

千葉大学大学院融合理工学府 修士論文

IceCube-Upgrade 実験に用いられる新型光検出器 D-Egg の
クロック同期精度の評価

先進理化学専攻 物理学コース

21WM2101

庭野 倅成

2023年3月1日

概要

IceCube 実験では、南極深氷河中の 5160 個の光検出器で宇宙ニュートリノの観測を行なっている。個々の検出器の光量や検出時刻の情報からニュートリノの到来方向を 0.5 度から 1 度の精度で推定しニュートリノ放射天体を発見するためには、検出器には O [ns] での時間精度が要求される。現在、これまでよりも低エネルギーのニュートリノ事象や氷河中での光伝搬特性の理解のために IceCube-Upgrade が進行中であり、千葉大学で開発、製造を行なった新型光検出器 D-Egg 300 個の性能評価試験を進めている。本研究では実際の IceCube で用いられている時刻同期の手法 RAPCal (The Reciprocal Active Pulsing Calibration) を用いて D-Egg の時刻同期精度の測定・解析を行なった。RAPCal は基準となる時計と検出器との間でパルス波を相互に送り合い、それぞれの送受信の時刻から検出器の時計を同期する手法である。研究室における性能評価試験において、時刻同期の際に基準となる時計と D-Egg との間で送受信されるパルス波のフィッティングを改善し受信時刻の精度を上げることで、時計の進み方のずれ (clock drift) やシグナルのケーブル輸送時間 (cable delay) をより正確に求めることができることがわかった。本論文では RAPCal におけるパルス波のフィッティングと研究室における性能評価試験の結果から D-Egg の時刻同期の精度についての議論を行う。

目次

第1章 ニュートリノ天文学	1
1.1 高エネルギー宇宙線	1
1.2 IceCube	3
1.2.1 DeepCore	3
1.2.2 IceTop	3
1.2.3 ICL	3
1.3 IceCube Upgrade	5
第2章 検出器	7
2.1 検出原理	7
2.1.1 チェレンコフ光	7
2.1.2 光電子増倍管	8
2.2 DOM	8
2.3 D-Egg	10
2.3.1 8 インチ PMT	11
2.3.2 HV board	11
2.3.3 Main Board	12
2.3.4 ICM	12
第3章 FAT	13
3.1 目的	13
3.2 セッティング	13
3.2.1 冷凍庫	13
3.2.2 MFH	13
3.2.3 測定項目	15
第4章 RAPCal	17
4.1 時刻同期の目的	17
4.2 時刻同期の手法	17
4.2.1 fine delay correction	19
4.2.2 clock drift	19
4.2.3 cable delay	20
4.3 FAT のセットアップでの RAPCal	21

4.3.1	フィッティング	21
4.3.2	結果	22
4.3.3	考察	25
第 5 章	D-Egg の時刻同期精度測定	27
5.1	測定の目的	27
5.2	セッティング	27
5.3	測定方法	27
5.3.1	事象選別	28
5.3.2	データマッチング	29
5.4	結果	30
5.5	考察	34
5.5.1	課題	34
第 6 章	結論	35

第1章

ニュートリノ天文学

可視光による観測に始まり、天文学は技術の進歩とともに観測できる電磁波の領域を広げることによって発展してきた。そして今現在、宇宙観測の手段としてニュートリノが注目されている。この章ではニュートリノによる観測の意義とニュートリノ観測実験 IceCube について説明する。

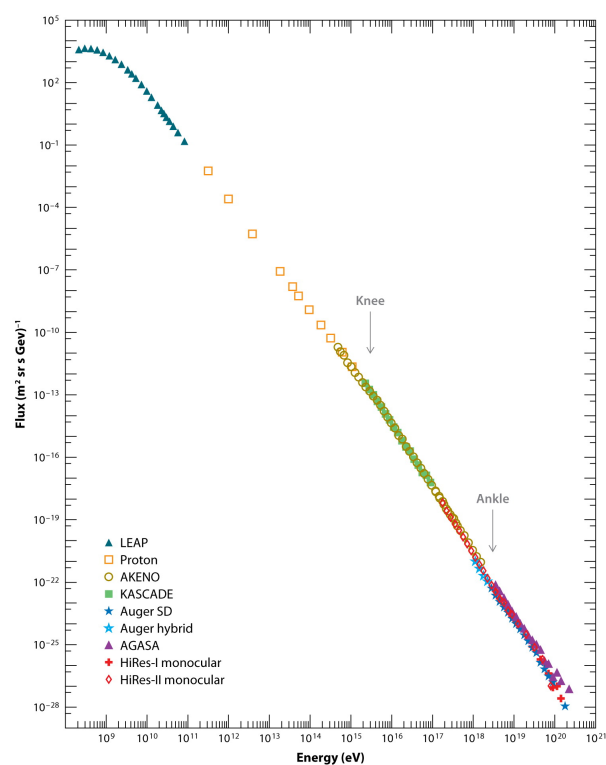
1.1 高エネルギー宇宙線

地球に降り注ぐ宇宙線のうち宇宙で加速された粒子そのものを一次宇宙線、一次宇宙線が地球まで到達する間に星間物質（主に水素）と衝突して生成されるものを二次宇宙線と呼ぶ [1]。宇宙線には陽子から鉄以上の重い原子核まで含まれているが電子、陽電子に加えて、電荷を持たない光子やニュートリノが含まれている。

これらの宇宙線のうち、ニュートリノ以外は地球の大気による影響を受けるために、地上での観測による正確な識別は難しい。そのために衛星や気球などの飛翔体を用いた観測が必要となる。また図 1.1 に示すように、高エネルギーになるにつれて宇宙線フラックスは冪乗で減少する。 10^{15} eV で傾きが変わっている点を”knee”と呼び、さらに 10^{18} eV の高エネルギー領域で傾きが変わる点を”ankle”と呼ぶ。knee では宇宙線フラックスは1年間に 1 m^2 あたり約 1 個程度であるが、ankle ではさらに減少して1年間に 1 km^2 あたり約 1 個程度となる。つまり高エネルギー宇宙線を観測するためには巨大な検出器が必要となるために、 10^{15} eV の領域においては飛翔体による観測は困難となる。

knee や ankle の起源を含めて、高エネルギー宇宙線の起源や加速機構についてはまだ未解明な部分が多い。その理由として粒子の種類ごとの正確なエネルギースペクトルの観測が困難であることに加えて、荷電粒子は宇宙空間の磁場によって進行方向が曲げられてしまうため、その到来方向から加速源を同定することが難しいことが挙げられる。一方で電荷を持たない光子は密度の大きい物質を透過することができない。

そこでニュートリノによる観測が注目されている。ニュートリノは電氣的に中性であるために宇宙空間の磁場によって曲げられることはない。また弱い相互作用しか持たないために星の中心部や遠方の宇宙の情報を損失することなく地球まで運ぶことができる。



Beatty JJ, Westerhoff S. 2009.
 Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 59:319–45

図 1.1: 様々な実験によって観測された宇宙線フラックスのエネルギースペクトル [2]。高エネルギーになるにつれて宇宙線はエネルギーの冪乗で減少する。またその勾配の変化する点を”knee”、”ankle”と呼ぶ。

1.2 IceCube

IceCube 観測施設は南極氷河を利用した世界最大のニュートリノ観測施設で、アムンゼン・スコット基地内に建てられている [3]。2004 年から建設が始まり、2005 年からは部分的な観測が開始された。2011 年に完成しフル稼働での観測が始まった。図 1.2 に示すように 5160 個の Digital Optical Module (DOM) が南極氷河中 1450 m から 2450 m まで設置されている。86 本の縦方向のストリングのうち 78 本は 1 本のストリングにつき 60 個の DOM が上下の間隔 17 m で設置されている。またストリングは六角形の形に設置されており、ストリング同士の間隔は 125 m である。IceCube の検出体積は 1 km^3 になり、 $O(\text{TeV})\text{--}O(\text{PeV})$ の高エネルギーニュートリノを検出することができる。

1.2.1 DeepCore

DeepCore は 8 本のストリングからなり、南極氷河中に深さ 2100 m から 2450 m の間に、垂直方向に 7 m 間隔、ストリング間の距離が平均 72 m と通常よりも密に DOM を設置している。DeepCore は 10 GeV から 100 GeV 比較的エネルギーの低いニュートリノの検出に適している。

1.2.2 IceTop

IceCube 観測施設上に 162 台の氷のタンクが均等に配置され、それぞれのタンクには DOM が 2 台ずつ設置されている [4]。これは IceTop と呼ばれ、高エネルギー宇宙線による空気シャワーを観測している。空気シャワーは宇宙ニュートリノ観測において背景事象として扱われるため、氷河中の DOM と同時に観測することで取り除くことが可能である。

1.2.3 ICL

The IceCube Laboratory (ICL) は IceCube の氷上に設置されたデータ収集基地である。全ての DOM はケーブルを介して ICL と接続されており、電力の供給やデータの抽出を行う。

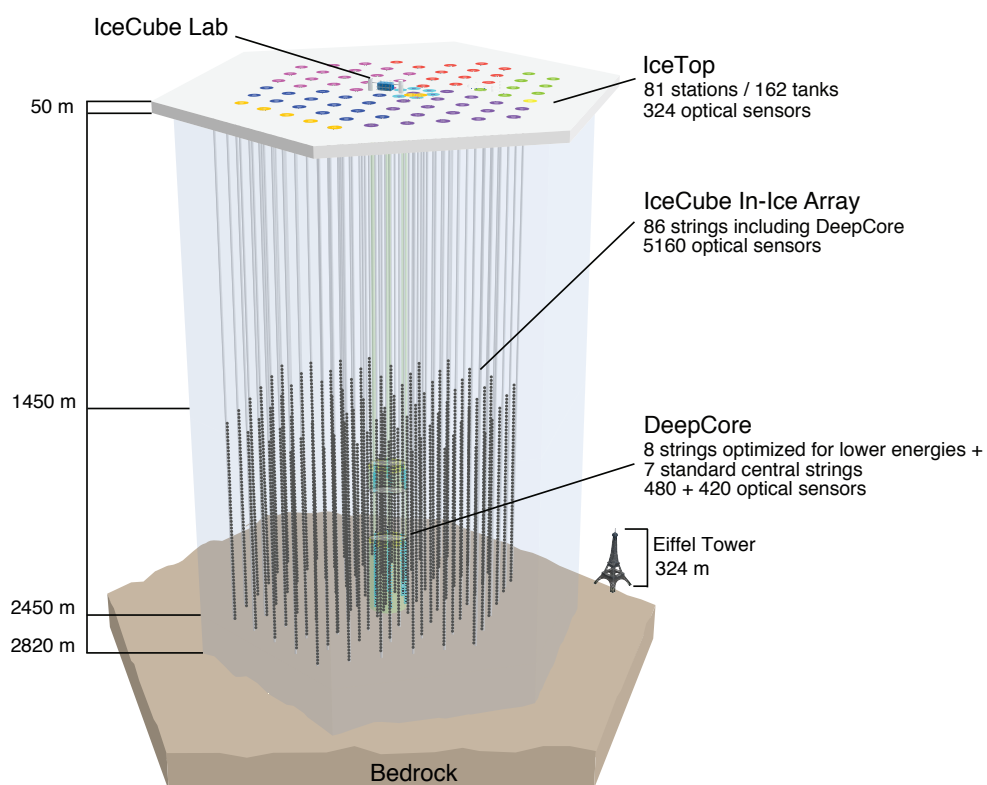


図 1.2: 現行の IceCube の模式図 [3]。南極氷河中の 1450 m から 2450 m の深さに DOM が 5160 個設置されている。また地表にはデータ収集基地である ICL と IceTop が設置されている。

1.3 IceCube Upgrade

IceCube-Upgrade は IceCube の拡張計画である。図 1.3 に示すように、IceCube Upgrade では 7 本のストリングを DeepCore 付近に追加する。IceCube Upgrade で埋設される新型光検出器は約 700 台であり、南極氷河の深さ 2150 m から 2450 m に、垂直方向に 3 m、水平方向に 20 m の間隔で埋設される [5]。IceCube-Upgrade ではこれまでよりも低エネルギーのニュートリノ事象や南極氷河の光伝搬特性の理解意が進むことが期待される。

IceCube-Upgrade では 2 種類の新型光検出器、Multi PMT Digital Optical Module (mDOM) と Dual optical sensors in an Ellipsoid Glass for Gen2 (D-Egg) が埋設される。D-Egg は千葉大学で開発、製造された。

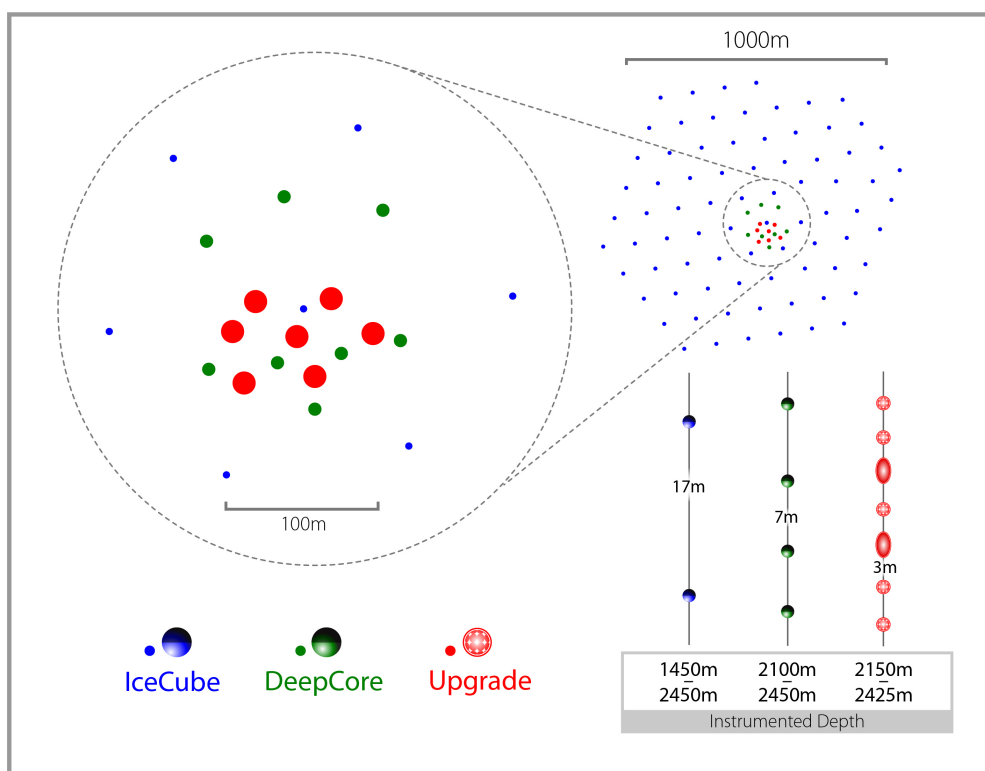


図 1.3: IceCube Upgrade の配置図。現行の IceCube を青、DeepCore を緑、IceCube-Upgrade を赤で示した。IceCube-Upgrade では新型光検出機がこれまでよりも密に設置される。

第 2 章

検出器

この章では IceCube の光検出器 DOM と IceCube-Upgrade で新しく埋設される D-Egg について説明する。

2.1 検出原理

ニュートリノは電氣的に中性で弱い力のみで相互作用を起こすため、直接検出することはできない。そのためニュートリノは元素中の核子や電子との弱い相互作用によって生成された二次粒子を観測することによって間接的に検出することができる。ニュートリノの種類は3つあり、電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ である。

ニュートリノと核子との相互作用には以下の2種類がある。

1. 核子と相互作用してニュートリノはそのまま飛び去り、観測可能な終状態として核子、または核子と中間子群の状態になる中性カレント相互作用 (NC)

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X \quad (2.1)$$

2. ある種のニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ) と核子が相互作用して対応する荷電レプトン、電子、ミューオン、タウが生成され、元の核子とは別の核子、あるいは核子と中間子群の終状態になる荷電カレント相互作用 (CC)

$$\nu_l + N \rightarrow l^\pm + X \quad (2.2)$$

ここで N は核子、 X はハドロン、 l は荷電レプトンを表している。

2.1.1 チェレンコフ光

上記の2つの過程によって生成された荷電粒子が南極氷河中で媒質中の光速 c/n を越える速度 v で運動した時に光を放射する。この光をチェレンコフ光と呼ぶ。単位長さ x あたりに放射される波長 λ の光子数 N_γ は Frank-Tamm の公式により、次の式で表される。

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \quad (2.3)$$

上式で α は微細構造定数、 $n(\lambda)$ は媒質の屈折率、 $\beta = \frac{v}{c}$ である。南極氷河において屈折率は $n \approx 1.33$ である。また荷電粒子の進行方向に対して、チェレンコフ光は放射角 θ で円錐状に広がる。

$$\cos \theta = \frac{1}{n(\lambda)\beta} \quad (2.4)$$

これらの式からチェレンコフ光の光量と放射角を求め、ニュートリノのエネルギーと到来方向を推定する。

2.1.2 光電子増倍管

光電子増倍管 (PMT) は光電効果によって放出された電子を増幅することによって取り出すことのできる光センサである。一般的にガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面 (陰極)、電子増倍部 (ダイノード)、陽極 (アノード) から構成される。その構造を図 2.1 に示す。

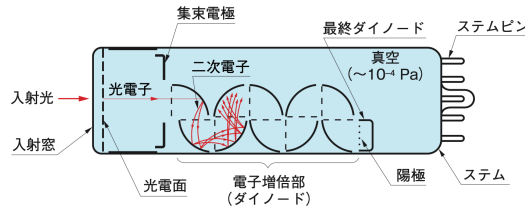


図 2.1: PMT の構造図 [6]

入射窓から入射した光は光電面内の電子を励起し、光電子増倍管内部の真空中に光電子を放出する。放出された光電子は収束電極により収束され第 1 ダイノードに衝突し 2 次電子を放出する。2 次電子がそれ以降のダイノードと衝突し増倍を繰り返すことで、最終ダイノードからは放出された 2 次電子は 10^6 倍~ 10^7 倍となりアノードから取り出される。

2.2 DOM

DOM は IceCube で稼働している光検出器である。図 2.2 に示すように DOM は球形の光検出器であり、直径約 30 センチの耐圧ガラスの中に下向きに 10 インチ PMT、データ収集基板 (Main Board)、PMT に高電圧をかけるための高電圧供給基板 (HV Board)、校正用の LED などが搭載されている。またケーブルを介して ICL から電力が供給されるとともに取得したデータを ICL に送信する。また DOM は設置された後 10 年以上もの間、0.5% 以下という低い故障率で稼働している。

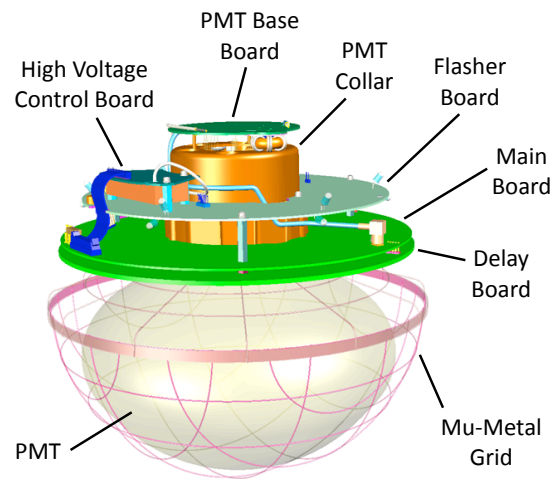


図 2.2: 光検出器 DOM の外観図。下向きに 10 インチの PMT を搭載している。また表面には磁気シールドのためのミューメタルグリッドが貼られている。そのほかに Main Board、PMT に高電圧をかけるための HV Board、校正用の LED などが搭載されている。またケーブルを介して ICL から電力が供給されるとともに取得したデータを ICL に送信する。

2.3 D-Egg

D-Egg は千葉大学で開発, 製造された IceCube-Upgrade で新たに設置される新型光検出器である。図 2.3 に D-Egg の写真とその内部構造を示す。D-Egg は 8 インチの PMT を 2 つ搭載しており、上下に向いて配置されている。DOM は下側に 1 つだけ PMT を搭載していたのに対し、上下に PMT があることで上からの信号にも感度があるため検出効率が向上している。PMT のネック部分には磁気シールドが取り付けられる。PMT 1 台につき 1 枚の高電圧供給基板 (HV board) が取り付けられ、上下の PMT にそれぞれ適切な別の電圧をかけることができる。また PMT は光学シリコンによって耐圧ガラスに直接固定されている。耐圧ガラスは半球の形になっており、D-Egg の内部を窒素充填し半気圧まで下げることで大気圧で上下の耐圧ガラスは強く密着する。さらに D-Egg 中央にハーネスを巻くことで上下の耐圧ガラスを固定する。ハーネスからはワイヤーが伸びており、これによって D-Egg はストリングに固定される。2 つの PMT は HV board を介して D-Egg 中央のデータ収集基板 (Main board) に接続される。Main board ではデータの収集や D-Egg の制御を行う。また D-Egg の下側の側面から伸びているペネトレーターケーブルを通して ICL と通信する。

また D-Egg の下側には 3 台のカメラを搭載したカメラリングと下方向に 4 台、横方向に 8 台の LED を搭載したフラッシャーリングが設置されている。LED を発光させ、それを周囲の D-Egg で検出することで埋設後の D-Egg の向きの確認や、南極氷河の光の伝搬特性の調査が行われる。

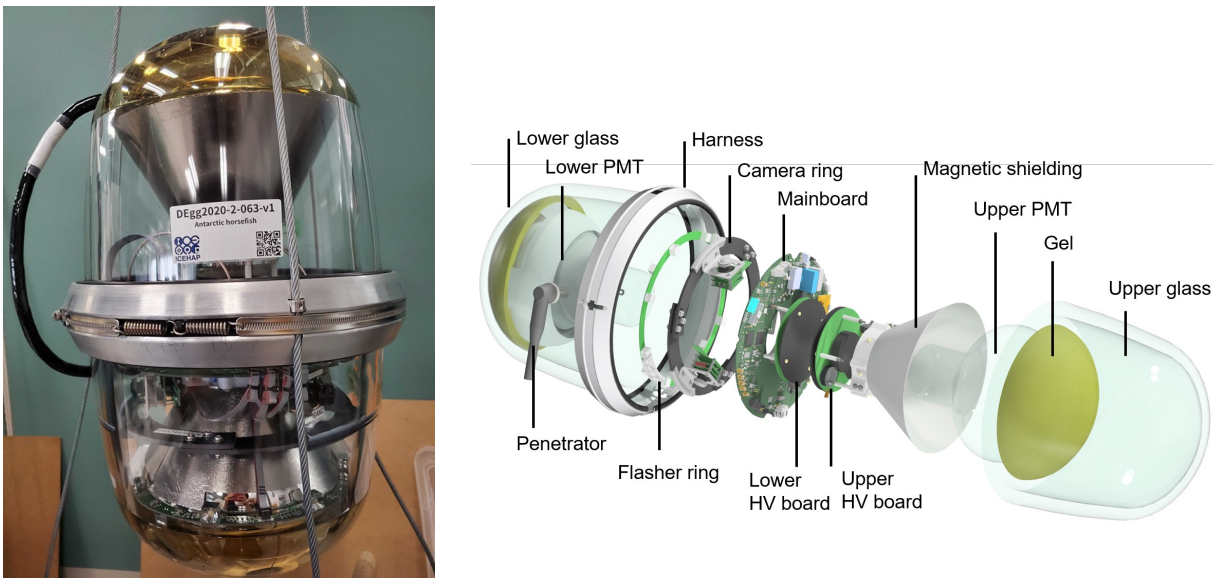


図 2.3: D-Egg の写真 (左図) とその内部構造 (右図)。D-Egg は 8 インチの PMT を上下に搭載し、耐圧ガラスに覆われた卵型をしている。2 つの PMT はそれぞれ別の HV Board に接続され高電圧がかけられている。また 2 つの HV Board は Main Board に接続されている。そのほかにも光学ゲル、磁気シールド、LED を搭載したフラッシャーリング、カメラリングが搭載されている。

2.3.1 8インチ PMT

D-Egg に搭載される 8 インチ PMT を図 2.4 に示す。これは浜松ホトニクス製の 8 インチ PMT (R5912-100-70) で 1 つの D-Egg に 2 つの PMT が上下に搭載される。1 つの D-Egg に搭載される PMT の組み合わせは、2 つの PMT の高さの和が均等になるように決定された。



図 2.4: D-Egg に搭載される 8 インチ PMT(浜松ホトニクス製、R5912-100)

2.3.2 HV board

D-Egg に搭載される HV board を図に示す。HV board は PMT と Main Board の間に接続され、PMT に高電圧をかけるとともに各ダイノードに電圧を分配する。HV board は 1 つの D-Egg に対して 2 枚搭載され、上下の PMT に適切な別の電圧をかけることができる。

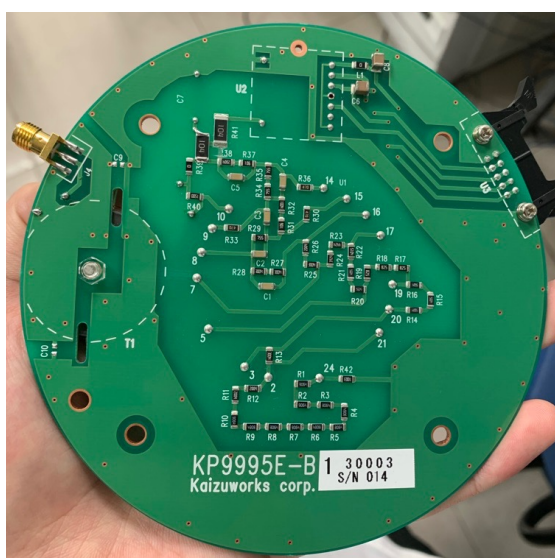


図 2.5: D-Egg に搭載される HV board。1 台の PMT につき 1 枚の HV Board が取り付けられ、それぞれの PMT に対して適切な電圧を引火する。

2.3.3 Main Board

図2.6に示したものはD-Eggに搭載されるMain Boardで、D-Eggの制御やデータ処理を行う基板である。円形の基盤の中心部に穴の空いたドーナツ型をしており内径86 mm、外径は246 mmである。D-Eggに搭載される際、中心の穴にはPMTのネック部分がくる。基板上にはAnalog-to-Digital Converter (ADC)、Field Programmable gate Array (FPGA)、Micro Controller Unit (MCU)が搭載される。温度計、気圧計、加速器計などのセンサも搭載されており、南極埋設後もD-Eggの内部環境を測定することができる。



図2.6: D-EggのMain Board。右側にICMが搭載されている。ICMは60 MHzのクロックを搭載しておりICLとのコミュニケーションを行う。

2.3.4 ICM

IceCube Communication Module (ICM)はD-EggのMain Board上に搭載された小基板である(2.6右側)。データの送受信などICLとのコミュニケーションを行う。本研究ではICLの60 MHzのクロックを用いてマスタークロックとの時刻同期を行った。またICMはICLの装置からfirmwareの更新ができる。同様にICMを通じてFPGAのfirmwareの更新を行うこともできる。

第3章

FAT

Final Acceptance Test (FAT) は D-Egg を南極へ出荷する前の最終性能評価試験である。本研究の D-Egg のクロック同期精度は FAT の試験項目の一つである。この章では FAT について説明する。

3.1 目的

IceCube の検出器は南極氷河中に埋設されることから、一度設置した後に取り出すことは不可能である。そのため設置される前に性能を評価し、基準を満たしたもののみを南極へ送る必要がある。FAT では3週間かけて様々な温度環境下での D-Egg の性能を測定し、D-Egg の信頼性と性能を評価する。FAT は D-Egg 300 個全てに行なわれる。

3.2 セッティング

3.2.1 冷凍庫

図 3.1 に示したものが FAT で使用する冷凍庫の内部である。冷凍庫の内部には 16 個の暗箱が設置されており、暗箱に D-Egg を設置して種々の測定を行う。暗箱の上面、下面の中心部には光ファイバーが接続されており、暗箱内部に設置された D-Egg に対してレーザーを用いた測定を行うことができる。一度に 16 個の D-Egg を -40°C の低温環境下で測定することができる。そのうちの 1 個をリファレンス用にし、異なる D-Egg のセットの測定でも測定の安定性を確認することができる。

3.2.2 MFH

図 3.2 に示したものが mini-FieldHub (MFH) である。MFH は D-Egg とのコミュニケーションを取る際に使用される。MFH は PC と D-Egg の間に接続され、PC と D-Egg を仲介する役割を果たしている。PC から MFH を介して D-Egg に指令を送ることで、D-Egg 内の 2 つの PMT の印加電圧を変化させたり、D-Egg 内の構成装置を作動させたり、D-Egg の情報を取得することができる。

図 3.3 にセッティングのダイアグラムを示す。FAT では 3 つの MFH を使用する。MFH は ICM を 2 つ搭載している。1 つの ICM あたり 4 つの D-Egg が接続されている。FAT では 2 つの MFH を使用し、冷凍庫内の 16 台の D-Egg とのコミュニケーションをとっている。さらに 1 つの MFH が単体の Main Board (Tabletop Mainboard) に接続されている。これは時刻同期の精度を測定する Transit



図 3.1: 冷凍庫の内部 (左図) と暗箱内部 (右図)。左図のように冷凍庫内部には暗箱が 16 箱設置されており、同時に 16 個の D-Egg を低温で測定することができる。冷凍庫の天井付近には D-Egg と MFH を接続するためのケーブルと光ファイバーが張り巡らされており、それぞれの暗箱まで伸びている。右図には暗箱内部に設置された D-Egg を示す。暗箱の上面と下面には光ファイバーが取り付けられており、光源を用いた測定を行うことができる。

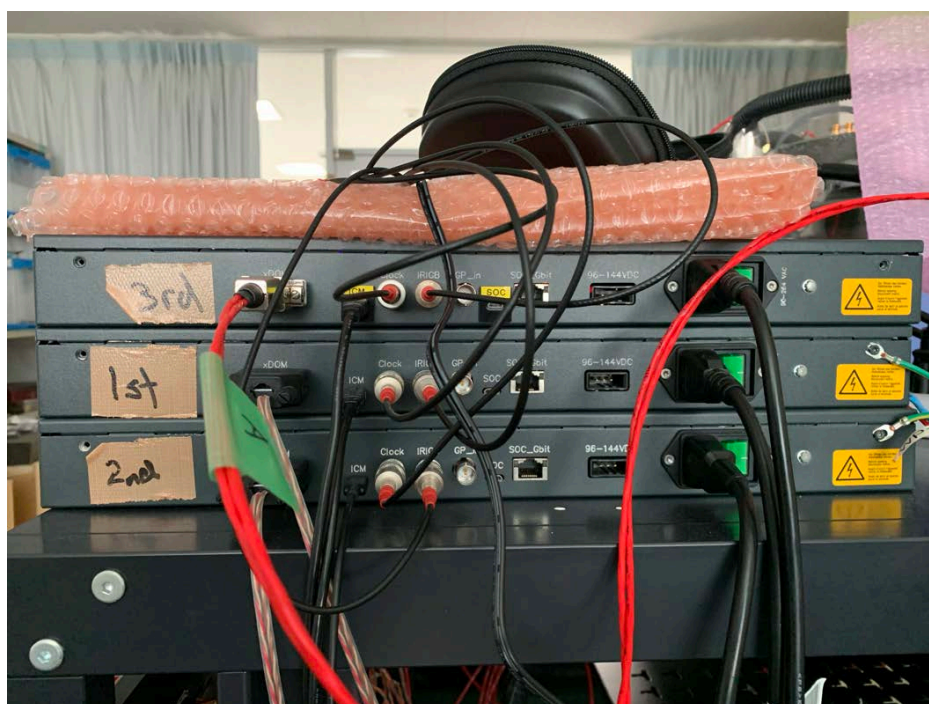


図 3.2: FAT に使用される 3 台の mini-FieldHub。1st、2nd と書かれたものは冷凍庫内の D-Egg と接続されている。3rd は Tabletop Mainboard に接続されている。

Time Spread Measurement (TTS Measurement) に使用される。Tabletop Mainboard はレーザーのシンクアウトからレーザーと同期した信号を受け取り、レーザーを打った時刻を記録する。詳細は5章で説明する。

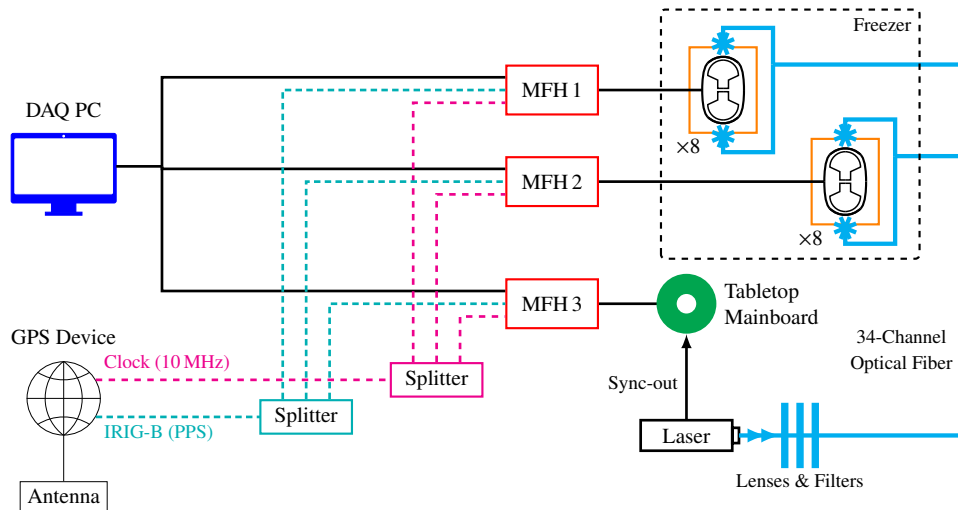


図 3.3: FAT のセッティングのダイアグラム [7]。3つのMFHのうち2つが16台のD-Eggと接続され、1つはTabletop Mainboardと接続されている。データ収集用のPCはMFHを介してD-Eggとコミュニケーションを行う。またMFHはGPSから時刻の情報を受け取り、世界標準時刻とのオフセットを記録している。レーザーはフィルターで強度を調整し、スプリッターで冷凍庫内の16台のD-Eggの上面と下面に照射される。Tabletop Mainboardにはシンクアウトから同期信号を送り、レーザーを打った時刻を記録する。

3.2.3 測定項目

測定項目には以下のものがある [7]。

1. Gain Calibration

D-Eggでは上下の2つPMTに対して別の電圧をかけることができる。本測定ではそれぞれのPMTのGainを 10^7 倍にするために適切な電圧を求める。

2. Dark Noise

D-Eggは外部から光が入射しなくてもシグナルを検出する。これをDark Noiseと呼ぶ。このDark Noiseの割合をDark Rateと呼び、Dark Rateを各PMTごとに測定する。

3. Linearity

PMTは入射光量が小さい時は出力電流との直線性が良いが、光量が大きくなるにつれて出力電流が飽和する。入射するレーザーの光量を変化させながら飽和特性について測定する。

4. TTS

PMTの光電面から電子が放出されてから信号として取り出されるまでの時間をTransit Timeと呼び、その標準偏差をTransit Time Spread (TTS)と呼ぶ。微弱な光量 (Single photon electron level: SPE レベル) に対する時間分解能を調べるために、TTSを測定する。

5. Double Peak Faecture

短い時間間隔で入射するパルスに対するD-Eggの時間分解能を測定する。

その他にもセンサ類、カメラやLEDなどの較正用装置の試験を行う。

3週間のFATの中で、本研究のテーマでもある時刻同期精度に関する測定TTSは -40°C で2回、 -20°C で1回の計3回行われる。

第 4 章

RAPCal

Reciprocal Active Pulsing Calibration (RAPCal) は現行の IceCube 実験で用いられている個々の検出器のクロックを同期する手法である。この章では RAPCal の原理と実験室における測定の結果について詳しく説明をする。

4.1 時刻同期の目的

IceCube では約 5000 台の光検出器でニュートリノ信号を観測している。DOM は一台の PMT とクロックを搭載し、チェレンコフ光を捉える。個々の光検出器で観測された、光量や観測時刻のデータからニュートリノの到来方向やエネルギーを推定する。特にニュートリノの到来方向を推定する上で時刻の情報は重要である。ニュートリノの到来方向を 0.5 度から 1 度の精度で推定しニュートリノ放射天体を発見するためには、検出器には O [ns] での時間精度が要求されるため、個々の検出器のクロックを高い精度で同期する必要がある。

4.2 時刻同期の手法

IceCube では Reciprocal Active Pulsing Calibration (RAPCal) を用いて、個々の DOM のクロックでのヒット時刻を氷上の ICL の基準となるクロック（マスタークロック）での時刻に変換している。これによって約 5000 台の DOM 上で独立に動いているクロックを O [ns] での精度で同期している。マスタークロックでの時刻は GPS を用いて世界標準時刻に変換される。

RAPCal ではマスタークロックと DOM との間で相互にパルスを送り合い、それぞれのクロックでの送信時刻、受信時刻をもとに時刻を同期する。そのアルゴリズムを図 4.1 に示す [3]。まずマスタークロックから DOM へケーブルを通して、双極性のパルスを送る。DOM はパルスを受け取ると同じ形のパルスをマスタークロックに送り返す。この一連の流れで 4 つのタイムスタンプ、 $T_{\text{tx}}^{\text{DOR}}$, $T_{\text{rx}}^{\text{DOM}}$, $T_{\text{tx}}^{\text{DOM}}$, $T_{\text{rx}}^{\text{DOR}}$ が記録される。パルスの送信時刻 T_{tx} 、受信時刻 T_{rx} はマスタークロック、DOM のそれぞれのクロックをもとに記録される。パルスの送受信において往路と復路で同じケーブルを通るため、ケーブル中を信号が輸送される時間は往路と復路で等しい。マスタークロックと DOM を繋ぐケーブルの長さや信号の伝搬特性に関わらず、独立して動いている個々の DOM のクロックでの時刻をマスタークロックでの時刻に変換し、さらには世界標準時刻に変換することができる。

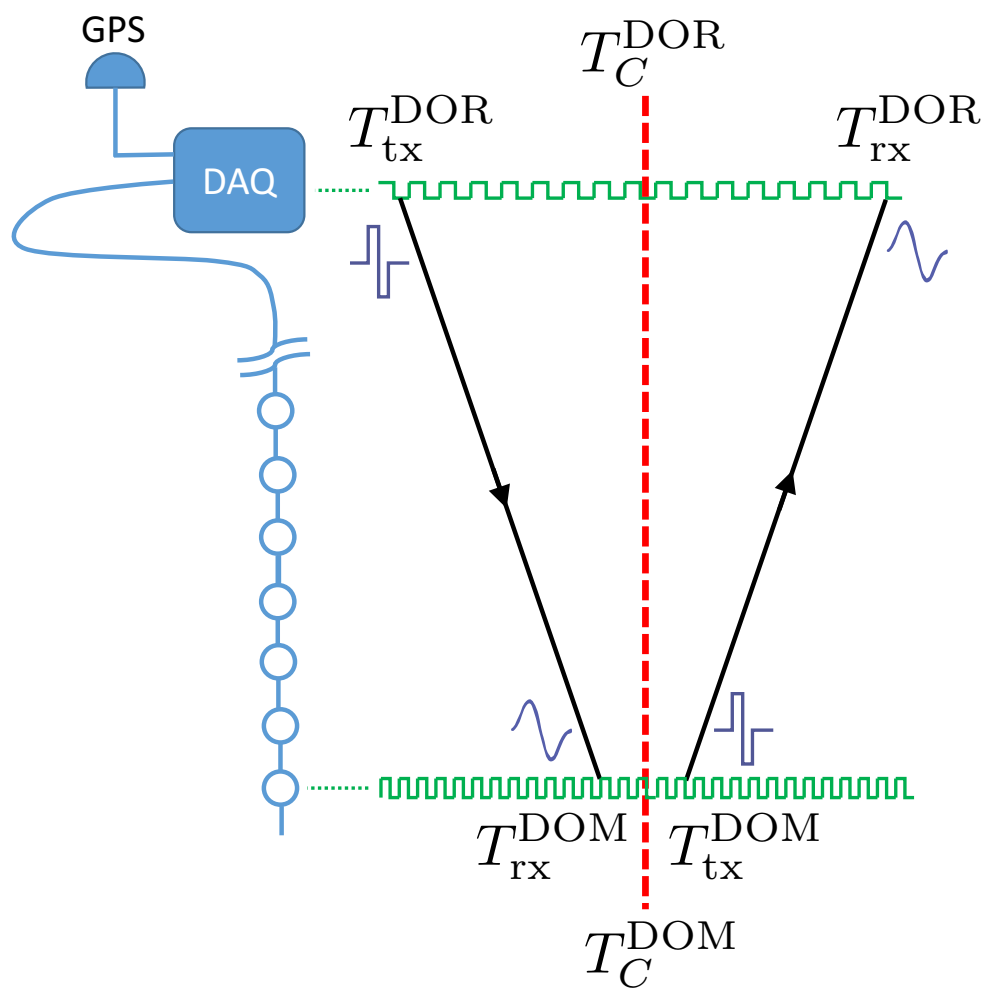


図 4.1: RAPCal のアルゴリズム [3]。黒の線はケーブルを使ったパルス波のやりとりを表す。 $T_{\text{tx}}^{\text{DOR}}$ 、 $T_{\text{rx}}^{\text{DOR}}$ はマスタークロックでの送受信時刻、 $T_{\text{rx}}^{\text{DOM}}$ 、 $T_{\text{tx}}^{\text{DOM}}$ は DOM での送受信時刻を表す。それぞれのクロックでの送受信時刻の中間地点 T_C で 2 つのクロックを合わせる。

4.2.1 fine delay correction

信号の受信時刻 T_{rx} は ICM でトリガーがかかった時刻であり、実際の信号の受信時刻 \tilde{T}_{rx} からは数クロックのディレイがある。このディレイを fine delay、補正を fine delay correction と呼ぶ。パルス波が来る直前の数点からベースラインを計算し、パルスの電圧がベースラインに対して正から負に向かう点に直線を内挿し、ベースラインとの交点を求めることによって fine delay を計算する (図 4.2)[3]。求めた fine delay をトリガー時刻 T_{rx} から引くことにより実際の信号の受信時刻 \tilde{T}_{rx} を求める。またこの補正によってサンプリングレート以上の精度でパルスの受信時刻を求めることができる。

$$\tilde{T}_{rx} = T_{rx} - f \quad (4.1)$$

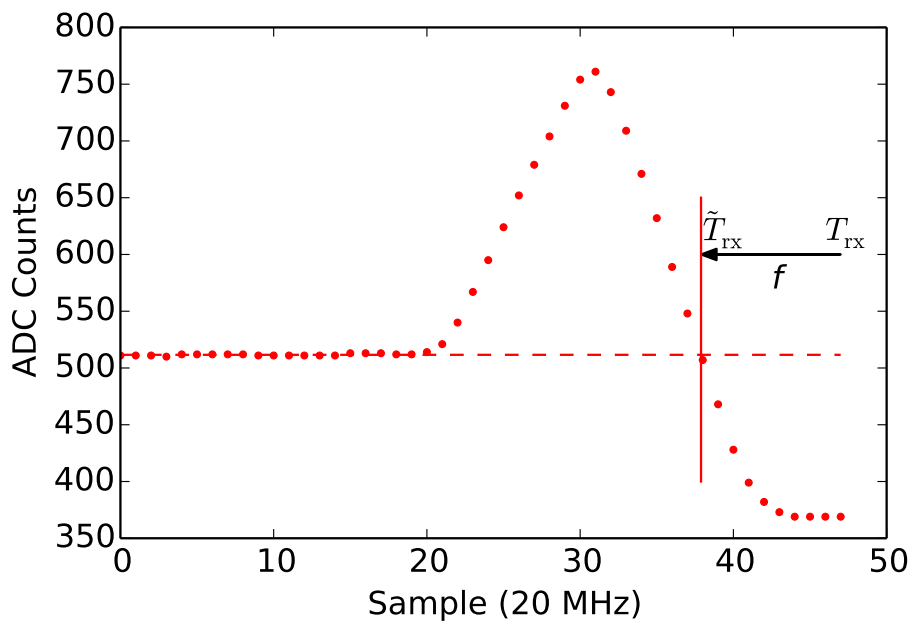


図 4.2: RAPCal のパルス波形 [3]。赤い点は波形を 20MHz の ADC でサンプリングしたもので赤い波線がベースラインを表す。時刻 T_{rx} にトリガーがかかり波形を取得する。ベースラインと波形の交点を直線を内挿することによって定め、実際の信号の受信時刻 \tilde{T}_{rx} を求める。

4.2.2 clock drift

fine delay correction によって補正された \tilde{T}_{rx} を使いマスタークロックと DOM、それぞれのクロックでの送信時刻 T_{tx} と受信時刻 T_{rx} の中間地点 T_C を以下の式で計算する (図 4.1)[3]。

$$T_C = \frac{T_{tx} + \tilde{T}_{rx}}{2} \quad (4.2)$$

またそれぞれの系で計算された T_C でマスタークロックと DOM のクロックの時刻を合わせる。

RAPCal は繰り返しパルスの送受信を行う。前後の RAPCal の結果を使い 2 点で時刻を合わせ、以下の式でマスタークロックと DOM のクロックの進み方のずれ (clock drift、 $1 + \varepsilon$) を求める。

$$1 + \varepsilon = \frac{T_{C,2}^{\text{DOR}} - T_{C,1}^{\text{DOR}}}{T_{C,2}^{\text{DOM}} - T_{C,1}^{\text{DOM}}} \quad (4.3)$$

上式で求めた clock drift を使い、DOM のクロックでの時刻 t を以下の式で世界標準時刻 $UTC(t)$ に変換する。

$$UTC(t) = (1 + \epsilon)(t - T_C^{\text{DOM}}) + T_C^{\text{DOR}} + \Delta. \quad (4.4)$$

Δ はマスタークロックと世界標準時刻との間のオフセットであり、これを加えることで DOM のクロックを世界標準時刻に変換することができる。

4.2.3 cable delay

clock drift を使い RAPCal のパルス波のケーブル輸送時間 (cable delay) を以下の式で求める。

$$T_{\text{cable}} = \frac{1}{2} \left((T_{\text{rx}}^{\text{DOR}} - T_{\text{tx}}^{\text{DOR}}) - (1 + \epsilon)(T_{\text{rx}}^{\text{DOM}} - T_{\text{tx}}^{\text{DOM}}) \right). \quad (4.5)$$

cable delay を確認することによって、RAPCal の安定性や再現性をモニターすることができる。

図 4.3 はある 1 つの DOM の cable delay のヒストグラムである。標準偏差は 0.6 [ns] であり、平均から 10 [ns] 以上離れたデータは破棄されている。

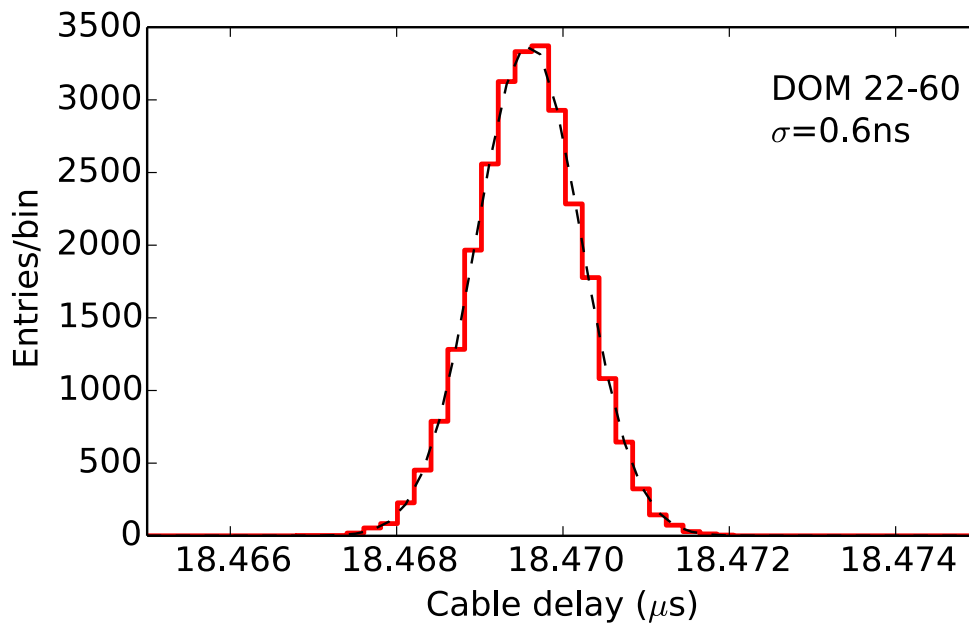


図 4.3: DOM 22-60 の cable delay [3]。赤線で示したものが cable delay の分布で波線で示したものがガウシアンでのフィットである。この分布の標準偏差は 0.6 ns である。

4.3 FAT のセットアップでの RAPCal

FAT のセットアップを用いて D-Egg に対して RAPCal のパルスの送受信を 1000 回行い、clock drift と cable delay を求めた。MFH から送信したパルス波を D-Egg で読み取ったものを図 4.4 に示す。図 4.4 では最初の 20 点の平均を取り、全体から引くことでベースラインを 0 に合わせている。ICM のクロックは 60 MHz なので 1 クロックあたり 16 ns である。時刻同期の精度として O [ns] の分解能を得るためにはサンプリングよりも細かい精度で時刻同期をする必要がある。図 4.2 で示したものと比較するとパルス波の波形の変化が急峻になっている。IceCube ではマスタークロックと個々の DOM を繋ぐケーブルの長さは 1500 m から 3000 m 程度あるため、パルスが長距離を伝送される間に波形がなまると考えられる。これに対し FAT のセットアップでは MFH と D-Egg を 8 m のケーブルで接続しているため、波形がより急激に変化する。現在、FAT が行われているが、その中の検査項目の一つである TTS measurement では 1 次関数によるフィットを用いて時刻同期を行なっている。

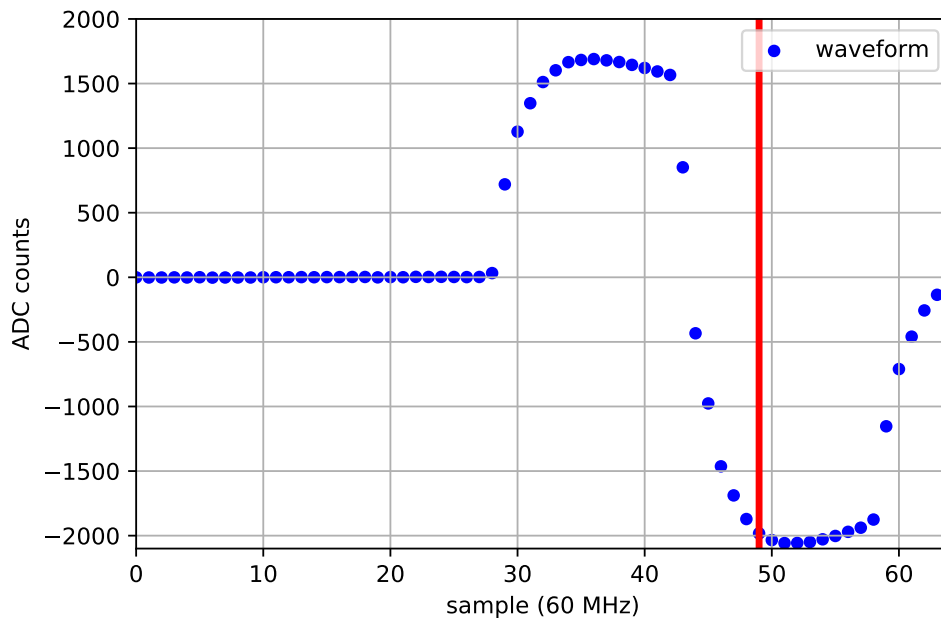


図 4.4: FAT のセットアップでの RAPCal のパルス波形。トリガーがかかった時刻を赤線で示す。D-Egg はトリガーがかかった時刻をパルスの受信時刻として記録するが、実際にパルスが到着した時刻からは数クロック分遅れていることがわかる。この遅れを fine delay correction によって補正する。

4.3.1 フィッティング

RAPCal の波形に対して、複数の関数を用いてフィッティングを行い、ベースラインとの交点を求めた。フィッティングに使った関数は以下の通りである。

1. 1 次関数での近似

フィッティングにはベースラインを下回った点から遡って 3 点を使用した。

$$y = ax + b \quad (4.6)$$

2. 2 次関数での近似

フィッティングにはベースラインを下回る直前の1点と下回った点から先の3点、計4点を使用した。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.7)$$

3. ロジスティック関数の一種であるリチャードカーブを使った近似

フィッティングには ADC Counts が最大の点から最小の点まで、15 から 16 点を使用した。

$$y = A + \frac{K - A}{(C + Qe^{-B(x-x_0)})^{\frac{1}{v}}} \quad (4.8)$$

これらの関数を用いて波形をフィットしたものが図 4.5 に示す。異なる関数によってベースラインとの交点も異なることがわかる。この異なる 3 つの交点を使い、fine delay correction を行った。

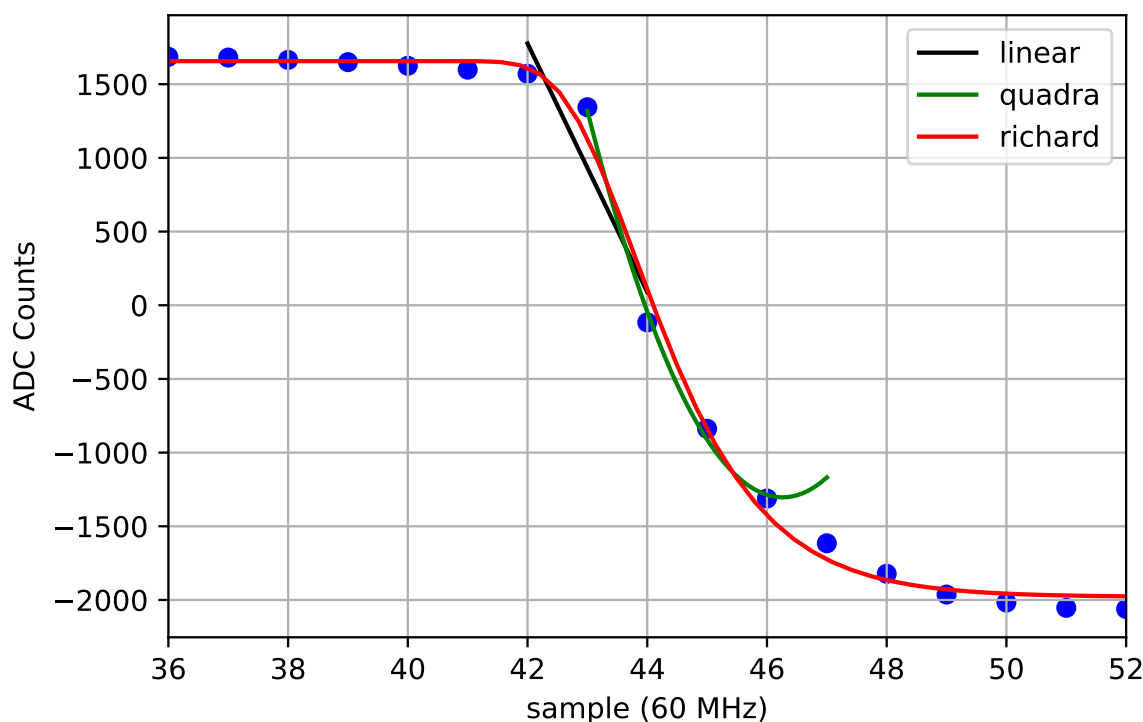


図 4.5: 波形とフィッティング。青い点が波形を 60MHz でサンプリングしたものである。黒線が 1 次関数でのフィット、緑線が 2 次関数でのフィット、赤線がリチャードカーブでのフィットを示している。

4.3.2 結果

fine delay correction に 3 種類のフィッティングを使い、clock drift を計算した。clock drift を 1 秒当たりの MFH と D-Egg の時計のずれに換算したものを図 4.6 に示す。いずれのフィッティングを用いても 1 秒間の間に 320 ns から 330 ns 程度 2 つの時計がずれることがわかる。この結果を用いて cable delay の計算を行った。その結果を図 4.7 に示す。1 次関数でのフィットでは 112 [ns] にピークを持ち、cable delay が長い方にテールがあることがわかる。これはフィットがうまくいくときとそうでない時の違いが表れていると考えられる。2 次関数でのフィットでも同様に 112 [ns] にピークがあるが、

cable delay が短い方にテールが伸びている。リチャードカーブによるフィットはほかの2つのフィットに比べて安定しているが、cable delay を大きく見積りやすいことがわかる。

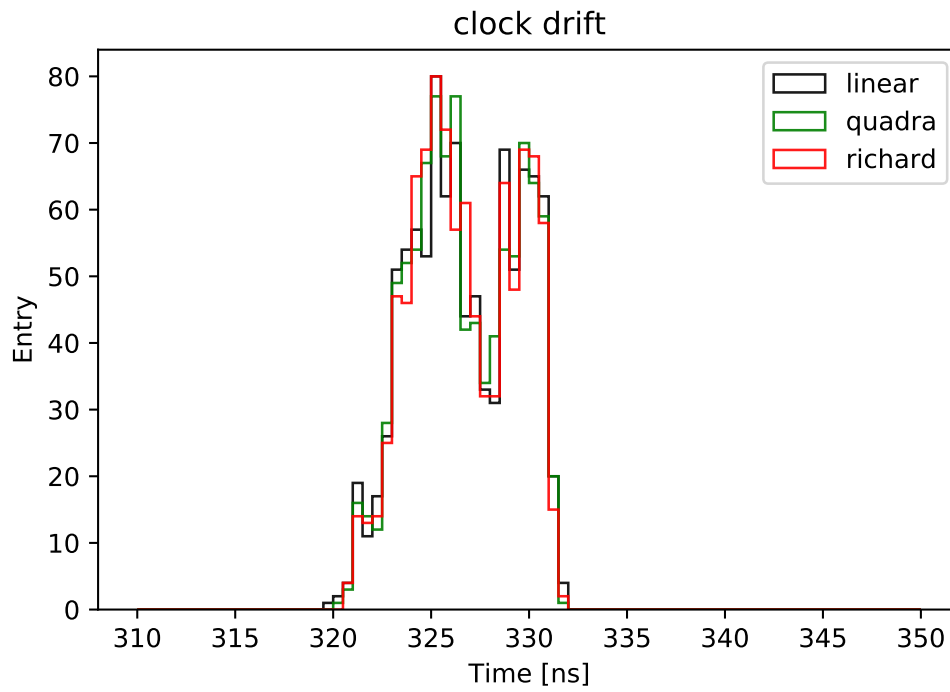


図 4.6: clock drift の分布。黒線が 1 次関数でのフィット、緑線が 2 次関数でのフィット、赤線がリチャードカーブでのフィットの結果を示している。

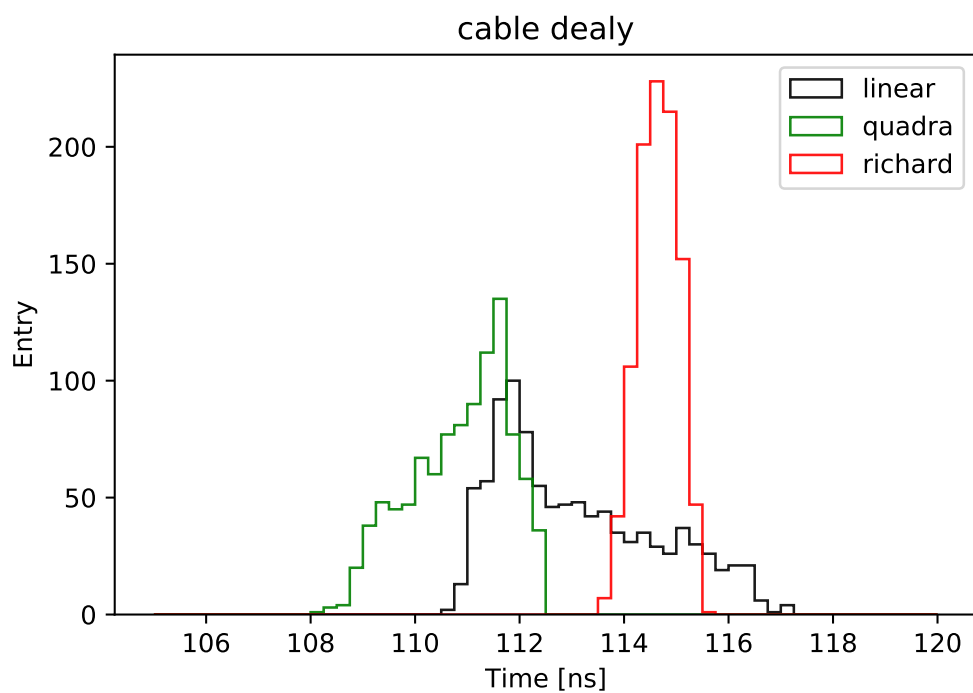


図 4.7: cable delay の分布。黒線が 1 次関数でのフィット、緑線が 2 次関数でのフィット、赤線がリチャードカーブでのフィットの結果を示している。

4.3.3 考察

1 次関数によるフィットが cable delay の大きい方にテールを持つ理由としてフィットが安定していないことが挙げられる。図 4.8 にフィットのいい例と悪い例を示す。どちらもフィットに使われている点は 42、43、44 である。1 次関数によるフィットではベースラインを下回った点から遡って 3 点をフィットに使用する。このベースラインを下回った点がベースラインと近い時にフィットが悪くなり、ベースラインとフィットの交点から得られるパルスの受信時刻が本来の受信時刻よりも遅くなってしまう。1 つの cable delay の計算には 4 つの受信時刻の情報が使われる。そのため 4 回のフィットの中にフィットの悪いものがある場合には cable delay が大きくなってしまふと考えられる。

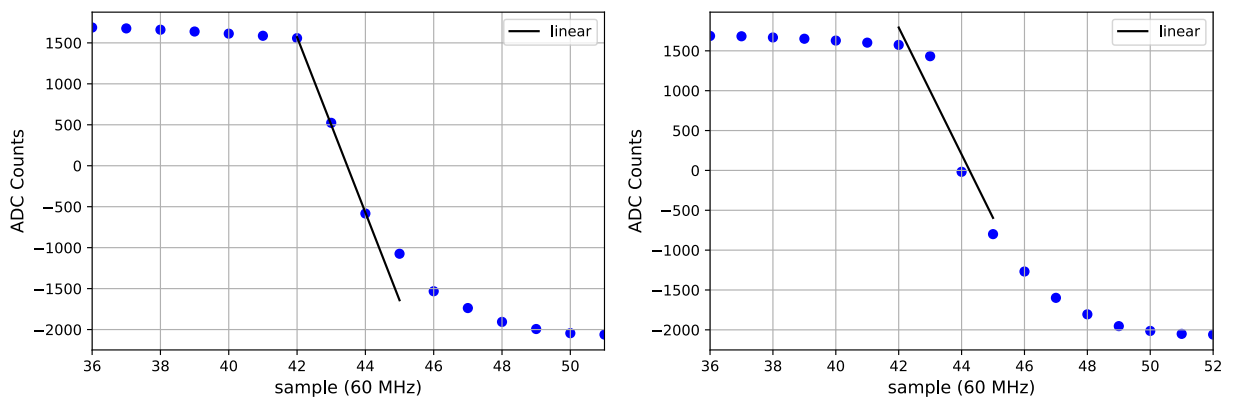


図 4.8: 1 次関数によるフィットの良い例 (左図) と悪い例 (右図)

第 5 章

D-Egg の時刻同期精度測定

前章で説明した RAPCal を用いて D-Egg の時刻同期の精度を測定した。この章では測定手法とその結果について説明する。

5.1 測定の目的

本研究の目的は D-Egg の時刻同期の精度を正確に測定することである。ここでは FAT の検査項目でもある TTS Measurement を用いてフィッティングのアルゴリズムによって時刻同期の精度がどう変化するかを調べた。

5.2 セッティング

PMT は低温の方がダークノイズが少ない。本測定では PMT の内部に 1 つの光電子が弾き出される程度の微弱な光量 (SPE レベル) の入射光に対する時間分解能を測定する。D-Egg の threshold を SPE レベルに設定しているため、ダークノイズが少ない方が好ましい。本測定は -20 度で行った。

D-Egg は Gain Calibration の結果から上下の PMT に対してそれぞれの Gain が 10^7 倍となるように適切な電圧をかけた。

400 nm のレーザーをスプリッターで分岐し、光ファイバーを通じて冷凍庫内の暗箱に設置された 16 台の D-Egg の上下の光電面の中心に SPE レベルの強度で照射した。またレーザーは 1000 Hz で照射した。ファンクションジェネレータのシンクアウトからレーザーと同期した信号を単体の D-Egg の Mainbord (Tabletop mainboard) に送った。また D-Egg と Tabletop Mainboard はそれぞれ別の MFH に接続されている。MFH は GPS と接続されており、時刻の情報を受け取ることで MFH 内の ICM は世界標準時刻とのオフセットを記録する。

5.3 測定方法

データ取得の前後で RAPCal によるパルスの送受信を D-Egg と Tabletop Mainboard に対して行う。D-Egg と Tabletop Mainboard には電圧の threshold trigger をかけ、threshold を超えた付近の波形データを積分し、電荷に変換し記録した。またその時刻をそれぞれの Mainboard 上の ICM のタイムスタンプで記録した。Mainboard 上の ICM でのタイムスタンプはデータ取得の前後の RAPCal の結果を

用いて、D-Egg、Tabletop Mainboard が接続されている MFH の ICM での時刻に変換して記録した。この際に、1 次関数による変換、2 次関数による変換、リチャードカーブによる変換を行いそれぞれの時刻を記録した。こうすることで D-Egg や Tabletop Mainboard の 1 つのタイムスタンプから 3 つの時刻の情報を取得することができ、フィットのアルゴリズムによって TTS がどのように変化するかを比べることができる。1 回のデータ取得で 1000 個のタイムスタンプを記録し、これを 100 回繰り返し、1 個の D-Egg につき合計 100,000 個のタイムスタンプを取得した。また測定は同時に冷凍庫内の 16 個の D-Egg に対して同時に行った。D-Egg でのシグナルの検出時刻からそれと同期したシグナルを Tabletop Mainboard が検出した時刻を引いたものを Transit Time と呼ぶ。Transit Time の標準偏差を Transit Time Spread (TTS) と呼び、時刻同期の指標とした。

5.3.1 事象選別

D-Egg で測定されたシグナルの検出時刻は 1000 Hz の周期的なレーザーによるヒットの他にもランダムに記録される電気ノイズやダークノイズや宇宙線によるヒットを含んでいる。これらのノイズを含んだまま次節のデータマッチングを行うと計算に時間がかかるため先にレーザーによるヒットを以下の手順で抽出した。

まず隣接する 2 つのタイムスタンプの時間差を計算した。その結果を図 5.1 に示す。縦軸は対数をとっている。1000 Hz でレーザーを照射しているので、隣接するタイムスタンプの時間差が 1 ms のものがレーザーによるシグナルである。前後のタイムスタンプの時間差が $1 \text{ ms} \pm 100 \text{ ns}$ のものを定め、基準とする。基準としたシグナルから $1 \text{ ms} \pm 200 \text{ ns}$ 毎に位置しているシグナルをレーザーによるシグナルとして抽出した。

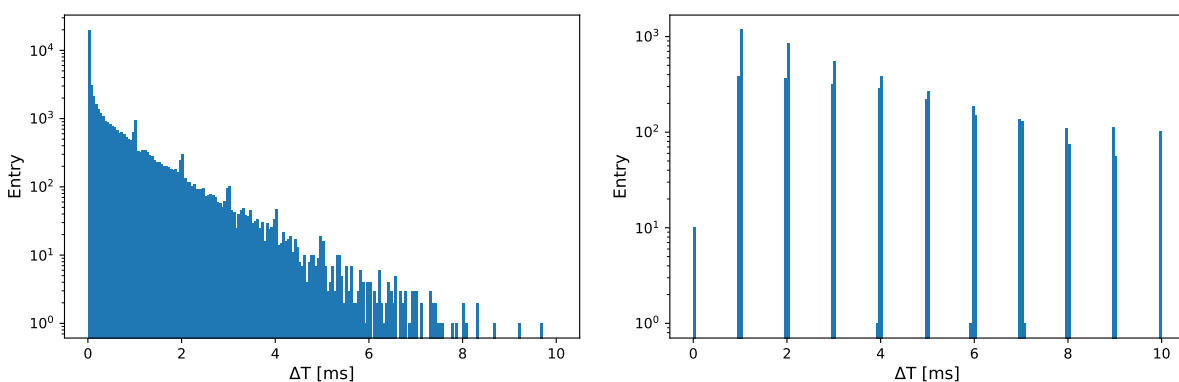


図 5.1: 隣接する 2 つのタイムスタンプの差。左図が事象選別前で右図が事象選別後である。レーザーによるヒットが 1 ms ごとに見られる。

上記の手順により抽出されたデータの電荷のヒストグラムを図 5.2 に示す。縦軸には対数を取っ

ている。データの抽出前では宇宙線由来と思われるヒットが7.5 [pc] 以上に見られるが、抽出後では電荷の大きいものがカットされていることがわかる。本測定では D-Egg に対して、入射した SPE レベルの光量を 10^7 倍にして取り出すように電圧をかけている。つまり 1.6 [pc] 付近にあるピークは SPE レベルの光量を意味しており、上記の手順により電荷の大きい宇宙線由来のシグナルはカットされていることがわかる。また全体のデータ量の減少から電荷の小さいダークノイズもカットされていることがわかる。

個々の PMT によって個体差はあるが、このような事象選別により取得した 100,000 個のデータのうちの 10 % から 20 % 程度をレーザーによるヒットとして抽出した。

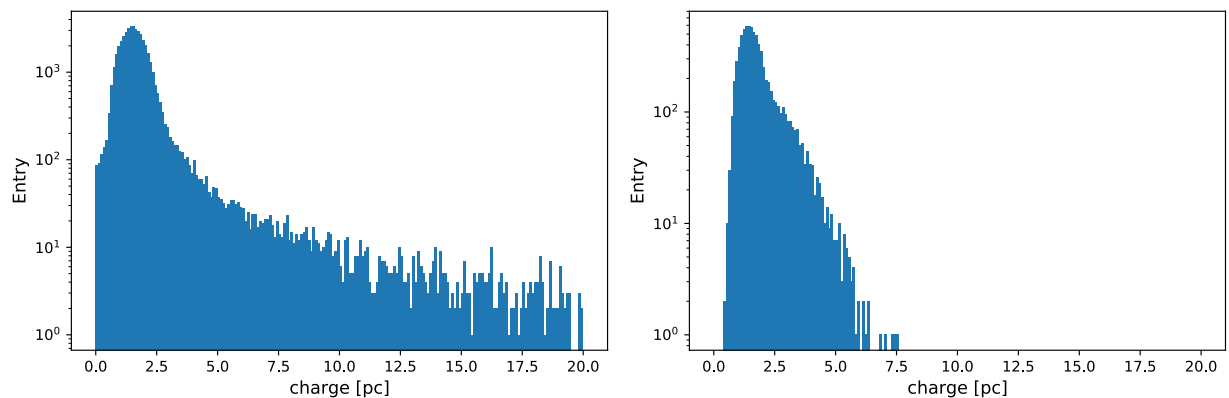


図 5.2: 左図がカット前の電荷の分布、右図がカット後の電荷の分布である。縦軸を対数軸に取っている。電荷の大きい宇宙線由来と思われるシグナルや、電荷の小さいダークノイズや電気ノイズをカットした。

5.3.2 データマッチング

データマッチングは D-Egg のシグナルのヒット時刻と Tabletop Mainboard のヒット時刻を 1 対 1 で対応させる作業である。事象選別によって得られた D-Egg のタイムスタンプを RAPCal の結果を用いて MFH での時間に変換した。同様に Tabletop Mainboard が同期した信号を受け取ったタイムスタンプも MFH での時刻に変換した。MFH はそれぞれ GPS から時刻の情報を受け取り、世界標準時刻からのオフセットを記録している。このオフセットを MFH での時刻に足すことで D-Egg のヒット時刻と Tabletop Mainboard のヒット時刻を世界標準時刻に変換して比較することができる。D-Egg でのヒット時刻と Tabletop Mainboard でのヒット時刻が世界標準時刻において 200 ns 以内のものを同期したシグナルとしてマッチングをした。これらのヒット時刻の差を取り Transit Time を計算した。

5.4 結果

図 5.3 に示したものはある D-Egg の 1 つの PMT の Transit Time のヒストグラムとガウシアンによるフィットである。RAPCal のフィットのアルゴリズムを変えてもそれぞれの分布のピークの位置は変わらないことがわかる。時刻の変換には clock drift の値が使われるため cable delay のピーク的位置が違っていても Transit Time のピーク的位置は変わらない。1 次関数によるフィットよりも 2 次関数とリチャードカーブによるフィットの方が精度が向上していることがわかる。標準偏差は 1 次関数によるフィットでは 3.0 ns、2 次関数によるフィットでは 2.7 ns、リチャードカーブによるフィットでは 2.6 ns であった。

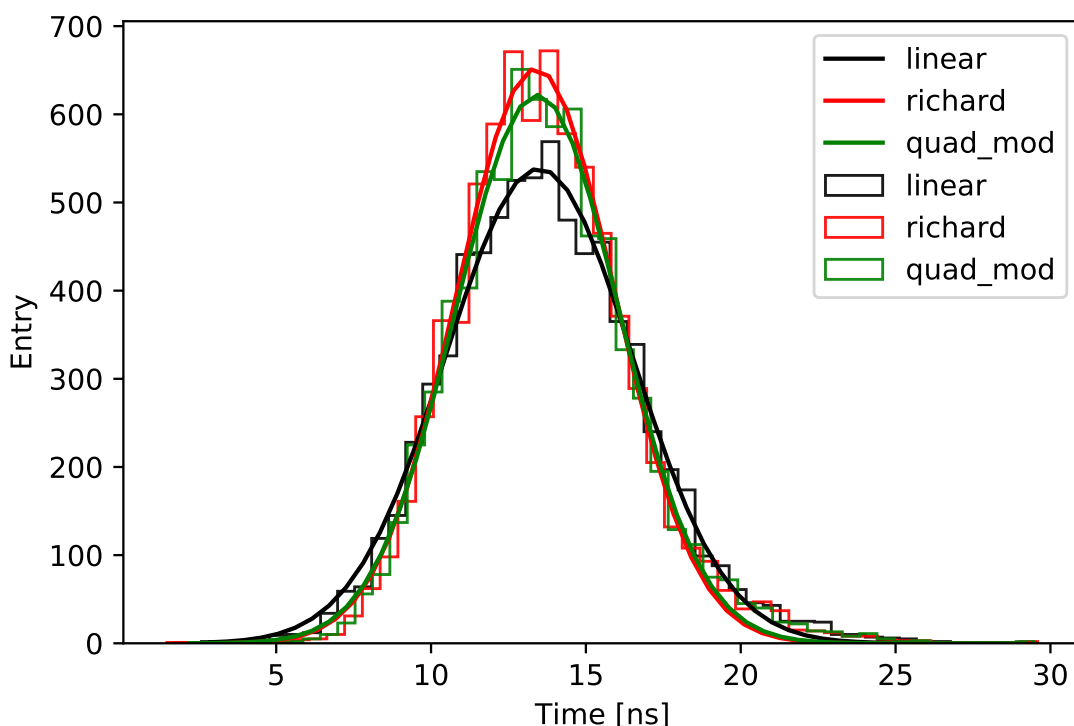


図 5.3: ある PMT の Transit Time のヒストグラムとガウス分布によるフィット。1 次関数によるヒストグラムとフィットを黒、2 次関数によるものを緑、リチャードカーブによるものを赤で示した。Transit Time の標準偏差 TTS は 1 次関数によるフィットでは 3.0 ns、2 次関数によるフィットでは 2.7 ns、リチャードカーブによるフィットでは 2.6 ns であった。

図 5.4 は同時に測定された 16 台全ての D-Egg の TTS を PMT ごとに示したものである。全ての PMT において 1 次関数のフィットによる TTS が最も大きくなった。リチャードカーブによる TTS は最も小さいことが多いが、D-Egg2 や D-Egg9 においては 2 次関数による TTS の方が小さいことがわかる。

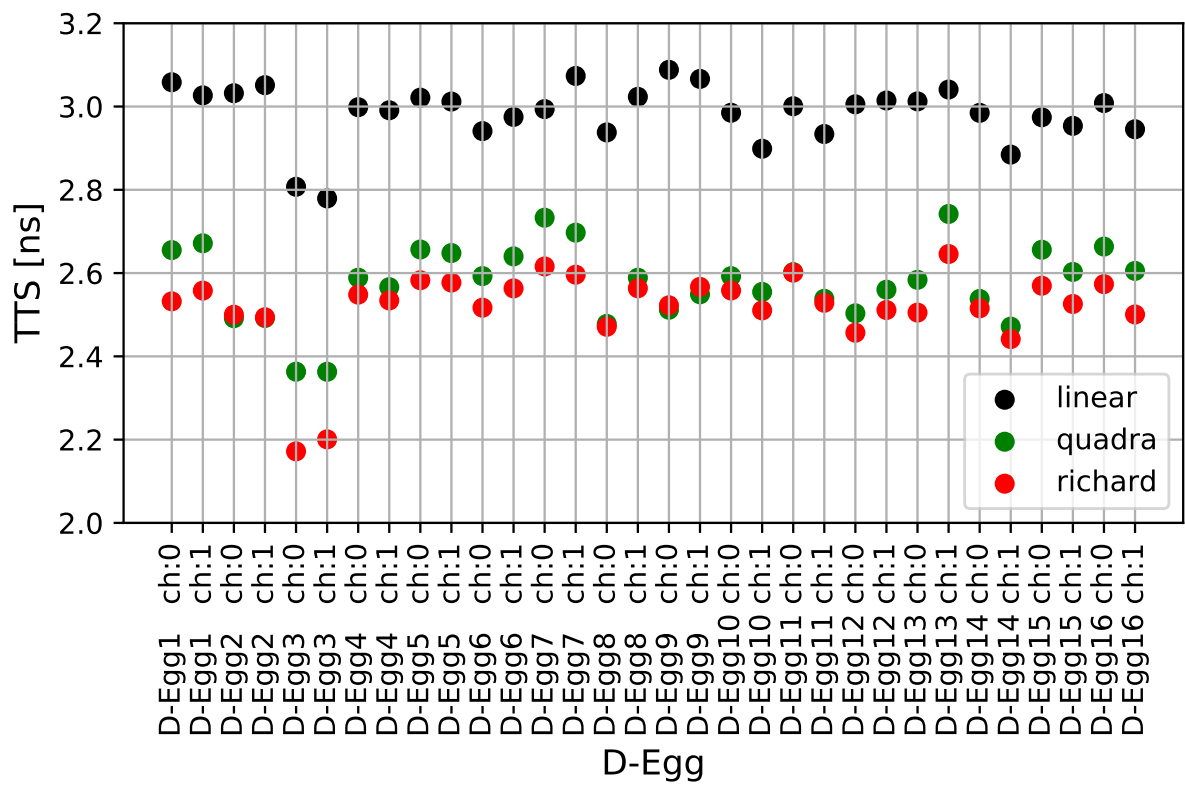


図 5.4: 32 個の PMT の TTS。全ての PMT において 1 次関数による TTS が大きいことがわかる。リチャードカーブによる TTS は 3 つのフィットの中で最も小さい結果となることが多いが、D-Egg2 や D-Egg9 においては 2 次関数によるフィットの方が TTS が小さくなっている。

図 5.5 に 2 次関数によるフィット、リチャードカーブによるフィットによって得られた TTS と 1 次関数によるフィットによって得られた TTS の比を示す。フィットのアルゴリズムを 1 次関数から変えることで、2 次関数では平均 14%、リチャードカーブでは平均 16% TTS が向上した。

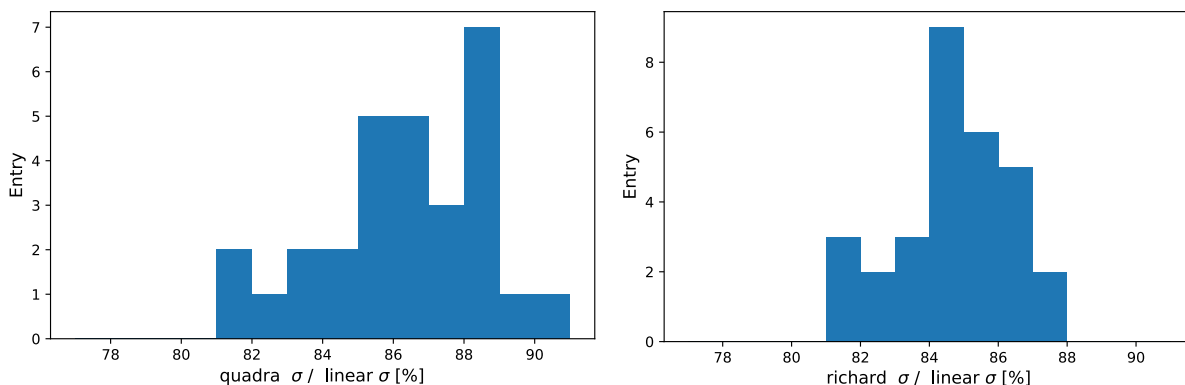


図 5.5: フィットの違いによる TTS の比。左図が 1 次関数によるフィットに対する 2 次関数によるフィットの TTS で、右図が 1 次関数によるフィットに対するリチャードカーブによるフィットの TTS である。2 次関数によるフィットでは 14%、リチャードカーブによるフィットでは 16% 1 次関数に対して TTS が向上した。D-Egg3 を除く 30 個 PMT を用いた。

図 5.4 において D-Egg3 の TTS がほかの D-Egg と比べて小さくなっている。図 5.6 に D-Egg3 の Transit Time のヒストグラムを示す。全てのフィットにおいて Transit Time がガウス分布ではなくなっている。これは何らかの理由で RAPCal による時刻同期がうまく行っていないと考えられる。その結果得られるヒストグラムがガウス分布ではなくなり、TTS が小さい値になっていると考えられる。

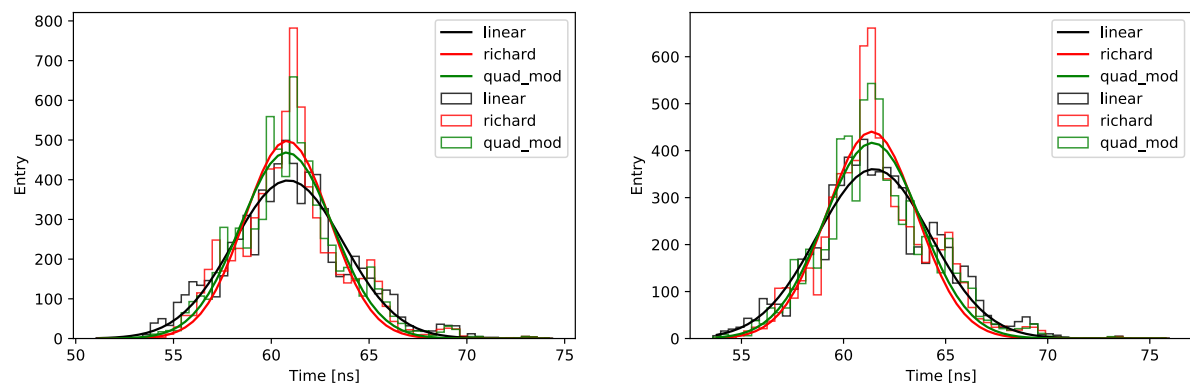


図 5.6: port:5002 の D-Egg の Transit Time のヒストグラム

5.5 考察

5.5.1 課題

今回の測定によって FAT で用いられている 1 次関数によるフィットと比べて 2 次関数、リチャードカーブによるフィットで時刻同期の精度が向上することがわかった。ただ図 4.7 を見るとリチャードカーブではピークの位置が違うことがわかる。これは正確に電圧の変化とベースラインとの交点を求めることができていないことを意味している。急激な電圧の変化の特徴をより正確に捉えるフィットのアルゴリズムを考えることで、より正確な D-Egg の時刻同期精度を測定することができる。

第6章

結論

本研究では、IceCube Upgrade に用いられる新型光検出器 D-Egg のクロックの同期精度を評価した。まず IceCube の時刻同期の手法である RAPCal を用いて FAT のセットアップでの D-Egg と MFH との間の cable delay と clock drift を計算した。RAPCal は MFH と D-Egg との間でパルス波をやりとりし、それらの送受信時刻から計算を行う。ICM のクロックによって記録された離散的な電圧の値をフィットすることで受信時刻を定めるが、FAT のセットアップのようなそれぞれのモジュールを繋ぐケーブルが短い時には、1 次関数によるフィットでは正確な受信時刻を定めることができないということがわかった。そこでフィットのアルゴリズムを変え、2 次関数によるフィットやリチャードカーブによるフィットを行った。これらのフィットでは 1 次関数によるフィットと比べて cable delay を求める精度が向上した。

次にこれらのフィットを用いて D-Egg の TTS measurement を行い TTS を測定した。測定には FAT のセットアップを用いた。TTS measurement の結果より、フィットの安定性が D-Egg の時刻同期に影響を与えることがわかった。1 次関数によるフィットと比べて 2 次関数によるフィットでは 14 %、リチャードカーブによるフィットでは 16 % 時刻同期の精度が向上することがわかった。また今後の課題として RAPCal のパルス波のフィットにおいて、正確なベースラインとの交点を求めるフィットのアルゴリズムを考える必要があることがわかった。

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。本研究を進めるにあたり、ご支援ご指導をいただきました石原教授、吉田教授に感謝申し上げます。また解析や論文執筆にたくさんのアドバイスをいただいた清水助教に感謝いたします。測定や解析に関して、特任研究員 Colton Hill 氏、永井氏、Max Meier 特任助教、Anna Pollmann 助教、Kareem Farrag 氏にはミーティングなどでたくさんの助言をいただきました。学生メンバーには日頃から仲良くしていただき充実した学生生活になりました。ICEHAP の高橋秘書には学生生活のサポートをしていただきました。皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 井上一, “宇宙の観測 高エネルギー天文学.”.
- [2] J. J. Beatty and S. Westerhoff, *The Highest-Energy Cosmic Rays*, Annual Review of Nuclear and Particle Science **59** no. 1, (2009) 319–345.
- [3] IceCube Collaboration, M. A. et al., *The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems*, JINST **3** (2017) P03012.
- [4] IceCube Collaboration, M. A. et al., *Measurement of the cosmic ray energy spectrum with IceTop-73*, Physical Review D **88** (2013).
- [5] A. Ishihara, *The IceCube Upgrade – Design and Science Goals*, 2019.
<https://arxiv.org/abs/1908.09441>.
- [6] “光電子増倍管 その基礎と応用 第4版.”.
- [7] R. e. a. Abbasi, *D-Egg: a Dual PMT Optical Module for IceCube*, 2022.
<https://arxiv.org/abs/2212.14526>.