アプローチ空間の形状と吹き抜け空間の天井高の感覚量との関係

RELATIONSHIP BETWEEN BENDING PATTERN OF LEADING PASSAGES AND FEELING VALUE OF CEILING HEIGHT IN HIGH CEILING ROOM

杉山 拓哉^{*1}, 吉岡 陽介^{*2}

Takuya SUGIYAMA and Yohsuke YOSHIOKA

Two experiments were conducted for examine the relationship between the bending pattern of leading passage and the psychological ceiling height of a high ceiling room. 32 participants walked through the virtual environment including "high-ceiling-room" and "leading-passage". Several experimental conditions are created by connecting different shaped "leading-passage" to "high-ceiling-room". The result indicates that the ceiling height in "high-ceiling-room" perceived higher when connecting the "leading-passage" of the upward slope than when connecting other shaped "leading-passage". It is suggested that the psychological ceiling height in "high-ceiling-room" can be controlled by passing through the approach space with a suitable shape.

Keywords: Immersive virtual environment, Openness feeling, High ceiling room, Leading Passage

没入型仮想環境, 開放感, 吹き抜け空間, アプローチ空間

1. 研究背景

1.1 吹き抜け空間へのアプローチ

吹き抜けは、規模や用途を問わず、様々な建築の内部空間の「顔」として重用される。吹き抜けがもたらす心理的な開放感が、その建築での空間体験をより印象的なものにすると期待されるからである。

吹き抜けのある空間に入ると、前後の天井高の変化から、頭上が開放された感覚が生じる。この頭上方向の開放感の強さは、おもに吹き抜け空間の天井の高さによって生じられ、かつ規定される。確かに、前後の天井高の変化が吹き抜けにおける開放感を決定づける大きな要因であることは間違いないが、しかしこれに加えて、吹き抜け空間に至るまでに通るアプローチの形状によっても、この開放感の強さは制御できるのではないかと考える。

すなわち、同じ天井高のアプローチを通して、同じ天井高の吹き抜けに出たとしても、アプローチが上り坂だった場合と下り坂だった場合では、吹き抜けでの開放感の強さは異なると考えられる。

水澤ら¹⁾は、縮尺 1/4 の模型を用いた実験によって、天井高の差と頭上の開放感との関係性を明らかにした。積田ら²⁾は、実際の吹き抜け空間を対象にした実験を行い、空間の構成やテクスチャー・光などの内部環境と、空間認知の特性との関係を分析した。込山らは寸法の可変が可能な実大空間での実験を行い、天井高の認知構造³⁾、室空間の容積と印象評価⁴⁾について基礎的な知見を得た。また、羽生⁵⁾ Okabe⁶⁾、Stefanucci⁷⁾らは視覚的な空間体験と距離認知との関係を分析し、階段などの歩行経路の特性と認知距離との間に定性的な相関があることを明らかにした。

このように、視覚情報が天井高などの空間の感覚量に与える影響を調査した先行研究は数多くある。しかし、接続されたアプローチの空間形状と吹き抜け空間の高さ方向の開放感（天井高の感覚量）との関係を明らかにしようとした研究はこれまでになかった。

1.2 シークエンスと開放感

建築は分節された「空間」の集合体である。分節されたそれらの「空間」がシークエンスというネットワークを形成することで、奥行きをもった建築がはじめて生まれる。シークエンスとは、「視点が移動することで徐々に変化していく景色の連続」のことであり、建築的な空間体験を説明する重要な概念である。

シークエンスに関する研究は幅広い論点から行われている。貝島ら⁸⁾は、現代建築におけるシークエンスの類型化を行い、その構成が、機能と合理性を超えた現代建築の意匠表現を成立させているとした。宮宇地ら⁹⁾¹⁰⁾は、ショッピングモールでの分析を通じて、壁や天井など身体移動と視線を遮る空間要素がシークエンスの評価に影響を及ぼすことを明らかにした。空間は壁や床、天井などの要素によって構築される。シークエンスとは、こうした空間を構成する様々な要素を連続的に横断的に体験することであり、その連続と横断を魅力的なものにする設計が現代建築には求められる。空間を構成する諸要素がどのように関連しながら空間の感じ方に影響を与えているのかを検証し、シークエンスを考慮した空間設計の知見として整備することが重要であるとする。

また、材野ら¹¹⁾は、シークエンス（景観）は「開放度」と「インパクト度」によって記述できるとした。宮岸ら¹²⁾も、寺院庭園のシ

¹⁾ ㈱久米設計設計本部建築設計部 修士（工学）

²⁾ 千葉大学工学研究院 准教授・博士（工学）

Architectural Design Dept., Architectural Div., KUME SEKKEI Co. Ltd., M.Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

ークエンスを分析し、「開閉度」の変化が視覚的行動に影響を与えることを明らかにした。益岡ら¹³⁾は各種の生理計測を用い、シークエンスに対する「開放感」が増加すると視覚行動量が増加し、「開放感」が減少すると歩行時間と前頭部の電位が減少することを明らかにした。三ツ木ら¹⁴⁾は、心理的分析により、経路探索時の心理変化をシークエンスとしてとらえ「不安度」を指標として定量化した。

特に材野、宮岸、益岡の研究では、「開放度（開閉度・開放感）」がシークエンスを分析する際の重要な指標であるとしている。そして、一連のシークエンスの中に開放感のある部分が挿入されることによって、シークエンス全体の評価が変化することを実験的に明らかにしている。しかしながらその逆、ある空間に至るまでのシークエンシャルな体験がある空間での開放感に与える影響について、定量的な検証を行った事例はこれまでになかった。そこで本研究では、吹き抜け空間に至るまでのシークエンシャルな体験が吹き抜け空間での高さ方向の開放感（天井高の感覚量）に与える影響について検証を行うこととした。

2. 目的

本研究では、没入型仮想環境を用いた被験者実験を行い、その実験結果を定量的に分析することによって、アプローチの空間形状と吹き抜け空間の天井高の感覚量との関係を検証する。

吹き抜け空間にいたるアプローチの空間形状として「直進」「上る」「下りる」「くぐる」「曲がる」の形状を設定し、それぞれの形状のアプローチを通り抜けることが、吹き抜け空間の天井に対する高さ感に与える影響を検証する。またアプローチを歩行している際の被験者の注視特性の分析を行うことで、アプローチの空間形状が視覚的な情報探索にどのような影響を与えているのかを検証する。

これらの検証によって、吹き抜け空間の天井高を効果的に演出するための知見を導出することを本研究の目的とする。

3. 方法

3.1 没入型仮想環境

本研究では没入型仮想環境技術を利用した被験者実験を行う。没入型仮想環境技術を利用する利点としては、1) 1/1 スケールでの空間評価が可能であること、2) 複数の空間条件を瞬間的に切り替えて体験できること、3) 被験者によるインタラクティブな空間操作が可能なこと、が挙げられる。本研究においてもこれらの利点を生かすように仮想環境体験システムを構築した。

まず、仮想環境構築ソフトウェア：Vizard6.0 (WORLD VIZ 社製)を用いて、「吹き抜け空間」と「アプローチ空間」を含む仮想環境を生成し、ヘッドマウントディスプレイ（実験Ⅰ：HTC-VIVE/ HTC 社（対角視野 110 度、リフレッシュレート 90Hz、片眼解像度 10800px × 1200px）実験Ⅱ：VIVE Pro Eye / HTC 社（対角視野 110 度、リフレッシュレート 90Hz、片眼解像度 1440px × 1600px））を介して、この仮想環境を被験者に等身大で体験させる。ヘッドマウントディスプレイに内蔵されたジャイロセンサおよび、実験室に配置した 2 基のポジショントラッキングセンサ（Base Station/Valve 社）によって、被験者の頭部角度と位置情報を計測しリアルタイムで提示映像に反映させた。これによって被験者はあたかも自分の体で仮想環境内を歩き廻っているかのように感じるようになる (Fig. 1)。

また、実験条件間の移動は瞬間的な転送で行えるようにプログラミングした。被験者が仮想環境内の特定の時空間座標に到達すると、次の実験条件の空間に瞬時に転送する。これによって被験者は、条件間に不要なタイムラグを挟むことなく、いくつもの空間条件を連続的に体験することができる。前の空間条件での感覚を鮮明に保持したまま次の空間条件を評価することができる。

そして、被験者の手にはコントローラ（VIVE コントローラ/HTC 社）を把持させ、コントローラのボタン操作によって、仮想環境の天井の高さを任意に変更できるようにプログラミングした。これによって、吹き抜け空間における天井高に対する感覚量を、被験者自身の直感的操作により数値化することができる (Fig. 2)。

Fig.1 Experiment environment and arrangement

Fig.2 Measuring method for Experiment 1 (mm)

Fig.3 Schematic illustration of each experimental condition

3.2 実験環境

実験は千葉大学の実験室(5900 mm×7000 mm)で行った。この実験室の二隅に、ポジショントラッキング用センサを設置し、およそ4000 mm×5000 mmの範囲で被験者は仮想環境内で複数の空間条件を体験しながら歩行できるように設定した(Fig. 1)。被験者は20代の健康な大学生32名(男16名、女16名)とした。

4. 実験 I

4.1 実験条件

仮想環境内に構築した「吹き抜け空間」の一辺に、6種類の「アプローチ空間」を接続することで、6つの実験条件を作り出した(Fig. 3)。「吹き抜け空間」は、いずれも幅5000 mm×奥行5000 mmの広さとした。吹き抜け空間の天井の高さは、先述の通り被験者の手元のコントローラで任意に変更することができる。「アプローチ空間」は、いずれも幅1000 mm、高さ2400 mmの廊下で、その形状によって、「直進」「上る」「下る」「くぐる」「左曲り」「右曲り」の6つの身体運動を被験者に促すこととなる。「アプローチ空間」の中央を歩いた場合の「吹き抜け空間」までの移動距離はいずれの条件でもおよそ4000 mmとなる。

なお、「上る」「下る」条件では、奥行き900 mm高さ100 mmのスロープを仮想環境内に配置するとともに、実空間の同位置にも同じ大きさのスロープを設置することで、スロープ昇降にかかる負荷も体験できるようにした。また、「くぐる」条件では、「吹き抜け空間」と「アプローチ空間」との接合部に、おおよそ被験者の身長から頭一つ分低く設定した垂れ壁を仮想環境内に設置し、頭部をぶつけないようにくぐらせることとした。

また「アプローチ空間」を通過することの有無が、「吹き抜け空間」の天井の高さの評価に与える影響を検証するため、「アプローチ空間」を接続しない「吹き抜け空間」のみの実験条件を追加した。この「吹き抜け空間」のみの実験条件を「基準条件」と呼称することとする。最後に、広さを幅5000 mm×奥行5000 mm×天井高5000 mmに固定した直方体の空間を用意し、「記憶空間」とした(Fig. 2)。

4.2 天井高の調整

本研究では、天井高に対する直感的な感覚量を数値化するために、天井の高さ方向の位置を、被験者自身の操作により上下に調整させる方法をとる。各実験条件における「吹き抜け空間」の天井は、被験者が手元に持っているコントローラのホイールで、その高さを50 mm 間隔で上下に調整できるようにプログラミングした。

被験者はまず「記憶空間」を体験し、その天井高5000 mmを記憶する。その直後、7つの実験条件のうちいずれかに瞬間移動し、「アプローチ空間」をたどって、「吹き抜け空間」まで歩行する。「吹き抜け空間」に到着した被験者は、記憶の中にある「基準空間」の天井高と一致するよう、各実験条件における天井高を調整する。

このとき仮に、被験者が天井高を、「記憶空間」の天井高5000 mmより低く4800 mm程度に調整したとする。この場合は、被験者は調整後の4800 mmの天井高を5000 mm相当だと評価しているわけであるから、その分だけ実際の寸法より天井を高く感じていることになる。すなわち、調整後に見えている天井に対して被験者は、5000 mmと4800 mmの差分である200 mm分だけ、その高さ方向の位置を高く感じていると解釈することができる。

なお、「吹き抜け空間」の天井高はあらかじめ、目標より500 mm低い4500 mmと、目標より500 mm高い5500 mmのいずれかに設定されている(Fig. 2)。被験者には「吹き抜け空間」の天井高を「上下方向どちらかに変えてある」ことのみを伝えている。なお、順序効果を相殺するため、各実験条件の提示順は被験者ごとにランダムとした。

4.3 実験手順

まず、被験者の頭部にヘッドマウントディスプレイを装着させ、天井高を調整するためのコントローラを持たせる。その後、実験条件ごとに①～⑥の手順で試行を繰り返した。

- ① 試行開始とともに「記憶空間」に被験者を転送する。
- ② 10秒間で「記憶空間」の天井高5000 mmを記憶させる。
- ③ 被験者を、各実験条件のスタート地点に転送する。
- ④ 転送後すみやかに「アプローチ空間」を通過し、「吹き抜け空間」まで歩行してもらう。「アプローチ空間」が接続されていない基準条件では、そのまま手順⑤に進む。
- ⑤ 記憶した「記憶空間」の天井高と同じになるように、コントローラで「吹き抜け空間」の天井高を調整してもらう。
- ⑥ 天井高の調整が完了したら被験者に口頭で合図をしてもらい、次の実験条件の手順①に進む。

「吹き抜け空間」の調整前の天井高2パターンに7つの実験条件を掛け合わせた計14回の試行を被験者ごとに実施した。なお、ヘッドマウントディスプレイを装着させる際には、被験者の個人特定にあわせて左右のレンズ間の距離、レンズと眼球の間の距離を調整した。被験者にはヘッドマウントディスプレイを装着した状態での歩行に慣れさせるため、試行前に5分程度、仮想環境内を歩き廻らせた。試行と試行の間では、随時ヒアリングを行い、酔い等の違和感があつた場合は即座に実験を中断するルールで運用したが、本実験では該当者はいなかった。

4.4 実験結果

「記憶空間」の天井高5000 mmと、各実験条件で被験者が調整したあとの天井高を比較することで、接続された「アプローチ空間」の形状と、「吹き抜け空間」における天井高の感じ方との関係を分析する。各実験条件における調整後の天井高について、被験者平均を求めたところ(Fig. 4)、基準条件での調整後の天井高は4983 mmであつた。調整前の天井高が4500 mmであつた場合と5500 mmでは、調整後の天井高に比較的大きな差があるものの(Fig. 5)、平均値で比較するかぎりでは基準条件での調整後の天井高は目標値の5000 mmに最も近い値であり、実験結果の分析手法としては調整前の天井高による差を平均したデータを比較することに一定の妥当性が与えられる。

まず、各実験条件における調整後の天井高について、「アプローチ空間」の接続の有無と「アプローチ空間」の形状を要因とした二元配置分散分析を行った。その結果、二つの要因に対する帰無仮説が棄却された。このことから「アプローチ空間」の接続の有無によって、「吹き抜け空間」での天井高の感じ方が変化することが分かった。また、「アプローチ空間」の形状によって、「吹き抜け空間」での天井高の感じ方が変化していることも分かった。

つづいて、実験条件「直進」「上る」「下る」「くぐる」「左折」「右折」における調整後の天井高に対して、Bonferroni法による多重比較検定(5%水準)を実施した。しかしながら、ここでは実験条件間

での有意差は見られなかった。そこで、データ推移の様相から、「アプローチ空間」が斜路であることの効果に着目し、「直進」「上る」「下る」における調整後の天井高に対して、一元配置分散分析と多重比較検定を行った。その結果、通り実験条件「直進」と「上る」との間に有意差が認められた ($p = 0.0149$)。

5. 考察

実験結果より、直進のみの「アプローチ空間」を接続する条件より、上り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を接続する条件の方が、直後の「吹き抜け空間」での天井高が高めに調整されることが確認された。すなわち、「アプローチ空間」の先の「吹き抜け空間」の天井高が同じであっても、「アプローチ空間」に斜路がある場合には、斜路がない場合より天井高を低く感じている。

上り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」の形状が被験者の視線を前方上方に移し、奥の「吹き抜け空間」の天井方向の見通しが良くなることで、「アプローチ空間」から「吹き抜け空間」へ抜ける際の開放感が薄れたと推察される。

ただし、下り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を接続した、実験条件「下る」のデータをみると、平均値の推移としては実験条件「直進」と「上る」の中間あたりに位置していることがわかる (Fig. 5)。実験条件「下る」では斜路を下っているため、上記の仮説に従えば、実験条件「直進」のデータよりも下側に位置していないはずである。

Fig.4 Comparison of subject-adjusted ceiling height under each experimental condition (Error bar means SE)

Fig.5 Comparison of the adjusted ceiling height under the conditions of 4500 mm and 5500 mm (Error bar means SE)

今回の実験結果からは、実験条件「下る」と、基準条件と実験条件「直進」、「上る」との間には、統計的に有意な差は見られていないが、先の推察に反するデータ推移である。また、+500 mmの天井高から調整する場合と、-500 mmの天井高から調整する場合とで、最終的な調整後の天井高に差異が生じていることも明らかである。

実験Ⅱではこうした問題が生じない実験方法を考案する。また「吹き抜け空間」の天井方向の見通しの良さが天井高の調整に影響を与えている、とする先述の推察を確認するため、アプローチ空間での被験者の注視特性の分析も行う。

6. 実験Ⅱ

6.1 実験条件

実験Ⅰの考察を受けて、「直進」「上る」「下る」の実験条件に焦点を絞り、注視特性分析を伴う追加実験を行った。実験Ⅱで使用するヘッドマウントディスプレイ (VIVE Pro Eye / HTC 社) では、接眼レンズの奥に設置されたカメラとその周囲に設置された LED 光源により、被験者の注視点の位置を高精度 (120Hz、精度 0.5-1.1 度) で抽出することができる。

実験Ⅰと同じく、仮想環境内に構築した「吹き抜け空間」の一辺に、3種類の「アプローチ空間」を接続することで、「直進」、「上る」、「下る」の3つの実験条件を作り出した (Fig. 3 上段)。

「吹き抜け空間」は、いずれも幅 5000 mm × 奥行 5000 mm 広さとし、天井高はこの実験では 5000 mm に固定した。「アプローチ空間」は、実験Ⅰと同じく幅 1000 mm、高さ 2400 mm の廊下で、中央を歩く場合の移動距離はおおよそ 4000 mm となる。ただし、「上る」、「下る」の実験条件で設置したスロープについては、実験Ⅰの2倍の寸法 (奥行 1800 mm、高さ 200 mm) を適用して実験を行う。昇降する距離と高さが大きくなることによって、スロープによる効果がより顕在化しやすくなると考える。実験Ⅰ同様、実空間にも同じ大きさのスロープを設置し、スロープ昇降にかかる負荷を体験できるようにした。

また、「吹き抜け空間」のみの「基準条件」を設け「アプローチ空間」を通過することの有無が、「吹き抜け空間」の天井の高さの評価に与える影響を検証する。最後に、広さを幅 5000 mm × 奥行 5000 mm に固定し、天井の高さを被験者の手元のコントローラで任意に変更することができる空間を用意し、「再現空間」とした (Fig. 6)。

6.2 天井高の調整

実験Ⅰでは各実験条件の「吹き抜け空間」の天井高を 5000 mm 相当に調整させて、その調整の加減によって被験者の感じた天井の高さを定量化した。調整前の天井高は 4500 mm、5500 mm の2種類であったが、どちらの天井高から調整をはじめると、最終的な調整後の天井高に有意な差異が生じていた。目標値プラスマイナス 500 mm という値の設定も、実験的検証のための暫定値とはいえ恣意的であった。また、各実験条件の「吹き抜け空間」の天井高を調整する手法であったため、厳密には直前に体験した「記憶空間」の天井高を再現し計測する手続きとなっていた。

そこで実験Ⅱでは、プロセスを逆にし、被験者が各実験条件で感じた「吹き抜け空間」の天井の高さを、「再現空間」において再現させる方法をとることとした。まず被験者に、天井高が 5000 mm であることを伏せた状態で、各実験条件の「吹き抜け空間」を体験させる。つまり実際には「吹き抜け空間」の天井高は 5000 mm で一定である

が、被験者には「5000 mmより高いかもしれないし、低いかもしれないし、ぴったり 5000 mmかもしれない」と告げておく。

各実験条件の「吹き抜け空間」の天井高を記憶させたあと、いったん目を閉じさせ、その間に「再現空間」に被験者を転送する。転送された「再現空間」において、記憶の中にある各実験条件の「吹き抜け空間」の天井高と一致するように、天井高を調整させる。被験者が「再現空間」で再現した天井高と、目標値である 5000 mmとの間にどのくらい差異が生じるかを分析することで、「アプローチ空間」の効果を検証する。

この実験Ⅱにおいては、各実験条件の天井高と「再現空間」の天井高は、いずれも 5000 mmで統一している。であるにもかかわらず、「再現空間」での調整後の天井高と各実験条件の「吹き抜け空間」の天井高との間に差異が生じていたとすると、それは各実験条件の「アプローチ空間」を通過することによって、「吹き抜け空間」に出た際に天井高を高くもしくは低く感覚していたものと推察できる。

また実験Ⅱではアプローチ空間での被験者の注視特性の分析を行う。この実験Ⅱの方法であれば、「吹き抜け空間」の天井高は 5000 mmに固定されているため、目標値である 5000 mmの天井高を持つ「吹き抜け空間」へのアプローチに際しての注視特性を、正確にデータとして取得することができる。実験Ⅰの方法では、4500 mmあるいは 5500 mmへの天井高を持つ「吹き抜け空間」に対する注視特性の分析しかできなかった。

6.3 実験手順

ヘッドマウントディスプレイを装着した被験者にコントローラを持たせ、注視特性分析のためのキャリブレーション (9 点) をおこなった。その後、実験条件ごとに①～⑥の手順で試行を繰り返した。

- ① 各実験条件のスタート地点に被験者を転送する。
- ② 転送後すみやかに「アプローチ空間」を通過し、「吹き抜け空間」まで歩行してもらう。「アプローチ空間」が接続されていない基準条件では、そのまま手順③に進む。
- ③ 10 秒間で「吹き抜け空間」の天井高 5000mm を記憶させる。
- ④ 閉眼して 10 秒を数えさせ、その間に「再現空間」に転送。
- ⑤ 記憶した「吹き抜け空間」の天井高と同じになるように、コントローラで「再現空間」の天井高を調整してもらう。
- ⑥ 天井高の調整が完了したら被験者に口頭で合図をしてもらい、次の実験条件の手順①に進む。

4 つの実験条件を被験者ごとランダムに実施した。没入型仮想環境の利用にあたっては実験Ⅰと同様のスキームとルールで運用した。

Fig.6 Measuring method for Experiment 2 (mm)

6.4 実験結果

6.4.1 調整後の天井高

「アプローチ空間」が接続されていない基準条件での調整後の天井高を 1 として、実験条件「直進」、「上る」、「下る」での調整後の天井高の比率を求めた (Fig. 7)。実験条件「直進」と「下る」において比率が 1 よりも大きくなっており、逆に実験条件「上る」において比率が 1 よりも小さくなっている。実験Ⅰの結果に比べて、データの推移が反転しているように見えるが、これは実験のプロセスが逆転しているためである。1 より大きい値であれば、その条件において基準条件より天井高を高く感じていると解釈できる。実験Ⅱでは各実験条件の天井高と「再現空間」の天井高がいずれも 5000 mmであったため、「再現空間」の天井高が初期状態からまったく動かされないことも予想されたが、実験条件ごとに数値に変動があり、アプローチ空間の接続による天井高の感覚の変化が計測できていることがわかる。

そこで、実験条件「直進」、「上る」「下る」それぞれの調整後の天井高について、「アプローチ空間」の形状を要因とした一元配置分散分析を行った。その結果、主要因に対する帰無仮説が棄却された。このことから「アプローチ空間」の形状によって、「吹き抜け空間」での天井高の感じ方が変化していることが分かった。つづいて Bonferroni 法による多重比較検定を実施したところ、実験条件「上る」と「下る」の間に有意差が認められた ($p=0.0445$)。実験条件「下る」では、実験条件「上る」よりも天井高を高く感じていることが確認された (Fig. 7)。

6.4.2 注視特性 (視線仰角)

実験条件「上り」と実験条件「下り」における被験者の注視特性を比較する。「アプローチ空間」を歩行するときの注視特性について、本研究では上下方向の視線移動に絞って分析を行う。この分析により、被験者が「アプローチ空間」を歩行中どのタイミングで視線を上げて、「吹き抜け空間」の視覚情報を取得しようとしているのかを検証する。

ヘッドマウントディスプレイから出力される注視特性の時系列データから、被験者が「アプローチ空間」を歩行している間の視線仰角 θ を、水平方向を 0、上方向を正として収集した (Fig. 8)。つづいて「アプローチ空間」の歩行開始地点を 0 として、200 mm 間隔で視線仰角の平均値を算出し、さらにそれぞれの区間での被験者平均を算出した (Fig. 9)。

Fig.7 Ratio of adjusted ceiling height under each experimental condition to standard condition (Error bar means SE)

データの推移をみると実験条件「上り」と「下り」とともに、「吹き抜け空間」に近づくにつれて次第に視線仰角が正方向に増大する傾向がみられた。また、区間 1000-1200 mm と区間 1200-1400 mm において実験条件「上り」のデータが特異に正方向に上昇している。

そこで 200 mm 毎の区間での視線仰角の平均値に対して「アプローチ空間」の形状を要因とした Bonferroni 法による多重比較検定を実施した。その結果、区間 1000-1200 mm、区間 1200-1400 mm と区間 1800-2000 mm で実験条件「上る」と「下る」の間に有意差が認められた ($p=0.0004$, $p=0.0027$, $p=0.0062$)。実験条件「下る」と比較すると、実験条件「上る」では、区間 1000-1200 mm、区間 1200-1400 mm においてより上方へ視点を移動し、区間 1800-2000 mm においてより下方へ視点を移動していることが分かった。

7. 考察

まず調整後の天井高の推移について考察する。基準条件での感覚量を基準にすると、実験条件「直進」と「下る」では天井高をより高く感覚し、逆に実験条件「上る」では天井高をより低く感覚する、という傾向がある (Fig. 7)。この傾向は実験 I の結果と共通している (Fig. 4)。実験方法の違いにもかかわらず共通の傾向が確認できたことで、この傾向が頑健であることを示すことができた。

ただし、統計的な有意差は実験 I とは異なる部分で検出されている。実験 I では、実験条件「直進」と「上る」の間に有意差が見られたが、実験 II では、実験条件「下る」と「上る」の間に有意差が見られた。実験プロセスを逆転させたことと、スロープのサイズの変更 (奥行 900 mm、高さ 100 mm → 奥行 1800 mm、高さ 200 mm) のどちらか、あるいはその両方が影響を与えていると考えられる。

また各実験条件の平均値の推移を比較すると、実験 I では、実験条件「直進」の平均値が実験条件「下る」と「上る」よりも下方に位置している (Fig. 4)。それに対して、実験 II では、実験条件「下る」と「上る」の中間あたりに位置している (Fig. 7)。実験 II の結果の方が、「吹き抜け空間」の天井方向の見通しの良さが天井高の調整に影響を与えている、とする仮説よく裏付けているといえる。

つづいて「アプローチ空間」での視線仰角の推移について考察する。Fig. 9 に見られるデータ推移では、実験条件「上る」、「下る」とともに右肩上がりに視線仰角が推移していた。これは、「アプローチ空間」を前に進むにつれて「吹き抜け空間」を視認できる領域が広がり、その中でも特に前方上方、すなわち「吹き抜け空間」の天井方向を見る傾向にあるためだと推察される。平均値が正の値に転じるのは区間 2000-2199 を過ぎたあたりからではあるが、両条件とも地点 1400 を超えたあたりから前方上方に視線を移す割合が増加しており、そのことが平均値に次第に反映された結果、右肩上がりの推移が形成されている。

また、区間 1000-1199 mm と区間 1200-1399 mm において実験条件「上る」の視線仰角は大きく上昇しており、実験条件「下る」における視線仰角との比較では有意な差が確認されていた。本実験の被験者の平均身長は 1688 mm である。このことを考慮すると、区間 1000-1200 mm とは、実験条件「上る」においては被験者が「吹き抜け空間」の天井を注視することができ、実験条件「下る」においては「吹き抜け空間」の天井を注視することがぎりぎりできない、という特別な区間であることがわかる (Fig. 10)。

Fig.8 Visual angle θ at point of x in "approach space" (mm)

Fig.9 Average visual angle at every 200mm divided area under "Go up" and "Go down" conditions (Error bar means SE)

Experimental condition "Go up"

Experimental condition "Go down"

Fig.10 Relationship between visual angle and section in "approach space" of experimental condition "Go up" and "Go down"

実験条件「上る」では10人中4人の被験者が地点1200mm未満の位置で、縦方向上方に視線を移し、「吹き抜け空間」の天井付近（天井と壁の境界）を注視していた。それに対して実験条件「下る」では、同程度まで前方上方に視線を移したのは10人中1人であった。

また統計的に有意な差は無いものの地点1600mmまでは、実験条件「下る」のほうが実験条件「上る」より常に被験者の視線仰角が下がる傾向にあった（Fig. 9）。実験条件「下る」における「アプローチ空間」は、下り方向に傾斜をつけて延びているため、安全確認のために床面を注視するにはより下方へ視線を移さなければならない。このことが地点1600mmまでの区間における視線仰角の低下を招いたと考えられる。地点1600mmを過ぎたあたりで床面への注視の必要がなくなり、地点1800mmで統計的有意差が確認されるほどに前方上方に視線を移す割合が増加したのではないだろうか。

以上のように、実験条件「上る」と「下る」との間には、注視特性に特徴的な差があることが示された。このことが、二つの条件間での天井高の感覚量の違いに影響を与えた可能性が考えられる。スロープの途中で「吹き抜け空間」の天井を視認することで、心的表象としての「天井」が生成される。そこからさらにスロープを上ることでの「天井」に接近する感覚が生じる。この「天井」に接近する感覚が、「天井」に接近したはずだという感覚に変わり、「吹き抜け空間」での天井高の感覚量に影響を与えたのではないだろうか。

本研究では、二つの事象の因果関係にまで踏み込むことはできていないが、実験条件に応じた感覚量の変化（調整後の天井高の変化）と、実験条件の与件に依存しているとみられる行動的な特徴（「吹き抜け空間」天井付近への注視）、この両方を一つの実験の中で確認できたことは重要である。二つの事象の因果関係を明らかにするためには、何らかの方法で視線仰角を下方に固定した実験を行い、調整後の天井高の変化が生じなくなることを確認する必要がある。

8. まとめ

本研究では没入型仮想環境技術を用いた2つの被験者実験を行い、「アプローチ空間」の形状と「吹き抜け空間」の天井高の感覚量との関係を検証した。二つの実験の結果を以下にまとめる。

実験Ⅰ：

被験者に、「直進」「上る」「下る」「くぐる」「左折」「右折」の6種類の形状の「アプローチ空間」を通して「吹き抜け空間」まで歩いてもらい、天井高を調整させたところ、以下の結果を得た。

- ・ 「アプローチ空間」の接続の有無によって、直後の「吹き抜け空間」での天井高の感覚量に変化する。
- ・ 「アプローチ空間」の形状によって、直後の「吹き抜け空間」での天井高の感覚量は変化する。
- ・ 平坦な「アプローチ空間」を通るより、上り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を通る方が、直後の「吹き抜け空間」での天井高が低く感覚される。

実験Ⅱ：

被験者に、「直進」「上る」「下る」の3種類の形状の「アプローチ空間」を通して「吹き抜け空間」まで歩いてもらい、そこでの天井高に対する感覚量を計測したところ、以下の結果を得た。

- ・ 実験Ⅰと同じく、「アプローチ空間」の形状によって「吹き抜け空間」での天井高の感覚量に変化していることが分かった。
- ・ 下り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を通るより、上り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を通る方が、直後の「吹き抜け空間」での天井高が低く感覚される。
- ・ 上り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を歩くときには、「アプローチ空間」の出口越しに「吹き抜け空間」の天井が見え始める位置において、下り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を歩くときよりも、上方を注視する。
- ・ 下り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を歩くときには、「アプローチ空間」の出口付近において、上り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を歩くときよりも、上方を注視する。

以上より、相応な形状の「アプローチ空間」を通過させることによって、直後の「吹き抜け空間」での天井高の感覚量を操作できる可能性が示された。また両実験に共通して、「アプローチ空間」のない場合と比較すると、平坦な「アプローチ空間」や下り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を通ると天井高をより高く感覚し、上り方向に傾斜のついた「アプローチ空間」を通ると天井高をより低く感覚する、という傾向も確認された。

なお本研究で得られた知見にはいくつかの適用限界がある。まずヘッドマウントディスプレイを介した没入型仮想環境における実験的検証であるため、模型や映像などを利用した実験的検証の知見と同様、現実空間での追加の検証が必要である。また設定寸法についても、特に吹き抜け空間の天井高を5mに設定しているが、ほかの高さの吹き抜け空間でも同様の結果になるのかを検証する必要がある。「アプローチ空間」の廊下幅や天井の形状も一考の余地がある。特に本研究の「アプローチ空間」の天井は、床面の傾斜に同調して上下していた。床と天井との間の距離が「アプローチ空間」各部で変化することによる実験結果への影響を排除するためである。しかし実際の建築の計画でこのような傾斜した天井の廊下を設計することは稀である。現実空間の設計に本研究の知見を適用するためにはこうした細部の検証が必要になる。一方で本研究では切り分けて検証しなかった別の論点もある。筋肉への刺激の有無である。傾斜の付いた「アプローチ空間」を上ったり下ったりする場合には、被験者の両足にかかる負荷が、平坦な「アプローチ空間」を歩く場合とは明らかに異なる。この身体的負荷が実験結果に影響を与えていた可能性がある。以上の事項を今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Mizusawa S., Yajima, N., Naoi, H.: An experimental study on change of felt overhead-space by person moving to room of higher ceiling, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, E-1, pp. 825-826, 2004.7
水澤秀輔, 矢島規雄, 直井英雄: 天井高の異なる二空間を通り抜ける時の頭上開放感の変化に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1, pp. 825-826, 2004.7
- 2) Tsumita, H., Tamao, Y., Hua, Xu.: Study on Spatial Cognition of Width, Depth and Height in Spaces in Well-Hole Style, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Vol.75, No.648, 315-320, 2010.2
積田洋, 玉尾祐輝, 徐華: 吹き抜け空間における幅・奥行・高さの認知

- 特性の研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 75, No. 648, pp. 315-320, 2010. 2
- 3) Komiyama, A., Hatsumi, M.: Cognitive Structure of Ceiling Height of Interior Space, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.490, pp.111-118, 1996.12
込山敦司, 初見学: 建築内部空間における天井高の認知構造, 日本建築学会計画系論文集, No. 490, pp. 111-118, 1996. 12
 - 4) Komiyama, A., Hashimoto, K., Hatsumi, M., Takahashi, T.: Experimental Study on Evaluation of Volume and Spaciousness of Interior-Space, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.496, pp.119-124, 1997.6
込山敦司, 橋本都子, 初見学, 高橋鷹志: 室空間の容積と印象評価に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 496, pp. 119-124, 1997. 6
 - 5) Hanyu, K., Itsukushima, Y.: Empirical Studies on Cognitive Distance of Stairways, *IATSS Review*, Vol.25, No.4, pp.243-253, 2000.8
羽生和紀, 巖島行雄: 階段の認知距離の実証実験, *IATSS Review*, Vol. 25, No. 4, pp. 243-253, 2000. 8
 - 6) Okabe, A., Aoki, K., Hamamoto, W.: Distance and Direction Judgment in a Large-Scale Natural Environment, Effects of a Slope and Winding Trail, *Environment and Behavior*, Vol.18, No.6, pp.755-772, 1986
 - 7) Stefanucci, J.K., Proffitt, D.R., Banton, T., Epstein, W.: Distances appear different on hills, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol.81, No.6, pp.1052-1060, 2005
 - 8) Kaijima, M., Sakamoto, I., Tsukamoto, Y.: The Connection of Rooms in Circulation Path -A study on spatial composition in circulation path in Japanese contemporary architecture, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.62, No.498, pp. 131-138, 1997.8
貝島桃代, 坂本一成, 塚本由晴, 動線による室の連結: 現代日本の建築作品における動線の空間構成に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 62, No. 498, pp. 131-138, 1997. 8
 - 9) Miyauji, K.: A Study on the Sequence of Visual Environment with Human Movement Part 1, Case study on shopping malls, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.440, pp. 99-109, 1992.10
宮宇地一彦: 人間移動に伴う視覚的シーケンスの研究 (その1), ショッピングモールを事例として, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 440, pp. 99-109, 1992. 10
 - 10) Miyauji, K.: A Study on the Sequence of Visual Environment with Human Movement Part 2, An analysis of sequential characteristics and verification of the sequential notation, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.59, No.455, pp. 97-108, 1994.1
宮宇地一彦: 人間移動に伴う視覚的シーケンスの研究(その2), シーケンスの特徴分析と表記法の検証, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 59, No. 455, pp. 97-108, 1994. 1
 - 11) Zaino, H., Miyagishi, Y.: Relation of Sequence Landscape of Fundamental space Structure and Sequence Landscape of Visual Behavior, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No.438, pp.79-85, 1992.8
材野博司, 宮岸幸正: 基本構造シーケンス景観と行動シーケンス景観との関係, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 438, pp. 79-85, 1992. 8
 - 12) Miyagishi, Y., Zaino, H.: A Study of Visual Sequence of Landscapes -According to Visual Behavior and Open-Close of Space-, *Journal of the City Planning Institute of Japan*, No.26, pp. 433-438, 1991.5
宮岸幸正, 材野博司, 景観のシーケンスに関する基礎的研究, 都市計画論文集, No. 26, pp. 433-438, 1991. 5
 - 13) Masuoka, R., Zaino, H.: A Study on the Sequence of Landscape with Pedestrian Action and Response, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.62, No.502, pp. 163-169, 1997.12
 - 益岡了, 材野博司: シーケンス景観における歩行者の行動と反応の研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 62, No. 502, pp. 163-169, 1997. 12
 - 14) Mitsuki, M., Uno, H., Munakata, J., Hirate, K., Yasuoka, M.: A Study on the Way-Finding Process Considering the Change in the State of Mind -Sequence of the change in the mental state measured by "degree of anxiety", *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.69, No.583, pp. 49-56, 2004.9
三ツ木美恵子, 宇野宏司, 宗方淳, 平小太郎, 安岡 正人: 心理変化に注目した経路探索プロセスに関する研究: 「不安度」を指標とした心理変化シーケンス, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 69, No. 583, pp. 49-56, 2004. 9

RELATIONSHIP BETWEEN BENDING PATTERN OF LEADING PASSAGES AND FEELING VALUE OF CEILING HEIGHT IN HIGH CEILING ROOM

Takuya SUGIYAMA ^{*1} and *Yohsuke YOSHIOKA* ^{*2}

^{*1} Architectural Design Dept., Architectural Div., KUME SEKKEI Co. Ltd., M.Eng.

^{*2} Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

In this study, we conducted two experiments using immersive virtual environment technology to test the relationship between the shape of the "Leading Passage" and the perceived ceiling height of the "High Ceiling Room". In order to quantify the amount of psychological height of the ceiling, we implemented a method to adjust the height of the ceiling up or down by the subject's own manipulation.

In Experiment 1, subjects were asked to walk through six different shapes of "Leading Passage" - "going straight," "going up," "going down," "going through," "turning left," and "turning right" - to "High Ceiling Room" and asked to adjust the ceiling height of the room. The results were as follows.

- Connection or Un-connection of "Leading Passage" led to a change in the amount of psychological ceiling height perceived in the "High Ceiling Room".
- The shape of "Leading Passage" led to a change in the amount of psychological ceiling height perceived in the "High Ceiling Room".
- The amount of psychological ceiling height perceived in the "High Ceiling Room" is lower after passing through an upward "Leading Passage" than after passing through a flat "Leading Passage".
-

In Experiment 2, subjects were asked to walk through three different shapes of "Leading Passage" - "going straight," "going up," "going down," - to "High Ceiling Room" and asked to adjust the ceiling height of the room. The results were as follows.

- As in Experiment I, the amount of psychological ceiling height perceived in the "High Ceiling Room" varied depending on the shape of "Leading Passage".
- The amount of psychological ceiling height perceived in the "High Ceiling Room" is lower after passing through an upward "Leading Passage" than after passing through a downward "Leading Passage".
- When walking in an upward "Leading Passage", subjects look more upward in the environment than when walking in a downward "Leading Passage", at the point where the ceiling of the "High Ceiling Room" begins to be visible over the exit of "Leading Passage".
- When walking in a downward "Leading Passage", subjects look more upward in the environment than when walking in an upward "Leading Passage", at the exit of "Leading Passage".

In both experiments, subject tends to perceived the ceiling height of the "High Ceiling Room" higher after they walked through a flat or a downward "Leading Passage" and perceived the ceiling height of the "High Ceiling Room" lower after they walked through an upward "Leading Passage", than in the case without "Leading Passage". These results indicate that the ceiling height in the "High Ceiling Room" can be controlled by passing through the approach space with a suitable shape.

(2020年10月3日原稿受理, 2021年1月8日採用決定)