

アイスクューブ・アップグレードに向けた次世代型光学モジュール

ICEHAP ハドロン宇宙国際研究センター 千葉大学

C. Hill¹

N. Shimizu²

K. Farrag³

Y. Kobayashi⁴

¹colton.hill@icecube.wisc.edu

²shimizu@hepburn.s.chiba-u.ac.jp

³kareem.farrag@icecube.wisc.edu

⁴ykobayas@icecube.wisc.edu

2025 年 9 月 11 日

1 序論

ニュートリノは電荷を持たず、弱い力のみを通じて他の粒子と相互作用する素粒子であり、宇宙における多くの物理現象に関わっています。ニュートリノそのものは、CP 対称性の破れや、マヨラナ粒子である可能性といった根源的な問いに関係しており、非常に興味深いものです。

高エネルギー天体物理において、ニュートリノは他の手法では観測が困難な天体現象を探るうえで不可欠なメッセンジャーであり、近年発展が著しい「マルチメッセンジャー」天文学の重要な柱となっています。ニュートリノの断面積は非常に小さく、たとえば 1 TeV においては $\mathcal{O}(10^{-35}) \text{ cm}^2$ 程度であることが知られています [1]。そのため統計的に有意な数のニュートリノを検出するには、極めて大規模な検出器の構築が不可欠となります。私たち千葉大学のグループは、南極氷河 1 ギガトンの領域を用いたプロジェクト、IceCube 実験に所属しています。

IceCube の性能を最大限に活用する取り組みの一環として、2025～2026 年の南半球の夏季に IceCube-Upgrade 計画が予定されています。これは、700 個の新型光検出器を IceCube の中心に高密度に埋設する計画であり、物理解析および検出器較正の両面において大きな貢献をすることが期待されています。新型の光検出器は最先端の技術が採用されており、IceCube の初代の検出器と比較して感度が約 2.8 倍向上しています。この改良により、ニュートリノ振動のパラメータの精密測定、質量階層性の制限、さらには GeV スケールのニュートリノ天体現象の探索に対する感度の向上が期待されています。

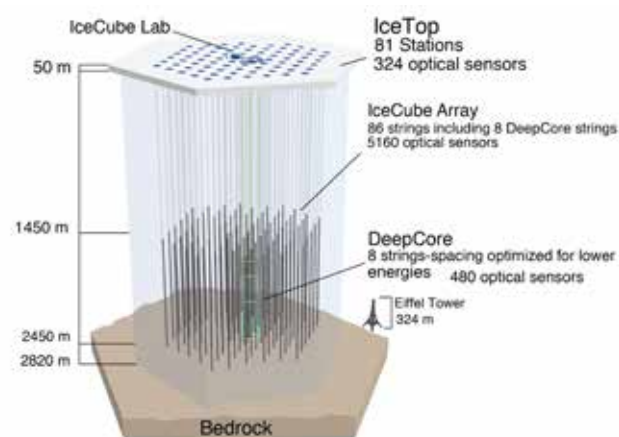


図 1: 現在の IceCube の概要。約 1 km^3 の領域にわたり IceCube-DOM が 5160 個埋設されている。中心部分は DeepCore と呼ばれ、検出器の密度を大きくした領域になっている。地表には宇宙線を veto するための IceTop という検出器が並べられている。地表の IceCube Lab では各検出器からの信号が集約され、データ収集を行う [3]。

2 IceCube ニュートリノ観測所

図 1 に示すように、IceCube は南極点の氷河の地下 1.5 km から 2.5 km の約 1 立方キロメートルの領域に、光検出器 Digital Optical Module (以下 IceCube-DOM, もしくは DOM と呼ぶ) を埋設して構成された観測装置です [2]。IceCube-DOM は合計 5,160 台あり、86 本の「ストリング」と呼ばれる数 km に及ぶケーブルに吊るされるように埋設されています。さらに中央部は高密度領域 DeepCore と呼ばれ、(IceCube の解析としては比較的) 低エネルギーである GeV 領域のニュートリノ観測を目的としています。DeepCore は 480 台の DOM が 8 本のストリングで配置されています。

IceCube は、ニュートリノの相互作用によって生成された二次粒子が放出するチェレンコフ光を検出すること

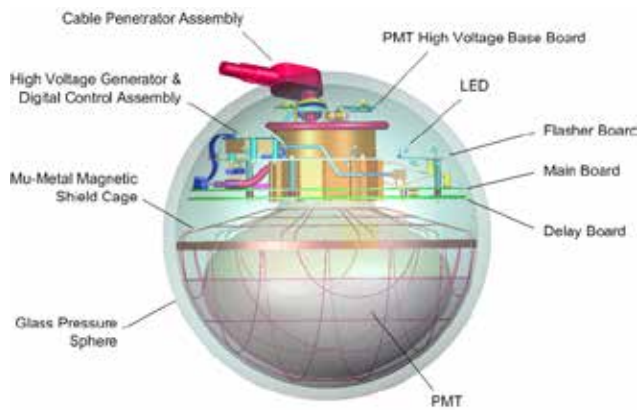


図 2: IceCube-DOM の模式図。10 インチの PMT を下向きに 1 台搭載しているほか、校正用 LED とオンボード電子回路を備えている [2]。

で、ニュートリノの検出を行っています。水中におけるチェレンコフ光の検出スペクトルは、およそ 380 nm (紫外域) 程度の波長をもち、これを埋められた IceCube-DOM で検出します。図 2 に示すように、IceCube-DOM はガラス容器に 1 台の 10 インチの光電子増倍管 (PMT) を下向きに内蔵しています。

過去 10 年間の研究により、南極の氷に関する特性の理解が進みました。例えば深さによって吸収率や散乱確率が異なる氷の層構造 (stratification)、氷層の長距離にわたる傾き (tilt)、氷の結晶構造による複屈折への影響などがあげられます [4][5]。これら氷のマクロな性質は、DOM に内蔵された LED フラッシャーを用いた較正により計測がされてきました。

IceCube の光検出器の埋設は、hot water drill と呼ばれるお湯で氷を溶かして穴をあける専用のドリルを用いて行われます。解けた水は一度地上に回収され、検出器を埋設した後、戻されて氷が再凍結するのですが、この過程で酸素などの不純物を取り込まれるために、周りの氷に比べて透明度が低下します。この再凍結氷は「bubble コラム」と呼ばれ、その光学的不透明度の大きさや範囲は、現在の較正データでは十分に理解できていないという問題があります。

IceCube の近年の解析では、この bubble コラムの不確かさに対しては、DOM の前方受光感度を一様に再スケールリングする (2 つのパラメータの自由度がある) ことで考慮にいられています。このパラメータの影響は、特に「カスケード」事象¹の方向再構成において顕著です。

IceCube-Upgrade に採用される新型の光検出器には、この bubble コラムの特性を評価するために専用の機能

¹ 電子型のニュートリノが氷と荷電カレント相互作用をすると、最終的に電子が含まれるため、電磁カスケードを起こします。この電磁シャワーは空間的に一様に広がり、カスケード事象と呼ばれます。 ν_μ が作るミューオンがトラック状の飛跡を作ることとは対照的な反応となります。

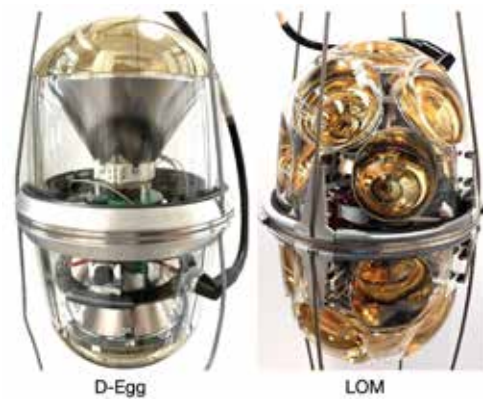


図 3: IceCube-Upgrade のために千葉大学で開発された光学モジュールの写真：(左) D-Egg, (右) LOM。

が内蔵されており、IceCube の解析の氷のモデル不定性に伴う系統誤差の削減が期待されています。

3 IceCube-Upgrade に採用される光検出器

IceCube-Upgrade の光検出器は、新しい 7 本のストリングで設置されることが決まっています。各ストリングに吊るされる 100 台の検出器は、単一ではなく、複数のタイプが採用されることになっています。このうち、千葉大学において開発されたものが「D-Egg」と「LOM」です。

両検出器の写真を図 3 に示します。特に D-Egg は IceCube-Upgrade における主要な検出器の一つであり、270 台以上が埋設されます [6]。一方、LOM は試験的な位置づけにあり、プロトタイプ 6 台が設置される予定です。

3.1 デュアル PMT 光学モジュール：D-Egg

D-Egg の内部要素を図 4 に示します。D-Egg は、二台の 8 インチ高量子効率 (high QE) 光電子増倍管 (Hamamatsu R5912-100-70) を紫外線透過性能の良い専用の耐圧ガラス容器に収めた構造をしています。容器は、再凍結した氷から最大 70 MPa の圧力がかかることを想定して設計されており、実際に 72 MPa までの加圧試験に耐えることが実証されています。PMT とガラスの間はシリコン樹脂で埋められており、これも紫外波長領域での透過性能が高いものを用いています。

全ての検出器は独立した検出器として動作し、内蔵電子回路によって PMT 信号の処理が行われます。PMT の信号を 240 MHz という高速なサンプリング周波数でデジタル信号に変えます。デジタル化された信号は、数 km に及ぶ銅線ケーブルを通じて南極氷床上に設置され

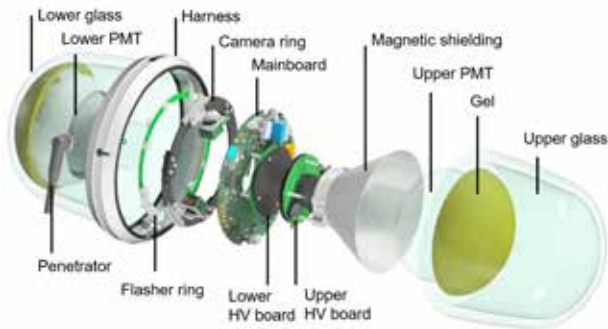


図 4: D-Egg の構成図。内部構造を示す [6]。

た中央サーバルームに送信され、各ストリングからの情報が統合されます。

PMT の他にガラスの中には、PMT を磁場から守る磁気シールド、高電圧の生成基板、データ収集基板、カメラリング、LED フラッシャーリングが搭載されています。フラッシャーリングには、水平方向および垂直方向に配置された LED が 12 個搭載され、405 nm の波長の光を放出することで、設置後の氷の散乱長および吸収長の測定に利用されます。さらに、3 台のカメラが放射状に外向きに設置されており、それぞれの視野が重なるように設計されており、異なる深さにおける氷の光学特性を詳細に観測することを目指しています。

3.2 マルチ PMT 光検出器：LOM

図 5 に Long Optical Module (LOM) の内部構造を示します。そのコンセプトは、D-Egg に用いられている卵型のガラス容器の側面領域をさらに有効活用しよう、というもので、比較的小さい PMT を複数内蔵することで、より広い検出面積を実現しています。LOM も D-Egg と同様な紫外線に対する透過度の優れた卵型のガラス容器の中に、18 台の 4 インチ PMT (Hamamatsu R16293 または North Night Vision Technology N2041) が 3 層 (これが上下で $\times 2$) に分かれて配置されています。各 PMT は「ゲルパッド」と呼ばれるシリコン樹脂を成型したライトガイドでガラスに光学的に接合されており、1 台あたりの光収集効率を高める革新的な設計を採用しています。

3.3 光学モジュールの性能

現行世代の IceCube-DOM と比較し、新たに開発された Upgrade モジュールは、1 台あたりの感度が大幅に向上しています。図 6 に、入射光の方向および波長に対する各検出器の感度を示します。D-Egg および LOM は PMT のサイズが小さいにもかかわらず、紫外線に特化

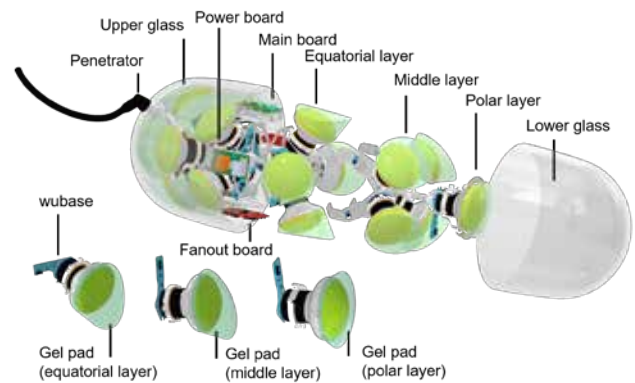


図 5: LOM の構成図。内部構造を示す

して最適化されたガラス²およびシリコン樹脂（信越化学工業製 OSN-3547-HE）のおかげで、全体としてより高い感度が得られています。

水中で想定される波長においては、D-Egg は IceCube-DOM に対して約 2.8 倍、LOM は約 4.4 倍の感度向上が期待されています。さらに、両検出器のガラスは低放射能化の処理が行われており、特にガラス内部の ^{40}K の濃度を小さくすることで放射性崩壊に起因する光子の生成が極めて抑制されています。

4 検出器の出荷前検査

先に述べたように、IceCube における検出器の埋設は、いったん氷に開けた穴に検出器を吊るし、再び水を戻して再凍結する、というプロセスで行うため、光検出器を埋めた後に取り出すことは事実上不可能となります。さらに、南極という超僻地に検出器を輸送するコストは非常に高額になるため、低温かつ高圧という厳しい環境に耐えられる信頼性の担保は非常に重要となります。そのため、IceCube では全ての光検出器は、南極に輸送する前に厳格な試験、いわゆる「最終受入試験 (Final Acceptance Testing : FAT)」を行うことが要求されています。

FAT の目的は、光検出器が低温環境 ($-20^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$) において機械的および電氣的に正常に動作すること、さらに、精密な物理測定を行うために必要な仕様を満たしていることを確認することです。具体的には、PMT のゲイン安定性、暗電流、光量に対する検出信号の直線性、時間分解能の評価などがあげられます。D-Egg と LOM は開発時期が異なるため、それぞれの FAT は別々に実施しました。以下の章で個別に説明します。

²岡本硝子製:<https://ogc-jp.com/>

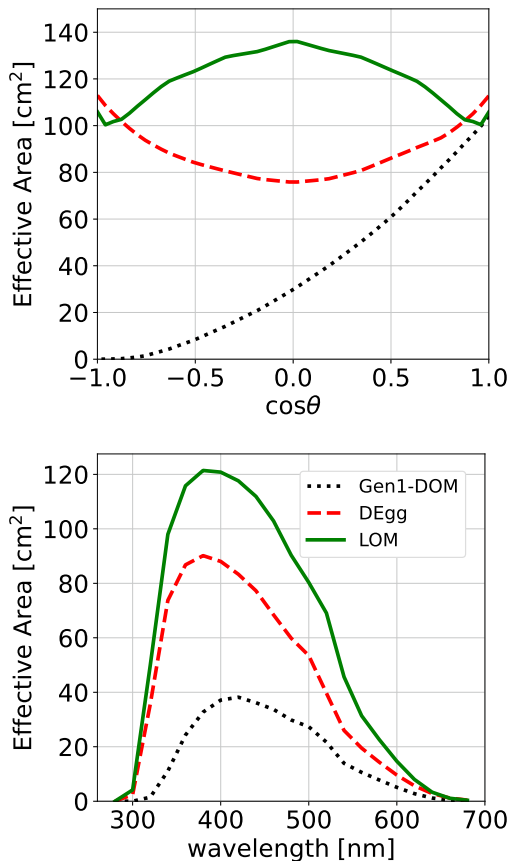


図 6: D-Egg および LOM の有効面積 (感度) を、上段は入射する 400nm フォトン の角度に対して、下段は角度で平均化した波長に対して示す。上段において $\cos\theta = -1$ は下向きを表す。水中で想定される波長分布で重み付けした場合、D-Egg および LOM の感度は、IceCube-DOM と比較してそれぞれ 2.8 倍および 4.4 倍高い [7]。

5 D-Egg FAT

D-Egg の FAT のために、300 台を超える検出器を試験するための専用の冷凍庫を用意しました。図 7 にその写真を示します。この冷凍庫は最大で 16 台の D-Egg を収容可能であり、内部には撥水处理を施した木製の遮光ボックスが設置されています。これにより、検出器間の光学的な干渉を防ぐとともに、光を照射するテストのための光ファイバーを固定する役割も果たしています。この照射における光の生成は 400 nm のピコ秒レーザー (Hamamatsu HPKM10306, PLP-10C10196) を使用し、光ファイバーで D-Egg の手前約 30 cm から約 3 cm のスポット径で入射します。検出器間の時刻の同期は、GPS を用いた手法を行い、常にグローバル時間に変換することが可能です。レーザーも同じシステムを用いて同期が行われるため、正確に入射時刻を知ることができます。



図 7: D-Egg を最大 16 台収容可能な最終受入試験用冷凍庫。試験時の温度は -40°C 。黒色のケーブルは光ファイバー、赤色のケーブルは通信のためのケーブル。

5.1 試験手順

D-Egg の FAT は 2022 年 8 月に開始され、2024 年 7 月に完了しました。1 回の試験 (「ラン」) では 16 台の検出器を同時に検査することが可能であり、それぞれ 20 日の期間試験を行いました。そのうち 10 日間は -40°C の低温環境下における試験で、残りは低温 \leftrightarrow 室温の温度変化に要した時間です。再試験を含め、全体で 26 ランが実施され、最終的に出荷された 292 台のモジュールの検証には合計 520 日を要しました。

FAT の運用には、本試験のために一から開発された自動スケジューラースクリプトを使用しました。このシステムには SlackBot、冷凍庫制御、環境モニタリング、リアルタイムのデータベース同期、データバックアップなどの機能が統合されており、高度な自動化が実現されています。データ取得 (DAQ) の自動化とアラート警報を行うことで、オペレーターのマニュアル操作を最小限に抑えることを可能にしました。エキスパート以外でも貢献ができるようにスクリプトは設計していたため、千葉大の学生はもちろん、広く IceCube のメンバーにもリモートシフトとして協力を仰ぐことが可能となりました。FAT はまさに国際的協力のもとで成功することができたのです。

冷凍庫内部は 0°C 以下の環境下でも、夏季を含めて 30% 未満の湿度が通常維持されていましたが、温度サイクル中には 60% を超える湿度となることがあり、冷却管に付着した氷が融けることで「雨」として装置内部に滴下する現象が確認されました。これによる水損リスクを軽減するため、FAT ランの合間に除湿を行いました。最終的には、約 2 年間の運用で大きな問題はおきず、順調に試験が終了しました。

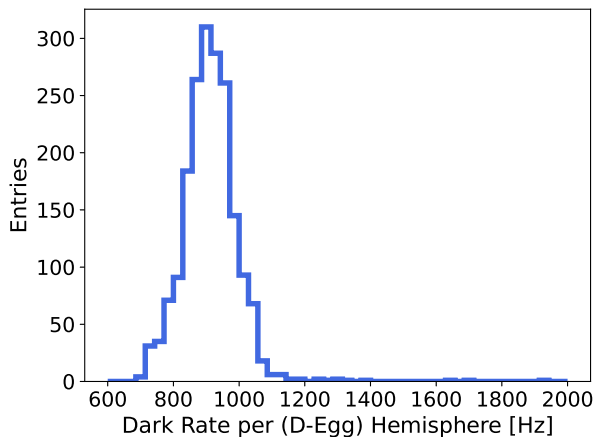


図 8: 26 回の FAT サイクルにわたる各 D-Egg 半球の平均ダークレート。空気中から水中への変換係数を用いて補正済。

5.2 試験結果

最終的に 312 台の D-Egg を試験し、そのうち 293 台が自動および手動による評価の両方を経て、合格基準を満たしていることが確認されました。各検出器は、常温、 -20°C 、および -40°C の各温度において、50 項目以上の独立した試験が行われました。

5.2.1 ダークレート

ダークレートとは、検出器を遮光した状態で見かけ上、光子が検出されてしまう頻度のことで、PMT そのものが光電面の熱励起等で発生する電子を増幅してしまうこと、D-Egg のガラスの内部の放射性物質が崩壊することで光子を発生させること、などの要因で発生します。FAT を通過したすべてのモジュールのダークレート測定結果を図 8 に示します。その結果、600 基を超える PMT について、 -20°C および -40°C で得られたデータを含めて、水中平均ダークレートは $896 \pm 12 \text{ Hz}$ となりました。この値は、検出器とその外側の境界における屈折率変化を補正するために実験的に求めた空気中から水中への補正係数を用いて補正されています³ [6]。また、PMT や D-Egg のシリアル番号との間に系統的な傾向は観測されませんでした。

³ 実際の実験で利用する場合、放射性崩壊などがきっかけでガラスの内部で生成された光子は、ガラスと水の屈折率が近いために、高い効率で検出器の外に逃げていくことが可能です。一方 FAT のような空気中での試験では、光子は空気とガラス境界で全反射を起こし、検出器内部にトラップされてしまうため、ダークレートを高く見積もってしまいます。のちの LOM の章で少しだけ登場しますが、氷の中の状況を模擬するためにはガラスの表面を黒いテープで覆います。このようにすると境界面での全反射を吸収し、実質的に氷と同じ状況を再現できます。今回は前もって空気中と黒いテープで覆ったときのダークレートの比を測定しておき、その比を用いて補正をかけています。

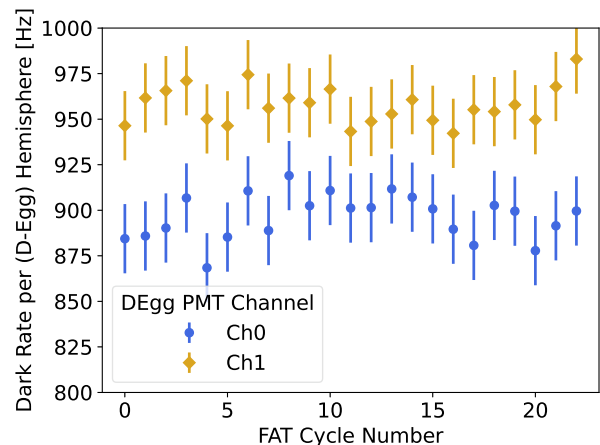


図 9: 基準 D-Egg の平均ダークレート（全 26 回の FAT サイクル）。空気中から水中への変換係数を用いて補正済。2 年間にわたる運用および定期的な 60°C の温度サイクルにもかかわらず、両 PMT チャンネルで安定したノイズ挙動が観測されていることから、検出器の温度に対する安定性を見てとることができる。

長期安定性を評価するために、すべての FAT ランにおいて常に同じ検出器を一貫して測定しており、その結果は図 9 に示されています。いずれの PMT チャンネルにおいても、長期間にわたり一貫したノイズ性能が確認されており、モジュール設計の信頼性が示されています。

平均ダークレートが 2.6 kHz（水中換算で約 1.1kHz）を超えるモジュールはレビュー対象とされ、3 kHz を超える場合は再評価の対象となりました。再評価の対象になった個体を詳細に調べると、問題は PMT ではなく ADC などの読み出し回路に起因するものであることが判明し、基板の交換によって復旧が可能でした。

IceCube-Upgrade では、いわゆる「ローカルコインシデンス」を用いたトリガーにより、事象選別を開始します。これは、幾何学的に近傍にある複数の検出器で同時に光子が記録されたときにのみトリガーを発生させるものです。本稿執筆時点では、トリガー条件（コインシデンスの閾値やタイミング幅）は調整中ですが、伝送ケーブルの帯域幅の性能に基づき、トリガーレートは 300～500 Hz の範囲に制限される見込みです。D-Egg のダークレートは共に埋設される multi-PMT Digital Optical Module (mDOM) の 20 kHz と比べて非常に小さく抑えられており、トリガーの効率化に大きく貢献します。

5.2.2 時間分解能

ニュートリノの到来方向の再構成は、各光検出器で光子が検出された時刻の情報を用いて行うため、その単一光子時間分解能 (SPTR: Single Photon Timing Resolution) は非常に重要です。SPTR は、PMT の Transition Time

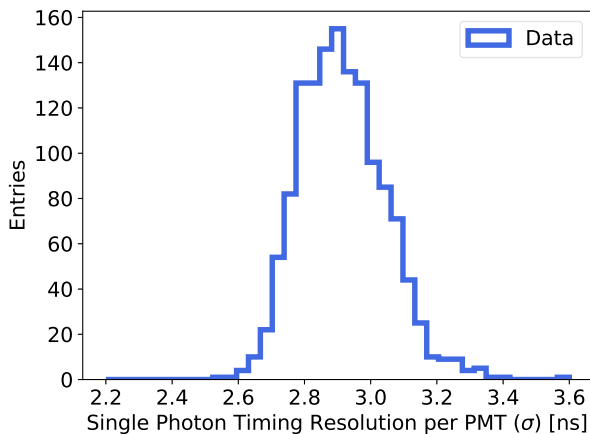


図 10: 26 回の FAT サイクルにおける PMT の平均単一光子時間分解能 (SPTR)。標準偏差は約 4% であり、全モジュールにわたって良好な一貫性が確認されている。

および ADC 回路、同期システム、すべての性能の組み合わせによって決まっており、大きい光子数ではなく、単一光電子レベルの電荷量のヒットに対して定義することが求められています。IceCube-Upgrade の requirement としては、SPTR が最大 5 ns 以下であることが求められていました。図 10 に FAT で測定した SPTR の分布を示します。0°C 未満の低温環境において、SPTR は 2.91 ± 0.12 ns と要求仕様を十分に満たしていることが確認されました。

5.3 輸送

日本から南極点への大量かつ大型の貨物輸送は、物流面で大きな課題となります。輸送用ボックスに収められた各 D-Egg の重量は約 26kg であり、全体の輸送重量は約 7,600kg に達します。米国南極プログラム (United States Antarctic Program) の規定に準拠するため、D-Egg は 8 台または 12 台単位で梱包され、防護用の外箱に入れたうえで空軍用パレットに積載されました。

日本からニュージーランド・クライストチャーチにある米国南極プログラムの拠点までは、コンテナ船による約 3 か月の輸送が行われました。その後、各パレットはクライストチャーチから南極沿岸のマクマード基地 (McMurdo Station) まで航空機で輸送され、さらに航空機により南極点にあるアムンゼン・スコット基地 (Amundsen-Scott South Pole Station) へと運ばれました。

2025 年 2 月時点で、292 台すべての D-Egg の南極点への到着を確認済みです。これらの機器を南極の厳しい冬季環境 (−60°C) にさらすことを避けるため、2025 年 11 月の展開開始 (南半球の夏) まで、温度管理された保管庫で保管されることになっています。

6 氷上での活動 - 2024~2025 年

IceCube では、毎シーズン少人数のチームが南極に派遣され、検出器の保守作業を行っています。IceCube-Upgrade の設置シーズンに先立ち、2024/2025 年の氷上作業シーズンでは、主に準備作業が実施されました。具体的には、サーバールーム電子機器の設置、7 本の地上ケーブルの敷設、および既に到着していた光検出器の事前テストが含まれます。

この事前テストは「南極受入試験 (South Pole Acceptance Testing: SPAT)」と呼ばれ、輸送後のデバイスの動作確認と、ファームウェアを最新バージョンに設定することを目的としています。図 11 に SPAT を行っているときの写真を示します。このテストは、FAT (最終受入試験) で見逃された可能性のある不具合や、輸送時の温度変化や振動により新たに発生した故障を発見するための、事実上最後の機会となります。

SPAT 施設は建物内に設置されていますが、その広さのため十分な暖房が困難であり、試験環境としては厳しい条件となっています。特に南極における極端に低い湿度 (< 0.1%) は、電子機器を扱う際の静電気放電 (ESD) リスクを高めており、安全管理上の重要な懸念事項となっています。

2024/2025 年の氷上シーズンでは、利用可能な IceCube-Upgrade 用モジュール 200 台の SPAT が実施され、2 名の専属作業員により約 40 時間で完了しました。これに基づき、2025/2026 年シーズンに予定されている約 700 台の試験には、合計 140 時間程度が必要と見積もられています。なお、2024/2025 年に試験された 200 台はすべて SPAT の基準を満たしました。

7 LOM の製造および受入試験

LOM の製造は、D-Egg の製造から遅れること 2 年、2024 年 4 月に着手し、同年秋に完了しました。製造の最初の行程はゲルパッドを PMT に取り付ける作業です。千葉大学の学生が中心となり、専用に設計されたプラスチック製の型および金属性の治具を用いて取り付けが実施されました。その後、すべての PMT に対して −40°C における事前スクリーニングが行われました。ゲイン校正をした後、ダークレートを計測し、異常な値を持つものは製造工程から除外しました。結果的に 190 台の試験を行い、約 1 kHz を超えるダークレートを示した 2 基の PMT が不採用となりました。PMT とゲルパッドをガラス容器へ取り付ける作業は、協力会社である SeisGadget 株式会社⁴と共同で実施しました。LOM の製造は順調に進み、2025 年初頭より FAT を開始しました。

⁴<https://www.seisgadget.com>



図 11: 南極点に到着したモジュールは、輸送・移動効率を考慮し、パレットに積載された状態のままで SPAT が実施される。これにより、空港、SPAT 施設、保管庫、掘削現場間での輸送が容易になる。

7.1 LOM FAT

LOM の FAT は 2025 年 3 月に開始され、約 3 か月後の 6 月に完了しました。14 日間のサイクルで複数台の LOM を同時に試験する形式で進められました。このうち半分の期間は -40°C の冷凍環境下で実施され、残りの期間は温度サイクルの試験に充てられました。再試験、デバッグ、および修理されたモジュールの試験も含めて、LOM の FAT は問題なく完了しました。輸送準備を含めた全行程の所要期間は 85 日以上にわたりました。LOM FAT では、 -40°C 、 -20°C 、および 20°C の 3 種類の温度条件において、すべての PMT のゲイン較正を行いました。これにより、各 PMT のゲインは常に 5×10^6 に設定され、データ取得のしきい値は 0.2 光電子に設定しました。較正された設定に基づき、LOM に内蔵されたフラッシャーを用いて光子の検出可能性を確認する試験が行われました。さらに、安定したデータ取得を確保するための長時間動作の監視も実施されました。D-Egg の FAT とは異なり、試験対象となる LOM の台数は少なかったため、FAT のスクリプトを完全自動化することは取立てを避けました。自動化に要する開発時間よりも、エキスパートによる個別対応のほうが効率的だと判断したからです。その代わり、専用の Slack ボットによる警告システムと、エキスパートによる徹底的な監視、解析などの手作業を行うことで、LOM FAT は非常に高い稼働効率 (およそ $> 80\%$) を維持することができました。

7.2 氷中における LOM の性能

図 12 に -40°C における、氷中を想定した 1 PMT あたりのダークレートの分布を示します。氷中環境を模擬するために、LOM のガラス表面を黒いテープで覆って測定が行われました。Hamamatsu Photonics 製および North Night Vision Technology 製のいずれの PMT においても、平均ダークレートは 120 Hz であり、1 モジュールあたりの総ダークレートは約 2 kHz となります。参考として、現在の IceCube-DOM のダークレートは約 900 Hz であるため、図 6 で示されたように LOM が約 4.4 倍の有効面積を持つことを考慮すれば、単位感度あたりのダークレート性能は大幅に改善されているといえます。

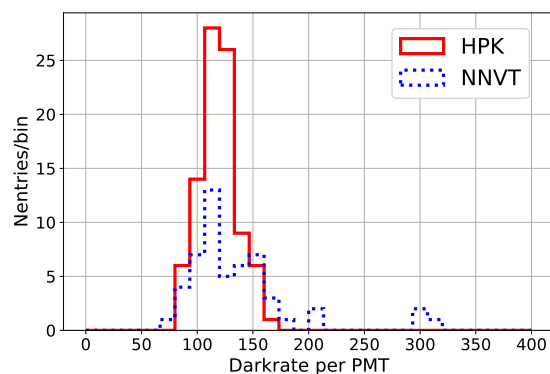


図 12: LOM の PMT ごとの氷中想定ダークレート分布 (-40°C)。色分けは PMT のメーカーを示しており、赤は浜松ホトニクス、青は North Night Vision Technology 製。

LOM のマルチチャンネル光検出器としての機能を実証するために、チャンネル間のコインシデンス事象の検出頻度を測定しました。コインシデンスを要求することにより、PMT の熱励起由来の誤検出や放射性崩壊由来の光子を抑制しつつ、宇宙線がガラスにヒットして生成するチェレンコフ光 (言ってみればちゃんとした物理事象由来!) の事象を選択することが可能になります。

図 13 は PMT のチャンネル間の二重検出に伴うコインシデンス頻度の分布を示しています。ここでいうコインシデンスとは、50 光子以上のヒットが 50 ns の時間差以内に任意の異なる 2 チャンネル間で検出されることを指します。コインシデンスの時間差の上限 50 ns は、PMT の時間分解能および検出器内部での光子の伝搬時間に比べて十分に広い設定としています。図に見られる頻度の高い組み合わせは、PMT 間の幾何学的な距離関係と整合しており、物理的な相関が読み取れます。一方上下半球の非対称性が特徴的です。これは、下向きの宇宙線ミューオンが LOM のガラスおよびゲルパッドを通過する際、媒質中に生成されたチェレンコフ光は上向き

PMT によって効率的に検出されますが、下向き PMT ではチェレンコフ光の放射角の影響により検出効率が低下することによります。まさに、宇宙線の天頂角分布の非対称性を反映したものになっています。

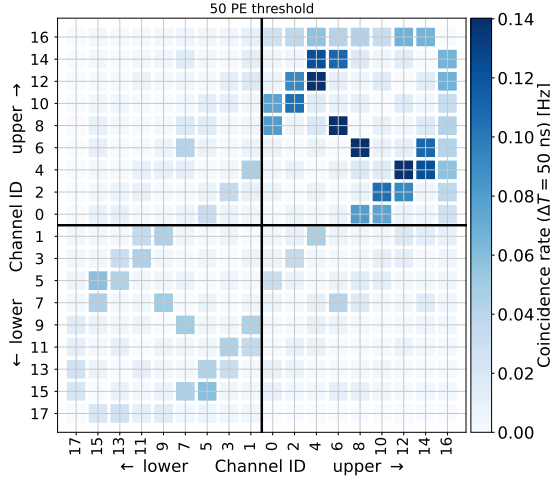


図 13: 各チャンネルに 50 光電子のしきい値を設定した場合の PMT チャンネル間のコインシデンス頻度（時間窓は 50 ns とした場合）。右半分（もしくは上半分）のチャンネルは上半球のチャンネルを表し、左（下）は下半球のチャンネルを表す。同一チャンネル内での自己コインシデンスは除外してある。ダークレート測定と同様、ガラス表面は黒いテープで覆われている。

8 較正の可能性

D-Egg および LOM の両モジュールには、南極氷河に設置した後に検出器の角度を高精度で決定し、氷の物理特性を測定するための較正装置が搭載されています。章 2 で述べたとおり、再凍結された bubble コラムの特性をより正確に記述することは、IceCube における物理解析にとって引き続き重要な課題です。D-Egg および LOM に搭載された LED フラッシャーは、この目的に特化して設計されており、1 つの検出器から LED を発光させ、同一ストリング上の他の PMT によって検出されるようになっています（図 14 参照）[8]。この手法により、bubble コラムの光学的特性（たとえば散乱長）や、bubble コラムのサイズおよびモジュールとの相対位置の測定が可能となります。この研究により得られる成果は非常に大きく、特に角度再構成に大きな影響を及ぼす支配的な系統誤差の一つを低減する可能性があります。どの程度不確かさが改善されるかは、今後取得される較正データの精度に依存しますが、bubble コラムの光学特性に関する理解が進めば、新たな解析のみならず、過

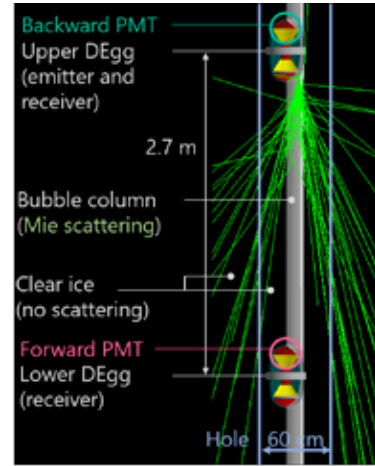


図 14: IceCube-Upgrade における D-Egg ペアを用いた bubble コラム測定手法 [8]。

去 15 年間にわたって蓄積されたデータの再解析にも直接的な恩恵をもたらすと期待されます。

9 IceCube-Upgrade による物理解析

IceCube-Upgrade は、GeV 領域のエネルギーを持つニュートリノの検出能力を大幅に向上することが期待されており、大気ニュートリノ振動を通じて現れる基本的なニュートリノの性質の解明を目指しています。加速器ニュートリノ実験のようなエネルギーや方向が良く理解されたビームとは異なり、IceCube が観測するのはいろいろな方向から地球を通過してやってくるニュートリノの集合です。距離に関しては $0 \sim 2R_{\text{Earth}}$ （地球半径）の範囲に渡り、エネルギーに関しては $10 \text{ GeV} \lesssim E_\nu < 300 \text{ GeV}$ の領域に分布しています。

ν_μ の消失および ν_τ の出現といったニュートリノ振動の特徴を観測することで、IceCube DeepCore の解析ではすでに Δm_{32}^2 および $\sin^2 \theta_{23}$ の測定において、加速器実験と比肩する感度の測定を行ってきました [9]。IceCube-Upgrade により、1 検出器あたりの感度が大幅に向上することで、ニュートリノ質量階層性といった基本的な性質の検証において、世界最先端の感度を達成することが期待されています [10]。

さらに、IceCube-Upgrade は低エネルギー（GeV）ニュートリノ放射源探索の新たなチャンネルを提供します。GeV スケールのニュートリノは、突発天体の中心領域で生成されると考えられていますが、ニュートリノの相互作用が弱いため高密度プラズマを直接透過して脱出して地球に到達することができます。そのため、低輝度ガンマ線バースト（GRB）や新星、重力崩壊型超新星といった天体現象の内部エンジンに関する新たな知見を与える可能性があります。

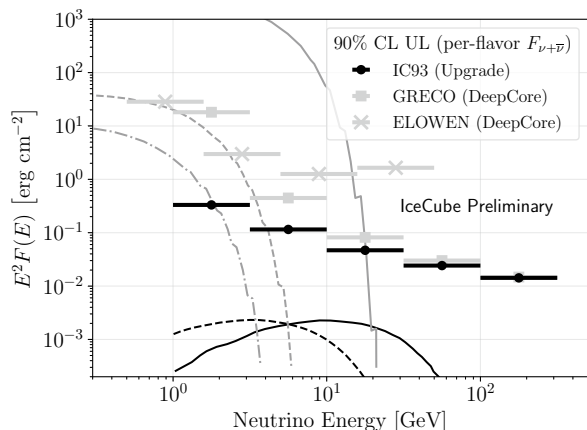


図 15: ニュートリノ突発天体に対する（フレーバーごと、かつ $\nu + \bar{\nu}$ をあわせたもの）検出に要する流量感度をエネルギーごとに示したもの。グレーの X および \square は現在の IceCube における二つの異なるデータセット（事象選別）による性能、黒の \bullet (IC93) は IceCube-Upgrade による性能を示す [11]。1 GeV 領域においては感度が約 1 桁向上している。黒線は 10 Mpc に位置する低輝度 GRB に対する 2 種類のブースト因子を持つプラズマモデル、灰色線は 10 kpc にある重力崩壊型超新星に対する 3 種類の自転速度仮定に基づくモデルを示す。

図 15 に、突発点源の検出感度（検出に必要な流量）をニュートリノエネルギーの関数として示します。IceCube-Upgrade では、現在の IceCube と比較して、GeV のニュートリノに対する感度が 1 桁向上すると見込まれています。

10 展望

IceCube-Upgrade は、ニュートリノ粒子物理および宇宙物理の両面において、極めて高い科学的ポテンシャルを有しています。質量階層性の決定に向けた、既存の国際的取り組みに対する補完的な手法を提供し、特に ν_τ 出現の領域に対して次世代の感度を持ち、GeV スケールのニュートリノ天体物理の探索にも挑戦します。本プロジェクトを支えるのは、最先端のハードウェアに裏付けられた堅牢な設計です。2026 年の南極の冬季に展開孔が再凍結した後、物理データの取得が本格的に開始される予定です。埋設後も、新型光検出器とそこに取り付けられた較正機能のさらなる活用がますます重要となり、要するに、これからが実験として面白いところです。

千葉大学の IceCube グループからも、IceCube-Upgrade への継続的な貢献の一環として、2025/2026 年の展開シーズンに数名のメンバーが再び南極に赴く予定です。活動内容には、先述の SPAT に加え、D-Egg および LOM の展開作業の現地監督作業も含まれています。

IceCube-Upgrade は、2030 年代半ばに設置が計画されている IceCube-Gen2 に向けた新たな光学モジュール設計の実証にもなっています。D-Egg/LOM の開発は、若手人材の育成や産業界との連携構築に貢献しただけでなく、IceCube-Gen1 の展開完了時（約 10 年前）に確立されたプロセスの再検証にもつながりました。米国南極プログラムの運営体制が当時とは異なる現在においても、IceCube-Upgrade の展開と運用の成功は、IceCube コラボレーションが IceCube-Gen2 を実現可能であるという信頼性の証明であり、南極および国際社会における優先度の高い科学課題の柱を支えるものとなります。

References

- [1] A. Cooper-Sarkar, P. Mertsch, and S. Sarkar, “The high energy neutrino cross-section in the Standard Model and its uncertainty”, *Journal of High Energy Physics* **2011**, 42 (2011) 10.1007/jhep08(2011)042.
- [2] A. Achterberg *et al.*, “First year performance of the IceCube neutrino telescope”, *Astroparticle Physics* **26**, 155–173 (2006) 10.1016/j.astropartphys.2006.06.007.
- [3] M. G. Aartsen *et al.*, “The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems”, *Journal of Instrumentation* **12**, 3012 (2017) 10.1088/1748-0221/12/03/p03012.
- [4] D. Chirkin and M. Rongen, “Light diffusion in birefringent polycrystals and the IceCube ice anisotropy”, *PoS ICRC2019*, 854 (2019) 10.22323/1.358.0854.
- [5] R. Abbasi *et al.*, “In-situ estimation of ice crystal properties at the South Pole using LED calibration data from the IceCube Neutrino Observatory”, *The Cryosphere* **18**, 75–102 (2024) 10.5194/tc-18-75-2024.
- [6] R. Abbasi *et al.*, “D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube”, *Journal of Instrumentation* **18**, P04014 (2023) 10.1088/1748-0221/18/04/p04014.
- [7] “IceCube-Gen2 Technical Design Report”, <https://icecube-gen2.wisc.edu/science/publications/tdr/> (2024).
- [8] A. Ishihara and A. Kiriki, “Calibration LEDs in the IceCube Upgrade DEgg modules”, *PoS ICRC2019*, 923 (2019) 10.22323/1.358.0923.
- [9] R. Abbasi *et al.*, “Measurement of Atmospheric Neutrino Oscillation Parameters Using Convolutional Neural Networks with 9.3 Years of Data in IceCube DeepCore”, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 091801 (2025) 10.1103/PhysRevLett.134.091801.
- [10] P. Eller *et al.*, “Sensitivity of the IceCube Upgrade to Atmospheric Neutrino Oscillations”, *PoS ICRC2023*, 1036 (2023) 10.22323/1.444.1036.
- [11] Y. Kobayashi *et al.*, “Prospects for GeV Neutrino Transient Searches with the IceCube Upgrade”, *PoS ICRC2025*, 1076 (2025) 10.48550/arXiv.2507.16050.