

三原色と混色

岡部 洋一

東京大学、放送大学名誉教授

2021年7月28日

起草: 2021年4月24日

1 加法混色

いくつかの色の光を同じ場所に当てた時に得られる色を**加法混色** (additive color mixture) と呼ぶ。この場合、**光の三原色** (three primary colors of light) と呼ばれる三つの重要な色 RGB (赤緑青) がある。これら三色を適切な強度にして投影すると、どんな色でも再現できるからである。他の色を組み合わせても、すべての色を再現することができないが故に、これらは三原色と特別な用語をもって呼ばれるのである。

RGB の三原色の強度を成分とする三次元ベクトルを (r, g, b) で表わす。これら三つのパラメータは 0 から 1 内の数である。図 1 のように、この三つの量で作られる空間

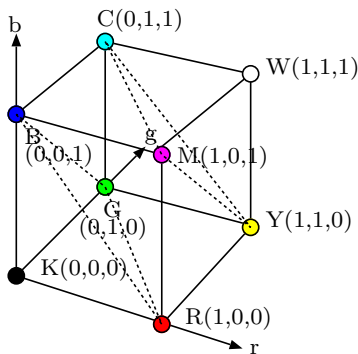


図 1 色立方体

を考える。RGB を色々変化させて作られる色のすべては、 (r, g, b) の作る立方体の中に存在することとなる。それ故に、これら三座標軸の作る空間を**色空間** (color space)、立方体を**色立方体** (color cubic) と呼ぼう、 (r, g, b) を**色ベクトル** (color vector) と呼ぼう。

$R = (1, 0, 0)$ は赤 (red)、

$G = (0, 1, 0)$ は緑 (green)、

$B = (0, 0, 1)$ は青 (blue)、さらに

$W = (1, 1, 1)$ は白 (white) になる。

$K = (0, 0, 0)$ は黒 (black) である。(Black は Blue の B と重複するので Key Plate の K を使ったと言われている)

RGB の 1 に相当する強度はある程度自由に変えられるので、三原色の強度をうまく調整し、この三色が重なった所がちょうど理想的な白 W になる時の RGB の強度を 1 と制定したというのが事実である。さらに、RGB の三色の光を全て例えば 20% 増強すると、20% 明かるい白が得られることになるが、それでも白は白である。つまり、白の強度にもかなりの幅がある。実際、人間は自分の視野の中で最も明かるい所を白と感じやすいことが知られており、その場合、最も明かるい所が多少の色味を有していても、それを純粋の白と感じるようである。そこで、RGB のそれぞれの強度の最大値を 1 とするといっても、それにはかなりの任意性が潜んでいる。しかしながら、本稿ではこういった任意性については深く考えないこととする。

任意二色の色ベクトルを (r_1, g_1, b_1) 、 (r_2, g_2, b_2) とすると、二色の加法混色の結果は、 $(r_1 + r_2, g_1 + g_2, b_1 + b_2)$ と、色空間におけるベクトルの加算結果となる。各成分が加算されることから加法混色と呼ばれる。

ちなみに

$G+B = (0, 1, 0) + (0, 0, 1) = (0, 1, 1) = C$ はシアン (cyan)、

$B+R = (0, 0, 1) + (1, 0, 0) = (1, 0, 1) = M$ はマゼンタ (magenta)、

$R+G = (1, 0, 0) + (0, 1, 0) = (1, 1, 0) = Y$ は黄 (yellow)

と呼ばれるもう一組の重要な色の組 CMY となる。C と R を合成すると $C+R = (0, 1, 1) + (1, 0, 0) = (1, 1, 1) = W$ で白となる。こうした合成すると白 W になる関係を互いに**補色** (complimentary color) であるという。C と R、M と G、Y と B は互いに補色である。なお、CMY は色の三原色と呼ばれ、別の混色の場合に重要な役割を演ずる。

三原色を混合すると $R+G+B = (1, 0, 0) + (0, 1, 0) + (0, 0, 1) = (1, 1, 1) = W$ で白と

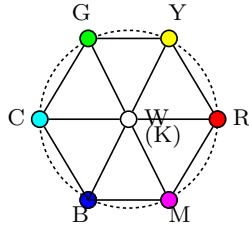


図2 色立方体を白 W から黒 K に向って見た図

なる。三原色の任意の強度の組み合わせ、あるいは原色と白や黒を組み合わせると彩度の低い非原色が得られる。

色立方体の黒 K から白 W に至る直線の延長線の十分遠方から色立方体を見ると、**図 2** のように光の三原色 RGB および色の三原色 CMY が六角形を形成する。色は点線で描かれた円に沿って、RYGCBM と変化していき、元の R に戻る。この回転方向を**色相 (hue)**と呼ぶ。この六角形に並ぶ色が**原色 (primary colors)**である。

この中心は黒 K または白 W またはその中間であれば灰色である。この中心軸から外に向えば向うほど色は鮮やかになり、逆に向かえば鈍くなる。この中心軸からの距離を**彩度 (saturation)**と呼ぶ (英語では chroma とも言う)。彩度は次式で与えられる。^{*1}

$$\text{彩度} = \sqrt{r^2 + g^2 + b^2 - gb - br - rg} \quad (1)$$

RGB および CMY のいずれのベクトルの成分を代入しても、この値は 1 となり、W および K の場合には 0 となる。

中心軸を横から見てみると、黒 K から白 W に向って段々明るくなっていく。この方向の変化を**明度 (brightness)**と呼ぶ (英語では lightness, value とも言う)。明度は次式で与えられる。^{*2}

$$\text{明度} = (r + g + b)/3 \quad (2)$$

W に対しては 1、CMY については 2/3、RGB については 1/3、K については 0 となる。

RGB は元々人工的に作られる発光体、あるいは人工的に作られた染料の塗られたフィルムに白い光を当てて作られる。しかし、プリズムにより分光された色はもっと彩

^{*1} (r, g, b) 色ベクトルと W ベクトル $(1,1,1)$ の「外積」を利用すると求めることができる。

^{*2} (r, g, b) 色ベクトルと W ベクトル $(1,1,1)$ の「内積」を利用すると求めることができる。

度が高く、この六角形で示された外に存在するが、本稿の説明の範囲では、そのことは意識しなくてよい。興味があれば「色度図 (chromaticity diagram)」などで検索してほしい。^{*3} 色度図は、図 2 のように、明度の自由度を落とした図に対応している。

本節の結論は「加法混色は色空間におけるベクトル加算となる」である。

2 減法混色

減法混色 (subtractive color mixture) とは、水彩絵の具を重ねた時に出るような混色をいう。絵の具の構成物質は染料 (透明で特定の色を吸収する) だったり、顔料 (特定の色を吸収する散乱物質) だったりするが、簡単のために透明な染料を仮定しよう。こうしたモデルを採用すると、紙の上から入射した光は染料で一部のスペクトルが吸収され、紙で反射した後に、もう一度染料で吸収されて目に戻ってくることになる。二色の染料が混ざっているとこの双方の吸収を受け、戻ってくることになる。そこで、混色のモデルとして、直進する白色が、色々なフィルターを通過した後の色を考えればよいことになる。二つの色フィルターの透過光の色をベクトル表示で (r_1, g_1, b_1) および (r_2, g_2, b_2) とすると、二フィルター透過後の色は、 $(r_1 r_2, g_1 g_2, b_1 b_2)$ となる。名称には減法となっているが、実態は成分ごとに乗法が施される。すべての成分が 1 以下であるので、乗法といってもフィルターを重ねるほど各成分は減っていく (同じ場合もある)。

赤 R を遮蔽するフィルターとは GB を透過するフィルターなので透過光は $(011) =$ とシアン C となる。つまり R 遮蔽フィルターは C 透過フィルターとなる。同様に G 遮蔽フィルターは $(101) = M$ のマゼンタ透過フィルター、B 遮蔽フィルターは $(110) = Y$ の黄透過フィルターとなり、これら三つのフィルターの透過光 CMY は減法混色の三原色、あるいは**色の三原色** (richromatic) と言われる。単に**三原色** (three primary colors) と言うと、光の三原色か色の三原色のいずれを指すか、状況で判断する必要がある。

三原色であるので、これらの混色について述べたい。MY の減法混色を行うと、ベクトルの成分ごとの積 $(1 \cdot 1, 0 \cdot 1, 1 \cdot 0) = (100) = R$ の赤となる。 $(1, 1, 1)$ 白から遮蔽成分 G $(0, 1, 0)$ と B $(0, 0, 1)$ を引いて R になったように見受けられるが、こうした減法的手法が使えるのは、三原色の組み合わせの場合だけであり、任意の混色はあくま

^{*3} 例えば「色度図の着色」: <https://www.t-kougei.ac.jp/activity/research/pdf/vol136-1-09.pdf>

でも通過成分の積であることに注意してほしい（したがって、著者は減法混色という言葉にはやや抵抗を感じている）。同様な考察により、YC の混色は G、CM の混色は B となる。また、CMY の透過フィルターを全部 100% かけると、混色結果は $(0 \cdot 1 \cdot 1, 1 \cdot 0 \cdot 1, 1 \cdot 1 \cdot 0) = (0, 0, 0) = K$ と黒が得られる。詳細は省くが、弱いフィルターも利用すると、CMY フィルターを利用すれば、色立方体内の色がすべて再現できる。

なお、減法混色の三原色として RGB を使うとどうなるかを検討しておこう。透過光が $R = (1, 0, 0)$ と $G = (0, 1, 0)$ となるフィルターを重ねると、これら二枚を通過する光は各成分ごとの積となるので $(0, 0, 0) = K$ の黒となる。つまり RGB をフィルターにすると、そのうちいずれの 2 枚を重ねても黒となってしまう、有効な混色は得られない。

本節の結論は「減法混色は色空間におけるベクトルの成分ごとの積を成分とする色ベクトルとなる」である。

3 中間混色

小さい面積をいくつかの原色で塗り潰したものを互いに重ならないように敷き詰め、それを遠方から見ることで得られる色を**中間混色** (intermediate color mixture) と言う。典型的なのは TV の画面であり、厳密には**並置混色** (spatial color mixture) と言う。もう一つ、色コマのように、時間と共に速い速度で色を切り替えることで得られる効果を得る混色を**継時混色** (successive color mixture) と言い、これも中間混色である。

いずれも同じ効果と色が得られることから、まとめて説明する。三原色を混色するのであるが、すべての色を再現しようとする、後からわかるように RGB を使わなければならない。したがってこれらを加法混色に分類する場合もあるが、混色の原理は加法混色とは異なる。

二色の色ベクトルを (r_1, g_1, b_1) 、 (r_2, g_2, b_2) とすると、これらの面積比が $k_1 : k_2 (k_1 + k_2 = 1)$ である場合、得られる色は $k_1(r_1, g_1, b_1) + k_2(r_2, g_2, b_2)$ となる。つまり、二つのベクトルの頭を結ぶ直線上で、重み付き平均の色が実現できる。三色の場合には三つのベクトルの頭を結ぶ三角形の面内で、面積による重み付き平均にあたる色が実現できる。

TV の画面を拡大鏡で拡大してみると、三つの同じ大きさの RGB ドットが並んでおり、それを遠方から見ると、網膜上で色混合が起きていることが実感できる。TV の場合にはドットの面積は固定であるが、RGB の輝度を変えることで、面積重み付けを変

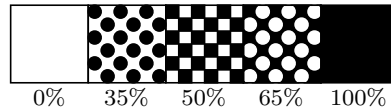


図3 網目状ドットによる濃淡の表現

えたのと同じ効果を与えている。

本節の結論は「中間混色は二つの色ベクトルの重み付け平均を成分とする色ベクトルとなる」である。

4 印刷における混色

インクを用いた印刷では減法混色により色を出していると言われている。しかし、実は中間混色の効果も利用しているのである。インクには CMY を用いる。CMY の純色は、いずれかの色をベタ印刷すればよい。R は MY のベタ印刷を重ねればよい。同様に RGB の他の色も CMY のうち二色のベタ重ね印刷で実現できる。黒は CMY 三色のベタ重ね印刷で作成することができる。

その他の色は薄い CMY の色を混合する。薄い色とは原色のドットを小さくし、白地を見せるというかその色の欠けた部分を増すことで達成する。印刷ではインクドットを図 3 のように網目状に置いていく。左ほどインクの被覆面積が小さいので白に近く、右ほど被覆面積が大きいため原色に近くなる。例えば C であれば、この方法により W から C に至る直線上の色が再現できる。

C と M を組み合わせる場合には、C にも M にも大小のドットを利用する。ただし、C ドットの作る網目と M ドットの作る網目は斜めに置かれ、CM の完全に重なった状態、CM が部分的に重なった状態、CM が完全に独立した状態などが一様に混ざるようにになっている。CM が完全に重なったドットでは B が実現する。そこで、W、C、M、B の 4 つの色が混在することになる。C の被覆率が k_C で、M の被覆率が k_M だとすると、確率的に $(1 - k_C)(1 - k_M)$ が W に、 $k_C(1 - k_M)$ が C、 $(1 - k_C)k_M$ が M、 $k_C k_M$ が B になっているだろう（全部合計すれば当然 1）。この色は、図 1 の WCMB で囲まれた上面内の色になる。

CMY の三種類のドットの網目をうまく工夫して配置すると、W、C、M、Y、R、G、B、K の 8 色が混在することになる。実際には図 4 のように、水平に対し、例えば M

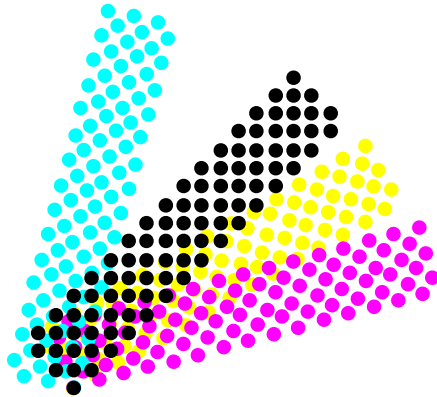


図4 網目の配置

(私の所有のドローソフトでは、残念ながら重なり部分が混色していない)

網目は 15° 、K 網目は 45° 、M 網目は 75° 、残る Y 網目は 30° に置かれる。^{*4} 混色について詳細な式は面倒なだけなので、要約した結果を示すと、CMY がすべて重なったところが K、CMY のうち二色が重なったところが RGB、CMY が一色だけで存在するところが CMY、CMY がまったくない所が W である。再現できる色は図 1 のこれら 8 色で囲まれた領域、つまり色立方体全体となり、WCMYRGBK の面積比の重み付け平均の位置となる。

ただし、完全なフィルター作用を行う CMY インクが得難いため、通常 K (黒) インクを併用する。なお、日本では CMYK のインクをそれぞれ藍、紅、黄、墨と呼ぶことが多い。

^{*4} 例えば「印刷物の構造」：<https://kimoto-sbd.co.jp/original/printstudy/structure/>

索引

■ A

additive color mixture (加法混色) 1

■ B

black (黒) 2

blue (青) 2

brightness (明度) 3

■ C

chromaticity diagram (色度図) 4

color cubic (色立方体) 2

color space (色空間) 2

color vector (色ベクトル) 2

complimentary color (補色) 2

cyan (シアン) 2

■ G

green (緑) 2

■ H

hue (色相) 3

■ I

intermediate color mixture (中間混色) 5

■ M

magenta (マゼンタ) 2

■ P

primary colors (原色) 3

■ R

red (赤) 2

richromatic (色の三原色) 4

■ S

saturation (彩度) 3

spatial color mixture (並置混色) 5

subtractive color mixture (減法混色) 4

successive color mixture (継時混色) 5

■ T

three primary colors (三原色) 4

three primary colors of light (光の三原色) . 1

■ W

white (白) 2

■ Y

yellow (黄) 2

■ あ

青 (blue) 2

赤 (red) 2

色空間 (color space) 2

色の三原色 (richromatic) 4

色ベクトル (color vector) 2

色立方体 (color cubic) 2

■ か

加法混色 (additive color mixture) 1

黄 (yellow) 2

黒 (black) 2

継時混色 (successive color mixture) 5

原色 (primary colors) 3

減法混色 (subtractive color mixture) 4

■ さ

彩度 (saturation) 3

三原色 (three primary colors) 4

シアン (cyan) 2

色相 (hue) 3

色度図 (chromaticity diagram) 4

白 (white) 2

■ た

中間混色 (intermediate color mixture) 5

■ は

光の三原色 (three primary colors of light) . 1

並置混色 (spatial color mixture) 5

補色 (complimentary color) 2

■ ま

マゼンタ (magenta) 2

緑 (green) 2

明度 (brightness) 3