

スーパーカミオカンデのデータ収集システムのアップグレード

東京大学 宇宙線研究所

奥村公宏, 塩澤真人, 中山祥英, 早戸良成, 山田 悟

2009年5月15日

1 はじめに

スーパーカミオカンデ(SK)検出器は、1996年4月の実験開始以来、大気・太陽ニュートリノの観測やK2K長基線実験を通じてニュートリノ振動現象の存在を証明し、また核子崩壊探索においては核子寿命の下限値を大幅に更新して理論に制限を与えるなど、数々の成果をもたらしてきた。T2K実験をはじめとするニュートリノ研究や核子崩壊探索、超新星爆発観測などの目的のため、SKには今後も長期にわたり安定して観測データを収集し続けることが求められている。そこでSK実験グループでは、10年以上使い続けたデータ収集システムを一新するため、2004年から開発を重ねてきた。そして2008年9月、フロントエンドエレクトロニクス・トリガーシステム・オンラインシステムからなるデータ収集システム全体が刷新された。本稿では、導入以降順調に稼働し観測データを取得しているSKの新しいデータ収集システムについて紹介する。

2 データ収集システムへの要請

SK検出器は、ニュートリノ散乱反応などによって発生した荷電粒子が水中を走る際に発生するチェレンコフ光を、壁面に取り付けられた約13000本の光電子増倍管(PMT)でとらえることにより、反応の検出を行っている。各PMTからの信号はフロントエンドエレクトロニクスに入力され、信号の大きさが設定した閾値を超えた場合をヒットと定義し、このときの電荷量とヒット時間情報がデジタル化される。

SKの種々の観測対象からデータ収集システムに要請される性能をキーワードとして列挙すると、

- (1) 低エネルギー事象観測
- (2) 高エネルギー事象観測
- (3) 高速処理

の三つがあげられる。(1)については、太陽ニュートリノ反応のような低エネルギー事象の観測では、1光電子(photoelectron, p.e.)を十分検出できるうえ、ノイズによる

ヒットがないことがフロントエンドエレクトロニクスに求められる。(2)については、核子崩壊や大気ニュートリノ反応のような高エネルギー事象の観測では、各PMT信号の電荷量を正確に測定する必要がある。より高いエネルギーの事象を精密に観測するためには、エレクトロニクスのダイナミックレンジもより大きくなければならない。また、低エネルギー事象と高エネルギー事象の観測どちらにもあてはまることだが、荷電粒子の発生点は各PMTがヒットした相対時間を用いて再構成されるため、nsecレベルの時間測定分解能が必要となる。(3)の高速処理については、超新星爆発ニュートリノバーストなどの高レート事象や、ミューオンとその崩壊で生じる電子のように連続した事象を、高効率高精度で観測するために必要となる。

加えて(1)に関して、単純なハードウェアイベントトリガーでは記録できない低いエネルギー事象の観測を可能とすることも目標の一つとなる。たとえば、反電子ニュートリノが準弾性散乱を起こした際に発生する中性子を、平均約200 μ sec後に水中の陽子によって捕獲された際に発生する2.2MeVのガンマ線の検出でタグすることにより、超新星背景ニュートリノのバックグラウンド除去率を向上することができる。旧来のSKデータ収集システムでは、ある個数以上のPMTが同時にヒットした際にトリガーを生成、トリガータイミング周辺1.3 μ secの範囲内のPMT信号のみがエレクトロニクス内で処理され、オンライン計算機に集められていた。2.2MeVのガンマ線は、SKの約11000本の内水槽PMTのうちの6本ほどしかヒットさせない低エネルギーの事象であるため、ハードウェアトリガー条件の閾値をここまで下げることはできず、観測することが不可能であった。このような低いエネルギーの事象を観測する方法として、PMTのダークノイズまで含めたすべてのヒット信号をエレクトロニクスからオンライン計算機に集め、ソフトウェアによってバックグラウンド除去率の高い高度なイベント選択を行うことが考えられる。われわれはこれをrecord every hit方式と呼んでいる。Record every hitを実現すれば、データ解析の段階で2.2MeVのガンマ線によるアクティビティを探しにいくといったことが可能である。当然のことながら、record every hit方式でデータを収集する

には、高速でデータ処理を行うことのできるフロントエンドエレクトロニクスが必要である。また、取り扱うデータ量も大きくなるため、エレクトロニクスからのデータ読み出しやオンライン計算機でのデータ処理についても、十分に高速化されている必要がある。

以下の章では、新エレクトロニクスシステム(3~7章)と新オンラインシステム(8~9章)の詳細を解説した後、新システムで観測したばかりの初期 SK データをいくつか紹介したい(10章)。

3 新フロントエンドエレクトロニクスモジュール

新データ収集システムの核となるフロントエンドエレクトロニクスモジュールの写真を図1に示す。モジュールの名称は QBEE で、これは QTC-Based Electronics with Ethernet の頭字語となっている。入力信号の電荷および時間測定のための基本となる構成要素は、QTC (Charge-to-Time Converter) ASICと multi-hit TDCである。それに加えて、デジタル処理を行う FPGA、1.5MB FIFOメモリ、ネットワーク経由でのデータ読み出しとモジュール制御を可能にするイーサネットサブボードなどにより QBEE は構成されている。TKO 規格の1幅のモジュールであり、1枚につき24の入力チャンネルを有している。

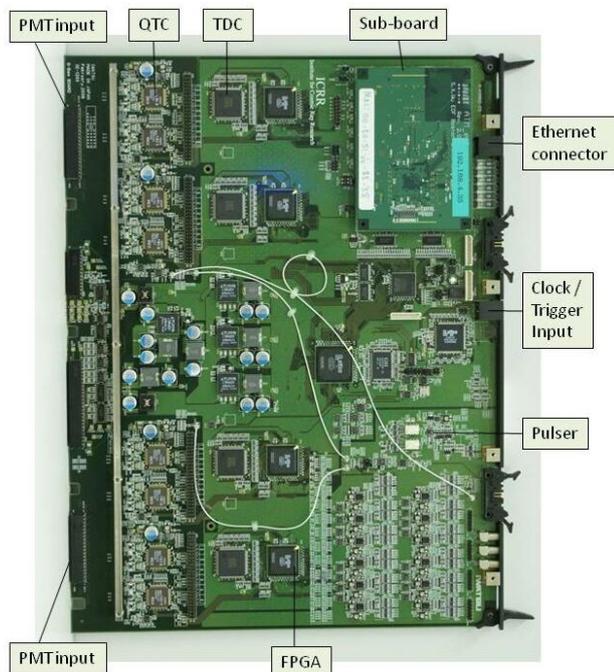


図1：新フロントエンドエレクトロニクス QBEE

PMT 信号は左のバックプレーン側から、データ読み出しやボード制御のためのイーサネットケーブルは、システムクロック同様、右側のフロントパネルから入力される。

図2に QBEE における信号処理の流れのダイアグラムを示す。QTC は、信号入力に対して、リーディングエッジでヒットタイミングを表しパルス幅が入力電荷に比例した矩形パルスを出力する。その両端エッジの時間を、後段に配した multi-hit TDC でデジタル化し、入力信号のヒット時間および電荷の両方を測定する。TDC には ATLAS 実験用に開発された AMT-3 を採用し[1]、時間分解能を稼ぐために 60MHz (1LSB=0.52nsec) にクロックアップして使用している。TDC の内部バッファに一時的に蓄えられたヒット情報は、後に述べる周期トリガーを用いて 17 μ sec 単位で連続的に FPGA に読み出され、データ圧縮などの処理を行ったうえで FIFO に記録される。このように QTC TDC FPGA というパイプライン処理によって、要求される高速化を実現している。

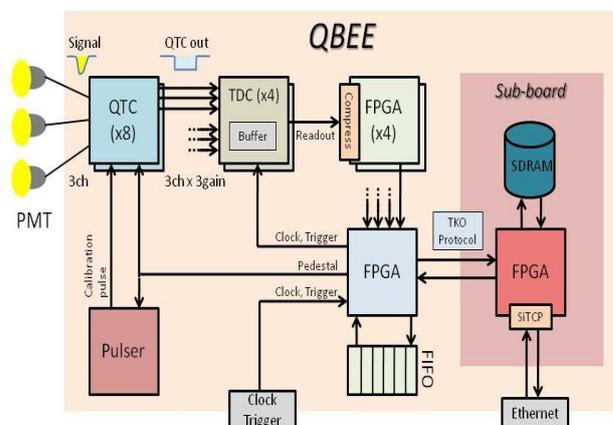


図2：QBEE における信号処理の流れ

SK で使用されている約 560 枚の QBEE ボードはすべて、一つの 60MHz システムクロックによって同期して動作している。すべての TDC を同期させることで、エレクトロニクスシステム全体として最高の時間測定分解能が得られるようにしている。

QBEE はボード上にキャリブレーションパルサーを備えており、SK では約 1Hz の周期で全チャンネルのキャリブレーションデータをペダスタルデータとともに取得している。このデータで温度変化による QTC のゲイン変化をモニターし補正することで、10 $^{\circ}$ C 温度が変化しても電荷測定誤差を $\pm 1\%$ 以内に抑えられる。消費電力はチャンネルあたり 1W 以下であり、種々の信頼性試験によって長期稼働時の安定性・耐久性も確認されている。

4 QTC ASIC

QTC ASIC は QBEE のアナログ性能を決めるものであり、多くの時間と労力がこの ASIC 開発に費やされた。計算機を使った回路シミュレーションでアナログ性能評価を行い、シミュレーションでは再現できない動作不良についてはイ

オンビーム装置で試作チップ内の配線を加工するなどしてデバッグを重ね、ようやく満足のいくものを完成させることができた。

図3はQTCチップの拡大写真である。1チップには入力チャンネルが三つあり、さらに各チャンネルがSmall/Medium/Largeの3段階のゲインを持っている。写真中3本の横線がそれぞれ三つあるのが見えるが、1本の横線が一つのゲインの回路に対応している。ゲイン比は1:7:49であり、これは外部回路の17dBアテネータで入力信号を減衰させることにより実現している。

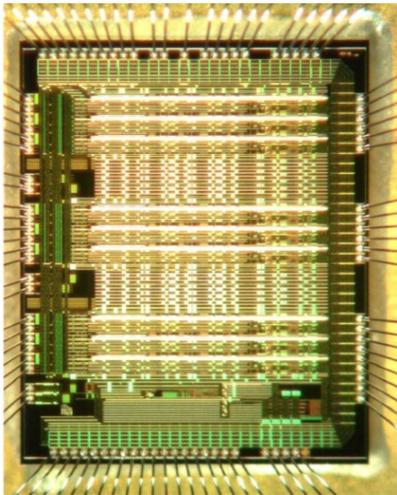


図3: QTC ASICの内部配線の写真

QTC内部回路のブロック図を図4に示す。前章で述べた通り、入力信号に対してQTCは、リーディングエッジで信号タイミングを表し、幅が電荷に比例した矩形パルスを出力する。QTCに入力された信号は、まずLNA(Low Noise AMP)で増幅された後、ディスクリミネータ部と電荷測定部の二つに分割される。各チャンネルは独立したディスクリミネータを持っており、波高がある閾値(SKでは -0.7mV 、 0.25p.e. に相当)を超えると、QTC出力が開始されると同時に 400nsec 幅の積分ゲートで電荷積分が行われる。積分終了後からリセットされるまでの間は信号の入力は受け付けない。蓄積された電荷はその後放電され、一定量以下になるとQTC出力が終了する。出力開始から 750nsec 経っても終了しない場合は強制リセットが働き、その後のVETOを含めて1サイクルあたり約 900nsec で一連の処理が行なわれる。

セルフトリガー方式であるので、通常はディスクリミネータが作動して積分ゲートが開くまで入力信号を遅らせる必要があるが、2段LPF(Low Pass Filter)回路で入力パルス

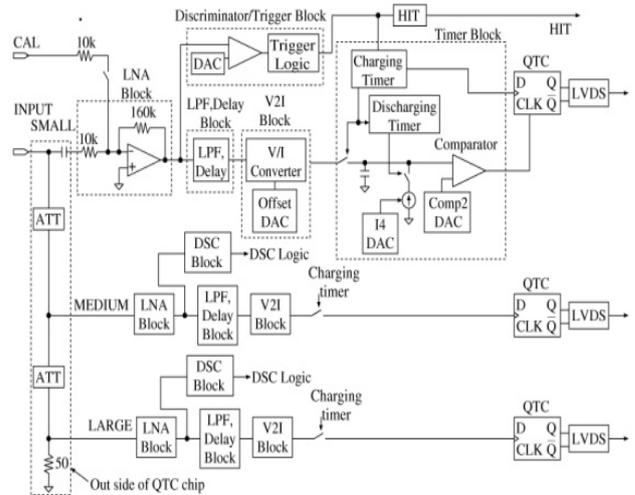


図4: QTC 1チャンネルのブロック図

の立ち上がりをなまらせることで遅延させ、かつ立ち下がりにはゲート幅に収まるようなまませすぎない仕組みになっており、遅延回路なしに信号を積分ゲートに納めることに成功している。

ノイズも少なく、閾値を普段使用する値の約半分の -0.3mV に設定してもノイズによるヒットはない。クロストークによるヒットは入力波高値が -3V 以下では発生しないので問題ないが、複数チャンネル同時ヒットの際は電荷測定値に1%程度のずれが生じるためオフラインで補正している。表1にQTCのスペックをまとめた。QTC ASICのさらなる詳細は文献[2]を参照されたい。

表1: QTC ASICのスペック

ディスクリミネータ	セルフ
入力チャンネル数	3
処理速度	約 900nsec/cycle
電荷積分ゲート	400nsec
ゲイン段数(比)	3 (1:7:49)
ディスクリ閾値	$-0.3 \sim -14\text{mV}$ (Small)
ダイナミックレンジ	$0.2 \sim 51\text{pC}$ (Small)
	$\sim 357\text{pC}$ (Medium)
	$\sim 2500\text{pC}$ (Large)
電荷分解能	約 0.2pC (Small)
電荷直線性	直線からのずれ $\pm 1\%$ 以下
時間分解能	0.3nsec (2pC 入力時)
	$< 0.2\text{nsec}$ ($> 10\text{pC}$ 入力時)
消費電力	$< 100\text{mW/channel}$
CMOSプロセス	$0.35\mu\text{m}$
パッケージ	100pin CQFP

5 QBEE のアナログパフォーマンス

QBEE の時間測定分解能を図 5 に示す。図には、旧来のシステムで使用されていたフロントエンドモジュールである ATM の時間分解能と、SK の 20inch PMT の時間分解能も合わせて示している。1p.e. レベル(SK で使用する PMT ゲインで約 2pC に相当)の信号の場合、QBEE の時間分解能は RMS で約 0.3nsec である。同等の信号において 20inch PMT の時間分解能は 3nsec 程度であり、QBEE は十分によい時間分解能を持っていることがわかる。ATM とはほぼ同等の性能である。また QBEE の時間測定直線性については、時間測定は 60MHz のクロックで動作する multi-hit TDC (AMT-3)によって行われているため、ほぼ完全なリニアリティを実現している。

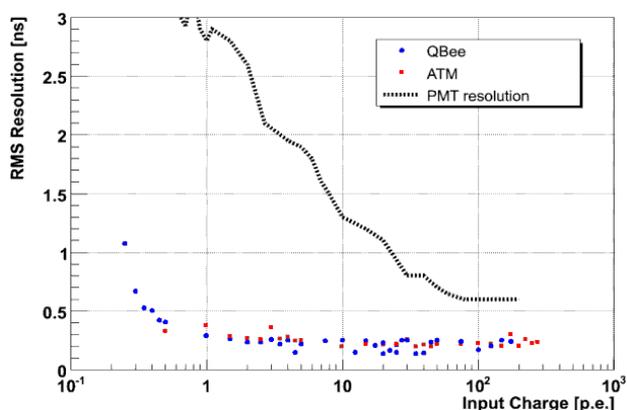


図 5 : 時間測定分解能

QBEE 電荷測定性能に関して、ATM と比べて大きく向上したのは、ダイナミックレンジである。ATM の場合は、入力電荷がおよそ 550pC のあたりで飽和してしまっていたが、QTC は三つのゲインステージを持たせることで広いダイナミックレンジを実現しており、QBEE の電荷測定の飽和点はおおよそ 2500pC (1000p.e. 相当)となっている。この電荷測定ダイナミックレンジの拡大により、数 GeV ~ 数十 GeV のニュートリノ事象のエネルギー測定分解能は、以前と比べて約半分まで小さくすることができる。

QBEE は 4 桁におよぶ広い電荷測定ダイナミックレンジを実現しながら、電荷測定直線性の面でも非常に優れている。図 6 に QBEE の電荷測定直線性を示す。1pC ~ 2500pC の入力電荷範囲にわたって、非直線性はほぼ $\pm 1\%$ 以下に収まっていることがわかる。

電荷測定分解能については、Small レンジによる測定領域である 25p.e. (50pC) 以下では ATM と同等であり、1p.e. で約 10% となっている。25p.e. より大きい電荷については、(ATM が飽和する約 200p.e. までの電荷範囲で) ATM より分解能は悪くなるが、それでも全範囲で 3% 以下であり、十分な性能を有している。

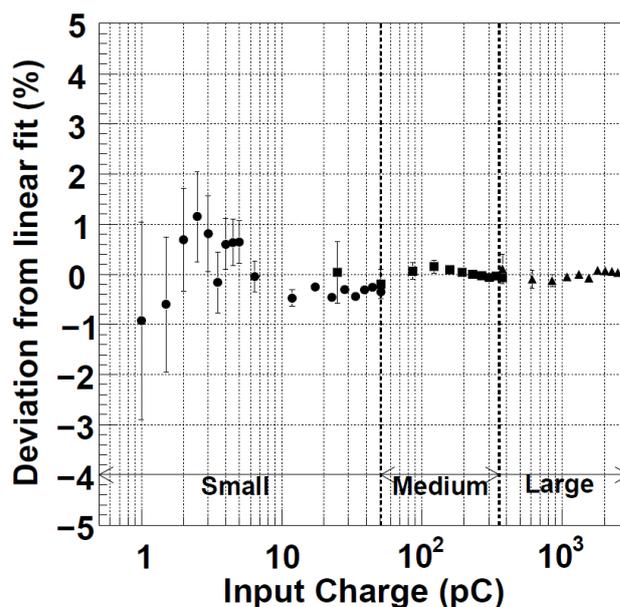


図 6 : QBEE の電荷測定直線性

6 クロック・トリガーシステム

2 章で述べた record every hit を実現するため SK では、約 17 μ sec (正確には 60MHz のシステムクロックで数えて 1024 クロック分)の周期ですべての QBEE に同時にトリガー信号を送り、この 17 μ sec を単位として全ヒットを漏れなく記録している。

60MHz のシステムクロックおよび 17 μ sec 周期の TDC トリガーを生成するのは、マスタークロック (MCLK) モジュールと呼ばれるエレクトロニクスで、システム全体で一つだけ使用される。MCLK モジュールの写真を図 7 に示す。前面にある RJ45 コネクタから、8 芯 4 ペアのうちの 1 ペアを使ってシステムクロックを、もう 1 ペアを使って周期トリガーを LVDS 信号で出力する。周期トリガー信号は、60MHz クロックに同期したシリアル信号になっており (1 クロック分で 1bit を表現)、トリガーごとに 1 ずつ増えていくトリガー番号 (32bits) や、ペダスタルトリガーなどの特殊なトリガーを表すトリガー ID (3bits) などの情報が付加されている。



図 7 : MCLK モジュール

MCLK モジュールで生成されたクロック・トリガー信号は、ゼロスキューと呼ばれる、信号線の経路長をできるだけ等しくそろえた特殊な UTP ケーブルを使い、Distributor と呼ばれる信号分配器を複数段経て、すべての QBEE に送

られる。SK のエレクトロニクスハット間のように 10 メートルを超える長い距離の部分は、伝送ロスが少なく外部ノイズの影響もより受けにくい 2 芯同軸ケーブルを使用している。

7 イーサネットデータ読み出し

QBEE からのデータ読み出しには、広く普及しているイーサネットを導入することにした。旧来の ATM ボードでの TKO バスを介した読み出し速度は 4MB/sec 程度であったが、今やノート PC に標準装備されている 100BASE-TX (ファーストイーサネット) でも、理論上は約 3 倍の 11.75 MB/sec の転送が可能である。またバスによる転送と異なり各ボードから同時並行にデータ転送を行うことが可能であり、さらに 10 倍程度の実効的な速度向上も得られる。

今回このネットワーク要素の開発を SK のアメリカグループが担当した。日本グループが担当する QBEE 本体の開発と切り分けるため、ネットワーク機能をもつ小基板(ネットワークカード)を作って QBEE ボードに装着する形にした。図 8 にイーサネットカードのブロック図を示す。QBEE とカード間のデータ転送には、以前から SK で用いていた TKO プロトコルを、下流の 100BASE-TX については、CPU は使わず、KEK 回路室で開発中であった FPGA を用いたネットワーク実装(SiTCP, シリコン TCP と呼ばれる[3])を採用した。

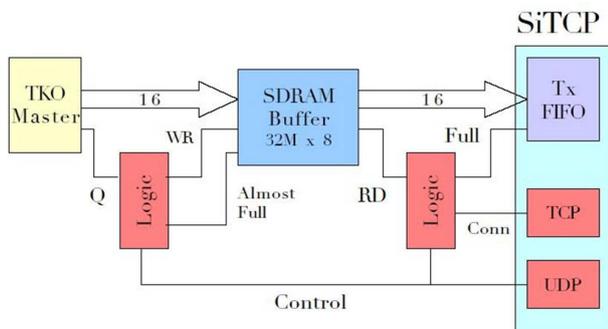


図 8: イーサネットカードのブロック図

図中左側で TKO プロトコルを介して QBEE 本体とのデータ読み書きを行う。図中右側でイーサネット(SiTCP)経由で、データ収集計算機と接続される。

QBEE からの観測データはスパースデータスキャンと呼ばれる連続転送モードで SDRAM に仮置きしたあと、TCP プロトコルでネットワーク転送される。オンライン計算機上のプログラムから見ると、ランの最初に open した TCP ポートのローカルバッファに自動的に観測データがたまっていくように見えることになる。TCP 送信バッファサイズやネットワークスイッチ設定は、転送エラーがなくかつ高速転送レートを実現するよう最適化されている。さらに TCP

はデータ化けや損失があれば再送するため、確実なデータ読み出しが二重に保障されている。TCP とは別に、単発の読み書き用に UDP ポートや ping(ICMP)用のポートも用意した。観測データ転送中でも、UDP でステータスを読むことや、ping で接続を確認することが可能になっている。

8 新オンラインシステムの概要

エレクトロニクスシステムの開発に合わせて、SK のオンラインシステムも新たに開発が行われた。先に述べたように、新システムでは、旧来のシステムで用いられていたハードウェアトリガーを使用せずにすべての PMT ヒットデータをオンラインシステムで処理することを目指した。また、近年大規模実験でも採用されている、安価な Linux PC を複数台導入してイーサネットをつなぎ大量のデータを各 PC が分散して処理する、という構成を採ることとした。

ここで、オンラインシステムが処理するデータ量について簡単に説明する。SK では、約 13000 本の PMT からの信号がフロントエンドエレクトロニクスに流れ、ヒット時間と電荷の情報をデジタル化したものがオンラインシステムに送られる。このデータは 1 ヒットにつき 6 bytes のサイズである。ヒットレートはおよそ 4.5 kHz/PMT であるが、その大半はダークノイズや環境放射能によるものである。このデータをすべてオンラインシステムで処理する場合、ヘッダなども含んだデータ全体のレートは約 470 MB/sec に達する。システムの開発にあたっては PMT のヒットレートが 10 kHz 程度になってもデータが処理可能であることを目標とした。

次に新システムの構成について述べる。図 9 はオンライン DAQ システムの概略を示したものである。QBEE からのデータはまず 20 台の Front-end PC (FEPC) によって読み出される。各 FEPC で処理されたデータは後段の Merger PC に送られる。Merger PC では、全 PMT のヒットデータを使ってイベントビルディングを行うが、1 台で処理を行うのはネットワーク処理としても PC 内の処理としても過負荷になるため、各 FEPC で時系列に並べられたデータを 22 msec ごとのブロックに分割し、それぞれのブロックを異

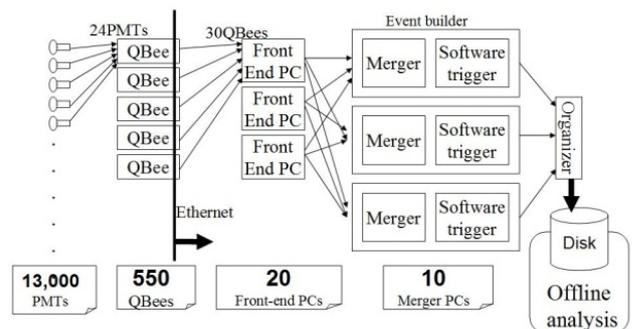


図 9: 新オンラインシステムの構成

なる 10 台の Merger PC に送ることで並行処理を行っている。FEPC からのデータの行き先は Data flow manager というプロセスが制御する。Merger PC でソフトウェアトリガーによるイベント選択が行われると、データ量は約 50 分の 1 まで減少する(通常の閾値設定の場合)。イベント選択後のデータは Organizer PC に送られ、時間順につなぎ合わされたものがディスクに保存される。その後データはリアルタイムで ROOT 形式にリフォーマットされ、種々の解析が行われる。

9 新オンラインシステムの性能

前章で大まかな構成を述べたところで、各コンポーネントの機能および性能について詳しく見ていくことにする。FEPC では、QBEE からデータを読み出す Collector、読み込んだデータを時系列に並べる Sorter、後段の PC へとデータを送る Sender のコンポーネントが、それぞれスレッドとして並列で動いている。PC は 1 台に Xeon 2 CPU(4 CPU コア)を搭載するサーバ(富士通製)を用いたため、コアを満遍なく使用することがパフォーマンスの向上につながる。先に述べた三つのカテゴリでは Sorter 部がもっとも CPU を使用しているため、このスレッドのソート部分をさらに複数のスレッドに分割して並列作業を行わせた。このスレッド個数を変えたときの処理速度がどうなるかをダミーデータを用いて測定したものが図 10 である。スレッドの個数が増えて、各コアの使用率を埋め尽くすようになるので徐々にスループットは上昇する。最終的に 64 MB/sec という SK のデータレートにたいして十分な性能を得た。

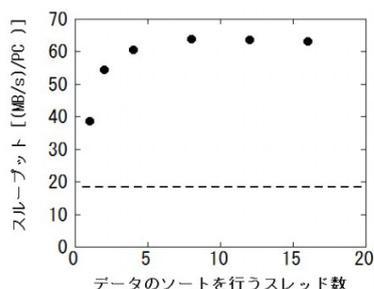


図 10 : FEPC のデータ処理能力

各 FEPC から後段の Merger PC にデータを送る部分では、Data flow manager と呼ばれるプロセスが、データブロック毎に送信先の Merger PC を FEPC に指示、次の指示を出す前に既に命令を出したデータ送信が完了したかを Merger PC から確認するという作業を行っている。各 PC との情報のやりとりは、Network Shared Memory と呼ばれるソフトウェアを用いている。これは、異なる PC 間の共有メモリ上の内容を同期させ、情報を共有することを可能にするものである。

SK においては総データ量は数百 MB/sec のオーダーであり、一方で各 PC の NIC はギガビットイーサネットまでの対応であるため、送信命令を逐次的に行っていたのでは、結局各 PC の NIC のスループットがボトルネックになる。そこで Data flow manager が一度に出す命令の数を増やして各 FEPC がデータを送信している相手先をずらすことにより、最終的には必要とされるスループットでデータを転送できることが確認された(図 11)。

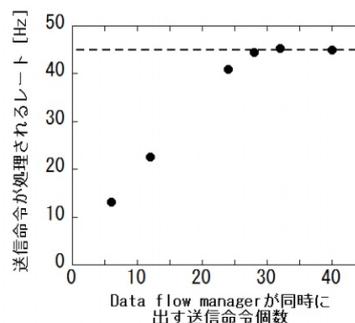


図 11 : Data flow manager における送信命令数と処理速度の関係

データは 22 msec の領域に分割されているため、ブロック毎の送信命令のレートは $1 / 0.022 = 45 \text{ Hz}$ が必要となる。

FEPC からデータを受け取ってイベントビルディングを行う Merger PC は 10 台用意され、1 台につき 4 個のプロセスが並行して走っている。この Merger PC において全 PMT のデータはマージされて再び時系列にソートされる。こうしてできたデータブロックはソフトウェアトリガーで処理される。

ソフトウェアトリガーのトリガー条件のうちもっとも基本的なものは、200 nsec の時間窓で PMT ヒット数を数え、閾値を超えたらイベントとして下流に流すものである。閾値の違いで、太陽ニュートリノに対応する Super Low Energy トリガー、大気ニュートリノ解析などに用いられる Low Energy トリガーと High Energy トリガーがある。これらは旧来のハードウェアトリガーと仕組みが同じであるため、新旧システムでのデータの比較は容易である。ヒット数によるセルフトリガーのほかに、水槽内で光源を光らせて検出器キャリブレーションを行う際に光源の光るタイミング信号を使ってトリガーをかける外部トリガーも実装している。旧システムでは、イベントのゲート幅は常に $1.3 \mu\text{sec}$ であったが、新システムではトリガーごとに異なるゲート幅を設定することが可能となった。

より複雑なトリガーとしては、超新星背景ニュートリノ探索のための中性子トリガーが実装されている。これは、反電子ニュートリノ反応でできる中性子の捕獲ガンマ線をとらえて、バックグラウンド低減を目的とするものである。ある程度高いエネルギーを持つニュートリノのトリガーが

かかった後に、中性子捕獲ガンマ線探索用の $800\mu\text{sec}$ の時間ウィンドウのデータを保存している。

また、まもなく本格的に始まる T2K 実験に対応するトリガーも準備されている。これは J-PARC からリアルタイムで送られてくる T2K のビームスピルの時刻情報から、対応する SK のデータ 1msec 分をソフトウェアトリガーで取り出すものである。

ソフトウェアトリガーで選択したデータは Organizer PC へと送信される。ここでは各々の Merger PC で処理されたデータブロックを、ひとつの時系列に並んだデータへとまとめる作業を行う。ここでの重要な作業が、重複領域の処理である。10 台の Merger PC により、データを 22msec 毎のブロックに分けて分散処理を行っているため、ブロックの境界上のイベントを漏らさないようにそれぞれのブロックには 1msec 程度重複したデータを持たせてある。Organizer ではこの重複領域内のイベントを比較して一つにまとめる作業を行っている。

太陽ニュートリノ観測のエネルギー閾値を下げるというのは、ソフトウェアトリガーのヒット数閾値を下げることに対応する。この場合、ソフトウェアトリガー下流に流れてディスクに保存されるデータ量が増加するが、このディスク書き込み速度が現システムのボトルネックになっている。図 12 にソフトウェアトリガー閾値とトリガーレートとの関係を示した。新システムでは約 12kHz までのレート上昇に耐えることができている(旧システムでは通常 $2\sim 3\text{kHz}$ でデータ取得。最大約 4kHz)。

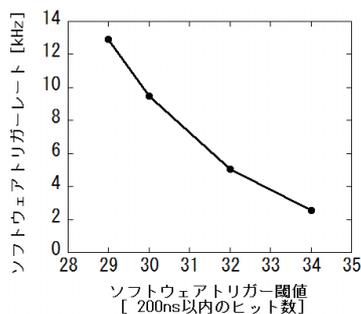


図 12 : ソフトウェアトリガー閾値とレートとの関係

これよりさらにエネルギーの低いニュートリノデータをとるためには、よりインテリジェントなトリガーによってデータ量を減らしてやる必要がある。現在検討されているのが、オンラインで事象発生点を再構成しフィルターをかけるというものである。このためソフトウェアトリガー直前でデータストリームを分岐させ、一方を通常の観測用のソフトウェアトリガーに、もう一方は事象発生点フィルタリングを行う PC ファームに導くことが検討されている。これも record every hit 方式によって可能となった手法であるといえる。

10 新システムのインストールと初期データ

2008 年 9 月の第 1 週に、データ収集システム全体の入れ替え作業が一斉に行われ、直後からシステムの稼働が開始された。SK で新システムによる観測が開始された 2008 年 9 月 6 日以降現在も続く観測期間を、われわれは SK-IV と呼んで区別している。SK 検出器は、いつ起きるか分からない超新星爆発ニュートリノバーストに備えるという使命からも、まもなく開始される T2K 長基線実験の far detector であることから、長時間の安定した連続運転が要求されている。開発中もこの点が一番気にかかるころではあったが、小規模システムで SK 検出器から実際にデータを取得するテストを事前に 2 度行っていたおかげで、システム入れ替え後に素早く安定したデータ取得を始めることができ、大きなトラブルも起きることなく、24 時間態勢で観測を行っている。

新システムによる観測データの例として、高エネルギー大気ニュートリノ事象のイベントディスプレイを図 13 に示す。旧来のエレクトロニクスでは飽和してしまって正しく測定できなかった 200p.e. を超える光量についてもきちんと測定できていることがわかる。大気ニュートリノデータを用いたニュートリノ混合角 θ_{13} の探索において重要となる、数 $\text{GeV} \sim 10\text{GeV}$ の電子事象のエネルギー測定精度向上が見込まれる。

ミューオン崩壊電子の検出は、核子崩壊の識別や大気ニュートリノ事象の相互作用識別、T2K 長基線ニュートリノ実験における電子事象のバックグラウンド除去など、様々な物理解析に用いられる、重要な要素である。図 14 に、水

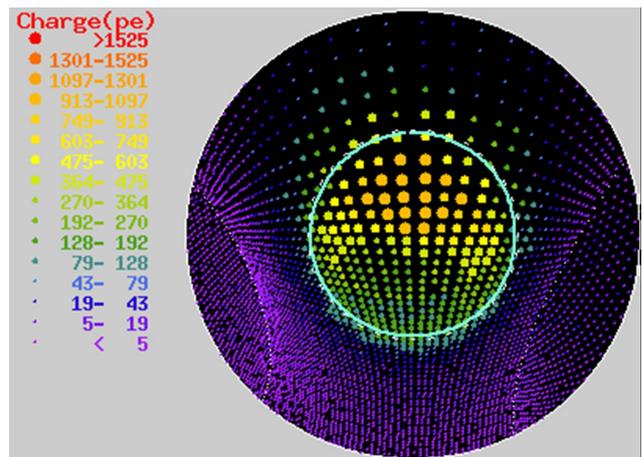


図 13 : SK-IV で観測された大気ニュートリノ事象例
(2008 年 10 月 15 日, run061612, ev#5657630)

約 14GeV の電子事象の、電子発生点からの視点における前方 180 度以内の各 PMT が点で表され、水色の円が再構成された 42 度のチェレンコフリングである。各点の大きさや色は測定された光量を表し、QBEE のダイナミックレンジ近く (1000p.e. 程度、オレンジ色) まで測定できていることがわかる。以前の電子回路 (ATM) のダイナミックレンジは 200p.e. 程度、図中の緑色に対応する。

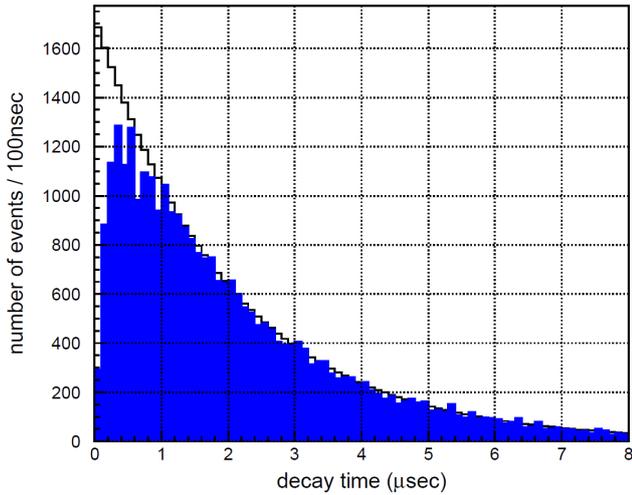


図 14：ミューオン崩壊電子事象の崩壊時間分布

黒線がミューオン事象の数と寿命から計算される崩壊電子数を、青いヒストグラムが実際に検出された崩壊電子事象数を表す。横軸は親ミューオンからの時間差である。

槽内で止まった宇宙線ミューオンの後に検出されたミューオン崩壊電子の分布を示す。時間差 $1\mu\text{sec}$ 以降はほぼ 100% の効率で電子検出ができており、エレクトロニクス的高速処理ができてることが確認できる。

SK の重要な物理目標として、超新星爆発ニュートリノの観測がある。われわれの銀河系内で超新星爆発が起きたときに SK で観測されるイベントレートは、通常を大きく上回る。われわれは光パルサーからの光をタンク内に導入し、超新星爆発に似せたイベントレート変化と光量で光らせることにより、新システムがどこまでの高レート事象を処理できるかをテストした(図 15 参照)。結果 10 秒間で 600 万個のイベント量に対して、その間のデータを失わずに処理ができた。これは旧システムで処理可能だったイベント量の約 100 倍、われわれのいる銀河の中心での超新星爆発の約 1000 倍に相当する。

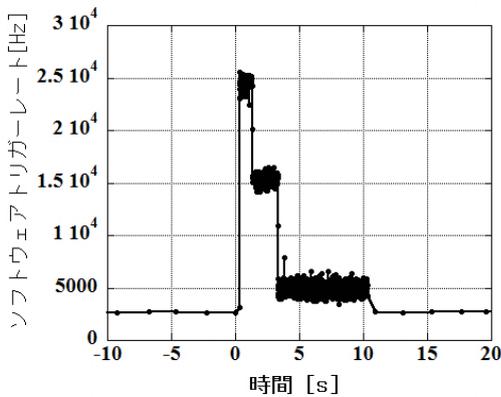


図 15：超新星爆発試験のソフトウェアトリガーレート

SK タンク内で光源を 10 秒間、階段状のプロファイルに従って合計 72636 回(銀河中心での超新星爆発の約 10 倍)光らせた時のもの。

またソフトウェアトリガーを用いて柔軟なイベント選択が行える例として、9 章で紹介した中性子トリガーのテスト結果について述べる。このテストでは、タンク内に入れた Am/Be 線源からの中性子が水中で捕獲されて出る 2.2MeV ガンマ線を測定して中性子発生を観測する。2 章で述べたようにこの 2.2MeV のガンマ線はエネルギーが低いためヒット数を用いた通常のトリガーでは捉えることはできない。Am/Be からの 4.4MeV ガンマ線が線源の周囲に配置した BGO を光らせる事象を初期イベントとし、中性子トリガーによってそれに続く $800\mu\text{sec}$ のデータを保存して、オフラインで 2.2MeV ガンマ線事象を探す解析を行っている。図 16 は初期イベントから、中性子捕獲の 2.2MeV ガンマ線と思われるイベントとの時間差を示した図である。得られた時定数約 $200\mu\text{sec}$ は予測された値とほぼ一致している。

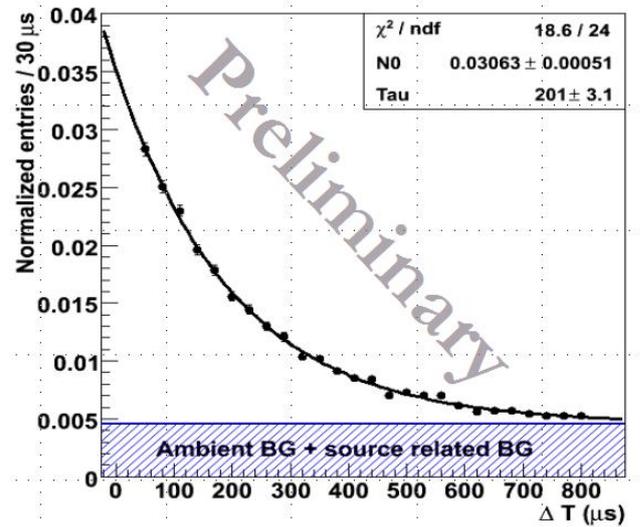


図 16：中性子捕獲ガンマ線事象の捕獲時間分布

11 まとめ

スーパーカミオカンデ検出器では、今後の長期安定観測と観測領域の拡大のため、データ収集システムの刷新を行った。新しいシステムは順調に観測データを取得している。旧来のシステムでは届かなかった観測対象もすでにとらえ始めており、今後 SK での新たな成果が期待される。

References

[1] Y. Arai, “AMT-3 Chip”, <http://atlas.kek.jp/tdc/amt3/>

[2] H. Nishino *et al.*, “High-Speed Charge-to-Time Converter (QTC) ASIC for the Super-Kamiokande Experiment”, to be submitted.

[3] T. Uchida *et al.*, “Development of TCP/IP processing hardware”, 2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp. 1411-1414, 2006.