

重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析 — part 5

川田真一

概要

¹ 本ノートは重心エネルギー 500 GeV で $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析を行った際の記録であり、文献 [1-4] の続きである。

¹リリースノート

● 2017 年 5 月 15 日 執筆

1 序論

本ノートでは、 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}h$ モードの解析についての最初の結果を主に記述する。この時、以前まで用いていた MC サンプルを少しだけ増量した。具体的には 2016 年までに作成されたフルシミュレーションサンプル全てである (SGV を除く)。このため、以前まで行っていた $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ モードについてもほぼ同じ解析を行い、その結果も記述することとした。

2 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}h$

2.1 概要

このモードではヒッグスの情報に加えて $Z \rightarrow q\bar{q}$ の情報も用いることができる。 $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ モードに比べてシグナル事象数は少ないものの、同程度の精度が得られうるものと期待される。

2.2 事象再構成

2.2.1 概要

このモードの解析では以下の順番で事象再構成を行った。

1. isolated muon の再構成 : IsolatedLeptonTagger
2. jet 再構成および $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons overlay}$ の除去 : k_T clustering (FastJet)

2.2.2 IsolatedLeptonTagger

このプロセッサの説明は文献 [5] に書いてある。このプロセッサでは以下のパラメータを用いる。

- $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$ (電子のみ)
- $(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})/|p|$
- E_{yoke}
- $|p|$
- $|d_0/\sigma(d_0)|$
- $|z_0/\sigma(z_0)|$
- MVA cut

以下の図はそれぞれのパラメータの分布である。

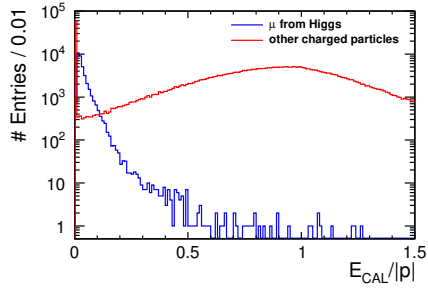


図 1: $(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})/|p|$ 分布。

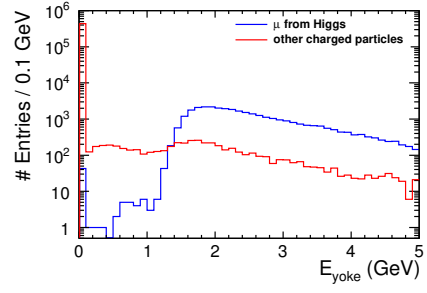


図 2: E_{yoke} 分布。

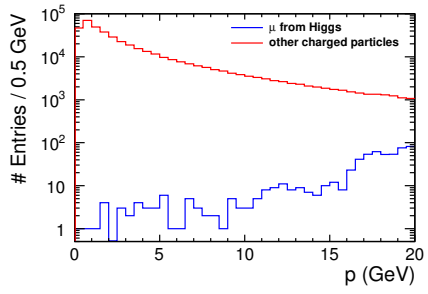


図 3: $|p|$ 分布。

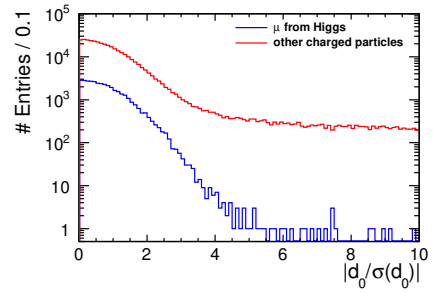


図 4: $|d_0/\sigma(d_0)|$ 分布。

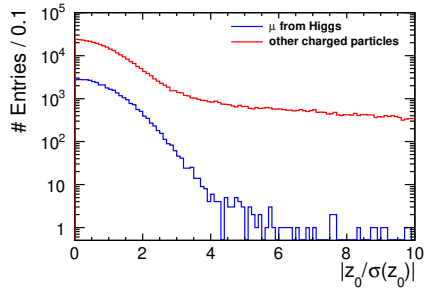


図 5: $|z_0/\sigma(z_0)|$ 分布。

これらから、カットを以下のように定めた。

- $(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})/|p| < 0.5$
- $E_{\text{yoke}} > 0.5 \text{ GeV}$
- $|p| > 10 \text{ GeV}$
- $|d_0/\sigma(d_0)| < 5$
- $|z_0/\sigma(z_0)| < 5$
- MVA cut > 0.7

MVA cut はプロセッサのデフォルト設定値を用いた。この状態でシグナルにおける事象再構成の efficiency (正しくミューオンを正負 1 本ずつ組めた) は 92.9% であった。なお MVA cut は電子とミューオンのそれぞれで設定できるため、電子の方は 2 以上とし、IsolatedLeptonTagger ではミューオンのみを識別できるようにし、電子は識別されないようにした。

2.2.3 k_T clustering

次に isolated muon を取り除いた後の PFO collection に対して k_T clustering を用いる。原理的には 2 本のジェットのみが残っているが、hard gluon jet などが追加で生成されることを考慮し、ジェット 3 本を再構成するように要求した。 R -value (jet radius) は 0.1 刻みで確認し、その最適化には Gaussian fit の中心値を用いた。結果、 $R = 1.0$ が最適であると求めた。次の図は overlay を含んだままの visible mass (M_{vis}) と 3 本のジェットの invariant mass (M_{jets}) の分布図である。

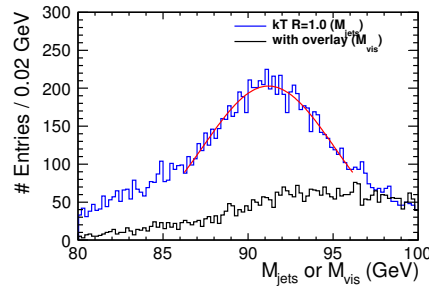


図 6: Mass 分布および Gaussian fit。

Gaussian fit を [86.2, 96.2] GeV の領域で行ったところ、その中心値は 91.201 ± 0.065 となり、 Z mass に非常に近い値を示した。

2.3 解析 — precuts

Precuts として、以下のカットを適用した。

- μ^+ ちょうど 1 本、 μ^- ちょうど 1 本
- ジェットが 0 本でない
- $\chi^2/Ndf(\mu^\pm) < 1.5$
- $\sigma(M_{\mu\mu}) < 1$ GeV
- トラックの数が 8 本以上
- $100 < M_{\mu\mu} < 130$ GeV
- $\cos \theta_{\mu\mu} < 0.55$
- $60 < M_{\text{jets}} < 180$ GeV
- thrust < 0.95

3・4 番目のカットは精度よく測定されたミューオンのみを使用するためのもの、5・6・7・8 番目はシグナルのようなイベントのみを使用するためのもの、9 番目は 2f や 4f バックグラウンドを除去するためのものである。以下はそれぞれの分布である。

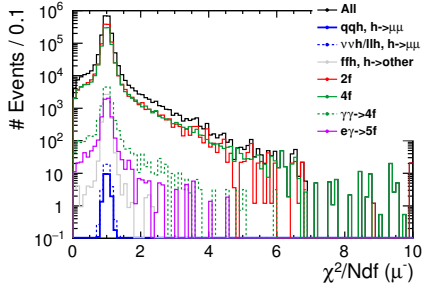


図 7: $\chi^2/Ndf(\mu^-)$ 分布。

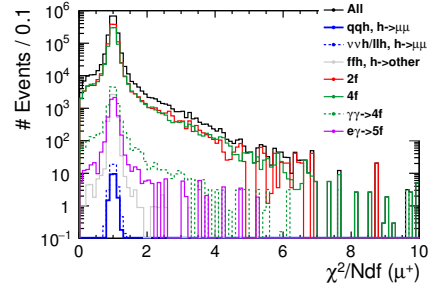


図 8: $\chi^2/Ndf(\mu^+)$ 分布。

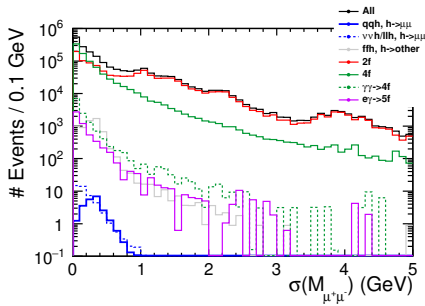


図 9: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

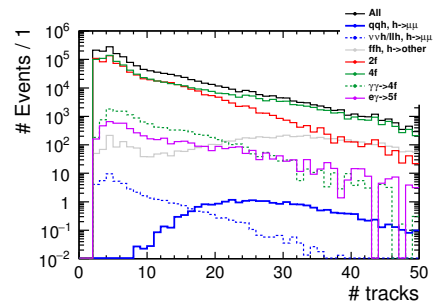


図 10: トラック数分布。

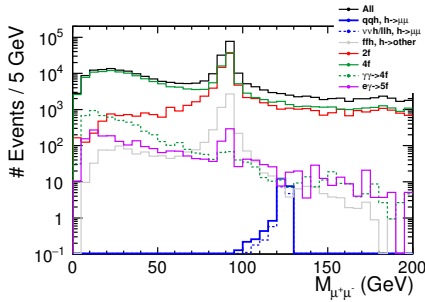


図 11: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

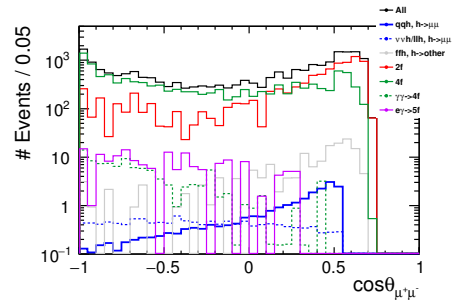


図 12: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

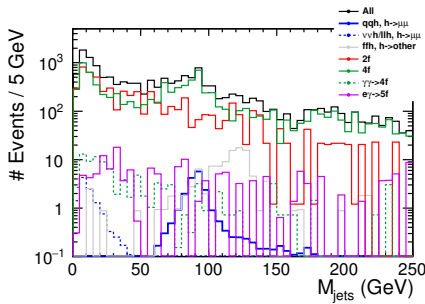


図 13: M_{jets} 分布。

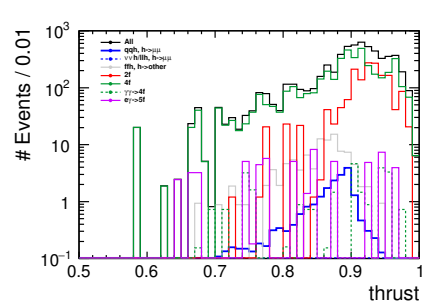


図 14: Thrust 分布。

次の表は precuts 時点でのカットテーブルである。

表 1: Precuts 時のカットテーブル。

	<i>qqh</i>	<i>ννh+ℓℓh</i>	<i>ffh</i>		4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$	2f			
No cut	24.56	64.10	4.116×10^5	4.224×10^7	4.592×10^7	3.356×10^5	2.231×10^5
# μ^\pm	22.76	59.72	6450.41	1.309×10^6	1.015×10^6	1.472×10^4	5922.55
# jet	22.76	45.98	6269.61	1.087×10^6	8.925×10^5	1.394×10^4	5664.37
χ^2/Ndf	22.65	45.72	6242.67	1.044×10^6	8.507×10^5	1.309×10^4	5461.88
$\sigma(M_{\mu\mu})$	22.21	45.13	6153.01	6.914×10^5	8.006×10^5	1.268×10^4	5328.00
# tracks	22.21	13.50	5519.68	1.972×10^5	2.578×10^5	5716.82	2531.53
$M_{\mu\mu}$	21.60	13.07	156.19	9093.54	1.154×10^4	102.26	164.16
$\cos\theta_{\mu\mu}$	21.57	13.07	112.87	5978.01	1.058×10^4	102.26	164.16
M_{jets}	20.00	0.83	101.17	1614.74	4242.11	25.42	60.30
thrust	19.91	0.83	101.17	1302.17	3552.63	21.39	56.36

2.4 解析 — TMVA

ここでは TMVA (BDTG) を用いて解析する。以下の 5 個のパラメータを用いた。

- thrust、 $\cos\theta_{\text{thrust}}$
- $M_{\mu\mu}$
- charge * $\cos\theta_{\mu+}$ 、charge * $\cos\theta_{\mu-}$

以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

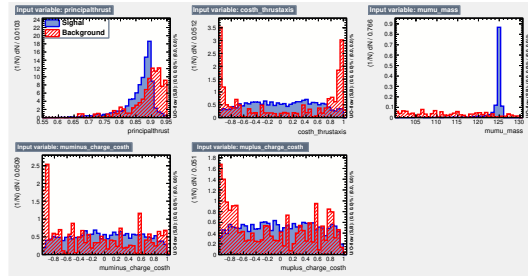


図 15: パラメータ分布。

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

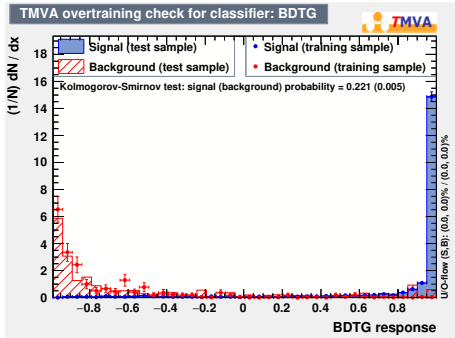


図 16: BDTG output 分布。

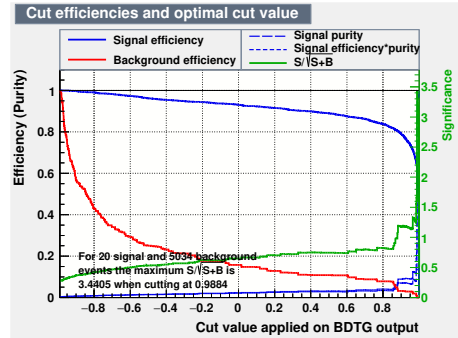


図 17: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 12.25$, $N_{\text{bkg}} = 0.42$ が得られ、統計的有意性は 3.4 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 29\%$ に一致する。またシグナル効率 100%でバックグラウンドなしの理想的なケースを考えた時、その時の精度は 20%であることから、これらの結果は理想の結果からファクター 1.5 離れていることになる。もちろん MC 統計量が不足していることを忘れてはならない。

3 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}h$ (右巻き偏極)

ここまでは左巻きビーム偏極についての解析であった。ほとんど同じことが右巻き偏極でもできる。

3.1 事象再構成

事象再構成は 2.2 節と完全に同じである。

3.2 解析 — precuts

Precut は以下の 1 点を除いて 2.3 節と同じである。

- $60 < M_{\text{jets}} < 180 \text{ GeV} \rightarrow 60 < M_{\text{jets}} < 150 \text{ GeV}$

以下の図はそれぞれのパラメータの分布図である。

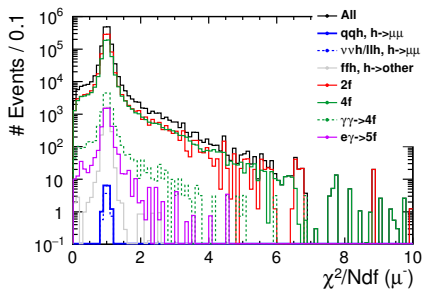


図 18: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^-)$ 分布。

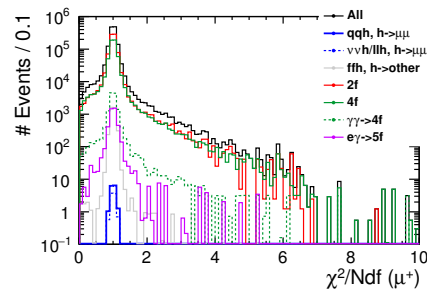


図 19: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^+)$ 分布。

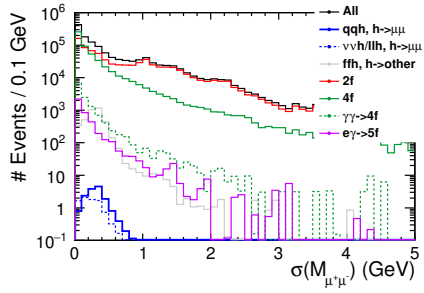


図 20: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

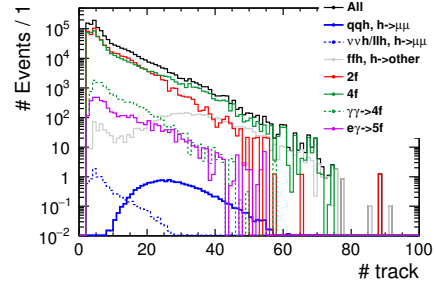


図 21: トラック数分布。

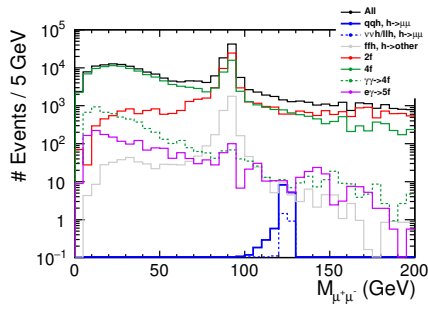


図 22: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

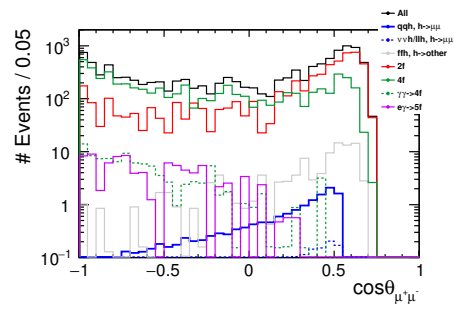


図 23: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

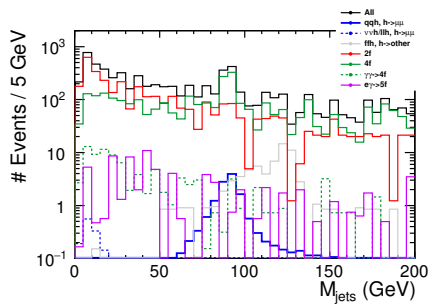


図 24: M_{jets} 分布。

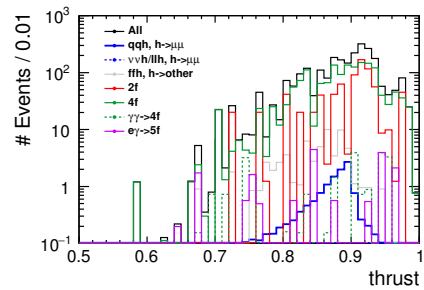


図 25: Thrust 分布。

次の表は precuts 時点でのカットテーブルである。

表 2: Precuts 時のカットテーブル。

	qqh $h \rightarrow \mu\mu$	$\nu\nu h + \ell\ell h$ $h \rightarrow \mu\mu$	ffh $h \rightarrow \text{other}$	2f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
No cut	16.45	12.19	1.274×10^5	2.820×10^7	1.744×10^7	3.356×10^5	1.472×10^5
# μ^\pm	15.29	10.56	3843.84	9.802×10^5	6.168×10^5	1.472×10^4	4532.72
# jet	15.29	8.79	3810.90	8.143×10^5	5.702×10^5	1.394×10^4	4328.89
χ^2/Ndf	15.24	8.75	3797.25	7.830×10^5	5.407×10^5	1.309×10^4	4173.92
$\sigma(M_{\mu\mu})$	14.96	8.61	3736.79	5.322×10^5	5.076×10^5	1.268×10^4	4062.08
# tracks	14.95	2.67	3509.83	1.555×10^5	1.482×10^5	5716.82	1900.04
$M_{\mu\mu}$	14.52	2.58	101.74	5516.61	5475.96	102.26	88.89
$\cos\theta_{\mu\mu}$	14.51	2.58	71.17	3525.66	5039.28	102.26	88.89
M_{jets}	12.88	0.45	63.57	771.66	1603.05	21.79	16.83
thrust	12.82	0.45	63.57	715.40	1468.32	18.49	14.71

3.3 解析 — TMVA

この後、TMVA (BDTG) 解析を行った。以下の 7 個のパラメータを用いた。

- E_{vis} 、thrust、 $\cos\theta_{\text{thrust}}$
- $M_{\mu\mu}$
- charge * $\cos\theta_{\mu^+}$ 、charge * $\cos\theta_{\mu^-}$ 、 $E_{\text{subleading}}$

以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

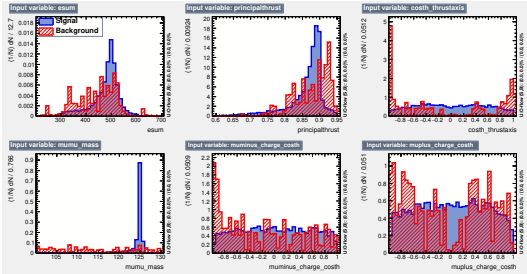


図 26: パラメータ分布 1。

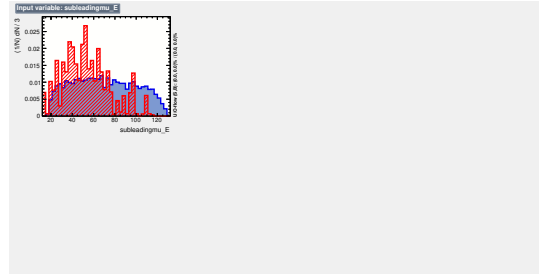


図 27: パラメータ分布 2。

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

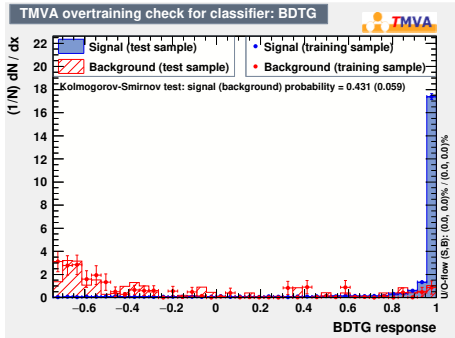


図 28: BDTG output 分布。

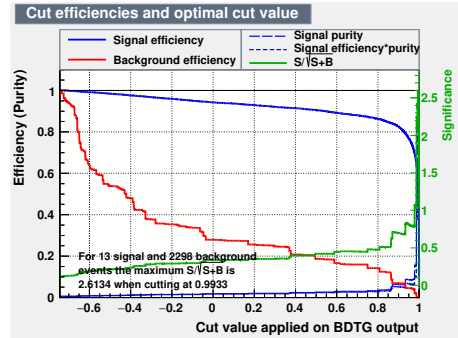


図 29: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 7.20$, $N_{\text{bkg}} = 0.39$ が得られ、統計的有意性は 2.6 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 38\%$ に一致する。またシグナル効率 100% でバックグラウンドなしの理想的なケースを考えた時、その時の精度は 25% であることから、これらの結果は理想の結果からファクター 1.5 離れていることになる。もちろん MC 統計量が不足していることを忘れてはならない。

4 $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$

4.1 事象再構成

事象再構成のやり方とパラメータは全て文献 [4] と同じである。ただし文献 [4] において、電子に対しての MVA cut は誤って 0.5 と入れてしまっていたことが分かった。ここでは正しく 2 としている。

4.2 解析 — precuts

Precuts として以下のカットを適用した。

- μ^+ ちょうど 1 本、 μ^- ちょうど 1 本
- $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^\pm) < 1.5$
- $\sigma(M_{\mu\mu}) < 1 \text{ GeV}$
- $100 < M_{\mu\mu} < 130 \text{ GeV}$
- $\cos \theta_{\mu\mu} < 0.55$
- $N_{P_t > 5 \text{ GeV}} \leq 1$
- $125 < E_{\text{vis}} < 320 \text{ GeV}$
- $P_t > 5 \text{ GeV}$
- $|\cos \theta_{\text{miss}}| < 0.99$

2・3 番目のカットは精度よく測定されたミューオンのみを使用するためのもの、4・5・6・7 番目はシグナルのようなイベントのみを使用するためのもの、8・9 番目は 2f や 4f バックグラウンドを除去するためのものである。文献 [4] との違いは 2 つであり、innermost hit のカットを取り除いたこと、 E_{vis} と、 θ_{miss} のカットをきつとしたことである。以下はそれぞれの分布である。

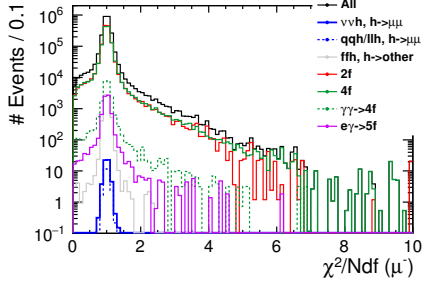


图 30: $\chi^2/Ndf(\mu^-)$ 分布。

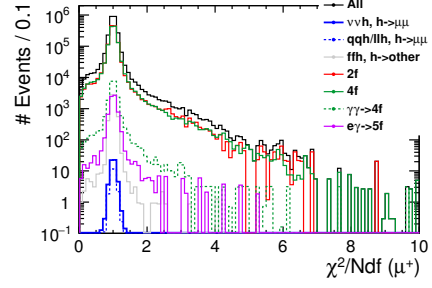


图 31: $\chi^2/Ndf(\mu^+)$ 分布。

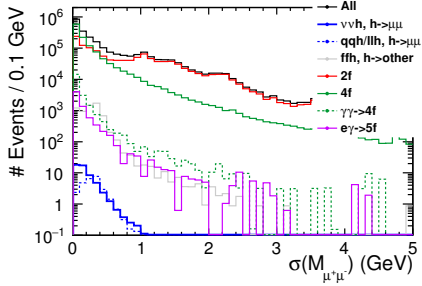


图 32: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

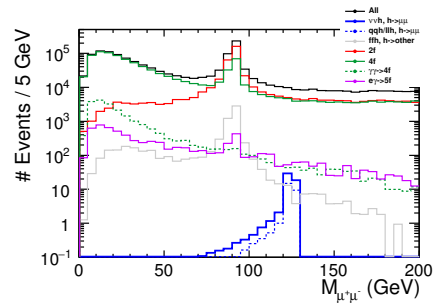


图 33: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

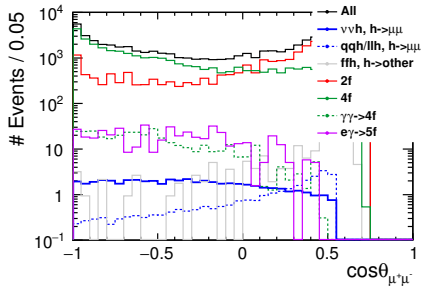


图 34: $\cos \theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

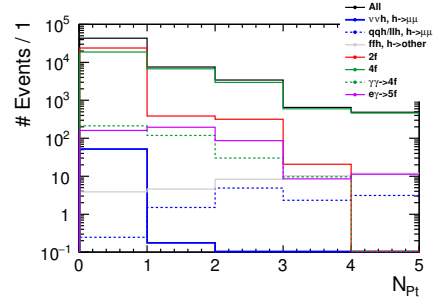


图 35: $N_{P_t > 5 \text{ GeV}}$ 分布。

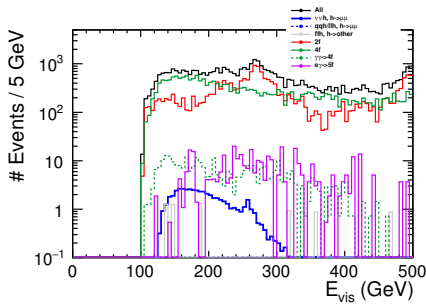


图 36: E_{vis} 分布。

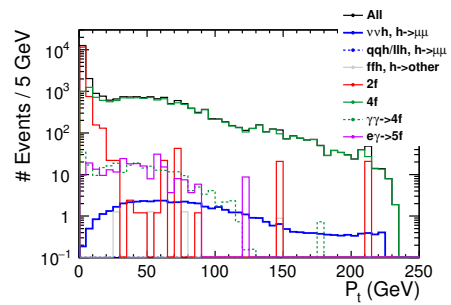


图 37: P_t 分布。

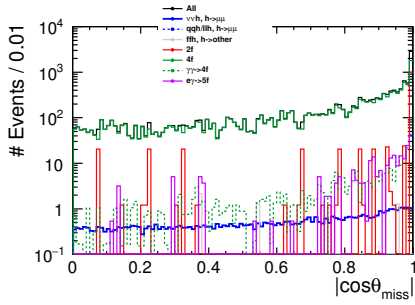


図 38: $\cos \theta_{\text{miss}}$ 分布。

次の表は precuts 時点でのカットテーブルである。

表 3: Precuts 時のカットテーブル。

	$\nu\nu h$	$qqh+\ell\ell h$	ffh	2f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$				
No cut	57.53	31.13	4.116×10^5	4.224×10^7	4.592×10^7	3.356×10^5	2.231×10^5
# μ^\pm	54.82	27.72	6553.83	1.314×10^6	1.262×10^6	2.227×10^4	7206.44
χ^2/Ndf	54.51	27.59	6525.51	1.261×10^6	1.208×10^6	2.118×10^4	6978.30
$\sigma(M_{\mu\mu})$	53.84	27.10	6434.58	8.171×10^5	1.154×10^6	2.078×10^4	6844.43
$M_{\mu\mu}$	52.23	26.37	164.85	3.879×10^4	3.238×10^4	373.65	472.07
$\cos \theta_{\mu\mu}$	52.22	26.33	117.99	2.477×10^4	3.093×10^4	373.65	472.07
N_{P_t}	52.19	1.74	8.44	2.444×10^4	2.559×10^4	330.82	355.34
E_{vis}	51.44	0.19	4.85	1.278×10^4	1.435×10^4	270.32	244.01
P_t	51.25	0.11	4.85	1193.04	1.336×10^4	235.91	234.35
$\cos \theta_{\text{miss}}$	50.22	0.08	4.85	208.25	1.156×10^4	212.17	190.87

文献 [4] の結果と比べると、 E_{vis} と $\cos \theta_{\text{miss}}$ に対するカットをきつくしたにもかかわらず、むしろシグナル数は増加し、多くのバックグラウンドプロセスでは事象数は減少している。つまり、前回かけた innermost hit に対するカットはよくないカットであったことが分かる。4f と $\gamma\gamma \rightarrow 4f$ はイベント数が増えているが、これは追加の MC サンプルの影響と考えられる。

4.3 解析 — TMVA

ここから TMVA (BDTG) を用いて解析する。以下の 8 個のパラメータを用いた。

- E_{vis} 、 P_t 、thrust、 $\cos \theta_{\text{thrustaxis}}$
- $M_{\mu\mu}$
- charge * $\cos \theta_{\mu^+}$ 、charge * $\cos \theta_{\mu^-}$ 、 $E_{\text{subleading}}$

以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

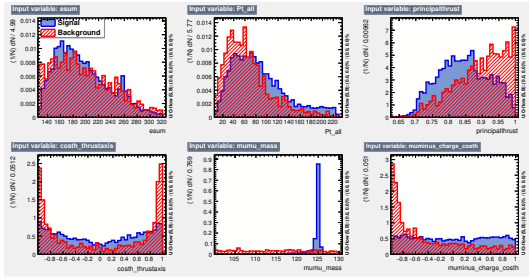


図 39: パラメータ分布 1。

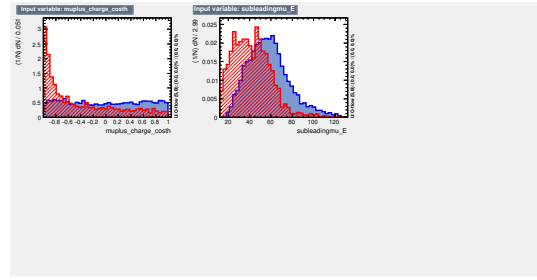


図 40: パラメータ分布 2。

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

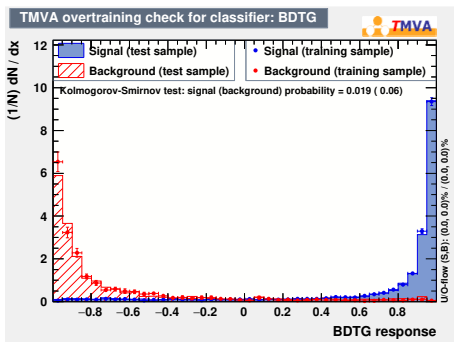


図 41: BDTG output 分布。

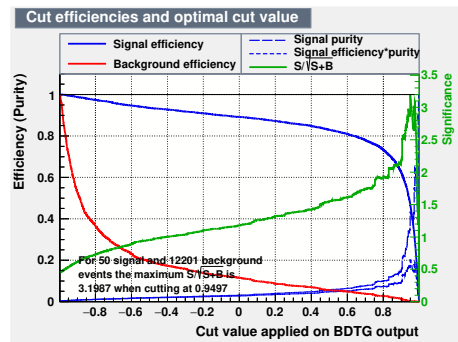


図 42: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 23.54$ 、 $N_{\text{bkg}} = 30.62$ が得られ、統計的有意性は 3.2 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 31\%$ に一致する。またシグナル効率 100% でバックグラウンドなしの理想的なケースを考えた時、その時の精度は 13% であることから、これらの結果は理想の結果からファクター 2.4 離れていることになる。もちろん MC 統計量が不足していることを忘れてはならない。文献 [4] の時よりも相対的に 10% 精度が悪くなったが、劇的というほどではなかった。

5 $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ (右巻き偏極)

このモードに対しても右巻き偏極での解析が行える。シグナルの数が著しく減ってしまうので、精度には期待できない。

5.1 事象再構成

事象再構成のやり方とパラメータは 4.1 節と同じである。

5.2 解析 — precuts

以下の 1 点を除いて precuts は 4.2 節と同じである。

- $125 < E_{\text{vis}} < 320 \text{ GeV} \rightarrow 125 < E_{\text{vis}} < 380 \text{ GeV}$

次の図はそれぞれのパラメータ分布である。

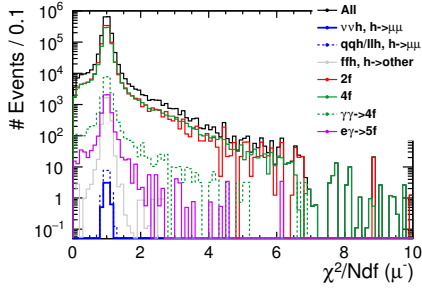


図 43: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^-)$ 分布。

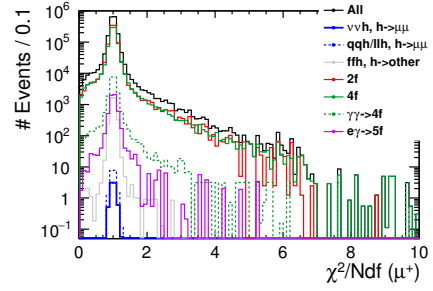


図 44: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^+)$ 分布。

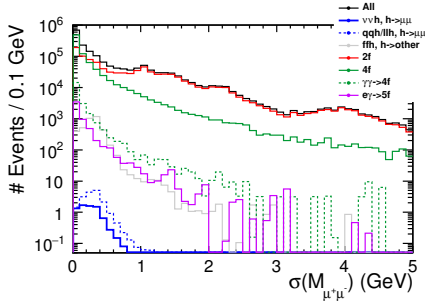


図 45: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

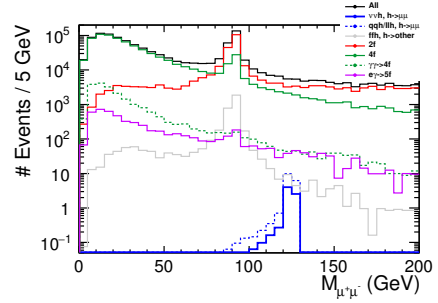


図 46: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

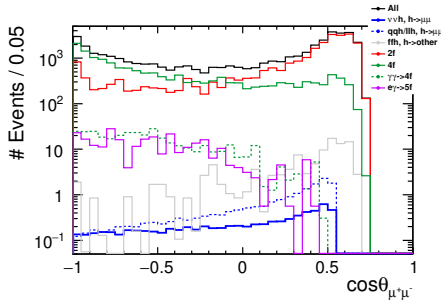


図 47: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

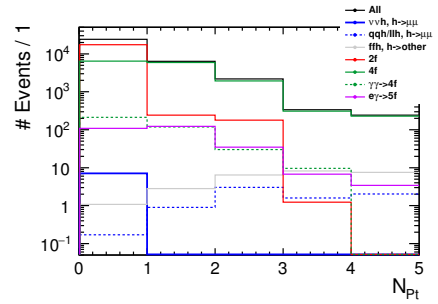


図 48: $N_{P_t > 5\text{GeV}}$ 分布。

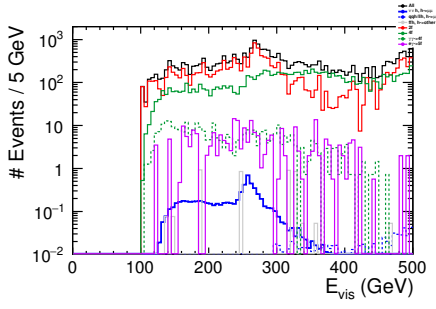


図 49: E_{vis} 分布。

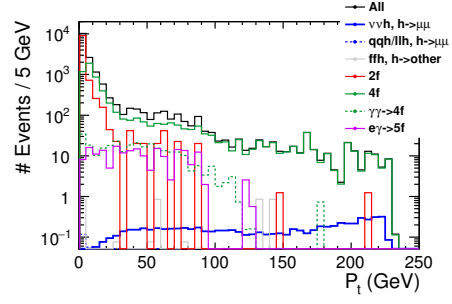


図 50: P_t 分布。

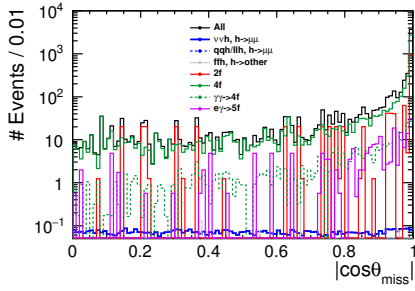


図 51: $\cos \theta_{\text{miss}}$ 分布。

次の表は precuts 時点でのカットテーブルである。

表 4: Precuts 時のカットテーブル。

	νh $h \rightarrow \mu\mu$	$qqh+\ell\ell h$ $h \rightarrow \mu\mu$	$f f h$ $h \rightarrow \text{other}$	2f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
No cut	7.93	20.71	1.274×10^5	2.820×10^7	1.744×10^7	3.356×10^5	1.472×10^5
$\# \mu^\pm$	7.48	18.38	3870.91	9.847×10^5	8.587×10^5	2.227×10^4	5773.28
χ^2/Ndf	7.44	18.32	3855.31	9.458×10^5	8.193×10^5	2.118×10^4	5590.78
$\sigma(M_{\mu\mu})$	7.33	18.00	3794.77	8.291×10^5	7.845×10^5	2.078×10^4	5478.94
$M_{\mu\mu}$	7.11	17.44	107.34	2.670×10^4	1.603×10^4	373.65	202.06
$\cos \theta_{\mu\mu}$	7.11	17.43	76.56	1.788×10^4	1.533×10^4	373.65	202.06
N_{P_t}	7.10	1.07	3.89	1.770×10^4	1.233×10^4	330.82	231.76
E_{vis}	7.05	0.32	3.79	1.043×10^4	5843.63	299.35	203.90
P_t	7.03	0.20	2.94	1392.60	4661.13	264.94	195.81
$\cos \theta_{\text{miss}}$	6.95	0.11	2.94	442.29	1959.48	237.98	164.98

5.3 解析 — TMVA

この後、TMVA (BDTG) 解析を行った。以下の 8 個のパラメータを用いた。

- E_{vis} 、 P_t 、thrust
- $M_{\mu\mu}$
- charge * $\cos \theta_{\mu^+}$ 、charge * $\cos \theta_{\mu^-}$ 、 E_{leading} 、 $E_{\text{subleading}}$

以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

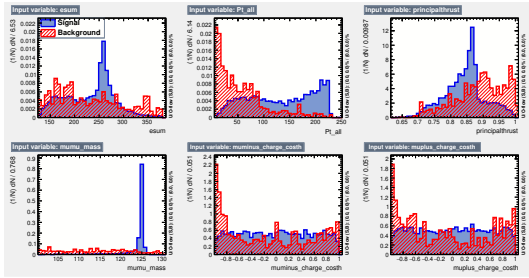


図 52: パラメータ分布 1.

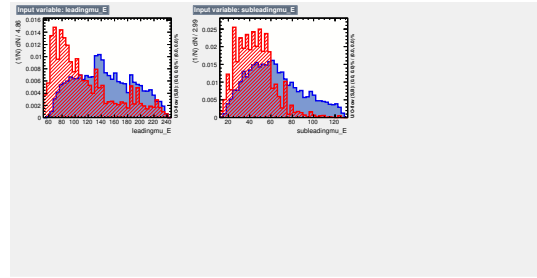


図 53: パラメータ分布 2.

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

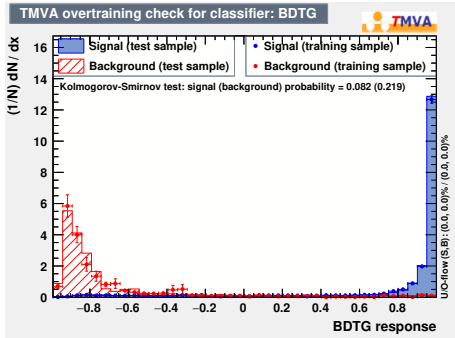


図 54: BDTG output 分布。

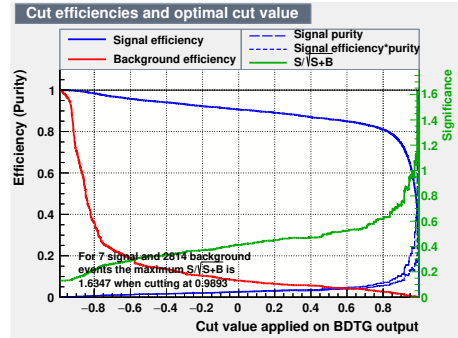


図 55: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 2.90$ 、 $N_{\text{bkg}} = 0.24$ が得られ、統計的有意性は 1.6 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 61\%$ に一致する。またシグナル効率 100% でバックグラウンドなしの理想的なケースを考えた時、その時の精度は 36% であることから、これらの結果は理想の結果からファクター 1.7 離れていることになる。もちろん MC 統計量が不足していることを忘れてはならない。

6 結論・今後の進展

初めて重心エネルギー 500 GeV のケースにおいて $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}h$ モードの解析結果を示した。結果として左巻き偏極（右巻き偏極）ビームの場合に対して $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 29\%$ (38%) を得た。また $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ モードにおけるミスを修正して解析しなおし、左巻き偏極（右偏極）の場合において $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 31\%$ (61%) を得た。いずれも MC 統計量が不足しているが、real analysis に基づく結果を得ることができた。今後の課題としては以下の点が挙げられる。

- IsolatedLeptonTagger では E_{yoke} を見るため、ミュオンの本数をカットとして要求すると SGV サンプル ($\gamma\gamma \rightarrow 2f$ 及び $3f$) が全てカットされる。これらをどう扱うか。
- re-weighting をどのように理解しどのように適用するか。
- 重心エネルギー 250 GeV における解析。

参考文献

- [1] 川田真一 “重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析”
- [2] 川田真一 “重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析 — part 2”
- [3] 川田真一 “重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析 — part 3”
- [4] 川田真一 “重心エネルギー 500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析 — part 4”
- [5] Junping Tian, Claude Dürig “isolated lepton finder”

[https://agenda.linearcollider.org/event/6787/contributions/33415/
attachments/27509/41775/IsoLep_HLRec2016.pdf](https://agenda.linearcollider.org/event/6787/contributions/33415/attachments/27509/41775/IsoLep_HLRec2016.pdf)