

論文 (Original)

新幹線鉄道騒音・振動に対するアノイアンスの複合効果

横島潤紀, 森原崇\*, 佐藤哲身\*\*, 矢野隆\*\*\*

(環境情報部, \*石川工業高等専門学校, \*\*北海学園大学, \*\*\*熊本大学)

Combined Effects of High-Speed Railway Noise and Ground Vibrations on Annoyance

Shigenori YOKOSHIMA, Takashi MORIHARA\*, Tetsumi SATO\*\*, and Takashi YANO\*\*\*

(Environmental Information Division, National Institute of Technology, Ishikawa College\*, Hokkai-Gakuen University\*\*, Kumamoto University\*\*\*)

Summary

The Shinkansen super-express railway system in Japan has greatly increased its capacity and has expanded nationwide. However, many inhabitants in areas along the railways have been disturbed by noise and ground vibrations from the trains. Additionally, the Shinkansen railway emits a higher level of ground vibration than conventional railways at the same noise level. These findings imply that building vibrations affect living environments as significantly as the associated noise. Therefore, it is imperative to quantify the effects of noise and vibration exposures on of each annoyance under simultaneous exposure. We performed a secondary analysis using individual datasets of exposure and community response associated with Shinkansen railway noise and vibration. The data consisted of six socio-acoustic surveys, which were conducted separately over the last 20 years in Japan. Applying a logistic regression analysis to the datasets, we confirmed the combined effects of vibration/noise exposure on noise/vibration annoyance. Moreover, we proposed a representative relationship between noise and vibration exposures, and the prevalence of each annoyance associated with the Shinkansen railway.

Keywords: Shinkansen Railway; Noise; Ground vibration; Social survey; Annoyance

1 はじめに

日本最初の高速鉄道である新幹線鉄道は、1964年に東海道新幹線が開業して以来、輸送能力を大幅に増大させてきた。近年も、北陸新幹線及び北海道新幹線が、それぞれ2015年、2016年に部分的に開通し、日本国内での新幹線鉄道網は確実に拡大し続けている。

一方、高速で走行する列車から発生する騒音、地盤振動、及び低周波音は、沿線住民の生活環境を阻害する問題となる。国は、生活環境を保全し、人の健康を保護するために、1975年に「新幹線鉄道騒音に係る環境基準について」を告示した。その翌年には、環境庁長官が、運輸大臣に対して、「環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について」を勧告した。

環境基準の施行により、沿線での新幹線鉄道

騒音は確実に低減している<sup>1,2)</sup>。しかし、地盤振動については、確実に低減できる対策技術が確立されていないことなどにより、騒音に比べて、その低減傾向は明確ではない<sup>1,2)</sup>。

このことは、騒音、振動ともに、高いレベルで暴露されている沿線住民が少なくないことを示唆している。横島ら<sup>3)</sup>は、建築物内における新幹線鉄道振動の測定結果を報告した。鉛直方向の振動レベルは、木造の戸建住宅ではわずかに増加するものの、鉄筋コンクリート造の集合住宅では減少していた。すなわち、戸建住宅の居住者は、集合住宅の居住者に比べて大きな振動に暴露されていると推測できる。さらに、Yano et al.<sup>4)</sup>は、山陽新幹線と隣接する在来線鉄道それぞれの沿線における騒音と振動の実測結果から、騒音レベルが同程度の場合に、新幹線

鉄道の振動レベルが在来線鉄道よりも大きいことを示した。このように、新幹線鉄道沿線の建築物内では、騒音のみならず振動も、生活環境に顕著な影響を与える可能性がある。

日本では、新幹線鉄道騒音・振動に対する住民反応に関する社会調査が数多く行われてきた。Yokoshima et al.<sup>5)</sup> は、1985年から2002年までの騒音と振動に対する住民反応の時間的変化について報告した。Yano et al.<sup>4)</sup> は、福岡県内の山陽新幹線沿線において社会調査を実施し、新幹線鉄道からの騒音と振動の相互作用の存在を示唆した。横島ら<sup>3)</sup> は、集合住宅ではなく戸建住宅においては、新幹線鉄道騒音・振動に対するアノイアンスは、それぞれ振動、騒音が大きくなるとともに増加することを示した。これらの結果を踏まえて、騒音と振動による複合アノイアンスの概念を導入し、騒音、振動それぞれの暴露量が、複合アノイアンスに及ぼす影響を定量的に示した。横島らは、その他にも、騒音の暴露-反応関係<sup>6,7)</sup> だけではなく、振動の暴露-反応関係<sup>8)</sup> も示した。これらの研究に続いて、近年に実施した社会調査についての結果も報告されている。Moriyama et al.<sup>9)</sup> は、北陸新幹線が金沢まで延伸する前に、長野新幹線沿線において社会調査を実施し、ロジスティック回帰分析の適用により、時間帯別等価騒音レベル ( $L_{den}$ ) とアノイアンスの反応率との関係を示した。Tetsuya et al.<sup>10)</sup> は、九州新幹線及び在来鉄道沿線が併走する地域において、騒音と振動それぞれの暴露量とアノイアンスを比較した。九州新幹線開通前後の比較では、“高度な”アノイアンスに変化は見られなかったが、“適度な”アノイアンスは、開業後に大幅に低減した。対照的に、在来鉄道線の開通前後では、“高度な”のみならず“適度な”アノイアンスも有意な差を示さなかった。これらの研究とは別に、Yokoshima et al.<sup>11)</sup> は、日本国内で行われた社会調査のデータセットを用いて、交通騒音の暴露-反応関係を比較した。その結果、新幹線鉄道騒音に対するアノイアンスの反応率は、民間航空機騒音と同程度であり、在来鉄道や道路交通騒音と同程度であることを示した。これは、ヨーロッパや北米諸国とは異なり、日本では鉄道騒音に対するボーナス (Railway bonus)<sup>12)</sup> がないことを明らかにした。日本で Railway bonus が存在しない要因として、著者らは、家屋内で同時に暴露され

る振動が、騒音に対するアノイアンスに影響を及ぼす可能性を指摘している。

社会調査の手法以外にも、振動試験装置等を用いて、高速列車からの騒音と振動の同時暴露による、複合感覚を対象とした主観評価実験が実施されている。Lee et al.<sup>13)</sup> は、高速列車通過時に、建築物内で記録した騒音と 20Hz の振動を用いて、騒音と振動の複合効果がアノイアンスに及ぼす影響を調べた。その結果、振動は騒音に対するアノイアンスに影響を及ぼさないが、騒音と振動の複合による全体的なアノイアンスは、騒音だけによるアノイアンスに比べて明確に大きかった。Moriyama et al.<sup>14)</sup> は、北陸新幹線沿線で記録した騒音と振動を刺激として、騒音と振動の複合が、生活妨害に及ぼす影響を調べた。その結果、暴露される騒音が低レベルの場合には、騒音と振動が複合して思考・読書妨害を引き起こすことを示した。

既往の研究成果から、高速鉄道から同時に発生する騒音と振動が複合して暴露されることにより、それぞれのアノイアンスに影響を及ぼす可能性が示唆される。しかし、騒音と振動の暴露量を組み合わせた場合に、暴露量と個々のアノイアンスとの関係は定量化されていない。

以上のことから、新幹線鉄道からの騒音と振動の同時暴露によるアノイアンスの複合効果を明らかにするために、新幹線鉄道沿線で実施された社会調査及び騒音・振動測定の個票データ (暴露量と調査票の回答結果) を含むデータセットを用いて、二次分析を実施した。分析には、過去20年間に実施された6回の社会調査で収集したデータを用いた。最初に、新幹線鉄道騒音・振動それぞれについて、データセット間で暴露-反応関係を比較した。続いて、個票データに多重ロジスティック回帰分析を適用し、騒音・振動暴露量の両者から個々のアノイアンスへの影響を調べた。最後に、性別や年齢などを交絡因子として調整し、騒音と振動の両暴露量と個々のアノイアンスとの関係を定量化した。

本稿は、International Journal of Environmental Research and Public Health<sup>15)</sup> に Article (査読付論文) として採択されたものを、日本語で再構成したものである。

## 2 調査方法

### 2.1 社会調査

本研究で分析に用いた個票データは、神奈川 (KNG95・KNG01), 福岡 (FKO), 名古屋 (NGY), 熊本 (KMM) 及び長野 (NGN) の 6 調査から得られたデータセットに含まれている。なお、これらの調査は別個に実施されたものである。すべてのデータセットは、騒音と振動それぞれの暴露量及びアノイアンスを含んでいる。社会調査の概要を Table 1 に示す。

KNG95 調査では、騒音、振動それぞれについて、複数の発生源の中から、新幹線鉄道が「最も気になる」及び「その次に気になる」と指摘した回答者から、新幹線鉄道に対する我慢感を 4 段階尺度 (我慢できる－我慢できない) で得た。これらの回答を整理して、5 段階尺度のアノイアンス (1. 気にならない, 2. 我慢できる, 3. どちらかといえば我慢できる, 4. どちらかといえば我慢できない, 5. 我慢できない) が得られていた。なお、新幹線鉄道を指摘しなかった回答者については、本来、そのアノイアンスは不明ではあるが、本稿において議論の中心となる高度なアノイアンスは発生していないと整理して、「1. 気にならない」を割り当てた。

その他の調査は、新幹線鉄道からの騒音と振動それぞれについて、ICBEN (International Commission on Biological Effects of Noise) の 5 段階尺度 (1. まったくない, 2. それほどない, 3. 多少, 4. だいぶ, 5. 非常に) <sup>16)</sup> に準拠したアノイアンスが得られていた。ただし、名古屋調査では、騒音のアノイアンスは、新幹線鉄道に限定せず、「鉄道の音」に対する反応が得られていた。一方、振動のアノイアンスは、発生源を特定せず、自宅で感じる振動に対する反応が得られていた。

KNG01 と KMM は、戸建住宅 (DH) だけでなく集合住宅 (AH) も対象としていた。戸建住宅と集合住宅では防音性能に顕著な差がある。このことから、例えば、建築物の音源側に面する外壁に入力される騒音レベルが同程度だとしても、居室内で暴露される騒音レベルは、集合住宅に比べて戸建住宅で大きくなる。同様に、鉛直方向の振動レベルが、戸建住宅と集合住宅の基礎構造は大きく異なるから、地盤上で同程度でも、居室内で暴露される振動レベルは戸建住宅で大きくなる。これらのことを考慮して、本研究では戸建住宅のみを分析の対象とした。その結果、サンプル数は 2,967 となった。

Table 1 Outline of datasets.

Dataset <sup>a</sup>	KNG95	KNG01	FKO	NGY	KMM	NGN
Date (FY)	1995–1996	2001–2003	2003	2004	2011–2012	2013
Location <sup>b</sup>	KNG Pref.	KNG Pref.	FKO Pref.	NGY City	KMM Pref.	NGN Pref.
Line <sup>c</sup>	TSL	TSL	SSL	TSL	KSL	HSL
Number of trains <sup>d</sup>						
Daytime (7:00–22:00)	234	265	142	249	112	62
Nighttime (22:00–7:00)	16	22	18	21	17	7
Method	Visit-Mail <sup>e</sup>	Visit-Mail <sup>e</sup>	Visit-Mail <sup>e</sup>	Interview	Visit-Visit <sup>e</sup>	Mail-Mail <sup>e</sup>
Housing type (DH; AB) <sup>f</sup>	DH	DH & AB	DH	DH	DH & AB	DH
Annoyance	unbearable	ICBEN <sup>g</sup>	ICBEN <sup>g</sup>	ICBEN <sup>g</sup>	ICBEN <sup>g</sup>	ICBEN <sup>g</sup>
Response proportion (%) <sup>h</sup>	72	57	66	58	45	45
Sample size	709	872	358	175	559	294

<sup>a</sup> References for datasets (left–right): (3, 1, 2, 5, 10, 8); <sup>b</sup> Kanagawa (KNG); Fukuoka (FKO); Nagoya (NGY); Kumamoto (KMM), and; Nagano (NGN); <sup>c</sup> Tokaido Shinkansen line (TSL); Sanyo Shinkansen line (SSL); Hokuriku Shinkansen line (HSL); Kyushu Shinkansen line (KSL); <sup>d</sup> Shinkansen super-express trains operate between 6:00 and 0:00; <sup>e</sup> Distribution-collection method; <sup>f</sup> Detached house (DH); Apartment building (AB); <sup>g</sup> International Commission on Biological Effects of Noise (ICBEN); <sup>h</sup> Response proportion of detached houses.

### 2.2 騒音・振動測定

暴露量を推定するための新幹線鉄道騒音・振動の測定は、原則、各調査で設定した調査地区を単位として実施された。NGY 以外のデータセットでは、社会調査の終了後に実施した測定から暴露量が推計された。一方、NGY では、調査の前年度に名古屋市が実施した測定結果から暴露量が推計された。なお、FKO では、一部の住

民の振動暴露量は、推計されなかった。

騒音に関しては、新幹線鉄道の通過列車ごとに、最大騒音レベル ( $L_{A,Smax}$ ) 及び単発騒音暴露レベル ( $L_{AE}$ ) を測定した。本稿では、 $L_{AE}$  のエネルギー平均値と昼間・夜間それぞれの基準時間帯ごとの運行本数から算出した昼夜騒音レベル ( $L_{dn}$ ) を、暴露量の評価指標とした。なお、基準時間帯の区分は、昼間を 7:00～22:00、

夜間を 22:00~7:00 とした。回答者の騒音暴露量を推計するために、各測定点で得られた  $L_{dn}$  を用い、軌道からの距離と  $L_{dn}$  との関係式を、調査地区ごとに 1 個又は複数個作成した。騒音の発生・伝搬状況を踏まえて、当該回答者宅に適用される関係式に、線路からの距離を代入して  $L_{dn}$  を推定した。

振動に関しては、地盤上において、鉛直方向の最大振動レベル ( $L_{vzmax}$ ) を、騒音測定と同じ地点で測定した。 $L_{vzmax}$  の測定値から、振動レベルが上位半数のものを算術平均し、これを振動暴露量の評価指標とした。各回答者の振動暴露量は、騒音と同様の方法で推定した。

暴露量は、騒音、振動ともに、小数点以下を四捨五入して整数値で整理した。

### 3 結果

#### 3.1 個人属性及び住宅構造

Table 2 は、分析に用いたデータセットの個人属性及び住宅構造について、それぞれの相対的分布を示したものである。性別に関しては、全体的には、男性よりも女性の回答者が多かった。特に、KNG95 では、主婦を調査対象としていたことから女性に偏っていた。年齢に関しては、戸建住宅のみを分析対象としたために、50 歳以上の回答者が各データセットで 52~83% と高い割合を示した。居住年数については、10 年以上の回答者が 70% を超えた。最後に、戸建住宅の大部分は、木造であった。ただし、NGY では、鉄筋コンクリート造の割合が高かったが、これは過去の災害の教訓を踏まえてのことによる。

Table 2 Relative frequency of distributions of demographic and housing factors (%).

Items	Categories	KNG95	KNG01	FKO	NGY	KMM	NGN
Gender	Male	14	47	49	39	41	56
	Female	86	50	50	61	58	35
	Unknown	1	3	0	1	1	10
Age	<30	6	3	7	4	4	3
	30-39	10	12	7	5	4	4
	40-49	31	17	10	10	12	9
	50-59	30	29	24	16	17	16
	60-69	17	22	37	31	28	33
	≥70	4	15	15	33	33	34
	Unknown	0	2	0	1	2	1
Period of residence	<5 years	14	17	5	9	6	4
	<10 years	12	13	9	5	11	10
	≥10 years	74	69	86	83	83	85
	Unknown	0	0	0	3	1	1
Housing structure	Wooden	85	86	91	59	89	86
	Reinforced Concrete	1	2	1	23	3	2
	Steel frame	10	10	6	7	7	10
	Others	3	0	1	6	0	1
	Unknown	1	2	0	4	1	0

#### 3.2 騒音・振動暴露量

Fig. 1 には、各データセットの  $L_{dn}$  と  $L_{vmax}$  それぞれの平均値の関係を示す。各データセットは異なる調査地域を対象としていたため、ここでは、相対的な位置関係に着目した。

データセット間の  $L_{dn}$  を比較すると、NGY が最も大きく、KNG01 が続き、KNG95 と FKO は同程度であった。KMM 及び NGN については、列車の運行本数や 1 編成の車両数が少なかったため、 $L_{AS,max}$  が同程度でも、 $L_{dn}$  は小さくなっていった。一方、 $L_{vmax}$  については、KNG95 が最も大きく、その他にも KNG01 及び NGY が大きくなっていった。 $L_{dn}$  と同様に、KMM 及び NGN の  $L_{vmax}$  が小さかったことは、鉄道構造物重量の増

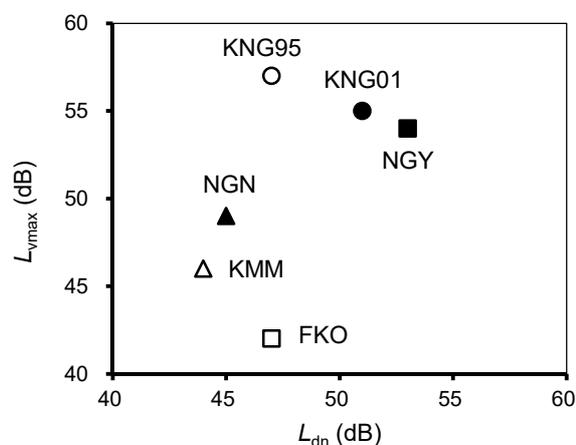


Fig. 1 Relationships between the mean energy-based index ( $L_{dn}$ ) and mean maximum-based index ( $L_{vmax}$ ) for each dataset.

加, 振動の事前対策の実施による防振対策の効果と考えられる。また,  $L_{vmax}$  に関しては, すべてのデータセットの中で, FKO が最も小さい値を示していた。これは, 軌道から 100 m 以上離れた遠方に立地していた住宅が多かったことによる。実際に, 100 m 以上離れて立地する住宅の割合は, FKO では 41%, KMM で 40%, KNG95 で 17% となっており, その他のデータセットでは 10% 未満であった。

### 3. 3 暴露-反応関係

本稿では, 新幹線鉄道からの騒音, 振動に対するアノイアンスを, それぞれ騒音アノイアンス, 振動アノイアンスと記す。暴露-反応関係を算出するために, 騒音・振動アノイアンスの指標として, % Extremely Annoyed (%EA) 及び % Very Annoyed (%VA) の有症率を用いた。これらの指標の算出方法は, 5 段階尺度のアノイア

ンスのうち, 前者は, 「非常に」又は「我慢できない」に回答した人 (extremely annoyed person) の割合とした。一方, 後者は, 「非常に」若しくは「だいたい」, 又は「我慢できない」若しくは「どちらかといえば我慢できない」に回答した人 (very annoyed person) の割合とした。

Fig. 2 は, 騒音暴露量と騒音アノイアンスの有症率との関係を, データセット間で比較したものである。 $L_{dn}$  を 5dB 間隔に分割したが, サンプル数が 10 未満のカテゴリーは非表示とした。騒音アノイアンスの有症率は, データセットにより大きく異なっていた。KNG01 及び FKO では, %EA, %VA のいずれもが高かったことがわかる。特に, FKO では, %EA, %VA のいずれも, 48~52 dB のカテゴリーで急激に増加した。対照的に, KMM 及び NGN では, NGN が FKO と同様に急激な増加を示したものの, 有症率そのものは全体的に低かった。

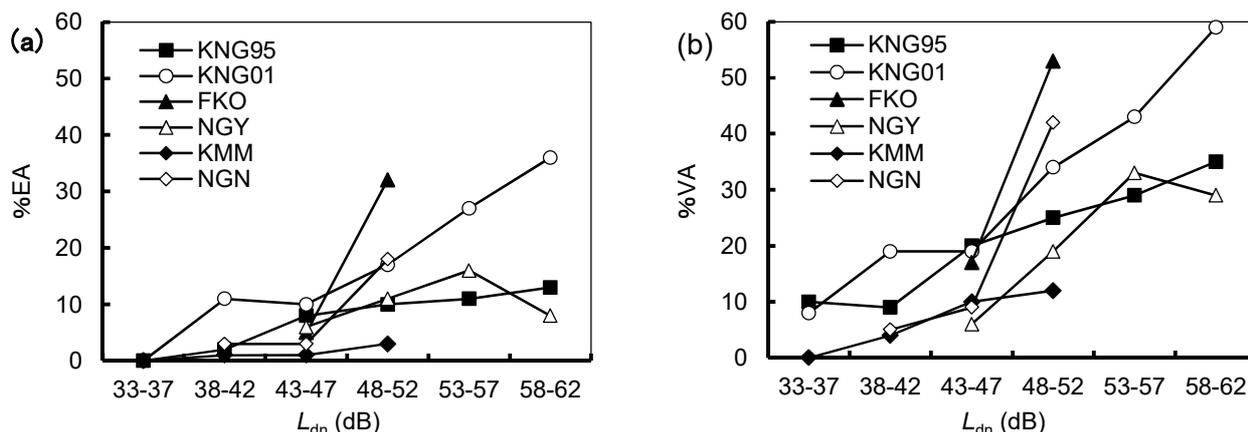


Fig. 2 Comparison of the relationships between  $L_{dn}$  and prevalence of noise annoyance for each dataset. (a)  $L_{dn}$ -%EA relationships; (b)  $L_{dn}$ -%VA relationships. Index of annoyance calculated from the rate of people who responded to the most annoyed category (%EA); the rate of people who respond to either of the top two annoyance categories (%VA).

Fig. 3 は, 振動暴露量と振動アノイアンスの有症率との関係を, データセット間で比較したものである。 $L_{vmax}$  を 5 dB 間隔に分割したが, サンプル数が 10 未満のカテゴリーは非表示とした。騒音の場合と異なり, %EA の場合には, KNG01 が他のデータセットに比べて全般的に高かったが, 残りの 5 データセットは同程度の有症率を示した。%VA に関しても, %EA と同様の傾向を示した。

ところで, KNG95 のアノイアンスは, 「我慢できない」を基礎評価語とした 5 段階尺度としたことから, ICBEN の 5 段階尺度との違いを確認する必要がある。ただし, 暴露量とアノイア

ンスとの関係を直接比較しても, 尺度の違いによる影響を把握することは難しい。そこで, 神奈川県内の調査より得られた KNG95 と KNG01 を対象とし, 生活環境項目として両調査に共通した「周辺の静けさ」及び「家の中の振動」(基礎評価語は満足-不満)の回答を用いて比較を行った。「周辺の静けさ」について,  $L_{dn}$  と不満の反応率との関係を比較すると, KNG95 に比べて, KNG01 が減少していた。「家の中の振動」について,  $L_{vmax}$  と不満の反応率との関係は, KNG95 と KNG01 で顕著な差を示さなかった。これらの結果は, アノイアンスの有症率が, KNG95 に比べて KNG01 で大きかったことと一致しない。調査地区は同一でないが, 両調査は

同じ神奈川県内で 10 年以内に実施されていた。さらに、2000 年以降にアノイアンスが増加する特段の要因も見出せないことから、筆者らは、%EA 及び%VA の差は、アノイアンス定義の相違に由来するものと判断した。このことから、KNG95 を除き、ICBEN の 5 段階尺度を用いたデータセットに絞り、以後の分析を行った。また、Fig. 2 及び Fig. 3 より、近年の調査対象であった KMM 及び NGN では、騒音、振動いづれも、アノイアンスの有症率は、他のデータセットに比べて低かった。KNG95 を除外した 5

データセットの調査は、調査時期に 12 年の時間差がある。すなわち、平均的にみると、アノイアンスは、10 年間で低くなったとも解釈できるが、これは既往の知見<sup>17)</sup>と一致しない。建設年代の視点から、新しい長野新幹線や九州新幹線には、初期の東海道新幹線や山陽新幹線に比べて、開業前の段階で、効果的な騒音・振動対策が実施されてきている。したがって、時間効果よりもむしろ、事前対策の導入により、アノイアンスの過小反応が生じていると考える。

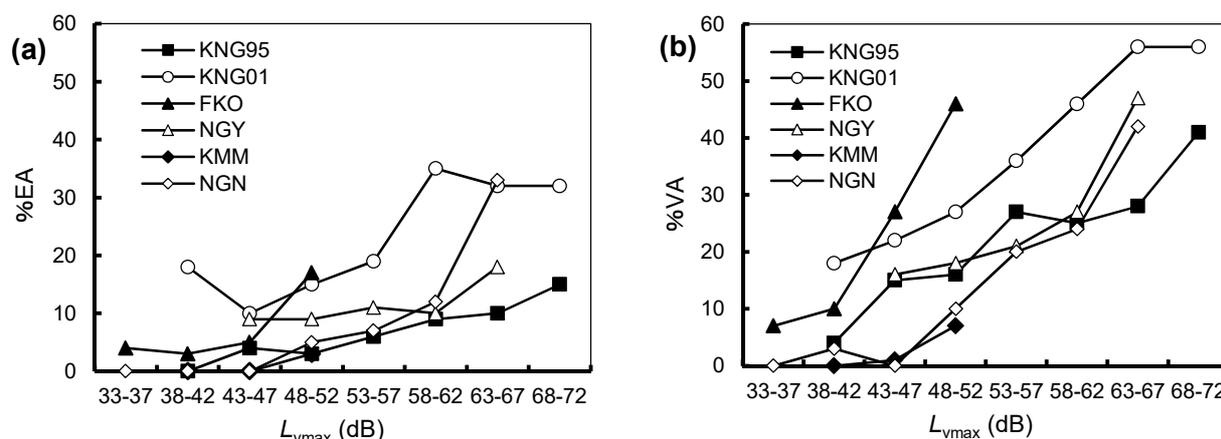


Fig. 3 Comparison of the relationships between  $L_{vmax}$  and prevalence of vibration annoyance for each dataset. (a)  $L_{vmax}$ -%EA relationships; (b)  $L_{vmax}$ -%VA relationships.

### 3. 4 複合効果

最初に、振動が、騒音アノイアンスに及ぼす影響を検討した。Fig. 4 は、騒音暴露量と騒音アノイアンスとの関係を、3 段階にカテゴリー化した振動暴露量で比較したものである。 $L_{vmax}$  のカテゴリーは、サンプル数を考慮して、LO-VL (38-47 dB), MD-VL (48-57 dB), 及び HI-VL (58-67 dB) の 10 dB 間隔で分類した。いずれ

のカテゴリーも 300 人以上の回答者を含んでいた。なお、サンプル数が 10 未満のカテゴリー非表示とした。Fig. 4 から、同一の  $L_{dn}$  カテゴリーで比較すると、 $L_{vmax}$  の増加とともに、%EA, %VA のいずれも増加する傾向を示した。さらに、振動暴露量の 3 カテゴリー間での有症率の差を検証してみると、HI-VL と MD-VL との差は、MD-VL と LO-VL との差よりも大きかった。

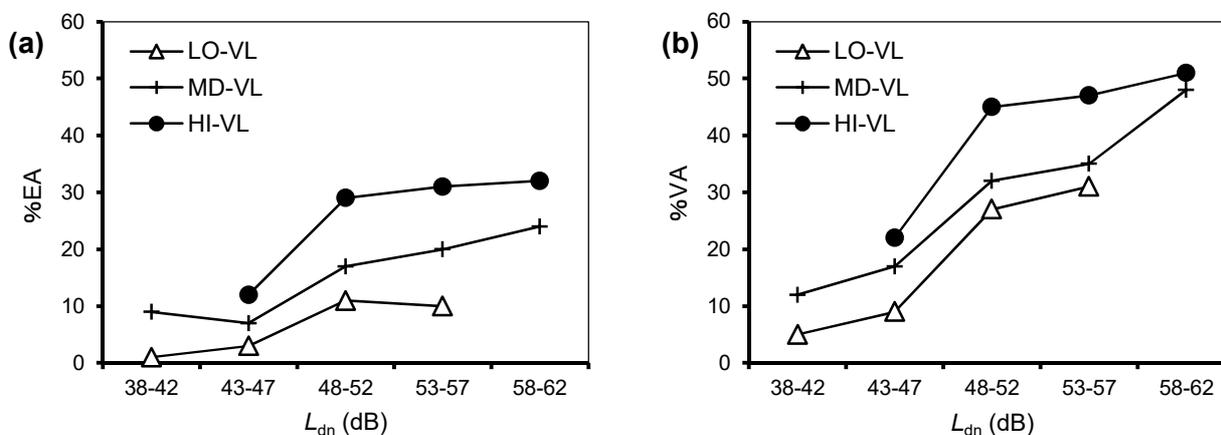


Fig. 4 Comparison of the relationships between  $L_{dn}$  and prevalence of noise annoyance according to vibration exposures: (a)  $L_{dn}$ -%EA relationships; (b)  $L_{dn}$ -%VA relationships. Low noise level group (LO-NL); medium noise level group (MD-NL); high noise level groups (HI-NL).

Fig. 5 は、振動の暴露量とアノイアンスとの関係を、3 段階にカテゴリー化した騒音暴露量で比較したものである。 $L_{dn}$  のカテゴリーは、サンプル数を考慮して、LO-NL (33–42 dB)、MD-NL (43–52 dB)、及び HI-NL (53–62 dB) の 10 dB 間隔で分類した。なお、サンプル数が

10 未満のカテゴリーは非表示とした。Fig. 5 から、同一の  $L_{vmax}$  カテゴリーで比較すると、 $L_{dn}$  の増加とともに、%EA、%VA のいずれも増加する傾向を示した。%EA は MD-NL と LO-NL との間では僅かな差であったが、 $L_{dn}$  の 3 カテゴリーの間では、%VA はほぼ等間隔に位置した。

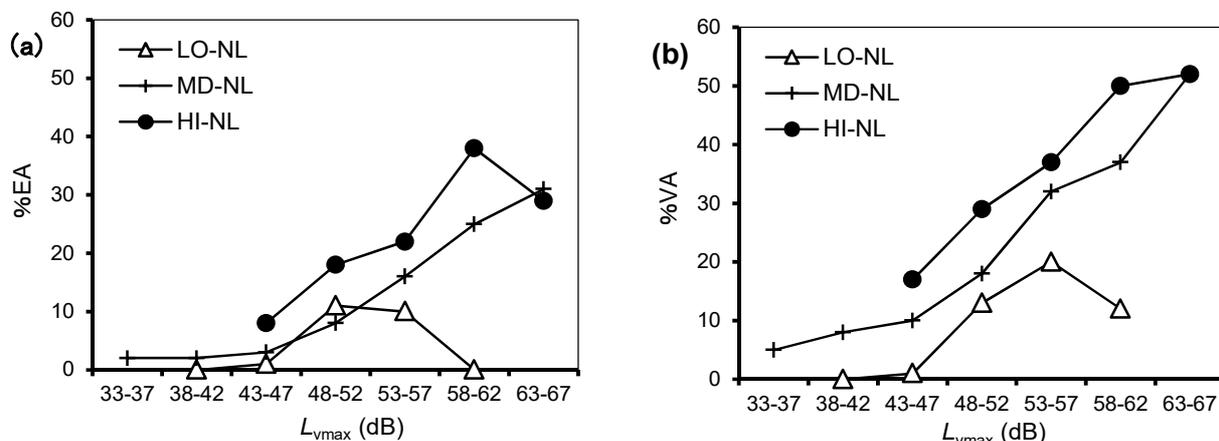


Fig. 5 Comparison of the relationships between  $L_{vmax}$  and prevalence of vibration annoyance according to noise exposures: (a)  $L_{vmax}$ -%EA relationships; (b)  $L_{vmax}$ -%VA relationships.

### 3. 5 ロジスティック回帰分析の適用

新幹線鉄道からの騒音と振動に対するアノイアンスの複合効果を定量化するために、ロジスティック回帰分析を適用した。分析では、騒音・振動アノイアンスそれぞれで、extremely annoyed person 又は very annoyed person の有無の 2 変数を目的変数とした。説明変数を騒音・振動暴露量とし、性別、年齢及び住宅構造を調整変数とした。騒音・振動暴露量については、5 又は 10 dB 間隔で分割した。具体的には、騒音アノイアンスの分析では、 $L_{dn}$  を 5 dB 間隔で分割した 5 カテゴリー、 $L_{vmax}$  を 10 dB 間隔で分割した 3 カテゴリー (LO-VL・MD-VL・HI-VL) を用いた。振動アノイアンスの分析では、 $L_{vmax}$  を 5 dB 区間で分割した 6 カテゴリー、 $L_{dn}$  を 10 dB 間隔で分割した 3 カテゴリー (LO-NL・MD-NL・HI-NL) を用いた。なお、上記の範囲外にあるデータは、分析の対象外とした。

Table 3 及び Table 4 には、それぞれ騒音アノイアンス、振動アノイアンスに対する各カテゴリーのオッズ比を示す。なお、 $L_{dn}$  と  $L_{vmax}$  との交互作用項は有意でなかったため、交互作用項を含めない分析結果である。オッズ比の計算では、騒音アノイアンスの場合には、性別は男性、年齢は 30 歳未満、住宅構造は木造、 $L_{dn}$  は 38–42 dB、 $L_{vmax}$  は MD-VL を、それぞれ基準カテゴリー

とした。振動アノイアンスの場合には、交絡要因の基準カテゴリーは同じとし、 $L_{vmax}$  は 33–37 dB のカテゴリー、 $L_{dn}$  は MD-NL とした。

Table 3 に示すとおり、 $L_{dn}$  が 48–52 dB のカテゴリーでは、%EA、%VA とともに、オッズ比は 1 より大きく、その 95%信頼区間の下限値も 1 を超過 (5%水準で有意) した。このカテゴリーより  $L_{dn}$  が大きい 2 カテゴリーでも、同様の結果が得られた。一方、LO-VL カテゴリーでは、オッズ比及びその 95%信頼区間の上限値は 1 未満 (5%水準で有意) であった。同様に、HI-VL カテゴリーでは、MD-VL と比べて、5%水準で有意に高かった。これらの結果は、 $L_{dn}$  が 48–52 dB 以上のカテゴリーでは、 $L_{dn}$  は 38–42 dB のカテゴリーに比べて騒音アノイアンスが有意に高く、加えて  $L_{vmax}$  が騒音アノイアンスに対して有意な増幅効果を及ぼすことを示している。

Table 4 は、Table 3 と同様の傾向を示す。すなわち、 $L_{vmax}$  が 48–52 dB のカテゴリーよりも大きくなると、%EA、%VA とともに、オッズ比は 1 よりも大きく、その 95%信頼区間の下限値も 1 を超えていた。同様に、 $L_{dn}$  による振動アノイアンスへの有意な増幅効果も確認できた。

その他の交絡要因について考察する。女性は男性よりも、騒音、振動ともに、アノイアンスの有症率は有意に低かった。年齢と住宅構造は、

騒音、振動ともに、アノイアンスの有症率に有意な影響を及ぼさなかった。ただし、有意ではないものの、鉄骨造や鉄筋コンクリート造の戸

建住宅よりも木造の戸建住宅では、騒音、振動ともに、アノイアンスの有症率が増加する傾向にあった。

**Table 3** Logistic regression analysis of %EA/%VA due to noise.

Item	Category	%EA		%VA	
		Odds Ratio	95% CI	Odds Ratio	95% CI
<i>L<sub>dn</sub></i>	43-47	1.204	0.542-2.676	1.627	0.938-2.823
	48-52	3.988	1.889-8.421	4.704	2.762-8.014
	53-57	4.780	2.171-10.524	5.459	3.062-9.732
	58-62	4.922	2.026-11.957	7.319	3.689-14.519
<i>L<sub>vmax</sub></i>	LO-VL	0.466	0.310-0.700	0.621	0.471-0.820
	HI-VL	1.717	1.215-2.426	1.482	1.104-1.989
Sex	Female	0.680	0.507-0.910	0.719	0.573-0.903
Age	30-39	1.287	0.506-3.271	0.770	0.389-1.521
	40-49	1.420	0.585-3.448	1.039	0.554-1.951
	50-59	1.708	0.733-3.979	1.254	0.692-2.272
	60-69	1.600	0.688-3.723	1.324	0.734-2.387
	≥ 70	0.751	0.308-1.832	0.604	0.325-1.120
Housing Structure	Reinforced Concrete	0.577	0.267-1.248	0.734	0.419-1.285
	Steel frame	0.882	0.521-1.491	1.044	0.705-1.547
	Others	0.529	0.119-2.342	0.487	0.160-1.478
Constant		0.051		0.130	

**Table 4** Logistic regression analysis of %EA/%VA due to ground vibration.

Item	Category	%EA		%VA	
		Odds Ratio	95% CI	Odds Ratio	95% CI
<i>L<sub>vmax</sub></i>	38-42	1.640	0.324-8.305	1.778	0.629-5.029
	43-47	1.625	0.367-7.201	2.084	0.805-5.398
	48-52	4.923	1.166-20.833	4.804	1.884-12.250
	53-57	9.277	2.220-38.778	9.231	3.6381-23.422
	58-62	15.659	3.709-66.111	11.804	4.569-30.498
	63-67	13.215	2.982-58.557	17.126	6.261-46.843
<i>L<sub>dn</sub></i>	LO-NL	0.489	0.248-0.963	0.333	0.196-0.565
	HI-NL	1.775	1.259-2.502	1.470	1.099-1.968
Sex	Female	0.721	0.535-0.972	0.621	0.490-0.786
Age	30-39	0.887	0.353-2.231	0.720	0.359-1.443
	40-49	1.379	0.589-3.231	1.157	0.611-2.189
	50-59	1.706	0.761-3.826	1.304	0.714-2.383
	60-69	1.126	0.498-2.547	0.982	0.537-1.794
	≥ 70	0.824	0.352-1.929	0.608	0.324-1.140
Housing Structure	Reinforced Concrete	0.748	0.355-1.576	0.814	0.455-1.456
	Steel frame	0.842	0.491-1.443	0.863	0.567-1.314
	Others	0.598	0.130-2.736	1.450	0.562-3.742
Constant		0.020		0.070	

Table 3 及び Table 4 に示す結果から、*L<sub>dn</sub>* 及び *L<sub>vmax</sub>* と騒音と振動それぞれのアノイアンスの有症率との関係の定量化を試みた。交絡要因については、性別と年齢を 2015 年の国勢調査の結果に基づき調整し、住宅構造は木造住宅とし、それぞれの %EA, %VA を算出した。

Fig. 6 は、騒音暴露量と騒音アノイアンスとの関係を、3 段階の振動暴露量別に示したものである。同様に、Fig. 7 は、振動暴露量と振動アノイアンスとの関係を、3 段階の騒音暴露量別に示したものである。

Fig. 6 から、*L<sub>dn</sub>* が 48-52 dB から 58-62 dB の

3 カテゴリーでは、%EA のみならず %VA でも、*L<sub>dn</sub>* に対する有症率の増加割合は緩やかであった。さらに、同一の *L<sub>dn</sub>* カテゴリーで比較すると、*L<sub>vmax</sub>* の増加にしたがい、%EA, %VA は顕著に増加した。*L<sub>dn</sub>* の平均値 48 dB を含むカテゴリー (48-52 dB) では、%EA は 9% (LO-VL), 17% (MD-VL), 及び 26% (HI-VL), %VA は 23% (LO-VL), 33% (MD-NL), 及び 42% (HI-VL) であった。

Fig. 7 から、振動アノイアンスの有症率は、*L<sub>vmax</sub>* が 63-67 dB のカテゴリーでの %EA を除き、*L<sub>vmax</sub>* の増加とともに、ほぼ単調に増加した。一

方, 同一の  $L_{vmax}$  カテゴリーで比較すると,  $L_{dn}$  の増加にしたがい, %EA, %VA どちらも顕著に増加した。 $L_{vmax}$  の平均値 50 dB を含むカテゴリー (48-52 dB) では, %EA は 5% (LO-NL), 9% (MD-NL), 及び 14% (HI-NL), %VA は 7% (LO-NL), 19% (MD-NL), 及び 26% (HI-NL) であった。

これらの結果から, 振動又は騒音の暴露量が増加するにしたがい, それぞれ騒音, 振動に対するアノイアンスの有症率が高くなることが確認できた。すなわち, 住民が高レベルの騒音と振動に同時に曝されている場合には, アノイアンスの複合効果が生じることを示唆するものである。

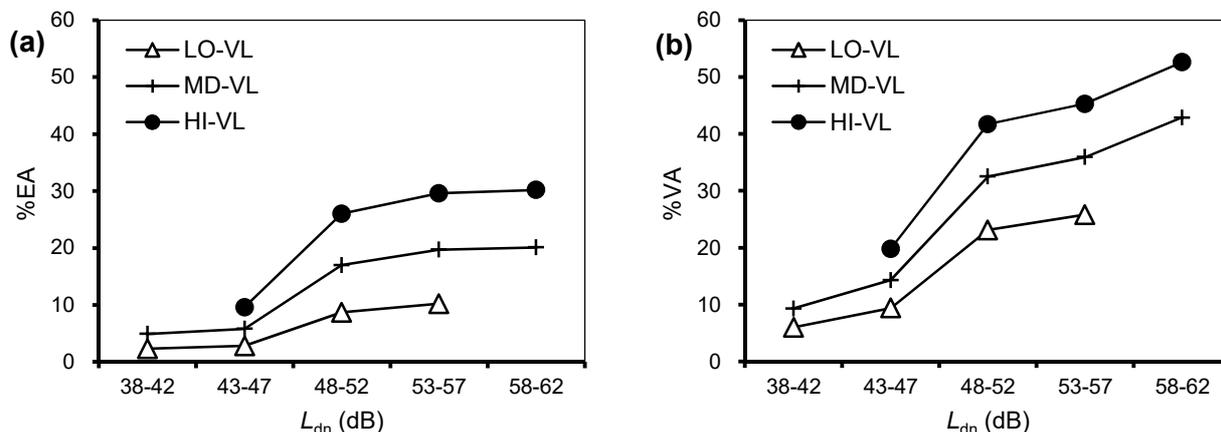


Fig. 6 Relationships between  $L_{dn}$  and prevalence of noise annoyance by vibration exposures: (a)  $L_{dn}$ -%EA relationships; (b)  $L_{dn}$ -%VA relationships.

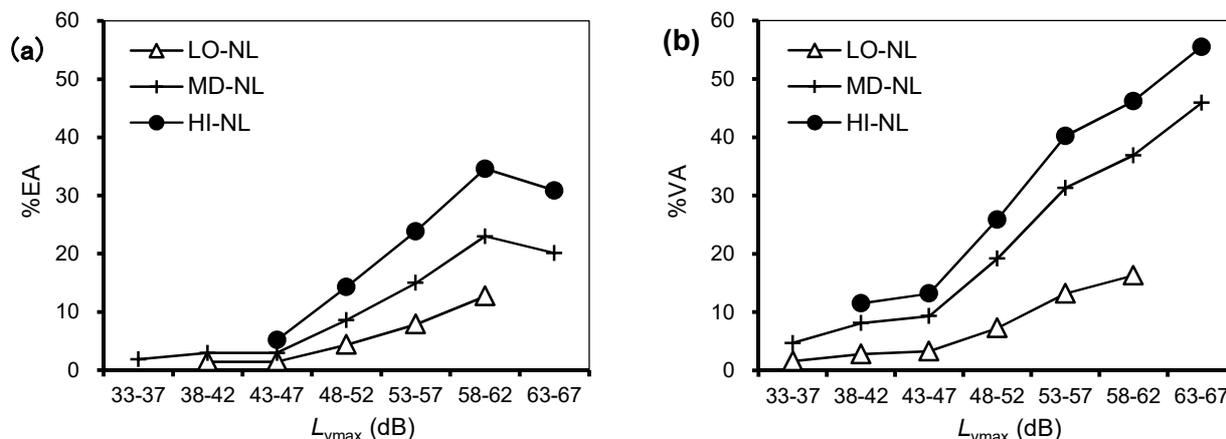


Fig. 7 Relationships between  $L_{vmax}$  and prevalence of vibration annoyance by noise exposures: (a)  $L_{vmax}$ -%EA relationships; (b)  $L_{vmax}$ -%VA relationships.

#### 4 考察

過去20年間で別個に実施された6回の社会音響調査で得られたデータセットの二次分析により, 新幹線鉄道からの騒音・振動に対するアノイアンスの複合効果を検証した。本研究から, 騒音と振動の同時暴露により, 騒音, 振動それぞれのアノイアンスが増大することを確認できた。しかし, Lee et al.<sup>12)</sup>は, 振動試験装置を用いた振動感覚実験では, 騒音に対するアノイアンスに振動が影響を与えないことを報告した。騒音と振動に対する感覚の複合効果を検討した

いくつかの研究でも, 同様の結果が報告されている<sup>18,19)</sup>。実際の生活環境の場を対象とする社会調査と振動感覚実験とで, アノイアンスの複合効果に差が生じる要因を議論するために, Lee et al.<sup>13)</sup> 及び Gidlöf-Gunnarsson et al.<sup>20)</sup> の議論も踏まえて, 実験の参加者と社会調査の回答者が, 騒音及び振動に曝される状況の違いを考察する。

本稿で分析対象とした戸建住宅の居住者は, 長期間にわたり, 騒音と振動に同時に曝されている。Öhrström<sup>21)</sup> は, 社会調査の結果から, 在来鉄道騒音に対するアノイアンスを, 振動が存

在する区域と存在しない区域で比較した。その結果、騒音に対するアノイアンスが同程度となる騒音レベルを比較すると、振動が存在する区域は、振動が存在しない区域に比べて、10 dB 小さかった。これは、Fig. 6 から、 $L_{vmax}$  が HI-VL の場合と  $L_{vmax}$  が MD-VL の場合で、騒音アノイアンスの%VA が同程度となる  $L_{dn}$  は、HI-VL の場合に 48–52 dB のカテゴリー、MD-VL の場合に 58–62 dB のカテゴリーで、その差が 10 dB 程度であったことと一致する。Lercher<sup>22)</sup> は、騒音と振動の複合効果に関する既往研究のレビューにより、振動は騒音に対するアノイアンスを増加させるが、その影響度は研究により異なるとして整理した。Tamura<sup>23)</sup> は、新幹線鉄道沿線の住民は、在来鉄道沿線に比べて、騒音を否定的に評価していることを報告した。これは、新幹線鉄道沿線では、住民の騒音問題に対する関心が強く、さらに新幹線騒音を地域にとって必要でないと感じているため、騒音を否定的に評価する住民が多くなることに起因している。

このように、高レベルの騒音と振動を長期間にわたり暴露されることにより、否定的反応であるアノイアンスは累積効果により増幅し、複合効果が生じやすくなる。対照的に、感覚実験の参加者は、短時間の実験中にのみ騒音と振動を同時に曝されているため、累積効果が働かず、アノイアンスの複合効果が生じにくくなる。

次に、本稿では、地盤上で測定された鉛直振動の測定結果に基づき、回答者への振動暴露量を推定した。しかし、家屋内での振動に関しては、周波数特性はもちろんその大きさも、地盤上での振動とは異なる。したがって、戸建住宅の居住者に暴露されている振動の大きさを、正確に推定することはできていない。しかし、木造又はS造の戸建住宅での振動増幅に関する近年の研究は、鉛直方向の振動に関して、地面と家屋内2階床面との間に顕著な差がなかったことを報告している<sup>24)</sup>。本稿での振動暴露量は、地盤上での測定結果に基づき推定されたものである。これは、5 dB 又は 10 dB 間隔の範囲内であれば、実際に戸建住宅内で暴露されていた振動の大きさと同程度とみなすことができると考えている。ただし、本研究では推定していない水平振動については、戸建住宅の固有振動数で増幅されることから、この限りではない。近年、戸建住宅でも、水平振動によって引き起こされ

る苦情や問題が、数多く報告されている<sup>25)</sup>。今後、鉛直方向はもちろん水平方向でも、戸建住宅の居住者に暴露される振動の大きさについて、精度良く推計する手法の確立が望まれる。

続いて、騒音・振動暴露量を 5 dB 又は 10 dB 間隔で分割した結果に基づいて、両者の暴露量と騒音、振動それぞれのアノイアンスの有症率との関係を構築した。ここで、振動暴露量のカテゴリーの範囲を、例えば 1 dB 間隔に狭めたとしても、前述のとおり、地盤上と家屋内での振動は異なるものであるため、現状以上に有益な情報を提供することにはならない。同様に、騒音に関しても、測定精度や暴露量の推定精度を考慮すると、5 dB 又は 10 dB 範囲のカテゴリー化による情報の損失は小さいと評価できる。このように、暴露量を 5 dB 又は 10 dB のカテゴリーで整理したデータで、アノイアンスの有症率を定量化することは、十分に有効である。

Fig. 6 及び Fig. 7 に示すとおり、騒音アノイアンスの有症率は、 $L_{dn}$  が 48–52 dB のカテゴリーで既に飽和していたが、振動アノイアンスの有症率は、振動暴露量の増加とともに、単調増加の傾向を示しており、特に%VA は顕著であった。ここで、高レベルの騒音・振動暴露量の回答者を確認すると、その大部分は、KNG01 調査の回答者であった。神奈川県内の東海道新幹線沿線に近接する戸建住宅の居住者は、長期間にわたり、騒音、振動ともに高レベルの環境下で長年生活を続けてきた。このような環境において、騒音と振動に対するアノイアンスは、そのいずれが卓越するのか考察する。振動暴露量が低レベルから中レベルの場合は、振動に比べて騒音に対するアノイアンスが強いが、高レベルになるにしたがい、振動に対するアノイアンスが、単調増加により卓越してくるものと考えられる。このことは、東海道新幹線からの騒音及び振動に対する複合効果に及ぼす暴露量の影響度については、線路に近接する範囲では、騒音よりも振動の方が大きかったことと一致する<sup>3)</sup>。

最後に、影響を受けている住民の視点から、騒音と振動も含めた多数の刺激に対する複合アノイアンスの概念を指標化した評価手法の開発が重要と考える。しかし、騒音・振動アノイアンスは、音源の視認性、発生源に対する態度、個人属性など<sup>26)</sup>、多面的な心理学的構造に基づき形成されるものである。さらに、騒音・振動

アノイアンスも相互に影響を及ぼしている。したがって、まずは、個々のアノイアンスに影響を及ぼす非音響的及び非振動的要因を議論することが、評価方法の開発には不可欠である。このことを踏まえ、既往の知見を整理した。

視覚の効果に関しては、Maffei et al.<sup>27)</sup> は、鉄道騒音に対するラウドネス及びアノイアンスは、列車が見える場合と見えない場合で、異なることを報告した。同様に、Peris et al.<sup>28)</sup> は、列車の可視性が振動に対するアノイアンスに及ぼす影響を検証した。その結果、振動暴露量が同レベルの場合、鉄道振動により非常に悩まされている人々の割合は、列車が見えない場合に比べ、見える場合の方が高いことを見出した。しかしながら、分析に用いたデータセットに、対象列車の可視性に関する回答がすべて含まれていないため、視覚の影響は一部のデータからの結果であることに留意が必要である。

発生源に対する態度と騒音に対するアノイアンスとの関係については、前述の Tamura<sup>23)</sup> も含め、Sato et al.<sup>29)</sup>、及び Pedersen<sup>30)</sup> の報告がある。これらの研究を含め、騒音と振動それぞれに対する暴露量とアノイアンスとの関係に、発生源への態度が与える影響を、筆者なりに整理した。その結果、高レベルの暴露量にある状況では、振動に対するアノイアンスは、騒音に対するアノイアンスに比べて、態度要因の影響を受けやすくなる可能性が高いことが示唆された。

さらに、性別及び年齢は、この分析においても、騒音・振動アノイアンスのいずれに対しても、特徴的な影響を及ぼしていた。性別に関しては、男性は女性よりも、騒音・振動アノイアンスのいずれも強かった。年齢は、騒音、振動の煩さに有意な影響を及ぼしていなかったが、分析から観察されたパターンは、Van Gervan et al.<sup>31)</sup> が示した曲線効果と一致していた。

## 5 結論

筆者らは、新幹線鉄道からの騒音・振動に対するアノイアンスの複合効果を検証するため、日本で過去20年間に別個に実施された6回の社会調査で得られたデータセットを用いて、二次分析を行った。各データセットの個票データに多重ロジスティック回帰分析を適用して、カテゴリ化した騒音・振動暴露量の組み合わせごとに、騒音と振動それぞれのアノイアンスに対

して及ぼす影響を調べた。その結果、いずれのアノイアンスに対しても、騒音と振動の暴露量ともに、増幅効果を及ぼすことを確認した。得られた結果に基づき、交絡要因である性別、年齢、及び住宅構造を調整して、騒音・振動暴露量とアノイアンスの有症率との関係を定量化した。今後の研究では、在来鉄道からの騒音と振動に対する複合効果について検討する予定である。加えて、在来鉄道と新幹線鉄道(高速鉄道)に対する反応を比較することで、日本やアジア諸国、さらに欧米諸国における、鉄道騒音に対するアノイアンスの違いを明らかにしたい。

## 謝辞

名古屋調査のデータセットを分析するために、佐野泰之先生(愛知工業大学准教授)からご助言いただいたことに深謝いたします。本研究は、科学研究費(C) JP15K06341 の助成を受けた。

## 参考文献

- 1) 樋田昌良, 大宮正昭, 久野和宏: 新幹線鉄道騒音・振動の変遷—名古屋市域における事例—, 日本音響学会誌, 58(12), 761-766 (2002).
- 2) 横島潤紀, 西野健太郎, 田村明弘: 神奈川県内における東海道新幹線鉄道騒音・振動の現状, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2016-46(2016).
- 3) 横島潤紀, 田村明弘: 新幹線鉄道の騒音と振動による複合被害感, 日本音響学会誌, 62(9), 645-653(2006).
- 4) Yano, T., Morihara, T., Sato, T.: Community response to Shinkansen noise and vibration: A survey in areas along the Sanyo Shinkansen line, In Proceedings of the Forum Acusticum, 1837-1841(2005).
- 5) Yokoshima, S., Tamura, A.: Community response to Shinkansen railway noise, In Proceedings of the Inter-noise, 4397-4404(2003).
- 6) Yokoshima, S., Morihara, T., Kawai, K., Yano, T., Ota, A., Tamura, A.: Secondary analysis of exposure-response relationships for Shinkansen super-express railway noise in Japan, In Proceedings of the Inter-noise, 5090-5096 (2016)
- 7) Yokoshima, S., Morihara, T., Ota, A.: Review of metrics for evaluation of Shinkansen railway noise, In Proceedings of the Inter-noise, 1902-1909(2009)
- 8) Yokoshima, S., Morihara, T., Sano, Y., Ota, A., Tamura, A.: Community response to Shinkansen railway vibration, In Proceedings of the Inter-noise, 929-936(2011)
- 9) Morihara, T., Yokoshima, S., Shimoyama, K.: Community response to noise and vibration caused by Nagano

- Shinkansen railway, Japan, In Proceedings of the ICBEN(2014).
- 10) Tetsuya,H., Yano,T., Murakami,Y.: Annoyance due to railway noise before and after the opening of the Kyushu Shinkansen line, *Appl. Acoust.*, 115, 173–180(2017)
  - 11) Yokoshima,S., Yano,T., Kawai,K., Morinaga,M., Ota,A.: Representative dose-response curves for individual transportation noises in Japan, In Proceedings of the Inter-noise, (2012).
  - 12) Miedema,M.E., Vos,H.: Exposure-response relationships for transportation noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, 104, 3432–3445(1998)
  - 13) Lee,P.J., Griffin,M.J.: Combined effect of noise and vibration produced by high-speed trains on annoyance in buildings, *J. Acoust. Soc. Am.*, 133, 2126–2135 (2013)
  - 14) Morihara,T., Yokoshima,S., Matsumoto,Y.: An experimental study on combined effects of high-speed railway noise and vibrations on activity disturbances, In Proceedings of the Inter-noise, 2850–2856 (2016).
  - 15) Yokoshima,S., Morihara,T., Sato,T., Yano,T.: Combined Effects of High-Speed Railway Noise and Ground Vibrations on Annoyance, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14(8), 845 (2017)
  - 16) 矢野 隆, 五十嵐寿一, 加来治郎, 神田一伸, 金子哲也, 桑野園子, 新居洋子, 佐藤哲身, 莊 美知子, 山田一郎, 吉野泰子: 騒音の社会反応の測定方法に関する国際共同研究—日本語のうるささの尺度の構成, *日本音響学会誌*, 58(2), 101–110(2002)
  - 17) Skinner,C.J., Grimwood,C.J.: The UK noise climate 1990–2001: Population exposure and attitudes to environmental noise, *Appl. Acoust.*, 66, 231–243(2005).
  - 18) Houwarth,H.V.C., Griffin,M.J.: Subjective response to combined noise and vibration summation and interaction effects, *J. Sound Vib.*, 143, 443–454(1990)
  - 19) Goto,T., Nageseki,Y., Endo,R., Kawakami,Y., Shimura,M.: Experimental research relating to responsive appraisal of compound vibrations and noise stimuli, In Proceedings of the Inter-noise, 1357–1366 (2006)
  - 20) Gidlöf-Gunnarsson,A., Ögren,M., Jerson,T., Öhrström,E.: Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors, *Noise Health*, 14, 190–201(2012).
  - 21) Öhrström,E.: Effects of exposure to railway noise — A comparison between areas with and without vibration, *J. Sound Vib.*, 205, 555–560(1997)
  - 22) Lercher, P.: Combined Noise Exposure at Home, Elsevier Science and Technology, 764–777(2011)
  - 23) Tamura, A.: Comparison of community response to outdoor noise in the areas along Shinkansen and ordinary railroad, In Proceedings of the Inter-noise, 815–820(1994)
  - 24) 平尾善裕, 国松 直, 東田豊彦: 地盤振動に起因する木質系・鉄骨系戸建て住宅の振動増幅特性, *日本建築学会技術報告集*, 42, 631–634(2013)
  - 25) Ohmura,T., Kimura,Y., Nakanishi,M.: Overview of vibration regulation policy in Japan. In Proceedings of the Inter-noise, p. 2256–2262(2011)
  - 26) Guski,R., Felscher-Suhr,U., Schuemer, R.: The concept of noise annoyance: How international experts see it, *J. Sound Vib.*, 223, 513–527(1999)
  - 27) Maffei,L., Masullo,M., Aletta,F., Di Gabriele, M.: The influence of visual characteristics of barriers on railway noise perception, *Sci. Total Environ.*, 445–446, 41–47(2013)
  - 28) Peris,E., Woodcock,J., Sica,G., Sharp,C., Moorhouse,A.T., Waddington,D.C.: Effect of situational, attitudinal and demographic factors on railway vibration annoyance in residential areas, *J. Acoust. Soc. Am.*, 135, 194–204 (2014)
  - 29) Sato,T.: A Path of the model of vibration on road traffic noise annoyance, In Proceedings of the ICBEN, 411–414 (1993)
  - 30) Pedersen,E., Larsman,P.: The impact of visual factor on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines, *J. Environ. Psycholo.*, 28, 379–389(2008)
  - 31) Van Gerven, W.M., Vos,H., Van Boxtel,P.J., Janssen,S.A., Miedema,M.E.: Annoyance from environmental noise across the life span, *J. Acoust. Soc. Am.*, 126, 187–194(2009)