

グリーンレーザ・Navigator の河床点の精度検証 ～ IMU 補正付 VRS の河床点との比較 ～

2025 年 4 月 技術部レポート

① 検証の目的・手法

本稿では、YellowScan 社のグリーンレーザ Navigator で取得された河床点の精度を検証する。比較のためには実測が必要だが、作業員が水中に進入して河床点を取得することになるため、安全に作業できるよう比較的浅い箇所（深くとも 1m 程度）での検証とする。Navigator で得られる河床点に、どの程度の信頼性があるかを把握することを目的とする。

実測での河床点計測には、Trimble 社の VRS-GNSS 計測機器 R12i を用いる。R12i の IMU 補正付き RTK 測量（註）で河床点を多点計測し、近傍の Navigator の河床点との Z 較差を集計し検証する。R12i の IMU 補正付き RTK 測量は、空中レーザ計測の欠測部に対する補備測量手段としても運用されており、同機による通常のネットワーク RTK 測量モードとの性能差も 1～2cm 程度であることから、検証点として精度上問題ない河床点が得られると判断した。

備考：IMU 補正付き RTK 測量とは、Trimble 社の Trimble® Inertial Platform (TIP) 技術を用いた測位モードによる計測のこと。同社では「TIP 補正測量」と呼称している。このモードでは、IMU による傾き補正が働くことで、アンテナを斜めに設置していても測位できる特長がある。1 点あたりの計測時間は最短 1 秒から設定でき、アンテナ保持の所要時間（秒）と併せて適切に設定することで、短時間での高精度な多点観測が可能。

② 場所・日時・人員・計画

2025 年 4 月 9 日午前 10 時頃より、神奈川県相模原市緑区大島 2550 付近の相模川流域で、飛行班 2 名、対標・水部計測班 3 名にて実施。予め神奈川県厚木土木事務所に飛行許可を申請済み。

Navigator は、DJI 社 UAV の Matrice600 Pro に搭載。フライト数は午前中に 2 本、午後にも 2 本を予定。流水方向に対し平行に飛行し、コース数は計 11～12、各コース間隔は 17m。飛行高度 70m、速度 4m/秒で計画する。

対空標識は、調整点 5 個を設置。R12i による河床点の多点計測は、流れの穏やかで浅い箇所を中心に、午前フライトと午後フライトの間に行う予定。併せて、複数個所で濁度・透視度を観測し、水質状態を記録する。

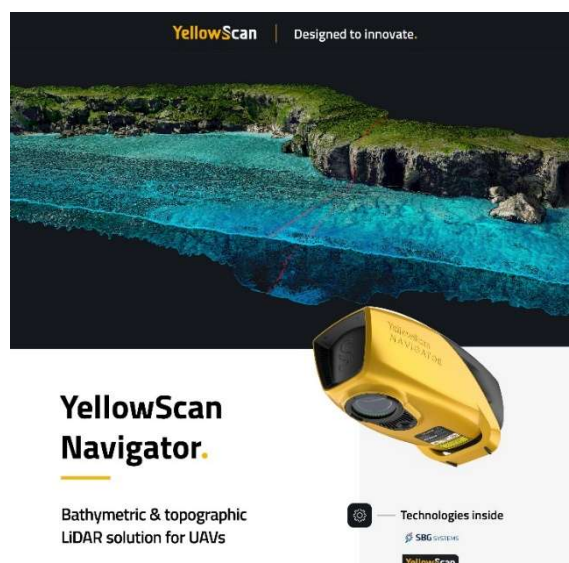


③ 検証機材 (Navigator、R12i)

UAV搭載型グリーンレーザ Navigator の性能は、YellowScan 社公表カタログでは以下の通り。運用実績のある DJI 社 Matrice600 Pro に搭載する。

GNSS/IMU 最適軌跡解析は、YellowScan 社製の点群生成ソフト CloudStation 上で動作する SBG 社 Qinertia (OEM 版) が半自動処理で実行する。使用するキネマティック用データは、近傍の電子基準点 (八王子 点番 960758) から RINEX Version3.04 形式で購入・入手する。

YellowScan Navigator 技術仕様	
GNSS/IMU 機器	SBG クアンタマイクロ
精度 (点分布の集束性)	3cm
正確度 (座標の整合性)	3cm
推奨計測飛行速度 (m/s)	5m/秒
推奨飛行対地高度 (AGL)	80m
点密度	最大 20 点/m ² (推奨飛行時)
計測可能距離	最大 120m
最浅計測可能深度	0.3m
最大計測可能深度	2 セッキ
スキャナ走査角度 (FOV)	40 度
1秒あたりのショット数	最大 20,000 発
走査周波数	最大 50Hz
ショットごとのエコー	最大 10 エコー
レーザクラス (安全規格分類)	クラス 3B (直視厳禁な強度に相当)



Trimble 社 R12i は、同社カタログパンフレットによると、測位性能は以下のようにまとめられている。今回の検証では、河床点は、IMU 補正付き RTK 測量（TIP 補正測量）モードで測位する。

R12i 各モードの測位性能			
静止 GNSS 測量	高精度静止測位	水平	3mm + 0.1ppm RMS
		垂直	3.5mm + 0.4ppm RMS
	静止および高速静止測位	水平	3mm + 0.5ppm RMS
		垂直	5mm + 0.5ppm RMS
リアルタイムキネマティック測量	単独ベースライン<30km	水平	8mm + 1ppm RMS
		垂直	15mm + 1ppm RMS
	ネットワーク RTK	水平	8mm + 0.5ppm RMS
		垂直	15mm + 0.5ppm RMS
		RTK 起動時間	2～8 秒
TIP 技術	TIP 補正測量	水平	RTK + 5mm +0.4mm/° チルト角(最大 30°)RMS
		垂直	RTK + 5mm +0.4mm/° チルト角(最大 30°)RMS
	IMU のインテグリティの監視	バイアスマニター	温度、経年劣化および衝撃

*カタログパンフレットには、TIP 補正測量での「垂直」性能の項目がない。「水平」が二つ並んでいるので誤植の可能性もあるが、英語版のパンフレットでも「Horizontal」表記が二つ並んでいるので、単純な間違いとも断定しがたい。

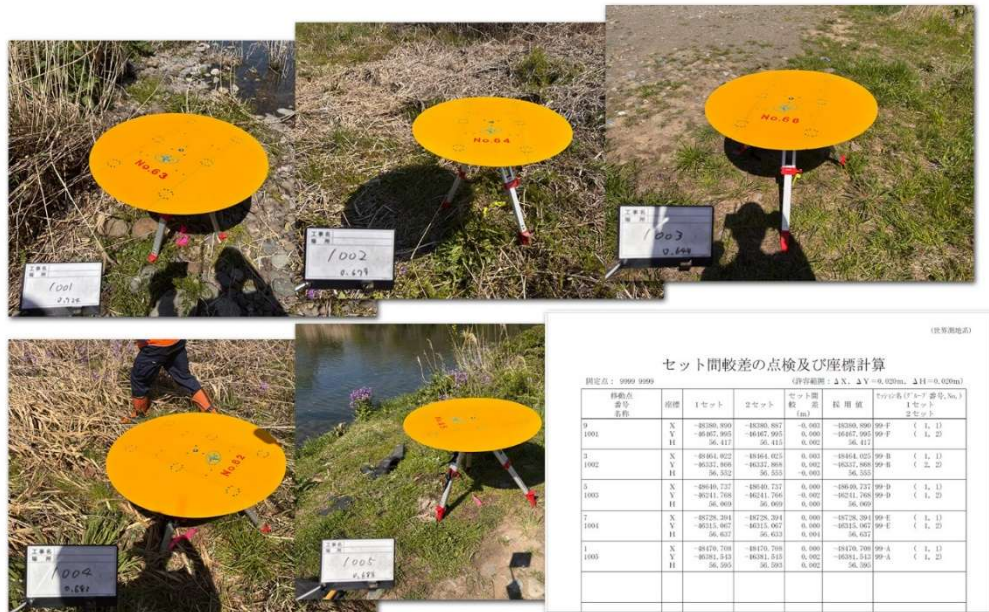
[illegible]

④ 対標設置と座標計測

当日は、午前9時頃に現地に到着。到着と同時に、各員が班ごとに準備を開始した。

地上班は、Navigatorの飛行前に対空標識を5個設置した。これらは、Navigator調整点として使用する。対標直下の地表面をR12iのネットワークRTK測量モードで計測し、Z値に対標表面までの高さを加えて、対標表面の中心のXYZ座標を求める。

R12iでは各対標につき2セット計測。セット間較差の点検に問題がないことを確認した後、1セット目の座標値を採用した。



⑤ Navigatorの飛行

飛行班2名は、1名が主パイロット、1名が補助・記録係の任を負う。



当日は晴天で午前中から強風だったが、午前予定の2フライトは無事に完了。

午前第1フライト 10:45 起動・離陸 ～ 11:01 着陸・停止

午前第2フライト 11:09 起動・離陸 ～ 11:27 着陸・停止

午後は更に風速が強まった。計測範囲の河川内に一般人のレジャー用カヌーが5艘ほど確認されていたので、安全を考慮して午後の2つ目のフライトは中止した。

午後第1フライト 13:52 起動・離陸 ～ 14:08 着陸・停止

午後第2フライト 14:12、飛行中止を決定

各飛行の詳細は、飛行班の補助・記録係が現地で記入した飛行前チェックシートからも確認することができる。

作業名	相模川 Nav 5st	機体No. 3	チェックリスト・記録簿 M600 Nav													
日付	年記入 (2024)	月	日	時	分	秒	時	分	秒	時	分	秒	時	分	秒	時
計画名	NAVI01	NAVI02	NAVI01	NAVI02												
VX/バッテリー/USBメモリー挿入	✓	✓	✓	✓												
Nav スイッチON	✓	✓	✓	✓												
周辺確認・機体水平設置	✓	✓	✓	✓												
フレームロック×6 GPS×3	✓	✓	✓	✓												
Navアンテナ/台座・コネクタ確認	✓	✓	✓	✓												
Nav取り付け再確認	✓	✓	✓	✓												
プロポ 電源ON	✓	✓	✓	✓												
バッテリー取付け確認×6 機体電源ON	✓	✓	✓	✓												
☆機体起動開始/時刻	10:45	11:09		13:52	14:12											
機体初期化中・グリーンランプ確認	✓	✓		✓												
DJI Go接続・エラー有無	✓	✓		✓												
バッテリーNo./容量確認	112/99%	111/99%	1/2	117/100%	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
プロポモード確認	1/2	1/2	1/2	1/2												
ジオフェンス(高度/範囲/RTH)	80/100/600	80/100/600		80/100/600												
Navランプ確認(すべてグリーンか)	✓	✓		✓												
Nav レーザ スイッチON(黄色ボタン押)	✓	✓		✓												
Litchi起動・計画確認	✓	✓		✓												
速度(m/s) 基本4.5ms(MAX6ms)	4.1/4.5	4.1/4.5		4.1/4.5												
高度(m) 最高高度/最低高度	ALL 70	ALL 70		ALL 70												
GPS個数確認(8個以上推奨)	12	13		13												
プロポ回転障害	✓	✓		✓												
風速(m/s) 5ms以下	0.0			✓												
Navレーザは水平か	✓	✓		✓												
ランプ 左と上点灯、右1秒点滅、下交互	✓	✓		✓												
周辺再確認(機体から5m離れる)	✓	✓		✓												
スタートイニシャライズ	✓	✓		✓												
Litchi WayP転送	✓	✓		✓												
エンドイニシャライズ	✓	✓		✓												
着陸後 バッテリー残量	50%	42%		40%												
黄色ボタン押し、点滅が点灯まで待つ	✓	✓		✓												
機体電源OFF	✓	✓		✓												
☆機体起動停止/時刻	11:01	11:27		14:08												
点灯確認、黄色長押し、消灯、電源OFF	✓	✓		✓												

⑥ 水質観測

水質観測は、水部計測班 1 名が担当。当日 9 時 30 分頃より開始し、合計 10 箇所を実施。各地点で濁度と透視度を観測した。

濁度は各箇所複数回観測することとし、おおよその値を求めた。9 箇所で 10 以下が観測され、R12i での河床点計測エリアの上流で 3～5 以下、下流で 7 以上となることが多かった。1 箇所は藻が大量に繁茂しており、濁度のバラツキも 4～16 と、大きかった。

晴天で風が強く、水温はどの箇所も摂氏 12～15 度程度だった。

透視度は、藻が大量に繁茂して濁度が高い箇所で 0.8m を記録したが、それ以外は、透視度計で測れる上限の 1m 以上だった。



⑦ R12i での河床計測

水部計測班は、午前中の2フライトが終了した後、12時半ごろから計測予定エリアに進入。安全を考慮し、計測作業中も2名での行動を必須とした。計測作業者はライフジャケットを着用。深いところでは腰まで水中に浸かっての計測作業となるため、サポート担当者がカヌー型ボートにて近傍で水上待機した。また適宜、役割を交代して実施した。



IMU 補正つき RTK 測量（TIP 補正測量）モードの設定の詳細は、垂直から 15 度以内の角度でアンテナを約 2 秒間保持した場合に、FIX 状態であれば計測値を自動記録していくように設定した。

90 分程の計測作業で、河床と地上点を計 298 点、取得した。



なお、R12i の計測中にアンテナが地下に沈み込まないように、石突に簡易的な「かんじき」を装着した。



⑧ Navigator 点群解析处理

【GNSS/IMU 最適軌跡解析処理】

CloudStation では、基線解析ソフト Qinertia OEM 版と連携し、半自動的に最適軌跡 (SBET) を生成する仕様となっている。

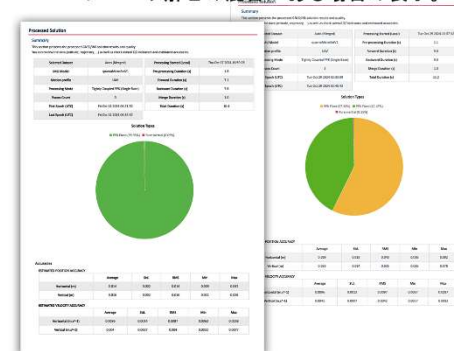
午後のフライトは中断されてしまったため、午前中の 2 フライトのみを採用することに決定。CloudStation+Qinertia で GNSS/IMU 最適軌跡解析処理を実施したところ、2 フライトとも全時間帯でフィックス解が得られず、フロート解となった。利用する電子基準点を切替えて再処理しても結果は同じであったため、このままフロート解を受け入れて、作業を進めた。

なお、作業規定の準則では、望ましい解の品質はフィックス解が原則とはしつつも、「固定局との基線距離が確保できない場合は、安定フロート解も可能」と定められている。

Qinertiaでの解析結果グラフ。2フライトとも100%フロート解となった。



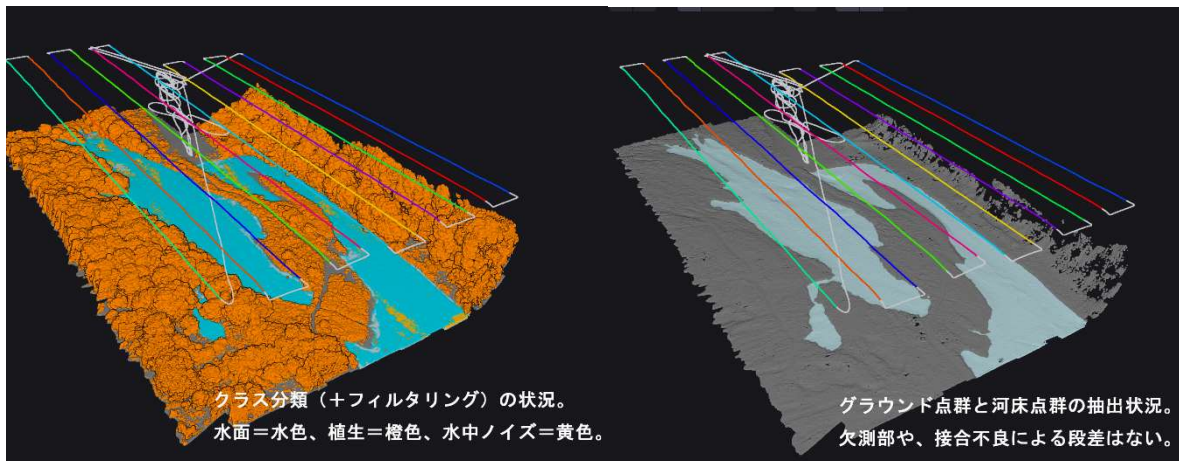
【参考】ほぼフィックス解のときのグラフ表示と、
フロート解との混合がある場合の表示。



【水面検出処理と屈折補正適用、クラス分類（フィルタリング）】

CloudStation ではスカナ生のデータから点群を生成する前段階で水面を抽出し、点群生成時に水面より低い位置に存在する点群の水深に屈折補正（推奨係数 1.33）を適用する仕様となっている。ここからの処理は、水面点群の自動抽出状態を目視確認し、過不足があればピンポイントで種別を修正する必要があるため、作業者が介在する工程となる。

今回は最適軌跡解析が全秒フロート解ではあったが、生成された点群の様子を確認すると、コースの重複部での大きなズレは見られないことから、水面と河床点の抽出処理および屈折補正処理は正しく適用されたものと判断してよいと思われる。



CloudStation では、簡易フィルタリングによる地表面抽出機能があるが、10～15cm 程度の厚みがあるサーフェス点群となる傾向がある。今回の検証では、VRS-GNSS 計測点 1 点毎とのピンポイントな比較になるので、CloudStation で抽出したグラウンド点群と河床点群を点群編集ソフト TerraScan で更にフィルタリングして、この厚みを薄くする必要があった。結果として、グラウンド点群と河床点群の点密度は、20～40 点/m²程度となった（次章参照）。

今回は河床点として抽出される点群の精度検証が目的であり、事前に必要な点群密度を定めていなかった。河床点の抽出数と分布状態も良好と思われたので、CloudStation での点群生成時に抽出数を 1/3 に間引いて設定した。そのため点数に関しては、カタログスペックの秒間 2 万発ではなく、1/3 相当の秒間約 6600 発程度の照射数のデータとして出力されているので注意を要する。

【「ジオイド 2024 日本とその周辺」の対応について】

計測日の 8 日前の 2025 年 4 月 1 日に、国土地理院が「ジオイド 2024 日本とその周辺」を公開した。今回の検証では、これを取り入れてデータを作成している。

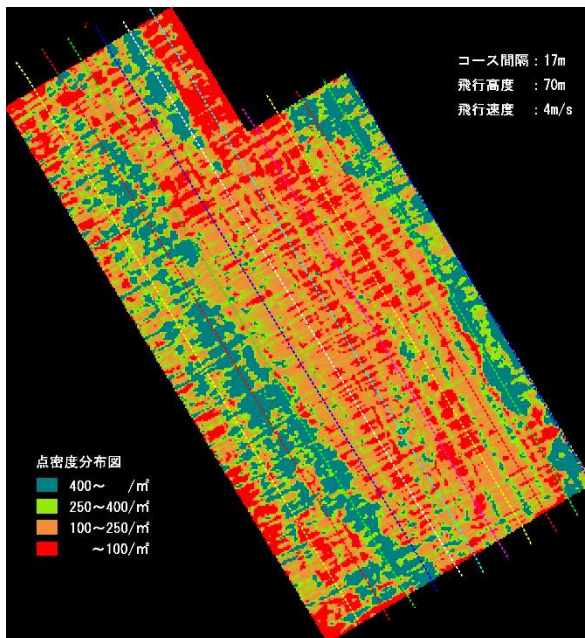
Navigator の計測点群では、CloudStation と QInertia では生データを GRS1980 楕円体高で作業・出力し、点群編集ソフト TerraScan にて「ジオイド 2024」をジオイドデータとして反映。点群を標高変換した後、調整点への擦り付けを行った。

前述のように、調整点は5点設置し、「ジオイド 2024」適用済みの R12i にてネットワーク RTK 測量で計測している（対標直下の地表を計測。XY 値は2セット観測のうちの1セット目をそのまま採用。Z 値は、1セット目の数値に対標表面までの高さを足して求めた）。

以上のように、検証機材と同じ R12i で計測した調整点座標を用いて Navigator 点群を調整しているため、Navigator 点群と R12i の座標値との間に（測位モードの違いによる 1～2cm 程度の精度差はあるものの）採用ジオイドの相違による高さのズレは考慮しなくてよいと判断できる。

⑨ Navigator 点群の点密度の分布傾向

参考として、Navigator のオリジナルデータの点密度を集計した（註）。グラウンド・河床点の他に、水面・水中ノイズ・未分類クラスを含む、全ての点群を対象とした。密度の分布状況は下図左のようになった。



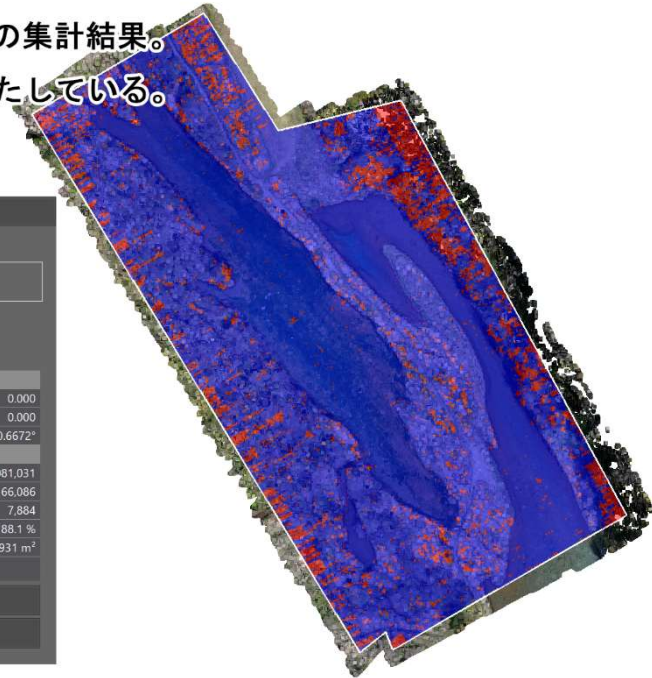
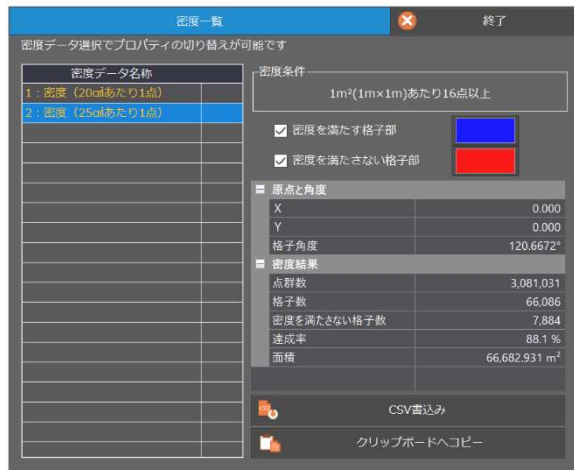
Navigator は1照射あたり最大 10 エコーを取得できるため、植生部でのリターン数が多い結果となっていることがわかる。

備考： 前述のように、今回は CloudStation で点群抽出数を 1/3 設定として間引いて出力したので、厳密に点密度を集計する意味はほぼない。点密度の高いデータを望むなら、抽出数を 1/1 に設定して、ハードウェア限界の 1 秒あたり最大 2 万発の照射数を採用すべきである。それ以上の点密度を必要とする場合は、「コース間隔を狭める・高度を下げる・速度を落とす」等、飛行計画の変更が必要になる。

グラウンド・河床点群の密度は、フィルタリング作業の結果、最終的には 20～40 点/m² となった。おおよそ 25 cm²につき 1 点以上の地表点が確保できており、作業範囲内に目立った欠測エリアは無かった。グリーンレーザにとって、好条件だったことが確認できた。

なお、準則ではUAVレーザ測深に関する規定はまだ無いが、航空レーザ測深測量では、レベル 500 相当のグリッドデータ作成時の要求点密度を 1 点/0.25 m²以上としている（第 584 条）。

グラウンド点群と河床点群の点密度の集計結果。
航空レーザ測深の1点/25cm²以上を満たしている。



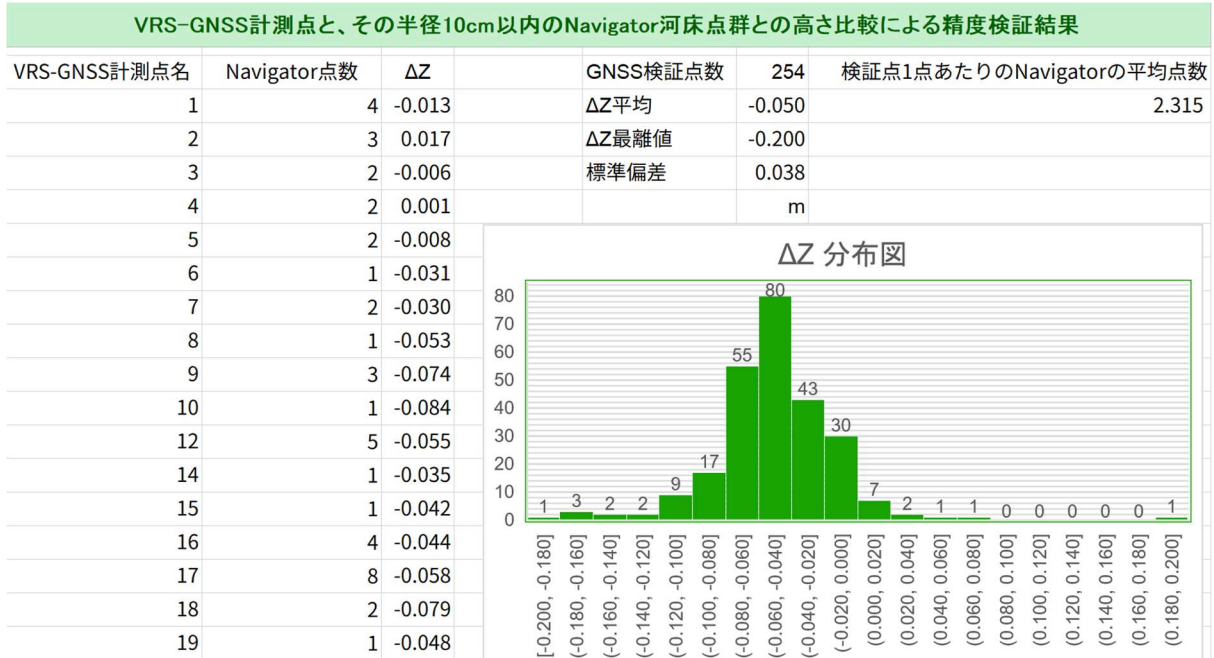
⑩ R12i の河床点と、Navigator 河床点群との比較

R12i による VRS-GNSS 計測点の各点 (No. 1~No. 298) の XY 座標を中心に、半径 10cm 以内に存在する Navigator のグラウンドもしくは河床クラスに分類されている点群の平均 Z 値を求め、VRS-GNSS 計測点との Z 値との較差を求める方法で、精度検証を行った。



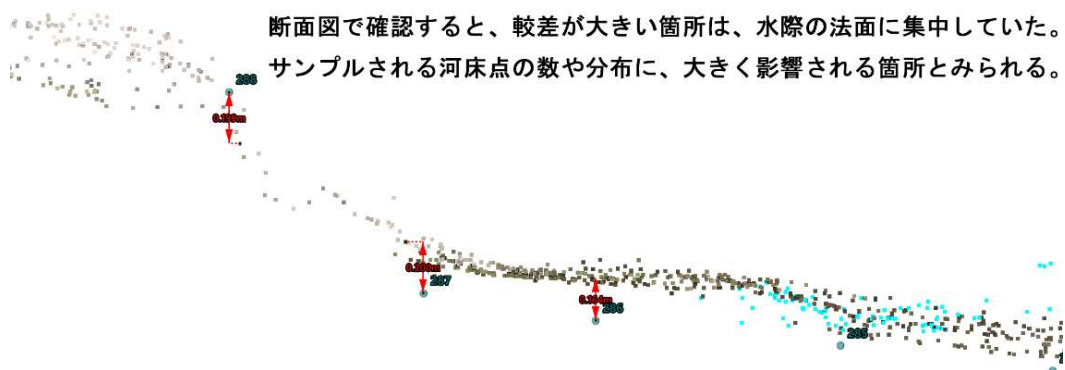
VRS-GNSS計測点の各点ごとに、半径10cm以内の河床点（あるいはグラウンド点）の平均Zを集計。
Trend-Pointの精度確認ツールを使用した。

R12i の計測した全 298 点のうち、半径 10cm 以内に比較対象となる Navigator の河床点（又は地表点）が存在しているのは、254 点だった。該当する河床点（+地表点）の 1 箇所あたりの Navigator の平均点数は 2.315 点で、複数点が存在する場合は点群の平均 Z 値を求め、R12i の計測点の Z 値との較差（ ΔZ ）を求めた。



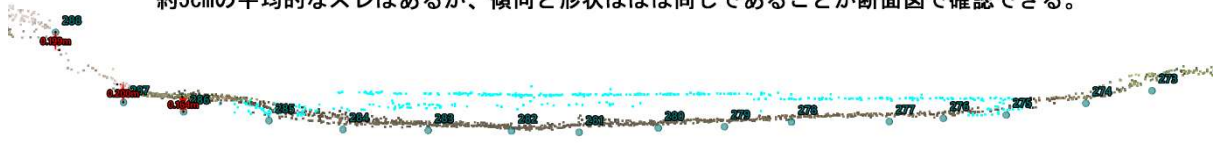
較差の平均は-0.050mで、R12i の計測点が Navigator 河床点よりもおよそ 5cm 程度低い位置に取得されている傾向があることがわかった。較差の大きい箇所では、-0.200m、+0.199mなどが検出されたが、これらはほぼ水際の急峻な法面部分だった。このような地形では、高さの比較には適さず、法面上のレーザ河床点の分布状況によって結果が大きく変動するので、厳密には省くべきだったかもしれない。今後の検証が必要な要素である（註）。

メーカーによると Navigator は水際での点群取得が難しいとされ、波打ち際などの浅い箇所での水面と河床の分離が苦手とみられる。水際には水深への屈折補正が適切に働かず、河床点が実際よりも浅く取得されていた可能性も捨てきれない。



較差の平均に対する標準偏差は 0.038m で、R12i 各点のバラツキの程度は、高価格帯 U A V 用空中レーザ機器に匹敵する正確度が伺える数値となった。断面表示で比較すると双方の地形の形状差も小さいことが目視確認でき、Navigator の河床点も R12i と同様に、十分な精度があると判断できる。

約 5cm の平均的なズレはあるが、傾向と形状はほぼ同じであることが断面図で確認できる。



⑪ 総括

以上の検証により、Navigator の河床点は、R12i での河床点よりも平均して 5cm 程度高い位置で取得される傾向があるものの、その平均値からの各検証位置でのバラツキはほぼ 4cm 以内に収まることから、地形形状の抽出傾向に双方の機材で大きな差はなく、高い精度をもつことが確認できた。

航空レーザ測深の要求精度が地表・水底とも 0.3m であること（準則第 586 条）を鑑みると、Navigator での河床取得点群は実用に足る十分な精度を持っていると判断できる。併せて、河床部での Navigator と R12i での取得傾向に大きな違いはなかったことから、R12i を Navigator の欠測部分に対する補備測量の手段として運用することの合理性も再確認できた。

(以上)

