

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340060

研究課題名(和文)スーパーカミオカンデにおける超新星爆発ニュートリノ観測システム高性能化の研究

研究課題名(英文)Development for the improvements of super-nova detection system in Super-Kamiokande

## 研究代表者

早戸 良成 (Hayato, Yoshinari)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：60321535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円

研究成果の概要(和文)：スーパーカミオカンデは超新星爆発のニュートリノを検出する能力が最も高い検出器である。しかし、近年可能性が議論されている数百光年という近傍における超新星ニュートリノ爆発においては、10秒間に観測されるニュートリノ事象数が六千万以上と予想され、現在のシステムでは爆発直後の20%分程度しかデータをとることができない。今回新たに開発した電子回路を用いることで、近傍超新星爆発時にもロスなく必要なデータが取得できると期待される。さらに、既存データ収集システム用には、超新星爆発らしい事象が発生した時、前後1分間のデータを全て保存、超新星爆発直前直後の様子を詳細に調べることができるソフトウェアも開発した。

研究成果の概要(英文)：The Super-Kamiokande (SK) detector is one of the most sensitive detector to observe supernova burst neutrinos. Recently, there are discussions of possibility that some stars, which are around 500 light years from the Earth, may become supernova. If this happens, more than 60 million neutrinos are expected to interact in SK. With the current data acquisition (DAQ) system, we can record ~20% of the data just after the burst. Therefore, we developed a new module to record necessary information without any loss even if nearby supernova occurs. At the same time, we have improved the software for the existing DAQ system to record entire data from the detector for 1 minutes before and after the neutrino burst. This data will make it possible to analyze small activity just before the supernova burst occurred. These additional data are expected to provide important information to understand the detail mechanism of supernova bursts.

研究分野：宇宙素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 超新星爆発 データ収集システム

## 1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は宇宙に存在する鉄より重い元素生成の起源と考えられている。この超新星爆発においてどのような反応が発生しているかを理解することが非常に重要な研究課題となっている。爆発時に発生する大量のニュートリノは中心部での反応の情報を持つため、その観測は超新星の理解を大きく助ける。しかし、ニュートリノが観測できる超新星爆発はおよそ100年に一度と大変稀であり、過去にはSN1987aからのニュートリノをカミオカンデ実験、IMB実験などが計二十弱観測した過ぎないが、このデータが研究に大きな役割を果たしてきた。スーパーカミオカンデ (SK) 検出器では、同一規模・距離の超新星爆発であれば前回の100倍以上のデータが得られると期待され、観測されれば理解を飛躍的に進めることが可能となる。最近の研究から、超新星爆発からのニュートリノは、バーストより数秒から数十秒前程度にもニュートリノ事象数の超過が観測される可能性が指摘[1]され、この時間領域において非常に低いエネルギーのニュートリノ事象まで確実に記録することが望まれる。一方、地球から約640光年に位置するベテルギウスの径が、ここ数十年で大きく変化したという観測結果が最近発表[2]され、超新星化への前段階であるという可能性も指摘された。このような地球から数百光年と非常に近い超新星が爆発した場合、SK 検出器において期待される事象数は数千万を越える。しかし、現在のSK 実験のデータ収集システムでは検出器内で1秒間に1千万を超える事象が発生した場合に、爆発後の情報に大きな欠落が発生してしまう。

### 参考文献

- [1] G.Raffelt, Private communication
- [2] C.H.Townes et al., APJ697, L127

## 2. 研究の目的

本研究ではSK 実験のデータ収集システムを拡張し、超新星からのニュートリノを爆発直前からもれなく収集し、超近傍星の超新星爆発時にも、解析に最も影響が出ない形でデータをロスなく効率的に取得し、超新星爆発のメカニズム解明とニュートリノの基本的性質の理解に役立てられるものとするを目的とする。

近年の研究から、現行システムではデータを取得しきれない可能性のある二つのケースの重要性が指摘された。まずひとつは、超新星爆発時に大量のニュートリノが到達する前数十秒の間のニュートリノ事象の観測にも重要性があるというものである。現在のシステムでもエネルギー閾値以上の事象についてはほぼ完全に取得可能であるが、より完璧を期すために超新星爆発前後30秒程度にわたって、読み出しているすべてのPMT情報を記録するシステムを開発することと

した。二つ目は、超近傍の大型星が超新星化、ニュートリノを放出した場合、SK 検出器内で反応するニュートリノ数は、爆発直後の100ミリ秒で数百万、その後10秒で数千万超と予想される。この場合、現在のシステムでは爆発直後1秒程度のデータはほぼロスなく取得できるものの、その後は数分以上にわたり断続的に欠測期間が発生してしまう。すなわち、最重要と考えられる爆発直後のデータについては現行システムにおいても取得可能であるが、超新星爆発後の数秒から数十分にわたる長期的なニュートリノ数の変動の完全な観測は難しい。長期間の観測により、標準的なモデルからの予想とは異なった効果が見える可能性も指摘されており、現在のシステムを改良、重要な情報を効率的かつ最大限に記録できるようにすることが必須との結論に至った。

## 3. 研究の方法

本研究では、既の実績のある現行のデータ収集システムの電子回路群には手を加えず、機材を追加することで必要なデータを効率的かつ最大限に取得することができるシステムを開発する。また、実際に超新星爆発が発生した場合のシステムの動作検証機構も構築する。

(1) 光電子増倍管からの全データを超新星爆発前後1分間記録するシステムの開発

144GB以上の大容量メモリを持つ計算機2台を現システムと高速ネットワークで接続、既存データ収集システムで読み出されている全てのデータを受信・集約、そのデータをソフトウェアで処理、超新星爆発と思われる現象を検出する。検出された場合は、前後の全てのデータをディスクに記録するようなシステムを構築することで実現する。

(2) 近距離超新星爆発ニュートリノデータ収集用システム

超新星からのニュートリノエネルギーは十数MeV程度と低く、比較的狭い幅を持つため、SK 検出器内のPMTが同時に何本信号を出していたかという情報を用いれば、超新星ニュートリノが反応した際にSK 検出器内に放出した総エネルギーの時間変化を知ることができる。現在SK 検出器において用いられている電子回路(QBEE)は、接続された24本のPMTのうち何本が閾値以上の信号を出したかを16ns毎にデジタル信号として出力する(デジタルヒットサム)。この信号は大量の事象が発生した場合でも停止することがない。よって、この信号を集約する電子回路と、これを読み出し、常時記録するソフトウェアを開発、SK 検出器内で何本のPMTが同時に信号を出したかを記録、検出器内で放出されたエネルギー総量を欠落なく記録するシステムを構築することで実現する。

#### 4. 研究成果

(1) 光電子増倍管からの全データを超新星爆発前後1分間記録するシステムの開発

SK 実験で現在用いられているデータ収集システムでは、光電子増倍管からの信号はQBEEと呼ばれる電子回路が、暗電流ノイズも含め一定以上の大きさを持ったものを全てデジタル変換、これを計算機群で読み出し、ソフトウェアで記録すべき事象の判定・選別を行っている。検出器からのデータ量は全体では500MB/sを超え、1台の計算機で全ての処理を行うことはできないため、読み出し部・事象判定部いずれも複数の計算機に分散してデータを処理している。しかし超新星爆発現象を検出、その前後のデータを記録するだけの機能とすれば、事象選別直前まで処理が終わったデータを用いることで、計算機1台でも能力が足りることがわかった。

現在、事象選別を行っている計算機は6台、各計算機上では8つのプログラムが並列で処理を行っている。(計算機の台数及びプログラム並列数はデータ収集システムの更新で若干変動するが、おおよそ50~80となる)。これらの事象選別用計算機と新たに導入するデータ集約・超新星爆発事象探索用計算機を10Gbitのイーサネットを用いて接続することで、1秒あたり500MBとなるデータを全て転送することとした。送信側は、現在稼働中の事象判別プログラムにデータ転送機能を加えることとした。何らかの障害によって、データ転送を正常に行えない場合には、通常データ収集処理を最優先で行うことができるようにするため、データを受け渡すために用いるバッファ用メモリはあらかじめ確保しておき、実際にデータを転送する部分については独立のスレッドとすることとした。また、超新星爆発事象探索を助けるため、事象判別プログラムが一定量のデータごとに、どの程度の事象を発見したかという情報も付加することとした。これにより、全てのデータを受信、超新星爆発事象を探索するプログラムは大幅に簡素化され、動作を高速にすることが可能となった。

データを受信、超新星爆発事象を探索するプログラムは、データ受信部と事象探索部、そして後述する超低エネルギー事象再構成用計算機群へのデータ転送部の3つに分かれた構成とした。データ受信部は、スレッド数は多くなる(50~80)が、送信側それぞれについて独立のスレッドを生成することとした。これにより、送信側との通信に障害が発生、たとえば遅延が発生した場合でも、他に影響を与えにくい実装となった。また、受信データに用いるメモリの管理はプログラム内で行うことで、オーバーヘッドを減らしている。事象探索部は、データとともに送られてきた事象発生数を確認、一定時間(約100ms)の間、事象数が通常よりも大幅に多い状態が続いた場合を『超新星爆発の可能性

のある状態』と判別して、この前後計1分間のデータをディスクに書き出す。このためには、可能性のある状態と判別してから30秒以上前までのデータをメモリ上に蓄積しておく必要がある。よって、判別を行った時点よりも30秒以上前のデータを随時メモリ上から削除する機構を実装している。なお、通常状態では30秒分のデータは15GBにしかならないが、比較的近傍の超新星爆発時には、これが10倍程度まで増える可能性もあるため、計算機の総メモリ量を250GBとしている。

このシステムを構築している際に、3MeV程度の低エネルギーの太陽ニュートリノを観測するため、事象選択を行う前のデータに事象再構成ソフトウェアを適用、事象選別を行う新たなシステムの導入が決まった。このシステムの実現には、高い計算能力が必要となるため、10台以上の計算機で並列にデータの処理を行う。このシステム実現のためには、各計算機での事象再構成速度のふらつきにも対応してデータを送信するプログラムが必要となった。本研究で構築しようとしたシステムは、当初は超新星爆発と思われる現象がなければデータをメモリ上から消去するだけというものであったが、機能を追加、事象再構成用計算機にデータを送る機能を追加することとした。こちらについても、何らかの理由で事象再構成処理が追いつかずデータが送信できなかったものについては、随時メモリからは消去、データ収集には影響を与えない機構とした。

これらのソフトウェア完成の後、連続稼働させて、正常に稼働するだけでなく、データ収集に影響が出ないことが確認できた。特に、SK 検出器内でレーザーダイオードを発光、これまでの試験結果からシステム負荷が最も高くなる、10秒間で超新星爆発ニュートリノが30万事象発生した場合に相当するデータ量となっても、データ収集系の遅延が増えないこと、また、較正用の放射線源を導入して数十kHzの低エネルギー事象を長時間取得するような場合についても期待した動作となっていることが確認された。さらに、超低エネルギー用事象再構成システムに適切にデータを送信できること、通信が突然切断した場合や、回復した場合にも安定して動作することを確認することができた。

現在はこのソフトウェアが常時安定して稼働している。

(2) 近距離超新星爆発ニュートリノデータ収集用システム

本システムは既存QBEEからのデジタルヒットサム出力を集約、SK 検出器全体で何本の光電子増倍管が同時に信号を出していたかを測定する。各QBEEからのデジタルヒットサム出力はケーブルを接続して集約する必要があるため、新たには10枚のQBEEの情報、計240本分のPMT情報を集約する

電子回路を開発、48枚を製作することとした。このシステムと既存データ収集システムで集められたデータを同期させるため、用いる同期信号ならびにカウンター情報については既存データ収集システムと同じものを用いている。各電子回路で集約されたデータは読み出し用PCにイーサネット経由で転送する。デジタルヒットサム出力は60MHzのため、最大で16.6ns毎にデータを集計することが可能だが、常時記録すると必要なディスク容量が膨大となってしまうため、QBEEからの信号を1024回分足しあげたものを常時記録することとした。超新星爆発からのニュートリノはおよそ20MeVのエネルギーをもち、このニュートリノがSK検出器内で反応すると約120本の光電子増倍管が信号を出す。一方、光電子増倍管の暗電流起因ノイズは各光電子増倍管あたり5kHz程度であるため、QBEEからのデータ1024回分を足し上げて17 $\mu$ sごととしても、超新星爆発ニュートリノが1事象あれば判別できる。一方で、超新星爆発前後については詳細なデータも記録したいため、接続されている10枚のQBEEからのデータを単純に足した結果も、常時約1分蓄えられるようなメモリを搭載することにした。このデータは、超新星爆発と思われる事象が検出された場合にPCから読み出すことで、既存データ収集システムからのデータを補完することが可能となる。これら二種類のデータを効率的に読み出すため、独立のギガビットイーサネットポートを用意し、効率的なデータ転送を可能とした。イーサネットを用いたデータ転送にはSiTCPと呼ばれるライブラリを利用した。SiTCPはFPGAに実装するTCP/IPライブラリで、非常に効率が高く、ネットワーク帯域の95%を使うことができる。また、QBEEからのデータ転送にも用いられ安定性も立証されているため、これを用いた。また、電子回路内で、超新星爆発時に特徴的な、50~100 $\mu$ sという長時間、多数のPMTからの信号が出続けた場合、超新星爆発検出の電気的信号を出す機構も組み込んだ。この電気信号は別に用意した論理回路に集約、データ量がQBEEや主データ収集装置で大きなロスを引き起こすと考えられる場合には、QBEE内のデータ記録を間引くために用いる。

今回、これらの機能を実現するために新規の電子回路基板を設計、製作、そして回路で利用するFPGAで動作するファームウェアの開発までを行った。この新たな電子回路は、デジタル信号のみのやりとりだけとはいえ、QBEEと電氣的に接続されるため、接続した場合、しない場合にQBEE側のデータの質を変えることがないかについて試験を行い、電荷測定、時間測定に対して、有意な違いが見られないことを確認した。この後、最終的なファームウェアを作成、動作確認を行った。動作については、完全を期するためQBEEで取得したデータを用いてデジタルヒットサ

ム出力を逆算、これが新モジュールの出力と完全に一致することを確認した。また、超新星爆発検出のトリガー出力についても、QBEE側のデータと比較、正しく動作していることが確認された。このトリガーが動作した場合に出力されるデータについても整合性を確認、全ての機能が正常に動作することが確認された。この動作試験は、別途導入された高速・高頻度で安定的に発光することができるレーザーダイオード光源を用いたシステムで実施している。最終的に、完成したファームウェアを導入、新データ収集システムを完成させた。超新星爆発検出時にQBEE上のデータを間引くことで、安定的なデータ取得を行う部分は、48枚全てのボードからの電気信号を集約、これをQBEE側にフィードバック、間引きをおこなうことができるように別途用意した汎用の論理回路ボードを接続、システムを構成した。SK実験稼働中の実際の間引き実施については、検出器較正時などに動作してしまうことはさける必要があるため、必要に応じて設定、運用することとした。

これらの新たなデータ収集システムにより、超新星爆発時に取得できるデータの種類が増え、また、これまでのデータ収集システムで記録しているデータについても、データの欠落をコントロールすることでその質が担保され、これまで以上に精密な超新星爆発ニュートリノのデータを取得・解析できるようになった。さらに、今回開発したシステムは自由度が高く、今後も新たな要請に応じてソフトウェアやファームウェアを改良することで、事象検出方法性能向上、特殊な現象の検出なども可能であるため、最大限にこれらを活用しようとしている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文) (計2件)

Tomura, T. ; Hayato, Y. ; Ikeno, M. ; Nakahata, M. ; Nakayama, S. ; Obayashi, Y. ; Okumura, K. ; Shiozawa, M. ; Suzuki, S.Y. ; Uchida, T. ; Yamada, S. ; Yokozawa, T., Development of New Data Acquisition System at Super-Kamiokande for Nearby Supernova Bursts, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 60, Issue 5, 3694-4697, 査読有

[DOI:10.1109/TNS.2013.2281585](https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2281585)

A. Orii et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Development of New Data Acquisition System at Super-Kamiokande for Nearby Supernova Bursts, Proceedings of IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference 2014, 査読なし

(学会発表) (計 4 件)

戸村 友宣、早戸 良成、中山 祥英、鈴木 聡、  
他、Super-Kamiokande における超新星爆発  
ニュートリノ用データ収集システムの開発、  
日本物理学会 2011 年秋季大会、2011/9/16、  
弘前大学 (青森県)

A. Orii et al. (Super-Kamiokande  
Collaboration), Development of New Data  
Acquisition System at Super-Kamiokande for  
Nearby Supernova Bursts, Proceedings of  
IEEE Nuclear Science Symposium & Medical  
Imaging Conference 2014, 2014/11/13,  
Seattle, USA

織井 安里 他 Super-Kamiokande  
Collaboration、スーパーカミオカンデにおけ  
る近傍超新星観測、日本物理学会 2014 年  
秋季大会、2014/11/21、佐賀大学 (佐賀県)

織井 安里 他 Super-Kamiokande  
Collaboration、スーパーカミオカンデにおけ  
る近傍超新星観測、日本物理学会第 70 回  
年次大会、2015/3/22、早稲田大学 (東京都)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早戸 良成 (HAYATO, Yoshinari)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：60321535

### (2) 研究分担者

中山 祥英 (NAKAYAMA, Shoen)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号：70401289

鈴木 聡 (SUZUKI, Soh)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器  
研究機構・計算科学センター・准教授

研究者番号：50280508

### (3) 連携研究者

内田 智久 (UCHIDA, Tomohisa)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加  
速器研究機構・計算科学センター・准教授  
研究者番号：40435615

### (4) 研究協力者

戸村 友宣 (TOMURA, Tomonobu)  
横沢 孝章 (YOKOZAWA, Takaaki)  
織井 安里 (ORII, Asato)