

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 6

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 [1-5] の続きである。

¹リリースノート

- 2017 年 5 月 22 日 執筆
- 2017 年 5 月 23 日 タイプミス修正

1 序論

本ノートでは、文献 [5] に少し手を加えた解析結果を記述する。特に再構成についてはその大部分が文献 [5] と同じなので、特段の違いがない限りは省略する。

2 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}h$ (左巻き偏極)

2.1 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
- $0.5 < \chi^2/\text{Ndf}(\mu^\pm) < 1.5$
- $\sigma(M_{\mu\mu}) < 1 \text{ GeV}$
- $100 < M_{\mu\mu} < 130 \text{ GeV}$
- $\cos\theta_{\mu\mu} < 0.55$
- ジェットが 0 本でない
- トラックの数が 8 本以上
- $60 < M_{\text{jets}} < 180 \text{ GeV}$
- $\text{thrust} < 0.95$

1~5 番目のカットはミューオンに関するカットである。2・3 番目は精度よく測定されたミューオンのみを選別するカットであり。その他はシグナルのようなイベントを選別するものである。6~8 番目はジェットに関するカットであり、それぞれシグナルのようなイベント選別するカットである。9 番目は 2f/4f といったバックグラウンドを除去するためのカットである。以下はそれぞれの分布である。

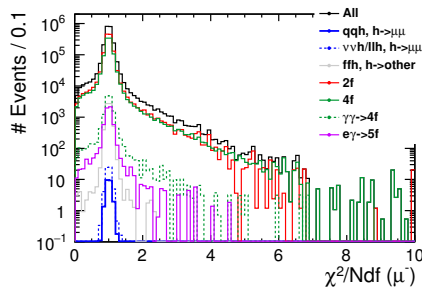


図 1: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^-)$ 分布。

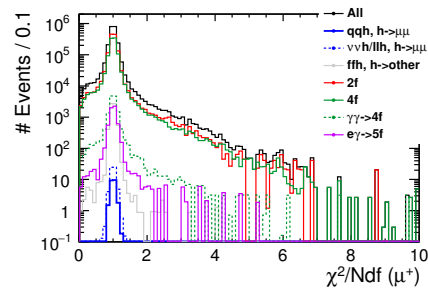


図 2: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^+)$ 分布。

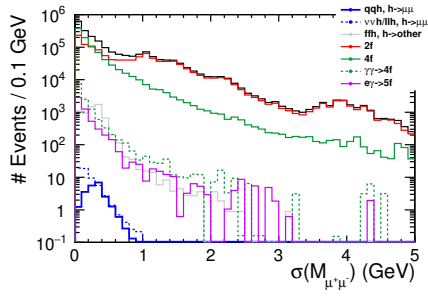


図 3: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

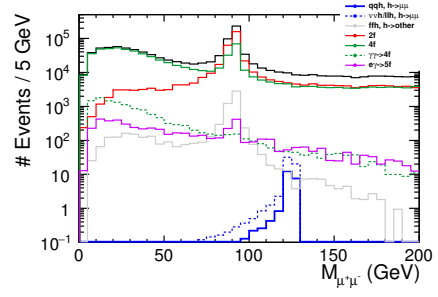


図 4: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

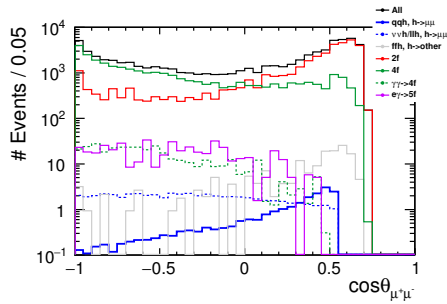


図 5: $\cos \theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

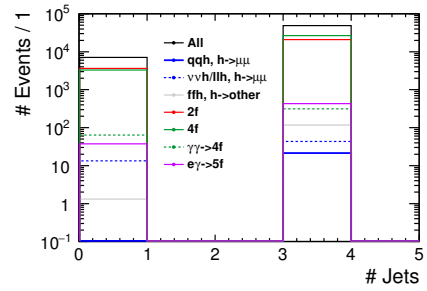


図 6: ジェット数分布。

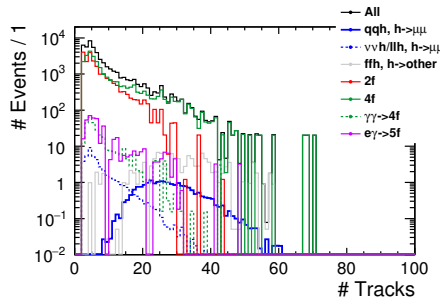


図 7: トラック数分布。

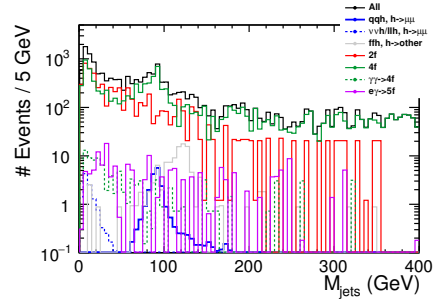


図 8: M_{jets} 分布。

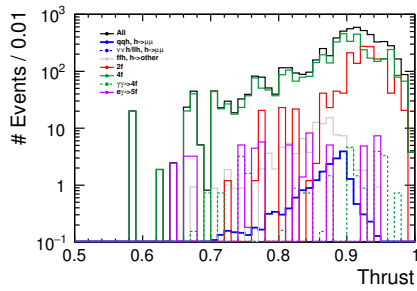


図 9: Thrust 分布。

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>		$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	2f	4f		
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	
χ^2/Ndf	22.59	59.07	6392.52	1.206×10^6	9.251×10^5	1.301×10^4	5526.02	
$\sigma(M_{\mu\mu})$	22.19	58.50	6322.01	8.092×10^5	8.845×10^5	1.275×10^4	5415.43	
$M_{\mu\mu}$	21.58	56.83	164.95	3.863×10^4	3.153×10^4	377.11	468.14	
$\cos\theta_{\mu\mu}$	21.54	56.81	117.99	2.462×10^4	3.008×10^4	377.11	468.14	
# jet	21.54	43.45	116.67	2.099×10^4	2.677×10^4	312.92	430.86	
# tracks	21.54	13.05	112.87	5953.80	1.025×10^4	98.81	160.22	
M_{jets}	19.99	0.83	101.17	1592.94	4049.17	25.42	56.36	
thrust	19.90	0.83	101.17	1281.58	3492.73	21.39	56.36	

2.2 解析 — TMVA

ここでは TMVA (BDTG) を用いて解析する。以下の 6 個のパラメータを用いた。

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

以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

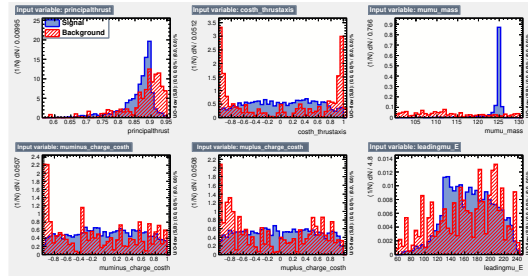


図 10: パラメータ分布。

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

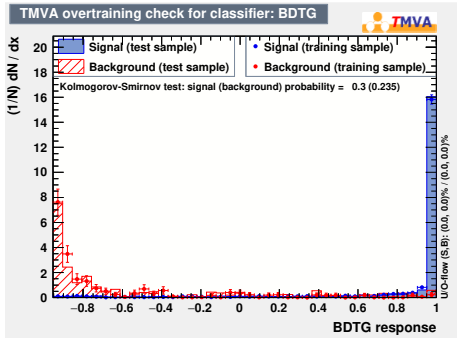


図 11: BDTG output 分布。

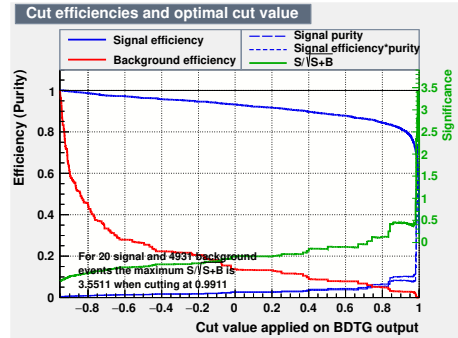


図 12: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 12.99$ 、 $N_{\text{bkg}} = 0.39$ が得られ、統計的有意性は 3.6 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 28\%$ 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 1.4 離れていることになる。

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

3.1 解析 — precuts

Precut は 2.1 節と同じである。以下の図はそれぞれのパラメータの分布図である。

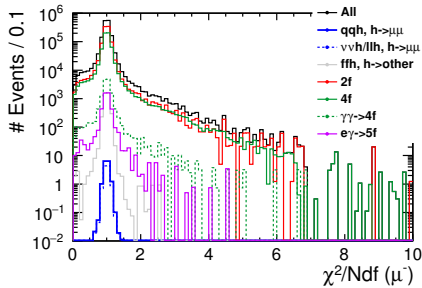


図 13: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^-)$ 分布。

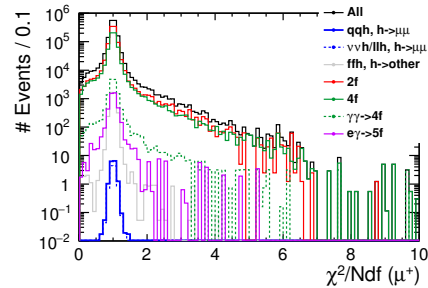


図 14: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^+)$ 分布。

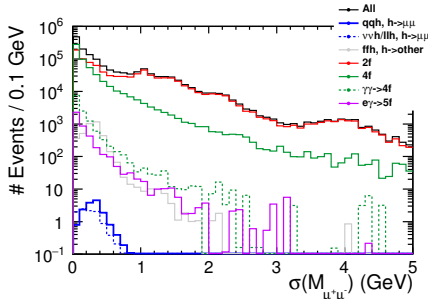


図 15: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

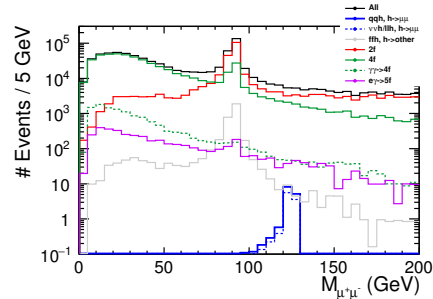


図 16: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

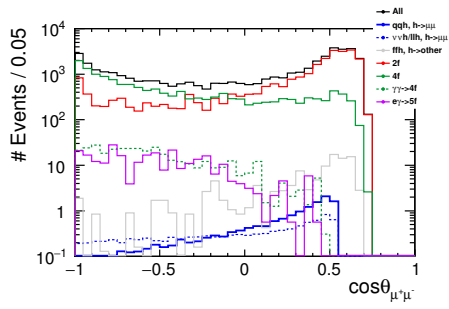


図 17: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

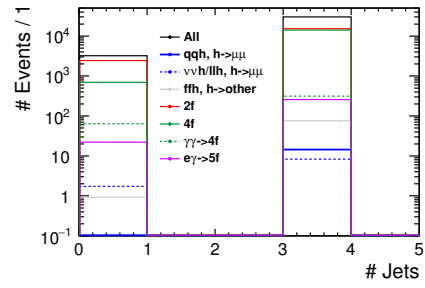


図 18: ジェット数分布。

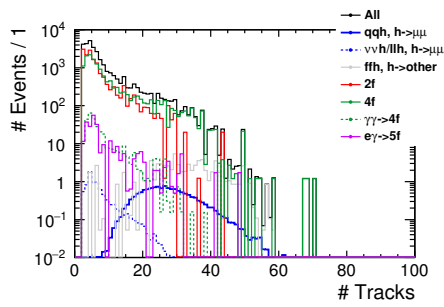


図 19: トラック数分布。

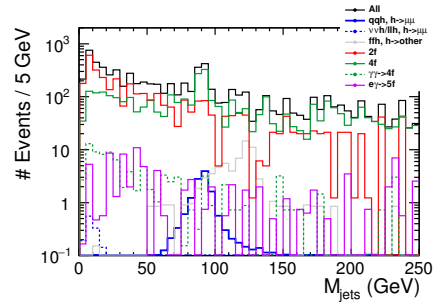


図 20: M_{jets} 分布。

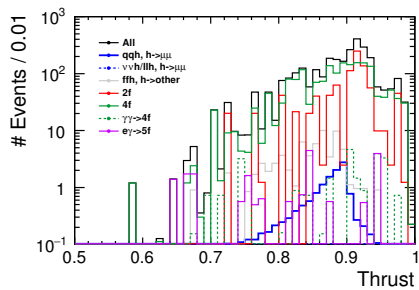


図 21: Thrust 分布。

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
χ^2/Ndf	15.19	10.46	3815.54	9.043×10^5	5.552×10^5	1.301×10^4	4226.24
$\sigma(M_{\mu\mu})$	14.94	10.33	3765.55	6.226×10^5	5.294×10^5	1.275×10^4	4141.14
$M_{\mu\mu}$	14.51	10.01	109.04	2.655×10^4	1.556×10^4	377.11	279.94
$\cos\theta_{\mu\mu}$	14.49	10.01	76.56	1.773×10^4	1.486×10^4	377.11	279.94
# jet	14.49	8.29	75.64	1.529×10^4	1.417×10^4	312.92	257.74
# tracks	14.49	2.58	71.17	3464.06	4941.36	98.81	86.77
M_{jets}	13.38	0.49	67.08	898.60	1803.33	25.42	19.00
thrust	13.31	0.49	67.08	838.60	1646.66	21.39	19.00

3.2 解析 — TMVA

この後、TMVA (BDTG) 解析を行った。用いたパラメータは 2.2 節と同じであるが、トレーニングパラメータのみ改めて最適化した。以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

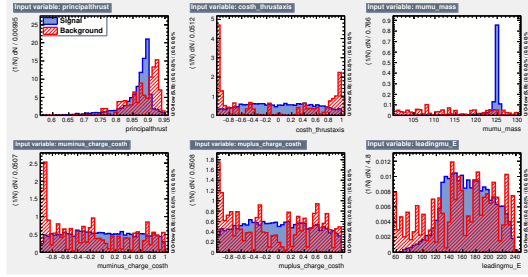


図 22: パラメータ分布

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

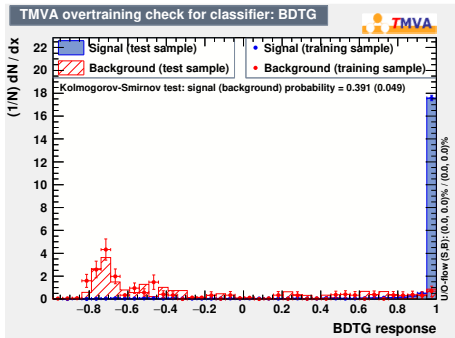


図 23: BDTG output 分布。

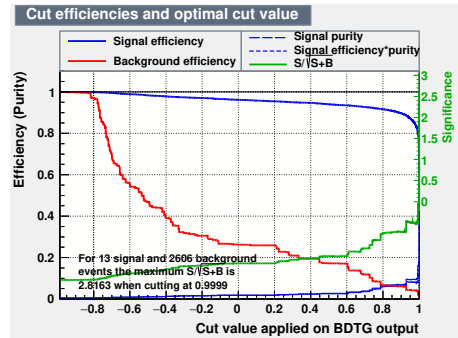


図 24: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 8.18$, $N_{\text{bkg}} = 0.25$ が得られ、統計的有意性は 2.8 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 35\%$ 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 1.4 離れていることになる。

4 $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ (左巻き偏極)

4.1 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
- $0.5 < \chi^2/\text{Ndf}(\mu^\pm) < 1.5$
- $\sigma(M_{\mu\mu}) < 1 \text{ GeV}$
- $100 < M_{\mu\mu} < 130 \text{ GeV}$
- $\cos\theta_{\mu\mu} < 0.55$
- $N_{P_t > 5\text{GeV}} \leq 1$
- $125 < E_{\text{vis}} < 320 \text{ GeV}$
- $P_t > 5 \text{ GeV}$
- $|\cos\theta_{\text{miss}}| < 0.99$

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。以下はそれぞれの分布図である。

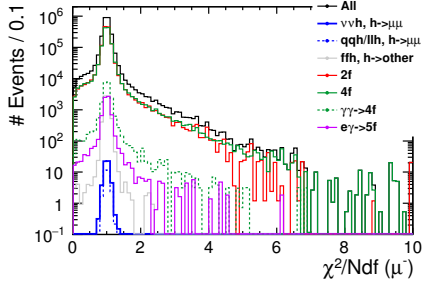


図 25: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^-)$ 分布。

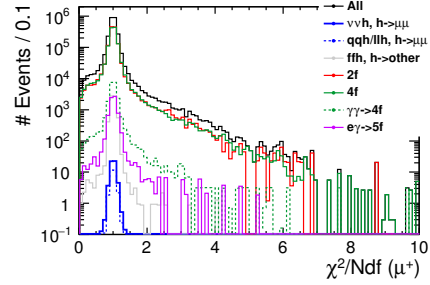


図 26: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^+)$ 分布。

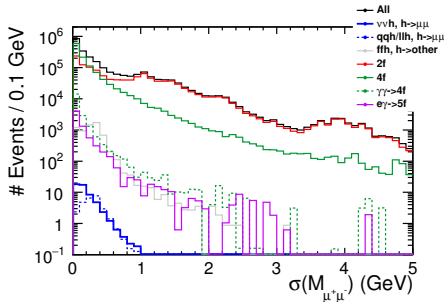


図 27: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

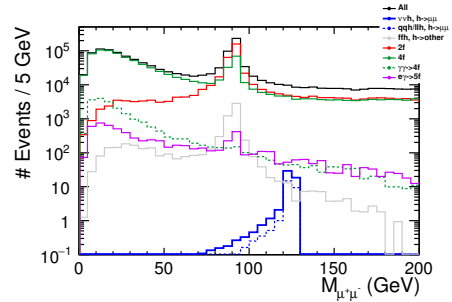


図 28: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

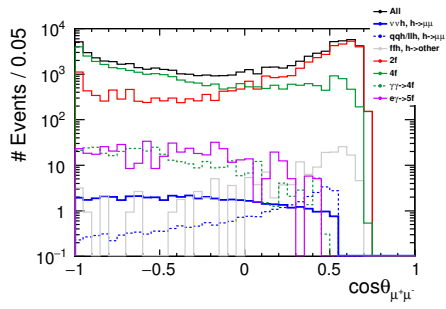


図 29: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

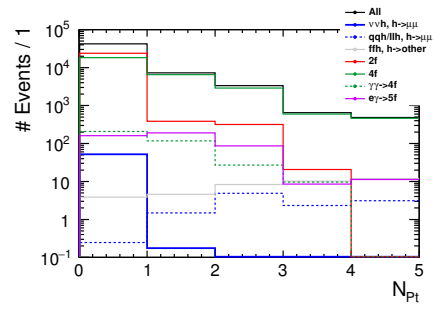


図 30: $N_{P_t > 5\text{GeV}}$ 分布。

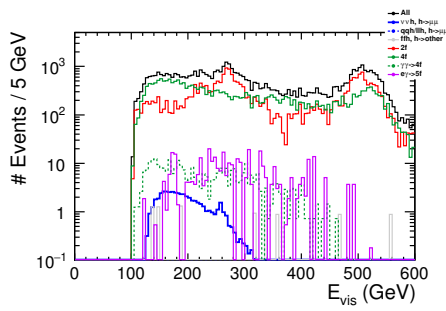


図 31: E_{vis} 分布。

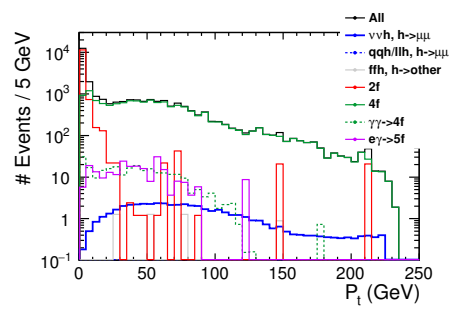


図 32: P_t 分布。

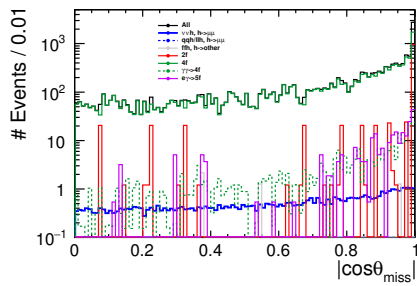


図 33: $\cos\theta_{\text{miss}}$ 分布。

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。

	$\nu\nu h$ $h \rightarrow \mu\mu$	$qqh+\ell\ell h$ $h \rightarrow \mu\mu$	ffh $h \rightarrow \text{other}$	2f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
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	54.21	27.51	6494.56	1.210×10^6	1.157×10^6	2.023×10^4	6775.69
$\sigma(M_{\mu\mu})$	53.68	27.06	6424.05	8.132×10^5	1.116×10^6	1.999×10^4	6665.11
$M_{\mu\mu}$	52.08	26.32	164.85	3.863×10^4	3.152×10^4	364.55	468.14
$\cos\theta_{\mu\mu}$	52.07	26.29	117.99	2.462×10^4	3.007×10^4	364.55	468.14
N_{P_t}	52.03	1.73	8.44	2.428×10^4	2.480×10^4	324.86	351.40
E_{vis}	51.29	0.19	4.85	1.267×10^4	1.391×10^4	265.82	240.07
P_t	51.11	0.11	4.85	1172.44	1.298×10^4	234.55	234.35
$\cos\theta_{\text{miss}}$	50.07	0.08	4.85	208.25	1.126×10^4	210.81	190.87

4.2 解析 — TMVA

ここから TMVA (BDTG) を用いて解析する。以下の 7 個のパラメータを用いた。

- E_{vis} 、thrust
- $M_{\mu\mu}$ 、 $\cos\theta_{\mu\mu}$
- 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。

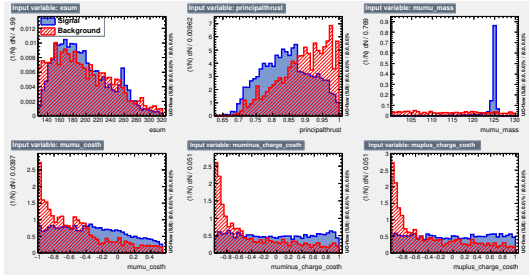


図 34: パラメータ分布 1。

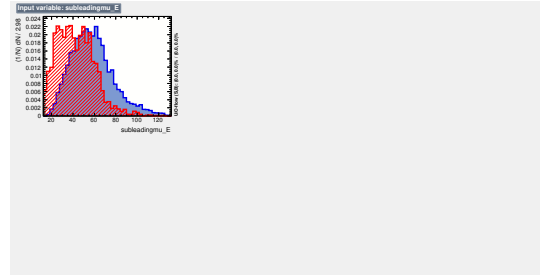


図 35: パラメータ分布 2。

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

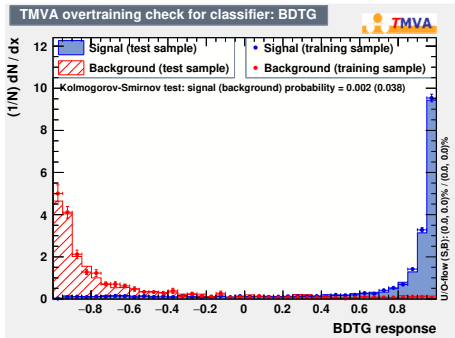


図 36: BDTG output 分布。

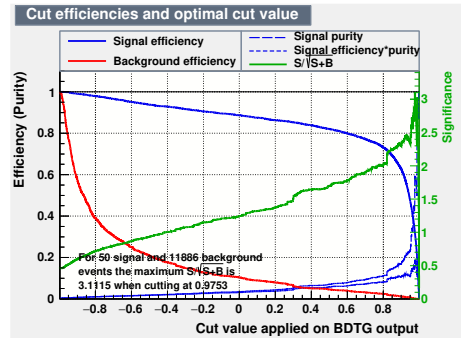


図 37: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 16.25$ 、 $N_{\text{bkg}} = 11.03$ が得られ、統計的有意性は 3.1 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 32\%$ 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 2.5 離れていることになる。

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

5.1 解析 — precuts

Precuts は 4.1 節と同じである。次の図はそれぞれのパラメータ分布である。

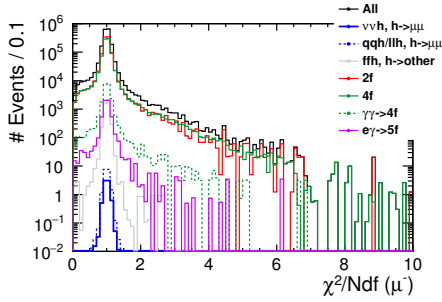


図 38: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^-)$ 分布。

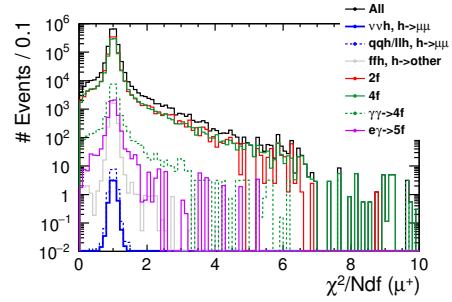


図 39: $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^+)$ 分布。

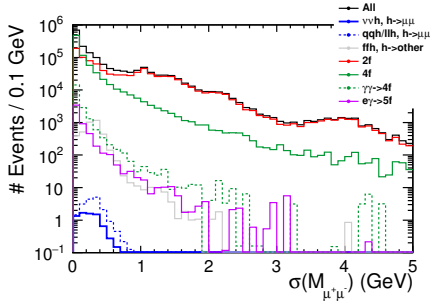


図 40: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

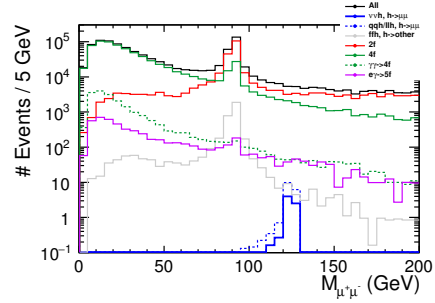


図 41: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

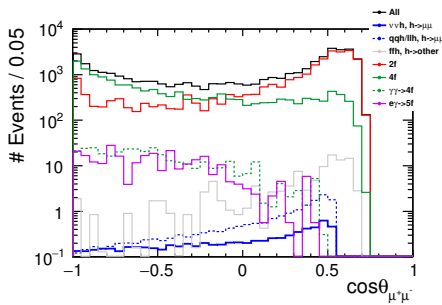


図 42: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

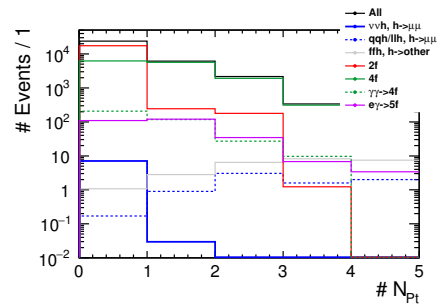


図 43: $N_{P_t > 5\text{GeV}}$ 分布。

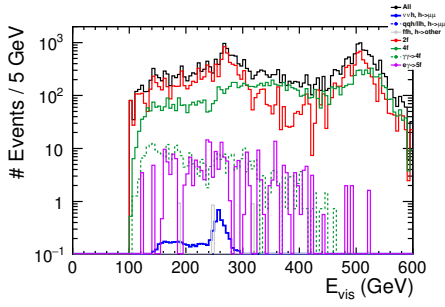


図 44: E_{vis} 分布。

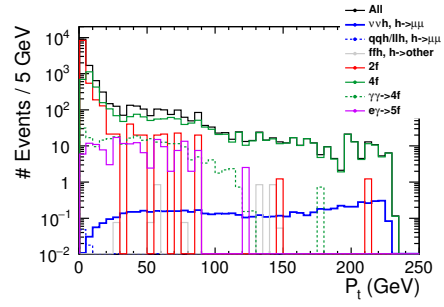


図 45: P_t 分布。

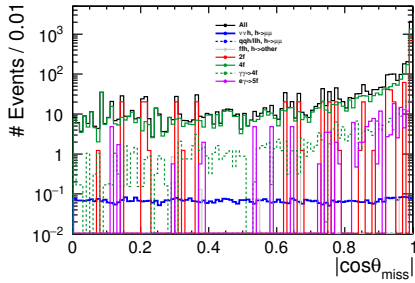


図 46: $\cos \theta_{\text{miss}}$ 分布。

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。

	$\nu\nu h$	$q\bar{q}h+\ell\bar{\ell}h$	$f\bar{f}h$	2f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$				
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	7.41	18.26	3840.66	9.083×10^5	7.822×10^5	2.023×10^4	5411.67
$\sigma(M_{\mu\mu})$	7.31	17.97	3790.67	6.265×10^5	7.561×10^5	1.999×10^4	5326.57
$M_{\mu\mu}$	7.10	17.42	107.34	2.655×10^4	1.556×10^4	364.55	279.94
$\cos \theta_{\mu\mu}$	7.09	17.40	76.56	1.773×10^4	1.486×10^4	364.55	279.94
N_{P_t}	7.08	1.07	3.89	1.755×10^4	1.189×10^4	324.86	229.64
E_{vis}	6.77	0.14	2.83	9359.68	3625.09	265.82	160.85
P_t	6.76	0.09	2.83	1072.68	2937.32	234.55	154.87
$\cos \theta_{\text{miss}}$	6.68	0.05	2.83	393.42	1587.83	210.81	134.19

5.2 解析 — TMVA

この後、TMVA (BDTG) 解析を行った。用いたパラメータは 4.2 節と同じであるが、トレーニングパラメータは改めて最適化した。以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

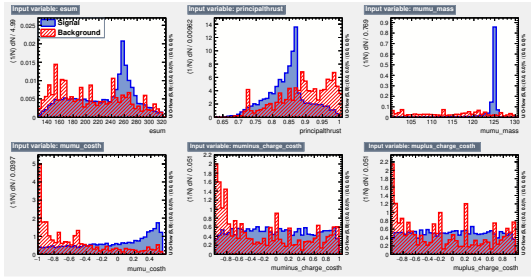


図 47: パラメータ分布 1。

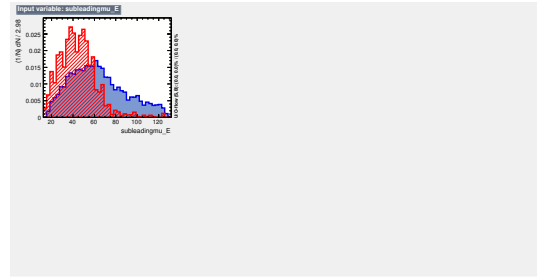


図 48: パラメータ分布 2。

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

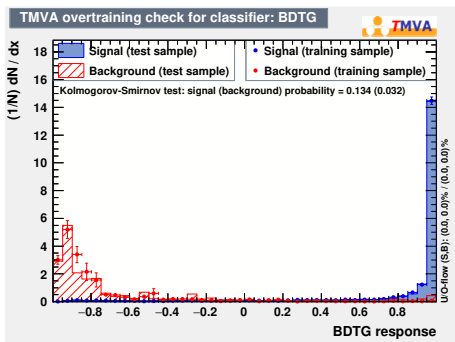


図 49: BDTG output 分布。

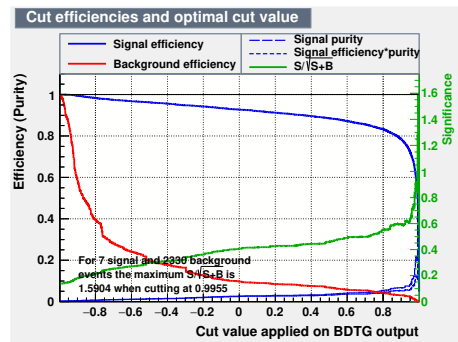


図 50: Significance 分布。

解析から $N_{\text{sig}} = 2.75$ 、 $N_{\text{bkg}} = 0.24$ が得られ、統計的有意性は 1.6 となった。これは $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 63\%$ 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 1.8 離れていることになる。

6 結論・今後の進展

得られた結果を表にまとめた。

表 5: 解析で得られた精度 $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})}$

	$q\bar{q}h$	$\nu\bar{\nu}h$
left-handed	28%	32%
right-handed	35%	63%

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。これらを combine すると精度 17%となる。HL-LHC で統計 3000 fb^{-1} の場合は精度 14%となるので、ほぼ同じような値となった。

今後の課題としては以下の点が挙げられる。

- FSR study.

- IsolatedLeptonTagger では E_{yoke} を見るため、ミュー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] 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 5”
- [6] Junping Tian, Claude Dürig “isolated lepton finder”

<https://agenda.linearcollider.org/event/6787/contributions/33415/>

[attachments/27509/41775/IsoLep_HLRec2016.pdf](#)