



スーパーカミオカンデにおけるGeant4ベースのシミュレーションを用いた水中での光伝播モデルの研究

多田智昭(岡大理)

他Super-Kamiokande Collaboration

2022年9月7日

日本物理学会 2022年秋季大会 @岡山理科大学

1. スーパーカミオカンデ(SK)
2. 研究背景
3. 研究目的
4. 研究方法
5. 結果
6. 考察
7. まとめ

スーパーカミオカンデ(SK)

検出器

- ・ 大型水チェレンコフ検出器
- ・ 岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山地下約1,000m

構造

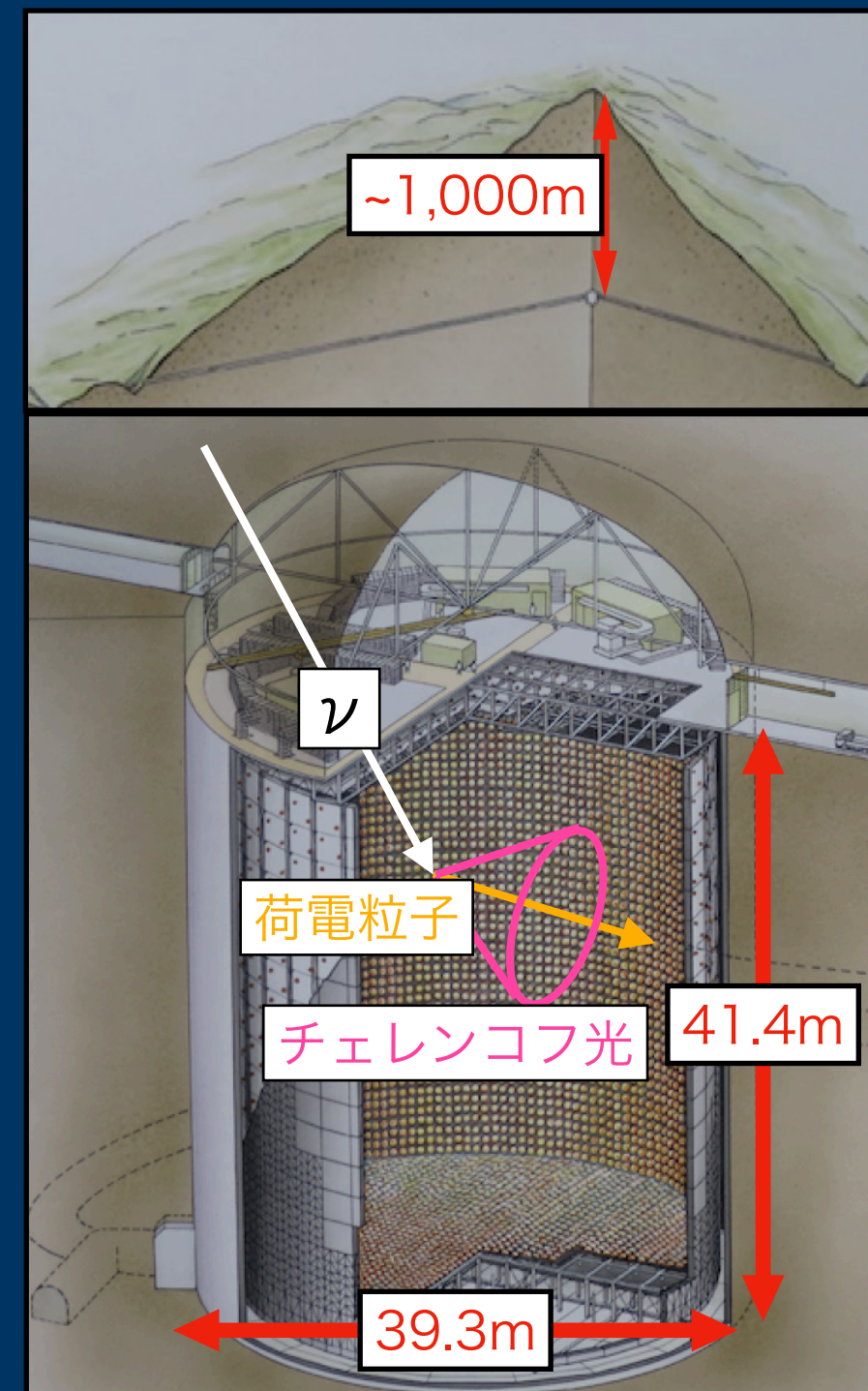
- ・ 約5万トンの超純水
 - ・ 2020年7月からはGd溶液 (SK-Gd実験)
- ・ 光電子増倍管(PMT)：約11,000本設置

検出原理

- ・ 荷電粒子から放出されるチェレンコフ光を検出

事象再構成

- ・ Hitの時間情報や電荷情報を用いる



SKのシミュレーション(MC)

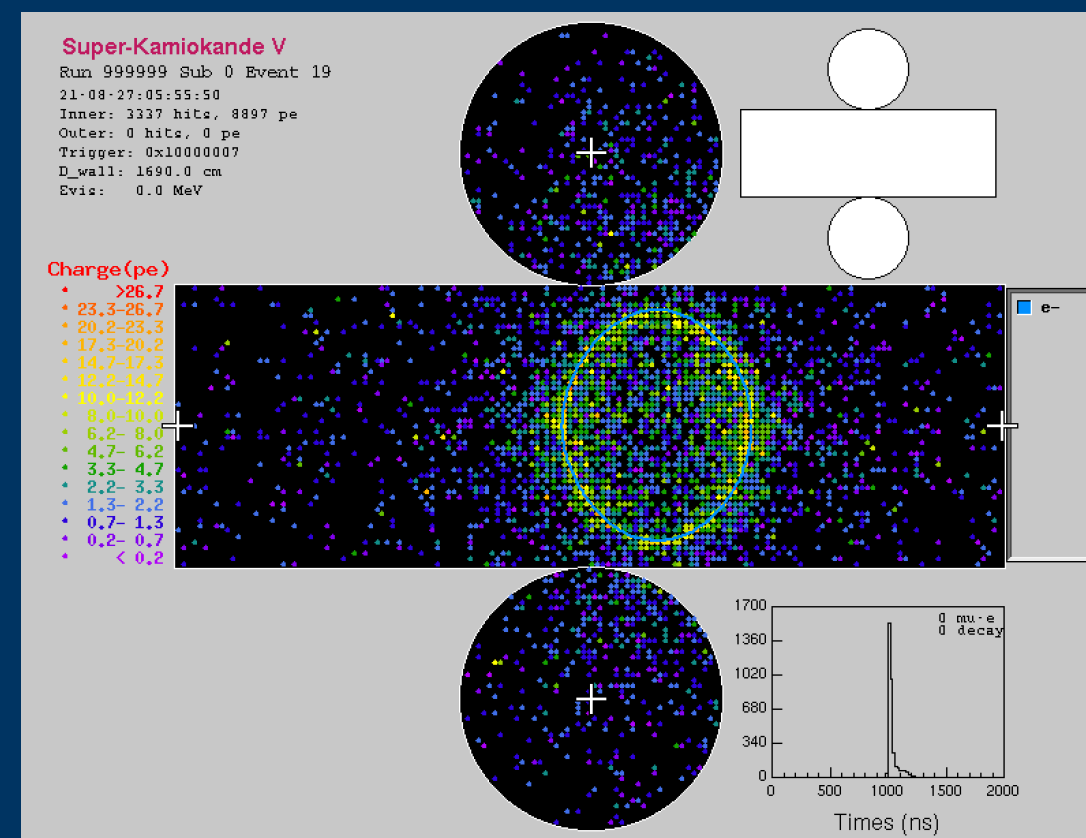
- SKDETSIM
 - SK観測開始時から現在も使用
- SKG4
 - SK-Gd実験で使用するため新たに構築

	SKDETSIM	SKG4
ツール	GEANT3	Geant4
言語	FORTRAN	C++
物理モデル	更新終了	最新

水による光子の減衰

- リングの周りに散らばったHit (散乱光子)
- 事象再構成に影響を与える

→ MCによる水の減衰長の理解が必要不可欠



光の減衰

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\frac{l}{L(\lambda)}}$$

MCでの水中における光の減衰長

$$L(\lambda) = \frac{1}{\alpha_{abs}(\lambda) + \alpha_{sym}(\lambda) + \alpha_{asym}(\lambda)} [m]$$

水の吸収散乱振幅 (確率のようなもの)

$\alpha_{abs}(\lambda)$: 吸収 [1/m]

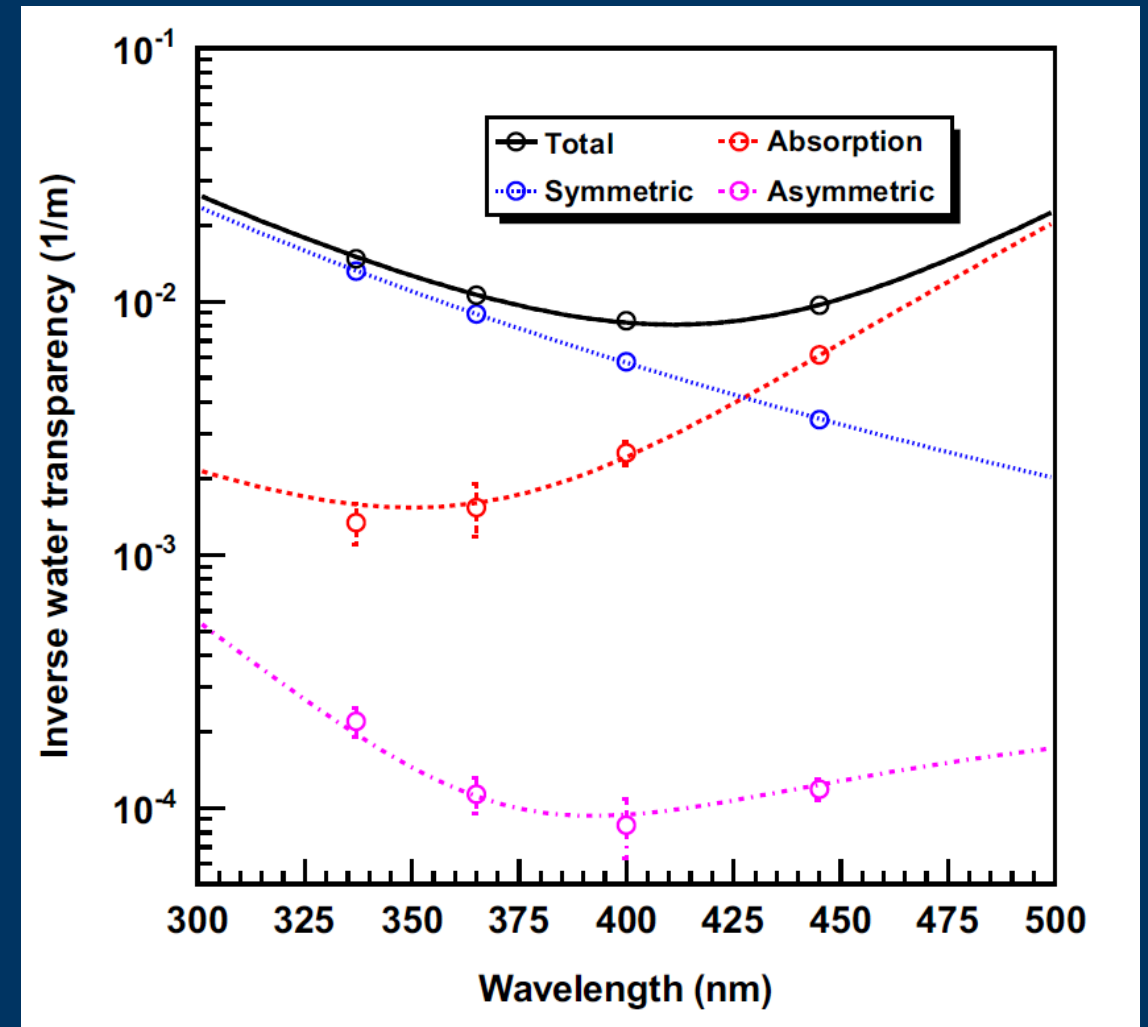
$\alpha_{sym}(\lambda)$: (前後)等方散乱 (レイリー散乱) [1/m]

$\alpha_{asym}(\lambda)$: 非等方散乱 (ミー散乱) [1/m]

- 光子の波長に依存した関数
- SKで経験的に決められた関数

水の吸収散乱パラメータ

- $P_0 \sim P_8$ の定数



2009年に決定した吸収散乱振幅の関数
NIM in Physics Research A 737 (2014) 253-272

$$\alpha_{abs}(\lambda) = P_0 \times \frac{P_1}{\lambda^4} + P_0 \times P_2 \times 0.0279 \times \left(\frac{\lambda}{500}\right)^{P_3} [1/m]$$

$$\alpha_{sym}(\lambda) = \frac{P_4}{\lambda^4} \times \left(1.0 + \frac{P_5}{\lambda^2}\right) [1/m]$$

$$\alpha_{asym}(\lambda) = P_6 \times \left(1.0 + \frac{P_7}{\lambda^4} \times (\lambda - P_8)^2\right) [1/m]$$

目的

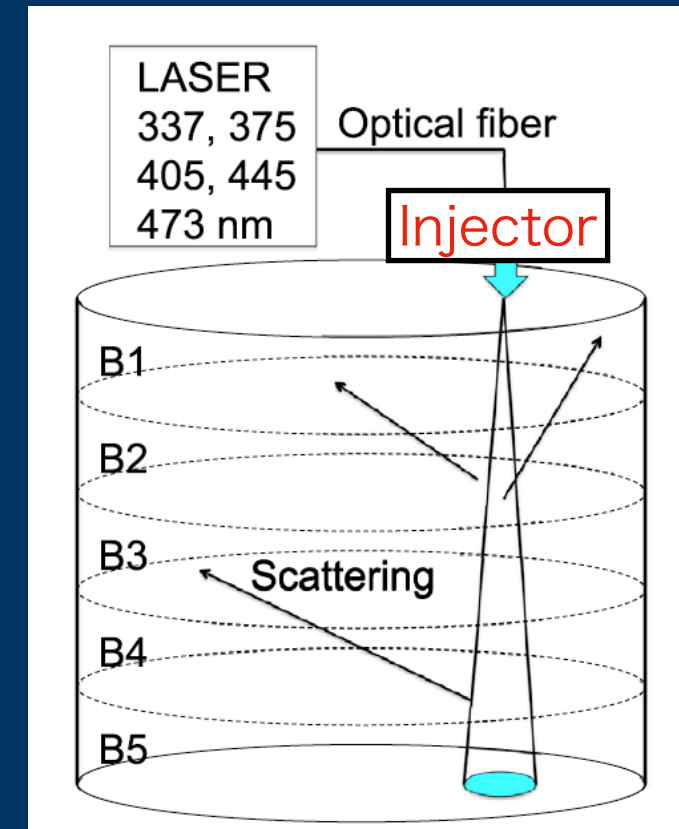
SKG4でSK-Gd期間の水の吸収散乱パラメータを最適化する

方法

- SKのタンク内に常設されたレーザー照射装置で取得したデータ
- 同様のことを行うシミュレーション

→ データとMCのHitの時間分布を評価し、吸収散乱パラメータを最適化

今回は最適化されたSKDETSIMに合うようにSKG4の吸収散乱パラメータを最適化する



Hitの時間分布

T-ToF分布

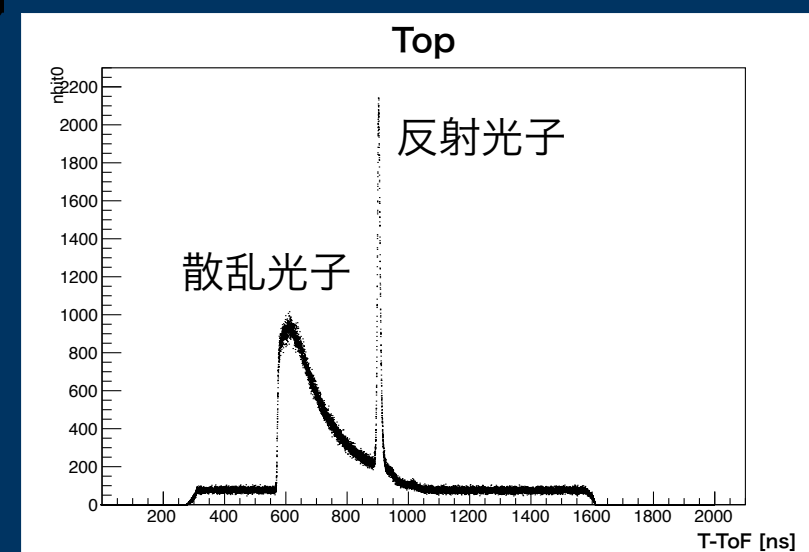
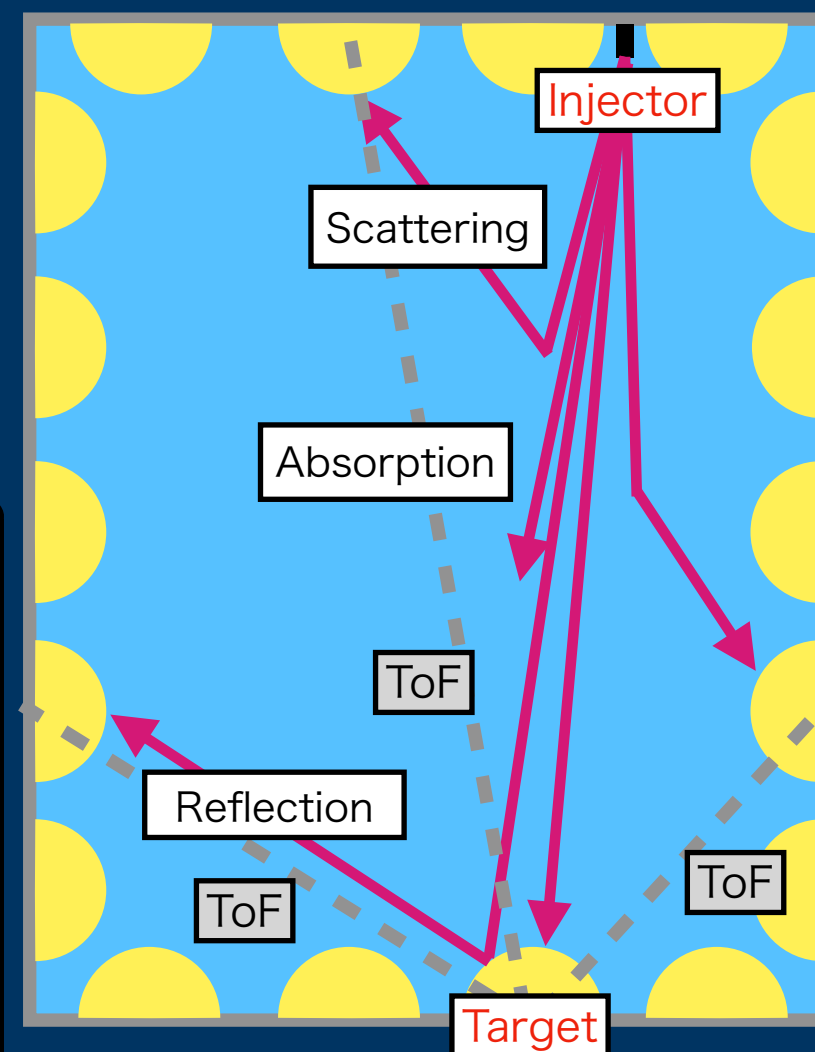
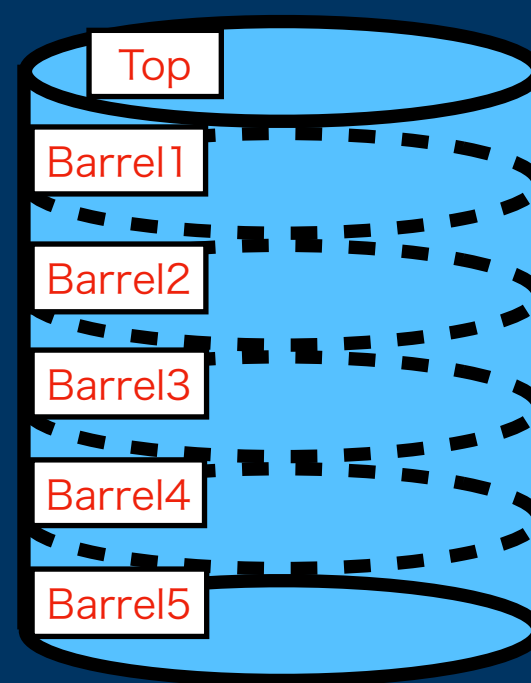
- ToF：右図の点線を光子が進む時間
- 始点：レーザー照射装置のほぼ真下のPMT
- 終点：光子のHitしたPMT

- HitしたPMTの位置で分類

- Top
 - Barrelは5分割
 - Bottomは使用しない
- 計6つに分類

- 散乱光子と反射光子を識別

- 本研究 → 散乱光子のみに注目

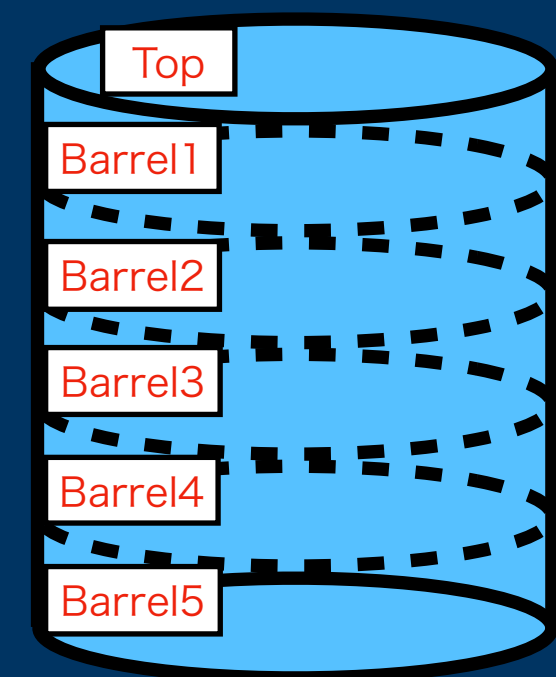
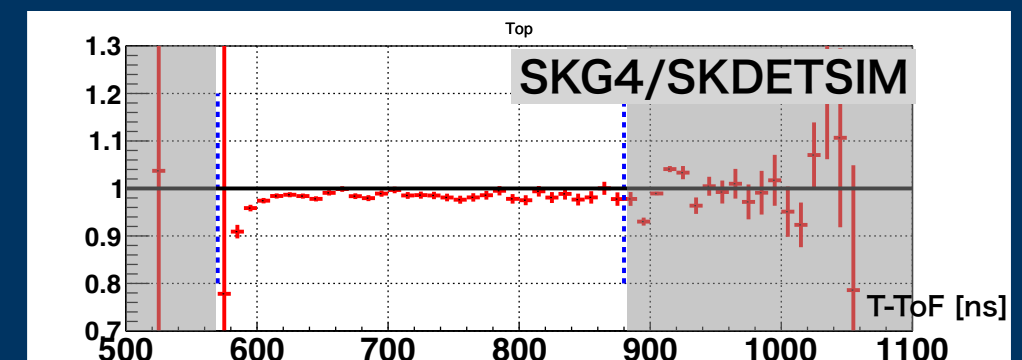
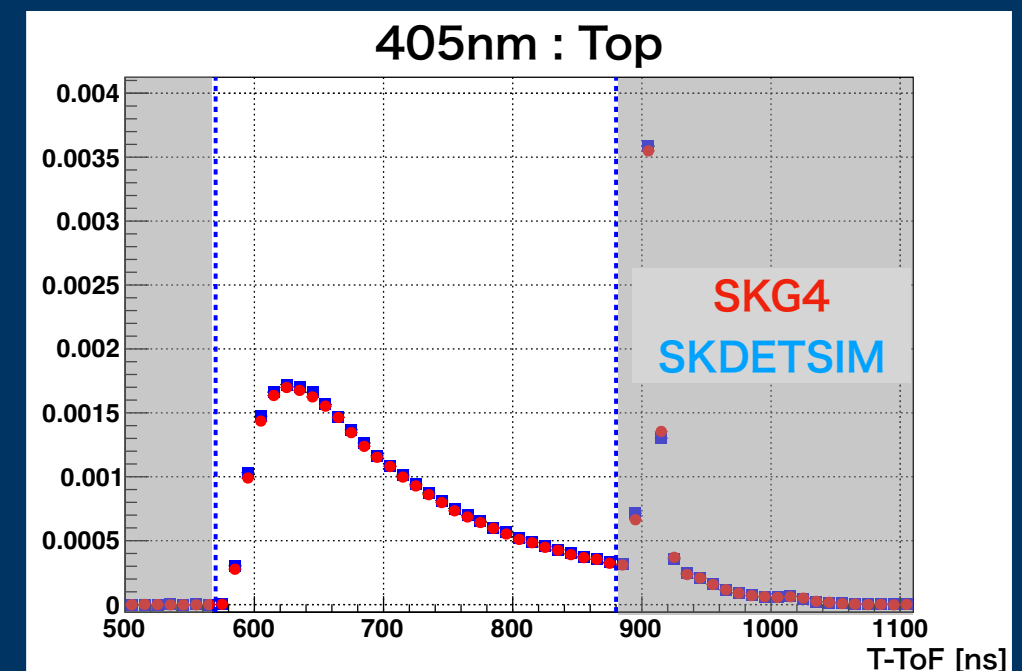


MCでの405nm Topの時間分布

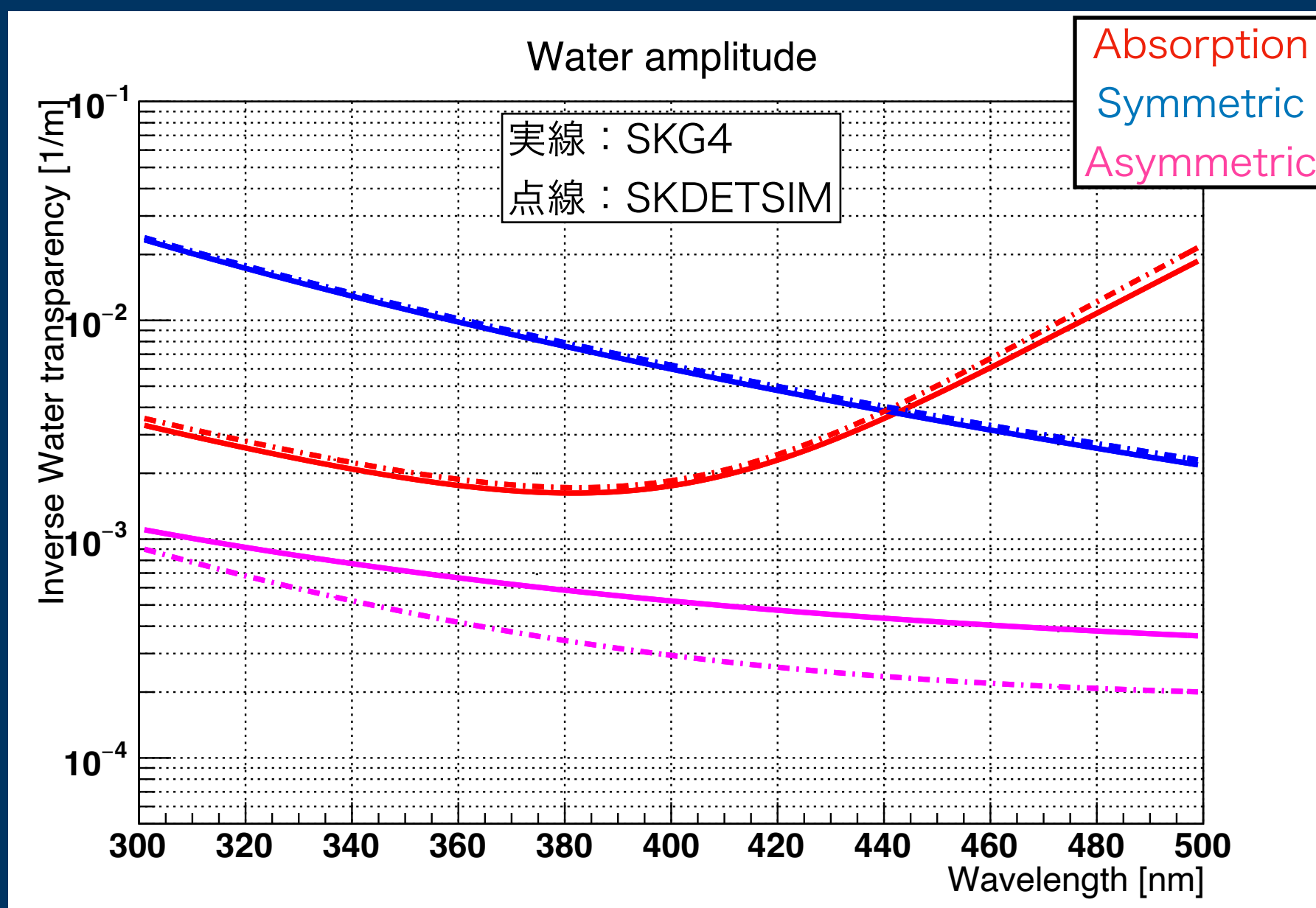
評価方法 (χ^2/ndf)

χ^2/ndf

- 散乱光子の時間領域を使用
- PMTの分類毎に以下の式で算出
 - nbin : 散乱光子の領域のbin数
- χ^2/ndf が最も小さくなるように3つの吸収散乱振幅の組を決める



$$\chi^2/ndf = \frac{1}{nbin} \sum \frac{(BinContent_{SKDETSIM} - BinContent_{SKG4})^2}{BinError_{SKDETSIM}^2 + BinError_{SKG4}^2}$$



- ・ 吸収と等方散乱はSKG4とSKDETSIMでほとんど違いはない
→ 全く異なるMCで同等の結果
- ・ 非等方散乱は全ての波長領域でSKG4が大きい

時間分布の比較

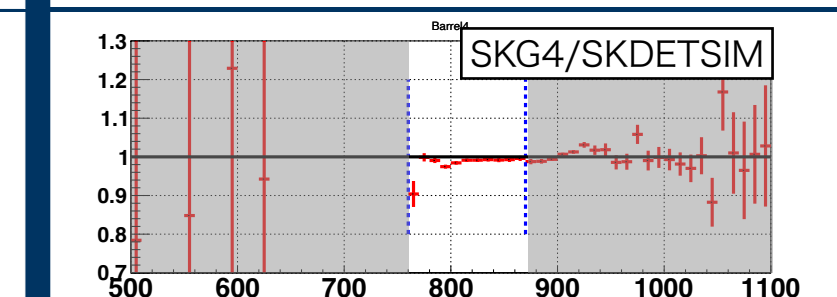
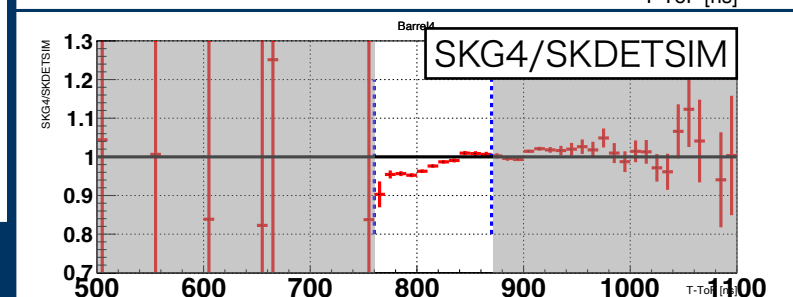
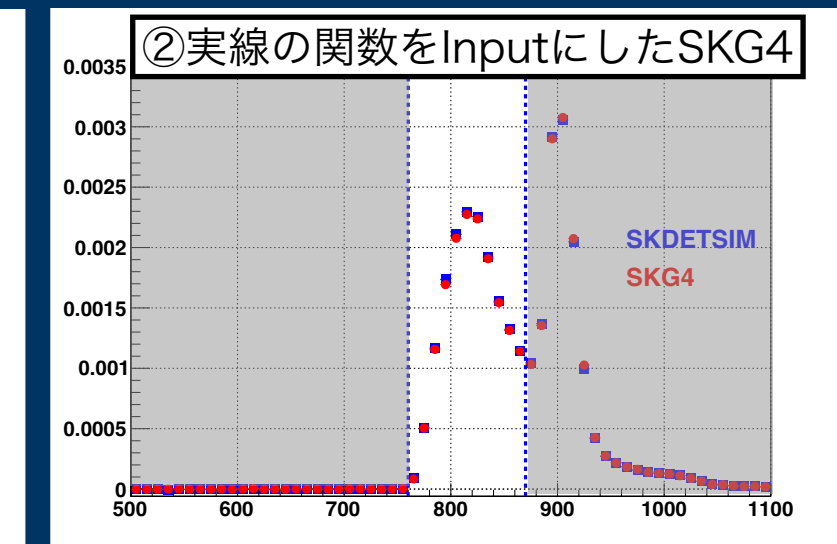
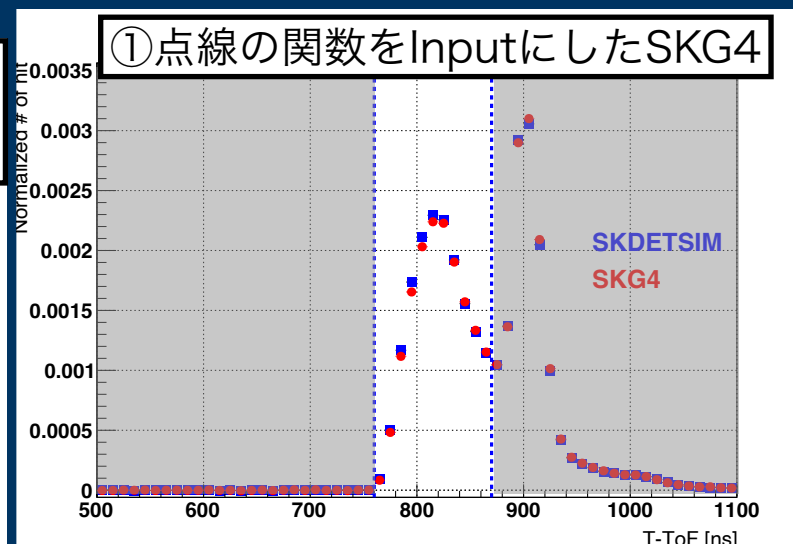
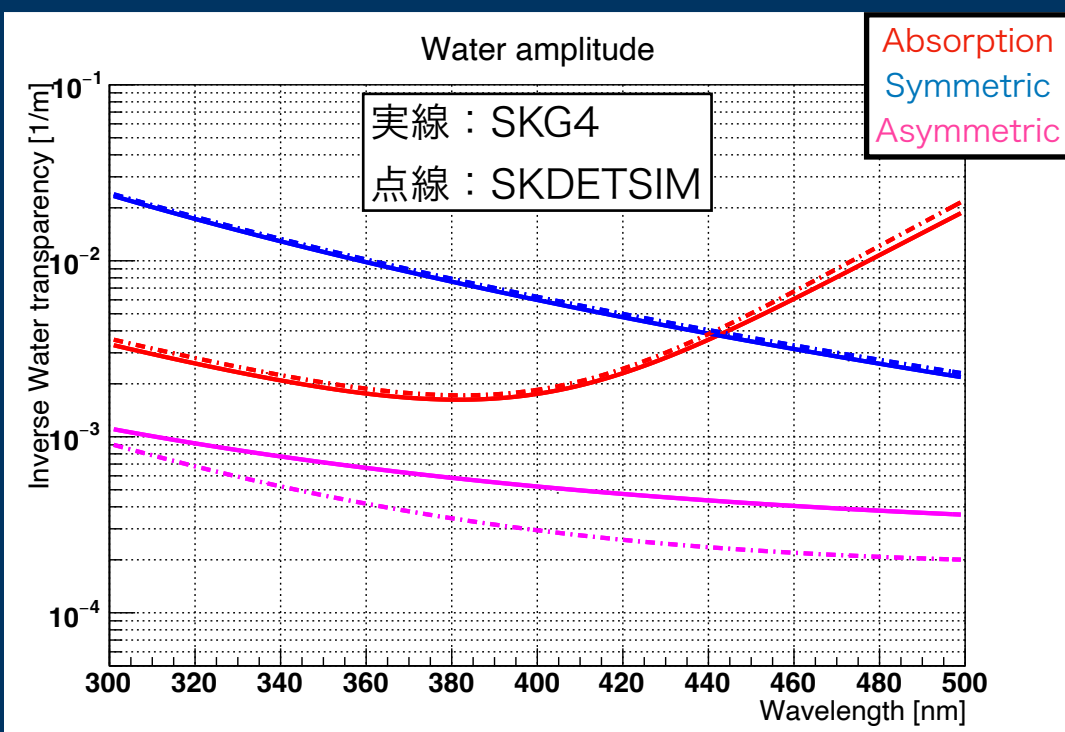
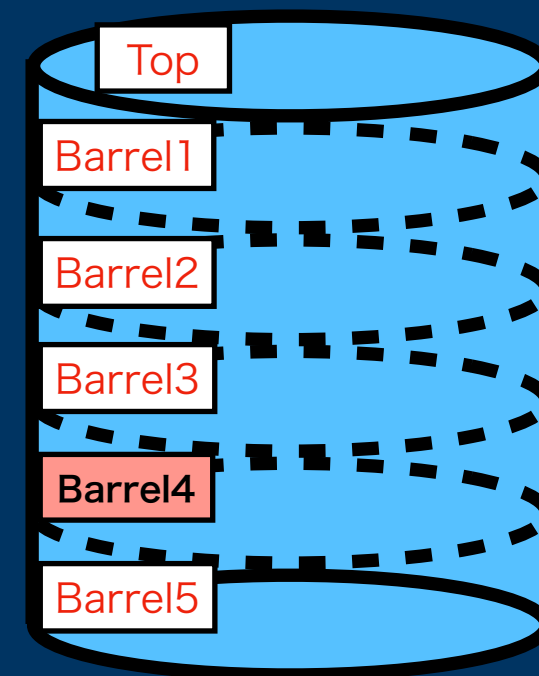
吸収散乱振幅の関数を変えたときのSKG4の振る舞いを比較する

- ①：点線の関数を用いたSKG4の時間分布
- ②：実線の関数を用いたSKG4の時間分布

→ タンクの下に行く(照射装置から離れる)ほど、時間分布の比に違いが現れる
 → Barrel4では、特に早い時間に顕著に違いが見られる

非等方散乱の関数の違いが効いている

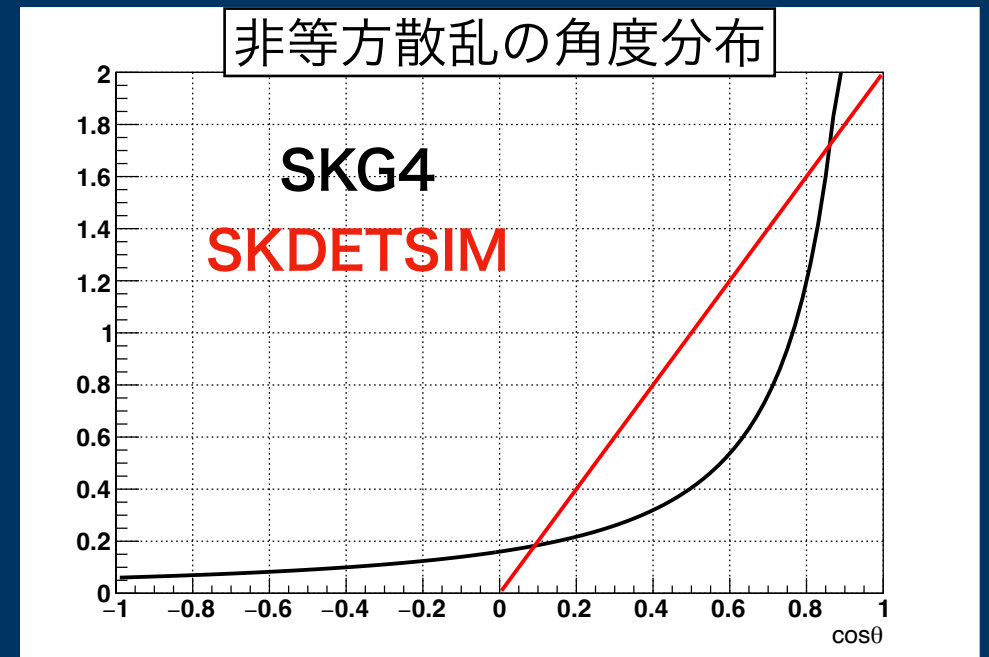
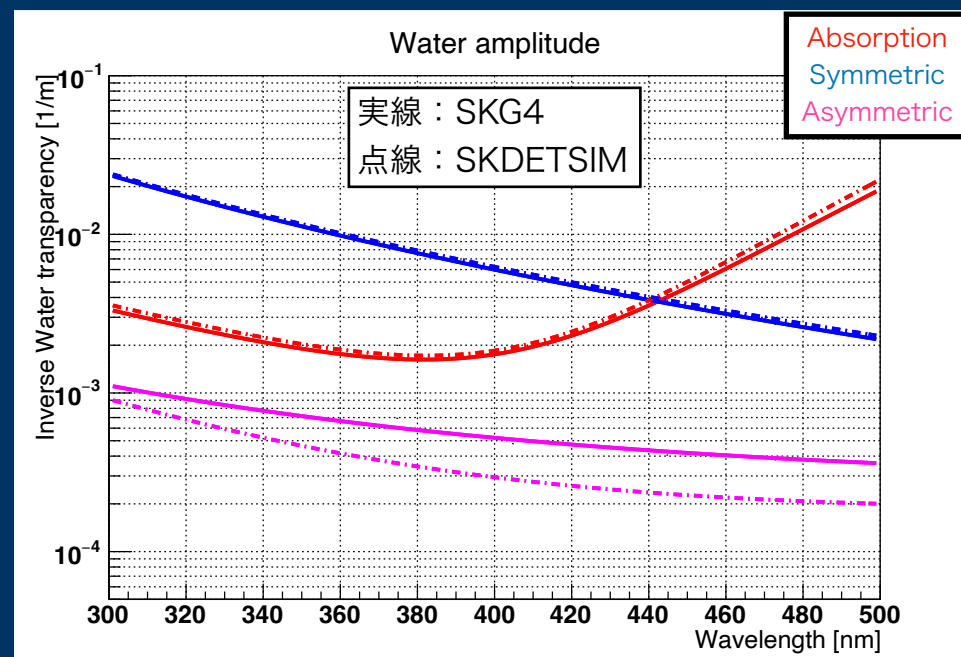
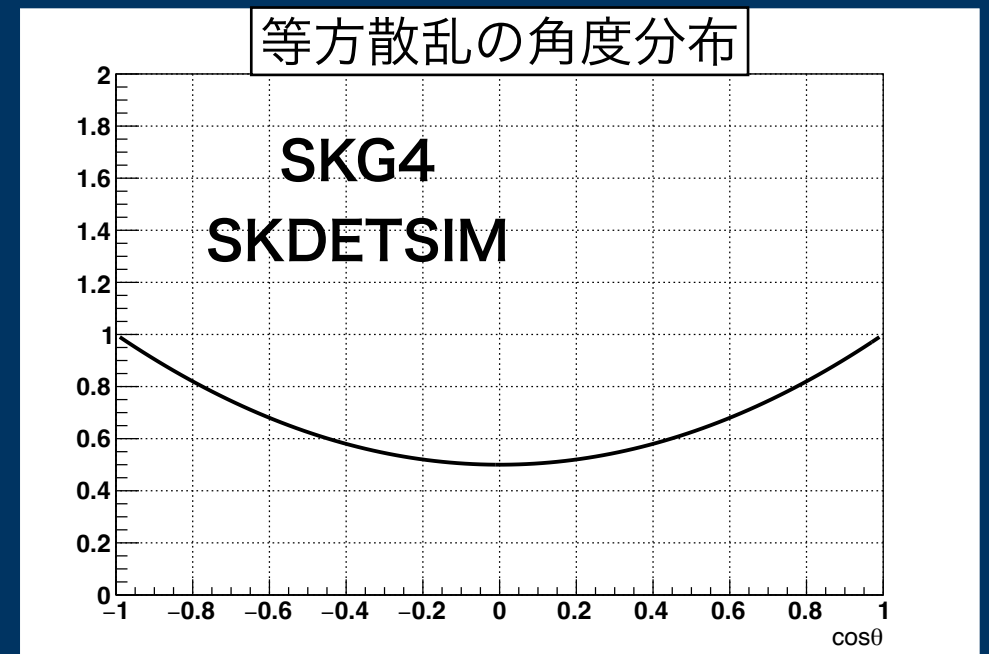
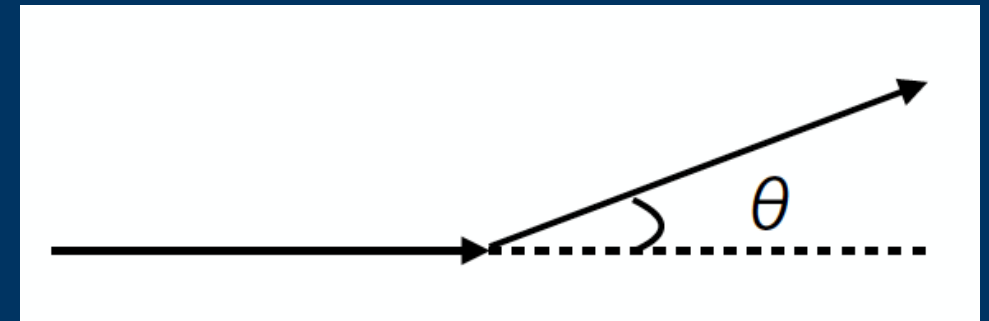
→ SKG4は実線の方がより適している



散乱角度分布

散乱後の角度分布

- ・ 等方散乱
 - ・ 角度分布は同じ
 - ・ 非等方散乱
 - ・ SKG4は僅かに横や後方もある
 - ・ 現実的なMie散乱のモデル
 - ・ SKDETSIMは前方のみ
- 散乱振幅の関数に違いを生む
- SKG4の方がより現実的



研究背景・目的

- 水の吸収散乱による光子の減衰が事象再構成に影響を与える
- MCによる水の減衰長の理解が必要
 - SKG4における水の吸収散乱パラメータの最適化 (波長依存の関数)

研究方法

- データから最適化されたSKDETSIMとSKG4の時間分布を評価する
 - 時間分布 → T-ToF分布
 - 評価方法 → 散乱光子の領域での χ^2/ndf

結果

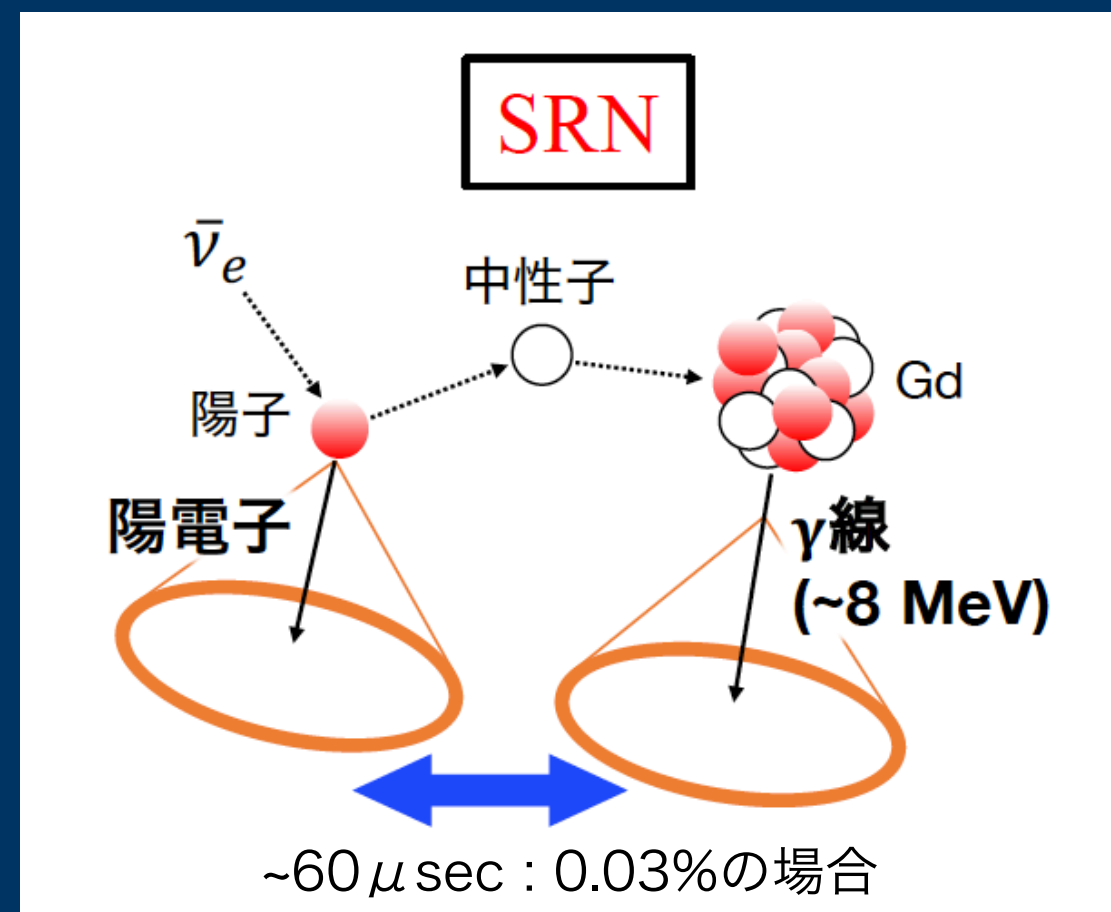
- 吸収と等方散乱の振幅関数はほぼ一致
 - 全く異なるMCで同等の結果
- 非等方散乱は全波長で不一致 (SKG4が大きい)
 - 角度分布に違いが原因

Back up

超新星背景ニュートリノ (SRN)の世界初観測を目指す実験

- SKの超純水中に**硫酸Gd**を溶解
 - 2020年7月に質量濃度**約0.01%**
 - 2022年6月に**約0.03%**に増加
- IBD事象の中性子を同定
 - Gdのn捕獲による γ 線
 - 約75%の確率(0.03%の場合)

→ 詳しくは池田さんのシンポジウム(10pS2-6)



SKのシミュレーション(MC)

SKDETSIM

- SKの観測開始時から使用
- 長年詳細にtuningされている
→ Dataをよく再現している
- 物理モデルや言語が最新でない
→ 管理・維持が難しい
- 熱中性子の輸送
- Gdのn捕獲からの γ 線放出
→ SK-Gdに向けて使用が難しい

未導入

SKG4

- 上記の問題を解決するために近年開発
- 詳細な性能評価が最終段階



	SKDETSIM	SKG4
ツール	GEANT3	Geant4
言語	FORTRAN	C++
物理モデル	更新終了	最新

時間分布の規格化

Q weighted T-ToF分布

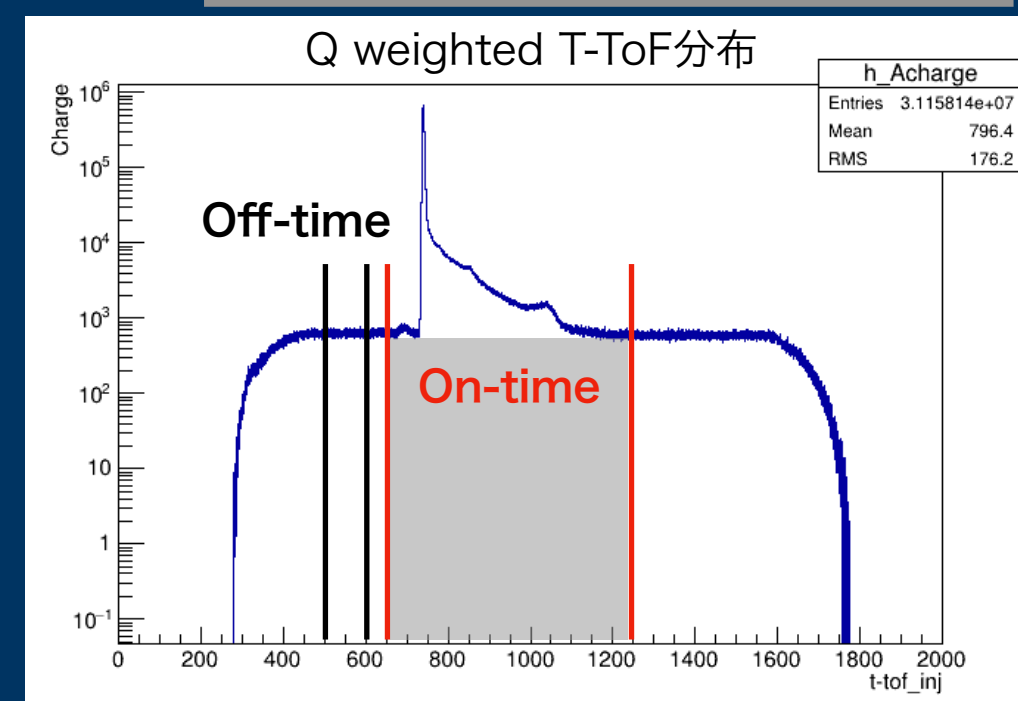
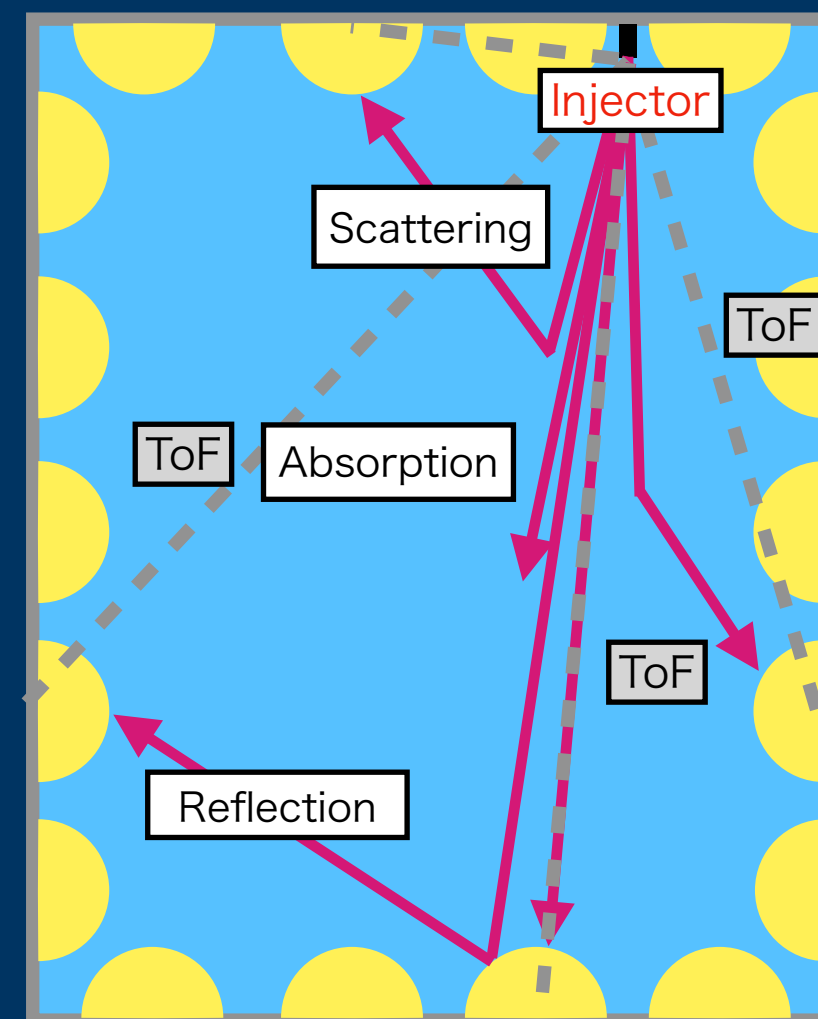
- ToF：右図の点線を光子が進む時間

Normalizing factor

- Off-time 領域：黒線の間
 - BinあたりのDark NoiseのQを算出
- On-time 領域：赤線の間
 - 全QからDark Q (Grayの四角) を減算

→ レーザーによる全電荷

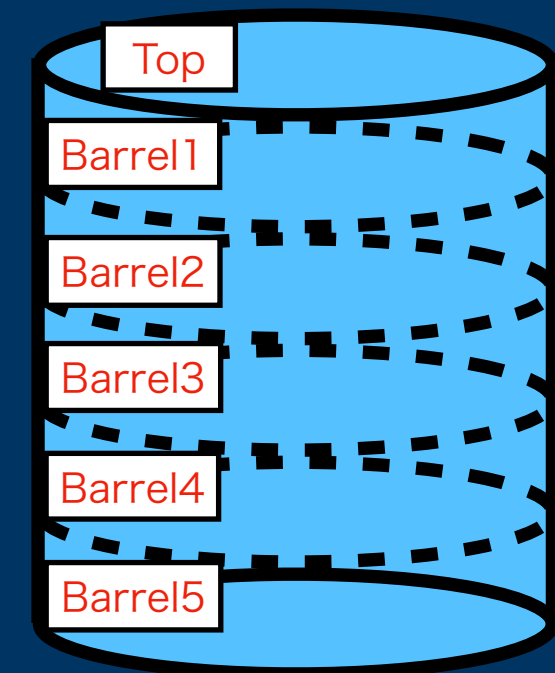
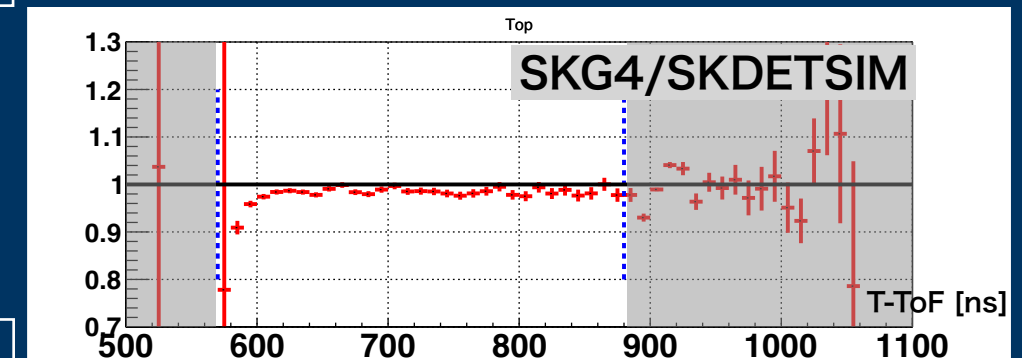
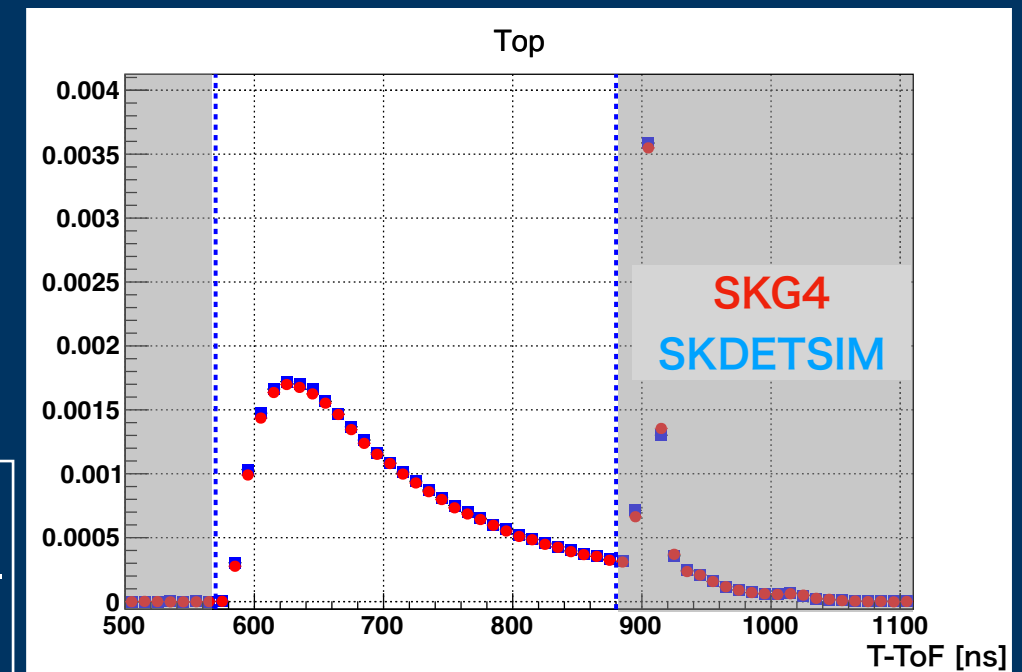
→ それぞれの時間分布を規格化



評価方法 (χ^2/ndf)

χ^2/ndf

- ・ 散乱光子の領域を使用：青点線の間
- ・ PMTの分類毎に以下の式で算出
 - ・ nbin：散乱光子の領域のbin数



$$\chi^2/ndf = \frac{1}{nbin} \sum \frac{(BinContent_{SKDETSIM} - BinContent_{SKG4})^2}{BinError_{SKDETSIM}^2 + BinError_{SKG4}^2}$$

Combined χ^2/ndf

- ・ χ^2/ndf を以下の式で合体

$$Combined : \chi^2/ndf = \frac{\chi_{top}^2 + \chi_{b1}^2 + \chi_{b2}^2 + \chi_{b3}^2 + \chi_{b4}^2 + \chi_{b5}^2}{ndf_{top} + ndf_{b1} + ndf_{b2} + ndf_{b3} + ndf_{b4} + ndf_{b5}}$$

- ・ 上の値が最も小さくなるように吸収散乱パラメータの組を決める
→ 波長依存の関数(p.4)でFitting

水の吸収散乱パラメータ

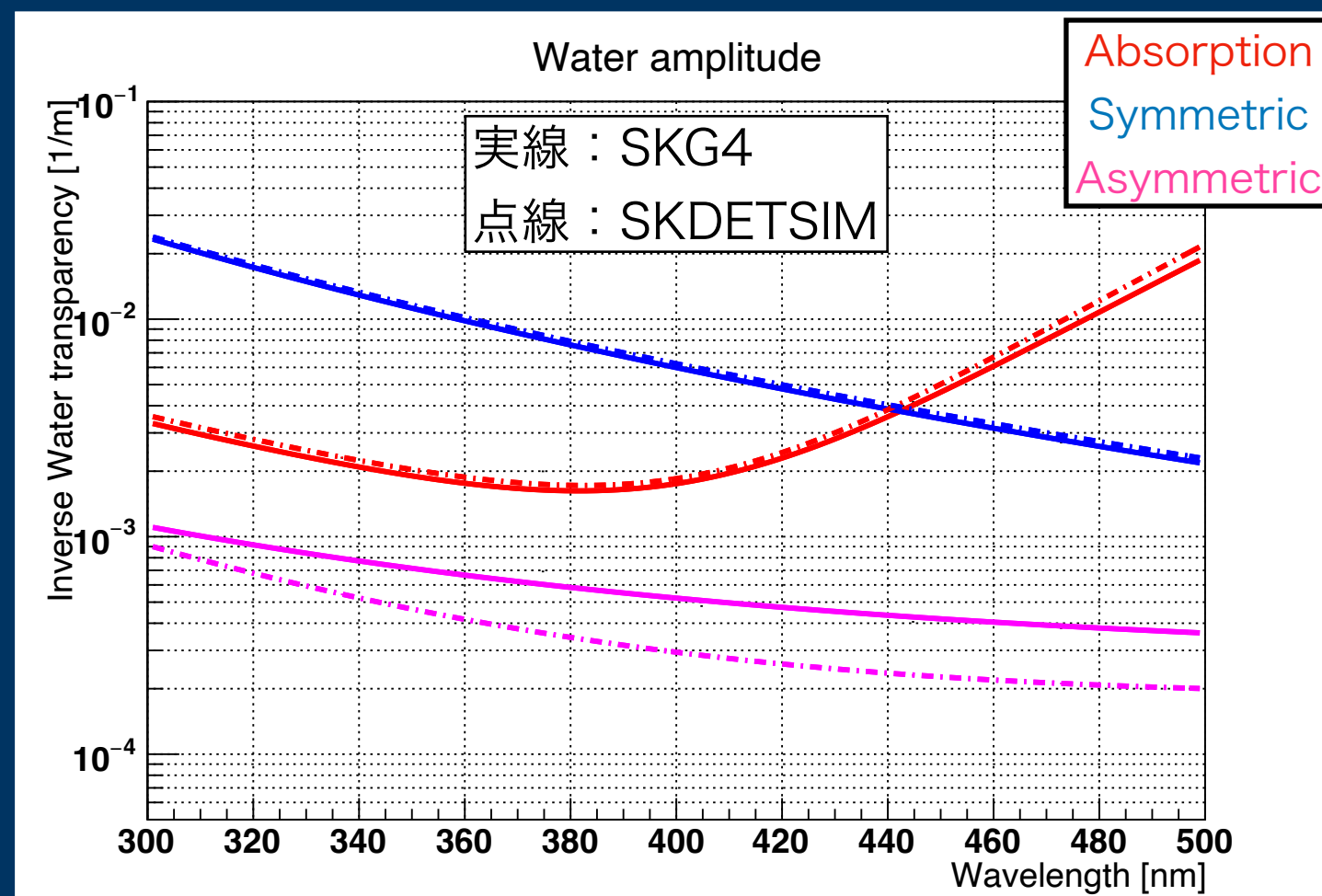
	SKG4	SKDETSIM
P0	0.5966	0.658048
P1	51888800	44315300
P2	1.06522	1.18114
P3	14.1858	15.3261
P4	113817000	112401000
P5	57910.8	67368.4
P6	2.26159E-04	1.87781E-04
P7	17.126	318720
P8	44862.2	613.511

Water coefficient formula

$$\alpha_{abs}(\lambda) = P_0 \times \frac{P_1}{\lambda^4} + P_0 \times P_2 \times 0.0279 \times \left(\frac{\lambda}{500}\right)^{P_3}$$

$$\alpha_{sym}(\lambda) = \frac{P_4}{\lambda^4} \times \left(1.0 + \frac{P_5}{\lambda^2}\right)$$

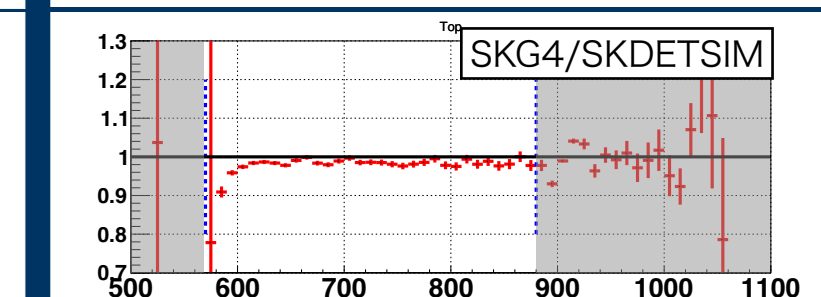
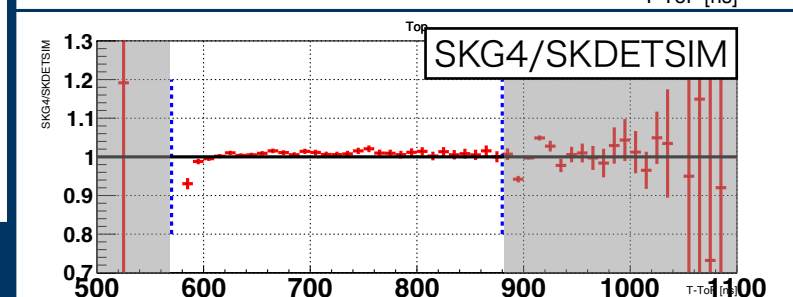
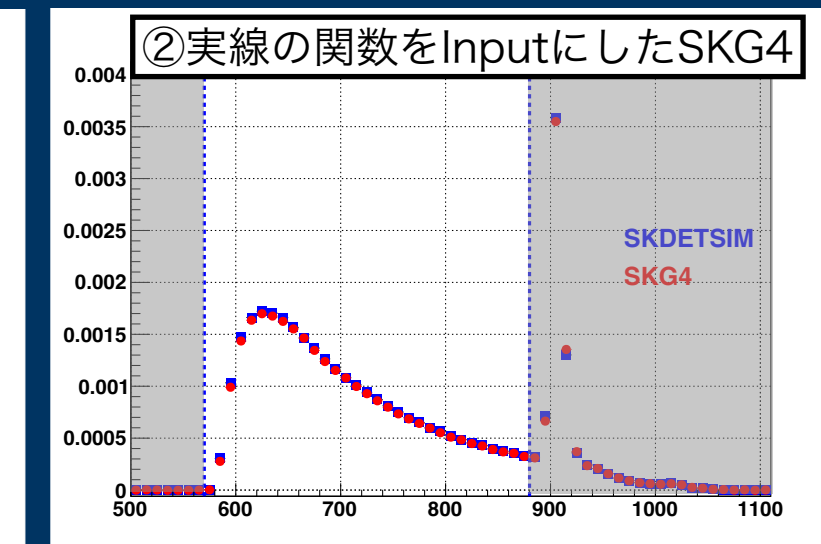
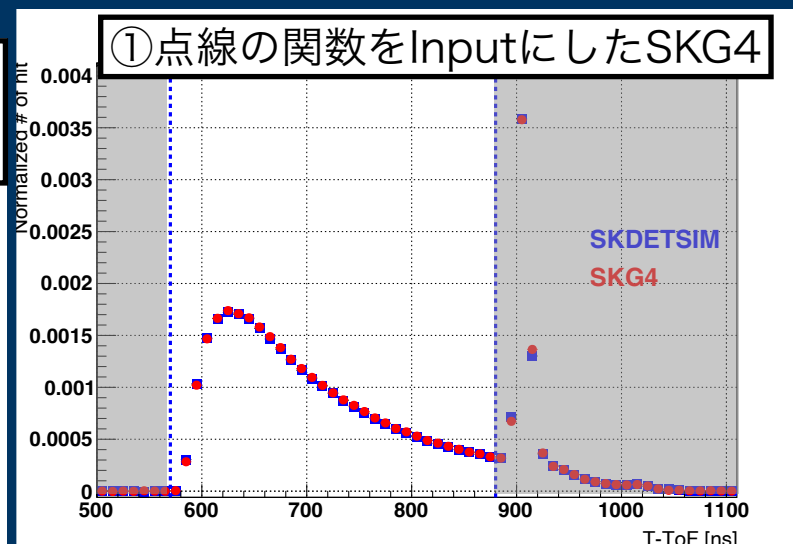
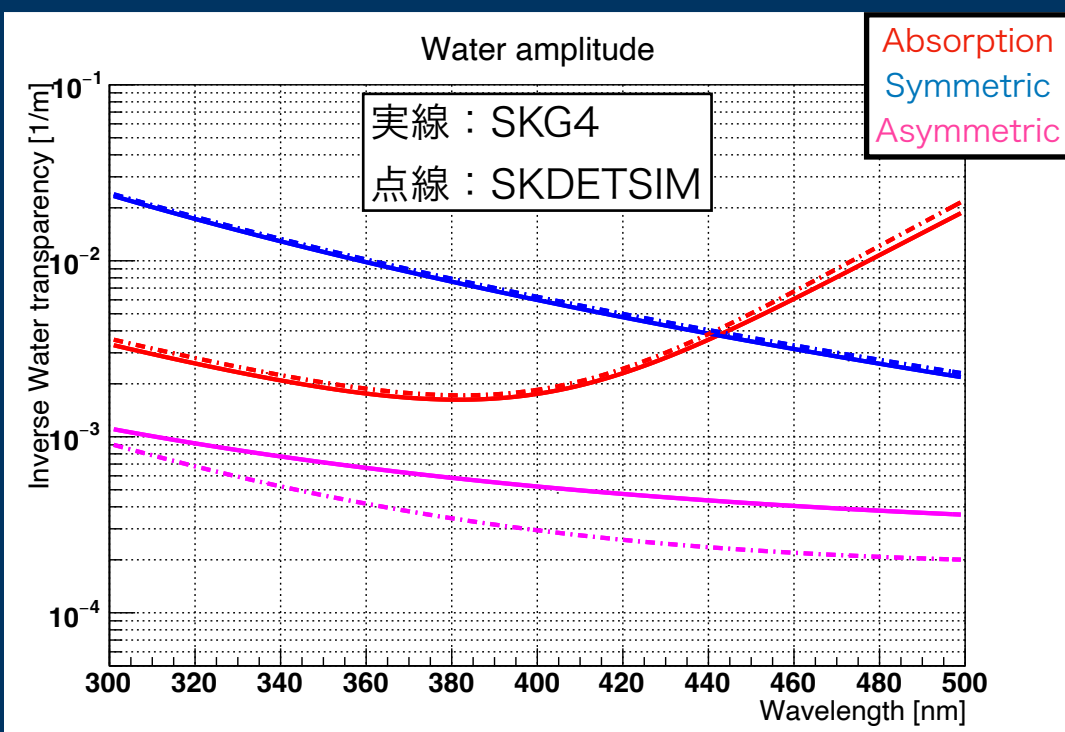
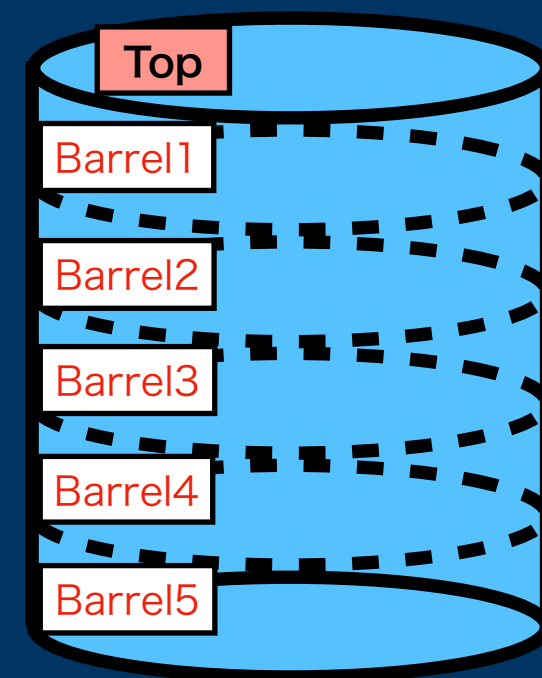
$$\alpha_{asym}(\lambda) = P_6 \times \left(1.0 + \frac{P_7}{\lambda^4} \times (\lambda - P_8)^2\right)$$



時間分布の比較

吸収散乱振幅の関数を変えたときのSKG4の振る舞いを比較する

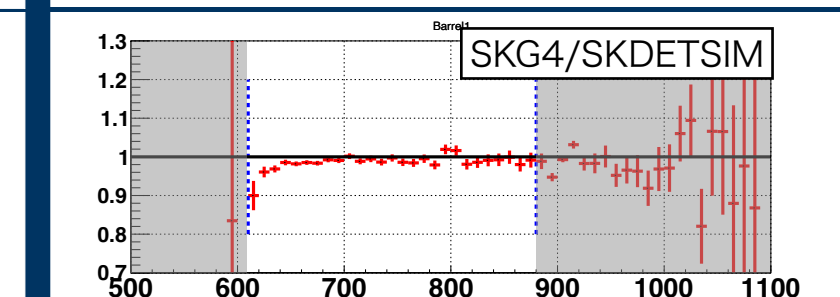
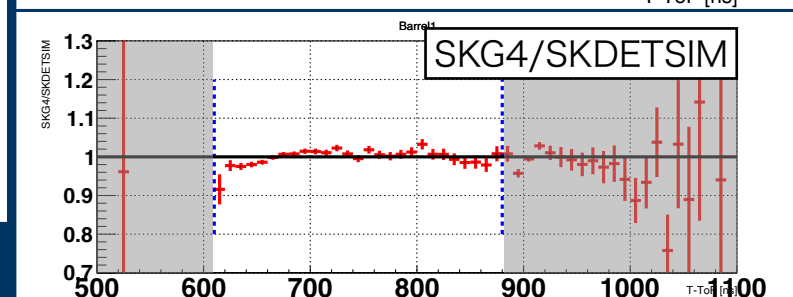
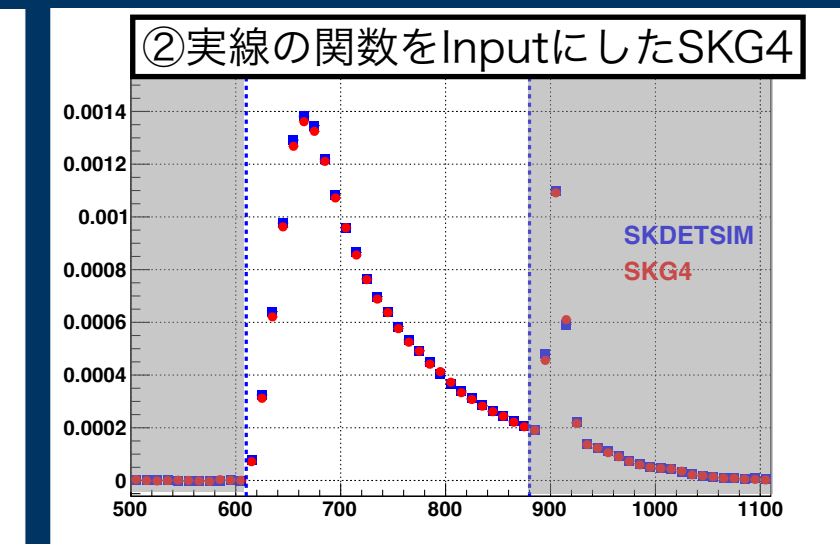
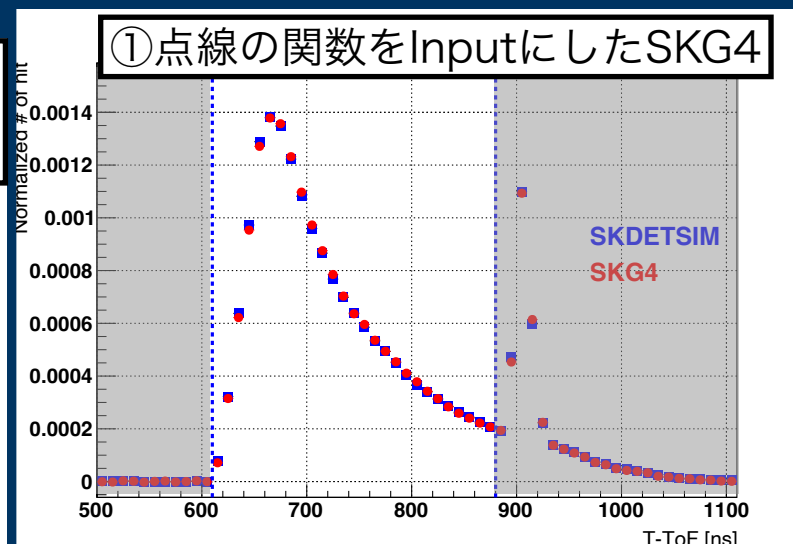
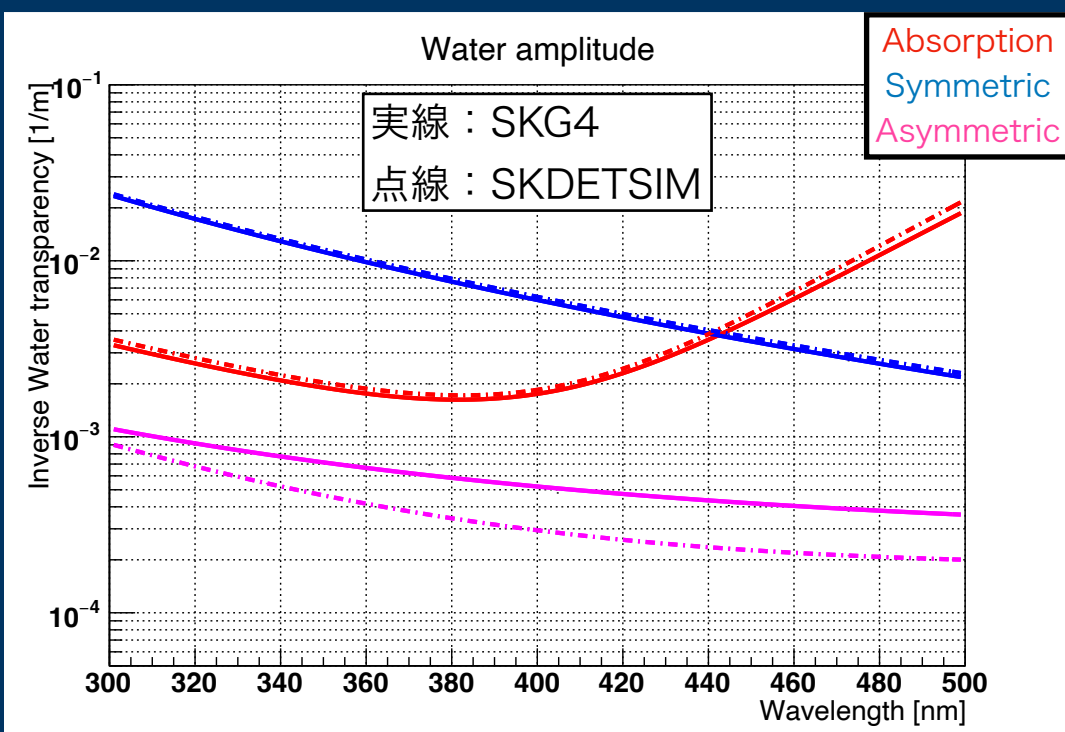
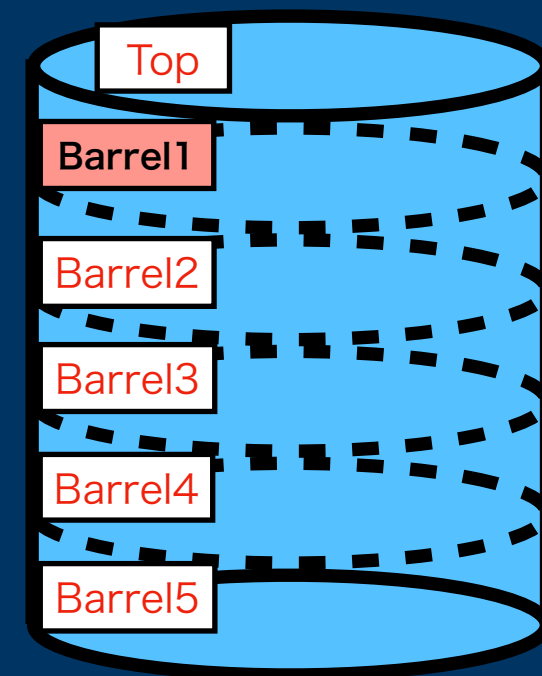
- ①：点線の関数を用いたSKG4の時間分布
- ②：実線の関数を用いたSKG4の時間分布



時間分布の比較

吸収散乱振幅の関数を変えたときのSKG4の振る舞いを比較する

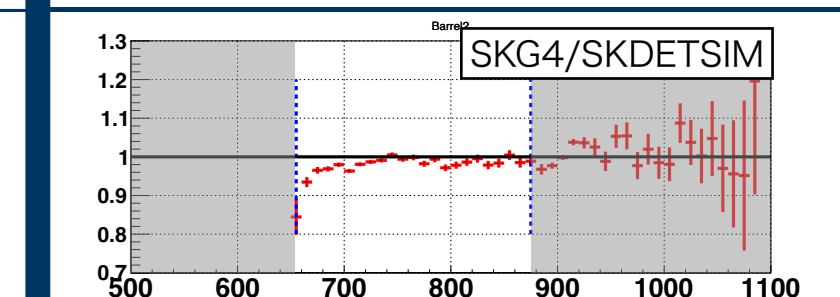
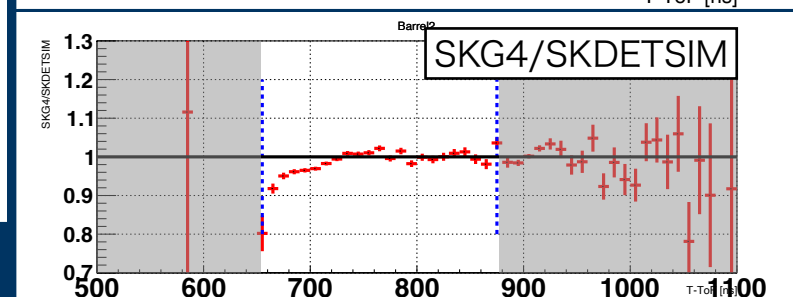
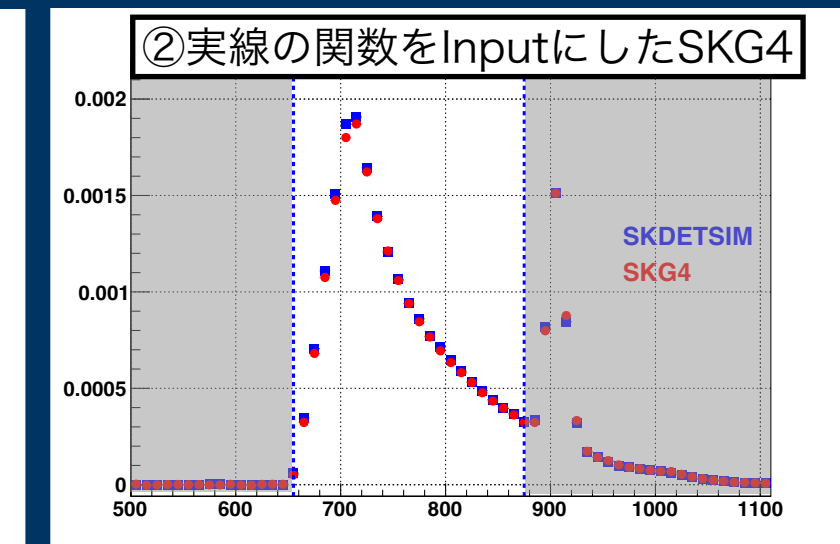
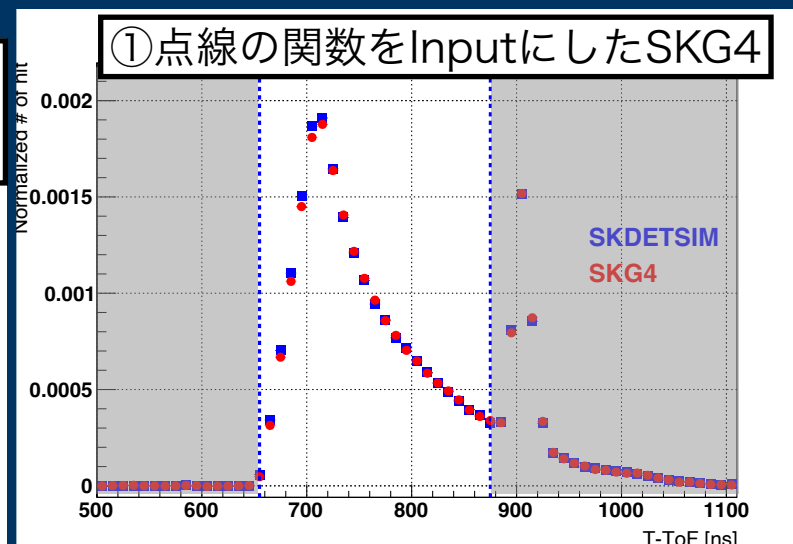
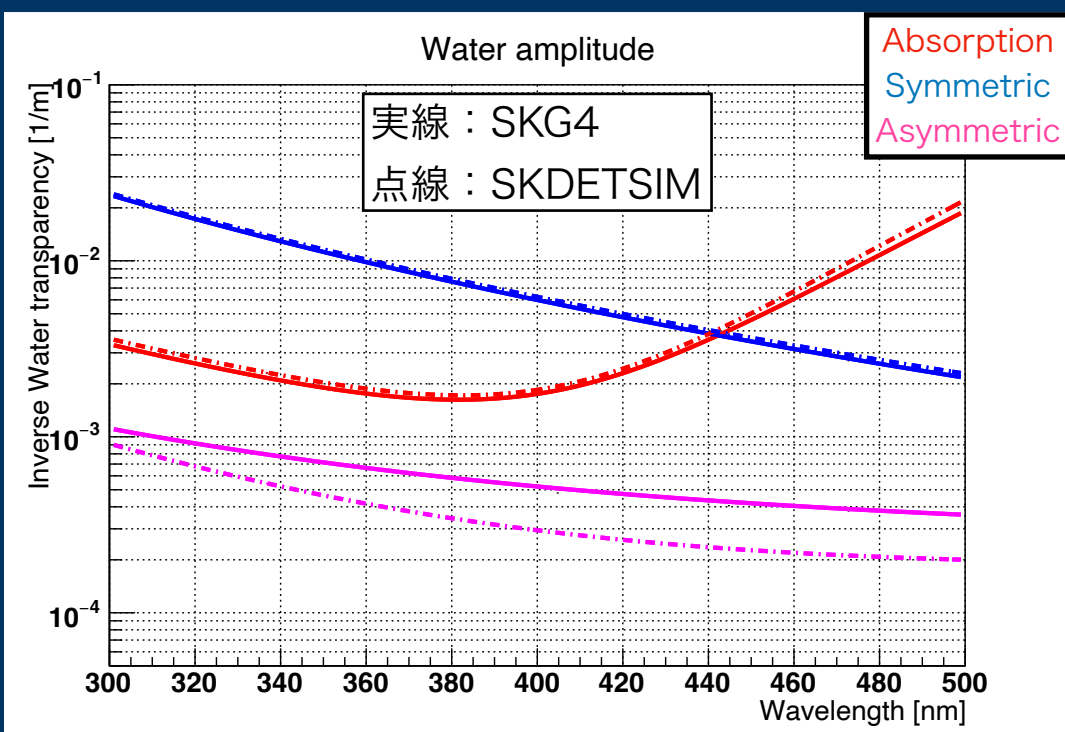
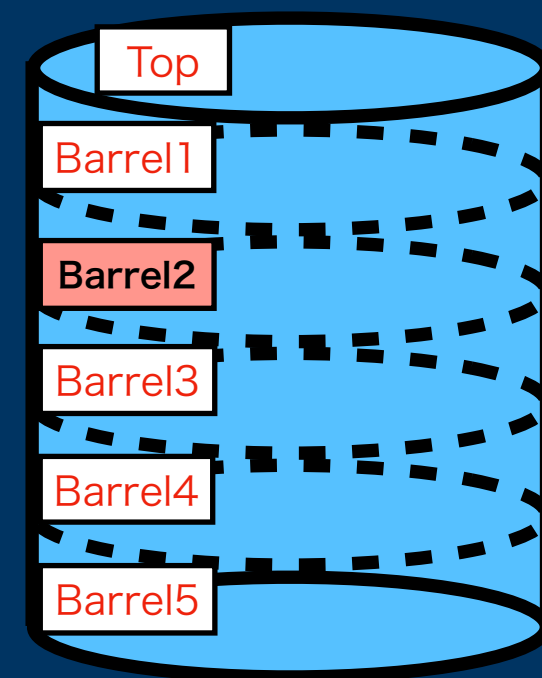
- ①：点線の関数を用いたSKG4の時間分布
- ②：実線の関数を用いたSKG4の時間分布



時間分布の比較

吸収散乱振幅の関数を変えたときのSKG4の振る舞いを比較する

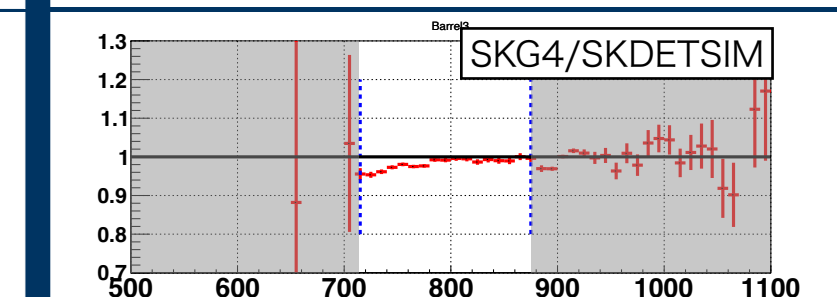
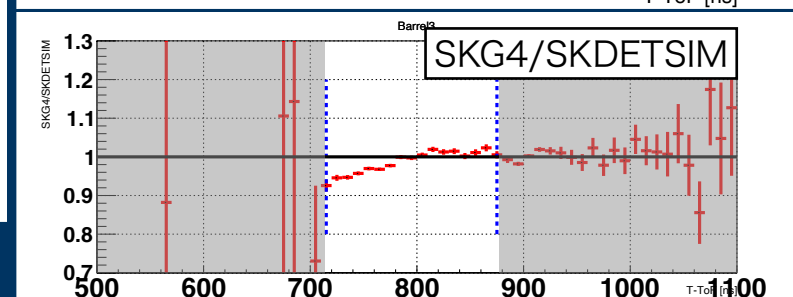
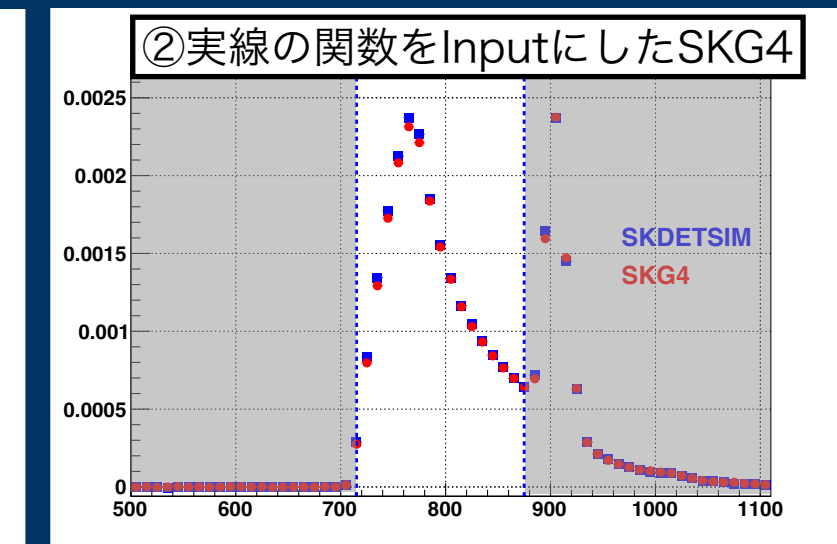
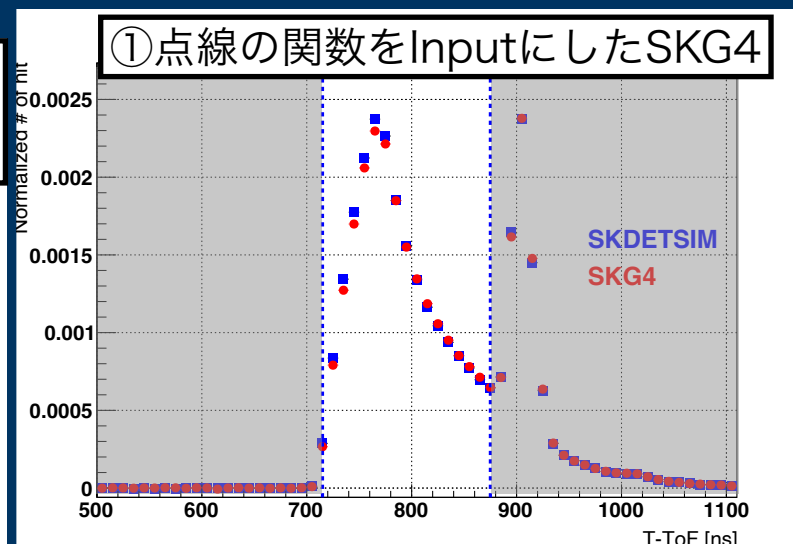
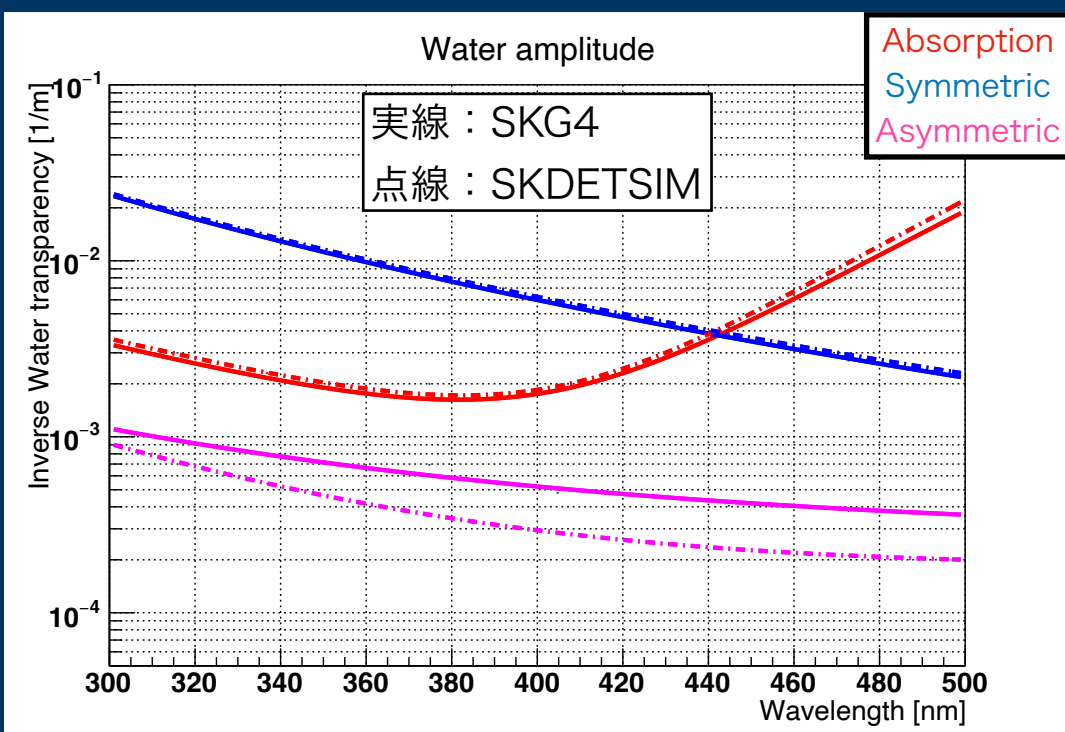
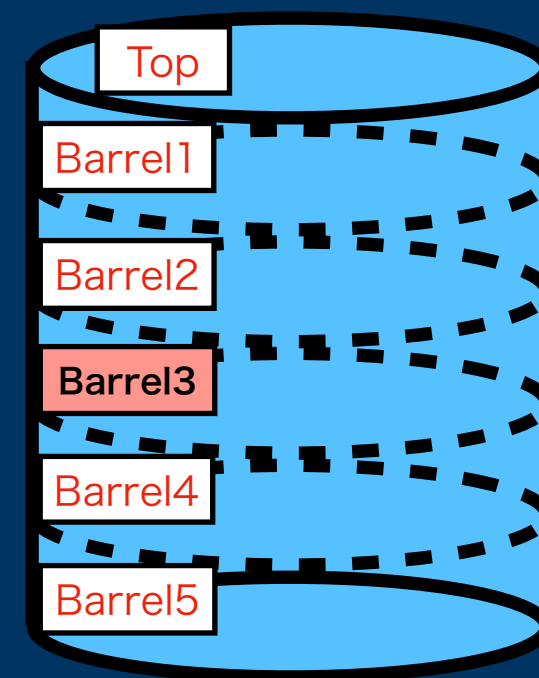
- ①：点線の関数を用いたSKG4の時間分布
- ②：実線の関数を用いたSKG4の時間分布



時間分布の比較

吸収散乱振幅の関数を変えたときのSKG4の振る舞いを比較する

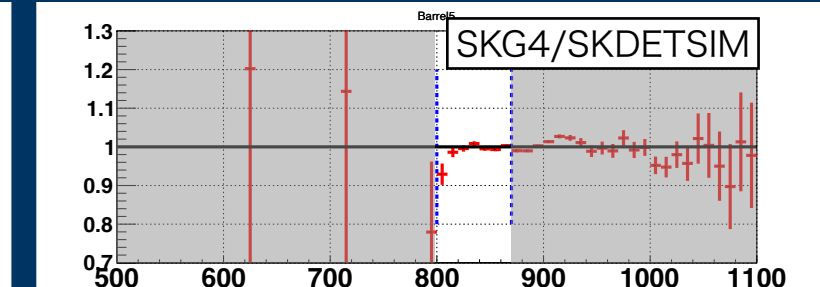
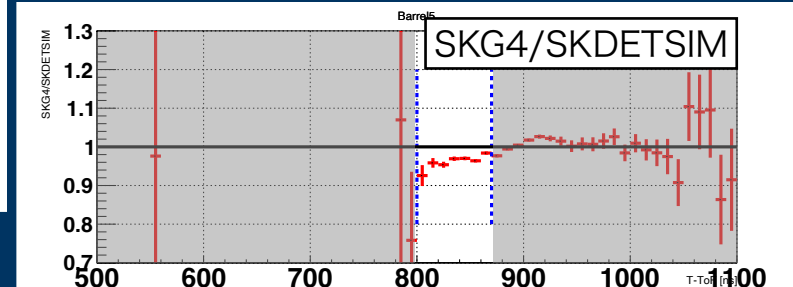
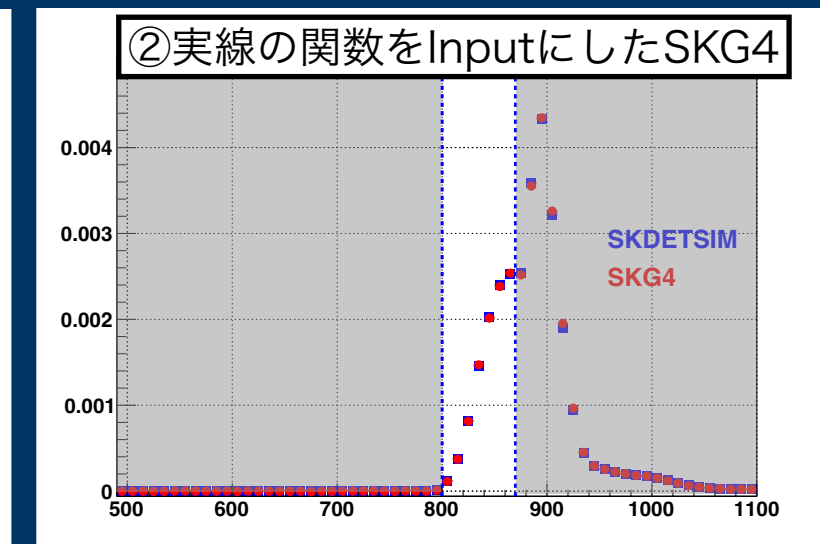
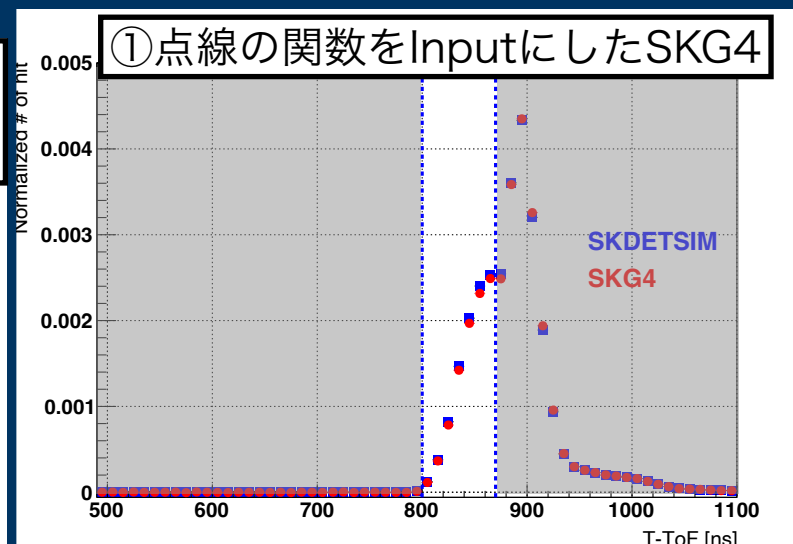
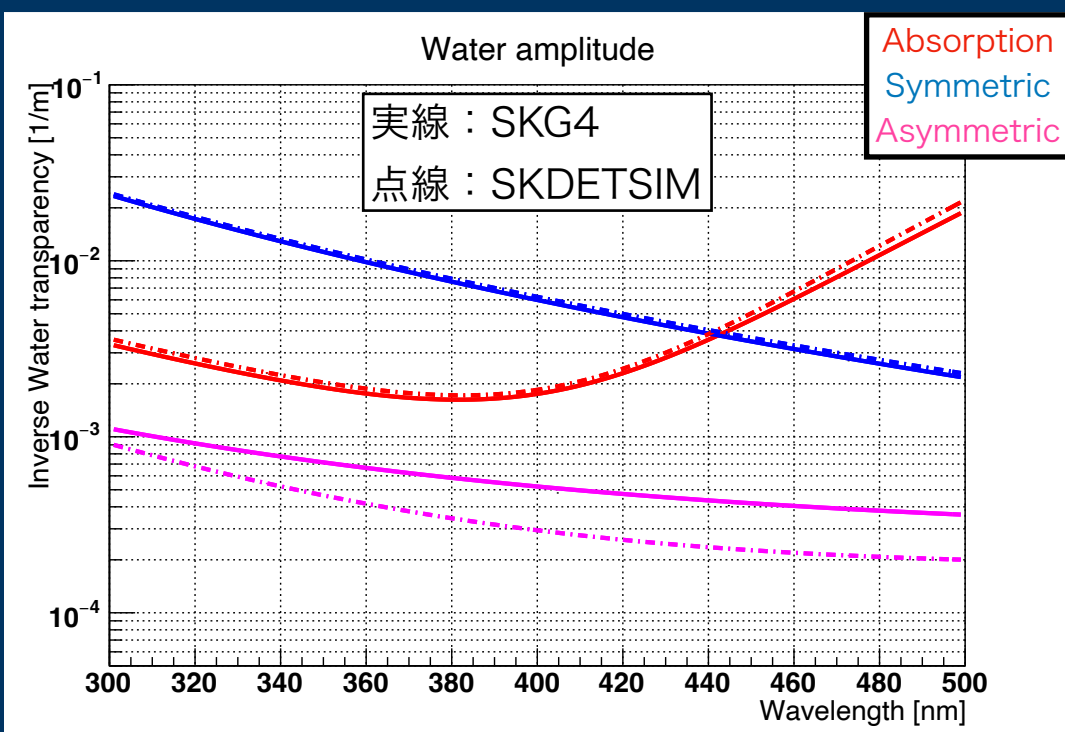
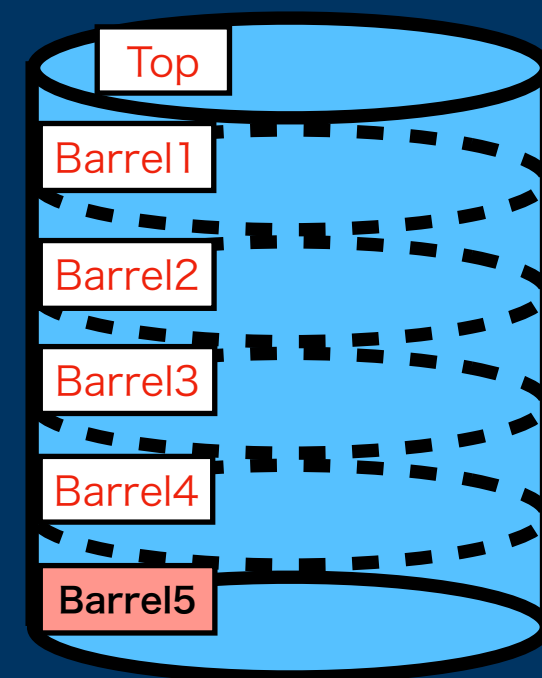
- ①：点線の関数を用いたSKG4の時間分布
- ②：実線の関数を用いたSKG4の時間分布



時間分布の比較

吸収散乱振幅の関数を変えたときのSKG4の振る舞いを比較する

- ①：点線の関数を用いたSKG4の時間分布
- ②：実線の関数を用いたSKG4の時間分布



タンクの水質の上下非対称性

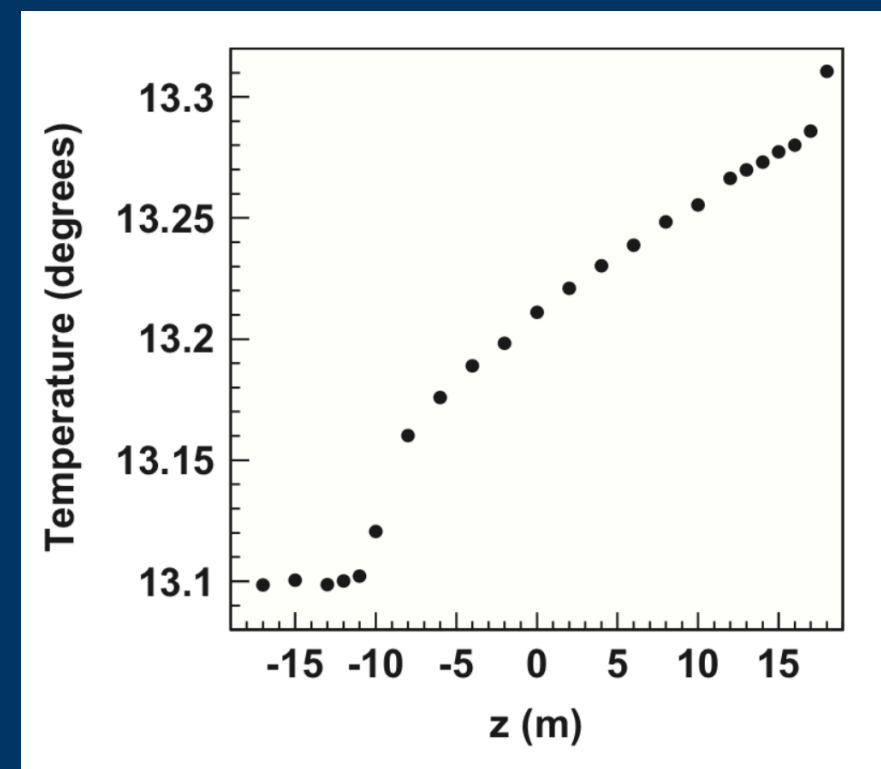
- $Z = -11\text{m}$ 以下は温度一定
 - 水が常に対流している
- $Z = -11\text{m}$ 以上は温度が上昇
 - 最大で 0.2°C の違い
- タンクの水は下部から供給、上部で回収
 - 上部ほど水質が悪い

→ MCによる水質の上下非対称性の理解が必要

Top Bottom Asymmetry : TBA

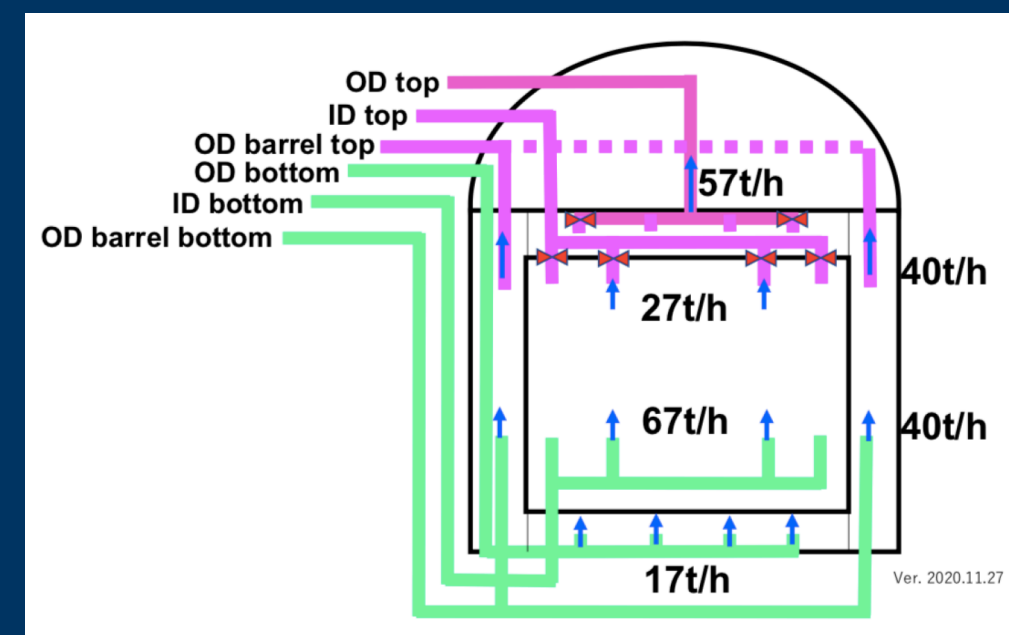
- Ni-Cf線源による測定で見積もる

→ 詳しくは重田さんの発表(7aA125-5)



タンク内部の水温の位置依存性

NIM in Physics Research A 737 (2014) 253-272



タンク内部の配管の様子と水の流量