

SDSSデータから調べた近傍銀河の進化と環境効果

原田 直樹¹, 谷口 義明²
¹放送大学大学院 文化科学研究科
²放送大学

The environmental effects and time evolution of nearby galaxies in the SDSS data

Naoki HARADA¹, Yoshiaki TANIGUCHI²
¹Graduate school of the Open University of Japan, Mihama-ku, Chiba 261-8586, Japan
²The Open University of Japan, Mihama-ku, Chiba 261-8586, Japan
1718000683@campus.ouj.ac.jp

(Received 2019 October 31; Accepted 2019 December 23)

概要

SDSSデータリリース14の公開データから近傍銀河 ($0.025 \leq z \leq 0.1$) 32,200個を抽出し、銀河特性に関する時間発展と環境効果を調べた。最近接銀河間距離と周囲銀河数密度に基づいて孤立銀河、高密度銀河、低密度銀河およびその他に分類し、カタログ化した。銀河の色と形態の赤方偏移依存性を調べたところ、Butcher-Oemler効果およびmorphological Butcher-Oemler効果に類似した現象が高密度領域のみならず低密度領域においても見られたが、後者では相関が弱かった。同じく色と形態の周囲銀河数密度依存性を調べた結果、3桁にわたる密度範囲で対数密度に関し直線的な相関が得られた。一方で第5近接銀河間距離 r_5 を変数にとったプロットからは、環境が3つの領域、すなわち $r_5 \leq 7$ Mpcの色と形態の変化が顕著な領域、 $r_5 > 12$ Mpcの変化が少ない領域、および両者の間にある過渡的な領域に分類できることがわかった。時間(赤方偏移)–環境(密度)の2次元空間における解析から、銀河の色と形態は時間、密度の組み合わせによって変化していると見なすことができる。1桁の密度差は6-8億年の進化の時間遅れに相当する。

Abstract

We examined the time evolution and the environmental effects on properties of 32,200 nearby galaxies in the redshift range $0.025 \leq z \leq 0.1$ extracted from the public SDSS data release 14 database. The galaxies are categorized into four groups, isolated galaxy, high-density galaxy, low-density galaxy, and others in the viewpoints of distance from the neighboring galaxy and local galaxy number density. We also found analogous effects to the Butcher-Oemler effect and the morphological Butcher-Oemler effect also in the low galaxy density region not only in the high density region. However, the correlation is weak in the low density region. Dependences of color and morphology on the logarithmic galaxy number density showed almost linear decrease over 3-orders of density change. On the other hand, color- and morphology- r_5 , distance to the fifth nearest neighbor, plots suggested three characteristic density regions. At $r_5 \leq 7$ Mpc, the environmental effect is evident, whereas it is not so effective at $r_5 > 12$ Mpc. There is an intermediate region between these two regions. We also analyzed color and morphology of the galaxies in the two-dimensional time (redshift)-environment (density) space. Both properties are governed by the combination of the two variables, redshift and density. We may say one order density difference is equivalent to 0.6-0.8 Gyr-delay in time evolution.

Key words: galaxy evolution—SDSS—environmental effect

1. はじめに

銀河の進化、すなわち銀河諸特性の時間発展はButcher-Oemler効果の発見(Butcher & Oemler 1984)によって示された。遠方の銀河団で青い銀河の割合が高いという彼らの発見は、その後の近傍や遠方を含む観測 (Rakos. & Schombert 1995; Margoniner & de Carvalho 2000)やSloan Digital Sky Survey (SDSS)(York et al. 2000)の初期データを用いた統計的解析(Goto et al. 2003a)によっても確認されてきた。同様に、銀河形態の時間発展を示すmorphological Butcher-Oemler効果もまた広く知られている (Couch et al. 1994; Dressler et al. 1997; Goto et al. 2003b)。一方、Dressler (1980)によって銀河形態の周囲銀河数密度依存性

が指摘されて以降、銀河進化における環境の影響が盛んに研究されるようになった。銀河の色や形態の環境(主に周囲銀河数密度)依存性を調べる研究がその代表である (e.g., Dressler et al. 1997; Goto et al. 2003b)。現在では、銀河は孤立系ではなく他の銀河 (e.g., Taniguchi & Wada 1996; Taniguchi 1999; Kauffmann et al. 2004; 谷口 2016)や銀河間空間に存在する高温プラズマガス(e.g., Gunn & Gott 2004; Farouki & Shapiro 1980)といった周囲環境との相互作用が銀河進化や活動銀河の鍵を握っていると考えられている。

一方で、周囲銀河と離れて存在する“孤立銀河”に関する研究も長く続けられ、色、形態、星生成率といった観点から調べられてきた (e.g., Allam et al. 2004; Hirschmann et

al. 2013)。近年では宇宙大規模構造に見られるボイド形成との関連を調べる観点も含めて、“ボイド銀河”というコンセプトも提案されており、主としてガスリッチで星生成率が高い、小型の晩期型銀河という特徴が知られている (van de Weygaert et al. 2011; Kreckel et al. 2012; Beygu, B. et al. 2017)。

孤立銀河から銀河団銀河までの広い環境範囲にわたる銀河の諸特性を比較することは、銀河進化の理解とそれに対する環境効果を抽出することからも重要と考えられる。本研究ではSDSS IV (Blanton et al. 2017)の公開データを用い、近傍銀河を周囲環境ごとに分類して銀河特性(色と形態)を系統的に調べた。環境の指標としては最近接銀河間距離と周囲銀河数密度を用いた。まず銀河特性の赤方偏移依存性であるButcher-Oemler効果とmorphological Butcher-Oemler効果を0.025から0.1までの赤方偏移範囲で調べた。この赤方偏移範囲では、Butcher & Oemler (1984)では変化が見られておらず、またGoto et al. (2003a)においてはサンプルが少ない。Margoniner & de Carvalho (2000)は赤方偏移 0.03から調べたが、対象の銀河団は48個で統計的性質を議論するには少なかった。次に周囲銀河数密度に対する色、形態の依存性を調べ、さらに上記分類による銀河特性の違いを確認する。また、時間と環境は単独に銀河特性を決めるものではなく両者の組み合わせによって決められるという観点から、時間-環境の2次元空間における銀河発展について考察する。

本研究で用いた宇宙論パラメータは $H_0 = 71$ km/s/Mpc、 $\Omega_m = 0.27$ 、 $\Omega_\Lambda = 0.73$ (Spergel et al. 2004)であり、平坦な宇宙を仮定している。統計解析ソフトウェアとしてEZR ver.1.38¹(Kanda 2013; 神田 2019)およびMicrosoft Excel 2010を用いた。

2. 方法

SDSSデータはデータリリース14 (Abolfathi et al. 2018)を利用し、分光データのあるMAINカテゴリ (Strauss et al. 2002)にある銀河を対象とした。調査した天域は赤経 α が $145^\circ \leq \alpha \leq 235^\circ$ 、赤緯 δ が $0^\circ \leq \delta \leq 15^\circ$ で、分光赤方偏移 z の範囲は0.025から0.1である。SDSS MAINカテゴリの限界等級は17.8等級であり、これから $z = 0.1$ までのvolume-limitedサンプルを作成するため r バンド(中心波長623 nm)の絶対等級が-20.6等級以下という制限を加えた。本研究はこのような明るい銀河のみを対象としていることに留意が必要である。総サンプル数は32,200銀河である。銀河環境の指標として最近接銀河間3次元距離 $d_{\text{gg-min}}^3$ (Mpc)と、第5近接銀河までを含む体積 $V_5 = 4\pi r_5^3/3$ 内の銀河数密度 $D_5 = 6/V_5$ (Mpc⁻³)を用いた。ここで r_5 は第5近接銀河までの距離である。分光赤方偏移と赤経、赤緯から各銀河の3次元共動デカルト座標を求めた後、銀河間の距離を平坦空間における3次元のピタゴラスの定理から算出した。密度は体積密度であり、前景および背景銀河の影響はうけない。このようにして各銀河に対して $d_{\text{gg-min}}^3$ 、 r_5 、 D_5 などの値が一意に決定される。

次にこれらの指標に基づき、銀河を環境ごとに分類した。高密度域にある銀河を代表するグループとして高密度銀河 (high density galaxy: HDG)を、比較対象として低密

度域にある低密度銀河 (low density galaxy: LDG)を設定した。赤方偏移を0.0125ごとの6つのビンに分け、各ビンに含まれる銀河のうち相対的に D_5 が上位10%内にあるものをHDG、下位10%内にあるものをLDGと定義する。HDG、LDGのいずれにも入らないものをmedium density galaxy (MDG)とした。従来、孤立銀河は銀河間距離に基づいて定義されてきたが (Allam 2004)、本研究でも $d_{\text{gg-min}}^3$ が相対的に上位10%内にあるものから孤立銀河 (extremely isolated galaxy: EIG)のグループを作成した。これらの概要をTable 1.にまとめておく。LDGのうち1,604個 (50%)はEIGと重複している。

以上の手続きにより、EIG、HDG、MDG、LDGおよび全銀河のカタログを作成した。Figure 1に $d_{\text{gg-min}}^3$ および D_5 の分布を、代表として最近傍の赤方偏移ビン ($0.0250 \leq z \leq 0.0375$)に対して示した。ある値で一つのピークを持ち、その両側では急に減少していくのは他の赤方偏移ビンでも同様であった。横軸を対数にとると対称に近い分布を示すが、Kolmogorov-Smirnov検定によれば正規分布と見なすことはできなかった。 $d_{\text{gg-min}}^3$ の中央値は1.76 Mpc、 D_5 の中央値は 1.61×10^{-2} Mpc⁻³であった。EIG、HDG、LDGがどの範囲に相当するかを同図に示しておく。 $d_{\text{gg-min}}^3$ が4.24 Mpcを超える銀河119個がEIGと判定され、また D_5 が 8.75×10^{-2} Mpc⁻³を超える銀河がHDGに、 2.20×10^{-3} Mpc⁻³を下回る銀河がLDGと判定された。両しきい値の比は40である。Table 2に各赤方偏移ビンに含まれる銀河数をまとめる。

3. 解析

3.1. 銀河の色と形態の赤方偏移依存性

Butcher & Oemler (1984)に倣い、各赤方偏移ビンで全銀河に対する青い銀河の割合 f_{blue} を、またGoto et al. (2003a)に従って晩期型銀河の割合 f_{late} を求め、対比させることにする。この時、後に見られるように両者は独立変数(赤方偏移および銀河数密度)に対して同符号の相関を示す。本研究では形態を2分類しているの、早期型銀河の割合は $f_{\text{early}} = 1 - f_{\text{late}}$ で与えられる。銀河の色の判定にはSDSSの u バンドと r バンドの等級差から求めた色指数 $u-r$ を用い、2.2以上のものを赤い銀河、それより小さいものを青い銀河と判定した(Goto et al. 2004)。形態は輝度中心集中度の逆数 $C_{\text{in}} = R_{50}/R_{90}$ を用い、0.4以上のものを晩期型、それより小さいものを早期型と定義する (Goto et al. 2003a, b)。ここで $R_{50}(R_{90})$ は撮像観測から求められた50 (90)%のペトロシアンフラックスが含まれる半径である。本論文では C_{in} を仮に形態指数 (morphology index)と呼ぶことにする。

Figure 2は全サンプル銀河、EIG、HDG、LDGにおけるビンごとの f_{blue} の赤方偏移依存性である。全銀河、HDGに関しては高い相関係数で正の相関、すなわち遠方の銀河ほど青いものの割合が高いという結果が得られた。元来、Butcher-Oemler効果とは銀河団に含まれる銀河の色に関する現象であるのに対して本研究ではある天域に含まれる銀河の色を調べたものであり、厳密には同一視できない。しかしながらHDGに関する結果から、この赤方偏移区間においてもButcher-Oemler効果と類似した現象が成り立っていると言うことができる。一方、EIGやLDGといった低密度領域の銀河においてもButcher-Oemler効果と同じ進化傾向を示すが、相関は弱く、その過程は必ずし

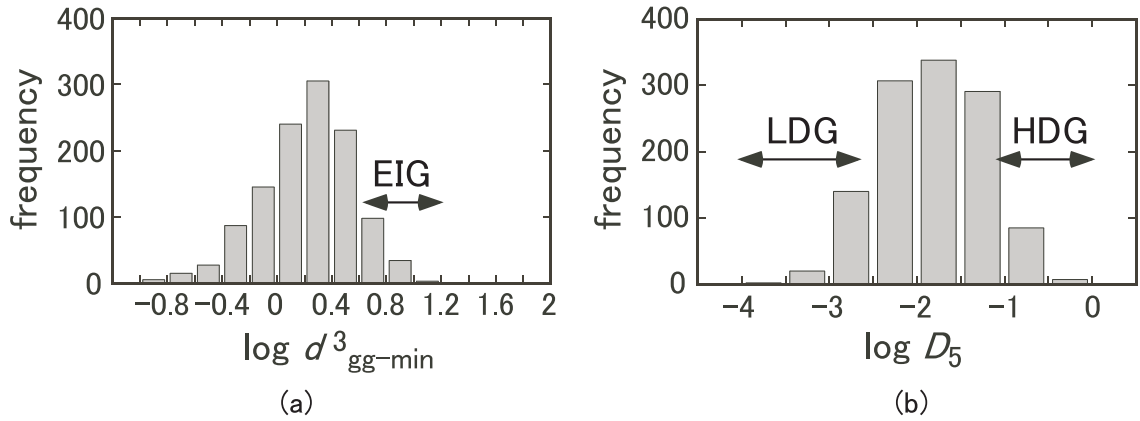
¹ EZRはRおよびRコマンドの機能を拡張した統計ソフトウェアであり、自治医科大学付属さいたま医療センターのホームページで無料配布されている。

Table 1. Summary of four subsamples.

subsample	derfinition	number of galaxies
EIG	top 10% galaxies for d_{gg-min}^3	3217
HDG	top 10% galaxies for D_5	3217
MDG	galaxies neither HDG nor LDG	25766
LDG	bottom 10% galaxies for D_5	3217

Table 2. Number of galaxies in each redshift bin.

redshift	EIG	LDG	MDG	HDG
0.0250-0.0375	119	119	952	119
0.0375-0.0500	207	207	1657	207
0.0500-0.0625	252	252	2022	252
0.0625-0.0750	518	518	4152	518
0.0750-0.0875	1140	1140	9128	1140
0.0875-0.1000	981	981	7855	981

**Fig. 1.** Distribution of (a) d_{gg-min}^3 and (b) D_5 for the galaxies in the redshift range $0.025 \leq z \leq 0.0375$.

も直線的ではなかった。また、HDGと比べてLDG、EIGの方が f_{blue} の値が高い、すなわち青い銀河の割合が高い。Figure 3は同様に f_{late} の赤方偏移依存性であるが、いずれのグループでも比較的高い相関係数で正の相関を示し、morphological Butcher-Oemler効果と類似した現象が確認された。 f_{blue} の場合と比べて低密度領域においても相関係数が高く、より明瞭な進化傾向を示した。また、いずれの赤方偏移においても低密度領域で f_{late} が高い、すなわち晩期型銀河の割合が高い。

以上、 $0.0250 \leq z \leq 0.1$ (ルックバックタイムにして約13億年以降)の近傍宇宙において、高密度領域、低密度領域のいずれでも銀河の色と形態の進化が統計的に見られたが、特に低密度領域では色の進化よりも形態の進化がより明瞭に表れていた。このことは近傍ではガスが消費された結果、色、あるいは関連して星生成の変化が鈍化している一方、重力に起因した銀河合体等による形態変化は続いている可能性を示唆する。

3.2. 銀河の色と形態の周囲銀河数密度依存性

サンプル銀河を対数密度 $\log D_5$ で0.5ごとにビン分けし、各対数密度ビンで f_{blue} 、 f_{late} を求めた。結果をFig.4に示す。明らかな負の直線的相関が得られた。すなわち、高密度領域で赤い早期型の銀河が多く、低密度領域で青い晩期型の銀河が多い。Dressler (1980)、Goto et al. (2003a)においても対数密度に対して直線に近い依存性が得られており、本結果はそれら先行研究とコンシステントである。低密度領域で若干の飽和傾向が見られるものの、約3桁の密度範囲にわたってほぼ一定の傾きで変化している。

距離区分 (EIGとそれ以外) と密度区分 (HDG, MDG, LDG) で色指数および形態指数の分布に違いがあるかを比較した。Figure 5は各赤方偏移ビンで距離区分ごとに色指数 $u-r$ 、形態指数 C_{in} を比較した箱ひげ図、Fig.6は密度区分ごとに比較した箱ひげ図である。広い範囲に分布しているが、中央値で見ると全ての赤方偏移ビンにおいてEIGはそれ以外 (non-EIG) と比べて色指数は小さく、形態指数は大きい。すなわち、青く、晩期型に寄った分布を示した。また、HDG、MDG、LDGの順に密度が低くなるに従い色指数は小さく、形態指数は大きくなり、青い晩期型に寄っていくことがわかる。これらの差が有意かどうかをノンパラメトリック検定 (e.g., 神田 2019; 内田 2017) により比較した (Table 3, 4)。距離区分に関してはMann-WhitneyのU検定、密度区分に関してはKruskal-Wallis検定を用いた。分布に差が無いことを帰無仮説としたときのp値はいずれの赤方偏移ビンにおいても十分に小さく、距離区分、密度区分に見られる色と形態の違いは有意であった。

3.3. 2次元時間-環境空間で見た銀河進化

Butcher-Oemler効果は時間軸上での銀河の変化を表したものであり、一方Dressler (1980)の得た結果は密度軸上での銀河変化を意味している。ここでは銀河の変化はいずれか1つのパラメータで記述できるものではなく、時間と環境の両者に依存するものとする。このような視点から、銀河進化の様相を時間 (赤方偏移) - 環境 (密度) の2次元空間上で解析した。赤方偏移を6個の区画に、対数密度を8個の区画に分け、総計48個のビンで目的変数 f_{blue} と f_{late} を求めた。そして、赤方偏移と対数密度を説明変数とした1次重回帰分析を行い、回帰平面を求めた。得られた回帰式は

$$f_{\text{blue}} = 0.18 + 1.91z - 0.119 \log D_5 \quad (1)$$

および

$$f_{\text{late}} = 0.046 + 1.96z - 0.085 \log D_5 \quad (2)$$

である。決定係数はそれぞれ0.90、0.86が得られた。偏回帰係数は赤方偏移と対数密度で符号が反対であり、逆方向に寄与している。Figures 7, 8(a)は回帰平面を含む f_{blue} 、 f_{late} の3D散布図、(b)は回帰平面の等高線図を示す。両図とも等高線の傾きは同じであり、右下 (過去で低密度の領域) へ行くほど青く、晩期型の銀河が多い。また、両図の(c)は回帰式(1)、(2)で求められた z と $\log D_5$ の線形結合を変数にとったときの f_{blue} 、 f_{late} の2D散布図であり、直線的な相関が確認できる。以上、 $z - \log D_5$ 平面における線形の重回帰分析により f_{blue} 、 f_{late} の統計的な予測が可能であることがわかった。

4. 考察

銀河特性の密度依存性を調べるに際し、従来ほとんどの研究で横軸として対数密度をとることが行われてきた。しかし、 f_{blue} 、 f_{late} が対数密度に直線的に依存するその起源について、必ずしも理論的説明がなされている訳ではない。Figure 4では3桁の密度にわたってほぼ直線的な関係が見られ、その間に折れ曲がりや飽和といったものは明瞭ではない。しかしながら、このような広範囲の密度領域で環境が銀河進化に影響する物理的機構が同一であるとは限らない。実際、Goto et al. (2003b)では依存傾向のわずかな変化から、3つの密度領域に分割してその機構を論じている。ここではFig.4の結果を異なる観点から再検討してみる。

Figure 9では横軸として第5近接銀河までの距離 r_5 をとり、ビン分けして f_{blue} 、 f_{late} の変化を調べた。 r_5 の大きいところではサンプルが少ないため、エラーが大きい。このようにプロットすると、密度領域を3つに分けることができる。すなわち、 r_5 が0-7 Mpc間の f_{blue} 、 f_{late} の変化が急な領域、7-12 Mpc間でゆるやかな領域、そして12 Mpc以上のほぼ一定になる領域である。銀河間隔が増えて低密度になるに従い環境効果が影響力を失っていく様子が見られる。

これから、まず第1の領域は銀河団のように銀河間高温プラズマが十分に存在するところで、動圧による銀河ガスのはぎとりといった効果が働き、また銀河間相互作用による形態変化も活発と考えられる。これに対して第3の領域ではもはや動圧が有効に働いておらず、色や形態の変化はほとんど見られない。第2の領域は両者を橋渡しする過渡的な範囲である。LDGの判定しきい値は $\log D_5 \approx -2.5$ で第2の領域にあり、LDGもそのほとんどがこのゆるやかに変化する領域に存在している。その結果、今回LDGにおいても f_{blue} 、 f_{late} の赤方偏移依存性と密度依存性が認められたものと考えられる。第3の領域はLDGあるいはEIGの中でも強く孤立した部分に対応している。

Figure 10は r_5 を横軸にとったときの銀河数ヒストグラムであり、3つの領域の範囲も示す。第3の領域に含まれる銀河は全体の0.9%、LDGのうち9.1%にすぎない。このように第3の領域の銀河をピックアップして統計的性質を求めるにはサンプル数が少なくエラーバーが大きいのが現状であり、より大きなデータベースの構築が望まれる。また、実際にどの程度の密度空間まで環境影響が存在す

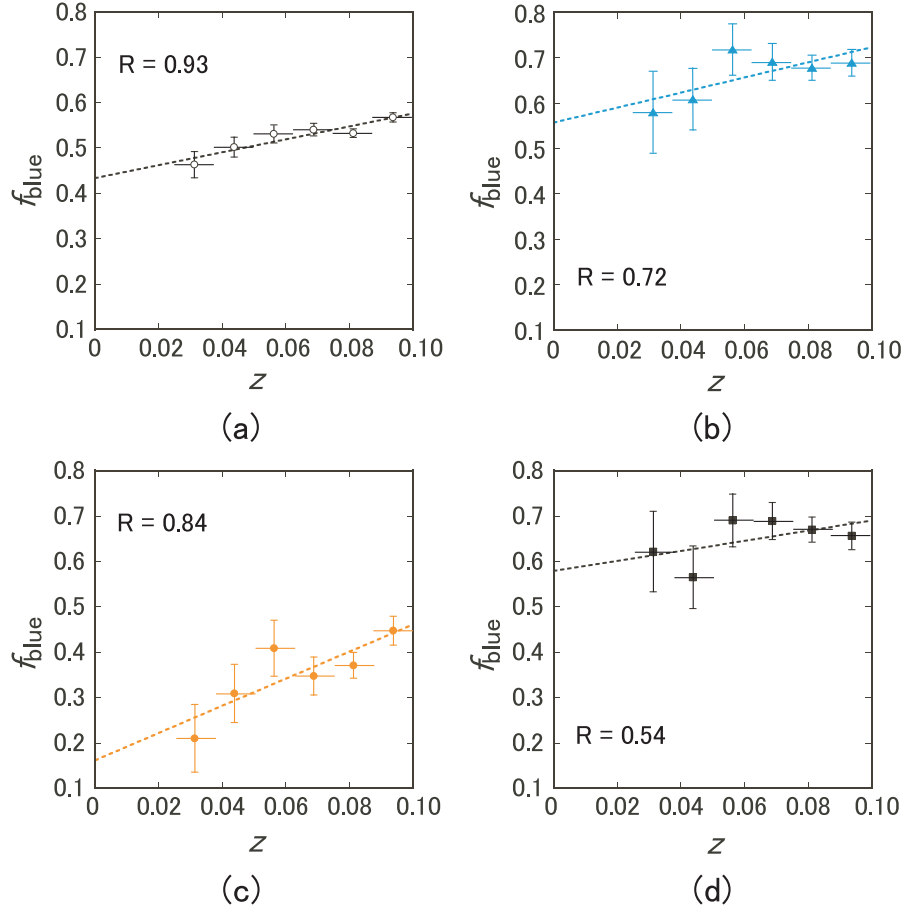


Fig. 2. Redshift dependence of f_{blue} for (a) all galaxies, (b) EIGs, (c) HDGs, and (d) LDGs in our sample. The vertical and the horizontal error bars show 95% confidence interval and bin width, respectively. The dashed lines show linear fitting and R is the correlation coefficient.

Table 3. Statistical test on color and morphology for EIG and non-EIG.

redshift	$u-r$			C_{in}		
	median		p-value	median		p-value
	non-EIG	EIG		non-EIG	EIG	
0.0250-0.0375	2.25	2.06	3.6×10^{-4}	0.345	0.383	1.8×10^{-3}
0.0375-0.0500	2.21	2.04	1.4×10^{-5}	0.348	0.364	2.8×10^{-4}
0.0500-0.0625	2.44	2.25	1.4×10^{-12}	0.356	0.383	5.4×10^{-7}
0.0625-0.0750	2.18	1.94	1.8×10^{-18}	0.363	0.394	1.1×10^{-17}
0.0750-0.0875	2.18	1.97	2.8×10^{-29}	0.367	0.393	5.5×10^{-21}
0.0875-0.1000	2.14	1.94	3.1×10^{-21}	0.372	0.394	8.3×10^{-19}

るかを明らかにするには、低密度領域までを視野に入れたプラズマ密度と温度の詳細な観測が必要である。

次に Figs. 7, 8 の $z - \log D_5$ 空間における解析結果について考える。等高線は右上がりに傾いていることから、 f_{blue} 、 f_{late} といった特性値は時刻と密度のいずれか一方ではなく、2つのパラメータの組み合わせによって説明される。すなわち、同時刻でも密度が異なれば f_{blue} 、 f_{late}

は異なり、同密度で時刻が異なっても同様である。ここで密度一定の水平な直線を考えてみると、密度の低い領域ほど時間軸の位相が遅れて変化していることがわかる。これを低密度領域で進化が遅れていると解釈すると、等高線の傾きから求めた1桁の密度差に対応する赤方偏移差 Δz はそれぞれ 0.062、0.044 であり、近傍宇宙における時間と赤方偏移の関係は比例 $\Delta t = \Delta z / H_0$ で近似すれば 8.5 億

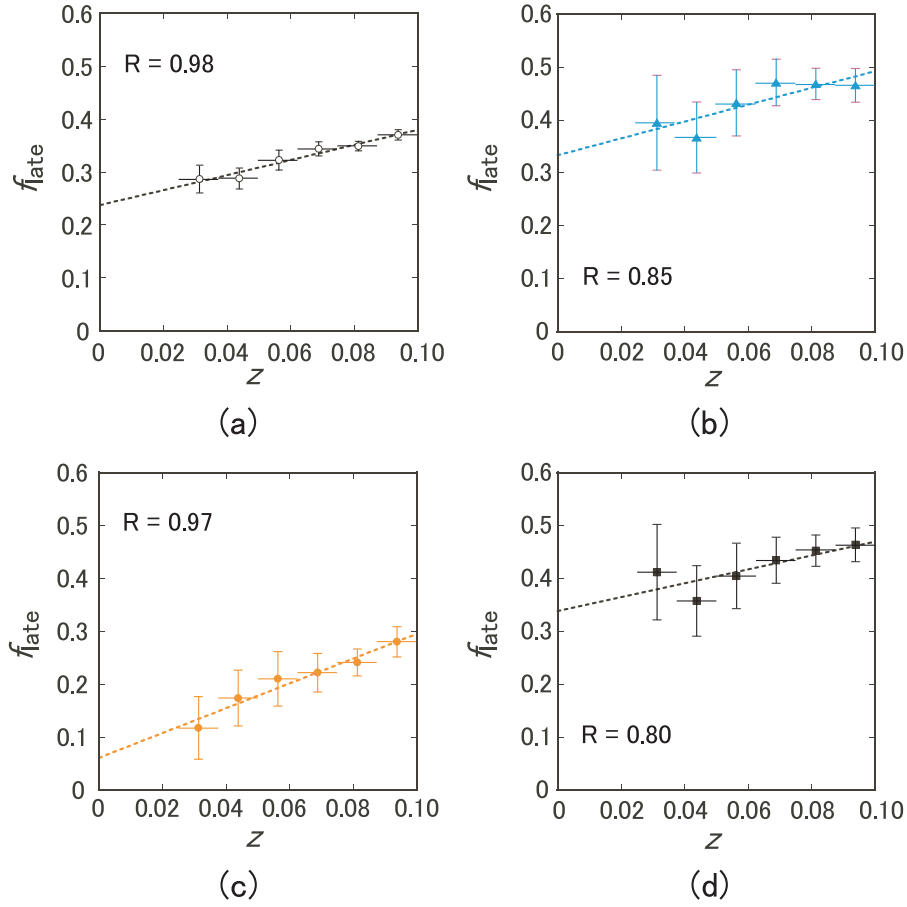


Fig. 3. Redshift dependence of f_{late} for (a) all galaxies, (b) EIGs, (c) HDGs, and (d) LDGs in our sample. The vertical and the horizontal error bars show 95% confidence interval and bin width, respectively. The dashed lines show linear fitting and R is the correlation coefficient.

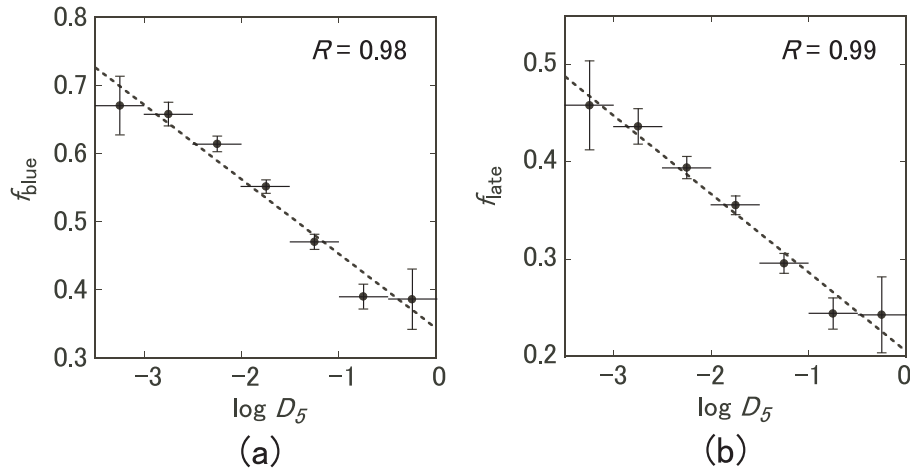


Fig. 4. (a) The color-density relation and (b) the morphology-density relation for the whole sample in the redshift range $0.025 \leq z \leq 0.100$. The vertical and the horizontal error bars show 95% confidence interval and bin size, respectively. The dashed lines show linear fitting. The correlation coefficient R is shown at the top-right corner of each panel.

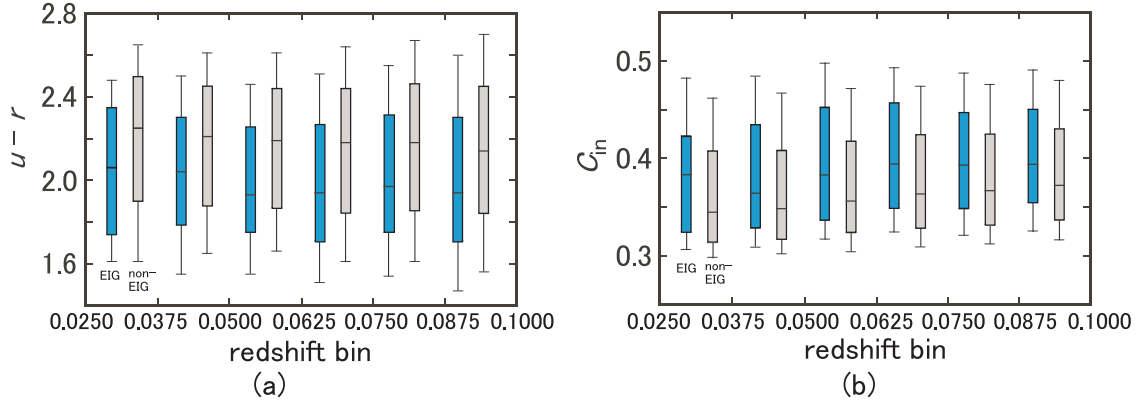


Fig. 5. The box plot of (a) the color index $u - r$ and (b) the morphology index C_{in} for EIG (blue) and non-EIG (grey) in each redshift (binned). For each redshift, the box is drawn between the first- and third quartiles, and the whisker shows the range between the 10th- and 90th percentile values.

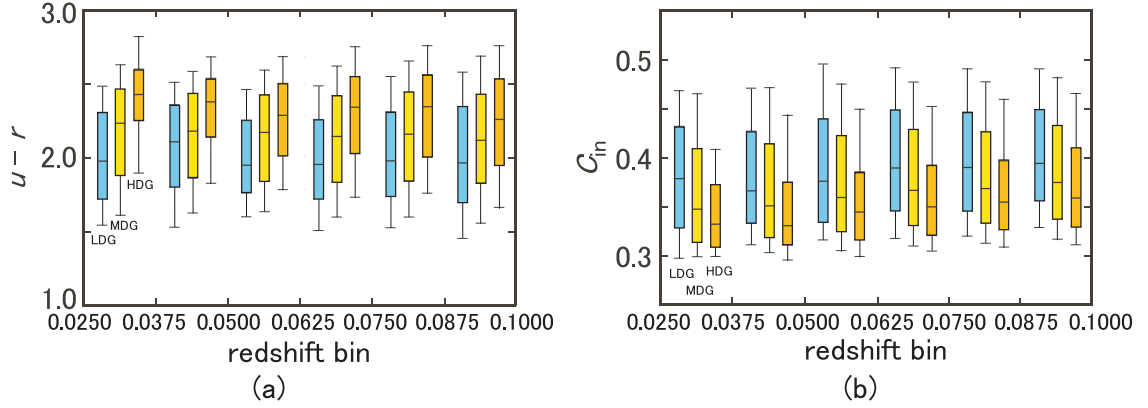


Fig. 6. The box plot of (a) the color index $u - r$ and (b) the morphology index C_{in} for LDG (sky blue), MDG (yellow), and HDG (orange) in each redshift (binned). For each redshift, the box is drawn between the first- and third quartiles, and the whisker shows the range between the 10th- and 90th percentile values.

Table 4. Statistical test on color and morphology for HDG, MDG, and LDG.

redshift	$u - r$			p-value	C_{in}			p-value
	median				median			
	HDG	MDG	LDG		HDG	MDG	LDG	
0.0250-0.0375	2.43	2.23	1.98	6.7×10^{-14}	0.332	0.347	0.379	6.5×10^{-5}
0.0375-0.0500	2.38	2.18	2.11	3.2×10^{-11}	0.331	0.351	0.366	1.3×10^{-8}
0.0500-0.0625	2.29	2.17	1.95	3.1×10^{-14}	0.345	0.359	0.376	4.2×10^{-7}
0.0625-0.0750	2.34	2.15	1.96	$< 2.2 \times 10^{-16}$	0.350	0.367	0.389	$< 2.2 \times 10^{-16}$
0.0750-0.0875	2.35	2.16	1.98	$< 2.2 \times 10^{-16}$	0.355	0.368	0.390	$< 2.2 \times 10^{-16}$
0.0875-0.1000	2.26	2.12	1.97	$< 2.2 \times 10^{-16}$	0.359	0.375	0.394	$< 2.2 \times 10^{-16}$

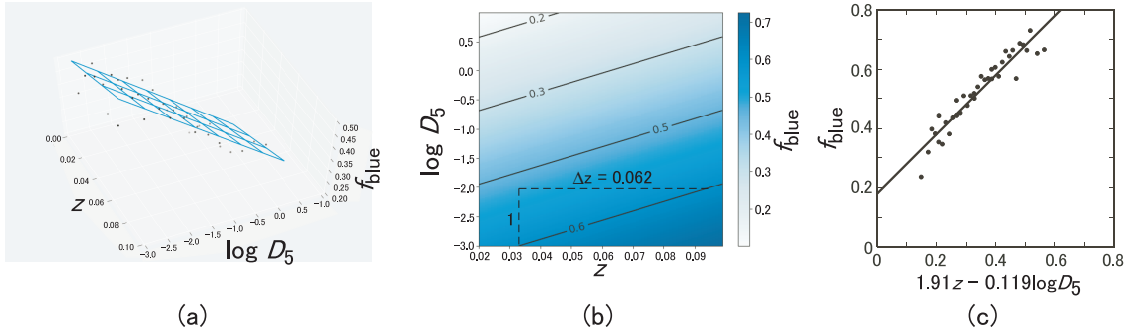


Fig. 7. (a) 3D scatter plot of f_{blue} in the $z - \log D_5$ space and the best-fit plane by the multiple regression analysis for all the galaxies in our sample. (b) Contour map of the best-fit plane. Δz is the redshift difference corresponding to the one-order difference of D_5 . (c) Scatter plot of f_{blue} against the transformed axis $1.91z - 0.119 \log D_5$.

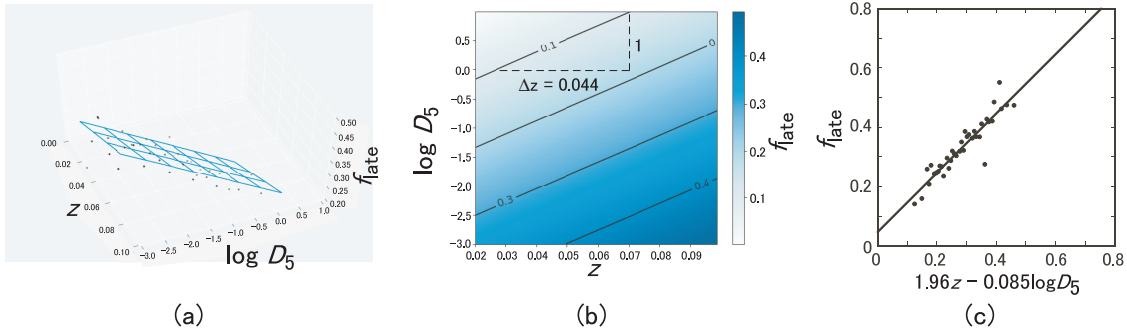


Fig. 8. (a) 3D scatter plot of f_{late} in the $z - \log D_5$ space and the best-fit plane by the multiple regression analysis for all the galaxies in our sample. (b) Contour map of the best-fit plane. Δz is the redshift difference corresponding to the one-order difference of D_5 . (c) Scatter plot of f_{late} against the transformed axis $1.96z - 0.085 \log D_5$.

年と6.0億年に相当する。本結果は、星生成の低下やダウンサイジングといった宇宙の大局的な変化に関連していると予想されるが、実際にこれらの値が現代の宇宙進化論と照らして定量的に妥当かどうかは今後の検討課題である。

5. まとめ

最新のSDSS DR14データベースから32,200個の近傍銀河をピックアップし、色と形態の時間発展と環境効果を調べた結果、以下の知見が得られた。

1. 近傍領域 $0.025 \leq z \leq 0.1$ においてもButcher-Oemler効果、morphological Butcher-Oemler効果と類似した関係が統計的に見られる。
2. 銀河数密度の低い領域においても同様な時間発展が見られたが、色よりも形態の変化が強い相関を示し、時間進化が明瞭であった。また、EIGとそれ以外、HDGとLDGなどの銀河区分間で色指数と形態指数に有意な差があった。
3. 色と形態の銀河数密度依存性を調べた結果、約3桁の密度範囲にわたって f_{blue} 、 f_{late} と対数密度の間に直線的な負の相関が見られた。横軸として r_5 をとると、依存性の異なる3つの密度領域の区分けが明瞭になり、低密度領域で環境効果が弱くなっていく様子が見られた。

4. 時間-環境の2次元空間中での銀河進化の解析から、銀河の色と形態は赤方偏移、密度の2変数が関係していることが示された。1桁の密度差から見積もられた進化の時間差は6-8億年に相当する。

大規模なデータの蓄積を利用することにより、各種環境下の銀河進化の様子を統計的に調べることができた。今回の分類では低密度領域にある銀河も時間進化し、環境影響を受けることが統計的に示された。99%の銀河は環境効果の働く領域に存在している。なお、SDSSの分光限界等級はMAINカテゴリで17.8等級であり、本研究もこの制限の下で行われた。伴銀河、矮小銀河などのより暗い銀河までを含めた距離、密度の算出および統計的性質の議論には、SDSSを超える銀河サーベイへの期待が大きい。低密度領域で実際にどのような物理過程が働いているかの解明には、そのような領域にフォーカスした詳細な観測が別途必要である。

References

- Abolfathi, B. et al. 2018, ApJS, 235, 42
 Allam, S. S. et al. 2004, preprint (arXiv:astro-ph/0410172v1 6)
 Beygu, B. et al. 2017, MNRAS, 464, 666
 Blanton, M. R. et al. 2017, AJ, 154, 28
 Butcher, H. & Oemler, A. 1984, ApJ, 285, 426

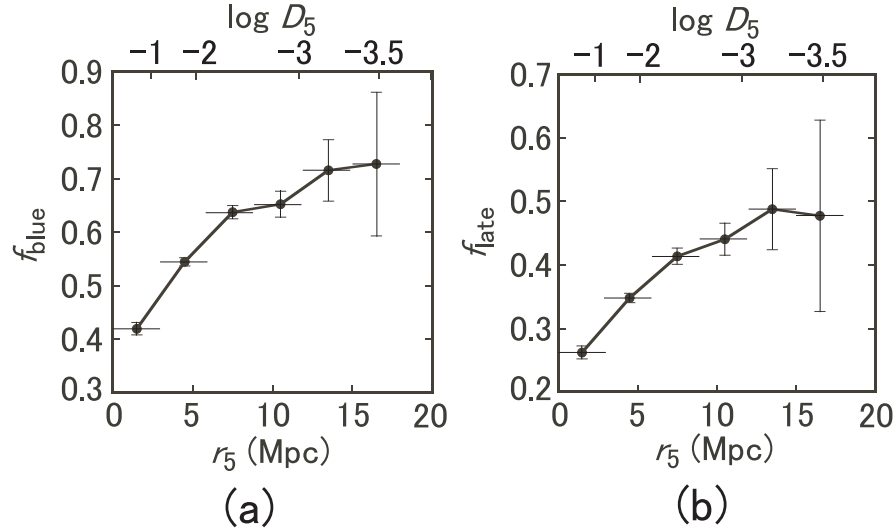


Fig. 9. (a) The f_{blue} and (b) the f_{late} as a function of r_5 for the whole sample in the redshift range $0.025 \leq z \leq 0.100$. The corresponding $\log D_5$ is shown on the top axis. The vertical and the horizontal error bars show 95% confidence interval and bin width, respectively.

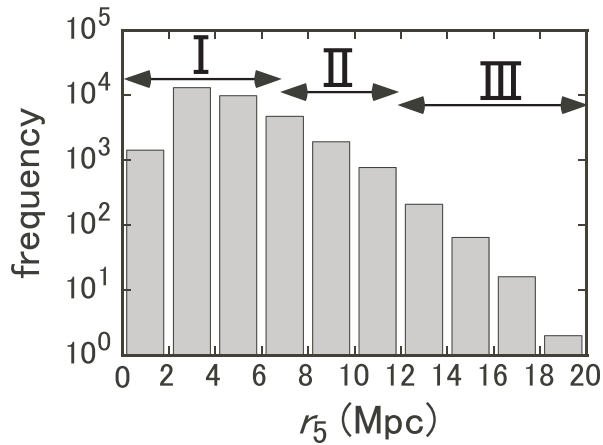


Fig. 10. Distribution of r_5 for the whole sample in the redshift range $0.025 \leq z \leq 0.100$. The r_5 ranges shown with I, II and III corresponds to the three regions defined based on the slopes in Fig. 9 (see Section 4).

Taniguchi, Y. 1999, ApJ, 524, 65

谷口義明 2016, 天文月報, 109, 339

van de Weygaert, R. et al. 2011, preprint (arXiv:101.4187v1)

York, D. G. et al. 2000, AJ, 120, 1579

神田善伸 2019, EZRでやさしく学ぶ統計学, 中外医学社

内田治 2017, Rによるノンパラメトリック検定, オーム社

Couch W. J. et al. 1994, ApJ, 430, 121

Dressler, A. 1980, ApJ, 236, 351

Dressler, A. et al. 1997, ApJ, 490, 577

Farouki, R. & Shapiro, S. L. 1980, ApJ, 241, 928

Goto, T. et al. 2003a, PASJ, 55, 739

Goto, T. et al. 2003b, MNRAS, 346, 601

Goto, T. et al. 2004, MNRAS, 348, 515

Gunn, J. E. & Gott, J. R. 1972, ApJ, 176, 1

Hirschmann, M. et al. 2013, MNRAS, 433, 1479

Kanda, Y. 2013, Bone Marrow Transplant, 48, 452

Kauffmann, G. et al. 2004, MNRAS, 353, 713

Kreckel, K. et al. 2012, AJ, 144, 16

Margoniner, V. E. & de Carvalho, R. R. 2000, AJ, 119, 1562

Rakos, K. D. & Schombert, J. M. 1995, ApJ, 439, 47

Spergel, D. N. et al. 2004, ApJS, 148, 175

Strauss, M. A. et al. 2002, ApJ, 124, 1810

Taniguchi, Y. & Wada, K. 1996, ApJ, 469, 581