

アスファルト

第45巻 第212号 平成14年9月発行

212

特集・路面プロファイル入門——路面の平坦性の評価技術——

特集にあたって	姫野賢治	1
路面のプロファイル	川村彰	2
路面プロファイルの測定方法	伊藤康伸	5
路面プロファイルと車両の運動	荻原哲夫	11
路面プロファイルと平坦性	遠藤桂	16
路面プロファイルの評価方法	高木久	23

<アスファルト舗装技術研究グループ・第45回報告>

峰岸順一 31

英国における重交通対応の長寿命たわみ性舗装の設計について

金井利浩・阿部長門・東本 崇

前田利明・保本敏伸 32

<用語の解説>

すべり抵抗値 小島逸平 42

<資料>平成13年市販アスファルトの性状調査 44

<統計資料>石油アスファルト需給統計資料 48

ASPHALT

社団法人 日本アスファルト協会
THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION

特集にあたって

姫野賢治

中央大学理工学部土木工学科 教授 工学博士

最近、「プロファイル」ということばをよく耳にする。もともとの意味は、「輪郭を描く」ということであり、犯罪者がどのような人物であるかを特定することも、海岸の砂浜の波打ち際付近のスロープの形もプロファイルという。すなわち、何かの断面図の輪郭の形をプロファイルといい、また、それを得ることまたははっきりとさせることをプロファイリングという。道路の上を自動車が走行する場合、基本的には舗装表面のタイヤ走行部分の縦断方向の凹凸が自動車の運動状態を決定する大きな因子になる。これはまさに舗装のタイヤ走行部を真横から見た輪郭のことであり、舗装の路面プロファイルと呼ばれる。

今回の特集は、この舗装の路面プロファイルに関するものであり、そもそも路面のプロファイルとはどのようなもので、それによって何ができるのか、また、プロファイルを測定するプロファイラとは何かなどの基本的な概念を紹介していただくとともに、路面プロファイルの測定方法と、信号処理、サンプリング間隔、フィルタリングなどという信号処理理論で用いられる基本概念をとおして、路面プロファイルの評価方法と車両の運動などについても説明をしていただいた。

路面プロファイルは、既往の概念である平坦性と強く結びついたものであるが、ここでは、もう少し幅広く、IRI、ライドナンバなど、各種の平坦性指標についても広く紹介していただくこととした。ただし、路面プロファイルの成分

のうち、タイヤの騒音やすべり摩擦などに大きな波長の非常に小さい領域については特には触れられていないが、基本的な考え方は同一である。

高速度で路面のプロファイルを計測する技術は、1960年代にゼネラルモータースで慣性型のプロフィロメータが試作されたことに始まる。それ以来、様々なタイプの高速度で測定可能なプロフィロメータが開発され、アメリカでは主要な州ではそれぞれのプロファイラーを保有している。そして、1989年より、国といくつかの州から財政的に援助を受けながら、州の担当者や大学関係者が集まって、RPUG (Road Profiler User's Group) と称する研究会を毎年開催している。1994年には、RPUGで行われてきた研究成果に基づいて、路面プロファイルの測定データをどのように処理すべきかについての啓蒙書を発表することにしたが、その名称をアメリカの子供なら誰でもが知っている絵本のシリーズ: "Little Golden Book"になぞらえて、"The Little Book of Profiling"とした (2002年10月に土木学会より翻訳出版予定)。

わが国でも、ここ20年以上前から複数の計測会社によって非常に高機能な路面性状測定車が開発され、その精度の高いデータの使い道に対して検討が開始され始めているが、本特集は、主として、この啓蒙書にもとづいて、路面プロファイルを基本から考え直していこうとする研究者や技術者のために企画されたものである。

路面のプロファイル

(Profile of Road Surface)

川 村 彰*

路面は交通荷重に耐えるだけでなく、車の走行安全性・快適性、走行費用や周辺住民の環境問題とも深い関係がある。このような路面のプロファイルとはそもそもどのようなもので、それによって何ができるのか。また、プロファイルを測定するプロファイラとは何でどのような種類があるのか。これらの基本的な概念について簡単に紹介する。

1. 路面のプロファイル

1.1 プロファイルとは何か？

道路のプロファイルと聞くと、多くの舗装技術者は路面の平坦性測定装置であるプロフィルメータ（英語でprofilometerと書き、発音はプロフィロメータ）を思い出すであろう。この測定装置は、記録された路面波形と任意の基準線との差の標準偏差である平坦性を算定するために使用される。

確かに、プロフィロメータはプロファイル測定装置の一種には違いないのだが、プロファイルから得られる情報のほんの一部を求めているに過ぎない。では、プロファイルとは何でそれからどのようなことがわかるかを見てみる。図-1にプロファイルの概念図を示す。

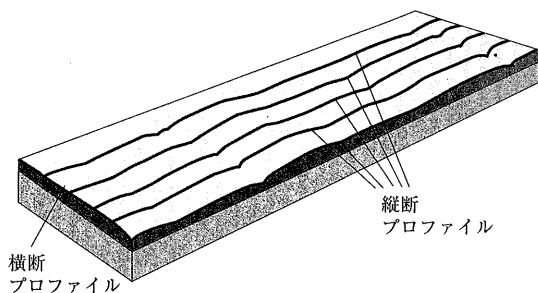


図-1 路面のプロファイル

※プロファイルとは、路面を仮想線に沿ってスライスしてできる2次元形状をいう

プロファイルは、基本的には路面の波状特性に着目

した呼称であるが、図に示されるように、プロファイルには縦断と横断の2種類があり、縦断プロファイルからは縦断勾配、ラフネス（波長が0.5～50mの範囲の波状路面）、テクスチャ（キメや粗さに代表される波長が0.5m以下の波状路面）が得られ、横断プロファイルからは片勾配、わだち掘れなどがわかる。

プロファイルから得られるこれらの情報は、車の運動、乗り心地、車両の動的荷重、路面排水状態などと直接関係があるため、その測定とそれに基づく評価は重要である。

路面プロファイルの測定は、路面上の仮想線に沿って行われ、測定が繰り返し行われた場合に同一仮想線をたどることができれば、理論的には同一プロファイルが得られることになる。曲線状のプロファイルを測定することは可能である。通常道路にとって重要なのは、道路の幾何構造に従うセンターラインとそれに平行な幾つかの測線である。多くの場合、1車線について2測線（通常ホイールパス）のプロファイルを測定するが、より詳細な路面プロファイルからの情報を得たい場合は、より多くの測線で測定すべきである。

1.2 プロファイラとはなにか？

プロファイラは、プロファイル測定装置の総称であるが、プロファイル測定装置とその測定方法は、神のみぞ知る「真のプロファイル」に関連した数値列データを得るために用いられる。

※プロファイラは、「真のプロファイル」におけるある限られた範囲の数値列データを得るための装置である。

*かわむら あきら 北見工業大学助教授

幾つかのプロファイラから得られる数値が、必ずしも真の路面高さとも一致していないことは容易に理解できる。実際、プロファイラは「真のプロファイル」を常時測定しているわけではなく、特別な目的のために必要な「真のプロファイル」の一部を測定しているに過ぎないのである。しかしながら、「真のプロファイル」とプロファイラによって得られる数値列の関係は、ある仕様に合致していなければならない。一般的に、プロファイラは以下の3構成要素によって動作する。すなわち、

- ・基準高さ
 - ・基準からの相対高さ
 - ・縦断方向距離
- である。

これら3要素は、様々な方法で組み合わせられ、プロファイラ設計の基礎となる。次に、代表的プロファイラの3タイプを見てみる。

直接水準測量

標尺とレベルはありふれた測量器具である。図-2に概要を示す。レベルは基準高さを、標尺からの読みは基準からの相対高さを、テープは個々の標高測定点の位置を測定する。直接水準測量は、測量が行われている時、それらの機器は動かないことから、静的測量と呼ばれる。ラフネスを計算するのに要求されるプロファイルの測定間隔は通常300mm以下であり、標高測定の精度は0.5mm以下である。しかしながら、絶対高さはラフネスに関するプロファイル測定においてそれほど重要でなく、通常の直接水準測量と同程度の注意を払えば良い。

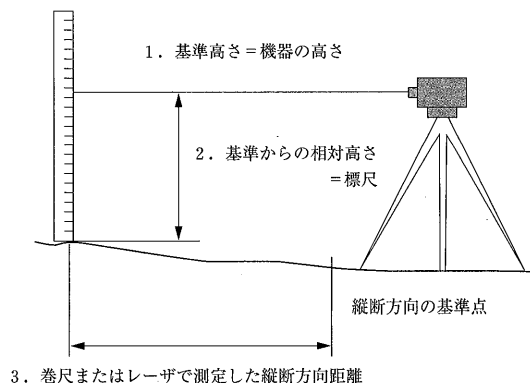


図-2 直接水準測量の概要

ディップスティック

ディップスティックは、米国のFACE社が開発して特許を取得し、販売している装置である。ラフネス解析用のプロファイル測定を直接水準測量よりも迅速に行うことができ、バッテリー駆動のコンピュータを搭載しており、測定データの自動記録およびプロファイルを求めるための必要計算が即座に実行される。

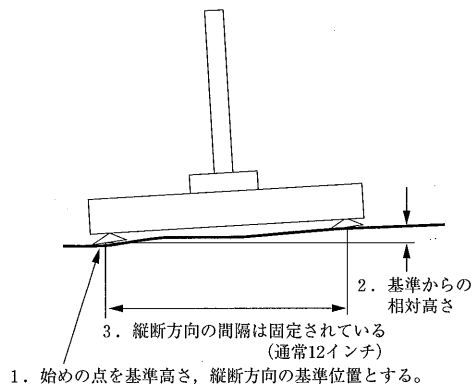


図-3 静的プロファイラ（ディップスティック）

この装置は、プロファイルの計測線に沿って手動で動かし、通常約30cm間隔に設置されている支持脚間の高さを内蔵傾斜計で測定する。1測線を測定するには、前方の支持脚を支点として他方の支持脚をわずかに浮かした後、計測線に沿って、前方の支持脚を中心に180度回転させることで、後方の支持脚を前方に持っていく、その際の高さ変化を記録するというステップを測定区間だけ繰り返す。この測定においては、基準標高は与えられた地点に関する計算値となる。また、基準からの相対高さは、傾斜計の角度から求められ、長さ方向の距離は測定回数の累積値となる。ディップスティックにより得られたプロファイルを直接水準測量における結果と一致させるには、最初の標高（初期値）を合わせると良い。

慣性プロファイラ

1960年代に米国のゼネラルモータース研究所が、広域道路網のモニタリングとして、慣性プロファイラによる高速プロファイラを導入した。

※慣性基準は加速度計から得られる。

加速度計は、加速度を測るセンサである。図-4に

示すように上下方向加速度測定値がデータ処理によって、慣性基準値に変換され、車載の加速度計の高さが時間とともに規定される。したがって、この場合の基準線からの地面の高さは、加速度計の設置位置と加速度計直下の地面との間隔になる。この高さは、非接触式レーザや超音波変換器といったセンサで測定される。これらの機器では、縦断方向の距離は車の速度計から求めるのが一般的である。

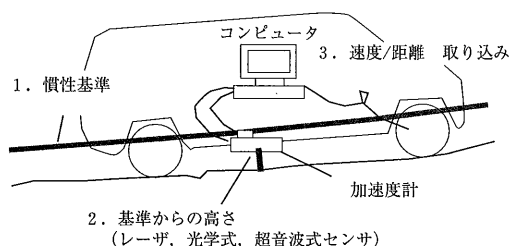


図-4 慣性プロファイラの概念図

※慣性プロファイラは、動かなければ機能しない。

この種のプロファイラは、ある速度で作動するだけでなく、機能するには一定の速度が必要となる。

プロファイラの用途には、以下の4分類がある。

- ・PMS（舗装マネジメントシステム）における道路網のモニタリング
- ・道路の新設あるいは補修区間における路面性状評価
- ・特定箇所における舗装状態の診断および適切な補修工法の決定
- ・研究を目的とした特定箇所の舗装状態調査

プロファイルにより得られた数値から情報を引き出すために様々な解析手法が考えられるが、役に立つ統計値を算出することが最終目標となる。プロファイル測定技術は1960年代から存在するが、そのデータを用いて何をすべきか、我々は今なお努力しているのである。

第81回アスファルトゼミナールのご案内

社団法人日本アスファルト協会

拝 啓 時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

さて、毎年恒例のアスファルトゼミナールですが、本年度は京都市での開催を予定しております。

案内状の発送につきましては11月下旬以降を予定しております。

皆様のご来場をお待ちしております。

記

開催日時： 平成15年 2月13日（木）～2月14日（金）

第1日目 平成15年 2月13日（木）13：00～16：35

第2日目 平成15年 2月14日（金）9：30～12：40

開催場所： 京都市「京都テルサ」（案内図参照）

京都市南区東九条下殿田町70

Tel. 075-692-3400



路面プロファイルの測定方法

(Method for Measuring Road profiles)

伊 藤 康 伸*

舗装路面のプロファイルを測定する技術は、土木工学の舗装試験法から生まれたものではなく、電気工学や機械工学の分野の技術によって開発されたものである。プロファイルを測定して得られる情報は、工学的には信号と見なされる。これを処理するための手法として、信号処理、サンプリング間隔、フィルタリング、移動平均、サイナソイドなどがある。これらは、そもそものようなもので、それによって何ができるのか、基本的な概念について簡単に紹介する。

1. 路面プロファイルの測定方法

1.1 信号処理とは何か？

舗装路面を評価するため、プロファイル測定で得た情報が用いられるが、プロファイル測定に係わる技術は、土木工学の舗装試験法から誘導されたものではない。これは、電気工学や機械工学の技術によって考案され開発されてきた。プロファイルの測定値を処理し解析するのに使われる方法の多くは、すでに確立されているが、土木技術の分野からみると標準的でない用語や技法が多く用いられている。

どのようにすればプロファイルが利用できるかを知るには、われわれは、信号、信号処理、フィルタ、周波数応答といった用語を理解しなければならない。

電気工学や計測技術の分野では、情報を含む変動電圧を信号と呼んでいる。

最近の慣性プロファイルは、同じタイプの情報を含んだ数値の列を作り出し、このシステムにおける数値の列を信号と呼んでいる。

●信号は数値の列である。

プロファイルのデータは、数値に変換されコンピュータで処理される。1つのプロファイルから幾つもの数値の列が取り出せる。これらは、変換器の出力の数値系列と算出済みのプロファイルとがあり、それぞれ信号とみなせる。

●信号処理とは数学的な解析と信号変換である。

信号を処理する主な理由は、以下の2つがある。すなわち、

1. データから不要なノイズを取り除いて、測定値の品質を改善すること

2. 信号から必要な情報を引き出すこと

道路プロファイルの解析は、信号処理の範疇に入る。また、変換器の信号からのプロファイル計算も信号処理の一つの方法である。

1.2 サンプリング間隔とは何か？

真のプロファイルは連続値であり、この連続値の測定を行う装置をアナログ方式と呼んでいる。例えば、インクペンで記録されるチャート紙はその代表である。それとは対照的に、連続した変数は、しばしば連続した数字で表現される。これはデジタル方式である。

●現在用いられているプロファイルシステムのほとんどがデジタル方式である。

ディップスティックや水準測量などの装置は、高さを計測する静的測定装置である。測定された数字の並びは本来デジタルである。水準測量やディップスティックによる測定値が、アナログとなることはない。

慣性プロファイルは、変換器に接続したコンピュータを備えている。コンピュータは、個々の加速度計や高さを測定するセンサによって、測定値をある間隔（時間であったり距離であったりする）で読みとる。読みとられた値は数字として表され、サンプリングされた地点の高さを得るために、コンピュータのプロフ

*いとう やすのぶ ニチレキ(株)道路エンジニアリング部調査課長

ファイル計算アルゴリズムに入力される。

初期の慣性プロファイラはアナログであった。それは電気的プロセッサや磁気テープを装備しており、プロファイルを連続的に変化する電圧として記録していた。デジタル式コンピュータの方が、より多くの解析オプションが可能であり、費用も安く、維持も容易であることから、コンピュータベースの装置が広く用いられるようになった。

●サンプリング間隔とは、測定点間の縦断距離である。

ディップスティックの場合、サンプリング間隔は二つの支持脚間の距離となる。水準測量の場合、サンプリング間隔は標尺間の距離である。高速の慣性プロファイラの場合、サンプリング間隔は、変換器からの読み値を、コンピュータがサンプリングするまでの間にプロファイラが移動する距離となる。

●サンプリング間隔は、1 kmあたりのデータ量を決定する。

もし、サンプリング間隔が ΔX （メートル単位）ならば、1 kmあたりのデータ数は $1000/\Delta X$ となる。サンプリング間隔を短くすることは、プロファイルを記録するため、より大容量の記憶装置が必要となる。さらに、より多くのデータを処理する必要があることから、プロファイル解析には、より多くの時間がかかる。効率性の観点から見た場合、測定間隔を必要以上に小さくすることは好ましいことではない。なぜなら、より多くのプロファイルを解析するため、データ容量が大きくなるからである。

●サンプリング間隔は、プロファイルに含まれている情報を制限する。

測定したプロファイルは、数字で表されている。サンプリングされた測定点間でプロファイルがどのようなになっているのか（真のプロファイル）について知ることはできない。理想的には、サンプリング間隔は、測定するプロファイルの特徴をとらえるため、十分小さくする必要がある。

後述することになるが、ラフネスの指標としての勾配（単位：m/kmなど）を得るために、過去において様々な統計計算が行われてきた。プロファイラを用いて、精度の良い測定を行うことによって「真の勾配」が得られると思われるかもしれないが、それは理論的

には困難なことである。なぜならば、図-1に示すように、プロファイルをテクスチャレベルのように細かく観察した場合、プロファイルは鉛直方向の変位となり、真の勾配は無限大となり得るからである。

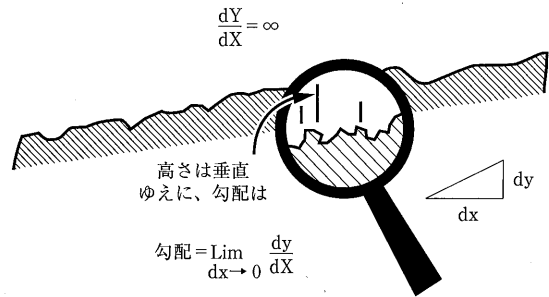


図-1 プロファイルと勾配（その1）

ここで、プロファイルがサンプリングされた高さによって表される理由について考えてみる。距離 X の関数であり連続値である高さ Y の代わりに、プロファイル測定によって Y_i （ i は高さデータの番号）を得る。2点間の勾配は次式によって計算される。

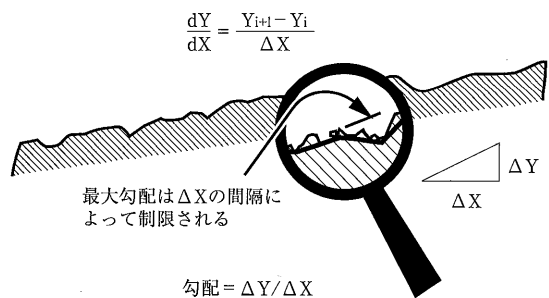


図-2 プロファイルと勾配（その2）

以上のことから、勾配のRMS値は ΔX が小さくなるにつれて増加することがわかる。

もし、用いたプロファイラがラフネスの指標としてRMS勾配を用いる場合、サンプリング間隔が標準化されていなければ意味がないことになる。一つの機関がある道路のRMS勾配を3 m/kmと報告し、別の機関が他の道路のRMS勾配を4 m/kmと報告した場合、少なくともサンプリング間隔が分からなければ、どちらの道路面が粗いかを判定することはできない。これらの違いは、真のプロファイルを表しているよりもサンプリング間隔の影響によるものかもしれないからで

ある。

図-3は、サンプリング間隔とRMS勾配の関係を示している。サンプリング間隔 ΔX を50mmに設定して測定したプロファイルのRMS勾配とそのプロファイルのサンプリング間隔を変化させたときのRMS勾配を示したものである。測定されたプロファイルからデータを間引くことによって、サンプリング間隔の大きなプロファイルを作成することができる。この図は、現在用いられている典型的なプロファイルのサンプリング間隔を網羅している。RMS勾配は、サンプリング間隔の変化とともに急激に変化しており、サンプリング間隔が長くなるにしたがいRMS勾配が減少する。

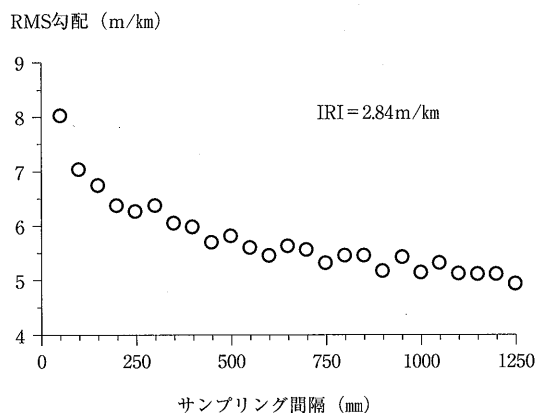


図-3 サンプリング間隔とRMS勾配の関係

1.3 フィルタリングとは何か？

水や油のような液体から不純物を取り除くためにフィルタが用いられる。水道の蛇口に取りつけるフィルタは、水中のゴミを取り除き水だけを通す。電気工学においては、電圧を連続的に修正する成分や回路をフィルタと呼んでいる。共通しているのは、フィルタリングとは電圧の変動など不要な成分を除去し、クリーンにすることである。フィルタリングによって、電気信号の不要なノイズが除去され、必要な情報が抽出できる。

一般的に、電気工学におけるフィルタリングの概念は、数学（特に、コンピュータ処理される場合）的に説明することができる。

- フィルタリングとは、ある信号を新しい信号に変換する計算手順のことである。

実際のプロファイル測定では、測定プロファイルを

フィルタリングすることが必要不可欠である。フィルタリングの計算はコンピュータによって自動的に行われるため、プロファイルの利用者にとっては、データ変換の詳細を理解する必要はない。しかしながら、フィルタリングの重要性を認識し、フィルタリングはプロファイル測定およびその解析の一部であることを理解する必要がある。

例えば、図-4のように3つのプロファイルを測定したとする。フィルタリングを行わない場合、プロファイルの細かいラフネスはみな同じに見え、違いが分からない。

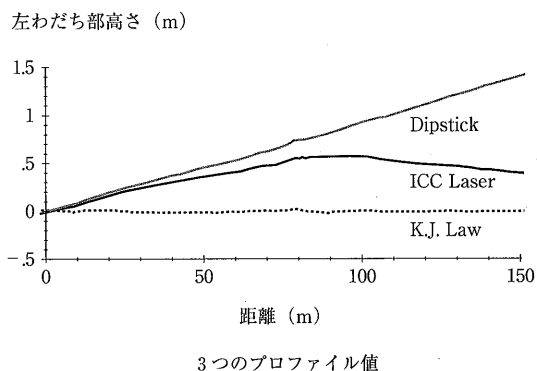


図-4 3種類のプロファイル値と左わだち部高さ

- プロファイルの特性を把握するためにはフィルタリングが必要である。

図-5は図-4に示した3つのプロファイルをフィルタリングし、道路の勾配と長波成分を取り除いたものである。

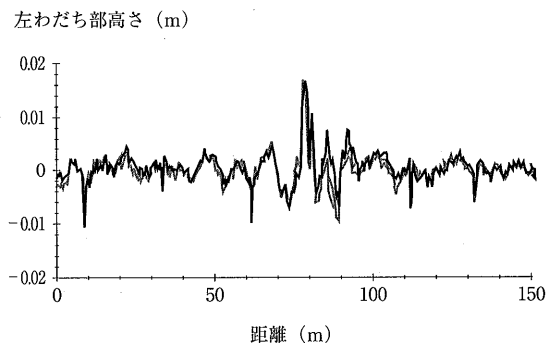


図-5 フィルタリング処理後の3種類のプロファイル値と左わだち部高さ

80m地点の突起に注目していただきたい。最初の図では、目盛りの縮尺が数フィートに設定されているため、ほとんど突起を見分けることができなかったが、フィルタリングを行ない勾配および長波成分を数学的に取り除くことによって、容易に突起を見分けることが可能となる。この突起の振幅は20mmである。これは道路において大きな障害であり、その上を走行するドライバーの注意を引くことになる。

フィルタリングは高速の慣性プロファイラにとって特に重要である。

●フィルタリングはプロファイル測定の基本である。

全ての慣性プロファイラは、少なくとも1つのフィルタを装備している。フィルタリングは加速度計や高さセンサからのデータを同じ次元のデータに変換する。さらに、計算したプロファイルに大きなずれを起こす原因となる電子的なノイズをフィルタにより除去する。

一般の解析においては、複数のフィルタを用いて操作を行っている。この場合、最初のフィルタからの出力が次のフィルタへの入力となる。概念的には、これは数種類の電子的なフィルタ（回路）を適用していることである。言い換えれば、水道の蛇口に数個のフィルタをつけるようなものである。

●プロファイルの解析に用いるフィルタは1つではない。

フィルタとは、データを改良する数学的な変換のことである。一般的に数種類の標準的なフィルタがあり、その内、いくつかは道路のプロファイル解析に日常的に使われている。それらは以下のようなものである。

1.4 移動平均とは何か？

移動平均とはプロファイル解析によく用いられる単純なフィルタであり、特にプロファイルを視覚的に捕えるときに用いる。

●移動平均フィルタはプロファイル上の各点を隣接する数カ所の平均値で置換する

あるプロファイル p がサンプリング間隔 ΔX で測定したものとすると、移動平均平滑フィルタは次式で表される。

$$P_{PL}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j)$$

ここで、 P_{PL} は、平滑化されたプロファイルである（これはローパスフィルタを通したプロファイルとも呼ばれる）。 B は移動平均の基底長であり、 N は合計したデータ数である。

移動平均フィルタの効果を下図に示す。移動平均フィルタの効果は、測点ごとの変動を平均することによってプロファイルを平滑化することである。

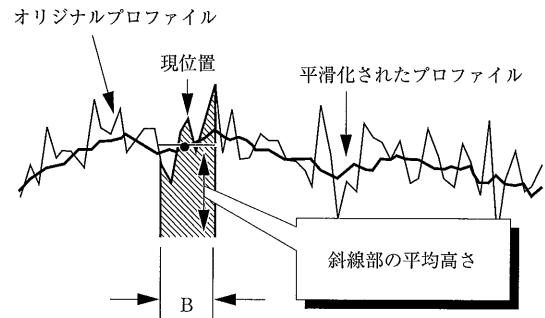


図-6 移動平均フィルタ

●移動平均は平滑化されたプロファイルを取り除くためにも用いられる

われわれは、ほとんどの場合、極端に平滑化されたプロファイルに興味を抱かない。極端に平滑化されたプロファイルは道路が上っているか、下っているか、あるいは水平であるかしか示していない。慣性式プロファイラでは、波長の長い起伏は正確に測定できない。その代わり、平滑化されたプロファイルからの偏差に注目することができる。これは、乗り心地を低下させ、道路利用者を悩ますものであるからである。

移動平均フィルタを次式により変換することによって、元データから平滑化されたプロファイルを抽出することができる。

$$P_{PH}(i) = p(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=1-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j)$$

この場合、フィルタ処理されたプロファイルには、「ハイパスフィルタ」を意味するHという添字をつける。

●プロファイル解析のための最適な基底長はない：
最適な基底長はデータの用途に依存する

例えば、次に示す3つの図は、PCC舗装のプロファイルに異なる方法で3つのフィルタを適用した例であり、各図は異なった情報を提供している。

最初の図は基底長約1 mの非平滑化フィルタ処理したものである（元データから平滑化したプロファイルを引いている）。この図はプロファイルに非常に小さ

な突起のみがあることを示している。段差が約4.5 m 間隔で生じていることが明確にわかる。

2 番目の図は、基底長1 mの平滑化フィルタ処理を行った後、基底長5 mの非平滑化フィルタ処理を行ったものである。最初の図に見られたすべての偏差は、この図では完全に消えている。段差の境界や表面の粗さは取り除かれているが、傾斜ははっきりと見てとれる。

3 番目の図は、基底長5 mの平滑化フィルタ処理を

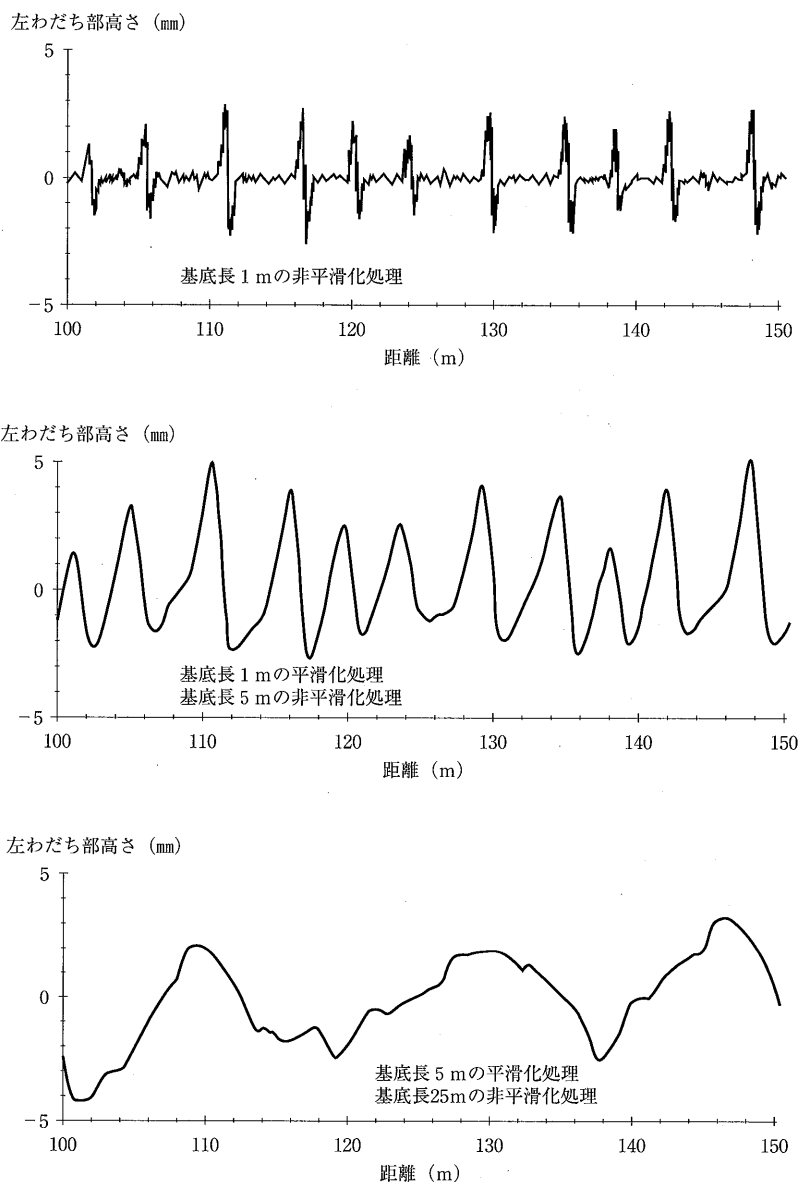


図-7 基底長と左わだち部の高さ

行った後、基底長25mの非平滑化フィルタ処理を適用したものである。この場合、前の2つの図に見られた偏差は、5mの平滑化処理によって取り除かれている。道路の勾配および非常に長い波は、25mの非平滑化フィルタ処理によって取り除かれており、より長い波長成分を示している。

●移動平均フィルタは、計算する上で効率が良い

移動平均フィルタは、プロファイルを平滑化するための手法であり、プログラムを組むことは容易にできる。最初の平均位置を計算したら、それ以後の値は次式により得ることができ、コンピュータで計算する上でも効率が良い。

$$P_{RL}(i) = P_{RL}(i-1) + \frac{1}{N} \left[p \left(i + \frac{B}{2\Delta X} \right) - p \left(i - \frac{B}{2\Delta X} - 1 \right) \right]$$

たとえ、平均化する処理が何百点にわたる場合でも、平均間隔を入力する値、そしてその間隔を取り除く値という、プロファイル上にある2つの値の影響に注意するだけでよい。

●移動平均処理を行ってプロファイル図を作るためのフリーソフトウェアが利用可能である

インターネットから入手できるRoadRufというWindows版の無料ソフトウェアに、移動平均による平滑化処理および非平滑化処理を組み込んでいる。RoadRufは以下のURLから入手できる。

<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr.html>

1.5 サイナソイドとは何か？

サイン波とコサイン波の両者をサイナソイドと言う。

プロファイル解析を理解するには、サイナソイドに精通していることが必要である。

フィルタがどのように作用するのか、乗り心地とラフネスにはどのような関係があるのか、様々なラフネス測定がどのように定義されるのか、測定誤差がいかにして生じるのかといった点について、波長と周波数はきわめて大きな影響を与える。

●サイナソイドは波長、振幅および位相によって定義される

サイナソイドYは次式に示すようにXの関数である。

$$Y = A \sin \left(\frac{2\pi (X - X_0)}{\lambda} \right)$$

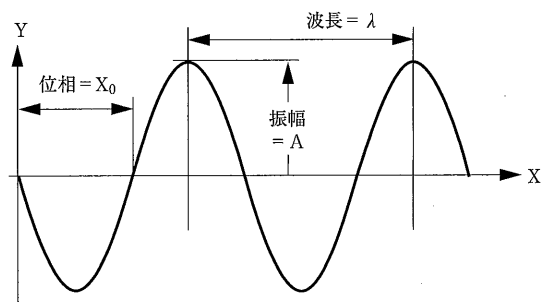


図-8 サイナソイドの波長、振幅、位相

●波数とは単位長に含まれるサイクル数である

波数は、単位長に含まれるサイクル数で定義される。信号処理では、ほとんどのケースにおいて、サイナソイドは距離の関数としてよりも、むしろ時間の関数として定義され、サイナソイドを、ヘルツ (Hz) という1秒あたりのサイクル周波数で定義するのが慣例である。サイナソイドが長さの関数として定義される場合、単位長さのサイクル周波数を波数と呼び、 ν ($\nu = 1/\lambda$) と書く。波数の単位は通常cycle/mである。

●サイナソイドを“見る”には1サイクル当たり最低2つのサンプルが必要である

デジタル信号におけるサイナソイド（例えば道路のプロファイル）を“見る”ためには、下図に示すようにサンプリング間隔をサイナソイドの波長の1/2以下に設定する必要がある。これを「Nyquistのサンプリング理論」と呼んでいる。例えば、もし、真のプロファイルのもつ情報のうち60cm以上の波長が必要ならば、サンプリング間隔は30cm以下としなければならない。

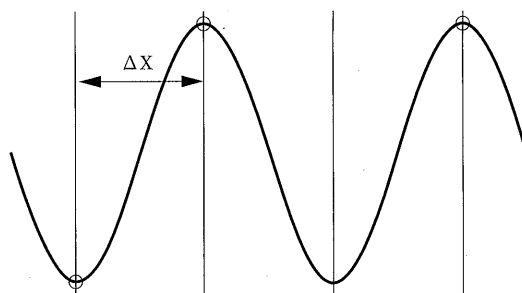


図-9 サイナソイドのサンプリング間隔

路面プロファイルと車両の運動

(Road Profile and Vehicle Movement)

荻原 哲 夫*

路面プロファイルは、上を走行する自動車の運動に直接影響を及ぼす。車の乗り心地は車体の加速度として測定され、座席の振動をサスペンションの効きの評価に用いる。車の垂直加速度はサイナソイドで表わされ、移動速度は車から路上のサイナソイドがどう見えるかに影響する。サスペンションは道路からの過酷な加速度からドライバを守るような周波数応答関数をもつ機械的フィルタといえる。乗り心地の力学は複雑で、ラフネスは路面高さの変化と、プロファイル測定間隔で定義される。ラフネスを測る応答型システムは、車両運動により路面プロファイルにバンドパス、またはハイパスフィルタをかける装置と考えられる。以上、主に車両の運動の観点から説明する。

1. 路面プロファイルと車両の運動

1.1 自動車の乗り心地とは何か？

道路の目的は車両が高速で移動できるような路面を提供することで、プロファイルの主目的は自動車運転者の要求のために必要な、道路面に関する情報を集めることである。運転者の評価基準は、自動車の乗り心地体験に大きく依存している。

●乗り心地は、車体の加速度として測定される。

自動車技術者は、サスペンションのパフォーマンス評価のためにシート上の加速度を測定し、前後のサスペンションを調整する。

●座席の振動は、サスペンションの動きの評価に用いる。

座った姿勢で受ける振動に対する人体の感度は、多くの研究で定量化されている。

一般に、人体は腹腔部の共鳴により垂直の振動に対して最小約 5 Hz まで耐えられると言われ、自動車は車体バランスを考慮し、ピッチング周波数を 1～2 Hz、車輪のホッピング共振周波数を 10～15 Hz になるように設計されている。水平加速度の受容レベルの最小値は 1 Hz である。横方向の水平加速度は車両のローリングに起因していて、ローリングは、幹線道路以外の損傷を受けた道路では問題となる。ローリングが

ドライバに及ぼす影響は、バンやトラックのような車高の高い車では顕著で、前後方向の水平加速度はピッチングに起因している。一般にはピッチングを最小にするよう前後のサスペンションを調整するが、トラックでは常に可能ではないため、トラックの運転手は、乗用車よりも道路のラフネスによる縦方向の振動のピッチングを多く経験する。垂直振動が低下する高級車や平坦な道路のもとでは、5 Hz の感度は低くなる。図-1 に示すように加速度レベルが低くなると、人体の感度はより広範囲の周波数帯におよぶ。

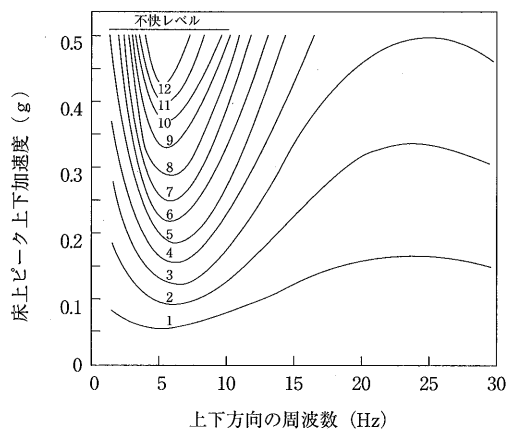


図-1

●座席以外の場所にも重要な振動がある。

*おぎわら てつお (株)バスコ道路センター主任技師

自動車の乗り心地は、座席の振動だけでは判断できない。技術者は、手や足で感じる振動も乗り心地に影響していると認識していて、技術を駆使して道路から生じる振動や車体の揺れがハンドルや、床に影響しないようにしている。

1.2 垂直加速度はどのようにプロファイルと関係しているか？

垂直加速度は乗り心地を示す重要な要素で、プロファイルの高さと加速度の関係を理解することは重要である。空間加速度サイナソイドを得るには導関数を導く過程を2回繰り返す。

●移動速度は、車から路上のサイナソイドがどのように見えるかに影響する。

道路を移動する車からは周波数のサイナソイドが「見える」。

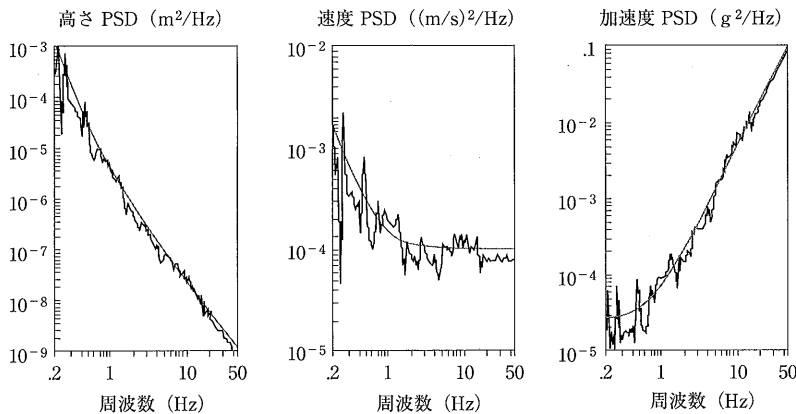
表－1 は、時速108kmの速度における3種類のサイナソイドの特性を要約していて、振幅が最大になるのは1番目のサイナソイドであるが、垂直加速度が最大になるのは3番目のサイナソイドである。

表－1 プロファイルと勾配（その1）

波 長	振 幅	勾配振幅	周波数 (96.6km/h)	加速度 (96.6km/h)
60m	20mm	2.09m/km	0.5Hz	0.02 g
15m	5mm	2.09m/km	2.0Hz	0.08 g
3m	1mm	2.09m/km	10.0Hz	0.40 g

●道路のパワースペクトル密度（PSD）関数は、加速度で示すことができる。

例にあげた3種類のサイナソイドから分かることは、道路における周波数スペクトルにも当てはめることが



図－2

できる。図－2 は移動速度80km/hにおける上下変位のPSD（左図）を入力したものである。これを1回微分したものは速度スペクトルを表し、さらに微分したものは加速度PSDを表す。加速度は、高周波数において最大となり、道路の短波長成分に対応している。

仮定した移動速度によってPSD関数は大きくもなり小さくもなる。しかし、道路PSD関数の基本形状は、波数の関数として計算した場合と同じになる。単位が長さ2/Hzである上下変位のPSDは、波数の関数として表されるPSDと同じ形状となる。PSDは距離よりは時間の影響を受ける。速度PSDは勾配PSDと同じ形状である。加速度PSDは空間加速度PSDに対応している。

1.3 乗り心地はどのように道路と関係しているか？

道路のラフネスは自動車の振動を引き起こす原因であるが、道路の評価には自動車自身の影響を分離する必要がある。ミシガン州運輸部は数年前、道路上での車の乗り心地評価を実施したところ、被験者の評価は車が高級車か小型車か、車種により影響を受けることを示したが、被験者に車種の違いを除いて道路を評価するよう依頼すれば、被験者は車種に関係なく道路のラフネスを評価する。

●車のサスペンションは、道路から生じる過酷な加速度からドライバーを守る。

基本的に、自動車はクォーターカーモデルで近似される。サスペンションは車体（バネ上質量）を支持し、タイヤの追従性により路面からの高周波振動が車体に及ばないようにする。クォーターカーモデルの動的特性を図－3に示す。

低周波数帯では、車体は路面の凹凸に合わせて上下動する。サスペンション上の車体はおよそ1 Hzで共振し、道路からの入力

を増幅する。高周波数帯では、サスペンションは道路からの入力を吸収して、道路と車体を分離する。タイヤは10～15Hzで共振し、道路によって生じるよりも大きく上下動する。この周波数帯では、路面からの入力振動を車体に伝えない性能は低下するが、これは避けがたい現象である。

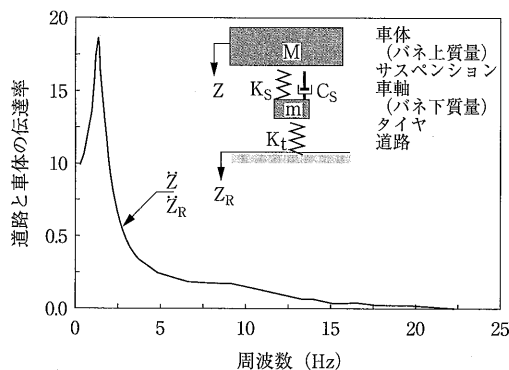


図-3

●車は周波数応答関数をもつ機械的なフィルタである。

サスペンションが持つ「振動を車体に伝えない」性能を図-4に示す。道路ラフネスの加速度スペクトルを左側に、車のサスペンションシステムのフィルタを通して得られる車両加速度スペクトルを右側に示した。中央の図はPSDに適合する単位に変換された車両の周波数応答である。

1 Hzでの加速度入力値は増幅されるが、これ以上の周波数帯では、加速度入力値は大幅に減少する。加速度の2番目のピークは10Hz付近にあり、タイヤのホッピング共振に因る。しかし、人体が最も敏感である5 Hz近傍の垂直加速度をサスペンションの機能がどのように減少させるかを知ることは重要である。

●自動車の乗り心地の力学は単純か？

単純ではない。クォータカーは車の基本であり、車両に生じる振動のおよそ75%は説明できる。クォータカーモデルに、さらにピッチングとローリングが加わるが、一般に、この種の振動は低レベルまで「調整」

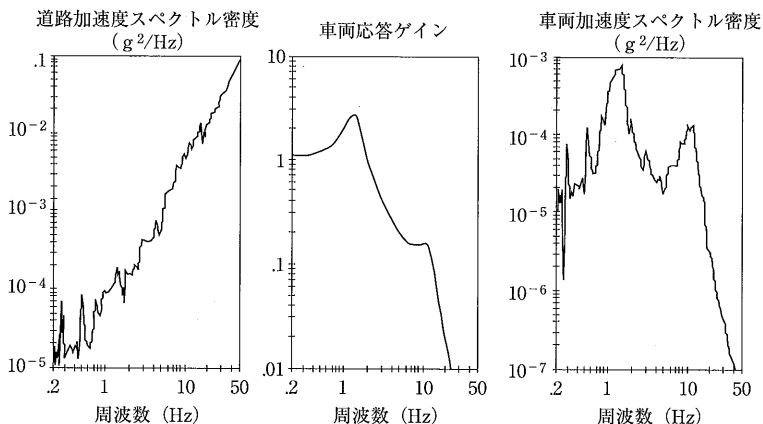


図-4

できる。重要なのは、乗り心地に関係する振動に影響を及ぼす車輪と車体構造様式の前部と後部の入力値で、乗り心地を理解に必要であるが、各モデルに特有なものである。

1.4 道路ラフネスとは何か？

道路プロファイラの主な適用法に道路ラフネスの数量化がある。

●道路ラフネスにはただひとつの標準はない。

アメリカ材料試験協会 (ASTM) の定義 (E867) では、道路ラフネスは、「縦断プロファイル、横断プロファイル、横断勾配のように車の運動、乗り心地、動荷重と排水設備に影響を与える特性を有しており、真に平らな表面に対する舗装道路表面の変化である」としている。

この考え方は道路ラフネスに関係する要因を含んでいるが、ラフネスの定量的な定義や標準的な尺度を示していない。広範囲なもので、排水設備と乗り心地のような通常は無関係な項目も含んでいる。

●「平滑さ」にはラフネスの考えが入っていない。

技術者は、平滑さというと道路状態を楽観視すると考えている。平滑さにはラフネスの考えが入っていないので、一般にはラフネスを決定し、その後その数値を変換している。アメリカでは、一般には平滑さではなくラフネスを扱う。道路を走行する人にはラフネスの概念は単純で「私を感じれば、あると判る」ものである。

●ラフネスが特定の装置の出力であるとする技術者がいる。

道路利用者はラフネス測定の良い方法が標準であると考えている。過去に使われた機器は次のセクションで紹介する。ラフネス測定がプロファイルに基づかないなら、その測定は再現できない。

●ラフネスは、車両が通過する際の振動を引き起こす表面高さの変化に関係している。

車両の振動には、長波長により起こる胸が悪くなるような不快感を起こすもの、短い波長により引

き起こされ、いろいろな不快さを与えるノイズ等、種類は多い。不快な車両の加速を引き起こす道路特性を応答特性の専門家は「ラフネス」と呼んでいる。

- ラフネスは、プロファイルの間隔を通して定義される。

ある1地点のラフネスを議論しても無意味で、ラフネスは2地点間の中で起こる変化を要約したものと考えるのがよい。

- 多くのタイプのラフネスがある。

道路を通行する者は、不快な車体振動など種々な形態の異なるタイプのラフネスを識別できる。もし異なる指数が道路の状態について独自の情報を提供するなら、一つのプロファイルから複数のラフネス指数を計算することは合理的である。ラフネスのタイプは全て一つではなく、プロファイルから計算されたラフネス指数の多くは統計学的に十分強く関連する。よって本質的に同じ2つの指数を計算しても意味がない。

- 異なるタイプのラフネスは異なる波長と関係付けられる。

車両メーカーはサスペンションの運動に関して、車体の騒音への影響から可聴範囲のノイズまで、乗り心地の異なる面に関心を持っている。これらは広く異なる波長範囲によって起こされている。それらサイナソイドをどう処理するかを基準として、ラフネス解析を比較することができる。解析の大部分は超長波と超短波を取り除くことにある。

- ラフネスは単次元の特性として容易に特定できない。

ラフネスは複雑で2次元に関係する：それは長さ方向のプロファイル高さの変化に関係している。ひとつのプロファイル点のラフネスについて、長さ方向の値を示さねばならない。ラフネスは、ノイズと音のレベルの関係に類似している。気圧には静的な特性があるが騒音レベルは長い時間にわたる気圧の変化に関係している。一般にはあまり高価でない騒音計を用いて、標準化した値を検出する。このデータ処理ではひとつのアウトプットレベルを作り出すために、長い時間にわたる気圧の測定を行ない、数学解析するノイズの測定が今まで標準化されていた。標準的な解析法はいくつかあるが、音量計測器を用いてスイッチを変えるこ

とで選択可能である。標準的な解析は音響関係の人々に、ラフネスが音と同じ意味を持つとの確信をもって、測定器を使い音との関連づけを可能にしている。おそらく数年でラフネスは騒音レベル問題と比べても同じくらい標準的なものになるであろう。

1.5 応答型システムとは何か？

この本はプロファイラについて書かれているが、他のタイプのシステムも歴史的にラフネス定義のために使われていた。現在、多くの技術者は、もっと古いシステムの挙動に基づくラフネスの直観的な概念を持つ。1920年代始め、ハイウェイ技術者がラフネスの測定のためサスペンションのストロークを記録する装置を車に据え付け、ロードメータと呼び、応答型（道路ラフネス）システムの総称で呼ばれる。一般に使用されているのは、Mays Ride Meterなど種々ある。

多くのロードメータは連邦道路局（BPR）のラフメータの考え方に従い、サスペンションがほとんど下方に移動するとき変位測定するように設計されている。BPRラフメータは一方向のクラッチ構造でサスペンションのストロークを測定する一輪トレーラである。（図-5）

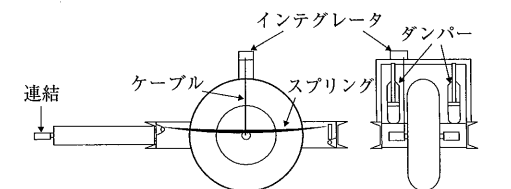


図-5 BPRラフメータ

一般にロードメータは普通乗用車に使われる。ラフネス測定器は、測定されたサスペンションのストロークがインチで得られ、移動した距離によって標準化される。時々単独で使用される単位が計測器ハードウェアにより、例えば、カウント/マイルに基づき使われる場合があるが、in/miまたはm/kmのような工学単位で報告される。車両の応答測定結果は車体加速度の振動数成分に良く近似するが、乗り心地での振動と大きく関係している。

- 応答型システムによる測定結果は、車両の応答特性に影響を与える因子と関係がある。

車両を標準化しても、同一と思われる車両間には違いがある。さらに問題を複雑にするのは、車両の応答特性が時間により変化することである。さらに応答型システムが基本車両の動特性に依存することには2つ

の問題点がある。

1. ラフネス測定方法は、時間で安定していなかった。現在、ロードメータで測定された値は、数年前に記録された測定値と比較できない。
2. ラフネス測定結果は移植可能ではなかった。あるシステムによって測定されたロードメータ測定は、他のシステムで再現可能にはなっていないかった。

ロードメータは一般にそれほど高価でなく、頑丈で使い易いよう考案されたが、上述した問題がある。それが機能を果たすための厳密な解析法と試験車両は1980年まで存在せず、それ以降に車両の応答特性に関する因子の研究が、アメリカ協同道路研究計画(NCHRP)により資金が供給され始まった。

●NCHRPレポート228に応答型システムの扱い方がある。

応答型システムに影響を及ぼす2番目の原因は、標準ラフネススケールの欠如であった。標準ラフネススケールで、応答型システムに固有の問題のいくらかがキャリブレーションによって解決できる。標準測定値の欠如は最初、ラフネス機器のユーザの多くによって重大な問題だと見られなかった。市、郡、あるいは州のラフネスデータは、データベース内部で一貫していたのと比べて、ほど遠い独断的な単位を持っている。しかしながら、機器の再現性さえ問題であった。

●応答型システムから得た「m/km」単位の測定結果は便利である。

応答型システムでは、データの再現性と移植性に問題があるが、過去50年間よく利用された理由は、それが使えたからである。有意義な方法で舗装道路の品質を決定する上で、提示された測定法は、技術者の経験に対応しているとされた。もしそれらが時間軸と車両間において再現可能であるなら、プロファイル処理方法において現在以上の利益があるといえる。

1.6 ラフネス計測装置の応答振動数とは何か？

初期のラフネス装置は線形のメカニカルフィルタが用いられている。サイナソイド条件で入力すると、同じ波数のサイナソイドを作り出し、車上計測装置で処理され、要約された指数を計算する。

●ラフネスを測るシステムはバンドパスあるいはハイパスフィルタである。

これまでに、フィルタ処理されていないプロファイルは、道路勾配と長波長の波動により支配されることを例で示した。道路ラフネス測定装置は、長波長をカットして車両走行に影響する波長に焦点を合わせたメカニカルフィルタを用いる。

●低速度ローリング装置は、道路の形状によりプロファイルにフィルタをかける。

波数が基底長の移動平均により標準化されたとき、出力点の中には装置固有の次元により標準化された波数が入っている。プロフィログラフは、実際にはハイパス移動平均に近い概念のシステムである。(図-6) 平均値は多くの車輪を用いて求められ、偏位はその平均に比較して測られる。

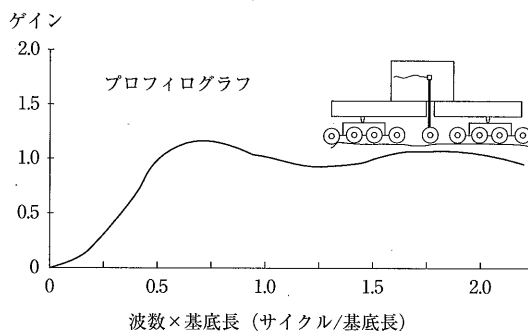


図-6

●応答型システムは、車両運動によりプロファイルにフィルタをかける。

乗用車等には、路面に関係する大きな振幅の加速度を運転手や車体から切り離すよう、サスペンションと空気タイヤが用いられる。車両の走行運動は、ある周波数で増幅され、その他では減少するようフィルタがかかる。道路測定時の入力である周波数応答(車軸と車体間の速度)は、人体の縦断方向の加速度応答に近似している。走行時の人間に及ぼされる加速度と道路測定時の運動は、5 Hz付近と15 Hz以上とに分離され、人体の共振振動数(1から2 Hz)と車軸の共振振動数(およそ10-15 Hz)に関係している。

低速度装置と異なり、走行車両のフィルタ自体は道路の形状と関係しないで、時間にかかわる車両運動に依存する。車の周波数応答は速度から独立し振動数は(cycle/s)の単位で定義される。しかし、もし空間周波数の関数(波数)として扱われるなら、その時応答は速度に依存する。

路面プロファイルと平坦性

(Surface Profile and Evenness)

遠 藤 桂*

路面プロファイルは、既往の概念である平坦性と強く結びついた概念である。ここでは、路面の凹凸を評価するため国内で用いられている σ やPrIという指標に加え、海外を中心に用いられているIRI, RNなどについても簡単に紹介する。また、これらの指標を解釈するための基礎的な概念として、長さの影響、キャリブレーション、相関、誤差についても簡単に紹介する。

1. はじめに

道路を走行するとき、路面の凹凸に起因する大きな振動や揺れを感じれば、それは快適ではなく、ひどい場合には安全な走行が保証されない。それゆえ、道路技術者は、道路を作って以来、路面の凹凸を興味の対象とし、路面の凹凸を測定する方法やそれによって路面を評価する方法について様々な検討を行ってきた。その方法として、路面プロファイルを測定し、それを元に路面を評価する方法は、非常に有効である。

路面プロファイルとは、ある基準点に対する路面の相対的な高さを示す数値の集合である。つまり、路面プロファイルは、路面に表れている骨材の凹凸のような非常に短い波長のものから、縦横断勾配のような波長の長いものまで様々な路面情報を含んでいる。

路面プロファイルを用いて路面の評価を行おうとする場合、その路面高さを連続測定するのが理想であるが、それは現実には無理な話であり、実際には、ある間隔（サンプリング間隔）ごとに測定することになる。路面プロファイルを測定する機械を一般に路面プロファイラと呼ぶが、プロファイラから得たデータは、サンプリング間隔によっては、測定延長1 kmあたり数1000点以上のデータにも及ぶ。その膨大な量のプロファイルデータは、路面に関する様々な有用な情報を含んでおり、そこから必要な情報のみを取り出すことが大切であり、その方法がいくつも検討されてきた。

ここでは、路面プロファイルデータから得ることができるいくつかの指標について簡単に説明するとともに、これらの指標を用いるときに必要な基礎的な概念に

ついて紹介する。

なお、路面状態を表現する方法として、非常におおまかに定義すると、どれだけ路面に凹凸があるのかを表現する方法（roughness）と、どれだけ平坦であるのかを表現する方法（evenness）があるが、ここでは厳密な定義はせず、両者をあわせた概念を平坦性という言葉で代表させている。

2. 平坦性の測定方法

2.1 3 mプロファイルメータによる標準偏差 σ

昭和40年初頭まで、国内では、舗装の平坦度を様々な方法で測定し、様々な方法で整理し、そして、様々な表記方法で表していた。昭和42年に土木研究所舗装研究室では、当時用いられていたいくつかの平坦性測定器について共通試験を行って、舗装工事竣工検査時の合否判定基準について検討した¹⁾。

表-1に示した試験器を用いて同一路面上で平坦性の測定を行い、反復性、サンプリング間隔による影響、標準偏差の算出方法、それぞれの試験器から得る指標の相関関係などを検討した。

標準偏差を求める方法について検討した結果、その精度、計算の簡便さから、測定値 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ を n 個ずつ k 組のグループに分け、各組の R （＝最大 x －最小 x ）を $R_1, R_2, R_3, \dots, R_k$ としたとき、

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{k} \quad \sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

(d_2 は n によって決まる定数、 $n = 6 \sim 10$)

*えんどう かつら 日本道路技術研究所第1研究室

表-1 検討された試験器とその特徴

試験器名	特 徴
足無し直読式凹凸測定器	3 m直定規と路面とのすきまが最大となる大きさを測定する。
N式プロフィロメータ	測定輪の前後に5輪ずつの固定輪を配置して、測定輪が常に前後5輪のうちの最高点にある輪と同じ高さを測定できる。連続的に凹凸が測れる。
足付き直読式凹凸測定器	3 m直定規の両端に10mmの足をつけたもの。測定原理は「足無し」と同じ。
C式プロフィロメータ	「足付き」の足の代わりに固定輪と、中央部分に上下移動可能な測定輪をつけて、この測定輪の動きを連続的に記録する。
公団式プロフィロメータ	C式と基本構造は同一であるが、自動車の長さや現場での取り扱いなどを考慮して、8 m長、固定8輪にしたもの。
AASHO式プロフィロメータ	基準線と路面の接線との交差角を測定することで路面の凹凸を測定するもの。前後輪間隔は7.65m。

によって標準偏差 σ を求める方法が最も良いと結論づけ、足付き直読式凹凸測定器あるいはC式プロフィロメータによるサンプリング間隔1.5mのときの σ で舗装の平坦性検査基準値を提案した²⁾。検査基準値は、目視観察による車両走行時の乗り心地を4段階に分類し、それに σ を対応させることによって提案した。C式プロフィロメータは、現在の3 mプロフィルメータに相当し、舗装試験法便覧でその輪数を規定していないが、現在は8輪式と16輪式が広く普及している³⁾。

当時は、計算機の発達が十分でなかったことから、前述の簡易法によって標準偏差を求めていた。その簡易法はデータが正規分布するという前提で用いたものであり、現在は計算機が十分に普及したこと、測定自体も自動化され省力化が図れることなどから、本来の方法で標準偏差を求めるようにした。竣工検査時の管理基準として提案された σ であるが、現在は、舗装の維持管理基準としても用いられている。

2.2 8 mプロフィルメータによるPrI

昭和36年以来、(財)高速道路調査会の施工機械分科会で、路面凹凸測定機としてのプロフィルメータの試作検討を実施してきた。この検討段階で、世界各国で用いられている様々な道路ラフネス測定機あるいはプロフィロメータについて検討し、複数の基準輪を持ち、ビームの中心にある基準高さから測定輪の上下変動を記録してそれをプロファイルとする原理のプロフィロメータに着目した。

原理的に基準輪の数が多く、しかもランダムに配置

されているほど、記録されるプロファイルがより実際のプロファイルに近づくが、自動車の車長や現場での取り扱いなどを考慮してフレームの長さを8 mにしたプロフィルメータを設計した。これは、フレームの長さゆえ8 mプロフィルメータと呼ばれた。3 mプロフィルメータによる σ が提案される2年前の昭和40年に8 mプロフィルメータの詳細と路面の評価方法について報告されている^{4) 5)}。

8 mプロフィルメータを用いた路面ラフネスの検討には、プロファイル指数 (PrI) と累積ラフネス (TCR) を用いる。

記録した路面プロファイルをだいたい200mごとに区切って、プロファイル波高の中心部に水平に6 mmバンドを設置し、このバンド外へはみ出している部分の延長を加算し、これをプロファイルの総延長で割ってプロファイル指数 (PrI) を得る。PrIは、cm/kmという単位で表され路面のラフネスあるいは乗り心地を反映した指標と考えられている。

測定輪が合計1 cm下向きに移動すると、記録紙に山が1つ記録されることから、このとき、上向きにも1 cm動いていると考えて、記録値を2倍して距離で除することでTCRを求める。TCRもcm/kmの単位で表し、TCRによって、車輪が完全に路面に接触して走行する場合の走行1 kmあたりの車輪上下合計偏位量を知ることができる。

乗り心地係数、PrI、路面凹凸のパワースペクトル密度解析 (PSD) などを検討した結果、8 mというフレーム長は、80~100km/hで走行する場合の人体に最も感じやすい成分を記録しており、PrI=16が大型車が高速道路を長時間走行するためのラフネスの限界であると結論づけた。

現在、維持修繕要綱で自動車専用道路の維持修繕要否判断の目標値としてPrI=90cm/kmとして用いている他に⁶⁾、日本道路公団では、表層施工後の日常管理試験項目として採用し、土工部でPrI $\leq$ 5 cm/km、構造物部でPrI $\leq$ 8 cm/kmとしている⁷⁾。

2.3 国際フラネス指数 (IRI) ⁸⁾

欧米では、1940年代から、応答型プロファイラから得ることができるm/kmという単位の路面凹凸指標を用いて路面の評価を行ってきた。しかし、使用する測定車が異なれば得られる値が異なるばかりか、同一車両で測定したとしても時間が経過すると同じ値を得ることは不可能であった。1970年代後半、アメリカNCHRPは、このタイプのプロファイラについて研究

を行った。国際ラフネス指数（IRI）の基礎は、この研究で行われた。

その後、世界銀行がこの研究を引き継ぎ、路面ラフネスを測定するための装置間の相関やキャリブレーション基準などを確立するための共通試験を1982年から開始するとともに、数年間費やして様々なプロファイル処理方法や測定間隔に関して検討した。その結果として、IRIという指数の定義、ガイドラインが提案された。

この研究では、図-1に示したような2軸4輪乗用車の1輪だけを取り出したクォーターカーと呼ばれる仮想的な車両モデルを構築し、路面を走行する車両の応答をシミュレートした。このシミュレーションで計算できるバネ上質量の鉛直高さとバネ下質量の鉛直高さの差の累積変動量と区間距離の比をIRIと定義した⁹⁾。すなわち、

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{LV} \left| \dot{z}_s - \dot{z}_u \right| dt$$

であり、ここで、Lは距離、Vは走行速度（=80km/h）、 z_s はバネ上質量、 z_u はバネ下質量、tは時間である（ z_s と z_u の上についているドットは、導関数であることを示している）。

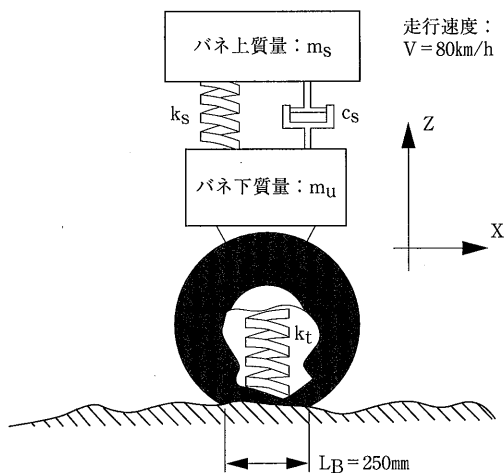


図-1 クォーターカーモデル⁹⁾

IRIは、主に乗用車の応答に適合するように開発されたものであるが、小型あるいは大型トラックとの相関も良い。特に、乗員にかかる鉛直方向加速度（乗り心地に関係）やタイヤの荷重（車両制御や安全に関係）と高い相関がある。その一方で、車軸の加速度や乗員

の鉛直位置にはあまり関係がない。図-2に示したように、IRIは、だいたい2.4m～15mの範囲の波長（波数0.065cycle/m～0.42cycle/m）に対する感度が高いという特徴がある。

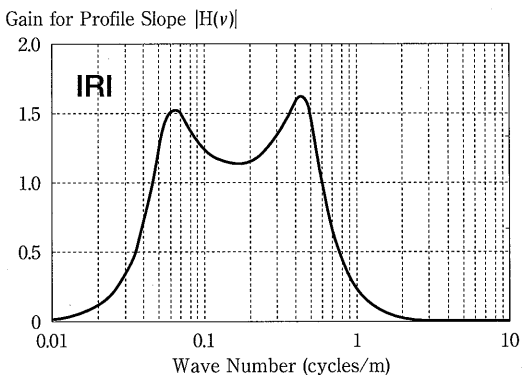


図-2 IRIの波数に対する感度⁸⁾

IRIには、その定義ゆえに、隣接する2区間のそれぞれのIRIを平均すると、その2区間全体のIRIに等しくなるといふ、他のラフネス指標にはない性質がある。もしも測定プロファイルの高さが数%高くなったとしたら、IRIも正確に等しい割合だけ変化する。

IRIは、路面プロファイルに基づいた最初のラフネス指数ではないが、時間が経過しても変化せず、異機種間の移植性が非常に高い、最初のラフネス指数である。IRIの計算式は例えば参考文献9などに公開されている。また、IRIを計算するためのフリーソフトウェアは以下のURLで公開されている。

<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr.html>

2.4 ライドナンバ（RN）⁸⁾

路面を管理あるいは評価するには、乗り心地に着目することが大切である。1980年代にアメリカNCHRPは、路面のラフネスが乗り心地に及ぼす影響に関する2つの研究を実施した。その研究では、数多くの道路において乗り心地を0～5の値で評価するとともに、左右の車輪走行部の縦断路面プロファイルも測定した。その乗り心地評価結果を平均パネル評定値（MRP）という。

しかしながら、乗り心地の評価にこういったアンケートのような評価方法を採用すると、費用がかさむのはもちろんだ、追跡調査するときの継続性に欠けるといった欠点がある。そこで、路面プロファイルからMPRを推定する解析方法が検討されたというのが、ライドナンバ開発の簡単な経緯である。

ライドナンバ (RN) とは、乗り心地を説明することを目的とした路面プロファイルの指標の一つである。おおよそ以下のような手順でRNを求める。

- (1) 左右の車輪通過位置 (あるいはどちらか一方) の縦断プロファイルを測定する
- (2) サンプル間隔が167mm以上の場合、基底長250mmのローパスフィルタを適用する
- (3) バンドパスフィルタを適用する
- (4) プロファイルからプロファイル指数 (PI) を求める (※ここではPIの詳細については触れない)
- (5) 次式を用いてPIからRNを計算する。ただし、左右2本のプロファイルを処理した場合は、次式で平均化してからRNを計算する。

$$RN = 5e^{-160 (PI)} \quad PI = \sqrt{\frac{PI_L^2 + PI_R^2}{2}}$$

このように、RNは、PIを非線形変換したものであり、0～5の正の値をとる。非線形であることから、IRIのように、隣接する区間の平均値から、その連続区間の値を計算するということができない。

図-3にRNの感度を示したが、最大ゲインは波数が0.164cycle/m (波長6m) のときである。RNはIRI (図-2) に比べて短い波長に対して感度が高いといえる。IRIの感度が最も高い15m付近の長い波長に対しての感度はあまり高くない。RNとIRIの相関は高いが、このように、RNあるいはIRIに影響を与える路面の波長成分が異なることから、それぞれ独自の路面情報を与えるものと解釈できる。よって、一方から他方を求めることはできない。

なお、RNを計算するためのフリーソフトウェアも、IRIのソフトウェアと同じURLで公開されている。

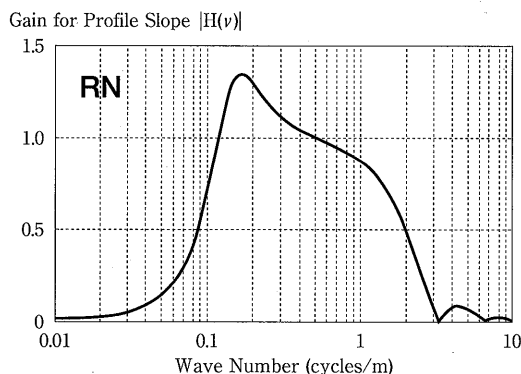


図-3 波数に対するRNの感度⁸⁾

2.5 その他の指数

2.5.1 ハーフカーラフネス指数 (HRI)⁸⁾

ハーフカーモデルは、クォーターカーモデルを左右に2つ連結したモデルであり、2つのプロファイルデータの平均に対して適用するIRIアルゴリズムと同一となる。ハーフカーモデルの長所は、乗用車にロードメータという応答型システムを設置する場合に良く適合するという点である一方、車両のローリングを感じないこと、2つのプロファイルデータをきちんと同期させる必要があることが欠点である。

プロファイルにハーフカーモデルを適用すると、ハーフカーラフネス指数 (HRI) を計算できるが、当然のことながら、HRIとIRIの相関は極めて高く、2つのプロファイルを完全に同期させる手間の割には、IRIから得ることのできる情報以上のものは得られないことから特別にHRIを採用する理由はない。

2.5.2 RMSVA⁸⁾

RMSVAは、1970年代後半にW. R. Hudson教授らが提案したラフネス統計値である。RMSVAは、基本的に両端を支持したストレートエッジの中央高さを感知する回転式ストレートエッジ (スパンを3mにすると3mプロファイルメータに相当) の出力と同等である。

RMSVAは、計算課程で用いる係数を得るため、基底長が割り切れるサンプル間隔にする必要があるという欠点がある。その係数は整数であるため、例えば、基底長1.4m、サンプル間隔0.4mのとき、 $1.4/0.4=3.5$ となり、この結果から、係数を3とするか4とするかで、計算結果が異なってしまう。また、慣性プロファイラを用いて測定した場合、その非平滑化フィルタのため、RMSVA値が小さめにでってしまうという欠点もある。

2.5.3 テキサス州MOとブラジルQI⁸⁾

Hudson教授らは、RMSVAを用いた2つの指数を提案した。

$$MO = -20 + 23RMSVA_4 + 58RMSVA_{16}$$

$$QI = 8.54 + 6.17RMSVA_{10} + 19.38RMSVA_{25}$$

MOは、基底長4フィート (1.2m) と16フィート (4.9m) のときのRMSVAから、QIは、基底長1mと25mのときのRMSVAから計算する。

両指数は、ともにRMSVAから計算されることからRMSVAと同じ性質を持つ。また、研究の結果、両指数はIRIと高い相関を持つことがわかったため、IRIがすでに求められていれば、MOやQIから新たな路面情報を得ることはできない。

3. 平坦性評価における長さの影響

広範囲の道路網をモニタリングするとき、どのあたりの路面がどの程度の平坦性を示しているのか知るには、例えば200mごとにまとめれば十分である。その一方で、より詳細な調査が必要である場合には、長さの影響を考慮する必要がある。以下に、IRIを例にとって、その影響について概説する。

ある150m区間で測定した30mごとのIRI値について、0m地点を解析開始点とした場合の結果を表-2に、20m地点を解析開始点とした場合の結果を表-3に示す⁸⁾。

表-2 0m地点を解析開始点としたIRIの例

始点 (m)	終点 (m)	IRI (m/km)	
		左側	右側
0.00	150.00	2.697	2.686
0.00	30.00	1.995	1.705
30.00	60.00	1.762	1.922
60.00	90.00	5.662	5.540
90.00	120.00	2.762	2.938
120.00	150.00	1.351	1.269

表-3 20m地点を解析開始点としたIRIの例

始点 (m)	終点 (m)	IRI (m/km)	
		左側	右側
0.00	150.00	2.697	2.686
20.00	50.00	1.596	1.747
50.00	80.00	3.782	3.426
80.00	110.00	4.471	4.727
110.00	140.00	1.853	1.861
140.00	150.00	0.974	1.178

これら2つの表で特徴的なのは、地点0を解析開始点とした場合、60m～90m区間のIRIが最大値を示し、左右とも5.5m/kmを越えていたのが、地点20mを開始点とした場合、IRI最大値が4.5m/km前後に減少した点である。その分、50m～80m地点のIRIが3.5m/km前後と大きくなっており、80m地点付近にIRIを増大させる原因があることがわかる。このように、解析開始点をどこにするかによって、得られるIRIに差が生じる。

調査延長が非常に長い場合、部分的な凹凸情報は平均化の影響で小さくなる。つまり、IRIをはじめとするラフネス指数の変動は、路面プロファイルの影響に加えて、区間長さの影響も受ける。よって、調査目的に応じて、各区間長を決定する必要がある。

4. プロファイル測定における検証テストの重要性⁸⁾

これまでは、プロファイルの測定結果が正しいものという前提で議論してきた。しかし、路面プロファイルを測定するためのプロファイラが正しく動作していない場合、プロファイルデータから計算される各指数や、それに基づいた路面の評価は正しくない。

新しいプロファイラを初めて使うときは、その出力が妥当かどうか検証する必要がある。もしも、IRIで路面管理をするつもりならば、IRIを用いてプロファイラが正しく動作しているか検証する必要がある、プロファイルそのもので評価するならば、得られたプロファイルを細かく検証しなければならない。

完全に同一測線を繰り返し測定することは、事実上不可能ではあるが、より慎重に同一測線（にきわめて近い測線）上を繰り返し測定して、等しい値が得られるかどうか、すなわち後述する反復性を確認することも大切である。

プロファイラに備え付けられた高さセンサや加速度計が壊れていたとしても、IRIのような指数を計算する限りにおいては故障に気づかないことがある。得られたプロファイルを実際にプロットしない限り、この故障には気づかない。

こういった検証を定期的に行うべきであり、検証テストに合格しなければ、そのプロファイラから得た値は使用できない。

5. プロファイラのキャリブレーション⁸⁾

一般的なプロファイラは、加速度計、高さ変位計、走行距離計、コンピュータ、電源供給システム、それぞれのコネクタといった数多くの電子部品から構成されている。そのうちどれか1つでも正しく動作しなければ、プロファイラ全体が正しく動作しない。

キャリブレーションとは、各種計測装置の出力と既知の入力を比較して、スケールファクタを決定することである。例えば、高さ変位計のキャリブレーションは、センサから測定対象物までの距離を既知の値にセットして、センサの出力と比較することで行う。路面プロファイルを測定することを考慮すれば、センサ出力が地上高に対して線形に比例していることを確認する必要がある、キャリブレーションは複数の距離で実施する。

しかしながら、システムの設計方法によっては、部品ごとのキャリブレーションができない場合があり、そういった部品のキャリブレーションは、工場出荷時

に行われるのみとなる。一方、走行距離計などは特別な装置を必要とせず容易にキャリブレーションできる。

例えばIRIが既知の区間のIRIを測定することで、プロファイラの検証はできてキャリブレーションができないことに注意する必要がある。そのとき得られたIRIのようなラフネス指数の値が同一値だったとしても、真のプロファイルが異なれば、様々な波長の寄与度も異なってくるので、ラフネス値でキャリブレーションすることはできない。

6. プロファイル測定時に生じる誤差⁸⁾

理想的な世界では、路面上に設定した測線上を繰り返し測定することができ、毎回等しいプロファイルを得ることができる。さらに、異なるプロファイラで測定することも可能で、その結果は、別のプロファイラによる結果と完全に一致する。しかし、現実の世界ではそうはならず、少なからず誤差が存在する。

6.1 反復性

1台のプロファイラを用いて、ある測線に沿って10回連続してプロファイルを測定するものと仮定する。もしも得られる10データの一貫性が高ければ、反復性が良いという。

反復性は、例えばプロファイラから得られる平均値にはあまり影響しない。ある部分の値が大きかったり逆に小さかったりしても、結局は平均化されるからである。よって、道路網の評価を行うような場合はプロファイラの反復性はあまり重要ではないが、道路の新設時や補修のための評価を行うような場合は、反復性の善し悪しが、きわめて重要になってくる。

6.2 再現性

基本設計が同一であるが、別のプロファイラを用いて同一測線の路面プロファイルを測定したとき、それぞれの装置から得た値の差が再現性である。

あるプロファイラの再現性を検証するには、別のプロファイラを用いて得たデータと比較することになるが、プロファイラの反復性がよければ、1回の測定で十分であるものの、反復性が悪ければ、信頼できる平均値が得られるまで繰り返し測定しなければならない。

6.3 移植性

移植性は、基本設計が全く異なる別のプロファイラで繰り返し測定したときの性能のことである。

ただし、移植性の基準となるものは、路面のもつ真のプロファイルであり、異なる2機種から得たデータのどちらが正しいのか検証するには、直接水準測量や

ディップスティックのような装置からの結果と比較するのが現実的である。

6.4 誤差を生む原因

誤差は、路面プロファイルの測定に関わっている人と機器のいずれから生じる。

ある路線を連続して調査する場合、厳密には毎回異なる測線のプロファイルを測定している。少なくとも、計測開始点の縦方向位置、横方向位置がずれた時点で誤差が生じることが決まってしまう。どんなに熟練した者が行っても、この誤差は少なくなることはあってもなくなることはない。結果的に、異なる測線の真のプロファイルが異なるのであるから、得られるデータも異なってくる。

正しいプロファイルを得るためには、プロファイラを構成する各部品が、すべて正しく機能することが必要である。しかしながら、各部品には、理論上きわめて小さいものの、確かに誤差が存在する。プロファイラの種類や表層の種類あるいは状況などに起因する誤差もある。

サンプリング間隔の問題もある。プロファイルからある統計値を計算する場合、サンプリング間隔が長くなるにつれて誤差が大きくなる。また、サンプリング間隔だけの問題ではないが、プロファイルの測定には、エイリアシングと呼ばれる影響もある。図-4に示した波長の短い正弦波が真のプロファイルであったとして、たまたま、真のプロファイルの1波長より少しだけ短い間隔(図の ΔX)でサンプリングすると、得られるプロファイルは、波長の長い正弦波(図の太線)になってしまう。

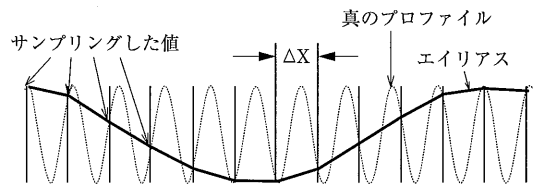


図-4 真のプロファイルとエイリアス⁸⁾

7. おわりに

以上、路面の平坦性を評価するために国内外で用いられている指標と、その指標の元となる路面プロファイルを測定する時、あるいは、測定結果を解釈する際の基本的概念について説明した。乗り心地は、路面の平坦性に大きく関係し、道路技術者は、何とかして乗り心地を定量化しようと努力してきた。路面を評価す

る上で、いずれの指標を用いようとも、それがどうい
う事象に深く関係しているのか、どういう方法あるい
はどういう状況で得たものであるのか、またそれがど

のように測定結果に影響するのかなどを正しく認識し
ない限り、路面の正しい評価もできないものとする。

— 参考文献 —

- 1) 河野 宏：竣工時の舗装の平坦性検査について
(I)，土木技術資料，Vol.9，No.4，1967年4月，
P.20
- 2) 河野 宏：竣工時の舗装の平坦性検査について
(II)，土木技術資料，Vol.9，No.7，1967年7月，
P.41
- 3) 社日本道路協会：舗装試験法便覧，昭和63年11月，
P.931
- 4) 金谷重亮：路面凹凸に関する研究(1)，道路，1965
年2月，P.112
- 5) 金谷重亮：路面凹凸に関する研究(2)，道路，1965
年4月，P.326
- 6) 社日本道路協会：道路維持修繕要綱，昭和53年7
月，P.93
- 7) 日本道路公団：舗装施工管理要領，P.13
- 8) M. W. Sayers, S. M. Karamihas : The Little Book
of Profiling, 1998年9月，P.1
- 9) M. W. Sayers : On the Calculation of International
Roughness Index from Longitudinal Road Profile,
TRR1501, 1995年, P.1

第81回アスファルトゼミナールのご案内

社団法人日本アスファルト協会

拝 啓 時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

さて、毎年恒例のアスファルトゼミナールですが、本年度は京都市での開催を予定しております。

案内状の発送につきましては11月下旬以降を予定しております。

皆様のご来場をお待ちしております。

記

開催日時： 平成15年2月13日（木）～2月14日（金）

第1日目 平成15年2月13日（木）13：00～16：35

第2日目 平成15年2月14日（金）9：30～12：40

開催場所： 京都市「京都テルサ」（案内図参照）

京都市南区東九条下殿田町70

Tel. 075-692-3400



路面プロファイルの評価方法

(Method of evaluating road profile)

高 木 久*

路面プロファイルの測定には、さまざまな要因により誤差が生じる。それは、必ずしも人為的な要因や装置的な要因ばかりではない。路面プロファイルの評価を行うためには、測定車両の速度、テクスチャやひびわれの影響などを理解しておくことも重要である。ここでは、それぞれの影響について簡単に紹介するとともに、最終的にプロファイルはどの程度正確でなければならないかについてまとめる。

1. 路面プロファイル観測における誤差要因

プロファイル観測における誤差は、操作者による操作、プロファイラ装置特性、道路特性によって生じる。

操作者による誤差とは

プロファイル測定における誤差要因の一つは、毎回道路上の同じラインのプロファイルが測定できずに処理されることにある。ラインが異なれば真のプロファイルも異なる。一般に、静定プロファイラについては、そのラインは物理的な方法で印が付けられることから、ほぼ同一のラインが測定でき、結果としてラインの変動は小さくなり誤差も小さい。慣性式プロファイラについては、同一のラインの選択は難しくなることから、ライン毎の変動が大きくなり誤差も大きくなる。

道路のセンターラインに平行な車輪走行部に沿ってプロファイラを運転していると仮定する。このとき、プロファイル処理されるラインには次の2つの変動が存在する。

- ・進行方向の測定開始地点
- ・横断方向の位置

時速100kmで移動した場合、人の通常の反応時間を数分の1秒とすると約6m移動していることになる。また、試験中にシステムを制御する電気機器、およびコンピュータのソフトウェアの設計に依存する遅れが生じることがある。測定処理が始まれば、これらの問題は加速度計や高さセンサの位置によらず機械的に処理されてしまうことになる。

進行方向の変動について

過去の研究成果によると、路面に試験箇所の印を付け、経験豊富な運転者と機械操作者のチームによって測定されたとしても、最も変動が小さい場合で測定開始位置は約10m変動するという結果になった。先に示したラフネスプロファイラは、プロファイル処理が開始される地点の感度が小さくなる。このことから、測定開始位置の変動に応じてラフネス情報も変わり誤差要因となる。

横断方向の位置の変動について

高い技能を持った運転者であれば、横方向の変動を約15cm以内に押さえることも可能であるが、一般的には約30~50cm変動させてしまう。これは、プロファイル処理装置の進歩により操作が容易になったことから、運転者はデータを収集していることを忘れてしまい、車線変更のときでさえ一般車両のように運転してしまうことに他ならない。車線をまたぐプロファイルが得られたとしても、それは容易に再現できるものではない。

プロファイラ装置特性による誤差とは

プロファイルを有効に測定するには、加速度計、高さセンサ、速度計、電源、シグナルコンディショナ、A/D変換器、そしてコンピュータなど、システムのすべての部分が正しく機能することが必要である。理論上、各部分の誤差は小さいが確かに存在する。

過去の研究成果によれば、レーザと光学式高さセンサを持つシステムで観察された主な誤差源は、操作者

*たかぎ ひさし 国際航業(株)日野技術所空間計測技術部

の実行によるものであった。しかしながら、後に述べるように、十分に注意を払った実験環境においてでさえ、説明のできない差異が存在している。

サンプリング間隔を小さくすること

プロファイル測定における数学的解析では、非常に小さなサンプリング間隔では正確であるが、サンプリング間隔が長くなるにつれて誤差が大きくなっていく。測定間隔を長くすることは解析者にとっては扱いやすくなるが、データから計算される統計量の潜在的誤差は大きくなる。図-1は、サンプリング間隔の関数としてPI (RNを計算するために用いられた中間統計量)の誤差レベルを示しており、30cmより長いサンプリング間隔に対しては、完璧に正確なプロファイル処理がなされたとしてもRNを計算するためには不十分であることを示している。

路面のテクスチャに関する問題では、サンプリング間隔の選択、道路のラフネス特性、そして適用する解析方法に対して相互作用を含んでいる。この誤差源は、プロファイラのフィルタによって低減されるが、すべてのプロファイラが有効なフィルタを持っているわけではない。従って、そのようなプロファイラの誤差を低減するためには、より短いサンプリング間隔を用いることである。

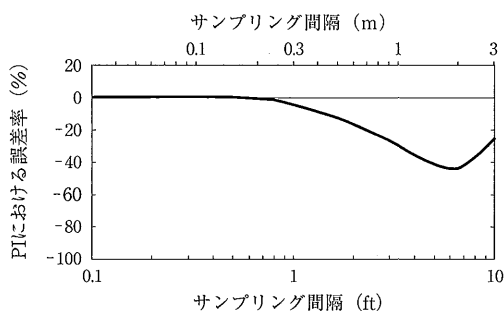


図-1 サンプリング間隔と誤差率

超音波システムには多くの誤差がある

超音波センサ付きのシステムは、レーザや他の光学装置ほど正確ではないが、限られた状況下では使うことができる。なぜなら、車の動きがセンサの分解能に比べて相対的に大きいならば、そのときの誤差は十分に小さいからである。

特殊な状況を除いて、超音波プロファイラで測定されたラフネスは、分解能の誤差によって実際の値より大きくなる。また、超音波プロファイラの製造会社

が異なると、異なるパフォーマンスが観測される傾向にある。実際のところ、システムが有効なところでのラフネスレベルは数多くの要因に依存しており、それに対する経験法則を見出すことは容易ではない。

部品の接触不良や破損

プロファイラがうまく動作しない原因の一つは、接続不良である。慣性式プロファイラの測定手順の複雑さから、部分的に壊れていてもプロファイル処理が行われているかのように見える場合がある。プロファイル処理の情報は、加速度計と高さセンサの信号が一緒になって提供される。このことは、車両のバウンドの影響をキャンセルするための情報も提供されることを示している。もし、センサのうちの一つが壊れたり、はずれたりした場合、そのセンサの測定値がゼロになることから、計算されるラフネスは小さくなるだろう。逆に、本来キャンセルされるべき車両のバウンドを検知してしまった場合、計算されるラフネスを増やすことも考えられる。

測定車両の動きはランダムであるが、同じ道路上を繰り返し走行すれば、実際にはかなり同じ動きが繰り返されることになり、再現性は高いと考えられる。経験を積み、プロファイル処理されたプロットを見ることで、加速度計または高さセンサのいずれかが壊れたことに気づくことができる。もし、加速度計が壊れたなら、フィルタリングをしないプロファイル処理での変動は、通常よりもずっと少なくなる。

図-2は、あるプロファイル処理と、高さセンサのみの出力値を比較したものである。高さセンサ単独から計算されたIRIは、約1.5m/kmであるのに対して、実際のプロファイル処理から計算されたIRIは、約2.2m/kmとなっている。これらの値は違っているが、測定装置の異常に気づかない範囲かもしれない。この誤差は、プロファイルをプロットしない限り発見できない。ま

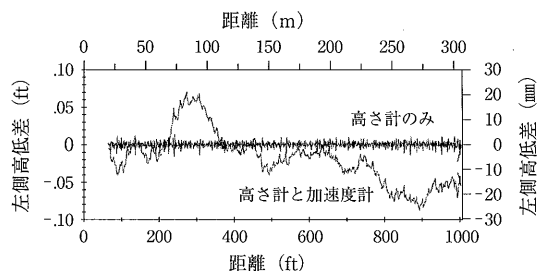


図-2 路面プロファイルの処理結果と高さセンサ出力値のプロット比較

た、高さセンサが故障している場合は、そのプロファイルはなめらかな変動を示すと考えられる。

道路特性による誤差とは

表層の種類による影響

路面のテクスチャは超音波センサシステムでとらえるのは難しく、いくつかのレーザセンサでも問題が起こることが分かっている。また、ひびわれがひどい路面でも、レーザセンサで問題が生じる。それについては、4. で述べる。

プロファイル自体の変化

「真のプロファイル」は、時間の経過とともに変化する。特に、PCC版舗装は気温の上昇と下降に応じて日々変化する。版の上面が縮んでいるとき、「版の反り」が生じる。この影響により、IRIで20%変化することが観測されている。また、日々の変化に加えて、土の含水量の変化に従って季節変動がプロファイルに影響しうる。凍結融解の季節も、大きな影響を及ぼす。

「真のプロファイル」が変化することによるプロファイル測定の変動は、もちろん誤差ではない。プロファイルは、ただその時点のプロファイルをとらえているだけである。しかし、観測された変化が「真のプロファイル」なのか測定や処理中の変化なのかを知ることとは、なかなか容易なことではない。

他の外的要因

慣性式プロファイルの中で最も壊れやすい部品は、高さセンサである。レーザと光学式センサの場合、測定時の路面の状態や天候により影響を受ける。具体的には、レンズがきれいなこと、土、雨、泥がついていないかを確認すべきである。

超音波センサも、泥や土などの影響を受ける。適切な防護装置を用いないと、路面から車両に戻ってきた反射音の測定時間を変えてしまい、誤差を生む要因になる。また、風は大気圧と音速を変え、外部ノイズによりセンサの回路が混乱することもある。超音波システムは、レーザ方式の数分の一という低価格であるが、残念ながらそのパフォーマンスには限界がある。誤差を減少させるためには、予算の許す限り、超音波センサをより正確な装置と取り替えることが必要である。

2. 車両速度の影響について

測定速度は、慣性式プロファイルを正しく操作する

ために重要である。一般的に、慣性式プロファイルは、バンあるいは乗用車のような普通に道路を走行する車両に搭載されている。従って、プロファイルを測定しないときは他の車両と同じ速度で走行できる。

では、プロファイルを測定するときの速度の影響とは何であろうか？

測定速度とプロファイルの関係とは

現在使用中のほとんどすべての慣性式プロファイルは、たとえ速度が測定中に変化しても有効なプロファイルデータを得ることができる。速度範囲はプロファイルの設計と得られたデータの使用目的によって異なる。

「真のプロファイル」とは静的なものであり、あくまで地上の1測線の特性であることを再確認すべきである。プロファイルそのものは速度には関係していない。もし、使おうとしているプロファイルが所定の目的のために有効であるなら、その測定中の速度は誤差の影響要因とならない。

また、測定後の解析時に「速度補正係数」などを考慮するようなことがあってはならない。もし、速度に応じて異なる結果が得られるとしたならば、それは何かプロファイルに不具合が生じていて修理が必要になるということである。

走行条件による速度誤差の影響

測定誤差において、速く走行するということは、ただ単にそれだけ早く測定を終了させることができるにすぎない。実際に、慣性式プロファイルの運転者は、経験的にこのことを理解するようである。もし、測定目的が特定の測線に対して「真のプロファイル」を捉えることならば、高速走行では正確に測線を追跡することは困難である。解決策として、運転者が正確に車両位置を測線に合わせることができるよう、低速走行を行うことが必要である。

同じ箇所を何度も繰り返し測定する場合は、プロファイルの横断方向の位置変化に留意する必要がある。仮に、何回目かの測定時にポットホールの上を通過してしまえばラフネスは増加してしまう。次の走行で、運転者が右に20cm程ずらして運転すればポットホールを避けて通ることになり、より低いラフネスが得られる。以上により、繰り返し測定において値が一定量異なる場合、それは横断方向の走行位置の変動によって、結果として異なる測線のプロファイルを求めたためと考えられる。

長い距離を走行する場合では、ラフネス特性の変化は平均化される。実際に、ポットホールやその他のラフネスへの影響要因は道路上に散在しているが、1つのプロファイルで無視されたラフネス特性は、同じ道路上の別のプロファイルには存在しなかった別の特性により補われる。従って、繰返し測定において極めて高い精度が必要でなければ、プロファイルを測る測線の正確な位置は重要でなく、高速道路においての一般的な走行速度（時速100km）での変動は問題にならない。

波長とプロファイラの関係とは
慣性式プロファイラと加速度計

慣性式プロファイラは、車両の上下の動きを感知し、状態基準を確立するための加速度計を持つ。理想的には、加速度計の出力は車両の微小な動きに対しても有効であるべきである。しかし、センサと電子機器は完全なものではなく電子的な「ノイズ」がある。もし、加速度計からの「信号」（加速度の結果としての出力である）がノイズより極めて大きいなら、プロファイラは十分良く作動している。しかし、信号がノイズと同じレベルであるかそれ以下なら、ノイズに基づいているため誤差のあるプロファイルをコンピュータが生成することになる。

次に、どの程度の加速度レベルの場合にノイズが問題になるのかについて見てみる。通常、加速度計とその電子機器は、標準使用で予想される最大の垂直加速度を処理できるように調整されていなければならない。例えば、垂直加速度1.0g（ g = 重力加速度単位）は、車両中の物体を空中に浮かせるレベルを意味する。プロファイラの精度の限界は設計と使用者の設定によるが、それは0.4g～1.5gの範囲にある（バンパー上あるいは車両に取りつけた加速度計では、2～3gの範囲まで上昇するかもしれない）。これらの設定でノイズと他の誤差は、0.01g以下の加速度レベルに対して重大な影響を及ぼすと認識され始めている。

速度による波長と加速度の関係

表-1に示す3つのサイナソイドの例について、速度と上下方向加速度との関係を考えてみる。道路上を運転するときに生じる上下方向加速度は（車の運動は無視して）速度に依存する。60mの波長（ λ ）は、時速96kmにおいて0.02gの垂直加速度を生ずるが、時速24kmのときわずか0.0013gである。プロファイラは高速度ほど長い波長を感知でき、高速度におけるプロフ

ファイルの処理は、60mの波長を含む解析が有効である。従って、低速度におけるプロファイルの処理について同様の解析をすることは、意味のないことである。

また、慣性式プロファイラには低速度での限界があり、それは作られたデータの使用目的、プロファイラにおける加速度計の品質と装置の使用方法、という2つの要素に依存する。経験的には、時速25kmがIRI算出を目的とした場合の最低速度と見なすべきである。もしプロファイルが短波長だけを扱って解析されるなら、速度は時速15kmに下げることができる。

表-1 速度に応じた波長と上下方向の加速度の関係

波長 λ ft (m)	振幅 in (mm)	15mi/h (24km/h)		30mi/h (48km/h)		60mi/h (96km/h)	
		周波数 (Hz)	加速度 (g)	周波数 (Hz)	加速度 (g)	周波数 (Hz)	加速度 (g)
200 (60)	1.00 (25.4)	0.11	0.0013	0.22	0.005	0.44	0.02
50 (15)	0.25 (6.35)	0.44	0.005	0.88	0.02	1.76	0.08
10 (3)	0.05 (1.27)	2.20	0.025	4.40	0.10	8.80	0.40

ブレーキ使用による加速度への影響

測定中の速度変化についてもう少し詳しく見てみる。もし、加速度計の軸が垂直方向にあるか、進行方向の加速度がゼロである、という条件を満たしているならば、速度の変化は完全に補償される。しかし、実際の測定車両の走行において、これらの条件を完全に満たすことはできない。車両は、道路でラフネスに反応するにつれ、わずかに前後に揺れる（ピッチング）。このとき、真の垂直に対して加速度計の垂直軸が変わる。揺れ角は、通常、1°よりずっと小さいが、ブレーキ軸を操作すると1～2°まで増加する。また、ブレーキやアクセル操作を頻繁に使うとき以外は、進行方向の加速度は小さい。

加速度計が傾き、車両が図-3に示されるような進行方向の加速度を生じるとき、潜在的な誤差要因が加わる。

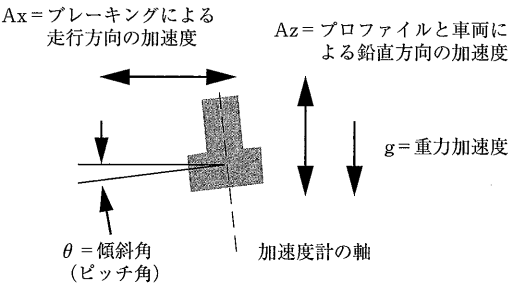


図-3 ブレーキングによる加速度計垂直軸の変化

ここで、ブレーキによる車両の進行方向の加速度が、測定された加速度に与える影響を算定してみる。

$$A_{\text{測定値}} = (A_z - g) \cos(\theta) + A_X \sin(\theta)$$

上式で、ピッチ角 1° の $\cos(\theta)$ は 0.99985 であり、 0.1 g の重力加速度の場合、誤差はわずか $(1 - 0.99985) = 0.00015\text{ g}$ である。同様に、 $\sin(\theta)$ の項は 0.0175 であり、もし、 0.1 g のブレーキによる減速があるなら、 $(0.0175)(0.1) = 0.00175\text{ g}$ の誤差が加わることになる。この加速度の誤差量は、実際にはプロファイルデータ上で明らかにならない程小さい。

また、進行方向の加速度と揺れ角は、概ねブレーキ力に比例している。つまり、誤差は概ねブレーキの力の二乗に比例していることになる。例えば、ピッチ角 2° で 0.2 g の進行方向加速度の減速がある場合、垂直加速度の誤差は 0.007 g である。

データ収集速度の影響

高速測定を行う場合、データ収集はより高速化を要求される。過去においては、コンピュータの処理速度によってデータの読取り速度が決定されていたため、高速度で扱える測定間隔も制限されていた。現在では、コンピュータ速度が格段に向上したため、非常に小さな (25 mm 以下) 測定間隔を除けばコンピュータの処理速度が高速測定の制限要因になることはない。

超音波センサ付プロファイラでは、音の反響と音速により限定される。音速はおおよそ毎秒 335 m である。仮に、センサが路面から 150 mm の位置に設置されていれば、音は路面に当たって反射して戻るのが約 0.001 秒かかる。時速 100 km で走行した場合、車両は音が感知されるまでに約 25 mm 移動することになる。しかし、正確に次のデータの読取りを行うためには十分な残響の消滅時間が必要である。超音波センサ付プロファイラでは、この残響時間を考慮して測定間隔を設定している。一例を挙げれば、 150 mm 間隔で測定するためには、時速約 50 km まで測定速度を下げる必要がある。

3. テクスチャの影響について

開粒度やチップシール舗装などのテクスチャの粗い路面では、重大な測定上の問題が発生する。テクスチャは、数センチ以下の短い波長に生じる変動に関係している。これらの波長は、プロファイル解析を行う上で解析の対象とはなりにくいが、いくつかの測定装置のパフォーマンスに影響を及ぼす。どのような誤差が

生じるかは、測定装置のタイプによって異なる。

テクスチャによる誤差要因とその軽減手法は

テクスチャは、測定間隔と波長との関係によってはエイリアスの発生原因となり、思わぬ誤差を引き起こしかねない。そこで、エイリアスの発生要因と誤差の軽減手法について見てみる。

エイリアシング

エイリアスをサインソイドとともに図-4に示す。

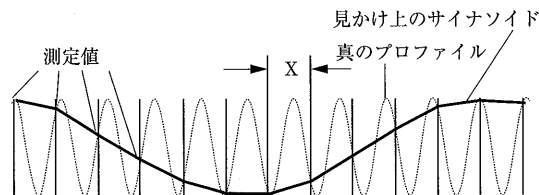


図-4 「真のプロファイル」とエイリアス誤差

図-4の垂線はプロファイルがサンプリングされた位置を表しており、短い波長のサインソイド(波線)は「真のプロファイル」である。垂線とサインソイドの交点は、サンプリング値を示している。本例は、測定間隔が大きすぎた場合にどのようなことが起こるかを表している。サンプリング値どうしを直線で結ぶと、かなり長い波長で描かれるように見えることに注意したい。これがエイリアシング(aliasing)と呼ばれる効果である。つまり波長の長いサインソイドは、短波長である真のサインソイドのエイリアスということになる。

ここで問題となるのは、「真のプロファイル」の中にエイリアスサインソイドが存在しないと考えて解析を進めた場合、これが誤差の原因になるかもしれないということである。測定間隔が十分に小さくない場合には、プロファイルにおける変化はエイリアスを発生させる原因となる。これは、サインソイド以外のプロファイルの形状に関しても同じである。測定間隔は、波長の半分かそれ以下でなければならないことを再確認すべきである。

エイリアシングの軽減

直接水準測量やディップスティックのような静的方法は、路面に物理的に接触する。かなり小さな面積で接触するため、短距離の変化を測定することができる。ディップスティックの支持脚やロッドの端が小さく

ほみにフィットする。一方、接地面積の大きい支持脚はテクスチャを円滑にし、エイリアシングの問題を軽減させる。

ディップスティックには直径数センチの“月着陸船の脚”というものが付属品として付いており、エイリアシング誤差やテクスチャの効果を軽減することができる。直接水準測量については、接地面積を増やすために図-5に示すようなパッドを取りつけることもできる。

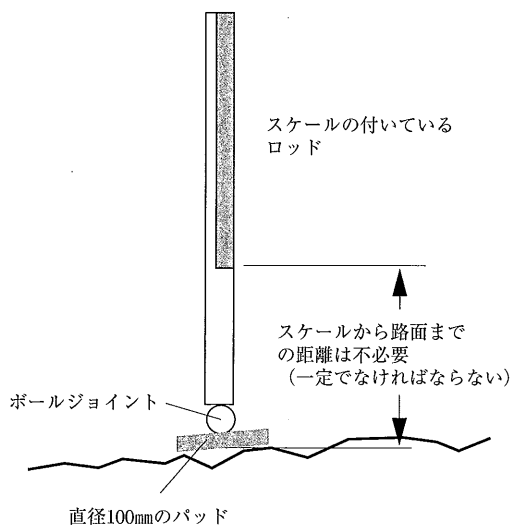


図-5 直接水準測量のアタッチメント（パッド）装着例

レーザや光学方式により高さを感知するセンサは、かなり高頻度でサンプリングすることができる。例えば、米国連邦道路局で開発されたPRORUTシステムはSELCOM社製で、高さを連続的な電圧比に変換して出力するレーザセンサを使用している。このレーザシステムは、毎秒16,000回の読取りができ、1秒間に30m移動した場合でもサンプリングは2.5mm以下の間隔で実行できる。その機械から出力として与えられる電圧は、コンピュータ処理するために大きな間隔（例えば50mm）でサンプリングする前に電氣的フィルタで円滑化される。

超音波センサの接地面積は、エイリアシングが無視できるほど十分に大きい。しかしながら、超音波センサの場合、別の理由によりテクスチャの大きい路面が重大な測定誤差を発生させる。

プロファイル毎の適応性は

ここでは、テクスチャの大きい路面に対して測定装

置毎の適応性を見してみる。

超音波式センサ

超音波式高さセンサは、短音波を発生させその反射音を検知することによって測定を行う。この方法は、路面が反射音を検知できるほど十分に音波を反射しなかったり、多重エコーがセンサロジックを混乱させてしまったりするように、路面が何度も音波を反射する場合には適用できない。過去10年、超音波センサを使用して得られた経験から、テクスチャの粗い路面ではうまく測定できないということが分かっている。

レーザ・光学式センサ

レーザ式高さセンサは、ある角度から見たときの位置を検知し、さらに三角測量法で距離を決定して路面にあるイメージを投影することにより測定を行う。このイメージが検知できない場合には、この技法は適用できない。従って、テクスチャの形状に対してこのイメージが相対的に小さい場合には、そのイメージがいつも検知できているとは限らない。

このような問題を解決するために、ある装置が開発されている。レーザのイメージは、かなり高い周波数でモニタされている。このイメージが消失してしまった場合には、最後に測定された高さを使用することになる。イメージが再度現れるとすぐに高さの値が更新される。このようにして、ほとんどの時間でイメージが消えてしまうような状態にならないければ、このイメージの消失はあまり問題にはならない。このような、次のイメージが現れるまで最後に取得した高さを保持する電子的なロジックを、“サンプル・アンド・ホールド”と呼んでいる。

レーザ式高さセンサは、一般に小さいスポット径のイメージで動作する。光学式センサは、一般に路面に大きなイメージを投影する。イメージが大きいほど大きな接地面積となる。テクスチャのある路面にイメージが見え続けていれば、問題はかなり軽減する。これらのことから、レーザ式及び光学式センサは大きなイメージでテクスチャの問題を軽減することが可能である。

4. ひびわれの影響について

舗装におけるひびわれは、プロファイルから得られる道路のパフォーマンスの品質というよりは、むしろ構造的パフォーマンスの低下と考えられている。ここ

では、舗装のひびわれがプロファイルに与える影響について見てみる。

車両の運動に与える影響はない

路面におけるひびわれの発生は、道路の品質の低下を示し、将来のラフネスの増加につながるかもしれないが、必ずしも車に乗っていて「感じられる」ものだとはいえない。なぜなら、図-6に示すようにタイヤの接地長に比べて通常ひびわれ幅の方が狭いためである。

ラフネス指数に大きく影響する

レーザセンサは、クラックに入り込めるほどの小さなイメージを路面に投影する。極端に短い測定間隔でない限り、ひびわれを幅広いくぼみと区別するような情報は得られない。測定間隔を短くすればより多くひびわれを拾うと思われがちだが、それは単に、ひびわれのようであるという情報を得ることにすぎない。そして、その情報はプロファイルが記録される前に削除されることがよくある。

本特集で記載されているプロファイル解析は、いずれもひびわれを正しく取り扱う方法ではない。これらは全て、ひびわれをひびわれの深さと同じ高さを持った突起と同じように扱う。すなわち、ラフネス指数は、予測しようとする品質とは無関係な路面形状によって大きな影響を受ける。

図-7は、ひびわれによって生じた大きなくぼみを含んだプロファイルに適用するローパスフィルタは、ひびわれを軽減するが取り除くことはできないことを示している。特殊な「指向性を持つ」アルゴリズムが、ひびわれを突起と区別するために必要となる。このアル

ゴリズムは、測定間隔がプロファイル中のくぼみをひびわれと判断できるほど短い場合には有効である。

5. プロファイルはどの程度正確でなければならないか

プロファイルの使い道はただ1つというわけではない。また、利用するすべての場合において、ただ1つの「最適な」プロファイラがあるわけでもない。これまでに見てきたことを踏まえて、最終的に路面プロファイルはどの程度の正確さが必要かについてまとめる。

プロファイラの精度とは

プロファイラの精度規準

プロファイラの精度規準を考えたとき、個々の測定の読みとり精度は決定的な問題ではなく、また、至近の10m以内における問題箇所的位置確定能力でもない。効果的なプロファイラのための規準の一つは、苦勞して測定したデータ値が、「真のプロファイル」より大きくも小さくもなく平均的であるべきだということである。道路の個々の工区における測定値のランダムな誤差は、区間で平均化され大勢には影響しない。

必要とされる精度は利用目的に依存する

プロファイラで測ったデータの利用法には、プロファイルの処理を行う解析と、その処理した結果の利用とがある。

例えば、目的が数km以下の区間を詳細に調べようとしているのであれば、測定時間や効率はそれほど重要な因子とはならない。測定速度は25km/hや40km/hでも十分であろう。また、舗装の診断を行うためには、道路の特性を10mか20mの区間のどこに問題箇所があるかを判定できることが望ましい。この場合、精度が

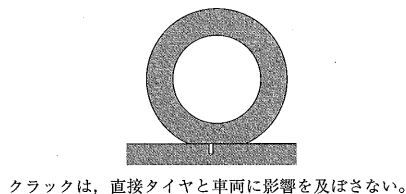
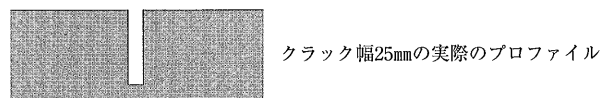
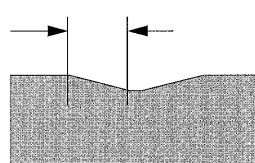


図-6 タイヤの路面設置長とひびわれ幅の関係



スムージングの波長



フィルターをかけたプロファイル（移動平均）
・特徴を減じることにはできるが、除去できない
・滑らかさは、IRIと他の指数による影響を受ける。
・「指向性を有するサンプルと保持」アルゴリズムは、推奨される。

図-7 ローパスフィルタによるひびわれ特徴の軽減

最大の関心事になりうる。そして、測定値は単なる統計的なデータベースのためだけでなく、舗装の特定の区間における正確な状況を評価するためのものとなる。

路面プロファイルの評価と精度規定とは

プロファイルの測定に用いられる標準的なコンピュータソフトによる解析法の多くは、次の2つの要因によって特徴付けることができる。

- ・特定の解析が、与えられた波長のサイナソイドとどのように対応しているか？
- ・特定の波長は、典型的な道路のラフネスにおいてどの程度重要か？

まず、最初の要因について考えてみる。プロファイルはIRIを計算するために用いられるものとする。表－2は、いくつかのサイナソイドに対するIRIを示している。表から、30mよりも長い波長のサイナソイドに対してIRIのソフトウェアを適用すると、ほとんど何も計算できないことが理解できる。

表－2 波長に応じて変化するIRI出力値

波長	振幅	勾配の大きさ	IRI
60m	20mm	2.09m/km	0.15m/km
30m	10mm	2.09m/km	0.62m/km
15m	5 mm	2.09m/km	1.99m/km
6 m	2 mm	2.09m/km	1.53m/km
3 m	1 mm	2.09m/km	1.89m/km
1.5m	0.5mm	2.09m/km	0.99m/km

波長が長くなるにつれて、出力はどんどんゼロに近づく。このように、波長が数10mを超えるプロファイルの測定の精度を高めても、IRIの精度は高くならない。従って、精度の規定には有効となる波長域を盛り込むが必要になる。

次に、2番目の要因である、典型的な道路のラフネスの内容について考えてみる。我々は、PSD関数を調べてきたことにより、プロファイルの勾配の変動はIRIを計算する範囲において、ほぼ波数に等しいということを知っている。IRIの周波数応答をプロットすることによって、IRIは多かれ少なかれ、1.5m以上24m以下の波長の勾配に（2倍の範囲内で）一様に応答する。IRIを得るために最適化されたプロファイルにとり意味のある精度の規定は、1.5m以上24m以下の波長のサイナソイドに対して、（例えば、1%以下の

誤差とか、0.03m/kmなどのしきい値を定めるなどして）測定する勾配の精度を定めたものになろう。

ここで、プロファイルの高さ（振幅）誤差がIRIにどのような影響を及ぼすかを評価するために、あるサイナソイドの高さ（振幅）誤差を0.1mmと仮定してみる。このとき、3mのサイナソイドでは10%の誤差（0.19m/kmの誤差）が発生し、15mのサイナソイドでは2%の誤差（0.04m/kmの誤差）、60mのサイナソイドでは0.5%の誤差（≒0m/kmの誤差）になる。つまり、高さ（振幅）の誤差だけを制限しても、波長によって誤差率が変わってしまうことになる。最終的に、得られるIRIの精度も決まらない。

以上により、IRIの測定に用いられるプロファイラは、勾配の誤差を制限することの方が最終的な結果とより密接に関係していると言える。例えば、勾配の許容誤差を0.03m/kmと決めた場合、IRIの誤差は、3mと15mのサイナソイドでは約0.03m/kmであり、60mのサイナソイドではほとんどゼロである。

まとめ

路面プロファイルの正確さは、次の3点を踏まえて評価されるべきである。

- ・「真のプロファイル」より測定値が大きくも小さくもなく平均的であるべき
- ・必要とされるプロファイラの精度は利用目的に依存する
- ・IRIを得るためのプロファイラの精度規定は振幅（高さ）ではなく勾配の誤差を制限すべき（例えば、1.5m以上24m以下の波長のサイナソイドに対して0.03m/kmの誤差など）

また、路面プロファイルの正確さを表す具体的な規定として、特定の装置の繰り返し測定の際ばらつき（再現性）を2%などと設定することも検討していく必要がある。その際、忘れてはならないのは、先に述べた誤差の要因のいくつか（例えば、温度と季節によってプロファイルがかなり変化する）は、プロファイラがどんなに正確であっても起こるものであるということである。

今後、利用者が特定の装置の質を評価できるような試験法が確立され、規準となる「真のプロファイル」測定の定義の明確化がなされ、運用されていくことを願ってやまない。

英国における重交通対応の長寿命たわみ性舗装の設計について

今回は、英国におけるたわみ性舗装の長寿命化に関する報告です。英国では、従来の設計法においてもステージコンストラクションにより40年の設計期間とすることが考慮されていましたが、本報告の長寿命たわみ性舗装は構造的な補修をすることなく40年間供用可能とする舗装で、表面処理や摩耗層の維持管理を行なうものです。我が国では、コンポジット舗装による長

期間供用可能な舗装の検討は行われていますが、本報告のたわみ性舗装による長寿命舗装はコンポジット舗装よりもコスト面から期待され興味が持たれます。我が国のたわみ性舗装の長寿命化への参考となると考えられます。

(研究グループ代表幹事：峰岸順一)

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

* は幹事

* 峰岸順一 東京都土木技術研究所技術部舗装研究室

* 阿部長門 東亜道路工業(株)技術研究所
市岡孝夫 前田道路(株)技術研究所
岩塚浩二 (株)パスコ道路センター
上野貞治 ニチレキ(株)技術研究所
打田幸平 日進化成(株)事業本部
遠藤哲雄 鹿島道路(株)技術研究所
江向俊文 前田道路(株)技術研究所
鎌田孝行 常盤工業(株)技術研究所
* 金井利浩 鹿島道路(株)企画部
小柴邦広 世紀東急工業(株)技術研究所
* 小関裕二 大林道路(株)技術研究所
* 佐々木厳 独立行政法人土木研究所
佐々木昌平 日本舗道(株)技術開発部
佐藤康彦 昭和シェル石油(株)
佐藤雅規 ジオサーチ(株)
島崎 勝 大成ロテック(株)技術部
神野正博 ニチレキ(株)道路エンジニアリング部
鈴木秀輔 大成ロテック(株)技術研究所
鈴木康豊 (株)パスコ道路センター
鈴木 徹 大林道路(株)技術研究所

高橋茂樹 日本道路公団試験研究所舗装研究室
高橋光彦 大成ロテック(株)技術研究所
武本敏男 東京都土木技術研究所技術部化学研究室
* 立石大作 新日本石油(株)中央技術研究所
東本 崇 大林道路(株)技術研究所
* 玉木琢雄 大成ロテック(株)技術部
中村 健 長岡技術大学
長谷川淳也 日本道路(株)
林 信也 鹿島道路(株)技術研究所
舟根 毅 常盤工業(株)技術研究所
前田利明 東亜道路工業(株)技術研究所
* 増山幸衛 世紀東急工業(株)技術部技術一課
村田信之 日本舗道(株)企画部
焼山明生 日進化成(株)製品技術部
山崎 剛 世紀東急工業(株)技術研究所
山脇宏成 (株)ガイアートクマガイ技術研究所
保本敏伸 ニチレキ(株)技術研究所
吉村啓之 前田道路(株)技術研究所

計39名

英国における重交通対応の長寿命たわみ性舗装の設計について

金井利浩*・阿部長門**・東本 崇***
前田利明****・保本敏伸*****

はじめに

英国においては、1960年にRoad Note 29が制定され、1970年までに3度改訂されている¹⁾。その後、交通事情の変化にともない、設計法の見直しが必要となり、1984年にはPowellらによってまとめられたLR1132²⁾に基づいて新しい舗装設計が提案された。現在、英国で用いられている舗装設計マニュアルは、「DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES Volume7: Pavement Design and Maintenance (1994)」³⁾ (HD25/94 (Foundations), HD26/94 (Pavement Design)) であるが、交通量のさらなる増大等により、重交通対応の長寿命舗装設計法が求められ、継続的な調査研究が行われているところである。

TRL REPORT 250「Design of long-life flexible pavements for heavy traffic (1997)」⁴⁾ (以下、TRLレポート250と記す) は、「たわみ性舗装」に関する上記のような調査研究結果報告書であり、その中では、従来方法で設計された舗装のモニタリング結果やアスファルト混合物層が十分に厚い舗装の破壊形態に関する考察が述べられている他、それらの知見に基づいた長寿命舗装設計法が提案されている。

本文は、舗装の長寿命化が重要な課題となっているわが国にとっても有用な内容であると思われるTRLレポート250の概要を、日本の研究動向なども交えながら紹介するものである。

2. 英国におけるたわみ性舗装の標準構成¹⁾

英国におけるたわみ性舗装の標準的な断面構成を図-1に示す。下から、路床、キャッピング層、下層

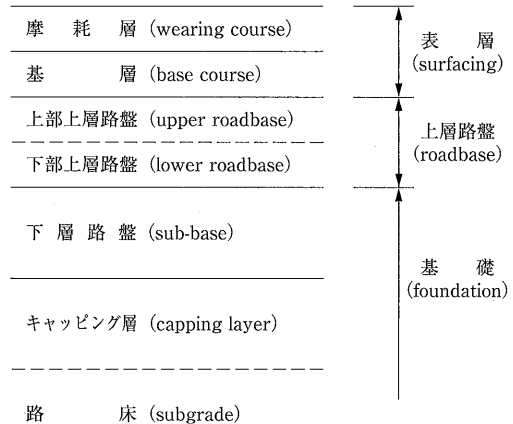


図-1 英国のたわみ性舗装の標準構成

路盤までで構成される基礎 (foundation)、下部上層路盤、上部上層路盤からなる上層路盤 (roadbase)、そして表層 (surfacing) として基層 (省略可) と摩耗層という構造になっている。

なお、たわみ性舗装における上層路盤ならびに表層には、各種アスファルト混合物を用いるが、本文では、TRLレポート250に則して混合物の名称を以下の略語で表記する。

DBM: Dense Bitumen Macadam (針入度100のアスファルトを使用)

DBM50: Dense Bitumen Macadam (針入度50のアスファルトを使用)

HDM: Heavy Duty Macadam (DBMよりも細粒分が多く、高スティフネス)

*かない としひろ 鹿島道路㈱企画部企画課長代理

**あべ ながと 東亜道路工業㈱技術研究所開発室室長

***とうもと たかし 大林道路㈱技術研究所開発研究室研究員

****まえだ としあき 東亜道路工業㈱技術研究所第2研究室研究員

*****やすもと としのぶ ニチレキ㈱技術研究所研究三課研究員

HMB15: High Modulus Base (針入度15のアスファルトを使用)

HMB25: High Modulus Base (針入度25のアスファルトを使用)

HMB35: High Modulus Base (針入度35のアスファルトを使用)

HRA: ホットロールアスファルト

3. 舗装パフォーマンスの観察結果

Powellらによって開発された舗装設計法²⁾は、アスファルト混合物層下面の引張りひずみによる疲労ひびわれと路床上面の圧縮ひずみによるわだち掘れに基づいている。

TRLレポート250には、これらの破壊規準の妥当性を確認するため、英国の幹線道路または高速道路において開削調査などを行った結果が報告されている。

3-1 わだち掘れ

わだち掘れは、表層または上層路盤の一部に限定して生じる機能的なものと、主たる変形が路床に生じる構造的なものに分類できる。現場で発生したわだち掘れがそのいずれであるか、特定するためには表面の変形形状をみるだけでは困難であり、開削調査による確認が必要である。

幹線道路であるM6路線などのたわみ性舗装において、開削調査を実施したところ、変形は摩耗層と基層内のみで発生しており、アスファルト混合物層（以下、特に断らない限り上層路盤と表層を合わせた層をいう）が十分に厚いアスファルト舗装においては、路床変形をともなう構造的なわだち掘れが発生する可能性は低いことが判明した。

また、図-2に示すように、アスファルト混合物層の厚さとわだち掘れ率（mm/msa）（msa：百万標準軸数）のデータから、アスファルト混合物層が180mmよりも厚い場合には、両者に顕著な関係は見いだせず、変形が舗装表面の限られた範囲に留まることが裏付けられた。

3-2 疲労ひびわれ

もうひとつの設計規準である上層路盤下面から生じるひびわれに関する調査として、アスファルト混合物層が厚い舗装からコアをサンプリングして以下の検討を行っている。

①上層路盤下面のひびわれ発生の有無

②交通量履歴の異なる上層路盤サンプルにおけるスティフネスの比較

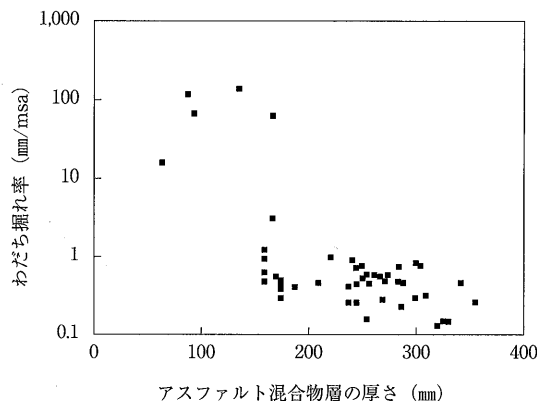


図-2 DBM上層路盤を有する舗装のわだち掘れ率

③同一箇所の上層路盤サンプルにおける上層部と下層部のスティフネス比較

その結果、いずれの項目においても、上層路盤におけるスティフネスの低下（疲労ダメージの蓄積）は認められず、ひびわれは舗装表面から下面に向かって進行していることがわかった。

3-3 表面ひびわれ

オランダにおける研究⁶⁾においても、同様の結果が得られており、英国では、前述したようなモニタリング結果や諸外国の研究成果を受けて、ひびわれは表面から発生するものとして、その原因などについて集中的に研究を進めている。

表面ひびわれの発生メカニズムは非常に複雑であり、従前の疲労破壊理論のみで説明できるものではない。TRLレポート250には、参考として各国の研究成果が列記されており、その中のひとつに日本のものとして、姫野の研究⁶⁾も取り上げられている。また、この表面ひびわれについては、松野が早くからその現象に注目し、原因究明に向けて多くの提言⁷⁾をしているなど、当該破壊形態に関して我が国は先進的な立場にあると言える。

さて、TRLレポート250では、表面ひびわれの原因として、タイヤの圧力分布、水平方向応力、ワイドタイヤなどの載荷条件のほか、温度応力やアスファルトの老化が挙げられている。このうち、アスファルトの老化に関しては、図-3に示すように、摩耗層の表面から10mmまでと20~30mmの範囲から回収したアスファルトについてDSR試験を実施した結果が示されている⁸⁾。図から明らかとなおり、舗装表面に近い部位のアスファルトの方が、老化して硬くなっていることが見て取れる。

アスファルトが硬くなれば、脆性破壊を起こしやすくなり、表面ひびわれの発生する可能性も高くなると考えられる。

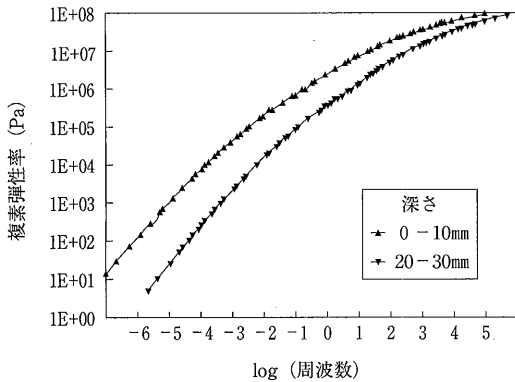


図-3 回収アスファルトのDSR試験結果⁸⁾

3-4 たわみ量

アスファルトの老化は、舗装のたわみ量にも大きな影響を及ぼす。図-4は、供用にともない上層路盤のスティフネスが増加する様子を示したものである⁹⁾。また、図-5は幹線道路（たわみ性舗装）における累積交通量とたわみ量の関係を示したものであるが、スティフネスの変化に対応するように時間の経過とともにたわみ量が小さくなっていることがわかる。このことは、幹線道路のようにアスファルト混合物層が十分に厚い舗装では、疲労ダメージの影響よりも上層路盤における経時的なスティフネスの増大効果の方が卓越することを示している。これらのことから、TRLレポート250では、たわみ量は残存寿命を算出するためのデータとしてよりも、構造的に弱体化した箇所の検出のために用いるのが妥当であると述べている。

重交通対応のアスファルト舗装における経時的なたわみ量の減少やスティフネスの増大に関しては、交通履歴のない試験ヤードにおける研究成果ではあるが、我が国においても神谷ら¹⁰⁾によって報告されており、厚いアスファルト混合物層を有する舗装の支持力評価を行う際、参考になるものと考えられる。

3-5 まとめ

以上のことから、アスファルト混合物層が厚いたわみ性舗装には、アスファルトの老化がプラス要因として作用することなどもあり、構造的には十分な長寿命が期待できるとして、TRLレポート250では次章で述べる新たな長寿命舗装の設計法を提案している。ただし、これは新設時からアスファルト混合物層が厚かつ

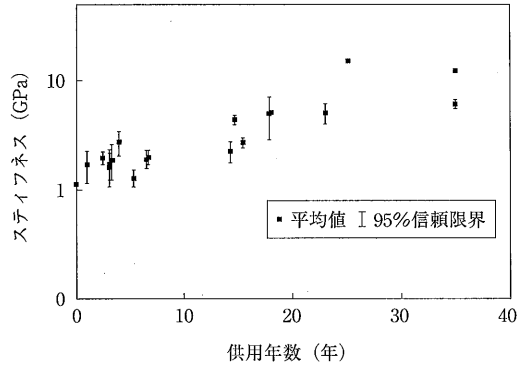


図-4 供用期間中の上層路盤におけるスティフネスの経時変化⁹⁾

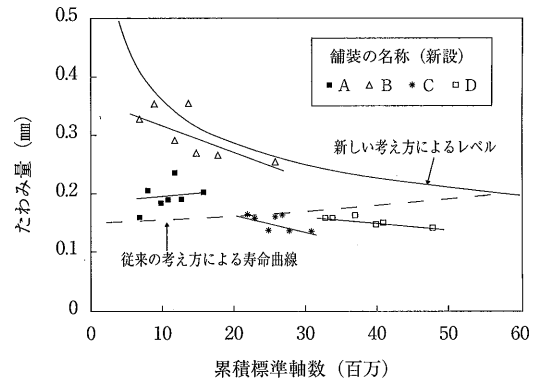


図-5 供用期間中のたわみ量の経時的変化

た場合であり、オーバーレイなどの補修により結果的にアスファルト混合物層が厚くなったケースは含まないので注意されたい。

なお、このことを支持するものとして、わが国においても、建設省（現国土交通省）によるアスファルト舗装の修繕に関する実態調査結果から、新設舗装の場合、重交通路線で等値換算厚 T_A が大きな舗装では表層付近の機能的な破損が支配的であり、構造的な破損は起こりにくい傾向にあるとの報告¹¹⁾がある。

4. 長寿命舗装設計の考え方

英国においては、長寿命舗装に限らずアスファルト舗装の設計は、「基礎」と「それより上部のアスファルト混合物層」とに分けて行われる。

現行設計法におけるたわみ性舗装の設計寿命は20年または40年であるが、通常は第1段階として最初の20年間の交通量に対して設計し、次の20年に関してはオーバーレイなどの構造的な支持力改善を目的とした補修を必要とする。

一方、ここでいう長寿命舗装とは、構造的な補修をすることなく40年間供用可能な舗装をいうが、供用期間中、表面処理や摩耗層の打換えなどの維持管理を適宜行うことを前提としている。

4.1 基礎

(1) 基礎の設計の考え方

基礎は、原則として工事用車両の荷重に耐えられ、その後、各層の施工のプラットフォームとして機能するように設計される。基礎は、施工時における悪天候から路床を保護するとともに、供用時の舗装支持力確保に重要な役割を果たす。

TRLレポート250で提案されている長寿命舗装においても基礎の設計は、現行のHD25/94に準拠して行うとしており、図-6からキャッピング層と下層路盤の厚さを読み取る。この図は、試験道路の供用性調査²⁾に基づいて作成されたものであり、走行実験¹²⁾、¹³⁾によっても検証されている。この図-6によって設計された基礎においては、工事用車両が1000回通行した後の表面変形を、再整正ならびに再転圧可能な最大変形量40mm以下に抑制でき、路床にも著しい変形が生じないとしている。

図-6を利用するにあたっては、路床CBRには供用期間中の平衡CBRもしくは施工時のCBRのうち、小さい方を用いる。また、表-1に示すように、CBRの大きさによってキャッピング層と下層路盤の厚さを設計することになっている。

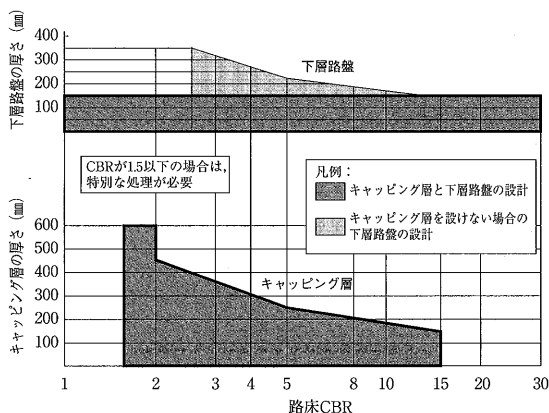


図-6 キャッピング層と下層路盤の厚さ設計

(2) 基礎に関する性能規定化の取り組み

仕様規定に基づいて管理すれば、良好な舗装パフォーマンスを確保できるものの、仕様規定では、請負者の材料ならびに工法に関する選択肢が制限され、

表-1 CBRの大きさによる設計手順の選択

CBR (%) の範囲	設計手順
$15 \leq \text{CBR}$	下層路盤15cm
$2.5 < \text{CBR} < 15$	下層路盤15cm + キャッピング層の読み取り厚
	下層路盤のみの読み取り厚 (キャッピング層は設けない)
$2 < \text{CBR} \leq 2.5$	下層路盤15cm + キャッピング層 (必須) の読み取り厚
$\text{CBR} \leq 2$	事前に路床の安定処理を実施

経済性に優れた方法を採用できる余地が少なくなるという課題は、世界共通のようである。TRLレポート250の付録では、このような問題に対応するために行われた、基礎の性能規定化 (end-product performance specification) に向けたプロジェクトについて述べられている。

転圧状態の評価指標として締固め度を、また、支持力の評価指標としてスティフネスを選定し、適切な評価方法や規定値を定めるため、ドイツ¹⁴⁾やフランス¹⁵⁾の例を参考にしながら各種フィールド実験を実施している。実験結果から得られた試験方法とそれぞれの推奨値は表-2に示すとおりである。動的平板載荷試験やFWDなど迅速に測定ができる試験を採用している点が注目されるが、その施行にあたっては、さらに様々な材料や条件下での検証が必要であるとしている。

表-2 基礎における性能規定値 (推奨値)

試験場所	スティフネス (MPa)		締固め度 (%) (振動式ハンマ) ¹⁶⁾
	(動的平板載荷)	FWD	
キャッピング層上面	30	40	95
下層路盤上面	50	65	97

キャッピング層や下層路盤上面における測定値が性能規定値を満足していることをもって性能が担保されるとすれば、実質的にキャッピング層や下層路盤の厚さは問題にはならない。このことを確認するため、図-7に示す実物大の試験ヤードにおいて、実車による走行載荷試験を実施している。

図-8は走行回数と基礎の累積変形量の関係を示したものであるが、実験結果からは性能規定値を満足しても、厚さが薄い断面D (セメント安定処理路盤) のように、「工事車両1000回走行で変形量を40mm以下とする」という基礎設計上の規定を満足できないケースがあることがわかった。

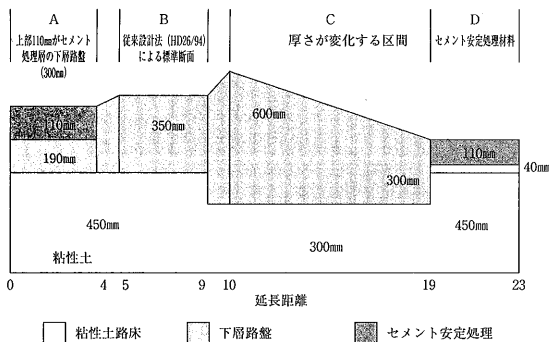


図-7 試験的実物大実験の断面図

また、基礎の厚さを15%減少させた場合には、1000回走行後の変形量が30mmから50mmと1.7倍になったというデータ¹⁷⁾も得られており、実務レベルでは、層厚の確認が依然として必要であるとしている。

これらのことは、舗装の耐久性に関する性能規定値の設定にあたっては、実物大実験等により、その規定が実質的に性能を担保できるかを検証することの重要性を示唆している。

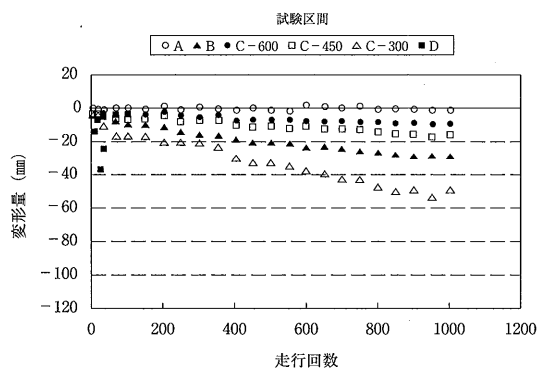


図-8 走行回数と基礎の累積変形量の関係

4.2 アスファルト混合物層

(1) アスファルト混合物層の厚さ設計

図-9は、基礎が図-6の曲線で設計されているか、もしくはそれよりも大きな支持力を有していることを前提としたときの、アスファルト混合物層の厚さを求める設計曲線である。この設計曲線は、摩耗層HRAの厚さを40mmとした場合のものであり、使用する上層路盤材料毎に縦軸の厚さを読みとり、摩耗層厚40mmを差し引けば、上層路盤と基層の合計厚が得られる。摩耗層の厚さが40mm以外の場合には、4-3で後述する方法により混合物種別毎に上層路盤

または基層の厚さを修正する。

図-9において注目すべき点は、設計交通量が80msa以上においても、アスファルト混合物層の設計厚は80msaのときのそれよりも厚くする必要がないことと、設計交通量が少ない場合でも長寿命舗装とする場合にはアスファルト混合物層厚を200mm以下としてはならないことである。これらのことは、3章で述べた現場調査の結果^{5), 8)}に基づいて決定されている。

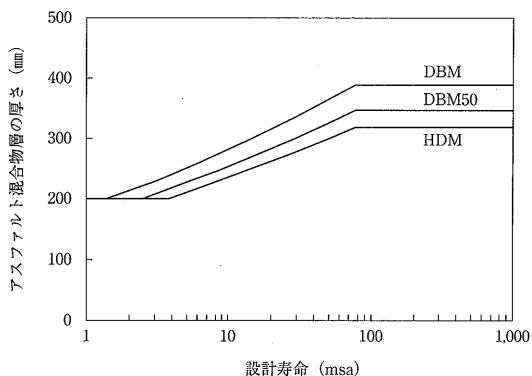


図-9 上層路盤の厚さ設計曲線

(2) 新しいアスファルト混合物HMBの開発と適用

表面排水のレベルや、高架橋などにより、舗装仕上がり高さに制限が加わる場合などにおいて、長寿命舗装として厚い断面の舗装を設計することが困難ケースがある。このような状況に対応するためには、従来のアスファルト混合物よりも荷重分散性に優れ、薄層で所要の性能を満足する材料が必要となる。ここでは、従前よりも高いスティフネスを有する材料の開発と設計への適用¹⁸⁾について述べる。

Powellらによって提唱されたひびわれの疲労破壊規準式は、式(1)に示すとおりであり、これによれば、アスファルト混合物層下面に生じるひずみが小さいほど寿命は長くなる。すなわち、アスファルト混合物のスティフネスは、荷重分散性能の指標であり、それが大きいほど分散性能が高いと評価される。

$$\text{Log}_{10} N_f = -9.38 - 4.16 \text{Log}_{10} \varepsilon_r \quad (1)$$

ここに、 N_f ：標準軸の通過回数（設計寿命）

ε_r ：アスファルト混合物層下面に生じる引張りひずみ

ただし、スティフネス、必要層厚ならびに荷重分散性能は互いに線形ではなく、標準のアスファルト混合

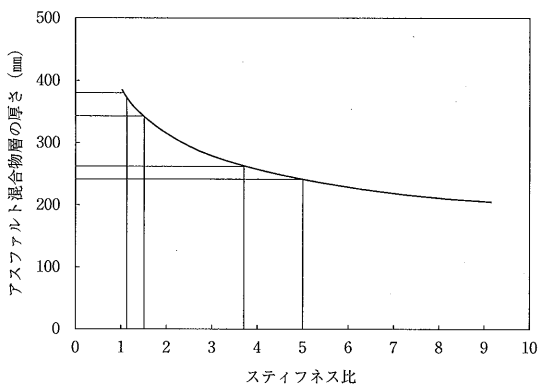


図-10 スティフネス比と層厚（交通量：80msa）

物DBMのスティフネスを規準とした各種アスファルト混合物のスティフネス比と必要層厚の関係は、図-10のようになる。

一方、アスファルト混合物のスティフネスは、混合物中のアスファルトの針入度ならびに量によって、式(2)のように推定することができる。したがって、骨材配合や使用するアスファルトの針入度や量を調整することにより、各種アスファルト混合物を開発することができる。

$$\text{Log}_{10}(\text{Sm}) = 1.86 - 0.0138\text{P} - 0.144\text{B} \quad (2)$$

ここに、Sm：間接引張りスティフネス

P：回収アスファルトの針入度

B：バインダ量（質量%）

表-3は、各種アスファルト混合物のスティフネスと、DBMのそれを標準としたときのスティフネス比を示したものである。この表におけるスティフネス比を、図-10のようなスティフネス比と層厚の関係図にプロットすれば、当該交通量において必要な層厚を求めることができる。そのような作業を様々な設計交通量に対して行って得られたものが、図-11の設計曲線である（図の見方は図-9に同じ）。

表-3 上層路盤用マカダムの設計スティフネス

材料名	設計スティフネス (GPa)	スティフネス比
DBM	3.1	1.0
DBM50	4.7	1.5
HDM	6.2	2.0
HMB35	8.0	2.6
HMB25	10.3	3.3
HMB15	12.4	4.0

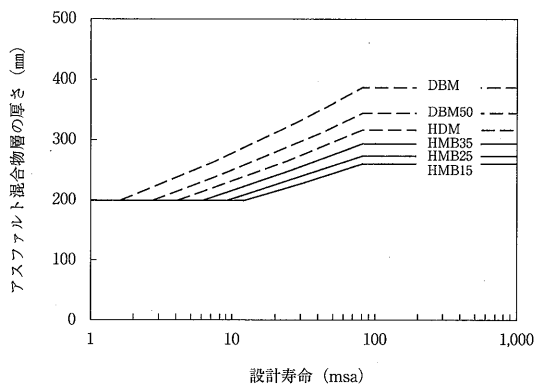


図-11 HMBを用いたアスファルト混合物層

4.3 摩耗層

摩耗層は直接タイヤが接する路面を形成するものであり、道路利用者の安全性、快適性に著しい影響を与える。摩耗層に求められる性能には、次のようなものがあり、路線の環境条件などを十分に把握したうえで材料・工法の選定を行う必要がある。

- ①良好なすべり抵抗性
- ②表面水の迅速な排水
- ③交通騒音の低減
- ④ひびわれおよびわだち掘れへの抵抗性
- ⑤タイヤのトルクやブレーキングへの抵抗性
- ⑥下層の保護
- ⑦メンテナンスの最小化
- ⑧リサイクルまたはオーバーレイの適用性
- ⑨適切なコストパフォーマンス

(1) 摩耗層の種類と用途

英国における摩耗層は、耐久性の向上を目的として、HRAの厚さを標準の40mmよりも厚くして45mm～50mmとすることも多い。その一方で、安価にテクスチャーの改善が可能な厚さ5mm程度の表面処理への関心も高まっている。

なお、摩耗層にポーラスアスファルト混合物50mmを用いる場合には、構造的に寄与する層厚は20mmとして設計することとしている（ただし、最近の研究¹⁹⁾には、30mmとしてもよいとするものもある）。

TRLレポート250では、摩耗層の種類とその効用を表-4のとおり一覧表にまとめて示しており、施工箇所の環境などを十分に勘案して適切な材料および工法を選定することを推奨している。

表－４ 要求性状に合致した摩耗層の効果

材料#		要求性状										
		プロファイル改善への適用性	変形抵抗性	ひびわれ抵抗性	スモークイングの減少	騒音低減	すべり抵抗性	キメ深さ	初期費用	耐久性	施工速度	乗り心地
厚い摩耗層	ホットロールドアスファルト	LLLL	LLLL (LLLL*)	LLLL	LL	LL	LLLL	LLLL	LLL	LLLLL	LL	LLLL
	ポーラスアスファルト	LLL	LLLLL	LLLL	LLLLL	LLLLL	LLLL	LLLLL	LL	LLL	LLL	LLLLL
	アスファルト混合物／密粒度瀝青マカダム	LLLL	LLLL	LLL	LL	LLL	LLL	LL	LLLLL	LLLLL	LL	LLL
	マスチックアスファルト／グースアスファルト	LLL	LL	LLLLL	L	LLL	L	L	L	LLLLL	LL	LLL
	ストーンマスチックアスファルト	LLLLL	LLLLL	LLLL	LLLL	LLLL	LLLL	LLLL	LLL	LLLLL	LLL	LLLL
薄い摩耗層	26-39mm厚	LLL	LLLLL	LLL	LLLL	LLLL	LLLL	LLLL	LLLL	LLL	LLL	LLLL
	18-25mm厚	LL	LLLL	LLL	LLL	LLL	LLLL	LLL	LLL	LLL	LLL	LLLL
	<18mm厚	L	LLL	LL	LL	LLL	LLLL	LLL	LLL	LL	LLLL	LLLL
表面処理	サーフェイスドレッシング	適用不可	適用不可	LLL	LLL	L	LLLL	LLLLL	LLLLL	LL	LLLLL	1
	高すべり抵抗処理		適用不可	LL	LL	LL	LLLLL	LLLL	L	LLL	L	適用不可
	スラリーサーフェイシング	LL2	適用不可	LL	LL	LL	LLL	LL	LLLLL	LL	LLL	適用不可
L=最も不適切 ～ LLLLL=最も適切												

#これらの材料のいくつかは、施工時期が限られる
*ホットロールドアスファルトの変形抵抗性は、高速道路に関する仕様Clause943を満足するように配合設計を行うことで高められる
1 サーフェイスドレッシングの乗り心地は、骨材粒径といった配合設計や下地の平坦性に左右される。
2 スラリーサーフェイシングは、この評価に見合った程度の路面タイプにおいて、そのプロファイルを改善することができる。
ただし、それ以外のタイプの路面には、適用することはできない。

(2) 摩耗層厚の増減による上層路盤または基層の厚さ修正

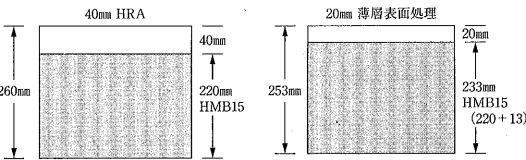
先に示した図－７や図－11は摩耗層HRAの厚さが40mmの場合の設計曲線であったが、前述したように現在、英国では摩耗層厚を45～50mmとすることも多く、当該層厚は必ずしも40mmとは限らない。そのような場合には、摩耗層厚に応じて表－５のように上層路盤または基層の厚さを調整することになっている。

図－12は、摩耗層を40mmから20mmに変更する場合には、HMB15を13mm増厚することを示した例である。この例のように摩耗層の厚さが薄くなると、構造上の荷重分散性能に関する下部層の負担が大きくなるため、上層路盤または基層にはよりグレードの高いアスファルト混合物HMBなどを適用することが望ましいとしている。

表－５ 摩耗層厚による上層路盤・基層の厚さ修正

摩耗層*の厚さ	上層路盤・基層厚さの増減 (mm)			
	DBM	DBM50	HDM	HMB15
50	-10	-9	-8	-6
40	0	0	0	0
30	+10	+9	+8	+6
20	+20	+18	+16	+13
10	+30	+27	+24	+20
0	+40	+36	+32	+26

*HRA、SMAおよび薄層表面処理（ポーラスアスファルトは含まない）



図－12 摩耗層厚の変化によるHMB15の厚さ修正

5. 長寿命舗装に関する考察

5-1 長寿命設計法と従来設計法によるコスト比較

TRLレポート250で提案されている長寿命舗装設計法と従来設計法により、設計期間40年で設計した舗装のコスト比較を行っている。

コストには、施工時のインシヤルコストに加え、維持費用と工事渋滞による利用者費用も含まれている。図-13は、年間日平均交通量が90000台の3車線道路において、上層路盤材としてDBM、HDMならびにHMBを用いた場合のトータルコストを、計算プログラムCOMPARE²⁰⁾を用いて試算した結果である。

試算に際しては、修繕工事にともなう交通規制の方法として次の3つの方法を想定している。すなわち、①40年間すべて24時間交通規制、②最初の20年間は24時間交通規制、その後は夜間のみ交通規制、③40年間すべて夜間のみ交通規制の3つである。

図-13より、新しい長寿命舗装設計法によれば、従来法よりもトータルコストを、わずかではあるが縮減できることがわかる。長寿命舗装の中では、HMBを使用した場合が最も安価になっている。また、夜間に補修を行えば、工事費用は高くなるが、利用者費用が減り、トータルでは安くなっている。

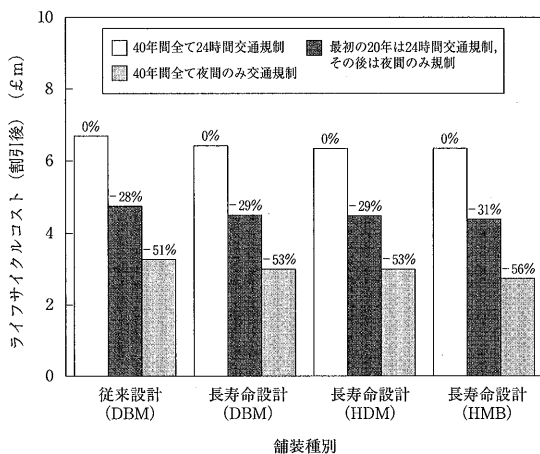


図-13 昼間および夜間の補修による3車線道路のトータルコスト比較

一方、補修のインターバルが1年長くなった場合のトータルコスト試算も実施しており、これが実現できれば、最終的にトータルコストの13~17%の費用削減が可能であるとの結果が得られている。

長寿命舗装の補修においては、摩耗層のメンテナンスが主な作業になると考えられ、当該層の耐久性向上

がトータルコストの縮減に大きく寄与するものと思われる。

5-2 長寿命舗装におけるリスクへの対応

舗装のパフォーマンスは、舗装設計、施工、供用期間中の条件（交通量、気象）などにより、当初の予想とは合致しないのが一般的である。

このようなリスクを最小化する方策には様々なものが考えられるが、いたずらに費用の増加を招くことは避けなければならない。すなわち、リスクと費用のバランスに配慮する必要がある、このような観点から、性能規定化やPFIがリスク回避のひとつの方策として捉えられている。

いずれにしても、設計の信頼性向上、材料の高品質化、良好な施工の実施、的確なモニタリングの実施がリスクの最小化に寄与することは論を待たないところであろう。表-6に各種リスクに対する対応などについてまとめたものを示す。

6. おわりに

上記のようにTRLレポート250では、多くの室内実験や現場のモニタリングに基づき、長寿命舗装の設計方法を提案しているが、さらなる精度の向上を目指して、現在も引き続き調査研究²⁰⁾が行われているようである。

わが国においても、道路構造令の改正や、車道及び側帯の舗装の構造に関する国土交通省令の制定にともない、「舗装の構造に関する技術基準」が通知されるなど、舗装設計の見直しが進められている。設計法に関しては、経験と理論の融合が必要であり、最終的には実路での検証が不可欠である。舗装パフォーマンスのデータベース化および情報の公開は、舗装設計に関する調査・研究を活性化し、ひいては舗装技術発展に大きく貢献すると考えられ、その一日も早い実現を切望する次第である。

今回紹介した英国の長寿命舗装の設計に関する考え方が、舗装に携わる方々のお役に立てば、望外の幸せである。

参考文献

- 1) 緒方健治：英国におけるたわみ性舗装の新設計法について、アスファルト、Vol.30, No.153, pp.57-66, 1987年
- 2) Powell W. D., J. F. Potter, H. C. Mayhen and M. E. Nunn: The Structural design of bituminous

表-6 想定されるリスクの一覧

	考えられる原因	レベル	リスク低減の方法	備考
荷重の評価	予想以上の商業車の年間伸び率	低	リスク係数を含んだ概略の伸び率を使用する	標準の交通量評価方法 (HD24/94) は、高いOGV2 (4軸以上の貨物車両) 比率を想定しており、控えめな数値を与える
	予期せぬ地域開発や進路変更による増加	中	より大規模な交通量予測モデルを使用する	限られた地域のモデルでは、他地域から進路変更して流入する交通量を予測できない
			リスク係数+20%を用いる	
わだち掘れ	車両および車軸の重量見直しによる増加 (EUハーモナイゼーション)	低	リスク係数+10%を用いる	上層路盤下面のひずみに基づくダメージは10%増加する
	スーパーシングルス車輪が複輪よりも大きな舗装ダメージを引き起こすことの影響拡大	高	リスク係数+20%を用いる	理論ならびに実験的研究により、わだち掘れおよび摩耗ともスーパーシングルスの方が大きいことがわかっている
	アスファルト層過多または低空隙	中	アスファルト材料の仕様にに基づくパフォーマンスを利用する	特にHRA(ホットローアドアスファルト) に関係する
	初期の高温	中	Clause29と943*	これら2つの原因が重なる、わだち掘れが発生する
	車両の低速走行	高	登坂車線や渋滞箇所ではより高性能な材料を使用する	
ひび割れ	過度な老化	中	空隙率を制限する	
	過度な散布量	低	品質管理を改善する	
チップングの飛散	接着不足	低	品質管理を改善する、または、接着剤を使用する	
	寒冷期の施工	中	表層を50mm厚とする、許容温度範囲の上限で作業する	
すべり抵抗性の低下	骨材の摩耗	低	有用な手段なし	規定されている天然碎石に関して最大に近いPSV (Polished Stone Value)とする
				テクスチャの改善効果は薄い
上層路盤のひび割れまたは損傷	表面のキメの損失	低	摩耗層の変形抵抗性を高める	わだち掘れとともに発生する
	疲労ひびわれ	低	アスファルト混合物厚を厚くする	厚い舗装では、理論的にはひびわれが発生するが、観測されていない
	材料分離	低	上層路盤のアスファルト量を増やす	
			40mmに換えて28mm骨材を使う	Clause29*の採用以来、リスクは減少している
	はく離	低	品質管理を改善する	HRA (ホットローアドアスファルト) では生じにくい
基礎の変形 (構造的なわだち掘れ)			パインダ量/転圧回数を増やす	ある種のタイプの骨材で問題となる
			はく離しやすい骨材の選択を避ける	
			上層路盤における含水土比の上昇を抑制する	
	オーバーレイするアスファルト材料の厚さまたはスチーフネスの不足	低	品質管理を改善する	設計厚は十分でも施工厚は不足していることもあり得る
	基礎材料の厚さおよび強度の不足	中	アスファルト材料においてスチーフネスの下限を確保する	慣用または新たな試験に基づいた性能規定評価が望ましい
排水不足による基礎支持力の喪失			品質管理を改善する	
			現場における強度またはスチーフネス試験の導入	
			表面と舗装体内とを分離したシステムの利用	地域的な現象で、ほとんどの場合、切土部で起きる。問題は、地下水、給排水の漏れ、ひびわれからの水の浸透により生じる
			横断勾配の増加	
*高速道路に関する仕様			透水性のキャッピングまたは側溝排水の利用	
			透水層が施工中詰まりを生じていないことを確認するための品質管理	
			排水システムの検査および維持の改善	

*高速道路に関する仕様

- road, Department of Transport, TRRL Report LR 1132, 1984
- 3) (社)日本道路建設業協会技術委員会・海外技術部会：イギリスの舗装に関する技術基準，建設図書，pp.70-79，1999年4月
 - 4) Nunn, M. E., A. Brown, D. Weston, and J. C. Nicholls : Design of Long-Life Flexible Pavements for Heavy Traffic, TRL Report 250, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K., 1997
 - 5) Schmorak N and Dommelen A : Analysis of the structural behavior of asphalt concrete pavements in SHRP-NL test sections. International Conference : SHRP and Traffic Safety, Prague, 1995
 - 6) Himeno K., Watanabe T and Maruyama T.: Estimation of the fatigue life of asphalt pavement, 6th International Conference: Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, USA, 1987
 - 7) 松野三朗：わだち割れ(1), (2), 舗装, 1984年2月～3月
 - 8) Leech D. and Nunn M.: Deterioration Mechanisms in Flexible Pavements, 2nd European Symposium on Durability and Performance of Bituminous Materials, University of Leeds, 1997
 - 9) Nunn M. E. : The Characterisation of Bituminous Macadams by Indirect Tensile Stiffness modulus, Department of Transport TRL Report 160, Transportation and Road Research Laboratory, 1996
 - 10) 神谷和明, 東滋夫, 金井利浩：交通履歴のないアスファルト舗装の経年的な支持力変化に関する研究, 舗装工学論文集, 第4巻, pp.53-60, 1999年12月
 - 11) 寺田剛, 吉田武, 東嶋奈緒子, 池田拓哉：アスファルト舗装の修繕に関する実態調査, 道路建設, pp.72-76, 2001年2月
 - 12) Potter J. F. and Currer E. W. H. : The Effect of Fabric Membrane on the Structural Behavior of a Granular Road Pavement, TRRL Report LR 996, TRRL, 1981
 - 13) Roddock E. C., Potter J. F. and McAvoy A. R. : A Full-scale Experiment on Granular and Bituminous Roads Laid on Fabrics, 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, 1982
 - 14) RstO 86: Guidelines for the Standardisation of the Upper Structure of Traffic-Bearing Surfaces, Federal Minister of Transport, Bonn, Germany, 1989
 - 15) the Technical Guide for the Construction of Embankments and Capping Layers, 1992
 - 16) British Standards Institute; British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, British Standard BS 1377: Part 4; Compaction-related Tests, 1990
 - 17) Chaddock B. C. J. and Brown A. J.: In-Situ Assessment of Road Foundations, Proceeding of the 4th International Symposium on Unbound Aggregates in Roads, University of Nottingham, July 1995
 - 18) Nunn M. E. and Smith T.: Road Trials of High Modulus Base for Heavily Trafficked Road, Transport Research Laboratory Report TRL 231, 1997
 - 19) Nicholls J. C.: Review of UK Porous Asphalt Trials, Transport TRL Report 264, Transportation Research Laboratory, 1997
 - 20) Abell R.: Whole Life Costing of Pavements, Proceedings BACMI/ACMA Seminar, TRL Paper PA 3013/93, Transport Research Laboratory, 1993
 - 21) Nunn M. E. and Ferne B. W.: Design and Assessment of Long-Life Flexible Pavements, Transportation Research Board, Transportation Research CIRCULAR, No.503, pp.32-49, December 2001

すべり抵抗値

(1) 路面とタイヤのすべりに対する抵抗性を評価する指標のことであり、一般にはすべり測定車によるすべり抵抗力をタイヤ荷重で除した値で表したすべり摩擦係数で評価することをいう。

(2) 「舗装の構造に関する技術指針・同解説」(社)日本道路協会、平成13年9月)では、「すべり抵抗」は「必要に応じて定める舗装の性能指標」に位置付けられている。さらに、「舗装設計施工指針」(社)日本道路協会、平成13年12月)では、すべり抵抗値の測定方法の例として、国土技術政策総合研究所が所有するすべり抵抗測定車または当該車両との相関が確認されているすべり抵抗車により行う方法、ダイナミック・フリクション・テスト(以下DFテスト)、あるいは振子式スキッド・レジスタンス・テストによる方法が示されている。

(3) すべり抵抗測定車による方法

「舗装試験法便覧 6-5」(社)日本道路協会、平成3年12月)(以下「試験法便覧」)によれば、一定速度でけん引する試験車輪に制動をかけ、その時の試験車輪にかかる力(N)を測定し、輪荷重(N)との比を係数とするものであり、実際に走行している車両が路面から受けるすべり抵抗に近い値を得ることができるとしている。

(4) 振子式スキッド・レジスタンス・テストによる方法

「試験法便覧 6-5」によれば、ASTME274-70を原型にした振子式スキッド・レジスタンス・テストに装置したゴム製のスライダの縁が、試験面を滑動する時の振子値を測定するもので、現場および試験室において、路面および供試体の摩擦特性を測定することができるとしている。

(5) ダイナミック・フリクション・テスト(DFテスト)による方法

「試験法便覧 別冊 4-1-1」によれば、路面とタイヤゴムピースが接する構造の測定器を用い、定速で回転しているタイヤゴムピースに作用する摩擦係数と速度を連続的に測定するものである。

(6) 「舗装性能評価小委員会」(社)日本道路協会)では、舗装の性能指標評価の中で、緊急を要する6項目について平成13年度に検討を行い、すべり抵抗値についてはすべり抵抗測定車による方法を最近の技術実態に合わせる意味から見直しを行い、主に以下のような項目の修正を行った暫定(案)を提案している。なお、DFテストによる方法と振子式スキッド・レジスタンス・テストによる方法は、現行どおりの取扱いとしている。

① 「試験法便覧」に規定されているすべり抵抗測定車の試験タイヤは、財団法人 高速道路調査会に設置された「路面すべり測定標準タイヤ検討委員会」が昭和53年～昭和55年度に実施した調査結果を基にバイアス構造にしている。しかし、近年のタイヤ市場の動向からすると、バイアス構造からラジアル構造に移行してきているので、財団法人 高速道路調査会に設置された「路面すべり測定標準タイヤ検討委員会」では平成4～5年度に調査研究を行い、新たな標準タイヤ仕様を示した。これを受けて、その後、国土交通省の各機関等で採用されて来ているので、試験タイヤの規格を次のように変更した。

イ) タイヤサイズの6.45-13-4PR(5.60-13-4PR)を165SR13にする

ロ) タイヤ構造について、バイアス構造をラジアル構造にする

ハ) 標準タイヤの使用区分は、表-1のとおりとする

ニ) タイヤコンパウンドの配合を「ASTME249」に規定していたものを、タイヤゴム配合「ASTME501」に準拠することにする。

ホ) 試験輪のリム規格、輪荷重の調整および空気圧の調整から5.60-13タイヤを削除する。

表-1 舗装の性能指標と基準値²⁾

タイヤ種類とトレッドパターン	使用区分
165SR13リブタイヤ	道路管理、試験研究
165SR13スムーズタイヤ	試験研究

- ② 国内で使用されているすべり抵抗測定車は、大型すべり試験車に移行し、中型すべり試験車を保有している機関が無いことから、中型すべり試験車の「タイヤ規格」、「輪荷重の調整」の項を削除する。
- ③ 輪荷重目標（3871N）に対する許容範囲 0 ～ 392N を ±392N に変更する。

- ④ 測定速度は、「一般道60km/h，高速道80km/h を原則とする記述」を、「法定速度を原則とする」に変更する。
- ⑤ 従来のペン書きレコーダのアナログ記録方法に加え、パソコン等ヘデータを取り込むデジタル記録にも対応する記述にする。
- [小島 逸平 (株)ガイアートクマガイ技術研究所]

アスファルトの利用技術

B 5 版・290ページ・実費頒価 ¥4,300 円

我が国におけるアスファルトの利用は、縄文前期の終わり頃より土器や石棺などの接着剤として使われ始めました。その後、江戸末期には油煙の原料として、明治に入ると防水や防湿および道路用として利用される等、アスファルトの黎明期を迎えています。

現在では、これまでの用途以外にも水利構造物や鉄道、燃料といった多くの分野に利用されるようになっております。

今回、創立40周年を記念し、アスファルトの種類、規格、製造方法、代表的な利用技術に関してわかりやすく執筆した本邦初の解説書を取りまとめました。

百科事典として、また関係者必読の書としてご購入をお勧めいたします。

目 次

第1編 アスファルト

- 第1章 天然アスファルトと石油アスファルト
- 第2章 アスファルト乳剤
- 第3章 改質アスファルト

第2編 アスファルトの道路舗装への利用

- 第1章 アスファルトと舗装
- 第2章 道路の種類と舗装構造
- 第3章 アスファルト混合物の種類と工法
- 第4章 アスファルト混合物の製造と施工
- 第5章 舗装の破損と補修

第3編 アスファルトの各種舗装への利用

- 第1章 空港
- 第2章 港湾
- 第3章 鉄道
- 第4章 鉄道貨物ヤード
- 第5章 構内・駐車場
- 第6章 歩道・自転車道
- 第7章 スポーツ施設
- 第8章 レース場・テストコース
- 第9章 石油タンク基礎
- 第10章 水利構造物
- 第11章 廃棄物最終処分場

第4編 防水・その他への利用

第1章 防水・防湿

- 1. 土木防水
- 2. 屋上防水（陸屋根防水）
- 3. 屋根防水（勾配屋根防水）
- 4. ターポリン紙（防湿紙）

第2章 建築

- 1. 木造住宅用床防音材
- 2. 床材
- 3. 鋼管塗布

第3章 原料

- 1. 酢酸原料用アスファルト
- 2. 石油コークス原料
- 3. 製鉄用コークスバインダー

第4章 燃料

第5章 その他

- 1. 電気絶縁用
- 2. レンズ研磨
- 3. のり面緑化用アスファルト乳剤
- 4. ノウサギ忌避剤
- 5. トネル断熱材
- 6. 放射性廃棄物の固化材
- 7. その他への利用

平成13年市販アスファルトの性状調査

(社)日本アスファルト協会技術委員会

1. はじめに

市販アスファルトの性状調査については、JISと(社)日本道路協会規格が、異なっていた昭和49年当時より品質の適合性に関して毎年実施してきており、本年度も市販アスファルトの品質動向を把握するために行った。

2. 調査方法

各製油所毎に各製品の長期間にわたる性状範囲を報告してもらうアンケート方式で行った。

- (1) 調査対象は、ストレート・ブローン・防水工事用アスファルトの全種類とする。
- (2) 製油所毎に、平成13年1月～12月に製造された当該製品の全ロットを対象に、試験項目毎の最大値、最小値、平均値を報告する。

3. データ提出機関

データは、下記の各社製油所から本協会へ提出されている。

出光興産	三共油化工業	ジャパンエナジー
鹿島石油	昭和シェル石油	日石三菱*
九州石油	昭和四日市石油	
日石三菱精製**	極東石油工業	
西部石油	興亜石油**	東燃ゼネラル石油
富士石油	コスモ石油	東北石油**

*現 新日本石油

**現 新日本石油精製

4. 調査結果

表-1～3の石油アスファルトの品質要約は、(1)ストレートアスファルト、(2)ブローンアスファルト、(3)防水工事用アスファルトに分類し、全アンケート報告値から品質項目毎に、最大および最小値を抽出してまとめたもので調査期間中に製造された各種アスファルトの品質項目毎の範囲を示したものである。

表-4、5は、製油所毎の各品質項目における全ロットの平均値を、ストレートアスファルトのうち60～80、80～100の2種類について、取りまとめたものである。

5. あとがき

この性状調査は、前述のとおりアンケート方式による報告値を整理したものである。

報告内容は、

- (1) 各製油所の品質項目毎の試験値の最大値、最小値および全ロットの平均値であり、一連の性状が同一ロットの性状でないこと。
- (2) 調査対象期間が、一年間に渡ったこと。
- (3) 測定機関が異なっていること。

などの理由から、品質範囲に幅があるが、JISや(社)日本道路協会規格の品質規格内にあり、適合している。

表-1 石油アスファルト品質調査要約 (1) ストレートアスファルト

項 目	種 類	40 ～ 60		60 ～ 80		80 ～ 100		150 ～ 200	
		範 囲	J I S・日本 道路協会規格	範 囲	J I S・日本 道路協会規格	範 囲	J I S・日本 道路協会規格	範 囲	J I S
針 入 度 (25℃)		43～57	40を超え 60以下	61～80	60を超え 80以下	81～97	80を超え 100以下	152～198	150を超え 200以下
軟 化 点 ℃		48.0～52.5	47.0～55.0	45.0～52.0	44.0～52.0	43.5～48.0	42.0～50.0	37.5～43.0	30.0～48.0
伸 度 (15℃) cm		76～150以上	10以上	100以上～150以上	100以上	100以上～150以上	100以上	100以上～150以上	100以上
トルエン可溶分 質量%		99.85～99.99	99.0以上	99.27～99.99	99.0以上	99.46～100.00	99.0以上	99.54～99.99	99.0以上
引 火 点 ℃		270以上～368	260以上	270以上～368	260以上	270以上～368	260以上	280～358	240以上
薄膜加熱質量変化率 質量%		+0.03～+0.12	0.6以下	-0.18～+0.13	0.6以下	-0.12～+0.12	0.6以下		
薄膜加熱針入度残留率 %		59.6～72.0	58以上	55.7～80.6	55以上	52.4～77.8	50以上		
蒸発質量変化率 質量%		0.00～+0.02		-0.02～+0.02		-0.02～+0.02		-0.02～+0.02	1.0以下
蒸発後の針入度比 %		90～100	110以下	76～107	110以下	82～103	110以下		
密度 (15℃) g/cm ³		1.030～1.048	1.000以上	1.020～1.041	1.000以上	1.013～1.038	1.000以上	1.015～1.030	1.000以上
動粘度 (120℃) mm ² /s		847～1,380		597～1,480		531～970			
動粘度 (150℃) mm ² /s		203～292		138～280		146～236			
動粘度 (180℃) mm ² /s		57.0～92.0		46.0～104		50.0～82.7			

表-2 石油アスファルト品質調査要約 (2) ブローンアスファルト

種 類 項 目	10 ～ 20		20 ～ 30	
	範 囲	J I S	範 囲	J I S
針 入 度 (25℃)	12～19	10を超え20以下	21～29	20を超え30以下
軟 化 点 ℃	98.5～112.5	90.0以上	85.0～105.0	80.0以上
伸 度 (25℃) cm	2 ～ 3	1 以上	2 ～ 4	2 以上
トルエン可溶分 質量%	99.40～99.97	98.5以上	99.17～99.96	98.5以上
引 火 点 ℃	300以上～360	210以上	300～344	210以上
蒸発質量変化率 質量%	-0.04～+0.01	0.5以下	-0.04～+0.01	0.5以下
針 入 度 指 数	3.6～5.3	2.5以上	3.6～5.4	2.5以上

表-3 石油アスファルト品質調査要約 (3) 防水工事用アスファルト

種 類 項 目	第 三 種		第 四 種	
	範 囲	J I S	範 囲	J I S
軟 化 点 ℃	100.0～139.0	100以上	100.0～113.0	95以上
針 入 度 (25℃)	23～39	20以上40以下	32～46	30以上50以下
針 入 度 指 数	5.2～8.7	5.0以上	6.1～7.6	6.0以上
蒸発質量変化率 質量%	-0.06～+0.02	1 以下	-0.03～+0.01	1 以下
トルエン可溶分 質量%	99.24～99.85	95以上	98.97～99.85	92以上
引 火 点 ℃	298～348	280以上	298～340	280以上
フラスゼい化点 ℃	-25～-15	-15以下	-25～-20	-20以下
だ れ 長 さ mm	0 ～ 8	8 以下	0 ～ 6	8 以下
加 熱 安 定 性 (フラスゼい化点差) ℃	1 ～ 4	5 以下	1 ～ 4	5 以下

表-4 ストレートアスファルト性状表 (60~80)

番号	針入度 (25℃)	軟化点 ℃	伸 度 (15℃) cm	トルエン 可溶分 質量%	引火点 ℃	薄 膜	加 熱	蒸発後 の針入 度比 %	密 度 (15℃) g/cm ³	動 粘 度 (mm ² /s)		
						質量変化 率 質量%	針 入 度 残留率%			120℃	150℃	180℃
1	65.4	48.5	150以上	99.95	363.4	+0.1	64	99.5	1.038	967.2	221.5	72.2
2	65.7	48.1	150以上	99.9	345.6	+0.089	66	99.9	1.035	1,050	239	79.7
3	70	47.0	100以上	99.97	332	-0.01	68.1	95	1.033	990	226	77.3
4	69	47.0	100以上	99.89	366	+0.06	70.1	94	1.037	861	199	67.4
5	66	48.0	140以上	99.98	300以上	+0.08	73.2	100	1.0362	968	221	74.1
6	68	46.8	150以上	99.98	360	+0.07	72.6	101	1.036	970	224	76.0
7	63.5	47.9	150以上	99.98	363.5	+0.12	65.3	98	1.0346	855	199.7	70.9
8	70	48.4	150以上	99.85	318	-0.14	63.3	100	1.034	930	211	73.4
9	72	48.0	140以上	99.99	335	+0.05	67.0	101	1.0322	1,070	262	90.9
10	70	47.7	150以上	99.94	270以上	+0.04	65.1	95	1.034	850	199	68.4
11	72	46.6	100以上	99.64	330	+0.05	62.6	101	1.032	754	181	62.8
12	68	48.0	150以上	99.92	336	+0.03	62.8	101	1.030	787	188	65.4
13	70.0	48.40	130以上	99.980	342.1	-0.101	59.09	101.0	1.0322	853.4	193.4	64.91
14	68	48.2	130以上	99.98	334	+0.09	67.5	98	1.032	735	170	57.9
15	67	48.4	150以上	99.96	354	+0.097	67.6	97	1.033	906.9	210	71.2
16	68.1	49.8	100以上	99.84	352	+0.04	66.1	95	1.035	1,123	259	86.9
17	69	47.0	150以上	99.89	327	+0.09	60.5	100.8	1.031	846	200	68.6
18	70	47.5	140以上	99.90	346	0	66.1	95	1.036	988	225	75.4
19	70	48.5	140以上	99.93	300以上	+0.08	62.6	87	1.035	966	230	78.5

(注) 道路用以外の用途を生産している場合は、測定を行っていない項目もある。

表-5 ストレートアスファルト性状表 (80~100)

番号	針入度 (25℃)	軟化点 ℃	伸 度 (15℃) cm	トルエン 可溶分 質量%	引火点 ℃	薄 膜	加 熱	蒸発後 の針入 度比 %	密 度 (15℃) g/cm ³	動 粘 度 (mm ² /s)		
						質量変化 率 質量%	針 入 度 残留率%			120℃	150℃	180℃
1	90	47	150以上	99.97	336	+0.05	62	84	1.036	775	187	63
2	89.5	45.9	150以上	99.95	360	+0.1	64	99.7	1.035	781.5	187.4	63.3
3	89.4	46.5	150以上	99.9	347.6	+0.02	64	98	1.032	819.2	195.6	67.7
4	87	45.5	100以上	99.92	326	-0.03	67.6	94	1.027	836	205	71.8
5	86	45.0	100以上	99.89	366	+0.06	69.3	94	1.034	731	176	61.1
6	89	45.5	140以上	99.94	300以上	+0.07	73.0	100	1.0307	827	197	68.1
7	89	46.3	150以上	99.85	319	-0.10	59.1	100	1.030	737	180	63.7
8	89	46.5	140以上	99.99	322	+0.05	66.6	101	1.0306	903	226	79.5
9	89	45.1	150以上	99.95	270以上	+0.05	63.4	95	1.031	701	171	60.8
10	89	45.0	100以上	99.60	330	+0.04	61.4	98	1.029	632	159	56.9
11	87	46.1	150以上	99.90	327	+0.03	61.8	101	1.029	726	178	62.5
12	90.1	46.07	130以上	99.980	341.4	-0.109	60.93	101.3	1.0327	685.9	178.2	65.01
13	90	46.0	150以上	99.96	348	+0.10	65.4	97	1.028	775.3	183	63.3
14	89	45.2	150以上	99.85	319	+0.10	59.8	99.7	1.028	681	163	57.0
15	89	45.0	140以上	99.81	341	-0.01	61.4	94	1.032	836	200	69.1
16	89	46.5	140以上	99.90	300以上	+0.07	59.1	88	1.032	817	199	70.6

(注) 道路用以外の用途を生産している場合は、測定を行っていない項目もある。

<統計資料>

1. 石油アスファルト需給実績（総括表）

（単位：千 t）

項 目 年 度	供 給					需 要					
	期初在庫	生 産	対前年 度 比	輸 入	合 計	内 需	対前年 度 比	輸 出	小 計	期末在庫	合 計
12 年 度	251	5,510	(98.6)	30	5,791	4,885	(97.2)	222	5,107	255	5,362
13. 8 月	261	422	(92.7)	6	689	344	(89.8)	19	363	276	639
9 月	276	429	(102.2)	4	709	372	(94.1)	20	392	266	658
7～9 月	247	1,295	(96.9)	12	1,554	1,077	(91.8)	68	1,145	266	1,411
10月	266	446	(97.6)	3	715	407	(100.4)	17	424	241	665
11月	241	556	(105.5)	4	801	477	(102.6)	39	516	252	768
12月	252	515	(96.3)	2	767	439	(91.8)	21	460	261	721
10～12月	266	1,517	(99.9)	9	1,783	1,323	(98.1)	77	1,400	261	1,661
14. 1 月	261	389	(98.7)	0	650	322	(113.8)	13	335	263	598
2 月	263	473	(100.2)	1	737	395	(92.5)	22	417	273	690
3 月	273	585	(93.3)	5	863	595	(88.5)	19	614	214	828
1～3 月	261	1,446	(96.9)	6	1,713	1,311	(94.9)	54	1,365	214	1,579
13 年 度	255	5,425	(98.5)	32	5,712	4,720	(96.6)	284	5,004	97	5,101
14. 4 月	214	401	(91.7)	1	616	306	(83.3)	12	318	258	576
5 月	258	320	(97.9)	3	581	279	(97.2)	20	299	248	547
6 月	248	352	(87.3)	0	600	302	(90.7)	19	321	236	557
4～6 月	214	1,073	(92.0)	4	1,291	887	(88.0)	51	938	236	1,174

2. 石油アスファルト内需実績（品種別明細）

（単位：千 t）

項 目 年 度	内 需 量						対 前 年 度 比					
	ストレート・アスファルト				ブローン アスフ アルト	合 計	ストレート・アスファルト				ブローン アスフ アルト	合 計
	道路用	工業用	燃焼用	計			道路用	工業用	燃焼用	計		
12 年 度	3,613	189	892	4,698	194	4,892	99.6	109.2	86.6	97.3	98.0	97.3
13. 8 月	223	13	95	331	13	344	84.4	76.5	109.2	89.9	81.3	89.6
9 月	257	13	89	359	14	373	101.3	76.2	116.1	95.3	76.4	94.6
7～9 月	717	41	277	1,035	42	1,077	94.9	81.6	109.4	92.1	83.6	91.8
10月	299	16	75	390	17	407	93.3	96.7	124.9	100.7	93.6	100.4
11月	360	18	80	458	18	476	99.1	102.7	123.2	102.6	101.0	102.6
12月	317	17	90	424	15	439	86.3	96.9	117.9	91.9	87.9	91.8
10～12月	976	52	246	1,274	50	1,324	93.7	98.8	121.7	98.3	94.6	98.1
14. 1 月	203	15	88	306	15	321	115.8	119.3	110.8	114.5	98.7	113.7
2 月	293	16	71	380	14	394	93.7	110.5	85.3	92.6	89.5	92.5
3 月	491	20	70	581	14	595	88.1	97.5	89.0	88.5	87.4	88.5
1～3 月	988	51	229	1,268	43	1,311	94.4	107.4	94.9	95.0	91.8	94.9
13 年 度	3,404	180	960	4,544	176	4,720	94.2	95.1	107.7	96.8	92.3	96.6
14. 4 月	219	75		294	12	306	84.7	78.9		79.1	87.9	83.3
5 月	190	76		266	13	279	96.7	99.2		96.2	93.2	97.2
6 月	235	62		297	15	312	95.6	85.4		90.0	108.5	90.7
4～6 月	644	213		847	40	887	94.4	87.2		87.6	96.7	88.0

〔注〕(1) 経産省エネルギー生産・需給統計月報 14年5月確報

(2) 工業用ストレート・アスファルト、燃焼用アスファルト、ブローンアスファルトは日本アスファルト協会調べ。

(3) 道路用ストレート・アスファルト＝内需量合計－（ブローンアスファルト＋燃焼用アスファルト＋工業用ストレート・アスファルト）

(4) 四捨五入のため月報と一致しない場合がある。

(5) 平成14年4月以降の工業用、燃焼用アスファルト内需量は、諸事情により区別が出来なくなったことを受け、合算の数値のみ表記となります。

石油アスファルト統計年報（平成13年度版）

A 4 : 26ページ ¥800（送料込）毎年 8 月発行

アスファルトに関する統計
資料を網羅し、年一回発行
する統計年報です。

広くご利用いただけるよ
う編纂致しました。

目次

- 石油アスファルト品種別月別生産量・輸入量
- 石油アスファルト品種別月別内需量・輸出量
- 石油アスファルト品種別月別在庫量
- 石油アスファルト品種別荷姿別月別販売量
- 石油アスファルト品種別針入度別月別販売量
- 石油アスファルト品種別地域別月別販売量

申込先

〒100-0014 東京都千代田区永田町 2 丁目10番 2 号
秀和永田町TBRビル514号室
社団法人 日本アスファルト協会

お知らせ

ホームページを開設いたしましたので、ご覧下さい。

<http://www.01.246.ne.jp/~askyo/>

編集顧問

多田 宏 行
藤 井 治 芳
松 野 三 朗

編集委員

委 員 長	： 中 村 俊 行			
阿 部 忠 行	栗谷川 裕造	塚 越 徹	溝 口 孝 夫	
安 崎 裕	小 島 逸 平	野 村 健 一 郎	溝 渕 優	
太 田 亨	柴 崎 隆 次	服 部 潤	吉 村 啓 之	
大 野 滋 也	田 井 文 夫	姫 野 賢 治		

アスファルト 第212号

平成14年 9 月発行

社団法人 日本アスファルト協会

〒100-0014 東京都千代田区永田町2-10-2

秀和永田町TBRビル514号室 TEL 03-3502-3956

本誌広告一手取扱 株式会社 廣業社

〒104-0061 東京都中央区銀座8-2-9 TEL 03-3571-0997（代）

印刷所 キュービシステム株式会社

〒104-0061 東京都中央区銀座1-21-7

GNビル4F TEL 03-3538-3171（代）

Vol.45 No.212 SEPTEMBER 2002

Published by **THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION**