

## 色差の評価限界の色度特性

鯉田 孝和・内川 恵二

東京工業大学工学部像情報工学研究施設 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

### Chromatic Properties of Judgment Limits on Color-Difference

Kowa KOIDA and Keiji UCHIKAWA

Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503

Colorimetric color-difference, defined in a color space, is not always proportional to our perceptual color-difference. It is known that accumulating *jnd* steps cannot scale the colorimetric color-difference between a distant pair of colors (e.g. red and green). The observers evaluated whether it was possible to adjust the mid-color of two color samples in color-difference. The results show that most of the judgment limits distribute around the line of  $j=0$  and the white point in the OSA color space. The convergence of the judgment limits may be explained by categorical color perception theory.

#### 1. はじめに

色弁別閾程度の色度差を積み重ねていくと、知覚される色差とずれが生じるということがある<sup>1)</sup>。これは、色差評価の定量化を困難にしている原因のひとつである。色差を均等に記述しようと試みた均等色空間は数多く提唱されているが、このずれが理由で統一的に表現することは難しく、条件に応じて使い分けるといった方法がとられている。

色差が大きくなると、色差を評価する判断基準に変化が起こるのだろうか。ここで極端な例を考える。黄色と薄い黄緑といった小さな色差の評価量を積み重ねることで、赤と緑といった極端に大きな色差を示す物差しになるだろうか。そもそも、赤と緑とでは色差を量的に評価するのは困難ではないだろうか。このように、大きな色差を与えると、そもそもの色差の数値評価が困難になるのではないかと考えられる。この色差の評価基準の変化、特に色差の量的評価が困難になる条件を色差の評価限界と呼ぶ。

色差が一定量に達すると限界になるのだろうか。別の決定要因があるのだろうか。本研究では、色差の評価限界を測定し、その決定要因について考察する。

#### 2. 実験

##### 2.1 実験原理

色差の評価・判断が変化することを積極的に取り出す実験を行う。任意の色ペア間の色差を評価する基準が、小色差の評価基準と同じかどうかを判断させる。トレーニングセッションとして、OSA (Optical Society of America) 空間<sup>2)</sup>で隣接したペアの色差評価を行うことで色差評価基準を覚え、そのあと参照刺激のペアの色差を変化させ評価基準がトレーニング時の刺激ペアの評価基準と同じかどうかを応答する。OSA 空間は隣接するすべて格子点間での等色差が保証されている<sup>3)</sup>。そのため、均等な差を積み重ねること、すなわち OSA 空間での距離を離していくことで判断基準の変化がどのように生じるのかを測定できると考える。

##### 2.2 装置と刺激

暗幕で仕切られた実験ブース内に D<sub>65</sub> 蛍光灯 2 本による照明がある。ブース内に置かれた机表面は OSA 明度  $L=-2$  に相当する灰色で塗装されており、その上に CRT ディスプレイが置かれる。視距離 50 cm の距離をおいた CRT ディスプレイ画面上に、OSA 色票を模擬した視角 6° の正方形刺激が横に 3 つ、間隔 0.6° をあけて呈示される (Fig. 1)。刺激の背景は、OSA 明度  $L=-2$  の灰色 ( $j, g)=(0, 0)$  を模擬した輝度 20.10 cd/m<sup>2</sup>, ( $x, y)=(.314, .331)$  の灰色で、サイズは横 35°, 縦 25° である。

E-mail: koida@isl.titech.ac.jp

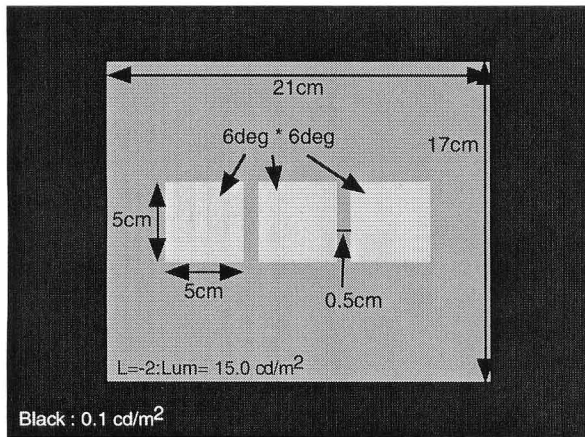


Fig. 1. Visual field configuration.

両端の2つが参照刺激で、中心はトレーニングセッション時にだけ呈示される色調整用の刺激である。

参照刺激として用いる色度を Figs. 2, 3 に示す。これらは OSA 色空間の  $L=-2$  と  $L=+2$  の明度面にそれぞれ対応する。刺激の輝度は、 $L=-2$  の無彩色点で  $16 \text{ cd/m}^2$ 、 $L=+2$  の無彩色点で  $30 \text{ cd/m}^2$  である。等 OSA 明度面は色度によって反射強度が異なるため無彩色での輝度のみを示すことで刺激強度の表記とする。CRT ディスプレイに表示する色は、MacAdam (1974) による OSA 色空間の定義式から計算した<sup>2)</sup>。定義式では 10 度視野での等色関数を用いられているが、ここでは 2 度視野での等色関数を用いて計算を行った。2 つの等色関数は、白色点近傍ではほぼ等しいからである。また、OSA 色票が定義され均等色差が保証されているのは、図中の白丸の点に限られている。白丸は実際の OSA 色票の色度点を測定したものである。CRT ディスプレイの色表示可能領域 (gamut) に対して、青・紫領域で色票の定義点の数が貧しいことがわかる。そこで、色平面に対して広く測定を行うために、定義されていない領域を計算式を元に外挿した。Figs. 2, 3 での黒丸が実験で用いる参照刺激の色度点である。OSA 色票の測定で得られた色度点と計算値と多少のずれが存在する。しかし、色差評価の全体の傾向を示すには問題ないと思われる。今後データの表現のために、OSA 色空間の  $j, g$  軸による表記をする。Figs. 2, 3 の右下に示した格子点が刺激点の  $j, g$  軸表記である。

参照色刺激は 2 つのペアで呈示される。各ペアは、特定の刺激系列から総当たりで選ばれている。刺激系列として定めたのは、各明度面内で、 $j$  軸平行な方向の各列と  $g$  軸平行な方向の各列である。

### 2.3 手続き

実験は次に示す 2 つのセッションに分かれており、順に

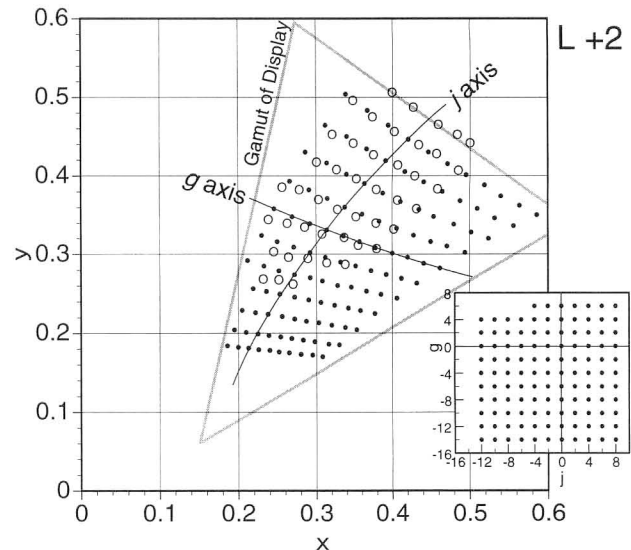


Fig. 2. CIE 1931  $(x,y)$  chromaticity diagram showing the chromaticity points of stimuli selected with  $L=+2$  (dot). Data of constructed OSA color sample (open circle).

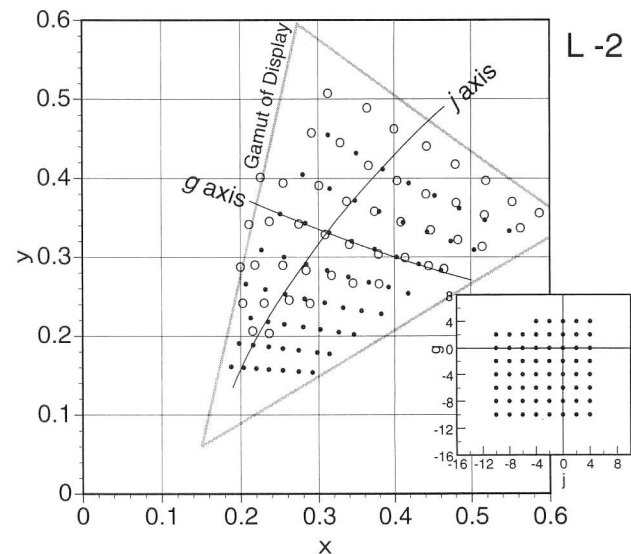


Fig. 3. CIE 1931  $(x,y)$  chromaticity diagram showing the chromaticity points of stimuli selected with  $L=-2$  (dot). Data of constructed OSA color sample (open circle).

行われる。(1) まずトレーニングセッションを行う。ここで参照刺激ペアとして呈示される色は、OSA 単位で 2 unit、つまり隣接したペアだけに限る。ここで隣接したペアだけを刺激として用いるのは、小さな色の差での色差評価基準を記憶させ、次のセッションでの判断基準として用いるためである。被験者は参照刺激ペアの中間に相当する色を CRT 上に作り出す。被験者は、マウスを動かすことで色を調整することができる。この色設定を通じて、隣接ペアでの色差評価基準を記憶する。(2) 次に、各刺激系列の中から総当たりで任意のペアを呈示し、トレーニングセ

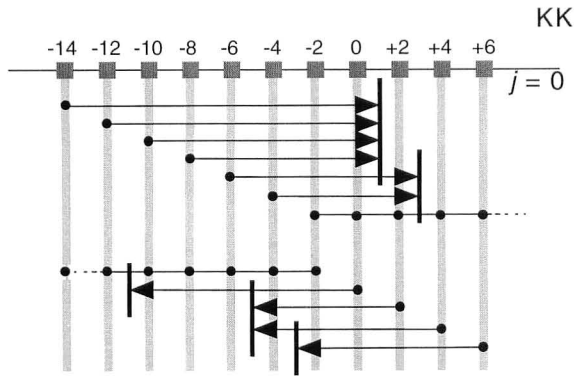


Fig. 4. Judgment-limit of color-difference of the series ( $j=0$ ).

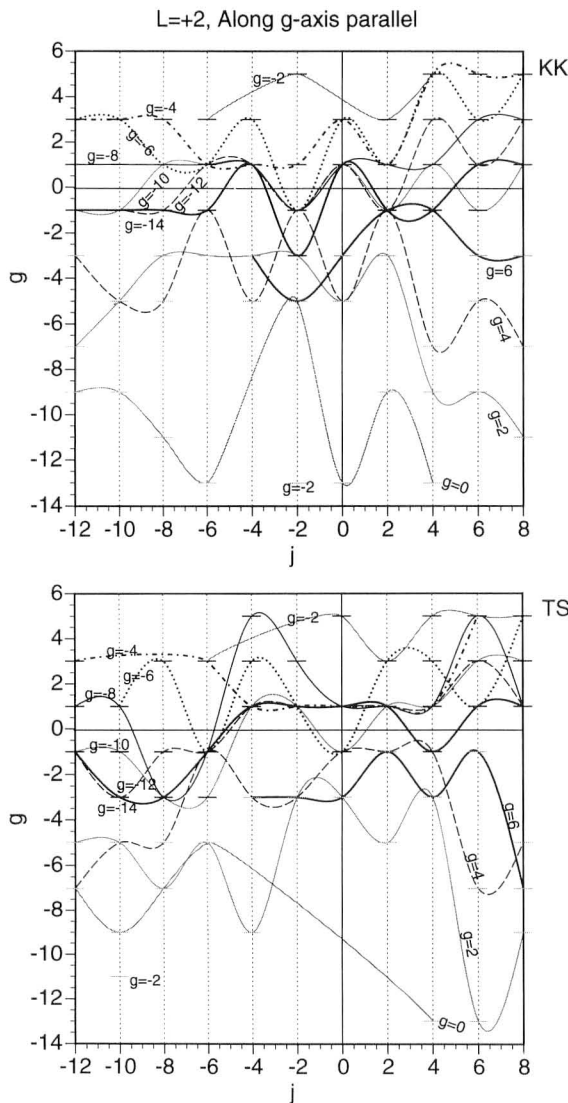


Fig. 5. Distribution of judgment-limit of color-difference along  $g$ -axis parallel on OSA  $j$ - $g$  plane (Short line) for  $L=+2$ . The curves connected among short lines are spline fitting.

ッションで記憶した判断基準で中間色の設定が可能かどうかを被験者に尋ねる。すなわち、(1)で記憶した小色差の量的な評価が、色の質的な差へと変化していないかについて着目してもらい、その変化から(可/不可)で尋ね、これを結果とする。

#### 2.4 被験者

被験者はTS (23), KK (24)の2名で、色覚正常の男性である。

### 3. 結果

#### 3.1 中間色の設定結果

本実験の目的は色差評価の判断基準の変化を求めることである。そのため中間色の設定結果については省略する。

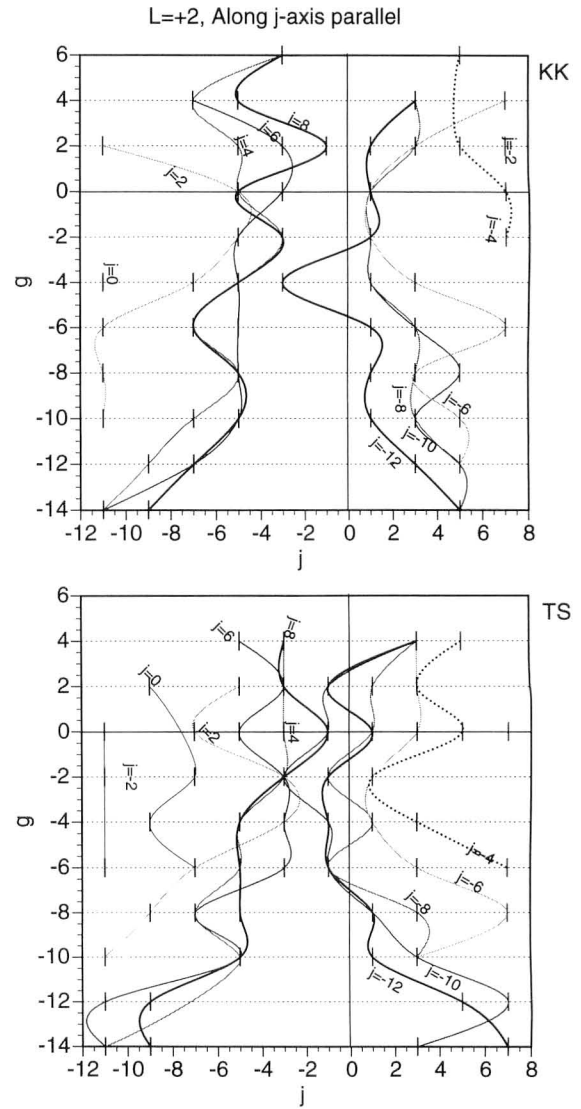


Fig. 6. Distribution of judgment-limit of color-difference along  $j$ -axis parallel on OSA  $j$ - $g$  plane (Short line) for  $L=+2$ . The curves connected among short lines are spline fitting.

ただし、設定された色度点は、 $xy$  色度図上で参照色ペアの間に収まっており、トレーニングセッションに関して問題は無いと考えられる。

### 3.2 判断基準の変化が起こる色度差について

Fig. 4 に結果の例（被験者 KK,  $j=0$ ;  $g$  軸に沿った系列）を示す。実験結果は、すべての参照ペアごとに色差評価の可・不可で得られている。ここで、参照ペアの片方が  $g=-14$  (Fig. 4 の左端) である場合を取り上げる。参照ペアのもう片方が  $g=-14$  に近い場合は“可”であり、かなり遠い場合“不可”であった。つまり、OSA ユニットで一定以上離れたときに色差評価の判断基準の変化が起きる。そこで、可・不可の切り替わり点を矢印の終点で示す (Fig. 4)。これを色差の評価限界と呼ぶことにする。それぞれの参照色からの評価限界を求め、図に示す。注目すべき点として、色差の評価限界が一部に集まるという傾向がある。Fig. 4 では、 $g=+2, -4$  に集中していることがわかる。

もし、色差の評価限界が OSA ユニットで一定値離れた色で起きるのならば、このような限界の集中はみられないはずである。つまり、集中がみられた領域に色空間内での

特異点として性質があると考えられる。そこで色差の評価限界をすべての刺激系列に対して求める。色平面上にプロットしたものが Figs. 5-8 である。ここでは、 $j$  軸に平行な系列の結果と  $g$  軸に平行な系列の結果を 2 つのグラフに分けて示す。あきらかに色差の評価限界が特定領域に集中している。その特定領域とは、1)  $g$  軸方向系列での  $j=0$  の線上、2)  $j$  軸方向系列での白色点近傍と白色点から右下 (第 4 象限) 方向と左下 (第 3 象限) 方向に伸びる放射線状領域である。

しかしながら、参照刺激の色差距離の依存性も存在しており、特定の位置に完全に収束しているとは限らない。そこで、参照刺激の色度によって色差の評価限界が変動するかを示す (Figs. 9-12)。参照刺激の片方をスタート点とし、各系列で正方向と負方向で分けて表示する。全体の傾向を示すために、各系列での同じスタート点からの評価限界を平均してプロットする。 $j$  軸に平行な系列では、評価限界の分布は  $g$  値によって変動しているため全体を平均することに問題があるかもしれない。しかし、全体の傾向を示す点ではかまわないと思われる。Figs. 9-12 の曲線から、色差の評価限界は、色差距離の依存性があることを示

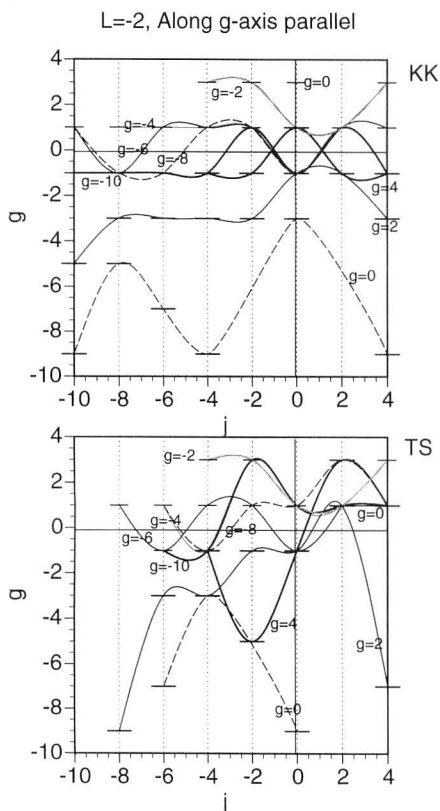


Fig. 7. Distribution of judgment-limit of color-difference along  $g$ -axis parallel on OSA  $j$ - $g$  plane (Short line) for  $L=-2$ . The curves connected among short lines are spline fitting.

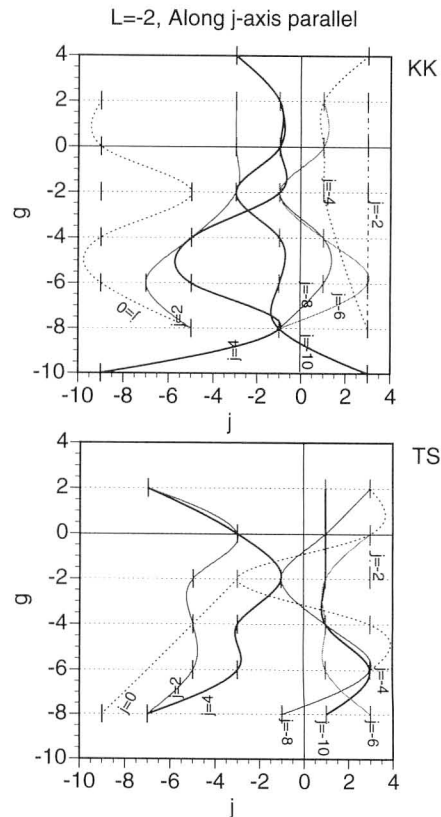


Fig. 8. Distribution of judgment-limit of color-difference along  $j$ -axis parallel on OSA  $j$ - $g$  plane (Short line) for  $L=-2$ . The curves connected among short lines are spline fitting.

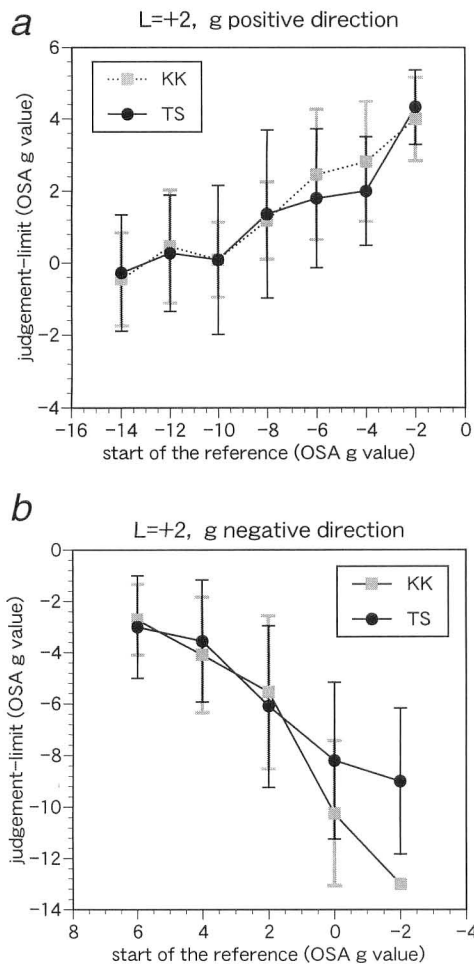


Fig. 9. Judgment-limit of color-difference against start of reference stimuli for  $L=+2$ , along  $g$ -axis parallel. a and b: The data for  $g$ -positive and  $g$ -negative direction, respectively. Symbols show the data of each subject. Error bar is standard deviation.

している。また曲線はそれぞれ漸近線に近づく特性がみられる。漸近線の位置はおおよそ、 $g$ 系列で $g=0, -2$ ,  $j$ 系列で $j=1, -4$  (それぞれ正方向, 負方向の順で表記) である。距離依存性は存在するが、色差の評価限界が特定の色度点に収束することが示された。

また、それぞれの系列で色差の評価限界が交差しているという特徴がある。たとえば Fig. 4 では  $g$  値が増える方向と減る方向での色差の評価限界が重なり合っている。

#### 4. 考 察

色差の評価限界が局所的に集まっているという結果から次のことが示唆される。色差の評価ができるかどうかは、対象となる色のペアが色空間の中で特定の領域をはさむかどうかによって決まっているのであり、OSA 色空間での距離によって決まっているのではない。

色差の評価限界の分布は白色点 ( $j, g=0, 0$ ) から放射

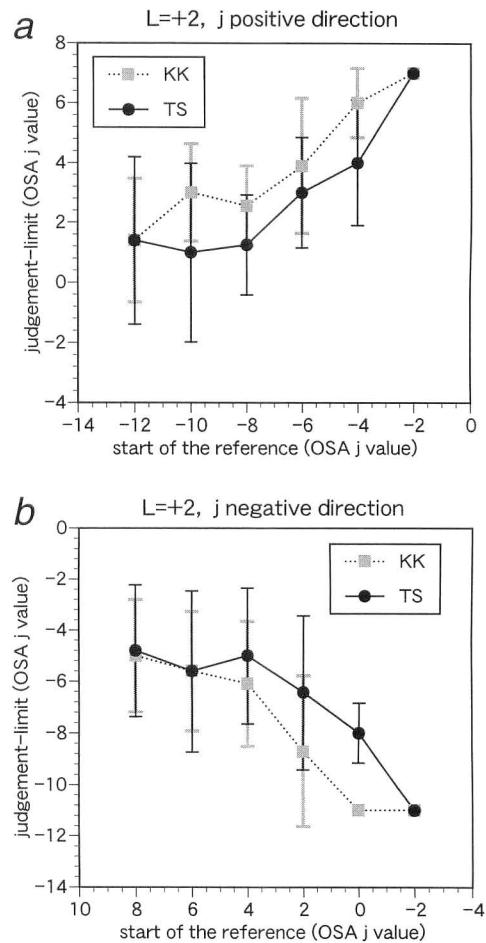


Fig. 10. Same as Fig. 9 but for  $L=+2$  and along  $j$ -axis parallel.

線状に分布している。このような軌跡を描くものとして等色相線が考えられる。色差の評価限界が特定の等色相線に収束する傾向があると仮定するとその特定色相とは何なのかという疑問が浮かび上がる。

色差の評価基準の限界とは何であろうか。小さな色差を評価する場合は、色差の量的な知覚があるため、色差を数値評価したり中間に相当する色の設定をすることは容易である。しかし、色差が大きくなると色差の量的な知覚は失われ、色の質的な差の知覚が主となる。そのため、色差の数値評価は困難となり中間色に相当する色の設定ができなくなってしまうのだと考えられる。色差の評価基準の変化(色差の評価限界)は、対象となる色のペアが特定の領域をはさむかどうかによって依存している。ということは、色空間の中の特定領域を境界とした部分空間の内部だけで、色差は評価できるのだといえる。

色が定性的に異なることを表現したものに、色のカテゴリー性がある。ここでいうカテゴリー性とは、異なる色を一まとめにして捉えることを指し、11基本色名<sup>3)</sup>によ

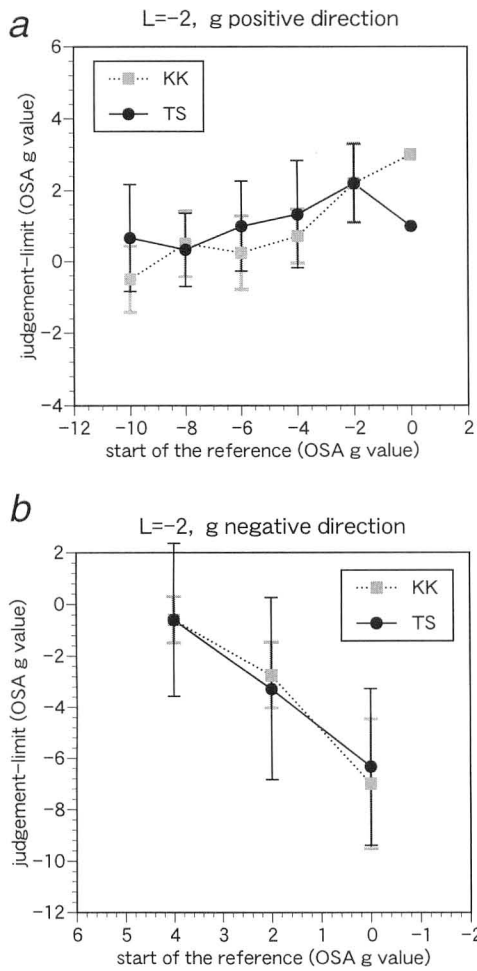


Fig. 11. Same as Fig. 9 but for  $L=-2$  and along  $g$ -axis parallel.

る基本色カテゴリーとは限らない。色差の評価基準の変化（色差の評価限界）を生む特定領域とは、色のカテゴリー境界であるかもしれない。このような色差の評価が色のカテゴリー性に影響されることについてふれた過去の研究もある<sup>4)</sup>。

色差評価が色カテゴリーに依存するという可能性から、均等色空間を構築する際には色カテゴリーを考慮する必要性が考えられる。

本研究は日本学術振興会特別研究員制度の協力を得て行われました。

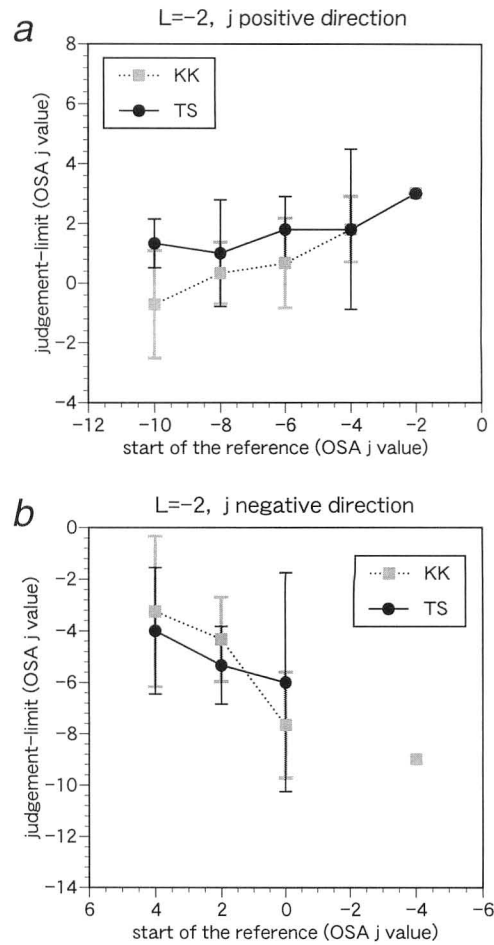


Fig. 12. Same as Fig. 9 but for  $L=-2$  and along  $j$ -axis parallel.

## 文 献

- 1) P. F. M. Stalmeier and C. M. M. de Weert: "Large colour differences measured by spontaneous gestalt formation," *Color Res. Appl.*, **13** (1988) 209-218.
- 2) D. L. MacAdam: "Uniform color scales," *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974) 1691-1702.
- 3) B. Berlin and P. Kay: *Basic Color Terms, Their Universality and Evolution* (University of California Press, Berkeley, 1969).
- 4) P. F. M. Stalmeier and C. M. M. de Weert: "Large colour differences and selective attention," *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 237-247.