

1. 二層式低騒音舗装における音響パワーレベル

Sound Power Levels on Dual-layers Low-noise Pavements

技術支援課 橋本喜正、○田中輝栄

1. はじめに

東京都（以下、都という）は、「車道の舗装体系」¹⁾に基づき、自動車走行により発生する騒音を抑制する機能を有する舗装を道路に適用している。この舗装は、走行自動車のタイヤと接触する舗装路面（舗装の表層）が騒音発生を抑制する機能を有するものである（以下、騒音抑制機能層という）。都は、騒音抑制機能層の構造の違いにより2種類の舗装を規定している。1つは、騒音抑制機能層を一層構造とするもの、もう1つは騒音抑制機能層を二層構造とするものである。都では、前者を低騒音舗装¹⁾（以下、一層低という）、後者を二層式低騒音舗装^{1),2)}（以下、二層低という）と呼んでいる。一層低は、二層低より先に開発・適用してきた舗装である。二層低は、更に騒音抑制性能を有する舗装として開発してきた舗装であり、特に騒音抑制対策を必要とする道路区間として都道路沿道環境対策検討会（事務局：前 環境保全局（現 環境局））で指定された優先的対策道路区間³⁾や新規に建設される高規格の道路に適用している。

一層低および二層低の騒音抑制性能の評価は、道路端で測定される道路交通騒音ではなく、走行自動車のタイヤ近傍で測定される特殊タイヤによるタイヤ/路面騒音を指標として行ってきた。これは、道路舗装の種類の違いだけによる騒音抑制効果を評価することを目的としたためである。各種舗装路面のタイヤ/路面騒音による評価結果を比較・整理した結果、一層低は騒音抑制性能を有し、二層低は一層低より、更に、騒音抑制性能を有することを確認した^{4)~11)}。なお、都が確

立・採用したタイヤ/路面騒音を指標とした舗装路面の騒音抑制効果の評価方法は、国土交通省直轄国道における騒音値を性能要件とした道路舗装の性能規定発注方式¹²⁾の工事において適用され、(公社)日本道路協会「騒音値を求めるための舗装路面騒音測定車によるタイヤ/路面騒音測定方法」¹³⁾として規定されている。

沿道における自動車走行騒音抑制対策の効果を予測するにあたっては、自動車走行騒音の音響パワーレベルを把握することが必要であり、かつ基本となる。自動車走行騒音の音響パワーレベルを把握する道具として、(一社)日本音響学会が公表している「道路交通騒音予測 ASJ RTN-Model」¹⁴⁾の音響パワーレベルの算定式（以下、パワーレベル式という）がある。このパワーレベル式は、密粒度アスファルト舗装路面に対するパワーレベル式を基本とし、一層低路面による騒音抑制効果を「補正量」として設定している。一方、二層低路面については、その騒音抑制効果は一層低以上の評価がされているものの、実道における音響パワーレベルの蓄積データが十分でないため、参考資料としての記述に留まっている。

以上の認識の下に、本文は、自動車走行騒音抑制対策の効果の予測に際して必要となる二層低路面における自動車走行騒音のパワーレベル式を作成し、音響パワーレベルを指標とした二層低の騒音抑制効果を評価することを目的として、二層低を適用している環七通りを対象に、2012~2016年度の5年間にわたり継続調査・蓄積してきた音響パワーレベルデータを整理・検証した結果を報告するものである。

2. 調査概要

(1) 調査対象路線

調査対象路線は、優先的対策道路区間³⁾である環七通り（主要地方道環状七号線（第318号）、主要地方道王子金町江戸川線（第307号））とした。

(2) 現地測定実施時期と調査地点数

現地における測定実施時期は2012～2016年度（5年間、各1～3月）、調査地点数は計36地点（調査地点累計83地点）である。

(3) 測定方法

① 単独で定常走行する自動車の騒音（以下、自動車走行騒音という）として、時間重み付け特性F、周波数重み付け特性Aの音圧レベル（以下、A特性音圧レベルという）を測定した。

② 自動車走行騒音の測定方法は、図-1を基本とした。

③ 測定は、図-1に示すとおり、歩道上（測定対象車線の中心線から7.5mの位置）で地上1.2mの高さにマイクロフォンを設置し、騒音計、データレコーダ、レベルレコーダによりデータを収集・記録した。

④ 走行速度を把握するため、自動車走行騒音の測定と同時に、測定対象とする走行車両の一定距離を走行する時間をストップウォッチにより測定した。

⑤ 自動車走行騒音は、予め準備した試験用の乗用車（以下、乗用試験車という）、一般に走行する車両（以下、一般走行車という）について測定した。

⑥ 乗用試験車

- 乗用試験車による測定は、一般走行車の測定と同一日に実施した。
- 走行車線は、一般走行車測定での対象車線と同一とした。
- 全ての測定において、試験速度は、一定速度(50km/h ±0.5km/h)での定常走行とした。
- 各調査地点、3回走行に対する自動車走行騒音のA特性音圧レベルを測定した。
- 乗用試験車の車種およびタイヤの規格は、それぞれ表-1、2に示す。また、乗用試験車の外観およびタイヤのトレッドパターンを写真-1に示す。

⑦ 一般走行車

- 測定に当たっての一般走行車の車種分類は、「小型車類」と「大型車類」の2車種分類とした。車種分類は、(一社)日本音響学会における道路交通騒音の予測モデル ASJ RTN-Model 2008¹⁵⁾および ASJ RTN-Model 2013¹⁴⁾による。
- 測定台数は、調査地点ごとに、測定対象車線を単独で走行する2車種分類各30台とした。

- 測定の対象は、片側3車線の場合、第2走行車線の走行車両を基本とした。

⑧ 測定は、降雨後1日以上経過した路面乾燥状態における晴天時に実施した。

⑨ 測定は、交通量の少ない夜間に実施した(写真-2)。

(4) データ整理に当たって本文で使用した用語

1) 乗用試験車のA特性音圧レベルについて

① 乗用試験車のオーバーオールA特性音圧レベルを、「試験車騒音レベル」という。単位記号は、dB。

② 各調査地点において、他の自動車走行騒音の影響を受けていない試験車騒音レベルのユニットパターンの最大値を、その調査地点における「試験車最大騒音レベル」という(図-1)。単位記号は、dB。

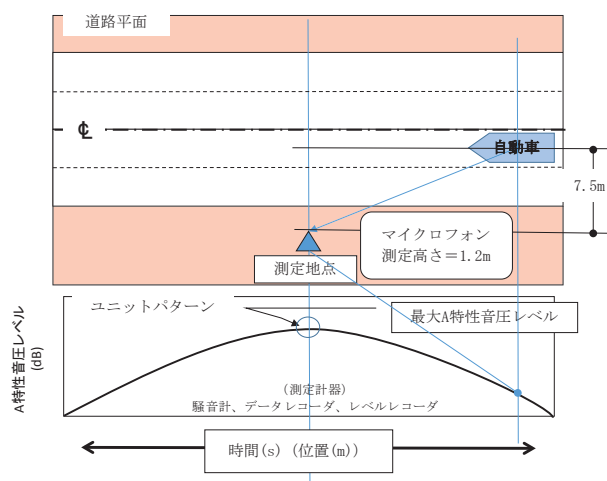


図-1 測定方法

表-1 乗用試験車の車種

車種	日産ティータ	
長さ	425	cm
高さ	153	cm
幅	169	cm
車両重量	1150	kg
総排気量	1.49	L

表-2 タイヤの規格

タイヤ	TOYO TIRES TOYO J50
リブタイヤ	185/65R15 88S



写真-1 乗用試験車の外観とタイヤのトレッドパターン



写真-2 自動車走行騒音の測定状況 (例)

③ 各調査地点において、乗用試験車走行 3 回に対する試験車最大騒音レベルの平均値 (エネルギー平均) を、その調査地点における「地点試験車最大騒音レベル」という。単位記号は、dB。

2) 乗用試験車の A 特性音響パワーレベルについて

① 乗用試験車のオーバーオール A 特性音響パワーレベルを、「試験車パワーレベル」という。単位記号は、dB。

② 各調査地点において、乗用試験車走行 3 回に対する試験車パワーレベルの平均値 (エネルギー平均) を、その調査地点における「地点試験車パワーレベル」という。単位記号は、dB。

3) 一般走行車の A 特性音圧レベルについて

① 一般走行車個々のオーバーオール A 特性音圧レベルを、一般走行車の「個別騒音レベル」という。単位記号は、dB。

② 他の自動車走行騒音の影響を受けていない一般走行車の個別騒音レベルのユニットパターンの最大値を、一般走行車の「個別最大騒音レベル」という (図-1)。

単位記号は、dB。

③ 走行速度の異なる一般走行車の個別最大騒音レベルを走行速度 50km/h 相当に換算したレベルを、一般走行車の「50km/h 換算個別最大騒音レベル」という。単位記号は、dB。

④ 各調査地点における一般走行車の 50km/h 換算個別最大騒音レベルの平均値 (エネルギー平均) を、その調査地点における一般走行車の「地点平均 50km/h 換算最大騒音レベル」という。単位記号は、dB。

4) 一般走行車の A 特性音響パワーレベルについて

① 一般走行車個々のオーバーオール A 特性音響パワーレベルを、一般走行車の「個別パワーレベル」という。単位記号は、dB。

② 各調査地点における一般走行車の個別パワーレベルの平均値 (エネルギー平均) を、一般走行車の「地点平均パワーレベル」という。単位記号は、dB。

③ 走行速度の異なる一般走行車の個別パワーレベルを走行速度 50km/h 相当に換算したレベルを、一般走行車の「50km/h 換算個別パワーレベル」という。単位記号は、dB。

④ 各調査地点における一般走行車の 50km/h 換算個別パワーレベルの平均値 (エネルギー平均) を、一般走行車の「地点平均 50km/h 換算パワーレベル」という。単位記号は、dB。

5) 走行速度について

① 一般走行車個々の走行速度を、一般走行車の「個別走行速度」という。単位記号は、km/h。

② 各調査地点における一般走行車の個別走行速度の平均値を、その調査地点における一般走行車の「地点平均走行速度」という。単位記号は、km/h。

③ 乗用試験車の試験時の走行速度は、一定速度 50km/h である。

6) 舗装の施工後供用時間について

① 自動車走行騒音の音響パワーレベル調査の対象とした乗用試験車および一般走行車個々の走行した調査地点における舗装の施工後供用時間を、「個別舗装供用時間」という。単位記号は、月。

② 各調査地点における舗装の施工後供用時間を、①と区別して「地点舗装供用時間」という。単位記号は、月。

(5) パワーレベルの算出

1) 乗用試験車のパワーレベルの算出

① 「試験車パワーレベル」は、(式-1)により算出した(最大騒音レベル法¹⁶⁾)。走行速度は、50km/h。

$$L_{WA50, m, h} = L_{A50, Fmax, m, h} + 8 + 20 \log_{10} I \quad (\text{式-1})$$

$L_{WA50, m, h}$: 調査地点 m における h 回目 ($h=1, 2, 3$) の「試験車パワーレベル (dB)」

$L_{A50, Fmax, m, h}$: 調査地点 m における h 回目 ($h=1, 2, 3$) の「試験車最大騒音レベル (dB)」

I : 走行車線中心 (路面上) から測定点 (マイクروفオン) までの最短距離 (m)

② 「地点試験車パワーレベル」は、3 回の「試験車パワーレベル」のエネルギー平均として、(式-2)により算出した。

$$L_{WA50, m} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{3} \left\{ 10^{(L_{WA50, m, 1})/10} + 10^{(L_{WA50, m, 2})/10} + 10^{(L_{WA50, m, 3})/10} \right\} \right] \quad (\text{式-2})$$

$L_{WA50, m}$: 調査地点 m における「地点試験車パワーレベル (dB)」

$L_{WA50, m, h}$: 調査地点 m における h 回目 ($h=1, 2, 3$) の「試験車パワーレベル (dB)」

2) 一般走行車のパワーレベルの算出

① 一般走行車の「個別パワーレベル」は、(式-3)により算出した(最大騒音レベル法¹⁶⁾)。

$$L_{WA, i} = L_{A, Fmax, i} + 8 + 20 \log I \quad (\text{式-3})$$

$L_{WA, i}$: 一般走行車サンプル No. i 、走行速度 V_i km/h の「個別パワーレベル (dB)」

$L_{A, Fmax, i}$: 一般走行車サンプル No. i の「個別最大騒音レベル (dB)」

I : 走行車線中心 (路面上) から測定点 (マイクروفオン) までの最短距離 (m)

i : 一般走行車のサンプル No. ($i=1, 2, 3, \dots, n$)

n : 一般走行車のサンプル数 (台)

② 一般走行車の「50km/h 換算個別パワーレベル」は、一般走行車の「個別パワーレベル」に対して、ASJ RTN-Model 2013¹⁴⁾ のパワーレベル式の走行速度依存項である $30 \log_{10} V$ (V : 走行速度 km/h) を適用し、(式-4)により 50km/h 相当に換算し算出した。

$$L_{WA50, i} = L_{WA, i} - 30 \log_{10} (V_i / 50) \quad (\text{式-4})$$

$L_{WA50, i}$: 一般走行車サンプル No. i の「50km/h 換算個別パワーレベル (dB)」

$L_{WA, i}$: 一般走行車サンプル No. i の「個別パワーレベル (dB)」

V_i : 一般走行車サンプル No. i の「個別走行速度 (km/h)」

i : 一般走行車のサンプル No. ($i=1, 2, 3, \dots, n$)

n : 一般走行車のサンプル数 (台)

③ 一般走行車の「地点平均 50km/h 換算パワーレベル」は、調査地点ごとに一般走行車の「50km/h 換算個別パワーレベル」のエネルギー平均として、(式-5)により算出した。

$$L_{WA50, m} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{k} \sum_j \left\{ 10^{(L_{WA50, m, j})/10} \right\} \right] \quad (\text{式-5})$$

$L_{WA50, m}$: 調査地点 m における一般走行車の「地点平均 50km/h 換算パワーレベル (dB)」

$L_{WA50, m, j}$: 調査地点 m における一般走行車サンプル No. j の「50km/h 換算個別パワーレベル (dB)」

j : 調査地点 m における一般走行車のサンプル No. ($j=1, 2, 3, \dots, k$)

k : 調査地点 m における一般走行車のサンプル数 (台)

3. 調査データ

(1) 調査地点数と測定サンプル数

1) 調査地点数

① 調査地点は同一でも、調査年度の異なる地点は、各 1 調査地点とする。それらの地点の合計を全調査地点という。

② 測定実施期間 2012~2016 年度 (5 年間、各 1-3 月) の全調査地点数は、83 地点である。

2) 測定サンプル数

収集した測定サンプル数は、表-3 に示すとおりである。表-3 は、各調査年度の調査地点数と各調査年度の車種別の測定サンプル数を示す。

① 小型車類の全調査地点の合計測定サンプル数は、2490 (以下、小型車類全測定サンプルという)。

② 大型車類の全調査地点の合計測定サンプル数は、2490 (以下、大型車類全測定サンプルという)。

③ 全車種 (小型車類+大型車類)、全調査地点の合計測定サンプル数は、4980 (以下、全車種全測定サンプルという)。

④ 乗用試験車のサンプル 1 単位は、各調査地点での 3 回走行の平均値であり、全調査地点の合計測定サンプル数は、83 である。

表-3 各調査年度の調査地点数と測定サンプル数

調査年度 (年度)	調査地点数 (地点)	測定サンプル数 (台)		
		小型車類	大型車類	乗用試験車
2012	17	510	510	17
2013	15	450	450	15
2014	14	420	420	14
2015	17	510	510	17
2016	20	600	600	20
計	83	2490	2490	83

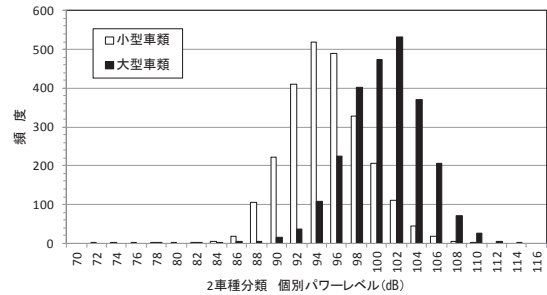


図-2 2車種分類に対する個別パワーレベルの頻度分布

(2) 分析対象データの分布

1) 2車種分類に対する個別パワーレベルの分布

小型車類全測定サンプルより算定した個別パワーレベルの頻度分布、大型車類全測定サンプルより算定した個別パワーレベルの頻度分布を図-2に示す。また、同データの基本統計量を表-4に示す。なお、個別パワーレベルの基本統計量の算定は、算術計算による。

① 小型車類全測定サンプル（サンプル数 2490）において算出した個別パワーレベルは、平均値 94.0 dB（標本標準偏差 4.0 dB）、最小値 71.8 dB、最大値 109.8 dB である。

② 大型車類全測定サンプル（サンプル数 2490）において算出した個別パワーレベルは、平均値 99.7 dB（標本標準偏差 3.9 dB）、最小値 76.8 dB、最大値 112.6 dB である。

③ 2車種分類に対する個別パワーレベルの平均値は、小型車類<大型車類である。

2) 2車種分類に対する個別走行速度の分布

個別走行速度 (km/h) の小型車類全測定サンプル、個別走行速度 (km/h) の大型車類全測定サンプルの頻度分布を図-3に示す。また、同データの基本統計量を表-5に示す。

① 個別走行速度の小型車類全測定サンプル（サンプル数 2490）は、平均値 53km/h（標本標準偏差 8km/h）、最小値 27km/h、最大値 86km/h である

② 個別走行速度の大型車類全測定サンプル（サンプル数 2490）は、平均値 49km/h（標本標準偏差 8km/h）、最小値 17m/h、最大値 81km/h である。

③ 2車種分類の個別走行速度の平均値は、大型車類<小型車類である。

表-4 2車種分類に対する個別パワーレベルの基本統計量

統計量	単位	小型車類	大型車類
サンプル数	サンプル	2490	2490
平均値	dB	94.0	99.7
標本標準偏差	dB	4.02	3.94
最小値	dB	71.8	76.8
最大値	dB	109.8	112.6
変動係数		0.04	0.04

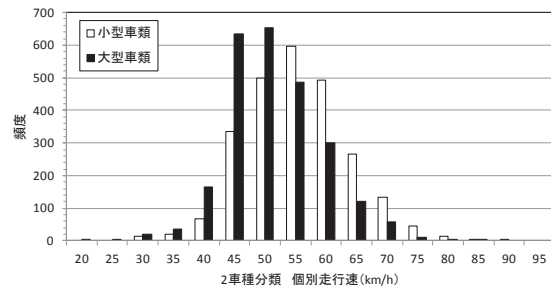


図-3 2車種分類に対する個別走行速度の頻度分布

表-5 2車種分類に対する個別走行速度の基本統計量

統計量	単位	小型車類	大型車類
サンプル数	サンプル	2490	2490
平均値	km/h	53	49
標本標準偏差	km/h	8.3	7.7
最小値	km/h	27	17
最大値	km/h	86	81
変動係数		0.16	0.16

3) 2車種分類に対する個別舗装供用時間の分布

個別舗装供用時間(月)の小型車類全測定サンプル、大型車類全測定サンプルの頻度分布を図-4に示す。また、同データの基本統計量を表-6に示す。

- ① 小型車類全測定サンプル(サンプル数2490)において算出した個別舗装供用時間は、平均値31月(標本標準偏差29月)、最小値0月、最大値113月である。
- ② また、中央値20月、最頻値11月である。
- ③ 大型車類全測定サンプル(サンプル数2490)に対する個別舗装供用時間は、小型車類と共通である。

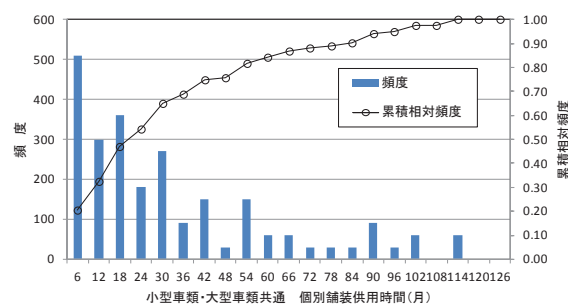


図-4 個別舗装供用時間(月)の頻度分布

4. 音響パワーレベルと走行速度

任意の舗装路面に対するパワーレベル式は、走行速度の関数として与えられる式を基本としている¹⁴⁾。二層低に対するパワーレベル式を作成するにあたり、二層低路面における音響パワーレベルと走行速度の関係を把握するため、本調査で得られたデータに基づき、その関係を整理・分析した。

なお、整理・分析に際しては、舗装路面への交通負荷が同程度である舗装供用時間が供用初期にある調査地点の調査データを対象とした。

(1) 対象とした調査データ

対象とした供用初期の調査データの抽出・整理・分析に際しては、次のことを基本とした。

- ① 供用初期とする条件は、舗装供用時間3か月以下とした。結果、83地点から表-7に示す11地点を抽出した。表-7は、抽出した調査地点の施工年度、83地点通し連続地点番号(No.)、舗装供用時間(月)、2車種分類のサンプル数(台)を示す。
- ② 一般走行車の個別パワーレベルは、走行速度の異なるパワーレベルであるため、「50km/h換算個別パワーレベル」で、整理・分析した。なお、乗用試験車の走行速度は、試験走行速度50km/hである。

(2) 地点試験車パワーレベルと一般走行車の地点平均50km/h換算パワーレベル

1) 地点試験車パワーレベル

供用初期にある地点試験車パワーレベルを図-5、その基本統計量(算術計算)を表-8に示す。なお、地点試験車パワーレベルは、走行速度50km/h、3回走行におけるパワーレベルのエネルギー平均である。

表-6 2車種分類に対する個別舗装供用時間(月)の基本統計量

統計量	単位	共通 (小型車類、大型車類)
サンプル数	サンプル	2490
平均値	月	31
中央値	月	20
最頻値	月	11
標本標準偏差	月	29.3
最小値	月	0
最大値	月	113
変動係数		0.95

表-7 抽出した供用初期(3か月以下)データ

施工年度	番号	連続地点番号	供用時間	小型車類	大型車類
(年度)		(No.)	(月)	(台)	(台)
2012	1	14	3	30	30
	2	16	2	30	30
2013	3	28	3	30	30
	4	31	2	30	30
	5	32	0	30	30
2014	6	45	2	30	30
	7	46	1	30	30
2015	8	60	1	30	30
	9	63	1	30	30
2016	10	82	0	30	30
	11	83	1	30	30
供用初期(3か月以下)のサンプリングデータの合計				330	330

図-5において、横軸は表-7における調査地点 83 地点の通し連続地点番号（計 11 地点）、縦軸は地点試験車パワーレベル（dB）である。

① 供用初期にある地点試験車パワーレベル（走行速度 50km/h）の基本統計量は、11 地点で、平均値 88.4 dB（標準偏差 1.5 dB）、最小値 86.6 dB、最大値 90.9 dB（範囲 4.3 dB）である。

② 同一試験車、同一走行速度による走行試験であるが、実道に施工されている二層低での走行試験である。したがって、得られたデータは、異なる施工状況による品質の差異（舗装路面のラフネスを含めて）、異なる沿道状況（道路断面、沿道施設などを含めて）における測定の差異、実際に流れている交通状況下での走行試験状態の差異など、現状としては把握できないバラツキ要因が包含された結果である。

③ 以上の認識の下に、乗用試験車による音響パワーレベル調査結果を基礎として、整理・分析した。

2) 一般走行車の地点平均 50km/h 換算パワーレベルと地点平均走行速度

供用初期にある地点平均 50km/h 換算パワーレベルを、2 車種分類について整理・分析した。供用初期における 2 車種分類の地点平均 50km/h 換算パワーレベルを図-6 に示す。

① 図-6 において、横軸は表-7 における通し連続地点番号（計 11 地点）、縦軸は地点試験車パワーレベルと 2 車種分類の地点平均 50km/h 換算パワーレベル（dB）である。

② 供用初期にある 2 車種分類の地点平均 50km/h 換算パワーレベル 11 データの基本統計量（算術計算）を表-9 に示す。

③ 供用初期にある音響パワーレベルの調査対象とした地点平均走行速度 11 データの基本統計量を表-10 に示す。

図-6 および表-9、10 から、

④ 小型車類の地点平均 50km/h 換算パワーレベルの平均値は 92.4 dB（標本標準偏差 2.0 dB）である。

⑤ 大型車類の地点平均 50km/h 換算パワーレベルの平均値は 100.6 dB（標本標準偏差 2.1 dB）である。

⑥ したがって、供用初期にある調査地点では、（小型車類地点平均 50km/h 換算パワーレベルの平均値） <

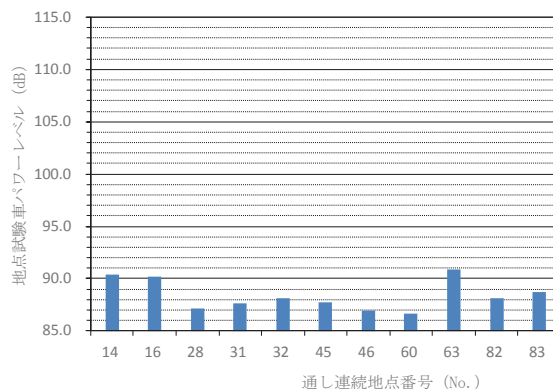


図-5 供用初期にある地点試験車パワーレベル

表-8 供用初期にある地点試験車パワーレベルの基本統計量

統計量	単位	乗用試験車
サンプル数	サンプル	11
平均値	dB	88.4
標本標準偏差	dB	1.5
最小値	dB	86.6
最大値	dB	90.9
変動係数		0.02

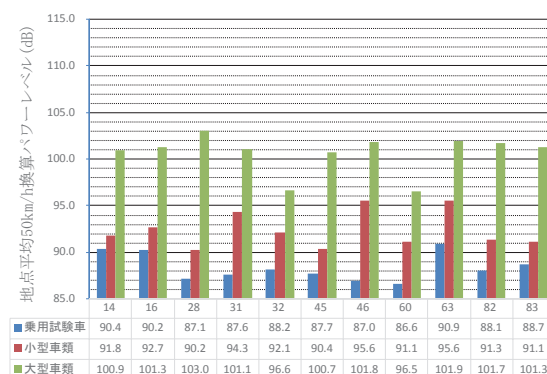


図-6 供用初期にある地点試験車パワーレベルと 2 車種分類地点平均 50km/h 換算パワーレベル

（大型車類地点平均 50km/h 換算パワーレベルの平均値）である。その差は、100.6-92.4=8.2 dBである。

表-9 供用初期にある2車種分類の地点平均50km/h換算パワーレベルの基本統計量（算術計算）

統計量	単位	小型車類	大型車類
サンプル数	サンプル	11	11
平均値	dB	92.4	100.6
標本標準偏差	dB	2.0	2.1
最小値	dB	90.2	96.5
最大値	dB	95.6	103.0
変動係数		0.02	0.02

⑦ 小型車類地点平均50km/h換算パワーレベルと大型車類地点平均50km/h換算パワーレベルの差の有意性について統計的検定（一対の標本による平均値の差の検定）を行った結果は、 t 値=10.5 > $t_{0.025;11-1}=2.2^{17)}$ で有意である。

⑧ 算定した地点平均50km/h換算パワーレベルに対応する車種別の地点平均走行速度の平均値は、小型車類および大型車類とも50km/h程度である。また、範囲（最小値、最大値）は、小型車類50～60km/h程度、大型車類40～60km/h程度である。

(3) 50km/h換算個別パワーレベルと個別走行速度の分布

1) 50km/h換算個別パワーレベルの頻度分布と基本統計量

供用初期11地点(330サンプル=11地点×30サンプル/地点)における小型車類の50km/h換算個別パワーレベル(30サンプル/地点)および大型車類の50km/h換算個別パワーレベル(30サンプル/地点)の頻度分布を図-7、基本統計量(算術計算)を表-11に示す。

図-7および表-11から、

- ① 小型車類の50km/h換算個別パワーレベルの平均値は91.3dB(標本標準偏差3.2dB)である。
- ② 大型車類の50km/h換算個別パワーレベルの平均値は99.5dB(標本標準偏差3.6dB)である。
- ③ 小型車類50km/h換算個別パワーレベルの平均値と大型車類50km/h換算個別パワーレベルの平均値の差の有意性について統計的検定(一対の標本による平均値の差の検定)を行った結果は、 t 値=30.7 >

表-10 供用初期にある2車種分類の地点平均走行速度の基本統計量

統計量	単位	小型車類	大型車類
サンプル数	サンプル	11	11
平均値	km/h	54	50
標本標準偏差	km/h	4	5
最小値	km/h	48	42
最大値	km/h	61	57
変動係数		0.07	0.10

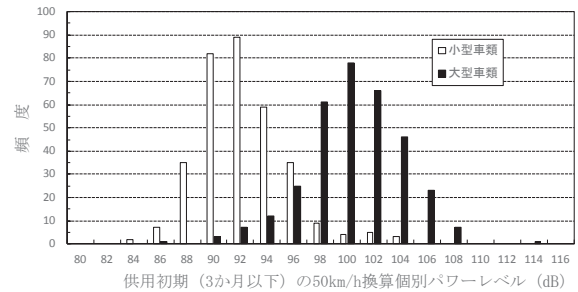


図-7 2車種分類50km/h換算個別パワーレベルの頻度分布(0 ≤ m ≤ 3か月)

表-11 2車種分類50km/h換算個別パワーレベルの基本統計量(算術計算)(0 ≤ m ≤ 3か月)

統計量	単位	小型車類	大型車類
サンプル数	サンプル	330	330
平均値 (dB)	dB	91.3	99.5
標本標準偏差	dB	3.2	3.6
最小値	dB	82.4	86.0
最大値	dB	104.0	113.7
変動係数		0.04	0.04

$t_{0.025;500}=1.9^{17)}$ で有意である。

- ④ したがって、供用初期において、(小型車類50km/h換算個別パワーレベルの平均値) < (大型車類50km/h換算個別パワーレベルの平均値)である。その差は、91.3-99.5=-8.2dBである。

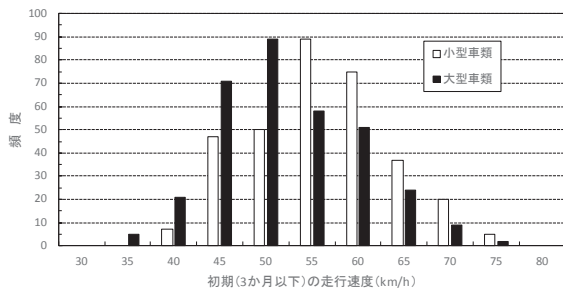


図-8 2車種分類の個別走行速度の頻度分布(0≤m≤3か月)

2) 個別走行速度の頻度分布と基本統計量

供用初期 11 地点(330 サンプル=11 地点×30 サンプル/地点)における音響パワーレベル調査対象走行車両の小型車類個別走行速度(30 サンプル/地点)および大型車類個別走行速度(30 サンプル/地点)の頻度分布を図-8、基本統計量を表-12 に示す。

図-8 および表-12 から、

- ① 小型車類の個別走行速度の平均値は、54km/h(標本標準偏差 7.6km/h)である。
- ② 大型車類の個別走行速度の平均値は、50km/h(標本標準偏差 7.7km/h)である。
- ③ したがって、調査対象とした走行車両の個別走行速度の平均値は、小型車類と大型車類と同程度である。
- ④ 小型車類個別走行速度は、最小値 36km/h、最大値 74km/h である。大型車類個別走行速度は、最小値 32km/h、最大値 75km/h である。

(4) 個別パワーレベルと個別走行速度

供用初期にある調査地点で測定された 2 車種分類 11 調査地点全測定値(330 サンプル/車種(11 地点×30 サンプル/車種/地点)による個別パワーレベルと個別走行速度の関係について、小型車類を図-9、大型車類を図-10 に示す。図-9、10 より、

- ① 小型車類の個別パワーレベルと個別走行速度の相関係数は、0.318 である。
- ② 大型車類の個別パワーレベルと個別走行速度の相関係数は、0.266 である。
- ③ ①および②の相関係数は、自由度 $\phi = \text{サンプル数} - 2 = 330 - 2 = 328$ であり、統計的に有意である¹⁸⁾。
- ④ 走行速度依存性を表す傾きは、小型車類が 17.1、大型車類が 14.2 である。
- ⑤ ASJ RTN-Model 2013¹⁴⁾におけるパワーレベル式の

表-12 2車種分類の個別走行速度の基本統計量
(0≤m≤3か月)

統計量	単位	小型車類	大型車類
サンプル数	サンプル	330	330
平均値	km/h	54	50
標本標準偏差	km/h	7.6	7.7
最小値	km/h	36	32
最大値	km/h	74	75
変動係数	km/h	0.14	0.15

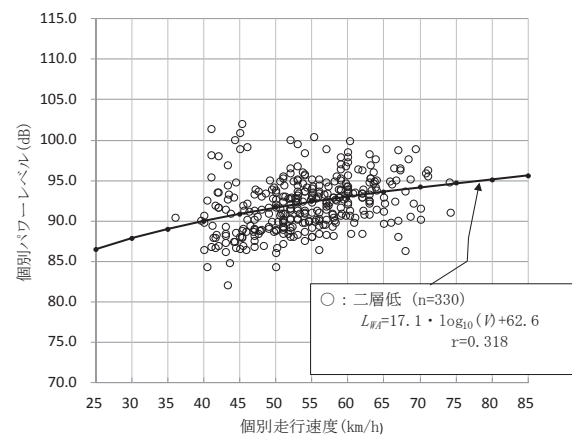


図-9 小型車類の個別パワーレベルと個別走行速度
(0≤m≤3か月)

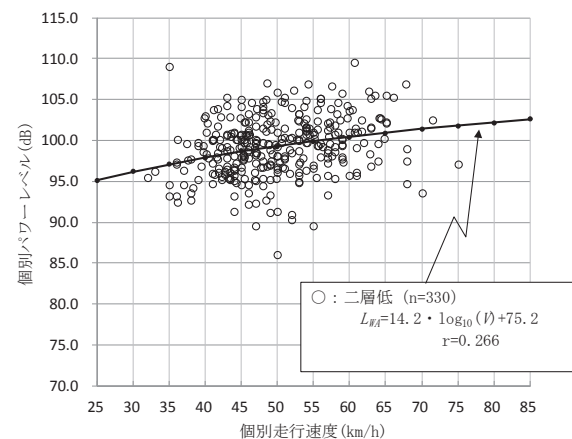


図-10 大型車類の個別パワーレベルと個別走行速度
(0≤m≤3か月)

走行速度依存性を表す傾きは、30 である。本調査により得られた音響パワーレベルに対する走行速度依存性を表す傾きは、ASJ RTN-Model 2013 におけるパワーレベル式の走行速度依存性を表す傾きである 30 より小

さい。

⑥ ASJ RTN-Model 2013 におけるパワーレベル式の走行速度依存性を 1 とすると、本調査では、小型車類 0.6、大型車類 0.5 の走行速度依存性である。これは、本調査結果では、音響パワーレベルの走行速度依存性は有意であるが、二層低でのその感度は、ASJ RTN-Model 2013 におけるパワーレベル式の約 5 割程度であることを示している。

⑦ なお、走行速度の対象範囲（パワーレベル式の作成に適用したデータ）は、ASJ RTN-Model 2013 は $40\text{km/h} \leq V \leq 140\text{km/h}$ ¹⁴⁾ である。本調査では、表-12 より、概ね、 $40\text{km/h} \leq V \leq 70\text{km/h}$ である。

5. 2車種分類のパワーレベル式

(1) パワーレベル式作成の考え方

本調査により得られたデータに基づき、二層低における 2 車種分類のパワーレベル式を作成した。パワーレベル式は、個別パワーレベルを目的変数、個別走行速度と個別舗装供用時間の 2 変数を説明変数とする重回帰式とした。

① 目的変数「個別パワーレベル (dB)」：「4. 音響パワーレベルと走行速度」で示した走行速度依存性の関係を考慮し、ASJ RTN-Model 2013¹⁴⁾ におけるパワーレベル式で適用している走行速度依存性を表す係数=30 で 50km/h 走行時の音響パワーレベルに換算した 50km/h 換算個別パワーレベルではなく、直接、個別パワーレベルを目的変数とした。

② 説明変数 1 「個別走行速度 (km/h)」：「音響パワーレベルと走行速度の関係」¹⁴⁾、および先に示した「供用性能が同程度と位置づけられる供用初期における二層低での音響パワーレベルの走行速度依存性の関係」を考慮し、個別走行速度を説明変数として取り込んだ。

③ 説明変数 2 「個別舗装供用時間 (月)」：二層低での自動車走行騒音の抑制性能は、舗装の供用時間の経過に伴い低下していくため^{11), 14)}、個別舗装供用時間を説明変数として取り込んだ。

④ なお、自動車走行騒音の音響パワーレベルは、車種、走行速度、舗装路面種類以外に、道路の縦断勾配、放射指向性などによって変化するため、現場状況により可能性のある項目については、ASJ RTN-Model 2013

表-13 ASJ RTN-Model 2013 パワーレベル式¹⁴⁾

車種分類	定常走行区間 ($40\text{km/h} \leq V \leq 140\text{km/h}$)		一般道路 (走行速度 60km/h まで)	
	a	b	ΔL_{surf} (排水性舗装)	
2車種分類	小型車類	46.7	30	$-5.7 + 7.3 \log_{10}(1+y)$
	大型車類	53.2		$-3.9 + 3.6 \log_{10}(1+y)$

A特性音響パワーレベル式 (ASJ) : $L_{WA} = a + b \cdot \log_{10} V + C$

L_{WA} : パワーレベル (dB)

V : 走行速度 (km/h)

a : 車種別に与えられる定数

b : 速度依存性を表す係数

C : 補正量 ($\Delta L_{surf} + \Delta L_{grad} + \Delta L_{dir} + \Delta L_{etc}$)

ΔL_{surf} : 排水性舗装等による騒音低減に関する補正量 (dB)
(y : 施工後の供用時間 (年))

ΔL_{grad} : 道路の縦断勾配による走行騒音の変化に関する補正量 (dB)

ΔL_{dir} : 自動車走行騒音の指向性に関する補正量 (dB)

ΔL_{etc} : その他の要因に関する補正量 (dB)

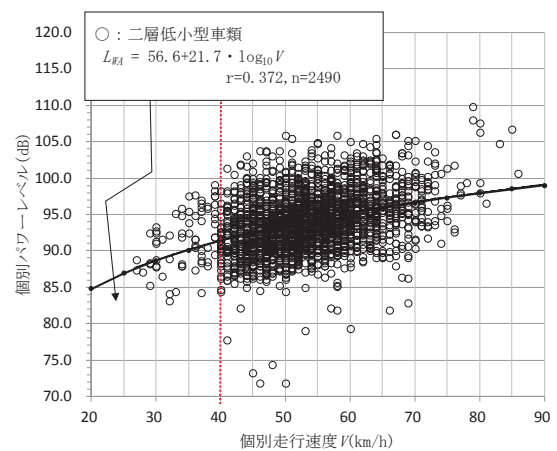


図-11 小型車類の個別パワーレベル (dB) と個別走行速度 (km/h) の相関

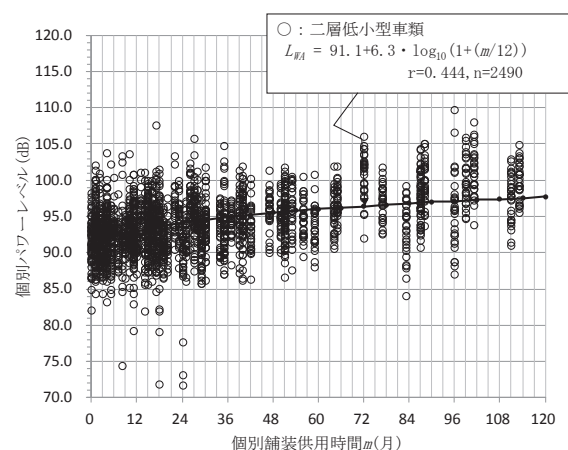


図-12 小型車類の個別パワーレベル (dB) と個別舗装供用時間 (月) との相関

におけるパワーレベル式に設定されている個々の補正項によることとする。ASJ RTN-Model 2013 におけるパワーレベル式は、表-13 のとおり設定されている¹⁴⁾。

(2) 個別パワーレベル、個別走行速度、個別舗装供用時間の相関

パワーレベル式に取り込む各変数（個別パワーレベル、個別走行速度、個別舗装供用時間）の相関関係を、図-11～14 に示す。

① 小型車類は、図-11、12 に示すとおり、目的変数である個別パワーレベルと説明変数である個別走行速度の常用対数 ($\log_{10}V$) との相関係数 0.372、個別舗装供用時間の常用対数 ($\log_{10}(1+(m/12))$) との相関係数 0.444 は、それぞれ統計的に有意である¹⁸⁾。

② 大型車類は、図-13、14 に示すとおり、目的変数である個別パワーレベルと説明変数である個別走行速度の常用対数 ($\log_{10}V$) との相関係数 0.272、個別舗装供用時間の常用対数 ($\log_{10}(1+(m/12))$) との相関係数 0.236 は、それぞれ統計的に有意である¹⁸⁾。

(3) パワーレベル式の作成

図-11～14 に示した相関関係にある「個別走行速度の常用対数」と「個別舗装供用時間の常用対数」により、2 車種分類のパワーレベル式を、重回帰分析により作成した。

$$L_{\#i}(2 \text{ 車種分類}) = f (V(\text{個別走行速度}), m(\text{個別舗装供用時間}))$$

$$L_{\#i} = a_0 + a_1 \cdot \log_{10}V + a_2 \cdot \log_{10}(1+(m/12)) + C \quad (\text{式-6})$$

$L_{\#i}$: 個別パワーレベル (dB)

V : 個別走行速度 (km/h)

m : 個別舗装供用時間 (月)

a_i : 係数 ($i=0, 1, 2$)

C : 補正量 (ASJ RTN-Model を適用)

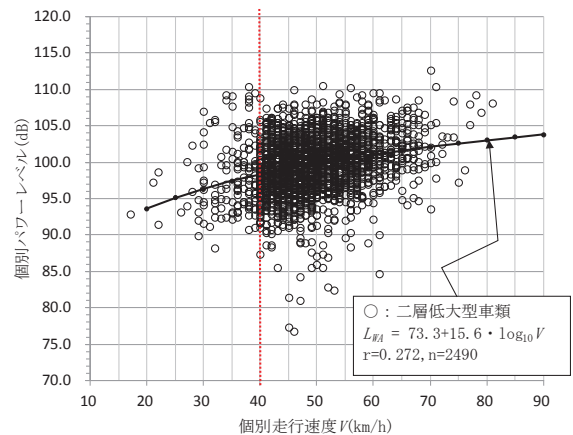


図-13 大型車類の個別パワーレベル (dB) と 個別走行速度 (km/h) の相関

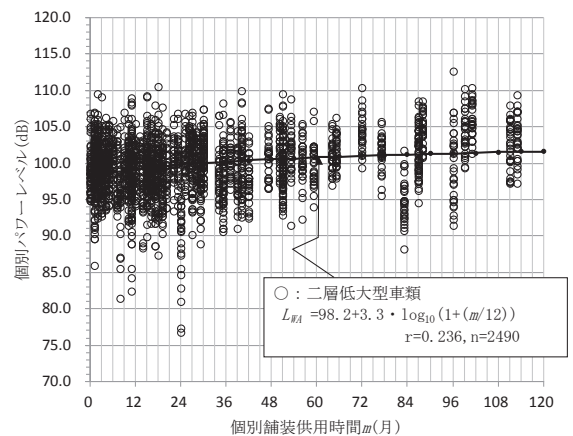


図-14 大型車類の個別パワーレベル (dB) と 個別舗装供用時間 (月) の相関

作成した二層低に対する 2 車種分類のパワーレベル式は、(式-6)、表-14 のとおり。

表-14 2 車種分類のパワーレベル式

車種	回帰式				F値	サンプル数
	a_0	a_1 (V :km/h)	a_2 (m :月)	重相関係数 R		
小型車類	49.7	23.9	6.8	0.604	$F_{2,2487} = 712.4$	2490
	$t_{2487}=30.6$ $t_{0.05;500}=1.648$	$t_{2487}=25.5$ $t_{0.05;500}=1.648$	$t_{2487}=29.7$ $t_{0.05;500}=1.648$		$F_{0.05;2,1000} = 3.00$	
大型車類	69.2	17.1	3.7	0.378	$F_{2,2487} = 207.3$	2490
	$t_{2487}=37.8$ $t_{0.05;500}=1.648$	$t_{2487}=15.9$ $t_{0.05;500}=1.648$	$t_{2487}=14.2$ $t_{0.05;500}=1.648$		$F_{0.05;2,1000} = 3.00$	

回帰式としての(式-6)の統計的有意性は、表-14に示すとおりである。

パワーレベル式(式-6)により、二層低における2車種分類の音響パワーレベル(dB)を計算した結果を、表-15に示す。表-15は、横軸が舗装供用時間(年/月)、縦軸が走行速度(km/h)に対する二層低における音響パワーレベル(dB)である。

(4) 作成したパワーレベル式の算定値による二層低の騒音抑制効果の評価

作成したパワーレベル式の算定値による二層低の騒音抑制効果の評価するために、一層低における音響パワーレベルとして補正したASJ RTN-Model 2013⁽⁴⁾パワーレベル式による算定値と比較した。([二層低音響パワーレベル]-[ASJ一層低音響パワーレベル])としての比較結果を、表-16に示す。表-16から個別舗装供用時間 $m=0$ 月(供用開始初期の時点)および個別舗装供

用時間 $m=108$ 月(9年)(本調査データの測定範囲上限113月(図-4、表-6))について示すと次のとおりである。

- ① 小型車類：個別舗装供用時間 $m=0$ 月のとき、一層低における音響パワーレベルに対して、
 - ・40km/h 走行時音響パワーレベル差 -1.1 dB
 - ・50km/h 走行時音響パワーレベル差 -1.7dB
 - ・60km/h 走行時音響パワーレベル差 -2.1dB
- ② 大型車類：個別舗装供用時間 $m=0$ 月のとき、一層低における音響パワーレベルに対して、
 - ・40km/h 走行時音響パワーレベル差 -0.8dB
 - ・50km/h 走行時音響パワーレベル差 -2.0dB
 - ・60km/h 走行時音響パワーレベル差 -3.0dB
- ③ 小型車類：個別舗装供用時間 $m=108$ 月のとき、一層低における音響パワーレベルに対して、
 - ・40km/h 走行時音響パワーレベル差 -1.6 dB

表-15 二層低におけるパワーレベル式による計算値 (L_{WA})

車種	走行速度 V (km/h)	舗装供用時間 m (年)・(月)																				
		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120
小型車類	30	85.0	86.2	87.1	87.7	88.2	88.7	89.1	89.4	89.8	90.0	90.3	90.5	90.7	91.0	91.1	91.3	91.5	91.7	91.8	91.9	92.1
	35	86.6	87.8	88.7	89.3	89.8	90.3	90.7	91.0	91.4	91.6	91.9	92.1	92.3	92.6	92.7	92.9	93.1	93.3	93.4	93.5	93.7
	40	88.0	89.2	90.0	90.7	91.2	91.7	92.1	92.4	92.7	93.0	93.3	93.5	93.7	93.9	94.1	94.3	94.5	94.6	94.8	94.9	95.1
	45	89.2	90.4	91.3	91.9	92.5	92.9	93.3	93.7	94.0	94.2	94.5	94.7	95.0	95.2	95.4	95.5	95.7	95.9	96.0	96.2	96.3
	50	90.3	91.5	92.4	93.0	93.5	94.0	94.4	94.7	95.1	95.3	95.6	95.8	96.1	96.3	96.4	96.6	96.8	97.0	97.1	97.2	97.4
	55	91.3	92.5	93.3	94.0	94.5	95.0	95.4	95.7	96.0	96.3	96.6	96.8	97.0	97.2	97.4	97.6	97.8	97.9	98.1	98.2	98.4
	60	92.2	93.4	94.2	94.9	95.4	95.9	96.3	96.6	97.0	97.2	97.5	97.7	97.9	98.1	98.3	98.5	98.7	98.8	99.0	99.1	99.3
	65	93.0	94.2	95.1	95.7	96.3	96.7	97.1	97.5	97.8	98.1	98.3	98.6	98.8	99.0	99.2	99.3	99.5	99.7	99.8	100.0	100.1
	70	93.8	95.0	95.8	96.5	97.0	97.5	97.9	98.2	98.6	98.8	99.1	99.3	99.5	99.7	99.9	100.1	100.3	100.4	100.6	100.7	100.9
大型車類	30	94.5	95.1	95.6	95.9	96.2	96.5	96.7	96.9	97.0	97.2	97.3	97.5	97.6	97.7	97.8	97.9	98.0	98.1	98.2	98.3	98.3
	35	95.6	96.3	96.7	97.1	97.4	97.6	97.8	98.0	98.2	98.3	98.5	98.6	98.7	98.8	98.9	99.0	99.1	99.2	99.3	99.4	99.5
	40	96.6	97.2	97.7	98.1	98.4	98.6	98.8	99.0	99.2	99.3	99.5	99.6	99.7	99.8	99.9	100.0	100.1	100.2	100.3	100.4	100.4
	45	97.5	98.1	98.6	98.9	99.2	99.5	99.7	99.9	100.1	100.2	100.3	100.5	100.6	100.7	100.8	100.9	101.0	101.1	101.2	101.2	101.3
	50	98.3	98.9	99.4	99.7	100.0	100.3	100.5	100.7	100.8	101.0	101.1	101.3	101.4	101.5	101.6	101.7	101.8	101.9	102.0	102.0	102.1
	55	99.0	99.6	100.1	100.4	100.7	101.0	101.2	101.4	101.5	101.7	101.8	102.0	102.1	102.2	102.3	102.4	102.5	102.6	102.7	102.7	102.8
	60	99.6	100.3	100.7	101.1	101.4	101.6	101.8	102.0	102.2	102.3	102.5	102.6	102.7	102.8	102.9	103.0	103.1	103.2	103.3	103.4	103.5
	65	100.2	100.9	101.3	101.7	102.0	102.2	102.4	102.6	102.8	102.9	103.1	103.2	103.3	103.4	103.5	103.6	103.7	103.8	103.9	104.0	104.1
	70	100.8	101.4	101.9	102.2	102.5	102.8	103.0	103.2	103.3	103.5	103.6	103.8	103.9	104.0	104.1	104.2	104.3	104.4	104.5	104.5	104.6

表-16 [二層低音響パワーレベル]-[ASJ一層低音響パワーレベル]

車種	走行速度 V (km/h)	舗装供用時間 m (年)・(月)																				
		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120
小型車類	30	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-0.8	-0.8
	35	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.3	-1.2
	40	-1.1	-1.1	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.4	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6	-1.5	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
	45	-1.4	-1.5	-1.5	-1.6	-1.6	-1.7	-1.7	-1.7	-1.7	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.9	-1.9	-1.8	-1.9	-1.9	-1.9
	50	-1.7	-1.8	-1.8	-1.9	-2.0	-1.9	-2.0	-2.0	-2.0	-2.1	-2.0	-2.1	-2.0	-2.1	-2.2	-2.2	-2.1	-2.1	-2.2	-2.2	-2.2
	55	-1.9	-2.0	-2.1	-2.1	-2.2	-2.2	-2.2	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4
	60	-2.1	-2.2	-2.3	-2.3	-2.4	-2.4	-2.4	-2.5	-2.4	-2.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.7	-2.6	-2.7	-2.6
	65	-2.4	-2.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.7	-2.7	-2.7	-2.7	-2.7	-2.8	-2.7	-2.8	-2.8	-2.8	-2.9	-2.9	-2.8	-2.9	-2.8	-2.9
	70	-2.6	-2.6	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.9	-2.9	-3.0	-2.9	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.1	-3.1	-3.1
大型車類	30	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
	35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	40	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.7
	45	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.3	-1.3	-1.4	-1.3	-1.4	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3
	50	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-1.9	-1.9	-1.9	-2.0	-1.9	-2.0	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9
	55	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.5
	60	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-2.9	-2.9
	65	-3.5	-3.4	-3.5	-3.4	-3.4	-3.4	-3.5	-3.4	-3.4	-3.5	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.3
	70	-3.9	-3.9	-3.8	-3.9	-3.9	-3.8	-3.8	-3.8	-3.9	-3.8	-3.9	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8

- ・ 50km/h 走行時音響パワーレベル差 -2.2 dB
- ・ 60km/h 走行時音響パワーレベル差 -2.6 dB

④ 大型車類：個別舗装供用時間 $m=108$ 月のとき、一層低における音響パワーレベルに対して、

- ・ 40km/h 走行時音響パワーレベル差 -0.7 dB
- ・ 50km/h 走行時音響パワーレベル差 -1.9 dB
- ・ 60km/h 走行時音響パワーレベル差 -2.9 dB

以上、実道での二層低に対する音響パワーレベルによる調査において、二層低は一層低より騒音抑制効果が優れていることを確認した。

6. まとめ

本調査の目的は、二層低における自動車走行騒音の抑制効果を評価するため、実道の二層低における音響パワーレベルの調査によるパワーレベル式を作成し、その算定値により二層低の騒音抑制効果を評価することであった。評価は、作成したパワーレベル式（自動車走行速度と舗装供用時間を説明変数とした）による算定値と（一社）日本音響学会道路交通騒音の予測モデル ASJ RTN-Model 2013¹⁴⁾におけるパワーレベル式を一層低として補正した算定値との比較により行った。比較結果は、本調査で作成した二層低におけるパワーレベル式による算定値は、ASJ RTN-Model 2013 におけるパワーレベル式を一層低として補正した算定値より小さいことを示した。

これまで行ってきた特殊タイヤによるタイヤ/路面騒音による調査結果と同様、音響パワーレベルによる調査においても、二層低は一層低より騒音抑制効果が優れていることを確認した。

なお、（一社）日本音響学会は、2019年4月、道路交通騒音の予測モデル ASJ RTN-Model 2013 を更新し、ASJ RTN-Model 2018¹⁶⁾を公表した。ASJ RTN-Model 2013 では、一層低の騒音低減効果は、密粒度アスファルト舗装を基本式とするパワーレベル式の「舗装路面の種

類による補正量 ΔL_{surf} として示していたが、ASJ RTN-Model 2018 では、「一層低に対するパワーレベル式」として、「舗装路面種類の違いによる補正量」ということではなく、一層低単独のパワーレベル式として示している。この ASJ RTN-Model 2018 におけるパワーレベル式の導出に際しては、ASJ RTN-Model 2013 のパワーレベル式に、直接、補正量を取り込んで構築したものであり、両者は異なるものではない。したがって、本文で示した ASJ RTN-Model との比較評価結果は、最新モデルである ASJ RTN-Model 2018 と比較評価を行ったことと同等である。

7. おわりに

道路敷地内での沿道環境騒音抑制の技術として遮音壁や環境緑地帯などあるが、本文で取り上げた騒音抑制性能をもつ舗装は、現在、構築しやすい抑制技術である。しかし、空隙を有するポーラスアスファルト混合物の舗装であるがゆえに発生しやすい材料のはく脱飛散への対応、性能維持のための方法（空隙詰まり・空隙潰れへの対策）、舗装修繕時に発生するアスファルト混合物廃材の再生方法など克服すべき課題を抱えており、官学民の連携した対応による更なる技術の向上が望まれる。

以上の認識の下に、今後も引き続き騒音抑制性能を有する舗装の性能維持向上のため調査検証を実施していく。

最後に、道路舗装からの沿道環境対策にご努力いただいている都建設局各建設事務所補修課、工区、およびこの調査に関する当センターとの合同検証者として多大なるご協力をいただいている都建設局道路管理部保全課の各位に対して、深甚なる感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 東京都建設局(2018)：平成30年度道路工事設計基準、平成30年4月
- 2) 東京都建設局道路管理部(2009)：二層式低騒音舗装(車道)設計・施工要領(案)、平成21年12月

- 3) 東京都環境局：優先的対策道路区間について
[<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/vehicle/noise/priority.html>]（最終検索日：2019年6月11日）
- 4) 東京都土木技術研究所(1994)：低騒音舗装に関する調査報告書、平成6年3月2
- 5) 田中輝栄、阿部忠行(1997)：低騒音舗装の機能評価、平9.都土木技研年報、91-102
- 6) 田中輝栄、阿部忠行(1998)：低騒音舗装におけるタイヤ発生音と吸音率、平10.都土木技研年報、63-72
- 7) 田中輝栄、阿部忠行(1999)：低騒音舗装の騒音低減効果の評価、平11.都土木技研年報、59-68
- 8) 田中輝栄、小林一雄(2006)：切削打換え工法で施工した低騒音舗装の性能履歴、平18.都土木技術センター年報、51-58
- 9) 田中輝栄(2008)：騒音低減性能をもつ舗装のタイヤ/路面騒音、平20.都土木技術センター年報、51-62
- 10) 田中輝栄、上野慎一郎(2015)：記録的積雪に見舞われた二層式低騒音舗装の積雪後の騒音低減性能、平.27 都土木技術支援・人材育成センター年報、45-56
- 11) 田中輝栄、上野慎一郎(2016)：都道に適用されている二層式低騒音舗装の騒音抑制性能、平28 都土木技術支援・人材育成センター年報、55-68
- 12) (公社)日本道路協会(2001)：舗装の構造に関する技術基準・同解説、54-55、平成13年7月、丸善(株)
- 13) (公社)日本道路協会(2006)：舗装性能評価法一必須および主要な性能指標の評価法編一、54-62、平成18年1月、丸善(株)
- 14) (一社)日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会(2014)：道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2013”、日本音響学会誌、70、172-230 (2014)
- 15) (一社)日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会(2009)：道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2008”、日本音響学会誌、65、179-232 (2009)
- 16) (一社)日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会(2019)：道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2018”、日本音響学会誌、75、188-250 (2019)
- 17) A. H. Bouwker , G. J. Lieberman : Engineering Statistics , Maruzen Asia Edition , Maruzen Company, Ltd. , 1964
- 18) 森口繁一 (1957) : 初等数理統計学改訂版、105-106、昭和37年3月、(株)培風館