測色の歴史と発展(3)

前号より続く

木村哲也
須賀茂雄

4.1.3　CIE 1931 測色標準観測者の等色関数(続)

表 2（P.17）に、CIE 1931 測色標準観測者の等色関数と色度座標を、**図 13** に等色関数、**図 14** にその色度座標のグラフを示す。

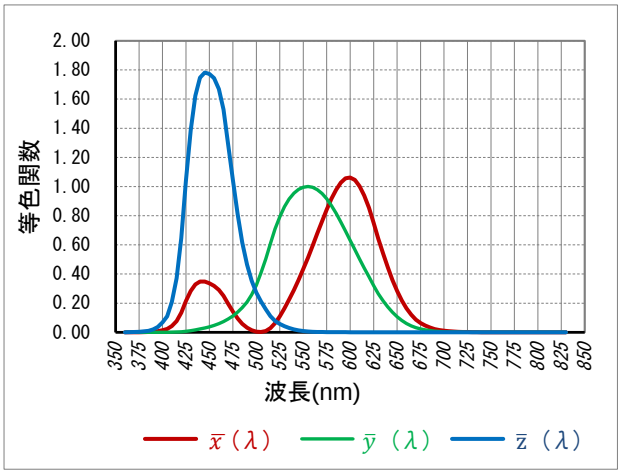

図 13　CIE1931 測色標準観測者の等色関数

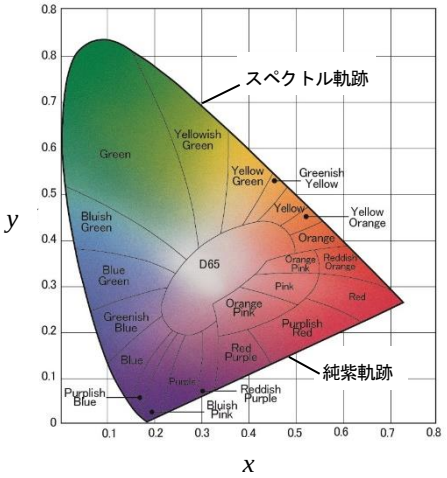

図 14　CIE 1931 測色標準観測者の色度座表

図 14 の馬蹄形の外周は 1nm 毎の単波長のスペクトルの等色関数を下記の計算式の結果を横軸 x、縦軸 y で表したグラフである。

$$x = \bar{x}(\lambda) / (\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda))$$

$$y = \bar{y}(\lambda) / (\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda))$$

$\bar{x}(\lambda)$、$\bar{y}(\lambda)$、$\bar{z}(\lambda)$色空間を斜角投影すると**図 15** のようになる[8]。

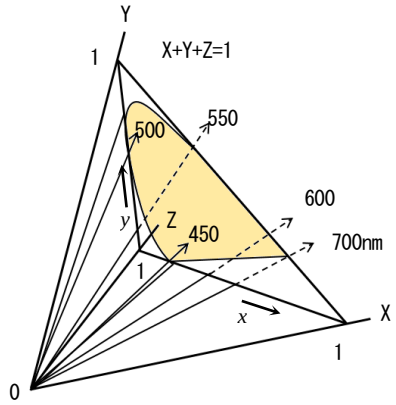

図 15　$\bar{x}(\lambda)$、$\bar{y}(\lambda)$、$\bar{z}(\lambda)$色空間の斜角投影図

スペクトルは正の値を持った原色量$\bar{x}(\lambda)$、$\bar{y}(\lambda)$、$\bar{z}(\lambda)$によって作り出されるが、混色によって作りだされるような 3 つの光は存在しない架空のものである。色覚正常者であれば、**図 15** から下記の点が上げられる。

①長波長側の極に近いスペクトル(700～770nm)はただ 1 点で表される。色度は不変なので、長波長エンド・ストレッチと呼ばれ、輝度を調節すれば完全に等色される。

②540～700nm にかけてはスペクトル線が色度図上の 1 つの直線に極めて近づいている。この間のスペクトル刺激は両端のスペクトル刺激を適当な割合で配合すると極めてよく等色される。この範囲はビトウィーン・ストレッチと呼ばれ、異常色覚の検査に用いられる。

③290～540nm の範囲は著しく湾曲している。この範囲のスペクトル光を加色混合してもその中間のスペクトル光の光度とは等しくならない[8]。

この馬蹄形の外周は、スペクトル軌跡と呼ばれ、各波長の最も鮮やかな色の色度点を示す。また、短波長側の色度点端と長波長側の色度点端を結ぶ直線は、純紫軌跡と呼ばれ、この直線と馬蹄形に囲まれている領域

は任意のスペクトル光の加法混色によって作り出されうる範囲である。

4.1.4　CIE 1964 測色補助標準観測者の等色関数

産業界では、2 つの色を比較するときには 10°或いはもっと大きい視野で判定することが多い。分光分布が異なる 2 つの試料は、10°視野で比較したときには同じに見えても 2°視野で比較すると等色でなくなることがある。ある種の試料について分光データから計算した三刺激値と厳密な意味では、実際の観測者によって得られた三刺激値が高い相関を持つためには、2°視野を用いることが大事である。

大きい視野が用いられる主要な理由は等色精度を上げるためである。視角に関して、Judd は 1930 年に、視角を大きくすることにより色度を合わせる精度が急激に増大することを示した [8]。**図 16** は円形視野と色度決定の不確実さを示すグラフであり、視角を 2°から 10°に広げることにより色度を決定する精度は 2.5 倍以上に上がることを示している。そして、視野の大きさをそれ以上広げても精度はそれほど上がらないことを示した。

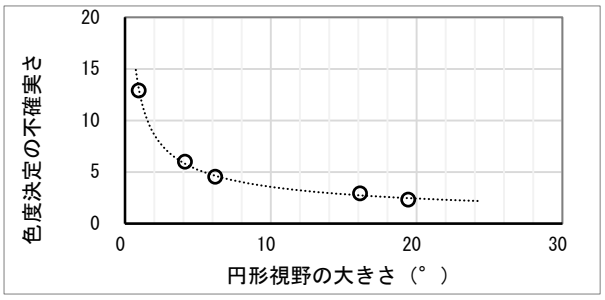

図 16　円形視野と色度決定の不確実さ

ここで視角とは、**図 17** に示すように対象物を見る時の、目の角度を表し、視角が 10°の場合、対象物の大きさは、50cm 離れたところから、直径 8.8cm の大きさを見ることになる [9]。

2°視野と 10°視野での判定が異なる原因は始め眼の黄斑色素の影響と考えられた。Stiles と Wyszecki が 1962 年に発表した平均的な 21 歳の人の眼の水晶体色素と黄斑色素の分光吸収率を**図 18** に示す [8]。

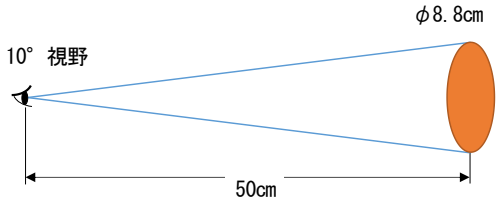

図 17　CIE1964 標準観測者の視角

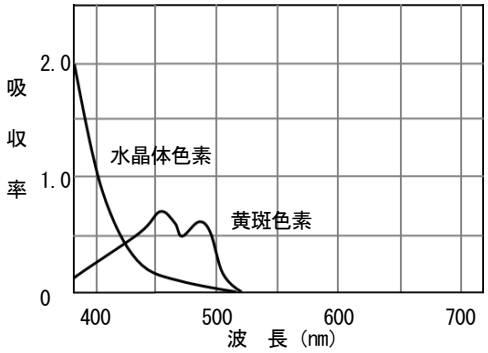

図 18　眼の水晶体色素と黄斑色素の分光吸収率

黄斑色素の分光吸収率が 430～490nm で最大になるためと考えられたが、これだけでなく 1955 年に Stiles と Burch は 2°視野と 10°視野の等色関数を比較した。多数の観測者について両等色関数をさらに詳細に研究すると、黄斑色素沈着に加えて、錐体の分光感度にも局所的に変動があり、主としてスペクトルの長波長端における桿体（かんたい）の影響を含めて違いを生じると考えられた。

CIE 1931 測色標準観測者および座標系が推奨されたのは、「それが正常な色覚を有する実在の観測者の中にある」と信じられたからである。その後、大きい視野に関する検討が CIE の中で行われた。

CIE 1931 測色標準観測者の等色関数については、特に 380nm から 460nm の波長領域で $\bar{x}(\lambda)$ $\bar{y}(\lambda)$ $\bar{z}(\lambda)$ の値は低すぎると報告されたため、1951 年に Judd はこの問題をまとめて論じ、スペクトルの短波長領域で新しく比視感度を定めることにより、修正した等色関数を計算した [10]。終局的に CIE 測色標準観測者のデータ $\bar{x}(\lambda)$ $\bar{y}(\lambda)$ $\bar{z}(\lambda)$ は変えずに、新しい等色関数である CIE 1964 測色補助標準観測者の等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ $\bar{y}_{10}(\lambda)$ $\bar{z}_{10}(\lambda)$ で補足することとし、さらに、

大きな視角(観測者の目に対して 4° をこえるもの)の視野における視感等色とより良い相関を望むときには、新しい等色関数を用いるように勧告した。これは 1959 年の Stiles 及び Burch、並びに Speranskaya の実験結果から導かれたものである。$\bar{r}_{10}(\lambda)$ $\bar{g}_{10}(\lambda)$ $\bar{b}_{10}(\lambda)$は原刺激として、波長 645.2nm(R)、526.3nm(G)、444.4nm(B)のスペクトル刺激をとって、等エネルギースペクトルの色度座標が全て等しくなるようにその単位を調整したもので表された。67 名の観測者の重み付き平均を用いて、$\bar{r}_{10}(\lambda)$ $\bar{g}_{10}(\lambda)$ $\bar{b}_{10}(\lambda)$から等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ $\bar{y}_{10}(\lambda)$ $\bar{z}_{10}(\lambda)$を求めた。**表 3**（P.18）に CIE 1964 測色補助標準観測者の等色関数を、**図 19** にそのグラフを示す[10]。

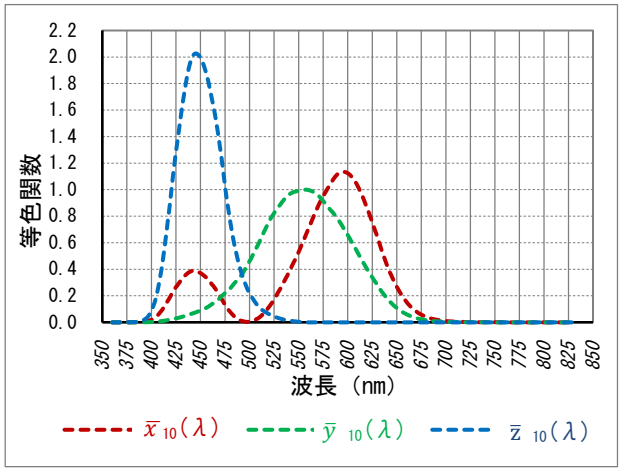

図 19　CIE1964 測色補助標準観測者の等色関数

CIE 1931 測色標準観測者の等色関数と CIE 1964 測色補助標準観測者の等色関数を比較すると、**図 20** のようになる。CIE 1964 測色補助標準観測者の等色関数は、CIE 1931 測色標準観測者の等色関数に比べて短波長側の補正がなされていることが分かる。また、**図 21** に標準観測者の色度座標の比較を示す。

CIE 1964 測色補助標準観測者によって定義される大視野の等色データは、視覚機構に桿体が寄与しないと考えられる輝度と相対分光分布を持つ刺激の状態において適応することを意図したものである[10]。桿体は第 2 項でも記したように暗所視の状態(夜間、日の出や星の光の下、曇り空等)で働き、眼の中心窩(ちゅうしんか)の 2° 以内

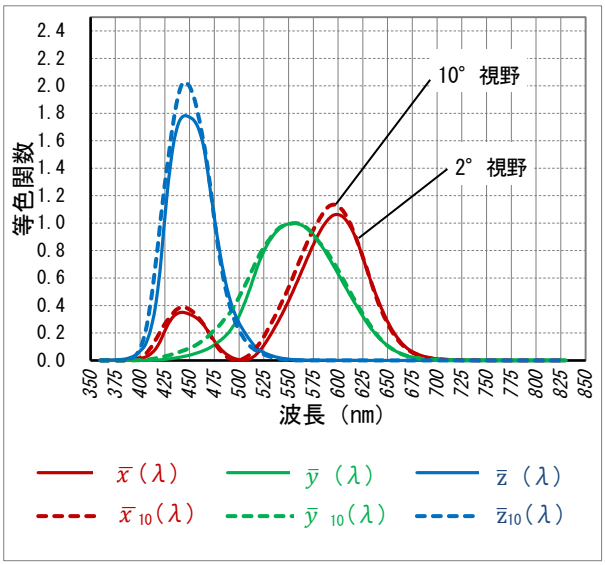

図 20　等色関数の比較

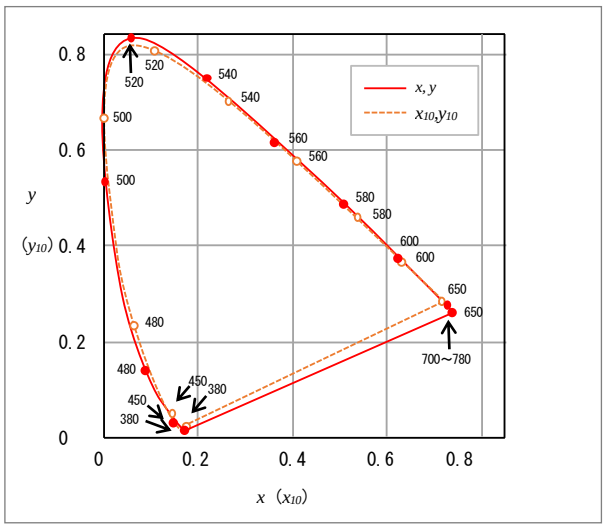

図 21　標準観測者の色度座標の比較

の領域には存在せず、中心窩～約 20° のところで最大密度になる。又、明所視の環境では、桿体の感度は失われる。これに対して、錐体は中心窩を除き、網膜の全域に分布し、網膜像を作っている放射束の密度が高く、桿体が反応できない場合にもその感度を失わない。明所視はほとんど錐体からくるので色合わせ時の環境は明所視の状態で行わなければならない。

【参考文献】
8) 応用色彩学 D.B.ジャッド/G.ヴィスツェッキー著
9) Colour　スガ試験機(株)　技術資料
10)測色　第 2 版　CIE 標準：測色の光　測色標準観測者

表 2　CIE 1931 測色標準観測者の等色関数

（注:原表は 1nm 間隔で記載されているが、ページの都合上５ｎｍで記載した）

波長	等色関数			色度座標		
(nm)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
360	0.00013	0.00000	0.00061	0.17556	0.00529	0.81915
365	0.00023	0.00001	0.00109	0.17516	0.00526	0.81958
370	0.00041	0.00001	0.00195	0.17482	0.00522	0.81996
375	0.00074	0.00002	0.00349	0.17451	0.00518	0.82031
380	0.00137	0.00004	0.00645	0.17411	0.00496	0.82093
385	0.00224	0.00006	0.01055	0.17401	0.00498	0.82101
390	0.00424	0.00012	0.02005	0.17380	0.00492	0.82128
395	0.00765	0.00022	0.03621	0.17356	0.00492	0.82152
400	0.01431	0.00040	0.06785	0.17334	0.00480	0.82186
405	0.02319	0.00064	0.11020	0.17302	0.00478	0.82220
410	0.04351	0.00121	0.20740	0.17258	0.00480	0.82262
415	0.07763	0.00218	0.37130	0.17209	0.00483	0.82308
420	0.13438	0.00400	0.64560	0.17141	0.00510	0.82349
425	0.21477	0.00730	1.03905	0.17030	0.00579	0.82391
430	0.28390	0.01160	1.38560	0.16888	0.00690	0.82422
435	0.32850	0.01684	1.62296	0.16690	0.00855	0.82455
440	0.34828	0.02300	1.74706	0.16441	0.01086	0.82473
445	0.34806	0.02980	1.78260	0.16111	0.01379	0.82510
450	0.33620	0.03800	1.77211	0.15664	0.01771	0.82565
455	0.31870	0.04800	1.74410	0.15099	0.02274	0.82627
460	0.29080	0.06000	1.66920	0.14396	0.02970	0.82634
465	0.25110	0.07390	1.52810	0.13550	0.03988	0.82462
470	0.19536	0.09098	1.28764	0.12412	0.05780	0.81808
475	0.14210	0.11260	1.04190	0.10960	0.08684	0.80356
480	0.09564	0.13902	0.81295	0.09129	0.13270	0.77601
485	0.05795	0.16930	0.61620	0.06871	0.20072	0.73057
490	0.03201	0.20802	0.46518	0.04539	0.29498	0.65963
495	0.01470	0.25860	0.35330	0.02346	0.41270	0.56384
500	0.00490	0.32300	0.27200	0.00817	0.53842	0.45341
505	0.00240	0.40730	0.21230	0.00386	0.65482	0.34132
510	0.00930	0.50300	0.15820	0.01387	0.75019	0.23594
515	0.02910	0.60820	0.11170	0.03885	0.81202	0.14913
520	0.06327	0.71000	0.07825	0.07430	0.83380	0.09190
525	0.10960	0.79320	0.05725	0.11416	0.82621	0.05963
530	0.16550	0.86200	0.04216	0.15472	0.80586	0.03942
535	0.22575	0.91485	0.02984	0.19288	0.78163	0.02549
540	0.29040	0.95400	0.02030	0.22962	0.75433	0.01605
545	0.35970	0.98030	0.01340	0.26578	0.72432	0.00990
550	0.43345	0.99495	0.00875	0.30160	0.69231	0.00609
555	0.51205	1.00000	0.00575	0.33736	0.65885	0.00379
560	0.59450	0.99500	0.00390	0.37310	0.62445	0.00245
565	0.67840	0.97860	0.00275	0.40873	0.58961	0.00166
570	0.76210	0.95200	0.00210	0.44406	0.55472	0.00122
575	0.84250	0.91540	0.00180	0.47878	0.52020	0.00102
580	0.91630	0.87000	0.00165	0.51249	0.48659	0.00092
585	0.97860	0.81630	0.00140	0.54479	0.45443	0.00078
590	1.02630	0.75700	0.00110	0.57515	0.42423	0.00062
595	1.05670	0.69490	0.00100	0.60293	0.39650	0.00057
600	1.06220	0.63100	0.00080	0.62704	0.37249	0.00047
605	1.04560	0.56680	0.00060	0.64823	0.35140	0.00037
610	1.00260	0.50300	0.00034	0.66576	0.33401	0.00023
615	0.93840	0.44120	0.00024	0.68008	0.31975	0.00017
620	0.85445	0.38100	0.00019	0.69151	0.30834	0.00015
625	0.75140	0.32100	0.00010	0.70061	0.29930	0.00009
630	0.64240	0.26500	0.00005	0.70792	0.29203	0.00005
635	0.54190	0.21700	0.00003	0.71403	0.28593	0.00004
640	0.44790	0.17500	0.00002	0.71903	0.28094	0.00003
645	0.36080	0.13820	0.00001	0.72303	0.27695	0.00002
650	0.28350	0.10700	0.00000	0.72599	0.27401	0.00000
655	0.21870	0.08160	0.00000	0.72827	0.27173	0.00000
660	0.16490	0.06100	0.00000	0.72997	0.27003	0.00000
665	0.12120	0.04458	0.00000	0.73109	0.26891	0.00000
670	0.08740	0.03200	0.00000	0.73199	0.26801	0.00000
675	0.06360	0.02320	0.00000	0.73272	0.26728	0.00000
680	0.04677	0.01700	0.00000	0.73342	0.26658	0.00000
685	0.03290	0.01192	0.00000	0.73405	0.26595	0.00000
690	0.02270	0.00821	0.00000	0.73439	0.26561	0.00000
695	0.01584	0.00572	0.00000	0.73459	0.26541	0.00000
700	0.01136	0.00410	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
705	0.00811	0.00293	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
710	0.00579	0.00209	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
715	0.00411	0.00148	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
720	0.00290	0.00105	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
725	0.00205	0.00074	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
730	0.00144	0.00052	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
735	0.00100	0.00036	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
740	0.00069	0.00025	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
745	0.00048	0.00017	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
750	0.00033	0.00012	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
755	0.00023	0.00008	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
760	0.00017	0.00006	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
765	0.00012	0.00004	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
770	0.00008	0.00003	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
775	0.00006	0.00002	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
780	0.00004	0.00001	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
785	0.00003	0.00001	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
790	0.00002	0.00001	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
795	0.00001	0.00001	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
800	0.00001	0.00000	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
805	0.00001	0.00000	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
810	0.00001	0.00000	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
815	0.00000	0.00000	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
820	0.00000	0.00000	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
825	0.00000	0.00000	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000
830	0.00000	0.00000	0.00000	0.73469	0.26531	0.00000

出典：ISO 11664-1　Colorimetry - Part 1: CIE standard colorimetric observers

表 3　CIE 1964 測色補助標準観測者の等色関数

(注：原表は 1nm 間隔で記載されているが、ページの都合上５ｎｍで記載した)

波長	等色関数			色度座標		
(nm)	$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$	$x_{10}(\lambda)$	$y_{10}(\lambda)$	$z_{10}(\lambda)$
360	0.00000	0.00000	0.00000	0.18222	0.01998	0.79780
365	0.00000	0.00000	0.00000	0.18210	0.01994	0.79796
370	0.00001	0.00000	0.00003	0.18192	0.01988	0.79820
375	0.00003	0.00000	0.00015	0.18167	0.01980	0.79853
380	0.00016	0.00002	0.00070	0.18133	0.01969	0.79898
385	0.00066	0.00007	0.00293	0.18091	0.01954	0.79955
390	0.00236	0.00025	0.01048	0.18031	0.01935	0.80034
395	0.00724	0.00077	0.03234	0.17947	0.01904	0.80149
400	0.01911	0.00200	0.08601	0.17839	0.01871	0.80290
405	0.04340	0.00451	0.19712	0.17712	0.01840	0.80448
410	0.08474	0.00876	0.38937	0.17549	0.01813	0.80638
415	0.14064	0.01446	0.65676	0.17323	0.01781	0.80896
420	0.20449	0.02139	0.97254	0.17063	0.01785	0.81152
425	0.26474	0.02950	1.28250	0.16790	0.01871	0.81339
430	0.31468	0.03868	1.55348	0.16503	0.02028	0.81469
435	0.35772	0.04960	1.79850	0.16217	0.02249	0.81534
440	0.38373	0.06208	1.96728	0.15902	0.02573	0.81525
445	0.38673	0.07470	2.02730	0.15539	0.03002	0.81459
450	0.37070	0.08946	1.99480	0.15100	0.03644	0.81256
455	0.34296	0.10626	1.90070	0.14594	0.04522	0.80884
460	0.30227	0.12820	1.74537	0.13892	0.05892	0.80216
465	0.25409	0.15276	1.55490	0.12952	0.07787	0.79261
470	0.19562	0.18519	1.31756	0.11518	0.10904	0.77578
475	0.13235	0.21994	1.03020	0.09573	0.15909	0.74518
480	0.08051	0.25359	0.77213	0.07278	0.22924	0.69798
485	0.04107	0.29767	0.57006	0.04519	0.32754	0.62727
490	0.01617	0.33913	0.41525	0.02099	0.44011	0.53890
495	0.00513	0.39538	0.30236	0.00730	0.56252	0.43018
500	0.00382	0.46078	0.21850	0.00559	0.67454	0.31987
505	0.01544	0.53136	0.15925	0.02187	0.75258	0.22555
510	0.03747	0.60674	0.11204	0.04954	0.80230	0.14816
515	0.07136	0.68566	0.08225	0.08502	0.81698	0.09800
520	0.11775	0.76176	0.06071	0.12524	0.81019	0.06457
525	0.17295	0.82333	0.04305	0.16641	0.79217	0.04142
530	0.23649	0.87521	0.03045	0.20706	0.76628	0.02666
535	0.30421	0.92381	0.02058	0.24364	0.73987	0.01649
540	0.37677	0.96199	0.01368	0.27859	0.71130	0.01011
545	0.45158	0.98220	0.00792	0.31323	0.68128	0.00549
550	0.52983	0.99176	0.00399	0.34730	0.65009	0.00261
555	0.61605	0.99911	0.00109	0.38116	0.61816	0.00068
560	0.70522	0.99734	0.00000	0.41421	0.58579	0.00000
565	0.79383	0.98238	0.00000	0.44692	0.55308	0.00000
570	0.87866	0.95555	0.00000	0.47904	0.52096	0.00000
575	0.95116	0.91518	0.00000	0.50964	0.49036	0.00000
580	1.01416	0.86893	0.00000	0.53856	0.46144	0.00000
585	1.07430	0.82562	0.00000	0.56544	0.43456	0.00000
590	1.11852	0.77741	0.00000	0.58996	0.41004	0.00000
595	1.13430	0.72035	0.00000	0.61160	0.38840	0.00000
600	1.12399	0.65834	0.00000	0.63063	0.36937	0.00000
605	1.08910	0.59388	0.00000	0.64713	0.35287	0.00000
610	1.03048	0.52796	0.00000	0.66122	0.33878	0.00000
615	0.95074	0.46183	0.00000	0.67306	0.32694	0.00000
620	0.85630	0.39806	0.00000	0.68266	0.31734	0.00000
625	0.75493	0.33955	0.00000	0.68976	0.31024	0.00000
630	0.64747	0.28349	0.00000	0.69548	0.30452	0.00000
635	0.53511	0.22825	0.00000	0.70099	0.29901	0.00000
640	0.43157	0.17983	0.00000	0.70587	0.29413	0.00000
645	0.34369	0.14021	0.00000	0.71025	0.28975	0.00000
650	0.26833	0.10763	0.00000	0.71371	0.28629	0.00000
655	0.20430	0.08119	0.00000	0.71562	0.28438	0.00000
660	0.15257	0.06028	0.00000	0.71679	0.28321	0.00000
665	0.11221	0.04410	0.00000	0.71789	0.28211	0.00000
670	0.08126	0.03180	0.00000	0.71873	0.28127	0.00000
675	0.05793	0.02260	0.00000	0.71934	0.28066	0.00000
680	0.04085	0.01591	0.00000	0.71976	0.28024	0.00000
685	0.02862	0.01113	0.00000	0.72002	0.27998	0.00000
690	0.01994	0.00775	0.00000	0.72016	0.27984	0.00000
695	0.01384	0.00538	0.00000	0.72030	0.27970	0.00000
700	0.00958	0.00372	0.00000	0.72036	0.27964	0.00000
705	0.00661	0.00256	0.00000	0.72032	0.27968	0.00000
710	0.00455	0.00177	0.00000	0.72023	0.27977	0.00000
715	0.00314	0.00122	0.00000	0.72009	0.27991	0.00000
720	0.00217	0.00085	0.00000	0.71991	0.28009	0.00000
725	0.00151	0.00059	0.00000	0.71969	0.28031	0.00000
730	0.00104	0.00041	0.00000	0.71945	0.28055	0.00000
735	0.00073	0.00028	0.00000	0.71919	0.28081	0.00000
740	0.00051	0.00020	0.00000	0.71891	0.28109	0.00000
745	0.00036	0.00014	0.00000	0.71861	0.28139	0.00000
750	0.00025	0.00010	0.00000	0.71829	0.28171	0.00000
755	0.00018	0.00007	0.00000	0.71796	0.28204	0.00000
760	0.00013	0.00005	0.00000	0.71761	0.28239	0.00000
765	0.00009	0.00004	0.00000	0.71724	0.28276	0.00000
770	0.00006	0.00003	0.00000	0.71686	0.28314	0.00000
775	0.00005	0.00002	0.00000	0.71646	0.28354	0.00000
780	0.00003	0.00001	0.00000	0.71606	0.28394	0.00000
785	0.00002	0.00001	0.00000	0.71564	0.28436	0.00000
790	0.00002	0.00001	0.00000	0.71521	0.28479	0.00000
795	0.00001	0.00001	0.00000	0.71477	0.28523	0.00000
800	0.00001	0.00000	0.00000	0.71432	0.28568	0.00000
805	0.00001	0.00000	0.00000	0.71387	0.28613	0.00000
810	0.00001	0.00000	0.00000	0.71341	0.28659	0.00000
815	0.00000	0.00000	0.00000	0.71294	0.28706	0.00000
820	0.00000	0.00000	0.00000	0.71247	0.28753	0.00000
825	0.00000	0.00000	0.00000	0.71200	0.28800	0.00000
830	0.00000	0.00000	0.00000	0.71152	0.28848	0.00000

出典：ISO 11664-1　Colorimetry - Part 1: CIE standard colorimetric observers