

# WISHで探る星質量集積史

鍛治澤 賢(東北大学)

# 銀河の星質量集積史

## ■ 個々の銀河の星質量

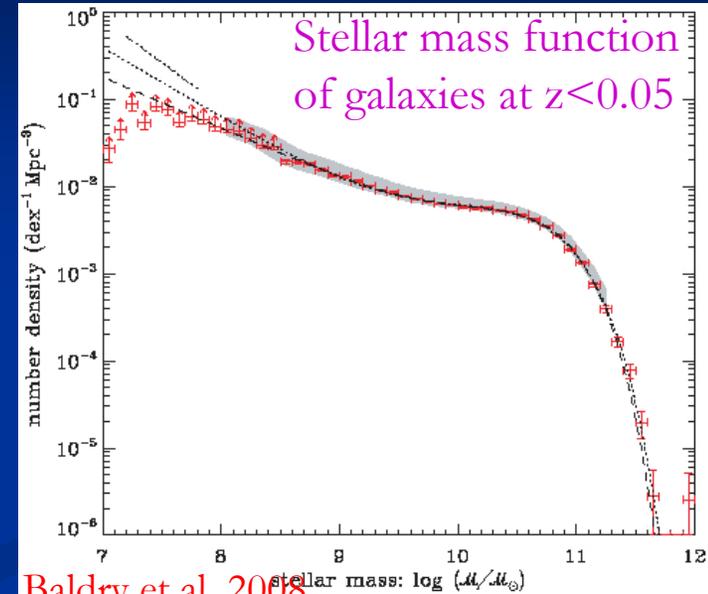
- 寿命の長い低質量星の寄与が支配的
- それまでに形成してきた星の積算量

## ■ 銀河の星質量集積史

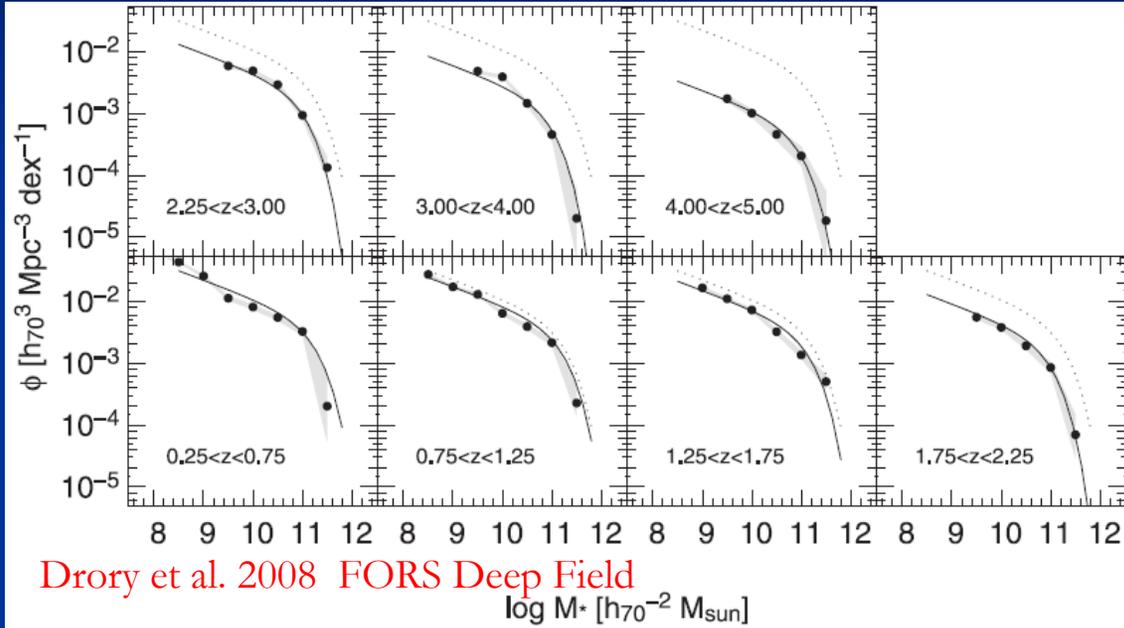
どれくらいの量の星をもつ銀河が  
いつ、どのように、どれくらいの数  
できたのか？

### ✓ 銀河の星質量関数

- 各星質量を持つ銀河がどれくらいの数存在するか
- 各時代で(赤方偏移を遡って)調べる



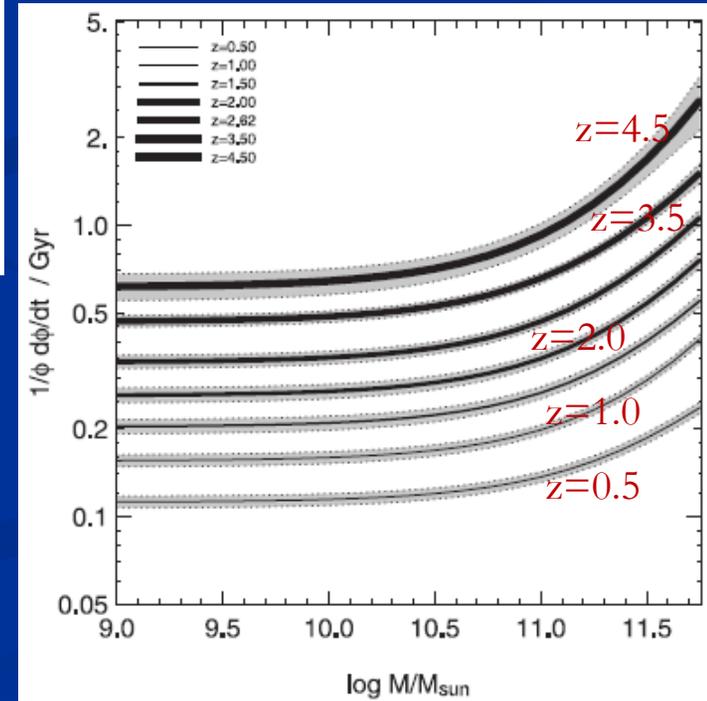
# 星質量関数の進化



各赤方偏移範囲での星質量関数



各質量の銀河の数密度増加率



# 可視近赤外撮像観測による 銀河の星質量集積史

## ■ 銀河の星質量関数の進化

- 各時代で各星質量を持つ銀河がどのくらいの数存在するか

## ■ 各質量での銀河の星形成率分布

✓ 各銀河の星質量はどのように成長したか

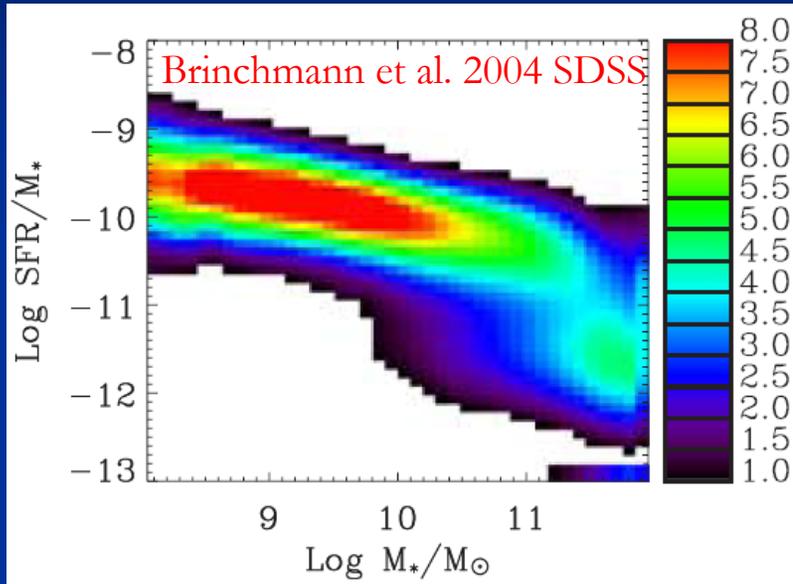
- 個々の銀河において星形成活動によって新たに星が増えた
- 階層的構造形成において合体(の繰返し)を通して星質量が増えた

## ■ 各質量での銀河のクラスタリング

✓ ダークマターハローの質量集積史との関係

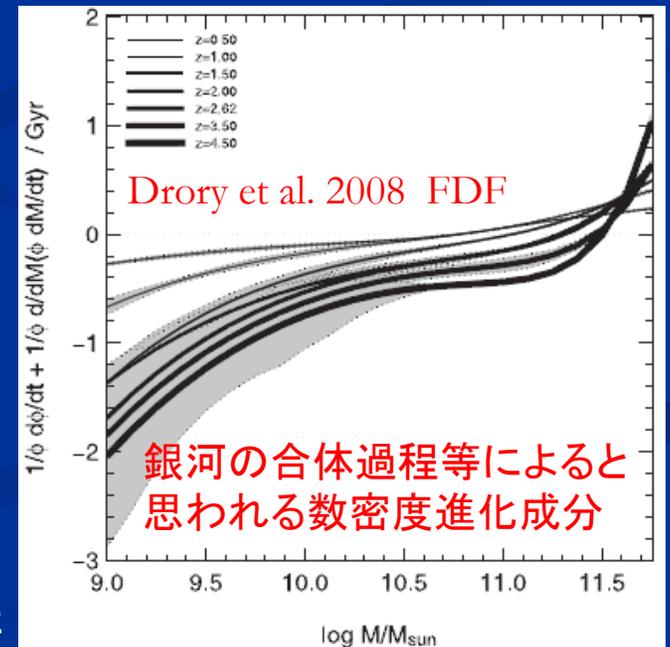
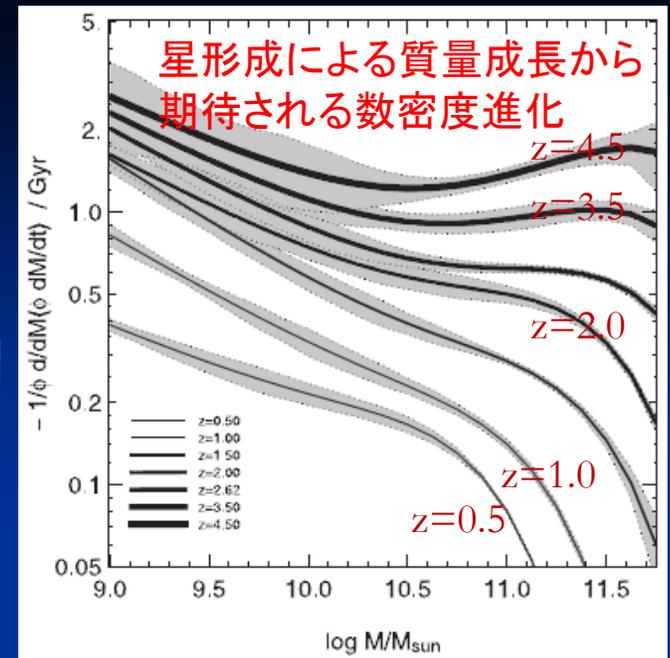
- 各時代におけるダークマターハロー質量と星質量の関係
- 各質量及び集積史のハローにおいて、どのように星質量が成長したか

# 星質量の成長： 星形成 & 合体



星形成率から期待される  
単位時間あたりの星質量成長率を計算

星質量関数の進化(時間微分)から  
星形成起源の数密度進化分を引いた



# 可視近赤外撮像観測による 銀河の星質量集積史

## ■ 銀河の星質量関数の進化

- 各時代で各星質量を持つ銀河がどのくらいの数存在するか

## ■ 各質量での銀河の星形成率分布

✓ 各銀河の星質量はどのように成長したか

- 個々の銀河において星形成活動によって新たに星が増えた
- 階層的構造形成において合体(の繰返し)を通して星質量が増えた

## ■ 各質量での銀河のクラスタリング

✓ ダークマターハローの質量集積史との関係

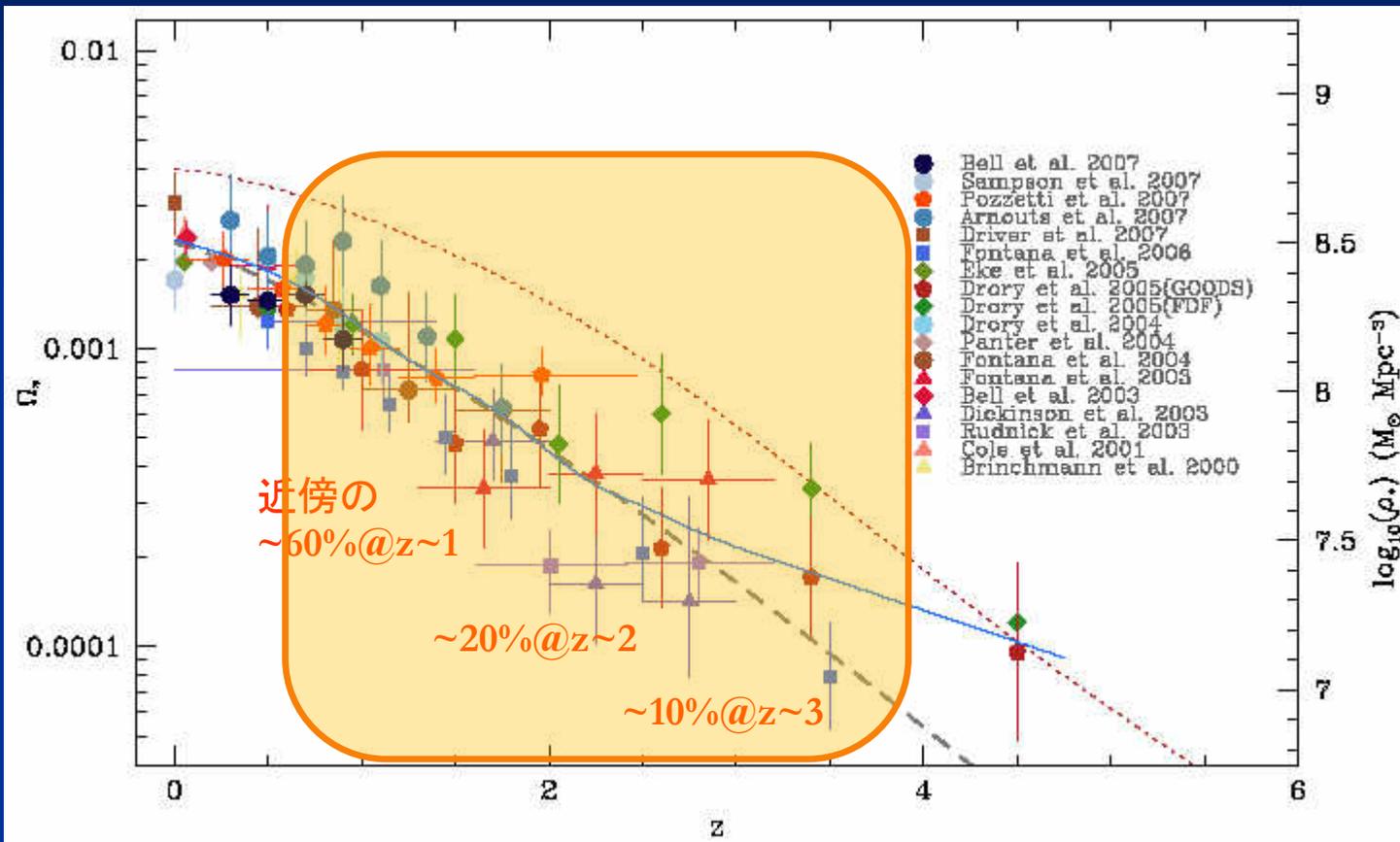
- 各時代におけるダークマターハロー質量と星質量の関係
- 各質量及び集積史のハローにおいて、どのように星質量が成長したか

# どこまで調べたいか

- どの時代まで遡る
- どの程度の深さ(星質量限界)
- どの程度の広さ

# 恒星質量密度進化

恒星質量密度



赤方偏移

Wilkins et al. 2008

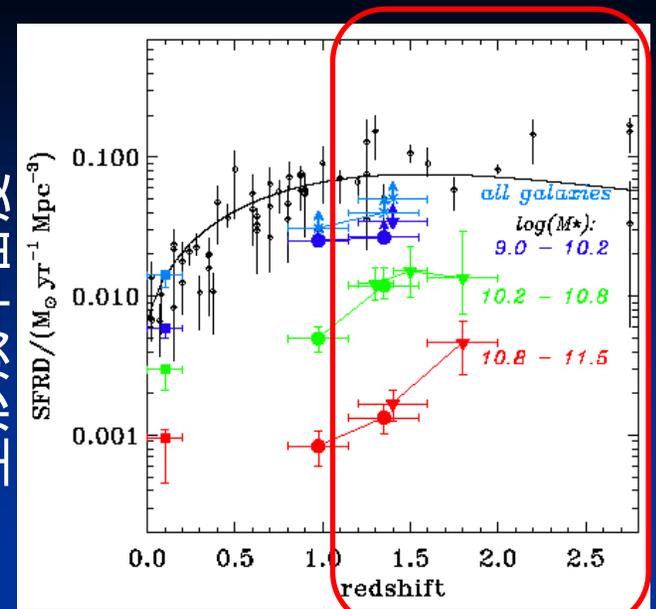
$z > 1$  で強い進化

$z \sim 1-4$  の時期にの星ができた

# z=1~4: 重要な時代

- 星形成/AGN の活動性がピーク
- 大質量銀河においても活発な星形成
- 宇宙の平均星質量密度の強い進化
- 銀河の形態分布の強い進化

星形成率密度

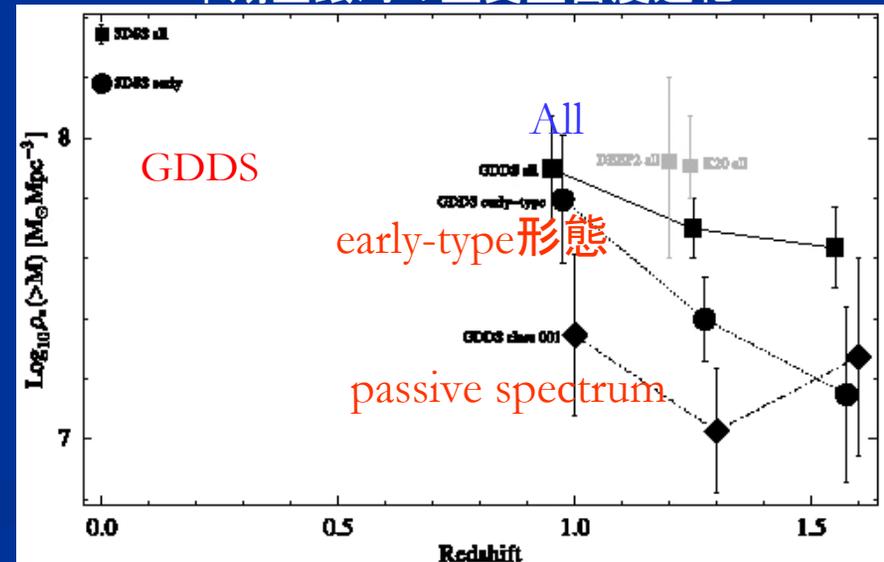


Juneau et al. 2005

## 早期型銀河の星質量密度進化



銀河の星形成や質量アセンブリの歴史において、非常に重要な時代



Abraham et al. 2007

# 近赤外データの必要性

## ■ $z \sim 1-4$ の銀河の星質量

✓ 静止系  $\sim 1 \mu\text{m}$

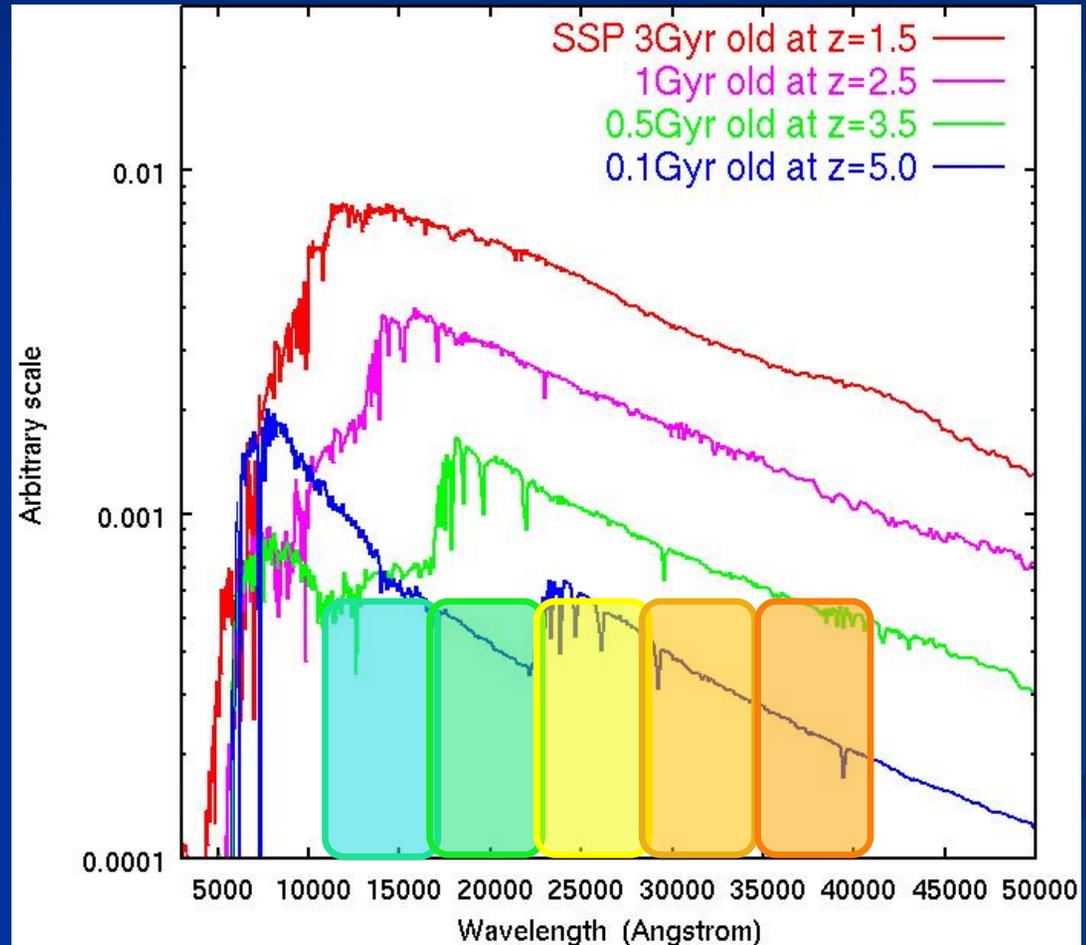
低質量星からの光が支配的で  
銀河の総星質量をよく反映

✓ Balmer/ $4000 \text{ \AA}$  break

星の平均年齢  
星のM/L比 をよく反映



銀河の星質量を  
高精度で推定



# どこまで調べたいか

## ■ どの時代まで遡る

- 宇宙の大部分の星が作られたと考えられている  $z \sim 1-4$  の時代に銀河の星質量集積がどう進行したか



近赤外  
データ

## ■ どの程度の深さ(星質量限界)

- 星質量集積史の質量依存性をみるために広い質量範囲
- 大質量銀河についても、階層的構造形成の中でどのように形成されたかを調べるためには低質量側の情報が必要

## ■ どの程度の広さ

# 星質量関数の進化 with Subaru/MOIRCS

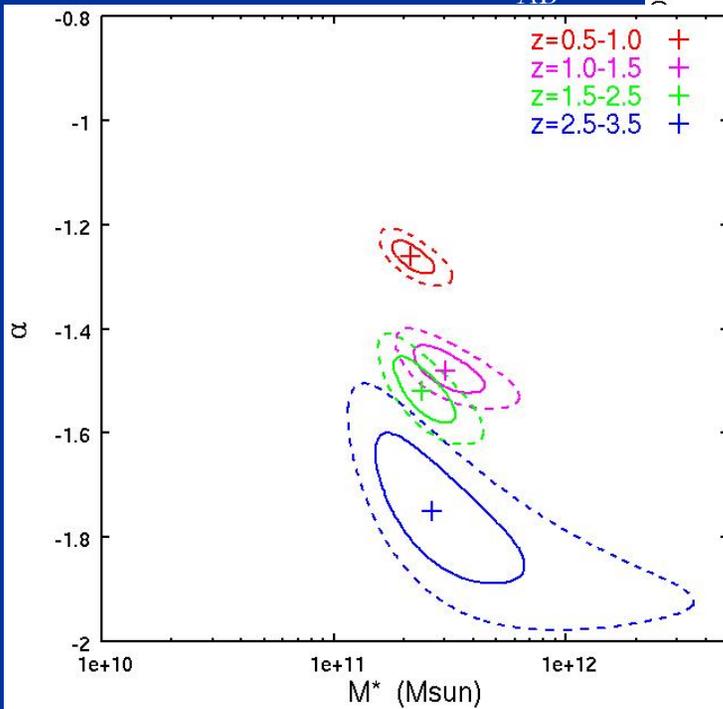
## ✓ MOIRCS Deep Survey

Wide

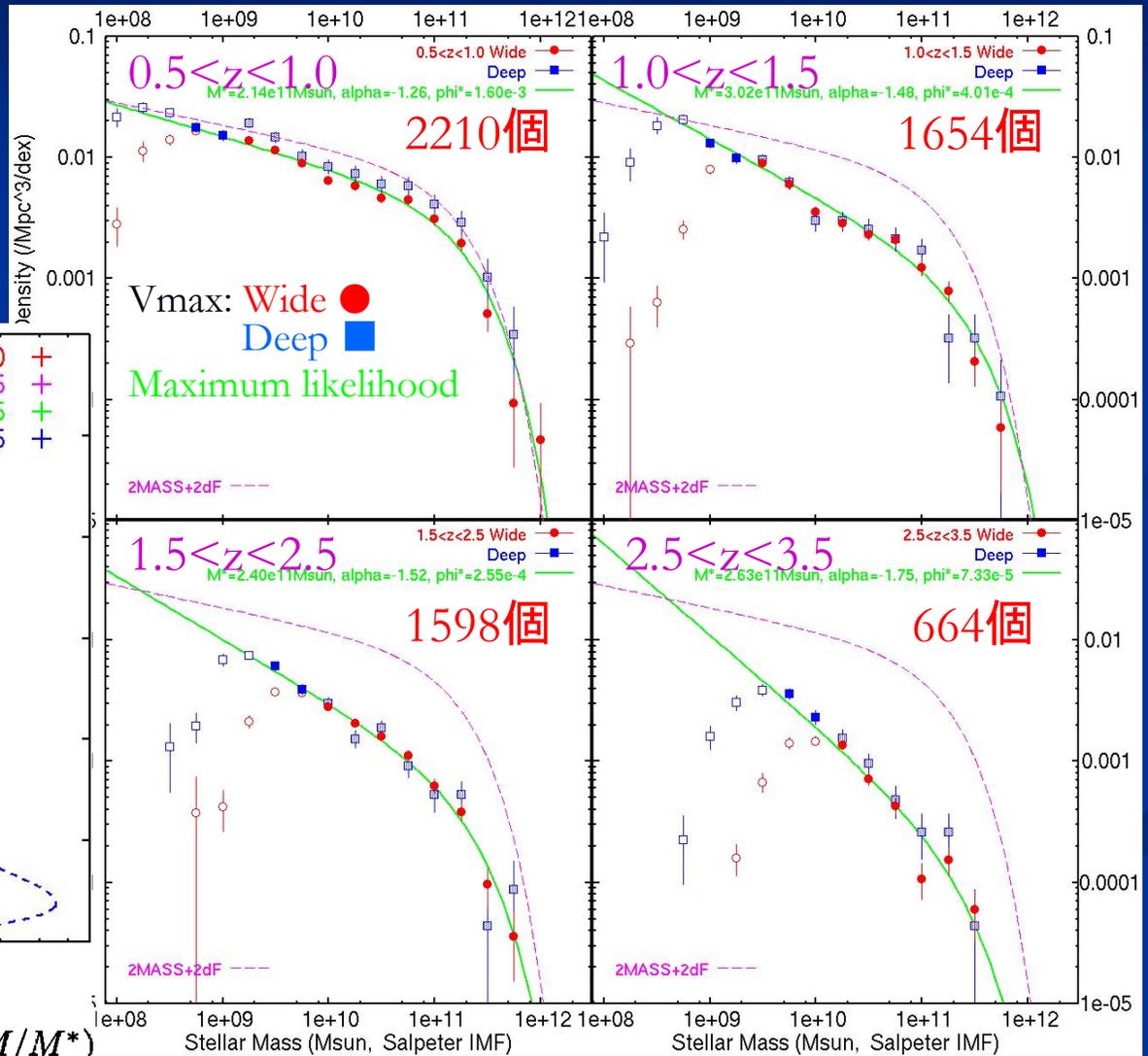
103arcmin<sup>2</sup> ~10時間  $K_{AB} < 25$

Deep

28arcmin<sup>2</sup> ~30時間  $K_{AB} < 26$

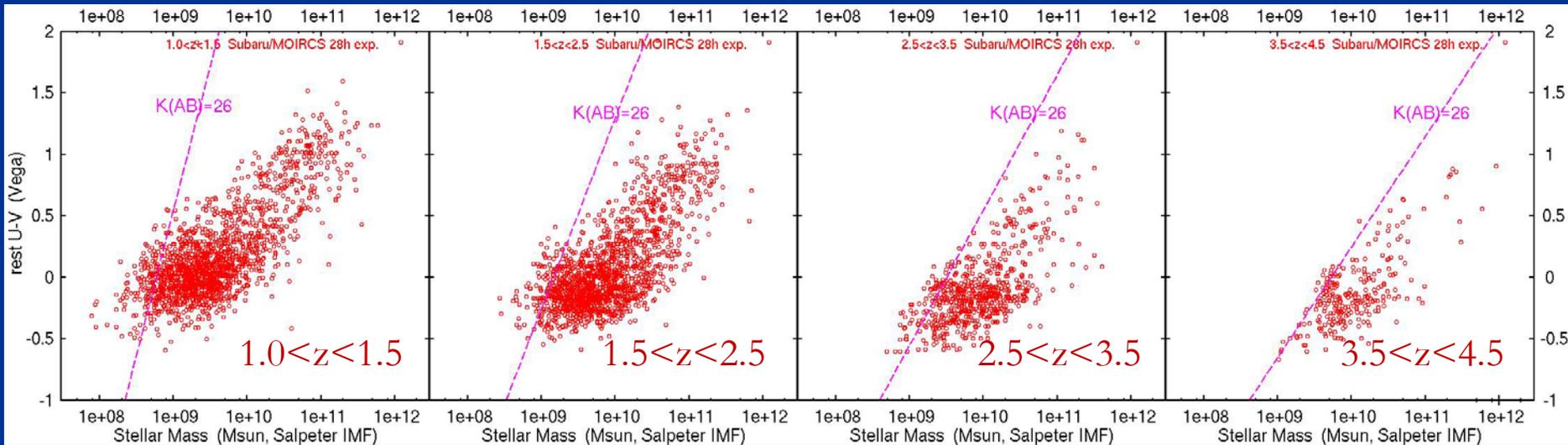


$$\phi(M) = \phi^* \ln 10 (M/M^*)^{-(1+\alpha)} \exp(-M/M^*)$$



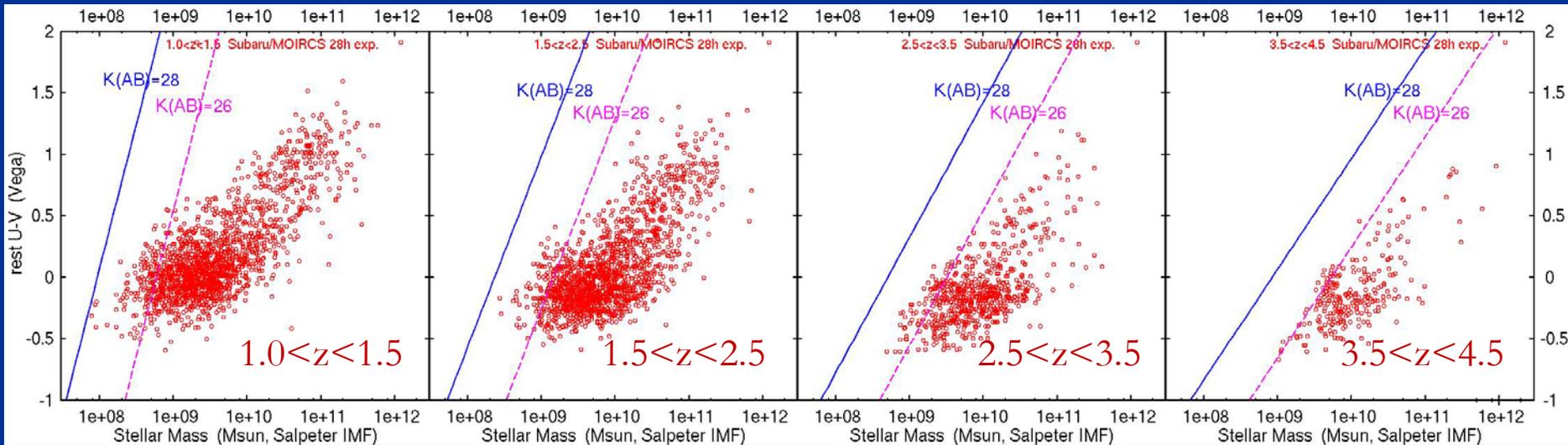
# 近赤外での深さと銀河の星質量

すばる/MOIRCS ~30時間積分 →  $K(AB) \sim 26\text{mag}$

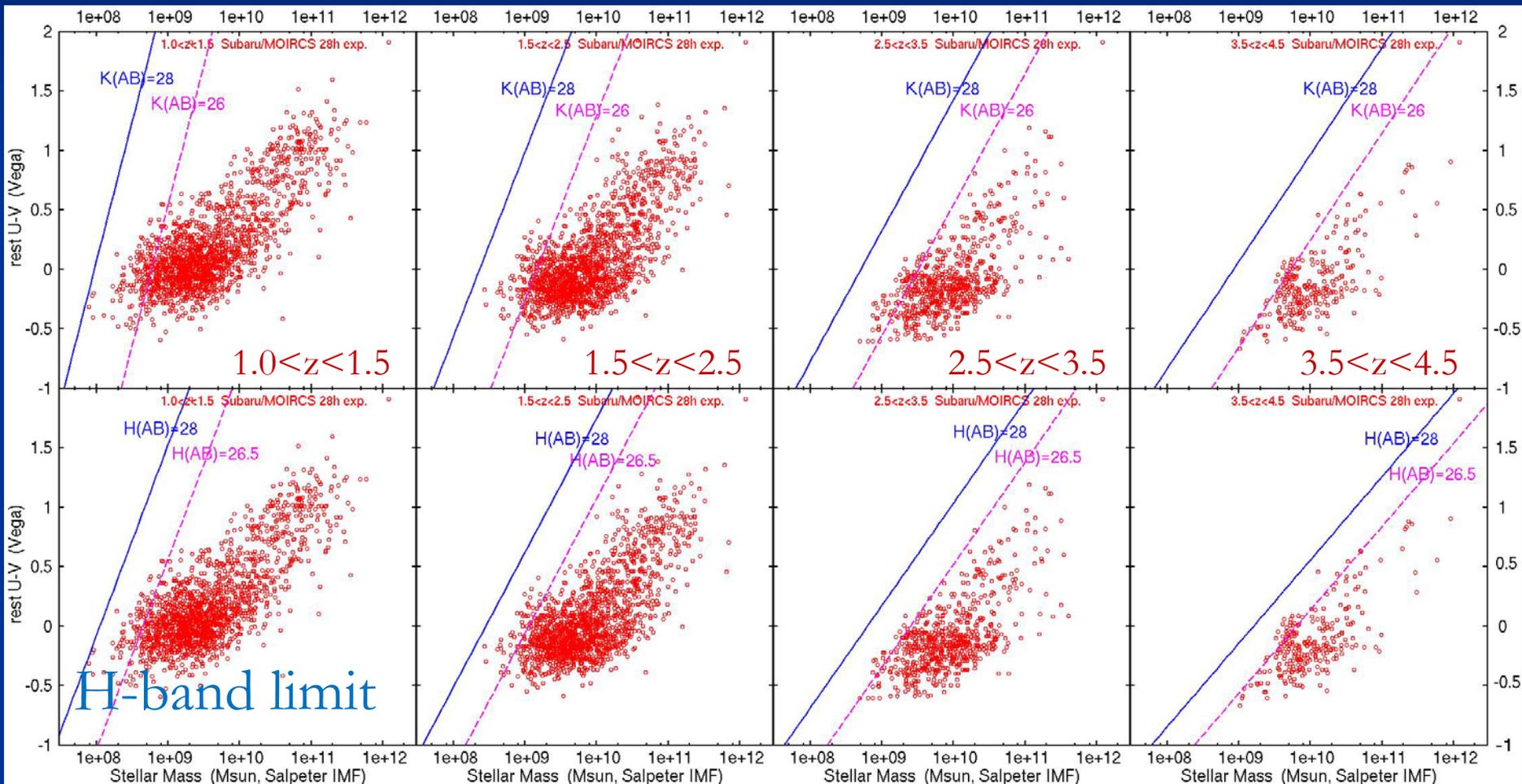


# 近赤外での深さと銀河の星質量

すばる/MOIRCS ~30時間積分 →  $K(AB) \sim 26\text{mag}$

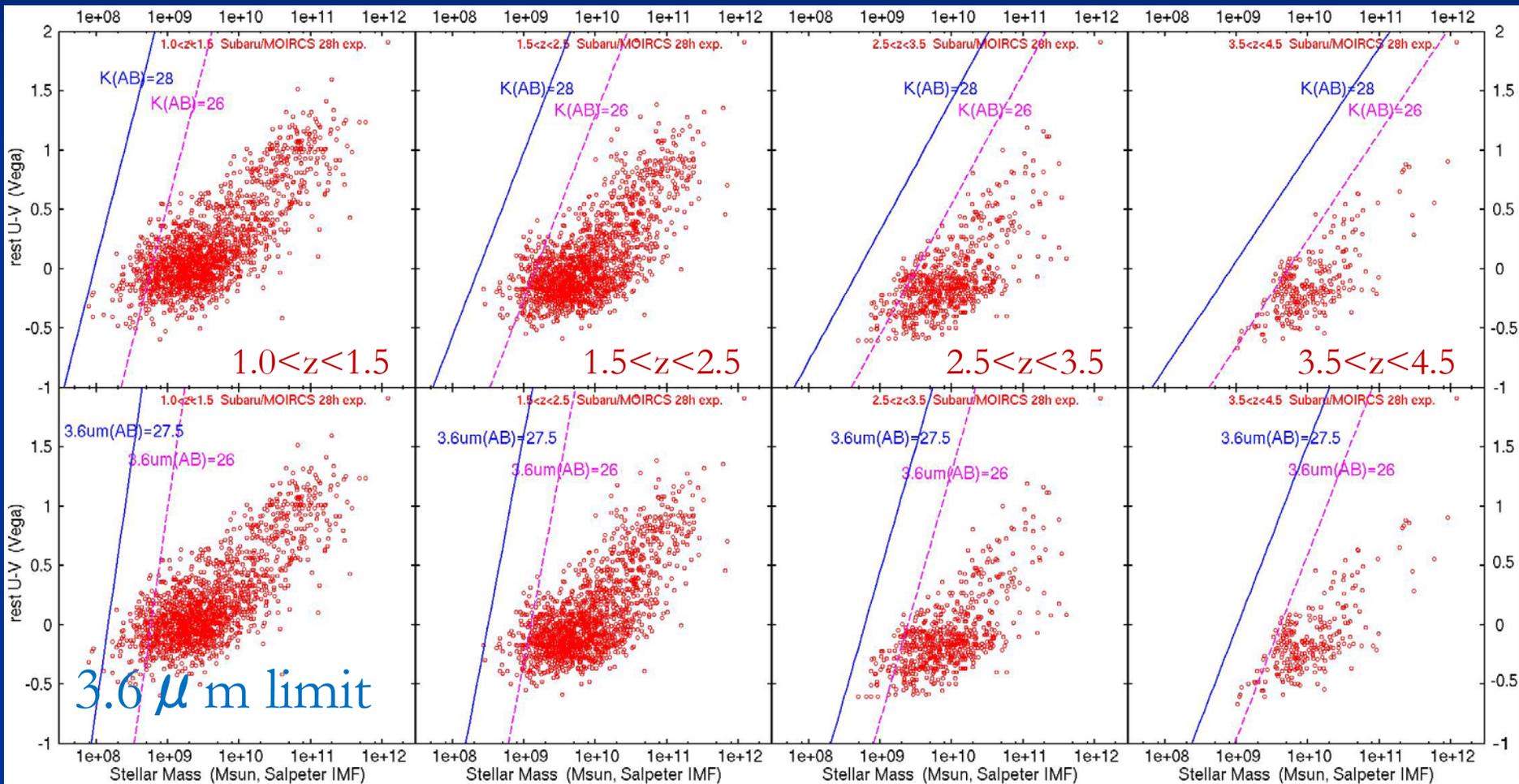


# 近赤外での深さと銀河の星質量



現状のHUDF NICMOS → H(AB) ~ 26.5mag

# 近赤外での深さと銀河の星質量



~3.8  $\mu\text{m}$  band は  $z > 3$  の mass-selected sample 構築に重要

~27.5 AB  $\rightarrow$   $\sim 10^9 M_{\odot}$  @  $z \sim 3-4$

# どこまで調べたいか

## ■ どの時代まで遡る

- 宇宙の大部分の星が作られたと考えられている  $z \sim 1-4$  の時代に銀河の星質量集積がどう進行したか



近赤外  
データ

## ■ どの程度の深さ(星質量限界)

- 星質量集積史の質量依存性をみるために広い質量範囲
- 大質量銀河についても、階層的構造形成の中でどのように形成されたかを調べるためには低質量側の情報が必要



27~28

ABmag

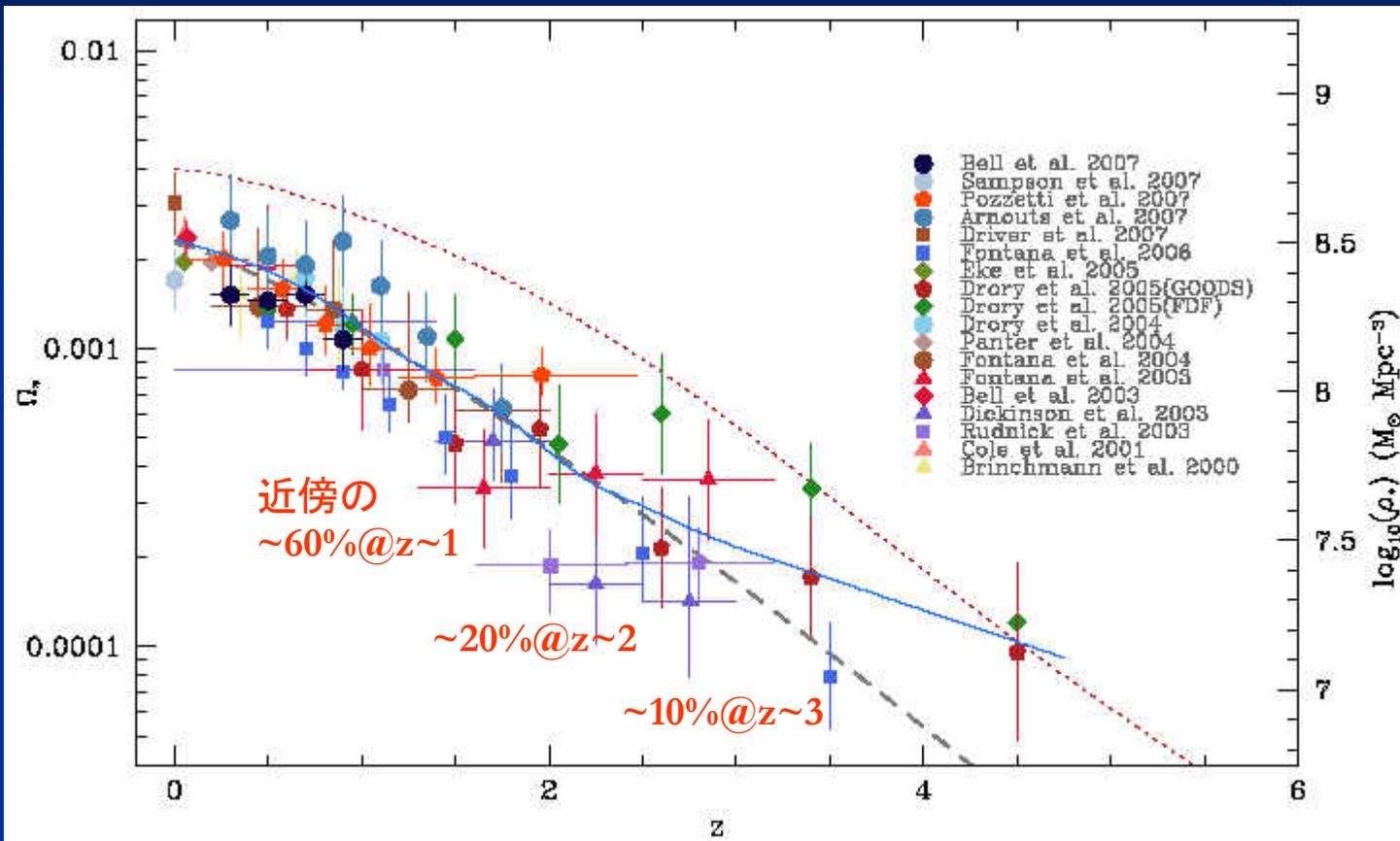
$10^9 M_{\odot}$ までの  
mass-limited sample

## ■ どの程度の広さ

- 統計的精度、field-to-field variance
- 星質量集積史の環境依存性

# 星質量密度進化

恒星質量密度

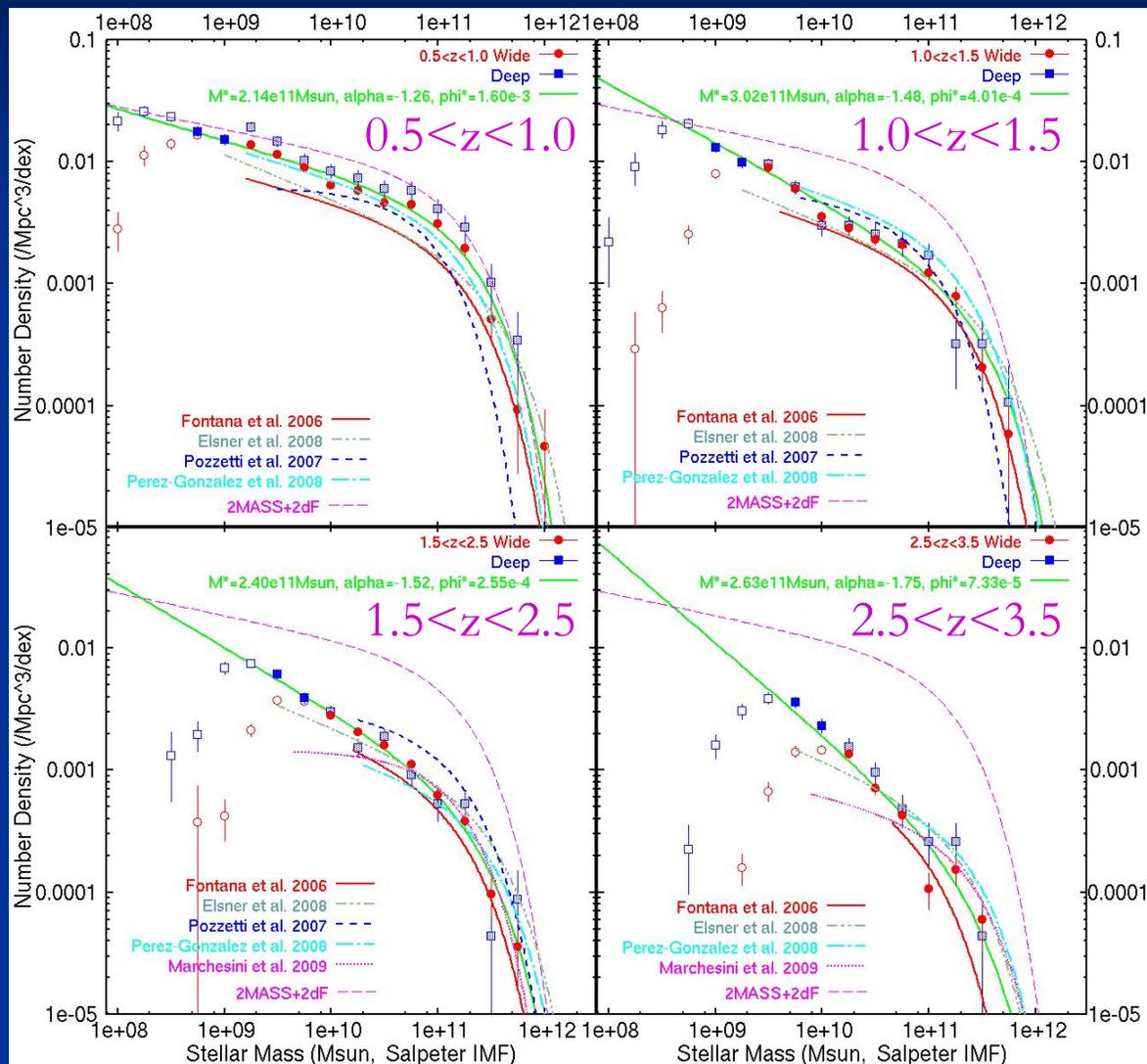


赤方偏移

Wilkins et al. 2008

- high- $z$ では大質量銀河だけしか見ていない
- 研究ごと(調べた領域ごと)にかなり大きいばらつき

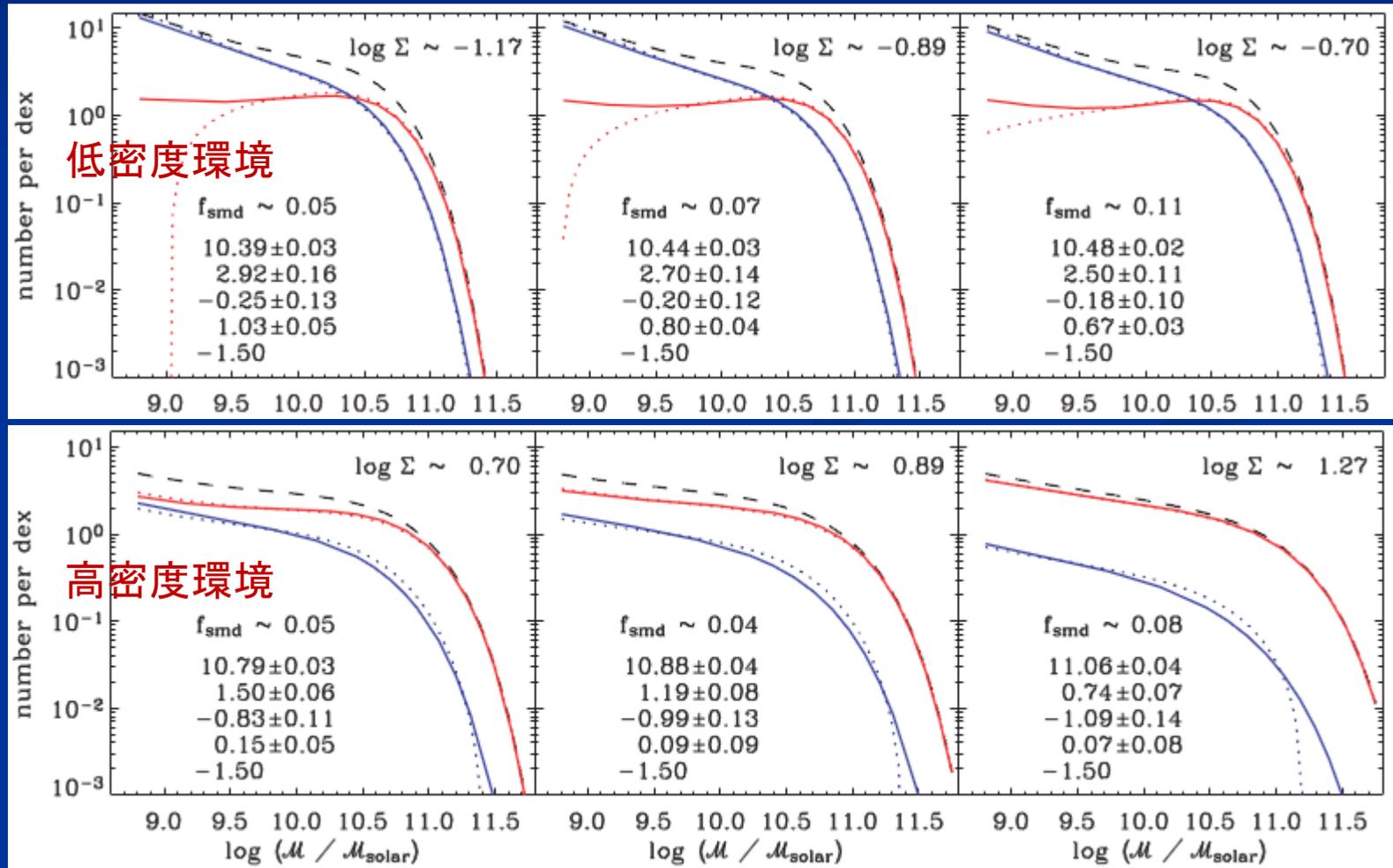
# 星質量関数の進化



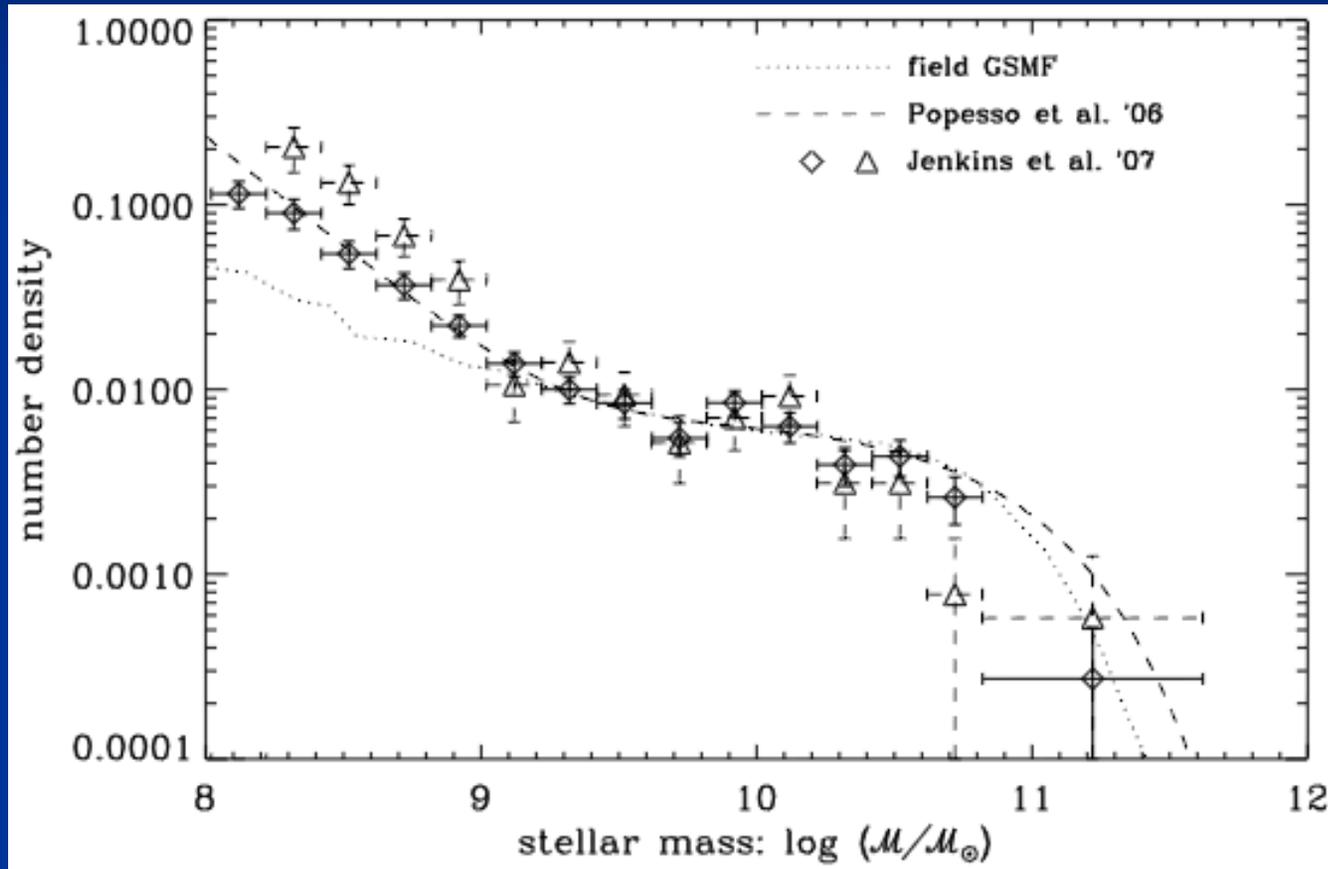
Normalizationに加えて  
形にもばらつきがある可能性

# 星質量関数の環境依存性

Baldry et al. 2006 SDSS



# 星質量関数の環境依存性



Baldry et al. 2008 SDSS  $z < 0.05$

# どこまで調べたいか

## ■ どの時代まで遡る

- 宇宙の大部分の星が作られたと考えられている  $z \sim 1-4$  の時代に銀河の星質量集積がどう進行したか

→ 近赤外  
データ

## ■ どの程度の深さ(星質量限界)

- 星質量集積史の質量依存性をみるために広い質量範囲
- 大質量銀河についても、階層的構造形成の中でどのように形成されたかを調べるためには低質量側の情報が必要

→ 27~28  
ABmag  
 $10^9 M_{\odot}$ までの  
mass-limited sample

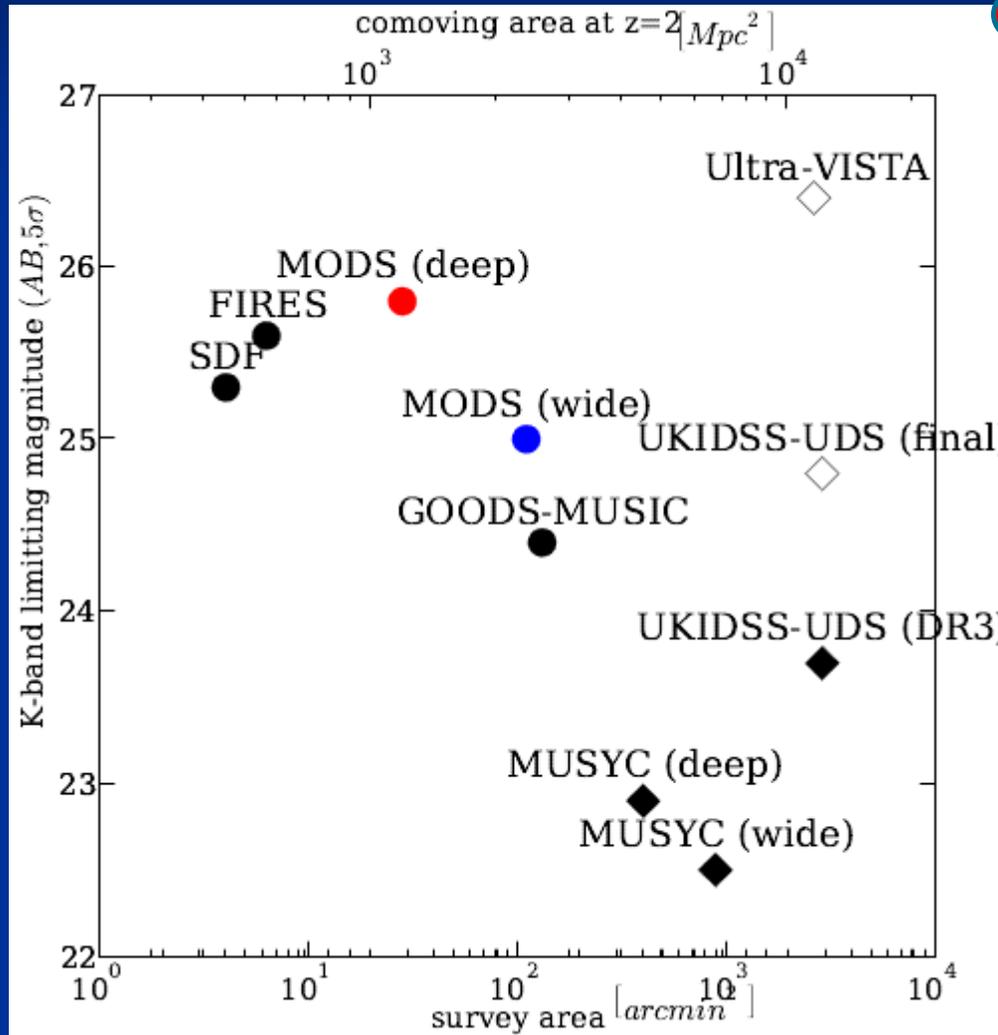
## ■ どの程度の広さ

- 統計的精度、field-to-field variance
- 星質量集積史の環境依存性

例えば Comaクラスの  
銀河団の数密度  $\sim 10^{-7} \text{ Mpc}^{-3}$

→  $10^8 \text{ Mpc}^3 / \Delta z=1$   
→ 10平方度程度のサーベイ

# 現状のK-band 深撮像サーベイ



これくらいの  
サーベイは必要か

# 必要な要素

- 近赤外で広くて( $\sim 10^\circ$ )深い( $\sim 28$ AB)撮像

➡ そのためのWISH

| サーベイ              | 検出限界     | バンド数 | 面積       |
|-------------------|----------|------|----------|
| Ultra Deep Survey | 28 AB    | 3    | 100 平方度  |
| Multi-Band Survey | 27-28 AB | 5    | UDS 内    |
| Ultra Wide Survey | 24-25 AB | 2-3  | 1000 平方度 |

例えばここで10平方度のサーベイ  
➡  
但し、長波長側( $3.2\sim 3.8\mu\text{m}$ )のバンドでも $\sim 27-27.5$ AB程度まで

期待される  
 $>10^9 M_\odot$ の天体数

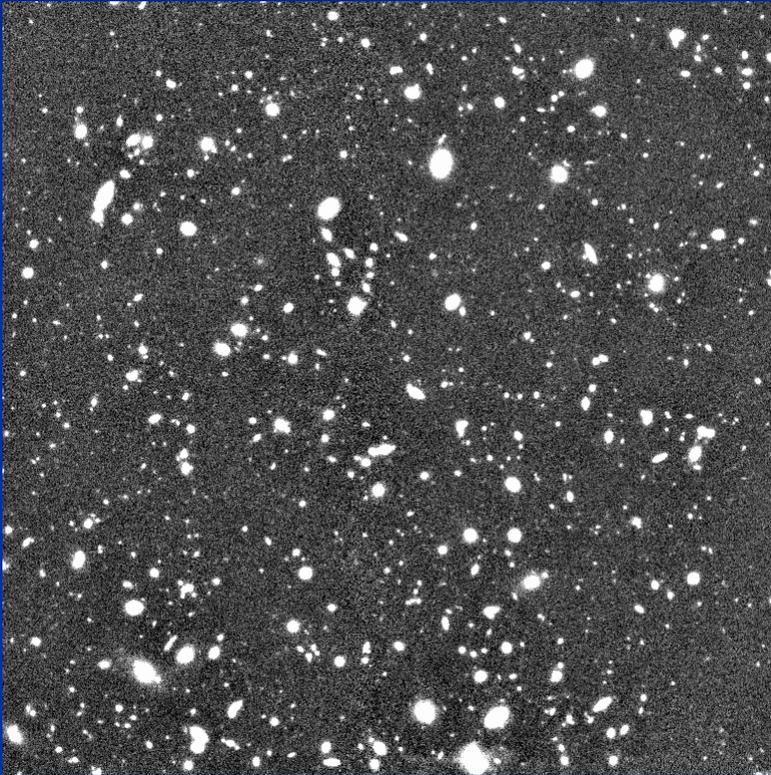
107万天体@ $0.5 < z < 1.5$   
88万天体@ $1.5 < z < 2.5$   
72万天体@ $2.5 < z < 3.5$

- 低質量銀河検出のための最低限の空間解像度

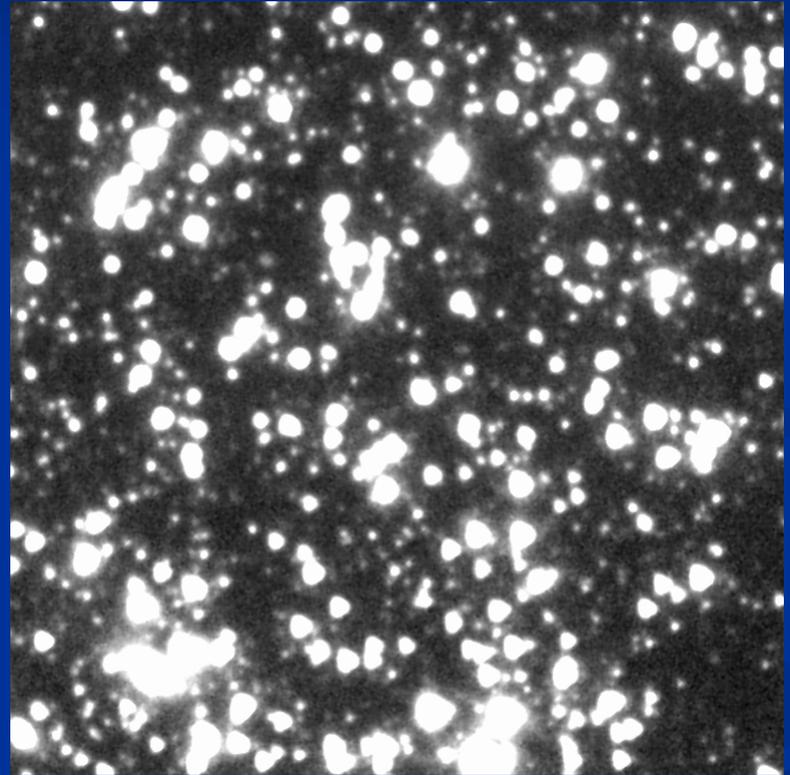
- 高赤方偏移の低質量銀河 → 非常に暗い
- Confusion の影響を受けやすい

# 空間解像度

GOODS-North領域  $3 \times 3 \text{ arcmin}^2$



MOIRCS  $K_s$ -band  $\sim 0.45''$  PSF FWHM  
 $K \sim 25.9$  (AB,  $5\sigma$  limit)



Spitzer/IRAC  $3.6 \mu\text{m}$   $\sim 1.7''$  PSF FWHM  
 $m_{3.6 \mu\text{m}} \sim 24.7$  (AB,  $5\sigma$  limit)

# 必要な要素

- 近赤外で広くて( $\sim 10^\circ$ )深い( $\sim 28\text{AB}$ )撮像

➡ そのためのWISH

| サーベイ              | 検出限界     | バンド数 | 面積       |
|-------------------|----------|------|----------|
| Ultra Deep Survey | 28 AB    | 3    | 100 平方度  |
| Multi-Band Survey | 27-28 AB | 5    | UDS 内    |
| Ultra Wide Survey | 24-25 AB | 2-3  | 1000 平方度 |

例えばここで10平方度のサーベイ  
➡  
但し、長波長側( $3.2\sim 3.8\mu\text{m}$ )のバンドでも $\sim 27\text{-}27.5\text{AB}$ 程度まで

期待される  
 $>10^9 M_\odot$ の天体数

107万天体@ $0.5 < z < 1.5$   
88万天体@ $1.5 < z < 2.5$   
72万天体@ $2.5 < z < 3.5$

- 低質量銀河検出のための最低限の空間解像度

- 高赤方偏移の低質量銀河 → 非常に暗い
- Confusion の影響を受けやすい



$< 1.0\text{arcsec}$  のデータで天体検出

# 必要な要素

## ■ Photo-z, M/L比推定のための可視域撮像データ

Multi-band, 10平方度、28mag(AB,  $3\sigma$ )



Subaru/HSC で 5~7 pointings

もう1回SXDSをやると思えば十分可能か

(同レベルのU-bandデータはなかなか難しいかも、LSSTのultra-deep?)

## ■ Photometric redshift

# Photometric redshift

UBVRiz + 1.4, 2.0, 2.6, 3.2, 3.8  $\mu$ m

MOIRCS Deep Survey K<26 の SED 分布

best-fit GALAXEV template

→ mock カタログ作成

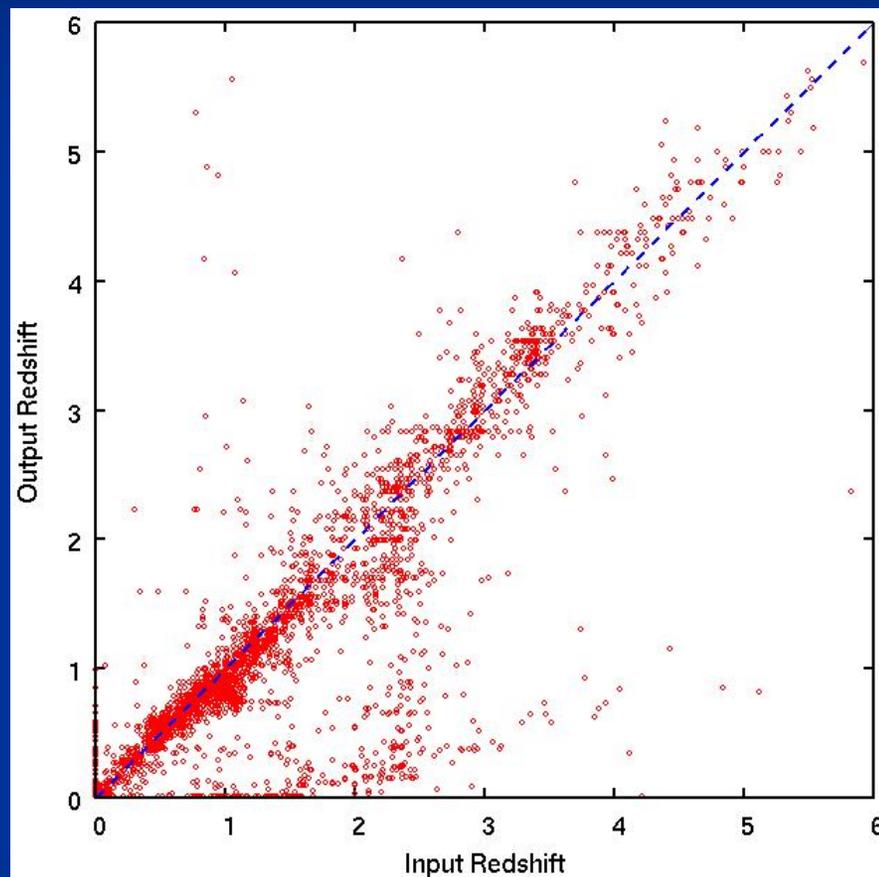
全てのバンドで 28ABmag limit

0.1mag の誤差

公開 photo-z code EAZY 使用

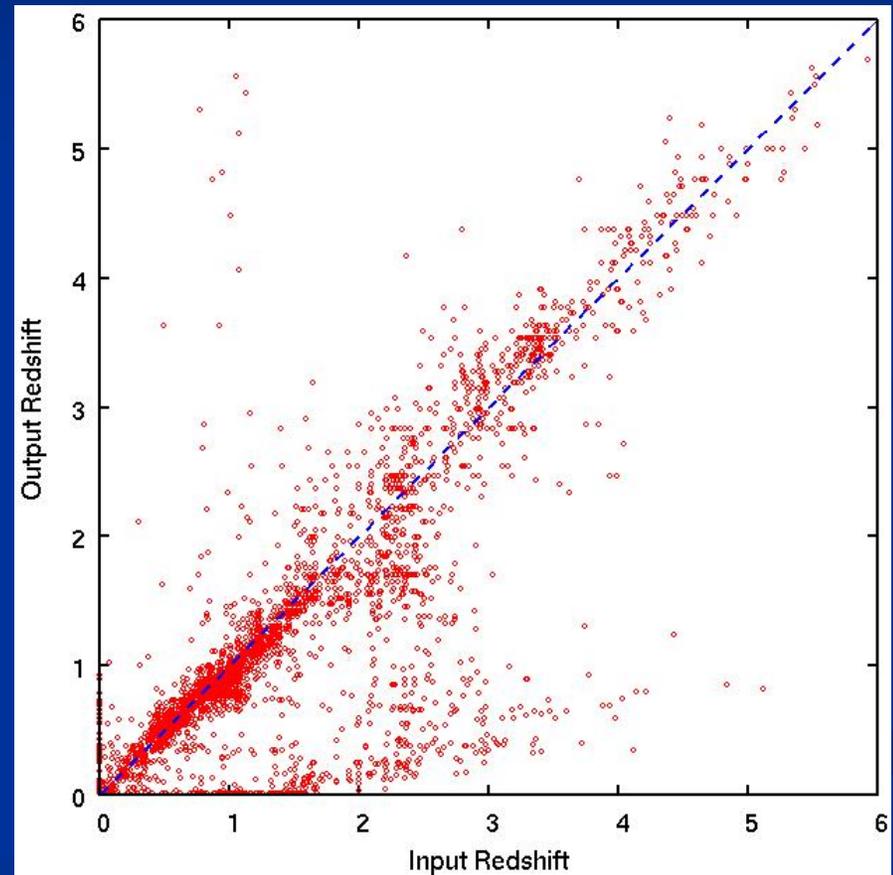
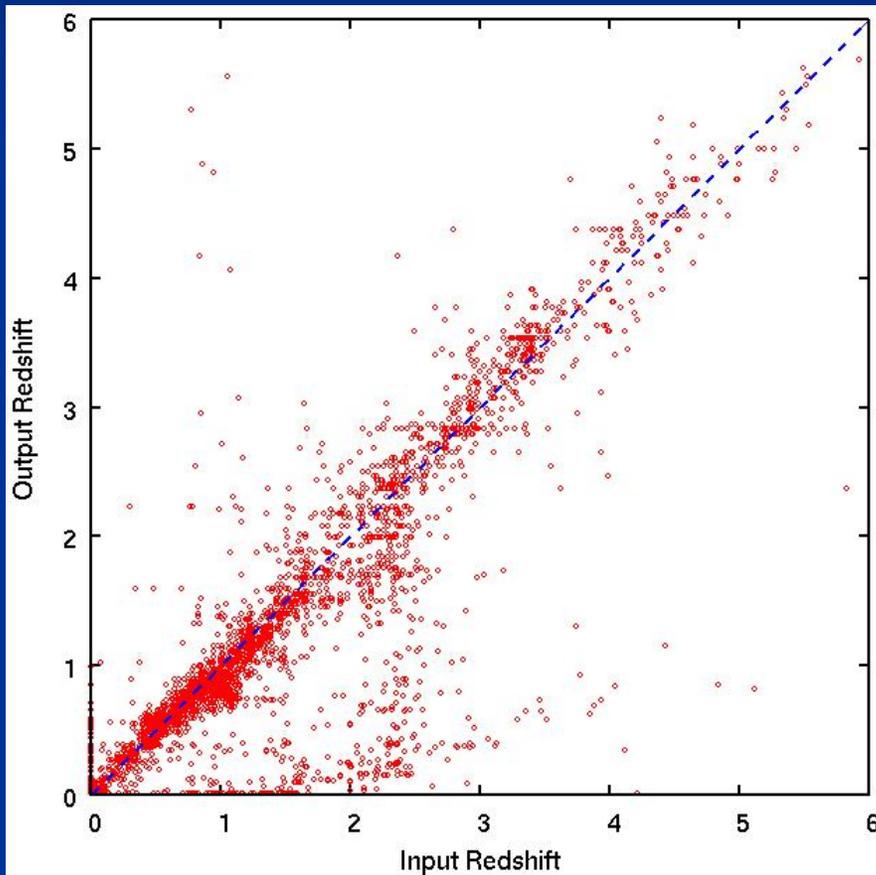
PEGASE2 を基にした主成分解析から  
作った template set の線形結合

通常の JHK (+ Spitzer 等) の場合と  
似たような精度



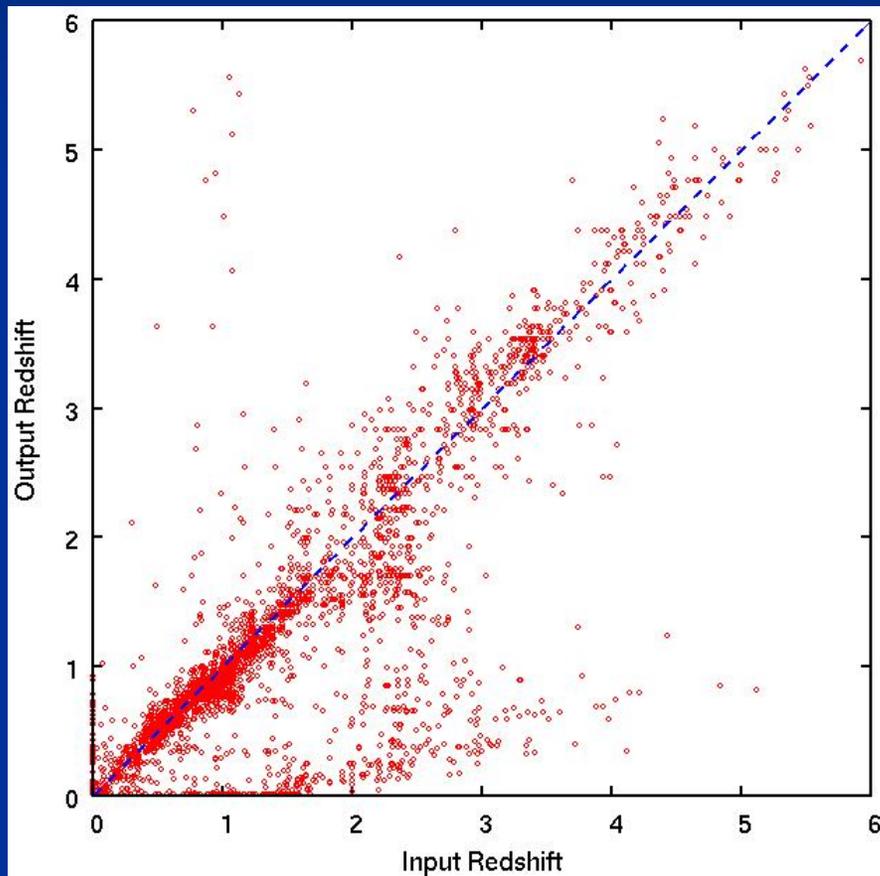
# Photometric redshift

U-band がない場合

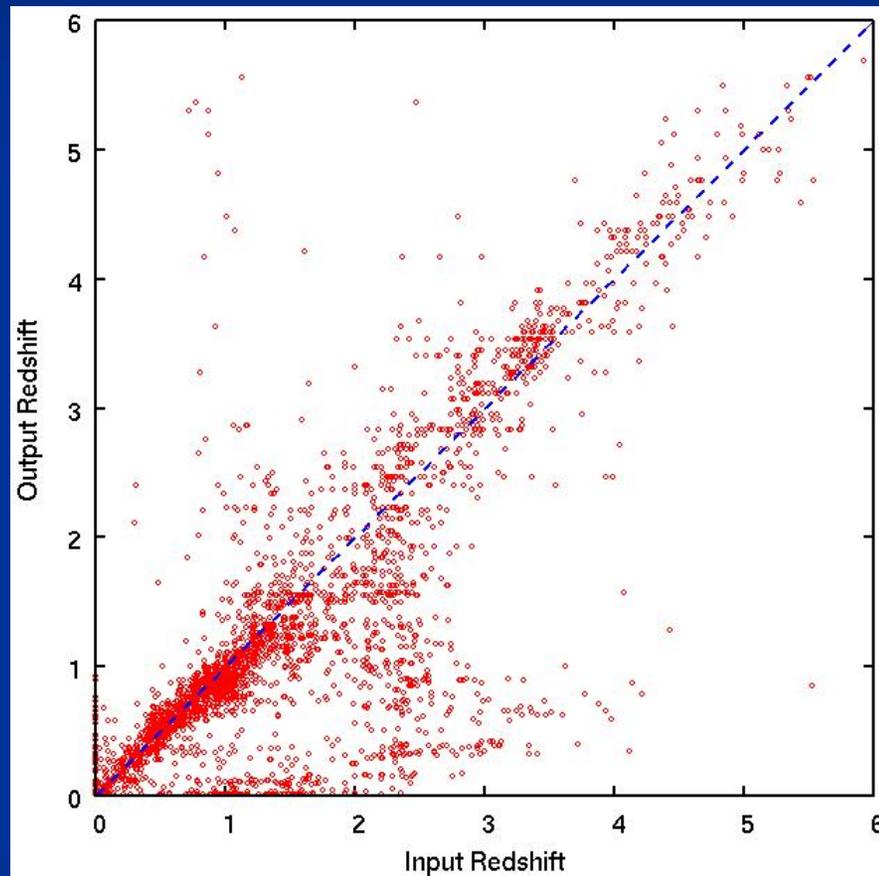


# Photometric redshift

U-band がない場合



U & z-band がない場合



# 必要な要素

## ■ Photo-z, M/L比推定のための可視域撮像データ

Multi-band, 10平方度、28mag(AB,  $3\sigma$ )



Subaru/HSC で 5~7 pointings

もう1回SXDSをやると思えば十分可能か

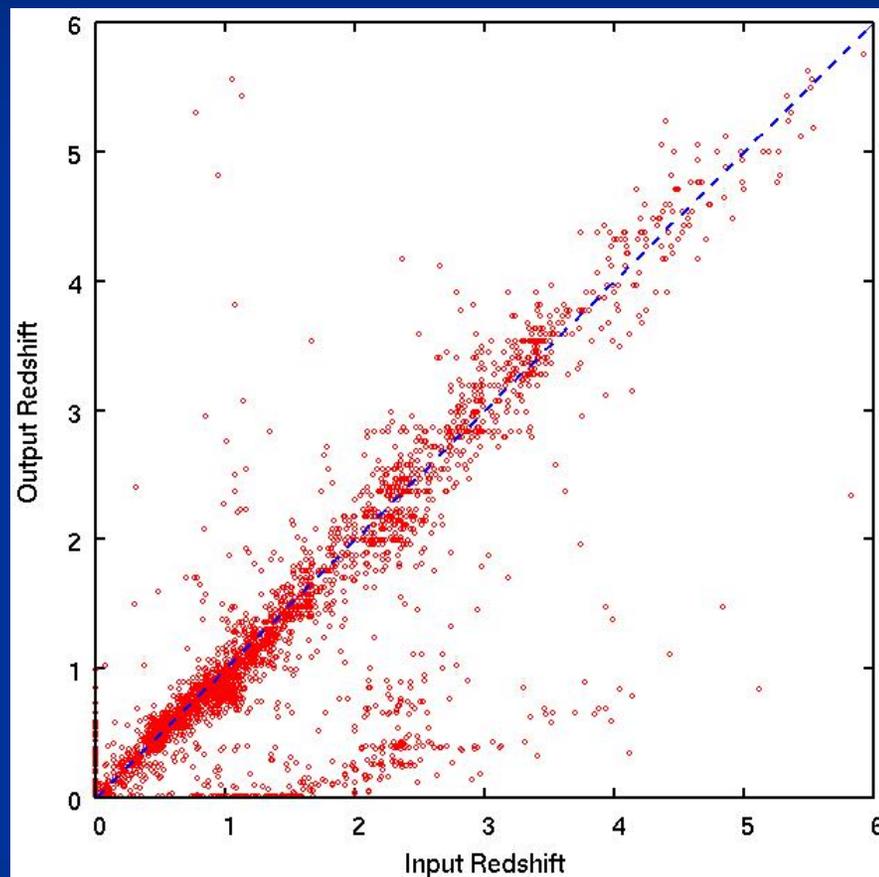
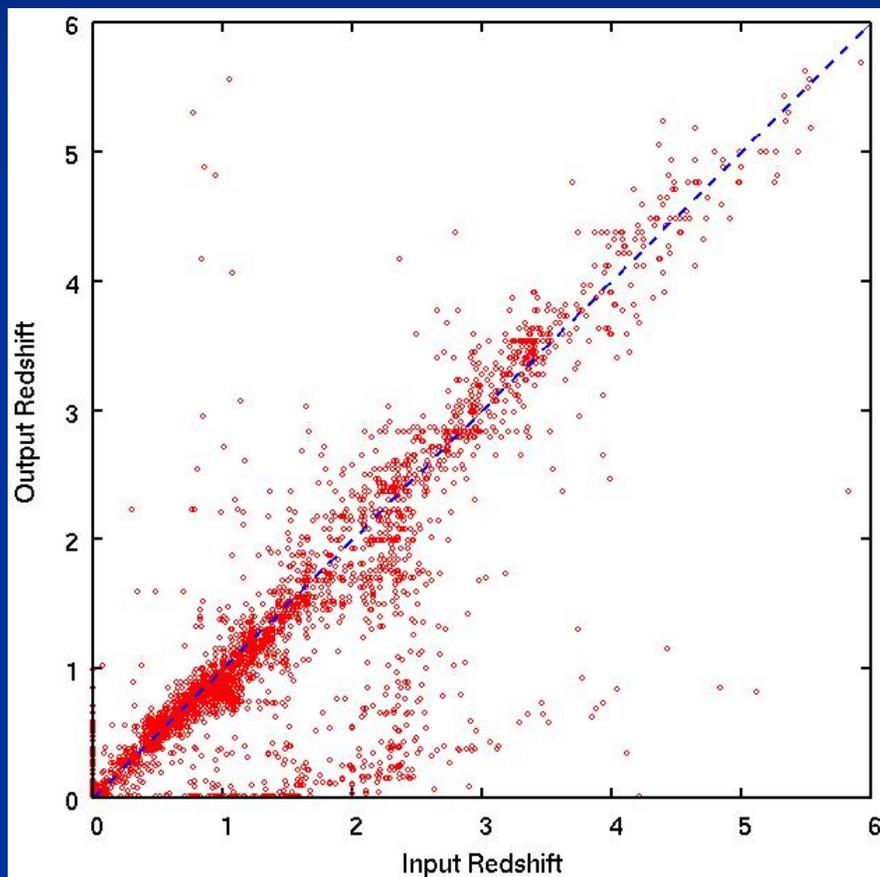
(同レベルのU-bandデータはなかなか難しいかも、LSSTのultra-deep?)

## ■ Photometric redshift

- 1.4, 2.0, 2.6, 3.2, 3.8  $\mu\text{m}$  の5バンドの場合ある程度の精度は出せそう
- U-band がない or 浅い場合でも致命的というほどではないかも  
(U-band も z-band もないと  $z\sim 1.5-3$  あたりの精度は結構悪くなる可能性)
- 1.1  $\mu\text{m}$  あたりにもう1バンド追加してはどうか

# Photometric redshift

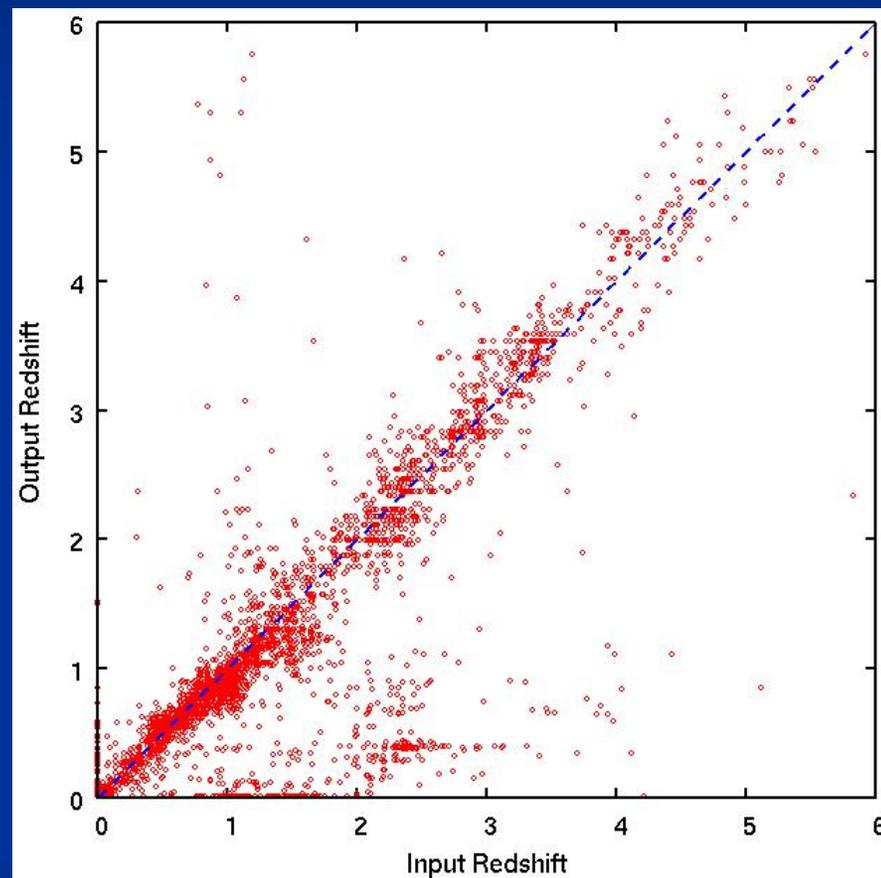
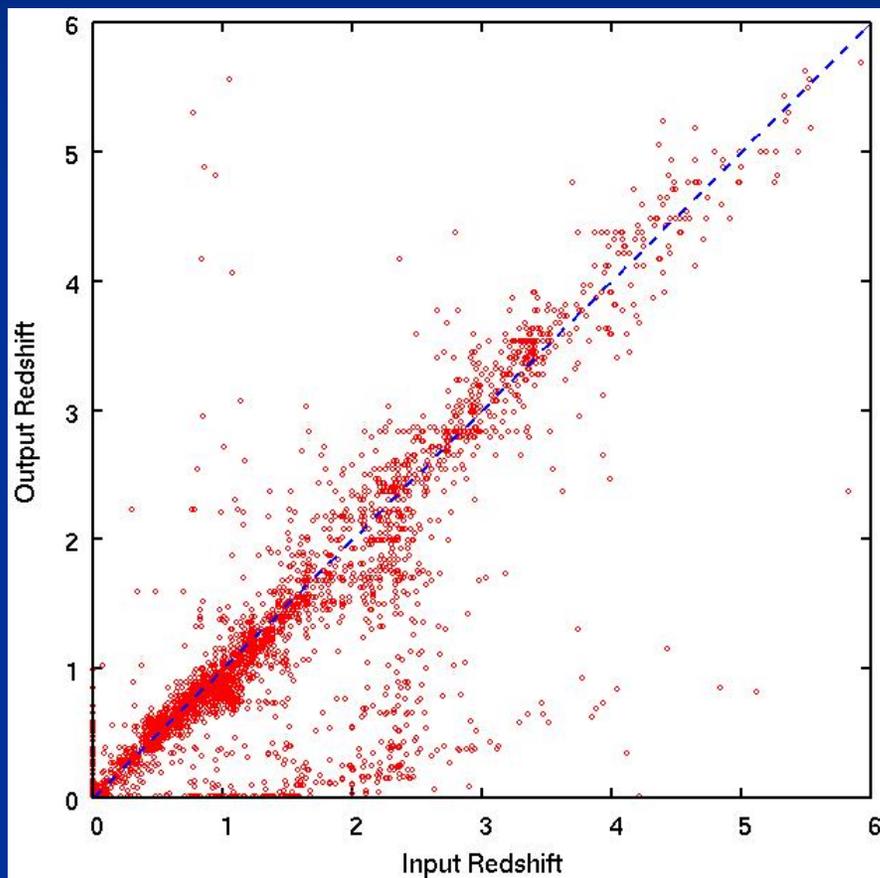
1.1 ± 0.15 μ m-band を加えた場合



- Lyman break が U-band より短波長側
  - Balmer break が  $z$  と J-band の間 ( $z \sim 1.4-2.4$ )
- $z \sim 2$  での不定性

# Photometric redshift

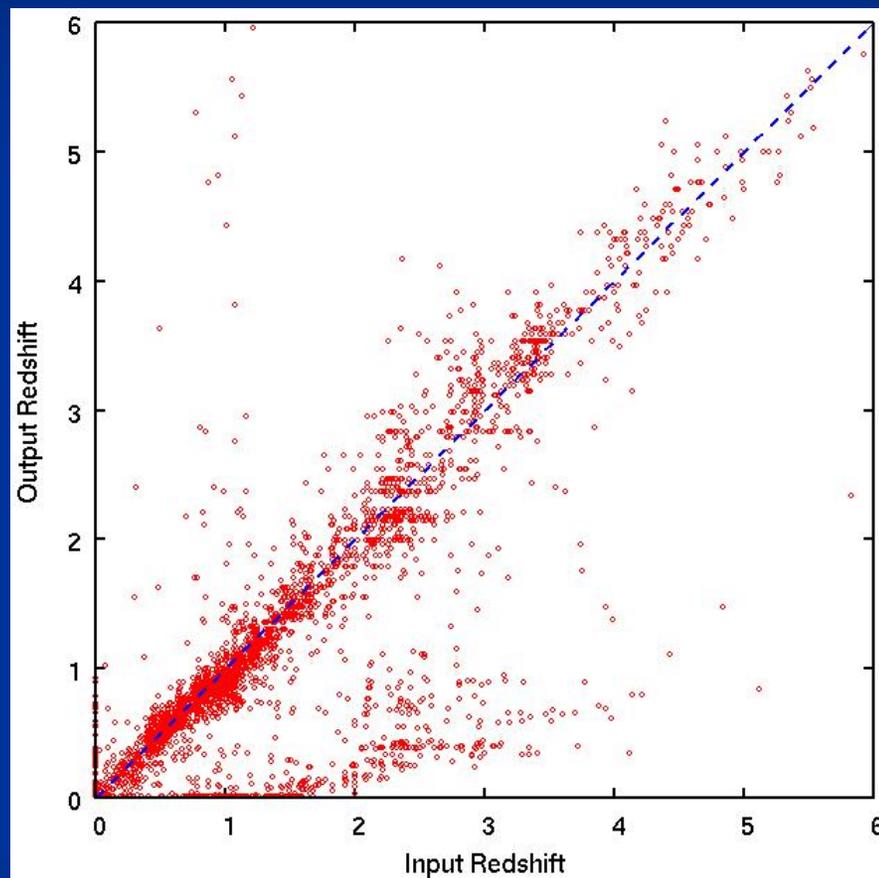
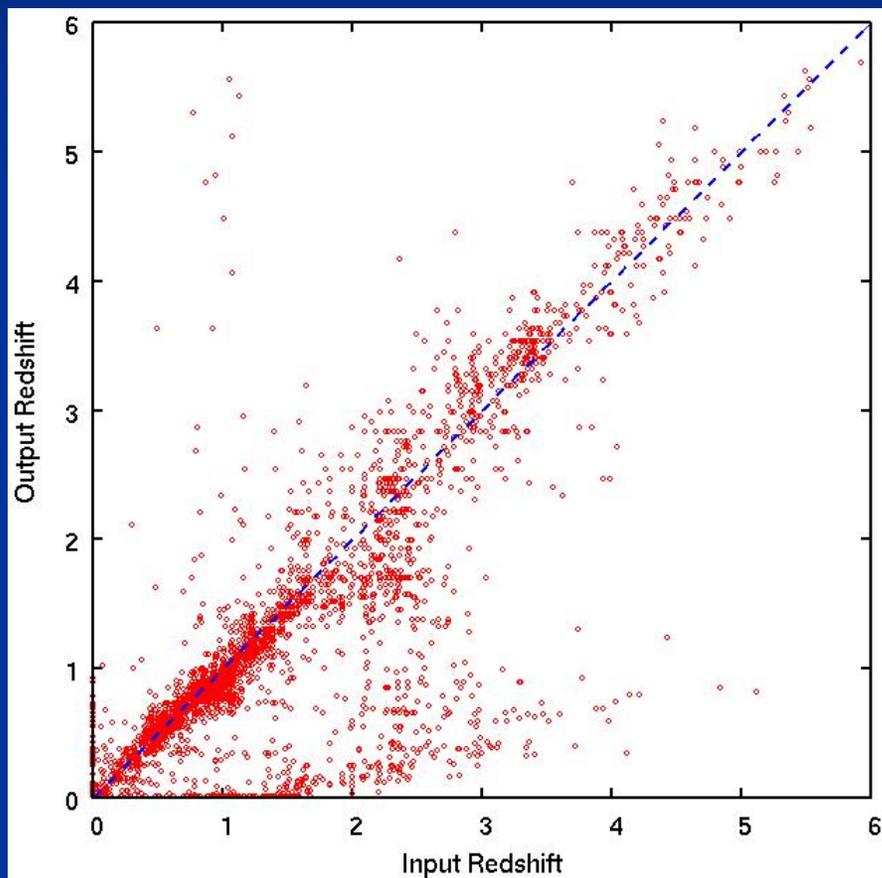
z-bandを除いて 1.1  $\mu$ m-band を加えた



# Photometric redshift

U-band がない場合

1.1  $\mu$ m-band を加えた



# 必要な要素

## ■ Photo-z, M/L比推定のための可視域撮像データ

Multi-band, 10平方度、28mag(AB,  $3\sigma$ )



Subaru/HSC で 5~7 pointings

もう1回SXDSをやると思えば十分可能か

(同レベルのU-bandデータはなかなか大変かも LSSTのultra-deep?)

## ■ Photometric redshift

- 1.4, 2.0, 2.6, 3.2, 3.8  $\mu\text{m}$  の5バンドの場合ある程度の精度は出せそう
- U-band がない or 浅い場合でも致命的というほどの影響ではないかも (U-band も z-band もないと  $z\sim 1.5-3$  あたりの精度は結構悪くなる可能性)

- 1.1  $\mu\text{m}$  あたりにもう1バンド追加してはどうか (←→ コスト、リスク)

✓  $z\sim 2$  での精度向上

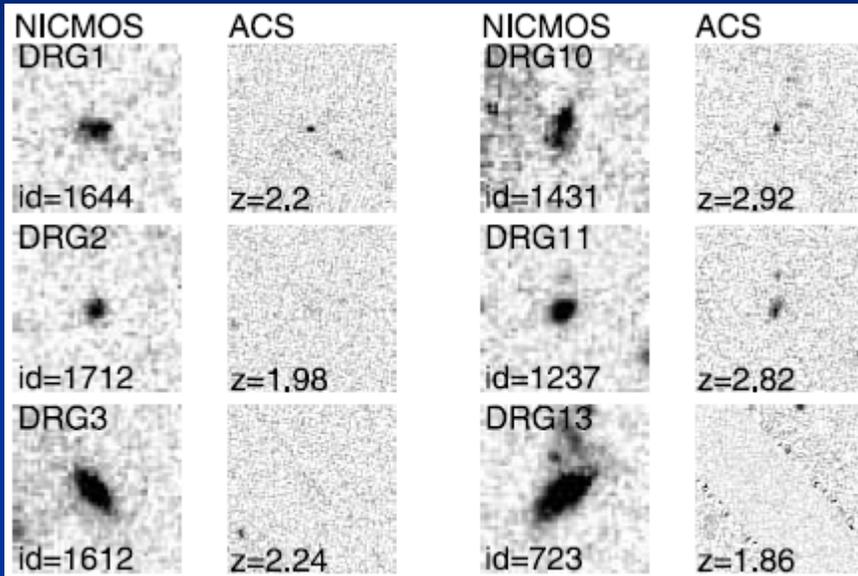


可視光データでは $z\sim 2$ の精度向上は難しい

U-band や z-band の深いデータは取得困難な可能性

- より長波長のバンド(例えば4.4  $\mu\text{m}$ )は、コスト&リスクに見合うだけのゲインはないかも?

# サイズ、形態分布

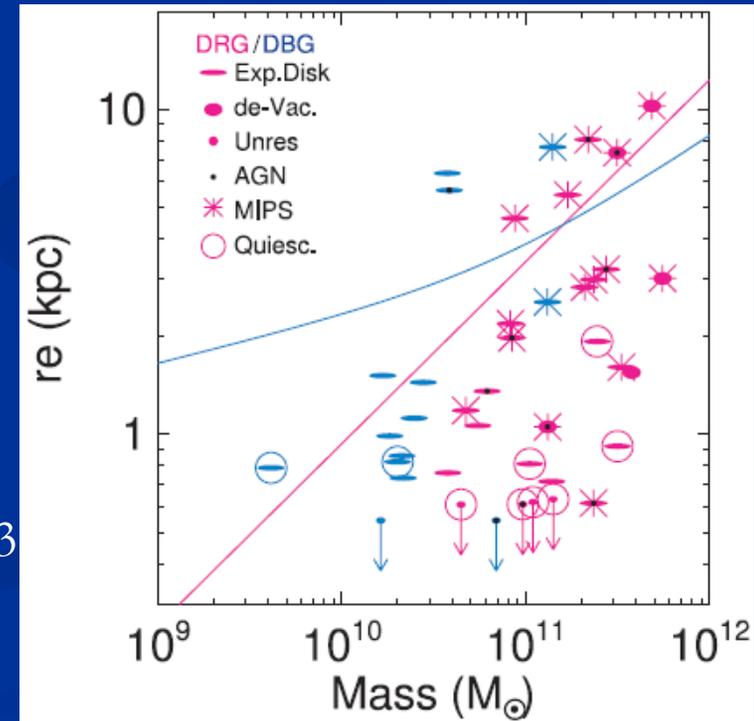
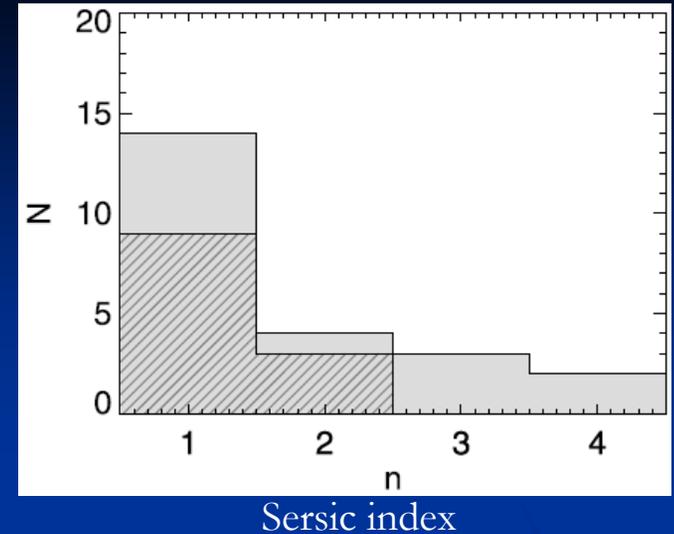


Toft et al. 2007 HST/NICMOS  $\sim 0.35''$  PSF FWHM

- サイズ分布
- 早期型/晩期型 形態

$\sim 2.0 \mu\text{m}$  band で可能  $\rightarrow$  rest B $\sim$ Vband@z $\sim$ 3

- 25ABmag 程度までの天体
- field-to-field variance 解消、形態-密度関係



# まとめ

- 宇宙の星の大半が形成されたと思しき $z \sim 1-4$ の時代において、銀河の星質量集積史の詳細を幅広い質量 & 環境に渡って明らかにすることは重要
- これを行うために、近赤外域で広く( $\sim 10$ 平方度)深い( $\sim 27-28$  ABmag)撮像観測が必要だが、WISHなら (でのみ?)これが実現可能
- 1.5m口径の回折限界に近い空間解像度も重要
- $1.1 \mu\text{m}$ あたりにもう1バンドあると重要な時代での photo- $z$  精度向上が見込める
- この目的に関しては $>4 \mu\text{m}$ のバンドを追加をすることは苦勞?のわりにゲインがそれほど大きくないかもしれない

おわり