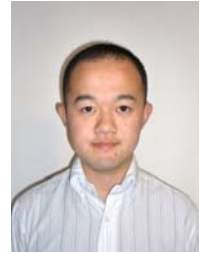


# ラジコンヘリコプターを用いたレーザ計測システム と河川防災・環境計測技術の開発



渡辺 豊<sup>1</sup>・河原能久<sup>2</sup>・荒木義則<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 株式会社 ECR 環境計測部 (〒733-0031 広島市西区観音町 6-7)

<sup>2</sup> 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>3</sup> 中電技術コンサルタント株式会社 河川部砂防グループ (〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30)

河川や砂防区域の物理環境データ（地盤高，植生等）はそれぞれの計画や管理の根幹を支えるものであり，その質・量をさらに充実させていくことが求められている．河川や砂防区域の物理環境は場所的にも時間的にも変化するため，迅速かつ低コストで計測することが必要である．本技術は，自律飛行型ラジコンヘリコプターに3次元レーザスキャナを搭載し，レーザ測量を用いて地表面を計測する技術であり，高精度・高可動性・低コストで物理環境を計測することを目指したものである．

キーワード レーザ計測，河川物理環境，自律飛行，ラジコンヘリコプター，DEM

## 1. 序論

河道の物理環境データは河川整備計画の策定や生態環境評価に不可欠な基礎情報である．現在，一級河川においては定期横断測量や空中写真撮影等，様々な調査により，河川環境のデータが整備されている．しかし，一級河川の支川や中小河川においては河道の横断面形状に関するデータすら不足しているものが大半である．このため，洪水被害の軽減対策や河川環境の保全対策を進めるためには，河道の物理環境データを整備することが急務となっている．

近年，この問題を解決するために航空レーザ測量が活用されてきた．航空レーザ測量とは，航空機に搭載する走査型のレーザ測距システムで，GPSとIMU（慣性計測装置）を統合したPOS（直接定位システム）により位置と姿勢を測定し，これに航空機から照射するレーザ測距データを統合することで，地表面の形状を測定する手法である<sup>1)</sup>．航空レーザ測量における誤差要因は，これらの計測機器に起因する誤差が複合したものである．具体的には，GPSシステムによる水平・鉛直誤差，IMUシステムによる水平誤差，レーザ測距システムによる鉛直誤差などが主な要因となる<sup>2)</sup>．また，航空レーザ測量におけるレーザ測距では，地上でのレーザのスポット径が数cmから1m程度の大きさとなり，そのスポット内での中間的な位置情報が計測される．ファーストパルス情報によりスポット内の比較的上位の位置情報が，ラストパルス情報によりスポット内の比較的低位の位置情報が取得

されることとなる．このような特性は，特定の点の位置の計測を目的とする従来の測量法と異なっており，計測結果の解釈というプロセスが必要となる理由の一つとなっている．

航空レーザ測量に用いる航空機としては，航空レーザ測量システムの容量や重量，運用上の理由により，これまで航空機や有人ヘリコプター<sup>3)</sup>が用いられてきた．しかし，最近では，航空レーザ測量システムに利用される各要素技術の発展により小型化が進んだこともあり，ラジコンヘリコプターを用いた計測も可能となっている．本研究では，自律飛行型のラジコンヘリコプターを利用して低高度で高密度に取得されたデータをもとに，河川の物理環境情報の取得法の開発を行っている．ここでは，平成21年に行った計測データの精度検証の結果について報告する．

## 2. 調査区間と現地観測

### (1) 太田川での実証実験計画

ラジコンヘリコプターによるデータ計測は，図-1に示すように一級水系太田川の下流域において様々な地表面被覆状況を有する太田川11K～12K（広島市安佐南区川内四丁目付近）区間において，平成21年1月14日と4月21日に実証実験を行った．実証実験では，レーザ計測および空中写真撮影を行うと共に，レーザ計測の精度検証用のデータを取得するために，特徴的な地表面被覆を有する断面において横断測量を行った．また，スタッフを用



図-1 太田川での計測区域 (航空写真)



図-2 相田地区での計測区域

いた植生高の計測，左岸の水際線での水位の縦断測量，礫河原での粒径調査を行った。

## (2) 相田地区での実証実験

ラジコンヘリコプターを使った土砂災害対応を想定した

実証実験を行うために，相田地区（広島市安佐南区相田7丁目）においてレーザ計測および空中写真撮影を平成21年1月14日に行った。相田地区は，土石流危険渓流に指定されており，現在，広島西部山系直轄砂防事業により砂防堰堤（海田ヶ原川砂防堰堤）が整備されている。当該渓流に土石流が発生した場合には，緊急的な溪流調査により流出土砂量や溪流に残っている不安定土砂量の推定等が求められることから，空中写真による溪流の状況把握，レーザ計測による地形・地物の3次元計測への適用性について確認した。

## 3. 計測プラットフォームと計測センサー

### (1) 自律飛行型ラジコンヘリコプター

計測プラットフォームとして使用したのは，図-3に示す産業用ラジコンヘリコプターである。このラジコンヘリコプターの一番大きな特徴は，人間が遠隔で操作することなく予めプログラミング設定したコースを自動で飛行できる自律飛行を行うことにある。機体内部にGPSとジャイロを搭載し，各時刻での機体の位置・姿勢を把握・制御することによって自律飛行を実現させている。機体の諸元を表-1に示す。輸送はワンボックスカーにて搬送でき，運送コストを抑制することができる。ただし，注意事項としては下記のことがある。

- ・ 人家の上を飛行できない（無人地帯のみ飛行可能）等の飛行制限がある。これは，JUAUV（日本産業用無人航空機協会）で規定されている。
- ・ 訓練を受けた者しか運用できない。
- ・ 気温や標高によりペイロードの制限を受ける。（実用運用高度限界：約800m。）

### (2) 計測センサー

上記のラジコンヘリコプターに計測システム（レーザスキャナ，GPS，IMU）を搭載した。その計測システムの性能を表-2，表-3に示す。レーザスキャナの重量は11.1kgであり，1秒間に12,000点の計測が可能である。

レーザの安全規格はClass 1であるため，低高度での計測も問題なく行うことができる。ビームの広がり角は



図-3 ラジコンヘリコプターの外観

表-1 機体の諸元

全長	3.64m(本体2.75m)
最大離陸重量	94kg (燃料込み)
ペイロード	10kg (標高0m, 気温20°C)
最高速度	72km/h
燃料タンク容量	11L
飛行時間	90分以上
飛行範囲	基地局から半径5km
飛行制限	雨量5mm/hr以下
	地上風速10m/s以下
運用人員	3名

表-2 レーザの諸元

レーザ発射周波数	12,000Hz
使用レーザ波長	0.9 $\mu$ m
レーザクラス	クラス1
ビーム幅	3mrad
レーザ測定精度	$\pm$ 25mm
最大スキャン数	50Hz
最大スキャン角度	$\pm$ 140°
計測高度	対地2m~200m
ミラー回転数	20Hz
重量	11.1kg

表-3 IMU/GPSの諸元

ドリフトレート	0.1deg/h
フレームレート	400Hz
GPS受信機	2周波,12ch,20Hz

3mradと多少大きいながらも計測時の高度が低いため、地上でのフットプリントは高度50mで15cm、高度75mで22.5cmとあまり大きくならない。

### (3) 計測方法

河川管理に用いられている既存のDEMデータを用いて予め計測コースのプログラミングを行い、自律飛行にて計測を行った。図-4に4月21日での飛行コースを示す。計測高度は75m、飛行速度は3 m/sを保持するようにプログラミングを行い、コース間のレーザのラップ率は50%となるよう計画した。なお、レーザ照射角度は両端の堤防に沿って運航しているときには45°、その他のコースでは40°とした。レーザの取得モードはファースト・ラストパルスを交互に取得する交互モードとした。本計測での地上でのレーザ径は22.5cmであった。

## 4. レーザ計測データの精度検証

### (1) 三次元計測データの精度検証

三次元計測データの精度検証として、公共作業規定の準則4)を参考にレーザ計測結果の精度を検証した。点検方法は、実測で求めた調整用基準点とレーザ計測点の標高値の較差点検として行った。以下、その手順を示す。

実測で求めた調整用基準点に対して、調整用規準点を中心とする0.5mの半径内にあるレーザ計測データを対象として較差点検を行った。

較差の平均値、標準偏差、RMS誤差を求めた。

今回用いた調整用基準点は、図-11に示すように右岸側では駐車場のGPS計測点(2点)、高水敷のGPS計測点(3点)、左岸側では高水敷のGPS計測点(2点)の合計7点とした。

その結果、半径0.5m以内にあるレーザ計測点に対して算出した較差平均値は-0.037m、標準偏差は0.0248m、RMS誤差は0.04455mであった。公共作業規定の準則では「点検の結果、標準偏差が25cm以上又は平均値が $\pm$ 25cm以上の場合には、原因を調査の上再計算処理又は再

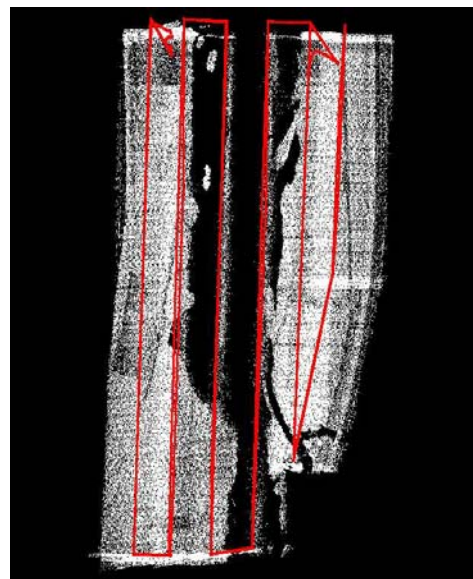


図-4 飛行ルート

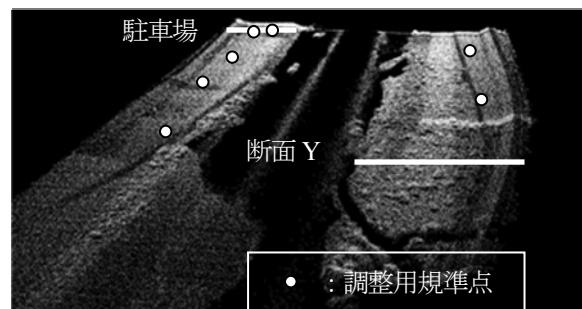


図-5 三次元計測データ



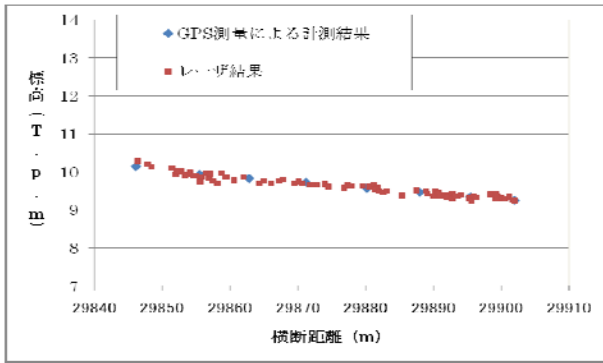


図-6 駐車場におけるオリジナルデータの精度の検証

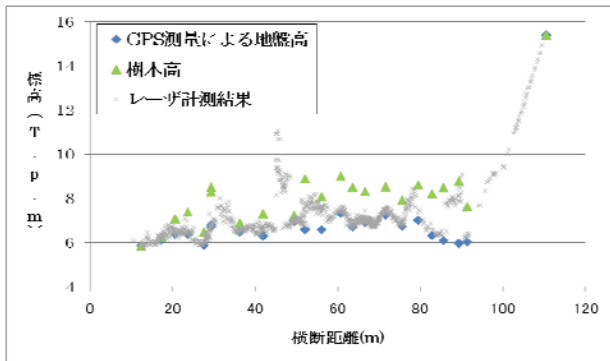


図-7 断面 Y におけるオリジナルデータの精度の検証

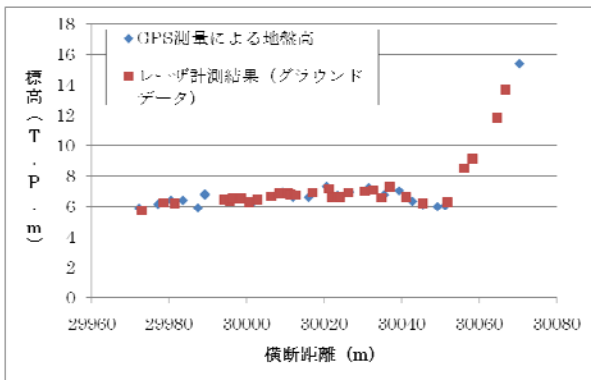


図-8 断面 Y におけるグラウンドデータの精度の検証

計測等の是正処置を講ずるものとする」とあることから、本計測データについては高精度なデータを取得することができたと判断される。また、取得した3Dレーザのデータ密度は、最大で118点/m<sup>2</sup>と高密度な計測結果が得られており、詳細な地形を再現することが可能であることが示された。

その結果、半径50m以内にあるレーザ計測点に対して算出した較差平均値は-0.037m、標準偏差は0.0248m、RMS誤差は0.04455mであった。公共作業規定の準則では「点検の結果、標準偏差が25cm以上又は平均値が±

25cm以上の場合は、原因を調査の上再計算処理又は再計測等の是正処置を講ずるものとする」とあることから、本計測データについては高精度なデータを取得することができたと判断される。図-5にレーザ計測によって得られた三次元計測データを示す。データ密度が118点/m<sup>2</sup>もある箇所もある。

## (2) オリジナルデータの精度検証

駐車場と断面 Y における実測値とオリジナルデータをそれぞれ図-6、図-7に示す。ラジコンヘリコプターによる三次元計測データはGPSによる測量データと良好に一致している。植生が繁茂している断面 Y では、オリジナルデータは地盤高と植生高の間に位置しており、地盤高を検出している地点も多いことがわかる。

## (3) グラウンドデータの精度検証

次に、オリジナルデータについてフィルタリング処理を行うことによって、植生を除去したグラウンドデータを作成し、実測の地盤高と比較した。フィルタリング方法は、縦横方向両方で1m間隔に計算していくが、許容角度を設定し、計算方向に対して現在の点より30°の角度よりも小さい点は採用とし、30°以上の点は不採用とする方法を用いている。図-8にグラウンドデータと実測の地盤高を示す。グラウンドデータは地盤高を良好に表現していることがわかる。

## 5. 河川の物理環境データの推定と検証

### (1) 河川水位

本計測で使用しているレーザ光線は、波長が0.9μmと近赤外線であるため、本来であれば水域ではレーザ光線は吸収されてしまい反射光が返ってこない。しかし、本計測では明らかに水域とわかる領域で機体の直下付近においてレーザデータが多数取得できている。これは、高度が低いために、鏡面状態となっている水面での反射光を計測したものと考えられる。この水面のデータを取得

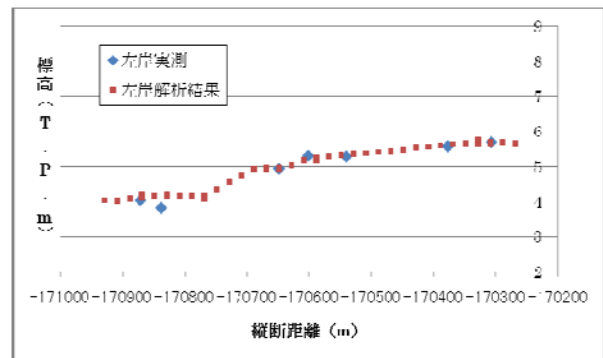


図-9 左岸の水際線の水位の比較

しているという特徴を考慮し、次のようにして河川水位を推定した。

- ① 水域のオリジナルデータから水際線近傍のデータを抽出する。
- ② 縦断的なメッシュ（本計測では2m）で区切り、そのメッシュ内での平均値を縦断メッシュ内の推定水位とする。図-9に左岸の水際における縦断水位の実測値と河川内データを利用した河川水位の推定値との比較を示す。実測データも数cmのGPS計測誤差を含まれること、水際の水位と河川内の水位が一致しない場所もあることから、提案する方法によって河川水位は算出可能と言える。

## 6. 砂防分野への適用性

ラジコンヘリコプターの砂防分野への適用は、土石流等の土砂災害が発生した直後に、立ち入りが危険な地域に対して低空からの写真撮影や3Dレーザ計測により、土砂災害の状況把握、災害復旧のための調査への適用性について検討した。

ラジコンヘリコプターに搭載したカメラシステムによる空中写真撮影では、砂防堰堤の土砂の堆積状況を把握するために目的地点までラジコンヘリコプターを移動させ垂直写真を撮影した。図-10に砂防堰堤周辺の垂直写真を示す。砂防堰堤への土砂堆積状況を詳細に確認でき



図-10 砂防堰堤（垂直写真）

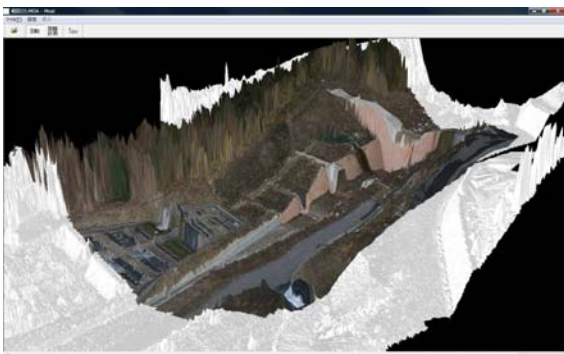


図-11 3Dモデルとオルソ写真の合成

たことから、今後、土石流の発生により砂防堰堤に堆積した土砂の状況を把握することができる。また、フライト途中であっても基地局においてカメラ画像のモニタリングと遠隔操作による写真撮影が出来るため、砂防堰堤の斜め写真を撮影することもできる。このように、低空からのカメラ画像を用いて自由に写真撮影を行うことが出来ることから、災害の状況把握に十分に効果を発揮することが期待できる。

一方、ラジコンヘリコプターによるレーザ計測から求まる3Dモデルと複数の垂直写真から作成したオルソ画像を合成することにより、図-11に示す3次元立体モデルを作成した。この3Dモデルは、今後、土砂災害が発生した後に再計測し、差分解析を行うことで、土砂変動量の計算が可能となる。

## 7. 結論

本研究で得られた主要な知見を以下に示す。

- ・ 遮蔽物の少ない場所においてグラウンドデータを実測値と比較し、グラウンドデータが高精度・高密度で得られていることを確認した。
- ・ 水面での反射データから水際での河川水位を推定できることを示し、縦断水面形が得られることを確認した。

今後の課題として次のことが挙げられる。データ密度が高く、フィルタリング時に植生を地盤と認識してしまう箇所があった。高密度データの特徴を活かしたフィルタリング方法の開発が必要である。また、安佐南区相田地区の海田ヶ原砂防えん堤周辺も計測しており、砂防区域における物理環境の解析を行う予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、社団法人中国建設弘済会の研究助成を頂き、深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小野田敏, 高山陶子, 沼田洋一, 豊山孝子, 佐々木靖人: 航空レーザ計測およびGISによる斜面防災への応用, APA No.82-15, pp. 82-15, 2002.
- 2) 高橋博将: 航空レーザ測量における標高精度の検証, APA No. 77-9, pp. 66-74, 2000.
- 3) 内田龍彦, 河原能久, 山水綾, 渡辺豊, 森山学: ヘリコプターに搭載した高精度3Dレーザスキャナによる河川の物理環境の計測, 河川技術論文集, 第13巻, 2007.
- 4) 国土交通省: 作業規定の準則, 2008.