

# 85dB(A)以下を目指した低騒音舗装の開発と検証

(株)NIPPOコーポレーション技術研究所

溝渕 優

## 1. はじめに

周知のように、平成13年4月の「道路構造令(政令)」改訂に続き、同年6月には「舗装の構造に関する技術基準(省令)」が通達され、これにより、これからの舗装は環境への負荷を低減するよう努めることとされた。爾来、いわゆる排水性舗装を契機とした環境関連の技術開発は、前述の法的整備を背景にして急速な進展を見せた。その現況は、「環境改善を目指した舗装技術の現状<sup>1)</sup>」に詳しいが、現状としては、あたかも道路遺産かくあるべしとする言わば未来からの干渉に応えつつも、その課題の多さや困難さに佇立ぎみの感がある。

本報告は、上記の現状に鑑み、より高次元負荷の軽減を図るべく実施したもので、走行騒音が85dB(A)以下となるための新たな原理の模索と適用、および該原理に基づいた低騒音舗装の開発とその検証に関するものである。

## 2. 低騒音舗装の現況

### (1) 経緯

低騒音舗装に関する研究は、いわゆる排水性舗装がその濫觴と言えるから、1980年代後半まで遡ることができる。しかし、排水性舗装ではなく、低騒音舗装として性能指標を明示した規定工事が発注されたのは平成11年からである<sup>1)</sup>。以来、実施件数は14年度から急増し、15年度までには、性能規定方式と総合評価方式とを併せ280件余と報告されている<sup>1,2)</sup>。

### (2) 課題

しかし、実施例の増加とともに、解決すべき技術的課題や要望が次第に明らかとなり、①環境への負荷がより小さい(より低騒音性に優れた)舗装、②機能の長期保持もしくは革新的な回復手法、③低騒音化による便益評価法の開発などが現状の課題として挙げられている<sup>3)</sup>。

### (3) 性能の実態

既述の280件余に上る低騒音舗装の路面騒音値は、いわゆるRAC車<sup>4)</sup>による測定で略88~89dB(A)の範囲にある。この幅は、混合物の最大粒径や空隙率、層厚あるいは層構成および施工技術の差などによると考えられるが、換言すれば、現下の技術では、斯界挙げての対応にも拘わらず、走行騒音をワンランク上の85dB(A)以下とすることは極めて困難であることを示唆している。

## 3. 開発の方針

85dB(A)以下の低騒音舗装の実現を困難にしている主な理由は、路面騒音の低減原理を、混合物の最大粒径、空隙率、厚さ、層構成および施工技術の工夫に求め、他の有用な原理を取り入れることがなかったためと推察される。本報では、該騒音が85dB(A)以下である低騒音舗装の開発と検証を以下の方針で実施する。

- ①室内型の騒音評価試験法を開発・検証し確立する。
- ②騒音低減のための新たな原理を模索し適用する。
- ③新たな原理を組み込んだ85dB(A)以下の低騒音舗装を提案し、その特性を精査する。
- ④実路で試験舗装を行い、性能の検証を行う。
- ⑤舗装としての耐久性を確認するため、一定期間追跡調査を行う。
- ⑥耐久的な85dB(A)以下の低騒音舗装を提案する。

## 4. 室内型の騒音評価試験法の開発と検証

### (1) 現況と課題

走行騒音が85dB(A)以下である低騒音舗装を効率良く開発するためには、都度の実路試験舗装によるよりも、まず供試体を作製し、その低騒音性を迅速かつ精度良く評価できる室内試験法によることの方が、時間や費

用などの面により望ましく合理的である。

しかし、現況の室内試験方法としては、①音響インピーダンス管による吸音率測定方法(旧名略称:管内法)(JIS A 1405)、②残響室法吸音率の測定方法(同1409)あるいは同1416などがあるが、いずれも建築材料の吸音特性を測定するためのもので、①大掛かりな設備を要すること、②該特性と舗装の低騒音性能との関係が明らかではないこと、③吸音率が100%に近づく(高性能になる)ほど一定の性能差を表す数値間隔が小さくなり、測定誤差と区別がつかないといった欠点があるため、本開発の実施のためには、新たな試験方法を開発することが必要と判断された。

## (2) 評価原理と測定法

タイヤと路面との接触騒音は、タイヤが高速回転しているある瞬間( $\Delta t$ )を想定すると、ほぼ平らで一定面積のタイヤ片が舗装路面を叩く現象に近似し得る。したがって、平滑な舗装体表面に、該タイヤ片に近似させた面積、形状、および材質の平滑板を一定の条件で倒し込み、この時生じる発生音の大きさを所定の位置に設置した騒音計で測定・分析すれば、これによって該舗装体とタイヤとの接触騒音の大きさをdB(A)単位で評価することができる。ここに、本試験はTPN(Tire Putting Noise)試験と称する(特願2004-129225)。

図-1にTPN試験の概念図を、図-2に同試験の精度と再現性に関するデータを示す。

図-2より、最大粒径5mmおよび8mmの両舗装体とも、過転圧面の位置(過転圧で碎石が寝ている状態/入射波が反射する)と $S_{TPN}$ とは極めて良い相関にある。したがって、転圧技術の差によって、舗装体の低騒音性能が大きく異なることは新知見であるとともに、TPN試験は、精度、再現性ともに優れていることが明らかと言える。

また、図-3は、いわゆるRAC車とTPN試験による騒音値の比較図である。同図より、データ数は十分と言いが難いが、両者は良い相関にあり、大略(1)式の関係にある。ここに、 $S_{TPN}$ =(TPN試験で得られた騒音値(AP)+1.9(dB(A)))、 $S_{RAC}$ =RAC車による騒音値(dB(A))である。

$$S_{RAC} \doteq S_{TPN} \dots\dots(1)$$

したがって、新規に開発したTPN試験は、①静粛な恒温恒湿室で行い、気象条件、通過交通車両、周辺構造物からの反射波、暗騒音などの影響を受けないので、①供試体の真の低騒音性能を測定できること、②多数の試験体を効率的に測定できること、③1層～多層構造の低騒音性能を測定できること、④実路にも適用できる試験法で

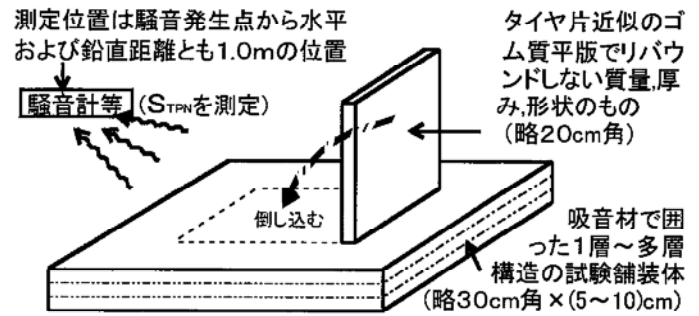


図-1 TPN試験の概念図

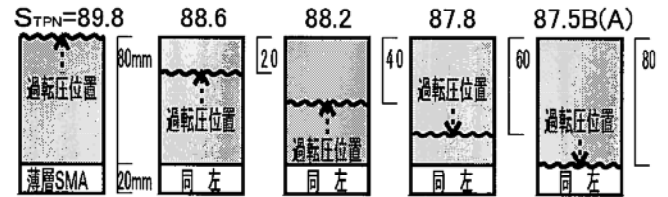


図-2a 同一構造における過転圧面の位置と $S_{TPN}$ 値(上層:5mm排水性混合物の場合)

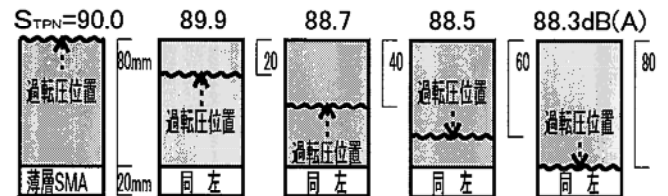


図-2b 同一構造における過転圧面の位置と $S_{TPN}$ 値(上層:8mm排水性混合物の場合)

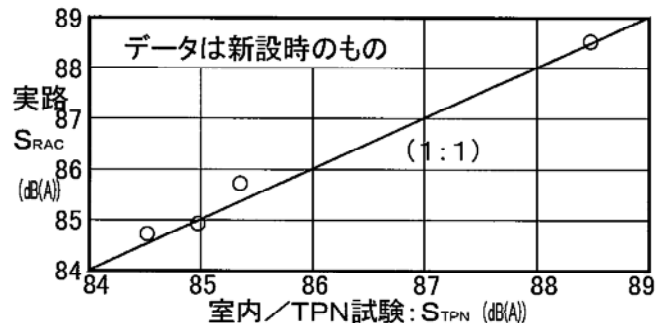


図-3 TPN試験とRAC車による騒音値比較

あること、および⑤絶対評価を行ういわゆるRAC車と同等の評価性能を有していることなどの特徴を有し、かつ高精度で再現性の高い試験法であると判断される。

## 5. 低騒音化のファクター

### (1) 騒音低減の原理

低騒音舗装は、沿道近隣も含めた良好な環境づくりといった観点から、常により高性能のものが望まれてきた。そのため、「3. 開発の方針」で述べたような種々の技術的改善と工夫がなされてきた。しかし、現況は前述の通りで、通常低騒音舗装の場合、88～89dB(A)の範囲に

留まっている。これは、これまでなされてきた改善技術が、舗装体に入射してくる騒音をいかに距離(経路)減衰させるかといった原理に拠るものであり、その意味では自ずと限界があるのは否めない。

したがって、85dB(A)以下を目指す低騒音舗装を開発するためには、これまでとは異なった原理の採用が必要となってくる。同時に、その実現のためには発生騒音の全音域に亘って減衰させることが極めて効果的と考えられたので、種々模索・検討の結果、下記のものを用いることとした。

- ①マフラー効果:主として中～高音域の減衰に対応
- ②熱変換効果:主として高音域の減衰に対応
- ③バッファ効果:低～高音域の減衰に対応

(2) 現行技術の限界

図-4は、過転圧面が生じないように留意して作製した1層舗装体の、最大粒径別の層厚と騒音値( $S_{TPN}$ )との関係である。同図より、図中の3本の折れ線は、整ったシフト関係にあるとはいえない(過転圧面を生じないように転圧することは極めて難しいことを意味する)、以下のことが明らかである。

- ①同厚の場合、最大粒径が小さいものほど低騒音性に優れ、5mm、8mm、13mmの順となっている。
- ②低騒音性は層厚にほぼ例して向上するが、その変化は緩やかな指数関数的変化で漸近値を有する。
- ③層厚が $\infty$ の時の漸近値は、 $S_{TPN} (= S_{RAC}) = 87 \pm 0.3$  dB(A)と推定される。したがって、同図は、特定の条件(空隙率が20%等)における一例であるが、転圧が最適に行われた場合、最大粒径、層厚の別などを問わず、略87dB(A)前後が現行技術の限界値と推定される。ただし、実用的見地に立てば、舗装厚の実態は50mm前後であるから、この場合88 $\pm$ 0.3dB(A)が限界値と推定される。

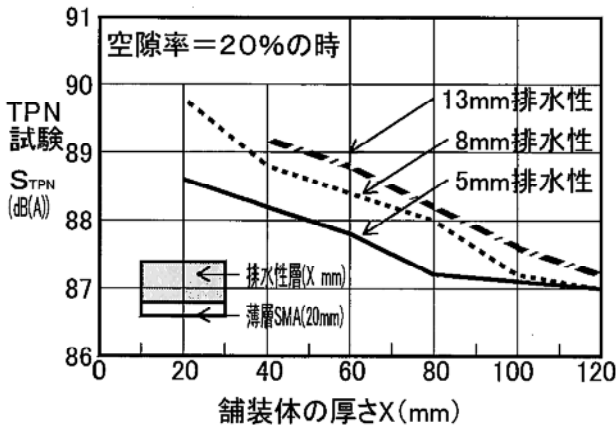


図-4 層厚と騒音値の関係

(3) マフラー効果(特願2004-129224)

現行の低騒音舗装は、ポーラスなキメによって路面からの反射音を減じ、かつ深さ方向に連続する無数の空隙孔内に発生直前のエアポンピング音を誘導して、音圧を減衰あるいは拡散させる原理のものである。

これに対し、マフラー効果は、いわゆる車両マフラーの消音機構による減音現象で、舗装体内に入射する音(波)の伝播方向に空隙孔径の急激な拡大が有れば、入射音はボイル・シャルル則に従う状態変化を起こし、これによって音圧が減衰する原理を期待したものである。この原理を適用した具体的な舗装構造およびその低騒音性能は、図-5に示す通りである。

ここに、図-5(c)の第1層は通常の8mm排水性層であり、第2層は、アスファルトでプレコートした4号単粒碎石層の基面に溶接鉄網を敷き込んで、該碎石の噛み合わせ(マトリックス)を完全に拘束し、これによって交通荷重による変形を抑制した特殊な層である(40~60mm厚が合理的と考えられる)。また第3層は、薄層SMA(基盤)からの反射音を抑制するための5mm排水性層である。

同図より、マフラー効果の有効性が明らかであるが、その効果(87.1dB(A))は、図-4より、過転圧面のない100mm厚の5mm排水性舗装とほぼ等価と推定される。

(4) 熱変換効果(特願2004-129224:前出)

舗装体の低騒音性能は、入射音を熱変換する材料、例えばグラスウールのような吸音性材料(以下吸音材。濡れても2~3日で乾燥し機能が回復する)の使用によってさらに高めることができる。すなわち、舗装体内に入射した音(波)は吸音材を通過する過程で熱変換され、図-5(c)に示すように、その有無で1.9dB(A)もの差が生じる。

(5) バッファ効果(その1)(特願2004-296389)

物が衝突する時、衝突される側の緩衝作用が大きければ(柔らかければ)一般にその衝突音は小さく、こうした減音現象をバッファ効果による減音と言う。したがって、高速転動によって生じるタイヤの路面衝撃力(音)といえども、

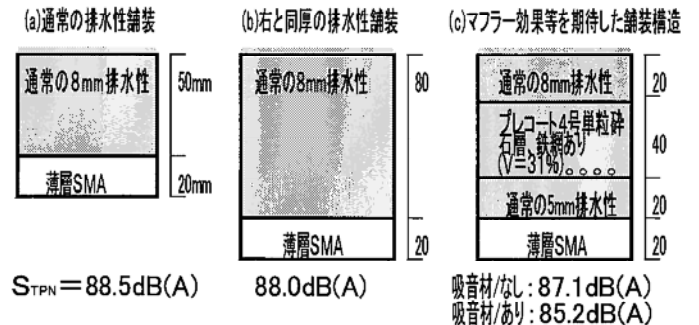


図-5 マフラーおよび吸音効果による騒音低減効果

舗装体側に該衝撃力を緩衝する性能が有れば、発生する騒音は低減できることとなる。

この原理に基づき、舗装として一定の耐久性を確保するため、第1層(表層)は低弾性型排水性層とし、第2層(基層)を高弾性型排水性の2層構造とすれば、その低騒音性能は図-6に示す通りである。ここに、第1層は、第2層の弾性付与原理とは異なり、碎石のみに特殊な高濃度ゴムアスファルトを被覆して適度な弾力性を付与し、これに砂、石粉、アスファルトを加えて再混練した排水性混合物である。また、第2層は、通常の排水性混合物にゴム粒子を添加した混合物であって、その転圧では中温化剤を加えて締め固めた層である(特許出願中)。

同図より、バッファ効果による騒音低減効果は著しく、低騒音性が良好と評価されている通常の8mm排水性舗装(50mm厚)との差が4.0~5.5dB(A)であるだけでなく、僅か60mm厚で目標の85dB(A)以下を満足している。

しかし、低騒音性能は極めて良好であっても、(b)に示す高バッファ効果を期待した低騒音舗装では、①DSが1,500程度であること、②接地圧強度が0.55MPa(5.5kgf/cm<sup>2</sup>)の時の弾性沈下量(=リバウンド量、 $\delta_e$ )が、同図の(a)に示す構造体の3倍近くもあることから、実荷重による繰返し剪断作用に対する抵抗性や境界層の接着性あるいは剥離抵抗性など、舗装としての基本的な耐久性を実路検証する必要がある。

#### (6) バッファ効果(その2)

前項の主旨に基づき、低騒音機能だけではなく、舗装としての耐久性ともバランスが取れている舗装を提案する。すなわち、開発目標は、舗装として耐久的でかつ85dB(A)以下の低騒音舗装体とする。

図-7に、上記主旨を満足する舗装体を示す。ここに、第1層は前出の低弾性型排水性舗装であるが、第2層は前出のような鉄網使用の単粒碎石層ではなく、コアの採取が容易かつ4号および5号碎石、砂、石粉、アスファルトからなる混合物(特殊マカダム型混合物で鉄網は不要)

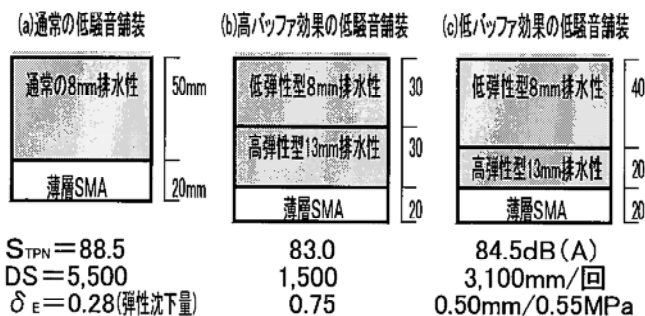


図-6 バッファ効果による騒音低減効果(その1)

層であって、低騒音性を高めるためにさらにゴムあるいは吸音材を添加したものである。ただし、ゴム入り混合物の転圧では中温化剤を使用している。

同図より、上記の開発目標を満足する低騒音舗装体は、DS値が6,300mm/回で、吸音材を添加した混合物を第2層とする舗装体のみであることが明らかである。したがって、試験舗装は、これまでの結果から下記の4工種で実施し、舗装としての耐久性を検証することとした。

- ①標準断面: 図-6(a)に示す構造で、50mm厚、最大粒径8mmの排水性舗装。 $S_{TPN}=88.5$ dB(A)
- ②提案断面(1): 図-5(c)に示す特殊な3層構造で、吸音材を使用したもの。 $S_{TPN}=85.2$ dB(A)
- ③提案断面(2): 図-6(c)に示す2層構造で、低バッファ効果を期待したもの。 $S_{TPN}=84.5$ dB(A)
- ④提案断面(3): 図-7に示す耐久的な2層構造で、添加物に吸音材を使用したもの。 $S_{TPN}=85.0$ dB(A)

層	低弾性型8mm排水性	30mm	第2層の配合と低騒音性能等			
			添加物の種類	$S_{TPN}$ :dB(A)	DS:mm/回	$\delta_e$
第2層	特殊マカダム型混合物 (V=31%) 添加物右欄の表(参照)	50mm	なし	86.5	6,300	0.32
			ゴム: 5%	86.4	3,700	0.73
			ゴム: 10%	86.2	2,600	0.87
基底	薄層SMA	20mm	ゴム: 15%	85.4	2,000	1.15
			吸音材	85.0	6,300	0.32

\*  $S_{TPN}$ 、DS値、 $\delta_e$ とも10cm厚で測定

図-7 バッファ効果による騒音低減効果(その2)

## 6. 試験舗装

### (1) 工区割り

試験施工は、合材、残土および長尺鋼材運搬車(20~50トン)が月10,000台以上通過することもある7m道路で実施した。なお、当道路は、通過交通のほか、近接工場からの大型フォークリフトやトレーラーによる据え切りや出入り時の切り返しなどもあり、交通条件は極めて過酷な場所と言える。図-8に、試験舗装の工区割りを示す。

### (2) 製造および施工

本試験舗装に用いる各種混合物は、近接の2トンバッチ練りアスファルトプラントで製造した。各種混合物の製

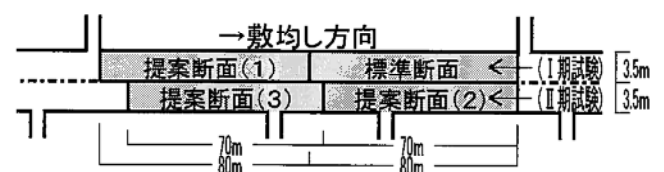


図-8 工区割り

造および施工上の特記事項は以下の通りである。

(a) 通常の排水性混合物および薄層SMA

製造、施工とも特記事項はなく、一般的な製造手順および施工編成で行った。

(b) プレコート4号単粒砕石層(吸音材入り)

製造では、単粒砕石を高粘度改質アスファルトでプレコート処理した後、所定量の吸音材を添加して混練した。練り落とし温度は110℃を目標とした。また、施工では、基盤層に鉄網を敷設してから混合物を敷均し、転圧した。

(c) 特殊マカダム型混合物(吸音材入り)

製造では、4号および5号砕石、砂、石粉と高粘度改質アスファルトとを先に混練し、その後所定量の吸音材を添加して混練した。練り落とし温度は110℃を目標とした。また、施工では、無振動で3往復の転圧とした。

(d) 低弾性型8mm排水性

製造では、8mm級整粒砕石を高濃度ゴムアスファルトでプレコート処理した後、これに所定量の砂、石粉、高粘度改質アスファルトを加えて混練した。練り落とし、敷均しおよび初転圧温度は、それぞれ170℃、150℃、130℃を目標とした。また、施工上の特記事項はなく、通常の排水性舗装と同様の編成で行った。

(e) 高弾性型13mm排水性

製造では、中温化剤等を添加して混合した13mm排水性混合物に、所定量の5mm級ゴムを添加して混練した。練り落とし、敷均しおよび初転圧温度は、それぞれ130℃、120℃、110℃を目標とした。また、施工では、敷均し時の引きずり発生防止のため、フィニツシャのアタックアングルは通常の倍程度とした。

## 7. 検証

試験舗装を行った舗装断面の種類、配合、力学性状値の概要は表-1に示す通りであるが、各断面における評価の詳細は以下の通りである。

(1) 施工直後の低騒音性

- 各断面のRAC車測定による騒音値( $S_{RAC}$ )は、室内で予測した数値( $S_{TPN}$ )にほぼ等しい結果となった。図-9に、TPN試験による周波数分析結果を示す。同図より、表-1に示す提案断面(3)は、周波数全域に亘って比較断面より騒音値が低く、新たな低騒音原理に関する仮説(5.(1)節)の妥当性が明らかである。また、全体的には、いずれの舗装体の発生周波数分布も正規分布に近い標準的なものであり、TPN試験の妥当性を裏付ける結果となっている。
- 提案断面の(1)~(3)とも、目標の $S_{RAC} \leq 85\text{dB(A)}$

かそれに準ずる性能を有している。

(2) 耐久性の評価

(a) 標準断面

RAC車による騒音値が88.6dB(A)であり、また極めて過酷な交通条件にも拘わらず、10ヶ月経過後も特に変化はなく、耐久性に問題のないことが明らかであった。

(b) 提案断面(1)

本断面の特徴は、第2層と第1層の空隙孔径比を可能な限り大きくするとともに、砕石の噛み合わせを鉄網で拘束した特殊な3層構造であり、距離減衰のほか、マフラー効果と熱変換効果とに期待した構造にある。

しかし、①鉄網と舗装材とでは剛性が違い過ぎ層の落ち着きが悪いこと、②鉄網の高い剛性のため、載荷部が僅かでも沈下すると周辺端部が浮き上がり易いことなどのため、供用3ヶ月目には、直径10cm内外のクラックが路肩寄り沿いに10箇所発生し、舗装としての耐久性に問題のあることが判明した。しかし、供用10ヶ月後に至ってもクラックの拡大は見られず、舗装としては安定していた。

(c) 提案断面(2)

本断面の特徴は、1、2層目とも弾性を有する構造であり、距離減衰と高バッファ効果とに期待した構造にある。

しかし、供用4~5ヶ月目には、2層目が多量の添加ゴムと不完全な分散とに起因する過大な弾性沈下と不斉沈下の繰り返しで剥離が進行し、特にゴムが偏って多い所は台風禍後にポットホールが8箇所発生するなど、かなり耐久的是であるが舗装として問題のあることが判明した。

(d) 提案断面(3)

本断面の特徴は、距離減衰、低バッファ効果、マフラー効果、熱変換効果といった騒音の低減原理をバランス良く組み込んだ構造にある。しかも、当該表層の据え切り抵抗性( $W_s$ )やマーシャル安定度は、通常の8mm排水性と

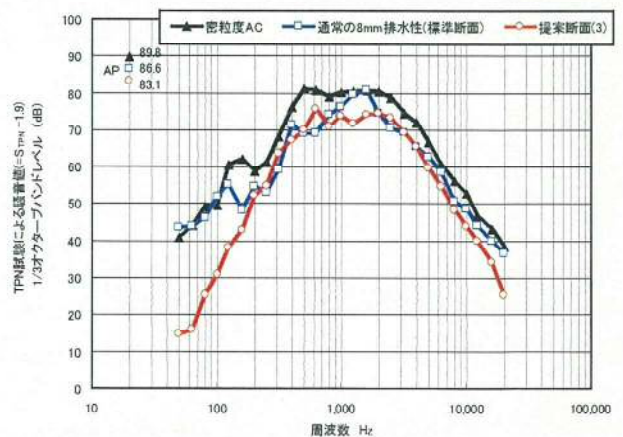


図-9 舗装体別の騒音周波数分布比較(TPN試験)

表-1 試験舗装の概要と結果

	標準断面		提案断面(1)		提案断面(2)		提案断面(3)	
試験舗装の断面	第1層 通常の8mm排水性 (Void=22%) 50 mm	薄層SMA (Void=3%) 20 mm	第1層 同左 20 mm	第2層 フレコド4号単粒 砕石(クラスウル入) 鉄網あり (V=38%) 40 mm	第1層 低弾性8mm排水性 (フレコトAs=対砕石 2.5%) (V=24%) 40 mm	第2層 高弾性8mm排水性 (V=25%,ゴム=10.5%) 20 mm	第1層 同左 30 mm	第2層 特殊マカダム混合物 (クラスウル入) (V=31%) 50 mm
低騒音の原理	①距離減衰		①距離減衰*②マフラー効果*③熱変換効果		①距離減衰*②低バッファ効果*③高バッファ効果		①距離減衰*②低バッファ効果*③マフラー効果*④熱変換効果	
層の位置	1層目	2層目	2層目	3層目	1層目	2層目	2層目	
配合(%)	砕石		51.9(7号)	98.0(4号単粒)		75.0(6号)	70.9(4号)、17.7(5号)	
	整粒砕石	76.8(8mm級)		73.7(5mm級)	86.2(8mm級)			
	砂	14.4	34.3	17.2	6.9		6.8	
	石粉	4.8	6.5	4.8	4.9	9.0	1.9	
	高粘度777ルト	4.0	7.3	2.0	4.3	2.0	5.5	2.7
添加物等			吸音材=5.1kg/1トン当り D13/100mmメッシュ鉄網			ゴム/10.5% 中温化剤 MC剥離防止剤	吸音材(細片に切断したもの)=4.2kg/1トン当り	
力学値	DS:mm/回	5,500		3,500(第2層/鉄網がなければ400)	3,100		6,300	
	Ws:mm/2000回	5.1					5.6	
	σ <sub>e</sub> :mm/0.55MPa	0.28			0.50		0.32	
	マフラー安定度:kN	第1層:6.8(残留安定度/99%)					第1層:6.6(残留安定度/10%)	
騒音値	S <sub>TPN</sub> :dB(A)	88.5	85.3	①第2層/熱変換効果加へ→87.1 ②第3層が無いとき→86.9	84.5	85.0	①第1層/低バッファ効果加へ→85.8 ②第2層/熱変換効果加へ→86.6 ③高効果と加へ→88.1	
	S <sub>RAC</sub> :dB(A)	88.6	85.8		84.9(最小値/83.8)	85.0(最小値/84.1)		
機能性評価	88dB(A)級		85dB(A)級	①87dB(A)級 ②86dB(A)級	85dB(A)以下		85dB(A)以下 ①85dB(A)級 ②86dB(A)級 ③88dB(A)級	
耐久性評価	現在の所(12ヶ月経過、積載車は全体の約半分)特に問題なし		課題有り:第2層に起因した局部クラック/10箇所発生(鉄網)		課題有り:第2層に起因したホットホール/8箇所発生(ゴム)		現在の所(5ヶ月経過、積載車は全体の約半分)特に問題なし	
使用材料の汎用性	特に問題なし		課題あり:①吸音材、②4号単粒砕石、③鉄網		特に問題なし		課題有り:①吸音材	

同程度であることから分かるように、5ヶ月経過後も荒れ以外の損傷はなく(通常の8mm排水性にも同様の荒れ現象有り)、耐久性に問題のないことが明らかであった。

### 8. 結論

85dB(A)以下を目指した低騒音舗装に関する本研究の結論は、概略以下の通りである。

- (1) TPN試験は、高精度でかつ再現性が良いだけでなく、いわゆるRAC車と同等の評価性能を有している。
- (2) 現行の騒音低減原理(距離減衰)では、空隙率が20%程度の時、87dB(A)前後が性能限界である。
- (3) 大幅な騒音低減は、発生騒音の低～高音の全域に亘って低減する必要がある。
- (4) 新たな低騒音原理の組合せによって、83dB(A)～87dB(A)級の低騒音舗装が可能である。しかし、84dB(A)級を越える高性能のものは、目下の所、舗装としての長期耐久性に欠ける。
- (5) 耐久的でかつ85dB(A)以下である低騒音舗装は、

距離減衰、マフラー効果、熱変換効果、低バッファ効果、過転圧の回避といった騒音低減原理をバランス良く組み込んだもので、表-1の提案断面(3)が好例である。しかも、騒音レベルに応じた選定が可能である。

(6) 耐久的で85dB(A)以下であるだけでなく、環境の創生にも寄与し得る低騒音舗装の実現のためにはさらに研究を進め、①好例とした提案断面(3)に使用した吸音材と同等品の開発、②50mm厚1層の低弾性型排水性舗装や、低弾性と中弾性型排水性混合物とを組み合わせ合わせた構造の舗装、③高比熱容量の特殊な人工砕石(特許出願中:暖まりにくく冷えやすい)を用いた、機能の長期保持などに関する研究が必要と言える。

謝辞: 本研究は、当社技術部門および関係部署の全面的支援を得て実施した。ここに記して謝意を表する。

### 【参考文献】

- 1) 舗装委員会、環境改善をめざした舗装技術の現状(1)~(8)、道路、2004年4月~11月
- 2) (財)道路保全技術センター、平成15年度事業報告書
- 3) 中村、特集にあたって、アスファルト、2004年、Vol.47、No.215
- 4) 阿部(文責)、路面騒音測定車、舗装、2000年7月

