

SDSS システムにおける渦巻銀河の内部減光量補正

石井 菜摘^{*1}・千葉 督^{*1}・西浦 慎悟^{*2}

宇宙地球科学分野

(2019年5月30日受理)

ISHII, N., CHIBA, O., and NISHIURA, S.: Correction of Internal Extinction of the Spiral Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) System. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 71: 75–92 (2019) ISSN 2434–9380

Abstract

In this paper, we report the internal extinction of the spiral galaxies in Sloan Digital Sky Survey (= SDSS) filter system, u -, g -, r -, i -, z -bands, and their colors, $u-r$, $g-r$, $g-i$, $r-i$ for each Hubble type. The internal extinctions that we obtained in this work were consistent with the results of the previous studies for the early type spirals (Sa-Sbc) and late type Sc spirals. Our results for the late type Scd and Sd spirals, however, were much larger than those of previous ones. The small sample of the Scd and Sd spirals may be the cause of it difference. Generally, in the spiral galaxies, as their Hubble types become late, their brightness and size of bulge to disk become faint and small. Furthermore, the winding of the spiral arms of the late-type spiral galaxies are looser than those of the early-type ones. Unlike the early-type spirals, by these natures, the aparent axis ratio of the later Scd and Sd spirals may not represent their inclination angles of the galaxy disks.

Keywords: spiral galaxies, galaxy disk, dust, ISM, internal extinction, Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo, 184-8501, Japan.

要旨: スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (Sloan Digital Sky Survey = SDSS) のフィルター・システム u -, g -, r -, i -, z バンド, および, カラー $u-r$, $g-r$, $g-i$, $r-i$ における, 渦巻銀河の内部減光量をハッブル形態毎に導出した。本研究で得られた内部減光量は, 早期型渦巻銀河 (Sa型-Sbc型) と晚期型渦巻銀河の Sc型においては, 先行研究の結果とほぼ一致する傾向が見られた。これに対して, Scd型+Sd型の晚期型渦巻銀河においては, 先行研究より誤差の範囲以上に大きな値となった。他のハッブル形態に比べて, Scd型+Sd型のサンプル数の小ささは, この違いを生じさせる一因であろう。さらに, 一般的な渦巻銀河の性質は, 早期型から晚期型に向かって, 銀河円盤に対するバルジの輝度とサイズは暗く小さくなり, また, 渦巻腕の巻き付きは緩くなる。この渦巻銀河の性質によって, 早期型渦巻銀河の見かけ上の軸比に比べて, 晚期型渦巻銀河の見かけ上の軸比が, その銀河円盤の傾き角を十分に反映していない可能性も考えられる。

* 1 東京学芸大学 大学院 教育学研究科 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

* 2 東京学芸大学 自然科学系 広域自然科学講座 宇宙地球科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

1. はじめに

銀河から放射された電磁波は、観測者に届くまでに、その銀河自身や我々の銀河系が持つガスやダストといった星間物質、そして地球大気によって吸収・散乱されて減光を受ける。銀河自身を持つ星間物質による減光を内部減光、銀河系内の星間物質による減光を銀河系減光（または銀河吸収）、そして、地球大気による減光を大気減光という。ガスやダストといった星間物質による可視光の吸収・散乱は、短波長側でより大きくなるため、観測される銀河のカラーは、その銀河本来のカラーよりも赤くなる。従って、銀河本来の輝度やカラーを得るためには、これらの減光効果をそれぞれ補正しなければならない。

大気減光は、測光標準星や分光標準星といった明るさやスペクトルが既知である天体を観測することで補正される。また、銀河系減光は、ダストとガスの柱密度比を一定と仮定し、全天の中性水素ガス分布から求められた全天のダスト柱密度分布 (Burstein & Heiles 1982) や、赤外線観測衛星 *IRAS* による $100\mu\text{m}$ ISSA (*IRAS Sky Survey Atlas*) マップと *COBE/DIRBE* による $100, 200\mu\text{m}$ マップを組み合わせて得られたダストの柱密度分布 (Schlegel *et al.* 1998) を用いることで補正が可能である。しかし、大気減光、銀河系減光に比べて、内部減光の補正は複雑である。

一般的に楕円銀河は、ほとんど星間物質を持っておらず、内部減光はほとんど無いか非常に小さいと考えられる (例えば, Gavazzi & Boselli 1996)。その一方で、渦巻銀河の銀河円盤には、現在でも活発な星形成が行われているほど豊富な星間物質が存在しており、内部減光の影響は無視できず、また、渦巻銀河の恒星に対する星間物質の存在比は、分散は大きいながらもハッブル形態に依存することが知られている (例えば, Roberts & Haynes 1994)。加えて、全く同じ銀河であっても、観測者に対するその銀河円盤の傾き角によって、銀河円盤を見通す幾何学的・光学的距離が変わるため、銀河の内部減光は、観測者に対する銀河の傾き角にも依存する (図1参照)。

銀河円盤中のダストによる内部減光の解析は、Holmberg (1958) によって始められたが、その初期には、しばしば、銀河円盤は光学的に透明であると仮定され (Holmberg 1958; 1975, de Vaucouleurs 1959)、その後、銀河円盤の光学的透明性について多くの議論が行われてきた (Holmberg 1958, Disney *et al.* 1989, Burstein, *et al.* 1991, Bosma *et al.* 1992, Disney 1992,

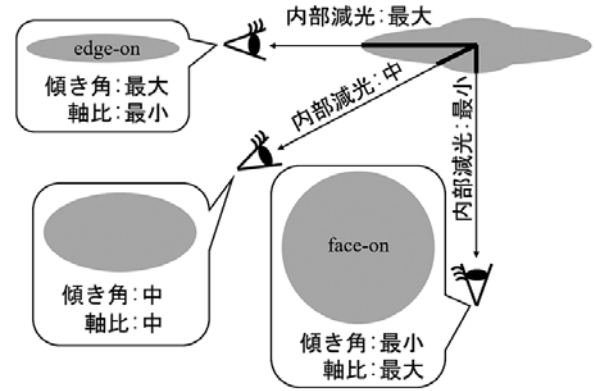


図1 銀河の傾き角・軸比と内部減光の概念図

Valentijn 1994, Kyllafis *et al.* 2001, Holwerda *et al.* 2005)。Burstein *et al.* (1991) 等により、銀河円盤の傾き角の増大に伴って銀河が暗く赤くなることがほぼ確立されると、様々な手法による、銀河の内部減光の補正が試みられるようになった (Giovanelli *et al.* 1994, Berlind *et al.* 1997, Verheijen 2001, Kauffman *et al.* 2003, Holwerda *et al.* 2005, Rocha *et al.* 2008)。その中でも、渦巻銀河の傾き角と内部減光による赤化に注目した手法では、その早い時期に de Vaucouleurs *et al.* (1991) や Han (1992) によって、内部減光が銀河の形態に依存することが提唱された。Boselli & Gavazzi (1994) や Giovanelli (1995), Tully *et al.* (1998) 等は、内部減光を軸比の対数値の1次関数として表したが、Masters *et al.* (2003) では、単純な1次関数ではなく、軸比の範囲を分けたフィッティングや2次関数によるフィッティングを試み、また、内部減光が銀河の光度に依存することを示した。

Sloan Digital Sky Survey (= SDSS) は、北天で観測可能な銀河の空前の大規模サーベイである。SDSS システムによる銀河の内部減光の研究は、Shao *et al.* (2007), Padilla *et al.* (2008), Unterborn & Ryden (2008) などによって行われ、特に Cho & Park (2009) では、内部減光は銀河の形態を反映した中心集中度と光度の両方に依存することが示唆された。この研究では、SDSS システムの r バンドのみに対する内部減光量の補正式が提案されている。SDSS は高い均一性と測光精度を持つ大規模なデータであり、現代の銀河研究には欠かせない基礎的な観測データである。これを有効に活用するためには、任意の SDSS のフィルターバンドにおける、任意の銀河に対する内部減光の補正が必要不可欠である。そこで、本稿では、SDSS の渦巻銀河データを用い、SDSS システムにおける任意のカラーとバンドに対する内部減光の補正方法について報告する。第2章では、カラーに対する内部減光補

正の原理について説明し, 第3章ではサンプルとデータ, 第4章では, SDSS のカラーと各等級に対して導出した補正係数を示し, 第5章ではそれらの妥当性について議論する。

2. 内部減光補正の原理

前述したように, 銀河の内部吸収はその傾き角に依存する。銀河円盤を face-on で観測した際の形態が円であると仮定すると, その見かけ上の軸比 a/b は傾き角の関数となるため, 銀河の内部吸収はその見かけ上の軸比に依存することになる。ここで, 観測波長 λ における銀河本来の輝度を等級 $m_{\lambda, \text{int}}$, これが内部吸収を受けて観測される輝度を等級 $m_{\lambda, \text{obs}}$ として, 銀河の内部減光量を軸比の対数値の1次関数とすると,

$$m_{\lambda, \text{obs}} - m_{\lambda, \text{int}} = \beta_{\lambda} \log(a/b) \quad (\text{式1})$$

と表される (例えば, Disney *et al.* 1989)。ここで β_{λ} は銀河の光度や形態などに依存するパラメーターであり, 本稿では, 以降, これを内部減光等級補正係数と呼ぶ。

さらに, 観測波長 λ' ($\lambda < \lambda'$) に対する,

$$m_{\lambda', \text{obs}} - m_{\lambda', \text{int}} = \beta_{\lambda'} \log(a/b) \quad (\text{式2})$$

を, (式1)から辺々差し引くことで,

$$(m_{\lambda, \text{obs}} - m_{\lambda', \text{obs}}) - (m_{\lambda, \text{int}} - m_{\lambda', \text{int}}) = (\beta_{\lambda} - \beta_{\lambda'}) \log(a/b) \quad (\text{式3})$$

が得られる。(式3)の左辺に対して, 波長 λ , λ' における銀河本来のカラーを $(\text{col}[\lambda, \lambda'])_{\text{int}} = m_{\lambda, \text{int}} - m_{\lambda', \text{int}}$, 内部減光を受けた後に観測される銀河のカラーを $(\text{col}[\lambda, \lambda'])_{\text{obs}} = m_{\lambda, \text{obs}} - m_{\lambda', \text{obs}}$ と表すことができることから, $\alpha_{\lambda, \lambda'} = \beta_{\lambda} - \beta_{\lambda'}$ とすると, 結局, (式3)は,

$$(\text{col}[\lambda, \lambda'])_{\text{obs}} - (\text{col}[\lambda, \lambda'])_{\text{int}} = \alpha_{\lambda, \lambda'} \log(a/b) \quad (\text{式4})$$

と表される。本稿では, 以降, $\alpha_{\lambda, \lambda'}$ を内部減光色補正係数と呼ぶ。

従って, 光度や形態などがほぼ均一であり, かつ, 様々な軸比を持つ渦巻銀河のサンプルを収集し, そのカラーと軸比の相関関係を調べることで, 内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda, \lambda'}$ を導出することが可能となる。そして, 特定の波長 λ' における内部減光等級補正係数 $\beta_{\lambda'}$ を決めることができれば, 内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda, \lambda'}$ と合わせて, 波長 λ における β_{λ} を算出できる。

3. サンプルおよびデータ

3.1 測光データと軸比

SDSS システムにおける渦巻銀河の内部減光量を導出するためには, ハッブル形態, SDSS システムによる測光データ, 軸比, が必要である。そこでまず, ハッブル形態による銀河の形態分類が記された Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (= RC3, de Vaucouleurs *et al.* 1991) から, 棒構造を持たない Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd, Sd 型に対応する 15180 渦巻銀河を抽出した。なお, 銀河のハッブル形態はその諸性質と密接に関連しているため, 以降, 本研究では, 渦巻銀河を Sa 型 + Sab 型, Sb 型 + Sbc 型, Sc 型, Scd 型 + Sd 型の4つのグループに分けて議論する。

次にこの中から, SDSS Data Release 14 (SDSS DR14, Abolfathi *et al.* 2018) によって, u, g, r, i, z の各バンドで model magnitude の値が得られており, $u-r, g-r, g-i, r-i$ の4つのカラーが算出できる 2396 個の渦巻銀河を選び出し, これらの SDSS の r バンド画像もしくは RC3 から軸比 a/b を抽出した。なお, SDSS における model magnitude とは, r バンド画像を用いて銀河の表面輝度プロファイル・フィットを行い, これ決められた開口サイズ (aperture size) によって測光された等級値である。

また, 各ハッブル形態のサンプルにおいて, 渦巻銀河の光度 (そして質量やサイズなど) がほぼ均一となるように, Two Micron All Sky Survey (= 2MASS) から, 近赤外線 K_s バンドの total magnitude を用いて, K_s バンドの絶対等級 M_{K_s} を算出した。この際に各サンプル銀河までの距離が必要となるが, これらは, NASA Extragalactic Database (= NED, <https://ned.ipac.caltech.edu>) を参照した。そして, ハッブル形態 Sa 型 + Sab 型と Sb 型 + Sbc 型のサンプルについては $-25 \leq M_{K_s} \leq -23$, Sc 型と Scd 型 + Sd 型については, $-24 \leq M_{K_s} \leq -22$ となる渦巻銀河を選出した。

最終的な渦巻銀河サンプルとして, Sa 型 + Sab 型 38 個, Sb 型 + Sbc 型 90 個, Sc 型 70 個, Scd 型 + Sd 型 24 個を得た。これらサンプル銀河のデータをハッブル形態毎に, 表 1a-1d に示した。

3.2 銀河系減光

前述したように, 銀河から放射された電磁波は, 内部減光と銀河系減光を受けて観測される。そのため, 銀河の内部減光を見出すためには, それに先立って, 銀河系減光の効果を補正しなければならない。波長 λ における銀河系減光量を A_{λ} とすると(式1)は,

表 1a : Sa 型 + Sab 型 サンプルデータ

銀河名	ハッブル形態	軸比	距離 (Mpc)	SDSS(model magnitude)				2MASS				銀河系減光 (mag)				
				u	g	r	i	z	H	Ks	total (mag)	A _u	A _g	A _r	A _i	A _z
MCG-1-3-64	Sa	0.68	73	16.11	14.11	13.21	12.77	12.46	12.51	12.18	10.01	0.449	0.350	0.242	0.180	0.134
MCG 0-32-10	Sa	0.58	102.1	16.26	14.87	14.18	13.80	13.55	13.90	13.48	11.46	0.162	0.127	0.088	0.065	0.048
UGC 6523	Sa	0.94	79.8	18.34	16.80	16.01	15.63	15.32	12.59	12.13	9.92	0.124	0.097	0.067	0.050	0.037
UGC 12225	Sa	0.69	66.5	16.20	14.37	13.51	13.10	12.79	12.33	12.03	10.51	0.308	0.240	0.166	0.123	0.092
UGC 5525	Sa	0.37	15.1	14.39	12.38	11.43	10.93	10.56	10.47	9.99	7.28	0.131	0.102	0.071	0.052	0.039
UGC 7497	Sa	0.79	34	14.08	12.03	11.15	10.76	10.47	11.07	10.30	8.51	0.070	0.054	0.038	0.028	0.021
UGC 7310	Sa	0.35	32	14.60	12.63	11.72	11.30	11.02	11.73	11.00	8.40	0.079	0.062	0.043	0.032	0.024
UGC 7292	Sa	0.5	34.6	14.80	12.74	11.76	11.29	11.02	11.73	11.11	8.61	0.103	0.080	0.055	0.041	0.031
UGC 9903	Sa	0.81	27.9	14.46	12.91	12.08	11.71	11.42	11.19	10.70	9.16	0.207	0.161	0.111	0.083	0.062
UGC 6614	Sa	0.94	86.2	16.20	14.43	13.60	13.22	12.90	12.58	12.18	10.94	0.120	0.093	0.065	0.048	0.036
UGC 1931	Sa	0.85	56.9	15.38	13.35	12.37	11.86	11.59	11.52	10.96	9.02	0.578	0.458	0.317	0.235	0.175
UGC 5559	Sa	0.35	16.4	13.94	12.01	11.05	10.61	10.25	10.17	9.70	7.46	0.106	0.083	0.057	0.043	0.032
UGC 4458	Sa	0.89	63.9	14.78	13.09	12.36	11.98	11.67	11.38	11.34	9.31	0.147	0.114	0.079	0.059	0.044
UGC 10752	Sa	0.52	92.9	15.56	13.77	12.95	12.51	12.17	11.52	10.94	9.81	0.227	0.216	0.149	0.111	0.082
UGC 398	Sa	0.79	65.3	15.70	14.34	13.70	13.35	13.13	14.54	13.45	10.82	0.179	0.139	0.096	0.072	0.053
MCG 5-27-10	Sa	1.00	120.2	16.32	14.19	13.26	12.84	12.49	12.26	11.83	10.47	0.123	0.096	0.067	0.049	0.037
UGC 8764	Sa	0.49	35.6	14.50	12.58	11.72	11.28	11.07	11.00	10.80	8.88	0.066	0.052	0.036	0.026	0.020
UGC 4544	Sa	0.4	46.1	14.04	12.19	11.29	10.92	10.55	10.99	10.63	8.40	0.100	0.078	0.054	0.040	0.030
UGC 6676	Sa	0.46	78.2	16.03	14.08	13.13	12.61	12.25	12.06	11.60	9.94	0.093	0.072	0.050	0.037	0.028
ESO 474-6	Sab	0.22	52.7	15.95	14.02	13.16	12.69	12.42	12.38	11.98	10.20	0.096	0.075	0.052	0.038	0.029
UGC 4492	Sab	0.81	53.1	15.26	13.37	12.49	12.07	11.82	12.78	12.54	9.08	0.184	0.144	0.099	0.074	0.055
UGC 8078	Sab	0.48	15.9	15.04	13.20	12.04	11.41	10.86	11.08	10.28	7.79	0.084	0.065	0.045	0.034	0.025
UGC 6111	Sab	0.34	131	17.01	15.46	14.66	14.22	13.92	14.20	13.64	11.76	0.219	0.171	0.118	0.088	0.065
UGC 6066	Sab	0.39	160.2	16.98	15.01	14.16	13.75	13.45	12.94	12.45	10.96	0.121	0.094	0.065	0.048	0.036
UGC 6072	Sab	0.92	144.5	16.98	15.07	14.28	13.87	13.61	13.58	13.44	11.87	0.129	0.100	0.069	0.052	0.038
UGC 241	Sab	0.65	72.1	15.22	13.99	12.92	12.92	12.65	13.57	13.16	10.36	0.321	0.243	0.168	0.125	0.093
UGC 7240	Sab	0.86	107.2	16.02	14.22	13.41	13.04	12.74	13.16	12.76	10.56	0.169	0.132	0.091	0.068	0.050
UGC 4864	Sab	0.97	113.3	16.20	14.35	13.45	13.02	12.72	12.91	12.60	10.21	0.135	0.105	0.073	0.054	0.040
UGC 7594	Sab	0.74	26.2	13.48	11.57	10.71	10.28	10.00	10.52	10.46	7.05	0.118	0.092	0.064	0.047	0.035
UGC 365	Sab	0.25	65.5	16.03	13.80	12.58	11.96	11.53	11.75	11.31	9.24	0.126	0.098	0.068	0.051	0.038
UGC 94	Sab	0.71	65.2	15.53	14.09	13.40	13.05	12.81	14.01	13.48	10.42	0.162	0.127	0.088	0.065	0.048
UGC 7791	Sab	0.53	105.2	16.24	14.38	13.51	13.08	12.75	12.59	12.15	10.64	0.074	0.058	0.040	0.030	0.022
UGC 11914	Sab	0.83	16	13.60	11.68	10.83	10.22	10.01	10.67	10.12	6.83	0.375	0.292	0.202	0.150	0.112
UGC 9133	Sab	0.58	54	14.43	12.62	11.77	11.35	11.04	11.18	10.80	8.80	0.063	0.049	0.034	0.025	0.019
UGC 8099	Sab	0.93	64.5	14.48	12.71	12.03	11.70	11.39	12.37	12.14	9.51	0.063	0.049	0.034	0.025	0.019
UGC 6060	Sab	0.84	90.8	15.66	13.93	13.21	12.82	12.58	13.31	12.96	10.69	0.051	0.040	0.028	0.021	0.015
PGC 033069	Sab	0.53	158.2	16.65	15.22	14.59	14.24	13.99	14.61	14.28	11.78	0.134	0.104	0.072	0.053	0.040
PGC 034842	Sab	0.37	154.9	17.51	15.85	15.04	14.61	14.25	14.08	13.78	12.20	0.282	0.220	0.152	0.113	0.084

表 1b: Sb 型+Sbc 型サンプルデータベース

銀河名	ハップル形態	軸比	距離 (Mpc)	SDSS(model magnitude)				2MASS				銀河系減光 (mag)					
				<i>u</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>H</i>	<i>K_s</i>	<i>K_s</i>	<i>K_s</i>	<i>A_u</i>	<i>A_g</i>	<i>A_r</i>	<i>A_i</i>	<i>A_z</i>
MCG-3-28-31	Sb	0.81	51	14.92	13.55	12.79	12.51	12.13	12.8	12.2	12.2	9.8	0.208	0.162	0.112	0.083	0.062
MCG-2-6-15	Sb	0.81	64.8	15.01	13.17	12.26	11.84	11.53	12.1	11.7	11.7	9.5	0.121	0.094	0.065	0.048	0.036
MCG-2-59-12	Sb	0.48	31.9	14.23	12.40	11.59	11.15	10.83	12.1	11.6	11.6	7.6	0.155	0.121	0.083	0.062	0.046
MCG-1-2-25	Sb	0.54	85.1	15.66	14.20	13.48	13.12	12.88	13.9	13.4	10.8	10.8	0.190	0.148	0.103	0.076	0.057
MCG-1-5-8	Sb	0.4	25.7	14.42	12.44	11.58	11.15	10.85	10.9	10.4	8.6	8.6	0.137	0.106	0.074	0.055	0.041
MCG-1-32-41	Sb	0.29	37.3	15.40	13.71	12.83	12.29	11.88	11.7	11.0	9.5	9.5	0.126	0.098	0.068	0.051	0.038
MCG-1-6-4	Sb	0.49	73.2	15.27	13.31	12.44	12.05	11.75	12.6	12.4	9.7	9.7	0.120	0.094	0.065	0.048	0.036
MCG-1-1-12	Sb	0.31	80.3	16.50	14.76	13.84	13.29	12.86	13.2	12.6	10.3	10.3	0.155	0.121	0.084	0.062	0.046
UGC 476	Sb	0.87	56.9	14.75	13.63	12.87	12.48	12.17	12.5	12.0	9.7	9.7	0.113	0.088	0.061	0.045	0.034
UGC 11695	Sb	0.57	134.6	15.57	14.15	13.24	12.91	12.51	13.9	13.4	10.6	10.6	0.320	0.249	0.172	0.128	0.095
UGC 7487	Sb	0.77	103.4	16.33	14.79	14.11	13.75	13.46	14.5	14.1	11.4	11.4	0.122	0.095	0.066	0.049	0.036
UGC 8645	Sb	0.68	91.9	15.67	14.10	13.37	12.96	12.67	13.1	12.6	10.0	10.0	0.117	0.091	0.063	0.047	0.035
UGC 7057	Sb	0.35	84.1	16.13	14.14	13.21	12.72	12.32	12.8	12.2	9.8	9.8	0.097	0.075	0.052	0.039	0.029
UGC 2374	Sb	0.62	41.8	14.87	13.34	12.56	12.14	11.89	12.1	11.6	9.9	9.9	0.452	0.352	0.244	0.181	0.135
UGC 5980	Sb	0.83	48.1	14.88	13.53	12.73	12.36	12.13	12.1	11.6	9.8	9.8	0.193	0.151	0.104	0.077	0.058
UGC 3294	Sb	0.54	55.7	14.94	13.25	12.40	11.96	11.62	12.7	12.1	9.8	9.8	0.439	0.342	0.237	0.176	0.131
UGC 1395	Sb	0.79	72.3	15.93	14.27	13.44	13.04	12.69	13.0	12.3	10.3	10.3	0.309	0.241	0.166	0.124	0.092
UGC 12539	Sb	0.4	53.5	15.40	13.67	12.85	12.41	12.14	13.1	12.5	9.9	9.9	0.309	0.241	0.166	0.124	0.092
UGC 12760	Sb	1	24.8	13.86	12.23	11.40	11.05	10.84	11.1	10.9	8.6	8.6	0.234	0.182	0.126	0.094	0.070
UGC 5808	Sb	0.9	107.2	16.17	14.49	13.97	13.63	13.98	14.4	14.1	11.4	11.4	0.121	0.094	0.065	0.048	0.036
UGC 7520	Sb	0.54	33.8	13.52	11.99	11.28	10.90	10.65	11.7	11.1	8.0	8.0	0.141	0.110	0.076	0.056	0.042
MCG 3-41-28	Sb	0.71	170.3	16.58	14.87	14.04	13.63	13.32	13.1	12.6	11.1	11.1	0.161	0.125	0.087	0.064	0.048
MCG 3-41-68	Sb	0.47	128.5	16.78	15.36	14.64	14.29	14.03	14.3	14.0	12.2	12.2	0.151	0.118	0.082	0.061	0.045
UGC 12808	Sb	0.95	59.9	14.28	12.87	12.08	11.67	11.35	11.6	11.4	8.9	8.9	0.315	0.245	0.170	0.126	0.094
UGC 6754	Sb	0.77	95.6	16.09	14.12	13.23	12.82	12.52	12.7	12.3	9.9	9.9	0.114	0.089	0.061	0.046	0.034
UGC 6391	Sb	0.32	59.3	16.14	14.30	13.38	12.87	12.49	12.0	11.7	9.8	9.8	0.099	0.077	0.053	0.040	0.029
UGC 5103	Sb	0.74	50	15.28	13.38	12.71	12.30	11.96	12.4	12.1	9.1	9.1	0.113	0.088	0.061	0.045	0.034
UGC 5803	Sb	0.83	85.6	15.39	13.60	12.82	12.43	12.17	12.1	11.8	10.0	10.0	0.114	0.089	0.062	0.046	0.034
UGC 7772	Sb	0.14	16.8	15.91	13.50	12.20	11.40	10.94	10.1	9.6	6.1	6.1	0.065	0.051	0.035	0.026	0.019
UGC 5884	Sb	0.7	86	15.36	14.18	13.67	13.42	13.24	14.0	13.6	11.1	11.1	0.136	0.106	0.073	0.054	0.040
UGC 57	Sb	0.76	64.7	15.22	13.55	12.70	12.28	11.96	11.6	11.0	9.8	9.8	0.269	0.210	0.145	0.108	0.080
UGC 5166	Sb	0.48	95.8	14.69	13.23	12.60	12.19	11.89	12.6	12.3	10.0	10.0	0.046	0.036	0.025	0.018	0.014
UGC 10255	Sb	0.72	130.1	17.17	15.36	14.55	14.12	13.81	13.2	12.9	11.7	11.7	0.083	0.064	0.045	0.033	0.025
UGC 8900	Sb	0.6	49.1	14.68	13.08	12.21	11.71	11.30	12.4	12.0	8.6	8.6	0.044	0.034	0.024	0.018	0.013
UGC 4219	Sb	0.79	170.2	16.51	14.89	14.09	13.66	13.35	13.5	13.1	11.2	11.2	0.229	0.179	0.124	0.092	0.068
UGC 2861	Sb	0.45	88.4	17.69	15.32	13.98	13.32	12.77	12.1	11.8	9.9	9.9	2.304	1.796	1.242	0.923	0.687
UGC 9566	Sb	0.66	68.6	15.11	13.29	12.47	12.10	11.78	11.7	11.3	9.5	9.5	0.079	0.061	0.043	0.032	0.024
UGC 6834	Sb	1	47.8	13.99	12.86	12.22	11.95	11.69	11.8	11.6	9.7	9.7	0.082	0.064	0.044	0.033	0.025
UGC 9361	Sb	0.37	34.3	15.51	13.34	12.37	11.84	11.48	11.1	10.8	9.0	9.0	0.245	0.191	0.132	0.098	0.073

表 1b (続き)

銀河名	ハッブル形態	軸比	距離 (Mpc)	SDSS(model magnitude)				2MASS				銀河系減光 (mag)				
				<i>u</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>	<i>H</i>	<i>K_s</i>	<i>K_s</i>	<i>A_r</i>	<i>A_g</i>	<i>A_r</i>	<i>A_i</i>	<i>A_z</i>
UGC 9745	Sb	0.59	50.3	14.66	13.17	12.40	12.02	11.80	12.5	12.3	9.4	0.080	0.063	0.043	0.032	0.024
UGC 8677	Sb	0.78	104.9	15.90	14.29	13.52	12.98	12.63	12.8	12.5	10.3	0.040	0.031	0.022	0.016	0.012
UGC 6144	Sb	0.87	113.4	15.29	13.67	12.90	12.50	12.23	12.8	12.5	10.4	0.070	0.055	0.038	0.028	0.021
MCG 10-17-103	Sb	0.39	136.6	17.17	15.77	15.10	14.73	14.42	14.0	13.7	12.1	0.082	0.064	0.044	0.033	0.024
UGC 3893	Sb	0.95	77	16.65	14.79	13.90	13.45	13.13	13.3	12.9	10.9	0.298	0.233	0.161	0.120	0.089
UGC 7351	Sb	0.33	36.2	14.94	12.87	11.81	11.27	10.91	10.6	10.3	8.2	0.110	0.086	0.060	0.044	0.033
PGC 038585	Sb	0.52	102.8	17.01	15.30	14.50	14.11	13.79	13.3	13.1	11.7	0.123	0.096	0.066	0.049	0.037
PGC 056617	Sb	0.29	139.4	16.77	15.06	14.17	13.65	13.22	12.9	12.2	10.9	0.198	0.155	0.107	0.079	0.059
MCG-3-9-28	Sbc	0.93	28.4	13.57	12.25	11.51	11.20	10.96	12.7	12.5	9.1	0.169	0.132	0.091	0.068	0.050
MCG-1-13-6	Sbc	0.71	61.6	14.51	13.27	12.65	12.29	12.01	12.7	12.1	9.8	0.154	0.120	0.083	0.062	0.046
MCG-1-58-9	Sbc	0.79	52.2	15.11	13.89	13.22	12.92	12.63	13.2	12.5	10.5	0.363	0.283	0.196	0.145	0.108
MCG 0-30-2	Sbc	0.56	186.3	17.21	15.68	14.96	14.56	14.27	15.3	14.9	12.1	0.196	0.152	0.105	0.078	0.058
MCG 0-30-16	Sbc	0.77	117.4	16.71	15.34	14.77	14.45	14.27	15.3	14.9	12.2	0.120	0.094	0.065	0.048	0.036
MCG 0-29-33	Sbc	0.85	170.8	16.78	15.48	14.95	14.65	14.46	15.3	14.9	12.1	0.133	0.104	0.072	0.053	0.040
UGC 7011	Sbc	0.25	82.6	16.87	15.08	14.23	13.78	13.47	13.7	13.2	11.1	0.135	0.105	0.073	0.054	0.040
UGC 4392	Sbc	0.34	66.3	15.58	13.70	12.37	12.18	11.77	12.4	11.7	9.4	0.203	0.158	0.109	0.081	0.060
UGC 6432	Sbc	0.70	163.5	16.83	15.35	14.71	14.33	14.13	14.2	13.8	11.5	0.128	0.100	0.069	0.051	0.038
UGC 6521	Sbc	0.77	78.4	15.26	13.61	12.91	12.60	12.40	13.9	13.6	10.2	0.123	0.096	0.067	0.049	0.037
UGC 7042	Sbc	0.36	99	17.15	15.64	14.90	14.49	14.16	14.7	14.4	11.7	0.133	0.088	0.061	0.045	0.034
UGC 2241	Sbc	0.71	93.2	14.90	13.33	12.52	12.13	11.83	12.3	11.8	9.8	0.154	0.120	0.083	0.062	0.046
MCG 1-29-38	Sbc	0.95	156.3	16.13	14.78	14.18	13.81	13.55	14.2	13.8	11.6	0.304	0.237	0.164	0.122	0.091
UGC 6134	Sbc	0.49	103.9	16.26	14.48	13.59	13.13	12.96	13.5	13.3	10.2	0.194	0.151	0.104	0.078	0.058
UGC 8853	Sbc	0.65	16.7	14.83	12.70	11.83	11.44	11.24	13.5	13.2	7.8	0.115	0.090	0.062	0.046	0.034
UGC 11555	Sbc	0.57	68.7	15.98	15.47	13.92	13.53	13.03	14.5	14.1	10.6	0.376	0.293	0.203	0.151	0.112
UGC 7777	Sbc	0.73	30	16.79	15.52	15.34	15.13	14.85	12.9	12.6	9.2	0.138	0.108	0.074	0.055	0.041
UGC 12294	Sbc	0.46	32.5	13.59	12.26	11.66	11.36	11.14	12.4	11.9	9.0	0.239	0.186	0.129	0.096	0.071
UGC 4643	Sbc	0.91	104.3	16.32	14.26	13.42	13.02	12.73	13.0	12.7	10.6	0.145	0.113	0.078	0.058	0.043
UGC 1305	Sbc	0.76	37.9	15.21	13.42	12.56	12.12	11.71	12.6	12.5	8.9	0.305	0.238	0.164	0.122	0.091
UGC 6425	Sbc	0.82	91.8	16.76	14.87	14.07	13.68	13.43	13.1	12.8	11.0	0.082	0.064	0.044	0.033	0.024
UGC 7632	Sbc	0.81	101.2	15.73	14.23	13.48	13.10	12.83	13.7	13.4	11.0	0.101	0.078	0.054	0.040	0.030
UGC 10104	Sbc	0.94	136.5	16.54	14.76	13.89	13.44	13.14	13.2	12.9	11.0	0.155	0.121	0.083	0.062	0.046
UGC 1744	Sbc	0.59	67.6	16.18	14.24	13.30	12.80	12.50	13.0	12.7	10.1	0.424	0.330	0.228	0.170	0.126
UGC 9143	Sbc	0.95	43.3	15.53	14.19	13.58	13.24	13.01	13.3	13.1	10.2	0.059	0.046	0.032	0.024	0.018
UGC 10338	Sbc	0.96	119.5	15.52	14.25	13.71	13.40	13.16	14.4	14.2	11.3	0.077	0.060	0.041	0.031	0.023
UGC 7020	Sbc	0.69	84.4	15.14	13.66	13.02	12.68	12.45	13.5	13.2	10.6	0.055	0.043	0.030	0.022	0.016
UGC 9366	Sbc	0.49	30.6	13.92	12.37	11.51	11.06	10.74	12.2	11.7	7.9	0.121	0.094	0.065	0.049	0.036
PGC 040406	Sbc	0.31	97.2	16.92	15.23	14.37	13.87	13.45	13.6	13.1	11.5	0.103	0.081	0.056	0.041	0.031

表 1c: Sc 型サンプルデータ

銀河名	ハップル形態		軸比	距離 (Mpc)	SDSS(model magnitude)								2MASS					銀河系減光 (mag)				
	b/a				u	g	r	i	z	H	Ks	Ks	total (mag)	A _r	A _g	A _r	A _i	A _z				
MCG -3-8-29	Sc	0.47	46.8	14.83	13.31	12.60	12.22	11.97	13.90	13.35	9.74	0.096	0.075	0.052	0.039	0.029						
MCG -2-33-4	Sc	0.62	87.9	16.07	14.69	14.10	13.79	13.57	15.21	14.79	12.26	0.188	0.147	0.102	0.076	0.056						
MCG -2-29-28	Sc	0.47	23.4	13.68	12.13	11.33	10.90	10.64	12.77	12.51	8.27	0.174	0.136	0.094	0.070	0.052						
MCG -1-8-7	Sc	0.62	19.1	12.58	11.16	10.45	10.14	11.17	12.04	11.43	8.21	0.112	0.088	0.061	0.045	0.034						
MCG -1-32-4	Sc	0.29	72.9	15.40	13.71	12.83	12.29	11.88	14.37	13.78	10.89	0.200	0.147	0.107	0.081	0.057						
MCG -1-35-16	Sc	0.93	40.8	14.43	12.78	12.12	11.81	11.59	13.87	13.51	9.38	0.122	0.095	0.066	0.049	0.036						
MCG -1-7-24	Sc	0.74	60.4	14.81	13.79	13.18	12.96	12.82	14.36	13.98	10.73	0.109	0.085	0.059	0.044	0.032						
MCG -1-13-43	Sc	0.83	48.5	14.93	13.19	12.60	12.30	12.05	13.12	12.76	10.02	0.217	0.169	0.117	0.087	0.065						
UGC 9564	Sc	0.72	26.7	14.67	13.67	12.57	12.24	11.97	13.35	13.03	9.73	0.386	0.301	0.208	0.155	0.115						
UGC 271	Sc	0.60	56.8	15.33	14.01	13.43	13.15	12.97	14.01	13.64	10.76	0.109	0.085	0.059	0.044	0.032						
UGC 1526	Sc	0.71	82.2	15.85	14.42	13.74	13.44	13.21	14.13	13.66	11.04	0.113	0.088	0.061	0.045	0.034						
UGC 3140	Sc	0.87	62.4	15.42	13.63	12.55	12.29	11.95	12.43	12.16	9.57	0.340	0.265	0.183	0.136	0.101						
UGC 7873	Sc	0.92	67.6	16.02	14.45	13.84	13.49	13.30	15.24	14.72	11.68	0.075	0.059	0.040	0.030	0.022						
MCG 0-29-38	Sc	0.90	204.5	16.71	15.29	14.64	14.24	13.99	15.10	14.68	12.50	0.116	0.091	0.063	0.047	0.035						
UGC 369	Sc	0.83	61.1	15.13	13.45	12.65	12.27	12.07	13.21	12.93	10.01	0.110	0.086	0.060	0.044	0.033						
UGC 414	Sc	0.95	73.6	14.63	13.29	12.59	12.24	11.96	13.58	13.15	9.72	0.081	0.063	0.044	0.033	0.024						
UGC 12788	Sc	0.74	42.2	15.01	13.87	13.37	13.10	12.93	15.05	14.62	10.91	0.191	0.149	0.103	0.076	0.057						
UGC 6646	Sc	0.47	78.4	16.09	14.55	13.85	13.44	13.14	14.19	13.76	11.15	0.105	0.082	0.057	0.042	0.031						
UGC 6053	Sc	0.97	106.2	16.56	15.24	14.63	14.32	14.09	15.44	14.95	12.69	0.124	0.097	0.067	0.050	0.037						
UGC 6875	Sc	0.41	82.1	16.66	15.34	14.71	14.36	14.19	14.65	14.16	12.20	0.053	0.041	0.028	0.021	0.016						
UGC 7334	Sc	0.75	49.9	14.93	13.44	12.73	12.39	12.20	14.81	14.50	9.95	0.102	0.080	0.055	0.041	0.031						
UGC 52	Sc	0.93	73.8	15.64	14.06	13.22	12.78	12.52	14.02	13.57	10.41	0.448	0.349	0.241	0.179	0.133						
UGC 5897	Sc	0.55	35.8	15.28	13.85	13.19	12.84	12.66	14.55	13.90	10.26	0.126	0.099	0.068	0.051	0.038						
UGC 1529	Sc	0.85	64.6	15.87	14.21	13.36	13.00	12.72	13.95	13.61	10.61	0.402	0.314	0.217	0.161	0.120						
UGC 6644	Sc	0.79	12.5	13.17	11.70	10.93	10.55	10.29	12.09	11.49	7.95	0.187	0.146	0.101	0.075	0.056						
UGC 7412	Sc	0.91	14.9	17.98	17.25	16.63	16.37	16.04	13.36	12.95	8.47	0.150	0.117	0.081	0.060	0.045						
UGC 1554	Sc	0.42	29.9	15.10	13.45	12.65	12.31	12.02	13.73	13.61	9.83	0.221	0.172	0.119	0.088	0.066						
UGC 8710	Sc	0.99	79.3	15.34	13.95	13.27	12.93	12.78	14.50	14.22	10.66	0.110	0.086	0.059	0.044	0.033						
UGC 7901	Sc	0.66	10.3	13.58	11.99	11.19	10.74	10.41	11.87	11.60	8.03	0.114	0.088	0.061	0.045	0.034						
UGC 6396	Sc	0.65	19.2	14.72	13.26	12.22	11.80	11.46	11.80	11.35	8.83	0.107	0.084	0.058	0.043	0.032						
UGC 9926	Sc	0.65	27.8	13.89	12.27	11.51	11.14	10.69	11.39	10.96	8.53	0.230	0.179	0.124	0.092	0.069						
UGC 4899	Sc	0.81	104.6	16.38	15.08	14.49	14.22	14.02	15.21	14.66	11.98	0.147	0.115	0.079	0.059	0.044						
UGC 12607	Sc	0.91	49.2	14.42	13.55	13.22	13.10	12.95	13.01	12.79	10.73	0.184	0.144	0.099	0.074	0.055						
UGC 5912	Sc	0.91	85.6	15.45	14.00	13.37	13.07	12.88	14.10	13.88	10.75	0.160	0.124	0.086	0.064	0.048						
UGC 11981	Sc	0.79	90.7	16.17	14.74	14.12	13.81	13.63	15.12	14.78	11.20	0.336	0.262	0.181	0.135	0.100						
UGC 714	Sc	0.74	65.5	15.52	14.20	13.56	13.20	12.91	14.57	14.31	10.92	0.274	0.214	0.148	0.110	0.082						
UGC 8451	Sc	0.82	72.8	15.58	14.17	13.44	13.07	12.82	14.90	14.67	10.60	0.051	0.040	0.028	0.021	0.015						

表 1d: Scd 型 + Sd 型 サンプル データ

銀河名	ハップル形態	軸比	距離 (Mpc)	SDSS(model magnitude)								2MASS				銀河系減光 (mag)					
				u	g	r	i	z	H	Ks	Ks	total	A _u	A _g	A _r	A _i	A _z				
MCG -1-58-7	Scd	0.71	62.6	15.51	14.29	13.69	13.40	13.19	14.93	14.52	11.02	0.163	0.127	0.088	0.055	0.049					
MCG -1-6-41	Scd	0.91	72	16.13	14.43	13.79	13.47	13.44	15.50	14.90	11.26	0.100	0.078	0.054	0.040	0.030					
MCG -1-6-7	Scd	0.40	69.1	15.98	14.51	13.92	13.65	13.57	15.40	15.14	11.63	0.130	0.101	0.070	0.052	0.039					
MCG -1-7-2	Scd	0.71	31.4	14.77	13.21	12.52	12.19	11.95	13.84	13.40	9.41	0.107	0.084	0.058	0.043	0.032					
UGC 10350	Scd	0.43	22.2	15.36	13.51	12.57	12.07	11.73	13.67	13.12	8.70	0.669	0.521	0.361	0.268	0.199					
UGC 12521	Scd	0.6	51.5	15.08	13.85	13.27	12.97	12.75	15.05	15.02	10.72	0.184	0.143	0.099	0.074	0.055					
UGC 7883	Scd	0.59	42.7	15.36	14.02	13.32	13.03	12.89	14.66	14.30	10.59	0.168	0.131	0.090	0.067	0.050					
UGC 10230	Scd	0.53	28.2	14.81	13.18	12.32	11.81	11.45	12.89	12.44	8.75	0.614	0.478	0.331	0.246	0.183					
UGC 5230	Scd	0.35	80.1	16.25	14.35	13.43	12.95	12.61	13.07	12.45	10.03	0.209	0.163	0.112	0.084	0.062					
UGC 7403	Scd	0.10	34.7	16.08	14.43	13.54	13.03	12.67	12.73	12.09	9.89	0.083	0.065	0.045	0.033	0.025					
UGC 1167	Scd	0.78	59.9	15.44	14.09	13.45	13.14	12.89	14.91	14.76	10.77	0.179	0.140	0.097	0.072	0.053					
MCG 1-58-26	Scd	0.49	68	16.78	15.16	14.21	13.69	13.23	13.20	12.58	10.47	0.290	0.226	0.156	0.116	0.086					
UGC 4329	Scd	0.95	55	15.61	14.22	13.65	13.30	13.11	14.51	14.10	10.77	0.227	0.177	0.122	0.091	0.068					
UGC 4368	Scd	0.91	52.1	15.37	13.97	13.19	12.83	12.79	14.74	14.47	10.23	0.164	0.127	0.088	0.066	0.049					
UGC 2435	Scd	0.83	67.8	15.76	14.33	13.65	13.30	13.09	15.06	14.95	11.11	0.660	0.514	0.356	0.264	0.197					
UGC 4226	Scd	0.66	108.3	16.74	15.01	14.18	13.77	13.45	13.56	13.20	11.26	0.244	0.190	0.131	0.098	0.073					
UGC 4798	Scd	0.68	110.1	16.56	14.97	14.34	14.00	13.74	14.14	14.07	11.74	0.074	0.058	0.040	0.030	0.022					
UGC 10075	Scd	0.40	13.7	13.39	12.00	11.29	10.95	10.88	13.75	13.41	8.47	0.053	0.041	0.029	0.021	0.016					
ESO 583-1	Sd	0.85	92.1	17.25	15.45	14.68	14.30	14.10	15.53	15.07	12.20	0.666	0.519	0.359	0.267	0.199					
UGC 5286	Sd	0.94	69.5	15.34	14.02	13.37	13.03	12.86	15.16	14.93	10.92	0.146	0.114	0.079	0.059	0.044					
UGC 10198	Sd	0.60	67.5	16.50	15.09	14.44	14.09	13.88	15.24	15.13	11.68	0.623	0.486	0.336	0.250	0.186					
UGC 2360	Sd	0.85	146.1	18.14	15.98	15.06	14.58	14.26	13.88	13.61	11.94	0.926	0.722	0.499	0.371	0.276					
UGC 732	Sd	0.55	76.6	16.18	14.52	13.80	13.49	13.18	14.49	14.23	11.01	0.234	0.182	0.126	0.094	0.070					
UGC 2461	Sd	0.44	94.5	17.31	15.86	15.07	14.67	14.41	15.13	14.95	12.66	0.568	0.442	0.306	0.227	0.169					

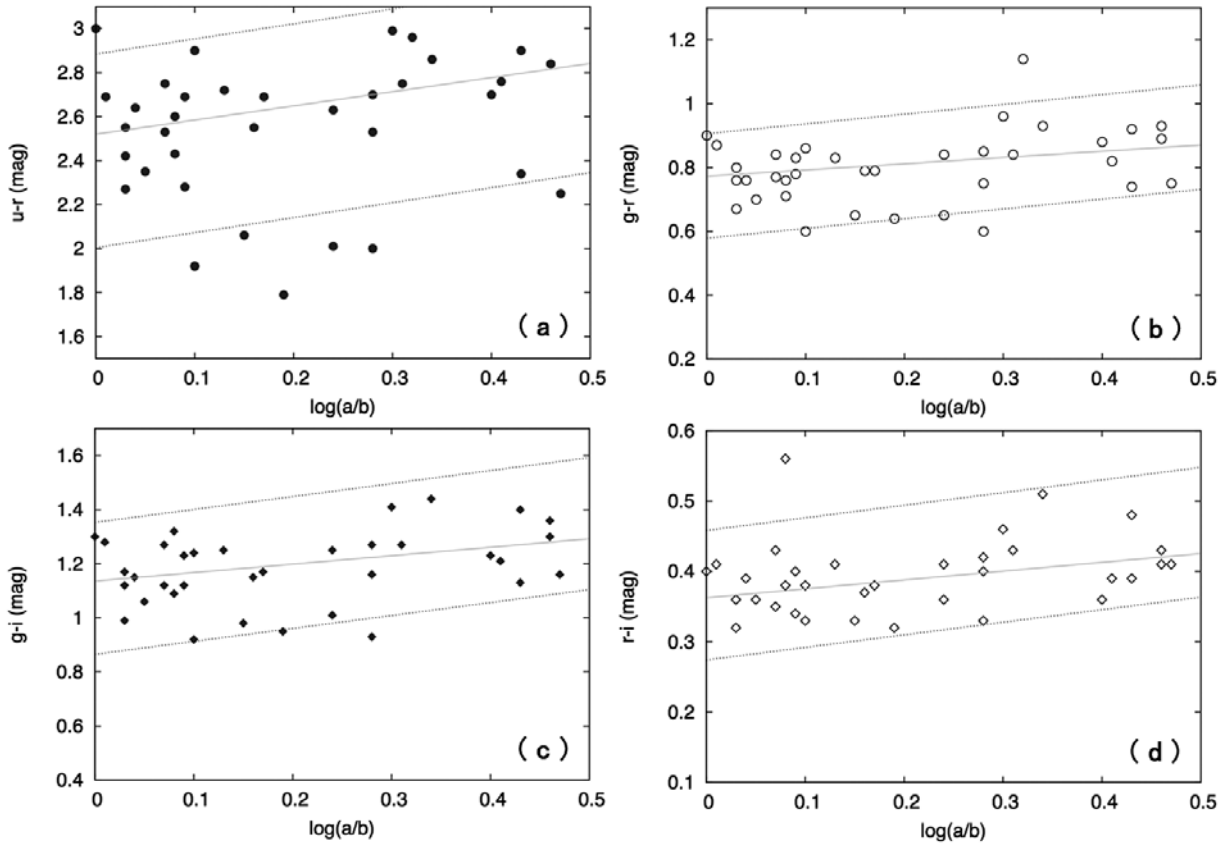


図2 ハッブル形態 Sa 型+Sab 型渦巻銀河における SDSS カラー, a) $u-r$, b) $g-r$, c) $g-i$, d) $r-i$, と軸比の関係。縦軸は SDSS カラー, 横軸は軸比の対数値である。図中の二つの点線は 80% (1.3σ) の上限と下限を, 実線は 1.3σ 以内のサンプルに対するベスト・フィット直線を示す。

$$m_{\lambda, \text{obs}} - m_{\lambda, \text{int}} = \beta_{\lambda} \log(a/b) + A_{\lambda} \quad (\text{式 } 5)$$

と書き直される。

そこで, サンプル銀河毎の SDSS システムにおける銀河系減光量 A_u, A_g, A_r, A_i, A_z を NED より参照し, 内部減光量を見積もる際には, 銀河の SDSS 等級およびカラーに対して, 銀河系減光の補正を施した値を用いた。これら銀河系減光量を表 1a-1d に示した。

4. 結果

4.1 内部減光色補正係数の導出

ハッブル形態毎の渦巻銀河サンプルを用いて, 軸比 a/b に対する SDSS システムによるカラーを最小二乗法によって直線フィットすることで, 内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda, \lambda'}$ を決定した。図 2a-2d に, それぞれ, ハッブル形態 Sa 型+Sab 型の $\log(a/b)$ に対する SDSS カラー $u-r, g-r, g-i, r-i$ を, 表 2 にこれらそれぞれで得られた内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda, \lambda'}$ と相関係数を示した。なお, 内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda, \lambda'}$ は, 各サンプルの 80% (有意水準 1.3σ) の範囲内にあるデータ

表 2 SDSS カラーに対する内部減光色補正係数

		$u-r$		$g-r$	
	$\alpha_{u,r}$	切片	$\alpha_{g,r}$	切片	
Sa+Sab	0.54 ± 0.19	2.54 ± 0.05 (0.48)	0.16 ± 0.07	0.78 ± 0.02 (0.38)	
Sb+Sbc	1.12 ± 0.21	2.09 ± 0.06 (0.54)	0.43 ± 0.07	0.66 ± 0.02 (0.60)	
Sc	0.40 ± 0.24	2.02 ± 0.04 (0.25)	0.24 ± 0.17	0.62 ± 0.03 (0.20)	
Scd+Sd	0.61 ± 0.34	1.97 ± 0.06 (0.24)	0.11 ± 0.34	0.68 ± 0.06 (0.04)	
		$g-i$		$r-i$	
	$\alpha_{g,i}$	切片	$\alpha_{r,i}$	切片	
Sa+Sab	0.29 ± 0.12	1.14 ± 0.03 (0.40)	0.13 ± 0.04	0.36 ± 0.01 (0.49)	
Sb+Sbc	0.61 ± 0.10	1.00 ± 0.03 (0.59)	0.26 ± 0.04	0.32 ± 0.01 (0.65)	
Sc	0.47 ± 0.21	0.91 ± 0.04 (0.29)	0.17 ± 0.06	0.29 ± 0.01 (0.37)	
Scd+Sd	0.41 ± 0.37	0.95 ± 0.07 (0.15)	0.31 ± 0.08	0.27 ± 0.01 (0.48)	

注) 括弧内の数字は相関係数。

によって導出した。

同様に, ハッブル形態 Sb 型+Sbc 型に対する軸比とカラーの関係は図 3a-3d に, Sc 型に対しては図 4a-4d に, そして, Scd 型+Sd 型に対しては図 5a-5d に掲げ, それぞれで得られた内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda, \lambda'}$ と相関係数を表 2 に示した。

銀河自身が持つ星間物質の量が多いほど, 内部減光色補正係数は大きくなる。渦巻銀河の恒星に対する星間物質の存在比は, ハッブル形態が早期型から晩期型に向かうにつれて大きくなるが, 銀河自身の規模は小

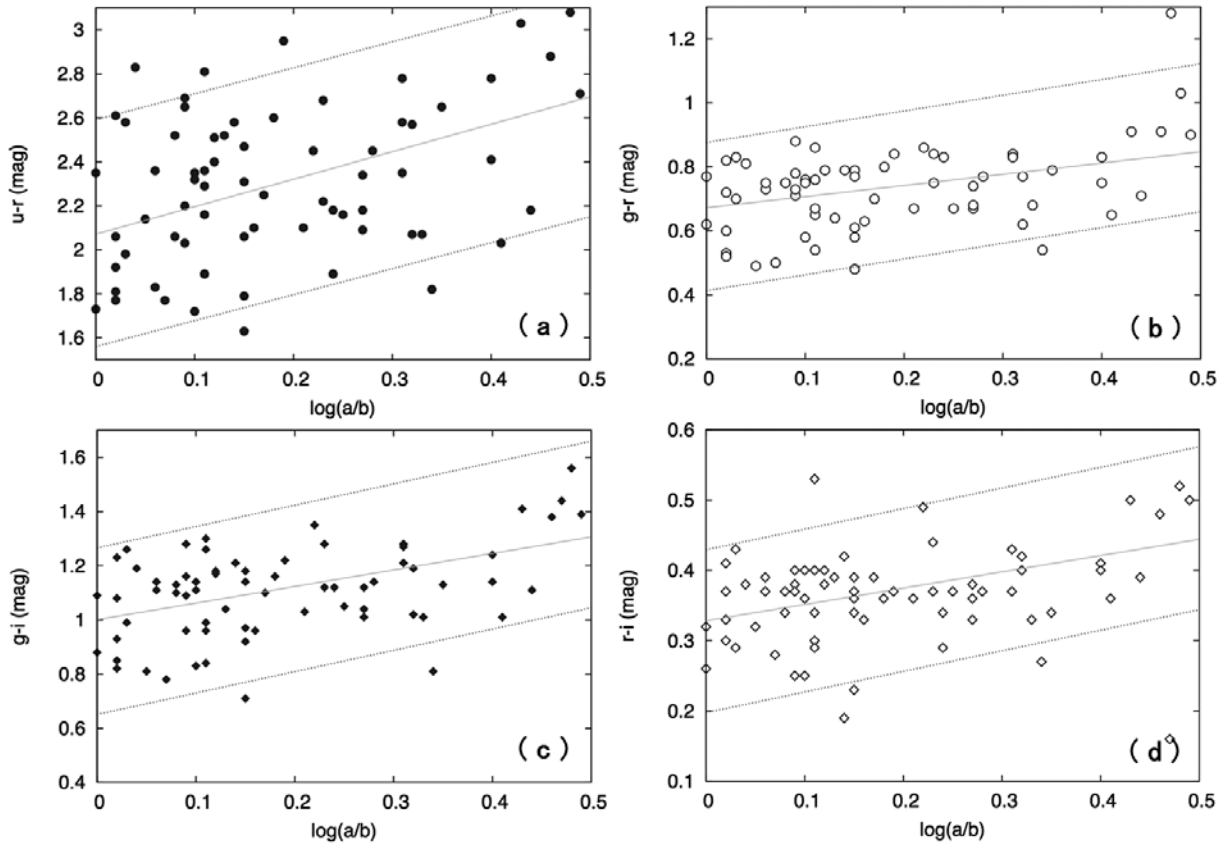


図3 ハッブル形態 Sb 型+Sbc 型渦巻銀河における SDSS カラーと軸比の関係。他は図2に同じ。

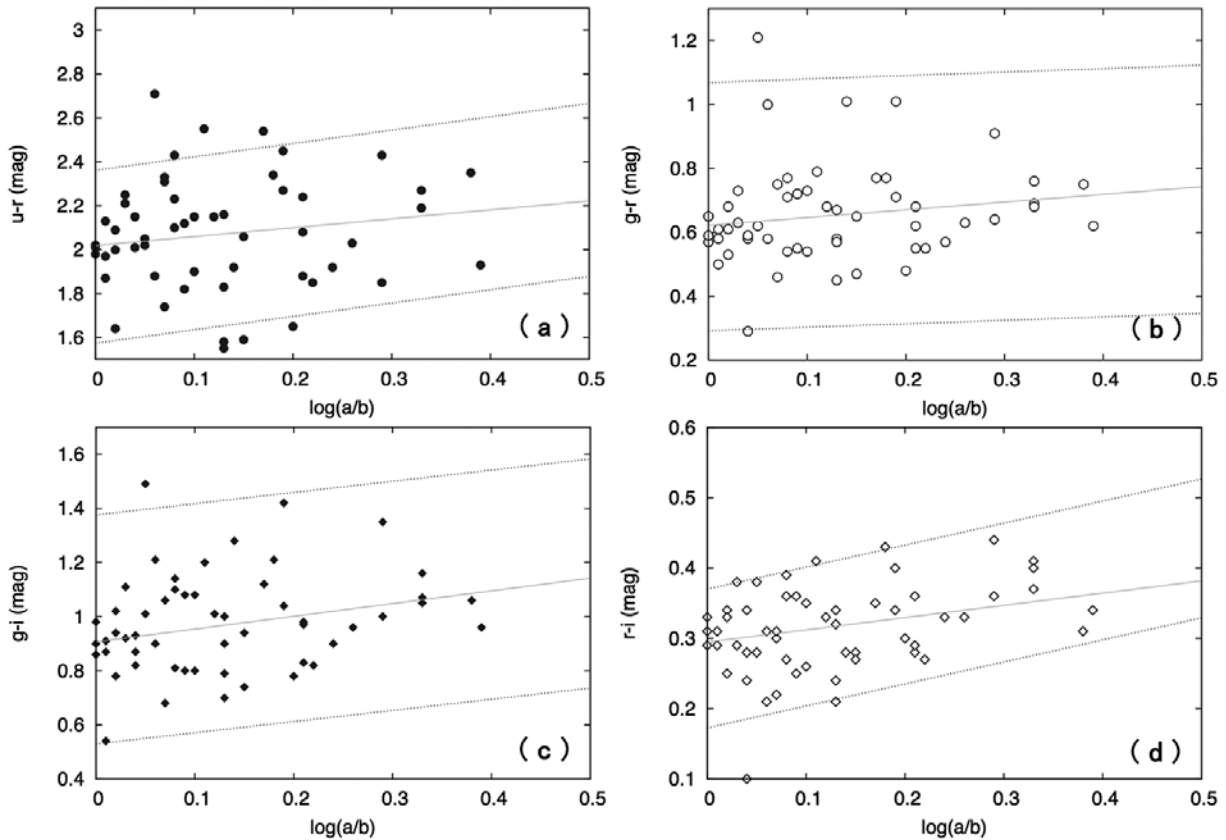


図4 ハッブル形態 Sc 型渦巻銀河における SDSS カラーと軸比の関係。他は図2に同じ。

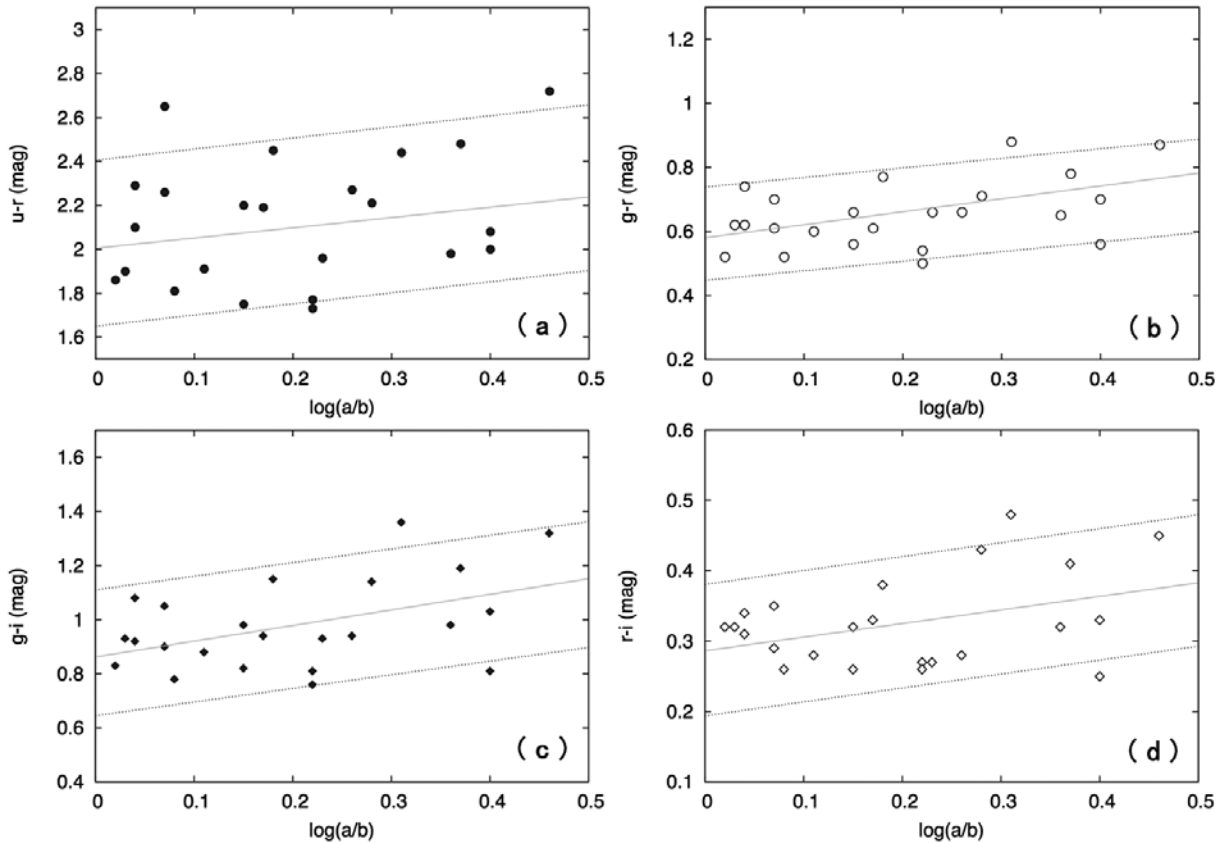


図5 ハッブル形態 Scd 型+Sd 型渦巻銀河における SDSS カラーと軸比の関係。他は図2に同じ。

さくなる。そのため、渦巻銀河が有する星間物質の量は、Sb から Sc 型あたりで最も多くなる (Roberts & Haynes 1994)。これは、銀河の内部減光量に対する傾き角の依存性が、Sb から Sc 型あたりで最も強くなることを意味しており、図2 から図5、および表2 に示したハッブル形態毎の内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda,\lambda'}$ の傾向は、この事実と矛盾しない。また、Cho & Park (2009) が、SDSS の $u-r$ に対して示した内部減光量の傾向とも一致している。加えて、表2 に掲げた、フィッティングから得られた「切片」は、ハッブル形態毎の銀河本来のカラーの代表値と見なせる値であり、いずれのカラーにおいても、早期型渦巻銀河から晩期型渦巻銀河に向かって小さくなっている。この傾向は、渦巻銀河の可視光カラーの一般的な性質と定性的に矛盾しない。

4.2 内部減光等級補正係数の導出

可視光波長域に比べて、近赤外線波長域では電磁波の吸収・散乱の効果は非常に小さくなる。例えば、Gavazzi & Boselli (1996) では、Sa から Sc 型の渦巻銀河と Irr 型不規則銀河の近赤外線 $2.2\mu\text{m}$ 帯 K バンドに対して、 $\beta_K=0.28$ を導き出している。これから、

Sa から Sd 型の渦巻銀河の 2MASS における $2.1\mu\text{m}$ 帯 K_s バンドに対して、 $\beta_{K_s}=0.28$ を仮定し、SDSS 各バンドと 2MASS K_s バンドとの内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda,\lambda'}$ を求めることで、SDSS システムに対する内部減光等級補正係数 β_λ が得られる。

各銀河に対する K_s バンドの profile fit magnitude を用い、図 6a-6e に Sa 型+Sab 型の軸比と可視・近赤外線カラー $u-K_s$, $g-K_s$, $r-K_s$, $i-K_s$, $z-K_s$ との相関を示した。また、これらを直線フィットすることで得られた内部減光色補正係数と相関係数を表3に掲げた。同様に図 7a-7e に Sb 型+Sbc 型、図 8a-8e に Sc 型、図 9a-9e に Scd 型+Sd 型に対する相関図を、表3に内部減光色補正係数と相関係数を示した。

得られた内部減光色補正係数 $\alpha_{\lambda,\lambda'}$ と、 K_s バンドにおける内部減光等級補正係数 $\beta_{K_s}=0.28$ という仮定を用いることで、ハッブル形態毎に、SDSS 各バンドに対する内部減光等級補正係数を導出し、それらを表4にまとめた。

5. 考察

ハッブル形態毎に、渦巻銀河の SDSS の各カラーに

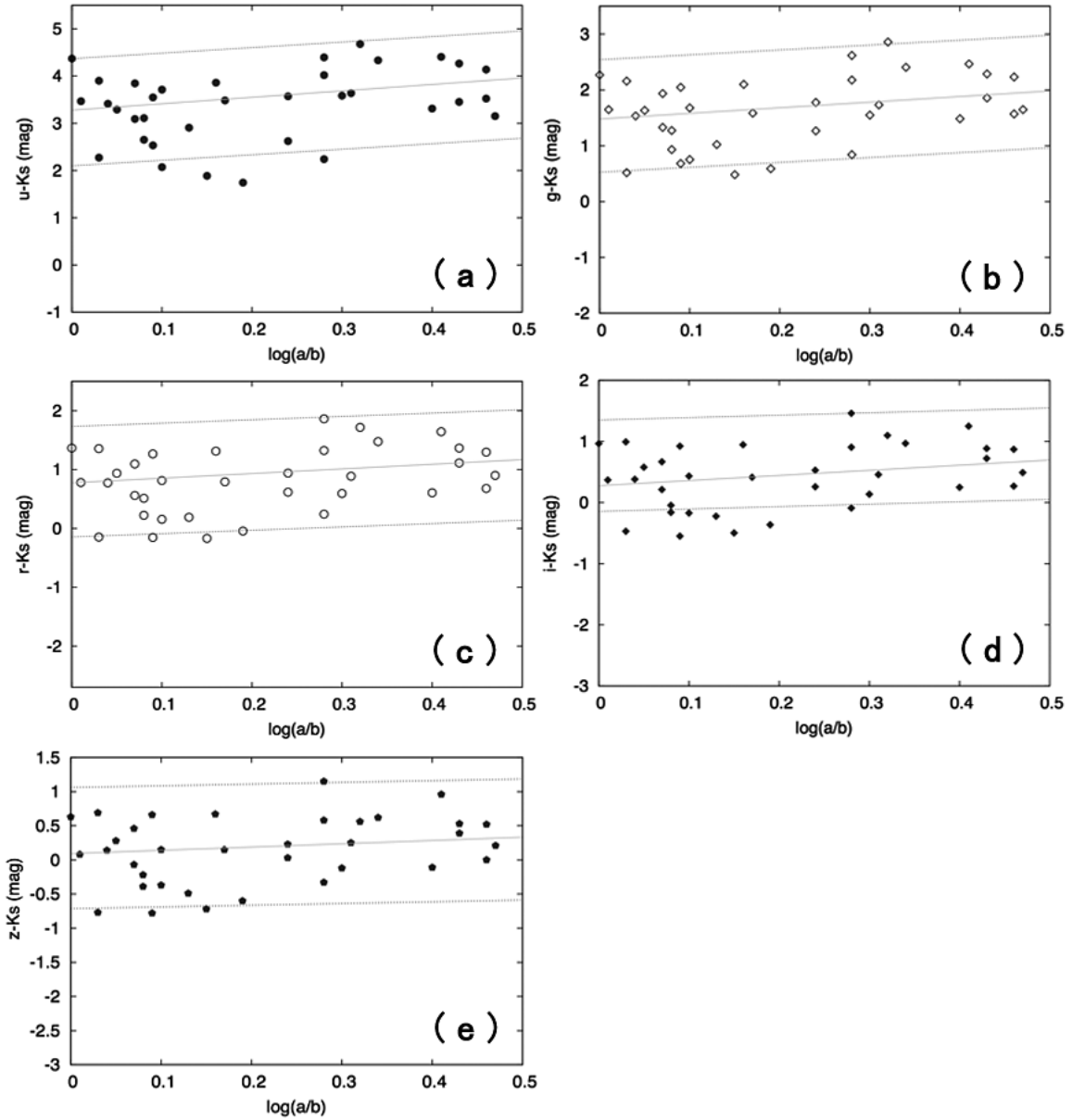


図 6 ハッブル形態 Sa 型+Sab 型渦巻銀河における SDSS-2MASS カラー, a) $u-K_s$, b) $g-K_s$, c) $g-K_s$, d) $r-K_s$, e) $z-K_s$ と軸比の関係。縦軸は SDSS-2MASS カラー, 横軸は軸比の対数値である。図中の二つの点線は 80% (1.3 σ) の上限と下限を, 実線は 1.3 σ 以内のサンプルに対するベスト・フィット直線を示す。

表 3 SDSS-2MASS カラーに対する内部減光色補正係数

	$u-K_s$		$g-K_s$	
	α_{u,K_s}	切片	α_{g,K_s}	切片
Sa+Sab	1.36 ± 0.66	3.28 ± 0.17 (0.36)	1.00 ± 0.59	1.48 ± 0.15 (0.30)
Sb+Sbc	2.16 ± 0.64	2.38 ± 0.15 (0.40)	1.25 ± 0.51	1.00 ± 0.12 (0.30)
Sc	1.03 ± 0.71	1.38 ± 0.11 (0.21)	0.88 ± 0.74	-0.02 ± 0.12 (0.17)
Scd+Sd	2.51 ± 1.37	0.93 ± 0.34 (0.45)	2.87 ± 1.04	-0.73 ± 0.24 (0.57)
	$r-K_s$		$i-K_s$	
	α_{r,K_s}	切片	α_{i,K_s}	切片
Sa+Sab	0.79 ± 0.53	0.78 ± 0.14 (0.26)	0.84 ± 0.52	0.28 ± 0.14 (0.28)
Sb+Sbc	0.79 ± 0.47	0.36 ± 0.11 (0.21)	0.72 ± 0.44	0.01 ± 0.10 (0.21)
Sc	0.54 ± 0.75	-0.60 ± 0.12 (0.10)	0.32 ± 0.78	-0.88 ± 0.12 (0.06)
Scd+Sd	2.52 ± 0.99	-1.30 ± 0.23 (0.54)	2.35 ± 0.94	-1.58 ± 0.22 (0.53)
	$z-K_s$			
	α_{z,K_s}	切片		
Sa+Sab	0.48 ± 0.47	0.09 ± 0.12 (0.18)		
Sb+Sbc	0.53 ± 0.42	-0.20 ± 0.10 (0.16)		
Sc	0.32 ± 0.76	-1.10 ± 0.13 (0.06)		
Scd+Sd	2.04 ± 0.89	-1.71 ± 0.21 (0.50)		

注) 括弧内の数字は相関係数。

対する内部減光色補正係数を導出した。また, SDSS 各バンドと 2MASS の $2.1\mu\text{m}$ 波長帯 K_s バンドにおける可視・近赤外線カラーを用いて得られた内部減光色補正係数に対して, K_s バンドにおける内部減光等級補正係数の値を仮定することで, SDSS 各バンドにおける内部減光等級補正係数を算出した。

図 2 から図 9 までの軸比とカラーの関係は, いずれのハッブル形態, いずれのカラーにおいても分散が非常に大きく, そのために, 算出された内部減光色補正係数も大きなフィッティング誤差を伴うものとなっている。この大きな分散は, 本研究における小さなサンプル数と銀河本来のカラーが持つ分散の両方に起因すると思われる。まず, SDSS それ自体は, 数億個も

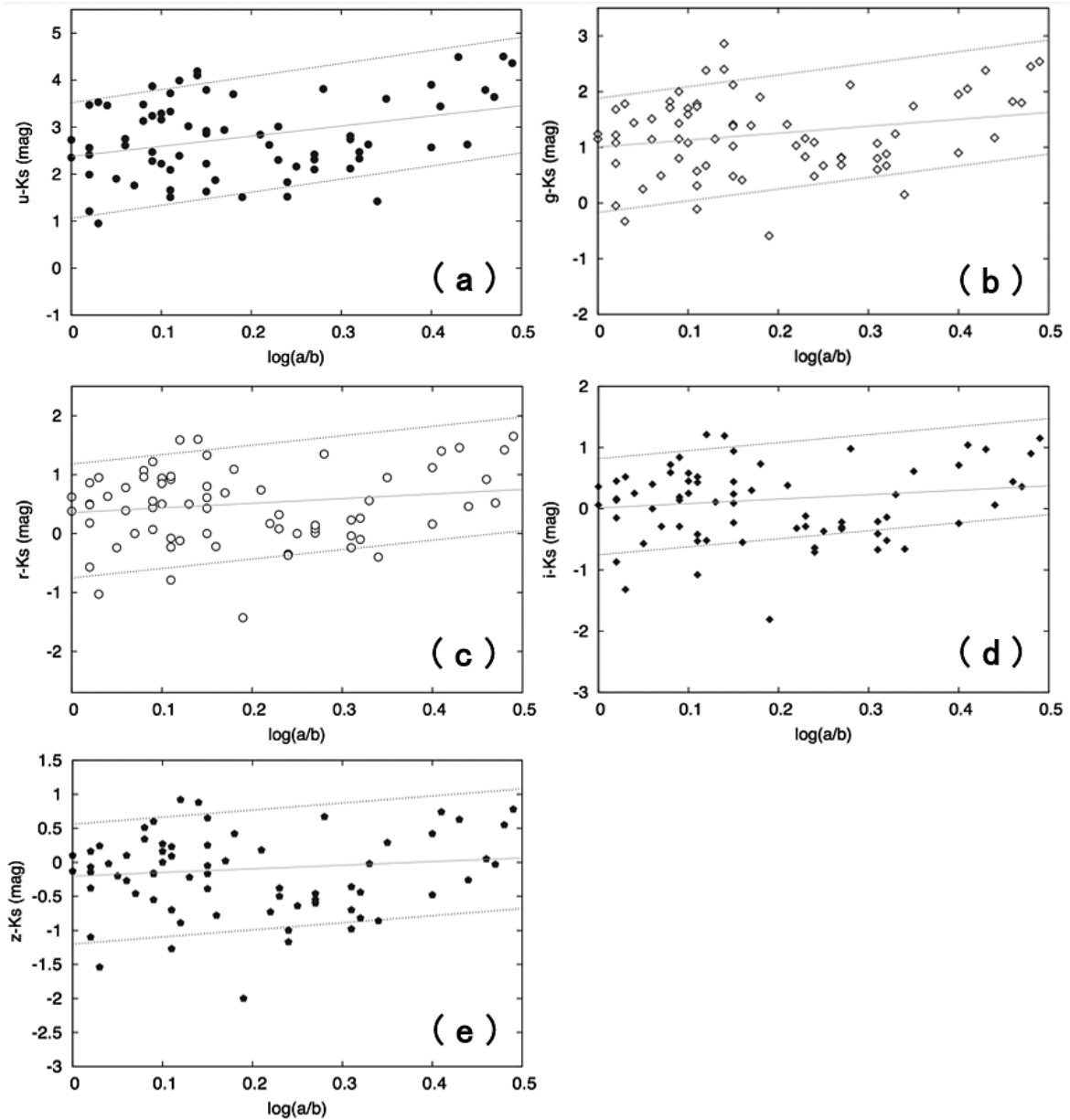


図7 ハッブル形態 Sb 型+Sbc 型渦巻銀河における SDSS-2MASS カラーと軸比の関係。他は図6に同じ。

の大規模な銀河サンプルを持つが、これに、“ハッブル形態が RC3 に記載されている渦巻銀河”といったサンプリングの条件を課したことで、ハッブル形態毎に数10個から100個程度のサンプル数となってしまった。また、例えば、ハッブル形態と絶対等級が同じ銀河であっても、星間物質の含有量やカラーといった諸性質の分散が大きいことは、よく知られた事実である（例えば、Roberts & Haynes 1994）。これらに起因する銀河の内部減光の分散の大きさは、同様の先行研究においても認められており、すぐ後に述べるように、本研究の誤差だけが特別に大きいという訳ではない。

本研究で算出された内部減光色補正係数は、Sb 型

から Sc 型渦巻銀河で内部減光が大きくなるという Cho & Park (2009) が示した傾向と一致しており、また、フィッティングから得られた切片の値（ハッブル形態毎の銀河本来のカラーの代表値）は、特にサンプル数が小さい Scd 型+Sd 型を除けば、早期型渦巻銀河から晩期型渦巻銀河に向かって青くなるという一般的な傾向と矛盾しない。

Han (1992) では、284 個の渦巻銀河の I_c バンド撮像データから、ハッブル形態 S0a から Sb 型に対して、 $\beta_I = 0.73 \pm 0.16$ 、Sbc から Sc 型に対して、 0.90 ± 0.18 、Scd 型以降に対して、 0.51 ± 0.23 が報告されている。Boselli & Gavazzi (1994) でも、8 つの近傍銀河団に属する約 100 個の渦巻銀河サンプルから同様の研究が

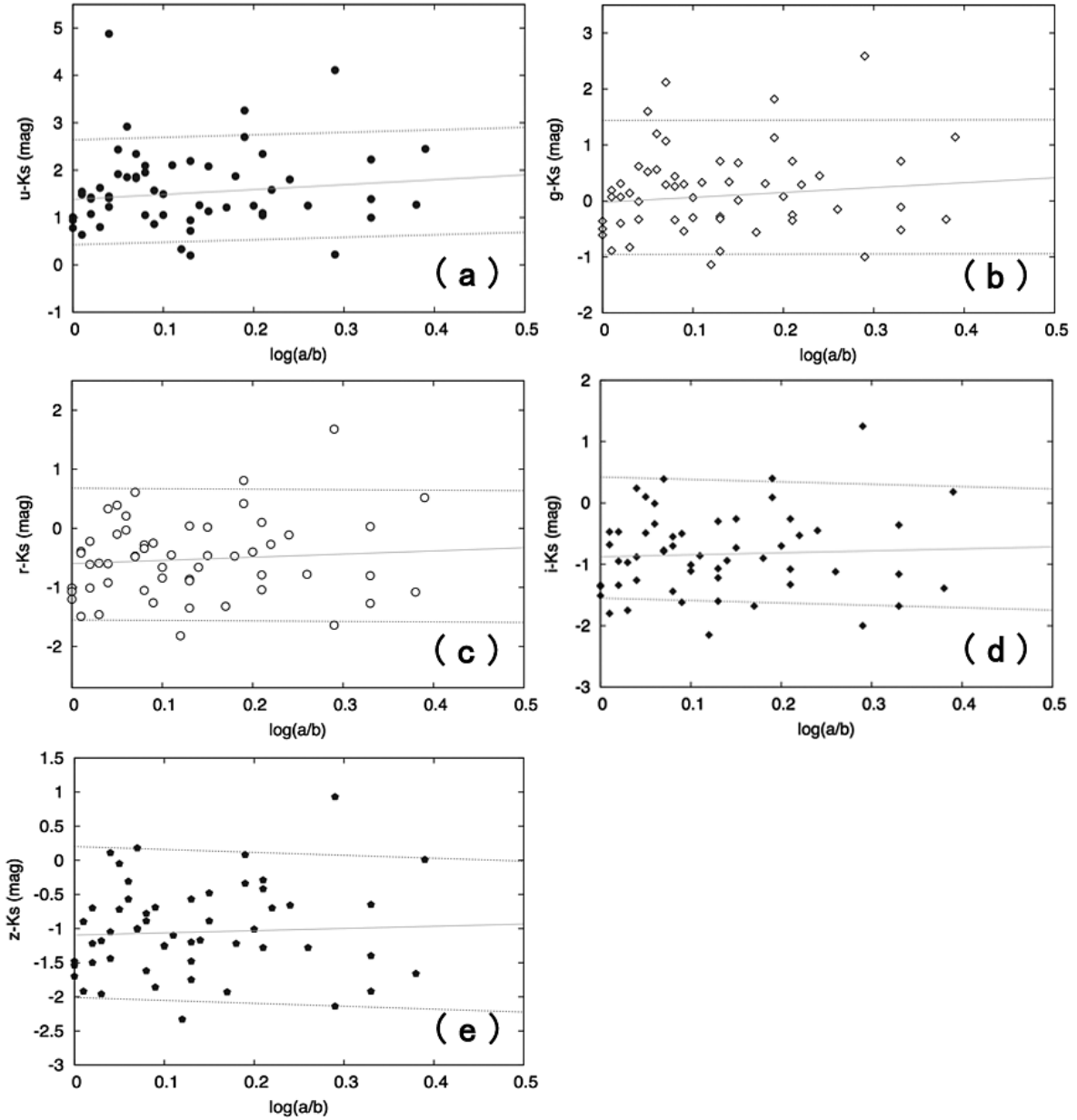


図8 ハッブル形態 Sc 型渦巻銀河における SDSS-2MASS カラーと軸比の関係。他は図6に同じ。

行われ, U, B, V, H バンドに対する波長依存補正係数 D_λ を, そして, Gavazzi & Boselli (1996) では U, B, V, J, H, K バンドに対する D_λ が公表された。この D_λ は, 本研究における $\beta_\lambda / 2.5$ に相当するパラメータである。Bottinelli *et al.* (1995) では, 5,171 個の渦巻銀河サンプルに基づいて, B バンドにおける内部減光が議論され, Sc から Sd 型に対して, $\beta_B = 1.67$ に相当する結果が報告されている。また, Tully *et al.* (1998) では, おおぐま座銀河団とうお座銀河団に属する 87 個の渦巻銀河の多色撮像観測から, B, Rc, Ic, K' バンドにおける内部減光量を, 各バンドの絶対等級の関数として提示した。これによれば, ハッブル定数を $75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ とした場合, $\beta_B = 1.24 \pm 0.70 (-21 \leq$

$M_B \leq -17)$, $\beta_R = 0.95 \pm 0.48 (-22 \leq M_R \leq -18)$, $\beta_I = 0.85 \pm 0.40 (-23 \leq M_I \leq -19)$, そして, $\beta_K = 0.17 \pm 0.09 (-24 \leq M_B \leq -20)$ となる。なお, この内部減光等級補正係数の誤差は, 統計的な誤差ではなく, 括弧内に示した絶対等級の違いによって生じる最大値と最小値を示している。

図 10a-10d に, 本研究で得られた内部減光等級補正係数 β_λ を, ハッブル形態毎に波長の関数として描き, さらに, 上記の先行研究による値も示した。なお, 各観測バンドの波長は, SDSS システム u, g, r, i, z バンドについては Doi *et al.* (2010) から SDSS “public” として掲げられた値を, ジョンソン・カズンス・システム U, B, V, Rc, Ic バンドと近赤外線 J, H, K, Ks バンド

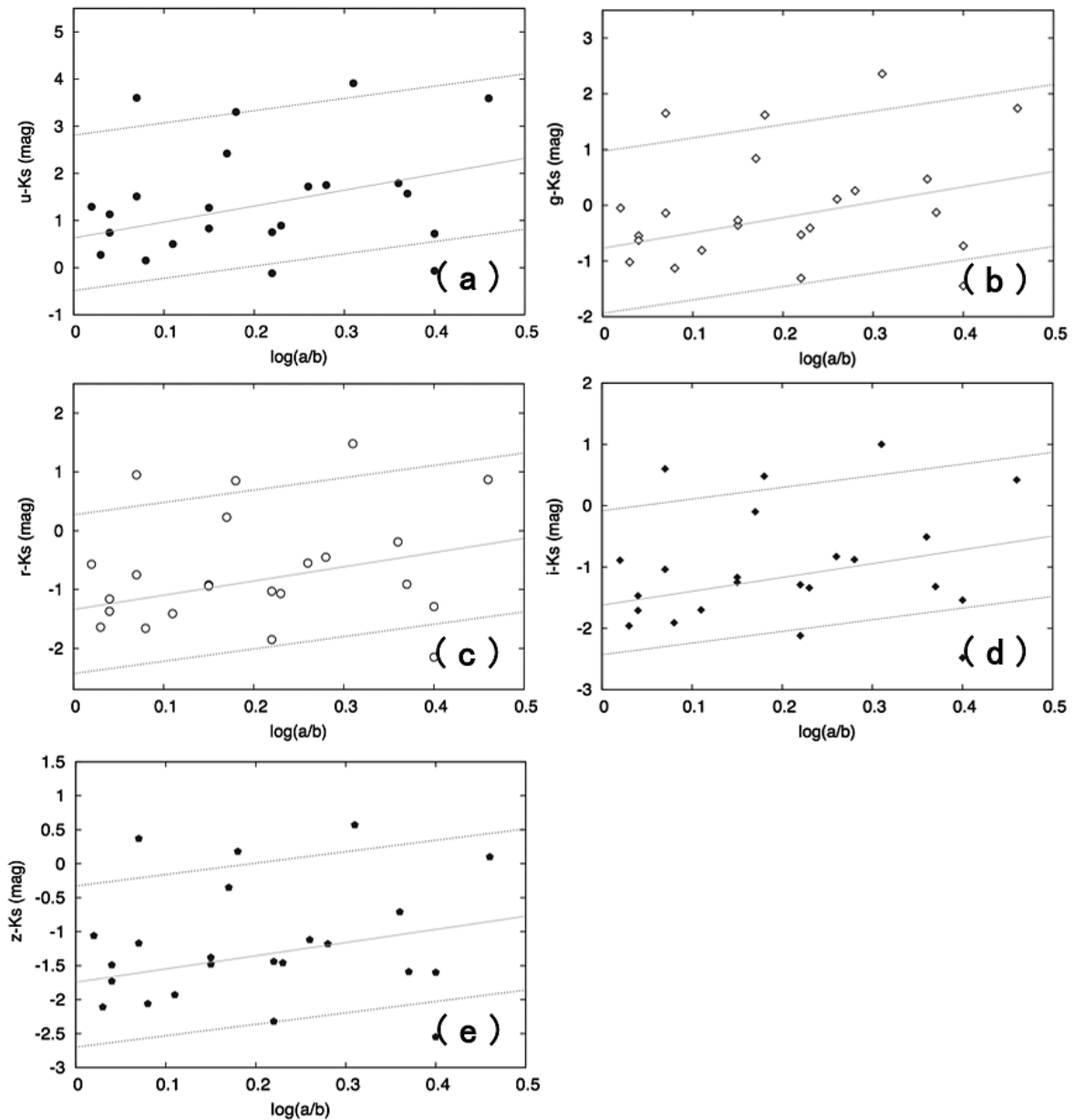


図9 ハッブル形態 Scd 型+Sd 型渦巻銀河における SDSS-2MASS カラーと軸比の関係。他は図6に同じ。

表4 ハッブル形態ごとの各カラー・各バンドに対する内部減光色・等級補正係数

	α_{u-r}	α_{g-r}	α_{g-i}	α_{r-i}
Sa+Sab	0.54 ± 0.19	0.16 ± 0.07	0.29 ± 0.12	0.13 ± 0.04
Sb+Sbc	1.12 ± 0.21	0.43 ± 0.07	0.61 ± 0.10	0.26 ± 0.04
Sc	0.40 ± 0.24	0.24 ± 0.17	0.47 ± 0.21	0.17 ± 0.06
Scd+Sd	0.61 ± 0.34	0.11 ± 0.34	0.41 ± 0.37	0.31 ± 0.08

	β_u	β_g	β_r	β_i	β_z	β_{Ks}
Sa+Sab	1.64	1.28	1.07	1.12	0.76	0.28
Sb+Sbc	2.44	1.56	1.07	1.00	0.81	0.28
Sc	1.31	1.16	0.82	0.60	0.60	0.28
Scd+Sd	2.79	3.15	2.80	2.63	2.32	0.28

については家ほか (2007) から、近赤外線 K' バンドについては、Wainscoat & Cowie (1992) を参照した。

図 10a から、本研究で得られたハッブル形態 Sa 型 + Sab 型に対する内部減光等級補正係数は、先行研究

の結果とほぼ同じ傾向を示していることがわかる。Sb 型 + Sbc 型に対しても、最も波長が短い u バンド帯でずれが生じているが、他の4つのバンド帯の傾向は、やはり先行研究の結果とよく一致している。これらは、本研究でのサンプル数が大きいことに加えて、早期型渦巻銀河はバルジが大きく、渦巻腕の巻き付きが強いため、軸比が銀河円盤の傾き角をよく反映しているためと考えられる。これに対して、晩期型渦巻銀河の Sc 型では、全体的に先行研究よりも小さな値が得られたように見えるが、誤差の範囲内であり、先行研究と矛盾しない傾向を示している。ところが、Scd 型 + Sd 型となると、誤差の範囲を超えて、全体的に先行研究よりも大きな値が算出されている。

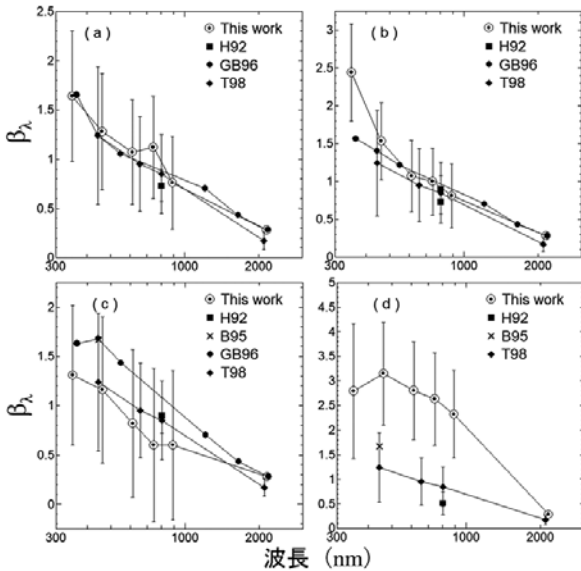


図 10 a) Sa 型+Sab 型, b) Sb 型+Sbc 型, c) Sc 型, d) Scd+Sd 型に対する, 波長の関数としての内部減光等級補正係数。縦軸が内部減光等級補正係数, 横軸が波長 (nm)。本研究による結果 (○: This work) と, Han (1992) [H92], Bottinelli *et al.* (1995) [B95], Gavazzi & Boselli (1996) [GB96], Tully *et al.* (1998) [T98] による結果を示した。

Scd 型+Sd 型は, 銀河として小型であり, これに含まれる星間物質も量としては多くない。従って, Scd 型+Sd 型に関する本研究の結果をそのまま受け入れることは難しい。この大きなずれの要因の一つは, Scd 型+Sd 型のサンプル数が特に少ないことだと思われるが, これに加えて, Scd 型や Sd 型渦巻銀河の軸比が銀河円盤の傾き角を十分に反映していない可能性が考えられる。銀河の軸比は, 一般に, 銀河の撮像観測から得られた等輝度線を楕円でフィットすることで導かれる。早期型渦巻銀河に比べて, Scd 型+Sd 型渦巻銀河はバルジが小さく, 渦巻腕の巻き付きが緩く, さらに, 銀河円盤に対する渦巻腕の輝度のコントラストは強くなる。そのため, 銀河の等輝度線は銀河円盤よりも, 渦巻腕に影響を受け, その軸比と銀河円盤の傾き角の相関が小さくなる可能性がある。本研究では SDSS や RC3 に記載された軸比を用いたが, 特に晩期型渦巻銀河に関しては, その傾き角を個別に検討する必要があるかも知れない。

6. まとめ

渦巻銀河の SDSS カラーおよび等級における, 内部減光量補正に必要なパラメータを, ハッブル形態毎に導出した (表 4)。

本研究で得られた渦巻銀河の内部減光量は, 早期型

渦巻銀河 (Sa から Sbc 型) と晩期型渦巻銀河の Sc 型については, 先行研究とほぼ一致している。しかしながら, 晩期型渦巻銀河の Scd 型と Sd 型については, 誤差の範囲以上に大きな値が算出されている。この主な要因は, Scd 型+Sd 型のサンプルが小さいこと, そして, 軸比が傾き角を反映していない可能性が考えられる。

本研究を行うにあたって, 東京学芸大学自然科学系宇宙地球科学分野の土橋一仁教授からは有益なコメントを多数頂きました, 心より御礼申し上げます。また, 本稿の執筆・出版に関して日本学術振興会による科学研究費補助金 (16K12750: 代表者 西浦慎悟, 17K00971: 代表者 伊藤信成) の支援を受けました, 心から感謝いたします。

引用文献

- Abolfathi, B., and 347 authors (2018), “The Fourteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment”, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 235, article id 42, 19pp.
- Berlind, A. A., Quillen, A. C., Pogge, R. W., and Sellgren, K. (1997) “The Extinction Law in an Occulting Galaxy”, *Astronomical Journal*, 114, pp. 107–114.
- Bosma, A., Byun, Y., Freeman, K. C., and Athanassoula, E., (1992) “The opacity of spiral disks”, *Astrophysical Journal*, 400, pp. L21–L24.
- Boselli, A., and Gavazzi, G. (1994) “Multifrequency windows on spiral galaxies”, *Astronomy & Astrophysics*, 283, pp. 12–20.
- Bottinelli, L., Gougenheim, L., Patrel, G., and Teerikorpi, P. (1995), “Extragalactic database. VI. Inclination corrections for spiral galaxies and disk opaqueness in the B-band”, *Astronomy & Astrophysics*, 296, pp. 64–72 (B95).
- Burstein, D., and Heiles, C. (1982), “Reddenings derived from HI and galaxy counts – accuracy and maps”, *Astronomical Journal*, 87, pp. 1165–1189.
- Burstein, D., Haynes, M. P., and Faber, M. (1991), “Dependence of galaxy properties on viewing angle”, *Nature*, 353, pp. 515–521.
- Cho, J., and Park, C. (2009) “internal extinction in the Sloan Digital Sky Survey late-type galaxies”, *Astrophysical Journal*, 693, pp. 1045–1055.
- de Vaucouleurs, G. (1959), “Photographic dimensions of the

- brighter galaxies”, *Astronomical Journal*, 64, pp. 397–409.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, C. Jr., Buta, R. J., Paturel, G., and Fouque, P. (1991), *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*, New York, Springer-Verlag (RC3).
- Disney, M., Davies, J., and Phillipps, S. (1989) “Are galaxy disks optically thick?”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 239, pp. 939–976.
- Disney M. (1992), “Optical thickness of galaxies”, *Nature*, 356, p. 114,
- Doi, M., Tanaka, M., Fukugita, M., Gunn, J. E., Yasuda, N., Ivezić, Z., Brinkmann, J., de Haars, E., Kleinman, S. J., Krzesinski, J., and Leger, R. F. (2010), “Photometric Response Functions of the Sloan Digital Sky Survey Imager”, *Astronomical Journal*, 139, pp. 1628–1648.
- Gavazzi, G., and Boselli, A. (1996) “A UBVIJK Photometric Catalogue of 1022 Galaxies in 8 Nearby Clusters”, *Astrophysical Letters & Communications*, 35, pp. 1–279 (GB96).
- Giovanelli, R., Haynes, M. P., Salzer, J. J., Wegner, G., da Costa, L. N., and Freudling, W. (1994), “Extinction in Sc galaxies”, *Astronomical Journal*, 107, pp. 2036–2054.
- Giovanelli, R. (1995), “Extinction in Sc galaxies at I band and in the 21 cm line”, *The Opacity of Spiral Disks*, eds. Davies, J. I. and Burstein, D., NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C, Kluwer Academic Publishers, 469, p. 127.
- Han, M. (1992), “The internal extinction in spiral galaxies”, *Astrophysical Journal*, 391, pp. 617–622 (H92).
- Holmberg, E. (1958), “A photographic photometry of extragalactic nebulae”, *Meddelande Fran Lunds Astronomiska Observatorium*, Ser. 2, No. 136.
- Holmberg, E. (1975), “Magnitudes, Colors, Surface Brightness, Intensity Distributions Absolute Luminosities, and Diameters of Galaxies”, *Galaxies and Universe*. eds Sandage, A., Sandage, M. & Kristian, J., Stars and Stellar Systems, University of Chicago Press, 9, p. 123.
- Holwerda, B. W., González, R. A., Allen, R. J., and van der Kruit, P. C. (2005), “The opacity of spiral galaxy disks. V. Dust opacity, HI distributions and sub-mm emission”, *Astronomy and Astrophysics*, 444, pp. 101–107.
- 家正則・岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利編 (2007), *宇宙の観測 I – 光・赤外天文学*, シリーズ現代の天文学 第15巻, 日本評論社, p. 65.
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., Charlot, S., Tremonti, C., Peng, E. W., Seibert, M., Brinkmann, J., Nichol, R. C., SubbaRao, M., and York, D. (2003), “The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 10^5 low-redshift galaxies”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341, pp. 54–69.
- Kylafis, N. D., Misiriotis, A., Papamastorakis, J., and Xilouris, E. M. (2001) “Modelling the Dust Content of Spiral Galaxies”, *Astrophysics and Space Science*, 276, pp. 531–538.
- Masters, K. L., Giovanelli, R., and Haynes, M. P. (2003), “Internal extinction in spiral galaxies in the near-infrared”, *Astrophysical Journal*, 126, pp. 158–174.
- Padilla, N. D., and Strauss, M. A. (2008), “The shapes of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 388, pp. 1321–1334.
- Roberts, M. S., & Haynes, M. P. (1994), “Physical Parameters along the Hubble Sequence”, *Annual Review Astronomy & Astrophysics*, 32, pp. 115–152.
- Rocha, M., Jonsson, P., Primack, J. R., and Cox, T. J. (2008), “Dust attenuation in hydrodynamic simulations of spiral galaxies”, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, 383, pp. 1281–1291.
- Shao, Z., Xiao, Q., Shen, S., Mo, H. J., Xia, X., and Deng, Z. (2007), “Inclination-dependent Luminosity Function of Spiral Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: Implications for Dust Extinction”, *Astrophysical Journal*, 659, pp. 1159–1171.
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., and Davis, M. (1998), “Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds”, *Astrophysical Journal*, 500, pp. 525–553.
- Tully, R. B., Pierce, M. J., Huang, J.-S., Saunders, W., Verheijen, M. A. W., and Witchalls, P. L. (1998), “Global extinction in spiral galaxies”, *Astrophysical Journal*, 115, pp. 2264–2272 (T98).
- Unterborn, C. T., and Ryden, B. S. (2008), “Inclination-Dependent Extinction Effects in Disk Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey”, *Astrophysical Journal*, 687, pp. 976–985.
- Valentijn, E. A. (1994), “The Opacities of Spiral Galaxies Using Volume Representative Samples”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 266, pp. 614–634.
- Verheijen, M. A. W. (2001) “The Ursa Major Cluster of Galaxies. V. HI Rotation Curve Shapes and the Tully-Fisher Relations”, *Astrophysical Journal*, 563, pp. 694–715.
- Wainscoat, R. J., and Cowie, L. L. (1992), “A Filter for Deep Near-Infrared Imaging”, *Astronomical Journal*, 103, pp. 332–337.