踏切長・鳴動状態・混雑状態が踏切横断時の歩行速度に与える影響¹

鈴木大輔², 遠藤広晴², 斎藤綾乃², 秋保直弘², 水上直樹²

This study aims to clarify the effects of length, warning, and congestion on the walking velocity of pedestrians at railroad crossings. Video recordings of 13,386 pedestrians were made at railroad crossings and their walking velocities were calculated. Multiple regression analyses were conducted with the mean and standard deviation of the pedestrians' walking velocity set as the objective variable. The explanatory variables in this study were the length, warning, and congestion at the railroad crossing. Among the explanatory variables that influenced the mean of walking velocity, warning of railroad crossing had the greatest influence. With all other variables being constant, the mean of walking velocity increased by 0.541 m/s when pedestrians entered the railroad crossing after the railroad crossing rod began falling. Among the explanatory variables that influenced the standard deviation of walking velocity, the congestion had the largest influence. With all other variables being constant, the standard deviation of walking velocity decreased by 0.159 m/s when the congestion increased by 1.0 person/m².

踏切長、鳴動状態、混雑状態が踏切横断時の歩行速度に与える影響を定量的に明らかにすることを目的とした。踏切内の通行状況をビデオカメラで撮影し、13,386名の歩行速度を計測した。歩行速度の平均値および標準偏差を目的変数として、踏切長、鳴動状態（踏切の鳴動および遮断の状態と歩行者が踏切に進入するタイミングの関係）、混雑状態（歩行者の密度）を説明変数とした重回帰分析を行った。その結果、歩行速度の平均値に影響を与える要因の中で、遮断桿が降下を開始した後に進入することの影響が最も大きかった。他の変数を一定にした場合、踏切を渡りきるまで鳴動しない状態と比較して、遮断桿が降下を開始した後に踏切に進入すると、歩行速度の平均値は0.541 m/s速くなった。また、歩行速度の標準偏差に影響を与える要因の中で、歩行者の密度の影響が最も大きかった。他の変数を一定にした場合、密度が1.0人/m²高くなると、歩行速度の標準偏差は0.159 m/s小さくなった。

（キーワード：踏切長、鳴動状態、混雑状態、歩行速度、重回帰分析）

1. はじめに

1-1. 背景と目的

踏切事故の原因究明と再発防止のために国土交通省が設置した「高齢者等による踏切事故防止対策検討会」の報告¹⁾によると、2013年度の踏切事故死亡者に占める歩行者の割合は約7割で、そのうち約4割は65歳以上の高齢者であった。その原因として、歩行速度が遅いことや自動車とすれ違う際に歩行を中止してしまうこと等が挙げられた。高齢者の歩行速度については数多くの研究が報告されている。溝端²⁾は、1,280名の歩行速度を計測し、

36～59歳では平均1.24 m/s（標準偏差0.23 m/s）、75歳以上では平均1.03 m/s（標準偏差0.23 m/s）であったと報告している。また、Lordら³⁾は、183名の女性の歩行速度を計測し、40歳代では平均1.29 m/s（標準偏差0.12 m/s）、70～74歳では平均1.07 m/s（標準偏差0.17 m/s）、75～79歳では平均1.01 m/s（標準偏差0.19 m/s）であることを示した。さらに、Bohannon⁴⁾は、237名の歩行速度を調査し、性別、年代別の標準歩行速度および最高歩行速度を計測した。その結果、例えば男性の標準歩行速度において40歳代では平均1.46 m/s（標準偏差0.16 m/s）、70歳代では平均1.33 m/s（標準偏差0.20 m/s）であることを示した。このように、高齢者は他の年代より歩行速度が遅い傾向である。踏切を安全に渡りきるためには、歩行速度が遅いことは一つの大きな問題であり、踏切横断時の歩行速度に影響を与える要因を知ることが、踏切の安全性向上に極めて重要である。

1 受付：2018年7月2日 受理：2019年5月14日

2 公益財団法人鉄道総合技術研究所
Railway Technical Research Institute

踏切での人間の行動の研究については、主に自動車ドライバーと歩行者の報告に分けられる。まず、自動車ドライバーについて、佐藤ら^{5,6)}は、踏切前での一旦停止義務を解除した際、仮に先行車が踏切を超えた地点で停止した場合にどの程度トリコ（踏切先での先行車の停止等によるスペースの無さから自車が踏切内に停滞してしまう状況）が発生するのかを評価した。また、松本ら⁷⁾は、自動車ドライバーの横断直前における一旦停止の有無が安全性に与える影響を評価した。さらに、Tenkinkら⁸⁾は、踏切手前の警告灯の種類による自動車ドライバーの運転行動の違いを調査した。Lennéら⁹⁾は、停止標識、警告灯、交通信号が設置された踏切において、自動車ドライバーの運転行動を比較した。次に、歩行者について、福田¹⁰⁾は、リスクテイキング行動を生じさせる警報時間の影響を明らかにするために、警報が鳴り始めてから渡り始めた歩行者等の多さ（横断実行率）を1時間の合計警報時間が長い朝時間帯と合計警報時間が短い昼時間帯で比較した。また、Lobbら¹¹⁾は、踏切における不法な横断を防止するためのポスターや警告サインの効果を評価した。さらに、Khattakら¹²⁾は、踏切における歩行者と自転車の交通違反について調査した。このように踏切における自動車ドライバーの運転行動や歩行者のリスクテイキング行動等は報告されているが、踏切横断時の歩行速度に影響を与える要因については検討されてこなかった。

筆者らは踏切における歩行速度の実態を把握するために基礎的な検討を進めてきた。まず、鈴木ら¹³⁾は、東京都内3箇所の踏切において2,854名の歩行者を対象に、踏切に進入する際の踏切の鳴動状態（踏切の鳴動および遮断の状態と歩行者が踏切に進入するタイミングの関係）が歩行速度に与える影響を調査した。その結果、鳴動後に進入した場合は歩行速度が速く、ばらつきが大きかった。また、鈴木ら¹⁴⁾は、東京都内3箇所の踏切において4,726名の歩行者を対象に、踏切内の混雑状態（歩行者の密度）が歩行速度に与える影響を調査した。その結果、歩行者の密度が高いと歩行速度は遅かった。これらの研究では、鳴動状態および混雑状態と歩行速度の関連性は示されたものの、それらの影響の定量化には至っていない。

そこで本研究では、踏切長、鳴動状態、混雑状態が踏切横断時の歩行速度に与える影響を定量的に明らかにすることを目的とした。

1-2. 先行研究と本研究の関連

道路交通分野での歩行速度に関する先行研究を参考に、踏切において歩行速度に影響を与える要因について検討する。道路交通分野では日常の歩行速度特性の

研究が行われてきた。交通工学ハンドブック¹⁵⁾によると、通勤中の歩行速度の平均値は1.54 m/s（標準偏差0.18 m/s）、買い物中の歩行速度の平均値は1.06 m/s（標準偏差0.19 m/s）である。また、Transportation and traffic engineering handbook¹⁶⁾によると、成人の歩行速度の平均値は約1.4 m/sである。

歩行者の横断行動を考慮した信号現示方式や横断速度に応じた青信号点灯時間の設定について検討するために、横断歩道における歩行速度特性に関する研究が数多く報告されている。まず、横断歩道長の影響について、斉藤ら¹⁷⁾は、東京都内の35箇所の横断歩道において12,668名の歩行者を対象に歩行速度を計測した。各横断歩道における平均歩行速度を目的変数とし、横断歩道長を説明変数とした回帰分析の結果、横断歩道長が5 m長くなると平均歩行速度は約0.05 m/s速くなることを示した。

次に、青信号の点滅の影響について、張ら¹⁸⁾は、名古屋市内8箇所の横断歩道において6,821名の歩行者を対象に歩行速度モデルを構築し、信号現示が歩行速度分布に及ぼす影響を調査した。その結果、青信号点滅後に横断を開始した歩行者は青信号点灯中に横断を開始した歩行者より速度が速く、そのばらつきが大きかった。また、矢野¹⁹⁾は、東京都内3箇所の横断歩道において4,333名の歩行者を対象に、横断途中で信号が青信号点滅や赤信号に切り替わった場合の横断歩行者の速度変化について調査した。その結果、残りの横断距離が長くない場合、横断途中で信号が青信号点滅や赤信号に切り替わっても歩行速度はあまり上昇しなかった。一方で、信号切り替わり後の残りの横断距離が20 mを超えるような長い場合、歩行速度は上昇する傾向であった。同様に、矢野²⁰⁾は、東京都内5箇所の横断歩道において2,686名の歩行者を対象に、青信号点灯が始まってからの横断タイミングに着目し、横断歩道長と横断速度の関係を調査した。その結果、横断歩道が長く横断開始タイミングが遅い歩行者ほど横断速度が高い傾向であった。さらに、Lamら²¹⁾は、香港の都市部において1,383名の歩行者を対象に、信号と歩行速度の関係を調査した。その結果、信号のある横断歩道では信号のない横断歩道と比較して歩行速度が速く、特に青信号点滅後は速く歩くことを示した。

最後に、歩行者の密度の影響については、歩道や地下道での研究が報告されている。毛利ら²²⁾は、大阪市内6箇所の歩道および地下道において、通勤時に任意抽出した50名の歩行者を対象に、歩行者密度と歩行速度の関係を調査した。歩行速度を目的変数とし、歩行者密度を説明変数とする回帰分析の結果、歩行者密度が1.5人/m²未満の場合、密度が1.0人/m²増えると歩行速度

が0.204 m/s遅くなること、密度が1.5人/m²以上になると、歩行速度はいったん急激に低下するが、その後はまた緩やかに低下していくことを示した。また、高宮ら²³⁾は、歩行者交通量の比較的多い全国75箇所の歩道で調査した結果を用いて、歩行者密度と歩行速度の関係を分析した。歩行速度を目的変数とし、歩行者密度を説明変数とする回帰分析の結果、歩行者密度が1.0人/m²増えると歩行速度は0.21~0.23 m/s遅くなった。さらに、Polusら²⁴⁾は、イスラエルのハイファにおいて4,106名の歩行者を対象に、歩行者密度と歩行速度の関係を分析した。歩行速度を目的変数とし、歩行者密度を説明変数とする回帰分析の結果、歩行者密度が1.0人/m²増えると歩行速度は0.27 m/s遅くなった。

以上のように、歩行速度特性については道路交通分野で詳細に研究されており、歩行速度に影響を与える要因についても検討されている。

ここで道路交通と踏切を比較すると、以下のような違いが挙げられる。まず、赤信号や踏切の遮断を予告する際に、横断歩道では青信号が点滅するのみであるのに対して踏切では警報が鳴動するため、急いで渡り切ろうとするといった歩行者の心理に影響を与える可能性がある。また、横断歩道では赤信号になる際に物理的な遮断はないのに対して踏切では遮断桿が降下してくるため、遮断桿の降下が完了する前に通り過ぎようとするといった歩行者の行動に影響を与える可能性がある。さらに、横断歩道では一定間隔で青信号になるのに対して踏切では遮断されている時間が長くなることがあるため、多数の歩行者が一斉に横断を開始し歩行者密度が極端に高くなる可能性がある。このような違いが歩行速度に影響を与えることが考えられることから、道路交通分野の知見をそのまま踏切に適用可能であるかどうかは不明である。

そこで本研究では、踏切横断時の歩行速度に影響を与える要因について検討するために、踏切長、鳴動状態、混雑状態と歩行速度の平均値および標準偏差との関係式

を重回帰分析で推定し、それらの影響を道路交通分野の先行研究と比較し考察した。

2. 方 法

踏切内の歩行者の実態を把握するため、踏切長の異なる東京都内4箇所の踏切をビデオカメラで撮影した。撮影にはビューポール（株式会社道路計画製）を用いた。ビューポールとは、ポールの先端にカメラを搭載した高所撮影システムである（図1）。踏切付近の照明柱等に設置し高所から踏切を撮影した。なお、踏切の撮影においては鉄道会社の許可を取るとともに、踏切の入口付近に本研究の目的とデータの取り扱い等についての文書を掲示し、倫理的な配慮を行ったうえで調査を実施した。

2-1. 調査対象踏切

多様な属性の歩行者を調査するために駅付近で交通量の多い踏切を選定した。車道は2車線、歩道は左右両側が色分けされている踏切とした。調査対象踏切の概要を表1に示す。

歩行者の属性が通勤・通学者に偏らないようにラッシュ時間帯を避け、昼（12：00~13：00）と夕方（16：00~17：00）を分析対象時間とした。なお、予備調査において一定時間の全歩行者の歩行速度を計測した結果、踏切鳴動時のサンプルが少なかったので、鳴動時のサンプル

図1 高所撮影システム（株式会社道路計画提供）

Fig. 1 Filming system on high place.

表1 調査対象踏切の概要と分析対象時間

Tab. 1 Outline of railroad crossing and analysis time.

	A踏切	B踏切	C踏切	D踏切
横断線数（本）	2	4	4	5
踏切長（m）	9.2	13.5	17.0	24.6
踏切幅（m）	8.6	9.0	9.8	8.2
交通量（人／日）	9,948	5,074	11,155	5,663
分析対象時間	2016年1月14日（木） 12：00~13：00 16：00~17：00 鳴動時間帯	2016年1月14日（木） 12：00~13：00 16：00~17：00 鳴動時間帯	2015年9月3日（木） 12：00~13：00 16：00~17：00 鳴動時間帯	2016年2月25日（木） 12：00~13：00 16：00~17：00 鳴動時間帯

を増やすために上記時間帯以外で踏切が鳴動した時間をピックアップし、その時間の歩行速度も計測した。分析対象時間を表1に併記した。分析対象時間の天候は晴れもしくは曇りで、路面は乾いた状態であった。

2-2. 歩行速度の計測方法

歩行速度については、各歩行者が踏切に進入した時刻と進出した時刻を記録し、その時間差と踏切長から平均速度を算出した。踏切内で対向歩行者等とすれ違う際に歩行速度が大きく変化する可能性があり、歩行速度に影響を与える要因をより詳細に検討するためには歩行速度の変動も考慮する必要がある。しかしながら、本研究では踏切横断時において踏切内に滞在している時間を重視し、多くのサンプルデータを取得するという観点から、平均速度を用いることとした。踏切の進入・進出の境界線のイメージを図2に示す。図中の黒線が踏切の進入・進出の境界線を意味する。なお、自転車を降りて押して歩いている人は歩行者として扱った。

2-3. 鳴動状態の分類方法

踏切の鳴動および遮断の状態と歩行者が踏切に進入したタイミングとの関係を以後、単に「鳴動状態」と呼ぶ。鳴動状態については、以下の4種類に分類した（表2）。踏切が鳴動する前に歩行者が踏切に進入し鳴動していない状態で渡り終えた場合を「①非鳴動」、踏切が鳴動する前に歩行者が踏切に進入し踏切内を歩行中に鳴動した

図2 踏切の進入・進出の境界線のイメージ

Fig. 2 Boundary line of entering and exiting a railroad crossing.

表2 鳴動状態の分類

Tab. 2 Classification of warning state.

①非鳴動	踏切が鳴動する前に進入し、鳴動していない状態で渡り終えた場合
②踏切内鳴動	踏切が鳴動する前に進入し、踏切内を歩行中に鳴動を開始した場合
③鳴動開始後進入	鳴動を開始した後で遮断桿が降下を開始する前に進入した場合
④降下開始後進入	遮断桿が降下を開始した後に進入した場合

場合を「②踏切内鳴動」、鳴動を開始した後で遮断桿が降下を開始する前に進入した場合を「③鳴動開始後進入」、遮断桿が降下を開始した後に進入した場合を「④降下開始後進入」とした。

2-4. 混雑状態の分類方法

ラッシュ時間帯以外でも混雑状態には差が見られ、その影響も分析することとした。混雑状態については、各歩行者が踏切に進入した際の左右の歩道それぞれの歩行者の人数を計測し、左右の歩道それぞれの面積で除して左右の歩道それぞれの歩行者密度を算出した。なお、自転車に乗車している人は踏切内の人数の計測に含めた。

踏切の映像から、歩行者が混雑の影響を受ける場面として以下の2つのパターンが観察された。

- (1)踏切に進入する際に他の歩行者の後ろに付いて歩行する場合
- (2)逆側から横断してくる歩行者をよけながら歩行する場合

そこで、当該歩行者が横断する際の前半と後半の領域の密度の高い方を採用することとした。

歩行速度の平均値と標準偏差を算出する際の各密度における階級の幅について、ヒストグラムの階級の幅の決定方法の一つであるスコットの選択を用いたところ0.077であったことから、これを参考に密度は0.1刻みで集計することとした。密度の小数点第2位で四捨五入し、小数点第1位までの密度を混雑状態の指標とした（例えば、1.26人/m²は1.3人/m²とした）。

2-5. 分析方法

踏切長（4種類）、鳴動状態（4種類）、混雑状態（31種類：0.0～3.0人/m²で0.1刻み）の組み合わせで計496条件について、歩行速度の平均値と標準偏差を算出した。歩行速度のばらつきの指標について、平均値が高い条件では標準偏差も他の条件より大きくなるので、標準偏差より変動係数の方が相応しい可能性がある。しかしながら、本研究では道路交通分野の先行研究と比較するために標準偏差を用いて検討することとした。

まず、踏切長、鳴動状態、混雑状態それぞれが歩行速度の平均値と標準偏差に与える影響を把握するために、単回帰分析および分散分析を行った。目的変数は歩行速度の平均値および標準偏差とした。説明変数はそれぞれ踏切長の値、鳴動状態のダミー変数、歩行者密度の値とした。鳴動状態のダミー変数は、非鳴動を基準として、「踏切内鳴動ダミー」、「鳴動開始後進入ダミー」、「降下開始後進入ダミー」を用いた。

次に、踏切長、鳴動状態、混雑状態が歩行速度の平均値と標準偏差に与える影響を明らかにするために、重回帰分析を行った。目的変数は歩行速度の平均値および標準偏差とした。説明変数は踏切長の値、鳴動状態のダミー変数、歩行者密度の値とした。変数選択は増減法とし、統計的有意水準は5%とした。統計解析にはエクセル統計（株式会社社会情報サービス製）を使用した。重回帰モデルの予測精度に関しては、回帰係数の推定に使用していないデータを用いて検証する必要がある。そこで、4箇所の踏切のうち3箇所のデータで回帰係数を推定し、残りの1箇所のデータで精度検証を行った。

3. 結果

3-1. 歩行速度計測の結果

各踏切のサンプルサイズは、A踏切が3,392名、B踏切が3,138名、C踏切が3,613名、D踏切が3,243名で、合計13,386名となった。全496条件の中でサンプルが2名に満たない条件は、平均値と標準偏差を算出できないため分析対象から除外した。重回帰分析については、最も多くの条件で平均値と標準偏差を算出できたC踏切のデータ

図3 踏切長と歩行速度の平均値の関係

Fig. 3 Relation between length of railroad crossing and mean of walking velocity.

図4 踏切長と歩行速度の標準偏差の関係

Fig. 4 Relation between length of railroad crossing and standard deviation of walking velocity.

を精度検証用とし、残りの3箇所の踏切のデータで回帰係数を推定することとした。

3-2. 単回帰分析および分散分析の結果

3-2-1. 踏切長が歩行速度に与える影響

踏切長と歩行速度の平均値の関係を図3に、踏切長と歩行速度の標準偏差の関係を図4に示す。歩行速度の平均値を目的変数とし、踏切長を説明変数とした単回帰分析の結果を表3に示す。調整済み決定係数は $R^2=0.562$ で有意でなかった ($p=0.158$)。歩行速度の標準偏差を目的変数とし、踏切長を説明変数とした単回帰分析の結果を表4に示す。調整済み決定係数は $R^2=0.228$ で有意でなかった ($p=0.523$)。

3-2-2. 鳴動状態が歩行速度に与える影響

鳴動状態と歩行速度の平均値の関係を図5に示す。図5のエラーバーは標準誤差を示す。鳴動状態の4群を説明変数とし、それぞれの歩行速度の平均値を目的変数として一要因分散分析を行った。その結果、有意な主効果が見られ ($F(3, 13382)=884.97, p<0.05$)、Bonferroni法による多重比較の結果、④降下開始後進入は他の3群より歩行速度が有意に速く、③鳴動開始後進入は②踏切内鳴動および①非鳴動より歩行速度が有意に速かった。

鳴動状態と歩行速度の標準偏差の関係を図6に示す。鳴動状態の4群において、分散が等しいかについてル

表3 歩行速度の平均値を目的変数、踏切長を説明変数とした単回帰分析の結果

Tab. 3 Result of simple linear regression analysis (objective variable: mean of walking velocity, explanatory variable: length of railroad crossing).

変数	踏切長	定数項
回帰係数	0.013	1.150
標準誤差	0.006	0.101
回帰係数の 95%信頼区間	上限値	0.039
	下限値	-0.012
p 値	0.158	$p<0.05$

表4 歩行速度の標準偏差を目的変数、踏切長を説明変数とした単回帰分析の結果

Tab. 4 Result of simple linear regression analysis (objective variable: standard deviation of walking velocity, explanatory variable: length of railroad crossing).

変数	踏切長	定数項
回帰係数	0.004	0.339
標準誤差	0.005	0.087
回帰係数の 95%信頼区間	上限値	0.026
	下限値	-0.018
p 値	0.523	0.060

図5 鳴動状態と歩行速度の平均値の関係

Fig. 5 Relation between warning of railroad crossing and mean of walking velocity.

図6 鳴動状態と歩行速度の標準偏差の関係

Fig. 6 Relation between warning of railroad crossing and standard deviation of walking velocity.

ベーン検定を行った。その結果、群間に有意差が見られ ($F(3, 13382) = 575.64$, $p < 0.05$), ①非鳴動から④降下開始後進入へ踏切の遮断が進むにつれて歩行速度の標準偏差が大きくなる傾向であった。

3-2-3. 混雑状態が歩行速度に与える影響

密度と歩行速度の平均値の関係を図7に、密度と歩行速度の標準偏差の関係を図8に示す。歩行速度の平均値を目的変数とし、密度を説明変数とした単回帰分析の結果を表5に示す。調整済み決定係数は $R^2 = 0.674$ で有意であった ($p < 0.05$)。回帰係数より、踏切内の密度が $1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ 高くなると、歩行速度の平均値は 0.132 m/s 遅くなった。歩行速度の標準偏差を目的変数とし、密度を説

図7 密度と歩行速度の平均値の関係

Fig. 7 Relation between congestion of railroad crossing and mean of walking velocity.

図8 密度と歩行速度の標準偏差の関係

Fig. 8 Relation between congestion of railroad crossing and standard deviation of walking velocity.

表5 歩行速度の平均値を目的変数、密度を説明変数とした単回帰分析の結果

Tab. 5 Result of simple linear regression analysis (objective variable: mean of walking velocity, explanatory variable: congestion of railroad crossing).

変数	密度	定数項
回帰係数	-0.132	1.415
標準誤差	0.017	0.029
回帰係数の 95%信頼区間	上限値	1.476
	下限値	1.355
p値	$p < 0.05$	$p < 0.05$

表6 歩行速度の標準偏差を目的変数、密度を説明変数とした単回帰分析の結果

Tab. 6 Result of simple linear regression analysis (objective variable: standard deviation of walking velocity, explanatory variable: congestion of railroad crossing).

変数	密度	定数項
回帰係数	-0.104	0.441
標準誤差	0.011	0.019
回帰係数の 95%信頼区間	上限値	0.480
	下限値	0.401
p値	$p < 0.05$	$p < 0.05$

表7 歩行速度の平均値を目的変数とした重回帰分析の結果

Tab. 7 Result of multiple regression analysis (objective variable: mean of walking velocity).

変数	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数	偏回帰係数の95%信頼区間		p値
				下限値	上限値	
踏切長 (m)	0.006	0.002	0.125	0.001	0.011	$p < 0.05$
踏切内鳴動ダミー	-0.073	0.038	-0.097	-0.149	0.003	0.059
鳴動開始後進入ダミー	0.256	0.038	0.341	0.180	0.332	$p < 0.05$
降下開始後進入ダミー	0.541	0.047	0.569	0.448	0.634	$p < 0.05$
密度 (人/m ²)	-0.224	0.026	-0.426	-0.277	-0.172	$p < 0.05$
定数項	1.386	0.061		1.265	1.506	$p < 0.05$

表8 歩行速度の標準偏差を目的変数とした重回帰分析の結果

Tab. 8 Result of multiple regression analysis (objective variable: standard deviation of walking velocity).

変数	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数	偏回帰係数の95%信頼区間		p値
				下限値	上限値	
踏切内鳴動ダミー	-0.080	0.029	-0.175	-0.138	-0.021	$p < 0.05$
鳴動開始後進入ダミー	0.092	0.029	0.203	0.034	0.150	$p < 0.05$
降下開始後進入ダミー	0.220	0.036	0.383	0.149	0.292	$p < 0.05$
密度 (人/m ²)	-0.159	0.018	-0.500	-0.195	-0.123	$p < 0.05$
定数項	0.442	0.027		0.388	0.496	$p < 0.05$

明変数とした単回帰分析の結果を表6に示す。調整済み決定係数は $R^2=0.754$ で有意であった ($p < 0.05$)。回帰係数より、踏切内の密度が1.0人/m²高くなると、歩行速度の標準偏差は0.104 m/s小さくなった。

3-3. 重回帰分析の結果

3-3-1. 歩行速度の平均値に対する重回帰モデル

歩行速度の平均値を目的変数とした重回帰分析の結果を表7に示す。調整済み決定係数は $R^2=0.695$ で有意であった ($p < 0.05$)。p値から統計的に有意な説明変数は、踏切長、鳴動開始後進入ダミー、降下開始後進入ダミー、密度であった。偏回帰係数より、以下のように整理できる。

- ・他の変数を一定にした場合、踏切長が1 m長くなると、歩行速度の平均値は0.006 m/s速くなる。
 - ・他の変数を一定にした場合、踏切を渡りきるまで鳴動しない状態と比較して、鳴動を開始した後で遮断桿が降下を開始する前に踏切に進入すると、歩行速度の平均値は0.256 m/s速くなる。
 - ・他の変数を一定にした場合、踏切を渡りきるまで鳴動しない状態と比較して、遮断桿が降下を開始した後に踏切に進入すると、歩行速度の平均値は0.541 m/s速くなる。
 - ・他の変数を一定にした場合、踏切内の密度が1.0人/m²高くなると、歩行速度の平均値は0.224 m/s遅くなる。
- また、標準偏回帰係数より、これら4変数の中で遮断

図9 C踏切における歩行速度の平均値の実測値と予測値

Fig. 9 Actual and predictive values of mean of walking velocity at railroad crossing C.

桿が降下を開始した後に進入することの影響が最も大きかった。

回帰係数の推定に使用していないC踏切における歩行速度の平均値の実測値と予測値を比較したものを図9に示す。歩行速度の平均値は実測値と予測値がよく一致しており、高い精度で予測できていることが確認できる。予測誤差は平均で0.175 m/s、最大で0.445 m/sであった。

3-3-2. 歩行速度の標準偏差に対する重回帰モデル

歩行速度の標準偏差を目的変数とした重回帰分析の結果を表8に示す。調整済み決定係数は $R^2=0.512$ で有意であった ($p < 0.05$)。p値から統計的に有意な説明変数は、踏切内鳴動ダミー、鳴動開始後進入ダミー、降下開始後

図10 C踏切における歩行速度の標準偏差の実測値と予測値
Fig. 10 Actual and predictive values of standard deviation of walking velocity at railroad crossing C.

進入ダミー、密度であった。偏回帰係数より、以下のよう
に整理できる。

- ・他の変数を一定にした場合、踏切を渡りきるまで鳴動
しない状態と比較して、踏切内を歩行中に鳴動すると、
歩行速度の標準偏差は0.080 m/s小さくなる。
- ・他の変数を一定にした場合、踏切を渡りきるまで鳴動
しない状態と比較して、鳴動を開始した後で遮断桿が
降下を開始する前に踏切に進入すると、歩行速度の標
準偏差は0.092 m/s大きくなる。
- ・他の変数を一定にした場合、踏切を渡りきるまで鳴動
しない状態と比較して、遮断桿が降下を開始した後に
踏切に進入すると、歩行速度の標準偏差は0.220 m/s大
きくなる。
- ・他の変数を一定にした場合、踏切内の密度が1.0人/m²
高くなると、歩行速度の標準偏差は0.159 m/s小さく
なる。

また、標準偏回帰係数より、これら4変数の中で密度
の影響が最も大きかった。

回帰係数の推定に使用していないC踏切における歩行
速度の標準偏差の実測値と予測値を比較したものを図10
に示す。歩行速度の標準偏差は実測値と予測値がよく一
致しており、高い精度で予測できていることが確認できる。
予測誤差は平均で0.128 m/s、最大で0.373 m/sであった。

4. 考 察

単回帰分析および分散分析、重回帰分析の結果のまと
めを表9に示す。まず、踏切長の影響について、踏切長
が長くなると歩行速度の平均値は有意に速くなった。ま
た、鳴動状態の影響について、遮断が進むにつれて歩行
速度の平均値は有意に速くなり、標準偏差は有意に大き

表9 単回帰分析および分散分析、重回帰分析の結果のまとめ
Tab. 9 Summary of simple linear regression analysis,
analysis of variance, and multiple regression analysis.

		平均値	標準偏差
踏切長	単回帰	有意差なし	有意差なし
	重回帰	踏切長が長くなると、平均値は有意に速くなった	有意差なし
鳴動状態	分散分析	遮断が進むにつれて、平均値は有意に速くなった	分散について、群間に有意差が見られ、踏切の遮断が進むにつれて標準偏差は大きくなる傾向であった
	重回帰	遮断が進むにつれて、平均値は有意に速くなった	遮断が進むにつれて、標準偏差は有意に大きくなった
混雑状態	単回帰	密度が高くなると、平均値は有意に遅くなった	密度が高くなると、標準偏差は有意に小さくなった
	重回帰	密度が高くなると、平均値は有意に遅くなった	密度が高くなると、標準偏差は有意に小さくなった

くなった。さらに、混雑状態の影響について、密度が高
くなると歩行速度の平均値は有意に遅くなり、標準偏差
は有意に小さくなった。

4-1. 踏切長が歩行速度に与える影響について

道路交通における先行研究¹⁷⁾では、横断歩道における
平均歩行速度は横断歩道長の増加に伴い速くなると報告
されている。本研究における単回帰分析の結果、歩行速
度の平均値に対する踏切長の影響は有意ではなかった。
その理由として、各踏切における踏切長以外の要因の影
響が考えられる。表1の調査対象踏切の概要を見ると、A
踏切の踏切長が他の踏切よりも短いこと、C踏切の歩行
者交通量が他の踏切よりも多いことが特徴として挙げら
れる。短い踏切では鳴動を開始した後や遮断桿が降下を
開始した後に進入する歩行者が比較的多いと考えられ、
その結果、鳴動状態の違いを考慮せずに歩行速度の平均
値を算出すると、短い踏切ほど歩行速度の平均値が高
くなる可能性がある。また、歩行者の交通量が多い踏切
では歩行者の密度が高い時間が比較的最長と考えられ、
その結果、混雑状態を考慮せずに歩行速度の平均値を算
出すると、歩行者の交通量が多い踏切ほど歩行速度の平
均値が遅くなる可能性がある。

道路交通における先行研究¹⁷⁾では、横断歩道長が5 m
長くなると、歩行速度の平均値は概ね0.05 m/s速くな
ると報告されている。本研究における重回帰分析の結果、

歩行速度の平均値に対する踏切長の偏回帰係数は0.006（すなわち、5mにつき約0.03 m/s）であり、5mにつき0.05 m/sよりやや低い傾向であった。重回帰分析により、踏切長以外の要因の影響が調整されたため、横断歩道長と同様の傾向が示されたと考えられる。

踏切長が歩行速度の標準偏差に与える影響について、単回帰分析と重回帰分析ともに有意ではなかった。単回帰分析で有意ではなかった理由としては、平均値の場合と同様に各踏切における踏切長以外の要因の影響が考えられる。また、重回帰分析で有意ではなかった理由としては、踏切長が歩行速度に与える影響が他の要因に比べて相対的に小さいことが考えられる。表7の標準偏回帰係数を見てみると、踏切長の標準偏回帰係数は0.125であり、絶対値の大きさは他の要因の半分以下であった。このように踏切長の影響が相対的に小さいため、歩行速度の標準偏差において有意差を検出できなかった可能性がある。踏切長が歩行速度に与える影響について詳細に検討するためには、調査対象踏切の数を増やす等、別途検討が必要である。

4-2. 鳴動状態が歩行速度に与える影響について

道路交通における先行研究¹⁸⁾は、青信号点滅後に横断を開始した歩行者は青信号点灯中に横断を開始した歩行者より速度が速くばらつきが大きいことを指摘している。

本研究における分散分析の結果、踏切が鳴動を開始した後に進入した場合は、鳴動を開始する前に進入した場合と比較して、歩行速度の平均値は有意に速く、標準偏差は大きい傾向であった。また、重回帰分析の結果、歩行速度の平均値に対する鳴動開始後進入ダミーの偏回帰係数は0.256、降下開始後進入ダミーの偏回帰係数は0.541であり、歩行速度の標準偏差に対する鳴動開始後進入ダミーの偏回帰係数は0.092、降下開始後進入ダミーの偏回帰係数は0.220であった。踏切においても鳴動開始後に進入した場合、歩行速度は速くばらつきは大きくなった。横断歩道と踏切のどちらも渡りきるための制限時間が少ないことを知らされて、歩行速度を上げたためと考えられる。これらの知見は、踏切横断時の歩行速度を考慮した鳴動時間の設定について検討する際に役立つと考えられる。

一方で、ばらつきが大きくなったことから、歩行速度を上げる歩行者と上げない（あるいは、上げられない）歩行者がいるものと考えられる。高齢者の歩行速度に関する先行研究⁴⁾では、性別、年代別の標準歩行速度および最高歩行速度が報告されている。例えば、男性の40歳代において標準歩行速度は平均1.46 m/s（標準偏

差0.16 m/s）、最高歩行速度は平均2.46 m/s（標準偏差0.36 m/s）であり、最高歩行速度は標準歩行速度の1.68倍であった。一方、男性の70歳代では標準歩行速度は平均1.33 m/s（標準偏差0.20 m/s）、最高歩行速度は平均2.08 m/s（標準偏差0.36 m/s）であり、最高歩行速度は標準歩行速度の1.56倍となり、70歳代の方が最高歩行速度で速くなる割合が低かった。このことから、鳴動を開始した後に進入した場合でも若年者ほど歩行速度を上げられない高齢者等があり、ばらつきが大きくなった可能性がある。しかしながら本研究においては、ビデオ観察であったことから歩行者の年齢を正確に知ることはできない。踏切横断における年齢と歩行速度の関係については、歩行者の年齢を聞き取る等、別途検討が必要である。

また、道路交通における先行研究¹⁹⁾では、残りの横断距離が長くない場合、横断途中で信号が青信号点滅に切り替わっても歩行速度はあまり上昇しないと報告されている。本研究の重回帰分析においても、踏切内鳴動ダミーは有意な変数として選択されなかった。一方で、先行研究¹⁹⁾では、信号切り替わり後の残りの横断距離が20 mを超えるような長い場合においては、歩行速度は上昇する傾向があったと報告されている。踏切長と鳴動タイミングの交互作用についてはさらなる検討が必要である。

4-3. 混雑状態が歩行速度に与える影響について

道路交通における先行研究²²⁾において、歩行者密度が1.5人/m²までは密度が増加すると歩行速度は直線的に低下していき、密度が1.5人/m²以上になると歩行速度は一旦急激に低下するが、その後また緩やかに低下していくと報告されている。

本研究における単回帰分析の結果、歩行速度の平均値および標準偏差に対する歩行者密度の影響は有意であったが、平均値と標準偏差ともに線形モデルで近似できるのは歩行者密度が1.5人/m²付近までであると読み取れる（図7、図8）。密度が1.5人/m²以上では、平均値と標準偏差ともに減少の度合いが緩やかになる傾向であり、各歩行者が自らの歩行速度を自由に決められなくなり歩行者が群化することを示唆している。

単回帰分析の結果から、密度が1.5人/m²以上を含めて線形モデルで近似することは相応しくない可能性があるが、本研究では道路交通分野の先行研究と比較するために重回帰分析を用いて検討した。道路交通における先行研究^{22~24)}では、歩行者密度が1.0人/m²増えるごとに歩行速度は0.20~0.27 m/s遅くなると報告されている。本研究においては、踏切内の密度が1.0人/m²増えると、歩行速度の平均値が0.224 m/s遅くなるという結果となり、先

行研究と同程度であった。これらの知見は、歩行者の横断行動を考慮した踏切内の歩道幅について検討する際に役立つと考えられる。

4-4. 本研究の限界について

3箇所の踏切で計測した歩行速度のデータから推定した重回帰モデルの妥当性が確認されたが、本研究の限界として、踏切の属性、測定方法、サンプルに関する課題が挙げられる。

第一に、本研究で調査対象とした踏切の長さが限定的であったため、踏切長の適用範囲は9.2~24.6 mである。この範囲外の踏切長においては本研究と同様の方法でデータを取得し、回帰係数を推定する必要がある。また、踏切遮断の条件について、左右両側から遮断する踏切を対象としたが、片側から遮断する踏切や遮断桿がない踏切での妥当性に関しては、別途検討する必要がある。さらに、車道の両側に歩道が設けられている踏切のみを対象としたことが挙げられる。それゆえ片側に歩道がない、もしくは両側に歩道がない踏切での妥当性に関しては、別途検討が必要である。

第二に、測定方法については歩行速度と歩行者密度の課題が挙げられる。本研究では歩行者は踏切内を一定速度で歩行していると仮定して、歩行速度の変動は考慮していない。歩行速度の変動に影響を与える要因を明らかにするためには、歩行速度の時間変化について検討する必要がある。例えば、歩行中に側方を自動車や自動二輪車が通過することにより歩行速度に影響を受ける可能性がある。通過車両が歩行速度に与える影響については、別途検討が必要である。また、歩行者密度について、線形モデルを適用できる範囲は密度が1.5人/m²付近までである可能性があり、密度が1.5人/m²以上を含めた詳細な分析に関しては非線形モデル等を用いた検討が必要である。さらに、遮断桿が上がった直後は、進入待ちをしていた歩行者や自転車が一斉に進入するため、歩道からはみ出して歩く人もいるので、歩道の面積で割ると実際よりも密度が高い可能性がある。正確な密度を算出するためには、各歩行者の時系列の位置を計測し時系列の密度を算出する等の検討が必要である。

最後に、サンプルに関する限界について、予備調査において一定時間の全歩行者の歩行速度を計測した結果、踏切鳴動時のサンプルが少なかったため、本研究では鳴動時のサンプルを増やすために踏切が鳴動した時間をピックアップし、その時間の歩行速度も計測した。このような計測方法でも、鳴動状態の分類のうち、③鳴動開始後進入と④降下開始後進入で横断をする人は少なく、サン

プルが少ない条件があった。データ数が少ないと平均値や標準偏差は安定しない可能性があるため、安定した結果を得るためには踏切鳴動時のサンプルをさらに増やした検討が必要である。また、季節の影響について、A、B、D踏切は冬にデータを収集し、C踏切は秋ごろに収集した。身体活動量や歩行速度は気温に左右される可能性があることから、季節の影響については別途検討が必要である。

5. おわりに

本研究では、踏切長、鳴動状態、混雑状態が踏切横断時の歩行速度の平均値と標準偏差に与える影響について検討した。歩行速度の平均値および標準偏差を目的変数として、踏切長、鳴動状態、混雑状態を説明変数とした重回帰分析の結果、下記の知見が明らかになった。

- ・3箇所の踏切のデータをもとに推定した重回帰モデルで算出した歩行速度の平均値と標準偏差は実測値とよく一致した。また、重回帰モデルの推定に使用していない1箇所の踏切における歩行速度の平均値と標準偏差をよく説明できるものであった。
- ・歩行速度の平均値に影響を与える変数は、踏切長、鳴動開始後進入ダミー、降下開始後進入ダミー、密度であった。これら4変数の中で遮断桿が降下を開始した後に進入することの影響が最も大きく、他の変数を一定にした場合、踏切を渡りきるまで鳴動しない状態と比較して、遮断桿が降下を開始した後に踏切に進入すると、歩行速度の平均値は0.541 m/s速くなった。
- ・歩行速度の標準偏差に影響を与える変数は、踏切内鳴動ダミー、鳴動開始後進入ダミー、降下開始後進入ダミー、密度であった。これら4変数の中で踏切内の密度の影響が最も大きく、他の変数を一定にした場合、密度が1.0人/m²高くなると、歩行速度の標準偏差は0.159 m/s小さくなった。

謝 辞

踏切の撮影においては、西武鉄道株式会社の関係者の皆様に多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) 国土交通省 高齢者等による踏切事故防止対策検討会。高齢者等の踏切事故防止対策について。2015。
- 2) 溝端光雄。高齢ドライバーと高齢歩行者の交通特性について。IATSS Review. 1990, 16 (1), p.49-57。
- 3) Lord, S.R.; Lloyd, D.G.; et al. Sensorimotor function,

- gait patterns and falls in community-dwelling women. *Age and Ageing*. 1996, 25, p.292-299.
- 4) Bohannon, R.W. Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20 to 79 years: Reference values and determinants. *Age and Ageing*. 1997, 26, p.15-19.
 - 5) 佐藤稔久, 赤松幹之, 他. 踏み切り前での一旦停止義務解除時における踏切内での停滞可能性の評価. 自動車技術会論文集. 2008, 39(6), p.259-264.
 - 6) 佐藤稔久, 赤松幹之, 他. 踏切前での一旦停止義務解除時における踏切内での停滞可能性の評価 (第2報) -徐行時での停滞可能性と先々行車による影響-. 自動車技術会論文集. 2010, 41(4), p.933-939.
 - 7) 松本真吾, 羽山和紀, 他. 踏切直前での警報開始に対するドライバーの運転行動評価. 鉄道総研報告. 2010, 24(11), p.11-16.
 - 8) Tenkink, E.; Van der Horst, R. Car driver behavior at flashing light railroad grade crossings. *Accident Analysis and Prevention*. 1990, 22(3), p.229-239.
 - 9) Lenné, M.G.; Rudin-Brown, C.M.; et al. Driver behaviour at rail level crossings: Responses to flashing lights, traffic signals and stop signs in simulated rural driving. *Applied Ergonomics*. 2011, 42, p.548-554.
 - 10) 福田志志. 踏切における歩行者・自転車利用者のリスクテイキング行動-警告時間の影響-. 労働科学. 2008, 84(4), p.140-150.
 - 11) Lobb, B.; Harre, N.; et al. An evaluation of a suburban railway pedestrian crossing safety programme. *Accident Analysis and Prevention*. 2001, 33(2), p.157-165.
 - 12) Khattak, A.; Luo, Z. Pedestrian and bicyclist violations at highway-rail grade crossings. *Transportation Research Record*. 2011, 2250, p.76-82.
 - 13) 鈴木大輔, 遠藤広晴, 他. 踏切鳴動を考慮した踏切通行者の歩行速度. 人間工学. 三重市, 2016-06-25/26. 日本人間工学会, 2016, p.308-309.
 - 14) 鈴木大輔, 遠藤広晴, 他. 踏切の鳴動状態と混雑状態を考慮した通行者の歩行速度. 人間工学. 習志野市, 2017-06-01/04. 日本人間工学会, 2017, p.302-303.
 - 15) 交通工学研究会編. 交通工学ハンドブック. 技法堂出版, 1984, p.90-96.
 - 16) Institute of Transportation Engineers. *Transportation and Traffic Engineering Handbook*. PRENTICE-HALL, INC. 1976, p.58-59.
 - 17) 齊藤威, 有蘭卓. 信号交差点における横断歩行者の歩行速度に関する基本的な特性. 科学警察研究所報告 (交通編). 1986, 27(1), p.15-27.
 - 18) 張馨, 中村英樹, 他. 横断歩道長と歩行者信号現示を考慮した横断歩行速度のモデル化. 土木学会論文D3 (土木計画学). 2014, 70(5), p.I_1031-I_1040.
 - 19) 矢野伸裕. 信号機付き横断歩道における歩行者の横断速度に関する研究 (1. 信号表示の切り替わり前後での横断速度の比較). 科学警察研究所報告 (交通編). 2001, 41(2), p.22-37.

- 20) 矢野伸裕. 信号機付き横断歩道における歩行者の横断速度に関する研究 (2. 横断開始タイミングと横断速度の関係). 科学警察研究所報告 (交通編). 2005, 44(1), p.38-43.
- 21) Lam, W.H.K.; Cheung, C. Pedestrian speed/flow relationships for walking facilities in Hong Kong. *Journal of Transportation Engineering*. 2000, 126(4), p.343-349.
- 22) 毛利正光, 塚口博司. 歩行路における歩行者挙動に関する研究. 土木学会論文報告集. 1977, 268, p.99-108.
- 23) 高宮進, 森望. 歩行者交通流からみた歩道幅員に関する一考察. 土木技術資料. 2002, 44(9), p.109-114.
- 24) Polus, A.; Schofer, J.L.; et al. Pedestrian flow and level of service. *Journal of Transportation Engineering*. 1983, 109(1), p.46-56.

著者情報

鈴木大輔 (すずきだいすけ, 正会員, 連絡著者)

2009年慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻博士課程修了. 博士 (工学). (公財) 鉄道総合技術研究所勤務. 専門領域: 安全人間工学, ヒューマンファクターズほか. 日本人間工学会, 安全工学会, 日本プラント・ヒューマンファクター学会, 日本鉄道運転協会会員ほか.

連絡先: suzuki.daisuke.55@rtri.or.jp

遠藤広晴 (えんどうひろはる, 正会員)

2004年慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士課程修了. (公財) 鉄道総合技術研究所勤務. 専門領域: 人間工学. 日本人間工学会, 人間-生活環境系学会会員.

斎藤綾乃 (さいとうあやの, 正会員)

1996年千葉大学大学院工学研究科工業意匠学専攻修了. 博士 (工学). (公財) 鉄道総合技術研究所勤務. 専門領域: 人間工学ほか.

秋保直弘 (あきうなおひろ)

2012年東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻博士前期課程修了. 修士 (工学). (公財) 鉄道総合技術研究所勤務. 専門領域: 人間工学, ヒューマンインタフェースほか. ヒューマンインタフェース学会会員ほか.

水上直樹 (みずかみなおき, 正会員)

1993年北里大学大学院衛生学研究科修士課程修了. 修士 (衛生学). (公財) 鉄道総合技術研究所勤務. 専門領域: 人間工学 (疲労, バリアフリーほか). 日本人間工学会, 日本交通医学会, 日本福祉のまちづくり学会会員ほか.