千葉大学大学院 融合理工学府

修士論文

IceCube Gen2計画における 次世代光検出器「mEgg」の性能評価

2021年3月提出

先進理化学専攻 物理学コース

 $19\mathrm{WM}2105$

鈴木 万里子

概要

IceCube 実験では、1 km³ の南極氷河下に埋設された 5160 台の光検出器 "DOM" を用いて、高エネルギー宇宙ニュートリノを観測する. 2030 年までに約 10000 台の光検出器を追加で搭載し、現在の検出面積を約 8 km³まで拡張する IceCube Gen2 計画が進行している. この拡張計画の第 1 期として、新型光検出器 "mDOM" と "D-Egg" が 2023 年冬から埋設される予定である. また 2030 年の Gen2 計画の稼働開始に向けて、mDOM と D-Egg のデザインをベースとしたより高性能な次世代光検出器 "mEgg" が現在開発されている.

本研究では、mEgg の性能を評価をするために Geant4 をベースとしたシミュレーションプログラム "DOMINANT"を用いた.氷中に mEgg を設置し光子ビームを全方向から打ち込むことで、mEgg の検出感 度の入射角依存性を計算した.シミュレーションの結果から、mEgg 真横からの光子入射に対する検出感度 が、D-Egg の最大 2.5 倍まで向上することを明らかにした.また"ゲルパッド"と呼ばれる取り外し可能な光 学シリコンを mEgg 内部に搭載した.検出器内の光子軌跡の描画を行うことで、ゲルパッドに集光効果があ ることを明かにした.またシミュレーションの結果から、最も効率的に光子を収集するゲルパッドの形状を決 定した.

加えて,実際に製作したゲルパッドのプロトタイプを D-Egg で用いる 8 インチ PMT とガラス容器の間に 搭載し,ゲルパッドの有無による検出感度の比を実験室で測定した.ゲルパッドの使用によって検出感度が (4.4±1.0)%向上し,シミュレーションの結果 (4.0±0.3)% と無矛盾な結果を得た.

目次

| 第1章 | ニュートリノ天文学 | | | |
|-----|---|--|--|--|
| 1.1 | 宇宙線エネルギースペクトル | | | |
| 1.2 | 宇宙ニュートリノ 4 | | | |
| 1.3 | Cherenkov 放射 | | | |
| 1.4 | ニュートリノ事象 (| | | |
| 第2章 | IceCube | | | |
| 2.1 | IceCube array | | | |
| 2.2 | DOM | | | |
| 2.3 | IceCube Gen2 | | | |
| | 2.3.1 Gen2 Phase1 — IceCube Upgrade | | | |
| 2.4 | D-Egg 11 | | | |
| | 2.4.1 基本構造 11 | | | |
| | 2.4.2 PMT | | | |
| | Quantum efficiency | | | |
| | Collection Efficiency 15 | | | |
| | Gain | | | |
| | Uniformity $\ldots \ldots \ldots$ | | | |
| | 2.4.3 光学結合シリコン 16 | | | |
| | 2.4.4 耐圧ガラス球 16 | | | |
| | 2.4.5 Main board | | | |
| | 2.4.6 HV board | | | |
| | 2.4.7 較正用装置 20 | | | |
| | カメラ | | | |
| | LED | | | |
| | 2.4.8 Performance : Dark rate | | | |
| | 2.4.9 大量製造 | | | |
| 2.5 | mDOM | | | |
| 第3章 | mEgg 25 | | | |
| 3.1 | Gen2 に向けた光検出器の改善 25 | | | |
| 3.2 | mEgg デザイン | | | |

| 第6章 | 結論 | 62 |
|-----|--|------|
| | 5.4.2 検出効率の ϕ 方向の依存性 | . 60 |
| | 5.4.1 ゲルパッドの有無による検出効率のスケールの変化 | . 60 |
| 5.4 | 考察 | . 60 |
| | 5.3.2 ゲルパッドの搭載/非搭載による検出効率の入射角 θ 依存性 | . 57 |
| | 5.3.1 測定セットアップ | . 56 |
| 5.3 | 実験室でのゲルパッド搭載/非搭載による検出効率の測定 | . 56 |
| | 5.2.2 ゲルパッドの搭載/非搭載による到達確率の増加 | . 55 |
| | 5.2.1 シミュレーションセットアップ | . 54 |
| 5.2 | シミュレーションでのゲルパッド搭載/非搭載による到達確率の変化 | . 54 |
| 5.1 | ゲルパッドのプロトタイプ.................................... | . 53 |
| 第5章 | ゲルパッドを用いた検出感度の測定 | 53 |
| | 全ての PMT にゲルパッドを搭載した mEgg | . 51 |
| | 最上 (下) 部にポッティングシリコンを用いた mEgg | . 48 |
| | 4.2.4 ゲルパッドの形状改良 | . 48 |
| | 4.2.3 ゲルパッドの開き角度 | . 45 |
| | 4.2.2 期待される性能 | . 44 |
| | 4.2.1 デザイン | . 43 |
| 4.2 | 光結合シリコンの最適化.................................... | . 43 |
| | 4.1.6 光結合シリコンの集光効果 | . 40 |
| | 4.1.5 Ray Optics Simulation | . 37 |
| | 4.1.4 ガラス内部の屈折率変化 | . 36 |
| | 4.1.3 全 Cherenkov 波長における検出面積 | . 32 |
| | 4.1.2 検出面積 | . 30 |
| | 4.1.1 カソード面への到達確率 | . 30 |
| 4.1 | mEgg の検出効率 | . 30 |
| 第4章 | シミュレーションによる mEgg の性能評価 | 30 |
| | Quantum efficiency | . 29 |
| | 1 月 別 便 出 部 の 設 定 | . 28 |
| | 7700000000000000000000000000000000000 | . 27 |
| | 3.3.1 検出器シミュレーションブログラム:DOMINANT | . 26 |
| 3.3 | mEgg のシミュレーションセットアップ | . 26 |
| | | |

| ~ | + | _ | + | h |
|---|---|---|------|---|
| ズ | ▰ | v | ¥7 | r |
| " | 5 | へ | 1+1/ | ١ |
| | | | | |

第1章

ニュートリノ天文学

1.1 宇宙線エネルギースペクトル

我々の住む地球には宇宙線が常時降り注いでいる.宇宙線は発生する場所によって一次宇宙線と二次宇宙 線に分類される.一次宇宙線は宇宙に存在する天体によって加速された粒子から成る.一次宇宙線のうち約 90% は陽子であり,9% を α 粒子が占める [1].二次宇宙線は,一次宇宙線が地球に到達するまでに宇宙背景 輻射や地球大気との相互作用によって生成された粒子を指す.これらの粒子はエネルギーの大きさによって区 別され,その最高エネルギーは 10²⁰ eV 以上にまでのぼる.図 1.1 は様々な空気シャワー実験によって観測さ れた一次宇宙線フラックスのエネルギースペクトルである.



図 1.1: 様々な空気シャワー実験によって観測された一次宇宙線フラックスのエネルギースペクトル [2]. スペクトルはエ ネルギーのべき乗則で表現され,高エネルギーになるにつれて減少していることが分かる.またスペクトルは, その勾配の違いによって "knee" や "ankle" と区別される.

事象のエネルギーを E_{CR} とすると,フラックス F(E_{CR}) は定数 a を用いて

$$F(E_{\rm CR}) = E_{\rm CR}^{-\alpha}$$

と表すことができる. エネルギーが増加するにつれてフラックスは減少するが,その減少率は一定ではない. エネルギーが 10^{14} eV 以下では $a \sim 2.7$ であるが, $10^{15} \text{ eV} - 10^{16} \text{ eV}$ においては $a \sim 3.0$ でありこの領域をスペクトルの "knee" と呼ぶ. $10^{18.5} \text{ eV}$ 以降は勾配は $a \sim 2.7$ に戻り,この領域をスペクトルの "ankle" と呼ぶ [2].

宇宙線の起源は未解決な部分が多いが,いくつかの候補がある.例えば,銀河系外に存在する超新星 (SNe), ガンマ線バースト (GRB) などの突発天体,または活動銀河核 (AGN) のブレーザーなどである [3]. これらの 天体は電波からガンマ線まで幅広い波長の光を放出するため,これまで電磁放射の観測によって宇宙探索を 行ってきた.しかし PeV 以上のエネルギー領域においては,観測において多くの困難が生じる.例えばガン マ線は宇宙空間を移動し地球に到達する間に宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) と衝突しエネルギーを失うた め,10 Mpc より先の宇宙空間を進むことが出来ない.また宇宙線観測の場合は,宇宙線の大半は陽子などの 荷電粒子であるため銀河系内外の磁場によって地球に到達するまでにその軌道を曲げられてしまう.

これらの困難を回避するためには,銀河系外の広大な空間から我々の地球にメッセンジャーとして訪れる, "高エネルギーニュートリノ"の観測が不可欠である.ニュートリノは電荷を持たないため,銀河系内外の磁 場の影響を受けない.そのため高エネルギー宇宙線由来のニュートリノ(宇宙ニュートリノ)の場合,起源天 体からの飛来方向の情報を保ったまま地球まで到達する.またニュートリノは弱い相互作用しか起こさないた め,放出時のエネルギーの情報を失うこともない.

実際に IceCube 実験では 2012 年に PeV 領域の高エネルギーニュートリノを 2 事象観測し,宇宙由来の ニュートリノの実在を示唆した [4]. 加えて 2017 年には,"IceCube-170922A"と呼ばれるニュートリノ事象 を観測し,その到来情報から世界中の観測施設が追観測を行った.するとこのニュートリノ事象は非常に強い ガンマ線を放出するブレーザー天体"TXS 0506+056"によるものであると確認でき,高エネルギーニュート リノ放射天体の同定に初めて成功した [5]. 今後より多くの同定例を増やすため,現在の IceCube 検出器の体 積を拡張し,より角度分解能に優れた検出器を実装する IceCube Gen2 計画が進行している.

1.2 宇宙ニュートリノ

高エネルギーニュートリノは電磁相互作用過程では作られず、高エネルギー宇宙線 ($E_{\rm CR} \ge 4 \times 10^{10}$ GeV) と CMB との photo-pion 相互作用によって生成される.

$$p + \gamma \rightarrow n + \pi^{+} (p + \pi^{0})$$
$$n \rightarrow p + e^{-} + \overline{\nu}_{e}$$
$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$
$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_{e} + \overline{\nu}_{\mu}$$

この過程を複数回行うことで, 陽子が持つエネルギーは 4 × 10¹⁹ eV 以下まで減少する. この限界エネルギー を GZK (Greisen, Zatsepin, Kuzmin) 限界 [6] と呼び, 図 1.1 の ankle 部分のフラックスが急激に減少する 原因であると考えられる. またこの過程によって発生したニュートリノは GZK ニュートリノと呼ばれ, PeV 以上のエネルギーを持つ.

1.3 Cherenkov 放射

ニュートリノは質量が非常に小さく弱い相互作用のみを持つため、検出が非常に困難である.そのため IceCube を始めとするニュートリノ実験においては、ニュートリノの弱い相互作用による生成物を検出する、 といったアプローチを取る. GeV 以上の高エネルギーニュートリノ $\nu_l(l = \mu, e, \tau)$ は検出器媒質の核子と深 非弾性散乱を起こすことで、Neutral current (NC 相互作用) あるいは Charged-current (CC 相互作用) を生 じる.

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X : \text{NC}$$

 $\nu_l + N \rightarrow l^{\pm} + X : \text{CC}$

ここで N は核子, X はハドロン, l は荷電レプトンである.荷電粒子が単位長さ x 進む間に放射する波長 λ の光子数 N_{γ} は Frank—Tamm の公式より以下のように表現できる [7].

$$\frac{\mathrm{d}^2 N_{\gamma}}{\mathrm{d}x \mathrm{d}\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \tag{1.1}$$

ここで α は微細構造定数, $n(\lambda)$ は媒質の屈折率である. IceCube における媒質は南極氷河を指し, $n \approx 1.33$ と近似できる. この荷電粒子が媒質中の光速度 c よりも早い速度 $v = \beta c$ で媒質中を運動するとき,進行方向 に対して角度 θ_c の Cherenkov 光を放射する. このとき,放射角度と媒質の屈折率,また荷電粒子の速度に対 して $\cos\theta_c = 1/n\beta$ が成り立つ. Cherenkov 光の光量と放射角度から元のニュートリノのエネルギーと到来方 向を再構成することが可能となる.

また式 1.1 において $\beta = 1$, x = 1 としたときの Cherenkov 光の波長スペクトルを図 1.2 に示す. 図 1.2 より, Cherenkov 光は低波長側に強度のピークが来ることが分かる.



図 1.2: 式 1.1 で $\beta = 1$, x = 1 としたときの Cherenkov 光の波長スペクトル. スペクトルは λ^{-2} に従って減少する.

1.4 ニュートリノ事象

1.3 小節で述べたように, IceCube 実験では CC 相互作用あるいは NC 相互作用の二次荷電粒子から生じる Cherenkov 光を捕らえることによりニュートリノの飛来方向やエネルギーを再構築する. このとき観測され るニュートリノ事象は 3 種類あり,図 1.3 に示す.



(a) トラック型





(c) ダブルバング型

- 図 1.3: IceCube で扱うニュートリノ事象 [8]. 透明の球で表現された IceCube 検出容積内の光学モジュール (5160 個) の 内,色が付いた大小の球はそのモジュールによって事象が検出されたことを意味する. 球のサイズは Cherenkov 光の相対的な光量を示し,球の色は検出した相対的なタイミングを示す (赤から青の順に早い).
 - トラック型

ミューニュートリノの CC 相互作用によって生じたミューオンによって生じる. ミューオンは有効体積 内を貫通するためエネルギーの同定は難しいが,飛来方向の同定が可能となる. またこの事象が上向き だった場合,地球を貫通してから検出器に到達したことになる. 他のどの粒子も地球を貫通するほどの 透過性を持ちえないため,もしこのような事象を観測できた場合,ニュートリノである可能性が高い.

シャワー型

電子ニュートリノまたは低エネルギータウニュートリノの CC 相互作用,あるいは全てのフレーバーの NC 相互作用によるハドロンシャワーによって生じる.ハドロンは氷中の僅かな移動距離で散乱するた め,図で示したようなシャワー型の事象となる.これはトラック型と異なり,飛来方向の同定が難し い.しかしハドロンは検出容積内で全てのエネルギーを失うため,トラック型と比較してより正確なエ ネルギーの再構成が可能となる.

ダブルバング型

タウオンの平均減衰長は 5 cm/TeV であり,数 PeV 以上のエネルギーを持つタウニュートリノによっ てダブルバング型の事象が見られる [9].タウニュートリノの CC 相互作用によって生じたタウオンが 電子またはハドロンを生成し,第二カスケードを引き起こすことで,2つの球形が現れる.

第2章

IceCube

2.1 IceCube array

IceCube Neutrino Observatory は南極に存在する世界最大のニュートリノ観測施設であり,この外観を図 2.1 に示す.実験施設は南極点付近に位置するアムンゼンスコット基地敷地内に存在する.熱水ドリルで氷河 に 86 本の "String"を開け, String に埋設された計 5160 台の光学モジュール (DOM) が稼働している.氷河 も含めた検出器の総体積は~1 km³ である.

全 String の内 78 本においては, DOM が 60 台ずつ垂直方向 17 m 間隔でデータ転送用のケーブルに固定され,水平方向 125 m 間隔で配置されている.氷河の厚みによって地表から降り注ぐミューオンや大気ニュートリノの影響を取り除くことができる. DOM は深さ 1450 m-2450 m に位置しており,これにより TeV-PeV レベルのエネルギーを持つ宇宙ニュートリノの探索を可能としている.

また残りの 8 本の String に関しては, HQE の PMT を用いた DOM が垂直方向 7 m 間隔, 水平方向平均 72 m と通常より密に配置されている. これらの String は総称して "DeepCore"(図 2.1) と呼ばれ, より低い GeV 領域のニュートリノ検出などに適している.

一方地表には、162 台の氷のタンクが IceCube 検出器の六角形表面上に均等に配置されている. 各タンク には DOM が 2 台ずつ埋設されている [10]. これらは総称して "IceTop" と呼ばれ、TeV-EeV レベルの宇宙 線による空気シャワーを観測するために用いられる. これらの空気シャワーは、宇宙ニュートリノの探索にお いては雑音 (背景事象) として扱われるため、メインのモジュールと同時測定することで取り除くことが可能 である.



(b) String の配置図

図 2.1: IceCube 実験施設 [11]. a): IceCube 実験施設の外観. 氷河 1450 m-2450 m の深さに計 5160 台の光学モジュー ル (DOM), 地表中心部には観測室とその周囲に 162 台の IceTop が設置されている. b): String の配置図. 86 本の String が地表真上から見て六角形状を成すよう配置されている. 全 String の内 78 本が "IceCube", 8 本が "DeepCore" と区別され, それぞれ検出対象が異なる. また 7 本が "Upgrade" (2.3.1 小節参照) として新たに埋 設される.

2.2 DOM

現在稼働している光検出器は DOM (Digital Optical Module) と呼ばれる. DOM を図 2.2 に示す.



図 2.2: DOM[12]. 耐圧ガラス球には基板, PMT などが搭載されている. PMT は感光面 (カソード面) が下を向いている.

DOM は球型の耐圧ガラス球内に、10 インチ光電子増倍管 (PMT: PhotoMultiplier Tube), DAQ 用基 板 (Main Board),電源供給基板 (HV supply board) などが内蔵している.PMT の感光面 (カソード面) とガラスの間は、UV 透過性能を持った光学結合シリコンで充填されている.カソード面は磁気シールド (Mu-metal) で覆われており、これによりカソード面の感度を均一にする.PMT から得られたアナログ信号 (光子の情報) は Main Board によってデジタル信号に変換され、各 DOM に繋がれたペネトレーターを介し て地表のコンピューター施設にリアルタイムに転送される.また較正用 LED も搭載されており、これらは南 極氷河における光伝搬特性の解析に用いる.

2.3 IceCube Gen2

現在 IceCube 実験では拡張計画が進行している. これを "Generation 2"(第 2 世代) と南極に生息する "gentoo penguin" (ジェンツーペンギン) にかけて Gen2 計画と呼ぶ. Gen2 計画では, 2024 年までに次世代 光検出器のデザイン決定, 2026 年から建設開始, 2030 年に稼働開始を目標としている. Gen2 計画のレイア ウトを図 2.3 に示す.



図 2.3: Gen2 計画で拡張される String の配列図 [14]. IceCube は 86 本, Upgrade は 7 本の String から成り, Gen2 で は更に 120 本もの String が埋設される.

Gen2 計画では現行の String の外側領域に, HEA (High Energy Array)[13] と呼ばれる 120 本の String を 水平方向に 120 m 間隔で配置する. HEA によって新たに埋設される光検出器は 9600 台に及ぶ. また氷河も 含めた体積は 8 km³ となり,現行の体積 1 km³ の 8 倍まで拡張される. これにより ~ 50 TeV 以上の超高エ ネルギー宇宙ニュートリノの検出を目指す.

2.3.1 Gen2 Phase1 — IceCube Upgrade

Gen2 計画の第一期として,2023 年から新たに検出器を 700 台埋設する "Upgrade 計画"が稼働予定であ る.図 2.1b,図 2.3 で示したように,新たに 7 本の String が DeepCore 付近に追加される.これらの検出器 は氷河の純度が高くミューオン雑音の影響が少ない深さ 2150 m-2425 m の範囲に埋設される [15].Upgrade 計画では GeV 領域のニュートリノ振動 (ミューニュートリノ消失) や暗黒物質の探索,あるいは南極氷河の光 伝搬特性のより詳細な理解に焦点を当てている.

また Upgrade 計画では新型の光検出器を開発しており、主なものとして "D-Egg" (Dual optical sensors in an Ellipsoid Glass for Gen2) と "mDOM" (Multi–PMT Digital Optical Module) が挙げられる. D-Egg は 2.4.1 節, mDOM は 2.5 節で説明する.

2.4 D-Egg

2.4.1 基本構造

D-Egg (The Dual optical sensors in an Ellipsoid Glass for Gen2)[16] とは、当研究グループが主として開 発した Gen2 および Upgrade 計画用の新型光検出器であり、これを図 2.4 に示す. DOM が球状であるのに 対し、D-Egg は高さ 21 インチ、直径 30 cm の卵型である. D-Egg は上下 2 対の Upper half D-Egg, Lower half D-Egg から成り、内部を真空吸引して窒素を半気圧まで充填させた後にハーネスを装着してガラス境界 面を固定している.



図 2.4: D-Egg. 卵型の上下対称な耐圧ガラス球の中に2台の PMT が搭載され,そのカソード面は光学結合シリコンで 固定されている.ハーネスに取り付けられたロープでモジュール同士を数珠上に繋ぎ,氷河に埋設する.

各 half D-Egg には PMT が搭載されている. PMT ダイノード部分には磁気シールドを巻き付けることで 地磁気の影響を取り除く. PMT とガラスは光学結合シリコンによって固定されている. 各 PMT のネック部 分上部には電源供給用回路基板 (HVB: High Voltage board) が搭載されている. また D-Egg の中心には, PMT からのシグナルを読みだすためのデータ取得用回路基板 (MB: Main Board) が搭載されている. MB から取得されたデータはペネトレーターケーブルを経由し,地表真上にあるサーバー室に転送される. Lower half D-Egg にはカメラと較正用 LED が搭載されている. これらは Cherenkov 光検出とは別に,南極氷河の 光伝搬特性の理解に用いられる.



(a) Upper half D-Egg



(b) Lower half D-Egg

図 2.5: Half D-Egg. a):ガラス球内部にシリコンで固定された PMT, HVB が搭載されている. 図の状態から上下反 転させて Lower half D-Egg の上に乗せ,真空吸引して結合させる. b):ガラス球内部にはシリコンで固定され た PMT,較正用 LED 基板,カメラ搭載基板,HVB,MBが搭載されている(図ではガラスに保護カバーがかけ られている). データ取得用基板は、半球同士を組み合わせるときに上半球の電源供給用基板とも接続される.

2.4.2 PMT

D-Egg では浜松ホトニクス製の8インチ PMT が採用され,耐圧ガラス球内部上下に計2台搭載されている. PMT に向かって飛来してきた光子は,カソード面で光電効果によって光電子 (PE: Photo-Electron) に変換される.光電子は光子の入射方向と同一方向に放出され,PMT 内部のダイノードで増幅された後にシグナルとして検出される.



図 2.6: 8 インチ PMT(浜松ホトニクス製, R5912-100, HQE)

Quantum efficiency

カソード面にヒットした光子数 N_{hit} の内, どれだけが光電子 N_{PE} に変換されるかは, PMT の量子効率 (QE: Quantum efficiency) によって表現できる.

$$QE = \frac{N_{PE}}{N_{hit}}$$
(2.1)

カソード面に使用されているアルカリ金属の組合せや製法によって,最高感度波長と,長波長側の限界が決定 される [17]. D-Egg の PMT の場合, 300 nm-650 nm の範囲に感度を持ち,個体差はあるが QE は 370 nm で最大 40% となる.

Collection Efficiency

カソード面から放出された光電子数と最終的にアノードから出力される光電子数の割合を,収集効率 (CE: Collection Efficiency) と呼ぶ. 一般的に CE はカソード面から第 1 ダイノードの有効部分への入射数に最 も依存する [17]. 第 2 ダイノード以降は二次電子の数が十分増加しているため,収集効率に与える影響は少 ない.

Gain

ダイノードでどれだけの光電子が増幅されるかは、PMT の Gain によって決定される. CE が 100% であるとき、Gain (G) は以下の式で表される.

$$G = A \times V^{\kappa} \tag{2.2}$$

ここで V は PMT の印加電圧, $A \ge \kappa$ は電極の構造や素材もしくはアノード数に依存するパラメーターである. また PMT の出力電荷を Q_{PE} ,素電荷を e とすると, G は

$$G = \frac{Q_{\rm PE}}{e \times N_{\rm PE}} \tag{2.3}$$

と表せる. 実験室においては SPE (Single Photo-Electron) レベルの光子ビームを入射し,図 2.7 のような 波形をオシロスコープで読み込む. このピーク波形が十分含まれるような時間 t の範囲 (t_1, t_2)を指定し, $Q = \int_{t_1}^{t_2} V/R \, dt$ から電荷 Q が求まる. ここで,オシロスコープの抵抗は $R = 50 \,\Omega$ とする. この積分を取得 した波形分 (10000 events) だけ繰り返し,得られた Q をヒストグラム化する. ヒストグラムの例を図 2.8 に 示す. $Q = 0 \,\mathrm{pC}$ に近い方から順に,ペデスタル分布, SPE 分布, 2PE 分布をガウス関数でフィッティングし ている. 特に SPE 分布は以下の式

$$f_{\rm SPE}(Q) = p_0 \exp\left(-\frac{(Q-p_1)^2}{2p_2^2}\right)$$
(2.4)

でフィッティングする.ここで p_0 は規格化定数, p_1 は mean, p_2 は sigma である.またペデスタルと SPE 分布の間に見られる赤点線のピークは,指数関数で表現できる熱雑音によるノイズ項である.



図 2.7: SPE 波形サンプル. ピーク部分が十分含まれるよう な時間 t の範囲 (t_1, t_2) を指定し, $Q = \int_{t_1}^{t_2} V/R dt$ を計算することで電荷 Q が求まる.

図 2.8: 図 2.7 で計算した電荷 Q のヒストグラム. PMT の
 印加電圧は V = 1560 V とした.赤実線で表現されているものは 0 pC に近い方から順にペデスタル,
 SPE, 2PE 分布である.また SPE 分布に式 2.4 を
 フィッティングさせた.

式 2.3 に $p_1 = Q_{\text{PE}}$, $N_{\text{PE}} = 1$ を代入した式 $G = p_1/e$ から Gが求まる. この Gを異なる印加電圧 V で 何点かデータを取り,最後に式 2.2 でフィッティングする. 図 2.9 にデータ点とフィッティング関数を示す. D-Egg において $G = 10^7$ となるように Vを設定するが,この図では $V_{(G=10^7)} = 3.93 \times 400$ V = 1572 V で あることが分かる. PMT や HV の個体差によって, $V_{(G=10^7)} = 1300$ V -1650 V と幅を持つ.



図 2.9: Gain curve の例. Control voltage を 400 倍したものが PMT の印加電圧 V である.フィッティングの結果から, $V_{(G=10^7)} = 3.93 \times 400 \, \text{V} = 1572 \, \text{V}$ であることが分かる.

Uniformity

カソード面から放出された光電子は地磁気の影響を受けて,ダイノードで上手く増幅されないことがある. そのため検出感度はカソード面上で偏りが生じる. PMT カソード面の検出感度の偏りを反映した図を "2D スキャンマップ"と呼ぶ.

実験室での測定では図 2.10 で示すような暗箱装置内に PMT または half D-Egg を設置する.またレー ザー超短パルス光源 (浜松ホトニクス製, C10196) が暗箱とは別に用意されており, 光源は光学ケーブルを 介して暗箱内に供給される.回転式モーターに取り付けられた光学ケーブル先端から発するレーザー光源 ($\lambda = 400 \text{ nm}$)を PMT カソード面の曲率中心に向けて入射する.



(a) 2D スキャンで用いる暗箱の中身



(b) モーターの移動範囲を示した図

図 2.10: 2D スキャン測定のセットアップ [18]. a): 2D スキャンで用いる暗箱の中身. PMT を固定する台の下には 回転式モーターと光源に繋がれた光学ケーブルが取り付けられている.入射位置を θ 方向に動かしたい場 合はモーター上のアームを上下に移動させ、方位角 ϕ 方向に動かしたい場合はモーターを回転させる. b): モーターの移動範囲を示した図.カソード面を十分覆うような範囲区間 (θ = 0 deg-60 deg を 64 区間刻み、 ϕ = 0 deg-360 deg を 5 deg 刻み、計 64 × 72 = 4608 区間) にモーターを動かしデータを取る. 各区間では 200 発ビームを打ち込む.

PMT で測定した 2D スキャンマップの結果を図 2.11 に示す.カソード面から放出された光電子は、地磁気の影響を受けると光路を外れて第1ダイノードの有効部分に到達しない.そのため地磁気の影響を一切取り除いていない図 2.11a では、第一ダイノードが存在する $\phi = 0 \deg$ 付近の感度が半分以下まで落ちている.そのため "FINEMET" (Hitach Metal 製, MS5000M) と呼ばれる磁気シールドを PMT ダイノード部分に巻き付けて、地磁気による感度の偏りを減らす.図 2.11b は FINEMET を用いたときの 2D スキャンマップである.カソード面全体で感度の平均を取ったとき、FINEMET を除いた場合は 0.758 + 0.003、FINEMET を使用した場合は 0.818 + 0.003 と感度が 6% ほど向上する [18].



(a) PMT のみの 2D スキャンマップ



図 2.11: FINEMET 有/無の PMT の 2D スキャンマップ [18]. $\theta = \phi = 0 \deg$ のときの Sensitivity を 1 として規格 化している. マップの色は相対的な感度の高さを示している. a): PMT のみの 2D スキャンマップ. 地磁気の 影響で $\phi = 0 \deg$ 付近の相対感度が半分以下まで落ちている. b): PMT+FINEMET の 2D スキャンマップ. (a) と比較して赤い領域が増え,偏りが軽減されていることが分かる.

2.4.3 光学結合シリコン

DOM と同様に, D-Egg では光学結合シリコンを PMT カソード面とガラス内側の間に充填させ硬化させる ことで PMT を固定する.加えて、シリコンは光子の反射や散乱を防ぐ目的にも適している.ガラスの屈折率 は 1.5、シリコンの屈折率は 1.43 である.そのため光子は空気よりもシリコンを介したほうが、ガラスを通過 し PMT に到達するまでの屈折率の差が小さくなる.

また図 1.2 より, Cherenkov 光は紫外領域に強度を持つ.よって D-Egg の検出効率を向上させるには,シ リコンやガラスの UV 透過性を向上させる必要がある [19]. D-Egg 用に改良されたシリコンと DOM 用のシ リコンの透過率の比較を図 2.12a に示す.この透過率は検出器真上 (下) から入射した場合を想定しており, 各シリコンの厚さ (DOM:10 mm, D-Egg:5 mm) は検出器真上 (下) 方向の厚さを意味する.図 2.12a より, D-Egg 用シリコンの透過率はより低波長側から増加し,400 nm 以降は 100% に達する.

2.4.4 耐圧ガラス球

D-Egg のガラスもシリコンと同様に紫外線透過に優れている. DOM 用または D-Egg 用ガラスの透過率の 比較を図 2.12b に示す. この透過率は検出器真上 (下) から入射した場合を想定しているため,各ガラスの厚さ (DOM:12.7 mm, D-Egg:10 mm) は検出器真上 (下) 方向での厚さを意味する. 図 2.12a より, $\lambda = 270$ nm 以降の透過率が大幅に改善されていることが分かる. 特に $\lambda = 300$ nm において DOM のガラスは光子を全く 透過させないのに対し, D-Egg ガラスは 20% 以上の光子を透過させる.

また日本から南極までの D-Egg の輸送中,あるいは D-Egg 埋設後に破損などの問題が生じた場合,検出器 を修理することは不可能に等しい.そのためガラス球には

- 輸送時の振動(トラック,貨物機を想定)
- 南極氷河中での温度と圧力 (温度最低 -40°C, 圧力最大 70 MPa)
- 埋設時の荷重引張(最大 850 kg)
- 落下アクシデント

に耐えうることが要求される.当研究グループでは耐震試験,耐荷重試験,耐温度(耐圧)試験,落下試験を 行った.耐震試験,耐温度(耐圧)試験では問題は見られなかった.耐荷重試験では,結果をふまえて D-Egg 同士を繋ぐロープの種類を変更した.また落下試験では D-Egg 内のパーツに破損が見られたため,そのパー ツを搭載する手法を改善した [20].



図 2.12: シリコンとガラスの透過率 [19]. a):シリコンの透過率.入射光 (λ = 320 nm) において, DOM のシリコンの透 過率は 85% であるのに対し, D-Egg は 95% まで改良されている.b):ガラスの透過率.入射光 (λ = 320 nm) において, DOM のガラスの透過率は 10% であるのに対し, D-Egg は 75% まで改良されている.

2.4.5 Main board

D-Egg 内の 2 台の PMT は,図 2.13 で示すような Main Board (MB) によって制御されている. MB は D-Egg の形状に合わせて円型であり、中心部は PMT のネックを通すため空洞となっている.

図 2.14 は Main Board の DAQ システムである [21]. D-Egg 上下に搭載された PMT によって,各光子の 到達したタイミング t_i とその電圧 V_i の情報がアナログ信号として得られる. この信号は, MB に搭載された A/D コンバーター (ADC) によって ADC カウント (デジタル信号)ADC_i に変換され,集積回路 (FPGA) に 蓄積,処理が行われる. その後マイクロコントローラ (MCU) 内の DAQ ソフトウェアを介し,それらの信号 に対し司令を与える.

また MB には D-Egg 内部の気圧,温度,重力を読み込むセンサーが搭載されている. これらは D-Egg 埋 設時の位置較正に用いられる.



図 2.13: Main Board. D-Egg 中心に水平に搭載される. MB は 2 枚の HVB, カメラリング, フラッシャーリングと接続される.



図 2.14: Main Board の DAQ システム [21]. D-Egg 内の PMT は、各光子の到達タイミング t_i とその電圧 V_i の情報 をアナログ信号として受け取る. この信号は、MB に搭載された ADC によってデジタル信号 ADC_i に変換さ れた後に FPGA に蓄積される. 蓄積されたデータは D-Egg に繋がれたペネトレーターケーブルを介して氷河 上にあるサーバー室に転送される.

2.4.6 HV board

図 2.15 に示す High Voltage board (HVB) によって, PMT に電圧を印加し, 各ダイノードに電圧を分配 することが可能となる. HVB は各 PMT ネック部上に接続され, D-Egg に対し計 2 枚搭載されている. また 各 HVB は MB にも接続される.



図 2.15: High Voltage board. HVB を用いることで PMT に電圧を印加することができる. HVB は各 PMT に 1 枚 ずつ搭載され、ソケットを介して簡単に脱着可能である.

2.4.7 較正用装置

D-Egg の南極氷河中への埋設時には,熱湯を噴出させながらドリルで氷河を掘削する.水で満たされた円 柱状の穴に数珠状に繋げた D-Egg を埋設する.この時溶けた氷は再度凝結するため,D-Egg は完全に凍結 して氷河内に固定される.再度凍結した氷は,掘削しなかった氷とは性質が異なる.この氷を"Hole Ice"と 呼ぶ.D-Egg で検出される光子は Hole Ice を必ず通過する.また掘削しなかった自然のままの氷河を"Bulk Ice"と呼んで区別する.南極氷河中での光伝搬特性の理解のために,図 2.16 に示す較正装置を用いる.

カメラ

Lower half D-Egg には図 2.16a のような 3 台の光学カメラが搭載されたトーラス型の支持リングが設置 されている.これをカメラリングと呼ぶ.カメラによって Hole Ice の凍結する様子を撮影することを目的と する.

LED

D-Egg には較正用 LED(Roithner 製, XRL-400-5O, 視野角 15 度, ピーク波長 400 nm-410 nm) が搭載さ れたトーラス型の基板が Lower PMT のシリコン上部に搭載されている. これをフラッシャーリングと呼び, 図 2.16b に示す. フラッシャーリングには, LED 8 台がリング横方向に 45 度間隔で配置されている. これに より埋設後の D-Egg の回転方向を較正することが可能である. また LED 4 台が D-Egg 下方向に 90 度間隔 で配置されている. 下向きに光源を発することで,予め方向が予測できている光子が隣り合う D-Egg にどの ように伝搬するかを確認することができる.



(a) カメラリング



(b) フラッシャーリング

図 2.16: D-Egg に搭載されている較正用装置. a):カメラリング.リング上に3台のカメラが等間隔に搭載されており, 氷河下の様子を撮影できる.各カメラに生えているケーブルは MB に接続される.b):フラッシャーリング. リング横方向に8台,下方向には4台の LED が等間隔に搭載されている.これらは D-Egg の埋設時の位置較 正や光子の氷河伝搬の理解に用いられる.

2.4.8 Performance : Dark rate

D-Egg は周囲に光源が一切無くともノイズシグナルを検出する. これを "Dark rate" と呼ぶ. Dark rate の主な原因として PMT で発生する熱雑音が挙げられる. PMT が持つ熱エネルギーがカソード面と各ダイ ノードの仕事関数 W を超えたとき,温度 T に従って電子を放出し,そのときに熱雑音が発生する. この熱雑 音 r(T) はボルツマン定数 k を用いて以下のように表現でき,T に関して指数関数的に増加する.

$$r(T) \propto T^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$
 (2.5)

実験室での測定では、図 2.17 のように PMT または Half D-Egg (D-Egg) 表面に黒いテープを巻き付けて 暗室に設置し、外部の光源を完全に遮断する.次にオシロスコープを用いて適当な時間幅で波形データを取 り、閾値 0.25 p.e 以上のピークを持った波形のみを"ノイズヒット"として数える.



(a) テープを貼った Half D-Egg



(b) ノイズ測定用の D-Egg

図 2.17: ノイズ測定のセットアップ. a): Half D-Egg のガラスにテープを貼っている様子. テープでガラス全面を覆い, カソード面に直接入射する光源を遮断する. b): ノイズ測定用の D-Egg. テープで光を完全に遮断した D-Egg を黒い袋に入れ,更に暗箱に入れる. 図 2.18 は,表面をテープで覆った half D-Egg を用いたときの Dark rate の温度依存性を示す. グラフ内 "All" は測定された全ての Dark rate を指し,All は "Random" と "Correlated" に区別できる.Random 事 象は式 2.5 でフィッテングできるため,PMT の熱雑音による寄与であることが分かる.しかし温度増加に反 する Correlated 事象も存在していることから,熱雑音の他にも Dark rate の原因があることを示唆してい る.また図 2.19 は 15 台の PMT 及びその D-Egg における Dark rate の測定値である.全ての事象において PMT よりも D-Egg の Dark rate の値のほうが大きいことから,D-Egg において PMT 以外の要素がノイズ 増加の主な原因となっていることが分かる.



 図 2.18: Dark rate の温度依存性 [18]. 図内 "All"は測定された全ての Dark rate を指し, All は "Random"と "Correlated"に区別できる. Random 事象 (赤線) は式 2.5 でフィッテングされており, 熱雑音による寄与で あることが分かる. しかし Correlated 事象 (青線)は温度増加に反していることから, この事象は熱雑音が原因 ではない.



図 2.19: 15 台の PMT 及びその D-Egg における Dark rate の測定値 [22]. 全ての事象において PMT よりも D-Egg の ほうが Dark rate が大きいことから、ガラスまたはシリコンにノイズの原因があると示唆している.

PMT の熱雑音以外の Dark rate の原因を調べたところ,ガラスやシリコンの成分によるシンチレーション 光が原因であると判明した [22]. 例えばガラスの成分の一つとして K₂O の ⁴⁰K が挙げられるが,⁴⁰K は放射 性物質の一部で,⁴⁰Ca あるいは ⁴⁰Ar への崩壊を通して β 線あるいは γ 線を放出する. これらがノイズの原 因となる.

これらのノイズがもし D-Egg のペネトレーターケーブルの帯域幅 (~ 1500 kHz) を超える場合,南極で のデータ転送に支障が出る.そのためノイズの測定をオシロスコープではなく南極で実際に使用する Main Board の DAQ システム (図 2.14 参照) を使用して測定したが,帯域幅を満たすことが確認された [23].ノイ ズの発生源を取り除くことは困難であるため,その特性を知り,ニュートリノシグナルとの区別をつけること が重要である.

2.4.9 大量製造

現在,当研究グループでは D-Egg の 2023 年埋設開始に向けて,D-Egg の実機製造に取り組んでいる.基 板などの精密機器を扱うため,防塵室での作業が必須である.研究室メンバーが作業所に赴いて手作業で組み 立てており,2021 年末までに 310 台の D-Egg 製作を予定している.

製造後に D-Egg は作業所から研究室に再送される.これは,研究室に設置された巨大な冷凍庫を用いて, 南極環境下を想定した稼働テストを全ての D-Egg に対して行うためである.

2.5 mDOM

mDOM は主にドイツのチームによって開発された新型光検出器であり、これを図 2.20 に示す.



図 2.20: Upgrade 計画に向けた新型光検出器 mDOM[24]. mDOM は主に耐圧ガラス球, 24 台の 3 インチ PMT, 制御 基板から成る. 各 PMT はプラスチックホルダーで固定されている (図では上半球のホルダー,反射材は除いて ある).

mDOM ではホウケイ酸ガラスから成る,直径 14 インチの耐圧容器を採用している.この容器内に 3 イン チ PMT 24 台を全立体角全体に分布することで,検出器全体にほぼ均一な感度を持たせることを可能として いる.各 PMT からの信号は個別にデジタル化され,光子の入射方向を判別することができる.

PMT カソード面上には UV 透過性に優れた光学結合シリコンと円錐型の反射材が搭載されている.反射材 はアルミニウムシートから成り,これはチェレンコフ放射のスペクトル,PMT の量子効率,および圧力容器 ガラスの透過率などを考慮して,全体的な反射率を最大化するように選択された.またこの反射材を使用する と、検出器全体の感度が約 20% 向上することが期待されている [25].

第3章

mEgg

3.1 Gen2 に向けた光検出器の改善

2.5 節で説明した mDOM は,複数の小型 PMT をガラス容器内全方向に配置することでより大きな検出有 効面積を達成している.しかし PMT の台数を増やしたため,D-Egg と比較して直径が2インチが大きい. 氷河中深さ約2500m に検出器を埋設することを仮定すると,直径が1インチ大きくなるごとに約70 cm³の 氷河を追加で掘削する必要がある[26].よって埋設時の氷河掘削費用や時間がD-Egg と比較して 30% 以上多 くかかることが予想される.2030 年に稼働開始予定の Gen2 計画では 120 本もの String を埋設するため,検 出器の性能と埋設時の費用対効果を考慮することは必須である.具体的には,

- 氷河掘削時の費用や時間を削減するために、より細長い耐圧ガラス容器 (11-12 インチ) を用いる
- ガラス容器内の限られたスペースにより多くの PMT を収めるために、従来よりもカソード面が大きく (平ら)かつネック部分が短い新型 PMT を搭載する

ことが要求される. これらの改善点を踏まえ,既にデザインが確立された D-Egg 用の耐圧ガラス球内に新型 PMT を配置した試験用検出器を用意し、シミュレーションによる感度研究を行う. またこの検出器を "mEgg" と呼び, D-Egg の角度分解能をより向上させることで Gen2 計画に向けた次世代光検出器の候補と する. 開発の上で, mEgg1 台で D-Egg の 1.5 倍以上の感度を持たせることを目標とする.

3.2 mEgg デザイン

mEgg のデザインを図 3.1 に示す. mEgg は, 4 インチ PMT をガラス容器内上下に 2 台, 中心部に 12 台 の計 14 台を搭載した光検出器である. ガラス容器は D-Egg のものと同じで, 既に 70 MPa の耐圧性能が実証 されている. 実際には PMT を固定するホルダーや基板が必要だが,本研究のシミュレーションでは考慮し ない.

図 3.1a より,ガラス最上 (下) 部に位置する PMT は D-Egg 同様にカソード面を検出器真上 (下) に向けて 配置されている.その他の PMT はガラス中心部に 4 層の配列を取り,各層には PMT が 3 台ずつ方位角方 向に 120 度間隔で配置されている.上 (下)半球に搭載されている PMT は,水平方向から 15 度上 (下) を向 くようにカソードの向きが固定されている.また図 3.1b より,PMT は検出器真上 (下) から見たときに前後 の層の PMT が重ならないよう方位角方向に 60 度等間隔で配置されている.



(a) mEgg(真横)

(b) mEgg(真上)

図 3.1: mEgg デザイン [27]. a):mEgg 真横から見た図. ガラス内部に 4 インチ PMT を計 14 台搭載している. ガラス球は D-Egg のものと同一である. b):mEgg 真上から見た図. ガラス真上に配置された PMT を中心として, 6 台の PMT が 60 度間隔に配置されている.

3.3 mEgg のシミュレーションセットアップ

3.3.1 検出器シミュレーションプログラム:DOMINANT

ニュートリノのエネルギーや飛来方向を正確に同定するには、氷河内を伝搬してきた Cherenkov 光が検出 器 (のガラスやシリコンなどのパーツ) とどのような相互作用を起こし、最終的に PMT まで到達したかを理解 する必要がある.本研究では "DOMINANT" (Dom Optical-photon to Material INteraction ANd Tracking simulator based on Geant4)[28] と呼ばれる IceCube 光検出器用に開発されたシミュレーションプログラム を扱う.

DOMINANT では,異なる物質境界 (氷,ガラス,シリコン) における光子の反射と屈折効果,ガラスとシ リコンによる光子の吸収効果を考慮した上で,光子の軌跡を描画することができる.また,検出器方向に飛来 してきた光子が最終的にいくつ PMT カソード面に到達したかを計算することができる.

現在 DOMINANT では DOM, D-Egg, mEgg が実装されており, これらのジオメトリや素材を自由に変 更することができる. 例として DOMINANT に実装した D-Egg と mEgg のジオメトリを図 3.2 に示す. 各 検出器内のパーツ (PMT, シリコン, 基板など)の形状は, CAD デザインを基に球や円柱などの単純な立体 の組み合わせで表現されている.





(a) D-Egg



図 3.2: DOMINANT に実装された光検出器 D-Egg と mEgg. a): D-Egg ジオメトリ. ガラス容器 (水色) の中に, PMT 2 台 (赤色) とそのネック部分を囲うシールド (灰色),基板 3 枚 (緑色),シリコン (青色) が搭載されてい る.周囲は南極氷河を再現した物質で覆われている. b): mEgg ジオメトリと光子ビーム. PMT 14 台 (赤色) がガラス容器 (水色) 内に搭載されている. (a) と同様に,検出器の周囲は南極氷河を再現した物質で覆われてい る. また z 軸 (青線) 正方向から検出器に向かって入射された光子の伝搬の様子を可視化している.

物質の吸収長と屈折率

DOMINANT で扱う全ての物質に対して,吸収長 (ABSLENGTH) と屈折率 (RINDEX) を設定する必要 がある [28]. 例として図 3.3a に Bulk Ice の吸収長,図 3.3b に Bulk Ice の屈折率の波長依存性を示す (ガラ スの屈折率は 1.5,シリコンは 1.43 であり波長依存性は無い.)



図 3.3: Bulk Ice の吸収長と屈折率の波長依存性. DOMINANT はこれらの情報を基に,光子の物質間での吸収や屈折の計算を行う.

有効検出部の設定

シミュレーション上で光検出器に光子ビームを打ち込む際に,どこを有効検出部 (SD: Sensitive Detector) とするか設定する必要がある. mEgg のような PMT 搭載型のモジュールの場合, SD は PMT のカソード面 である. 図 3.4 は mEgg に 10000 発の光子を全外方向から検出器中心方向に打ち込み, SD にヒットした光子 の位置情報を描画したものである.



(a) 検出器横方向から見た場合



図 3.4: カソード面にヒットした光子の分布図. 全外方向から mEgg 中心方向に光子を打ち込むと, カソード面にヒット した光子の位置情報が得られる. この分布図を図 3.1 の mEgg デザインと比較すると, PMT のカソード面をシ ミュレーション上で再現できていることが分かる. Quantum efficiency

mEgg の 4 インチ PMT は開発中のため QE が決定していない. そのためシミュレーションでは,DOM と D-Egg で用いられている 2 種類の既存の PMT の QE データを用いる. 図 3.5 に各 PMT の QE の波長依 存性を示す. High QE (HQE) とは D-Egg 用の 8 インチ PMT の QE のことで,Normal QE (NQE) とは DOM 用の 10 インチ PMT の QE のことである.



図 3.5: 各 PMT における QE の波長依存性. High QE とは D-Egg 用の 8 インチ PMT の QE のことで, Normal QE とは DOM 用の 10 インチ PMT の QE のことである.

第4章

シミュレーションによる mEgg の性能評価

この章では DOMINANT シミュレーションを用いて mEgg の性能評価を行った.まずシミュレーション上 で mEgg に向けて光子ビームを入射し,入射光子数のうちどれだけが PMT のカソード面に到達したか ("到 達確率")を計算した.

4.1 mEgg の検出効率

4.1.1 カソード面への到達確率

光子数 N_{beam} , 波長 λ , 半径 r の円形ビームを天頂角 θ , 方位角 ϕ の方向から検出器中心に打ち込む. DOMINANT では N_{beam} の内カソード面上に到達した i 番目の光子 $N_i(0 \le i \le N_{\text{beam}})$ の座標, 時間, エ ネルギーの情報を記録する.このとき, カソード面に到達した全光子数 $N_{\text{hit}}(\lambda, \theta, \phi) = \sum_{i(\lambda, \theta, \phi)} N_i$ を入射 光子数 N_{beam} で割った到達確率 (Probability: P) を以下に定義する.

$$P(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{N_{\rm hit}(\lambda, \theta, \phi)}{N_{\rm beam}}$$
(4.1)

4.1.2 検出面積

式 2.1 より N_{hit} は QE によって光電子 N_{PE} に変換される (CE は常に 100% とする). 到達確率はビーム の射影面積に依存するため、検出器の検出感度は N_{PE} にビームの面積 A_{beam} をかけた "検出面積" (Effective area: A_{eff}) によって評価する.

$$A_{\text{eff}}(\lambda,\theta,\phi) \equiv N_{\text{PE}}(\lambda,\theta,\phi) \times A_{\text{beam}} = P(\lambda,\theta,\phi) \times \text{QE}(\lambda) \times A_{\text{beam}}$$
(4.2)

円型ビームの場合 $A_{\text{beam}} = \pi \times r^2$ であり、検出器全体にビームが当たるよう r はビームをどの方向から入射 しても検出器を全て覆うほど大きいとする (mEgg の場合 $r \ge 26.7 \text{ cm}$).

DOMINANT で実装した検出器とビームのセットアップを図 4.1 に示す. mEgg はガラス内部に 14 台の 4 インチ PMT が搭載している. ガラス内部と PMT の隙間を完全に満たす物質を "Inside material" (内部物 質) と称し, "Air"(空気) または "Infilled gel"(充填シリコン) から選択する. シリコンは, D-Egg で用いてい る光学結合シリコンと同等の性能を持つ. また "ExpHall" とは検出器外部の環境のことで, "Ice"(南極氷河) あるいは "Air" から選択する. また mEgg の検出面積の計算では、内部物質を空気または充填シリコン、外部環境を氷とし、円型入射ビームは、 $\lambda = 320$ nm, 340 nm, 380 nm, 500 nm の紫外領域の 4 波長のいずれか、入射光子数 $N_{\text{beam}} = 1000$ 、 半径 r = 26.7 cm とした. このビームを、 $\theta = 0$ deg, 10 deg, 20 deg, ..., 180 deg の 19 方向から検出器中心 (x, y, z) = (0 cm, 0 cm) に向けて 1000 回 (run) ずつ打ち込んだ. 各 run で計算した到達確率をヒスト グラム化し、ガウス関数でフィッティングしたときの mean 値をその入射角度 θ の P として検出面積の計算 に用いた. mEgg は ϕ 方向に 60 度対称性を持つため、 θ 方向に加えて $\phi = 0$ deg, 30 deg, 60 deg にもビーム を回転して P を計算し、 ϕ 方向に対して平均を取った.



(a) 検出器真横

(b) 検出器真上

図 4.1: DOMINANT シミュレーションのセットアップ. a):検出器真横から見た図.光子数 N_{beam} から成る半径 r, 波長 λ の円型ビームを 30 cm 離れた方向から検出器中心に打ち込む.また入射角度は $\theta = 0$ deg-180 deg の範囲 を 10 deg 刻みに変化させてゆく.b):検出器真上から見た図.mEgg は ϕ 方向依存性があるため,入射ビームを ϕ 方向時計回りにも回転させる必要がある.

図 4.2 は異なる内部物質における mEgg の検出面積である. どの波長においても充填シリコンを用いたほうが検出面積が向上し,かつ角度依存性が減少している (ピークがなだらかになっている) ことが分かる.



図 4.2: mEgg の検出面積. ϕ 方向に平均化済み. ExpHall は氷とした. 実線ならば High QE, 点線ならば Normal QE を計算に用いた. a):内部物質が空気の場合の検出面積. $\theta = 90 \deg$ にピークを持ち, $\theta = 30 \deg$, 150 deg 付近 は落ち込んでいる. b):内部物質が充填シリコンの場合の検出面積. (a)と比較して角度依存性は減少し,また ピーク位置が $\theta = 30 \deg$, 150 deg 付近に移動している.

4.1.3 全 Cherenkov 波長における検出面積

図 4.2 の結果では、 $\lambda = 320 \deg, 340 \deg, 380 \deg, 500 \deg$ の 4 波長全てに対して常に同一光子数が入射す ると仮定した.しかし実際は式 1.1 より、Cherenkov 光の放出強度は紫外領域にピークが来る.より現実的な 検出器の検出面積を計算するため、 $\lambda = 270 \text{ nm}-660 \text{ nm}$ を全 Cherenkov 波長と定義し、この範囲における光 子の放出量 N_{γ} の波長依存性を含めた検出面積を "Cherenkov-weighted effective area" (全 Cherenkov 波長 における検出面積: $A_{\text{cherenkov}}(\theta)$)とし、以下の式で定義する.

$$A_{\text{cherenkov}}(\theta) = A_{\text{eff}}(\lambda, \theta, \bar{\phi}) \times N_{\gamma}(\lambda)$$
(4.3)

$$= \int_{\lambda=270\mathrm{nm}}^{\lambda=660\mathrm{nm}} \pi r^2 \times P(\lambda,\theta,\bar{\phi}) \times \mathrm{QE}(\lambda) \times \frac{2\pi}{137\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2(\lambda)}\right) \mathrm{d}\lambda \tag{4.4}$$

mEgg の全 Cherenkov 波長における検出面積を、内部物質と QE の組み合わせ

- 1. InsideAir(空気), High QE
- 2. InsideAir(空気), Normal QE
- 3. InsideGel(充填シリコン), High QE
- 4. InsideGel(充填シリコン), Normal QE

の 4 パターンに対して、図 4.2 を計算したときの同じ条件のビーム (但し波長は $\lambda = 270 \text{ nm}-660 \text{ nm}$ の全範囲)を用いて $A_{\text{cherenkov}}(\theta)$ を計算した.また DOM と D-Egg に対しても同条件の環境とビームを用いて $A_{\text{cherenkov}}(\theta)$ を計算した.但し ϕ 方向依存性がある mEgg のみ ϕ 平均を取った.

各検出器における $A_{\text{cherenkov}}(\theta)$ を図 4.3 に示す. DOM(黒点線) や D-Egg の場合 (赤実線), PMT が搭載 されている方向 (DOM なら $\cos(\theta) = -1$, D-Egg なら $\cos(\theta) = 1, -1$) にのみ検出面積のピークが表れて いる.一方青線,緑線は mEgg(パターン 1–4)の検出面積である.パターン 1 と 2 あるいは 3 と 4 を比較す ると,Normal QE よりも High QE を用いた方が検出面積が増加することが分かる.パターン 1 と 3 を比 較すると,ガラス内部にシリコンを充填させた方が検出面積が増加し,かつピーク位置が $\cos(\theta) = 0$ から $\cos(\theta) = \pm 0.9$ 付近に移行していることが分かる.



図 4.3: DOM, D-Egg, mEgg に対する全 Cherenkov 波長における検出面積の θ 依存性 (任意単位). 実線は High QE, 点線は Normal QE を計算に用いた. DOM の場合 (黒点線), PMT が下向きに搭載されているため検出器下か らの入射に対して感度が増加する. 同様に D-Egg の場合 (赤実線) も, PMT が搭載されている検出器真上 (下) 方向に対して感度が増加する. その他は mEgg の場合で,内部物質に空気 (緑線) または充填シリコン (青線) を 用いた. Normal QE よりも High QE を用いた方が,またシリコンをガラス内部に充填させた方が mEgg の感 度が増加していることが分かる.

次に、図 4.3 で示した全 Cherenkov 波長における検出面積の各角度での比 $A_{mEgg}(\theta)/A_{DOM,D-Egg}(\theta)$ を図 4.4 に示す.図 4.4a は mEgg と DOM の検出面積の比である.DOM の感度が最大になる $\cos(\theta) = -1$ にお いても、mEgg の感度は DOM と比較して $O(10^0)$ 倍となる.一方図 4.4b は mEgg と D-Egg の検出面積の比 である. パターン 2(空気、NQE) の mEgg の場合、全入射角度において比は 1.0 倍以下となり常に D-Egg の 検出面積を下回る.パターン 3(充填シリコン、HQE) ならば全入射角度において mEgg の検出面積は D-Egg を上回り、特に $\theta = 90 \deg$ の入射では D-Egg の O(2.5) 倍となる.これは D-Egg は上下方向にのみ PMT を 搭載しているのに対し、mEgg では横方向にも PMT を搭載しているため横方向からの入射に対して高い検出 感度を得るためである.



図 4.4: mEgg と DOM, mEgg と D-Egg の全 Cherenkov 波長における検出面積の比. a): mEgg と DOM の検出面積 比 $A_{mEgg}(\theta)/A_{DOM}(\theta)$. DOM の感度が最大になる $\cos(\theta) = -1$ においても, mEgg の感度は DOM と比較し て $O(10^0)$ 倍となる. b): mEgg と D-Egg の検出面積比 $A_{mEgg}(\theta)/A_{D-Egg}(\theta)$. mEgg では検出器横方向にも PMT を搭載しているため, $\theta = 90 \deg 方向の入射において面積比は最大 <math>O(2.5)$ 倍となる.

最後に総合的な検出器の検出感度を比較するため、図 4.3 で示した各検出器の全 Cherenkov 波長 における検出面積を全 $\cos\theta$ で積分した $A_{detector} = \int_{\cos\theta} A_{cherenkov}(\cos\theta) d(\cos\theta)$ を計算し、面積比 $A_{detector1/detector2} = A_{detector1}/A_{detector2}$ を取った、計算値を表 4.1 に示す.

表 4.1: 全入射角平均を取った検出面積比 A_{detector1/detector2}. detector1 は detector2 の何倍の検出感度を持つか分か る. D-Egg と比較した場合 mEgg は最低 0.62 倍, 最高 1.90 台の感度を持つ.

| detector1 | detector2 | $A_{\rm detector1/detector2}$ |
|-----------------------|-----------|-------------------------------|
| mEgg (InsideAir, NQE) | DOM | 1.36 |
| mEgg (InsideAir, HQE) | DOM | 2.02 |
| mEgg (InsideGel, NQE) | DOM | 2.80 |
| mEgg (InsideGel, HQE) | DOM | 4.14 |
| mEgg (InsideAir, NQE) | D-Egg | 0.62 |
| mEgg (InsideAir, HQE) | D-Egg | 0.92 |
| mEgg (InsideGel, NQE) | D-Egg | 1.29 |
| mEgg (InsideGel, HQE) | D-Egg | 1.90 |

以上のことから, mEgg は充填シリコンかつ HQE を用いた場合に D-Egg の最大 1.90 倍の感度を持つこと が分かった.また mEgg の検出面積を向上させるには, HQE の PMT を全角度方向をカバーするように配置 すること, ガラス内部にシリコンを搭載することが必須であることが分かった.

4.1.4 ガラス内部の屈折率変化

4.1 節の結果の疑問点として、なぜガラス内部をシリコンで充填すると検出面積が増加するのか、という ことが挙げられる. この理由として、シリコンと空気の屈折率の違いによってカソード面に到達する光子数 が変化すると考えた. 内部物質を空気からシリコンへと徐々に変更したときにどのように到達確率が増加す るのか確認するために、図 4.1 と同じセットアップ内で、 $\lambda = 380$ nm, $N_{\text{beam}} = 1000$, r = 26.7 cm の光子 ビームを $\phi = 0$ deg に固定したまま各 θ 方向から 1000 回ずつ mEgg 中心に向けて打ち込み到達確率を計算 した. このとき mEgg の外部環境は氷とし、PMT とガラス内部を満たしている内部物質の屈折率 $n_{\text{inside}} = 1.0-1.7$ の範囲内で 0.1 刻みに変化させた. 例えば $n_{\text{inside}} = 1.0$ ならば内部物質は空気の屈折率と一 致し、 $n_{\text{inside}} = 1.43$ ならば D-Egg で用いているシリコンの屈折率と一致する.

到達確率の屈折率依存性の計算結果を図 4.5 に示す.内部物質の屈折率の増加に伴って到達確率も増加し, そのピーク位置は検出器真横方向 ($\theta = 90 \deg$)から検出器斜め上下方向 ($\theta = 30 \deg$, 150 deg) へ移動するこ とが分かった. $n_{\text{inside}} = 1.6, 1.7$ でデータが重なり,ここでは示していないがこれ以上屈折率を上げても到達 確率は増加しなかった.



図 4.5: 内部物質の屈折率 n_{inside} を変化させた時の到達確率の θ 角度依存性. $\phi = 0 \deg$ とし, ϕ 平均は取っていない. $n_{\text{inside}} = 1.0$ のときに $\theta = 90 \deg$ 付近に到達確率のピークが見られる. n_{inside} を増加させるにつれ到達確率は 増加かつなだらかになり, $\theta = 30 \deg$, 150 deg 付近にピークがシフトしていく. $n_{\text{inside}} = 1.6, 1.7$ 付近で増加は 停止し, グラフが重なっているのが見える.

4.1.5 Ray Optics Simulation

図 4.5 より,内部物質の屈折率の増加によって到達確率も増加したことから,シリコンは光子を収集する効 果を持つと考えた.検出器内部での光子の軌跡をより明瞭に描画するために,Ray Optics Simulation[29]を 用いた.これは光子の屈折と反射の様子を2次元で描画することが可能なウェブアプリケーションソフトであ る.光子ビームの大きさや入射方向,また標的である物質の形状とその屈折率などを自由に指定することがで きる.Geant4 に比べて,屈折率を変化させながら光子の軌跡が変化していく様子を描画することに優れてい る.このソフト内で DOMINANT と同じ手法でガラスの形状を作り,ガラス外部を氷河と同じ屈折率,また ガラス内部の屈折率 n_{inside}を 1.0 から 1.6 まで自由に変更できるように設定した.図 4.6 にシミュレーション 内でのセットアップを示す.



(a) ガラスの形状



図 4.6: Ray Optics Simulation のセットアップ。a):ガラスの形状の作成方法.ガラスの形状は、図内左のように大き さの異なる円の一部を組み合わせることで再現できる.図内右はガラスの縁に沿って形状をくり抜いたものであ る.b):ガラス (Glass),ガラス内部 (Inside),ガラス外部 (Ice)の形状と各物質の屈折率 n. PMT は搭載して いない.シミュレーションの都合により、氷は Upper と Lower に二分割して組み合わせてある.

このとき、どの入射方向においても検出器を十分覆うような平行ビームを $\theta = 0 \deg, 45 \deg, 90 \deg 方向$ からガラス中心方向に向けて入射した.また各入射角において、ビームを固定したままガラス内部の屈折率 n_{inside} を 1.0 から 1.6 まで変更し、軌跡がどのように変化するか確認した.この結果を図 4.7-4.9 に示す.ど の入射角度に対しても、 $n_{\text{inside}} = 1.0$ のときはガラス内部に入射した光子はガラス外側方向に進行しているの に対し、 n_{inside} が高くなるにつれて光子はガラス内側方向に収束している.この集光性は入射角が $\theta = 0 \deg$ のときに明確に確認できる.



図 4.7: θ = 0 deg 方向 (検出器真上) からガラス中心方向にビームを入射したときの,異なる内部物質の屈折率 n_{inside} における光子の軌跡. 屈折率の増加に伴って,ビームがガラス底方向に収束している.



図 4.8: θ = 45 deg 方向 (検出器斜め) からガラス中心方向にビームを入射したときの,異なる内部物質の屈折率 n_{inside} における光子の軌跡.屈折率の増加に伴って,ガラス外側に通過していた光子がガラス内部右側で屈折している.



(a) $n_{\text{inside}} = 1.0$

(b) $n_{\text{inside}} = 1.43$

(c) $n_{\text{inside}} = 1.6$

図 4.9: θ = 90 deg 方向 (検出器真横) からガラス中心方向にビームを入射したときの,異なる内部物質の屈折率 n_{inside} における光子の軌跡. 屈折率の増加に伴って,ビームがガラス外側右方向に収束している.

光結合シリコンの集光効果 4.1.6

4.1.5 節の Ray Optics Simulation の結果から、内部物質の屈折率が高いほどレンズのような集光効果があ ることが分かった. この現象を DOMINANT でも再現するため、光路が予想しやすい細いビームを用意し、 ビームを検出器から遠ざけて入射してもシリコンの集光効果によって PMT カソード面にビームがヒットする かを確認した.

図 4.10 にシミュレーションのセットアップを示す. mEgg が氷中に設置されている. このとき 1000 個の光 子から成る直径 1 cm, 波長 380 nm の光子ビームの中心 x_{beam} を, x = 10 cm-14 cm の範囲で 1 cm 刻みで移 動させながら $z = 30 \, \text{cm}$ の高さから z 軸負方向に入射し、PMT カソード面にヒットした光子数 N_{bit} とヒッ トした PMT 番号の関係をヒストグラムにした.内部物質は屈折率 n_{inside} = 1.43, 1.6 のシリコン,外部環境 は氷とした.また参考として、PMT 14 台のみを mEgg と同じ配列で氷中に設置した "OnlyPMTs"の場合 においてもヒストグラムを作成した.



(a) PMT 番号の割り当てとビームの位置設定



図 4.10: シミュレーションセットアップ. ガラス内にシリコンと PMT が搭載された mEgg が氷中に設置されてい る. シリコンの屈折率 n_{inside} は 1.43 または 1.6 とした. a): PMT 番号の割り当てとビームの位置設定. 各 PMT に 0 から 13 まで番号を振った. PMT 4 と PMT 10 は y 軸負方向にあるため, 他の PMT と重なり この図からは見えない. ビームは x = 10 cm - 14 cm の範囲を 1 cm 刻みで移動させながら, z = 30 cm の高 さから z 軸負方向に向けて入射した.b): z 軸正方向から見た PMT 番号の割り当て.ビーム中心位置 xbeam が $13.1\,\mathrm{cm} \leq x_\mathrm{beam} \leq 15.1\,\mathrm{cm}$ ならば z 軸正方向から見て x_beam はガラス内,また $x_\mathrm{beam} \geq 15.1\,\mathrm{cm}$ ならば xbeam は検出器外にあるため、明かにビームはどの PMT 上にも存在しない.

図 4.11–4.15 に PMT カソード面にヒットした光子数 N_{hit} とヒットした PMT 番号のヒストグラムを示す. 10 cm $\leq x_{\text{beam}} \leq 11$ cm (図 4.11,図 4.12)のとき,ビーム中心 x_{beam} は z 軸正方向から見て PMT1 のカソー ド面の真上にあるため、光子はガラス境界面での反射によって O(1%) レベルで減少するのみである.

 $x_{\text{beam}} = 12 \text{ cm} (\boxtimes 4.13) \text{ obs}, x_{\text{beam}}$ は PMT カソード面と空気の境界面にあるため, PMT のみの場合 のヒット数は O(200) まで減少したが,シリコンがある場合,特に $n_{\text{index}} = 1.6$ ならば入射光子数に対し 95% の光子がヒットしている. $x_{\text{beam}} = 13 \text{ cm} (\boxtimes 4.14)$ において,ビームは完全に PMT と重ならない位置から 入射しているが、シリコンがある場合は光子が検出器内側方向に屈折し、カソード面にヒットしている.

これらの結果から、シリコンによる集光効果を DOMINANT でも確認できた.シリコンの集光効果が、 mEgg の検出面積が向上する理由である.



(a) Only PMTs, $N_{\rm hit} = 1000$ (b) シリコン ($n_{\rm inside} = 1.43$), $N_{\rm hit} = 993$ (c) シリコン ($n_{\rm inside} = 1.6$), $N_{\rm hit} = 995$

図 4.11: 光子数 N_{beam} = 1000, 半径 r = 0.5 cm の円型ビームを (x, y, z) = (10 cm, 0 cm, 30 cm) から z 軸負方向に入 射した時の光子ヒット数 N_{hit} と PMT 番号. (a) において N_{beam} = N_{hit} であるため, ビームは PMT 1 のカ ソード面上にあることが分かる. (b), (c) より, ガラスがある場合も N_{beam} の内 99% 以上の光子が PMT 1 の カソード面にヒットしている.



(a) Only PMTs, $N_{\text{hit}} = 1000$ (b) $\Rightarrow \forall \exists \Rightarrow (n_{\text{inside}} = 1.43), N_{\text{hit}} = 987$ (c) $\Rightarrow \forall \exists \Rightarrow (n_{\text{inside}} = 1.6), N_{\text{hit}} = 987$

図 4.12: 光子数 N_{beam} = 1000, 半径 r = 0.5 cm の円型ビームを (x, y, z) = (11 cm, 0 cm, 30 cm) から z 軸負方向に入 射した時の光子ヒット数 N_{hit} と PMT 番号. (a) より, 図 4.11 と同様にビームは PMT 1 のカソード面上にあ ることが分かる. ガラスが存在する場合には, O(10) 個の光子がガラスの境界面での反射によって光路から外れ ている.



(a) Only PMTs, $N_{\rm hit} = 234$ (b)

(b) $\forall \exists \forall (n_{\text{inside}} = 1.43), N_{\text{hit}} = 161$ (c) $\forall \exists \forall (n_{\text{inside}} = 1.6), N_{\text{hit}} = 959$

図 4.13: 光子数 N_{beam} = 1000, 半径 r = 0.5 cm の円型ビームを (x, y, z) = (12 cm, 0 cm, 30 cm) から z 軸負方向に 入射した時の光子ヒット数 N_{hit} と PMT 番号. (a) よりビームの中心位置は z 軸正方向から見て PMT 1 のカ ソード面上から外れた位置にあると考えられる. そのため (b) においてヒットした光子数は O(160) まで減少 し、シリコンでの屈折により z 軸正方向から見て PMT 1 の真下にある PMT 7 にも光子がヒットしている. 一 方 (c) では、入射数の 95% 以上の光子が PMT 1 のカソードにヒットしていることから、シリコンによって光 子が検出器内側方向に収束していると考えられる.



(a) Only PMTs, $N_{\text{hit}} = 0$ (b) $\geq \mathcal{Y}$

(b) $\forall \exists \forall \exists \forall (n_{\text{inside}} = 1.43), N_{\text{hit}} = 203$ (c) $\forall \exists \forall \exists \forall (n_{\text{inside}} = 1.6).N_{\text{hit}} = 901$

図 4.14: 光子数 $N_{\text{beam}} = 1000$, 半径 r = 0.5 cmの円型ビームを (x, y, z) = (13 cm, 0 cm, 30 cm)から z 軸負方向に入 射した時の光子ヒット数 N_{hit} と PMT 番号. (a) よりビームは完全に PMT 1 のカソード面上から外れた位置 にあることが分かる. しかし (b), (c) を比較すると, $n_{\text{inside}} = 1.6$ のほうがヒット数が多く, かつ PMT 1 に ヒットしていることから, シリコンの屈折によって光路が検出器中心方向へ曲げられていることが分かる.



 図 4.15: 光子数 N_{beam} = 1000, 半径 r = 0.5 cm の円型ビームを (x, y, z) = (14 cm, 0 cm, 30 cm) から z 軸負方向に入 射した時の光子ヒット数 N_{hit} と PMT 番号. ビームはガラスと氷の境界にある. (b) より, ビーム入射原点か ら見て手前にある PMT 1 よりも,遠方に位置する PMT 7 にヒットした光子のほうが多い. (b), (c) を比較す ると, ヒット数は n_{inside} = 1.6 のほうが多い.

4.2 光結合シリコンの最適化

4.2.1 デザイン

4.1 節の結果から,ガラス内部をシリコンで充填させた HQE の mEgg は D-Egg に比べて 1.90 倍,シリ コンを用いなかった NQE の mEgg は 0.62 倍の感度を持つこと,またシリコンには集光効果をあることが分 かった.このことから,検出感度の向上にはシリコンの搭載は必須である.しかし検出器製造を考慮した場 合,ガラス内部には基板やケーブルなども搭載するため,ガラス内部の PMT 以外の隙間をシリコンで完全に 充填させることは現実的ではない.そのため脱着可能式の "ゲルパッド"を各 PMT のカソード面上とガラス 内側の間のみを満たすように搭載する.DOMINANT でゲルパッドを搭載した mEgg を図 4.16 に示す.ゲ ルパッドの形状は円筒型で,カソード面からガラスに向かって垂直に伸びている.ゲルパッドの先端はガラス 曲面に沿っているため,ゲルパッドの形状は PMT の配置場所に依存する.またガラス内部のゲルパッドと PMT 以外は空気で充填されているとする.



(a) 検出器正面から見た図



(b) 検出器横方向から見た図

図 4.16: ゲルパッドを搭載した mEgg. 各 PMT カソード面上の青い部分がゲルパッドである (z 軸の青線は除く).

4.2.2 期待される性能

図 4.16 で示した形状のゲルパッドを搭載した mEgg を氷中に設置した.図 4.1 において $r = 26.7 \text{ cm}, N_{\text{beam}} = 1000, \lambda = 380 \text{ nm}$ としたときの光子ビームを各 θ, ϕ 方向に 1000 回ずつ入射 し、期待性能を計算した.また結果を、シリコンを充填させた場合とさせなかった場合の期待性能とも比較 した.

図 4.17a は φ = 0 deg のときの到達確率の θ 依存性である.シリコンには集光性があることから,シリコン をガラス内部に充填させた場合よりもシリコンの総量が少ないゲルパッドの方が到達確率が減少すると予想さ れた.しかしシミュレーションでは,横方向からの入射 (θ = 50 deg-140 deg) に対しゲルパッドを用いた方が 到達確率が増加した.

一方図 4.17b は θ = 90 deg のときの到達確率の ϕ 依存性である. PMT の配置は ϕ 方向に 60-deg 対称性 を持つため,図内 "Gel pad"のグラフカーブから 60-deg 対称性が確認できる.しかし空気と充填シリコンの 場合,ゲルパッドのような到達確率の ϕ 方向依存は見られず常に一定であった.



図 4.17: ゲルパッド有/無,充填シリコンを用いたときの mEgg の到達確率. a): φ = 0 deg のときの到達確率の θ 依存
 性. 図内 "Air"(空気,青線) と "Infilled gel"(充填シリコン,緑線)のグラフの形状は 4.1.3 小節で示した結果
 と等しい.入射角 θ = 50 deg-140 deg に対して,ゲルパッドを用いた方が充填シリコンの場合よりも到達確率
 が増加した. b): θ = 90 deg のときの到達確率の φ 依存性. "Gel pad"のグラフカーブから,検出器 φ 方向に
 対し 60-deg 対称性が確認できる. 一方空気と充填シリコンの場合,ゲルパッドのような到達確率の φ 方向依存
 は見られず常に一定であった.また全 φ 方向に対し,ゲルパットの到達確率は充填シリコンの到達確率を上回った.

4.2.3 ゲルパッドの開き角度

図 4.17 より,シリコンを充填させたときよりもゲルパッドを用いたほうが到達確率が増加することから, ゲルパッドの形状に光子を収集するような効果があると予想した.ゲルパッドの形状 (ゲルと空気の境界面の 形状) に着目し,形状の変化によって光子がどのようにカソード面にヒットしているか確認した.

まず図 4.18 のように、例として PMT 0, 3, 4 に対してゲルパッドの開き角度 α_{angle} を定義し、シミュレーション上で $\alpha_{angle} = 0 \deg$ –90 deg の範囲を自由に変化できるようにした. (mEgg 内の PMT 0, 3, 4 の位置 は図 4.2.3 を参照する.)例えば $\alpha_{angle} = 0 \deg$ ならば各 PMT のカソード面より上はシリコンで満たされる ため、カソード面上だけ充填シリコンと同じ条件になる. $\alpha_{angle} = 90 \deg$ ならばゲルパッドは円筒状となり、図 4.16 で示したゲルパッドと同一の形状となる. またゲルパッドの高さはガラス内側に接するほど十分長い とし、ガラス内のゲルパッドと PMT 以外の空間には空気を充填させた.

このとき,各 PMT 0,3,4 のいずれか 1 台と開き角度 α_{angle} のゲルパッドを,氷中にある mEgg ガラス容 器内に搭載した. 1000 個の光子から成る直径 21 インチのビームを,ビームが各 PMT のカソード面上を通る よう $\phi = 0 \deg, 90 \deg, 270 \deg$ に固定して θ 方向から検出器中心に向けて 30 cm 離れた距離から入射した. これを各 θ に対し 1000 回繰り返し到達確率を計算した.



図 4.18: PMT 0, 3, 4 とそのゲルパッドの開き角度 α_{angle} の定義. $\alpha_{angle} = 90 \deg$ に近づくにつれ, ゲルパッドは 平らな形状から円筒状になる.また PMT 0 はガラス内の z 軸上最も高い位置 (top) に, PMT 3 は 1 層目で $\phi = 270 \deg$, PMT4 は 2 層目で $\phi = 90 \deg$ を向くよう配置されている (図 4.2.3 参照). 図 4.19 は開き角度 α_{angle} のゲルパッドを搭載した PMT 0 に, 直径 21 インチの円型ビームを全 θ 方向から 入射したときの到達確率である. PMT 0 は検出器真上に搭載しているため, $\theta = 0 \deg$ に到達確率のピークが 集中している.また $\alpha_{angle} = 20 \deg -40 \deg$ においては光子がゲルパッドの端でゲルパッド内側方向に反射す るため,到達確率のピークが $\theta = 0 \deg$ からずれた位置 ($\theta = 10 \deg - 30 \deg$ 付近)に表れる.これらのピーク 位置は $\alpha_{angle} = 50 \deg$ で再び $\theta = 0 \deg$ に戻る.ピークは $\theta = 50 \deg$ で最大となり,その後減少してゆく.



図 4.19: ビームを $\phi = 0 \deg f$ 向から入射したときの、PMT 0 の異なるゲルパッドの開き角度 α_{angle} による到達確率の θ 依存性. 見やすさのために、 $\alpha_{angle} = 50 \deg$ を境にグラフを (a)、(b) に分割している. $\alpha_{angle} = 50 \deg$ のと き、到達確率は最も大きくなる.

また PMT 0 上に搭載したゲルパッドの端を通る光子の軌跡を図 4.20 に示す. 異なる 4 つの開き角度 $\alpha_{angle} = 0 \deg, 30 \deg, 50 \deg, 90 \deg$ のゲルパッドに、直径 10 mm のビームを z 軸正方向から負方向に 向けて水平に入射した. このとき全てのゲルパッドに対し、ビームの入射位置は等しい. 図 4.20 より、 $\alpha_{angle} = 0 \deg$ では素通りしていたビームが、 $\alpha_{angle} = 30 \deg$ ではゲルパッドの端で屈折して検出器内側に 向く. $\alpha_{angle} = 50 \deg$ ではこの屈折角がカソード面にヒットするほど大きくなる. $\alpha_{angle} = 90 \deg$ ではゲル パッドの開きが狭くビームはゲルパッド外を通り過ぎるため、カソード面にはヒットしない.



図 4.20: α_{angle} を変化させたときの, PMT0 のゲルパッドの端に入射した光子の軌跡. α_{angle} が増加するにつれ, PMT のカソード面上にないビームもゲルパッドの端で反射を起こすことによって, 光子がカソード面にヒットしている.

図 4.21 は開き角度 α_{angle} のゲルパッドを搭載した PMT 3 に, 直径 21 インチの円型ビームを全 θ 方向から 入射したときの到達確率である. $\alpha_{angle} = 20 \deg -40 \deg$ のとき, ゲルパッドの両端で反射した光子がカソー ド面にヒットしたことでダブルピークが見られる. また PMT 0 の場合と同様に α_{angle} の増加によってピー ク位置も高くなり, $\alpha_{angle} = 50 \deg$ で最大値を取った後に減少してゆく (ピークがなだらかになってゆく).



図 4.21: ビームを $\phi = 270 \deg f$ 向から入射したときの、PMT 3 の異なるゲルパッドの開き角度 α_{angle} による到達確率 の θ 依存性. 見やすさのために、 $\alpha_{angle} = 50 \deg$ を境にグラフを (a)、(b) に分割している. PMT 3 も PMT 0 と同様に、 $\alpha_{angle} = 50 \deg$ のときに到達確率が最も大きくなる.

また PMT 3 のゲルパッドの端を通る光子の軌跡を図 4.22 に示す. 異なる 4 つの開き角度 $\alpha_{angle} = 10 \deg, 30 \deg, 50 \deg, 90 \deg$ のゲルパッドに, 直径 10 mm のビームを検出器真横から z 軸に垂直に入射した. 全てのゲルパッドに対し, ビームの入射位置は等しい. $\alpha_{angle} = 10 \deg$ では一部の光子がゲルパッドと空気の境界面で反射し検出器外に抜ける. また反射しなかった光子はそのまま空気中を進み, ガラス境界面で 再び反射するか, 反射せず検出器外に抜ける. $\alpha_{angle} = 30 \deg$ では光子がゲルパッドと空気の境界面で反射 しカソード面方向へ向かっていることが分かる. $\alpha_{angle} = 50 \deg$ ではこの反射角がカソード面にヒットする ほど大きくなる. $\alpha_{angle} = 90 \deg$ ではゲルパッドの開きが狭く, ビームはゲルパッド外を通るためカソード 面にはヒットしない.



図 4.22: α_{angle} を変化させたときの, PMT 3 のゲルパッドの端に入射した光子の軌跡. α_{angle} = 10 deg では光子はゲ ルパッドを通り抜けるか, ゲルパッドの端でカソード面に当たらない角度で反射していたが, α_{angle} = 50 deg では, 光子がゲルパッドの端でカソード面に向かって反射している.

図 4.23 は開き角度 α_{angle} のゲルパッドを搭載した PMT 4 に, 21 インチの円型ビームを全 θ 方向から入射 したときの到達確率である. PMT4 は 2 層目に位置しており, PMT 0 と PMT 3 同様に $\alpha_{angle} = 50 \deg$ に 到達確率のピークが来る. また PMT 4 のゲルパッドの端を通る光子の軌跡を描画したところ, 図 4.22 と同 様に $\alpha_{angle} = 50 \deg$ で光子がゲルパッドの端でカソード面に向かって最も反射している様子が確認された.



図 4.23: ビームを $\phi = 90 \deg f$ 向から入射したときの,PMT 4 の異なるゲルパッドの開き角度 α_{angle} による到達確率 の θ 依存性. 見やすさのために, $\alpha_{angle} = 50 \deg$ を境にグラフを (a), (b) に分割している.PMT 4 も PMT 3 と同様に, $\alpha_{angle} = 50 \deg$ のときに到達確率が最も大きくなる.

以上の結果から、ゲルパッド内部を通過した光子はゲルパッドと空気の境界面で反射を起こし、反射後に 一部の光子はカソード面がある方向に向かうことが分かった.シリコンを充填していたときにはこのような 反射は生じないため、ゲルパッドの反射材としての効果が到達確率を増加させた要因である.また開き角度 $\alpha_{\text{angle}} = 50 \deg \text{ Of} ルパッドが、最も光子を収集することが分かった.$

4.2.4 ゲルパッドの形状改良

最上 (下) 部にポッティングシリコンを用いた mEgg

図 4.16 で示したゲルパッドの開き角度は $\alpha_{angle} = 90 \deg$ (円筒状) だが, 4.2.3 小節の結果から $\alpha_{angle} = 50 \deg$ が光子の到達確率が最大となることが分かった.しかしこれは PMT とゲルパッドを一台ずつ搭載した上での結果であるため,実際に 14 台分のゲルパッドを搭載したときに開き角度が $\alpha_{angle} = 50 \deg$ だと隣のゲルパッドと重複してしまう.そのため重複しない手前の角度である $\alpha_{angle} = 60 \deg$ のゲルパッドを複数台 DOMINANT に搭載した.またガラス内最上 (下) 部に位置する PMT 0 と PMT 13 に対して, D-Egg と同様にカソード面より上 (下) をシリコンで満たす "ポッティング"形式を採用する.これをゲルパッドと区別するために "ポッティングシリコン" と呼ぶ.シリコンを直接ガラス内に注いで硬化させることによって,PMT を完全にガラス容器内に固定することができる.そのため mEgg 製造時に 1–4 層目の PMT を固定するためのホルダーを,PMT 0 と PMT 13 を支柱としてガラス容器内に設置することが可能となる.形状を改良したゲルパッドとポッティングシリコンを搭載した mEgg を図 4.24 に示す.

このデザインの mEgg を用いて,式 4.3 で示した全 Cherenkov 波長における検出面積 $A_{\text{cherenkov}}(\theta)$ を計算 した.このとき,シミュレーションのセットアップは図 4.1 を用いた.mEgg (図 4.24 参照) を氷中に設置し, 全 Cherenkov 波長 $\lambda = 270 \text{ nm}-660 \text{ nm}$,入射光子数 $N_{\text{beam}} = 1000$,半径 r = 26.7 cmの円型ビームを全 θ



図 4.24: 改良したゲルとポッティングシリコンを搭載した mEgg のデザイン. 図 4.16 と比較して, ゲルパッドの開き角 度を α_{angle} = 90 deg から 60 deg に変更した. またガラス容器中間部の PMT を固定するホルダーを搭載する 際に最上 (下) 部の PMT を支柱とすることを検討している. そのためガラス容器最上 (下) 部にはゲルパッドで はなく, シリコンをガラス内部に直接注いだ "ポッティングシリコン"を採用する.

方向から 1000 回ずつ打ち込んだ.

ゲルパッド (+ ポッティングシリコン) を用いた mEgg の全 Cherenkov 波長における検出面積を図 4.25 に示す.また参考として DOM, D-Egg, 充填シリコンを搭載した mEgg の場合の結果も掲載した.実線は High QE, 点線は Normal QE を計算に用いた. ゲルパッドの反射の効果によって, $\cos(\theta) = -0.6$ -+0.6 の 範囲において充填シリコンを用いるよりもゲルパッド (+ ポッティングシリコン) を用いたほうが検出面積が 上回っている.対して検出器真上 (下) 方向からの入射 ($\cos(\theta) = -1.0, 1.0$) は, ゲルパッド (+ ポッティン グシリコン) を搭載した mEgg の検出面積は他の全検出器の検出面積を下回る. これは, mEgg のガラス最上 (下) 部には小型 (4 インチ)PMT 1 台しか搭載されていないため,絶対的な PMT のカソード検出面積が少な いことが原因である.また検出器真上 (下) から入射された光子のうちゲルパッドを通過しなかったものは (ガ ラスを通過した後の物質が空気であるとき),図 4.7 で示したように光子はガラス外部に抜けてしまうことも ゲルパッドを搭載した mEgg の真上 (下) 方向の検出面積が減少する原因である.



図 4.25: 各検出器における全 Cherenkov 波長の検出面積の θ 依存性 (任意単位). 実線は High QE, 点線は Normal QE を計算に用いた. 黒線は DOM, 赤線は D-Egg, 青線は充填シリコンの mEgg である. 一方緑線がゲル パッド (+ ポッティングシリコン) を搭載した mEgg であり, 充填シリコンを搭載した mEgg と比較して, $\cos(\theta) \in [-0.6, +0.6]$ の範囲において検出面積が上回っている.

最後に各検出器の総合的な検出感度を比較するため,図 4.25 で示した全 Cherenkov 波長における検 出面積の全入射角平均 $A_{detector} = \int_{\cos\theta} A_{cherenkov}(\cos\theta) d(\cos\theta)$ を各検出器ごとに計算し、その面積比 $A_{detector1/detector2}$ を取った.計算結果を表 4.2 に示す.

表 4.2: 全入射角平均を取った検出面積比 A_{detector1/detector2}. detector1 は detector2 の何倍の検出感度を持つか分か る. ゲルパッド (+ ポッティングシリコン) を搭載した mEgg は充填シリコンを搭載した mEgg と比較して 8% 感度が落ち, D-Egg と比較した場合は最大 1.74 倍の検出感度を持つ.

| detector1 | detector2 | $A_{\rm detector1/detector2}$ |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| mEgg (NQE, Gelpad + Potting) | DOM | 2.57 |
| mEgg (HQE, Gelpad + Potting) | DOM | 3.80 |
| mEgg (NQE, Gelpad + Potting) | D-Egg | 1.18 |
| mEgg (HQE, Gelpad + Potting) | D-Egg | 1.74 |
| mEgg (Gelpad + Potting) | mEgg (InfilledGel) | 0.92 |

以上の結果から,ゲルパッド (+ ポッティングシリコン)を搭載した場合,シリコンを充填させた場合と比較して効率は 8% 減少する.しかし充填シリコンよりもゲルパッド (+ ポッティングシリコン)を使用したほうが,製造時の利便性を考慮した現実的な結果である.また D-Egg と比較した検出感度は最大 1.74 倍であり,ゲルパッド (+ ポッティングシリコン)を用いても「1 台で D-Egg の 1.5 台分以上の検出感度を持つ」ことを達成できることが分かった.

全ての PMT にゲルパッドを搭載した mEgg

4.2.4 小小節で示した mEgg のデザインは,製造時の利便性を考慮して最上 (下) 部の PMT に対してゲルを 直接ガラスに注いで硬化させているが,全ての PMT に対してゲルパッドを搭載した mEgg のデザインも作 成した. この mEgg のデザインを図 4.26 に示す.



図 4.26: 全ての PMT にゲルパッドを搭載した mEgg のデザイン. 図 4.24 と比較して,最上 (下)部の PMT に対して もゲルパッドを搭載している.また全てのゲルパッドの開き角度は α_{angle} = 60 deg である.

このデザインの mEgg の性能を評価するため,図 4.1 で示すシミュレーションのセットアップを用いた. mEgg(図 4.26)を氷中に設置し, $\lambda = 320$ nm, 340 nm, 380 nm, 500 nm の 4 波長,入射光子数 $N_{\text{beam}} = 1000$, 半径 r = 26.7 cm の円型ビームを全 θ 方向から 1000 回ずつ打ち込み検出面積を計算した (ϕ 平均も取った). 結果を図 4.27 に示す.



図 4.27: λ = 320 nm, 340 nm, 380 nm, 500 nm の光子ビームにおける mEgg の検出面積の入射角度依存性. 左が全ての PMT にゲルパッドを搭載した mEgg (図 4.26 参照),右はゲルパッド (+ ポッティングシリコン)を搭載した mEgg (図 4.24 参照)の場合である.両方を比較してグラフの形状は大きく変化していないが, cos(θ) = −1, 1 においてはポッティングシリコンを用いた場合よりもゲルパッドを用いたほうが検出面積が増加していることが 分かる.

図 4.27 内左のグラフは,全ての PMT にゲルパッドを搭載した mEgg (図 4.26 参照)の検出面積である. 一方右のグラフは,最上 (下)部にゲルパッドではなくポッティングシリコンを用いた mEgg (図 4.24 参照)の 検出面積である.ゲルパッドには反射効果があるため,真上 (下)からの入射に対して全ての波長に対して最 上 (下)部にゲルパッドを用いた mEgg の方が検出面積が増加している.しかし全体的なグラフの形状はほと んど変化していない.またこれらの検出面積を全 $\cos\theta$ で積分した $A_{detector} = \int_{\cos\theta} A_{cherenkov}(\cos\theta) d(\cos\theta)$ を計算し,各入射波長で面積比 $A_{detector1/detector2} = A_{detector1}/A_{detector2}$ を取った.計算値を表 4.3 に示す.

表 4.3: 全入射角平均を取った検出面積比 A_{detector1/detector2}. detector1 は detector2 の何倍の検出感度を持つか分か る. 最上 (下) 部の PMT にポッティングシリコンを搭載した mEgg はゲルパッドを搭載した mEgg と比較して 最大 4% 感度が落ちる.

| Wavelength | detector1 | detector2 | $A_{\rm detector1/detector2}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 320 nm | mEgg (All Gelpad) | mEgg (Gelpad + Potting) | 1.06 |
| $340~\mathrm{nm}$ | mEgg (All Gelpad) | mEgg (Gelpad + Potting) | 1.05 |
| 380 nm | mEgg (All Gelpad) | mEgg (Gelpad + Potting) | 1.04 |
| 500 nm | mEgg (All Gelpad) | mEgg (Gelpad + Potting) | 1.04 |

この結果から, $\lambda = 320 \text{ nm}, 340 \text{ nm}, 380 \text{ nm}, 500 \text{ nm}$ の全ての入射波長に対して,検出器最上 (下)部にポッ ティングゲルではなくゲルパッドを用いたほうが検出面積は最大 6% 増加する.この増加は,ゲルパッドを用 いた場合にゲルパッド端での光子反射による再捕獲効果によるものであると考えられる.

第5章

ゲルパッドを用いた検出感度の測定

5.1 ゲルパッドのプロトタイプ

4.2.4 小小節の結果から, ゲルパッド (+ ポッティングシリコン) を mEgg の PMT のカソード面上に搭載 すると, 全入射角平均を取った検出面積は D-Egg と比較して最大 1.74 倍まで増加することが分かった. ゲル パッドによる光子収集効果を実際に実験室で測定し, 再現できるか確認した.

ゲルパッド製作時の様子と完成品を図 5.1 に示す.ゲルパッドは検出器内ガラス横方向あるいは斜め方向に 貼りつけるため,製造時にシリコンをガラスに直接注いで硬化させることは難しい.そのため直径 6.5 cm,厚 さ 0.5 cm-3.5 cm の様々なカップを別途用意し,D-Egg と同じロットのシリコンをミキサーを用いてカップに 注ぎ (図 5.1a 参照), 2-3 週間かけて常温で硬化させた.十分硬化したら,シリコンに直接触れないようにピ ンセットなどを用いてカップからゲルパッドを取り外した.完成したプロトタイプを図 5.1b に示す.測定時 にはこれらのゲルパッドを直接 PMT やガラス上に搭載した.



(a) シリコンをカップに注いでいる様子



(b) ゲルパッドのサンプル (直径 6.5 cm, 厚さ 0.5 cm)

図 5.1: ゲルパッドのプロトタイプ.a):シリコンをカップに注いでいる様子.シリコン中に含まれている気泡は硬化する過程で減少する.シリコンを任意の高さまで注いだ後に、上部に蓋をして数週間常温で放置して硬化させた.b):硬化した後にカップから取り出したゲルパッドのサンプル (直径 6.5 cm,厚さ 0.5 cm).カップはポリプロピレンでできているためスムーズに取り外しが可能である.ゲルパッド表面には指紋やゴミが付きやすいため、取り扱いに注意する必要がある.

5.2 シミュレーションでのゲルパッド搭載/非搭載による到達確率の変化

5.2.1 シミュレーションセットアップ

製作したプロトタイプを用いて, mEgg のゲルパッドの搭載/非搭載による検出効率の違いを実測で確認し たい.しかし mEgg で用いる 4 インチ PMT はまだ開発過程であるため,現段階では mEgg と同じデザイン 条件 (mEgg ガラス内部に 4 インチの PMT とゲルパッドを実装した状態) で検出効率を実測することはでき ない.そのため, D-Egg ガラス半球 (mEgg ガラスと同一形状) に D-Egg の 8 インチ PMT を 1 台搭載し,ま たガラスと PMT の間にゲルパッドのプロトタイプを搭載して,カソード面のゲルパッドが有る箇所と無い箇 所での検出効率の違いを比較することとした.

まず実験室での測定前に、シミュレーションを用いた場合ゲルパッドの搭載/非搭載でどれだけ感度が変化 するのかを確認するため、実験室と同じセットアップを DOMINANT 内で再現した.シミュレーションでの セットアップを図 5.2 に示す.空気中に設置したガラスに、8 インチ PMT のカソード面が真下に向くように 搭載した.ガラスと PMT の間には測定で用いるプロトタイプと同一形状のゲルパッド (屈折率 1.43,直径 6.5 cm,厚さ 3 cm)を搭載した.ガラス内部には空気を充填させた.このとき、実験室と同じ $\lambda = 400$ nm, 直径 1 mm の光子ビームを各 θ, ϕ 方向から PMT の曲率中心に向けて入射した.シミュレーションでは常 に ϕ 対称性が成り立つ (カソード面の感度のばらつきが存在しない) ため、任意の ϕ を一つ選択し (今回は $\phi = 0 \deg$ とした)、 $\theta = 0 \deg$ -60 deg の範囲を 1 deg 刻みに 200 回ずつ入射して到達確率を計算した.



図 5.2: シミュレーションのセットアップ. 空気中にガラス球, 8 インチ PMT, 厚さ 3 cm のゲルパッドが搭載されてい る. ガラス内部には空気が充填されている. 100 個の光子から成る直径 1 mm の細いビームを PMT の曲率中心 に向けて θ = 0 deg-50 deg の範囲を 1 deg 刻みに 200 回ずつ入射した.

5.2.2 ゲルパッドの搭載/非搭載による到達確率の増加

ゲルパッドの搭載/非搭載による到達確率の入射角度依存性と、ゲルパッド搭載/非搭載による到達確率の 比を図 5.3 に示す.図 5.3aの赤点線はゲルパッドを搭載した場合の到達確率 $P_{w \text{ gelpad}}$ である.ビームがゲル パッドを通過する $\theta = 0 \text{ deg}$ -15 deg の範囲において到達確率は常に一定 (~96%)であり、 $\theta = 20 \text{ deg}$ 以降の 到達確率は 92%-93% まで減少する.光子は検出器内をガラス、空気またはゲルパッドを通過した後にカソー ド面に到達する.このときゲルパッドが無い領域 ($\theta = 20 \text{ deg}$ 以降)では各物質の境界面での屈折率の差が大 きくなるため反射を起こす光子が増加し、結果カソード面に到達した光子が減少する.一方図 5.3a の青点線 はゲルパッドを搭載しなかった場合の到達確率 $P_{wo \text{ gepad}}$ である.この場合ガラスと PMT の間は常に空気で あるため、物質境界面での屈折の増加によって到達確率は常に 92%-93% となる.

また図 5.3b は、図 5.3a で示したゲルパッドの搭載/非搭載での到達確率の比 $P_{w \, gepad}/P_{wo \, gepad}$ である. ゲルパッドが無い領域 ($\theta = 20 \deg 以降$)の比を $P_{w \, gepad}/P_{wo \, gepad} = 1.000$ とすると、統計誤差を含めたゲルパッド中心 ($\theta = 0 \deg$)の到達確率の比は $P_{w \, gepad}/P_{wo \, gepad} = 1.040 \pm 0.003$ であり、到達確率はゲルパッドの搭載によって (4.0 ± 0.3)% 増加していることが分かる.



(a) ゲルパッド搭載/非搭載による到達確率の変化



図 5.3: 空気中にガラスと 8 インチ PMT を設置し, その間に厚さ 3 cm のゲルパッドを搭載/非搭載した場合の光子ビームの到達確率とその比. a):ゲルパッド搭載/非搭載による到達確率の変化. ゲルパッドが有る領域 (θ = 0 deg-20 deg) での到達確率は,ゲルパッド有りのほうが 3.0% 以上大きい. b):ゲルパッド搭載/非搭載による到達確率の比. θ = 20 deg を境界とし,手前をゲルパッドが有る領域,後ろをゲルパッドが無い領域として比較すると,到達確率は約 4.0% 増加していることが分かる.

5.3 実験室でのゲルパッド搭載/非搭載による検出効率の測定

5.3.1 **測定セットアップ**

図 5.3 の結果から,厚さ 3 cm のゲルパッドをガラスと PMT の間に搭載することで検出効率 (到達確率)が 約 4% 増加した.これを実験室の測定でも再現するため,図 2.10 で示した 2D スキャン装置とゲルパッドの プロトタイプ (屈折率 1.43,直径 6.5 cm,厚さ 3 cm)を用いて,図 5.2 と同じセットアップを用意した.測定 には D-Egg の 8 インチ PMT (S/N: SQ0918,QE_{λ=400nm} = 34.8%)と D-Egg のガラス容器を用いた.図 5.4 で示すように,ガラス容器の底にゲルパッドと PMT を設置し,ガラスを回転モーターの真上に固定した. このときゲルパッドのプロトタイプは円柱型でありガラスと PMT の曲面には完全にフィットしないため,ガ ラスとゲルパッドの間に別途シリコンを充填させて空気の隙間を無くした (このシリコンは脱着不可能).その ためゲルパッド搭載/非搭載で,それぞれ異なるガラス容器を測定に用いている.

直径約 1 mm, 波長 $\lambda = 400$ nm のビームを $\theta = 0$ deg-60 deg の範囲を 64 区間, $\phi = 0$ deg-360 deg の 範囲を 18 区間,計 64 × 18 = 1152 区間において 200 回ずつビームをガラス下方向から PMT に向けて入 射したときの光電子数を測定した.このときビームの強度は完全に一定ではなく,入射区間によって入射 光子数にばらつきがあると仮定した.そのため別途 2 インチの Reference PMT (R7056, S/N: UA8917, QE_{$\lambda=400$ nm} = 26.3%)を用意した.光源 (レーザービーム)を 2 本の光学ケーブルを用いて 8 インチ PMT と Reference PMT 方向の 2 つに分岐させ,各区間における 8 インチ PMT への入射光子数を都度測定した.こ れらの測定データから,各区間において入射光子数のうちどれだけが光電子として検出されたかを示す検出効 率 (PDE: Photon Detection Efficiency)を計算した.



(a) ガラス内のゲルパッドの様子



(b) 2D スキャン装置に PMT, ゲルパッド, ガラスを 設置した様子

図 5.4: ゲルパッドと PMT をガラス容器内に搭載した様子. a):ガラス内のゲルパッドの様子. ガラスとゲルパッドに 隙間が出来ないよう別途シリコンで充填させ,上から押さえ付ける. b):2D スキャン装置に PMT, ゲルパッド, ガラスを設置した様子. 直径約 1 mm, 波長 λ = 400 nm のビームが,ガラス下方向から PMT に向けて放出さ れる.

5.3.2 ゲルパッドの搭載/非搭載による検出効率の入射角 θ 依存性

検出効率 PDE の入射角 θ, ϕ 依存性の測定結果を図 5.5 に示す (図 5.5a: ゲルパッド搭載,図 5.5b: ゲル パッド非搭載). 灰色のデータ点は各 θ, ϕ における検出効率であり,赤色/青色のデータ点は各 θ における全 ϕ の検出効率の平均値である.

図 5.5a において, $\theta = 10 \deg - 30 \deg$ の範囲では平均値の増減が見られることから,この範囲ではビームが ゲルパッドの側面から入射したことによる反射が生じていると考えられる.一方図 5.5b では, θ が大きくな るにつれて検出効率がなだらかに現象していることが分かる.

また図 5.5a と図 5.5b を比較すると,全入射角 θ において図 5.5b のほうが検出効率が大きくなった.この スケールの違いは,各測定 (ゲルパッド搭載/非搭載) において Reference PMT に入射する光量が約 40 倍変 化してしまったことが原因であると考えられる.



図 5.5: 空気中に D-Egg ガラスと 8 インチ PMT を設置し, その間に厚さ 3 cm のゲルパッドを搭載/非搭載した場合の 検出効率の入射角度依存性. 直径約 1 mm, 波長 $\lambda = 400$ nm のビームを $\theta = 0$ deg-60 deg の範囲を約 1 deg 刻 み, $\phi = 0$ deg-360 deg の範囲を 20 deg 刻みに 200 回ずつ入射した. また各 θ において, 2ϕ の検出効率に対し 平均を取り, それぞれ赤点または青点で表現した. a): ゲルパッドを搭載した場合の検出効率 (PDE). 赤点は, 各 θ における全 ϕ の検出効率 (18 データ)の平均値である. $\theta = 10$ deg-30 deg の範囲において, (b) では見られ ないような検出効率の急激な減少とばらつきが見られる. これはビームがゲルパッド側面から入射したことによ るゲルパット表面上での反射によるものであると考えられる. b): ゲルパッドを搭載しなかった場合の検出効率. 青点は, 各 θ における全 ϕ の検出効率 (18 データ)の平均値である. θ が大きくなるにつれ (ビーム入射位置が PMT のカソード中心から離れるにつれ),検出効率はなだらかに減少していることが分かる. 図 5.5 の結果より, $\theta = 10 \deg - 30 \deg$ の領域において,明かにゲルパッドを搭載した場合にデータにばら つきが見られる. そのためゲルパッドを搭載した場合に対し,入射角 θ に対し以下の 3 つの領域に区分する.

- 2. $10 \deg \le \theta < 30 \deg$: ゲルパッド側面での反射が生じる領域
- 3. $30 \deg \le \theta \le 60 \deg$: ゲルパッドが無い領域

Reference PMT への入射光量の測定誤差によって、ゲルパッドの搭載/非搭載によって検出効率のスケー ルが変化した.しかしゲルパッドの搭載/非搭載に関わらず、30 deg ≤ θ ≤ 60 deg にはゲルパッドは存在しな い.この領域で各データを直線近似した場合、切片は異なるが傾きは等しいはずである.そのため"funcA" をゲルパッドを搭載した場合、"funcB"をゲルパッドを搭載しなかった場合のデータ点に対するフィッテング 関数とし、フィッテングした結果を図 5.6 に示す.



図 5.6: ゲルパッド搭載/非搭載による検出効率. データ点は各θにおける全φの検出効率の平均値であり、そのエラーバーはφ方向のデータのばらつきを意味する. ゲルパッドが存在しない 30 deg ≤ θ ≤ 60 deg の領域の検出効率に対して直線近似を行った. funcA はゲルパッドを搭載した場合, funcB はゲルパッドを搭載しなかった場合のデータ点に対する一次関数である. このとき傾きは funcA で -0.000522, funcB で -0.000523 となり, 99%の精度で一致した. よってこの領域はゲルパッドの搭載/非搭載に関わらずゲルパッドが無いと言える.

また各関数は,

funcA : PDE = $-0.000522\theta + 0.218570$ funcB : PDE = $-0.000523\theta + 0.251766$

となり傾きは 99% の精度で一致した. このとき, $\theta = 60 \deg$ で各関数の PDE が 1 となるように両データ のスケールを揃えた. ゲルパッドが有る領域 $0 \deg \le \theta < 10 \deg$ で, ゲルパッド搭載/非搭載に対してデー タの加重平均を取り, さらに誤差伝搬でその差を計算した. スケールを調整した検出効率と, 加重平均を 取った線を示した図を図 5.7 に示す. 黒の点線は傾き -0.0005225 の直線であり (切片は任意), $\theta = 60 \deg$ での検出効率 (PDE)を1と定義している.また 0 deg $\leq \theta < 10 \deg$ の領域に引かれた赤線と青線は領域内 のデータに対して加重平均を取ったものであり、ゲル搭載の場合は PDE_{w gelpad,ave} = 1.120±0.008,ゲル パッド非搭載の場合は PDE_{wo gelpad,ave} = 1.074±0.007 となった.これらの加重平均に対して誤差伝搬で比 PDE_{w gelpad,ave}/PDE_{wo gelpad,ave}を求めたところ、PDE_{w gelpad,ave}/PDE_{wo gelpadaverage} = 1.044±0.010 と なった.測定の結果から、検出効率はゲルパッドの搭載によって (4.4±1.0)%増加した.これは図 5.3 でシ ミュレーションから得られた (4.0±0.3)%を含む結果となった.



図 5.7: ゲルパッド搭載/非搭載で、ゲルパッドの無い領域 (30 deg $\leq \theta \leq 60$ deg) でスケールを揃えた検出効率. 黒の点線は傾き -0.0005225の直線である (切片は任意). また 0 deg $\leq \theta < 10$ deg の領域に引かれた赤線、青線は領域内のデータに対して加重平均を取ったものであり、これらの比を求めると PDE_{w gelpad,ave}/PDE_{wo gelpad,ave} = 1.044 ± 0.010 となる.

5.4 考察

5.4.1 ゲルパッドの有無による検出効率のスケールの変化

図 5.5 の結果から,全ての入射角 θ においてゲルパッドを用いなかった場合 (図 5.5b) の方が検出効率が大 きくなった. この現象に対し,考えられる原因を 3 つ挙げる.

1つ目は、ゲルパッド有り無しの各測定時に異なるガラス容器を用いたことである. ゲルパッドを搭載した ときに、別途シリコンをガラスに直接注いでゲルパッドとガラスの隙間を充填させた. このシリコンは取り外 しが出来ないため、各測定で同一のガラスを用いることができなかった. 2つのガラスの個体差によって検出 効率のスケールが変化したと考えられる.

2つ目は、ガラスを入れ替える時にセットアップを解体したことによる、ガラスを設置する高さの不一致で ある.ガラスを設置する高さが測定の度に変化したことで、ビームが PMT に入射するまでの距離も変化して しまった.今回の場合、検出効率のスケールが高いゲルパッド無しの測定時のほうが、ガラスの位置が低かっ た (ガラスがビームに近かった) と考えられる.

3 つ目は, Reference PMT に入射する光量が, ゲルパッド搭載/非搭載の各測定で変化してしまったことで ある. 各 PMT に入射された光量 *I* の比を $R = I_{D-Egg PMT}/I_{Reference PMT}$ とすると, ゲルパッドを搭載した 場合は R = 1.313, ゲルパッド非搭載の場合は R = 0.03 であり約 40 倍の差があった. これらの光量の測定 の誤差が, ゲルパッド有り無しで検出効率のスケールが一致しなかった原因であると考えられる.

5.4.2 検出効率の *φ* 方向の依存性

図 5.5 において,各 θ における灰色のデータ点の縦方向の広がりが各 θ での検出効率の φ 依存性である.このとき,ゲルパッド搭載/非搭載どちらの場合においても 2–6% のばらつきが見られる.測定で用いた PMT やゲルパッドの形状は円型であり φ 方向に対して対称であるため,本来は検出効率の φ 依存性は見られない. この φ 依存性に対し,考えられる原因を 2 つ挙げる.

1つ目は、測定環境の ϕ 対称性が成り立っていないことである. 今回用いた 2D スキャン装置では、回転 モーターとモータ上に設置されたアームを用いてビームの入射方向を変化させている (図 2.10 参照). アーム はモーター中心に対して左右どちらかにだけ設置されている (モーターは ϕ 方向に対して対称なデザインで はない). ビームの入射方向を θ 方向に変化させる場合,光源 (光学ケーブル)を搭載しているアームの高さが レールに沿って上下に変化する. またビームの入射方向を ϕ 方向に変化させる場合,モーター自身が回転す る. このとき、回転前後でスキャン装置内の環境 (パーツ位置)が変化する. 例えば、スキャン装置内でのアー ムの位置、またアームから下に伸びている光学ケーブルや配線ケーブルの位置が変化する.

また,ビームの入射初期位置は原点 $(\theta, \phi) = (0 \deg, 0 \deg)$ である.ビームは原点から $\phi = 0 \deg$ のまま θ が最大になる $(\theta, \phi) = (60 \deg, 0 \deg)$ まで移動し,次に $(\theta, \phi) = (60 \deg, 20 \deg)$ に移動する.つまり各 ϕ に おいて全 θ のスキャンが完了した後は,都度原点に戻るのではなく最短ルートを通るようにモーターとアーム が回転,移動している (カソード面上をジグザグに移動している).

図 5.5 で示した各 θ , ϕ で測定した全ての PDE のデータを、測定順 (data number) に並び変えた. 結果を 図 5.8 に示す. ビームはカソード面上をジグザグに移動しながらデータを取得しており、 θ が原点から遠ざか れば PDE は減少し、 θ が原点に近づけば PDE は増加する. つまり data number が 64 ごとに (ϕ が移動す るごとに)PDE は増減を繰り返す. もし ϕ 依存性が無ければ、この増減の範囲は常に同じである. 図 5.8a は ゲルパッド搭載時の PDE である. data number が 0–3, 12–18 の範囲では PDE の最大値、最小値の位置が はっきりと見えるのに対し、data number が 4–6, 8–10, 10–12 の範囲では見えない.

また図 5.8b はゲルパット非搭載時の PDE である. data number が 0–3, 12–18 の範囲では PDE は 0.20– 0.26 の範囲を移動しており、また最小値が data number の奇数位置 ($\theta = 0 \deg$) にきていることが分かる. しかし data number が 3–12 の範囲では、PDE が 0.22–0.24 と小さい範囲でゆらいでいることが分かる.

このように, φに対して対称な形状, 性能である PMT, ゲルパッド, ガラスを用いたとしても, 入射方向 を変化させればスキャン装置内の環境 (特にモーターやアームの φ の位置) が変化し, 結果として測定データ が φ に対して変化してしまうと考えられる.



図 5.8: 図 5.5 で示したゲルパット搭載/非搭載における PDE をデータ取得順に並び変えたもの. a): ゲルパッド搭載時の PDE. data number が 6–9 の範囲で 3 回 PDE の明かな減少が見られる. b): ゲルパッド非搭載時の PDE. data number が 3–12 の場合,他の範囲と比べて PDE の最大 (小) 値が約 2% 小さい (大きい).

2 つ目は,実験室内での温度変化である.図 5.8 では $64 \times 18 = 1152$ 点データを取得している.各点で 1 分ずつデータ取得に時間がかかるとすると,例えば原点 ($\theta = 0 \deg$) では ϕ が変化する度に 1 min × 64×2 (1 往復分)=128 分ごとにデータを取得していることになる.また全データを取得するには約 20 時間かかる.こ の時間内での温度の変化によって,レーザーやモーターなどの電子機器が常に同じ条件下で動作しなかったこ とが検出効率にばらつきが見られた原因であると考えられる (本測定は夜間から翌日にかけて行った).

第6章

結論

本研究では, IceCube 拡張計画の 2030 年稼働に向けて, D-Egg のデザインをベースとした次世代光検出器 "mEgg"の性能をシミュレーションを用いて評価した. mEgg ではガラス容器内に 14 台の 4 インチ PMT を 全天頂角 θ, 方位角 φ を向くよう配置するデザインを採用した. 仮に mEgg のガラス内部に D-Egg で用いて いるシリコンを充填させた場合, D-Egg と比べて最大 1.90 倍の検出感度を持つことがシミュレーションの結 果から明らかになった. 特に検出器真横からの入射に対しては最大 2.5 倍検出面積が増加した.

シリコンを充填させる方法に代わり取り外し自由なゲルパッドを搭載することで,ガラスに対し斜め方向を 向いている PMT を固定させた. このとき mEgg の検出感度はゲルパッドの形状に依存し,またその開き角 度 α_{angle} = 60 deg のときにゲルパッドはガラス内部で最もパフォーマンスを発揮した. ゲルパッド (最上下 部の PMT に対してはポッティングゲル)を用いた場合には,D-Egg と比べて最大 1.74 倍の検出感度を持つ ことが明らかになった. これは目標である D-Egg の 1.5 倍の検出感度を達成する結果となった.

また D-Egg と同じシリコンを用いてゲルパッドのプロトタイプを製作し,8インチ PMT でゲルパッドの 搭載/非搭載による検出感度の違いをシミュレーションと実験室での測定において確認した.実験室での測定 では,ゲルパッドを搭載することにより (4.4±1.0)% 検出感度の増加が見られた.これはシミュレーション で得られた (4.0±0.3)% を再現するものであり,確かにゲルパッドが光子収集に有効であることが分かった.

mEgg を含めた Gen2 計画用の光検出器は現在デザインの構成段階にある.光検出器の最終的なデザイン は、直径 12.5 インチ以内、かつ総重量が 27 kg 以下となる予定である.この条件を守るためには、mEgg の ように卵型のガラス容器内に 16–18 台の小型 PMT を搭載する必要がある.そのため、本研究のシミュレー ションから得られた mEgg の性能結果を基準とし、今後デザインをより最適化していく予定である.

シミュレーションに加え、大量製造を見据えたプロトタイプの製作も今後行ってゆく.特にゲルパッドは検 出器1台で最大18個必要であるため、いかに質を保ったまま大量製造できるかが重要となる.本研究では単 純な円筒型のプロトタイプを製作し、隙間にシリコンを別途注ぐことでゲルパッドを固定した.ゲルパッドに よって光子をより収集するためには、ゲルパッドの形状をPMTのカソード面とガラス面の曲面に正確に沿わ せなければならない.そのためには、例えばシリコンは他の素材との吸着性に優れているため、脱着時にゲル パッドが破損しないような型の素材を選定する必要がある.

参考文献

- [1] J. Beringer et al. The Review of Particle Physics. Phys. Rev. D, 86: 010001, p305–310, 2012.
- [2] J. Santen. Neutrino Interactions in IceCube above 1 TeV. PhD thesis, University of Wisconsin Madison, 2014.
- [3] The IceCube–Gen2 Collaboration et al. IceCube–Gen2: The Window to the Extreme Universe. arXiv: 2008. 04323, 2020.
- [4] The IceCube Collaboration et al. First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube. Phys. Rev. Lett. 111, 021103 (2013).
- [5] teams The IceCube, Fermi–LAT, MAGIC, AGILE, ASAS–SN, HAWC, H.E.S.S, INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS and VLA/17B-403. Multi–messenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino. Science, 361(6398): eaat1378, 2018.
- [6] 日本天文学会. GZK カットオフ. 日本天文学辞典, 2019. https://astro-dic.jp/gzk-cutoff/
- [7] John David Jackson. Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons, 3 edition, 1999.
- [8] IceCube Neutrino Observatory: IceCube. https://icecube.wisc.edu/
- [9] IceCube Collaboration et al. Search for Astrophysical Tau Neutrinos in Three Years of IceCube Data. Phys. Rev. D 93, 022001 (2016).
- [10] IceCube collaboration et al. Measurement of the cosmic ray energy spectrum with IceTop-73. Phys. Rev. D 88 (2013) 042004.
- [11] The IceCube Collaboration et al. The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems. JINST 12 P03012 (2017).
- [12] P. Peiffer. New optical sensors for IceCube–Gen2. HAP non–thermal workshop, 2016.
- [13] The IceCube-Gen2 Collaboration et al. The IceCube-Gen2 High Energy Array. PoS (ICRC2015) 1146.
- [14] The IceCube Collaboration et al. Neutrino astronomy with the next generation IceCube Neutrino Observatory. arXiv: 1911. 02561v1, 2019.
- [15] A. Ishihara for the IceCube Collaboration. The IceCube Upgrade Design and Science Goals. PoS (ICRC2019) 1031.
- [16] The IceCube–Gen2 Collaboration, and S.Shimizu. PoS (ICRC2017) 934.
- [17] 浜松ホトニクス. 光電子増倍管-その基礎と応用- 第 4 版, 2017. https://www.hamamatsu.com/ resources/pdf/etd/PMT_handbook_v4J.pdf
- [18] Y. Makino. Performance studies with prototype D-Eggs. HK–IceCube detector workshop, 2018.

- [19] Y. Makino for the IceCube–Gen2 Collaboration. D-Egg: A next–generation optical module for IceCube. EPJ Web of Conferences 207, 06005, 2019.
- [20] A. Ishihara. 新型光検出器 D-Egg の南極点氷河埋設に向けた耐性評価. JPS autumn meeting, 2020.
- [21] R. Nagai for the IceCube Collaboration. Electronics Development for the New Photo–Detectors (PDOM and D-Egg) for IceCube-Upgrade. PoS (ICRC2019) 966.
- [22] S. Nagasawa. IceCube-Gen2 用新型光検出器「D-Egg」の Dark rate の理解. 千葉大学卒業発表, 2019.
- [23] M. Suzuki. Measurement of Dark rate for new optical module D-Egg in IceCube experiment. JPS spring meeting, 2020.
- [24] A. Kappes. Multi-PMT Optical Module Designs for IceCube-Gen2. VLVnT Workshop, 2015.
- [25] IceCube Collaboration et al. A multi–PMT Optical Module for the IceCube Upgrade. PoS (ICRC2019) 855.
- [26] L. Classen. The mDOM-a multi-PMT digital optical module for the IceCube-Gen2 neutrino telescope. PoS ICRC2017 (2018) 1047, 2018.
- [27] V. Basu. Private Communication, 2020.
- [28] K. Hoshina. DOMINANT. http://www.ppl.phys.chiba-u.jp/research/IceCube/DetectorSim/ DOMINANT
- [29] Ray Optics Simulation. https://ricktu288.github.io/ray-optics/

謝辞

本研究は、千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターニュートリノ天文学研究室 (ICEHAP) にて行われました.本研究の遂行にあたり、研究の着想から論文執筆まで多くのご指導を頂いた指導教員である石原教授、日頃から実験や解析方法についてご助言を頂いた吉田教授に感謝申し上げます.清水助教,永井特任助教,特任研究員の諸氏には、定期ミーティングなどで適切なアドバイスを頂きました.また ICEHAP グループの高橋秘書、学生メンバーの多くのご支援のおかげで、充実した研究生活を過ごすことができました.皆さまに感謝申し上げます.

2021年3月 鈴木 万里子