3DLidarによる路面プロファイル計測の検証

大廣　智則[1]・齊田　光[2]・伊東　靖彦[3]

[1]正会員　国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）
E-mail:oohiro-t@ceri.go.jp

[2]正会員　国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）
E-mail:saida-a@ceri.go.jp

[3]正会員　国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）
E-mail:yasu-ito@ceri.go.jp

低コストで高精度に二車線同時計測可能な路面性状自動測定装置が望まれている．本研究では，路面プロファイルを面的に高精度で定量的に計測するため，マルチビーム三角測量方式の 3DLidar に着目し，同一箇所において水準測量と 3DLidar で計測して IRI を算出し，その値を比較した．同一車線を走行した場合の 3DLidar の計測精度（誤差率）は 7.8%，再現性 3.8%，速度依存性 3.9%と実用できる高精度な値であった．また，路面プロファイルを波長 0.4～51.2m の帯域で抽出し，7 つのオクターブバンドに分割して各バンドの振幅について標準偏差を求め，水準測量で規格化した結果，3DLidar の振幅は各バンドとも水準測量と同様の傾向を示した．また，平たん性の波長では 1.16 と水準測量と振幅がほぼ等しい結果が得られた．これらの結果は第二走行レーンを走行したと仮定した計測でも同様の結果が得られた．

Key Words: *3dlLidar, Lidar, 路面プロファイル, IRI, 平たん性*

1. はじめに

国土交通省は，平成 28 年に舗装点検要領を策定し，直轄国道では平成 29 年度から点検要領を踏まえた点検を実施するように通知した[1]．平成 29 年度からの点検手法は目視を基本としつつ，必要に応じて機器を用いることを妨げないとしている．しかしながら，目視観測による主観的な手法は，ひび割れ率については十分な点検精度を有しているとの報告があるが[2]，平たん性の評価では乗車している車両・速度・評価者の経験による影響を受けやすいなど個人差に起因して，定量的な判定が難しい課題がある．また天候や時間帯等による路面状態の視認性の差異や，判別の難しい路面状態が存在した場合の評価のバラツキ等の問題もある．倉持ら[3]は舗装点検要領により，路面性状自動測定装置の性能確認試験の受検数が年々増加しており，舗装点検に用いる自動測定装置の必要性が高まっていることを示唆している．自動計測装置により道路管理者は早期に補修箇所を発見し，道路管理上のリスクを低減することができる．また，適切な修繕や補修計画を立案する際に客観的なデータに基づく判断が可能になると考えられる．

これまで路面プロファイルの測定は，ローリングディップスティック[4]等の路面を直接測定する方法や路面性状自動測定装置[3]等の計測装置で計測する方法が用いられてきた．ローリングディップスティックは交通規制が必要であり測定に時間を要する．路面性状計測車は導入費用が高額で台数が少ないことや走行車線のみの計測であることから，任意のタイミングで計測できないなど，運用に際して問題があった．このため大廣ら[5]により加速度計により簡易ラスネス測定装置による路面管理手法が提案されているが二車線同時に計測はできていない．このように低コストで高精度に二車線同時計測可能な装置の運用が望まれている．

本研究では，冬期路面管理に活用することを視野に路面プロファイルを面的に高精度で計測するため，マルチビーム三角測量方式の 3DLidar[6]に着目した．最も高い精度で路面プロファイルの測定が可能な水準測量を絶対基準となる真のプロファイル（以降，基準プロファイル）の IRI として測定し，さらに同一箇所を 3DLidar で計測して IRI を算出し，両者を比較することで 3DLidar の第一走行レーンと第二走行レーンを走行した場合の計測精度，再現性，速度依存性について示す．また，路面プロファイルは様々な波長と振幅を有する波の複合体として捉えることができ，3DLidar の性能を明らかにするためには

波状特性によって分類した評価が必要である．そこで，路面プロファイルの平たん性（ラフネス）の波長である 0.4～51.2m の帯域を解析対象とし，7 つのオクターブバンドに分割し，各バンドの路面プロファイルの振幅について標準偏差（以降，σ）を求め，基準プロファイルで規格化することにより波長の傾向を明らかにする．

2. 3DLidar の特性

検証に使用した 3DLidar は，**図-1** に示すように一般的に市販されている SUV やワンボックスカー等の車両の後方に搭載し，走行車両から路面に 28,000 本のレーザー光を扇状に同時に高速で発射し，反射したレーザー光を捉えることで，路面の高さを正確に面的に計測できる計測装置である（このことをマルチビーム三角測量式という）．使用した 3DLidar の仕様は，**表-1** に示す通りで，2 車線幅の路面凹凸を計測高さ方向 2.5mm 以下の精度で計測が可能である．

3. 検証方法

(1) 検証日・場所

検証は令和 5 年 3 月 7 日と 8 日に実施した．当日の天候は曇り，実験時の外気温は 3～9℃である．検証場所は，**図-2** に示す北海道の南西部に位置する苫小牧寒地試験道路で行った．検証は密粒度アスファルト区間の直線部で行った．計測距離は（一財）土木研究センターの路面性状自動測定装置の性能確認試験 [2]を参考に 200m（0.3KP～0.5KP）とした．路面プロファイルの計測線は，第一走行レーンの車両計測時の車両の左輪と同一となる位置とした．

(2) 基準プロファイルの測定方法

測定機器は国土交通省国土地理院の作業規則の準則 [7]に準じ 3 級水準測量精度で行うため，測量機器は 2 級レベルに適合した測量機器を使用した．標尺とレベルを用いて，測定間隔 200mm で測定点における基準からの相対高さを 1mm の精度で測定した．測定したデータは測定間隔 100mm で線形補間した．**表-2** に使用した電子レベルの主要諸元を示す．

(3) 3Dlidar による路面プロファイルの計測方法

3DLidar の第一走行レーンと第二走行レーンを走行した場合の計測精度，再現性，速度依存性を検証するため直線区間 200m を対象に，路面プロファイルの計測線と同一車線（第一走行レーン）と第二走行レーンの 2 パターン，計測速度を 60km/h，80km/h，100km/h の 3 パターン，同じ計測を 5 回繰り返して，計 30 回行った．なお横断方向の計測位置は，第一走行レーンを想定した計測は車両の左輪が路面プロファイルの計測線と同一となるように，第二走行レーンを想定した計測では，路面プロファイルの計測線から右側に 3.5m 程度の距離を走行して行った．

(a)3DLidar 本体



(b)車両への搭載した計測状況

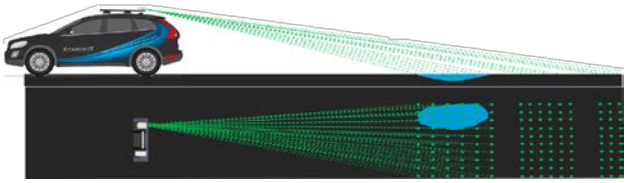


図-1 3DLidar の計測方法

表-1 3DLidar の仕様

項目	値
計測範囲	左右：7.5m 前後：2.9m ～ 6.4m（3.5m） ※3DLidar の取付け高さ 2m の場合
視野角	水平：60 度 垂直：20 度
平均分解能	左右：8 - 11mm 前後：8 - 11mm ※50～80km/h 走行の場合
高さ精度	2.5mm 以下（静止状態）
計測点数	1,120,000 点/sec 以上(28,000 点×40Hz)
レーザークラス	クラス 1（本質的に安全なレベル）
取付高さ範囲	1.8m～2.2m



図-2 苫小牧寒地試験道路

表-2 水準測量に使用した電子レベルの主要諸元

業務工程別	名称	数量	備考
水準測量	トプコン DL-503 No521025	1	2 級レベル

4. 計測精度，再現性，速度依存性の検証結果

(1) IRI の計算

IRI とは舗装路面の凹凸に関する評価指数であり，自動車の乗り心地を評価する際の世界的な統一指標である．IRI はサスペンション変位の累積値を走行延長で正規化した値であり，上下方向の変位は QC シミュレーションにより算出したものである．

10m 評価長で IRI を算出（以降，IRI_{10}）した基準プロファイル（水準測量）と 3DLidar で 60km/h の走行速度で 1 回目に計測した値の比較を**図-3** に示す．**図-4** には 60km/h で走行した 2 回目と 3 回目の IRI_{10} の比較と，参考として基準プロファイルを示す．また，**図-5** には 60km/h 1 回目と 80km/h 1 回目の IRI_{10} の比較と，参考として基準プロファイルを示す．なお，①に第一走行車線，②に第二走行車線の IRI_{10} の比較を示す．

3DLida の IRI_{10} の変化は，計測精度・再現性・速度依存性・第一走行車線・第二走行車線いづれも水準測量と同様の傾向を示している．

(2) 計測精度の検証

基準プロファイル（水準測量）を正として，3DLidar による各種計測結果の計測精度（誤差率）を**表-3** に示す．なお①に第一走行車線の，②に第二走行車線の計測精度を示す．

路面性状自動計測装置の性能確認試験 [3]を参考に誤差率（%）をεとし，水準測量の値を T，3DLidar の値を M として (1) 式で算出した．

$$\varepsilon = \frac{M - T}{T} \times 100 \qquad (1)$$

第一走行車線の 5 回計測した計測速度 60km/h による誤差率の平均は 7.7%であり，80km/h は 7.2%，100km/h は 8.6%，全体では 7.8%であった．同様に第二走行車線の計測速度 60km/h による誤差率の平均は 7.5%であり，80km/h は 6.1%，100km/h は 9.4%，全体では 7.6%であった．

路面性状自動計測装置の性能確認試験における平たん性計測の認定範囲 [3]が±30%以内の精度（誤差率）であることを鑑みると 3DLidar の路面プロファイル計測は第一走行車線・第二走行車線ともに実用上十分な精度を有しているといえる．

(3) 再現性の検証

同一箇所を計測した場合のデータの再現性を検証するため，複数回計測した結果の比較を**表-4** に示す．1 回目は 2 回目と比較した．同様に 2 回目は 3 回目，3 回目は 4 回目，5 回目は 1 回目と比較した．第一走行車線の 60km/h の誤差率の平均は 5.2%であり，80km/h は 2.0%，100km/h は 4.2%，全体では 3.8%であった．同様に第二走

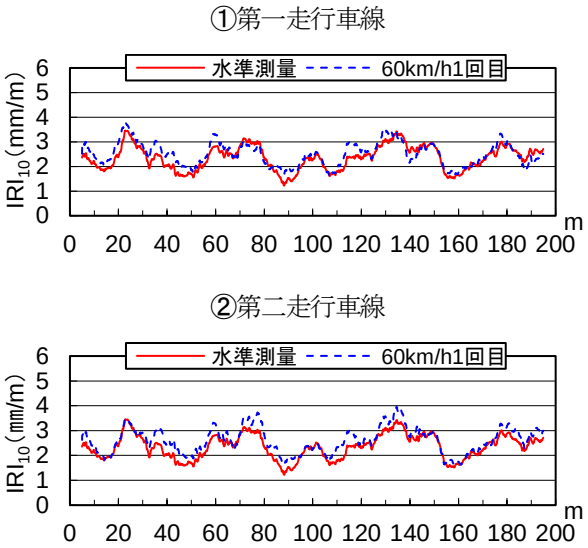


図-3 計測精度 (水準測量と 60km/h1 回目の比較)

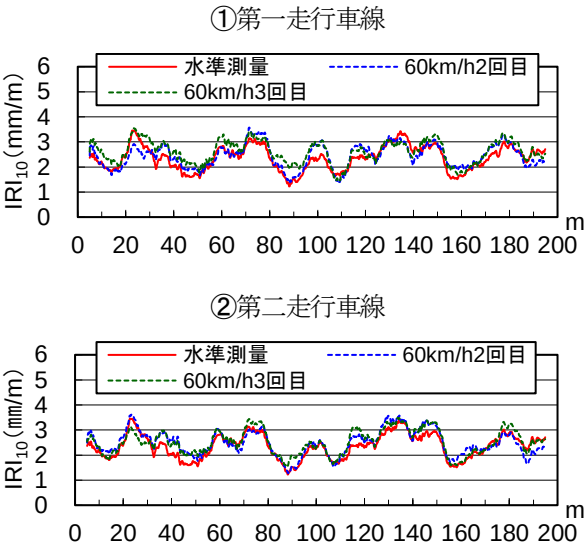


図-4 再現性 (60km/h2 回目と 3 回目の比較)

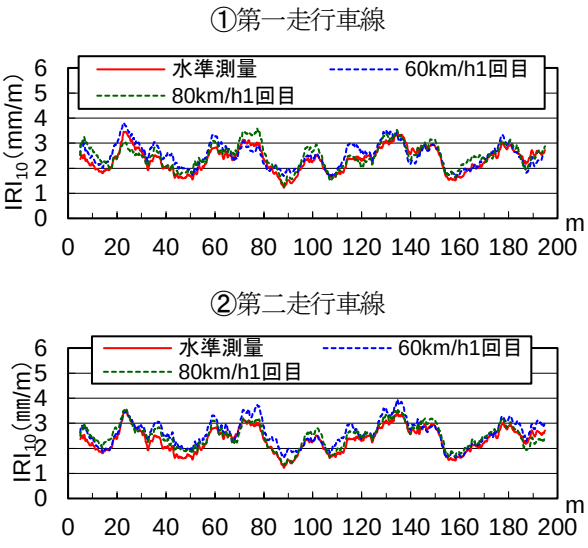


図-5 速度依存性 (60km/h1 回目と 80km/h1 回目の比較)

行車線の計測速度 60km/h による誤差率の平均は 2.7%であり，80km/h は 2.5%，100km/h は 4.4%，全体では 3.2%と第一走行車線・第二走行車線ともに高い再現性が得られた．

(4) 速度依存性の検証

速度依存性を検証するため，異なる速度で計測した結果の比較を**表-5** に示す．第一走行車線の 60km/h と 80km/h の誤差率の平均は 3.9%，80km/h と 100km/h の誤差率の平均は 3.2%，100km/h と 60km/h の誤差率の平均は 4.6%，全体では 3.9%であった．同様に第二走行車線の 60km/h と 80km/h の誤差率の平均は 2.0%，80km/h と 100km/h の誤差率の平均は 3.0%，100km/h と 60km/h の誤差率の平均は 3.3%，全体では 2.8%と第一走行車線・第二走行車線ともに計測速度による影響が小さいことが示された．

5. 3DLidar の波長の傾向

3DLidar の波長特性を明らかにするため，計測した路面プロファイルは，まず 6 次のバターワース・バンドパスフィルタにより，平たん性に必要な波長 0.4～51.2m の帯域で抽出した．次に FFT（高速フーリエ変換）のエッジ効果を低減するため，始終点に向かい振幅を減衰させるよう，ハミング窓による重み付けを行い，FFT により空間領域から空間周波数領域に変換し，**表-6** に示す波長範囲で 7 つのオクターブバンド毎に抽出し，IFFT により空間領域へ逆変換した．なお，平たん性は 0.5～50m の帯域で抽出した．最後に各バンドの路面プロファイルの振幅についてσを求め，水準測量のσで規格化した．

基準プロファイル（水準測量）と 3DLidar で 60km/h の走行速度で 1 回目に 3DLidar で計測した路面プロファイルの波長毎の比較を**図-6** に示す．なお①に第一走行車線，②に第二走行車線の計測精度を示す．**図-6** より第一走行車線・第二走行車線ともに 3DLidar の振幅は水準測量と比較して全体的にほぼ等しいことが確認できる．

3DLidar による計測結果のσを水準測量で規格化した計測速度 60km/h，80km/h，100km/h を平均した値を**表-7** に示す．なお①に第一走行車線，②に第二走行車線の計測精度を示す．3DLidar のσを水準測量のσで除した値は 1 が理想値であるが，第一走行車線の 5 回計測した 1 オクターブバンドの平均は 1.37，2 オクターブバンドの平均は 1.20，3 オクターブバンドの平均は 1.14，4 オクターブバンドの平均は 1.05，5 オクターブバンドの平均は 1.11，6 オクターブバンドの平均は 1.05，7 オクターブバンドの平均は 1.22 とそれぞれ 1 に近い値を示した．同様に第二走行車線の 5 回計測した 1 オクターブバンドの平均は 1.24，2 オクターブバンドの平均は 1.01，3 オクターブバンドの平均は 0.99，4 オクターブバンドの平均は 0.99，5

表-3 計測精度（誤差率）

①第一走行車線

	60km/h	80km/h	100km/h	平均
1 回目	6.7%	6.0%	3.3%	5.3%
2 回目	3.6%	7.2%	9.9%	6.9%
3 回目	10.8%	9.5%	11.7%	10.7%
4 回目	10.1%	6.4%	9.6%	8.7%
5 回目	7.3%	6.9%	8.4%	7.5%
平均	7.7%	7.2%	8.6%	7.8%

②第二走行車線

	60km/h	80km/h	100km/h	平均
1 回目	10.7%	6.1%	6.8%	7.9%
2 回目	5.8%	7.4%	10.6%	7.9%
3 回目	7.6%	4.9%	8.0%	6.8%
4 回目	7.7%	8.0%	14.7%	10.1%
5 回目	5.5%	4.3%	6.7%	5.5%
平均	7.5%	6.1%	9.4%	7.6%

表-4 再現性（誤差率）

①第一走行車線

	60km/h	80km/h	100km/h	平均
1 回目	3.1%	2.5%	6.4%	4.0%
2 回目	6.9%	2.3%	4.7%	4.6%
3 回目	8.9%	2.9%	3.9%	5.2%
4 回目	4.1%	0.5%	1.3%	2.0%
5 回目	3.2%	1.7%	4.8%	3.2%
平均	5.2%	2.0%	4.2%	3.8%

②第二走行車線

	60km/h	80km/h	100km/h	平均
1 回目	4.5%	1.2%	3.7%	3.1%
2 回目	1.7%	3.2%	2.4%	2.4%
3 回目	0.3%	3.0%	6.2%	3.2%
4 回目	2.1%	3.4%	6.8%	4.1%
5 回目	4.9%	1.7%	3.0%	3.2%
平均	2.7%	2.5%	4.4%	3.2%

表-5 速度依存性（誤差率）

①第一走行車線

	60×80km/h	80×100km/h	100×60km/h	平均
1 回目	1.8%	2.7%	3.2%	2.6%
2 回目	3.3%	2.7%	6.0%	4.0%
3 回目	3.1%	3.9%	7.1%	4.7%
4 回目	7.4%	3.1%	5.6%	5.4%
5 回目	3.6%	3.5%	1.2%	2.8%
平均	3.9%	3.2%	4.6%	3.9%

②第二走行車線

	60×80km/h	80×100km/h	100×60km/h	平均
1 回目	4.2%	1.4%	3.5%	3.0%
2 回目	1.4%	3.0%	4.6%	3.0%
3 回目	2.7%	3.0%	0.8%	2.2%
4 回目	0.4%	5.6%	6.4%	4.1%
5 回目	1.1%	2.2%	1.2%	1.5%
平均	2.0%	3.0%	3.3%	2.8%

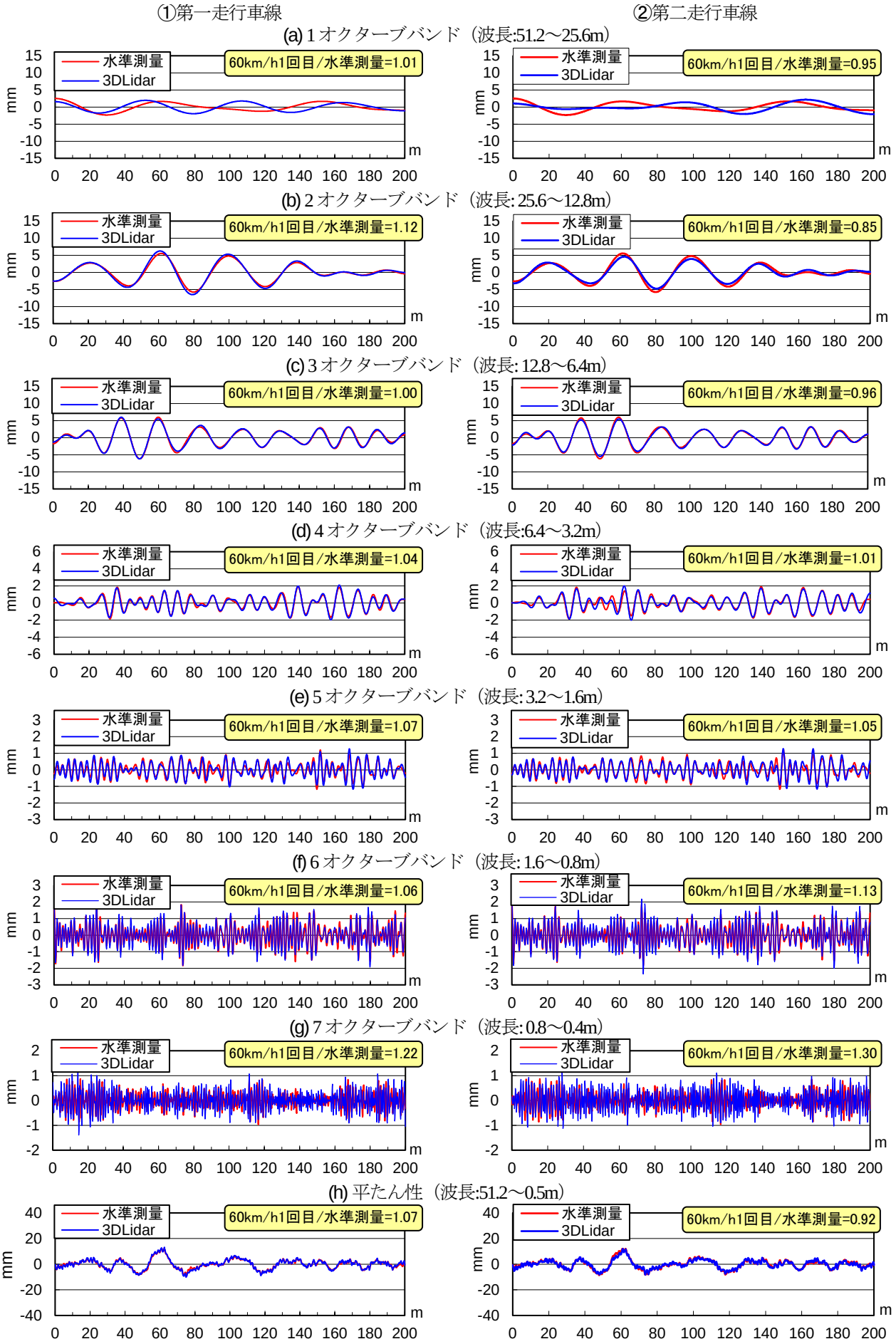


図-6　波長毎の路面プロファイル（水準測量と 60km/h1 回目の比較）

表-6 7つのオクターブバンドと平たん性の波長範囲

オクターブバンド	波長
1	51.2～25.6m
2	25.6～12.8m
3	12.8～6.4m
4	6.4～3.2m
5	3.2～1.6m
6	1.6～0.8m
7	0.8～0.4m
平たん性	50～0.5m

表-7 3DLidar の σ を水準測量で規格化した値

①第一走行車線

オクターブバンド	1	2	3	4	5	6	7	平たん性
1回目	1.45	1.17	1.07	1.04	1.09	1.03	1.23	1.10
2回目	1.38	1.16	1.11	1.07	1.08	1.05	1.22	1.15
3回目	1.62	1.35	1.23	1.01	1.12	1.07	1.21	1.27
4回目	1.25	1.13	1.11	1.04	1.14	1.06	1.25	1.10
5回目	1.13	1.18	1.20	1.10	1.10	1.03	1.20	1.18
平均	1.37	1.20	1.14	1.05	1.11	1.05	1.22	1.16

②第二走行車線

オクターブバンド	1	2	3	4	5	6	7	平たん性
1回目	1.01	1.06	0.97	1.00	1.10	1.08	1.24	1.02
2回目	1.56	1.19	1.02	1.01	1.09	1.07	1.18	1.07
3回目	1.29	0.99	0.95	0.98	1.08	1.06	1.22	0.96
4回目	1.21	0.91	1.01	0.96	1.09	1.10	1.33	0.97
5回目	1.11	0.92	0.99	1.02	1.12	1.05	1.22	0.96
平均	1.24	1.01	0.99	0.99	1.10	1.07	1.24	1.00

オクターブバンドの平均は 1.10，6 オクターブバンドの平均は 1.07，7 オクターブバンドの平均は 1.24 と第一走行車線と同様にそれぞれ 1 に近い値を示した．

また，第一走行車線の 5 回計測した平たん性の平均は 1.16，第二走行車線の平均は 1.00 と 3DLidar の σ は水準測量とほぼ等しい結果が得られた．

6. おわりに

基準プロファイルを正として，3DLidar による各種計測を行った結果，本研究で得られた成果を以下にまとめる．

- 計測精度（誤差率）の検証を行った結果，計測精度の平均では，第一走行車線は 7.8%，第二走行車線は 7.6%と実用できる高精度な値であった．
- 再現性の検証を行った結果，再現性の平均では，第一走行車線は 3.8%，第二走行車線は 3.2%と実用できる高精度な値であった．
- 速度依存性の検証を行った結果，速度依存性の平均では，第一走行車線は 3.9%，第二走行車線は 2.8%と実用できる高精度な値であった．
- 平たん性に必要な波長 0.4～51.2m の帯域で抽出し，1～7 のオクターブバンドに分割して各バンドの路面プロファイルの振幅について σ を求め，水準測量で規格化した結果，第一走行車線は 1.05～1.37，第二走行車線は 0.99～1.24 と 1 に近い値を示した．
- 平たん性の波長では，第一走行車線は 1.16，第二走行車線は 1.00 と 3DLidar の σ は水準測量の σ とほぼ等しい結果が得られた．

筆者が調べた限りでは，第一走行車線と第二走行車線を同時に水準測量と同様の路面プロファイルを計測可能な路面プロファイラについての知見はまだ報告されていない．路面のプロファイル計測は，冬期路面管理にも活用できる可能性があり，例えば，走行中の路面の積雪高さを容易に面的に計測することができれば，除雪作業や運搬排雪の効果的で効率的な計画の立案に活用が可能と考えられる．今後，冬期道路管理に活用していく予定である．

参考文献

1) 国土交通省：舗装点検要領について, 2017. https://www.road.or.jp/event/pdf/201708211.pdf（令和 5 年 6 月確認）
2) 亀山修一, 長屋弘司, 郭慶煥, 洞口克彦, 川端伸一郎：車両から撮影した動画を用いた舗装の目視点検，土木学会論文集 E1(舗装工学), 75(2), I_25-I_31,2019.
3) 倉持智明，寺田剛：路面性状自動測定装置の性能確認試験の変遷と現状，土木技術資料, 63-7, pp.60-63, 2021.
4) The Face Dipstick^{R} Profile：The Face^{R} Companies https://dipstick.com/（令和 5 年 6 月確認）
5) 大廣智則，上杉隆則：簡易ラフネス測定装置「STAMPER-FW」による路面管理手法，高速道路と自動車, 58(2), pp.37-40.
6) 路面性状計測システム「TN-Twin Tracker」：ネクスコ東日本エンジニアリングおよび東陽テクニカ https://e-nexco-engi.co.jp/pdf/tn-twintracker.pdf（令和 5 年 6 月確認）
7) Sayers, M. W. and Karamihas, S. M.: The Little Book of Profiling, - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, The University of Michigan,1998.
8) 国土交通省国土地理院：作業規則の準則, 2016. https://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/pdf/h28/H28_junsoku_honbun.pdf（令和 5 年 6 月確認）

(2023. 10. 13 受付)

VALIDATION OF ROAD PROFILE MEASUREMENT WITH 3DLIDAR

Tomonori OHIRO, Akira SAIDA and Yasuhiko ITO