

初代星・銀河形成研究会 2008年9月10日

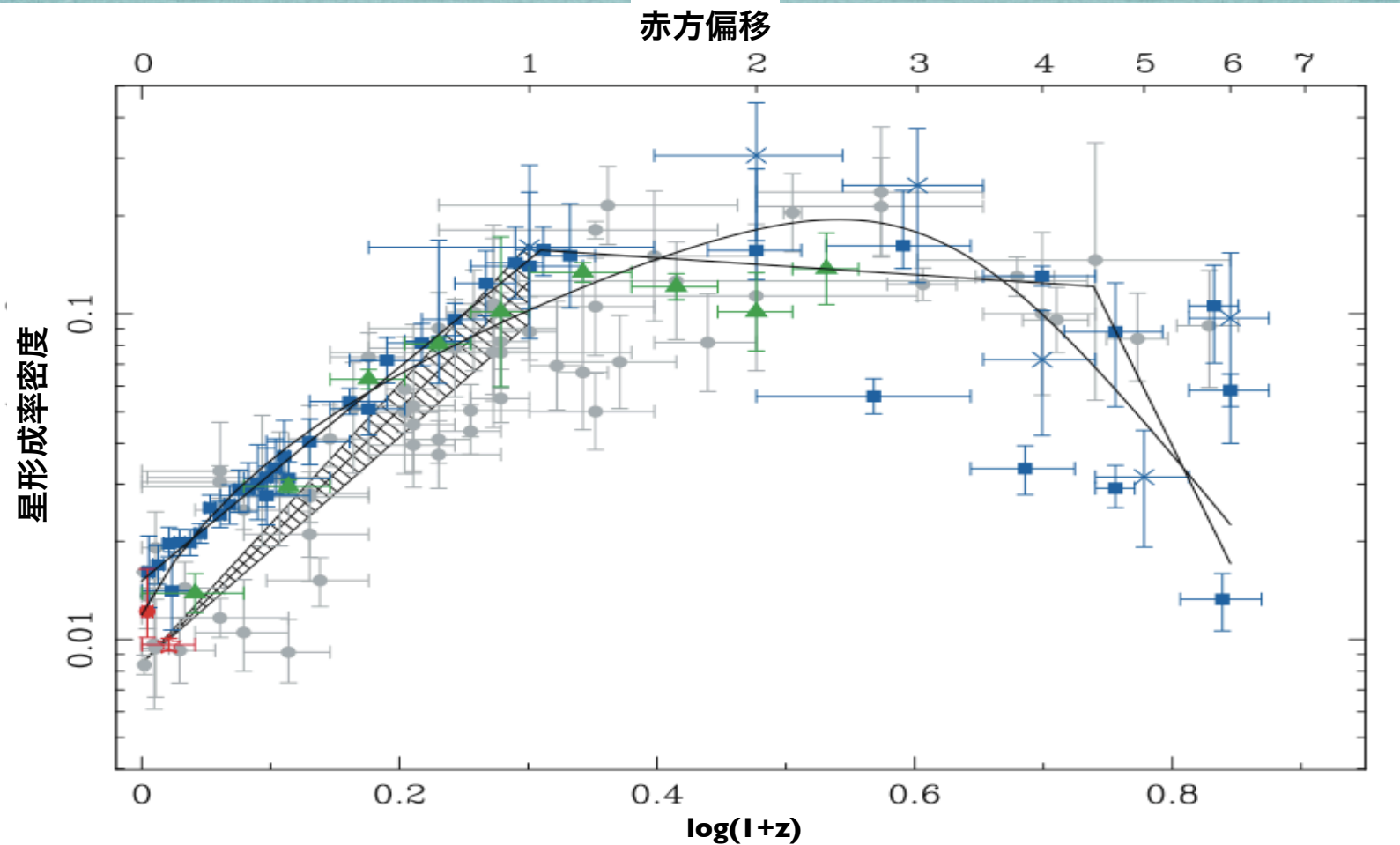
# The stellar masses of LBGs at $z \sim 5$

矢部清人(京都大学)

太田耕司, 梶野裕喜, Suraphong Yuma(京都大学),  
岩田生(国立天文台/岡山), Marcin Sawicki(St Mary's Univ.),  
秋山正幸(東北大学), 田村直之, 青木賢太郎(国立天文台/ハワイ)



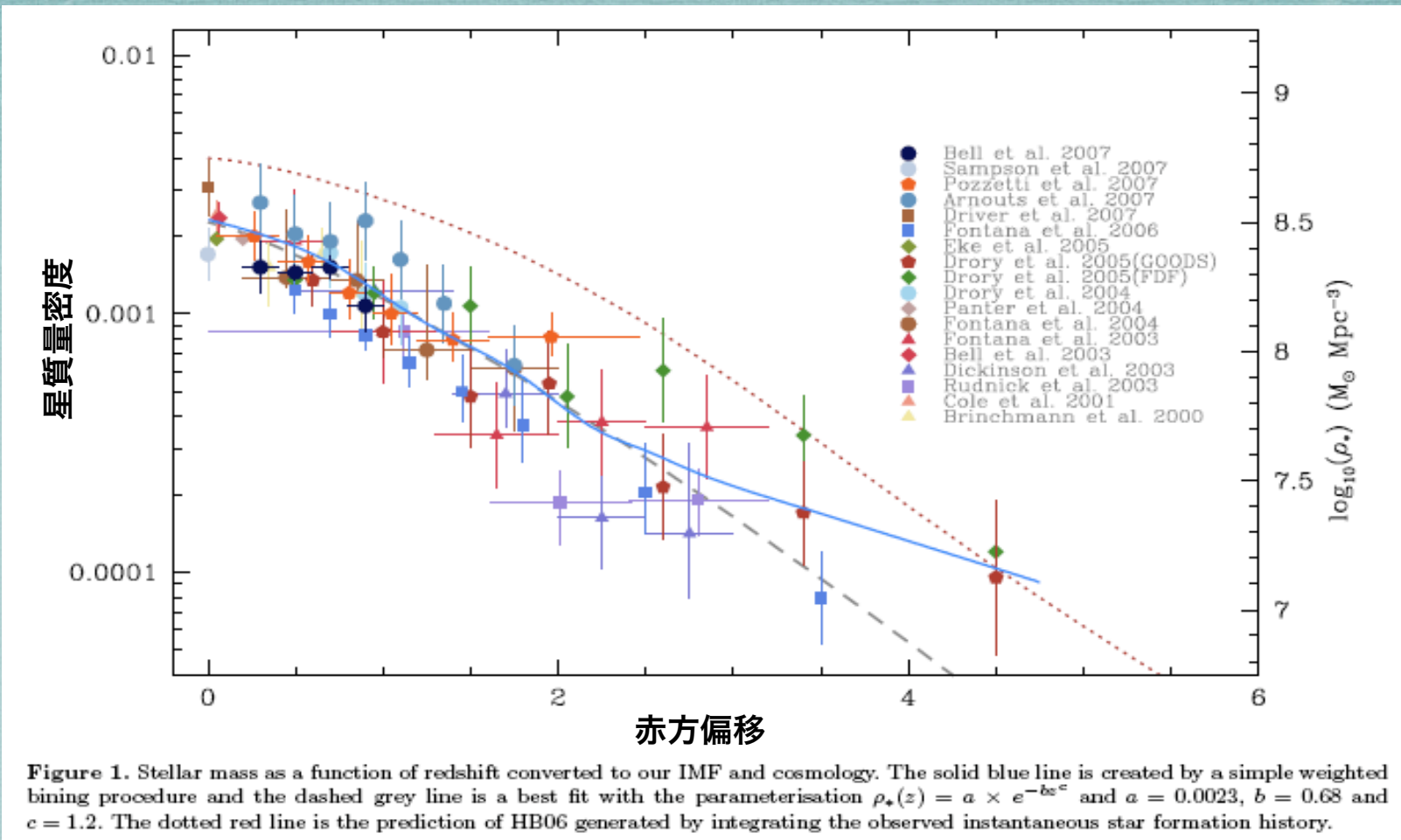
# 宇宙の星形成率密度の進化



Hopkins&Beacom 2006

- ✓近年の大規模なサーベイにより $z \sim 6$ までの銀河が大量にサンプルされている。
- ✓星形成率密度の進化: $z \sim 6$ から増加、 $z=2-3$ でピーク、現在まで減少

# 宇宙の星質量密度の進化



Wilkins+2008

- ✓星質量の“assembly”の様子を調べる事も重要
- ✓CDMシナリオに従えば、小さな系からmergerによって大きな系に成長
- ✓星質量密度は時間と共に増加していくと考えられる



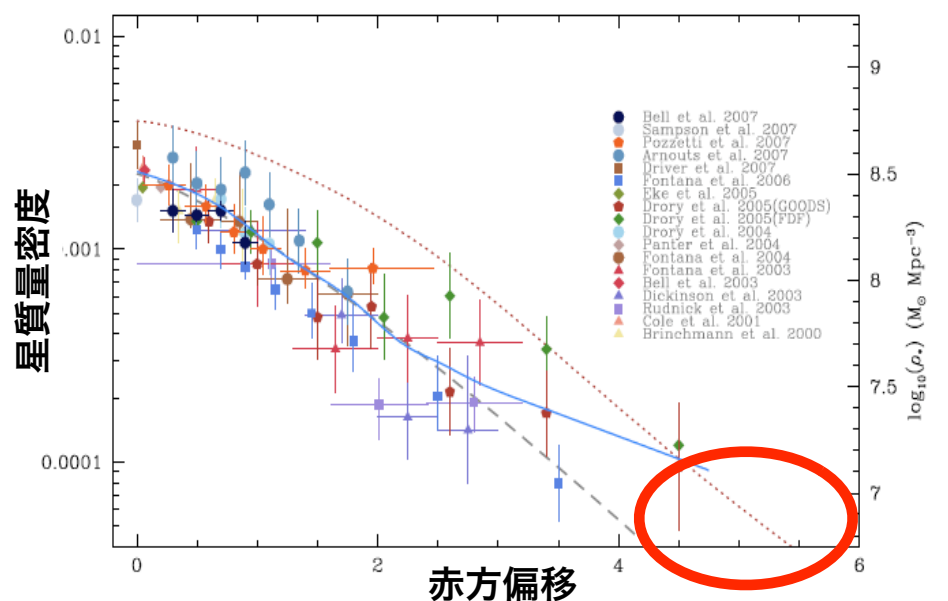
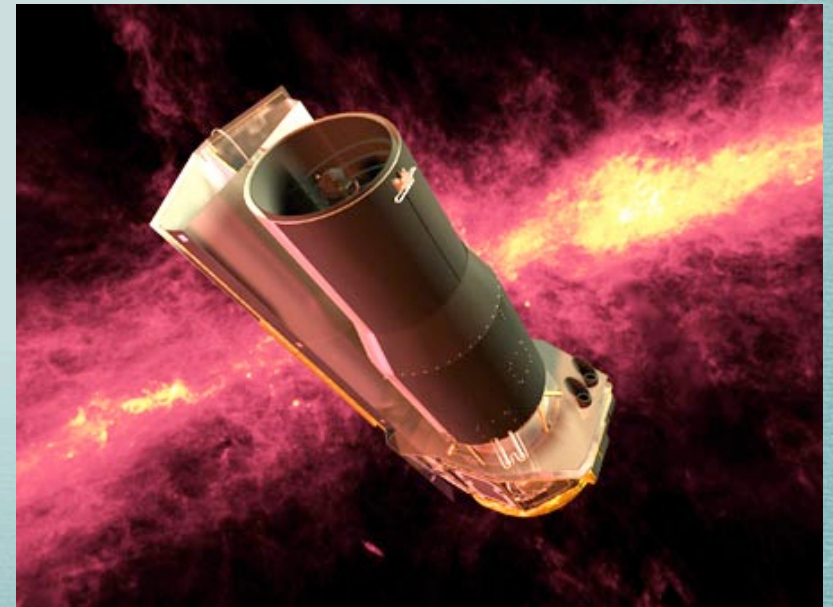


Figure 1. Stellar mass as a function of redshift converted to our IMF and cosmology. The solid blue line is created by a simple weighted binning procedure and the dashed grey line is a best fit with the parameterisation  $\rho_*(z) = a \times e^{-bz^c}$  and  $a = 0.0023$ ,  $b = 0.68$  and  $c = 1.2$ . The dotted red line is the prediction of HB06 generated by integrating the observed instantaneous star formation history.

- ✓ これまでの研究では  $z < 5$  が対象
- ✓ 星質量を調べるためには静止系で可視を見る必要がある
- ✓  $z \geq 5$  でこれは中間赤外に対応し、地上からの観測が困難
- ✓ Spitzer望遠鏡の登場で中間赤外線の deep な観測が可能になる

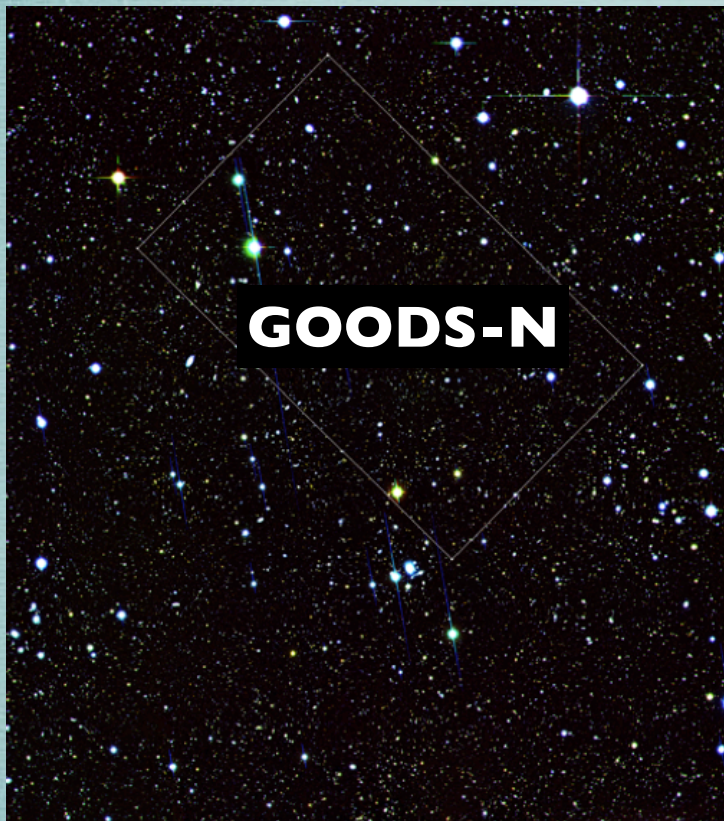
Spitzer/IRAC (3.6 $\mu\text{m}$ ~8.0 $\mu\text{m}$ )で  $z \sim 5$  にある銀河の rest-frame 6000 $\text{\AA}$  より長い側を見ることができる。



Spitzer Space Telescope



# $z \sim 5$ におけるLBG探査(Iwata et al. 2003, 2007)



GOODS-N周辺 (508 arcmin<sup>2</sup>)



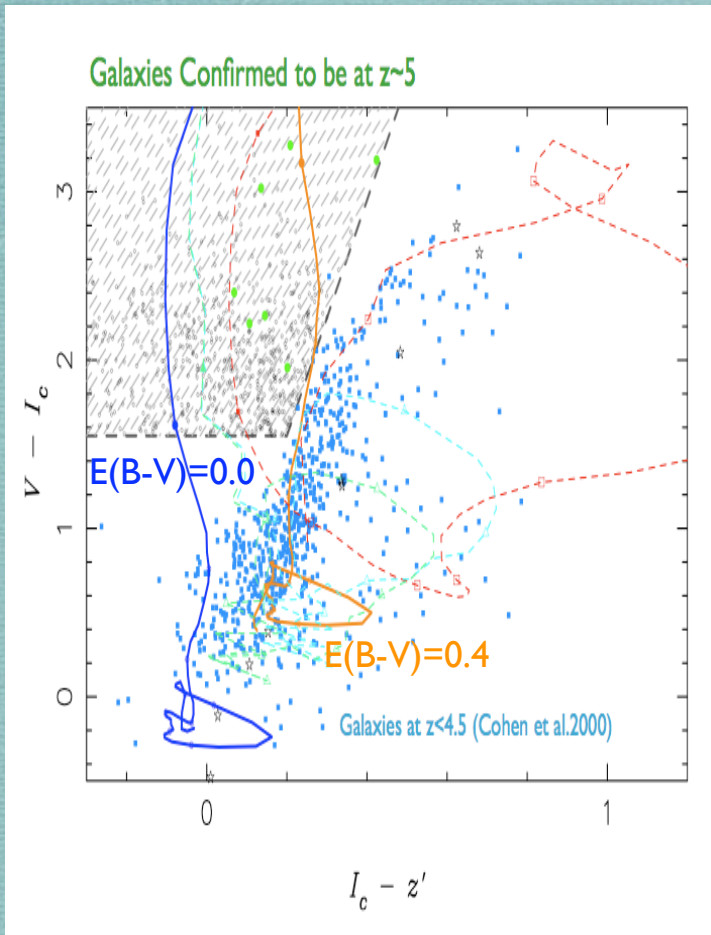
J0053+1234 (781 arcmin<sup>2</sup>)

Total  $\sim$  1300 arcmin<sup>2</sup>

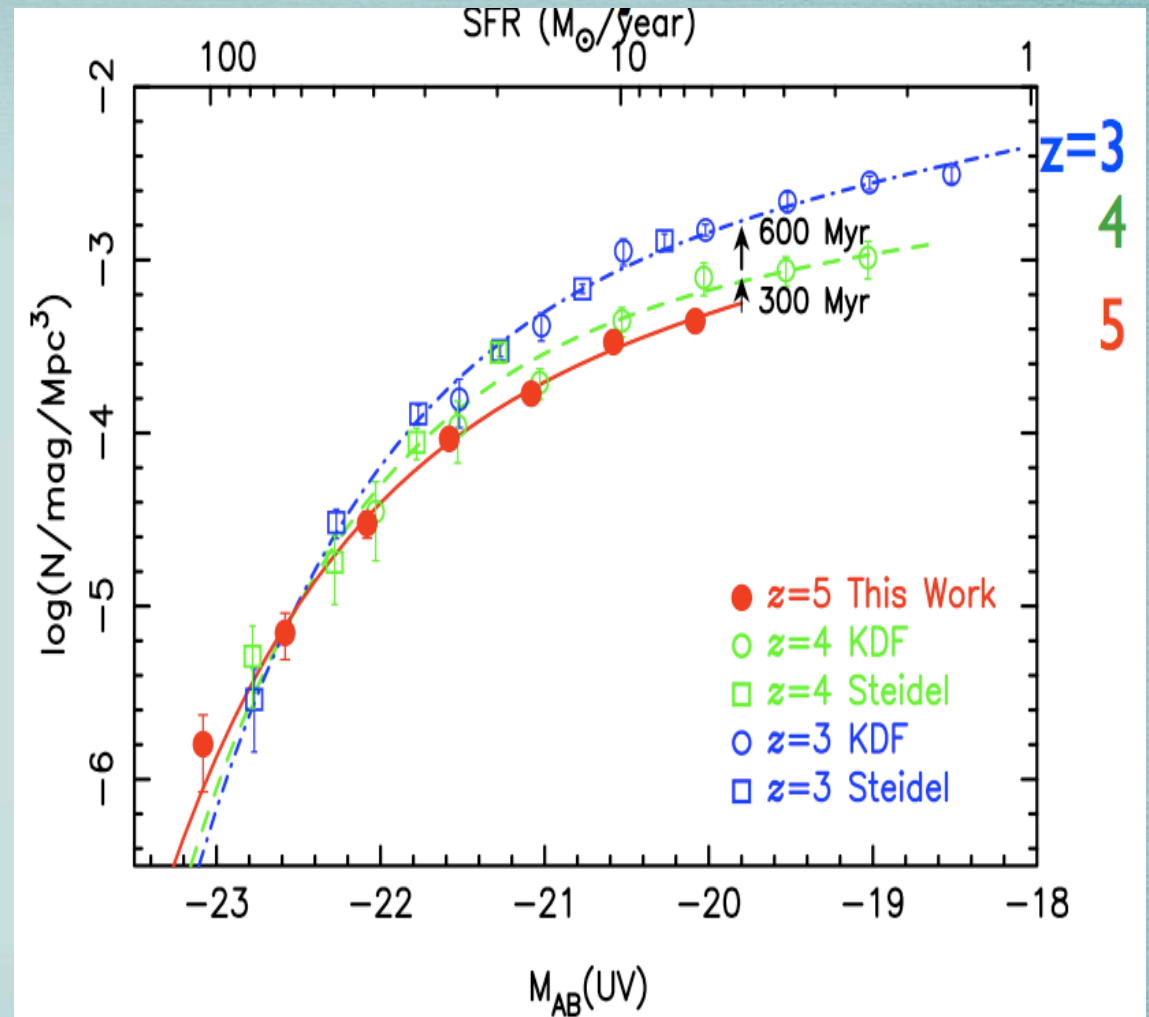
$V=28.2, I_c=26.9, z'=26.6$  (in GOODS-N)



# LBG@z~5のUVLF (see Iwata et al. 2007)

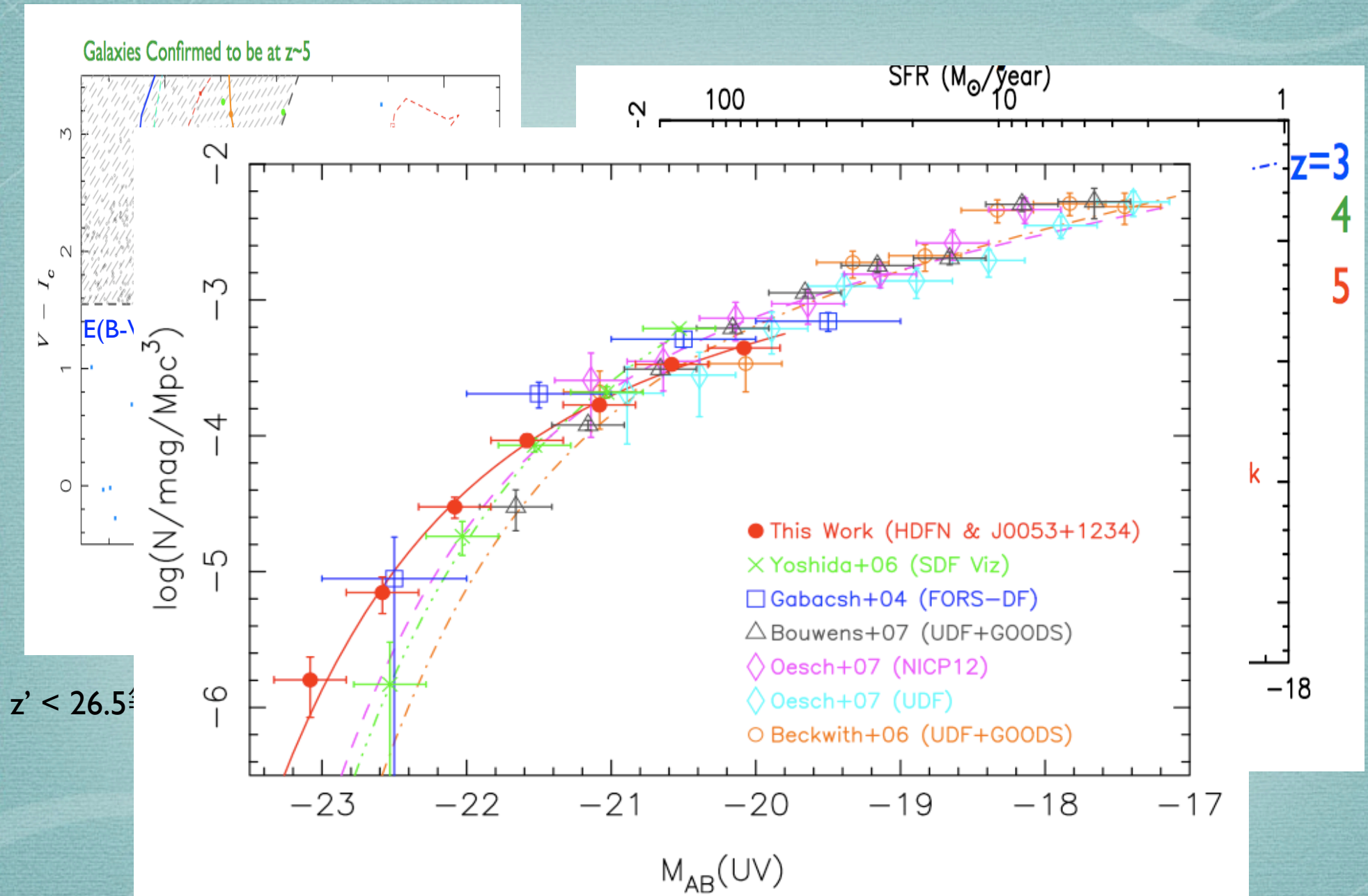


$z' < 26.5$ 等で約850個のLBGサンプル



- ✓ bright endでは $z=5$ から $z=3$ にかけて有意な変化はない
- ✓ faint endでは $z=5$ から $z=3$ にかけて有意に増加している
- ✓ luminosity dependent evolution ?

# LBG@z~5のUVLF (see Iwata et al. 2007)



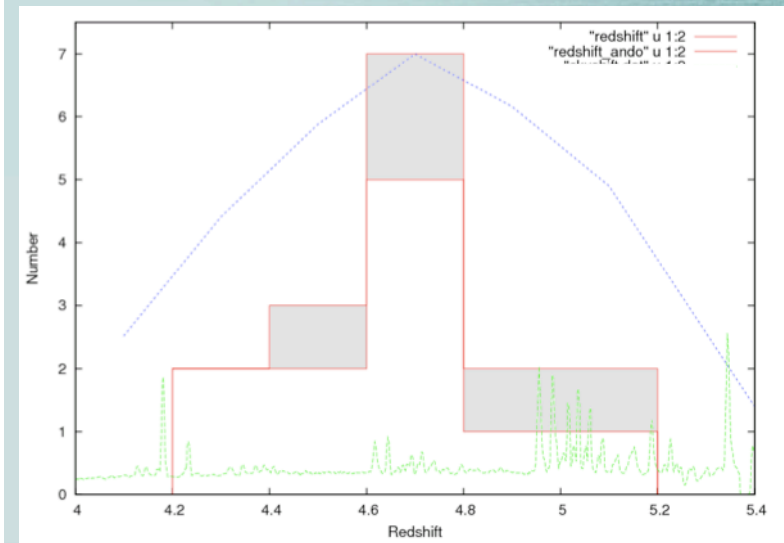
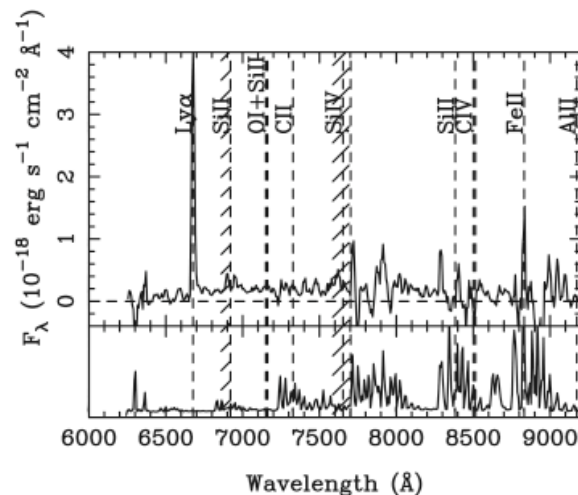
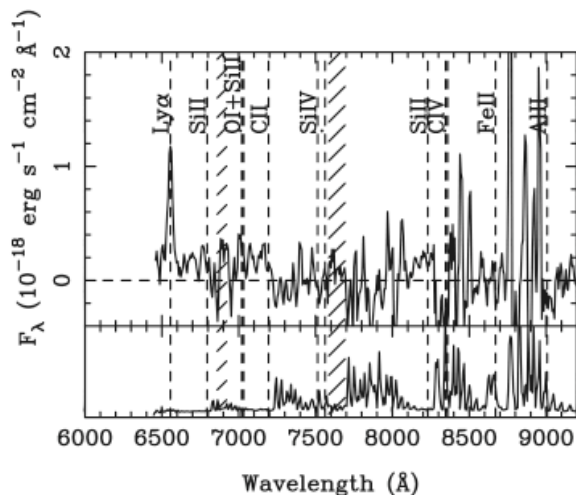
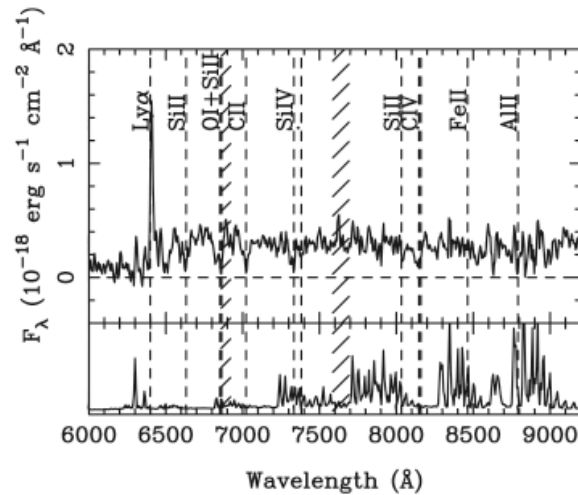
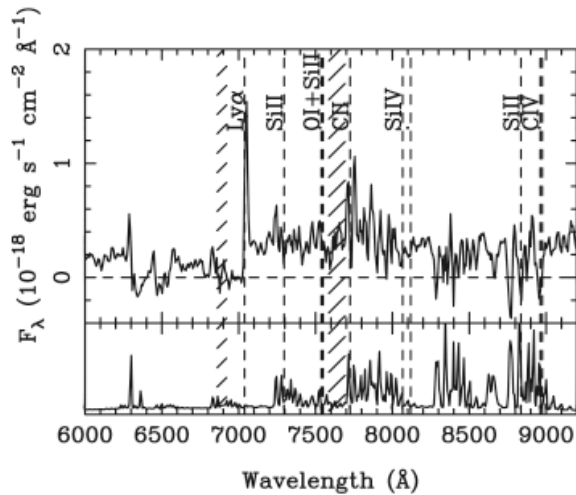
$z' < 26.5$

✓ luminosity dependent evolution ?



# Follow-up分光観測

- Subaru/FOCAS: Ando et al. 2004, 2007 . . . 計11天体を $z \sim 5$ と同定
- Gemini/GMOS: Kajino et al. in prep. . . . 計5天体を $z \sim 5$ と同定



↑ spec-zの分布

← 同定されたLBGの1次元スペクトルの例  
(see Ando et al. 2007)

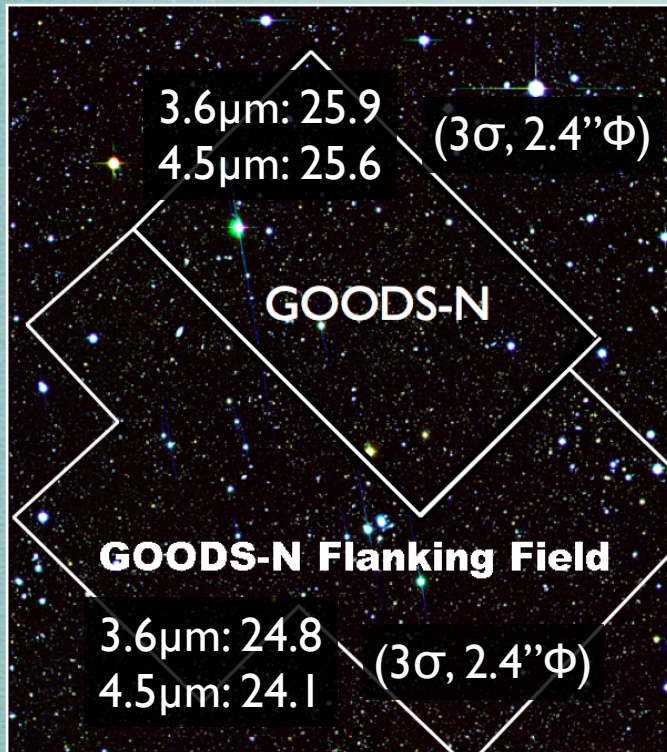


# Stellar Population Analysis

Spitzer Space Telescope

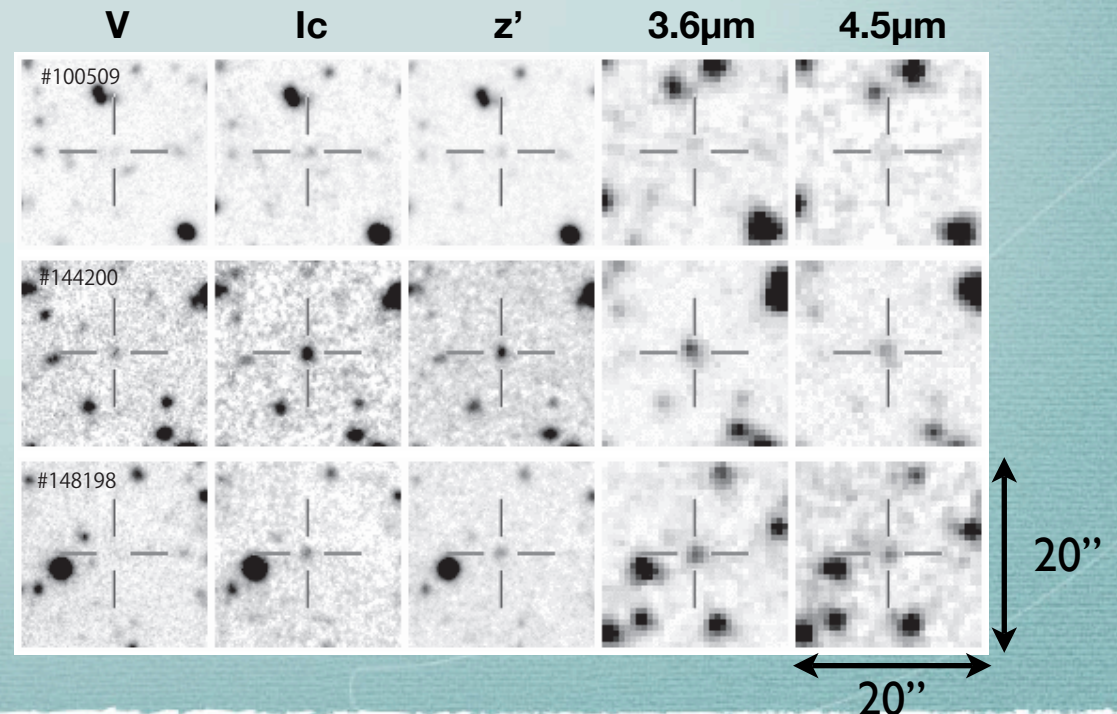


- ✓  $z \sim 5$ のLBGの星質量等をSEDフィットから求める
- ✓ 使用したデータ：S-Cam(V, Ic, z'), IRAC(3.6 $\mu$ m, 4.5 $\mu$ m)
- ✓ GOODS-Nに関してはアーカイブデータを使用
- ✓ GOODS-FFでは新たにIRACで観測



- ✓ LBGサンプルはIwata+07のLBG@ $z \sim 5$  ( $z' < 26.5$ ; 617個)
- ✓ その中からIRACで周りの影響がないような物(170個)を目で見て選択
- ✓ その中でIRACで受かったもの(105個)についてSED fittingを行った

典型的なサンプルの顔写真



IRACデータの領域の面積は  
 GOODS-N： $\sim 150 \text{ arcmin}^2$   
 GOODS-FF： $\sim 250 \text{ arcmin}^2$   
 2領域で可視データの領域の約80%をカバー



# SED fitting

- ✓ SED fittingとは観測されたSEDをモデルでフィットする方法
- ✓ Sawicki & Yee (1998)と同様の方法で行った (Sawicki in prep.)
- ✓ モデルSEDの作り方は以下の通り

種族合成モデル：Bruzual&Charlot2003

IMF：Salpeter IMF ( $0.1M_{\text{sun}} < M_* < 100M_{\text{sun}}$ )

金属量： $0.2 Z_{\text{sun}}$

ダスト減光則：Calzetti et al. (2000)

IGM吸収：Madau (1995)

星形成史：Constant SF モデル

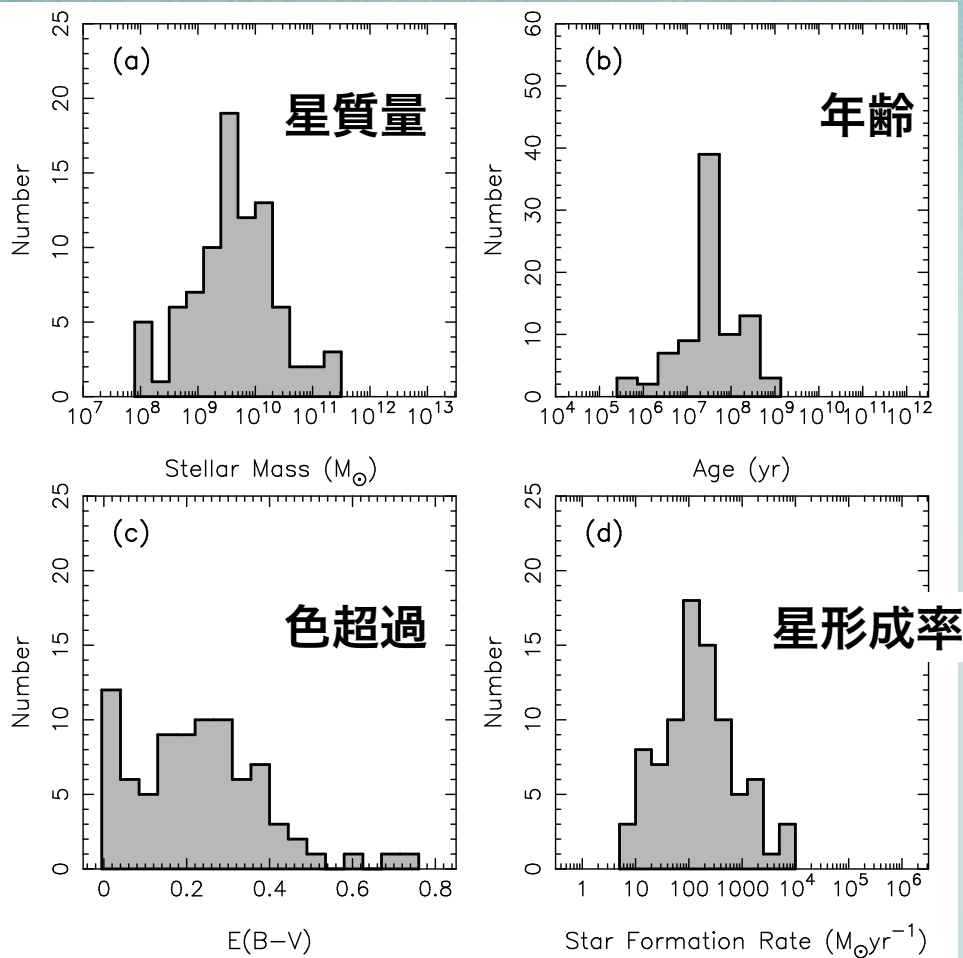
赤方偏移： $z=4.8$ に固定

H $\alpha$ の影響を考慮 ( $M_*$ に20%程度影響)

赤方偏移をフリーパラメータにしても星質量にはそれほど影響ない。金属量、減光則、星形成史による星質量の不定性はファクターで2程度。

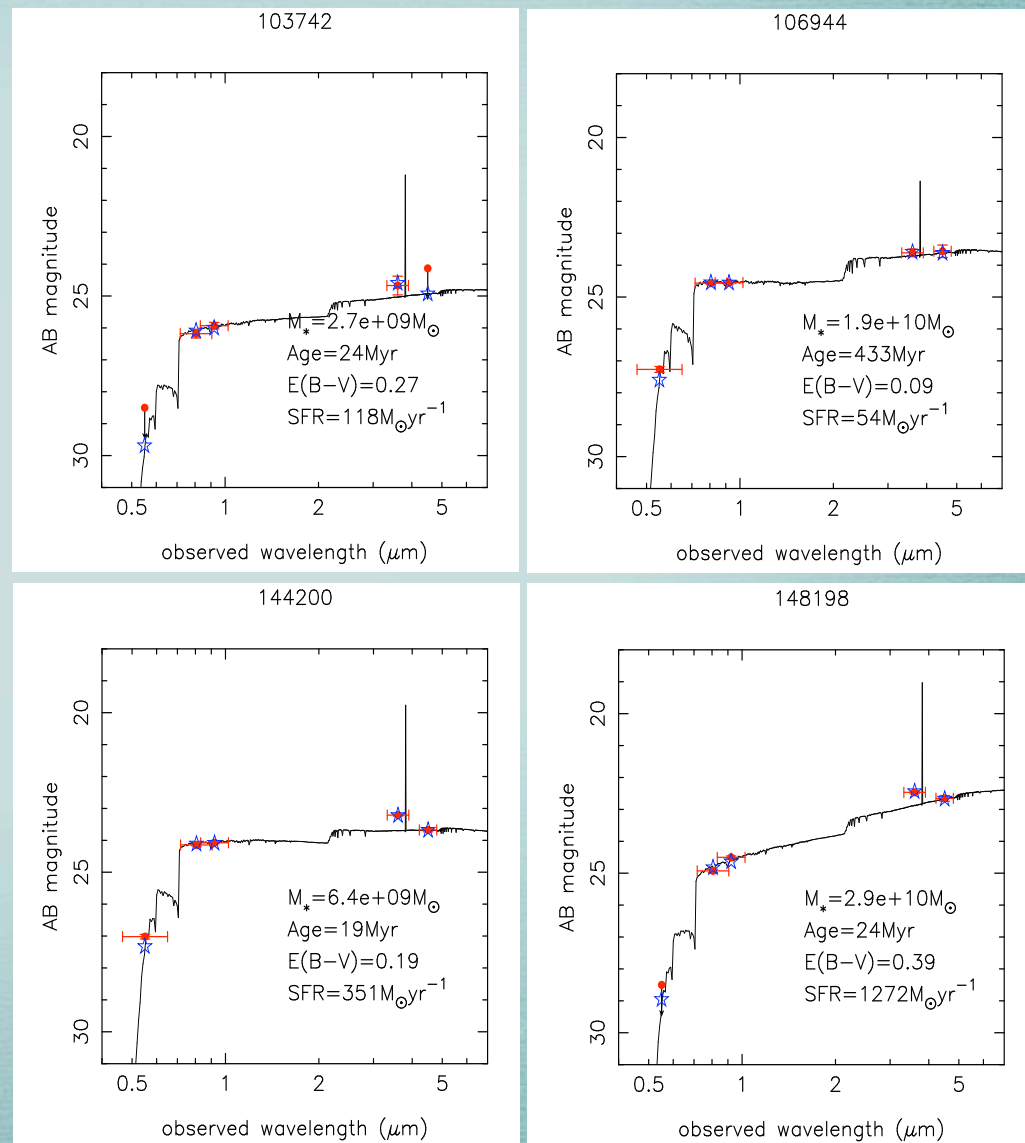


# 結果



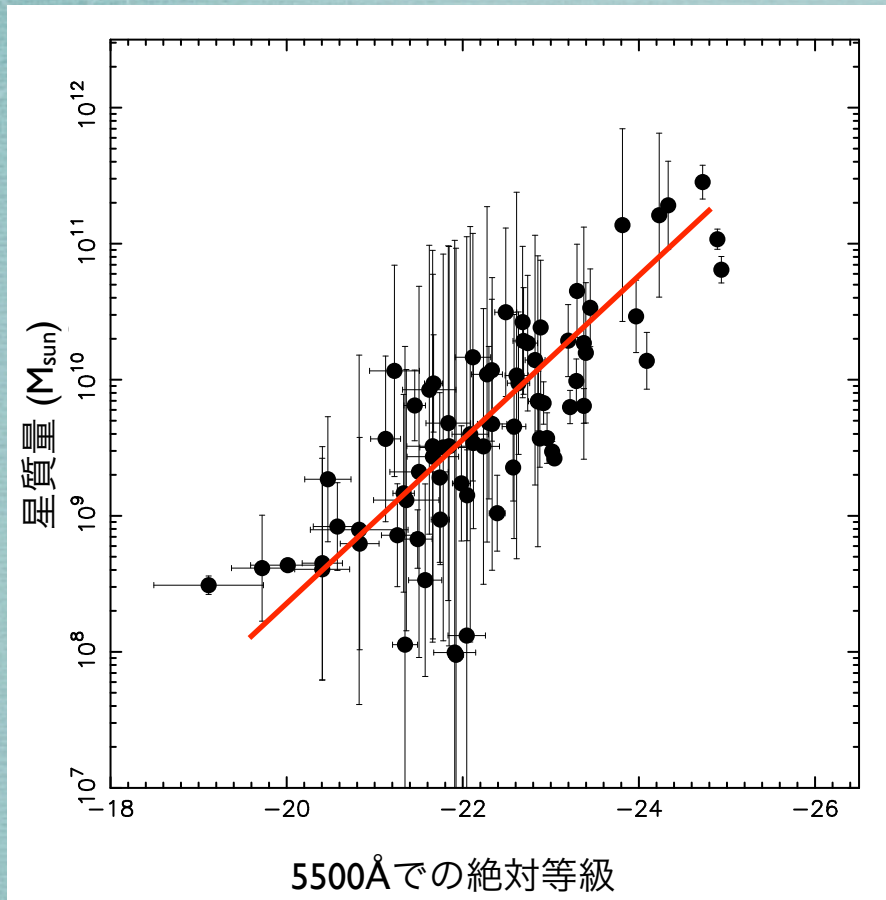
$M_{*}^{\text{median}} = 3.8 \times 10^9 M_{\text{sun}}$   
 $\text{age}^{\text{median}} = 25 \text{ Myr}$   
 $E(B-V)^{\text{median}} = 0.23 \text{ mag}$   
 $\text{SFR}^{\text{median}} = 190 M_{\text{sun}} \text{yr}^{-1}$

## 典型的なfitの例

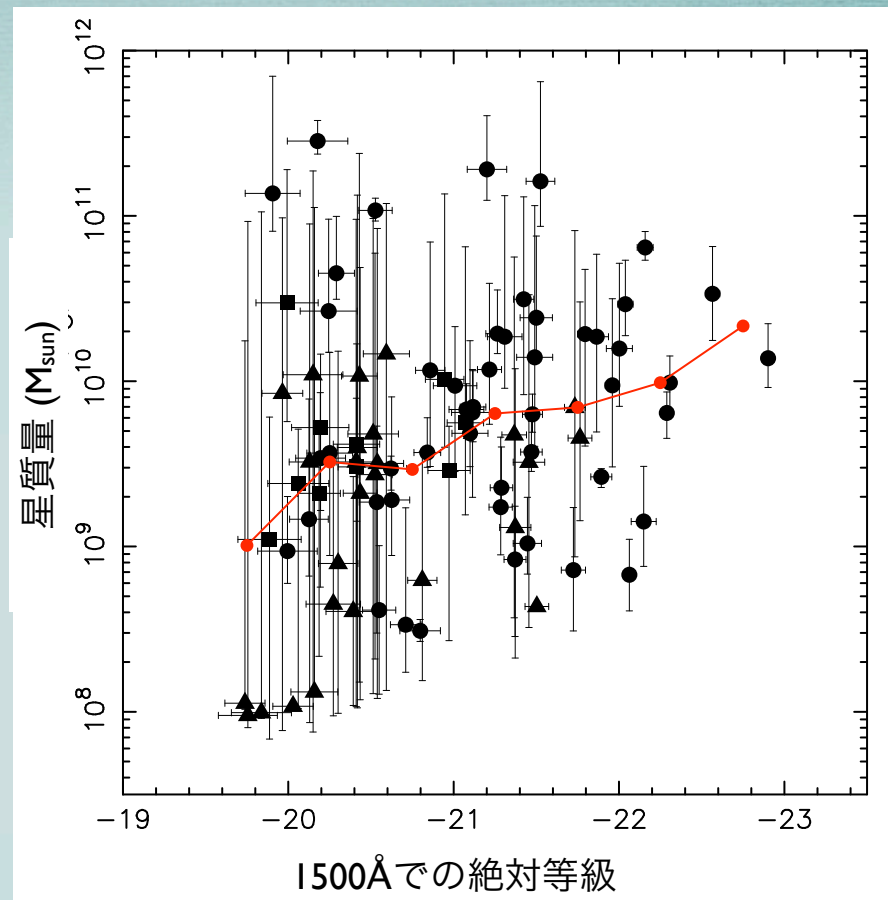




可視絶対等級vs星質量



UV絶対等級vs星質量



- ✓ 星質量は静止系可視の絶対等級と良い相関がある
- ✓ UV絶対等級とは良い相関はない(ように見える)
- ✓ 各等級ビンで星質量の平均をとると相関が見えてくる



# Stellar mass function

約100個の大規模なサンプルを用いて、LBG@z~5の星質量関数を導出。  
各星質量のビンにおける数密度は以下のようにして計算する。

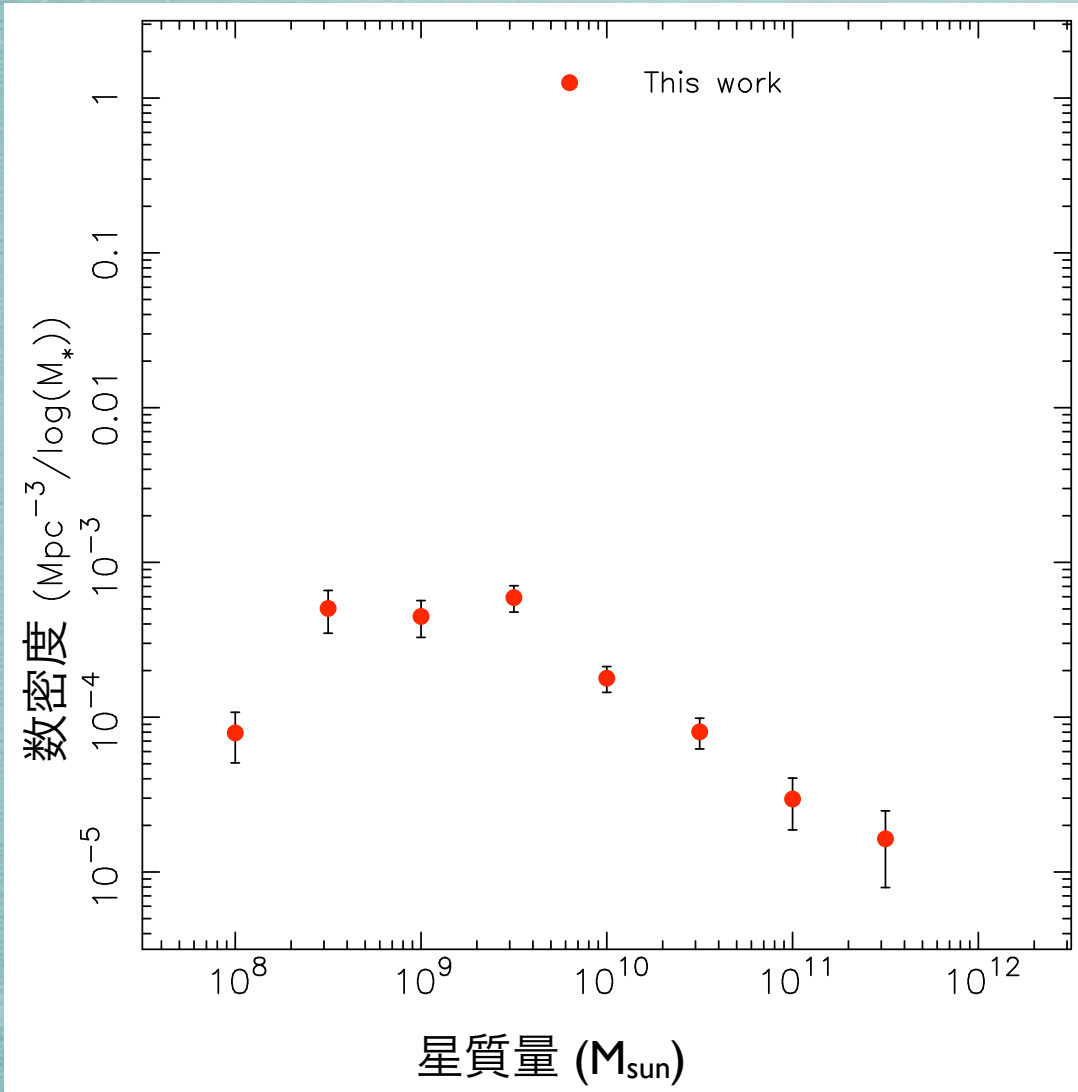
$$\phi(\log(M_*/M_\odot)) = \sum_{i,j} \frac{N_{i,j}(1 - f_i^{int})}{f_{eye} f_j^{det} V_i^{eff} \Delta \log(M_*/M_\odot)}$$

- ✓  $N_{i,j}$  : i番目の4.5 $\mu$ m等級ビンとj番目のz'等級ビンに入る個数
- ✓  $f_{eye}$  : 選択したサブサンプルの全体に対する割合 ( $f_{eye}=170/617$ )
- ✓  $f_j^{det}$  : 4.5 $\mu$ mバンドでのdetection rate (IRAC-band completeness)
- ✓  $V_i^{eff}$  : effective volume (z'-band completeness)
- ✓  $f_i^{int}$  : interloperの割合



# Stellar mass function

このように計算した星質量関数を図の赤点で示す



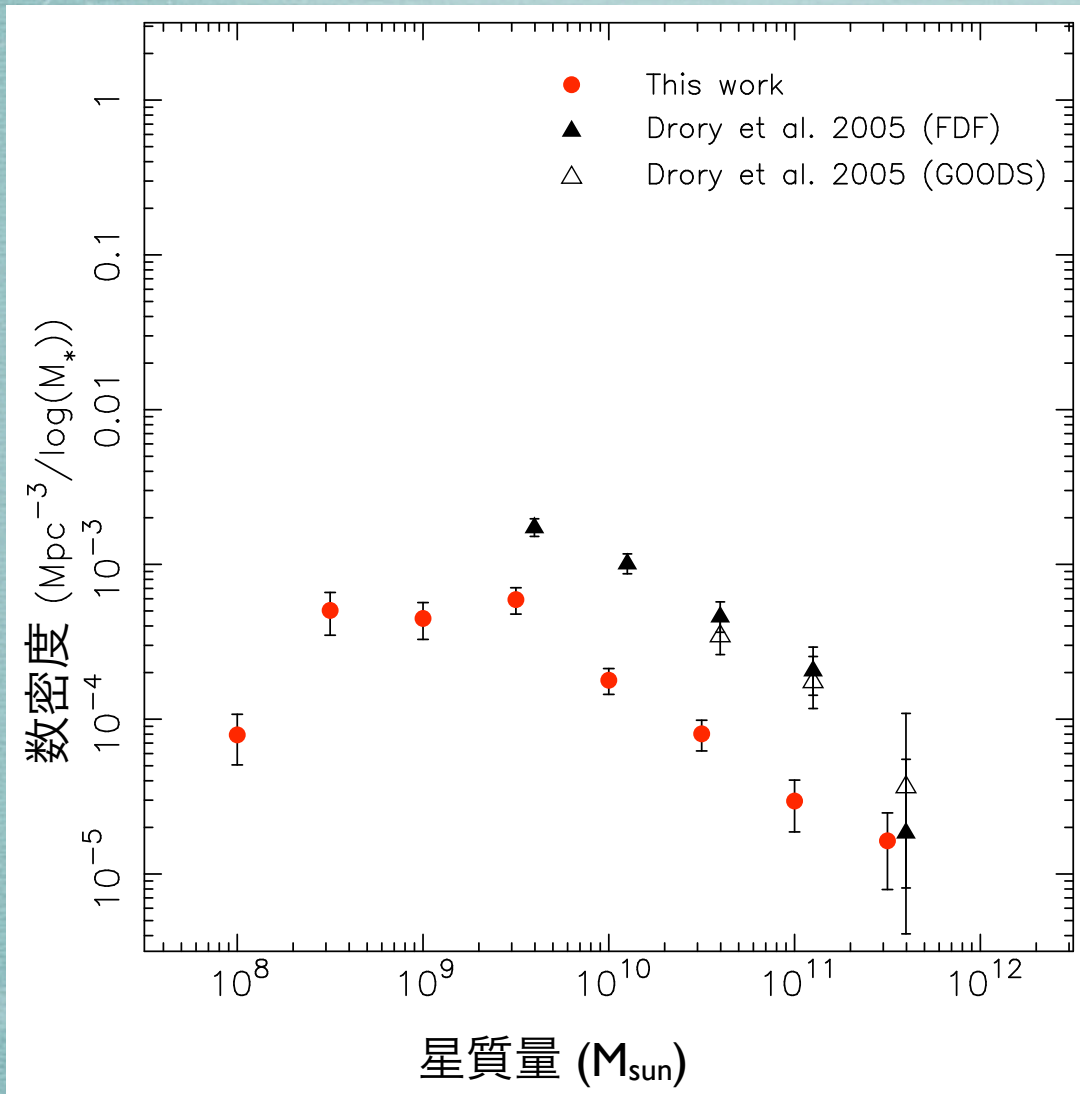
✓このLBG@z~5の星質量関数を他の観測等と比較する

✓まずDrory+2005と比較



# Stellar mass function

このように計算した星質量関数を図の赤点で示す



✓このLBG@z~5の星質量関数を他の観測等と比較する

✓まずDrory+2005と比較

- ▶一番重いビン以外で一致しない
- ▶Drory+はKsまでしか使用せず

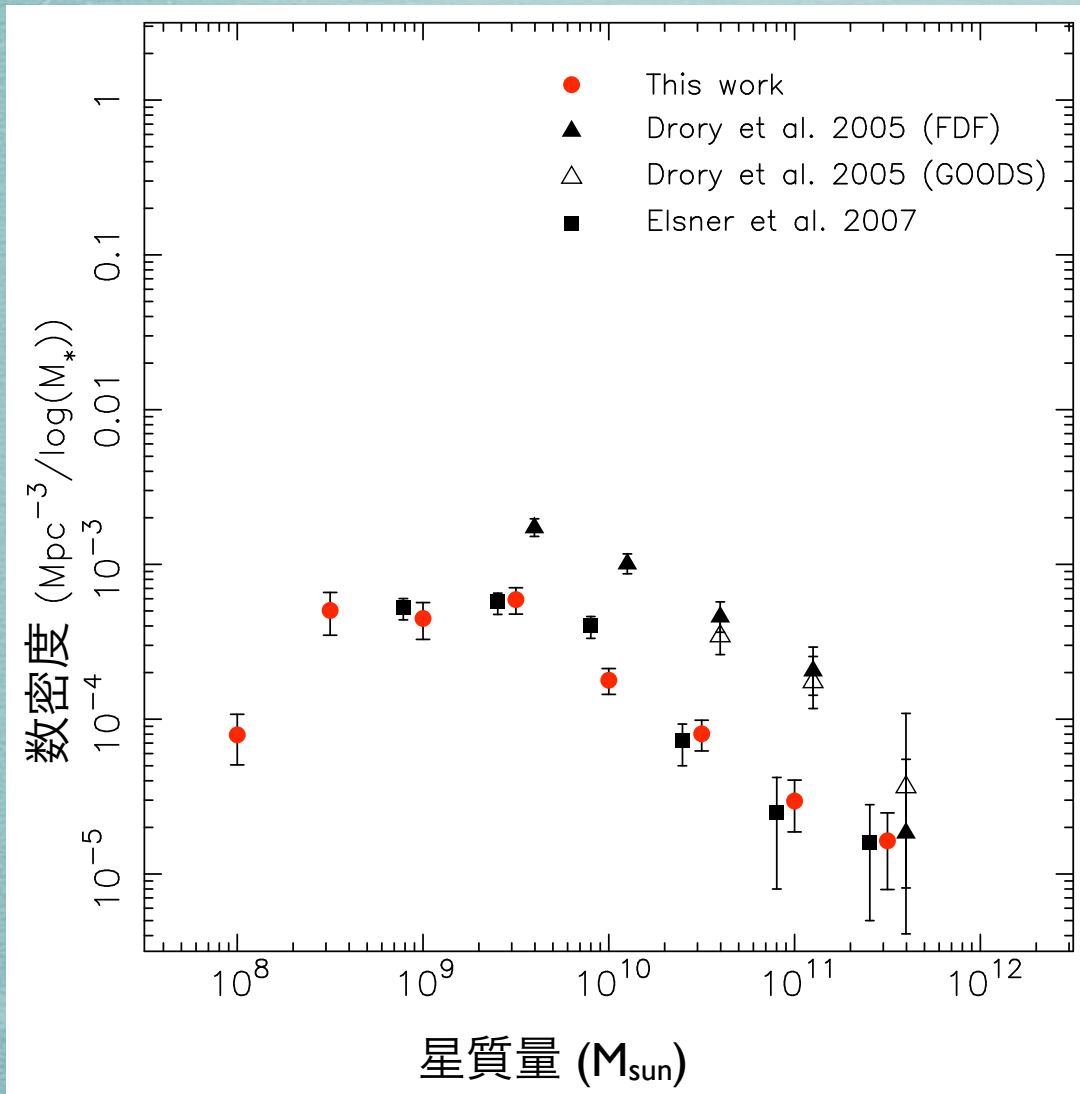
✓IRACまで使ったElsner+2008と比較

注) 他の観測のデータ点はz=4.5の結果



# Stellar mass function

このように計算した星質量関数を図の赤点で示す



✓このLBG@z~5の星質量関数を他の観測等と比較する

✓まずDrory+2005と比較

- ▶一番重いビン以外で一致しない
- ▶Drory+はKsまでしか使用せず

✓IRACまで使ったElsner+2008と比較

- ▶きわめてよく一致する
- ▶IRACまでである方が良い

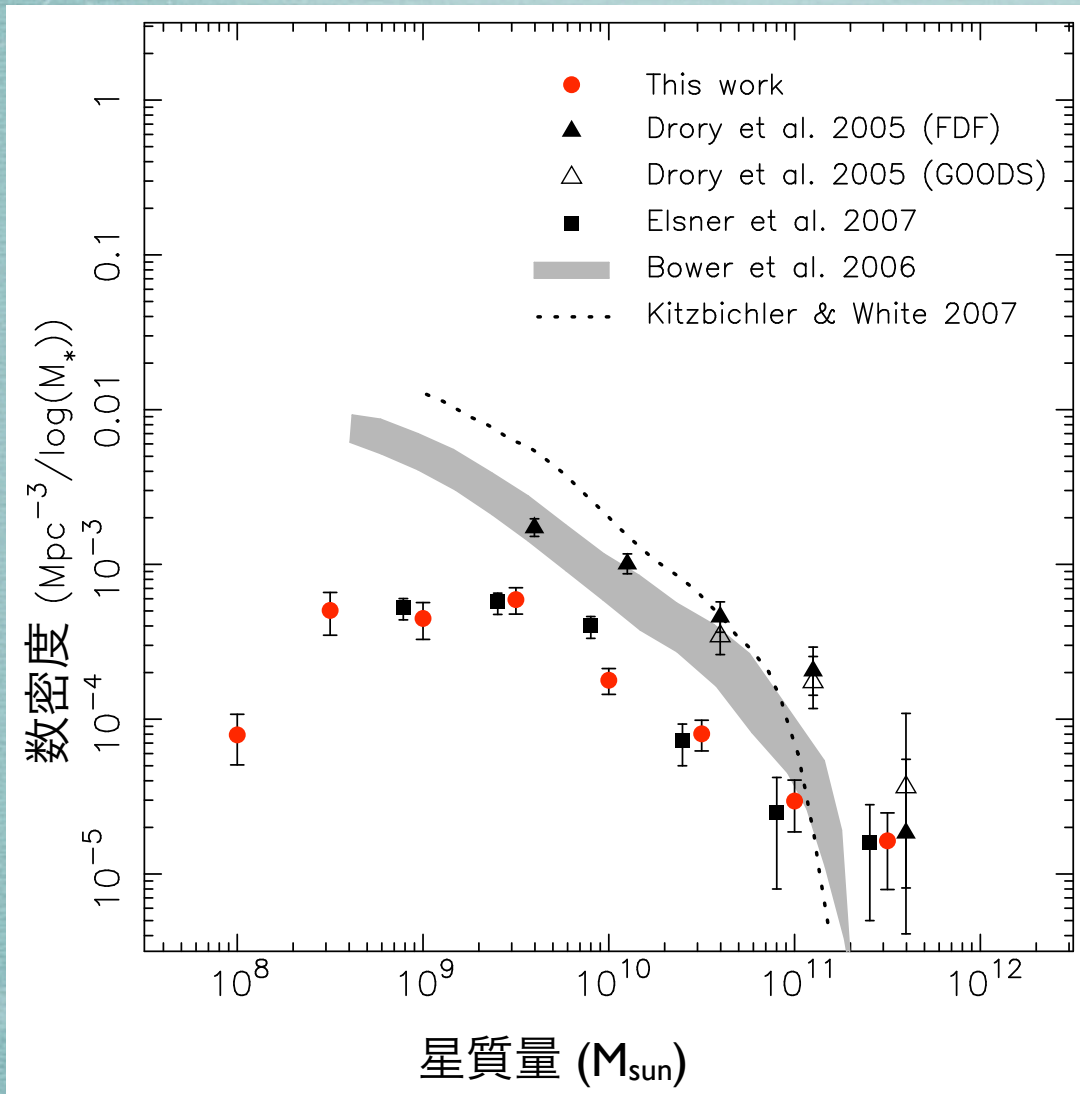
✓理論モデルと比較

注) 他の観測のデータ点はz=4.5の結果



# Stellar mass function

このように計算した星質量関数を図の赤点で示す



✓このLBG@z~5の星質量関数を他の観測等と比較する

✓まずDrory+2005と比較

- ▶一番重いビン以外で一致しない
- ▶Drory+はKsまでしか使用せず

✓IRACまで使ったElsner+2008と比較

- ▶きわめてよく一致する
- ▶IRACまでである方が良い

✓理論モデルと比較

- ▶重い側以外では一致しない

✓z'>26.5の天体の寄与

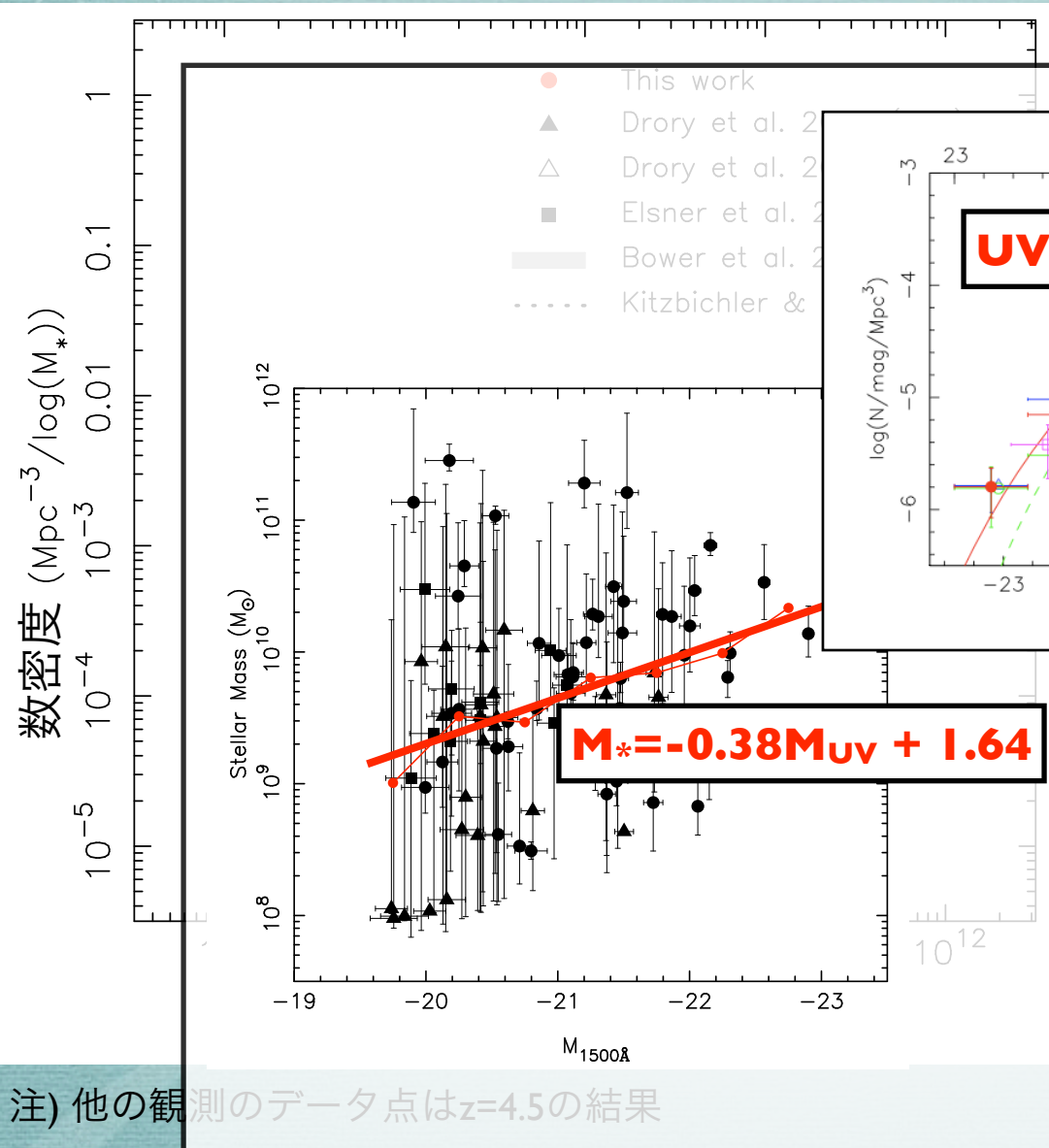
- ▶M<sub>UV</sub> vs 星質量の相関を使いUVLFからMFに換算してやる

注) 他の観測のデータ点はz=4.5の結果



# Stellar mass function

このように計算した星質量関数を図の赤点で示す



このLBG@z~5の星質量関数を他の

一致しない  
が使用せず  
2008と比較  
る  
良い

▶ 重い側以外では一致しない

√ z' > 26.5の天体の寄与

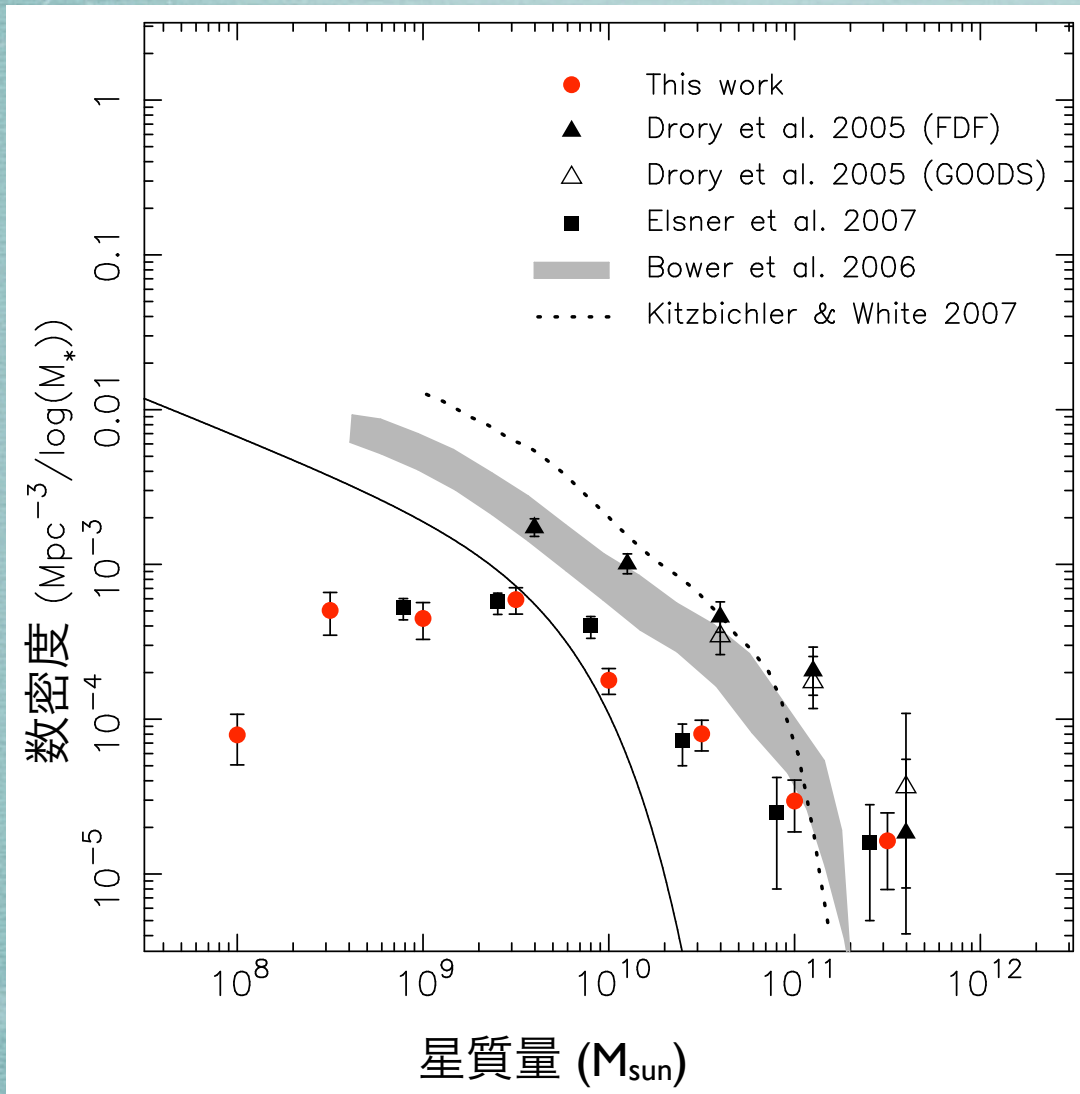
▶ M\_UV vs 星質量の相関を使い  
UVLFからMFに換算してやる

注) 他の観測のデータ点はz=4.5の結果



# Stellar mass function

このように計算した星質量関数を図の赤点で示す



✓このLBG@ $z \sim 5$ の星質量関数を他の観測等と比較する

✓まずDrory+2005と比較

- ▶一番重いビン以外で一致しない
- ▶Drory+はKsまでしか使用せず

✓IRACまで使ったElsner+2008と比較

- ▶きわめてよく一致する
- ▶IRACまでである方が良い

✓理論モデルと比較

- ▶重い側以外では一致しない

✓ $z' > 26.5$ の天体の寄与

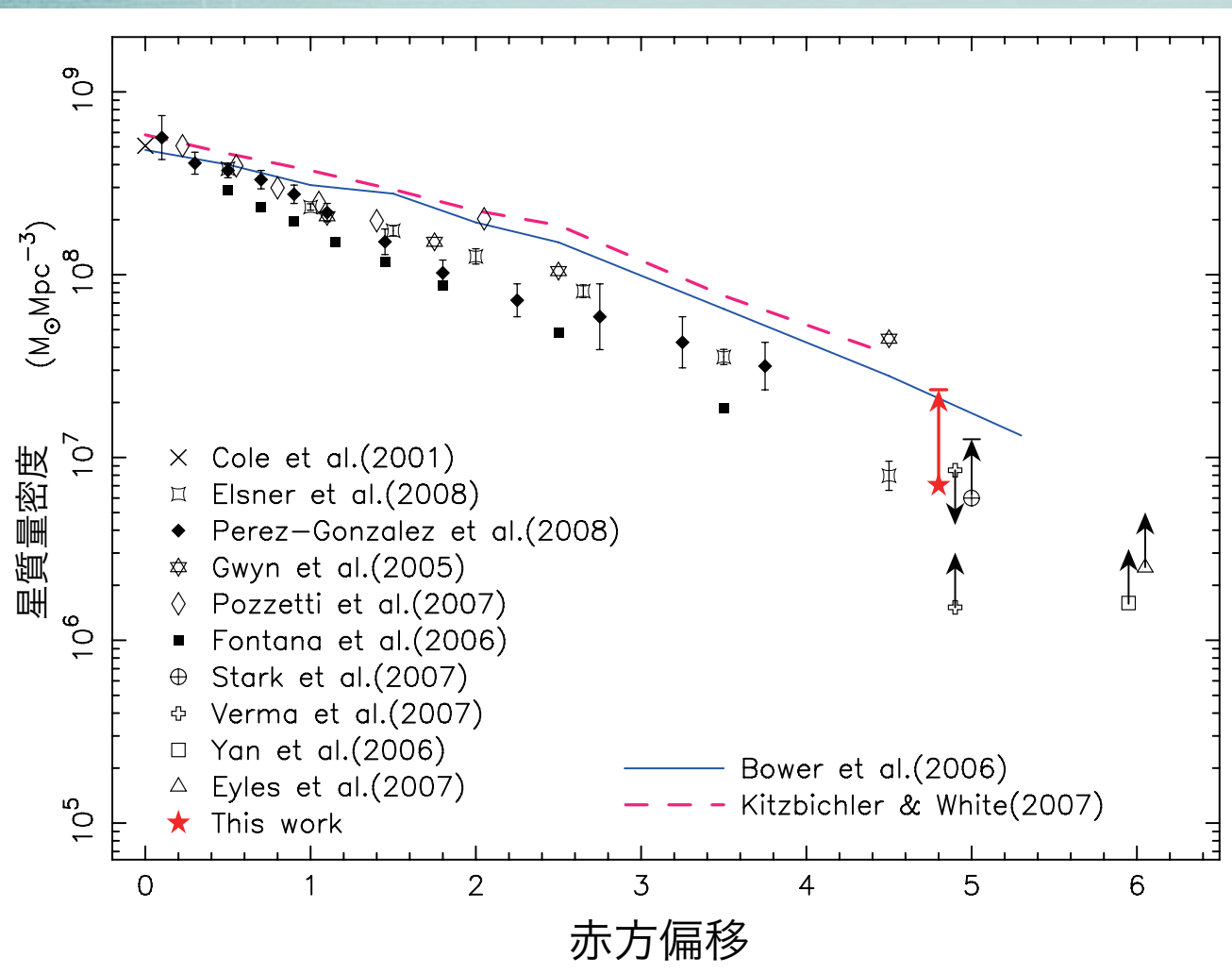
- ▶ $M_{\text{UV}}$  vs 星質量の相関を使いUVLFからMFに換算してやる
- ▶重い方ではずれ
- ▶ $< 10^9 M_{\text{sun}}$ で影響ありそう

注) 他の観測のデータ点は $z=4.5$ の結果



# Stellar mass density

- ✓ 得られた星質量関数を  $10^8 M_{\text{sun}}$  まで足し合わせる事で星質量密度を見積もった
- ✓ 星質量密度 =  $7.0 \times 10^6 M_{\text{sun}}/\text{Mpc}^3$
- ✓ 星形成史などによる不定性を考えると上限値  $\sim 2 \times 10^7 M_{\text{sun}}/\text{Mpc}^3$



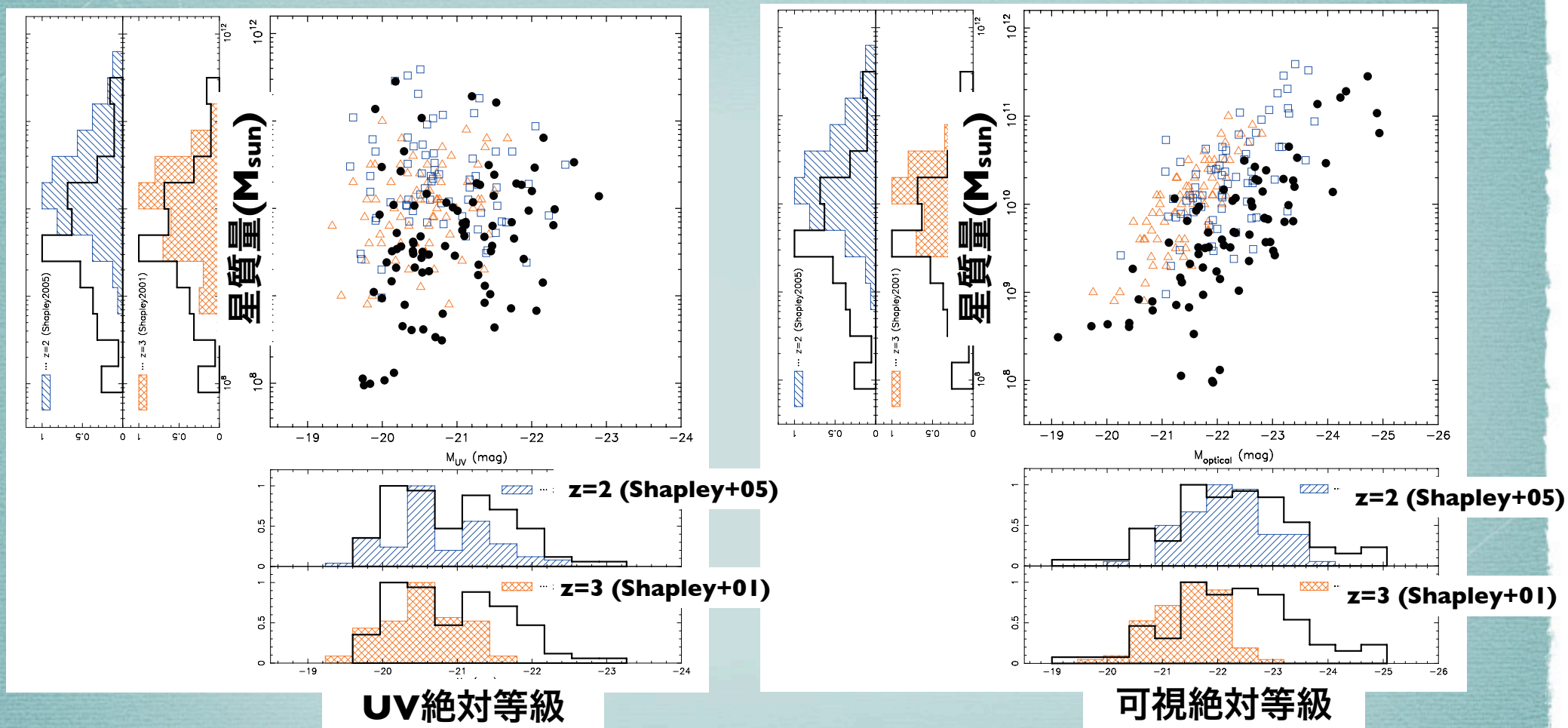
✓ 他の観測と比較して大まかなトレンド(時間と共に単調増加する)としては一致する

✓ 上限値の範囲内ではBower +05、Kitzbichler+07の理論モデルと大体一致する



# z=2-3のLBGとの比較

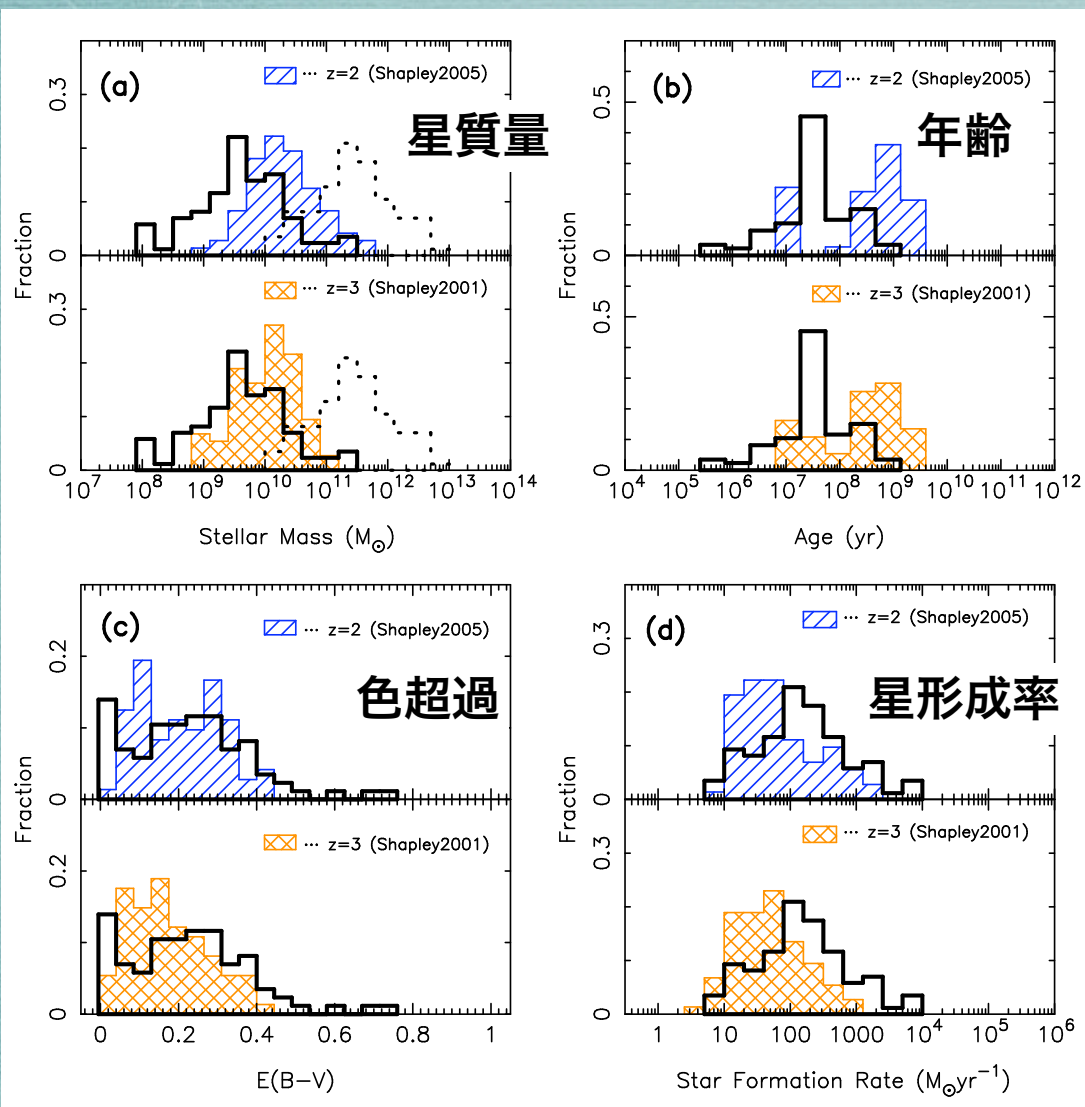
z=3 (Shapley+2001)とz=2 (Shapley+2005)のLBGの結果と比較



- ✓ 静止系UV絶対等級、可視絶対等級は暗い側は大体同じ
- ✓  $M_{\text{UV}}$  vs. 星質量: 分布の様子がz=2-3からz=5へかけて変化
- ✓  $M_{\text{可視}}$  vs. 星質量: 分布の様子がz=2-3からz=5へかけて変化



# z=2-3のLBGとの比較



各パネルで上がz=2、下がz=3との比較

サンプルの比較のため、UV光度の範囲をそろえている。SED fitの詳細は異なるが、Salpeter IMF、Constant SF、Calzetti dust-lawを使っている。

z~5の銀河はz=2-3の銀河に比べ比較的若く、激しい星形成活動をしている。また、星質量はそれほどできていない。

z~5の星形成率でz=2-3まで星形成を続けると、星質量の分布が観測されるものよりも重い側にずれる。



# GOODS-N領域でのLAEs@z=4.8探査 (Yuma et al. in prep.)

## ✓ 可視データ

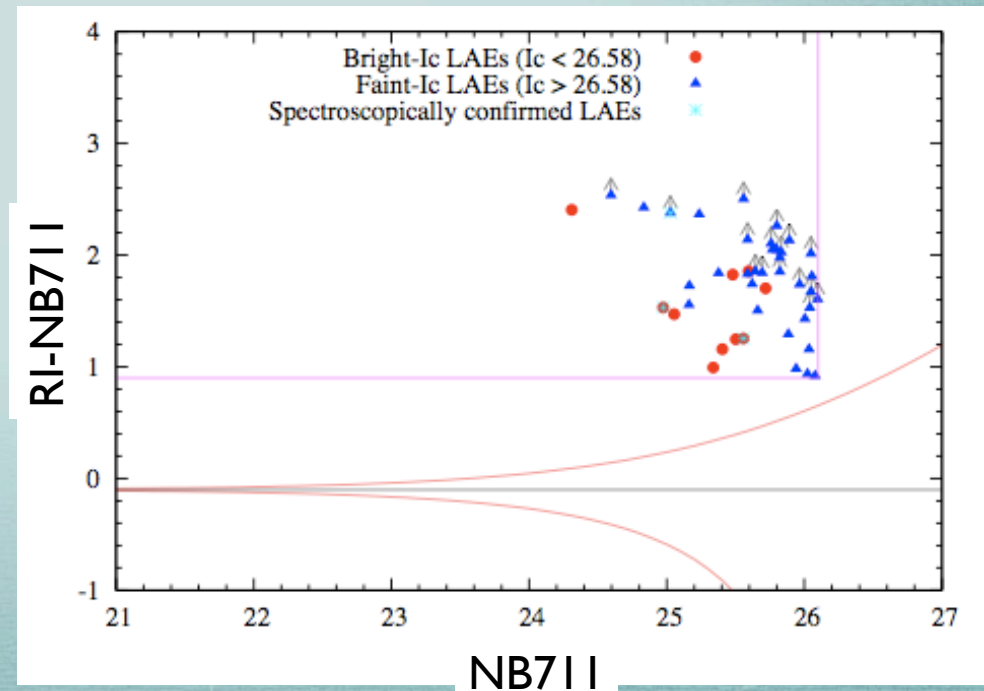
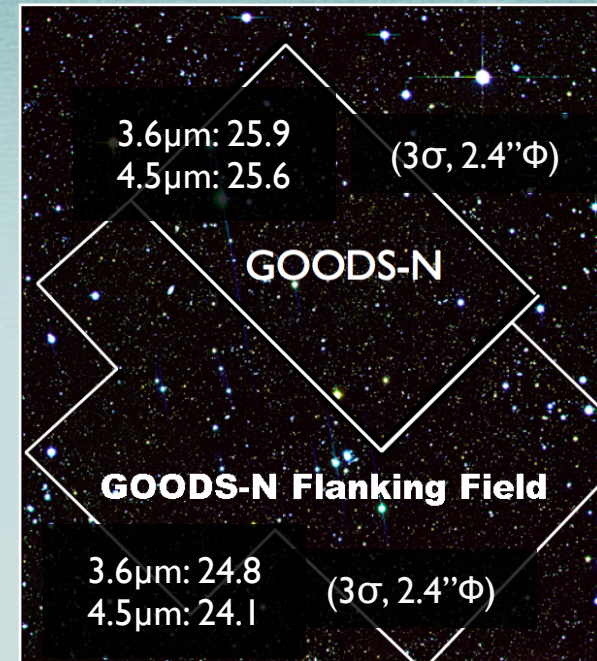
- Broadband: B, V, R, I<sub>c</sub>, z'
- Narrowband: NB711
- total area: ~750 arcmin<sup>2</sup>

## ✓ 中間赤外データ

- Spitzer/IRAC
- GOODS-N + GOODS-FF
- total area: ~400 arcmin<sup>2</sup>

## ✓ 44 LAEs at z=4.8

## ✓ 可視-MIR → SED fitting



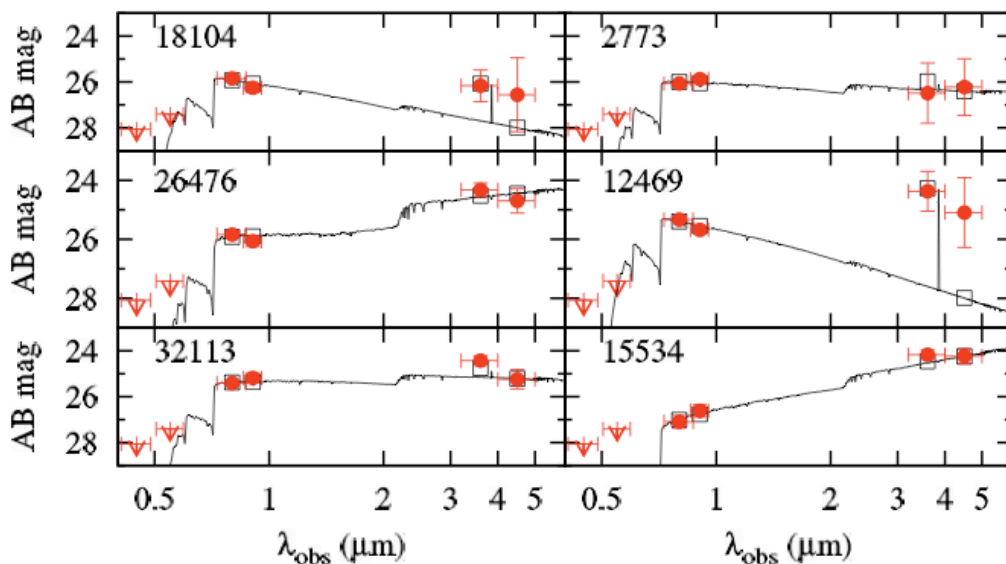


# $z=4.8$ LAEsのstellar population 解析 (Yuma et al. in prep.)

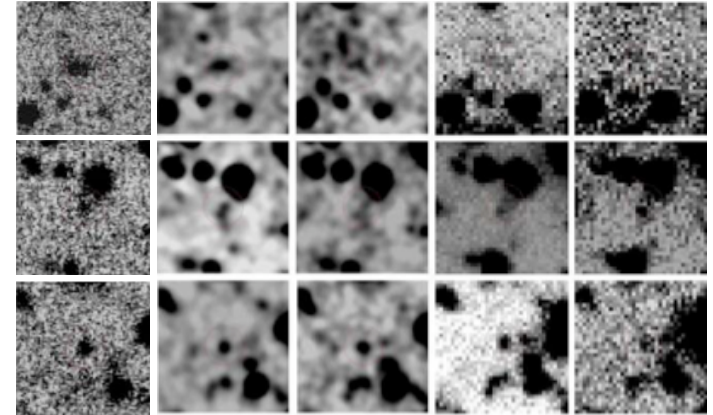
44個のLAEサンプルのうち、IRACで受かっている、周りから影響されていないもの6個についてSED fittingを行なった

モデルSEDの作り方はLBGと同様の方法

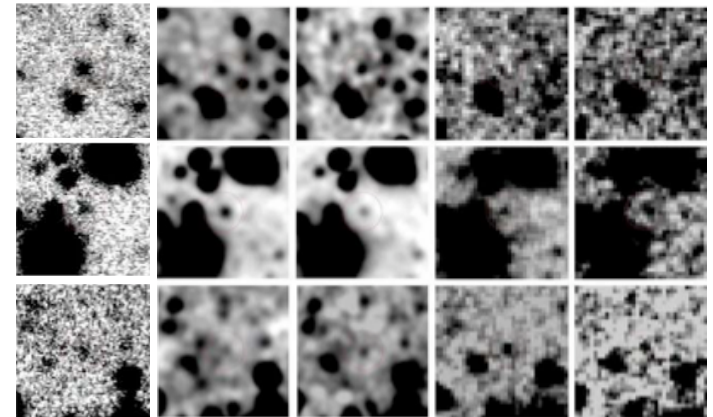
種族合成モデル：Bruzual&Charlot2003  
 IMF：Salpeter IMF ( $0.1M_{\text{sun}} < M_* < 100M_{\text{sun}}$ )  
 金属量： $0.2 Z_{\text{sun}}$   
 ダスト減光則：Calzetti et al. (2000)  
 IGM吸収：Madau (1995)  
 星形成史：Constant SF モデル  
 赤方偏移： $z=4.8$ に固定  
 $H\alpha$ の影響を考慮 ( $M_*$ に20%程度影響)



NB711  $l_c$   $z'$  3.6 $\mu\text{m}$  4.5 $\mu\text{m}$



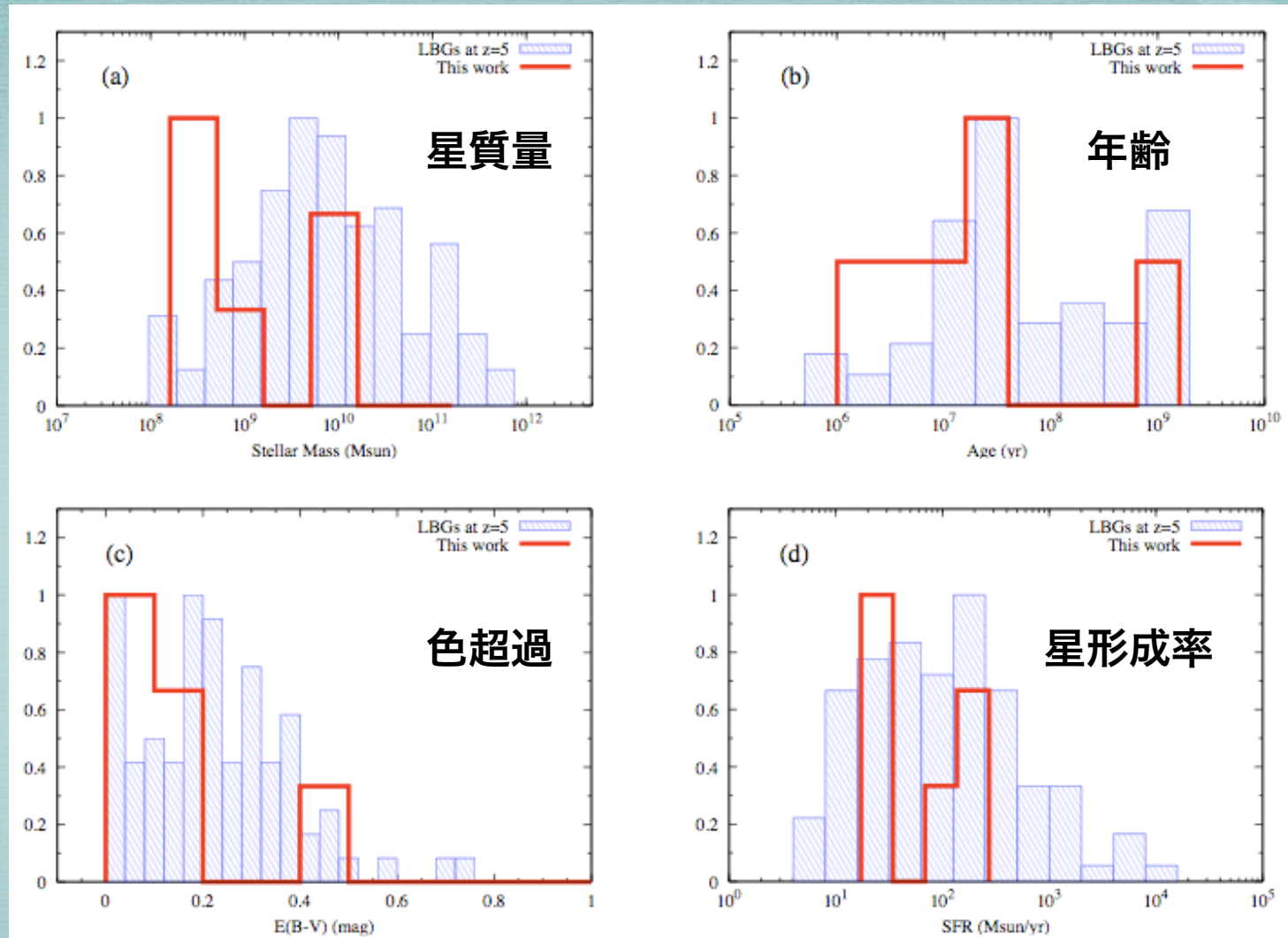
NB711  $l_c$   $z'$  3.6 $\mu\text{m}$  4.5 $\mu\text{m}$



↑ 典型的なサンプルの例  
 ← SED fittingの例



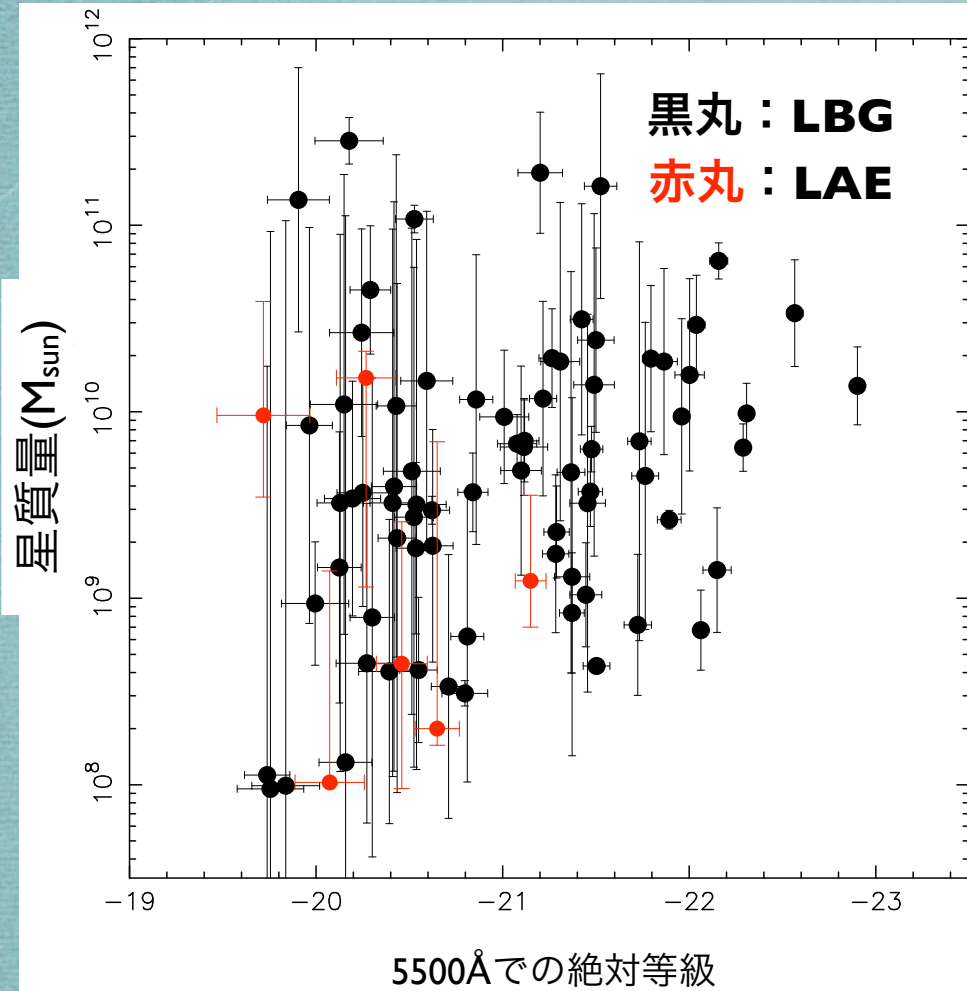
## z~5のLBGとの比較



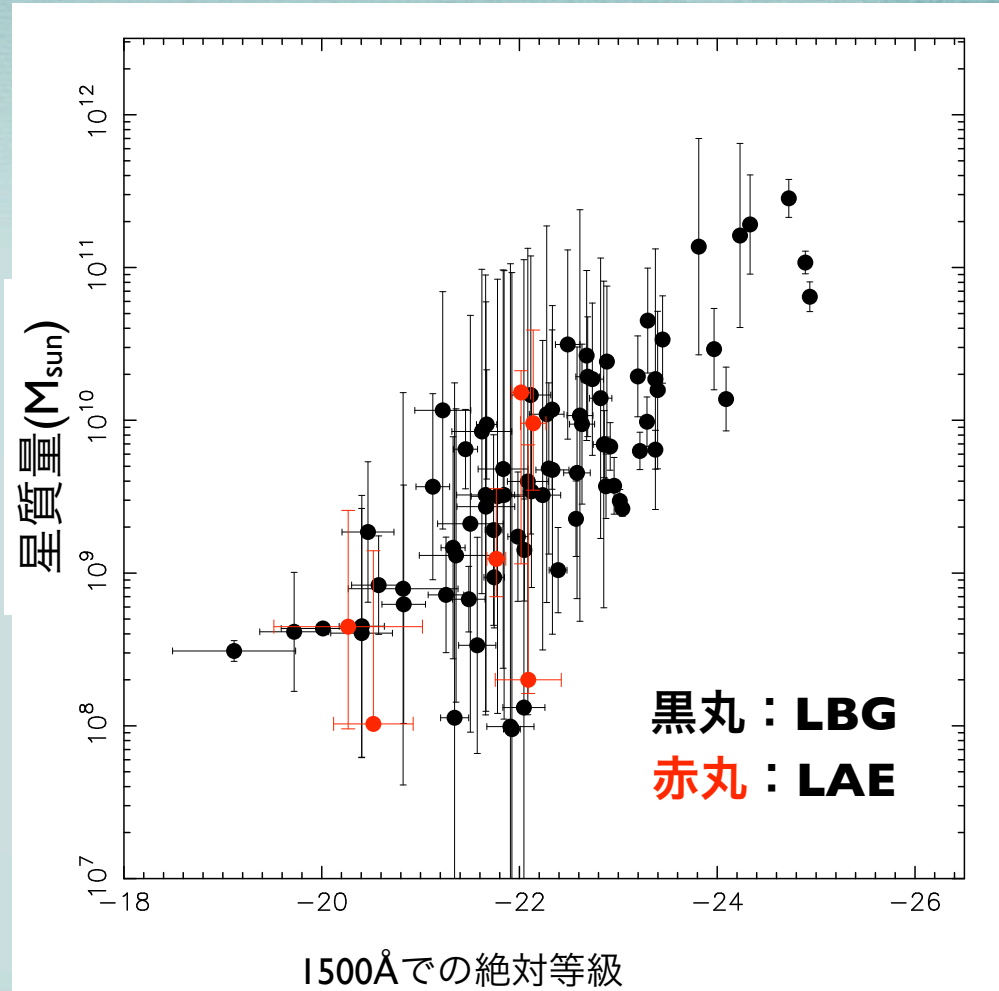
LAEはLBGに比べ年齢が若く、星質量の小さな銀河。また、ダストによる減光が小さい。星形成率は同じ程度か少し小さい。



可視絶対等級vs星質量



UV絶対等級vs星質量



- ✓ 静止系UV、可視での絶対等級ともにLAEは暗い側を占める
- ✓ 星質量との相関の様子はLBGと大まかには一致



# まとめ

- ▶ 約100個の大規模なLBGs@ $z\sim 5$ サンプルについて、
- ▶ Subaru(V, Ic, z') + Spitzer(3.6 $\mu$ m, 4.5 $\mu$ m)を用いてSED fitting
- ▶ 星質量(median)= $4\times 10^9 M_{\text{sun}}$
- ▶ 星質量は静止系可視絶対等級と強い相関を持っている
- ▶ LBGs@ $z\sim 5$ の星質量関数を導出
- ▶ IRACデータなしの他の観測結果とはmassive end以外で合わない。また、理論モデルともmassive end以外合わない
- ▶  $z\sim 5$ での星質量密度は $\sim 7\times 10^6 M_{\text{sun}} \text{Mpc}^{-3}$ 。大まかなトレンドとしては他の観測結果と一致
- ▶  $z\sim 5$ の銀河は $z=2-3$ の銀河に比べ比較的若く、激しい星形成活動をしている。また、星質量はそれほどできていない。
- ▶ 同じ赤方偏移のLAEに比べ年齢が大きく、星質量が大きい。また、ダストによる減光も大きく。星形成率は同じ程度か少し大きい。