

重心エネルギー 250/500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードの解析 — part 9

川田真一

概要

¹ 本ノートは文献 [1–8] の続きである。今回は新たに解析を始めた 250 GeV $\nu\bar{\nu}h$ チャンネルについて記述する。

¹リリースノート

• 2017 年 11 月 6 日 執筆

1 序論

本ノートでは 250 GeV $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ 解析について記述する。

2 250 GeV $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ 解析：左巻き偏極 (nnh250-L)

2.1 使用した MC サンプル

DBD の時代に作成された SM background (2f, 4f, 3f, aa_2f, higgs_ffh) 全てのサンプルを使用した。追加生成されたサンプルのうち、ELOG ID が 56~59 のものを解析に加えた [9]。

2.2 事象再構成

事象再構成には IsolatedLeptonTagger のみを用いた。以下はこのプロセッサに関するパラメータの分布図である。

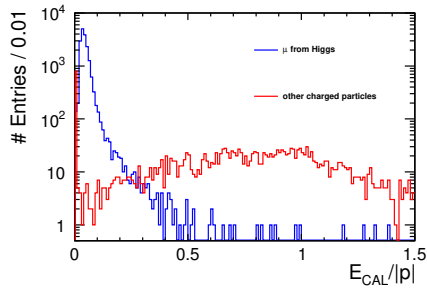


図 1: $E_{\text{CAL}}/|p|$ 分布。

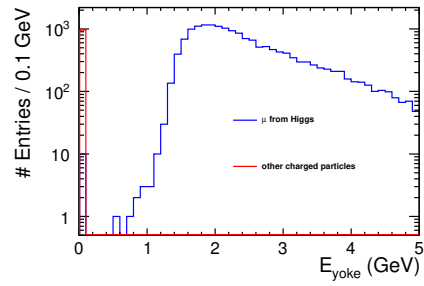


図 2: E_{yoke} 分布。

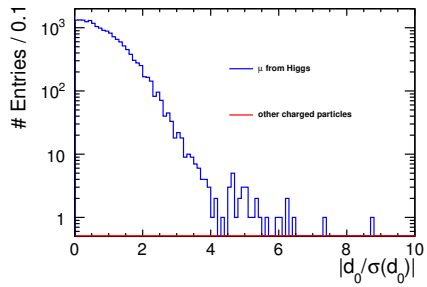


図 3: $|d_0/\sigma(d_0)|$ 分布。

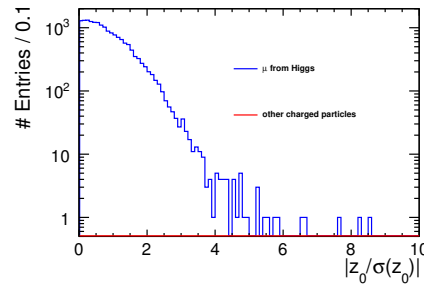


図 4: $|z_0/\sigma(z_0)|$ 分布。

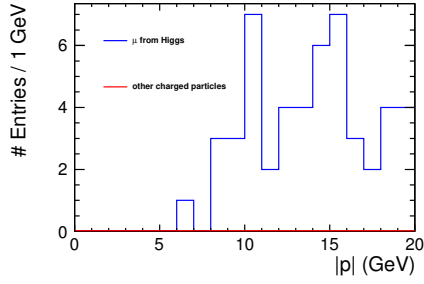


図 5: $|p|$ 分布。

ここから、以下のようにパラメータを決定した。

- $E_{\text{CAL}}/|p| < 0.3$
- $E_{\text{yoke}} > 0.5 \text{ GeV}$
- $|d_0/\sigma(d_0)| < 5$
- $|z_0/\sigma(z_0)| < 5$
- $|p| > 5 \text{ GeV}$

シグナルサンプルに対して、 μ^+ 本と μ^- 本を正しく再構成できた割合は 95.8%だった。

2.3 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
- $0.5 < \chi^2/\text{Ndf}(\mu^\pm) < 1.5$
- $|d_0(\mu^\pm)| < 0.02 \text{ mm}$ 、 $|d_0(\mu^-) - d_0(\mu^+)| < 0.02 \text{ mm}$
- $|z_0(\mu^\pm)| < 0.5 \text{ mm}$ 、 $|z_0(\mu^-) - z_0(\mu^+)| < 0.5 \text{ mm}$
- $\sigma(M_{\mu^+\mu^-}) < 0.5 \text{ GeV}$
- $100 < M_{\mu^+\mu^-} < 130 \text{ GeV}$
- $\cos \theta_{\mu^+\mu^-} < -0.4$
- $N_{P_t > 5\text{GeV}} = 0$ (charged only)
- $125 < E_{\text{vis}} < 190 \text{ GeV}$
- $40 < M_{\text{rec}} < 140 \text{ GeV}$
- missing $P_t > 5 \text{ GeV}$
- $|\cos \theta_{\text{miss}}| < 0.99$

以下にそれぞれの分布図とカットテーブルを並べる。

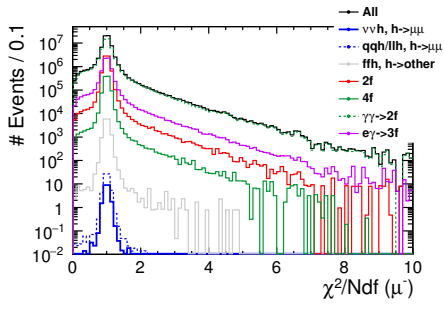


图 6: $\chi^2/Ndf(\mu^-)$ 分布。

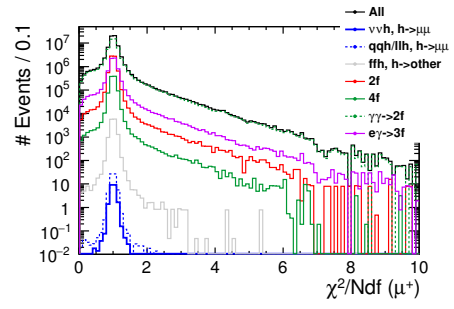


图 7: $\chi^2/Ndf(\mu^+)$ 分布。

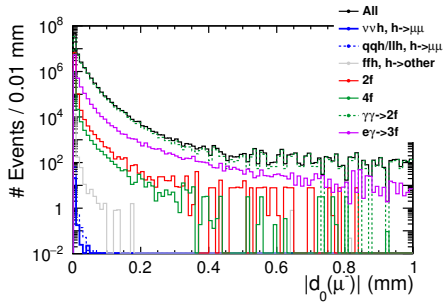


图 8: $|d_0(\mu^-)|$ 分布。

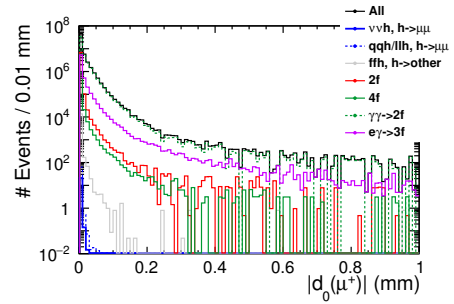


图 9: $|d_0(\mu^+)|$ 分布。

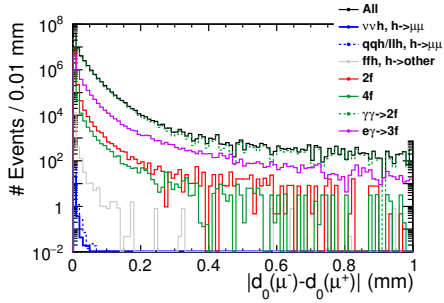


图 10: $|d_0(\mu^-) - d_0(\mu^+)|$ 分布。

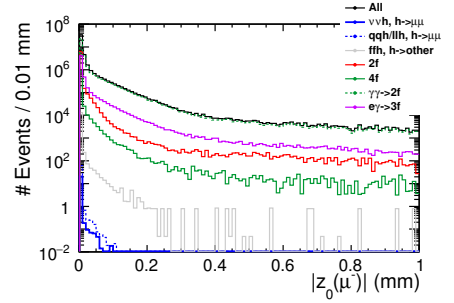


图 11: $|z_0(\mu^-)|$ 分布。

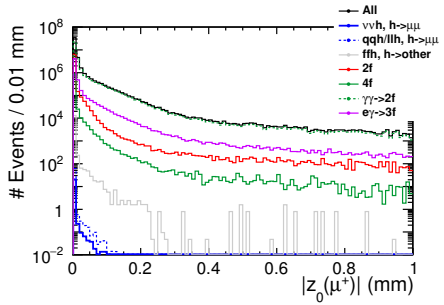


图 12: $|z_0(\mu^+)|$ 分布。

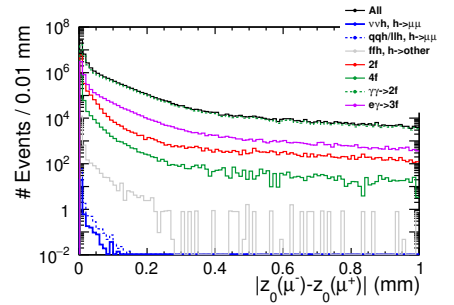


图 13: $|z_0(\mu^-) - z_0(\mu^+)|$ 分布。

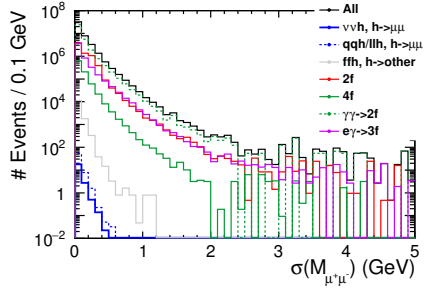


图 14: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

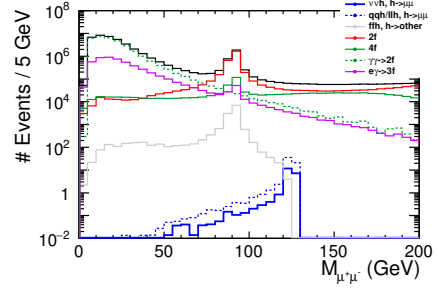


图 15: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

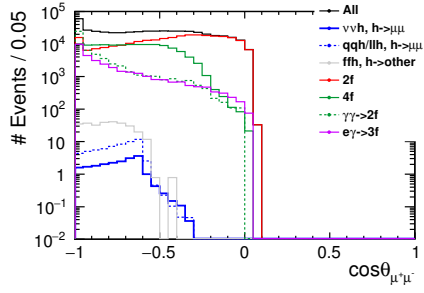


图 16: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

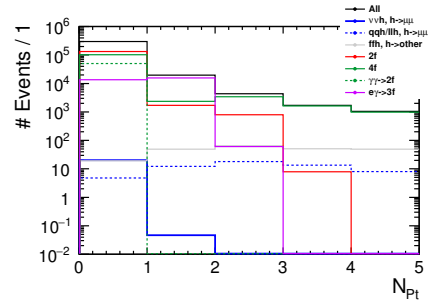


图 17: $N_{P_t > 5\text{GeV}}$ 分布。

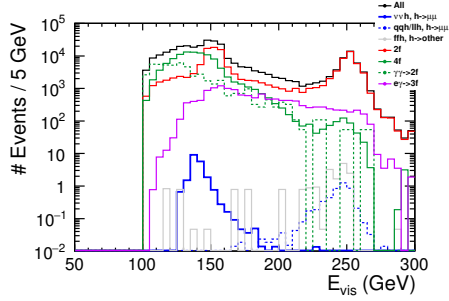


图 18: E_{vis} 分布。

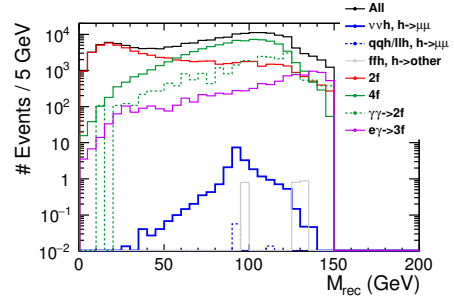


图 19: M_{rec} 分布。

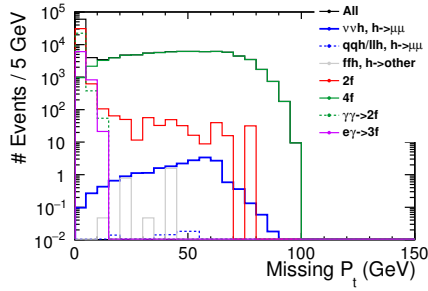


图 20: Missing P_t 分布。

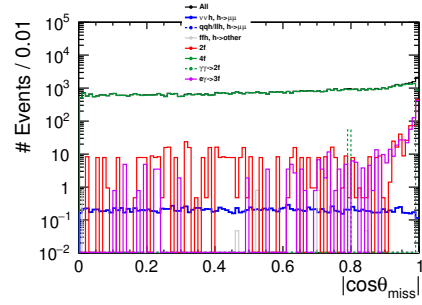


图 21: $|\cos\theta_{\text{miss}}|$ 分布。

表 1: nnh250-L の precuts 時のカットテーブル。

	$\nu\nu h$	$qqh+\ell\ell h$	ffh		2f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 2f$	3f
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$					
No cut	22.55	70.82	4.311×10^5	1.569×10^8	5.515×10^7	8.925×10^8	1.645×10^9	
# μ^\pm	21.55	64.73	1.407×10^4	7.114×10^6	9.854×10^5	5.400×10^7	7.259×10^6	
χ^2/Ndf	21.37	64.04	1.392×10^4	6.893×10^6	9.564×10^5	4.476×10^7	6.351×10^6	
d_0	21.25	63.60	1.369×10^4	6.799×10^6	9.265×10^5	3.310×10^7	5.272×10^6	
z_0	21.23	63.54	1.368×10^4	6.782×10^6	9.246×10^5	3.263×10^7	5.218×10^6	
$\sigma(M_{\mu\mu})$	21.21	63.50	1.367×10^4	6.658×10^5	9.174×10^5	3.217×10^7	5.111×10^6	
$M_{\mu\mu}$	20.55	61.73	285.29	2.793×10^5	1.265×10^5	5.362×10^4	3.244×10^4	
$\cos\theta_{\mu\mu}$	20.40	61.63	285.29	1.348×10^5	1.121×10^5	5.059×10^4	2.913×10^4	
N_{P_t}	20.35	4.78	19.16	1.323×10^5	1.030×10^5	5.059×10^4	1.349×10^4	
E_{vis}	20.29	0.10	2.46	7.806×10^4	8.082×10^4	2.439×10^4	8792.87	
M_{rec}	20.21	0.10	2.46	3.223×10^4	7.777×10^4	2.286×10^4	6937.62	
missing	20.11	0.10	2.46	1132.23	7.681×10^4	431.68	847.30	
θ_{miss}	20.00	0.10	2.46	683.28	7.593×10^4	53.96	425.21	

2.4 TMVA 解析

TMVA 解析には以下の 8 個のパラメータを用いた。

- E_{vis} 、 $\cos\theta_{\text{thrust}}$
- $P_{t,\mu^+\mu^-}$ 、 $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 、 $\cos\theta_h$
- charge * $\cos\theta_{\mu^-}$ 、charge * $\cos\theta_{\mu^+}$
- M_{rec}

以下はそれぞれのパラメータの分布図である。全てのヒストグラムはそれぞれ 1 に規格化してあり、青がシグナルで赤がバックグラウンドである。

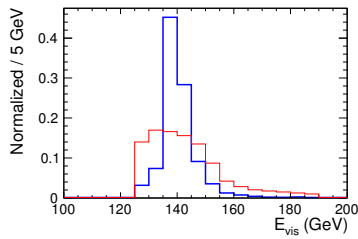


図 22: E_{vis} 分布。

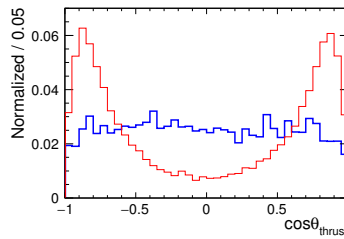


図 23: $\cos\theta_{\text{thrust}}$ 分布。

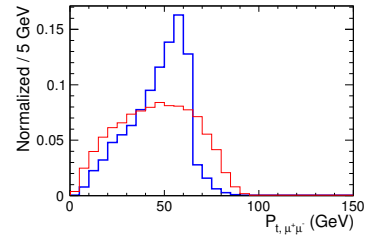


図 24: $P_{t,\mu^+\mu^-}$ 分布。

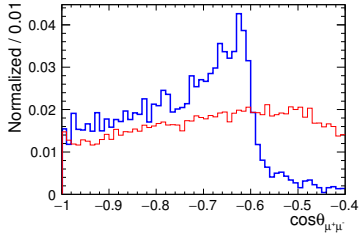


図 25: $\cos \theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

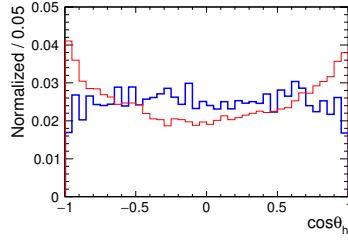


図 26: $\cos \theta_h$ 分布。

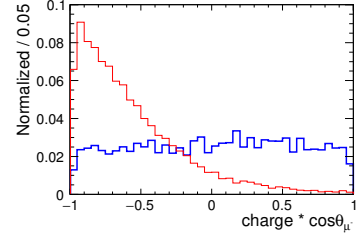


図 27: $\text{charge} * \cos \theta_{\mu^-}$ 分布。

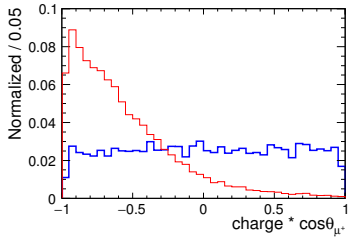


図 28: $\text{charge} * \cos \theta_{\mu^+}$ 分布。

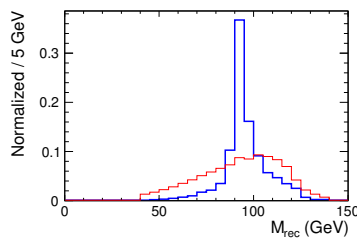


図 29: M_{rec} 分布。

TMVA 解析の結果が次の図である。ここから BDTG output > 0.6 とした。

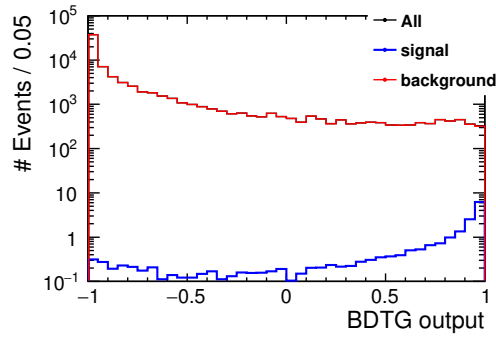


図 30: BDTG output 分布。

2.5 Toy MC による評価

BDTG output カットを施した後の $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布が次の図である。

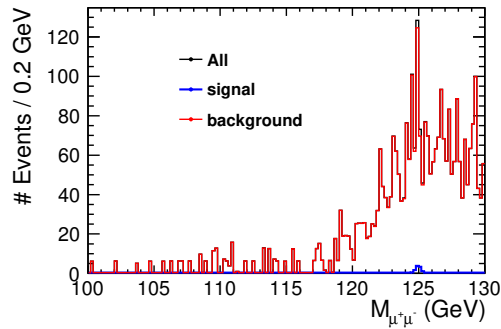


図 31: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

ここでさらに $M_{\mu^+\mu^-} > 120$ GeV のカットを適用した。全てのカット適用後の残存イベント数は $N_S = 13$ 、 $N_B = 2704$ である。ここでのモデル関数として、シグナルには規格化ガウス関数 (gausn)、バックグラウンドには定数 (pol0) を用いた。それらのフィッティング結果が次の図である。シグナルは緑、バックグラウンドは黄色で示してある。またバックグラウンドのフィッティングには対数尤度メソッドを用いている。

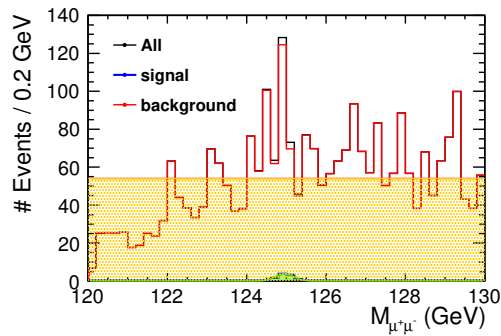


図 32: $M_{\mu^+\mu^-}$ のフィッティング結果。

以上でモデル関数が得られたので、ここから疑似実験を行う。この 1 例が次の図である。青がシグナル疑似データ、赤がバックグラウンド疑似データ、黒が青と赤の足し合わせ、紫曲線が関数 f によるフィッティングの結果である。

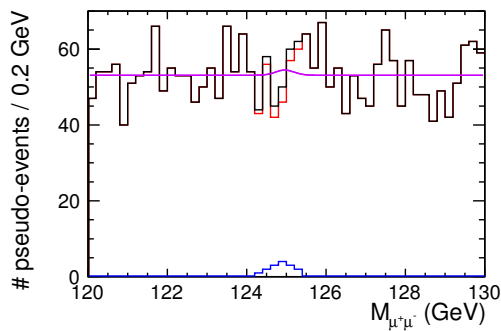


図 33: 疑似実験の 1 例。

この疑似実験を 20 万回行い、得られた Y_S 分布と pull 分布が次の 2 図である。

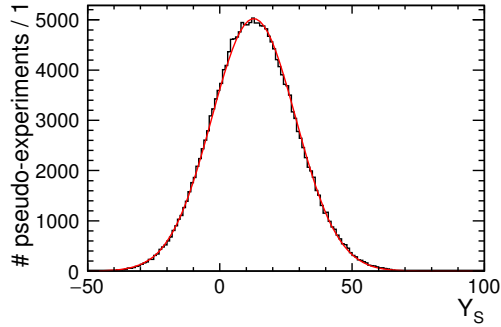


図 34: Y_S 分布。

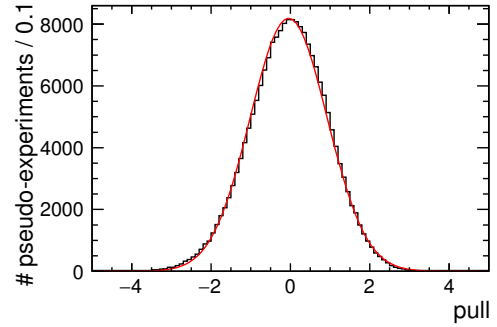


図 35: Pull 分布。

Y_S 分布をガウス関数でフィットしたところ、中心値 12.851 ± 0.036 、幅 15.868 ± 0.025 となり、最終的な精度が 123.5%と求められた。また pull 分布をガウス関数でフィットしたところ、中心値 -0.0414 ± 0.0022 、幅 0.9711 ± 0.0015 となった。

3 250 GeV $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ 解析：右巻き偏極 (nnh250-R)

3.1 使用した MC サンプル

当然ながら nnh250-L 解析と同じものを用いた。

3.2 事象再構成

nnh250-L 解析と同じ手法を適用した。

3.3 Precuts

nnh250-L 解析と同じカットを precuts として適用した。以下にそれぞれの分布図とカットテーブルを並べる。

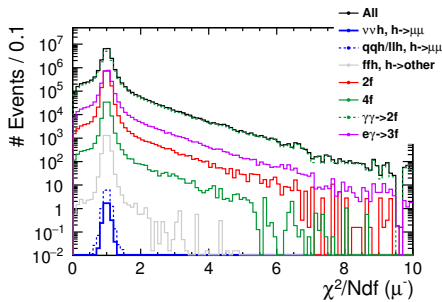


図 36: $\chi^2/Ndf(\mu^-)$ 分布。

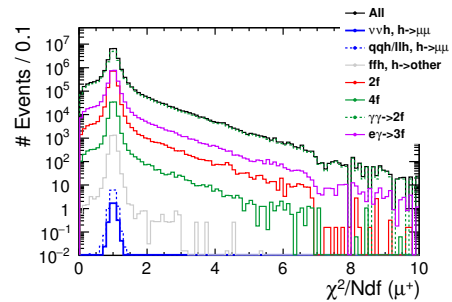


図 37: $\chi^2/Ndf(\mu^+)$ 分布。

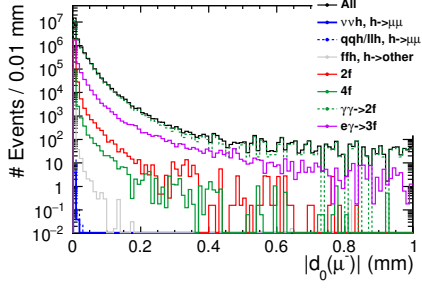


图 38: $|d_0(\mu^-)|$ 分布。

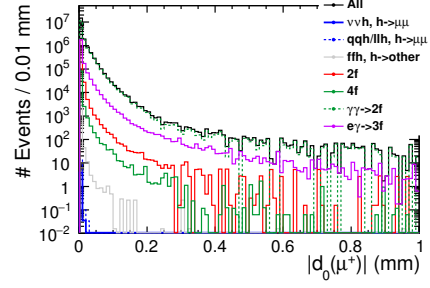


图 39: $|d_0(\mu^+)|$ 分布。

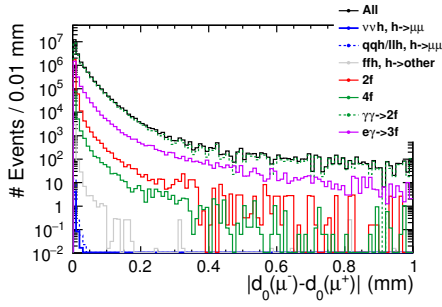


图 40: $|d_0(\mu^-) - d_0(\mu^+)|$ 分布。

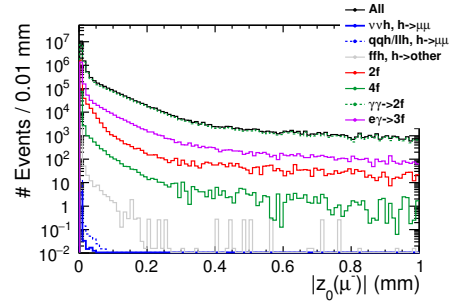


图 41: $|z_0(\mu^-)|$ 分布。

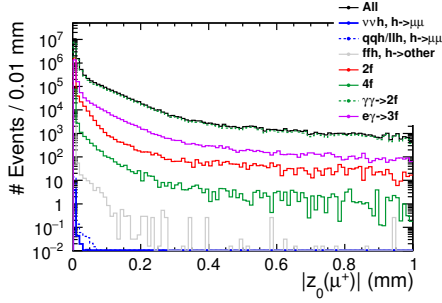


图 42: $|z_0(\mu^+)|$ 分布。

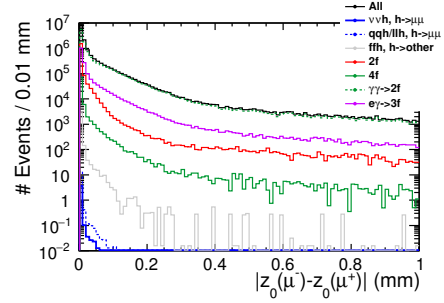


图 43: $|z_0(\mu^-) - z_0(\mu^+)|$ 分布。

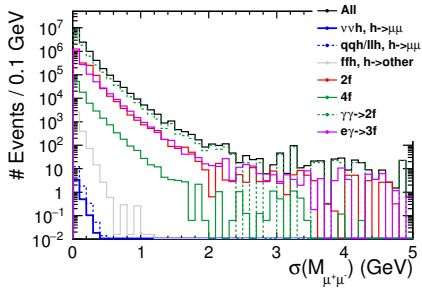


图 44: $\sigma(M_{\mu^+\mu^-})$ 分布。

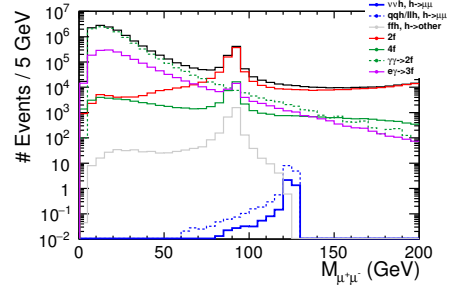


图 45: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

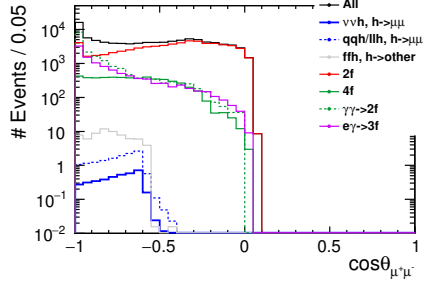


图 46: $\cos \theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

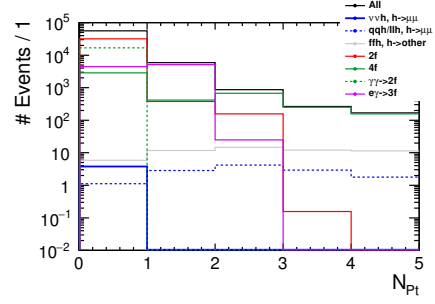


图 47: $N_{P_t > 5\text{GeV}}$ 分布。

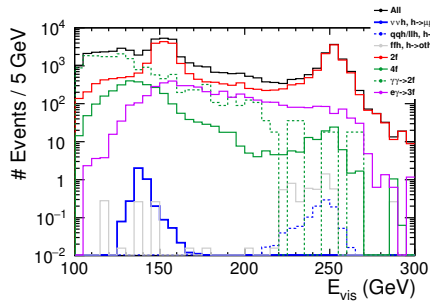


图 48: E_{vis} 分布。

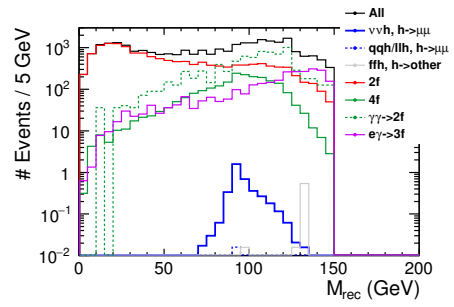


图 49: M_{rec} 分布。

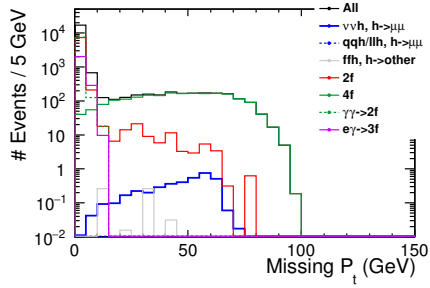


图 50: Missing P_t 分布。

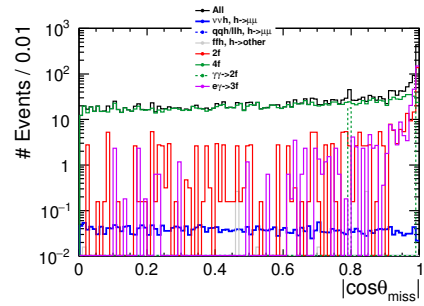


图 51: $|\cos \theta_{\text{miss}}|$ 分布。

表 2: nmh250-R の precuts 時のカットテーブル。

	$\nu\nu h$	$q\bar{q}h+\ell\ell h$	$f\bar{f}h$		4f	$\gamma\gamma \rightarrow 2f$	3f
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$	2f			
No cut	4.19	16.22	9.266×10^4	3.654×10^7	2.295×10^6	2.975×10^8	6.821×10^8
# μ^\pm	4.03	14.74	3178.03	1.845×10^6	9.065×10^4	1.800×10^7	2.412×10^6
χ^2/Ndf	3.98	14.60	3140.65	1.785×10^6	8.613×10^4	1.492×10^7	2.110×10^6
d_0	3.96	14.49	3090.25	1.760×10^6	8.221×10^4	1.103×10^7	1.750×10^6
z_0	3.95	14.48	3087.29	1.756×10^6	8.197×10^4	1.088×10^7	1.732×10^6
$\sigma(M_{\mu\mu})$	3.95	14.47	3086.07	1.718×10^6	8.047×10^4	1.072×10^7	1.696×10^6
$M_{\mu\mu}$	3.82	14.05	68.12	6.429×10^4	5261.76	1.787×10^4	1.063×10^4
$\cos\theta_{\mu\mu}$	3.81	14.03	68.12	3.228×10^4	4456.24	1.686×10^4	9617.56
N_{P_t}	3.80	1.12	5.89	3.174×10^4	2846.20	1.686×10^4	4461.30
E_{vis}	3.79	0.03	0.57	1.829×10^4	2169.39	8129.69	2900.79
M_{rec}	3.79	0.03	0.57	7615.86	2073.90	7621.58	2326.83
missing	3.78	0.03	0.57	311.16	2033.52	143.89	296.92
θ_{miss}	3.75	0.03	0.57	173.66	2009.83	17.99	147.02

3.4 TMVA 解析

nmh250-L 解析で用いたパラメータと同じものを使用した。以下はそれぞれのパラメータの分布図である。全てのヒストグラムはそれぞれ 1 に規格化してあり、青がシグナルで赤がバックグラウンドである。

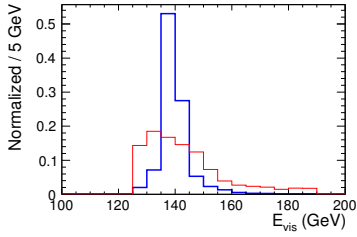


図 52: E_{vis} 分布。

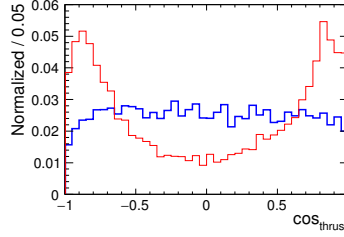


図 53: $\cos\theta_{\text{thrust}}$ 分布。

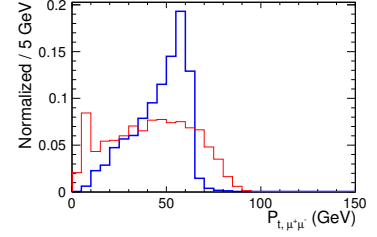


図 54: $P_{t,\mu^+\mu^-}$ 分布。

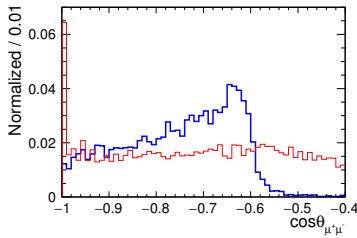


図 55: $\cos\theta_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

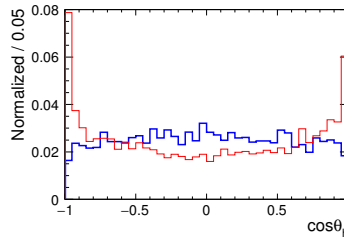


図 56: $\cos\theta_h$ 分布。

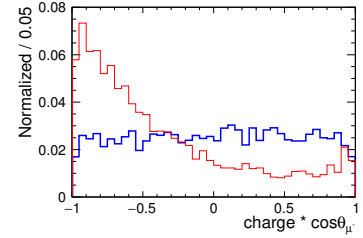


図 57: $\text{charge} * \cos\theta_{\mu^-}$ 分布。

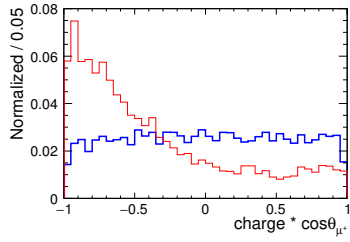


図 58: $\text{charge} * \cos \theta_{\mu^+}$ 分布。

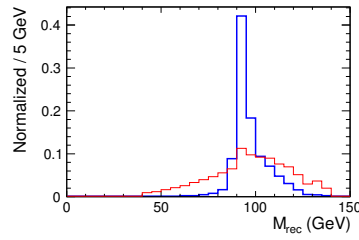


図 59: M_{rec} 分布。

TMVA 解析の結果が次の図である。ここから BDTG output > 0.3 とした。

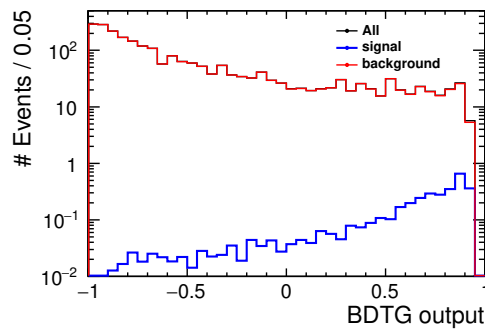


図 60: BDTG output 分布。

3.5 Toy MC を用いた評価

BDTG output カットを施した後の $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布が次の図である。

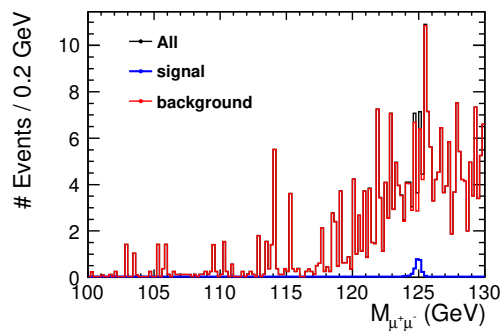


図 61: $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布。

この後さらに $M_{\mu^+\mu^-} > 120$ GeV というカットを適用した。全カット適用後の残存イベント数は $N_S = 4$ 、 $N_B = 210$ である。ここでのモデル関数として、シグナルには規格化ガウス関数 (gausn)、バックグラウンドには定数 (pol0) を用いた。それらのフィッティング結果が次の図である。シグナルは緑、バックグラウンドは黄色で示してある。またバックグラウンドのフィッティングには対数尤度メソッドを用いている。

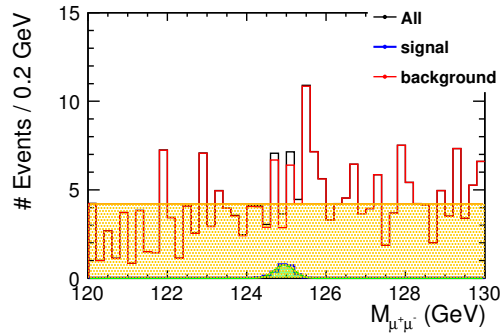


図 62: $M_{\mu^+\mu^-}$ のフィッティング結果。

以上でモデル関数が得られたので、ここから疑似実験を行う。この 1 例が次の図である。青がシグナル疑似データ、赤がバックグラウンド疑似データ、黒が青と赤の足し合わせ、紫曲線が関数 f によるフィッティングの結果である。

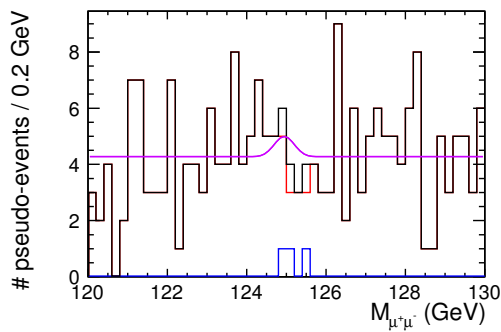


図 63: 疑似実験の 1 例。

この疑似実験を 20 万回行い、得られた Y_S 分布と pull 分布が次の 2 図である。

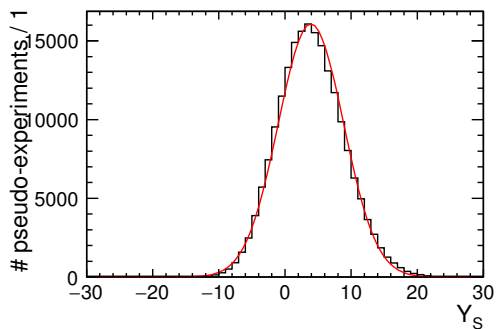


図 64: Y_S 分布。

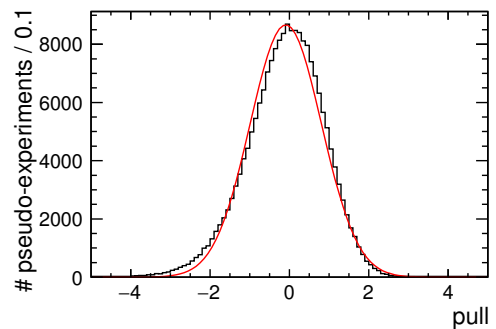


図 65: Pull 分布。

Y_S 分布をガウス関数でフィットしたところ、中心値 3.927 ± 0.012 、幅 4.9255 ± 0.0077 となり、最終的な精度が 125.4%と求められた。また pull 分布をガウス関数でフィットしたところ、中心値 -0.0888 ± 0.0022 、幅 0.9008 ± 0.0014 となった。

4 結論・今後の進展

ここまでで得られた全ての結果を表にまとめた。

表 3: 解析で得られた精度 $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})}$

500 GeV	$q\bar{q}h$	$\nu\bar{\nu}h$
left-handed	47.8% (1600 fb ⁻¹)	39.2% (1600 fb ⁻¹)
right-handed	52.1% (1600 fb ⁻¹)	71.5% (1600 fb ⁻¹)
250 GeV	$q\bar{q}h$	$\nu\bar{\nu}h$
left-handed	30.0% (1350 fb ⁻¹)	123.5% (1350 fb ⁻¹)
right-handed	52.5% (450 fb ⁻¹)	125.4% (450 fb ⁻¹)

いずれも MC 統計量が不足しているが、toy MC を用いたことにより以前よりも信頼に足る結果が得られたといえる。しかしその結果、全てのチャンネルで精度が悪化した。やはり以前の結果は良すぎるものであったことを確認した。これらを全て combine すると精度 17.5%となる。HL-LHC で統計 3000 fb⁻¹ の場合は精度 14%となるので、これと比較すると相対的に 25%悪化している。

また toy MC study から得られた pull 分布は少し非対称な分布をしていた。考えられうる理由としては以下が挙げられる。

- シグナルの数が 10 程度である Y_S 分布に Gaussian fit を行うこと自体がよくない
- $M_{\mu^+\mu^-}$ 分布は FSR の影響を受けて低い領域にテールを持っているが、normalized Gaussian は対称な形をしているため、正しいモデル関数ではない

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、ミューオンの本数をカットとして要求すると SGV [14] 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。

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] 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 6”
- [7] 川田真一 “重心エネルギー 250/500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+\mu^-$ モードの解析 — part 7”
- [8] 川田真一 “重心エネルギー 250/500 GeV ILC における $h \rightarrow \mu^+\mu^-$ モードの解析 — part 8”
- [9] <https://ild.ngt.ndu.ac.jp/eolog/dbd-prod/>

- [10] 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)
- [11] S. Catani, Yu. L. Dokshitzer, M. H. Seymour, B. R. Webber, “Longitudinally-invariant k_{\perp} -clustering algorithms for hadron-hadron collisions”, Nucl. Phys. B **406** (1993) 187 - 224
- [12] Stephen D. Ellis, Davison E. Soper, “Successive combination jet algorithm for hadron collisions”, Phys. Rev. D **48** 3160 (1993)
- [13] S. Catani, Yu. L. Dokshitzer, M. Olsson, G. Turnock, B. R. Webber, “New clustering algorithm for multijet cross sections in e^+e^- annihilation”, Phys. Lett. B **269** (1991) 432 - 438
- [14] Mikael Berggren, “SGV 3.0 — a fast detector simulation”, arXiv:1203.0217 [physics.ins-det] (2012)