

マイクロフィルム用資料

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3677号

土木研究所資料

低騒音舗装の自動車走行騒音低減効果 とそのメカニズムに関する研究

平成12年3月

建設省土木研究所
環境部交通環境研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

低騒音舗装の自動車走行騒音低減効果 とそのメカニズムに関する研究

交通環境研究室 室長 大西 博文

要 旨

本研究は、低騒音舗装（排水性舗装及び多孔質弾性舗装）による自動車走行騒音の低減効果を定量的に把握し、その減音メカニズムを解明したものである。さらに、多孔質弾性舗装に関しては、その実用化に必要な種々の課題を検討したものである。

ここでは、排水性舗装の騒音低減効果を走行速度に依存する通常の密粒舗装との騒音パワーレベルの差として定量化した。このとき、この騒音低減効果の経時的変化を施工時からの経過月数の関数として表現した。また、実験等により求めた同舗装の各種音響特性を用いて、その騒音低減メカニズムを要因別に定量的に解明した。さらに、多孔質弾性舗装に関してはその大きな騒音低減効果を把握し、その実用化に必要なとされる滑り摩擦抵抗、耐火性、耐久性等の課題に関してその性能を確認した。

キーワード：低騒音舗装、騒音低減効果、騒音パワーレベル、音響特性、道路交通騒音対策

目 次

第1章 本研究の背景と目的	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 道路交通騒音の現状	1
1.1.2 道路交通騒音を取り巻く最近の情勢	1
1.2 本研究の目的	3
1.2.1 道路交通騒音対策の体系	3
1.2.2 道路交通騒音対策における低騒音舗装の位置づけ	6
1.2.3 本研究で扱う低騒音舗装の課題	7
1.3 本論文の構成	8
第2章 低騒音舗装の騒音低減に関する既往の研究	10
2.1 排水性舗装の自動車走行騒音低減効果に関する既往の研究	10
2.2 排水性舗装の音響特性に関する既往の研究	11
2.3 排水性舗装の自動車走行騒音低減メカニズムに関する既往の研究	11
2.4 多孔質弾性舗装に関する既往の研究	13
第3章 排水性舗装の自動車走行騒音低減効果	15
3.1 排水性舗装の沿道における騒音低減効果	15
3.2 排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの定量化	15
3.2.1 騒音予測手法での排水性舗装の騒音パワーレベルの使い方	17
3.2.2 密粒舗装と排水性舗装の自動車走行騒音パワーレベルの差	20
3.2.3 排水性舗装の自動車走行騒音パワーレベル	22
3.2.4 密粒舗装に対する排水性舗装の騒音パワーレベルの補正による定量化	31
3.3 排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの経時変化	31
3.3.1 排水性舗装の騒音低減効果の低下	31

3.3.2	騒音測定調査の概要	32
3.3.3	測定データの整理方法	32
3.3.4	排水性舗装施工後の経過月数と騒音低減効果の関係	34
第4章	排水性舗装の騒音低減メカニズム	37
4.1	排水性舗装の仕様と騒音低減効果	37
4.1.1	空隙率の影響	37
(1)	調査方法	37
(2)	空隙率の違いによる自動車走行騒音の低減効果の変化	37
(3)	空隙率の違いによる駆動機関音の変化	42
(4)	まとめ	45
4.1.2	舗装厚の影響	46
4.1.3	骨材粒径の影響	46
4.2	騒音低減要因	46
4.3	排水性舗装の音響特性	48
4.3.1	垂直入射吸音率	48
4.3.2	道路交通騒音に対する平均吸音率	49
4.3.3	実効的流れ抵抗	52
(1)	排水性舗装上の伝搬音測定調査の概要	52
(2)	伝搬音の超過減衰	52
(3)	伝搬音のユニットパターンによる排水性舗装の実効的流れ抵抗値の推定	52
4.3.4	音響インピーダンスと吸音率	55
4.3.5	排水性舗装上の自動車走行騒音の指向性	59
(1)	自動車走行騒音の指向性の測定概要	59
(2)	定常走行騒音の指向性	61
(3)	惰性走行騒音の指向性	63
(4)	まとめと今後の課題	65
4.4	騒音低減メカニズムの検証	66
4.4.1	音源における騒音発生抑制	66
(1)	一般道路における騒音測定調査の概要	66

(2) 自動車走行騒音のパワーレベル式	66
(3) 沿道での等価騒音レベルによる検証	69
4.4.2 路面上を伝搬するときの超過減衰	69
4.4.3 音源における騒音の抑制効果と吸音効果	72
(1) 路面と車体下面のモデル化	72
(2) 吸音による減音効果のシミュレーション結果	74
4.5 騒音低減効果の経時変化の要因	74
4.5.1 音響特性の経時変化	74
(1) 垂直入射吸音率の経時変化	74
(2) 道路交通騒音に対する平均吸音率の経時変化	74
4.5.2 騒音低減効果の経時変化の要因	77
(1) 空隙率調査方法の概要	77
(2) 排水性舗装の成分分析方法の概要	77
(3) 空隙率の経時変化	77
(4) 空隙閉塞物の成分	79
4.5.3 高圧水洗浄による空隙率の回復	79
第5章 多孔質弾性舗装の研究開発	82
5.1 多孔質弾性舗装とは	82
5.2 多孔質弾性舗装の騒音低減効果	85
5.2.1 実験の概要	85
(1) 自動車走行騒音の測定概要	85
(2) 垂直入射吸音率の測定概要	85
5.2.2 自動車走行騒音の測定結果	85
(1) 空隙率と騒音低減効果	85
(2) 舗装厚・ゴム粒子の大きさと騒音低減効果	89
(3) 惰性走行時の騒音低減効果	89
(4) タイヤ路面音と駆動機関音	92
(5) 周波数分析の結果	97
5.2.3 垂直入射吸音率の測定結果	102

5. 2. 4	まとめ	105
5. 3	多孔質弾性舗装のその他の課題	106
5. 3. 1	路面の滑り摩擦抵抗	106
5. 3. 2	耐火性	106
5. 3. 3	耐久性	112
第6章	総 括	115
6. 1	研究成果のまとめ	115
6. 2	今後の課題	122
謝 辞		125
参考文献		126

第1章 本研究の背景と目的

1.1 本研究の背景

1.1.1 道路交通騒音の現状

環境庁の調査によると1997年度の道路交通騒音の環境基準の達成率は、全国の4,713測定地点のうち13.3%であり¹⁾ (図1.1参照)、道路交通騒音は厳しい状況にある。測定地点が多少異なっているので同等には比較できないが、過去20年間の環境基準の達成率は1981年の17.2%を最高に1997年の13.3%までずっと10%台と低迷している²⁾ (図1.2参照)。また、環境基準を10dB以上超過している地点も少なからずある。これまで各種の騒音対策が講じられているが、自動車交通量の増加、幹線道路周辺の市街化等のため道路交通騒音の状況の改善ははかばかしくない。

大都市地域（東京23区と12政令指定都市）とそれ以外の地域で見た環境基準の達成率は、それぞれ6.3%、14.4%と大都市地域の方が低くなっている。しかし、それ以外の地域でも達成率は低く、道路交通騒音は大都市圏だけでなく地方部においても幹線道路の沿道では問題となっていることが分かる。

また、道路種類別の環境基準の達成率では、自動車専用道路である高速自動車国道が24.2%と最も高く、逆に都市高速道路が4.1%と最も低い。これは、都市高速道路が平面道路に併設されていることが多く、この平面道路では遮音壁等の対策が困難であり、また交通量が多いためである。一方、高速自動車国道はこれに比べて交通量が少なく、道路用地も確保できており対策が比較的容易であるためと考えられる。また、一般道路では国道の達成率が8.1%と最も低く、市町村道が22.2%と最も高い。これは、国道のような幹線道路であるほど交通量が多いためであると思われる。

1.1.2 道路交通騒音を取り巻く最近の情勢

道路交通騒音を取り巻く最近の情勢を整理してみると、まず挙げられるのは1995年7月の「国道43号・阪神高速道路騒音排気ガス規制等請求事件」に関する最高裁判所の判決であろう。この判決では、沿道住民に対し騒音等による生活妨害が認容されている。これに

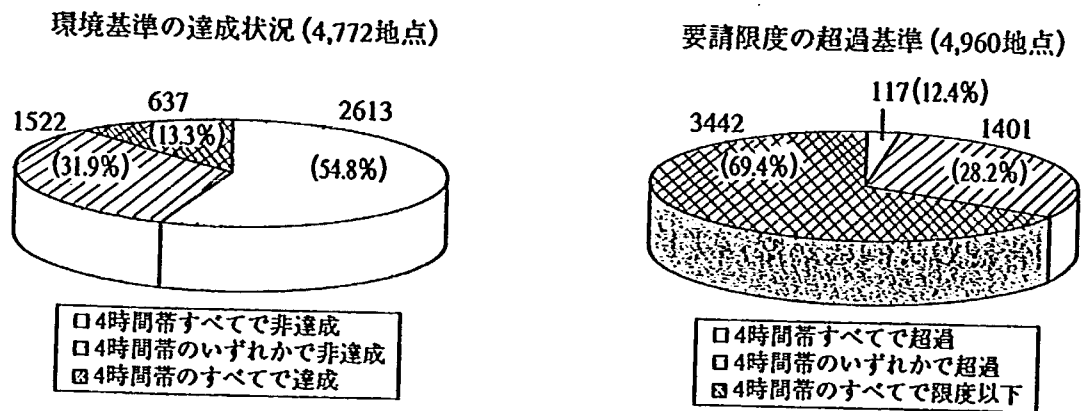


図 1. 1 自動車騒音に係る環境基準の達成状況及び要請限度の超過状況 ¹⁾

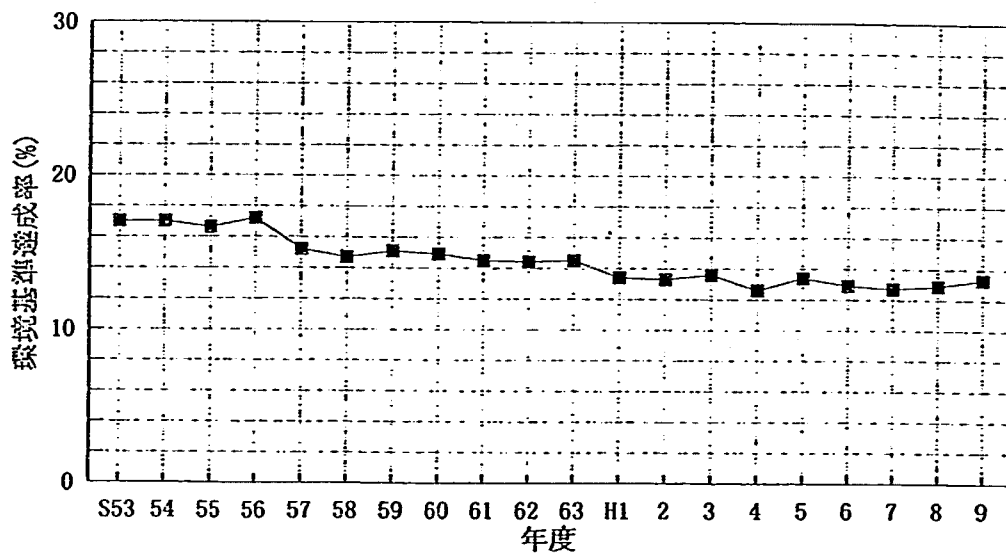


図 1. 2 環境基準の達成状況の推移 ²⁾

加えて、道路交通騒音が中央値（ L_{50} ）ではなくて、等価騒音レベル（ L_{Aeq} ）を評価指標として評価されていることが注目される。

これを契機に関係省庁等の機関では各種の道路交通騒音に関する対策等の措置が一層推進されることとなった。その一環として、1971年に閣議決定された騒音に係る環境基準を見直すため、環境庁は1996年7月に中央環境審議会に対し、「騒音の評価手法等の在り方について」を諮問した。1998年5月にこの諮問に対する答申³⁾が中央環境審議会より環境庁になされた。これを受け、騒音に係る環境基準が1998年9月の環境庁告示により27年振りに改定され、1999年4月から施行された⁴⁾。今回の改定では、騒音の評価指標が L_{50} から L_{Aeq} に変更されたことが注目される。

一方、道路事業をはじめとする各種の開発事業にかかる環境アセスメントは、従来1984年の閣議決定等に基づく制度により行われていたが、1997年6月環境影響評価法が制定され、1999年6月に施行され、これに基づき行われることとなった。

1. 2 本研究の目的

1. 2. 1 道路交通騒音対策の体系

道路交通騒音対策には、騒音の発生、伝搬、受音の各段階で講じられる発生源対策、交通流対策、道路構造対策、沿道対策がある。また、これらには施設の設置等によるハードな対策と規制・誘導等によるソフトな対策がある（図1. 3⁵⁾参照）。騒音のような環境問題の対策では発生源対策が基本であるが、1. 1. 1で述べたとおりその改善が容易でない現状では、問題となっている地域の状況を踏まえてこれら各種対策を適切に組み合わせることが効果的である。

ここでは、図1. 3の中の主な道路交通騒音対策について述べる。

発生源対策の主要なものに自動車騒音単体規制があり、自動車騒音の低減が図られてきた。1992年11月及び1995年2月の中央環境審議会の答申⁶⁾・⁷⁾では、加速走行騒音を1～3 dB、定常走行騒音を1～6.1 dB低減とする目標値が設定された。しかしながら、タイヤ音や大型車のエンジン音がまだ課題として残っている。タイヤの単体規制、エンジンの一層の遮蔽等対策のさらなる進展が必要である。

交通流対策では、道路網の体系的な整備により幹線道路と生活道路の機能を分化させる

道
路
交
通
騒
音
対
策

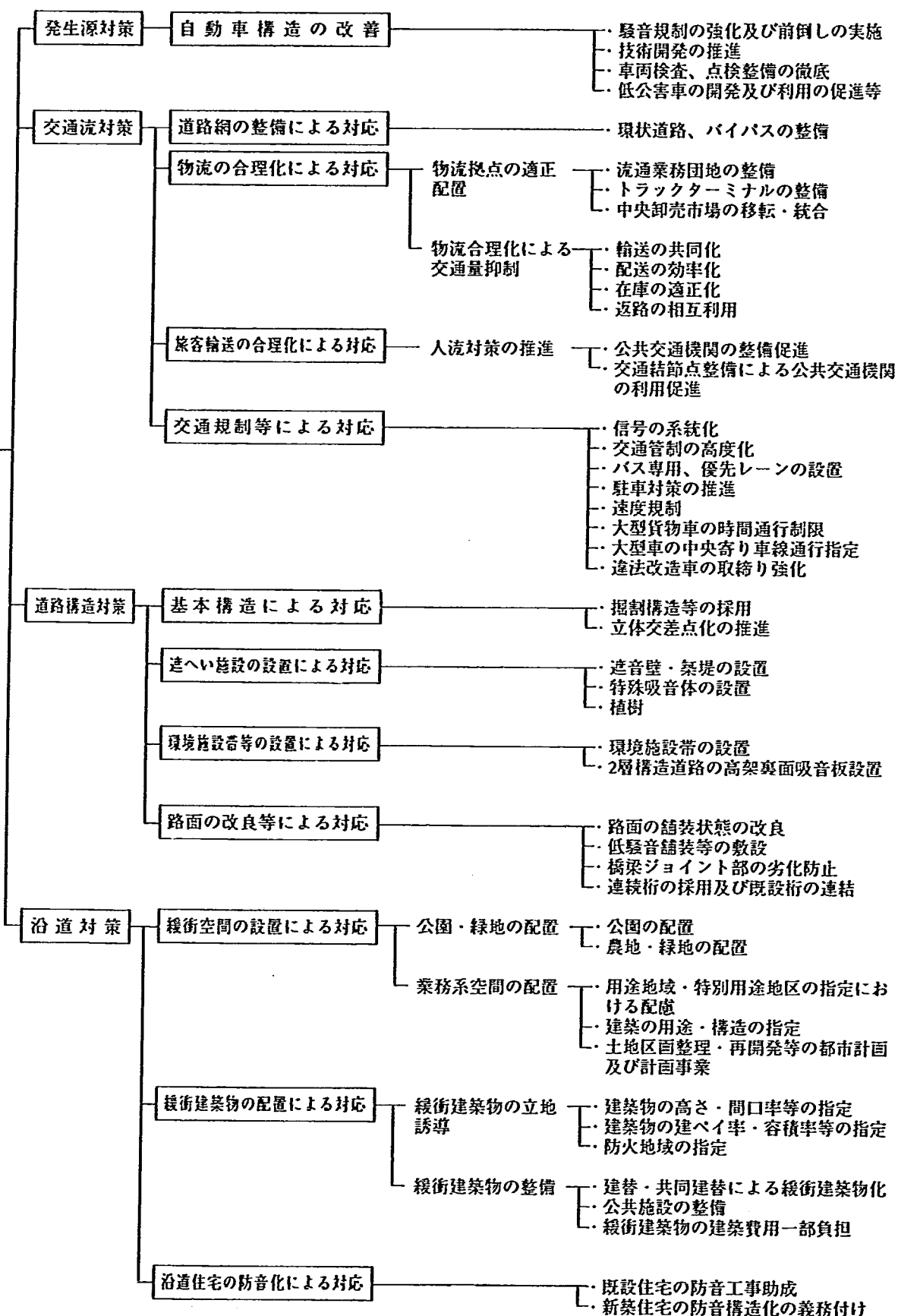


図 1.3 道路交通騒音対策の体系図 ⁵⁾

ことが重要である。例えば、都市部を迂回する環状道路やバイパスの整備により都市部を通過する交通の転換を図り、既存の道路は主に当該地域に関係する交通を処理する機能を果たすこととなりその沿道環境は改善される。

道路構造対策では、一般的には遮音壁がよく用いられる。最近では、その上端部に吸音体や突起を取り付けることにより、騒音の回折減衰量を高める工夫がなされた遮音壁が開発されている^{8)・9)}。前者は、吸音体により遮音壁の上端部周辺の騒音を吸音することによって、遮音壁の背後の騒音低減を図ろうとするものである。後者は突起により騒音を干渉させ、騒音低減を図ろうとするものである。

また、平面道路に高架道路が併設されている区間では、高架道路の裏面に吸音板を設置することにより反射音を低減させる対策が適用される。この対策は、道路に遮音壁が設置されていて高架裏面の反射音が沿道で卓越している場合に効果的である。最近では、吸音率が90%を超える高い吸音性能を有する吸音板が開発されている¹⁰⁾。

さらに、近年では排水性舗装が低騒音舗装として広く用いられるようになってきた。排水性舗装は通常の密粒度アスファルト舗装（以後、密粒舗装という）に比べると3～5 dBの騒音低減効果を有するが¹¹⁾、経時的にその空隙が閉塞するため効果は低下する。効果の回復、持続性の向上を図る技術開発が期待される^{12)・13)}。

沿道対策としては、騒音等環境負荷の大きい幹線道路に面した地域には住宅の立地を抑制することが重要である。このため、沿道の土地利用が業務系、商業系となるように用途地域の指定に配慮することが望まれる。また、沿道の住宅の防音化を図るため、既設住宅に対しては防音工事の助成を行ったり、新規の住宅立地に対しては例えば防音構造化を義務づけるなどが必要である。

これらの対策の推進に関しては、発生源対策である自動車単体規制の強化、低公害車の開発・普及及び道路機能を分化させる体系的な道路網の整備を基本としつつ、騒音が著しい箇所ではその状況を踏まえて道路構造対策、沿道対策を実施していくことが重要であると考えられる。このとき、これら対策による沿道生活環境の改善の程度をいろいろな視点から評価することも対策推進上忘れてはならない。

実際のところ、これら各種の対策が講じられているにもかかわらず、沿道の騒音状況の改善ははかばかしくない。この理由としては、自動車交通量の増加が著しいこと、また上記の対策では効果が十分大きくない、あるいは効果は大きい遮音壁のように道路と沿道地域の間で自動車の出入りのあるような一般道路では適用できないなどが挙げられる。

1. 2. 2 道路交通騒音対策における低騒音舗装の位置づけ

「低騒音舗装」という用語は、道路交通騒音を低減するために用いられる舗装で、広義には通常よく使われている密粒アスファルト舗装やコンクリート舗装に比べ、自動車走行騒音が小さい同種の舗装がこの低騒音舗装と考えられているようである。また、狭義には種々の「低騒音舗装」の中でも、すでに実用化されている排水性舗装と考えられているようである¹⁴⁾。本研究では「低騒音舗装」を前者の広義に使われる用語として用いる。

現在、様々な種類の低騒音舗装があり、アスファルト系の舗装では、空隙率の高い多孔質なアスファルト混合物を表層に用いた排水性舗装や開粒度型のアスファルト混合物にゴム粒子を混入したものを表層に用いる舗装などがある。また、セメント系の舗装では、最大粒径が4～8mm程度の骨材を露出させて表面を仕上げる小粒径露出コンクリート舗装などがある。さらには、これらとはまったく異なったもので、粒状のゴムをウレタン樹脂で接合した高い空隙率を有する多孔質弾性舗装がある。これらは、すでに実用化されているもの、試験的に施工されているもの、まだ研究開発中のものといろいろな段階にある。本研究では、低騒音舗装として排水性舗装と多孔質弾性舗装を取り上げ、これらに関して論ずることとする。

排水性舗装は、路面の水を表層内の空隙を通して側方に排水することにより雨天時に路面に水が溜まらないので、ハイドロプレーニング現象や水飛沫によるスモーキングが防止でき、このため当初は交通安全に資するものとして用いられてきた。しかし、道路交通騒音の低減効果があることから、現在では騒音対策としても用いられている。1992年に「アスファルト舗装要綱」¹⁵⁾が改訂され、排水性舗装の施工状態も一定の水準を維持できるようになってきた。さらに、その後の技術的蓄積も踏まえて、1996年には「排水性舗装技術指針(案)」¹⁶⁾及び「低騒音舗装の概説」¹⁷⁾も発行されている。

低騒音舗装は、道路構造のうち舗装路面の性状を工夫することによって自動車走行騒音のうち主としてタイヤ路面騒音の発生を抑制する。従って、この舗装は発生源対策であり、図1. 3の道路交通騒音対策の体系の中では道路構造対策であると言えることができる。ただし、低騒音舗装の中でもここで取り扱う排水性舗装や多孔質弾性舗装は空隙を有し、吸音性の材料であるため、騒音の伝搬過程における低減効果もあると考えられ、従って伝搬過程対策の性格も一部もっている。この低騒音舗装は、道路構造の中で舗装を代えるだけであるため、路側に設置する遮音壁とは違い道路と沿道の建物・施設の間で自動車が入り出するのを阻害することはない。このため、低騒音舗装は高速道路のような自動車専用道

路だけでなく、一般道路にも騒音対策として用いることができる。

1. 2. 3 本研究で扱う低騒音舗装の課題

本研究では低騒音舗装として排水性舗装と多孔質弾性舗装を扱う。前者については、1. 2. 2で述べたように現在広く道路交通騒音対策として用いられているが、どれだけ騒音低減効果を見込むことができるか判然としない。これは、道路事業の環境影響評価を行う場合などに問題となってくる。従来の道路交通騒音の予測手法（ASJ Model 1975¹⁸⁾、ASJ Model 1993¹⁹⁾）には排水性舗装による騒音低減効果は考慮されていない。このため、道路交通騒音の予測手法において排水性舗装の騒音低減効果の取り扱いを定めることが必要になってくる。また、排水性舗装はその空隙が徐々に閉塞するために、経時的に騒音低減効果が低下する。上記の予測手法における減音効果の取り扱いには、この現象も含める必要がある。

さらに、本研究では排水性舗装の騒音低減要因を定量的に解明する。一般的には、その要因はこれまでの研究で次のように考えられている。排水性舗装は連続した空隙をもつため、タイヤが路面上を転動するときタイヤのトレッドパターンの溝と路面に挟まれた空気が圧縮・膨張することにより発生するエアポンピング音を抑制すること、タイヤ路面騒音やエンジン騒音が路面と自動車の車体下面の間で多重反射するときに路面により吸音されること、さらに吸音性の路面上を自動車騒音が伝搬するときに超過減衰が生じることによって考えられている。ここでは、これらそれぞれの要因による減音量を定量的に求める。これは、現在その騒音低減効果が約3～5 dBと十分大きいわけではないので、今後効果の改善を図るときに重要となるであろう。

最後に多孔質弾性舗装に関しては、まだ道路交通騒音対策として開発の途中であるが、排水性舗装に比べて非常に大きな騒音低減効果を有しており、これを定量的に把握すること、さらに、その音響特性を把握することを目的とする。この舗装が実用化されれば、相当な騒音低減効果が期待でき、道路交通騒音問題を大きく改善できると考える。

1. 3 本論文の構成

本論文は6章で構成されており、各章の内容はそれぞれ次のとおりである。

第1章では、幹線道路の沿道地域の騒音が厳しい状況にあること、その対策として用いられる排水性舗装の騒音低減効果を定式化することが道路事業の環境影響評価などで必要とされていること、また、その効果を改善するためにもこの舗装の騒音低減メカニズムを明らかにすること、さらには排水性舗装より大きな騒音低減効果が期待できる多孔質弾性舗装の効果の把握及びその実用化が求められていることを、本研究の背景及び目的として述べ、本研究の位置づけを行った。

第2章では、本研究のテーマである「低騒音舗装の自動車走行騒音低減効果とその要因」に関連する既往の研究を概観するとともに、それらの課題を示した。これら課題のうちいくつかは、本研究の中で検討する課題とした。

第3章では、これまで施工されてきた排水性舗装の数多くの騒音測定データに基づき、この舗装の騒音低減効果の定式化を検討している。このとき、この騒音低減効果が経時的に低下することを考慮できるようにすることに留意した。

第4章では、排水性舗装の各種音響特性を実験等により把握し、これに基づいてこれまで定性的に説明されている同舗装の騒音低減メカニズムを定量的に解明することを試みている。騒音低減メカニズムを解明することは、この舗装の騒音低減効果を改善することに大いに役立つと考える。

第5章では、道路交通騒音の状況を大きく改善するためには大きな効果をもつ騒音対策が必要とされており、そのための有力なものとして期待されている多孔質弾性舗装の騒音低減効果を把握し、その実用化のための課題を検討している。

第6章では、本研究で得られた成果と今後の課題をまとめている。

以上の各章よりなる本論文の構成を図1.4に示す。

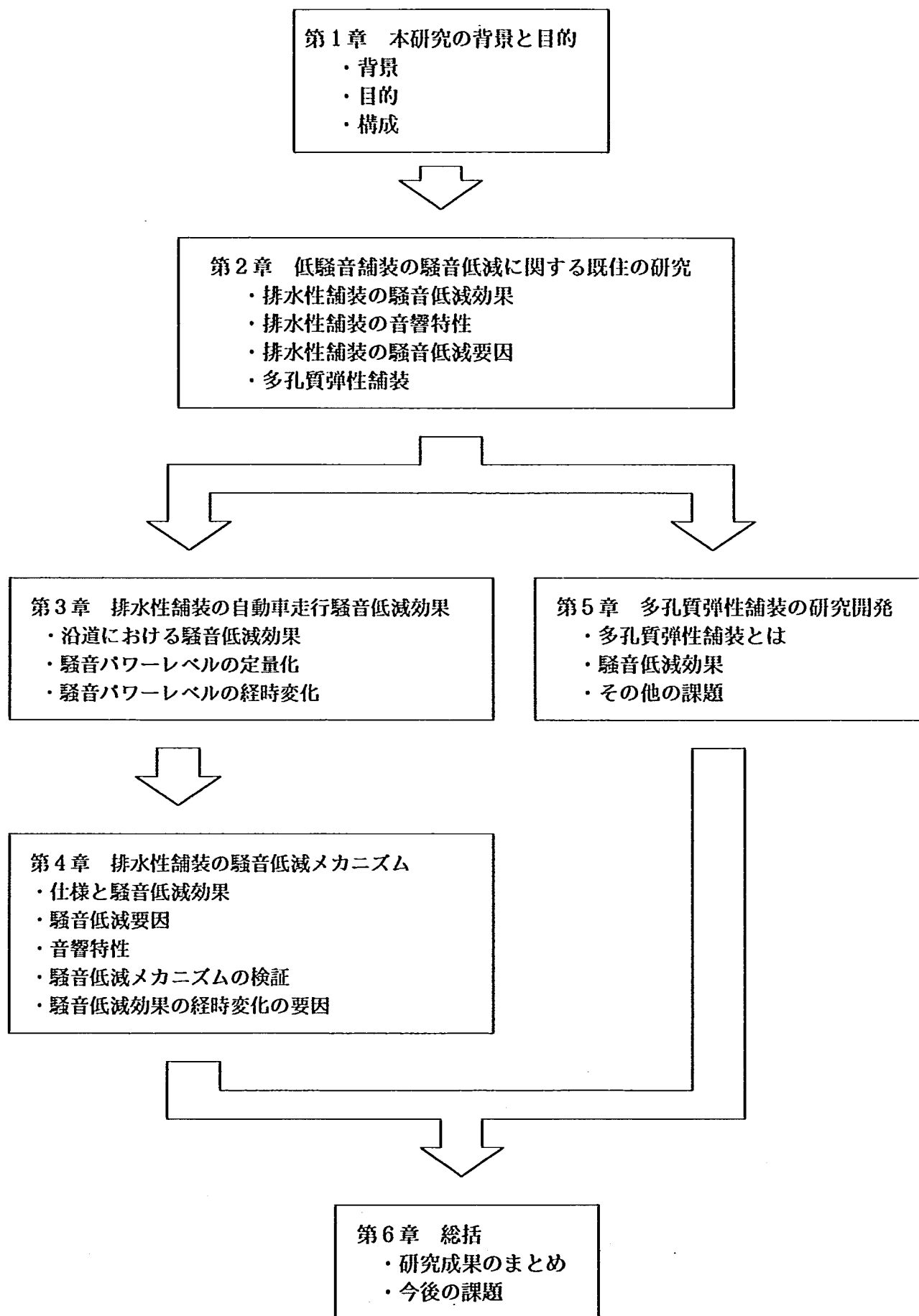


図1.4 本論文の構成

第2章 低騒音舗装の騒音低減に関する既往の研究

2.1 排水性舗装の自動車走行騒音低減効果に関する既往の研究

排水性舗装の自動車走行騒音低減効果に関する研究は、これまで多く行われてきた。これら研究の多くは、通常の密粒舗装と排水性舗装の路側等において測定された騒音レベルの差を、騒音低減量として報告したものである。これらは、騒音測定が行われたのが試験走路か実際の道路かによって、また、測定対象が試験車の走行騒音か一般交通の走行騒音かによって分類することができる。

明嵐ら²⁰⁾は、試験走路に施工された密粒舗装と排水性舗装で試験車を定常走行させて、測定された騒音レベルから排水性舗装の騒音低減効果を、乗用車の場合0～5 dB、小型貨物車の場合2～4 dB、大型貨物車の場合2～5 dBと報告している。また、滝沢ら²¹⁾も、同様に試験走路における試験車の走行騒音の測定結果から、排水性舗装の厚さ、骨材粒径等の仕様に関して騒音低減効果の視点から検討している。

竹中ら²²⁾は、実際の道路に排水性舗装が施工される前後に試験車の走行騒音を測定することにより、2～5dBの騒音低減効果が得られたことを報告している。さらに、小林ら²³⁾は、実際の道路に骨材粒径の異なる4種類の排水性舗装を施工した前後に、試験車のタイヤの近くに取り付けたマイクロフォンによりタイヤ近接音を測定することにより騒音低減効果を求めており、骨材粒径が小さい方が騒音低減効果が大きいとの結果を得ている。

実際の道路に施工された排水性舗装における一般交通の騒音に関しては、仲西ら²⁴⁾は高速道路及び一般道路の路側における騒音測定結果より、騒音レベルの中央値(L₅₀)でそれぞれ5.8dB及び1.8dBの騒音低減効果を報告している。

以上のとおり、排水性舗装の騒音低減効果に関する既往の研究において、試験走路や実際の道路における試験車の走行騒音測定結果から騒音低減効果を求めているものは、排水性舗装における自動車走行騒音のパワーレベルを与えることができるものの、データ数が十分でないため一般性に欠ける。また、実際の道路における一般交通の騒音測定からL₅₀や等価騒音レベル(LA_{eq})で排水性舗装の騒音低減効果を求めたものからは、排水性舗装

の騒音パワーレベルを与えることはできない。低騒音舗装として最近広く用いられるようになってきている排水性舗装の沿道における道路交通騒音を予測するには、排水性舗装における試験車や一般交通中の単独走行車の騒音測定データを数多く収集し、自動車走行騒音のパワーレベルを適切に設定する必要がある。

2. 2 排水性舗装の音響特性に関する既往の研究

排水性舗装の吸音率を始めとする音響特性に関しては、これまで多くの研究が行われている。まず、排水性舗装の空隙率や厚さ等構造と吸音率の関係については、井上ら²⁵⁾は空隙率が大きくなると、吸音率のピーク値を示す周波数帯が高周波域に移動し、また、排水性舗装の厚さが増すにしたがい、吸音率のピークを示す周波数帯が低周波域に移動すると報告している。また、水野ら²⁶⁾は、排水性舗装の連続空隙長に関する指標として屈曲度を考え、これがこの舗装のピーク吸音周波数に関係しているとし、その吸音特性は音波の共鳴現象によるものと報告している。帆苅ら²⁷⁾は、水野らの言う屈曲度を排水性舗装の垂直入射吸音率のピーク吸音周波数から波長を求め、その4分の1を空隙長とし、これを舗装の厚さで除したものと定義し、これと吸音特性の関係を分析している。その分析によると、空隙率が大きくなると屈曲度は小さくなり、通常、排水性舗装の屈曲度は2～3の範囲にあるとしている。また、屈曲度が大きくなるとピーク吸音率が小さくなると報告している。

一方、岩瀬ら²⁸⁾は、排水性舗装上の音響伝搬をローカルリアクティブと仮定し、推計計算を行っている。それによると、伝搬距離が5 m以遠で密粒舗装より大きな距離減衰が得られ、また、そのスペクトルは1 kHz以上の周波数領域でレベルが低下する傾向が明瞭であると報告している。

2. 3 排水性舗装の自動車走行騒音低減メカニズムに関する既往の研究

排水性舗装の騒音低減メカニズムに関する既往の研究によると、一般的には次のような要因が主に挙げられている。

- ①路面とタイヤのトレッドパターンの溝に挟まれた空気が、タイヤが転動するときに圧縮・膨張することにより生じるエアポンピング音の発生を排水性舗装の空隙が抑制する。
- ②路面と車体下面の間においてタイヤ路面騒音やエンジン騒音等が多重反射するときに、空隙がある排水性舗装の路面が吸音する。
- ③多孔質で吸音性のある排水性舗装面上を自動車走行騒音が伝搬するときに、超過減衰が生じる。

この他に上記①の要因の代わりに、路面とタイヤのトレッドパターンの溝により囲まれる細長い空間における気柱共鳴音の発生が多孔質な排水性舗装の路面により抑制されるとする研究²⁹⁾もある。さらには、上記の要因②の特殊なものとして排水性舗装の空隙がホーン効果を抑制すると指摘している研究³⁰⁾もある。これは、主としてタイヤの接地部付近を中心として発生するタイヤ路面騒音が、タイヤのトレッドと路面により作られる鋭角のホーンのような空間において伝搬するときに、多孔質な排水性舗装の路面により吸音されることをいっている。

明嵐ら³¹⁾は、排水性舗装の斜め入射吸音率をノーマル比音響インピーダンスから求め、これを用いて吸音による同舗装の騒音低減量を推定したところ 0.1 ～ 1.0dB 程度となり、騒音低減効果への吸音の寄与分は比較的小さいと報告している。しかしながら、明嵐ら²⁰⁾は、タイヤに色々な工夫をした自動車走行騒音測定の結果を用いて、排水性舗装の騒音低減要因を分析している。これによると、排水性舗装の騒音低減効果において車種別（乗用車、小型貨物車、大型貨物車）、走行速度別（80km/h 以下、100km/h 以上）にトレッドパターンエアポンピング音、トレッドパターンタイヤ加振音、他のタイヤ音と空力音及び駆動機関音の低下等の各種要因が異なるとしている。このとき、舗装の吸音特性を考慮した拡散音場モデルに基づいた多重反射モデルにより騒音低減効果を推計し測定値と比較したところ、両者はよく一致していたため騒音低減要因の大部分は吸音によるとしている。

また、岩井ら³⁰⁾は、タイヤ接地面付近のホーンと言われる空間において路面が吸音性の場合の方が伝搬音の超過減衰が大きいことを模型実験により測定している。

一方、山口ら³²⁾や川真田ら³³⁾は、排水性舗装の吸音のメカニズムは舗装表面で反射する音と舗装の空隙内を進みその裏面で反射し舗装表面から放射される音とが干渉することによって吸音が生じるとしている。

以上のとおり、排水性舗装の騒音低減メカニズムに関する既往の研究では種々の要因があると定性的に説明する研究や、また各要因による減音量を定量的にはあるが個別に求

めている研究がほとんどである。上述した各種の騒音低減要因をそれぞれ定量的かつ統一的に明らかにすることが必要である。これが明らかになれば、排水性舗装の騒音低減効果を改善する際にも大いに役立つことと考えられる。

2. 4 多孔質弾性舗装に関する既往の研究

多孔質弾性舗装は、古タイヤを細かく裁断してできるゴム粒子をポリウレタン樹脂で接合した多孔質な材料を、舗装構造の表層として用いた舗装である。この舗装は 1970 年代にスウェーデンの Nilsson によって開発されて³⁴⁾、一般道路にも試験的に施工されたが、冬期において除雪車による道路の維持管理作業中に基層から多孔質弾性材料の表層がはがれた等の理由で、その後用いられていない。しかしながら、この舗装は低騒音舗装としては、排水性舗装と比べるとはるかに大きい騒音低減効果を有している。

この多孔質弾性舗装に関する既往の研究はそれ程多くはないが、次のようなものがある。Nilsson ら³⁵⁾は、この舗装の騒音低減メカニズムについて次のように説明している。タイヤ音の励起時には、タイヤの接地圧傾度が通常の密粒舗装に比べて小さくなり、タイヤ加振力が小さくなる。反応過程では舗装材料の多孔質弾性による衝撃エネルギーの内部ロスによる減衰が大きくなる。同様にエアポンピング作用も減衰する。拡散過程ではタイヤのトレッドの溝と路面との間での気柱共鳴効果が低減し、また、ホーン壁の吸音性によりエッジホーン効果が低減する。伝搬過程では地面の抵抗が増加することにより伝搬音が低減する。

また、Zetterling ら³⁶⁾は、粒径 4 ～ 8 mm のゴム粒子をポリウレタン樹脂で縦 20cm、横 20cm、厚さ 2.5cm の大きさに成型したものを表層材として用いた多孔質弾性舗装をストックホルム市内の一般道に敷設して、路面の摩耗試験をした。この試験期間は約 2 年で、約 300 万台の交通量（大型車混入率は約 10 %）があったが、路面はほとんど摩耗しなかった。路面では氷層は通過交通により除去され付着しなかった。また、この多孔質弾性舗装の騒音低減効果は、乗用車の場合、速度 50 ～ 70km/h の定常走行で約 10dB であったと報告している。

Sandberg ら³⁷⁾は、ゴム粒子をポリウレタン樹脂で固めた材料を表層に用いた多孔質弾性舗装の騒音低減効果は約 8 dB であると報告している。一方で、この舗装には表層と基

層との接着、耐火性及び初期の低い摩擦等の非音響的な課題があると指摘している。

明嵐ら³⁸⁾も、厚さ 5 cm、空隙率 35 %の多孔質弾性舗装と通常の密粒舗装を試験走路に敷設して試験車の走行騒音を測定した。その結果、多孔質弾性舗装の騒音低減量は走行速度 60km/h では乗用車に関しては 13dB、貨物車に関しては 6 dB であると報告している。また、多孔質弾性舗装の垂直入射吸音率は周波数領域 800 ～ 2,500Hz で排水性舗装よりも優れていて、その約 2 倍となっている。

以上のとおり、多孔質弾性舗装に関する研究はそれ程多くなく、その騒音低減効果もまだ十分に把握されていない。道路交通騒音問題の解消を図るため大きな騒音低減効果を持つ対策が必要とされている今、多孔質弾性舗装の騒音低減効果を把握し、その実用化を図ることが求められている。

第3章 排水性舗装の自動車走行騒音低減効果

3.1 排水性舗装の沿道における騒音低減効果

平成2年度から5年度にかけて一般国道の7箇所に敷設された一般的な仕様の排水性舗装（空隙率20%、舗装厚5cm、骨材粒径5～13mm）区間とそれに近接した通常の密粒舗装区間において、道路交通騒音を測定した。両区間において車道部端から5m（最も近い車線の中心線から約7～8m）側方の地上1.2mの位置にマイクロフォンを設置し、同時にこれら両区間で10分間の道路交通騒音の測定を5回行った。従って、両区間の自動車の交通量及び走行速度等の交通条件はほとんど同じと考えられる。この騒音測定は、舗装の施工直後、半年後、1年後及び2年後に行った。各区間の騒音レベルの中央値 L_{50} は、それぞれ5回の測定値の算術平均とした。これらの区間における騒音測定の結果及び交通条件等を表3.1に示す。これによると、密粒舗装に対する排水性舗装の騒音低減効果は、箇所によって若干異なるが沿道における L_{50} で約3～5dBとすることができる。

3.2 排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの定量化

上記のとおり一般的な仕様の排水性舗装では、通常の密粒舗装に比べ約3～5dBの騒音低減効果があることが騒音測定により分かった。第2章でも述べたように、このような排水性舗装の騒音低減効果に関する報告は色々なされている。

しかしながら、排水性舗装の騒音低減効果を騒音予測の場面で扱うには、排水性舗装上を走行する自動車騒音のパワーレベルを定量化する必要がある。そのため、ここでは排水性舗装のパワーレベルに関する検討を次の二つの方法で行った。一つは、密粒舗装と排水性舗装のパワーレベルをそれぞれ騒音測定データより求め、それらの差を密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベルの補正量（騒音低減効果）として分析する方法である。もう一つは、数多くの排水性舗装上を走行する車両の騒音パワーレベルを測定し、直接パワーレベル式を求める方法である。

表 3. 1 排水性舗装の騒音低減効果

路線名	測定箇所	L50 (dB(A))			交通量		大型車 混入率(%)	走行速度 (km/時)	調査時期
		密粒舗装	排水性舗装	減音効果	12h	24h			
R2	広島市安芸区	68.2	63.0	5.2	17,016	26,375	32.9	70.1	施工直後
		69.2	65.2	4.0				71.5	半年後
		68.6	65.6	3.0				71.9	1年後
		69.6	65.4	4.2				68.4	2年後
R21	岐阜県大垣市	67.0	63.0	4.0	29,307	40,151	16.6	52.0	施工直後
		69.4	63.2	6.2				33.9	半年後
R25	三重県上野市	68.2	65.0	3.2	36,697	55,525	35.0	71.2	施工直後
		68.2	69.8	-1.6				77.6	半年後
		75.6	69.8	5.8				71.1	1年後
R190	山口県小野田市	68.6	65.8	2.8	19,187	24,943	12.2	49.1	施工直後
		70.4	67.4	3.0				55.8	半年後
		71.4	69.6	1.8				58.9	1年後
R202	佐賀県有田町	67.8	62.4	5.4	13,199	16,367	14.0	48.7	施工直後
		データ無し	61.6	—				47.3	半年後
R208	福岡県大和町	64.4	61.2	3.2	12,290	15,485	16.1	37.8	施工直後
		64.6	60.8	3.8				41.8	半年後
R258	三重県桑名市	69.5	65.0	4.5	16,050	21,261	36.3	49.0	施工直後
		69.4	64.8	4.6				45.5	半年後
		68.0	63.2	4.8				46.1	1年後

注) 交通量と大型車混入率はH6道路交通センサスによる。

ここでは、まず排水性舗装のパワーレベルがどのように使われるのか 3. 2. 1 で示し、次に、上記の方法による検討を、それぞれ 3. 2. 2 及び 3. 2. 3 に述べる。さらに、3. 2. 4 では排水性舗装のパワーレベルとして、これらの方法で得られたパワーレベルのどちらを用いるのが適当かを考察する。

これらの検討では、後述する騒音測定方法によるとおり自動車から直接出る騒音と自動車の車体下面と路面の間での多重反射の後出てくる騒音を合わせて測定しているため、これらの騒音を合わせたものを音源とし、そのパワーレベルを扱っていることになる。

3. 2. 1 騒音予測手法での排水性舗装の騒音パワーレベルの使い方

排水性舗装の騒音低減効果を定式化し、位置づけるためには、道路交通騒音予測手法の中で使われる自動車の騒音パワーレベルとして表現する必要がある。この後の節で具体的に定量化される排水性舗装上を走行する自動車の騒音パワーレベルが、道路交通騒音予測手法として日本音響学会により提案されている ASJ Model 1998³⁹⁾ の B 法の中でどのように使われているかを以下に示す。

図 3. 1 に示す仮想車線を音源となる自動車が走行するとき、予測地点における A 特性音圧レベル L_{pA} のユニットパターンが、図 3. 2 のように得られたとする。このとき、このユニットパターンの時間積分値（単発騒音暴露レベル L_{AE} ）は次のように与えられる。

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \frac{1}{T_0} \sum_i 10^{L_{pA_i}/10} \cdot \Delta t_i \quad (3. 1)$$

また、この仮想車線の 1 時間当たりの交通量を N （台 / 3,600 s）とすると、その 1 時間の自動車走行騒音のエネルギー平均レベルである等価騒音レベル L_{Aeq} は次のように表される。

$$\begin{aligned} L_{Aeq} &= 10 \log_{10} (10^{L_{AE}/10} \cdot N / 3600) \\ &= L_{AE} + 10 \log_{10} N - 35.6 \end{aligned} \quad (3. 2)$$

以上の計算を車線別、車種別に行い、それぞれ得られた結果をエネルギー合成することに

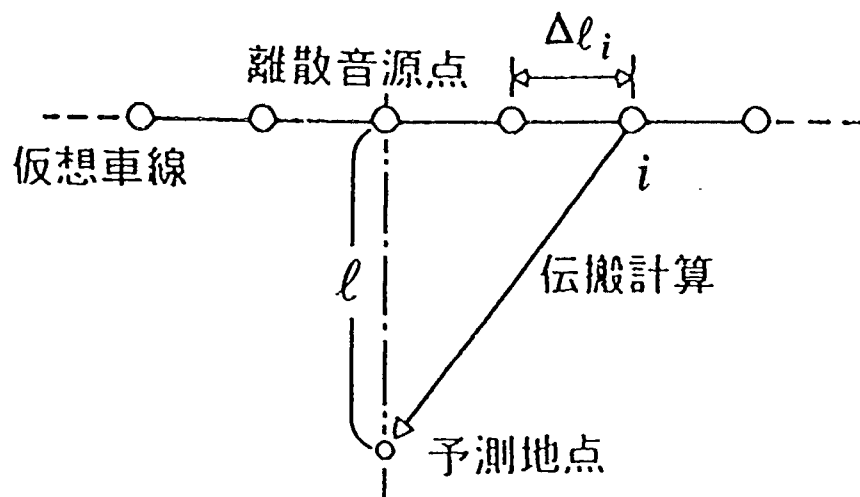


図 3. 1 音源点の設定と伝搬計算³⁹⁾

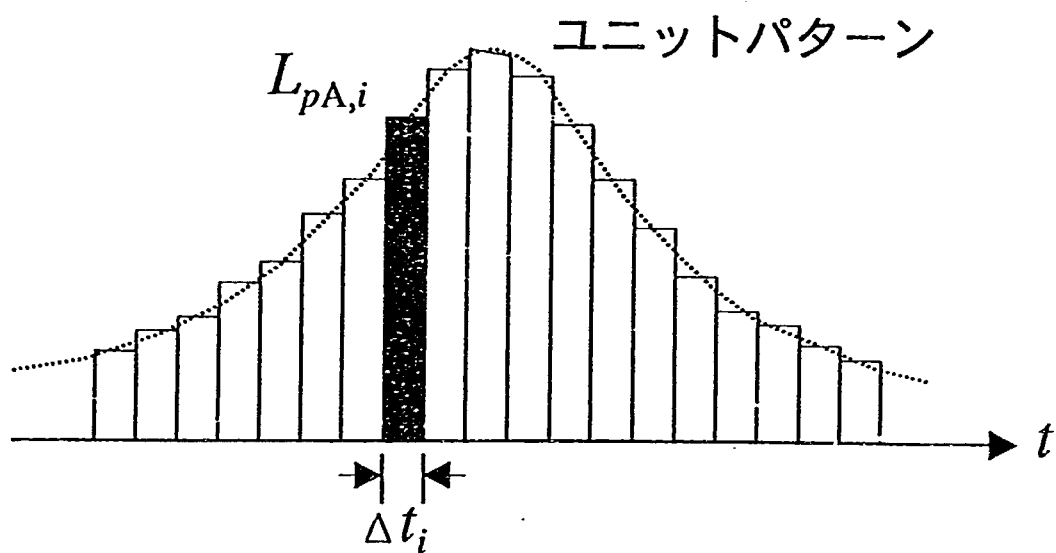


図 3. 2 ユニットパターン³⁹⁾

より、予測地点における当該道路全体からの騒音の L_{Aeq} が求められる。

今、道路上を自動車が走行したときに観測される A 特性音圧レベル L_{pA} は、これを半自由空間とした当該道路と予測地点を含む地域における無指向性点音源とした自動車走行騒音の伝搬と考えたと次式で表される。

$$L_{pA} = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_d + \Delta L_g \quad (3.3)$$

ここで、

L_{pA} : A 特性音圧レベル (dB)

L_{WA} : 自動車走行騒音の A 特性パワーレベル (dB)

r : 点音源から予測地点までの距離 (m)

ΔL_d : 回折効果による補正量 (dB)

ΔL_g : 地表面効果による補正量 (dB)

ASJ Model 1998 では、定常走行部の自動車走行騒音の A 特性パワーレベルは走行速度 V の関数として 4 車種分類で次のように与えられている。

$$\text{大型車} \quad L_{WA} = 54.4 + 30 \log_{10} V \quad (3.4)$$

$$\text{中型車} \quad L_{WA} = 51.5 + 30 \log_{10} V \quad (3.5)$$

$$\text{小型貨物車} \quad L_{WA} = 47.6 + 30 \log_{10} V \quad (3.6)$$

$$\text{乗用車} \quad L_{WA} = 46.4 + 30 \log_{10} V \quad (3.7)$$

また、2 車種分類では大型車類の A 特性パワーレベルは、種々の道路での実測データを基にして大型車と中型車の車種構成比を 1 : 1 として式 (3.4) と式 (3.5) から得た。さらに、小型車類については同様に小型貨物車と乗用車の車種構成比を 1 : 4 として式 (3.6) と式 (3.7) から得た。これらは次のように与えられている。

$$\text{大型車類} \quad L_{WA} = 53.2 + 30 \log_{10} V \quad (3.8)$$

$$\text{小型車類} \quad L_{WA} = 46.7 + 30 \log_{10} V \quad (3.9)$$

3.2.2 密粒舗装と排水性舗装の自動車走行騒音パワーレベルの差

ここでは、密粒舗装と排水性舗装の自動車走行騒音のパワーレベルをできるだけ条件を合わせて測定するために、次のような配慮をした。まず、排水性舗装の騒音低減効果は経時的に変化するので、施工後1年以内の排水性舗装とそれに隣接する密粒舗装の道路区間（国道408号茨城県つくば市及び建設省土木研究所の試験走路）で騒音を測定した。次に、音源を一定にするために、試験車を両区間で定常走行させて騒音測定を行った。試験車は、大型貨物車と乗用車の2車種とした。また、排水性舗装の主な仕様は、空隙率20%、舗装厚5cm、骨材粒径13～5mmであった。騒音測定は、車線の走行中心線から側方に7.5m、高さ1.2mの位置で行った。この騒音測定結果よりピーク法により騒音パワーレベルを求めた。

このようにして求めた両舗装における走行速度別のパワーレベルの差を、排水性舗装の騒音パワーレベルの補正量（騒音低減効果）として車種別に図3.3、図3.4に示す。また、騒音パワーレベルの補正量と走行速度の関係を回帰分析し、求められたパワーレベルの補正式を次に示す。

$$\text{大型車種：} \quad \Delta L_{WA,dr} = -3.1 \log_{10} V + 2.5 \quad (3.10)$$

$$\text{小型車種：} \quad \Delta L_{WA,dr} = -3.8 \log_{10} V + 3.8 \quad (3.11)$$

ここで、

$\Delta L_{WA,dr}$: 密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベル補正量 (dB)

V : 走行速度 (km/h)

式(3.10)、式(3.11)によると、大型車種では走行速度40～120km/hの範囲で減音効果は2.5～3.9dBであり、また、小型車種では走行速度40～140km/hの範囲で減音効果は2.3～4.4dBであった。上記のとおり、走行速度の上昇とともに減音効果が大きくなっており、減音効果に速度依存性が見られる。これは、走行速度が速くなると、排水性舗装が主として減音効果を発揮するタイヤ路面騒音が大きくなり、その自動車走行

[大型車類]

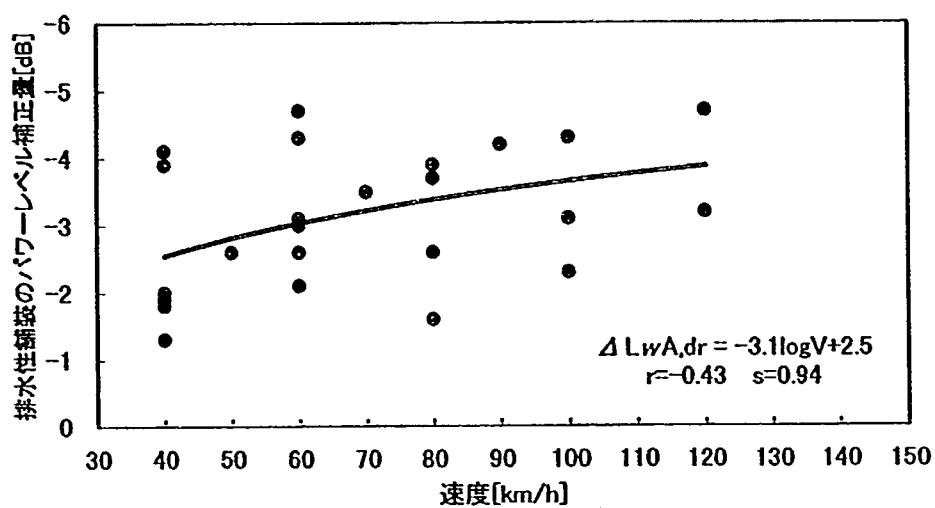


図 3. 3 試験車による排水性舗装のパワーレベル補正量(大型車類)

[小型車類]

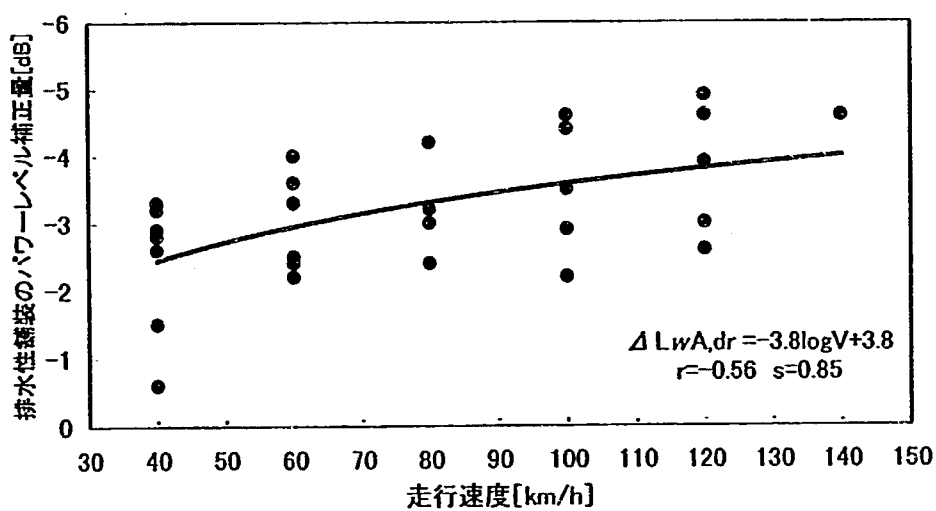


図 3. 4 試験車による排水性舗装のパワーレベル補正量(小型車類)

騒音全体に占める割合が大きくなるためであると考えられる。しかしながら、大型車類と小型車類では自動車走行騒音全体に占めるタイヤ路面騒音の割合が異なると考えられるが、今回得られた騒音データからは両者の減音効果にあまり差異は見られなかった。そこで、現在のところ、排水性舗装のパワーレベルの補正量は車種別に設定せずに、両者を合わせて次式のとおりに設定することとした。

$$\Delta L_{wA,dr} = -3.5 \log_{10} V + 3.2 \quad (3.12)$$

なお、式(3.12)の適用できる範囲は、騒音データの得られた速度域、すなわち大型車類が40～120km/h、小型車類が40～140km/hである。図3.5にこの関係を示した。これによると、走行速度が40～140km/hの範囲で2.4～4.3dBと上記のように速度依存性のある騒音低減効果が得られている。

上記のとおり今回のデータでは、大型車類と小型車類に対する排水性舗装の騒音低減効果にあまり差異は見られなかったが、他の報告では両者の効果に差異があるとされているものもあり²⁰⁾、この点について今後データを蓄積しつつ検討する必要がある。

3.2.3 排水性舗装の自動車走行騒音パワーレベル

上記3.2.2と同様の騒音測定を一般道路及び自動車専用道路に施工された排水性舗装の区間で行った。ここでは、試験車ではなく、単独走行する一般車の騒音を測定した。得られたデータは、大型車類1,224個、小型車類1,583個であった。その詳細は表3.2に示すとおりである。

これらのデータを用いて、排水性舗装における自動車走行騒音のパワーレベルと走行速度の関係を回帰分析した。この時、速度依存項 $a \log_{10} V$ の係数 a を30、20に固定した場合と、固定しない場合で分析した。なお、表3.2に示すとおり一般道路のデータ数が自動車専用道路に比べて多いため、これらのデータ数が同じになるように調整した。その結果得られたパワーレベル式を次に示す。また、これらの関係を図3.6～8に示す。

$$\text{大型車類: } L_{wA,dr} = 30 \log_{10} V + 50.2 \quad (3.13)$$

$$\text{小型車類: } L_{wA,dr} = 30 \log_{10} V + 43.6 \quad (3.14)$$

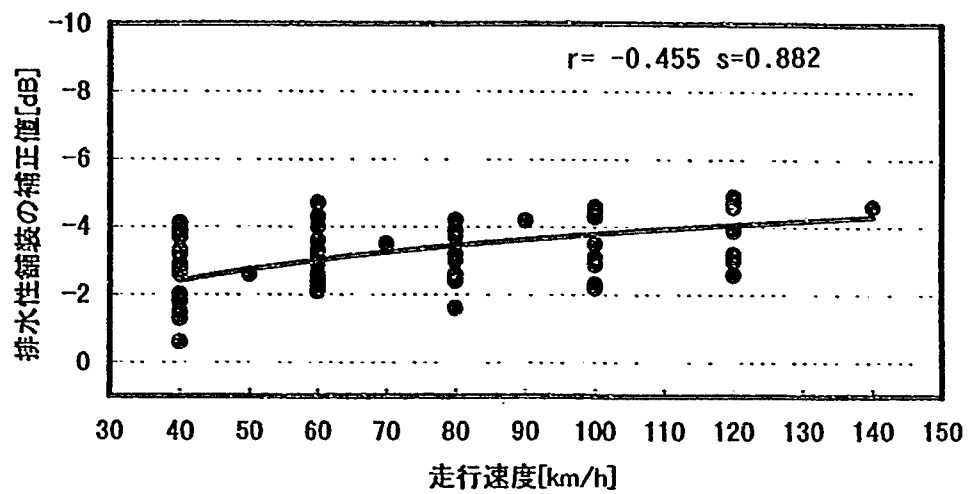
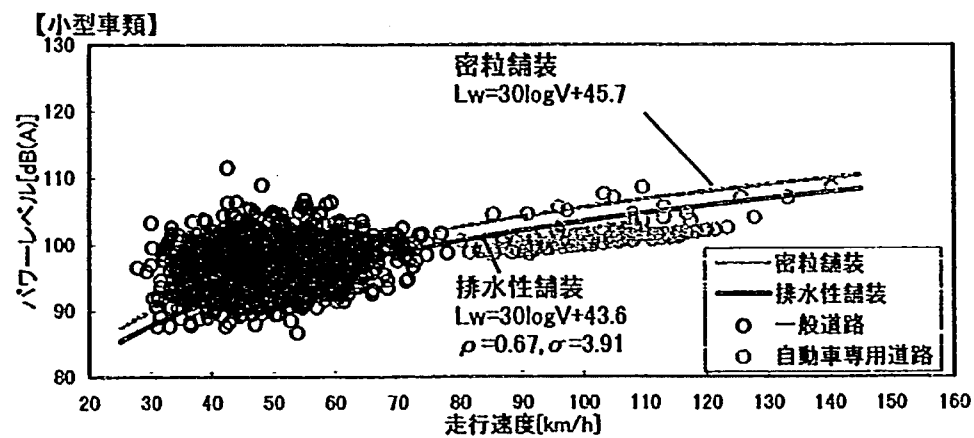
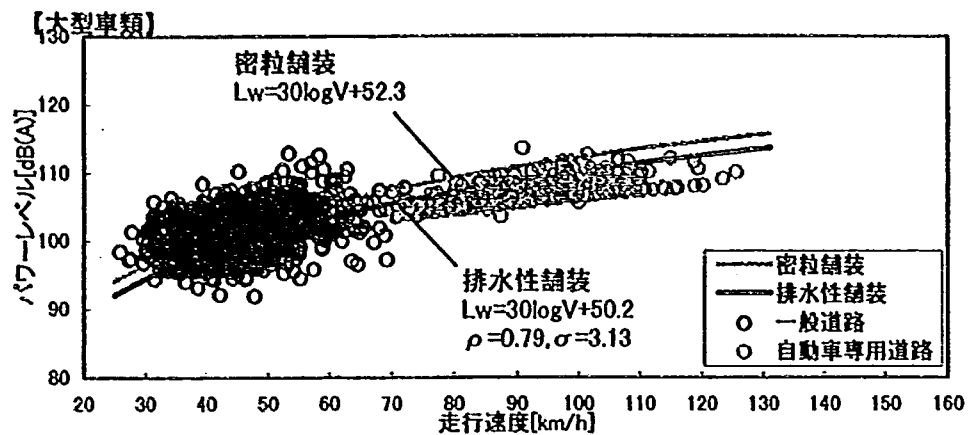


図 3. 5 排水性舗装のパワーレベル補正量

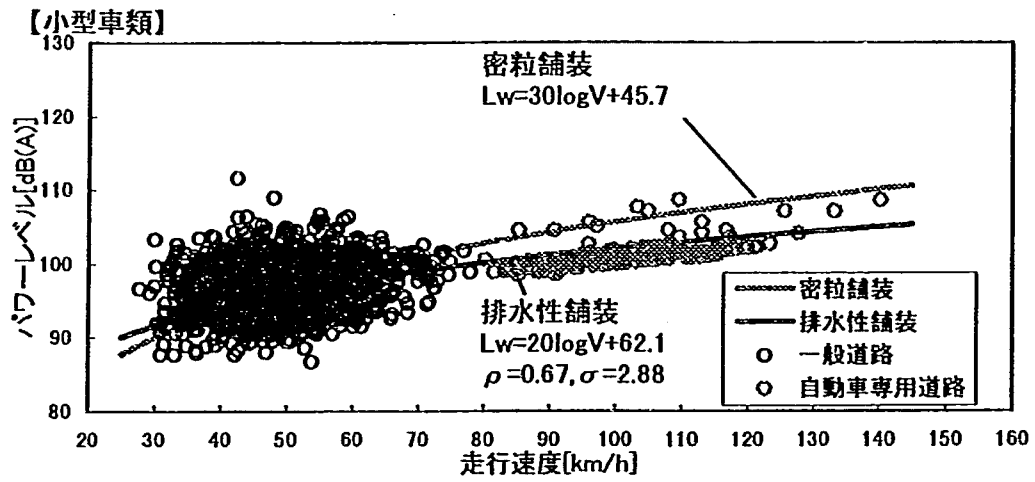
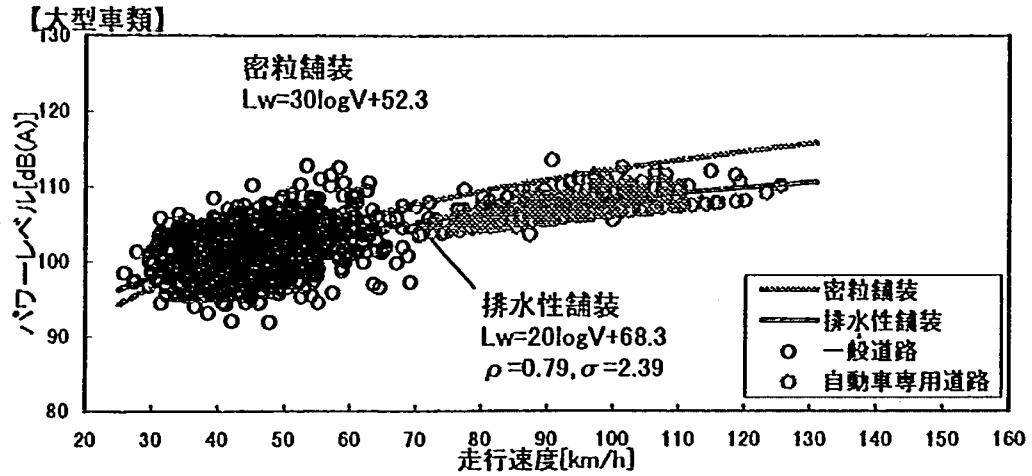
表3. 2 排水性舗装のパワーレベルの検討に用いた一般車のデータ

道路 種別	調査箇所名	サンプル数	
		大型車類	小型車類
一 般 道 路	埼玉県南埼玉郡白岡町	1 0 6	8 0
	新潟県白根市田中	2 6 8	3 9 9
	福島県相馬郡小高町	5 5	8 6
	新潟県白根市保坂	2 4 8	4 3 9
	香川県高松市伏石町	1 3 2	1 8 8
	香川県高松市林町	1 2 5	2 2 3
	小 計	9 3 4	1 4 1 5
自 動 車 専 用 道 路	関越道高崎	8 3	2 5
	山陽道熊毛	1 4 2	1 0 5
	東北道白石	6 5	3 8
	小 計	2 9 0	1 6 8
合 計		1 2 2 4	1 5 8 3



[ρ =相関係数、 σ =標準偏差]

図 3. 6 排水性舗装と密粒舗装のパワーレベルの速度依存性
 (密粒舗装 $30 \log V$ 、排水性舗装 $30 \log V$)



[ρ =相関係数、 σ =標準偏差]

図 3. 7 排水性舗装と密粒舗装のパワーレベルの速度依存性
 (密粒舗装 $30 \log V$ 、排水性舗装 $20 \log V$)

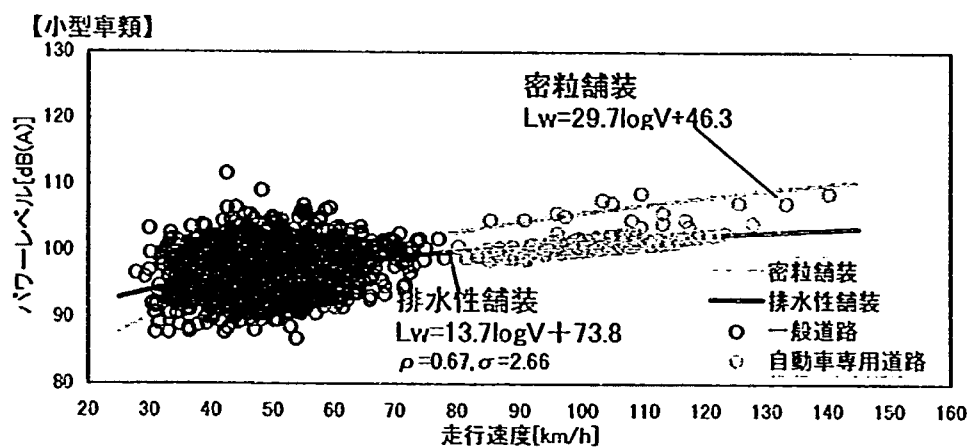
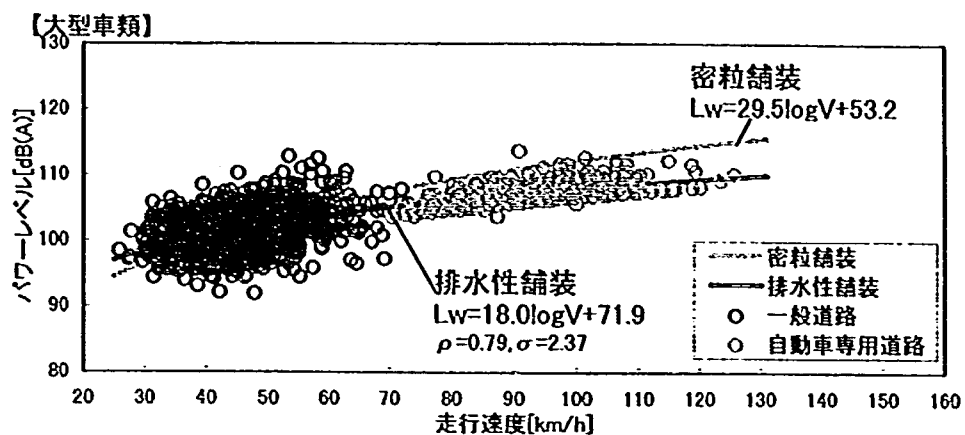


図 3. 8 排水性舗装と密粒舗装のパワーレベルの速度依存性
 (密粒舗装 $a \log V$ 、排水性舗装 $a \log V$)

[ρ =相関係数、 σ =標準偏差]

$$\text{大型車類： } L_{wA,dr} = 20 \log_{10} V + 68.3 \quad (3.15)$$

$$\text{小型車類： } L_{wA,dr} = 20 \log_{10} V + 62.1 \quad (3.16)$$

$$\text{大型車類： } L_{wA,dr} = 18.0 \log_{10} V + 71.9 \quad (3.17)$$

$$\text{小型車類： } L_{wA,dr} = 13.7 \log_{10} V + 73.8 \quad (3.18)$$

別途得られている密粒舗装のパワーレベル式と上記の排水性舗装のパワーレベル式を比べ、それらの差を排水性舗装の減音効果として表3.3に整理した。これによっても、速度が速いほど排水性舗装の減音効果は大きくなっており、減音効果に速度依存性が見られる。（速度依存項の係数が20のときと、固定しなかったとき）

排水性舗装のパワーレベル式を見ると、速度依存項 $a \log V$ の係数を固定しない場合、その係数は大型車類で18.0、小型車類で13.7である。そこで、パワーレベル式の速度依存項を $20 \log V$ として、さらに検討を進めてみる。図3.9に速度依存項の係数が20の時の排水性舗装の減音効果を示した。

走行速度が100km/hのとき、大型車類、小型車類ともに約4 dBの減音効果が得られているが、走行速度が低下すると効果も小さくなり、約40km/hでは効果がなくなっている。しかし、上記3.2.2の試験車の走行騒音測定結果では、走行速度が40km/hでも約2 dBの減音効果が測定されている。これは、高速域の自動車専用道路の排水性舗装と中低速域の一般道路の排水性舗装のパワーレベルを一つのパワーレベル式で表現しようとしたために、特に中低速域でのパワーレベルの表現に無理が生じているからではないかと思われる。すなわち、自動車専用道路では一般道路に比べ道路外から持ち込まれる土砂が少なく、さらに自動車が高速走行するためにタイヤによるポンピング作用が大きく働き、これにより排水性舗装の空隙に大きな自浄効果⁴⁰⁾がでると考えられ、空隙率が維持されやすいと思われる。従って、今後高速域と中低速域を分離して分析を行うことにより、より精度良く排水性舗装の減音効果を説明できる可能性があると思われる。

表 3. 3 密粒舗装と排水性舗装のパワーレベルの差

速度依存項		大型車類	小型車類
$30 \log_{10} V$		2.1dB	2.1dB
$20 \log_{10} V$	60km/h	1.8dB	1.4dB
	100km/h	4.0dB	3.6dB
$a \log_{10} V$	60km/h	1.7dB	0.9dB
	100km/h	4.4dB	4.5dB

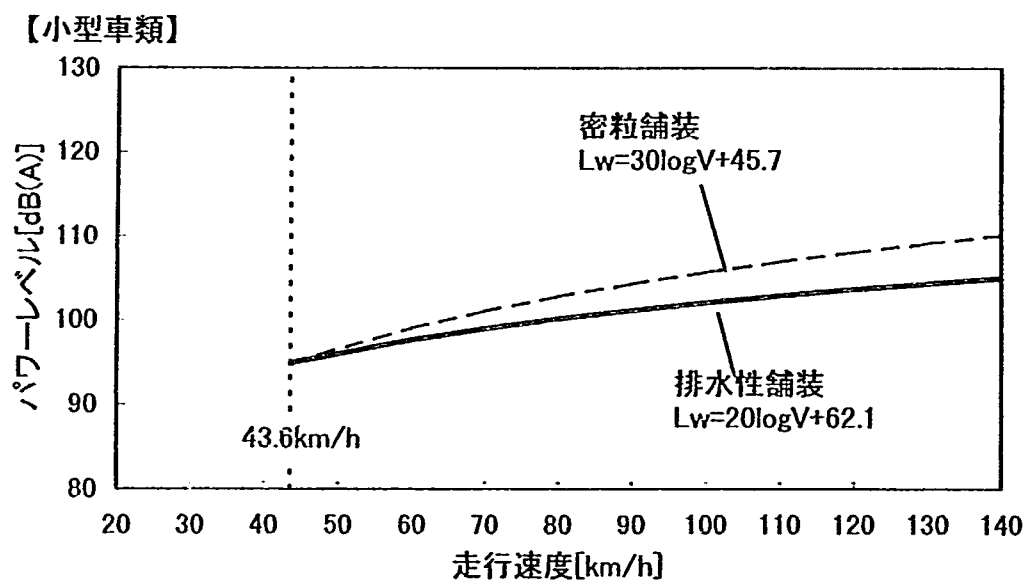
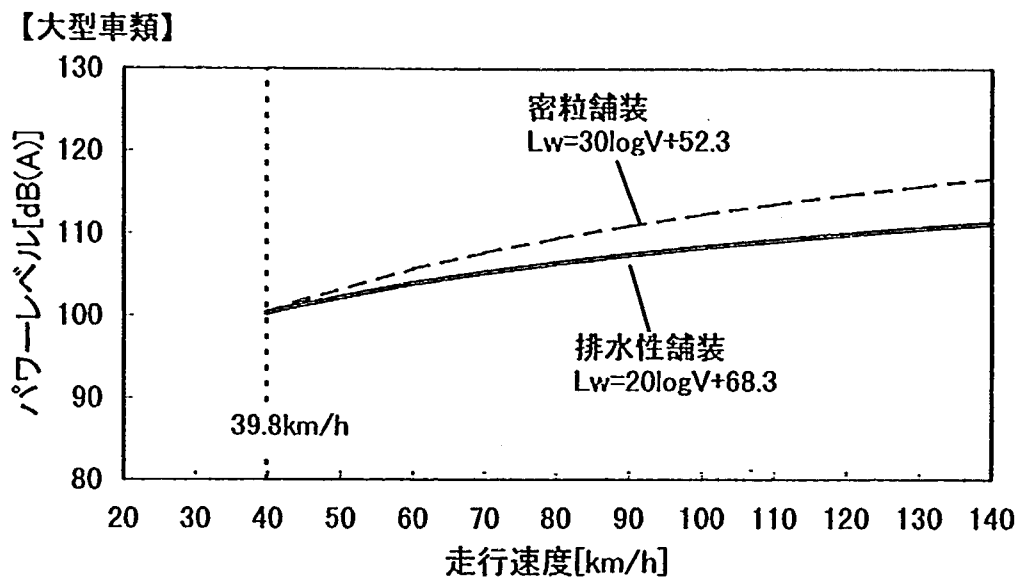


図 3. 9 排水性舗装と密粒舗装のパワーレベルの速度依存性
(密粒舗装 $30\log V$ 、排水性舗装 $20\log V$)

3. 2. 4 密粒舗装に対する排水性舗装の騒音パワーレベルの補正による定量化

上記3. 2. 2の試験車と、3. 2. 3の一般車の走行騒音測定結果を用いた二つの方法で、排水性舗装の走行騒音パワーレベルを検討した。3. 2. 3の一般車の騒音測定による方法では、騒音データのばらつきが大きくなっている。これは、一般車を対象としたため音源となる自動車の状況が異なっていること等によるものと考えられる。今後、この方法により排水性舗装のパワーレベルを直接設定するためには、排水性舗装の路面状況をよく考慮して、騒音データをさらに蓄積する必要がある。一方、3. 2. 2の試験車の騒音測定による方法では、音源となる自動車の状況に変化は少ないと考えられ、また、排水性舗装も施工後1年以内のものとしたため、排水性舗装と密粒舗装のパワーレベルの差はかなりの精度を有していると思われる。これらのことを考慮すると、現在のところ排水性舗装のパワーレベルは、3. 2. 2の方法により得られた密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベルの補正量（騒音低減効果）を用いるのが適当であると考えられる。

3. 3 排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの経時変化

3. 3. 1 排水性舗装の騒音低減効果の低下

排水性舗装はその空隙の閉塞により騒音低減効果が時間とともに低下することは知られている⁴¹⁾。しかし、排水性舗装がどの程度の期間騒音低減効果を維持できるのかは、累積交通量、大型車混入率、走行速度等の排水性舗装が敷設されている箇所の諸条件により地域差があり、これまで十分には把握されていなかった。今後、排水性舗装を道路交通騒音対策として位置づけ、活用するためには、排水性舗装の騒音低減効果の経時変化を把握することが重要である。

ここでは、今まで集積された騒音測定データから、排水性舗装の施工後の経過時間と大型車類、小型車類それぞれの高速域、中速域における排水性舗装の騒音低減効果との関係を検討した。なお、高速域の速度は100km/h、中速域の速度は60km/hとした。

これまで排水性舗装の騒音低減効果は、排水性舗装の近隣にある密粒舗装の騒音パワーレベルに対する差分で表されることが多かった。この方法は両舗装区間における交通量の変化が少なく、騒音測定地点の周囲の状況がほぼ同じであることから、個々の排水性舗装の騒音低減効果を求めるには良い方法であるが、比較する密粒舗装のパワーレベルも時間

の経過とともに変化することに留意する必要がある。そこで、比較に使う密粒舗装のパワーレベルは、ASJ Model 1998で提案されている高速道路および一般道路の定常走行部のパワーレベル式により求めた。

3.3.2 騒音測定調査の概要

騒音測定箇所及び回数は、一般道路では 14 箇所、高速道路では 3 箇所、計 17 箇所であった。測定箇所数と測定回数が異なるのは、経年的に測定をしている箇所があるためである。一般道路、高速道路とも排水性舗装の空隙率は 20 %、骨材最大粒径は 13mm である。また、舗装厚は、一般道路では 50mm、高速道路では 40mm であった。騒音測定は、一般道路では平面部、高速道路では盛土部において走行車線中心から側方 7.5m、高さ 1.2m の位置で行い、測定データからピーク法⁴²⁾によりパワーレベルを求めた。各騒音測定箇所の詳細を表 3.4、表 3.5 に示す。

3.3.3 測定データの整理方法

上記 3.3.2 で得られた測定されたデータから、60km/h の中速域と 100km/h の高速域別、大型車類と小型車類の車種別に以下の方法でパワーレベルを求めた。

①測定データから測定箇所毎に次のパワーレベル回帰式を作成し、これにより 60km/h、100km/h 走行時のパワーレベルを求めた。ただし、この方法は下記の③には適用しない。

$$L_{wA,dr} = A + B \log_{10} V \quad (3.19)$$

ここで、

$L_{wA,dr}$: 排水性舗装の A 特性パワーレベル (dB)

V : 走行速度 (km/h)

A、B : 速度依存性に関する係数

②上記パワーレベル回帰式の係数 B が 10 以下のものについては、速度依存性に乏しいため、回帰式により求めるパワーレベルは、測定されたデータの速度域付近に限定した。

③測定された走行速度の分布範囲が小さいものについては、回帰式の設定が困難なため、測定データから得られたパワーレベルをそのまま各速度域のパワーレベルとした。

表 3. 4 一般道路における排水性舗装の騒音測定箇所

箇所名	施工後経過月数	舗装厚 (mm)	骨材粒径 (mm)	車線数
千葉県大栄町	26	50	5 ~ 13	2 (2)
千葉県富山町	30	50	5 ~ 13	2 (2)
千葉県東金市	21	50	5 ~ 13	2 (2)
群馬県藤岡市新町	25	50	5 ~ 13	4 (4)
福井県敦賀市曙～本町	21	50	5 ~ 13	2 (2)
福井県高浜町 蘭部	34	50	5 ~ 13	2 (2)
島根県益田市須子町	34	50	5 ~ 13	2 (2)
茨城県つくば市	6,12,24,36,48,53	50	5 ~ 13	2 (4)
福島県小高町	6	50	5 ~ 13	2 (2)
新潟県白根市田中	6,12	50	5 ~ 13	2 (2)
新潟県白根市保坂	12	50	5 ~ 13	2 (2)
香川県高松市伏石町	12	50	5 ~ 13	2 (2)
香川県高松市林町	12	50	5 ~ 13	2 (2)
埼玉県白岡町	10	50	5 ~ 13	2 (2)

表 3. 5 自動車専用道路における排水性舗装の騒音測定箇所

箇所名	施工後経過月数	舗装厚 (mm)	骨材粒径 (mm)	車線数
群馬県高崎市	27	40	5 ~ 13	3 (6)
山口県熊毛町	7,15,19,40,53	40	5 ~ 13	4 (4)
宮城県白石市	5,13,17,26,30,40,41,52,64	40	5 ~ 13	2 (4)

以上①、②、③の方法により得られた排水性舗装の騒音パワーレベルのデータ数は、60km/h の中速域で 25、100km/h の高速域で 26 となった。これらの騒音パワーレベルと ASJ Model 1998 で提案されている密粒舗装での自動車走行騒音のパワーレベル式より求めた 60km/h、100km/h のパワーレベルの差を、排水性舗装の騒音低減効果とした。

3. 3. 4 排水性舗装施工後の経過月数と騒音低減効果の関係

排水性舗装の施工後の経過月数による騒音低減効果の変化の様子を車種別、走行速度別に図 3. 10、図 3. 11 に示す。また、これらの関係を示す回帰式を以下に示す。ただし、測定データは一般道路では施工後 6 ヶ月から 53 ヶ月まで、高速道路では施工後 5 ヶ月から 64 ヶ月までのもので、これらから求めたものである。

高速域 (100km/h) の場合

$$\text{大型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = -4.59 + 0.057 m \quad (3.20)$$

$$\text{小型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = -5.17 + 0.053 m \quad (3.21)$$

中速域 (60km/h) の場合

$$\text{大型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = -2.70 + 0.036 m \quad (3.22)$$

$$\text{小型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = -2.71 + 0.028 m \quad (3.23)$$

ここで、

$\Delta L_{wA,dr}$: 密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベル補正量 (dB)

m : 排水性舗装の施工後の経過月数

上記の分析結果によると、騒音低減効果は、車種別には小型車類の方が、速度別には 100km/h の高速域の方が大きかった。また、騒音低減効果の経過月数による低下は、車種別には小型車類の方が、速度別には 60km/h の中速域の方が小さかった。

得られた速度別、車種別の回帰式により騒音低減効果の変化を、もう少し詳しく見てみ

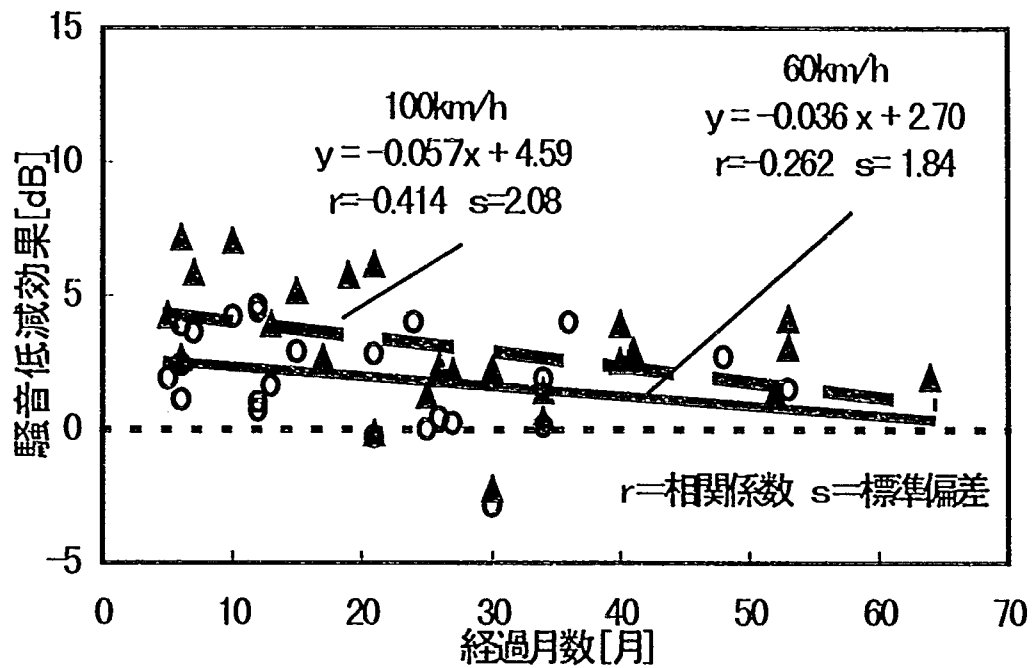


図 3. 10 大型車種の経過月数による騒音低減効果の変化

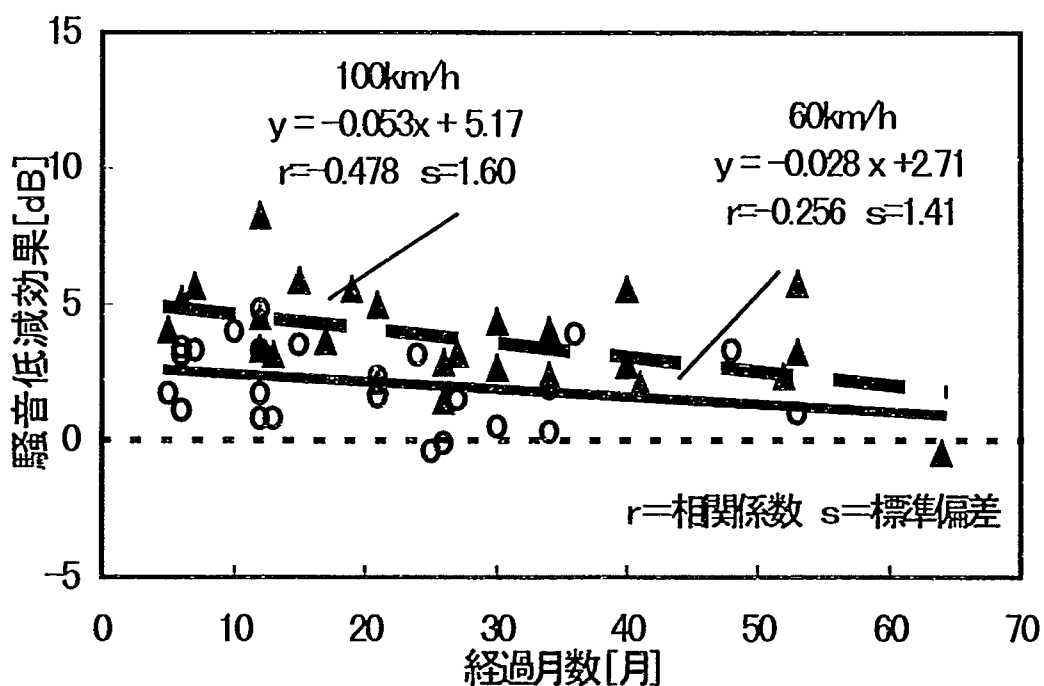


図 3. 11 小型車種の経過月数による騒音低減効果の変化

注) ○は走行速度 60km/h の時の騒音低減効果の実測値、

▲は 100km/h の時の騒音低減効果の実測値。

よう。大型車類の騒音低減効果は、施工後半年で 60km/h の場合約 2.5dB、100km/h の場合約 4.3dB であるが、施工後約 5 年ではそれぞれ約 0.5dB、約 1.1dB に低下した。一方、小型車類の騒音低減効果は、施工後半年で 60km/h の場合約 2.5dB、100km/h の場合約 4.9dB であるが、施工後約 5 年ではそれぞれ約 1.0dB、約 2.0dB に低下した。

また、1 年間の騒音低減効果の平均低下量は、大型車類では 60km/h の場合約 0.4dB、100km/h の場合約 0.7dB である。また、小型車類では 60km/h の場合約 0.3dB、100km/h の場合約 0.6dB である。このように年間の騒音低減効果の低下量は 100km/h の場合の方が 60km/h より大きい、100km/h の方が初期の騒音低減効果が大きいため効果は持続することになる。

上記の分析で用いた騒音データ数はあまり多くないため、各騒音測定箇所では測定された車両走行速度の範囲が 40km/h 付近のものについては、速度依存性を考慮したパワーレベル式により 60km/h 及び 100km/h のパワーレベルを推計し、これを用いて騒音低減効果を検討している。しかしながら、高速走行時のタイヤによる排水性舗装の空隙の自浄作用等一般道路と高速道路における騒音低減効果の持続性に関する要因の違いを考慮していくためには、それぞれの種類の道路において調査データを増やし、一般道路は中低速域のみ、高速道路は高速域のみの騒音低減効果の経時変化を調査する必要がある。

第4章 排水性舗装の騒音低減メカニズム

4. 1 排水性舗装の仕様と騒音低減効果

第3章では一般的な仕様の排水性舗装（空隙率 20 %、舗装厚 5 cm、骨材粒径 13 ～ 5 mm）の騒音低減効果について述べたが、本節では排水性舗装の空隙率、厚さ、骨材粒径等が排水性舗装による騒音パワーレベルの低減に及ぼす影響について述べる。

4. 1. 1 空隙率の影響

排水性舗装は、その空隙が騒音低減効果をもたらしている。従って、排水性舗装の空隙率が騒音低減効果に大きな影響を与えていると考えられ、ここではこの影響を調べるため、土木研究所の試験走路に空隙率を変えた 6 種類の排水性舗装を敷設して空隙率の違いによる騒音低減効果を調査した。

（1）調査方法

試験走路に、密粒舗装（空隙率 5 %）と空隙率を 12%、15%、18%、21%、23%、27% の 6 種類に変えた排水性舗装を敷設した。これら舗装の骨材には 6 号砕石（骨材粒径 5 ～ 13 mm）を使用し、舗装厚さは 5 cm として車両走行騒音を測定し、測定結果からピーク法により騒音パワーレベルを求めた。

試験車両は大型貨物車（積載重量 10 t、定積載）と乗用車を用いた。試験車両の走行速度は 4 種類（40, 60, 80, 100 km/h）とし、速度センサーによって計測した速度がその ± 5 % 以内に収まったものを速度毎に各 5 データ採用し、それらの算術平均値を速度毎の騒音レベルとした。走行方法は定常走行及び惰性走行の 2 種類とした。また騒音測定は、車両走行中心線から側方 5.6 m、高さ 1.2 m の位置で行った（図 4. 1 参照）。

（2）空隙率の違いによる自動車走行騒音の低減効果の変化

排水性舗装の空隙率と大型車、乗用車の定常走行時における騒音低減効果の関係を図 4. 2、図 4. 4 に、惰性走行時における騒音低減効果の関係を図 4. 3、図 4. 5 に示す。なお、ここでいう騒音低減効果とは試験車が密粒舗装上を走行するときのパワーレベルか

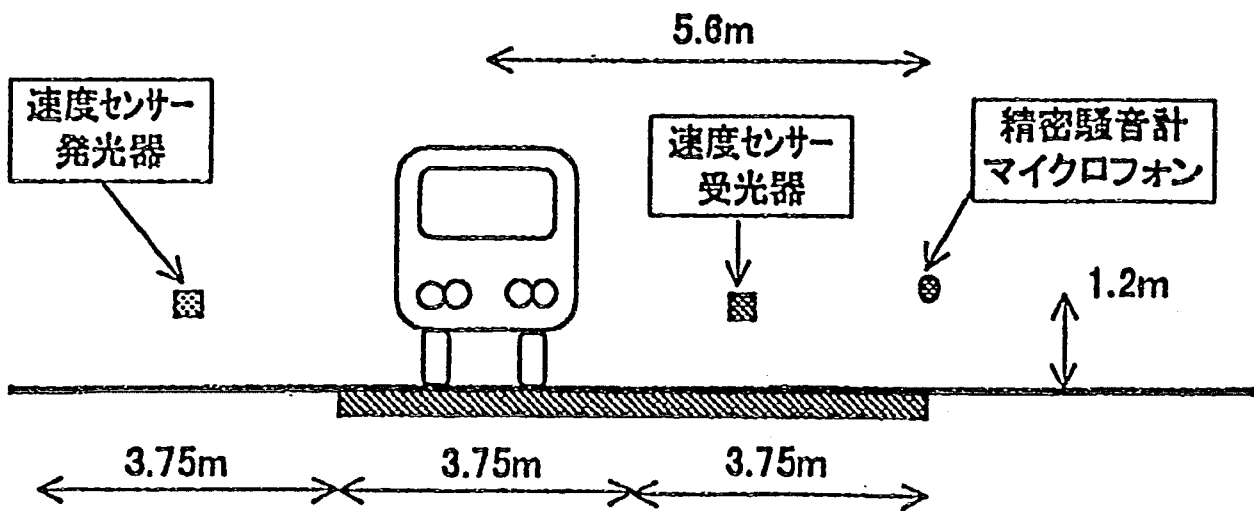


図4. 1 マイクロフォン、速度センサー等の配置図（断面図）

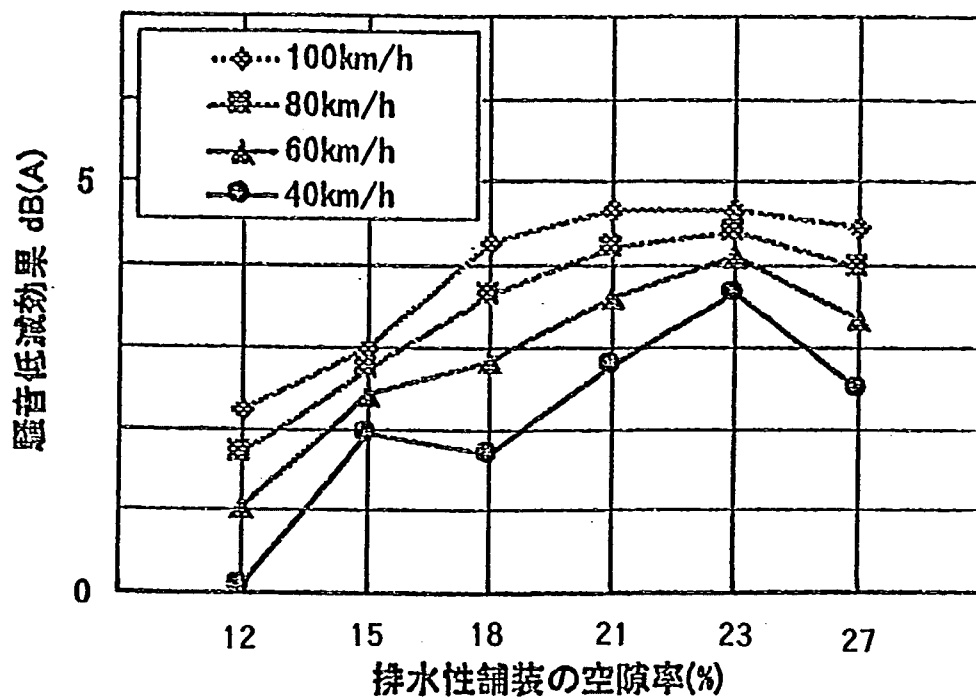


図4. 2 大型車の定常走行時の騒音低減効果

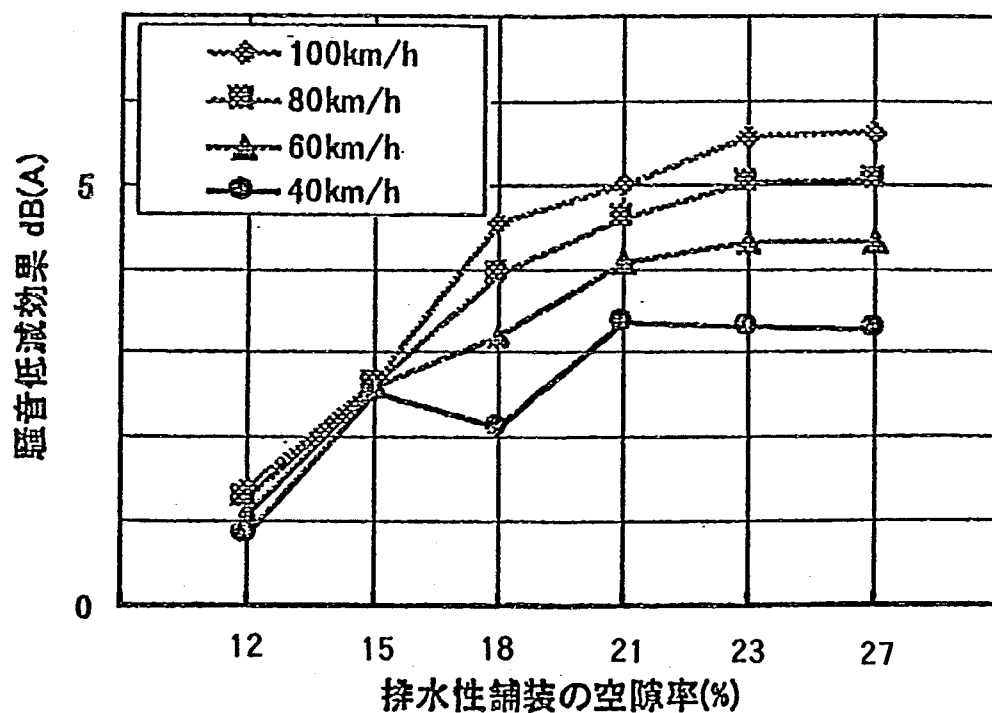


図4. 3 大型車の惰性走行時の騒音低減効果

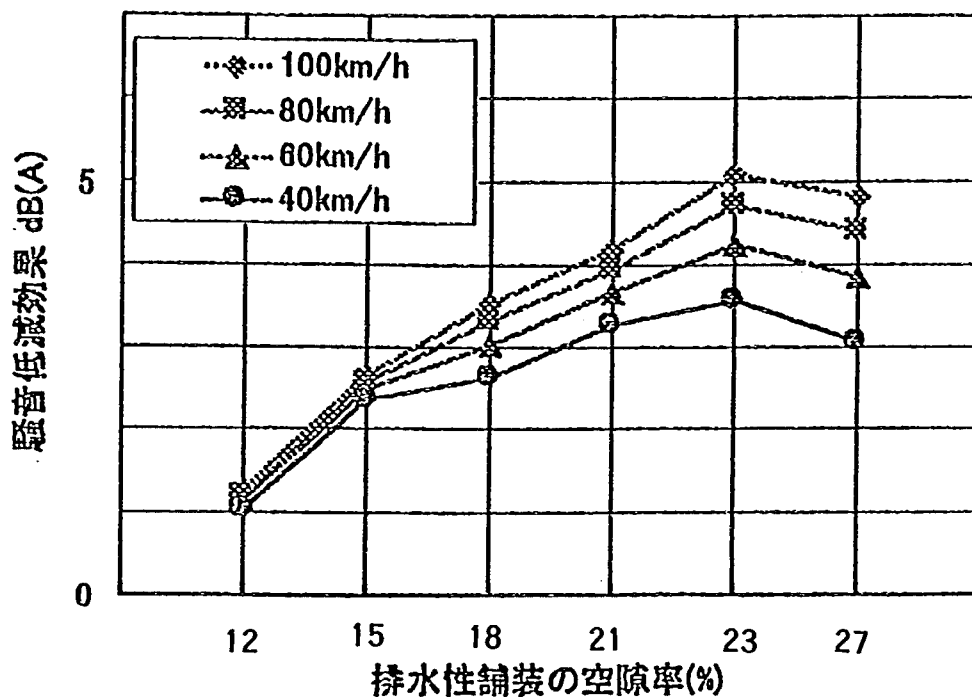


図 4. 4 乗用車の定常走行時の騒音低減効果

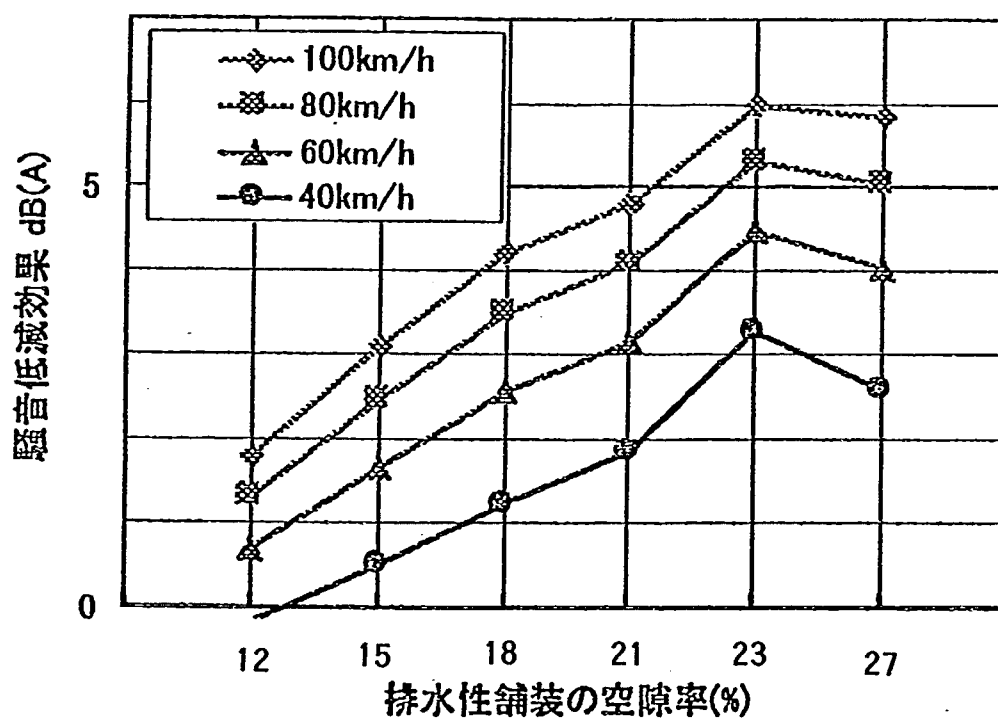


図 4. 5 乗用車の慣性走行時の騒音低減効果

ら排水性舗装上を走行するときのパワーレベルを差し引いたものである。

・大型車の騒音低減効果

定常走行時の騒音低減効果は、40～100km/hの全ての速度で空隙率が23%の排水性舗装の騒音低減効果が最も大きく、3.7～4.7dBであった。最も空隙率の大きい27%の騒音低減効果は2.5～4.4dBと23%よりもやや小さかった。空隙率が23%から15%まで小さくなるにつれて騒音低減効果も徐々に低下し、空隙率が12%になると騒音低減効果は0.1～2.2dBとかなり小さくなった。また、速度が速くなるとともに騒音低減効果も大きくなり、各速度の空隙率の違いによる騒音低減効果の差は縮まった。その理由として、高速走行時では全体のパワーレベルに対して排水性舗装が主として騒音低減効果を発揮するタイヤ路面音の寄与が大きくなることが考えられる。

惰性走行時の騒音低減効果は、40～100km/hの全ての速度で空隙率が23%と27%のものが同程度で最も大きく、3.3～5.6dBであった。空隙率が12%と15%のものについては、騒音低減効果に速度依存性がほとんど見られず、騒音低減効果はほぼ一定であった。また、定常走行時と違い、速度が速くなるとともに各速度の空隙率の違いによる騒音低減効果の差は大きくなった。

・乗用車の騒音低減効果

定常走行時では40～100km/hの全ての速度で空隙率が23%の騒音低減効果が最も大きく、3.6～5.1dBであった。最も空隙率の大きい27%の騒音低減効果は3.1～4.8dBと23%よりもやや小さかった。速度の違いによる騒音低減効果の差は空隙率が12%と15%ではほとんどなく、12%で約1dB、15%で約2.5dBの騒音低減効果であった。しかし、空隙率が27%では速度100km/hで4.8dB、速度40km/hで3.1dBの騒音低減効果であるからその差は1.7dBとなり、空隙率が大きくなるとともに速度の違いによる騒音低減効果の差は広がった。

また惰性走行時の騒音低減効果は約0～6dBで、定常走行時と同じく空隙率が23%の騒音低減効果が最も大きく、3.3～6.0dBであった。空隙率が高いほど、かつ走行速度が速いほど、騒音低減効果は大きい。この惰性走行での騒音低減効果は、定常走行での騒音低減効果に比べて速度依存性が強かった。

図4.2、図4.4と図4.3、図4.5とを比較してみたところ、大型車、乗用車ともに惰性走行時に比べ定常走行時の騒音低減効果は少ない。これは、排水性舗装がその騒

音低減効果を発揮するのは、主としてタイヤ路面音に対してであるためと考えられる。

また大型車の定常走行時（図4.2）の場合、高速域では空隙率21%と23%は同程度で最も高い騒音低減効果を示したが、低速域では空隙率23%の騒音低減効果が大きかった。空隙率27%のものは23%より騒音低減効果が小さかった。惰性走行時（図4.3）では空隙率23%と27%の騒音低減効果が最も高かった。乗用車の定常走行時（図4.4）の低速域では空隙率21~27%まで騒音低減効果はほとんど同程度で最も大きかったが、高速域では空隙率23%のものが最も騒音低減効果があった。惰性走行時（図4.5）では高速域では空隙率23%と27%のものは同程度の騒音低減効果があったが、低速域では定常走行時と同様に空隙率23%のものが最も騒音低減効果があった。これらを考慮して総合的に判断すると、今回の調査では空隙率23%のものが最も騒音低減効果のある排水性舗装だと考えられる。

（3）空隙率の違いによる駆動機関音の変化

惰性走行騒音は主としてタイヤ路面音からなっている。一方、定常走行騒音から惰性走行騒音を差し引いたものは、エンジン音や吸排気音等からなっている（以後、駆動機関音という）。また密粒舗装と3種類の空隙率（12%、21%、23%）の排水性舗装上を走行する自動車の騒音パワーレベルを上記のタイヤ路面音と駆動機関音のパワーレベルに分けて、大型車に関して図4.6~9に、乗用車に関して図4.10~13に示す。

・大型車の騒音低減効果

図4.6~9より、大型車においては密粒舗装、排水性舗装とも全ての速度でタイヤ路面音が駆動機関音を上回っていた。ただし、速度40km/hの時は両者とも同程度のパワーレベルであった。また、タイヤ路面音と駆動機関音の差は、密粒舗装と空隙率12%では比較的大きかったが、速度が大きくなるにつれてその差は縮まり、空隙率の大きい21%と23%ではほぼ同程度にまで小さくなった。どの空隙率の排水性舗装の場合においても高速域での駆動機関音はあまり変わらないが、空隙率の大きいものの方が空隙率が小さいものよりもタイヤ路面音は小さくなっており、その結果空隙率の大きいものの方が全体のパワーレベルも小さくなった。

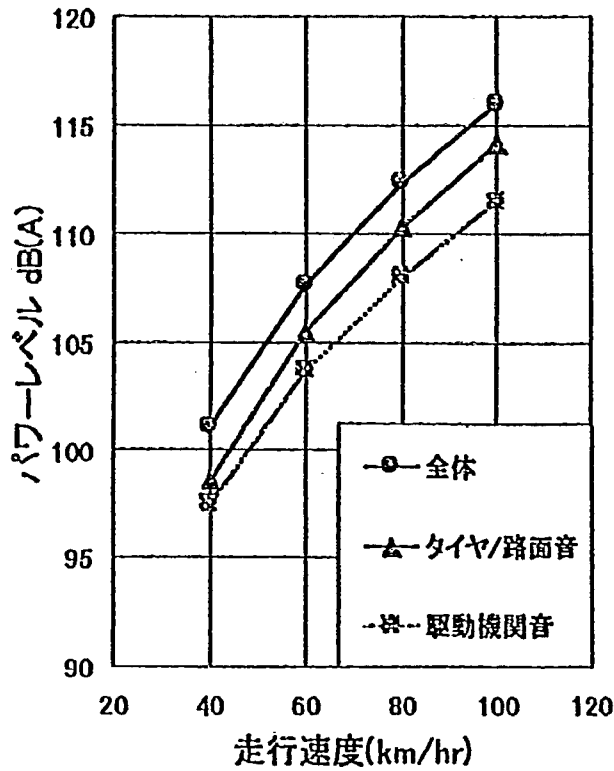


図4. 6 大型車の要因別
パワーレベル(密粒舗装)

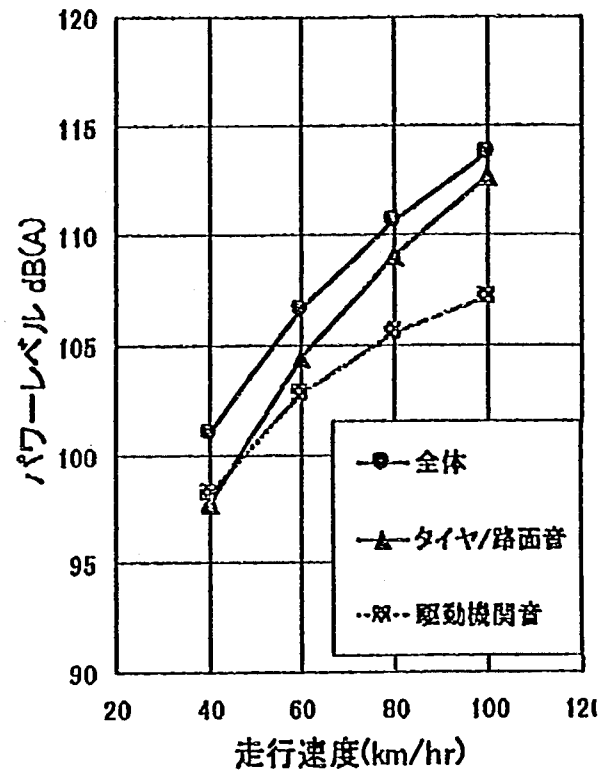


図4. 7 大型車の要因別
パワーレベル(空隙率12%)

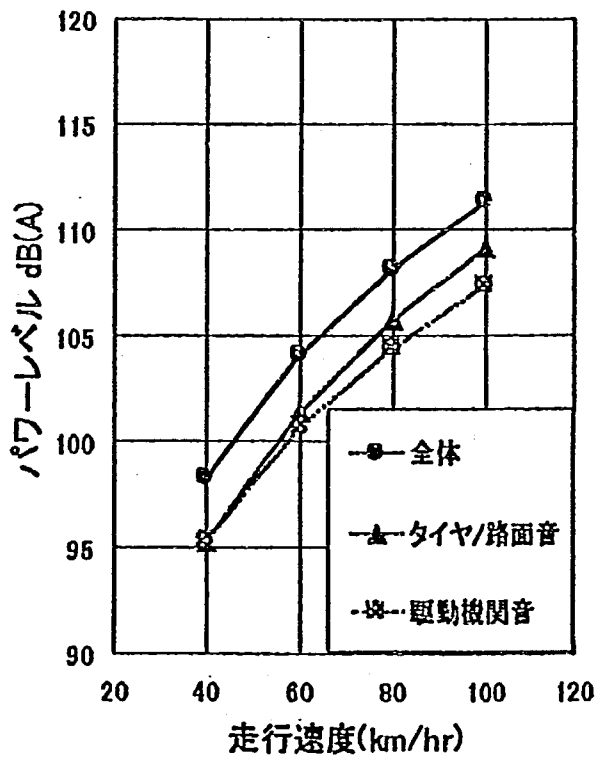


図4. 8 大型車の要因別
パワーレベル(空隙率21%)

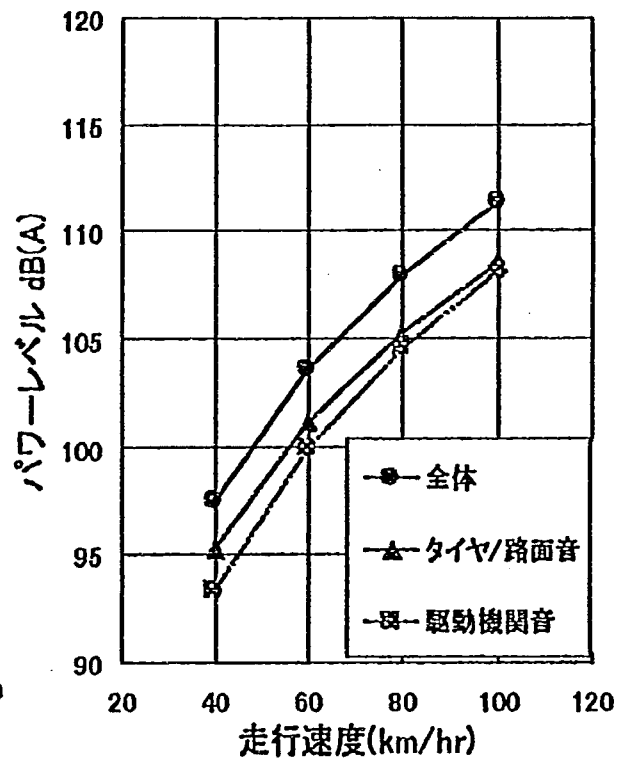


図4. 9 大型車の要因別
パワーレベル(空隙率23%)

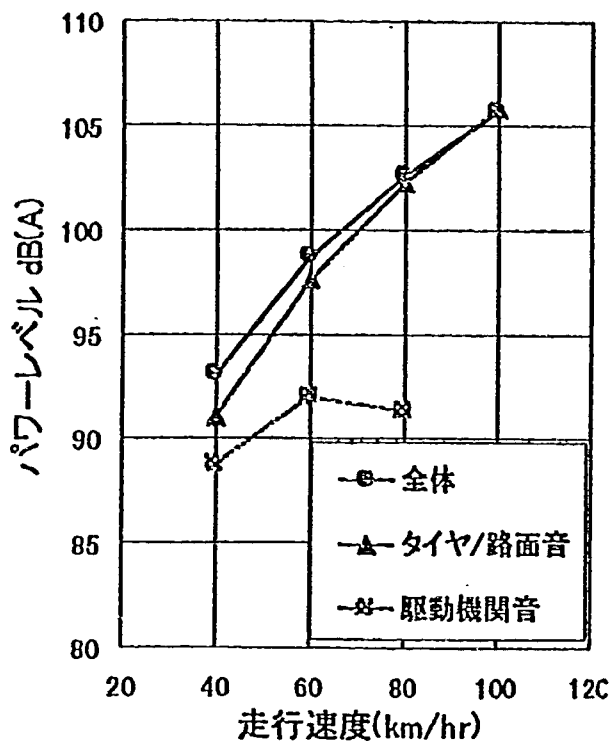


図4. 10 乗用車の要因別
パワーレベル(密粒舗装)

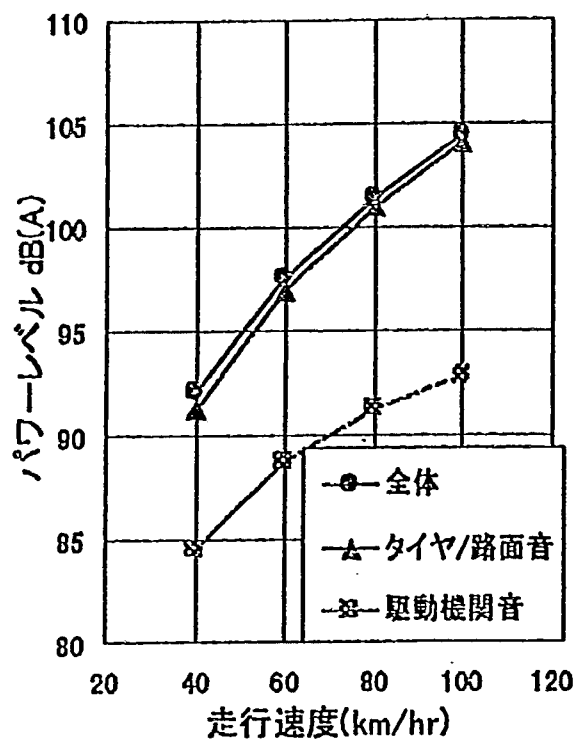


図4. 11 乗用車の要因別
パワーレベル(空隙率12%)

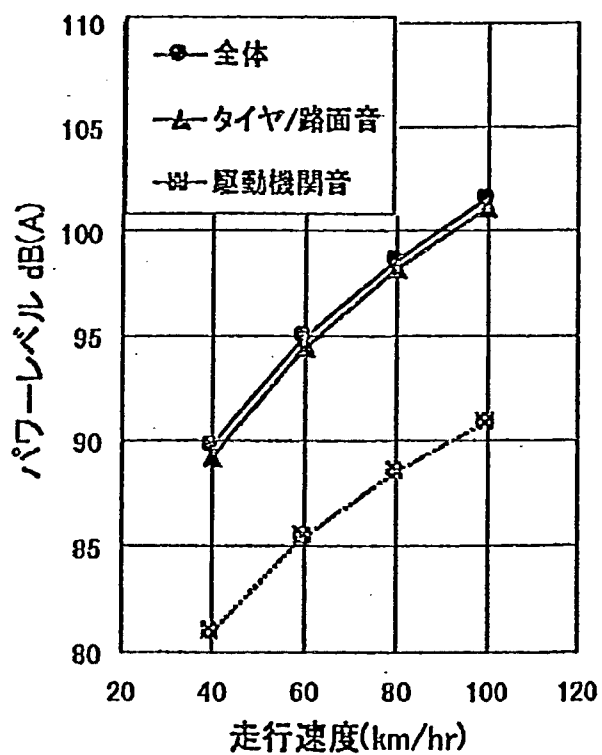


図4. 12 乗用車の要因別
パワーレベル(空隙率21%)

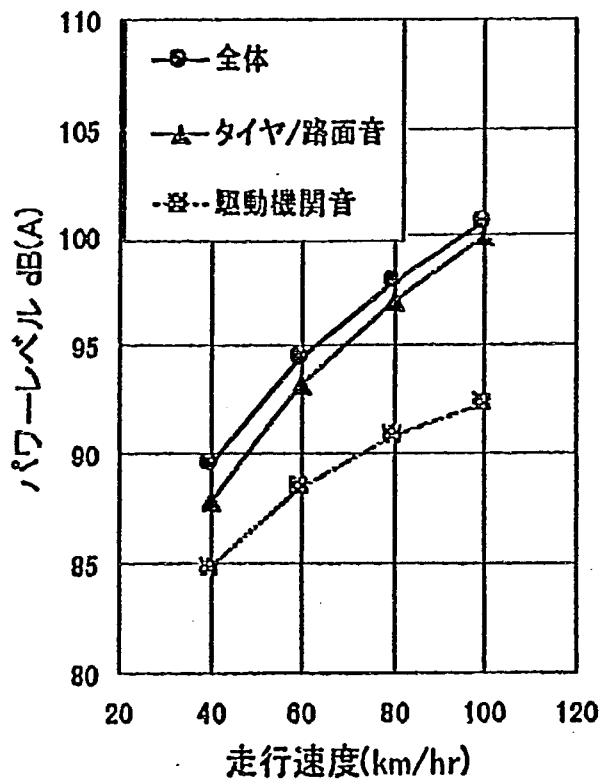


図4. 13 乗用車の要因別
パワーレベル(空隙率23%)

・乗用車の騒音低減効果

図4. 10～13より、乗用車においては密粒舗装、排水性舗装とも全ての速度でタイヤ路面音が駆動機関音を大きく上回っていた。これは、乗用車のパワーレベルではタイヤ路面音が支配的であり、駆動機関音があまり寄与していないためである。駆動機関音は空隙率が12%でも23%でもあまり違わないが、タイヤ路面音は空隙率が23%の方が12%より小さくなっており、その結果全体のパワーレベルも空隙率が23%の方が小さくなった。

(4) まとめ

大型貨物車の定常走行時は、排水性舗装の騒音低減効果と空隙率の関係では、全ての走行速度において空隙率23%のものの騒音低減効果が最も大きかった。惰性走行では、空隙率23%のものと27%のものが最も騒音低減効果が大きかった。乗用車の場合は、定常走行時及び惰性走行時とも、すべての走行速度で空隙率23%のものが騒音低減効果が最も大きかった。よって、大型貨物車、乗用車を含めた評価では、排水性舗装の空隙率が23%で最も騒音低減効果が大きくなると認められる。

以上のように排水性舗装では、その騒音低減効果において空隙率の最適値の存在が示唆された。一般には空隙率が高いほど騒音低減効果は上がると考えられてきたが、今回の結果では空隙率23%のものが最適であり、27%にまで空隙率を上げると逆に騒音低減効果が低減することが分かった。空隙率23%が27%のものより騒音低減効果が大きいことは、空隙率以外の要因があることを示唆している。これは、空隙率が27%まで上がると路面テクスチャーが粗くなり、タイヤ加振音が増大するのが原因ではないかと考えられるが、これは今後確認する必要がある。排水性舗装は供用に伴い空隙率が徐々に低下することを考えると、空隙率が高い方が効果の持続性は良くなるので、この視点からも排水性舗装敷設時の空隙率は23%とすることが適当であると考えられる。また空隙率15%までは2～3 dBの騒音低減効果が見られるが、空隙率が12%まで下がってしまうとその騒音低減効果は約1 dB程度まで落ちてしまうため、空隙率が15%程度までは騒音低減効果があると考えてもよいと思われる。

上記の考察は排水性舗装の敷設時に空隙率を調整した場合のものである。実際の道路では経時的に空隙率が低下するとともに舗装の表面性状も変化するわけであり、後者の騒音低減効果に対する影響も考慮して騒音低減効果を検討することが望まれる。

4. 1. 2 舗装厚の影響

次に排水性舗装の騒音低減効果に影響を及ぼすものとして、表 4. 1 は騒音パワーレベルの低減量と舗装厚の関係を示したものである。これらのデータも、土木研究所の試験走路に敷設された排水性舗装における自動車走行騒音測定調査により得られたものである。このときの空隙率は 20 %、最大骨材粒径は 13mm である。

舗装厚が 3 cm、5 cm、8 cm の場合の密粒舗装に対する排水性舗装の騒音パワーレベルの低減量を比較すると、舗装厚が大きくなると低減量も大きくなる傾向が見られるが、これら三者では舗装厚の違いによるパワーレベルの低減量にあまり差はみられない。従って、舗装厚を 8 cm にする必要はなく、3～5 cm の範囲で舗装設計により与えられる厚さとすればよいと考えられる。

4. 1. 3 骨材粒径の影響

さらに排水性舗装の騒音低減効果に影響を及ぼすものとして、表 4. 2 は騒音パワーレベルの低減量と最大骨材粒径の関係を示したものである。これらのデータも、土木研究所の試験走路に敷設された排水性舗装における自動車走行騒音測定調査により得られたものである。このときの空隙率は 20 %、舗装厚さは 5 cm である。

最大骨材粒径が小さいほど、密粒舗装に対する排水性舗装の騒音パワーレベルの低減量は大きくなる。これは、舗装材料として使われる骨材の粒径が小さいほど舗装の表面粗さが小さくなり、このためタイヤ加振力が小さくなりタイヤ路面音が低下することによると考えられる。小型車の場合、最大骨材粒径が 20mm のとき低減量は約 2～3 dB、13mm のとき約 6～7 dB、10mm のとき約 9～10dB となっている。また、大型車の場合では、低減量はそれぞれ約 4～5 dB、約 5～6 dB、約 6～7 dB となっている。大型車に比べ小型車の方が、最大骨材粒径の影響が大きく現れている。これは、自動車走行騒音全体に占めるタイヤ路面音の寄与が、小型車の方が大きいためであると考えられる。

4. 2 騒音低減要因

排水性舗装はその表層に連続した空隙をもつため、道路交通騒音を低減させる効果を有する。この騒音低減効果は、タイヤが路面上を転動するときタイヤのトレッドパターンの

表 4. 1 舗装厚と騒音低減効果

(単位：dB)

車種	速度	舗装厚		
		3 cm	5 cm	8 cm
小型車	80 km/h	4.4	4.8	5.5
	100 km/h	4.5	6.3	6.8
	120 km/h	5.1	5.6	6.2
大型車	80 km/h	5.1	5.9	6.2
	100 km/h	5.9	6.4	6.6
	120 km/h	6.2	7.1	7.2

(注) 空隙率は 20%，最大骨材粒径は 13 mm。

表 4. 2 最大骨材粒径と騒音低減効果

(単位：dB)

諸元	最大粒径(mm)	10	13	20
	空隙率 (%)	20	20	20
	舗装厚さ (cm)	5	5	5
大型	80 km/h	6.2	4.8	3.5
	100 km/h	7.3	6.3	3.7
	120 km/h	6.4	5.6	4.5
小型	80 km/h	8.5	5.5	2.4
	100 km/h	9.2	6.4	3.4
	120 km/h	9.8	6.6	3.0

溝と路面に挟まれた空気が圧縮・膨張することにより発生するエアポンピング音を、連続空隙が空気の圧縮・膨張を緩和することにより抑制すること、タイヤ路面音やエンジン音等が路面と自動車の車体下面の間で多重反射するときに多孔質な路面により吸音されることが、さらに多孔質な吸音性の路面上を自動車騒音が伝搬するとき超過減衰が生じることによると考えられている⁴³⁾。

第3章で論じられた排水性舗装上の自動車走行騒音のパワーレベルは、それを求めるための騒音データが路側に設置されたマイクロフォンにより測定されているため、上述の騒音低減要因のうち主として前二者による減音効果を考慮していることになると考えられる。従って、ここで言う自動車走行騒音のパワーレベルとは厳密な意味での音源である自動車が発生させる騒音ではなく、路側に設置されたマイクロフォンまでの間で排水性舗装の路面により吸音されており見かけ上のパワーレベルと考えられる。以下において、まず排水性舗装の各種音響特性を求め、これを用いて上記の三つの要因による排水性舗装の騒音低減効果を定量的に分離することを試みてみる。

4. 3 排水性舗装の音響特性

4. 3. 1 垂直入射吸音率

空隙率の異なる7種類の道路舗装（密粒舗装1種類、排水性舗装6種類）からそれぞれ5セット（1セットは直径98mmと28mmの供試体それぞれ1個ずつからなる。）のコアサンプルを採取し、2マイクロフォン音響管でこれらの複素音響インピーダンス比を測定した。舗装種類毎に5個の測定値を周波数別に算術平均し、これから次式により垂直入射吸音率を求めた。

$$\alpha = 1 - |(z - 1)/(z + 1)|^2 \quad (4. 1)$$

ここで、

α ：垂直入射吸音率

z ：複素音響インピーダンス比

なお、空隙率は、舗装種類毎にノギス法により得られた測定値を算術平均して求めた。

空隙率の異なる各種舗装の周波数帯域別の垂直入射吸音率を図4.14に示す。これによると、空隙率が12%、15%の排水性舗装は500Hzで吸音率が0.30～0.39のピーク値を示し、空隙率が21%、23%、27%と大きくなると800Hzで吸音率が0.63～0.87のピーク値を示す。このように、空隙率が大きくなるとともに垂直入射吸音率のピーク値も約0.3から約0.9に大きくなり、またピークを示す周波数は500Hzから800Hzへと高域へ移動した。また、空隙率が20%以上になると第1のピークより相当小さい第2のピークが2,500Hz辺りに現れた。いずれの場合も吸音率の曲線はピーク値を頂点とする釣り鐘状であり、共鳴器型の吸音特性を示している。なお、密粒舗装については、すべての周波数域で吸音率は0.1未満でありピークは認められなかった。

4.1.1の調査によると、空隙率が12%から27%の範囲で23%の排水性舗装が最も大きい騒音低減効果を有することがわかった。一方、吸音特性では空隙率27%が最も高い効果を示した。これは、空隙率以外の要因が空隙率23%の場合のタイヤ路面音を最も大きく抑制していることを示している。今後はこの要因を解明するために、路面のテクスチャーと騒音低減効果の関係を調査していく必要がある。

4.3.2 道路交通騒音に対する平均吸音率

各種舗装の周波数帯域別の吸音率を道路交通騒音のパワースペクトル（速度区分なし）⁴⁴⁾により加重して平均吸音率を求めたものと空隙率の関係を図4.15及び表4.3に示す。これによると、大きいピーク値をもつ空隙率が21%以上の排水性舗装は、平均吸音率が0.18～0.21と比較的大きな値を示した。一方、ピーク値が小さい空隙率が18%以下の排水性舗装の平均吸音率は0.11～0.13と小さかった。なお、密粒舗装の平均吸音率は0.03と非常に小さかった。

これら多孔質舗装の空隙率と平均吸音率の関係を回帰分析すると、両者には相関係数が0.990と強い相関関係が認められる。得られた回帰式は、次のとおりである。

$$\alpha = 1.126 u - 0.018 \quad (4.2)$$

ここで、

α : 平均吸音率

u : 空隙率

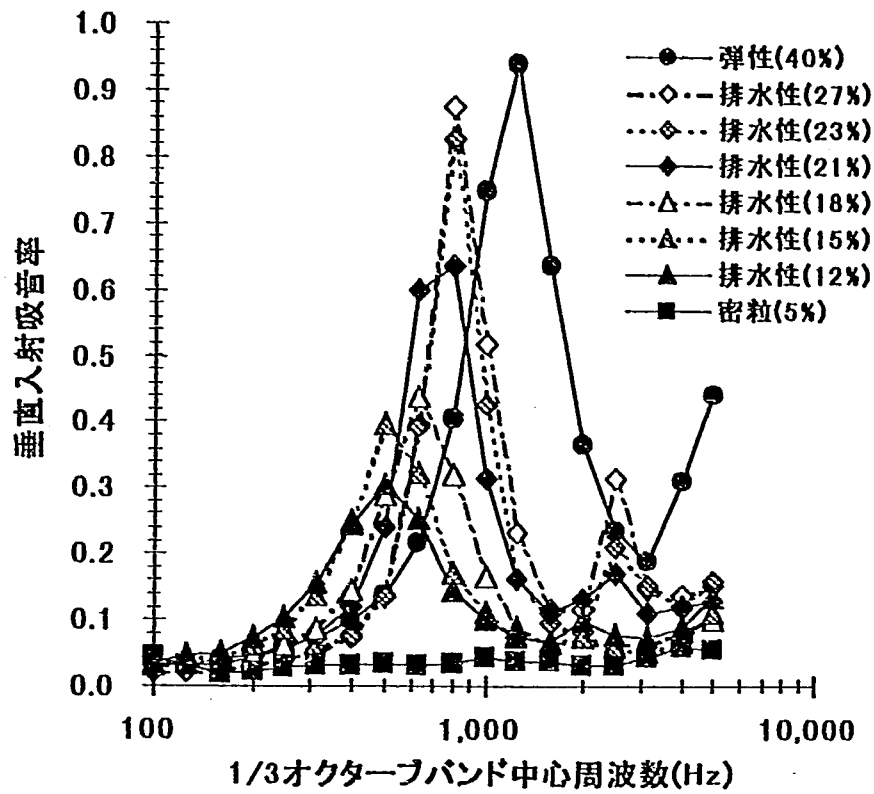


図4. 14 各種舗装の吸音率の周波数特性

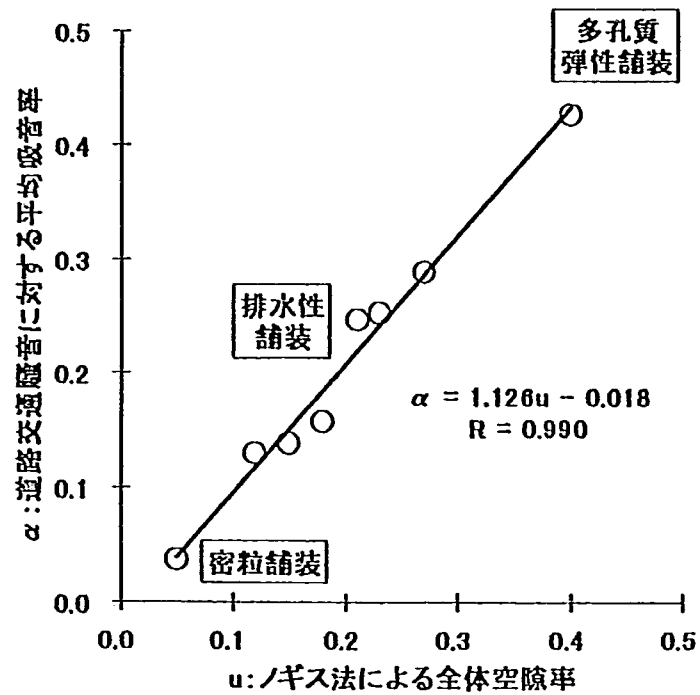


図4. 15 舗装の空隙率と平均吸音率の関係

表4. 3 空隙率と道路交通騒音に対する平均吸音率

空隙率	密粒舗装	12%	15%	18%	21%	23%	27%
平均吸音率	0.03	0.11	0.12	0.13	0.19	0.18	0.21

4. 3. 3 実効的流れ抵抗

(1) 排水性舗装上の伝搬音測定調査の概要

排水性舗装上を音が伝搬するときの超過減衰を求めることを目的として、建設省土木研究所の試験走路に敷設されている排水性舗装及び密粒舗装上でスピーカから発生する音を伝搬距離別に測定した（図4. 16参照）。スピーカ及びマイクロフォンをそれぞれ舗装面上の0 m及び1.2 mに設置した。なお、排水性舗装の主な仕様は、表層厚5 cm、空隙率20 %、骨材粒径5～13mmであった。

(2) 伝搬音の超過減衰

上記による伝搬音の測定結果をA特性の道路交通騒音のパワースペクトルにより補正し、密粒舗装上のスピーカから距離2 mの地点における騒音レベルを0 dBとして伝搬音の減衰の様子を示したものが図4. 17である。これによると、排水性舗装における伝搬音の超過減衰効果は、伝搬距離が5 mを超えると現れ、10 m以上のところで2～3 dBであった。2. 2で述べたように岩瀬らは排水性舗装上の音響伝搬における距離減衰を推計計算しているが、本実験と同様に伝搬距離が5 m以遠で密粒舗装より大きな距離減衰を得ている。また、図4. 18は密粒舗装と排水性舗装上の伝搬音のレベル差を周波数別に示したものであるが、これによると500Hz以上で超過減衰が現れ、スピーカから40 m離れた地点ではそれはより顕著となり、800Hz付近で最大8～10dB程度の減音となっている。

(3) 伝搬音のユニットパターンによる排水性舗装の実効的流れ抵抗値の推定

上記では排水性舗装におけるスピーカ音の伝搬特性について述べたが、ここではこれを用いて排水性舗装上の伝搬過程における減音効果を計算するために必要な実効的流れ抵抗値を求める。まず、上記の実験により得られた伝搬距離別の減音量に基づきスピーカ音のユニットパターンを求める。次に、各舗装の実効的流れ抵抗値を仮定してASJ Model 1993のA法⁴⁵⁾により計算した1/3オクターブバンド別レベルにスピーカ音のパワースペクトルを加味してユニットパターンを求める。このとき、幹⁴⁶⁾により提案されている次式を用いて実効的流れ抵抗から各舗装の音響インピーダンス比を計算した。

$$1/\beta = 1 + 5.5 (\sigma / f)^{0.62} + i 8.43 (\sigma / f)^{0.62} \quad (4. 3)$$

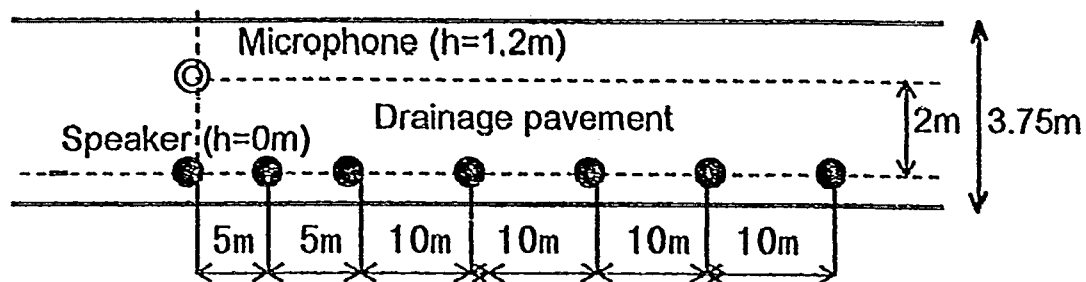


図 4. 16 排水性舗装上での騒音伝搬実験の配置

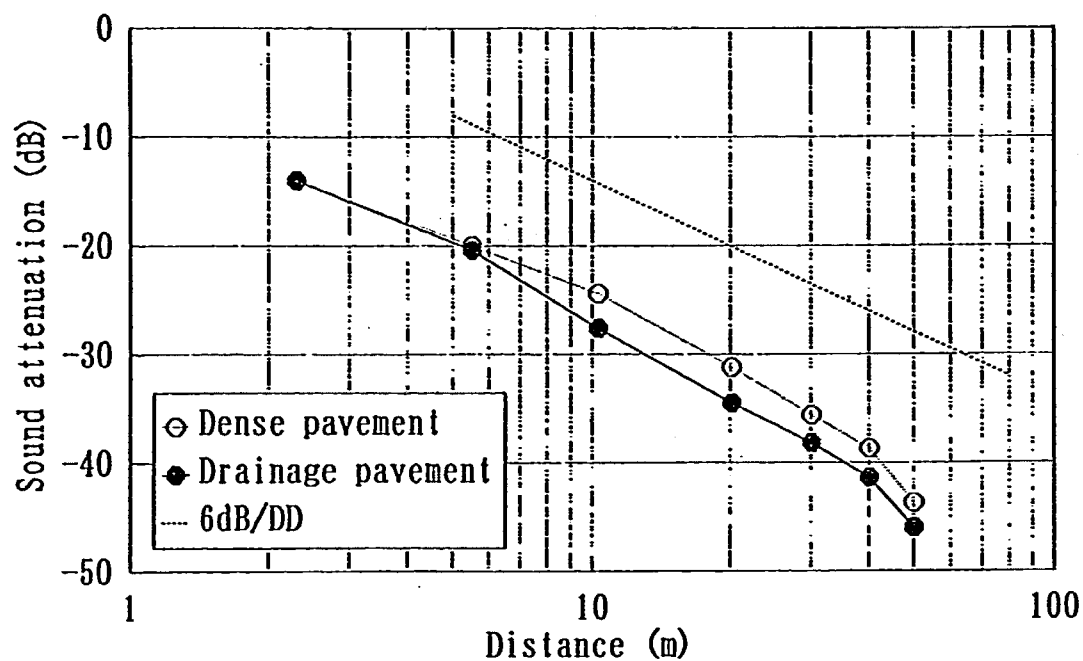
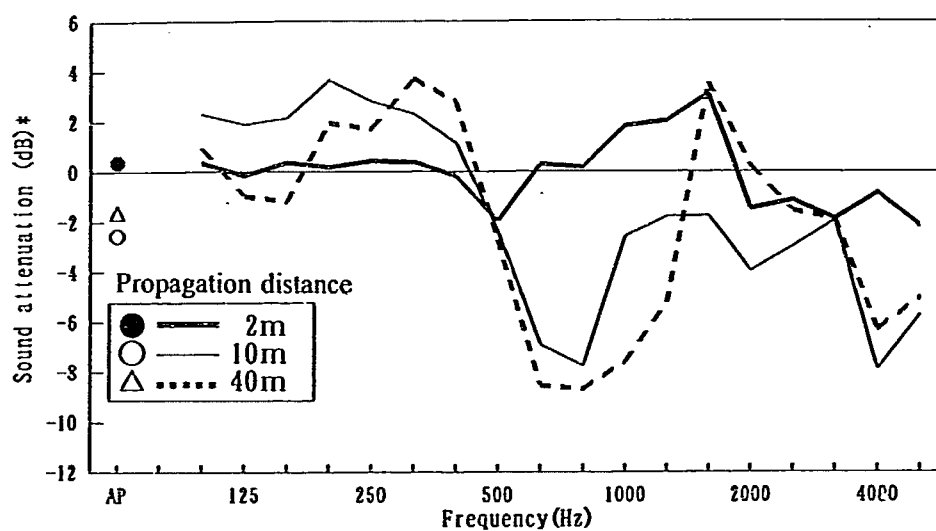


図 4.17 舗装上での騒音伝搬による減衰量



* The vertical axis shows the difference in the sound pressure level between the drainage pavement and the dense pavement.

図 4.18 騒音伝搬による減衰量の周波数特性

ここで、

β : 音響アドミッタンス比 (β の逆数が音響インピーダンス比)

σ : 実効的流れ抵抗

f : 周波数

これらのユニットパターンを示したものが図 4. 19 である。この図において、各舗装の実効的流れ抵抗値を推定するために、実測値によるユニットパターンと計算によるユニットパターンを比較した。この実効的流れ抵抗値は後述するように各舗装の路側における等価騒音レベルを計算するのに用いるので、両者の比較においてはピークレベル付近の一致の状況を重視した。この結果、実測値によるユニットパターンと最もよく一致している計算によるユニットパターンの実効的流れ抵抗値は、排水性舗装の場合 $1,250\text{kPas/m}^2$ 、密粒舗装の場合 $20,000\text{kPas/m}^2$ であった。このように各舗装の実効的流れ抵抗値が得られたので、これらを用いて各舗装上を騒音が伝搬するときの地表面による減衰効果を計算できる。

ところで、井清⁴⁷⁾や高木ら⁴⁵⁾は数種の地表面の実効的流れ抵抗値を提案しており、代表的な裸地の実効的流れ抵抗値を $1,250\text{kPas/m}^2$ としている。これは、上記のスピーカ音の伝搬実験から推定された排水性舗装の実効的流れ抵抗値と同じである。また、この実験から推定された密粒舗装の実効的流れ抵抗値 $20,000\text{kPas/m}^2$ は、井清⁴⁷⁾が提案している値と同じである。

4. 3. 4 音響インピーダンスと吸音率

音響管による 2 マイクロフォン法により得られた排水性舗装と密粒舗装の音響インピーダンス比と吸音率を図 4. 20 に示す。この施工後 1 年の排水性舗装は、600Hz 周辺でまだ約 0.8 と大きな吸音率をもっている。一方、この排水性舗装の音響インピーダンス比は、すべての周波数領域で密粒舗装よりはるかに小さな値となっている。しかし、その位相は吸音率がピークを示す周波数 600Hz の前と後でずれており、700 ~ 1,200Hz では約 60 度、300Hz 以下では約 - 60 度ずれている。また、密粒舗装は空隙が非常に少ないので、その垂直入射吸音率は非常に小さく、すべての周波数領域で 0.1 未満である。一方、その音響インピーダンス比は 200 ~ 1,200Hz の周波数領域で 100 以上の大きな値を示している。

図 4. 21 は排水性舗装上における伝搬音の減衰の状況を実測と計算により求め、示したものである。計算は二つの方法により行った。一つは、4. 3. 3 で推定された排水性舗装の実効的流れ抵抗値 $1,250\text{kPas/m}^2$ を用いて計算したもの、もう一つは、上記の音響管

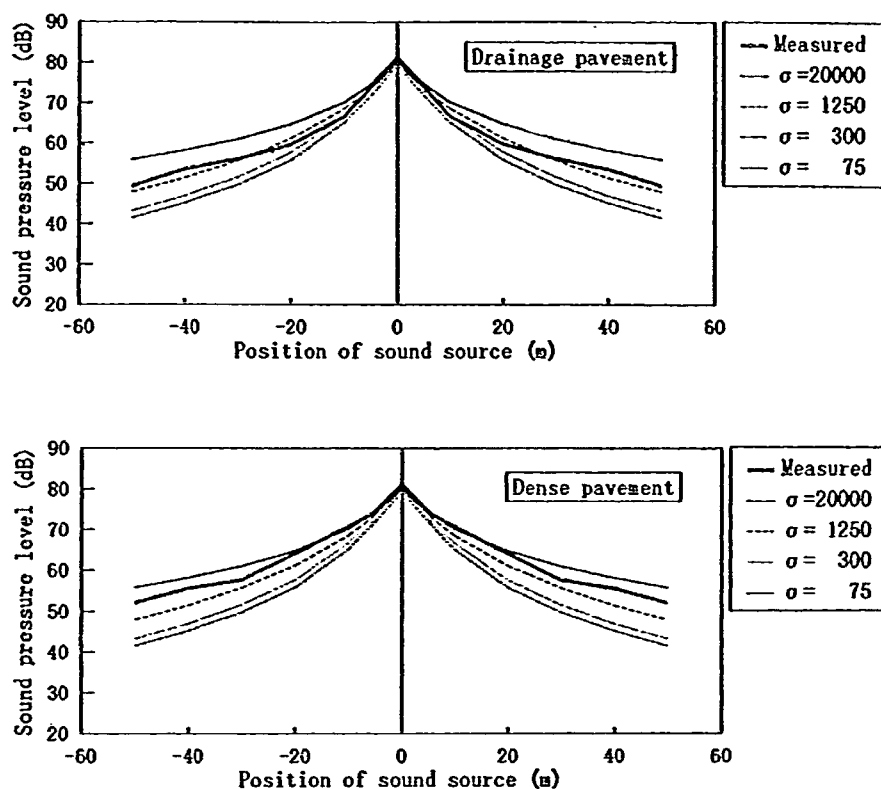


図 4. 19 排水性舗装及び密粒舗装上における
騒音伝搬のユニットパターンの実測値と計算値の比較

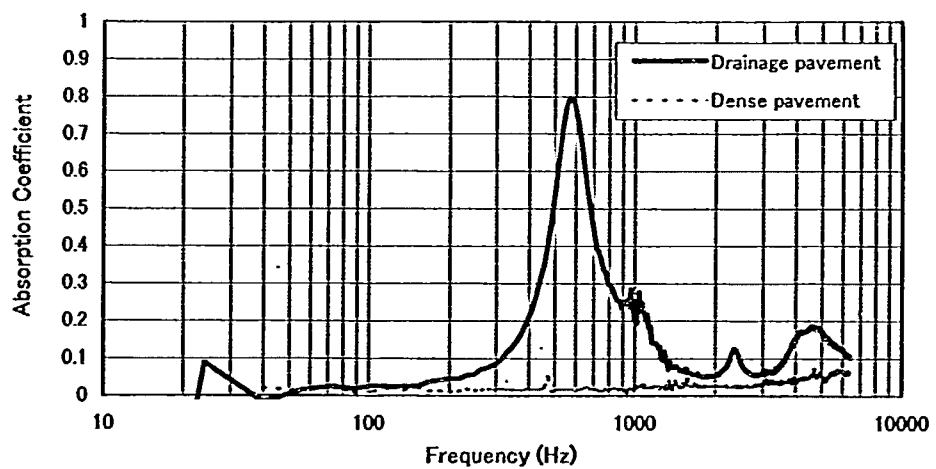
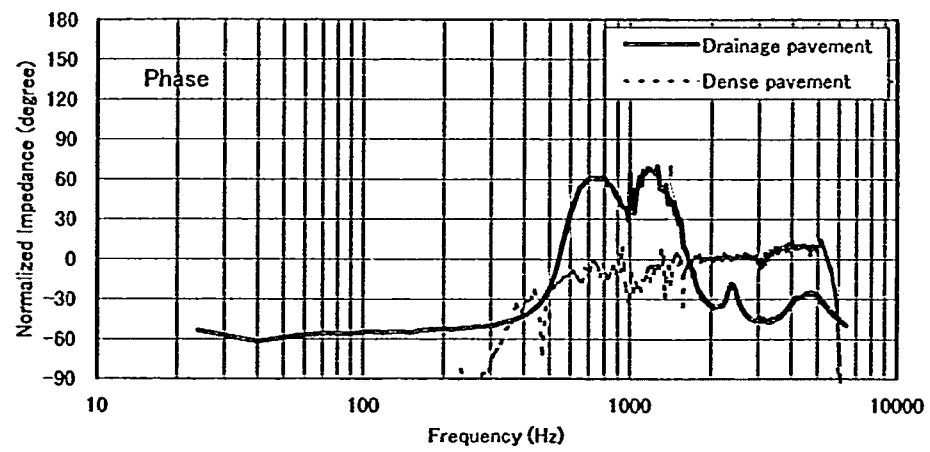
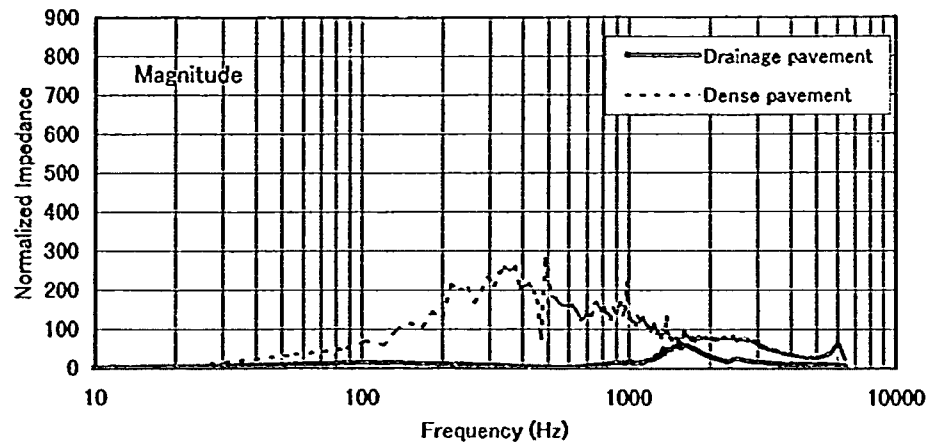
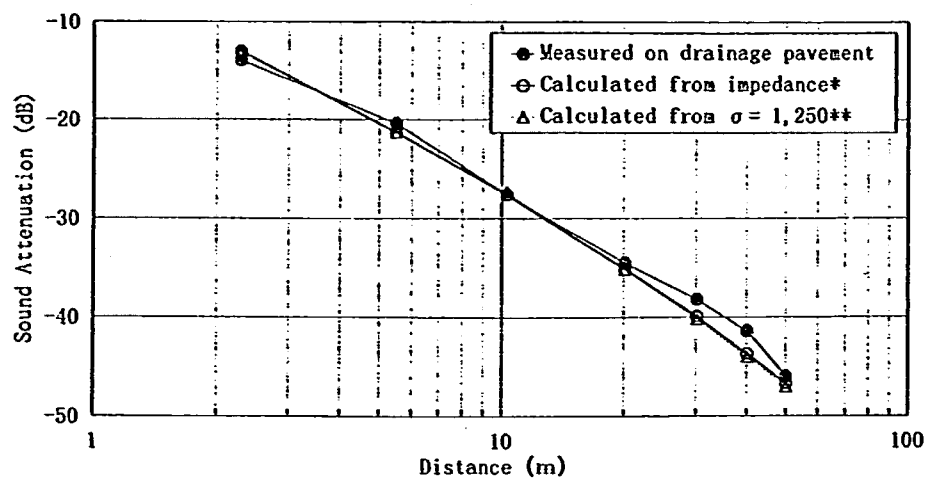


図 4. 20 舗装の音響特性



* Calculated from the normalized acoustic impedance measured for the drainage pavement.

** Calculated from the flow resistivity estimated for the drainage pavement.

図 4. 21 排水性舗装上の伝搬による減音量

による2マイクロフォン法により測定された排水性舗装の音響インピーダンス比を用いて計算したものである。図4.21によると、これら二つの計算方法による伝搬音の減衰状況は、実測によるものとよく一致している。これは、4.3.3で推定された排水性舗装の実効的流れ抵抗値と、上記のとおり測定された排水性舗装の音響インピーダンス比が適切であったことを示していると考えられる。しかし、二つ目の方法に関しては、舗装の音響特性が広い舗装面から採取される小さなサイズの試料を用いて行われる実験により得られることを考えると、検討対象となる舗装から多くの試料を採取して音響特性を測定することが望ましいことに留意する必要がある。

4.3.5 排水性舗装上の自動車走行騒音の指向性

道路交通騒音対策に関する研究はこれまで数多く報告されているが、自動車走行騒音の特性や指向性を考慮したものは少ない^{48)・49)}。たとえば、遮音壁による音の回折減衰量の計算にしても、一般的には自動車は無指向性の点音源として扱っている。しかし、自動車騒音はエンジン、排気管、タイヤ等様々な音源から発生しており、音の指向性が存在することは知られている。さらに、この指向性は路面性状の違い等によっても変化すると考えられる。

ここでは、密粒舗装と排水性舗装上を走行する自動車の騒音について、走行方向に垂直な面内で指向性を測定し、その特徴について述べる。

(1) 自動車走行騒音の指向性の測定概要

土木研究所の試験走路の密粒舗装区間及び排水性舗装区間において乗用車及び定積載（積載重量10t）の大型貨物車を40km/h及び80km/hで走行（定常走行、惰性走行）させ、車両の進行方向に対し垂直な面内に無指向性マイクロホンを取り付けた矩形ゲート（高さ4m、幅5m）を設置し、ゲート内を通過する車両の騒音レベルを測定した（図4.22参照）。測定点数は15点であった。

自動車の騒音レベルは、ゲート前後30mの範囲で通過車両の音圧を二乗積分することにより求めた。さらに、矩形ゲートの各マイクロホン位置での値が、車両の進行方向に対し垂直な面内における路面上の走行中心線を中心とした同一円周上での騒音レベル分布となるように、距離補正を行った。

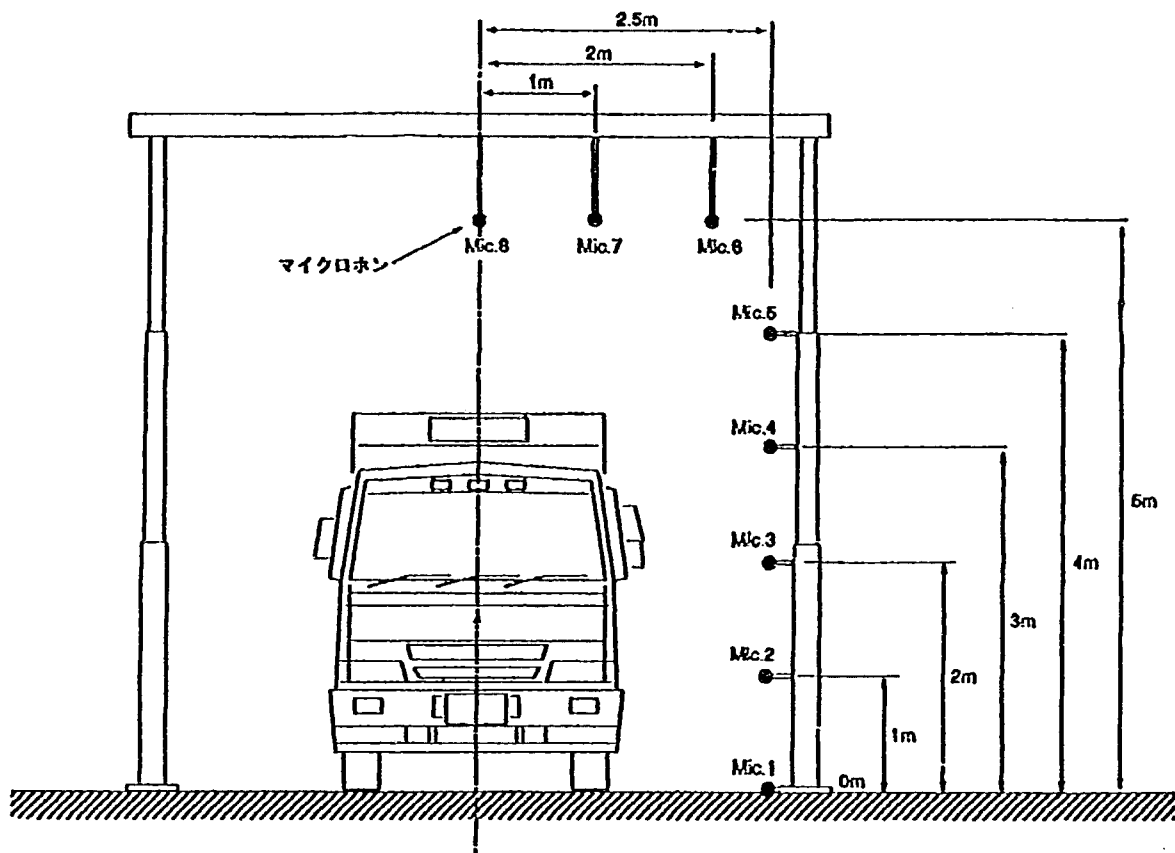


図 4. 22 指向性測定位置断面図

（２）定常走行騒音の指向性

図４．２３は、定常走行騒音の指向性を示したものである。この図において、密粒舗装上を走行した場合の車両側方路面上の測定点での騒音レベル値を基準として、他の測定点での値との差により指向性を表した。図中の三つの半円は 10dB ごとに描かれている。前述の基準点は中央の円周上にあり、それより内側に位置すれば基準点より騒音レベルが小さく、外側に位置すれば大きいことになる。

・乗用車と大型貨物車

乗用車の走行騒音の指向性は、車両側方から車両上方に向かうにしたがって徐々に小さくなり、車両真上では車両側面路上に比べ約 3～4 dB 小さくなる。大型貨物車も、同じような傾向を示すが、車両側方の路上に比べ車両真上で約 7 dB と乗用車よりさらに小さくなっている。

これは、自動車の車体により上方への音の伝搬が妨げられるため、側方への指向性が現れると考えられる。乗用車と大型貨物車の騒音の指向性を比べると、後者は車両側方により強い指向性を示すことがわかる。これは、乗用車ではタイヤの部分を除き側方までほぼ車体で覆われているのに対し、大型貨物車では車台の上に車体に乗っているだけで側方はほとんど覆われていないためと考えられる。

・走行速度40km/hと80km/h

乗用車も大型貨物車も、密粒舗装上を走行した場合は、速度が 40km/h から 80km/h に変化しても、基準点と各測定点の騒音レベルの差はほとんど変わらない。すなわち、速度の増加による騒音レベルの上昇はあるが、指向性は依然として側方に強くでており、その強さは変化していない。

一方、排水性舗装上を走行した場合は、40km/h では密粒舗装に比べ車両上方で 0.5dB 程度、車両側方で 1 dB 程度騒音レベルが減少したが、速度が 80km/h に上がると、車両上方での低減量が 1 dB 程度、車両側方での低減量は約 2～4 dB となる。すなわち、排水性舗装上では走行速度が上がると、車両側方への指向性が弱められることになる。これは、速度が高い場合に寄与率が大きくなるタイヤ路面騒音が、排水性舗装により低減されるためと考えられる。

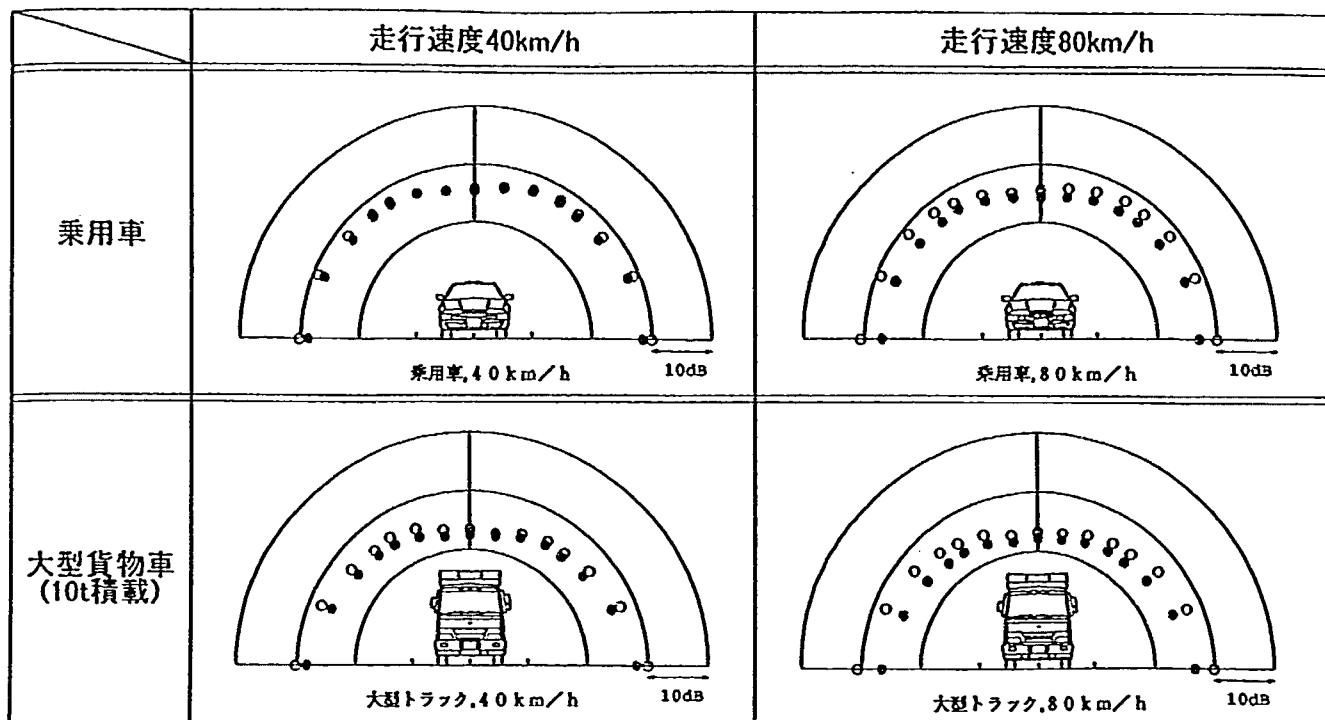


図 4. 23 定常走行騒音の指向性 (○:密粒舗装、●:排水性舗装)

・排水性舗装と密粒舗装

排水性舗装を走行する場合は、どの条件においても密粒舗装より騒音レベルが小さくなることがわかる。特に密粒舗装に比べ、車両上方の低減量は0～1 dB程度であるのに対し、車両側方での低減量は1～3 dB程度と大きく、車両側方への大きい指向性が弱められていることがわかる。また、速度が上がるとこの傾向は一層顕著になる。

(3) 惰性走行騒音の指向性

図4.24は、各種条件における惰性走行騒音の指向性を示したものである。

・乗用車と大型貨物車

惰性走行ではエンジンが停止しているため、タイヤ路面騒音が主な音源となる。乗用車、大型貨物車とも車両側方から上方に向かうにしたがい、騒音レベルは低減している。車両の側方と真上における騒音レベルの差は、乗用車で3～4 dB程度に対し、大型貨物車では8～9 dB程度となっている。

特に、大型貨物車は車両側方への指向性が強く、この傾向は定常走行騒音の場合より大きい。これは、エンジン音がなくなり、側方への指向性に強い影響を与えているタイヤ路面騒音が卓越するようになるためと考えられる。

・走行速度40km/hと80km/h

定常走行の場合と同様、乗用車も大型貨物車も密粒舗装上を走行した場合には、走行速度が上がっても、基準点と比較した減音量はほとんど変わらない。これは、速度が変化しても、密粒舗装では車両側方への強い指向性が変わらないことを示している。

しかし、排水性舗装上を走行した場合、密粒舗装と比べて減音量は、乗用車が40km/hで0～1 dB程度、80km/hで1～3 dB程度に、大型貨物車が40km/hで1～2 dB程度、80km/hで2～5 dB程度になる。すなわち、排水性舗装では惰性走行においても、速度が上がると車両側方への指向性が弱まっていることがわかる。

・排水性舗装と密粒舗装

定常走行の場合と同様、どの条件においても、密粒舗装より排水性舗装を走行する場合の方が、騒音レベルが小さくなる。密粒舗装と比べた場合、車両上方の低減量は0～2

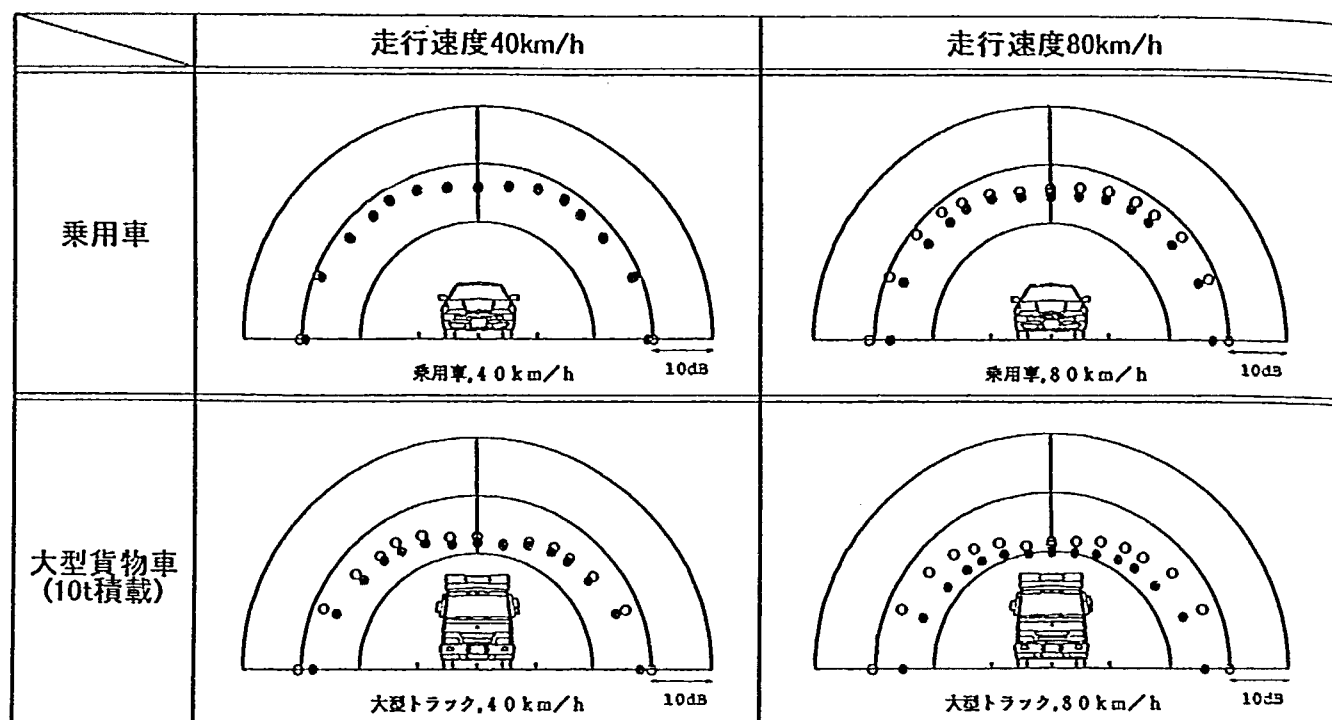


図 4. 24 惰性走行騒音の指向性 (○:密粒舗装、●:排水性舗装)

dB 程度であるが、車両側方での低減量は 1 ～ 4 dB 程度となっており、車両側方への指向性を弱めていることがわかる。また、乗用車よりも大型貨物車、速度 40km/h よりも 80km/h の方が、車両側方での低減量が大きくなっており、指向性は弱められている。

(4) まとめと今後の課題

本研究では、密粒舗装と排水性舗装における車両走行騒音の測定結果をもとにして、次の事項が明らかにされた。

- ・車両走行騒音の指向性の測定方法として、走行線を中心とした円周上あるいは球面上にマイクロホンを設置する方法と、矩形ゲートの各点にマイクロホンを設置する方法が報告されている。いずれの方法も、音源位置を走行線上の地表面に設定しているので、後者の方法で測定しても、距離補正を行えば前者の方法に一致する。

- ・密粒舗装と排水性舗装において測定された乗用車と大型貨物車の走行騒音の指向性は、車両真上で一番小さく、車両側面の路面近傍に向かうに従って大きくなり、車両側方に強い指向性があるという点で類似している。

- ・排水性舗装上での定常走行騒音及び惰性走行騒音は、密粒舗装に比べ車両側方の路面上から車両真上まで全ての方向にわたって小さくなる。また、その低減量は路面近傍で大きく、車両真上に向かうにしたがって小さくなる。従って、排水性舗装での車両騒音の側方への指向性は、密粒舗装の場合ほど大きくない。

今回の調査では、密粒舗装及び排水性舗装という 2 種類の路面において、自動車走行騒音の指向性を把握した。道路交通騒音の効果的な低減対策を行うためには、以下の点について今後検討する必要がある。

- ・遮音壁による騒音対策をより効果的なものとするため、今回得られた指向性の特徴を考慮して、遮音壁の形状、高さ、設置方法等について検討する必要がある。

- ・今回の調査では、自動車にかなり接近した位置における騒音の指向性について検討したが、自動車から離れた位置における指向性についてさらに検討する必要がある。

4. 4 騒音低減メカニズムの検証

ここでは、4. 2で述べられた排水性舗装の主な三つの騒音低減要因、すなわちエアポンピング音の抑制、反射音の路面による吸音及び路面上における伝搬音の超過減衰が、それぞれどの程度騒音低減に寄与しているのかを定量的に検討する。このとき、3. 2で論述した排水性舗装の騒音パワーレベルや、4. 3で求めた排水性舗装の音響特性、すなわち吸音率、実効的流れ抵抗を用いて検討する。

4. 4. 1 音源における騒音発生抑制

上述した排水性舗装の主な三つの騒音低減要因のうち、ここでは1番目と2番目の要因からなる見かけ上のパワーレベルによる騒音低減効果を定量的に検討する。この検討では、それ程大きくない排水性舗装の騒音低減効果を比較的厳密に分析することになるので、3. 2. 1で得られた一般的な排水性舗装のパワーレベルの密粒舗装に対する補正量を用いるのではなく、一般道路のある箇所に施工された排水性舗装のパワーレベルを求め、これを用いてその箇所における排水性舗装の騒音低減の要因分析を行う。

(1) 一般道路における騒音測定調査の概要

平成8年に埼玉県白岡町の県道大宮栗橋線で施工された排水性舗装の区間（4車線）で、自動車走行騒音等の測定調査を施工の約1年後に行った。測定箇所は周辺に反射物がない比較的ひらけた場所に設定した。マイクロフォンは外側車線の中心線から側方7.5 m、地上1.2 mの地点に設置し、単独走行する自動車の騒音レベルをデータレコーダに収録した。得られたデータは大型車106台、小型貨物車5台、乗用車75台の騒音レベル（FAST）であった。このとき、5回にわたって10分間の等価騒音レベルと交通量、走行速度も計測した。自動車の走行速度は、延長85 mの区間で通過時間をストップウォッチで計測して求めた。なお、当該箇所の排水性舗装の主な仕様は、舗装厚5 cm、空隙率20 %、骨材粒径5～13mmであった。

(2) 自動車走行騒音のパワーレベル式

7.5m 地点で測定された騒音レベルからピーク法により算出した排水性舗装のパワーレベルと、走行速度の関係について回帰分析を行った。これらの散布状況及び回帰曲線を、

乗用車と大型車の別にそれぞれ図 4. 25、図 4. 26 に示す。また、このとき乗用車及び大型車について得られた排水性舗装のパワーレベルと走行速度の回帰式は、それぞれ次のとおりである。

$$\text{乗用車} \quad L_{WA,d} = 17.8 \log_{10} (V/50) + 93.4 \quad (4. 4)$$

$$\text{大型車} \quad L_{WA,d} = 4.5 \log_{10} (V/50) + 101.3 \quad (4. 5)$$

ここで、

$L_{WA,d}$: 排水性舗装における自動車走行騒音のパワーレベル (dB)

V : 走行速度 (km/h)

なお、図 4. 25、図 4. 26 には上坂らが求めた通常の密粒舗装の騒音パワーレベル式⁵⁰⁾が比較のため記載されている。これらの式は次のとおりである。

$$\text{乗用車} \quad L_{WA,d} = 23.1 \log_{10} (V/50) + 97.3 \quad (4. 6)$$

$$\text{大型車} \quad L_{WA,d} = 13.7 \log_{10} (V/50) + 103.3 \quad (4. 7)$$

排水性舗装のパワーレベルをこれらの図の中に示されている通常の密粒舗装のパワーレベルと比べると、速度域 30 ~ 70km/h で乗用車の場合 2.7 ~ 4.7dB、大型車の場合 0.0 ~ 3.3dB、排水性舗装のパワーレベルが小さくなっている。

排水性舗装による騒音低減効果は大型車より乗用車の方が大きく、また、速度が高くなるほど大きくなっている。これは、排水性舗装により特に低減されるタイヤ路面音の全騒音に占める割合が大きくなるような上記の場合に、減音効果が大きくなるためである。また、大型車のパワーレベルが乗用車に比べ速度依存性が小さいのもこのためである。すなわち、大型車の場合、低速度域ではエンジン騒音の割合が大きいため減音効果は小さく、速度が高くなるにつれてタイヤ路面騒音の割合が大きくなり、排水性舗装による減音効果が大きく現れるためである。

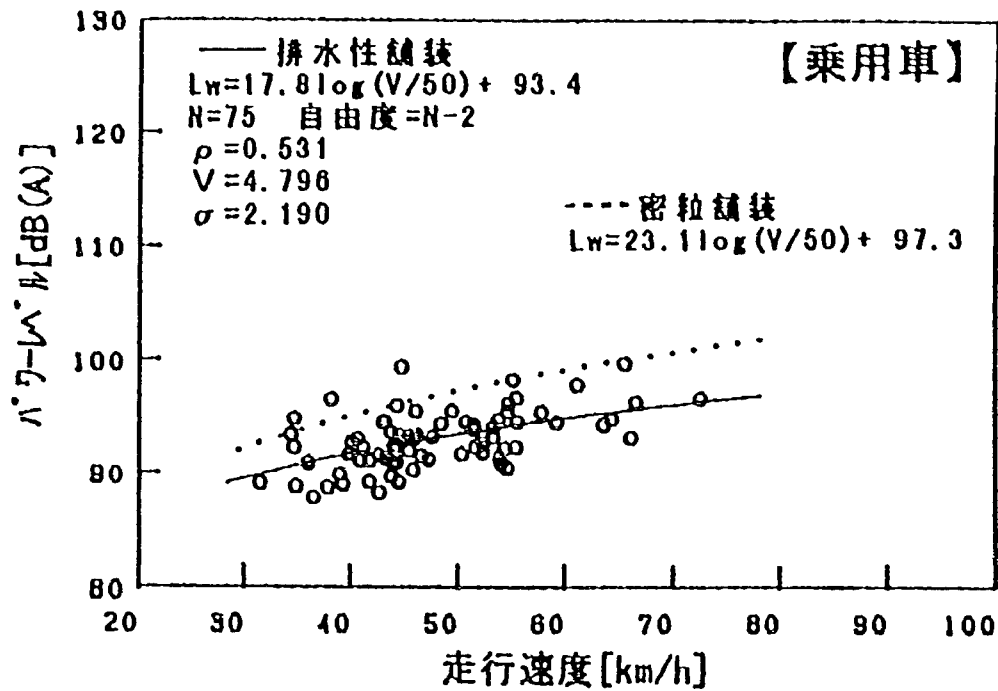
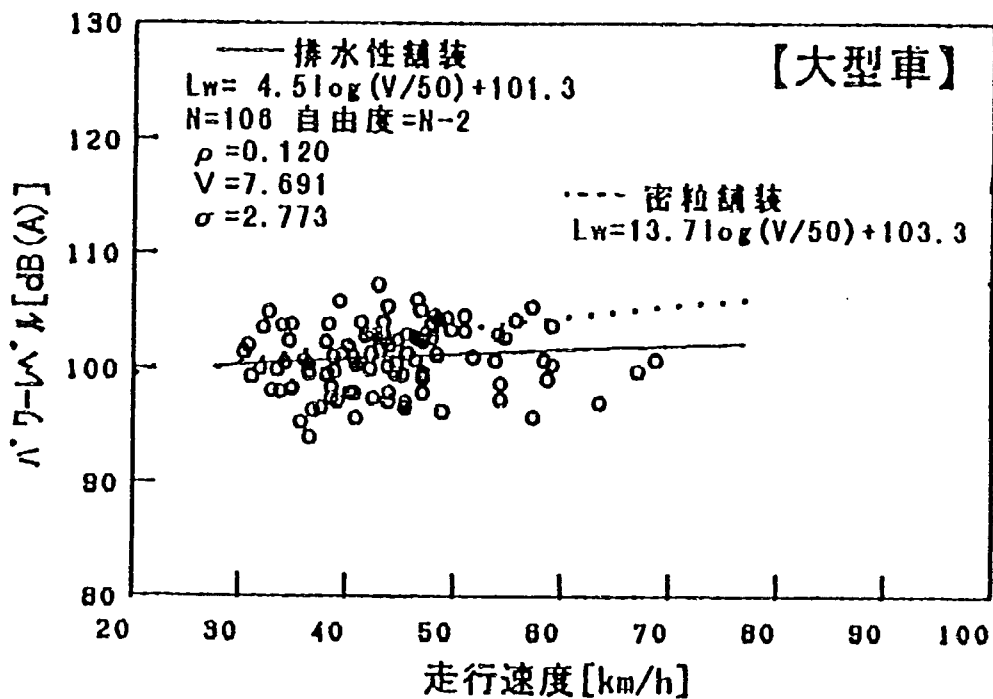


図 4. 25 排水性舗装における乗用車のパワーレベル



[N : サンプル数 ρ : 相関係数 V : 分散 σ : 標準偏差]

図 4. 26 排水性舗装における大型車のパワーレベル

(3) 沿道での等価騒音レベルによる検証

上記(1)の騒音測定箇所における等価騒音レベル L_{Aeq} を、次の二つの計算方法により求めた。

a. 通常の密粒舗装の騒音パワーレベルを用い、ASJ Model 1993のB法⁴⁵⁾により計算する方法。

b. 白岡地区の排水性舗装区間の騒音測定により得られた騒音パワーレベルを用い、ASJ Model 1993のB法により計算する方法。

このときb.の排水性舗装の騒音パワーレベル式は、走行速度を50km/hとしたときの各測定値に対応するパワーレベルをエネルギー平均して、これを基に修正されたものを使用する。修正された排水性舗装のパワーレベル式は次のとおりである。

$$\text{乗用車} \quad L_{WA,d} = 17.8 \log_{10} (V/50) + 94.0 \quad (4.8)$$

$$\text{大型車} \quad L_{WA,d} = 4.5 \log_{10} (V/50) + 102.1 \quad (4.9)$$

一方、沿道では L_{Aeq} を測定しており、これらの計算値と実測値を図4.27に示す。等価騒音レベルを計算するときに使った交通条件は表4.4の通りである。図4.27により実測値と各方法による計算値を比べてみると、通常の密粒舗装のパワーレベルを用いる方法の場合は計算値が約2.5dB大きくなる。次に、排水性舗装のパワーレベルを用いる方法の場合は計算値が約1.6dB大きい、その差は縮小し、両者は比較的良い一致を示すようになった。これは、上記の排水性舗装のパワーレベル式の適合性を検証していると考えられる。ここで、計算値がやや実測値より大きくなっているが、これは排水性舗装の騒音予測手法にパワーレベルにおける減音効果だけが考慮されており、伝搬過程での減音効果が考慮されていないためであると考えられる。このことは次に扱う。

4.4.2 路面上を伝搬するときの超過減衰

次に、上記4.4.1の分析結果に伝搬過程における騒音低減効果を加味して、さらに要因分析を行う。このとき、4.3.3で推定された排水性舗装の実効的流れ抵抗値を用いることとする。

上記4.4.1で検討の対象とされた排水性舗装が施工された一般道路の沿道における

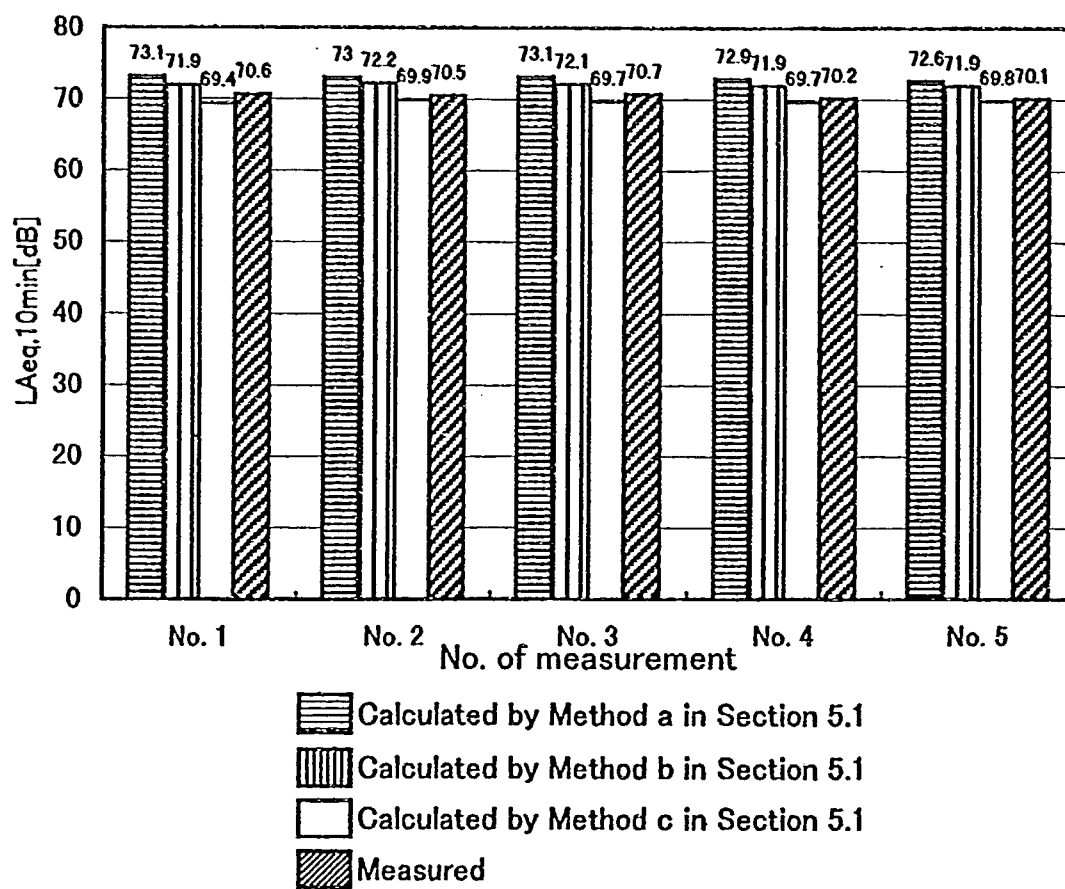


図 4. 27 排水性舗装における L_{Aeq} の実測値と計算値の比較

表 4. 4 騒音測定箇所の交通条件

測定回数	上り				下り			
	交通量	大型車	平均車速(km/h)		交通量	大型車	平均車速(km/h)	
	(台/10分)	混入率(%)	大型車	小型車	(台/10分)	混入率(%)	大型車	小型車
1 回目	180	42.2	44.0	48.5	216	43.5	34.2	38.4
2 回目	206	41.8	38.6	42.4	219	42.9	33.3	39.6
3 回目	182	41.2	40.6	43.4	266	42.5	35.0	37.1
4 回目	199	39.7	39.6	46.2	241	41.5	37.7	38.9
5 回目	198	42.4	37.2	43.6	226	39.4	35.7	41.5

等価騒音レベルをさらに次の方法で計算してみる。

c. 白岡地区の騒音測定により得られた騒音パワーレベル、パワースペクトル及び4.3.3で推定された排水性舗装の実効的流れ抵抗値 $1,250\text{kPa}/\text{m}^2$ を用い、ASJ Model 1993のA法により計算する方法。

この予測方法によって計算された等価騒音レベルと実測値も図4.27に示している。この図により実測値とc.による計算値を比べてみると、排水性舗装のパワーレベルと伝搬特性を考慮する方法の場合は計算値が約0.7dB小さくなるものの、その差は4.4.1のb.による計算値に比べさらに縮まった。以上の通り、排水性舗装の音源における減音効果及び伝搬過程における減音効果を考慮することにより騒音予測の精度は高くなった。これは、ここで用いた排水性舗装のパワーレベル、さらには実効的流れ抵抗値が適当であることを検証していると考えられる。

上記の排水性舗装の状態、交通条件の場合、これらの計算によると音源における減音効果は0.9dB、伝搬過程における減音効果は2.3dBであった。なお、この例では音源における減音効果の方が伝搬過程における減音効果より小さくなっているが、これは表4.4でも示したとおり自動車の走行速度が約40km/hと遅いためである。

4.4.3 音源における騒音の抑制効果と吸音効果

(1) 路面と車体下面のモデル化

上記4.4.1では排水性舗装における自動車走行騒音のパワーレベルを用いて、これによる音源における騒音低減効果量を求めた。しかしながら、前述のとおりこのパワーレベルと密粒舗装のパワーレベルとの差には、タイヤ路面音の発生源における抑制による減音効果と、タイヤ路面音やエンジン音等の路面での反射時における吸音による減音効果が含まれていると考えられる。ここでは、これら二つの要因による減音効果を定量的に分離して分析する。そこで、この騒音低減効果のうち吸音による寄与を、路面と車体を図4.28のとおりモデル化して検討してみる。

乗用車が60km/hで定常走行するときを想定し、音源はタイヤと路面の接触面⁵¹⁾とし、また4.1.1(3)で述べたようにエンジン音はタイヤ路面音に比べて非常に小さいのでここでは無視した。音の伝搬は、路面と車体下面での鏡面反射を仮定し、路面と車体下面との開口部をスリットとして考慮した。このときの反射面の吸音率は、路面については4.3.2で得られた平均吸音率、車体下面については完全反射とした。

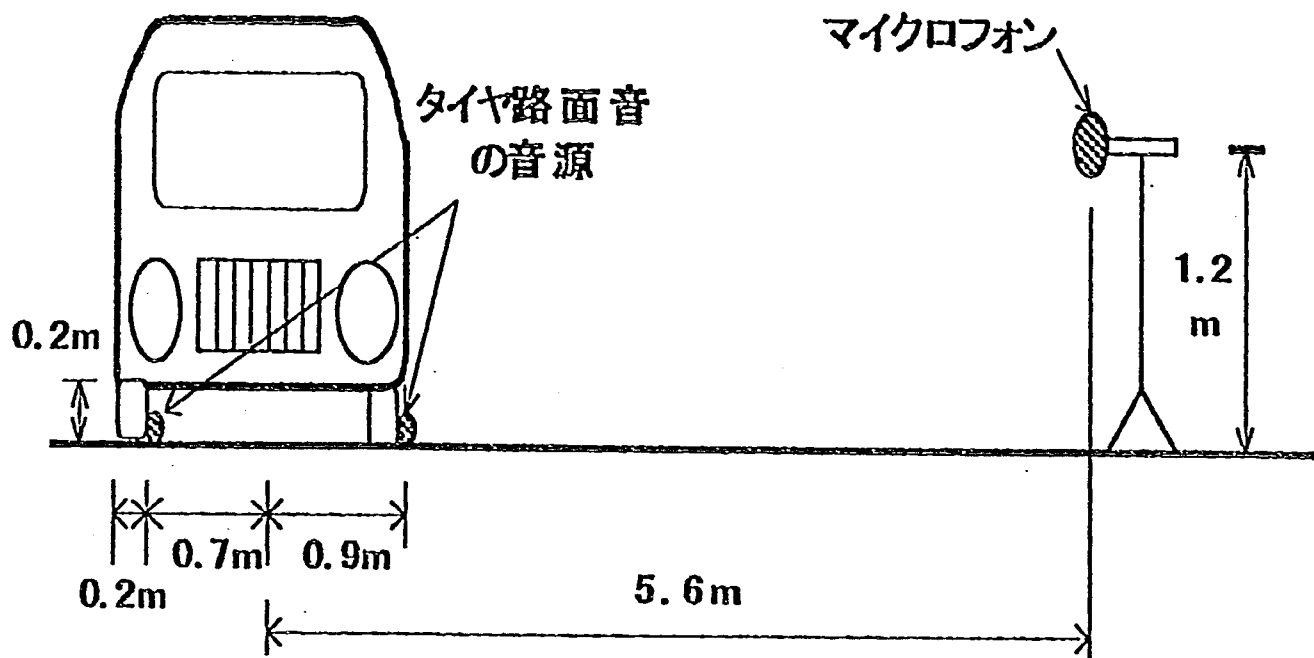


図 4. 28 路面と車体のモデル化

(2) 吸音による減音効果のシミュレーション結果

上記(1)で行った排水性舗装の吸音による減音効果のシミュレーション結果を図4.29に示す。

なお、空隙率別の排水性舗装について全体の騒音低減効果の測定値も同図に示す。これによると空隙率が12～27%において、多孔質舗装の全体の減音効果が1.1～4.6dBであるのに対し、吸音による減音効果は0.4～1.0dB程度と推定され、あまり大きくない。従って、厳密な意味での音源において発生する騒音の抑制効果は0.7～3.8dBと推定され、この効果が音源における騒音低減効果の大半を占めると考えられる。これは、マイクロフォン側のタイヤからの直達音が卓越しており、他方反対側のタイヤ路面音が伝搬過程で路面に吸音されたり、路面と車体との開口部(スリット)で回折するものの、減音にはあまり影響していないためと考えられる。また、これは排水性舗装の要因別騒音低減効果量を推計した岩瀬らの報告⁵²⁾にも符合する。

4.5 騒音低減効果の経時変化の要因

4.5.1 音響特性の経時変化

(1) 垂直入射吸音率の経時変化

図4.30は、国道202号佐賀県西有田町に施工された排水性舗装の吸音率を経年的に示したものである。施工直後には大きな吸音率を示していたが、時間の経過とともに吸音率のピークとなる周波数帯が低域に移動し、また吸音率自体も小さくなってきている。

(2) 道路交通騒音に対する平均吸音率の経時変化

一方、図4.31は国道202号佐賀県西有田町及び国道208号福岡県大和町の5箇所施工された排水性舗装の吸音率に、道路交通騒音のスペクトルを用いて加重平均した後、それらを施工後の経過時間毎に算術平均して経時的に示したものである。これによると、施工直後0.36あった平均吸音率は3年後には0.14まで低下し、その後はあまり変化していないのが読み取れる。また、わだち部と非わだち部では施工後1年まではわだち部の方が平均吸音率は小さいが、3年以上になると両者の差はほとんどなくなっていた。

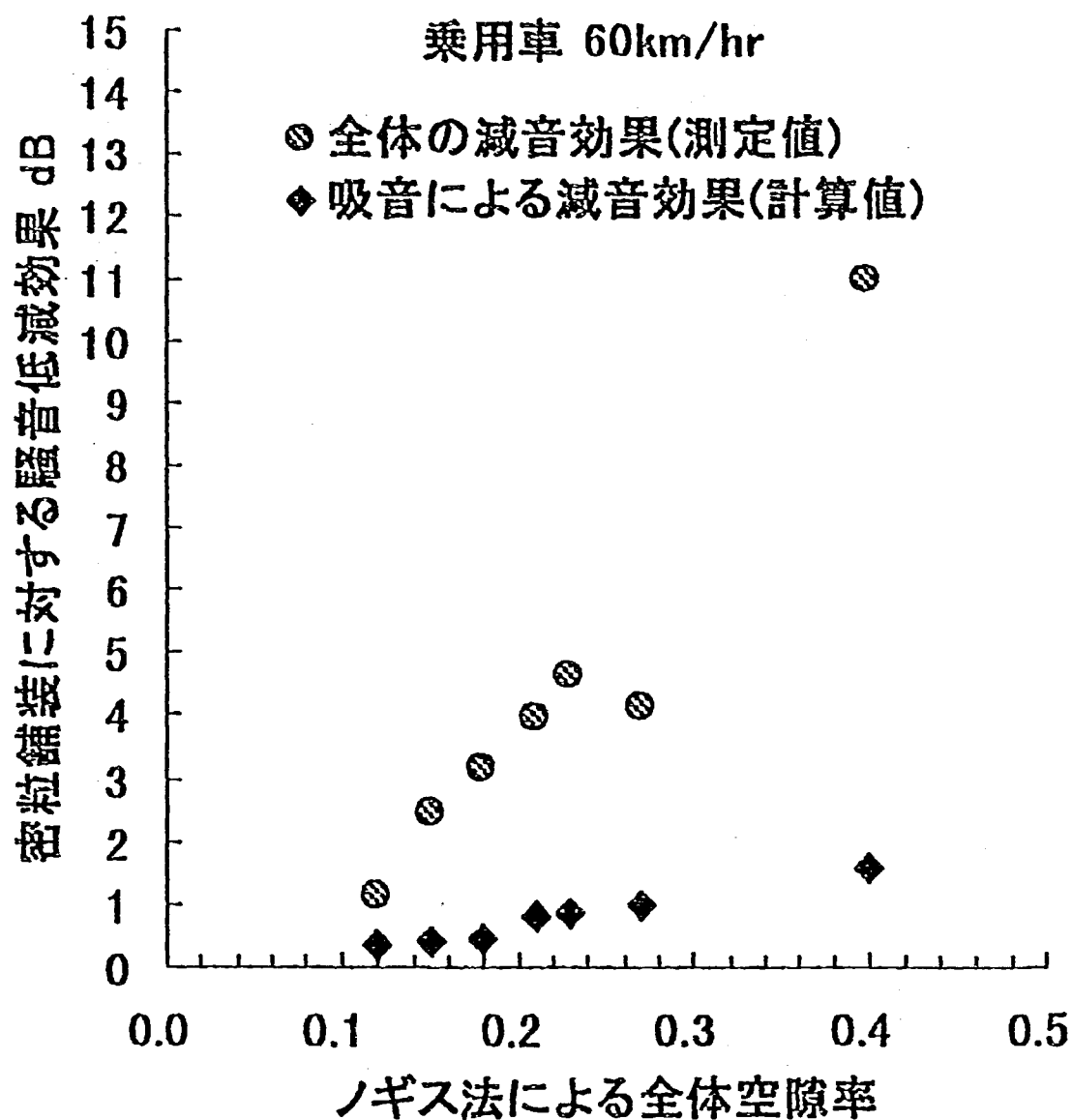


図 4. 29 多孔質舗装の減音効果

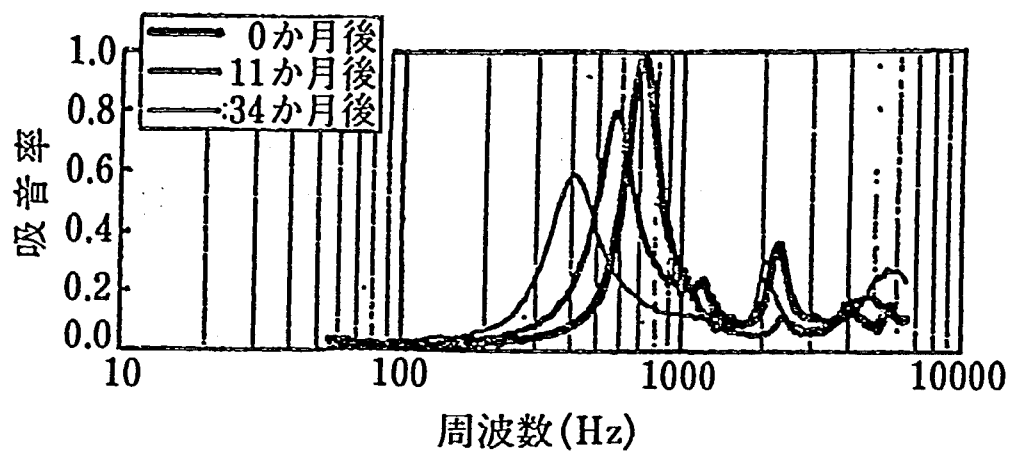


図 4. 30 吸音率の周波数特性の経時変化

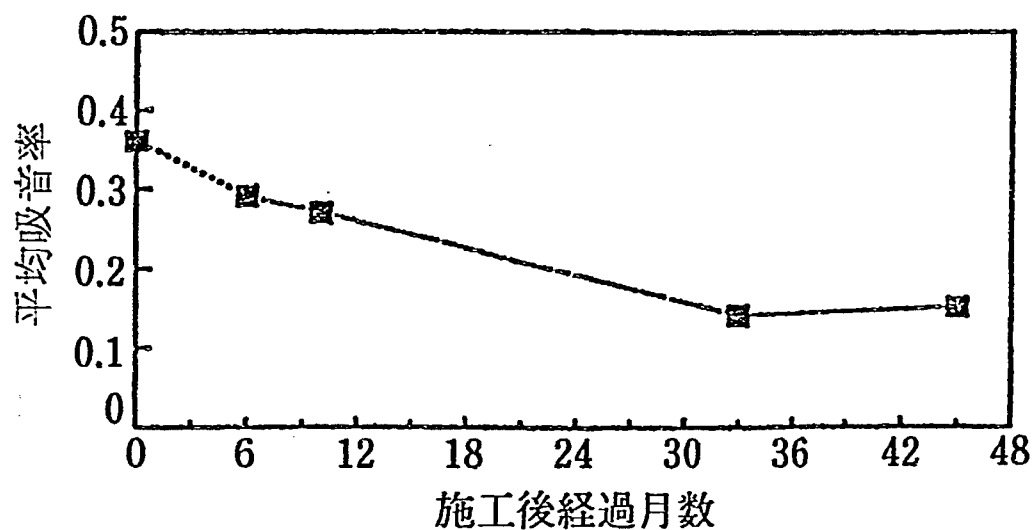


図 4. 31 平均吸音率の経時変化

4. 5. 2 騒音低減効果の経時変化の要因

(1) 空隙率調査方法の概要

排水性舗装のコアサンプルの採取箇所、施工時期、厚さ及び骨材粒径等は表 4. 5 に示すとおりである。コアカッターにより路面から切り取られた直径 10cm の円筒状の試料を、ダイヤモンドカッターで厚さ方向に 3 等分し、それぞれ上層部、中層部及び下層部とした。これら供試体の空隙率を次式により求めた。

$$\text{空隙率} = (\text{かさ容積} - \text{実容積}) / \text{かさ容積} * 100 \quad (4. 10)$$

ここで、かさ容積はノギス等により計測した。また、実容積は気相置換法による高精度自動体積計により測定した。

(2) 排水性舗装の成分分析方法の概要

排水性舗装や密粒舗装等のアスファルト舗装の構成成分は、骨材、アスファルト及び砂である。また、これらに自動車等の走行により土砂や炭素化合物等が加わると考えられる。そこで、成分分析にあたっては排水性舗装を骨材、アスファルト・油分、砂及び炭素化合物の 4 種類の成分に分類することとし、石油アスファルトの三塩化エタン可溶分による方法に準拠して供試体を分析した。これにより求められた 4 成分の重量百分率に、空隙率及び各成分の比重を考慮して容積百分率を計算した。表 4. 6 に各成分の分析方法と比重を示す。

(3) 空隙率の経時変化

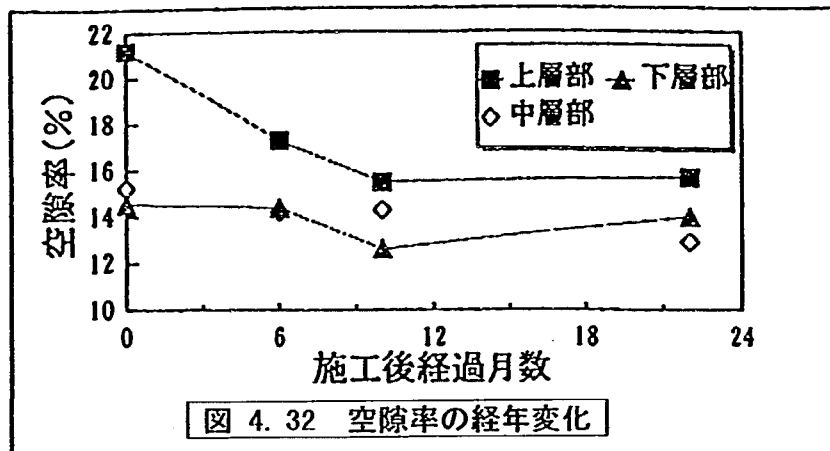
排水性舗装の空隙率の経時変化を図 4. 3 2 に示す。これは、国道 202 号佐賀県西有田町及び国道 208 号福岡県大和町の数工区に施工された排水性舗装の空隙率を施工後の経過時間毎に算術平均し、経年的に示したものである。これによると舗装の上層部では施工後 10 ヶ月までに空隙率が 21.2 % から 15.5 % へと 5.7 % も減少した。しかし、その後の空隙率にはあまり変化が見られない。一方、中・下層部では空隙率は施工直後の 15 % 程度から 10 ヶ月後の 13 ~ 14 % 程度まで徐々に低下したが、その後空隙率はほぼ安定している。

表 4. 5 排水性舗装の試料採取箇所

路線名	箇所名	工区名	施工年月	舗装厚	骨材粒径	試料採取年月
国道190号	山口県小野田市	A工区	平成4年11月	5cm	20-13mm	平成7年1月洗浄前後
国道190号	山口県小野田市	B工区	平成4年11月	5cm	13-5mm	平成7年1月洗浄前後
国道190号	山口県小野田市	C工区	平成4年11月	5cm	7.5-2.5mm	平成7年1月洗浄前後
国道190号	山口県小野田市	D工区	平成4年11月	5cm	13-10mm	平成7年1月洗浄前後
国道190号	山口県小野田市	E工区	平成4年11月	5cm	10-5mm	平成7年1月洗浄前後
国道202号	佐賀県西有田町	2工区	平成4年12月	5cm	13-5mm	平成5年6月、11月、6年11月
国道202号	佐賀県西有田町	3工区	平成4年12月	6cm	13-5mm	平成5年6月、11月、6年11月
国道208号	福岡県大和町	2工区	平成5年2月	7cm	13-5mm	平成5年6月、11月、6年11月
国道208号	福岡県大和町	3工区	平成5年2月	8cm	13-5mm	平成5年6月、11月、6年11月
国道208号	福岡県大和町	4工区	平成5年2月	9cm	13-5mm	平成5年6月、11月、6年11月

表 4. 6 各成分の分析方法と比重

成分	分析方法	比重
骨材	溶剤(三塩化イソ)不溶分のうち2mm以上のもの	2.620
アスファルト・油分	溶剤(三塩化イソ)溶解分	1.025
砂	骨材を除き、溶剤不溶分のうち、強熱(800℃)残さ分	2.580
炭素化合物	骨材を除き、溶剤不溶分のうち、強熱(800℃)減量分	2.000



(4) 空隙閉塞物の成分

排水性舗装の空隙閉塞物の成分を調べると、大半が砂分であり、それに若干の炭素化合物が混じっているというものであった。

図4.33～35は経年的な空隙率の変化と砂と炭素化合物からなる閉塞物の変化を示している。舗装の上層部では施工後10ヶ月で空隙率が5.7%減少したのに対し、空隙閉塞物はわずか1.1%増加しただけであった。その後、空隙閉塞物は22ヶ月後には1.7%まで徐々に増加した。すなわち、施工後10ヶ月までは、4.6%の空隙が空隙潰れにより減少し、1.1%の空隙が空隙詰まりにより失われたと考えられる。その後は、空隙潰れはほとんど見られないが、空隙詰まりの進行により空隙率は少しずつ減少していくと考えられる。

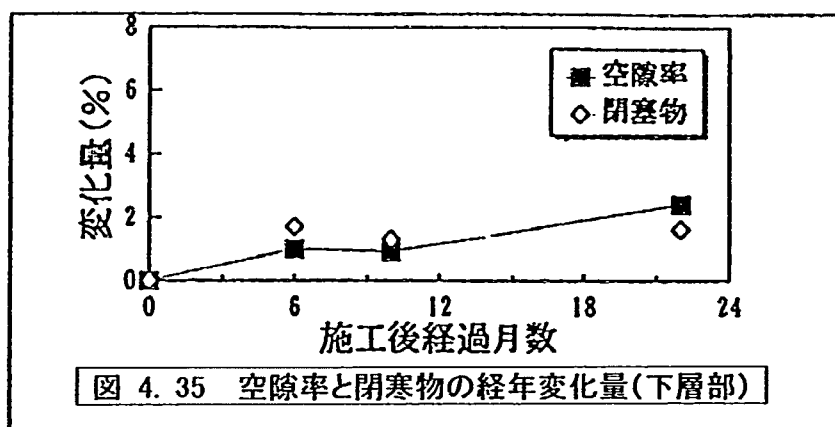
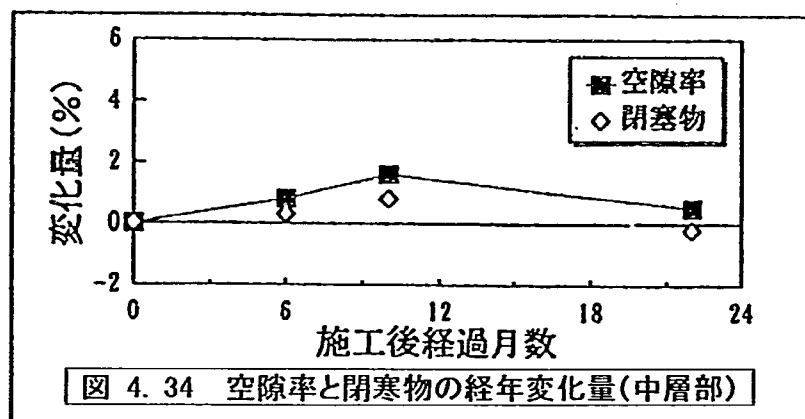
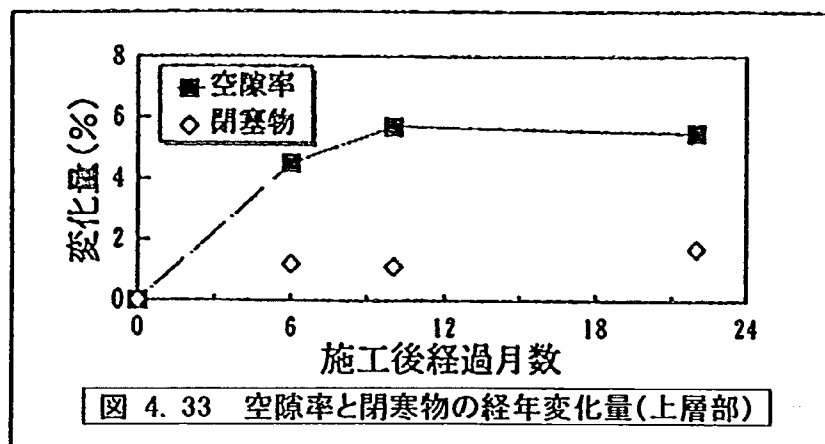
次に、中・下層部では空隙率の減少及び空隙閉塞物の増加は、ともに1～2%程度であった。すなわち、空隙潰れによる空隙の減少はほとんど見られず、空隙の減少は閉塞物による空隙詰まりのために引き起こされたと考えられる。今、施工後22ヶ月における上・中・下層部すべての空隙率の減少量を計算すると2.7%になるが、これを空隙詰まりによるものと空隙潰れによるものに分けて試算してみると、それぞれ1.2%及び1.5%となった。

4.5.3 高圧水洗浄による空隙率の回復

図4.36は国道190号の山口県小野田市で行われた高圧水を用いた洗浄による排水性舗装の空隙率の回復状況を示したものである。ここでは5種類の骨材粒度分布をもつ排水性舗装を対象にして、施工してから約2年後に洗浄実験を行った。

まず、骨材粒径が大きい方が、空隙率が小さくなっているのに気が付く。これは、骨材粒径が大きくなると空隙の大きさも大きくなり、土砂等の閉塞物が詰まりやすくなったためと考えられる。また、空隙率は上層部、中層部、下層部の順に大きい。この傾向は施工直後より見られるもので、施工中にアスファルト分、砂分が下方に流動したためと考えられる。

さて、洗浄による排水性舗装の空隙率の変化であるが、上層部では0～8%程度の空隙率の回復が見られるが、中・下層部では必ずしも空隙率が回復するとは限らない。骨材粒径が大きい排水性舗装A、B、Dの場合は、空隙率はむしろ低下することもあった。一方、骨材粒径が小さい排水性舗装C、Eの場合は洗浄の効果は下層部でも見られ、空隙率は4～6%程度回復していた。



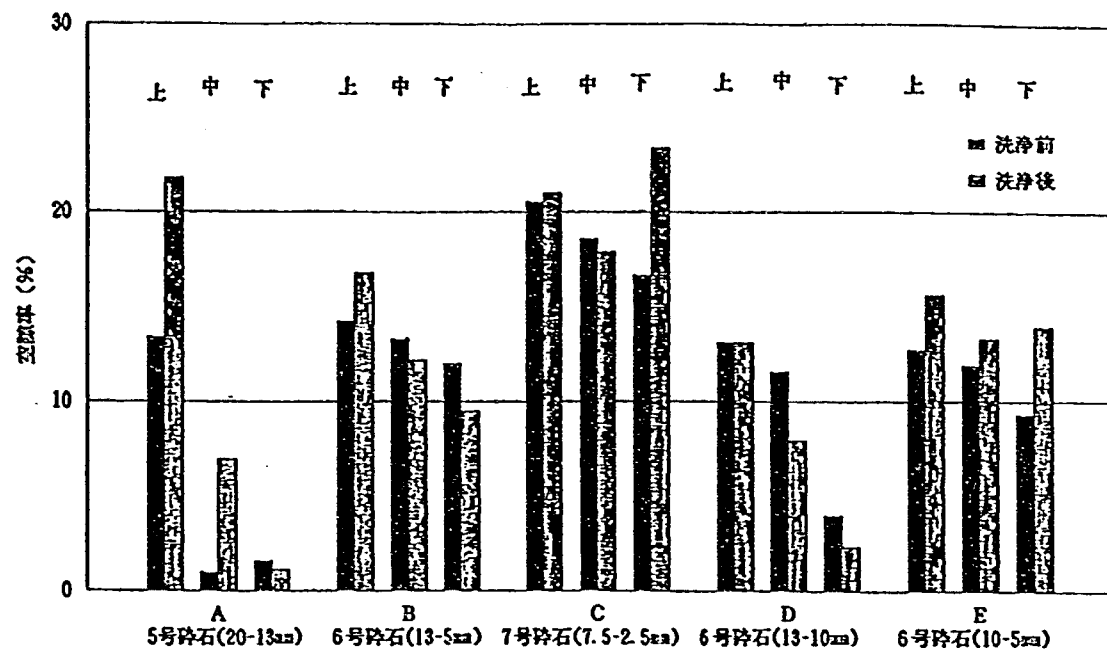


図 4. 36 洗浄前後の空隙率

第5章 多孔質弾性舗装の研究開発

第3章、第4章では排水性舗装について述べた。その騒音低減効果は約3～5 dBである。本章では排水性舗装に比べ相当大きな騒音低減効果を持つ多孔質弾性舗装について述べる。まず多孔質弾性舗装について説明する。次にこの舗装の自動車走行騒音低減効果を把握するために行った実験の概要を述べ、これら実験から得られたデータに基づき多孔質弾性舗装の騒音低減効果を分析・考察した。なお、ここでいう騒音低減効果とは、通常用いられる密粒舗装における自動車走行の騒音レベルから多孔質弾性舗装等における騒音レベルを差し引いたもののことである。

5.1 多孔質弾性舗装とは

多孔質弾性舗装は、道路舗装の3～5 cm程度の表層として通常よく使われる密粒度アスファルトの代わりに、古タイヤを粉砕して作られるゴム粒子をウレタン樹脂で固めて作られたゴム版を用いた舗装のことである。ゴム粒子の大きさ、形状には色々なものがあり、ここでは幅1～2 mm、長さ10～20mmのひじき状のゴム粒子を用いて多孔質弾性舗装の表層版を成型した（図5.1参照）。もともとこの舗装はスウェーデンの Nilsson らによって1970年代の中頃に考案され、1990年代の初期まで断続的に研究開発が行われたが、実用化には至っていない^{34)、36)、37)、38)}。一方、筆者らは上記のような多孔質弾性舗装版を用いて研究開発を行っており、その実用化のため騒音低減効果^{53) 54)}に加えて走行安全性、施工性、耐久性等に関する研究も実施している。

本舗装は、ゴム粒子を固めたものであるため多孔質であり、またゴムでできているため弾性を有している。これらの特徴のため、本舗装は通常の密粒舗装に比べ自動車走行騒音が格段に小さい。前者の特徴は排水性舗装と同じであるが、後者は排水性舗装にはないものである。これが本舗装の騒音低減効果を排水性舗装より大きくしている要因であると考えられる。これら3種類の舗装の路面性状を図5.2に示す。

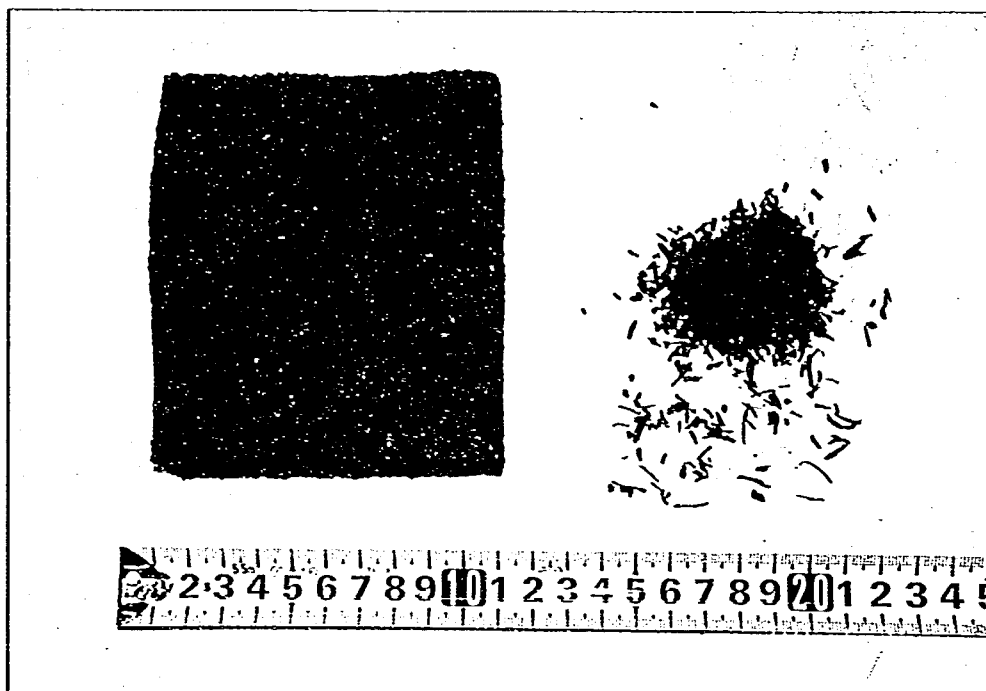


図 5. 1 多孔質弾性舗装のゴム粒子と成型版

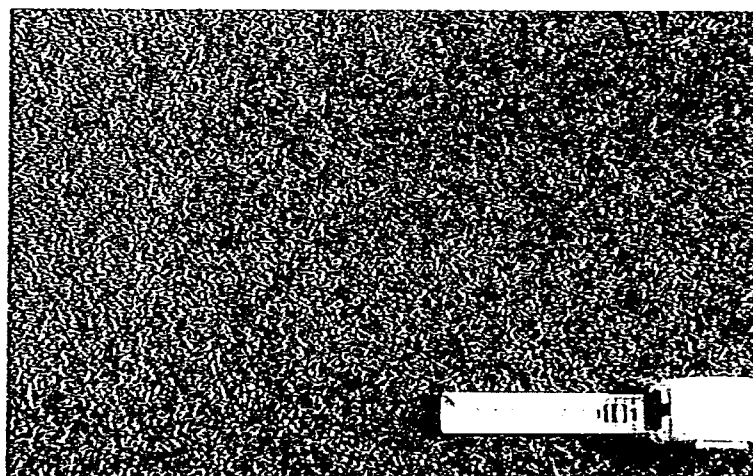
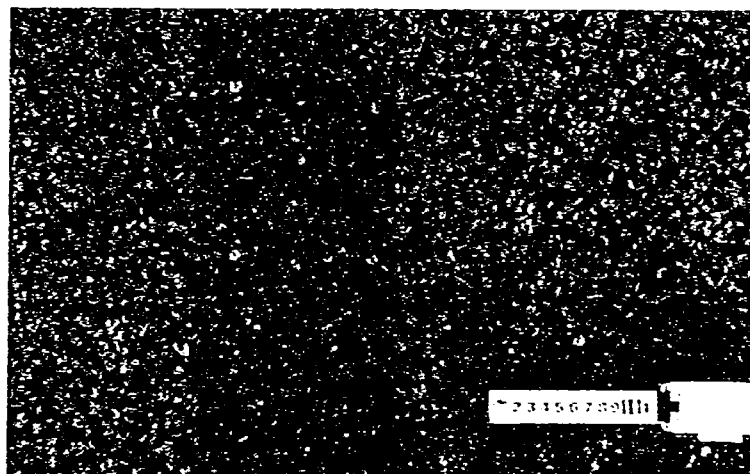
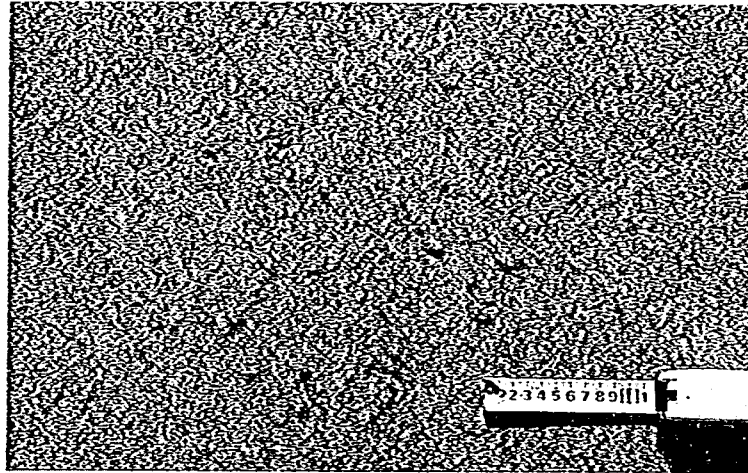


図 5. 2 各種舗装の路面性状（上から密粒舗装、排水性舗装、多孔質弾性舗装）

5. 2 多孔質弾性舗装の騒音低減効果

5. 2. 1 実験の概要

(1) 自動車走行騒音測定の実験概要

建設省土木研究所の試験走路に敷設された3種類の多孔質弾性舗装と密粒舗装の上を試験車を走行させ、その時の走行騒音を測定した。試験車は乗用車（排気量 1,980cc）及び大型貨物車（排気量 10,520cc、最大積載量 12 t）を用いた。これら試験車両の走行速度は、それぞれ 40 ～ 160km/h 及び 40 ～ 120km/h の範囲で 20km/h 刻みとし、定常走行と惰性走行を行った。なお、大型貨物車の積載条件は定積載とした。これら各条件で試験車を3回ずつ走行させ、測定された3個の騒音レベルを算術平均して各条件の測定値とした。

騒音測定用のマイクロフォンは自動車の走行中心線から側方に 5.6 m、地上 1.2 m に設置した。また、マイクロフォンを中心として前後 10 m の位置に走行速度計測用の赤外線センサーを設置した（図 5. 3 参照）。

一方、多孔質弾性舗装は前述のゴム粒子を厚さ 5 cm、縦横それぞれ 1 m のパネル状に工場で製作したものを、試験走路の基層上に接着剤で接着した。このとき本舗装の空隙率は、30 %、35 % 及び 40 % の3種類とした。次に、後述するように最も騒音低減効果の大きい空隙率 40 % の多孔質弾性舗装に関して、厚さを 2 cm、3 cm、4 cm、5 cm として、またゴム粒子の大きさを小さいもの（直径約 1.0mm、長さ約 10mm）と大きいもの（直径約 1.5mm、長さ約 15mm）を用いて同様の騒音測定を行った。

(2) 垂直入射吸音率の測定の概要

上記の各種類の多孔質弾性舗装のパネルから直径 98mm、28mm の供試体を各種類3組ずつ作成し、これら供試体を用いて音響管による2マイクロフォン法で音響インピーダンス比を測定し、垂直入射吸音率を求めた。

5. 2. 2 自動車走行騒音の測定結果

(1) 空隙率と減音効果

試験走路に敷設された3種類の空隙率 30 %、35 %、40 % の多孔質弾性舗装上で試験車を定常走行させたときの騒音のパワーレベルを図 5. 4 に示す。このときの表層の厚さは

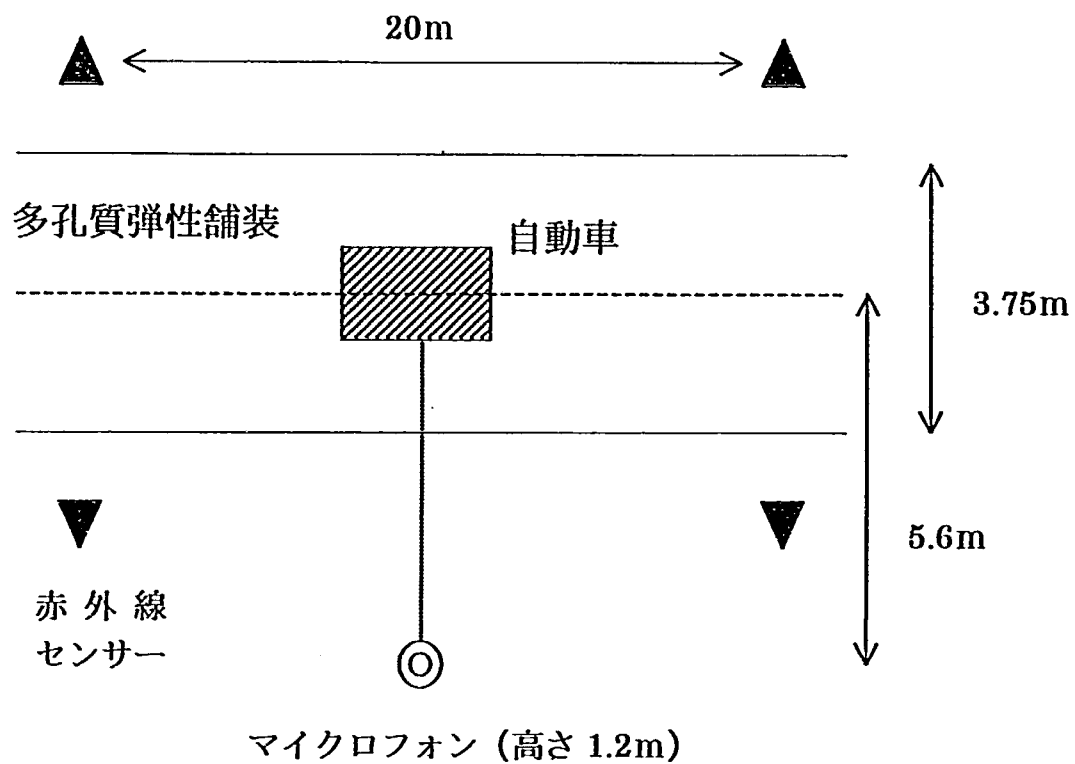


図5.3 自動車走行騒音の測定機器の配置

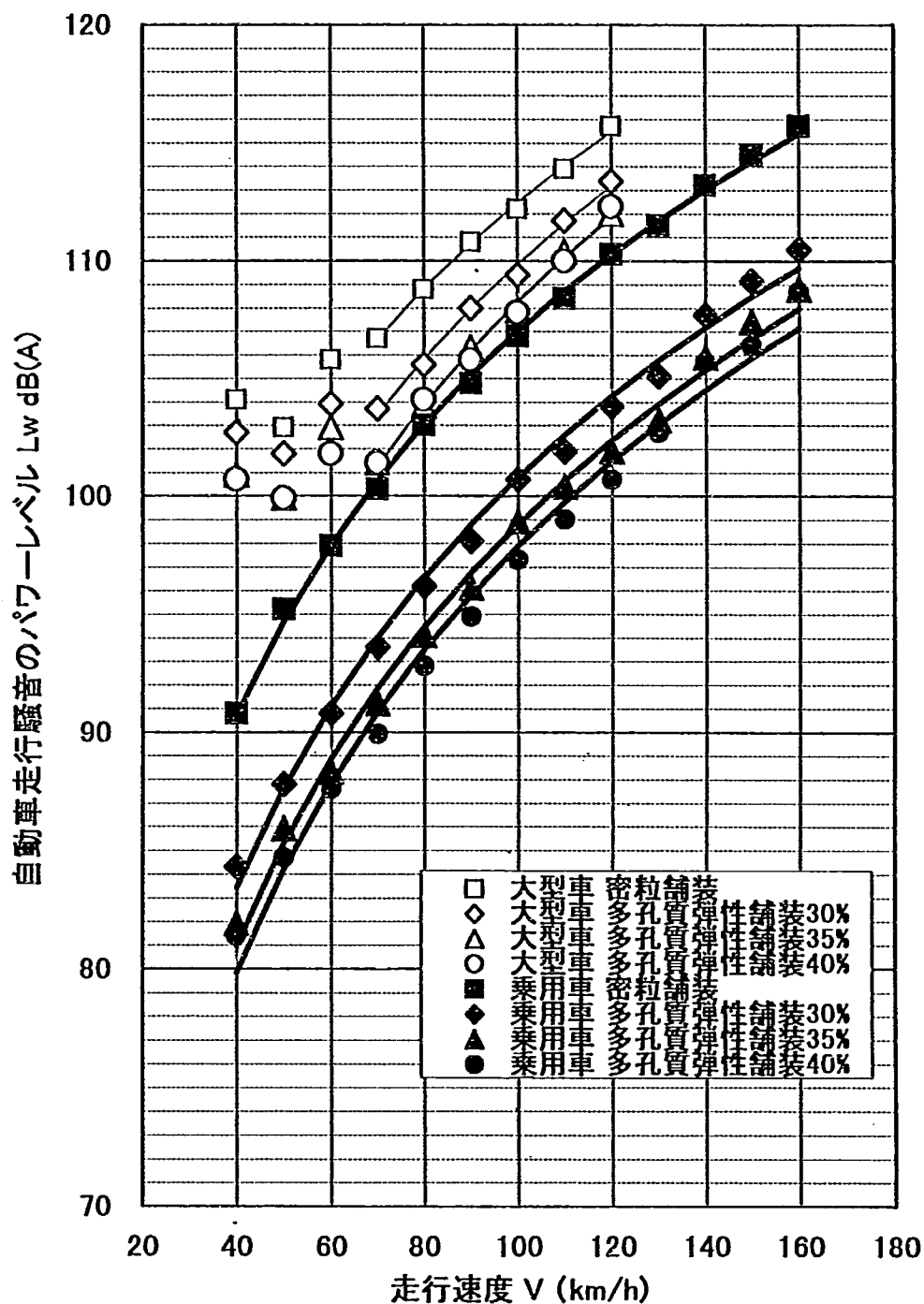


図5.4 車種別、舗装種類別自動車走行騒音のパワーレベルと走行速度の関係

(注1)図中の曲線は、パワーレベルと走行速度の回帰曲線。

(注2)大型貨物車のギヤ位置は、40km/hのとき4速、50・60km/hのとき5速、70km/h以上のとき6速。

(注3)大型貨物車の回帰分析は70km/h以上で行った。

5 cm であり、ゴム粒子は小さいものを用いた。なお、ここでは図 5. 3 に示すマイクロフォンの直前の地点を中心とする 1 秒間の走行距離の区間における自動車走行騒音を用いて有限長自乗積分法によりパワーレベルを求めた。乗用車の場合、走行速度が 40 ～ 160km/h の範囲で、空隙率 30 % の多孔質弾性舗装は約 5 ～ 7 dB の騒音低減効果を示した。空隙率 35 %、40 % のものは約 7 ～ 10dB の減音効果を示した。

一方、大型貨物車の場合は、走行速度が 40 ～ 120km/h の範囲で、空隙率 30 % の多孔質弾性舗装は約 1 ～ 3 dB、空隙率 35 %、40 % のものは約 3 ～ 6 dB の減音効果を示した。

両車種とも空隙率が高いほど大きな騒音低減効果を示す。空隙率 30 % と 35 % の減音効果の差は大きい、空隙率 35 % と 40 % の差はあまり大きくない。また、大型貨物車に比べ乗用車の方が騒音低減効果は大きい。これは、多孔質弾性舗装の騒音低減効果が主として発揮されるタイヤ路面騒音の自動車走行騒音全体に占める割合が、大型貨物車より乗用車の方が大きいためである。

ここで、減音効果が最も大きい空隙率 40 % の多孔質弾性舗装のパワーレベル L_w と走行速度 V の回帰式を乗用車及び大型貨物車について示すと、それぞれ次のとおりである。

$$L_w = 7.2 + 45.3 \log_{10} V \quad (5. 1)$$

$$L_w = 17.8 + 45.2 \log_{10} V \quad (5. 2)$$

このとき得られた密粒舗装のパワーレベルと走行速度の回帰式は、乗用車及び大型貨物車についてそれぞれ次のとおりである。

$$L_w = 25.1 + 41.0 \log_{10} V \quad (5. 3)$$

$$L_w = 37.0 + 37.7 \log_{10} V \quad (5. 4)$$

これら回帰式の速度項の係数を比べると、密粒舗装では約 38 ～ 41、多孔質弾性舗装では約 45 と、パワーレベルの速度依存性は多孔質弾性舗装の方が大きくなっている。

なお、大型貨物車の場合、走行速度が 40km/h から 50km/h、60km/h から 70km/h へ上昇するときパワーレベルが低下しているが、これは上記の速度変化の時にトランスミッション

ギアが変わったためである。

(2) 舗装厚・ゴム粒子の大きさと減音効果

上記の通り空隙率が 40 %の多孔質弾性舗装が最も大きい騒音低減効果を示したので、空隙率を 40 %として、表層の厚さを 2～5 cm まで 1 cm 刻みとし、またゴム粒子の大きさを大と小として同様の騒音測定を行った。このときの自動車走行騒音の低減効果を示したものが図 5. 5、図 5. 6 である。これによると乗用車の場合、速度が 40～120km/h の定常走行の場合、厚さ 3 cm、ゴム粒子小の多孔質弾性舗装が最も騒音低減効果が大きく約 16～19dB であった。次に減音効果が大きかったのは厚さ 2 cm、ゴム粒子小のもので約 13～17dB であった。減音効果が最も小さかったのは、厚さ 2 cm、ゴム粒子大のもので約 8～9 dB であった。減音効果の速度依存性を見ると、小さいゴム粒子の多孔質弾性舗装においては、60km/h のとき最大となった減音効果はその後速度の上昇とともに緩やかに低下している。全般的にゴム粒子が小さい方が減音効果は大きかった。また、表層版の厚さは必ずしも厚い方が減音効果が大きいわけではなく、ゴム粒子が小さい場合はむしろ厚さが 3 cm、2 cm の方が 4 cm、5 cm よりも大きい減音効果を示した。

一方、大型貨物車の場合も、走行速度が 40～120km/h の範囲で、厚さ 3 cm、ゴム粒子小の多孔質弾性舗装が最も騒音低減効果が大きく約 6～10dB であった。次に減音効果が大きかったのは厚さ 2 cm、ゴム粒子小のもので約 5～8 dB であった。減音効果が最も小さかったのは、厚さ 2 cm、ゴム粒子大のもので約 2～4 dB であった。減音効果の速度依存性は、どの仕様の多孔質弾性舗装の場合でも 40km/h から 80km/h までは速度の上昇とともに減音効果は大きくなり、その後 120km/h までは速度の上昇とともに効果は低下する。乗用車の場合もそうであるが、排水性舗装のように減音効果が速度上昇とともに単調に増加するといった明確な傾向を示さない。大型車の場合も、全般的にゴム粒子が小さい方が減音効果は大きかった。また、表層版の厚さも、ゴム粒子が小さい場合は厚さが 3 cm、2 cm の方が 4 cm、5 cm よりも大きい減音効果を示した。

(3) 惰性走行時の騒音低減効果

これ以降は上述のとおり騒音低減効果が最も大きい多孔質弾性舗装、すなわち空隙率 40 %、厚さ 3 cm、ゴム粒子小のものを中心にして述べる。

惰性走行時の騒音低減効果を乗用車についてみると、走行速度が 40～120km/h の範囲

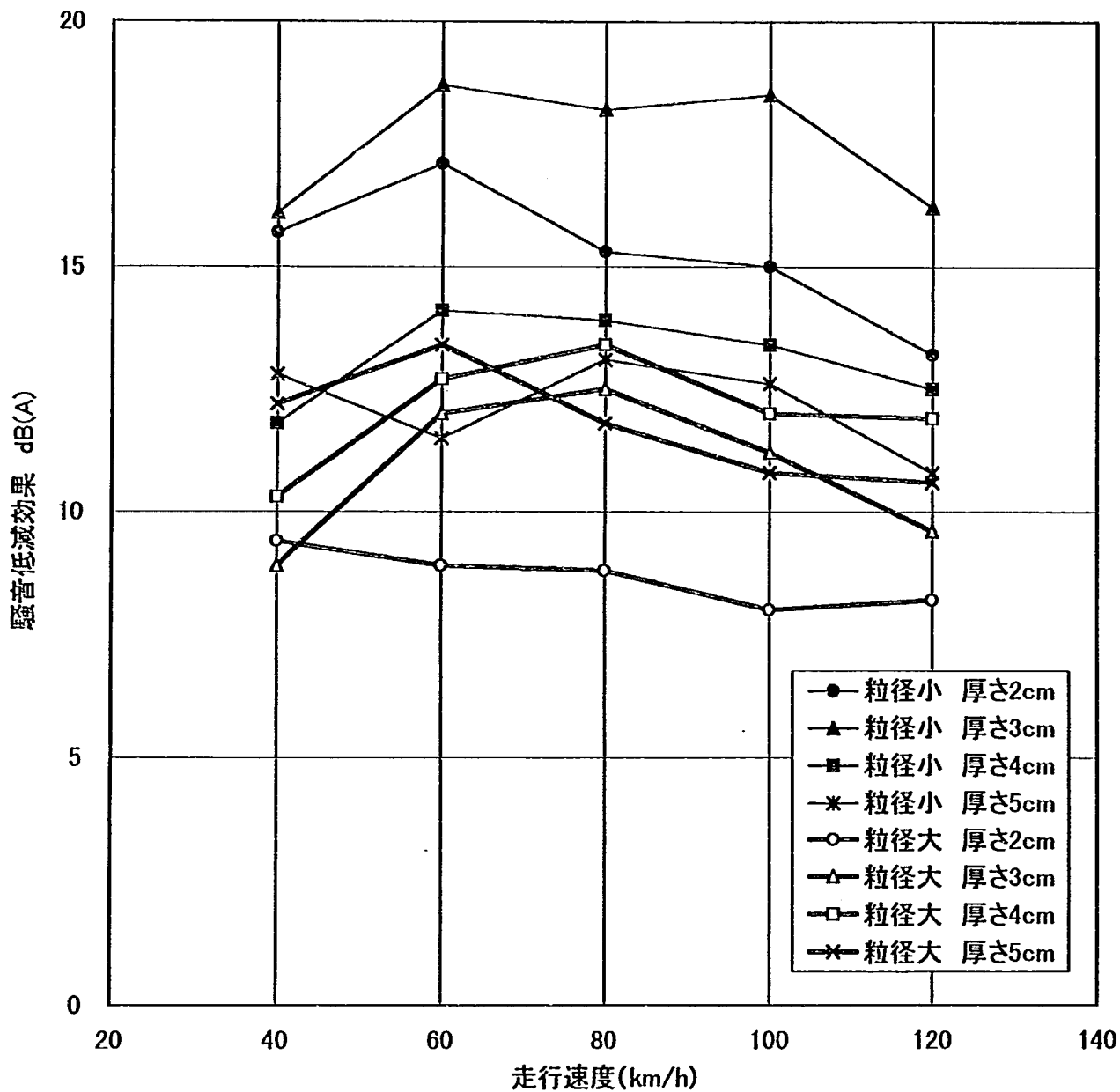


図5.5 ゴム粒子径別、表層厚さ別多孔質弾性舗装の騒音低減効果
(乗用車、定常走行)

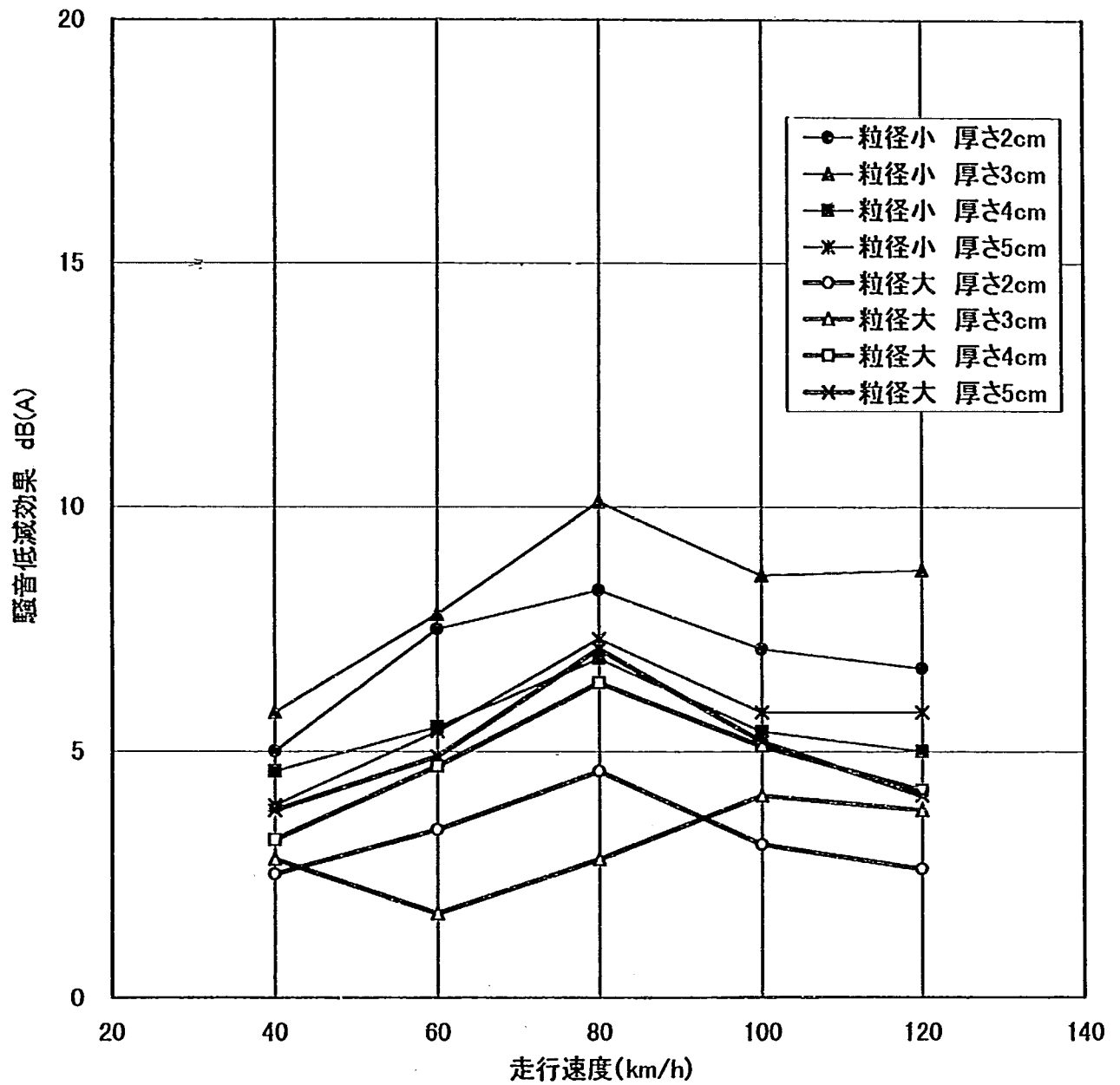


図5. 6 ゴム粒子径別、表層厚さ別多孔質弾性舗装の騒音低減効果
(大型貨物車、定常走行)

では速度が 40km/h のとき約 19dB で、60km/h のとき約 20dB と最大になり、その後速度の上昇とともに急激に減音効果が小さくなり 120km/h では約 8 dB となった（図 5. 7 参照）。これは、密粒舗装におけるパワーレベルが走行速度の上昇に伴い大きくなるよりも、速度上昇に伴う多孔質弾性舗装におけるパワーレベルの増大の方が大きいためである。この傾向は定常走行時にもみられたが、惰性走行時にはより顕著にみられる。

一方、大型貨物車では走行速度が 40 ～ 120km/h の範囲で約 6 ～ 12dB の騒音低減効果を示した。速度が 40 ～ 60km/h では約 11dB で、80km/h のとき最大の約 12dB となり、その後 120km/h の約 6 dB まで低下する（図 5. 8 参照）。定常走行時と比べると 80km/h までの減音効果は 11 ～ 12dB と大きい状態が続くが、80km/h を超える範囲での減音効果は急激に低下し、定常走行時と同程度となる。これは、定常走行時の 40 ～ 80km/h の範囲では自動車走行騒音全体に占める駆動機関音の割合が大きい、惰性走行時には駆動機関音はなくなりタイヤ路面音だけになるためである。

（４）タイヤ路面音と駆動機関音

惰性走行騒音をタイヤ路面音とし、定常走行騒音から惰性走行騒音を差し引いたものを駆動機関音として、定常走行騒音におけるこれら音源別の寄与率を大型貨物車について示したものが図 5. 9 である。密粒舗装では走行速度が 40km/h のとき自動車走行騒音全体の 78 % を駆動機関音が占めていたが、60km/h では駆動機関音の寄与（48 %）とタイヤ路面音の寄与（52 %）がほぼ同じ大きさになった。さらに、80km/h、100km/h となると逆にタイヤ路面音の寄与が大きくなり 72 ～ 74 % を占めた。一方、多孔質弾性舗装では 40km/h のとき駆動機関音が 94 % を占めていたが、60km/h で 75 %、80km/h で 55 % に減少し、さらに 100km/h では 30 % にまで減少した。このときのギヤ位置は、走行速度が 40km/h のとき 4 速、60km/h のとき 5 速、80km/h 及び 100km/h のとき 6 速であった。多孔質弾性舗装の場合も密粒舗装同様に走行速度が上昇すると駆動機関音の寄与が低下するが、同じ走行速度における駆動機関音の自動車走行騒音全体に占める割合は多孔質弾性舗装の方が密粒舗装より常に大きい。これは、多孔質弾性舗装が主としてタイヤ路面音の発生を抑制しているからである。しかし、このときタイヤ路面音ほどではないが、駆動機関音も路面に吸音され低減している。

一方、乗用車についてこれらの関係を見ると（図 5. 10 参照）、密粒舗装では走行速度が 40km/h、60km/h のときは駆動機関音がそれぞれ 25 %、15 % と少し寄与があるが、

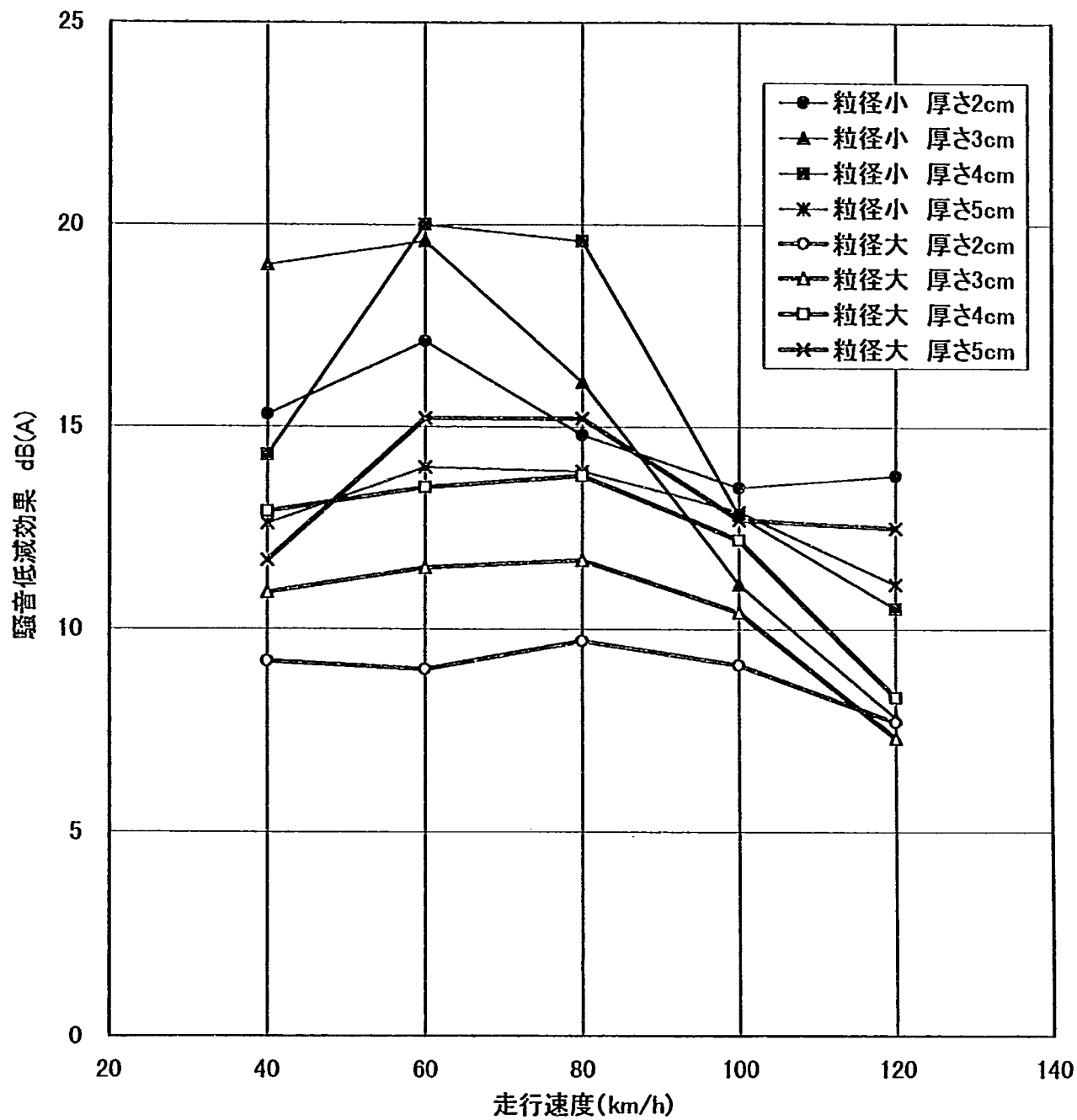


図5. 7 ゴム粒子径別、表層厚さ別多孔質弾性舗装の騒音低減効果
(乗用車、惰性走行)

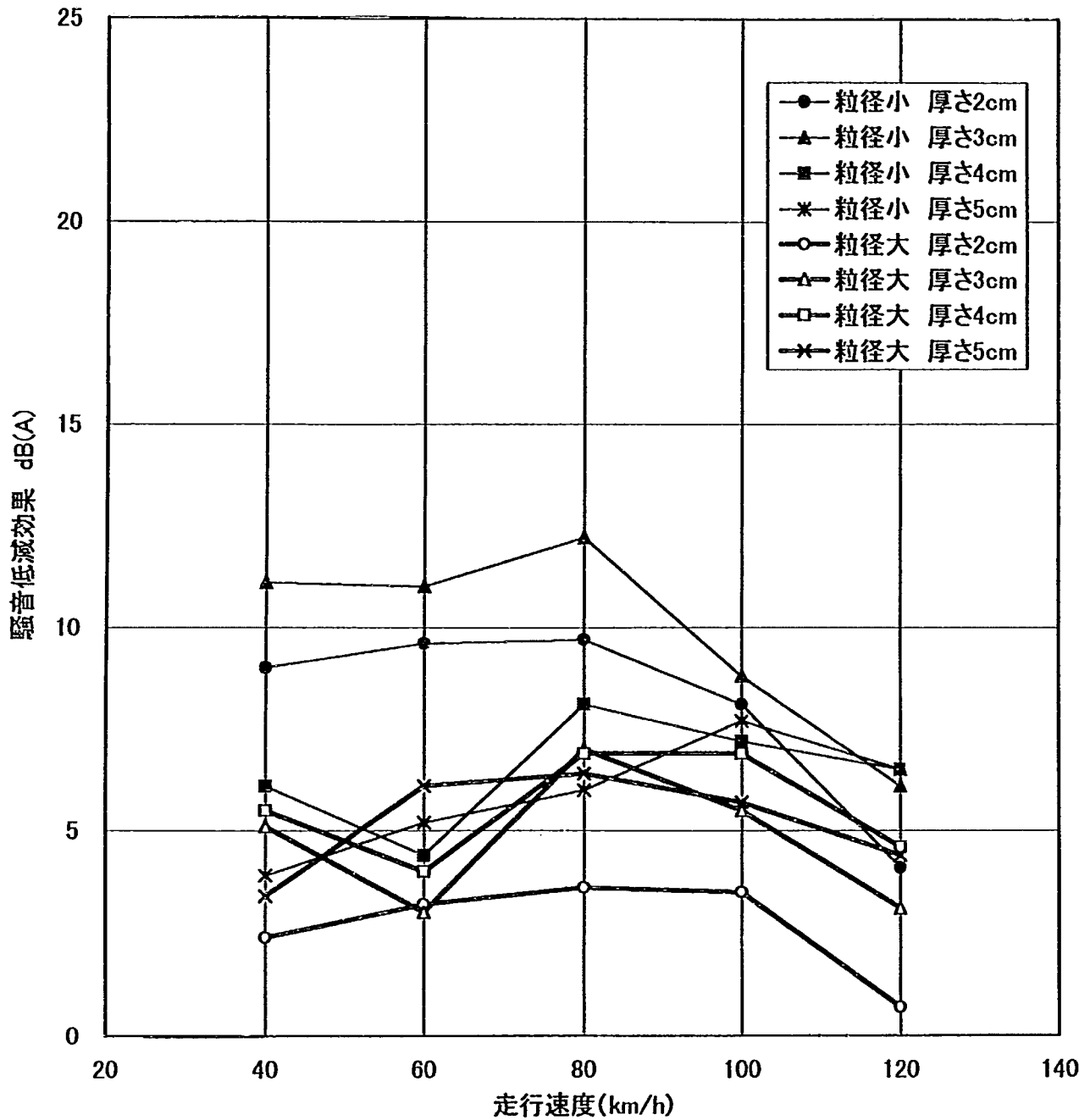


図5. 8 ゴム粒子径別、表層厚さ別多孔質弾性舗装の騒音低減効果
 (大型貨物車、惰性走行)

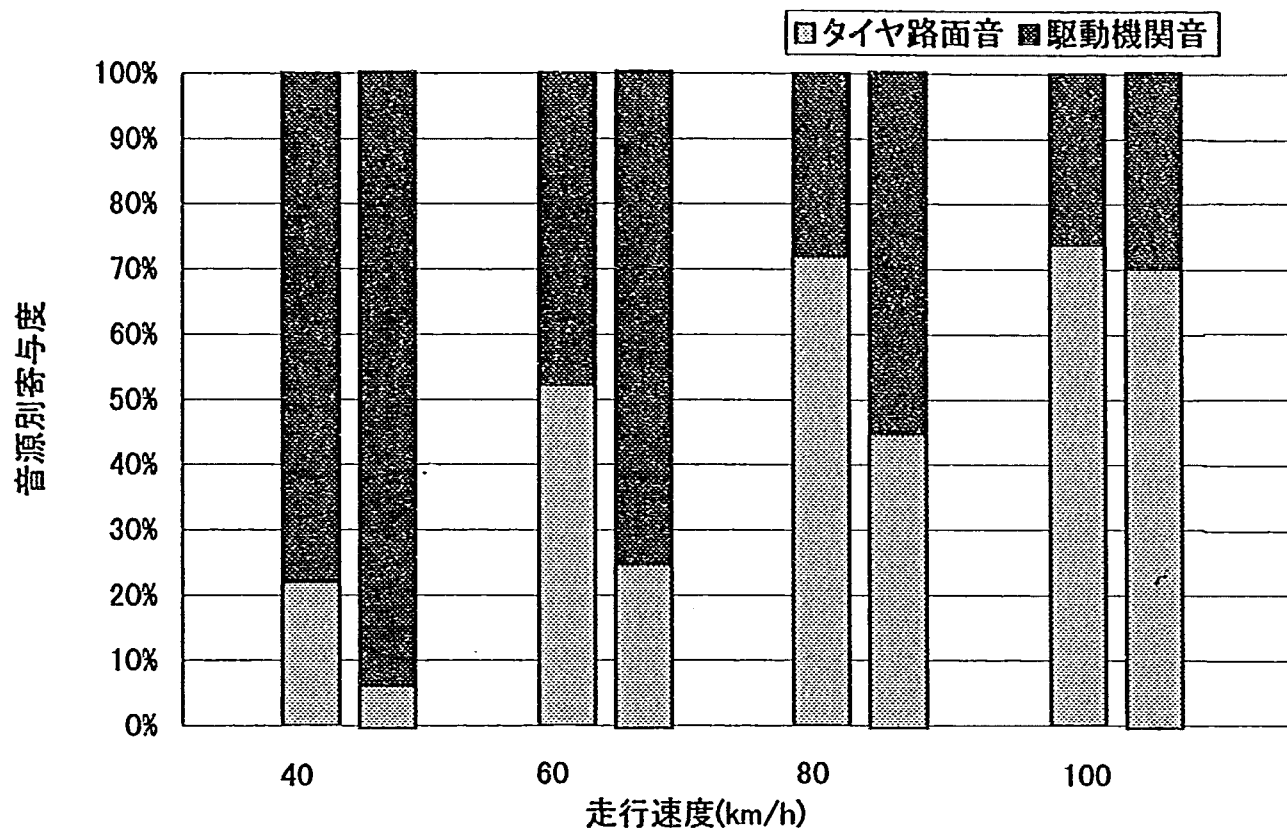


図5. 9 自動車走行騒音の音源別寄与度(大型貨物車)
 注) 左は密粒舗装、右は多孔質弾性舗装の場合。

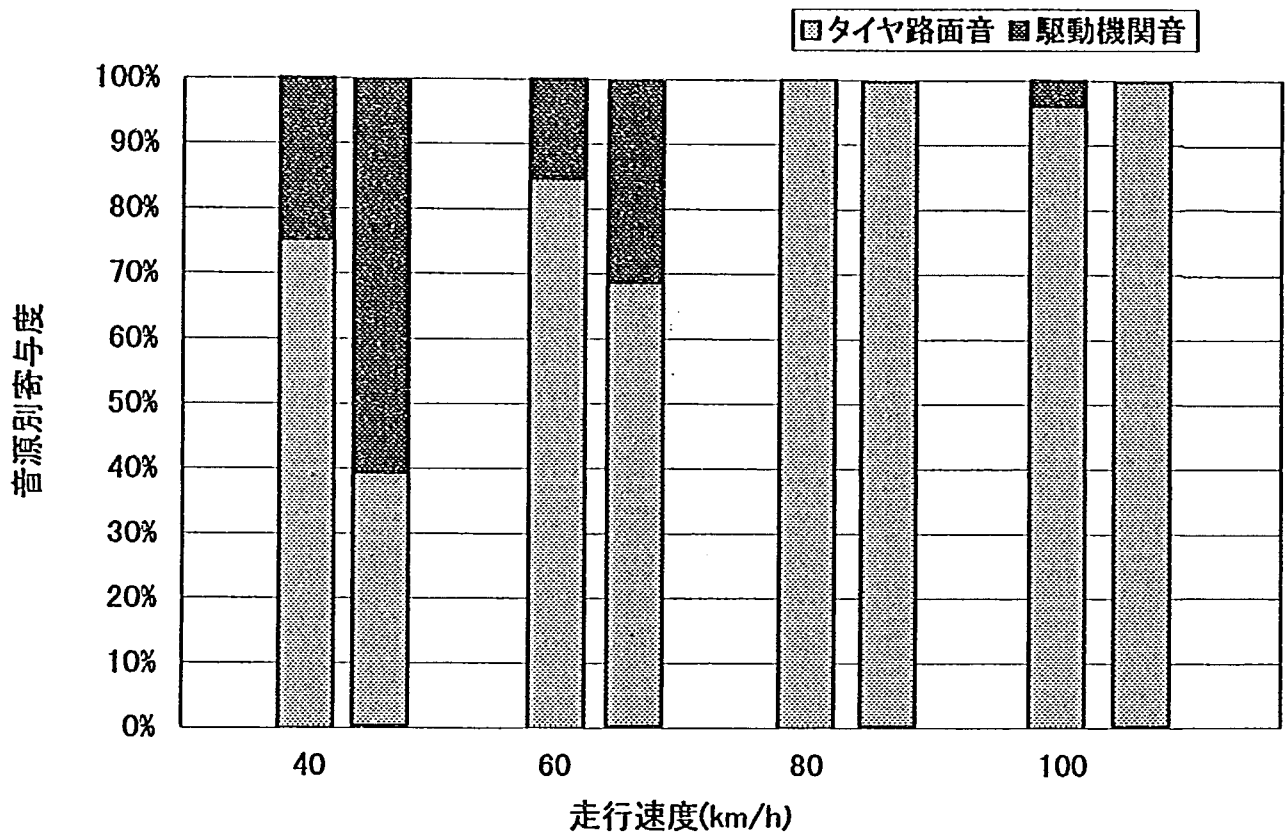


図5. 10 自動車走行騒音の音源別寄与度(乗用車)
 注)左は密粒舗装、右は多孔質弾性舗装の場合。

80km/h 以上の走行速度ではほとんどすべてがタイヤ路面音の寄与である。一方、多孔質弾性舗装では主としてタイヤ路面音が低減するため駆動機関音の割合が上がるが、それでも 40km/h のとき 61 %、60km/h のとき 31 %の寄与となる程度で、80km/h 以上ではほとんどすべてがタイヤ路面音の寄与となる。

(5) 周波数分析の結果

多孔質弾性舗装の騒音低減効果を周波数別にみると、大型貨物車の定常走行時には走行速度によって異なるが、100Hz で 20 ～ 22dB の低減、500Hz で 10 ～ 12dB、1 kHz で 5 ～ 11dB、2 kHz で 5 ～ 7 dB の低減であり、800 ～ 1,500Hz の周波数帯域を除いて 40 ～ 100km/h の各走行速度でほぼ同様の低減量であった（図 5. 1 1 参照）。しかし、800 ～ 1,500Hz の周波数帯域では 40km/h のとき 4 ～ 7 dB、60km/h のとき 6 ～ 10dB の低減量であるのに対し、80km/h では 11 ～ 13dB、100km/h のとき 9 ～ 11dB と前二者より大きな低減量を示した。5. 2. 2 (2) で述べたようにオーバーオールでの走行速度別の減音効果の違いは、上記のとおり 800 ～ 1,500Hz の周波数帯域での減音量の違いのためである。多孔質弾性舗装が排水性舗装より大きな騒音低減効果を示すのは、両者の周波数別の減音特性から次のように説明できる。排水性舗装は通常 800Hz 以上で減音効果を示し、800Hz で 3 dB、1 kHz 以上で 6 ～ 7 dB の減音量⁵²⁾となるのに対し、多孔質弾性舗装は上述のとおり 1 kHz 以下でも大きな減音量を有し、特に排水性舗装が減音効果をもたない 600Hz 以下の周波数帯域で 10 ～ 22dB と非常に大きな減音量を示すためである。

また、大型貨物車の惰性走行時にも周波数別の減音効果には定常走行時と同様の傾向がみられたが、卓越している周波数帯域 800 ～ 1,500Hz では 10 ～ 15dB と定常走行時の 4 ～ 13dB より大きな減音量となっているため、オーバーオールでの減音効果は惰性走行時の方が大きい（図 5. 1 2 参照）。

一方、乗用車の定常走行時における騒音低減効果をみると、100Hz で 18 ～ 27dB、500Hz で 12 ～ 19dB、1 kHz で 17 ～ 21dB、2 kHz で 15 ～ 20dB の低減量であった（図 5. 1 3 参照）。特に乗用車の定常走行騒音の中で卓越した周波数帯域である 800 ～ 2,000Hz で 15 ～ 21dB と非常に大きな低減量を示すため、オーバーオールでも 5. 2. 2 (2) で述べたように 16 ～ 19dB と非常に大きな減音効果となったのである。

また、惰性走行時には、100Hz で -4 ～ 26dB、500Hz で 2 ～ 22dB、1 kHz で 14 ～ 21dB、2 kHz で 18 ～ 22dB の減音量を示した（図 5. 1 4 参照）。1 kHz 以上では各走行速度と

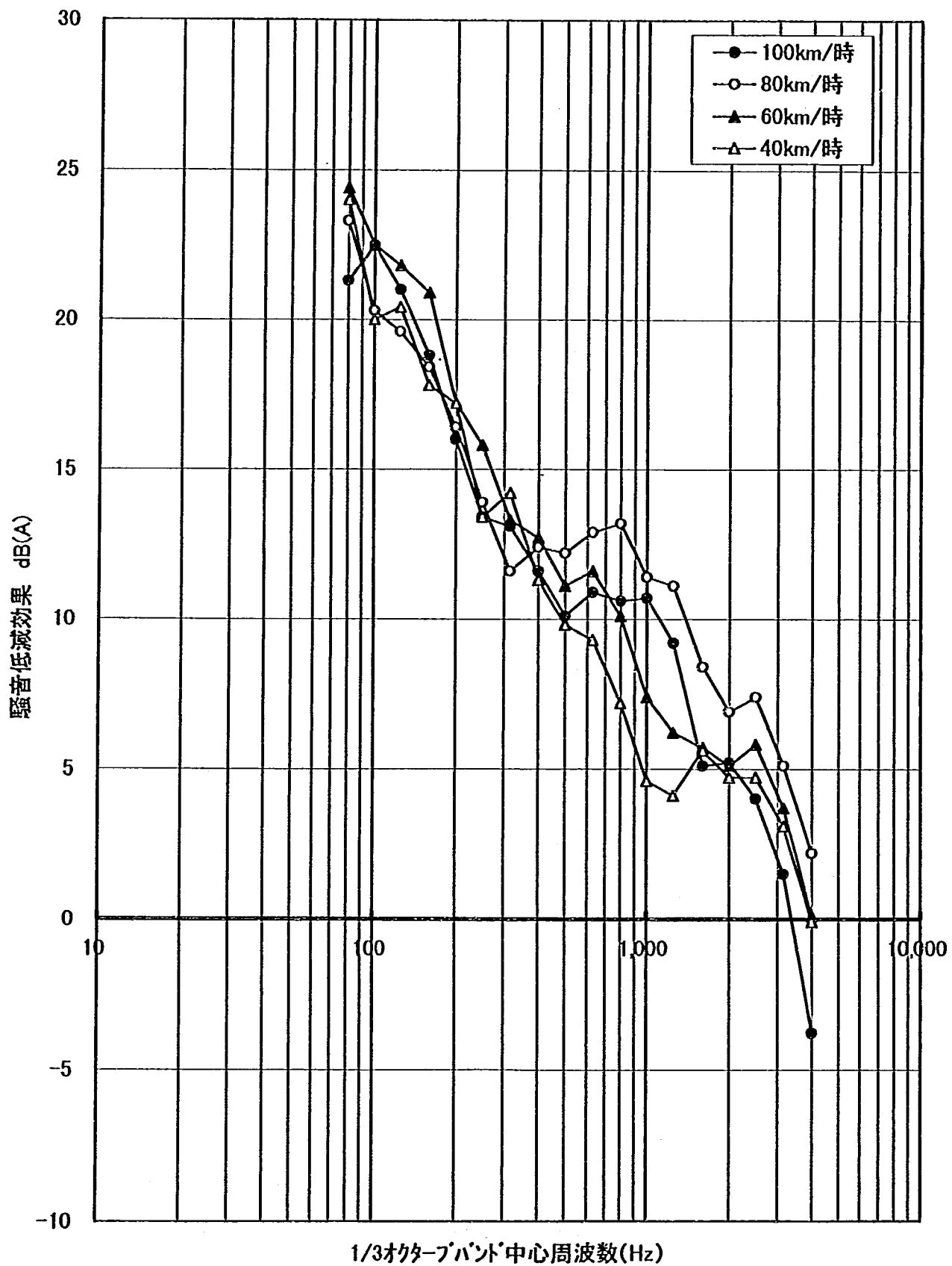


図 5. 1 1 多孔質弾性舗装(厚さ3cm、粒径小)の周波数別騒音低減効果
(大型貨物車、定常走行)

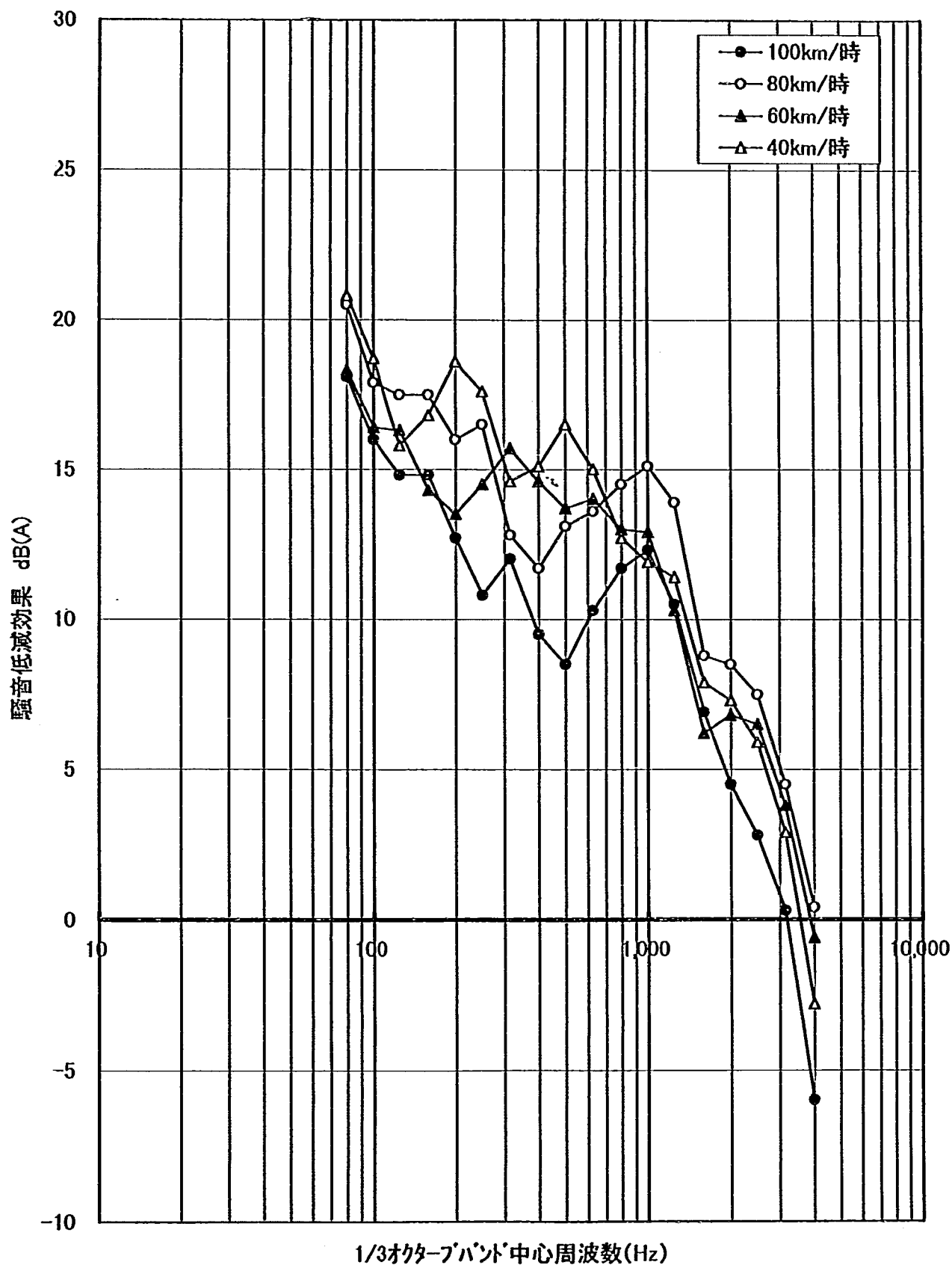


図5. 12 多孔質弾性舗装(厚さ3cm、粒子小)の周波数別騒音低減効果
(大型貨物車、惰性走行)

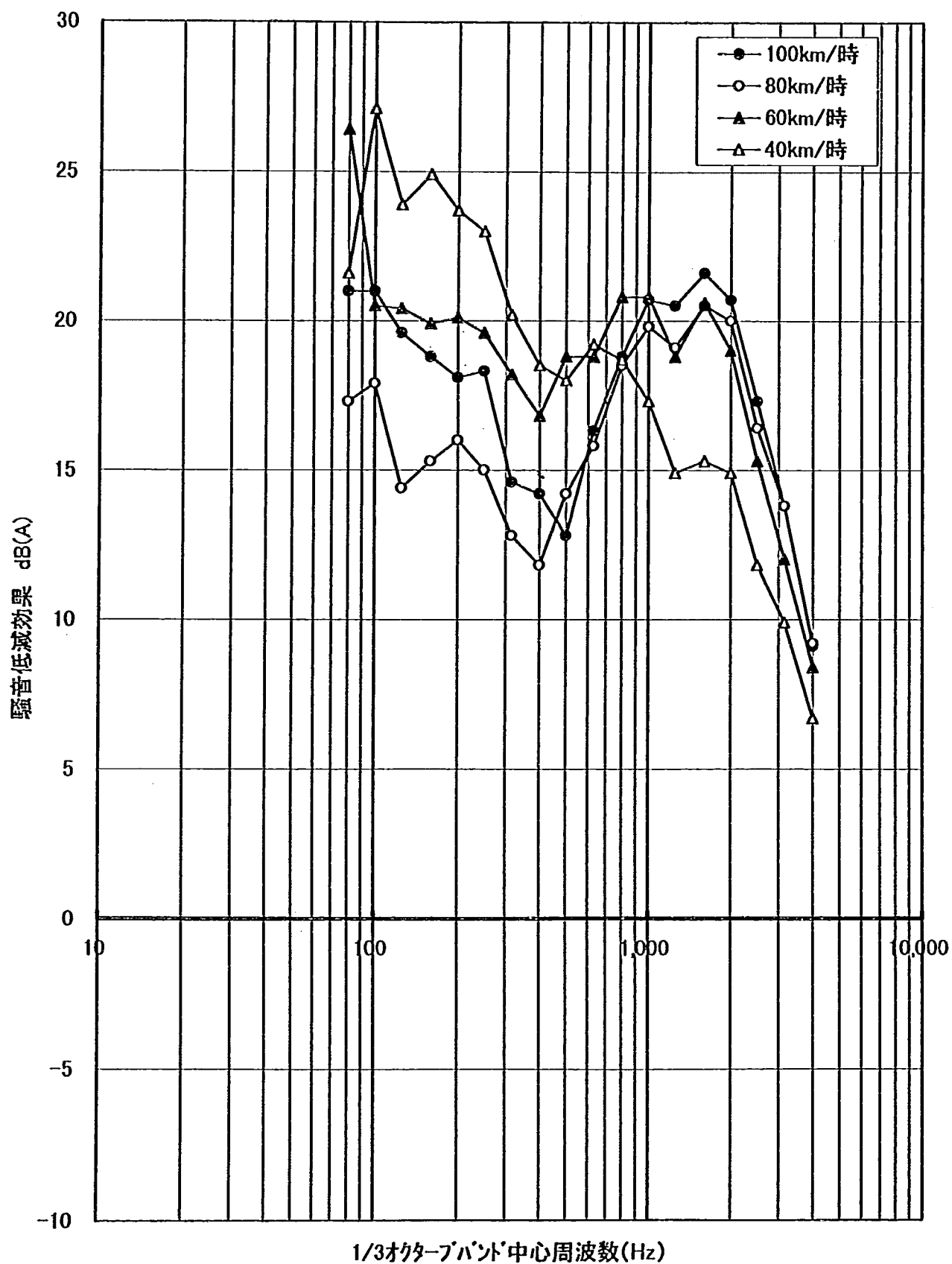


図5. 13 多孔質弾性舗装(厚さ3cm、粒子小)の周波数別騒音低減効果
(乗用車、定常走行)

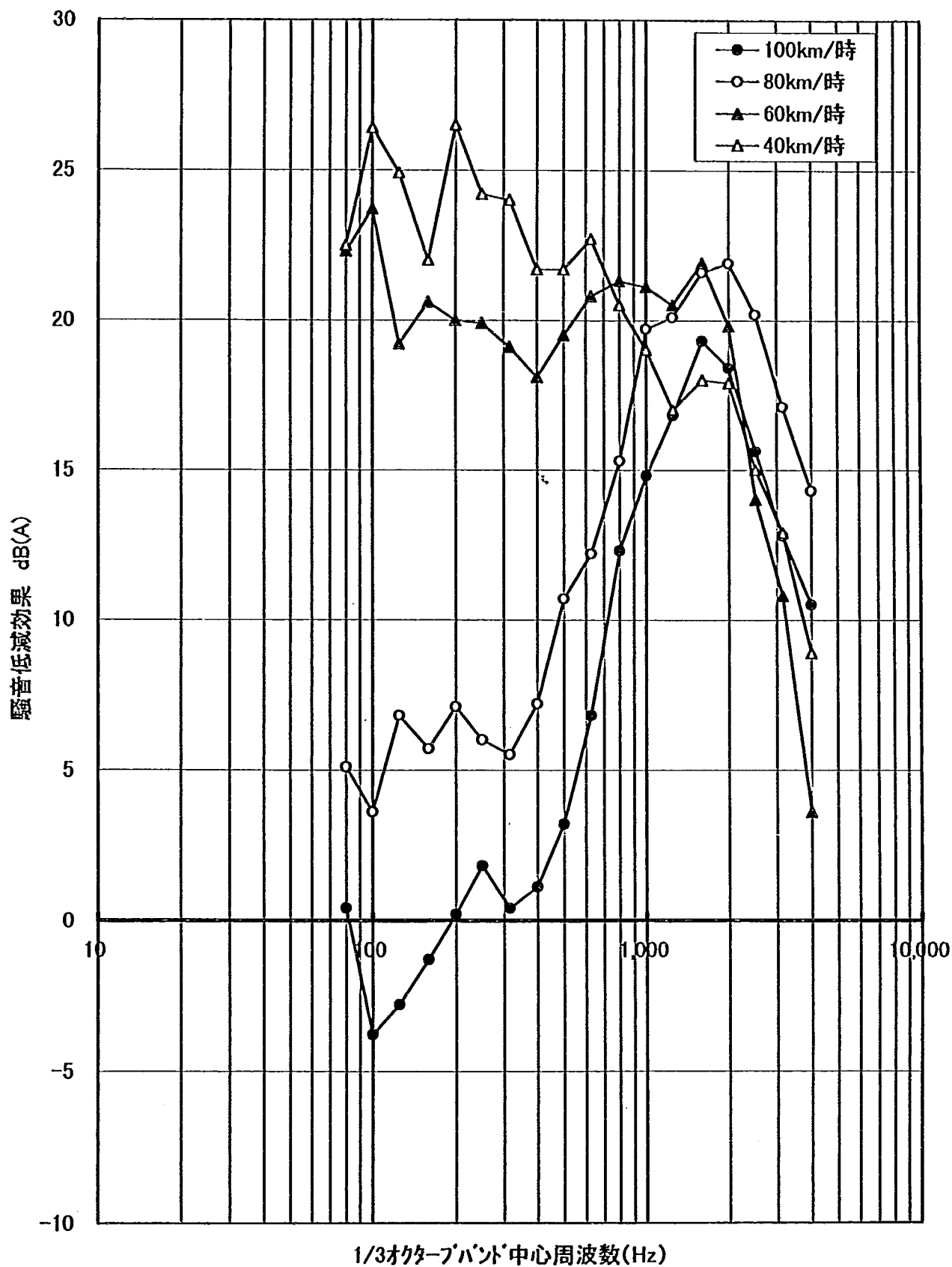


図5. 14 多孔質弾性舗装(厚さ3cm、粒子小)の周波数別騒音低減効果
(乗用車、惰性走行)

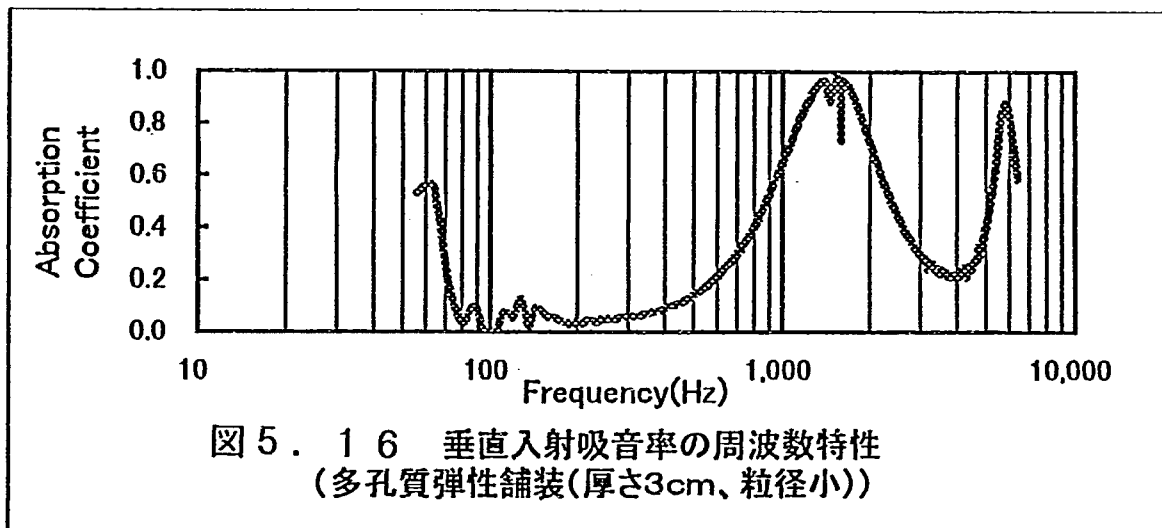
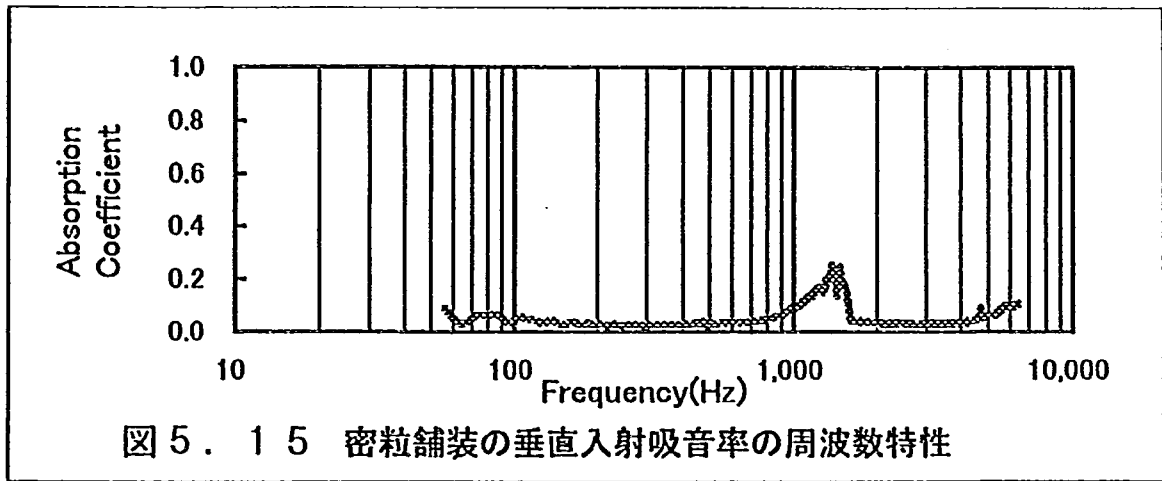
も大きな減音量を示すが、1 kHz 未満の周波数帯域では 80km/h 以上の速度で、特に 100km/h 以上の速度で減音量が小さくなっている。この結果、オーバーオールでは 40 ～ 60km/h で 19dB と大きな減音効果が現れたが、80km/h 以上では走行速度の上昇とともに減音効果は小さくなっていく。

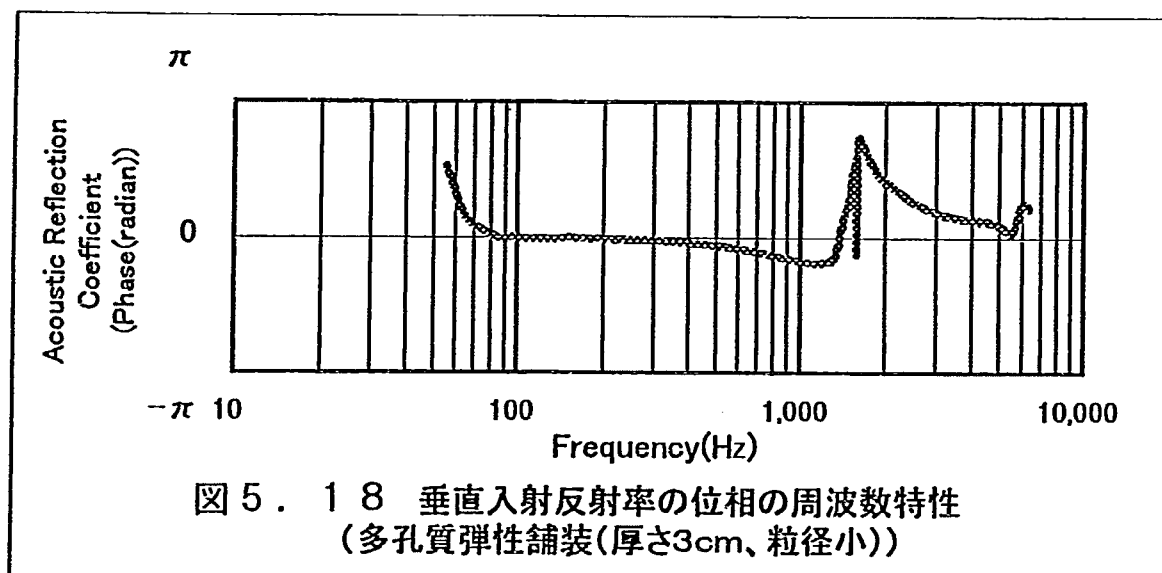
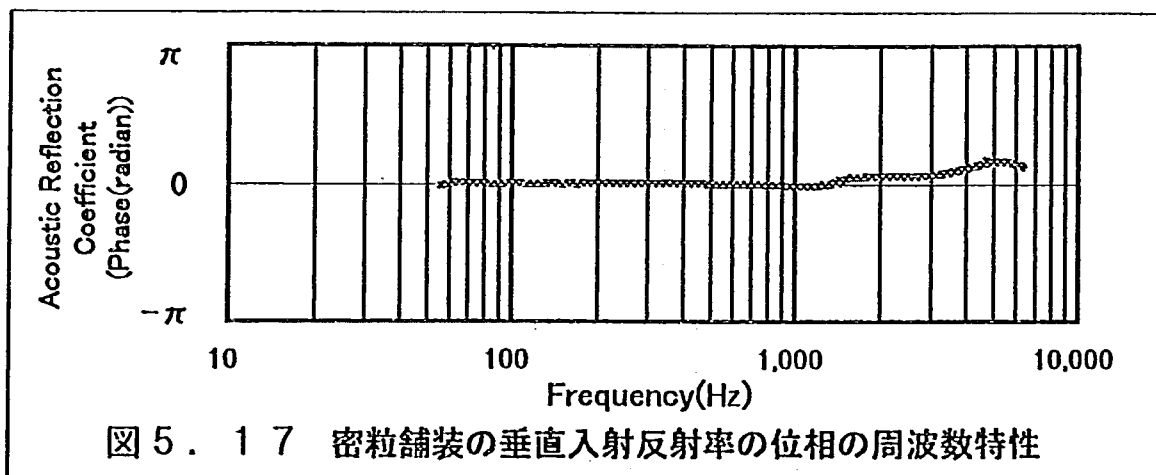
5. 2. 3 垂直入射吸音率の測定結果

密粒舗装と 7 種類の多孔質弾性舗装からそれぞれ 3 組ずつの供試体を作り、これらを用いて 2 マイクロフォン管内法でまず音響インピーダンス比を求め、これから垂直入射吸音率を算出した。各種類の 3 組の供試体はそれぞれ比較的よく吸音特性が一致しており、これらを平均したものを各舗装の吸音特性とした。ここでは、垂直入射吸音率と反射率の位相について述べる。

密粒舗装の垂直入射吸音率は 1,600Hz の周波数帯域で約 0.2 になるのを除き、ほとんどすべての周波数帯域で 0 に近い値であった（図 5. 15 参照）。一方、多孔質弾性舗装では厚さによって吸音率のピークを示す周波数帯域が異なるが、概ね 800 ～ 2,000Hz の周波数帯域で約 0.9 のピーク値を示す。さらにこれらの約 4 倍の周波数帯域で第 1 ピークより低いピークを示す。また、第 1 ピークの周波数は、厚さ 2 cm のときは約 1,800Hz、厚さ 3 cm では約 1,500Hz（図 5. 16 参照）、厚さ 4 cm では約 1,000Hz、厚さ 5 cm では約 850Hz であった。このように舗装厚さが増加するとともに、吸音率のピークを示す周波数帯域が低下している。これらの特徴から多孔質弾性舗装の吸音メカニズムは、共鳴器型のもと考えられる。

次に、反射率の位相をみると、密粒舗装では位相のずれはどの周波数帯域でもほとんど見られない（図 5. 17 参照）。これは、音が密粒舗装の表面で反射していることを示している。一方、多孔質弾性舗装では位相が、吸音率がピークを示す 1,500Hz 付近で -0.2π から 0.8π までずれている（図 5. 18 参照）。すなわち、1,500Hz 付近では位相が約 π 、つまり約 1/2 波長ずれているため干渉により減音し、その結果吸音率が約 0.9 と大きくなっていると考えられる。





5. 2. 4 まとめ

多孔質弾性舗装に関して各種の実験、測定を行った結果、この舗装に関して明らかになった低騒音舗装としての特性は以下のとおりである。

- ・空隙率 40 %、厚さ 3 cm、ゴム粒子小の多孔質弾性舗装が各種の仕様の中で最も大きな騒音低減効果を有し、定常走行時の速度が 40 ~ 120km/h の範囲で、乗用車の場合約 16 ~ 19dB、大型貨物車の場合約 6 ~ 10dB と非常に大きな減音効果があった。
- ・減音効果の速度依存性に関しては、走行速度が 40km/h から 60km/h ないし 80km/h まで上昇するとき効果は大きくなり、その後 120km/h までは速度の上昇とともに効果は低下する。排水性舗装のように減音効果が速度上昇とともに単調に増加するといった明確な傾向を示さない。
- ・多孔質弾性舗装におけるタイヤ路面音と駆動機関音の関係を大型貨物車についてみると、走行速度が 40km/h から 100km/h の範囲で駆動機関音の寄与率が 94 % から 30 % に減少した（密粒舗装では 78 % から 26 % に減少した。）。一方、乗用車についてこの関係をみると、同じ速度の範囲で駆動機関音の寄与率が 61 % から 0 % に減少した（密粒舗装では 25 % から 0 % に減少した。）。
- ・多孔質弾性舗装の騒音低減効果を周波数別にみると、大型貨物車の定常走行時には走行速度によって異なるが、100Hz で 20 ~ 22dB の低減、500Hz で 10 ~ 12dB、1 kHz で 5 ~ 11dB、2 kHz で 5 ~ 7 dB の低減であった。一方、乗用車の定常走行時の場合は、100Hz で 18 ~ 27dB、500Hz で 12 ~ 19dB、1 kHz で 17 ~ 21dB、2 kHz で 15 ~ 20dB の低減量であった。このように排水性舗装が減音効果を持たない 600Hz 以下の周波数帯域でも多孔質弾性舗装が大きい減音量を示すことが、この舗装の減音効果が排水性舗装よりも大きい要因となっている。
- ・多孔質弾性舗装では厚さによって垂直入射吸音率のピークを示す周波数帯域が異なるが、概ね 800 ~ 2,000Hz の周波数帯域で約 0.9 のピーク値を示す。この特徴から多孔質弾性舗装の吸音メカニズムは、共鳴器型のものと考えられる

以上のとおり多孔質弾性舗装に関して、音源における騒音低減効果はかなり明らかになってきたが、騒音の伝搬過程における減音効果はまだ解明されていない。上記のように吸音率も大きな値を有しており、伝搬過程の減音効果もある程度期待できると思われる。

一方では、本舗装の実用化に向けての課題である走行安全性、施工性、耐久性等が研究されているところである。これら課題が解決され、大きな減音効果を持ち適用範囲が広い

この多孔質弾性舗装が騒音対策として用いられるのを期待する次第である。

5.3 多孔質弾性舗装のその他の課題

5.3.1 舗装面の滑り摩擦抵抗

自動車の走行安全性を確保するために道路舗装が備えるべき条件に滑り摩擦抵抗がある。これは、自動車が走行中に制動をかけたときに道路構造令に規定されている制動距離内で停止するのに十分大きい滑り摩擦係数を舗装面が示すことが必要であるということである。通常、路面の滑り摩擦係数は乾燥時より湿潤時の方が小さいため、湿潤時の滑り摩擦係数が十分に大きいか確認する必要がある。そこで、図5.19に示す滑り摩擦測定車を使って多孔質弾性舗装と密粒舗装の湿潤時の滑り摩擦係数を走行速度が60～140km/hの範囲で測定した。

測定結果から得られた道路進行方向への縦滑り摩擦係数を図5.20に示す。これによると多孔質弾性舗装の縦滑り摩擦係数は約0.4～0.5で、走行速度80km/h未満では密粒舗装より小さいが、80km/h以上ではそれより大きくなっている。この滑り摩擦係数を用いて道路構造令に規定する制動停止距離を計算したものを図5.21に示す。これによると多孔質弾性舗装の制動停止距離は道路構造令に規定している値よりも小さく、規定を満足している。また、自動車の車線変更時などに必要となる進行方向と垂直な横滑り摩擦係数も同様に測定結果から求め、図5.22に示す。多孔質弾性舗装の横滑り摩擦係数は横滑り角や走行速度によっても異なるが、0.28～0.67の範囲にあり、道路構造令で基準値として想定されている0.11～0.15より大きく、規定を満足している。従って、道路舗装としてゴムを用いた新しい舗装である多孔質弾性舗装は、十分大きな滑り摩擦抵抗を示し、自動車の走行安全性に支障を来すものではないと考えられる。

5.3.2 耐火性

多孔質弾性舗装はゴムでできており、その耐火性を確認しておく必要がある。そこで、表5.1に示す屋内実験と屋外実験を行い、通常の密粒舗装と多孔質弾性舗装の耐火性を比較、検討した。

屋内実験ではガソリン相当の高揮発性燃料（*n*-ヘプタン）を用いた場合、密粒舗装で

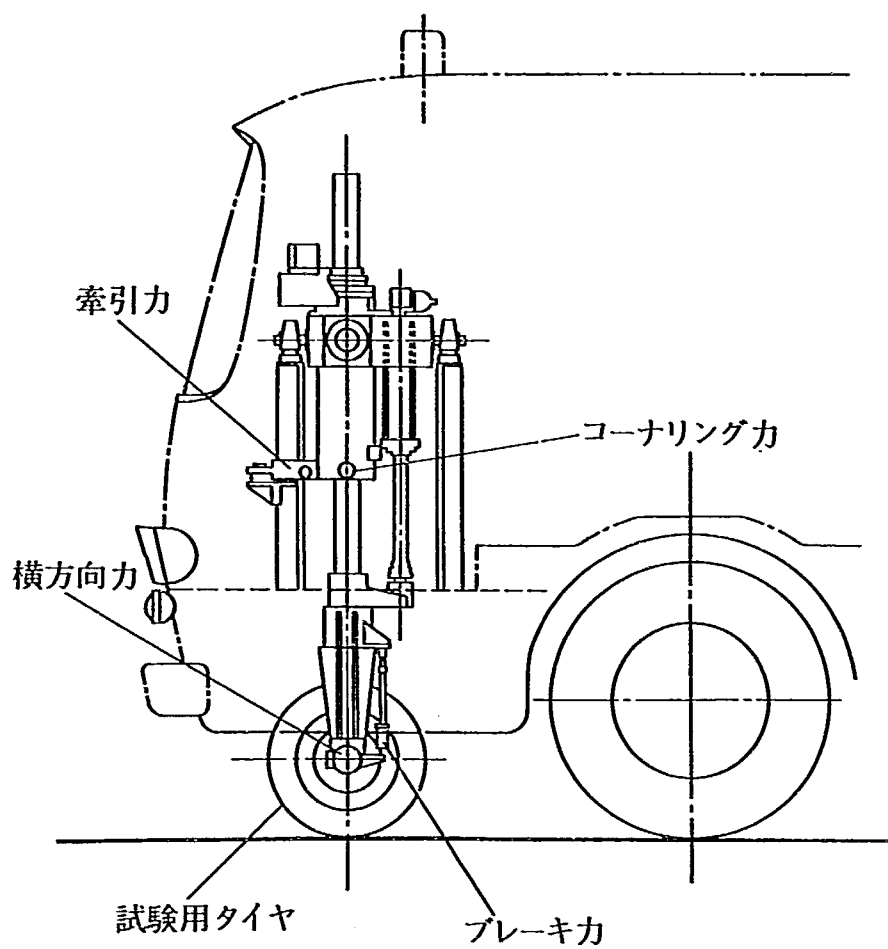


図 5. 19 すべり摩擦測定車

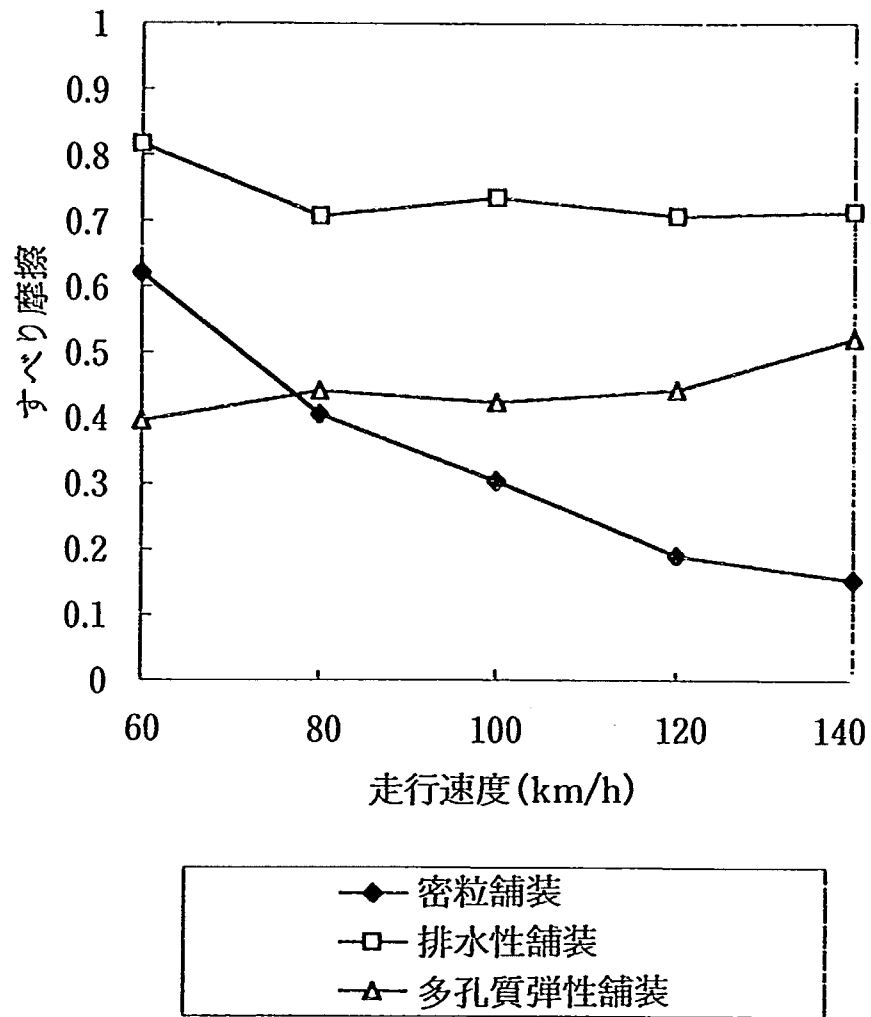


図 5. 20 縦すべり摩擦係数

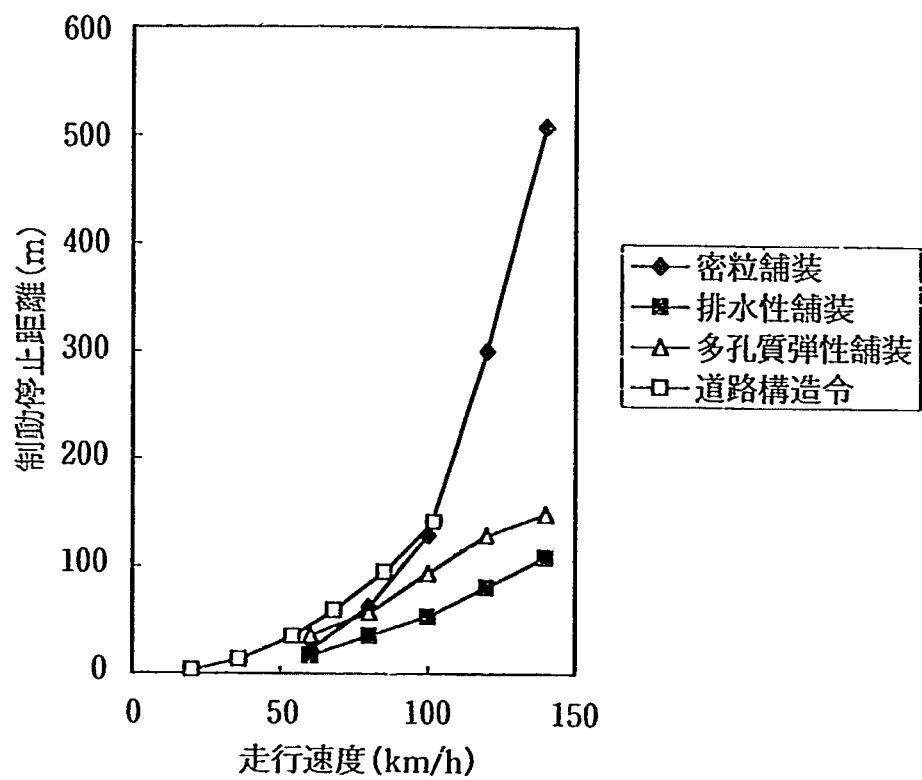


圖 5. 21 制動停止距離

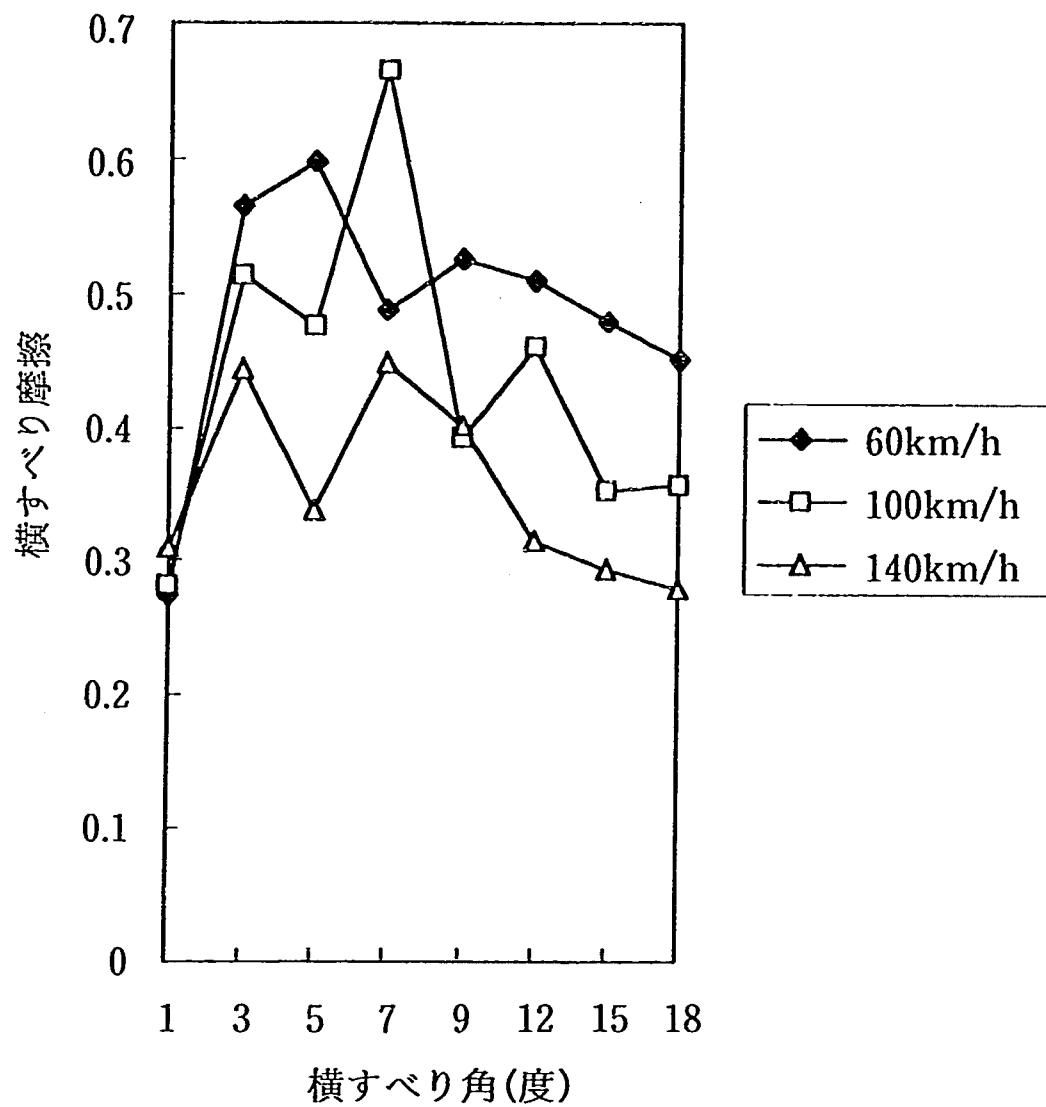


図 5.22 横すべり摩擦係数

表 5.1 耐火性実験の概要

実験種別	舗装体種類	骨材・空隙率	燃料種類	実験方法
屋内実験	密粒舗装	骨材粒径13～5mm、 空隙率3%	高揮発性燃料： n-ヘプタン (ガソリン相 当) 低揮発性燃料： n-デカン (軽油相当)	大きさ50*50cm、厚さ5cm の供試体の中央において 直径30cmの範囲に500mLの 燃料を一様に散布する。 燃料が供試体に浸透した ら（密粒舗装には浸透し ない）、供試体の中央に パイロットランプにより 着火する。
	排水性舗 装	骨材粒径13～5mm、 空隙率20%		
	多孔質弾 性舗装	古タイヤをひじき 状に細断したもの 空隙率35%		
屋外実験	密粒舗装	屋内実験と同様	ガソリン 軽油	広さ5*5m、厚さ5cmの範囲 に実験用の舗装を施工す る。その中央部に直径3m の範囲に36Lの燃料を一様 に散布する。燃料が供試 体に浸透したら（密粒舗 装の場合は浸透しな い）、供試体の中央にパ イロットランプにより着 火する。
	排水性舗 装			
	多孔質弾 性舗装			

は火種を近づけると一瞬にして燃料散布領域に火炎が広がったが、舗装材料は燃えなかった。一方、多孔質弾性舗装でも、火種を近づけると燃料散布領域に火炎が広がった。その後、舗装材料のゴムも燃えだし、燃料散布領域外に火炎が伝播した。このときの火炎の伝播速度は約 4 cm/分で極めて遅い。なお、放射温度計により測定された燃焼領域の中心部の舗装表面温度は密粒舗装、多孔質弾性舗装ともに約 400 ° Cであった。

屋内実験では軽油を散布した場合には、密粒舗装、多孔質弾性舗装とも火種を近づけても引火しなかったが、ガソリンの場合には双方ともすぐに引火した。密粒舗装の場合は、舗装表面に流れ広がったガソリンに引火し、その流れ広がった範囲で激しく燃え、炎は約 2.5 ～ 3 mの高さにまで上がった。このとき、舗装表面にある燃料が直接燃えるため炎の色は赤く、また不完全燃焼が起こり黒煙が発生した。しかし、舗装材料は燃焼しなかった（図 5. 2 3 参照）。一方、多孔質弾性舗装の場合は、燃料を散布した範囲以外には燃料は広がらず、散布した範囲内の舗装の空隙に燃料が浸透し、その範囲内で気化した燃料が舗装体内から空隙を通り、それに引火した。このとき、舗装材料のゴムが燃えたため炎の色は赤く、多くの黒煙が発生した。炎の高さは密粒舗装より低く、約 1 ～ 1.5 mであった。また、火炎は多孔質弾性舗装上を伝播していったが、その速度は非常に緩慢であった（図 5. 2 4 参照）。

上述のとおり、密粒舗装と多孔質弾性舗装上に燃料が散布され、それに引火した状況を比較すると、前者では散布された燃料が舗装上を流れ広がり、その燃焼範囲は大きくなり、火炎の高さも高い。一方、後者では燃焼範囲は燃料が散布された範囲に限られ（その後、燃焼範囲は徐々に拡大するが、その速度は遅い）、火炎の高さは低い。従って、耐火性については多孔質弾性舗装の方が密粒舗装よりも安全であると考えられる。

5. 3. 3 耐久性

道路舗装は、その寿命中に自動車は何百万台も通ると考えると、この通過交通に対する耐久性を備えている必要がある。そこで、車両の走行による多孔質弾性舗装の摩耗、変形を調べるために、ラベリング試験及びカンタブロ試験を行った。これと比較するために、密粒舗装についても同時にこれらの試験を行った。また、上記の試験は屋内試験であるが、屋外の舗装走行実験所に多孔質弾性舗装を敷設して、試験車走行による耐久試験も実施した。

路面の摩耗度を調べるラベリング試験では、より条件が厳しいスパイクタイヤを用いて



図 5. 23 密粒舗装の燃焼状況

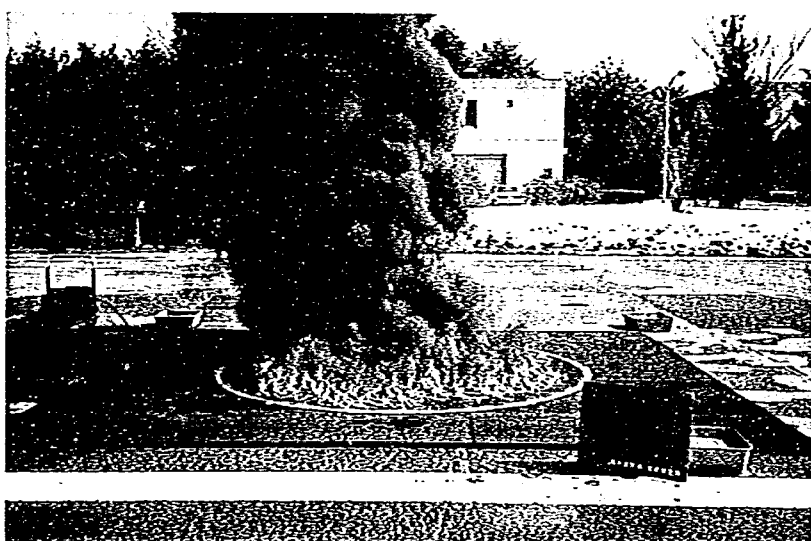


図 5. 24 多孔質弾性舗装の燃焼状況

約 3 万回走行させた。その結果、密粒舗装では轍の中央部付近が約 1 cm と深く摩耗していた。一方、多孔質弾性舗装ではほとんど摩耗もなく路面は平坦であった。また、舗装材料の衝撃に対する安定性を調べるカンタプロ試験の結果は、密粒舗装では重量で約 10 ～ 20 % の材料が飛散していたが、多孔質弾性舗装では材料の飛散はほとんど見られずその安定性を示していた。一方、舗装走行実験所における試験車走行試験では、2 軸の総重量 14 t の大型車を約 25 万回走行させたところ、多孔質弾性舗装の路面はほとんど摩耗されておらず、平坦であった。

以上のとおり、屋内実験や屋外の実験施設による試験ではあるが、今のところ多孔質弾性舗装の耐久性に関して否定的な結果はでていない。今後は、実際の道路でこの舗装の耐久性を確認する必要がある。

第6章 総 括

6. 1 研究成果のまとめ

・排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの定量化

排水性舗装の騒音低減効果に関する報告は色々なされているが、この舗装の騒音低減効果を騒音予測の場面で扱うには、排水性舗装上を走行する自動車騒音のパワーレベルを与えることが必要である。本研究では次の二つの方法で排水性舗装の騒音パワーレベルを定量化した。

一つ目の方法では、施工後1年程度以内の排水性舗装とそれに隣接する密粒舗装の道路区間で試験車を走行させ、その時の騒音の測定結果から得られた両舗装における走行速度別の騒音パワーレベルの差を、通常の密粒舗装に対する排水性舗装の騒音パワーレベルの補正量（騒音低減効果）として車種別に次の式で示した。なお、この式は施工後1年程度以内の初期の排水性舗装に適用できる。また、密粒舗装の騒音パワーレベルは、ASJ Model 1998に示されているものを用いることとする。

$$\text{大型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = -3.1 \log_{10} V + 2.5 \quad (3.10)$$

$$\text{小型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = -3.8 \log_{10} V + 3.8 \quad (3.11)$$

ここで、

$\Delta L_{wA,dr}$: 密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベル補正量 (dB)

V : 走行速度 (km/h)

大型車類と小型車類では、排水性舗装が主として減音効果を発揮するタイヤ路面騒音の自動車走行騒音全体に占める割合が異なるため、両車種で排水性舗装の減音効果に違いがあると考えられたが、今回得られた騒音データからは両車種の減音効果にあまり差異は見られなかった。そこで、簡単のため、排水性舗装のパワーレベルの補正量は車種別に設定せずに、両者を合わせて次式のとおり設定することとした。

$$\Delta L_{wA,dr} = -3.5 \log_{10} V + 3.2 \quad (3.12)$$

二つ目の方法では、一般道路及び自動車専用道路に施工された排水性舗装の区間で自動車走行騒音の測定を数多く行った。ここでは、試験車ではなく、単独走行する一般車両の騒音を測定した。この数多くの騒音測定データから排水性舗装の騒音パワーレベルを直接求めた。次に車種別のパワーレベル式を示す。

$$\text{大型車類} \quad L_{wA,dr} = 20 \log_{10} V + 68.3 \quad (3.15)$$

$$\text{小型車類} \quad L_{wA,dr} = 20 \log_{10} V + 62.1 \quad (3.16)$$

これら二つの方法で求めた排水性舗装の騒音パワーレベルを比較してみると、走行速度が 40km/h における排水性舗装の減音量は前者が約 2.4dB であるのに対し、後者ではほとんど 0 dB となる。これは、後者の方法では高速域の自動車専用道路の排水性舗装と中低速域の一般道路の排水性舗装のパワーレベルを一つのパワーレベル式で表現しようとしたために、特に中低速域でのパワーレベルの表現に無理が生じているからではないかと考えられる。また、後者の一般車の騒音測定による方法では、騒音データのばらつきが大きくなっている。これは、一般車を対象としたため音源となる自動車の状況が異なっていること等によるものと考えられる。一方、前者の試験車の騒音測定による方法では、音源となる自動車の状況に変化は少ないと考えられ、また、排水性舗装も施工後 1 年以内のものとしたため、排水性舗装と密粒舗装のパワーレベルの差はかなりの精度を有していると思われる。以上のことを考慮すると、現在のところ排水性舗装のパワーレベルは、前者の方法により得られた密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベルの補正量（騒音低減効果）を用いるのが適当であると考えられる。

・排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの経時変化

本研究では、施工後 1 年程度までの初期の排水性舗装における騒音パワーレベルを定量的に示すとともに、その経時変化も定量化した。そのため、これまで集積された騒音測定データから、排水性舗装の施工後の経過時間と大型車類、小型車類それぞれの高速域、中速域における排水性舗装の騒音低減効果との関係を検討した。なお、高速域の速度は

100km/h、中速域の速度は 60km/h とした。その結果、次に示すように密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベル補正量（騒音低減効果）と施工後の経過月数の回帰式を得た。ただし、これらの式は施工後半年から 5 年程度の排水性舗装に適用できる。

高速域 (100km/h) の場合

$$\text{大型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = - 4.59 + 0.057 m \quad (3.20)$$

$$\text{小型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = - 5.17 + 0.053 m \quad (3.21)$$

中速域 (60km/h) の場合

$$\text{大型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = - 2.70 + 0.036 m \quad (3.22)$$

$$\text{小型車類} \quad \Delta L_{wA,dr} = - 2.71 + 0.028 m \quad (3.23)$$

ここで、

$\Delta L_{wA,dr}$: 密粒舗装に対する排水性舗装のパワーレベル補正量 (dB)

m : 排水性舗装の施工後の経過月数

上記の回帰式によると、排水性舗装の騒音低減効果の経時的な低下は、車種別には小型車類の方が少し小さく、速度別には 60km/h の中速域の方が小さい。1 年間の騒音低減効果の平均低下量は、大型車類では 60km/h の場合約 0.4dB、100km/h の場合約 0.7dB である。また、小型車類では 60km/h の場合約 0.3dB、100km/h の場合約 0.6dB である。この結果、施工後約 5 年の排水性舗装の騒音低減効果は、大型車の場合 60km/h の中速域で約 0.5dB、100km/h の高速域で約 1.1dB に低下する。一方、小型車類の場合は、60km/h の中速域で約 1.0dB、100km/h の高速域で約 2.0dB に低下する。施工後約 5 年たつと騒音低減効果はかなり低下するが、それでもまだ有意な騒音低減効果を有していると考えられる。

・排水性舗装の音響特性

排水性舗装の騒音低減効果と空隙率（12%から27%まで）の関係では、大型貨物車及び

乗用車とも40～100km/hのすべての定常走行速度において空隙率23%のものが効果が最も大きかった。これまで一般には空隙率が高いほど騒音低減効果は大きいと考えられてきたが、今回の結果では空隙率23%のものが最適であり、27%にまで空隙率を上げると逆に効果が低減することが分かった。排水性舗装は供用に伴い空隙率が徐々に低下することを考えると、空隙率が高い方が効果の持続性は良くなるので、この視点からも排水性舗装敷設時の空隙率は23%とすることが適当であると考えられる。また空隙率が15%のもので約2～3 dBの騒音低減効果が見られるが、空隙率が12%まで下がってしまうとその効果は約1 dB程度まで落ちてしまう。従って、空隙率が15%程度までは騒音低減効果はあると考えてもよいと思われる。

次に、排水性舗装の厚さが3 cm、5 cm、8 cmの場合の騒音低減効果を比較すると、厚さが大きくなると低減量も大きくなる傾向が見られるが、これら三者では厚さの違いによる低減量にあまり差はみられない。従って、舗装厚を8 cmにする必要はなく、3～5 cmの範囲で舗装設計により与えられる厚さとすればよいと考えられる。

また、排水性舗装に使用する骨材の最大粒径については、小型車の場合、最大骨材粒径が20mmのとき騒音低減量は約2～3 dB、13mmのとき約6～7 dB、10mmのとき約9～10dBとなっている。また、大型車の場合では、低減量はそれぞれ約4～5 dB、約5～6 dB、約6～7 dBとなっている。このように、最大骨材粒径が小さいほど騒音低減量は大きくなる。これは、骨材の粒径が小さいほど舗装の表面粗さが小さくなるため、舗装からタイヤに加わる衝撃力が小さくなりタイヤ路面音が低下することによると考えられる。

舗装の空隙率と垂直入射吸音率の関係については、空隙率が12%、15%の排水性舗装は500Hzで吸音率が0.30～0.39のピーク値を示し、空隙率が21%、23%、27%と大きくなると800Hzで吸音率が0.63～0.87のピーク値を示す。このように、空隙率が大きくなるとともに垂直入射吸音率のピーク値も約0.3から約0.9に大きくなり、またピークを示す周波数は500Hzから800Hzへと高域へ移動する。いずれの場合も吸音率の曲線はピーク値を頂点とする釣り鐘状であり、共鳴器型の吸音特性を示している。

上記の空隙率と吸音率の関係を道路交通騒音に対する平均吸音率を用いて見てみると、大きいピーク値をもつ空隙率が21%以上の排水性舗装は、平均吸音率が0.18～0.21と比較的大きな値を示した。一方、ピーク値が小さい空隙率が18%以下の排水性舗装の平均吸音率は0.11～0.13と小さかった。なお、密粒舗装の平均吸音率は0.03と非常に小さかった。これら多孔質舗装の空隙率と平均吸音率の関係を回帰分析すると、相関係数が0.990

と強い相関関係が認められ、次のような回帰式が得られた。

$$\alpha = 1.126 u - 0.018 \quad (4.2)$$

ここで、

α : 平均吸音率

u : 空隙率

排水性舗装上における伝搬音の超過減衰効果は、伝搬距離が 5 m を超えると現れ、10 m 以上のところで約 2 ～ 3 dB であった。また、密粒舗装と排水性舗装上の伝搬音のレベル差を周波数別に見ると、500Hz 以上で排水性舗装に超過減衰が見られ、スピーカから 40 m 離れた地点ではそれはより顕著となり、800Hz 付近で最大 8 ～ 10dB 程度の超過減衰となっている。

各舗装の実効的流れ抵抗値を舗装上の伝搬音のユニットパターンを実測値によるものと計算によるものとを比較することにより推定したところ、排水性舗装の実効的流れ抵抗値は 1,250kPas/m²、密粒舗装では 20,000kPas/m² であった。これらを用いて各舗装上を騒音が伝搬するときの地表面による減衰効果を計算できる。

排水性舗装の音響インピーダンス比は、すべての周波数領域で密粒舗装よりはるかに小さな値となっている。その位相は、この舗装の吸音率がピークを示す周波数 600Hz の前後でずれており、700 ～ 1,200Hz では約 60 度、300Hz 以下では約 - 60 度ずれている。

本研究で得られた排水性舗装の実効的流れ抵抗や音響インピーダンス比の妥当性を検討するため、排水性舗装上における伝搬音の減衰の状況を実測値とこれら音響特性に基づいた計算値を比較したところ、これらはよく一致していた。すなわち、ここで得られた排水性舗装の実効的流れ抵抗値と音響インピーダンス比が妥当であったことを示している。

排水性舗装における自動車走行騒音の指向性を測定により検討したところ、乗用車と大型貨物車の走行騒音の指向性は、車両真上で一番小さく、車両側面の路面近傍に向かうに従って大きくなり、車両側方に強い指向性があった。これは、密粒舗装と類似している。また、排水性舗装の騒音低減効果は路面近傍で大きく、車両真上に向かうにしたがって小さくなるため、排水性舗装での車両騒音の側方への指向性は、密粒舗装の場合ほど大きくない。

・排水性舗装の騒音低減メカニズム

排水性舗装の主な三つの騒音低減要因、すなわちエアポンピング音の抑制、反射音の路面による吸音及び路面上における伝搬音の超過減衰の寄与を、排水性舗装施工箇所における等価騒音レベルの実測値と本研究で得られた排水性舗装の騒音パワーレベル、吸音率及び実効的流れ抵抗を用いた計算値とを比較することにより定量的に検討した。その結果、排水性舗装の諸特性を考慮しないで計算した場合の計算値は実測値より約 2.5dB 大きかったが、考慮すると計算値は実測値より約 0.7dB 小さくなり、計算精度は非常に向上した。このときの騒音データを測定した排水性舗装施工箇所では自動車の走行速度は約 40km/h と低かったため、音源における騒音低減効果（エアポンピング音の抑制及び反射音の路面による吸音による）は約 0.9dB、伝搬過程における騒音低減効果は約 2.3dB と、前者が小さかった。

さらに、音源における騒音低減効果をエアポンピング音の抑制と反射音の路面による吸音の寄与に分離するため、自動車と路面（空隙率が 12 ～ 27%）をモデル化しシミュレーション計算を行った。その結果、排水性舗装の音源における減音効果 1.1 ～ 4.6dB のうち吸音による効果は約 0.2 ～ 0.6dB、厳密な意味での音源において発生する騒音（エアポンピング音）の抑制効果は 0.9 ～ 4.1dB と推定され、後者が音源における騒音低減効果の大半を占めると考えられる。これは、マイクロフォン側のタイヤからの直達音が卓越しており、他方反対側のタイヤ路面音が伝搬過程で路面に吸音されたり、路面と車体との開口部（スリット）で回折するものの、減音にはあまり影響していないためと考えられる。

・騒音低減効果の経時変化の要因

排水性舗装は施工直後には大きな吸音率を示していたが、時間の経過とともに吸音率のピークとなる周波数帯が低域に移動し、また吸音率自体も小さくなってきている。これを道路交通騒音に対する平均吸音率で見ると、施工直後 0.36 あった平均吸音率は 3 年後には 0.14 まで低下し、その後はあまり変化していない。

この経過を排水性舗装の空隙率の変化で見ると、舗装の上層部では施工後 10 ヶ月までに空隙率が 21.2 % から 15.5 % へと 5.7 % も減少した。しかし、その後の空隙率にはあまり変化が見られない。一方、中・下層部では空隙率は施工直後の 15 % 程度から 10 ヶ月後の 13 ～ 14 % 程度まで徐々に低下したが、その後空隙率はほぼ安定している。また、施工後 22 ヶ月における上・中・下層部すべての空隙率の減少量を計算すると 2.7 % になるが、こ

れを空隙詰まりによるものと空隙潰れによるものに分けて試算してみると、それぞれ 1.2 %及び 1.5 %であった。

また、骨材粒径が異なる排水性舗装の空隙率の経時変化を見ると、骨材粒径が大きい方が、空隙率が小さくなっているのに気が付く。これは、骨材粒径が大きくなると空隙の大きさも大きくなり、土砂等の閉塞物が詰まりやすくなるためと考えられる。

洗浄による排水性舗装の空隙率の変化については、上層部では 0 ~ 8 %程度の空隙率の回復が見られるが、中・下層部では必ずしも空隙率が回復するとは限らない。骨材粒径が大きい排水性舗装の場合は、空隙率はむしろ低下することもあった。一方、骨材粒径が小さい排水性舗装の場合は洗浄の効果は下層部でも見られ、空隙率は 4 ~ 6 %程度回復していた。

・多孔質弾性舗装の騒音低減効果

多孔質弾性舗装の騒音低減効果は、空隙率 40 %、厚さ 3 cm、ゴム粒子小（直径約 1.0mm、長さ約 10mm）のものが各種の仕様の中で最も大きい。定常走行時の速度が 40 ~ 120km/h の範囲で、乗用車の場合約 16 ~ 19dB、大型貨物車の場合約 6 ~ 10dB と非常に大きな減音効果を有している。また、減音効果の速度依存性に関しては、走行速度が 40km/h から 60km/h ないし 80km/h まで上昇するとき効果は大きくなり、その後 120km/h までは速度の上昇とともに効果は低下する。排水性舗装のように減音効果が速度上昇とともに単調に増加するといった明確な傾向を示さない。

さらに、多孔質弾性舗装の騒音低減効果を周波数別にみると、排水性舗装が減音効果を持たない 600Hz 以下の周波数帯域でも多孔質弾性舗装が大きい減音量を示す。このことが、この舗装の減音効果が排水性舗装よりも大きい要因となっている。

垂直入射吸音率に関しては、多孔質弾性舗装の厚さによってピークを示す周波数帯域が異なるが、概ね 800 ~ 2,000Hz の周波数帯域で約 0.9 の大きなピーク値を示す。

・多孔質弾性舗装のその他の課題

多孔質弾性舗装の縦滑り摩擦係数は約 0.4 ~ 0.5 で、この滑り摩擦係数を用いて道路構造令に規定する制動停止距離を計算すると道路構造令に規定している値よりも小さく、規定を満足している。また、自動車の車線変更時などに必要となる進行方向と垂直な横滑り摩擦係数は、横滑り角や走行速度によっても異なるが、0.28 ~ 0.67 の範囲にあり、道路構

造令で基準値として想定されている 0.11 ～ 0.15 より大きく、規定を満足している。従って、多孔質弾性舗装は十分大きな滑り摩擦抵抗を示し、自動車の走行安全性に支障を来すものではないと考えられる。

多孔質弾性舗装の耐火性を検討するため、密粒舗装と多孔質弾性舗装上に燃料を散布し、それに引火した状況を比較した。前者では散布された燃料が舗装上を流れ広がり、その燃焼範囲は大きくなり、火炎の高さも高い。一方、後者では燃焼範囲は燃料が散布された範囲に限られ（その後、燃焼範囲は舗装材料のゴムが燃えるため徐々に拡大するが、その速度は遅い）、火炎の高さは低い。従って、耐火性については多孔質弾性舗装の方が密粒舗装よりも安全であると考えられる。

多孔質弾性舗装の耐久性を確認するため、ラベリング試験、カンタプロ試験及び試験車走行試験を行った。路面の摩耗度を調べるラベリング試験では、密粒舗装では約 1 cm と深く摩耗したが、多孔質弾性舗装ではほとんど摩耗もなく路面は平坦であった。また、舗装材料の衝撃に対する安定性を調べるカンタプロ試験の結果は、密粒舗装では重量で約 10 ～ 20 % の材料が飛散していたが、多孔質弾性舗装では材料の飛散はほとんど見られず安定していた。試験車走行試験では、総重量 14 t の大型車を約 25 万回走行させたが、多孔質弾性舗装の路面はほとんど摩耗されておらず、平坦であった。以上のとおり、屋内実験や屋外の実験施設による試験ではあるが、今のところ多孔質弾性舗装の耐久性に関して否定的な結果はでていない。

6. 2 今後の課題

・排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの定量化

6. 1 (1) のとおり今回のデータでは、大型車類と小型車類に対する排水性舗装の騒音低減効果にあまり差異は見られなかったが、他の報告では両者の効果に差異があるとされているものもあり、この点について今後データを蓄積しつつ検討する必要がある。

また、自動車が高速域で走行する自動車専用道路では中低速域の一般道路に比べ道路外から持ち込まれる土砂が少なく、さらに自動車が高速走行するためにタイヤによるポンピング作用が大きく働き、これにより排水性舗装の空隙に大きな自浄効果がでると考えられ、空隙率が維持されやすいと思われる。従って、今後高速域と中低速域を分離して分析を行うことにより、より精度良く排水性舗装の減音効果を説明できる可能性があると思われる。

・排水性舗装における自動車走行騒音パワーレベルの経時変化

高速走行時のタイヤによる排水性舗装の空隙の自浄作用等高速道路と一般道路における騒音低減効果の持続性に影響する要因の違いを考慮すると、それぞれの種類の道路において調査データを増やし、高速道路は高速域のみ、一般道路は中低速域のみの騒音低減効果の経時変化を調査する必要がある。

・排水性舗装の音響特性

排水性舗装の騒音低減効果と空隙率（12％から27％まで）の関係では、空隙率が12％から27％の範囲で23％の排水性舗装が最も大きい騒音低減効果を有することがわかった。一方、吸音特性では空隙率27％が最も高い効果を示した。これは、空隙率以外の要因が空隙率23％の排水性舗装がタイヤ路面音を最も大きく抑制していることを示している。今後はこの要因を解明するために、路面のテクスチャーと騒音低減効果の関係を調査していく必要がある。

排水性舗装と遮音壁を組み合わせる騒音対策を実施することがよくある。このときこの対策による効果をよりよく把握するため、ここで得られた排水性舗装における自動車走行騒音の指向性の特徴を考慮して、遮音壁の形状、高さ、設置方法等について検討する必要がある。また、指向性に関する今回の調査では、自動車にかなり接近した位置における騒音の指向性について検討したが、自動車から離れた位置における指向性についてさらに検討する必要がある。

・排水性舗装の騒音低減メカニズム

音源における排水性舗装の騒音低減効果をエアポンピング音の抑制による寄与と反射音の路面による吸音の寄与とに分離するのをシミュレーション計算により推計したが、これを実測等により検証する必要がある。

・多孔質弾性舗装の騒音低減効果

多孔質弾性舗装に関して、音源における騒音低減効果はかなり明らかになってきたが、騒音の伝搬過程における減音効果はまだ明らかではなく、今後解明していくことが求められる。5.2.3で述べられているように大きな吸音率を有しており、伝搬過程の減音効

果もある程度期待できると思われる。

- ・多孔質弾性舗装のその他の課題

- ・多孔質弾性舗装の実用化のための課題として、滑り摩擦抵抗等の走行安全性、耐久性等に関して試験されてきた。しかし、これらは屋内試験や試験走路での実験により検討されたものであり、今後実際の道路でこれらの諸課題の試験結果を確認する必要がある。

謝 辞

本研究は、筆者が建設省土木研究所環境部交通環境研究室において主として 1995 年度以降に研究した成果を取りまとめたものである。また、研究の一部に関しては、日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会における ASJ Model 1998 に関する調査、開発の中で、筆者が上記委員会にかかわって行った。

本論文をまとめるに当たり、終始多大なる労を厭わずご指導ご鞭撻を賜りました京都大学教授 高木興一先生 に対し、ここに深甚なる感謝の意を表します。また、材料の音響特性について種々の助言を頂いた財団法人小林理学研究所所長 山本貢平氏 に心から謝意を表します。さらに、騒音測定データの整理、試算等において協力を頂いた株式会社エスタの藤原敏彰氏、株式会社オリエンタルコンサルタンツの 石川賢一氏 に感謝の意を表します。

最後になりましたが、排水性舗装の騒音パワーレベルの検討に際し有益なご議論を頂いた日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会の委員各位、また、この検討に用いた各種データを提供して頂いた関係道路事業者の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

第 1 章

- 1)環境庁：平成 11 年版環境白書各論、大蔵省印刷局、p.67、1999.6
- 2)大西博文：道路交通騒音の現状と対策、騒音制御、Vol.23, No.3, p.129, 1999.6
- 3)中央環境審議会：「騒音の評価手法等の在り方について」答申、1998.5
- 4)環境庁告示：騒音に係る環境基準、1998.9
- 5)環境庁：平成 11 年版環境白書各論、大蔵省印刷局、p.70、1999.6
- 6)中央公害対策審議会：「今後の自動車騒音低減対策のあり方について」中間答申、1992.11
- 7)中央環境審議会：「今後の自動車騒音低減対策のあり方について（自動車単体対策関係）」答申、1995.2
- 8)庄野豊、吉田幸信、山本貢平：道路遮音壁先端に設置する騒音低減装置の開発、土木学会論文集、No.504/VI-25、pp.81-89、1994
- 9)K.Fujiwara, D.C.Hothersall, C.Kim：Noise Barriers with Reactive Surfaces, *Applied Acoustics*, 53, pp.255-272, 1998
- 10)大西博文、上坂克巳、鉢嶺清範：道路騒音対策用の吸音板の開発・評価、土木技術資料、Vol.39, No.11, pp.6-7, 1997.11
- 11)大西博文、明嵐政司：排水性舗装の騒音低減効果に関する研究、道路、pp.82-84、1996.4
- 12)増山幸衛、草刈憲嗣、福井洋二、岡崎博国：排水性舗装の機能回復の現状、道路建設、No.581, pp.33-41, 1996.6
- 13)久保和幸：排水性舗装の機能回復機器の開発、建設の機械化、No.565、pp.45-49、1997.3
- 14)大西博文：最近の低騒音舗装技術について、道路建設、pp.54-55、1997.8
- 15)（社）日本道路協会：アスファルト舗装要綱、1992.12
- 16)（社）日本道路協会：排水性舗装技術指針（案）、1996.11
- 17)低騒音舗装研究会：低騒音舗装の概説、（財）建設物価調査会、1996.12
- 18)石井聖光：道路交通騒音予測計算方法に関する研究（その 1）－実用的な計算式について－、日本音響学会誌、Vol.31, No.8, pp.507-517, 1975
- 19)橋秀樹他：道路騒音の予測：道路一般部を対象としたエネルギーベース騒音予測法（日

本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告)、日本音響学会誌、Vol.50, No.3, pp.227-252, 1994.3

第2章

- 20) 明嵐政司、仲柴二三夫、長谷部正基：排水性舗装の騒音低減要因に関する研究、交通工学、Vol.29, No.6, pp.31-40, 1994
- 21) 滝沢由美子、松本晃一、山本稔：路面性状と騒音特性に関する調査検討、日本道路公団試験研究所報告、Vol.34, pp.145-150, 1997.11
- 22) 竹中雄一、後藤賢光、小西一生：排水性舗装路面による騒音低減効果の測定例、日本騒音制御工学会講演論文集、pp.305-308、1995.9
- 23) 小林次男、竹井光明、栗木稔：低騒音舗装のタイヤ騒音簡易測定手法に関する一考察——一般国道 298 号における測定事例——、第 22 回日本道路会議論文集、pp.478-479、1997
- 24) 仲西治雄、沖山文敏：排水性舗装による減音効果——高速道路と主要地方道の比較について——、日本騒音制御工学会講演論文集、pp.217-220、1997.9
- 25) 井上武美、笠原彰彦、井原務：吸音型透水性アスコンの検討、舗装、Vol.23, No.6, 1988.6
- 26) 水野卓哉、帆苅浩三、丸山暉彦：球の充填モデルによる吸音特性の検討、土木学会第 47 回年次学術講演会、1992.9
- 27) 帆苅浩三、増井裕明、丸山暉彦、姫野賢治：排水性舗装の空隙の屈曲度に関する研究、土木学会年次学術講演会予稿集、pp.530-531、1995.9
- 28) 岩瀬昭雄、川端亮達：透水性舗装面上の音響伝搬特性の推定その 2、日本音響学会講演論文集、pp.721-722、1998.3
- 29) 小池博、藤川達夫、押野康夫、橋秀樹：タイヤ／路面騒音の発生に関する実験的検討——トレッド溝内の気柱共鳴——、日本音響学会講演論文集 II、pp.701-702、1999.9-10
- 30) S. Iwai, Y. Miura, H. Koike, G. Levy: Influence of porous asphalt pavement characteristics on the horn amplification of tire/road contact noise, Proceedings of Inter-noise 94, pp.431-434, 1994.8
- 31) 明嵐政司、宮川隆己、石田稔：排水性舗装の吸音特性とその評価について、日本音響学会誌、Vol.49, No.6, pp.401-406, 1993
- 32) 山口道征、中川博：各種多孔質材料の音響特性——(第 17 報) 排水性舗装の吸音メカニズムについて・その 4——、日本音響学会講演論文集、pp.719-720、1998.3
- 33) 川真田智、山口道征、水野卓哉：排水性舗装の吸音特性と測定手法に関する一考察、

舗装、Vol.33, No.11, pp.13-17, 1998

34)Nils-Ake Nilsson: The Poro-elastic Road Surface - A New Tool for Controlling Traffic Noise ,
Proceedings of Noise Con'83, pp.375-378, 1983

35)Nils-Ake Nilsson, Tommy Zetterling: Noise reduction mechanisms for poroelastic road surfaces,
Proceedings of International tire/road noise conference 1990, pp.47-66, August 1990

36)Tommy Zetterling, Nils-Ake Nilsson: Implementation of the poro-elastic road surface, Proceedings of
International tire/road noise conference 1990, pp.315-325, August 1990

37)Ulf Sandberg, Hans Bendtsen, Johnny Johansen, Jorgen Kragh, Svein A Storeheier: Low noise road
surfaces - A Nordic co-operation project, VTI rapport, No. 388, 1993

38)明嵐政司、藤原敏彰、長谷部正基：多孔質弾性舗装の騒音低減特性について、交通工
学、Vol.30, No.6, pp.21-28,1995

第3章

39)日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル"ASJ Model
1998"－日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告－、日本音響学会誌、Vol.55, No.4,
pp.281-324, 1999

40)Ulf Sandberg: Low noise road surfaces - A state-of-the-art review, Journal of Acoustical Society of
Japan (E), Vol.20, No.1, pp.1-17, 1999

41)阿部忠行、田中輝栄：低騒音舗装におけるタイヤ発生音と吸音率、東京都土木技術研
究所年報、pp.63-72、1998

42)押野康夫：自動車の走行騒音パワーレベルの予測モデル、日本音響学会第4回音響技
術セミナー、1995

第4章

43)日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル"ASJ Model
1998"－日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告－ 付属資料 A-1 排水性舗装に対
するパワーレベルの補正、日本音響学会誌、Vol.55, No.4, pp.303-305, 1999

44)曾根敏夫、香野俊一、岩瀬昭雄：自動車走行騒音のパワーレベルとスペクトル、日本
音響学会誌、Vol.50, No.3, pp.233-239, 1994.3

45)高木興一、山本貢平、吉久光一：道路交通騒音予測における伝搬計算方法、日本音響

学会誌、Vol.50, No.3, pp.240-249, 1994.3

46)Y. Miki: Acoustical properties of porous materials - Modification of Delany-Bazley models, Journal of Acoustical Society of Japan (E), Vol.11, pp.19-24, 1990

47)井清：騒音伝搬に与える地表面の影響、日本音響学会誌、Vol.38, No.5, pp.270-276, 1982

48)藤田和則、阿部武、堀吉晴：車体の音響放射特性を考慮した車外騒音レベルの予測、自動車技術会論文集、No.34, pp.118-124, 1987

49)Georges Pachiaudi: Noise directivity of a light running vehicle, Proceedings of Inter-noise 81, pp.151-154, 1981

50)上坂克巳、大西博文、那須猛士：一般道路を走行する自動車の騒音パワーレベル、日本音響学会講演論文集、春季、II, pp.829～830 (1997.3)

51)小池博、押野康夫、橘英樹：タイヤ／路面騒音の音源探査、騒音制御、Vol.22、No.1、pp.11-13、1998

52)T. Iwase, R. Kawabata: Measurements of basic acoustical properties of the porous pavement and their applications to the estimation of road traffic noise reduction Journal of Acoustical Society of Japan (E), Vol.20, No.1, pp.63-74, 1999

第5章

53)大西博文、明嵐政司、鉢嶺清範：多孔質弾性舗装の騒音低減特性について、土木技術資料、Vol.38、No.1、1996

54)大西博文、南里吉輝：多孔質弾性舗装の開発 —材料粒子、舗装厚と自動車走行騒音、車外振動との関係—、平成9年秋季日本音響学会講演論文集 II、pp.677-678、1997