中心視の選択的制限が階段下降時の歩行速度に与える影響¹

吉岡陽介²

This study aimed to investigate the effects of selective restriction of central vision on the walking speed while descending a standard staircase. An experiment was performed by using a newly developed experimental instrument for restricting the arbitrary area of the human visual field. Subjects descended a short staircase under different visual conditions wearing the experimental instruments. The main result of the experiment was that, in the beginning area that included the first and the second steps of the staircase, the walking speeds under the visual condition that the central vision was selectively restricted were significantly slower than the walking speed under the other visual condition. The results indicated that, for walking fast through the beginning area of the staircase, the central vision has to be intact for receiving certain specific visual information from the environment.

本研究は、中心視の選択的な制限が階段下降における歩行速度に与える影響を検証しようとするものである。視野の任意の部分を遮蔽できる実験装置を開発し、この実験装置を用いて被験者の中心視を制限し、階段下降実験を実施した。実験結果より以下のことが明らかになった。平坦な廊下が前後に接続する階段の、下りはじめの2段とその手前の1mの平坦な廊下を含む「階段下りはじめ」のエリアにおいて、中心視を選択的に制限した条件における歩行速度が、中心視を制限しない他の視野条件における歩行速度に比べて、有意に遅くなっていた。すなわち、この「階段下りはじめ」のエリアを速やかに歩行するためには、中心視による視覚情報の獲得が機能していなければならないことが示された。

(キーワード：中心視，周辺視，制限視野，階段下降，歩行速度)

1. 研究背景

人間の視野機能は、その領域的特性によって「中心視」と「周辺視」に分類される¹⁾。中心視とは、視野中央の視力の良い部分で対象を捉えることであり、周辺視とは視野周辺部で環境を捉えることである。二つの視野機能を相互補完的に駆使することで、日常における情報処理活動が実現される。対象の詳細を捉える中心視と、環境のより広い範囲を捉える周辺視。人間の空間把握のメカニズムをこの二つの視野機能をとおして理解することで、安全で快適な建築空間を計画するための新しい知見を得ることができると考える。

中心視と周辺視の機能分化に関しては、これまで医学や心理学の分野において多くの基礎研究が行われてきた^{2~6)}。しかし、こうした基礎研究の多くは実験室内での視覚感度測定に留まったものであり、日常的な行為の中での視野機能を解明したものではなかった。

能動的な行為の最中に発揮される視野機能を、定量的に分析する手法として「制限視野法」がある。制限視野法では、さまざまな実験装置を用いて視野の一部をあえて遮蔽し、その状態で被験者に能動的な行為を行ってもらい、遮蔽によって生じる被験者の行動の特性を、遮蔽されていない状態での行動の特性と比較することで、遮蔽された視野の部分が本来ならば担っていたであろう役割を定量的に抽出することができる。

既往研究において我々は、視野制限を行うための実験装置を開発し、迷路や廊下、階段歩行時における中心視と周辺視の役割を明らかにした^{7~10)}。その過程で、特に探索歩行時において、中心視と周辺視が協調し機能することの重要性が示唆された⁷⁾。迷路空間のディテールを中心視で一度確認し、その後の捕捉追尾を周辺視で行っているような行動が観察されたのである。

本研究では、中心視のみを選択的に制限できる実験装置を開発し階段下降実験を行う。実験結果の定量分析によって、階段下降における中心視の重要性を明らかにし、既往研究で見出された知見の補完を試みる。

なお既往の階段研究には、下降時の歩行特性を検証対象としたものが多い^{11~13)}。階段上昇時よりも下降時の

1 受付：2015年7月10日 受理：2016年1月14日

2 千葉大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Chiba University

方が転倒や転落において深刻な事故が発生しやすいこと¹⁴⁾、火災や地震などの災害避難においては、階段下降の流動性を担保することの重要度が高いことが理由である。本研究も同じ理由から、階段下降時の歩行特性と中心視制限との関係について検証する。

2. 研究目的

本研究は、中心視による情報獲得の有無が階段下降時の歩行速度に与える影響を検証するものである。視野の任意の部分を制限できる実験装置を開発し、この実験装置を用いて、被験者の中心視を選択的に制限した階段下降実験を実施する。歩行速度の変化に加え、歩幅や頭部回転角との関連を分析することで、階段下降時における中心視の機能の解明を試みる。

3. 実験装置の開発

既往研究において我々が開発した実験装置では、眼前に直径1 mmの小さな穴を配置することで、全方位に35°強の広さの円形の視野を確保しつつ、その中で任意の視野部分を制限することができた⁷⁾。今回開発した実験装置では、既往の装置のメカニズムを解釈しなおし、垂直方向であれば150°以上の視野を確保しつつ、任意の視野部分を制限することを可能とした。

3-1. 実験装置の仕組み

実験装置の仕組みをFig. 1に示す。眼前に置かれた薄い板は、眼球の回旋点と瞳孔の直径から幾何学的に決定される配列規則に従って配置される。眼球が正面を向いていれば、周囲から眼球へ向かう光は、板と板の隙間を通して網膜へ到達する。すなわちこの状態では、板の向こう側の環境を視野全体で「見る」ことができる。この見えている範囲を「視野範囲」と定義する。

しかし視野範囲の中で、注視できるエリアは、中央部に限定される。「注視」とは、網膜上で最も視力の良い中心窩網膜において対象を捉えることである。中心窩網膜から水晶体中央へと伸ばした視線を、回旋点を中心に回転させると、放射状の配列の中央部では、向こう側まで視線を伸ばすことができる。

ただし、配列中央から外側へと視線を回転させると、板によって視線が遮られ、そのまま連続的に配列の周縁部分まで、向こう側を捉えられない状態が続く。放射状の配列が作り出す視野の中では、たしかに比較的広い「視野範囲」が確保されている。しかし、その中で、中心

図1 実験装置の仕組み

Fig. 1 Mechanism of experimental instrument.

窩網膜が活用できる範囲、「注視可能な範囲」は中央のごく狭い範囲に限定される。本研究で開発した実験装置はこの原理を応用したものである。

3-2. 実験装置の構造

実験装置は、装着者の視野状態を制御する「装置部（黒色）」と、装置部を被験者の頭部に固定する「台座部

(透明)」によって構成される (Fig. 2).

装置部には0.2 mm厚の黒色の薄い板が22枚、垂直方向に配列されている。後述するように、この配列によって、上下方向の広い視野を確保しながら、注視が可能な範囲をより狭い範囲に留めることができる。

台座部には、被験者の眼球と装置部との微細な位置調節をするため、レール状の可動部が二つ設計されている。また装置部に接合している部材には溝があり、「装置部」を設置した状態で、この溝に特定の形状の遮蔽板を嵌め込むことで、任意の視野の部分を制限することが可能となる。本研究ではこの溝に、視野中央を遮蔽する形状の遮蔽板を挿入し、装置部の効果との相乗で中心視のみを選択的に制限した視野状態を創出し、実験を行う。台座部の上部には、被験者の視野映像を記録するための小型カメラが設置されている。

図2 実験装置の外観

Fig. 2 Appearance of experimental instrument.

3-3. 実験装置の効果の検証

20代の大学院生22名 (男性14名、女性8名) を対象に実験装置による視野の特性を測定した。被験者の年齢と視力をTab. 1に示す。着座した被験者に装置を装着させ、1750 mm離れた壁面上の計測用紙にテスト指標を提示し、その判別精度から実験装置の視野特性を導出する。測定中、被験者頭部は顎台に固定されるが、眼を動かして指標を追視することは許されている。

計測用紙の中央には水平方向に1本の線分が、その水平線分を12分割するように20 cmおきに13本の鉛直線分が引かれている。各テスト指標の判別検査はこの13本の鉛直線の上で1回ずつ行い、上下の判別限界点と視点とのなす角度を計測値とする。計測前には着座した被験者の正面に、中央の鉛直線分と水平線分の交点ができるように、顎台と椅子の高さを調整した。

計測ではまずレーザーポインタを照射し、その反射光が視認できる限界域を「視野範囲」とした。続いて視力検査用のランドルト環を用いて、中心窩視力が維持できている範囲を測定し、「注視可能な範囲」とした。13本の鉛直線分上での計測値の、平均値 (Ave.) と最高値 (Max.), 最低値 (Min.) をTab. 1に記す。「視野範囲」は、各被験者とも約150度 (各被験者の平均は137.4 ~ 159.5度の間) の広さを維持している。一方「注視可能な範囲」は、「視野範囲」の中央の約11度 (各被験者の平均は9.3 ~ 12.9度) の範囲に狭められている。

続いて、「装置部」の上に中央遮蔽用の遮蔽板を挿入し、遮蔽板による制限部分の大きさをレーザーポインタ指標によって検出した。「遮蔽範囲」は約22度 (各被験

表1 実験装置による各被験者の視野状態 (平均および最大値・最小値)

Tab. 1 Visual condition of each subject in developed experimental instrument.

Subject		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Ave.
Age 年齢		24	23	27	23	24	25	23	24	22	23	22	23	25	22	23	24	22	23	23	23	24	23	23.4
Visual Acuity 両眼視力		1.2	1.5	1.0	1.2	1.5	1.2	1.0	1.2	1.2	1.5	2.0	1.2	1.5	0.9	1.0	1.2	1.5	1.2	1.2	1.5	0.9	1.5	1.3
Visible Area 視野範囲 (°)	Ave.	149.5	138.3	158.3	138.8	158.4	153.7	157.1	145.5	142.6	149.4	156.7	152.5	149.7	146.9	140.7	147.3	146.2	155.8	137.4	153.1	159.5	149.7	149.4
	Max	164.1	147.8	161.6	148.8	164.7	161.7	159.0	156.0	157.8	156.2	166.2	158.5	156.8	156.5	155.1	155.8	155.6	162.6	146.6	166.5	165.6	158.6	158.3
	Min	145.8	136.8	148.4	134.8	143.6	141.4	143.7	139.1	134.0	145.2	141.5	141.1	142.1	141.4	136.8	132.4	140.5	141.9	134.4	141.1	145.1	138.1	140.4
Gazeable Area 注視可能な範囲 (°)	Ave.	12.4	10.8	10.1	11.8	10.0	10.6	9.6	12.0	12.9	12.6	9.3	9.9	12.4	10.8	10.0	10.1	12.4	12.3	11.3	9.7	11.8	11.9	11.1
	Max	13.6	12.8	11.1	13.0	12.9	12.3	11.2	13.1	13.4	13.1	11.3	11.1	13.7	12.9	12.8	12.3	14.3	13.2	13.3	11.1	13.4	14.2	12.7
	Min	10.7	9.5	8.8	8.8	9.5	9.4	8.7	10.9	10.6	11.5	8.5	9.2	10.9	9.2	8.9	9.6	10.2	10.4	10.4	8.9	10.4	9.4	9.7
Restricted Area with Plural Sheets (°)	Ave.	23.8	21.8	23.1	20.8	22.3	20.9	21.2	21.4	21.4	20.6	23.6	21.0	22.1	20.5	23.2	23.8	23.3	21.6	22.3	21.7	22.3	21.9	22.0
	Max	24.4	25.7	24.2	22.9	25.8	24.5	24.6	23.3	23.5	24.7	25.3	23.7	23.2	24.0	24.6	24.8	24.6	22.3	24.0	25.0	24.1	25.1	24.3
	Min	20.1	19.5	20.5	19.5	20.9	20.5	20.6	20.4	19.3	19.1	20.5	19.3	19.7	19.4	19.5	20.0	20.3	19.3	19.4	21.0	20.5	20.3	20.0
Restricted Area without Plural Sheets (°)	Ave.	24.5	23.4	22.1	20.1	21.2	23.1	22.1	21.8	21.7	23.4	25.1	22.4	24.1	22.4	24.1	23.1	23.3	22.4	21.2	21.0	21.4	21.6	22.5
	Max	25.1	24.8	24.1	23.4	23.1	26.1	23.1	23.3	23.8	24.9	26.2	23.1	25.1	24.1	25.1	24.4	24.7	25.1	23.2	24.0	23.5	24.1	24.3
	Min	21.0	18.5	21.5	19.8	20.4	21.3	21.5	20.6	19.9	20.1	22.1	21.2	20.3	21.3	20.4	19.5	19.6	20.4	19.5	20.0	19.8	20.6	20.4

者の平均は20.5～23.8度)であり、「注視可能な範囲」より十分に大きく、遮蔽板が「注視可能な範囲」を完全に覆っていることが確認された。

この時、遮蔽板による帯状の遮蔽領域の上下には、視覚的には「見る」ことのできる領域が残されるが、この領域を中心視で「見る」ことはできない。再度、ランドルト環による検査を行い、「装置部」の効果によって、上下の領域において中心窩視力が維持されていないことを確認した。「装置部」と「遮蔽板」の組合せによって、中心視で対象を視ることができない領域が残されること、すなわち中心視を選択的に制限できることが実証された。この視野状態を本論では「中心視制限 (Restriction of Central Vision)」と呼ぶ。

最後に、階段下降実験で用いる視野条件の一つとして、「装置部」を置かない「遮蔽板」のみでの視野状態の計測を行い、眼前中央約22度の帯状の領域が遮蔽されていることを確認した。ただしこの状態では、「装置部」の効果がないため、「遮蔽板」によって遮蔽された帯状の領域の外側を中心視で自由に視ることができる。すなわち眼前中央に遮蔽はあるが、中心視を選択的に制限することはできていない状態である。この状態を本論では「中央遮蔽 (Central Restrict)」と呼ぶ。

本実験装置では、その根幹である「装置部」がなければ、たとえ遮蔽があっても、残されたすべての領域を自由に中心視で視ることができる。本論では、この装置部のない状態を、「遮蔽板」の有無にかかわらず、「注視可能な範囲が限定されていない (Free Fixation)」状態と表現する。逆に「装置部」が挿入されている状態は、「遮蔽板」の有無にかかわらず、「注視可能な範囲が限定されている (Fixed Fixation)」状態と表現する。なお上述の「中心視制限 (Restriction of Central Vision)」は、「装置部」と「遮蔽板」の効果の相乗、つまり「注視可能な範囲の限定 (Fixed Fixation)」と「中央遮蔽 (Central Restrict)」の掛け合せによってはじめて成立することを確認されたい。

4. 実験方法

4-1. 視野条件

本実験での視野条件は以下の4つとする。

- 1) 中心視制限条件 (Central Restrict under Fixed Fixation／以下CR-Fix)：注視可能な範囲を限定する「装置部」と中央遮蔽用の「遮蔽板」をセットした装置を装着。

注視可能な範囲が限定された状態での中央遮蔽であるため、中心視が選択的に制限されている。

- 2) 中央遮蔽条件 (Central Restrict under Free Fixation／以下CR-Free)：「装置部」を取り外し、中央遮蔽用の「遮蔽板」のみをセットした装置を装着。注視可能な範囲が限定されないため、眼球運動に応じて、遮蔽板の外側の領域を中心視で視ることができる。
- 3) 注視範囲限定条件 (No Restriction under Fixed Fixation／以下NR-Fix)：注視可能な範囲を限定する「装置部」のみを装着。広い視野範囲が確保されるが、注視可能な範囲はその中央部に限定される。
- 4) 通常視野条件 (No Restriction under Free Fixation／以下NR-Free)：「装置部」も「遮蔽板」も取り外した状態の実験装置を装着。視野を遮るものではなく、眼球運動に応じて自由な注視が可能。

4-2. 実験手順

実験装置の検証の被験者22名が、そのまま階段下降実験に参加した。本実験は千葉大学工学部生命倫理委員会の承認を受けている (承認番号21-07)。被験者には、本実験の意図を事前説明し、個人情報管理の徹底を前提に、実験参加・継続の意思を折々に確認した。

実験は、踏面300 mm、蹴上160 mm、幅1300 mm、12段の階段 (傾斜約28度) にて実施した (Fig. 3)。この階段寸法は、不特定多数が利用する公共空間¹⁵⁾を想定し、かつ永田らの一連の研究¹⁶⁻¹⁸⁾で提示された、階段下降時の危険性を最小化する安全寸法、踏面300 mm、蹴上155 mmの組合せに近似したものとして選定した。

階段手前2000 mmから歩行を開始し、階段を下降し終わったあと1500 mm歩行して終了とする。習熟効果を除くため、CR-Fix状態での階段下降にかかる時間が一定になるまで4～6回のテスト歩行を繰り返した後、前節の4つの視野条件ごとに、各1回ずつ階段下降を行った。4条件は被験者毎に入れ替え順序効果を相殺している。

被験者には実験開始時において「実験経路をなるべく速く歩いて下さい。ただし階段では手摺を使わないで下さい」と教示した。実験中は、実験経路上方に設置した7台のカメラによって定点撮影 (WorldViz：PPT-X) を行い、被験者の頭部位置やつま先の位置、頭部の横回転角などを抽出した。なお、歩行終了後にも再度視野状態の確認を行い、実験装置の装着に大きなズレが生じていないことを確認した。計測用紙中央の鉛直線における計測値が、およそ実験前の計測値の最大値と最小値の範囲にあれば許容範囲と判断している。

4-3. 計測方法

4-3-1. 経路区分

既往研究より⁹⁾、階段下降の始めや終わりなどの場面の違いによって、歩行特性に特徴があることが予想された。そこで実験経路を以下の三つに区分し (Fig. 3)、各区分での歩行特性を個別に抽出し比較することとした。まず歩行開始後、スタートから1000 mmの地点から、階段の上から1段目までのエリアを「階段下りはじめ」とする。つづいて階段の上から1段目より、階段の下から2段目までのエリアを「階段下り」とする。最後に、階段の下から2段目から、歩行終了の1000 mm手前の地点までのエリアを「階段下りおわり」とする。

4-3-2. 水平歩行速度の計測

多くの階段歩行研究では、歩行速度が、歩行困難度を評価する指標として用いられている^{12,19~22)}。本研究でも、歩行速度を歩行困難度を定量化する第一の指標として用いる。本実験では、視野の制限や遮蔽によって、歩行時の視覚情報の獲得に大きな困難が生じる。そうした困難に対応するための行動の変化は、その帰結として、歩行速度により端的に表現され则认为する。

歩行速度の計測には、既往研究によってさまざまな手法が提案されている。本研究ではFujiyamaら²³⁾による手法を参考に、以下のような、水平方向の移動速度をもとにした定量化手法を採用する。

まず、定点撮影映像より被験者の頭頂とつま先の三次元位置を読み取る。階段前後の廊下にある区分線については、被験者頭頂が区分線上を通過したタイミングを時間計測点とする。階段途中にある区分線については、区分線のある段上で左右どちらかのつま先の動きが停止した時点をも、足の裏が踏面に着地したタイミングとし、時

間計測点とする。4名の被験者において、視野が遮蔽された条件で、頭頂位置が一端区分線上を通過した後で、もう一度区分線の手前に戻ってくるような状況が発生し、頭頂位置だけでは定性的な計測できなかったためである。ただしそれ以外の被験者では、区分先手前の段に足裏が着地するタイミングと頭部中央が区分線上空を通過するタイミングはほぼ同時であった。最後に水平方向の移動距離を各経路区分の歩行所要時間で除した値を、経路区分ごとの平均歩行速度として算出する。

4-3-3. 歩幅の計測

実験経路には、階段手前のアプローチ部分や、階段下降後の平坦な経路も含まれる。こうした歩行場面においては、視野の制限による歩幅の変化の生じることが予想された。定点撮影映像より、着地時の左右のつま先の間の実長を、一歩あたりの歩幅として導き出し、各被験者の身長による正規化を行った後、比較することとした。

4-3-4. 俯角方向の頭部回転角の計測

定点撮影映像および実験装置頂部のCCDカメラの映像より、経路区分ごとの被験者の俯角方向の頭部回転角を平均化し比較する。階段を安全に歩行するためには「階段下りおわりの段」や「階段下りはじめの段」の段鼻の位置を正確に把握する必要がある。歩行者の視点を中心とした幾何学的な位置関係を考えると、同じ水平距離だけ離れた位置からこれらの段鼻を捉えようとした場合、「階段下りおわりの段」のほうが「階段下りはじめの段」より低い位置にあることになる。

特に注視範囲が固定された条件では、この「階段下りおわりの一段」を中心視で視るために、頭部を大きく下方へ回転させなければならないはずであり、計測された頭部俯角にそれぞれの経路区分において変化が生じると考えられる。

4-4. 統計分析手法

実験データの統計処理は以下の手順で行う。まず中央遮蔽および注視範囲限定を要因とした二元配置分散分析を行い、交互作用がみられた場合には、単純主効果が有意に示された比較のみTukeyによる多重比較検定の結果を拾う。有意水準はいずれも5%とする。

5. 実験の結果

5-1. 経路全体における歩行速度

経路全体の歩行速度の推移をFig. 4に示す。NR-Freeの値が最も高く、次にNR-FixとCR-Free、少し差をあげ

図3 実験経路と経路場面の区分

Fig. 3 Experimental route and divided area.

図4 経路全体における歩行速度

Fig. 4 Walking speed on all experimental route.

図5 「階段下りはじめ」の歩行速度

Fig. 5 Walking speed at "Beginning Area of Staircase".

表2 経路全体における歩行速度の分散分析結果

Tab. 2 ANOVA of walking speed on all experimental route.

	SS	df	MS	F	P-value
Central Restrict	0.225	1	0.225	39.89	0.000**
Fixed Fixation	0.193	1	0.193	42.50	0.000**
Central Restrict *Fixed Fixation	0.040	1	0.040	8.14	0.009**

てCR-Fixが検出された。分散分析より、注視範囲限定と中央遮蔽の交互作用が確認された ($p=0.009$) (Tab. 2)。中心視の選択的制限によって階段下降時の歩行速度が低下した。多重比較検定からは、CR-FixとNR-Fix、NR-FreeとCR-Freeの間に有意差 ($p<0.001$, $p=0.011$) が見出された。注視範囲限定の有無に関わらず、その視界の中央を約22度の範囲で遮蔽することで歩行速度が低下した。注視範囲限定については、CR-FixとCR-Freeの間に有意差が見出された ($p<0.001$)。その一方、NR-FixとNR-Freeの間には有意差はなかった。視界中央を約22度の範囲で遮蔽された状態では、注視範囲限定によって階段下降における歩行速度が低下した。

5-2. 経路区分ごとの歩行速度

各経路区分の歩行速度を集計結果をFigs. 5～7に示す。分散分析の結果、「階段下り」では視野条件間に有意な変化はみられなかった。それに対し、「階段下りはじめ」と「階段下りおわり」のそれぞれの経路区分では、視野条件間において有意差が認められた。以下に詳細を記述する。

5-2-1. 「階段下りはじめ」における歩行速度

「階段下りはじめ」における歩行速度の推移をFig. 5に示す。経路全体と同じく、NR-Freeの値が最も高く、そのあとにNR-Fix、CR-Free、少し差をあけてCR-Fixの値が検出された。分散分析の結果、注視範囲限定と中央遮

表3 「階段下りはじめ」の歩行速度の分散分析結果

Tab. 3 ANOVA of walking speed at "Beginning Area of Staircase".

	SS	df	MS	F	P-value
Central Restrict	0.479	1	0.479	37.28	0.000**
Fixed Fixation	0.305	1	0.305	18.19	0.000**
Central Restrict *Fixed Fixation	0.058	1	0.058	4.96	0.037*

図6 「階段下り」の歩行速度

Fig. 6 Walking speed at "Middle Area of Staircase".

蔽の交互作用が確認された ($p=0.037$) (Tab. 3)。中心視の選択的制限によって、「階段下りはじめ」における歩行速度が低下することがわかった。

多重比較からは、NR-FreeとCR-Freeの間に有意差が認められた ($p<0.001$)。注視範囲の限定がない状態で、その視界中央を遮蔽されると、「階段下りはじめ」の歩行速度が低下することがわかった。またCR-FixとCR-Freeの間、NR-FixとNR-Freeの間にも有意差が見出された ($p<0.001$, $p<0.001$)。中央遮蔽の有無に関わらず、注視範囲の限定そのものが、「階段下りはじめ」における歩行速度を低下させている。

5-2-2. 「階段下りおわり」における歩行速度

「階段下りおわり」での歩行速度の推移をFig. 7に示

図7 「階段下りおわり」の歩行速度

Fig. 7 Walking speed at "End Area of Staircase".

図8 「階段下りはじめ」の歩幅

Fig. 8 Walking stride at "Beginning Area of Staircase".

表4 「階段下りおわり」の歩行速度の分散分析結果

Tab. 4 ANOVA of walking speed at "End Area of Staircase".

	SS	df	MS	F	P-value
Central Restrict	0.335	1	0.335	21.57	0.000**
Fixed Fixation	0.564	1	0.564	20.28	0.000**
Central Restrict *Fixed Fixation	0.011	1	0.011	1.70	0.206

す。これまでと同様、NR-Freeの値が最も高く、CR-Fixの値が最も低い。分散分析では、中央遮蔽と注視範囲限定の主効果は確認されたが、交互作用は確認されなかった (Tab. 4)。すなわち「階段下りおわり」では、中心視の選択的制限による歩行速度の低下は生じていない。

多重比較からは、NR-Fix とCR-Fixの間、およびNR-FreeとCR-Freeの間に有意な差が見出された ($p < 0.001$, $p < 0.001$)。「階段下りおわり」では、注視範囲限定の有無に関わらず、視界の中央遮蔽だけでも、歩行速度が有意に低下している。またNR-FreeとNR-Fixの間にも有意差が見出されており ($p < 0.001$)、「階段下りおわり」では、中央遮蔽がない場合にのみ、注視可能な範囲を限定することによる歩行速度の有意な低下が生じることがわかった。

5-3. 歩幅

経路区分ごとの歩幅を集計し、視野条件を要因とする二元配置分散分析を行った。その結果、全ての経路区分において統計的に有意な変化はみられなかった。「階段下りはじめ」における歩幅の推移をFig. 8に示す。どの条件間にも全く変化を見出すことはできない (Tab. 5)。

5-4. 頭部俯角

5-4-1. 「階段下りはじめ」における頭部俯角

「階段下りはじめ」における頭部俯角について視野条

表5 「階段下りはじめ」の歩幅の分散分析結果

Tab. 5 ANOVA of walking stride at "Beginning Area of Staircase".

	SS	df	MS	F	P-value
Central Restrict	0.0001	1	0.0001	3.472	0.077
Fixed Fixation	0.0002	1	0.0002	1.406	0.249
Central Restrict *Fixed Fixation	0.0000	1	0.0000	0.140	0.712

図9 「階段下りはじめ」の頭部俯角

Fig. 9 head roll angle at "Beginning Area of Staircase".

表6 「階段下りはじめ」の頭部俯角の分散分析結果

Tab. 6 ANOVA of head roll angle at "End Area of Staircase".

	SS	df	MS	F	P-value
Central Restrict	36.79	1	36.79	7.14	0.014*
Fixed Fixation	28.75	1	28.75	3.76	0.066
Central Restrict *Fixed Fixation	52.39	1	52.39	10.32	0.004**

件ごとの被験者平均をFig. 9に示す。平均値の比較では、CR-Freeの値が、他の視野条件の値に比べて低く検出された。分散分析より、注視範囲限定と中央遮蔽の交互作用が確認された ($p = 0.004$) (Tab. 6)。平均値の推移より、この交互作用は、視野中央が「遮蔽される」とこと、注

図10 「階段下り」の頭部俯角

Fig. 10 Head roll angle at "Middle area of Staircase".

表7 「階段下り」の頭部俯角の分散分析結果

Tab. 7 ANOVA of head roll angle on "Middle Area of Staircase".

	SS	df	MS	F	P-value
Central Restrict	201.6	1	201.6	13.29	0.002**
Fixed Fixation	176.4	1	176.4	12.45	0.002**
Central Restrict *Fixed Fixation	202.2	1	202.2	8.00	0.010*

視範囲が「限定されない」こととの相乗効果を示していることがわかる。

多重比較検定からも、CR-Freeの値が、NR-FreeおよびCR-Fixの値に比べて有意に低い ($p < 0.001$, $p < 0.001$)。以上より、「階段下りはじめ」では、注視範囲が限定されていない状態で、その視界の中央を約22度の範囲で遮蔽されると、他の視野条件に比べてより高い位置へ頭部を向けながら歩行するようになる。

5-4-2. 「階段下り」における頭部俯角

「階段下り」における頭部俯角について、被験者平均の推移をFig. 10に示す。NR-Fixの値が他に比べて高く検出された。分散分析より、注視範囲限定と中央遮蔽との交互作用が確認された ($p = 0.010$) (Tab. 7)。この結果は、視野中央が「遮蔽されない」ことと、注視範囲が「限定される」ことの交互作用によって、「階段下り」の頭部俯角が有意に変化することを示す。

多重比較検定からも、NR-Fixの値が、NR-FreeおよびCR-Fixの値に比べて有意に低い ($p < 0.001$, $p < 0.001$)。「階段下り」では、注視範囲が限定され、かつその視界が遮蔽されないとき、他の視野条件に比べより低い位置へ頭部を向けながら歩行するようになる。

5-4-3. 「階段下りおわり」における頭部俯角

「階段下りおわり」における頭部俯角について被験者平均の推移をFig. 11に示す。「階段下り」での頭部俯角の推移と同じく、NR-Fixの値が、他の視野条件での値に

図11 「階段下りおわり」の頭部俯角

Fig. 11 Head roll angle at "End area of Staircase".

表8 「階段下りおわり」の頭部俯角の分散分析結果

Tab. 8 ANOVA of head roll angle at "End Area of Staircase".

	SS	df	MS	F	P-value
Central Restrict	11.78	1	11.78	6.11	0.022*
Fixed Fixation	11.06	1	11.06	5.81	0.025*
Central Restrict *Fixed Fixation	32.40	1	32.40	9.58	0.005**

比べて高く検出された。

分散分析の結果、注視範囲限定と中央遮蔽との交互作用が確認された ($p = 0.005$) (Tab. 8)。平均値の推移より、この交互作用は、視野中央が「遮蔽されない」ことと、注視範囲が「限定される」こととの相乗効果によってもたらされているものと理解できる。

また多重比較検定からは、NR-Fixでの頭部俯角が、NR-FreeおよびCR-Fixでの頭部俯角に比べて有意に小さい ($p < 0.001$, $p < 0.001$)。「階段下り」と同じく「階段下りおわり」においても、注視範囲が限定され、かつその視界が遮蔽されないとき、他の視野条件に比べてより低い位置へ頭部を向けながら歩行するようになる。

6. 考 察

6-1. 実験装置装着による負荷

実験装置による頭部負荷や、装置の構造上生じてしまう周辺部の視界遮蔽など、装置装着そのものの影響による歩行速度の変化について検証する。本実験の階段傾斜が約28度であることから、階段下りの歩行速度を扱った既往研究の中から、同程度の傾斜の階段での検証を行っている以下の2件の研究を引用し比較する。

Fujiyamaら²⁴⁾は、傾斜30.5度の階段下降時において、0.74 m/s (若年男性で0.72 m/s, 若年女性で0.76 m/s) の

水平歩行速度を抽出している。Fruin²⁵⁾は、傾斜27度の階段下降において若年男性で0.81 m/s、若年女性で0.65 m/sの水平歩行速度を抽出している。両研究とも、同じ階段での高齢者のデータも提示しているが、本実験の被験者は全て20代であることから比較対象としていない。また両研究とも階段下降の前後の平面歩行での歩行速度は計上していない。したがって本実験についても、下りはじめや下りおわりを除いた「階段下り」でのNR-Freeの水平歩行速度0.78 m/sを代表値として、2つの研究の水平歩行速度と比較する。

Fruinの若年女性のデータとはやや隔たりがあるが、その他のデータとは概ね同等の値が出ている。標準偏差についても本研究では0.173であったのに対しFujiyamaでは0.17を示しておりほぼ同値である。またFujiyamaらは同じ研究の中で傾斜24.6度の階段下降における水平歩行速度0.87m/sも示している。本研究の傾斜28度の階段下降における水平歩行速度0.78m/sは、Fujiyamaらによる傾斜24.6度と傾斜30.5度のデータ間を結ぶ線形推移の中にちょうど位置づけられる。Fruinらのデータも若年男性の結果だけを見れば同じ線形推移の中に位置づけられる。以上より本実験のNR-Freeの視野状態、すなわち中央遮蔽も注視範囲固定もない状態では、実験装置を装着することのみによる負担は、生じていないものとして検証できると考える。

なおFruinによる計測結果は、周囲に歩行者がいる状況での計測であり、その条件の違いが、若年女性における歩行速度の低下を招いていることが考えられる。ただし本研究の実験結果からは、いずれの視野条件、経路区分においても、男女の性別による有意な差は見出されなかった。したがって本研究においては男女による差はなかったものとして以降の考察を続ける。

6-2. 視野条件と水平歩行速度の変化

実験結果より、中央遮蔽と注視範囲限定の相乗効果、すなわち中心視の選択的な制限によって、「階段下りはじめ」における歩行速度が低下することがわかった。「階段下りはじめ」を速やかに歩行するためには、中心視が機能している必要があるといえる。逆に「階段下りおわり」では相乗効果はないものの、注視範囲限定と中央遮蔽の各々に主効果が確認された。「階段下りおわり」では、自由に注視できること、視野中央に遮蔽のないことが歩行速度を維持する要件といえる。

「階段下りはじめ」においても、中央遮蔽と注視範囲限定、それぞれの単純主効果が確認されているが、多重比較検定では、NR-FixとCR-Fixの間に有意差が見出され

ていない。中央遮蔽や注視範囲限定の付加が個別に歩行速度を低下させる効果を持つか否かは、付加される前の視野状態に依存するといえる。

既往研究¹⁰⁾において我々は、「階段下りはじめ」と、「階段下りおわり」において特に周辺視による視覚情報の獲得が重要であることを示した。本実験結果より、特に「階段下りはじめ」において、周辺視だけでなく、中心視による情報獲得がともわなければ速やかな歩行ができなことを示すことができた。

Sørensenら²⁶⁾は、避難における視覚障害者の階段下降歩行速度を詳細に検証し、最高片眼視力が0.01以下では、健常者に比べて階段下降時の歩行速度が低下するとした。視野欠損によって階段下降時の歩行速度が低下することについては、本実験の結果とも共通する。

ただしSørensenらの検証では、階段下降速度について、視力が0.01以下において0.74 m/s、視力が0.001以下において0.71 m/sの値が検出されている。歩行速度の計測方法が明示されていないが、この値が本研究と同様の計測方法による水平歩行速度であるとするとも明らかに速い。Sørensen自身も、実験で使用した階段が、被験者が日頃使用している慣れ親しんだ階段であったことをその理由に挙げており、避難時を想定するなら、不慣れな環境での追加検証が必要としている。本実験では、実験前にCR-Fix状態への習熟期間を設けてはいるが、実験としては1つの視野条件について1度だけ階段下降をおこなった。さらに試行回数を増やせば、被験者が視野状態に慣れるにしたがって、視覚に頼らない歩行の方略を獲得し、歩行速度や頭部俯角などの歩行特性が変容する可能性はある。

またSørensenらは最高片眼視力が0.01の弱視者と、0.001以下の視覚障害者の間に歩行速度の差はないとした。この結果には若干の疑義が残る。視覚障害者の障害の度合いを、最高視力のみで表現するのは適当ではない。視力に加え、個々の視野欠損の位置や大きさを考慮して区分すれば結果は異なったのではないか。

ただこの問題は、視覚障害者の環境行動を検証する上で避けては通れないものである。個々人の視野欠損の位置野大きさを測定することは可能だが、まったく同じ視野欠損を抱えた被験者を見つけ出し環境行動について統計的な検証を行うことは不可能に近い。

本研究で開発した実験装置では、選択的に視野の一部を制限できる。同じ視野欠損を再現した複数の被験者の行動を観察することで、視野欠損時の環境行動について量的な検証を行うことができる。今後、中央遮蔽の大きさを変数とした検証を追加したい。

6-3. 歩幅の変化と水平歩行速度

実験結果より、「階段下りはじめ」では、中心視の選択的制限によって歩行速度は低下するものの、歩幅に有意な変化はないことがわかった。すなわち中心視制限下において被験者は、歩幅を変えずに、ゆっくりと足を前に出すような行動をとっていることがわかる。

我々の既往研究⁹⁾では、周辺視制限を伴う視野狭窄によって、階段下りはじめの歩行速度が低下すると同時に歩幅も小さくなることが示されている。身体と階段との位置関係を把握するために、すり足で、足裏の感覚で階段の段鼻の位置を確かめようとする行為も観察されており、本来ならば周辺視でおこなうべき環境情報の獲得が不全になったためと考えられた。本実験では、中心視の選択的制限では、そのような状況は生じていない。身体と階段との位置関係の把握には、中心視が機能している必要はないことが示唆される。

6-4. 頭部俯角の変化と水平歩行速度

Zietzら²⁷⁾は、階段歩行における注視特性を分析し、若年層では、2段から4段先までの段を頻繁に注視しながら階段下降するとした。本実験では「階段下り」と「階段下りおわり」において、NR-Fixの頭部俯角が有意に増加している。NR-Fixでは注視範囲が視野中央に限定されるため、2段先や4段先を注視しようすると、より低い位置へと頭部自体を傾けなければならない。結果はこの状況を反映したものと考えられる。さらに「階段下りおわり」におけるNR-Fixの歩行速度は、NR-Freeより低下している。注視に伴う俯角方向への頭部回転が、歩行速度に影響することが推察される。ただしもう一方の、「階段下り」におけるNR-Fixの歩行速度は低下していないため、この推察は結論としては保留したい。逆にCR-Fixにおいては、顕著な頭部回転の増減はないのにも関わらず、この2つの歩行場面における歩行速度が他に比べ有意に低下している。この結果については以下のように考察したい。

先のZietzら²⁷⁾の結果は、実際に自分が足を置いている0段目や1段目は注視されない傾向にあることも示している。Patla²⁸⁾も、障害物回避において健常者は下方を注視する傾向にあるとしたが、障害物に対する注視は、障害物を超える前に終了し、実際に超えるときは全く注視しないとした。我々の既往研究⁹⁾においても、階段下りの一段目への注視は、階段を下りはじめの数歩手前では既に終了しており、その後の身体と階段との位置関係は、周辺視によって捕捉されていることが示唆された。本実

験においても、最も傾いている「階段下り」における頭部俯角でも、その平均は20～30度の間にある。注視範囲を限定しない条件では、被験者がどこを注視しているかは推測できないが、階段傾斜が28度であることから、足元直下のような位置への注視が頻繁に行われているとは考えにくい。しかし、ここで重要なのは、実際に足を置くときには注視されていない足元の階段も、足を置くその数歩手前で必ず、中心視を用いて注視されているということである。

CR-Fixでは、どの時点でも階段の詳細を中心視で把握することができない。中心視での把握を諦めているがゆえに、被験者は俯角方向への余計な頭部回転をせず、残された周辺視によって階段の位置をなんとか捉えようとする。ただ周辺視だけでは視覚解像度が足りず、階段がどのような階段であるかの判別ができない。この不全が歩行速度の低下を生じさせているのではないだろうか。階段下降時には、周辺視によって階段の位置を捕捉する以前に、中心視によってその詳細を把握しておく必要のあることが示唆される。

なお「階段下りはじめ」におけるCR-Freeの頭部俯角の減少については、頭部をやや上向きにして、中央遮蔽の下から、斜交いに環境の下方の情報を注視しようとした結果であると考えられる。

7. 結 論

本研究では、中心視を選択的に制限することができる実験装置を用いて階段下降実験をおこない、中心視による情報獲得の有無が階段下降時の歩行特性に与える影響を検証した。その結果、特に「階段下りはじめ」において、中心視の選択的な制限が顕著な歩行速度の低下をもたらすことが明らかとなった。この知見は中心視野欠損のある弱視者の混在を想定した建築計画、特に中規模歩行空間における群衆流動の予測、高層建築における避難所用時間の想定や、踊場などの下りはじめのある空間の設計に援用できると考える。

今後は、実験装置上部に搭載されたカメラによる視野映像の比較分析を追加し、それぞれの歩行場面でどのような環境情報を中心視で捉えているのかについて詳細な検討を加えたい。なお本研究で開発された実験装置は、中心視以外の部分も選択的に制限することができる。また白内障のようなぼやけた視野欠損の状況も再現できる。視野欠損のある弱視者が使用する建築空間や日用品の評価検証への活用が期待できる。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 (B)「探索歩行時の空間把握における中心視と周辺視の協応メカニズムの解明」(代表: 吉岡陽介, H26 ~ 28, 課題番号26289210) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Polyak SL: The retina, University of Chicago Press, Chicago, 1941
- 2) Maunsell JH, Newsome WT: Visual processing in monkey extrastriate cortex, Annual review of neuroscience, 10, 363-401, 1987
- 3) Previc FH: Functional specialization in the lower and upper visual fields in humans: Its ecological origins and neurophysiological implications, Behavioral and Brain Sciences, 13 (03), 519-542, 1990
- 4) Bernard J-B, Kumar G, et al: The effect of letter-stroke boldness on reading speed in central and peripheral vision, Vision research, 84, 33-42, 2013
- 5) Amblard B, Carblanc A: Role of foveal and peripheral visual information in maintenance of postural equilibrium in man, Perceptual and motor skills, 51 (3), 903-912, 1980
- 6) Mateeff S, Gourevich A: Peripheral vision and perceived visual direction, Biological cybernetics, 49 (2), 111-118, 1983
- 7) 吉岡陽介, 一色高志, 他: 探索歩行時にみられる特徴的行動と中心視および周辺視, 人間工学, 39 (1), 9-15, 2003
- 8) 吉岡陽介, 一色高志, 他: 迷路内探索歩行において周辺視が果たす役割, 人間工学, 39 (1), 1-8, 2003
- 9) 吉岡陽介, 岡崎甚幸: 廊下および階段歩行時に活用されている視野範囲, 人間工学, 38 (2), 104-111, 2002
- 10) 黒岩将人, 岡崎甚幸, 他: 視野制限下と通常視野での注視行動の比較: 廊下および階段の歩行時において, 人間工学, 37 (1), 29-40, 2001
- 11) 大西明宏: 歩行速度の違いが階段降段時の体幹前屈運動に与える影響, 労働安全衛生研究, 1 (3), 245-249, 2008
- 12) 佐々木大輔, 柳瀬亮太: 下り歩行における勾配と歩行速度に関する研究ー踏面・蹴上寸法と階段歩行時の印象評価との関係(その2), 日本建築学会計画系論文集, 76 (662), 747-754, 2011
- 13) 矢嶋雅倫, 佐野友紀, 他: 高層建築物避難訓練実態から見た階段室内での避難者の密度と歩行速度の関係および合流比, 日本建築学会環境系論文集, 80 (710), 315-322, 2015
- 14) Templer J, Archea J, et al: Study of factors associated with risk of work-related stairway falls, Journal of Safety Research, 16 (4), 183-196, 1985
- 15) 日本建築学会編: 建築設計資料集成: 人間, 丸善, 2003
- 16) 永田久雄: 階段からの転落要因に関する基礎的な考察: 階段の安全性からみた踏面・蹴上寸法の評価に関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 439, 73-80, 1992
- 17) 永田久雄: 視野に基づく踏面・蹴上寸法の検討: 階段の安全性からみた踏面・蹴上寸法の評価に関する研究 その2, 日本建築学会計画系論文集, 444, 61-66, 1993
- 18) 永田久雄: 主観的評価に基づく踏面・蹴上寸法の検討: 階段の安全性からみた踏面・蹴上寸法の評価に関する研究 その3, 日本建築学会計画系論文集, 456, 145-152, 1994
- 19) 伊藤納奈, 福田忠彦: 歩行時の下方視覚情報への依存における加齢効果: 眼球運動の時系列的变化: 眼球運動の時系列的变化, 人間工学, 40 (5), 239-247, 2004
- 20) Shah J, Joshi G, et al: Walking Speed of Pedestrian on Stairways at Intercity Railway Station in, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 9, 2013
- 21) Hamel KA., Cavanagh PR: Stair Performance in People Aged 75 and Older, Journal of the American Geriatrics Society, 52 (4), 563-567, 2004
- 22) Hermodsson Y, Ekdahl C, et al: Gait in male trans-tibial amputees: A comparative study with healthy subjects in relation to walking speed, Prosthetics and Orthotics International, 18 (2), 68-77, 1994
- 23) Fujiyama T, Tyler N: Free Walking Speeds on Stairs: Effects of Stair Gradients and Obesity of Pedestrians, Pedestrian and Evacuation Dynamics, 95-106, 2011
- 24) Fujiyama T, Tyler N: An explicit study on walking speeds of pedestrians on stairs, Procs 10th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled People, 2004
- 25) Fruin JJ: Pedestrian planning and design, Metropolitan association of urban designers and environmental planners, 1971
- 26) Sørensen JG, Dederichs AS: Evacuation characteristics of visually impaired people - a qualitative and quantitative study, Fire and Materials, 39 (4), 385-395, 2015
- 27) Zietz D, Hollands M a.: Gaze behavior of young and older adults during stair walking., Journal of motor behavior, 41 (4), 357-365, 2009
- 28) Patla AE, Vickers JN: Where and when do we look as we approach and step over an obstacle in the travel path?, Neuroreport, 8 (17), 3661-5, 1997

著者情報

吉岡陽介 (よしおかようすけ, 正会員, 連絡著者)
1999年京都大学工学部卒. 博士 (工学). 2003年より千葉大学大学院工学研究科助教. 専門領域: 建築計画, 建築人間工学ほか.
連絡先: yoshioka.yohsuke@faculty.chiba-u.jp