

ドローンを用いた平成28年熊本地震が農地の地表に及ぼした影響の調査 - 3次元モデリング解析を活用した不陸評価 -

石塚直樹・岩崎亘典・坂本利弘

(2018年10月24日 受理)

要 旨

石塚直樹・岩崎亘典・坂本利弘：ドローンを用いた平成28年熊本地震が農地の地表に及ぼした影響の調査-3次元モデリング解析を活用した不陸評価-。九州沖縄研究資料 95：3-9, 2019.

地震による被災農地圃場では、被害状況により、復旧に向けた対策が異なってくる。このため、熊本地震が農地の地表に及ぼした影響についてドローンを用いて調査した。ドローン空撮画像にSfM・MVS処理を行うことで3次元モデルを作成し、国土地理院の地理院地図の座標値と地上における簡易測量結果を組み合わせることで、DSMを作成した。その結果、圃場の不陸量（ほ場の平均標高値からの差）や亀裂が計測・評価可能であることを明らかにした。ドローンで計測した不陸量は、航空機LiDAR測量と比較したところ、有意な差が認められない高い精度を有していた。一方、計測コストは航空機LiDAR測量の約1/3であり、加えて、迅速に機動的な観測が可能という利点がある。さらに、ドローン観測により確認された規則的な地表面の不陸について原因を探ったところ、不陸の凹部が1962年撮影の航空写真の水路部分と一致しており、熊本地震により圃場基盤整備前の水路の埋め立て部分が沈下したことを明らかにした。

キーワード：熊本地震，ドローン，不陸，SfM・MVS

I. 緒 言

2016年4月14日と4月16日に震度7を観測する地震が発生した平成28年度熊本地震（以降、熊本地震）は大きな被害をもたらした。様々な農業被害も発生しており、農林水産省のまとめ（平成29年4月10日時点）では、被害額の合計は1,320.5億円となっている。このうち、農地の損壊は熊本県のみならず福岡県、佐賀県、大分県、宮崎県、鹿児島県で11,696箇所発生し、被害額は278.3億円と報告されている（農林水産省 2017）。被災農地圃場では、段差、地割れ、液状化、噴砂等が発生し、作物の作付ができないケースも多くみられた。

このような被災農地では、被害状況により、復旧に向けた対策は異なってくる。重篤な被害であれば、

土木工事を含めた対策が必要であり、軽微な被害であれば、農家による対策のみで作付を再開することが可能である。国が定める土地改良事業などの土木工事施工管理基準（農林水産省 2015）では農地土面は高低差規格値±5cm以内、施工管理目標値として±3.5cmに収まることが望まれている。これはこれ以上の高低差があると湛水および水管理が困難になるためである。地震が起こった際、農地土面に基準値以上の高低差が生じることは、過去の新潟県中越地震や能登半島地震、2011年東北地方太平洋沖地震においても報告されている（藤森ら 2006, 大嶺ら 2006, 若杉ら 2008, 北田ら 2009, 小柳ら 2012, 若杉ら 2012）。この地表面が均平でなく凹凸がある状態を土木用語で「不陸（ふりく）」、歴史的には「不陸（ふろく）」といい、圃場内における不

陸量が大きいと水田における稲作が困難になる。

本研究は、熊本地震により発生した農地損壊被害の一つである水田における不陸を、マルチコプタ型の UAV (Unmanned aerial vehicle) いわゆるドローンをを用いて計測した結果について報告する。

本調査は、農林水産省の平成 28 年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業の緊急対応研究課題として実施された。炎天下におけるオートレベルによる地上計測には、九州沖縄農研センター中野恵子、川口康崇氏、伊藤博人氏にご協力頂いた。熊本県からは、熊本市東区秋津町における LiDAR 測量結果を提供いただいた。ここに謝意を示す。

Ⅱ. 材料および方法

1. 材料

1) ドローンによる空撮

熊本市東区秋津町・益城町・阿蘇市を対象として 2016 年 7 月 14～15 日, 8 月 3～5 日, 9 月 26～28 日, 11 月 9～11 日に合計 56 フライトのドローンによる現地観測を実施し、空撮画像を取得した(第 1 表)。撮影に使用したドローンは、Phantom3 Professional・DJI 社製, Phantom3 Standard・DJI 社製, S900 DJI 社製を用いた。Phantom3 シリーズについては、上空 50m もしくは 100m から、標準装備のカメラ (FC300X, FC300C) を鉛直下向き方向に向けて対象圃場の空撮を行った。S900 については、RICOH 社 GR を搭載して撮影を行った。

第 1 表 事業期間中に行ったドローン観測一覧

撮影日	場所	対象	機材
7 月 14 日	秋津町	裸地	P3P ^{a)}
7 月 15 日	秋津町	裸地, 水田	P3P, P3S ^{b)}
8 月 3 日	阿蘇市	水稲	P3P
8 月 4 日	秋津町	水稲	P3P
8 月 5 日	秋津町	水稲, 大豆	P3P
9 月 26 日	秋津町, 益城町	水稲, 大豆	P3S, S900 GR ^{c)}
9 月 27 日	秋津町	水稲, 大豆	P3S, S900 GR
11 月 9 日	秋津町, 益城町	水稲, 大豆	P3S
11 月 10 日	益城町	水稲	P3S
11 月 11 日	阿蘇市, 秋津町, 益城町	水稲, 大豆	P3S

a) Phantom3 pro, b) Phantom3 standard, c) S900+GR.

熊本市東区秋津町の水田圃場では、地震発生時この付近の圃場では転作コムギが作付されており、2016 年 6 月上旬まで栽培された。その後、地震に

よる給水パイプや用水路の損壊によって農業用水の利用ができない状態にあったこともあり、多くの圃場では転作ダイズが作付された。熊本県益城町の対象圃場では、地震発生時の作付状況は不明であるが、地震発生後は多くの圃場において水稲が作付された。阿蘇市の対象圃場は、一部を除き、多くの圃場において水稲の作付がなされなかった。

2) 地上計測

後述する SfM・MVS による 3 次元モデルの生成では、地上基準点 (GCP: Ground Control Point) における標高が必要となる。そこで熊本市東区秋津町の一部において、8 月 4 日に、任意の場所に設定した基準点からの相対的な高低差を 16 地点について、オートレベル (ソキア社製 B20) を用いて計測し記録した。

2. 方法

1) SfM・MVS による 3 次元モデルの生成

取得した空撮画像に対して SfM (Structure from Motion)・MVS (Multi-view stereo) 技術を用いて圃場土面に生じた凹凸を計測した。SfM とは、画像に映った同じ対象物の見え方の違いから、形状とカメラの位置・方向を同時に推定する手法であり、結果として画像間における同じ特徴点の 3 次元座標が得られる。MVS とは、多視点ステレオとも呼ばれ、2 枚の画像の見え方の違いから距離を推定することで 3 次元形状を求めるステレオ画像処理を、3 枚以上の画像も同時利用するように拡張した手法である。解析に使用したソフトウェアは、Agisoft 社 PhotoScan Professional バージョン 1.2.6 である。処理中に与えた GCP としては、熊本市東区秋津町については、ドローン撮影日に行った簡易測量における基準点からの相対的な高低差、および国土地理院の地理院地図より読み取った基準点の座標値を使用した。秋津町以外の地域については、地理院地図の座標値、標高値を使用した。

2) 圃場不陸量の算出方法

熊本市東区秋津町における 10 圃場 (740～5540 m²) について圃場単位での不陸量の算出を行った。圃場内の不陸量は、圃場平均標高値を基準面 (0cm) とした上で、基準面からの高低差 (凸部: プラス, 凹部: マイナス) で表現した。まず、取得したドローン画像より作成したオルソ画像 (正射投影画像) をオープンソースの地理情報システムである QGIS

(<http://qgis.org/ja/site/>) で読み込み、手動にて圃場区画ポリゴンを作成した。次に、PhotoScan による3次元モデリング解析によりドローン画像から作成されたDSM (Digital Surface Model) を用いて、圃場区画ポリゴン内の標高値の平均(基準面)を求め、圃場区画ポリゴンの属性データとして圃場平均標高値を格納した後、ベクターラスタ変換を行い、圃場平均標高値のラスタ画像を作成した。最後にドローン画像から得られたDSMのラスタ画像と圃場平均標高値のラスタ画像の差分をとることで、不陸量を算出した。

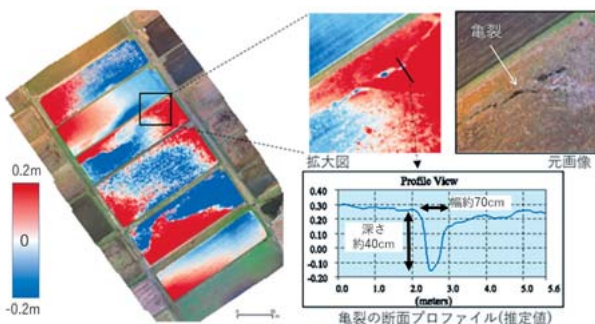
3) 不陸量の計測精度検証

熊本市東区秋津町において、熊本県から提供いただいた航空機LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) 測量データ(2017年5月24日撮影)を用いて、圃場内のおよそ28万点(0.6~1.1点/m²)を対象に、ドローンによる計測値との比較を行った。不陸量の真値(トータルステーション等による実測値)があれば、それぞれの計測値と真値を比較すべきであるが、真値は不明である。そのため、公共測量作業規定に基づいて作成された航空機LiDAR測量値を正しいと見なし、ドローンによる計測値との間でt検定を行い、両者のデータに有意な差の有無をもって精度検証とした。

Ⅲ. 結 果

1. 3次元モデルによる亀裂・段差等の計測

阿蘇市において、8月3日の15時から15時15分までのフライトで取得した空撮画像に対してSfM・MVS処理を行い3次元モデルを作成し、DSMを得ることができた(第1図)。作成されたDSMを見ると、傾斜部分は徐々に色が変化してい

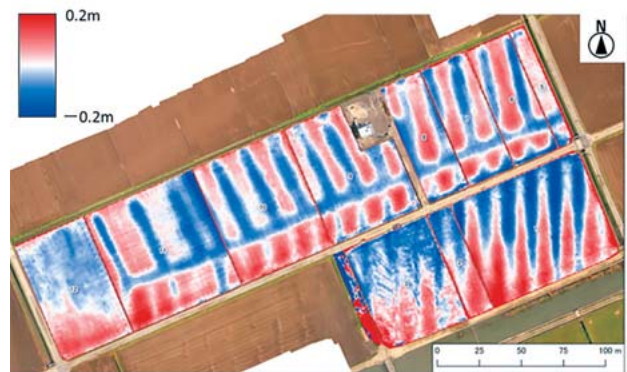


第1図 ドローンによる圃場に生じた亀裂・段差の計測例

る一方、段差や亀裂などでは色が急激に変化しており、高低差が大きいことが分かる。また、画像中の亀裂部分に対応するDSMを計測すると、亀裂の幅や深さを計測することが可能である。

2. 不陸量の算出

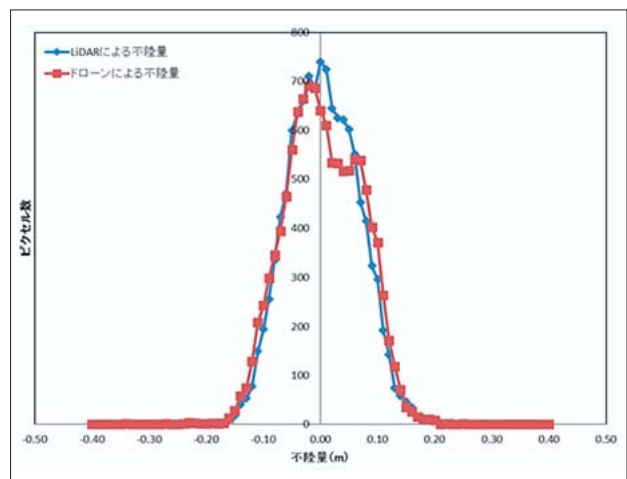
熊本市東区秋津町において、7月15日の8時28分から8時38分までのフライトで取得した124枚の空撮画像に対してSfM・MVS処理を行った結果、解像度約2.5cmのオルソ画像と解像度約5cmのDSMを得ることができ、不陸量を面的に算出することができた(第2図)。秋津地区の10圃場を計測した結果、圃場平均面より±5cm以上の凹凸のある面積割合は54.6%であった。



第2図 ドローンによる圃場毎の不陸計測結果
2016年7月15日撮影

3. 計測精度検証結果

ドローン計測値と航空機LiDAR測量値との比較結果を第3図に示す。航空機LiDAR測量値を正しいと見なし、t検定を行ったところ、両データ間に有意な差は認められなかった。また、航空機



第3図 ドローンによる不陸計測結果と航空機LiDAR(熊本県提供)による不陸計測結果の比較

LiDAR 測量値に対するドローン計測値の誤差の標準偏差は7.4であった。

IV. 考 察

1. ドローンによる水田不陸計測について

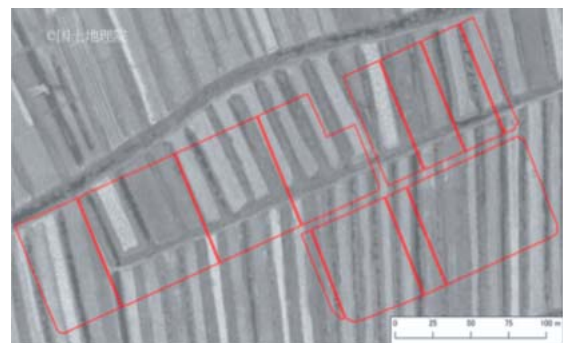
先に述べたように、ドローンによる水田圃場の不陸計測については、航空機 LiDAR 測量と統計的に有意な差は認められなかった。第3図のグラフを見ると、航空機 LiDAR とドローンから得られた不陸量は概ね一致しているが、 $\pm 5\text{cm}$ 程度の範囲では航空機 LiDAR との間で差が見られる。航空機 LiDAR 測量とドローンによる計測の間には約2ヶ月半の時間差があるため、その間の余震による地表の変化や、農家が独自に復旧を試みたことによる土の移動なども影響している可能性がある。また、両者の空間解像度が大きく違うことも影響していると考えられる。今回の航空機 LiDAR 測量データは先の面積あたりの点数からわかるように、フットプリントが約1mの円と大きく、レーザーの照射面の平均値しかわからない。一方、ドローンによる計測は5cmメッシュであるため、たまたま評価点が航空機 LiDAR 測量値の平均値より高い場合と低い場合が発生する可能性がある。航空機 LiDAR 測量値に対するドローン計測値の誤差の平均値は0.09cmと非常に小さい値となっており、図3の両者のヒストグラムのピークもほぼ一致していることから、十分な精度を有していると考えられる。

コストについて km^2 単位面積あたりで比較をすると、航空機 LiDAR 測量が270万円ほどであるのに対し(古川・秩父 2015)、ドローンの場合はドローン本体、ソフトウェア等の初期費用を含めても80万円程度であり、およそ1/3という試算結果になった。これは初期費用としての機材費に現地での簡易測量の費用を加えて算出した値であり、2回目以降の計測では、ドローン計測と簡易測量にかかる人件費および消耗品代の数万円と解析費用のみとなるため、さらに圧縮される。なお、今回の試算ではドローン計測・解析を自ら行うことを想定して計算しており、外注した場合は想定していない。航空機 LiDAR 測量は、既に公共測量作業規定が制定されているなど、測量方法として確立したものであり、それと有意な差無く不陸の計測が可能でドローン計

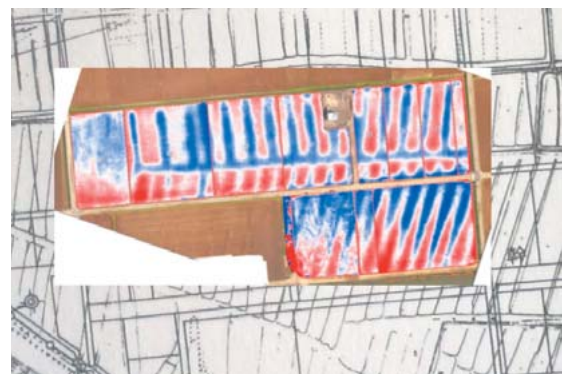
測は、非常に有用なものと言える。特に、航空機 LiDAR 測量の場合、飛行前の準備やデータの処理に日数を要するのに対し、ドローンの場合は、天候によるが、必要な時に直ぐ撮影をすることが可能であり、対象範囲が狭いためデータ処理も短時間で終わることが可能である。つまり、この迅速性は、今回の熊本地震のような被災農地の実態調査に非常に有用といえる。一方、マルチコプタ型のドローンの多くは、現在のところ飛行可能時間が30分未満と短く、また、高度150m未満で運用しなければならないため、航空機 LiDAR 測量のように広域を一度のフライトで計測するのは不可能である。したがって、対象とする農地の面積や、求められる迅速性に応じて、適した方法を選択する必要がある。

2. 不陸発生の素因究明

対象地においては、第2図にみられるような規則的に波打つ形での不陸が観察された。この規則的な不陸が何によるものか検討を重ねた結果、1962年撮影の航空写真(第4図)において、当時の水路と判読できる部分と、凹部が一致していた。さらに土地改良区の資料(秋津飯野土地改良区1996)より圃場基盤整備前の秋津地区には細い水路が多数存在したことを確認するとともに、基盤整備以前の圃場の水路部分と、ドローンによる不陸計測結果の凹部が一致していることを確認した。(第5図)。



第4図 1962年に撮影された第2図と同地域の航空写真



第5図 基盤整備前後の圃場図(背景;秋津飯野土地改良区(1996))に計測された不陸図(第2図)を重ねた図

災害は、被害が生じる素因を有する場所に、誘因となる事象、つまり地震や大雨などが起こると発生するとされている。今回のこの水田に発生した規則的な不陸被害は、基盤整備前の非常に密に入ったクレークが素因となり、熊本地震によって沈下が誘発されたと言える。

今回のように過去の土地利用や地形と、地震による被害が関係している報告は、数多く存在している。しかしながら、今回のような圃場基盤整備前の密なクレーク跡が地表面に現れて来たという報告は見当たらない。これは、密なクレークがある水田が特殊な水田形態であることと、熊本地震が短期間に震度7が2回発生するという観測史上希な地震であったことが影響している可能性がある。

誘因となる地震はいつどこで、どのような規模で発生するかは予測不可能である。しかし、素因となる水田は、先に調べることが可能である。対象地のように、水田として利用するのも困難であった低湿地を水田として利用するため、水路となる部分の土を横の耕作地となる部分に掻き上げ、水路と耕作地が交互になるようにして新田開発を行う手法が江戸時代より始められた。このような水田は、堀田（ほりだ、ほった）、掻き上げ田、浮田などと呼ばれており、全国で見られる（元木 1997, 菅 2003）。今後、このような歴史的な農地の履歴を把握しておくことで、大規模災害への備えとすることも可能である。

V. 摘要

地震による被災農地圃場では、被害状況により、復旧に向けた対策が異なってくる。このため、熊本地震が農地の地表に及ぼした影響についてドローンを用いて調査した。その結果、

1. SfM・MVS技術を活用することで、ドローン空撮画像から農地の地表面変動を面的に計測することが可能な手法を開発した。
2. 既存の地図情報と簡易的な測量により、航空機LiDAR測量と有意な差が認められない精度で不陸量（ほ場の平均標高からの高低差）を評価可能であることを明らかにした。
3. 計測コストはドローン本体、ソフトウェア等の初期費用を含めても航空機LiDAR測量の約1/3であり、さらに、迅速に機動的な観測が可能とい

う利点がある。本手法を活用することで、熊本地震によって発生した農地の不陸および段差等の被害状況が迅速かつ安価に評価可能になった。

4. 秋津地区の10圃場を計測した結果、圃場平均面より±5cm以上の凹凸のある面積割合が54.6%であることを明らかにした。
5. ドローン観測により確認された規則的な地表面の凹凸は、1962年撮影の航空写真の水路部分と一致しており、熊本地震により圃場基盤整備前の水路の埋め立て部分が沈下していることを明らかにした。

なお、本研究で開発を行ったドローンによる圃場の不陸計測方法は、マニュアルを作成し、農研機構HPにおいて公開した（石塚ら 2018）。

引用文献

- 1) 秋津飯野土地改良区（1996）豊穰～圃場整備事業完成記念～。
- 2) 石塚直樹・岩崎亘典・坂本利弘（2018）ドローンを用いたほ場計測マニュアル（不陸（凹凸）編）. 46p. (研) 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター, つくば.
http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/drone_unevenness.pdf
- 3) 藤森新作・若杉晃介・谷本岳（2006）平成16年（2004年）新潟県中越地震による水田の被害. 農工研技報 205:17-24.
- 4) 古川健作・秩父宏太郎（2015）UAV（無人航空機）を用いた空中写真測量技術の適用性について. 平成27年度国土交通省北陸地方整備局事業研究発表会.
<http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h27/A/A08.pdf>
- 5) 菅豊（2003）「水辺」の開拓史 近世中期における堀り上げ水田工法の発展とその要因. 国立歴史民俗博物館報告 105:357-380.
- 6) 北田敬宇・源裕・高瀬裕章（2009）能登半島地震による被害水田の復旧対策. 石川県農総研研報 28:7-17.
- 7) 小柳敦史・川口健太郎・村上敏文（2012）東北地方太平洋沖地震により茨城県稲敷市の水田で発生したオオムギの噴砂被害と湿害. 日作紀

81:212-218.

- 8) 元木 靖 (1997) 日本における滞水性低地の開発 - クリーク水田地域の比較歴史地理学序説 -, 歴史地理学, 39(1):18-35.
- 9) 農林水産省 (2017) 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の農林水産業関係被害の状況. <http://www.maff.go.jp/j/saigai/zisin/160414/kumamoto/taiou.html>. 農林水産省, 東京.
- 10) 農林水産省 (2015) 土木工事施工管理基準の制定について. http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/kyotu_siyosyo/k_kizyun/pdf/doboku_kouji_sekou_kanri_kizyun_zentai_ban.pdf. 農林水産省, 東京.
- 11) 大嶺政朗・細川寿・帖佐直・足立一日出・谷本岳 (2006) 水田の液状化などによる被害の特徴 - 圃場凹凸の実態 -. 中央農研研究資料 6:14-17.
- 12) 若杉晃介・瑞慶村知佳・北川巖・原口暢朗 (2012) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による水田面の起伏 (不陸), 亀裂, 液状化に関する復旧対策技術. 農工研技報 213: 53-62.
- 13) 若杉晃介・藤森新作 (2008) 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震による農地被害調査. 農工研技報 208:67-74.

Investigation Using Drones on the Influence of the 2016 Kumamoto Earthquake on the Surface of Farmlands

Naoki Ishitsuka, Nobusuke Iwasaki, and Toshihiro Sakamoto

Summary

Because of the damages suffered by farmlands due to the 2016 Kumamoto earthquake, measures for restoration vary according to the degree of damages. Therefore, using drones, we investigated the influence of the Kumamoto earthquake on the surface of farmlands. We calculated a three-dimensional model by performing SfM (Structure from Motion) –MVS (Multi View Stereo) processing of the drone aerial images and performed DSM (Digital Surface Model) by combining the altitude levels obtained by the ground-survey results. After comparison of the results with the airplane laser-survey results, the quantity of unevenness (difference from the mean altitude level of the farmland ground) measured by the drones exhibited a high precision; thus, a meaningful difference was not observed. On the other hand, the measurement cost of the drone survey was approximately one-third that of the airplane laser survey. In addition, quick mobile observation was made possible. It was concluded that the quantity of unevenness measured by the drones be able to evaluation. Furthermore, we investigated the cause of the wavy surface confirmed by the drone observation. As a result, the reentrant of the unevenness accorded with that of the creeks of the aerial photograph obtained in 1962. We reveal that the 2016 Kumamoto earthquake sank the creek part before the infrastructure maintenance.

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, Drone, Unevenness, SfM–MVS