

UAVレーザを用いた施工現場に対する 出来形管理への適用性検討

水野 洋平・高橋 弘・皆木 美宣・高野 正範・河村 倫明 (中日本航空株式会社 調査測量事業本部)
竹本 憲充 (一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所)

1. はじめに

昨今、国内における少子高齢化が進み、生産年齢人口が減少した結果、深刻な労働力不足が浮き彫りになっており、建設分野においても就業者数がピークの平成9年から平成27年までに185万人減(27%減)と落ち込んでいる。

このような背景を踏まえ、生産性の向上が喫緊の課題として取り上げられ、建設現場における安全性や生産性の向上に向けて、測量・設計から施工管理に至るプロセスにおいて、情報化施工を前提とした新基準と、魅力ある建設現場を目指す取り組みとしてi-Constructionが平成28年度より導入された(図1.1)。

近年、飛躍的に普及の進むマルチコプターをはじめとする無人航空機(以下、「UAV」)は、i-Constructionの推進もあり主に写真測量手法で利活用が進められていたが、平成27年3月に国土交通省より『空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土木編)(案)』¹⁾が

策定されたことにより、施工管理の分野での利活用が本格化した。

一方で空中写真測量では困難な植生下の地形データの取得を目的として、UAV搭載型のレーザスキャナの開発や利活用の検討が進められ、最近では写真測量手法と共に災害調査や施工管理の分野の利活用に注目が集まっている。また、中日本航空(株)においても、平成26年からUAVによるレーザ計測手法の開発検討を行い²⁾、翌年から本格的な運用を開始している。UAVによるレーザ計測では、植生下の地形が取得できるほか、高密度かつ高精度な3次元データが取得できる特徴を活かし、河川・砂防の分野で多くの実績を有していたが、施工管理の分野における利活用は少なかった。

本稿は、平成28年度にUAVレーザ計測手法を用いた施工現場での実証実験に参加した結果から施工現場に対する「UAVレーザ計測の適用性」について報告する。

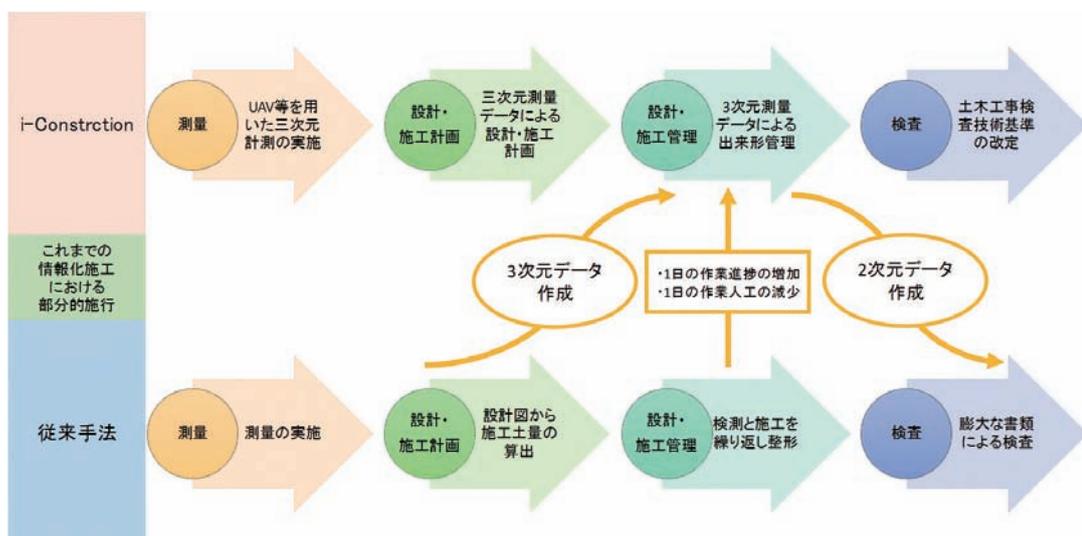


図1.1 i-constructionと従来手法の流れ



図2.1 計測システム「TOKI」

表2.1 GNSS/IMU諸元

GNSS/IMUシステム AP20 (Trimble製)		
緒元	AP20性能値	公共測量 施業規定
水平位置精度	0.05m	0.3m
高さ位置精度	0.01m	0.3m
速度	0.01m/s	—
ローリング	0.015°	0.015°
ピッチング	0.015°	0.015°
ヘディング	0.035°	0.035°
データ取得間隔	0.005秒	0.005秒

2. 実証実験内容

2.1 実証実験に使用したシステム

UAVレーザ計測システムは、産業用UAV・レーザスキャナ・GNSS/IMUから構成される『TOKI』を使用した(図2.1)。この計測システムは、『UAVレーザ測量システム「TOKI」』として、NETISに新技術として登録されている(登録番号:CB-170020-A)。

TOKIは、地上測量では困難な樹木等の植生に覆われた急傾斜地などで、詳細設計に対応可能な地形図を作成することのできるシステムである。産業用UAVはペイロード(搭載可能重量)が30kg以上あるため、計測システム10kg、バッテリー10kgを搭載しても重量に余裕があり、安定した飛行が実現できる機体である。

レーザスキャナのVUX-1は、3.6kgと非常に軽量であるが、波形記録計測や、レーザ発射回数(最大50万発/秒)は、有人機の航空レーザ計測システムと同等の性能を有している。

位置姿勢情報を計測するGNSS/IMUはAP20を採用しているが、スキャナ同様に軽量化高精

度を実現しており、公共測量作業規程の各精度基準を満たしている機材でもある(表2.1)。

2.2 実証実験箇所

本実証実験では、施工現場におけるUAVレーザ計測の出来形管理への適用性の検討を目的として、条件の異なる『平坦地(A地区)』、『緩斜面(B地区)』、『急斜面(C地区)』の3か所でデータの取得・解析及び点検を実施し、トータルステーションで計測した実測値とレーザデータから取得した標高値の較差を検証した(図2.2)。

2.3 UAVレーザ計測

① 現地踏査と飛行コース計画

UAVレーザ計測では、現地踏査結果及びUAVの飛行可能時間(1フライト10分)を考慮した上で、効率的な飛行コースを計画する必要がある。

現地踏査では、離発着場の選定や計測時に注意しなければならない送電線や工事注意箇所の確認のほか、オペレータ以外の現地監視

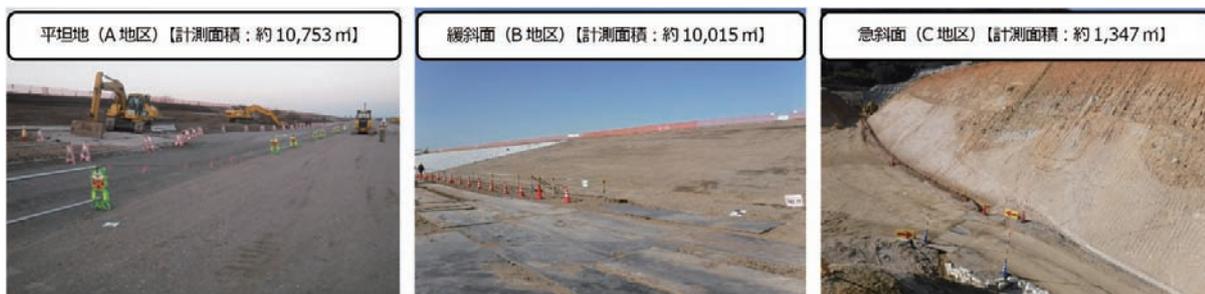


図2.2 各実証実験箇所

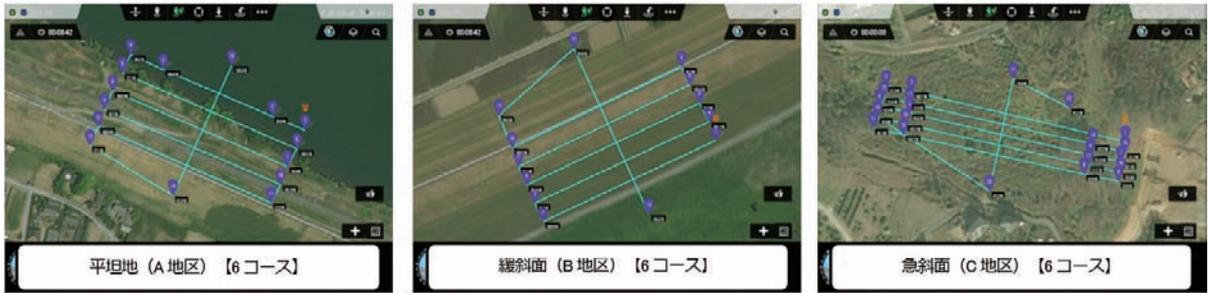


図2.3 各地区の計画計測コース図

員の配置場所を調査し、効率的かつ安全な計測コース設定に必要な情報収集を現地にて実施した。

今回の現地踏査結果では、3地区ともに6コースとなり(図2.3)、各コース間の重複率は採用するスワスの50%以上とした。50%以上に設定することにより、計測範囲内において複数コースのレーザが照射され高密度計測が実現でき、データの接合点検が可能となる。

また、衛星の配置状況が、GNSS/IMUの基線解析結果の高精度化に影響を与えるため、良好な衛星条件で計測する必要があり、PDOP及び衛星数の配置状況を事前に確認し、計測時間帯を決定した。

② 調整用基準点測量

航空レーザ測量と同様、レーザ三次元計測データの標高値を点検、調整を行うために調整用基準点を設置した。有人機による航空レーザ測量では通常、平坦でアスファルトやコンクリート等で被覆されている箇所を選定するが、本計測では高精度化を考慮し、有人機の航空レー

ザでは通常設置しない対空標識を設置し、調整用基準点とした。調整用基準点の設置にあたり、対空標識の大きさは20cm四方として水平設置に注意した(図2.4)ほか、計測範囲を網羅するように各地区で4点設置した。調整用基準点の測定は、水平座標値はネットワーク型RTK法によるGNSS測位とし、標高座標値は施工現場の水準点より水準測量により実施した。

③ 計測飛行

設定した飛行計画コースをもとに計測飛行を行った。計測時の諸元は図2.5のとおりである。

2.4 UAVレーザ解析

取得したレーザデータの解析は、図2.6に示す手順に従い三次元計測データ、オリジナルデータ及びグラウンドデータを作成し合わせて、品質の点検を行った。

点検項目は、航空レーザ測量と同様に【計測漏れ点検】【欠測率点検】【コース間点検】【標高較差点検】を実施した。

航空レーザ測量では通常、電子基準点を基



図2.4 設置した対空標識



図2.5 計測風景と計測諸元

準局（固定局）としたGNSS/IMU解析を行うため、最新の公共測量座標値と整合を図るため、本計測においても固定局は電子基準点を採用した。

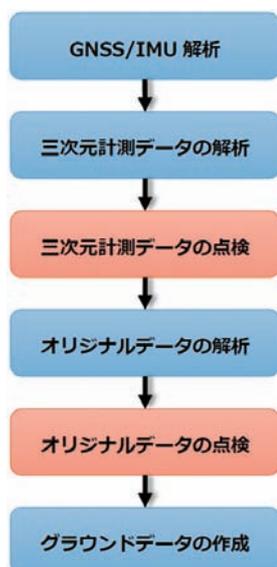


図2.6 レーザデータ解析手順



図2.7 既知点観測状況

一方で、施工現場においては現地にある既存の基準点を使用する事が多く、公共測量座標値との不整合に注意が必要である。不整合状況を把握するため、既存基準点の座標を観測（図2.7）した結果、表2.2のように最大50cm程度の水平座標値の不整合があった。このように施工現場では、既存構造物との整合性が重要なため、既存基準点の使用が大前提となるが、最新の測地系座標と合致しない可能性があるため、注意が必要である。

なお、本計測においては、水平座標値の較差を基に、UAVレーザデータの水平座標値の補正を行い、既存座標値に整合させた。

2.5 データ取得状況

各地区において、高密度なレーザデータが取得されていることがわかる（図2.8）。植生がなく比較的レーザデータの取得しやすい状況下であるが、図中赤枠内のように建設機械の走行したキャタピラの跡やブロックの形状といった微小な地形変化や地物をとらえられている。C地区では、A地区のような微地形だけでなく、図中青枠内のように流水侵食による地形変化や、斜面に留まっている礫等の形状や大きさもレーザデータより確認することができた。

また、B地区のように微地形や特徴がみられない場所では、データの重複箇所較差（コー

表2.2 座標値較差比較（既知点と観測値）

（単位：mm）

点名	既知座標値			観測値			観測方法	較差			地区
	X	Y	標高	X	Y	標高		X	Y	標高	
K1	20990.763	-33891.409	24.936	20990.666	-33890.916	24.118	VRS-RTK法	-0.097	0.493	-0.818	A地区
K2	21907.614	-26527.860	20.410	21907.599	-26527.841	19.579	VRS-RTK法	-0.015	0.019	-0.831	B地区
SAB-1	-177433.221	90518.830	33.415	-177433.233	90518.842	33.429	静止観測	-0.012	0.012	0.014	C地区
SAB-1	-177433.221	90518.830	33.415	-177433.235	90518.842	33.445	VRS-RTK法	-0.014	0.012	0.030	C地区
SAB-2	-177419.714	90418.140	42.783	-177419.718	90418.149	42.816	VRS-RTK法	-0.004	0.009	0.033	C地区
SAB-3	-177418.472	90390.949	41.062	-177418.478	90390.954	41.089	VRS-RTK法	-0.006	0.005	0.027	C地区
SAB-5	-177356.187	90402.568	54.900	-177356.199	90402.580	54.927	VRS-RTK法	-0.012	0.012	0.027	C地区
AKB-6	-177398.218	90518.914	41.459	-177398.226	90518.931	41.489	VRS-RTK法	-0.008	0.017	0.030	C地区
AKB-7	-177389.943	90498.216	45.622	-177389.953	90498.233	45.652	VRS-RTK法	-0.010	0.017	0.030	C地区
AKB-8	-177384.045	90472.556	48.126	-177384.215	90472.582	48.150	VRS-RTK法	-0.170	0.026	0.024	C地区

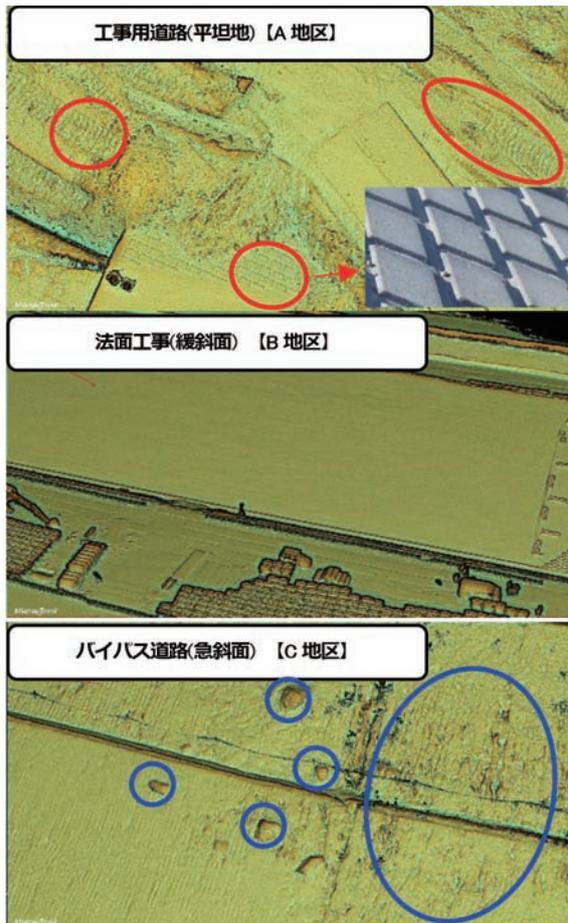


図2.8 データの取得状況

（空間段差）が見えやすいが、今回のデータでは、較差が見受けられず均質に高精度のデータが取得されていることがわかる。

2.6 UAVレーザデータの点検及び補正

① 計測漏れ点検

計測データから、重複コース数に応じて色分けされた計測漏れ点検図（図2.9）を作成し、十分なラップが得られていることや、計測範囲

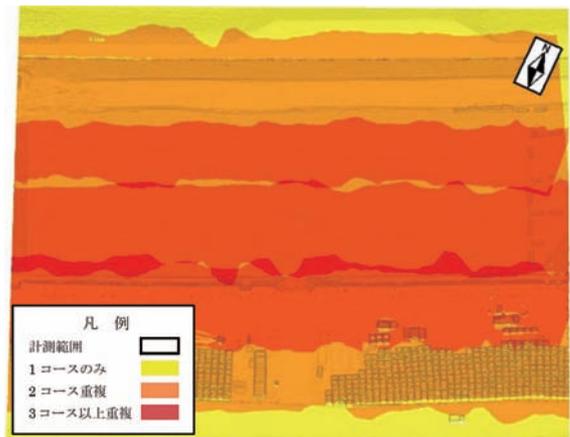


図2.9 B地区の計測漏れ点検図

内に漏れがないことを確認した。

② 欠測率点検

欠測率の点検では、100点/㎡を満たすことを前提として、これを満たさないメッシュ数を欠測としてカウントした。その結果、すべての地区において欠測率は0%となった。

なお、各地区のレーザ点群密度を集計した結果、表2.3の結果が得られ、平均1000点/㎡以上の図郭も多く見受けられた。本計測範囲が狭小であり、複数のコースが重複しているための結果でもあるが、高密度計測が実現できている。

③ コース間点検

隣接するコースにおいて、同一地点の標高較差を点検した（表2.4）。点検結果は、以下のとおり全てのコース間点検結果は0.03m以内となり、公共測量作業規程におけるコース間較差の基準値“0.30m”と比較しても、高精度な結果が得られた。

表2.3 各地区における点密度と欠測率

地区名	図郭名	面積 (㎡)	総点数 (点)	密度 (点/㎡)	点間隔 (m)	欠測率 (%)
A地区	09JD2363	6,937	8,385,399	1,208.793	0.029	0.000
	09JD2373	3,083	3,279,218	1,063.645	0.031	0.000
B地区	09JD2194	1,854	2,275,403	1,227.294	0.029	0.000
	09JD2195	5,048	5,955,224	1,179.719	0.029	0.000
	09JD3104	669	459,602	686.999	0.038	0.000
	09JD3105	3,183	3,248,185	1,020.479	0.031	0.000
C地区	03PG9216	1,349	4,074,559	3,020.429	0.018	0.000

表2.4 コース間点検結果

地区名	点検箇所 (箇所)	最大値 (m)	最小値 (m)	平均値 (m)	標準偏差 (m)
A地区	8	0.01	-0.01	0.001	0.008
B地区	8	0.00	-0.03	-0.009	0.016
C地区	8	0.01	-0.01	0.001	0.007

④ 標高較差点検

標高較差点検では、現地で計測した調整用基準点(各4点)との較差を算出した(表2.5)。その結果、各地点の較差平均がA地区(-0.04m)、B地区(-0.03m)、C地区(-0.11m)となった。航空レーザ測量における標高較差の基準値“0.25m”以内であり、絶対値標高としても高精度な結果が得られたが、本計測では、地区全体の傾向が同一であるほか、高精度化を

目的としているため全域を較差平均で標高オフセットを行った。標高オフセット後の精度は、全ての区域で標準偏差が1cm以内の結果が得られた。

3. 精度検証結果

3.1 精度検証の方法

施工現場での適用性を検証するため、施工技術総合研究所にてトータルステーション(以下、「TS」という)による実測値を計測した(図3.1)。各地区における計測点数は、「A地区:125点」「B地区:450点」「C地区:176点」である。

これらTSによる実測値と実測点近傍のUAVレーザ計測データを抽出し、標高値の較差による検証とした。

表2.5 標高較差点検結果一覧

(単位:m)

地区名	点名	実測値標高(m)	レーザデータ標高(m)	調整値(m)	調整後(m)	調整後較差(m)	標準偏差(m)
A地区	G1	31.470	31.500	-0.040	31.460	-0.010	0.005
	G2	31.450	31.480		31.440	-0.010	
	G3	24.900	24.940		24.900	0.000	
	G4	24.880	24.920		24.880	0.000	
B地区	S1	28.480	28.510	-0.030	28.480	0.000	0.004
	S2	28.430	28.460		28.430	0.000	
	S3	20.300	20.330		20.300	0.000	
	S4	20.410	20.450		20.420	0.010	
C地区	H1	29.420	29.530	-0.110	29.420	0.000	0.007
	H2	34.040	34.140		34.030	-0.010	
	H3	45.880	46.000		45.890	0.010	
	H4	44.130	44.240		44.130	0.000	

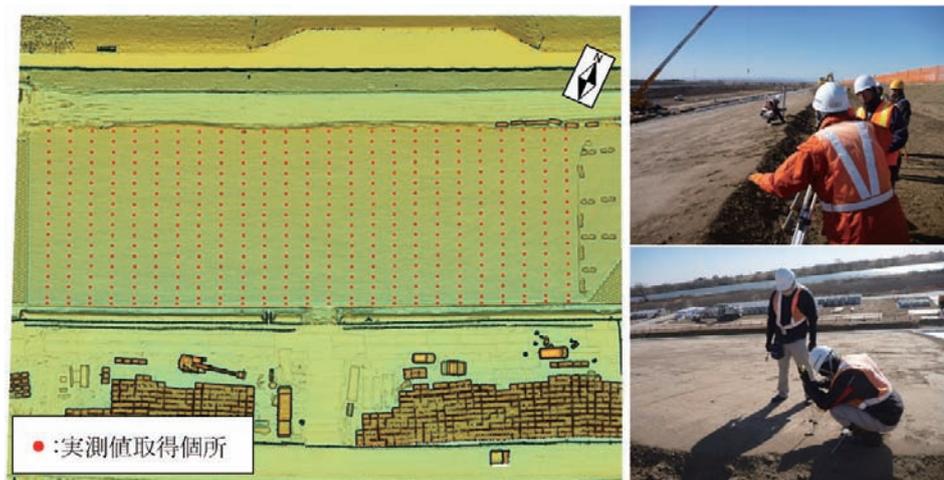


図3.1 B地区での実測値取得箇所と取得風景

表3.1 各地区における標高較差の一覧

標高較差のデータ区間 (mm)	-50 ~ -45	-45 ~ -40	-40 ~ -35	-35 ~ -30	-30 ~ -25	-25 ~ -20	-20 ~ -15	-15 ~ -10	-10 ~ -5	-5 ~ 0	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45	45 ~ 50
A地区	0	0	0	0	0	0	0	1	6	47	36	19	9	5	1	1	0	0	0	0
B地区	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	106	216	94	23	0	1	1	0	0	0
C地区	2	1	4	3	5	12	18	7	15	21	23	37	14	8	4	2	0	0	0	0

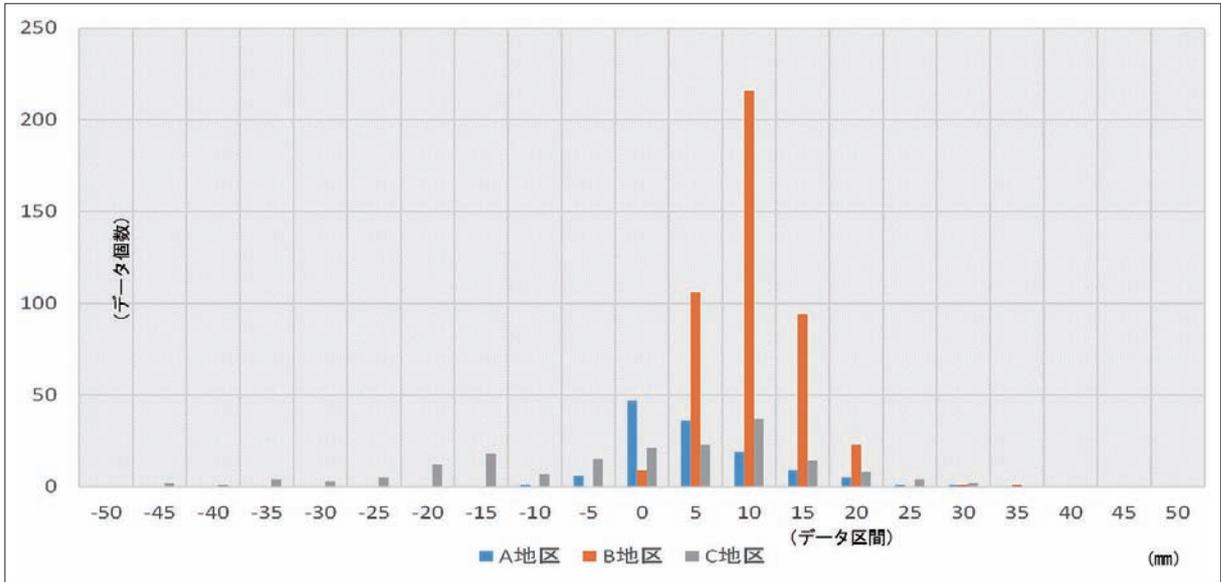


図3.2 各地区における較差分布

3.2 精度検証結果

標高検証結果から、各地区の標高較差の分布を表3.1、図3.2に示し、各地区別の特徴を以下に示す。

① A地区 (データ個数：125個)

A地区は、平坦地の施工箇所である。標高較差をみると-15～30mm内であり、概ね-10～20mm以内に較差が分布しており、ばらつきは少ない。最頻値は-5～0mm区間(47個)であり、-5～10mm区間において81.6%の較差が集中している。

② B地区 (データ個数：450個)

B地区は、緩斜面の施工箇所である。標高較差をみると-5～35mm内に分布するが、概ね-5～20mm以内に較差が集中しており、ばらつきは少ない。最頻値は5～10mm(216個)であり、0～15mm区間において92.4%の較差が集中しているが、A地区と比較すると分布の中央値が若干プラス方向にある。

③ C地区 (データ個数：176個)

C地区は、急斜面の施工箇所である。標高較差をみると-50～30mm内に分布するが、他地区と比較するとばらつきは若干大きいものの、概ね-25～20mm以内に較差が分布している。最頻値は5～10mm区間(37個)である。また、標準偏差(約±15mm)の範囲には約71%(125個)が存在しているが、ほかの地区と比較して較差の幅が広い(-50mm～30mm)結果であった。

地区共通の傾向としては、標高較差がプラス域に多く分布しており、本実証実験ではUAVレーザデータの標高値が実測値と比べ若干ではあるが高い傾向となった。

3.3 考察

較差は絶対値で50mm以内であるほか、概ね-25～20mm以内に96.7%の較差が分布していることから、均質的で高精度なデータであるといえる。また、全体的にUAVレーザデータの標

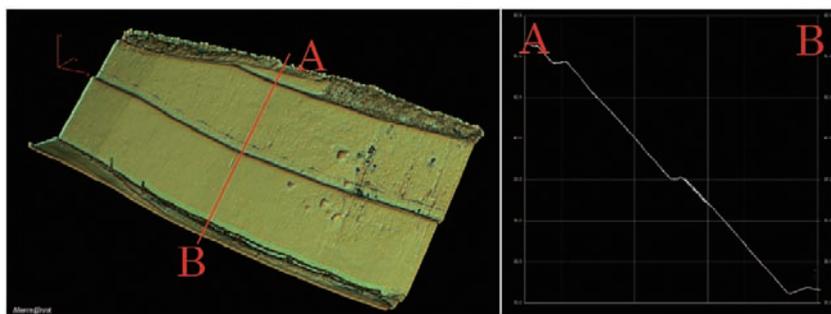


図3.3 C地区の鳥観図と断面

表4.1 各地区における較差統計

z 差 (mm)			
	A地区	B地区	C地区
平均	2.78	7.30	-3.01
標準偏差 (σ)	6.43	4.22	15.30
3σ	19.28	12.65	45.89
最小	-12.00	-3.90	-49.00
最大	28.00	31.10	27.00
データの個数	125.00	450.00	176.00

高値が高い結果となったが、精度検証がTSで実施しているため、mm精度で検証するためには水準測量の併用等も検討しなければならない。

今回の実証実験において、C地区において他の2地区と比較すると若干ばらつきが大きい傾向にあった。これは、C地区の地形に起因するものと考えられる(図3.3)。C地区は、地形勾配が1:1と急峻な地形であるため、わずかな水平誤差が標高精度の影響したものと考えられる。そのため、水平位置精度が標高較差に与える影響が大きいと考えられることから、様々な地形条件において水平精度の高精度化を今後検討していく必要がある。

4. まとめ

施工現場における適応性を検討した場合、「土木工事施工管理基準(案)」では、標高較差の基準値は、 ± 50 mmかつ絶対値において99%値が精度を担保している必要があり、平均値 $\pm 3\sigma$ に値が入る確率は約99.7%である。そのため今回の実証実験では【平均値 $\pm 3\sigma = \pm 50$ mm以内】として値の評価を実施することにより、

「土木工事施工管理基準(案)」の精度基準を満足できる成果であると考えた。その結果、すべての地区において基準値をクリアできる値であることが分かった(表4.1)。以上の事から、UAVレーザ計測は、施工現場で要求される精度を満たしており、出来形管理への適用が可能との、結論に至った。

5. 今後の課題

これらの検証結果を踏まえ、国土交通省より「無人航空機搭載型レーザスキャナを用いた出来形管理要領(土木編)(案)」が平成29年3月に策定された。今後、UAVによるレーザ計測が施工現場において積極的に活用されることが期待できる。但し、以下の課題も残る。

① 測地系座標の整合点検

表2.2で示したように、施工で使用している基準点座標値と、世界測地系座標値に不整合が発生する可能性がある。対応策として固定局を設置する際に、施工で使用している基準点にGNSS測量機を設置し、施工座標値に整合させる事も一案として挙げられるが、機材の調達と若干のコストが掛かってしまうほか、座標軸にねじれがあった場合、本対応策では解消が困難である。よって当面は、施工で使用している基準点座標値の点検を実施し、不整合が発生した場合は、現場座標と整合させる作業が必要である。

② システムの汎用性と利活用

本計測で使用したUAVは、大型であるため

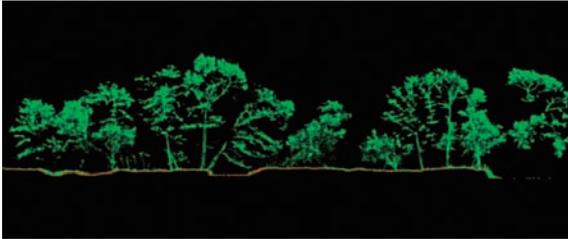


図5.1 樹木下の地形データ取得状況

熟練した操縦オペレータが必要なほか、データ取得、解析、点検にはレーザデータの解析スキルが必要となる。施工現場で広く活用されるためには、システムの小型化、データ解析の簡素化等を行い、普及がしやすいシステムへと改良する必要があると考える。

なお、レーザ計測の大きな特徴として、複数の反射波から植生下の地形データを取得できるという大きなメリットがある(図5.1)³⁾。このメリットを活用するため、施工現場における出来形管理だけでなく、起工測量等への利活用も期待したい。

③ 公共測量への適用

本要領は、施工現場の出来形管理への適用であり、公共測量で適用する事は出来ない。今後の利活用として、公共測量にも拡大していくべきと考えるが、公共測量を実施する場合は、公共測量作業規程の第17条による対応が当面必要である。

6. 謝辞

最後に本実証実験のデータの使用にあたり、国土交通省関東地方整備局の協力を頂いた。この場を借りて、深く感謝致します。

■参考文献

- 1) 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）平成28年3月策定
- 2) 都竹正志、瀬口栄作、長井伸正：UAVによる高精細レーザ計測の試み－Riegl LMS VUX-1の試験報告－、（一社）日本写真測量学会、平成27年度学術講演会論文集、2015.
- 3) 高橋弘、高野正範、宮山智樹、若松孝平、瀬口栄作：超小型モバイルレーザ計測装置のUAVへの適用、公財）日本測量調査技術協会、先端測量技術107号、pp102～114、2015

■執筆者

水野 洋平（みずの ようへい）

中日本航空株式会社



（共著者）

高橋 弘（たかはし ひろむ）

中日本航空株式会社

皆木 美宣（みなぎ よしのり）

中日本航空株式会社

高野 正範（たかの まさのり）

中日本航空株式会社

河村 倫明（かわむら ともあき）

中日本航空株式会社

竹本 憲充（たけもと のりみつ）

一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所