

# 国際間比較に基づく高速道路における 路面の局部損傷の評価方法に関する研究

神谷恵三<sup>1</sup>・川村彰<sup>2</sup>・富山和也<sup>3</sup>・山口清人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 高速道路総合技術研究所 舗装研究担当部長 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail : k.kamiya.ab@ri-nexco.co.jp

<sup>2</sup>正会員 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 北見工業大学研究員 応用研修推進センター (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

<sup>4</sup>非会員 高速道路総合技術研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

路面プロファイルの周波数分析により、高速道路に発生する局部損傷の特性把握を試みた結果、振幅の変動が大きくなるのは、大型車の軸間距離を包含する第4オクターブバンドに集中し易いことが分かった。また、振幅の最大高低差と標準偏差との関係を把握することにより、補修の優先順位付けに役立てることが期待できる。さらに、この関係においてプロファイルを安価に計測できる簡易プロファイラ (STAMPER) は、路面性状測定車と同様の散布傾向を示すことを確認した。STAMPER を用いて AUTOBAHN の路面プロファイルを計測した結果、IRI の最頻値は NEXCO のそれとほぼ同等であった。また、損傷が小さい時には第6オクターブバンドが卓越し、徐々に損傷が大きくなると第4オクターブバンドが支配的になるという知見が得られた。

**Key Words** : highway maintenance, localized distress, road profiler, IRI, frequency analysis

## 1. はじめに

様々に異なる路面の損傷形態とその大きさを客観的に評価することにより、優先順位を的確に付した上で補修を実施することは、道路管理者の使命である。都市間高速道路の管理運営を担う東日本高速道路㈱、中日本高速道路㈱、西日本高速道路㈱ (以下「NEXCO」という) においては、わだち掘れやひび割れ率のほか、FWD によるたわみ指標等を総合的に捉えることにより、ある程度の施工単位で舗装改良工事を実施している。しかしながら、局所的に発生する橋梁ジョイントの段差やコンクリート舗装目地の角欠け、高機能舗装の局部わだち等の離散的な損傷の補修については、現場技術者の判断に委ねられている。このような日常点検レベルで処理される小規模な損傷については、優先順位を的確に付すのは極めて困難である。例えば、ひび割れは面的に評価される一方で、段差やパッチング等は凹凸の差で評価される。しかも、目視評価が採用されることが多いので、局部的な損傷については、統一性のある評価方法の確立が望まれている。

Ueckermann 及び Maurer<sup>1)</sup>等は、路面の損傷を縦断方向の特異なプロファイルとして捉え、これが存在する箇所に対しては、周波数分析において重み付けを付すことにより、その発生個所と質の評価を定量的に行える方法を

提案している。しかしながら、この方法はフーリエ変換のほか高度な数学知識を要するので、データの取り扱い方法の困難さを呈している。

また、評価方法とは別な問題として、時々刻々と変化する路面の局部的な状態を、計測が高価である路面性状測定車に委ねることは現実的ではない。最近では、路面のプロファイルを簡易に計測できる装置が市場に出回りつつあるが、局部的な損傷の評価方法については依然として未解決である。

本研究は、路面プロファイルの周波数分析を実施することにより、高速道路に発生する局部損傷の特性を見出すと共に、その客観的な評価方法を提案することを目的としている。さらに、北見工業大学が開発した STAMPER と呼ばれる簡易な路面プロファイルシステムの計測精度を検証したうえで、提案した評価方法の実用性を試みた。具体的には、STAMPER を活用してドイツにおける高速道路 AUTOBAHN から得られた路面プロファイルを分析したものである。これにより、局部損傷のメカニズムに関する知見を得ることができた。

本論文は、このような国際間の路面プロファイル比較に基づく、局部損傷の評価方法を提案するものである。

## 2. 路面プロファイルの周波数分析

### (1) 対象データ

局部損傷の分析を容易にするために、路面性状測定車で測定した約3万km/車線の中から、NEXCOにおけるIRIの補修目標値(3.5mm/m)を超えた100m区間で、局部的な損傷が生じている95区間の路面プロファイルを対象とした。NEXCOではIRIの評価基準長を200mとしているが、局部損傷を顕著に捉えることを目的として、本検討においては、100mを基本単位とした。表-1に対象とした局部損傷の形態と区間数を示す。

### (2) IRIの周波数応答特性

IRIの周波数応答特性として、図-1<sup>2)</sup>に示す公知のIRIの波数応答を引用し、9つのオクターブバンドに分割した周波数と波長を表-2に示す。

### (3) 路面プロファイルのオクターブバンド解析

周波数分析に先立ち、縦横断線形の影響を排除するために、ハイパスフィルタ0m~50mを採用した。ここで、0.5m以下の領域をも対象にしたのは、局部損傷の大きさを考慮するためである。その後、95区間の路面プロファイルを表-2のオクターブバンドに分割のうえ第2~第9バンドに注視することとした。

図-2に示すように、分割したバンドごとに得られたプロファイルについて、振幅の最大高低差(以下、「 $\Delta$ 」という)と標準偏差(以下、「 $\sigma$ 」という)を算出した。

表-1 局部損傷の形態と区間数

局部損傷の形態	区間数
	橋梁ジョイント 13 橋梁取付 10
C-Bx段差とは、C-Bx前後の土工部(裏込め)沈下に伴うC-Bx上の路面との高低差をいう。	C-Bx段差 8
	クラック 29
	パッチング 12 薄層舗装 9
小補修跡とは、車線全幅に渡る延長50mに満たない連続した打換えをいう。	小補修跡 7
	トンネル目地 7
計	95

各オクターブバンドの標準偏差 $\sigma_i$ を8つの $\sum_n$ の総和で除した値を $\sigma$ の影響度として定義し、図-3においてプロファイルの変動を把握することとした。

$$\text{影響度}(i \text{ octave}) = \frac{\sigma_i}{\sum_{n=2}^9 \sigma_n} \quad (1)$$

( $i=2, \dots, 9$ )

$\sigma_i$ : オクターブバンド別プロファイルの標準偏差

この影響度は、図-3において次のように解釈される。例えば、周期的な局部損傷になり易いトンネル目地は、10m 間隔で目地が設置されていることから、10m の波長を包含する第4オクターブバンド(波長域12.8m~6.4m)の影響度が大きいということが分かる。

影響度の概ねの傾向は、新設と損傷の両路面において同様に確認される。しかしながら、何れの局部損傷も第4オクターブバンド付近において大きくなる事が分かる。

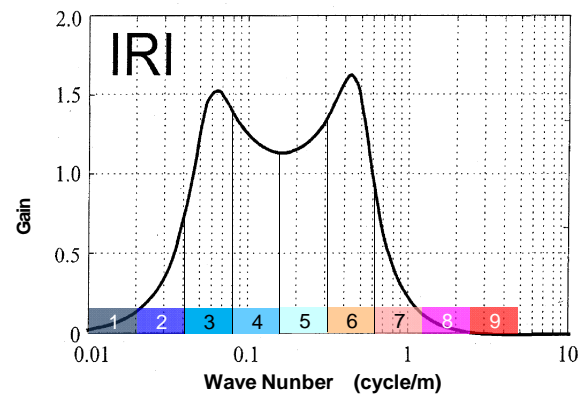


図-1 IRI クォーターカーフィルタの波数応答

表-2 オクターブバンド別の周波数と波長

	周波数 (cycle/m)	波長 (m)
1	0.01 ~ 0.02	102.4 ~ 51.2
2	0.02 ~ 0.04	51.2 ~ 25.6
3	0.04 ~ 0.08	25.6 ~ 12.8
4	0.08 ~ 0.16	12.8 ~ 6.4
5	0.16 ~ 0.31	6.4 ~ 3.2
6	0.31 ~ 0.63	3.2 ~ 1.6
7	0.63 ~ 1.25	1.6 ~ 0.8
8	1.25 ~ 2.50	0.8 ~ 0.4
9	2.50 ~ 5.00	0.4 ~ 0.2

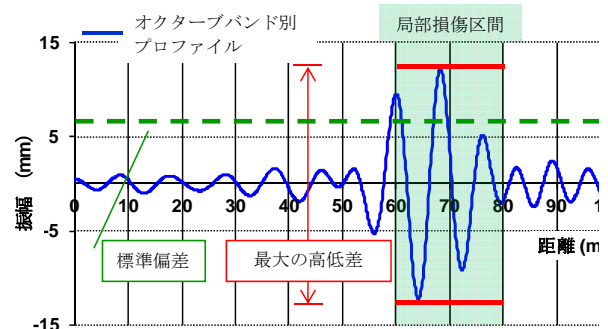


図-2 最大高低差 ( $\Delta$ ) と標準偏差 ( $\sigma$ )

これは、特に舗装の損傷に大きな影響を与える大型車の軸間距離が第4オクターブバンドに集中するため、この波長間隔で路面の損傷が表れやすいものと推察される。また、図-1<sup>2)</sup>より、IRIの波数応答が大きいのは第3～第6オクターブバンドであるので、この波長間隔付近のプロファイルの変動が乗り心地に対して影響を与えているといえる。

#### (4) 路面プロファイルの分類方法

図-4は、局部損傷の形態ごとに第4オクターブバンド

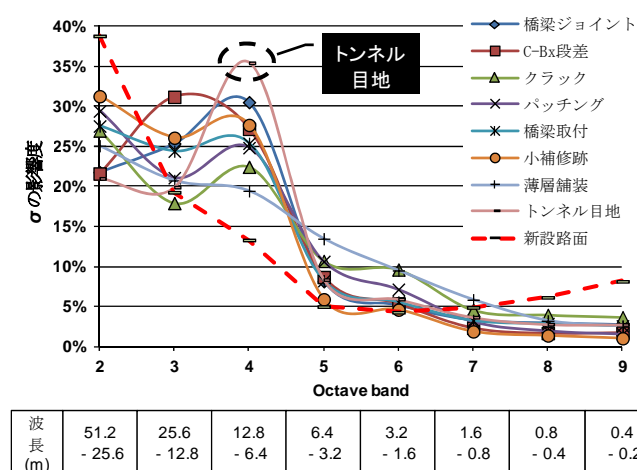


図-3 オクターブバンド別の $\sigma$ の影響度

における振幅の標準偏差 $\sigma$ と最大高低差 $\Delta$ の関係を示したものである。何れの損傷形態においても、両者の間に高い相関が得られていることが分かる。これは、損傷 $\Delta$ が大きくなると、その変動 $\sigma$ も大きくなる傾向にあることを意味する。回帰式の傾きに注目すると、補修が困難なカルバートボックスが最も大きいこと、そして応急補修を終えているパッチングが最も小さいという現場の管理実態を窺い知ることができる。

このように、局部損傷の統一的な指標として $\Delta$ と $\sigma$ を捉えることは、今後の路面管理の方法に大きな利便性を提供するものである。これは、多様に異なる損傷の形態に対して、評価方法が異なる故に、補修の優先順位を客観的に行えないからである。しかしながら、局部損傷の発生頻度に対して、路面性状測定車の活用を頻繁に行うことは現実的ではない。この課題解決は、次章で述べる。

なお、路面プロファイルの $\Delta$ と $\sigma$ によって、損傷とその変動を定量的に評価するという考え方は、Ueckermannらによる研究<sup>1)</sup>を参照したものである。

### 3. 簡易プロファイルの適用性

#### (1) STAMPER

路面のプロファイルデータは、測定に多額の費用を要する路面性状測定車を使用することが一般的であるので、

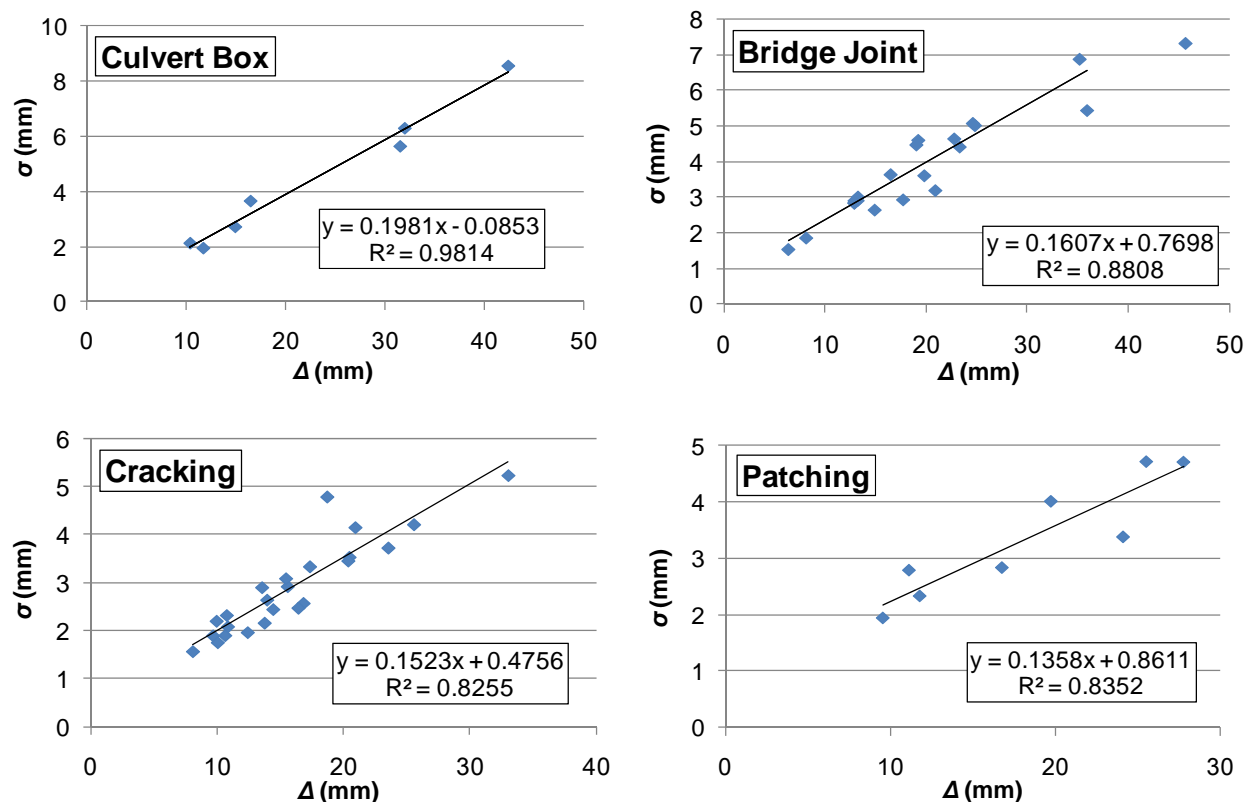


図-4 プロファイルの標準偏差と最大高低差 (第4オクターブバンド)

これを頻繁に収集することはできない。川村等<sup>3,4)</sup>はこのニーズに応えるべく、プロファイルのデータ収集を行える STAMPER と呼ばれるシステムを開発した。

このシステムは、市販車を用いてプロファイルの測定をリアルタイムかつ効果的にしかも簡易に行えるものである。従来の高速度プロファイルシステムではレーザーセンサーを使用するのに対して、STAMPER は車両のサスペンションに 2 個の小さな加速度計を設置する。そして、逆解析により得られたプロファイルは直ちに IRI 等のラフネス指数へ変換されるので、このラフネスの情報は、車内のパソコンにリアルタイムで表示されることと

なる。このシステムの外観を、写真-1<sup>3)</sup>と写真-2<sup>4)</sup>に示す。

図-5 は、3 水準の速度で得られた逆解析プロファイルと共に、低速度の計測システムを組み合わせた基準プロファイル(図中:Reference)とを対比させたものである<sup>5)</sup>。ここでは、STAMPER と水準測量の計測システムの両者に対して、舗装ラフネスの波形特性を定義する波長域として、0.5~50m の限定範囲でフィルタを適用した<sup>6)</sup>。

STAMPER の 3 つのプロファイルは、計測速度に拘わらず、水準測量と同等の値を提示したことが分かる。これより、STAMPER から逆解析したプロファイルは、波長域 0.5~50m の範囲では信頼できることが判明した。



(a) 加速度計



(b) GPS センサー



(c) パーソナルコンピューター

写真-1 装置のシステム<sup>3)</sup>

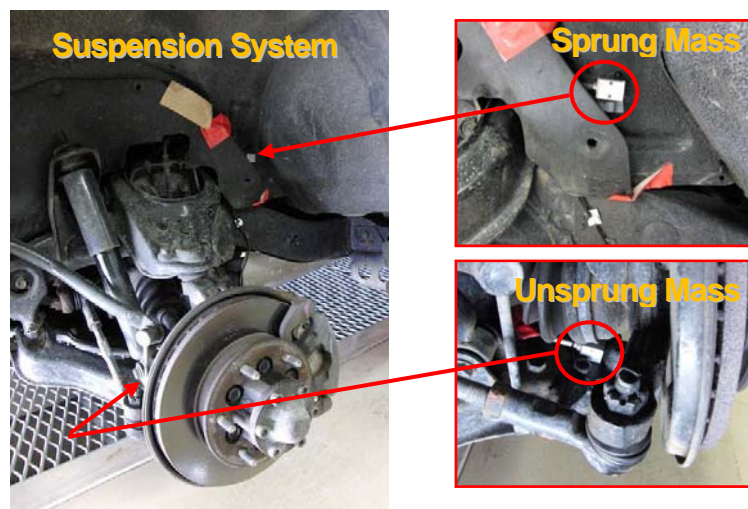


写真-2 サスペンションに搭載した上下加速度<sup>4)</sup>

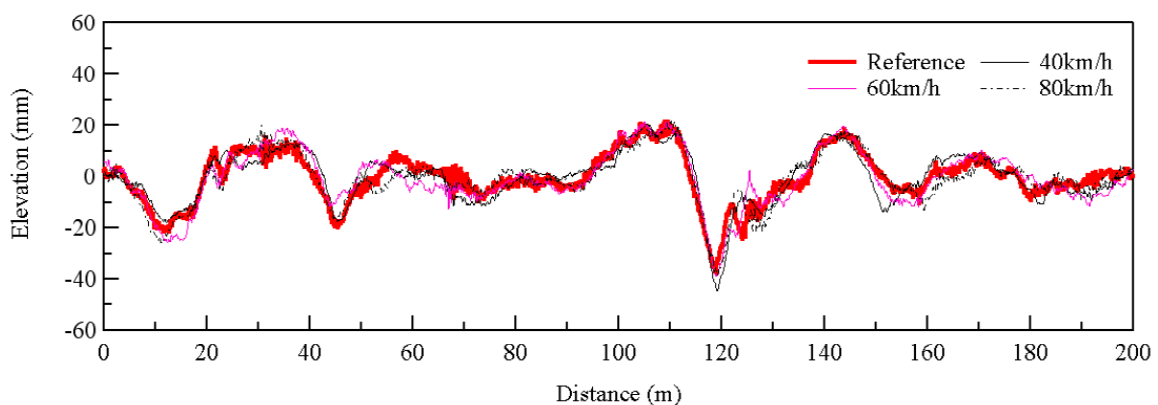


図-5 STAMPER の逆解析プロファイルと基準プロファイルの比較<sup>5)</sup>



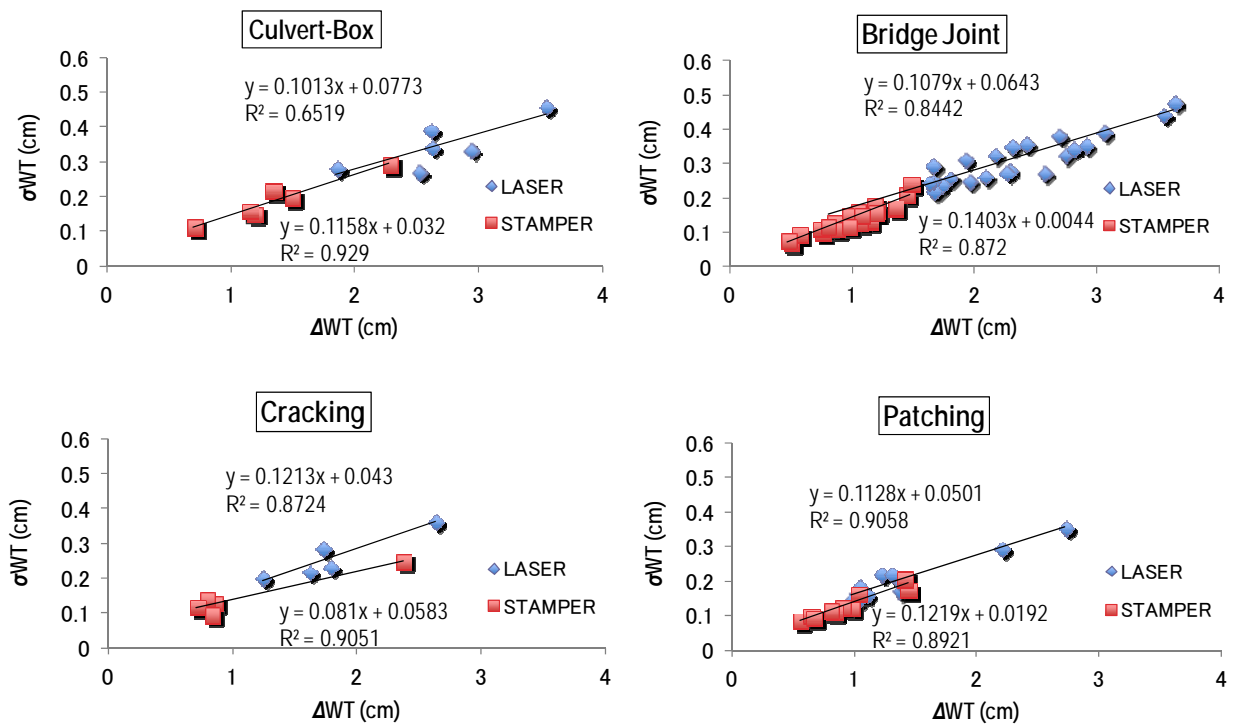


図-6 レーザープロファイラーと STAMPER の比較 (第4 オクターブバンド)

Section ID	Route	Pavements	Section Length(m)
#1	Autobahn	Asphalt	2,700
#2	Autobahn	Asphalt	43,100
#3	Autobahn	Asphalt	10,400
#4	Autobahn	Concrete	10,600
#5	Autobahn	Concrete	10,200
#6	Autobahn	Concrete	10,300
#7	Autobahn	Concrete	3,300
#8	Autobahn	Concrete	10,300
#9	B Line	Asphalt	12,200
#10	Autobahn	Concrete	12,700
#11	B Line	Concrete	14,100
#12	Autobahn	Asphalt	29,600
#13	Autobahn	Concrete	19,800
#14	Autobahn	As on Con	10,600
#15	Autobahn	As on Con	5,000
#16	Autobahn	As on Con	8,400
#17	Autobahn	Asphalt	3,800

図-7 STAMPER の調査区間

## (2) 感度分析

STAMPER の逆解析データが損傷形態に与える感度を分析するために、STAMPER とレーザー方式の路面性状測定車の両プロファイルデータの比較を行った。図-6 は、各種の局部損傷データについて、波長域 0.5~50m の範囲でフィルタを適用した後、ウェーブレット分析 (以下、「WT」という) を適用させた第4 オクターブバンドにおける  $\sigma$ WT と  $\Delta$ WT の関係を対比させたものである。STAMPER と路面性状測定車は、共に高い相関を示しているが、より重要なことは、両測定システムの回帰式の

傾きが似ているということである。これは、損傷のレベルに変化が生じた場合、どちらのシステムもその変化を同様に捉えることができることを意味するものである。

以上より、前章で述べた路面プロファイルの管理方法は、STAMPER を用いても路面性状測定車と同様に可能であることが分かった。

ハイパスフィルタ 0.5~50m 領域での精度検証については、今後の課題とする。

#### 4. 路面プロファイルの国際比較

STAMPER はモバイル式のプロファイラーであるので、レンタカーにシステムを搭載すれば、世界中の至る所で路面プロファイルの計測が可能となる。以下には、日本とドイツにおける国際比較の事例を示す。

##### (1) AUTOBAHN と NEXCO の比較

図-7 は、ドイツにおいて 2007 年 9 月 22 日～26 日の間で STAMPER による路面プロファイルを計測した調査区間を示している。調査走路は、5 日間にわたりドイツ国内

の主要都市（ストラスブルグ、ミュンヘン、ベルリン、ハノーバー、ケルン、フランクフルト）を経由したものであり、1 つの区間長は数 km から 30km までに及んだ。

表-3 は、Autobahn と日本の高速道路（NEXCO）区間の内訳を対比している。Autobahn では STAMPER による総延長 190.8km に対して、NEXCO では路面性状測定車による資産延長の 7 割に相当する 23710.2km ものデータが得られている。STAMPER のデータは限られているが、都市間の重交通区間を代表しているものと推察される。

図-8 は、Autobahn と NEXCO における IRI の度数分布を比較したものである。Autobahn のデータは希少である

表-3 Autobahn と NEXCO 区間のデータ数

	Autobahn	NEXCO	Section Unit
Asphalt Section	448	89,201	200m
Concrete Section	386	6,882	200m
Composite Section (As on Con)	120	22,468	200m
Total Lengths	190.8km	23,710.2km	

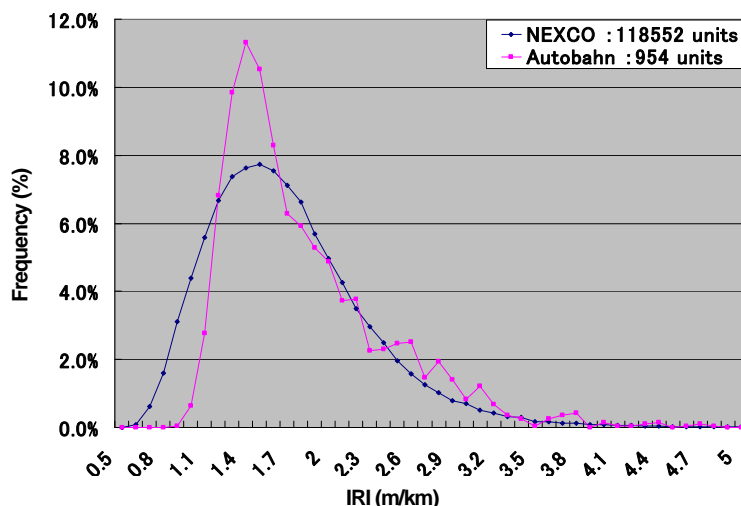


図-8 AUTOBAHN と NEXCO の IRI の比較

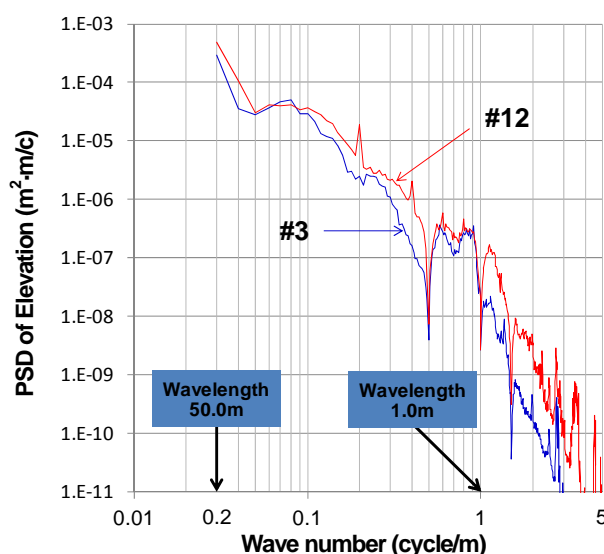


図-9 アスファルト舗装区間の PSD 比較 (Autobahn)

ものの、両者の最頻値はほぼ等しく、類似した分布傾向を示した。

## (2) AUTOBAHN セクション間の比較

図-9 は、STAMPER の逆解析データを用いて、ドイツ国内の 2 区間のパワースペクトル密度（以下「PSD」という）を比較したものである。ここでは、先述したように、0m～50m の波長域でフィルタを適用している。

#3 と #12 セクションを選定した理由は、前者が小さな IRI を、そして後者が大きな IRI を示したことによる。このことは、#3 の PSD が波数の全域において #12 よりも小さな値を示していることに符合する。写真-3 は、両区間の代表的な路面状態を示すものである。

#3 と #12 セクションのプロファイルの差異を精査するために両者の区間長から大きな IRI を示した連続 5km 区

間をそれぞれ抽出した。図-10 は、第 3 オクターブバンド～第 6 オクターブバンドにおける  $\Delta$  と  $\sigma$  の関係をそれぞれ示したものである。両区間の散布傾向の差異は、第 4 オクターブバンド～第 6 オクターブバンドにかけて徐々に大きくなることが窺い知れる。図-1 によると、第 6 オクターブバンドは IRI の波数応答が大きいので、この波長域の差異が乗り心地に影響を与えているものと思われる。

図-6 において重視した第 4 オクターブバンドがここでは支配的でないのは、 $\Delta$  と  $\sigma$  の大きさに起因する可能性がある。図-10 おける  $\Delta$  の最大値は 20mm 程度であるのに対して、図-4 では 40mm を超えているからである。つまり、損傷 ( $\Delta$ ) が小さい時は第 6 オクターブバンドが卓越し、 $\Delta$  が大きくなると徐々に第 4 オクターブバンドが支配的になるという解釈である。同様のことは損傷の



写真-3 代表的な路面状態 (Autobahn)

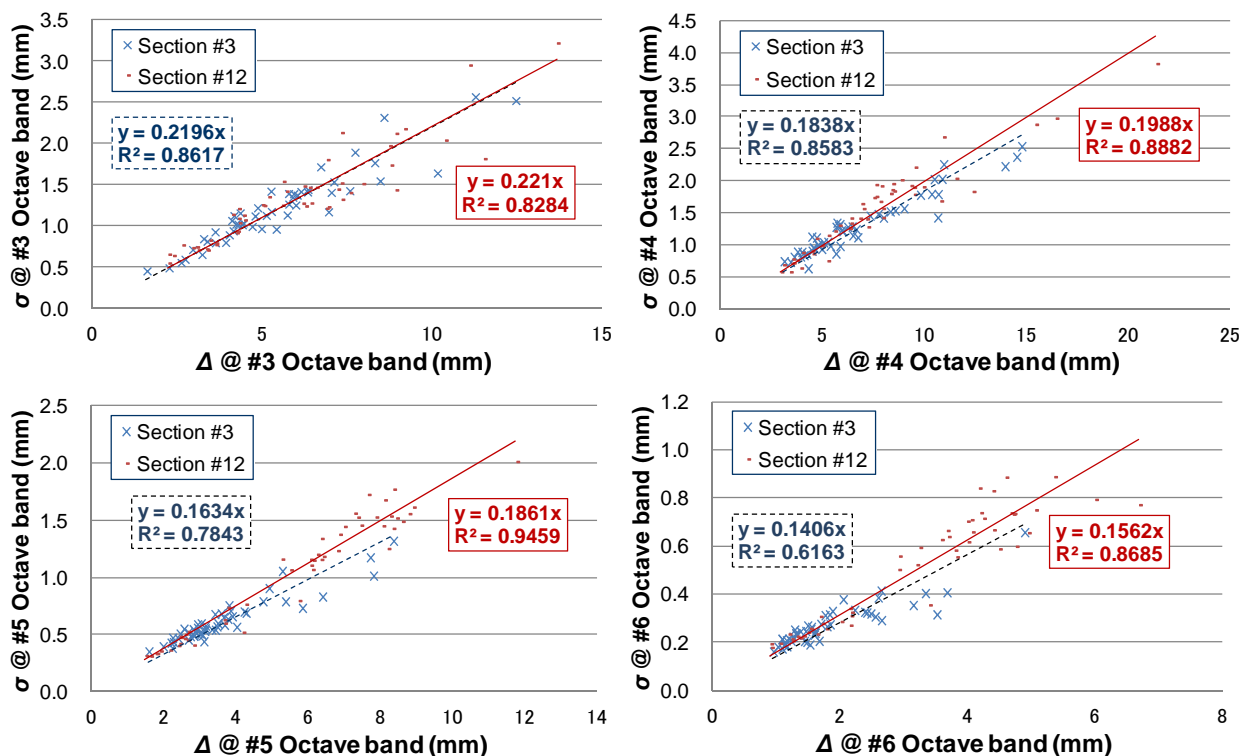


図-10 損傷 ( $\Delta$ ) と変動 ( $\sigma$ ) の関係 (Autobahn)

標準偏差 ( $\sigma$ ) においても当てはまるが、これはあくまで仮説であるので、今後の検証課題としたい。

ドが支配的になるという仮説を得た。これは今後の検証課題としたい。

## 5. まとめ

本研究では、高速道路に発生する局部損傷の特性を見出すと共に、その客観的な評価方法を提案した。さらに、STAMPER を併用することにより、提案した評価方法の適用性を AUTOBAHN において試みたものである。得られた知見を以下に示す。

- (a) 局部損傷を有する路面に対して、プロファイルの周波数分析を実施した結果、第 4 オクターブバンドにおける振幅の変動が最も大きい結果が得られた。これは、特に舗装の損傷に大きな影響を与える大型車の軸間距離がこのオクターブバンドに集中するため、この波長間隔で路面の損傷が表れやすいものと推察される。
- (b) 何れの損傷形態においても、第 4 オクターブバンドにおける振幅の最大高低差と標準偏差の間に高い相関が得られた。両者の関係を把握することにより、多様に異なる損傷の形態に対して、補修の優先順位付けに役立てることが期待できる。
- (c) STAMPER とレーザー方式による路面性状測定車のデータを比較した結果、第 4 オクターブバンドにおける振幅の最大高低差と標準偏差の間において、両測定システムの回帰式の傾きが類似していることを確認した。これより、両法は同様の路面プロファイルの管理が可能であることが分かった。
- (d) STAMPER により得られた AUTOBAHN と路面性状測定車により得られた NEXCO の IRI を比較した結果、両者の最頻値はほぼ同等であった。
- (e) AUTOBAHN と NEXCO の周波数分析データを比較した結果、損傷が小さい時は第 6 オクターブバンドが卓越し、徐々に大きくなると第 4 オクターブバン

## 参考文献

- 1) P. MAULER. Et al. (2008). The weighted Longitudinal Profile (WLP) - A new Profile Index. Technical Specifications and Experiences in Austria and Germany. 6<sup>th</sup> Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2008), Portoroz, Slovenia
- 2) 「舗装工学ライブラリー1 路面プロファイリング入門」平成 15 年 1 月 (社) 土木学会
- 3) A. Kawamura. (2011). Using Road User-Oriented Approach in Pavement Evaluation: Critical Data and Potential Tools, Keynote Speech & Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Road and Airfield Pavement Technology 2011, pp. 27-41, Bangkok, August
- 4) K. Tomiyama, A. Kawamura, S. Nakajima, T. Ishida, and M. Jomoto. (2011). A Mobile Data Collection System Using Accelerometers for Pavement Maintenance and Rehabilitation, Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavement Assets (ICPMA 2011), Santiago, November
- 5) Sayers, M.W. Profiles of Roughness. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1260, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1990, pp. 06-111.
- 6) Sundberg, U., and Ejsmont, J.A. Tyre/Road Noise Reference Book. Infomex, Sweden, 2002.

## A STUDY ON EVALUATION METHOD OF DISCRETE ROAD SURFACE DISTRESS ON THE MOTORWAYS BASED ON INTERNATIONAL COMPARISON

Keizo KAMIYA, Akira KAWAMURA, Kazuya TOMIYAMA and Kiyohito YAMAGUCHI

Judging from frequency analysis of road profiles that contain localized surface distress on the Japanese motorways, it was found that standard deviation of the amplitude tends to vary most at the fourth octave band, as it covers axle distances of commercial vehicles. By grasping the relation between the standard deviation and the maximum difference of amplitude, it is expected to use it for prioritizing repair sites. Also in this relation, a mobile profiler, STAMPER gives a similar tendency as laser profiler. By measuring road profiles using STAMPER on AUTOBAHN, the peak value of IRI was almost the same as that on NEXCO. It was also found that the sixth octave band is prevailing when road surface is less deteriorated, and that the fourth will be as it gets more.