

気象学の色遣い

～均等色空間を利用したカラーリング～

稲津 将*・濱田 篤**

要旨

気象要素の定量的な表現が直感と一致するような配色を提案する。まず、RGB 表色系であらわされる単色グラデーションを CIE LAB 均等色空間を使って補正する方法を解説する。また、虹色について隣接する色の差やユニバーサルデザインなどの問題を解決する新たな虹色を提案する。

1. はじめに

2000年ころから、各種媒体の電子化に伴って、気象学の図版をカラーで目にする機会が増えた。学術論文においては、それまで原則白黒の図のみであったのが、米国地球物理学連合 (AGU) を筆頭にオンラインによる論文の出版が台頭し、原則カラーではないかと思えるほどに論文の図はカラー化されている。また、同時期に、日本気象学会等の口頭発表も、白黒印刷した OHP にカラーペンで書き込みや塗りつぶしを施した時代から、プロジェクターによって図や文章をスクリーンに投影する時代へと激変した^{†1}。これによって、投影される図はほぼカラーとなり、聴衆の色覚的直感に訴える発表が可能になった。

多くの気象要素は色のイメージをもっている。もともともわかりやすい例は、寒い印象を与える青によって低温を表し、暖かい印象を与える赤によって高温を表すことである。その他にも、森の緑、土の茶色、雪氷の白、あるいは水の青といった物体特有の色による表現もある。低気圧を赤、高気圧を青などという天気図

上の慣例もある。風には色のイメージはないが、たとえば色のイメージのある他の気象要素に、矢印を重ねることで、風と他の気象要素とを同時に把握することができる。

そのようななか、著者たちは色の違いの視覚的な非均一性が原因で、気象要素の定量的な表現と直感が必ずしも一致しない可能性を考えた。具体的に、青から赤へのグラデーションを考えてみる。この例の場合、青から白を経由して赤に至るのか、あるいは虹色によって表現するのか、の2通りのグラデーションが主に使われる。前者の場合はそれほど大きな問題にならないだろう。一方、後者の場合、緑色付近で色の差を感じる事が困難な場合が多い。このことはこれまでにもたびたび指摘されており、無批判に慣例で用いている虹色は避けるべきという議論もある (Borland and Taylor 2007; Stauffer *et al.* 2015)。とくに、Light and Bartlein (2004) は色覚に関するユニバーサルデザインの観点から虹色は避けるべきと議論しており説得力がある。ともかく図の表現として、等間隔の気象データに対し視覚的に等間隔のグラデーションを施すことが合理的であるのは間違いない。そうでなければ、たとえば気象学的にみて均一な温度変化である図を、さもある部分で急激な温度変化があるかのような

* (連絡責任著者) 北海道大学大学院理学研究院, 札幌市北区北10条西8丁目.
inaz@mail.sci.hokudai.ac.jp

** 東京大学大気海洋研究所.

—2016年3月15日受領—
—2016年7月18日受理—

^{†1} 日本気象学会においては、2001年度春季大会より PC プロジェクターの利用が始まり (「天気」2000年12月号)、ついに2010年度秋季大会より PC プロジェクターのみとなった (「天気」2010年5月号)。

作為的な色覚表現が可能になるからである。

本稿の目的は、視覚的に色の間隔が均等になるようなグラデーションを作る方法を与えることにある。ただし、注意報・警報のように、ある閾値を超えることに特別な意味づけが必要な場合、そこに黄色や赤色などの注意喚起を促す色を用いることは否定しない。つまり、本稿には視覚的に等間隔なグラデーションを例外なく推奨する意図はない。

2. 色に関する基礎知識

色と色との視覚的区別は、色彩工学においても長年の問題として考察されてきた。本節では、以降の説明に必要な色に関する最小限の知識をまとめる。

2.1 光の三原色

色は無数にあるがどの色もある基本的な色の組み合わせによって表現できる。プロジェクターに投影する場合はレッド (R)、ライム¹² (G)、およびブルー (B) のいわゆる「光の三原色」であり、紙に印刷する場合はシアン (C)、マゼンタ (M)、およびイエロー (Y) のいわゆる「色の三原色」に、黒 (K)¹³を加えた四色である。RGB と CMYK を併記すると混乱するので、以降は RGB のみを議論する。

ある原色は別の原色同士の組み合わせによって表現できないが、すべての色は基本的にこれら原色の組み合わせによって表現できる。たとえば、萌黄色は R=170, G=207, B=83 である。このようにして考えると、すべての色を RGB を成分として定量的に表現できることになる。たとえば、萌黄色はベクトル (170, 207, 83) である。このような RGB を成分とした色の表記法を RGB 表色系という。この手法によって色づけることは、ウェブページの色指定や気象学でよく用いられる描画ソフトにおいても行われている。

2.2 色空間

RGB 表色系による表色は、3次元空間上の点として色を指定することにある。この RGB を直交軸とする空間を RGB 色空間と呼ぶ。さて、視覚的に等間隔のグラデーションを作成するためには、色と色との間の距離を定義しなければならない。その際、空間上のどこでも、同じ距離だけ離れていれば同程度の差とし

て認識できることが望ましい。このような色空間を均等色空間と呼ぶ。しかし、RGB 色空間は均等色空間ではない。

均等色空間の作成は色彩工学でいまなお議論されており (大田 2001; 千々岩 2001)、決定版があるわけではない。また、光源によっても色の見え方は変わるため、そのことも考慮する必要があるが、ここでは議論しない。均等色空間で現在、暫定的に使われているのが、CIE LAB 表色系 (Commission Internationale de l'Éclairage 2004) である。RGB 表色系から CIE LAB 表色系への変換公式は付録にある通りである。たとえば、萌黄色を CIE LAB 表色系で表わすと $(L^*, a^*, b^*) = (78.34, -30.54, 56.17)$ となる。 L^* は明暗にかかわる明度であり、 $L^* = 100$ が白で、 $L^* = 0$ が黒である。 a^* の正、負方向はそれぞれ赤、緑を、 b^* の正、負方向はそれぞれ黄、青を表す (第 1 図 a)。よって、 L^* を固定した (a^*, b^*) 平面上では色の鮮やかさを表す彩度は原点からの距離であり、色合いを表す色相は原点からの方向である。CIE LAB 空間上に配される色は空間のうちの一部であり、色が配される立体は四角錐と三角錐を上下に無理やり貼り合わせたいびつなものになっている。

CIE LAB 空間は均等色空間であるから、その空間内の 2 点間の距離を定義することができる。たとえば、CIE LAB 表色系における (L_1^*, a_1^*, b_1^*) と (L_2^*, a_2^*, b_2^*) とのユークリッド距離

$$D = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

は色の違いである色差を表す。しかし、実際の視覚的な違いは、相当程度、明度によっている。そこで、色差を視覚的直感と合わせるために L^* 、 a^* 、 b^* 各成分に重みをつけることもある。色の違いを出したい場合は明度の指標である L^* を違えることが重要かと思われる。

3. 理想的なカラートーン

3.1 単色

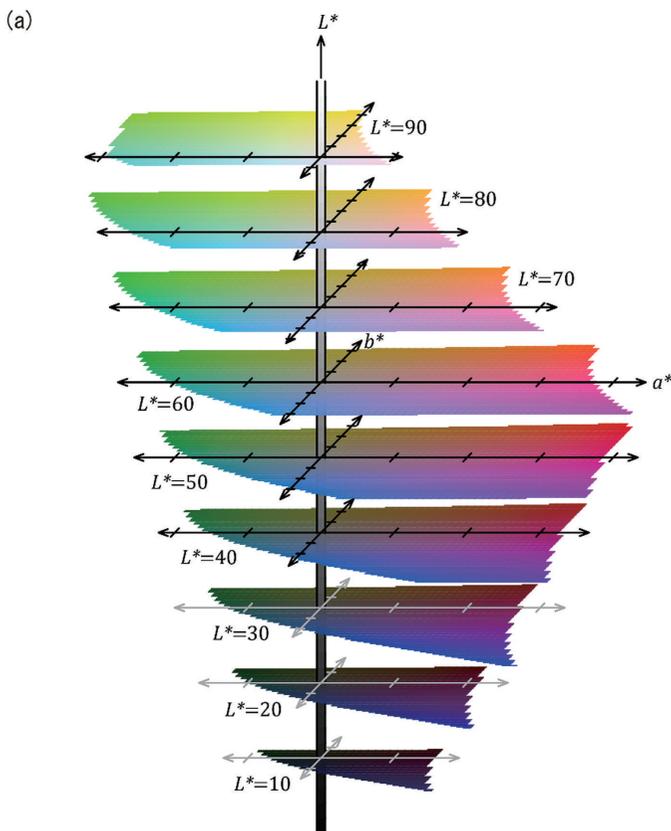
前節を踏まえて、CIE LAB 空間における色差が均等になるようなカラートーンの作成を試みる。単色のグラデーションは黒から白に至るまである色を経由した配色である。また、二色のグラデーションは異なる 2 つの色に対する単色のグラデーションの組み合わせにより作成できる (Silva *et al.* 2011)。たとえば、赤

¹² RGB の G は Green の G だが、色名はライムであって、緑ではない。緑の RGB 表現は (0, 128, 0) である。

¹³ Keyplate の略であり blacK や Kuro の K ではない。

と青の二色グラデーションは黒-赤-白-青-黒となる。赤-白-青など、用途に応じて二色グラデーションで作られる配色の一部を取り出してもよい。安直な単色グラデーションの作り方として、RGBの成分を基準に形式的に数値を等分割するものがある。たとえば、ライムを基準の色とする単色グラデーションを考える。RGB表色系で、白は(R, G, B) = (255, 255, 255)、ライムは(R, G, B) = (0, 255, 0)、黒は(R, G, B) = (0, 0, 0)なので、形式的に白とライム色、ライム色と黒を直線でつなぐように(R, G, B) = (x, 255, x)と(R, G, B) = (0, x, 0)と等間隔に配色する。しかし、そうすると視覚的に白からライムにかけて隣り合う色の区別がしにくくなる(第1図c上)。

一方、CIE LAB色空間における単色グラデーションは、ある色の(L*, a*, b*)値を黒(0, 0, 0)から基準となる色を経て白(100, 0, 0)へつなぐことで作成する。前述のとおり、色差はおよそ明度の差のみに依存する。そこでCIE LAB表色系におけるL*が均等になるように色を配した(このためほとんどの場合、基準となる色そのものは配色されない)。この配色(第1図b, c, d下)はRGBに基づく配色(同上)よりも視覚的にも



(b) RGB

R:255	R:212	R:170	R:128	R:085	R:042	R:000						
G:255	G:212	G:170	G:128	G:085	G:042	G:000						
B:255	B:212	B:170	B:128	B:085	B:042	B:000						

L*a*b*

R:255	R:255	R:255	R:255	R:255	R:255	R:233	R:191	R:151	R:112	R:076	R:042	R:000
G:255	G:212	G:186	G:150	G:110	G:059	G:014	G:025	G:028	G:027	G:023	G:017	G:000
B:255	B:207	B:161	B:117	B:074	B:029	B:003	B:008	B:011	B:011	B:009	B:005	B:000

(c) RGB

R:255	R:212	R:170	R:128	R:085	R:042	R:000						
G:255	G:212	G:170	G:128	G:085	G:042	G:000						
B:255	B:212	B:170	B:128	B:085	B:042	B:000						

L*a*b*

R:255	R:139	R:015	R:028	R:034	R:036	R:036	R:035	R:032	R:028	R:023	R:016	R:000
G:255	G:255	G:240	G:214	G:187	G:162	G:137	G:113	G:090	G:068	G:047	G:027	G:000
B:255	B:116	B:009	B:019	B:023	B:025	B:026	B:025	B:024	B:021	B:018	B:011	B:000

(d) RGB

R:255	R:212	R:170	R:128	R:085	R:042	R:000						
G:255	G:212	G:170	G:128	G:085	G:042	G:000						
B:255	B:212	B:170	B:128	B:085	B:042	B:000						

L*a*b*

R:255	R:238	R:220	R:201	R:180	R:157	R:132	R:100	R:055	R:027	R:035	R:027	R:000
G:255	G:227	G:198	G:171	G:143	G:116	G:089	G:060	G:026	G:010	G:016	G:015	G:000
B:255	B:211	B:136	B:067	B:000								

第1図 (a) CIE LAB表色系におけるL*を10から90まで10ごとに固定した横軸a*および縦軸b*の平面における色。a*軸とb*軸の目盛の間隔はともに20。(b) レッド、(c) ライム、および(d) ブルーの単色のグラデーション(12分割)。(上) RGB成分を形式的に等分割した配色と(下) CIE LAB表色系におけるL*を等分割した配色。

等間隔になっていることがわかる。このような違いは明度が50より離れている色を基準となる色として利用するとき顕著になる。たとえば、RGBの数値を形式的に等分割して作成したグラデーションとCIE LABの L^* を利用して等分割して作成したものとを比較する。すると、単色にレッド($L^*=53$)を選んだ場合には大差ない(第1図b)が、ライム($L^*=87$)やブルー($L^*=32$)を選んだ場合は見た目ではわかるほどの差が出てくる(第1図c, d)。

3.2 虹色

虹色の場合は話が複雑になる。従来用いられている虹色は、第2図aに示すように明度が不均等に变化する。黄色から水色にかけての明度の差が極端に小さくなる一方、赤や青付近の明度の変化は急激である(前述のとおり、式(1)で定義した色差は直感的な色の違いを十分に反映していないので、ここに図示するのみとし、以降では明度でのみ議論することとする)。このようなことから、従来の虹色は緑色付近の区別が難しいのである。

理想的な虹色を作成する一つの考え方として、明度(L^* 値)を固定し(a^*, b^*)平面の円周上の点として虹色を配色することがあげられる。Ihaka (2003)は L^* 軸を中心とする円周上に色を配することで、明度と彩度が一定のグラデーションを提案した。それにならって式(1)で与えられる色差が最大になるように、色立体(第1図a)の切り口がおおよそ最大面積を持ち、内接円の半径が大きな L^* として71.5を選んだ。つまり、色空間内において、明度 $L^*=71.5$ における色立体の断面に内接円を書き、その円周を24分割した色を虹色として配色した(第2図b)。しかし、この方法で作った虹色は明度が一定のため、白黒印刷したときコントラストがなくなってしまう。また、明度の差がないことから、色覚に関するユニバーサルデザインの観点からも好ましくない(Light and Bartlein 2004)。このため、これでは実用に耐える虹色とは言い難い。

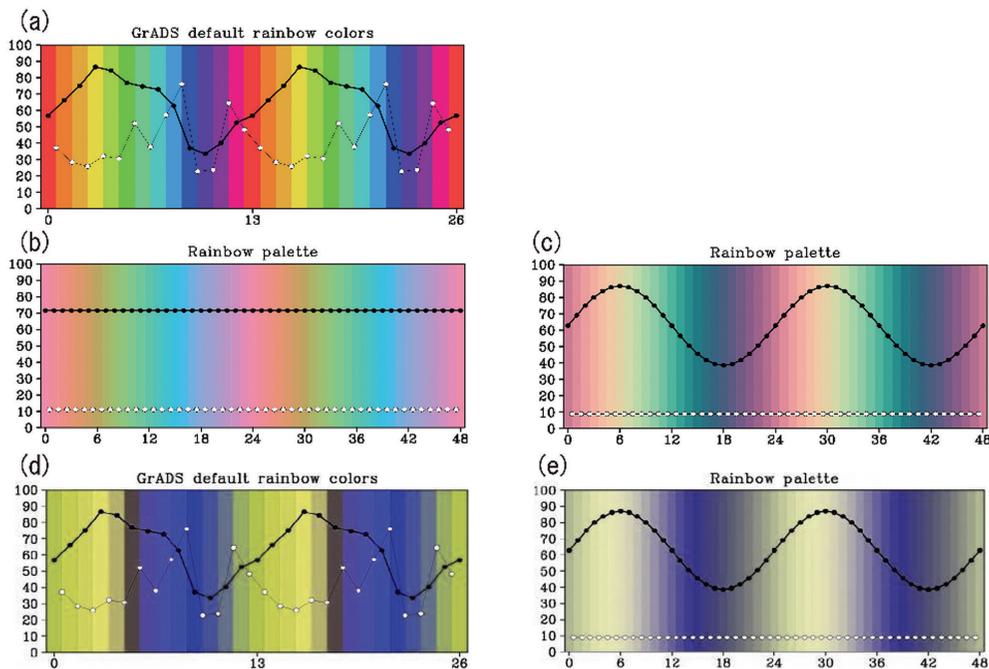
そこで、上記の考えを拡張し、色立体を斜めに切った切り口に内接する円の円周上を等分割し、明度に関して変化をつけることで虹色らしくすることを考える。虹色らしさを保つため、内接円の中心は L^* 軸におく。また、明度に差が出てかつ色相が虹色らしく変化するように、(a^*, b^*)平面に対し45度傾いた平面を考える。このような円のうち最大の半径をもつものは、 b^* 軸に対して45度傾けた中心を(L^*, a^*, b^*)=

(62.8, 0.0, 0.0)にもつものだった。このとき円の半径は34.3であった。第2図cはその円の円周を等分割することで得られた虹色である。従来の虹色に比べてくすんだ印象は拭えないものの、色差は等間隔である。明度の最大は薄黄色、最小は紫色であり、明度は38から87までの範囲である。また、第2図cは円周を24分割したため24色の配色である(第1表)。この方法を応用すると、好きな数だけの配色を視覚的に等間隔の虹色とできる。

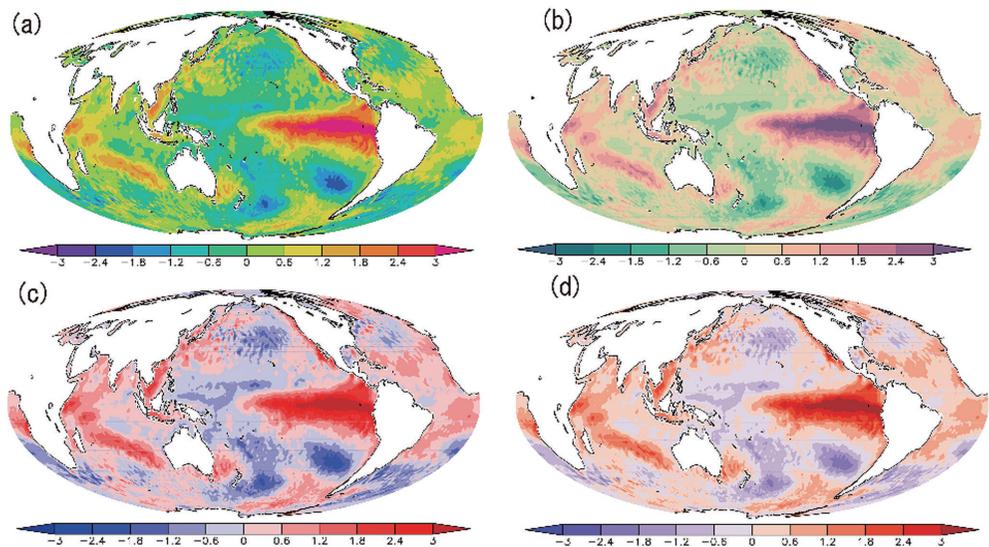
本稿で提案するグラデーションは、色覚に関するユニバーサルデザインの観点でも優れている。人口の大多数の色覚であるC型色覚(いわゆる一般色覚)で従来型の虹色は第2図aのように見えていたが、D型色覚(第2色弱;いわゆる赤緑色盲の一つ)では第2図dのようになり、不等間隔であることが際立ってしまう。つまり、色覚によって色の持つ間隔が変わることを意味する。本稿で提案する虹色はC型色覚では第2図cのように見えるのに対し、D型色覚では第2図eのようになる。この図に見るように等間隔で構成した虹色は色覚によっても色の持つ間隔は変化しない。このように第2図cの配色は従来の虹色(第2図a)よりもよい性質を持つものと考えられる。なお、Gresh (2010)はわれわれの方法とは異なるアルゴリズムで視覚的に等間隔な虹色を作成する方法を提案した。しかし、この手法は従来型の虹色の配色を抜本的に改めずに視覚的に等間隔にするよう補正したに過ぎないため、色相が急激に変化するという問題点があることを補足する。

4. 使用例

日本気象学会の会員なら誰もが一度は見たことがあろう1998年エルニーニョ時の海面水温偏差(第3図)を例に、虹色グラデーションの差を説明する。第3図aは従来の虹色によって配色したものであり、第3図bは本稿で提案する虹色によって配色したものである。ただし、本例のように正負に意味がある量には二色グラデーションを用いることをお勧めしたいが、ここではあくまで配色の例として示す。また、以降の記述は、通常明るさの部屋において、液晶ディスプレイを媒体として見たときの印象とする。よって、紙に印刷したものは印象が異なる可能性がある。従来の虹色では $\pm 1.2 K$ の範囲の色の違いが不明確である一方で、赤や青付近の色は隣の色との違いが明確である。このことから、第3図aでは東部太平洋やインド洋



第2図 (a) 描画ソフト GrADS のデフォルトで用いられる13色の虹色。太線はその明度であり、細線は隣り合う色との色差(定義は式(1))である。(b) 色立体の L^* 軸上の $L^*=71.5$ に中心をもち半径42.4の円周を24等分して作成した虹色。(c) $(L^*, a^*, b^*) = (62.8, 0.0, 0.0)$ に中心をもち半径34.3の円を $b^*=0, L^*=62.8$ の直線を軸に45度回転させた円の円周を24等分して作成した虹色。(d) 色覚シミュレータによりD型色覚者が(a)を見た場合の結果。(e) 色覚シミュレータによりD型色覚者が(c)を見た場合の結果。



第3図 1998年1月における海面水温偏差(K)。Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (Reynolds *et al.* 2007) をもとに作成した。色影の間隔は0.6Kで、配色は図下のカラーバーの通り。(a) 従来の虹色を利用したもの、(b) 本稿で提案する虹色を利用したもの、(c) RGB等分割により作成した二色グラデーション、および (d) CIE LAB空間の L^* を等分割して作成した二色グラデーションである。

第1表 本稿で提案する理想的な虹色のRGB値および $L^*a^*b^*$ 値。本表は24分割の場合で利便のため紫-赤-黄-緑-青-紫のグラデーションの順に並べた。色番号は第2図cと同じ。

R	G	B	色	L^*	a^*	b^*
137	93	137	21	45.65	24.25	-17.15
162	101	142	22	50.67	29.70	-12.13
186	113	148	23	56.52	33.13	-6.28
208	128	153	24	62.80	34.30	0.00
227	145	159	25	69.08	33.13	6.28
241	163	164	26	74.93	29.70	12.13
249	181	168	27	79.95	24.25	17.15
250	197	170	28	83.80	17.15	21.00
244	209	172	29	86.23	8.88	23.43
231	217	172	30	87.05	0.00	24.25
212	220	171	31	86.23	-8.88	23.43
187	218	168	32	83.80	-17.15	21.00
159	211	165	33	79.95	-24.25	17.15
128	200	161	34	74.93	-29.70	12.13
97	185	156	35	69.08	-33.13	6.28
66	169	151	36	62.80	-34.30	0.00
36	151	145	37	56.52	-33.13	-6.28
9	135	140	38	50.67	-29.70	-12.13
8	120	136	39	45.65	-24.25	-17.15
30	108	133	40	41.80	-17.15	-21.00
50	98	131	41	39.37	-8.88	-23.43
71	92	130	42	38.55	0.00	-24.25
91	89	131	43	39.37	8.88	-23.43
114	89	134	44	41.80	17.15	-21.00
137	93	137	21	45.65	24.25	-17.15

における温度偏差が周囲よりどの程度際立っているのかを、色の違いだけから判断できない。それに対し、第3図bは全体的にくすんだ印象は拭えないものの、どこかの場所の偏差を取り立てて数値以上に強調することはない。

次に、同じ図によって二色グラデーションの差を説明する。第3図cはRGBを等分割する方法で作成した配色であり、第3図dはCIE LAB色空間の L^* を等間隔にする方法で作成した配色である。全体的に同じような図の印象であるが、第3図cの方が青色が濃く、数値以上に冷水偏差が強調されている。このことはチリ沖の海面水温偏差に注目すると一目瞭然で、第3図cの色の印象ではペルー沖の暖水偏差に拮抗するような錯覚を起こすが、実際はそうではない。

により作成した。

本稿で提案した単色・虹色グラデーションの作成を支援するウェブページ上のツールを、<http://recca-hokkaido.sci.hokudai.ac.jp/~inaz/colour/> で公開している。

謝辞

瀬戸口知巳氏（コニカミノルタ株式会社）には、本稿執筆の際に色差に関する基本的な知識を教わりました。また、佐々木克徳博士（北海道大学）には本稿についてご意見をいただきました。第2図d, eの作図には色覚シミュレータCoblis (<http://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>) を利用しました。一部、科学研究費26310201の支援を受けました。

5. まとめ

単色グラデーションや虹色を配色する際、形式的にRGBの成分を等間隔にするのでは等色間隔にならない。本稿では、CIE LAB均等色空間を利用し、気象要素のイメージに合い、かつ気象要素の定量的な表現が色の定量表現と齟齬のないように、配色を調整した。その結果、単色グラデーションの場合、CIE LAB空間の L^* が等間隔になるように調整した方が、視覚的な差異が等間隔になるように配色できることがわかった。とくに、用いる色の明度が50より離れているときにこの違いは顕著であった。また、従来の虹色は明度が不均等に変化し色の間隔が均等ではない。本稿では理想的な虹色を、CIE LAB色空間内における色立体を斜めに切断した平面上で色立体に内接する円の円周を等分割すること

付録：RGB 表色系から CIE LAB 表色系への変換

標準的に用いられる sRGB の D₅₀光源（色温度5000 K に対応する環境光の白色点で，印刷物の標準光として利用されるか³，モニタにおける標準光 D₆₅と異なる点に注意）における変換方法を記す。最大値を 1 に規格化した RGB 値に対し，

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.436041 & 0.385113 & 0.143046 \\ 0.222485 & 0.716905 & 0.060610 \\ 0.013920 & 0.097067 & 0.713913 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (A1)$$

とする． $\begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9642 \\ 1.0000 \\ 0.8249 \end{pmatrix}$ に対して，

$$\begin{aligned} L^* &= 116f(Y/Y_n) - 16 \\ a^* &= 500\{f(X/X_n) - f(Y/Y_n)\} \\ b^* &= 200\{f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)\} \end{aligned} \quad (A2)$$

と計算できる．ただし，

$$f(t) = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}} & (t > (\frac{6}{29})^3) \\ \frac{1}{3}(\frac{29}{6})^2 t + \frac{4}{29} & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (A3)$$

である．

参 考 文 献

Borland, D. and R. M. Taylor II, 2007: Rainbow color map (still) considered harmful. *IEEE Comput. Graph.*

Appl., 27, 14-17.
 千々岩英彰, 2001: 色彩学概説. 東京大学出版会, 239pp.
 Commission Internationale de l'Éclairage, 2004: *Colorimetry* (3rd edition). Publication CIE 15:2004, 72pp.
 Gresh, D., 2010: Self-corrected perceptual colormaps. Online March 2010. <http://www.research.ibm.com/people/g/donnagresh/colormaps.pdf> (2016.6.9閲覧).
 Ihaka, R., 2003: Colour for presentation graphics. K. Hornik, F. Leisch, A. Zeileis eds., *Proceedings of the 3rd International Workshop on Distributed Statistical Computing*, 18pp.
 Light, A. and P. J. Bartlein, 2004: The end of the rainbow? Color schemes for improved data graphics. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 85, 385-391.
 大田 登, 2001: 色彩工学 第2版. 東京電機大学出版局, 310pp.
 Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, 20, 5473-5496.
 Silva, S., B. Sousa Santos and J. Madeira, 2011: Using color in visualization: A survey. *Comput. Graph.*, 35, 320-333.
 Stauffer, R., G. J. Mayr, M. Dabernig and A. Zeileis, 2015: Somewhere over the rainbow: How to make effective use of colors in meteorological visualizations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 203-216.

Coloring in Meteorology with Uniform Color Space

Masaru INATSU* and Atsushi HAMADA**

* (Corresponding author) Faculty of Science, Hokkaido University, N10 W8, Sapporo, 060-0810, Japan.

** Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo.

(Received 15 March 2016; Accepted 18 July 2016)
