

地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた 舗装路面プロファイルの算出

東亜道路工業株式会社
ライカジオシステムズ株式会社
東亜道路工業株式会社

○梅田 隼
金子 公一
塚本 真也

1. はじめに

国土交通省では建設業の生産性向上のための取り組みとして、i-Construction を推進している。その一環として ICT 技術の全面的な活用を掲げており、平成 28 年度から ICT 土工、平成 29 年度には ICT 舗装工が始まっている。平成 30 年度には新たに「地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領（舗装工事編）（案）」が新設された。地上移動体搭載型レーザースキャナー(以下、地上移動体搭載型 LS)は、レーザースキャナーを移動しながら計測可能な計測技術で、データを迅速に取得可能なため、従来の地上型レーザースキャナー(以下 TLS)と比較して作業効率が極めて高い。特に道路のように長い距離を計測する場合に有利であると考えられる。

一方、従来より舗装の出来形の管理指標として平たん性があり、3m プロフィールメータ等により測定し、結果を提出することが求められている。

以上の背景より、本論文では、地上移動体搭載型 LS により得られる 3 次元点群データから舗装の平たん性、IRI を算出することを目的として、実路にて地上移動体搭載型 LS と舗装の平たん性や IRI の測定に一般的に用いられている低速プロファイラの測定を実施した。点群データから平たん性 $\sigma 3m$ と IRI を算出する手法を検討し、妥当性の確認を行ったので、ここに報告する。

2. 測定概要

関東地方の新設自動車専用道路にて測定を行った。現場は全線片側 1 車線、測定延長 934m(アスファルト舗装区間 L=134m, コンクリート舗装(トンネル) 区間 L=800m) であり、表層施工後に全区間の測定を実施した。

2.1 測定機器

測定時に使用した機器および解析ソフトウェアを表-1、写真-1 に示す。地上移動体搭載型 LS は Leica ProScan を、低速プロファイラには NEXCO の「路面プロファイラの性能確認方法」にて精度確認されたマルチロードプロファイラ(以下、MRP)を使用した。

表-1 使用機器およびソフトウェア

項目	使用機器名称	備考
地上移動体搭載型 LS (Leica ProScan)	トータルステーション TS	国土地理院 1 級(1 秒機) プリズムトラッキング 10Hz
	レーザースキャナ LS	最大スキャンスピード 1,000,000 点/秒 スキャンレンジ 40m ミラー回転 100Hz (外部バッテリー使用時)
点群処理ソフト	ProScan ベーシックソフト	各スキャンデータの取り込み、合成など
	SiTE-Scope 2019 ver3.00.00	指定範囲の点群抽出
設計データ作成ソフト	SiTEC 3D ver7.00.00	抽出エリア作成
低速プロファイラ	MRP-3000	NEXCO 試験方法 第 2 編 付属書 001「路面プロファイラの性能確認方法」 ¹⁾ にて精度確認済み機器
プロファイル解析ソフト	NEXCO 路面プロファイラ精度検証 ver1.0.0.β	性能確認
	ProVAL ver3.61.24	IRI 算出



写真-1 MRP(左) Leica ProScan(右) 外観

2.2 地上移動体搭載型 LS の測定原理

国土交通省の ICT 舗装工において、使用するレーザースキャナーの測定精度は基層・中間層及び表層表面において、鉛直方向で $\pm 4mm$ 以内、平面方向で $\pm 10mm$ 以内と規定されており、点密度も 100 点以上/ m^2 が必要となる。図-1 に TLS 測定時の舗装表面でのレーザースポット形状のイメージを示す。従来の TLS 測定では、測定舗装表面が TLS 本体から離れるほどレーザーの入射角が小さくなり、ビーム長径の増加による延長方向の測定精度の低下や、放射方向の測定間隔増加による点密度の減少が発生する。よって規格を満たすためには、TLS 機種により異なるが、20~50m 毎に TLS 本体

を移設する作業が必要であり、測定後は点群処理ソフトを使用しデータを結合するなどの処理も必要となる。

一方、地上移動体搭載型 LS は自己位置を高精度に定位し、移動しながら測定できる計測技術である。測定原理を図-2 に示す。①TS のトラッキングまたは GPS による移動体の位置情報、②移動体搭載 IMU による移動体姿勢角情報、③移動体搭載型レーザースキャナーによるスキャンデータ、の3つの測定情報より絶対座標を持つ点群データの生成が可能となる。TLS と比較して、レーザースキャナーと測定路面が常に近い位置にあるため、ビーム長径の変動が少ない、点密度が確保しやすい、測定時間、解析時間が大幅に削減されるなどの利点がある。表-1 に示す機器を使用して測定した場合、これまでの経験では TS から前後 300m 計 600m 程度の区間を一度に測定することが可能である。なお、移動しながらの測定なので TLS で行うような写真撮影はできないため、点群に色情報を付与することはできない。

Leica ProScan の測定手順を図-3 に示す。TS の測定結果は、全ての点群に影響するため、その設置は特に慎重に行う必要がある。

2.3 IRI について

平成 25 年 2 月に国土交通省から総点検実施要領(案)舗装編が策定され、舗装点検の調査項目として「ひび割れ率」「わだち掘れ量」「IRI(International Roughness Index)」の3指標を使用することが定められている²⁾。NEXCO が管理する道路においては新設工事における出来形管理基準や、保全における日常点検において IRI が指標として用いられている³⁾。

IRI は、世界銀行が提案した路面のラフネス指標で、運転者の乗り心地に関連している。「2軸4輪の車輪の1輪だけを取り出した仮想車両モデルをクォーターカー(QC)と呼び、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と走行距離の比(mm/km または mm/m)を、その路面のラフネスとする」と定義されている⁴⁾。従来用いられてきた平坦性σは評価路面自体の凹凸を直接評価する指標であるが、IRI は QC が評価路面を通行した際の振動具合を観測することで、間接的に路面のラフネスを評価するものである(図-4)。

IRI の測定装置は、算出方法によって表-2 に示す4クラスに分類される⁴⁾。MRP による測定はクラス2に分類される。一方、Leica ProScan による測定で IRI を算出する手法は、クラス分類が明確ではないが、作成する路面プロファイルの元となる点群は正しい標高座標を持つので、クラス1あるいはクラス2に相当すると推測される。

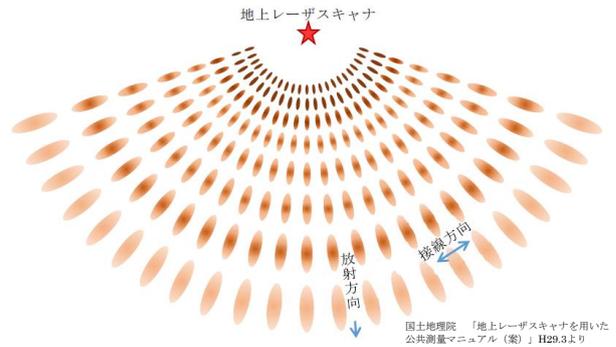


図-1 TLS 測定時の舗装表面でのスポット形状

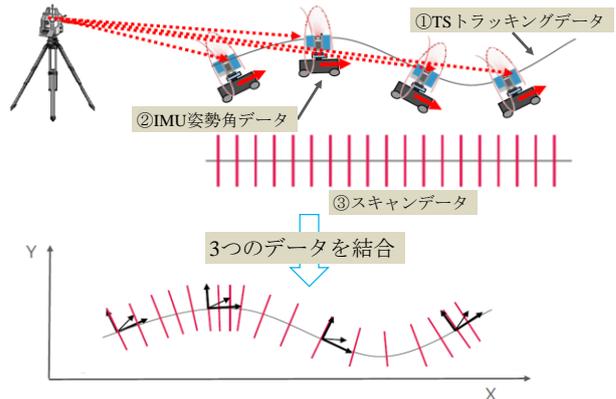


図-2 地上移動体搭載型 LS の測定原理



図-3 Leica ProScan 測定手順

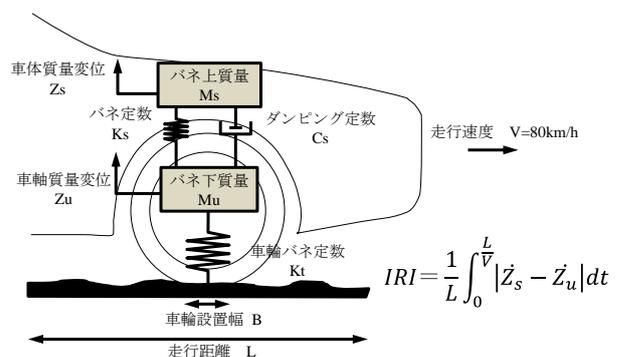


図-4 QC モデル

3. Leica ProScan のデータ処理方法の検討

平坦性の測定方法は車道中心線から 1m 離れた線上を測定すると定義されている。本研究では OWP 側に 1m 離れた線を測定線とした。MRP の測定は、測定線上を MRP レーザー照射部が通過するように走行する。Leica ProScan で計測した点群データより、平坦性の測定線上のデータを抽出する方法を以下の様に検討した。

3.1 Leica ProScan の測定位置

図-5 に示すように Leica ProScan は足元(機体下方)のデータは取得できないため、通常は走行位置を変えて往復走行することで欠損部が生じないように測定する。そのため IRI を算出するためのプロファイルを取得する車線と同一車線、反対側車線にて測定した二つのデータが得られるが、

- ① 二つのデータは微小ながら高低差が生じることがあるため、プロファイルの取得を目的とする場合は、一方のデータのみを使用する方が、精度が高まると予想されること
 - ② 同一車線にて測定したデータは、測定時の足元の欠損部と測定線が重なってしまい、取得できない箇所が生じる可能性があること
- という事由より、本検討においては、反対車線にて測定したデータのみを使用し測定線の点群を取得することとした。

3.2 プロファイル作成方法

3.2.1 測定線取得幅

図-6 に点群データから測定線上のデータを抽出するイメージ図を示す。点群を取得する抽出幅は、表-3 に示す四通りを検討した。

3.2.2 サンプルング方法

路面プロファイルを解析ソフト ProVAL に入力するためには等間隔の標高データを入力する必要がある。MRP の測定データは 0.01m 間隔で出力することが一般的である。Leica ProScan 測定データを同条件にて比較するため 0.01m 間隔にサンプルングした。まず各点に対し測定線上での位置(距離)の割り付けを行い、二次元データに変換した後サンプルングを行った。この際、サンプルングの手法として①最近傍点抽出方法、②区間平均算出方法の二つを検討した(図-7)。

4. 測定結果

4.1 測定状況

測定は 2018 年 3 月 19 日に実施した。延長 934m の上下線を、TS 設置位置の選定などの事前準備を含め約 3 時間半で測定した。Leica ProScan は台車の手押し作業員：1 名と、TS 据え付け、視準等作業員：1 名の計 2 名での作業であった。Leica ProScan 及び MRP の測定状況を写真-2 に示す。

4.2 Leica ProScan 精度確認

測定の妥当性確認のため、高さ方向の精度確認

表-2 IRI 算出方法の違いによるクラス分類

クラス	路面凹凸等の測定方法	IRI の算出方法
1	水準測量	間隔 250mm 以下の水準測量で縦断プロファイル測定し、QC シミュレーションにより IRI を算定する。
2	任意の縦断プロファイル測定装置	任意の縦断プロファイル測定装置で縦断プロファイル測定し、QC シミュレーションにより IRI を算定する。
3	RTRRMS (レスポンス型道路ラフネス測定システム)	RTRRMS 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	パトロールカーに乘車した調査員の体感や目視	パトロールカーに乘車した調査員の体感や目視により IRI を推測する。



図-5 Leica ProScan 測定イメージ図

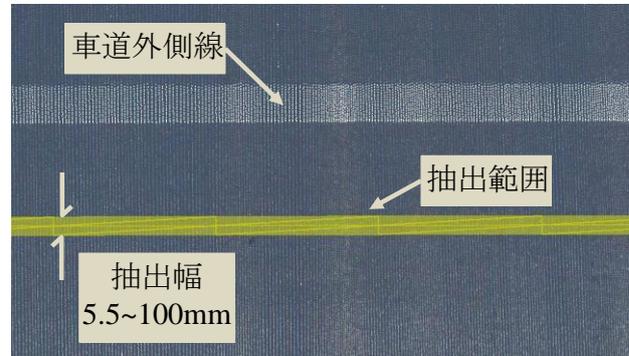


図-6 測定線抽出方法

表-3 測定線抽出幅の選定

測定線抽出幅	選定理由
5.5mm	3m プロファイルメータの測定車輪の幅を想定したもの
20mm	MRP の前輪の幅を想定したもの
50mm	水準測量にて使用するアルミスタッフの、地面に接する底面幅を想定したもの
100mm	低速プロファイル測定において、測定者に起因する走行軌跡の変動を考慮したもの

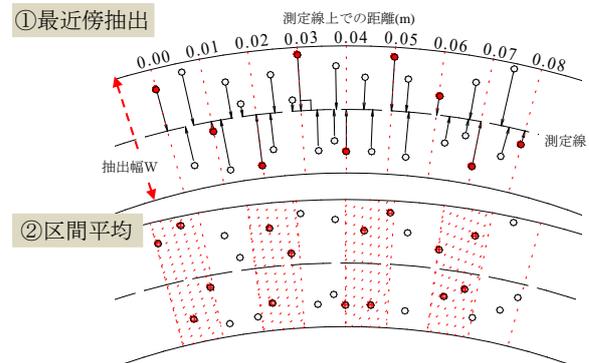


図-7 サンプルング方法



写真-2 Leica ProScan 及び MRP 測定状況

試験 5)を 2 個所で行った。検証方法は 1m 四方の検証路面を作り、検証路面の四隅を水準測量した平均値と、Leica ProScan により測定した検証路面内全点の平均値を比較するものである。測定結果を図-8、表-4 に示す。精度に関してはいずれも十分規格を満足するものであった。なお点群の色は、反射輝度で表示している。検証路面は①②ともに上り線側に作成したので、検証路面と距離が近い上り車線側を走行した測定結果の方が精度、密度共に下り車線走行と比較し良い結果となった。

上り線と下り線の高さを比較すると 2mm 程度ではあるが差が生じている。これは走行位置の違いによって生じた誤差と推測される。機械点の位置によって高さの差が生じることは地上移動体搭載型 LS に限らず従来の TLS においても同様であり、スキャナーの機械点を移動させる毎に必ず点群のラップ領域が生じる。ラップ領域において各点群の高さが異なるが、表-4 に示すように微小な差であり、出来形測定を目的とする際は問題ない誤差である。

しかし、本研究の線形上のプロファイルを算出するという目的においては、たとえ微小な差であっても二層に重なった状態の点群から抽出した場合、図-9 のように上下の点群の値を使用すると本来のプロファイルとは異なる形状となる事も想定されることから、本検討では前章に示したように片側車線でのデータのみを使用することとした。

4.3 評価区間での測定結果

現場内のコンクリート舗装において評価区間 200m 及び区間前後 20m の余長を含む 240m 区間を測定区間とし、NEXCO 試験方法「路面プロファイラの性能確認方法」を参考に検証を行い、Leica ProScan の路面プロファイラとしての性能を確認した。

4.3.1 データサンプリング結果

各プロファイル作成方法について検討する。サンプリングを行う際、0.01m 区間内に点群が存在しない場合があるが、その場合は前区間の値を引用し補間を行った。ただし上記区間が 0.05m 以上ある場合はエラー区間として記録を行った。Leica ProScan の解析方法に対しそれぞれ A~H と設定し、MRP により取得したプロファイルとの一致度を解析ソフト「NEXCO 路面プロファイラ精度検証」により算出した。結果を表-5 に示す。

抽出幅 5.5mm の時にエラー数が多く、最長空白区間も 0.27m と長いが、その他の抽出幅ではあまり変化がなかった。地上移動体搭載型 LS の点間隔は、縦断方向は台車手押し走行速度に依存し、横断方向は路面位置と LS との距離に依存するものである。本測定においては、走行速度は約 4~6m/s、TLS から測定線までの距離は約 10m でほぼ一定であり、点群の縦断ピッチは 5~20mm 程

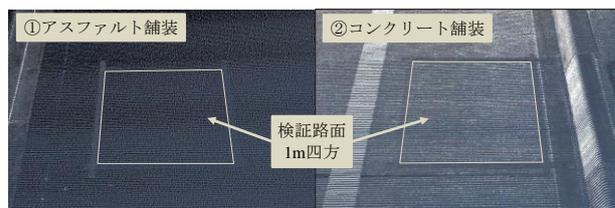


図-8 精度確認検証路面の点群図

表-4 Leica ProScan 精度確認試験結果

検証路面	TS から検証路面までの距離	真値となる四隅の平均値(m)	Leica ProScan 走行経路	Leica ProScan の測定高さ平均値(m)	高さの差(m) [±4mm 以内]	点密度(n/m ²) [n=100 以上]	合否
①As	150m	779.7385	下り車線	779.7360	+0.0025	2794	合
			上り車線	779.7381	+0.0004	5439	合
			上下結合	779.7373	+0.0012	8233	合
②Co	300m	775.7140	下り車線	775.7107	+0.0033	6233	合
			上り車線	775.7141	-0.0001	12938	合
			上下結合	775.7130	+0.0010	19171	合

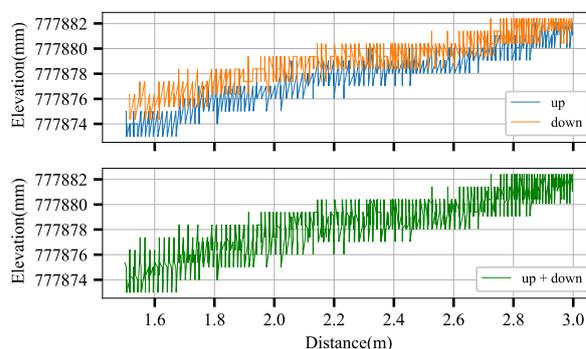


図-9 ラップ領域でのプロファイルの挙動

表-5 評価区間解析結果

番号	抽出幅 (mm)	サンプリング	抽出点数	平均点群数 /0.01m 区間	エラー数	最長空白区間
A	5.5	最近傍	14290	0.60	753	0.27
B	5.5	平均	14290	0.60	753	0.27
C	20	最近傍	51534	2.15	0	0.02
D	20	平均	51534	2.15	0	0.02
E	50	最近傍	128365	5.35	0	0.02
F	50	平均	128365	5.35	0	0.02
G	100	最近傍	256596	10.69	0	0.02
H	100	平均	256596	10.69	0	0.02
MRP	-	-	24000	1.00	-	-

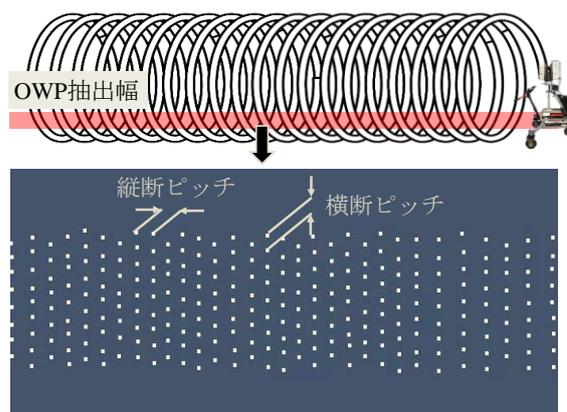


図-10 縦横断ピッチ イメージ

度、横断ピッチは 10~15mm 程度であったため、抽出幅 5.5mm ではエラー区間が多く生じた。以上のことから横断ピッチ以上の抽出幅であれば、抽出幅を増やしても縦断ピッチはほとんど変わらないと考えられる。平均点群数、エラー数を考慮する

と A, B の解析は 0.01mm 間隔でのサンプリングには適していないと言える。

4.3.2 プロファイル及び IRI 比較

前項にて算出した点群を用いて作成したプロファイルの一致度、及び IRI の精度を検証した¹⁾。ただし基準プロファイルは水準測量ではなく、同試験にて精度確認済みの MRP を使用している。ここで使用した MRP の、水準測量に対する移植性能は 0.996 である。また NEXCO の試験方法では移植性性能と反復性性能を乗じた評価値を算出することになっているが、本測定では複数回の測定は行っていないため移植性性能のみを算出した。

結果を表-6 に示す。プロファイル一致度は解析方法による違いは見られなかった。一方 IRI 精度は区間平均算出方法が優れているという傾向がある。A, B の解析は C~H の解析に比べて著しく低くなっている。抽出幅 20mm が最も IRI 精度が高い結果となった。

図-11 は MRP, Leica ProScan のプロファイルを表示したものである。Leica ProScan 測定による高さは絶対値を持つデータであるがグラフの表示の関係上起点を 0 にオフセットして表示している。C~H の形状はほぼ一致している。距離が進むにつれ差が大きくなっているが、これは MRP 側の傾斜計の精度に依存した誤差であるが、プロファイルの一致度、IRI 精度の算出にはほとんど影響しない。図-12 は一部区間を拡大したものである。MRP の傾斜計の影響により高さの値そのものは異なっているが、路面の形状はよく一致している。

4.4 全工区での測定結果

4.4.1 プロファイル及び IRI について

上下線全線において、Leica ProScan の解析方法 C~H を使用して作成したデータと MRP によるデータの比較を行った。結果を表-7 に示す。一致度、精度について 0.95 以上を緑、0.90 以下を赤で表示

した。評価区間での結果と違い、解析手法による違いは確認されなかった。プロファイルは上下線ともに一致度が高く、全線の相関係数は 1.000 と非常に高い結果が得られた。IRI 精度に関しても概ね高い値となったが、上り線 400~600m において精度が低かった。10m 区間 IRI においても同様に、当該区間では Leica ProScan の値が高く算出されている。IRI 差異の理由として、MRP の走行位

表-6 評価区間 性能確認結果

番号	抽出幅 (mm)	サンプリング	プロファイル一致度	IRI (mm/m)	IRI 精度
A	5.5	最近傍	0.9461	1.307	0.975
B	5.5	平均	0.9460	1.334	0.954
C	20	最近傍	0.9462	1.269	0.996
D	20	平均	0.9461	1.275	0.999
E	50	最近傍	0.9462	1.246	0.978
F	50	平均	0.9461	1.271	0.997
G	100	最近傍	0.9462	1.298	0.981
H	100	平均	0.9461	1.264	0.992
MRP	-	-	-	1.274	-

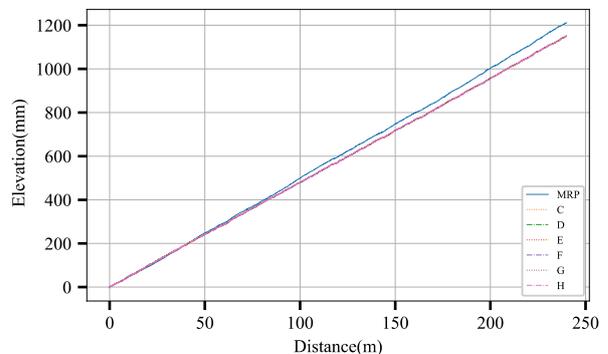


図-11 評価区間内プロファイル

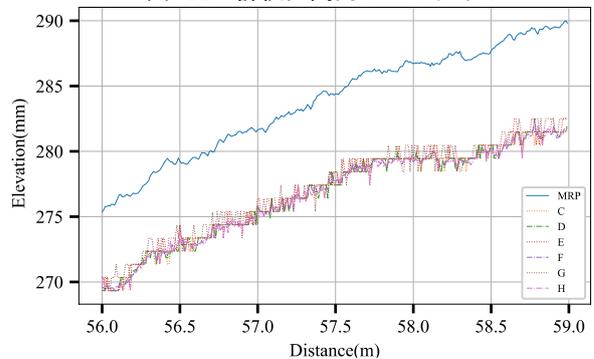


図-12 評価区間内プロファイル一部表示

表-7 全工区の性能確認結果

路線	区間(m)	プロファイル一致度						IRI(mm/m)						IRI 精度						
		C	D	E	F	G	H	MRP	C	D	E	F	G	H	C	D	E	F	G	H
下り	0-200	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952	0.952	1.484	1.411	1.418	1.397	1.413	1.458	1.417	0.956	0.952	0.934	0.947	0.987	0.951
	200-400	0.969	0.969	0.969	0.969	0.969	0.969	1.403	1.317	1.321	1.303	1.312	1.317	1.291	0.992	0.993	0.955	0.986	0.966	0.967
	400-600	0.952	0.952	0.951	0.952	0.951	0.952	1.45	1.395	1.391	1.376	1.368	1.441	1.374	0.962	0.959	0.949	0.944	0.994	0.948
	600-800	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	1.499	1.367	1.37	1.38	1.374	1.415	1.379	0.912	0.914	0.921	0.917	0.944	0.920
	800-934	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	2.001	2.059	2.044	2.08	2.054	2.088	2.051	0.971	0.978	0.960	0.973	0.956	0.975
上り	0-200	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.676	1.643	1.678	1.637	1.629	1.645	1.687	0.966	0.999	0.961	0.953	0.969	0.989
	200-400	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	1.399	1.362	1.364	1.443	1.353	1.405	1.333	0.963	0.965	0.956	0.954	0.994	0.934
	400-600	0.966	0.966	0.966	0.966	0.966	0.966	1.264	1.532	1.535	1.549	1.545	1.520	1.545	0.733	0.730	0.715	0.719	0.744	0.719
	600-800	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	1.477	1.407	1.405	1.461	1.406	1.407	1.406	0.930	0.928	0.984	0.929	0.931	0.929
	800-934	0.940	0.940	0.940	0.939	0.940	0.940	1.934	2.044	2.044	2.117	2.043	2.074	2.006	0.889	0.890	0.817	0.891	0.860	0.928
平均	-	0.961	0.961	0.961	0.961	0.961	0.961	1.559	1.554	1.557	1.574	1.55	1.577	1.549	0.927	0.931	0.915	0.921	0.935	0.926

置が測定線からずれていた可能性や、微小区間でのプロファイルの違いが影響したものと考えられる。

4.4.2 平坦性について

全線のプロファイルを用いて平坦性の比較を行った。なおジョイント等の控除は行っていない。結果を表-8に示す。平坦性についても一定の相関が確認され、特にC、Dが上下線共に高い一致度であった。平坦性は前項にて算出したプロファイルを元に計算されるので、プロファイル同様、下り線がより相関が高い結果となった。

5. まとめ

本研究は生産性向上を目的として、地上移動体搭載型LSにより取得した点群からIRIを算出する手法について検討を行い、以下の結果を得た。

1)路面プロファイルについてはMRPとの高い相関が認められ、IRIについては一部区間を除いて概ね高い相関が得られた。また、平坦性は全線の比較において9割以上の一致度が得られた。

2)プロファイルの作成は、抽出幅20mmの場合に相関が高い傾向があるが、サンプリング方法による大きな差は見られなかった。

以上のことから、測定及びデータ処理の方法にいくつかの留意点はあるものの、地上移動体搭載型LSにより舗装のIRIや平坦性を算出できる可能性を示唆するものであった。

6. おわりに

今後の課題として、ProScanの測定結果の反復性を確認していきたい。

ICT舗装の開始により、舗装の管理が点管理から面管理へと移行している。面管理における情報量は非常に大きいため、膨大なデータの取り扱いに戸惑う声もあるが、そのデータには未だ見ぬ活用方法が眠っていると考える。

本研究の結果が今後のICT舗装での出来形管理において、生産性向上につながることを期待する。

参考文献

- 1) 東.中.西日本高速道路(株):NEXCO 試験方法 第二編, pp.54-58, 平成29年7月
- 2) 国土交通省:総点検実施要領(案)【舗装編】, pp.2. 平成25年2月
- 3) 東.中.西日本高速道路(株):舗装施工管理要領, pp.29, 35, 平成29年7月
- 4) (社)日本道路協会:舗装調査・試験法便覧, 第1分冊. pp.180-185, 平成19年6月
- 5) 国土交通省:地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた出来形管理要領(舗装工事編)(案), pp.56, 平成30年3月

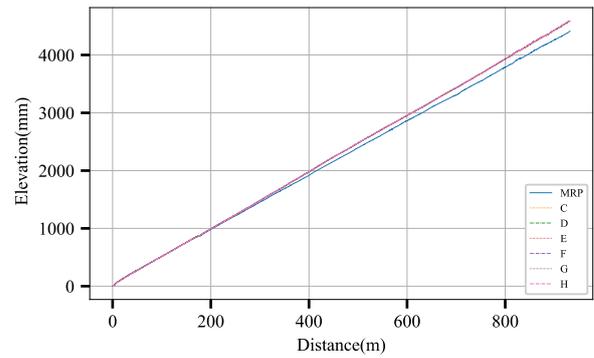


図-13 上り線全区間プロファイル

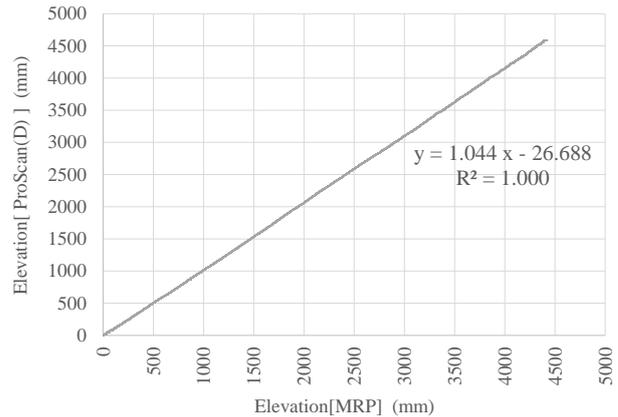


図-14 上り線 MRP-ProScan(D)プロファイル相関

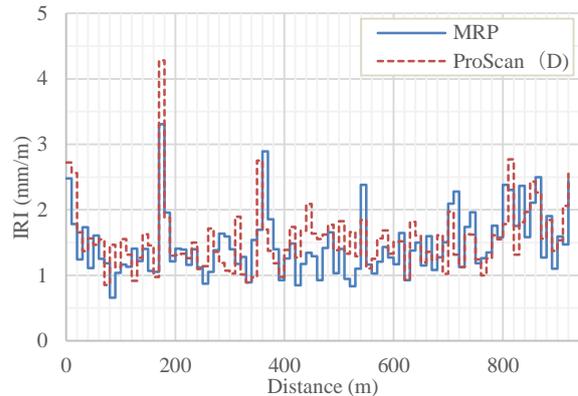


図-15 上り線 10mIRI

表-8 平坦性比較結果

路線	平坦性 63m (上)						
	MRP	C	D	E	F	G	H
下り	1.299	1.285	1.278	1.284	1.272	1.296	1.288
		0.989	0.984	0.988	0.979	0.998	0.991
上り	1.287	1.341	1.349	1.360	1.363	1.383	1.385
		0.958	0.951	0.943	0.941	0.925	0.924