

遠赤外カメラを用いた加熱冷却の経時変化の観測に基づく含水状態推定

○福井 駿, 櫛田 貴弘, 船富 卓哉, 向川 康博 (奈良先端大)

Estimating soil moisture content based on observation of temperature changes in heating and cooling using far-infrared camera

○Shun FUKUI, Takahiro KUSHIDA, Takuya FUNATOMI and Yasuhiro MUKAIGAWA (NAIST)

Abstract : We propose a method to estimate soil moisture content using a far-infrared camera for the emergency recovery of natural disasters. By calculating the speed of temperature change from the observation in heating and cooling processes, a wide range of moisture content can be estimated in a non-contact manner. We evaluate the effectiveness of the proposed method in soil samples with different moisture.

1. はじめに

近年、台風や線状降水帯などで生じる豪雨によって日本各地で土砂災害が発生している。地すべりや土砂崩れによって大量の土砂が河川をせき止めると、河道閉塞と呼ばれる天然ダムが形成されてしまう。上流側では溜まった水によって周辺住居の浸水被害が発生し、天然ダムが崩壊した際には土石流となって下流に大きな被害をもたらす恐れがある。河道閉塞の復旧作業には重機が必要となるが、地盤が緩んでいる場合には重機による作業自体が危険を伴う。そのため、事前に地盤強度を把握し、それを基に重機が安全に作業できる走行ルートを決定する必要がある。地盤強度は土壌の含水状態に大きく依存するため、迅速な復旧作業のためには、安全に土壌の含水状態を推定する技術が必要となる。

土壌の含水状態の測定には、物理探査と呼ばれる種々の技術がある。大津ら [1] は含水比と電気インピーダンスの変化に相関関係があることを利用して土壌の相対的な含水状態を推定している。林ら [2] は地盤に対して能動的に物理的な振動を与え、それにより発生する表面波を測定することで地盤強度を推定している。また、陳ら [3] はバケット切削時の抵抗力から地盤強度の推定を試みている。しかし、これらの物理探査技術はいずれも接触式であり、設置した測定系の数がサンプリング地点数となるため、大規模な自然災害現場で広範囲な地盤強度の推定が求められるケースには不向きである。また地盤強度が未知な環境では、探査作業そのものが危険を伴うため、非接触で含水状態を推定できる手法が望ましい。

広範囲な土壌の含水状態を安全な場所から非接触に推定する手法として、本研究では遠赤外カメラの活用を検討する。含水状態の異なる土壌の温度を遠赤外カメラによって経時的に観測したとき、それらの経時変化に差異があることが報告されている [4]。そこで本研究では、土壌を加熱

した場合と冷却した場合に得られる経時変化から土壌の含水状態を推定する手法を提案し、その可能性について検証する。

2. 経時変化解析による含水状態推定

本章では物体が加熱・冷却される過程の遠赤外観測による経時変化の特性について概観したのち、その特性に基づいて含水状態を推定する手法について述べる。

2.1 加熱冷却の経時変化特性

[4]では、日の出から日の入りまでの12時間の観測値の経時変化が土壌の含水状態によって異なることが示されている。本研究では、比較的短時間の加熱・冷却過程における経時変化の遠赤外観測に基づいて、土壌の含水状態を推定する手法を提案する。加熱・冷却過程における観測値はFig. 1に示すような指数関数的な経時変化をすることが知られている [5]。この経時変化は10分ほどの計測によって得られるため、迅速性を要する自然災害の応急復旧現場に対して有効な手段となることが期待される。本研究では、この加熱・冷却過程の温度変化の速さが含水状態を反映していると仮説を立て、これを検証する。

なお、熱源としては、晴天時には太陽の日照を利用できる。曇天時には人工的な熱源の利用が考えられるが、実際に河道閉塞の災害現場でどのような機材が利用できるかについては今後の検討課題である。

2.2 経時変化のモデル化による特徴量の抽出

前述のように加熱・冷却による温度変化は指数関数的な経時特性を示す。そこで観測された経時変化に対し、最小

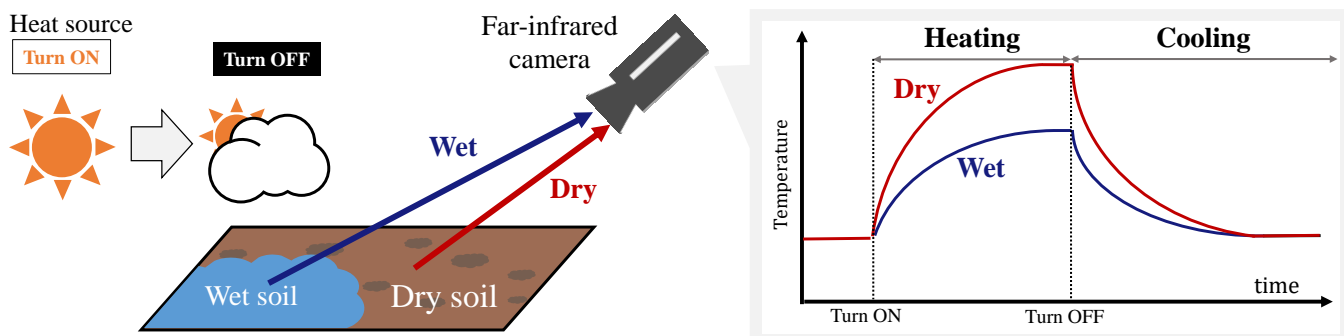


Fig. 1: Temperature changes of soil in heating and cooling.

二乗法により以下の式を当てはめる.

$$T^{\text{heat}}(t) = T_0^{\text{heat}} + (1 - e^{-\alpha^{\text{heat}}t})T_{\infty}^{\text{heat}} \quad (1)$$

$$T^{\text{cool}}(t) = (T_0^{\text{cool}} - T_{\infty}^{\text{cool}})e^{-\alpha^{\text{cool}}t} + T_{\infty}^{\text{cool}} \quad (2)$$

ここで、式 (1) は加熱過程の経時変化を表し、 T_0^{heat} は加熱前の初期温度、 α^{heat} は加熱過程の温度上昇の速さ、 T_{∞}^{heat} は十分に加熱したときの定常値を示す。一方、式 (2) は冷却過程時の経時変化を表し、 T_0^{cool} は冷却前の初期温度、 α^{cool} は冷却過程の温度下降の速さ、 T_{∞}^{cool} は十分に冷却したときの定常値を示す。加熱については α^{heat} と T_{∞}^{heat} の 2 つのパラメータを推定し、冷却についても α^{cool} と T_{∞}^{cool} の 2 つのパラメータを推定する。

3. 実験

本研究では 2 章で述べた経時変化のモデルを用いて、土壌の含水状態を推定可能であるかどうかを検証する。そのために含水状態のみが異なる複数の土試料を作製した。また、太陽を熱源として利用することで、屋外環境において加熱・冷却過程の経時変化を観測した。

3.1 測定系と測定方法

Fig. 2(a) のように作製した試料を配置し、遠赤外カメラ (InfRec R500) を用いて経時変化を観測する。本研究では広範囲を均一に加熱できる日照を利用した。Fig. 2(b) のように試料を太陽光に直接当てることで加熱を、Fig. 2(c) のように試料を日射から遮蔽することで自然冷却させた。加熱時間は約 12 分間とし、冷却時間は約 16 分間として経時変化を観測した。

3.2 測定試料の作製

経時変化の解析によって得られる特徴量と含水状態との関係を検証するために、比較的粒子の小さい真砂土を用

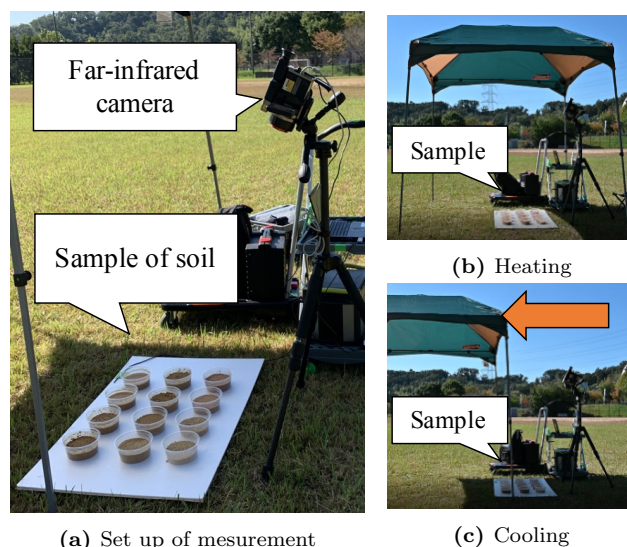


Fig. 2: Experimental setup.

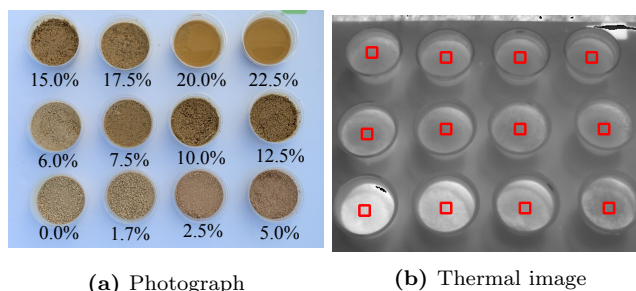


Fig. 3: Images of soil samples.

いて含水状態の異なる土試料を作製した。含水状態は、土粒子に対する水の重量比である含水比によって表したときに、0.0~22.5%の範囲で 12 種類作製した。作製した土試料を Fig. 3(a) に示す。図より含水比 20.0%以上の試料は土壌表面に水が浮き出るほどに間隙が水で満たされており、22.5%の試料については 2mm ほどの水の層が形成されていた。また含水比 10.0~17.5%の土試料については視覚的な違いは得難いが、比較的高い含水比を有する。

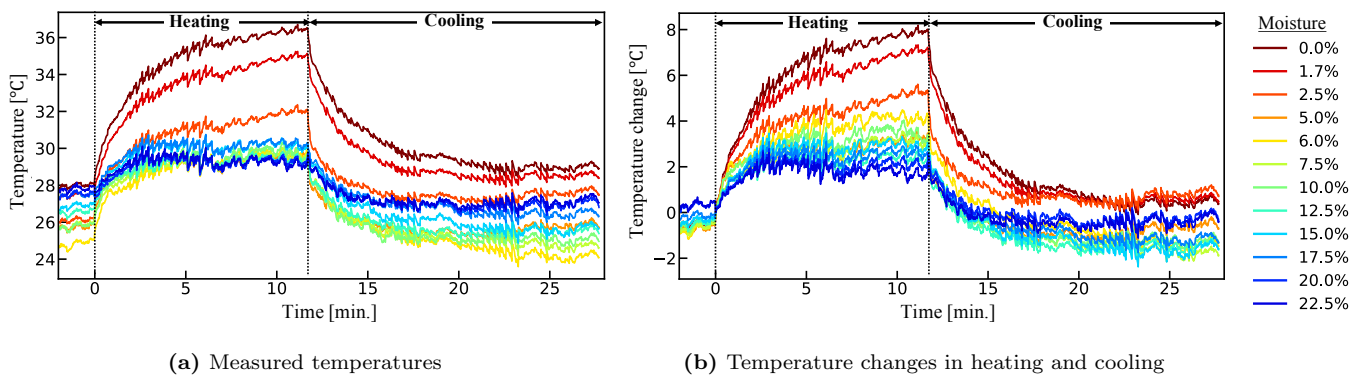


Fig. 4: Observation of temperature changes in heating and cooling.

3.3 測定結果

撮影した熱動画について、加熱開始から10分後の1フレームを Fig. 3(b) に示す。各試料について Fig. 3(b) の赤枠部分における領域の経時変化の平均値を Fig. 4(a) に示す。また、加熱開始時刻を基準としたときの各試料の温度変化量を Fig. 4(b) に示す。Fig. 4(a) より、加熱および冷却過程の経時変化は 2.2 節で述べたとおり、指数関数的な経時変化を示した。Fig. 4(b) より、加熱終了時付近において 0.0~2.5% の低含水比の土壤試料では、含水比の増大に応じて温度の上昇量が小さくなっていることがわかる。しかし、7.5~17.5% の中含水比の範囲では含水比と温度上昇量の相関関係は見られない。また含水比の増大に伴い、温度変化量は小さくなっていき、含水比毎の温度上昇量の差異はわずかであるため、ノイズの多い遠赤外観測において含水状態推定の特徴量として利用するには不安定であるといえる。

3.4 経時変化モデルによる含水状態推定

Fig. 4(a) に示した加熱・冷却の経時変化の観測値に対して 2.2 節で述べた算出法によって各試料について推定した特徴量 α^{heat} 、 α^{cool} と含水比との関係を Fig. 5 に示す。この結果より加熱の速さを表す α^{heat} と含水比には線形関係がみられた。特に表面に水の層が形成されている 20.0% と 22.5% の試料についても差別化できていることから、遠赤外観測による物体表面のみの経時変化解析によって、内部の含水状態まで推定可能であることが示唆される。なお、含水比が 5.0% の点のみ線形関係から大きく外れる値をとった。これは試料作製の不手際により 5.0% の試料のみ作製工程が他試料と大きく異なったためである可能性が高い。

一方、冷却の速さを表す α^{cool} と含水比の関係には相関を得られなかった。これは冷却が外乱の影響が大きいためであると考えられる。屋外での土壤表面温度は、風や湿度などの外乱の影響を受けやすいとの報告がある [4]。そのため、

自然冷却方式をとった今回の計測では、含水状態によるわずかな経時変化に外乱が大きく影響し、推定した特徴量に一貫性がなかったと考えられる。外乱に対して加熱の場合、温度上昇の速さは日射光の強さに大きく依存するため、これらの影響が小さく、推定値が安定したと考えられる。以上の結果より、加熱の速さを表す特徴量 α^{heat} が土壤の含水状態の推定に有効であることが示された。

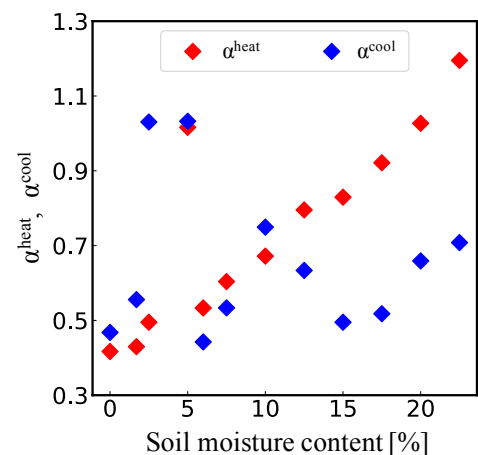


Fig. 5: Relationship between soil moisture and estimated features.

3.5 適切な計測時間

本研究は、自然災害の応急復旧のために迅速な含水状態推定技術の開発を目的としている。今回の実験では加熱時間をひとまず約 12 分間としたが、これをさらに短縮可能かどうか検証を行った。Fig. 6 に計測時間に対する加熱の速さ α^{heat} の振る舞いを示す。図は加熱開始から各時間までの経時変化データのみを用いて推定したときの α^{heat} を描画している。今回の実験の場合、4 分以下では推定が安定しないことがみてとれる。一方、6 分以上の加熱時間を設けることで含水状態の推定が概ね安定することが分かった。

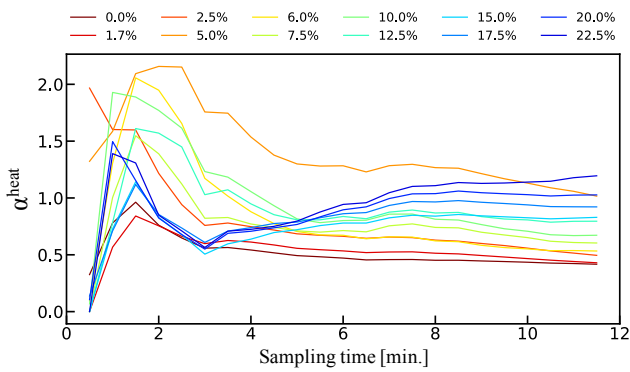


Fig. 6: Sampling time for estimation.

しかし、太陽を熱源として利用する場合、季節や日時によって日照が変動するため、今後実験条件を広げてデータを取集し経験的に適切な計測時間を決定するべきであると考えられる。

4. まとめ

本研究では自然災害の応急復旧現場への応用を目標として、遠赤外カメラを用いて非接触で広範囲に土壌含水状態を推定する手法を提案し、その有効性を検証した。土壌を加熱・冷却した場合の温度変化の速さを経時変化の観測値に基づいて推定し、土壌の含水状態の推定への利用可能性を検証した。実験では含水比の異なる土試料を作製し、太陽の日照を利用して加熱、その後日陰にて自然冷却させ経時変化を観測した。観測値に対してモデルを当てはめて推定した加熱の速さと含水比には線形関係がみられ、加熱過程の温度変化の速さが土壌の含水状態推定に寄与することが示唆された。今後は実験条件を広げてデータを収集し、手法の適用範囲を明らかにする必要があると考えている。

謝辞 本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 大津宏康, 北岡貴文, 馬場隆聡, ピパットボンサー ティラボン, 伊東俊一郎, 相澤隆生: “斜面表層部の湿潤・乾燥に伴う水分特性変化に対する比抵抗電気探査の適用性”, 地盤工学ジャーナル, 14 巻, 3 号, pp.241-252 (2019)
- [2] 林宏一, 鈴木晴彦, 斎藤秀樹: “人工振源を用いた表面波探査の開発とその土地質調査への適用”, 応用地質技術年報, 21 号, pp.9-39 (2001)
- [3] 陳敏, 里見知昭, 高橋弘: “バケットに作用する掘削抵抗力を用いた土の強度特性の推定に関する研究”, 建設機械施工, 66 巻, 9 号, pp.82-89 (2014)
- [4] “遠赤外サーモグラフィの河川堤防の湿潤部検知への適用性検討”, 国総研プロジェクト研究報告第 50 号, 「社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発」第 6 章 (2015)

- [5] K. Tanaka, N. Ikeya, T. Takatani, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Mukaigawa: “Time-Resolved Far Infrared Light Transport Decomposition for Thermal Photometric Stereo,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 2075-2085 (2021)