

SK-Gdにおける核破碎中性子捕獲を用いた検出器全体でのエネルギースケールの連続評価

東京大学 中島研究室 M1 室朝喜

目次

- Super-Kamiokande 実験
- 本研究で行ったこと
 - Event selection
 - 時間依存性の評価
 - 位置依存性の評価

目次

- ▶ Super-Kamiokande 実験

- ▶ 本研究で行ったこと

 - ▶ Event selection

 - ▶ 時間依存性の評価

 - ▶ 位置依存性の評価

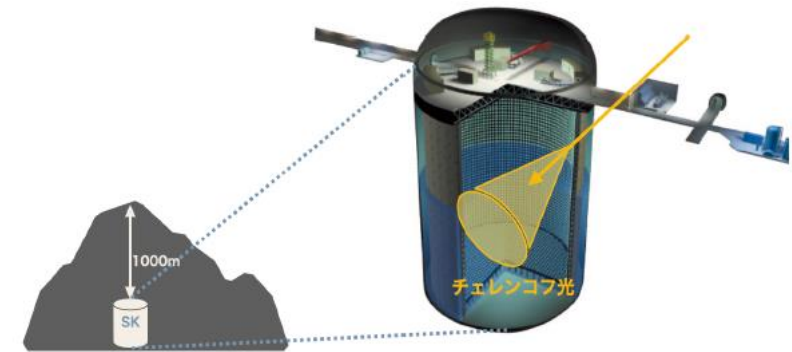
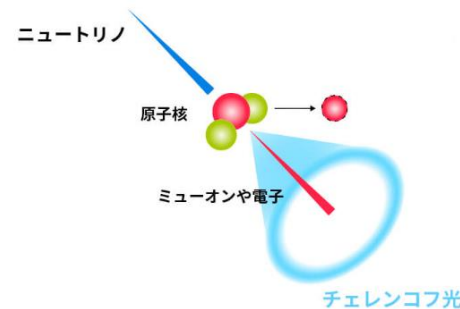
Super-Kamiokande 実験

●検出器

- 岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下約1000mに設置された大型水チェレンコフ検出器
- 検出器は5万トンの水を蓄えた、直径39.3m、高さ41.4mの円筒型水タンク
- 約1万1千本の50cm光電子増倍管(PMT)が設置されている
 - 荷電粒子の発するチェレンコフ光を観測する

●実験目的

- 陽子崩壊
- ニュートリノの研究
 - 大気ニュートリノ、太陽ニュートリノ、超新星背景ニュートリノ、加速器ニュートリノなど

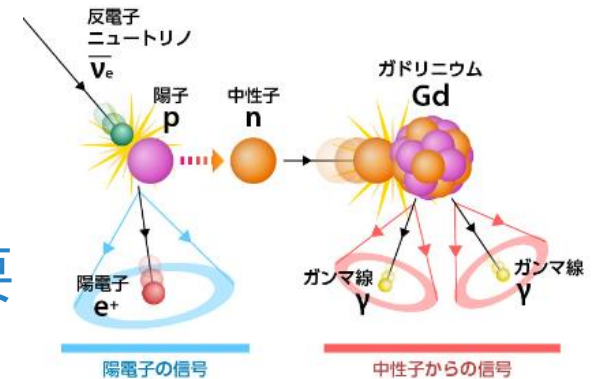


Super-Kamiokande 実験

●SK-Gd

- 中性子の検出効率を高めるために、タンク内の純水にガドリニウム(Gd)を導入
- Gdは中性子の捕獲能力に優れ、合計約8MeVのガンマ線を放出
- これにより超新星背景ニュートリノをはじめとしたニュートリノの観測感度向上が期待される
 - 逆ベータ崩壊による陽電子由来の先発信号、中性子捕獲由来の後発信号によって、反電子ニュートリノの観測感度を向上
- 2020年7月より導入開始、2022年7月にGd濃度0.03%を達成

中性子の検出効率の評価、検出器全体でのエネルギー較正が重要



目次

➤ Super-Kamiokande 実験

➤ 本研究で行ったこと

➤ Event selection

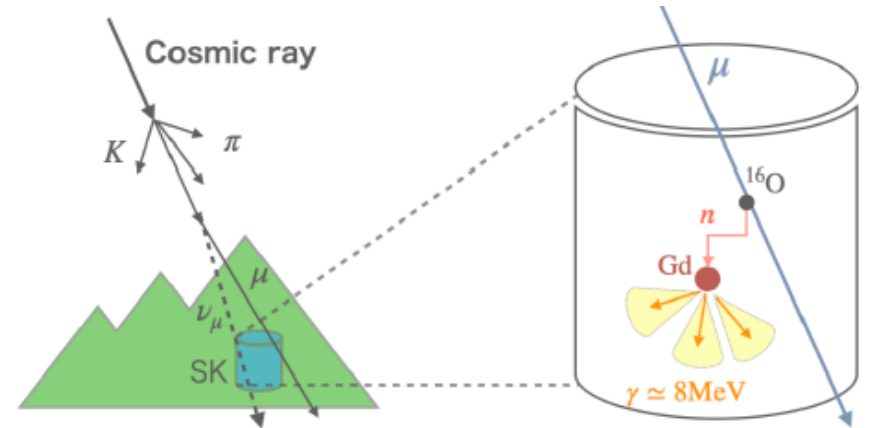
➤ 時間依存性の評価

➤ 位置依存性の評価

核破砕中性子を用いたエネルギー較正

●核破砕中性子

- 宇宙線ミュオンが検出器内の酸素原子と核破砕反応を起こし、中性子を生成
- この中性子をGdが捕獲した際に生じる合計約8MeVのガンマ線を較正に用いる



●エネルギー較正

- 対象事象は放出される光子が少なく、PMT1つにつき1光子程度しか入射しない
 - PMTのhit本数でエネルギーの再構成が可能
- 50ns以内のPMTのhit本数を計測(N_{50})
- 補正式によって N_{50} におけるPMTのdark noiseや水の透過率などの影響を補正(N_{eff})
- N_{eff} の関数として、エネルギーを再構成

本研究における目標

●目標

- 現状のSKにおける太陽ニュートリノ観測での主要な系統誤差はエネルギースケール
- この系統誤差は0.54%となっている
 - 本研究におけるエネルギースケールの系統誤差を0.5%以下にすることを目標とする

●本手法における利点

- 発生事象数が多く、短期間で十分な統計数を得られ、検出器全域において検出可能なので、位置依存性と時間依存性の評価が可能

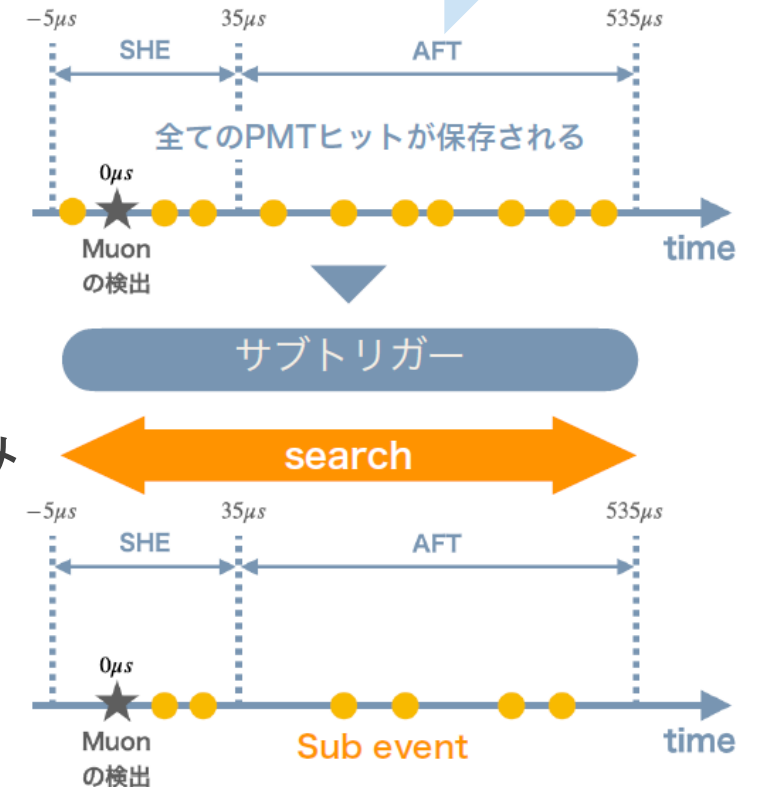
Event Selection

宇宙線ミュオンの事象の選択

サブイベントの検出

Gdによる中性子捕獲事象の選択

- ミューオン事象を $0\mu s$ とし、 $[-5, 35]\mu s$ と $[35, 535]\mu s$ の二つの時間幅においてトリガーをかける
- サブトリガー(200ns以内のPMTヒット数20以上のイベント)をかけ、サブイベントの検出
- 検出器内壁から2m以上離れた有効体積内でのイベントのみ検出



Event Selection

宇宙線ミュオンの事象の選択

サブイベントの検出

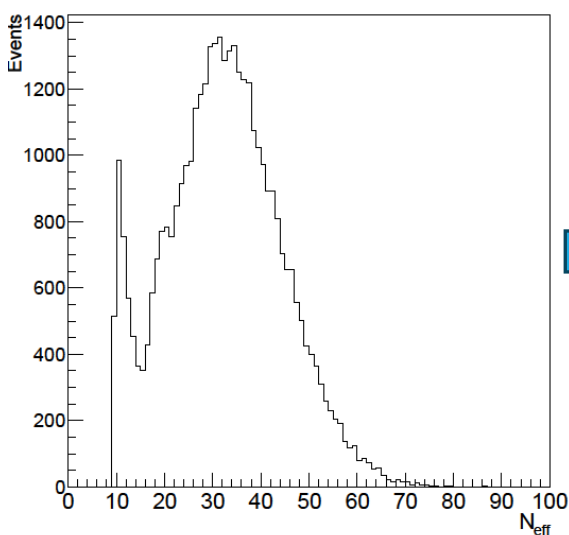
Gdによる中性子捕獲事象の選択

➤ サブイベントの内、右の表の条件に従って
Gdによる中性子捕獲事象を選択

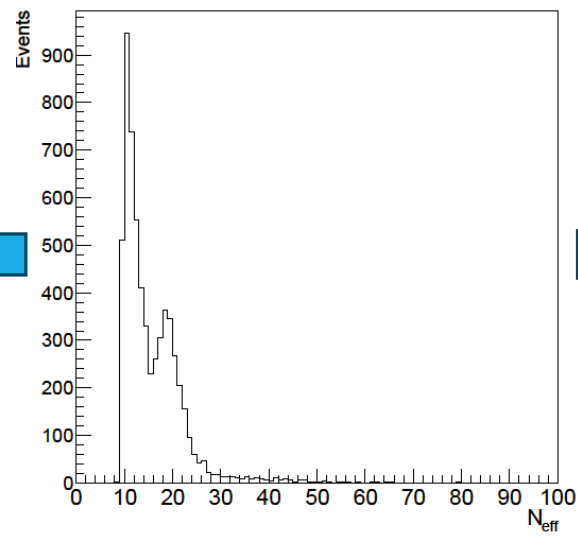
Time window	AFT trigger : [35, 535] μ s
事象発生点と方向再構成の確らしさ	$g_{\text{vtx}} > 0.40$ & $g_{\text{dir}} < 0.40$
Lt cut	$d < 300$ cm
検出される中性子数	n : 1~3
時間再構成	[0.7, 1.0] μ s

バックグラウンドの除去

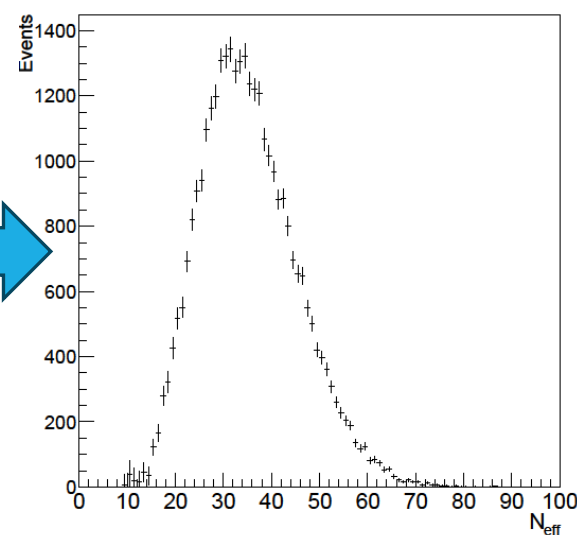
- 中性子のイベント数が時定数を持って減少すること、バックグラウンドが一定に存在することを用いてバックグラウンドを除去する
- Time windowの内、 $[35, 235]\mu\text{s}$ をGdによる中性子捕獲による信号、 $[235, 535]\mu\text{s}$ をバックグラウンドによる信号と仮定し、これらを差し引いた信号を用いる



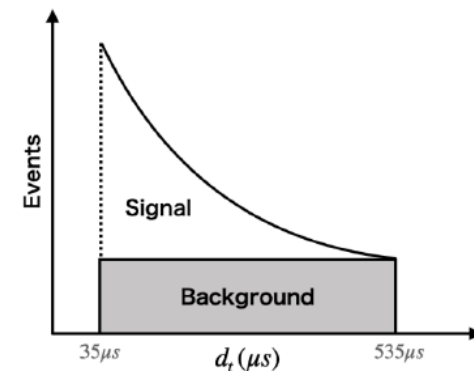
$[35, 235]\mu\text{s}$ の信号



$[235, 535]\mu\text{s}$ の信号



中性子捕獲の信号



目次

➤ Super-Kamiokande 実験

➤ 本研究で行ったこと

➤ Event selection

➤ 時間依存性の評価

➤ 位置依存性の評価

使用データ

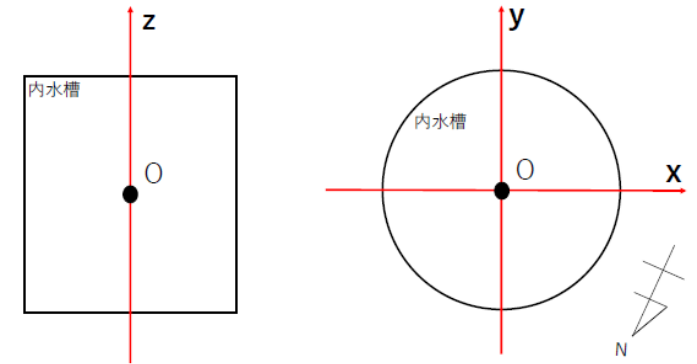
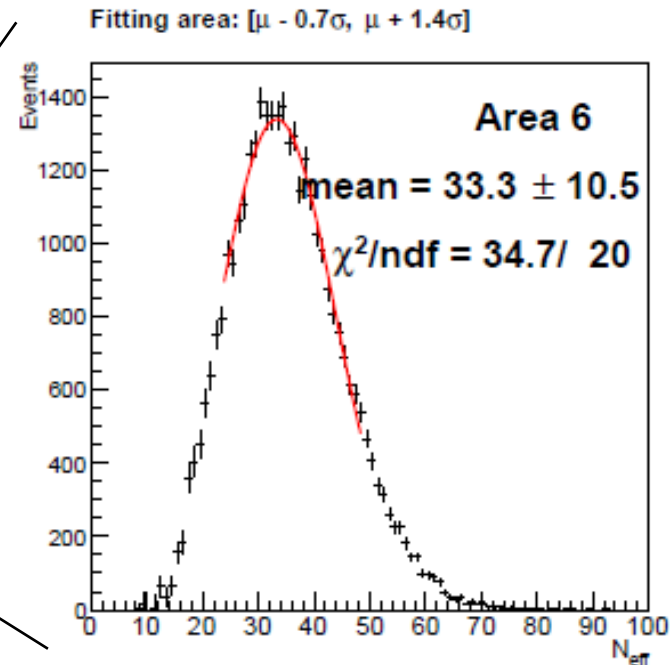
- Gd導入完了後の2022年7月から2023年10月までのデータを使用
- 30日ごとのデータを1 periodとし、 N_{eff} の値をヒストグラム化、period0-15の N_{eff} の時間変化を見る

検出器の分割

- 右の条件によって検出器全体を9つのエリアに分割
- 各エリアでの N_{eff} のhit数グラフをガウス関数によってフィッティング

$$f(x) = a \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Area	$0 < r^2 < 74$	$74 < r^2 < 148$	$148 < r^2 < 222.01$
$5.36 < z < 16.1$	7	8	9
$-5.36 < z < 5.36$	4	5	6
$-16.1 < z < -5.36$	1	2	3



SKの座標系
 $r^2 = x^2 + y^2$

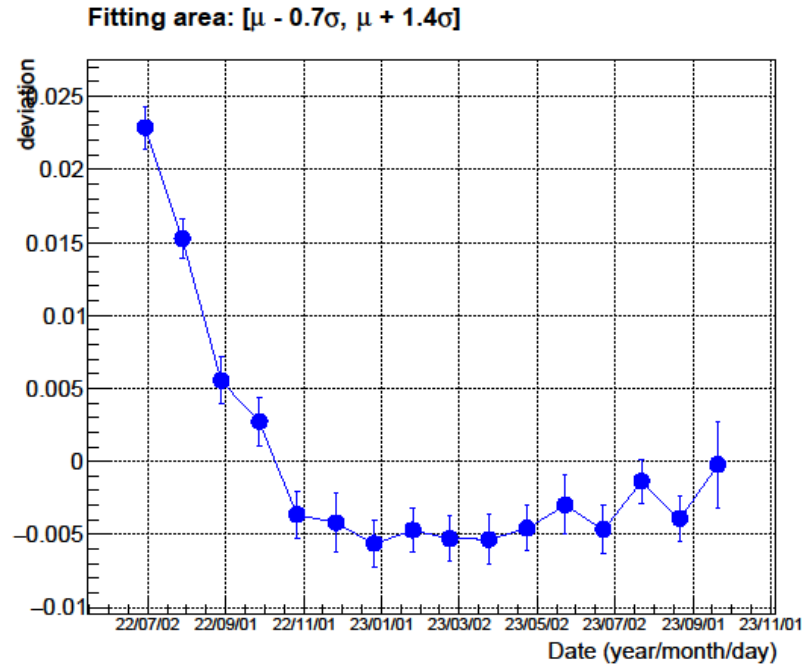
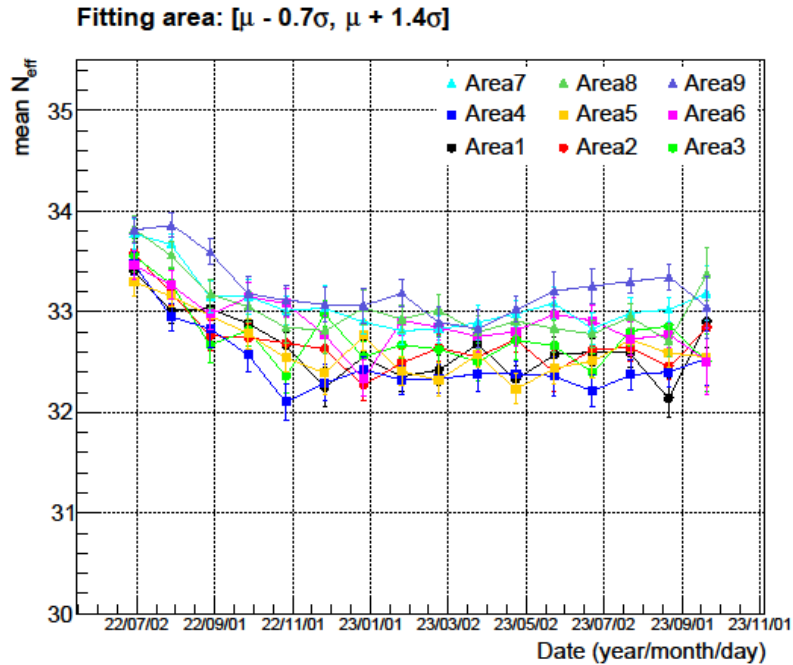
検出器の分割

▶ また、以下の式によって安定性を評価

$$\text{Deviation} = \frac{(\text{mean } N_{eff})_{\text{one period}}^{\text{ave}} - (\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}{(\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}$$

フィッティング結果

➤ 各エリア、各periodでのフィッティングの平均値の遷移、安定性は下図



$$\text{Deviation} = \frac{(\text{mean } N_{eff})_{\text{one period}}^{\text{ave}} - (\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}{(\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}$$

➤ 2022/07-2022/09の点において2.5%以内と0.5%以内に収まっていない
→ 時間依存性が存在する

フィッティング結果

▶ 時間依存性の原因として

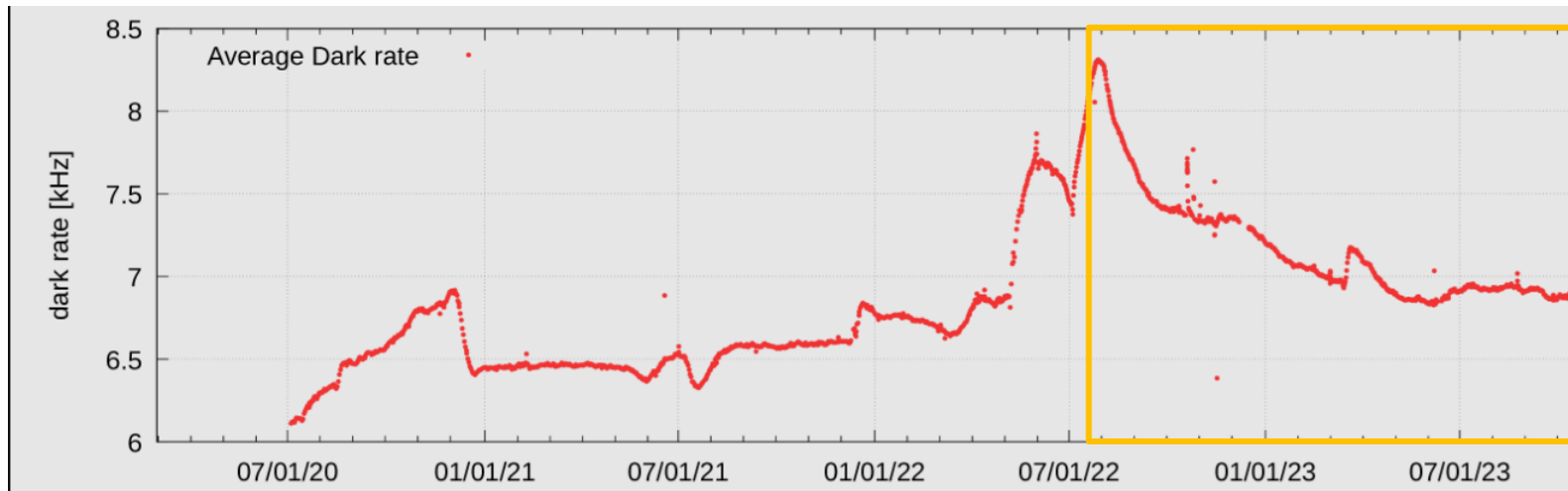
1. サブトリガーのthresholdによるカットオフの影響
2. 水の透過率の時間変化の影響

などが考えられる

- ## ▶ 1.の影響を考え、フィッティング範囲、関数が適切かどうかを確認する
- フィッティング関数の変更に関しては有意な差は見えなかった
 - フィッティング範囲の妥当性を考える

サブトリガーのthresholdの時間的変動

- ▶ PMTのdark rateに時間的な変動が見られる
- ▶ この影響は N_{50} から N_{eff} への補正においては考慮されているが、サブトリガーがかかる際には考慮されていない
- ▶ 結果として、実質的にサブトリガーのthresholdが時間的に変動している可能性がある

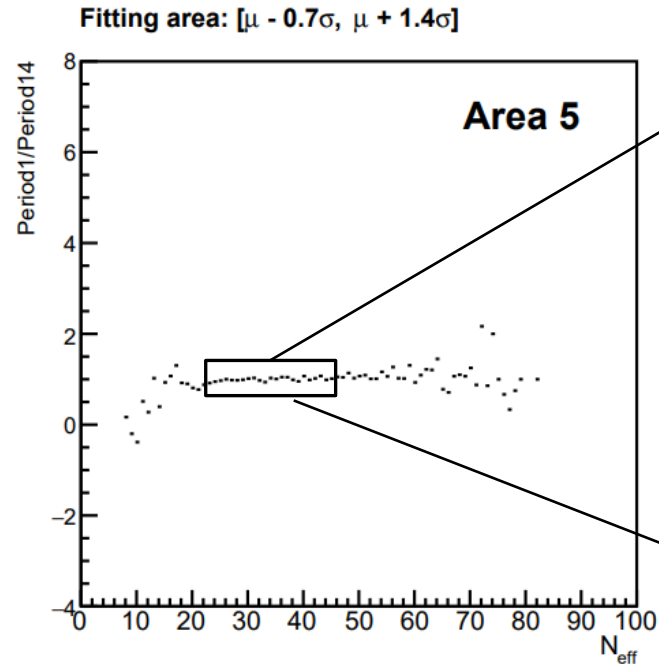
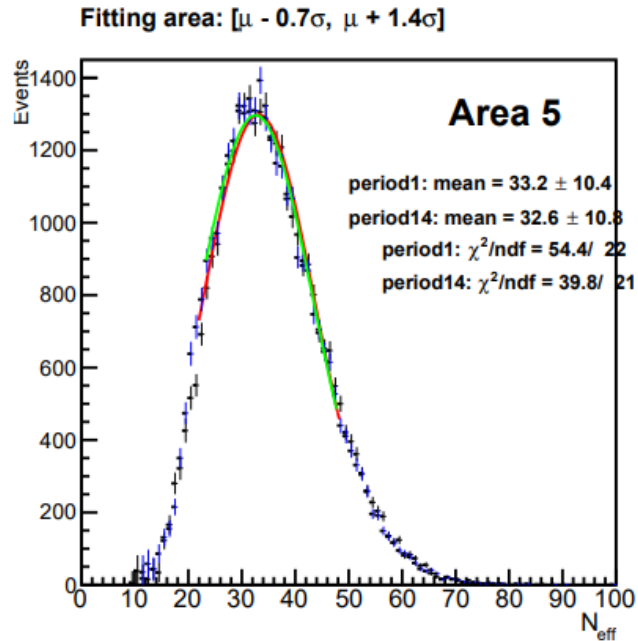


本研究における使用データの区間

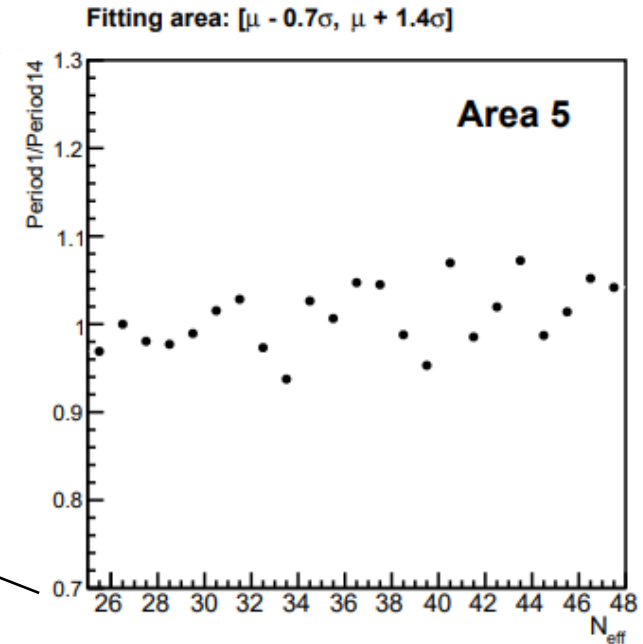
PMTのdark rateの時間的変化

フィッティング範囲の変更

▶ フィッティング範囲におけるperiod 1とperiod 14のヒストグラムの比は下図



全区間における比



フィッティング範囲における比

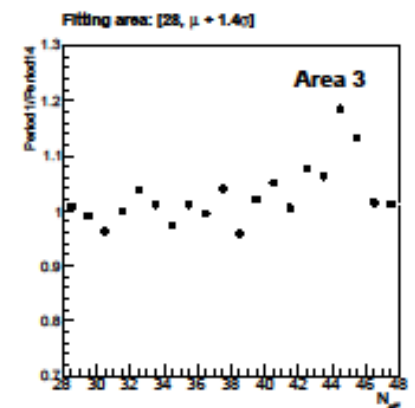
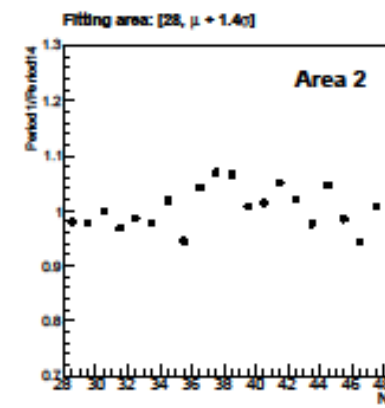
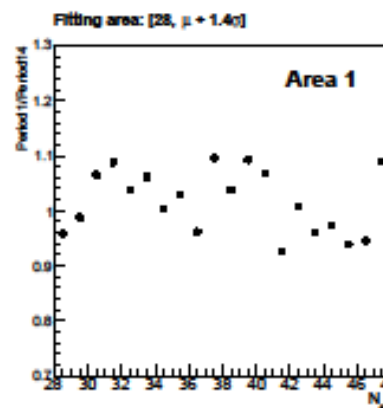
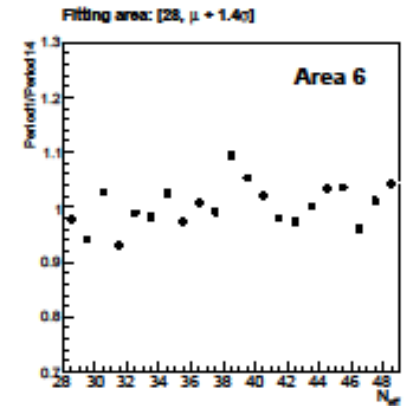
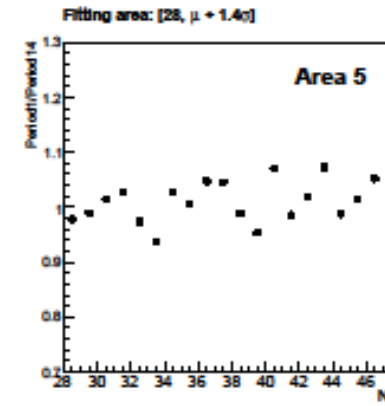
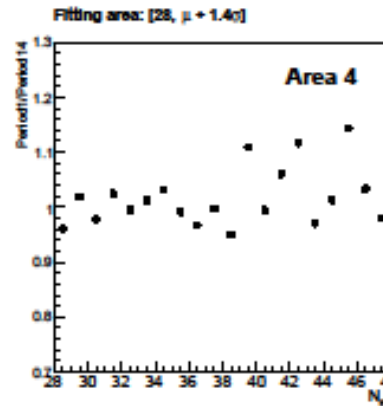
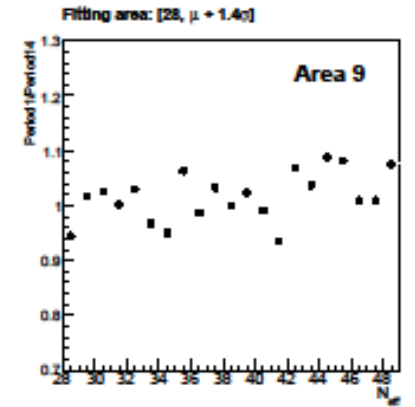
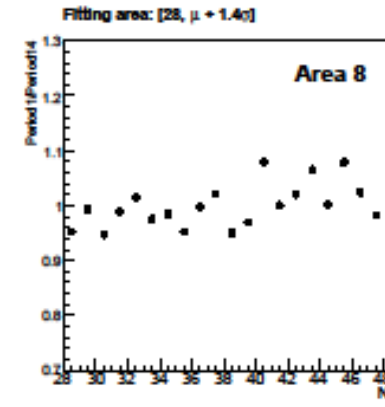
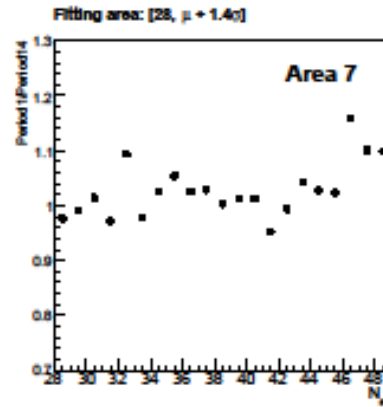
ヒストグラム

黒のプロットと赤の線: period1

青のプロットと緑の線: period14

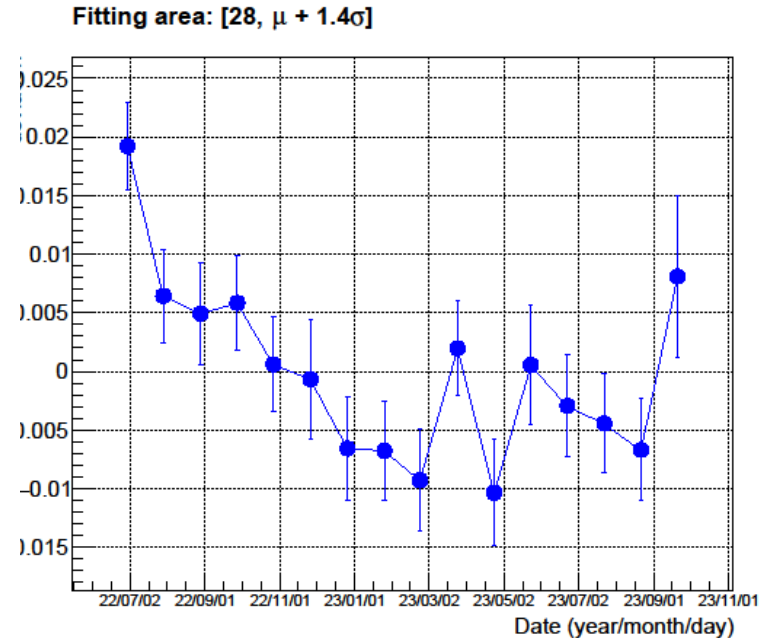
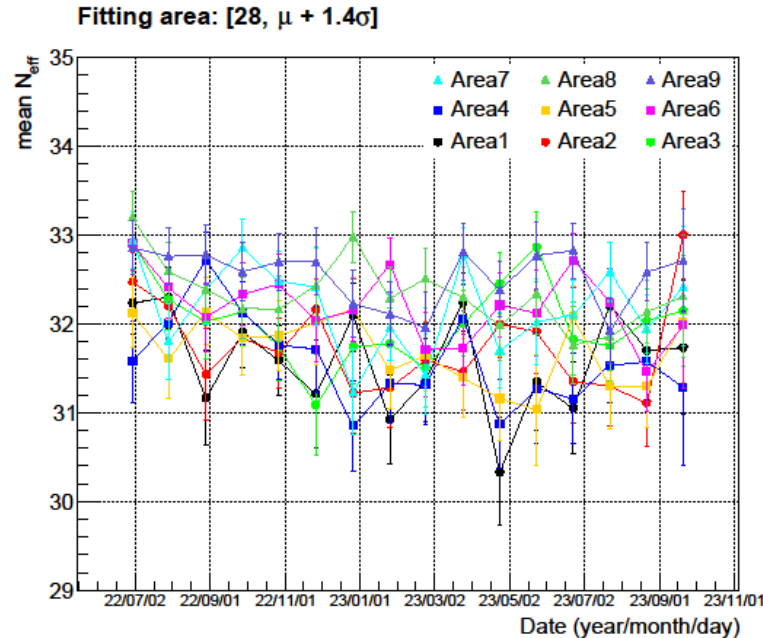
フィッティング範囲の変更

- ▶ フィッティング範囲を $[\mu - 0.7\sigma, \mu + 1.4\sigma]$ から $[28, \mu + 1.4\sigma]$ に変更
- ▶ フィッティング範囲での period 1 と period 14 の比は次図
- ▶ フィッティング起点あたりの比は安定している
→ threshold による影響は抑えられている



フィッティング範囲の変更

➤ 変更後のフィッティング結果と安定性は次図



$$\text{Deviation} = \frac{(\text{mean } N_{eff})_{\text{one period}}^{\text{ave}} - (\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}{(\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}$$

➤ 2%以内に収まり少し改善したが、その他の期間において1%以内となり、また、誤差の範囲も大きく安定性が悪い

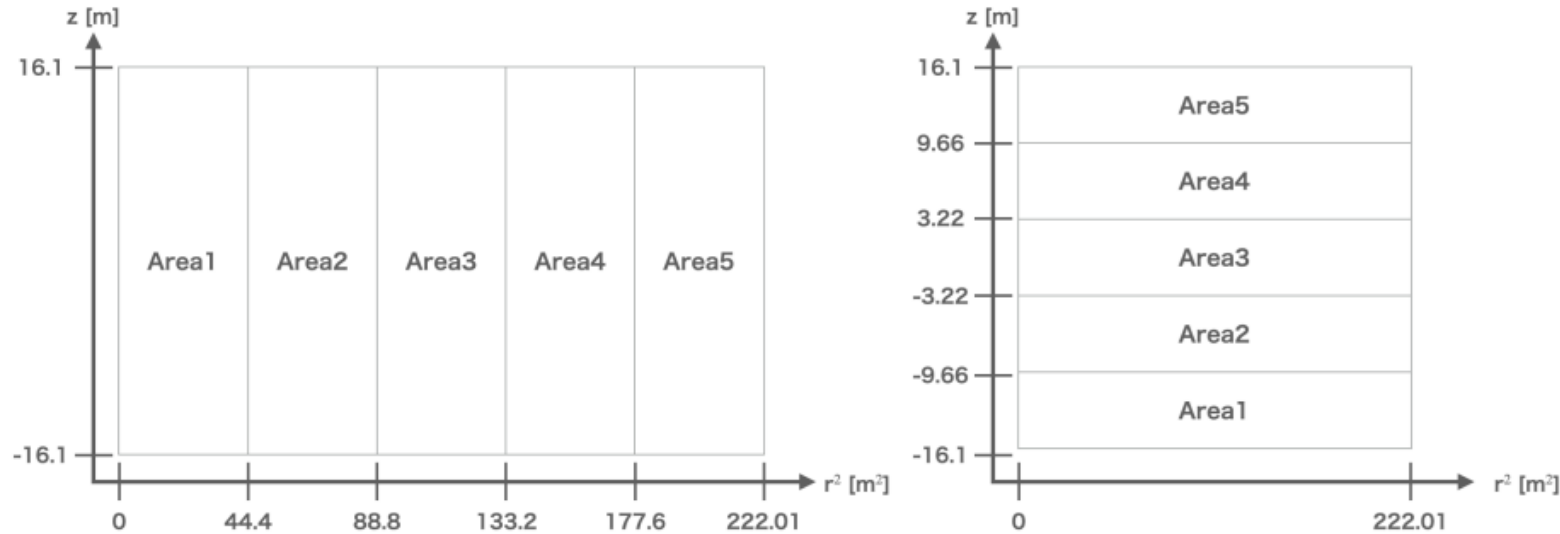
➤ このフィッティング範囲の変更は有意に改善したとは言えない

目次

- ▶ Super-Kamiokande 実験
- ▶ 本研究で行ったこと
 - ▶ Event selection
 - ▶ 時間依存性の評価
 - ▶ 位置依存性の評価

検出器の分割

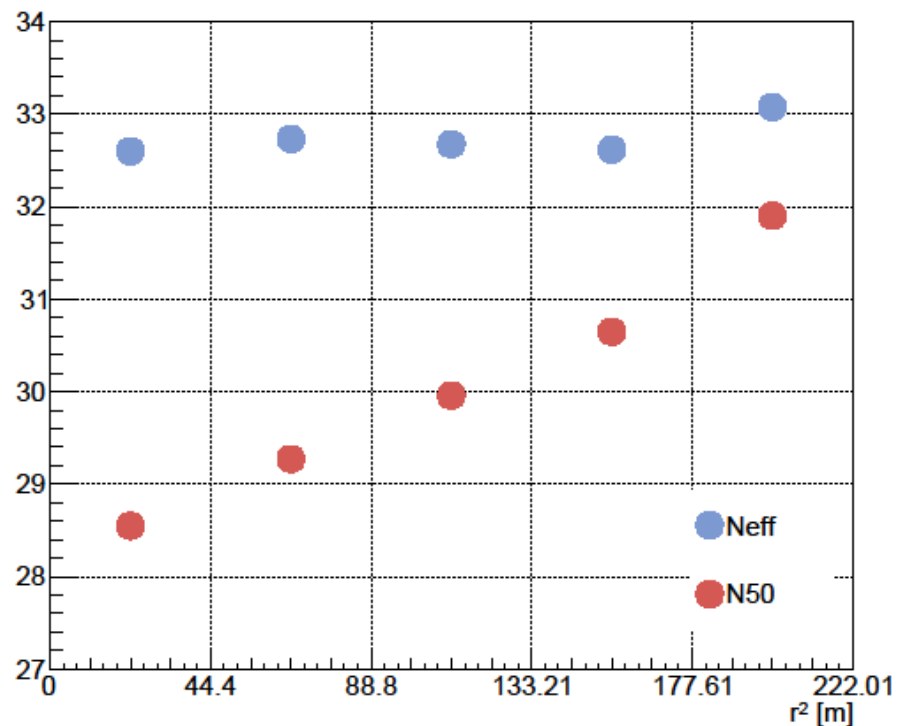
- 検出器を r^2 方向に五等分、 z 方向に五等分し、 r^2 と z の依存性を見る



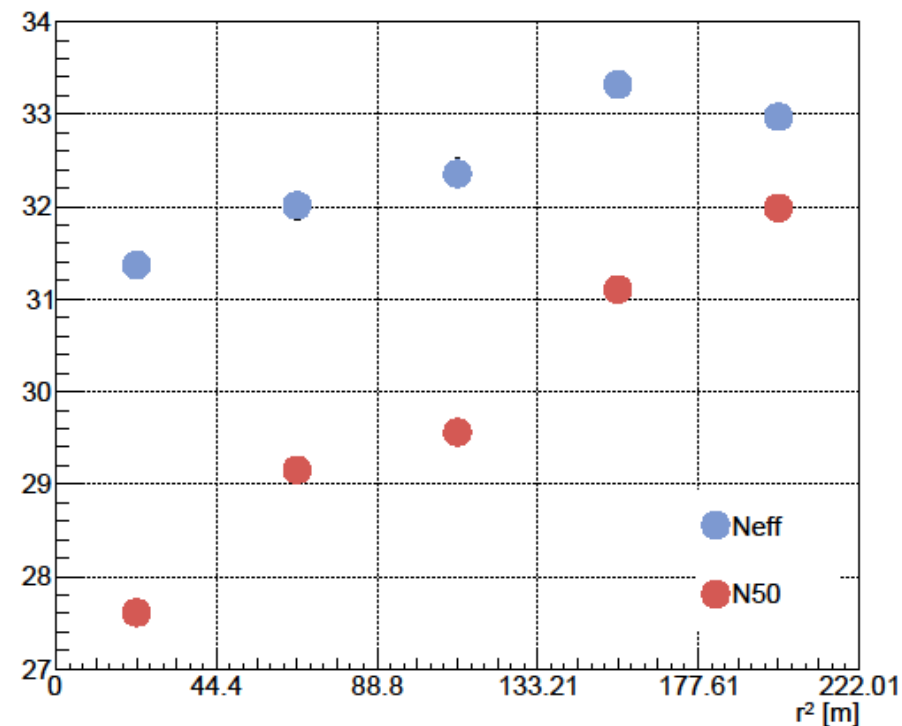
- エネルギー再構成時の系統誤差はデータとシミュレーションの不一致から求まる
→ Period 14のデータとモンテカルロ法によるシミュレーションの結果を比較

r^2 方向の依存性

▶ データ(下図左)とシミュレーション(下図右)による N_{50} と N_{eff} の r^2 分割における各エリアでの値は下図



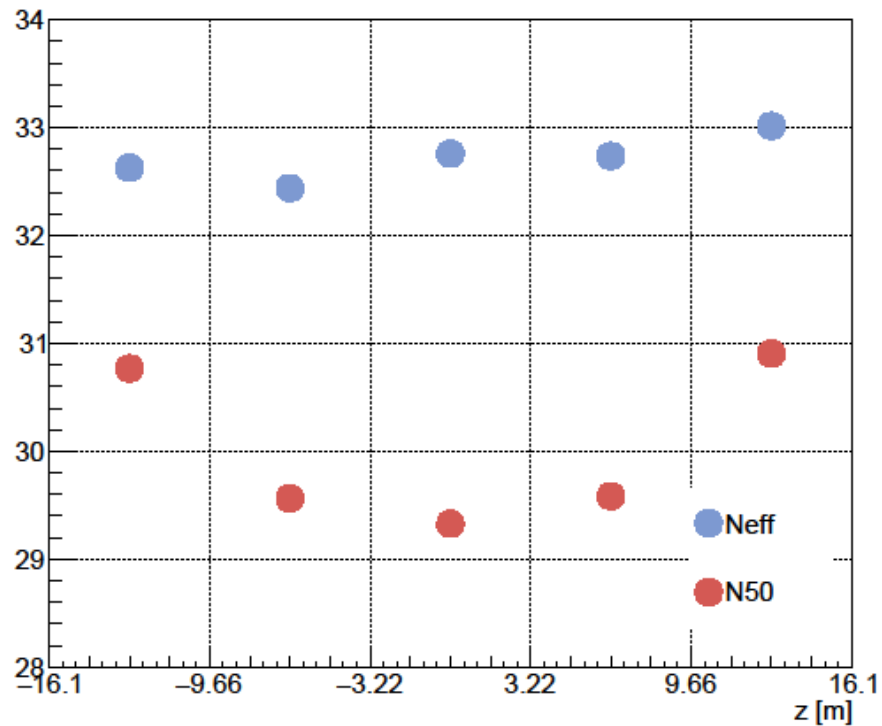
データによる N_{50}, N_{eff} の r^2 依存性



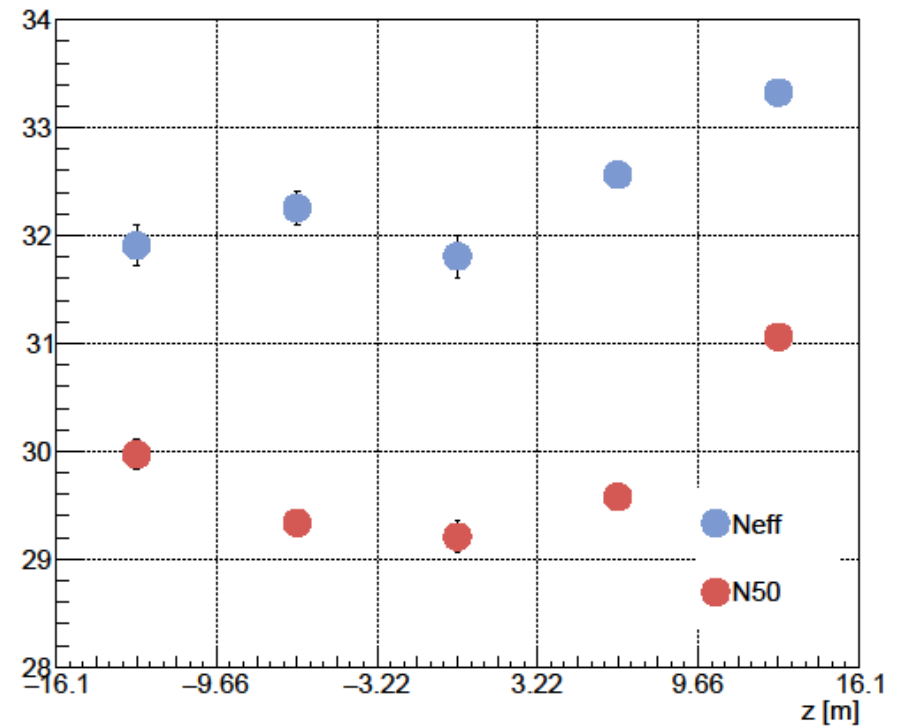
シミュレーションによる N_{50}, N_{eff} の r^2 依存性

z方向の依存性

▶ データ(下図左)とシミュレーション(下図右)による N_{50} と N_{eff} のz分割における各エリアでの値は下図



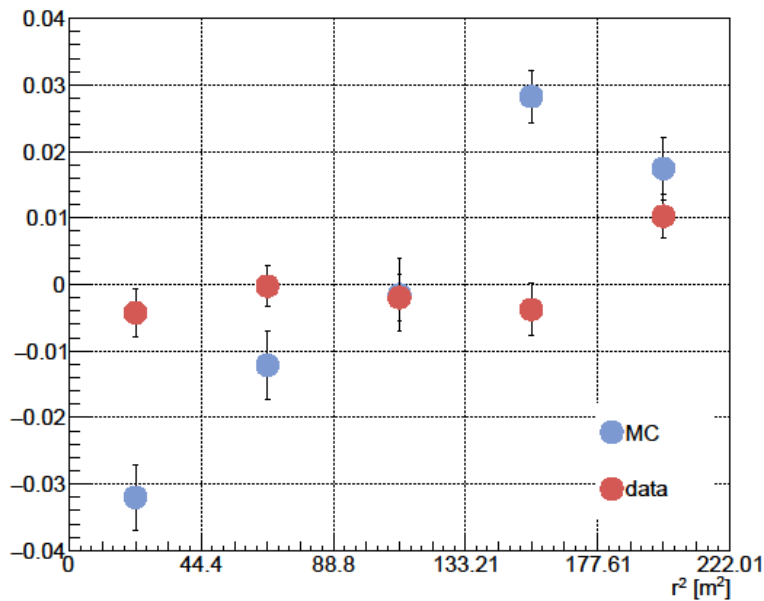
データによる N_{50}, N_{eff} のz依存性



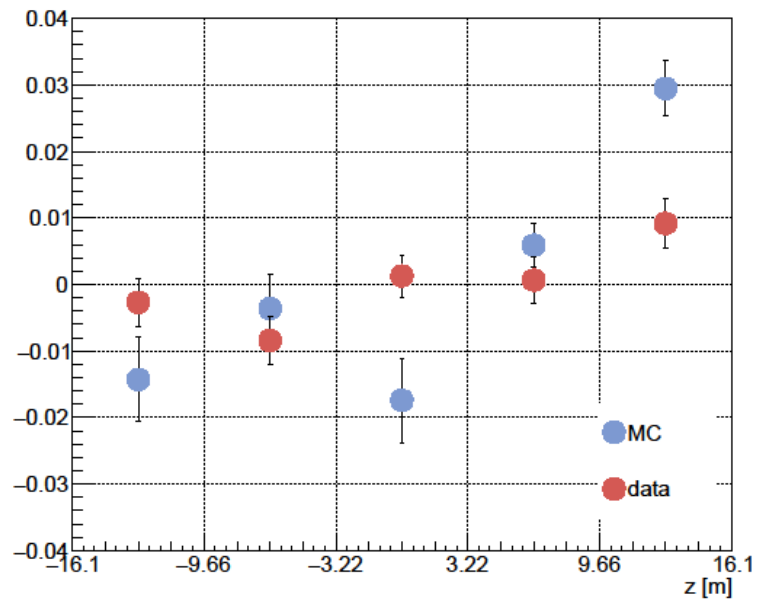
シミュレーションによる N_{50}, N_{eff} のz依存性

位置依存性

- N_{eff} によって位置依存性はある程度補正されている
- データとシミュレーションの安定性は以下の図



r^2 分割による安定性



z 分割による安定性

$$\text{Deviation} = \frac{(\text{mean } N_{eff})_{\text{one area}} - (\text{mean } N_{eff})_{\text{all area}}^{\text{ave}}}{(\text{mean } N_{eff})_{\text{all area}}^{\text{ave}}}$$

- データとシミュレーションで最大約3%ほどの差がある

位置依存性

▶ シミュレーションとデータとの違いの原因として、

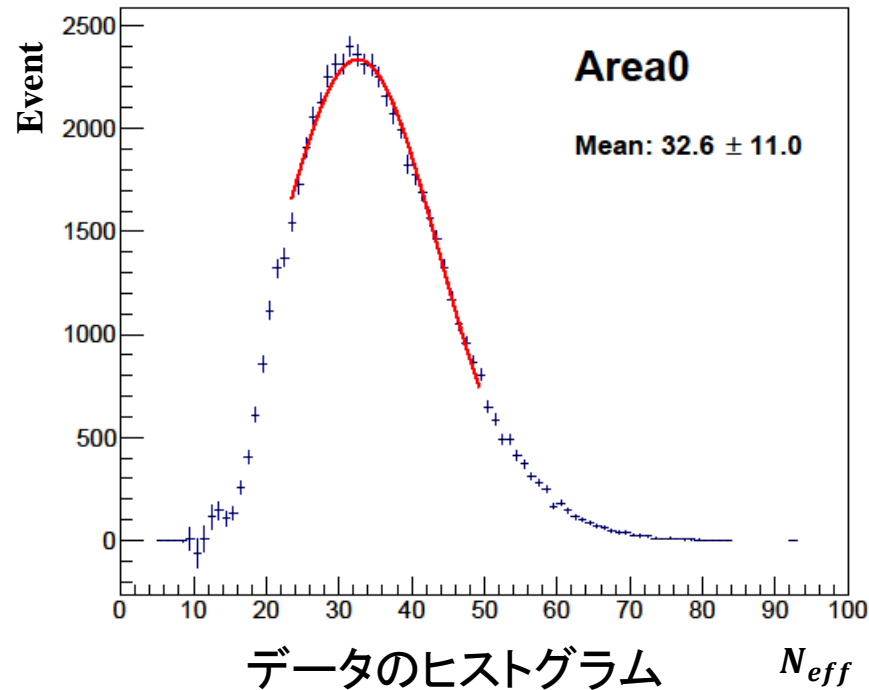
1. ノイズライクなイベントが混ざっている
2. 水の透過率の位置依存性などのモデルを再現できていない
3. PMTの個々の応答を再現できていない

などの可能性が考えられる

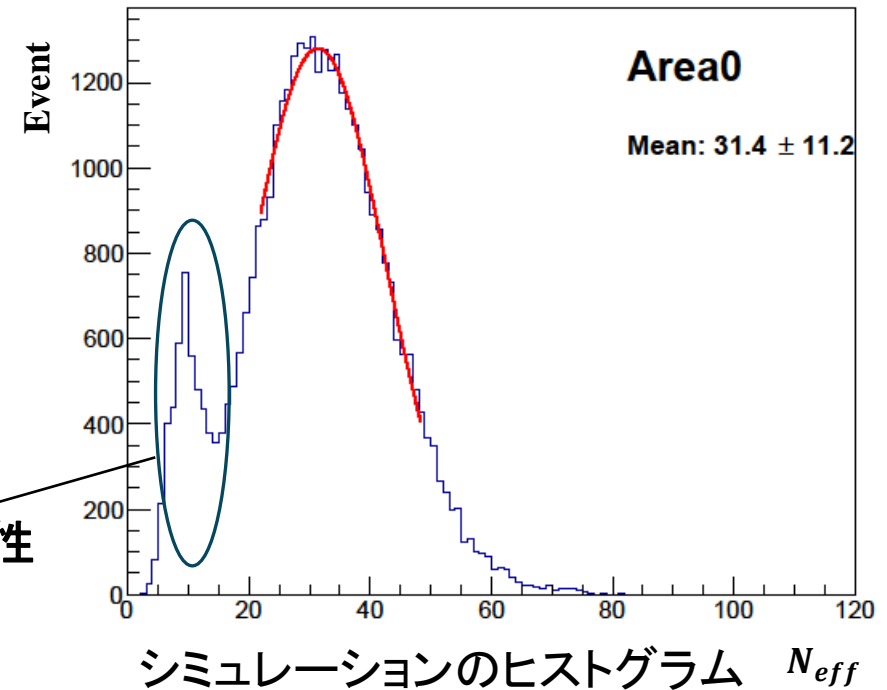
▶ ノイズライクなイベントについて考える

位置依存性

- シミュレーションにおいて、dark noiseなどのノイズの影響も含めてシミュレーションをされている可能性がある



ノイズの可能性



- このノイズの様な信号の評価と除去が必要

まとめ

- ▶ SKにおけるエネルギー較正の改善のため、核破碎中性子を用いた新しい較正手法を研究している
 - ▶ 位置依存性、時間依存性において0.5%以内での安定性を目標とする
- ▶ 2022年のGd導入直後の時期において、エネルギースケールに時間依存性、位置依存性が見えている
- ▶ 時間依存性の原因として、トリガーのthresholdの影響が考えられる
 - フィッティング範囲を適切に設定し、この影響を取り除く
- ▶ 位置依存性の原因を調べるために、データとシミュレーションの差異を比較する
 - データを再現するシミュレーションを作るために、ノイズライクなイベントを評価、適切に処理する
- ▶ そのうえで時間依存性、位置依存性を再評価、原因の解明と較正方法改善することを目指す

Back up

N_{eff} の計算式

➤ N_{eff} は以下の式によって定義される

$$\begin{aligned} \text{➤ } N_{eff} = & \sum_i^{N_{50}} (X_i + \epsilon_{tail} - \epsilon_{dark}) / (1 + G_i \times C_{gain}) \\ & \times \frac{N_{alive}}{N_{all}} \times \frac{S(0,0)}{S(\theta_i, \phi_i)} \times \frac{1}{QE_i} \exp\left(\frac{r_i}{L_{eff}}\right) \end{aligned}$$

Correction elements

- X_i : multiple photoelectrons
- ϵ_{tail}^i : delay hit
- ϵ_{dark}^i : dark hit
- $(1 + G_i \times C_{gain})$: gain
- $\frac{N_{all}}{N_{alive}}$: the percentage of PMTs that are working properly
- $S(\theta, \phi)$: photocathode coverage
- $\exp(r_i/L_{eff}^i)$: attenuation effect by water
- $1/QE_i$: quantum efficiency of PMT

フィッティング範囲の決定

➤ N_{eff} のフィッティングにおいて、サブトリガーのthresholdによるカットオフの影響を乗せないために複数回連続でフィッティングを行う

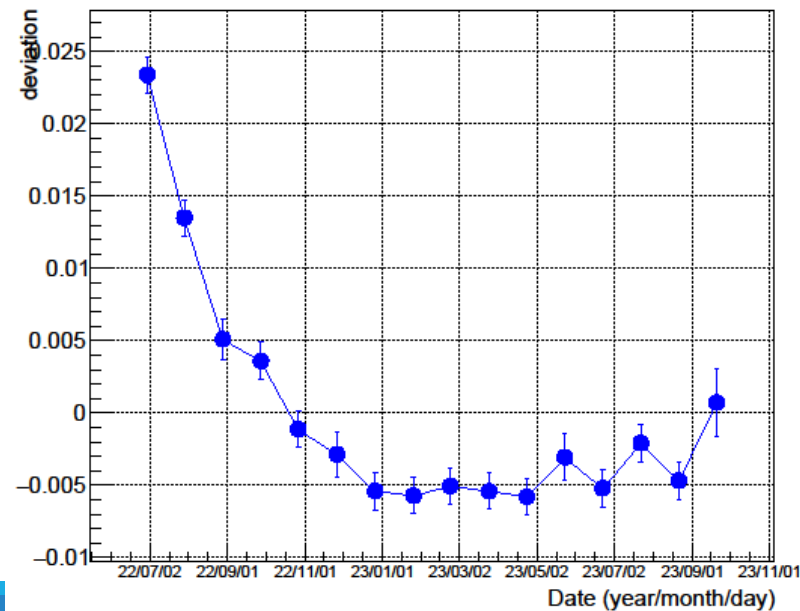
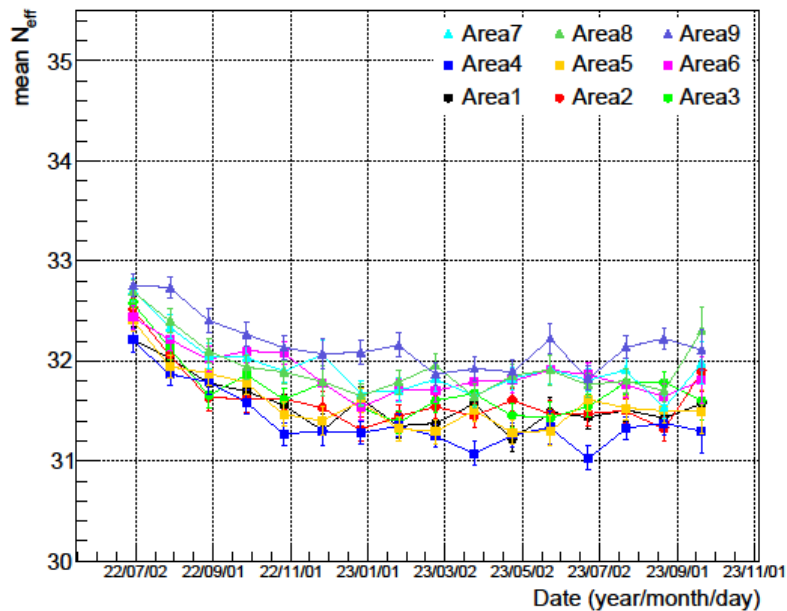
1. $[20, 70]$ の範囲でフィッティングを行い、 μ_1, σ_1 を求める
2. $[\mu_1 - 0.4\sigma_1, \mu_1 + 1.5\sigma_1]$ の範囲で二回目のフィッティングを行い、 μ_2, σ_2 を求める
3. $[\mu_2 - 0.7\sigma_2, \mu_2 + 1.5\sigma_2]$ の範囲で三回目のフィッティングを行い、 μ, σ を求める
4. μ を N_{eff} の平均値として使用する

フィッティング関数の変更

- フィッティング関数として、以下の関数を用いる

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2x}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- この関数の最頻値を N_{eff} として用いる
- フィッティング結果と安定性は以下



$$\text{Deviation} = \frac{(\text{mean } N_{eff})_{\text{one period}}^{\text{ave}} - (\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}{(\text{mean } N_{eff})_{\text{all period}}^{\text{ave}}}$$

フィッティング関数の変更

- ▶ ガウス関数の時と同様最大2.5%以内のずれが存在している
- ▶ フィッティング関数の変更に有意な差はないと言える