

24. 各種UAV測量機器による出来形の測量精度の比較検証について

○株式会社熊谷組 神崎 恵三

1. はじめに

UAVを用いた測量は、UAVやデジタルカメラの性能向上、SfMソフトウェアの普及により、現場での土工管理ツールとして摘要事例が増加している。現在、多くの現場で実績が増えつつある事例は、比較的低価格のUAVを使用し、写真測量から概算土量を算出して出来高管理、進捗管理を行うものである。ただ、実際の測量精度がどの程度のものかという疑問が残っているのが現状であった。今回、下記の5種類のUAV測量機器(3基は無人航空機搭載型レーザスキャナ,2基は空中写真測量(無人航空機))を使用して各種ケースで飛行させ、出来形の測量精度の比較検証を実施することとした(図-1)。

2. 実証実験目的

本実証実験の目的を以下に示す。

- I. 5種類のUAVをできるだけ均等な条件で飛行させ、任意断面における垂直較差を比較検証する。
- II. 同じUAVを異なる飛行高さで飛行させ、法面の法肩と法尻位置で計測を行い、対地高度の違いによる解像度の影響を比較検証する。
- III. 5種類のUAVを同条件で飛行させ、任意範囲における土量を算出、比較検証する。

図-1 各種UAV使用機器一覧

無人航空機搭載型レーザスキャナ			空中写真測量(無人航空機)	
①Ranger Series (RIGEL VUX-1)	②Ranger Series (RIGEL miniVUX-1)	③Alpha Series (Velodyne VLP-16)	④MATRICE600pro (Sony α 7R)	⑤Phantom4Pro (DJI製)
最大測定距離920m	最大測定距離250m	最大測定距離100m	カメラ有効画素数 約3640万画素	カメラ有効画素数 約2000万画素
最短距離 3m	最短距離 3m	最短距離 1m	シャッタースピード 1/8000~30秒	シャッタースピード 1/8000~8秒
測定精度 10mm	測定精度 15mm	測定精度 30mm	ISO感度 AUTO(100-6400)	ISO感度 AUTO(100-3200)
有効測定レート 500,000測定/秒	有効測定レート 100,000測定/秒	有効測定レート 300,000測定/秒	センサーサイズ 36mm×24mm	センサーサイズ 13.2mm×8.8mm
 	 	 	 	

3. 実証実験場所

実証実験は、処分場現場の法面 2 箇所を使用し
て実施した。法面 1 に対して断面 1 を、法面 2
に対して断面 2 を任意に設定した。法面の 4 隅に
標定点を設置し、検証に用いるデータは、この標定点
に整合させた (図-2)。

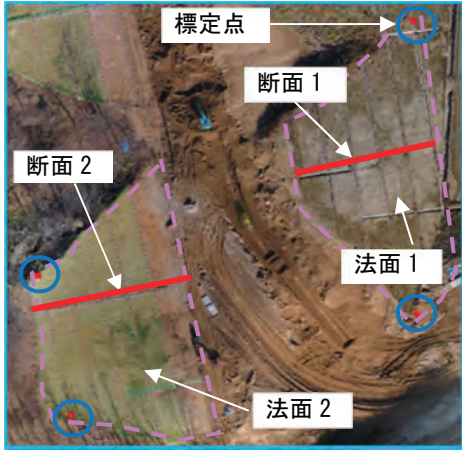


図-2 法面と断面位置図

4. 飛行パターンと比較ケース

4.1 飛行パターン

図-2 の法面 1, 2 に対して各 UAV 機器を表-1 の
飛行高度で飛行を実施した。高度は法面からの高
さで、法面に平行に飛行し、飛行ルートはオー
verラップ 90%, サイドラップ 60% とした。実証実験
は、断面 1, 2 に対し、別途 TS で測量した法面形
状を基準法面とし、それぞれの UAV 機器で取得
された LP 点群と SfM 点群から作成された断面
を法面上に重ね合わせ、比較検証した。

表-1 法面における各機材の飛行高度

使用機器	法面1・2 飛行高度	備考
①VUX-1	30m 50m 100m	計測点密度10cmに1点以下
②miniVUX-1	30m 50m 100m	"
③VLP-16	30m 50m 100m	"
④α7R	20m 30m 60m	地所解像度:1cm以下
⑤Phantom4Pro	20m 30m 60m	地所解像度:約0.5cm~1.6cm

4.2 比較ケース

比較検証ケースは、以下のとおりである。

I. 垂直較差による比較

法面 1 の断面 1, 法面 2 の断面 2 において、各 U
AV 機器①~⑤を飛行高度 30m で飛行した結果
を比較した (図-3)。

II. 対地高度の違いによる比較

断面 1, 2 において、各 UAV 機器①~⑤毎を飛
行高度 3 ケース (30m, 50m, 100m, or 20m, 30m,
60m) で飛行して結果を比較した (図-4)。

III. 土量計算結果による比較

土量の比較は、法面 1 付近の任意エリアを設定
し、各 UAV 機器①~⑤の飛行高度 30m のケー
スで比較した。

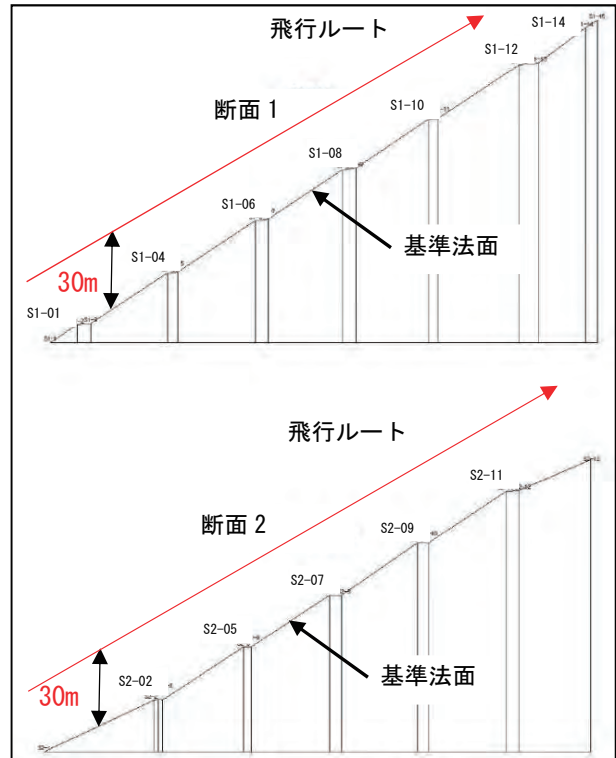


図-3 比較ケース I 飛行断面図

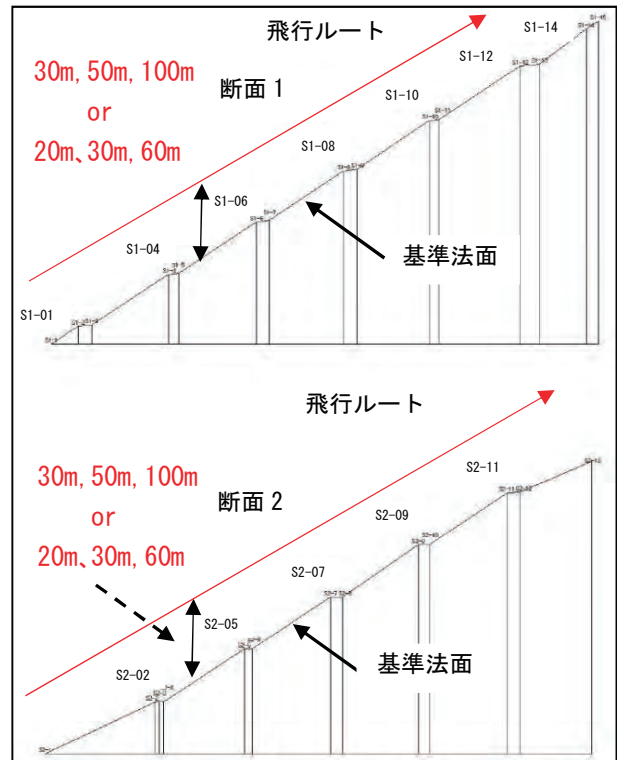


図-4 比較ケース II 飛行断面図

5. 測量精度の比較検証結果について

5.1 実測断面との垂直較差の比較（断面1）

T Sで測量した実測断面（基準法面）と、それぞれの手法で取得されたL P点群とS f M点群から作成された断面を比較検証し、断面形状の垂直較差を比較した。

L P点群はG N S Sローバーで計測した調整用基準点成果に整合させたデータを使用し、画像データについても、G C Pを使用して現地に整合させたS f M点群を使用した。

比較検証結果として、L P点群では、①V U X - 1、②m i n i V U X - 1、③V L P - 1 6となるにつれて、断面形状のばらつきが目立つ傾向にあるが、どの手法においても断面形状を捉えていることがわかる（図-5～図-7、図-10）。

S f M点群では、どちらの手法でも実測断面の形状をよく捉えていることが分かる（図-8～図-10）。

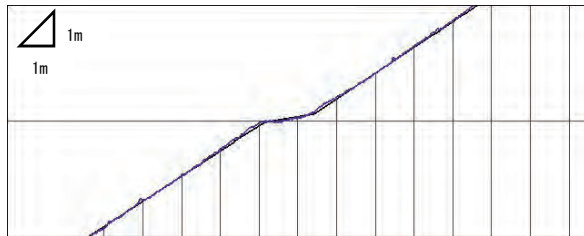


図-5 ①VUX-1対地 30m断面抜粋

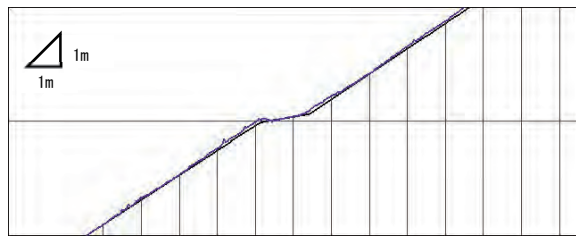


図-6 ②miniVUX-1対地 30m断面抜粋

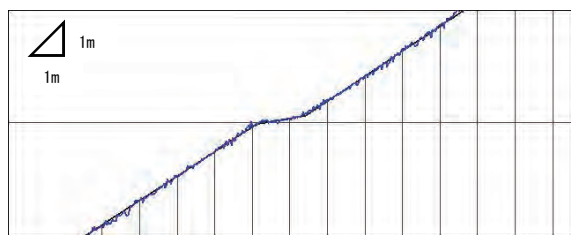


図-7 ③VLP-16対地 30m断面抜粋

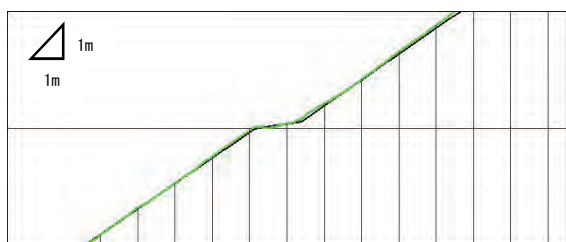


図-8 ④alpha 7R対地 30m断面抜粋

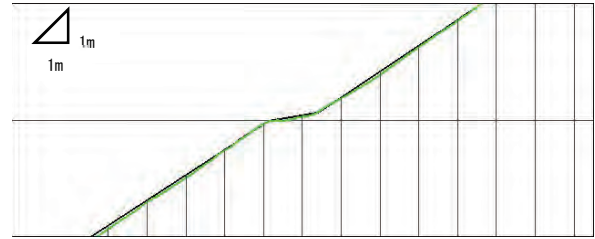


図-9 ⑤Phantom4Pro 対地 30m断面抜粋

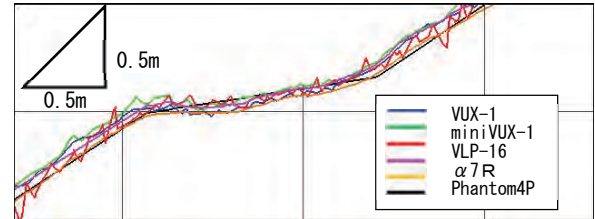


図-10 断面1の各手法統合断面

実測点とL P点群及びS f M点群から取得した近似点の標高較差を比較した。結果、図-11及び表-2に示す結果となった。比較した近似点のほとんどは実測点より高い傾向にあり、m i n i V U X - 1は平均値が0.083mと他と比べ高い値であるが、どの手法においても標準偏差が0.05m以内と高精度であることがわかった（図-11、表-2）。

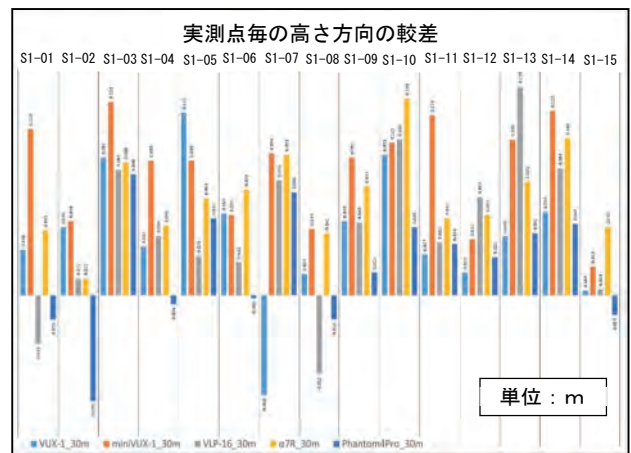


図-11 各実測点との標高差比較

表-2 各実測点の平均値と標準偏差

	単位(m)				
	VUX-1_30m	miniVUX-1_30m	VLP-16_30m	alpha 7R_30m	Phantom4Pro_30m
S1-01	0.030	0.110	-0.032	0.043	-0.016
S1-02	0.045	0.049	0.011	0.011	-0.070
S1-03	0.091	0.128	0.083	0.088	0.080
S1-04	0.032	0.089	0.039	0.046	-0.006
S1-05	0.121	0.089	0.026	0.064	0.051
S1-06	0.054	0.053	0.022	0.070	-0.002
S1-07	-0.066	0.094	0.076	0.093	0.068
S1-08	0.014	0.044	-0.052	0.041	-0.016
S1-09	0.049	0.091	0.048	0.072	0.015
S1-10	0.093	0.101	0.103	0.130	0.045
S1-11	0.027	0.119	0.035	0.051	0.034
S1-12	0.015	0.037	0.065	0.053	0.025
S1-13	0.039	0.103	0.138	0.075	0.041
S1-14	0.055	0.122	0.084	0.104	0.047
S1-15	0.003	0.019	0.004	0.045	-0.013
平均	0.040	0.083	0.043	0.066	0.019
標準偏差	0.044	0.034	0.050	0.030	0.039

5.2 対地高度の違いによる比較（断面2）

各UAV機器①～⑤を飛行高度3ケース（①～③は30m, 50m, 100m, ④と⑤は20m, 30m, 60m）で飛行して結果を比較した。

LP点群では、VUX-1の断面は、高度による影響が見られないのに対して、その他のLP点群は、高度ごとに形状が異なることがわかる。また、側溝の形状についても再現性が異なる（図-12～図-14）。

SfM点群では、形状の違いは見られず、0.05m程度の高さ方向の違いが見られるが、低高度のものは、側溝の形状が再現までできており、高高度になるにつれて側溝の再現性が難しくなり、丸みを帯びた実際の地形とは異なる結果となっている（図-15, 図-16）。

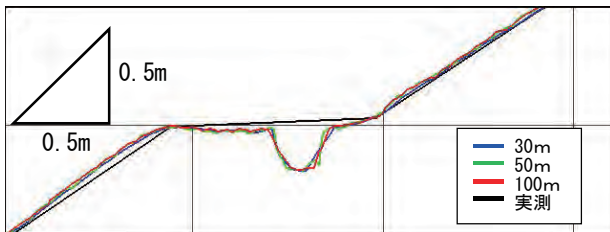


図-12 ①VUX-1対地高度別比較断面抜粋

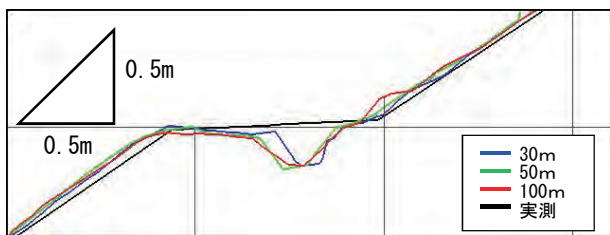


図-13 ②miniVUX-1対地高度別比較断面抜粋

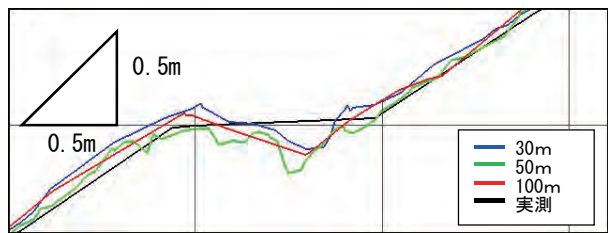


図-14 ③VLP-16対地高度別比較断面抜粋

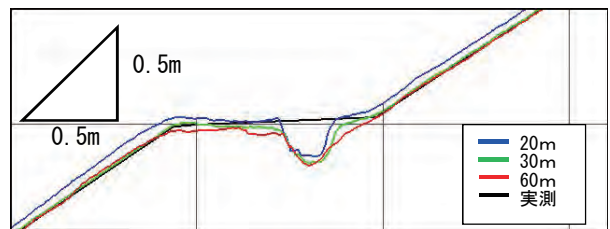


図-15 ④alpha7R対地高度別比較断面抜粋

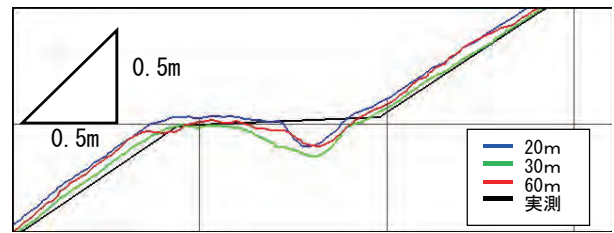


図-16 ⑤Phantom4pro 対地高度別比較断面抜粋

5.3 土量算出結果の比較

法面1の断面1付近にてエリアを設定し、土量計算の算出結果を比較した（図-17）。

算出方法は、現地で取得した断面1の実測点の上端と下端を結んだ一定勾配の斜面から仮想の法面を作成し（図-18, 図-19）、作成した仮想の法面と各手法の対地30m高度のLP点群, SfM点群から作成した0.1m格子間隔のグリッドデータの差分から土量を算出した。5.1の結果から、VUX-1の値が実測断面との較差が少ない事がわかったため、VUX-1で算出した土量の値を基準として土量の比較を実施した。



図-17 土量算出結果比較箇所

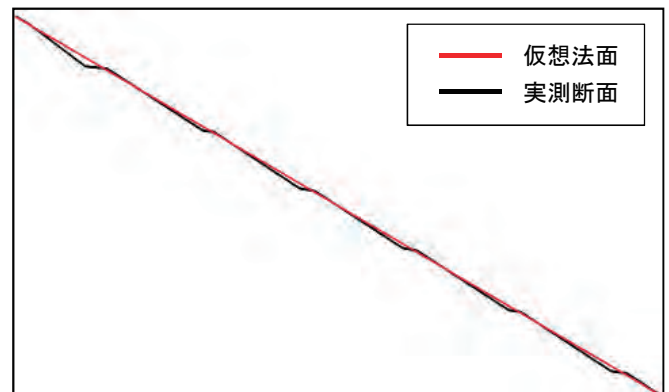


図-18 作成した一定勾配法面

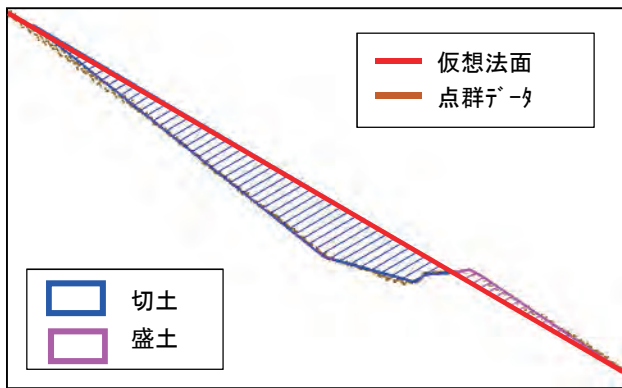


図-19 土量算出結果イメージ図

土量算出結果を表-3 にまとめる。結果より、①VUX-1の盛土と切土の体積差分が -324.8m^3 に対して、④ $\alpha 7R$ が 313.3m^3 、⑤Phantom4Proは -402.4m^3 で、VUX-1との較差は $\alpha 7R$ では約 11m^3 、Phantom4Proでは約 77m^3 となった。これは、SfM点群のばらつきが少ないことや、 $\alpha 7R$ のように、側溝の形状を再現できていないことが大きな影響を与えていると考えられ、SfM点群による土量算出においてもLP点群と同様の土量算出が可能であることがわかった。

表-3 土量算出結果一覧

	①VUX-1	②miniVUX-1	③VLP-16	④ $\alpha 7R$	⑤Phantom4Pro
比較範囲面積 (m ²)	1970.6	1970.6	1970.6	1970.6	1970.6
盛土体積 (m ³)	93.1	117.8	62.9	92.0	63.8
切土体積 (m ³)	-417.9	-362.0	-505.5	-405.3	-466.2
体積差分 (m ³)	-324.8	-244.2	-442.6	-313.3	-402.4
VUX-1との体積の差 (m ³)	—	-80.6	117.8	-11.5	77.6

5.4 実証実験まとめ

(1) 垂直較差の比較

5.1で検証した近似点との標高較差の比較検証(法面1,法面2)から最大較差,最小較差,平均値,標準偏差をまとめた結果を表-4に示す。

表-4 垂直方向較差集計(対地30m)

単位(m)	①VUX-1	②miniVUX-1	③VLP-16	④ $\alpha 7R$	⑤Phantom4Pro
最大較差	0.121	0.128	0.138	0.13	0.084
最小較差	-0.066	0.019	-0.052	0.007	-0.085
平均	0.029	0.066	0.054	0.048	0.003
標準偏差	0.037	0.035	0.051	0.032	0.049

①VUX-1と④ $\alpha 7R$ は平均値や標準偏差の結果から,同等の精度であると考えられる。②miniVUX-1も標準偏差が近い値であるが,平均値が全ての手法の中で一番高い。しかし,全手法とも,平均較差が 0.066m 以内,標準偏差が 0.051m 以内と精度の良い結果を得られたといえる。また,SfM点群においては,標定点を4点しか設置していないことを考慮すると,標定点の数によりさらに精度向上が見込まれる。高精細なデータが必要とされる場合は,①VUX-1や④ $\alpha 7R$ といった上位機種を使用する必要があるが,そうではない場合では,その他の機材でも十分な成果が得られ,植生の影響がない現場においては,Phantom4Proでも十分対応できる結果であるといえる。

(2) 対地高度との比較

①VUX-1に関しては,高度の違いによる大きな変化はなかったが,他のレーザ及び④ $\alpha 7R$,⑤Phantom4Proに関しては,高度による影響がみられた。

施工現場においては,データの取得方法(撮影の対地高度)の決定には留意が必要となる。

(3) 土量計算結果の比較

①VUX-1の値を正しい値として比較した結果,④ $\alpha 7R$ が一番近い値となった。これは, $\alpha 7R$ のSfM点群がVUX-1同様に均一的な点群であり,側溝等を再現できていることが大きく影響すると考えられる。⑤Phantom4Proにおいても,②miniVUX-1や③VLP-16と比較して結果に大きな差はなく,施工現場での適用も十分可能であるといえる。

6. RTK-UAVの測量精度の検証について

RTK (Real Time Kinematic) 測位は固定局(基地局)と移動局という2つの受信機を使用し,リアルタイムに2点間で情報をやり取りすることで測位精度を高める手法である。RTKをUAVに搭載したRTK-UAVが開発,製品化されている。

RTK-UAVのメリットとしては,

- ・ 標定点の設置することなく,UAVを飛行させ正確な測量が可能
- ・ 飛行の安定性が増す
- ・ 高度測位の正確性が増す

などが挙げられる。現在の公共測量マニュアル(案)では,本機種の測量は対象外となっているものの,今後普及することが予想されるため,今回実証実験を行い,測量精度について検証することとした。

6.1 飛行条件

使用機種：Phantom4RTK（写真-1）

飛行ルート：写真-2

対地高度：30m

オーバーラップ：80%

サイドラップ：70%

対空標識 標定点：8点（外側6点、内側2点）
 検証点：7点（うち1点は観測データ
 破損により欠番のため、6点）



写真-1 Phantom4RTK



写真-2 飛行ルート

6.2 飛行ケース

測位方法として、ネットワークRTKと固定局RTK、及び単独GNSS（UAV搭載のGNSS使用のみ）の3ケースと、標定点設置と設置なしの8ケースで実証実験を行い、検証点での較差で比較した（表-4）。

表-4 飛行ケース

解析ケース	飛行ケース	測位方法（後処理）	標定点	備考
P1	1	ネットワークRTK	設置	日本GPSデータサービス
P2			全点	
P3	2	単独GNSS	設置	後処理を実施（PPK）
P4			全点	-
P5		設置	-	
P6		全点		
P7	3	固定局RTK	設置	2級基準点K-5
P8			全点	

6.3 解析結果と考察

解析結果を表-5に示す。

表-5 解析結果

解析ケース	飛行ケース	測位手法（後処理）	標定点	検証点との較差			√
				X	Y	Z	
P1	1	ネットワークRTK	設置	0.000	0.002	-0.028	0.028
P2			全点	-0.001	0.005	-0.004	0.006
P3	2	単独GNSS（PPK）	設置	-0.037	-0.020	0.096	0.105
P4			全点	0.003	0.004	-0.005	0.007
P5		単独GNSS	設置	-0.810	-0.194	-0.500	0.972
P6			全点	0.002	0.004	-0.005	0.006
P7	3	固定局RTK	設置	-0.029	0.000	-0.023	0.037
P8			全点	-0.001	0.005	-0.002	0.006

解析結果より、測位手法がネットワークRTK、固定局RTK、及び単独RTKにおいて、標定点を設置したケースはどれも測定精度が良好であることが分かった（解析ケースP2、P4、P6、P8）。また、標定点を設置しなくても、ネットワークRTK、固定局RTKの場合は、ほぼ同程度の精度が得られることが分かった（P1、P7）。

以上、今回の実証実験により、

- ・測位手法による違い（ネットワークRTKと固定局RTK）は見られない。
- ・標定点を設置した方が精度が良くなるが、ネットワークRTKと固定局RTKを測位手法とした場合は、設置しなくても精度は悪くなく、測量結果として使用できる。

といった結果を得ることができた。

7. おわりに

今回の実証実験より、定価格のPhantom4proのようなUAVでも撮影飛行高度を十分検討して測量を実施すれば、他のUAV測量機器とほぼ同程度の測量精度結果が得られることがわかった。RTK-UAVにおいても、今後普及が拡大することが想定されるため、更に実証実験を重ね、精度検証を行っていきたいと考える。