

疑似等価幅によるM型星のサブクラスと有効温度の推定

----- 可視低分散スペクトルの場合 ----

藤井 貢 (FKO)

2022/03/25

可視低分散スペクトル(R~500)で、サブクラスが知られている既知のM型星の分子吸収バンド(主にTiO)の疑似等価幅を測定すると、サブクラスとの間に相関(決定係数 $R^2=0.90$)が得られた。

そこでサブクラスが未知のM型星を観測した場合、その分子吸収バンドの疑似等価幅を測定すれば低分散分光器でも、そのサブクラスと有効温度の推定が可能と思われる。

またM型の変光星でそのサブクラスが変動する天体についても、この方法は有用と思われる。

疑似等価幅測定に用いたスペクトルはFBSPEC-III (R~500) + 40cmSCT で取得し、ほぼ同高度における分光標準星を観測し波長感度較正されたものを用いた。

等価幅測定は波長感度較正無しでも可能だが、後述のように地球大気吸収の影響の大きい長波長側の吸収バンドを補正する際、この観測夜毎の同高度分光標準星観測は有用だった。

1) 既知M型星観測リスト

スペクトル型はSIMBADを参照し、M型星のサブクラス変動の無い天体を計122星抽出し、その疑似等価幅を測定した。サブクラスは0～8まで含まれるが、光度階級については不明なものが19星含まれる。

表1に観測天体と測定したew1～8の疑似等価幅値を示す。

No.	Sp Type	M-subclass	ew1	ew2	ew3	ew4	ew5	ew6	ew7	ew8	ew1-5	ew1-8	stars	YMD(UT)	stradrad-star(HR No.)	No.	Sp Type	M-subclass	ew1	ew2	ew3	ew4	ew5	ew6	ew7	ew8	ew1-5	ew1-8	stars	YMD(UT)	stradrad-star(HR No.)	
1	M0I	0	32.9	38.3	42.1	38.0	55.0	25.2	54.8	8.2	41.3	38.8	OO Cam	2011/01/07/839	1544	62	M3III	3	59.2	54.1	84.2	73.5	83.9	100.0	112.0	77.0	71.0	80.5	YY Pic	201/0/12/18400	9087	
2	M0II	0	31.4	30.0	40.9	30.8	51.1	33.8	44.3	23.4	36.8	35.7	μ UMa	2011/12/25/892	3454	63	M3III	3	58.4	50.7	82.0	72.8	86.2	106.0	111.0	67.1	70.0	79.2	HDB8419	2011/02/25/615	1544	
3	M0III	0	35.4	27.4	40.5	38.2	46.0	41.0	52.2	14.1	37.5	36.9	π Gem	2012/10/15/820	718	64	M3IIla	3	56.2	55.1	80.1	67.7	79.8	89.4	91.7	45.0	67.8	70.6	V384 Aur	2011/03/13/435	3454	
4	M0III	0	31.7	22.5	39.5	40.3	47.8	45.2	57.0	17.9	36.4	37.7	ο Aur	2012/10/20/823	1544	65	MGV	3	59.3	23.3	50.6	55.3	52.7	82.9	69.3	33.8	44.2	50.8	OE Boo	2011/04/09/755	3454	
5	M0III	0	31.8	21.7	39.1	41.9	46.7	37.2	51.7	18.9	36.2	36.1	ο Cet	2012/08/25/778	8634	66	M5 SIII	3.5	58.6	44.4	77.9	77.2	84.4	108.0	107.0	64.4	68.7	77.9	V973 Cyg	201/0/10/05466	8634	
6	M0III	0	30.2	21.0	33.5	31.2	40.0	31.7	43.7	9.6	31.2	30.1	ο Gem	2012/10/15/826	718	67	M4II	4	75.1	76.4	99.8	84.7	81.4	122.0	130.0	110.0	83.8	97.4	3.2 Lyr	2011/07/14/572	5501	
7	M0III	0	29.8	25.1	35.6	27.2	34.3	31.1	36.1	1.1	30.4	27.5	LN Vir	2012/01/28/788	3454	68	M4III	4	69.5	61.0	97.2	89.0	88.5	120.0	135.0	92.0	81.0	94.0	AT Dra	2013/08/14/535	7596	
8	M0III	0	34.0	20.6	39.8	31.8	43.7	40.2	50.9	11.1	34.0	34.0	75 Leo	2011/01/15/747	3454	69	M4III	4	68.6	60.9	95.5	86.1	51.8	124.0	121.0	88.0	72.6	87.0	BO Gem	2011/02/05/484	1544	
9	M0V	0	38.3	24.9	44.3	46.8	44.7	68.3	58.7	46.3	39.8	46.5	DT Vir	2011/04/24/571	3454	70	M4III	4	84.5	86.1	114.0	96.5	102.0	152.0	151.0	142.0	96.6	116.0	BR CVn	2011/05/08/580	5501	
10	M0.5Iab	0.5	35.6	45.5	47.3	37.9	38.9	32.4	45.9	7.5	41.0	36.4	V438 Per	2012/12/12/526	8634	71	M4III	4	70.0	63.9	97.4	85.4	95.1	123.0	126.0	90.0	82.4	93.9	DF Leo	2011/03/11/538	3454	
11	M0.5III	0.5	27.6	11.2	30.3	42.6	43.4	36.8	55.0	29.1	31.0	34.5	δ Oph	2012/08/11/465	7596	72	M4III	4	60.6	48.9	83.6	84.0	89.2	112.0	123.0	96.6	73.3	87.2	EL Pic	2011/08/04/767	8634	
12	M0.5IIlab	0.5	32.8	25.0	35.9	31.9	39.0	36.4	51.6	14.4	32.9	33.4	κ Ser	2012/04/14/820	5501	73	M4III	4	66.0	57.2	93.6	85.8	93.6	123.0	128.0	130.0	91.6	79.2	92.4	HM UMa	2011/05/19/483	4963
13	M0.5IIlb	0.5	32.0	35.0	30.5	40.1	43.7	44.4	49.5	25.4	36.3	37.6	α Vul	2012/08/19/548	8634	74	M4III	5	90.0	91.6	116.0	98.3	106.0	151.0	163.0	156.0	99.2	120.7	ZZ Aps	2011/06/28/753	7596	
14	M0.7V	0.7	31.0	18.4	27.2	26.0	24.2	39.5	34.7	27.8	25.4	29.6	OK Leo	2011/03/24/580	3454	75	M4III	4	89.3	88.4	123.0	106.0	116.0	155.0	150.0	131.0	104.5	119.8	LP Aps	2010/08/13/568	8634	
15	M1 Iab	1	37.9	49.1	51.6	41.6	42.8	38.8	54.2	12.9	44.6	41.1	FZ Per	2012/12/12/462	8634	76	M4III	4	83.6	80.9	113.0	97.1	102.0	140.0	144.0	143.0	95.3	110.5	LQ Her	2010/07/18/479	5501	
16	M1 II	1	34.3	23.8	39.5	36.2	44.5	44.9	48.8	15.8	35.7	36.0	ν Vir	2012/01/28/852	3454	77	M4III	4	82.4	81.9	114.0	98.0	108.0	146.0	148.0	96.9	113.3	PU Aur	2011/10/19/822	1544		
17	M1 III	1	37.7	31.7	45.2	39.5	49.2	49.9	59.7	17.9	40.7	41.4	π Eri	2012/01/05/519	718	78	M4III	4	63.6	60.5	92.3	81.7	92.3	115.0	116.0	87.9	78.1	88.7	RX LMi	2012/03/19/489	3454	
18	M1 III	1	35.3	25.4	41.6	42.2	48.3	50.3	58.3	11.6	38.6	39.2	σ Vir	2011/06/18/484	4963	79	M4III	4	70.6	67.5	91.3	80.5	83.5	113.0	128.0	99.9	78.7	91.8	V1293 Aql	2011/01/05/453	8634	
19	M1 III	1	34.8	33.8	48.5	40.8	46.3	48.0	56.5	25.8	40.8	41.9	4 Cas	2014/12/20/451	8634	80	M4-IIa	4	75.1	73.4	109.0	93.4	101.0	128.0	131.0	89.0	89.8	99.6	α Per	2011/09/14/804	718	
20	M1 III	1	33.5	26.2	39.0	31.8	39.1	38.6	47.1	0.4	33.9	32.0	δ LMi	2014/12/20/768	1544	81	M4 IV	4	55.6	40.5	87.8	85.7	74.6	116.0	106.0	107.0	86.0	84.2	EV Lac	2010/08/26/683	8634	
21	M1 III	1	27.8	16.8	27.0	29.6	35.8	33.0	38.0	2.2	27.4	26.3	CH Boo	2012/04/15/448	4963	82	M5 III	4.5	80.3	77.3	112.0	101.0	105.0	149.0	139.0	118.0	95.1	110.1	BY Boo	2013/07/07/491	5501	
22	M1 III	1	41.2	34.6	52.0	48.2	53.8	59.9	66.0	17.4	46.0	46.6	ES Leo	2011/04/12/465	3454	83	M4.5 III	4.5	71.9	66.1	101.0	86.9	100.0	130.0	126.0	83.0	85.2	95.6	FZ Cnc	2014/03/03/543	1544	
23	M1 IIab	1	34.9	27.9	44.1	39.7	48.4	51.5	55.1	17.2	39.0	39.9	75 Cyg	2014/11/15/499	8634	84	M5 III	5	107.0	117.0	138.0	107.0	124.0	195.0	168.0	183.0	116.6	142.4	W Tri	2010/06/13/749	718	
24	M1.5 III	1.5	35.5	20.2	45.3	47.1	55.7	50.3	66.5	35.0	40.8	44.5	φ Aqr	2012/10/02/555	7596	85	M5 III	5	110.0	116.0	136.0	107.0	130.0	178.0	175.0	201.0	119.8	144.1	AF Cyg	2010/01/05/449	8634	
25	M1.5 III	1.5	37.8	25.3	46.8	47.5	56.3	50.7	55.8	12.8	42.7	41.6	CF Boo	2011/06/18/541	4963	86	M5 III	5	84.3	83.9	115.0	98.0	104.0	147.0	150.0	138.0	97.0	115.0	HW Peg	2013/08/12/684	8634	
26	M1.5 IIlb	1.5	37.2	33.0	45.9	39.8	46.0	40.5	52.4	16.4	40.4	39.9	μ CrB	2012/08/30/447	7596	87	M5 III	5	71.1	63.5	95.5	90.3	100.0	141.0	135.0	107.0	84.9	101.1	MO Cep	2014/08/29/411	7596	
27	M2-Ia	2	35.3	39.0	35.4	42.9	46.8	54.4	66.6	16.2	39.9	42.1	μ Cep	2014/08/29/457	8634	88	M5 III	5	66.6	64.3	117.0	96.8	108.0	150.0	147.0	139.0	98.5	117.0	XZ Pic	2010/12/18/397	9087	
28	M2Iab	2	45.3	48.0	54.2	49.7	55.1	53.6	72.5	20.9	50.5	49.9	T Per	2013/12/29/504	718	89	M5IIa	5	95.7	108.0	113.0	85.0	96.7	169.0	127.0	228.0	100.3	133.8	ε 4 Ser	2013/05/03/538	5501	
29	M2Iab	2	44.5	51.2	58.9	48.0	54.0	60.6	72.8	30.5	51.3	52.6	NO Aur	2014/01/31/426	1544	90	M6III	6	117.0	128.0	138.0	103.0	117.0	187.0	171.0	220.0	120.8	147.8	S Dra	2012/02/10/803	4963	
30	M2 II	2	49.6	51.3	70.7	62.4	63.0	71.9	88.8	42.3	59.4	62.5	BE Cam	2010/08/31/808	718	91	M6 III	6	84.0	82.0	120.0	102.0	98.1	147.0	167.0	168.0	101.2	123.5	DL Pic	2011/08/04/770	8634	
31	M2 III	2	46.0	43.5	64.5	57.4	64.7	63.8	80.2	20.1	55.2	55.0	ν 1 CrB	2012/08/30/451	8634	92	M6 III	6	117.0	126.0	140.0	106.0	129.0	190.0	183.0	236.0	123.6	153.4	EU Del	2010/01/05/504	8634	
32	M2 III	2	37.1	22.6	43.3	42.9	54.3	56.9	63.0	25.5	40.0	43.2	ψ Leo	2012/03/20/557	3454	93	M6 III	6	115.0	125.0	148.0	112.0	128.0	186.0	181.0	214.0	125.6	151.1	RX Lep	2010/01/10/3737	1544	
33	M2 III	2	41.1	30.3	51.6	48.8	59.1	62.3	72.7	30.5	46.2	49.6	ω 2 Cyg	2011/01/28/481	8634	94	M6 III	6	77.2	74.2	108.0	92.4	106.0	147.0	140.0	116.0	91.6	107.6	UUM LMi	2012/03/26/521	3454	
34	M2 III	2	41.9	31.9	52.6	48.3	58.4	68.9	31.7	46.6	50.1	87 Vir	2012/01/29/833	4498	95	M7V	6	61.9	62.1	142.0	103.0	111.0	171.0	154.0	171.0	96.0	122.0	UV Cet	2010/01/29/848	1544		
35	M2 III	2	53.9	48.7	76.8	65.5	75.3	91.2	95.9	49.5	64.0	69.6	V771 Mon	2013/04/05/526	1544	96	M7	7	135.0	147.0	182.0	131.0	152.0	219.0	251.0	216.0	149.4	166.5	Y Cam	2012/01/31/464	1544	
36	M2 III	2	54.2	42.2	71.7	69.5	80.6	100.0	95.1	56.1	63.6	71.2	V694 Her	2014/08/27/429	7596	97	M7	7	113.0	126.0	147.0	115.0	122.0	192.0	189.0	226.0	124.6	153.8	KL Aqr	2020/06/22/751	8634	
37	M2 III	2	44.2	38.0	57.6	49.4	60.2	72.9	69.0	27.5	49.9	52.4	V1509 Cyg	2014/11/15/424	8634	98	M7	7	84.5	88.8	119.0	102.0	109.0	154.0	156.0	144.0	107.0	119.7	OT Del	2020/06/22/762	8634	
38	M2 III	2	32.9	21.5	43.2	45.2	52.5	52.1	69.4	20.1	39.1	42.1	IQ UMa	2011/05/19/481	4963	99	M7	7	115.0	124.0	149.0	117.0	121.0	179.0	172.0	228.0	125.2	150.6	SV Peg	2020/07/01/743	8634	
39	M2 III	2	42.1	33.6	51.4	47.4	58.4	64.8	71.2	37.2	46.7	50.8	HDB8389	2011/12/25/891	3454	100	M7	7	85.5	90.7	134.0	112.0	120.0	177.0	168.0	182.0	111.7	135.7	RS CrB	2020/08/27/457	7596	
40	M2 III	2	28.6	19.0	26.0	24.0	32.4	30.2	33.6	13.4	26.0	25.9	HDB7955	2011/12/25/805	3454	101	M7															

表2 に各サブクラスのサンプル数、表3 に光度階級のサンプル数を示す。

M型	サンプル数
M0	9
M0.5	4
M0.7	1
M1	9
M1.5	3
M2	17
M2.5	5
M3	17
M3.5	1
M4	15
M4.5	2
M5	6
M6	6
M7	15
M8	12
計	122

表2 サブクラスのサンプル数

光度階級	サンプル数
I	7
II	4
II-III	1
III	84
V	7
不明	19

表3 光度階級のサンプル数

光度階級ではIIIが多い。IとIIに関しては図3に記入した。

I やII がかけ離れた分布を示さないか気になったが、特にそういう兆候はないので除外しなかった。

2) 疑似等価幅測定

ew1～ew8までの疑似等価幅の測定範囲を図1に示した。M型星は基準となる連続光の位置が明瞭でないため疑似と名付けた。またew6,7,8は地球大気 O_2 と H_2O の吸収線の寄与が大きく (<http://otobs.org/FBO/mutter/telluric.pdf>)、且つ地球大気は観測高度や時期により絶えず変動する。そこでほぼ同高度で観測した分光標準星を利用して地球大気の影響を除外した。

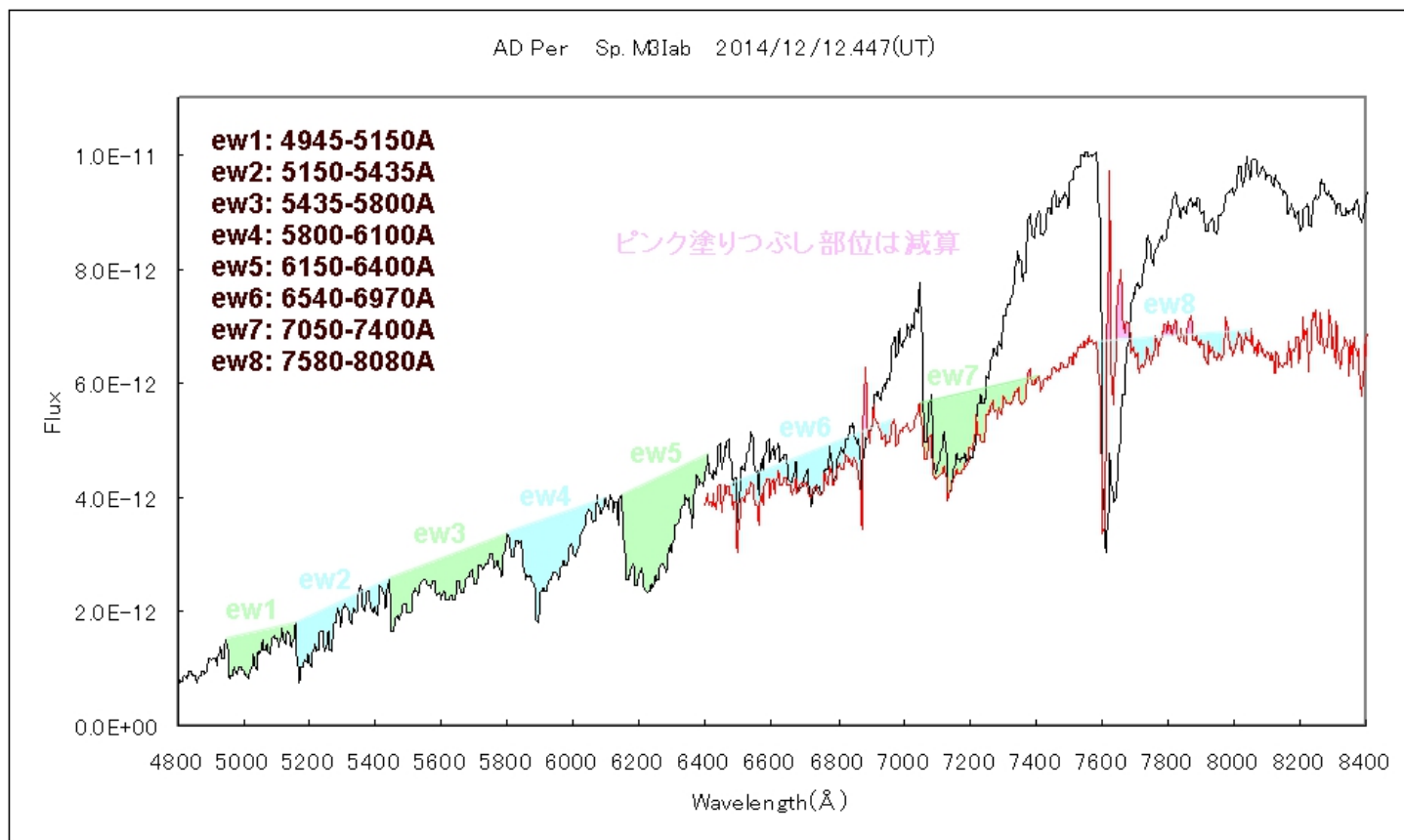


図1 測定したew1～8を示す。赤色は地球大気を除外したスペクトル。

地球大気除外は観測毎に同高度で得た分光標準星を用い、地球大気吸収が多く含まれる6400 Å -8600 Å 範囲を連続光で規格化した。また分光標準星には強いH α 吸収線(6563 Å)が含まれるのでカットした。 図2にそのスペクトルを示す。

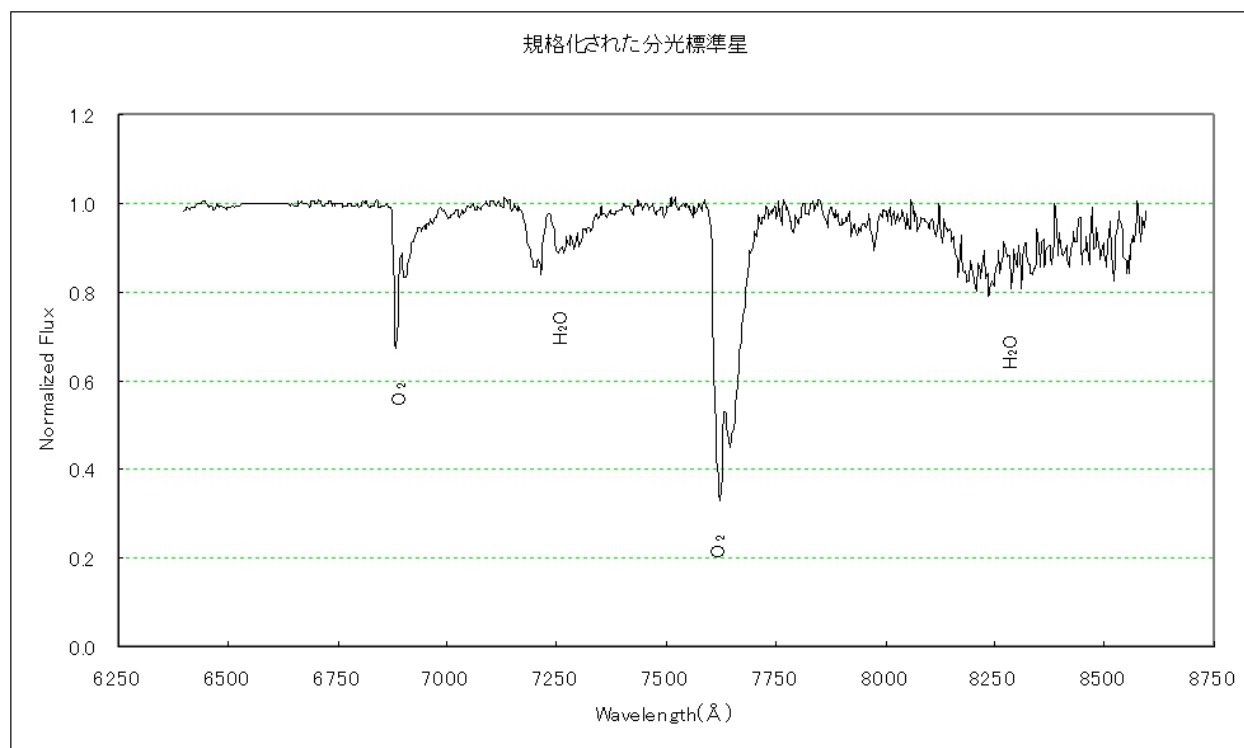
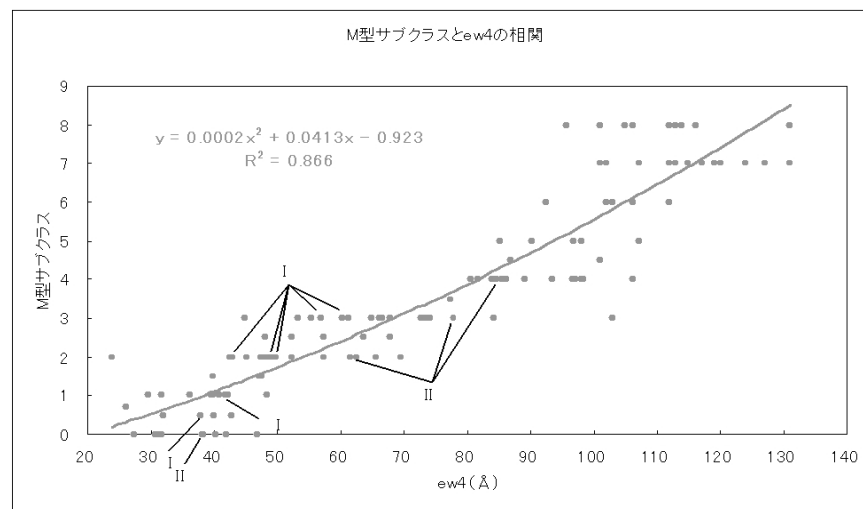
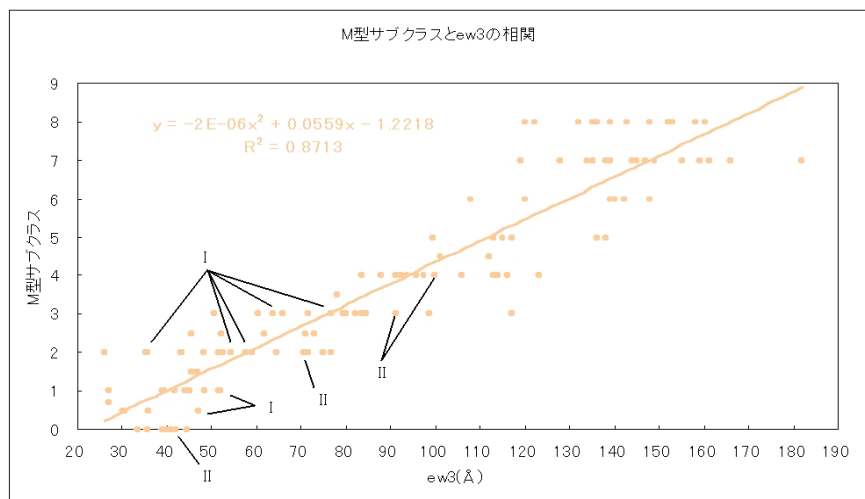
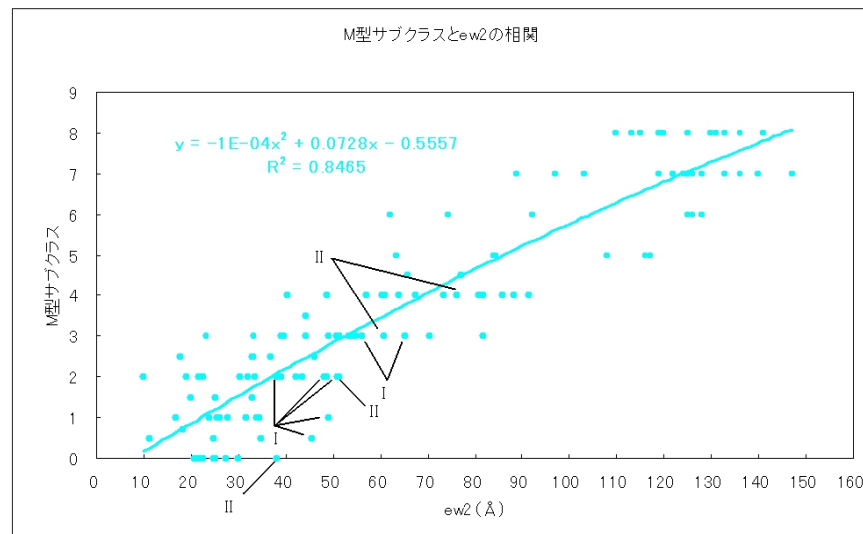
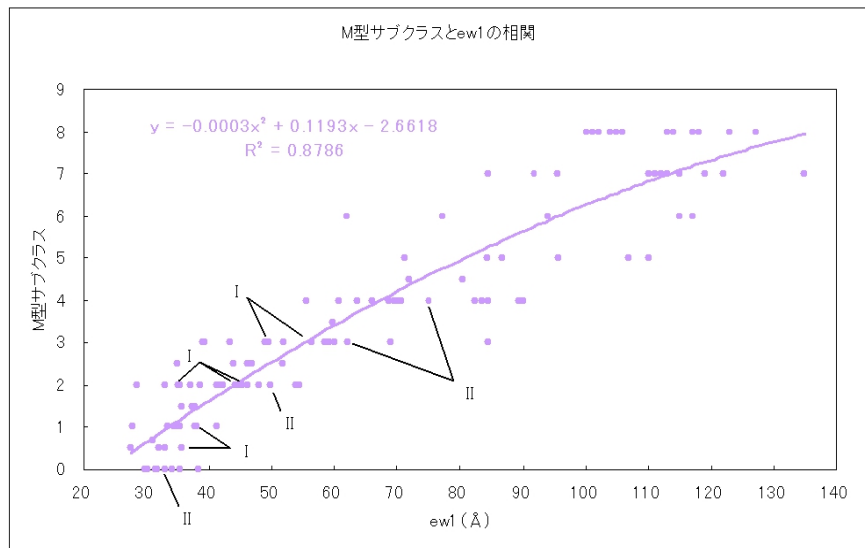


図2 地球大気の規格化。O₂やH₂Oの吸収が大きい。H α 吸収線はカットしている。

次に目的星のスペクトルをそのスペクトルで割り算した。得られたスペクトルが図1で赤色で示されている。ew6,7,8 の疑似等価幅測定はこの赤色スペクトルを用いた。

3) 疑似等価幅 vs M型サブクラスの相関

図3にew1～8の疑似等価幅 vs M型サブクラスを2次近似式で表したグラフを示す。



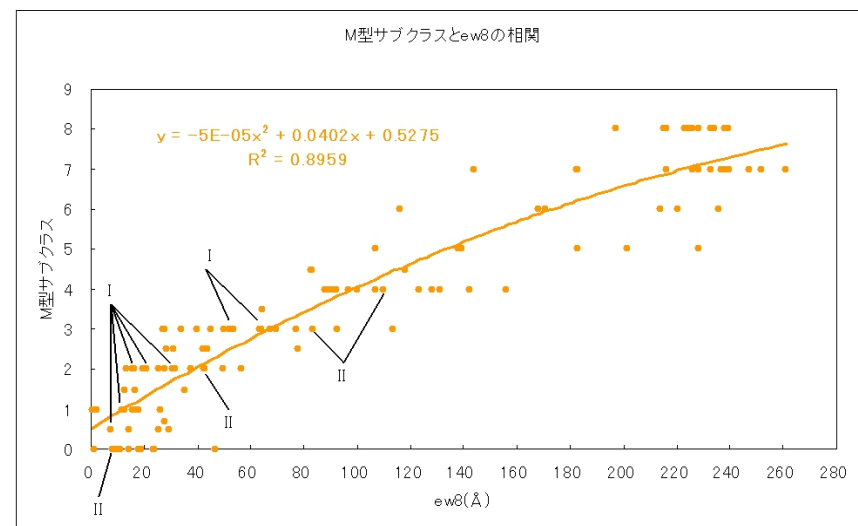
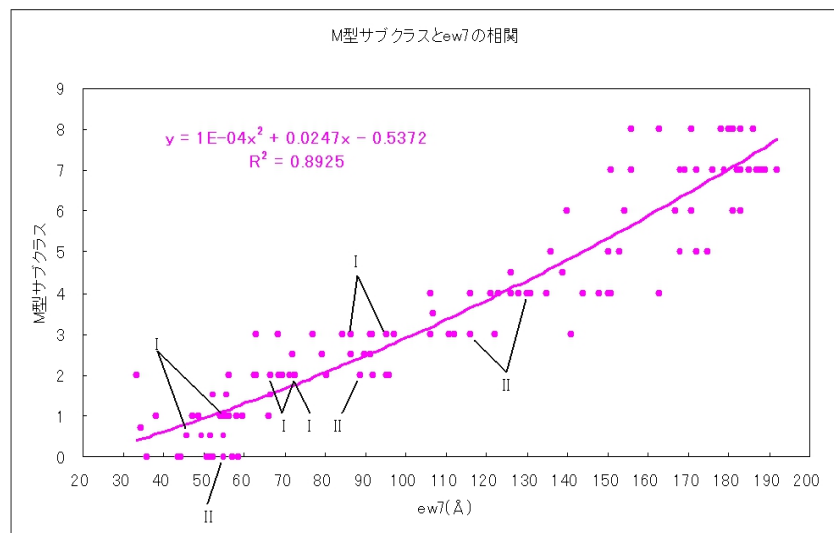
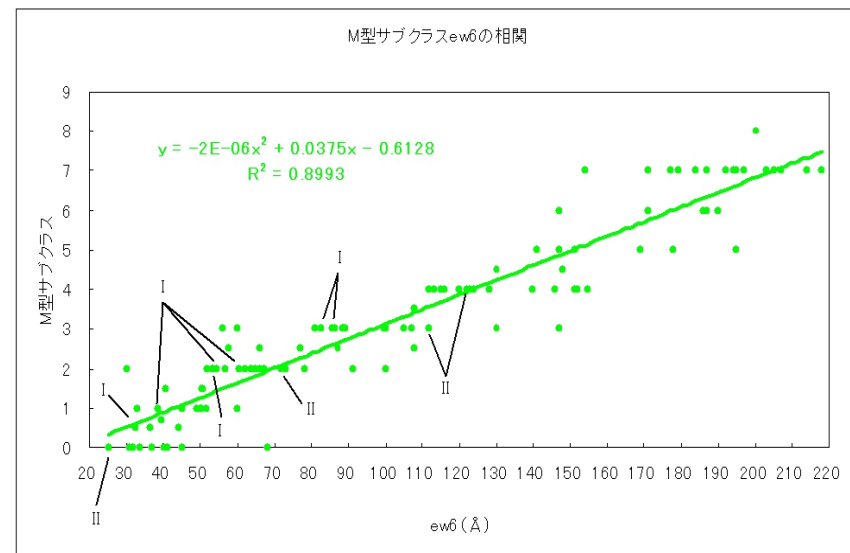
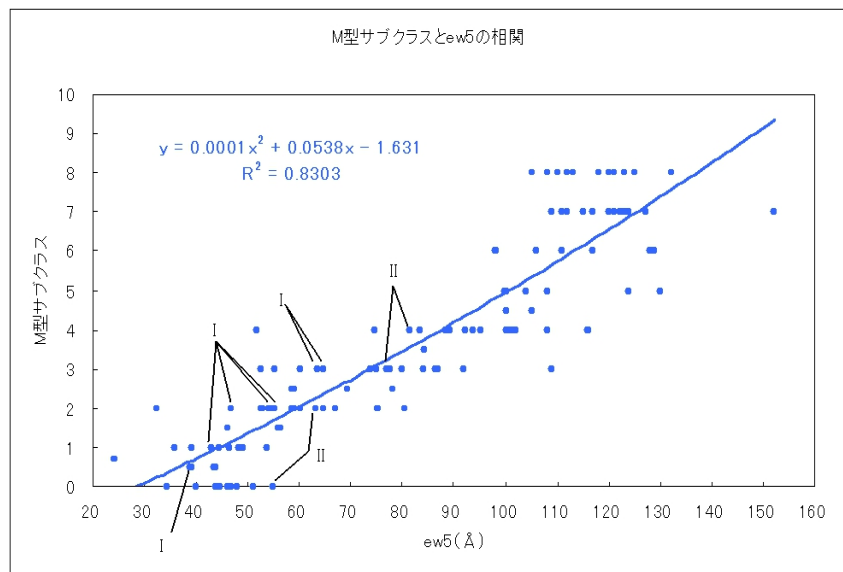


図3 ew1～ew8の2次近似式曲線を表す。

光度階級 I と II を記入してみるが、特に大きなばらつきはないように見受けられる。

表4のように ew1～ew8 の決定係数 R^2 をみると 0.83～0.90範囲である。

	R^2
ew1	0.88
ew2	0.85
ew3	0.87
ew4	0.87
ew5	0.83
ew6	0.90
ew7	0.89
ew8	0.90

表4 ew1～ew8 各々の決定係数 R^2

次に ew1～ew8 の疑似等価幅を平均し、2次近似式で表しその R^2 をみると図4のように0.901だった。

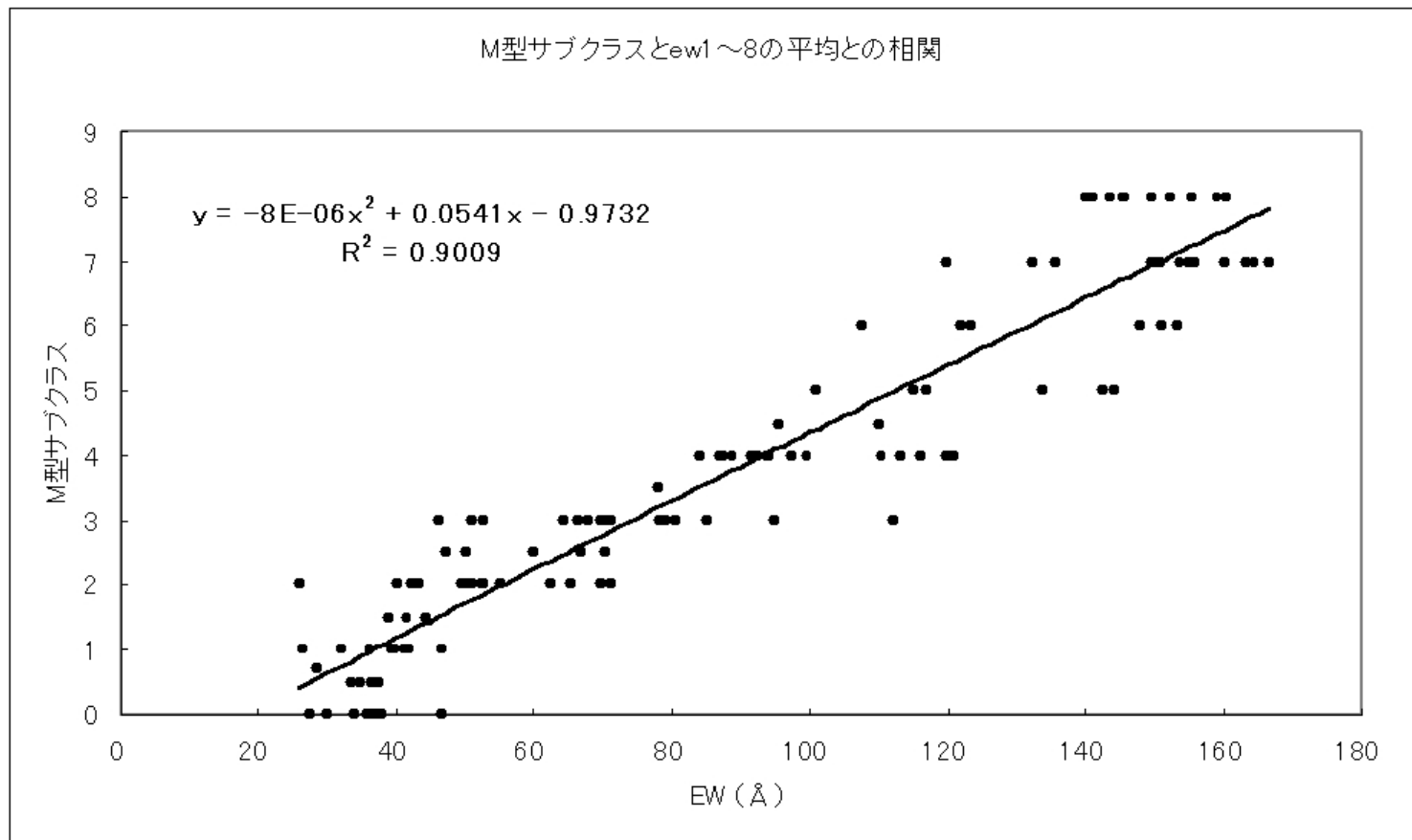


図4 ew1～ew8の疑似等価幅の平均の2次近似式曲線を表す。

よってM型星に関しては次の近似式でサブクラスが得られる。

$$M_{\text{sub}} = -8E-6 \cdot ew^2 + 0.0541 \cdot ew - 0.9732 \quad \text{---- ①}$$

M_{sub} = M型星のサブクラス ew = ew1～8 の疑似等価幅の平均値

ここで ew1～8の平均値を用いる場合、図2 のように ew6,7,8 を得るためには観測毎に同高度の分光標準星観測が必要となる。その場合観測と整約共に煩雑になる。

そこで分光標準星観測が不必要な ew1～5 の平均値を用いて近似式を求めたのものを図5に示す。

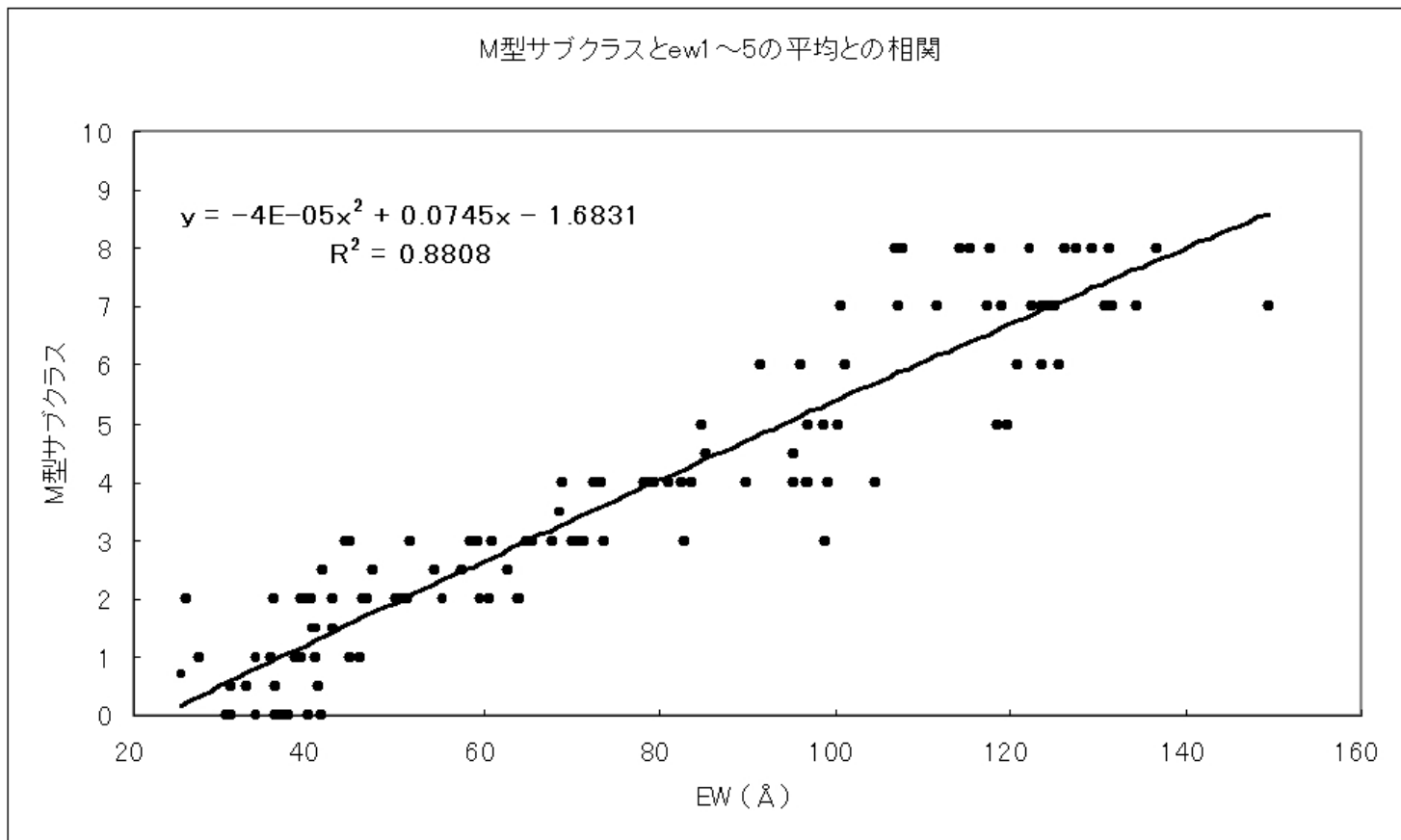


図5 ew1～ew5の疑似等価幅の平均の2次近似式曲線を表す。
この場合は同高度の分光標準星観測が不必要である。

この場合 R^2 を比較すると 0.90 → 0.88 と少し相関は低下しているが、この疑似等価幅からのサブクラス推定法では必要十分にも思える。

よって同高度分光標準星観測を省いた場合は次の近似式でサブクラスが得られる。

$$M_{\text{sub}} = -4E-5 \cdot ew^2 + 0.0745 \cdot ew - 1.6831 \quad \text{---- ②}$$

M_{sub} = M型星のサブクラス $ew = ew1 \sim 5$ の疑似等価幅の平均値

4) M型サブクラスから有効温度の推定

M型のサブクラスが分かると有効温度の推定が可能になる。

R.O.Gray STELLAR SPECTRAL CLASSIFICATION P.568 Table B.4 を参照し、サブクラス vs 有効温度の近似式を作成する。この文献では 光度階級 Ib, III, Vの三種についての有効温度が示されている。

	Ib	
M型サブクラス	Supergiants	
0	3790 K	
1	3745 K	
2	3660 K	
3	3605 K	
5	3450 K	

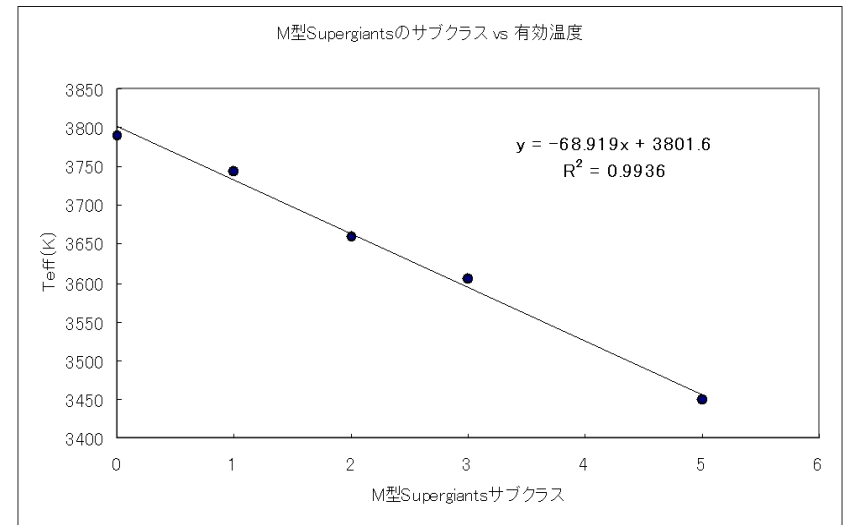
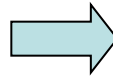


図6 Ib (Supergiants) のサブクラス vs 有効温度

	III	
M型サブクラス	Giants	
0	3845 K	
1	3750 K	
2	3655 K	
3	3560 K	
4	3460 K	
5	3355 K	
6	3240 K	
7	3100 K	
8	2940 K	
9	2755 K	

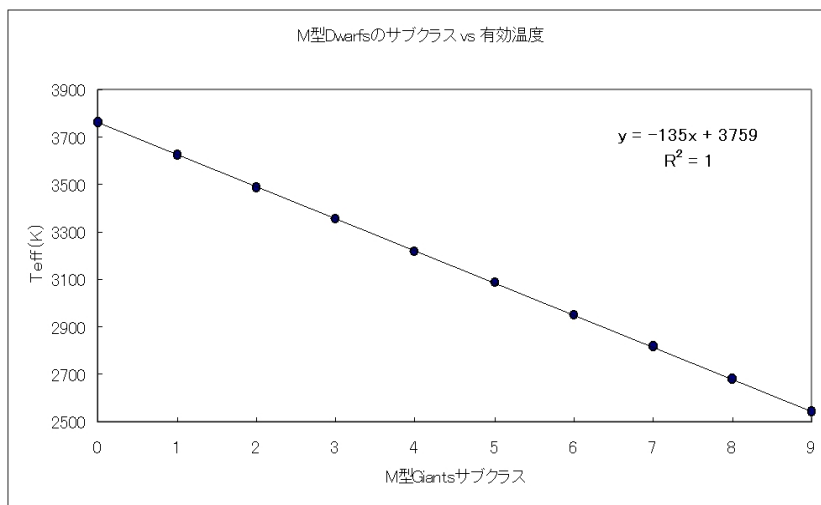
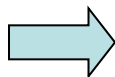


図7 III (Giants) のサブクラス vs 有効温度

	V	
M型サブクラス	Dwarfs	
0	3759 K	
1	3624 K	
2	3489 K	
3	3354 K	
4	3219 K	
5	3084 K	
6	2949 K	
7	2814 K	
8	2679 K	
9	2544 K	

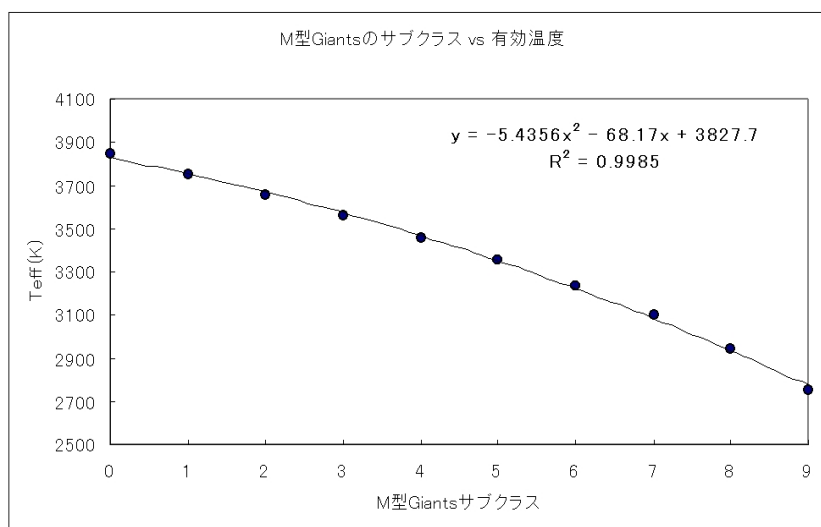
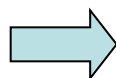


図8 V (Dwarfs) のサブクラス vs 有効温度

よってM型サブクラスからの有効温度推定は次の近似式で推定できる。

Ib (Supergiants) の場合 $T_{\text{eff}} = -8.919 * M_{\text{sub}} + 3801.6$ ---- ③

III (Giants) の場合 $T_{\text{eff}} = -5.4356 * M_{\text{sub}} + 3827.7$ ---- ④

V (Dwarfs) の場合 $T_{\text{eff}} = -135 * M_{\text{sub}} + 3759$ ---- ⑤

$M_{\text{sub}} = \text{M型星のサブクラス}$

参考文献

1) R.O.Gray STELLAR SPECTRAL CLASSIFICATION

2) <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>