

T2K 実験ミューオンモニターの開発

京都大学大学院理学研究科

松岡 広大, 久保 一

matsuoka@scphys.kyoto-u.ac.jp, kubo1@scphys.kyoto-u.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科

横山 将志

masashi@phys.s.u-tokyo.ac.jp

2010年5月18日

1 はじめに

T2K 実験は、J-PARC 加速器を用いて作り出したニュートリノを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで検出し、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動現象の探索をはじめとするニュートリノ振動の精密測定により、ニュートリノの質量とフレーバー混合の研究を行うことを目的とした実験である。本稿では、T2K 実験の実験装置のうちミューオンモニターについて紹介する。T2K 実験全体の概要、およびビームラインの他の機器については最近の一連の高エネルギーニュースの記事[1]に詳しい説明があるのでそちらを参照していただきたい。

2 ミューオンモニターの設計

2.1 概要

ミューオンモニターは、ビームライン中で π 中間子の崩壊によってミューオンニュートリノと共に生成されるミューオンの分布を測定することで、ニュートリノビームの情報をビームバンチごとに得る検出器であり、T2K 実験の中で二次ビームの状態を即時に監視できる唯一の装置である。標的で反応しなかった陽子や崩壊しなかった π 中間子などの大量のハドロンを浴びることを避けるため、ミューオンモニターはビームダンプの背後に設置されており、ミューオンの中でも約 5 GeV 以上の高エネルギー成分のみに感度をもつ。

ミューオンモニターの信号からミューオンの空間分布を再構成することで、ビームの方向や広がり、強度の情報を得ることができる。T2K ではオフアクシス法[1]を採用しているために、ビームの方向とスーパーカミオカンデで検出されるニュートリノのエネルギー分布には強い相関がある。このため、ニュートリノビームの方向を制御することが重

要であり、T2K で目標とする測定精度を達成するためにはビーム方向の安定性が 1 mrad よりも十分によいことが要請されている。また、仮に陽子ビームやニュートリノ生成機器の状態に変化があると生成される二次ビームの分布や強度が変わる。これらをデータ収集中に常時モニターし、必要ならば上流の機器を調整する必要があるのだが、ニュートリノ反応を測定しては反応率が低いために短時間の変化を追うことは不可能であり、即時のフィードバックが可能なミューオンモニターからの情報はビームの調整や安定運転のために不可欠である。

ミューオンモニターに入射する荷電粒子(大部分はミューオン)のフラックスは設計強度でスパルあたり約 $10^8/\text{cm}^2$ にも達し、検出器では 100 kGy / 年 程度の放射線吸収線量が予想されている。従って、使用する検出器は放射線耐性が高く、また万が一の場合に直接メンテナンスが可能なように放射化しにくい物質を選ぶ必要がある。加えて、もし本体にアクセスが必要な故障があると、しばらくビーム運転を止めねばならないため、運転中にメンテナンスが不要で、できるかぎり故障しない堅牢な設計が要求される。

このような要求を満たす検出器として、平行平板型のイオンチェンバーとシリコン PIN ダイオードを使用し、それぞれ 7×7 のアレイで $150 \times 150 \text{ cm}^2$ の領域をカバーする設計を選んだ。2 種類の検出器を使用するのは冗長性のある測定によりシステムとしての安定性を担保するとともに、独立な検出器間でのクロスチェックにより検出器の信頼度を高めるためである。

これらの検出器は図 1 のように、ビーム上流側にシリコン、下流側にイオンチェンバーという形で架台に設置される。架台には駆動機構が備わっており、後述するように検出器間の相対的な較正が可能となっている。

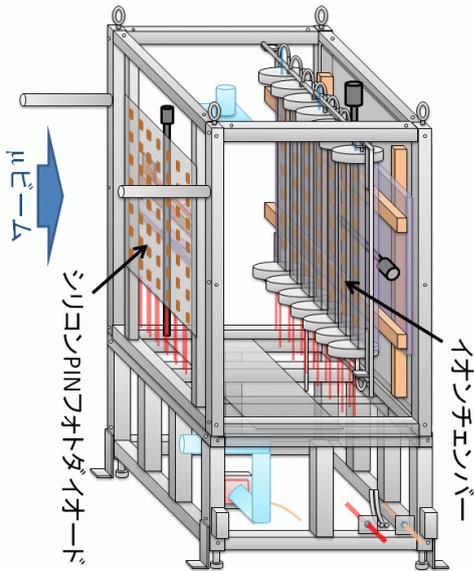


図 1 ミューオンモニターの模式図
ビームは図中左側から右側へ抜けて行く。

2.2 シリコン PIN フォトダイオード

ミューオンモニターのシリコン検出器には図 2 の浜松ホトニクス製シリコン PIN フォトダイオード, S3590-08 を使用している。検出領域面積は $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 、空乏層の厚さは $300 \mu\text{m}$ である。

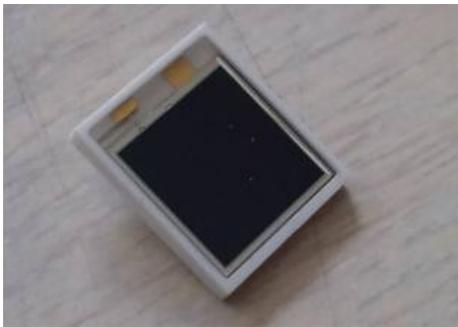


図 2 浜松ホトニクス製 S3590-08 シリコン PIN フォトダイオード

このシリコン検出器を使う利点としては、安価で入手が容易である点、K2K 実験[2]のミューオンモニターとして 5 年間安定動作していた実績がある点、ガス検出器より取り扱いが単純で温度・圧力変動の影響を受けにくい点などが挙げられる。また、固体検出器であるため中程度の利得(入射ミューオン 1 粒子あたり約 30,000 電子-ホール対生成)を持ち、比較的ビーム強度が弱くても測定が可能である。

弱点は放射線耐性であり、定期的な交換が必要である。設計ビーム強度で毎スビル 1 cm^2 あたり 10^8 個のミューオンにさらされた場合には、1 ヶ月以内の運転で性能劣化が起きると予想され、もはや交換では対処できなくなる。そのためダイヤモンド検出器や CT などを候補に、より放射線耐性の高い代替検出器を研究している。

われわれはこの検出器を放射線耐性に優れた PEEK 樹脂にピンソケットを埋め込んだマウントに取り付け、これも放射線に強いポリイミド製のケーブルを接続し、アルミニウム製のシールドで覆ったパッケージを製作した(図 3)。検出器部分のみを簡単に着脱できるため、放射化した環境での交換作業を短時間で行うことができる。

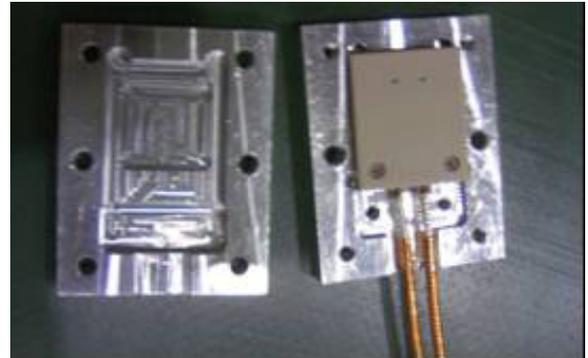


図 3 シリコン検出器パッケージ

2.3 イオンチェンバー

もう一つの検出器として、平行平板型のイオンチェンバーを用いている。基本構造は米国 FNAL のビームラインで実績のある NuMI ミューオンモニターのイオンチェンバー[3]を参考にした。 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の電極板が 2 枚、 3 mm の間隔を空けて平行に並び 1 つのチャンネルを構成する(図 4)。電極間には 200 V の電圧が印加される。有感体積は $75 \times 75 \times 3 \text{ mm}^3$ である。7 チャンネルを 25 cm 間隔で並べたものが長さ約 2 m のガス容器に収納され、これをやはり 25 cm 間隔で 7 本並べて検出器を構成する。

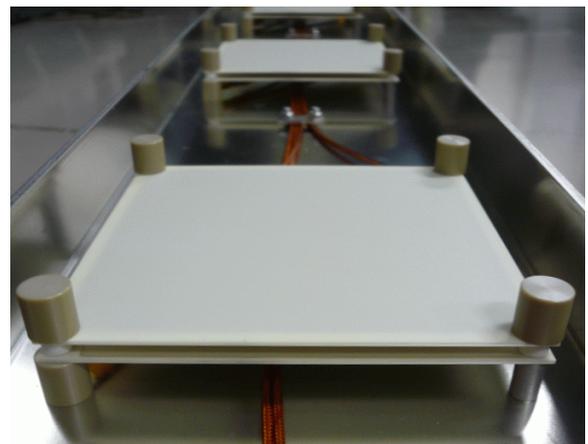


図 4 イオンチェンバー内部の電極部

ここで、イオンチェンバーの動作原理を簡単に説明する。荷電粒子が電極間を通過すると、ガスが電離し、電極間に印加した電圧により電離電子は陽極へ、電離イオンは陰極へドリフトする。このとき電極に誘起される電荷を信号として読む。すなわち、電極間ガス中に粒子が落としたエネルギー(粒子数)に比例した信号が得られる。

イオンチェンバー設計のコンセプトは以下の4つである。

(A) 入射粒子数に比例した応答

ミュオンモニターは、ビームコミッショニングでの約1kW 運転時からデザインビーム強度の750kW まで、常にかつ精度よくビームをモニターしなければならない。そこで、低ビーム強度(陽子ビーム強度200kW 程度まで)のときは電離量の大きいアルゴンと窒素(2%)の混合ガスを用い、高ビーム強度のときは逆に電離量を抑えるためヘリウムと窒素(1%)の混合ガスを使用する。これは、電離量が大きすぎると、電子がドリフト中にイオンと再結合してしまい、粒子数に比例した応答が得られなくなるからである。

(B) 速い応答

ミュオンモニターでは、581nsec の間隔でやってくるバンチごとの情報を測定したいので、速い応答を得るために電離電子のドリフトで誘起される電荷のみ読み出す。電離イオンのドリフトは電子の約1000分の1と遅く、電子がドリフトする時間スケールではイオンはほとんどドリフトせず、したがって信号にも寄与しない。より速い応答を得るには、電極間隔 D をできるだけ小さくすればよい。しかし、間隔が小さすぎると製作精度 ΔD が顕在化してチャンネルごとのばらつき $\Delta D / D$ が大きくなり、また低強度ビーム運転時に十分な信号が得られなくなる。われわれは最適な間隔として3mm を選んだ。

さらに、電子のドリフト速度を高めるため、アルゴンに窒素を2% 混ぜたことで、純粋なアルゴンの場合に比べパルス全幅が約半分になり、バンチごとの信号をほぼパイルアップすることなく読み出すことができるようになった。

(C) 安定な応答

イオンチェンバーの安定な応答を得るためには、ガスの圧力・温度・純度を一定に保つことが必須である。ガス圧力は、放射線を避けるためイオンチェンバーから約13m 離れた場所で、絶対圧力センサーを用いてモニターしている。PID 制御の比例電磁弁によって、圧力は絶対圧で $130 \pm 0.1\text{kPa}$ に保たれている。

ミュオンモニターの周りには、ビームダンプ冷却用の水配管が張り巡らされており、そこからの熱流入によって周囲の温度が数°C から34°C 程度まで変動すると見積もられている。そのため、ミュオンモニターの架台を断熱アルミパネルで覆い、内側の空気をサイリスタ制御のヒーターで34°C に温めている。これにより、ガスの温度変化を $\pm 0.2^\circ\text{C}$ に抑えている。なお、ガス温度は、白金測温抵抗体をイオンチェンバーガス容器の中に入れて常時モニターしている。

また、電子親和性の酸素などがガス中に混入すると、電離電子が吸着され信号が減少してしまう。よって、空気の混入を防ぎガス純度を高く保つことが必要である。そこで、配管にはすべて、アウトガスの少ないステンレス鋼管を用いている。また、常時100cc/min の流量でガスを流し捨てている。この結果、酸素濃度は、100ppm 以下の要求に対し2ppm までに抑えられている。

純粋な希ガス中にごく微量の窒素などが混入すると、ペニング電離により電離量が増大する(Jesse 効果)。アルゴン・ヘリウムガスに窒素を混ぜているのはこの効果を飽和させるためでもあり、多少のガス純度の変動ではイオンチェンバーの信号が変動しない設計になっている。

(D) 耐放射線性

ミュオンモニターが浴びる放射線量は、750kW 運転時に年間約100kGy と見積もっている。最低でも5年間メンテナンスなしに運転できるように、イオンチェンバーは放射線に強くかつ放射化しにくい物質で作られている。ガスチューブ、フランジ、ねじなどの構造体はすべてアルミ製で、絶縁体にはポリイミド、PEEK やセラミックを使用している。また、検出器を設置する架台もアルミ製である。

2.4 DAQ システム

ミュオンモニターの各検出器の信号は、約10m の耐放射線性同軸ケーブルと約70m の難燃性同軸ケーブルを介して地上のエレキハットへと導かれ、KEK で開発された FINESSE 65MHz FADC によって読み出される。DAQ システムについては、前号の鈴木・坂下両氏による記事[1]に詳しく紹介されているのでそちらを参照していただきたい。

図5はFADC により記録されたシリコン検出器の信号波形である。約600nsec 間隔でバンチが6つあるビームの時間構造が確認できる。この波形を積分することで各チャンネルの収集電荷量を計算し、スパル毎、さらにはバンチ毎のビームプロファイルの再構成を行うことができる。

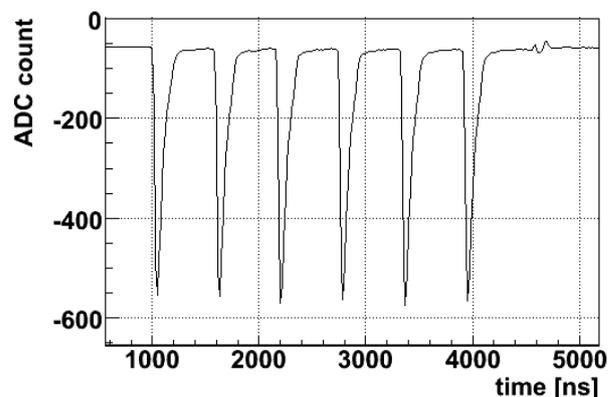


図5 FADC 読み出しによるシリコン検出器の信号波形

3 開発の歴史

3.1 京都大学化学研究所でのビームテスト

ミュオンモニター開発の歴史は、京都大学化学研究所(化研, 宇治市)でのビームテストの歴史といっても過言ではない。

これまで実に7回ものビームテストを化学研究所・先端ビームナノ科学センターの100MeV電子線形加速器を用いて行ってきた(表1)。化研の電子線形加速器は、電子蓄積・ストレッチャーリング(KSR)への入射装置でもあるが、われわれのビームテストでは線形加速器からの時間幅約50nsecのパルスビームを直接検出器に照射した。パルスの繰り返しは15Hz, パルスあたりの電子数はおおよそ 10^5 から 10^{10} まで調整可能で、T2Kで予測されるミュオンビーム強度のすべての範囲をカバーできる。ビームプロファイルは $\sigma \sim 6\text{mm}$ のガウス分布に近く、イオンチェンバーの有感領域 $75 \times 75\text{mm}^2$ 内にすべて収まる。ビーム強度はCT(Current Transformer)で、ビームプロファイルは9つのシリコンPINフォトダイオードをアレイ状に並べたもので測定した。

表1 宇治ビームテスト年表

Si: シリコンPINフォトダイオード, IC: イオンチェンバー,
Dia: ダイヤモンド検出器, MCT: ミュオンCT

年	月	内 容
2005	10	IC(純 Ar)試作機 v1.0 の動作テスト。 Si, 多結晶 Dia の動作テスト。
2006	7	IC(純 Ar, 純 He)試作機 v1.1 と Si の動作テスト。多結晶 Dia の基礎特性の測定。
	12	IC(Ar + N ₂ , 純 He)試作機 v2.0 の動作テスト。IC 実機デザインの決定。 多結晶 Dia の基礎特性の測定。
2007	6	T968 用ミニ IC の動作テスト。 多結晶 Dia の基礎特性の測定。
2008	7	IC(Ar + N ₂)実機全 8 台の動作テスト。 HV のサージ電圧により FADC 故障。
	9	再テスト。加速器電源故障で中断。
2009	2	(ミュオンモニターのインストール)
	7	ミニ IC を製作, 圧力依存性などを測定。 単結晶 Dia, MCT など Si に替わる新しい検出器の動作テスト。Si の放射線耐性試験。

宇治ビームテストでは、各検出器の応答時間、応答の印加電圧依存性、入射ビーム強度に対する応答の線形性についておもに測定し、シリコンPINフォトダイオード、イオンチェンバーとも要求される性能を満たすことを確認した。詳しくは[4]を参照。ここでは、ビームテストで測定した各検出器の特性について、次の2つに話題を絞って述べる。

(A) シリコンPINフォトダイオードの放射線耐性

事前に文献で調べたところによると、750kW 運転時には約8日間で型反転(*p*型が*n*型に変わる現象)が起こって、シリコンPINフォトダイオードは動作しなくなると予想していた。実際にわれわれの使用する検出器がどの程度放射線に強いのかを確かめるため、約4時間にわたり電子ビームを照射し続けた。図6に、ビームを照射した3サンプルと照射していないレファレンスサンプルの収集電荷量の比を示す。 $1 \times 10^{14}\text{electron/cm}^2$ (750kW 運転で約20日分のT2Kミュオンビーム量に相当)以上照射すると信号が減少してくるが、当初予想していたよりも高い放射線耐性があることがわかった。

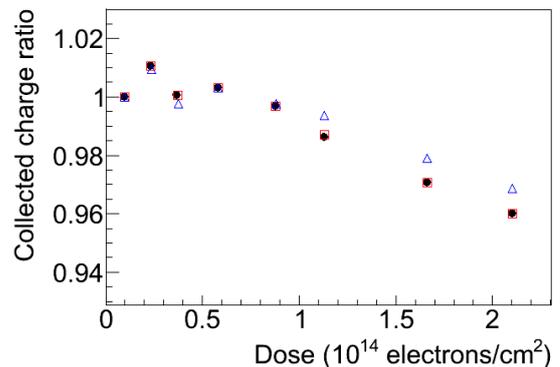


図6 電子ビーム照射量に対するシリコンPINフォトダイオードの収集電荷量の推移

(B) イオンチェンバーの応答の線形性

図7に、照射ビーム強度に対するイオンチェンバー(He + 1%N₂)の収集電荷量の相関を示す。チェンバーを通過する粒子数としてはおおよそ設計ビーム強度750kWに対応する領域まで測定をした。ただし、このビームテストではビームの広がり小さいため、電荷密度に依存する効果に対しては実際よりも厳しい条件となっている。印加電圧が150V以下では、ビーム強度が強くなると、電離電子とイオンの再結合による収集電荷量の減少が見られる。200Vのときは線形な応答が得られ、フィットした直線からのデータ点のずれは1.7%以内に収まっている。

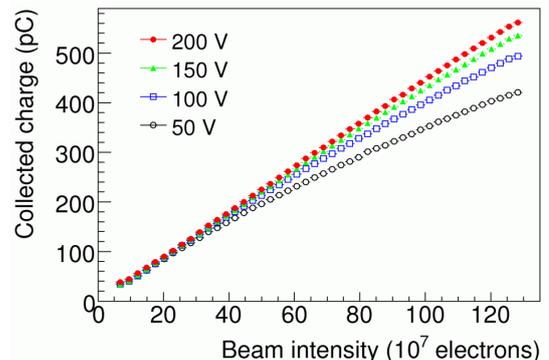


図7 イオンチェンバー(He + 1%N₂)の応答の線形性異なる4つの印加電圧について示した。

3.2 FNAL-T968 テスト実験

宇治でのビームテストで検出器の基本性能に自信を得たわれわれは、最後に残された課題であった長期安定性の検証と設計の最終確認のため、米国 FNAL の NuMI ビームラインにおいて長期試験を行った[5]。この試験は FNAL にテスト実験として提案を行い、正式に T968 として採択された。NuMI ビームラインは、FNAL の Main Injector 加速器からの 120 GeV 陽子を利用したニュートリノビームラインであり、長基線ニュートリノ振動実験 MINOS が行われている。

図 8 に NuMI ビームラインの概観図を示す。NuMI ビームラインには 3 つのミュオンモニターがあり、ハドロン吸収体と岩盤を突き抜けてくる高エネルギーのミュオンの分布をイオンチェンバーで測定している。

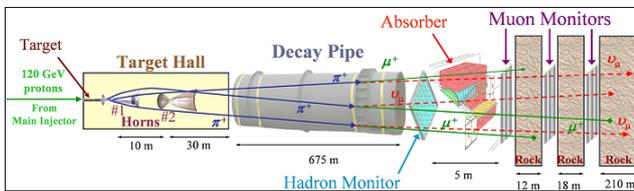


図 8 NuMI ビームラインの概観図

われわれは、設置スペースの都合で 3 チャンネルに小型化した以外は実機と同じデザイン・材質のイオンチェンバーを製作して、シリコン検出器 2 チャンネル、ダイヤモンド検出器 2 チャンネル と共に NuMI 第 2 ミュオンモニターの下流に設置した(図 9)。チェンバー試作機に使うガスは NuMI のミュオンモニターで使ったヘリウムガスの排気を、そのまま利用させていただいた。

試作機を設置した位置に、当時の NuMI のビーム強度 (2×10^{13} protons/spill) で到達するミュオンの数は約 $2 \times 10^6/\text{cm}^2$ であり、これは T2K 実験ミュオンモニターが初年度の調整運転中に測定するミュオン数にほぼ同等の理想的な試験環境であった。



図 9 設置された T-968 用プロトタイプ検出器

手前の短いチューブがわれわれのインストールした試作機、奥に見える数本の長いチューブが NuMI ミュオンモニターである。

密度の低いヘリウムガスを使用していることもあって、イオンチェンバーからの信号サイズは 0.2mV に過ぎず、十分な測定精度を得られるか危惧されたが、周辺の電氣的ノイズが非常に小さいことに救われ、十分な精度の測定が行えることがわかった。

データ収集は 2007 年 11 月から 2008 年 6 月までの半年間行った。試作機はその間トラブルも性能劣化もなく、安定して稼動し続けた。図 10 は陽子数 10^{12} あたりの収集電荷量であるが、両検出器とも $\pm 2\%$ の範囲内で安定している。

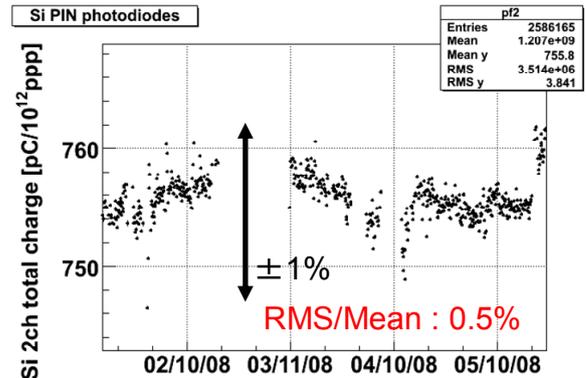
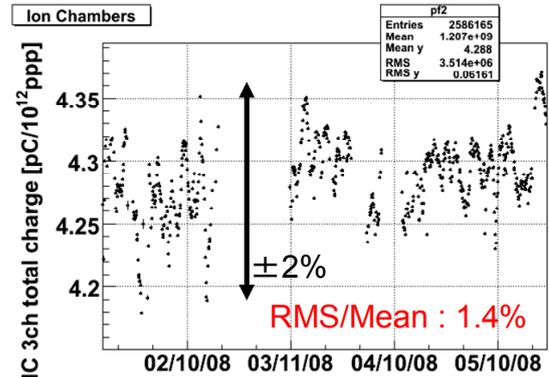


図 10 陽子数 10^{12} あたりの T954 での収集電荷量の推移

上：イオンチェンバー，下：シリコン検出器。各データ点は数時間の測定値の平均を示す。ガス純度が著しく悪化した期間のデータは除いてある。

イオンチェンバーの方が大きくばらついているのは単に信号サイズが小さいからではなく、ヘリウムガスの純度・温度・圧力の変動による影響を受けているためである。

測定期間中には、人為的ミスによりガス純度が悪化してペニング電離を起こし、一時的に信号量が 50% も増大したことがあった。信号量がガスの状態によって変動する問題は NuMI ミュオンモニターを担当している人々の頭を悩ませていたようで、このような問題点の情報を共有し、さらに測定器運用の実験を得ることができたことは、この長期試験のもうひとつの大きな意義であったといえる。

4 実機の製作・設置とファーストビーム

上記のように数々の試験で検出器の性能を確認した後、2008年夏に実機を製作し、直後に宇治でイオンチェンバー全チャンネルのビーム試験を行った。

試験前にチェンバーのチャンネルをチェックしたところ、なんと3割程度のチャンネルで電極とケーブルの接触不良が見つかった。ミュオンモニターでは、あたり一面を強力な荷電粒子ビームが通過するため、電極やケーブルの導体部が外部に露出していると周辺から電荷を収集し、余計な信号を拾ってしまう。これを避けるために電極と高压/信号線の接続部は、PEEK製キャップで機械的に押さえて接触を保つ特殊な構造になっていた。京大理学部から化学研究所までの運送時にこのキャップがゆるみ、接触不良をおこしたものと判明した。設計を変えて振動に強いロックナットで押さえつけた上からキャップをかぶせる構造とし、また輸送用の梱包も全面的に見直した結果、この後J-PARCへの輸送、ピットへの設置、後述の較正のための移動などを行っても不具合は発生していない。

また、チェンバーのフランジとガスを流すチューブの溶接による接合部の強度が十分ではなく、リークが発生するという事件もあった。あわてて設計を見直し、フランジを全数作りかえて対処した。さらに、ビーム試験では読み出しに本番と同じFADCを使用していたが、そのゲインが試験中に大幅に変動するという事象が起きた。調査の結果、使用していた高電圧モジュールの主電源を切る時に巨大なパルスが出ていて、それが入力部の抵抗を壊していたことが分かった。本番ではFADCの前に保護回路を挿入して再発を防いだ。実機の運用に向けて不具合を洗い出すという意味では非常に成果の大きいビームテストとなったが、実験開始まで残り半年を切り、本当にすべての不具合を解消できたのかどうか不安な日々を過ごすこととなった。

秋には検出器をJ-PARCに運び、地上で実際に架台に設置して不都合がないか確かめるとともに、実際の環境に近い形でチェンバーの温度制御やガスシステムなどの試験を行った。

2009年2月13日から14日にかけて、地上での試験をすべて終え、いよいよミュオンモニターをビームラインへ設置した。ピット内では前日までディケイボリューム/ビームダンプのための冷却水配管作業が行われており、直後には天井を埋める土木工事が始まるというスケジュールの間隙を縫って、架台の据え付け・位置出しと検出器の設置を終わらせた。ミュオンモニターの測定に影響する検出器上流側を除くピットの内側は配管で埋め尽くされており、架台を入れるとほとんど人が通るのがやっとという隙間しか残らない。それどころか、あやうくミュオンモニターの設置予定地に配管が置かれ干渉するところであったのを、

施工直前に気づいて変更をしてもらったりもした。図11は架台を地下のピットに設置した直後の写真である。この2日後からは天井の埋め戻しが始まったため、このように上からのぞくことができたのは非常に短期間だけであった。



図11 架台を地下ピットにインストールした直後の記念写真
右下から時計回りに、丸山(KEK)、村上(京大)、久保、松岡、横山。

天井のコンクリート打設中は安全のためピット内に立ち入れず、それ以外の場所で読み出し系のチェックやガスシステムの構築などを行い、立ち入りが可能になるとすぐに、配線や配管のつなぎ込み、架台の動作や温度制御の試験などを急ピッチで進めた。天井の埋め戻し直後には天井や周囲のコンクリートから水が出てくるなど様々な困難があったが、そんなこともあろうかと天井に張っていたビニールシートをさらに強化するなどしてなんとか乗り切った。3月末までにはどうかすべての動作確認を終えることができ、その後もビームラインのその他の機器とともに総合試験を続け、ついに4月23日、ファーストビームの日を迎えた。ビームラインの全機器を立ち上げた後、最初のビームを入射するカウントダウンの声が途切れた直後、オシロスコープにはまぎれもないビーム由来の信号が映し出されていた(図12)。T2Kのビームラインで最初のミュオンビーム、すなわちニュートリノビームの生成を確認した瞬間であった。ミュオンモニターのコンテナに詰めていたわれわれはテレビニュースに映る機会を逸したが、そんなことはまったくどうでもよかった。

ただ、感無量、であった。

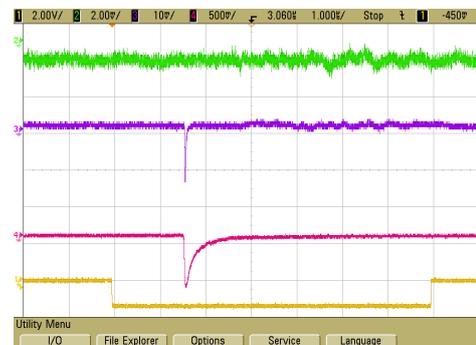


図12 ミュオンモニターによるファーストビームの信号
上から、イオンチェンバー(このときは信号が小さくて見えない)、シリコン、初期だけ仮設したプラスチックシンチレータ、ビームタイミングの信号。

5 コミッショニングと性能

ここまでやや長い道のりではあったが、T2K 実験はやっと始まったところであり、検出器としてはここからが本番である。いつまでも感動してばかりはいられない。これまでの運転で得られた性能について紹介する。

5.1 検出器のキャリブレーション

粒子の分布中心を測定するミュオンモニターにとって、検出器の各チャンネル間の個体差を較正することは重要な課題である。しかしながら、大強度パルスビーム測定用にデザインされた検出器であるため利得が非常に小さく、インストール後に宇宙線や放射線源を用いてキャリブレーションを行うのは困難である。そのため、われわれは検出器に駆動機構を取り付けて運用中に相対キャリブレーションができる設計にした。

シリコン検出器には7×7のアレイに加えて、約23cm ビーム下流側に可動式のキャリブレーション専用チャンネルがあり、これを二軸ステッピングモーターにより他の各チャンネルの背後に移動させて同時計測することにより較正值を得ることができる。

イオンチェンバー検出器はアレイ全体を縦・横それぞれチャンネル間隔に等しい±25cm ずつ移動できる仕組みになっている。これを用いると計9ヶ所でビームプロファイルを測定することができ、各チャンネルのゲイン個体差をパラメータにして、これらのプロファイルの差異が最小になるようにフィットすることで較正值を算出する。

実際の較正作業は、これまで2009年11月と12月に行われ、シリコン検出器とイオンチェンバーのチャンネル間の利得個体差をそれぞれ0.1%、0.4%の精度で較正することができた。この大きさの個体差不定性がビーム方向測定に対して与える影響は0.02mrad以下である。

こうして、2種類の検出器をともに要求される精度で較正できることが確認できたが、データを取得するためには2時間程度ビームを占有する必要があるため、較正を頻繁に行うことは出来ない。今後はシリコン検出器の交換や、長期のシャットダウン前後などの節目に実施する予定である。

5.2 プロファイル、方向、強度、安定性

ミュオンビームのプロファイルは、シリコン検出器アレイ、イオンチェンバーアレイそれぞれの7×7チャンネルの収集電荷量から図13のように独立に再構成される。また、ビーム中心位置は収集電荷量の分布を2次元ガウシアンでフィットすることにより算出する。

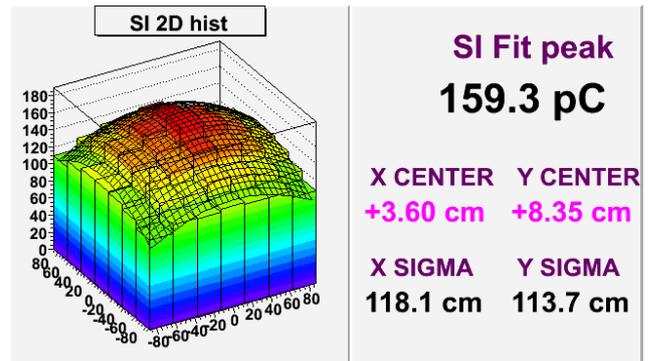


図13 典型的なミュオンビームプロファイル

シリコン検出器によるもの。イオンチェンバーでも同様のプロファイルが得られる。

次に、ミュオンモニターの性能について述べる。

A) ビーム方向安定性の測定

ミュオンモニターにおいて、ビームの方向は測定されたビームプロファイルの中心位置から求める。検出器は陽子標的から118m 下流にあり、プロファイル中心位置の11.8cm がビーム方向の1mrad に相当することになる。

図14は、ある数日間のビーム中心位置の推移であるが、1mradのずれに相当する11.8cmよりも遥かに小さな範囲内で安定していることが分かる。測定値の1ショットごとの典型的なばらつきは3mmであり、単純に換算するとミュオンモニターは0.03mradの高精度でビーム方向の安定性をモニターしていることになる。

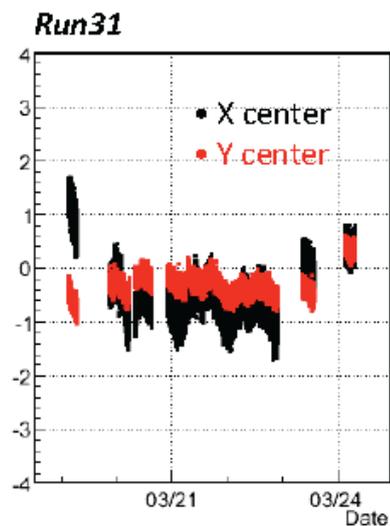


図14 ビーム中心位置の推移

シリコン検出器アレイによって再構成されたビーム中心位置の推移。縦軸の単位はcm。変動の大部分は陽子ビーム照射位置の変化に起因する。

B) ビーム強度安定性の測定

ミュオンモニター的全チャンネルで得られた収集電荷量の合計から、ビームの強度安定性を見ることができる。

図15に、ある数日間の測定結果を示す。縦軸は強度モニターで測定された陽子数で規格化してある。1ショットごとの典型的なばらつきは0.5%であるが、その大部分は陽子数の測定精度によるものである。ミュオンモニター自体の測定精度はシリコン検出器とイオンチェンバーの各々で測定される収集電荷量の比較から0.2%以内であると見積もられる。

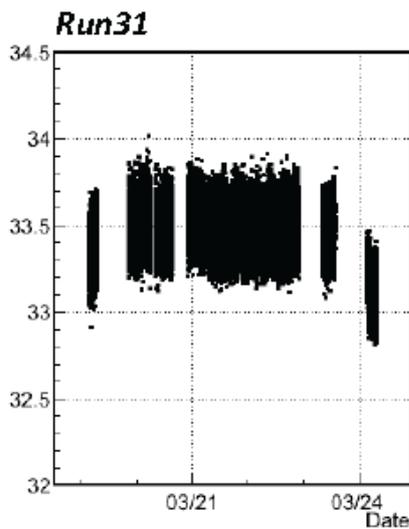


図15 収集電荷量の推移

陽子数 10^{12} あたりのシリコン検出器 49 チャンネルの総収集電荷量の推移。縦軸の単位は nC。

われわれが設計段階で課していた目標精度は、ビーム中心位置精度 3cm(0.3mrad)、ビーム強度安定性 3% であったので、現在の性能は目標の 10 倍に相当する数字である。これはノイズが予想よりも小さく抑えられたためであるが、単なる幸運だけではなく、数多くのビームテストや長期試験の経験を踏まえた対策の成果であろう。今後は検出器の安定性の確認を含め、長期的な運用経験を積むとともにビーム運転に貢献していく予定である。

5.3 ホーン電流、陽子ビーム位置との相関

ミュオンモニターは、ビームラインの最下流に位置するため、上流のすべての機器の影響を受ける。これは逆にいえば、上流のすべての状況を見渡しているともいえ、上流部の機器の安定性をよい精度でモニターできることがわかっている。以下では、例として電磁ホーンの電流や陽子ビームの標的への照射位置とミュオンモニターでの測定の関係について述べる。

T2K 実験では、標的に生成した π 粒子を 3 台の電磁ホーンで収束させることによってビーム強度を増幅している。詳しくは前号の市川・関口・中平氏による記事を参照[1]。

図16は電磁ホーンに流す電流を変化させたときのミュオンプロファイルの変化である。電磁ホーン 3 台を 320kA で運転した際にはビーム中心での収量が元の約 7 倍に増幅されている。この測定から電磁ホーンの収束効果が正しく機能していることをいち早く証明することができた。

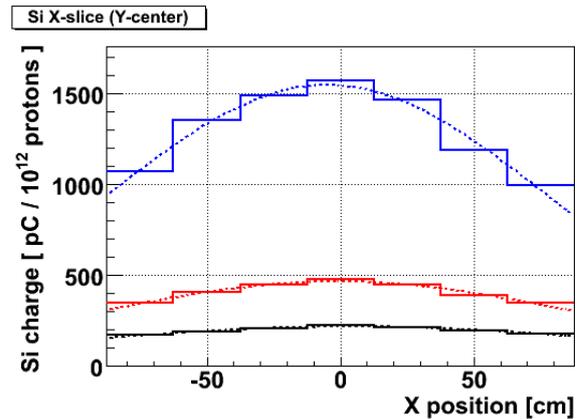


図16 ミュオンモニターの信号で見た電磁ホーンの効果

ミュオンのプロファイルを中心位置で x 方向にスライスしたもの。下からそれぞれホーン電流 OFF, 第 1 ホーンのみ 275 kA で運転, ホーン 3 台を 320 kA で運転したときのプロファイルである。点線はそれぞれの分布をガウシアンでフィットした曲線。

ミュオンモニターのビーム中心位置の測定は、電磁ホーンによる収束の効果によって、陽子ビームの標的への照射位置に対して強い相関があり(図17)、陽子ビームの 1mm のずれがミュオンモニターではおよそ 2cm に増幅されて観測される(ただし、電磁ホーンによる光学系の設定のため逆相関となる)。ミュオンモニターの中心位置精度は 3mm なので、単純に換算すると陽子ビームの $150 \mu\text{m}$ の変位に対しても感度があることになる。

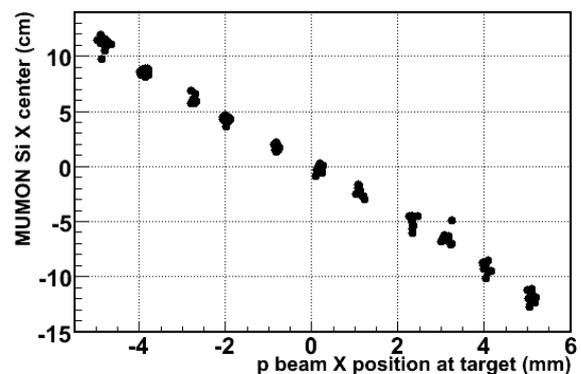


図17 陽子ビームの標的への照射位置(横軸)とミュオンモニターでのプロファイル中心(縦軸)の相関

6 まとめと今後

ミュオンモニターは、二次ビームの方向、強度、空間分布の情報を即時に得られ、また上流の機器の稼働状況を高精度でモニターする機器として、ビームチューニング時にも連続運転時にも、T2K 実験の遂行に欠くことのできない機器として活躍している。とりあえずは目標としていた性能を達成できているようでほっと胸をなで下ろしたところであるが、長期にわたりデータをため、最終的な物理結果までつなげていくことがこれからの課題である。

また、ビーム強度が向上するに従い新たな問題が現れる可能性がある。特に、シリコン PIN フォトダイオードに関しては設計強度に達するまでに代替の検出器を開発することが望まれる。候補の一つとして、陽子ビームの強度モニターにも採用されているファインメットをコアとした Current Transformer (CT) を使うというアイデアがある。放射線に強く電源すら不要な地球にやさしい検出器であり、ビームの実効電流を検出するために μ^+ と μ^- の数の差がわかるという特徴もある。これまでに実際に試作機 MCT (Muon Current Transformer) を 1 台インストールして、T2K ミュオンビームで動作テストをした。電磁ホーンを 320 kA に励磁したとき、励磁しないときと比べてイオンチェンバーの信号は約 7 倍になったのに対して、MCT の信号は約 15 倍になった。これにより、電磁ホーンが確かに π^+ を収束し π^- を発散していることが確認できた。

繰り返しになるが、T2K 実験はまだ始まったばかりであり、ミュオンモニターが本領を発揮するのまだまだこれからである。これまでの開発の経験を礎に、常に新しいアイデアをつぎ込み性能の維持・向上をはかり、大強度での連続運転にも耐え得るシステムとして長期にわたりニュートリノ振動の研究に貢献していきたい。

謝辞

京都大学先端ビームナノ科学センター 粒子ビーム科学グループの野田章教授、白井敏之助手(現放医研准教授)、想田光助教、頓宮拓さんにはビームテストのたびにたいへんお世話になりっぱなしで、感謝の表しようもありません。また、FNAL-T968 は NuMI のミュオンモニターを担当するテキサス大学の Sacha Kopp 氏、Marek Proga 氏、Laura Loiacono 氏の協力がなければ実行不可能でした。ここに深く感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- [1] 小林隆, 高エネルギーニュース **28-2**, 62 (2009);
藤井芳昭, 山田善一, 同 67 (2009);
荻津透, 榎田康博, 同 76 (2009);
柴田政宏, Nicholas C. Hastings, 石井孝信, 角野秀一,
同 **28-4**, 239 (2009);
市川温子, 関口哲郎, 中平武, 同 246 (2009);
鈴木聡, 坂下健, 同 255 (2009).
- [2] M. H. Ahn *et al.*, Phys. Rev. D **74**, 072003 (2006).
- [3] S. Kopp *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **568**, 503 (2006).
- [4] 松岡広大, 「T2K 長基線ニュートリノ振動実験 ミュオンモニターの開発」, 修士論文, 京都大学 (2007).
- [5] 久保一, 「NuMI ビームラインを用いた T2K 実験ミュオンモニターの長期試験」, 修士論文, 京都大学 (2008).