

# WISH Filter Set 検討

2010/01/04 岩田 生 (国立天文台)

2010/02/04 rev.2 DM Halo MF の進化に合わせた光度関数進化を仮定した場合の検出数評価 岩田 生

2010/02/07 rev.2.1 サーベイプランから LBG の総検出期待数を計算 岩田 生

WISH での最大の科学目標である、最初期の銀河の検出に最適化したブロードバンドフィルタセットを検討する。仮定したフィルタセットに対し、サーベイの completeness 等を考慮した上で、光度関数進化の予測に基づいて、期待される検出数を評価した。

## 1 仮定したフィルタセット

Set 3

0.9 $\mu\text{m}$  から 4.5 $\mu\text{m}$  をほぼ対数ベースで等間隔に分割したフィルタセットである。

$\lambda_{\text{center}}$	width	w0	w1
1.040	0.280	0.900	1.180
1.360	0.360	1.180	1.540
1.775	0.470	1.540	2.010
2.320	0.620	2.010	2.630
3.030	0.800	2.630	3.430
3.965	1.070	3.430	4.500

Table 1: Set 3 の仕様。width は FWHM、w0, w1 はピークの 50% となる波長。単位は  $\mu\text{m}$

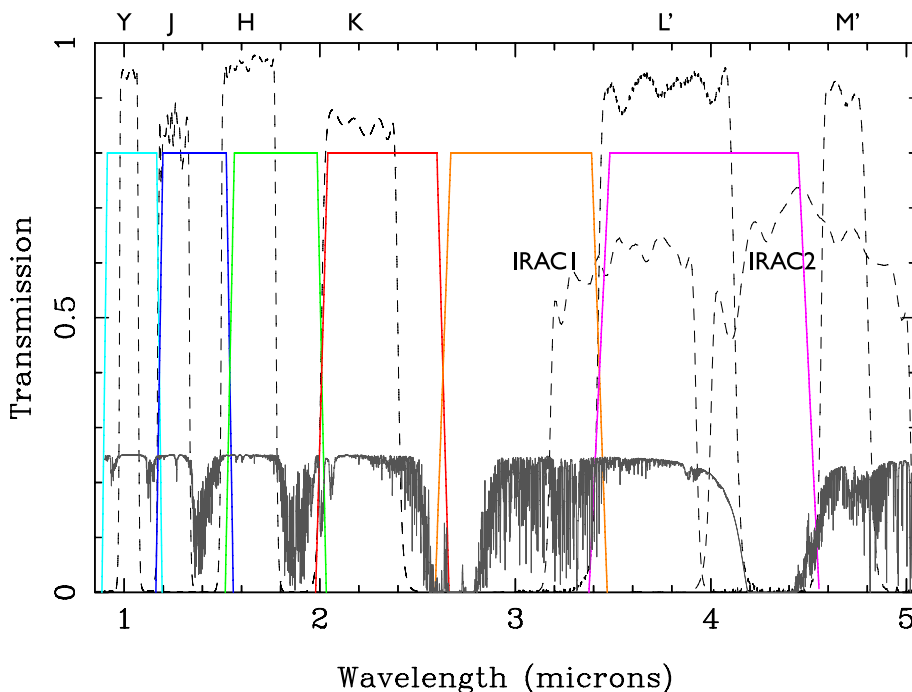


Figure 1: Filter Set 3. 地上望遠鏡で使用されている Y, J, H, Ks, L', M' (Subaru IRCS), Spitzer Ch 1, Ch2 と地球大気の透過率を併せて示している。

Set 4

0.9 $\mu\text{m}$  から 2.0 $\mu\text{m}$  をほぼ対数ベースで等間隔に分割し、2.0 $\mu\text{m}$ –4.2 $\mu\text{m}$  を 2 枚のフィルタでカバーしたフィルタセットである。

$\lambda_{\text{center}}$	width	w0	w1
1.000	0.200	0.900	1.100
1.220	0.200	1.100	1.340
1.490	0.300	1.340	1.640
1.820	0.400	1.640	2.000
2.450	0.900	2.000	2.900
3.550	1.300	2.900	4.200

Table 2: Set 4 の仕様。width は FWHM、w0, w1 はピークの 50% となる波長。単位は  $\mu\text{m}$

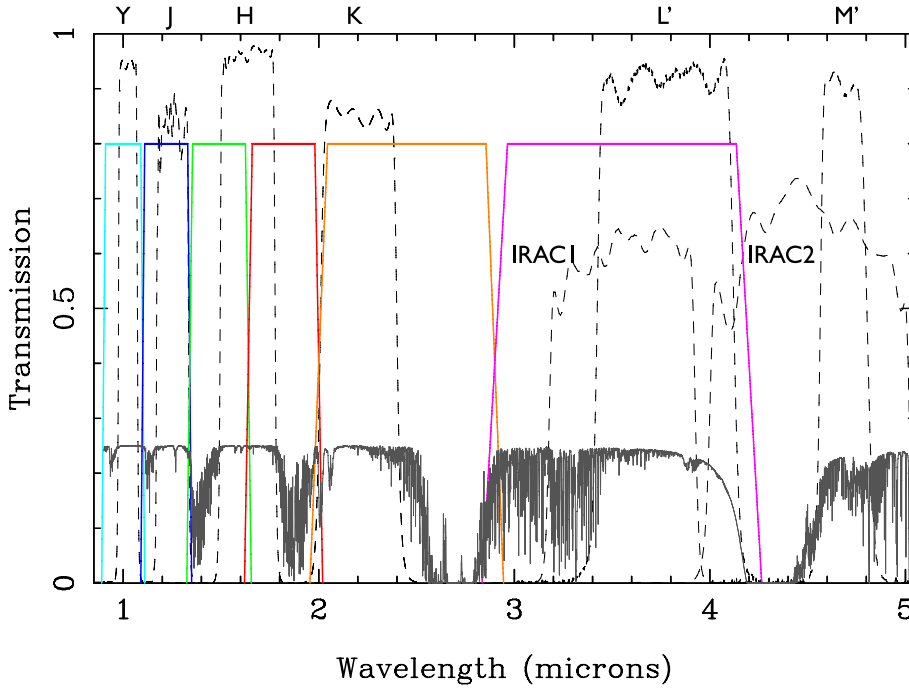


Figure 2: Filter Set 4.

## 2 検出期待数の見積り

### 2.1 二色図

PEGASE v.2 で Constant star formation, age = 10 Myr,  $Z=0.01$ , Salpeter IMF, no nebular emission のモデルを作成し、Calzetti (2000) の dust extinction で  $E(B - V) = 0, 0.2, 0.4, 0.6$  の場合を計算。IGM attenuation は [Inoue et al.(2005)] のモデルを使用。

interloper となりうる Low- $z$  銀河として、[Maraston(2005)] の SSP モデル (age = 50 Myr, 1 Gyr), [Coleman et al.(1980)] の楕円銀河テンプレートを使用。

Dwarf star のテンプレートとして、Dr. France Allard の website で公開されている M, L-dwarf star のモデル (AMES-dusty, NextGen) と Dr. Adam Burrows の website で公開されている L, T, Y-dwarf star のモデルを使用した。その他の星については Dr. Robert L. Kurucz の 1993 年のモデルを使用した。

#### 2.1.1 Filter Set 3 の二色図

Fig. 3, 4, 5 に Filter 0, 1, 2 でそれぞれ dropout する銀河を選択する二色図を示した。Passive evolution の  $z \sim 2$  付近の銀河が、 $E(B - V)=0.6$  の LBG とよく似た SED となっている (Fig. 6 参照)。また、Filter 3:0-drop において Y-dwarf star のモデルが LBG の selection criteria 内に入っている。Fig. 7 に見られるように、超低温の dwarf star の SED は  $z > 7$  dropout 銀河と似たものになる可能性があるようである。ただし、観測的に Y-dwarf はまだ見つかっていないし、その SED, 数密度とも不明であって、もし見つければそれ自体興味深いし、長波長側の明るさを見ることで LBG とは区別できそうである。

Gray hatched area が今回設定した selection criteria を示す。Filter 3:0-drop では  $z \geq 8.0$ , Filter 3:1-drop では  $z \geq 10.5$ , Filter 3:2-drop では  $z \geq 14.0$  の銀河を select できる。E(B-V) は 0.4 よりも小さいものを選択するように設定した。上述のように、より dust による赤化の大きい銀河があったとしても、low- $z$  銀河との区別が困難と考えられる為である。

PEG/Sal/10Myr/Z=0,0.5,1.0 $Z_{\odot}$ /E(B-V)=0-0.6

PEG/Sal/10Myr/Z=0,0.5,1.0 $Z_{\odot}$ /E(B-V)=0-0.6

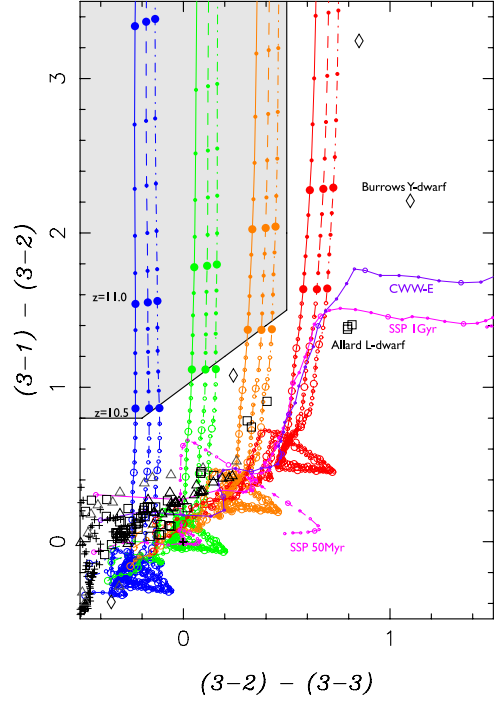
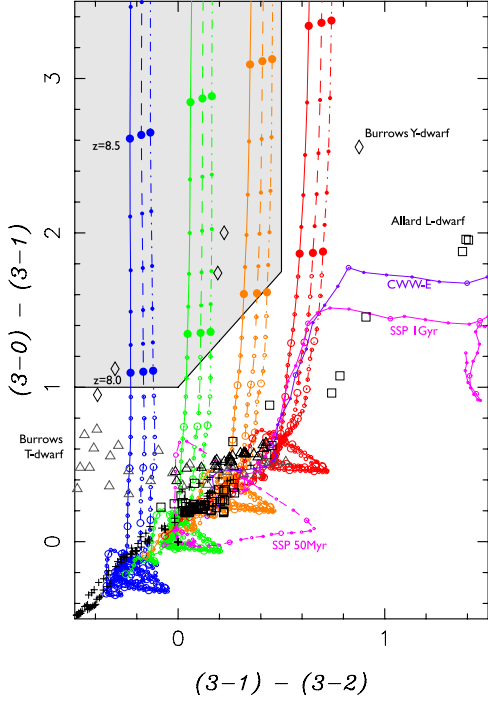


Figure 3: Filter Set 3 での Filter 0-dropout の二色図。

Figure 4: Filter Set 3 での Filter 1-dropout の二色図。

PEG/Sal/10Myr/Z=0,0.5,1.0 $Z_{\odot}$ /E(B-V)=0-0.6

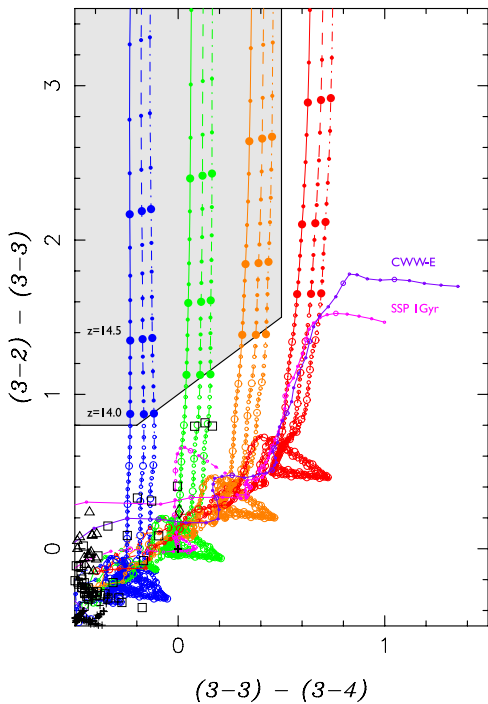


Figure 5: Filter Set 3 での Filter 2-dropout の二色図。

PEGASE( $z=8.0$ )/M05 SSP 1Gyr( $z=2.3$ )/CWW-E( $z=2.0$ )

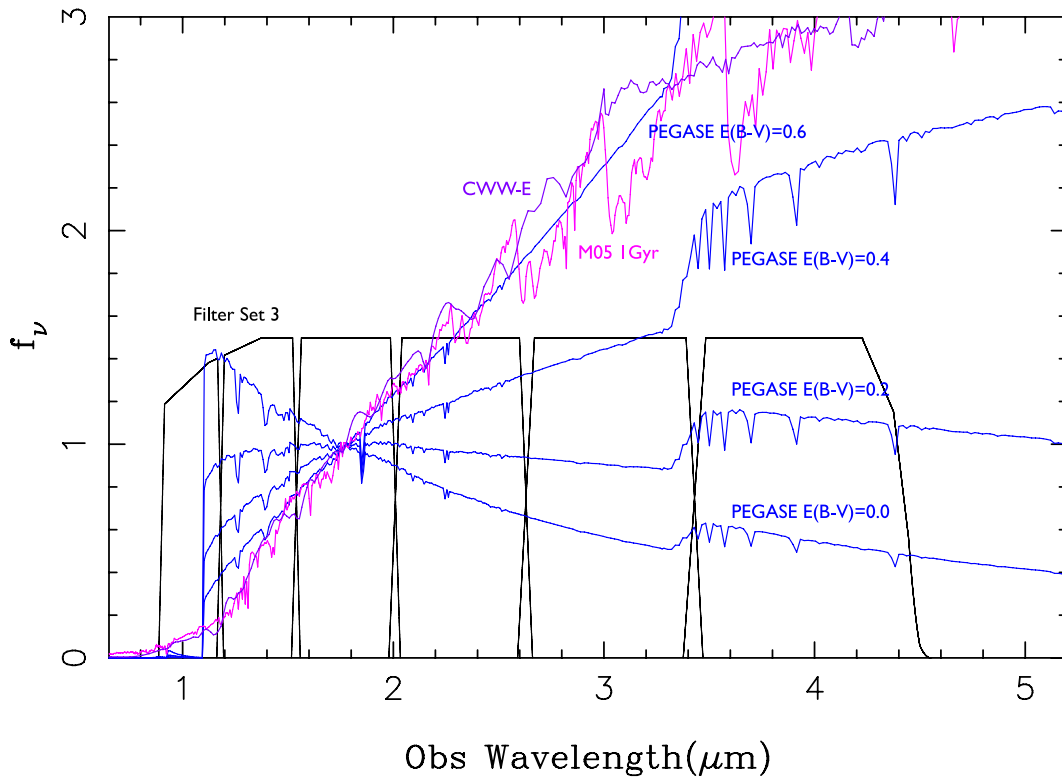


Figure 6:  $z = 8$  LBG ( $E(B - V)=0,0.2,0.4,0.6$  と Passive evolution の銀河 (Maraston SSP 1 Gyr, CWW E) の SED。Filter Set 3 の透過曲線 (検出器の感度も含む) も併せて示す。

## PEGASE( $z=8.0$ )/L,T&Y-Dwarf Models

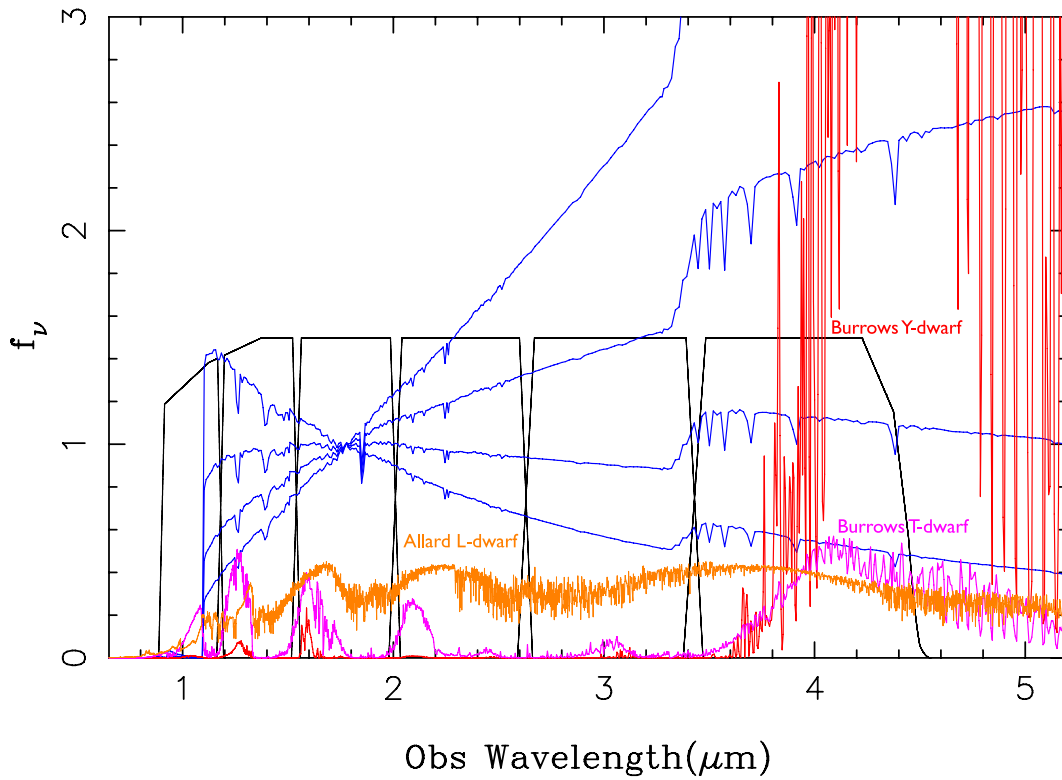


Figure 7:  $z = 8$  LBG ( $E(B - V)=0,0.2,0.4,0.6$  と dwarf stars モデルの SED。

### 2.1.2 Filter Set 4 の二色図

Filter Set 4 でも Set 3 同様に二色図を描いた。Fig. 8, 9, 10 でそれぞれ Filter 0-dropout, 1-dropout, 2-dropout を選択する二色図を示した。Set 4 ではフィルタの幅が狭く、Set 3 よりも low- $z$  側の LBG を選択するようになっている。Filter 4:0-drop では  $z \geq 7.5$ , Filter 4:1-drop では  $z \geq 9.3$ , Filter 4:2-drop では  $z \geq 11.4$  の LBG を選択する。また、Fig. 11 で Filter 3-dropout の銀河を選択する二色図を示した。Filter 4:3-drop では  $z \geq 14.3$  の LBG を選択する。

PEG/Sal/10Myr/Z=0,0.5,1.0 $Z_{\odot}$ /E(B-V)=0-0.6

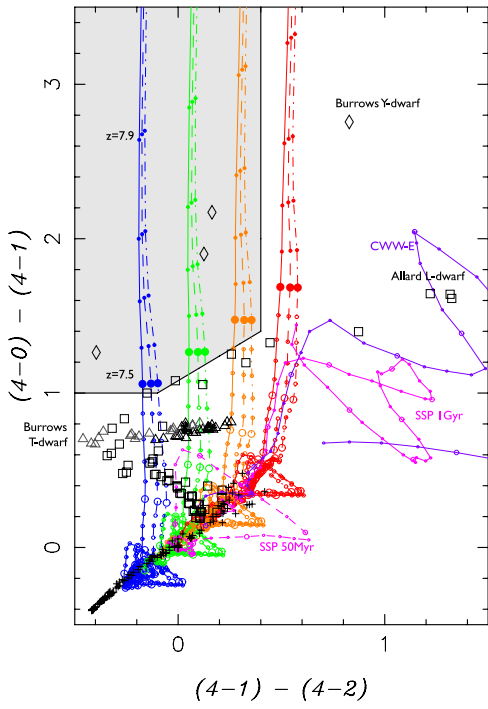


Figure 8: Filter Set 4 での Filter 0-dropout の二色図。

PEG/Sal/10Myr/Z=0/E(B-V)=0-0.6

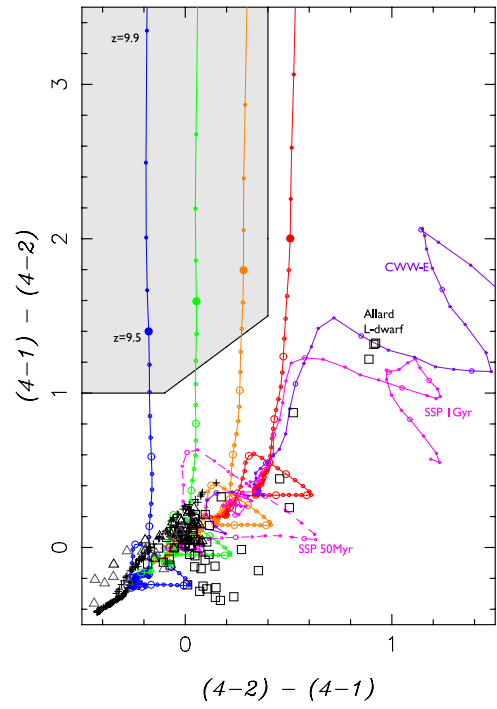


Figure 9: Filter Set 4 での Filter 1-dropout の二色図。

PEG/Sal/10Myr/Z=0/E(B-V)=0-0.6

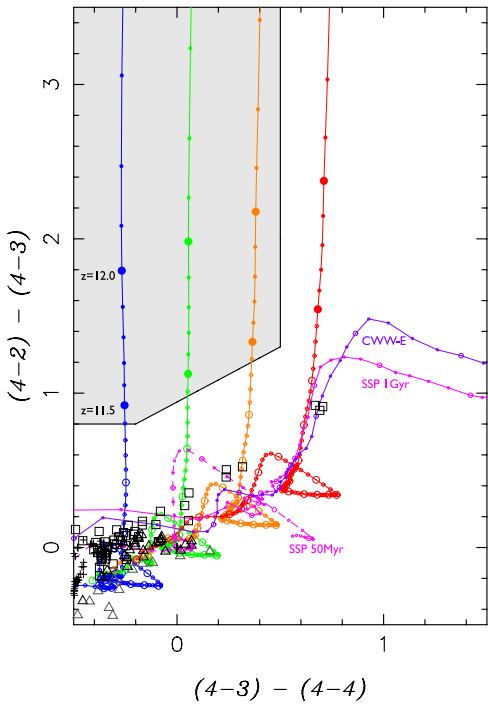


Figure 10: Filter Set 4 での Filter 2-dropout の二色図。

PEG/Sal/10Myr/Z=0/E(B-V)=0-0.6

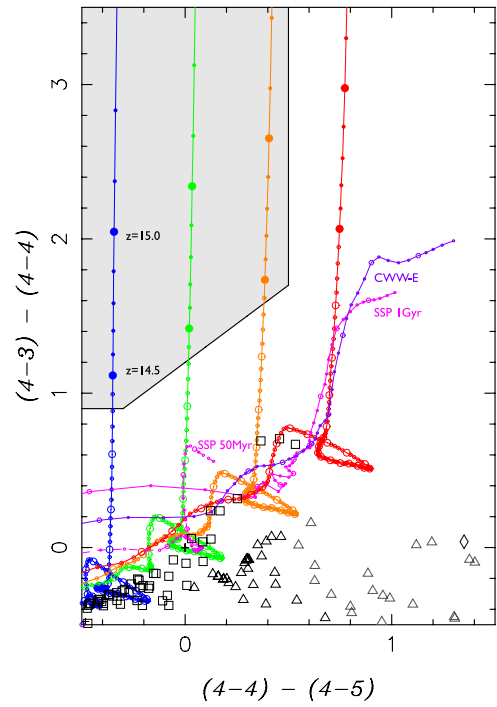


Figure 11: Filter Set 4 での Filter 3-dropout の二色図。

## 2.2 Completeness の評価

通常 Completeness 評価は人工天体を生成し、観測データに埋め込んで観測された銀河と同様に検出を行って検出率を評価するが、WISH の場合観測データが現時点でないため、数値的に評価する。

星種族合成モデルから redshift,  $E(B - V)$  に依存した色を計算し、誤差を入れた時に color criteria を満たすか判定することで、selection function を得る。

考慮した誤差等は以下の通り:

- 各バンドでの限界等級から得た測光誤差。gauss 分布を仮定。
- IGM attenuation。[Inoue et al.(2005)] のモデルをもとに、log-normal 分布の絶対値をとったような形でばらつきを与える (= [Inoue et al.(2005)] と同じくらいの IGM attenuation にピークをもち、より大きい吸収を受ける方に tail がある分布)。ただし、 $z > 6$  ではほぼ完全な Gunn-Peterson trough となっているので、あまり影響はないと考えられる
- 前面の天体との overlap による非検出。等級に依存して、暗い銀河ほど検出できない割合が増える (26.0AB で 5%, 28.0AB で 25%) ように閾値を設定してランダムに非検出になるようにする

0.5 mag step で各 bin, redshift,  $E(B - V)$  で 10,000 回の試行を行って、検出され、かつ color criteria にマッチする回数を数える。使用した SED モデルは PEGASE によるもので、Const. SF, age=10Myr,  $Z=0.01$ , Salpeter IMF, no nebular emission のモデルを使用した。各バンドの  $3\sigma$  限界等級を 28.0AB mag. とした。各 redshift, 0.5 mag step での completeness は、 $E(B - V)=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  の結果に対し 0.2, 0.3, 0.3, 0.1, 0.1 の重みをかけた平均をとって求めた。

### 2.2.1 Selection Function

Fig. 12 に Filter Set 3 (0-drop, 1-drop, 2-drop) と Filter Set 4 (0-drop, 1-drop, 2-drop, 3-drop) の 26.0–26.5 AB mag. の銀河の redshift 毎の completeness (= selection function) を示す。また、Fig. 13 に Filter Set 3 での等級毎の completeness の変化を、Fig. 14 に Filter Set 4 での等級毎の completeness の変化を示す。

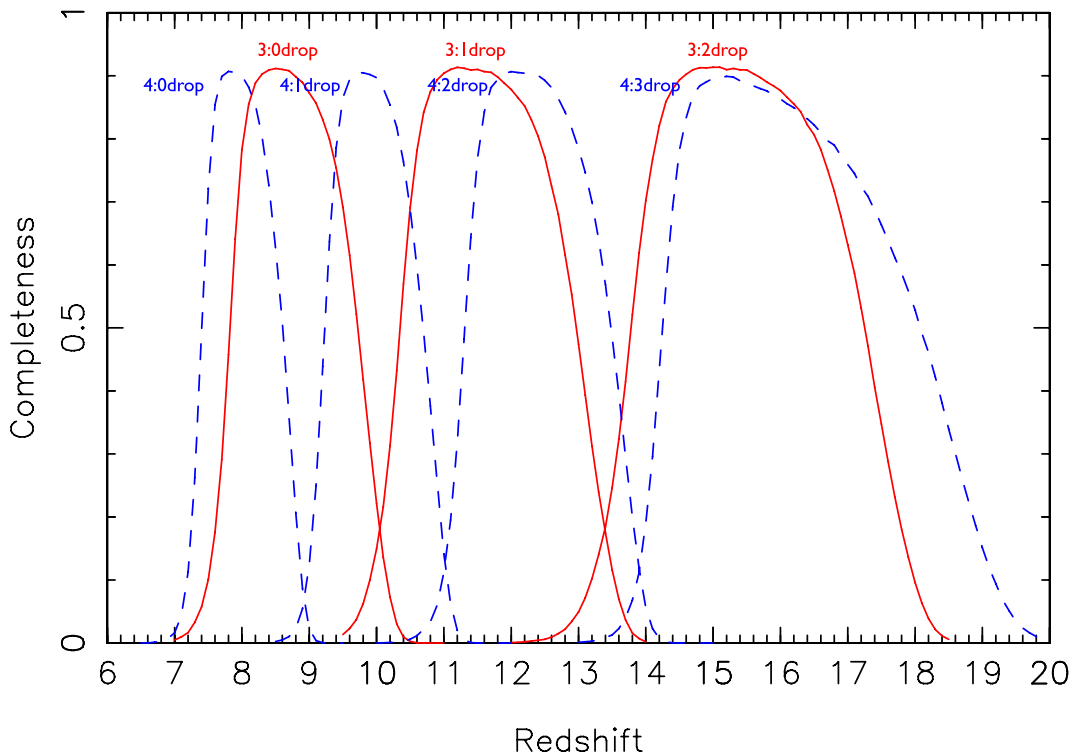


Figure 12: Filter Set 3 (赤) と Filter Set 4 (青) の 26.0–26.5 AB 等級の銀河の completeness

Filter Set 3

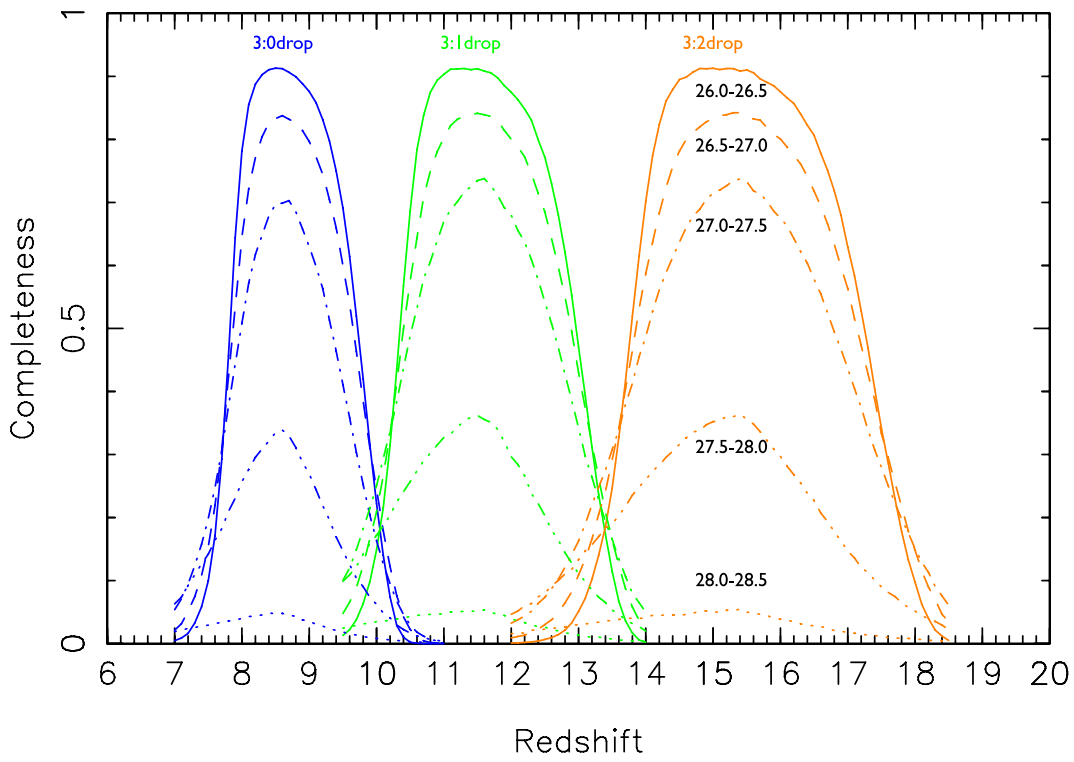


Figure 13: Filter Set 3 での等級毎の completeness の変化

Filter Set 4

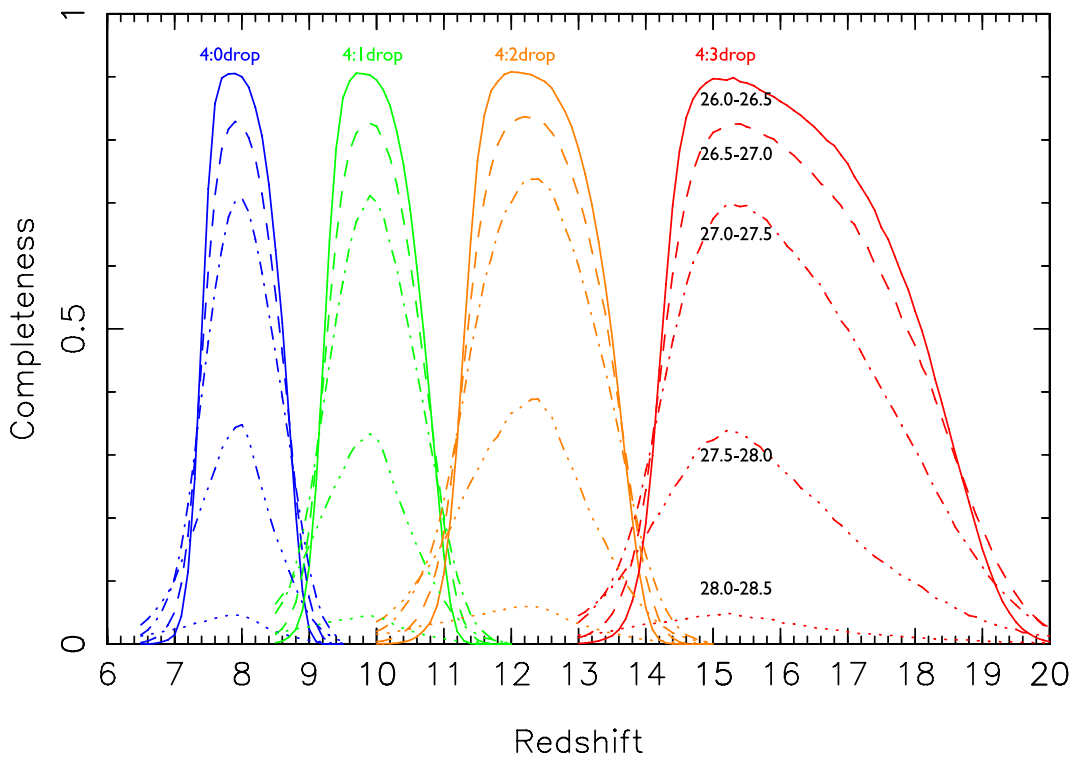


Figure 14: Filter Set 4 での等級毎の completeness の変化



### 2.3 UV 光度関数の進化

検出期待数を見積もる為には LBG の光度関数を仮定する必要がある。ここでは、まず二つの場合を検討した。

1. [Bouwens et al.(2008)] で指摘されたような、 $z \sim 4$  から  $z \sim 9$  での redshift に依存した UV 光度関数の進化が、higher redshift でも継続していると仮定した場合。[Bouwens et al.(2008)] に記述されている parameterization はおかしいので、Schechter 関数において、 $\phi^*$ ,  $\alpha$  はそれぞれ  $1.1 \times 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3}$ ,  $-1.74$  で変化しないとし、 $M^*$  について  $M^* = -21.117 + 0.408(z - 3.8)$  ( $z$  は対象 redshift) として high- $z$  ほど  $M^*$  が暗くなる進化を仮定する。high- $z$  ではかなり急激な進化となり、faint-end slope も変化しないと考えるので、宇宙再電離に必要な電離光子密度を  $z = 6$  までに達成できない可能性がある。Fig. 15 にこの場合の UV 光度関数進化の様子を示した。
2. [Oesch et al.(2009)] で報告された  $z = 7$  での UV 光度関数から high- $z$  でも変化しないと仮定した場合。 $z = 15$  でも  $z = 7$  と同数の銀河が存在すると考えるのは非現実的かと思われるが、期待される数の上限を与えると考える。

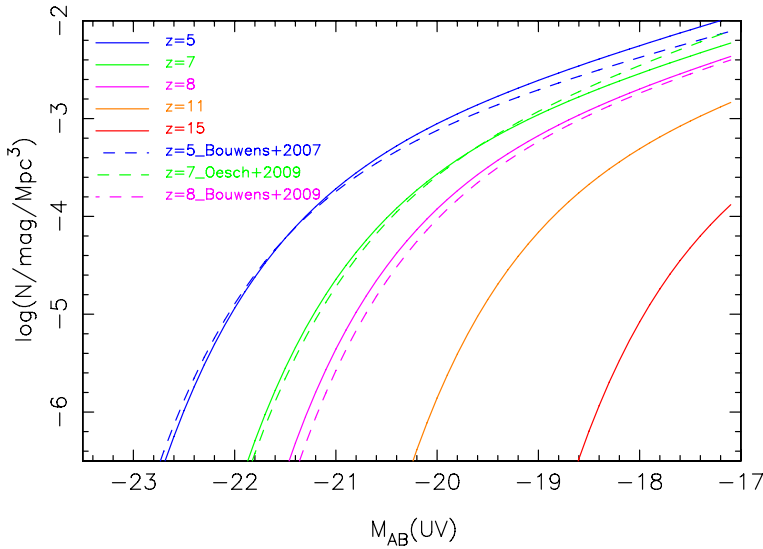


Figure 15: UVLF の進化がある場合の進化モデル。 $M^*$  のみが進化している。破線で [Bouwens et al.(2007)]( $z = 5$ ), [Oesch et al.(2009)]( $z = 7$ ), [Bouwens et al.(2009)]( $z = 8$ ) の GOODS / Hubble UDF での結果を示した

3 番目に、[Sheth and Tormen(2002)] の DM Halo Mass Function の進化モデルから光度関数進化を仮定した場合を計算した。DM Halo Mass / UV 光度の比が一定であると仮定することで、各 redshift での DM Halo Mass Function から UV 光度関数を導くことができる。この場合の UVLF 進化は、[Bouwens et al.(2008)] で考えた empirical な進化よりもはるかに急激になる (Fig.16)。なお、DM Halo Mass / UV 光度比は、 $z = 5$  で光度関数が観測結果と概ね一致するように設定したので、ある程度 arbitrary なものであり、factor 程度の変動はありうる。上記の場合と同様に検出の completeness を考慮して検出期待数を計算した。

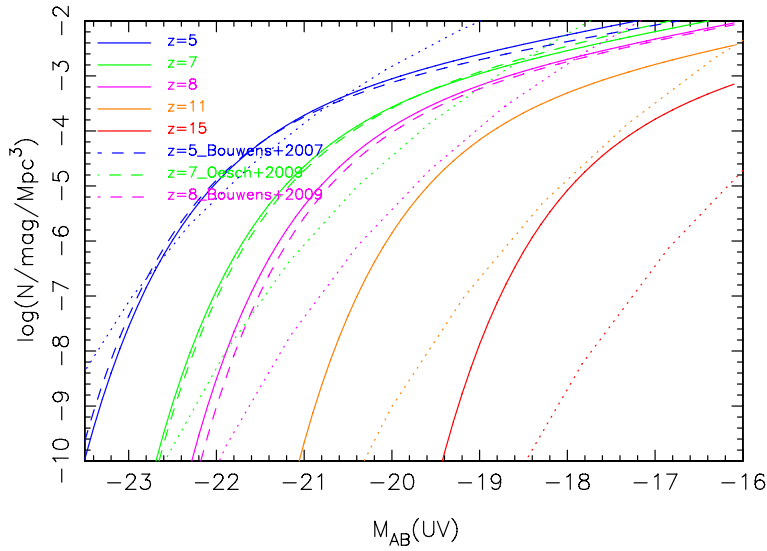


Figure 16: 実線、破線: Fig.15 と同様。点線: DM Halo Mass Function の進化に合わせて UV 光度関数が進化すると仮定した場合の光度関数進化

## 2.4 検出期待数

### 2.4.1 Filter Set 3 での検出期待数

上述のような completeness の計算、UVLF 進化の過程を踏まえて、redshift 0.1 step で単位面積あたりの検出期待数の計算を行った。

0.5 mag step での redshift に依存した検出期待数密度を、Fig. 17, 18 (Set3:0-dropout) Fig. 19, 20 (Set3:1-dropout) Fig. 21, 22 (Set3:2-dropout) に示した。UVLF( $M^*$ ) の進化があると仮定した場合には、redshift の小さい方に検出が偏る傾向が見られる。特に  $z \geq 14$  の銀河を select する Set3:2-dropout の場合には、数密度進化の影響で、 $z \sim 12$  付近の LBG ばかりが見つかることになっている。

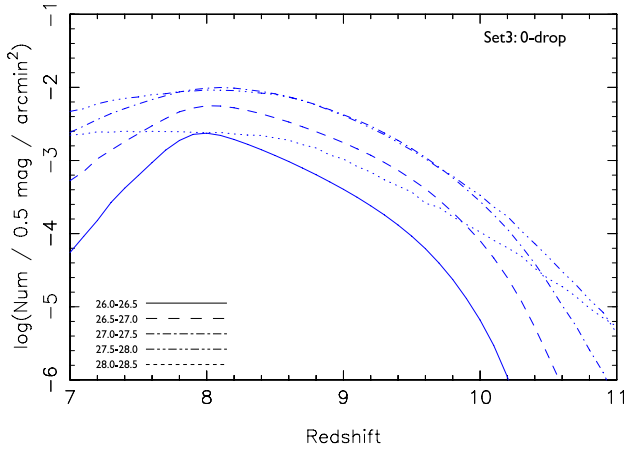


Figure 17: Filter Set 3:0-dropout の検出期待数: LF 進化有りの場合

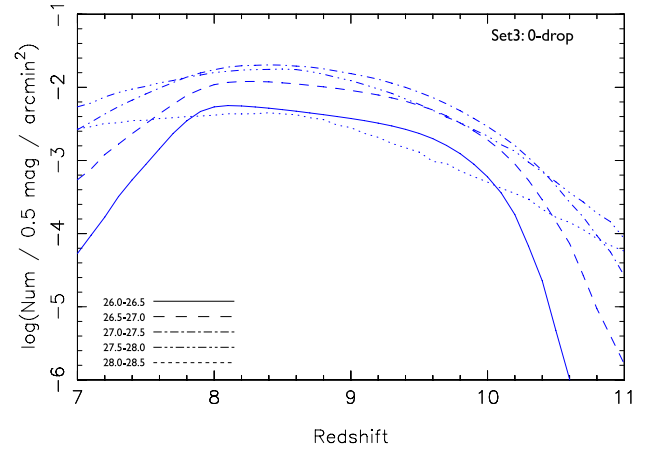


Figure 18: Filter Set 3:0-dropout の検出期待数: LF 進化なしの場合

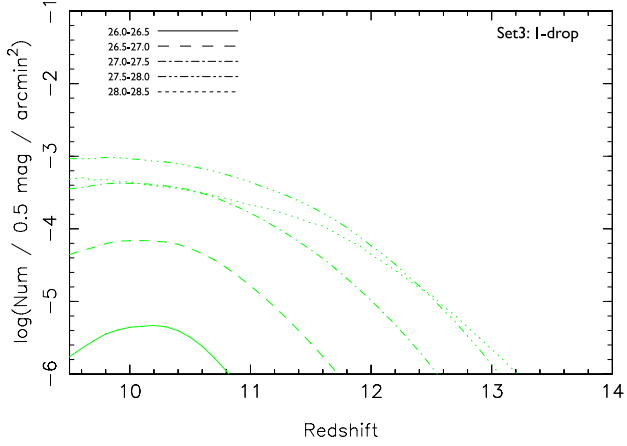


Figure 19: Filter Set 3:1-dropout の検出期待数: LF 進化有りの場合

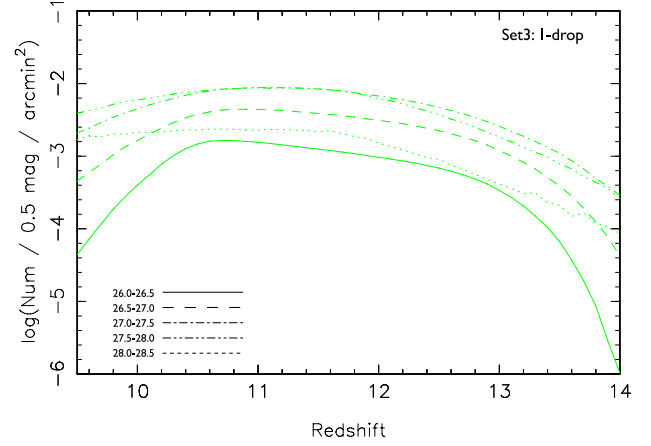


Figure 20: Filter Set 3:1-dropout の検出期待数: LF 進化なしの場合

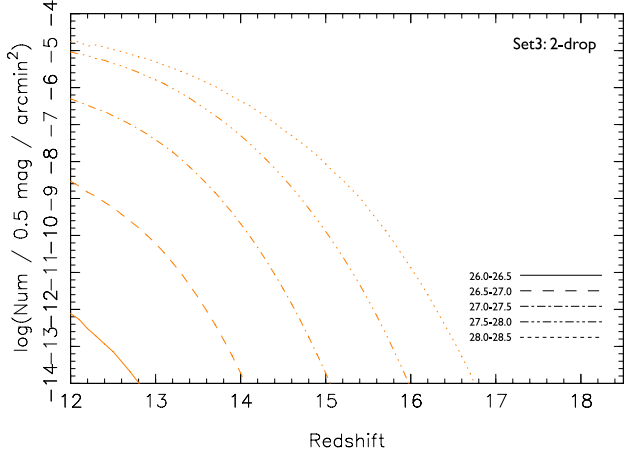


Figure 21: Filter Set 3:2-dropout の検出期待数: LF 進化有りの場合

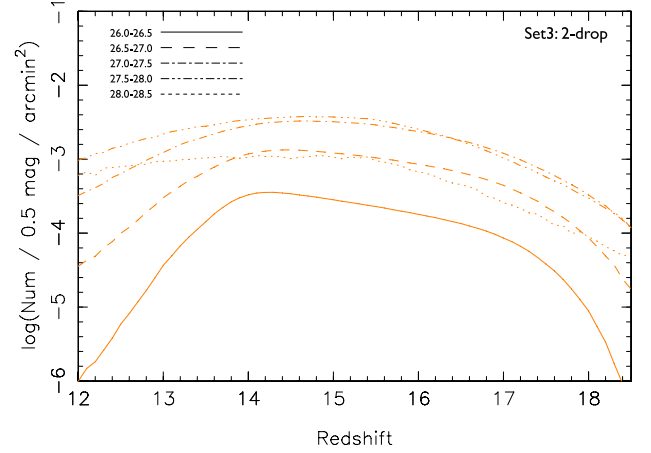


Figure 22: Filter Set 3:2-dropout の検出期待数: LF 進化なしの場合

これらを合算して各 selection criteria での cumulative な検出期待数を示したのが Table 3 および Fig. 23 である。UVLF の進化の有無で大きな違いが生じている。

	redshift	LF 進化なし	LF 進化あり	DMH 進化
Set3:0-dropout	8–9	4,000	1,690	852.3
Set3:1-dropout	11–12	2,393	104.2	4.116
Set3:2-dropout	14–17	1,249	0.723	0.003

Table 3: Filter Set 3 での dropout 銀河の 1 平方度あたりの検出期待数。3 $\sigma$  28.0 AB 等級の検出限界での期待数。

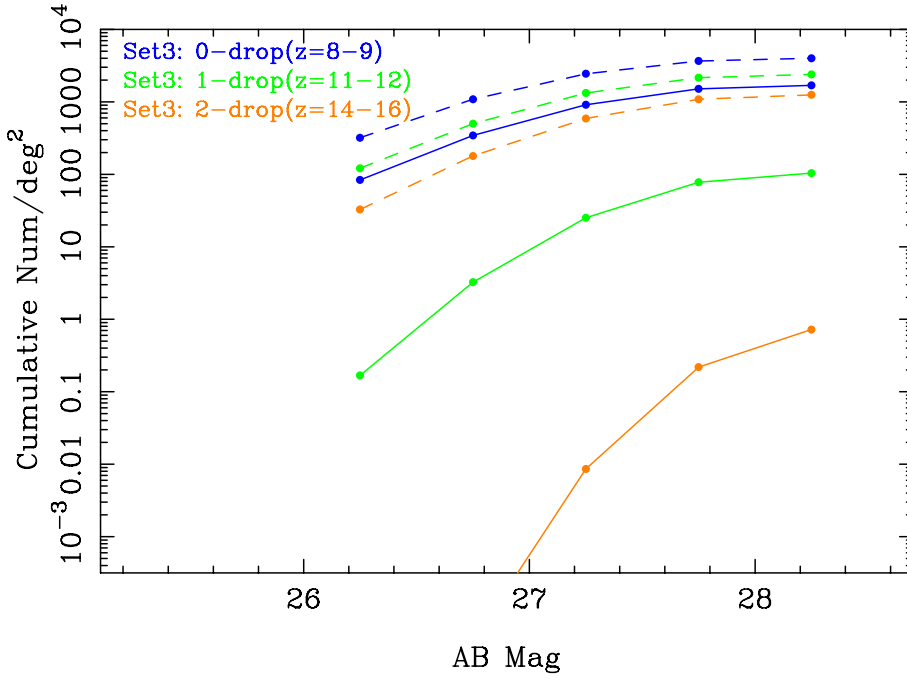


Figure 23: Filter Set 3 での検出期待数。実線は UVLF 進化有り、破線は進化なしの場合

#### 2.4.2 Filter Set 4 での検出期待数

Set 3 同様に Set 4 についても単位面積あたりの検出期待数の計算を行った。

0.5 mag step での redshift に依存した検出期待数密度を、Fig. 24, 25 (Set4:0-dropout) Fig. 26, 27 (Set4:1-dropout) Fig. 28, 29 (Set4:2-dropout) Fig. 30, 31 (Set4:3-dropout) に示した。

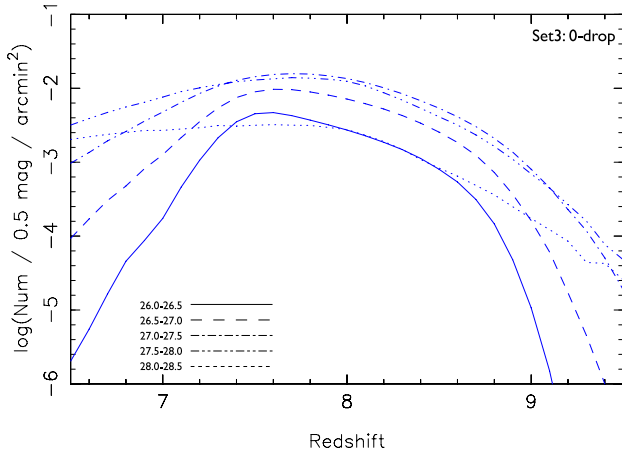


Figure 24: Filter Set 4:0-dropout の検出期待数: LF 進化有りの場合

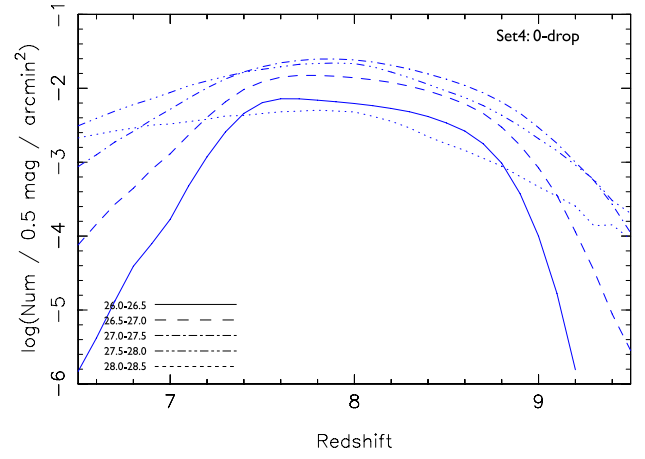


Figure 25: Filter Set 4:0-dropout の検出期待数: LF 進化なしの場合

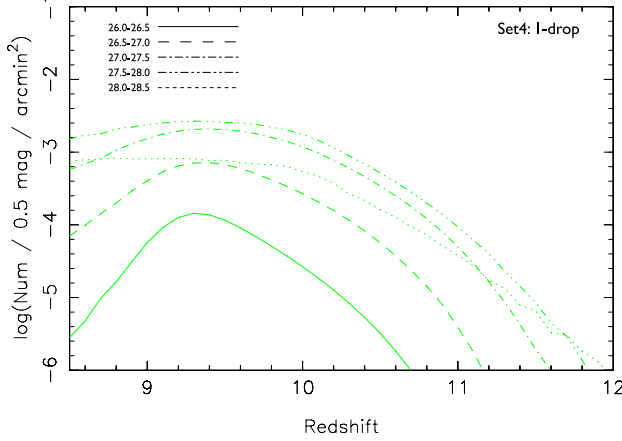


Figure 26: Filter Set 4:1-dropout の検出期待数: LF 進化有りの場合

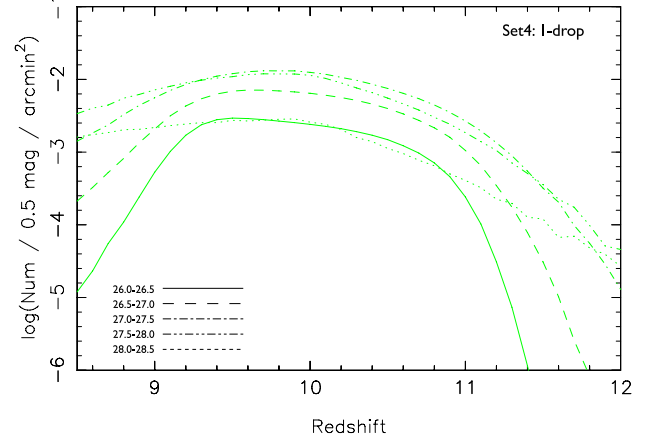


Figure 27: Filter Set 4:1-dropout の検出期待数: LF 進化なしの場合

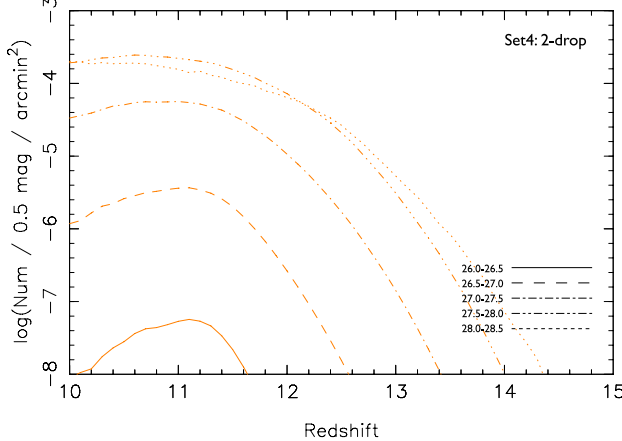


Figure 28: Filter Set 4:2-dropout の検出期待数: LF 進化有りの場合

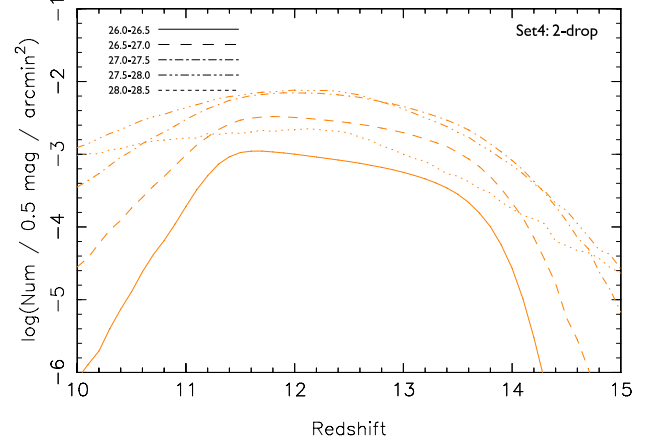


Figure 29: Filter Set 4:2-dropout の検出期待数: LF 進化なしの場合

これらを合算して各 selection criteria での cumulative な検出期待数を示したのが Table 4 および Fig. 32 である。

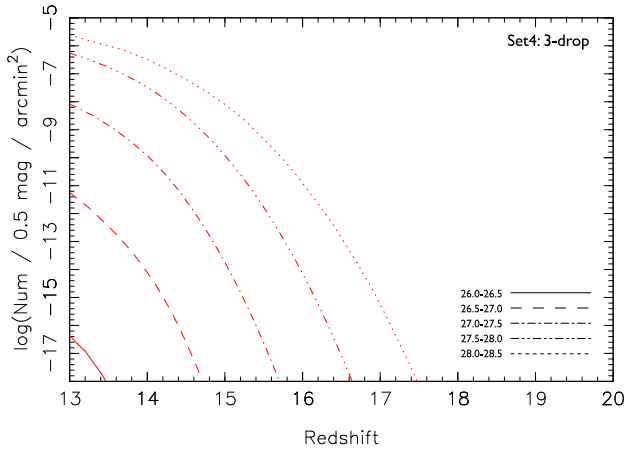


Figure 30: Filter Set 4:3-dropout の検出期待数: LF 進化有りの場合

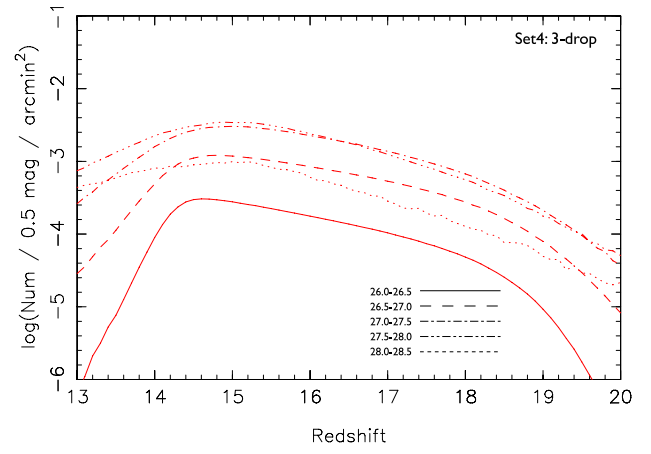


Figure 31: Filter Set 4:3-dropout の検出期待数: LF 進化なしの場合

	redshift	LF 進化有り	LF 進化なし	DMH 進化
Set4:0-dropout	8	3,522	2,129	1,682
Set4:1-dropout	10	2,150	329.9	35.86
Set4:2-dropout	12-13	1,728	30.37	0.715
Set4:3-dropout	15-18	981.5	5.672e-2	1.212e-4

Table 4: Filter Set 4 での dropout 銀河の 1 平方度あたりの検出期待数。3 $\sigma$  28.0 AB 等級の検出限界での期待数。

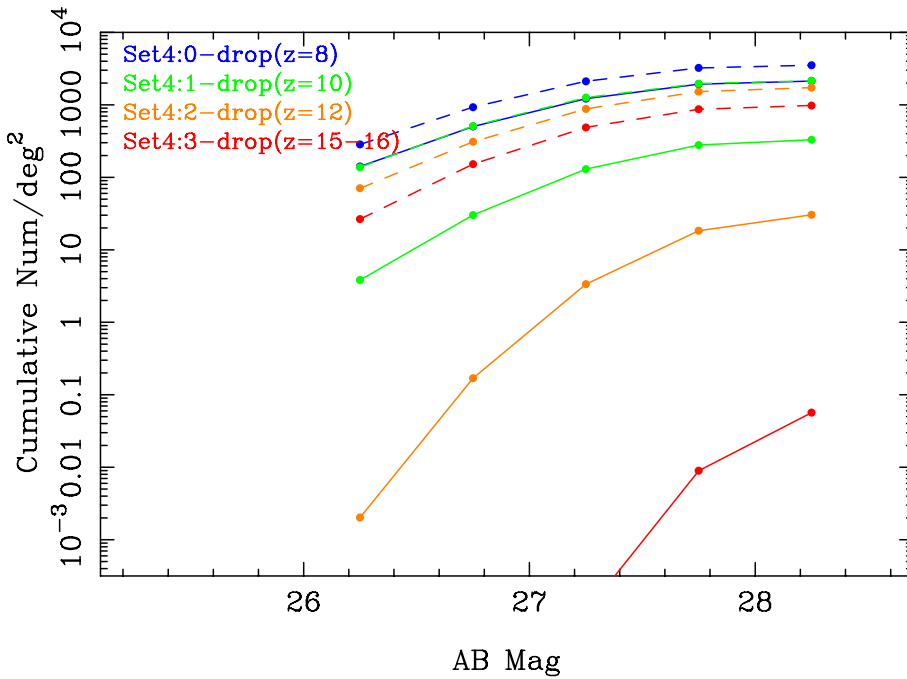


Figure 32: Filter Set 4 での検出期待数。実線は UVLF 進化有り、破線は進化なしの場合

### 3 議論

#### 3.1 フィルタセットの比較

- いずれのフィルタセットでも、設定したような steep な立ち上がりで flat な透過効率を実現できれば、secure な LBG sample の構築が可能と期待できる。
- Set 4 の方が短波長側のフィルタの幅が狭いため、dropout で検出する redshift range が狭い。このため、ある dropout selection で検出できる銀河の数は、UVLF 進化を考えないと、Set 3 よりも 1 割前後少ない傾向にある。
- UVLF 進化があるとすると、サンプルする redshift range が異なるため、単純な検出数密度の比較はできなくなる。Set 4 の方が数密度が少ないということは必ずしもない。
- redshift range が狭い方が、分光フォローアップは行いやすいと考えられるが、Set 4 は地上望遠鏡で使用されているフィルタシステム (JHKs) とはかなり異なっており、大気吸収帯にかかっている。4:1-drop や 4:2-drop の地上からの分光は難しいかもしれない。
- Filter Set 3 でも Set 4 でも 0-dropout ( $z = 7-9$ ) は数平方度のサーベイを行えば、 $< 27AB$  の明るいものも 1,000 個程度検出可能と期待できるので、100 平方度のサーベイは不要であろう。
- 十分な数の  $z > 12$  の銀河を検出するためには、Set 3 の場合は (1,2,3,4) の (3 or )4 枚、Set 4 の場合は 2,3,4,5 の 4 枚で 28AB まで到達して 100 平方度程度サーベイすることが最低要件となる。

#### 3.2 サーベイプラン案に基づいた検出期待数

「WISH サーベイプラン」で検討したサーベイプランでの LBG の総検出数を計算する。UV 光度関数は empirical な進化 (redshift が大きくなるにつれて  $M^*$  が暗くなる) を用いる。

Plan 1, Plan 2 は Filter set 3 を用いるもので、Plan 1 は UDS にフィルタ 3 枚 (2,3,4) を、Plan 2 は UDS にフィルタ 4 枚 (1,2,3,4) を用いるものである。Plan 1 では UDS は 75.83 sq.deg<sup>2</sup>, MBS は 20.07 sq.deg<sup>2</sup> のサーベイ領域、Plan 2 では UDS は 59.03 sq.deg<sup>2</sup>, MBS は 17.03 sq.deg<sup>2</sup> のサーベイ領域となっている。

	redshift	Expected total # of detections	
		Plan 1	Plan 2
Set3:0-dropout	8–9	33,910 (MBS)	28,773 (MBS)
Set3:1-dropout	11–12	2,090 (MBS)	6,418 (UDS)
Set3:2-dropout	14–17	54 (UDS)	42 (UDS)

Table 5: サーベイプランによる検出期待数。Filter set 3 を用いる Plan 1, 2 の場合

Plan 3 は Filter set 4 を用いるもので、UDS にフィルタ 4 枚 (2,3,4,5) を用いる。UDS は 52.03 sq.deg<sup>2</sup>, MBS は 18.43 sq.deg<sup>2</sup> のサーベイ領域となっている。

	redshift	Expected total # of detections
		Plan 3
Set4:0-dropout	8	39,241 (MBS)
Set4:1-dropout	10	6,080 (MBS)
Set4:2-dropout	12–13	1,580 (UDS)
Set4:3-dropout	15–18	2.95 (UDS)

Table 6: サーベイプランによる検出期待数。Filter set 4 を用いる Plan 3 の場合

#### 3.3 今後の検討項目

- 検出限界到達時間からサーベイに要する時間を評価

- 数値シミュレーションでの推定による UVLF を使用した検出期待数の評価
- 異なる星種族合成モデルの使用: あまり大きな影響はないと予想される

## References

- [Bouwens et al.(2007)] Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Franx, M., Ford, H. 2007, ApJ 670, 928
- [Bouwens et al.(2008)] Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Franx, M., Ford, H. 2008, ApJ 686, 230
- [Bouwens et al.(2009)] Bouwens, R. J., et al. 2009, arXiv:0909.1803
- [Coleman et al.(1980)] Coleman G. D., Wu C.-C., Weedman D. W. 1980, ApJS 43, 393
- [Inoue et al.(2005)] Inoue, A. K., Iwata, I., Deharveng, J.-M., Buat, V., Burgarella, D. 2005, A&A 435, 471
- [Maraston(2005)] Maraston, C. 2005, MNRAS 362, 799
- [Oesch et al.(2009)] Oesch, P. A., et al. 2009, arXiv:0909.1806
- [Sheth and Tormen(2002)] Sheth, R. K., & Tormen, G. 2002, MNRAS 329, 61