

赤外線熱画像解析による 浅層地中探査に関する基礎検討

平田 克己*¹, 岸川 彬*²

Fundamental Study on Shallow Underground Exploration
Based on Analysis of Infrared Thermal Images

Katsumi HIRATA, Akira KISHIKAWA

Recently, various methods for underground exploration are developed. If the method of analyzing the thermography obtained with an infrared camera also in it is used, wide range exploration may be able to be performed in remoteness and non-contact for a short time. Since the temperature distribution of the ground surface will become uneven if a buried object is under the ground, it is thought that the position and form of it is estimated with analyzing the thermography. In this paper, after explaining the principle to estimating the position and top form of the buried object, the possibility and the features of the method is clarified through consideration of the numeric simulation and the fundamental experimental result.

KEYWORDS: far infrared camera, thermography, buried object, underground exploration, position, top form

1. はじめに

現在、地中探査のためのさまざまな方法が開発されている。中でも、赤外線カメラを用いる方法によれば、広範囲な探索を短時間に遠隔かつ非接触で探索できる可能性がある。ここでいう赤外線カメラとは、遠赤外線領域を撮影できるものであり、熱を持つ物体から放射される遠赤外線を検出することで、対象物の表面温度の分布を撮影するものである。このようなカメラで撮影された熱画像はサーモグラフィと呼ばれている。本研究は、サーモグラフィの解析により、地中探査をしようとするものである。近年では、建物の壁面剥離の

検出をはじめとして、さまざまな遠隔非破壊検査の方法としてサーモグラフィが注目されている。しかしながら、画像の解析は専門家の経験と勘によりなされることが多く、内部の形状や深さ、位置などを定量的な検出に関する研究はあまり進んでいない¹⁾。そこで、我々は、地中埋没物の検出に的を絞って、埋没物の有無や位置、形状を自動的に推定するシステムの開発を目指して、その可能性について検討した。本稿では、サーモグラフィによる地中埋没物の位置と上部形状の推定原理を説明した後、その可能性と特徴と明らかにするために行った数値シミュレーションおよび基礎的な実験について述べる。

*1 電子制御工学科 (Dept. of Electronic and Control Engineering), E-mail: hirata@oyama-ct.ac.jp

*2 専攻科複合工学専攻 (Advanced Course of General Engineering)

2. 原理

地中に埋没物がある場合に地面を加熱または放熱すると、砂の熱拡散率が小さいために熱流が乱れ、地表面の温度場は不均一になる。本稿で提案する探査法は、その温度場を赤外線カメラで撮影して得られるサーモグラフィを解析し、地中埋没物の有無や位置を推定しようとするものである。

図1は提案原理の基本を模式的に表したものである。この図は、金属のように熱伝導率が大きく、円筒状の物体を地中に埋めた場合の、地表面の温度分布、すなわち、地表面のサーモグラフィを示したものである。埋没物を含む地面を加熱し、地表面の温度分布が均一になった状態である。その後、加熱を停止してしばらくたったものが下図である。加熱を停止すると地面と埋没物から放熱されるが、熱伝導率が低い物体からは放熱が早く進む。その結果、地表面は、その埋没物が近い部分から早く温度が下がる。図の濃いグレーは温度が低い部分である。

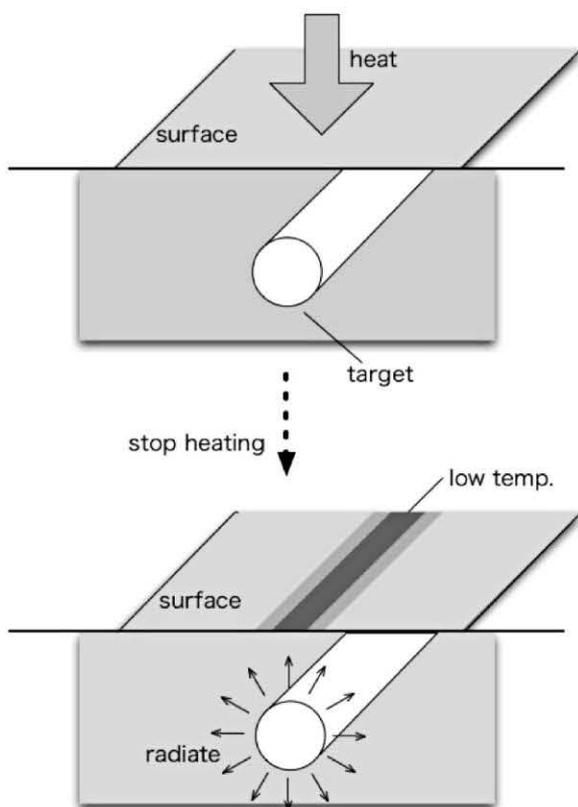
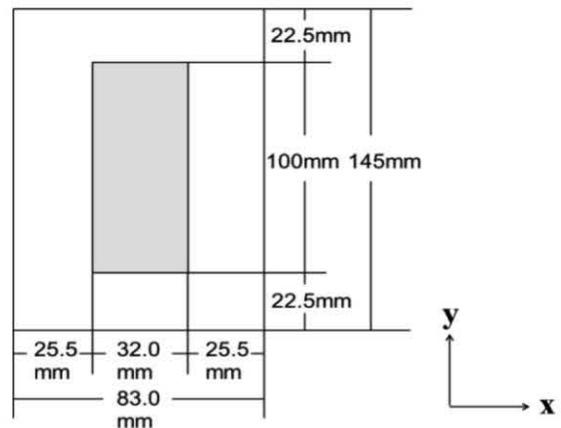


図1 地表面の温度分布の変化

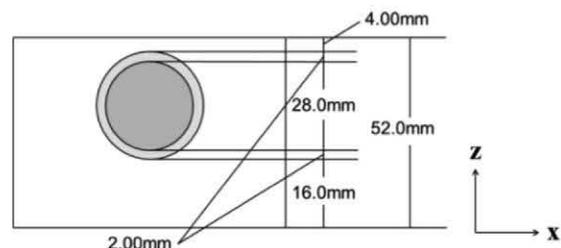
この時間変化を解析することにより、埋没物の位置、さらには上部形状が推定できるものと考えられる。以上が、本手法の基本的な原理である。

3. 数値シミュレーション

提案手法の可能性を検討するために理想的な状況を仮定した数値シミュレーションを行った。無限に広がる地中に、図2に示すような寸法を持った有限長のアルミパイプがもっとも浅い部分で深さ4mmのところ埋まっている場合を想定した。薄い灰色の部分がアルミニウム、濃い部分が空気、白い部分が土である。熱伝導率などの物性値は伝熱工学資料改訂第4版記載の値を用いた²⁾。このモデルの地表面を120秒間加熱し、加熱停止後さらに120秒間の地表面の温度分布の時間変化を計算した。なお、地表面や空気の温度は、次節で述べる実験との比較を考慮し、その実験の際に実測した温度を設定した。

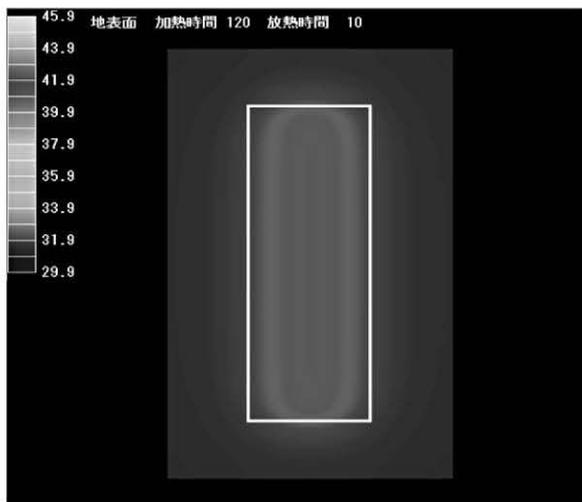


(a) 平面図

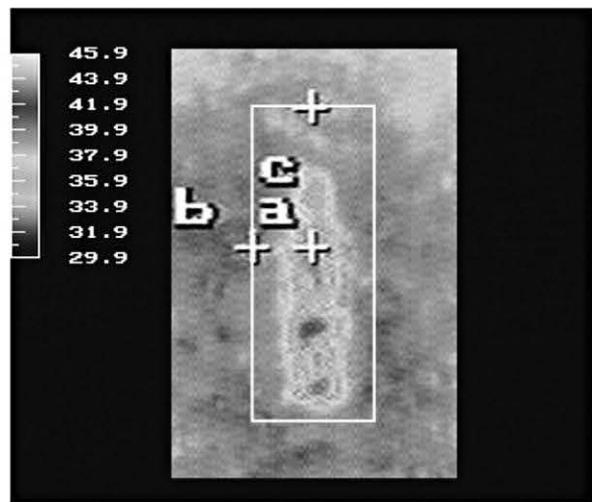


(b) 側面図

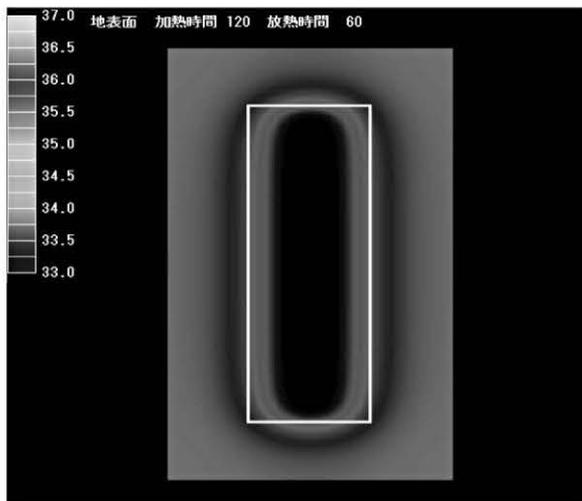
図2 埋没物の形状と寸法



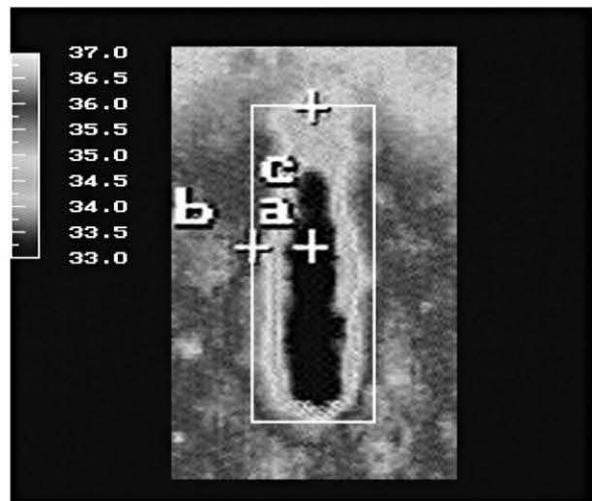
(a) 加熱停止後 10 秒後



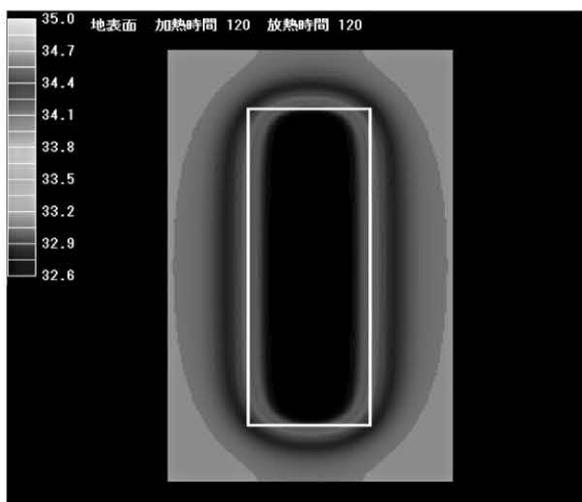
(a) 加熱停止後 10 秒後



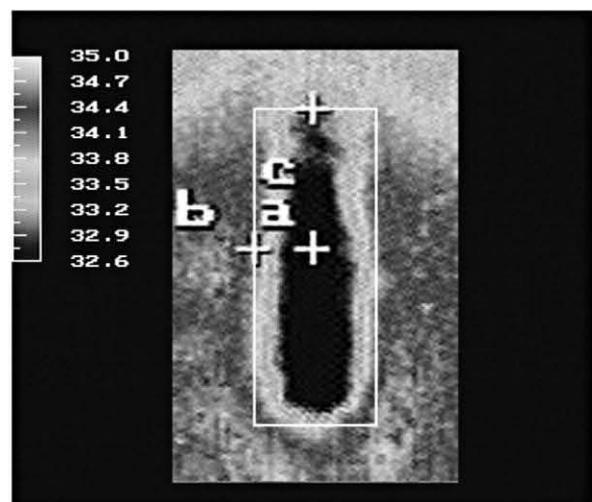
(b) 加熱停止 60 秒後



(b) 加熱停止後 60 秒後



(c) 加熱停止 120 秒後



(c) 加熱停止後 120 秒後

図3 数値シミュレーションによる地表面の温度分布

図4 実験により得た地表面の温度分布

図3にシミュレーションにより得た温度分布画像を示す。(a)が加熱停止後10秒、(b)が60秒、(c)が120秒それぞれ経過したものである。白い四角は実際の埋没物の位置と大きさを示したものである。カラー画像をグレースケールに変換した関係で一部変則的になっているが、各図の左端のバーが示すとおり、温度が高いほど白っぽく表される。全体的に見ると、埋没物が浅い中央の部分ほど早い段階から温度が低くなっていることがわかる。これは、浅い箇所は埋没物上の砂が少ない分、蓄積される熱も少なくなるためである。

この結果より、埋没物の表面が地表面に近いほど早くから温度が下がることが明らかであり、地表面が平らでありさえすれば、温度分布の時間変化を追うことにより、埋没物の上部（地表面側）の形状が分かると考える。

4. 実験

前節の数値シミュレーションの妥当性を検証するために実験を行い、熱画像の比較を行った。

直径440mm、高さ170mmのプラスチック製のタライに砂を入れたものを地面とした。砂は深さ90mmになるように入れ、埋没物はその上端までの深さが4mmになるように埋めた。この地面を110V、200W型の白熱電球を用いて、地表面から380mm離して加熱した、また、赤外線カメラは地表面から470mm離れたところに設置した。

撮影した熱画像を、シミュレーションした領域に相当する領域を切り抜いて縮尺を合わせたものを図4に示す。いずれも加熱時間は120秒間であり、(a)は加熱停止から10秒後、(b)は60秒後、(c)は120秒後のものである。白い四角は埋没物の位置と大きさを示したものである。図3のシミュレーション結果と比較すると、図の上方の温度が高くなっているものの、それ以外については、埋没物表面が浅い部分から温度低下が始まっているといった、同様な傾向が見られている。上方の温度が高いことについては、加熱にむらがあったことが原因として考えられる。できるだけまんべんなく加熱できるように、電球をゆっくりと動かしながら加熱したが、フィラメント形状の影響もあり、完全に均一に加熱することはできなかった。

次に、シミュレーション結果と実際に撮影した熱画像の地表中心（埋没物表面まで最も近い点）

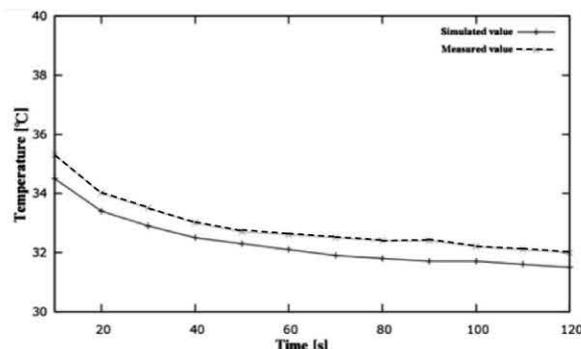


図5 地表面中心部分の温度変化

の温度変化を比較したものを図5に示す。実線はシミュレーション結果で、破線は実験での実測値であり、横軸は加熱終了からの経過時間である。はじめから約0.6°Cのバイアスがあるものの、時間による温度変化はよく一致している。このバイアスは、加熱の不均一や測定温度に誤差があることが考えられる。誤差は実験中の周囲の気温の影響が考えられる。これは特に屋外で用いる場合に十分に検討すべき事項である。さらに、屋外の場合には太陽光による地表面の温度変化も発生する。今後これらの外乱への対処を検討する必要がある。

5. おわりに

赤外線カメラを用いて撮影した地表面の温度分布の解析による埋没物の位置や形状の推定について、その可能性を理想環境下での数値シミュレーションと実際の実験結果を通して検討した。その結果、埋没物が浅い場合において、大体の形状は推定できそうであることがわかった。しかし正確な形状の推定のためには、熱画像の画像処理が必要である。また、特に屋外での適用を考えた場合、外乱への対処を検討する必要がある。

今後、地表面の温度変化と埋没物深さの関係を調査し、定量的に埋没物上部形状の推定を行うための具体的な手法の開発をする予定である。

参考文献

- 1) 稲垣ら：乾燥・砂漠地帯の地雷探査に向けた赤外線リモートセンシングの応用と数理モデルによる考察，日本機械学会論文集（A編），71-702，181/189（2005）
- 2) 日本機械学会：伝熱工学資料改訂第4版（1986）

【受理年月日 2011年 9月28日】