

# 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( $R \sim 500$ )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 ( $R \sim 500$ ) + 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)	standard-star(HR No.)	No.	Sp. Type	M-subclass	ew1	ew2	ew3	ew4	ew5	ew6	ew7	ew8	ew1-5	ew1-8	stars	YMD(UT)	standard-star(HR No.)		
1	M0II	0	32.9	38.3	42.1	38.0	55.0	25.2	54.8	8.2	41.3	36.8	CG Cam	2011/10/07 839	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 Peg	2011/01/21 8400	9087		
2	M0III	0	31.4	30.0	40.9	30.8	51.1	33.8	44.3	23.4	39.6	35.7	$\mu$ UMa	2011/12/25 892	3454	63	M3III	3	58.4	50.7	82.0	72.8	86.2	105.0	111.0	67.1	70.0	79.2	HD88419	2011/01/22 1544	1544		
3	M0III	0	35.4	27.4	40.5	38.2	46.0	41.0	52.2	141.3	37.5	36.9	$\pi$ Gem	2012/10/15 820	718	64	M3IIIa	3	56.2	55.1	80.1	67.7	79.6	89.4	91.7	45.0	47.8	70.6	V934 Aur	2011/03/13 435	4354		
4	M0III	0	31.7	22.5	39.5	40.3	47.8	45.2	57.0	17.9	38.4	37.7	$\nu$ Aur	2012/10/20 823	1544	65	M3V	3	39.3	23.3	50.6	55.3	52.7	82.9	68.3	33.8	44.2	50.8	CE Boo	2011/04/09 755	5501		
5	M0III	0	31.8	21.7	39.1	41.9	46.7	37.2	51.7	18.9	38.2	36.1	$\nu$ Cet	2012/06/25 778	8634	66	M5III	3.5	59.6	44.4	77.9	72.2	84.4	108.0	107.0	64.4	68.7	77.9	V973 Cyg	2011/01/05 466	8634		
6	M0III	0	30.2	21.0	33.5	31.2	40.0	31.7	43.7	9.6	31.2	30.1	$\nu$ Gem	2012/10/15 826	718	67	M4II	4	75.1	76.4	99.8	84.7	81.4	122.0	130.0	11.0	83.5	97.4	$\delta$ 2 Vir	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	2012/01/28 798	3454	68	M4III	4	69.5	61.0	97.2	89.0	88.5	120.0	135.0	9.0	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	EQ Gem	2011/02/05 494	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	M0.5lab	0.5	35.6	45.5	47.3	37.9	38.9	32.4	45.9	7.5	41.0	36.4	V439 Per	2014/12/12 526	8634	71	M4III	4	70.0	63.9	97.4	85.4	95.1	123.0	126.0	9.0	82.4	93.9	DF Leo	2011/09/11 538	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	$\delta$ Oph	2012/08/11 465	7596	72	M4III	4	60.6	48.9	83.6	84.0	89.2	112.0	123.0	9.6	73.3	87.2	EL Psc	2011/08/04 767	8634		
12	M0.5IIIab	0.5	32.8	25.0	35.9	31.9	39.0	36.4	51.6	14.4	32.9	33.4	$\kappa$ Ser	2012/04/14 820	5501	73	M4III	4	66.0	57.2	93.6	85.8	93.6	123.0	128.0	9.1	79.2	92.4	HM UMa	2011/05/19 483	4963		
13	M0.5IIIb	0.5	32.0	35.0	30.5	40.1	43.7	44.4	49.5	25.4	36.3	37.6	$\nu$ Vul	2012/08/19 548	8634	74	M4III	4	9.0	91.6	116.0	98.3	100.0	150.0	163.0	9.9	120.7	12.7	IZ Aqr	2011/05/28 753	7596		
14	M0.7V	0.7	31.0	18.4	27.2	26.0	42.4	39.5	34.7	27.8	25.4	28.6	DL 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 Aqr	2010/09/13 568	8634		
15	M1lab	1	37.9	49.1	51.6	41.6	42.8	38.8	54.2	12.9	44.6	41.1	F2 Per	2014/12/14 626	8634	76	M4III	4	83.6	80.9	97.1	97.0	102.0	140.0	144.0	123.0	95.3	110.5	LO Her	2011/07/18 479	5501		
16	M1.1II	1.1	34.3	23.8	39.5	36.2	44.5	44.8	48.8	15.8	35.7	36.0	$\nu$ Vir	2012/01/28 8852	3454	77	M4III	4	82.4	81.9	114.0	98.0	108.0	146.0	148.0	128.0	96.9	113.3	PU Aur	2011/01/19 882	1544		
17	M1.1II	1.1	37.7	31.7	45.2	39.5	49.2	49.9	57.9	17.9	40.7	41.4	$\pi$ Eri	2012/01/05 519	718	78	M4III	4	63.6	60.5	92.3	115.0	116.0	87.9	78.7	88.7	87.7	88.7	RX LMi	2012/03/19 498	3454		
18	M1.1II	1.1	35.3	25.4	41.6	42.2	48.3	50.3	58.8	11.6	38.6	39.2	$\delta$ Vir	2011/05/18 484	4963	79	M4III	4	70.6	67.5	91.3	80.5	83.5	113.0	128.0	9.9	78.7	81.9	V1293 Aqr	2011/05/04 535	8634		
19	M1.1II	1.1	34.8	33.8	48.5	40.8	46.3	49.0	56.5	25.8	40.8	41.9	4 Cen	2014/12/20 541	8634	80	M4IIIa	4	75.1	73.4	106.0	93.4	101.0	128.0	131.0	89.0	88.6	99.6	$\mu$ Per	2011/09/14 804	718		
20	M1.1II	1.1	33.5	26.2	39.0	31.8	39.1	38.6	47.1	0.4	33.9	32.0	8 LMi	2014/12/20 768	1544	81	M4IV	4	55.6	40.5	87.8	85.7	74.6	116.0	106.0	107.0	68.8	84.2	EV Lac	2010/08/26 683	8634		
21	M1.1II	1.1	27.8	16.8	27.0	29.6	35.6	33.0	38.0	2.2	27.4	26.3	CH Boo	2011/05/16 548	4963	82	M4.5III	4	80.3	77.3	112.0	101.0	105.0	148.0	139.0	118.0	95.1	111.0	BY Boo	2013/03/07 479	5501		
22	M1.1II	1.1	41.2	34.6	52.0	48.2	53.8	59.9	66.0	17.4	46.0	46.6	ES Boo	2011/04/12 465	3454	83	M4.5III	4	51.9	66.1	101.0	98.0	86.0	100.0	130.0	83.0	85.2	87.6	F2 Cne	2014/08/03 5343	1544		
23	M1.1II	1.1	34.9	21.5	44.1	41.1	48.4	51.9	59.1	17.1	39.0	39.0	75 Cyg	2014/11/17 499	8634	84	M4III	5	107.0	117.0	138.0	120.0	124.0	140.0	168.0	118.0	124.2	140.0	W Vir	2016/03/13 749	718		
24	M1.1II	1.1	35.5	20.3	45.3	47.1	50.7	50.3	60.5	35.0	44.5	44.5	$\phi$ Aqr	2012/01/20 555	7950	85	M4III	5	111.0	110.0	136.0	116.0	107.0	150.0	173.0	125.0	20.0	119.8	147.0	AF Cys	2016/03/05 5448	8634	
25	M1.1II	1.1	31.8	25.3	46.0	47.5	53.3	50.7	58.8	12.8	40.7	41.6	DF Boo	2017/01/18 511	4963	86	M4III	5	84.9	83.0	98.1	115.0	108.0	147.0	150.0	130.0	138.0	94.5	15.0	HW Peg	2016/03/02 6264	8634	
26	M1.1II	1.1	32.7	33.0	45.9	39.8	50.6	40.0	54.4	16.4	40.4	39.9	$\mu$ UMa	2012/03/27 447	7596	87	M4III	5	111.5	65.5	98.0	100.0	140.0	130.0	136.0	97.0	107.0	101.0	MD Cep	2014/09/20 411	7596		
27	M2a	2	35.9	39.0	35.4	42.9	48.8	54.4	54.4	16.2	39.9	42.1	$\nu$ Cep	2014/12/23 457	8634	88	M4III	5	86.6	84.3	96.8	109.0	151.0	130.0	139.0	98.5	117.0	12.0	X2 Psc	2016/12/13 397	8087		
28	M2ab	2	45.3	49.0	54.0	49.7	55.1	53.6	72.5	20.9	205.0	49.9	T Per	2013/12/23 504	716	89	M5IIIa	5	95.7	103.0	130.0	85.0	90.0	169.0	172.0	220.0	228.0	100.3	133.8	54.4	54.4	2016/03/06 5358	5501
29	M2ab	2	44.5	51.2	58.9	48.0	54.0	60.4	60.4	72.8	30.8	51.3	52.6	N26	2014/01/31 426	1544	90	M7	6	11.0	12.0	120.0	110.0	117.0	120.0	120.0	10.0	124.0	147.0	5 Dra	2012/03/10 2083	4963	
30	M2II	2	49.6	51.3	70.7	62.4	62.0	71.9	78.8	9.8	20.2	27.5	49.9	52.4	10 UMa	2011/05/19 491	4963	91	M7	6	94.0	92.0	120.0	102.0	98.1	147.0	167.0	168.0	102.2	125.5	DL Psc	2011/08/04 770	8634
31	M2III	2	46.0	43.5	64.5	57.4	64.8	64.8	71.2	37.2	45.7	50.8	HDE389	2011/12/25 800	3454	92	M4III	6	11.0	12.0	120.0	108.0	120.0	120.0	120.0	117.7	13.6	134.4	U Delt	2016/01/05 5054	8634		
32	M2III	2	28.6	19.0	26.0	24.0	32.4	30.2	33.6	13.4	25.0	25.9	HDE755	2011/12/25 805	3454	93	M4III	6	11.0	12.5	148.0	112.0	128.0	186.0	181.0	214.0	125.6	151.1	RY Leo	2016/11/03 7377	1544		
41	M2IIIa	2	48.1	51.0	75.1	61.4	67.0	78.2	92.1	49.7	60.5	65.3	$\eta$ Gem	2011/01/29 462	718	102	M7	7	11.0	11.0	135.0	112.0	111.0	140.0	140.0	116.0	91.6	107.6	UU LMi	2012/03/25 6251	3454		
42	M2IIIa	2	38.4	32.1	48.3	42.5	52.9	53.2	67.5	15.5	42.8	43.2	ET Vir	2011/01/20 5680	4468	103	M7	7	12.0	13.6	159.0	124.0	117.0	214.0	182.0	261.0	131.6	164.4	EV Hyi	2020/11/14 8460	3454		
43	M2V	2	35.2	10.1	35.6	52.1	46.6	66.3	19.6	35.9	40.2	40.2	GX And	2010/08/16 697	8634	104	M7	7	91.9	10.0	120.0	112.0	171.0	169.0	183.0	107.2	132.4	CP Vir	2021/01/09 854	5181			
44	M2.5III	2.5	51.7	46.3	72.8	63.6	78.2	91.3	92.2	42.5	62.5	66.7	$\nu$ Lib	2013/01/28 900	4468	105	M7II-III	7	11.0	13.0	133.0	120.0	203.0	176.0	247.0	130.8	160.0	Y UMa	2020/12/19 5648	3454			
45	M2.5III	2.5	34.8	17.8	45.3	52.3	58.4	57.8	79.1	31.1	41.7	47.1	V1472 Aql	2011/07/16 624	8634	106	M7	7	84.5	88.8	119.0	102.0	109.0	150.0	156.0	144.0	100.7	119.7	CT Del	20			

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
IV	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つたが、特にそういう兆候はないので除外しなかつた。

## 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<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>O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。

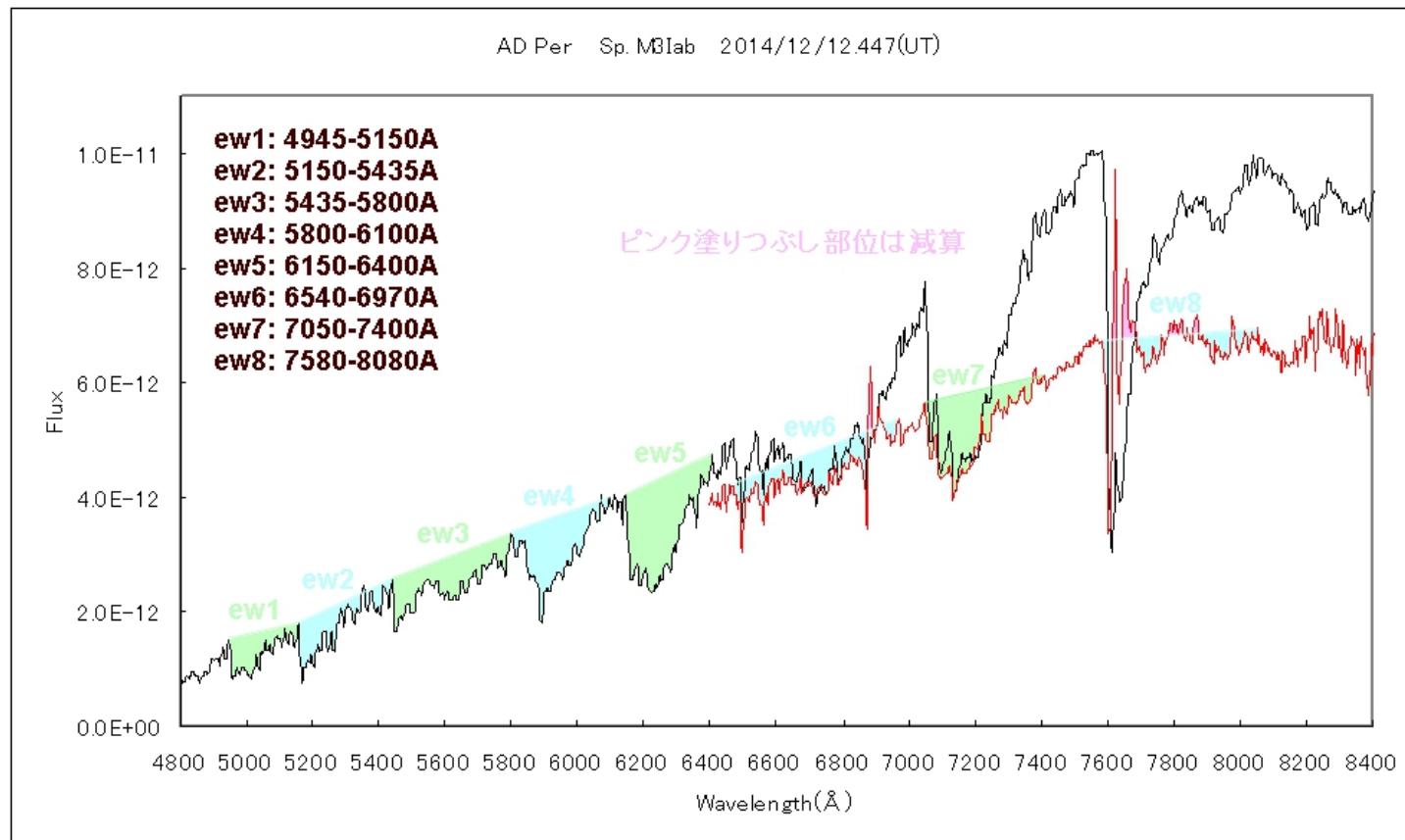


図1 測定したew1～8を示す。赤色は地球大気を除外したスペクトル。

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範囲を連續光で規格化した。また分光標準星には強いH $\alpha$ 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。

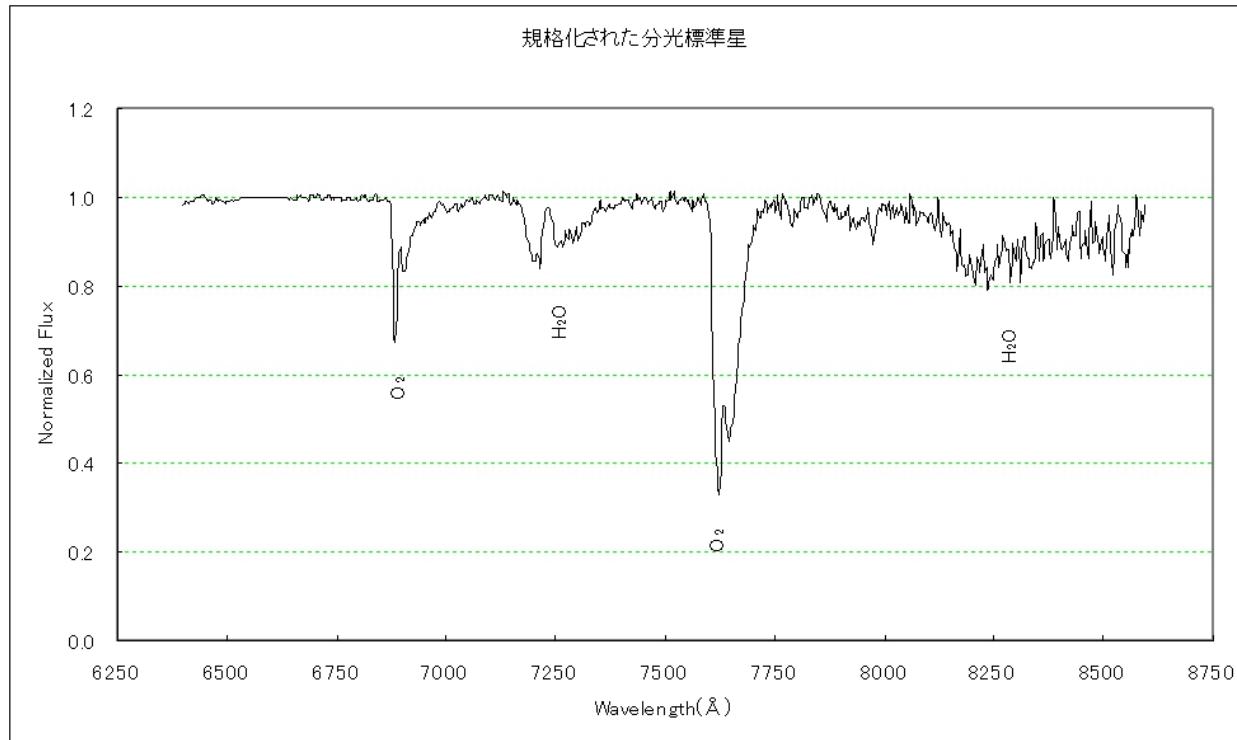
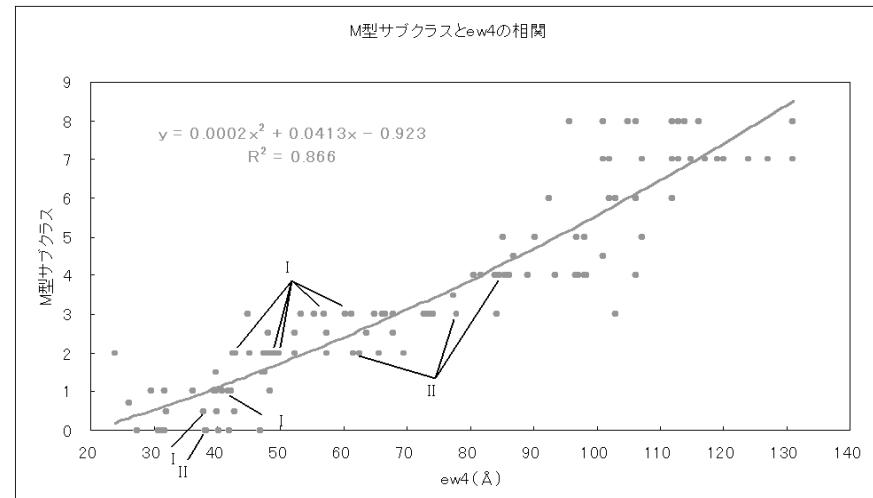
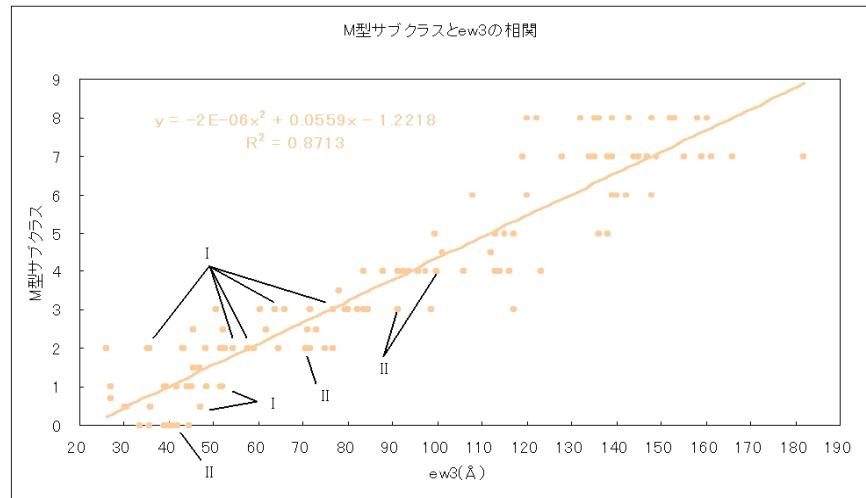
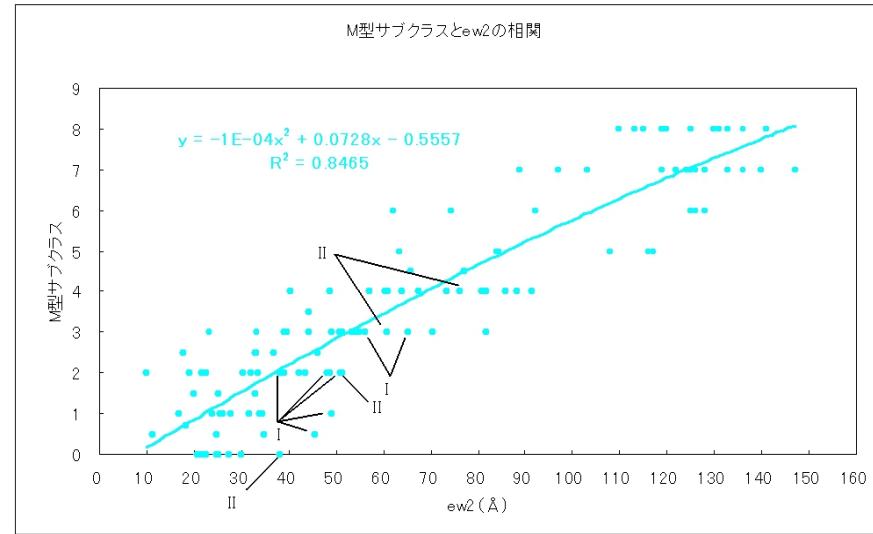
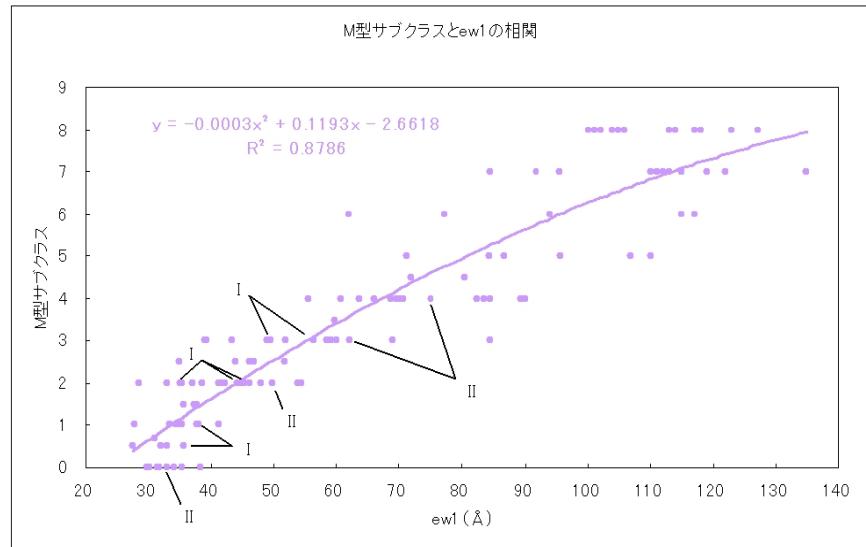


図2 地球大気の規格化。O<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Oの吸収が大きい。H $\alpha$ 吸収線はカットしている。

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。



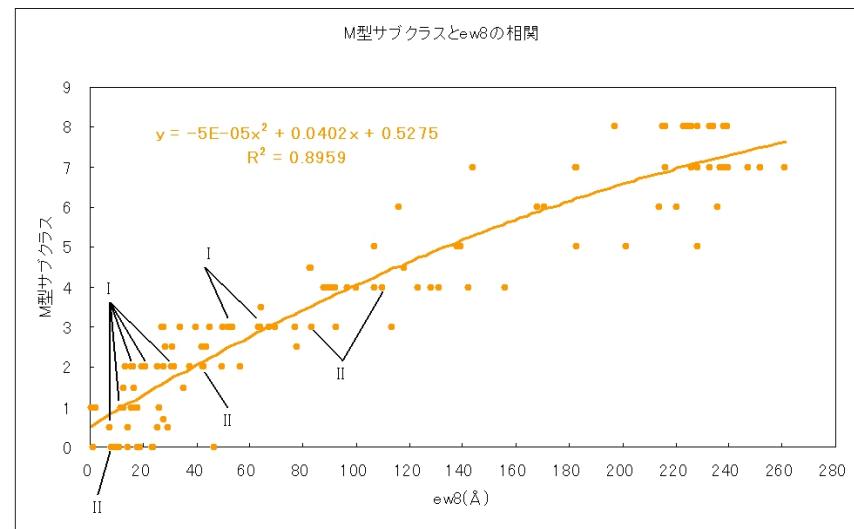
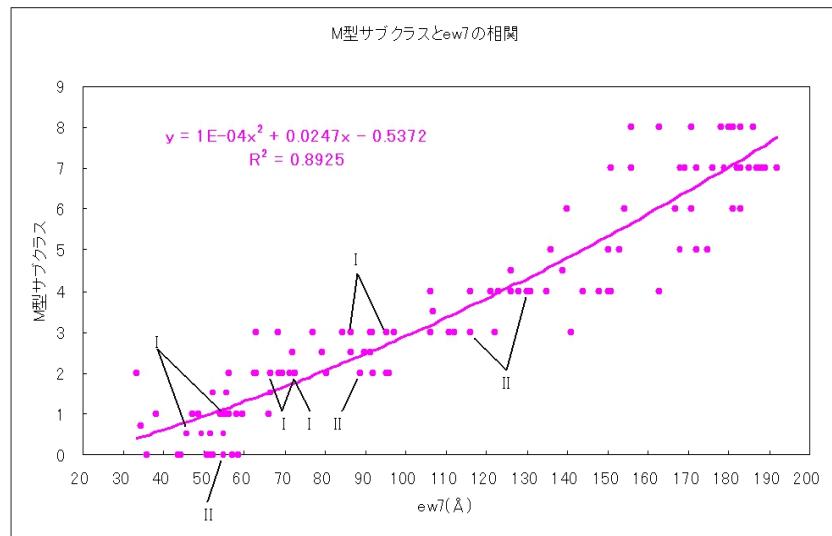
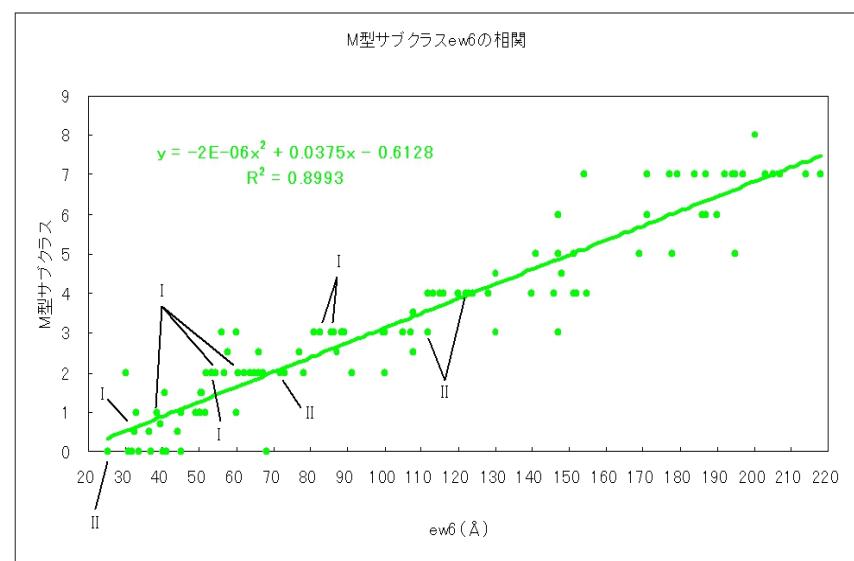
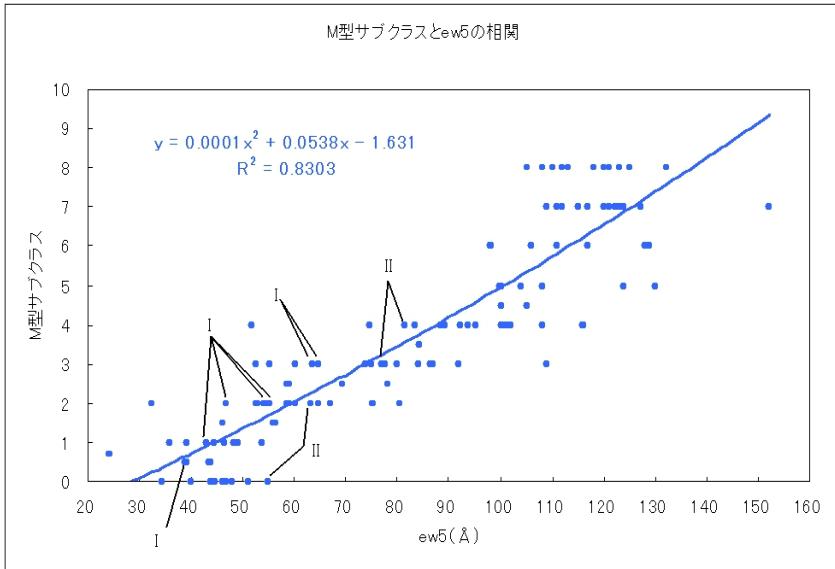


図3 ew1～ew8の2次近似式曲線を表す。

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  $ew1 \sim ew8$  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  $ew1 \sim ew8$  各々の決定係数  $R^2$

次に  $ew1 \sim ew8$  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。

M型サブクラスとew1～8の平均との相関

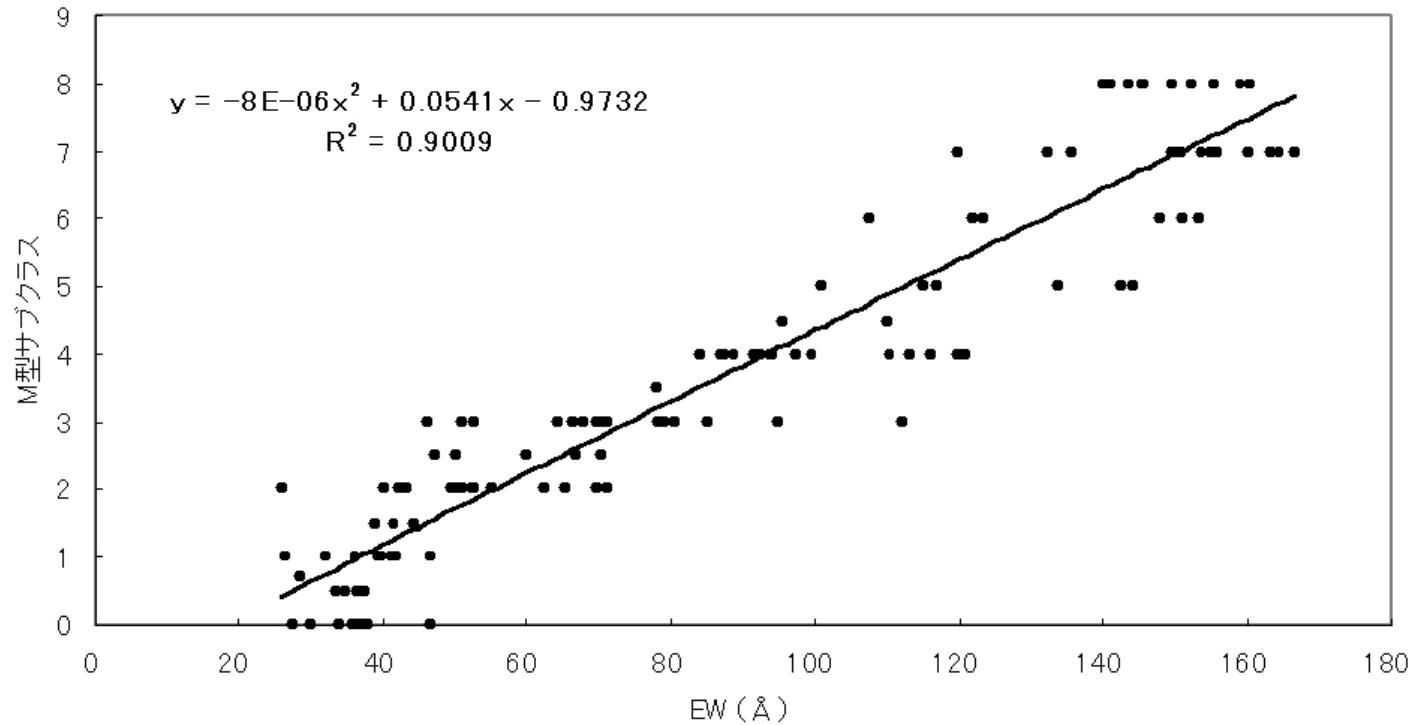


図4 ew1～ew8の疑似等価幅の平均の2次近似式曲線を表す。

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。

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

$M_{\text{sub}}$  = 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  $ew1 \sim 8$  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的  $ew1 \sim 5$  の平均値を用いて近似式を求めたのものを図5に示す。

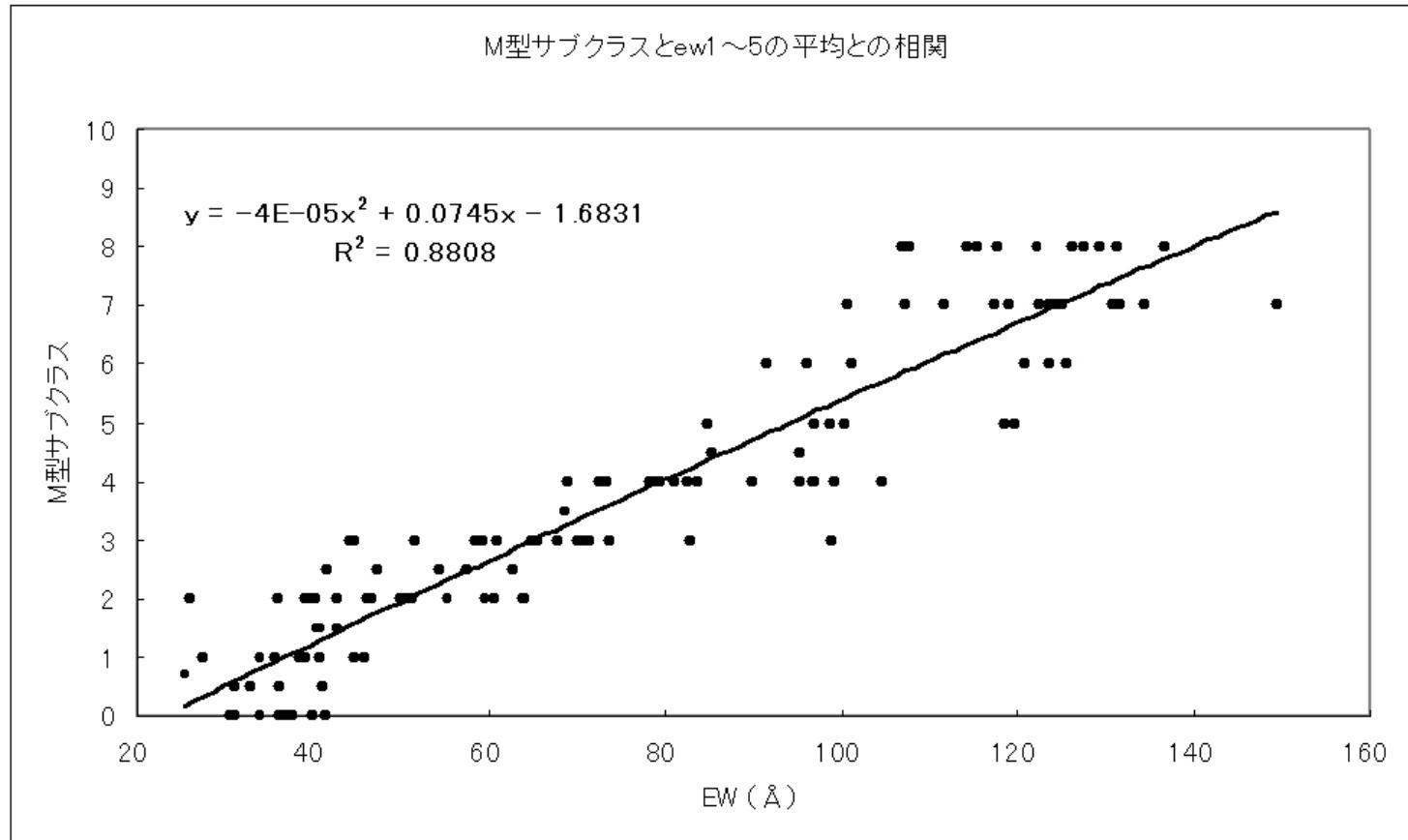


図5  $ew1 \sim ew5$  の疑似等価幅の平均の2次近似式曲線を表す。  
この場合は同高度の分光標準星観測が不要である。

この場合R<sup>2</sup>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。

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

**Msub** = M型星のサブクラス      **ew** = ew1～5 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	

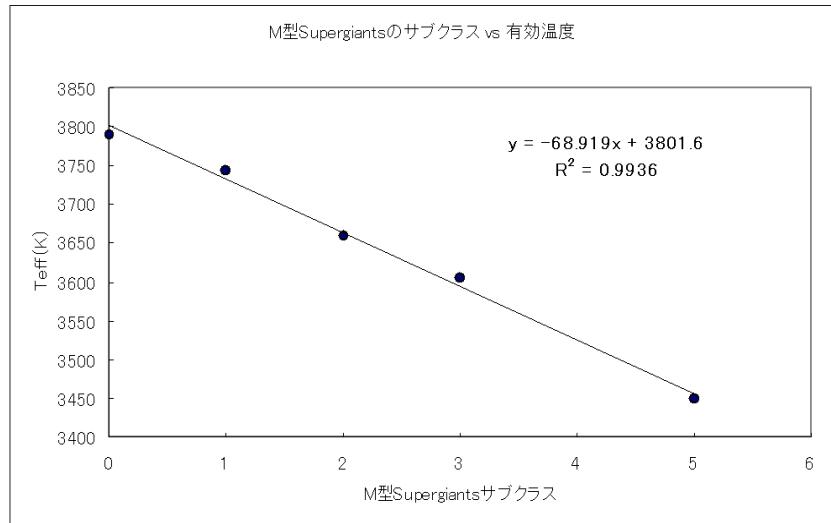
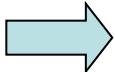


図6 Ib (Supergiants) のサブクラス vs 有効温度

	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	

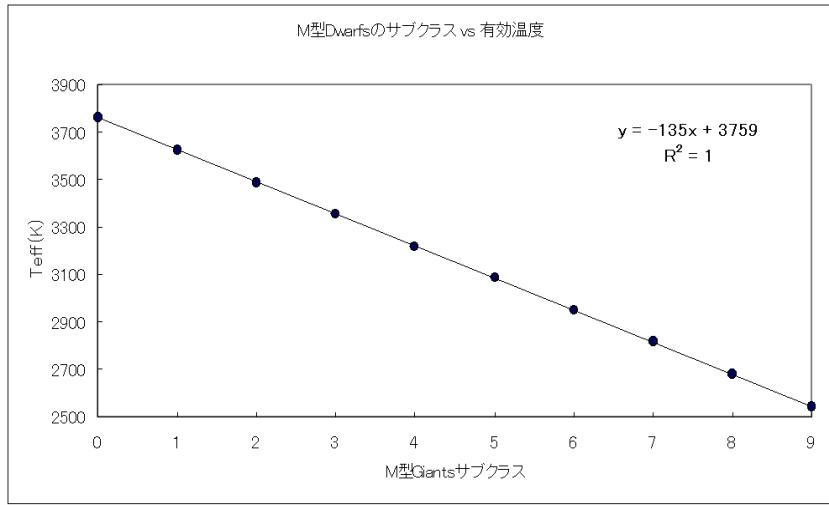
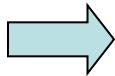


図7 III (Giants) のサブクラス vs 有効温度

	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	

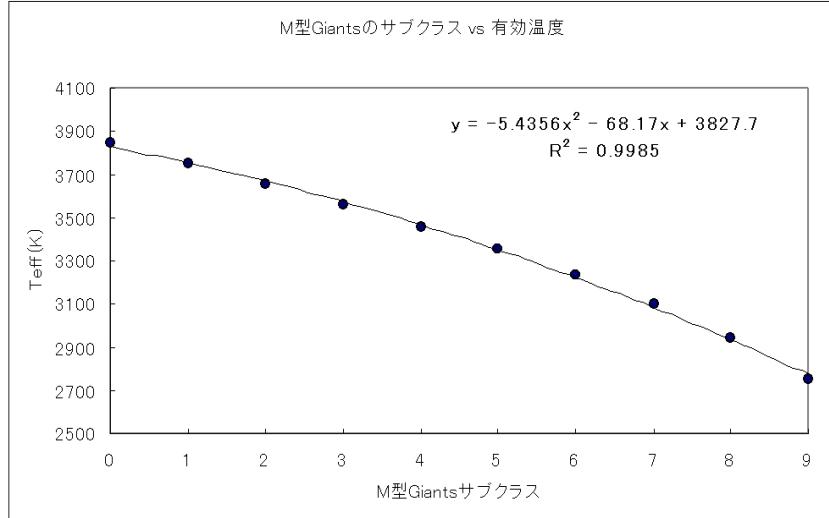
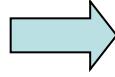


図8 V (Dwarfs) のサブクラス vs 有効温度

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  $T_{eff} = -8.919 * M_{sub} + 3801.6$  ---- ③

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

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

$M_{sub}$  = 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/>