

国際ラフネス指数の計測方法に関する研究

池田 拓哉¹・東嶋 奈緒子²

¹正会員 建設省土木研究所 舗装研究室長 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

²正会員 建設省土木研究所 舗装研究室 研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

国際ラフネス指数 (IRI) は、道路路面の平坦性を評価するための世界共通指標として、世界銀行より提案された。しかし我が国では、IRI についての研究、供用性能評価への導入などこれまで積極的な取組は行われていない。本論文では、我が国への IRI の導入方法の検討を目的に、以下の2方法について検討した結果を報告する。①縦断プロファイル自動計測車において縦断プロファイルを測定し、クォーターカーシミュレーションにより IRI を算出する方法、② σ_{3m} との相関式により IRI を算出する方法。

KeyWords: International Roughness Index, IRI, leveling, 3m profilometer, roughness

1. はじめに

舗装の修繕の必要性を判断するためには、舗装の供用性能を適切に評価する必要がある。現在、我が国をはじめ世界各国において供用性能を評価するための研究が進められている。供用性能は、一般に、路面損傷、すべり抵抗、たわみ、乗り心地などの要素の中から、1あるいは複数の要素を組み合わせて評価されている。

現在建設省においては、維持管理指数¹⁾ (Maintenance Control Index, 以下、MCI という) を用いて舗装の供用性能を評価している。これは式(1)に示すように路面損傷の程度を用いて舗装の供用性能を評価する方法である。

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \quad (1)$$

ここで、C: ひびわれ率(%)

D: わだち掘れ量(mm)

σ : 平坦性(mm)

しかし、道路利用者である運転者あるいは乗客の立場で考えると、道路を利用する上で重視しなければならないのは乗り心地である。MCI の構成要素の1つである平坦性は、道路利用者の乗り心地に影響を与えるが、MCI は道路管理者の視点で作られており、わだち掘れやひびわれを重視しているので、平坦性が MCI に及ぼす影響は小さい。そこで、舗装の供用性能を総合的に評価するためにも、乗り心地を構成要素の1つに組み込むことが求められる。

最近、世界各国において、舗装の供用性能に乗り心地を取り入れる際の指標として、国際ラフネス指数 (International Roughness Index, 以下、IRI という) が採用される傾向にある。しかし我が国では、IRI については、研究段階あるいは試験的な導入段階にある。本論文では、我が国に IRI を導入する際の測定方法について調査を行ったので報告する。

2. 国際ラフネス指数 (IRI) ^{2),3),4)}

(1) IRIの開発の背景

道路路面のラフネスは、「平坦性」、「縦断プロファイル」、「縦断凹凸」など様々な言葉で表現されており、舗装の供用性能を評価する指標である。しかし、この測定方法は各国多種多様であり、その指標間の互換性は十分に確認されていない。これらの問題を解決するため、現行の多くのラフネス測定装置と関係づけられるような標準的なラフネス指数を設定し、世界各国のラフネス指数を相互比較できるようにすることを目的に、世界銀行から IRI が提案された。つまり、IRI とは各種ラフネス指数を仲介する物差しとなる指標といえる。

(2) IRIの開発

従来から用いられているラフネス測定装置は、プロファイル方式とレスポンス方式の2つに分類

表-1 IRI の算出方法³⁾

クラス	算出方法
1	間隔250mm 以下の水準測量で縦断プロフィールを測定し、QC シミュレーションにより IRI を算出する。
2	任意の測定装置で縦断プロフィールを測定し、QC シミュレーションにより IRI を算出する。
3	RTRRMS (レスポンス型道路ラフネス測定システム) で任意尺度のラフネス指数を測定し、相関式により IRI に変換する。
4	パトロールカーに乗車した調査員の体感や目視により IRI を推測する。

される。プロフィール方式は、路面の縦断方向の凹凸や起伏の形状を実測するものであり、標尺を用い人力で行う水準測量から通常の車両走行速度と同程度の速度で測定可能な自動計測車まで各種の装置がある。また、レスポンス方式は、車が路面から受ける動的応答を主として加速度の形で測定するものであり、装置装着車のタイプ、走行方法、測定時期、天候などにより測定データが異なるという特徴を持つ。

(3) IRIの算出

a) 算出方法

IRI の算出方法には表-1に示す4種類がある。これらのうち最も実用的なのは、任意の測定装置で路面の縦断プロフィールを測定し、クォーターカー (Quarter Car, 以下、QC という) シミュレーションによって IRI を算出するクラス2の方法である。

b) 算出手順

クラス1, 2の QC シミュレーションを用いて IRI を算出する方法は、文献3)によると以下のとおりである。

- ① 調査箇所の縦断方向に1本の測線を設定し、縦断プロフィールを測定する。測定間隔は300mm 未満とする。
- ② 測点間の勾配は一定とみなし、プロフィールを平滑化する。
- ③ 平滑化したプロフィールに QC シミュレーションを適用する。
- ④ シミュレーションによる車体懸架装置の上下運動を加算し、プロフィールの延長で除して IRI を算出する。

c) QCシミュレーション

QC は、通常用いられている2軸4輪の乗用車の1輪だけを取り出し抽象化した仮想車両モデル

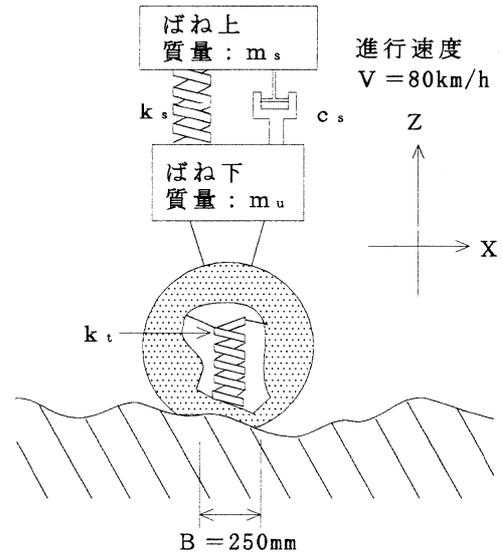


図-1 クォーターカーモデル

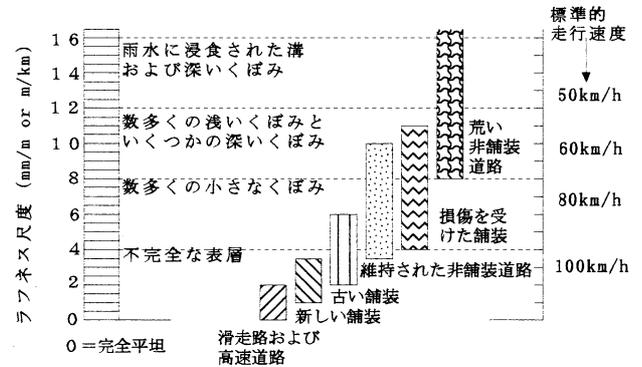


図-2 IRIによるラフネス尺度²⁾

であり、路面上を走行する QC は、図-1に示すような力学系で表現される。IRI は、この QC を一定の速度で路面上を走行させたときの車が受ける上下方向の運動変位の累積値 (mm) と走行距離 (m) との比である。すなわち、QC シミュレーションによって算出される IRI は、式(2)で表せる。

$$IRI = \left\{ \int_0^{L/V} | \dot{z}_s - \dot{z}_u | dt \right\} / L \quad (2)$$

ここで、 z_s : ばね上質量の高さ (mm)

z_u : ばね下質量の高さ (mm)

\dot{z}_s, \dot{z}_u : z_s, z_u の時間の導関数(m/s)

L: 走行距離 (m)

V: 走行速度 (22.2m/s = 80km/h)

t: 時間 (s)

(4) IRIの評価

IRI のラフネス尺度を図-2に示す。IRI を用いることで、全く維持作業が行われていない未舗装道路から非常に高い平坦性が要求される滑走路までの縦断方向のラフネスを同一尺度で表現できる。

3. 我が国における平坦性測定手法の検討

(1) IRIの導入方法の検討

我が国におけるラフネスは、一般に「平坦性」と呼ばれている。この平坦性は3mプロフィールメータにより測定され、路面の凹凸量を一定間隔で読み取り標準偏差を求めるものである（単位：mm、以下、この平坦性を「 σ_{3m} 」という）。この測定方法は、2.(2)であげたプロフィール形式に該当するが、この方法によるプロフィールは、プロフィールメータの車輪間の相対プロフィールであり、相対プロフィールのままQCシミュレーションによりIRIを算出することは難しい。

現在、IRIを算出するための方法としては、以下の方法が考えられる。

- ① 縦断プロフィールを測定しQCシミュレーションによりIRIを算出する方法
 - ・ 縦断プロフィール（水準測量，自動計測）
 - ・ 疑似縦断プロフィール（ σ_{3m} 測定機）
- ② 相関式によりIRIを変換する方法
 - ・ σ_{3m}

①の方法で縦断プロフィールを測定する場合、測定間隔を250mmとする必要がある。この間隔で水準測量を実施するには、膨大な時間を要し、測定中の一般車両の規制等実用的でない部分が多く、縦断プロフィールの自動計測が望ましい。疑似縦断プロフィールについては既に一部で研究が進められている⁹⁾が実用化には至っていない。また、②の方法でIRIを算出するには、 σ_{3m} とIRIの関係が明確にされておらず、それらの関係を明らかにする必要がある。そこで、①の方法として、既存の自動計測車⁹⁾を用いて縦断プロフィールを測定することが可能であるか、また、②の方法として σ_{3m} とIRIの関係を明らかにすることを目的に調査を実施した。

(2) 縦断プロフィール自動計測車

調査に用いた縦断プロフィール自動計測車は、逐次2点真直度測定法の理論⁹⁾を応用しニチレキ¹⁰⁾が開発した測定車である。その測定の原理を以下に示す。

a) 逐次2点真直度測定法

逐次2点真直度測定法は自動計測車の外側走行車輪位置にA、B2対のセンサーを10cm間隔で設置し（図-3参照）、その設置間隔で測定を行うことで測定車の上下方向の変動量と路面の凹凸量を測定する方法である（測定精度 $\pm 1.2\text{mm}$ ）。この原理を模型的に示したのが図-4である。2対のセ

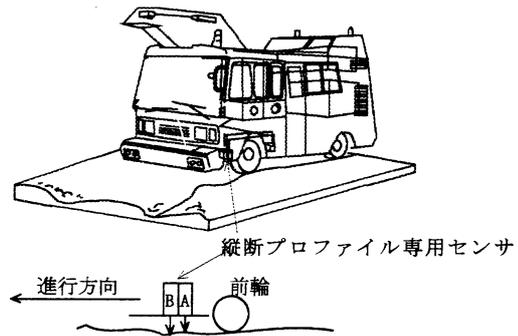


図-3 逐次2点真直度測定法による測定車の概要

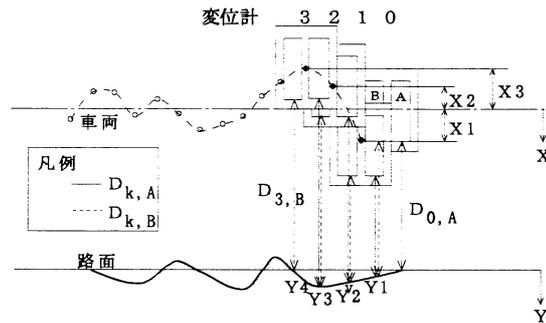


図-4 逐次2点真直度測定法の原理

ンサーは常に鉛直方向に向くよう光ファイバージャイロを搭載し、車のピッチング・ローリングやヨーイングの影響を消去するようにしてある。この測定結果より以下の関係式を導くことができる。

$$X_k = X_{k-1} + D_{k-1,B} - D_{k,A} \quad (3)$$

$$Y_k = X_k + D_{k,A} - D_{0,A} \quad (4)$$

ここで、

k : XとYの間に関連する延長方向の位置

X_k : k における計測車の上下動の量

Y_k : k における路面の凹凸量

$D_{k,A}$: k におけるセンサーAの測定値

$D_{k,B}$: k におけるセンサーBの測定値

すなわち、逐次2点真直度測定法の原理を用いることで、計測車の上下方向の変動と路面の凹凸量を分離でき、縦断プロフィールを計測することができるようになる。

b) GPSの組み込み

逐次2点真直度測定法による縦断プロフィール測定は、短区間の縦断プロフィールを測定することは可能であるが、長区間の縦断プロフィールを測定するには、測定機の持つ誤差が累積し大きなゆがみが生じる。そのため、自動計測車単独では長区間の測定をすることは難しい。そこで、自動計測車にGPSを組み込み、長区間の縦断プロフィールを測定し（垂直方向の測定精度 $\pm 2\text{cm}$ ）、短区間と長区間のデータを合成することで、短区間成分と長区間成分を含めた絶対的なプロフィールデータを収集することが可能となる。このGPSの

測定概要を図-5に示す。

c) 絶対プロファイルの測定結果

逐次2点真直度測定データとGPSデータとを組み合わせて得られる絶対縦断プロファイルの概要を図-6に示す。路面の縦断プロファイルを波形としてとらえ、GPSデータ(図-6(1))より長区間の波形を、また逐次2点真直度測定法データ(図-6(2))により短区間の波形を測定し、これら2つのデータを合成することにより長距離にわたる絶対縦断プロファイルの測定を可能とした(図-6(3))。

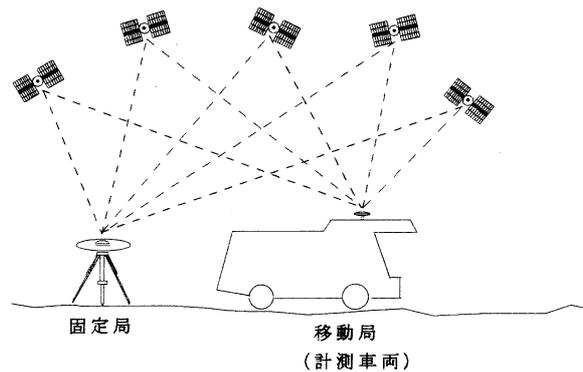


図-5 GPS測定システムの概要図

(3) 縦断プロファイルの自動計測方法の検討

a) 調査方法

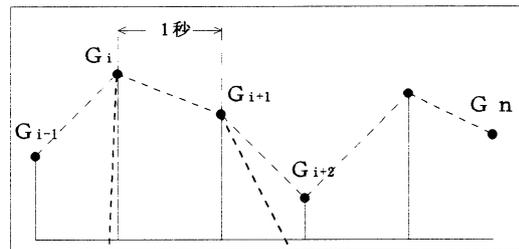
水準測量と自動計測により縦断プロファイルを250mm間隔で測定した。また、測定車の走行速度は30km/h程度とし、GPSの測定間隔は約8m(1秒間隔)とした。調査箇所には、道路の縦断勾配の有無により結果に違いが出る可能性を考慮し、「平坦」、「上り坂」、「下り坂」の3箇所(300m/箇所)を選定した(表-2に示す箇所A~C)。この結果をもとにIRIを算出し、水準測量と自動計測の相関を求めた。なお、水準測量と自動計測の相関は、評価する単位延長によって変化するため、箇所Aのデータを用いて、相関を求めるために適当な評価延長の検討もあわせて行った。

b) 調査結果

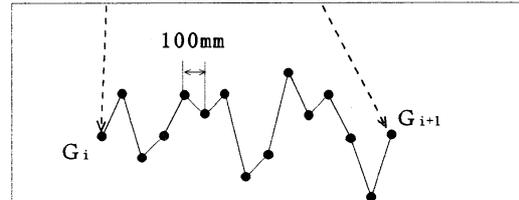
水準測量と自動計測の縦断プロファイル測定結果の一例を図-7に示す。また、箇所Aについて縦断プロファイルの相関係数と評価延長の関係を調査した結果を図-8に示す。評価延長を長くした場合、相関係数は大きくなり、評価延長を長くするにつれ一定の値に収束していくことがわかった。この図より判断すると、精度のよい縦断プロファイルの測定値を得るためには、評価延長を100m以上とすることが必要であるといえる。そこで、評価単位延長を100mとして、各調査箇所の100mごとに縦断プロファイルの水準測量と自動計測の相関を求めた。その結果を表-3に示す。坂道部である箇所B、Cではかなり高い相関を示し、平坦部である箇所Aにおいても1区間を除いて相関が高い傾向にあった。相関の低い区間については、わだち掘れが大きく(約40mm)、水準測量と自動計測の測線がずれることで測定値に大きな差が生じたものと考えられる。

次に、水準測量と自動計測結果より算出したIRIを比較した結果を表-4に示す。ここで、IRIは100、150、300mごとに算出した(以下、この算出単位を「評価単位」という)。これを見るとデ

(1)GPS測定によるプロファイル



(2) 逐次2点真直度測定によるプロファイル



(3) 合成プロファイル

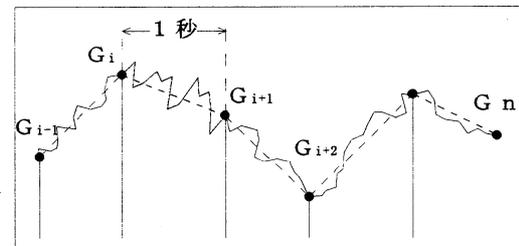


図-6 GPS測定と逐次2点真直度測定結果を合成した絶対縦断プロファイル

表-2 調査箇所と測定項目

箇所	特徴	測定項目	縦断プロファイル		平坦性
			水準測量	自動計測	
A	平坦		○	○	
B	上り坂 (2.3%)		○	○	
C	下り坂 (1.7%) , 橋梁有		○	○	
D	下り坂 (3.3%)				○
E	平坦				○
F	ゆるい上り坂 (0.9%)				○
G	平坦				○

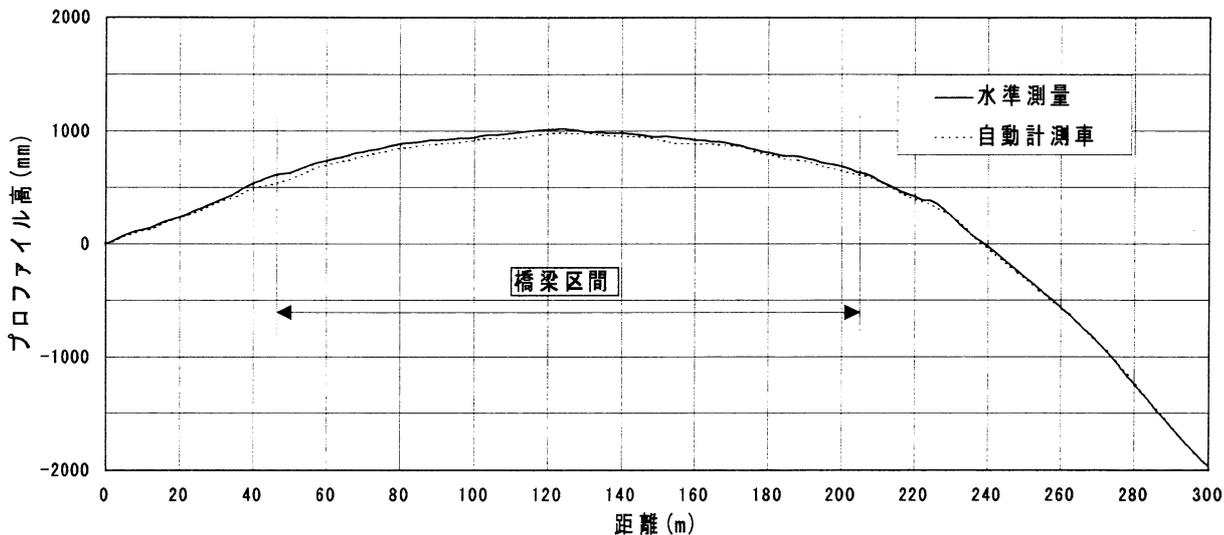


図-7 縦断プロファイル測定結果（筒所C）

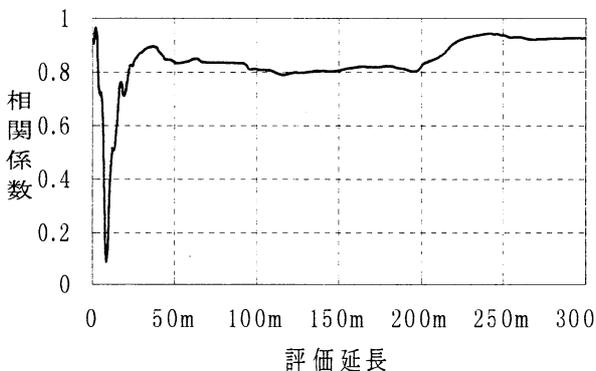


図-8 水準測量と自動計測の相関と評価延長

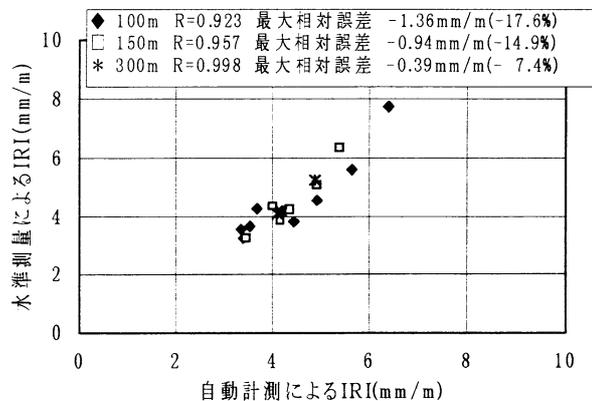


図-9 水準測量と自動計測の IRI の比較

表-3 水準測量と自動計測の縦断プロファイルの相関係数

調査 箇所	測定距離 (m)		
	0~100	100~200	200~300
A	0.8109	0.8579	0.4637
B	0.9995	0.9993	0.9865
C	0.9988	0.9925	0.9999

一タ数は少ないが相関は非常に高くなっている。また、建設省技術評価制度における自動計測車の性能確認試験では、 σ_{3m} の精度を±30%以内としているが、図-9に示すように IRI はその精度を満たしていることがわかる。

以上より、自動計測により水準測量に代わって IRI を測定することは可能であるが、その場合、評価単位を100m 以上とする必要があることがわかった。

(4) σ_{3m} を用いたIRIの換算式の検討

a) 調査方法

3.(3)の調査箇所に加えて、別の箇所を4箇所

(300m/箇所) 選定し(表-2に示す箇所 A ~ G), 自動計測により IRI と σ_{3m} を測定した。この結果を用いて、IRI と σ_{3m} の回帰分析を行った。なお、IRI は図-7に示すような絶対プロファイルから、 σ_{3m} は1.5m 間隔で車両側面に配置した半導体レーザー・光点変位計によって測定された変位量から算出した。

b) 調査結果

自動計測による IRI と σ_{3m} の回帰分析の結果を表-4に示す。ここで、評価単位には100, 150, 300 mを用いた。これを見ると、どの評価単位においても比較的相関が高いことがわかる。また、決定係数から相関式の適合性を判断すると、 σ_{3m} を測定し相関式により実用的な精度で IRI に変換することは可能であると考えられる。ただし、測定対象のプロファイルについて、偶然 QC の共振周波数に近い形状が連続すると、IRI の値は大きくなるが、一般の路面にはそのような規則性がないことを前提としている。

次に、評価単位により相関式が異なるのは非実

表-4 IRI と σ_{3m} の回帰分析結果 (評価単位別)

評価単位	相関係数 R	相関式	決定係数 R ²	データ数
100m	0.826	IRI = 0.74 σ_{3m} + 1.78	0.683	21
150m	0.835	IRI = 0.72 σ_{3m} + 1.84	0.697	14
300m	0.858	IRI = 0.77 σ_{3m} + 1.57	0.736	7

表-5 IRI と σ_{3m} の回帰分析結果

相関式	相関係数 R	決定係数 R ²	データ数
IRI = 0.74 σ_{3m} + 1.77	0.833	0.695	42

用的であるため、100～300m評価単位の全てのデータを用いて回帰分析を再度行った。その結果を表-5に示す。相関係数、決定係数とも評価単位ごとに解析した場合とほとんど変わっていない。そこで、今回の調査結果である σ_{3m} と IRI の換算式として、表-6に示す暫定式を提案する。

なお、1998年7月に北海道内の15区間において PIARC (常設国際道路会議協会の略称、現 WRA) 路面性状国際共通試験が開催された。この中で IRI や σ_{3m} が測定されている。この結果とあわせて今後暫定式の精度を高めていきたい。

4. おわりに

今回の調査結果から、

① 自動計測により縦断プロファイルを測定し、QCシミュレーションにより IRI を算出する。

② σ_{3m} を測定し、相関式により IRI に変換する。の2方法により、IRI が算出できることが明らかになり、IRI を舗装の供用性能評価の1要素として導入することが可能となった。今後その評価方法について検討する必要がある。

また、IRI の研究に使用されている評価単位は、現在は320m (0.2マイル)、160m (0.1マイル) が主流である。これは、ある路線の傾向を見るた

めには有効であるが、舗装の管理に用いるには局所的な評価ができず適当ではない。今後、短区間の平坦性評価方法についても検討していく必要がある。

謝辞： 本論文の執筆に当たり、ニチレキ株式会社秋本隆氏には多大なるご協力を頂いた。紙面を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 飯島尚, 今井博, 猪股和義 : MCI による舗装の供用性能の評価, 土木技術資料, 第23巻11号, pp. 15-20, 1981.
- 2) 笠原篤, 加藤昌太郎 : 国際ラフネス指数, 舗装, 第26巻7号, pp. 24-26, 1991.
- 3) マイケル W. セヤーズ, (訳) 笠原篤, 関口幹夫, 加藤昌太郎 : 道路縦断プロファイルからの IRI の算出 (上), 舗装, 第31巻7号, pp. 21-27, 1996.
- 4) マイケル W. セヤーズ, (訳) 笠原篤, 関口幹夫, 加藤昌太郎 : 道路縦断プロファイルからの IRI の算出 (下), 舗装, 第31巻8号, pp. 12-17, 1996.
- 5) 加藤昌太郎, 荻原哲夫 : IRI 評価のための縦断形状復元手法の開発, 日本道路会議, 第18回, pp. 548-549, 1989.
- 6) Akimoto T., Kawamura A., Himeno K., Kasahara A. and Hachiya Y. : CHARACTERISTICS OF PAVEMENT SURFACE PROFILE ON AIRPORT RUNWAYS, The 3rd Surfacing Symposium, PIARC, 1996.

METHOD FOR EVALUATION OF INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX

Takuya IKEDA, Naoko HIGASHIJIMA

International Roughness Index (IRI) was developed by the World Bank as a common index to convert roughness measured by various devices and methods. However, in Japan, the study on IRI is still at beginning stage. This paper studies two methods for IRI evaluation in order to introduce IRI to pavement evaluation.

- 1) Method by quarter car simulation based on road profile data obtained by an automatic measuring vehicle
- 2) Method to calculate IRI by a regression formula using data given by 3m profilometer