

修士論文

J-PARC K1.8 ビームラインにおける オンライン運動量解析システムの開発



京都大学大学院理学研究科
原子核・ハドロン物理学研究室
杉村 仁志

2010 年 3 月 9 日

概要

原子核物理の最前線は、加速器の発展に伴い近年目覚ましく発展してきた。特にストレンジネス核物理の分野においてはこれまで KEK-PS 加速器に代わって茨城県東海村に大強度の K^- ビームを供給可能な大強度陽子加速器施設 J-PARC が建設され、その大強度性から稀事象の統計をためることが可能となり、今までにない実験が始められようとしている。

我々が実験を行う J-PARC ハドロン実験施設 K1.8 ビームラインではビーム強度 1MHz を超える K 中間子や π 中間子を利用することが可能である。この高計数率のビームに対応するため、ビームラインの検出器が一新する必要があった。そのため、最上流の飛跡検出器はアノード間隔 5mm のドリフトチェンバーからアノード間隔 1mm のワイヤーチェンバー (MWPC) に変え、読み出し回路も新たに KEK で開発された COPPER モジュールが用いることとなった。また、ターゲット前後におかれるドリフトチェンバーもアノード間隔 5mm のドリフトチェンバーからアノード間隔 3mm のドリフトチェンバーに変わり、読み出し回路も TKO 規格の多重ヒット対応 TDC を用いることとなった。

読み出し方法に新たな回路を導入したことにより、新たにデータ収集系 (DAQ) も一新した。COPPER モジュールには各ボードに CPU とネットワークインターフェースが搭載されており、これらと TKO の読み出しを全て一つのネットワークの中に組み込むネットワーク分散型データ収集システム (HDDAQ) を開発した。

また、この HDDAQ を利用し、実験データをオンラインで解析するシステムを開発した。HDDAQ マシンから実験データをソケット通信によりオンライン解析システムに送信するため、サーバーソケットを HDDAQ マシンに立てておき、ここに任意の解析マシンが接続することによりエンコードされたデータが送信される。解析マシンはデータを受け取ると 1 イベントずつデコードし即座にヒストグラムに詰め、次のデータの受信を待つ。

K1.8 ビームラインで実験がおこなわれる際、ビームの拡がりやビームの運動量分布などをオンラインで見ることは実験条件の最適化を図る上で重要である。トリガーレートが $10^3/\text{spill}$ であると仮定すると、オンラインでこれらのヒストグラムを即座にモニターするためにはある程度のデータを間引きながら解析しなければいけないが、間引きしすぎると統計的に十分なデータ量 (約 10000 イベント) を解析できなくなる。そのため、プログラムの処理の高速化に心がけ、疑似データを利用したテストを行った。また、2009 年 10 月から 12 月まで J-PARC K1.8 ビームラインで行われたビームチューニングにおいて、実際の実験データを利用した性能試験も行った。本論文ではデータ収集システム、オンライン解析システムの概要とその性能評価を詳しく述べることにする。

目次

第 1 章	K1.8 ビームライン	1
1.1	ビームスペクトロメータ	2
1.2	散乱粒子スペクトロメータ (SKS)	7
第 2 章	データ収集システム	11
2.1	DAQ サブシステム	12
2.2	トリガー配布系	18
2.3	データ収集系ソフトウェア	22
第 3 章	オンライン運動量解析システム	27
3.1	目的と意義	27
3.2	オンラインシステム	27
第 4 章	データ収集システムの性能評価	31
4.1	目的	31
4.2	収集効率	31
4.3	HDDAQ の不感時間	32
4.4	チェンバーのノイズと MHTDC 問題	34
4.5	性能評価	35
第 5 章	オンライン運動量解析システムの性能評価	39
5.1	目的と意義	39
5.2	ビームライン運動量解析の手順	39
5.3	解析に要する時間	44
5.4	オンライン解析としての評価	45
第 6 章	まとめ	47
付録 A	最小二乗法を利用したチェンバーの直線トラッキング	49
A.1	平面内のトラッキング	49
A.2	空間内の直線トラッキング	50

参考文献

55

目次

1.1	K1.8 ビームライン概観	1
1.2	K1.8 ビームスペクトロメータ	2
1.3	K1.8 ビームラインの光学設計	3
1.4	BH1 と BH2	4
1.5	トリガー論理回路	5
1.6	ビームライン上流の様子	5
1.7	ASD	6
1.8	散乱粒子スペクトロメータ (SKS)	9
2.1	HDDAQ ネットワーク構成	12
2.2	COPPER ボード (左) と FINNESE カード (右)	13
2.3	MWPC エンコードルーチン	13
2.4	COPPER データ収集システム	14
2.5	TKO データ収集システム	15
2.6	TKO Multi Hit TDC	16
2.7	タイミングチャート	18
2.8	マスタートリガーモジュール	19
2.9	トリガー配布系概観	20
2.10	TKORM	20
2.11	COPPERRM	21
2.12	HDDAQ 概観	22
2.13	Event Builder プロセス	23
2.14	Event Distributor プロセス	24
2.15	メッセージバス概観	25
3.1	ED-Analyzer 間の処理	28
3.2	オンラインシステム概観	29
3.3	オンラインモニター	29
4.1	MHTDC の efficiency	34

4.2	MHTDC システム	35
4.3	DAQdeadtime	36
4.4	1 イベント当たりのデータサイズ	36
4.5	DAQ 収集効率	37
5.1	VI と VO の位置	40
5.2	ローカルトラッキングから求めた VI と VO でのヒットパターン	40
5.3	トラッキングアルゴリズム	41
5.4	BC1 の multiplicity とクラスターサイズ	41
5.5	イベント選択効率	42
5.6	運動量分布	43
5.7	ヒットパターン	43
5.8	二次元ヒットパターン	44
5.9	角度分布	44
5.10	データサイズに対するデータ解析時間	45
5.11	オンライン解析効率	46
5.12	トリガーレートに対する解析時間	46

表目次

1.1	K1.8 ビームラインの性能表	3
1.2	トリガーカウンターの諸特性	4
1.3	K1.8 ビームラインチェンバー	7
1.4	K1.8 ビームラインチェンバー (2)	7
1.5	SKS 設計パラメータ	8
1.6	K1.8 トリガーカウンター	8
2.1	ノードヘッダーデータフォーマット	14
2.2	COPPER データフォーマット	14
2.3	TKO のデータフォーマット 1word 分	15
2.4	MHTDC のデータフォーマット (データ 16bit 部)	16
2.5	VME ヘッダーデータフォーマット	17
2.6	TKO データフォーマット (全体)	17
2.7	MTM シグナル対応表	19
4.1	TKO のデータサイズ	33

第 1 章

K1.8 ビームライン

我々が実験を行う K1.8 ビームラインは茨城県東海村にある大強度陽子加速器実験施設（J-PARC[1]）のハドロン実験施設内に建設されたビームラインである。J-PARC の主リング加速器で最大運動エネルギー 50GeV まで加速された一次粒子（陽子）ビームはハドロン実験施設へ入射され、二次粒子生成標的（T1 ターゲット：物質は Ni や Pt）に衝突する。このときに生成される様々な二次粒子のうち、 K 中間子や π 中間子ビームを利用した実験が予定されている。ビームラインの設計上、最大で 2.0GeV/c までの運動量をもったビームを利用することができる。二次ビームライン上流にある二段の静電質量弁別装置（ES1,ES2）によって純度の高い K, π ビームを取り出すことができる。

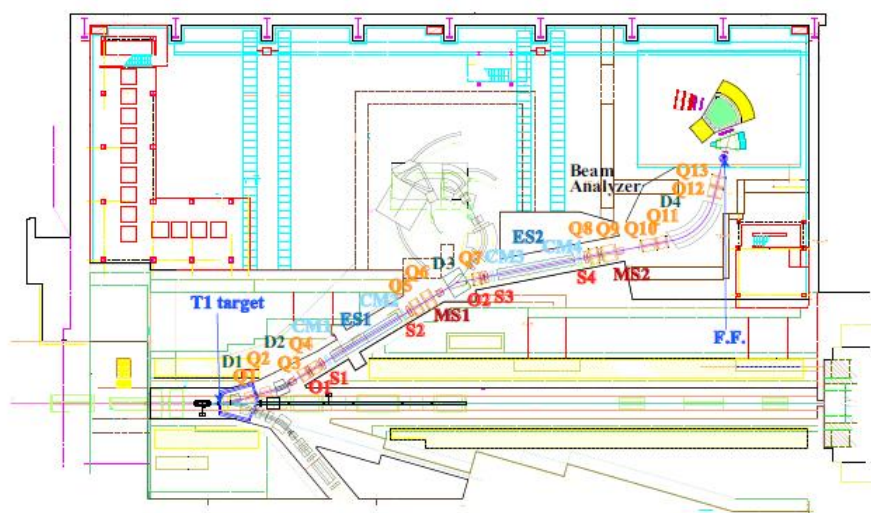


図 1.1 ハドロン実験施設内の K1.8 ビームライン。Q10 から Q13 までと D4 がビームラインスペクトロメータである。

1.1 ビームスペクトロメータ

K1.8 ビームラインの二段目の静電質量弁別装置の下流に設置された質量選別用スリット (MS2) より下流から実験標的 (FF) までをビームスペクトロメータと呼んでおり、入射ビームの運動量を解析するために用いられる。K1.8 ビームラインの運動量アクセプタンスはビーム収量を上げるために $\pm 4\%$ もあり、ハイパー核分光を行うにはビーム運動量とビーム毎にさらに良い精度で測定しなければならない。

4 台の四重極電磁石 (Q10-Q13) と双極電磁石 (D4) を用いた QQDQQ 光学系とその上流と下流に設置してある入射ビームの運動量を測定するための 4 台のチェンバー (BC1,2,3,4)、およびトリガー生成のための 4 種のカウンター (GC,BH1,BH2,BAC) が置かれている。ビームの運動量は QQDQQ 光学系の 3 次のビーム輸送行列とその前後におかれたチェンバー (BC1,2,3,4) の位置情報を用いて測定される。また、QQDQQ 光学系内の双極電磁石 (D4) は 64° の偏向角を持っている。生成標的から実験標的までのビーム輸送は運動量収差のない点一点収束が得られる光学系となっている。これと同時にビームラインスペクトロメータ内の多重散乱の影響を減らすようにこのスペクトロメータ部分でのビーム輸送行列の $\langle x|\theta \rangle$ の項が 0 になるように調整してある。

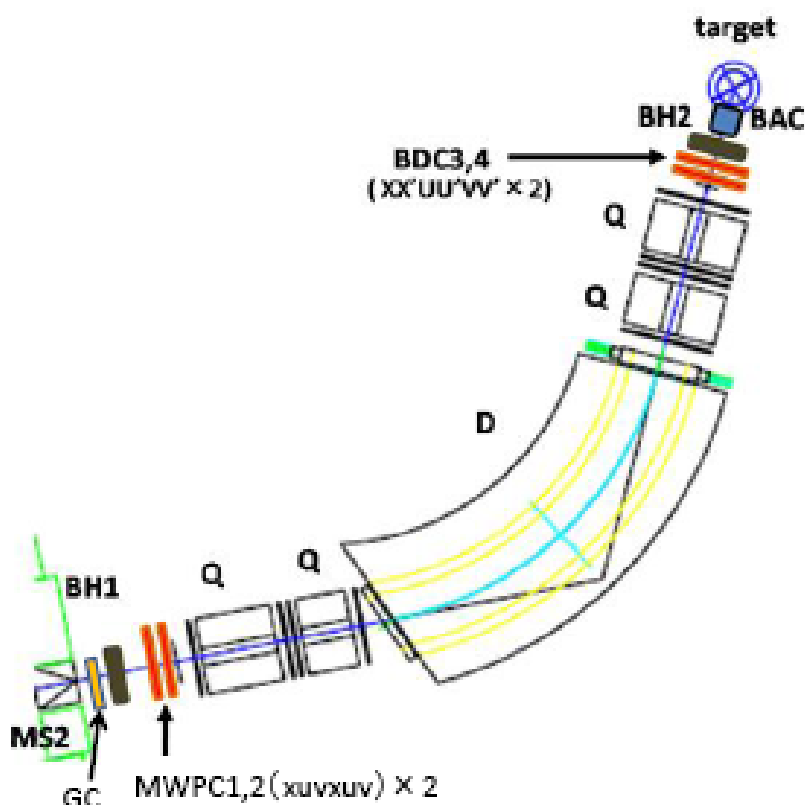


図 1.2 K1.8 ビームスペクトロメータ

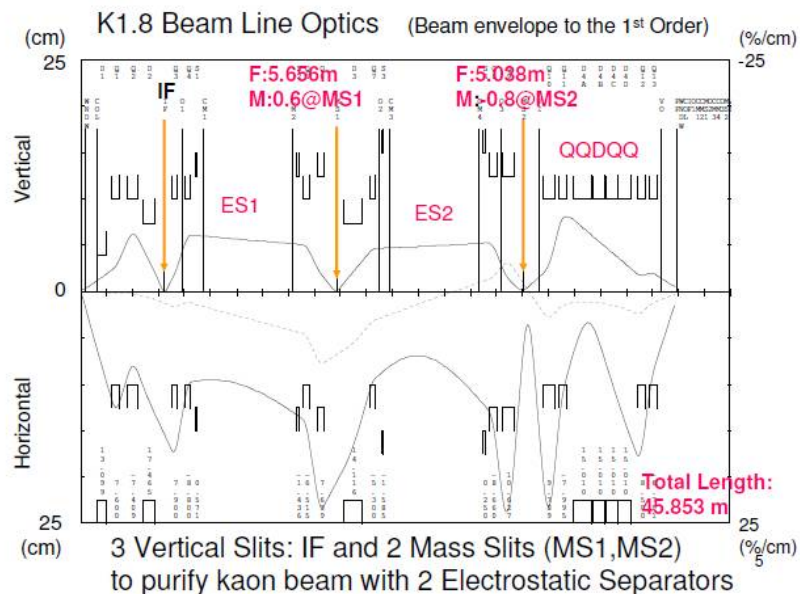


図 1.3 K1.8 ビームラインの光学設計

表 1.1 K1.8 ビームラインの性能表

ビーム最大運動量	2.0 GeV/c
取り出し角度	6°
生成標的	Ni,Pt
ビームライン全長	45m
ビーム強度 [/spill]	
1.8GeV/c	6.6×10^6
1.1GeV/c	3.8×10^5
アクセプタンス	1.4msr %

トリガーカウンター

質量弁別スリットの直後、ビームスペクトロメータの最上流には電子と荷電 π 中間子を分離するためにガスケレンコフカウンター（GC）が置かれている。GC では 1.5 気圧のイソブタンガスが充填され、その屈折率は $n = 1.002$ である。

GC の直後にセグメント化されたシンチレーションカウンター（BH1）が設置され、高計数率下での高電子増倍管（PMT）のダイノードの電圧降下による時間分解能や検出効率の悪化を防ぐため、それぞれのセグメントの計数率が同等になるように 11 セグメントに分割された構造をもつ。図 1.4 が BH1 の概観である。ビームスペクトロメータ下流に置かれている BH2 は BH1 と同等の理由により、7 セグメントに分割された構造になっている。この BH2 は全ての検出器のスタートタイミン

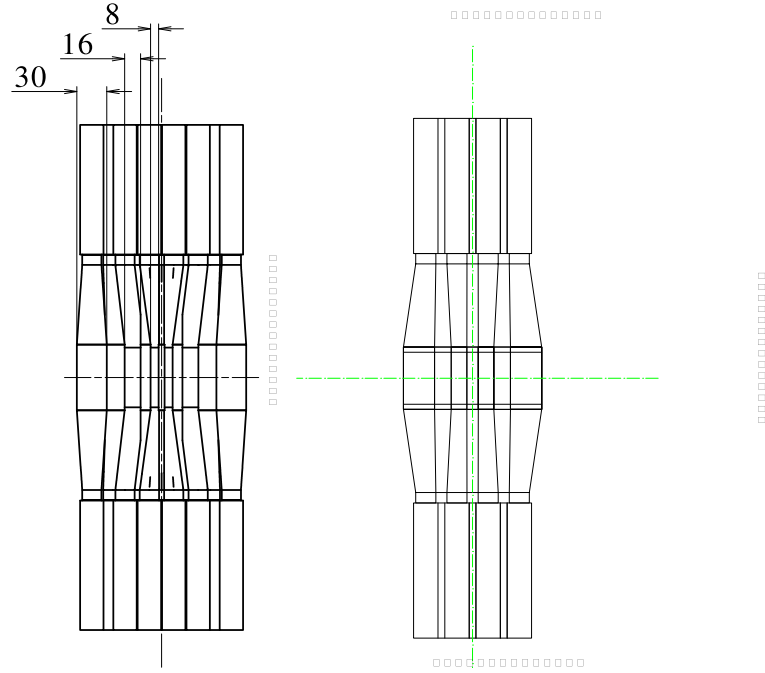


図 1.4 BH1 と BH2

表 1.2 トリガーカウンターの諸特性

名称	PMT	etc.	読み出し回路
GC	R1250-03	isobutane(n=1.002)	TKO (ADC,TDC)
BH1	H6524mod	11 セグメント	TKO (ADC,TDC)
BH2	H6524mod	7 セグメント	TKO (ADC,TDC)
BAC	H6614-70UV	Aerogel(n=1.03)	TKO (ADC,TDC)

グ (T_0) を与える役割を持つ。また、BH1-BH2 間の飛行時間差 (飛行距離：約 10.4m) より、静電セパレータで除去しきれなかったビーム中の陽子等のバックグラウンドをコインシデンスゲートによりトリガーレベルで除去することができる。

ターゲットの直前には屈折率 1.03 のエアロジェルチェレンコフカウンター (BAC) が置かれ、 π 中間子と K 中間子をトリガーにおいて分離するために用いられる。

これらの検出器により、 π ビームトリガーを生成する時には、

$$\pi\text{-beam} \equiv \overline{GC} \times BH1 \times BH2 \times BAC$$

K ビームトリガーを生成するときには

$$K\text{-beam} \equiv \overline{GC} \times BH1 \times BH2 \times \overline{BAC}$$

の回路を組むことにより生成する。

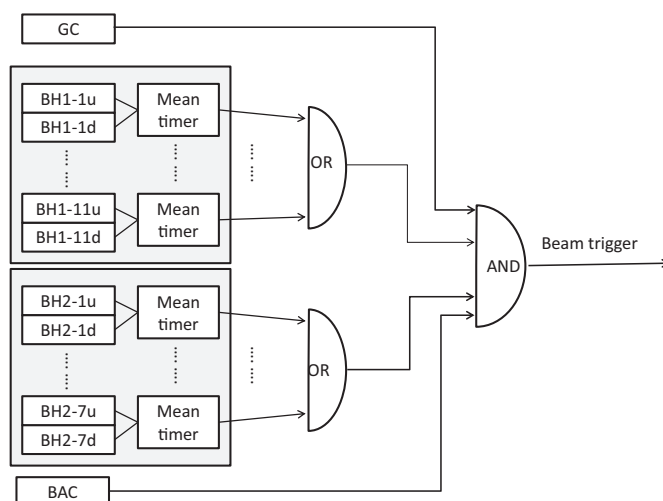


図 1.5 トリガー論理回路

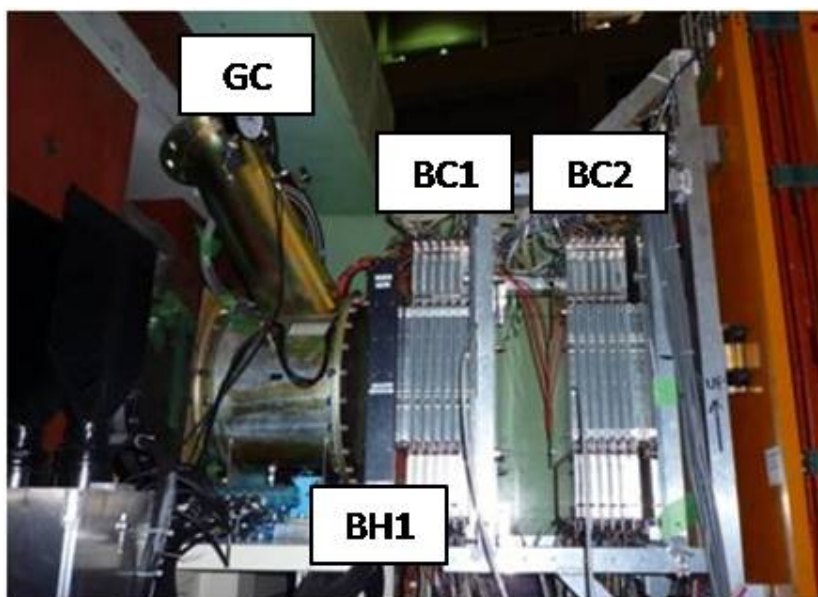


図 1.6 ビームライン上流の様子

飛跡検出器

ビームの運動量を決定するための飛跡検出器はビームスペクトロメータ上流、下流にそれぞれ2台ずつ置かれており、ビームスペクトロメータへの入射位置と角度、またスペクトロメータからの出射位置と角度をビームごとに測定する。上流に置かれている BC1,2 は $10^7/sec$ のビーム強度に耐え得るよう、アノード間隔 1mm のワイヤーチェンバー (MWPC) [7] となっており、下流に置かれている BC3,4 はアノード間隔 3mm のドリフトチェンバー (MWDC) となっている。4つのチェンバーはすべて6面構造 BC1,2($xuvxuv$) BC3,4($xx'uu'vv'$) になっており、 x 面は垂直にワイヤーが

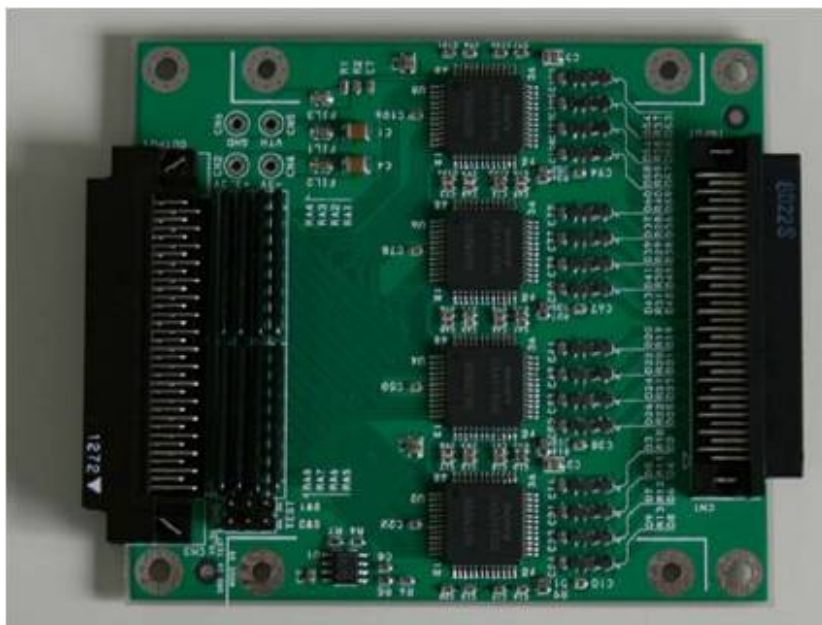


図 1.7 ASD

張られているのに対し、鉛直方向の位置情報を得るための uv 面は $\pm 15^\circ$ の角度で張られている。ドリフトチェンバーである BC3,4 においては、対となる面同士 (xx', uu', vv') で互いの面に対し半セル (1.5mm) ずつずれた pair plane 構造になっており、各プレーンで粒子がセンスワイヤーの左右どちら側を通過したのかが判る仕組みになっている。この pair plane 構造をとることにより、single plane 構造よりも $\sqrt{2}$ 倍よい位置分解能を得ることができる。BC1,2、BC3,4 それぞれの面の間隔は 20mm となっており、位置分解能はそれぞれおよそ $300\mu\text{m}$ となっている。このため、角度分解能として $\sim 15\text{mrad}$ を得ることができる。センスワイヤーには金メッキしたタングステン ($\phi 12.5\mu\text{m}$) を、ポテンシャルワイヤーには金メッキした銅ベリリウム ($\phi 75\mu\text{m}$) を使用している。ガスはアルゴン (Ar) : イソブタン (C_4H_{10}) : メチラール ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) が 76:20:4 という混合比のガスを常温 1 気圧のもとで用いている。各チェンバーからの信号は ASD (Amplifier Shaper Discriminator) カードを用いてアナログ信号をデジタル信号 (LVDS) に変換する。ASD カードの内部には 8 枚の ASD チップが搭載されており、1 枚につき 4ch の信号を読み出す。積分時間は 16ns である。デジタル信号に変換された後、デジタル読み出し回路に入力する。デジタル読み出し回路は読み出しの高速化を踏まえ、BC1,2 は KEK で開発された COPPER ボードを、BC3,4 は TKO 規格の多重ヒット対応 TDC (MHTDC) 用いた (表 1.3)。

表 1.3 K1.8 ビームラインチェンバー

名前	ワイヤー本数	ドリフト長	ワイヤープレーン	分解能	読み出し回路
BC1	256	-	$xuvxuv$	290	COPPER
BC2	256	-	$uvxuvx$	290	COPPER
BC3	64	1.5	$xx'uu'vv'$	300	TKO(MHTDC)
BC4	64	1.5	$uu'vv'xx'$	300	TKO(MHTDC)
SDC1	64	1.5	$vv'uu'$	300	TKO(MHTDC)
SDC2	96	2.5	$vv'uu'xx'$	300	TKO(MHTDC)
SDC3	108(x) 120(uv)	10	$vxuvxu$	300	TKO(Dr.T II)
SDC4	108(x) 120(uv)	10	$vxuvxu$	300	TKO(Dr.T II)

表 1.4 K1.8 ビームラインチェンバー (2)

名前	ワイヤー径 (μm)	ワイヤー物質	有感面積	ガス混合比
BC1	15	Au-W	$25.6^w \times 10^H$	Ar:C ₄ H ₁₀ :C ₃ H ₈ O ₂ =76:20:4
BC2	15	Au-W	$25.6^w \times 10^H$	Ar:C ₄ H ₁₀ :C ₃ H ₈ O ₂ =76:20:4
BC3	S:12.5 P:75	S:Au-W P:Au-BeCu	$19.2^w \times 10^H$	Ar:C ₄ H ₁₀ :C ₃ H ₈ O ₂ =76:20:4
BC4	S:12.5 P:75	S:Au-W P:Au-BeCu	$19.2^w \times 10^H$	Ar:C ₄ H ₁₀ :C ₃ H ₈ O ₂ =76:20:4

1.2 散乱粒子スペクトロメータ (SKS)

実験標的によって散乱された粒子は超伝導 K 中間子スペクトロメータ (SKS) を用いて測定される。SKS は 1GeV/c 領域の中間子実験主に (π^+ , K^+) 反応を用いたハイパー核の分光学的研究を目的として建設された [4]。SKS の設計パラメータを表 1.5 に示す。SKS は扇形超伝導双極電磁石とその入り口と出口に二台ずつ置かれた合計 4 台のドリフトチェンバー (SDC1,2,3,4) および後方に設置された 4 台のトリガーカウンター (TOF,AC1,AC2,LC) からなる。

SKS 内に入った粒子の運動量は計算された磁場マップを用いて Runge-Kutta 法により決定する。

トリガーカウンター

SKS システムのトリガーカウンターは time-of-flight 測定用シンチレーションカウンターウォール (TOF)、シリカゲルエアロジェルカウンター (AC1,2) ルサイトチェレンコフカウンター (LC) がある。AC は屈折率 1.06 で 0.4GeV/c から 1.4GeV/c までの運動量領域で π 中間子と K 中間子を分離することができる。またその後方に置かれたルサイトチェレンコフカウンターでは屈折率 1.44 で K 中間子と陽子を分離することができる。これらのトリガーカウンターにより、散乱粒子のトリガーとして、

$$\pi\text{-beam} \equiv TOF \times LC \times AC$$

$$K\text{-beam} \equiv TOF \times LC \times \overline{AC}$$

$$p\text{-beam} \equiv TOF \times \overline{LC} \times \overline{AC}$$

の回路を組むことでトリガーを生成する。

表 1.5 SKS 設計パラメータ

SKS システム	運動量分解能	0.1% (FWHM)
	最大中心運動量	1.1Gev/c
	許容運動量範囲	$\pm 10 \%$
	屈折角度	中心軌道で 100 度
	立体角	100msr
	飛行距離	中心軌道で 5 m

表 1.6 K1.8 トリガーカウンター

名前	セグメント	読み出し
TOF	32(両面読み)	TKO(ADC,TDC)
AC	38	TKO(ADC,TDC)
LC	28(両面読み)	TKO(ADC,TDC)

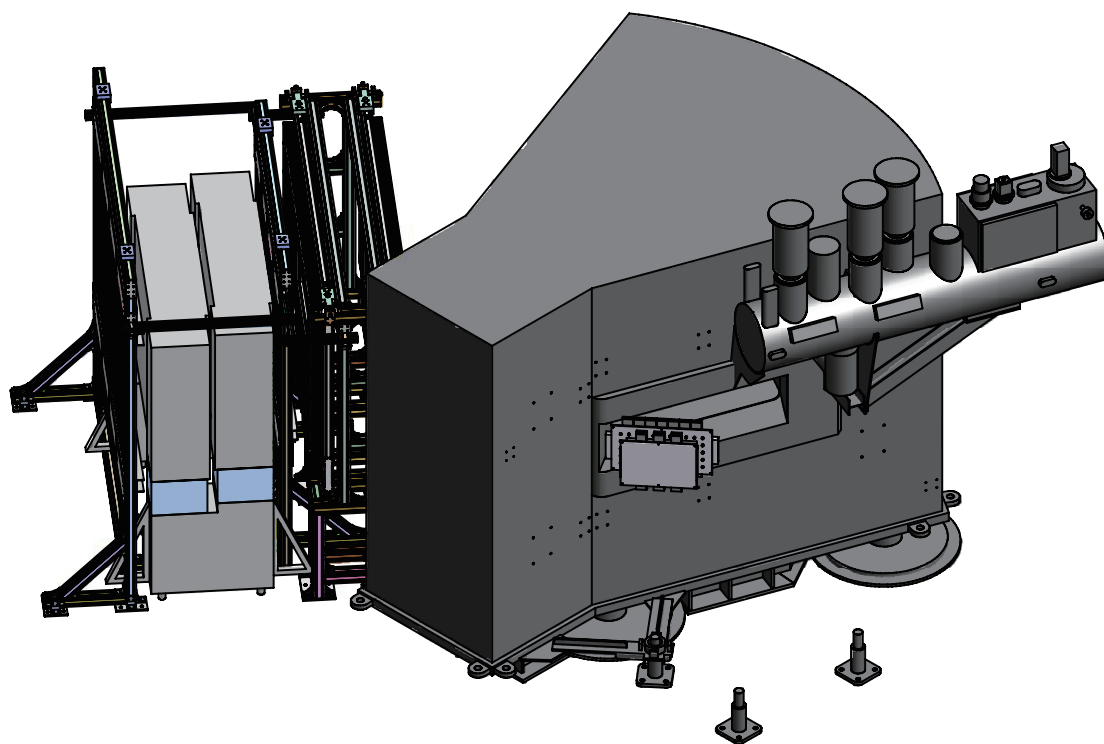


図 1.8 散乱粒子スペクトロメータ (SKS)

第 2 章

データ収集システム

ビームスペクトロメータの飛跡検出器は $\sim 10^7 \text{count/sec}$ の計数率に耐え得るように新たにアノード間隔 1mm の MWPC とアノード間隔 3mm の MWDC が開発され、前者はビームスペクトロメータ入口に、後者は出口に配置された。

これらの新しい検出器は読み出しチャンネル数が MWPC でおよそ 3000 チャンネル、MWDC でおよそ 1500 チャンネルと多く、また計数率が高いことから多重ヒット対応の読み出し回路が必要とされた。そのため、この度 K1.8 データ収集システムの読み出し回路として MWPC には KEK で最近開発された COPPER ボード [2] を、MWDC には TKO 規格の多重ヒット対応 TDC (Multi Hit TDC) を用いることにした。

異なる形式の読み出し回路を利用し、ビームの運動量を解析するには各読み出し回路系の間で取得データの事象が同一であることを確認するための手段が必要となる。そこで各読み出し回路に対してトリガーと一緒にトリガー数 (イベント番号)、ビームスピル数といったタグを配布する MTM(master trigger module) とそれらを受け取るための RM(receiver module) を COPPER 読み出し系、TKO 読み出し系に対して開発した。

これにより、イベント番号は読み出されたデータのヘッダーに書き込まれる。データは COPPER 読み出し系ではボードに搭載されているネットワークインターフェースを利用して ethernet 経由で送信され、TKO 読み出し系ではフラットケーブルを介して VME 計算機に搭載されているネットワークインターフェースを利用して同様に送信される。これらのデータを集約する計算機 (EventBuilder) を計測室にて配置し、図 2.1 のようにネットワークで結ぶことにより、K1.8 ビームライン全体のデータ収集を行う。以下、各読み出し回路系の間でのデータ処理のシステムのことを DAQ サブシステムと呼び、全体のデータ処理システムを DAQ システムと呼ぶことにする。

この章では、まず各検出器からの信号を各読み出し回路においてどのように処理するか (DAQ サブシステム) を述べ、次に MTM などのトリガー配布システムについて述べる。その後 DAQ システムにおけるデータ処理とオンラインシステムへの関連性を述べることにする。

2.1 DAQ サブシステム

K1.8 ビームラインでは TKO 読み出し系と COPPER 読み出し系による読み出しが主体となっている。そこでこれらのシステムについて紹介する。

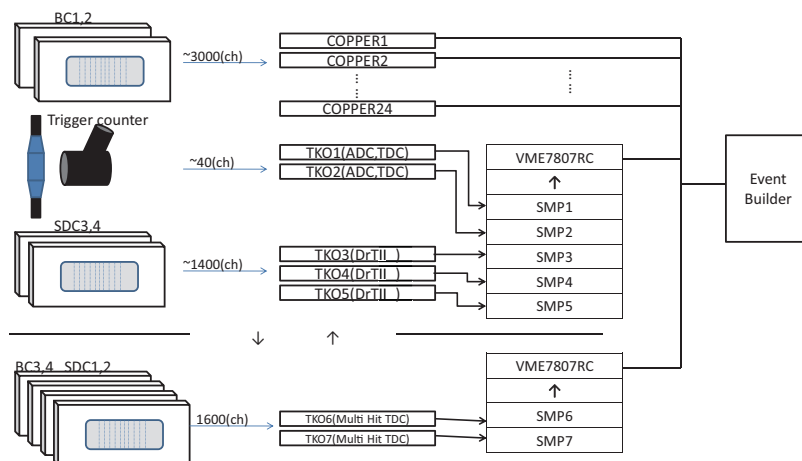


図 2.1 HDDAQ ネットワーク構成

COPPER 読み出し系

特にビーム強度の増加によりデータ量が増加する BC1,2 の読み出しには COPPER と呼ばれるコントローラを用いた [2]。COPPER は 2005 年に KEK で次世代データ収集システムとして開発され [11]、このシステムの設計時における主導原理は徹底的なモジュール化による機能分離とネットワークの導入によるモジュールレベルの分散化である。モジュール化した COPPER ボードに FINESSE カードを差し込むことによりデータの読み出しを行う。FINESSE は COPPER ボード 1 枚に対して 4 個挿入可能であり、目的に応じて ADC や TDC などに変えることが可能 (FPGA) である。今回 BC1,2 の読み出しには FINESSE mwpc エンコーダーを用いた。FINESSE 内で行われているエンコードルーチンを図 2.3 に示す。

FINESSE カードには一枚当たり 32ch 分のデータを読み出すことが可能であり、ヒットがあれば 1、なければ 0 のデータとして 32ch の信号を 32bit のデータに変換する。また、FINESSE 内には 100MHz の sampling クロックが発生しており、10ns ごとのヒット情報を得ることができる。エンコードされたデータは FINESSE 内で確保されたメモリ領域をソフトウェア的に分割したリングバッファに逐次書き込んでいく。common stop のタイミングで FINESSE 内の FIFO に空きがある場合に FIFO に転送される。トリガーが入力されると、40MHz のシステムクロックによって各 FINESSE の FIFO から COPPER の FIFO へある時間幅をもったデータが転送される。時間幅は 10ns (1word 分) から最大で $2.56\mu\text{s}$ (256word) までのデータを転送することが可能である。COPPER では各 FINESSE からのデータを一つのデータとして EventBuild を行い、ネットワーク

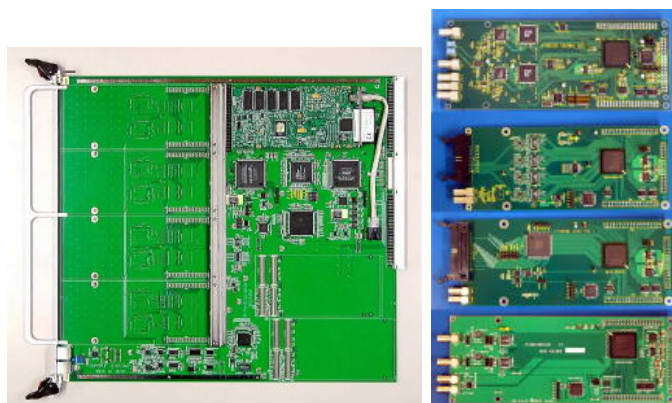


図 2.2 COPPER ボード (左) と FINNESE カード (右)

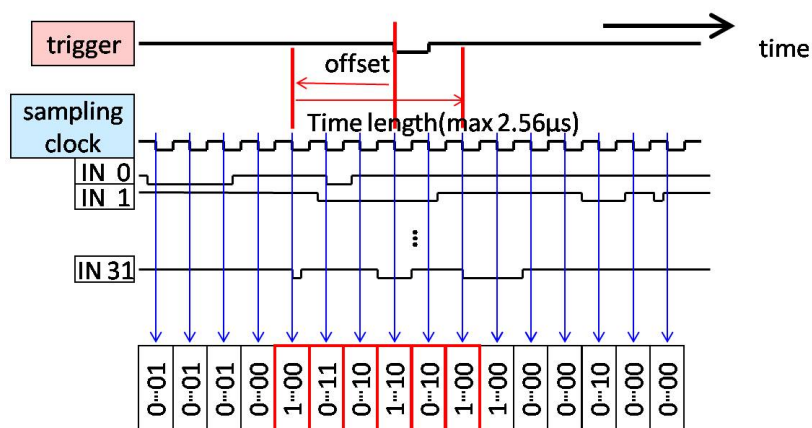


図 2.3 MWPC エンコードルーチン

インターフェースを利用して ethernet 経由で DAQ システムへ送信する。

COPPER のデータフォーマットは表 2.1 のようになっている。ヘッダーとして各計算機において先頭につけられるノードヘッダー (8word) に加えて COPPER 内での EventBuild 時につけられる COPPER ヘッダー (6word) と各 FINESSE につけられるヘッダーとフッター (計 2word) によって構成されている。これらのヘッダーの下にデータが 10ns ごとに取り付けられる。COPPER ボードは一台当たり 128ch のデータを読み出すことができる ($32\text{ch} \times 4(\text{FINESSE})$)。BC1,2 は 1 プレーン当たり 256 本のワイヤーが張られているため、BC1,2 の全 12 面では読み出しチャンネルが $256 \times 12 = 3072\text{ch}$ となる。そのため必要となる COPPER ボードは 24 枚となる。

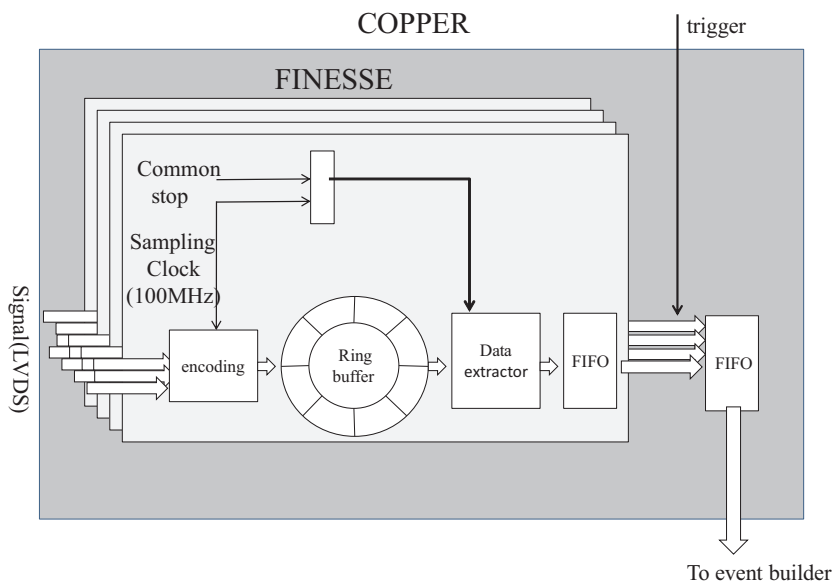


図 2.4 COPPER データ収集システム

表 2.1 ノードヘッダーデータフォーマット

0	Magic Word(EVNT)
1	データサイズ
2	イベント番号
3	Run 番号
4	Node ID
5	Event Type
6	データ数
7	Data Type

表 2.2 COPPER データフォーマット

ノードヘッダー
ヘッダー (COPPER)
ヘッダー (FINESSE)
データ (32bit)
ヘッダー (FINESSE)
データ (32bit)
ヘッダー (FINESSE)
データ (32bit)
ヘッダー (FINESSE)
データ (32bit)

TKO – MultiHitTDC

TKO 規格のモジュールは KEK で古くから用いられてきた回路である [3]。TKO はコントローラ (CPU) を持たないため、VME のコントローラから読み出しを行う。TKO-SCH (*Super Control Header*) モジュールから VME-SMP (*Super Memory Partner*) モジュールへフラットケーブル (*Towel Bus*) でつなぎ、5Mbyte/s の転送速度でデータを SMP へ送信し、マッピング (*Sparse Data Scan*) を行っている。VME-SMP には 1Mbyte のメモリが 2 つ搭載されており、データを CPU へ読み出す操作とメモリに書き込む操作を同時に行えるようになっている (図 2.5)。Buffer Switch により 2 つの操作を切り替え可能で、効率のよいデータ収集が行える機構になっている。

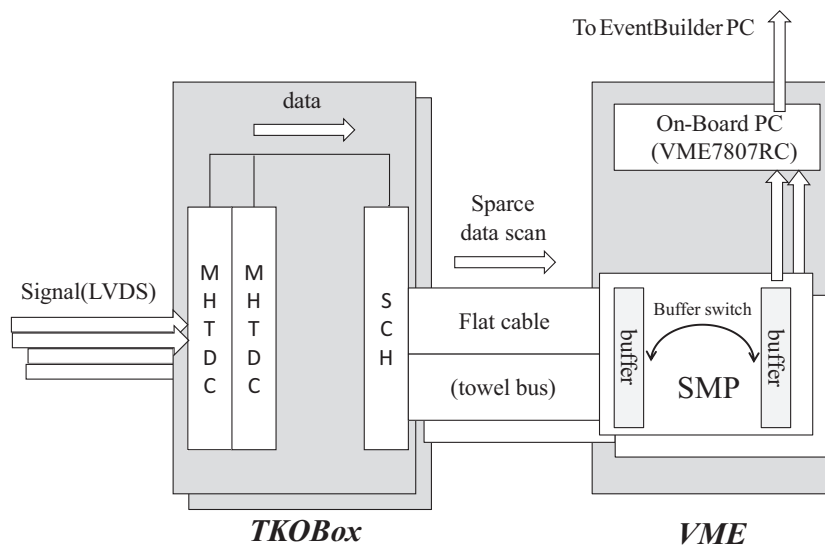


図 2.5 TKO データ収集システム

表 2.3 TKO のデータフォーマット 1word 分

[illegible]

MWDC の読み出しに用いる Multi Hit TDC(MHTDC) はボード上に 7 台の AMT チップ [8] が搭載されており (図 2.6)、そのうち 6 台の AMT で 1 台あたり 24ch の読み出しを行い、全部で 128ch の読み出しを行う (AMT16ch 分は余り) [10]。チェンバーからのシグナルは ASD カードにより LVDS 信号に変換され、80pin ハーフピッチフラットケーブル 4 本 (32ch×4) によって MHTDC に入力される。シグナルは AMT チップ内で common stop のタイミングで 0.78ns/bit の時間分解能で時間変換される。ダイナミックレンジ 17bit であり、最大で 100 μ s までの時間情報を得ることができる。また、周期的なリセット信号を入れることで内部 FIFO にためられたヒット情報をリセットする。

TKO のデータフォーマットは表 2.3 のようになっており、32bit のデータの上位 5bit を TKOBox のスロット番号 (MA=Module Address)、次の 11bit を TKO モジュールのバックプレーン入力チャンネル (SA=Sub Address)、下位 16bit をデータとして配分している。MHTDC はデータが 17bit であるので、表 2.4 のようにしてデータを 2word 分に分け、上位 1bit だけが最初のデータの下位 1bit に入るような特殊なデータフォーマット構成になっている。BC3,4 は 1 プレーン当たり 64 本のアノードワイヤーが張られており、全 12 プレーンあるので 768ch の読み出しを行う。このため、MHTDC モジュールは全部で 6 台必要となる。

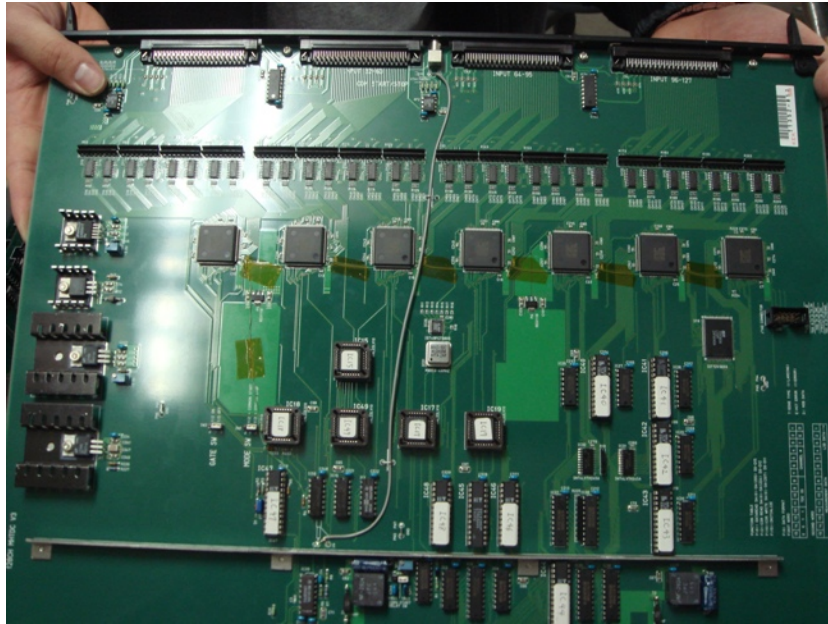


図 2.6 TKO Multi Hit TDC

表 2.4 MHTDC のデータフォーマット (データ 16bit 部)

最初のワード

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	1	1	AMT ID				channel				T	E	D	

(注釈) 参照

2 番目のワード

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Measurement Data															

(注釈)

T:Edge type 1=Leading edge, 0=Trailing edge

E>Error type 1=Error, 0=No Error

D:data の上位 1bit

TKO-その他の読み出し回路

ビームラインの運動量解析には COPPER と TKO-MHTDC が重要な読み出し回路となるが、そのほかの飛跡検出器やトリガーカウンタを読み出すために他の読み出し回路も使用している。トリガーカウンタは TKO 規格の ADC と TDC を用いる。データは表 2.4 と同じデータフォー

表 2.5 VME ヘッダーデータフォーマット

0	Magic Word(VME)
1	データサイズ (VME 内)
2	モジュール数
3	MagicWord(vmeboard)
4	アドレス
5	データサイズ (vmeboard 内)
6	イベント番号
7	... 以下 SMP

表 2.6 TKO データフォーマット (全体)

ノードヘッダー
ヘッダー (VME)
ヘッダー (VMEboard(SMP))
データ (32bit)
ヘッダー (VMEboard(SMP))
データ (32bit)
... ..

マットをとり、16bit のデータに 0-1000pC の電荷量をデジタル化した ADC を、また TDC は 25psec/bit の高時間分解能で 16bit のデータを構成する。

SKS 後方のチェンバー (SDC3,4) には TKO 規格の DrT.II(Drift Chanber Tdc.II)[9] を用いる。1 ボード当たり 32ch のシングルヒット読み出しで、ボードに一つ搭載されている ADC によって時間情報を電荷量に変換したものをデジタル化している。

2.2 トリガー配布系

異なる形式の読み出し回路を利用し、ビームの運動量を解析するには各読み出し間で取得データの事象が同一であることを確認するための手段が必要となる。そこで各読み出し回路に対してトリガーと一緒にトリガー数（イベント番号）、ビームスピル数といったタグを配布する MTM(master trigger module) とそれらを受け取るための RM(receiver module) を COPPER 読み出し系、TKO 読み出し系に対して開発した。

2.2.1 MTM(Master Trigger Module)

MTM は 12bit のイベント番号と 8bit のスピル番号を作成し、シリアライズして TRIGGER1, TRIGGER2, CLEAR, SPILL NUMBER INCREMENT, RESERVE1, BUSY, RESERVE2 という 7 種類の信号を MLVDS 信号として CAT-7 のケーブル 2 本を使って RM へ分配転送する。

トリガーカウンターで作られたトリガーはまず trigger1 信号として MTM に入力される。これは各読み出し回路における GATE や common stop 信号として利用される。その後 trigger1 のシグナルから $100\mu\text{s}$ 遅れた信号が trigger2 信号として MTM に入力される。これは ADC の conversion time や MultiHitTDC での conversion にかかる時間を考慮して遅らせる信号であり、データの読み出しのタイミングとして利用される。Event 番号は trigger2 のタイミングでカウントされ、スピル番号は加速器から送られてくるスピルゲートを入れることによりカウントされる。2 本のネットワークケーブルにおけるこれらの信号の対応表は表 2.7 のようになっており、RM からの BUSY 信号を受信することで trigger1 の veto として使用することができる。

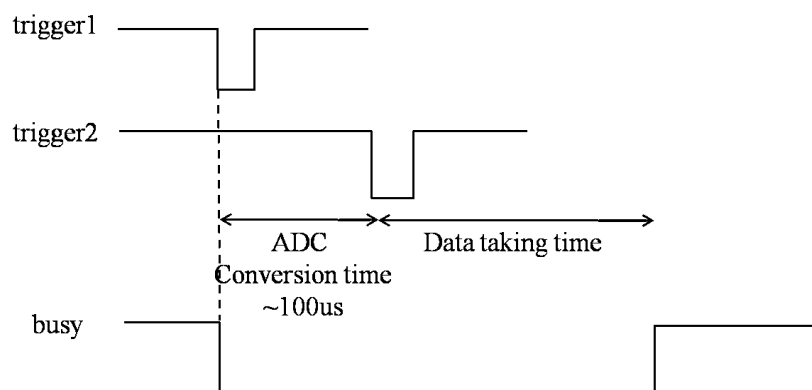


図 2.7 タイミングチャート

表 2.7 MTM シグナル対応表

RJ-45 コネクタ A		
ピン番号	転送方向	信号名
1-2	MTM→RM	SPILL(flat-top signal)
3-6	MTM→RM	TRIGGER2
4-5	MTM→RM	CLEAR
7-8	MTM→RM	TRIGGER1

RJ-45 コネクタ B		
ピン番号	転送方向	信号名
1-2	MTM→RM	タグ (Event & Spill Number)
3-6	MTM→RM	RESERVE1
4-5	RM→MTM	BUSY
7-8	RM→MTM	RESERVE2



図 2.8 マスタートリガーモジュール

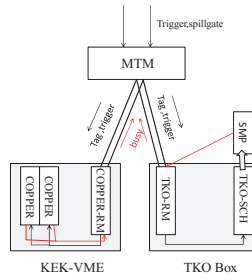


図 2.9 トリガー配布系概観

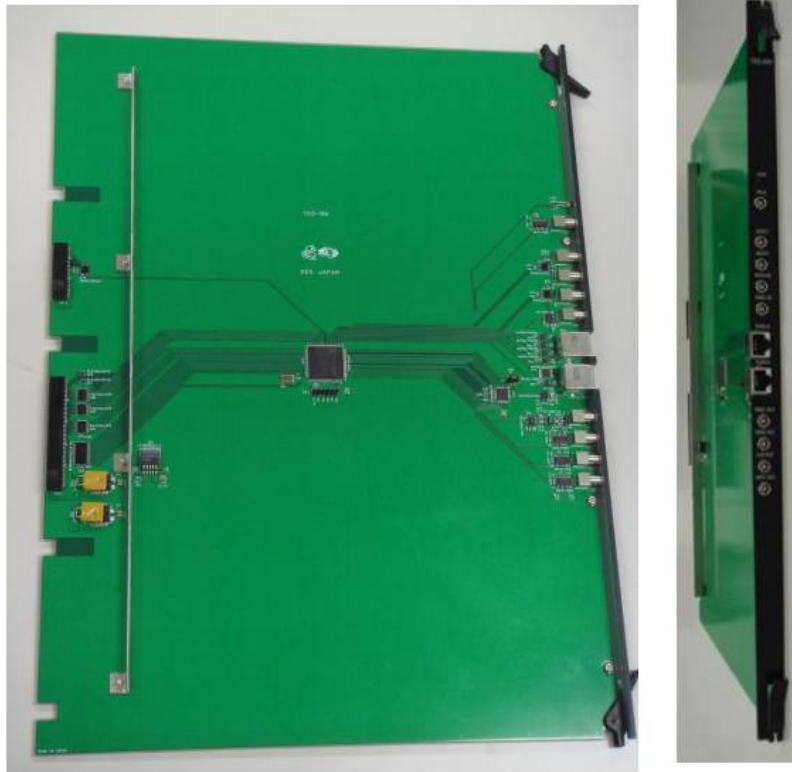


図 2.10 TKORM

2.2.2 RM(Receiver Module)

TKO 用 RM は図 2.10 のようなモジュールでフロントパネルからタグを取り込み、通常の TKO モジュールと同様に SCH に対してデータを送出する。COPPER 用 RM は図 2.11 のような KEK-VME 規格の GPIO ボード用メザニンカードとして使用し、J0 バスを介して KEK-VME サブラック内の COPPER にトリガーとタグを配布する。

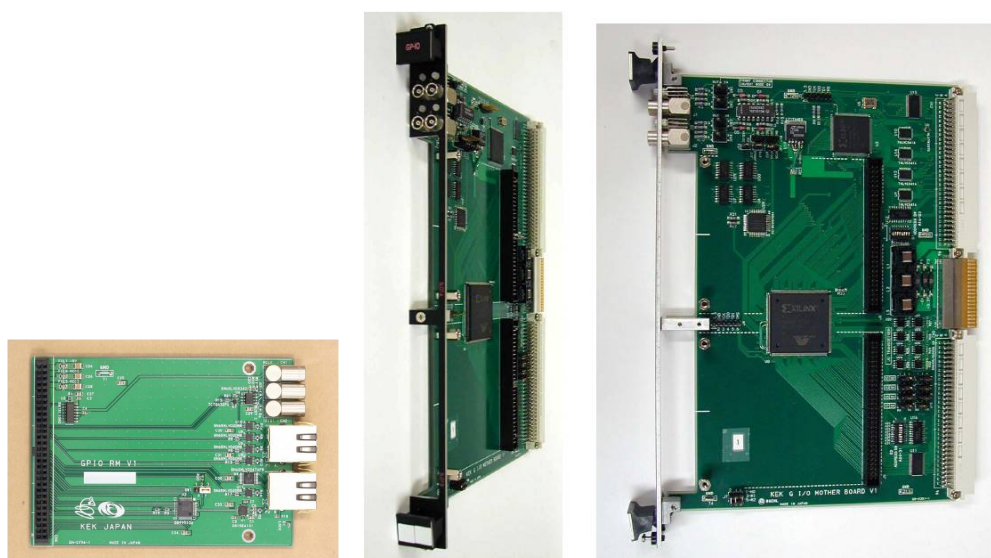


図 2.11 COPPERM

2.3 データ収集系ソフトウェア

前節までで DAQ サブシステムにおいてイベントタグ情報も含んだデータが収集されたことを示した。ここからはこれらのデータをソフトウェアを利用して処理していくことになる。データ収集系ソフトウェアの主要部分は検出器の読み出しを行う計算機 (Front-end node) と各 Front-end node からネットワーク経由でデータを収集する Event Builder から構成される。図 2.12 が DAQ システムの概観である。この DAQ システムを通称「HDDAQ」と呼んでいる。「HD」というのはハドロンの意味でハドロン実験施設で利用する DAQ という意味でつけられた名称である。DAQ ソフトウェアは拡張性のある C++ と Python (tk) によって記述し、OS 環境は Scientific Linux3,4,5 を用いて開発した。

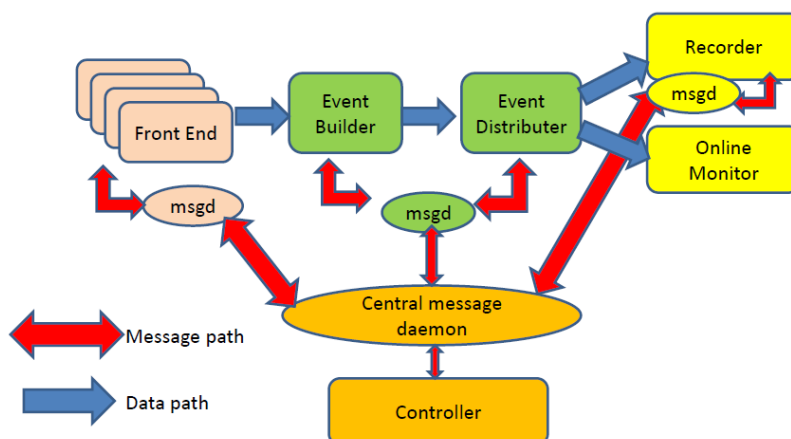


図 2.12 HDDAQ 概観

HDDAQ には二つの転送経路がある。一つが「データパス (DATAPATH)」である。これは検出器からのデータを転送するパスである。もう一つが「メッセージパス (MESSAGEPATH)」である。これは DAQ のコントロールを行うために利用するパスで各読み出し回路に対してデータ収集開始や停止、状態などの情報を通信するためのパスである。これらについて詳しく解説する。

2.3.1 DATA PATH

データパスは主に 5 つのプロセスから成り立っている。Front-end では ADC や TDC などのようなデータを読み出し、次のプロセス (Event Builder) に送る。このプロセスを各読み出し回路 (COPPER、VME など) ごとに実行している。Event Builder は各 Front-end からのデータを読み出し、同じイベント番号のついたデータを一つのデータとしてまとめる。この処理が終了後、次のプロセス (Event Distributer) にデータを送る。Event Distributer はデータを読み出し、次の二つのプロセス (Recorder, Online Analyzer) にデータを送る。Recorder ではデータを読み取り、

ファイルに保存していく。Online Analyzer ではデータを読み取り、それを解析することにより画面上にヒストグラムを表示する。これら 5 つのプロセスのうち 4 つのプロセス (Front-end, Event Builder, Event Distributor, Recorder) は MESSAGEPATH を通じてコントローラと通信できるようになっている。これによってそれぞれのプロセスの状態をコントローラに送るようなシステムになっている。Online Analyzer プロセスは MESSAGEPATH を持っておらず、独立した環境になっている。

1) *Front – end (FE)*

Front-end とは各 DAQ サブシステムにおけるデータ読み出しにおいて実行されるプロセスのことである。Front-end プログラムが実行されると各 DAQ サブシステムにおいてサーバーソケットが立てられ、データ転送のスタンバイ状態になる。この状態は MESSAGEPATH を通じてコントローラに伝えられ、EventBuilder からのソケットの接続かつコントローラからの DAQ 開始のシグナルが Front-end に伝えられた時、実行プロセス内の DAQ スレッドによりデータの先頭にノードヘッダーがつけられ、データが EventBuilder に送られる。

2) *EventBuilder (EB)*

EventBuilder は図 2.1 のようにネットワーク上にある各 Front-end に立てられたソケットに接続してデータを読み出し、同一イベントを一つのデータとして統一し、Event Distributor に対してデータを転送する。これらの過程「集約 (read)」「統一 (build)」「転送 (send)」、そしてコントローラとの通信 (control) はマルチスレッドになっており、またこれらのスレッド間にリングバッファを挟むことでデータ処理におけるパフォーマンスの向上を図っている。

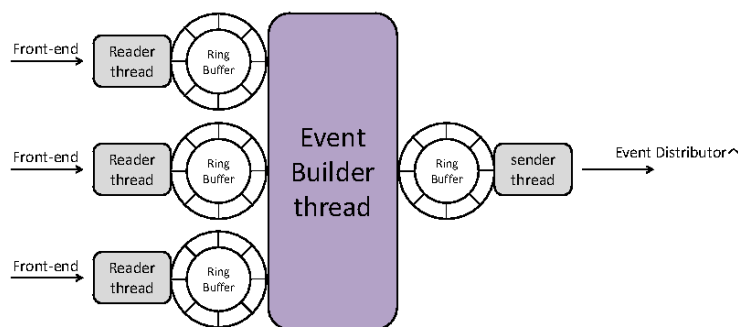


図 2.13 Event Builder プロセス

3) *EventDistributor (ED)*

Event Distributor は Event Builder に立てられたソケットに接続し、データを読み出し、二つのポートに対してデータを転送する。

一つが Recorder ポートであり、全てのデータを転送する。もうひとつが Monitor ポートであり、一部のデータを転送する（データの間引き）。Event Distributor もマルチスレッドになっており、read スレッドと二つの send スレッドに加え、二つの server スレッドを立てている。server スレッドはサーバーソケットを立てクライアントからの接続を待っている。send スレッドでは接続があったクライアントに対してデータを送っている。

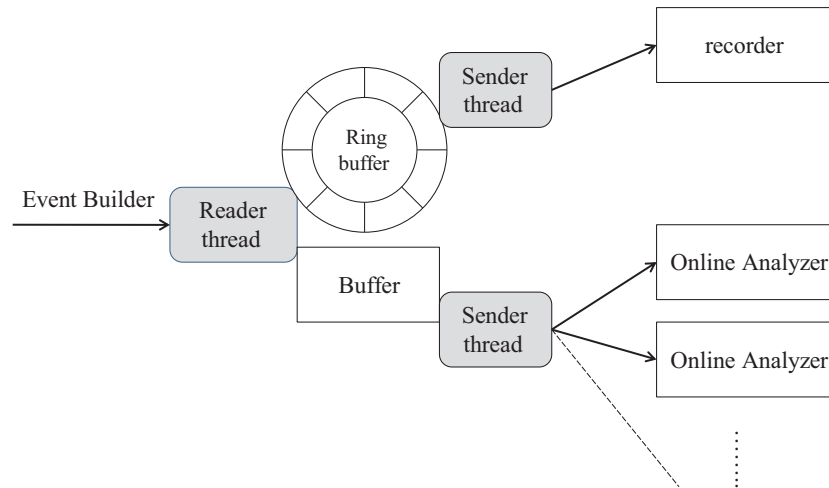


図 2.14 Event Distributor プロセス

4) Recorder

Recorder は Event Distributor に接続することでデータを受け取り、圧縮ファイルに変換してデータを保存媒体に書き込んでいく。Recorder もコントローラとの通信ができるようになっており、コントローラからのデータ収集開始のシグナルを受け取ってからデータの受信がおこなわれる。

5) Online Analyzer

Online Analyzer は MESSAGE PATH がなく、コントローラからの制御がない。そのため、Event Distributor に接続するといつでもデータの受信が可能な状態になっている。Online Analyzer 内では 3 つのスレッドが走っており、データのデコード、解析しオンラインヒストグラムへ詰めていくためのメインスレッド、GUI によるヒストグラムのアップデートやリセットを行うためのコントローラスレッドとアップデートスレッドがある。これらは ROOT ライブラリを利用して開発した。特にメインスレッドは実験ユーザーが各々の解析をしやすくするため、層構造のディレクトリ形式にすることによって、各検出器ごとの解析を行えるようになっている。

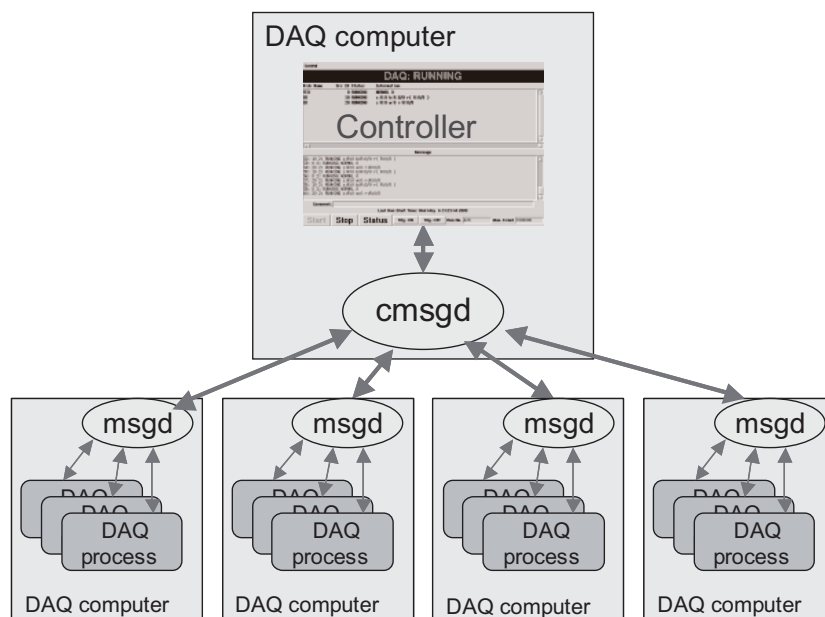


図 2.15 メッセージパス概観

2.3.2 MESSAGE PATH

MESSAGE PATH はデータ転送の制御や各プロセスの状態などを管理するために用いられる。MESSAGE PATH は 3 種類のプロセス (msgd, cmsgd, controller) からなっており、controller から送られたシグナルは cmsgd (Central Message Daemon) へ送られる。cmsgd ではシグナルを各計算機上で実行されている msgd (Message Daemon) に対して送る。また、逆に各計算機上での状態を Controller に送ることもできる。これらの接続は全てソケット通信による接続方法を用いた。

第 3 章

オンライン運動量解析システム

3.1 目的と意義

実験時に即時に検出器からのデータを解析し、モニターすることは、各検出器の動作確認のみならず、ビームの広がりやビームの時間構造などのような実験のコンディションを把握する上でも必要となる。そのため、HDDAQ に組み込むような形でオンラインシステムを開発した。K1.8 ビームラインでは運動量分解能 ($\sim 0.1\%$ FWHM) を誇る SKS スペクトロメータを用いたハイパー核分光実験が予定されている [5][6]。ハイパー核やハイペロンの生成現象を見るために入射粒子の運動量と散乱粒子の運動量からミッシングマスを用いてその存在を確認する。そのため、運動量がオンラインで解析できることは同時にミッシングマスのスペクトルをオンラインでモニターすることを可能とする。そこで今回入射粒子の運動量を解析するためにビームラインスペクトロメータの運動量をオンラインで解析するシステムを開発した。

3.2 オンラインシステム

前章でも記述した通り、Online Analyzer は Event Distributor からのモニターポートに接続することにより、データの受信を行う。図 3.1 が具体的に Online Analyzer と Event Distributor 間で行われているデータやり取りの仕組みである。

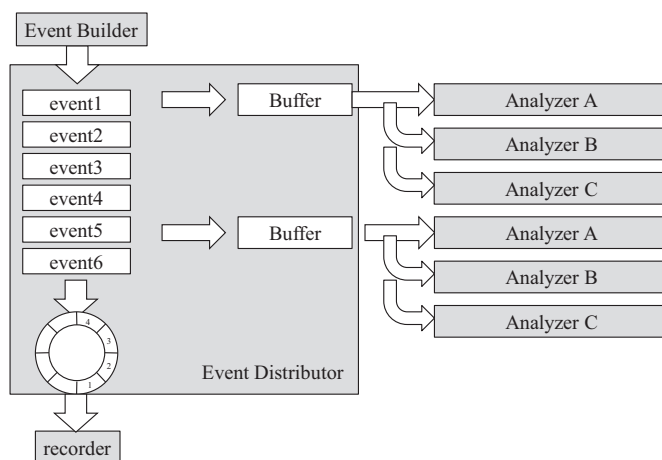


図 3.1 ED-Analyzer 間の処理

アナライザープロセスは複数起動することが可能であり、Event Distributor の一つのモニターポートに複数のアナライザーを接続するアナライザープロセスは複数起動することができ、Event Distributor の一つのモニターポートに複数のアナライザーを接続することができる。図 3.1 はアナライザープロセスを 3 つ起動した場合の状態を表している。Event Distributor はモニターポートに対して 1 イベントを確保することのできるバッファを保有している。バッファはデータを確保すると次のデータを受けつけないようにロックしておく。その間に接続しているアナライザーに対してデータを送信する。データの送信はアナライザープロセスに一つずつ送信するようになっており、並行して送ることができない。そのため、一つのアナライザープロセスへのデータが送信終了後に次のアナライザープロセスにデータを送信していく。アナライザー側ではデータを受け取ると、解析が始まる。一方バッファに確保されたデータが全てのアナライザーに対してデータを送信終了後、次のデータをもたらるようにロックを解除する。このロックされる時間によってどれだけのデータが間引きされてアナライザーに送信されるのかが決まる。次のイベントを確保したバッファは再びアナライザーに送ろうとするが、アナライザー側で解析作業が終了されていなければデータの送信はできない。つまりアナライザーからの要求がないとデータ送信はできない。ということでロックにかかる時間というのは全てのアナライザーにデータを転送する時間とアナライザー側での解析時間に影響する。これらの具体的な考察は 5 章で述べることにする。

Analyzer 内でのデータ処理

アナライザーでは受け取られたデータに対してデコード作業を行う。各検出器からのデータは読み出し回路が違うので、データフォーマットも異なっている。それぞれのデータフォーマットに対応したデコード方法を一つの関数としてデコードしやすくしたソフトウェアを *unpacker*^{*1} という。アナライザーではこの *unpacker* を利用して解析作業を行う。アナライザーは C++ によって記述されたソフトウェアである。そこに *unpacker* と *ROOT* のライブラリを利用した形で開発した。

^{*1} *unpacker* は東京大学の高橋智則氏によって開発された HDDAQ のためのライブラリである。

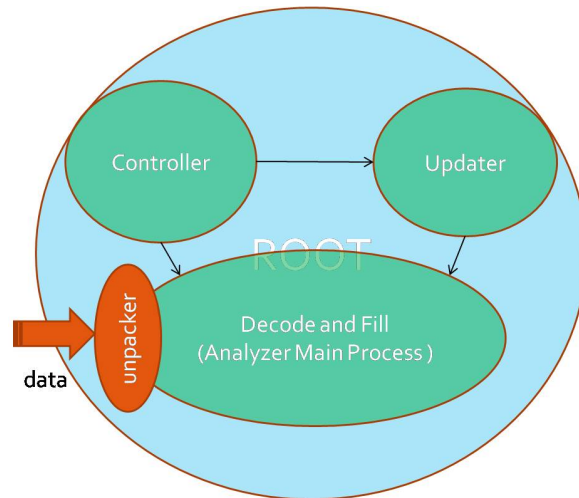


図 3.2 オンラインシステム概観

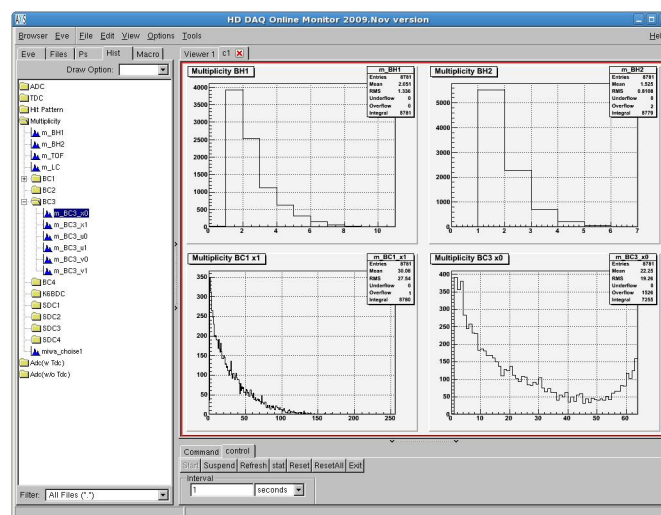


図 3.3 オンラインモニター

アナライザーが起動されるとまず GUI が起動される。これは ROOT の TEveManager を利用した GUI である。次にコントローラと updater を起動する。これを GUI にボタンとしてコントローラを埋め込み、ボタンを押したときのシグナルによって updater が動く。次にヒストグラムのイニシャライズを行う。これによりオンラインモニターとして表示するためのヒストグラムをセットアップする。以上に上げたものが起動時に走る。次にデータを取得し解析作業が始まる。イベントを解析し、ヒストグラムに詰めると即座に次のイベントへのデコード待ち状態になり、EventDistributor からデータを受け取ると同じように解析作業が続いていく。updater が呼ばれるとヒストグラムは最新の状態のヒストグラムへと変えられこれにより、オンライン的にデータをモニターすることができる。

第 4 章

データ収集システムの性能評価

4.1 目的

実験においてどれだけよい検出器やスペクトロメータを利用したとしても、実験データを効率よく収集しなければ、有限の時間で統計的に十分な量のデータを取得することはできない。特にネットワーク分散型のデータ収集系はデータをネットワークケーブルを介して EventBuild するため、ネットワークの転送速度もデータの律速要件になることが考えられる。それぞれの読み出し回路においてもデータをエンコードする時間はそれぞれ異なる。そのため、さまざまな影響から収集効率を下げる可能性がある。

この章では収集効率について理解し、それぞれの読み出し回路における不感時間を計算した上で、実際のビームタイムでの収集効率の測定をした。この結果と考察をする。

4.2 収集効率

$$\text{収集効率} = \frac{\text{実際にデータ収集系が取得できたトリガー事象の数 (trigger - accept)}}{\text{発生したトリガー事象の数 (trigger - request)}} \quad (4.1)$$

単位時間に平均値 μ をもつ ν 個のイベントがおこる確率 $P_\mu(\nu)$ はポアソン分布に従う。 $P_\mu(\nu)$ は次式で与えられる。

$$P_\mu(\nu) = e^{-\mu} \frac{\mu^\nu}{\nu!} \quad (4.2)$$

ここで ν の期待値がトリガー発生率になることは明らかである。

ν の期待値 $\bar{\nu}$ は、

$$\bar{\nu} = \sum_{\nu=0}^{\infty} \nu \cdot P_\mu(\nu) \quad (4.3)$$

$$= \mu e^{-\mu} \left(1 + \mu + \frac{\mu^2}{2!} + \frac{\mu^3}{3!} + \cdots \right) \quad (4.4)$$

$$= \mu \quad (4.5)$$

と求められる。ここで、DAQ の際に発生したトリガー事象の数を N 、実際にデータ収集系が取得できたトリガー事象の数を N' 、不感時間を T_{dead} とすると、以下の等式が成り立つ。

$$DAQ \text{ が数え落としたイベントの数} = N - N' \quad (4.6)$$

$$= \bar{\nu} N' T_{dead} \quad (4.7)$$

$$= \mu N' T_{dead} \quad (4.8)$$

これを変形することで、収集効率を求めることができる。

$$\text{収集効率} = \frac{N'}{N} \quad (4.9)$$

$$= \frac{1}{1 + \mu T_{dead}} \quad (4.10)$$

N : trigger request

N' : trigger accept

T_{dead} : dead time

μ : trigger rate

と表される。つまり、データ収集効率はトリガーレートと不感時間の二つのパラメータによって決まることが分かる。

4.3 HDDAQ の不感時間

K1.8 ビームラインで利用されている TKOBox と KEK-VME(COPPER) のそれぞれの不感時間を調べていく。

4.3.1 TKOBox の不感時間

TKO では主に以下の二つの要因がとりわけ大きな不感時間を引き起こしている。

- ADC のアナログ → デジタル変換に要する時間
- TKOBox から VME ボードへデータを転送する時間 (*sparcedatascan*)

ADC のアナログ/デジタル変換時間は $\sim 100\mu s$ である。この値は回路で決まっているため、縮めることのできない時間である。そこで Sparse Data scan について考察する必要がある。Sparse Data scan は TKO-SCH から VME-SMP へデータを転送するための時間に相当するが、この転送速度は 8Mbyte/s と決まっている。つまり Sparse Data scan の時間を少なくするには転送すべきデータサイズを小さくする必要がある。表 4.1 が実際に利用されている TKO モジュールとそれらのデータサイズである。

表 4.1 TKO のデータサイズ

TKOBox	モジュール	内訳	データサイズ
TKO1	32chADC $\times$ 5 16chTDC $\times$ 8	BH1,BH2,BAC,AC,GC	288
TKO2	32chADC $\times$ 4 16chTDC $\times$ 8	TOF,LC	256
TKO3	32chDr.TII $\times$ 15	SDC3	0~480
TKO4	32chDr.TII $\times$ 16	SDC3,4	0~512
TKO5	32chDr.TII $\times$ 16	SDC4	0~512
TKO6	128chMHTDC $\times$ 6	BC3,4	10~100
TKO7	128chMHTDC $\times$ 8	SDC1,2	10~100

チェンバーの読み出しに関してはヒットがあった時にデータが増えていく仕様になっているため、可変長のデータサイズである。このためチェンバーのノイズが多いとデータサイズは増えることになる。その意味で実験装置の動作条件も影響してくる。チェンバーのノイズについての考察は次節で述べることにする。もし検出器が正常に動いていれば一番データサイズが大きくなるのは TKO1 であり、4byte/word なので 1.1Kbyte のデータが 1 イベントに伴う。このデータを TKObox から VME へ転送する時間は $1.1/(8 \times 10^3) \sim 140\mu s$ であり、これらを考慮すると TKO での不感時間は $\sim 240\mu s$ ということになる。

4.3.2 COPPER の不感時間

COPPER ボードは第 2 章で記述したように、4 枚の FINNESE カードを差し込む仕様になっており (図 2.2)、チェンバーのシグナルは各 FINESSE カードに入力する構造になっている。トリガーが KEK-VME に入ると、COPPER に VME の J0bus を通じて信号が入り、各 FINESSE の FIFO が COPPER の FIFO ヘデータを転送する。そして COPPER の FIFO から PCI バスを通じてネットワークでデータが転送される。このとき FIFO にデータがいっぱいに詰まると busy 信号を出す。これが COPPER の不感時間となる。

大きな時間幅のデータを収集しようとするデータサイズが上昇し、ネットワークの転送時間が上昇し、FIFO にデータが詰まっている時間もこれに応じて上昇するため、不感時間も上昇してしまう。COPPER で読み出しを行う BC1,2 はワイヤー本数は全部で 3072ch ある。COPPER1 台で 128ch の読み出しを行うことができるため、COPPER は 24 台必要になる。例えば、10ns(1word) 分のデータ転送には 1Gbps のネットワークで $1(\text{word}) \times 32(\text{bit/word}) \times 4(/FINESSE) \times 24(\text{台}) / 10^9 \sim 3.2\mu s$ かかる。これに header word も付与されるため、実際の転送時間による不感時間はデータの word 数を x とおくと $\sim 3.2x + 86.4(\mu s)$ である。

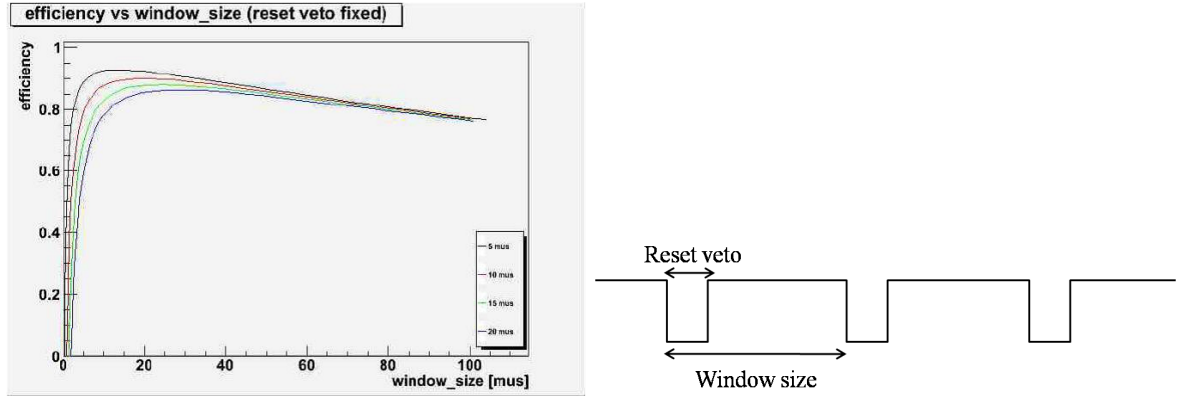


図 4.1 MHTDC の efficiency

4.4 チェンバーのノイズと MHTDC 問題

ここでデータサイズが可変長である MHTDC の読み出しについて考える。TKO の MHTDC は common-stop 型の仕様であり、これとは別に内部の時間カウンターを reset するためのロジックシグナルを周期的に入れなければならない。この reset シグナルは 80ns の幅で入れるようにしているが、reset 前後でのトリガー入力を防ぐため、reset に伴って veto を入れるようにしている (reset veto)。この間はデータを取得することができないため、これも不感時間の要因である。そのため、4.2 での収集効率は

$$efficiency = \left(1 - \frac{resetveto}{windowsize}\right) \left(\frac{1}{1 + \mu T_{dead} \times \left(1 - \frac{resetveto}{windowsize}\right)}\right) \quad (4.11)$$

となる。ここで window size は reset veto の間の時間を表している (図 4.1)。チェンバーにノイズがある場合、リセット周期を長くすると common stop が入った時の Hit 数が増え、データサイズの増加につながる。また、リセット周期を短くすると、Hit 数は減るものの、reset veto の幅が相対的に大きくなるため、収集効率は下がる。図 4.1 が MHTDC 単体にノイズを想定したランダムパルスを入れて測定した時の reset の入れる時間幅 (window size) と収集効率の関係である。この図より一番収集効率の高い条件 window size=10 μ s resetveto=1.6 μ s で実験を行った。

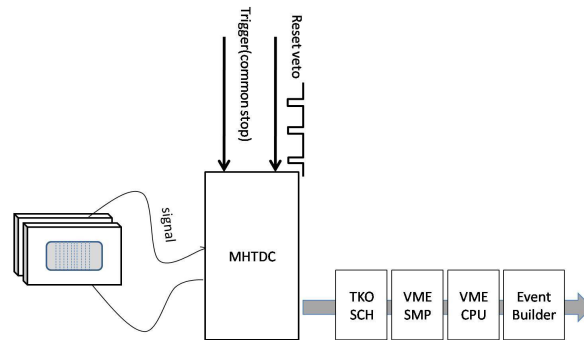


図 4.2 MHTDC システム

4.5 性能評価

これらの状況を踏まえて K1.8 ビームラインにおいて収集効率の性能評価を行った。COPPER の時間幅は正しいシグナルが出うる時間幅 200ns とビームの時間構造を把握するため時間幅 $2.5\mu s$ の二種類で行った。オシロスコープで確認したところ、時間幅 200ns の時の不感時間は図 4.3 のようになっており、およそ $320\mu s$ であった。また周期的に見える信号が MHTDC の reset veto の時間幅となっている。この写真からわかることはトリガーカウンター系で見積もられた不感時間よりも長い不感時間なので、データサイズが可変長の MHTDC でノイズなどによりデータサイズが大きくなったため不感時間が長くなったことが原因である。実際に MHTDC から読み出した BC3,4 の 1 イベント当たりのデータサイズが図 4.4 である。～100word 当たりまでは粒子が通った際の正しい信号であるが、ノイズが多い時は 500word を超えることもある。ノイズの対策のためにはノイズ源をひたすら低減する必要があるが、これ以上の考察はデータ収集系の性能評価からは離れてしまうため、詳しくは触れないことにする。

図 4.5 はデータサイズ $2.5\mu s$ の時に実際にトリガーレートを変えた時の収集効率のグラフである。赤線が第 5.4 節などにより $deadtime 280\mu s$ と見積もった時の理論値であり、実際の測定値が青丸の点である。これを第 5.2 節で示した式でフィッティングを行った結果、理論値よりも低くなった。

理論値からのズレはデータサイズが可変長である MHTDC でのノイズが多いことによるデータサイズの上昇が原因だけでなく、ビームの構造が悪いことによる収集効率の低下も考えられる。ビームは必ずしも一様なレートで出るわけではなく、レートが高い時もあれば低い時もある。

したがって、収集効率低下の原因は一つとは限らないことがわかった。結論として、トリガーレートが 100Hz 前後におけるデータ収集においては収集効率 80% 以上を達成している。これからビームの構造やチェンバーのノイズ対策によって改善されることが期待される。

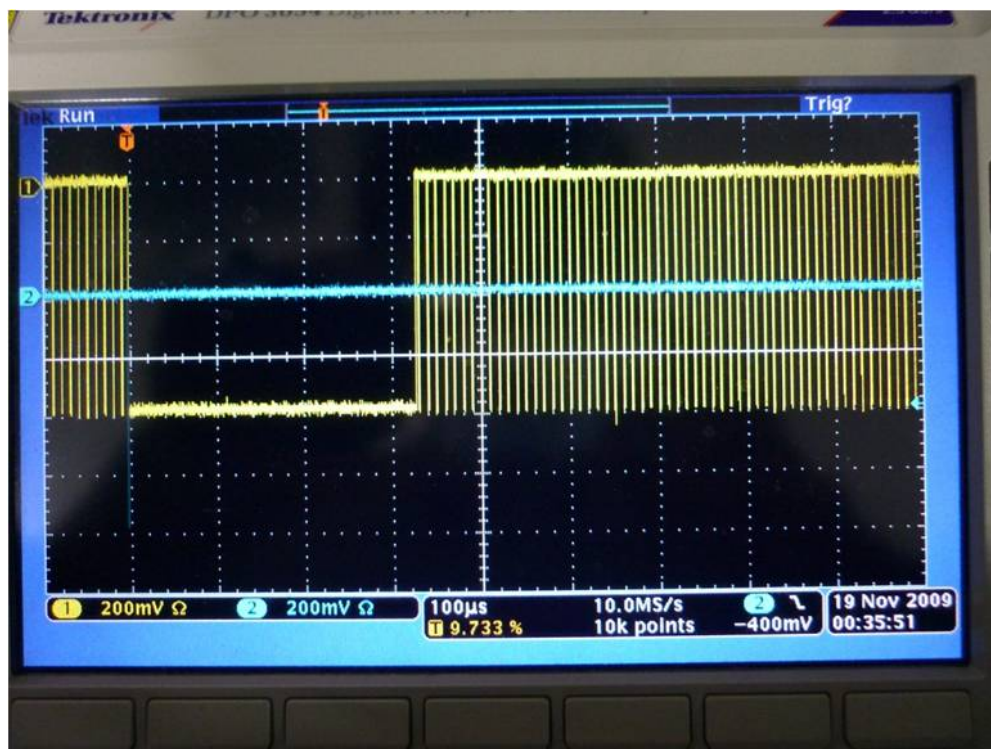


図 4.3 COPPER の時間幅 $200ns$ の場合の不感時間。黄色が不感時間を表している

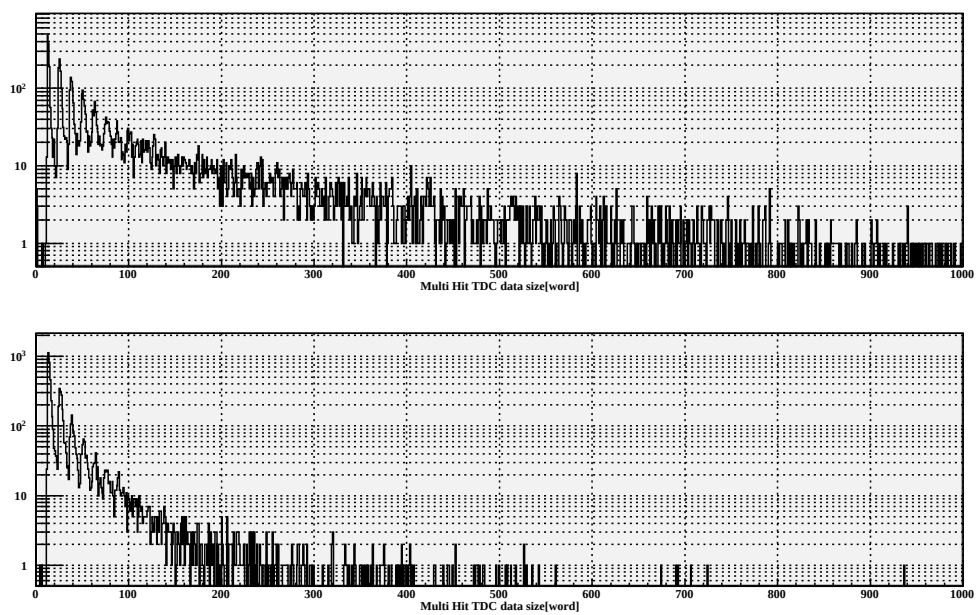


図 4.4 BC3,4 の 1 イベント当たりのデータサイズ
(上) ノイズが多い時、(下) ノイズが少ない時

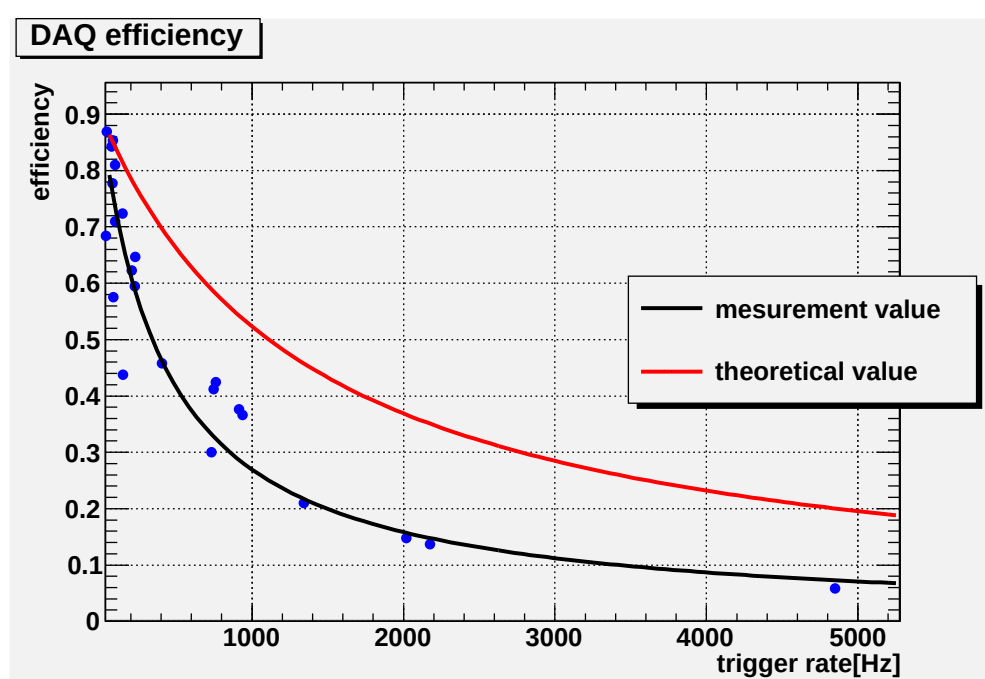


図 4.5 DAQ 収集効率

第 5 章

オンライン運動量解析システムの性能評価

5.1 目的と意義

オンラインでデータを解析するためには統計的に十分なデータ量 (~ 10000 event) を即座に解析することが重要である。その意味で EventDistributor からどれだけデータを間引きされずに取得できるかが重要である。3 章で示したように Event Distributor は 1 イベント分のデータを解析している間はバッファは次のイベントを保持しながら続いてくるイベントを取り込めないようにロックをかけている。つまり、1 イベントの解析をできるだけ速く行い、バッファのロックされる時間をできるだけ短くすることがオンラインの解析効率を上げることになる。この章では、まず運動量を解析するまでの手順を示した上で各解析の中での解析時間を考察し、最適な解析ルーチンを決める。これにより、全データ中オンラインで解析できたイベントの割合 (Online efficiency) を求め評価していく。

5.2 ビームライン運動量解析の手順

ビームラインの解析は大きく 3 段階の手順を踏む。

1. BC1, 2 のローカルトラッキング
2. BC3, 4 のローカルトラッキング
3. ビームラインのトラッキング

QQDQQ 構成のビームラインスペクトロメータは上流と下流で光学点 (VI と VO) が決められている。VI は Q10 マグネットの上流側の端から 30cm, VO は Q13 マグネットの下流側の端から 30cm と定義されている。まず上流、下流それぞれの 2 台のチェンバーでローカルトラックを引き、この光学点での位置と角度を求める。次にビーム輸送行列を利用し VI での位置と角度から VO での位置と角度を求めていく。つまり、 $\vec{X}_{out} = M\vec{X}_{in}$ を求めていく。ここで $\vec{X} = (x, y, \frac{dx}{dz}, \frac{dy}{dz}, \delta)$ である。

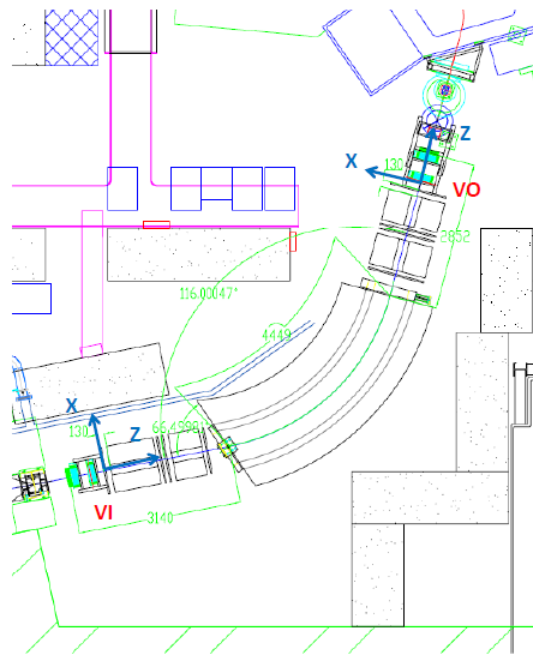


図 5.1 VI と VO の位置

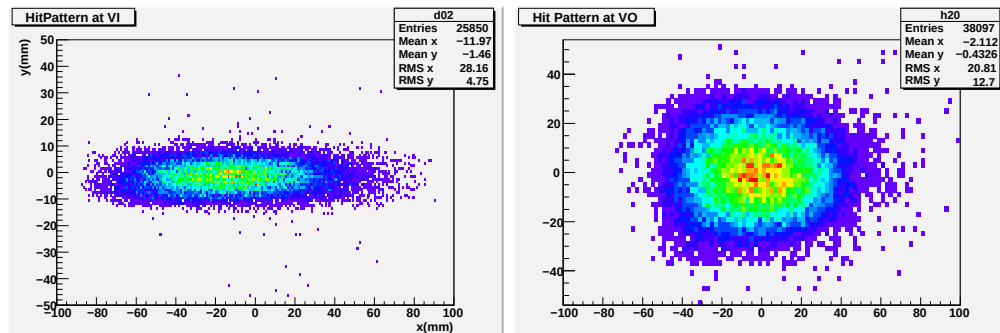


図 5.2 ローカルトラッキングから求めた VI と VO でのヒットパターン

5.2.1 BC1,2 のローカルトラッキング

BC1,2 のローカルトラッキングの手順を示す。

1. ヒットのあったワイヤーを探す
2. 連続してワイヤーがヒットしているときにクラスタリングをする
3. 粒子の通過した位置を求める
4. 最小二乗法による直線トラッキングをする

即時解析の場合、解析時間の短縮が必要になってくる。そのため、必ずしも完全な解析を求めるのではなく、速度が求められるので、粗い解析でもよい。そこである程度のイベントを選択してい

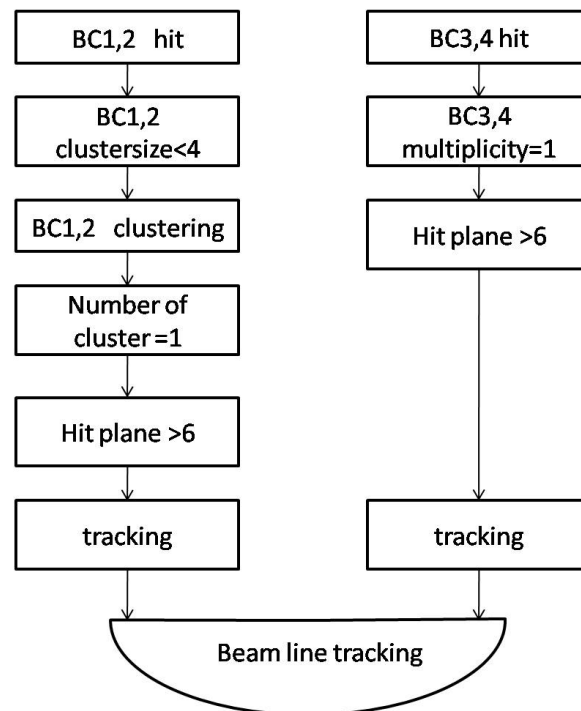


図 5.3 トラッキングアルゴリズム

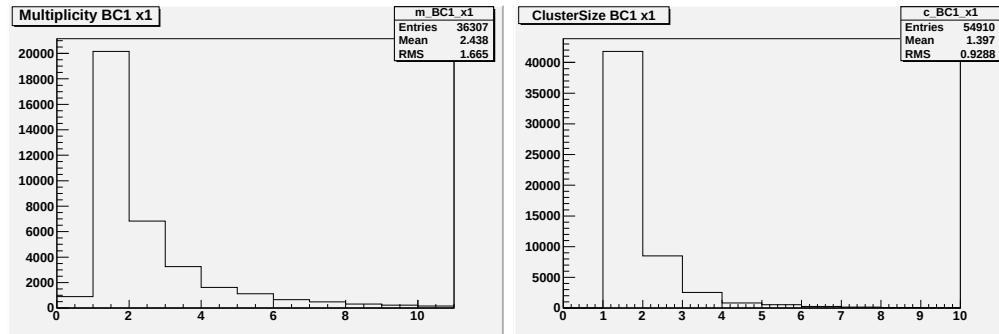


図 5.4 BC1 の multiplicity とクラスターサイズ

く。図 5.4 が実際のビームタイムによって得られたヒット多重度（multiplicity）である。多重度はビームの強度や構造によっても変わるが、今回は以下の条件を課すことによりイベントを選択することにした。

- クラスターサイズは 4 以下にする。
- クラスタリング後の多重度（multiplicity）は 1 だけを考慮する。
- 12 面あるチェンバーのうち 6 面以上に上の条件が満たされた場合トラッキングを開始する。

MWPC に関してはヒット位置はワイヤーのヒットをそのままヒット位置とすることにした。つまり時間情報によって位置を決めないことにした。これは時間条件を入れることによる解析時間の増加を避けるためである。クラスターサイズが大きくなると時間情報が必要になってくる。そのため

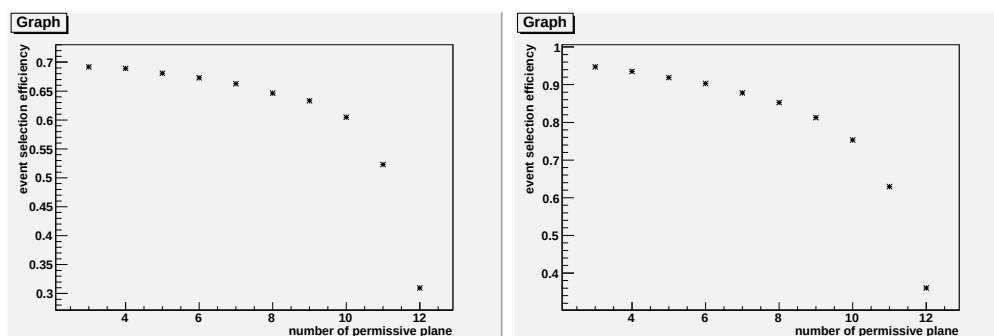


図 5.5 トラッキングを許容する面の数を変えた場合のイベント選択効率 (左)BC1,(右)BC2
デフォルトの設定では 6 にした。

クラスターサイズは図 5.4 にあるように 95 %ほどがクラスターサイズ 4 以下であることよりこれに決定した。また、クラスターの中心は連続してヒットのあったワイヤーの重心をとることで位置を決定した。また、クラスターリング後の多重度が 1 のイベントを考慮することにより、解析時間の短縮を試みた。これにより一つのイベントにより引けるトラックの数は絶対に 1 本しか引けないことになるが、即時性を追求するためにこのアルゴリズムを採用した。もし、全ての事象についてトラッキングを試みるとトラッキングの候補が増え必要となるメモリの容量も増えるため、この方がよいと考えた。解析時間に関しての考察は次節で述べることにする。これらの条件で行えば全イベント中ある程度の間引きができる。図 5.5 がこれらの条件をいろいろと変えた場合のイベント選択効率である。もちろんこれらはビームのコンディションによっても変わる。そのため、解析プログラムとしては関数の引数にこれらの条件のパラメータを入れることで容易に条件を変えることができるようにした。

5.2.2 BC3,4 のトラッキング

BC3,4 はアノード間隔 3mm のドリフトチェンバーであり、粒子の通った位置を決定するためにはトリガーが入ってからシグナルが出るまでの時間、つまり tdc から粒子のドリフト時間を計算し、そこからドリフト長を計算しなければならない。さらには二枚のチェンバーによって粒子がワイヤーの左を通ったか、もしくは右を通してワイヤーにシグナルが入ったか（通称；LR を解く）という判別を行わなければならない。これに関してはオンライン解析では全て行わないことにした。つまり MWPC と同じようなルーチンで行うことにした。BC3,4 は 1 面あたりのワイヤーの本数は 64 本、一方 MWPC は 256 本でありヒット探索を行う時間も短くなるはずである。

5.2.3 ビームラインのトラッキング

ビームラインのトラッキングは BC1、2 で得られたローカルトラックから VI での位置と角度を求め、そこから、ビーム輸送行列を利用して VO での位置と角度を求めていく。ここで用いるビー

ム輸送行列は *ORBIT* ^{*1} と呼ばれるソフトウェアを用いて 3 次のオーダーまで計算した。ここから二つのローカルトラックをフィットするように輸送行列の δ ($\delta = \frac{\Delta p}{p}$) の項を変えていく。

その結果得られたグラフが図 5.6 のようになった。

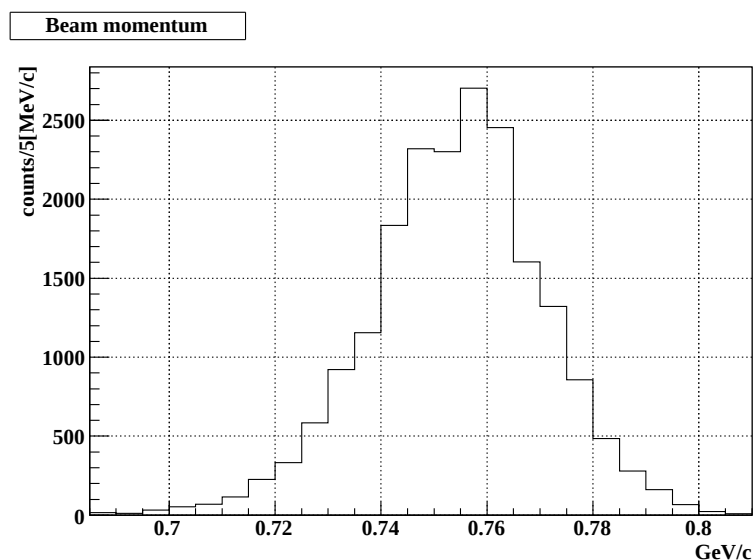


図 5.6 中心運動量を 0.75GeV/c に設定した際のビーム運動量の分布

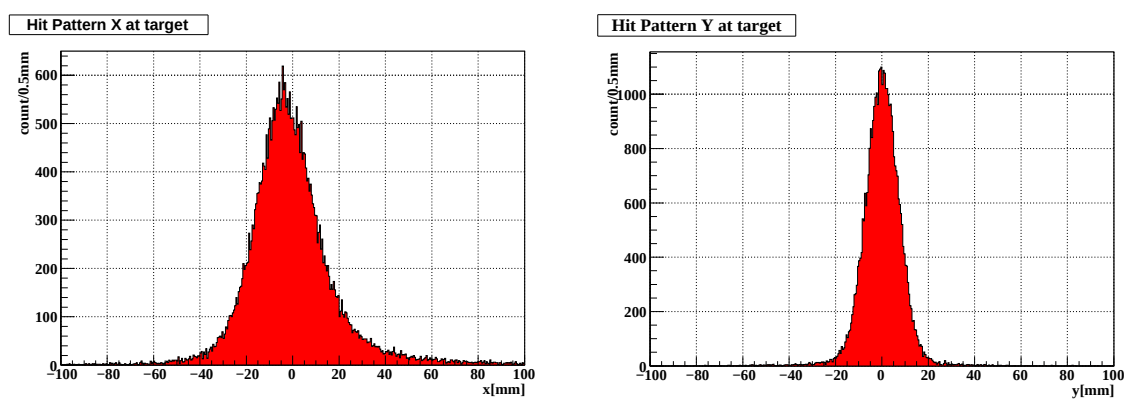


図 5.7 実験標の上でのビームプロファイル
(左) 水平方向 (右) 垂直方向

^{*1} *ORBIT* は九州大学の森信氏によって開発されたソフトウェアである。

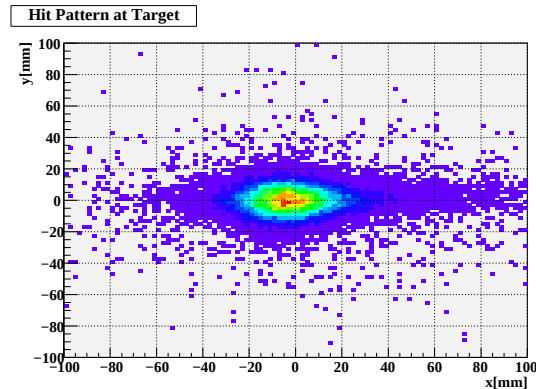


図 5.8 実験標的上での二次元ビームプロファイル

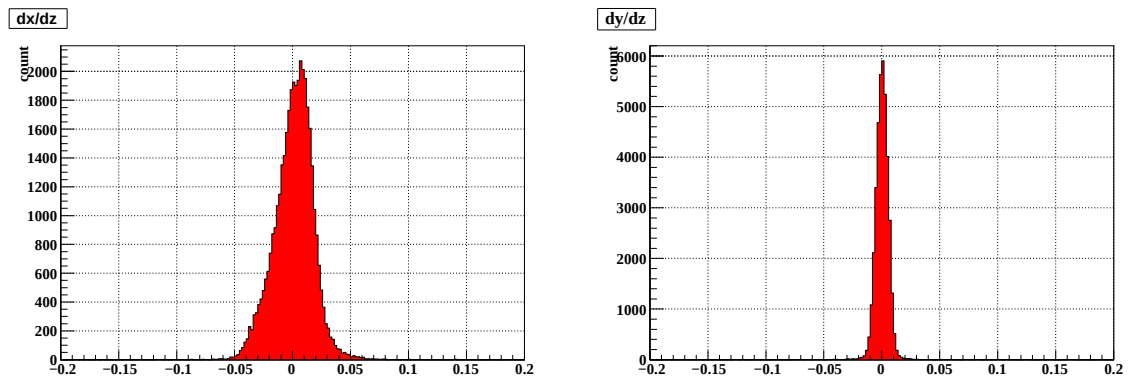


図 5.9 角度分布

5.3 解析に要する時間

ここから開発した解析プログラムについての解析時間を評価する。オンライン解析で統計的に十分といえる量 (～10000 イベント) をどれだけ速く解析できるかを 1 イベント当たりの時間で測定した。ここで運動量を解析するアルゴリズムの順序を以下のようにした。

1. BC3,4 のローカルトラッキングを引くことができた。
↓
2. BC1,2 のローカルトラッキングを引くことができた。
↓
3. beamline のトラッキングを行う。

BC3,4 は BC1,2 比べてワイヤーの本数が少ない (BC3,4:768 本, BC1,2:3078 本) ため、「ヒットがあったワイヤーを探す」というプロセスを速く終了できるのは BC3,4 である。BC3,4 でトラックを引くことができたという条件で BC1,2 のトラッキングを行うと BC1,2 の解析を行うイベント数を減らすことができる。そのため、解析時間の短縮になる。図 5.10 が 1 事象当たりのデータサイ

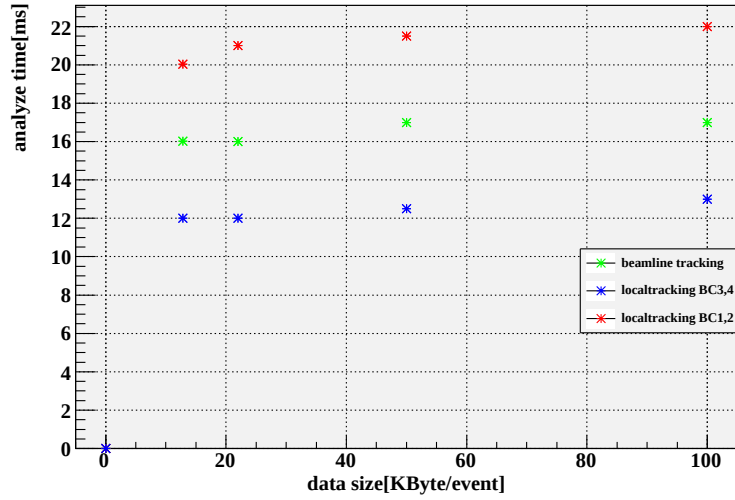


図 5.10 データサイズに対するデータ解析時間

ズに対する解析時間である。見てわかるようにデータサイズの変化に対してそれほど解析時間は長くなっていない。つまり、データを取り込む際に要する時間はそれほど変わらないことになる。この解析ルーチンを利用すれば 1 秒あたり 60event 分の解析が可能となり、オフライン解析としては 10000 イベントの解析は 3 分以内で終わることができる。

5.4 オンライン解析としての評価

オンライン解析の場合、実際に収集できたデータ量（イベント数）に対してある程度の間引きを行い、モニターする。このとき、全イベントに対してオンラインでモニターできるイベント数の割合のことをオンライン効率 (Online efficiency) と定義する。

オンライン効率は Event Distributor 内でのモニターポートにデータを送信するために 1 イベント分のデータを確保しているバッファがどれだけの時間ロックがかかっているかによる。前節での解析時間の測定から、ビームがもし一様に出ているのであれば平均トリガーレートが 60Hz まではオンライン効率は 100% になるはずである。しかし、ビームはランダム事象であり、時間構造が一樣とは限らないため、瞬間トリガーレートは変動する。そのため、予想される解析効率よりは下がるはずである。

このことを確認するために実際に K1.8 ビームラインにおいてビームを利用してオンライン解析効率を測定した。

図 5.11 がデータサイズが 100kbyte の場合のオンライン解析効率である。確かにオンライン効率 100% になるトリガーレートは解析時間から計算した 60Hz よりも若干低いことが確かめられた。

この結果をまとめ、ビームスペクトロメータでビームが 6s 周期のスピル、スピル長 2s を仮定した場合、トリガーレートに対して 10000 イベントをオンラインで表示するのに必要な時間は

$$R \times \epsilon_{daq} \times \epsilon_{online} \times \epsilon_{tracking} \times time \times \frac{2}{6} = 10000 \quad (5.1)$$

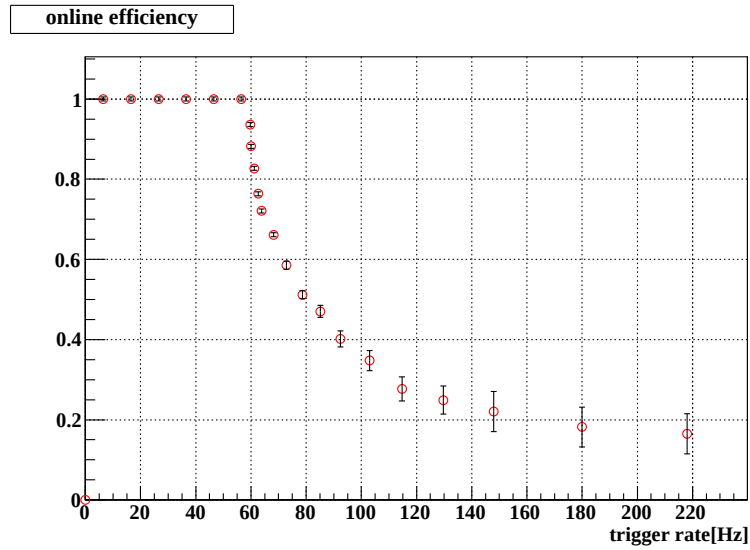


図 5.11 オンライン解析効率

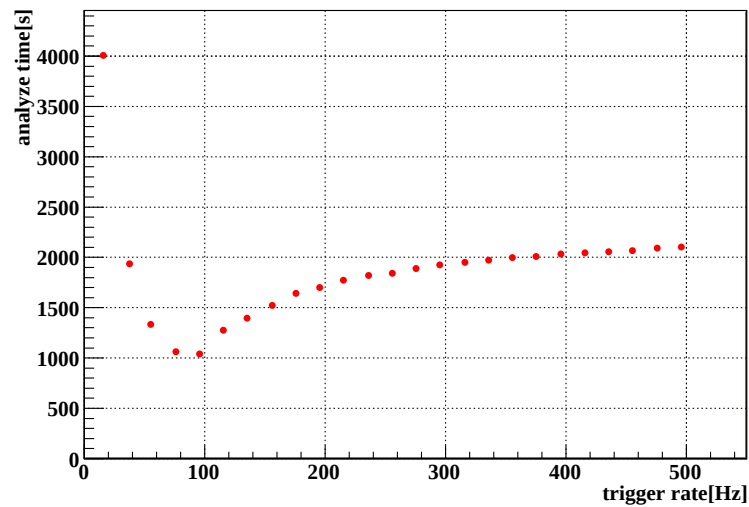


図 5.12 トリガーレートに対する解析時間

$$R: \text{trigger rate [Hz]}$$

これを図 4.5 の DAQ 効率と図 5.11 のグラフから計算し、図 5.5 よりイベント選択効率 $\epsilon_{tracking}$ を 0.5 とすれば図 5.12 のようになった。もちろんこれはビーム強度やスピン条件を仮定した場合の評価であるが、このオンライン解析システムを利用することでビームラインの運動量を解析して統計的に十分なデータを表示するために一番効率のよいトリガーレートは $\sim 80\text{Hz}$ ということが分かった。この結果をさらに良いものにするためには DAQ 収集効率の改善とさらなる解析速度の高速化が必要であることが分かった。

第 6 章

まとめ

J-PARC ハドロン実験施設内にある K1.8 ビームラインでは大強度の π 中間子や K 中間子を用いて様々な実験が行われようとしている。ビームの強度はビームライン上流で 10^7count/s と大きいため、新たな検出器を開発した。その中で運動量を解析するために用いることにした飛跡検出器はビームスペクトロメータ入口にアノード間隔 1mm の MWPC、出口にはアノード間隔 3mm の MWDC を配置した。読み出しチャンネル数の増加と大きなビーム強度により読み出し回路も多重ヒット対応の COPPER や MHTDC を用いたデータ収集系を用いることにした。異なる読み出し回路を利用することによりイベント番号の同一化が必要になり、トリガー配布系モジュールを開発した。また、各読み出し回路のデータを一つのイベントとして集約するため、EventBuilder 計算機を中心としたネットワーク分散型データ収集システムを新たに開発した。ソフトウェアとしてのデータ収集システムも開発し、オンライン解析システムをデータ収集系に接続することでデータを受け取り即時解析するシステムを構築した。その中でもオンラインでビームライン運動量を解析できるプログラムを開発し、実際に運動量をモニターすることに成功した。解析時間などを測定し、1 イベントの解析時間を 17 ミリ秒ほどであることを確認した。オンライン解析の最適化を試み、実際のビームを利用してトリガーレートが変動する状態でのオンライン収集効率を測定した。その結果統計的に十分なイベントを解析し、モニターするために一番効率のよいトリガーレートは $\sim 80 \text{Hz}$ ということが分かった。

今後 K1.8 ビームラインにおける実験において、このシステムは欠かすことのできないシステムになることであろう。

付録 A

最小二乗法を利用したチェンバーの直線トラッキング

A.1 平面内のトラッキング

ビーム軸を z 軸にとり、 $z-x$ 平面におけるトラッキングを考えるとする。
一般の直線の方程式は次のように記述することができる。

$$x = az + b \quad (\text{A.1})$$

ここで N 個のデータ点 $N(x_i, y_i)$ を直線 $x = az + b$ で近似する場合を考える。ここで、 z_i には誤差が存在せず、 x_i の誤差を σ_i とする。最小二乗法では

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - (az_i + b)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

と定義した χ^2 が最小となる a, b を求める。そのための条件は、

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = 0, \frac{\partial \chi^2}{\partial b} = 0 \quad (\text{A.3})$$

であり、これらを満たす a, b を求めることができれば、直線を決定することができる。

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N (x_i - az_i - b) z_i = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^N (x_i - az_i - b) = 0 \quad (\text{A.5})$$

これを行列表示にして解くと簡単に解くことができ

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N z_i^2 & \sum_{i=1}^N z_i \\ \sum_{i=1}^N z_i & \sum_{i=1}^N 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N x_i z_i \\ \sum_{i=1}^N x_i \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

ここで、

$$A = \sum_{i=1}^N z_i^2 \quad (\text{A.7})$$

$$B = \sum_{i=1}^N z_i \quad (\text{A.8})$$

$$C = \sum_{i=1}^N x_i z_i \quad (\text{A.9})$$

$$D = \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{A.10})$$

結局

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \frac{1}{NA - B^2} \begin{pmatrix} NC - BD \\ AD - BC \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

となる。

A.2 空間内の直線トラッキング

チェンバーのワイヤーはビームの強度などを想定してある角度を傾けてワイヤーが張ってある。この場合、異なる角度の複数のチェンバーでトラッキングを行う時は、より一般化した式が必要である。

前節と同様にして空間内での直線の方程式は次のように記述することができる。

$$f(z) = \cos \theta (a + zb) + \sin \theta (c + zd) \quad (\text{A.12})$$

ここで $f(z)$ は $x - y$ 平面を θ だけ傾けた $x' - y'$ 平面内における x' 座標を表している。 χ^2 は

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{x'_i - f(z_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (\text{A.13})$$

この χ^2 が最小となる a, b, c, d を求める。

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{x'_i - f(z_i)}{\sigma_i} \right) \cos \theta_i = 0 \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{x'_i - f(z_i)}{\sigma_i} \right) z_i \cos \theta_i = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial c} = -2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{x'_i - f(z_i)}{\sigma_i} \right) \sin \theta_i = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial d} = -2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{x'_i - f(z_i)}{\sigma_i} \right) z_i \sin \theta_i = 0 \quad (\text{A.17})$$

$\sigma_i = \text{定数}$ とすれば式は簡単になり、行列で表示すると

$$M \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N x'_i \cos \theta_i \\ \sum_{i=1}^N x'_i z_i \cos \theta_i \\ \sum_{i=1}^N x'_i \sin \theta_i \\ \sum_{i=1}^N x'_i z_i \sin \theta_i \end{pmatrix} \quad (\text{A.18})$$

$$M = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i \cos^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i \cos \theta_i \sin \theta_i \\ \sum_{i=1}^N z_i \cos^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i^2 \cos^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i^2 \cos \theta_i \sin \theta_i \\ \sum_{i=1}^N \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^N \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i \sin^2 \theta_i \\ \sum_{i=1}^N z_i \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i^2 \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N z_i^2 \sin^2 \theta_i \end{pmatrix} \quad (\text{A.19})$$

この行列 M の逆行列を求めることにより、4つのパラメータを求めることができる。

謝辞

この修士論文を書くにあたり、とても多くの方にお世話になりました。

今井憲一教授には経験を基にした物理を教えてもらい、困った時には最終的に相談いたしました。また、食事中にはよく京都の昔話を聞かせていただき、とても楽しいひと時も送れました。

指導教官である永江知文教授には DAQ のシステムから修士論文の構成まで様々なことを教わりました。物理の勉強はもちろん語学、文化の勉強もさせていただきました。

藤岡宏之助教には物理のことだけでなく、生活面などにもいろいろとお言葉をいただき、時には、騒がしいと感じた時もありましたが、今思えば藤岡さんがいなければ自分は怠慢な人間になっていたように思います。

谷田聖助教にはわからないことがあった時にいつでもすばやくお答えをいただき物理に関しても、アニメ、漫画、様々なことに対していつもお世話になりました。川畑貴広准教授には昔の我々の研究室の話などをしていただき、今の研究室を明るくしていただきました。

村上哲也助教にはちょっとしたことで突っ込みをいただき、話をする際にはすごく緊張しました。しかし研究室の中で一番学生を思ってくださっている村上さんは頼りになる存在でした。

Shimonetta Marcello さんには 10 カ月という短い期間でしたが、自分にとっての語学力の向上にもなりましたし、部屋に入った時にはいつもお菓子を出していただいたりとてもありがとうございました。J-PARC では現場作業の方法などちょっとしたことも教わりました。庄司幸平さんにはネットワークの知識を教えてください大変勉強になりました。修士の研究のなかでの基礎知識を習得できたように思います。

関義親さんはいつもふらっと部屋に来て気分をリフレッシュしていただきました。飲み会での変貌ぶりにいつも楽しめました。

大楽誠司さんには KEK での昔話を聞かせていただき、困った時にはいつも優しく答えてくれてとても貴重な存在でした。これからも解析などで聞くことがあるかもしれませんがよろしくお願いします。

唐津謙一さん、中村克郎さんにはたまに日本に戻られたときにいろいろと食事に行ったりしました唐津さんには怖くてなかなか突っ込めませんでしたが、同じ計算機委員としてお世話になりました。克郎さんには物理的な話を教わりました。特に学振を書くときには様々なテクニックを教わりました。

時安敦史さん、森津学さんとは同じストレンジグループとして J-PARC での作業で長期間の共同生活、共同作業をいたしました。時安さんには DAQ からチェンバー作業までいろいろと勉強にな

ることが多く、森津さんとは研究室でも同じ部屋、J-PARC でも同じ家に宿泊し、いつも親近感のわく存在でした。修士1年の頃はこれから何をすべきか全くわからない私に基礎の基礎から教えていただき、一番質問しやすい方でした。どうもありがとうございました。

同期の浅野秀光君、足立智君、酒向正巳君、佐田優太君とは修士一年のころは自主ゼミなどを通じてお互いにわからないことをぶつけ合ったり、修士二年になってもそれぞれの研究に対する進捗状況などを報告してお互いに何をやっているのかを理解することで、切磋琢磨して二年間を過ごしました。

東北大学のストレンジ核物理グループの方とも J-PARC で大変お世話になりました。田村裕和教授、小池武志助教、三輪浩司助教には検出器のセットアップや様々な作業においてひとつひとつわかりやすく教えていただきました。白鳥昂太郎さんには KEK にいた時から作業拠点が J-PARC に変わるまで常にお世話になりました。KEK にいた時はシンチレーション検出器の様々な特性などを教えていただき、食事にはいつも車に乗せていただき、毎日が楽しかったです。J-PARC に移動してからは色々な労働をともにやり、SKS の立ち上げに長期間一緒に参加することでとても親近感がわきました。11 月頃からは解析作業でもお世話になり、私の中では最高の頼れる先輩であり、理想の先輩でありました。細見健二さん、山本剛史君とは宿泊家でとても楽しい話で盛り上がり、作業のほうでもつらい作業でも愉快的気分になりました。佐藤美沙子さん、八木一也君、本多良太郎君、米本慶央君とはともに共同作業を行う同志として J-PARC で楽しく過ごさせていただきました。

大阪大学の J-PARC 組ともお世話になりました。阪口篤志教授には 8 月に検出器の動作などについてあまり知識のない私に色々教えていただきました。石橋直哉君には人手の足りない時期にすぐに駆け付けてくれて一緒にビームラインの測定の手伝いをしていただきました。解析に移ってからも私の作ったアナライザーにイベントディスプレイを拡張してみたりととても力になってくれました。ありがとう。あと吉田幸太郎という人もいました。

奈良女子大の元気娘、岩崎るりさんは常にグループの雰囲気明るくしてくれて、SKS グループにとって欠かせない存在でした。

そして、KEK の方々には大変お世話になりました。高橋俊行准教授には厳しいコメントもいただきましたが今に生きています。常に的を得たことをおっしゃっていただき、修士論文を書く上でも大変お世話になりました。ビームタイム期間は短い時間で効率のよいデータの取り方など参考になることが大変多かったです。どうもありがとうございました。成木恵助教にはとても癒されました。ビームのプロファイルを出す際のプログラムのバグを一緒に探していただいたりしました。どうもありがとうございました。木内隆太博士とはビームライン側のセットアップを長期間一緒に作業しました。どんなときも一生懸命な姿に感動しました。

そして高橋智則さんには修士2年間で一番お世話になりました。修士の研究テーマとして DAQ 系をやることに決まった 2008 年の秋から智則さんのもとに弟子入りし、エレクトロニクスの知識の全くなかった僕に基礎から一つずつ教えていただきました。KEK や J-PARC にいるときはもちろん僕が京都にいて困ったときでもすぐにメールしていただき、そのメールの内容もとても丁寧にわかりやすく書かれていて大変助かりました。最後の最後までご迷惑をかけっぱなしでしたが僕の中では事実上の指導教官でした。本当にどうもありがとうございました。

最後に、いつも陰ながら見守ってくれた両親に感謝の気持ちを送ります。

参考文献

- [1] The Joint Project Team of JAERI and KEK, "The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators", KEK- PREPRINT-1999-4, Jul 1999.
- [2] Y.Igarashi *et al.*, "A Common Data Acquisition System for Hish Intensity Beam Experiments", IEEE Trans.Nucl.Sci, vol 52, p2286-2871, 2005.
- [3] KEK Data Acquisition Development Working Group, "TKO SPECIFICATION", KEK- PREPRINT-1985-10, Nov, 1985
- [4] T.Fukuda *et al.*, Nucl Instr and Meth in Phys. Res A **361** (1995) 485.
- [5] T.Nagae *et al.*, "Spectroscopic study of Ξ -Hypernucleus, ${}_{\Xi}^{12}\text{Be}$, via the ${}^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ Reaction", Proposal for J-PARC 50 GeV Proton Synchrotron, P05, Apr 2006.
- [6] H.Tamura *et al.*, "Gamma-ray spectroscopy of light hypernuclei", Proposal for J-PARC 50 GeV Proton Synchrotron, P13, Apr 2006.
- [7] T.N.Takahashi JPS 26aSD-1(2007A).
- [8] Atlas muon Tdc URL <http://atlas.kek.jp/tdc/amt1/AMT1-2manual.pdf>
- [9] Repic URL <http://www.repic.co.jp/contents/products/repic/center.html>
- [10] ジーエヌディー GNT-050 URL <http://www.gn-d.com/guest/gnt050.pdf>
- [11] 田中真伸 高エネルギーニュース 26 巻 第 3 号