

修士学位論文

K2K実験のSciFi検出器における低エネルギーニュートリノ反応と粒子識別の研究

神戸大学大学院自然科学研究科 粒子物理研究室

034S122N

森口 曜

2005年2月10日

目次

第 1 章	ニュートリノとその振動現象	3
1.1	導入	3
1.1.1	ニュートリノ研究の背景	3
1.2	ニュートリノ振動	4
1.2.1	大気ニュートリノ異常	6
1.2.2	人工ビームを用いたニュートリノ測定	7
第 2 章	K2K 実験	9
2.0.3	K2K 実験の概要	9
2.1	K2K 実験の構成	9
2.1.1	ニュートリノビームライン	9
2.2	前置検出器	11
2.2.1	1 キロトン 水チェレンコフ検出器 (1kt)	11
2.2.2	Fine-Grained 検出器 (FGD)	12
2.2.3	後置検出器 (スーパーカミオカンデ)	13
2.3	K2K 実験の最新結果	16
第 3 章	SciFi 検出器	20
3.1	シンチレーティングファイバー (SciFi)	21
3.1.1	シンチレーティングファイバーシートとバンドル	21
3.2	光検出装置 IIT-CCD チェーン	24
3.3	SciFi 検出器のデータ取得	24
3.4	SciFi 検出器の性能	25
3.4.1	ヒット検出効率	25
3.4.2	トラック検出効率	25
3.4.3	検出器の安定性	25
3.5	SciFi におけるデータ解析	29
3.5.1	ヒット検出	29
3.5.2	トラック検出	30
3.5.3	トラック整合	30
3.5.4	2次トラック検出	30
第 4 章	低エネルギー領域でのニュートリノ反応イベントの研究	32
4.1	低エネルギーニュートリノ事象の重要性	32
4.2	SciFi-MRD のトラック整合によるイベントの分類	32
4.3	K2K-I における低エネルギーイベントの研究	34
4.3.1	LG 信号の信号の大きさを用いたエネルギー再構成	34
4.3.2	LG イベントのミューオン識別	35

4.3.3	LG イベントのエネルギー	39
4.4	K2K-IIa データにおける低エネルギーイベントの研究	40
4.4.1	SciFi-MRD トラック整合条件の見直し	40
4.5	K2K-IIa MRD-2L イベント	48
4.5.1	エネルギー再構成	49
4.5.2	基本分布	49
4.6	低エネルギーイベントの寄与	54
4.7	K2K-I データセットでのイベント再定義	57
第 5 章	SciFi 検出器における粒子識別	66
5.1	粒子識別の必要性	66
5.2	ヒットおよびトラック認識の改良	67
5.2.1	使用したイベントのまとめ	68
5.2.2	改良後のトラック基本分布	68
5.2.3	2次トラック検出能	68
5.3	粒子識別の方法	73
5.3.1	エネルギー損失と N_{pix}	73
5.3.2	2次トラックの運動量 (速度) 分布	74
5.3.3	1次トラック 2次トラックに対する N_{pix} 分布と N_{pix} 補正	76
5.3.4	Likelihood 関数の定義	82
5.4	粒子識別の結果	85
5.4.1	1次トラックに対する粒子識別の結果	85
5.4.2	2次トラックに対する粒子識別の結果	85
5.4.3	粒子識別の性能評価	91
5.5	物理解析への応用	96
5.5.1	CCQE 反応選択への応用	96
5.5.2	低エネルギー事象への寄与	99
5.6	まとめ	103
第 6 章	まとめと展望	104
6.0.1	低エネルギーイベントの研究 まとめ	104
6.0.2	粒子識別の研究 まとめ	105
6.1	展望	105
6.1.1	K2K-IIb イベントの解析	106
6.1.2	N_{pix} 補正による粒子識別性能の向上	106
6.1.3	粒子識別法の低エネルギーイベント解析への応用	106
付 録 A	SciFi 検出器におけるニュートリノ反応の基本分布	111

目次

1.1	SKにおけるニュートリノフラックス天頂角分布	8
2.1	K2K 実験のニュートリノビームライン	10
2.2	電磁ホーンマグネット	10
2.3	前置検出器の構成	11
2.4	スーパーカミオカンデ (SK)	14
2.5	SK のミュオンライクイベント	15
2.6	K2K 実験の振動パラメータ感度	16
2.7	SK でのエネルギースペクトル	18
2.8	K2K 実験の結果から許容される振動パラメータ領域	19
3.1	シンチレーティングファイバーシート飛跡検出器	20
3.2	シンチレーティングファイバー	21
3.3	ファイバーシートの構造 1	22
3.4	ファイバーシートの構造 2	22
3.5	ファイバーバンドルの製作	22
3.6	SciFi 検出器のファイバーシート層	23
3.7	IIT-CCD チェーン	24
3.8	SciFi 検出器のヒット検出効率	26
3.9	SciFi 検出器のトラック検出効率	26
3.10	宇宙線による安定性モニター	27
3.11	ビームスピル間のトリガーを用いたノイズモニター	28
3.12	CCD 画面のイメージ	29
3.13	SciFi 検出器におけるニュートリノイベントの例	31
4.1	LG イベントの例	34
4.2	K2K-I: MRD との整合がとれたイベントのミュオン運動量分布	35
4.3	K2K-I:ニュートリノエネルギー分布	35
4.4	LG の通過距離	37
4.5	LG 信号の大きさ (ADC) の分布	37
4.6	通過距離と信号の大きさ	37
4.7	LG におけるエネルギー損失と信号量の関係	38
4.8	2次トラック Contained イベントに対する LG エネルギー分布	38
4.9	2次トラック nonContained イベントに対する LG エネルギー分布	38
4.10	LG イベントミュオン運動量分布	39
4.11	LG イベントニュートリノエネルギー分布	39
4.12	K2K-IIa ミュオン運動量分布	40
4.13	K2K-IIa ニュートリノエネルギー分布	40

4.14	2D イベントに分類されていた 3 D イベント	41
4.15	χ^2 分布	42
4.16	新しい 3D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) のミュオンエネルギー分布	43
4.17	MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1	44
4.18	MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 2	44
4.19	新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) トラック数分布	46
4.20	新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) 角度分布	46
4.21	新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) ミュオン運動量分布	47
4.22	新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) ニュートリノエネルギー分布	47
4.23	2L イベント	49
4.24	MRD 2 L イベント	50
4.25	MRD 2 L イベント MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1	51
4.26	MRD 2 L イベント MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 2	51
4.27	MRD 2L イベントトラック数分布	52
4.28	MRD 2 L イベント 角度分布	52
4.29	MRD 2L イベント	53
4.30	MRD 2L イベントニュートリノエネルギー	53
4.31	全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いたトラック数分布	55
4.32	全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いた角度分布	55
4.33	全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いたミュオン運動量分布	56
4.34	全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いたニュートリノエネルギー分布	56
4.35	K2K-I 新しい MRD 3D イベント:エネルギー分布	58
4.36	K2k-I 新しい MRD 3D イベント:MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1	59
4.37	k2k-I 新しい MRD 3D イベント:MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 2	59
4.38	K2K-I MRD 2L イベント:エネルギー分布	60
4.39	K2k-I MRD 2L イベント:MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1	61
4.40	k2k-I MRD 2 L イベント:エネルギー再構成 2	61
4.41	K2K-I 新しい MRD 3D イベント トラック数分布	62
4.42	K2K-I 新しい MRD 3D イベント ビーム軸に対するトラック角度	62
4.43	k2k-1 新しい MRD 3D イベント ミュオン運動量分布	63
4.44	k2k-1 新しい MRD 3D イベント ニュートリノエネルギー分布	63
4.45	k2k-1 MRD 2L イベント トラック数分布	64
4.46	k2k-1 2L イベント:ビーム軸に対するトラック角度	64
4.47	k2k-1 2L イベント ミュオン運動量	65
4.48	k2k-1 2L イベント ニュートリノエネルギー分布	65
5.1	トラック角度による QE イベントの選択	67
5.2	K2K-I:トラック数分布	69

5.3	K2K-I:角度分布	69
5.4	K2K-I:ミューオン運動量分布	69
5.5	K2K-I:ニュートリノエネルギー	69
5.6	K2K-I:2次トラックヒット数分布	70
5.7	K2K-I:2次トラック角度分布	70
5.8	K2K-IIa トラック数分布	71
5.9	K2K-IIa 角度分布	71
5.10	K2K-IIa:ミューオン運動量	71
5.11	K2K-IIa:ニュートリノエネルギー	71
5.12	K2K-IIa 2次トラックヒット数分布	72
5.13	K2K-IIa:トラック角度分布	72
5.14	N_{pix} とエネルギー損失	73
5.15	2次トラック 運動量、速度分布	75
5.16	N_{pix} 分布の比較	75
5.17	1次トラックの N_{pix} 分布 (補正前)	77
5.18	2次トラック (Contained) N_{pix} 分布 (補正前)	77
5.19	K2K-IIa 1次トラック (Contained) N_{pix} 分布	78
5.20	K2K-IIa 2次トラック (Contained) N_{pix} 分布	78
5.21	N_{pix} 値と補正係数	79
5.22	N_{pix} 値と補正ファクター K2K-2a	79
5.23	K2K-I 1次トラックの N_{pix} 分布 (補正後)	80
5.24	2次トラックの N_{pix} 分布 (補正後)	80
5.25	1次トラックの N_{pix} 分布 (補正後) K2K-2a	81
5.26	2次トラックの N_{pix} 分布 (補正後) K2K-2a	81
5.27	2次トラック Contained イベントに対するトラック止まり際4層の N_{pix} 分布	83
5.28	2次トラック Contained イベントの N_{pix} 分布	84
5.29	1次トラックの N_{pix} 分布	86
5.30	1次トラックの L_p 分布	86
5.31	K2K-I,Contained イベントの N_{pix} 分布	87
5.32	K2K-I,Contained L_p 分布	87
5.33	K2K-I,nonContained イベントの N_{pix} 分布	88
5.34	K2K-I,nonContained L_{pi} 分布	88
5.35	K2K-IIa Contained イベントの N_{pix} 分布	89
5.36	K2K-IIa Contained イベント L_p 分布	89
5.37	K2K-IIa nonContained イベント N_{pix} 分布	90
5.38	K2K-IIa nonContained イベント L_p 分布	90
5.39	K2K-I Contained イベントの検出効率と純度	92
5.40	K2K-I nonContained イベントの検出効率と純度	93
5.41	K2K-IIa Contained イベントの検出効率と純度	94
5.42	K2K-IIa nonContained イベントの検出効率と純度	95
5.43	粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-1 Contained イベント	97
5.44	粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-1 nonContained イベント	97
5.45	粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-IIa Contained イベント	98
5.46	粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-IIa nonContained イベント	98

5.47	K2K-IIa MRD 1L イベント MC の N_{pix} 分布	100
5.48	K2K-IIa MRD 1L イベント N_{pix} 分布 X 側	101
5.49	K2K-IIa MRD 1L イベント N_{pix} 分布 Y 側	101
5.50	K2K-IIa MRD 1L イベント L_p 分布	101
5.51	K2K-IIa MRD 1L イベント 運動量分布	102
5.52	K2K-IIa MRD 1L イベント 粒子識別の条件を課したミューオン運動量分布	102
A.1	K2K-I,K2K-IIa トラック数分布:	111
A.2	K2K-I,K2K-IIa トラック角度分布	112
A.3	K2K-I,K2K-IIa 2 トラック、 $\cos \Delta\theta$ 分布	112
A.4	K2K-I,K2K-IIa ミューオン運動量分布	113
A.5	K2K-I,K2K-IIa ニュートリノエネルギー分布	113

表目次

1.1	ニュートリノフレーバーと質量の上限	4
1.2	大気ニュートリノにおける R 値のこれまでの観測結果	7
1.3	加速器人工ビームを用いたニュートリノ実験の特徴	8
4.1	K2K-IIa イベントタイプの内訳	40
4.2	イベントまとめ K2K-IIa	54
4.3	イベントまとめ K2K-I	57
5.1	Event Summary	68
6.1	イベントまとめ K2K-I	104
6.2	イベントまとめ K2K-IIa	105

概要

本研究は長基線ニュートリノ振動実験である K2K 実験の前置検出器シンチレーティングファイバースシート飛跡検出器 (SciFi 検出器) を用いたニュートリノ反応の解析的研究である。

これまでの K2K 実験の結果からニュートリノ振動は 1 GeV 以下の低エネルギー領域で特に顕著であることが確認されており、この領域のニュートリノ反応の詳細な研究が重要性を増している。本研究の主な目的は現在利用されていないイベント、特に低エネルギーのイベントを解析し、これらを利用可能にすること。ならびに振動解析や低エネルギーイベントの解析に応用できる粒子識別の方法についてその有効性と性能を評価することである。

まず、本研究では主に 2003 年前半のデータ (K2K-IIa) を用いて SciFi 検出器とその後段に位置するミュオン飛程検出器 (MRD) の間のトラック整合条件を見直すことにより、これまで解析からはずされていたイベントを利用可能にすることを検討した。結果、既に利用されているイベントの 15% 程度新しいイベントを増やすことが出来た。これらの中にはミュオントラックの飛程が短い低エネルギーのイベントが多く含まれ、1 GeV 以下のエネルギー領域に限ってみればこれらのイベントの寄与は 25% 程度であることがわかった。

次に、1999 年 11 月～2001 年 7 月までのデータ (K2K-I) および 2003 年 1 月～2003 年 6 月までのデータ (K2K-IIa) を用いて、SciFi 検出器における粒子識別の性能およびその応用可能性を調べた。粒子識別は振動解析に用いる荷電準弾性散乱 (CCQE) 反応の選択に役立つとともに、ミュオントラックの同定が困難なため利用されていない、より低エネルギーのイベント研究の足がかりになるものとして期待されている。粒子識別の方法としてはトラックの残したエネルギー損失に対応する N_{pix} 情報を用いることとし、SciFi 検出器で発生する 2 次トラック (短いトラック) 中の陽子とパイオンを分離することを検討した。

結果として K2K-I, K2K-IIa とともに陽子あるいはパイオンを 85% 選んで、他方の粒子の混入を 15% 以下に抑えるようにイベントを選ぶことが出来た。こうしたサンプルは振動解析やニュートリノの陽子生成過程、 π 中間子生成過程の研究に活かされることが期待される。さらに粒子識別の応用として、陽子と識別されたイベントを使った CCQE イベント選択の純度向上および、より低エネルギーのイベント解析への応用可能性についても言及した。CCQE 選択に粒子識別の方法を導入することにより、選ばれた CCQE イベントの純度をもとの 60～65% から 70～75% まで向上させることができた。但し、このとき CCQE イベント検出効率は 10% 程度低下する。また、現在解析に利用できていない K2K-IIa データの MRD 1 層目でトラックが止まっているイベントの 1 次トラック (MRD に達したトラック) に対して粒子識別を適用することによりミュオントラックの純度が 35% 程度から 52% 程度にまで高まることを確認した。

今後の課題としては、今のところ利用できていない 2003 年 6 月以降のデータ (K2K-IIb) を解析に加えることがまず挙げられる。この時期のデータは SciFi 検出器の後段にプラスチックシンチレータを使用した新しい飛跡検出 (SciBar 検出器) が導入されており、この検出器のトラック (ヒット) 情報を利用することにより、単純に統計を上げるのみならず、SciFi の飛跡検出性能の向上、より低エネルギーなニュートリノ反応イベントの研究などが可能になると期待される。

序論

本研究は K2K 長期線ニュートリノ振動実験の前置検出器シンチレーティングファイバー飛跡検出器 (SciFi 検出器) を用いた解析的研究である。K2K 実験のこれまでの研究結果からニュートリノ振動 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ への振動) は ν_μ のエネルギーが 1GeV 以下のエネルギー領域で特に顕著に現われることがわかっており、これは K2K 実験に用いるニュートリノビームの平均エネルギーの 1.3GeV に対して低エネルギーの領域である。こうした背景から、本研究は SciFi 検出器における現在利用されていないイベント、特に低エネルギーのイベントを解析し、これらを利用可能にすること。ならびに振動解析や低エネルギーイベントの解析に応用できる粒子識別の方法についてその有効性と性能を評価することを目的としている。粒子識別を行うことは振動解析に利用するニュートリノの準弾性散乱反応の選択や低エネルギーイベントの解析において有効な道具となり得るものと期待されている。

本論では、まず、第 1 章でニュートリノの性質やニュートリノの振動現象について説明する。そして、第 2 章では本研究の主題である K2K 実験についてその目的、手法を述べ、第 3 章では K2K 実験の前置検出器である SciFi 検出器の構成について述べる。

第 4 章では SciFi 検出器における主に 2003 年以降のデータを用いた低エネルギーニュートリノイベントの解析について述べるとともに、既に研究がなされている 2003 年以前のデータの低エネルギーイベントに対する試みについても解説する。第 5 章では第 4 章で議論するデータも含めた、現在解析に利用できる全データを用いて SciFi 検出器での粒子識別についてその性能および具体的な物理解析への応用可能性についても言及する。最後に第 6 章にて本論の結果をまとめ、今後の課題、展望について述べる。

第1章 ニュートリノとその振動現象

1.1 導入

今日、宇宙を構成する素粒子の1つとして知られるニュートリノは、宇宙の初期の段階から、その発展に重要な役割を果たしたと考えられている。しかし、ニュートリノは物質と相互作用しにくい
ため、その詳細な性質は未だ知られていない部分が多い。特に、ニュートリノの質量（の有無）や世代間の混合に関しては、最新の研究成果をもってしても未だに明らかにされていない。そして、それらは現在、高エネルギー物理学、素粒子物理学、および宇宙物理学の最新研究の盛んなテーマになっている。そうした中、ニュートリノ振動現象は、ニュートリノ質量および世代間混合を証明しうる現象の1つとして注目されている。この章では現在までに分かっているニュートリノの基本的な性質とニュートリノの振動現象、そして、現在進行中の実験的研究とその目的、方法について簡単に説明する。

1.1.1 ニュートリノ研究の背景

ニュートリノ研究は、1930年に W.Pauli [5] が当時観測していた原子核の β 崩壊で生成される電子の連続的なエネルギースペクトルを説明するために未知の粒子（ニュートリノ）の存在を仮定したことに端を発する。この仮説では、未知の粒子は極めて小さな質量を持ったスピン $\frac{1}{2}$ の中性粒子であることが要求された。最初に実験的にニュートリノ反応を観測したのは、F.Reines と C.L.Cowan [6] であった。彼らは原子炉から発生する $\bar{\nu}_e$ を用いて、逆 β 崩壊 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ を観測した。ついで、1962年には L.M.Lederman、M.Schwartz、J.Steinberger ら [7] によって電子ニュートリノと分類可能なミューニュートリノが発見された。これら2種類のニュートリノに加えて、タウニュートリノの存在が M.L.Perl らによって1975年に示唆され、25年後の2000年、DONUT 実験 [8] によってその存在が確認された。現在、ニュートリノの世代は3つであると考えられており、このことは LEP 実験 [9] の結果によって強く示唆されている。これら3種類のニュートリノそれぞれ対応するレプトンと弱い相互作用を通して結びついている。現在最も成功を修めている（あらゆる実験結果を最も良く説明する）理論である、素粒子の標準模型 [1, 2, 3] では、ニュートリノの質量は全て0であることを仮定しているが、質量がないことが理論的に証明（要求）されているわけではない。もしニュートリノの質量が0でないとする、これらは弱い相互作用の固有状態としてのみでなく、質量の固有状態としても表現されることになる。このとき、ニュートリノはマヨラナ粒子か、ディラック粒子か？レプトンの世代間混合があるか否か？重いニュートリノは安定か？などの疑問が浮上する。それゆえ、ニュートリノ質量の存在を観測することは、標準模型を超えた物理を探索する鍵として、素粒子物理学の世界に大きな影響を与えることになる。ニュートリノ質量探索の試みを俯瞰すると、今日までに数多くの実験が粒子の崩壊からの運動力学を用いて質量の直接測定をおこなっている。その成果を表??にまとめた。電子ニュートリノの質量上限を決める最も精度の良い方法はトリチウムの β 崩壊 [4] によって放出される電子のエネルギースペクトルを測定する方法であり、質量があればスペクトラムの終端がシフトする。様々な実験によってこの解析が行われ、電子ニュートリノの質量に数 eV の上限を与えている。続いてミューニュートリノ質量に関する最も良い制限は PSI [11] におけるパイオン崩壊に

表 1.1: ニュートリノフレーバーと質量の上限

Flavor of Neutrino	Experimental Technique	Upper Limit
ν_e	Tritium β -decay kinematics	3eV(95% C.L)
ν_μ	π decay kinematics	170 KeV (90% C.L)
ν_τ	τ decay kinematics	18.2MeV (95% C.L)

よって発生するミューオンの運動量測定によって与えられる。現在の上限は 170KeV となっている。タウニュートリノ質量の制限は LEP 実験の ALEPH 検出器 [12] における、タウオンの 3 ないし 5 つのパイオンと 1 つのタウニュートリノへの崩壊の運動学から導かれ、上限は 18.2MeV となっている。

1.2 ニュートリノ振動

前節に述べた運動学的な質量の直接観測の他に、ニュートリノ質量を探索する実験的方法として、ニュートリノ振動現象 [14, 15] の観測がある。この節ではニュートリノ振動とニュートリノ質量の関係を求め、振動現象を観測することがニュートリノ質量を探索することと同義であることを示す。3 世代のニュートリノが質量を持つとき、ニュートリノは弱い相互作用の固有状態と同時に質量の固有状態として、記述することができる。弱い相互作用の固有状態と質量の固有状態は同じである必要はなく、ある固有状態は式 1.1 のように質量の固有状態を用いて表すことができる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

ここで、 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = 1, 2, 3$) は弱い相互作用の固有状態、 $|\nu_i\rangle$ ($i = e, \mu, \tau$) は質量の固有状態、 $U_{\alpha i}$ は MNS 行列 [16] と呼ばれるユニタリ行列の要素である。MNS 行列はクォークにおける CKM 行列 [17] と同様のものである。3 つのフレーバーを考えると、 U は 4 つの独立なパラメータ $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ そして、CP 位相 σ から成る 3×3 行列になる。(式 1.2)

$$\begin{aligned}
 U &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\sigma} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\sigma} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\sigma} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\sigma} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\sigma} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\sigma} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\sigma} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.2)
 \end{aligned}$$

ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ である。質量の固有状態は Schrödinger 方程式に従い、

$$|\nu_i(\tau_i)\rangle = e^{-im_i\tau_i} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.3)$$

という関係を得る。ここで、 m_i は ν_i の質量、 τ_i は ν_i 座標系での時間を意味する。式 1.3 の位相因子は実験室系での時間 τ と座標 L を用いて次のように書ける。

$$e^{-im_i\sigma_i} = e^{-i(E_i t - p_i L)} \quad (1.4)$$

さらに、式 1.4 を相対論的な式に置き換えると、

$$t \approx L \quad (1.5)$$

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \approx p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \quad (1.6)$$

ニュートリノが生成された時点で運動量 p を持っていたとすると、質量の固有状態 ν_α は全て共通の運動量を持つはずである。それゆえ、 ν_i 成分の運動量 p_i を全て共通の運動量 p で置き換えることが出来る。このとき式 1.4 の位相因子は近似的に

$$e^{-i(m_i^2/2p)L} \quad (1.7)$$

と書き換えることが出来る。そして、この表現での位相因子と式 1.1 を用いると、生成されてから距離 L 進んだ時点での固有状態は

$$|\nu_\alpha(L)\rangle \approx \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2/2E)L} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.8)$$

と表される。ここで $E \cong p$ はニュートリノの質量固有状態の平均エネルギーである。ユニタリ行列 U を用いて式 1.1 を変形し、これを式 1.8 に代入すると、次の式 1.9 を得る。

$$|\nu_\alpha(L)\rangle \approx \sum_\beta \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2/2E)L} U_{\beta i} |\nu_\beta\rangle \quad (1.9)$$

この式から、 ν_α は距離 L 離れた場所では全てのフレーバーのニュートリノ（弱い相互作用の固有状態）の重ね合わせになるという結果が導かれる。この現象をニュートリノ振動と呼ぶ。 ν_α 距離 L 離れた点でフレーバー β として観測される確立 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ は

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \\ &\quad - 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \end{aligned} \quad (1.10)$$

と計算できる。ここで、 $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$ は ν_i と ν_j の質量の 2 乗差である。また、反ニュートリノに振動を考えるとときには式 1.10 の最後の項の符号を-から+に変えればよい。ニュートリノ振動が起る条件は、

1. 少なくとも 1 種類のニュートリノが質量を持ち、なおかつ質量の固有状態が縮退していないこと
2. 混合角の少なくとも 1 つが 0 でないこと \rightarrow ニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態が同一でないこと

である。ここで、省略してきた要素 h, c を補って $\Delta m_{ij}^2, L, E$ をそれぞれ eV^2, km, GeV で表すと振動の位相は

$$\phi_{ij} \equiv \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \cong 1.2669328 \Delta m_{ij}^2 [eV^2] \cdot \frac{L [km]}{E [GeV]} \quad (1.11)$$

のようになり、振動確率がニュートリノの飛程 L とエネルギー E に依存することがわかる。ここまででは3世代のニュートリノ振動を扱ったが、2フレーバーのニュートリノ振動 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ に着目すると式 1.1 の行列 U は次のような簡単な形になる。

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

そして、式 1.1～式 1.11 と同様の議論から2フレーバー間の振動率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ は

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 \theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}) \quad (1.13)$$

となる。ここで、 θ および Δm^2 はそれぞれ2フレーバー間の混合角と質量の2乗差である。

現在、これらのパラメータを決定することを目的とした実験的、理論的取り組みが世界中で盛んになされており本論の主題である K2K 実験もその1つである。

1.2.1 大気ニュートリノ異常

大気ニュートリノは1次宇宙線（主に陽子）が大気中の核子と衝突することによって発生するパイオンの崩壊によって発生する。その過程は次のように表わせる。

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.14)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.15)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.16)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.17)$$

こうして生成されるニュートリノのエネルギーはおよそ1GeVから100GeV程度である。この過程の結果生成されるニュートリノは式 1.14～式 1.17 から、大気ニュートリノのニュートリノフレーバーの比 $N(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/N(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ は2になるはずである。しかし地上の検出器でこの比を観測すると2よりも小さい値になることをカミオカンデ [18] や IMB [19] によって確認された。この現象は大気ニュートリノ以上と呼ばれ、ニュートリノ振動が原因であると考えられている。このようなニュートリノフレーバー比の異常は様々な実験によって独立に観測されており、式 1.18 に示す R 値を用いて評価されている。

$$R \equiv \frac{(N_\mu/N_e)_{DATA}}{(N_\mu/N_e)_{MC}} \quad (1.18)$$

この式は分母が振動がないと仮定したときのシミュレーションによって予想されるフレーバー比、分子がその実測値になっている。各実験の測定した R 値を表 1.2 に示した。ここでカミオカンデとスーパーカミオカンデ (SK) における Sub-GeV と Multi-GeV は可視エネルギー（チェレンコフ光の光量から求めたエネルギー）が 1.33GeV 以下のイベントとそれ以上のイベントをそれぞれ意味する。

結果として、ほぼ全ての実験において R 値が1以下になっており、IMB [19], Soudan2 [22], SK [23] の結果は一致している。また、SK グループは R 値だけでなくニュートリノフラックスの天頂角分布の測定も行っている。その結果を図 1.1 に示す。ここで天頂角とはニュートリノの荷電カレント反応から生じる荷電レプトンの生成角度と鉛直方向のなす角度である。天頂角 $\theta = 0$ ($\cos \theta = 1$) が空に向かう上向きを、 $\theta = \pi$ ($\cos \theta = -1$) が地面に向かう下向きを表わす。図を見ると ν_μ にのみ上下非対称性

表 1.2: 大気ニュートリノにおける R 値のこれまでの観測結果

Experiment	R 値 (\pm 統計誤差 \pm 系統誤差)	参照
カミオカンデ (Sub-GeV)	$0.60_{-0.06}^{+0.05} \pm 0.05$	[18]
カミオカンデ (Multi-GeV)	$0.57_{-0.08}^{+0.07} \pm 0.057$	[18]
IMB	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.07$	[19]
Frejus	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$	[20]
NUSEX	$0.99_{-0.25}^{+0.35}$	[21]
Soudan2	$0.51_{-0.07}^{+0.05} \pm 0.14$	[22]
スーパーカミオカンデ (Sub-GeV)	$0.35 \pm 0.033 \pm 0.053$	[23]
スーパーカミオカンデ (Multi-GeV)	$0.604_{-0.065}^{+0.058} \pm 0.14$	[23]

がみられ、下向きに比べて上向きのイベントは半分程度しか観測されていない。角度の違いはニュートリノの飛距離の違いに対応するものであり、下向きに荷電レプトンを発生させるニュートリノは直上の大気中で生成されたものである一方、上向きの成分は地球の裏側の地球の大気中で生成されたニュートリノであると考えられる。即ち上向きのイベントと下向きのイベントでは地球の直径程度ニュートリノの飛距離が異なり、その差がフラックスの差として観測されていると考えられる。このことは振動確率がニュートリノの飛距離に依存するという式 1.13 とも合致するものである。また、図中の実線は振動現象を想定しないシミュレーションによって予想される天頂角分布、点線は結果に最も合う振動パラメータを設定したときの分布である。このとき振動パラメータは $\Delta m^2 = 3.2 \times 10^3 eV^2$, $\sin^2 2\theta = 1$ となっている。これらの結果はニュートリノ振動現象の存在を示唆するものである。次節では人工ビームを用いたニュートリノ振動観測実験について説明する。

1.2.2 人工ビームを用いたニュートリノ測定

現在加速器を用いて作った人工ニュートリノビームを利用してニュートリノ反応を測定するいくつかの実験が世界中で動いている。人工のビームを用いることの利点はニュートリノの発生点、フレーバー、エネルギーなどの素性が正確にわかるということである。探索したいパラメータ領域に応じて、実験の設計をすることで適切な L/E を選べることも有利な点である。加速器を使用するニュートリノ実験はこの L/E の大小によって大きく 2 つに分けることが出来る。 L/E が大きい (L が約 100km 程度) 実験を長基線ニュートリノ実験、小さい (10m~1km) 実験を短基線ニュートリノ実験と呼ぶ。短基線ニュートリノ実験には $\sim 10\text{GeV}$ の高エネルギーニュートリノを用いる CHORUS [24]、NOMAD [25] や、500MeV 以下の低エネルギーニュートリノを用いた LSND [29]、KARMEN2 [28] などがある。これらの探索できるパラメータは CHORUS、NOMAD では $\Delta m^2 \geq 1eV^2$ 、LSND、KARMEN2 では $\Delta m^2 \geq 0.1eV^2$ 程度である。一方、長基線ニュートリノ実験には本論の主題でもある K2K 実験や MINOS や OPERA などがある。これらの実験は $\Delta m^2 \sim 10^3 eV^2$ 程度まで感度を持つ。現在は Δm^2 は $\Delta m^2 \sim 10^3 eV^2$ 以下の小さい値であると考えられており長基線ニュートリノ実験の重要性が高まっている、これまでの K2K 実験の結果 (2004 年 3 月までの実験結果) によってニュートリノ振動が起こっている確率は 99.99% 以上であるという結果が報告されている。この K2K 実験については次章で詳しく記述する。現在活動している人工ビームを用いたニュートリノ実験の特徴を以下にまとめた。

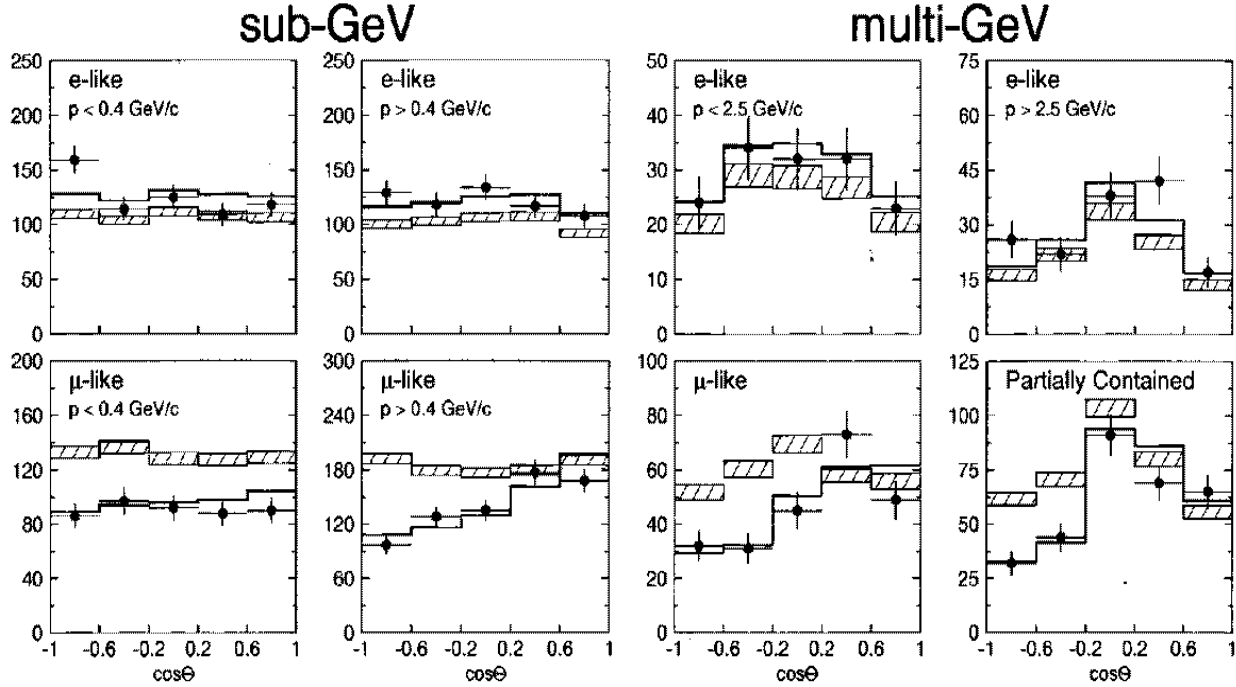


図 1.1: SK におけるニュートリノフラックス天頂角分布

横軸に天頂角 θ の余弦、縦軸が観測イベント数である。黒い点がデータ、ハッチが振動がないと仮定したときの予想観測値である。エネルギーを Sub-GeV(可視エネルギーが 1.33GeV 以下)、Multi-GeV(可視エネルギーが 1.33GeV 以上) で分け、上段が電子イベント(電子ニュートリノに由来)、下段がミュオンイベント(ミュオンニュートリノに由来)を表す。電子イベントについてはデータと MC がほぼ一致するが、ミュオンイベントについては天頂角に依存した不一致が見られる。実線でしめたものはデータの最も合う振動パラメータを設定したときの分布である。このとき設定値は $\Delta m^2 = 3.2 \times 10^3 \text{ GeV}^2, \sin^2 2\theta = 1$ である。

表 1.3: 加速器人工ビームを用いたニュートリノ実験の特徴

LSND の DAE は Decay At Rest、DIF は Decay In Flight の略である。

Experiments	$E_\nu(\text{GeV})$	L(km)	探索モード	Δm^2	$\sin^2 2\theta$	参照
CHORUS	27	0.82	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$	≤ 1.1	≤ 0.0035	[24]
NOMAD	23	0.82	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$	≤ 1.2	≤ 0.0012	[25]
CHARM2	20	~ 0.65	$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \rightarrow \nu_e(\bar{\nu}_e)$	≤ 0.9	≤ 0.0056	[26]
BNL E776	1.4	1.0	$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \rightarrow \nu_e(\bar{\nu}_e)$	≤ 0.075	≤ 0.03	[27]
KARMEN	DAR	0.0177	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	≤ 0.053	≤ 0.013	[?]
LSND	DAR	0.030	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	≤ 0.053	≤ 0.03	[29]
	DIF	0.030	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	0.003-0.3	0.005-0.3	[30]

第2章 K2K実験

この章では、加速器ビームを用いた K2K 長基線ニュートリノ実験について述べる。

2.0.3 K2K 実験の概要

K2K 実験は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて 12GeV 陽子シンクロトロン加速器を用いて生成した ν_μ ビーム (純度 98.2%) を 250km 離れた岐阜県飛騨市神岡町に設置した大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置 (スーパーカミオカンデ) に打ち込む、世界初の加速器長基線ニュートリノ振動実験である。生成されたビームは KEK 内に設置された前置検出器によって、そのエネルギースペクトル、角度分布、フラックス、成分 (フレーバー) が測定され、この結果をスーパーカミオカンデでの同様の測定結果と照らし合わせることによってニュートリノ振動現象の検証が行われる。

K2K 実験ではニュートリノ振動現象を検証するにあたり、KEK にて生成された、 ν_μ の ν_τ への振動に伴う、 ν_μ の欠損 (dissappearance) を観測している。方法として、前置検出器で観測された事象数から後置検出器での (振動がないと仮定した場合の) 観測事象数を推定し、予測値と実測値との差を見て、振動による事象数の減少を確認するとともに、前置、後置検出器でのエネルギースペクトルの違いから、振動のパラメータを決定する。

2.1 K2K 実験の構成

2.1.1 ニュートリノビームライン

2K 実験では KEK の 12GeV 陽子シンクロトロンを用いてビームを生成している。加速器から取り出される陽子ビームは 2.2sec 毎に 1.1 μ sec の幅を持つスピルから成り、強度は $\sim 6 \times 10^{12}$ 個/スピルとなっている。また、各スピルは 9 つのバンチで構成され、1 バンチの幅は 50~60nsec である。取り出された陽子ビームはターゲットステーションへと導かれ、アルミニウム標的に照射される。このとき、衝突の結果 2 次粒子として、 π 、 K 中間子等が生成される。そしてそれらはターゲットと一体となって設置されている電磁ホーンシステム図 2.2 によって正電荷の成分だけが収束され (負電荷の成分は逆に発散される) て、崩壊トンネルに導かれる。崩壊トンネルに入った粒子は、次のように崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.1)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2.2)$$

崩壊トンネルの後ろにはビームダンプが設置されており、陽子や崩壊しなかった π^+ などがここで止められる。ビームダンプの直後には μ 粒子モニターが設置されており、スピルごとの μ 粒子のプロファイル (中心位置、強度変化) をモニターすることにより、ビームの安定性を監視している。 μ 粒子モニターの後ろには長さ 100m 程の土層が設けられており、 μ^+ をはじめとした ν 以外の成分がこ

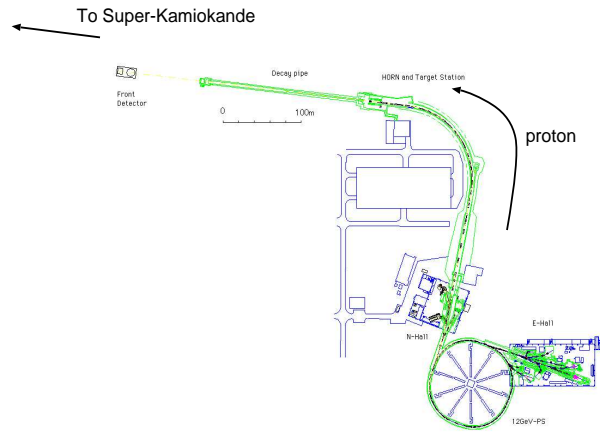


図 2.1: K2K 実験のニュートリノビームライン

12GeV 陽子シンクロトロンによってつくられた陽子はターゲットと反応し、2次粒子のうち正電荷のものは電磁ホーンマグネットを経て荷電パイオンとして集められ、パイオンの崩壊によって発生するミューオンから、 ν_μ が生成される

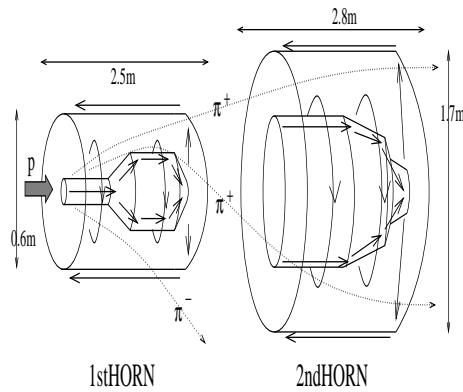


図 2.2: 電磁ホーンマグネット

K

ここで止められる。こうして生成されたニュートリノビームは、 ν_μ が98.2%、 ν_e が1.5%、 $\bar{\nu}_\mu$ が0.5%と見積もられている。また、 μ 粒子モニターの情報から、ビームの方向は約1mradの精度でスーパーカミオカンデの中心を向いていることが確認されている。ビームライン全体の模式図を図2.1

2.2 前置検出器

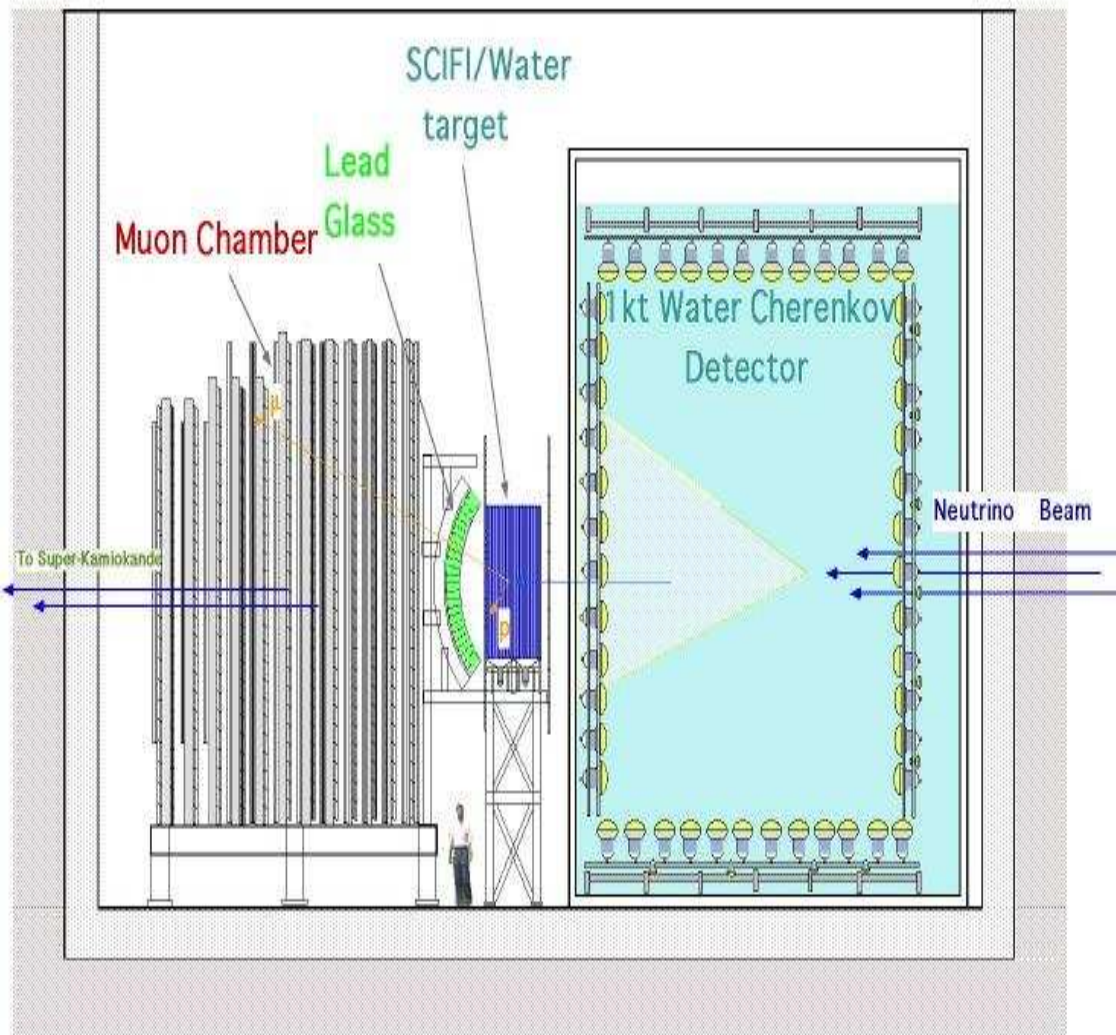


図 2.3: 前置検出器の構成

上流（右）から順に1キロトン水チェレンコフ検出器、SciFi 検出器、鉛ガラス検出器、ミューオン飛程検出器が配置されている。ここに示したものは K2K-I 実験のセットアップである。

このようにして作られた高純度の ν_μ ビームはビームダンプの後方約 100 m の位置に設置された前置検出器 (near detector) に入射する。前記の通り、前置検出器の役割は、生成直後のニュートリノビームのフラックスおよび、エネルギースペクトルを精密に測定することである。前置検出器は大きく1キロトン水チェレンコフ検出器 (1kt) と Fine-Grained 検出器 (FGD) の2つの要素からなる。これらの構成と役割について、以下にまとめる。

2.2.1 1キロトン 水チェレンコフ検出器 (1kt)

1kt は前置検出器の最上流に位置する水チェレンコフ型検出器である。形状はスーパーカミオカンデと同様の円筒状の水タンクに 1000 トンの超純粋を入れたものである。水の層は内水槽と外水層に分けられており、内水槽の内壁には 1kt 内で発生した事象を捕らえるための直径 20 インチの光電子

増倍管 (PMT) が 680 本、外層には外からきた荷電粒子を捕らえるための直径 8 インチの PMT が 68 本、それぞれ設置されている。1kt は後置検出器の SK をそのまま縮小したものであり、同じ測定原理、装置設計、解析方法を用いることでこれらの違いに起因する系統的な誤差を打ち消すことができる。1kt はニュートリノ反応事象の個数と、主に 1GeV 以下のエネルギースペクトルを測定し、SK における予想反応事象数の導出に重要な役割を果たしている。また、1% 程度の混入が予想される ν_e のフラックス測定も行っている。

2.2.2 Fine-Grained 検出器 (FGD)

Fine-Grained 検出器 (FGD) は複数の構成要素からなるが、実験の時期によってセットアップが多少異なっている。2001 年 7 月以前の実験 (K2K-I) ではシンチレーティングファイバー飛跡検出器 (SciFi) の後段にトリガーカウンタ、鉛ガラスカロリメータ (LG)、ミューオン飛程検出器 (MRD) が設置されていた。一方 2003 年 7 月以降の実験 (K2K-II) では、LG が取り払われ、代わりに全感知型シンチレータ (SciBar 検出器) が導入された。FGD は全体として、ニュートリノビームのエネルギースペクトルを測定することを主な目的としている。その方法は下の通りである。まず、ニュートリノエネルギーを測定するために、次の荷電準弾性散乱反応 (CCQE 反応) を観測する。

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p \quad (2.3)$$

この反応は 2 体反応であるため、生成される μ^{-} のエネルギーとビームに対する散乱角を測定できれば次の式によりもとのニュートリノエネルギーを運動学的に決めることが出来る。

$$E_{\nu} = \frac{E_{\mu} m_N - m_{\mu}^2 / 2}{m_N - E_{\nu} + p_{\mu} \cos \theta_{\mu}} \quad (2.4)$$

ここで、 m_N は核子の質量、 m_{μ} は μ^{-} の質量、 E_{μ} 、 p_{μ} はそれぞれ μ^{-} の運動量とエネルギーである。FGD はこの反応を捕らえ、 μ 粒子のエネルギーを測定することを目的として構成されている。FGD を構成する各コンポーネントの内容は以下のように纏められる。

1. シンチレーティングファイバーシート飛跡検出器 (SciFi 検出器) : シンチレーティングファイバーシートと水標的の層を交互に並べた飛跡検出器であり、FGD の最上流に位置する。ファイバーシートの層が 19 層、水標的の層が 20 層からなる。水は SK と同じ超純水をアルミタンクに入れて設置しており、物質の違いからくる系統誤差を打ち消すことができる。光検出には 24 本のイメージインテンシファイアチューブ (IIT) と CCD (Charge Coupling Device) を結合したものが用いられ、個々のファイバーはバンドルでまとめられてこの IIT に接続される。本研究に用いたデータはこの SciFi 検出器によって取得されたものである。SciFi 検出器のより詳しい説明は第 3 章に記述する。
2. ベトーカーカウンタ (VETO)、トリガーカウンタ : SciFi の上流と下流にはプラスチックシンチレータが設置されている。上流側には 466cm (長さ) × 20cm (高さ) × 4cm (幅 という形状のものが 20 本、下流には 466cm × 10cm × 4cm のものが 40 本設置されている。上流のシンチレータをベトーカーカウンタ、下流のシンチレータをトリガーカウンタと呼ぶ。ベトーカーカウンタの目的はニュートリノが SciFi の内部で反応した事象と荷電粒子が外部から進入したイベントを分離することである。ニュートリノ反応を選ぶ場合にはベトーカーカウンタにヒットがなく、下流のトリガーカウンタのみにヒットがあるような事象を候補として後の解析にまわす。また下流に置かれたトリガーカウンタのヒットは後段の MRD におけるデータ取得のトリガーとして利用されている。

3. 全検知型シンチレータ飛跡検出器 (SciBar 検出器) : SciBar 検出器はプラスチックシンチレータの板を用いた飛跡検出器であり、その特徴はシンチレータをしきつめ、標的と一体化するため不感領域がないということである。1本の板は1.3cm(厚み)×2.5cm(幅)×300cm(長さ)という大きさで、板の中央には波長変換ファイバーが埋め込まれている。検出器全体では14848本の板を用いて64の層を構成し、大きさは2.9m×2.9m×1.7mである。2002年の12月に検出器の一部 (Mini SciBar) が設置され、2003年の1月には完全な形態になった。SciBar 検出器の主な目的はニュートリノ反応の精密測定を行うことである。
4. ミューオン飛程検出器 (MRD) : FGD の最後段に位置する鉄標的とドリフトチェンバーを交互に配置した飛程検出器である。全体で鉄2mの厚みがあり、運動量が2.8GeV/cまでの μ 粒子であればこのMRDで停止する。これはK2K実験のビームエネルギーを考えると十分な性能であるといえる。MRDはその飛程からミューオンを同定するとともに、そのトラック(ヒット)情報を上流の検出器と整合することで、ミューオンの散乱角とエネルギーを決定する。またMRDは大きな物質に加えて断面積が7.6m×7.6mと大きくFGDの中で最も大角度の事象を捕らえられることを活かして、内部で発生したニュートリノ事象の測定によりニュートリノビームの方向や広がり、フラックスなどを評価している。

2.2.3 後置検出器 (スーパーカミオカンデ)

KEKから約250km離れた、岐阜県神岡町の神岡鉱山の地下1000mに設置された後置検出器がスーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器 (SK) である (2.4)。SKは1ktをそのままスケールアップした構造の検出器であり、高さ41.4m、直径39.3mの円筒状の水タンクに約50000トンの超純水が満たされている。水タンクは内水層と外水層に分けられる。内水層の内側には11146本 (現在は5182本) の直径20インチのPMTが取り付けられ、ニュートリノ水標的反応の測定を行っている。また、外水層の外壁には1885本の直径8インチのPMTが取り付けられ、検出器外部から来るバックグラウンドの除去に用いられている。SKでニュートリノ反応が起こると発生した荷電粒子が水中の光速以上の速度で走ることによりチェレンコフ光が発生する。この光を内水層を取り囲むPMTが捕らえることによりニュートリノ反応を検出する。このとき発生する荷電粒子が ν_μ に伴う μ 粒子の場合、 μ 粒子は透過力が強いため1つのチェレンコフリングが観測される (図:2.5)。一方、発生した荷電粒子が ν_e に伴う電子の場合にはシャワーが起こり、多数の荷電粒子が走ることにより、複数のチェレンコフリングの重なりが観測される。このようにして、SKではリングパターンの違いを見ることにより、ニュートリノのフレーバーを識別することが出来る。こうして識別された e^- 起源と見られるイベントは $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 現象の解析に用いられる。そして ν_μ 起源と見られるイベントを用いて先に述べた前置検出器の結果との事象数およびエネルギースペクトルの比較を行う。このとき、ミューオンの散乱角やエネルギーの再構成にはチェレンコフリングのヒットパターンや輝度情報が用いられる。但し、もとのニュートリノエネルギーを再構成するためには発生した荷電粒子がSKの中で停止した事象 (Fully Contained Event) であることが要求される。SKはK2K実験の後置検出器としてだけでなく、その巨大な質量(核子数)を活かして、陽子崩壊や大気、太陽その他宇宙から来るニュートリノを捕らえる目として、多くの物理現象の解明に多大な役割を果たしている。

図2.5:SKの純水の中をミューオンが走るとこのような1つのリングのようなヒットパターンが観測される。このミューオンがSKの中で発生したものであれば ν_μ イベントの候補になる

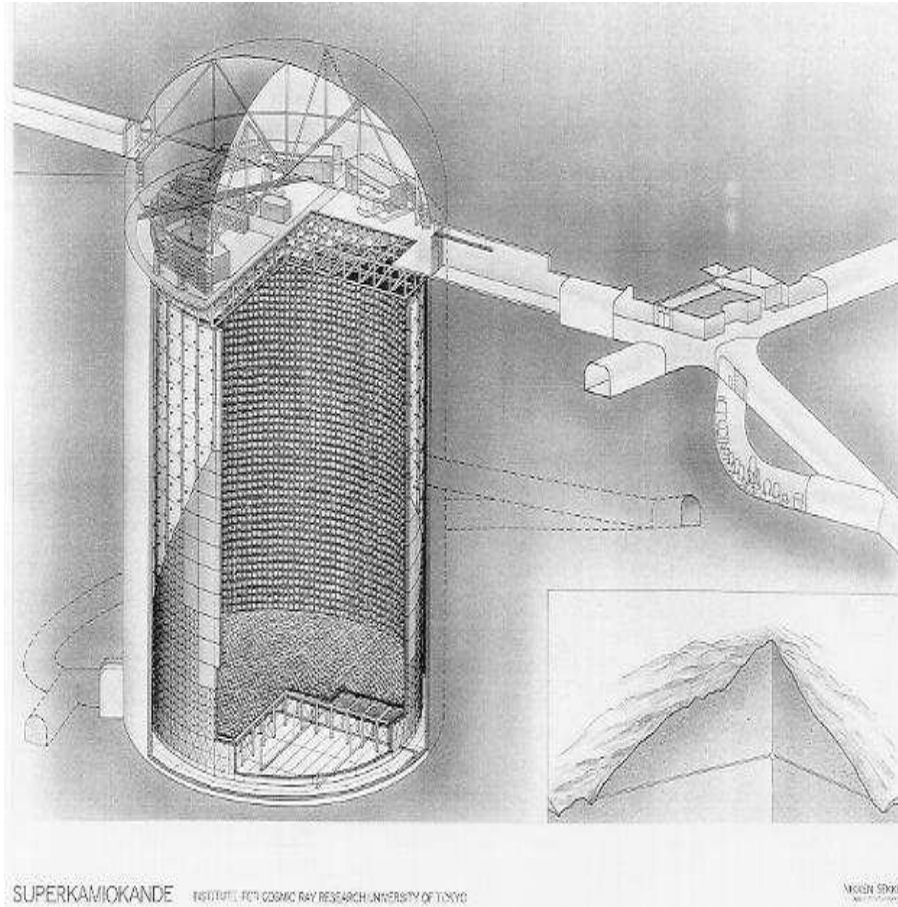
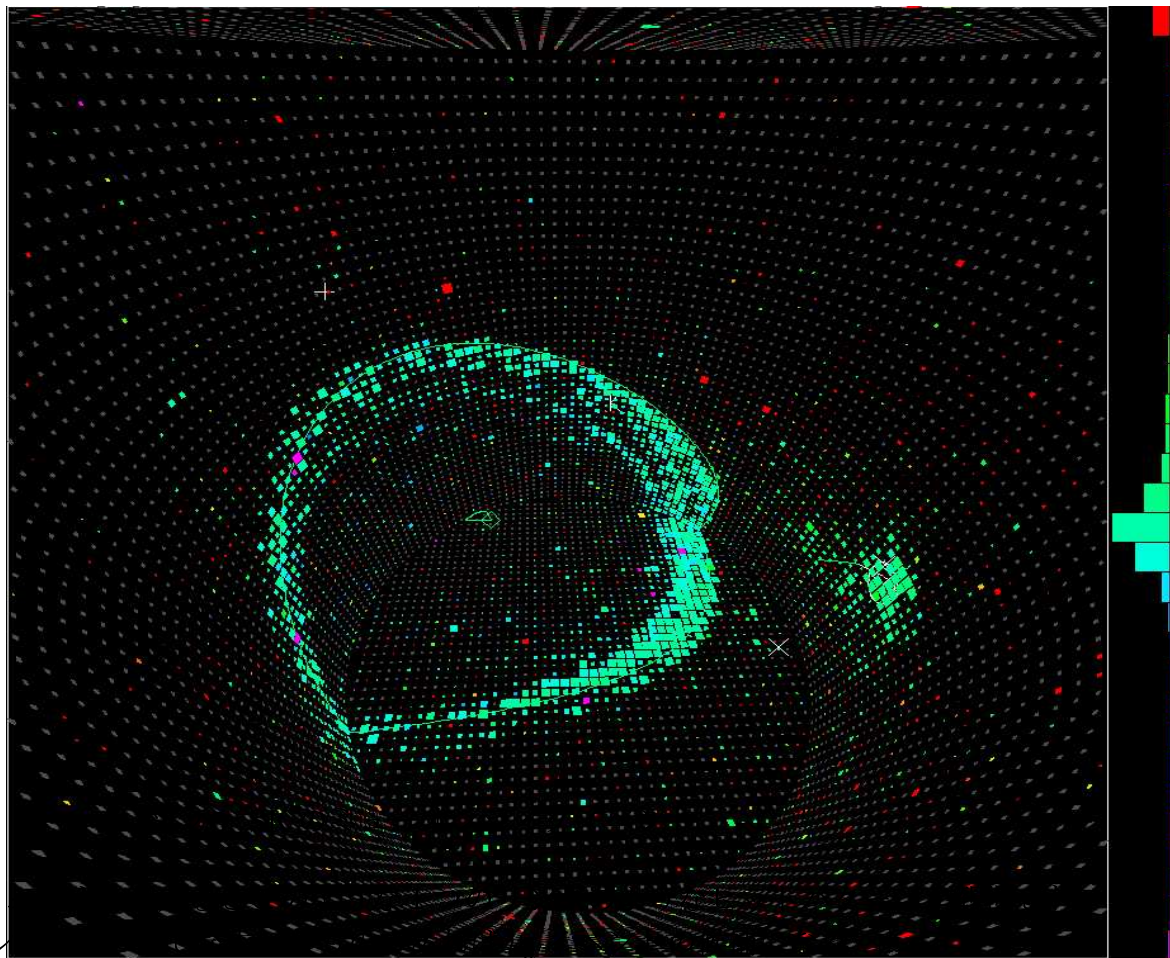


図 2.4: スーパーカミオカンデ (SK)

純水タンクのまわりを PMT で囲んだ水チェレンコフ型検出器。K2K 実験の後置検出器としてだけでなく、様々な物理現象の解明に役立てられている。

SKの純水の中をミ
る。このミュオン



2.3 K2K実験の最新結果

K2K実験では、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動による ν_μ の欠損を主な観測対象にしている。第1章で述べたように振動の式はこの2フレーバーの振動のみに限って見ると

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E}\right) \quad (2.5)$$

と言う形になる。このとき θ は ν_μ と ν_τ の混合角、 $\Delta m^2 = (m_{\nu_\mu})^2 - (m_{\nu_\tau})^2$ は質量の2乗差、 E はニュートリノのエネルギー、 L は飛行距離である。K2K実験では距離 L は250 kmと決まっており、エネルギーは再構成できるので、未知のパラメータは Δm^2 と混合角の2つである。この2つのパラメータについてK2K実験の探索可能領域は図2.6のようになる。(パラメータは距離、検出器の性能で決定される)

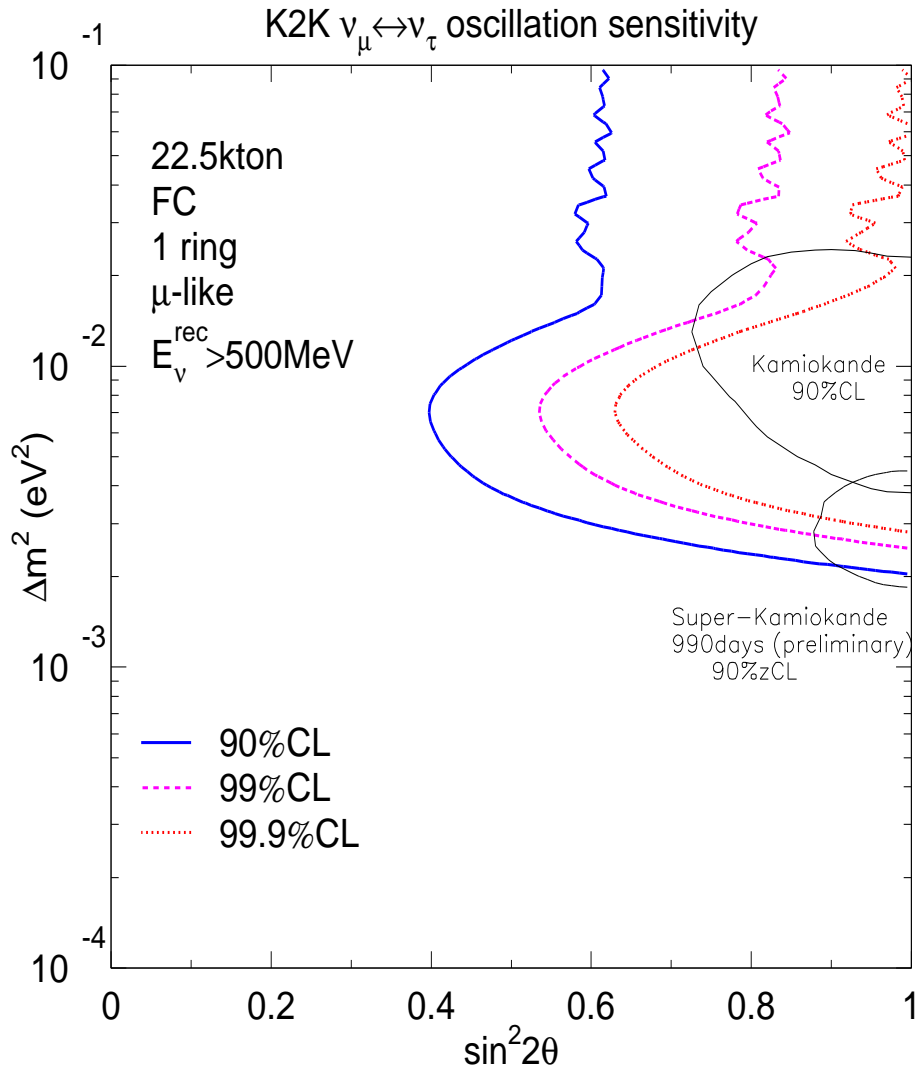


図 2.6: K2K 実験の振動パラメータ感度

横軸に $\sin^2 2\theta$, 縦軸に Δm^2 をとり、K2K 実験が探索できる領域を線で囲んでいる

1999年から2004年2月までの実験でSKにおいて108個のミュオンライクイベントが観測されている。一方で前置検出器の測定から導かれる予想観測事象数は150であり、予想される数の2/3程度しか観測されていない。この結果から、振動が起こっていない確立は0.005%と見積もられている。

またこれら 56 個のイベントから再構成したエネルギースペクトルは図 2.7 のようになる。図の黒い点が観測データを示している。色つきの実線は、青色が振動がないと仮定したときに予想されるエネルギースペクトルであり、青色がその中の荷電準弾性散乱 (CCQE) 反応、赤色は観測されたデータに最も合う振動パラメータを選んだときのスペクトルである。現在までの実験で観測された事象数およびエネルギースペクトルを最もよく説明する振動パラメータは $\Delta m^2 = 2.79 \times 10^{-3} [eV^2]$ 、 $\sin^2 2\theta = 1.0$ である。また、これらの結果から許される振動パラメータの領域を図 2.8 に示した。エネルギースペクトルを見ると、振動の効果はニュートリノエネルギーが 500MeV~700MeV の領域で特に顕著である。このことから、今後の実験、解析では特にこの領域に焦点を絞ってより詳細な研究を行うことが重要になってきている。

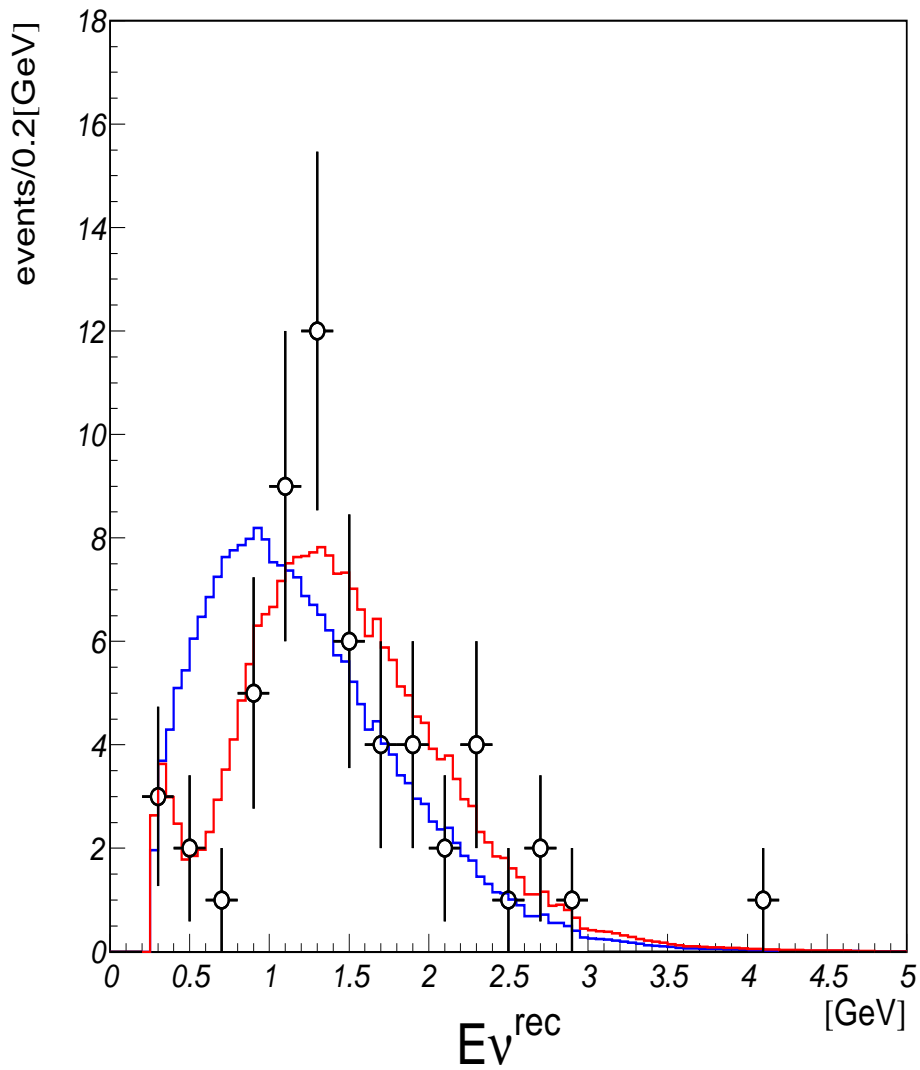


図 2.7: SK でのエネルギースペクトル

2004年2月までに合計56個の ν_μ イベントが観測された。そのエネルギースペクトルである横軸にエネルギー、縦軸にイベント数を取り、黒い点がデータ、実線がMCである。青色の線で示したものは前置検出器の測定から予想される振動がないと仮定した場合のスペクトルである。エネルギーが0.5GeV付近でスペクトルの歪みが見られる。赤色の線で示したものはデータの最も合うような振動パラメータを仮定したときのスペクトルである。このとき、振動パラメータは $\Delta m^2 = 2.79 \times 10^{-3} [eV^2]$ 、 $\sin^2 2\theta = 1.0$ となる。

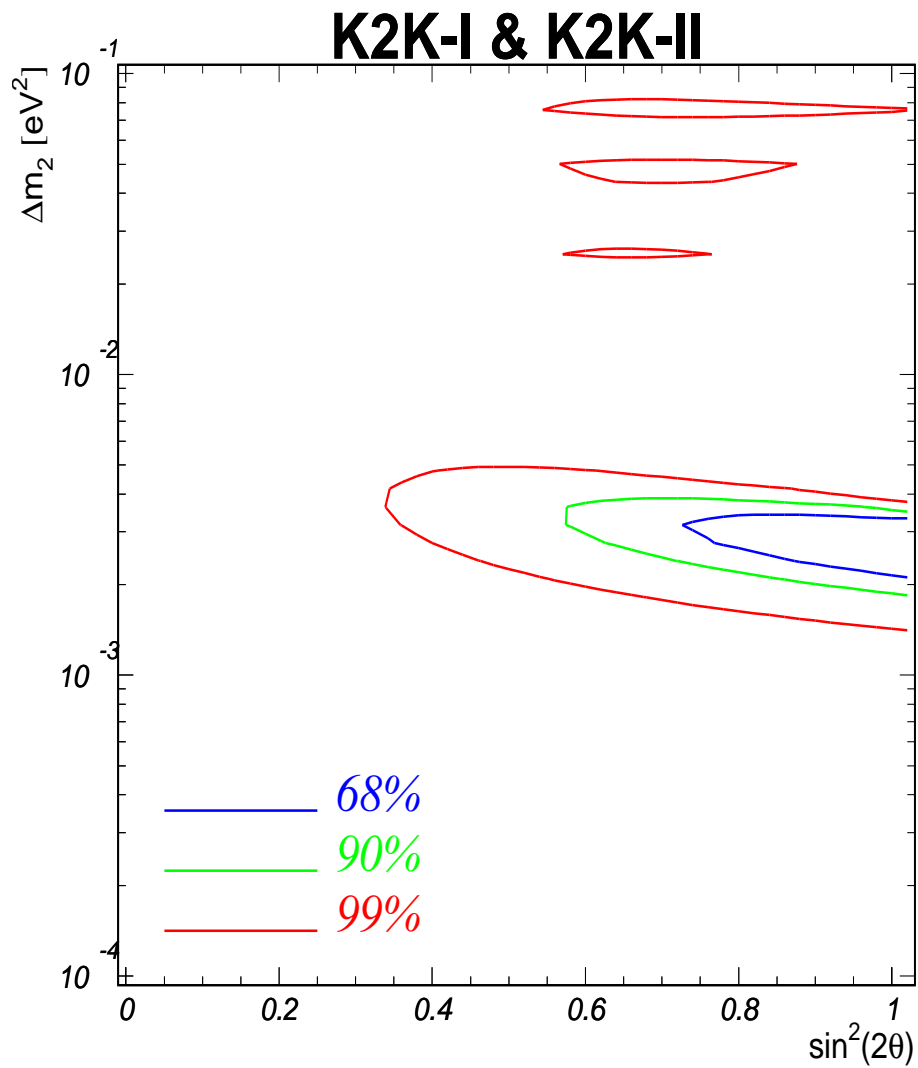


図 2.8: K2K 実験の結果から許容される振動パラメータ領域

第3章 SciFi検出器

この章では本研究に用いたデータの取得を行ったシンチレーティングファイバーシート飛跡検出器 (SciFi 検出器) について述べる。図 3.1 に SciFi 検出器の構成を図示した。SciFi 検出器は 2 層俵積み にされたシンチレーティングファイバーシート 20 層とアルミタンクに入れられた純水 19 層からなる 飛跡検出器である。

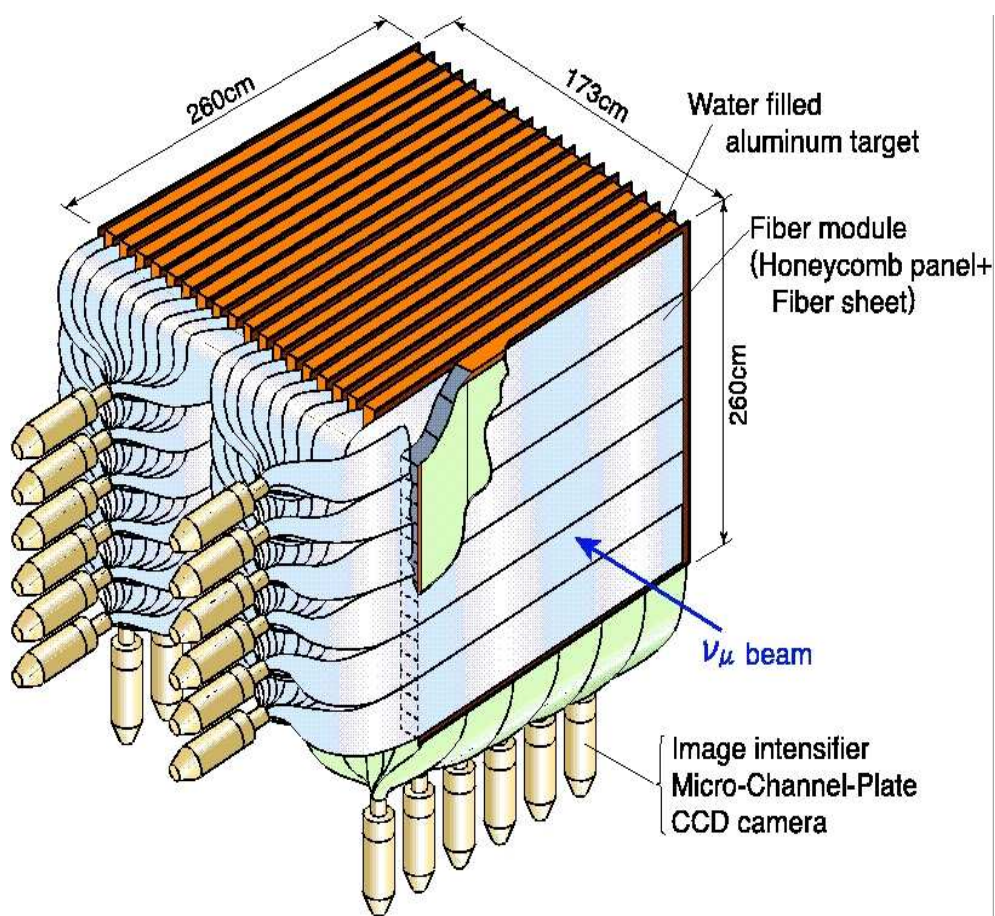


図 3.1: シンチレーティングファイバーシート飛跡検出器

シンチレーティングファイバーシート 19 層、純水 20 層から構成される飛跡検出器である。信号読み出しには IIT - CCD チェーンが用いられる。FGD の最上流に配置され、ニュートリノフラックス、エネルギー測定の中心的な役割を果たす。

3.1 シンチレーティングファイバー (SciFi)

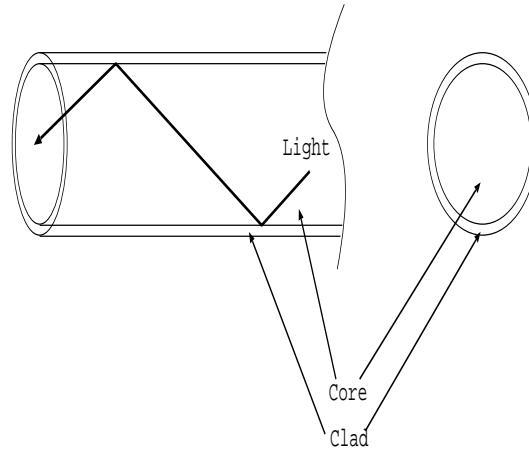


図 3.2: シンチレーティングファイバー

コア、クラッドの2層構造からなる直径約 $700\mu\text{m}$ の光ファイバー。コアには波長変換剤が混入されており、光を伝播しやすい波長に変換する。

シンチレーティングファイバー (SciFi) は、荷電粒子が通過すると発光するプラスチックシンチレータで作られた光ファイバーの一種である。光ファイバーは一般に複数の媒質の屈折率の違いによる全反射を利用して光を伝播する光学素子である。中心部にはコア (core) と呼ばれる透明な物質があり、その周りをクラッド (clad) と呼ばれるコアより低い屈折率の物質が包んでいる。SciFi 検出器に使用している SciFi はマルチクラッドと呼ばれる2層構造のクラッドをもつタイプである。一本のファイバーは直径が $700\mu\text{m}$ で、クラッドの厚みは直径の $\sim 2\%$ 程度である。これに荷電粒子が通過するとコアであるポリスチレンの分子が励起されシンチレーション光が発生する。発生した光は 340nm 付近に波長のピークを持つが、コアに混入されている波長変換蛍光体により吸収、再放出されることによって伝播しやすい 430nm の光に変換される。

3.1.1 シンチレーティングファイバーシートとバンドル

SciFi 検出器では上記のシンチレーティングファイバーを図 3.3, 3.4 のように2層併せにして白ペンキによって接着し1枚のファイバーシートを形成する。但し光検出器の光電面に接続する際の自由度を考えて図に示すように一部分は接着せず、自由に曲げられるようにしてある。また、光電面に接続しない側の端面はアルミニウムを蒸着し、ここから光が逃げることを抑えている。図 3.6 に示したように SciFi 検出器では、ニュートリノビーム軸を Z 方向としてこれに直行する X 軸と Y 軸をそれぞれ定義し、それぞれに平行に6枚のファイバーシートを並べる。X 軸に平行なファイバーシートと Y 軸に平行なファイバーシートはハニカムボードをはさんで密着され、全体で一層を形成する (図 3.6)。これらの層は水標的の層をはさんで合計20層で SciFi 検出器を構成し、計240枚のファイバーシート、274080本のファイバーが使用されている。SciFi シートは24枚ごとに端面をバンドルでまとめられ (図 3.5) 光検出装置である IIT-CCD チェーンの光電面に接続される。SciFi シート層の間には $241.7\text{cm} \times 16\text{cm} \times 6\text{cm}$ のアルミコンテナが15個並んでいる。アルミコンテナはニュートリノビームに対する標的の役割を果たす純水で満たされており、水標的の層を形成している。こうした水標的の層が合計19層あり、全体で285個のコンテナが置かれていることになる。

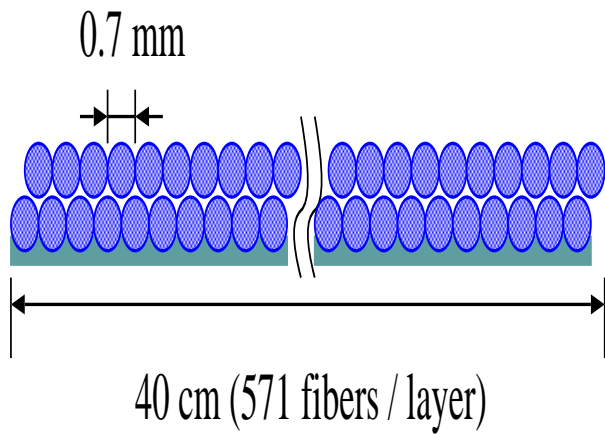


図 3.3: ファイバーシートの構造 1

ファイバーを2層俵積みにする事でどこを粒子が通過しても大きな光量を得られる。

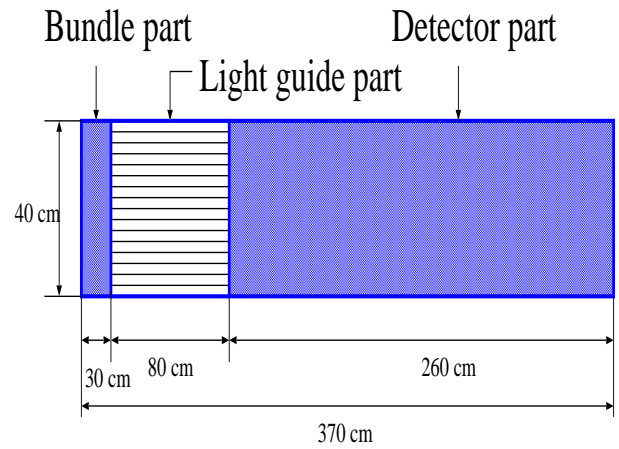


図 3.4: ファイバーシートの構造 2

青で示したものはペンキで固められた領域である。バンドルに束ねる都合上一部を自由に動かせるようにしている。

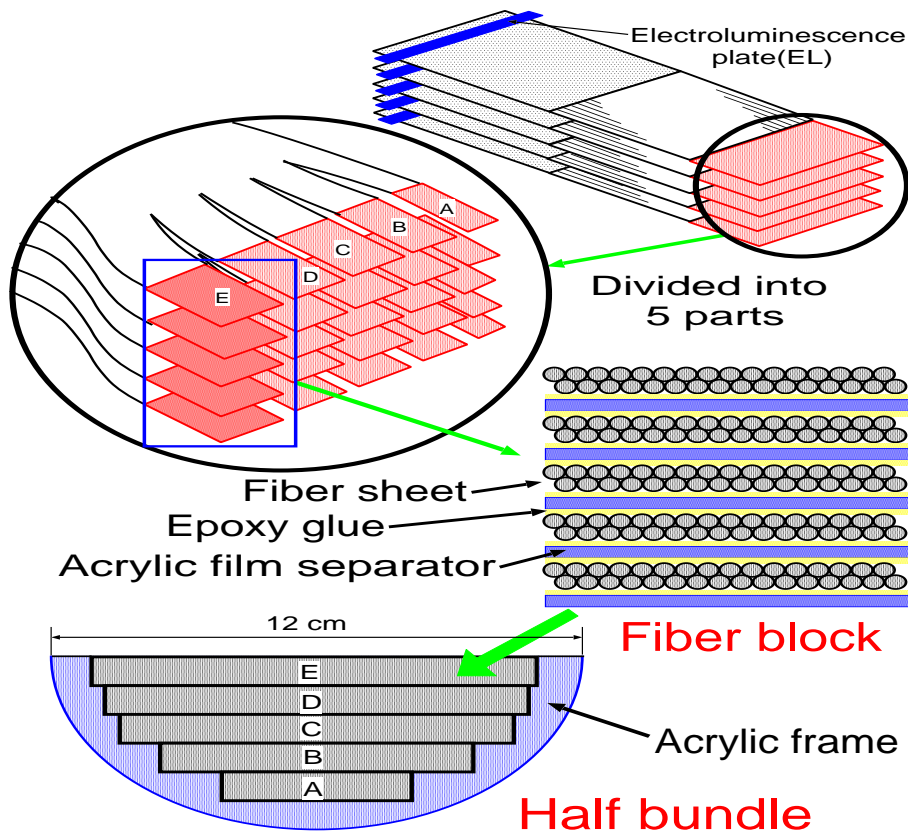


図 3.5: ファイバーバンドルの製作

図のように1枚のファイバーシートの端を5つに裂き、それらを束ねてアクリルのフレームに固定する。

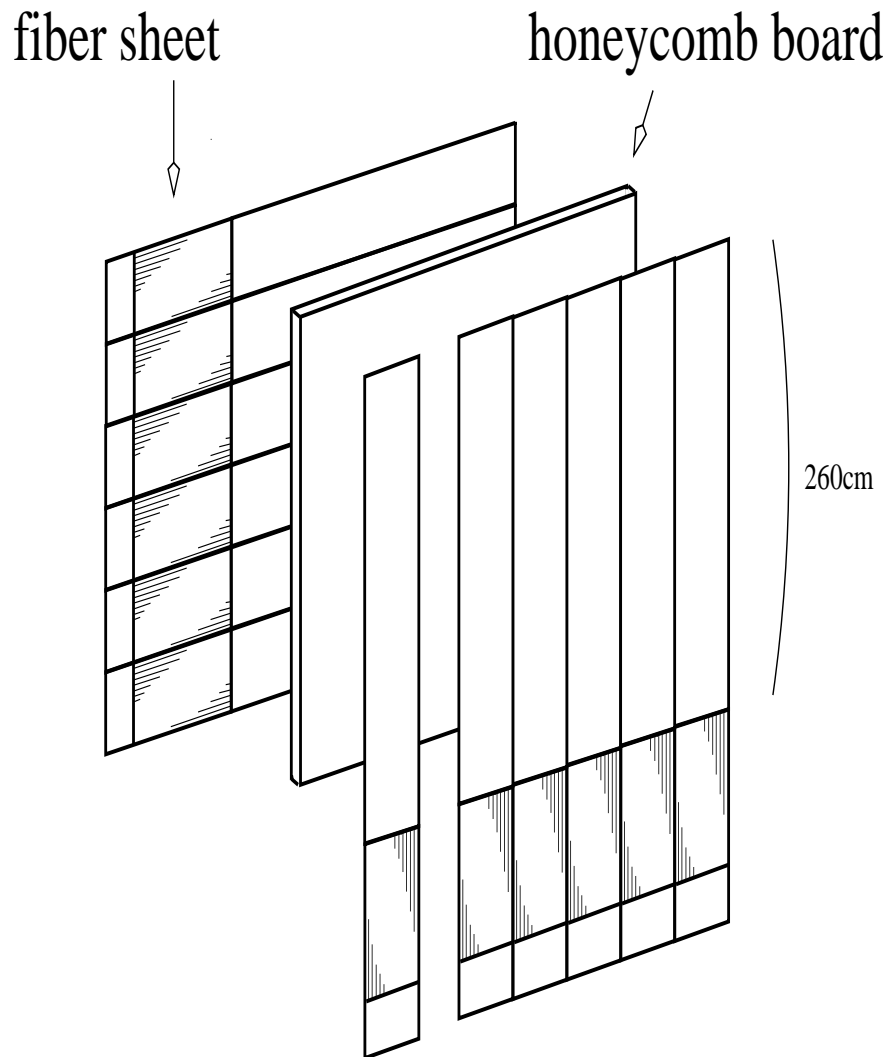


図 3.6: SciFi 検出器のファイバーシート層

6枚のファイバーシートを並べたものをビーム軸に垂直な直行する2つの軸に平行に配置し、これらをハニカムボードをはさんで密着させる。このようにしてファイバーシートの層を形成する。

3.2 光検出装置 IIT-CCD チェーン

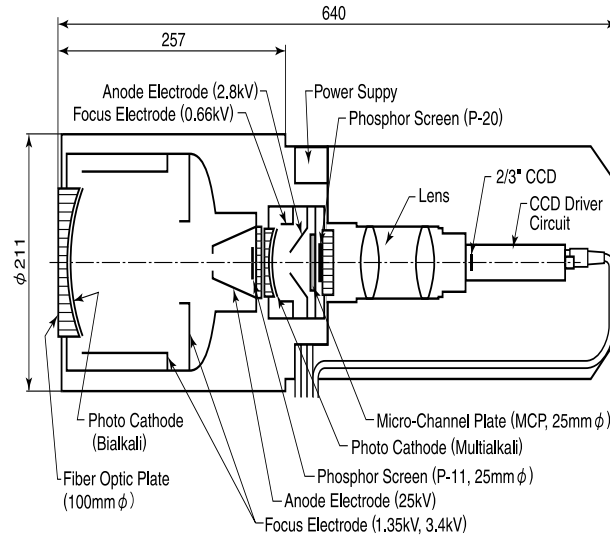


図 3.7: IIT-CCD チェーン

飛跡検出のためには IIT-CCD1 個の読み出し面の 11420 本もの SciFi の中から光ったファイバーの位置情報と輝度情報を検出し粒子のヒットした座標を特定することが必要である。そのために使用される光検出装置が IIT-CCD チェーンである。IIT は Image Intensifier Tube [31, 32] の略である。IIT は光電子増倍管のように、微弱な光を光電子に変換して高電場によって信号を増幅する。増幅された信号は後段の CCD カメラに打ち込まれその位置情報と輝度情報が記録される。これらの装置が光電子増倍管と異なる点は光電面で光電子の発生した位置情報を保存したまま信号を増幅できることにあり、このことにより光電面と接続されているファイバーとの関係を押さえておけば (X 層、Y 層のヒットを組み合わせることで) 光電子の位置情報から粒子のヒットした 3 次元的な位置情報を再構成することが出来る。図 3.7 に IIT - CCD チェーンの模式図を示した。IIT は 2 段構造になっており、初段の IIT (浜松フォトニクス V5502) は静電型と呼ばれ、直系 100mm の像を 23mm に縮小し、輝度を 10 倍程度に増幅させる。後段 IIT (浜松フォトニクス社 V1366) は MCP (Micro Channel Plate) を内蔵したタイプのもので信号を増幅させるとともに印荷電圧を 2.2sec 毎のニュートリノビームタイミングにあわせてかけることで、よけいな雑音成分の混入を防ぐ働きをしている。信号取得のゲート幅は IIT 後部にある蛍光体の減光時間である 100μ 秒にあわせている。蛍光体からの光は光学レンズを通して収束され、CCD カメラの撮影面積 ($8.8\text{mm}\times 6.6\text{mm}$) に像を収め、ピントを合わせた後 CCD カメラによって撮影される。CCD の解像度は 768×493 画素 (ピクセル) であり、1 ピクセルが前段 IIT 光電面上の $165\sim 200\mu\text{m}$ に相当する。

3.3 SciFi 検出器のデータ取得

CCD カメラからのビデオ信号は CCD 画面の画素毎に 24 台の Flash ADC (Analog to Digital Converter) によって 8 ビット (256 階調) の輝度情報に変換され、CCG (Clock and Coordinate Generator: サンプル用クロック信号及び座標データ生成モジュール) によって座標情報を付加されて、FIFO (First In First Out) メモリーに記録された後、ワークステーションに送られる。こうした出力

信号の中から CCD 画面上の輝度を持ったピクセルの情報のみを残し、さらに輝度に適切な閾値を設けてこれを越える輝度をもつピクセル情報のみが記録される。こうして選んだピクセルをヒットピクセルと呼んでおり、データ解析においてはこのヒットピクセルを用いて粒子の飛跡再構成している。

3.4 SciFi 検出器の性能

SciFi 検出器では、宇宙線を用いてその性能や安定性を調べている。宇宙線イベントの選択には、SciFi 上流と下流のベトー、トリガーカウンタを利用して両方のカウンタのヒット情報をトリガーとして、トリガータイミングを作る。こうして選ばれたイベントの中でさらに SciFi に 15 層以上ヒットを残したイベントのみが宇宙線サンプルとして、後の解析に利用される。宇宙線データは週に 1 度測定されており、常に過去のデータとの比較による性能の安定性評価がなされている。

3.4.1 ヒット検出効率

宇宙線データを用いて SciFi に用いる 24 本の各 IIT に対するヒット検出効率を見積もる。ここでヒット検出効率とは、

$$\text{ヒット検出効率} = \frac{\text{ヒットした層の数}}{\text{宇宙線が通過した SciFi 検出器の層の数}} \quad (3.1)$$

定義される量である。図 3.8 に各 IIT のヒット検出効率を示した。全ての IIT が 95% 程度の検出効率を持っていることがわかる。また、これまでの測定でヒット効率は全ての IIT について $\pm 2\%$ 以内で安定していることがわかっている。

3.4.2 トラック検出効率

ヒット検出効率と同様にトラック検出効率を式 3.2 ような量として定義する。トラック検出率はトラック長（ヒットを残した層の数）の関数として表され、長いトラック程検出効率が良くなる。宇宙線解析の結果、3(4) ヒットのトラックの検出率がおよそ 70(87)% の検出効率程度であり、それ以上の長いトラックに対してはほぼ 100% の検出効率を持つことがわかっている。なおヒットを 2 つしか持たない短いトラックは今のところ解析には利用されていない。図 3.9 に SciFi のトラック検出率を示した。

$$\text{トラック検出効率の定義} = \frac{\text{SciFi の宇宙線データイベント}}{\text{上流と下流のベトー、トリガー間でトラックのあるイベント}} \quad (3.2)$$

3.4.3 検出器の安定性

長期間に及ぶ実験期間中に取得したデータを比較するためには検出器性能の安定性を常に確認しておくことが必要である。安定した光源である宇宙線を利用して検出器の安定性がモニターされている。図 3.10 に示したものは宇宙線を用いた IIT のヒットピクセル数 (N_{pix}) およびヒット検出率の安定性を示す図である。宇宙線データは週に一度測定され、それらを過去のデータと比較することにより、検出器の性能が変化していないことを確認している。また、IIT のノイズは高電圧のわずかなブレや周囲の温度などに敏感に反応して変化することがわかっている。そこで、SciFi 検出器ではニュートリノビームのスピル間の空白時間にトリガーをかけてデータを取ることで IIT の安定性を常にモニターする。実験期間中は常に誰かが図 3.11 のようなノイズ安定性を確認するようにしている。

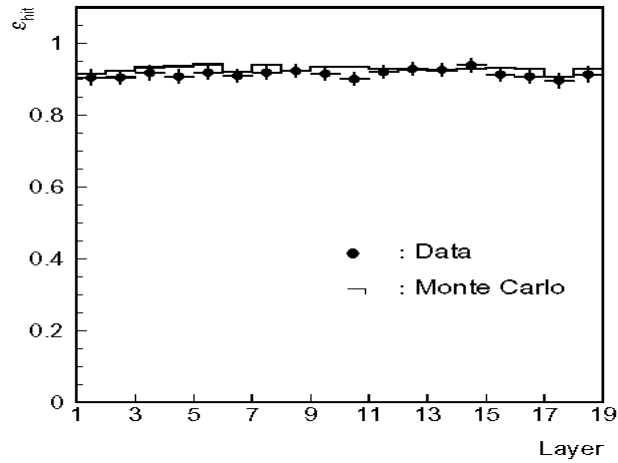


図 3.8: SciFi 検出器のヒット検出効率

横軸の数字が SciFi 検出器の層番号を意味し、縦軸が検出効率になっている。どの層においても 95%程度の高い検出効率を保っていることがわかる

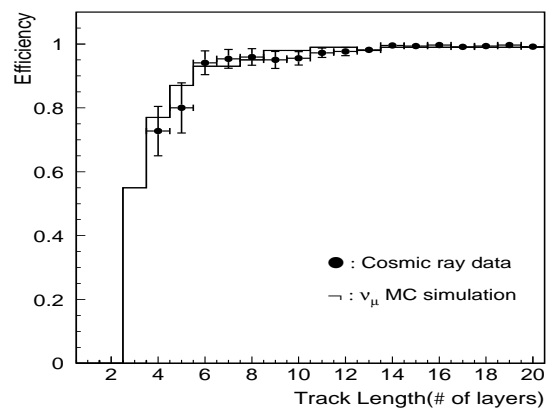


図 3.9: SciFi 検出器のトラック検出効率

横軸がトラックの長さ（ヒット数）、縦軸がトラック検出効率である。黒い点がデータ、実線が MC を表している。5 ヒット以上を残す長いトラックに対してはほぼ 100% の検出効率を持っていることがわかる。

Npix,eff,noise stability

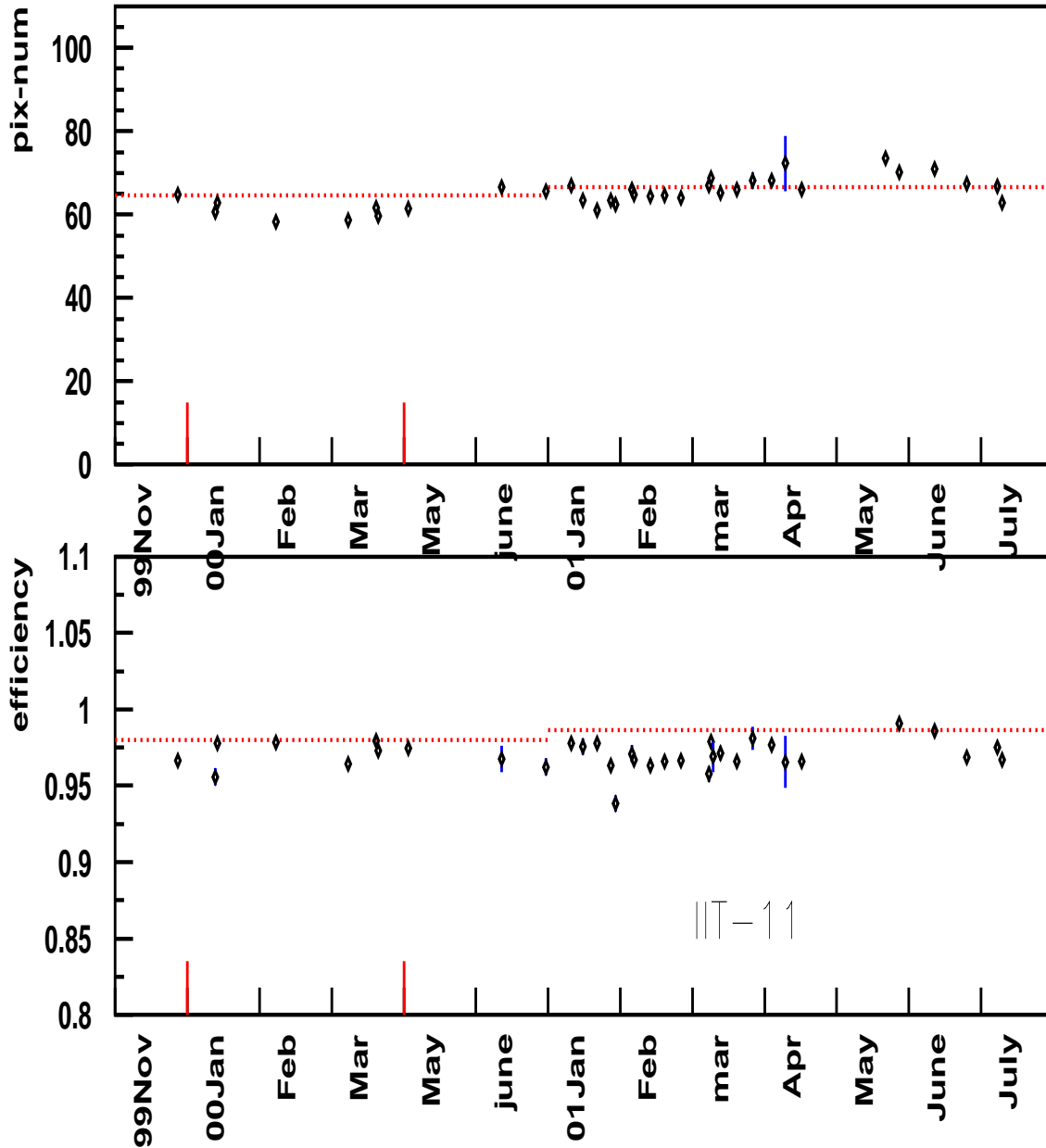


図 3.10: 宇宙線による安定性モニター

週に一度 24 本の IIT に対して Npix の平均値およびヒット検出効率を宇宙線を用いて測定し、検出器の性能を評価している。IIT の故障や高電圧の低下などが起こると Npix 値や検出効率が低下する。

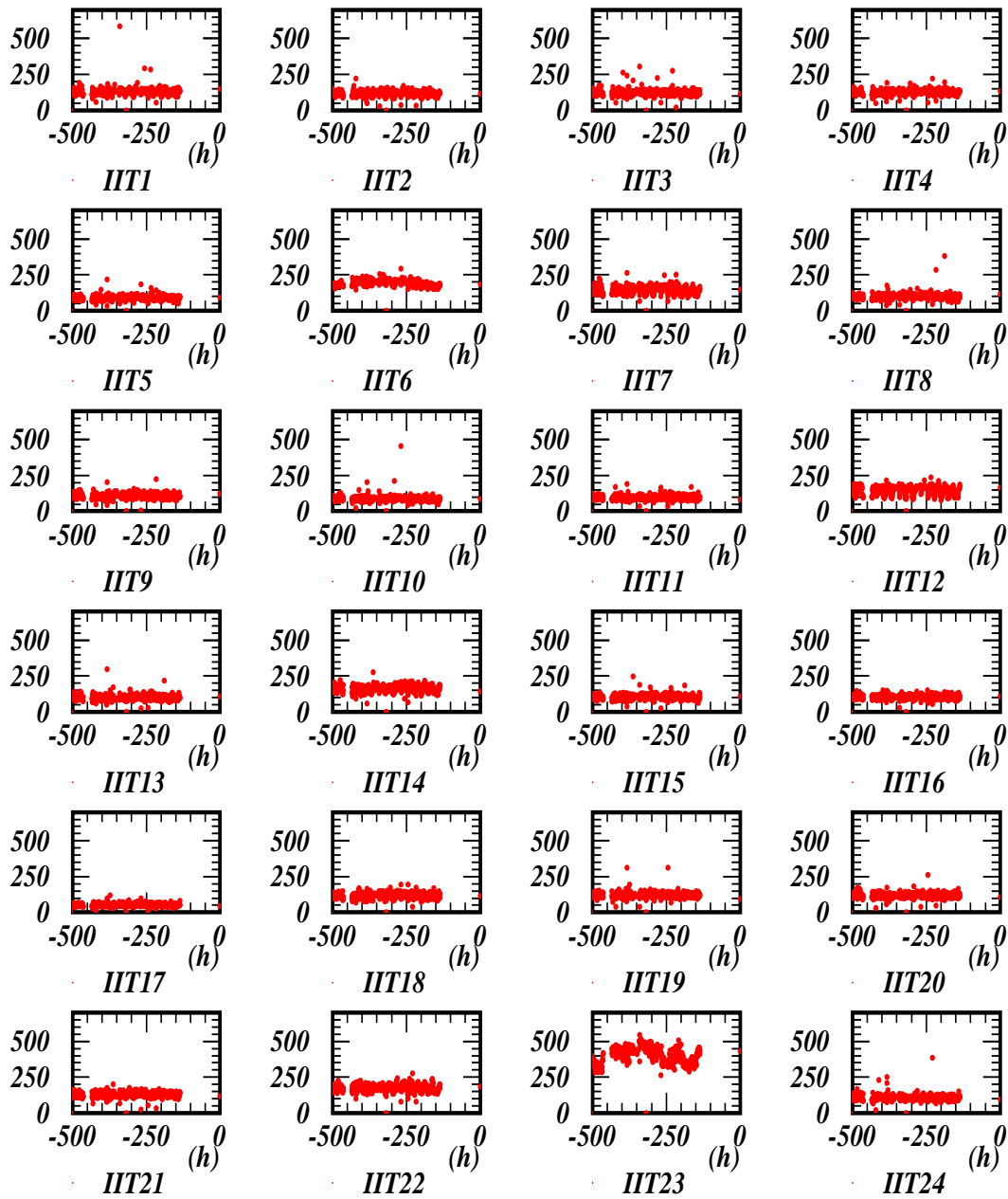


図 3.11: ビームスピル間のトリガーを用いたノイズモニター

IIT のノイズは周囲の温度等に左右されやすいことがわかっており、実験中も常に監視する必要がある。そこで、ビームスピル間のタイミングでトリガーをかけてデータをとることで IIT ノイズをモニターしている。

3.5 SciFiにおけるデータ解析

SciFi 検出器におけるデータ解析の流れは次のようにまとめることができる。

1. ヒット検出
2. トラック検出
3. トラック整合
4. 2次トラック検出

ここではこれらの概要をまとめる。

3.5.1 ヒット検出

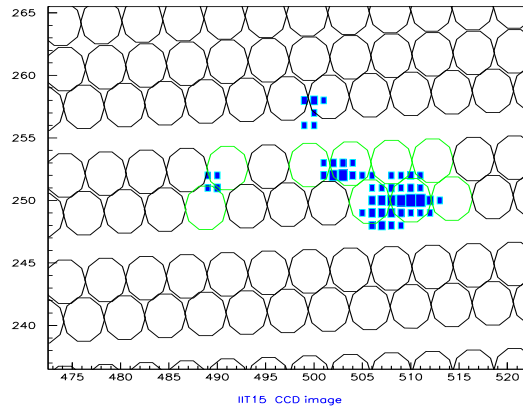


図 3.12: CCD 画面のイメージ

黒い点が輝度を持ったピクセルである。このようなピクセルの集合をヒットと定義する。図中の円はファイバーを意味している、実際に CCD 画面上にこのような円が見えるわけではないが、事前の校正により、ヒット位置と接続されているファイバーを対応させることができる。

SciFi 検出器では粒子のヒット情報は CCD 画面上の輝度情報をもったピクセルとして測定される。SciFi ではこのような輝度を持ったピクセルの集まり（ピクセルクラスター）をヒットと定義している。またヒットを構成するピクセルの個数を N_{pix} と定義している。 N_{pix} は IIT への入射光量や荷電粒子がファイバーで失ったエネルギーとよく対応する量であることが確認されている。（これについては第 5 章で述べる）解析の第一歩は隣接するヒットピクセルが作る集合を選ぶことである。ここで、雑音である独立したピクセルの多くが除かれる。CCD 画面の座標とそこに接続されているファイバーの対応はあらかじめ較正されているため、ピクセルクラスターは直ちに光ったファイバーの集合（ファイバークラスター）に置き換えることができる。このとき次の 2 つの条件を課すことにより雑音成分を除去している。

- 2 層俵積みのシートの上下のファイバーにともにヒットがあること

- 2層のファイバーシートにまたがるピクセルクラスターが輝度のピークを複数もつときには最大輝度のクラスターのみがヒットとして選ばれる

このようにしてヒットが選ばれる。このときヒットの座標はピクセルの輝度を重みにした重心位置で定義される。

3.5.2 トラック検出

次にヒットからトラックを再構成する。このとき、まずX (Y) 層のみを見て連続するヒットを探す。片側の層のみでつくった2次元のトラックをフラグメントとよぶ、フラグメントをつくる条件は3層以上に連続するヒットが存在し、それらがある角度の範囲内に並んでいることである。こうしたフラグメントをX,Y 層で探して、これらの中でよく重なる組み合わせを選んで3次元的なトラック(3Dトラック)をつくる。フラグメントから3Dトラックをつくる条件は、フラグメントの始点および終点が2層以上ずれていないとこ、そしてフラグメントを構成するヒットが2層以上重なっていることである。

3.5.3 トラック整合

トラックの候補が見つかる、次にこれらの中からCCQE反応によって発生するミュオントラック(1次トラック)を探す。ミュオンの識別はトラックの飛程によって判断し、トラック候補の中から最も飛程の長いトラックを見つけてこれを1次トラック(Primary Track)の候補とする。この際にはトラックがSciFiの外にぬけて後段の検出器にヒット(トラック)を残していることが要求される。SciFi検出器の後ろにはトリガーカウンタ、鉛ガラス検出器(LG: K2K-Iのみ)、ミュオン飛程検出器(MRD)が設置されている。これらのそれぞれに独立に記録されたヒット情報(座標情報、時間情報)とSciFi-トラックの整合をとることにより、1次トラックを検出する。トラックがどこで停止したかによってVetoイベント、LGイベント、MRDイベントなど分類がされており、これらは分けて取り扱われる。

3.5.4 2次トラック検出

上記の方法によって1次トラックの候補を探した後、このトラックの始点を起点として2本目のトラック(2次トラック)と相互作用点を探す。2次トラックは主に陽子やパイオンによってつくられ、多くの場合2ヒットか3ヒット程度の短いトラックである。2次トラックが見つかる、相互作用点の座標は1次トラックと2次トラックの交点として定義される。また、トラックが一本しか発見できない1トラックイベントの場合はトラック始点直前にある水の層の中心が相互作用点として記録される。SciFiではCCQE反応を選ぶために、2トラックイベントをまず選び、その中で2次トラックの角度がCCQE反応を仮定した角度に近いイベントをさらに選ぶ方法をとっている。また、2次トラックに関してトラックがSciFi検出器の内部で止まっているイベントを2次トラック Contained イベント、2次トラックが外に抜けているイベントを2次トラック nonContained イベントと定義している。第5章で述べる粒子識別においてはこれらのイベントを分けて取り扱う。図3.13にSciFiでのニュートリノイベントの一例を示した。

K2K Fine-Grained Detector (Top View)

Run900003 Spill 2 TRGID 1
 101 11 23 18 37 47 0
 Nvtx 1
 v1 typ 1(CCqe) np 3 t .10E-05sec
 tmd= 3 (-56.6 33.5 100.0)

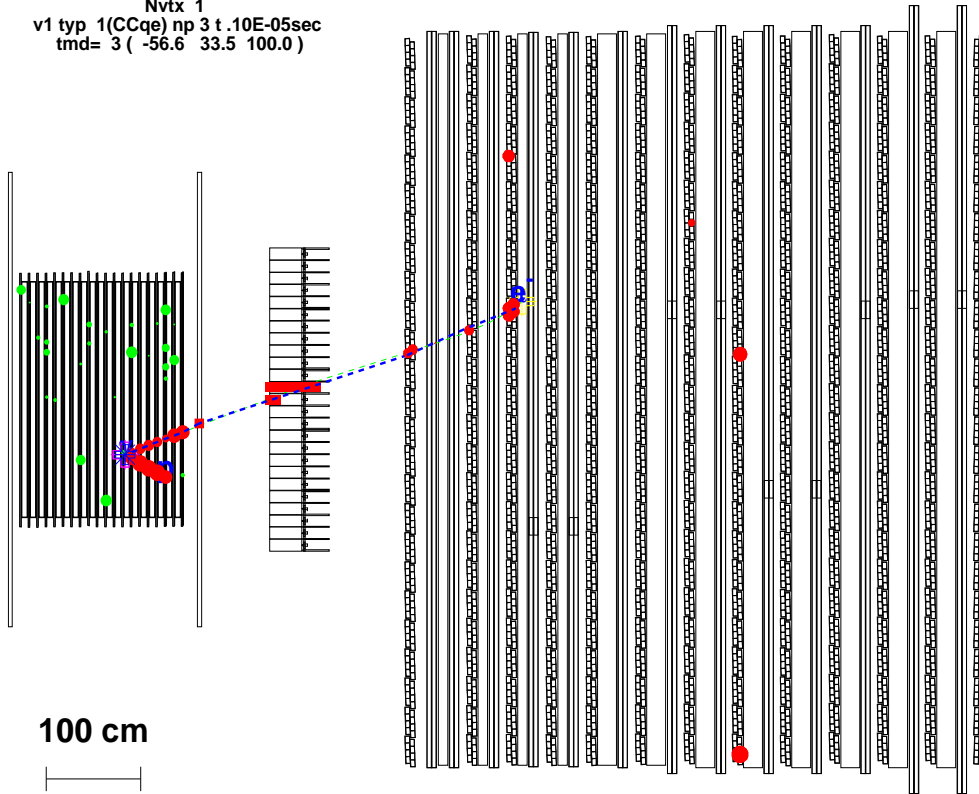


図 3.13: SciFi 検出器におけるニュートリノイベントの例

左から順に SciFi 検出器、トリガーカウンタ、LG、MRD のイメージである。SciFi で発生したトラックがトリガーカウンタ、LG にヒットを残し、MRD に進入している様子が見える。SciFi 検出器の解析ではまず後段検出器のヒットやトラック情報を利用して長いトラック (1 次トラック) を検出する。その後 1 次トラックの始点から他のトラックを探す図には 1 次トラック始点から短いトラックが伸びている。このような 2 本目の短いトラックを 2 次トラックという。

第4章 低エネルギー領域でのニュートリノ反応イベントの研究

4.1 低エネルギーニュートリノ事象の重要性

第2章でも触れたように、K2K実験ではその実験の期間により、前置検出器の構成が変わっており、従って期間毎に取得したデータを区別して取り扱っている。具体的には1999年11月～2001年7月までの実験（K2K-I）では、SciFi検出器の後ろに電磁シャワー成分の測定のための鉛ガラス検出器（LG）が設置されていた。2003年1月～2003年6月までの期間の実験（K2K-IIa）では、役割を終えたLGが取り外されて、代わりにプラスチックシンチレータを用いた新しい飛跡検出器（SciBar検出器）の一部（MiniSciBar）が設置された。そして、それ以降の実験（K2K-IIb）には完全なSciBar検出器が設置された。本研究に用いるデータセットはK2K-IとK2K-IIaの時期のものである。これまでのK2K実験の結果（第2章を参照）から、ニュートリノ振動現象はエネルギーが1GeV以下の領域で特に顕著に現れることがわかっており、K2K実験に用いているニュートリノビームの平均エネルギー（1.3GeV）に対してより低いエネルギーのニュートリノ反応を捕らえることが重要になってきている。K2K-Iのデータセットについては、既にミュオントラックがLGで止まったイベント（LGイベント）を解析することにより、こうした低いエネルギーの反応を調べる試みがなされた [33]。一方でK2K-II以降の実験では上記の通りLGが除かれたことにより、捕らえることのできるニュートリノ反応のエネルギーの閾値がK2K-Iに比べて下がっており、この時期のデータを解析することは大変重要であるといえる。この章では、まずK2K-Iにおける低エネルギーイベントの研究と結果について簡単に紹介するとともに、K2K-IIaデータを用いての低エネルギーイベントの解析について述べる。

4.2 SciFi-MRD のトラック整合によるイベントの分類

（第3章で述べたように）SciFi検出器では、SciFiのトラックと後段の検出器のトラック（ヒット）の整合をとることにより、ニュートリノ反応の同定やそのエネルギー再構成を行っている。現在のSciFiにおけるイベントは以下のように分類されている。

- MRD3D イベント : SciFi-MRDにともにトラックがあり、それらが整合する（トラックがMRDの中で止まっている）
- MRD3Dext イベント : SciFi-MRDにともにトラックがあり整合するが、トラックがMRDの外に抜けている
- MRD1L イベント : SciFiトラックを延長したMRDの1層目にヒットがある（トラックは存在しない）
- MRD 2 D イベント : SciFiトラックと整合するMRDの2Dトラック（片側の層だけのトラック）が存在する

- MRD2Drec イベント: SciFiトラックと整合するMRD 2 Dトラックとヒットが存在する
- LG イベント :SciFiトラックがLGで止まっているイベント
- Veto イベント : SciFiトラックがトリガーカウンタで止まっているイベント

これらのイベントのうち、発生したトラックがミュオントラックであると信頼でき、なおかつそのエネルギーを再構成することのできるイベントのみが後の解析に利用される。現在、振動解析に利用されているのはK2K-IデータセットのMRD3D, 1 L イベントとLG イベント、K2K-IIaに関してはMRD 3D イベントのみである。

4.3 K2K-Iにおける低エネルギーイベントの研究

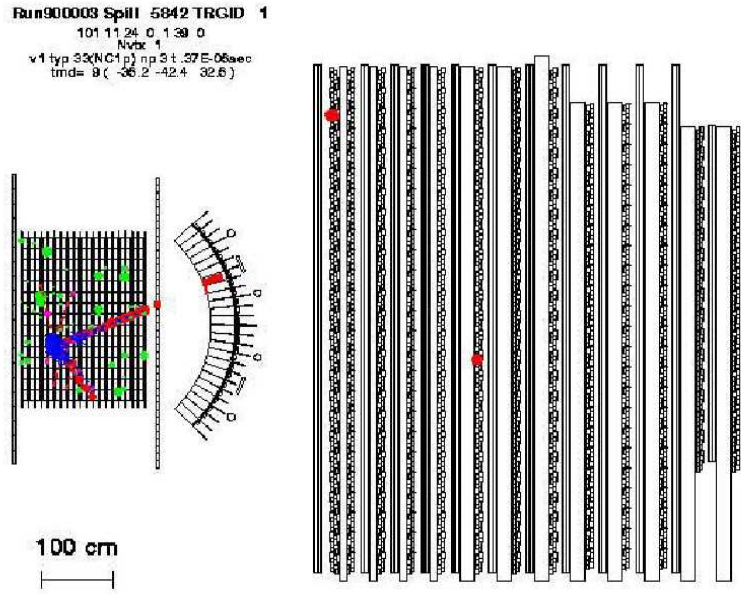


図 4.1: LG イベントの例

SciFi で発生したトラックが後段のトリガーカウンタにヒットを残し、LG で止まっている。

K2K-I データにおいては、SciFi でのニュートリノ反応の結果発生するミュオンを識別するために、SciFi で発生したトラックが少なくとも MRD にヒットを残していることを要求してきた。この条件で再構成されるイベント集団のミュオン運動量および、対応するニュートリノエネルギーの分布を図 4.2, 4.3 に示した。この条件で取得されるイベントはミュオンの運動量が $1.34\text{GeV}/c$ 程度、ニュートリノエネルギーが 1.55GeV 程度の集団である。

一方で、これまでの結果から振動の効果が顕著に見られる領域はニュートリノエネルギーが $0.5\text{GeV} \sim 0.75\text{GeV}$ であり、今程度のエネルギーに対する感度が求められる。そこで、より低いエネルギーのイベントを拾うための試みとして粒子が鉛ガラス検出器で止まったイベント (LG イベント) の研究がなされた。LG イベントの条件は、SciFi トラックの延長上に LG のクラスター (ヒット) が存在し、なおかつその先の MRD には対応するトラックやヒットがないことである。図 4.1 に典型的な LG イベントの例を示した。LG イベントを利用するためには、LG で止まった粒子がミュオンであることを保障するとともに、LG で粒子が失ったエネルギーを正しく再構成できることが要求される。

4.3.1 LG 信号の信号の大きさをを用いたエネルギー再構成

LG でのエネルギー損失を求めるために LG に取り付けられた PMT 信号の大きさ (ADC) が用いられた。LG の信号の大きさは入射した粒子の飛程、そしてエネルギーに対応すると考えられるためである。そこで、LG の通過距離と信号の大きさの関係を調べた。方法としてトラックが MRD に達したイベントを選び、SciFi 検出器と MRD のトラック (ヒット) 情報から LG の通過距離 (図 4.4) を見積り、信号の大きさとの対応を調べた。図 4.5 に示したものは LG 信号の分布である。横軸が信号の大きさ、縦軸がイベント数になっている。図には 2 つのピークが見られるが、信号量が大きい領域に見える比較的なだらかなピークは粒子が LG と PMT を接続するライトガイドを通過したことによる

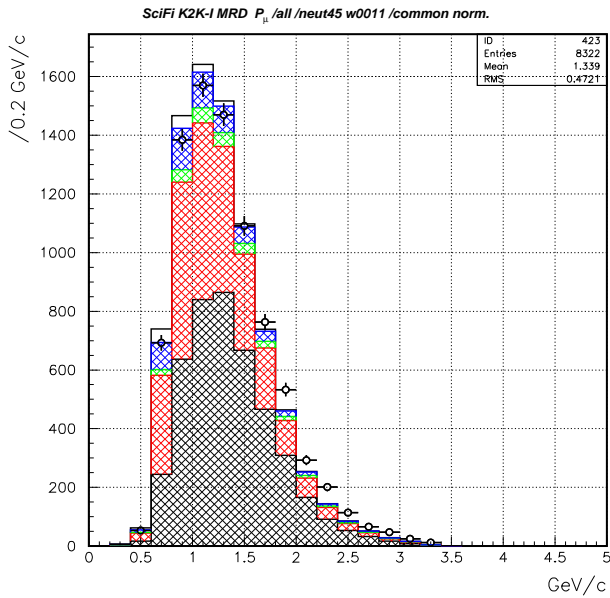


図 4.2: K2K-I: MRD との整合がとれたイベントの
ミュオン運動量分布

黒い点がデータ、実線が MC。ハッチは反応モードを表し、黒が CCQE 反応、赤が CC- 1π 、緑が CC-coherent π 、青が CC-multi π を表す平均値は $1.34\text{GeV}/c$

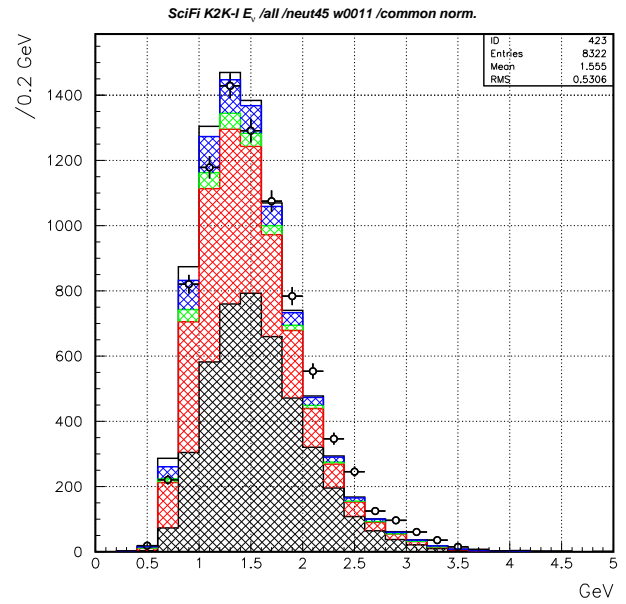


図 4.3: K2K-I:ニュートリノエネルギー分布

横軸にニュートリノエネルギー、縦軸にイベント数をとった図。表示の形式は左図と同様である。平均値は 1.55GeV

ものである。そしてこれらのイベントに対して LG の通過距離と信号の大きさの関係をプロットしたものが図 4.6 である。この図は横軸にトラックの通過距離、縦軸に信号の大きさをプロットしたものであり、この図から、通過距離と波高の間に線形な関係のあることがわかる。また、図 4.7 に示したものは、モンテカルロシミュレーション (MC) における入射粒子の LG のエネルギー損失を横軸にとり、縦軸に信号の大きさをとった図である。LG の物質質量 ($34\text{cm} \times 5\text{g}/\text{cm}^3$) を考えると LG で停止するトラックのエネルギーは 0.4GeV 以下であり、図 4.7 を見るとこの領域でエネルギー損失と信号の大きさの間に直線的な相関がみられる。この関係を用いて LG におけるエネルギー損失 E_{LG} を計算する。最終的に LG イベントにおけるミュオンのエネルギーは次の式で表される。

$$E_{\mu} = E_{\text{SciFi}} + E_{\text{veto}} + E_{\text{LG}} + M_{\mu} \quad (4.1)$$

ここで、 $E_{\text{SciFi}}, E_{\text{veto}}, E_{\text{LG}}$ はそれぞれ SciFi、トリガーカウンタ、LG でのエネルギー損失、 M_{μ} はミュオンの静止質量である。

4.3.2 LG イベントのミュオン識別

LG イベントはエネルギーが低い、飛程の短いトラックを捕らえることができるが、そのためにミュオンだけでなく同時に生成される陽子やパイオンも混入すると考えられる。CCQE 反応の解析を行うためにはまずミュオントラックを捕らえる必要があり、これらの成分はミュオン識別の S/N を悪くする。図 4.8 および、図 4.9 に示したものは SciFi に 2 本トラックが観測されたイベントのうち 2 本目のトラック (短いほうのトラック) が SciFi 内で止まっているイベント (2 次トラック Contained イベント) および 2 本目のトラックが外に抜けているイベント (2 次トラック nonContained

イベント)それぞれに対する LG エネルギー分布である。誤差棒付きの黒い点がデータ、実線が MC を表わしている。また、色付きの実線は入射粒子の種類を表わしており、水色が陽子 (2 次トラックの主な成分), 青色がミューオンである。この図から、LG の信号から換算したエネルギーが 0.1GeV 以下のイベントを排除することによって、陽子の混入を半分以上除くことができるという結果が出ている。LG イベントはこのような方法でミューオン識別の純度を高めている。

SciFi-MRD events

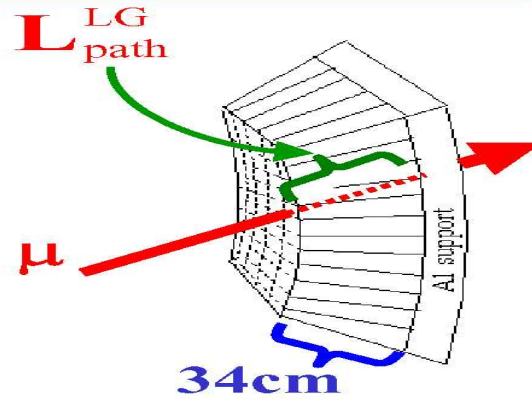


図 4.4: LG の通過距離

上流 (SciFi) と下流 (MRD) のヒット位置から LG の通過距離を求める

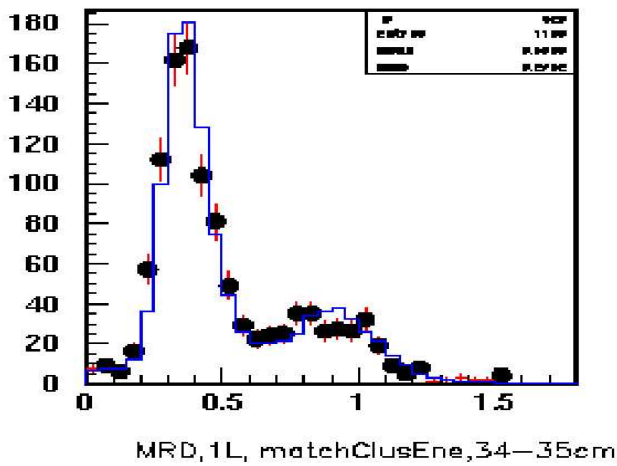


図 4.5: LG 信号の大きさ (ADC) の分布

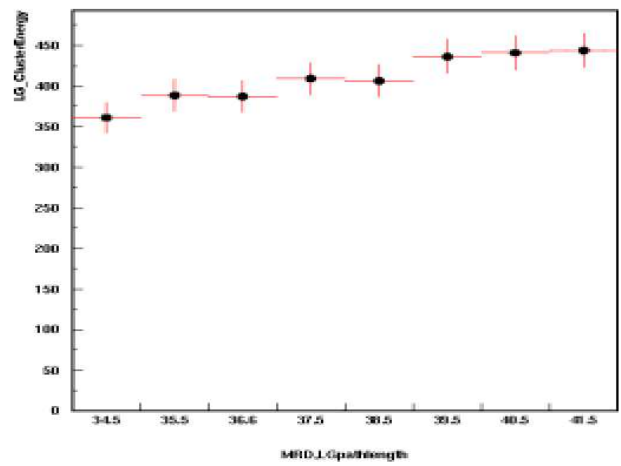


図 4.6: 通過距離と信号の大きさ

横軸が波高、縦軸がイベント数を表わす。黒い点がデータ実線が MC である。2つのピークが見られ、波高の高い領域のピークは粒子がライトガイドを通過したイベントに対応する

横軸に通過距離、縦軸に信号の大きさをとった図である。両者に線形な関係が見て取れる。MRD とのトラック整合がとれた信頼できるトラックのみを使っている。

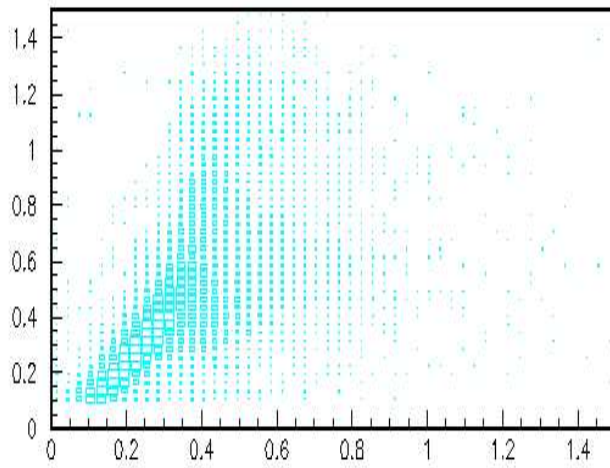


図 4.7: LG におけるエネルギー損失と信号量の関係

横軸が LG におけるエネルギー損失、縦軸が信号の大きさを表している。LG で停止する粒子のエネルギーは 0.4GeV 以下であり、このエネルギー領域でエネルギーと信号の大きさが対応することがわかる

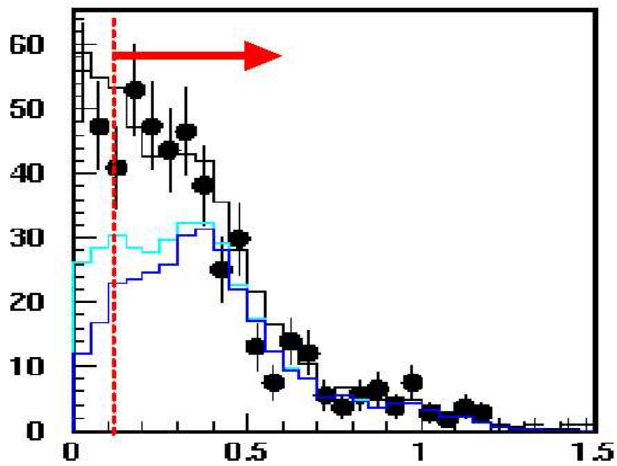


図 4.8: 2次トラック Contained イベントに対する LG エネルギー分布

黒い点がデータ実線が MC である。また、水色で示したものは陽子トラック、青色がミュオントラックを表わしている。エネルギーが低い所では陽子の混入率が大きい

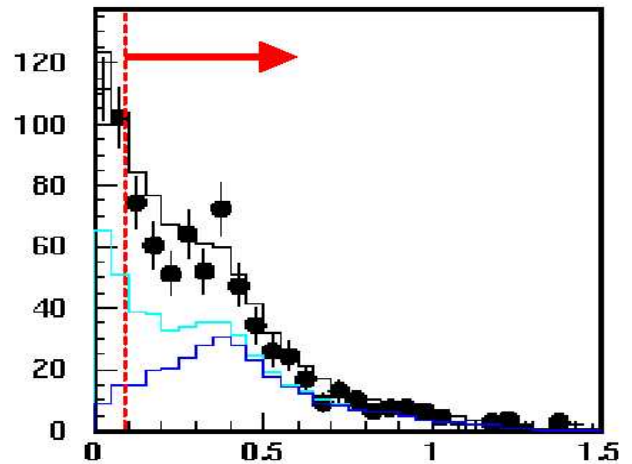


図 4.9: 2次トラック nonContained イベントに対する LG エネルギー分布

Contained イベントの場合と同様に陽子トラックは LG で落とすエネルギーが小さい傾向にある。

4.3.3 LG イベントのエネルギー

LG イベントのエネルギーに関する分布を図 4.10, 図 4.11 に示す。データと MC がよく一致しているとともに、LG イベントが先に示した、MRD 3 D および 1 L イベントに比べてより低いエネルギー領域に分布していることがわかる。こうして得られた低エネルギーの LG イベントは MRD イベントとともに振動解析に利用され、重要な寄与をしている。

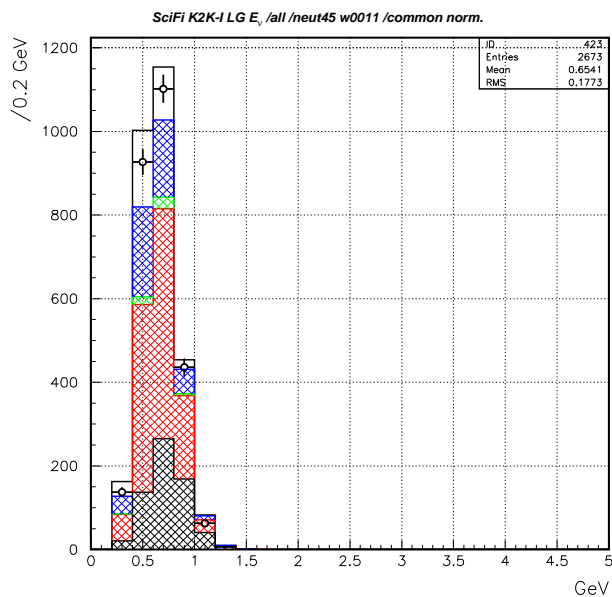


図 4.10: LG イベントミューオン運動量分布

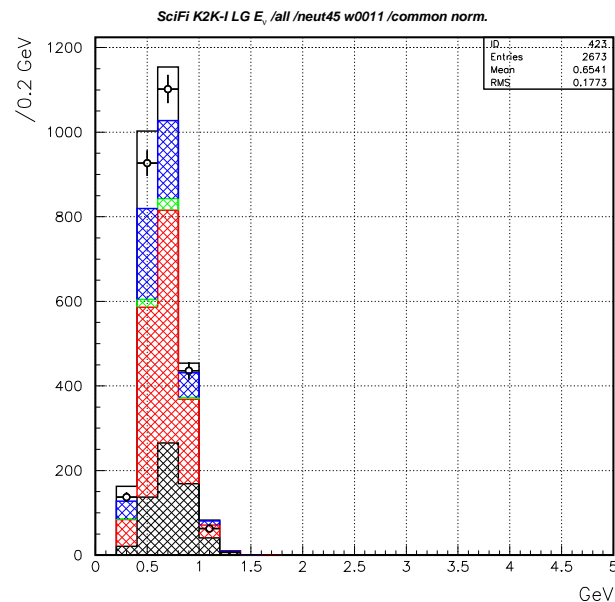


図 4.11: LG イベントニュートリノエネルギー分布

横軸がミューオン運動量、縦軸がイベント数を表わす。また MC の色分けは反応モードをあらわすものであり、黒でしめたものが CCQE 反応、赤色が CC1 π 、緑色が CC-coherent π 、青色が CC-multi π 反応である。平均値は 0.55 GeV/c となっている

横軸にエネルギー、縦軸にイベント数をとった図。色分けは左図と同じである。平均値は 0.65 GeV となり、MRD 3 D イベント (1.55 GeV) に比べて低いエネルギー領域を捉えている。

4.4 K2K-IIa データにおける低エネルギーイベントの研究

本研究の主な対象である K2K-IIa データと K2K-I データとの違いは SciFi 検出器後方の LG が取り除かれたことである。この実験期間のデータのイベント内訳は表 4.1 の通りである。LG イベントがなくなり、代わりに 2D あるいは 2Drec に分類されるイベントが増加している。また、現在解析に利用している MRD 3 D イベントの運動量、エネルギーに関する分布を見ると (図: 4.12、4.13)、K2K-I のとき (平均値 1.55 GeV) に比べて平均値が 1.28 GeV となり、より低いエネルギー領域のイベントまで捉えていることがわかる。この意味で K2K-IIa イベントを解析することが重要であるといえる。

表 4.1: K2K-IIa イベントタイプの内訳

種類	3D	1L	2 D	2Drec
個数	4149	1286	499	264

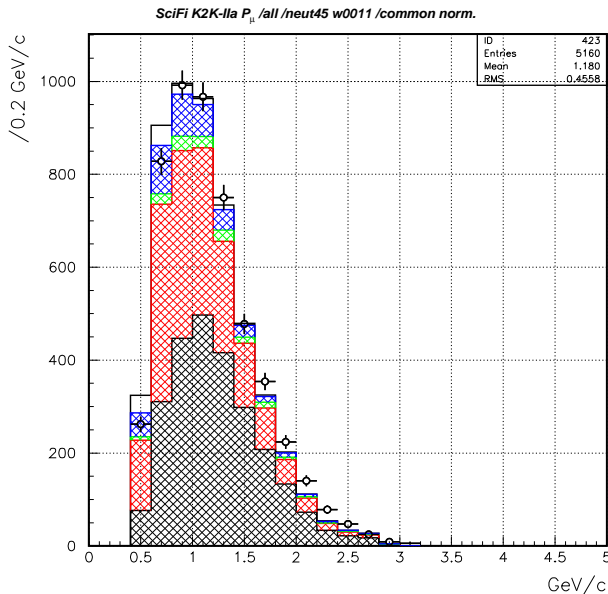


図 4.12: K2K-IIa ミューオン運動量分布

平均値は $1.18 \text{ GeV}/c$ である。黒丸の点がデータ、色つきの箱型ヒストグラムが MC を表わしている。色分けは反応モードを意味しており、黒で示したものが CCQE 反応、赤が CC- 1π 、緑が CC-coherent π 、青が CC-multi π である。

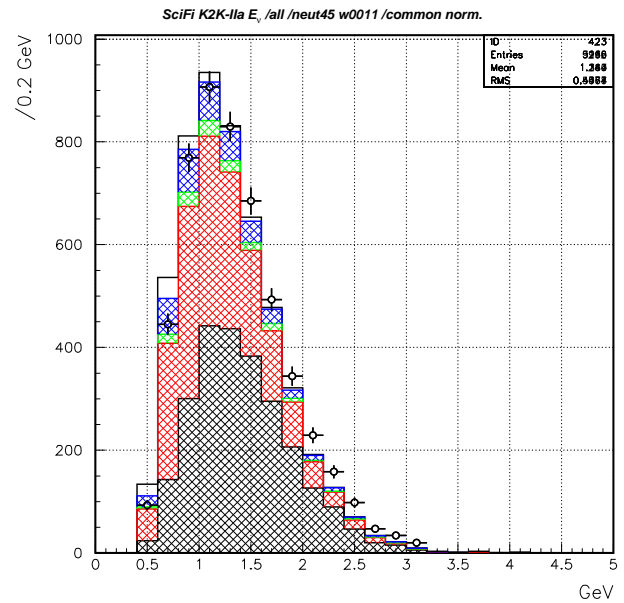


図 4.13: K2K-IIa ニュートリノエネルギー分布

平均値が 1.28 GeV となっており、K2K-I の結果 1.55 GeV と比べて LG の物質量がなくなった分低エネルギーのイベントを捕らえている。表示の形式は左の運動量の図と同様である。

4.4.1 SciFi-MRDトラック整合条件の見直し

K2K-IIa データのイベント種類別の個数分布を見ると MRD 2 D、および 2 Drec に分類されるイベントが K2K-I に比べて多い。これらのがどのようなイベントであるかを調べた結果、特徴として

かなりのものがSciFiトラックの延長上にMRDの3Dトラックが存在することがわかった(図:4.14)。現在のSciFi-MRD間のトラック整合の方法は、

- SciFi の 3 DトラックをMRDまで延長したときの座標とMRDトラック始点座標の差(距離)
- SciFi の 3 Dトラック角度とMRDの3 Dトラック角度の差

の2つの要素から作ったパラメータ $\chi^2 - x$ と $\chi^2 - y$ を用いて評価している。

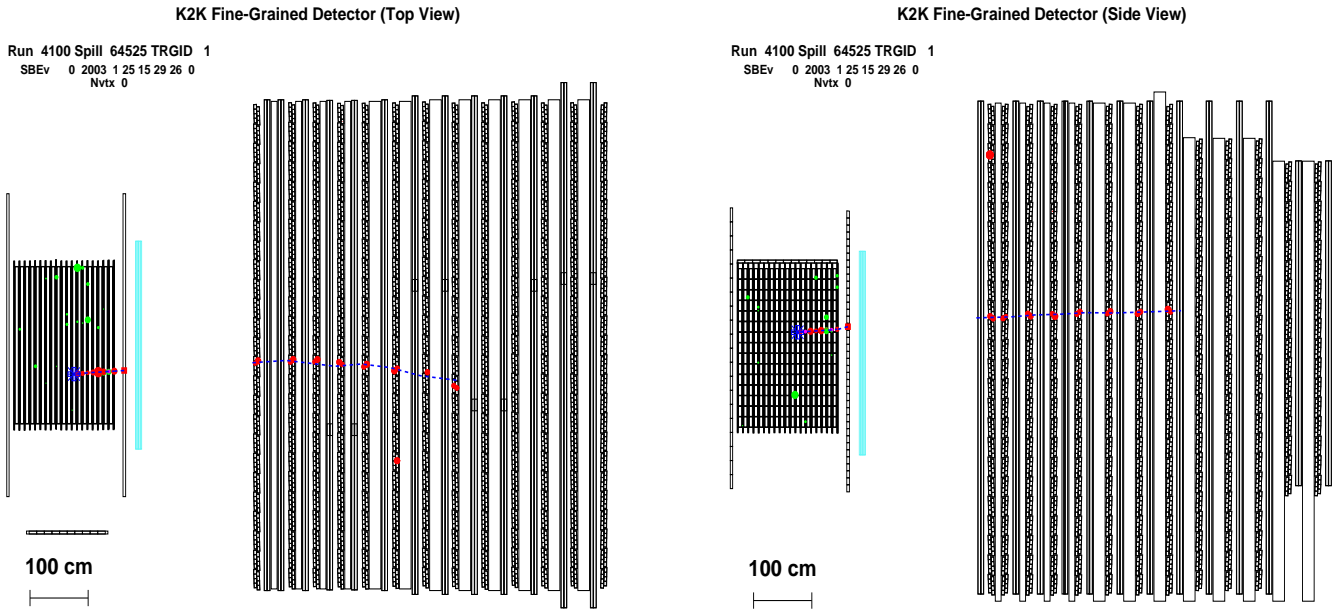


図 4.14: 2D イベントに分類されていた 3 D イベント

右の図が X 側、左の図が Y 側の層である。明かに SciFi で発生した粒子が MRD にトラックをつくっているように見えるが現行の条件では整合が取れていないとみなされる。

図 4.15 にこれらのパラメータに関する分布を示した。このパラメータについて、データと MC はよく一致している。現在の定義では、 $\chi^2 - x, \chi^2 - y$ がともに 8 以下のとき、SciFi トラックと MRD トラックが一致したとみなすことになっている。図 4.14 のようなイベントが多く見られたということは現行のトラック整合条件が厳しすぎることが原因であると考えられる。そこで、この条件をもう少し緩めて、上記のような 3 D イベントを救うことを検討した。 χ^2 分布(4.15)から、ほとんど(90%以上)のイベントが χ^2 が 20 以下の領域に存在することがわかったので、この領域 (χ^2 8~20) のイベントの性質を調べることにした。まず、イベントディスプレイで確認した結果では、データに対しては、90%以上が図 4.14 のようにトラックがつながっていると判断できるイベントであった。また、MC に対しても同様に 90%以上のイベントが SciFi で発生したミュオンが MRD にトラックを作り、これを正しくトラックングできているものであった。次にこれらのイベントがミュオンのエネルギーを正しく再構成できているかどうかを見たものが図 4.16~図 4.18 である。データと MC が良く一致し(図 4.16)、MC の真のミュオンエネルギーと再構成されたミュオンエネルギーも良く対応する(図:4.17、図:4.18)。このことは高い純度でミュオンを識別出来ていることも意味している。これらの結果からこのイベント集団は解析に用いて差し支えないものであると言える。

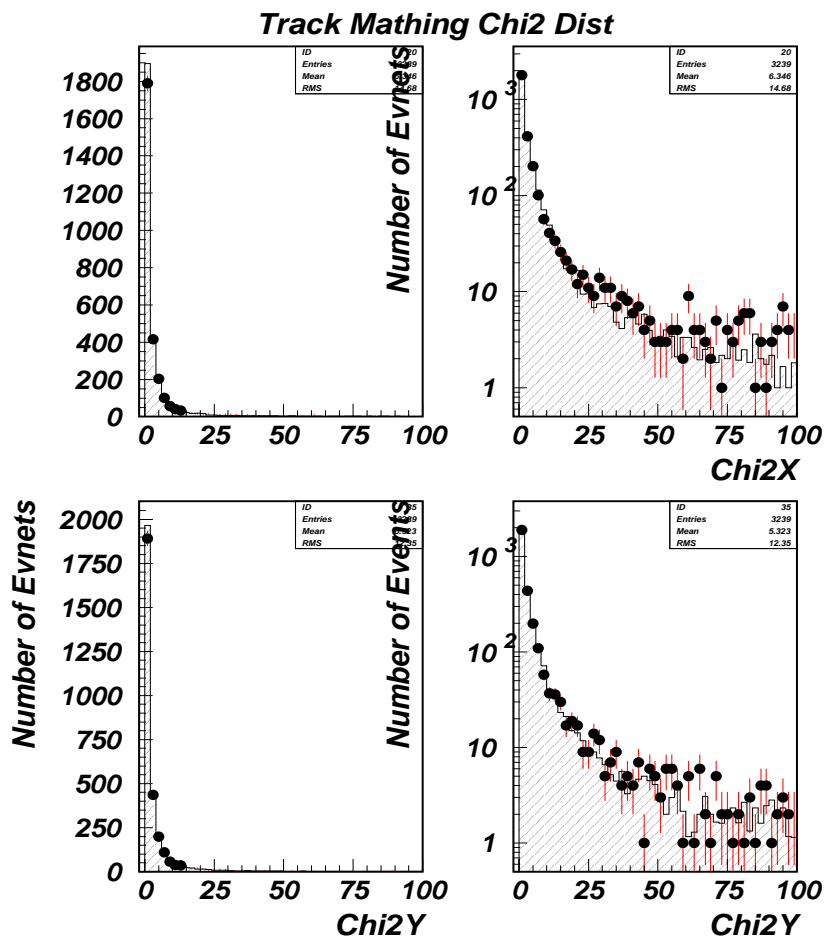


図 4.15: χ^2 分布

SciFi と MRD に 3 D トラックがある全てのイベントについての $\chi^2 - x$ および $\chi^2 - y$ に関する分布。左上の図が $\chi^2 - x$ 、左下が $\chi^2 - y$ の分布であり、右側の図は縦軸を対数にとって、より χ^2 が大きい領域の構造を見やすくしたものである。

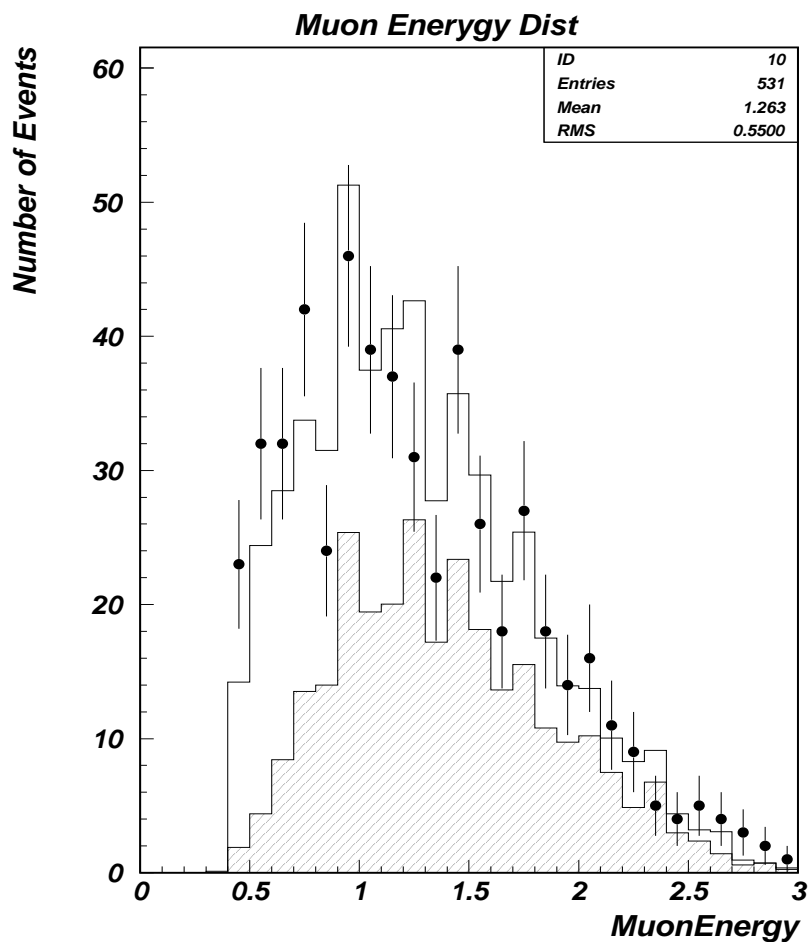


図 4.16: 新しい 3D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) のミュオンエネルギー分布

黒い点がデータと誤差、実線のヒストグラムが MC を示す。また、影をつけたものは CCQE 反応を意味する。データと MC が一致する。ミュオンエネルギーの平均値は 1.3GeV 程度となる。

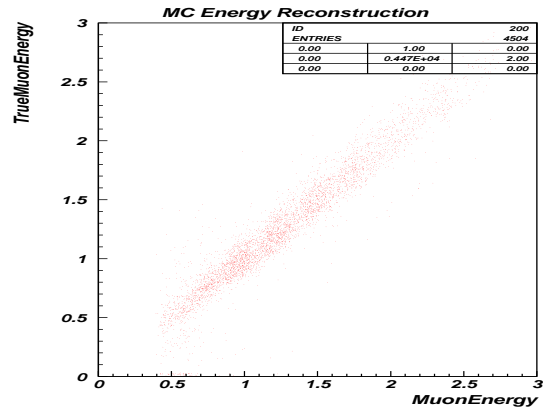


図 4.17: MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1

横軸が再構成されたエネルギー、縦軸が真のエネルギーを表わしている。黒い点がデータ、実線が MC であり、影をつけた部分は CCQE 反応を意味する

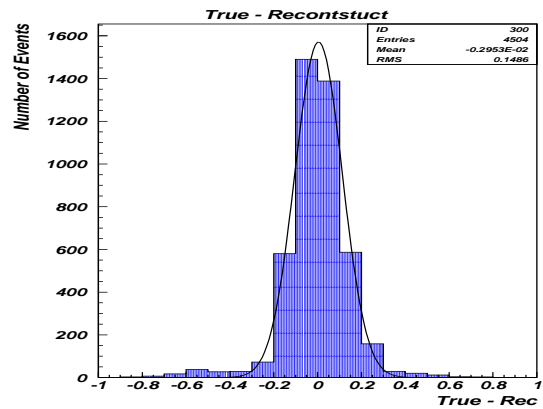


図 4.18: MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 2

(真のエネルギー)-(再構成されたエネルギー) プロットしたもの。黒い点がデータ、実線が MC であり、影をつけた部分は CCQE 反応を意味する

さらに、これらのイベントの基本的な分布(トラック数、角度、ミューオン運動量、ニュートリノエネルギー)を見たものが図4.19～図4.22である。どの分布についてもデータとMCはよく合っている。また、K2K-IIaの従来の3 D イベントに対する結果(付録Aを参照)と比較しても、これらのイベントがこれまで利用されてきたイベントサンプルと同様の性質を持っていることがわかる。これらの結果からこの節で述べた、 χ^2 条件の見直しによって利用可能になる新しい3 D イベントはこれまで利用されてきた3 D イベントと同様に、信頼できるイベントとして以後の解析に利用可能なのではないかと考える。図4.22から、ここで述べたイベント集団のニュートリノエネルギー平均値は1.2GeV程度となっている。元の3 D イベント集団の平均値(1.17GeV)とほぼ一致する値であり、K2K-I イベントの平均(1.55GeV)よりも低い領域を捕らえている。個々に述べたイベントはこれまで利用してきたイベントの10%以上を占める。こうしたより低いエネルギー領域を見ることのできるイベントの統計が増すことは後の解析にとって意味のあることであると考えられる。

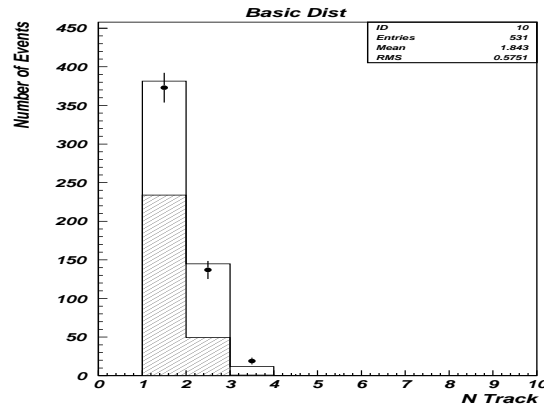


図 4.19: 新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) トラック数分布

横軸がトラック数、縦軸がイベント数を表わす。黒い点がデータ、実線が MC であり、黒いハッチは CCQE 反応を意味する

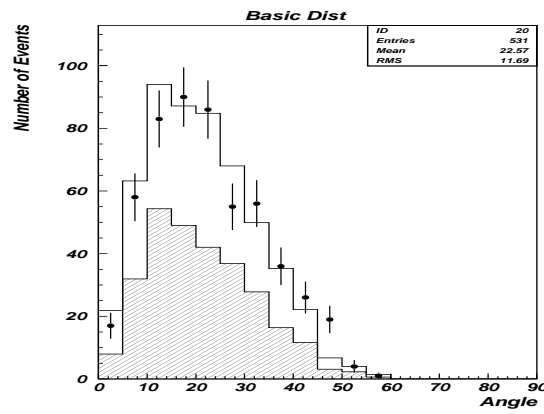


図 4.20: 新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) 角度分布

1 次トラックのビーム軸に対する角度の分布を見たもの。横軸が角度、縦軸がイベント数になっている

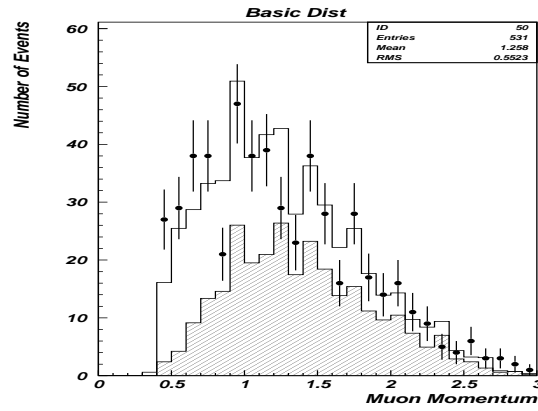


図 4.21: 新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) ミューオン運動量分布

横軸が運動量、縦軸がイベント数を表わす。黒い点がデータ、実線が MC、黒いハッチは CCQE 反応を意味する。

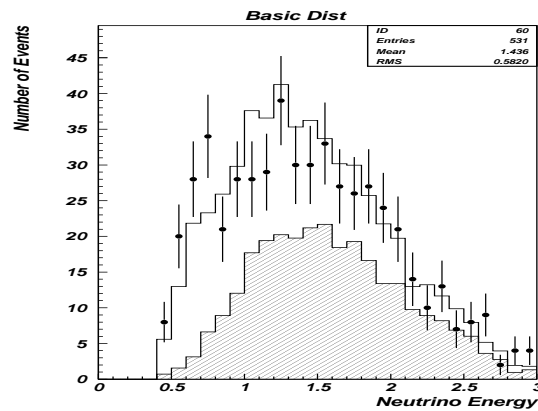


図 4.22: 新しい 3 D イベント ($8 \leq \chi^2 \leq 20$) ニュートリノエネルギー分布

横軸が再構成されたニュートリノエネルギー、縦軸がイベント数である。黒い点がデータ、実線が MC、黒いハッチは CCQE 反応である。

4.5 K2K-IIa MRD-2L イベント

前節では、 χ^2 条件の見直しによって SciFi-MRD を結ぶトラックが存在するにも関わらず 2D イベントに分類されるイベントを利用可能にすることを検討した。このようなイベントと並んで MRD2D に分類されるイベントの典型的な例として図 4.23 のようなものが見られた。MRD はドリフトチェンバーの層と鉄の層が重なったものであり、ドリフトチェンバーの 1 層は 2 層のセルから構成されている。この 2 層のセルにともにヒットが観測されることが、MRD のヒット定義であり、この条件で、2 つ以上の連なるヒットが存在するとき、これを 2 D トラックとして認識する。さらに X-側、Y-側の層に対応する 2 D トラックがあるとき、これを組み合わせて 3 D トラックを構成する。図 4.23 を見ると、片側には確かに連なるヒット=2D トラックが存在するが、もう片側では、セルの片方にしかヒットのない層が無視されたために 2 D トラックを形成できていない。このため、このようなイベントは 2 D イベントと分類されると考えられる。一方で、こうしたイベントはほとんど SciFi トラックの延長上にヒットがあることが確認できており、SciFi で発生した粒子に対応するものであると考えられる。また、MRD に 2 層進入しているということがわかるために、エネルギーの再構成が可能なはずである。そこで、次の条件を満たすイベントを新たに MRD-2L イベントと定義して分類し、その性質を確認した。

- MRD の最初の 2 層に SciFi トラックと対応するヒットがあり、3 層目にはない
- 上の条件が MRD の X 層、Y 層の両側で満たされる

K2K Fine-Grained Detector (Top View)

Run 4077 Spill 87 TRGID 1
SBEv 0 2003 1 21 23 7 23 0
Nvtx 0

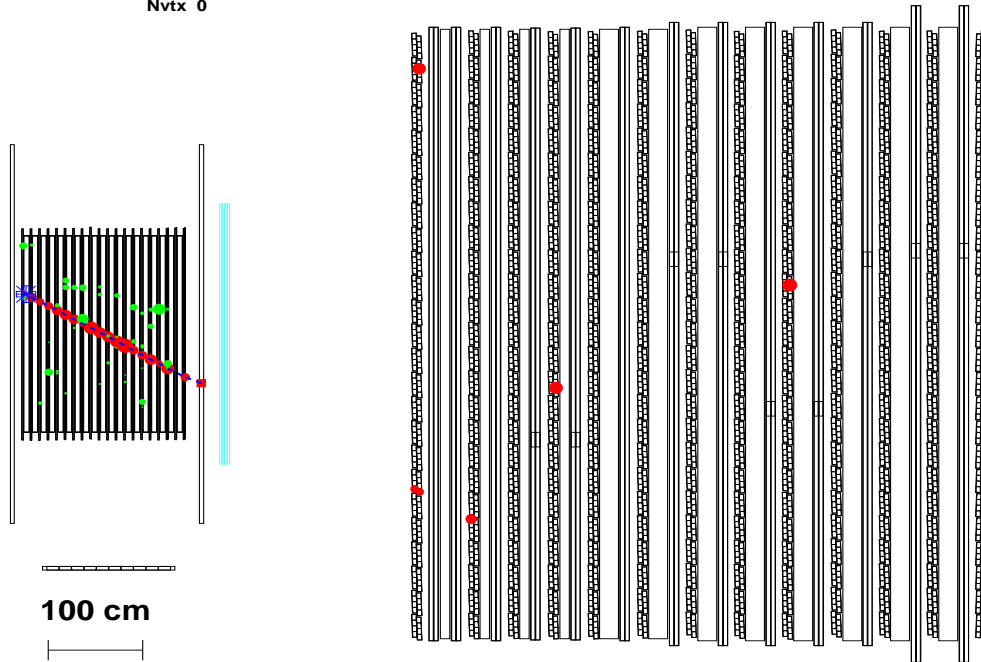


図 4.23: 2L イベント

SciFi のトラックが MRD の 2 層目まで進入して止まっているように見える。X,Y 両方の層にこのようなトラックがあるとき、そのイベントを MRD 2L イベントと定義した。

4.5.1 エネルギー再構成

このような条件で選び出した 2 L イベントに対しても、前節と同様にエネルギー再構成の様子を確認した。このとき、粒子の MRD でのエネルギー損失、 E_{MRD} の計算は SciFi トラックの角度で入射した粒子が MRD の鉄の層を 1 層通過したと考え、これに相当するエネルギー損失を割り当てた。その結果が図 4.24 である。データと MC が一致することが見て取れる。分布の平均値が 0.5 GeV 程度と、ここまで議論してきた MRD 3 D イベントに比べて明らかに低い領域に集中的に分布している。MC のエネルギー再構成の図 (図 4.25、図 4.26) を見ると、真のエネルギーが再構成されたエネルギーに比べて低いイベント集団が目立つが、これらは全てミューオン以外の粒子である。低いエネルギー領域を捉えようとする、このようなミューオン以外の粒子の混入率が増加する。シミュレーションの結果を信用すれば、このような雑音成分の混入率は MRD 2 L イベントに対しては 35 % 程度であり、同じエネルギー領域の 3 D イベントに対する混入率 35 % とほぼ同様であることが確認できている。従って、これらのイベントを新たに解析に加えることによってイベントの純度が低下することはない。

4.5.2 基本分布

これらの 2 L サンプルについても基本的な性質 (トラック数、角度、ミューオン運動量、ニュートリノエネルギー) を確認した。その結果を図 4.27～図 4.30 に示した。これらのイベントサンプルに対

しても、シミュレーションがデータを再現していることがわかる。エネルギーに関する分布が低エネルギー領域に集中していること以外はこれまでに議論してきたイベント集団と同様の性質をもつことが確認できた。

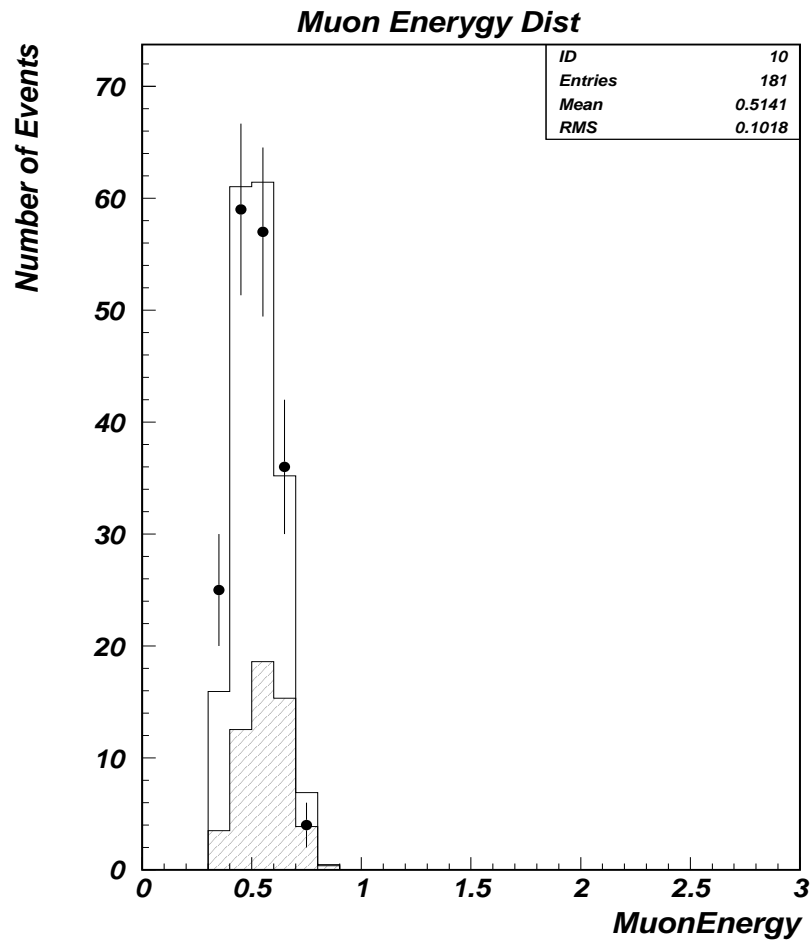


図 4.24: MRD 2 L イベント

エネルギー分布:横軸がミューオンエネルギー (GeV)、縦軸がイベント数である。影をつけたヒストグラムはCCQE反応を意味する。平均値は0.51GeVとなり、3Dイベント(平均1.28GeV)よりも低いエネルギー領域を捕らえている。

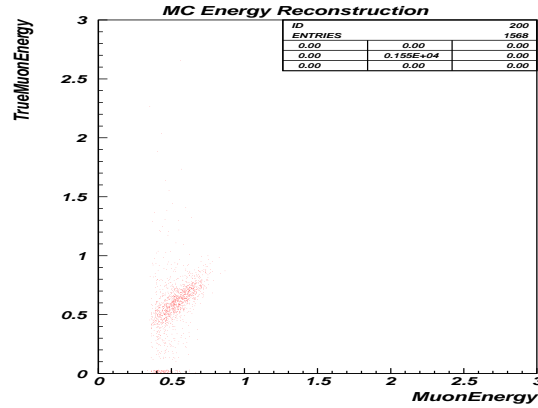


図 4.25: MRD 2 L イベント MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1

横軸に真のミュオンエネルギー、縦軸に再構成されたミュオンエネルギーをとった図。真のエネルギーが0付近に分布する成分はミュオン以外のトラックを1次トラックとして再構成したイベントである。それ以外は正しく再構成できていることがわかる

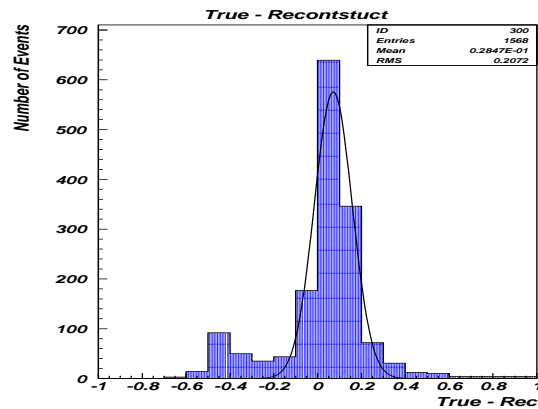


図 4.26: MRD 2 L イベント MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 2

横軸に真のエネルギーから再構成されたエネルギーを引いた値、縦軸にイベント数をとったもの。真のエネルギーが再構成されたもより低くなっているものはすべてミュオン以外の粒子である。

MRD 2L イベント 基本分布

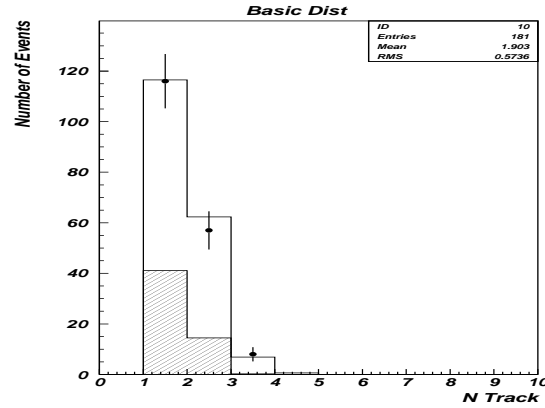


図 4.27: MRD 2L イベントトラック数分布

横軸がトラック数、縦軸がイベント数である。黒い点がデータ、実線がMCを表し、黒のハッチはCCQE反応を表す

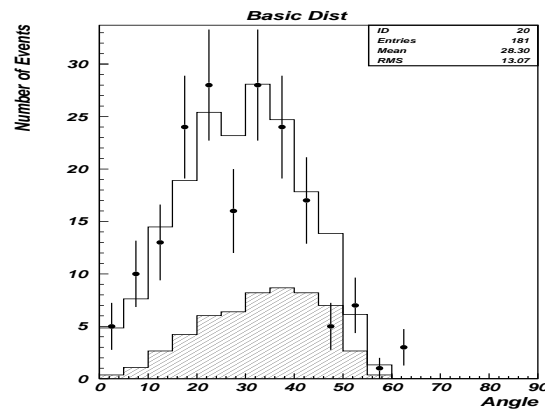


図 4.28: MRD 2L イベント 角度分布

横軸がビーム軸に対するトラック角度、縦軸がイベント数である。黒い点がデータ、実線がMC、黒のハッチはMCのCCQE反応である。

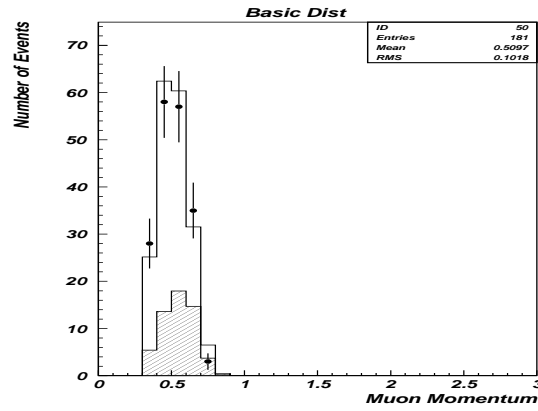


図 4.29: MRD 2L イベント

ミューオン運動量分布:横軸に運動量、縦軸にイベント数をとった図。3D イベントの同じ分布(付録 A)と比べて、運動量の低い範囲に集中的にイベントが分布する。

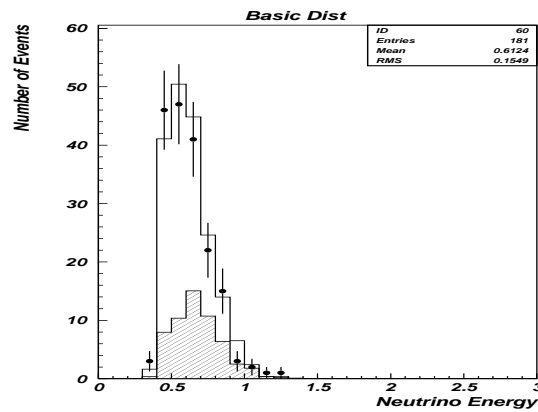


図 4.30: MRD 2L イベントニュートリノエネルギー

横軸がニュートリノエネルギー、縦軸がイベント数である。平均値がおよそ 0.6GeV となり、これまで利用されてきたイベント集団(平均 1.28GeV)に比べて低いエネルギー領域の集団であることがわかる。

4.6 低エネルギーイベントの寄与

ここまで、MRD 3 D イベントの条件見直しと、MRD の 2 層にヒットを持つイベントによって、解析に利用できるイベント、特に低エネルギーのイベントを増やすことを検討した。こうして、新たに加えたイベントの数は、元の 3 D イベントの 15% 程度であり。さらにニュートリノエネルギーが 1 GeV 以下 (0.8 GeV 以下) の領域に限って見れば 25% (35%) の寄与をする。ここでは、これらのイベントをまとめるとともに、これまでに利用してきた MRD 3 D イベントを合わせて、SciFi におけるニュートリノ反応事象の基本的な分布がどう変化するかを確認した。ここまでに新しく定義したイベントとこれまでに利用してきた MRD 3 D イベントの個数、対応するニュートリノエネルギーについて、以下にまとめた。また、これらのイベント全てを使つての SciFi 検出器の基本トラック分布を

表 4.2: イベントまとめ K2K-IIa

種類	MRD 3D	MRD 3 D(8~20)	MRD 2 L
イベント数	3900	541	181
イベント数 ($E_\nu \leq 1\text{GeV}$)	1513	199	181
イベント数 ($E_\nu \leq 0.8\text{GeV}$)	908	129	181
$\langle P_\mu(\text{GeV}/C) \rangle$	1.18	1.25	0.51
$\langle E_\nu(\text{GeV}) \rangle$	1.28	1.44	0.6

見た結果が図 : 4.31~4.34 である。新しいイベントを加えても基本的な分布に関してデータと MC はよく合っている。またニュートリノエネルギーに関してはこれまで利用されてきた 3D イベント (付録 A) に比べて、0.5 GeV 程度にまで分布範囲が広がっている。

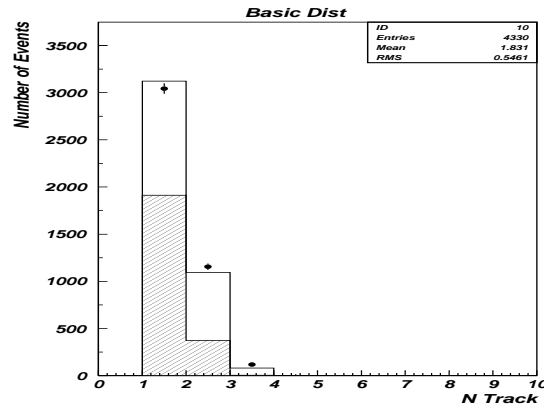


図 4.31: 全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いたトラック数分布

横軸がビーム軸に対するトラック数分布、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMC(黒いハッチはCCQE 反応)を表す。

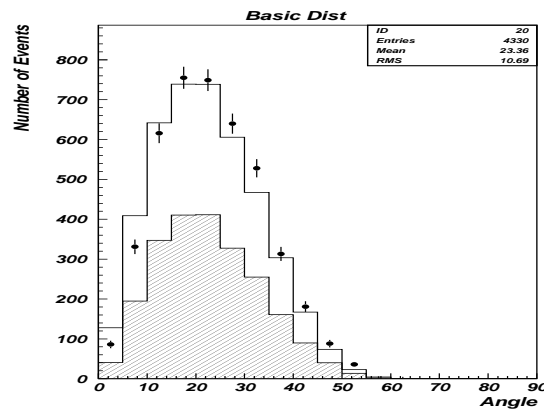


図 4.32: 全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いた角度分布

横軸がビーム軸に対するトラック角度、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMC(黒いハッチはCCQE 反応)を表す。

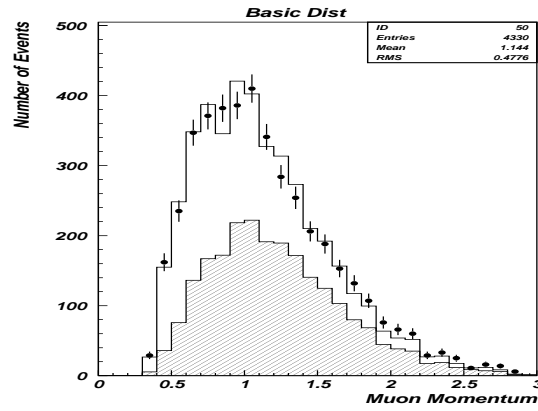


図 4.33: 全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いたミューオン運動量分布

横軸がミューオン運動量、縦軸がイベント数。黒い点がデータ実線が MC(黒いハッチは CCQE 反応) を表す。

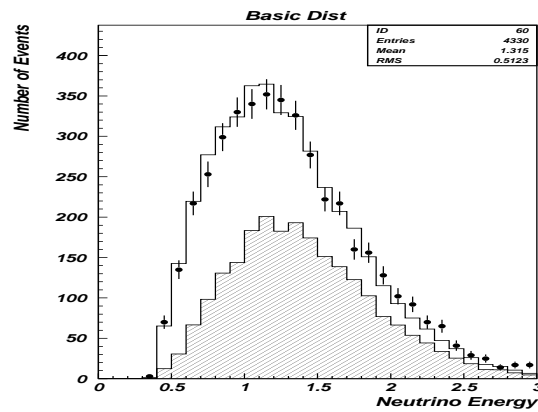


図 4.34: 全てのイベント (MRD 3D,newMRD 3D,MRD 2L) を用いたニュートリノエネルギー分布

横軸がニュートリノエネルギー、縦軸がイベント数。黒い点がデータ実線が MC(黒いハッチは CCQE 反応) を表す。もとの MRD 3D イベント (図 4.13) にはなかった 0.5GeV 以下のエネルギー領域にも分布が広がっている事がわかる。

表 4.3: イベントまとめ K2K-I

種類	MRD 3D	new MRD 3 D(χ^2 8~20)	MRD 2 L
イベント数	5631	345	276
イベント数 ($E_\nu \leq 1\text{GeV}$)	843	80	224
イベント数 ($E_\nu \leq 0.8\text{GeV}$)	96	21	50
$\langle P_\mu(\text{GeV}/C) \rangle$	1.34	1.29	0.90
$\langle E_\nu(\text{GeV}) \rangle$	1.55	1.50	1.07

4.7 K2K-I データセットでのイベント再定義

ここまでの結果はすべて、K2K-IIa のデータセットに対するものであった。一方でこうした方法は K2K-IIa でのみ有効なものではなく、K2K-I のデータセットに対しても同じことが出来るはずである。K2K-I のデータの場合は LG の物質量の分、イベントのエネルギー領域が IIa のものよりも高い方向へシフトするものと考えられる。実際に K2K-I データセットに対して同様の手法を適用した結果を表 6.1 にまとめた。K2K-I においては χ^2 条件の見直しによって新たに MRD 3 D に分類されるイベントが元の MRD 3 D イベントのおよそ 6% 程度となる。一方 MRD 2 L イベントは MRD 3 D イベントのおよそ 5% 程度となり、割合としては K2K-IIa のときと同様である。さらに、低いエネルギー領域に着目すると、ニュートリノエネルギーが $1\text{GeV}(0.8\text{GeV})$ 以下の領域では新しく増やしたイベントが MRD 3D イベントの 35%(60%) を占める。K2K-IIa イベントのときと同様に、 χ^2 条件を緩めることで利用可能になるイベントについてのエネルギー再構成の様子を図 4.35~図 4.37 に、これらのイベントの基本トラック分布を図 4.41~図 4.44 に示した。また、K2K-I データの 2 L イベントに対するエネルギー再構成の様子を図 4.38~図 4.40 に、これらのイベントに対する基本トラック分布を図 4.45~図 4.48 にまとめた。表示の形式は K2K-IIa データのときと同様であり、横軸に各パラメータ、縦軸にイベント数をとっている。またハッチで示したものは CCQE 反応を表わす。予想された通り、新しく定義されたイベントのエネルギー領域は K2K-IIa データに比べて $300\sim 400\text{MeV}$ 程度高くなっている。これはちょうど LG でのエネルギー損失に対応する。

最終的に K2K-I データに対して 10% 程度、K2K-IIa データに対しては 15% 程度利用可能なイベントが増加する。さらに 1GeV 以下の低エネルギー領域のみで考えるとこれらのイベントが K2K-I では 35%、K2K-IIa では 25% を占めることから、より低エネルギーのイベントを増やすことができたといえる。次の章ではこれらのイベントを加えた SciFi ニュートリノイベントに対する粒子識別の試みについて述べる。

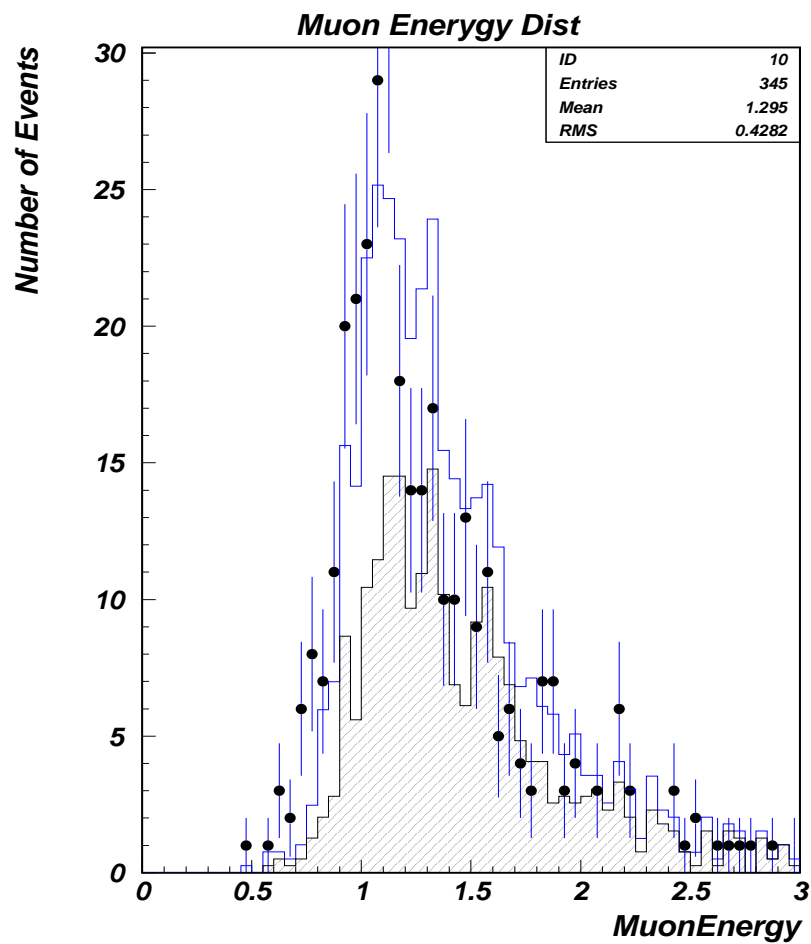


図 4.35: K2K-I 新しいMRD 3D イベント:エネルギー分布

横軸がエネルギー、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMCを表している。

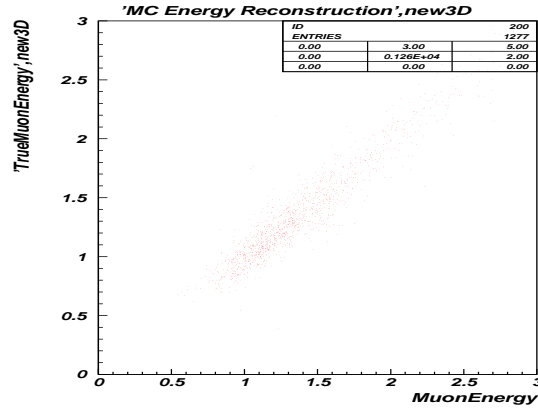


図 4.36: K2k-I 新しい MRD 3D イベント:MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1

横軸が再構成されたエネルギー、縦軸が真のエネルギー。黒い点がデータ、実線が MC を表している。

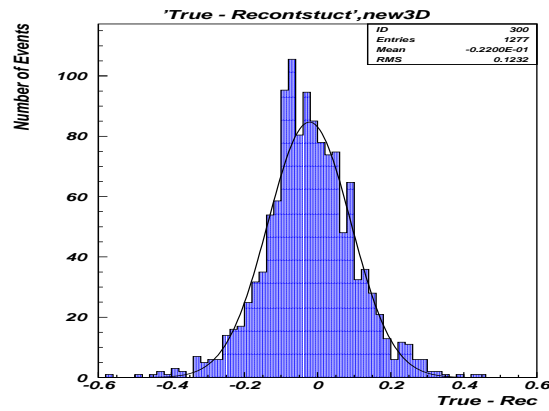


図 4.37: k2k-I 新しい MRD 3D イベント:MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 2

横軸が(真のエネルギー)-(再構成されたエネルギー)、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線が MC を表している。

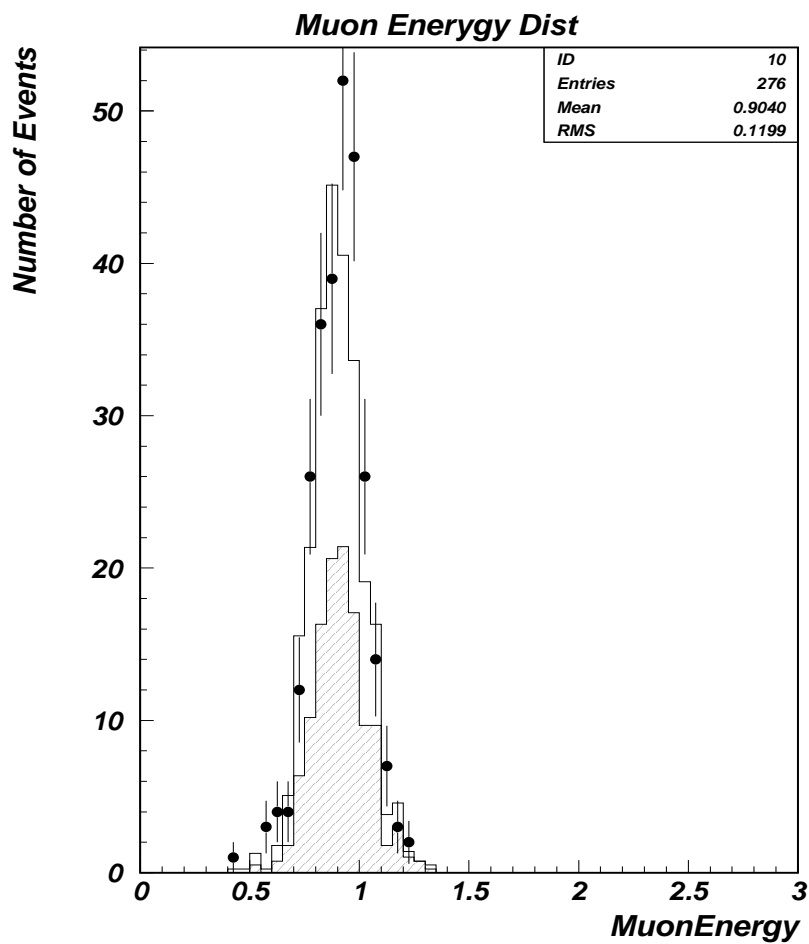


図 4.38: K2K-I MRD 2L イベント:エネルギー分布

横軸がエネルギー、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMCを表している。平均値が0.9GeVとなり、LGの物質質量の分K2K-IIaデータよりも高いエネルギー領域に分布する。

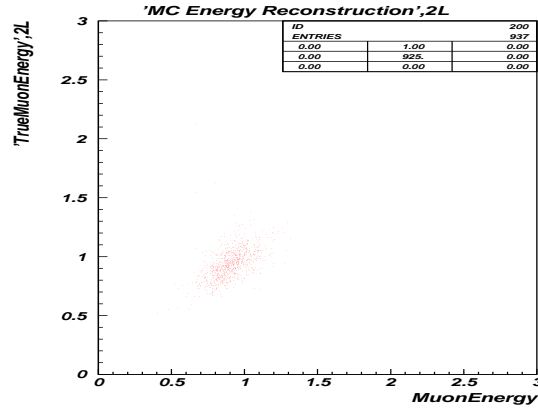


図 4.39: K2k-I MRD 2L イベント:MC による再構成されたミュオンエネルギーと真のミュオンエネルギーの関係 1

横軸が真のエネルギー、縦軸が再構成されたエネルギー。黒い点がデータ、実線が MC を表している。

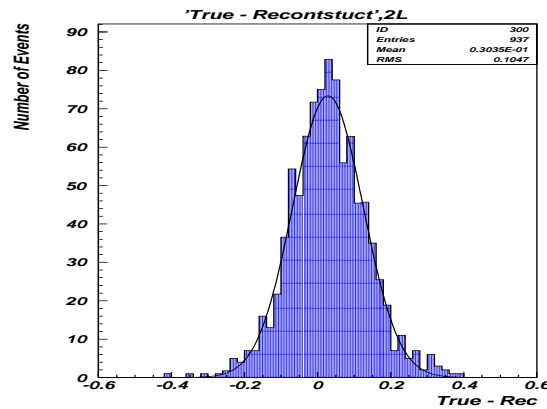


図 4.40: k2k-I MRD 2 L イベント:エネルギー再構成 2

横軸が(真のエネルギー)-(再構成されたエネルギー)、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線が MC を表している。K2K-IIa の同じデータに比べて高いエネルギー領域を見ているため、その分ミュオンの識別は良く出来ていることがわかる。

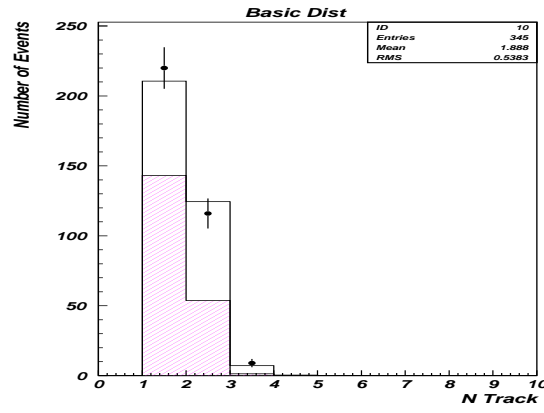


図 4.41: K2K-I 新しいMRD 3D イベントトラック数分布

横軸がトラック数、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMCを表している。

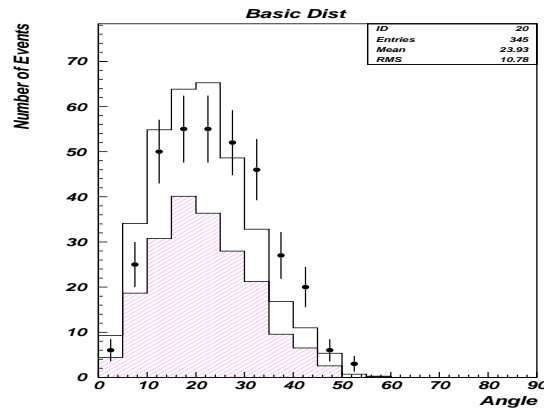


図 4.42: K2K-I 新しいMRD 3D イベント ビーム軸に対するトラック角度

横軸がトラック角度、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMCを表している。

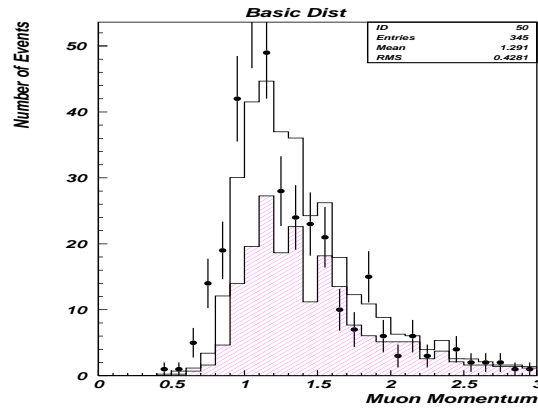


図 4.43: k2k-1 新しい MRD 3D イベント ミューオン運動量分布

横軸がミューオン運動量、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線が MC を表している。

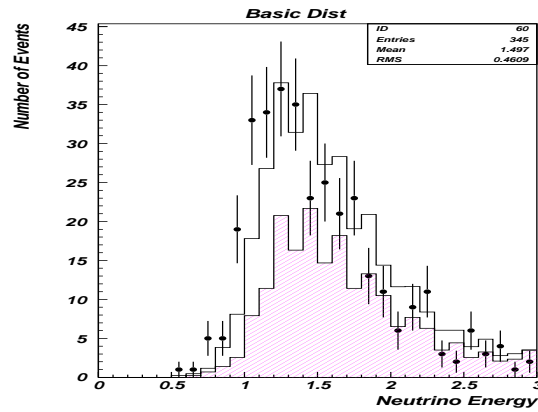


図 4.44: k2k-1 新しい MRD 3D イベント ニュートリノエネルギー分布

横軸がニュートリノエネルギー、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線が MC を表している。

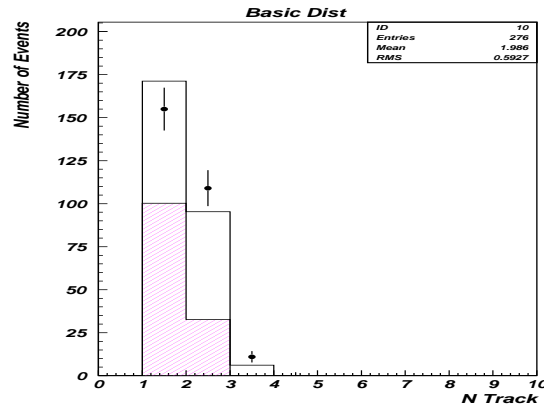


図 4.45: k2k-1 MRD 2L イベントトラック数分布

横軸がトラック数、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線が MC を表している。

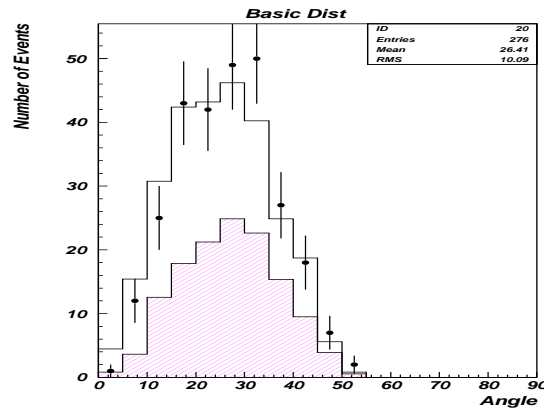


図 4.46: k2k-1 2L イベント:ビーム軸に対するトラック角度

横軸が角度、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線が MC を表している。

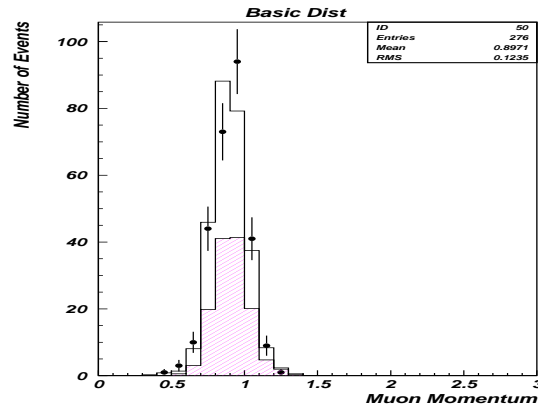


図 4.47: k2k-1 2L イベント ミューオン運動量

横軸がミューオン運動量、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMCを表している。

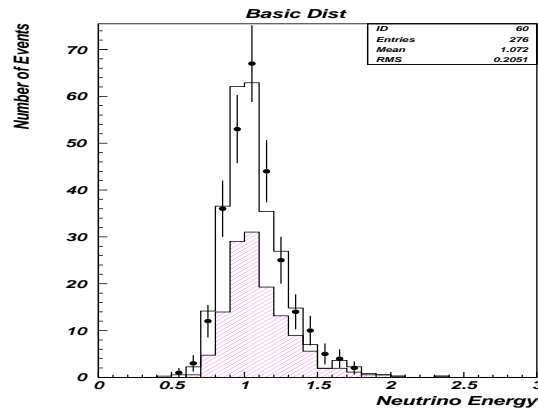


図 4.48: k2k-1 2L イベント ニュートリノエネルギー分布

横軸がニュートリノエネルギー、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、実線がMCを表している。K2K-IIa のときと同様 3D イベントのエネルギー (1.55GeV) に比べて低いエネルギー領域にイベントが集中する。平均値は 1.07GeV である。

第5章 SciFi検出器における粒子識別

5.1 粒子識別の必要性

ニュートリノは弱い相互作用の媒介粒子 W^\pm や Z^0 を交換することによって物質と反応する。 W^\pm を介する反応を荷電カレント反応 (CC 反応)、 Z^0 を介する反応を中性カレント反応 (NC 反応) と呼ぶ。K2K 実験では、前置検出器で ν_μ のエネルギースペクトルを測定し、その結果を後置検出器であるスーパーカミオカンデにて観測されたスペクトルと比較することによって $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動の検証を行う。前置検出器における ν_μ スペクトルの測定には荷電準弾性散乱 (CCQE) 反応 (式 5.1) が用いられる。

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad (5.1)$$

この反応は2体反応なので、ミューオンのエネルギーと散乱角を測定すると、標的である核子の運動量を見れば

$$E_{\nu_\mu} = \frac{m_N E_\mu - \frac{m_\mu^2}{2}}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \quad (5.2)$$

という式によってニュートリノのエネルギーを求められる。ここで $E_{\nu_\mu}, E_\mu, \theta_\mu, m_N$ はそれぞれニュートリノのエネルギー、ミューオンのエネルギー、ミューオンの散乱角、核子の質量である。一方で、1GeV 付近のエネルギーを持つニュートリノと核子 (原子核) の反応には以下のようなモードもある。

$$\nu_l + N \rightarrow l + N' + m \quad (CC \text{ single - meson production}) \quad (5.3)$$

$$\nu_l + N \rightarrow l + N' + n\pi \quad (CC \text{ multi - pion production}) \quad (5.4)$$

$$\nu_l + {}^{16}\text{O} \rightarrow l + {}^{16}\text{O} + \pi \quad (CC \text{ coherent pion production}) \quad (5.5)$$

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + N \quad (NC \text{ elastic scattering}) \quad (5.6)$$

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + N' + m \quad (NC \text{ single - meson production}) \quad (5.7)$$

$$\nu_l + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu_l + {}^{16}\text{O} + \pi \quad (NC \text{ coherent pion production}) \quad (5.8)$$

$$(5.9)$$

ここで、 l は荷電レプトン、 N, N' は核子を意味する。また、 ${}^{16}\text{O}$ は酸素原子核である。これらの反応は CCQE 反応を選ぶ際の雑音成分になるものであり、これらの反応と QE 反応を区別することが必要である。第3章で述べたように、SciFi 検出器では、後段の MRD との間でトラックの整合をとることによりミューオンを識別している。そのため、レプトンが出ない NC 反応は除かれると考えてよい。残る CC 反応においては、ミューオンと主にパイオンが SciFi に2本のトラックを残し、これがミューオンと陽子の2トラックイベントである CCQE と区別の付きにくいバックグラウンドになる。現在の解析では、ミューオンが識別できた2トラックイベントに対して、QE 反応を仮定した場合の2次トラックの放出角度を計算し、その角度と実際に観測した2次トラック角度の差をとって、

差がある範囲内にあるイベントをQEサンプルとして選び出している(図5.1)。しかし、こうして選んだQEサンプルの純度は60%程度であり、40%はCCQE以外のイベントが混入していると考えられている。こうした雑音成分を除いてQE選別の純度を向上させるためには、SciFiで発生した2次トラックが陽子であるかパイオン(など陽子以外の粒子)であるかを識別することが求められる。

SciFi 2 track $\cos(\Delta\Theta_p)$ distribution

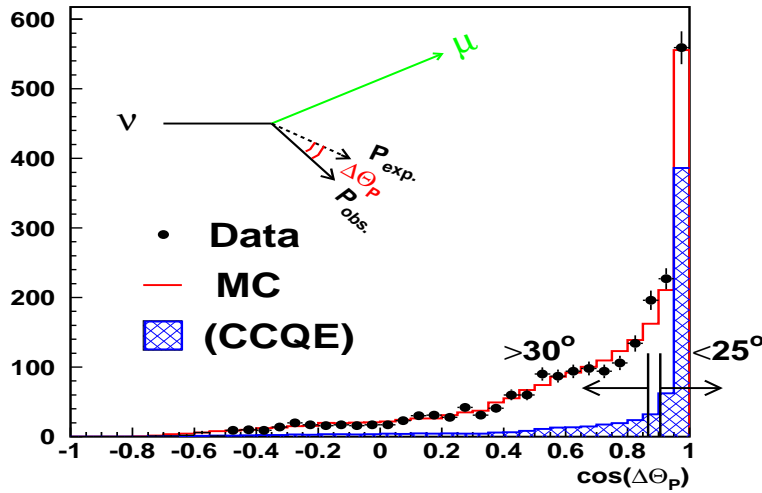


図 5.1: トラック角度による QE イベントの選択

図に示すように CCQE 反応を仮定したときの 2 次トラック放出角度と実際に観測される角度の差 $\Delta\theta$ を定義し、この量を用いて QE 反応を選ぶ。図は横軸に $\cos \Delta\theta$ 縦軸にイベント数をとったものである。黒い点がデータ色つきの実線が MC を意味しており、赤色で示したものが CCQE 反応である。

5.2 ヒットおよびトラック認識の改良

本研究では粒子識別を行うにあたって粒子の残したヒットのエネルギー損失 (dE/dX) に対応する N_{pix} という量を用いる。粒子識別を行うための SciFi におけるヒット認識およびトラック認識が既に研究されている [34]。その詳細については [34] を参照されたい。ここではこの研究によって提案されたヒット検出およびトラック検出の設定を用いることとした。変更の内容を以下に簡単にまとめた。

1. ヒット検出 (ファイバークラスタリング) アルゴリズムの変更
2. ノイズヒットを除くための N_{pix} 閾値の変更
3. X 層、Y 層のフラグメント一致条件の変更

これらの変更は粒子識別を行う 2 次トラックの検出効率の向上、および粒子識別に利用するヒットピクセルの数 (N_{pix}) をより正しく見積もるために行われた。変更後、1 次トラックに対する検出効率は 99%(変更前 86%)、3 ヒット以上の 2 次トラックに対する検出効率は 84%(変更前 46%) と大幅に改善される。一方でヒット検出効率については 95%(変更前 96%) とほとんど変化せず、高い検出効率を保つ。また、これらの変更に伴う SciFi トラック基本分布の変化についても後の節で確認する。

5.2.1 使用したイベントのまとめ

既に述べてきた通り、本研究には K2K-I、K2K-IIa のデータを用いている。その中で、解析に使用できるのは MRD との整合が取れているイベントのみである。また、粒子識別には 2トラックイベントで 2 次トラックが 3 ヒット以上を残しているイベントのみを使う。今回の解析には、これまで解析に利用されてきた K2K-I の MRD 3D、1L、LG イベント、K2K-IIa の MRD 3D イベントに第 4 章で議論した新しい条件での 3D イベントおよび 2L イベントを加えたサンプルを利用した。イベント数とイベント選択のまとめを以下に示した。

表 5.1: Event Summary

Data-Type	K2K-I	K2K-I(MC)	K2K-IIa	K2K-IIa(MC)
Total	17161	34642	7029	65950
MRD-Match	7378	15242	3889	36687
1Track	4689	9299	2451	22049
2Track	2540	5587	1335	13859
j_2 Track	149	358	83	959
2Track, Contained(≥ 3 Hit)	839	1679	418	4290
2Track, nonContaine(≥ 3 Hit)	860	1707	423	4122

5.2.2 改良後のトラック基本分布

設定変更後の SciFi におけるトラック検出の基本的な分布を確認した。K2K-I データに対する結果が図 5.2～図 5.5、K2K-IIa データに対する結果が図 5.8, 図 5.11 である。設定変更に伴う傾向は特に見られず、変更前（第 3 章）と同様にデータと MC がよく一致している。これらの図はすべて黒い点がデータ実線のボックスが MC を表わしており、影をつけた部分は CCQE 反応である。

5.2.3 2次トラック検出能

基本的な飛跡検出の分布については、データと MC が一致していることが確認できた。これらは SciFi 検出器の 1 次トラックに関する分布であったが粒子識別は 2 次トラックに対して行うので 2 次トラックを正しくトラックングできることが特に重要である。そこで、2 次トラックのトラック検出能を確認した。K2K-I データに対する結果が図 5.6、図 5.7、K2K-IIa データに対する結果が図 5.12、図 5.13 である。この結果から、2 次トラックに対してもデータと MC がよく一致しており、現象をよく理解できていることがわかる。

K2K-I 設定変更後の1次トラック分布

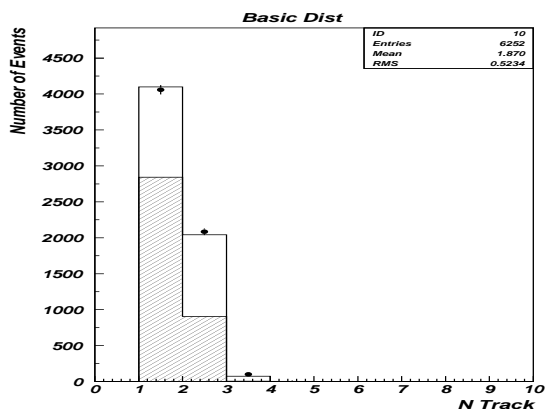


図 5.2: K2K-I:トラック数分布

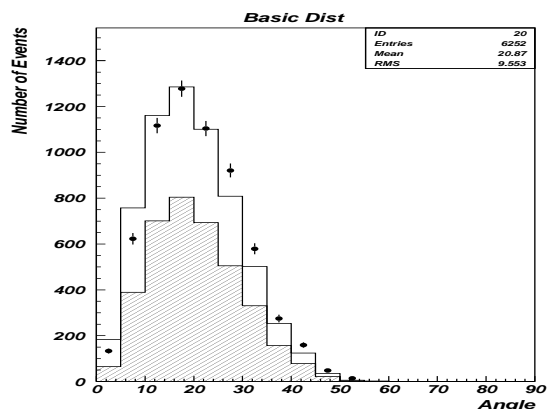


図 5.3: K2K-I:角度分布

横軸にトラック数、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

横軸にトラック角度、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

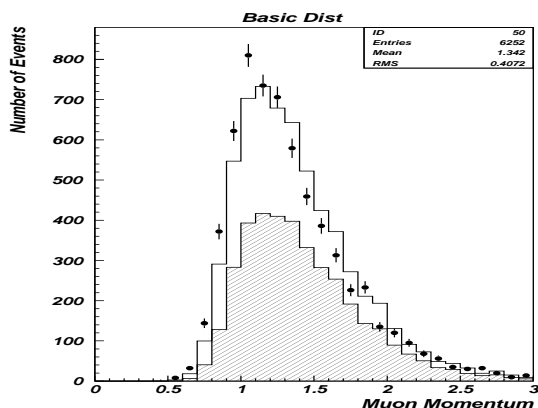


図 5.4: K2K-I:ミューオン運動量分布

横軸にミューオン運動量、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

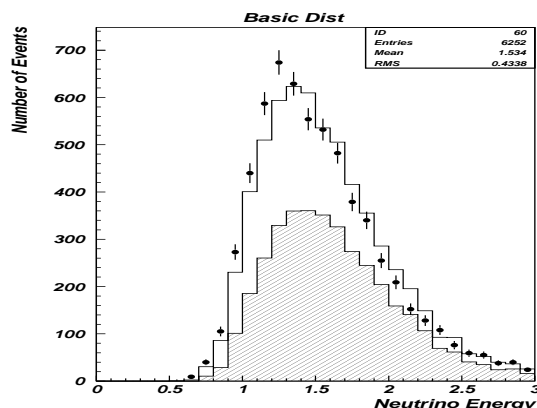


図 5.5: K2K-I:ニュートリノエネルギー

横軸にニュートリノエネルギー、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

K2K-I 2次トラック検出能

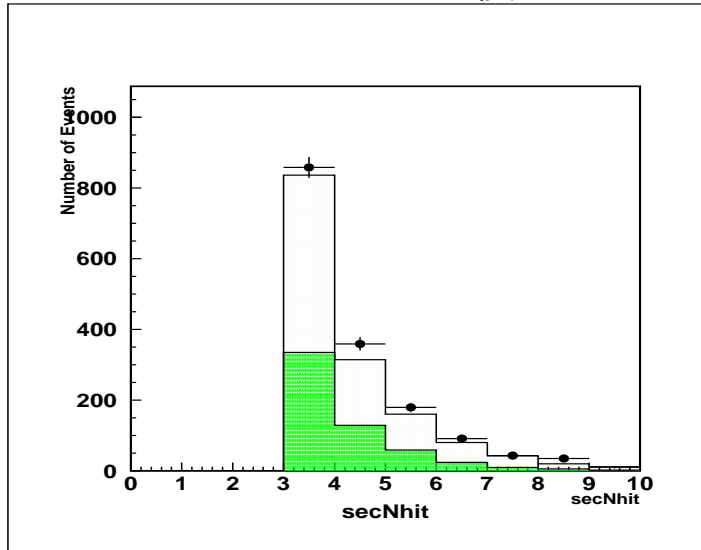


図 5.6: K2K-I:2次トラックヒット数分布

横軸に2次トラックのヒット数、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

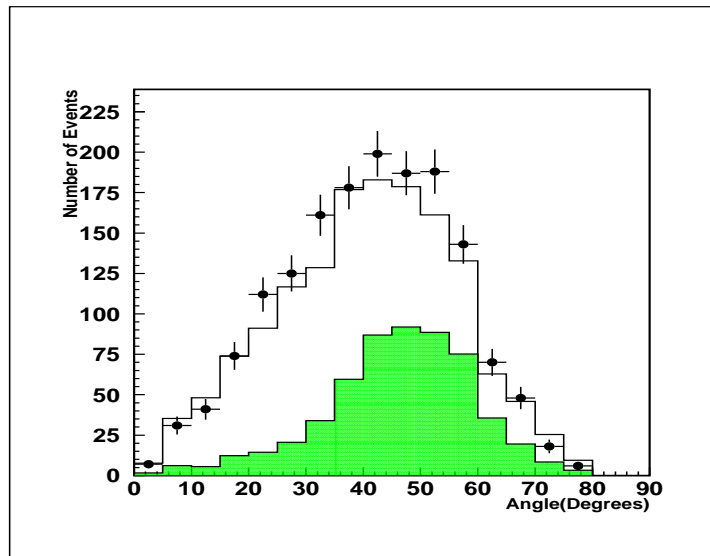


図 5.7: K2K-I:2次トラック角度分布

横軸に2次トラックの角度、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

K2K-IIa 設定変更後の1次トラック基本分布

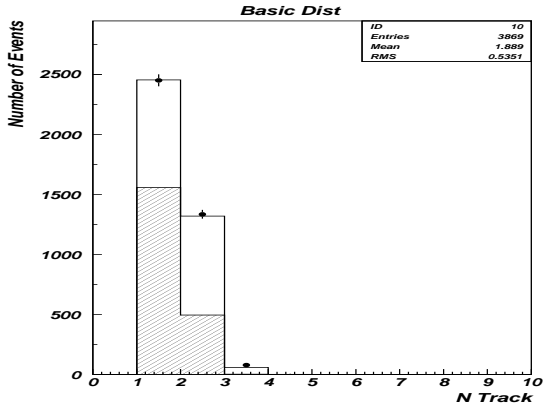


図 5.8: K2K-IIa トラック数分布

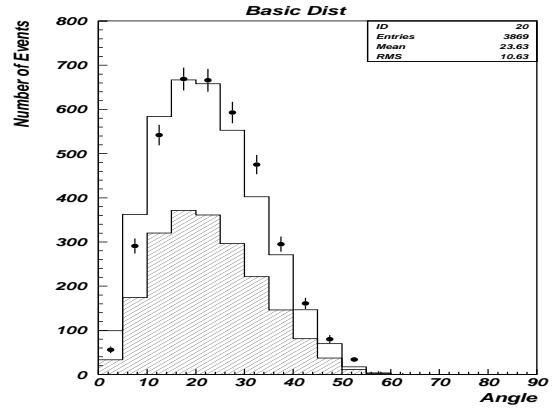


図 5.9: K2K-IIa 角度分布

横軸にトラック数、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

横軸にトラック角度、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

運動量：エネルギー分布

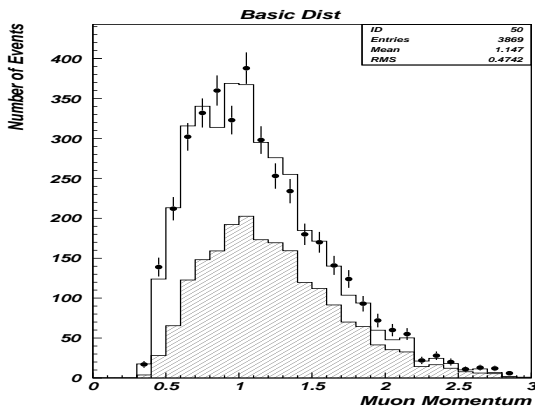


図 5.10: K2K-IIa: ミューオン運動量

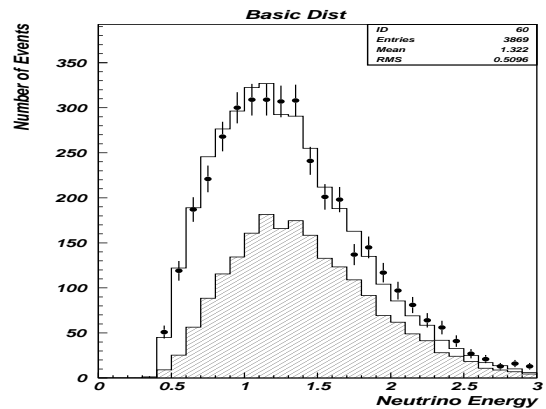


図 5.11: K2K-IIa: ニュートリノエネルギー

横軸ミューオン運動量、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

横軸にニュートリノエネルギー、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

K2K-IIa 2次トラック検出能

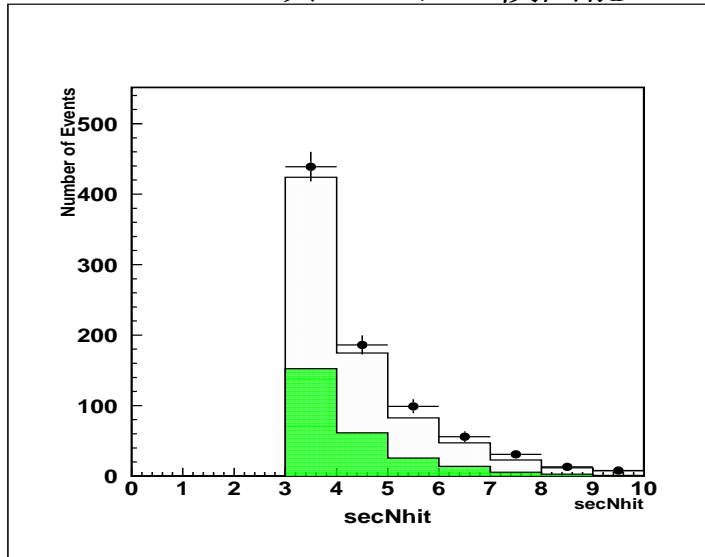


図 5.12: K2K-IIa 2次トラックヒット数分布

横軸に2次トラックヒット数、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

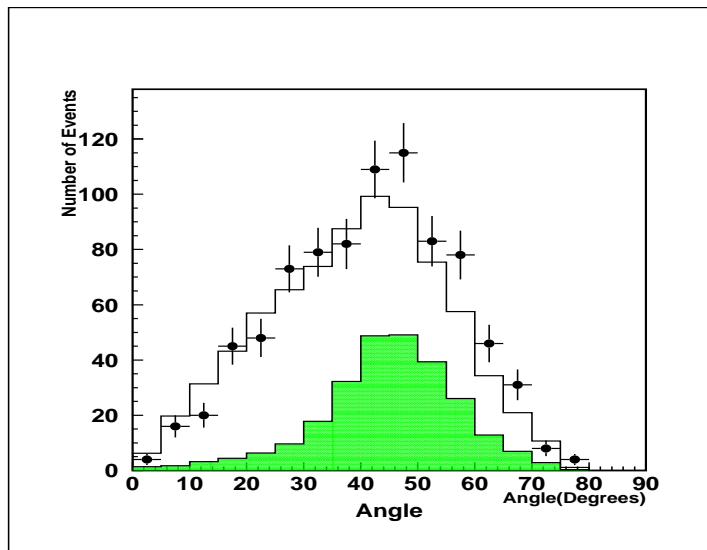


図 5.13: K2K-IIa:トラック角度分布

横軸に2次トラック角度、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、実線がMCを意味しハッチはMCのCCQE反応である。

5.3 粒子識別の方法

本研究ではトラックの残したピクセルの数 (N_{pix}) を利用して粒子識別法を行う。この節では粒子識別の具体的な方法について説明する。

5.3.1 エネルギー損失と N_{pix}

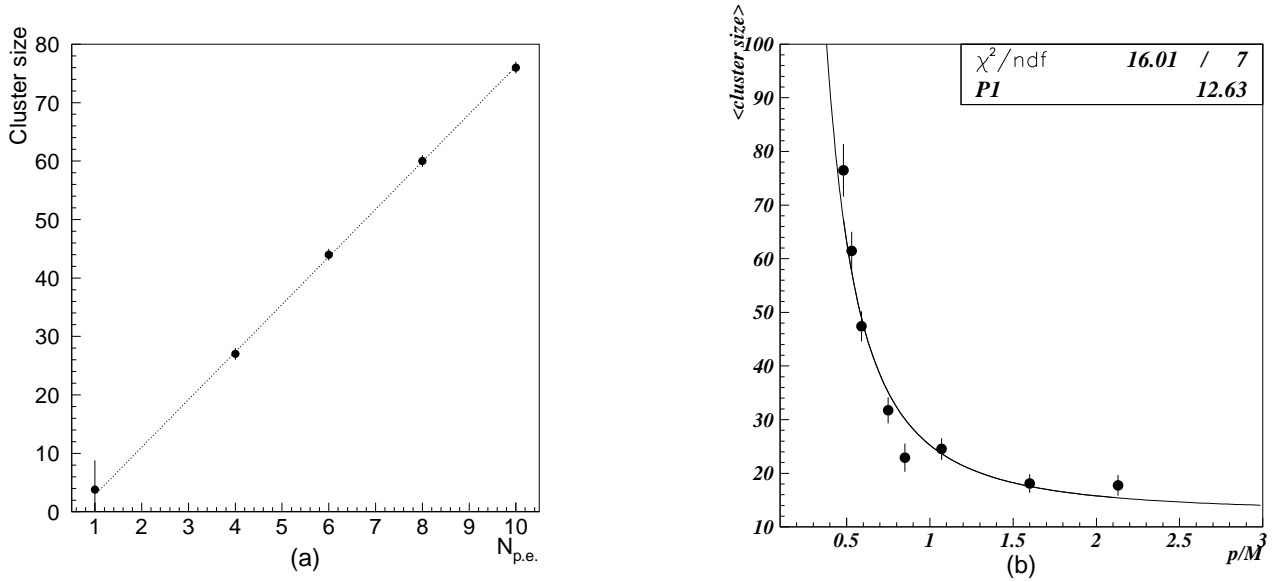


図 5.14: N_{pix} とエネルギー損失

左の図: LED キャリブレーションによる N_{pix} と入射光量の対応。横軸が光電子数、縦軸が N_{pix} になっている。右の図: 陽子ビームを用いたビームテストによる N_{pix} と運動量/質量の関係。横軸が運動量を質量で割った値 (p/M) 縦軸が N_{pix} を表わす。曲線は $y = \alpha\beta^{\frac{5}{3}} = \alpha(1 + (p/M)^2)^{\frac{5}{6}}$ の形の関数で χ^2 フィットした結果である。 N_{pix} が粒子の速度に対して dE/dX と同様の振る舞いを示すことがわかる。

第3章で述べたように、SciFi 検出器では、IIT-CCD における輝度を持ったピクセルの集まりをヒットと定義し、集合の大きさ (ピクセルの数) を N_{pix} と呼ぶ。これまでの研究結果で、この N_{pix} が粒子の落としたエネルギーや IIT への入射光量とよく対応することが確認されている。図 5.14 の右の図は LED を用いたキャリブレーションの結果であり、横軸に入射光子数、縦軸に N_{pix} をとったものである。また、図 5.14 の左の図はビームテストの結果であり、横軸にビームの運動量を粒子の質量で割った値、縦軸に N_{pix} をとったものである。ビームテストは陽子ビームを使って $0.2\text{GeV}/c \sim 2\text{GeV}/c$ の領域で行われた。これらの関係から N_{pix} が粒子の dE/dX や入射光量と対応することが確認できており、本研究では N_{pix} を用いて粒子の dE/dX を評価し、粒子識別に利用する方法をとる。

5.3.2 2次トラックの運動量（速度）分布

既に述べた通り、粒子識別の主な目的は陽子とパイオンを区別することである。そこで、本研究ではシンチレーティングファイバー内での荷電粒子による発光量の違いに着目する。発光量は粒子の dE/dX に対応し、物質中でのエネルギー損失を説明する Bethe-Bloch の式に従う。Bethe-Bloch の式は以下のように表される。

$$\frac{dE}{d(\rho x)} = D \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta}\right)^2 (\ln 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 I - \beta^2 - \frac{\delta}{2}) \quad (5.10)$$

ここで、 β 、 z は入射粒子の速度、電荷、 Z 、 ρ 、 A は物質の原子番号、密度、質量数、 m_e は電子の質量、 I は平均電離エネルギー、 δ は密度効果である。また、 $\beta\gamma \leq 1$ の運動量領域では、以下のように表される。

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2}$$

子とパイオンは運動量が同じであっても質量の違いから速度が異なる、その速度領域が十分に低ければ dE/dX に違いが生ずるものと考えられる。図5.15はMCデータを用いて、2次トラックが陽子の場合とパイオンの場合の運動量と運動量/粒子の質量の分布を調べたものである。図5.15から陽子トラックとパイオントラックでは粒子速度の分布領域が異なっており、粒子の通過により発生する光量の違いとして観測できる可能性がある。こうした光量の違いは図5.14からもわかる通り $Npix$ の違いとして観測されると考えられる。そのことを確認したものが図5.16である。この図は2次トラックが陽子の場合とパイオンの場合での SciFi に残した平均 $Npix$ 値の違いをみたものである。横軸が $Npix$ 値、縦軸がイベント数になっており、赤色でしめたものが陽子トラックの平均 $Npix$ 、青色で示したものがパイオントラックの平均 $Npix$ になっている。陽子トラックの残す $Npix$ は130程度にピークを持つ、これに対してパイオントラックの残す平均 $Npix$ は100以下にピークがあり分布範囲に違いが見られる。

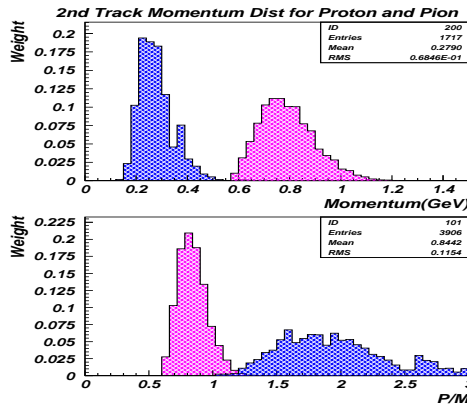


図 5.15: 2次トラック 運動量、速度分布

上段: 2次トラック運動量分布、下段: 2次トラック P/M 分布: 赤色で示したものが陽子トラック、青色で示したものがパイオントラックである。運動量で見ると陽子のほうが大きい、これを粒子の質量で割った値 (P/M) に直すと関係が逆転する。このことから、陽子のほうが遅い速度を持っていることがわかる。この差を光量の違いとして観測する。

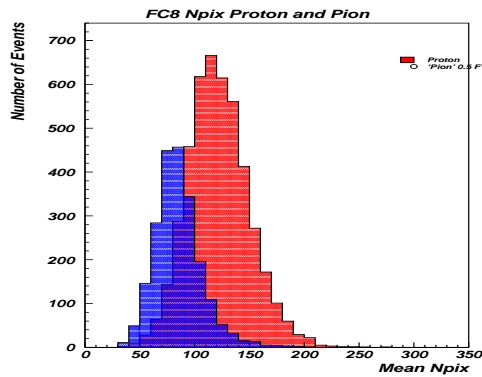


図 5.16: N_{pix} 分布の比較

陽子とパイオンの N_{pix} 分布: 赤色が陽子トラックの残した平均 N_{pix} 分布、青色がパイオントラックの残した平均 N_{pix} 分布になっている。粒子の速度の違いが N_{pix} 値の違いとして現れる。

5.3.3 1次トラック 2次トラックに対する N_{pix} 分布と N_{pix} 補正

粒子識別においては、MC の N_{pix} 値を元にして、データの N_{pix} 値を評価しトラックの陽子らしさ、パイオンらしさを評価する。そこで、この章では N_{pix} 値に関するデータと MC の分布を確認する。K2K-I データ、K2K-IIa データそれぞれの1次トラック (MRD-3D)、2次トラック (Contained) の最後の4層の N_{pix} 分布を示したものが図 5.17～図 5.20 である。誤差つきの黒い点がデータ、影のついたヒストグラムが MC を表し、Layer 4 が最下流のヒットを意味している。1次トラックは MRD-3D を条件に選んできたものであり、SciFi においては十分に速度な速度を持った MIP 粒子であったと考えてよい。

これらの図からわかるように、MIP (1次トラック) に対しては N_{pix} のデータと MC がほぼ一致するが、より N_{pix} 値の大きい (入射光量の大きい) サンプルに対しては一致せず、データのほうがより大きい N_{pix} 値を示す傾向が見られる。また、データのほうが分布の広がり大きいこともわかる。こうしたデータと MC の間のずれは粒子の止まり際にいくほど大きくなる傾向が見られる。これは IIT への入射光量が大きくなるほど MC がデータを再現できなくなることを意味している。こうした問題を根本的に解決するためには MC の再チューニングが必要であるが、本研究では簡単な補正として N_{pix} 値についてのデータと MC の系統的な差異を利用する方法を検討した。まず、サンプルとして1次トラック (MRD-3D) 最後の4層の N_{pix} 分布、および角度情報を用いて選んだ CCQE サンプルの2次トラック最後の4層の N_{pix} 値 (Contained イベント、nonContained イベント) を用いることとした。2次トラックの QE サンプルを選んだ理由は、大きい N_{pix} 値をとるサンプルの情報 がほしかったことと、 N_{pix} が低い領域に見られる雑音成分の影響をできるだけ除きたかったためである。これらのサンプルに対して、横軸に MC の N_{pix} 平均値、縦軸にデータ、MC の N_{pix} 平均値の比 ($= \frac{\text{平均 } N_{pix} \text{ DATA}}{\text{平均 } N_{pix} \text{ MC}}$) をプロットしたものが図 5.21、図 5.22 である。 N_{pix} 値が 90～100 程度に分布している点は1次トラックに対するデータ点であり、それより大きい点は2次トラックに対応する。この図から N_{pix} が大きくなるに従ってデータ、MC の差異が広がる傾向が見てとれる。そこで、図の縦軸の値 (データ、MC の N_{pix} 平均値の比) を横軸の値 (MC の N_{pix} 値) に対応する補正係数であると考えて、これらのサンプルを1次関数でフィットし、その式を用いて次のように MC の N_{pix} 値を補正することを検討した。

- N_{pix} 値が MIP の平均 N_{pix} 以下の場合には一定の補正係数 (MIP (1次トラック) に対する補正係数の平均値) をかける
- N_{pix} が MIP 以上 500 以下の領域では上記の方法で求めた直線の式を用いて補正係数を決め、これを MC の N_{pix} にかける
- N_{pix} 500 以上は一定の補正係数 ($N_{pix}500$ の補正係数) をかける

このような補正をかけた後、K2K-I、K2k-IIa データに対する1次トラック、2次トラックに対する N_{pix} 分布は図 5.23～図 5.26 のようになる。このような補正を用いることで、MIP 程度の光量 (N_{pix} が 100 以下) から、陽子トラックなどのつくるより光量の大きいヒット (N_{pix} が 200 以上) まで、データと MC が一致させることが出来る。以降の結果は全てこのような N_{pix} の補正を行っている。

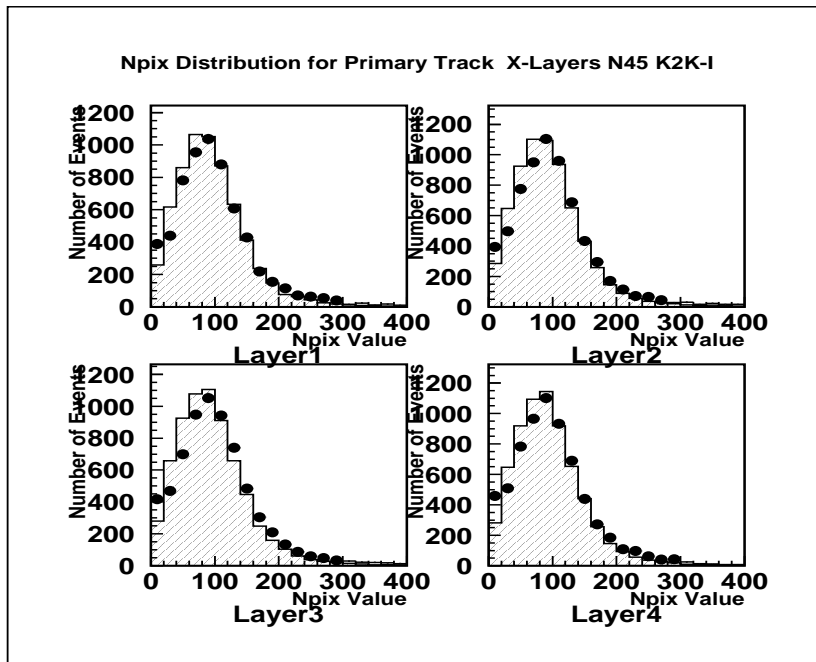


図 5.17: 1次トラックの $Npix$ 分布 (補正前)

補正をかけない状態でのK2K-I 1次トラック最後の4層の $Npix$ 分布。横軸に $Npix$ 値、縦軸にイベント数を取り、黒い点がデータ、影のついたヒストグラムがMCを表す。Layer4が最後のヒットに対応する。

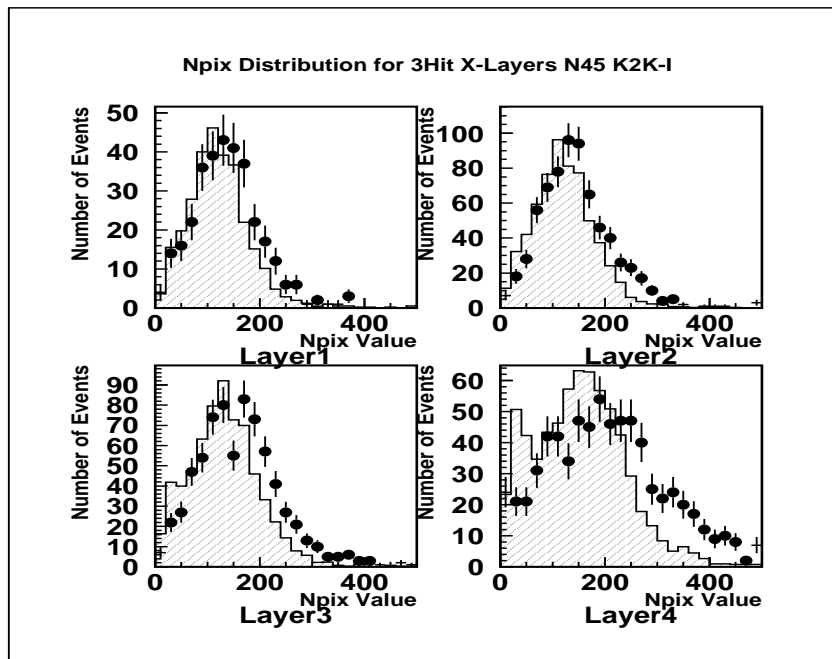


図 5.18: 2次トラック (Contained) $Npix$ 分布 (補正前)

K2K-I 2次トラック最後の4層の $Npix$ 分布 黒い点がデータ、影つきのヒストグラムがMCを表す。 $Npix$ が大きい領域 (Layer3やLayer4) ではMCがデータを再現できていない

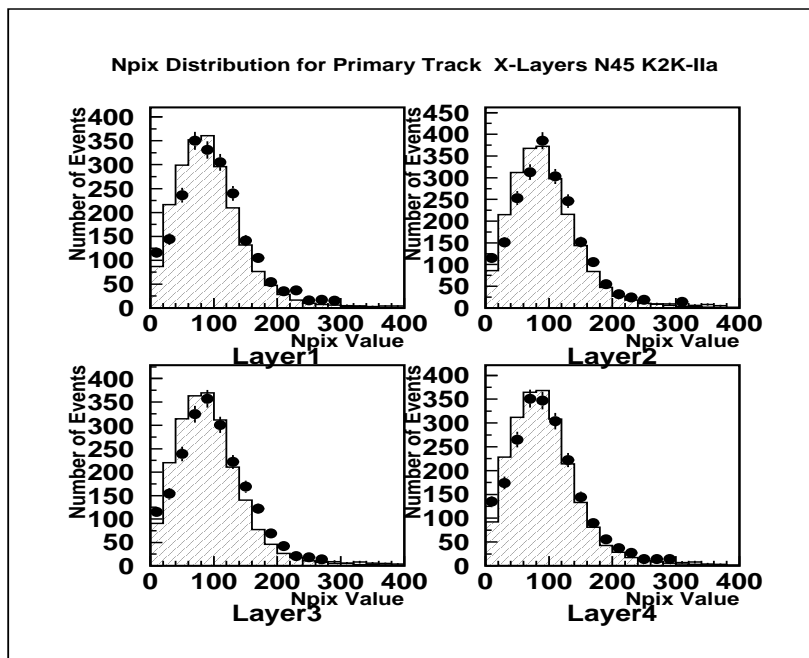


図 5.19: K2K-IIa 1次トラック (Contained) N_{pix} 分布

K2K-IIa 1次トラック最後の4層の N_{pix} 分布。黒い点がデータ、影つきのヒストグラムがMCを表す。

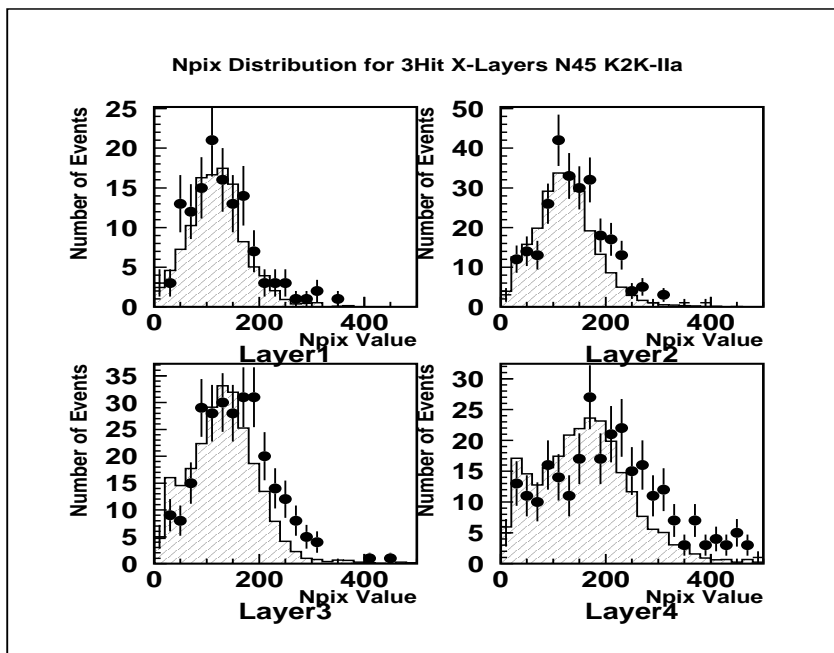


図 5.20: K2K-IIa 2次トラック (Contained) N_{pix} 分布

K2K-IIa 2次トラック最後の4層の N_{pix} 分布。黒い点がデータ、影つきのヒストグラムがMCを表す。K2K-Iデータのと様、 N_{pix} の大きい領域でデータとMCが一致しない。

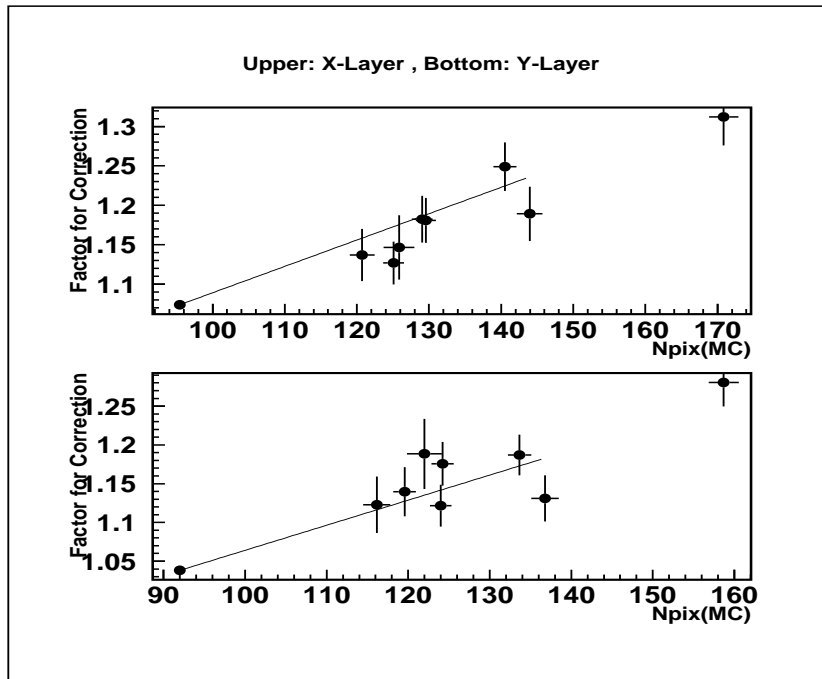


図 5.21: N_{pix} 値と補正係数

横軸に MC の N_{pix} 平均値、縦軸にデータ、MC の N_{pix} 平均値の比をプロットした図。上段が X 層、下段が Y 層に対応している。これらのデータを直線でフィットして、これを N_{pix} と対応する補正係数の関係とみなした。

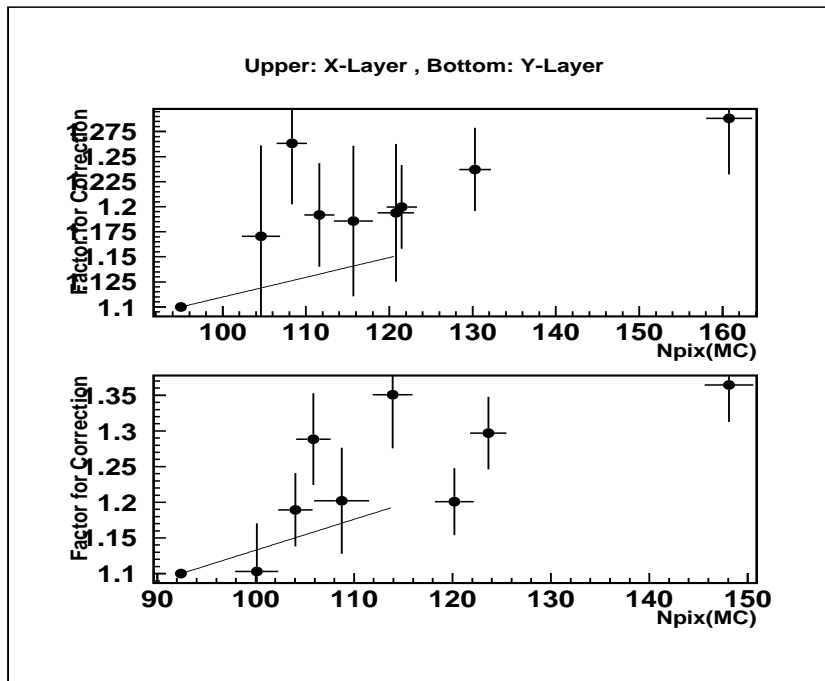


図 5.22: N_{pix} 値と補正ファクター K2K-2a

K2K-IIa データに対する図 5.21 と同様の結果。上段が X-層、下段が Y-層に対する結果である。

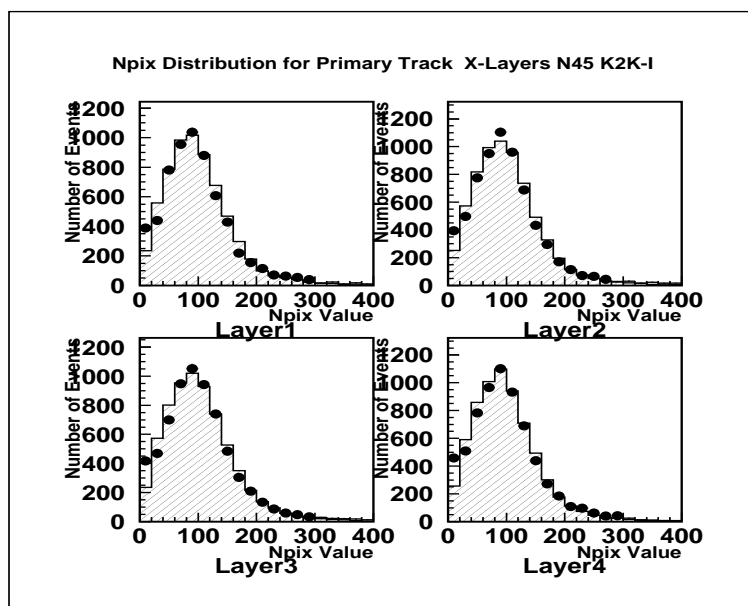


図 5.23: K2K-I 1次トラックの N_{pix} 分布 (補正後)

図 5.21 の関係を用いて補正した K2K-I データの 1 次トラック N_{pix} 分布。

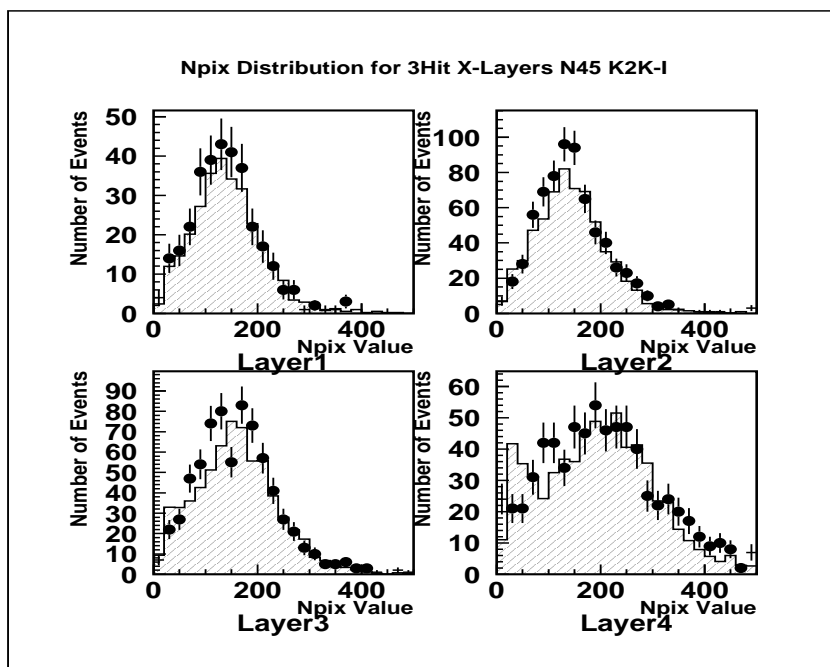


図 5.24: 2次トラックの N_{pix} 分布 (補正後)

図 5.21 の関係を用いて補正した 2 次トラック Contained イベントの N_{pix} 分布、止まり際の N_{pix} の大きな領域でもデータと MC が一致する

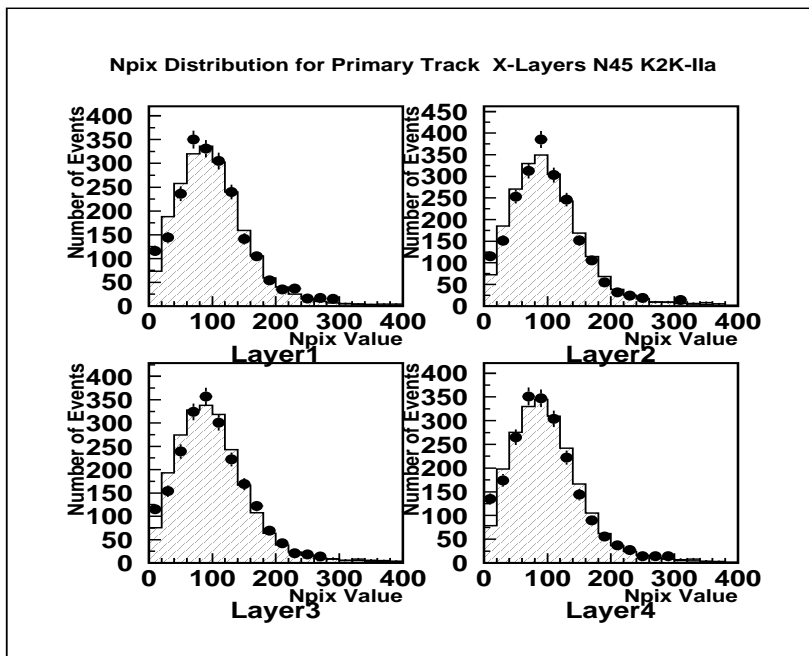


図 5.25: 1次トラックの N_{pix} 分布 (補正後) K2K-2a

K2K-IIa 補正後の1次トラック N_{pix} 分布。データとMCが一致する

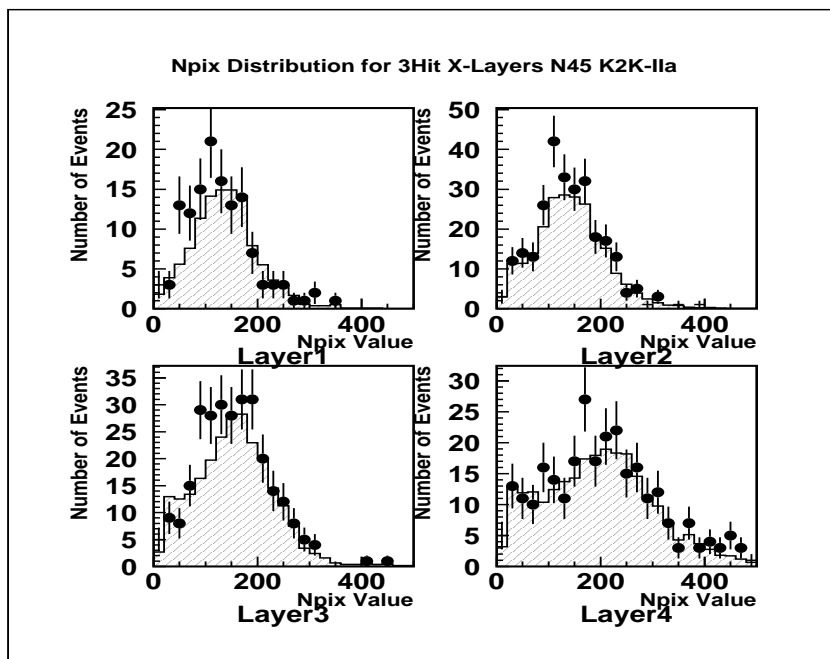


図 5.26: 2次トラックの N_{pix} 分布 (補正後) K2K-2a

K2K-IIa 補正後の2次トラック N_{pix} 分布。補正前にはあっていなかった Layer3、Layer4 に対してもデータとMCが一致する

5.3.4 Likelihood 関数の定義

前節までに、2次トラックが陽子の場合とパイオンの場合で、ファイバーに落とすエネルギーが異なると期待されること、そして、エネルギー損失と $Npix$ がよく対応することがわかった。 $Npix$ の差異はトラックの終端（粒子の運動量が低い領域）にいくほど顕著に現れるので、粒子識別にはトラックの残した最後の4ヒット（3ヒットトラックの場合は最後の3ヒット）の $Npix$ を用いる。図 5.27、図 5.28 に、2次トラック Contained イベント、nonContained イベントそれぞれに対する2次トラックが残した最後の4層の $Npix$ 分布を示した。2次トラックが陽子の場合とパイオンの場合では $Npix$ 値の分布範囲が異なる。また、Contained イベントに対しては、トラックの終端に向かって $Npix$ 値が発展していく様子が見られ、さらに発展の仕方が陽子とパイオンで異なっている。こうした情報も、粒子識別を行う助けになる。具体的な $Npix$ を用いた粒子識別の方法は次の通りである

図 5.27 のような MC の陽子（パイオン）トラックのとまり際4層の $Npix$ 分布を取得して、これらの分布を1で規格化する。このとき、規格化された $Npix$ 分布は陽子（パイオン）トラックのヒットが残す $Npix$ 値の確立密度分布になる。こうして MC の $Npix$ 分布からトラックの止まり際4層それぞれに対して陽子、パイオンが残す $Npix$ 値の確立密度分布を取得する。次にデータのトラックが残した $Npix$ 値を見て、これを先ほど確率密度分布と対応させることによりそのヒットが陽子によるものである確立 f_p およびパイオンのヒットである確率 f_π を求める。この f_p および f_π をトラックが x 層および y 層に残した最後の4（3ヒットトラックの場合は3）ヒット全てに対して求める。こうして得られた合計8個の f_p, f_π を式 5.14 のように掛け合わせてトラック全体としての陽子らしさ F_p およびパイオンらしさ F_π をそれぞれ計算する。最後に式 5.11 のように F_p, F_π を比較して得た $L_p(L_\pi)$ を用いてトラックの陽子らしさ、パイオンらしさを評価する。

$$L_{\pi(p)} \equiv \frac{F_{\pi(p)}}{F_\pi + F_p} \quad (5.11)$$

$$F_\pi = \prod_{i=1}^8 = f_{\pi x1} \times f_{\pi x2} \times f_{\pi x3} \times f_{\pi x4} \times f_{\pi y1} \times f_{\pi y2} \times f_{\pi y3} \times f_{\pi y4} \quad (5.12)$$

$$F_p = \prod_{i=1}^8 = f_{px1} \times f_{px2} \times f_{px3} \times f_{px4} \times f_{py1} \times f_{py2} \times f_{py3} \times f_{py4} \quad (5.13)$$

Npix Distribution for 3hit Cont X-Layers N45 K2K-IIa

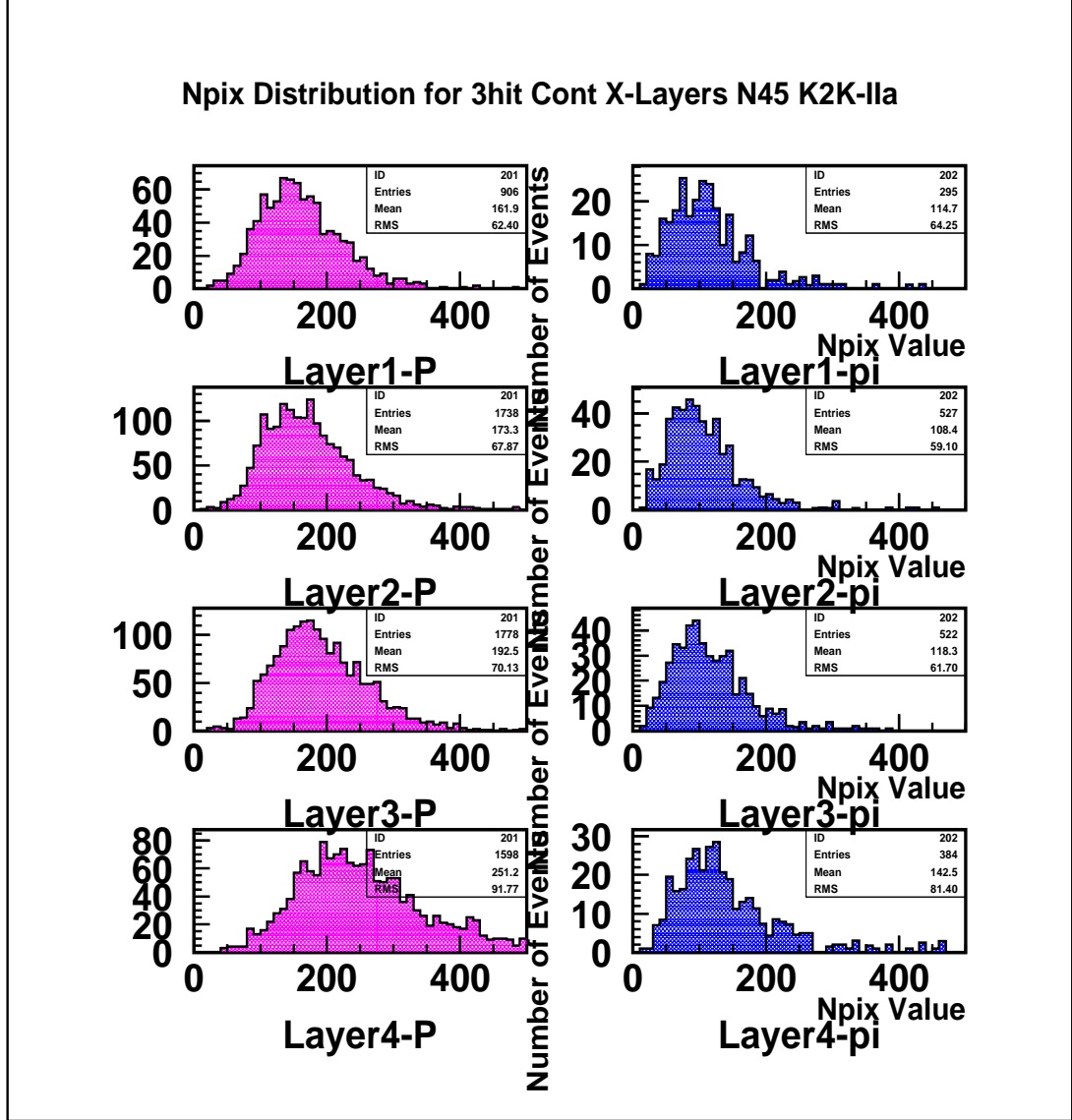


図 5.27: 2次トラック Contained イベントに対するトラック止まり際4層の N_{pix} 分布

左側の赤色のヒストグラムが陽子トラック、右側の青色がパイオントラックの N_{pix} を表わしている。最下段がトラックの残した最後のヒットに対応し、上段にいくほど反応点に向かって遡っていく。明かに陽子の N_{pix} とパイオンの N_{pix} で分布範囲が異なっており、プロトンの残す N_{pix} のほうが大きい。また、とまり際に行くほど N_{pix} が大きくなる（粒子の速度が落ちていくため）様子が見られ、その傾向は陽子トラックでより顕著に見られる。

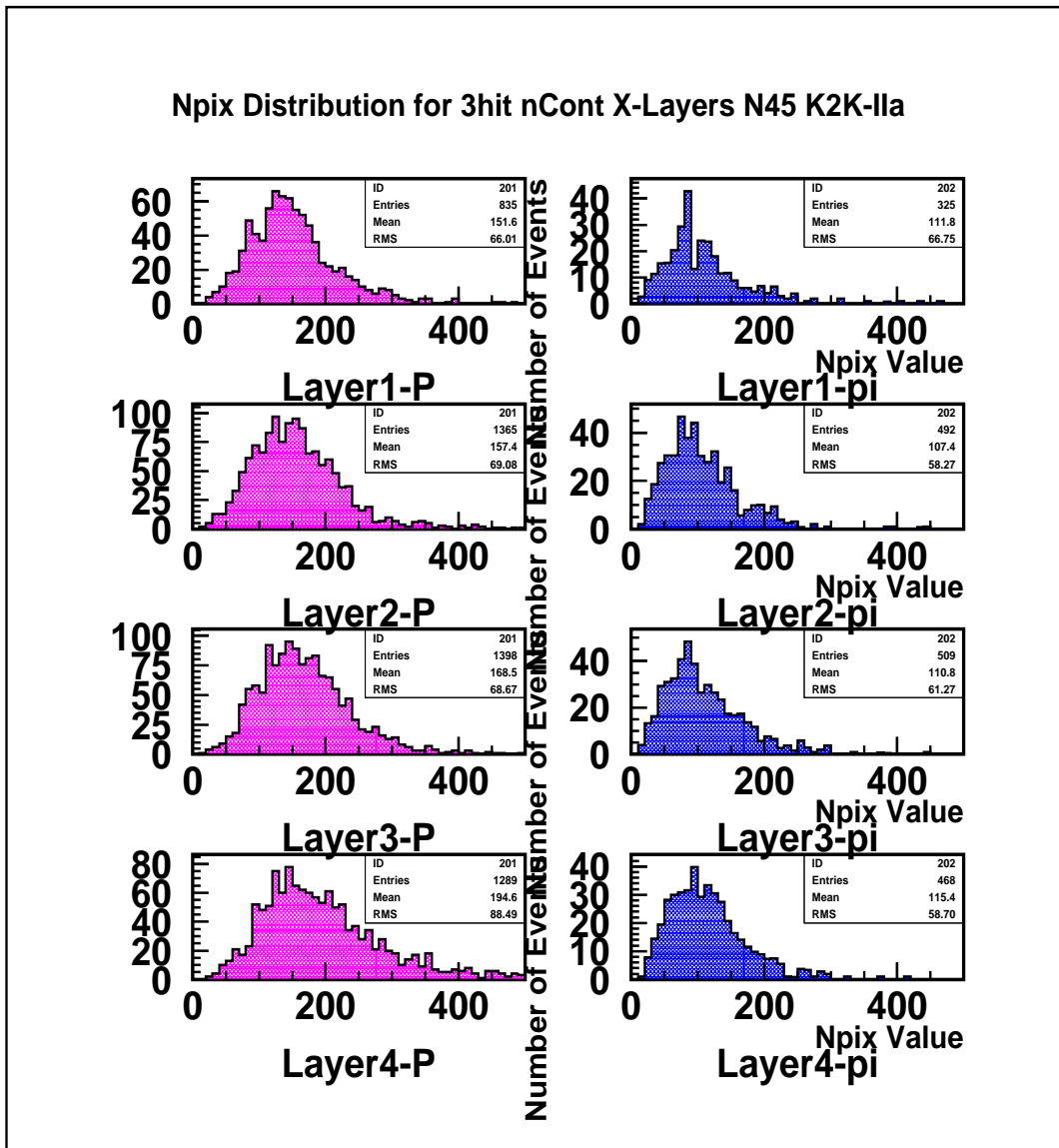


図 5.28: 2次トラック Contained イベントの Npix 分布

色わけなどの形式は図 5.27 と同様である。nonContained イベントはトラックが SciFi 検出器の外に抜けているため、最後の 4 層をもってきても止まり際を見ていることにはならないため、図 5.27 でみられたような N_{pix} の発展は顕著には見られないが、この場合も陽子の残した N_{pix} とパイオンの残した N_{pix} の大きさには違いが見られる。このことから、2次トラックが外に抜けたイベントに対しても N_{pix} を用いた粒子識別が可能であると期待される。

5.4 粒子識別の結果

前節で述べたトラックの最後の4層の N_{pix} 値と Likelihood 関数を用いた粒子識別を実際のデータセットに対して適応してみた。ここではその結果について述べる。

5.4.1 1次トラックに対する粒子識別の結果

粒子識別の目的は2次トラックの粒子を分類することにあるが、まず粒子の種類がほぼわかっている1次トラックに対して粒子識別を行い、その正当性を確認した。1次トラックはMRDに3Dトラックをつくっていることを要求して選んだこのような条件を課すことによってその飛程から1次トラックを作った粒子はほぼ全てがミューオンであると信頼できる。こうして選んだミューオンはSciFi検出器の中では速度の速い最小電離粒子(MIP)であり、そのため粒子識別の結果はパイオンライクになることが期待される。図5.29に、1次トラックが残した最後の4層の N_{pix} 分布を示した。そして、粒子識別の結果を図5.30に示した。図5.29は横軸に N_{pix} 値、縦軸にイベント数をとったものである。層毎に見ても N_{pix} に関してデータとMCが良く一致することがわかる。また、図5.30は横軸に図5.11の L_p をとり、縦軸にイベント数をとったものである。黒い点がデータを、色付きのボックスがMCを表わす。MCの色分けはトラックをつくった粒子の種類であり、緑色がミューオン、赤色陽子、青色がパイオン、黄色がそれ以外の粒子を表わしている。結果を見ると、データとMCが一致し、ほとんどの成分が L_p の大きな領域に分布している。このことから、少なくともパイオンらしいMIP粒子(ミューオン)を正しく識別できることが確認できた。

5.4.2 2次トラックに対する粒子識別の結果

前節で1次トラックに対する粒子識別の正当性が確認できたので、この節では2次トラックに対して粒子識別を適用した。その結果を示す。K2K-Iデータの2次トラック Contained イベントに対する粒子識別の結果を図5.31～図5.32に、nonContained イベントに対する結果を図5.33～図5.34に示した。また、K2K-IIaデータのContained イベントに対しては図5.35～図5.36、nonContained イベントに対しては図5.37～図5.38のような結果を得た。 N_{pix} 分布は前節の1次トラックのときと同様の形式になっている。また、 L_p 分布については横軸に L_p 、縦軸にイベント数をとったものである。黒い点と誤差棒がデータとその統計誤差を表しており、色付きの実線がMCを表している。MCの色分けは、2次トラックを作った粒子の種類に対応しており、赤色が陽子、青色がパイオン、黄色がそれ以外の成分を表している。黄色で表したのものの中には電子やミューオンなど、粒子に起因するトラックの他に、ノイズヒットをつなげてトラックを作ってしまったような成分も含まれている。こうした、トラックを間違えてつくっている成分は、全体の10%程度を占める。これらの成分は多くの場合小さな N_{pix} 値を持つため、陽子、パイオンを分離する際にはパイオンに近い傾向を示す。

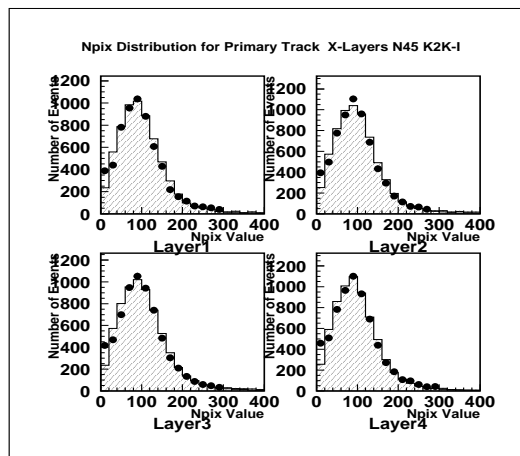
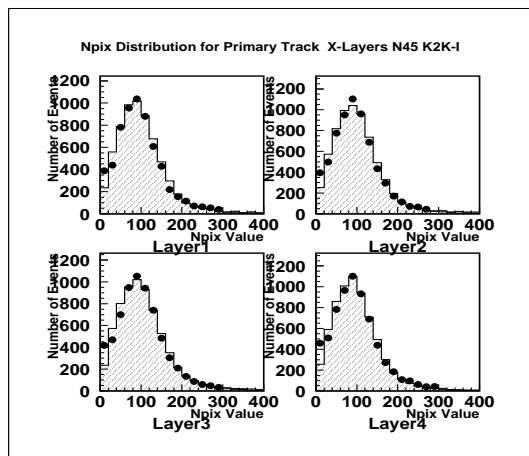


図 5.29: 1次トラックの N_{pix} 分布

横軸に N_{pix} 、縦軸にイベント数を取った図。黒い点がデータ、ボックスがMCを表わす。データとMCが良く一致している

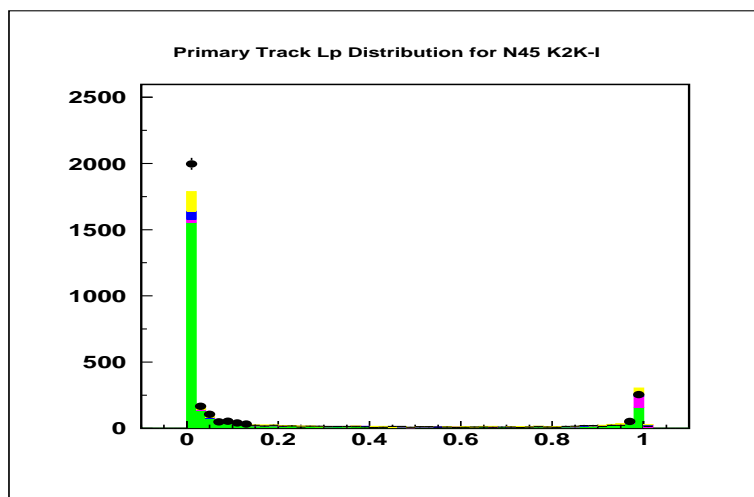


図 5.30: 1次トラックの L_p 分布

横軸に L_p 、縦軸にイベント数をとった図。黒い点がデータ、色つきのヒストグラムがMCを表わす。色分けは緑色がミューオン、赤色が陽子、青色がパイオン、黄色がその他の粒子を表わしている。MIPであるミューオントラックをパイオンライクなトラックのほとんどを識別出来ている。

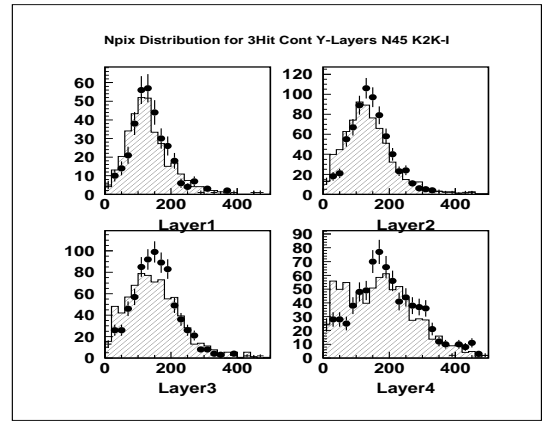
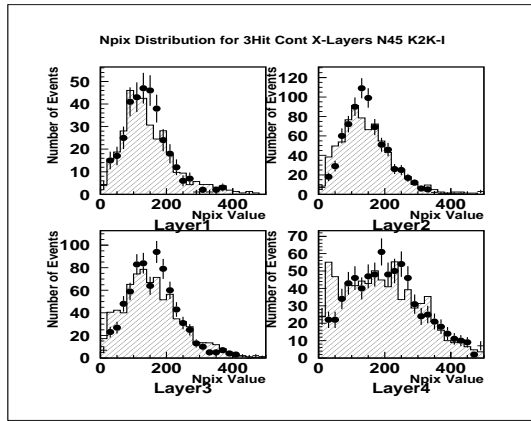


図 5.31: K2K-I, Contained イベントの $Npix$ 分布

トラックの終端付近 (Layer 3 や Layer 4) の $Npix$ が低い領域でデータと MC に差異が見られる。MC の低い $Npix$ 領域のピークは全てトラック終端の先に発生したノイズヒットをつないでいることが原因であるとわかっている。その他の領域では MC がよくデータを再現している。

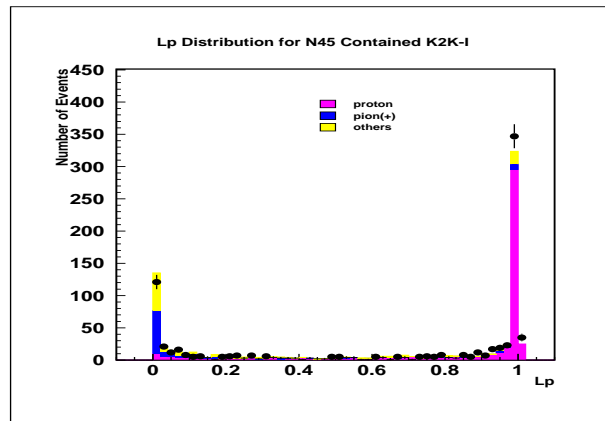


図 5.32: K2K-I, Contained Lp 分布

式 5.11 で定義した Lp を横軸に、イベント数を縦軸にとった図。黒い点がデータ、色つきの実線が MC である。色分けは赤が陽子トラック、青がパイオントラック、黄色がそれ以外の成分を意味する。 Lp 値が大きい領域にパイオンが分布し、低い領域 (Lp が大きい領域) に陽子が集中的に分布している。また、黄色で示したものは電子やミュオンがトラックを作ったイベントやノイズをつなげてトラックを作ったイベントが含まれる。これらのほとんどがパイオンに近い性質を示すことがわかる。

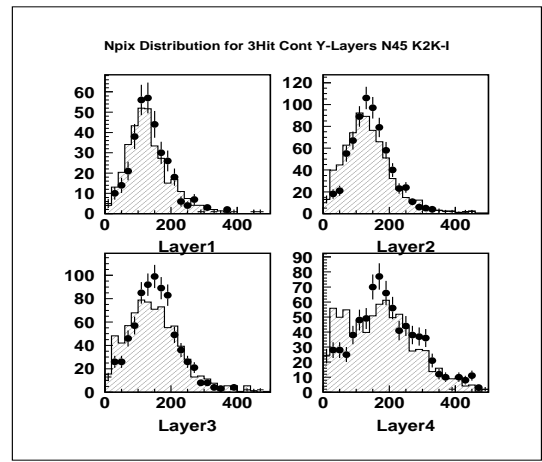
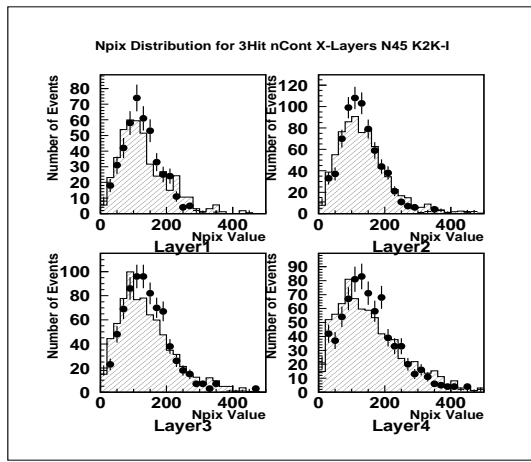


図 5.33: K2K-I,nonContained イベントの N_{pix} 分布

データと MC は概ね一致するが、Contained イベントでも見られたように N_{pix} の低い領域で差異が大きい

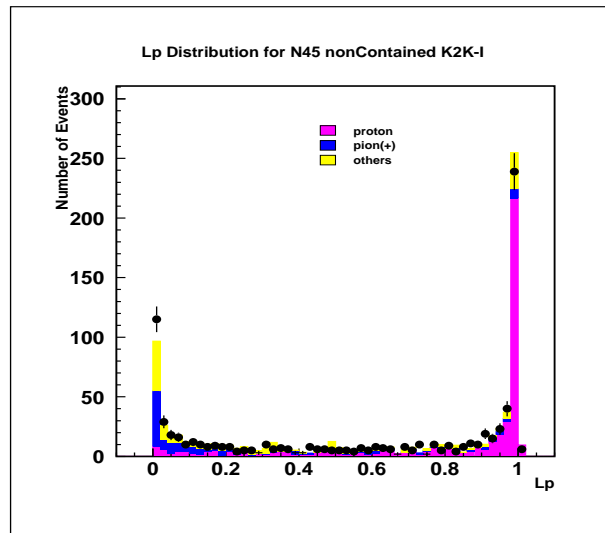


図 5.34: K2K-I,nonContained L_{pi} 分布

元の N_{pix} 分布の粒子による差が Contained イベントほど顕著でない (図: 5.28) ことから、Contained イベントのときほどには分離できていない

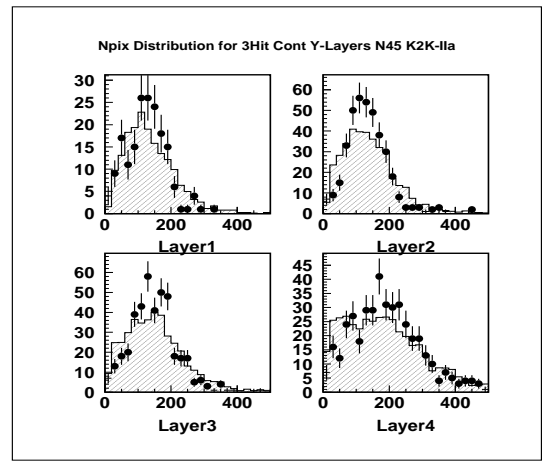
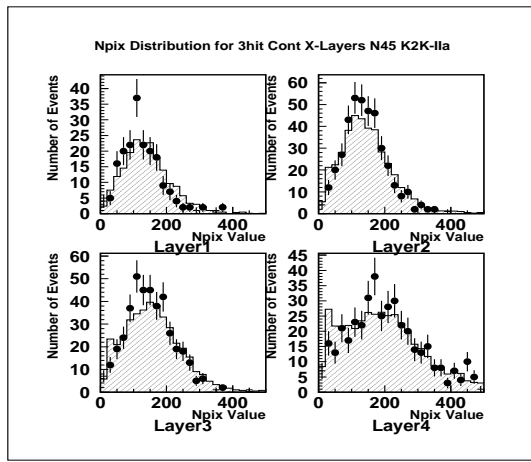


図 5.35: K2K-IIa Contained イベントの N_{pix} 分布

K2K-I に比べて実験期間が短い分イベント数は少ないが、どの層に対してもデータと MC は誤差の範囲内でよく一致している。

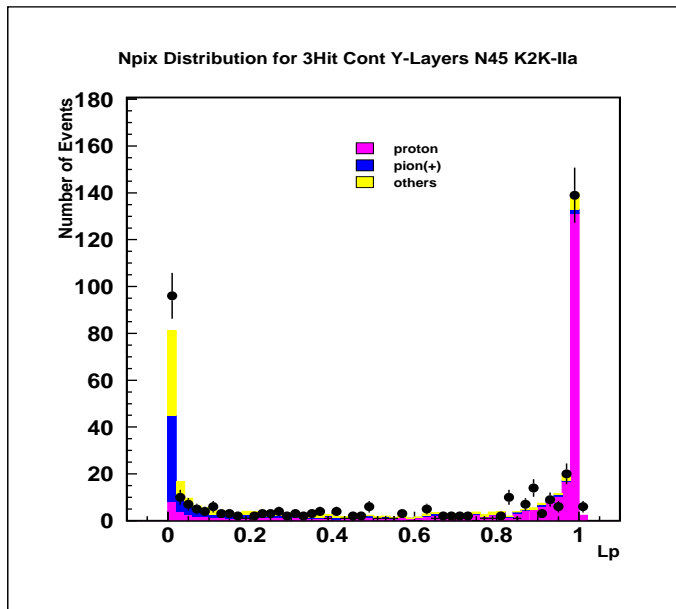


図 5.36: K2K-IIa Contained イベント L_p 分布

K2K-I に対する結果と同程度に P/Pi を分離できている。

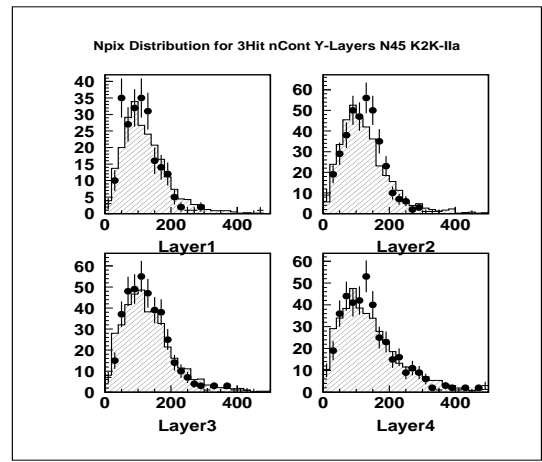
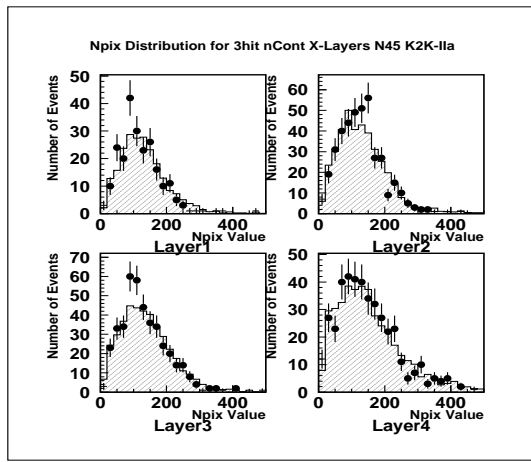


図 5.37: K2K-IIa nonContained イベント N_{pix} 分布
どの層においてもデータとMCが一致している。

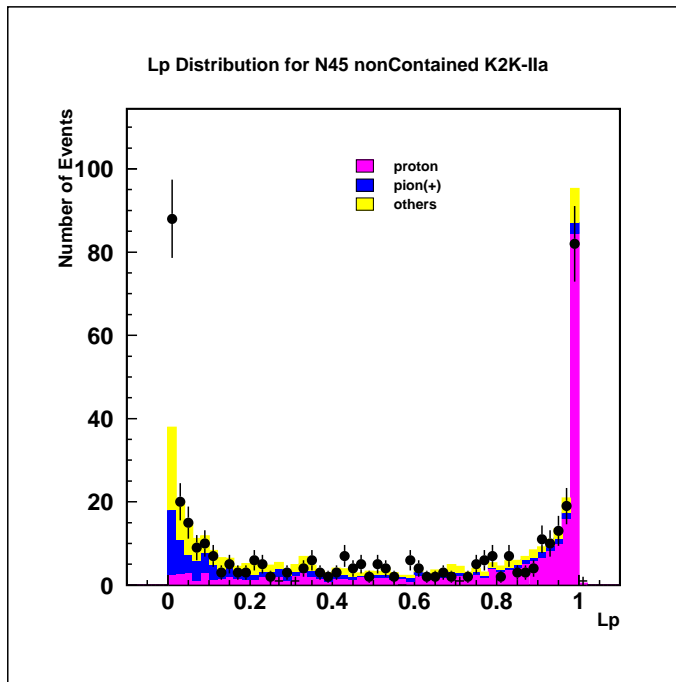


図 5.38: K2K-IIa nonContained イベント L_p 分布

nonContaine イベントに対しても K2K-I データの同じサンプルと同程度に粒子を識別できている。

5.4.3 粒子識別の性能評価

K2K-IデータおよびK2K-IIaデータに対する粒子識別の結果は図5.32～図5.38に示した通りである。こうした粒子識別の性能を定量的に評価するために、次のように粒子識別の識別効率 (Efficiency) および純度 (Purity) を定義する。まず、陽子 (パイオン) の検出効率は、ある $L_p(L_\pi)$ の値を選んだときに

$$\text{陽子 (パイオン) 検出効率} = \frac{L_p(L_\pi) \text{ がある値以上の陽子 (パイオン) イベントの数}}{\text{全陽子 (パイオン) イベントの数}} \quad (5.14)$$

という量である。また、純度 (Purity) は、ある $L_p(L_\pi)$ を選んだときに、

$$\text{陽子 (パイオン) の純度 (Purity)} = \frac{L_p(L_\pi) \text{ 以上の陽子 (パイオン) のイベント数}}{L_p(L_\pi) \text{ 以上の全イベント数}} \quad (5.15)$$

と定義される。検出効率は、選び出したサンプルが、どれだけ目的の粒子を残して、分離したい粒子を排除できているかをしめす量であり、純度は選び出したサンプル中の目的とする粒子の占める割合である。2次トラック Contained, nonContained イベントに対する、粒子識別の性能を図5.39～図5.42に図示した。検出効率に関しては、陽子とパイオンで N_{pix} 分布の違いが大きい Contained イベントについては、陽子 (パイオン) を85%選ぶように $L_p(L_\pi)$ の値を決めてイベントを選ぶと、その中に混入するパイオン (陽子) は、全パイオン (全陽子) イベントの10%程度となる。また、純度については、陽子 (パイオン) の検出効率が85%になる $L_p(L_\pi)$ の値を選んだとすると、陽子の純度は95%となり、このときパイオンサンプルの純度は50%程度になる。陽子以外の粒子やノイズ成分が全て、パイオン側に分布するため純度は低くなる。 N_{pix} 分布の差異が比較的小さい nonContained サンプルについては、陽子 (パイオン) を85%選ぶとパイオン (陽子) が15%～20%混入するという結果になった。元の N_{pix} 分布を反映して、陽子とパイオンの分離能力が低下している。また、このとき、陽子サンプルの純度は95%、パイオンサンプルの純度は45%程度になる。陽子 (パイオン) サンプルにパイオン (陽子) イベントが混入する主な理由は、元の N_{pix} 分布が重なりを持っていることによる。また、極めて陽子トラックに近い性質を示すパイオントラック (図5.32などの左端の青色成分) は、発生したパイオンが陽子と反応して、トラック終端のヒットを陽子を作っているような事例が見られた。逆にパイオントラックがプロトンライクになる現象は陽子が中性子と反応して、中性子に運動量を渡して急激に停止するような事例がかなりの部分を占めることがわかっている。このような事例は陽子が高い運動量を持った状態でヒットを作っているため、パイオンライクなイベントになる。こうしたイベントを正しく識別することは難しいかもしれないが、IITの校正をさらに検討することで N_{pix} の分解能が良くなればさらに、識別能力は良くなると期待される。現在、IIT光電面に位置依存性があると報告されている。これまでの N_{pix} を用いた解析では、光電面の性質は一様であると仮定してきたので、こうした位置依存を確認しそれぞれのIITに対して補正を行うことができれば N_{pix} 分布の分解能が向上すれば陽子とパイオンの N_{pix} 分布がよりはっきりと分離され、さらに検出効率が上がるものと考えられる。

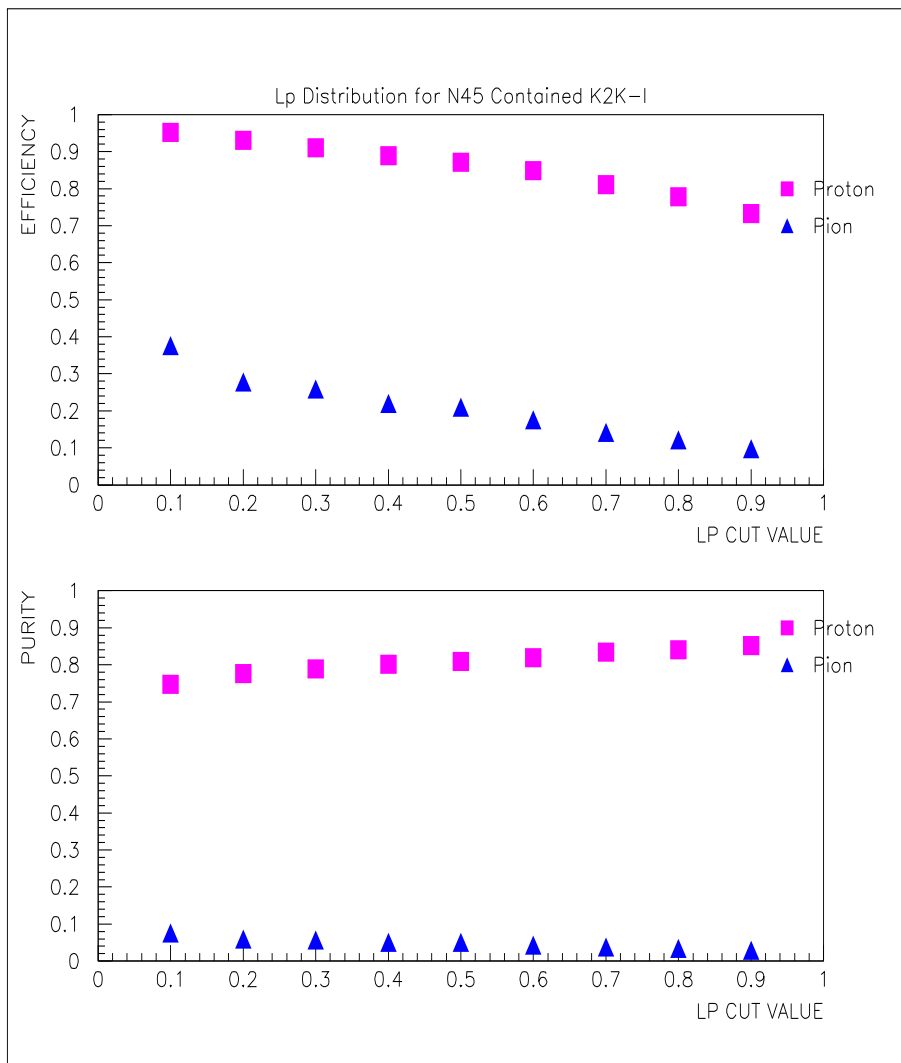


図 5.39: K2K-I Contained イベントの検出効率と純度

上段の図が検出効率を表わす。横軸が L_p の値であり、縦軸がその L_p 値をカット値として選んだときの検出効率になっている。赤色のマークで示したものは陽子の検出効率、青色がパイオンの検出効率になっている。例えば、 $L_p=0.5$ をカット値として選んだときには陽子の検出効率が 85%程度でパイオンの検出効率が 10~15%程度となっている。これは逆に $L_p=0.5$ の領域を選べばパイオンの検出効率が 90~85%で陽子の検出効率が 15%程度のサンプルを選べるということでもある。下段の図は同じ横軸に対する純度をプロットしたものである。マークの色分けについても上の図と同様である。

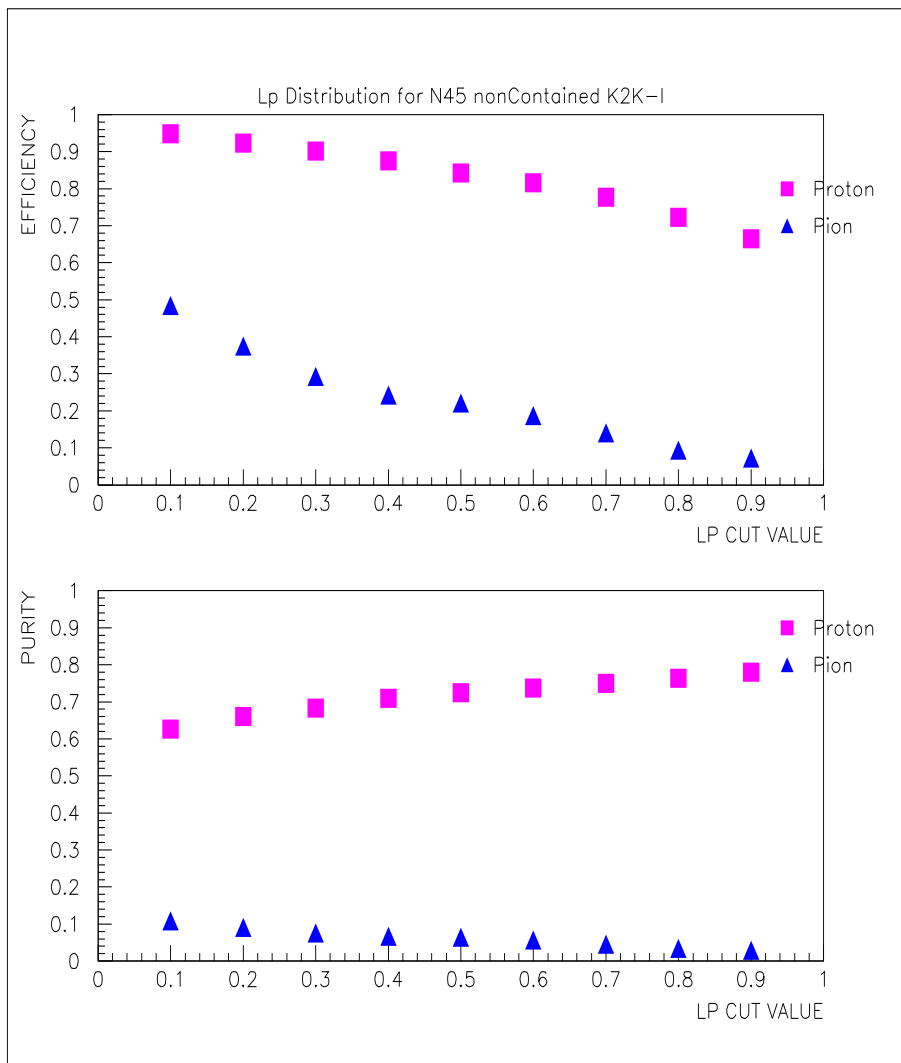


図 5.40: K2K-I nonContained イベントの検出効率と純度

Contained イベントに対する結果に比べると、もとの Lp 分布 (N_{pix} 分布) を反映して、わずかに性能が落ちている。このサンプルに対して 85% の検出効率でパイオン (陽子) を選ぶと陽子 (パイオン) の検出効率 (混入) は 20% 程度である。

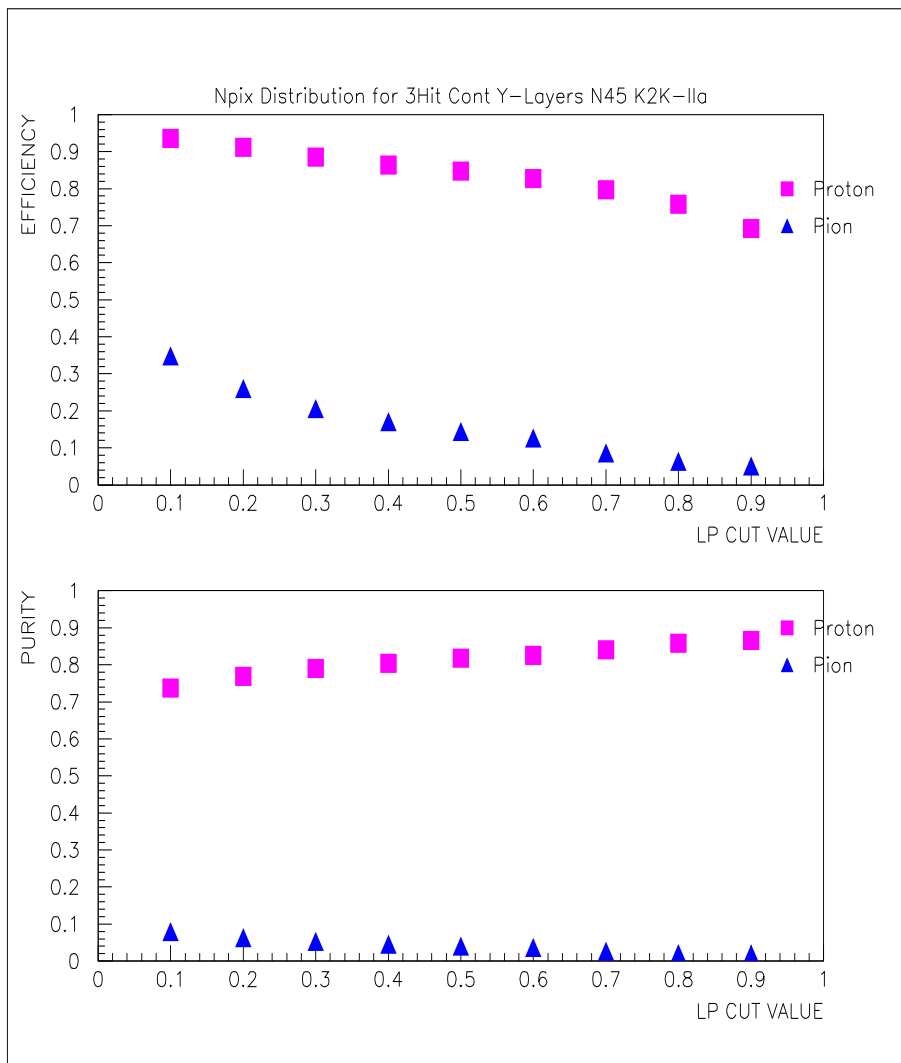


図 5.41: K2K-IIa Contained イベントの検出効率と純度

K2K-I の Contained サンプルに対する結果とほぼ同等の性能が得られた。 $L_p = 0.5$ でカットすると 85%程度の陽子を選んでパイオンの混入を 10%程度に抑えることが出来る。また、このとき陽子イベントの純度は 80%程度である。

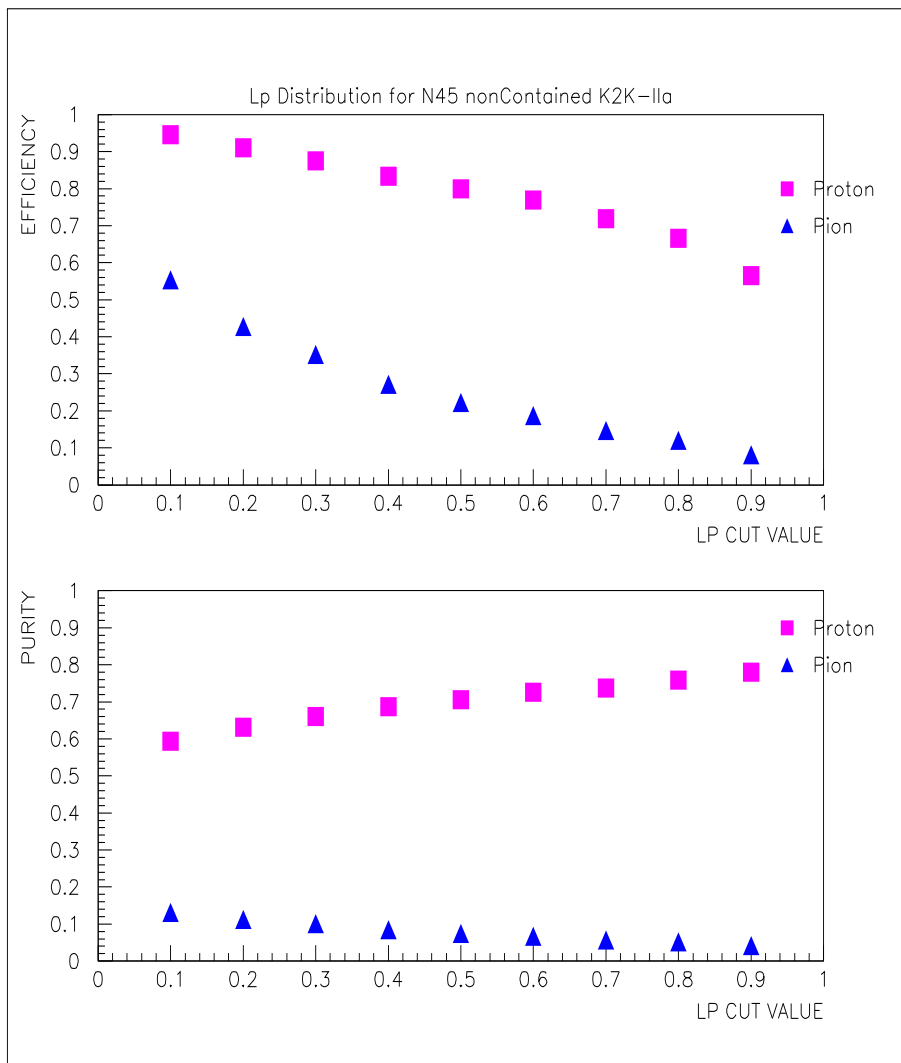


図 5.42: K2K-IIa nonContained イベントの検出効率と純度

K2K-I の同じサンプルに対する結果とほぼ同様の性能を示し、Contained イベントに比べると性能がわずかに落ちている。

5.5 物理解析への応用

ここまでに、SciFi 検出器における粒子別の方法とその結果を見てきた。この章では粒子識別が物理解析にどのように応用、貢献できるかということを検討する。

5.5.1 CCQE 反応選択への応用

この章の始めに述べたとおり、現在 SciFi 検出器では、ニュートリノ振動解析に利用する CCQE サンプルを 2 次トラックの角度情報を使って選んでいるが、この方法では QE サンプルの中に 40% 程度 QE でないサンプルが混入していると見積もられている (図 5.1)。また、このとき陽子トラックとパイオントラックの比はおよそ 8:2 になることがわかっている。この段階で 20% 程度のパイオンイベントを含んでおり、これにさらに粒子識別による条件を課せば、効果的にパイオンイベントの混入を除くことができると考えられる。そこで、角度で選んだ分布にさらに L_p の条件を課した場合に QE 事象数と QE/nQE の比、2 次トラックにおける P/P_i がどのように推移するかを調べた。QE 選択および陽子トラック選択の性能を定量的に評価するために新たに QE イベント検出の効率 (Efficiency) および純度 (Purity) を次のように定義した。

$$\text{QE イベント検出効率} = \frac{\text{角度、} L_p \text{ の条件で選ばれる QE イベント}}{\text{全 QE イベント}} \quad (5.16)$$

$$\text{QE イベント純度} = \frac{\text{角度、} L_p \text{ の条件で選ばれる QE イベント}}{\text{角度、} L_p \text{ の条件で選ばれる全イベント}} \quad (5.17)$$

また、選んだイベントがどの程度の純度の陽子生成イベントであるかを見積もるために選ばれたイベント集団の陽子イベントの純度を以下のように定義した。

$$\text{陽子トラック純度} = \frac{\text{角度、} L_p \text{ の条件で選ばれる陽子トラックイベント}}{\text{選ばれる全イベント}} \quad (5.18)$$

これらの値を使って本研究に用いた各データセットに対する QE 選択の性能を見たものが図 5.43～図 5.46 である。こららは横軸に L_p をとり縦軸に対応する QE イベント検出効率、QE イベント純度、陽子トラック純度をプロットしたものである。横軸の 0 は角度のみで選ぶことを意味している。

角度のみで選ぶと 60% 程度であった QE サンプルの純度をさらに L_p の条件を課すことによって Contained イベントに対しては～75%、nonContained イベントに対しては～70% 程度にまで高めることができる。また、これらのイベントは純度が 90%～95% の陽子生成イベントである。 L_p に加えて、角度の条件を課すことで高純度の陽子サンプルを選び出したともいえる。 L_p 値を上げていくとこれらの純度はわずかに上がっていくが、それに伴って事象数も減少する。もとの L_p 分布を見るとパイオンやその他の成分のほとんどが横軸がミューオン運動量、縦軸がイベント数。黒い点がデータ実線が MC (黒いハッチは CCQE 反応) を表す。 $L_p \leq 0.1$ のところに分布することから、 $L_p \leq 0.1$ 程度の条件でも十分に効果があるといえる。逆にそれ以上条件を厳しくしても検出効率が低下する効果の影響でイベントを失う効果が大きく検出効率が大幅に減少する。

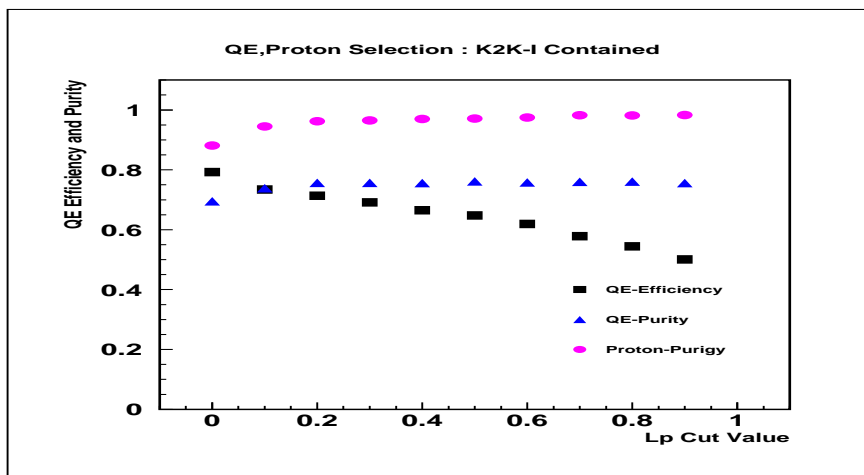


図 5.43: 粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-1 Contained イベント

横軸に Lp 値をとり、その値を条件に選んだ QE サンプルにおける、QE イベント検出効率、純度、陽子生成イベントの純度をプロットしたもの。黒で示したものが QE 反応の検出効率、青が QE 反応の純度、赤が陽子トラックの純度を表わす。角度に加えて粒子識別の条件を課すことで選ばれたサンプル中の CCQE 反応の純度を 75%程度に高めることが出来る。

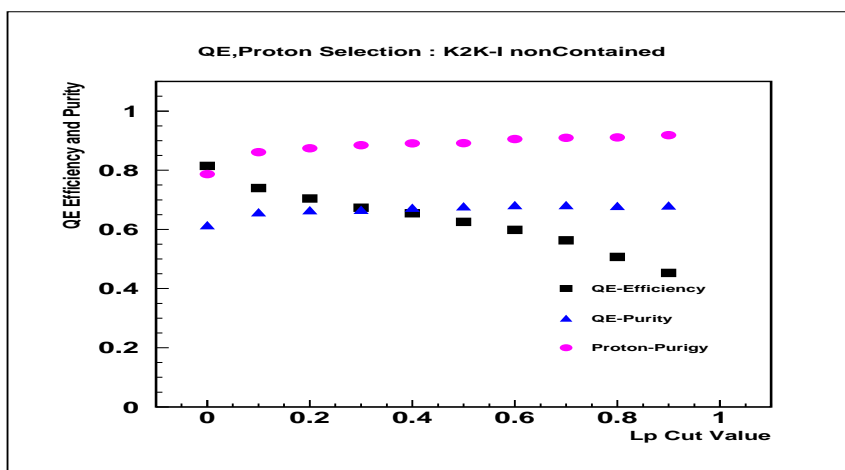


図 5.44: 粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-1 nonContained イベント

2次トラックが外に抜けたイベントに対する結果。表示の形式は Contained サンプルに対する上の図と同様である。検出効率が70%のときの純度がおよそ70%程度である。また陽子イベントの純度は90%以上になる。

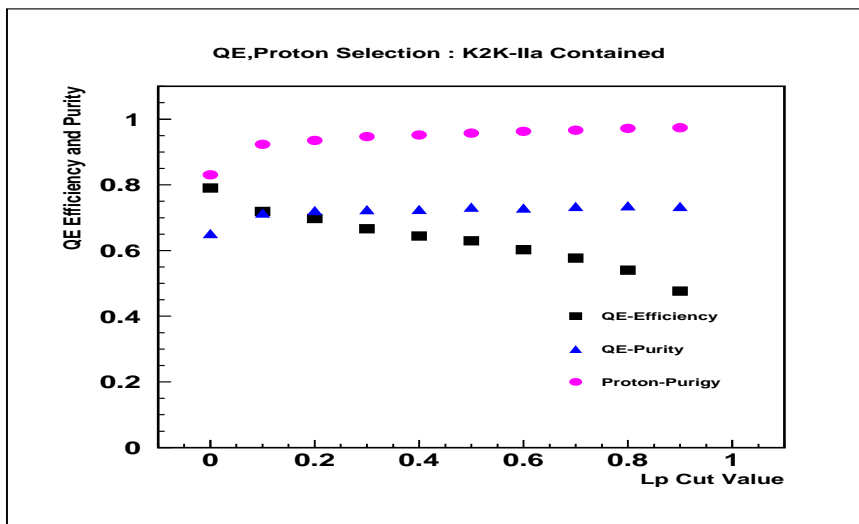


図 5.45: 粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-IIa Contained イベント

横軸に L_p のカット値をとり QE イベントの検出効率(青)、QE イベントの純度(青)、陽子の純度(赤)をプロットしたもの。検出効率が70%以上、純度が70%以上のイベントを選ぶことが出来る

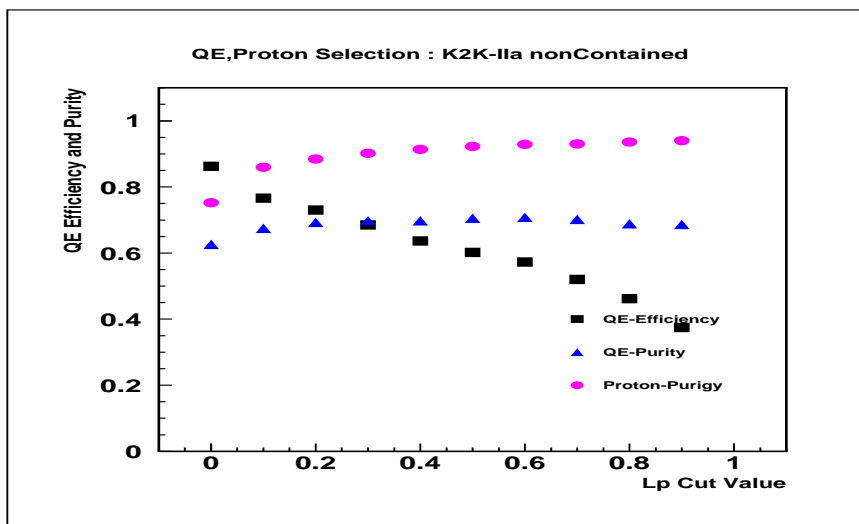


図 5.46: 粒子識別を用いた QE 反応の選択 K2K-IIa nonContained イベント

nonContained イベントに対しても、純度70%、検出効率70%程度の QE サンプルを選ぶことが出来る。このとき陽子イベントの純度は90%程度である

5.5.2 低エネルギー事象への寄与

この章で、トラックが SciFi の外へ抜けたイベントに対しても粒子識別が有効であることがわかった。この結果を利用してトラックが SciFi に残した N_{pix} 情報を用いて低エネルギー反応 (K2K-I の LG イベントや K2K-IIa の MRD 1L イベント) におけるミュオン識別の純度を向上できるかもしれない。そこで本研究に使用したデータの内 SciFi トラックが MRD の 1 層目にヒットを残しているイベント (MRD 1L イベント) を用いてこれらのことを確認した。こうしたイベントは第 4 章で述べた MRD 2L イベントよりもさらに低いエネルギー領域のイベントであると考えられるが、それだけにミュオン以外のトラック (陽子やパイオン) が数多く混入すると考えられ、解析には利用されていない。こうした雑音成分の最も多くを占めるものは 2 次トラックとして発生する陽子であると考えられる。本研究では陽子とパイオンの分離能力を評価したが、ミュオンはほとんどパイオンと同様の N_{pix} を残すと考えられるから低エネルギーのイベント集団の 1 次トラックに対して粒子識別を適用することにより、陽子とミュオンを分離して効果的に陽子トラックの混入を除くことが出来ると期待される。シミュレーションではこのイベント集団の 1 次トラック中のミュオントラックは 35% 程度と低く、およそ 22% の陽子トラックが混入していると見積もられている。1 次トラック中の陽子とミュオンを分離できるかどうかを確認するために 1 次トラックが陽子の場合とミュオンの場合での最後の 4 層の (MC) N_{pix} 分布を確認した (図 5.47)。図の左側が陽子の N_{pix} 、右側がミュオンの N_{pix} に対応するが、陽子とミュオンで N_{pix} の分布範囲が異なりこの情報を用いてトラックを分離できると期待される。また図 5.48, 図 5.49 に示すように N_{pix} に関してデータと MC が一致することも確認できた。そして、これらの情報を元に 1 次トラックに対して粒子識別を行った結果が図 5.50 である。これは、陽子とパイオンを分離したのと同じ方法で MC の N_{pix} から陽子とミュオンを分離したものである。図中の赤色で示したものが陽子、緑色がミュオンを表わす。この結果から大部分の陽子が L_μ の低い (プロトンライクな) 領域に分布しておりこの部分を除くことで効果的に陽子の混入を防ぐことができる。実際に L_μ が 0.2 以上という条件を課して、陽子を効果的に除けていることを確認した。図 5.51 および図 5.52 粒子識別の条件を課す前と後のミュオン運動量分布である。図の緑色のハッチがミュオンを表わし、赤色のハッチは陽子の混入を表わす。条件を課す前の図 (図 5.51) と比較すると陽子成分がかなり減少していることがわかる。このとき全体に占めるミュオントラックの割合はおよそ 52% という結果になり、陽子トラックの混入は 8% にまで減少する。残る 40% の成分はパイオンや電子などミュオン以外の粒子の混入が 25% 程度、SciFi でのトラッキングに失敗している成分が 15% 程度となっており、これらは粒子識別によって除くことは難しい成分である。このように粒子識別の方法を応用することによって、1 次トラックにおけるミュオン識別の純度を 15% 程度向上させることが出来た。この方法は MRD 1L イベントのようなより低エネルギーのイベントを解析する際の助けになるとともにこれまで利用されてきたイベントに対しても陽子の混入率が高くなる低エネルギー領域の純度向上に利用できるものである。

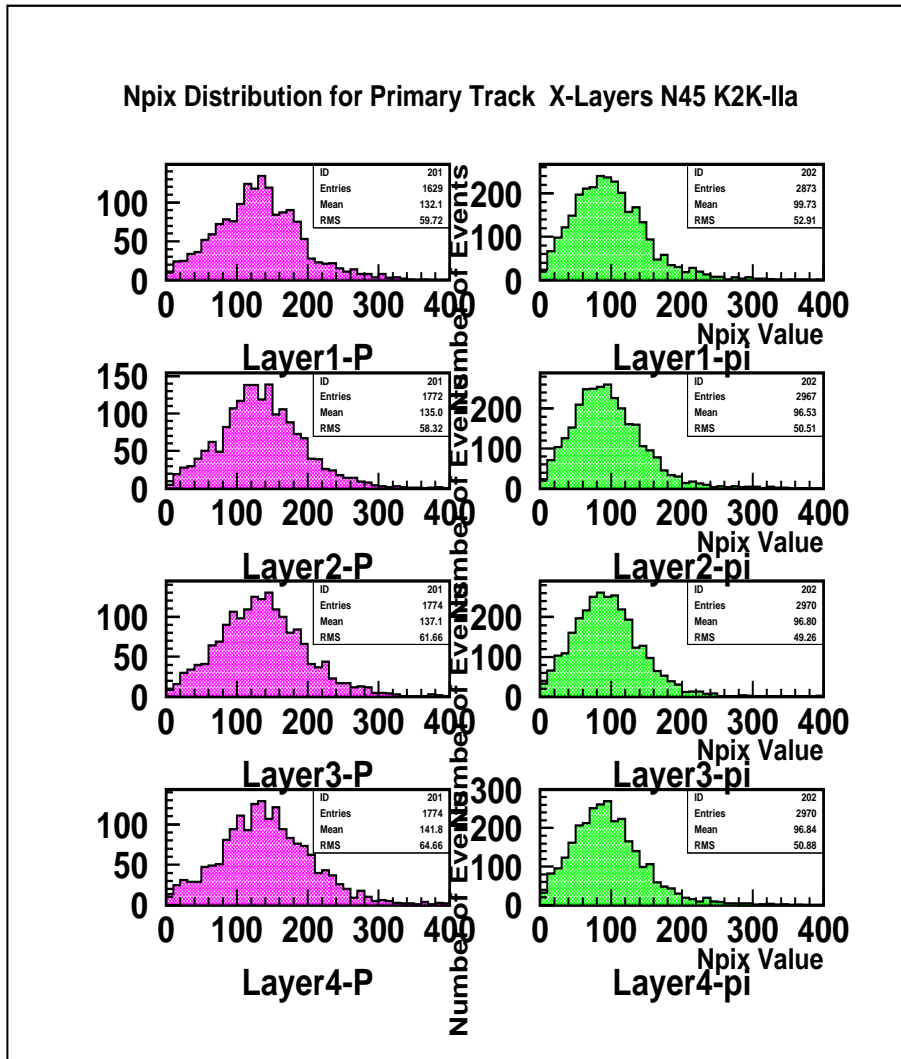


図 5.47: K2K-IIa MRD 1L イベント MC の Npix 分布

左側が陽子の N_{pix} 分布、右側がミューオンの N_{pix} 分布である。陽子とパイオンを分離したときと同様に陽子の残す N_{pix} のほうが大きい傾向がある。

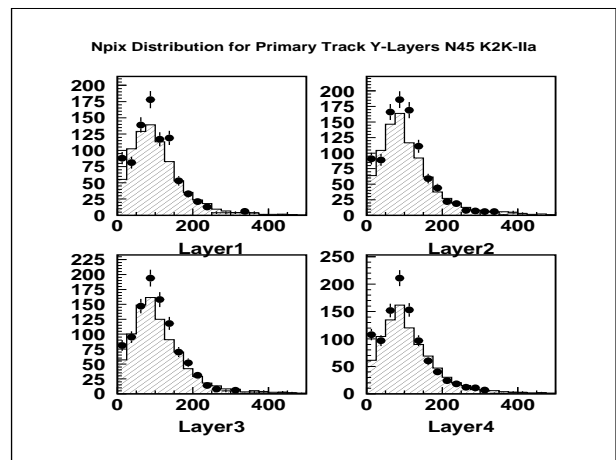
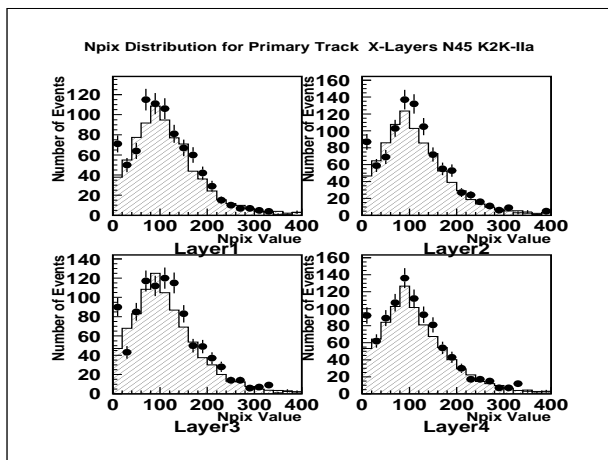


図 5.48: K2K-IIa MRD 1L イベント N_{pix} 分布 X 側

図 5.49: K2K-IIa MRD 1L イベント N_{pix} 分布 Y 側

N_{pix} 分布 X 側:黒い点がデータ、実線が MC を表す。

N_{pix} 分布 Y 側:黒い点がデータ、実線が MC を表す。

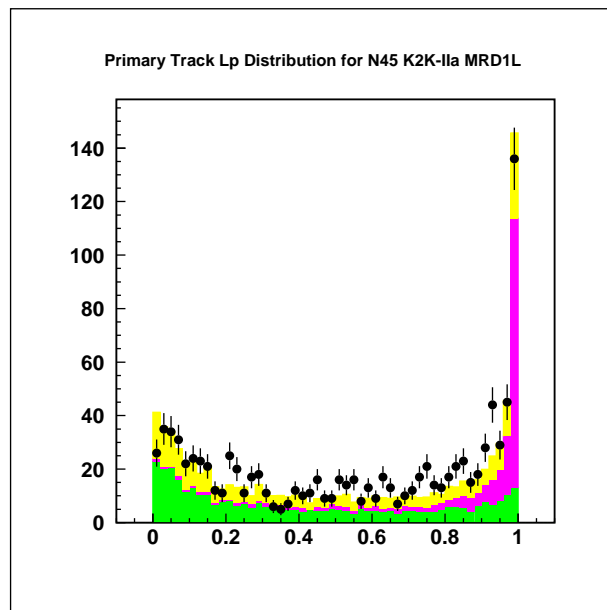


図 5.50: K2K-IIa MRD 1L イベント L_p 分布

粒子識別の方法を応用し、1次トラック中の陽子とミューオンを分離してみた結果。横軸に陽子らしさを表わす L_p をとり、縦軸はイベント数である。黒い点がデータ、色つきのボックスが MC を表わす。色分けは緑色がミューオン、赤色が陽子、黄色がその他の成分を表わす。ほとんどの陽子が L_p の高い領域に分布しており、この領域を除くことで効果的に陽子トラックの混入を排除できる

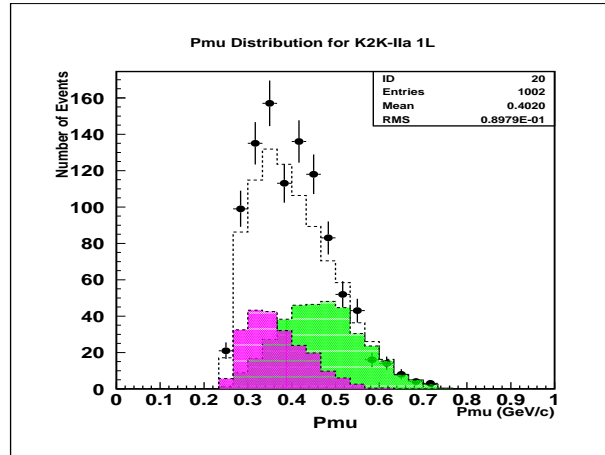


図 5.51: K2K-IIa MRD 1L イベント運動量分布

ミュオン運動量分布:横軸が運動量、縦軸がイベント数。黒い点がデータ、点線がMCである。色分けは緑色がミュオン、赤色が陽子になっている。この状態ではミュオントラックが全体に占める割合が35%と低い。また22%を陽子が占めている

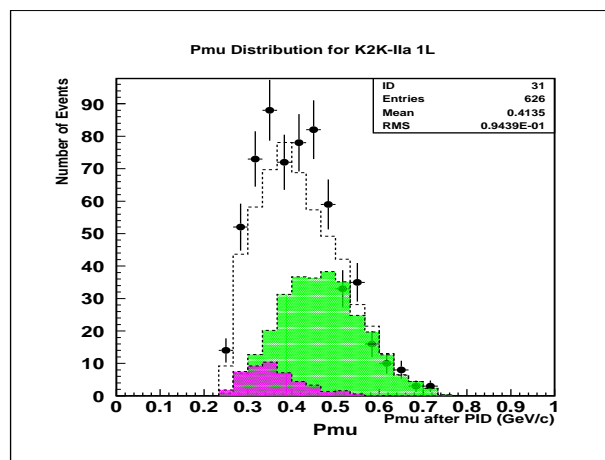


図 5.52: K2K-IIa MRD 1L イベント 粒子識別の条件を課したミュオン運動量分布

粒子識別の条件を課した結果。明かに陽子が減っている。このときミュオントラックの純度は52%まで向上し、陽子の混入率は8%程度と見積もられる

5.6 まとめ

この章では SciFi における Npix を用いた粒子識別を K2K-I および、K2K-IIa のデータに適用し、その性能を評価した。そして、粒子識別を行うことによって、振動解析に用いる CCQE 反応選択の純度が向上することを確認した。粒子識別の性能については 2 次トラックの Contained イベントおよび nonContained イベントに対して粒子識別を試し、Contained イベントに対しては陽子（パイオン）を 85% 程度選んでパイオン（陽子）の混入を 15% 程度に抑えることが出来た。nonContained イベントに対しても陽子（パイオン）を 85% 程度選んでパイオン（陽子）の混入を 20 % 程度に抑えたイベントサンプルを選べることがわかった。また、これらの粒子識別を CCQE 反応選択に適用することで、QE サンプルの純度が 70~75% まで高まることを確認した。ただしこのとき QE 選択の検出効率は 10% 程度低下する。純度を重要視するかイベント数を重視するかということは簡単にはいえないが、より高い純度を持つサンプルを選ぶ選択肢を用意できたことは意味のあることであると考えられる。同時にこれらのサンプルは 90~95% の純度をもつ陽子生成イベントであることも確認できおり、粒子識別の方法では、これ以上の純度の向上は望めない。また、SciFi の外に抜けた 1 次トラックに対して粒子識別を行うことで、陽子などミューオン以外の粒子の混入が問題になる低エネルギーイベントの純度が向上することも確認した。こうした方法はより低いエネルギー領域のイベントを解析する際の助けになると考えられる。

第6章 まとめと展望

本研究では K2K 実験の前置 SciFi 検出器で取得した、2001 年～2003 年のデータ (K2K-I, K2K-IIa) を用いて、これまで解析に使われてこなかったイベントの利用可能性について検討するとともに、振動解析に用いる CCQE 反応の選択や、より低エネルギーのイベントを利用する助けになると期待される粒子識別の方法についてその有効性および性能を評価した。また、粒子識別のこうした目的への応用可能性についても検討した。この章ではこれらの結果をまとめる。

6.0.1 低エネルギーイベントの研究 まとめ

これまで利用できていないイベントを利用可能にするために本研究では SciFi トラックが MRD の 2D トラック (片側の層のみで作った 2 次元的なトラック) としか整合できないイベントに着目し、その内容を確認した。その結果多くのイベントがトラック整合条件の見直しにより利用可能であることがわかったのでこれらを抽出してその性質を確認した。新しく定義されたイベントは K2K-I データに対しておよそ 11% 程度、K2K-IIa データに対して 15% 程度の個数がある。そしてその多くはニュートリノエネルギーが低い領域に分布していることがわかった。ニュートリノエネルギーが 1 GeV 以下の特に振動減少が顕著に観測される領域に限ってみれば新しく定義したイベントは K2K-I データに対しては 35%、K2K-IIa データに対しても 35% 程度の寄与をすると見積もられる。また、これらのイベントを加えることにより、SciFi 検出器は K2K-IIa データに対してはニュートリノエネルギーが 0.5 GeV 程度の領域まで感度を持つことになり、検出器のスペック向上にも貢献できた。本研究で新たに定義したイベント集団の全体に対する寄与を以下にまとめた。これらのイベントはミューオントラックの識別能力、及びエネルギー再構成に関してこれまで解析に利用されてきたイベント集団と遜色のないものであり、そのまま解析可能なイベントとして足し合わせて差し支えないものであるといえる。

表 6.1: イベントまとめ K2K-I

種類	3D	3 D(χ^2 8~20)	2 L
イベント数	5631	345	276
イベント数 ($E_\nu \leq 1\text{GeV}$)	843	80	224
イベント数 ($E_\nu \leq 0.8\text{GeV}$)	96	21	50
$\langle P_\mu(\text{GeV}/C) \rangle$	1.34	1.29	0.90
$\langle E_\nu(\text{GeV}) \rangle$	1.55	1.50	1.07

表 6.2: イベントまとめ K2K-IIa

種類	3D	3 D(Chi2 8~)	2 L
イベント数	3900	541	181
イベント数 $E_\nu \leq 1\text{GeV}$	1513	199	181
イベント数 $E_\nu \leq 0.8\text{GeV}$	908	129	181
$P_\mu(\text{GeV}/C)$	1.18	1.25	0.51
$E_\nu(\text{GeV})$	1.28	1.44	0.6

6.0.2 粒子識別の研究 まとめ

次に上記のイベントを含む全てのイベントを用いて、SciFi 検出器で発生した 2 次トラックに対する粒子識別についての研究を行った。粒子識別は振動解析に用いる CCQE 反応を選択する際の助けになることが期待されるとともに、より低エネルギーなイベントのイベント統計を増やすことと並んで重要である。粒子識別の方法は粒子の dE/dX に対応する N_{pix} を用いて、トラックの残した N_{pix} の大きさおよびその発展の情報を用いてトラックをつくった粒子を識別する方法をとった、本研究では 2 次トラックが SciFi の中でとまったイベント (2 次トラック Contained イベント) および 2 次トラックが外に抜けたイベント (2 次トラック nonContained イベント) をわけて扱い、これらに対する粒子識別の性能を見た。その結果は Contained イベントに対しては陽子 (パイオン) を 85% 選んでパイオン (陽子) の混入を 15% 程度に押さえることが出来、nonContained イベントに対しても陽子 (パイオン) を 85% 選んでパイオン (陽子) の混入を 20% 程度に押さえることが出来るというものであった。また、粒子識別の性能に関して K2K-I データと K2K-IIa データの間に差は見られず、どちらのデータに対しても同程度の性能を示した。こうした粒子識別の方法を現行のトラック角度情報を用いた CCQE 反応選択と組み合わせて使うことにより、角度のみでは 60% 程度であった CCQE サンプルの純度を K2K-I データ、k2K-IIa データともに 70~75% にまで高めることが出来た。このとき検出効率は角度のみで選んだ場合に比べて 10% 程度低下する。このように純度の向上はイベント数の減少を伴うため、その兼ね合いで考えていくべきことではあるが、少なくともより純度の高いサンプルを選ぶ選択肢を用意できたことは意味のあることであると考ええる。

また、本研究により 2 次トラックが SciFi 検出器の外に抜けているトラックに対しても粒子識別が可能であるとわかったのでこの方法を用いて、低エネルギーイベントにおけるミュオン識別の S/N を向上させることを検討した。低エネルギーのサンプルとして、K2K-IIa の MRD 1L イベントを選び、このサンプルの 1 次トラックに粒子識別を適用することによりミュオンと陽子を識別し、1 次トラックにおけるミュオンの純度が 35% から 52% まで向上することを確認した。このとき陽子の混入は 22% から 8% まで減少した。

6.1 展望

本論では振動解析において求められる低エネルギーニュートリノ反応イベントの統計を増やすことを検討し、同時に振動解析に用いる CCQE サンプルの純度を粒子識別の方法により向上させることを検討した。これらの結果は既に述べたとおりである。この章ではこうした研究結果の今後の課題、展望について考察する。

6.1.1 K2K-IIb イベントの解析

本研究に用いたデータセットは K2K-I および K2K-IIa の時期のものであった。その中で特に鉛ガラス検出器が取り払われたことにより、低エネルギー反応に対する感度の高い K2K-IIa イベントの解析は重要な意味を持つが、これらのデータは取得期間が4ヶ月程度であったことから統計が少ない。一方で我々は完全な SciBar 検出器の導入された K2K-IIb のデータをいまだ解析に入れておらず、これらのデータを解析することが大きな課題となっている。これらのデータを解析することは単にデータ統計を増やすのみならず、SciBar のトラック及び dE/dX 情報 (粒子識別情報) を用いることによりさらに低いエネルギーのニュートリノ反応事象を解析に組み込めることが期待されること、また SciBar, SciFi 両飛跡検出器の解析結果を相互に確認することにより前置検出器の解析結果の信頼性を高めることが出来ることなどから大変重要であるといえる。現在数人の研究者がこの時期のデータを用いて、SciFi トラックと SciBar トラック (ヒット) の整合をとることを研究しており、遠からずこの新しいデータセットを用いての解析結果が出るものと期待される。本研究で検討した、新たなイベント定義 (第4章) や粒子識別の方法 (第5章) は K2K-IIb のデータにおいても有効なものであり、様々な物理解析に貢献できるものと考えられる。K2K-IIb イベントを利用することで、LG を除去した後の低エネルギー領域に感度を持つデータが少なくとも倍以上増加するものと予想される。

6.1.2 N_{pix} 補正による粒子識別性能の向上

現行の MC の N_{pix} は光量の大きな領域でデータを再現できないことを第5章で見た。 N_{pix} を用いた解析を行うためには、LED などを用いて大きな光量に対する IIT の応答 (N_{pix}) を詳しく調べ、これを再現できるように MC を再チューニングせねばならない。また、MC だけに見られたトラック止まり際の N_{pix} 分布における N_{pix} が低い領域のピークは MC が IIT の雑音を正しく再現できていないことを示唆するものであり、これについても検討せねばならない。これらの問題を解決して、 N_{pix} に関して MC がデータをより再現できるように改良することが今後の課題として挙げられる。

また、本文でも触れたように現在の粒子識別性能では陽子とパイオンのトラックが残す N_{pix} 分布の重なりを反映して 15~20% 程度目的以外の粒子が混入するものと見込まれている。現在宇宙線を用いた解析により IIT 光電面に有意な位置依存性があるとの結果が報告されている。報告されている位置依存性とは IIT 光電面の中心付近と端で同じ光量に対する N_{pix} 値がことなり、端のほうが大きな N_{pix} 値を出力するというものである。こうした位置依存性については以前から疑われていたが、定量的な評価には至っていなかった。位置依存性の程度及び傾向は IIT 毎に異なるものと考えられるが、本研究に用いた N_{pix} 値はこうした光電面の位置依存性を考慮していない。そこで、位置依存性を IIT 毎に調べ、それを用いて N_{pix} 値を補正できれば N_{pix} の分解能がさらに向上し、結果として陽子、パイオン間の N_{pix} の差異が顕著になり、粒子識別の性能をさらに高めることが出来ると期待できる。こうした各 IIT の位置依存を LED を用いて測定する試みはすでに始まっている。

6.1.3 粒子識別法の低エネルギーイベント解析への応用

(本文でも述べたが) 低エネルギーイベントを捕らえようとする、どうしてもミューオン以外の粒子が混入し、CCQE 反応選択の性能が低くなってしまう問題がある。こうしたミューオンと取り違えられる粒子の大部分は陽子であることがわかっている。一方で、本論で述べた粒子識別の性能を考えると SciFi の外にトラックが抜けたようなイベントに対しても (K2K-I, K2K-IIa とともに) およそ 80% の陽子生成トラックのサンプル (純度が 90% 以上) を選ぶことが出来る。この結果は陽子とパイオンに対するものであったが、これがミューオン (1次トラックの主成分) と陽子 (ミューオンと取

り換えられる粒子の主成分)であっても状況は変わらないと考えられる。このことは逆にいえば陽子トラックを効果的に除去できる可能性を示す結果であり、粒子識別の方法を低エネルギーイベントの1次トラックに適用することで、ミューオン識別の性能が向上することが期待される。本論ではこのことをK2K-IIaのMRD 1Lイベントに対して確認したが、現在利用されているイベントにおいても低エネルギー領域でのS/Nを向上させる手段として活用できるものとする。

謝辞

本論をまとめるにあたり、数多くの方々にお世話になりました。この場をかりてお礼申し上げます。

初めに、K2K 実験の責任者である京都大学の西川公一郎教授、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の中村健蔵教授には、本実験に参加させていただいたことを深く感謝いたします。そして、神戸大学の原 俊雄助教授には研究のみでなく様々なことを御指導頂きました。ならびに、発達科学部の青木茂樹助教授、そして鈴木 州助手にはお忙しい中貴重な助言を頂き大変感謝しております。岡山大学の作田 誠教授には研究を進める上での指針となる助言を頂きました。また、実際に実験機器やソフトウェアを使うにあたっては、KEK の石田 卓助手ならびに岩下 大器さんにこまやかな指導、助言をしていただきました。皆様大変お忙しい中、時間を割いていただき本当に有難うございました。また、東京理科大学の横山 広美さんには解析を進める上で何もわからなかった私に丁寧な助言をしていただきました。

神戸大学の先輩である関口 舞さんには解析の方法に限らず、KEK でどう生活すべきかといった私的なことに至るまで有用なアドバイスを頂きました。また、同級生の朝倉 健二君、K2K グループの青山祐三君とは研究をすすめる上で常に情報を交換し多くの問題を解決する上で助けてもらいました。彼らとの議論は大変有益であったと実感しています。

最後にここには書ききれませんが、研究および私生活においても神戸大学粒子物理研究室の皆様、KEK の職員ならびに学生の皆様には多くの御助言、御手伝いを頂きました。ここにお礼申し上げます。

関連図書

- [1] S.L.Glashow,Nucl.Phys.22,579 (1691)
- [2] S.Weinberg,Phys.Rev.Lett.19,1264 (1967).
- [3] A.Salam,"Elementary Particle Physics",Nobel Symp.No.8.
- [4] Ch.Weinheimer *et al*,Phys.Lett.B460,219 (1999)
- [5] W.Pauli,"Zur älteren un neuen Geschichte des Neutrinos", Collected Papers by W.Pauli,ed.R.Kronig and U.P.Weisskopf (Interscience Pub,N.Y.1964) Vol.2,p.1312
- [6] F.Reines,C.L.Cowan,Jr,Phys.Rev.92,830 (1953)
- [7] G.Dandy *et al.*,Phys.Rev.Lett.9,36 (1953)
- [8] M.Nakamura *et at.*,"Result from DONUT-Direct obserbation of ν_τ interaction", Nucl,Phys. BUproc.Suppl.77,259(1999).
- [9] J.Nnich for LEP collaborations and the LEP Electroweak Working Group, Preprint CERN-EP/99-143,October 1999.
- [10] Lobashev *et al.*,Phys.Lett. J, B460pp,227(1999).
- [11] K.Assamagan *et al.*, Phys Lett. B335,231(1994).
- [12] R.Barate *et al.*, E.Phys.Lett.B335,231 (1994).
- [13] Particle Data Group,Eur.Phys.J.C15,1-878 (2000).
- [14] B.Pontecorvo,Sov.Phys.JETP 10,1236 (1960).
- [15] M.Nakagawa,H.Okonogi,S.Sakata and A.Toyoda,Prog.Theor.Phys.30,727(1962).
- [16] Z.Maki,M.Nakagawa,and S.Sakata,Prog.Theor.Phys.28,870 (1962)
- [17] M.Kobayashi and T.Masukawa,Prog.Theor.Phys.49.652 (1973)
- [18] Y.Fukuda *et al.*,Phys.Lett.B335,237 (1994).
- [19] R.Becker-Szendy *et al.*,Phys.Rev.D46,3720 (1992).
- [20] K.Daum *et al.*,Z.Phys. C66,417 (1995).
- [21] M.Agelietta *et al.*,Europhys.Lett.8,611 (1989).

- [22] W.W.M.Allison,Phys.Lett.B391,491 (1997).
- [23] Y.Fukuda *et al.*,Phys.Rev.Lett.81,1562
- [24] E.Eskut *et al.*,Phys.Lett.B424,202 (1998)
- [25] P.Astier *et al.*,Phys.Lett.B453,169 (1999)
- [26] P.Vilain *et al.*,Z.Phys.C64,539 (1994)
- [27] L.Borodovsky *et al.*,Phys.Rev.Lett 638,273 (1994)
- [28] G.S.Vidyakin *et al.*,JETP.Lett.59,390 (1994)
- [29] C.Athnassopoulos *et al.*,Phys.Rev.C54,2685 (1996)
- [30] C.Athnassopoulos *et al.*,Phys.Rev.C58,2689 (1996)
- [31] Delft Hitech Inc. "Technical Handbook of the Image Intensifier" (1994)
- [32] 田中 康之, 神戸大学自然科学研究科修士論文 (2001)
- [33] 横山 広美, 東京理科大学博士論文 (2004)
- [34] 関口 舞, 自然科学研究科修士論文 (2004)
- [35] C.H.Llewellyn Smith,Phys.Rep.3,261 (1972)
- [36] H.H.kaumann,*et al.*,Particle and Fields 31,203 (1986)
- [37] D.Rein and L.M.Shegal,Nuclear physics B223,29 (1983)

付録A SciFi検出器におけるニュートリノ反応の基本分布

本論で得た新しいイベントと集団と比較すべき対象として、K2K-I,K2K-IIa 実験データにに対する SciFi 検出器のオフィシャルな結果をここに載せる。

K2K-I の結果は MRD 3D,1L および LG イベントを用いた結果であり、K2K-IIa の結果は MRD 3D イベントのみを用いた結果である。

トラック数分布

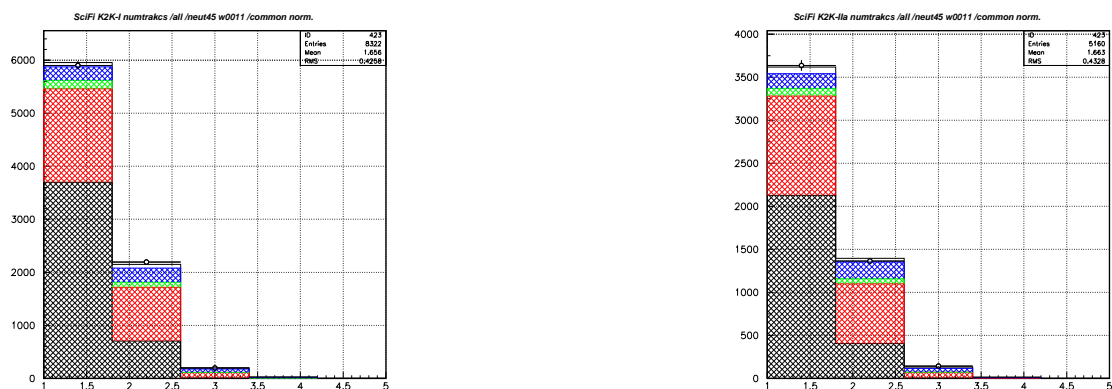


図 A.1: K2K-I,K2K-IIa トラック数分布:

左の図が K2K-I データのトラック数分布。右の図が K2K-IIa データのトラック数分布である。黒い点がデータを表し、実線のヒストグラムが MC である。色分けは反応モードを表し、黒が CCQE, 赤が CC- 1π , 緑が CC-Coherent π , 青が CC-multi π を表す

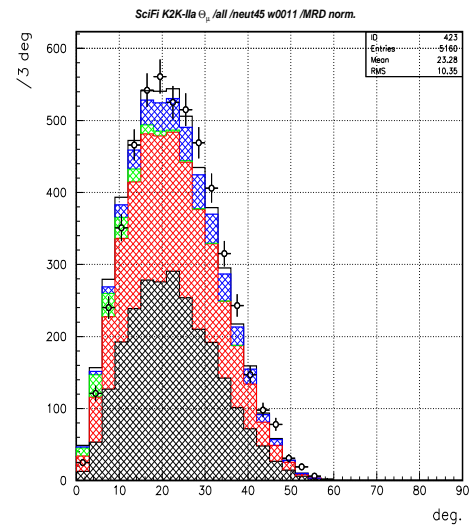
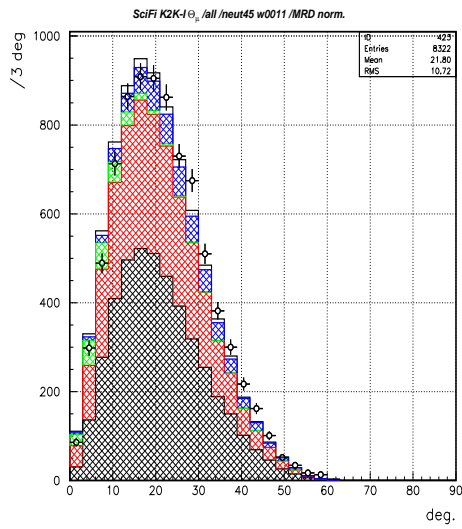
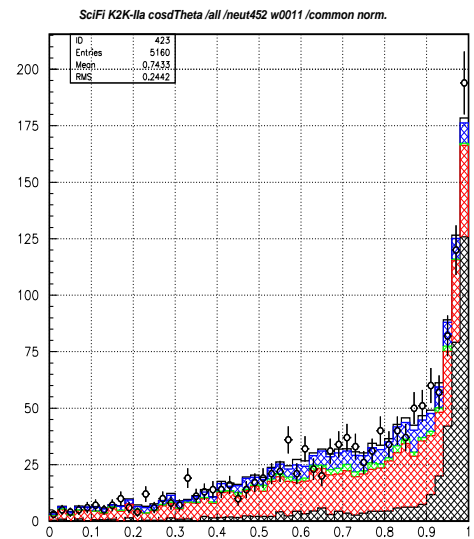
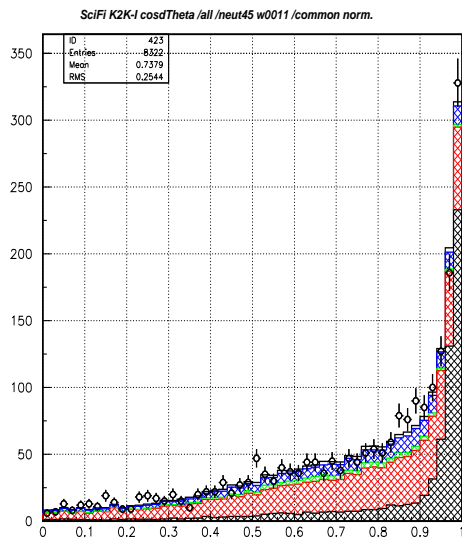


図 A.2: K2K-I,K2K-IIa トラック角度分布

横軸がビームに対するトラック角度、縦軸がイベント数。黒い点がデータを表し、実線のヒストグラムがMCである。色分けは反応モードを表す。黒がCCQE, 赤がCC-1 π , 緑がCC-Coherent π , 青がCC-multi π を表す



--- 図 A.3: K2K-I,K2K-IIa 2トラック、 $\cos \Delta\theta$ 分布 ---

横軸に $\cos \Delta\theta$ 、縦軸にイベント数を取った図。黒い点がデータ、実線のヒストグラムがMCである。色分けは黒がCCQE, 赤がCC-1 π , 緑がCC-Coherent π , 青がCC-multi π である

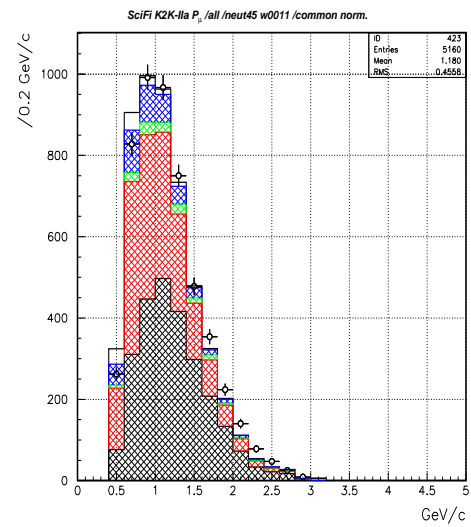
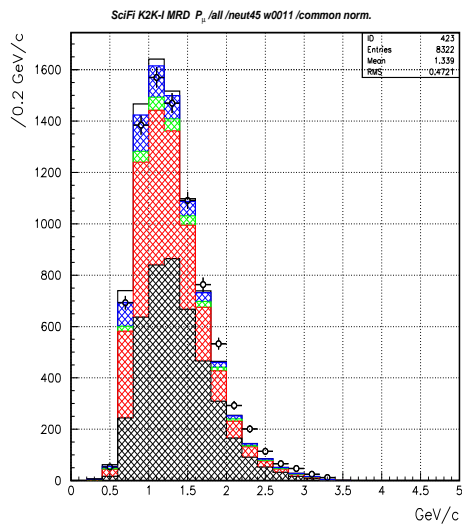


図 A.4: K2K-I,K2K-IIa ミューオン運動量分布

横軸がミューオン運動量、縦軸がMCを表す。黒い点がデータ、実線のヒストグラムがMCである。色分けは黒がCCQE, 赤がCC-1 π , 緑がCC-Coherent π , 青がCC-multi π である

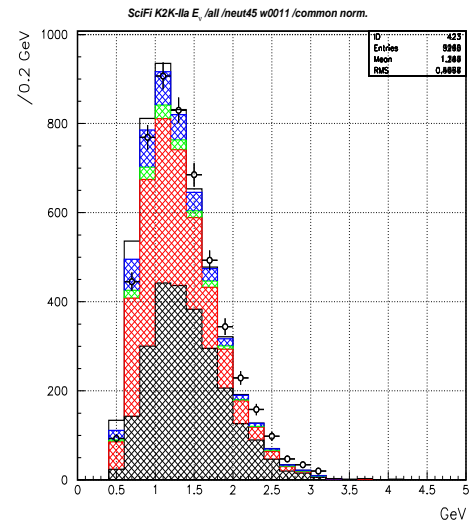
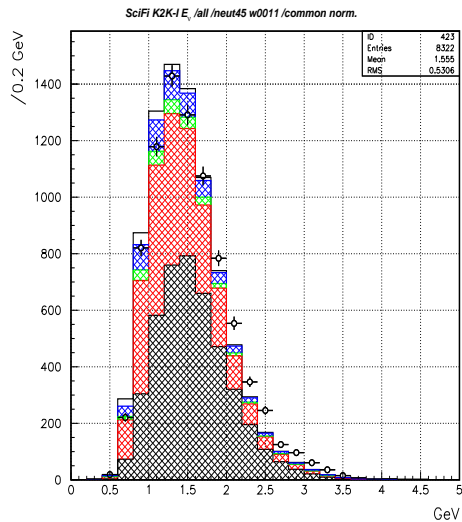


図 A.5: K2K-I,K2K-IIa ニュートリノエネルギー分布

横軸に式??に従って再構成されたニュートリノエネルギー、縦軸がイベント数である。い点がデータ、実線のヒストグラムがMCである。色分けは黒がCCQE, 赤がCC-1 π , 緑がCC-Coherent π , 青がCC-multi π である