

## UAV を用いた超高解像度 DEM の作成と地熱資源探査への応用

久保大樹\*, Ahmad Ali Syafi'i\*\*, Arie Naftali Hawu Hede\*\*,  
Asep Saepuloh\*\*, Mohamad Nur Heriawan\*\*, 小池克明\*, Sudarto Notosiswoyo\*\*

### Generation of super high resolution DEM using UAV with application to geothermal resource exploration

Taiki Kubo\*, Ahmad Ali Syafi'i, Arie Naftali Hawu Hede\*\*,  
Asep Saepuloh\*\*, Mohamad Nur Heriawan\*\*, Katsuaki Koike\* and Sudarto Notosiswoyo\*\*

\*京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻 Department of Urban Management,  
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.  
E-mail: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

\*\*バンドン工科大学, Institut Teknologi Bandung,

Jl. Ganesha No.10, Lb. Siliwangi, Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia.

キーワード: 航空写真, インドネシア, 地熱資源探査, リニアメント, 地形解析

Key words: Aerial photograph, Indonesia, Geothermal resources exploration, Lineament, Topographical analysis

#### 1. はじめに

地熱資源はベースロード電源としての利用が期待される再生可能エネルギーであり、火山国である日本にとっての貴重な埋蔵資源として今後一層の活用が求められている。またアメリカに次ぐ世界第二位の地熱資源量を保有するインドネシアでも、政府主導のもと急速な開発が進められている。しかし各国共通の課題として、高額な導入コストが障害となっており、特に開発可能地域を特定するための探査コストの削減が求められている。

地熱資源探査を実施するにあたり、対象地域の地形に関する情報は極めて重要なもので、現地調査計画の策定や地形解析による広域の概要調査など幅広く利用される。日本国内であれば、国土地理院によって国内全域を網羅するDEM(数値標高モデル)が無償で提供されており、地域によっては5 m メッシュの高精細データまで完備されている。また広く利用されている世界規模の地形情報として、宇宙航空研究開発機構(JAXA)による30 m メッシュの全球数値地表モデル(DSM)や、アメリカ航空宇宙局(NASA)によるスペースシャトル地形データ(SRTM)の公開も行われている。しかし、インドネシアの特に非都市域、山岳域においては地形や標高などの測量情報は容易に利用できる形態での整備・公開がなされておらず、前述の全球DSMやSRTMもデータが欠損していたり、最新の情報への更新が滞っていたりという問題がある。

そこで筆者らを含む京都大学・バンドン工科大学の研究チームは、探査コストの削減を目的とした先進的な地熱資源探査技術の開発の一環としてUAV(Unmanned Aerial Vehicle, 近年では総称としてドローンと呼ばれる場合もある)を用いてケーススタディサイトであるインドネシア西ジャワ州に位置するWayang Windu エリア(以下、WW エリア)の高解像度DEM(High resolution DEM, 以下HR-DEM)の作成を行った。さらに作成されたHR-DEMを用いて、地熱資源開発有望地域の抽出を目指した解析を実施した。

なお本発表は、JICA・JST 地球規模課題対応国際科学技

術協力プログラム(SATREPS)として、2015年より京都大学・バンドン工科大学の共同により実施されている研究プロジェクトの成果の一部である。

#### 2. Wayang Windu エリア

対象地域であるWWエリアは、西ジャワ州の州都であるBandungの南方約35 kmに位置しており(第1図)、インドネシア国内最大級の地熱発電所(Star Energy Geothermal Ltd., 発電容量227 MW)が稼働している。当該地域は海拔1500 mから2200 mほどの連山帯に属し、周辺に大規模・小規模のカルデラ地形が見られる活発な火山地域で、複数の噴気や高温温泉などの地熱兆候が確認できる。基盤岩は安山岩を主としており、その上を地域ごとに年代の異なる溶岩層が不整合に覆っている(Maghsoudi *et al.*, 2018)。主な地表の利用形態としては、茶葉やコーヒーの栽培が広範囲で行われており、プランテーションとして樹高1 m程度の低木が植えられている。

#### 3. UAV を用いた HR-DEM の作成

航空機型のUAV(写真1)を使用し、WWエリアの空中写真撮影を行った。撮影範囲は南北に約10 km、東西に約5 kmで、撮影シーンは約10,000シーンに及ぶ。撮影方法として垂直撮影法を採用し、各シーンは隣接するシーンと60%程度ずつ重複している。空中写真から標高値への変換には、航空写真測量ソフトウェアであるPix4D mapperを用いた。標高値は、実測標高による較正、およびUAVの飛行高度とカメラの焦点距離から計算される。変換後のHR-DEMの解像度は水平方向・垂直方向ともに約0.5 mである。しかし、撮影には光学式カメラを用いるため、得られる標高の値は植生被覆を含んだ結果となる。そのため今回は、現地調査に基づいてエリアごとに樹高の平均値を設定し、これを差し引いたものを地表の標高とした。WWエリア全域の空中写真(全シーンの連結画像)と変換後のHR-DEMを第2図に示す。

#### 4. 地熱資源探査への HR-DEM の活用

作成された HR-DEM を用いた地形解析の一例として、リニアメント抽出を実施した。リニアメントは地形に現れる線状構造であり、断層などの断裂系と関連性が強いことから、地熱発電で重要となる地熱流体パスの推定に利用されている。リニアメント抽出には、Saepuloh *et al.* (2018) による解析プログラム(m-STA)を用いた。ただし、HR-DEM の元データは合計で 1 億ピクセルを超える大容量データであり、そのままでは計算に膨大な時間を必要とするため、今回は試験的な解析として解像度を 20 m メッシュに低下させたものを使用している。

第 3 図は、推定されたリニアメント分布から求めた密度 (リニアメント本数) マップである。既知の断層マップと重ねて比較すると、密度の高い領域と断層交差部に対応が見られる。研究プロジェクトの一環として同地域で行われているラドン調査結果(久保ほか, 2018)では、断層交差部においてラドン濃度が高くなる傾向が確かめられており、地下からのガスの流動性が高いと考えられる。すなわち、リニアメントが密集する領域の深部には、地熱流体パスとなる断裂系が存在する可能性が高く、地熱開発の有望地域として期待される。また、既知の断層交差部と対応しない高密度領域には、未確認の断層が存在している可能性も考えられる。

上記のように、HR-DEM の地熱資源探査への応用例としてリニアメント解析は一定の有効性があるといえるが、前述のように原データを用いた場合は計算に膨大な時間を要し、また高解像度の DEM では畑や道路など人為的な地形変化の影響がノイズとなり、断層に関連する大規模リニアメントの推定精度が低下することが予想される。そのため今後は、解析領域を分割し、従来の DEM では検出できない小規模リニアメントの抽出へ利用することを検討している。また、最新の地形情報であることから、既存の DEM や干渉 SAR (Maghsoudi *et al.*, 2018 など) による解析結果と比較することで、地すべり跡の検出や地形変動量の推定への応用が期待される。



第 1 図 Wayang Windu エリアの位置



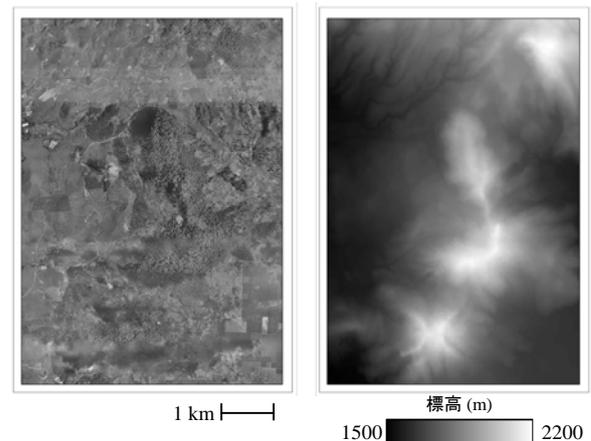
写真 1 空中写真撮影に用いた UAV

#### 5. まとめ

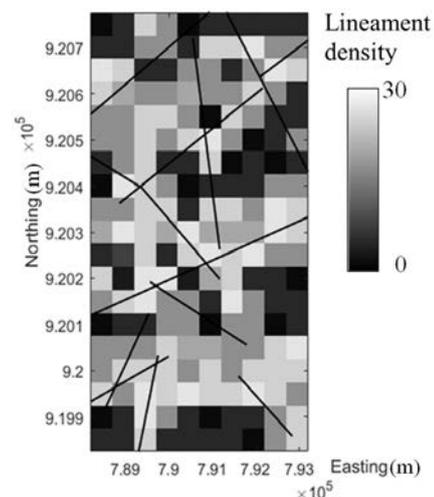
本研究では先進的な地熱資源探査技術の開発を目的とし、インドネシアの WW エリアにおいて UAV を用いて高解像度 DEM を作成した。得られた 0.5 m メッシュの DEM から、地形解析の一例としてリニアメント抽出を行い、既知の断層分布や現地調査データとの比較により、地熱資源の開発有望地域の特定に活用できる可能性を示した。今後は、他のリモートセンシングデータとの統合的な解析を実施する予定である。

#### 文 献

- Maghsoudi, Y., Van Der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D. and Saepuloh, A. (2018) Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *JAG*, vol. 64, pp. 386-396.
- Saepuloh, A., Haeruddin, H., Heriawan, M. N., Kubo, T., Koike, K. and Malik, D. (2018) Application of lineament density extracted from dual orbit of synthetic aperture radar (SAR) images to detecting fluids paths in the Wayang Windu geothermal field (West Java, Indonesia). *Geothermics*, vol. 72, pp. 145-155.
- Kubo, T., Kitamura, S., Iskandar, I., Heriawan, M. N., Notosiswoyo, S., Koike, K. and Sakurai, S. (2018) 地中ガスラドン濃度の時間・季節変化に基づく地熱地域での蒸気スポット検出の可能性. 資源・素材学会 平成30年度春季大会(東京) 講演要旨.



第 2 図 連結後の空中写真(左)と変換後の HR-DEM(右)



第 3 図 HR-DEM を用いた抽出リニアメントの密度マップ