

T2K ニュートリノビームライン制御システム

高エネルギー加速器研究機構

鈴木 聡 坂下 健

soh.suzuki@kek.jp kensh@post.kek.jp

2010年(平成22年)2月15日

1 はじめに

1.1 本文

T2K 実験は、大強度陽子加速器施設 J-PARC の 30 GeV 陽子を用いてミューオンニュートリノビームを生成して、このニュートリノを 295 km 離れたスーパーカミオカンデ(SK)で検出し、電子ニュートリノ出現事象の発見や、ニュートリノ振動現象を精密測定することにより、質量、フレーバー混合などニュートリノの未知の性質を解明することを目指す実験である。

本記事では、T2K 実験のビームラインの制御システムについて紹介する。この制御システムとは、ビームの情報(強度、位置、ロスなど)やビームライン機器の情報を収集して、これらの情報からビーム軌道などを調整したり、ビームライン機器を操作したりして、フィードバックをかける仕組みである。以下の章では、まず、ビームモニターなどのデータ収集システム(第2章)、GPSを用いたSKとのイベント同期(第3章)を紹介し、次にEPICSを用いたビーム制御について紹介する(第4章)。第5章では、その他の制御システム(ビームラインのインターロック)について簡単に紹介する。なお、ビームライン全般については過去の高エネルギーニュース[1,2,3]、ビームモニターについては本号の別の記事に詳しい説明があるので、そちらを参照して下さい。

2 ビームラインデータ収集システム

2.1 目的と要求仕様

T2K 実験では、一次陽子ビームが大強度であるため、常時ビームをモニターして、ビームライン機器の放射化や、故障を防ぐ必要がある。また、ニュートリノビームの不定性を小さく抑えるためには、二次ミューオンビームの方向や強度を常にモニターし、ビーム方向のズレがないことを保証する必要がある。そのために、陽子ビームモニターやミューオンモニターなどの信号を、3.5 秒毎の加速器のビーム取り出しに同期してデータを収集して、常にこれらの量を記録し、監視する。ビームモニターの情報なしに運転しても、そのようなビームは後のデータ解析にも使えず、ま

た機器保護の観点からも危険なので、ビーム運転中にもデータ収集システムが止まってしまった場合は、ただちにビーム運転を停止する。

2.2 特徴

通常、データ収集システム(DAQ)で重要視されるのは全体としてのデータ処理速度や不感時間(一つのトリガーが受け付けられた後、次のトリガーの受け付けができるまでの時間)であり、システム内に滞留する時間についてはあまり問題にされない。

計算機でデータを処理する際、ディスクやネットワークに対する入出力操作はデータ量がどんなに小さくても一定のオーバーヘッドがかかる。そのためデータ量が小さい場合は個別に操作せずに、ある程度まとめてから入出力した方がこのオーバーヘッドの割合を削減することができ、全体の転送性能は向上する。このまとめ操作のために一時的にデータを保持するためのキャッシュが配置されていることが多い。このキャッシュのためにシステム内にデータが滞留する時間が発生し、データ記録装置やオンラインモニターなどに対してデータの到着時間の遅れや揺らぎが発生する。この遅れがビームライン DAQ では非常に問題である。

データ収集システム内に滞留する時間が長いと危険をせずデータが含まれていたり、正しくビームをモニターできていなかったなどの事態を制限時間内に検知することができない。T2K ビームライン DAQ システムではトリガーは 3.5 秒毎でデータサイズも 1 トリガーあたり数メガバイト程度であり、要求はさして厳しくないが、滞留時間はできるだけ短くするシステムを開発した。

2.3 ハードウェア構成

2.3.1 検出器

ビームラインモニタのための検出器として Current Transformer (CT), Beam Loss Monitors (BLM), Segmented Secondary Emission Profile Monitor (SSEM), Electro Static Beam Position Monitor (ESM), Optical Transition Radiation Monitor (OTR), Muon モニター, ホーン電磁石の電

流モニターが使用されている。これらに加えてビーム取り出しタイミングをGPSによってモニターしている。検出器はビームライン上に配置されており、最寄りの建物内で読み出しを行う。建物の数は全部で五つあり、それぞれの建物は光ファイバーによって結ばれ、ギガビットイーサネットを用いて通信を行っている(図1)。

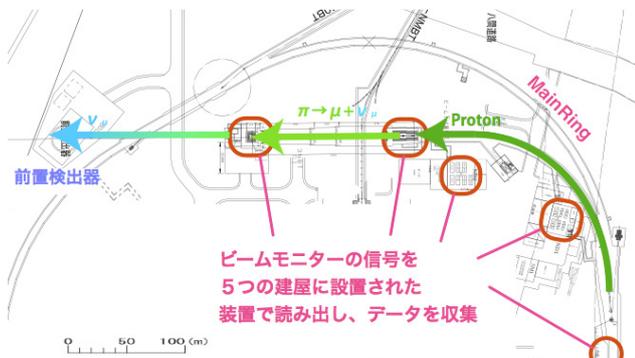


図1 ニュートリノビームライン全体図

約350mのビームラインに沿って五つの建屋があり、それぞれをギガビットイーサネットと光ファイバーで接続している。

2.3.2 読み出し機器

検出器からの信号をデジタル化する機器は検出器毎に異なる(表1)。SSEM, BLM, HORNの読み出しに65MHz FlashADCを装着したCOPPERが、ESM, CTの読み出しには160MHz サンプリングレートのADCが、またGPSおよびOTRについてはそれぞれ専用のハードウェアを使用している。65MHz FlashADCはT2K実験が初めて本格的に使用するハードウェアであり、COPPERの開発段階から入念なテストと性能評価を行ってきた。COPPERの読み出しに関して Belle 実験で蓄積してきたノウハウを活かし、非常に短い応答時間でデータの取り出しを可能にしている。

表1 各検出器の台数と読み出しチャンネル数

読み出しは、a: 160MHz FADC, b: COPPER 65MHz FADC, b': COPPER 65MHz FADCを200kHz サンプルで使用, c: 専用のハードウェア。GPSのデータを含めて、1スピルあたりのデータ量は約1.8MBである。

検出器	台数	総 ch 数	読み出し
CT	5	5	a
BLM	50	50	b
SSEM	19	912	b
ESM	21	84	a
OTR	1	画像情報	c
Mumon	Si:49 + IC:49	98	b
Horn Current	14	14	b'
GPS/LTC	1	-	c

2.4 ソフトウェア(MIDAS)

T2K 実験では J-PARC 側にビームライン, INGRID, 前置検出器(ND280)にそれぞれ独立の DAQ システムが存在するが、どれも MIDAS[4]ミドルウェアによってコントロールされている。MIDAS は、PSI と TRIUMF で開発されたデータ収集用ミドルウェアで、VME ドライバ・CAMAC ドライバ・イベントビルダ・遠隔操作用 WWW インターフェースなどを提供しており、RUN の開始・終了・状況確認など、実験シフトレベルの操作はすべて遠隔から可能である。プログラム間のデータ受け渡しは同一ホスト上では共有メモリが、異なるホスト間ではネットワークを通じて行われるが、これらの違いは MIDAS ライブラリ側で完全に隠蔽されており、プログラム側からは DAQ システムが複数のホストに分散しているかどうかを意識する必要がまったくない。データの受け渡し以外のログ集約やキャラクタ端末によるチャット機能なども MIDAS ライブラリで提供されており、ネットワーク操作を明示的に行うことなく複数ホストをネットワークで連携させて DAQ システムを構築することが容易に可能である。

MIDAS には OnlineDataBase(ODB)という仕組みが用意されており、キャリブレーションなどによって変動する値や、RUN 中の統計情報、その履歴などを自動的に記録することが出来る。ODB に記録される統計情報を元に警告の表示・RUN の強制停止を行うことも可能である。ODB の内容はテキストや XML 形式でバックアップ・リストアすることができ、過去の値に戻すなどの操作が容易である。

MIDAS で管理できるプログラムはトリガーに同期して検出器からデータを読み出すものに限らず温度などの環境条件などを定期的に読み出すプログラムや、MIDAS に対してデータのやりとりを行わないものでもよい。MIDAS で管理されるプログラムはウェブブラウザから動作状況の確認や起動・停止操作が行えるので、多数のプログラムが協調して動作しているときに状態の把握が行いやすい。

MIDAS が出力するデータフォーマットは MIDAS 独自・YBOS・ROOT などがある。MIDAS の独自形式で出力しておき、解析時に必要に応じてフォーマット変換を行うという手順が一般的であるが、T2K ビームライングループでは直接 ROOT 形式のファイルを生成することで、解析時の手間やディスク領域の節約をはかった。MIDAS から生成される ROOT フォーマットのファイルは特殊クラスを一切含まない TTree で記録されているため、粗い解析であれば root コマンドのみで即座に可能である。

2.5 DAQ システム構築

2.5.1 イベントビルダとサブイベントビルダ

T2K ビームライン DAQ のために MIDAS の利用を検討し始めたのは 2007 年末である。MIDAS は多数の実験で利用されているが、ソフトウェアの構造上、データ読み出しのプログラムの数に応じて DAQ サーバ上のプロセスが増加する。このため、UNIX ベースの OS では応答時間が悪化することが予想された。そこで MIDAS の提供するイベントビルダで複数のデータ源からのデータを結合する所要時間を測定し、MIDAS イベントビルダの性能の評価を行った。ダミーデータを生成するソフトウェアを用意して、MIDAS のデータ源の数を増やしていった結果が図 2 である。実際にはデータ源の数は 50 前後になるので、MIDAS に直接すべての読み出しプロセス管理を任せると、要求性能を達成することは不可能に近いと判断された。遅延の振る舞いを見ると UNIX 上のプロセス切り替えの影響と考えられる。このプロセス数を少なくするため、サブイベントビルダを用いた多段階イベントビルドを行う方針とした。サブイベントビルダは MIDAS からみると一つのデータ源であるが、実際には多数の COPPER からのデータを自力で収集し、一つのイベントにまとめて MIDAS に送り出すものである。

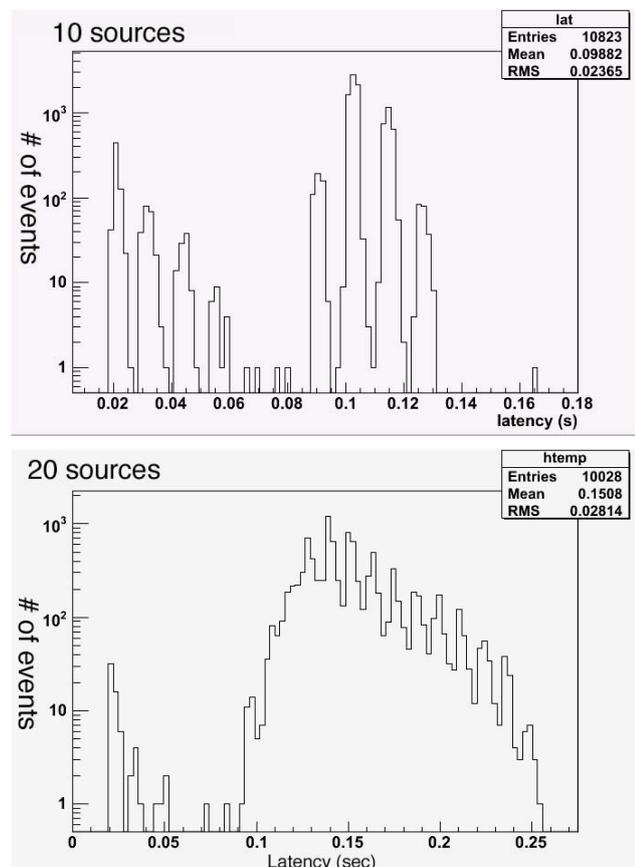


図 2 データ源の数が 10 および 20 個の場合のデータ発生時刻からデータ収集完了までの遅延時間

UNIX のタイムスケジューリングの特徴である 10 ミリ秒単位の切り替えの影響が見られる。

サブイベントビルダと COPPER の間のデータ転送には MIDAS の機能を用いず、ROOT オブジェクトをソケット経由で直接受け渡すものとした。

サブイベントビルダを採用する場合のシステムの性能を測定するため、COPPER を 12 枚用意し、実際の実験で想定されるデータを発生させ、イベント発生時刻からイベントビルド完了までの遅延時間を測定したところ、ほとんど 6~7 ミリ秒であったが、稀に 250 ミリ秒を越えることがあった(図 3)。ネットワークモニタを行った結果、パケットロスが発生した際に遅延が延びていることがわかった。COPPER の出力は 100Mbps であるが、12 枚からのデータが同時にスイッチに到着するとスイッチ上でパケットロスが発生したと考えられる。この問題は産総研で開発された PSPacer[5,6] を COPPER モジュールに適用して速度を調整し、パケットロスが起きないようにすることで解決した。その後 32 枚の COPPER を二つのサブイベントビルダで集約した場合の遅延を測定したところ、常時 20 ミリ秒に収まる結果となった。サブイベントビルダを使用して建物毎の COPPER をそれぞれ一つに集約すると DAQ システム全体のプロセスは 10 前後となり、イベントビルダとして MIDAS を採用しても要求性能を満たすことが可能となった。

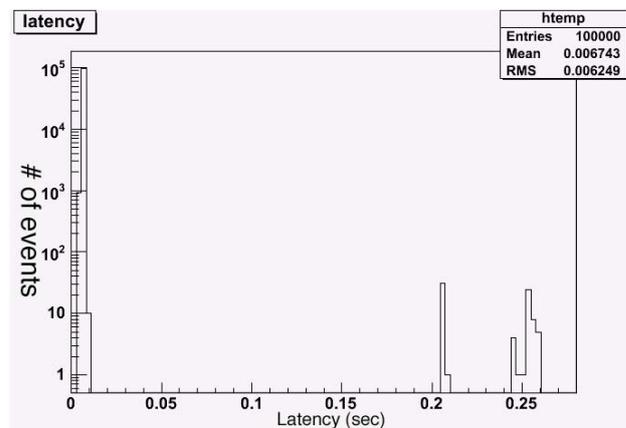


図 3 サブイベントビルダが 12 枚の COPPER 想定サイズのデータを収集した際の処理完了までの遅延時間

250 ミリ秒を越える遅延が稀に発生している。

2.5.2 データの記録

MIDAS においては、データ記録は、通常 mlogger と呼ばれるプログラムを用いて行う。これは、各データ源が送ってくるデータの構造を保持して記録していくものである。イベントビルダから受け取るデータは MIDAS 形式であるため、MIDAS 形式以外でファイルに記録する場合は変換が必要となる。T2K ビームライン DAQ においては、ROOT 形式でデータを記録することとしたので、mlogger でデータ形式の変換も行う。配送されている mlogger にも ROOT 形式への変換機能は実装されているが、この変換を行うためにはすべてのデータ源の生データを ODB 上にも展開する

に使用している FlashADC は VME モジュールであり、複数の FlashADC を一つの VME クレートに装着して一つのコントローラで読み出している。この読み出しに DMA 機能がないためクレート全体のデータ量に応じて読み出し時間が伸び、データを読み出し PC のメモリ上に読み出す部分だけで 100ms 以上の時間が消費されることが原因である。

3 GPS を用いた SK とのイベント同期

SK での T2K ニュートリノ事象を同定するために、ビーム生成時刻を GPS をもちいて記録し、この情報を用いて SK とイベント同期を行っている。

SK で T2K 事象が起こるタイミングは、時刻 T_{SK} ;

$$T_{SK} = T_{trig} + T_{delay} + T_{TOF}$$

で表す事ができる。ここで、 T_{trig} は、加速器からの取り出し信号と GPS を用いて測定したビーム時刻、 T_{delay} は、このビーム時刻から実際に陽子ビームがターゲットに衝突する時刻までの遅延時間、 T_{TOF} は、ターゲットから SK 検出器にニュートリノが到達する飛行時間である。東海側(ビームライン)と神岡側(検出器)で、同様に GPS を用いて時刻を記録して T_{SK} の時の SK 事象を探すことで、T2K ニュートリノ事象を測定する。

東海側、神岡側ともに、それぞれ二つの GPS 受信機を用いて時刻を記録している。二つの受信機を用いることで、片方の受信機が故障しても、もう一方の受信機のデータを用いてイベントを失うことを回避できる。ビーム時刻は、GPS からの 1pps 信号を 100MHz のクロック(ルビジウム原子時計の 10MHz クロックを利用して生成、神岡側は 60MHz で運用)で内挿した値が、Local-Time-Clock(LTC)と呼ばれるカスタムメイドの VME モジュールによって記録される(図 6)。

T_{delay} は、取り出し位置からターゲットまでの距離を GPS を用いた測量で測定し、この情報に加えてすべてのロジックや信号ケーブルの遅延時間の測定結果を用いて計算する。 T_{TOF} もターゲットから SK 検出器の中心までの距離を GPS を用いた測量で測定して、算出している。

実験の間、 T_{SK} の安定性をモニターするために、各 GPS で測定した時刻の差や、加速器からの取り出し信号と実際のビーム信号(陽子モニターからの信号)の相対時間差をスピル毎に測定して確認している。本格的に運用を始めた 2009 年 4 月から現在まで、GPS 受信エラーはなく、東海側の二つの GPS で測定した時刻の差は 200nsec 以内で一致している。(この時刻の差は 200nsec 以内ではあるが、差の値が時期により変化する現象が起きている。この原因については、現在調査中である。)また、加速器からの取り出し信号と実際のビーム通過の時間差も 5nsec 以下で安定している。

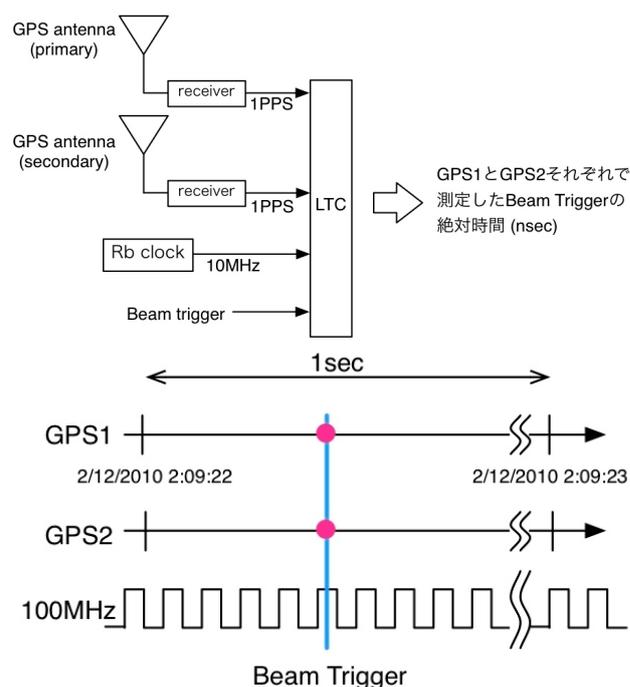


図 6 GPS を用いたビーム時刻の測定

4 EPICS を用いた情報収集と制御

ビームラインを安定に運用するためには、最初に述べたように、ビームモニターの情報や、その他のビームライン機器からの情報をもとに、ビーム軌道を調整したり、ビームライン機器を操作したりして、フィードバックをかける(制御する)必要がある。

これまでに紹介したビームモニターのデータ収集とは別に、ビームライン機器の情報や加速器の情報を収集してビームライン機器を制御するために、EPICS¹ と呼ばれる分散制御システムを用いている。EPICS は、J-PARC の加速器制御で用いられており、加速器と情報を共有するためにも、制御システムの構築に EPICS を用いた。

EPICS を用いて収集している情報は、ビームライン機器の状態(運転/停止、異常、設定値/運転値など)、各装置の温度・流量・圧力や、DAQ のラン番号、スピル番号など様々である。これらの情報は、一定時間毎にディスクにアーカイブされており、過去のデータを参照することも可能である。

機器の制御には、主に PLC(Programable Logic Controller)を用いている。PLC は、シーケンスを動かすための CPU モジュールやデジタル入出力、アナログ入出力モジュールを備えた機器である。あらかじめ「入力信号がある条件になった場合に、モジュール○○の ch1 から出力信号を出す」などといったシーケンスを用意して PLC 上で動かすことにより、機器を制御している。また PLC を EPICS で上位操作することで、遠隔での制御を実現している。この PLC

¹ Experimental Physics and Industrial Control System[7].

や、機器の状態監視をするためのデータロガーなどをEPICSを用いて装置を制御するために、加速器制御グループの開発した各装置のデバイスドライバーを使用した。

また、ニュートリノビームラインのビーム調整でもEPICSを利用している。前述のビームラインDAQで収集したビームモニターの情報、オンラインモニターによって物理量(ビーム強度、位置、プロファイルなど)に変換された後に、EPICSを用いて制御ネットワークに送信される。これらの情報を別の端末上のビーム軌道・オプティクス調整ツール(SAD[s])で読み取り、計算との比較、調整に必要な電磁石の電流変化値の計算などを行う。電磁石の制御は、制御室から専用のSQLデータベースを操作して行う(図7)。

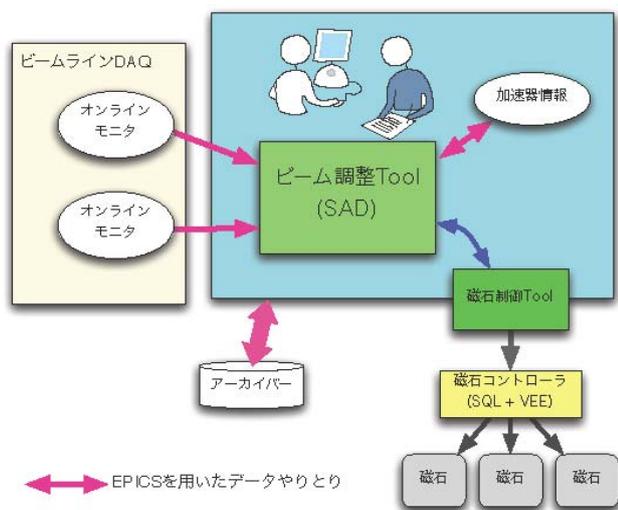


図7 EPICSを用いたビーム調整

加速器とニュートリノビームラインで双方向で各々のEPICSデータの参照が可能であるため、お互いの機器運転状態を確認したり、ビーム取り出し部とニュートリノビームラインの情報を統一的に解析してビーム調整をしたりできる。当初の目的とおり、機器立ち上げやビームコミッショニングではEPICSを用いた一体的なビームライン制御を実現することができた。

5 インターロック

T2Kニュートリノビームラインでは、人保護インターロックと機器保護インターロックの2種類のインターロックシステムが稼働している。共にJ-PARC加速器施設で共通のインターロックであり、異常時には加速器の運転を停止させる。

前者はビームライン施設での放射線被爆からの人の保護と法令で決められた放射線施設の認可条件の担保を目的にしており、非常停止ボタン、扉インターロック、パーソナルキー、空調排気機器、ビーム誤入射防止機器や、放射線エリアモニターなどのインターロックである。また、この

インターロックシステムによってJ-PARC加速器のビーム運転モード(ビーム行き先)も決めている。

後者、機器保護インターロックは、大強度ビームからビームライン機器を保護するためのインターロックであり、機器異常時に、メインリングの中のビームをアボートダンプへ放出し、ニュートリノビームラインへのビーム入射を防いで、機器を保護する。また、ビームロスをも最小限に抑えて機器の放射化を防ぐ目的もある。T2Kニュートリノビームラインでは、超伝導電磁石のクエンチ発生、常伝導電磁石の異常、ビームラインの真空異常、ホーン電磁石の電流バランス異常やビームロスが閾値を超えた場合など(その他にも多数)が、機器保護インターロックに含まれている。

これらのインターロック要素は、ビーム運転前に実際に異常信号を発報して、ビーム停止のロジックが正しく動作するかの確認を行った。機器保護インターロックについては、ビームコミッショニングの初期に、実際にビーム運転を行って、インターロック発報時にビームがアボートダンプへ放出されることも確認した。

6 今後

これまでに、システムのコミッショニングや、2009年4月からはビームコミッショニングを行った。各制御システムは大きな問題はなかったが、より安定した運用のために少しずつ改善を行っている。

次のステップは、ビームの大強度化に向けたビームライン制御システムの改善である。J-PARC加速器の大強度化に向けて、取り出し周期が段階的に短くなっていくので、短い取り出し周期を想定した試験と必要な改善を行っている。

7 おわりに

T2Kビームライン制御システムの開発・構築にあたっては、KEK加速器グループ、計算機科学センター、エレクトロニクスシステムグループ、ハドログループ、施設部など色々な方々のご支援・ご協力をいただきました。この場をお借りして感謝と敬意を表したいと思います。

参考文献

- [1] 小林 隆, 「T2K 実験の概要」, 高エネルギーニュース, 28-2 (2009).
- [2] 藤井芳昭, 山田善一, 「ニュートリノ実験施設の概要」, 高エネルギーニュース, 28-2 (2009).
- [3] 荻津 透, 槇田康博, 「J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導複合磁場電磁石システムの開発」, 高エネルギーニュース, 28-2 (2009).

- [4] <https://midas.psi.ch/>
- [5] R. Takano, T. Kudoh, M. Matsuda, Y. Kodama, H. Tezuka, and Y. Ishikawa, *A Consideration of TCP/IP Congestion Control Mechanisms for the GridMPI (in Japanese)*, SWoPP04 (2004).
- [6] R. Takano, T. Kudoh, M. Matsuda, Y. Kodama, H. Tezuka, and Y. Ishikawa, *Precise Software Pacing Method for Long Fat Pipe Communication (in Japanese)*, Internet Conference (IC2004) (2004).
- [7] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [8] Strategic Accelerator Design,
<http://acc-physics.kek.jp/SAD/>