

京都大学	博士（工学）	氏名	Panggea Ghiyats Sabrian
論文題目	Improvement of Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) technique to accurate and overall displacement monitoring in geothermal fields for sustainable resource use（持続可能資源使用を目指した地熱フィールドでの高精度で全域にわたる変位モニタリングのための差分干渉 SAR 処理法の改良）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>Topographic change or deformation of the ground surface detected through Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar technique (D-InSAR) can be used to specify permeable fracture zones that act as upward pathways of hydrothermal fluids in geothermal areas. Such pathways are essential to locate production wells for geothermal power generation and development of geothermal resource. For accurate measurement of surface displacement by D-InSAR, time series analysis is indispensable, because this analysis can minimize spatial and temporal decorrelation between image pairs of the same SAR scene with different acquisition dates. The time series analysis, which uses many SAR image pairs whose baseline lengths are adequately short to keep high coherence for interferogram generation, has been implemented by several methods, typically multi-temporal InSAR (MT-InSAR), persistent scatterer (PS), and small baseline subset (SBAS). This study aims to develop a new MT-InSAR method that enables accurate and overall monitoring of surface displacement in geothermal fields for sustainable, long-term resource use, by combining lineament density (an index of degree of fracture development), topographic property, water geochemistry, and geophysical data. This monitoring contributes to detect high permeability zones and resultantly, high potential zones of geothermal resource. As the most suitable test areas for this purpose, I selected the Bandung basin (2000 km<sup>2</sup>) with several geothermal fields such as Patuha, Wayang Windu, and Tangkuban Parahu in West Java, Indonesia. The most noted outcome of this study is realization of clarifying vertical and horizontal east-west (E-W) displacements over the whole study area by an application of geostatistical methods, although interferograms appear in only half of the study area due to the low coherence between image pairs. Effectiveness of this method is examined by a case study of the Aso volcano with enough amount of GPS data for the displacements and a comparison between the measured and detected displacements. As the result, the method was verified by their agreement within the 95% confidence level. This dissertation consists of eight chapters and the followings are outlines of each chapter.</p> <p>Chapter 1 provides an introduction to this research with the background, objectives, and brief reviews of principles of the main topic, MT-InSAR. The study area, Bandung basin and the targeted geothermal fields as well as the SAR dataset used in this study are also explained.</p> <p>As a new MT-InSAR technique, Chapter 2 examines an applicability of InSAR stacking method by a combination of PS and SBAS-InSAR with different wavelength, C and L band data, and demonstrates an accuracy of the detected displacement result for a tropical area as the Bandung basin.</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Panggea Ghiyats Sabrian
<p>Chapter 3 proposes an overall displacement monitoring method by MT-InSAR combined with geostatistics for densely vegetated and low coherence areas with partly absences of interferogram. The method, termed two-dimensional, geostatistical, multi-temporal InSAR method (2D-G-MT-InSAR), is tested for C-band Sentinel-1 scenes of the Aso volcano with continuous GPS measurement dataset and demonstrated to be effective by the agreement between the measured and detected displacements. The resultant displacements reveal the detailed topographic change patterns caused by the volcanic and seismic activities after the Kumamoto 2016 Earthquake.</p> <p>The 2D G-MT-InSAR is applied to the Tangkuban Parahu geothermal field with the most active volcano in the northern Bandung basin in Chapter 4. Using the obtained vertical and horizontal E-W displacement patterns, a heat source model that controls the geothermal system in this field is constructed. This result can provide the highest potential zone of geothermal resource for the power generation.</p> <p>Chapter 5 also applies 2D G-MT-InSAR with the Sentinel-1 dataset to specify high permeability zones in the Patuha geothermal field by combining the obtained vertical and horizontal E-W displacements, lineament density, and radon concentration in soil gas as a geochemical property. These datasets are integrated using geographic information system (GIS) and high permeability zones are selected by the weight of evidence (WoE) method. The correctness of selected zones is checked by the positional agreement with the known major faults.</p> <p>More detailed examination of 2D G-MT-InSAR is implemented in Chapter 6 for targeting four geothermal fields around the Bandung basin. Near the geothermal manifestations, weakly positive correlations between the vertical displacement and lineament density are observed in each water type (sulfate, chloride, and bicarbonate). The largest vertical displacement is identified in the sulfate water type, and displacements in the chloride- and bicarbonate-type areas are to the same degree. The permeable zones are determined by the supervised maximum likelihood classification using the vertical displacement, lineament density, and elevation and their correlation with water type.</p> <p>Chapter 7 examines a possibility of the 2D G-MT-InSAR-derived vertical and horizontal E-W displacements for sustainability assessment of geothermal resource use by combining microearthquake and radon concentration data by selecting the Wayang Windu geothermal field with a working geothermal power station of 227 MW. Suitable location of production wells for a long-term use of geothermal resource is identified by the proposed method and evaluation map.</p> <p>Chapter 8 is the general conclusion of this PhD dissertation by summarizing the most important results in Chapters 2 to 7. Important future works that can develop this research are also described for furthermore accurate detection of topographic displacement for geothermal resource use.</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

地熱という再生可能エネルギーを利用した地熱発電は CO<sub>2</sub> 排出量が少ないとともに、比較的大出力で設備利用率が高いため、一層の利用促進が世界的に図られている。発電では生産井から取り出す高温高圧の地熱流体を利用するが、生産井設置のために熱源とその周辺に存在する高透水性ゾーンの特特定が重要になる。その特定に有効な手法の一つとして、同一軌道で撮影日が異なる多くの合成開口レーダ (SAR) データを用いた差分干渉 SAR 処理 (D-InSAR) による地表変位があげられる。しかしながら、データペア間の相関性 (コヒーレンス) が高い箇所しか変位は求められず、地熱フィールドで熱源と高透水性ゾーンを特定することは、従来の手法ではほぼ不可能であった。本研究ではこれらの特定を目的とし、2つの D-InSAR 法と地球統計学を組み合わせた初めての地質リモートセンシング研究である。主な成果は次の3点に纏められる。

- 1) 地表変位取得の改善を目指し、D-InSAR として持続的散乱体 (persistent scatterer : PS) と短基線長組み合わせ (small baselines subset : SBAS) の2手法を統合したが、それでもデータペア間のコヒーレンスの低さから、画像シーンの半分以上で変位が求められなかった。変位の空白域を埋めるために、得られた離散状の変位データを繋ぎ合わせる種々の手法を検討した。2016年熊本地震の余震活動が継続している阿蘇カルデラ域を対象とし、GPS連続観測変位データと比較することで各手法の推定精度を評価した。その結果、地球統計学シミュレーションの一つである回転バンド・カーネル平滑化法による結果の精度が高いことがわかり、シーン全域にわたって垂直方向と東西水平方向の変位分布を明らかにできるようになった。変位の大きな部分は微小地震と火山の活動域と整合したことから、2D G-MT-InSAR (two-dimensional, geostatistical, multi-temporal InSAR method) と称した本手法の有効性を実証できた。
- 2) 温泉や噴気帯という地熱兆候地周辺では、2D G-MT-InSAR による鉛直変位とリニアメント密度に正の相関が見られた。鉛直変位、リニアメント密度、標高、熱水試料の分析による水質タイプという4種の情報に注目し、これらに最尤法分類を適用することで、高透水性ゾーンの特特定を試みた。その結果、バンドン盆地周辺の3つの地熱フィールドでは、高透水性ゾーンは硫酸塩タイプの水質を伴う大規模断層や火山斜面に概ね沿うことが明らかになった。
- 3) その1つである Wayang Windu フィールドでは、北部の蒸気卓越型地熱貯留層周辺で大きな沈降が現れ、これは蒸気生産に伴う貯留層の圧力低下に起因することを弾性変位モデルの利用により明らかにした。圧力低下域は微小地震の集中域とも重なった。また、貯留層北部の表層は低透水性、南部は高透水性であると推定でき、長期にわたって地熱発電を可能にするには南部に生産井、あるいは熱水の還元井を設置するのが適切であることを見出した。

以上、本論文での開発手法の精度・有効性は高く、地熱資源の探査と開発、持続的利用に貢献できることが示され、学術上、實際上、寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令

氏名	Panggea Ghiyats Sabrian
----	-------------------------

和 4 年 2 月 22 日，論文内容とそれに関連した事項について試問を行い，申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し，合格と認めた。

なお，本論文は，京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し，公表に際しては，当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。