トランジットモールにおけるLRV走行音が 歩行者横断に与える影響の分析

波床 正敏¹・村上 悟²

¹正会員 大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

E-mail: hatoko@ce.osaka-sandai.ac.jp

²非会員 大阪産業大学 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

E-mail: s11k081@sub.osaka-sandai.ac.jp

LRVは旧来の路面電車に比べて低騒音・低振動の軌道交通であるとされているが、繁華街の街路では、歩行者がLRVの接近に気付きにくくなる原因となる可能性がある。そこで、本研究では、海外のトランジットモールを走行するLRVの発する騒音レベルを実際に測定し、歩行者がトランジットモール上の軌道をどのようなタイミングで横断するのかについて音の面から分析を行った。

分析の結果、接近するLRVの発する音が街路の静寂時の騒音レベルを超えるようになると軌道横断をやや控える傾向になり、定常的な暗騒音レベルと同程度になると大きく横断者が減ることがわかった。

Key Words : transit mall, sound level, light rail vehicle, pedestrian behaviour

1. はじめに

(1) 研究の背景

LRT (=Light Rail Transit) が新しい都市交通として日本に紹介されて30年以上経過し、低床式LRV (=Light Rail Vehicle) も多少導入されたが、LRTシステムを構成する他の要素はほとんど実現していない。中心市街地活性化が期待されているトランジットモール（以下、TM）もその一つである。わが国ではこれまでは道路から歩行者をいかに隔離すべきかという視点で道路行政が行われてきたため、どのような状況ならば共存可能かといった点を議論するための基礎的な情報・知見の蓄積が不足していると考えられる。

TMに関しては、LRVと歩行者の接触が懸念されていると思われるが、TMが実際に実施されている欧州の街路では特に大きな問題もなく運用されている。ところが、欧州の歩行者がどのようにしてLRVの接近を認知して軌道横断に注意を払っているのかは明確にはわかっていない。LRVが歩行者から見えているかどうかで横断行動に大きな影響を与えていると思われるが、向かってくるLRVはかなり遠方から歩行者の視界に入っており、既存の研究では何秒前まで横断するかまでは判明したものの、どの程度の距離まで接近した時点で危険と判断し始めていかなどについては、その判断基準が定かではない。視覚による情報を重視して横断を開始していると考えら

れるものの、走行音などの追加的な情報を頼りに横断の判断をしている可能性がある。

(2) これまでの研究

本研究では中心市街のTMの軌道部分を横断しようとする歩行者がLRVの発する走行音をどの程度の音量で受け止め、それが軌道横断開始の判断に与えた影響について分析する。

TMにおけるLRVの走行音に関する研究は土木計画学分野や都市計画分野では見当たらず、従来より交通と音に関しては騒音として取り扱われることが多かったり、市街の音環境についても公害の一種としての騒音を取り扱われていたが²⁾、その後、音環境の設計という考え方も導入されるようになり³⁾、平尾の研究⁴⁾では京都の音環境についてアンケート調査を用いて音そのものの性質についての分析が行われている。近年の研究としては、嶋田らの研究⁵⁾において騒音レベルと都市内における滞留行動の関係の分析が行われ、騒音レベルが小さい空間において人々の滞留行動が見られることが示されている。また、明石・小笠原の研究⁶⁾では、生活交通が発生させる音が市街地の音環境に与える影響を分析することで、用途地域のあり方についての考察を行っている。

TMが実施されている街路に関する研究としては、TMの街路の幅員構成の研究⁷⁾やTMにおける歩行者の横断行動の研究⁸⁾、あるいは街路に沿っての歩行時に軌道部分

を歩行する割合に関する研究⁹⁾などがおこなわれている。この研究では、基本的な行動として横断歩行者は十分な安全を確保しながら横断すること、歩道の整備状態によって軌道上歩行の状態が変わることなどが分析されている。

一方、LRVの関係する事故については軽車両や自動車に関する件数が最も多く、次いで歩行者に関するものが多い¹⁰⁾。歩行者と電車の接触としては、電停上で転倒した際に電車と接触、電停の踏切部以外で軌道横断しようとして電車と接触、併用軌道上の電停に路側の歩道から渡ろうとした際に車道上や手前側の軌道上で電車等に接触、軌道上を歩行している際に背後から電車が接近してきて接触などの事例が報告されている¹¹⁾。このような状況に対し、主な対応は軌道構造や電停等の物理的な施設面での工夫によって歩行者とLRVの接触を避けるといった方策が多く^{12),13)}、音に関するものとしてはLRVの警笛音量（ベル等）を周辺騒音よりも10dB大きくする方針が米国において示されているだけであり¹³⁾、LRVが定常的に発している騒音については考慮外のようなのである。一般の市民向けには、LRVの接近に気づきにくくなることを理由に、街路歩行時にはイヤホンの使用を中止するように呼びかけている都市もある^{14),15)}が、TMにおける基本的な音環境と歩行者の横断行動への影響については十分な知見が得られている様子はない。

(3) 本研究の目的

LRTが運行されている都市では、歩行者に対してLRV接近についての注意喚起の表示板などをしばしば見かけるが、これはLRVが従来から使用されてきた路面電車に比べて走行音が静かであるため、接近に気づきにくいことを反映してのものと考えられる。わが国でLRTシステムを導入する際にも、特にTMのような混合交通状態を許す街路では検討を要する課題となる可能性がある。

そこで本研究では、TMとなっている街路に関して、LRVが通過する際にどの程度の騒音を発生させているかについて海外のいくつかの都市において実測し、その測定結果を分析することで、音の面からTMにおける歩行者の軌道横断行動について考察を行うこととした。

2. 都市交通の発する音について

(1) 騒音について

騒音そのものは、従来からの公害対策基本法の流れをくむ環境対策基本法¹⁶⁾(1993)において、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、振動、地盤沈下、悪臭などと共に健康や生活環境に被害を及ぼす公害の一種として規定されている。

具体的な騒音に係る環境基準¹⁷⁾としては、中心市街地（地域類型C）では昼間時60dB以下、夜間で50dB以下となることが望ましく、C地域のうち車線（1縦列の自動車が安全かつ円滑に走行するために必要な一定の幅員を有する帯状の車道部分）を有する道路に面する地域でも昼間時65dB以下、夜間で60dB以下が求められている。また、幹線道路沿道では、昼間時70dB、夜間で65dBまで許容されている。さらに、航空機や新幹線に関する基準はこれらとは別に定められている。

これらの環境基準としての騒音は、A特性¹⁸⁾（人間の聴覚に合わせた補正）に基づく計測における時間の区ごとの全時間を通じた等価騒音レベルによって評価することを原則としている。等価騒音レベルによる評価は、大きな音であってもごく短時間ならば結果に与える影響が小さく、逆に低レベルであっても長時間継続する音については反映されやすいという特徴を持っている。

(2) 生活騒音と交通関連騒音について

日常生活の騒音レベルとしては、全国環境研協議会騒音小委員会により騒音の目安¹⁹⁾（図-1）が作成されており、同目安を作成する際に測定された調査結果²⁰⁾のうち都心地域や交通施設周辺地に関するものを抜き出して図示したものが図-2である。本研究で対象としてしているTMは都心の街路であり、図-2から参考となる状況の箇所の騒音レベルを見ると、概ね60dB台（例えば、商店街で66dB、鉄道周辺[平坦]で65dB、2車線道路で68dB）であることがわかる。

LRTは比較的静かな交通機関であることが特徴であり、都市の生活環境としては基本的には好ましい特徴である。ところが、自動車のうちハイブリッド車(HV)や電気自動車(EV)では、街路走行の際に静かであるがために歩行者が気づきにくいことが問題となっている。EVやHVが10km/h程度以下の低速で走行する際の騒音レベル（50dB未満）が繁華街での暗騒音レベル（65dB前後）を下

図-1 騒音の目安（都心・近郊用）¹⁹⁾

回っており、車両の接近に気付来にくい状況になっている²¹⁾。これにより、安全の観点から車両に音を発する装置を設置するという対策が検討されるに至っている²²⁾。

TMを走行するLRVの発する音が歩行者行動に与える影響という点では、EVやHVが置かれている状況を無視することは出来ず、TM上をLRVが走行する音に関する実態調査が必要であるとともに、軌道横断に与える影響に関する分析が必要になってきていると考えられる。

なお、世界的な生活騒音に関するガイドラインとしては、WHOによって「Guideline values for community noise in specific environments」が示されており²³⁾、具体的数値が示されている主な項目について図-3に示した。図-2とは項目が双方で異なっているので全項目の比較はできないが、例えば高層住宅地域や都市公園とOutdoor living areaとにおける屋外の騒音レベルが50dB程度、繁華街の騒音レベルとIndustrial, commercial, shopping and traffic areasが70dB程度であることなど、類似項目の値は双方で似ている。

3. 本研究の分析方法

(1) 分析方法の概要

本研究では、TMを横断する歩行者がどのようなタイミングで横断を開始するかについて、LRVと歩行者の位

置関係だけでなく、LRVの発する走行音が横断者にどの程度聞こえたかに着目して分析を行う。

まず現地調査として、TMが実施されている都市街路上の定点においてLRVの走行状況をビデオカメラで撮影すると同時に、騒音計を用いて街路騒音レベルを連続測定して記録する。また、街路幅員構成やビデオ撮影範囲に写り込んでいる目印となる地点などの位置関係を現地で計測し、ビデオ画像や走行音量のデータ分析の際に用いる。

これらデータとビデオ画像から、歩行者がTMを横断開始する時刻と横断位置を求めるとともにLRVの計測対象区間への出入り時刻を求め、LRVの位置と歩行者の横断開始のタイミングを明確にする。さらに、騒音データをもとに横断開始時において聞こえていたであろう走行音量や暗騒音量を推計し、横断開始の判断に与えたであろう影響について考察を行う。

(2) 分析対象都市について

分析対象とした都市は表-1に示すフランスの6都市であり、いずれも中心市街地でTMになっている街路である。Nancyについては鉄輪式ではなくゴムタイヤトラムである。Lyonは軌道の無いバストランジットモールであり、トロリーバスが運転されている。また、参考用に日本の2都市の街路についても計測と分析を行ったが、これら日本の街路はTMではない。

図-2 都心地域や交通施設周辺地の騒音レベル²⁰⁾

図-3 Guideline values for community noise in specific environments²³⁾

表-1 計測対象都市と対象区間について

都市名	街路名	観測区間長	軌道部分幅員	全幅員	計測日	時間帯	備考
Lyon	Rue de la République	35.32 m	10.1 m	21.8 m	2014/09/03	17時台	バスTM(トロリーバス)
Nancy	Rue Saint-Jean	61.86 m	6.2 m	17.3 m	2014/09/06	16時台	BRT(TVR)
St.Étienne	Rue Général Foy	37.31 m	5.9 m	11.6 m	2014/09/03	13時台	
Dijon	Avenue Maréchal Foch	24.12 m	6.5 m	25.6 m	2014/09/04	16時台	
Tours	Rue Nationale	48.34 m	5.9 m	14.4 m	2014/09/08	14時台	
Orléans	Rue de la République	31.03 m	6.7 m	16.9 m	2014/09/10	16時台	
広島	観音町電停と天満町電停との中間	46.04 m	6.1 m	14.3 m	2014/11/15	17時台	TMでない(参考用)
岡山	中納言電停と小橋電停との中間	77.63 m	11.5 m	13.6 m	2014/11/16	12時台	TMでない(参考用)

表-1には後述の観測区間長や軌道部分の幅員、街路の全幅員、計測人時間帯などについても示している。Lyonはバストランジットモールになっているため軌道が存在しないので、両側の歩道幅員を全幅員から除いたものを軌道幅員相当としている。また、参考用の日本の都市の街路については、使われ方の実態に合わせて広島は軌道部分以外を歩道相当としており、岡山は路側帯よりも外側を歩道相当としている。

(3) 歩行者横断位置の測定と結果の整理

計測対象街路において、計測区間を例えば図-4のように設定し、この区間をビデオカメラで30分間動画撮影する。この計測対象区間へのLRVの進入・退出時刻、歩行者が軌道横断を開始する時刻とその位置をそれぞれ計測する。LRVの進入・退出時刻や歩行者の横断開始時刻は1/30秒（動画フレーム）単位で計測した。また、計測区間長や画像に写り込んでいる建造物の大きさや街等の間隔等については現地でレーザー距離計を用いて計測した。

録画したビデオ画像をディスプレイ上で再生した場合、撮影画像は画面奥のほうが手前よりも位置関係が圧縮されるように記録されるなど画像が歪んでおり、単純に画像上の位置を測定しても実際の位置にはならない。そこで、画像に写り込んだ実物の大きさや位置と画面上の大きさや位置との関係についての複比が一定であること²⁴⁾を利用して幾何的な補正計算をすることで実際の距離に変換して分析した。例えば図-5のようにカメラ画像上の

図-4 計測対象区間の例（Tours）

図-5 画像上の位置と実際の位置

線と実際の線があり、図のような線上の各点の位置関係および線分長であった場合については、次の関係が成り立つ。

$$\frac{x/y}{p/q} = \frac{x'/y'}{p'/q'} \quad (1)$$

これにより、計測対象街路における画像に写り込んだ目印となる物の実際の長さを実測しておくことで、実際の位置を計算により求めることができる。

(4) 騒音の測定方法と結果の整理

LRVの走行音測定に使用した騒音計は表-2に示すような積分型普通騒音計であり、同表に示したモードによって表-3のような位置において計測した。

実際の街路で測定したため、走行するLRVから騒音計までの距離がそれぞれ異なっており、そのままでは相互の比較などがしにくい。そこで、以下の式を使って距離による減衰量を計算し、軌道中心から2mの位置の場合に換算して分析する。式(2)は線音源に対する距離減衰に関する近似式であり、音源からの距離が線音源の長さの $1/\pi$ より近い場合において、距離が倍になる毎に3dB低減することを反映したものである²⁵⁾。LRVの車長（20～30m）に比べて測定器から音源までの距離が十分近いことから、最大音量についてはこの式を用いて補正する。

$$D=10 \log_{10} (r/r_0) \quad (2)$$

D : 減衰量(dB)

r : 軌道中心から測定器まで(m)

r_0 : 基準となる距離($r_0=2m$)

LRVの騒音レベルについては、表-2にも示すように、10ms（0.01秒）間隔で連続的に記録し、各種の騒音レベルの分析を行う。

なお、騒音レベルの測定は等価騒音レベルで表示するのが標準的であり、騒音に関する生活環境水準という視点ではこのような表記が適切である。しかし、本研究の

表-2 測定器の諸元

項目	内容
メーカー	小野測器
型番	LA-1440
規格	JIS C 1509-1:2005 クラス 2 IEC 61672-1:2002 Class 2
周波数範囲	10Hz~8kHz (JIS,IEC)
測定範囲	A特性:26 dB ~ 137 dB(JIS, IEC)
測定間隔	10 ms
周波数特性	A特性で測定
応答速度	FASTで測定

場合は歩行者の安全、すなわち歩行者がLRVの走行に気付きやすいかという視点での分析であるため、記録された騒音レベルを分析し、LRVの走行に起因すると思われる最大騒音レベルを算定した。また、暗騒音についてはLRV等が通行していない比較的静穏な時間帯部分（本研究では走行音ピークの前後10秒ずつを除外した）を取り出し、その間の等価騒音レベルを計算することで暗騒音の値とする。等価騒音レベルについては、本研究では10ms間隔で測定されており、次式により計算²⁰した。

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{p_i}/10} \right] \quad (3)$$

L_{eq} : 等価騒音レベル(dB)

N : サンプル数

L_p : 騒音レベルのサンプル値(dB)

4. 歩行者の横断状況について

(1) LRV交通量と横断者数

図-6は調査各街路における1時間あたりのLRV通過数と横断歩行者数であり、実際にはそれぞれ30分間計測したものを1時間あたりに換算している（本節のみ）。横方向の矢線のうち下側がAD→CBのLRV通過数、上側が

C B→A Dである。また、縦方向の矢線のうち右側がAB→CDの横断歩行者数、左側がCD→ABである。図の矢線は交通量や横断歩行者数の量に応じて太さを変えている。

図-6の(1)～(6)のTMを実施している各都市と参考用の(7)(8)とでは、LRV（路面電車）の通過数については都市によってばらつきはあるものの大きな差は無い。だが、横断歩行者数については(1)～(6)の各都市のうち最大のToursは両方向合計342人/時、最も少ないLyonでも両方向合計100人/時である一方、参考用の(7)(8)では広島で両方向合計32人/時、岡山では8人/時であり、大幅に少ない。このように、TMと日本の路面電車の走行する街路とでは基本的な状況に大きな差があることがわかる。

(2) 歩行者横断開始時におけるLRVの位置

横断歩行者の横断開始位置と時刻、およびLRVの観測区間への進入退出時刻とから、図-7～図-9のように歩行者が軌道を横断開始した時点における接近する直近のLRVとの間隔を計算した。図-7と図-8は時間間隔に関するものであり、図-7ではLRVと歩行者の間隔が近い場合がわかりにくいため、30秒以下の場合について拡大表示したものが図-8である。また、図-9は距離についてのものであり、観測間を通過するのに要した時間からLRVの速度を計算し、この速度と時間間隔とを乗じること

表-3 測定器から各軌道中心までの距離

都市名	手前の軌道	奥の軌道	地上高
Lyon	3.0m	7.9m	1.2m
Nancy	2.7m	5.7m	1.2m
St.Étienne	2.4m	5.2m	1.2m
Dijon	2.5m	5.8m	1.2m
Tours	2.9m	5.8m	1.2m
Orléans	2.7m	5.6m	1.2m
広島	5.3m	10.1m	1.2m
岡山	4.6m	7.4m	1.2m

図-6 LRV交通量と横断者数

図-7 横断開始時におけるLRVと歩行者の時隔

図-8 横断開始時におけるLRVと歩行者の時隔(30秒以下)

図-9 横断開始時のLRVと歩行者の距離(250m以下)

で計算したものである。同図は250m以下の場合だけについて表示している。いずれも横軸は時間的あるいは距離的なLRVと歩行者の間隔であり、グラフは左下側から都市別に加積曲線の形式で描いている。以下、横断者数は全て30分間の調査の結果である。

図-7でわかるように、基本的にはいずれの都市も左下側から急激に立ち上がり、間隔が長くなると加積曲線の傾きが緩やかになっている。これは、LRVの運行間隔そのものが数分間隔であるため、歩行者とLRVの間隔の長さそのものが頭打ちになるからである。このような歩行者の横断行動とは無関係なデータの傾向を排除するために作成したものが図-8であり、30秒以下の場合についてのグラフになっている。図-8からは、LRV通過数秒前に横断歩行者がほとんどいないことがわかり、これは既存の研究⁸⁾と同傾向の結果である。また、同時に都市により若干前後するものの、いずれの曲線も時間間隔が10～20秒あたりに階段状の変化が見られる。図-9はLRVと歩行者の間隔を距離で示したもの(250mは、30km/hで30秒の走行に相当)であるが、図-9においても一部の都市を除き、50～100m付近に階段状の変化が見られる。

このような階段状の変化については、もしも歩行者がLRVの接近とは無関係にランダムに軌道横断していれば階段状のグラフは出現せず、比較的滑らかな変化であったはずである。したがって、グラフに階段状の変化があったということは、目視によって接近が明らかな距離の場合だけでなく、ある程度の距離がある場合においても何らかの判断基準をもとに横断行動を控える原因が発生し始めており、それが行動として表れている可能性が高いと考えられる。

5. 走行音が軌道横断行動に与える影響

(1) LRV走行音と街路騒音レベル

図-10は走行音の測定結果について図示したものである。LRV走行音については第3章(4)の式(3)により測定位置が2mであるように換算し、各都市のLRV走行音(最

図-10 LRVの最大騒音レベルと暗騒音

大騒音レベル)の平均、最大、最小を図示している。

6都市のLRV走行音の最大騒音レベルはToursが最大で84.3dB、バスTMのLyonが最小で80.6dBであり、LRVで最小はSt.Étienneの81.9dBであった。参考とした日本の路面電車については、広島、岡山ともに90dBに近く、欧州の調査対象都市と比べて5～20dB程度大きかった。ゴムタイヤ式のLyonやNancyと他都市のLRVとでは、ゴムタイヤ式の方が若干静かであった。このように、LRVやゴムタイヤ式トラム等は、旧式の路面電車に比べて大幅に静かであることがわかる。

暗騒音については、Nancyが最大で66.2dB、Toursが最小で60.6dBであった(参考都市も含めると、広島は58.6dBが最小)。概ね60～65dBであり、この値は図-2の商業地の値(62dB)と同程度である。走行音と暗騒音の差は、Toursが最大で23.7dB、Nancyが最小で14.5dBであり、概ね20dB程度の差があった。また、LRV走行音は暗騒音に紛れていても聞き取れる可能性があるため、静寂時の騒音レベルも測定しており(騒音レベル測定結果の最小値)、これについてもNancyが最大で56.7dB、St.Étienneが最小で47.1dBであった(参考都市も含めると岡山が42.8dBで最小)。走行音と静寂時の騒音の差は、St.Étienneが最大で34.8dB、Nancyが最小で24.1dBであり、概ね30dB程度の差があった。

走行音については、ゴムタイヤ式(バス含む)は鉄輪式のLRVよりやや小さいが、両者に大幅な差は無い。したがって、少なくとも通常の走行速度(TMでは10～20km/h程度)では接近に気付きにくいほど小さな音であるというわけではない。

HVやEVが街路走行時に静かすぎるのが課題となっているが、これらの走行音は10km/h程度以下の走行時には50dB以下となり^{21),22)}、街路の暗騒音などに紛れる可能性があるが、通常走行時におけるLRVの走行音は暗騒音よりも20dB程度以上大きく、判別しにくい状況では無い。ただし、LRVについても停車時にはほぼ無音になる

ため、実際の街路走行時にはカウベルのような音を発して注意喚起をしながら走行していることが多い。

(2) 横断開始時におけるLRVの走行音

TMではLRVが接近するにつれて走行音が大きくなることで歩行者が気づきやすくなる。本研究では最接近時の最大音量の計測を行っていることから、横断行動開始時におけるLRVの音量を計算によって求める、その大きさそのものや暗騒音等との比較から、横断行動に与える影響を分析する。

距離による音圧の減衰についての式(2)は、線音源長の $1/\pi$ 程度の距離(列車長を30mとすると、発生源から測定器まで10m程度)までの減衰式であるが、それ以遠については以下の式で減衰量を計算することとする。式(4)は距離が倍になる毎に6dB低減²⁵⁾することを反映した近似式である。

$$D' = 20 \log_{10}(r/r_0) \quad (4)$$

D' : 減衰量(dB)
 r : 軌道から音の聴取位置まで(m)
 r_0 : 基準となる距離($r_0=2m$)

図-9に示した歩行者からLRVまでの距離を用いて式(4)により減衰量を計算し、図-10に示したLRVの走行音(平均値)から減衰量を減じることで歩行者位置における横断開始時のLRVの走行音圧を計算した。図-11はその結果であり、図の横軸はLRVの走行音圧である。図-7～図-9に合わせて左側がLRVが接近した状態、右側が離れた状態になるように、右に行くほどdB値が小さくなるようになっている。縦軸は歩行者数であり、図-7～図-9と同じく、左側から右側へと累計されるように表示している。

図-12は図-11の左下部分を詳しく分析するために、音圧が80～30dBの範囲で表示したものである。ただし、縦軸の歩行者数は対数目盛りにしている。もし、時間あたり横断歩行者が均等に発生したとすると式(4)のような形

であるため、縦軸を対数表記した場合には図-13のようにグラフが直線になる(図-13はLRVの速度が15km/h、運転間隔が3分、総横断者数が100人、均等に横断者が発生した場合を想定した説明用の図)。

図-12で右上から左下にグラフをたどると、右上付近(歩行者とLRVの距離が大きくて計算上の走行音が小さい状態)では、グラフの形が各都市ともほぼ直線であり、横断歩行者の発生が概ね均等であることがわかる。ところが、図の中央付近(歩行者とLRVが接近して走行音が大きくなってきた状態)にはグラフに段差が見られる。この段差の位置は都市によって異なるものの、横断歩行者の発生が均等ではなくなっている(LRV接近に伴い比較的急に横断者が減少)ことがわかる。さらに左方ではグラフが急激に落ち込んでおり、横断者がいなくなっていることがわかる。

このような段差の発生位置は都市によって異なっているが、これは街路の暗騒音(図-10参照)などが関係しているのではないかと考えられる。LRV接近に伴う軌道横断可否判断の要因としては、歩行者からのLRVの見た目の大きさ、LRVの発する騒音レベルなども考えられるが、これらは連続的に大きさが変化するものである。一方、階段状の変化は何らかの閾値が関係している可能性があり、LRVの発する騒音が街路の暗騒音を超えるなどの不連続的变化が影響している可能性が高いのではないと思われる。

(3) 暗騒音を考慮した分析

前節の分析について暗騒音の大きさを考慮するため、まず歩行者位置における走行音(図-11、図-12参照)と暗騒音(図-10参照)の差を都市ごとに計算した。そのまま都市別に分析しようとする横断者数データが少ない領域で詳しい分析をしなければならないため、全6都市のデータを重ね合わせて平均化するとともに分析対象とできるデータ数を増やした。これにより、状況の変化点付近でもある-10～-20dB付近でも10dBあたりのデータ

図-11 歩行者位置での走行音圧と横断者数

図-12 歩行者位置での走行音圧と横断者数(対数表記)

図-13 均等に横断者が発生することを想定した場合

図-14 走行音と暗騒音の差と横断者数(全6都市)

数を数十件確保できるとともに、異なる環境下での測定結果を混合することで騒音以外の要因を相殺できるという利点もある。データ数が少ないことによる凸凹が生じる可能性があるが、偶然誤差に基づく変位は図-13のような直線の上下に現れるはずであるため、一方向に偏った変位は偶然ではないと判断できる。図-14の横軸は上述のような方法で計算した走行音と暗騒音の差であり、縦軸は横断者数である。横断者数は左側（横断者とLRVが接近した状態）から右側（横断者とLRVが離れた状態）へと累計されるように表示しており、図-12と同じく対数目盛りにしている。均等に横断者が発生する場合はこの図でもグラフが直線になり、図の基本的な読み取り方法は図-11と同じである。

図-14の全体的な傾向としては、走行音と暗騒音の差が-30dB付近よりも右側（走行音が暗騒音よりも大幅に小さい）では、横断者数が頭打ち状態になっている。これは図-7の説明と同様に、LRVの運行間隔そのものが数分間隔であるため、歩行者とLRVの間隔の長さそのものが頭打ちになっていることを反映している。中央部では部分的に乱れはあるものの基本的には直線状に推移しており、基本的には横断者は均等に発生している。走行音と暗騒音の差が7～8dB付近よりも左側（走行音が暗騒音よりも大きい）では、急激にグラフが落ち込んでおり、

LRVの最接近に伴い、横断者がいなくなっていることを反映している。

図-14の中央部では走行音と暗騒音の差が-12～-13dB付近よりも左側において、直線的な傾向（図-14の赤点線であり、横断者が均等に発生）に比べて実際の推移が下側に振れている。つまり横断者は走行音と暗騒音の差が小さくて走行音が相対的に大きく聞こえる領域では横断者を控える傾向があり、逆に走行音が相対的に小さく聞こえる領域でそれを補うように横断を増やす傾向があることを示している。走行音と暗騒音の差が-12～-13dBというのは、図-10を見てわかるように概ね静寂時の街路騒音レベルと暗騒音のレベルの差（概ね11dB）に相当している。すなわち、接近するLRVの発する音が街路の静寂時の騒音レベルを超え、雑踏の暗騒音に紛れて聞こえはじめると軌道横断をやや控える傾向であったと言える。また、グラフは走行音と暗騒音の差が0dB付近（走行音と暗騒音の大きさが同程度）で段差を生じており、定常的な暗騒音レベルと同程度になるまで接近すると大きく横断者が減る傾向であったと言える。さらに走行音と暗騒音の差が10dB付近（LRVが目前に迫り、明確に走行音が聞こえる状態）で横断者がいなくなっている。

なお、上の分析で示したLRVの発する音が街路の静寂時の騒音レベルになるのは、概ねLRVと横断者の間隔が80m程度、走行時間で20秒程度である。また、走行音と暗騒音のレベルが同程度になるのは、概ねLRVと横断者の間隔が16m程度、走行時間で4秒程度である。

6. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では、トランジットモール(TM)におけるLRVの発する走行音を測定して分析することで、LRVの走行音がTMにおける歩行者の軌道横断に与える影響について考察を行った。その結果、接近するLRVの発する音が街路の静寂時の騒音レベルを超えるようになると軌道横断を控える傾向になり、定常的な暗騒音レベルと同程度になると大きく横断者が減ることがわかった。

このことから、わが国でTMを整備するような場合においても、単に歩行者とLRVとの視覚的な見通しだけでなく、音環境についても配慮が必要ではないかと思われる。

今後の研究課題としては、日本の街路の音環境について測定を行って本研究の結果と比較考察を詳しく行ったり、TM実現のために、具体的にどのような点について配慮や対策を行うべきかなどについて考察を行うことが必要と思われる。また、音環境以外にも、軌道や街路の構造と歩行者の安全の関係や、歩行者やLRVへの優先権の与え方の影響などについても研究課題と思われる。

謝辞：本研究は科研費基盤研究C(課題番号24560651)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 大野春雄, 川浦潔：道路騒音による沿道住民の被害意識構造に関する研究, 都市計画論文集, No.14, pp.403-408, 1979.
- 2) 毛利正光, 塚口博司, 金甲洙：環境騒音に対する住民意識と影響評価に関する研究, 都市計画論文集, No.19, pp.409-414, 1984.
- 3) 福本隆司, 野村茂生：音環境に配慮した住宅地の計画手法に関する研究, 都市計画論文集, No.29, pp.235-240, 1994.
- 4) 平尾和洋：等音圧分布と周波数特性に基づく京都における音環境に関する一考察, 都市計画論文集, No.36, pp.835-840, 2001.
- 5) 嶋田圭佑, 田中一成, 吉川眞：外部空間における音環境と滞留行動の関係, 景観・デザイン研究講演集, No.4, 2008.
- 6) 明石達生, 小笠原芳樹：静穏性と生活利便性を両立する住宅市街地の用途配置のあり方—生活利便用途の生成交通と生活街路の騒音レベルの実測に基づく一考察—, 都市計画論文集, Vol.47, No.3, pp.1003-1008, 2012.
- 7) 野中邦宏, 波床正敏, 西田圭佑, 大島秀樹：海外都市のLRT走行空間との比較に基づく日本の街路断面の課題考察, 土木計画学研究講演集, Vol.43, CD-ROM, 2011.
- 8) 波床正敏, ペリー史子, 塚本直幸, 吉川耕司, 伊藤雅：トランジットモールにおける歩行者のLRT軌道横断に関する分析, 都市計画論文集, Vol.48, No.3, pp.411-416, 2013.
- 9) 波床正敏, 伊藤雅, ペリー史子, 吉川耕司：トランジットモールにおける軌道上歩行者の横断角に関する考察, 都市計画論文集, Vol.50, No.3, pp.371-378, 2015.
- 10) L Menetrix, STRMTG: Tram Accidents' Analysis - France, European Transport Conference 2010, <http://abstracts.aetransport.org/paper/download/id/3470>, 2016年07月04日取得.
- 11) Marine MILLOT: LRT safety in France: how are pedestrians involved?, 13th National Light Rail & Streetcar Conference, 2015, <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2015/LRT/MMillot.pdf>, 2016年07月04日取得.
- 12) COST (European Cooperation in Science and Technology): Operation and safety of tramways in interaction with public space, http://www.ivt.ethz.ch/oev/publications/papers/COST_TU1103.pdf, 2016年07月04日取得.
- 13) Transportation Research Board: Guidebook on Pedestrian Crossings of Public Transit Rail Services, TCRP REPORT 175, 2015, 2016年07月04日取得.
- 14) Metrolink (Manchester, UK): Looking out for your safety, <http://www.metrolink.co.uk/Documents/Looking-out-for-your-safety.pdf>, 2016年07月04日取得.
- 15) The City of Edinburgh Council (UK): Tram safety, http://www.edinburgh.gov.uk/info/20126/trams/176/tram_safety, 2016年07月04日取得.
- 16) 環境基本法(最終改正2012年6月27日), <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H05/H05HO091.html>, 2014年3月11日取得.
- 17) 環境省：騒音に係る環境基準について(改正2012年3月30日), <http://www.env.go.jp/kijun/oto1-1.html>, 2014年3月11日取得.
- 18) 小野測器：小野測器技術レポート「騒音計とは」, http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/noise/souon_3.htm#mark6_5, 2014年3月11日取得.
- 19) 全国環境研協議会：騒音の目安, <http://www.env.go.jp/air/ippan/meyasu.pdf>, 2014年3月12日取得.
- 20) 菊地英男, 木戸一博：新しい「騒音の目安」調査について, 宮城県保健環境センター年報, 第28号, 2010, <http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/95533.pdf>, 2014年3月12日取得.
- 21) 国土交通省：「ハイブリッド車等の静音性に関する対策について(報告)」の取りまとめ等について, 2010, http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha07_h-h_000049.html, 2014年3月12日取得.
- 22) 独立行政法人交通安全環境研究所：車両接近通報装置に関する調査結果, <http://www.mlit.go.jp/common/000044181.pdf>, 2014年3月12日取得.
- 23) World Health Organization: Guidelines for Community Noise, <https://www.nh.gov/oep/energy/programs/documents/sb99-who-guidelines-community-noise.pdf>, 1999, 2016年07月04日取得.
- 24) 例えば, G.ジェニングス著(伊理正夫, 伊理由美訳)：幾何再入門, pp.144-152, 岩波書店, 1996.
- 25) (社)日本計量振興協会編：改訂騒音と振動の計測, pp.25-28, コロナ社, 2003.
- 26) 小野測器：等価騒音レベルの測定方法(JIS Z 8731:1999の概要), https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/noise/souon_9.htm, 2016年2月21日取得.

(2016. 2. 26 受付)

AN ANALYSIS OF PEDESTRIANS CROSSING BEHAVIOR ON TRANSIT MALLS CAUSED BY RUNNING NOISE OF LIGHT RAIL VEHICLES

Masatoshi HATOKO and Satoru MURAKAMI

Light Rail Vehicles generate lower noise and vibration than traditional streetcars but the feature increase a possibility that pedestrians can't aware of approaching LRV on downtown streets. In this study, sound pressure levels of running LRV on transit malls are measured and it was analyzed from a viewpoint of sound level that what kind of timing was selected for crossing the track.

As a result, it was found that excess of LRV noise over the minimum background noise of the street reduce crossing pedestrians, and LRV noise over ordinary street background noise cuts off crossing pedestrians.