

# 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

川田真一

## 概要

<sup>1</sup> 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 [1,2] の続きである。ここではさらなるバックグラウンドの除去を目指した解析について記述する。

---

<sup>1</sup>リリースノート

- 2016 年 11 月 8 日 執筆
- 2016 年 11 月 10 日 コメント追加

# 1 序論

前回の解析 [2] では、シグナルが約 20 残り、バックグラウンドが約 120 残った。詳細を調べたところ、ほとんどが 4f プロセスであり、終状態が  $\nu\nu\mu\mu$  が支配的・次に  $\mu\mu\tau\tau$  であることが分かった。これをさらに排除するためにはどうすればよいかを考察した。

解析において仮定する反応断面積の数字や積分ルミノシティ、用いた MC サンプルなどは文献 [2] で用いたものと同じである。

# 2 フルシミュレーションサンプルを用いた解析

ここではフルシミュレーションサンプルを用いた解析について記述する。

## 2.1 事象再構成

ミューオンの再構成の手順は、文献 [2] のものと同じである。

## 2.2 解析

最適化を始める前の事前の選別として以下を要求した。

- ちょうど 1 本の  $\mu^+$  とちょうど 1 本の  $\mu^-$  がある
- イベント中の  $P_t$  が 5 GeV 以上の荷電粒子の数 ( $N_{P_t > 5\text{GeV}}^{\text{track}}$ ) が 4 本以下
- $124 < M_{\mu\mu}^{\text{FSR}} < 126 \text{ GeV}$  (FSR 補正込み)
- $\sigma(M_{\mu\mu}) < 1 \text{ GeV}$

最後の 1 個を新たに事前の選別として加えた。これにより、精度良く測定されたミューオンのみを解析に用いるということを要求している。以下の 4 つの図は各パラメータの分布図である。

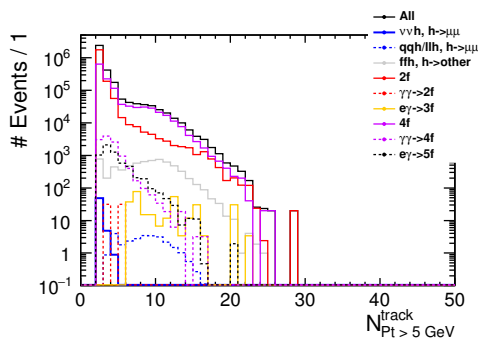


図 1:  $N_{P_t > 5\text{GeV}}^{\text{track}}$  分布。

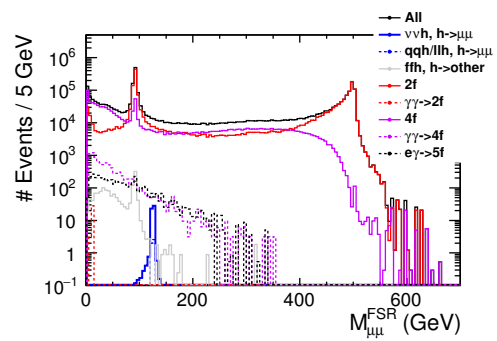


図 2:  $M_{\mu\mu}^{\text{FSR}}$  分布。

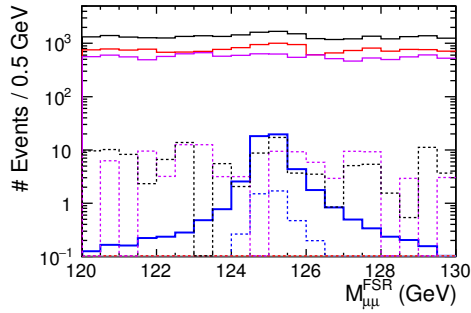


図 3:  $M_{\mu\mu}^{\text{FSR}}$  分布 (ズームアップ)。

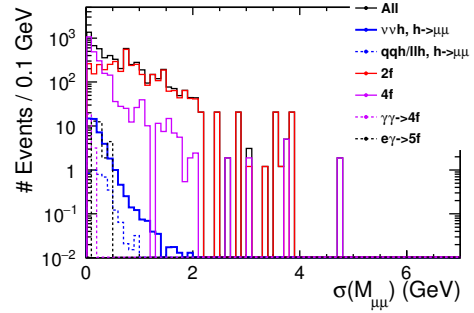


図 4:  $\sigma(M_{\mu\mu})$  分布。

この時点で 3f プロセスは完全に消えた。その後、最適なカットとして以下を適用した。

- 可視エネルギー  $E_{\text{vis}} < 270$  GeV
- $P_t > 45$  GeV
- $(\text{charge}) \times (\cos \theta_{\mu^+}^{\text{FSR}}) > -0.75$  and  $(\text{charge}) \times (\cos \theta_{\mu^-}^{\text{FSR}}) > -0.75$
- $\text{thrust} < 0.88$
- $E_{\mu^+\mu^-} > 160$  GeV

ここにおける  $P_t$  は事象中で観測された全ての粒子の 4 元運動量を足し合わせて得られた 4 元運動量から計算される横方向運動量である。3 つ目の変数は、粒子の電荷にその粒子の飛行方向を掛け合わせたものである。これは  $WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$  バックグラウンドに対しては +1 または -1 に偏りやすくなるが (本研究の場合は -1)、シグナルのミューオン対にはそのような特徴はないことから、有効と考えられる。異符号の粒子が互いに反対方向に飛ぶようなイベントは、この変数を用いて特徴づけられる。以下の 6 つの図はそれぞれの変数の分布である。

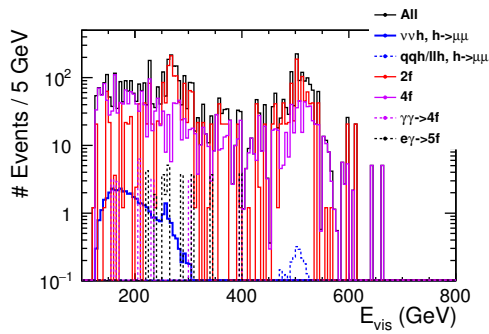


図 5:  $E_{\text{vis}}$  分布。

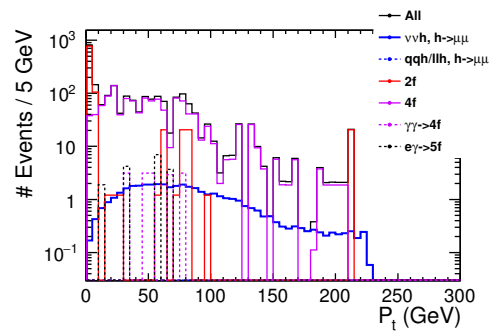


図 6:  $P_t$  分布。

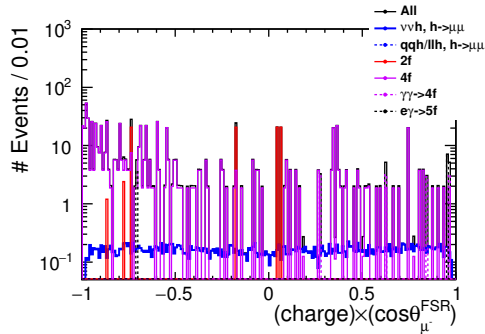


図 7:  $(\text{charge}) \times (\cos \theta_{\mu^-}^{\text{FSR}})$  分布。

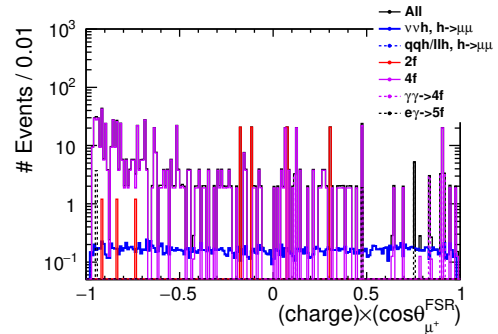


図 8:  $(\text{charge}) \times (\cos \theta_{\mu^+}^{\text{FSR}})$  分布。

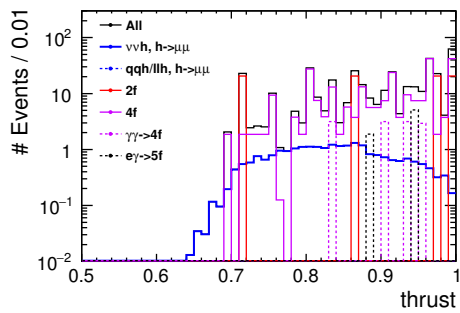


図 9: thrust 分布。

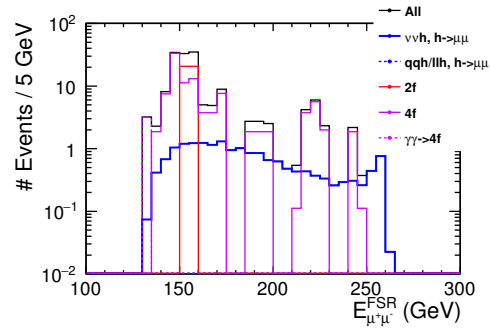


図 10:  $E_{\mu^+\mu^-}$  分布。

表 1 はフルシミュレーションサンプルを用いた場合のカットテーブルである。

表 1: フルシミュレーションサンプルを用いた時のカットテーブル。

	$\nu\nu h$	$qqh+\ell\ell h$	$ffh$	2f	$\gamma\gamma \rightarrow 2f$	3f	4f	$\gamma\gamma \rightarrow 4f$	5f
	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \mu\mu$	$h \rightarrow \text{other}$						
No cut	57.53	31.13	$4.116 \times 10^5$	$4.224 \times 10^7$	$4.283 \times 10^9$	$4.269 \times 10^8$	$4.592 \times 10^7$	$3.356 \times 10^5$	$2.209 \times 10^5$
# $\mu^\pm$	54.39	27.39	6895.00	$2.071 \times 10^6$	62.62	299.75	$1.209 \times 10^6$	$1.131 \times 10^4$	6125.00
# $N_{\text{track}}^{P_t > 5\text{GeV}}$	54.27	4.89	1425.76	$2.014 \times 10^6$	31.28	0	$9.826 \times 10^5$	9544.48	4411.00
$M_{\mu\mu}^{\text{FSR}}$	44.61	3.94	0	3741.41	0	0	2407.24	21.81	31.63
$\sigma(M_{\mu\mu})$	44.28	3.92	0	2619.66	0	0	2295.69	21.81	31.63
$E_{\text{vis}}$	41.38	0.04	0	966.60	0	0	1273.28	15.52	16.74
$P_t$	31.55	0.02	0	86.00	0	0	676.33	12.37	10.64
$\text{charge} \times \cos \theta_\mu$	24.42	0.01	0	82.39	0	0	261.77	12.37	6.96
thrust	17.67	0.01	0	41.19	0	0	101.15	3.15	0
$E_{\mu\mu}$	13.04	0.01	0	0	0	0	34.20	0	0

この解析から  $N_{\text{sig}} = 13.04$ 、 $N_{\text{bkg}} = 34.21$  が得られた。ゆえに統計的有意性は  $\frac{13.04}{\sqrt{13.04 + 34.21}} = 1.90$ 、精度は  $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 53\%$  となる。統計的有意性が少しでも改善したものの、最終的な精度の数字は同じである。

### 3 さらに改善を目指して

上述の通り、少しは改善したものの、まだまだ精度はよくない。アイデアとして考えられるものがいくつかある。

- $\sigma(M_{\mu\mu})$  を用いた event-by-event reweighting、およびそれによる統計的解釈
- ミューオンのさらなる高効率再構成
- TMVA の使用
- カテゴリー分け

1つ目は自分自身が未だに理解しきれていないのでここでは無視する。2つ目は書いてある通り、さらなる高い効率での再構成を目指すものである。3つ目は多変量解析に移行するというものである。4つ目のカテゴリーとは、Higgs-strahlung プロセスカテゴリーと  $WW$ -fusion プロセスカテゴリーの2つである。現在取り扱っているシグナルはこの2つの寄与があり、これらを分離してそれぞれに最適化することによって改善を目指す。本レポートでは、2つ目と3つ目について記述する。

### 4 ミューオン再構成

ここではミューオンの再構成について再び考えることにする。今まで行ってきたミューオンの再構成手法および選別は次の通りである。

- ミューオン候補の選別
  - 電荷
  - エネルギー
  - $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$
  - $(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})/|p_{\text{track}}|$
- FSR リカバリー
  - 再構成されたミューオンからの角度が小さい中性粒子を見つける。
  - 選ばれた中性粒子の4元運動量をミューオンに足し合わせる。
- 異符号のミューオンを1つずつ持ち、なおかつリカバリー込みでのミューオン対不変質量が 124 GeV から 126 GeV の範囲にある事象のみ解析に用いる。

この中で改善の余地があると考えられるのはミューオン選別と FSR リカバリーである。本レポートではミューオン選別についてのみ考える。

#### 4.1 ミューオン選別

ミューオンを選択するにはカロリメータにおけるエネルギー損失の値、およびトラックの運動量が重要になる。次の2図はシグナルにおける  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$  分布および  $(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})/|p_{\text{track}}|$  分布である。

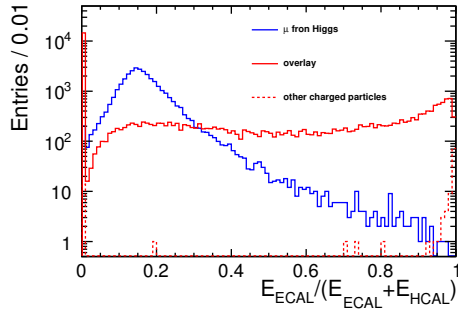


図 11:  $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})$  分布。

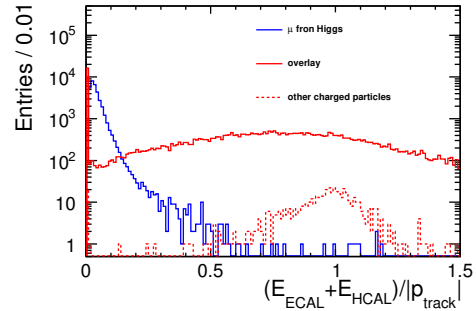


図 12:  $(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})/|p_{\text{track}}|$  分布。

“Other charged particles”はそのほとんどが電子または陽電子であった。おそらくこれらは detector interaction によって生成されたものと考えられる。見ての通りシグナルにおいて問題となるのはこれらではなく、overlay 由来の粒子である。この段階ではできるだけ高い効率を維持したいので、これらのカットを緩くすることができる。もちろん overlay 由来のものが多数残ってしまうが、これは次に考えることとする。この 2 図から、ミューオン選別カットを次のように定義した。

- $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}) < 0.95$
- $(E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}})/|P_{\text{track}}| < 0.5$

次に overlay による contamination を減らす。これには  $P_t$  が最も効くだろう。さらに、ヨークにおけるエネルギー損失  $E_{\text{yoke}}$  も強力であると考えられる。次の 2 図が荷電粒子の  $P_t$  分布および  $E_{\text{yoke}}$  を表す。ただし上述のミューオン選別カットがかかっている。

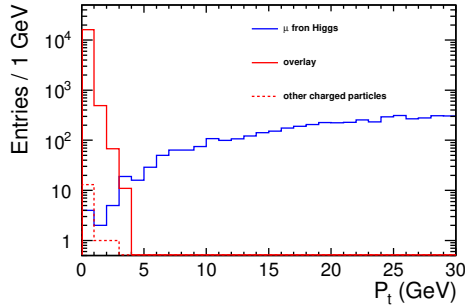


図 13:  $P_t$  分布 (ミューオン選別カット後)。

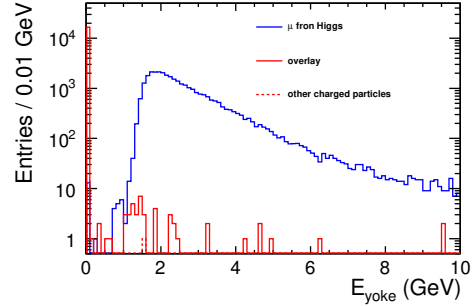


図 14:  $E_{\text{yoke}}$  分布 (ミューオン選別カット後)。

ここから次のカットを定義した。

- $P_t > 3 \text{ GeV}$
- $E_{\text{yoke}} > 1 \text{ GeV}$

この時点で purity はほぼ 100%であった。この時点で、シグナルイベント中で  $\mu^+$  ちょうど 1 本と  $\mu^-$  ちょうど 1 本を再構成できた割合は 96.3%であった。前回は 94.6%だったので、約 2%の改善である。残りの 3.7%は片方または両方のミューオンがビームパイプ方向または  $\theta \sim 90^\circ$  方向に飛んでしまい、情報を取得できなかったからと考えられる。

## 4.2 Precuts

以前までは FSR 補正を含めたミューオン対の不変質量の幅を 124 GeV から 126 GeV と要求していた。しかしこれ自身がきつめのカットであり、さらに今回は TMVA を用いるのでこれを緩めることとした。加えて、よく測定されたトラックの情報にさらに制限をかけて、非常に良く測定されたミューオンのみを用いて解析を行う、という方針を取ることにした。この方針のもと、以下のカットを適用した。

- $\mu^+$  ちょうど 1 本、 $\mu^-$  ちょうど 1 本
- $\sigma(M_{\mu\mu}) < 1 \text{ GeV}$
- $\chi^2/\text{Ndf}(\mu^\pm) < 2$
- innermost hit ( $\mu^\pm$ )  $< 100 \text{ mm}$
- $30 < M_{\mu\mu} < 130 \text{ GeV}$
- $125 < E_{\text{vis}} < 400 \text{ GeV}$

2 つ目はよく測定されたミューオン対のみを要求するものであり、分布は次の通りである。

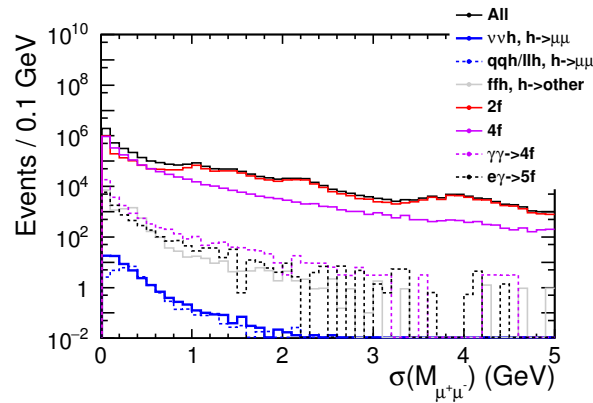


図 15:  $\sigma(M_{\mu\mu})$  分布。

3 つ目は track fitting に関するパラメータであり、この値が小さいほどよくフィッティングできていることを表す。4 つ目はトラックの最初のヒット点が測定器のどこかというものである。この 2 つは  $\mu^+$  と  $\mu^-$  の両方に適用している。残りの 2 つはシグナル領域を決めるために緩めのカットをかけている。事象数が増えると TMVA におけるトレーニングに時間がかかるため、緩めのカットであっても重要である。以下はそれぞれの分布図である。

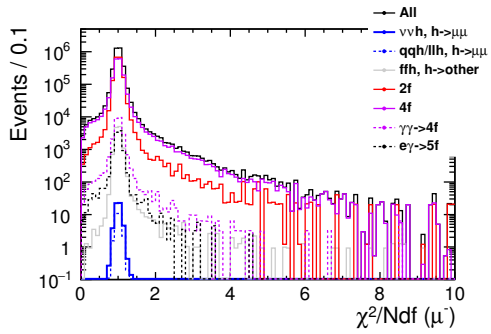


図 16:  $\chi^2/Ndf(\mu^-)$  分布。

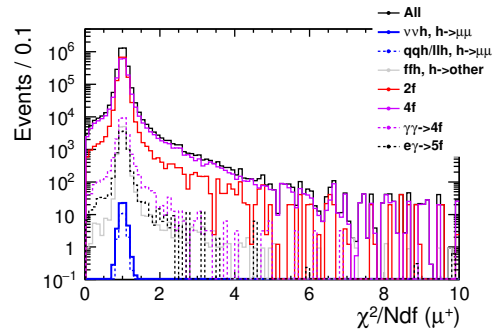


図 17:  $\chi^2/Ndf(\mu^+)$  分布。

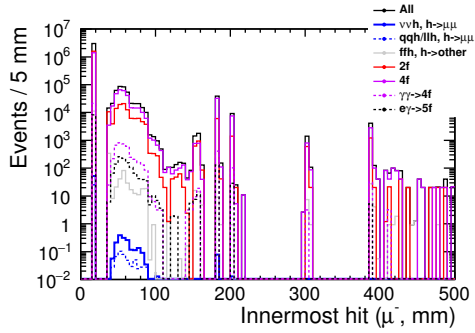


図 18:  $\mu^-$  innermost hit 分布。

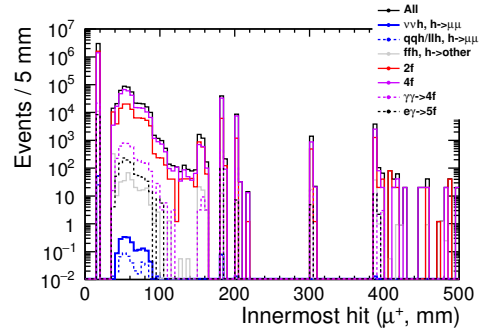


図 19:  $\mu^+$  innermost hit 分布。

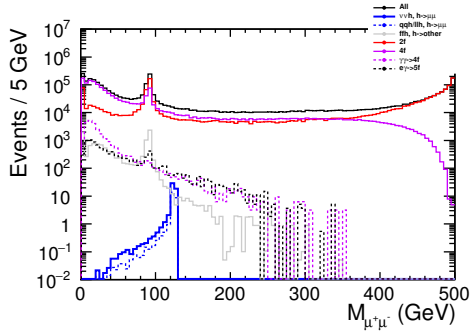


図 20:  $M_{\mu\mu}$  分布。

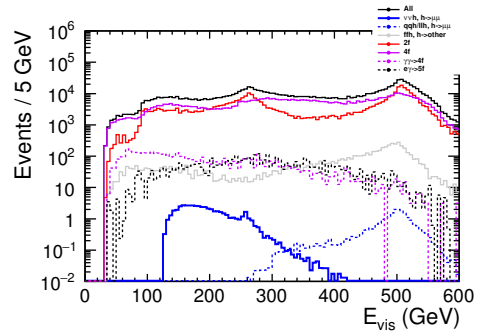


図 21:  $E_{vis}$  分布。

表 2 は precuts 時点でのカットテーブルである。ただし SGV sample である 3f および  $\gamma\gamma \rightarrow 2f$  は除いている。SGV では  $E_{yoke}$  を正しく取り扱えないため、ミューオン再構成が正しく行っていないからである。



表 2: フルシミュレーションサンプルを用いた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	$4.116 \times 10^5$	$4.224 \times 10^7$	$4.592 \times 10^7$	$3.356 \times 10^5$	$2.209 \times 10^5$
# $\mu^\pm$	55.32	26.12	$1.216 \times 10^4$	$2.246 \times 10^6$	$1.890 \times 10^6$	$2.692 \times 10^4$	9935
$\sigma(M_{\mu\mu})$	54.60	25.64	$1.202 \times 10^4$	$1.728 \times 10^6$	$1.785 \times 10^6$	$2.638 \times 10^4$	9690
$\chi^2/\text{Ndf}$	54.52	25.61	$1.187 \times 10^4$	$1.719 \times 10^6$	$1.753 \times 10^6$	$2.599 \times 10^4$	9573
innermost hit	54.28	25.55	$1.163 \times 10^4$	$1.698 \times 10^6$	$1.660 \times 10^6$	$2.481 \times 10^4$	9225
$M_{\mu\mu}$	54.24	25.53	6506	$4.200 \times 10^5$	$5.488 \times 10^5$	5787	4114
$E_{\text{vis}}$	54.16	2.71	1879	$1.948 \times 10^5$	$2.802 \times 10^5$	3419	3225

シグナルは残しつつ、その他のバックグラウンドはそれぞれ2桁ずつ除去できている。

### 4.3 TMVA 解析

ここから TMVA BDTG を用いて解析する。以下の 14 個のパラメータを用いた。

- $E_{\text{vis}}$ ,  $P_t$ , thrust,  $\cos\theta_{\text{thrust}}$ ,  $\cos\theta_{\text{miss}}$
- $M_{\mu\mu}$ ,  $E_{\mu\mu}$ ,  $P_{t,\mu\mu}$ ,  $\cos\theta_{\mu\mu}$ ,  $p_{\mu\mu}$
- charge \*  $\cos\theta_{\mu^+}$ , charge \*  $\cos\theta_{\mu^-}$ , leading energy of muon, subleading energy of muon

各トレーニングパラメータの最適化も行った。以下はそれぞれのパラメータの分布図である。

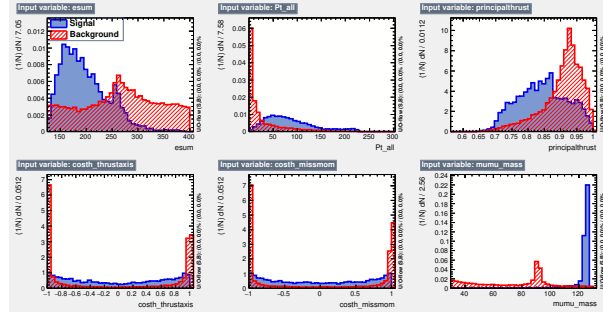


図 22: パラメータ分布 1。

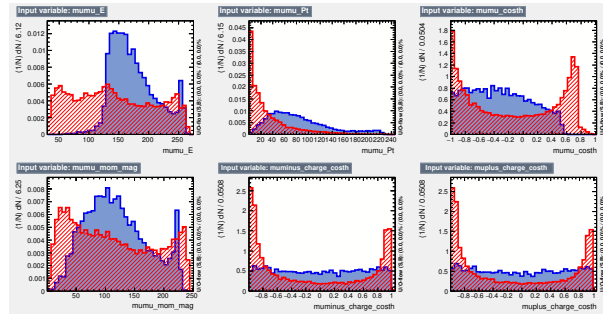


図 23: パラメータ分布 2。

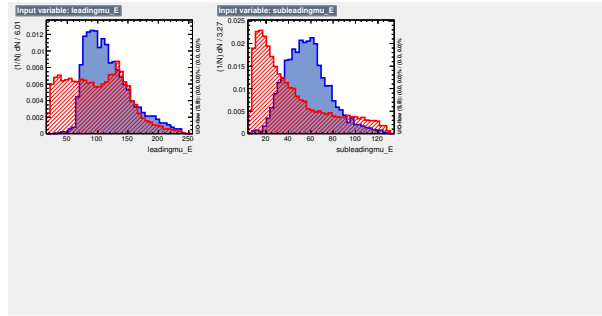


図 24: パラメータ分布 3。

次の 2 図は TMVA 解析の結果である。

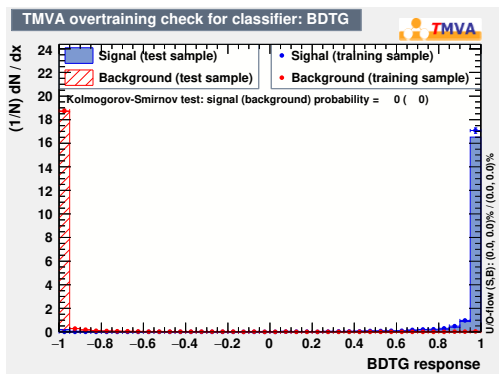


図 25: BDTG output 分布。

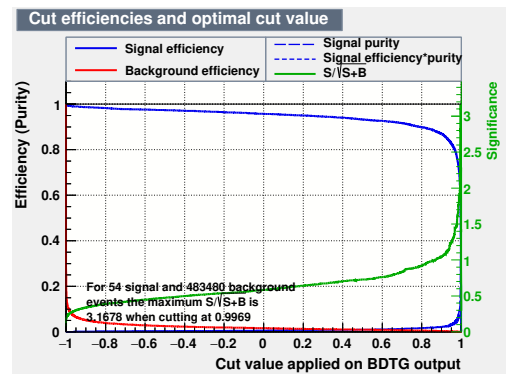


図 26: Significance 分布。

解析から  $N_{\text{sig}} = 24.2$ 、 $N_{\text{bkg}} = 34.3$  が得られ、統計的有意性は 3.16 となった。これは  $\frac{\Delta(\sigma \times \text{BR})}{(\sigma \times \text{BR})} = 32\%$  に一致する。以前までの結果と比べて、約 2 倍精度がよくなっている。ただし図を見ても明らかのように overtraining しているため、この数字をそのまま用いるのはいささか時期尚早と思われる。よい方向に向かっていることは確かだが、まださらなる検討が必要である。

## 5 結論・今後の進展

さらなる改善を目指して解析に取り組んだ。TMVA を用いた結果、精度 32% に達することができた。ただし overtraining しているため、さらなる検討が必要である。

今後の課題としては、FSR 補正さ再検討と re-weighting が考えられる。また、 $e^+e^- \rightarrow Zh$  (Higgs-strahlung) プロセスと  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$  ( $WW$ -fusion) プロセスを切り分ける際にどうするか、という点もある。

## 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”