

盲点補完に及ぼす線分刺激と背景間の 色差および輝度差の効果

蘭 悠久*・中溝 幸夫**

*九州大学大学院 人間環境学府

**九州大学大学院 人間環境学研究院

〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-19-1

(受付：2005年7月3日；改訂稿受付：2005年10月13日；受理：2005年11月9日)

Effects of the Difference of Color and/or Luminance between Line Segments and Background on Perceptual Completion at the Blind Spot

Yukyu ARARAGI* and Sachio NAKAMIZO**

*Graduate School of Human-Environment Studies, Kyushu University

**Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University

6-19-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

(Received 3 July 2005; Received in revised form 13 October 2005; Accepted 9 November 2005)

Three experiments examined how the difference of color and/or luminance between line segments and background affect perceptual completion at the blind spot. When a pair of line segments was presented on the both sides of the blind spot while varying length of the segments, the observers reported whether the line segments appeared 'a continuous line' or not. We measured the minimum length of the line segments for perceptual completion, or filling-in, to occur. Experiment 1 examined how different colors of the line segment (red, green, blue, and gray) affect the minimum length of the line segments. Experiment 2 examined how different luminance of the line segments affect the minimum length of the line segments. Experiment 3 examined how the equiluminant chromatic, equichromatic luminance, and both chromatic and luminance difference between line segments and background affect the minimum length of the line segments. The results of the three experiments showed that the minimum length of line segments for perceptual completion to occur at the blind spot (a) did not change irrespective of different colors of line segments with large luminance difference between line segments and background, (b) was shorter, as luminance difference between line segments and background was increased, (c) was longer in both chromatic and luminance condition than that in the equichromatic luminance condition, and (d) was shorter in both chromatic and luminance condition than that in the equiluminant chromatic condition. The results suggest that both color and luminance affect perceptual completion at the blind spot, and that the luminance difference between line segments and background facilitates perceptual completion greater than color difference.

1. はじめに

ギャップをもつ線分をそのギャップがちょうど盲点に入るような視野位置に提示すると、ギャップの部分が“補完”されて連続した直線

が見える¹⁻³⁾。盲点には光受容細胞は存在しないので、脳は盲点からの求心性の信号を受け取ることはないにもかかわらず、線分のギャップは知覚されず、1本の連続した直線が見える。この現象は盲点における知覚的補完（あるいは知

覚的充填, フィリングイン)と呼ばれてきた。

盲点における線分補完を生む刺激の空間的特性については、これまでにいくつかの報告がある。蘭・大隈・二瀬・中溝・近藤は、盲点の両側の線分の長さを変えると線分の長さに依存して線分の見えが変化し、線分補完が生じるためにはある一定の長さの線分が盲点の両側に必要であることを示した¹⁾。図1に示されるように、盲点幅のギャップをもつ線分を盲点中心に対して対称的に提示したとき、盲点の両側の線分がひじょうに短い場合、2本の短い線分が知覚される。線分の長さを徐々に増加していくと、盲点内部へ線分の色および輝度情報がフィリングインされ、不完全な線分補完が生じる。さらに、線分の長さを増加していくと、ある臨界的な長さでギャップのない1本の連続した線分が知覚される。補完されて連続して見える線分は、盲点外に提示された物理的に連続した線分と見かけ上、差がないように見えるので、完全な線分補完が生じたとみなすことができる。この知覚的基準を用いて、彼らは補完に必要な線分の最小の長さは水平線分のほうが垂直線分よりも短いという異方性があることを報告した^{1,4)}

また、盲点をはさむ両側の線分間の位置のずれ(非整列性)および方位(orientation)差^{*1}がある一定の範囲内であると、両側の線分が整列していなくても(両側の線分が一直線をなしていなくても)、補完が生じることが報告されている^{5,6)}。蘭・中溝は、盲点をはさむ垂直線分間のズレ(非整列性)および方位差がそれぞれ約視角2.1度および51.5度以内であれば、補完が生じることを示した⁵⁾。これらの研究は、盲点をはさむ2本の線分の物理的特性がある程度、不一致であっても補完は生じる、つまり補完には許容度(tolerance)が存在することを示している。

一方で、盲点をはさむ2本の線分の色あるいは輝度が大きく異なっても、線分補完は生じる^{3,7,8)}。盲点をはさむ一對の垂直線分がそれぞれ赤あるいは緑の異なる色をもつ場合に、

*1 盲点をはさむ2本の線分の角度(傾き)が異なる。

実際の刺激 線分の知覚

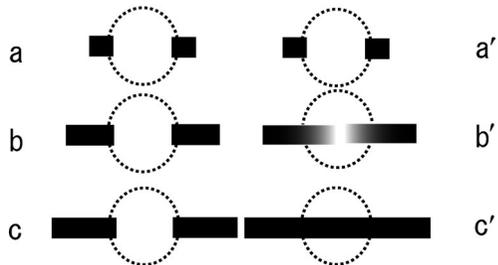


図1 盲点の両側に提示された線分の長さとの知覚の関係。図の左側 a, b, c のように線分の長さが伸びていくと、最初は右側 a' のように知覚されていた2本の線分が右側 c' のように1本の連続した線分として知覚される。本論文では b' を不完全な線分補完, c' を完全な線分補完と呼ぶ。点線は盲点境界を示す。

赤と緑の境界線ははっきりとは見えないにもかかわらず、線分がつながっているように見えることが報告されている^{3,7,8)}。また、Ramachandran は、灰色の背景に盲点をはさむ一對の垂直線分がそれぞれ白あるいは黒の異なる輝度をもつ場合でも補完が生じ、補完された線分の中心部分(盲点の中心付近)は、黒と白が混じりあったようなメタリックグレイのように見えると報告した⁸⁾。これらの観察は、盲点をはさむ2本の線分の色および輝度情報が完全に不一致でも補完が生じることを示しており、線分補完において色および輝度情報は、整列性や方位といった空間情報とは異なる特性をもつことを示唆する。

盲点における色および輝度情報の補完について、これまでにいくつかの報告がある。Brown & Thurmond は、一様な色(8種類)の正方形あるいはドットパターンが盲点領域内から周辺にかけて提示された場合に、提示された刺激と同じ一様な色の正方形あるいは同じ色のドットパターンが知覚されると述べている⁷⁾。また、木村・宮沢は、緑色の線分と赤色の背景を用いて、線分と背景間の輝度コントラスト(輝度比^{*2})を組織的に操作し、線分補完の強さを7

*2 線分と背景の輝度比(0.6~1.4¹⁰⁾)。線分の輝度/背景の輝度により求められた。

段階尺度法で観察者に報告させた^{9,10}。その結果、線分と背景が等輝度で色が異なる場合にも補完が生じること、および補完の主観的な強さは線分と背景間の輝度コントラストには影響されないことがわかった。しかしながら、これらの研究は、質的観察にとどまっており、Brown & Thurmondの研究⁷⁾においては輝度コントラストを統制しておらず、木村・宮沢の研究^{9,10)}においては線分と背景間の色の違いが輝度コントラストの知覚に影響を及ぼしている可能性がある。このため刺激と背景間の色差あるいは輝度差を統制することによって、盲点補完に及ぼす色、輝度、あるいはその相互作用のそれぞれの効果を定量的に調べることは、盲点補完における色情報あるいは輝度情報の処理を理解するうえで重要であると考えられる。

本研究の目的は、盲点における線分補完に及ぼす色、輝度、およびその相互作用の効果を定量的に調べることであった。そのために、線分と背景の色および輝度を統制し、刺激線分の長さを量的な測度として用いて、補完に及ぼす色と輝度の効果を測定した。実験1では、線分と背景間の輝度差が一定かつ大きい場合に、線分の色の違いが線分補完に及ぼす効果を調べた。実験2では、無彩色刺激を用いて線分と背景間の輝度差を組織的に操作し、線分補完に及ぼす輝度だけの効果を調べた。実験3では、色と輝度に関する3つの条件（等輝度異色条件、等色異輝度条件、および異色異輝度条件）を用いて、線分補完に及ぼす色、輝度、およびその相互作用の効果を調べた。それらの結果に基づいて、盲点における線分補完に及ぼす、色、輝度、およびその相互作用の効果について考察した。

2. 全般的な方法

2.1 被験者

実験1および3では8名の大学生（著者1名を含む）、実験2では6名の大学生がそれぞれの実験に参加した。いずれも色覚正常で、正常な視力（矯正視力を含む）を有していた。著者以外の実験参加者は実験目的を知らなかった。

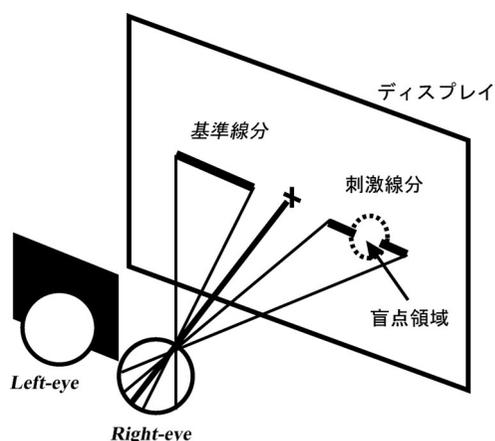


図2 盲点における線分補完を調べるために提示した刺激線分と基準線分の位置。刺激線分は盲点領域にギャップをもつ。一方、基準線分は連続した1本の線分である。両線分の全体の長さは等しい。点線は盲点境界を示す。

2.2 刺激と装置

図2に示すように、盲点領域をはさむように、盲点の水平軸上、あるいは垂直軸上に刺激線分を提示した。刺激線分と同一の幅で、両端点の長さと同じ長さの1本の線分（基準線分）が“こめかみ側”網膜の盲点と同じ網膜偏心度部位に提示され、被験者は基準線分を判断の基準にして刺激線分の“見え”を判断した。線分の方角は水平および垂直であった。線分幅は視角1.7degであった（0.2degから1.7degの線分幅は補完に必要な線分の最小の長さに影響を及ぼさないことが示されている^{1,11)}）。一試行の開始時点において、片側の線分の長さは水平、垂直方位のどちらも視角0.6degであった。眼球運動（固視微動）や盲点測定の見誤差が補完の生起を妨げる可能性のある程度除去するために、水平、垂直方位のどちらの場合でも、あらかじめ測定された盲点境界線の内側0.4degの網膜位置から線分を提示した。線分の一回の提示時間は常に200msであり、被験者が基準線分と同じように1本の連続した線分として見えたと同判断するまで、繰り返し提示された。被験者がキーを押すごとに、提示される線分の長さは視角0.07degずつ長くなった。

刺激の作成，提示，制御および被験者の反応記録にはパーソナル・コンピュータ（FMV ME3/507, Fujitsu）と CRT ディスプレイ（MA901U, Iiyama）を用いた。

2.3 手続き

実験試行に先立って被験者ごとに盲点を計測した（盲点の計測法については大隈・二瀬・中溝・近藤¹¹⁾を参照）。計測された盲点の位置と大きさのデータに基づいて，被験者ごとにディスプレイ上での刺激の提示位置が定められた。被験者の課題は，自らキーを押すことで試行を開始し，刺激線分が基準線分と同じ“形，色，および輝度”をもつ1本の連続した線分として見たかどうかを判断することであった。実験は暗室で行われ，観察距離は30 cmであった。被験者の頭部はバイトボードを噛むことによって固定され，左眼が遮蔽された。被験者は，試行中ディスプレイの中央に提示された凝視点を右眼で注視した。

3. 実験 1

実験1の目的は，線分の色情報が盲点補完に及ぼす効果を検討することであった。そのため，線分と背景の輝度差を一定にして，線分の色のみが変えられ，補完に必要な線分の最小の長さが測定された。

3.1 方法

背景の輝度は 88.0 cd/m^2 で，色は CIE1931xy 色座標で (0.28, 0.31) であった。一方，線分の色は無彩色（灰）と3種（赤，緑，青）の有彩色であり，それらの CIE1931xy 色座標値は灰 (0.28, 0.31)，赤 (0.59, 0.34)，緑 (0.29, 0.54)，および青 (0.17, 0.11) であった。刺激の輝度は無彩色が 8.0 cd/m^2 で，有彩色の輝度は，実験試行の前に各被験者に対して行った交照法による等輝度測定実験の結果を用いた。等輝度測定実験では，被験者ごとに盲点実験において提示される線分の位置に線分刺激を提示した。 8.0 cd/m^2 の無彩色線分と有彩色線分が高速に交替する刺激を提示し，この刺激の交替によるちらつき感が最小となる有彩色刺激の輝度値を線

分方位別に求めた。その結果，赤，緑，青の水平および垂直線分における実際の輝度の被験者間の平均値は，それぞれ $8.2 (SD=1.7)$ ， $8.4 (SD=2.2)$ ， $14.1 (SD=2.1)$ ， $14.5 (SD=2.1)$ ， $6.2 (SD=0.9)$ ， $6.3 (SD=0.9) \text{ cd/m}^2$ であった。独立変数は線分色（赤，緑，青，灰）と線分方位（水平，垂直）であった。各被験者は，線分色4条件×線分方位2条件の組み合わせを9セッション行った。各試行は，方位別のブロックに分けられ，被験者ごとにランダムに提示された。

3.2 結果と考察

各被験者が刺激線分を基準線分と同様に1本の連続した線分として知覚したときの，片側の線分の長さを補完の指標として用い，統計的分析の単位とした。2要因繰返し分散分析を行った結果，線分色の主効果は統計的に有意ではなかった [$F(3, 21)=0.57, n.s.$]。線分方位の主効果は統計的に有意であった [$F(1, 7)=7.56, p<.05$]。つまり，補完に必要な線分の最小の長さは，水平線分のほうが垂直線分よりも短かった。また，線分色と線分方位の交互作用は有意ではなかった [$F(3, 21)=2.79, n.s.$]。図3は，線分色の関数として補完に必要な線分

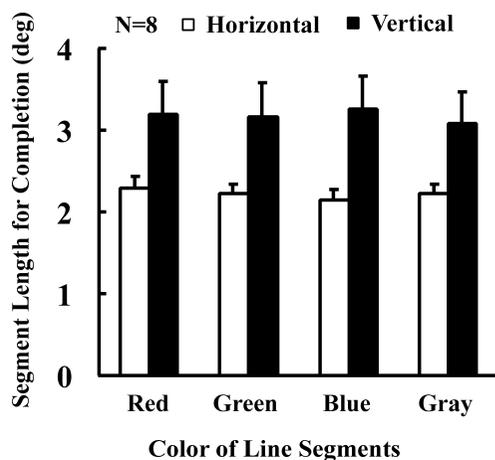


図3 線分の色の関数としてプロットされた補完に必要な線分の最小の長さの平均値。水平線分および垂直線分別にプロットされている。細い線分は標準誤差を示す。

の最小の長さの平均値を線分方位別に示す。

実験結果から、線分と背景の輝度差が大きい場合（およそ 80 cd/m^2 ）に、線分の色の違いは盲点における線分補完にほとんど影響を及ぼさないことが示された。この実験結果は、盲点における一様な色情報をもつ正方形あるいはドットパターンが補完されることを観察した Brown & Thurmond の結果⁷⁾を確認するものである。被験者の内省報告によると、補完された線分全体の色および輝度は基準線分と同じように知覚された。また、従来の研究結果によれば、盲点の周辺視野における色の見え（color appearance）は、赤、緑、および青において中心窩付近とほとんど変わらないことが示されている^{12,13)}。これらの知見および本実験結果から、盲点補完に線分の色の違いが影響を及ぼさなかったことは、提示された線分の色の明瞭度の低さによるものではないと考えられる。

また、補完に必要な線分の最小の長さは水平線分のほうが垂直線分よりも短いという異方性を示す結果は、先行研究^{1,4)}と一致する。この結果から、盲点補完の異方性は線分の色の違いによって影響を受けないといえ。

4. 実験 2

実験 2 の目的は、線分の輝度情報が盲点補完に及ぼす効果を検討することであった。線分と背景の色差を一定にして、線分の輝度のみを変えて補完に必要な線分の最小の長さを測定した。

4.1 方法

線分および背景の色は CIE1931xy 色座標で (0.28, 0.31) であった。一方、線分の輝度は 5.0, 10.0, 15.0, 25.0, 30.0, 35.0 cd/m^2 であり、背景の輝度は 20.0 cd/m^2 であった。各被験者は各実験試行の前に、線分が知覚できるかどうかを確認し、試行を開始した。

独立変数は、線分と背景間の輝度差（5 cd/m^2 : 15, 25 cd/m^2 ; 10 cd/m^2 : 10, 30 cd/m^2 ; 15 cd/m^2 : 5, 35 cd/m^2 ）および線分方位（水平、垂直）であった。各被験者は、線分の輝度 6 条件 × 線分方位 2 条件の組み合わせを 8 セッション

行った。各試行は、方位別のブロックに分けられ、被験者ごとにランダムに提示された。

4.2 結果と考察

各被験者が刺激線分を基準線分と同様に 1 本の連続した線分として知覚したときの、片側の線分の長さを補完の指標として用い、統計的分析の単位とした。2 要因繰り返し分散分析を行った結果、線分と背景間の輝度差および線分方位の主効果は統計的に有意であった [線分と背景間の輝度差: $F(2, 10) = 7.97, p < .05$; 線分方位: $F(1, 5) = 5.17, p < .05$]。輝度差について多重比較を行った結果、補完に必要な線分の最小の長さは輝度差 5 cd/m^2 のほうが輝度差 15 cd/m^2 よりも有意に長かった [5 cd/m^2 と 15 cd/m^2 : $t(10) = 3.10, p < .05$; 5 cd/m^2 と 10 cd/m^2 : $t(10) = 2.29, n.s.$; 10 cd/m^2 と 15 cd/m^2 : $t(10) = 0.81, n.s.$]。交互作用は、有意ではなかった [$F(2, 10) = 0.06, n.s.$]。図 4 に輝度差の関数として補完に必要な線分の最小の長さの平均値を線分方位別に示す。被験者の内省報告によると、補完された線分全体の色および輝度は基準線分と同じように知覚された。

実験結果から線分と背景間の輝度差が大きくなるにつれて、補完に必要な線分の最小の長さ

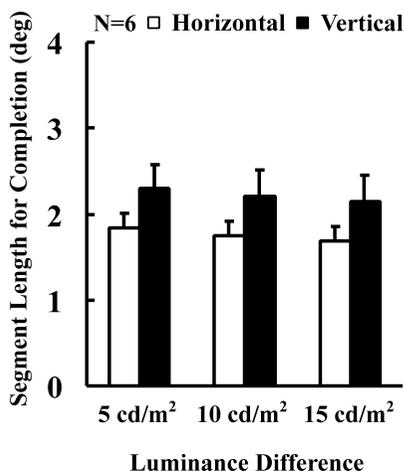


図 4 線分と背景間の輝度差の関数としてプロットされた補完に必要な線分の最小の長さの平均値。水平線分および垂直線分別にプロットされている。細い線分は標準誤差を示す。

は短くなることが示された。また、輝度コントラスト (Michelson contrast)^{*3} の効果は有意傾向を示した [$F(5, 25) = 2.44, p < .10$]。一方、背景に対する線分刺激の明暗の主効果は統計的に有意ではなかった [$F(1, 5) = 0.52, n.s.$]。これらの結果から補完が輝度コントラストに依存するかどうかについては明らかではない (実験結果は輝度比 (0.3~1.8) の主効果においても輝度コントラストと同じ有意傾向を示した [$F(5, 25) = 2.44, p < .10$]。そのため、線分補完が輝度コントラスト (輝度比) に依存しないことを示した木村・宮沢の結果^{9,10}) と一致するかどうかは明らかではない。しかしながら、少なくとも輝度差は盲点補完に系統的に影響を及ぼすことが明らかになったといえる。

補完に必要な線分の最小の長さは水平線分のほうが垂直線分よりも短いという異方性を示す結果は、先行研究^{1,4}) と一致する。先行研究の線分と背景間の輝度差は 50 cd/m^2 以上であったが、本実験では $5, 10$ あるいは 15 cd/m^2 であり、盲点補完の異方性が線分と背景間の輝度差が小さい場合にも同様の異方性が生じることを示している。

実験 1 および実験 2 から線分の色の違いおよび線分と背景間の 5 cd/m^2 の輝度差は補完に必要な線分の最小の長さに有意な影響を及ぼさないことが明らかにされた。この知見を踏まえて、先行研究^{3,7-10}) で用いられている有彩色の赤と緑、および 5 および 10 cd/m^2 の輝度を採用して実験 3 を行った。

5. 実験 3

実験 3 の目的は、線分の色、輝度、および両情報が盲点補完に及ぼす効果を比較することであった。線分と背景間の色差および輝度差を操作して、補完に必要な線分の最小の長さを測定した。

^{*3} Michelson contrast は (線分の輝度 - 背景の輝度) / (線分の輝度 + 背景の輝度) の絶対値により求めた。

5.1 方法

線分と背景の輝度は、 5.0 あるいは 10.0 cd/m^2 で、色は CIE1931xy 色座標で赤 ($0.59, 0.34$) あるいは緑 ($0.29, 0.54$) であった。刺激の輝度は緑が 5 cd/m^2 あるいは 10 cd/m^2 で、赤の輝度は、実験 1 と同様に実験試行の前に各被験者に対して行った交照法による等輝度測定実験の測定結果を用いた。等輝度測定実験では、それぞれの輝度および線分方位に対して、緑線分および赤背景刺激と赤線分および緑背景刺激が高速に交替する刺激を被験者に提示し、この刺激の交替による全体的なちらつき感が最小となる赤の輝度値を被験者ごとに求めた。その結果、 5.0 cd/m^2 および 10.0 cd/m^2 に対する赤の水平および垂直線分における実際の輝度の被験者間の平均値は、それぞれ 6.3 ($SD = 0.5$)、 6.4 ($SD = 0.6$)、 10.2 ($SD = 1.2$)、 10.1 ($SD = 1.2$) cd/m^2 であった。背景刺激は盲点の中心を正方形の中心とする一辺の長さが 18 deg の正方形を提示した。

独立変数は色差輝度差条件 (等輝度異色条件, 等色異輝度条件, 異色異輝度条件) および線分方位 (水平, 垂直) であった。それぞれの色差輝度差条件には 4 つの下位条件があり、それぞれの線分の色および輝度 / 背景の色および輝度の組み合わせは以下のとおりであった。等輝度異色条件は 4 種類 (赤 5 / 緑 5, 緑 5 / 赤 5, 赤 10 / 緑 10, 緑 10 / 赤 10) であり、等色異輝度条件は 4 種類 (赤 5 / 赤 10, 赤 10 / 赤 5, 緑 5 / 緑 10, 緑 10 / 緑 5) であり、および異色異輝度条件も 4 種類 (赤 5 / 緑 10, 緑 10 / 赤 5, 緑 5 / 赤 10, 赤 10 / 緑 5) であった。各被験者は、線分および背景の色および輝度の組み合わせ 12 条件 × 線分方位 2 条件の組み合わせを 4 セッション行った。各試行は、方位別のブロックに分けられ、被験者ごとにランダムに提示された。

5.2 結果と考察

各被験者が刺激線分を基準線分と同様に 1 本の連続した線分として知覚したときの、片側の線分の長さを補完の指標として用いた。等輝度

異色条件, 等色異輝度条件, および異色異輝度条件は, それぞれ4つの下位条件で得られたデータの平均値を統計的分析の単位とした^{*4}. 2要因繰り返し分散分析を行った結果, 色差輝度差条件および線分方位の主効果は統計的に有意であった [色差輝度差条件: $F(2, 14) = 20.81, p < .001$; 線分方位: $F(1, 7) = 8.78, p < .05$]. また, 色差輝度差条件の多重比較を行った結果, 補完に必要な線分の最小の長さは, 等色異輝度条件, 異色異輝度条件, 等輝度異色条件の順に有意に長くなることが示された. 色差輝度差条件と線分方位の交互作用は統計的に有意であった [$F(2, 14) = 4.26, p < .01$]. 単純主効果の検定を行った結果, それぞれの条件において線分方位の効果が有意であった [等輝度異色条件: $F(1, 21) = 10.13, p < .01$; 等色異輝度条件: $F(1, 21) = 4.68, p < .05$; 異色異輝度条件: $F(1, 21) = 11.34, p < .01$]. また, 水平線分において, 補完に必要な線分の最小の長さは, 等輝度異色条件のほうが等色異輝度条件よりも有意に長いことおよび等輝度異色条件のほうが異色異輝度条件よりも有意に長いことが示された [等輝度異色条件と等色異輝度条件: $t(28) = 2.85, p < .01$; 等輝度異色条件と異色異輝度条件: $t(28) = 2.37, p < .05$; 等色異輝度条件と異色異輝度条件: $t(28) = 0.49, n.s.$]. 垂直線分において, 補完に必要な線分の最小の長さは, 異色異輝度条件のほうが等色異輝度条件よりも有意に長いことおよび等輝度異色条件のほうが等色異輝度条件よりも有意に長いことが示された [等輝度異色条件と等色異輝度条件: $t(28) = 6.80, p < .001$; 等輝度異色条件と異色異輝度条

^{*4} 実験1および実験2の結果から, 色の違いおよび背景に対する線分の明暗は線分補完に影響を及ぼさないと考えられること, および実験3の結果から等輝度異色条件および等色異輝度条件における色の違いによる輝度差の効果および線分の背景に対する明暗の違いの効果はほとんどないことが示された [等輝度異色条件: 線分の色: $t(7) = 1.03, n.s.$; 線分の明暗: $t(7) = 1.09, n.s.$; 等色異輝度条件: 線分の色: $t(7) = 2.02, p < .10$; 線分の明暗: $t(7) = 1.30, n.s.$] ことから, それぞれの色差輝度差条件における4つの下位条件のデータを平均した.

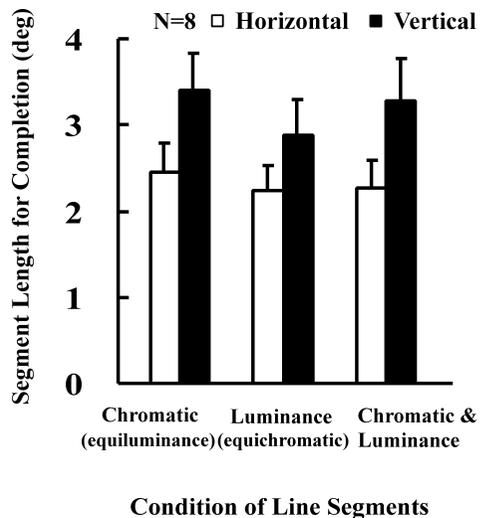


図5 線分と背景間の色および輝度の条件の関数としてプロットされた補完に必要な線分の最小の長さの平均値. 水平線分および垂直線分別にプロットされている. 細い線分は標準誤差を示す.

件: $t(28) = 1.66, n.s.$; 等色異輝度条件と異色異輝度条件: $t(28) = 5.14, p < .001$]. 図5は色差輝度差条件の関数として補完に必要な線分の最小の長さの平均値を線分方位別に示す. 被験者の内省報告によると, 補完された線分全体の色および輝度は基準線分と同じように知覚された.

実験結果から, 補完に必要な線分の最小の長さは, 等色異輝度条件, 異色異輝度条件, 等輝度異色条件の順に長くなることが示された. この結果は線分と背景間に輝度差がある場合には色差がないほうがあるよりも補完は生じやすく, また線分と背景間に色差がある場合には輝度差があるほうがないよりも補完は生じやすいことを示唆する. すなわち, 異色異輝度条件における線分と背景間の色差および輝度差情報は加算的にあるいは選択的に盲点補完の処理に影響を及ぼさず, 線分と背景間の輝度差は補完を促進するが, 色差は補完を抑制するという相反する影響を及ぼすと解釈できる. 一方で, 等輝度異色条件においては色差のみでも補完は生じるので色差が補完を抑制するとは一概には言えない. これらの結果の解釈については総合考察で議論する.

等輝度条件における補完の生起および異方性を示す本実験結果は先行研究の結果と一致している。本研究において等輝度異色条件、いわゆる等輝度条件においても盲点補完は生じることが示されたことは、木村・宮沢による補完の主観的な強さを指標にした結果と一致している^{9,10)}。盲点以外の補完現象について、Livingstone & Hubelは主観的輪郭が等輝度条件においては消失することを指摘し、輪郭の知覚には輝度コントラストが重要であることを示唆した¹⁴⁾が、盲点補完においては線分と背景間の輝度差に関係なく、色差だけでも生じることが確認された。本実験における補完に必要な線分の最小の長さは水平線分のほうが垂直線分よりも短いという異方性を示す結果は、異輝度条件における先行研究^{1,4)}の異方性を示す結果と一致する。これは盲点補完の異方性は線分と背景間の輝度差に関係なく、色差だけでも生じることが示している。

本実験結果から色差輝度差条件において異方性が示された。水平線分では等輝度異色条件のほうが等色異輝度条件および異色異輝度条件よりも補完が生じにくいことが示された。一方で、垂直線分では等色異輝度条件のほうが異色異輝度条件および等輝度異色条件よりも補完が生じやすいことが示された。この結果は水平線分では線分と背景間の輝度差による促進が、垂直線分では色差による抑制が補完に影響を及ぼすことを示唆する。しかしながら、実験1および実験2の結果から、色差および輝度差による補完の異方性は示されていない。したがって、本実験結果がどのような原因から生じているのかについては、いまのところわからない。

6. 全体的考察

本研究の結果から、盲点における補完に必要な線分の最小の長さは、(a) 線分と背景間の輝度差が大きい場合、線分の色如何によらず、ほぼ一定である、(b) 線分と背景間の輝度差が大きくなるにつれて短くなる、(c) 線分と背景間に輝度差がある場合には、色差がないほうがあ

るよりも短い、および (d) 線分と背景間に色差がある場合には、輝度差があるほうがないよりも短いことが示された。これらの結果は、(1) 線分の色および輝度の両情報が盲点補完の処理に影響を及ぼしていること、および (2) 線分と背景間の輝度差情報のほうが色差情報よりも盲点補完を促進させることを示唆する。

異色異輝度条件における補完に必要な線分の最小の長さが等輝度異色条件よりも短く、かつ等色異輝度条件よりも長いという結果は、色および輝度の両情報が盲点補完の処理に影響を及ぼしていることを示唆する。等輝度異色条件(木村・宮沢^{9,10)} および実験3) および等色異輝度条件(実験2および実験3)の結果から、盲点補完は線分と背景間の色差情報のみあるいは輝度差情報のみでも生じることが示されている。一方で、実験3の結果から、線分と背景間に輝度差がある場合には色差がないほうがあっても補完は生じやすく、また線分と背景間に色差がある場合には輝度差があるほうがないよりも補完は生じやすいことが示された。この結果は線分と背景間の色情報の差は補完の生起を抑制するが、逆に、輝度情報の差は補完を促進するという相反する効果をもつことを示唆する。つまり、異色異輝度条件における線分補完において、色差および輝度差の両情報が補完処理に影響を及ぼしていることを示唆する^{*5)}。

また、異色異輝度条件における補完に必要な

*5 線分と背景間に色差および輝度差の両情報がある異色異輝度条件の結果は、実験1と実験3で一致していないように見える。線分と背景間の輝度差の大きい実験条件(実験1)においては、背景と同じ色をもつ灰とその他の色(赤、緑、青)の線分では補完に必要な線分の最小の長さにほとんど違いが見られなかった。これは色差情報は盲点補完に影響を及ぼしていないことを示唆する。一方で、線分と背景間の輝度差の小さい実験条件(実験3)においては、両情報差が補完に影響を及ぼしていると考えられる。これらの結果の違いは色差と輝度差の差が影響していると考えられる。すなわち、実験1のように輝度差が大きい場合には、輝度差の影響が大きく、色差はあまり影響を及ぼさないが、実験3のように輝度差および色差が比較的等しい条件では、色差および輝度差の両情報が盲点補完に影響を及ぼすと考えられる。

線分の最小の長さが等輝度異色条件よりも短く、かつ等色異輝度条件よりも長いという結果は、線分と背景間の輝度差情報のほうが色差情報よりも盲点補完を促進させることを示唆する。本研究ではコントラストの主観的強度を統制していないために等色異輝度条件と等輝度異色条件を直接比較することは厳密には妥当ではないのかもしれないが、等色異輝度条件と異色異輝度条件の比較および等輝度異色条件と異色異輝度条件の比較から、線分と背景間に輝度差がある場合には色差がないほうがより補完は生じやすく、また線分と背景間に色差がある場合には輝度差があるほうがより補完は生じやすいことが示された。この結果は線分と背景間の色情報の差は補完の生起を抑制するが、逆に、輝度情報の差は促進することを示唆する。また、実験結果は輝度差が大きくなるにつれて線分補完は生じやすくなることを示した。これらの結果は色差情報よりも輝度差情報のほうが補完の促進という点で効果が大きいことを示唆する。

盲点補完において、線分と背景間の色差および輝度差情報がどのような処理を経て本研究結果を生みだしているのかについて、2つの解釈が考えられる。まず、コントラストの主観的強度の差が補完に影響したのかもしれない。輝度情報の差が色情報の差よりもコントラストの主観的な強度が大きかった可能性がある。コントラストが強いほど補完が生じやすいのであれば、異色異輝度条件において最も補完が生じやすいと考えられるが、本研究では等色異輝度条件のほうが補完は生じやすいという結果が得られた。この結果は輝度格子の知覚は色格子に大きく妨害されることが示されている¹⁵⁾ことから、異色異輝度条件においては線分と背景間の主観的な輝度コントラストが色情報によって弱められたと解釈できる。しかしながら、盲点補完が輝度コントラストに依存するという明らかな結果は得られていないことから、この説が妥当であるかどうかは明らかではない。

第2の解釈として、線分と背景間の補完の競

合が線分補完に影響しているのかもしれない。補完に必要な線分の最小の長さは、線分と背景との間で生じる“補完の競合”の結果、視覚系が盲点の両側にある2本の線分を盲点を通る1本の連続した線分であると解釈するのが妥当であるとみなすのに必要な情報量（刺激量）を示していると考えられる。すなわち、実験開始時には盲点領域はすでに背景の色および輝度情報が補完（フィリングイン）されているので、線分の色および輝度情報が、線分が長くなることによって、背景の色および輝度情報よりも強くなれば、補完が生じると考えられる。本研究の結果から線分と背景間の輝度情報の差が大きくなるにつれて補完は生じやすくなり、線分と背景間の色情報の差があると補完は生じにくくなることから、背景の輝度情報は弱く、色情報は強いと考えられる。これは赤・緑の反対色を用いたことが線分と背景間の補完の競合を強めた原因かもしれない。しかしながら、同じ色情報の競合を伴う、ターゲットと背景間の輝度が等しく、色が異なる等輝度異色条件において行われた知覚的フィリングインの研究¹⁶⁾においては、白と赤と緑の組み合わせにおける色の違いはフィリングインにあまり影響を及ぼさなかった。という結果も得られていることから、赤と緑の反対色が色情報の補完の競合を強めているのかどうかはわからない。

盲点補完において、色および輝度情報がどのような処理を経て、本研究結果を生み出しているのか、本研究結果だけからでは明らかではない。色および輝度情報が盲点補完にどのように影響を及ぼしているのかを解明するためには、線分と背景間の主観的な色コントラストと輝度コントラストの強度を統制して比較すること、および赤・緑の反対色のみでなく、線分と背景間の他の色の組み合わせを用いて検討する必要があると考えられる。

謝辞 本論文の執筆にあたり、色および輝度について九州大学大学院芸術工学研究院の須長正治氏に有益なコメントをいただきました。ま

た、九州大学文学部心理学研究室の皆さんからも多くの助言をいただきました。さらに二人の査読者からひじょうに有益なコメントをいただきました。ここに、深く感謝いたします。

本研究は文部科学省「21世紀COEプログラム」および「科学研究費」(萌芽研究 課題番号17653089 研究代表者 中溝幸夫)から研究補助を受けた。

文 献

- 1) 蘭 悠久, 大隈峰人, 二瀬由理, 中溝幸夫, 近藤倫明: 盲点におけるフィリングイン (知覚的充填) の異方性. *Vision*, **16**, 1–12, 2004.
- 2) 小林永樹, 樋田英輝, 斎藤秀昭: 盲点のフィリングインは主観的輪郭の認知メカニズムと共通か. *電子情報通信学会技術報告*, 147–154, 1999.
- 3) V. S. Ramachandran: Blind spots. *Scientific American*, **266**, 86–91, 1992.
- 4) Y. Araragi and S. Nakamizo: Anisotropy of perceptual filling-in at the blind spot. *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, **22**, 45–46, 2003.
- 5) 蘭 悠久, 中溝幸夫: 盲点におけるフィリングインの刺激特性. *日本心理学会第67回大会発表論文集*, 517, 2003.
- 6) N. Kawabata: Visual information processing at the blind spot. *Perceptual and Motor Skills*, **55**, 95–104, 1982.
- 7) R. J. Brown and J. B. Thurmond: Preattentive and cognitive effects on perceptual completion at the blind spot. *Perception and Psychophysics*, **53**, 200–209, 1993.
- 8) V. S. Ramachandran: Blind spots. Filling in gaps in perception: Part I. *Current Directions in Psychological Science*, **1**, 199–205, 1992.
- 9) 木村英司, 宮沢一郎: 盲点での補完に及ぼす輝度コントラストの効果. *Vision*, **4**, 32, 1992.
- 10) E. Kimura: Completion at the blind spot occurs under equiluminant condition. *Investigative Ophthalmology and Visual Sciences (Supplement)*, **33**, 1350, 1992.
- 11) 大隈峰人, 二瀬由理, 中溝幸夫, 近藤倫明: 盲点の計測と知覚的補完の時空間特性. *Vision*, **13**, 45–48, 2001.
- 12) I. Abramov, J. Gordon, and H. Chan: Color appearance in the peripheral retina: Effects of stimulus size. *Journal of the Optical Society of America A*, **8**, 404–414, 1991.
- 13) Committee on Colorimetry, Optical Society of America: The science of color. pp. 101–105, 1963.
- 14) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *Journal of Neuroscience*, **7**, 3416–3468, 1987.
- 15) K. K. De Valois and E. Switkes: Simultaneous masking interactions between chromatic and luminance gratings. *Journal of the Optical Society of America*, **73**, 11–18, 1983.
- 16) Y. Sakaguchi: Target/surround asymmetry in perceptual filling-in. *Vision Research*, **41**, 2065–2077, 2001.