

縦断勾配錯視の研究

對梨成一・北岡明佳

立命館大学立命館グローバル・イノベーション研究機構
立命館大学

The slope illusion : a review

Seiichi TSUINASHI and Akiyoshi KITAOKA

Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University
Department of Psychology, Ritsumeikan University

We review a series of studies on the illusion of the vertical gradient of a slope, or simply the "slope illusion", which includes the phenomenon that an ascent appears to be a descent or vice versa. After discussing several factors affecting slant perception that are considered to be related to this illusion, we introduce two factors that are included in the retinal image of a slope. One is the angle of constriction, and the other is the angle of projected obliquity. The angle of constriction refers to the angle formed by a pair of edges of a side in front of and behind a sag or crest. We hypothesize that if this angle is constricted or is concave, which indicates a sag, the nearer slope appears to descend while the farther slope appears to ascend. On the other hand, we assume that if the angle is 'negatively' constricted or is convex, which indicates a crest, the nearer slope appears to ascend while the farther slope appears to descend. The angle of projected obliquity refers to the angle between the horizontal direction and each of the edges of a slope. We hypothesize that this angle is closely related to the apparent slant of a slope, in which the slope tends to appear to be an ascent (descent) when the angle is large (small). These hypotheses convincingly explain a variety of findings presented in previous studies.

Key words : visual illusion of vertical gradient, slant perception, sag, crest, angle of constriction, angle of projected obliquity, retinal image

キーワード : 錯視, 縦断勾配錯視, 傾斜知覚, サグ, クレスト, くびれ, 投影斜角, 網膜像

1. はじめに

坂道を正面から見たとき、その見かけの傾斜が客観的な傾斜とは異なり、上り坂が下り坂に見えたり、下り坂が上り坂に見えることがある。このような現象は、「錯覚的感覚」(illusory sensation: Ninio, 1988), 「反重力の丘」(antigravity hill: Bressan, Garlaschelli, & Barracano, 2003), 「道路の縦断勾配の錯視」(visual illusion of vertical gradient of road: 今井, 1971, 1984), 「縦断勾配錯視」(visual illusion of vertical gradient: 對梨, 2008) などとよばれている。本稿ではこれらの現象を「縦断勾配錯視」とよぶことにする。なお、「縦断勾配」とは坂道の上下の傾斜のことで

あり、坂道の左右の傾斜を意味する「横断勾配」の錯視(對梨, 2005)については本稿では扱わない。

縦断勾配錯視のなかでもとくに顕著なものとしては、日本では、ミステリーゾーン(香川県高松市屋島中町)(図1a, b), ミステリー坂(岩手県和賀郡東和町)(図1c, d), 後戻り坂(青森県三戸郡階上町)(図1e, f), ゆうれい坂(鹿児島県熊毛郡中種子町), おぼけ坂(沖縄県島尻郡久米島町), 坂上り水(福岡県久留米市田主丸町)などが知られている。外国においては、神秘の道路(韓国済州島済州市我羅洞), 反重力の丘(Antigravity Hill)(Straws Lane Road, Wood-End, Victoria, Australia), 磁力の丘(Magnetic Hill)(Neepawa, Manitoba, Canada), 幽霊の丘(Spook

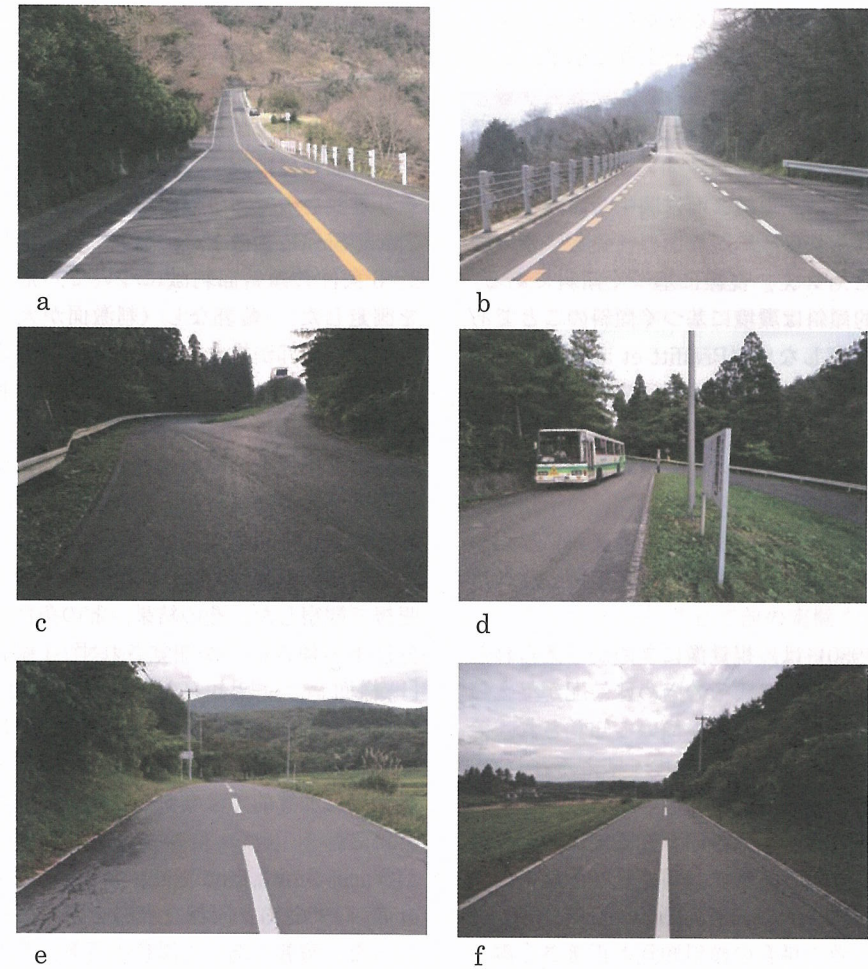


図1 縦断勾配錯視の例。aとbはミステリーゾーンを示す。aは下から上り坂を見た図で、この方向から見た縦断勾配錯視がミステリーゾーンといわれる。実際に立って観察すると、約1°の上りの近坂は下り坂に見える。bはaを逆方向から見た図で、この方向から見ても縦断勾配錯視が生じ、約1°の下りの遠坂は上って見える。cの右の坂とdの左の坂はミステリー坂を示す。cは上から下り坂を見た図で、この方向から見た縦断勾配錯視がミステリー坂といわれる。実際に立って観察すると、約2°の下り坂は上り坂に見える。dはcを逆方向から見た図で、この方向から見ても縦断勾配錯視が生じ、約2°の上り坂は下って見える。eとfは後戻り坂を示す。eは下から上り坂を見た図で、この方向から見た縦断勾配錯視が後戻り坂といわれる。実際に立って観察すると、手前から2番目にある約2°の上り坂は下って見える。fはeを逆方向から見た図で、この方向から見ても縦断勾配錯視が生じ、約2°の下り坂は上って見える。

Hill)(North Wales Drive, North Avenue, Lake Wales, Florida, USA), 電氣的斜面(Electric Brae)(Croy Bay, Ayr, Ayrshire, Scotland)などが知られていて、そのいくつかは観光名所である。

縦断勾配錯視が起こりやすい箇所の中には、サグかクレストがある。土木学や交通科学の分野では、「近坂」(観察者から見て相対的に近くに位置する坂)と「遠坂」(観察者から見て相対的に

遠くに位置する坂)の接合部が凹状であれば「サグ」(sag)といい、逆に、凸状であれば「クレスト」(crest)という(飯島, 1997)。近坂と遠坂がサグをなすとき、両坂の組み合わせは5種類(それぞれ、急な下りとゆるやかな下り、下りと水平、下りと上り、水平と上り、ゆるやかな上りと急な上り)である(大口, 1995)。同様に、近坂と遠坂がクレストをなすとき、両坂の組み合わせ

せは5種類（それぞれ、ゆるやかな下りと急な下り、水平と下り、上りと下り、上りと水平、急な上りとゆるやかな上り）である。

縦断勾配錯視は、より一般的には、傾斜知覚 (perception of slant) に関連するテーマである。傾斜知覚の研究は、単純な面に関する研究と地理的傾斜に分けられる。単純な面の傾斜というのは光学的傾斜ともいえ、視線に基づく傾斜である。また、地理的傾斜は環境に基づく傾斜のことであり、視線に依存しない (Proffitt et al., 1995)。本稿では、まず傾斜知覚に関する研究をレビューした後に、坂道の見かけの縦断勾配を説明する網膜像についての2つの要因（「くびれ」と「投影斜角」）を論じる。

2. 面の傾斜知覚の研究

Gibson (1950) は、視覚像にきめが与えられたときに面の知覚が生じ、そのきめに勾配が与えられたときに面が奥行き方向へ傾いて知覚され、その勾配が急なほど大きく傾斜して見えるとした。彼はこのことを多くの図版を用いて例証した。

通常の奥行き方向の面の傾斜知覚では、環境に基づく地理的傾斜と視線に基づく光学的傾斜は一致しているが、Gibson and Cornsweet (1952) は両傾斜が不一致の場合の傾斜知覚の正確さを調べた。身体は四角い部屋の壁の一つに対して平行に置き、頭部だけを左に45°回転させた状態で、床とは垂直に置かれ、きめの付いた面を観察した。面は顔面の正面に置かれ、円形窓から単眼視で観察した。面は垂直軸を中心に回転させることができた。きめには規則的なものと不規則なもの2種類を用いた。被験者の課題は、面を視線に垂直な位置（光学的傾斜と呼ぶ。物理的には部屋の壁に対して斜め45°）に調整することと、部屋の壁に対して平行あるいは垂直な位置（地理的傾斜）に調整することであった。その結果、不規則なきめの付いた面を地理的傾斜に調整する時のみ有意な不正確さが見られたが、他の条件では面は比較的正確に調整された。

Clark, Smith, and Rabe (1955) は、面の形（矩形、台形）と面の見かけの傾斜の関係を調べた。台形が垂直のときの網膜像は、面が実際に20°傾斜したときの網膜像に対応するものであった。そ

の結果、面が実際に傾斜しなくとも、その面が台形のとき面は8°傾斜して知覚された。彼らは、網膜に投影されたときの面の輪郭の変形が、面の傾斜知覚の手がかりになると考えた。

傾斜知覚には、面の輪郭と面のきめのどちらがより重要なのであろうか。この問題に答えるため、Clark, Smith, and Rabe (1956a) は、以下の3x2=6条件の傾斜面刺激について、見かけの傾斜を測定した。「輪郭なし（刺激面が大きすぎて観察窓から輪郭が見えない）条件」、「刺激面の矩形の輪郭が見え、背景は黒色の条件」、「刺激面の矩形の輪郭が見え、背景にはきめが付いている条件」の3条件それぞれにおいて、刺激面にきめのある条件と、一様な明るさの条件を設定した。面は床に垂直で、前額平行面を基準とし、上から見て反時計回りに40°傾けた。被験者はそれらを単眼視で観察した。その結果、どの条件も実際の半分以下の傾きにしか知覚されず、「輪郭なし」で「一様面」ではほとんどフラット（前額平行面）に見えた。彼らは、面の見かけの傾斜には輪郭はきめよりも効果が大きいことを示唆したが、両者の効果は加算的ではなかったことにも注意を促している。

Clark, Smith, and Rabe (1956b) では、Clark et al. (1956a) と同様な実験を円形の面について行った。輪郭（あり：黒色の背景、なし：刺激が大きくて輪郭が見えない）、きめ（あり、なし）について、単眼視と両眼視で観察させ、それらの面の見かけの傾斜を測定した。面の傾斜はClark et al. (1956a) と同じであった。条件同士を比較した結果、単眼視と両眼視の両条件で、輪郭がありきめのない面は、輪郭がなくきめのない面よりも大きく傾斜して見え、実際の傾斜に近づいた。また、輪郭がありきめのある面も、輪郭がなくきめのある面よりも大きく傾斜して見えた。以上の結果から、面の見かけの傾斜には輪郭がきめよりも重要であると、彼らは考えた。

Freeman (1966a) は、正方形の面の大きさと面の見かけの傾斜（縦断勾配）を調べた結果、面が大きくなるとその見かけの傾斜も大きく判断されることを報告した。彼は、網膜像を透視図と同等であると仮定したとき、面の輪郭が投影された台形の両側の縁線（エッジ）が水平となす角度（後述の投影斜角）を用いて、面の大きさが大き

いほど、その角度変化が大きくなるためであると説明した。

Freeman (1966b) は、Freeman (1966a) と同じ装置を用いて、矩形面の大きさと面の傾斜（縦断勾配）の弁別閾（傾斜閾）を調べた。傾斜閾は、面の上端が垂直よりも遠方か手前かを判断させた。その結果、面の大きさが大きくなると傾斜閾は低くなり、よりわずかな傾きで傾斜の知覚が生じた。彼は、面の大きさが大きいほど、その網膜像の変形が大きくなるためであると考えた。

Epstein (1981) は、面の見かけの角度に及ぼす視覚マスキングの効果を検討した。テスト刺激は、前額平行面を基準にして、上から見て時計回りに20°、40°、60°回転した面（3D面）とそれらの写真（2D面）であった。マスクの効果を調べる条件は、面の提示からマスクの提示までの時間間隔 (ISI) を0、40、80、120 msとして、さらにマスクなし条件を加えた。被験者は片方の目でテスト刺激を、もう片方の目で比較刺激を観察した。その結果、3D面と2D面の見かけの角度はマスクなし条件でもある程度過小視されたが、マスクがあると過小視の程度が大きくなった（前額平行面に近い側に変位して見えた）。その効果はマスクまでのISIが短く、面の傾きが大きい時に顕著であった (ISIが0 msの時、60°の面の傾きは20°程度に見えた)。彼は、面の傾斜を正しく知覚するにはその知覚的表象が一定時間熟成されることが必要であり、Gibsonの言う直接知覚仮説では説明できないと考えた。

3. 地理的傾斜知覚の研究

Proffitt et al. (1995) は、実際の上下り坂（2°から34°）の傾斜を見上げさせ、3つの推定法（口頭：口頭で坂の傾斜を角度で見積もる、円盤：直線部分を上に水平に固定された半円と、直線部分を中心として回転する半円でなす角度で見積もる、手：傾斜する板を手で傾けた角度で見積もる）で判断させた。その結果、口頭と円盤の判断は傾斜が過大視された。性差があり、女性は男性よりも傾斜が過大視された。口頭判断が最も性差が大きかった。次の実験では、今度は下り坂（最小2°、最大34°）を見下ろさせ、先の実験を繰り返した。その結果、3つの推定法すべてにおいて傾斜は過

大視された。こちらも性差があり、女性は男性よりも傾斜を大きく判断した。口頭で判断させたとき最も性差が大きかった。前の実験と比較すると、円盤と手の判断のとき見下ろしは見上げよりも過大視の程度が大きく、特に、傾斜が急なときにその差が顕著に現れた。ここにも性差があり、男性よりも女性の方がその程度が大きかった（女性は見下ろしの過大視の程度がさらに大きかった）。

彼らの別の実験では仮想現実の坂道について検討を行なっている。3Dグラフィックスの上り坂（5°から60°まで5°きざみ）をヘッドマウント・ディスプレイで両眼立体視によって観察させ、2つの推定法（口頭、手）で判断させた。その結果、口頭は手の判断よりも過大視された。また、口頭では傾斜は過大視されたが、手では傾斜は過小視された。次の実験では、今度は3Dグラフィックスの下り坂を観察させて前の実験を繰り返した。その結果、口頭では傾斜は過大視された。前の実験と比較すると、傾斜が大きくなると見かけの傾斜も大きくなるが、見下ろしの過大視の程度は見上げの過大視の程度よりも大きかった。さらに、口頭では、ゆるやかな傾斜のとき、見上げの過大視の程度の方が見下ろしの過大視の程度よりも大きかったが、急な傾斜のときはその反対であった。しかし、手では、見下ろしの過大視の程度は傾斜の緩急によらず見上げの過大視の程度よりも大きかった。

さらに別の実験では、疲労（走る前、走った後）について、実際の2種類の上り坂（5°、31°）を3つの推定法（口頭、円盤、手）で判断させた。その結果、口頭と円盤の両方で、走った後は走る前よりも傾斜が過大視された。実際の上下り坂を用いた実験と比較して、5°と31°の傾斜のとき、走った後の口頭と円盤の過大視の程度の方が大きかった。以上から彼らは、疲労が坂道の見かけの傾斜を過大視させると考えた。また、下り坂を見下ろすときの坂道の見かけの傾斜は、上り坂を見上げるよりも過大視の程度が大きいのは、下るのは上るのよりも難しいためと彼らは考えた。

Ninio (1998) はバニユルス（フランス）にある下りの遠坂が上り坂に見える縦断勾配錯視を観察し、遠坂の形が平行ではなく、先太（さきぶと：先端の方が太いこと）であるために錯視が生じたと考えた。一方、距離を大きく見せるために

坂道の形を先細（さきほそ：先端の方が細いこと）にすることは、建築の分野では古くから用いられている（黒田, 1992）。例えば、鶴岡八幡宮（鎌倉）にある段葛（だんかづら）とよばれる歩道（長さ 435 m）は入り口から出口に向かって先細をなし、入り口から見ると実際よりも長く 1000 m ぐらいに見え、逆に、反対方向（先太）から見ると実際よりも短く見える（日経映像, 1999）。スパダ宮（ローマ）にある柱廊も、入り口から出口に向かって先細をなし、その柱廊の奥行きは実際よりも大きく見える（椎名, 1995）。テアトロオリンピコ（ヴィチエンツァ）という劇場舞台では、奥行きを大きく見せるために、街路が観客席側から見て先細につくられている（黒田, 1992）。

Bressan et al. (2003) は、遠坂と近坂が接続してサグをなし、それぞれに傾斜を操作可能な坂道模型を用いて、近坂と遠坂の見かけの縦断勾配をそれぞれ判断させた。なお、近坂と遠坂をあわせた坂道全体の形は先細であった。その結果、遠坂の縦断勾配が上り方向に傾斜したとき近坂は下り坂に傾斜して判断された。また、近坂の縦断勾配が急な下り坂に傾斜したときゆるやかな下りの遠坂は上り坂に判断された。次の実験では、坂の数を増やし、連続した 3 坂（近坂、中坂、遠坂）の坂道模型を用いて、近坂と遠坂の傾斜を同じ傾斜で変化させ、中坂の見かけの縦断勾配を判断させた（図 2）。近坂と中坂あるいは中坂と遠坂はサグあるいはクレストをなした。なお、これらの三つの坂をあわせた坂道全体の形は先細であった。その結果、近坂と遠坂が急な下りのときゆるやかな下りの中坂は上り坂に判断され、逆に、近坂と遠坂が急な上りのとき、ゆるやかな上りの中坂は

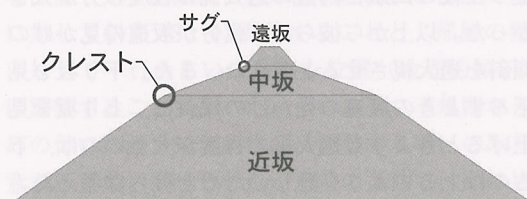


図 2 クレストとサグの坂道のくびれ。図は 3 坂（近坂、中坂、遠坂）がクレストとサグをなすときの網膜像を示す。中坂が近坂とクレストをなし、中坂が遠坂とサグをなすことによって、それぞれに中坂が下り方向に傾斜して見える効果が生じると説明できる。

水平（下り方向）に判断された。

Bressan et al. (2003) の別の実験では、並走する 2 つの坂道（本道と側道）の模型を用いて、本道の見かけの縦断勾配を測定した。これは側道の傾斜の影響を調べることが目的である。本道と側道の一番手前の高さは同じレベルに揃え、側道にそれぞれ複数の傾斜条件を設けた。さらに模型の遠端に地平線を模したボール紙を設置して、その高さの効果も調べた（地平線なし条件を含む）。その結果、本道の遠端と地平線の高さが等しい時、側道の傾斜に関係なく本道を水平な坂に知覚させる効果があった。一方、側道の遠端と地平線の高さが等しい時、急な上りの側道はゆるやかな上りの本道を下り坂に知覚させる効果があり、急な下りの側道はゆるやかな下りの本道を上り坂に知覚させる効果があった。地平線がない時は、急な下りの側道はゆるやかな下りの本道を上り坂に知覚させる効果があったが、急な上りの側道はゆるやかな上りの本道を下り坂に知覚させる効果はなかった。

さらに別の実験では、写真の下り坂を用いて、坂道の遠方にある山の高さを変化させた。その結果、坂道の遠方に高い山があるときその坂道は下り坂に見え、低い山があるときその坂道は上り坂に見えた。以上から彼女らは、縦断勾配錯視の要因として、2 坂からなるサグの遠坂と近坂が相互に影響を及ぼすこと、さらに、3 坂で近坂と中坂がクレストをなし中坂と遠坂でサグをなすとき、中坂は近坂と遠坂の影響を受けて下り方向に傾斜して見えることを示した。また、側方の坂道が隣接する坂道の見かけの縦断勾配に影響を及ぼすことを示した。さらに、山の高さが坂道の見かけの縦断勾配に影響を及ぼすことを示し、それは、「目の高さ」(eye level) の知覚が変化するためであると考えた。

Ross (1974) は、坂道の傾斜判断（縦断勾配知覚）には距離の知覚が重要であるとその本の中で述べている。坂道の遠端までの観察距離は、その手前までの距離よりも短縮されることによって、上り坂も下り坂も傾斜がより上り方向に傾斜して見え、かつ、坂道の長さも短縮して見えることになる。また、この説明では、坂道は上り方向に傾斜して見えやすいことになる。これは、上り坂に見える錯視は下り坂に見える錯視よりも起こりや

すいこと (Bressan et al., 2003) や、坂道は上り坂に見えやすいこと (對梨, 2008) と一致する。なお、坂道が上り坂に見えやすい説明として、對梨 (2008) は、上り坂、水平な坂、下り坂にかかわらず、坂道の網膜像が、遠方の道幅が手前の道幅よりも短い台形として投影されるためであると考えた。

一方、距離についての研究であるが、上り斜面の縦断勾配も測定した研究がある。Stefanucci et al. (2005) は、実際の丘の斜面 (25°) を用いて上り斜面と下り斜面における距離の判断を求めるとともに、同じ距離をもつ平坦な地形の見かけの距離の判断を求めた。また、実験の最後に上り斜面のみ、その縦断勾配を口頭で判断させた。その結果、坂道の見かけの距離は下り坂が最も長く、実際の距離と同等に判断され、次いで上り坂、平坦な地形が最も短く判断された。また、上り坂の見かけの縦断勾配は平均で 50° であった (実際の 2 倍)。彼らは急な縦断勾配を見たり、重い荷物を背負っているときの労力が急斜面の距離と縦断勾配を過大視させると考えた。ただし、彼らは実験では直接労力を測定していないので、下り坂が最も労力を必要とするという論理的帰結は確認していない。また、Ninio (1998) も労力 (身体にかかる負担の見積もり) の要因について、頂上から見下ろす山の斜面は下から見上げるときよりも急に傾斜して見え、自転車競技の選手はトラックの傾斜を初めの周回よりも最後の周回の方が急に傾斜して見えると述べている。ここで、Stefanucci et al. (2005) の結果を Ross (1974) の仮説と照らしてみると、上り斜面のとき距離が実際より短く見えたことと、縦断勾配が上り方向に過大視されたことは説明できるが、斜面の縦断勾配が変化しても、斜面の遠端までの観察距離はほとんど変化しないので、Ross (1974) の説明では、斜面の縦断勾配が変化すると、見かけの斜面の距離も変化したという結果を説明できない。

Stefanucci et al. (2008) は、実際の急な下り坂を両眼で観察させ、Proffitt et al. (1995) と同じ 3 つの推定法（口頭、円盤、手）で測定した。観察にはスケートボードに立った恐怖条件と観察位置を壁で囲んだ安心条件があった。その後、恐怖を 6 点評定尺度で測定した。その結果、口頭と円盤は、恐怖条件の方が安心条件よりも傾斜が過大

視された。彼らは、恐怖が坂道の見かけの傾斜に影響を与えると考えた。

對梨 (2008) は、傾く部屋の中で坂道模型の縦断勾配を水平に調整させ、同時に、観察者の座る椅子が位置する床面の傾斜（傾く部屋の床の場合、静止した水平台の場合）も変数として、それらの効果を検討した。その結果、部屋の傾斜は坂道の見かけの傾斜に影響を及ぼし、部屋が上り方向に傾斜したとき坂道は下り方向に傾斜して見え、部屋が下り方向に傾斜したとき坂道は上り方向に傾斜して見えた。一方、観察者が位置している床の傾斜の効果はなく、傾く床から知覚された坂道の縦断勾配は、水平台から知覚されたものと同じであった。別の実験では、坂道模型の側壁に描かれた横縞模様が ±30° の範囲で傾き、側壁の高さも変化した。その結果、横縞模様が下り方向に傾斜したとき坂道は上り方向に傾斜して判断され、上り方向に傾斜したとき坂道は下り方向に傾斜して判断された。坂道の見かけの縦断勾配は側壁の縞模様が ±10° で最大であった。側壁の高さは効果がなかった。

對梨 (2008) の別の実験では、水平と垂直からそれぞれ ±10° 傾斜した横縞と縦縞模様を組み合わせた 6 側壁の縞模様が作成された。その結果、坂道の見かけの縦断勾配に格子パターンが最も効果があり、また、縞模様の傾斜が上りのとき、横縞模様は縦縞模様よりも効果が大きかった。對梨は、縞模様の投影斜角（網膜像に投影された縞の収束線が水平となす角度）に着目し、縞模様の客観的な傾斜量が同じであっても、横縞の投影斜角の傾斜量（横縞が水平時の投影斜角との差）は縦縞（縦縞が垂直時の投影斜角との差）よりも 4 倍程度大きいためであると説明した。

以上のことをまとめると、傾斜知覚要因には、きめの勾配、面の輪郭あるいは坂道の形、面の大きさ、投影斜角あるいは網膜像の変形、マスクの効果、近坂と遠坂の相互作用、坂道の周囲の視環境の傾斜（側方の坂道の傾斜、視野全体の傾斜、側壁縞模様の傾斜）、山の高さ、目の高さ、距離の短縮といった物理的・知覚的要因があることがわかった。また、その他の要因として、疲労、労力、恐怖といった生理的要因や性差があげられている。

4. 坂道の縦断勾配錯視の網膜像の要因

以上紹介した先行研究の中で、Bressanら(2003)では近坂と遠坂の相互作用を説明する要因が示されていない。また、Freeman(1966a)では面の大きさの効果が網膜像の要因によって説明されているが、坂道の見かけの縦断勾配を説明するためには、その定義が十分ではない。以下では、これらの不十分さを補うことができると考えられる網膜像要因を2種類提案し、それらをこれまでレビューしてきた知見と比較検討した。

4.1 くびれ

2坂あるいは3坂でサグやクレストをなす坂道では、それぞれの坂道が相互作用し、例えば、遠坂の縦断勾配が上り方向に傾斜すると近坂は下り坂に傾斜して判断され、近坂の縦断勾配が急な下り坂になるとゆるやかな下りの遠坂は上り坂に判断された(Bressan et al., 2003)。この坂道の相互作用では、対象の坂道自体の網膜像は変化しないので、輪郭の変形(Clark et al., 1955, 1956a, 1956b; Freeman, 1966a, 1966b)では説明できない。そこで、我々は、「くびれ」を仮定した。くびれとは、近坂と遠坂が接続してサグあるいはクレストをなすとき、その網膜像において、両坂の縁がなす角度(°)のことである(図3)。くびれは、

$$\theta_c = \theta_f - \theta$$

で表される。くびれが正の値(サグ)をとるとき近坂は下り方向、遠坂は上り方向に傾斜して見え(図3左)、くびれが負の値(クレスト)をとると

き近坂は上り方向、遠坂は下り方向に傾斜して見え(図3右)、また、くびれが大きいくほどこれらの知覚が顕著になると仮定する。

このくびれによって、Bressanら(2003)の2坂(近坂と遠坂)の相互作用に加えて、3坂の相互作用とバニユルスの縦断勾配錯視を説明できる。3坂(近坂・中坂・遠坂)でクレストとサグをなしたとき、中坂の見かけの縦断勾配が実際よりも下り方向に傾斜して判断された(Bressanら, 2003)のは、クレストとサグの両くびれが中坂に対して下り方向に傾斜して見えるように作用するためである(図2)。このように、中坂がクレストとサグあるいはサグとクレストにはさまれるとき、2坂のサグあるいはクレストのときよりも、中坂の見かけの縦断勾配への影響が強められることが予想される。また、下りの遠坂が上り坂に見えるバニユルスの縦断勾配錯視は、遠坂の形が先太のためであると述べられている(Ninio, 1998)が、この坂道は急な下りの近坂とサグをなしていること、それに加えて、先太の遠坂によってくびれが増加する分、より上り方向に傾斜して見えるように作用するためであると説明できる。

サグとクレストの坂道には、その組み合わせがそれぞれ5種類あることを先に述べたが、くびれによって、それらの中でも、サグは近坂が下り坂で遠坂が上り坂に、クレストは近坂が上り坂で遠坂が下り坂に見えるやすいといえるかもしれない。

くびれが生じる坂道であるサグやクレストの研究はわずかであり、クレストを取り上げた研究は特に少ない。これらの研究は、交通渋滞解消等を目的とした応用のためにも、さらなる知見の蓄積が必要である。

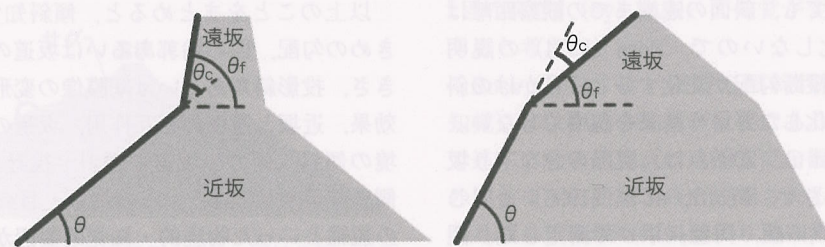


図3 くびれ。左図と右図はサグとクレストの網膜像をそれぞれ示す。 θ は近坂の投影斜角、 θ_f は遠坂の投影斜角、 θ_c はくびれを示す。くびれとは、近坂と遠坂の縁がつくるくびれの程度(角度)のことである。サグのくびれ(正の値をとる、左図)のとき近坂は下り方向、遠坂は上り方向に傾斜して見え、クレストのくびれ(負の値をとる、右図)のとき、近坂は上り方向、遠坂は下り方向に傾斜して見える。くびれが大きくなるほど、それぞれの方向に大きく傾斜して見えると仮定する。

4.2 投影斜角

Freeman(1966a)は、面の大きさが見かけの傾斜(縦断勾配)に及ぼす効果を説明するために、網膜像を透視図と同等と仮定して、網膜像に投影された面の両側の縁線(エッジ)が水平となす角度を用いた。我々はこの角度を「投影斜角」とよぶ(図4)。彼が定義した投影斜角は、2つの面のどちらがより傾斜して見えるかを説明する。しかし、坂道ではどちらの方向(上り方向なのか下り方向なのか)かが重要であり、これについての定義があいまいであるので、ここで明確に定義する必要がある。よって、投影斜角が小さくなる時坂道の縦断勾配は下り方向に傾斜して見え、投影斜角が大きくなる時坂道の縦断勾配は上り方向に傾斜して見えるとする(図5)。

Ninio(1998)の遠坂の先太の形の効果は、先太の形の坂道は平行よりもその投影斜角が大きくなるので、より上り方向に傾斜して見えると説明できる。また、Bressanら(2003)のサグの近坂

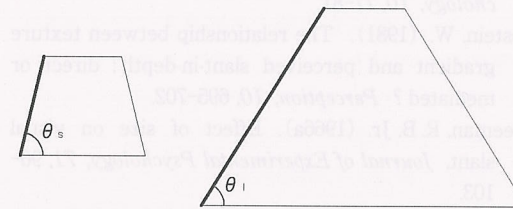


図4 矩形面の大きさが変化したときの投影斜角。図の台形は、Freeman(1966a)の縦断勾配が同じで、大きさが異なる相似の矩形面を同じ距離から観察したときの網膜像のイメージを示す。左図は小さい面の網膜像で θ_s はその投影斜角を示し、右図は大きい面の網膜像で θ_1 はその投影斜角を示す。面が大きくなると縦断勾配が変化せずとも、投影斜角は小さく($\theta_1 < \theta_s$)なる。

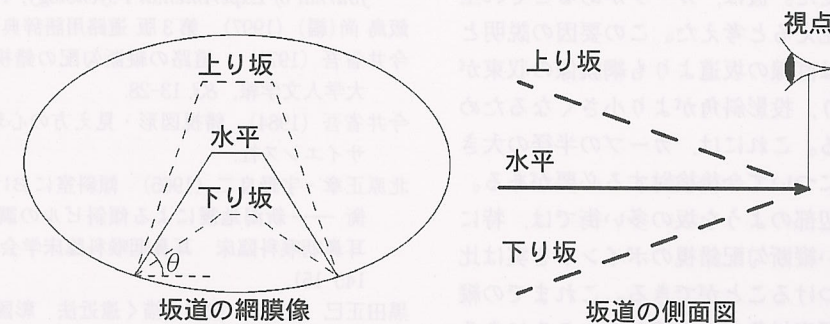


図5 投影斜角。左図は坂道の網膜像を示し、 θ は投影斜角を示す。右図は坂道の側面図を示し、網膜像から知覚される坂道の縦断勾配を示す。投影斜角が大きくなると坂道は上り方向に傾斜して見え、投影斜角が小さくなると坂道は下り方向に傾斜して見えるとする。

が下り方向に傾斜して判断された結果と、クレストとサグの中坂が下り方向に傾斜して判断された結果は、用いられた坂道模型が先細の形であったことが影響し、坂道の投影斜角が小さくなることで、下り方向に傾斜して判断された可能性がある。

Ross(1974)は、距離知覚の短縮によって下り坂が上り坂に見える縦断勾配錯視が生じると述べている。この仮説は、投影斜角を用いて、同様の説明をすることができる。すなわち、平行な形の坂道の下り坂の投影斜角は、視点と坂道までの高さが大きくなるほど大きくなるので、遠方にある下り坂ほどその縦断勾配はより大きく上り方向に傾斜して見える。

投影斜角の定義に、建築で用いられている坂道の形を用いてその距離を操作する方法(黒田, 1992; 日経映像, 1999; 椎名, 1995)を取り入れると以下ようになる。坂道の投影斜角が小さくなる時見かけの縦断勾配は下り方向に傾斜して見え、かつ距離は長く見える。反対に、坂道の投影斜角が大きくなる時見かけの縦断勾配は上り方向に傾斜して見え、かつ距離は短く見える。これをStefanucciら(2005)の結果と照らすと、距離の短縮(Ross, 1974)で説明できた上り斜面の距離の短縮と縦断勾配の過大視に加え、距離の短縮では説明できない下り坂が最も長く判断されたこと(坂道の縦断勾配が異なる時の距離の知覚)を説明できる。しかし、上り斜面の長さが2番目に短く判断されたことは説明することができない。

きめの勾配と輪郭について、きめよりも輪郭の方が傾斜の手がかりになりやすい(Clark et al., 1955, 1956a, 1956b)のは、輪郭には投影斜角が

面の傾斜手がかりになるためであると考えられる。また、きめは、まだら模様よりも格子模様の方が面の傾斜手がかりになりやすい (Gibson & Cornsweet, 1952) のも、格子模様の縦方向の線の投影斜角が、面の傾斜手がかりとして機能したという可能性が考えられる。

5. まとめと展望

本稿では坂道の縦断勾配錯視について、それに関連する傾斜知覚の要因 (きめの勾配, 面の輪郭あるは坂道の形, 面の大きさ, 投影斜角あるいは網膜像の変形, マスクの効果, 近坂と遠坂の相互作用, 坂道の周囲の視環境の傾斜 (側方の坂道の傾斜, 視野全体の傾斜, 側壁縞模様の傾斜), 山の高さ, 目の高さ), 距離の短縮, その他の要因 (疲労, 労力, 恐怖, 性差) を紹介し, さまざまな要因が見かけの奥行き方向の傾斜に影響を及ぼしていることを示した。そして, これらのうち, くびれを仮定することによって, 2坂 (近坂と遠坂) の相互作用, 3坂 (近坂・中坂・遠坂) の相互作用, 坂道の形とくびれの関係 (バニユルスの縦断勾配錯視) を説明できることを示した。また, 投影斜角を再定義することによって, 坂道の形の効果, 下りの遠坂が上り坂に見える縦断勾配錯視を説明し, さらに, 投影斜角と距離の関係について説明を試みた。

本稿で紹介した要因の他にも, 縦断勾配錯視の要因が示唆されている。村松 (2011) は, 上り坂のカーブが下り坂に見える縦断勾配錯視を示し, 写真を用いてその縦断勾配を推定させた。その結果, 写真の上りカーブは下り坂あるいは下り方向に傾斜して見えた。彼は, カーブがあるとそれ全体が下り坂に見えると考えた。この要因の説明として, カーブは直線の坂道よりも網膜像の収束が大きい, つまり, 投影斜角がより小さくなるためであるといえる。これには, カーブの半径の大きさ, 幅員などについて今後検討する必要がある。

京都盆地周辺部のような坂の多い街では, 特に知られていない縦断勾配錯視のポイントを実は比較的容易に見つけることができる。これまでの縦断勾配錯視は研究対象が人里離れたところにあることが多かったが, 都市すなわち生活の場における縦断勾配錯視の研究の発展を期待できる。例え

ば住居においては知覚された水平 (あるいは垂直) と実際の水平 (あるいは垂直) が異なるとめまいや頭痛など健康に悪い影響をもたらす (北原・宇野, 1965) ことから考えて, 縦断勾配錯視の研究は人間の生活の質 (QOL) の向上に役立つ研究に発展する可能性があると考えられる。

文 献

- Bressan, P., Garlaschelli, L., & Barracano, M. (2003). Antigravity hills are visual illusions. *Psychological Science, 14*, 441-449.
- Clark, W. C., Smith, A. H., & Rabe, A. (1955). Retinal gradient of outline as a stimulus for slant. *Canadian Journal of Psychology, 9*, 247-253.
- Clark, W. C., Smith, A. H., & Rabe, A. (1956a). The interaction of surface texture, outline gradient, and ground in the perception of slant. *Canadian Journal of Psychology, 10*, 1-8.
- Clark, W. C., Smith, A. H., & Rabe, A. (1956b). Retinal gradients of outline distortion and binocular disparity as stimuli for slant. *Canadian Journal of Psychology, 10*, 77-81.
- Epstein, W. (1981). The relationship between texture gradient and perceived slant-in-depth: direct or mediated? *Perception, 10*, 695-702.
- Freeman, R. B. Jr. (1966a). Effect of size on visual slant. *Journal of Experimental Psychology, 71*, 96-103.
- Freeman, R. B. Jr. (1966b). Absolute threshold for visual slant: The effect of stimulus size and retinal perspective. *Journal of Experimental Psychology, 71*, 170-176.
- Gibson, J. J. (1950). *The Perception of the Visual World*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J., & Cornsweet, J. (1952). The perceived slant of visual surfaces—optical and geographical. *Journal of Experimental Psychology, 44*, 11-15.
- 飯島 尚 (編) (1997) 第3版 道路用語辞典 丸善.
- 今井省吾 (1971) 道路の縦断勾配の錯視 東京都立大学人文学報, 83, 13-28.
- 今井省吾 (1984) 錯視図形・見え方の心理学 東京: サイエンス社.
- 北原正章・宇野良二 (1965) 傾斜室における眩暈と平衡——新潟地震による傾斜ビルの調査研究——耳鼻咽喉科臨床 耳鼻咽喉科臨床学会, 58, No. 3, 145-151.
- 黒田正巳 (1992) 空間を描く遠近法 彰国社.
- 村松亜夢斗 (2011) 上り勾配のカーブが引き起こす不思議 2011年度立命館大学文学部卒業論文.
- 日経映像 (1999) 日経映像 CD-ROM 科学教育シリー

ズ イリュージョン: 不思議な錯覚の世界 日経映像.

- Ninio, J. (1998). *La science des illusions*. Paris: Odile Jacob. (鈴木光太郎・向井智子 (訳) (2004) 錯視の世界 古典からCGまで 新曜社)
- 大口 敬 (1995) 高速道路サグにおける渋滞の発生と道路線形との関係 土木学会論文集, No. 524/IV-29, pp. 69-78.
- Proffitt, D. R., Bhalla, M., Gossweiler, R., & Midgett, J. (1995). Perceiving geographical slant. *Psychonomic Bulletin & Review, 2*, 409-428.
- Ross, H. E. (1974). Behavior and Perception in Strange Environment. (大久保幸朗・鈴木由紀生 (訳) (1976) 特殊環境における行動と知覚 北村晴朗 (監) 現代心理学の展開1 東京: 誠信書房)

- 椎名 健 (1995) 錯覚の心理学 講談社現代新書.
- Stefanucci, J. K., Proffitt, D. R., Clore, G. L., & Parekh, N. (2008). Skating down a steeper slope: Fear influences the perception of geographical slant. *Perception, 37*, 321-323.
- Stefanucci, J. K., Proffitt, D. R., Banton, T., & Epstein, W. (2005). Distances appear different on hills. *Perception & Psychophysics, 67*, 1052-1060.
- 對梨成一 (2005) 階段の水平踏面が傾いて見える錯視の実験的解明 心理学研究, 76, 139-146.
- 對梨成一 (2008) 縦断勾配錯視——周囲視環境と床の傾斜効果—— 心理学研究, 79, 125-133.

— 2012. 5. 14 受理 —

縦断勾配錯視の対比効果と多感覚統合

—— 對梨論文へのコメント ——

櫻井 研三

東北学院大学

對梨論文が取り上げた縦断勾配錯視は、自然環境で偶発的に発生するため、生起要因が確認されていない。また、2次元画像の錯視ではなく、3次元空間内の3次元構造に関する錯覚である点がこの現象を興味深いものにしてている。これらの点をふまえ、このコメント論文では、縦断勾配錯視研究の今後の展開として期待される2つの方向性を述べる。ひとつは2傾斜面の対比効果の定式化であり、もうひとつは、多感覚研究としてのアプローチである。

1. 縦断勾配錯視における対比効果

對梨論文の前半に書かれているように、縦断勾配錯視に関連する先行研究として傾斜面知覚(perception of slant surfaces)の論文がある。それらは、単純化された面の知覚の研究と、geographical slantの研究に分類することができ、特に後者は、縦断勾配錯視に直結する。坂を上から見下ろすか、下から見上げるかという視点位置の違いにもとづいて坂の傾斜度の知覚を調べた Proffitt et al. (1995)の論文がその一例である。

對梨論文では、縦断勾配錯視を接合する2傾斜面の知覚としてとらえており、その2傾斜面がサグあるいはクレストと呼ばれる凹部あるいは凸部を形成する場合に、縦断勾配錯視が生じると述べている。これはすなわち、2傾斜面の対比効果である。ただし、Bressan, Garlaschelli, and Barracano (2003)で取り上げられたイタリアのMongagnagaのケースや、對梨論文でも取り上げられた岩手県のみすてり坂のように、上空からみた場合に2つの坂が鋭角のV字形に接続している場合でも、縦断勾配錯視は生起する。對梨論文はサグとクレストに焦点を絞っているが、縦断勾配錯視を2傾斜面の対比効果としてとらえ

るなら、2つの坂の接合のタイプにかかわらず、この錯視が生起する条件の、なんらかの定式化が可能であろう。この点を、縦断勾配錯視研究の今後のひとつの方向性として提案したい。

2. 多感覚研究からみた縦断勾配錯視

今後期待される、縦断勾配錯視研究のもうひとつの方向性は、多感覚統合の観点からのアプローチである。冒頭で述べたように、縦断勾配錯視は3次元空間内の3次元構造に関する錯覚であるが故に、その環境内を移動する観察者の身体運動との関係は無視できない。この現象を錯視に限定する必要はないため、静止時の足裏の感覚にもとづく地面の傾斜判断や歩行時の道路の傾斜判断を、縦断勾配「錯覚」の範疇に含めることができよう。このように、縦断勾配「錯覚」として取り上げる感覚の範囲を拡大すると、Anstis (1995)のジョギング残効の論文が視野に入ってくる。そこで報告された複数の実験は基本的に順応もテストも閉眼で行なわれているが、彼はそのひとつで、上り坂のトレッドミル上で一定時間走ると、その後走る水平のトレッドミルを下り坂に感じる残効が生じることを明らかにした。

この報告から推測される縦断勾配「錯覚」の多感覚的側面は2つある。第1は、縦断勾配「錯覚」を体験できる場所に行くまで、坂を登る、あるいは下ることが、その先にある坂の勾配の視知覚にクロスモーダルに影響している可能性である。Anstis (1995)の実験では視覚は除外されているが、坂の傾斜角の残効が同一モダリティで生じるなら、モダリティ間での残効が生起する可能性を検討すべきであろう。第2は、縦断勾配「錯覚」の場所を自分の足で歩いていないためにこの現象が起きる可能性である。その場所を自分の足で歩

くと縦断勾配「錯覚」が起こらないのだとしたら、それはそれでこの現象が多感覚統合の一例である証左かもしれない。あるいは、坂に立つと錯視の印象が弱くなるが、自動車の中から観察するとより強く感じるのであれば、足裏の感覚にもとづく地面の傾斜判断が視知覚に影響していることになり、これも縦断勾配「錯覚」の要因を明らかにする手がかりとなるであろう。

以上の2つの方向性を提起し、今後の縦断勾配「錯覚」研究の展開に期待する。

文 献

- Anstis, S. (1995). Aftereffects from jogging. *Experimental Brain Research*, 103, 476-478.
- Bressan, P., Garlaschelli, L., & Barracano, M. (2003). Antigravity hills are visual illusions. *Psychological Science*, 14, 441-449.
- Proffitt, D. R., Bhalla, M., Gossweiler, R., & Midgett, J. (1995). Perceiving geographical slant. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2, 409-428.
- 對梨成一・北岡明佳 (2012) 縦断勾配錯視の研究 心理学評論, 55, 400-409.

— 2012. 7. 15 受理 —

心理学評論

Vol. 55 No. 3 2012

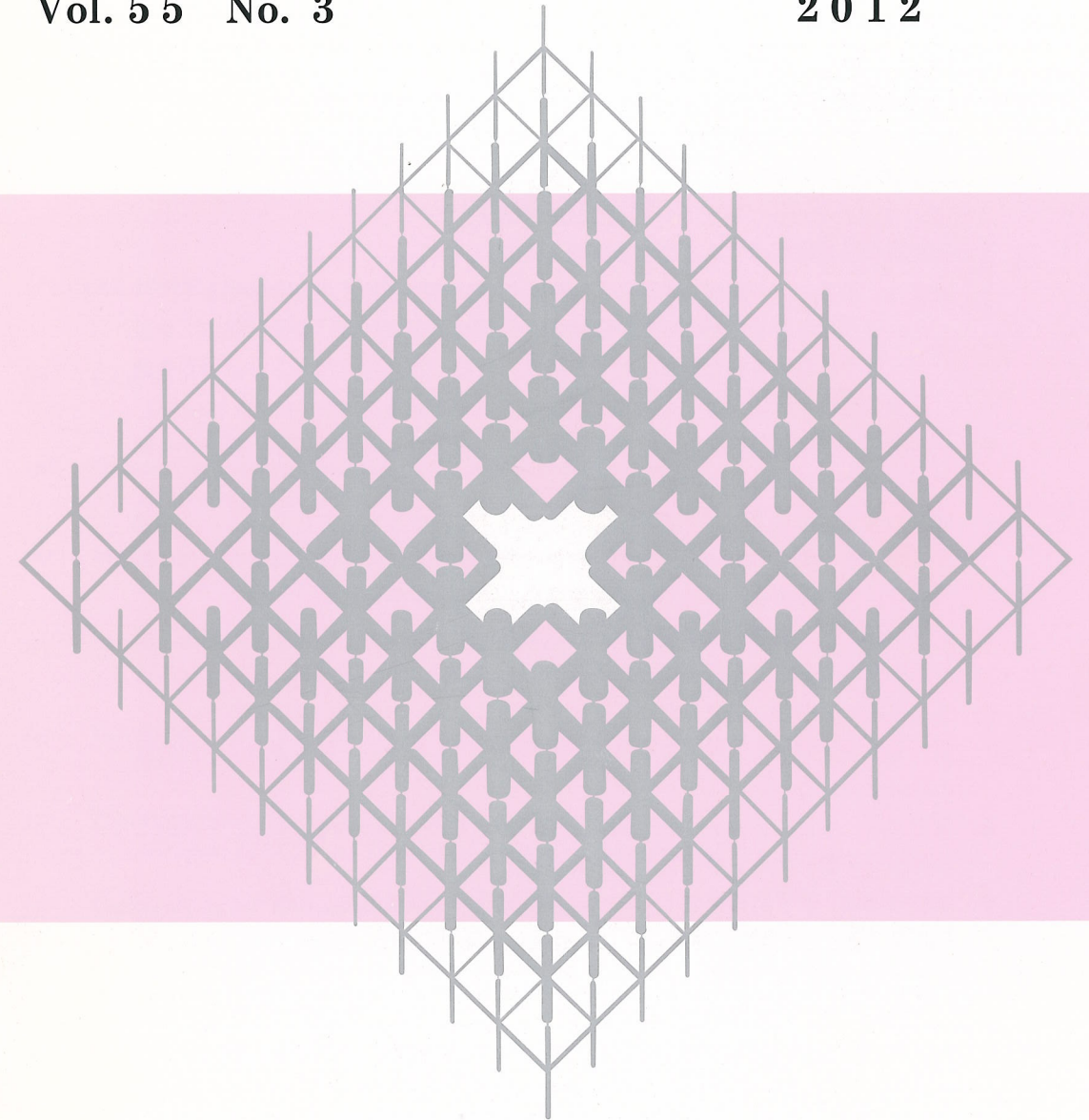
- 特集：多様化する錯視研究 編集：北岡明佳・蘆田 宏
- 289 近年の錯視研究の展開——巻頭言に代えて——
北岡明佳・蘆田 宏
- 296 投影の幾何学と立体錯視
杉原厚吉
- 307 錯視デモンストレーションの醍醐味——杉原論文へのコメント——
鈴木光太郎
- 309 視覚の数理モデルと錯視図形の構造解析
新井仁之・新井しのぶ
- 334 新井・新井論文へのコメント
栗木一郎
- 336 エニグマ錯視と追従眼球運動追従錯視の共通性
伊藤裕之・富松江梨佳・柏 園園
- 346 伊藤・富松・柏論文へのコメント
西田真也
- 348 顔と身体に関連する形状と大きさの錯視研究の新展開——化粧錯視と服装錯視——
森川和則
- 362 日常生活の錯視——森川論文へのコメント——
阿部恒之
- 367 錯視観察に基づく能動的観察における視覚情報処理特性についての理解
——フラッシュラグ効果を中心とした検討——
一川 誠・政倉祐子
- 376 能動的視覚観察事態の解き明かす逆方向モデリング・順方向モデリングの計算方略
——一川・政倉論文へのコメント——
村上郁也
- 381 能動的観察における視覚情報処理の促進について
——コメント論文への返答——
一川 誠・政倉祐子
- 385 あいまいな物体位置の知覚に影響する運動情報
久方瑠美・村上郁也
- 396 位置の錯視を引き起こす視覚のメカニズムに迫る——久方・村上論文へのコメント——
竹内龍人
- 400 縦断勾配錯視の研究
對梨成一・北岡明佳
- 410 縦断勾配錯視の対比効果と多感覚統合——對梨・北岡論文へのコメント——
櫻井研三

心理学評論刊行会

心理学評論

Vol. 55 No. 3

2012



心理学評論刊行会