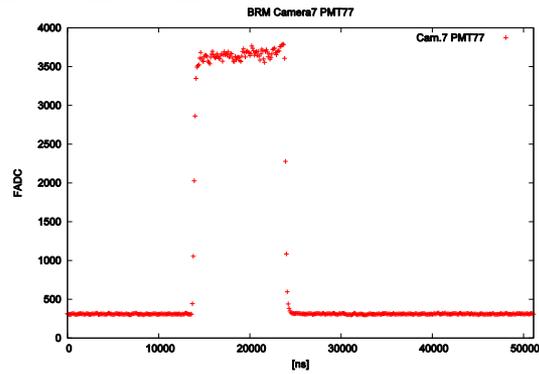
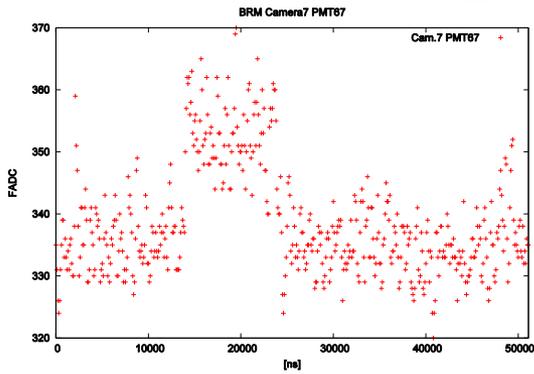
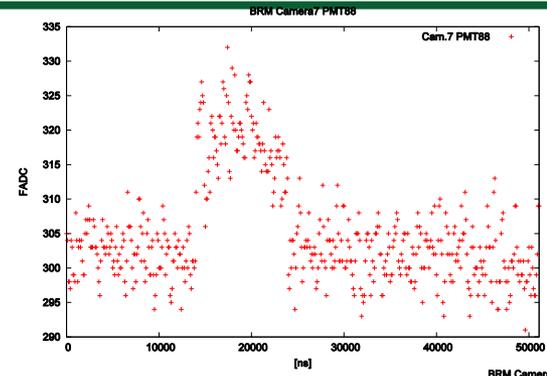
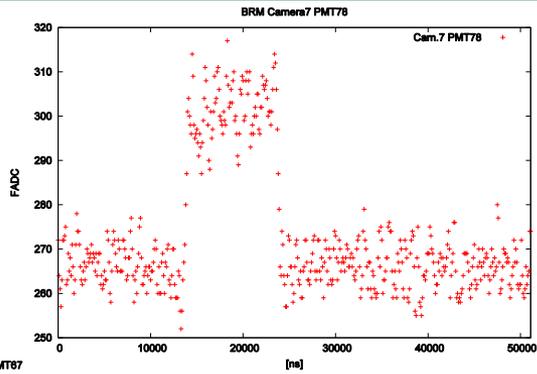
図2. 中心と周辺(6本)PMTの波形

- 中央(PMT77)とその周辺のPMTで光源をトリガー

- まとめ
 - FDの較正の手順を確立
 - 距離200mで最適な光量に調整
 - FDのセルフトリガーを用いて測定可能
 - 高性能GPSで飛行性能を評価
 - 入力した座標と実測値の平均との差は0.03 m
 - ホバリング精度: スペック値 ± 1.58 mに対しホバリング精度: 実測値+0.34 m/-0.44 m
 - 光源重心で飛行性能を評価
 - PMT中心と光源重心の平均との差は0.06m
 - 標準偏差0.07m
- 今後の予定
 - 9月フライト試験の詳細な解析
 - より適した光源回路の製作
- 様々な望遠鏡での応用を期待

Back up



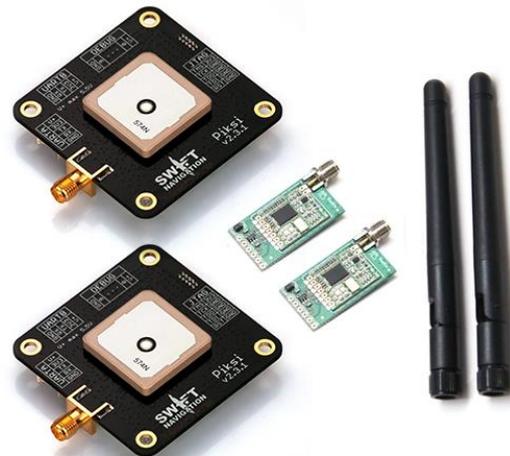
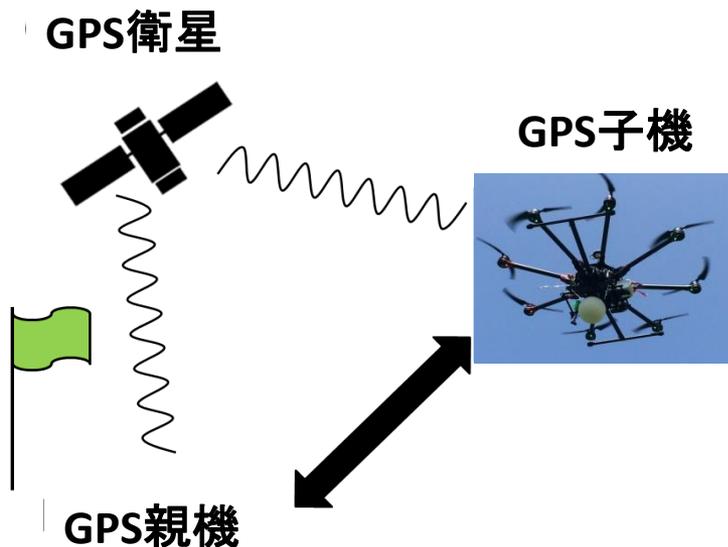


高性能GPS

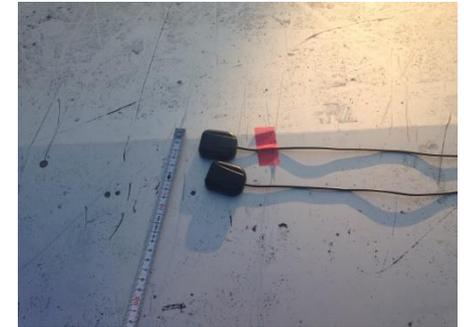
GPSモジュール×2(親機・子機)を較正後に使用※¹することにより、
相対的位置関係※²を~±10cmの精度で取得する。

※¹) Real Time Kinematics (RTK)測量を利用

※²) Opt-copterに子機を搭載し親機を基準点(既知の座標)に設置



今回使用した高性能GPS「PiKsi」



ホームポジション

- 水平方向: 6cm
- 垂直方向: -2cm

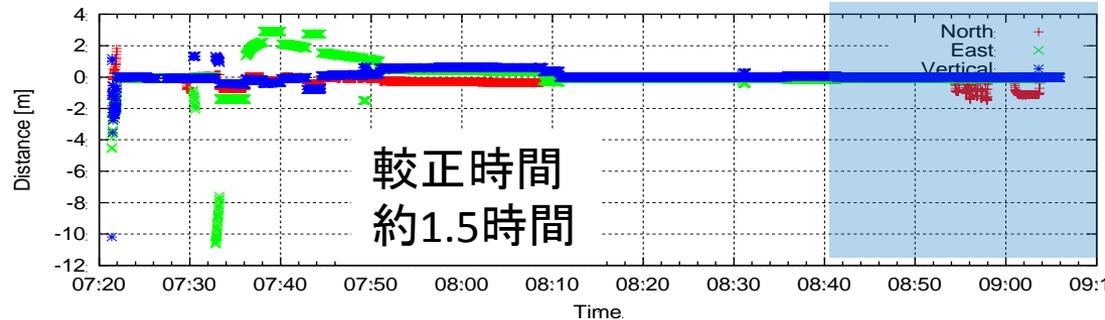
移動後の位置

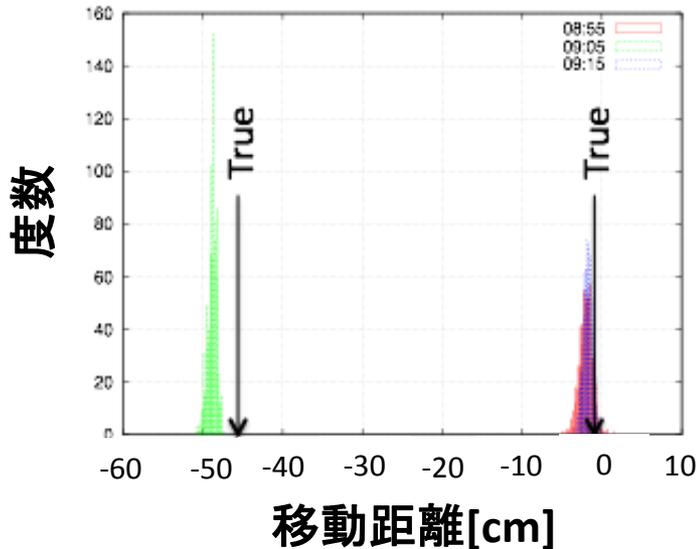
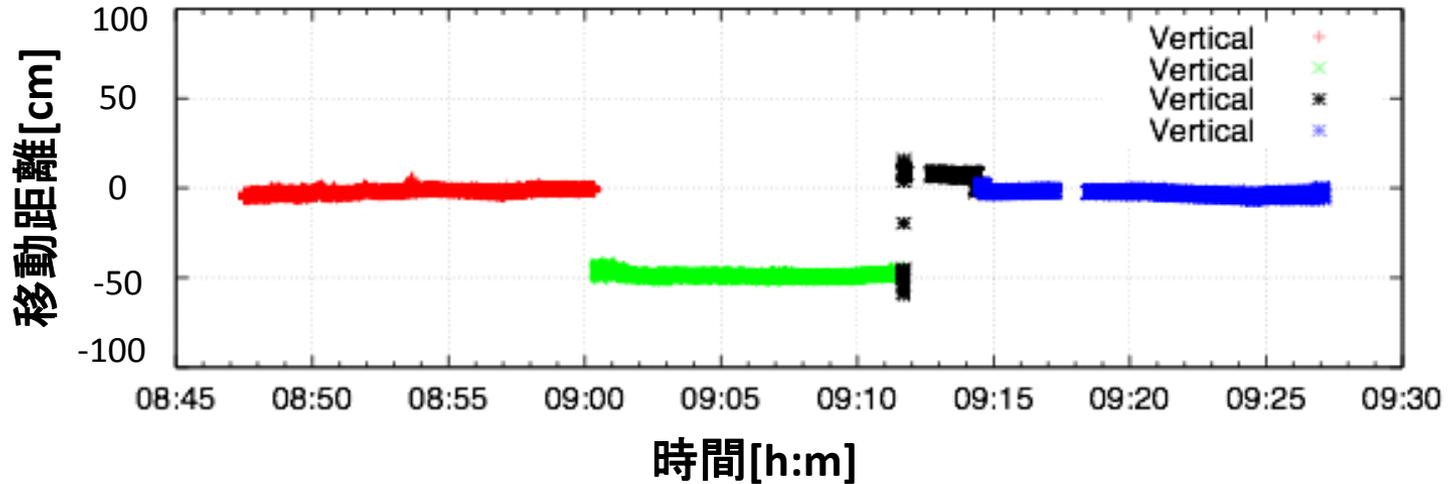
- 水平方向: 199~201cm
- 垂直方向: -45cm

ホームポジション

- 水平方向: 6cm
- 垂直方向: -2cm

- 日時: 2015.06.02
- 天候: 薄曇り(微風)
- 試験場所: 信州大学屋上

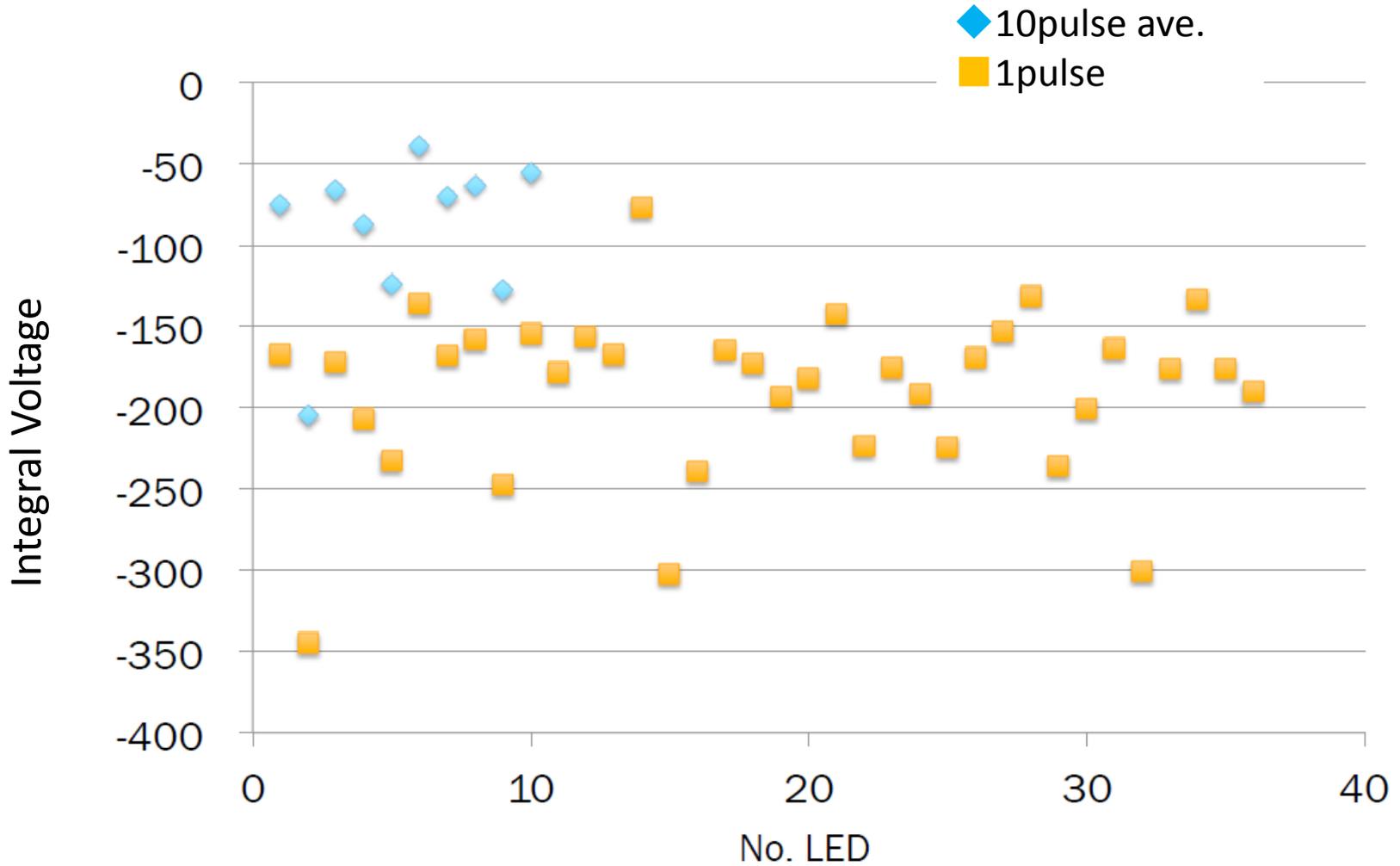




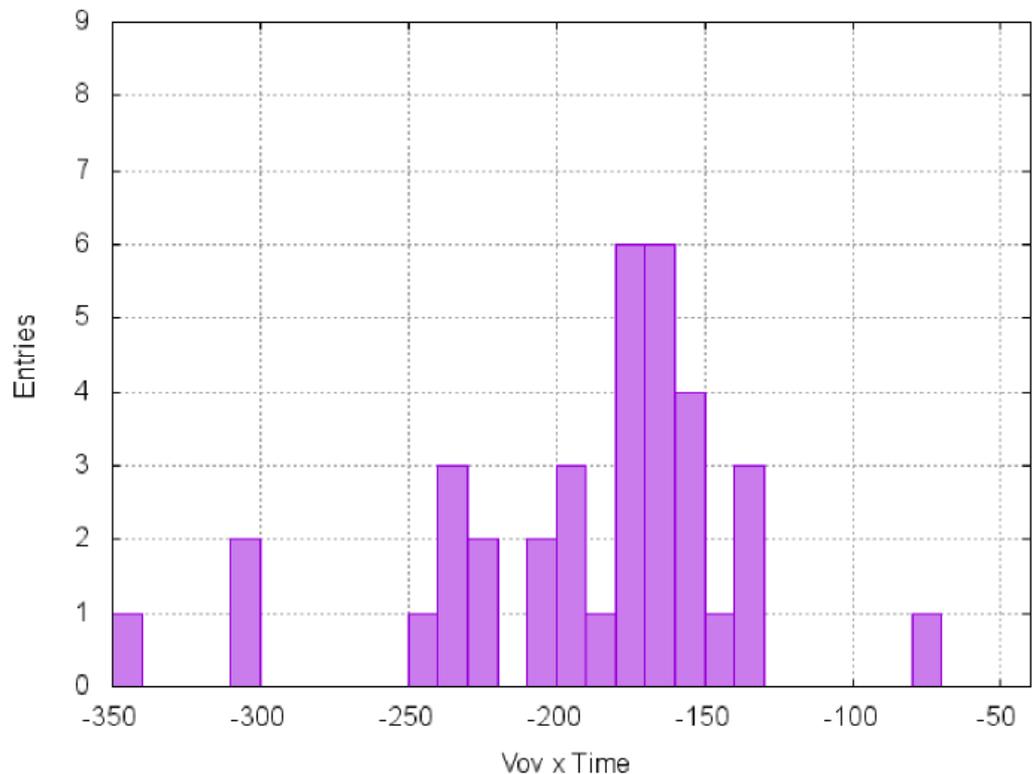
	移動前	移動一回目後	移動二回目後
真値	-2 cm	-45 cm	-2 cm
平均	-1.9 cm	-48.8 cm	-1.7 cm
最大値	1.5 cm	-47.3 cm	0.2 cm
最小値	-4.9 cm	-50.7 cm	-0.3 cm

- 垂直方向の精度 : $\pm 6\text{cm}$
- 水平方向の精度 : $\pm 4\text{cm}$

LEDの個体差

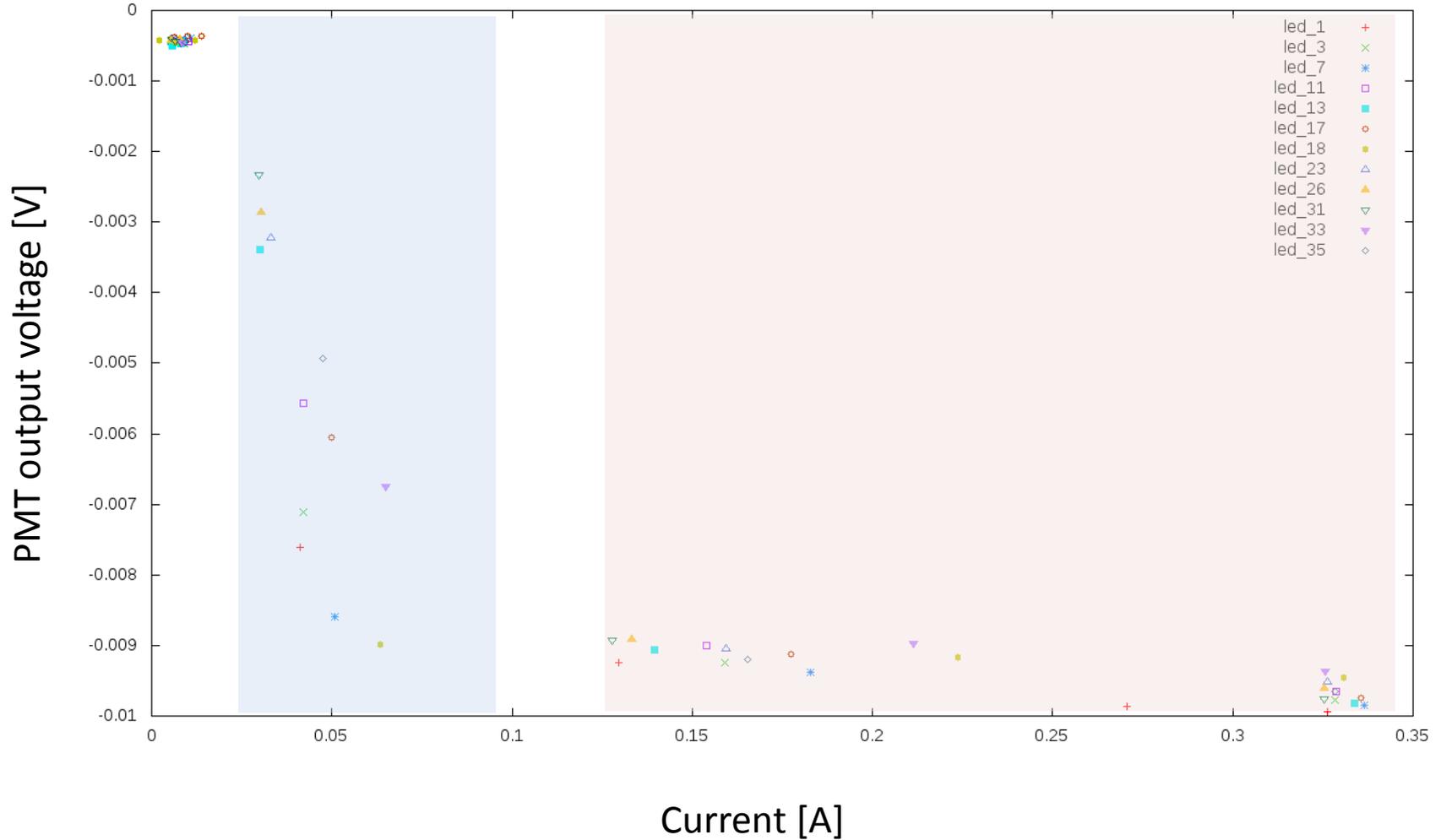


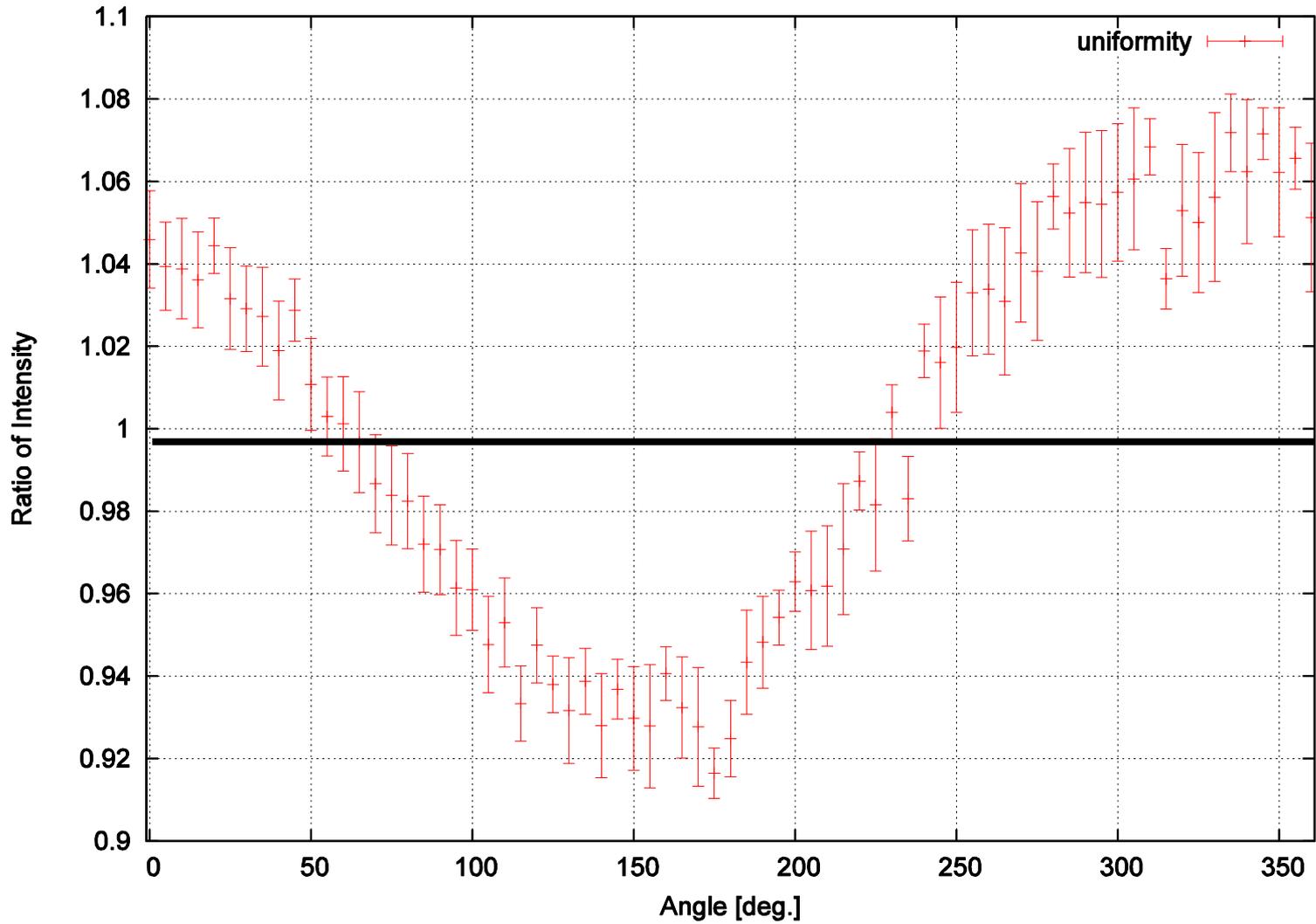
結果より12個のLEDを選定



- 1 : -1.672008e+02
- 3 : -1.717424e+02
- 7 : -1.680148e+02
- 11 : -1.781280e+02
- 13 : -1.675704e+02
- 17 : -1.647648e+02
- 18 : -1.723612e+02
- 23 : -1.753916e+02
- 26 : -1.692044e+02
- 31 : -1.634868e+02
- 33 : -1.761612e+02
- 35 : -1.762540e+02

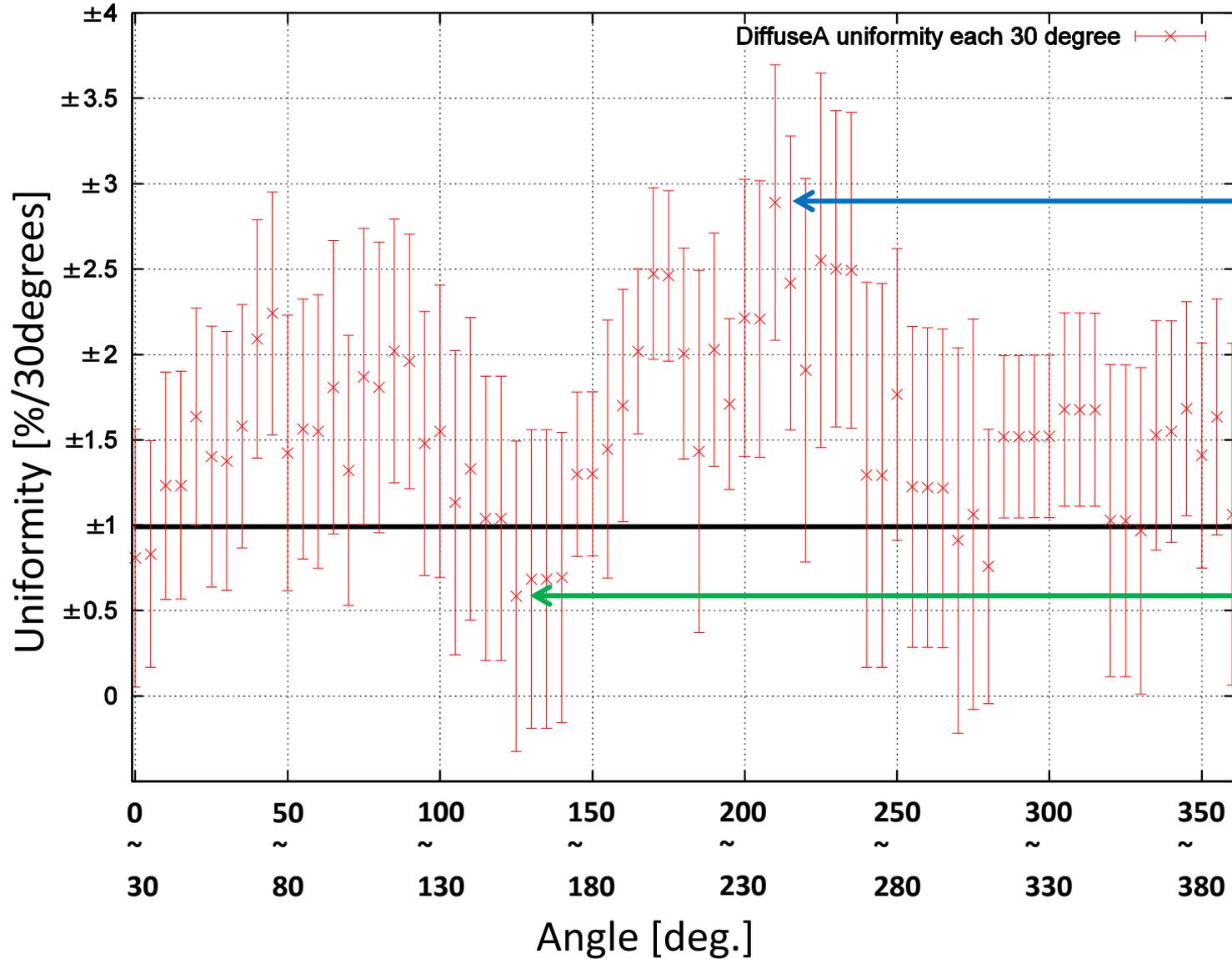
選定した12個のLEDの個体差約±5%





$\pm 9\%/360^\circ @ 2\pi \text{ sr}$

30° 毎の一様性



最悪値
 $\pm 3\%/30^\circ @ 2\pi \text{ sr}$

目標値
 $\sim \pm 1\%/30^\circ @ 2\pi \text{ sr}$

最良値
 $\pm 0.6\%/30^\circ @ 2\pi \text{ sr}$

