知覚的余白の空間特性：場の理論に基づく解析¹⁾

村田 晶子 (京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科)

高橋 成子 (京都市立芸術大学美術学部)

大谷 芳夫 (京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科)

The spatial properties of perceptual empty space (yohaku): An analysis based on field theory

Shoko MURATA (*Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology*)

Shigeko TAKAHASHI (*Faculty of Arts, Kyoto City University of Arts*)

Yoshio OHTANI (*Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology*)

The cognitive effects of “yohaku” (empty space) have been discussed within the fields of Eastern art history and visual design, but the visual processes underlying yohaku perception have yet to be fully elucidated. The present study examines the spatial properties of yohaku areas through a psychological experiment in which participants report on areas that they perceived to be yohaku within Japanese artistic paintings and patterns of arranged discs. In order to explain the spatial properties (area and location) of such areas, we construct a simple computational model based on visual field theory. Our model assumes that yohaku areas can be specified in terms of thresholds for two-dimensional Gaussian-filtered images of the stimuli. The model is able to well account for yohaku areas within disc patterns but not so well for those within artistic paintings. This difference may be ascribed to the spatial contexts depicted within artistic paintings.

Key words: yohaku (empty space), field theory, computational model, image filtering

「余白」がもたらす認知的・感性的効果は、東洋絵画や視覚デザインなどの分野で論じられてきたが、ヒトが余白を知覚する心理学的過程を解明する試みはこれまで行われていない。本研究では、この試みの第一段階として、画像内でヒトが余白として知覚する領域（知覚的余白領域）の空間特性を解析した。日本絵画と、円を配置した画像に対し、知覚的余白領域を描線で囲む実験の結果から、この領域にはオブジェクトの近傍、および、オブジェクトに囲まれた空白部分などは含まれないことが示された。この知覚的余白領域の特性を定量的に記述するために、視覚的場の理論に基づく解析を行った。オブジェクトと画枠からの影響力（場の強度）を、刺激画像を2次元ガウスフィルタリングした後の画像強度と見なし、基準強度値以下の領域を余白とする計算モデルの出力を知覚的余白領域と比較したところ、円刺激では0.7、絵画刺激では0.5程度の一貫率が得られた。絵画刺激の一貫率低下の要因として、オブジェクトの空間的文脈などの影響が示唆された。

キーワード：余白，場の理論，計算モデル，画像フィルタリング

古代から現代に至る文化の営みの中で、人々は数多くの絵画を生み出し、またそれを鑑賞することを楽しんできた。絵画の多くは2次元平面に「空間」を表現したものとされるが、西洋と東洋ではその表現方法に大きな違いがある。西洋絵画では遠近法を用いてシーンを具体的に

に表現するため、絵画全体にくまなく図像が描かれ空白が存在しない。一方で、東洋では絵画の主題となるオブジェクトを主軸に描き、そのほかは減筆などの手法により図像を省略して表現するなど（秋山，1985）抽象的に表現する傾向がある。このような差異を画家の上村淳之は、“西洋画の空間においては、ほんのわずかに濃淡があるかどうか、という程度に色が塗ってある部分でも、そこには必ずなんらかの具体的な存在物が意識されている。それに対して東洋画の空間を満たしているのは

1) 本研究の実施にあたり、京都工芸繊維大学名誉教授江島義道先生には多大なるご指導、ご支援をいただきました。ここに記して厚く感謝いたします。

そのような具体物ではなく「世界」あるいは「空気」とでもいうべき抽象的な空間なのである”（上村，1992）と表現している。このような、西洋絵画にはない、東洋絵画の「抽象的な空間」をもたらす大きな要因の一つとして、画面に配された大きな「余白」の領域の効果が挙げられる。

余白のある絵画の祖形となったのは、中国の水墨画——特に南宋院体画であった（金沢，1998）。水墨画とは人物、風景、花鳥などのシーンを、墨の黒から紙の素地の色である白へのグラデーションで表現したものである（加藤，1987）。墨の濃淡による表現の限界から、オブジェクトの内部や背景の明るい部分は白いまま残され、その結果空白の部分が生まれたと考えられる。14世紀から日本でも水墨画が描かれるようになり、15世紀には詩画軸が盛行する。この詩画軸では多くの漢詩を書くために空白が大きく確保され、絵画は画面下方に配置された（金沢，1998）。15世紀後半になると詩画軸の詩が取り除かれ、絵画だけを鑑賞する形式へと発展した。このため詩が書かれていた上部が空白となり（熊谷・小高根，1969）、結果的に余白の大きい水墨画が描かれるようになった。その後狩野派によって、墨一色であった水墨画と彩色を施したやまと絵を融合した絵画が生み出され（並木，1998）、室町時代以降の余白のある絵画が成立したと考えられる。

一般的に余白とは、文字や事物などオブジェクトが描かれている領域以外の何も記されないで白いまま残っている部分を指す。一方、日本美術史的理解では、東洋絵画における余白とは単なる空白部分ではなく、あえて描かないことによる「空間」の表現だとされている（秋山，1985）。このような余白に対する美的意識に加え、前述の画材による制約や歴史的遷移など余白のある絵画の成立過程によって、余白を美術史的に定義することができる。また、心理学的な研究でも、オブジェクトを画面に描ききらずに余白を生み出すことで、鑑賞者に余白部分に奥行きのある空間を知覚させているとしている（佐藤，1982）。

絵画以外の分野でも余白の感性的・心理学的効果が指摘されている。たとえばエディトリアルデザインの分野では、文章の内容に即した印象を与える紙面作りのために、文章の塊を取り囲む余白の部分の形状を意識してデザインを行うことが重要だとされている（鈴木・佐々木，2003）。またマーケティングの分野では、余白が大きい広告は購買者に高いラグジュアリー感をもたらすとされている（外川，2012）。

このように余白の効果やそれを利用するための経験則的な知見が得られてはいるが、ヒトが余白を知覚する過程の科学的理解は得られていない。本研究ではヒトが知覚する余白領域、即ち知覚的余白領域の空間特性を測定

し、その領域を定量的に説明・予測するモデルの可能性について検討する。これにより余白知覚の心理学的特性を実証的に検証するための基礎を構築し、さらにそのモデルでは説明できない要因を明らかにすることによって余白の心理学的理解を深めることを目的としている。余白を画像的に定義すると、Figure 1に示すようにある形をもった領域内にオブジェクトが配置された際の、領域からオブジェクトを差し引いた差分の領域だといえるが、心理学的検討では、知覚的余白領域はこのような定義とは必ずしも一致しないことが示唆されている。佐藤（1982）は、オブジェクトと知覚的余白の成す構成を「視覚のリズム」と表現し、そこにはオブジェクトの配置の条件が大きく作用していると述べている。つまりオブジェクトとその他の領域との空間的関係性が知覚的余白領域を生み出していると考えられることができる。

このようなオブジェクトとその他の領域の空間的関係を理解する枠組みとして必要な要件は、個々のオブジェクトとそれらが配置されている領域全体との間の相互作用のパターンを検討できることであり、これを満たす枠組みとしては場の理論がある。場の理論では、互いに相互依存すると考えられる、共存するオブジェクトの全体性（totality）を場（field）と定義する（Lewin, 1951）。また、場の特性は偏微分方程式によって数学的に記述されるので、計算表現・定量化が可能である（Kadar & Shaw, 2000）。視覚的な「場」とは、視野内に図形が提示された場合、図形は近傍の領域にある種の影響力を及ぼし、その結果生じる特有の状態変化のことを指す。このような図形の近傍の特殊な状態にある領域が「場」である（森，1970）。ゲシュタルト心理学では、視野内に図形が時空間的に隣接しているとき、それらが互いに影響を及ぼし合い、群化や色や明るさの変化をもたらすことが指摘されている（Koffka, 1935）。また、視野内に呈示された図形刺激の近傍では光覚閾が上昇する

Figure 1. Graphical definition of yohaku area.

ことから (Cobb, 1911), 感度の変化として効果を表す場があると考えられている (金子・小保内, 1952). これら場の理論はいずれも図形以外の領域に図形が及ぼす影響力を表現する枠組みである. 本研究では, 図形 (オブジェクト) がそれ以外の領域に与える影響を場として捉え, その空間特性と知覚的余白領域の関係解析を行った.

絵画刺激を用いた余白実験

ヒトが余白と知覚する領域の空間特性を解明するため絵画作品画像を呈示し, 知覚的余白領域を同定する実験を行った. 前述の余白の美術史的経緯に基づき, 日本の室町以降の絵画を対象とした.

方法

被験者 大学生, 大学院生 10 名 (22~36 歳, 男性 3 名, 女性 7 名) が予備実験と本実験に参加した. 各被験者に対して, 実験の説明と被験者として参加する同意を得たうえで, 京都工芸繊維大学における「ヒトを対象とする研究倫理審査委員会」から承認を得た手続きに基づいて実験を実施した.

装置 実験ではタブレット型 PC (iPad Air) とプログラミングソフト (Xcode) によって作成した自作アプリケーションを用いて刺激呈示と被験者応答入力を行った. 実験結果の解析には, 画像・数値解析ソフト (Matlab) を用いた.

刺激 絵画作品カラー画像を刺激として用いた. 選定基準は室町時代以降の日本絵画とし, 東京国立博物館所蔵の屏風および掛け軸のデジタル画像から 72 点の候補を選定した. 画像の形式は RGB 各 8 bit カラー, 解像度は 72dpi, サイズは横 5000~4965 px×縦 3960~3987 px であった. 画像内には絵画に付帯する表具や額縁も撮影されていたが, 画像編集ソフト (Photoshop) を用いて絵画本体以外の部分はトリミングした. これらの候補について, 画像が縦長の場合は縦を 960 px, 19 cm に縮小し, 横幅は縦横比が保たれるよう調整した (227~536 px, 4.5~10.6 cm). 画像が横長の場合は横幅を 770 px, 14.5 cm に縮小し, 縦幅は縦横比が保たれるよう調整した (335~719 px, 6.7~14.4 cm). 実験における視距離約 45 cm での刺激の大きさは横 $5.7^{\circ}\sim 13.4^{\circ}\times$ 縦 23.8° (縦長), 横 $18.3^{\circ}\times$ 縦 $8.5^{\circ}\sim 18.3^{\circ}$ (横長) であった.

手続き (予備実験) 絵画 72 点の候補のうち, 知覚的余白領域があると評価される画像を選定するために予備実験を行った. 予備実験は蛍光灯による通常照明下で行った. 被験者は椅子に座り, 机上に置かれているタブレット型 PC 上の黒背景 (輝度 1.1 cd/m^2) の中央に呈示される刺激を観察し, 画像に余白があると感じられるか否かを口頭で回答した. このとき余白がどのようなものかは規定せず, 直感的に回答させた. 72 枚の候補画像

は各 1 回呈示し, 提示時間は約 5 sec, 呈示順序は被験者間でランダムとした. 被験者 10 名分の回答から, 余白が感じられるとの回答頻度が高い画像上位 50 枚を選定し, 本実験に用いた.

手続き (本実験) 本実験は蛍光灯による通常照明下で行った. 被験者は椅子に座り, 机上に置かれているタブレット型 PC 上の黒背景の中央に呈示される刺激を観察し, 画面上に人差し指でタッチすることで回答を行った. 被験者は画像を観察し, 余白が感じられた場合に, その領域を囲う線を描くことによって回答した. 余白が感じられない場合は, 領域の指定は行わなかった. 教示では余白がどのようなものかは定義せず, 直感的に回答するよう求めた. 領域は複数指定してもよいこととした. 領域を囲う際は描線が画像からはみ出ないように, 描線が閉合するように教示した. 50 枚の刺激画像は各 1 回呈示し呈示順序は被験者間でランダムとした.

結果

被験者 10 名すべてが余白があると感じ, 知覚的余白領域を回答した画像は Figure 2a に示す 18 枚であった. 以後の分析は被験者 10 名×画像 18 枚, 総計 180 枚の結果画像 (回答画像) について行った. Figure 2b は結果画像について被験者 10 名分の回答を刺激画像上に重ね書きしたもので, 白い線が知覚的余白領域 (赤色面) の輪郭線である. 領域が重なり合い, 赤色が濃くなるほど重なり合いの度合いが高いことを示している. この結果を見ると被験者は一貫して, 描かれているオブジェクトと画枠の両方から一定の距離を保って知覚的余白領域を指定しており, なにも描かれていない部分でも知覚的余白領域に属さない部分が存在している. すなわち知覚的余白領域は, 画像的に定義された余白 (Figure 1) とは異なっており, 領域内のオブジェクト以外のすべての部分とはなっていない. さらに詳しくみると, Figure 3a のように, 画面右下のオブジェクトを取り囲むように知覚的余白領域を指定する例や, Figure 3b のようにオブジェクト (右中央の落款部分) があっても知覚的余白領域に含む例があった. また, Figure 3c のように複数の領域を指定する例, さらに Figure 3d のように小さく領域を指定する例もあった.

円刺激を用いた余白実験

円を刺激として, 知覚的余白測定実験を行った. 被験者は長方形の領域内に円を配置し, その配置に対して知覚される余白領域を回答した.

方法

被験者 絵画余白実験とは異なる大学生, 大学院生 10 名 (22~25 歳, 男性 7 名, 女性 3 名) が実験に参加した. 各被験者に対して, 実験の説明と被験者として参加する同意を得たうえで, 京都工芸繊維大学における「ヒ

Figure 2a. Japanese art painting stimuli.

1. 花鳥図（部分） 久保田米僊；2. 猫児図（部分） 月岡芳年；3. 花鳥図（部分） 英一蝶；4. 鶏図（部分） 中村芳中；5. 牡丹図（部分） 俵屋宗達；6. 牽牛花図（部分） 曾我蕭白；7. 王昭君図（部分） 久隅守景；8. 龍樹菩薩像（部分） 俵屋宗達；9. 猿猴図（部分） 狩野山雪；10. 猿曳図（部分） 狩野尚信；11. 芙蓉図（部分） 狩野探玄；12. 柳に小禽図（部分） 狩野山楽；13. 梅鳩図（部分） 狩野探玄；14. 画人揮毫図（部分） 狩野芳崖；15. 鉄拐・山水図（部分） 鶴沢探山；16. 游鯉図（部分） 中島来章；17. 桃源図（部分） 狩野伊川院；18. 楨図屏風（部分） 尾形光琳筆

画像すべて：国立東京博物館所蔵 Image: TNM Image Archives Source: <http://TnmArchives.jp>

Figure 2b. Perceived yohaku areas for the Japanese art painting stimuli.

The transparent red areas surrounded by white lines indicate perceived yohaku areas. For each stimulus, perceived yohaku areas for the 10 subjects are superimposed, and opacity (or depth) of the color indicates the degree of coincidence of perceived yohaku areas.

トを対象とする研究倫理審査委員会」から承認を得た手続きに基づいて実験を実施した。

装置 実験ではデスクトップPC (Apple iMac 27 inch) と描画ソフト (Adobe Illustrator CS4) を用いて刺激呈示と被験者応答入力を行った。実験結果の解析に

ついては、画像・数値解析ソフト (Matlab) を用いた。

刺激 絵画刺激と類似の長方形の画枠と、枠内に配置する円を用いた。

画枠は縦長と横長の2種類とした。縦長の長方形の縦横比は絵画刺激50枚のうち縦長の36枚の平均縦横比と

Figure 3. Examples of the perceived yohaku areas for the Japanese art paintings.

Note. The Solid lines indicate the outlines of the perceived yohaku areas, reported by representative subjects.

等しくなるように、横長の長方形の縦横比は絵画刺激14枚の平均縦横比と等しくなるように調整した。縦長の長方形のサイズは960 px×418 px, 13.2×30.4 cm, 横長の長方形は472 px×850 px, 25×13.8 cmとした。画枠内部は白色（輝度194.0 cd/m²）とし、背景は灰色（147.5 cd/m²）とした。実験における視距離約45 cmでの画枠の大きさは視角、横16.7°×縦37.3°（縦長）、横31.0°×縦17.4°（横長）であった。

配置する円の数は1～3個の3条件とした。円の数が必要であってもその合計面積が絵画画像に描かれているオブジェクトの平均面積比²⁾と等しくなるよう円のサイズを調整し、円が1個の条件では直径220 px, 6.5 cm, 2個の条件では156 px, 4.5 cm, 3個の条件では127 px, 3.7 cmとした。円の大きさは視角で、1個の条件で直径8.3°, 2個の条件で直径5.7°, 3個の条件で4.7°であった。

配置する円の輝度は絵画画像が輝度諧調を含むことから、黒（1.6 cd/m²）、灰（65.8 cd/m²）、淡灰（130.0 cd/m²）の3種とした。円の輝度の組み合わせは、円が1個の場合は3種、2個の場合は6種、3個の場合は10種となり合計19種、画枠の縦長・横長の2条件を合わせ

て全38種の刺激を用いた。

手続き 実験は蛍光灯による通常照明下で行った。被験者は椅子に座り、机上に置かれているデスクトップPCに呈示される刺激を観察し、マウスによって応答した。各試行では被験者はまず画枠外に配置された円をマウスでドラッグすることで余白が感じられるように画枠内に配置し、次にその配置画像上の余白と感じられる領域を描線で囲うことで回答した。このとき余白がどのようなものであるかの定義は教示せず、直感的に回答するよう求めた。円の配置の際には、円同士が重なり合うことや円が画枠からはみ出ることがないように教示した。知覚的余白領域は複数回答してもよいこととし、領域を囲う際は、描線が画枠からはみ出ないように、また描線が閉合するように教示した。画枠の縦長・横長それぞれの条件で、円の個数条件と輝度の組み合わせ条件を考慮した19刺激を各1回呈示し、その順序は被験者間でランダムとした。

結果

実験によって、Figure 4に例示するような結果画像が総計380枚得られた。図の明度の異なる円（Figure 4a上の三つの円、左上は黒、右上は灰、右下は淡灰）は被験者によって配置された円を示しており、実線が被験者による描線で、その内部が知覚的余白領域である。

380枚の結果画像を見ると全体的な傾向として、絵画刺激と同様、オブジェクト（円）と画枠の両方から一定の距離を保って知覚的余白領域が回答されていた。さらに詳しく見ると、Figure 4aのように画枠内の周辺部に配置された円を取り囲むように知覚的余白領域を回答する例や、Figure 4bのように円二つを画枠中央部に配置し、知覚的余白領域を上下に分けて回答する例があっ

2) 絵画画像のオブジェクトの面積は以下の手順で算出した。画素R, G, Bそれぞれの諧調255～5まで50刻みで全画面表示し、その輝度を計測し、各色の諧調と実測輝度の関係式をもとにRGB値を輝度値に変換し、輝度のグレースケール画像を作成した。さらにオブジェクトだと判断される部分の画像強度が1、それ以外の部分が0となるように任意にしきい値を定め、グレースケール画像を2値化した。この2値画像から、オブジェクトの面積を求めた。18枚の絵画画像のそれぞれについて、オブジェクトの面積が画枠の面積に占める割合を求め、その平均値（9.5%）から円の面積を定めた。

Figure 4. Examples of the perceived yohaku areas for the disc patterns.

Note. The filled circles with different lightness are the discs arranged by the subject, and the solid lines indicate the outlines of the perceived yohaku areas, reported by representative subjects.

た。また、Figure 4cのように下部に配置した円から離れた画枠周辺部に小さく知覚的余白領域を回答する例もあった。

この実験では、円の輝度条件を3種類用いたが、全結果画像に共通する特徴として、円の輝度が異なっても円境界と知覚的余白領域の境界との距離には明確な変化が見られず (Figure 4a参照)、知覚的余白領域に含まれない部分の面積は、円の輝度によらず一定であることが示唆された。画枠の面積とオブジェクトの総面積が縦長・横長条件内で一定であることを考慮すると、このことは知覚的余白領域の面積が円の輝度に依存しないことを意味する。この点を検討するため、知覚的余白領域の面積について円の個数条件ごとに画枠 (縦長, 横長) × 円の輝度の2要因分散分析を行った。その結果、円の個数条件1~3それぞれについて輝度の主効果 (個数条件1個 $F(2, 18) = 0.31, ns, \eta^2 = 0.00$; 2個 $F(5, 45) = 1.49, ns, \eta^2 = 0.01$; 3個 $F(9, 81) = 1.08, ns, \eta^2 = 0.00$) および輝度と画枠の縦長・横長条件の交互作用は見られなかった (個数条件1個 $F(2, 18) = 0.06, ns, \eta^2 = 0.00$; 2個 $F(5, 45) = 1.96, ns, \eta^2 = 0.01$; 3個 $F(9, 81) = 0.92, ns, \eta^2 = 0.00$)。したがってこれ以降の分析は円の輝度を区別せず行った。

考察：知覚的余白領域に関する計算モデル

絵画余白実験と円刺激余白実験の結果から、知覚的余白領域は、オブジェクトと画枠の両方の境界からある距離を保って知覚されており、オブジェクトと画枠近傍は空白であっても、余白とは知覚されないことが明らかとなった。このような知覚的余白領域の空間特性を定量的に表現・予測するために知覚的場の理論に基づく計算モデルについて検討した。モデルの検討にあたっては、ま

ず、オブジェクトが単純な空間・輝度特性を持つ円刺激余白実験の結果を対象とした。

円刺激余白実験の解析

余白がオブジェクトと画枠の両方からある距離を保って知覚される特性を記述するために、知覚的場の理論に基づく計算モデルを用いた。

知覚的場の理論から、知覚的余白領域の特性を表現する概念的枠組みは、以下のように表現できる。

1. オブジェクトと画枠は刺激画像内に知覚的影響力及ぼし、影響の強度は両者の領域で高く、両者からの距離が増すにつれて減衰する。
2. オブジェクトと画枠からの影響が減衰し、影響の強度がある基準値以下になる領域が「余白」として知覚される。

序論でも述べたように、場の特性は偏微分方程式によって数学的に記述されることを考慮し、上記の枠組みを定量化する最適なモデルとして、2次元ガウスフィルタリングモデルを用いた。このモデルは、刺激画像を2値化することによってオブジェクトを抽出し、その後2次元ガウスフィルタによって平滑化し、フィルタリング後の画像強度を知覚的影響の強度と見なして、基準値 (閾値; thres) 以下となる強度領域を抽出するものである。ここで、2次元ガウスフィルタは、フィルタの広がり規定するパラメータを σ として、次式で表現される。

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{式-1}$$

また、計算モデルによって予測される余白領域 (予測領域) がどの程度知覚された余白領域を表現しうるかは、予測領域の面積と知覚された余白領域の面積に対して、次式で定義される一致率 I により評価した。

$$I = (\text{Area}_{\text{model}} \cap \text{Area}_{\text{perceived}}) / (\text{Area}_{\text{model}} \cup \text{Area}_{\text{perceived}}) \quad \text{式-2}$$

ここで、分子はモデルによる予測領域面積 ($\text{Area}_{\text{model}}$) と知覚された余白領域面積 ($\text{Area}_{\text{perceived}}$) の重なり部分の面積、分母は両領域のいずれかに含まれる部分の面積を表し、予測領域と知覚された余白領域が完全に一致する場合は $I=1$ 、全く一致しない場合は $I=0$ となる。

この計算モデルの妥当性を検証するための予備的検討として、円刺激余白実験で得られた結果画像総計 380 枚について、個別に次のような分析を行った。各結果画像から被験者の描線を削除し、円と画枠の輪郭を画像強度 1、それ以外の部分を画像強度 0 とする 2 値画像に変換してフィルタリングを行った後、最大画像強度が 1 となるよう正規化した。フィルタリングの範囲は 3σ とした。フィルタの広がりパラメータ σ (8~150 px, 8 px step)

Figure 5. Procedure of analysis by our computational model.

- The data obtained by the experiment (See Figure 4a).
- Coincidence ratio (I) as a function of filter size (σ) with threshold level (thres) as a parameter. See text for details.
- The visual field strength (grayscale map) obtained by eq.(1), the outlines of the perceived yohaku areas (solid gray line), the predicted yohaku areas by the computational model (dashed white line) and the discs arranged by the subject (dashed black circles).

Figure 7. Coincidence ratio (I_{mean}) as a function of filter size (σ) with threshold level (thres) as a parameter.

Figure 6. Two examples of the results of the analysis in terms of our computational model. *Note.* The graphic conventions are the same as Figure 5c.

- Multiple areas were perceived as yohaku.
- A small and restricted areas was perceived as yohaku.

と閾値 thres (0~1, 0.05 step) を組織的に変化させて両者の組合せごとに一致率 I を求め、最も高い一致が得られる thres と σ を採用した。Figure 5 は個別分析の一例で、Figure 5a は 1 名の被験者について得られた 1 枚の結果画像、Figure 5b はこの結果画像に対する σ , thres と一致率との関係を示したものである。Figure 5b を見ると各 thres において一致率はガウスフィルタサイズに関して逆 U 字型関数で変化し、そのピーク値は thres の増加に伴って、やや減少する傾向が見られた。最も高いピーク値を示す曲線は、図中赤線で示した $\text{thres}=0.1$ のものであり (図中左から 2 番目の曲線)、 $\sigma=42$ px で最大一

Figure 8. Analysis of coincidence ratio for dot pattern.

a. Mean coincidence ratio for ten subjects. b. An example of the results showing a low coincidence ratio.

致率 $I_{\max}=0.9$ が得られた。この画像について、知覚的余白領域と影響の強度分布、予測領域を重ね書きしたものが Figure 5c である。図中の灰色の実線が知覚的余白領域で、白黒諧調が影響の強度分布、白い点線が予測領域、黒い点線が配置された円の輪郭である。この例では、知覚的余白領域の形状・広がりも予測領域とよく対応している。Figure 6 はほかの二つの個別分析の結果である。Figure 6a では、 $\text{thresh}=0.15$, $\sigma=67$ px で $I_{\max}=0.71$ が得られている。この例では知覚的余白領域は、中央の二つの円を挟んで上部と下部2カ所に分かれているが、予測領域も同様に分かれており、両領域の形状・広がりもよく対応している。一方、Figure 6b では、 $\text{thresh}=0.05$, $\sigma=58$ px で $I_{\max}=0.23$ と低い値となった。この例では知覚的余白領域は小さく、画枠の下部に配置された円からは離れた上部にあるが、予測領域は画枠中央部に縦長に広がっており、両領域が対応していない³⁾。380 枚の画像に対する個別分析の結果、 $I_{\max}$ の平均は 0.73 ($SD=0.19$) となった。

以上の結果からガウスフィルタリングを用いた計算モデルは thresh と σ を個別に最適化すれば、大部分の結果画像に関して知覚的余白領域の空間特性をよく説明することができるといえるが、モデルの一般性を評価するためには、すべての画像に対して共通の thresh と σ を設定した場合に全体としてどの程度の一致率が得られるかを

検討する必要がある。そのため、円刺激余白実験で得られた結果画像 380 枚について、 thresh と σ の組み合わせごとに一致率をもとめ、その平均 (I_{mean}) を求めた。Figure 7 は thresh , σ と I_{mean} の関係を示したものであり、図中の黄色い線で示した $\text{thresh}=0.2$ (図中左から 4 番目)、 $\sigma=58$ px で最大 $I_{\text{mean}}=0.65$ が得られた。この値は個別分析における平均 $I_{\max}=0.73$ に比べてやや低くなっているが、両者の間には統計的に有意な差は見られなかった ($t=0.72$, $df=18$, ns , Cohen's $d=0.37$)。したがって、このモデルは単一の thresh と σ の組み合わせで今回得られた結果画像全体を説明可能であり、一般性を持つと考えることができる。

これまでの解析は、被験者を区別しない全結果画像 380 枚を対象としたものであったが、 $\text{thresh}=0.2$, $\sigma=58$ px に固定して、被験者ごとに各 38 枚の画像の平均 I を求めたところ、Figure 8a に示すような結果が得られた。図から明らかなように、濃灰のバーで示した 7 名の被験者については平均 $I=0.7\sim0.9$ と高い値の一致率が得られているが、淡灰のバーで示した 3 名 (Sa2, 3, 8) については、平均 $I=0.3$ 程度と一致率が非常に低くなった。

このような被験者間の一致率の違いを統計的に検証するため、被験者を要因とする一要因分散分析を行った。その結果、被験者の要因は統計的に有意となり ($F(9, 333)=187.22$, $p<0.01$, $\eta^2=0.82$) 多重比較の結果、Sa2, 3, 8 はそれ以外の 7 名よりも有意に一致率が低いことが示された⁴⁾。

一致率が低い例の特徴的なものとして Sa2 の結果を

3) このように低い一致率しか得られない例は、全画像 380 枚中の 15% 程度に見られたが、これらについては後に詳しく述べる。

Figure 8bに示す。この例は個別分析で例示したFigure 6bと同一被験者・同一結果画像のものであり、両者を比較すると知覚的余白領域と予測領域との不一致は、 thres と σ を個別画像について最適化するか、全画像について最適化するかの違いによるものではないことが示唆される。この点を検証するために、3名の被験者の結果画像について、個別に thres と σ を最適化した場合と、全画像の最適値を用いた場合の一致率の間で統計検定を行ったところ、両者の平均一致率の間に有意な差は見られなかった ($t=3.69$, $df=4$, ns , Cohen's $d=1.74$)。以上のことからこれらの被験者での不一致の主要因は予測領域と知覚的余白領域の形状ではなく、領域間の広がりや位置のずれとよるものと考えられる。

絵画余白実験の解析

円刺激余白実験と同じ計算モデルを用いて、より複雑なオブジェクトを含む絵画刺激について解析した。まず、RGBカラー画像を次の手順で2値化した。iPad上で画素R, G, Bをそれぞれの諧調255~5まで50刻みで全画面表示し、その輝度を計測した。各色の諧調と実測輝度の関係式をもとにRGB値を輝度値に変換し、輝度のグレースケール画像を作成した。オブジェクトだと判断された部分の画像強度が1、それ以外の部分が0となるように任意に閾値を定め、グレースケール画像を2値化した。このとき画枠の輪郭の画像強度は1とした。この2値画像にガウスフィルタリングを施し、画像強度分布図を作成した。

円刺激余白実験と同様に絵画余白実験で得られた結果画像総計180枚について個別分析を行い、画像ごとに $I_{\max}$ を求めた。Figure 9に知覚的余白領域、およびオブジェクトと画枠の知覚的影響の強度分布、予測領域を重ね書きしたものを例示した。Figure 9aに例示した結果画像(刺激はFigure 2aの画像番号11)では $\text{thres}=0.05$, $\sigma=33\text{ px}$ で、 $I_{\max}=0.70$ が得られた。知覚的余白領域と予測領域は共にオブジェクトを取り囲むように指定されているため、予測領域の形状・広がりが知覚的余白領域とよく対応している。一方、Figure 9b(画像番号1)では $\text{thres}=0.05$, $\sigma=17\text{ px}$ で、 $I_{\max}=0.15$ と低くなっている。知覚的余白領域は小さく、オブジェクトから離れた上部に指定されているが、予測領域はオブジェクトの上下に広がっており、オブジェクトの上下部ともに予測領域が知覚的余白領域と対応していない。180枚の画像

Figure 9. Two examples of the results for the Japanese art paintings.

Note. The solid black thin lines indicate the outlines of the objects depicted in the paintings. The other graphic conventions are the same as Figure 5c.

- A large areas was perceived as yohaku.
- A small and restricted areas was perceived as yohaku.

に対する個別分析の結果、平均 $I_{\max}$ は0.53 ($SD=0.10$)となった。

円刺激余白実験と同様、モデルの一般性を評価するために、全180枚の結果画像に対して共通の thres と σ を設定した場合について解析したところ、 $\text{thres}=0.05$, $\sigma=25\text{ px}$ で、最大 $I_{\max}=0.48$ が得られた。この値は個別分析における平均 $I_{\max}=0.53$ に比べて、やや低くなっているが、両者の間には統計的に有意な差は見られなかった ($t=0.99$, $df=18$, ns , Cohen's $d=0.47$)。従って、このモデルは円刺激余白実験と同様、単一の thres と σ の組み合わせで絵画余白実験の結果画像全体をある程度説明可能であるといえる。

Figure 10aは $\text{thres}=0.05$ と $\sigma=25\text{ px}$ に固定して、被験者ごとに各18枚の画像の平均 I を示したものである。濃灰のバーで示した9名の被験者については平均 $I=0.4\sim0.6$ 程度の一致率が得られているが、淡灰のバーで示した1名(Sb4)については、平均 $I=0.2$ 程度と低くなっており、円刺激余白実験と同様に個人差が見られた。この個人差を一要因分散分析により検定したところ、個人の要因が有意となり ($F(9, 153)=20.60$, $p<0.01$, $\eta^2=$

- 多重比較の結果、有意な差が見られた組み合わせは以下のとおりである ($ps<0.01$)。
 $Sa2<Sa1$, $Sa3-10$
 $Sa2<Sa3<Sa1$, $Sa4-7$, $Sa9-10$
 $Sa2<Sa8<Sa1$, $Sa3-7$, $Sa9-10$
 $Sa4<Sa1$
 $Sa10<Sa1$, $Sa6$

Figure 10. Analysis of coincidence ratio for Japanese art paintings.
a. Mean coincidence ratio for ten subjects. b. An example of the results showing a low coincidence ratio.

0.38) 多重比較の結果、Sb4はそれ以外の9名よりも有意に一致率が低いことが示された⁵⁾。ただし、絵画余白実験における一致率は、円刺激余白実験よりも全体的に低くなっており、絵画刺激に対する知覚的余白領域は今回の計算モデルでは表現されていない要因が寄与していることが示唆される。

平均Iが低い例の特徴的なものをFigure 10b (画像番号1) に示す。この例はFigure 9bと同一結果画像であり、両者を比較すると知覚的余白領域と予測領域との不一致はthresと σ を個別画像について最適化するか、全画像について最適化するかの違いによるものではないことが示唆される。この点を検証するために、この被験者の結果画像について個別にthresと σ を最適化した場合と、全画像の最適値を用いた場合の一致率の間で統計検定を行ったところ、両者の間に有意な差は見られなかった ($t=0.25$, $df=34$, ns , Cohen's $d=0.24$)。以上のことからこの被験者での不一致の主な要因は予測領域と知覚的余白領域間の広がりや位置ずれによるものだと考えられる。

円刺激余白実験と絵画余白実験の比較

円刺激余白実験と絵画余白実験で得られた結果のうち、一致率が低い被験者を除いたそれぞれ7名と9名について、Figure 8, Figure 10で示した結果を比較すると、円刺激余白実験では、平均 $I=0.79$ であるのに対し、絵画余白実験では平均 $I=0.51$ と、前者のほうが高い一致率が得られており、この差は統計的に有意となった ($t=9.26$, $df=14$, $p<0.01$, Cohen's $d=4.32$)。

絵画余白実験の一致率が低くなった要因について、個別の結果画像を精査すると、知覚された余白領域と予測領域間の不一致に三つの特徴が見られた。第一の特徴は、オブジェクトの下部の予測領域と知覚的余白領域の不一致である。円刺激余白実験では、Figure 6aに示すように、オブジェクトが画枠中心近傍に配置され、予測領域が上下にある場合、知覚的余白領域も上下に指定される傾向にあった。一方で絵画余白実験では、Figure 9bに示すように、オブジェクトが画枠中心近傍に描かれている場合、予測領域は上下にあるが、知覚的余白領域は上部のみに指定される傾向にあった。絵画実験の被験者9名分の結果画像162枚中、知覚的余白領域が上部に指定されているものは162枚 (100%) であったのに対し、下部に指定されているものは48枚 (30%) であった。一方で、予測領域が上部にあるものは162枚 (100%) で、下部にあるものはFigure 2に示した絵画画像のうち、画像番号1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 13, 14, 16の10枚

5) 多重比較の結果、有意な差が見られた組み合わせは以下のとおりである ($ps<0.01$)。
Sb4<Sb1-3, Sb5-10
Sb1>Sb5, Sb6, Sb10
Sb7>S5, S10
S2>S10

で、被験者9名で総計90枚（56%）であった。よって42枚（26%）は予測領域が上下にあるにもかかわらず、知覚的余白領域は上部のみに指定されておりオブジェクト下部の領域が一致していない。

さらにこれら10枚の画像に描かれているオブジェクトの画像的特徴は二つのタイプに分けることができた。画像番号1, 2, 7, 10, 14のようにオブジェクトが平面（画像上描かれていないが地平面と推定される部分）の上に据え置かれているように見えるもの（タイプ1）と、画像番号3, 6, 9, 13, 16のようにオブジェクトが中空もしくは水中に浮いているように見えるもの（タイプ2）の2種類である。タイプ1の5枚の画像に対する被験者9名の結果画像45枚のうち、下部にも知覚的余白領域が指定されているのは19枚（42%）と半数を下回る割合となった。一方でタイプ2の結果画像45枚のうち下部にも知覚的余白領域が指定されているのは29枚（64%）であり、タイプ1よりも下部に知覚的余白領域が指定される割合が多くなった。タイプ1のようにオブジェクト下部の領域が地平面だと感じられる場合には下部の領域は知覚的余白領域となりやすく、空間だと感じられる場合には知覚的余白領域となりやすいと考えられる。このようにオブジェクト下部の領域が地平面を推定させる場合には、オブジェクト下部の領域の予測領域と知覚的余白領域がより不一致となる傾向にある。

第二の特徴は、オブジェクトによってほぼ囲まれた部分の予測領域と知覚的余白領域の不一致である。円刺激余白実験では、オブジェクトが円であり個数も3個以下のためオブジェクトによって囲まれるような領域はみられなかった。他方で絵画実験では、Figure 11a（画像番号12）に示すように画像右中央からオブジェクトである枝が垂れ下がっている場合、Figure 11bに示すように計算モデルによる予測領域（白い点線）はオブジェクトである枝の間にも広がるが、このような領域は知覚的余白領域として指定されないため、両領域が部分的に一致しない。このようにオブジェクトの間隙にも予測領域が広がる例は、画像番号6, 10, 11, 12, 13の5枚であり、被験者9名分の結果画像総計45枚のうち、オブジェクトの間隙にある予測領域と知覚的余白領域が重なっているものはなかった。このようにオブジェクトの間隙の領域は知覚的余白領域とはならないことが、予測領域と知覚的余白領域の部分的な不一致の要因である。

第三の特徴は、オブジェクトの左右に広がる予測領域と知覚的余白領域の不一致である。円刺激余白実験では被験者によって中央部に円が配置されたのは全結果画像380枚中32枚（8%）と少ないが、絵画余白実験ではオブジェクトが中央に配置されている画像は、18枚中画像番号2, 4, 7, 8の4枚（22%）と比較的多い。Figure 12a（画像番号8）に示した絵画実験結果から、画像中央

Figure 11. The areas surrounded by objects.
a. The painting stimulus containing the areas surrounded by objects.
b. The experimental data and the result of our analysis for a representative subject. The graphic conventions are the same as Figure 9.

Figure 12. The areas surrounding an object.
a. The painting stimulus containing the areas surrounding an object.
b. The experimental data and the result of our analysis for a representative subject.

部にオブジェクトがある場合、Figure 12bに示すように予測領域（白い点線）は上部と左右に広がるが、知覚的余白領域（灰色の実線）はオブジェクトの上部にとどまり、左右に広がらないため、オブジェクト左右で両領域が一致しない。このような特徴を持つ結果画像は総計32枚中18枚（56%）となり、Figure 12bの様にオブジェ

クト左右に予測領域があるが、そこは知覚的余白領域が指定されないため、両領域が不一致となっている。

上記三つの特徴はオブジェクトとその周囲の領域の位置関係（上下、左右、囲み）によって計算モデルによる予測領域のうちの一部が知覚的余白領域には含まれないことを示すもので、これらの要因が絵画の一致率の低下をもたらしている。

以上の検討から、円刺激余白実験と絵画余白実験間で、多くの被験者に共通して見られる知覚的余白領域と予測領域の不一致は、オブジェクトの配置の画像的特徴に依存することが示された。これに対し、特に一致率の低い少数の被験者（円刺激余白実験3名、絵画余白実験1名）の結果からは、オブジェクトの配置の画像的特徴に依存せずに、共通して見られる被験者特性が示された。このような被験者について、Figure 8bはSa2の円刺激余白実験、Figure 10bはSb4の絵画余白実験の結果画像を示したものである。この例から明らかなように、両実験ともに、それぞれの被験者はオブジェクトから離れた位置に小さく知覚的余白領域を指定しており、その領域の大きさや位置について類似性が認められる。このような傾向は、ほかの2名の被験者、および、多くの円刺激・絵画刺激に共通して見られており、オブジェクトの種類や画像的特徴には依存しない個人特性であると考えられる。このことは、今回用いた知覚的場に基づく計算モデルとは異なる枠組みで余白を知覚・評価する被験者が存在することを示唆している。

結 論

本研究では、ヒトが知覚する余白領域を特定し、その領域を視覚的な場の理論に基づく計算モデルで表現することを試みた。その結果、知覚的余白領域と計算モデルによる予測領域の一致率は、円刺激余白実験で平均0.7程度となり、モデルは知覚的余白領域をある程度良く表現できたといえる。今回用いた計算モデルでは、知覚的余白領域は画像的に定義される単なる空白部分としてではなく、オブジェクトと画枠からの知覚的影響力が距離とともに減衰し、一定の基準値以下になった領域として捉えており、知覚的余白領域生成に関わる心理学的モデルとして位置づけることができる。筆者らの知る限り、このような知覚的余白領域に関する検証は本研究が初めてであり、モデルによる説明力のレベルから見て、ヒトの余白知覚に関わる視覚情報処理過程の基本的側面を捉えることができたと考えられる。

一方、絵画余白実験では、日本絵画を対象としてモデルの検討を行った。その結果、知覚的余白領域と計算モデルによる予測領域の一致率は平均0.5程度となり、円刺激余白実験に比べ低い値となった。2次元ガウスフィルタリングに基づく計算モデルによって、複数の円刺激

による幾何学的場の性質が知覚される余白領域をかなり説明することが可能であることが示されたのに対して、日本絵画に対して知覚される余白領域は、このモデルだけでは説明できない要因を含むことが示された。この要因としては、前項で詳述したように、絵画刺激に描かれたオブジェクトとその周囲の領域の位置関係に関わる三つの特徴と、さらにはオブジェクトの意味や異方性、オブジェクトの置かれた3次元空間的文脈などが考えられる。これらの要因を計算モデルとしてどのように組み込んでいくかが今後の大きな課題であるが、従来専ら芸術的・感性的文脈で語られてきた知覚的余白領域が、今回の計算モデルである程度説明可能であることを実験的に示した点、および、このモデルで説明できない部分に関わる要因に関して示唆的な知見が得られた点は、知覚的余白領域に関する実証的研究の第一歩としての成果であると考えられる。

また、今回の検討では、少数ではあるが知覚的余白領域を小さく指定し、計算モデルによる予測領域との一致率が非常に低い被験者が存在することも明らかになった。これらの被験者では、知覚的余白領域はオブジェクトとほぼ同じ大きさで、領域内でオブジェクトと対称的な位置に配置されており、知覚的余白領域とオブジェクトとのバランスを取っているようにも見える。これらの被験者は、佐藤（1982）の述べる「視覚のリズム」、つまり知覚的余白領域とオブジェクトで構成する均衡のとれた状態を生み出すように知覚的余白領域を指定していると考えることが可能である。このことは、今回の計算モデルが想定するものとは異なる、「視覚のリズムによる知覚的余白領域の生成過程」が存在することを示唆している。

今回の検討では、絵画に関して、東洋絵画を対象とした。西洋絵画においては、遠近法を用いてシーンあるいは3次元空間を、2次元画面上に表現するという手法を用いる。そのため、西洋絵画では画面にくまなく図像が描かれて背景は必ず塗りつぶされており、空白の部分はなく、「余白」は定義できないと考えられる。したがって、絵画に関しては、今回の計算モデルは、余白が定義できる東洋絵画にのみ適用可能であり、西洋絵画は適用外となる。一方、絵画以外の分野では、序論に述べたように、エディトリアルデザインや広告などで余白が積極的に利用されている。これらの分野の制作物に関して今回のモデルを適用し、知覚的余白領域の特性を解析することで、余白の持つ訴求力を心理学的観点から明らかにすることが可能ではないかと期待できる。

引用文献

秋山光和（編纂）（1985）．新潮世界美術辞典

- 新潮社, p. 482, p. 1529.
(Akiyama, T.)
- Cobb, P. (1911). The influence of illumination of the eye on visual acuity. *American Journal of Psychology*, **29**, 76-99.
- Kadar, E. E., & Shaw, R. E. (2000). Toward an ecological field theory of perceptual control of locomotion. *Ecological Psychology*, **12**, 141-180.
- 金沢 弘 (1998). 雪舟〔四季山水図巻 (山水長巻)〕 山岡泰造 (監修) 日本美術史 昭和堂, pp. 116-125.
(Kanazawa, S.)
- 金子隆芳・小保内虎夫 (1952). 感応理論の研究 (第39報告) —感応における刺激の強さ, 分量および距離の要因— 心理学研究, **23**, 73-79.
(Kaneko, T., & Obonai T.)
- 加藤周一・NHK取材班 (1987). 日本その心と かたち—4水墨天地の心象— 平凡社, p. 27.
(Kato, S.)
- Koffka, K. (1935). *Principles of Gestalt Psychology*. London: Routledge & Kegan Paul Ltd.
(コフカ, K. 鈴木正彌 (監訳) (1998). ゲシュタルト心理学の原理 福村出版, pp. 190-304).
- 熊谷宣夫・小高根太郎 (1969). 室町時代絵画 藤田経世 (編) 日本美術全史3—鎌倉・室町時代— 美術出版社, p. 202.
(Kumagai, N., & Odakane, T.)
- Lewin, K. (1951). *Field theory in social science*. New York: Harper & Row.
- 森 孝行 (1970). 視知覚の場 大山 正 (編) 知覚 東京大学出版会, pp. 139-166.
(Mori, T.)
- 並木誠士 (1998). 狩野永徳〔唐獅子図〕 山岡泰造 (監修) 日本美術史 昭和堂, pp. 126-135.
(Namiki, S.)
- 佐藤愛子 (1982). 日本人の感覚と生活 ナカニシヤ出版, pp. 287-302.
(Sato, A.)
- 鈴木一誌・佐々木正人 (2003). ページとフォーマットの劇場 佐々木正人 (編) レイアウトの法則 春秋社, pp. 156-194.
(Suzuki, H., & Sasaki, M.)
- 外川 拓 (2012). パッケージ・デザインに対する知覚と評価—広告研究に基づく余白の効果に関する検討— 早稲田大学大学院商学研究科紀要, **74**, 77-89.
(Togawa, T.)
- 上村淳之 (1992). 日本画の行方 美術年鑑社, p. 10.
(Uemura, A.)
- (2015年6月16日受稿, 2016年5月20日受理)