

# T2K実験におけるミューオンニュートリノ 消失現象を用いたニュートリノ振動 パラメータの測定

京都大学 高エネルギー物理学研究室  
村上 明

# 目次

- ニュートリノ振動
- T2K実験
- データ取得・ビームの安定性
- ニュートリノ事象の予測・観測
- 振動解析
- 結論

# ニュートリノ振動

フレーバー固有状態(物質との反応)と質量固有状態(時間発展)が異なる:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \times \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

混合行列

(Pontecorvo-Maki-Nagawa-Sakata matrix)

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$
$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

$\delta$ :CP phase

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ニュートリノ質量>0 ( $\leftarrow$ 標準理論では0)

$\rightarrow$  飛行中にフレーバーが変化: “ニュートリノ振動”

振動確立は混合角, 質量二乗差, 距離(L), エネルギー(E)に依存

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \cdot \sin\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) + \dots \quad \Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$$

# ニュートリノ振動の理解・課題

現状の理解 (~2012年, グローバルフィット by G. Fogli et al.)

	$\Delta m^2_{12} (\text{eV}^2)$	$\Delta m^2_{32} (\text{eV}^2)$	$\theta_{12} (\text{°})$	$\theta_{23} (\text{°})$	$\theta_{13} (\text{°})$	$\delta$
中心値	$7.6 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-3}$	<b>34.0</b>	<b>40.4</b>	<b>9.1 ≠ 0</b>	?
誤差	$0.2 \times 10^{-5}$	$0.1 \times 10^{-3}$	1.1	3.2	0.6	?

$\theta_{13} \neq 0$ , しかも意外と大きい

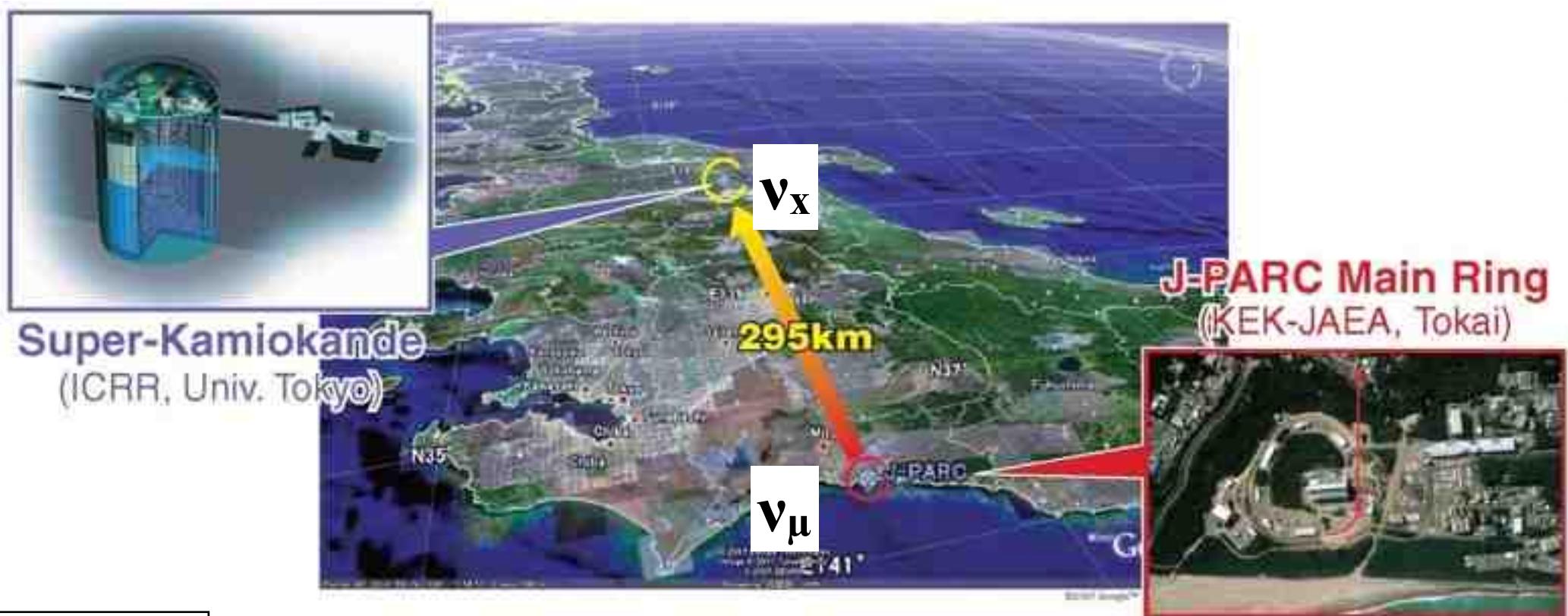
→ 未測定 CP asymmetry ( $\delta$ ) の測定

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4 \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin \left( \frac{\Delta m^2_{31} L}{4E} \right) + (\text{CP asymmetry}) \dots$$

$$(\text{CP asymmetry}) \propto \sin \theta_{12} \sin \theta_{13} \sin \theta_{23} \sin \delta$$
$$\sim 0.56 \quad \sim 0.16 \quad \sim 0.65$$

今後、 $\theta_{23}$ の精度が重要 → T2K実験にて $\theta_{23}$ の精密測定

# T2Kニュートリノ振動実験



## 主な目的

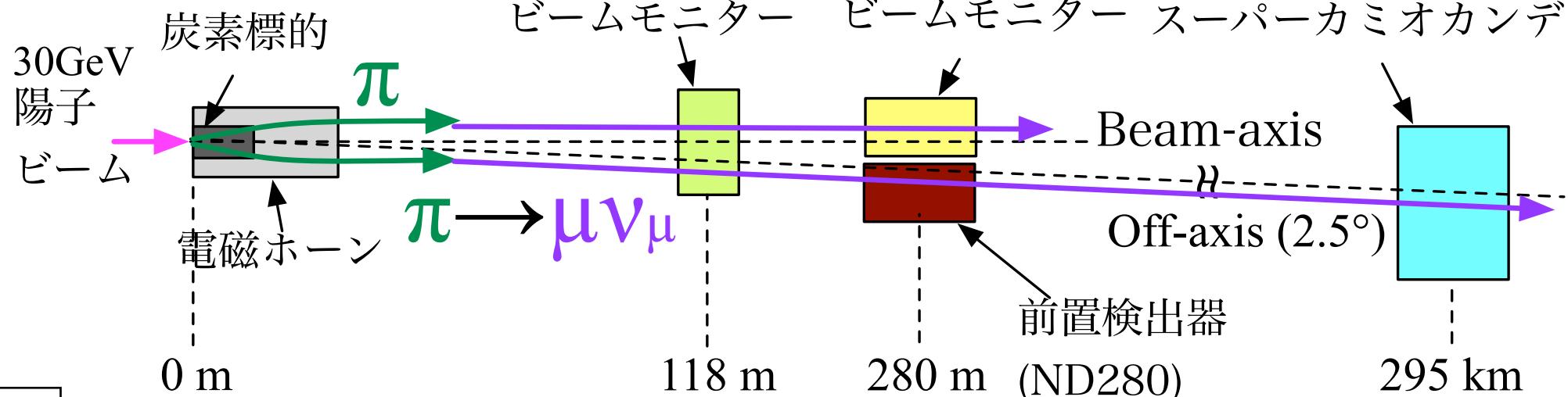
$\nu_e$ 出現事象( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ )の観測、有限な $\theta_{13}$ の値を決定

$\nu_\mu$ 消失事象( $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ )の観測を元に、( $\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m^2_{32}$ )の精密測定

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \sim 1 - \textcircled{\sin^2 2\theta_{23}} \cdot \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2_{32} L}{4E} \right)$$

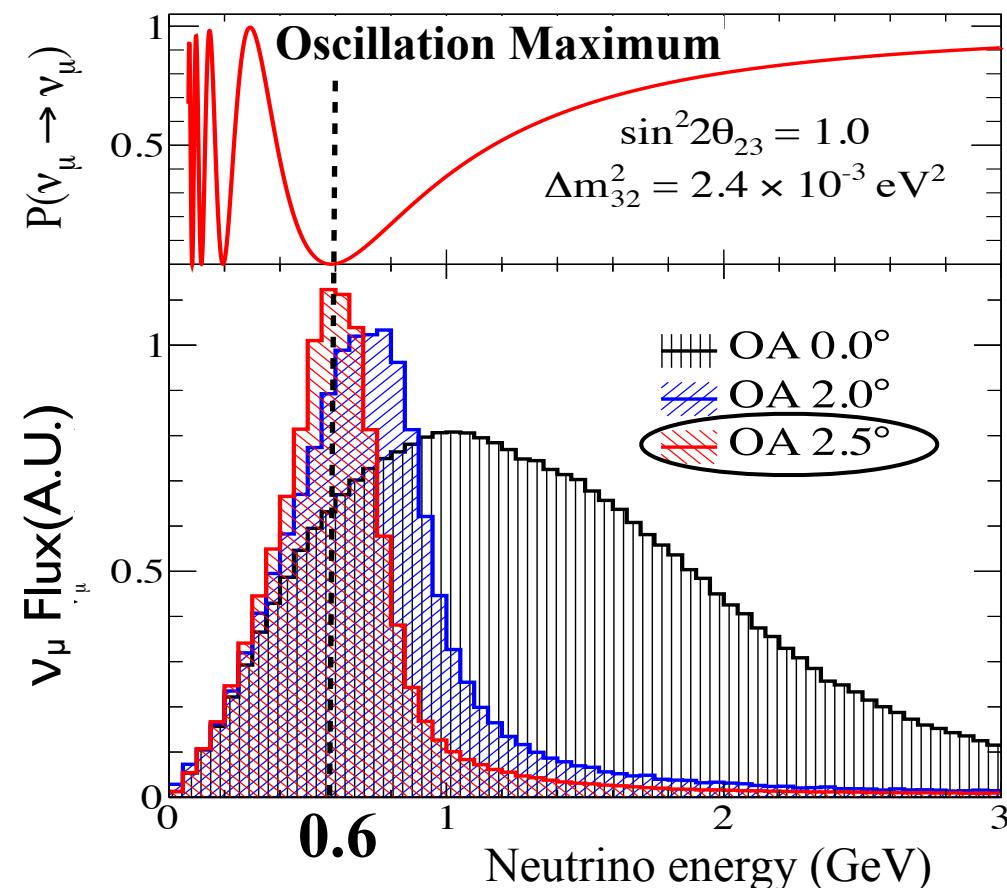
目標精度:  $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \sim 0.01$ ,  $\delta(\Delta m^2_{32}) \sim 10^{-4} \text{ eV}^2$

# 実験概略



## 特徴

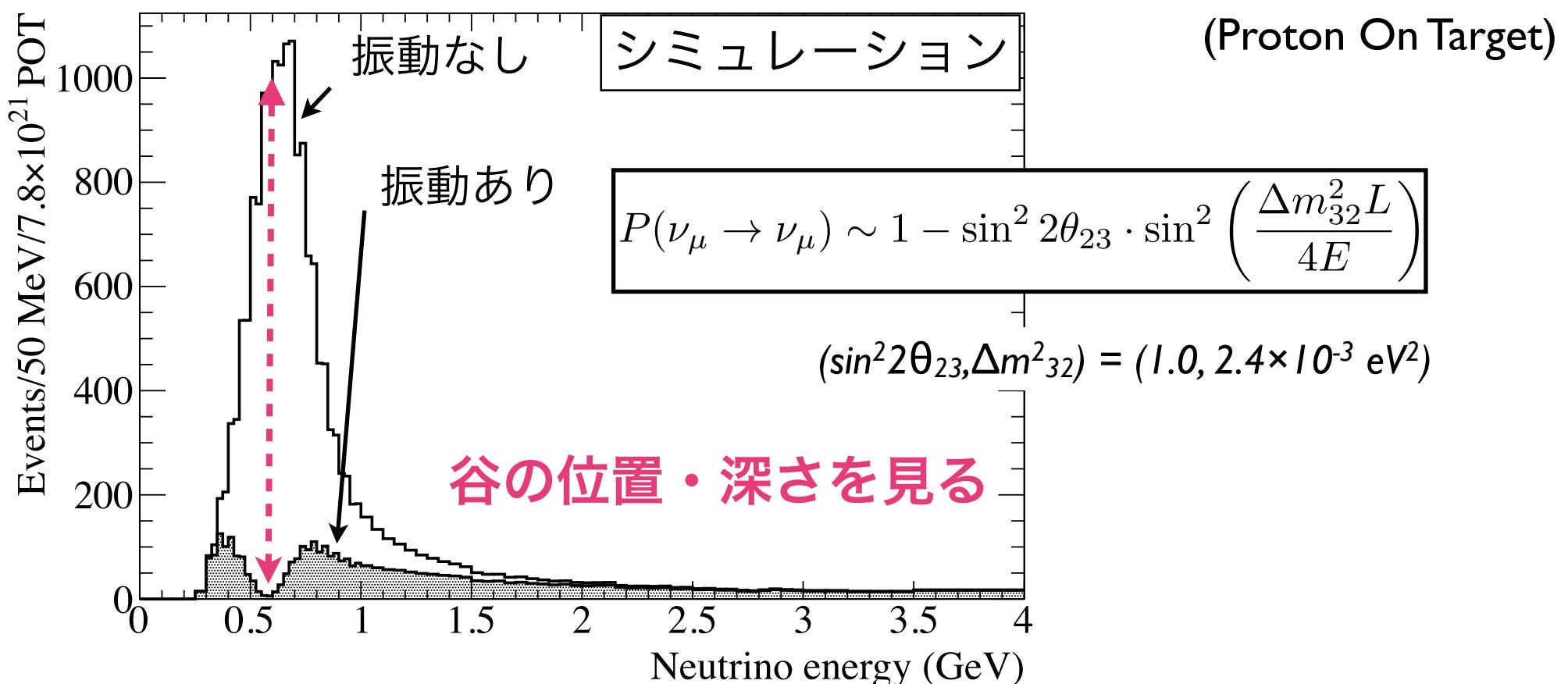
- 世界最高峰の強度の陽子ビーム
- 世界最大級の水チェレンコフ検出器: スーパーカミオカンデ
- Off-axisビーム
  - 振動の効果を最大に
  - \*  $\nu$  の方向がフラックスに影響
  - 目標精度達成のためビームモニタで方向を 1 mrad 以内に制御



# SKでの $\nu_\mu$ 事象観測

- $\nu_\mu$ の観測 : Charge current (CC)反応で出てくる $\mu$ を観測
  - 0~1 GeVで主な反応 = **CCQE**;  $\nu_\mu + n \rightarrow \mu + p$
  - $\mu$ の運動量・角度分布から $\nu$ のエネルギーを再構成

SKでの予測 $\nu_\mu$ エネルギー分布 (目標統計:  $7.8 \times 10^{21}$  POT) POT: 統計の指標



# 振動解析

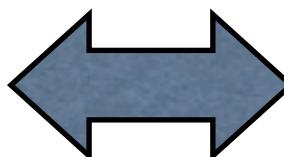
SKでの予測 $v_\mu$ の事象数・  
エネルギースペクトル

II

振動確率

×

$v$ フラックス ×  $v$ と物質の反応断面積 × SKの検出効率



SKでの測定 $v_\mu$ の事象数・  
エネルギースペクトル

- ① 実験を続け、観測数を増やす  
- 大強度陽子ビームの運用  
-  $v$ の方向の制御

②  $v$ フラックス,  $v$ 反応断面積に大きな系統誤差(20~30%)

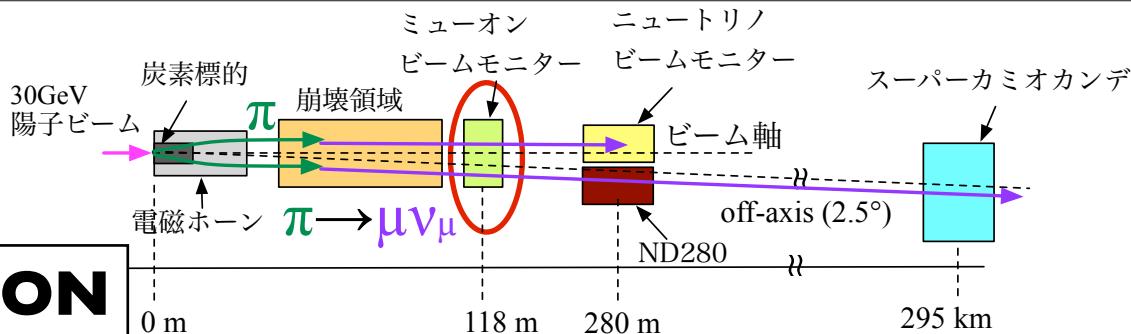
感度向上のために.....

- ①: ビームモニターによる安定した実験の遂行 &  $v$ ビームの方向を精度よく制御。
- ②: T2K&外部実験の測定を元に予測精度(特に $v$ フラックス)を向上。  
→ 振動解析を行い、( $\sin^2 2\theta_{23}$ ,  $\Delta m^2_{32}$ )を求める。

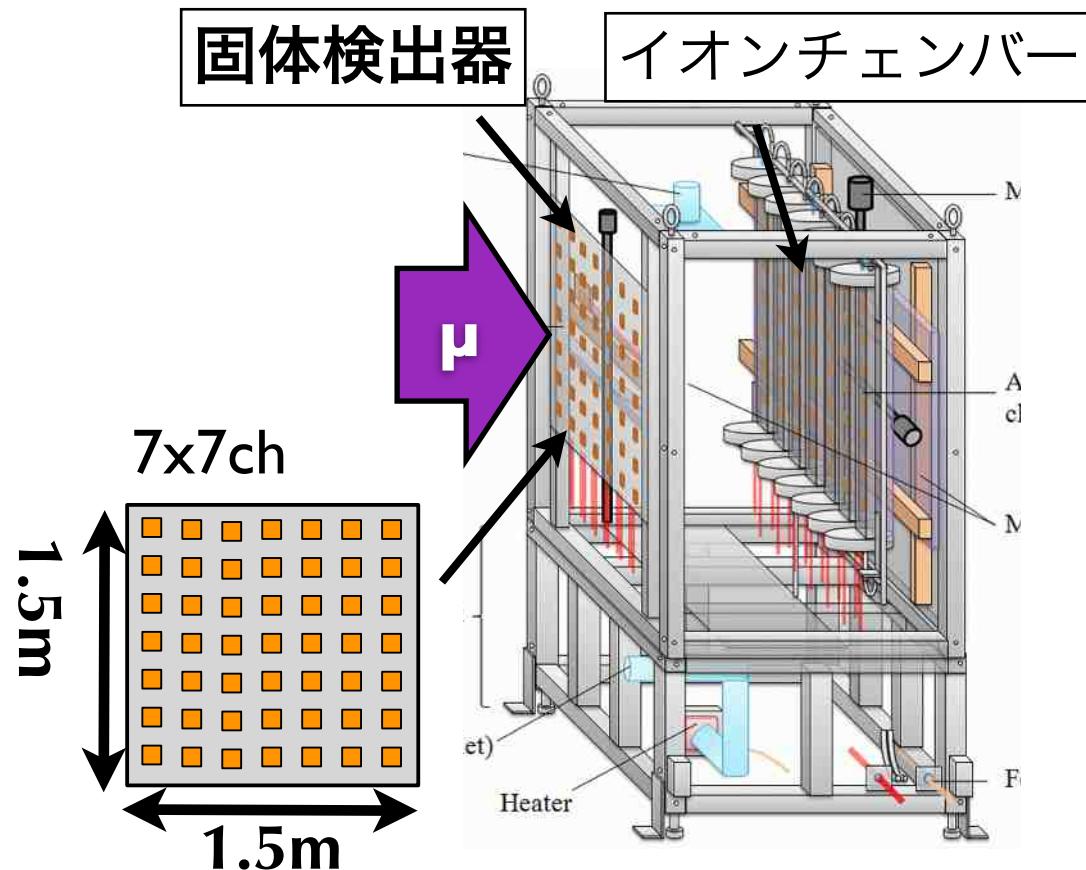
# ビームモニターによる監視

# ビームモニター

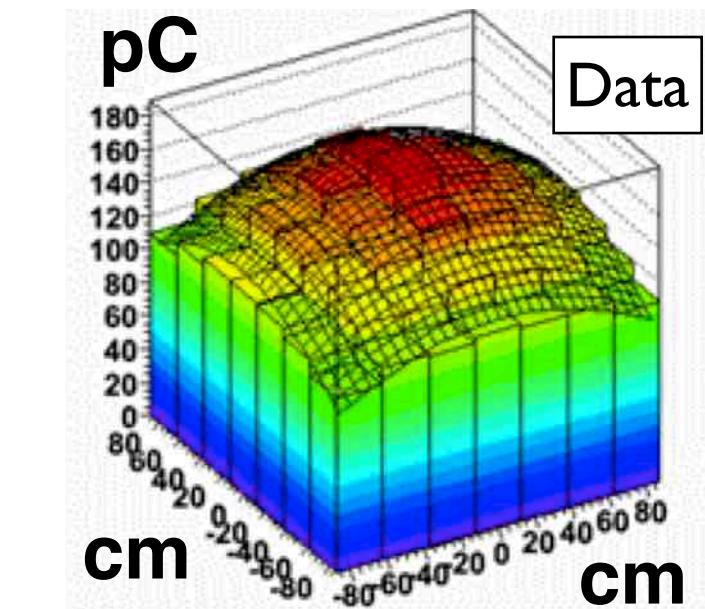
## ミューオンビームモニター:MUMON



- $\nu_\mu$  と一緒に生成される  $\mu$  の強度・方向を測定し、 $\nu_\mu$  を間接的に監視
- リアルタイム監視 → 即座にビーム制御にフィードバック



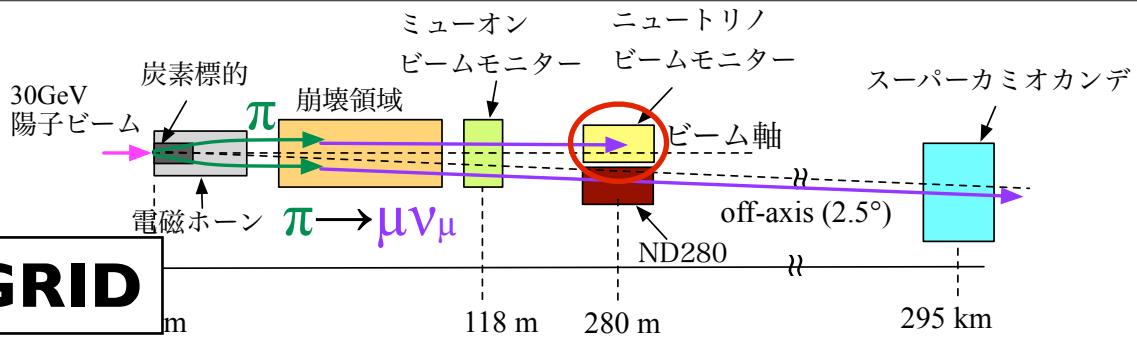
アレイ状の各chの電荷から $\mu$ のプロファイルの中心を求める



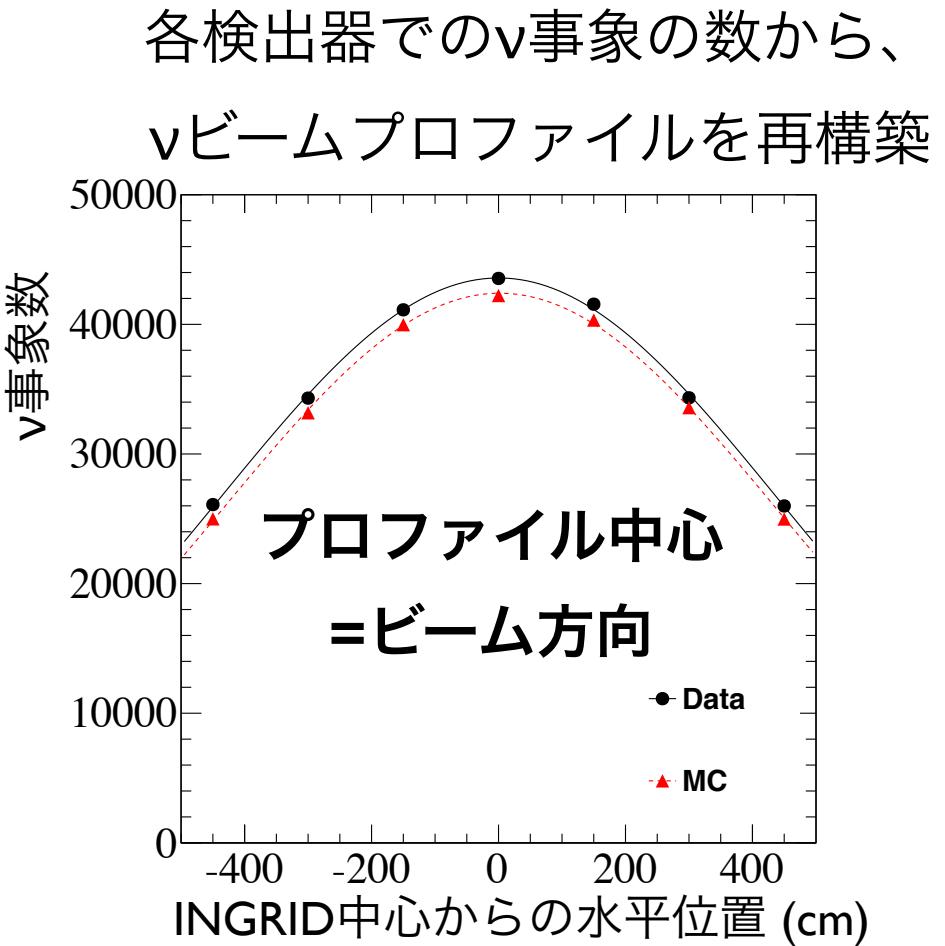
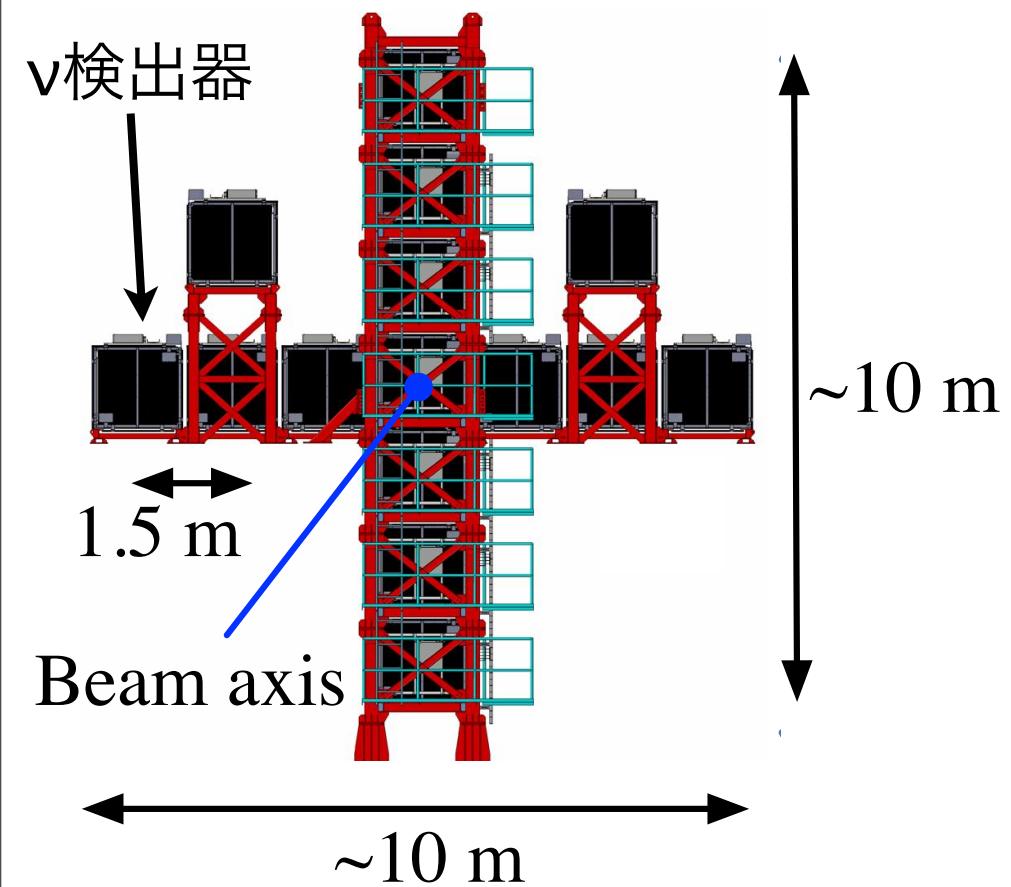
プロファイル中心=ビーム方向

# ビームモニター

## ニュートリノビームモニター: INGRID

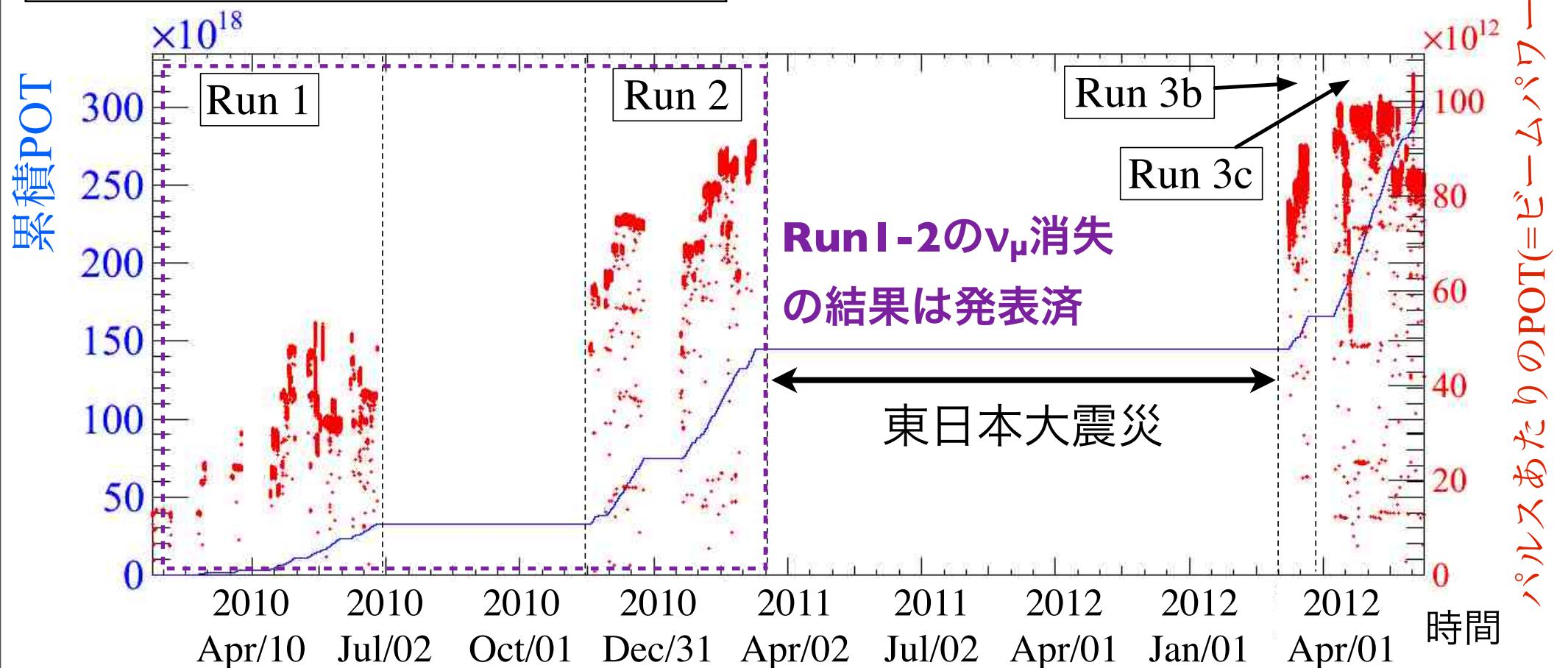


- $\nu$ 事象を観測し、 $\nu$ ビームの強度・方向を直接測定
- $\nu$ の反応断面積は小さいので、約1ヶ月のデータが必要



# データ収集(2010年1月~2012年6月)

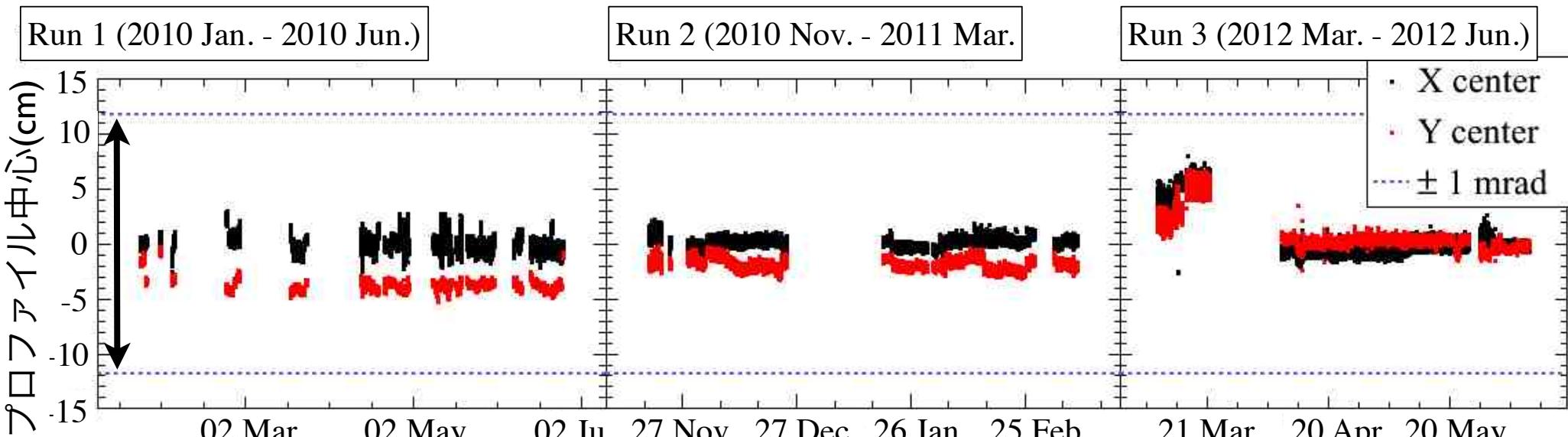
## 累積統計とビームパワーの推移



- 今回使用したデータの統計量(Run 1-3): **3.01×10<sup>20</sup> POT**
- Run 1-2の**約2倍**, T2Kの目標統計の**4%**

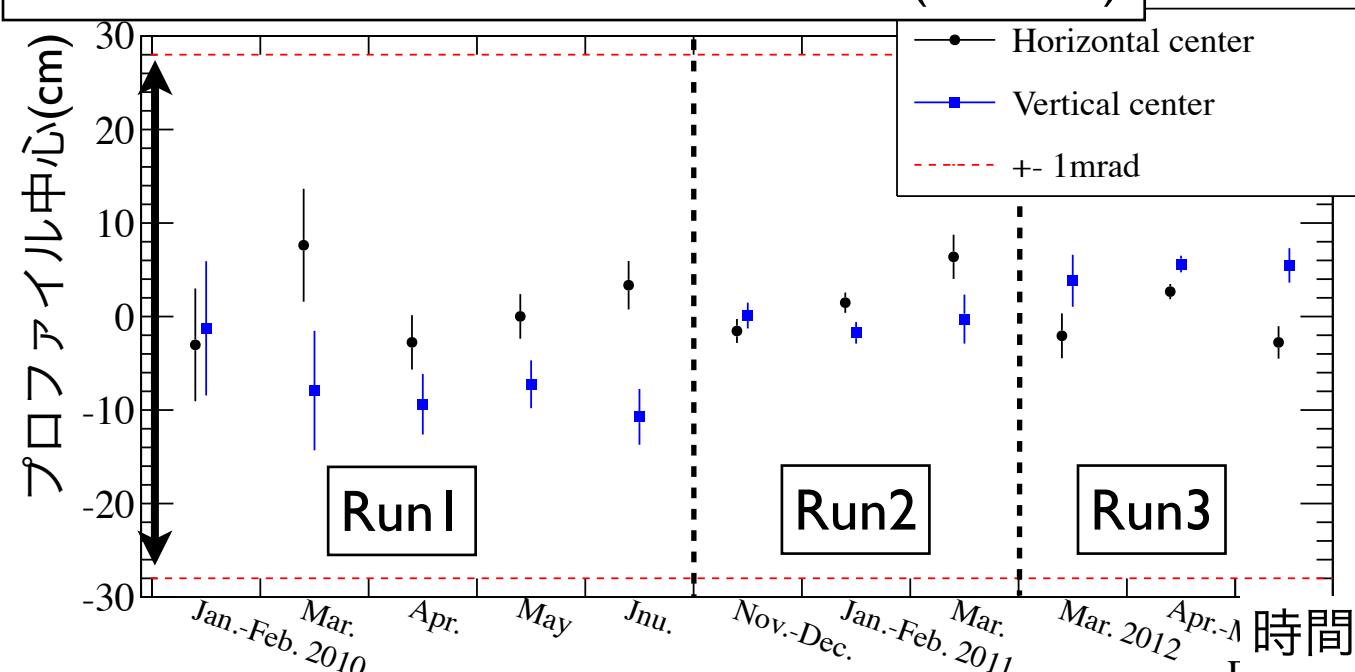
# ビームの安定性

MUMONで測定した $\mu$ ビームの方向 (パルス毎)



INGRIDで測定した $\nu$ ビームの方向 (月平均)

時間



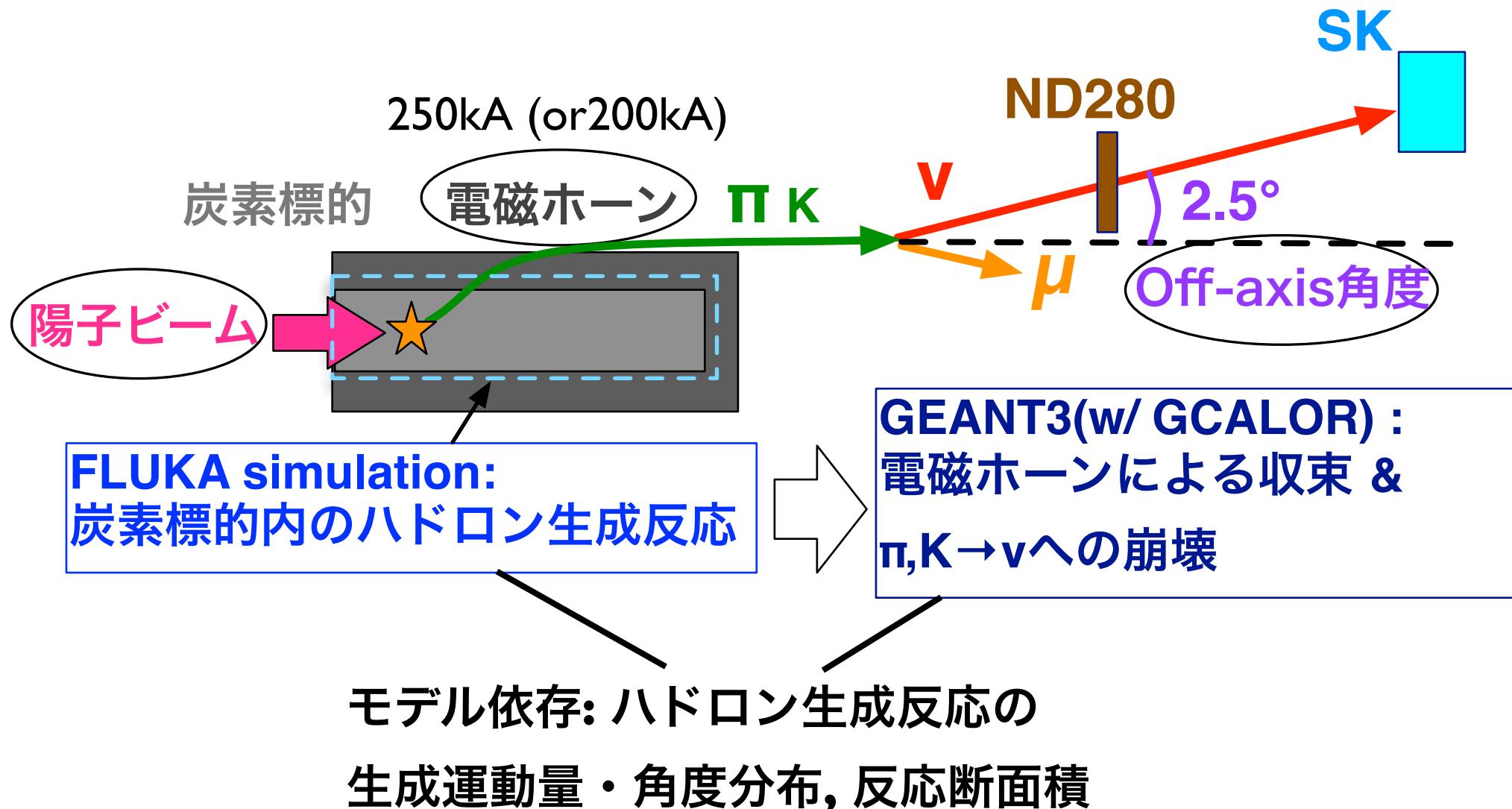
要求の1mrad内で  
安定にビームを制御

INGRIDの測定結果は  
 $\nu$ フラックス予測に使用

# SKでのν事象数・エネルギースペクトルの予測

# vフラックス予測

- モンテカルロシミュレーション(MC)を用いて予測



# $\nu$ フラックス予測の改善

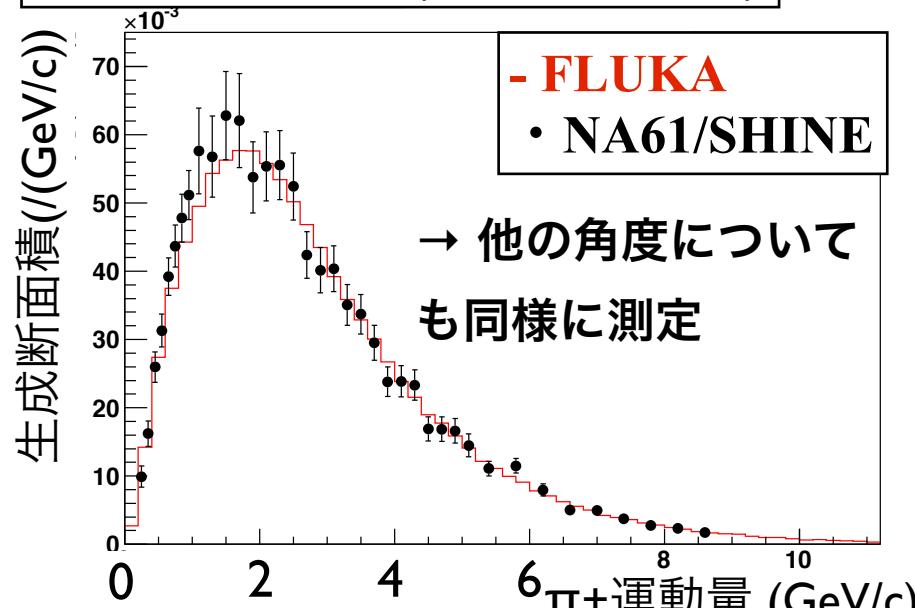
- ハドロン生成反応モデルの不定性

→ 外部の実験データ(**CERN NA61/SHINE: 30GeV p+C 等**)を元に、  
ハドロンの生成運動量・角度分布、  
反応断面積を調整

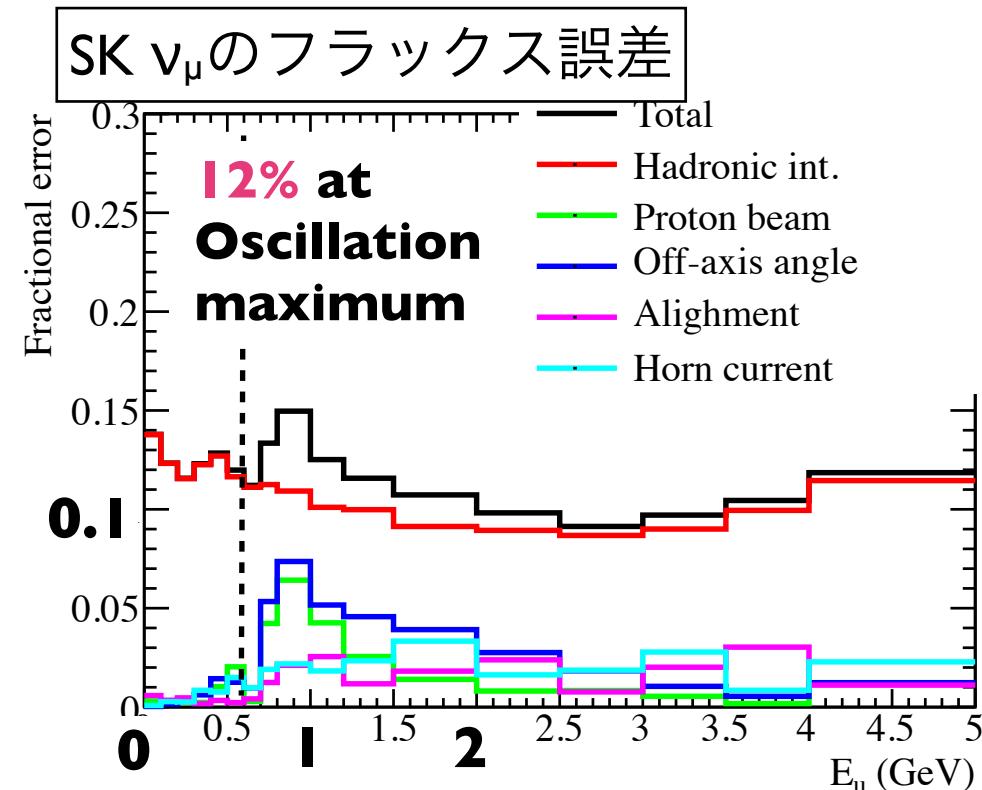
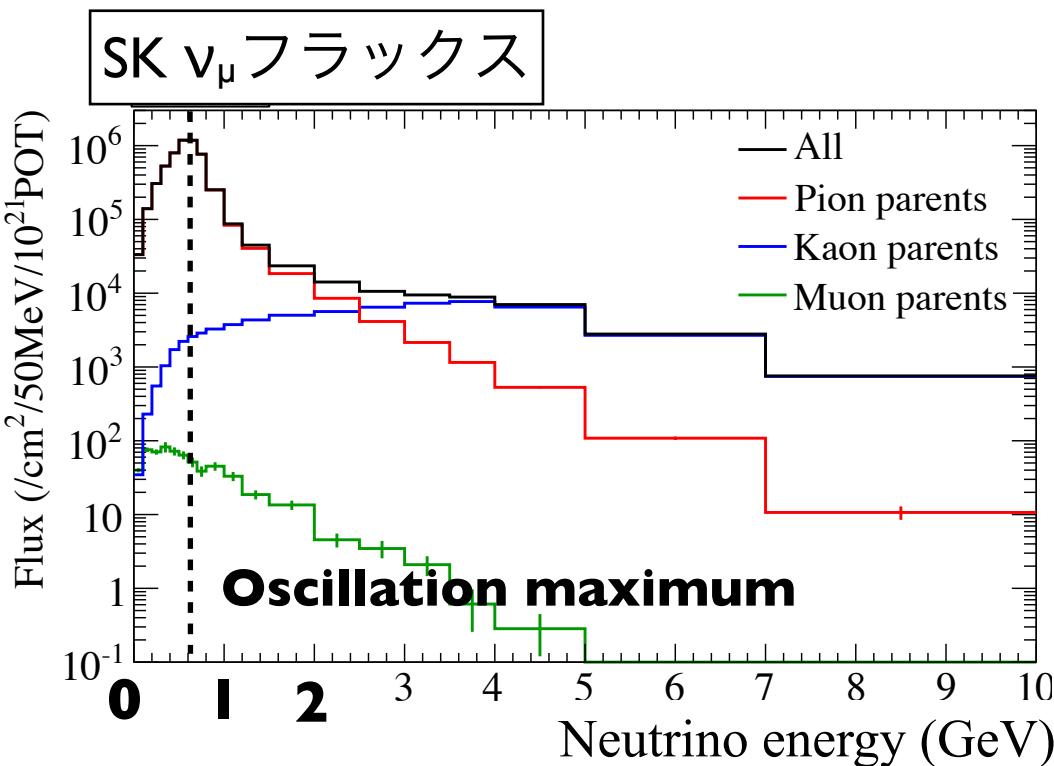
- モデル以外のパラメータの不定性

- $\nu$ ビームの方向、標的上での陽子ビームの位置・角度  
→ Off-axis角度に影響
  - ホーン電流値 →  $\nu$  フラックスの量に影響
- T2Kの各種ビームモニターで測定。
- 安定したビーム運転により不定性を抑える。

NA61/SHINEで測定した  
 $\pi^+$ の生成断面積(100~140 mrad)



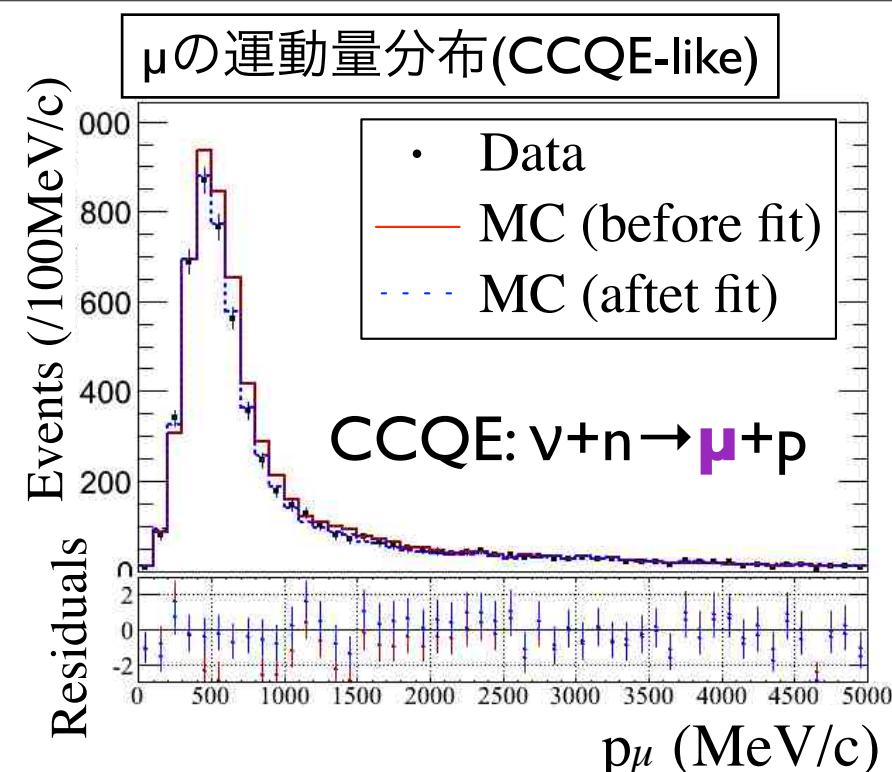
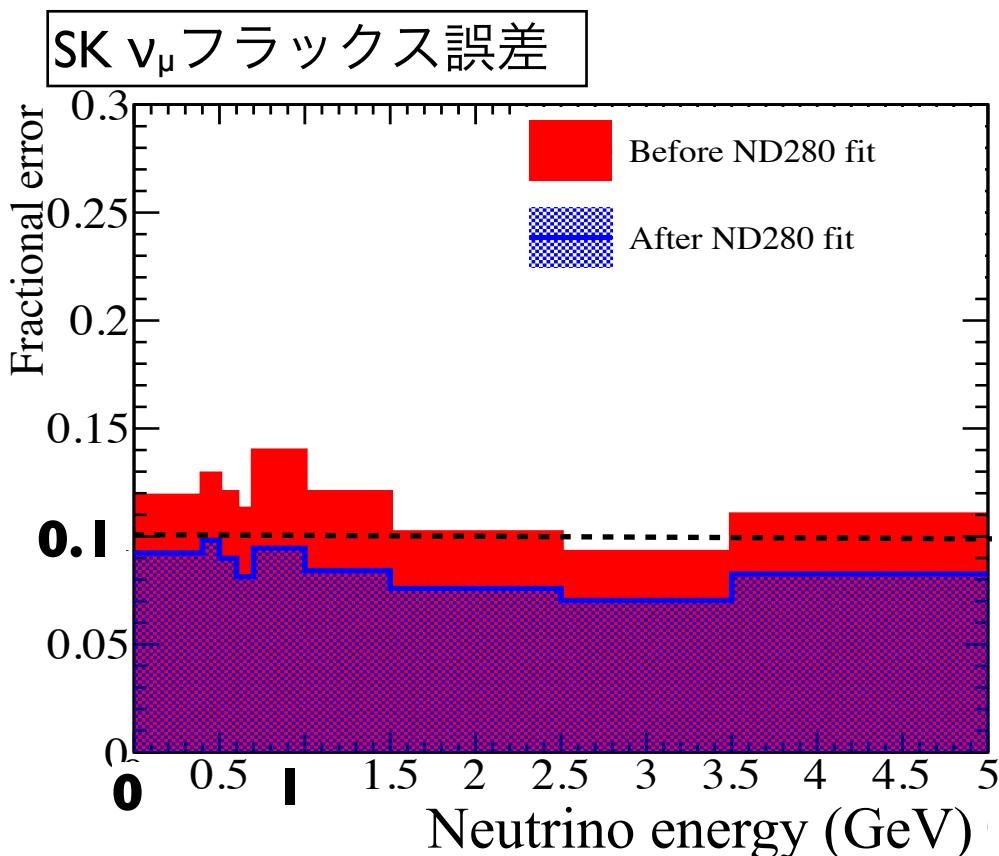
# SK νフラックス予測



- **πの崩壊**からの寄与が支配的。
  - 誤差の内訳は、**ハドロン生成モデル**の不定性が支配的
    - **陽子ビーム**、**Off-axis角度**、の寄与はビーム制御により、小さく抑えた。
- 更に**ND280**でのνフラックス&反応断面積の測定に基づき、  
**SK**でのν事象の予測精度を改善。

# ND280による $\nu$ 予測の改善

- ND280で $\nu_\mu$ のCC反応を観測、  
μの運動量・角度分布を測定
- ND280での $\nu$ フラックスと $\nu$ 反応断面積  
を同時に測定  
→ SKの $\nu$ 事象予測に反映



**CCQE反応断面積の誤差**

vエネルギー	Before	→ After
<1.5GeV	<b>0.11</b>	<b>0.09</b>
1.5~3.5GeV	<b>0.30</b>	<b>0.21</b>
>3.5GeV	<b>0.30</b>	<b>0.22</b>

**vフラックス-反応断面積間の逆相関**

$$\delta(\text{vフラックス}) \times \delta(\text{反応断面積}) > \delta(\text{vフラックス} \times \text{反応断面積})$$

# SKでの $\nu$ 事象の予測

## 予測SK $\nu_\mu$ 事象数 (統計誤差)

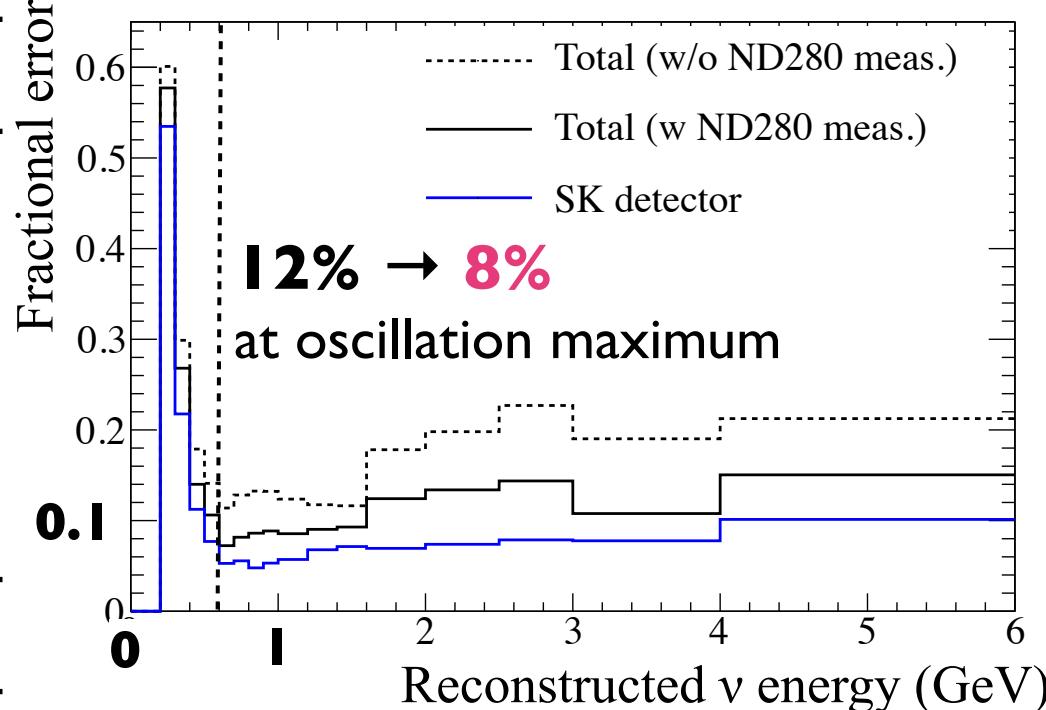
振動あり	57.8 (13%)	$(\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m^2_{32}) = (1.0, 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$
振動なし	196.2 (7%)	

## 系統誤差 (振動あり)

### 事象数に対する誤差

種類	ND280なし	ND280あり
<b><math>\nu</math> Flux &amp; <math>\nu</math> int.</b>	<b>21.7%</b> → <b>4.2%</b>	
Other $\nu$ int.	6.2%	-
<b>SK detection</b>	<b>10.5%</b>	-
Final state interaction	3.5%	-
<b>Total</b>	<b>25.3%</b> → <b>13.5%</b>	

### エネルギースペクトルに対する誤差



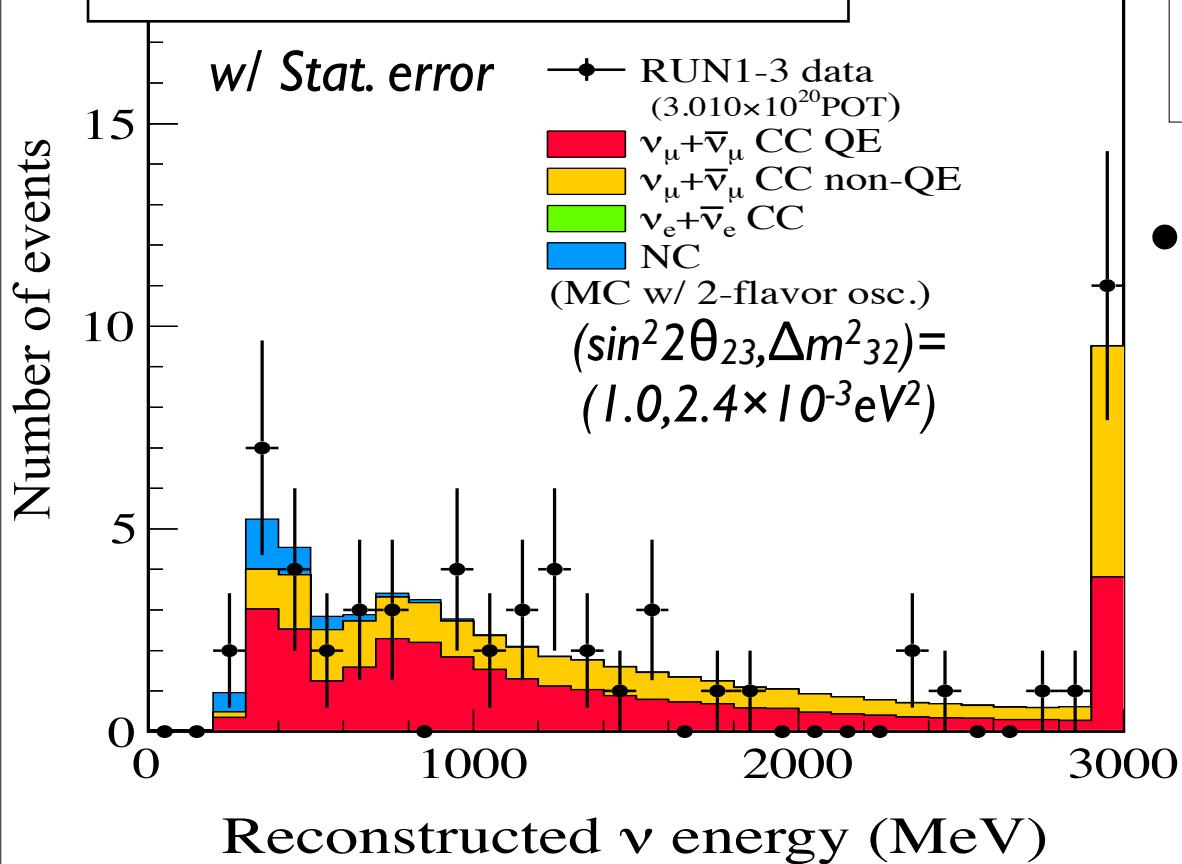
種々の測定データにより、系統誤差を軽減

# 振動解析

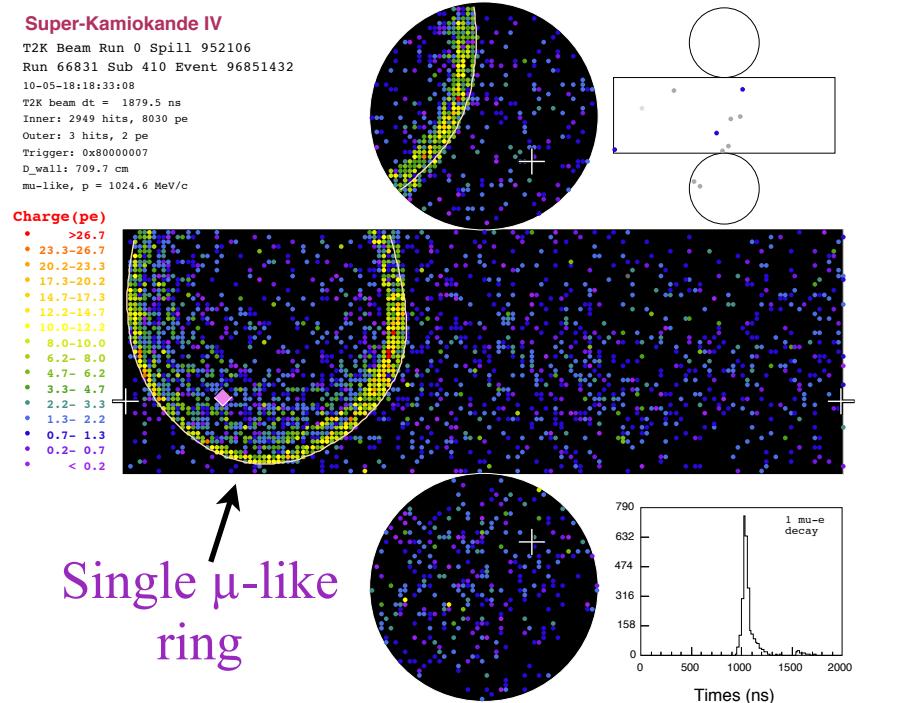
# SKでの $\nu$ 事象の観測

- 一つの $\mu$ -likeなチェレンコフリングを持つ $\nu$ 事象を選択(CCQE:  $\nu + n \rightarrow \mu + p$ )  
→ **58 事象**

再構成した $\nu$ エネルギー分布



選択した $\nu$ 事象の一例



- $\mu$ の運動量・角度から $\nu$ エネルギーを再構成 (CCQEを仮定)

観測した事象数・エネルギースペクトルを振動解析に使用

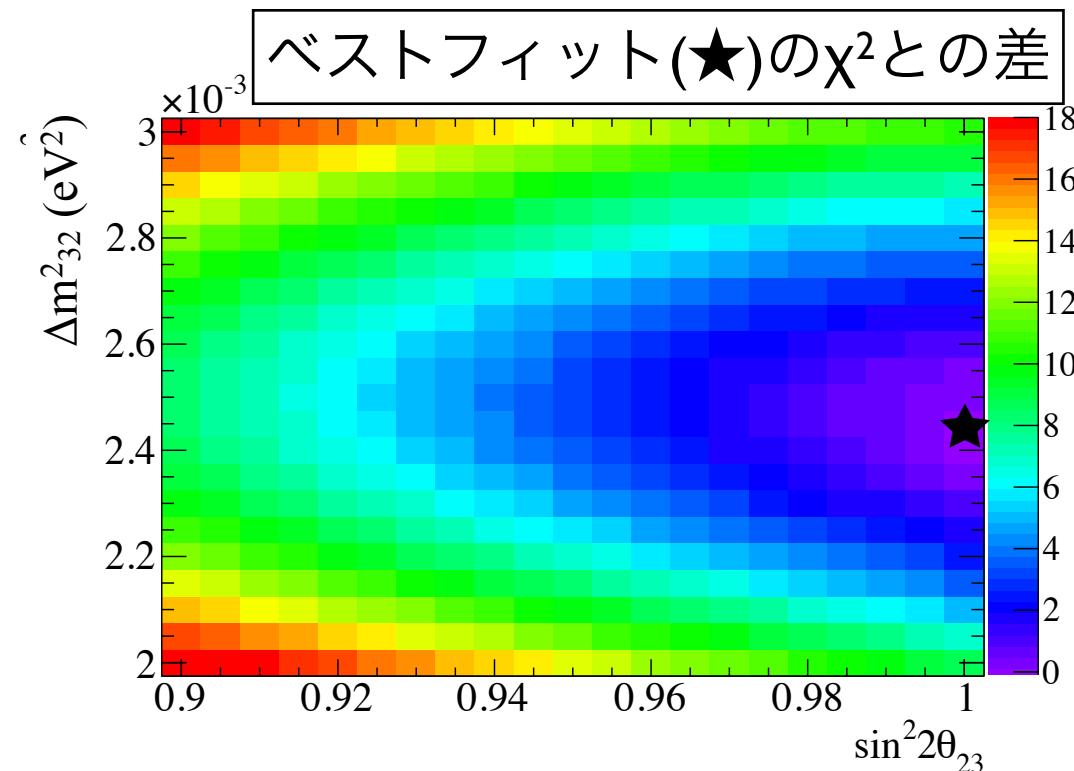
# 振動解析の方法

Maximum likelihood method →  $(\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m^2_{32}) = \bullet$  を決定。

	事象数	エネルギースペクトル	系統誤差
$\mathcal{L}(N_{obs}, E_{obs}^{rec}; o, f) = \mathcal{L}_{norm}(N_{obs}; o, f) \times \mathcal{L}_{shape}(E_{obs}^{rec}; o, f) \times \mathcal{L}_{syst}(f)$			
測定した $\nu_\mu$ 事象数と エネルギースペクトル		系統誤差の寄与を表すパラメータ: $\nu$ フラックス、 $\nu$ 反応断面積、 $\nu$ 検出効率を変化させる。	

解析の流れ

- $\bullet, f$ を動かして、 $\chi^2 = -2 \log L$ を最小にするベストな $\bullet, f$ を決定。
- $\bullet$ 以外の振動パラメータは固定
  - $\Delta m^2_{12} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
  - $\sin^2 2\theta_{12} = 0.8757, \sin^2 2\theta_{13} = 0.098$
  - $\delta_{CP} = 0$
- 各 $\bullet$ 点とベストフィットでの $\chi^2$ の差( $= \Delta \chi^2$ )を元に $\bullet$ の許容範囲を決定。

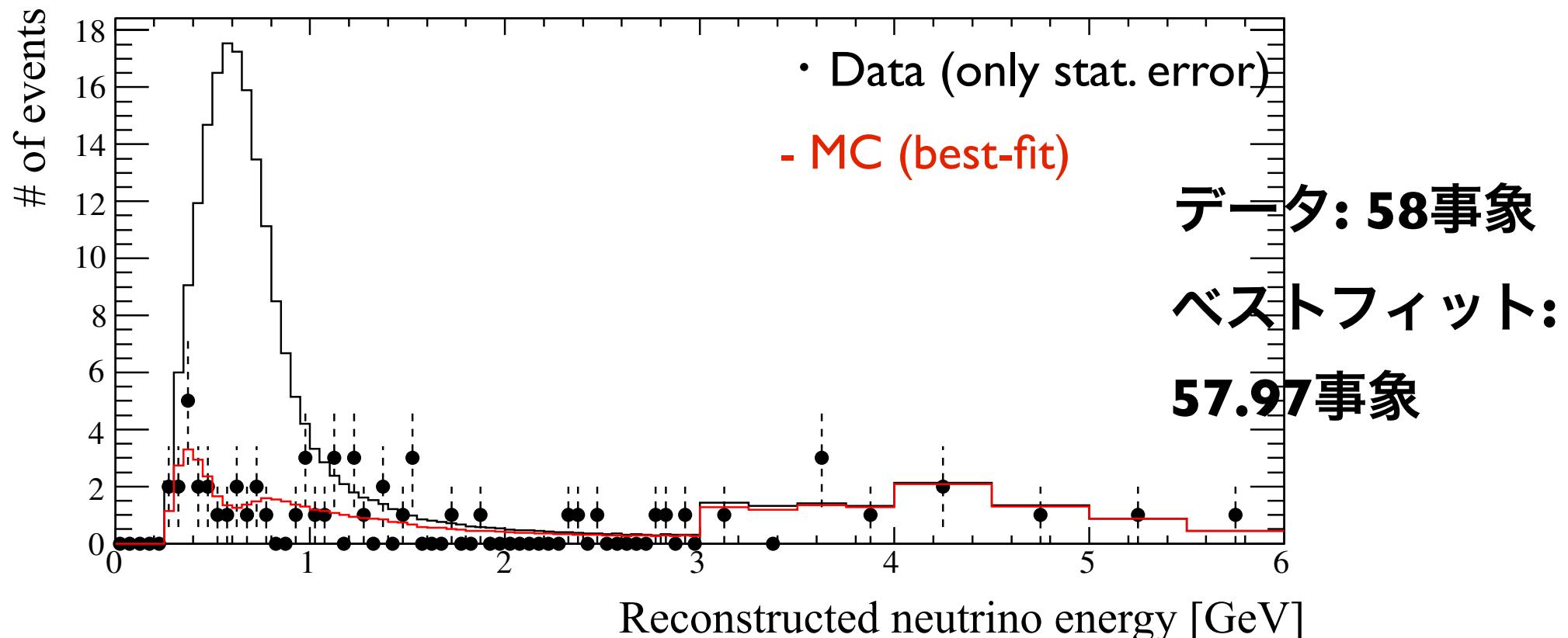


# データの解析結果

ベストフィット

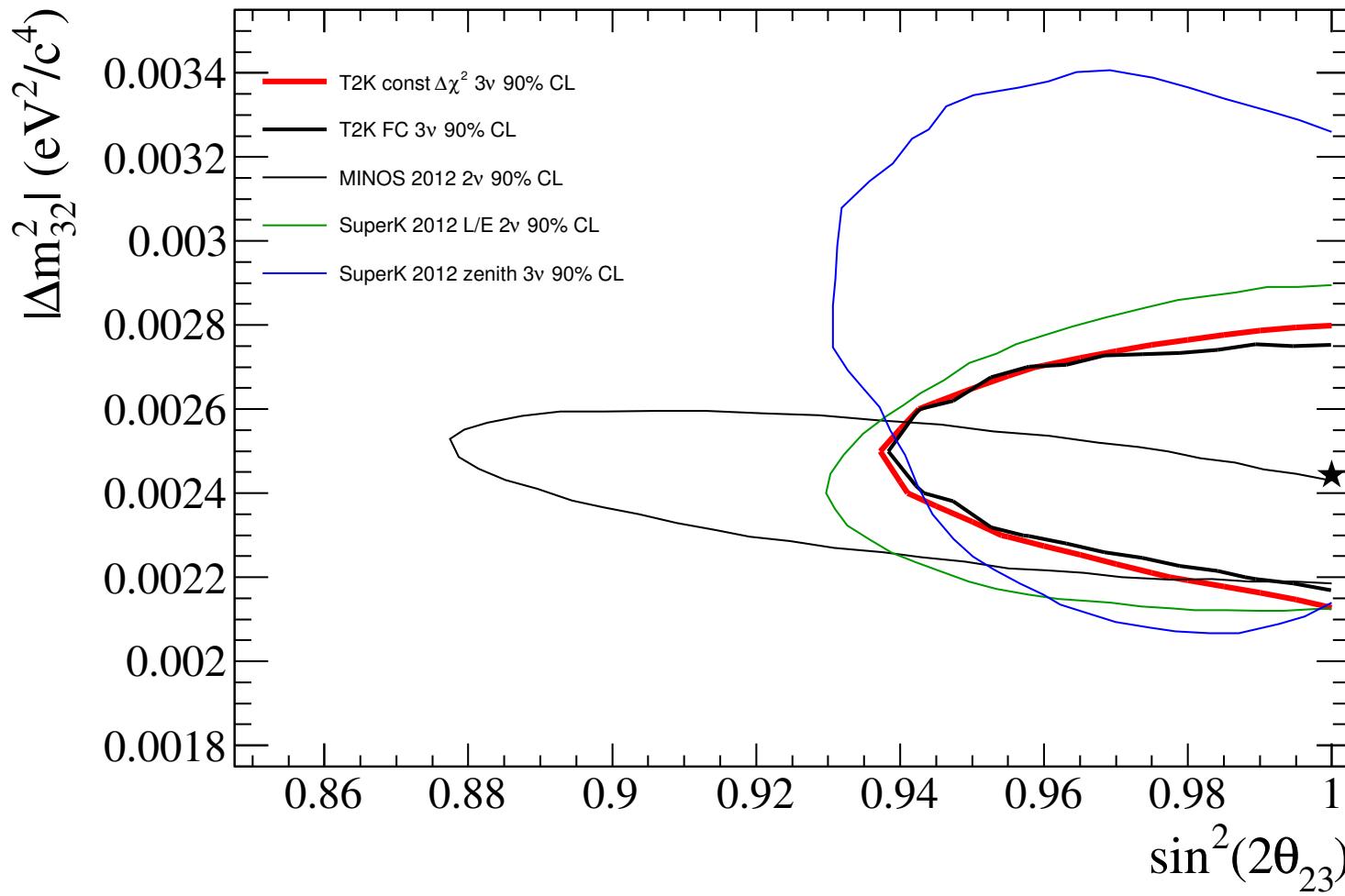
$$(\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m^2_{32}) = (1.00, 2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$$

再構成したニュートリノエネルギー分布



# 他の実験との比較

## 90% C.L. コントナーの比較



---- T2K RunI-2  
-  $1.45 \times 10^{20}$  POT

— T2K RunI-3  
-  $3.01 \times 10^{20}$  POT

— MINOS:  
- 加速器 @Fermilab  
- データ: 2005~2012  
( $\nu_\mu: 1.07 \times 10^{21}$  POT,  
 $\text{anti-}\nu_\mu: 3.36 \times 10^{20}$  POT)

— SK 大気 $\nu$ :  
- データ: RunI-4  
(@Neutrino2012)

T2Kの目標統計のわずか4%の統計

( $3.01 \times 10^{20}$  POT)で、世界最高峰の精度を達成

# まとめ

- T2K実験において $\nu_\mu$ 消失現象を観測することで、振動パラメータ $(\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m^2_{32})$ を測定する。
- ビームモニターを用いて、要求の1mrad以上の精度でビーム方向をコントロール、安定した実験遂行に貢献。
- 測定データを用いて、ニュートリノフラックスの予測精度を改善させ、振動パラメータの精度を向上させた。
- 2010年1月~2012年6月までのデータで、 $(\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m^2_{32}) = (1.00^{+0.00}_{-0.04}, 2.45 \pm 0.19 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ を得る
  - T2K目標統計のわずか4%で世界最高峰の測定精度を達成

# バックアップ