

低騒音舗装－世界的に見たその技術革新



ウルフ サンドベルグ (スウェーデン道路研究所)
By Dr Ulf Sandberg
Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)
Linköping, Sweden
E-mail: ulf.sandberg@vti.se

訳：編集委員 藤田 仁 (日本道路株)

1. 低騒音舗装－その歴史的所見

現在、我々は交通騒音の問題は第二次世界大戦以降の工業の近代化に伴って発生したと考えがちである。しかし、そうではない。歴史を見ていけば交通騒音問題は2千年も前に遡る。ローマ帝国の時代には交通騒音を減少するための交通規制が制定されている[Sandberg & Ejsmont, 2002]。18世紀から19世紀にはヨーロッパの舗石舗装において牛車や馬車の騒音を低減するため路面に藁を敷き詰めることは通常行われていた[Sandberg, 2009]。ただこれらは病院や重要人物の家や事務所の近くに限定して行われた。

都市における環境という面から舗装の考え方をドラマチックに変えたのは19世紀から20世紀初頭に行われた木質ブロック（杉や松）の使用である。これらは、この舗装の開発者であるサミュエル・ニコルソン（米国、ボストン）の名前から別名「ニコルソン舗装（Nicolson pavement）」と呼ばれる。彼は初期の舗装工法の抱える各種の問題を解決しようと1848年に本工法を考案した[Nicolson, 1859]。安全で耐久性があり、静かできれいな道を舗装しようと考えた。その多くを成し遂げることができたが唯一十分でなかったのは耐久性であった。最初に施工した舗装は7年後に打ち替えられた。19世紀後半から20世紀前半にかけて木質ブロック舗装は北米やヨーロッパの大都市の多くで低コストかつ低騒音の舗装として使用された。現在もなお数箇所での舗装が現存している。図－1は、木質ブロックの敷設例を示したものである。



図 1: オスロにおける1914年ごろの木質ブロックの舗装. 写真は1984年のノルディック道路回議で"Väghistoriska utställningen" から入手したもの.

江戸時代の騒音の状態を試験的に解析したところでは、低騒音の路面の存在を明らかにすることはできず、むしろ木製の橋は騒音源であった可能性があると思われ、馬の蹄に装着されたわらじは騒音低減に有効と考えられた [Otsuka & Sandberg, 2010]。

2. 本文の目的と注意

本文は読者に最近の世界的な低騒音舗装について技術的な試みや解決法についてまとめて示すことを目的としている。しかし本文は日本の読者を対象としているため、日本の技術についてはほとんどの読者が知っておられることを前提とし敢えて日本の技術開発については述べていない。必要ならば日本の技術についてはたとえば [Fujita, 2012] を参考にされたい。

なお、騒音レベル dB の表現は A 特性の重み付けを行った値を表す。しばしば "dB(A)" と間違っ て表現されるので注意いただきたい。

3. 騒音測定方法

本文では今後、騒音測定結果について述べる必要があるため、騒音測定方法について多少の説明が必要と思われる。本来、道路の騒音測定には 2 種の国際的な方法が使用されてきた (SPB 法と CPX 法)。また、CPX 法は比較タイヤに関する規定が必要である。

- SPB 法は The Statistical Pass-By Method であり ISO 11819-1 に規定される。
- CPX 法は The Close-Proximity Method であり ISO/DIS 11819-2 に規定される (2012年12月より ISO として利用できる)
- CPX 法の比較タイヤについては ISO/TS 11819-3 に規定される (現在は案として存在)

もちろん米国は国際的な方法として受け入れていないが、最近同様な規定を作成している。

- The Statistical Isolated Pass-By Method(SIP 法) : AASHTO TP-98 に規定[Lodico et al,2012]
- The On-Board Sound Intensity Method(OBSI 法) : AASHTO TP-76-09 に規定

これら AASHTO 基準は購入できる

SPB 法においてマイクロフォンは音を反射する障害物のない道路レーンの中央から 7.5 m の位置に設置し一定速度の 1 台の車両の通過騒音レベル (時には周波数スペクトルも) を測定する。車速は同時に測定する。車速と騒音レベルをプロットし、乗用車では 50、80、110 km/h、大型車では 50、70、85 km/h の時の騒音レベルを読み取る。少なくとも 100 台の乗用車、80 台の大型車について試験し、試験路面の評価とする。SPB 法では道路に沿ったある 1 点での測定を行う。

CPX 法では1ないし2の比較タイヤをトレーラーに装着し、2つのマイクロフォンをタイヤ近くに設置する。車両が一定速度（50および80 km/h）で走行したときの音圧レベルをマイクロフォンで測定する。一般的に少なくとも100mにわたって測定した信号を解析し、それぞれの速度での平均的な騒音レベルを求め、試験路面の代表的な騒音レベルとする。マイクロフォンを外部と遮断するため図-2に示すようにトレーラーを覆う。他のオプションとしてマイクロフォンを大型車もしくはバンの4つのタイヤの一つに取り付ける方法もある。タイヤは比較用のものとしていずれ規定される ISO 11819-3 に適合するものでなくてはならない。それらはすでに ASTM F2493 で SRTT と呼ばれて規定されており、代表的な乗用車のタイヤとして考案された。また AV4 という英国の Cooper-Avon 製の小型トラックのタイヤもあり、大型トラックタイヤを代表するものとして考案されている。これらの結論に到達するまでには数多くの試験が行われてきた。これらのタイヤの製造法は特殊な方法が採られ、低い温度での保管が必要である。

日本もまた ISO の中でこれらの測定法の開発に参加している。



図- 2: 覆いを上げた CPX トレーラー



図- 3: 比較用タイヤ

4. 低騒音舗装-その概要

音響的な観点からみれば騒音特性に関わる基本的な路面のパラメータは以下の5つである。

- マクロ-そしてメガテクスチャ、最大骨材寸法 (MAS) も含む
- 空隙 (内部連続空隙)
- 層厚 (空隙率が10%以上の層にとって重要)
- スチフネス (硬さ) (タイヤの硬さに近い路面のみについて重要)
- ミクロテクスチャと粘着性 (この影響については未だ明らかにはなっていない)

これらのパラメータとその影響は以下の書籍等に極めて詳しく述べられている [Sandberg & Ejsmont, 2002], [Bernhard & Sandberg, 2005]。そこでいくつかの興味ある事例についてのみ本文では紹介させていただくこととする。

特に技術革新の面から見た興味深い路面タイプとしては以下のものが挙げられる。

- 小粒径骨材路面
- 薄層舗装 (TAL)
- 2層式ポーラスアスファルト舗装 (DPAC)
- エポキシバインダーを用いたポーラスアスファルト舗装 (1層もしくは2層)
- 少量のゴムを混合したアスファルト舗装 (AR)
- 多孔質弾性舗装 (PERS); 硬質骨材を含むものと含まないものがある
- ダイヤモンドグラインディングしたセメントコンクリート舗装
- 次世代コンクリート路面 (NGCS)

最初の5つはアスファルト舗装であり、最後の2つはコンクリート舗装である。多孔質弾性舗装 PERS はゴムとポリウレタン樹脂と硬質骨材を混合したものである。

5. 「騒音低減」と「比較路面」

「低騒音」という言葉は相対的な意味を持つ言葉であり、常に比較すべき対象を持つ。もし音響的に非常に悪い舗装、たとえば横断方向にタイングルーピングしたコンクリート舗装と比べればほぼ全ての舗装（通常の密粒度アスファルト舗装も含め）は低騒音舗装となる。この現象は米国では特別のことではない。しかし、この比較が最大粒径 11 mm の骨材を使用した碎石マスチックアスファルト (SMA) を対象に行われたとしたらほんのわずかの舗装が低騒音舗装と分類されるだろう。

「低騒音舗装」という言葉を定義するためには、グローバルな比較路面が必要である。このことについては [Sandberg, 2006] で詳細に扱っているが、ここでは「仮想比較路面 (virtual reference surfaces)」の概念を述べている。これは現在、ヨーロッパの交通騒音予測モデル (CNOSSE-EU) に取り入れられている。仮想比較路面はともに最大粒径 11 mm の骨材を使用した密粒度アスファルトと碎石マスチック路面を採用している。騒音特性がこの比較路面と同様な実路面が得られれば比較路面として有用であることは間違いない。

日本では最大粒径 13 mm の密粒度アスファルト (以下 DAC13) が通常使用されているが、DAC13 は前述の視覚的比較路面とはそれほど違わない。DAC13 を比較路面とする場合はわずか 0.2dB を差し引けば良い。つまり、日本の DAC13 を比較路面とした場合には [Sandberg, 2006] で提案した仮想比較路面を使用した場合よりも 0.2dB 高い騒音低減効果があるということを意味する。これは非常に小さいレベルであり、本文では特に記述しない限り無視することとし、DAC13 を比較路面としたか仮想比較路面を用いて騒音低減を記述したかについては特に記述しない。

6. セメントコンクリート路面

セメントコンクリート舗装の騒音低減については大きく2つの技術がありそうである。一つがダイヤモンドグラインディング (CDG) でありもう一つがこの技術を進化させた次世代コンクリート路面 (NGCS) と呼ばれるものである。どちらの技術も米国で行われスウェーデンでもまた試行されている。CDG は縦断方向に回転するダイヤモンドカッターで溝を付けるもので数 mm の深さおよび幅の密なルービン

グであるが NGCS はより大きな間隔で同様な溝を作るものである。路面の写真を図—4に示す。



図- 4: NGCS 路面 (左側) CDG 路面 (右側). 写真は[Kraemer, 2008]より.

CPX を用いた OBSI (SRTT タイヤのみを使用する) と呼ばれる測定が米国の数多くのセメントコンクリート舗装に対して行われた。結果を図—5に示す。CDG 路面は 99 dB のピークを示し、通常の密粒度アスファルト DAC が 101 dB である [Sohaney et al, 2012] ことから 2 dB の騒音低減効果を示している [Rasmussen et al, 2008]。2011年に筆者らが行ったスウェーデンの結果では比較路面に対し 3 dB の騒音低減であった。NGCS 路面は 100-101 dB [Scofield, 2012] であり、この結果からは彼らの意図に反し良い結果は見られていない。しかし、[Scofield, 2012]による別の比較では NGCS と CDG の差は約 2 dB であった。Scofield による CDG は Rasmussen らが測定したものより騒音が大きいことが考えられる。スウェーデンで 2012年に行った測定では NGCS は比較路面 (アスファルト) よりも約 1 dB 高かった。このことから良好に施工された CDG はセメントコンクリート舗装の騒音低減において最良であり、比較路面よりも 2 – 3 dB 低い騒音とすることができる。

ポーラスコンクリートについても試行がいろいろと行われてきたがポーラスアスファルトの騒音レベルに匹敵する低い騒音レベルにはなかなか達していない。例外としてオランダの Modieslab と呼ばれる特殊かつ高価な事例がある [Sandberg, 2009]。

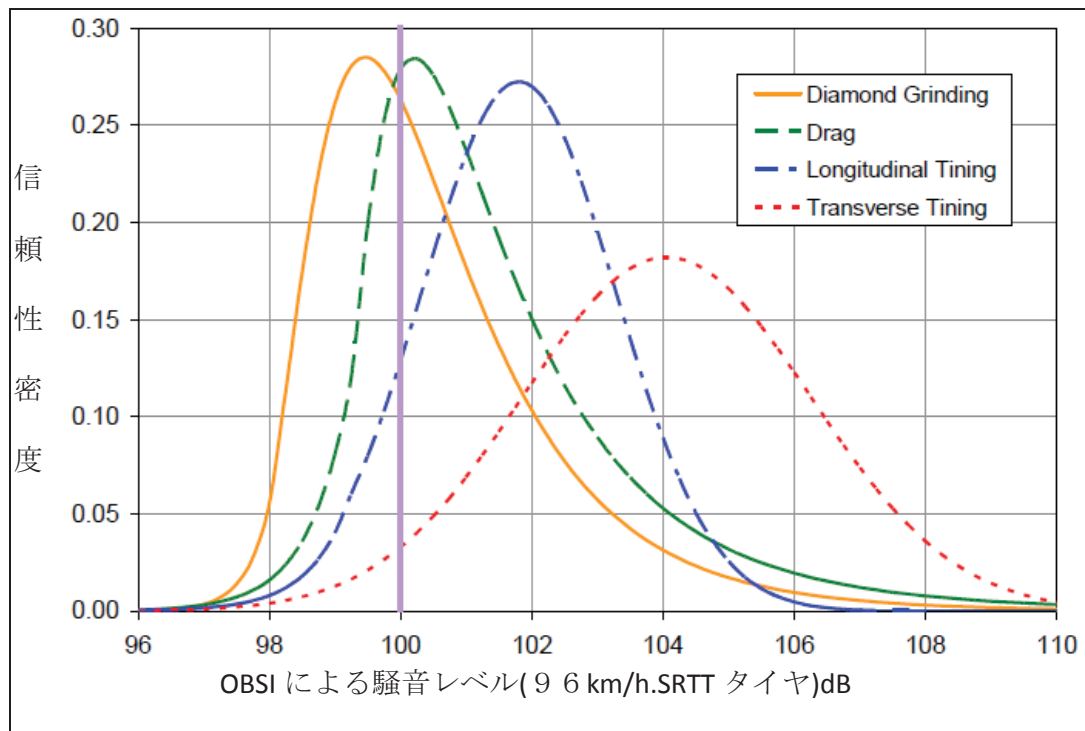


図- 5: 米国での時速 96 km/h におけるコンクリート舗装の騒音測定レベルの分布図。オレンジの実線は CDG 路面. 代表的な密粒度アスファルト (DAC) や比較路面はおよそ 101 dB を示す. 図は[Rasmussen et al, 2008]より。

CDS や NGCS は空気や水を十分に排出させることによりエアポンピング音を減少させる効果を持ち、タイヤが走行する上で滑らかな路面であると考えられる。これらの路面は好ましい「ネガティブテクスチャ (負のテクスチャ)」を持った路面であると特性付けられる。すなわちタイヤ/路面の接着面積を減少させるテクスチャを持っているということの意味している。

7. 多孔質弾性舗装 (PERS)

7.1 世界的なプロジェクト

多孔質弾性舗装は、もともと 1970 年代にスウェーデンで開発され、日本において実用化するための作業が行われてきた。横浜ゴム株式会社と日本道路株式会社が共同で行った座間市、平塚市、飯塚市の試験施工は非常に有用なものであったが、残念なことにすでに撤去された [Fujita et al, 2011]。独立行政法人土木研究所の走行試験場で施工された PERS は未だ残っており、そこでの条件下では満足できる結果を示していると報告されている [Kubo, 2011]。これら日本の PERS に関しては、読者はこれらの文献を参考にされたいが、 [Sandberg et al, 2010] でも、これら日本の開発についてまとめて記述している。

ヨーロッパにおいては PERS に関する 2つのプロジェクトが進行中である。ひとつはヨーロッパの数カ国でともに行っている PERSUADE と呼ばれるプロジェクト

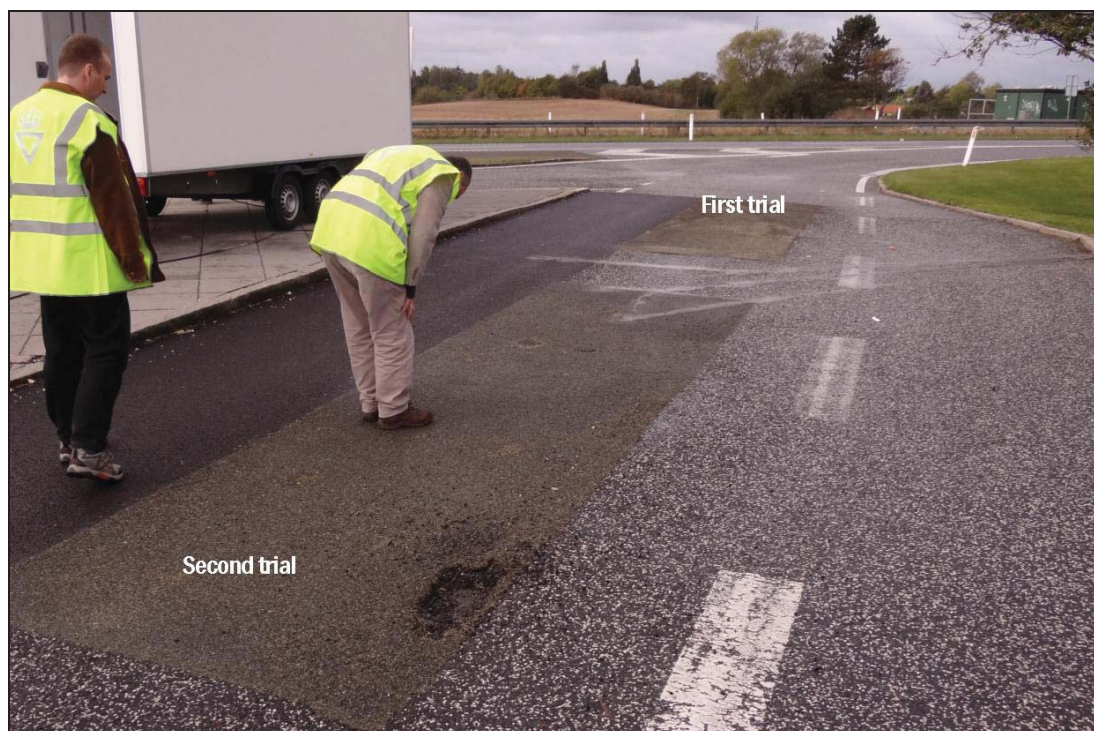
(www.persuadeproject.eu)であり、もう一つはオランダの国家的プロジェクト（正確な名称は不明）である。

PERS は滑らかなテクスチャと高い空隙率によりエアポンピング音を減少させるとともに吸音効果により騒音を低減するほか、その軟らかさによりタイヤ/路面間の静的および動的変位を減少することができるものであると考えられる。

7.2 PERSUADE プロジェクト

PERSUADE プロジェクトは現在3年目に入っており、ほぼ計画の中間に差し掛かっている。初年度は主として材料開発に当たったが、その大部分を健康への影響や火災の危険性の解析に費やした。ゴム骨材、硬質骨材（砂や小粒径の石）やポリウレタン樹脂や添加剤の各種混合物についての結合強度や基層への接着強度、滑り抵抗、摩耗性の試験を実施した。全ての目標を同時に満足させることは非常に困難であった。現在のところ最良の配合としては容積配合で33%のゴム骨材、50%の硬質骨材、17%のポリウレタンとしたものでその空隙率は24%である。初期の試験では空隙は30%を超えていたが、結果的に空隙と吸音は犠牲となった。

本材料は、現在デンマークの Arnakke(Roskilde の数 km 西側)の休憩エリアに施工されている。最初の施工ではポリウレタンが湿度により発泡してしまい失敗した。2度目は湿度は問題なかったが夏季の数ヶ月間で、おそらく紫外線の影響と考えられるがポリウレタンが黄色化し結合強度が悪化した。2012年10月に入ってポットホールが発生し材料は完全に崩壊した。図一6に試験区間の一部を示す。



図一6: デンマーク Arnakke の PERS 試験施工、施工後半年が経過 (October 2012).

材料開発は継続し、より大きな規模（代表的なものは延長 80 m）の試験施工を 2012 年にデンマーク、ベルギー、ポーランド、スウェーデン、スロベニアで行う計画である。

現在の関心（不安も含まれるが）は初期のものよりも小さな空隙率にしたことにより、水分が含まれ、乾燥するときに「スポンジ」のような挙動を示すことである。底部に存在する水分は基層との接着を悪化させるだろう。空隙を小さくしたことは騒音低減効果を下げ、硬質骨材を増やしたことによりたわみ性が小さくなっており表面の空隙詰まりも生じるかもしれない。

現在まで、そして今後の本プロジェクトの状況はウェブサイトで見ることができる。

7.3 オランダの国家的 PERS プロジェクト

本プロジェクトの初期の部分については [Hofman et al, 2011] に報告されている。PERS 材料は室内で製作され、機械に搭載されたドラムに巻き取られる。ドラムを現場に運び、現地でポリウレタンを使用して接着する。図一 5 に施工状況を示す。自動車道 A50 に沿った休憩エリアへのアクセス道路において延長 300 m が施工された。騒音低減効果は DAC16 に比べて 8.5 dB となった（日本の DAC13 に比べれば 7.5 dB の低減と考えられる）。残念なことに舗装はわずか 4 ヶ月後に崩壊し撤去された。

新しいオランダのプロジェクトが 2012 年に始まり、2019 年まで継続される。2012 年から 2017 年にかけての主な作業が材料の開発である。新しい材料については必ずしも図一 7 に示した方法で施工される必要はない。



図一 7 ロールペーブの技術を使用しての PERS の施工。2009 年 Kloosterzande のテストトラックでの施工。同じ方法で 2009 年の自動車道のアクセス道路でも施工された。写真はベルギー道路研究所 Luc Goubert 氏提供。

8. 少量のゴムを混入したアスファルト路面

米国、特にアリゾナやカリフォルニアでは、アスファルト中に微粒のゴムを混合した舗装が開発され、使用されている。この種の舗装は「アスファルトラバー (AR)」や「ラバライズドアスファルト (RA)」と呼ばれている。バインダーに定めるゴムの量は一般的に20%であり、バインダー量は9~10%と多めになっている。したがってトータルのゴム量は1.8~2.0%である。この舗装には2種類あり、一つは密粒度タイプ (空隙10%以下) でもう一つが開粒度タイプ (空隙15~19%) である。後者はアリゾナでは AFRC、カリフォルニアでは RAC-O と呼ばれている。

AR の騒音特性に関するセッションが 2010 年にポルトガル、リスボンで開催された Inter-Noise2010 の中で開かれており多くの報文を見ることができる [Inter-Noise, 2010]。2012 年の10月にはドイツで AR 舗装についての国際会議が開催されている。[\(http://www.consulpav.com/ar2012/english/\)](http://www.consulpav.com/ar2012/english/)。

米国の ARFC の騒音低減に関する研究では、約10dB の騒音低減が報告されている。興味ある結果であるが比較路面はかなり騒音の大きな路面であり、通常のアスファルト舗装との比較がなされていない。比較がおこなわれれば違ったストーリーとなることが考えられる。スウェーデンでのわれわれの経験によれば、同じ最大粒径の混合物で AR と SMA、ポーラスアスファルトを比較した場合、ゴムの混入により密粒度タイプでは0.5dB、ポーラスアスファルトでは同じ空隙率の場合1~2dB の低減効果が確認できている [Sandberg, 2010]。

しかし、ゴムを混入させることはスクラップタイヤへの配慮であったり、バインダーの老化や摩耗の防止などの利点を有する。交通による動的な荷重があるところではクラックが「閉じる」という効果も見られる。その他、アリゾナの AR 舗装の場合には13~20mm の厚さで施工でき、資源とコストの節約に寄与できる。通常密粒度アスファルト (アリゾナでは最大粒径9.5mm) の場合にはそのような厚さで施工することは困難である。ただし温暖な気候であることが必要と考えられる。

9. 薄層アスファルト舗装 (TAL)

薄層アスファルト舗装 (TAL) は道路管理者にとって道路の維持管理コスト低減に効果があることと、さらに主要道路の近郊の住民からの低騒音へのニーズもあってその適用が増加しているように思われる。TAL は基本的に DAC や SMA や PAC とは厚さが薄い (通常30mm 未満と定義される) 点を除いては異なるものではない。ただ、時には特殊な粒度で設計されたり、厳選された骨材を使用するものも存在する。また、最大粒径8mm あるいはそれ以下の骨材を使用した DAC や SMA も薄層アスファルト舗装として通常使用される。

いくつかのタイプの TAL が存在するが、筆者は以下のように分類したいと考えている。

- 通常の小粒径 DAC, PAC および SMA。一般的に国が定めた仕様による (1-3 dB の騒音低減)。
- 通常の小粒径 DAC, PAC および SMA。国が定めた仕様によるが、より良い騒音低減が可能ないように改良を加えたもの (2-4 dB の騒音低減)。
- 通常の小粒径 DAC, PAC および SMA。企業が特別に開発したもので国の仕様とは異なる。企業独自の製品である (1-4 dB の騒音低減)。
- 特殊かつ特別に進化した小粒径アスファルトで、企業独自の仕様による。特に性能を向上させたもの (3-8 dB の騒音低減)

これらのタイプの騒音低減効果は上記の括弧内に示したものである。多くのヨーロッパの国においては独自のより高度な舗装路面は低速や中速の市街地および郊外の道路において広く用いられてきている。ただし英国、オランダ、フランスにおいては使用されていない

TAL としてはしばしば空隙率 14-24 % のものが用いられる。これは吸音によって騒音低減効果を向上させようとしたものである。しかし、吸音効果を向上させるためには層厚が必要である。TAL の吸音はわずかであるが、重要なことは高い空隙により、エアポンピング音を効果的に減少させることである。

薄層舗装の騒音低減はそのタイプにより下記の特性の 2 つもしくはそれ以上によってもたらされる。

- 小さな最大粒径の骨材を使用することにより滑らかなテクスチャとし、タイヤ/路面の接触点の間隔を小さくする。
- たとえば骨材の形を厳選するなどの特殊な骨材を用いる。
- 骨材の頂点をなめらかに揃えることにより、タイヤのころがりをスムーズにする。
- ネガティブテクスチャと呼ばれるものを形成する。
- エアポンピング音を減少させる開粒度のテクスチャを形成する。
- エアポンピング音を減らし吸音をする。

これら上述した特性を得るには特別なコストが必要である。ただ厚さが薄いためこれらのコストは材料が少なくなることで相殺できる。

騒音低減の面から見れば薄層アスファルト舗装も他の舗装と同様に、その効果がなくなっていく。2~7 年にわたり 44 の路面を調査したオランダの研究では市街地においては 0.5 dB/年、高速道路では 0.6 dB/年の割合で騒音低減効果が低下していく [Bendtsen et al, 2012]。しかし、この低下割合のばらつきは大きい。

多くの情報は [Sandberg, 2009], [Sandberg (ed), 2011]. に述べられている。

10. 超小粒径骨材路面

アスファルト混合物の最大粒径 (MAS) は騒音特性に関して重要な要因である。MAS の観点からは以下のような分類が考えられる。

超小粒径	MAS = 3-4 mm
小粒径	MAS = 5-9 mm

中粒径	MAS = 10-13 mm
大粒径	MAS = 14-20 mm

一般的には騒音特性は MAS と良好な関係があるといえる。MAS が小さくなれば騒音も小さくなる。薄層アスファルト舗装でも述べたが舗装に使われる小粒径骨材はほぼ共通している。安全性や耐久性を考えれば小さくできる限界があるといえる。

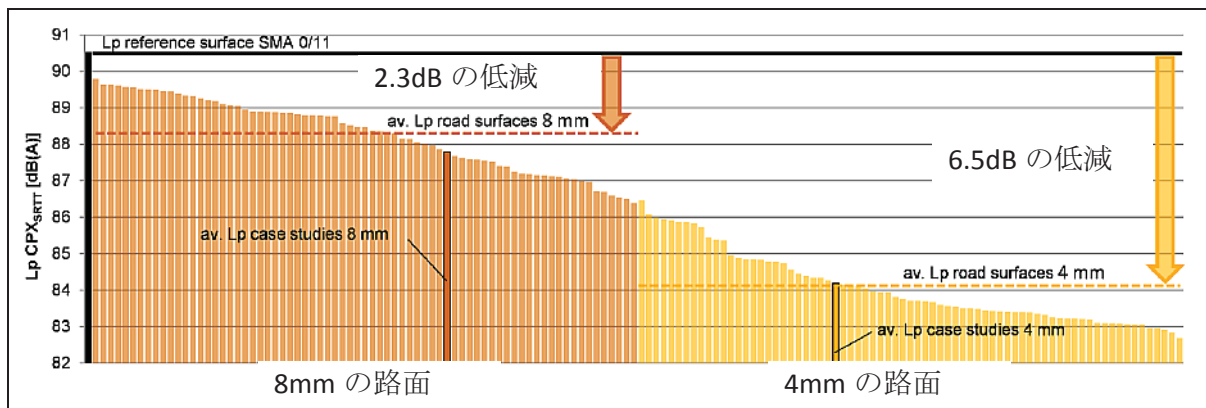
ヨーロッパでは近年低騒音舗装として新しい技術が始められた。フランスの企業であるコーラス (Colas) 社が 2008 年より「Nanosoft」と呼ばれる特許技術により 2 層式ポーラスアスファルトに匹敵する 8～9 dB を超える低騒音舗装を提供している。超小粒径骨材として 0～4 mm の骨材を使用し大きなマクロテクスチャを持ち良好な排水機能を有するというものである (図一 8 参照)。排水機能については 25～30% の空隙を有することにより実現し、厚さは 25～40 mm であるにもかかわらず十分な吸音特性を持っている。コーラス社が行った吸音に関する研究では最適な骨材サイズ (1～2 mm) と最適な空隙量を組み合わせ、結果として望ましい粒度曲線を示している [Gautier, 2008]。そのような路面で十分な安定性と摩耗抵抗性を持たせるというチャレンジは SBS 改質アスファルトによってこそ実現できたであろう。



図一 8: 新設時の Nanosoft 路面、2008 年ポーランドの Poznan で施工された。コインの直径は 23 mm。写真はポーランド TUG の Piotr Mioduszewski より。

上記の情報は Nanosoft 路面としての企業としての情報であり、騒音の測定は第三者の研究者によって行われることが望ましい。ポーランドでの測定結果では数例の Nanosoft 路面の騒音は SRTT タイヤを用いた CPX 測定で 7 dB、AAV4 タイヤを用いた測定では 4 dB の騒音低減であった [Mioduszewski, 2012]。しかし、これは最大骨材サイズが 5 mm の初期の仕様のものであり、現在のものとは異なっているようである。筆者はおそらく 1 dB は初期のものとは異なっていると考えており、結果として乗用車であれば 8～9 dB の騒音低減というコーラス社の値と大きくは異なることはないだろうと考えている。しかし、トラックタイヤを用いた場合に騒音低減が小さくなることは十分考えられることである。というのは、小粒径の舗装上ではトラックタイヤの騒音が相対的に大きいことは知られていることである [Sandberg & Ejsmont, 2002]。この点で乗用車のタイヤに対しては良い結果となっている。

多くの超小粒径骨材路面を含むスイスの TAL と SMA に関する研究報告がある [Bühlmann et al, 2012]。最大粒径が 4 mm および 8 mm の 7 2 箇所の路面を SMA11 と比較した。その結果を図一 9 に示す。4 mm の最大粒径の路面は各種の Nanosoft と他の 2 社により施工された同様な路面 である。それらは Nanosoft とは違ったコンセプトで製造されている。4 mm の路面は 供用後 0～3 年で空隙率は 16-22 %、また 8 mm の路面は 供用後 0～6 年、空隙率は 6-12 % である。



図一 9: スイスの低騒音舗装調査結果 [Bühlmann et al, 2012]。SRTT タイヤ使用、速度 50 km/h で CPX 法による。

8 mm の路面は平均 2.3dB の騒音低減を示し、8 mm の路面は平均 6.5 dB となっている。筆者が聞いたところでは 4mm 路面の騒音レベルの変動は主として供用年数によるものであり、騒音低減は 1 年あたり 1 dB 小さくなるとのことである。これは極めて早い変化であり、速度 50 km/h での 2 層式のポーラスアスファルトにおいて予測されるものと同等に良くない結果である

図一 9 において 4 mm 路面と 8 mm 路面のラップする部分がないことは興味深い。これは、騒音への最大粒径の影響が大きいことを示している。この図に最大粒径 16mm の路面の結果を加えてもおそらく同様にオーバーラップしないであろう。

11. ポーラスアスファルト (PAC) - 1 層

すでに 1 層のポーラスアスファルトは長年用いられてきており、通常のものと考えられるので最近の 2 つの試みについてのみ述べることにする。

最初の試みは、ニュージーランド交通局 (NZTA) がエポキシアスファルトを用いて PAC の強化を図ったものである。エポキシアスファルトを用いた PAC (ニュージーランドでは開粒度ポーラスアスファルト (OGPA) と呼ばれる) は 初めに NZTA の室内促進試験施設 (CAPTIF) で、次に現場でプラントでの製造や施工工程に特に修正を加えることなく実施された。20% の空隙率で施工されたこの舗装は SPB 法での測定で良好な結果を示し、4 年経過後の供用性も良好である (2012)。

エポキシアスファルトと呼ばれるバインダーはおよそ15%のエポキシと85%のアスファルト（それと数種の添加剤を加える）から成り、養生後は固くなり、ゴムの性質はわずかとなる。初期の研究ではエポキシ改質バインダーの主な利点は酸化に対する抵抗性にありそうである。筆者はこの手法は交差点などの水平方向の応力が高い箇所にPACを適用する際に可能性があると思っている。

二つ目の試みはスウェーデンのJonkopingからHuskvarna間の自動車道E4の最大粒径11mmの1層PACの例であり、SMA16と比べて2-3dBの騒音低減しかなかったものである。その理由は厚さが40mmしかなく、吸音のピークがタイヤ/路面騒音のピークと合っていないためである。騒音低減を大きくするため、供用2年後に厚さ30mmの1層PACをオーバーレイした。2年経過した後ではあるが2層式ポーラスアスファルトと同様な形となったことで、騒音低減も2-3dBから7dBへと大きくなった。

これは年数を経ても厚いPACを得るために効果的な方法である。もちろん当初の層が空隙を失っていないということが条件である。

12. 2層式ポーラスアスファルト (DPAC)

2層式ポーラスアスファルト (DPAC) は最も低騒音舗装を得るのに効果的と一般には考えられている。一方、温暖な気候の地域では、自動車道のDPACの寿命はおよそ平均で8年である。スカンジナビアのような厳しい寒冷地ではスタッドタイヤの影響でその半分の寿命となる。図—10に代表的なDPAC舗装を示す。



図-10: 道路端から見た 2 層式ポーラスアスファルト舗装。事例はイタリアのもの。上層は空隙 20-28% で厚さ 25-30mm (最大粒径 4 あるいは 6、8、11mm) 下層は同じ空隙率で厚さ 40-50mm、11/16mm の骨材を使用。施工は 2 層別々の施工である。

DPAC はオランダ、ドイツ、イタリアでよく用いられている。しかし米国、フランス、オーストラリア、香港ではほとんど使用されていない。これらの国ではアスファルト舗装は通常厚さ 50mm までであり、2 層式技術は厚い舗装にしか使用できない。しかし、本当に我々は 35-45mm より厚い舗装は必要としないのであろうか？

スウェーデンでは現在、DPAC と 1 層の PAC の両方を行っているが、前述の Jonkoping から Huskvarna 間の自動車道 E4 での騒音は面白い結果を示している。当初の騒音低減は通常の SMA16 に比べ 7-8dB であった。これは仮想比較路面との比較では 1.5 dB 差し引かねばならない。驚くべきことに 1 年後の騒音は変化しなかった。つまり、空隙詰まりが騒音に影響を与えなかった。2 年後 (2012) にも空隙詰まりはあったが 1 dB しか低下しなかった。現地の交通量はかなり重交通で大型車混入率も大きかった。

1 層の PAC および DPAC の上層の最大粒径は 11mm である。多くの国では 8mm を採用している。スウェーデンの道路局は冬季のスタッドタイヤによる摩耗のため 11mm よりも小さな最大粒径を使用したがらない。経験によれば 8mm を採用すれば騒音低減は 1 dB 大きくできる。オランダでは 8mm を上層に採用し 8 dB の騒音低減という結果となっている [Morgan, 2008] (ただ仮想比較路面と比べるならば 1 dB 差し引かねばならない)。スタッドタイヤを使用している国ではこの選択が最良であろう。最大粒径が 8mm を下回ると摩耗が多くなってしまう。

スウェーデンにおいては、司法により自動車道沿線における騒音低減のための低騒音舗装を使用するよう求められた。面白いことは 1 層の PAC と DPAC の騒音の差は 5dB あるが、DPAC の 30mm 厚の上層は 1 層の PAC (ただし 5-8mm 厚い) と同じ混合物である。このことは騒音低減の 3分の2 は DPAC の下層 (35-40mm 厚) によって行われることを意味する。

DPAC の全体の音響特性に対する下層の影響を調査した最近の研究では 80mm の厚さではタイヤ/路面騒音のピークと吸音がよく一致するが、40mm では一致しないという結果が得られている [Sandberg & Mioduszewski, 2012]。図-11 を見れば 1 層と 2 層のポーラスアスファルトの周波数ごとの吸音に違いがあることが明らかである。

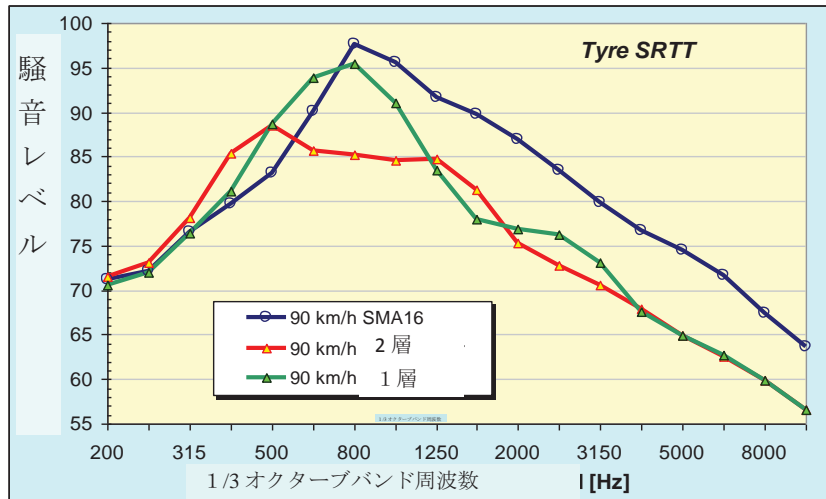


図-11: SRTT タイヤを使用した CPX 法 (90 km/h) による 1/3 オクターブ解析結果。AV4 タイヤ (比較用トラックタイヤ) を用いても同様である。

吸音効果について図-12 に示す。吸音ピークの高さは空隙率により決まり、ピークの幅はフロー抵抗により決まる。またピーク周波数 (ピークの位置) は層厚によって決定される。

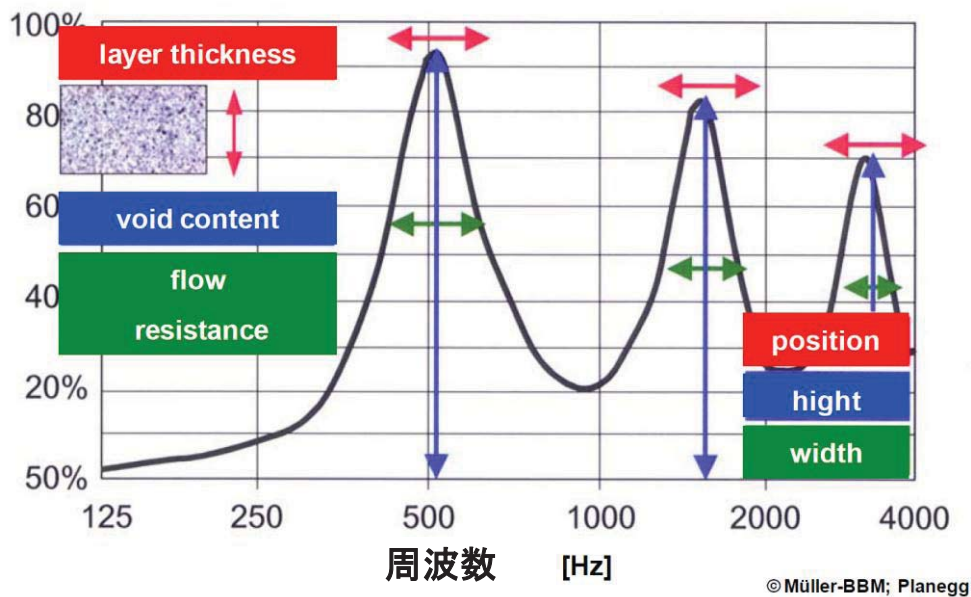


図-12: 3種の舗装のパラメータと吸音率、周波数との関係。本図はドイツ、Müller-BBM の Dr Thomas Beckenbauer の許可を得て掲載。

筆者は周波数のピークに関して重要なことは層厚のみでなく、層の中で上から下までどのように音が伝わってきたかが重要であると考え。もし空隙が広ければ (最大粒径が 11 ないし 16 mm の場合)、音は直線的に短い距離で伝わるが、空隙が狭い (最大粒径が 4 mm もしくは Nanosoft の場合) と曲がって伝わる。このことにより、最大粒径 4 mm の Nanosoft が厚さ 40mm であるのに厚さ 80mm の最大粒径 11 あるいは 16 mm のスウェーデンの DPAC と同じように 800-1200Hz の吸音特性を有するかが説明できるだろう。

13. 大きなネガティブテクスチャ路面

ポーラスな路面のテクスチャ（キメ）を測定したならば、それがかなり大きいことに気づくであろう。たとえばスウェーデンの DPAC を ISO 13473-1 により測定したならば平均キメ深さ（MPD）は 1,8mm である。ポーラスでない SMA11 の MPD はおよそ 0,9mm でありポーラスアスファルトの半分である。大きなテクスチャの路面はタイヤを振動させそうであるが、ポーラスアスファルトはより静かである。もちろん吸音やエアポンピング音の減少という面もあるが、テクスチャが上向きでなく舗装中の下に向かっていくことが大きな要因であり、そのためタイヤトレッドがテクスチャを閉じ込めることができなくなるのである。テクスチャはその形状を曲線で表現でき、それが下向きのものをネガティブと呼び、上向きなものをポジティブと呼ぶ。ポーラスな路面は代表的なネガティブなテクスチャを持つ路面である。同じことが薄層舗装にも言える。

2011 年に本文でも触れた供用後 1 年の DPAC において走行車線の右側走行位置について表面を研磨機によって延長 65m、幅 0.9m を研磨した。表面の 1-2mm が研磨され、初期の路面に比べ、よりフラットなネガティブテクスチャ路面が得られた。図-13 は本手法により得られた形状曲線を示し、図-14 に研磨前後の路面の写真を示す。

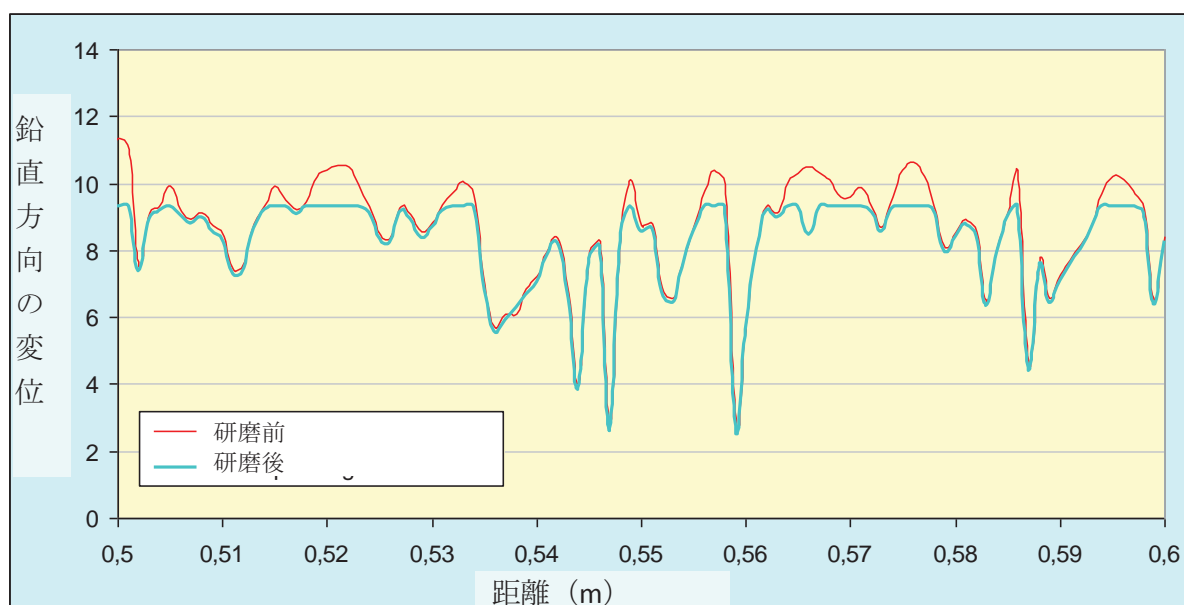


図-13: 表面研磨による形状曲線の変化（赤：研磨前、青：研磨後）



図-14: 研磨前（左）、研磨後（右）の写真。コインの直径は25mm。

研磨した路面はタイヤ/路面の接触の際に、より滑らかな路面となり結果的にタイヤの振動を減ずる。CPX法による2種の比較タイヤを用いた騒音測定結果では1-3dBの騒音低減が見られた（図-15参照）。比較路面のSMA16に比べれば70-90km/hで9dBの騒音低減となっている。

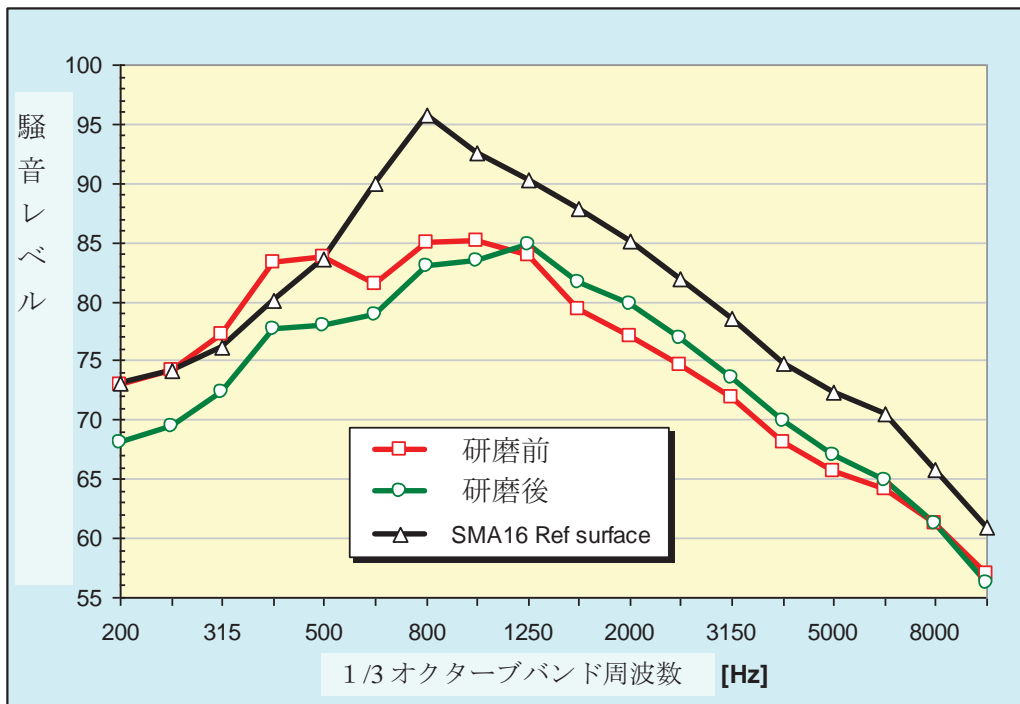


図-15: 研磨前（赤）と研磨後（緑）および比較路面 SMA16（黒）の1/3 オクターブバンド周波数スペクトルの比較。2種のタイヤでの測定の平均（速度70および90 km/h）

さらに研磨路面は転がり抵抗が4-7%低下した。これにより騒音および転がり抵抗の両面からタイヤが路面を転がる際に滑らかな路面がいかに重要かが示唆された。

タイヤ/路面の接触において、その変位は小さいほど良く、空気が排出されるためには十分なスペースが必要であることも分かった。

これらのことから、研磨法はすでに騒音低減の効果がある舗装の騒音をさらに低減せる方法として提案される。同じ効果が SMA でも期待できるがまだ試験は行っていない。騒音低減に限らず、転がり抵抗の減少もまた研磨に要するコストをカバーできる利点である。

だが、1年後の試験では(2012年)、研磨の効果は消えてしまった。目視でも研磨跡は認められない。これは冬季にスタッドタイヤの走行に曝されたためと考えられ、スタッドタイヤの走行がなければ、効果はもっと持続したと思われる。

14. 路面の種類分けとクラス分け

14.1 国家的な種類分け

英国、デンマークそしてオランダでは騒音特性も含めた路面の種類分けの計画がある。

オランダは各種路面の騒音低減値を種類分け(ラベル付け)し、道路工事の騒音レベルの仕様に利用しようとしている。この方法は Δ_{road} 手法、英語では C_{road} と呼ばれ、その値は C_{wegdek} と呼ばれる。ある種の路面の C_{wegdek} 値を得るためには試験区間における SPB 法による測定が必要である。得られた値はオランダの数多くの比較路面(DAC16)の値と比較し、騒音レベルの差が C_{wegdek} となる。2012年7月17日に54の試験路面(比較路面、低騒音路面が含まれる)のリストが出された[Stillerverkeer, 2012]。

英国の計画は HAPAS (for Highway Authorities Products Approval Scheme) と呼ばれ、British Board of Agreement (BBA) によって運営されている。これは1995年に道路および関連分野の革新的な製品、材料、システムについて国家的な承認を確立させようとして設立されたものである。これにより、個々の機関が独自に評価、試験を行う必要がなくなった。HAPAS に関する BBA の承認プロセスでは SPB 法による騒音試験を含む室内試験、現場の調査、材料の製造に関わる評価などが含まれている。データが許容されれば HAPAS 証明書が発行される[HAPAS, 2008]。本文執筆時点では67種の薄層舗装が承認されている(<http://www.bbacerts.co.uk/certificates.aspx?ca=Thin+Surface&ct=HAPAS&ob=0&pg=1&>)。

デンマークでは SRS と呼ばれるシステムがある。これは騒音特性の試験である[Kragh, 2007]。測定は CPX 法により行われる。

14.2 ヨーロッパレベルでのクラス分け

欧州基準のグループである CEN/TC 227/WG 5 は欧州基準の路面特性に関するワーキンググループであるが、そこでは路面の騒音のクラス分けを行っている。この作業は始まったばかりで2013年に最初のレポート案が出される予定である。

15. まとめ

本文は低騒音舗装の改良や新しいより優れた低騒音舗装の開発について現在の国際的な状況をまとめたものである。多くの場合に共通することは、騒音低減は決して無料ではできないということである。通常の舗装に比べ、低騒音舗装は極端に高コストとなる場合があり多くの先進的な薄層舗装もまた高価である。Nanosoft タイプの4 mm 骨材による路面は、通常の舗装に比べて高価である。スウェーデンの気象条件における DPAC は通常使用される SMA16 に比べてライフサイクルで見れば6倍高価である。この原因は材料や施工、維持費用の高さもあるが、寿命が短いことも要因である。そのような舗装もオランダでは一般的に使用されている。それは低騒音舗装により人々がより道路の近くで暮らせるようになるからである。スウェーデンでは司法が道路管理者に低騒音舗装を使用するように命じたことが採用の理由である。

いくつかのヨーロッパの国、たとえばスウェーデン、デンマークでは騒音に曝されることによる健康関連の影響も含めたコストを道路を建設する際に計算し、考慮されている。騒音の低減をコストとして受け止めることがスタートである

一般的に低騒音舗装の近くで生活している人々の反応は極めて肯定的である。また路面を走行する運転者や同乗者もまた良い感触をもっている。しかし、道路管理者にとっては社会へのサービスのための超過資金調達する方法を見つけねばならないという問題を抱えているというのが現状であろう。

参考文献

注) 下記のリストにおいて著者名は姓、名の順で記載している。

AASHTO (2012): Techstreet on-line shop; see <http://www.techstreet.com/standards/aashto>

Alabaster, David; Herrington, Phillip; Waters, Jeff (2012): "Ultra Long Life Low Noise Porous Asphalt". Proc. of Acoustics 2012 Hong Kong, May 2012, Hong Kong S.A.R.

Bendtsen, Hans; et al (2012): "Long time effect of noise reducing thin layer pavements". Paper 206, Proc of Inter-Noise 2012, New York City, NY, USA.

Bernhard, Robert J.; Sandberg, Ulf (2005): "Tire/Pavement Noise -- Where Does It Come From?" TR NEWS, No. 240, Sep-Oct 2005, pp 17-21, Transportation Research Board, Washington, DC, USA.

Bühlmann, Erik; Cosandey, Laurent; Ziegler, Toni (2012): "Acoustic performance assessment of Swiss low-noise road surfaces in urban areas". Proc. of Euro-Noise 2012, Prague, the Czech Republic.

Fujita, Hitoshi; Yoshifumi, Arai; Hamada, Kouji (2011): "Performance of the Porous Elastic Road Surface (PERS) as Low Noise Pavement". Proc. of Inter-Noise 2011, Osaka, Japan.

Fujita, Hitoshi (2012): "Construction and Performance of Japanese Low Noise Pavements". Proc. of Acoustics 2012 Hong Kong, May 2012, Hong Kong S.A.R.

Gautier, Jean-Luc (2008): "From theoretical acoustics studies to implementation on a worksite: a major step towards rolling noise reduction". PowerPoint presentation at SURF 2008 (the 6th symposium on pavement surface characteristics), Portoroz, Slovenia.

Goubert, Luc; Sandberg, Ulf (2011): "The poroelastic road surface (PERS): a powerful tool for traffic noise reduction". Proc. of the 24th World Road Congress, September 2011, Mexico City, Mexico.

HAPAS (2008): "Highway Authorities Products Approval Scheme (HAPAS)". British Board of Agrément (BBA), United Kingdom. See <http://www.bbacerts.co.uk/product-approval/hapas.aspx>

Hofman, Rob; The, Peter; van Vliet, WillemJan (2011): "Results Dutch PERS test on A50". Proc. of Inter-Noise 2011, Osaka, Japan.

Inter-Noise (2010): "Session on Asphalt rubber pavements - noise and sustainability, at the 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering", held in Lisbon, Portugal, 13-16 June, 2010. See <http://www.spacustica.pt/internoise2010/index.htm> Conference proceedings and individual papers are available at <http://www.inceusa.org/publications>

Kalman, Björn; Biligiri, Krishna Prapoorna; Sandberg, Ulf (2011): "Optimization of Poroelastic Road Surfaces in the Laboratory ". Proc. of Inter-Noise 2011, Osaka, Japan.

Kraemer, Terrance (2008): "Next Generation Concrete Surface -- Industry Innovations in Quiet Pavement Technology". Presentation 02-14-08, International Grinding and Grooving Association, USA.

Kragh, Jørgen (2007): "Noise Classification - Asphalt pavement". Danish Road Institute Technical Note 61, 2007, Danish Road Institute, Hedehusene, Denmark. May be downloaded from: www.Roadinstitute.dk

Kubo, Kazuyuki (2011): "Present Status of Porous Elastic Rubber Surface (PERS) in Japan". Proc. of Inter-Noise 2011, Osaka, Japan.

Kubo, Kazuyuki; Terada, Masaru (2012): "Development of cleaning machine for drainage asphalt pavement in Japan". Proc. of Acoustics 2012 Hong Kong, May 2012, Hong Kong S.A.R.

Lodico, Dana, et al (2012): "Overview and application of the Statistical Isolated Pass-By Method (SIP) for determining the influence of road surfaces on vehicle noise (AASHTO TP-98)". Paper 613, Proc of Inter-Noise 2012, New York City, NY, USA.

Mioduszewski, Piotr (2012): "Low noise pavements in Poland". Paper 1143, Proc of Inter-Noise 2012, New York City, NY, USA.

Morgan, Phil A. (2008): "Scientific Strategy Document - End Report". Report DVS-2008-016, Road and Hydraulic Engineering Division of Rijkswaterstaat, P.O. 5044, 2600 GA Delft, the Netherlands.

Nicolson, Samuel (1859): "The Nicolson Pavement, invented by Samuel Nicolson, of Boston, Mass". Boston: H.W. Dutton, 1859. Making of America Books (<http://quod.lib.umich.edu/cgi/t/text/text-id?c=moa;idno=AJR3196.0001.001>) (accessed 9 October 2012).

Otsuka, Takako; Sandberg, Ulf (2010): "A study of the history of traffic noise in a large city: modern Tokyo compared to Edo - the predecessor to Tokyo". Proc. of Inter-Noise 2010, Lisbon, Portugal.

Rasmussen, Robert; Garber, Sabrina I.; Fick, Gery J.; Ferragut, Ted; Wiegand, Paul (2008): "How to Reduce Tire-Pavement Noise: Interim Better Practices for Constructing and Texturing

Concrete Pavement Surfaces". Report for Pooled Fund TPF-5(139), March 2008, National Concrete Pavement Technology Center, Ames, Iowa, USA.

Sandberg, Ulf; Ejsmont, Jerzy A. (2002): "Tyre/road noise reference book". Book published by INFORMEX, Hargs gard, SE-59039 Kisa, Sweden (www.informex.info).

Sandberg, Ulf; Kalman, Björn; Nilsson, Roger (2005): "Design guidelines for construction and maintenance of poroelastic road surfaces". Report SILVIA-VTI-005-01-WP4-16/06/05 to EU project SILVIA, see <http://www.trl.co.uk/silvia/>

Sandberg, Ulf (2006): "The concept of virtual reference pavement for noise prediction and comparison purposes". Proc. of Inter-Noise 2006, Honolulu, Hawaii, USA.

Sandberg, Ulf (2009): "The global experience in using low-noise road surfaces: A benchmark report". Report to the Environmental Protection Department in Hong Kong, 16 February 2009. May be downloaded at: <http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/noise/studyreports/files/LNRS-final.pdf>

Sandberg, Ulf (2010): "Asphalt rubber pavements in Sweden – Noise and rolling resistance properties". Proc. of Inter-Noise 2010, Lisbon, Portugal (see also Inter-Noise, 2010 above).

Sandberg, Ulf; Goubert, Luc; Biligiri, Krishna Prapoorna; Kalman, Björn (2010): State-of-the-Art regarding poroelastic road surfaces, Deliverable D8.1 of the PERSUADE project, downloadable from <http://persuadeproject.eu> .

Sandberg, Ulf; Goubert, Luc (2011): "PERSUADE -- A European project for exceptional noise reduction by means of poroelastic road surfaces". Proc. of Inter-Noise 2011, Osaka, Japan.

Sandberg, Ulf; Goubert, Luc (2011): "Poroelastic Road Surface (PERS): A review of 30 years of R&D work". Proc. of Inter-Noise 2011, Osaka, Japan.

Sandberg, Ulf (ed), et al (2011): "Optimization of Thin Asphalt Layers –State-of-the-Art Review". Deliverable No. 1 – Final version – 30 April 2011, ERA-NET ROAD Project "Optimization of thin asphalt layers". May be downloaded from <http://www.transguide.org/VTI%20publ/OPHTHINAL-SoA-rpt-Final-110617.pdf>

Sandberg, Ulf; Mioduszewski, Piotr (2012): "Gaining extra noise reduction and lower rolling resistance by grinding a porous asphalt pavement". Paper 1439, Proc. of Inter-Noise 2012, New York City, NY, USA.

Sandberg, Ulf; Mioduszewski, Piotr (2012): "The importance for noise reduction of the bottom layer in double-layer porous asphalt." Proc. of Acoustics 2012 Hong Kong, May 2012, Hong Kong S.A.R.

Scofield, Larry (2012): "Development and Implementation of the Next Generation Concrete Surface - Final Report". Report from the American Concrete Pavement Association in cooperation with International Grooving and Grinding Association.

Sohaney, Richard C, et al (2012): "Evaluation of tire-pavement noise from pavement surface treatments". Paper 1152, Proc of Inter-Noise 2012, New York City, NY, USA.

Stillerverkeer (2012): Dutch website where type tested low noise road surfaces are listed, and where appropriate data sheets may be downloaded for each one and for an overview: <http://www.stillerverkeer.nl/index.php?section=general&subject=downloads>

サンドベルグ博士略歴

サンドベルグ博士は、1946年スウェーデン生まれ。1972年にチャルマース大学で電気工学を修士。1987年、リンチェピング工科大学で博士。

論文名「タイヤ/路面騒音の発生メカニズム、測定方法、ならびに路面特性の研究」

修士取得後、リンチェピング工科大学で2年勤務後、VTI（スウェーデン道路研究所）に勤務。以後、現在も勤務中。

長年にわたってタイヤ/路面騒音の研究として、特に路面に強く関心を持ってきた。2002年、チャルマース大学工学部の助教授となる。

現在は3つの騒音関連のISOワーキンググループのメンバーとして活動中。騒音関係の国際会議では多くの座長を務める。何度も来日され、日本国内に数多くの知人、友人を有する。日本音響学会の会員でもある。

著書：Tyre/Road Noise Reference Book 他

