901 乾燥・砂漠地帯に埋設された地雷の赤外線探査

Application of Infrared Remote Sensing for Mine Exploration in Desert Zones

正 稲垣照美 (茨城大)
稲熊和之 (東京電力)○北山真司 (茨城大院)
内田亮祐 (茨城大)Terumi INAGAKI¹, Masashi KITAYAMA¹, Kazuyuki INAGUMA², Ryouzuke UCHIDA¹¹Ibaraki University, Nakanarusawa 4-12-1, Hitachi, Ibaraki, 316-8511, Japan²Tokyo Electric Power Company, Uchisaiwai 1-1-3, Chiyoda, Tokyo, 100-8560, Japan

Infrared thermography detects thermal energy emitted from various objective surfaces, and it is a procedure for evaluating the surface temperatures nondestructively. We can diagnose and evaluate a two-dimensional temperature field having complicated shape every real-time pixel by using this technique, if an appropriate image processing technique is combined. The technique has therefore widely been used for various applications such as engineering, medical and industrial utilizations. In this paper the applicability of infrared sensing to nondestructive diagnosis for invisible mines installed in desert zones is experimentally and numerically investigated with the aid of an appropriate mathematical modeling.

Key Words: Infrared Sensing, Nondestructive Testing, Numerical Analysis, Mine Exploration

1. 緒言

赤外線サーモグラフィーは、対象物から発せられる熱エネルギーを検知し、その表面温度場をリモートセンシングに評価する手段である。本研究では、このような赤外線センシング^{(1),(2)}の利点を乾燥・砂漠地帯の地雷探査に応用して、少しでも作業に関わる危険を低減する技術の可能性について、実計測及び数値シミュレーションの観点から探査に付随するメカニズム、探査限界及び探査に付随する影響・因子などについて検討を加えた。

2. 実験及び数値計算法

実験では、幅 300[mm]、長さ 300[mm]、深さ 400[mm]の内壁に断熱材を貼り巡らせた矩形の木箱を用意し、内部に砂を充填して乾燥・砂漠地帯の地中を再現し、中央部の地中に模型地雷を埋設した。この模型は、プラスチック地雷を想定して外部をベークライト樹脂、内部に火薬の代わりに砂を充填し、上面にはゴムを付加した。実験は、午前 6 時に測定を開始し、翌日午前 6 時に測定を終了する計 24 時間とした。実験時では、太陽熱流束、風速、気温、湿度などに加え、地雷上部の地表面温度についても計測している。また、地雷上部の地表面温度場を赤外線サーモグラフィーで 3 時間毎に計 9 回計測した。

数値シミュレーションでは、内部に地雷を有する三次元物理モデルを構築した。ここで、地表面を加熱面かつ放熱面とし、その他の 5 面 (側面及び底面) を断熱面とした。三次元数値シミュレーションには、基礎方程式として非定常三次元熱伝導方程式を用いた。これらに使用した初期条件及び境界条件の詳細は、前報⁽³⁾を参照されたい。

また、計算では、三次元非定常熱伝導方程式を Patankar のコントロールボリューム法⁽⁴⁾に基づき差分化し、ADI 法で各時間の非定常解を得た。計算は、地雷の存在する状況下で 24 時間計算した後の諸量を基に次の 24 時間、すなわち午前 6 時から翌朝午前 6 時までの計算を行っている。

3. 結果及び考察

Fig.1 は、周辺土壌を砂とし、地表面から地雷までの距離が 10[mm] の実験で得た熱画像である。日中は、地雷上部が周辺部より温度が高く、夜間は温度が低いことがわかる。Fig.2 は 10[mm]、30[mm]、50[mm]、70[mm] の場合の数値シミュレーション結果であり、日の出後 6[h] における地表面の 2 次元

熱画像である。画像中、赤色が相対的に高温領域、青色が相対的に低温領域を示している。地雷深度が大きくなるにつれて、地雷イメージが不鮮明になっているのがわかる。

Fig.3 は、Fig.2 に示した数値シミュレーション結果を基に算出した地表面の温度差 (地雷上部とその周辺の地表面温度) を表したものである。地表面から地雷までの距離が大きくなるにつれて温度差が小さくなっていることがわかる。すなわち、埋設深度が大きくなるにつれて、地雷が不鮮明になり、赤外線サーモグラフィーによる地雷探査が難しくなる。

Fig.4 は、地表面から地雷までの距離を 10[mm] とし、想定される様々な土壌環境 (砂、砂利、粘土、有機質土) に対して数値シミュレーションした結果を基に算出した地表面の温度差である。なお、砂利、粘土、有機質土の地表面放射率は、文献データを参照して、それぞれ 0.88、0.85、0.95 としてある。地雷周辺土壌が砂、砂利、粘土、有機質土の場合を比較すると、砂利、粘土、砂、有機質土の順に温度差が大きくなっている。これは、地雷の熱特性と周辺土壌の熱特性の差が相対的に大きいほど温度差が生じることに起因する。これから、地雷周辺の土質によっても探査能が左右されることがわかる。

Fig.5 は、砂中に地雷を 10[mm] 埋設して同じ気象条件の下、地雷サイズを変化させた場合の数値シミュレーションによる 2 次元熱画像である。(a)、(b)、(c) は、通常地雷寸法の高さ (DZ) は変えず、幅 (DX, DY) のみを変化させた。幅が大きいほど地雷イメージが鮮明になっていく。(d)、(e)、(f) は、全ての地雷寸法を変化させてある。地雷が大きいほど地雷イメージが鮮明になっている。また、Fig.6 から、地雷寸法が大きいほど地雷上部と周辺部との温度差は大きくなることがわかる。これは、地表面からの熱流が地雷部を避けて流れ、地雷上部の地表面近傍で熱流が滞る際に、寸法の大きい方がより熱流を滞らせる結果生じるためと考えられる。このことから、地雷寸法によっても探査能が左右されることがわかる。

Fig.7 は、周辺土壌の砂の含水率を 0[%]、5[%]、10[%]、15[%]、20[%]、30[%] と変化した場合の数値シミュレーションした結果を基にした地表面の温度差である。含水率 0[%] の場合、砂よりも地雷の構成材料であるベークライト樹脂の熱拡散率が大きいので、日中では地表面からの熱流が地雷上部の地表面を流れ、地雷上部の地表面以外では熱流が滞る結果生じるためと考えられる。また、夜間でも地中からの熱流が地雷部を

流れ、地雷上部の地表面以外では熱が蓄積されにくく、地雷上部の地表面温度がその周辺部より高温となる。含水率 5[%] 以上は、日中に温度差が正、夜間に温度差が負になる。また、含水率 10[%] 未満では、温度差が少ないため、探査が困難となる。この結果から、含水率が高ければ温度差が大きくなりやすく、探査能が向上する可能性があると考えられる。

Fig.8 は、地表面の放射率を 1.0 から 0.8 まで 6 段階に分割し、周辺土壌を砂、埋設深度を 10[mm] とした数値シミュレーション結果であり、地表面の二次元熱画像である。地表面放射率の高い部分は、入射するエネルギーを相対的に受けやすいため地表面温度が早く上昇し、地雷上部の地表面温度と差が縮小するため、地雷イメージが不鮮明になる可能性がある。

4. 結言

本研究は、赤外線センシングの利点を地雷探査に応用して、探査・除去作業に関わる危険について、実計測及び数値シミュレーションの観点から探査に付随するメカニズムや探査限界について検討を加えたものである。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 太陽放射や自然環境条件を援用した赤外線センシングの地雷探査では、地表面放射率や日射時間帯により探査に最適な環境条件が存在する。
- (2) 地表面から地雷までの距離が大きくなるにつれて地雷上部の地表面とその周辺部の温度差が小さくなり地雷イメージは不明瞭となる。気象条件を利用した場合は、計算上 50[mm] 以上の埋設深度になると探査が困難になる。
- (3) 地雷の熱特性と周辺土壌の熱特性の差が相対的に大きいほど温度差が生じ、地雷イメージが明瞭となる。計算上は、地雷と周辺土壌との物性値の差異が 4.5[%] までなら赤外線探査が可能である。
- (4) 地雷寸法は、寸法の大きい方が地表面からの熱流をより滞りやすいため、地雷上部と周辺部との温度差が大きくなり地雷イメージが明瞭となるため、探査能が向上する。
- (5) 含水率が 10[%] 未満の場合、地雷イメージが不鮮明になるが、10[%] 以上であれば、地雷イメージは鮮明になりやすく、探査能が向上する。
- (6) 地表障害物等で放射率が種々に変化している地表面は、探査が難しくなる。これに対して、放射率の特定し易い砂漠地帯では、赤外線地雷探査が比較的容易である。計算上は、地表面の放射率の 0.92~0.84 までなら赤外線探査が可能である。

参考文献

- (1) Inagaki, T., and Y. Okamoto, Measurement of Turbulent Heat Transfer Coefficients Using Infrared Thermography near Ambient Conditions and Its Quantitative Error Estimation, J. of JSME International, Series B, Vol. 42, No. 2, (1999), 275.
- (2) Inagaki, T., et. al., Nondestructive Testing HANDBOOK 3rd. ed (Editor: Xavier P. V. Maldague and Patrick O. Moore), ASNT, (2001).
- (3) 稲垣照美, 他 2 名, 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, (2006), 153.
- (4) Suhas V. Patankar, Heat and Mass Transfer in Boundary Layers, 2nd ed., Intertext Books (1970)

(a) 6[h] after sunrise (b) 15[h] after sunrise
Fig.1 Transient Thermal Image Using Infrared Thermography

Fig.2 Transient Thermal Images

Fig.3 Influence of Buried Depth

Fig.4 Influence of Soil Type

Fig.5 Influence of Mine Size (6[h] after sunrise)

Fig.6 Transient Temperature Difference

Fig.7 Influence of Water Content

Fig.8 Thermal Image with Changing Emmissivity