

## 論文の内容の要旨

論文題目 Formation History of Galaxies and Large-Scale Structures in the Subaru Deep Fields  
(すばるディープフィールドにおける銀河と大規模構造の形成史)

氏名 大内正己

大口径望遠鏡の登場で遠方銀河の直接観測が可能となり、銀河とその群れ(構造)からなる「銀河宇宙」がどのように形作られてきたかを観測的に調べられるようになった。しかし従来、こうした観測の対象は赤方偏移  $z \leq 3$  の銀河に限られてきた。一部の観測では  $z > 3$  の銀河も対象となったが、そのほとんどはハッブルディープフィールド(HDF)に見られるようなペンシルビームサーベイだった。この為、場所による銀河の性質の非一様性(cosmic variance)と銀河進化との区別がつかなかった上、遠方宇宙で大規模構造のような銀河の空間分布を調べることは不可能だった。この原因は、 $z > 3$  という超遠方の銀河を検出するだけの「深さ」とそれらを広範囲で調べる為の「広さ」を併せ持った観測が行えなかったことにある。そこで、我々は  $z > 3$  の銀河と構造の観測を行い「銀河宇宙」の形成および進化をより初期の宇宙から理解しようと考えた。まず、我々は口径すばる望遠鏡につける可視光広視野カメラ Suprime-Cam (Miyazaki et al. 2002)を開発し、「深さ」と「広さ」を併せ持つ観測を世界に先駆けて可能にした。

第2章では、主にこの Suprime-Cam を用いた観測およびデータ解析について述べる。我々は2000年11月から2001年6月の間に、遠方宇宙の観測に適した「すばるディープフィールド」(SDF;  $\alpha = 13^{\text{h}}24^{\text{m}}21.4^{\text{s}}$ ,  $\delta = +27^{\circ}29'23''$ ) および「すばる/XMM ディープフィールド」(SXDF;  $\alpha = 2^{\text{h}}18^{\text{m}}00.0^{\text{s}}$ ,  $\delta = -5^{\circ}12'00''$ ) を撮像観測した。観測は  $B, V, R, i', z'$  の5つの広帯域フィルターおよび NB711 と呼ぶ狭帯域フィルター(中心波長 7126 Å、波長幅 73 Å)を用い、各1時間から3時間の露出を行った。その結果、 $i' \sim 27$  程度の限界等級をもつ計 1200 平方分におよぶ領域の多色撮像データを得た。これは HDF に匹敵する限界等級でありながら、その300倍の

広さがあり、「深さ」と「広さ」を兼ね備えたこれまでにない巨大な深宇宙撮像データである。

第3章では、この撮像データから遠方銀河のサンプルを作り、サンプルの信頼性について述べる。我々は撮像データから星および近傍銀河を含めおよそ 100,000 個の天体を検出し、その中から、2色図を使って  $z=3.5-5.2$  にある 2556 個の Lyman Break Galaxy (LBG) と  $z=4.9$  にある 87 個の Lyman  $\alpha$  Emitter (LAE) を選び出した(これらを LBG および LAE の測光サンプルと呼ぶ)。LBG は紫外連続光の強い(したがって、Lyman break が顕著に見られる)銀河、LAE は Lyman  $\alpha$  輝線が強い銀河で、いずれも星形成銀河である。また、測光サンプルの一部の天体を 2002 年 6 月にすばる/FOCAS で分光して赤方偏移を求めた結果、2色図で推定した赤方偏移はほぼ正しかった。

第4章では、これらの測光サンプルを用いて光度関数を求めた。図1は我々が求めた  $\langle z \rangle = 4.0, 4.7$  および  $4.9$  における LBG の光度関数を、文献にある  $z=0$  および  $3$  のものと比較したものである。この光度関数から、 $z=3$  から  $4$  の間には銀河の個数および光度はほとんど変化していないが、 $z=5$  では明るい ( $M < -22$ ; 星形成率にして  $> 30 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) の銀河が有意に減っていることがわかった。

第5章では、ダスト減光量を紫外線連続光の傾きから求めたところ、 $z=4$  の LBG は平均して  $E(B-V) = 0.15 \pm 0.03$  の減光を受けていることがわかった。この値は  $z=0$  の星形成銀河および  $z=3$  の LBG の値と大きな違いはない。

第6章では、光度関数を積分することで  $z=4-5$  の紫外線光度密度を計算した。これと上記のダスト減光量を基に星形成密度および星質量密度の進化を  $z=5$  まで求めたところ、星形成密度は  $z=2-5$  にわたってほぼ一定であることがわかった。また  $z=5$  の紫外線光度密度から水素電離光子の数を見積もった。その結果、銀河間ガスが電離を保つ為には、 $z=5$  の LBG が星形成に伴って作る水素電離光子のうち少なくとも 13% 以上が銀河外に放出されなくてはならないことがわかった。

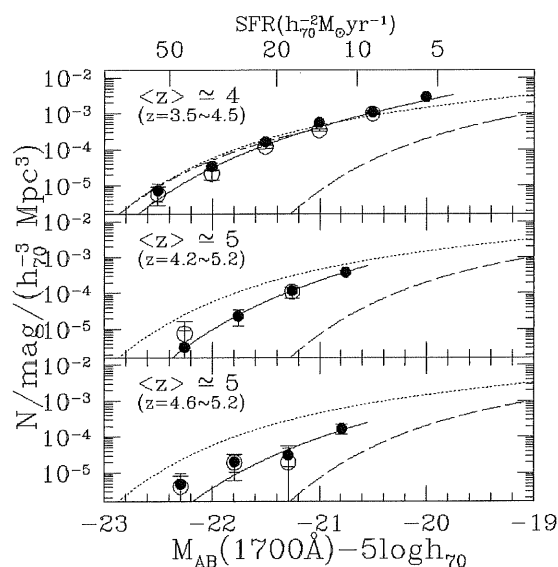


図1： $z=4.0 \pm 0.5, z=4.7 \pm 0.5$  および  $z=4.9 \pm 0.3$  における LBG の光度関数。黒点および白点はそれぞれ SDF および SXDF で検出された LBG から求めた測定点で、実線はそれらに最も合う Schechter 関数。点線(鎖線)は  $z=3$  の LBG ( $z=0$  の UV-selected 銀河)。

第7章では、測光サンプルの銀河の空間分布を調べた。SDF とその北側の領域における追観測から  $z=4.9$  における LAE が北西から南東に幅 20Mpc で 50Mpc 以上に連なる大規模構造をなしていることを発見した (図2)。これは遠方宇宙における大規模構造の初の発見例である。さらに分布を定量的に調べる為、LBG と LAE の天球分布から角度相関関数を計算して相関強度を求めた。得られた相関強度と LBG および LAE の赤方偏移分布を元に Limber 逆投影を行うことで3次元における LBG と LAE の相関関数の相関長( $r_0$ )を求めた。その結果、 $z=4$  と 5 の LBG および  $z=4.9$  の LAE の相関長は、 $r_0=4.1(\pm 0.2), 5.9(+1.3/-1.7), 6.2(\pm 0.5)h^{-1}\text{Mpc}$  だとわかった。求めた  $r_0$  とこれまでに調べられた low- $z$  銀河の  $r_0$  およびモデルが予言するダークマターの  $r_0$  を赤方偏移に対してプロット

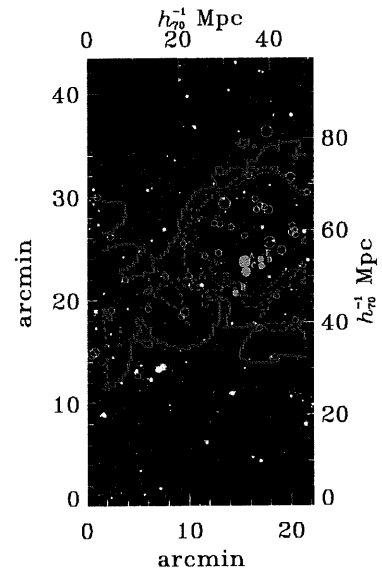


図2 : 発見された  $z=4.9$  における LAE が作る大規模構造。黄色丸が LAE の位置を示し、赤線が LAE の天球面上での密度を示す。実線、鎖線、点線の順に  $\delta \rho / \bar{\rho} = 0, 1, 2$  の密度等高線。

したものが図3である。ダークマターの相関は high- $z$  ほど弱くなるが、銀河の相関は high- $z$  でもあまり変わらないことがわかった。銀河の相関関数( $\xi_g$ )とダークマターの相関関数( $\xi_m$ )の違いをバイアス  $b_g=(\xi_g/\xi_m)^{1/2}$  として定義すると、 $b_g$  は  $z \geq 3$  で 3~5 程度であり、high- $z$  ほど大きくなる傾向が見つかった。この傾向は、biased galaxy formation と呼ばれる銀河形成シナリオを支持する。

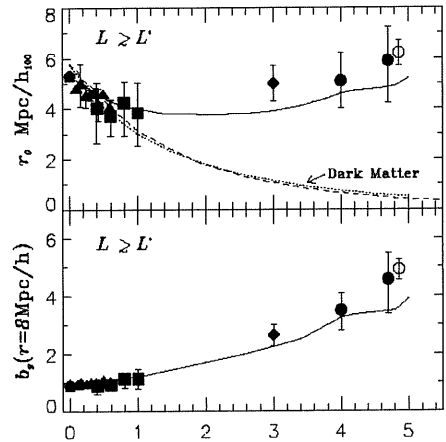


図3 :  $z$  に対する相関長( $r_0$ )および銀河-ダークマターバイアス( $b_g$ )の進化。黒点および白点が我々が求めた  $z=4-5$  の LBG および LAE の  $r_0$  と  $b_g$  (ここで、LBG の  $r_0$  は  $L > L^*$  のサブサンプルから求めた値)。Low- $z$  の点は文献から得られたもの。点線および鎖線はモデルが予言するダークマターの相関長。実線は Kauffmann et al. (1999) のモデル。

第8章では、銀河の光度関数および相関強度という両測定量を基に CDM モデル(Sheth & Tormen 1999, Sheth et al. 2001)を介して銀河と構造の形成がどのように行われたかを調べた。ここでは、ある明るさの銀河はある典型的な質量の virialize したダークマターのハロー (ダークハロー) に付随すると仮定する。すると、ある明るさの銀河の相関強度(バイアス  $b_g$  に対応)から、それらの銀河が付随するダークハローのバイアスが分かり、このバイアスに相当するダークハローの質量が CDM モデルから見積もれる。図4は、こうして求めたダークハローの質量に対して、光度関数から求めた  $z=4$  LBG の個数密度をプロットしたものである (これは我々が独自に開発した視覚的理解の方法)。図4から  $z=4$  の LBG は  $10^{11} \sim 10^{13} M_\odot$  のダークハローに付随していることがわかった。また明るい LBG ほど大質量のダークハローに付随していることがわかった。さらに、LBG の個数密度を CDM モデルの予想するダークハローの個数密度と比較すると、大質量のダークハローには平均して1個の LBG が付随しているのに対し、中質量のダークハロー( $10^{11} \sim 10^{12} M_\odot$ )は平均して 0.1~0.3 個の LBG しか持たないことがわかった。これは  $z=4$  では銀河(星)を持た

ないダークハローが多数存在するとも解釈できるが、むしろ中質量のダークハローに付随する銀河の一部がたまたま強い星形成を起こし、これにより銀河が LBG として検出されたと考えるほうが自然だろう。

同様の解析を  $z=5$  の LBG および  $z=4.9$  の LAE に対して行った結果、LBG および LAE とも  $10^{12}M_{\odot}$  程度の質量のダークハローに付随していることがわかった。また、LBG は  $z=4$  と同様、ダークハローに平均して 0.3 個しか付随していないが、LAE はこれらのダークハローに複数個(3 個程度)付随していることがわかった。さらに文献にある  $z=3$  の銀河 (LBG や K-band selected 銀河、SCUBA source) の個数密度および相関強度を用いて同様の解析を行い  $z=3$  の銀河に関して同様の議論を行った。

次にこれら  $z=3\sim 5$  の銀河を持つダークハローは現在どのくらいの質量に成長するか CDM モデルを用いて見積もった。その結果、LBG, LAE, K-selected 銀河および SCUBA source を持っていたダークハローは、現在 ( $z=0$ ) では  $3 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14} M_{\odot}$  程度に成長し、銀河団から銀河群に相当するダークハローになる (取り込まれる) ことがわかった。つまり観測された  $z=3\sim 5$  の銀河の大部分は現在の銀河団および銀河群の構成銀河の祖先に当たる。また、LAE や暗い ( $L < L^*$ ) LBG は  $z=3\sim 5$  から現在まで少なくとも数回は衝突合体を繰り返した可能性がある。

第 9 章は、以上の結果を踏まえて考察を行う。図 5 において  $z=3\sim 5$  の全ての LBG と SCUBA source は一つの質量—個数密度系列に乗ることから、LBG と SCUBA source は同族の銀河と考えられる。またこれらの銀河は定常的ではなくたまたま強い星形成を起こしながら星質量を集積してゆく (第 8 章)。  $z=5$  から 4 に時代が下るにつれ光度が大きい銀河が現れる (第 4 章) ことから星形成の規模が銀河の規模とともに大きくなるが、星形成の大半は中規模の銀河で行われる為、星形成率密度は大きく変化しない (第 6 章)。一方で、ダークマターの相関強度は時間とともに増加するがバイアス ( $b_g$ ) は減少するので、銀河分布自体は見かけ上変わらない。そのため発見された図 2 のような大規模構造が  $z=4.9$  にも存在している (第 7 章)。

論文全体をまとめると、我々は  $3 < z < 5$  における銀河の光度関数および空間分布の進化を観測的に明らかにした。観測で分かった銀河 (星) の形成過程を理論 (CDM モデル) に基づくダークマターの構造形成と共に考察することで、銀河と構造形成の統一的解釈を提示した。

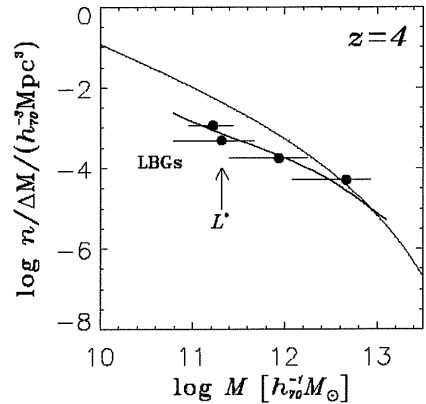


図 4 :  $z=4$  におけるダークハローの質量関数。黒点および太線は LBG の個数密度と LBG が付随するダークハローの質量。細線は CDM モデルの予想する  $z=4$  に存在する全てのダークハロー。

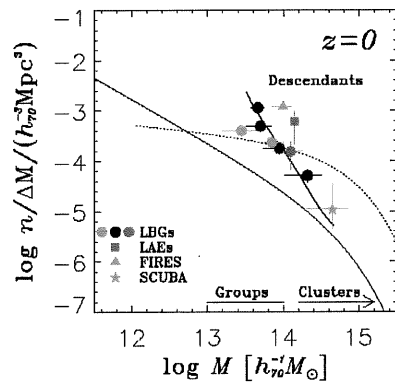


図 5 :  $z=0$  におけるダークハローの質量関数。黒点および太線は  $z=4$  の LBG が付随していたダークハローの現在 ( $z=0$ ) の質量。赤丸および赤四角は  $z=5$  における LBG および LAE が付随していたダークハローの現在の質量。青丸、青三角、青星印は  $z=3$  の LBG, K-selected 銀河および SCUBA source が付随していたダークハローの現在の質量。細実線が  $z=0$  における全ダークハロー、点線がそれに付随する銀河の個数密度 (2dFGRS による)。