防災・減災のための ICRT 技術による 3 次元レーザ点群

の活用法とその取得法に関する研究

岡山大学大学院 博士後期課程 環境科学専攻

冨井 隆春

防災・減災のための ICRT 技術による 3 次元レーザ点群 の活用法とその取得法に関する研究

目次

- 第1章 必要とされるドローンハード技術の概要 : p.1
 - 1.1 防災・減災のためのドローン測量システム開発のコンセプト : p. 1
 - 1.2 第1章の結論 : p.8
- 第2章 高精度ドローン測量用 GNSS の開発と有用性の検証 : p.9
 - 2.1 ドローン測量の課題 : p. 9
 - 2.2 ドローンの高精度自己測位技術の開発 : p. 12
 - 2.3 高精度自己測位技術を活用した計測事例 : p. 16
 - 2.4 第2章の結論 : p. 27

第3章 ドローンレーザ測量の開発と防災・減災への応用 :p. 28

- 3.1 ドローンレーザ測量の特徴と開発の背景 : p. 28
- 3.2 開発したドローンレーザ測量システムの測量精度検証 : p. 37
- 3.3 ドローンレーザ測量システムの災害地への適用事例 : p. 43

3.4 第3章の結論 : p・51

第4章ドローンを用いたグリーンレーザ測量システムの開発 : p. 52

4.1 ドローングリーンレーザ測量の実用性の実証:海底地形の測量例:p. 52

- 4.2 ドローングリーンレーザ測量の実用性の実証:河川の測量例 : p. 61
- 4.3 第4章の結論 : p. 70

第5章 結論および今後の展開 : p. 71

5.1 本論文の結論 : p. 71

5.2 今後の展開 : p. 72

参考文献 : p. 74

第1章 必要とされるドローンハード技術の概要

1.1 防災・減災のためのドローン測量システム開発のコンセプト

構造運動や火山運動の影響により、日本列島の多くは複雑かつ脆弱な岩盤から 構成されており、また台風、梅雨あるいは近年増加傾向にある集中豪雨などの誘 因によって、斜面災害による人的および経済的被害が毎年多発している.このよ うな現状において、限られた財源と管理体制のなかで、効率的かつ効果的な斜面 防災対策を行なう必要があるが、潜在的な斜面災害の危険性を有する個所は多数 あり、すべてに対して抜本的な対策工を早期に実施することは困難である.また モニタリングより斜面の状態を把握して災害を未然に防ぐことも検討されている が、計測機器を斜面上に密に配置することは困難であり、岩盤斜面では全体の挙 動を捉え難いという問題を抱えている.さらに道路防災総点検以降に災害が発生 した箇所の多くでは、災害の形態や規模が想定外の事例であったという事例も報 告されている.これまで斜面災害によって、多くの人的あるいは経済的な被害を 発生しているにもかかわらず、点検作業が人的労力に頼っていることから、危険 個所の見逃しが多く、点検を実施している着目点以外の箇所からも新たな災害が 発生しているのが実情である.

この状況は河川関連の災害でも同様である.2015年の関東・東北豪雨での鬼怒 川や、平成30年豪雨災害での岡山県内高梁川流域における堤防決壊などに見ら れるように、近年の地球規模の気候変化に伴う極端な総降水量の増加による外水 氾濫が多発する傾向にある.今世紀末には、全国の1級水系における年最大流域 平均降雨量は、現在より約1.1~1.3倍くらいに増加すると予測されており、河道 や河川管理施設の維持管理の重要性が増している.なかでも主たる管理対象施設 である堤防は、総延長の長い線的構造物であり、たとえ1箇所でも決壊すると、 広範囲にわたる区間全体が被災する危険性がある.この河川堤防は、特殊区間を 除いて、河川管理施設等構造令により、盛土によって築造されることが規定され ている.河道の流下能力向上や流水による浸食洗掘対策として、嵩上げや腹付け などの改修・強化が幾度も行われた変遷を経て現在に至っており、盛土内部の構 造や地質的な資料が完備されていない場合も多い.その一方で,河川の点検作業 は、歩きながら目視で確認する作業によって行われており、堤防の健全性の評価 は、担当技術者の技量や経験に頼っているのが実情である.現在の気候変動に対 応するためには、出水直後だけでなく、平常時から堤防の外形を詳細に監視し、 変形などの異常が発見された場合は、いち早く対策を講じるための評価を行う必 要があるが、点検作業が人的労力に頼っていることから、危険個所が定量的に把 握され、有効な対策が講じられているとは言い難い状況である.

これらの課題を解決する手法として,広範囲の地形を効率よく調査する航空レ ーザ測量データを用いることで,点検対象の斜面や河川流域の地形の把握,特に 現位置での調査で安定性を確認する必要がある箇所を机上で的確に抽出する手法 の開発が試みられてきた.しかしながら,広域を定期的に測量する作業には航空 測量は適しているものの,2007 年新潟県で発生した中越地震あるいは 2008 年の 岩手・宮城内陸地震などに代表される突発的な災害対応において,被害状況の把 握あるいは対策立案のための被害査定作業に必要な 3 次元座標データを,現位置 で迅速に取得するために適した手法が必要であることが痛感された.図 1-1 には, 前述の災害で明らかになった航空機を使ったデータ取得法の課題を示す.



図 1-1 ドローンを使った 3 次元座標データ取得法を開発するに至った背景

また河川分野においては、車両で走行しながら連続的にレーザ点群が取得でき るモービルマッピングシステム (Mobile Mapping System :以下 MMS と称する) が,高精度の測量を迅速に実施できる手法として注目されている.この MMS は, 車両にデジタルカメラおよびレーザスキャナを搭載する.複数の衛星を介して電 子基準点等の情報を統合した RTK 方式の GNSS キネマティック解析により自己 位置を算出し、オドメータの値や IMU (inertial measurement unit) による加速度お よび角加速度から求めたレーザ照射時の姿勢情報と GNSS 時刻による関連付けを 行うことで、レーザ照射点の3次元位置座標を取得する手法である. これまでも MMS を河川堤防の測量に適用する研究例は幾つか報告されている. 例えば, 長大 な河川堤防を車両走行によって高精度で測量することの可能性を考察し、走行中 の車両の自己位置の精度と測量精度の関係を検証し、基線長が長くなると測量精 度が劣化することを明らかにし、電子基準点の選択が重要であることが報告され ている. さらにこの結果を踏まえて、VRS (仮想基準点方式)により基線長を 5km 以下にし、調整点による高さ補正を実施することにより、高精度の堤防の変状把 握を実証した報告などがある. しかしながら, MMS は堤防天端の走行により測量 を実施するので、堤防上の雑草や構造物が障害となり、レーザ照射の死角が発生 する場合が生じる.そのため,堤防天端の沈下箇所を高精度に検出できるものの, 法面を含めた堤防全体に対して、対策が必要な個所を抽出する手法として実用化 された例はない.法尻での MMS 走行により, MMS が計測できない箇所の 3 次元 データを取得する試みも報告されているが、機材の再配置が必要になり、人的・ 時間的労力の削減につながらないという課題がある.この課題を解決するために、 レーザ照射範囲の死角を少なくするために、地上から 3.5m の高所にスキャナを 設置した MMS 測量システムの試行も報告されている(橘ほか, 2005b).また, この 3.5m の高所にレーザスキャナを設置した MMS は, 波返工の沈下の測量に有 用であることが報告されている.一般的に活用されている航空レーザ測量では, レーザ点群間隔が 0.50m 以上になり,幅が約 0.40mの波返工の天端を正確な座標 値で再現できない.それに対して, MMS による測量は, 高密度のレーザ点群間隔 で測量できるので、波返工の天端の形状も明瞭に再現される. このように MMS は、長距離にわたる測量が簡便であるという車両走行型レーザ測量の特徴を活か しながらも、高精度の測量が可能であるという利点がある。その一方で、波返工

の天端は測量できるものの,堤防法面のレーザ点群はレーザの入射角度の関係で 欠損することが多く,堤防法面の全体の測量は困難であることが報告されている. これらの背景を鑑みると,河川分野においても,図 1-1 に示すような,航空機を 使った計測に代わる自律飛行型小型航空機を使った 3 次元座標データ取得法の要 求が大きいことが明らかになった.

2007 年頃までには,普及はしていないものの,現在のドローンを使った計測法 は報告されている.しかしながら,飛行時間は最大でも 5~10 分であり,また精 密なデータを取得できる計測器を搭載できるようなペイロード性能はなく,小型



図 1-2 ドローン開発に際して、備えるべき性能と考えた内容

カメラを搭載できる程度のものしか開発されていなかった.そこで,図1-2 に示 す性能を備えたドローンの開発を着手するに至った.図1-3は開発したドローン の概観であり,表1-1は仕様である.



図 1-3 開発したドローンの概観 表 1-1 図 1-3 に示すドローンの仕様

最大飛行距離	概ね 4 km (周辺環境による)				
自動飛行範囲	1 km(標準) オプションにより無制限				
最大飛行高度	標高 5,000 m 程度				
最大風速抵抗	概ね 12m/s				
飛行時間目安	概ね 50 分				
最大搭載重量	概ね 3.5 kg				
運用周波数	2.4GHz				
寸法	約 1,000 x 1,000 x 350 mm				
プロペラサイズ	13~15 inch				
バッテリー	8,000mAh x2 又は 12,000mAh x 2				
カメラ	SONY 社製 α6300 (標準)				
ジンバル	サーボ式ジンバル				
重量	約 2.4 kg				
その他	フェイルセーフ機能/冗長機能 など				

このドローンを用いて、各種対象物の計測結果を図 1-4~1-6 に示す.



図 1-4 災害現場の動画撮影例

崩落現場で,長距離飛行の性能を活かして,数キロ先の源頭部の撮影を自動飛行 により行った.これにより2次災害の無い現場状況把握を可能にした.



図 1-5 災害現場の 3 次元再現化事例

災害現場においては、あらゆる場所の情報を記録したいという要求がある.1台



図 1-5 落石工事状況撮影事例

のカメラを様々な方向に向けて撮影するのは困難なため、複数台のカメラを搭載 しモーション VR 化することで全方向の詳細な動画を記録することを可能にした. 開発したドローンは、小型カメラ搭載時でも約40分の飛行が可能であった.図 は 60t の岩を人為的に落とす工事の状況であるが、車道と河川箇所しか撮影場所 が無いための地上からの撮影は困難であり、ドローンを使用して空中から撮影



図 1-6 洪水の痕跡調査事例

された.本現場では,岩が落ちる動画から,その加速度や速度が画像から解析された.これまで目視で行っていた洪水痕跡調査をドローンに置き換えた事例.必要な解像度は約 1mm であり,低空で移動しながら高速シャッターでスチル撮影を行った.このように,図1-2に示す性能を備えたドローンの開発により,図1-4~1-6 に示す各種応用に見られる 3 次元空間データを取得することを可能にした.

1.2 第1章の結論



第2章 高精度ドローン測量用 GNSS の開発と有用性の検証

2.1 ドローン測量の課題

ドローン測量は、航空レーザ測量の手法における機体を、航空機から無人航空 機(Unmanned aerial vehicle, UAV) に変えたものである. UAV は、人が搭乗しな い(無人機である)航空機のこと全般を称するもので、通称として短くドローン (drone)と呼ばれることが多く、UAV を使った測量は、ドローン測量とも称され る.ドローン測量の原理は航空測量と同じであり、測量の基本原理を考えると、 データ取得時のドローン機体の位置と姿勢の計測値が測量の精度に大きく関与す る.これは測位誤差と称されるが、GNSS や IMU をドローンに搭載しても測位誤 差が発生し、図 2-1 に示すように衛星クロック、衛星位置に起因するもの、電離 層による信号遅延、対流圏における信号遅延、マルチバスの影響などが原因であ る.



図 2-1 ドローン測量の誤差要因

GNSS 測位においては、キネマティック測量を用いるのは、リアルタイム性を 要求するだけでなく、位置の分かっている基準局と位置を求めようとする観測点 で同時に観測を行い、基準局で観測したデータを観測点へリアルタイムに送信す ることで、両点で同じ衛星の電波を受信していること、あるいは衛星から発射さ れた信号電波が同じような気象条件の中を通過してくることから、2 点の観測値 の差を知ることにより、観測値に含まれる衛星の位置誤差や対流圏および電離層 遅延量が消去しようとすることに因る.しかしながら、キネマティック測量で測 位精度を改良できるのは、衛星からの信号電波が擾乱を受けることなく地上に届 いた場合である.衛星と地表の間の伝搬経路上には電離層が存在する.そこは大 気中の分子や原子が、紫外線などにより電離した領域である.これが衛星からの 信号電波の伝播速度に大きく影響する:式(1)に示すように、電波速度は伝播する 媒体中の電子密度に比例し、電波の周波数の二乗に反比例する量だけ遅くなる性 質がある.

電離層による速度の遅延長 L(m)

=C(定数×Ne(経路上の全電子数)/f²(電波の周波数) 式(1) 電離層内の電子数は時々刻々と変化する太陽の状態の影響を受けるので,モデル による補正は困難である.これらの理由により、例えばドローンによる写真測量 では、地上に GCP (Ground Control Point)と称される標定点を設置して当 GCP の 座標を測量で求め、この値を用いて測量結果の誤差が最小になるよう調整する. このため、ドローンによる写真測量では、図 2-1 に示すような課題すなわち測量 に要する労力の削減がなされない,という課題がある.また図 2-2 に示すように, 斜面や災害地では GCP の設置そのものが困難であるため, ドロー測量の応用も限 られてしまう課題があった。そこで本研究では、ドローン測量の精度の向上を図 るため、高精度の自己測位技術の構築に取り組む、具体的には、高精度のドロー ン用 GNSS の開発である. 衛星からは L1(1575MHz)および L2(1228MHz)の 2 つの 周波数を搬送波とした電波信号が送られてくる.この二つの周波数を用いれば, 測量した瞬間の時間に応じて,式(1)から電離層による速度遅延を定量的に求める ことができる.この原理を利用して高精度の測位が実現するように2周波 GNSS の開発に取り組んだ.

10





図 2-2 ドローン写真測量の課題:GCP 設置に伴う労力が大きい



図 2-3 ドローン写真測量の課題:GCPの設置が困難な個所の測量が不可

2.2 ドローンの高精度自己測位技術の開発

本研究では、図 2-4 に示す 2 周波 GNSS を開発し、高精度の自己測位を可能に した. ここで 1 周波および 2 周波 GNSS が測位誤差に与える影響を記述する.



図 2-4 2 周波 GNSS デバイスの概観

GNSS の性能の差によって SfM (Structure From Motion)の初期値の違いを比較 した結果が図 2-5~2-7 である.ドローンで画像を取得すると、そこには3次元空 間を反映する様々な情報が含まれる.画像に映った対象の3次元的形状を画像か ら得る方法として、影を用いる方法 (Shape from Shading) や、ピントを利用す る用いる 方法 (Shape from Defocus) などがあり、これらをまとめたものが Shape from X という概念である.移動 (Motion) するカメラから得られる画像から形状 を復元するのが SFM であり、ドローン写真測量に一般に使われる解析手法であ る. この SfM を使って、カメラの位置姿勢と対象の座標を取得する. そして、 SfM 初期値とは、ドローン写真測量において、地上に設置した標定点を用いた位 置補正を行う前の、写真画像に付加されている位置精度を表すものである.この SfM 初期値の精度が高いと、標定点を用いた位置補正量が少なく、SfM 初期値の 精度が低いと位置補正量が大きくなるため、補正後と補正前では写真画像が撮影 されたカメラ位置に大きな差が生じる.図 2-5~2-7 は、ドローンの機体として Matrice600, Phantom4 および Mavic を用いた時の, SfM 初期値を表す. なお, 各 機体の特徴は表 2-1 に示すとおりであり,開発した 2 周波は Matrice600Pro に搭 載した.

UAV機種名	Matrice600 Pro	Phantom4 Pro	Mavic Pro	
			A.	
GNSS周波	2周波	1周波	1 周波	
オーバー/サイドラップ率	80%/60%	80%/60% 80%/60%		
標定点の個数	標定点の個数 7個		7個	
地上画素寸法 0.01m		0.01m	0.01m	

表 2-1 各種ドローン機体の性能

図 2-5~7 は、それぞれ Matrice600、Phantom4 そして Mavic の SfM 初期値を表

す. 図中における赤い丸は写真画像が使用されなかった未校正カメラ位置である, また青い丸が標定点を用いた位置補正を行う前の SfM 初期値であり,緑の丸が位 置補正後のカメラ位置である. したがって,最近傍の青丸と緑丸が離れているほ ど位置補正された尺度が大きいことになる. さらに米印が標定点位置であり,緑 の様々な大きさの楕円はカメラ位置の不確実性を表す. これはカメラ位置がその 楕円中のどこかに含まれているかを示している. 図 2-5 では緑丸と青丸が重なっ ており, SfM 初期値が標定点を用いた位置補正後の値に限りなく近いことを示す. これは 2 周波 GNSS を用いた Matrice600 の SfM 初期値の精度が高いということ を意味する. これと比較して図 2-6 および 2-7 は,最近傍の青丸と緑丸の重なり が少なく, SfM 初期値と補正後のずれが大きいことから,1 周波 GNSS を用いた UAV である Phantom と Mavic の SfM 初期値の精度が低いということが分かる.



図 2-5 Matrice600 の測位誤差



図 2-6 Phantom4 の測位誤差



図 2-7 Mavic の測位誤差

2-3 高精度自己測位技術を活用した計測事例

ここでは、開発した2周波 GNSS デバイスによるドローンの高精度での自己測 位技術の有用性を実証した事例を示す.あらためて図2-8にこれまでのドロー ン写真測量の課題を示し、図2-9に本研究の効果を示す.



図 2-8 ドローン写真測量の課題:GCPの設置が必要な理由



図2-9 本研究の効果の概要

図2-10には、図1-3に示したドローンを用いた写真測量に関して、施工技術研究所において実施した精度検証実験の結果を示す.図は現位置の状況を再現した写真測量結果で示したものであり、また本研究による2周波 GNSS デバイスを用いて、1)GCPを設置しなかった場合、2)1点だけの GCP の測量値を用いて補正した場合、3)複数の GCP の測量値を用いて補正した場合、のそれぞれの

測量誤差を標準偏差で示したものを示す.



ΔZ	∆ Z(-0.022)	ΔZ	∆ Z(+0.006)	ΔZ	∆ Z(-0.073)
GCSv5 + All GCP		GCSv5 + 1 GCP		GCSv5 + no GCP	
0.036	0.014				
0.089	0.067	0.013	0.020	-0.014	-0.087
		0.008	0.015	0.005	-0.068
0.037	0.015	-0.017	-0.011	-0.026	-0.099
0.015	-0.007	-0.008	-0.002	0.006	-0.067
0.014	-0.008	0.017	0.024	0.081	0.008
0.032		0.025		0.063	

図2-10 本研究の成果:精度検証結果

上図:精度検証実験を実施した現場状況,下図:GCPの値の使用数と精度(標準偏差)の関係,なおGCSv5というのは本研究による2周波GNSSデバイス

図の結果に示す通り, 複数の GCP を使った場合と 1 点のみの GCP を使った場合では, 精度は同様であった. さらに GCP の値を全く使わない場合でも, 標準

偏差が 100 mm以内であり,災害時の測量などでは十分な精度を確保できると考 える.

図2-11には、同じく図1-3に示したドローンを用いた写真測量で、災害地 での被害状況を測量した事例を示す.現場は、国土交通省近畿地方整備局 紀伊 山地砂防事務所赤谷地区である.赤色の実線は本研究の飛行軌跡である.数社の ドローンが測量を試みたが、本研究は図1-3に示したように長距離の飛行を可 能にするドローンを用い、GCPの設置が不要になることから、2次災害とならな い場所から最遠方4kmとなる約30分のフライトにより、被災地の測量(約 50ha)を実施できた.また、さらに図2-12は、図2-11に示す被災地を写真 測量結果から再現したものである.



図2-11 被災地のドローンを用いた写真測量事例

本測量は、国土交通省が主催する「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委 員会」において、より効率的・効果的な『災害対応に資するロボット』としての 実用化技術の検証実験として実施されたものである.当委員会の検証実験におけ る「地形の変化や状況を把握するための高精細な画像・映像や地形データ等の取 得ができる技術」として、フェーズ2:発災後の初動対応検討レベルおよびフェ ーズ3:初動対応後の詳細設計レベルへの適用が可能であると評価された成果を 得ることができた.特に、GCPの設置が不要な高精度の自己測位技術を含めて、 「30 分以内に被害状況を把握するシステム」であることが実証された. 図2-1 3には、ドローンの着陸後、ただちに実施した解析処理の結果、図2-14には微 地形を表現した結果を示す. このように本研究により、これまでのドローン写真 測量の課題を克服し、迅速かつ簡便で高精度の測量を実施することを実現させた.



図2-12 被害状況を写真測量によって再現した結果



図 2 - 1 3 ドローン測量を用いた災害地の解析結果 上:オルソ画像,中:陰影図,下:傾斜図(赤色:急傾斜,青色:緩傾斜)



図2-14 図2-12に示す箇所の微地形表現図

次に火山災害への適用事例を示す. 図2-15は御嶽山の噴火時の調査概要を示 すものである. 図2-16には、フライトプランを赤色の実線で示す. 風の向きを 考慮して、2方向からのフライトプランを作成した. 図2-17には、ドローンに 搭載した各種計測機器の概要を示し、図2-18~2-20には、当計測機器の活 用例を示す. さらに、図2-21に桜島を計測した際のフライトプラン、図2-2 2には写真測量による桜島の全景の再現図、さらには図2-23に噴煙の隆盛の 調査結果を示す. これらの結果に示されるように、本研究による高精度自己測位 技術によって、GCP 設置の労力を不要にし、特に災害地での測量に有用となるこ とが実証できた.



2014年に発生した御嶽山の噴火時の調査。

フライトは標高2,400mの駐車場から標高3,600mまで 1,200m上昇させ、4~6km遠方の噴火口まで向かった。 45分程度のフライトを2日で22回行った。 ドローンは3機用意。火山灰が心配なのでモーターの 線はフレーム通さずにいつでも交換できるよう外に巻 き付けた。実際には1機で全ての調査を終えることが できた。火口周辺の3D計測以外に次の3種類の調査を 同時に行った。

図2-15 火山災害: 御嶽山の噴火時の調査概要



図 2-16 設定したフライトプラン



図2-17 ドローンに搭載した各種計測機器の概要



図2-18 サーモカメラの活用例 火口周りを計測し、マグマ爆発か水蒸気爆発かなどの調査を実施



図 2-1 9 エアーサンプラーの活用例 ドローンを噴煙の中に飛行させ, 硫黄濃度の計測を実施した.



図2-20 分光計の活用例

噴煙の下において,噴煙の在る箇所と無い箇所を複数回往復し,噴煙の 体積の計測を実施した.



図2-21 桜島計測時のフライトプラン:赤色の実線が飛行ルート



図2-22 写真測量から3次元で復元した桜島



図2-23 噴煙の調査結果 低高度からの撮影が可能なため,高精細なオルソ画像が作成でき, 噴煙の粒径も詳細に分析することが可能である.

2.4 第2章の結論



第3章 ドローンレーザ測量の開発と防災・減災への応用

3.1 ドローンレーザ測量の特徴と開発の背景

ドローンレーザ測量は、写真測量におけるデジタルカメラの代わりに「レーザ 測距装置」を用いる.このレーザ測距装置は、レーザ光を発射して地表から反射 して戻ってくる時間差を調べて距離を決定する装置である.図 3-1 のように進行 方向に対し横方向にスキャンさせて座標値を調べるので、「レーザスキャナ」とも 呼ばれる.



図 3-1 レーザスキャナの仕組みの概要

航空レーザ測量においては,飛行高度 2000m でスキャン角度が左右の合計 20 度で計測する場合,地上を幅約 700m で一度に測ることができる.またレーザ光 を1秒間に 50,000~100,000 回発射することが可能になっており,地表で 50~ 60cm 間隔またはそれ以下の間隔でも計測が可能になる.ただしレーザ計測点の配 置はランダムであり,計測点のレーザスポットは点ではなく円形となる. この円 の大きさ(フットプリント)は計測高度 1,000m で直径が約 30cm,計測高度 2,000m で約 60cm にもなる. このフットプリントは,測量精度と関係するので,ドロー ンを使った方が飛行高度を低くすることができるので,ドローン測量のほうが有 利である. 一方,ドローンは搭載する機器の重量が重くなると飛行時間が短くな るため,大型のレーザスキャナを活用することが出来ず,航空レーザ測量のよう なレーザ光の発射回数を得ることは困難である.

このレーザ測距装置の他に、ドローン写真測量と同じく、図 3-2 に示すように、 GNSS と IMU の自己測位のための機器のデータを用いて、地表まで達したレーザ 光の位置(x,y)と高さ(z)を正確に算出して測量を実施する. すなわち、3 つの技術 の性能が測量誤差に影響することになる.



• 計測した距離・位置・姿勢から、3次元位置を算出

図 3-2 レーザ測量に必要な 3 つの測定値の概念

本研究では,前章で記述した2周波 GNSS を用いて自己測位の精度を向上させる.図 3-2 を参照して,あらためてドローンレーザ測量における誤差要因をまと

めると図 3-3 となる. このうち,図 3-4 の機器間調整に起因する誤差はドローン 測量独自のもので、ドローンを活用した測量では、ドローン機体の組み立てや計 測機器の取り付け・取り外しが頻繁に行われるため、GNSS、IMU およびレーザス キャナの機器間の位置・姿勢のズレ量や機器間の時間同期の誤差が含まれてしま う場合が多い. これを防ぐためには、IMU とレーザスキャナの一体型の機器を用 いることが有効であり、それによって精度管理が容易となる. これら精度に関す る項目を、"高精度の測量が可能"という観点でまとめると、GNSS は 2 周波方式 のもの、IMU はレーザスキャナと一体になった構造であること、フットプリント は小さい方が高精度レーザドローン測量には有利である.

ドローンレーザ計測の誤差要因

GNSS/IMUを用いた測位による<u>自己位置</u>計測の誤差 (E_{GNSS})

(E_{IMII})

)

(E_s

 $(E_{\rm C})$

- IMUによる<u>自己姿勢</u>計測の誤差
- レーザの性能に起因する誤差
 - ・レーザの測距誤差
 - ・レーザの角度測定誤差による誤差
 - ・フットプリントによる誤差
- 機器間調整に起因する誤差

$$\operatorname{RES}_{\text{xyz}} = \sqrt{\operatorname{E}_{\text{GNSS}}^2 + \operatorname{E}_{\text{IMU}}^2 + \operatorname{E}_{\text{S}}^2 + \operatorname{E}_{\text{C}}^2}$$

図 3-3 ドローンレーザ測量における誤差要因

また図 3-5 は、写真測量によって高精度の測量が困難となる対象を示したもの である.写真測量は連続で写真を撮って処理するものであるため、図のように風 で動いてしまう草木が写り込んでいる場合や、太陽光が反射される部分がある場 合は、ハレーションを生じるために高精度の測量が困難である.また図 3-6 は、 図 3-5 の河川堤防を測量した結果である.繁茂している草の影響等もあって、堤 防形状の詳細は写真測量では分からない.

ドローンレーザ計測機器の特性と機器間調整

- ドローンレーザ計測機器の特性

- ・複数の機器間を組み合わせた計測システムであり、<u>機器間調整</u>が必要
- ・ドローン機体の組み立て、計測機器の取り付け・取り外しが頻繁に行われる

機器間調整とは、

- GNSS, IMU, レーザスキャナの機器間の位置・姿勢のズレ量
- 機器間の時間同期



図 3-4 機器間調整に起因する誤差の概念



図 3-5 高精度の写真測量が困難な対象 左:樹木が写っている場合 右:太陽光が反射する箇所が写っている場合



図 3-6 ドローンレーザおよび写真測量で堤防の形状を測量した結果

この図 3-6 に示した結果の他、ドローン写真測量の課題とレーザ測量の利点を 図 3-7 および図 3-8 に示す.このような利点の多いドローンレーザ測量であるが、 さらに、防災・減災用の用途を含めて、広い範囲を測量したい、狭い範囲である が遠い場所の測量をしたいとの要求が多く、レーザスキャナの軽量化とスキャン レートの高速化を図る必要があった.これが実現できれば、軽量化によりフライ ト時間が増え、高速化によりフライト時間を減らすことができる.



図 3-7 ドローン写真測量の課題とレーザ測量の利点を:データ処理の観点から



図 3-8 ドローン写真測量の課題とレーザ測量の利点を:飛行ルートの観点から

また国土交通省革新的河川管理プロジェクトから考察した,ドローンレーザ測 量システムに要求される事項を図 3-9 に示す.高性能であっても高額であれば活 用場面が減る.また専門職しか使えない特殊なものも普及しない.これらをまと めると,有人航空機が小型化されたというドローン測量ではなく,図 3-10 に示す ような,トータルステーションから地上設置型レーザの延長線上で,空から測れ る機器というコンセプトから成るレーザ測量システムが必要であると考える.



図 3-9 ドローンレーザ測量システムが備えるべき性能 :国土交通省のプロジェクトより考察


図 3-10 ドローンレーザ測量システムの開発背景の概念を示したもの

またレーザ光がスキャンされる角度において,取得された座標の高さの値の精 度が何に依存するのかを示したものが図 3-11 である.横方向にスキャンされて いる時は,測量の精度はドローンの姿勢に依存することが判明した.



図 3-11 レーザスキャン角度において高さの測量値精度が依存する因子の関係

データ容量が大きくなると、処理時間が増加することになり、かえって活用し 難くなるなどの状況を勘案して、図 3-12 に示すように、90°のスキャン角度にお いて 6 万点/秒の性能を有するスキャナを開発するに至った.図 3-13 には、開発 した当スキャナの仕様を示す.



図 3-12 開発したレーザスキャナのスキャン性能を示す概念図



※ クラウド処理によるポストプロセッシング後の精度。

図 3-13 開発したドローン専用レーザスキャナの仕様

また、データ処理過程において、 GNSS と IMU を複合させた最適軌跡解析を より簡便に実施できるようにするため、図 3-14 に示すような、電磁基準点など の固定局が取得した GNSS データによる 3 次元座標を、測量時に自動的にダウン ロードしてくるソフトや、微調整を加えてさらに高精度化する場合や、ミスアラ イメントの調整を行う場合に、取得した全レーザ点群に対して再計算する過程を リアルタイムで視覚的に調整できるソフトを開発した.これにより、汎用的なド ローンレーザ測量のシステム化を実現させた.



図 3-14 ドローンレーザ測量システムとしてのデータ処理ソフトの開発例 上図:最適軌跡解析処理ソフト 下図:レーザ点群再調整処理ソフト

以上,ドローンレーザ測量システムには,図 3-15 に示す各要素の開発が需要 であり、本研究はそれら要素を完成させることで,汎用的なシステムを構築させ た.



図 3-15 ドローンレーザ測量システムの汎用化に必要な要素

3.2 開発したドローンレーザ測量システムの測量精度検証

本節では、前節で記述したドローンレーザ測量システムの測量精度の検証を実施した結果を示す.大阪府内の能勢高原ドローンフィールドにて行った.当フィールドの面積は 6152m²である.図 3-16 に能勢高原ドローンフィールドにおける 機器の配置を示す.図において円形で示すものが検証点となる 1 から 17 までの 対空標識点(ターゲット)である.また三角形で示した No.1 から No.2 は検証点の 測量のための GNSS による 2 級基準点の計測位置を示す.検証点の測量にて使用 したターゲットと GNSS 受信アンテナは図 3-17 に示すとおりである.

図 3-18 は,前節において示したドローンレーザ測量システム(機体:Matrice600 とレーザスキャナ:TDOT の組み合わせ)の概観である.ただし,計測対象のフ ィールドに植生は無く,6万点/秒以下でも充分に高密度のレーザ点群を得ること ができるので,レーザスキャナは4万パルス/秒の仕様のものを使用した.取得し たレーザ点群の結果を図 3-19 に示す. 航空レーザ測量のレーザ光は, 地面ばかり でなく, 建物や樹木の上で反射するので, 直接得られる高さのデータは建物や樹 木の高さを含むものとなる. このような高さのデータよりグリッド化した地表モ デルを数値表層モデル, 通称 DSM (Digital Surface Model) と称する. これに対し て, 一般の地図のように地表の高さを示したい場合は, これらの建物や樹木の高 さを取り除くことが必要となる. この建物や樹木の高さを取り除く作業を「フィ ルタリング」と呼ぶが, フィルタリングを行って得た地表面だけの高さのデータ からグリッド化した地表モデルを数値標高モデルを通称 DEM (Digital Elevation Model) あるいは DTM (Digital Terrain Model) と称する



	凡例			
\triangle	2級基準点			
+	対空標識点			
⊞	検証点			

図 3-16 能勢高原ドローンフィールドの概観



図 3-17 本検証で使用されたターゲットと GNSS 受信アンテナ



図 3-18 ドローンレーザ測量システムの概観

```
ドローンレーザ計測
```

	表	ドロー	-ンレーザ計測諸元
項目			
回転数			20回転/秒
照射数			4万発/秒
対地高度			50m
飛行速度			2m/秒



図 3-19 本測量実験で取得したレーザ点群例

図 3-19 は、DSM を陰影段彩図として表現して、立体的な図にしたものである. この陰影段彩図は高さのデータに対し、高いところを赤、低いところを青として、 その間を橙、黄、黄緑、緑および青緑と連続的に表現し、さらに影をつけたもの である.また計測対象の近傍の植生が繁茂している箇所を計測した際の DSM が 図 3-20 である.植生を通過して地表面が計測されていることが分かる.このよう にレーザ測量は、写真測量に比べて植生の影響を受け難い測量手法であると言え る.図 3-21 および図 3-22 には、あらためて当計測対象の DSM と DTM を示す.



図 3-20 植生が繁茂している箇所のレーザ点群取得状況



図 3-21 当フィールドの DSM データの例



図 3-22 当フィールドの DTM データの例

図 3-23 に、レーザ点群密度を示す. 図に示すように、進行方向はレーザ点間隔 にバラツキが生じ、進行方向に対して直角の横断方向は、一定のレーザ点間隔を 得ることが出来る. これはドローンの機体の不安定さが原因であり、風速が強い 場合(例えば 5m/s 以上)の計測では、安定した制度を得ることが困難な場合が生 じることが予想される.

次に検証点の座標と比較したドローンレーザ測量の精度を求めたのが図 3-24 である.標高値を比較したものであるが、2 級基準点測量を与点にした測量によ る座標に対して±50mmの精度が確保できていることが分かる.さらに計測対象フ ィールド内の地物(プール)の特徴点に対して測量を行った結果が図 3-25 である. なお特徴点も同じく2級基準点を与点にした測量を実施した.この結果から分か るように、図 3-23 に示したレーザ点群密度の影響が現れ、進行方向の較差が大き くなっている.しかしながら、進行方向では最大で 200mm 以内,標高は±50mm、 ドローンの進行に対して直角方向は±100mm 以内の較差であり、一般的な航空レ ーザ測量での高さの精度±150mm、水平方向の位置精度 1000mm に比較すると、高 精度の測量が可能になることを実証した.

41



図 3-23 レーザ点群密度の計測結果

検証点との比較

比較方法 (公共測量 作業規程の準則に準じる)

- ・ 検証点から最近傍のドローンレーザ計測点を選択
- 標高の比較を行う

点番 号	検証点標高 (m)	ドローンレーザ計測点 標高 (m)	較差 (m)
1	544.862	544.866	0.004
2	552.332	552.328	-0.004
3	544.791	544.820	0.029
4	544.580	544.592	0.012
5	535.435	535.452	0.017
6	537.817	537.771	-0.046
7	544.305	544.333	0.028
8	544.600	544.597	-0.003
9	544.873	544.876	0.003
10	544.990	545.021	0.031
11	545.029	545.058	0.029
12	544.767	544.787	0.020
	100 m m	平均值(m)	0.010
		最大較差(m)	-0.046
		標準偏差(m)	0.022
		平均二乗誤差(m)	0.024



図 3-24 ドローンレーザ測量の精度検証結果



図 3-25 地物でのレーザドローン測量の精度検証結果

3.3 ドローンレーザ測量システムの災害地への適用事例

航空レーザ測量技術の進展により,植生で被覆された地域でも詳細な地形や地物を可視化することが可能となった. 広域を迅速かつ高精度に計測出来る航空 Lレーザ測量の優位性は揺らがないものの,実際には 1 回の費用が高額である. さらに秒間 10 万点を超す稠密なデータシステムであるが,高度数百 m を時速 100 km 以上で移動する機体からのデータ取得となるため,実際のデータ密度は 1 平方メートルあたり最大 20 点程度となる. このため,詳細形状把握には限界がある. 一方,ドローンレーザ測量システムは,自らが操作可能なため低コストでの計測が可能となる.高度数 10m を低速移動しながらデータ取得し,データ密度は

1平方メートルあたり200点以上で,詳細な地形データを取得することが出来る. ここでは,前節に示した開発したドローンレーザ測量システムを災害地での測量 に応用した事例を示す.使用したドローンレーザ測量システムは図3-13に示し たスキャナを使用した.ドローンの機体は,最大積載量 5.5kg の折畳み可能な機 材 DJI Ma-trice600Pro を用いた.

現場は、2018年4月、大分県中津市耶馬溪町大字金吉の梶ケ原地区において発 生した斜面崩壊地である.大分県中津市耶馬溪町の崩壊地付近は標高 350m~ 400mの平坦な火砕流台地が広がり、その中を山国川の支川の金吉川が貫流して いる.崩壊は図 3-26に示すように、金吉川の左岸側斜面で発生した.崩壊地付 近で金吉川は大きく蛇行し、被災集落の梶ケ原地区は河川の攻撃斜面にあたる. 崩壊前には地震も先行する降雨もない中で、深夜崩壊が発生した.周辺の地質は 新第三紀中新世~鮮新世の豊肥火山岩類(:安山岩,玄武岩質安山岩および火砕 岩)の分布地域で、この中に耶馬渓層である凝灰質砂、シルト、軽石が挟まれて いる.平坦な火砕流台地を形成する地層は、約100万年前の耶馬渓火砕流堆積物 で柱状節理の発達した溶結凝灰岩でその下位には非溶結部を伴っている.山国川 沿いには約9万年前の阿蘇4火砕流堆積物の溶結凝灰岩の分布はあるが、崩壊地 周辺には分布しない.



図 3-26 崩壊斜面の状況



図 3-27 崩壊斜面周辺の崩壊前の地形図

図 3-27 に示す崩壊前の地形図から,崩壊は急崖直下で僅かに凸型に張り出した 部分で発生していること.周辺には同様の地形が複数確認でき,地形図判読だけ からこの場所の崩壊を予測することは極めて難しいと考えられる.崩壊地の計測 は,対策現地本部の許可を得て,捜索活動が続いていた期間中に実施した.図 3-28 に示すドローンに搭載したデジタルカメラの画像からは,崩壊地の範囲と倒木 現況は把握することが出来るが,樹木下の詳細な地形形状が分からない.そこで ドローンレーザ測量システムの適用を考え,事前に現地の地形を地理院地図で確 認し,樹木の高さを考慮したフライトプランを作成した. 具体的には対地高度 70mとし,飛行速度 3m/s 程度で,ほぼ 0.1m 格子の点群が取得できる計画とした. 計測終了後数分でプレ解析し,点群を閲覧した後,本解析処理を行った.本解析 はクラウド処理した.事前に一連の処理をプログラミングしてクラウド化してお り,これにより電子基準点データの収集から GNSS や INS の最適基線解析,解析 処理までの処理を完全自動で実施した.



図 3-28 ドローンに搭載したデジタルカメラによる崩壊地の全景画像

樹木を含む崩壊地全体 3 次元モデルを図 3-29 に,詳細図を図 3-30 に,また樹木除去処理後の 3 次元地形モデルを図 3-31 に示す.図 3-32 に示す崩壊地を横切る 5m 毎の樹木を含めた崩壊地中央部を通る代表断面を図 3-33 にて作成した. これを見ると,樹木の倒壊の向きや形態と樹木下の地形が同時に可視化されることが分かる.

次に崩壊形態を推定するために, 主断面を図 3-34 のように作成した. 対象斜 面は標高 170m~360m, 比高約 200m の急斜面で, 崩壊は斜面中部付近の標高 240m~270m で発生している. 図 3-35 に示したように, 崩壊主部では地盤に根 を張った状態で樹木が倒壊し, 木の倒壊方向から地盤が後方回転していることが 読み取れる. 崩壊は斜面中部がスプーンで抉るように滑っていることが明瞭に確 認できる.



図 3-29 樹木を含む崩壊地全体 3 次元モデル図



図 3-30 樹木を含む崩壊地全体 3 次元モデル図



図 3-31 樹木を除去処理後の 3 次元地形モデル



図 3-32 崩壊地全体の点群平面と断面を表示させる位置:赤色の実線



図 3-33 図 3-32 の赤色の実線で示した箇所での崩壊地代表断面



図 3-34 崩壊斜面の主断面



図 3-35 崩壊斜面の主断面の拡大部

今回の計測内容や観察結果をもとに、崩壊プロセスについて推定した.崩壊前 の地形をみると周辺には多数の崩壊地形が確認され、その中で今回の崩壊地付近 は僅かに尾根状に張り出した部分であった.このことから、斜面中腹に不安定土 塊が残存していたと想定される.崩壊直後にかなりの湧水があったとの報告から、 不安定土塊内部の地下水位が上昇し、斜面の安全率が低下していたとみられる. これらの条件が揃った結果、図 3-36 に示すように、斜面中腹に張り付いていた不 安定土塊が一気に抜け出して崩壊したと想定される.通常、崩壊の引き金は地震 動や降雨があるが、今回は直接の外的要因がない.崩壊の素因は地層構成と急崖 斜面、地下水環境があり、遠因としては、地震動や長期間の先行降雨の影響の可 能性も除外できず、地形的な計測結果からは崩壊メカニズムの推定は困難な状況 である.しかしながら、本現場では、ドローンレーザ測量システムを活用して、 現地計測 30 分、1 時間後には 3 次元モデルを作成できることが示された.本研究 成果によるドローンレーザ測量システムは、崩壊形態の可視化や 2 次災害防止対 策の観点から、その有用性を実証できたと考える.



図 3-36 推定される崩壊プロセス

3.4 第3章の結論



第4章ドローンを用いたグリーンレーザ測量システムの開発

4.1 ドローングリーンレーザ測量の実用性の実証:海底地形の測量例

海浜の地形は,海域の砂が沿岸流や風波で移動することで日々変化している. 静穏で透明度の高い水域であれば、航空写真により概略の地形形状を把握できる が、水深と共に地形の定量的な計測は出来ない、そこで通常は、音波を使った音 響測深による地形の計測が行われる.音響測深では,測深区域に対して測線を設 定し、その測線に沿って計測を行うシングルビーム深浅測量が実施されてきたが、 測線に沿って帯状に未測深幅が発生する課題が解決できない.そこでコンピュー ター技術 GNSS 測位技術を組合せたマルチビーム測深技術が導入され、面的な海 底地形を把握できるようになった.このマルチビーム方式であれば水深の最大10 倍程度の面的な測深も可能である.しかし水深が浅い領域は調査船が入ることが 出来ない、そこで前述のシングルビーム深浅測量、あるいは潜水夫の持つターゲ ットを陸上から計測することで、沿岸域の海底地形の測量が行われているのが実 情である.このような研究によって、これまで図 4-1 に示すような海浜地形の地 形が理解されている.ただしこれは航空写真や部分的な断面測量結果を総合して, 概念図として描かれたものである。実際の海浜は動的な平衡状態にあり、常に海 浜形状は変化し続ける.そのため、任意の時期におけるスナップショット的な正 確な断面を捉えることは難しい.さらに広域を対象にした場合,その平面形状を 面的な3次元で捉えることは、音響測深では困難である.そこで水中を透過する 波長(532nm)をもつグリーンレーザを活用した航空レーザ測深(Airborne Laser Bathymetry, 以下 ALB) が最近活用されるようになった. 音響測深では, 船舶の 揺動の影響による平坦な海底地形がキャタピラのような凹凸を繰り返した地形と なったり、送受波器直下の強反射エコーが両端部付近のエコーに入り込むトンネ ル効果などの誤差が発生するが、ALB では発生しないので、広域の地形変化を高 精度に計測する手法として期待されている.

52



図 4-1 海浜における代表的地形例

しかしながら、ALB 計測は数 100m という高い高度を時速 200km で移動しなが ら計測するため、パルスレートの大きなスキャナを使用しても、最大 20 点/m²程 度のレーザ点群密度が限界となる.そのため、高精度で微地形を把握することは 不可能である.さらに現状では、数億円規模の機器を搭載しての計測となるため、 計測費が高価となり、局所的な狭い範囲の計測手法としての普及が困難である. このような背景を鑑みて、本研究では、グリーンレーザースキャナをドローンに 搭載して計測する測量システムの開発を試みた.ドローンは数 10m の低空からの 計測が可能であり、またその操作性が容易なことから管理者自らが実施すること が可能であり、またその操作性が容易なことから管理者自らが実施すること が可能であり、計測の迅速化あるいは低コスト化が期待できる.本研究では、ALB 計測の代替としてのドローン搭載 LiDAR システムの実用性を実証するため、鳴 き砂海岸の保全対策用の各種データの取得を試みた、さらにその結果から.今後 の沿岸域の保全対策への実用性を考察する.

図 4-2 は開発したレーザスキャナ,およびドローングリーンレーザ測量システムシステムの概観である.また表 4-1 はレーザスキャナの仕様である.レーザスキャナはペイロード 3kg 以上のドローンに容易に装・脱着可能である.そのため,これまで近赤外レーザスキャナを搭載している汎用のドローンと組み合わせて使用できる.航空レーザ測深では,水面の位置を近赤外レーザを用いて,水中部の測深にはグリーンレーザを使うが,本機はグリーンレーザのみを使用する.アイセーフ機能はレーザークラス 1M に準拠し,測深能力の理論値は高度 100m の計測時で約 10mの測深能力をもつ.最大 27 分の飛行が可能であり,局所的な範囲

が対象にはなるが、容易に計測技術を学べるドローン計測の利点が発揮されることから、簡便かつ迅速な計測を実現することができる.



図 4-2 レーザスキャナおよびドローンレーザ測量システムの概観

最長測定距離	> ≧10%	158m	≧60%	300m over		
精度	> ≧10%	±15mm	≧60%	±5mm		
レーザーパルスレート	>60,000Hz/秒					
エコー切り替え	> 1st / Last / 1st&Last / 4echo					
スキャン速度	> 30走査/秒					
レーザー波長	> 532±1nm					
ビーム拡がり角	> 0.3mrad					
作動温度範囲	> 0~+40℃					
寿命	> 10,000時間					
重量	> 2.8kg(本体のみ/アンテナ除く)					

表 4-1 グリーンレーザスキャナの仕様

島国である我が国において,沿岸環境の保全は需要な課題であり,例えば水産 生物の生育にとって非常に重要な役割を有しているが,沿岸域の開発状況だけで

なく、近年の気候変動に伴う海水面あるいは海水温の変化による地形変動の影響 を大きく受ける。例えば砂浜の砕波帯に形成されるバー・トラフは、浅海域に生 息する二枚貝類の生息とも密接な関係を有していることが知られており、細砂か らなる緩勾配の砂浜に形成される多段バーの形成と規模を予測するためにも、沿 岸域の海底地形の把握は重要である。また特殊な鳴き砂海岸は、地域特有の貴重 な海岸であり、エコツーリズムの実施などの地域社会の活性化につながる付加価 値を有しているが、水・陸域の環境の変化に敏感に反応するため有効な保全対策 が困難な対象である.全国に分布している 100 個所を超える鳴き砂海岸のいくつ かは消失する傾向にあり、鳴き砂の存在が優れた海岸環境の指標にもなるため、 有効な保全対策の検討は緊急の課題である。鳴き砂の発音の回復方法として、置 砂の実施が考慮されることもあるが、その地点としては沖合バー地形付近が最適 であるとの報告がある.これは破砕による波の洗浄効果が発揮されることに因る が、沖合バー地形の変動により砕波現象が変化し、それに伴い置砂の効果も変化 するので、当バー地形の形状変化を把握することが重要になる。そこで本研究で は鳴き砂海岸である京都府網野町の琴引浜における海底地形を,開発したドロー ングリーンレーザ測量システムにて計測し、海岸保全に有用なデータの収集を試 みることで、ALB に代わる計測システムの有用性を実証する.鳴き砂海岸は、主 として北陸より山陰にかけて北九州に至る日本海側に分布し,湾曲したポケット ビーチ状をしているため,鳴き砂が湾外に流出しにくい形状になっている.海岸 線長がほぼ 2000m 以下と比較的短く,湾の奥行長さに対する湾口幅の割合は 0.2 ~0.4 あたりが多いのが特徴で、局所的な計測を得意とするドローン測量の対象 として好適である.

琴引浜は全長 1.8km で、国の天然記念物に指定された数少ない自然海岸の一つ である.鳴き砂の発音は、底質に付着する有機物の影響が大きいことが指摘され てきた.浸食型あるいは堆積型の波浪により、汀線近傍に発音特性の回復した鳴 き砂が集積するなど、保全に有用な研究例が報告されており、それに対するバー 地形の影響などが議論されている.今回、潮位変動量が 200 mm以下と少ない時期 を選択して、琴引浜でのドローングリーンレーザ測量システムを使って、陸域か ら海域までの同時計測を実施し、保全に有用なデータの収集を通し、当ドローン システムの効果を考察する. 図 4-3 は,琴引浜でのドローンの飛行ルートであり,沖合 400m の範囲を計測した.図 4-4 は,計測によって取得されたデータから描いた断面である.



図 4-3 琴引浜におけるドローン飛行ルート



図 4-4 ドローン搭載グリーン LiDAR システムによる琴引浜の断面形状事例

本計測では、前述のような ALB 計測とは異なり、水面計測用の近赤外レーザ を搭載していない.図よりグリーンレーザを水面上に対して同時にスキャンさせ ることにより、水面位置と最大水深 8.6m までの地形を捉えていることが分かる 図 4-5~図 4-8 は,開発システムの計測データから,陸域から海域までを図化した 結果である.図 4-6 および図 4-8 は,等高線および等深線による地形表現を見や すくするため,グラデーションをつけた地形断彩図である.



図 4-6 琴引浜の地形段彩図 :10月に計測を実施



図 4-8 琴引浜の地形段彩図 :12月に計測を実施

図 4-5 琴引浜の 3 次元形状 :10 月に計測を実施



図 4-7 琴引浜の 3 次元形状 :12 月に計測を実施

図では10月から同年12月の約2か月後に計測した際のデータを用いた.陸域 では蛇行する掛津川河口の形状と水面下の地形が捉えられ、また海陸境界では汀 線部分や波打ち際で急激に深くなるステップ地形が把握できていることが分かる、 さらに遠浅の地形と沖合バー地形および岩礁も捉えられている.各図は、電子基 準点に準拠した絶対座標で図化している.そのため、2ヶ月間の海浜地形の変化 を、陸域の河川護岸構造物と沖合海底下の岩礁を基準に読み取ることができる. 海面下では、当初見られたバーは消失し、海底は広い範囲で平坦化している.河 口位置は東に大きく移動し、ステップ位置は陸側に後退している.ステップの陸 側では、アーチ状の汀線形状がリズミカルに連なるビーチカスプが観測される. ビーチカスプは,波打った汀線形状や汀線付近に形成された凹凸地形で判定でき、 堆積ステージで発達する場合や台風などの高波浪来襲直後に発達することが指摘 されており,砂浜への波浪の影響を考慮する際の重要な現象である.琴引浜では、 砂は季節により岸から沖方向に大きく移動することが知られており、冬季には汀 線より沖にバー地形が発達し、春から夏にかけて浜に堆積することも報告されて いる.本研究による計測手法は、これら現地の特徴を明確に捉えていると言える.



図 4-9 琴引浜の 2 時期のレーザー点群の平面差分量

また図 4-9 は、2 時期のレーザ点群から標高の差分量を算出したものである.

この図から、さらに3次元的な海底地形の変化を読み取ることができ、海底下の 堆積域と浸食域が明瞭に可視化することができる.この結果を基にして、海陸同 時の断面図を描いたものが図 4-10 である. この図から、1 回目の計測から 2 か月 の期間中の地形変化を詳細に読み取ることができる。例えば、海底下のバーの消 失が、この期間中に発生していることが明瞭に分かる.これまでの研究例では、 一様勾配の海浜に暴浪波を作用させると汀線が後退 してバーが形 成され、続い て静穏波を作用させると汀線が前進することが報告されている.この研究によれ ば、暴浪波の作用直後に、それによって形成されたバーが削除されると、静穏波 を作用させても汀線が前進しない. このように, 外浜の地形変化, なかでも外浜 の地形変化を特徴づけるバーの変動特性を把握することは海岸保全を考える上で 重要である).また安価な養浜手法である沖合養浜が行われているが、これは沖に 養浜砂を投入し, その砂が岸に移動する, あるいは投入地点にとどまることが期 待されている。投入砂はバーを形成するため、養浜砂の移動を精度良く予測する ためには、バーの移動特性 を把握 しておくことが必要である. このように、バ ーの海 岸管理上の重要性に対する認識が高まりつつあるが, 海岸全体の 3 次元 地形の変動とともに、土砂収支を考える上で重要な底質の移動量と関連して議論 された事例はなく、長期にわたって収集 されたデー タを基に、バー地形その も のの発達、移動および消滅が把握された事例は多くない、本研究で示したドロー ングリーンレーザ測量システムは、ドローンの移動速度が時速 5~6km, すなわち 人が歩く程度の速度で計測し、さらに最大6万点/秒の高密度レーザを発射しなが らデータを取得できる、また前述のように、海岸管理者が操作できるので、継続 的して長期的な海底地形データを容易に取得することができる。このように、我 が国の沿岸域,特に砂浜の保全に有効な対策の立案に貢献する詳細なデータベー スを本手法によって蓄積することが可能になると考える.

今回開発した手法は,航空機にレーザスキャナを搭載する ALB に比べて,100 倍以上高密度情報が取得できるので,詳細な海底地形が可視化される.レーザ点 群密度は移動速度で調節することが可能であり,例えば 10cm メッシュの密度で レーザ点群を取得する場合は,対地高度 70m で 3m/秒の飛行速度,20cm メッシュ なら高度を 140m にすると同時に飛行速度も倍の 6m/秒に設定すれば良く,広範 囲を短時間で計測することが可能である.



図 4-10 2 時期の測量結果から得られた地形変動結果 青色:10 月の計測データ,赤色:12 月の計測データ

4.2 ドローングリーンレーザ測量の実用性の実証:河川の測量例

河川は自然公物であり、日々その姿を変える河川に対してその差分を把握し、 それに対応していくいことが河川管理の基本であり、3 次元で連続して河川を把 握できれば、管理の一層の高度化が期待できる.現在、全国の一級河川では河川 管理のために定期横断測量が実施されている.ところが、この河川定期横断測量 は、縦断方向に 200m 間隔で実施されており、護岸部の局所的な洗掘状態や、瀬 や淵の詳細な地形など、河川管理において重要な情報が得られていないのが実情 である.また河道内の水部は、主に音響測深機によって計測されているが、計測 自体が多大な労力と時間を要する上に、急流部では計測作業自体が困難となるた め充分なデータを取得できない課題がある.これらの課題に対して、広域を効率 よく測量できる航空レーザを活用した計測も実施されているが、計測作業には専 門技術が要求され、さらに高コストを要するという新たな課題が発生している, 近年、迅速かつ簡便な計測手法としてドローンによるレーザ測量の普及が期待さ れている.しかしながら、使用しているレーザは近赤外線であり、陸部のみのデ ータしか取得できない. そのため、ドローンによる計測が普及しても、河道内を 効率よく面的に計測する手法が実現しないと、河川管理に有効なデータ取得が抱 える課題は解決されない.一方,水部の計測において,水中を透過するグリーン レーザを用いた航空レーザ測深(Airborne Laser Bathymetry:以下 ALB)が開発さ れ、河川測量への適用が試みられているが、専門的な技術を要し、高コストにな るという課題は解決されていない.

ここでは、前節に続いて、ドローンに搭載できるグリーンレーザを照射するス キャナを開発し、陸上部だけでなく水中部をシームレスで測量できる技術の実現 に取り組んだ成果を報告する.対象は、由良川および梓川・上高地であり、陸上 部と水中部をシームレスで測量できるドローングリーンレーザ測量システムの有 用性を述べる.

使用したシステムは、図 4-2 に示したものである.まず由良川への適用例を述べる.福知山盆地を流れる由良川の中流部は,広い川幅と緩やかな勾配による瀬・ 淵が多く見られ、多様な魚類の生息域となっている.この由良川を対象に、本研 究によるシステムを用いた測量を実施した.図 4-11 には、フライトプランおよび 計測状況を示す. また図 4-12 には,水域部の詳細な断面図を示し,図 4-13 に平面図および各測線における断面図を示す. このように,陸域と水域の同時計測状況を確認することができる.



図 4-11 左図:フライトプラン 右図:計測時の状況



図 4-12 水域部の詳細断面

次に梓川・上高地での適用事例を示す.上高地は国指定特別天然記念物に指定 された地域で,網状流とケショウヤナギからなる景観は日本の原風景を代表する 河川地形とされている.測量は,その代表地点である河童橋より横尾大橋に至る 図 4-14 に示す延長 約 6 km を区間で実施した.図 4-15 は計測実施区間の概況で ある.



図 4-13 測量平面と各測線での断面図



図 4-14 梓川・上高地の飛行ルート



図 4-15 梓川・上高地の現況

測量の結果,図 4-16 に示すような全域に亘るレーザ点群が取得された.図 4-17 には,航空写真による現況を示す.図に示す 01 から 04 の代表区間の空撮画像か らは,砂礫河床と河畔林の繁茂状況が読みとれる.この区間の立体的なイメージ として鳥瞰図と断面図を,それぞれ図 4-18 および図 4-19 に示す.図に示すよう に河床と河畔林が可視化され,樹木の形状から樹種同定も可能なレベルの精緻な 可視化が実現できていることが分かる.



図 4-16 レーザ点群測量結果. 図中の 01~04 は航空写真撮影箇所



図 4-17 図 4-16 に示す 01~04 の個所の航空写真

ここでの測量対象は,飛騨山脈南部の長野県側に位置する上高地であり,梓川 上流河谷を中心とする地域である.ここは標高 3000 m の稜線に挟まれているに もかかわらず,幅約 500mの広い谷底平野が広がっているという,日本ではめず らしい地域でもある.幅の広い谷底にはケショウヤナギの群落が形成され,上高 地の重要な景観となっている。ケショウヤナギは,日本では十勝地域を中心とす る北海道と梓川流域にのみ隔離分布しており,河岸や中州上の日当たりのよい砂



図 4-18 網状流と河畔林の 3 次元イメージ



図 4-19 河畔林と河床断面

礫地に定着するので、河川裸地が形成される地形変化による攪乱が必要である. そのため、礫床網状河川は流路の移動などの地形変化が激しい箇所は、ケショウ ヤナギの定着には適している.一方、このような場所では発芽したケショウヤナ ギが激しい地形変化によって消失する可能性も大きくなる.上高地の梓川流域の ように、ケショウヤナギが繁茂していることは、地形変化の激しい河道にあって も多様の環境が存在し、河道が攪乱を受けるだけでなく、ケショウヤナギが定着 できる場所になっていることを示している.一方で、土砂移動が激しく、氾濫を くり返してきた梓川の安定化のために、上高地では河川工事が行われ、ケショウ ヤナギの維持機構が破壊されており,自然景観が変化することが危惧されている. このような河川環境のもとで、ケショウヤナギが継続的に更新をくり返して定着 できるのか、河川工事はどのような影響を及ぼすのかということを明らかにする ことは、上高地の自然景観の成立のしくみを理解し、保全対策の立案のために重 要となり,そのために河道地形の変化プロセスを明らかにする必要がある.流路 形態の変化を土砂流量,河川流量,河床勾配あるいは堆積物の粒径等の河川要素 と関係するが、この流域では、網状流路という流路形態は維持されつつも河道の 地形が定期的に変化する現象が生じており、前述の河川要素の変化に対応する流 路形態の変化ではない、近年、生物多様性を提供する場として礫床の網状河川が 注目されているが、河道内の流路の移動や侵食、堆積の実態は明らかにされてい ない、この上高地での河道の動態を解明するには、毎年生じる河道の地形変化の 実態と地形プロセスを明らかにして、変動する河道のなかでどこにケショウヤナ ギの定着する場がつくられるか、またどのような場でケショウヤナギが生きのび 生長するのかを考察する必要がある.上高地では、河道と氾濫原の位置関係が数 100 年スケールで変動しており、現在の景観は河道の現在の位置への移動後に生 じた河道地形の年々変動の積み重ねによって形成されてきたものである. したが って、その変動の様子を明らかにすることは、さらに長い時間スケールでの景観 形成の解明にもつながるものとなる.本研究で示したドローングリーンレーザ測 量システムの活用による測量は, この 1 年スケールで起きる網状河川の地形変化 プロセス、とくに流路の移動のしかたを明らかにするとともに、地形変化の激し い礫床網状河道においても場所によって地形変化の起こりかたや頻度が異なるこ とを明らかに出来ると期待される.

この網状河道の微地形を考察するための解析結果を示す.図4-20は植生除去後 の陰影図,そして図4-21は陰影地形グラデーション図である.これらの図では, 網状流の形状や流木の集積状況が視認できる.また図4-22に標高段彩図,図4-23 には,図4-22に等高線を重合した図を示す.これらの図から,容易に微地形が読 み取れる.さらに,図4-24に微地形陰影図を作成し,網状河道の詳細な地形を可 視化することが可能であることを示す.

67



図 4-20 植生除去後の地形陰影図



図 4-21 陰影地形グラデーション



図 4-22 標高段彩図

上高地では,1995年以降毎年同位置で図 4-24 に示すような実測が実施されて きた.図には水路は描かれているが,水中部の情報は無い.今回は水陸同時計測 することで,水中を含む網状流や河畔林の立体形態も河童橋から横尾までの区間 で可視化されており,本手法の有用性が実証された.



図 4-23 図 4-22 に等高線を重ねた標高段彩図



100m 4



図 4-24 微地形陰影図

図 4-25 1996 年作成の実測地形図
4.3 第4章の結論



第5章 結論および今後の展開

5.1 本論文の結論





5.2 今後の展開

グリーンレーザの開発により被災直後でもスキャンできることになったが、 現在は、さらにドロー測量を高度化するためにドローン自体の耐環境性、特に強 風時の対応が必要となった。特に、被災直後は悪天候であることが多く、全天候 型ドローンの開発が急務であり、将来は被災中でも測量が可能になることが期待 される.本研究では、2組のプロペラを同軸に配置し、各組を相互に逆方向に回 転させる図 5-1 のような 2 重反転構造の羽根をもつドローンを開発した。この構 造ではカウンタートルクを相殺できることで安定飛行を可能にし、さらに1組で は流れのねじれによるエネルギー損失が相殺により無くなるので、電池のパワー をより効率的に生かすことができる.すなわち、これまでのドローンでは.一つ の羽根の回転の反力を反対に回転する羽根で打ち消す必要があり、このバランス が安定性に大きく影響していたが、2 重反転構造では各羽根のトルクがその場で 打ち消されるので、機体全体の安定性が向上する.また構成部品が少なくなるの で、電気消費量が少なくなり、電池のパワーを効率的に生かすことが出来るの で、強風下での安定な飛行が可能になる.



図 5-1 2 重反転構造のプロペラ

以上の2重反転構造の羽を8枚搭載したドローンを試行させた結果,5m/s以上の強風下での飛行は可能であることを実フィールドで確認する実験を行った.

図 5-2 は、地上 20m/s の風速下でも安定な飛行を行うことを確認した状況を示 すものである.このように理論的に悪環境下でも安定飛行が可能な 2 重反転構造 のプロペラの有用性は実証された





図 5-2 全天候ドローンの飛行実験状況

:風速 20m/sの状況下での飛行

参考文献

第1章

- ・大西有三:ドローンを用いた測量技術の教育・研究,認定資格の実施等について (特集 i-Construction の取り組み(2)調査・設計等における生産性の向上), 建設マ ネジメント技術, 493, pp.51-54, 2019.
- ・青山幸男:建設現場でのドローン空撮ならびにレーザ測量データの活用例(特集環境のビッグデータとそのデータ解析技術),環境技術,48(3),pp.131-135,2019.
- ・吉田勇介:平成 30 年 7 月豪雨災害のドローン測量支援 (特集 災害復旧現場で 活躍する施工機械),建設機械, 55(7), pp.1-7, 2019.
- ・野波健蔵:ドローン技術の現状と課題および ビジネス最前線,情報管理, Vol.59, No. 11, pp.755-763, 2017.
- ・野波健蔵:地理空間情報の科学と技術,測量,64(5), pp.10-15, 2014.

第2章

- ・間野耕司,堺浩一,橘菊生,冨井隆春,西山哲:UAV レーザ計測システムのキャリブレーション,応用測量論文集, 30, pp.63-74, 2019.
- ・弓場憲生:ドローン空撮による被災の測量:従来手法と比較して(第52回森林・林業技術シンポジウム:新時代につなぐ日本の森:防災、持続、利用を考える),森林・林業技術シンポジウム,52,pp.29-34,2019.
- ・杉山忠: UAV マルチコプター・3D レーザースキャナーの概要と今後の展開:
 施工の生産性向上(i-Construction)への貢献(特集 ドローンと画像の建設活用:
 最新技術を探る),建設機械, 52(8), pp.55-61, 2016.
- ・富井隆春:ドローンと呼ばれる無人航空機 (特集 ドローン(無人機)と画像技術の融合),映像情報 industrial, 47(11), pp.23-30, 2015.

第3章

・原口強, 杉本一起, 冨井隆春:ドローンレーザー計測による斜面崩壊地形の迅速可視化: 2018 年 4 月耶馬溪土砂災害を例として, 都市防災研究論文集, 5,

pp.33-39, 2018

- ・(公) 地盤工学会,平成 29 年 7 月九州北部豪雨地盤災害調査団先遣隊調査メン バー:平成 30 年 4 月中津市耶馬渓町金吉梶ケ原地区における斜面崩壊と今後 の問題点.pp.1-51,2018.
- ・春口孝之,松場康二,渡部芳彦:ドローンを使用した不安定岩盤の抽出(小特集)ドローンの地質調査への活用),地質と調査,2017(1),pp.32-36,2017.

第4章

- ・中村圭吾:グリーンレーザを用いた航空レーザ測深(ALB)による河川調査の現状と可能性(特集水環境研究におけるドローン・リモートセンシング技術活用の最前線),水環境学会誌,42(5),pp.174-178,2019.
- ・森田真一, 冨井隆春:河川におけるドローンレーザの実証実験 (特集 ドローンを活用した計測), 計測技術, 47(1), pp.24-30, 2019.
- ・佐藤寿延:「革新的河川管理プロジェクト」陸上・水中レーザー測量ドローンの 実用化,写真測量とリモートセンシング, Vol.56, No.1, pp.22-23, 2017.
- ・森田真一:陸上・水中レーザードローン開発への取り組み(特集河川管理の高度化に向けた取り組み)--(革新的河川管理プロジェクト(第一弾)),河川, 73(9), pp.11-14, 2017.
- ・中村秀至,関本義秀,樫山武浩,坂下裕明,宮作尚宏,川村裕:河川における航空 レーザ測深技術の適用可能範囲推定方法の開発, Vol.53, No.5, pp.213-218, 2014.
- ・上高地自然史研究会:上高地梓川の河辺植物群落の動態に関する研究,図表報告書,1997.
- ・砂村継夫:土木工事における海岸地形の変化,小池一之・太田陽子(編),「変化する日本の海岸」古今書院, p.117-127.1996.

75

謝 辞

主査を務めて頂きました岡山大学大学院環境生命科学研究科 西山哲教授,副 査を務めて頂きました岡山大学大学院環境生命科学研究科 吉田圭介准教授, 岡山大学大学院環境生命科学研究科 木本和志准教授のご指導の下,本論文を 完成するに至りました.厚く御礼申し上げます.

また京都大学名誉教授 大西有三先生,大阪市立大学理学研究科 原口強教 授,岐阜大学工学部附属インフラマネジメント技術研究センター 沢田和秀教 授には,貴重なご助言を頂きました.御礼申し上げます.