

## 金属探知機に対する土壌の影響と地雷探知性能の評価

高橋 一徳<sup>†a)</sup> 佐藤 源之<sup>††</sup>

Influence of Soils on Metal Detector and Modelling of the Performance in Landmine Detection

Kazunori TAKAHASHI<sup>†a)</sup> and Motoyuki SATO<sup>††</sup>

あらまし 地雷除去活動において、電磁誘導を利用したパルスインダクション型の金属探知機が活用されている。本報では、地雷探知において土壌が金属探知機に与える影響について考察する。磁性土壌と導電性土壌による金属探知機の時間応答を導出し、自然に存在し得る土壌を想定して数値計算を行うことにより、金属探知機に対し磁性土壌がより深刻な影響を与えることを示す。また、現地でも簡便に計測することのできる2周波数での帯磁率を用いて、金属探知機の時間応答を計算する手法について論じ、実際に現場で計測した金属探知機の性能とよく合致することを示す。この手法により、土壌が金属探知機に与える影響を定量的に評価することができ、また実際の地雷除去作業の前にその現場における局所的な金属探知機性能を把握することができる。

キーワード 金属探知機, 磁性土壌, 導電性土壌, 帯磁率, 地雷探知, パルス・インダクション・センサ

### 1. ま え が き

金属探知機は電磁誘導減少を利用して金属を検出する装置であり、空港やイベント会場での保安検査、食品加工や衣料縫製工場での異物混入検査、建築現場での鉄筋や釘の検知などに広く応用されている。また、同様の原理を使い、鉱山調査や資源調査に用いられる物理探査手法の一つとしても利用されている。これらに加え、金属探知機が活用されている分野に地雷探知がある。特に現在の人道的地雷除去活動では、金属探知機が最も一般的に用いられている探知手法である。これは、金属探知機が比較的単純な仕組みであるにもかかわらず、地雷内にある金属部品からの反応を確実に捉えることができるためである。その一方で、地雷探知では地中に埋設された金属を探知することになるが、その反応には土壌の影響が含まれる。土壌の電気・磁気的特性によっては、金属探知機が地雷に反応する前に土壌に反応してしまい、探知性能の低下や多数の

掘削を伴う確認作業が必要となることによる作業効率の低下が問題となる。

地雷除去活動は非常に危険な作業であり、見逃しは重大な事故につながる。そこで、金属探知機をはじめとする除去活動に関わる機材は慎重に選定される。この選定過程の中では、機能や信頼性はもとより、使いやすさや費用対効果なども検討される [1]。各国の地雷除去活動の技術支援や財政援助を行う国連地雷対策サービス局 (United Nations Mine Action Service; UNMAS) が定める国際標準 (International Mine Action Standards; IMAS) によれば、除去活動を行う団体 (Mine action organisations/users) が実際の作業内容や被害状況に合わせた標準業務手順 (Standard Operating Procedure; SOP) や要求事項 (Statement of Operational Need; SON, Statement of Operational Requirement; SOR) をまとめ、その要求を満たす機器の選定を各国の地雷対策当局の責任において行う。このとき、国連地雷対策サービス局や国連の関係機関であるジュネーブ人道的地雷対策センター (Geneva International Centre for Humanitarian Demining; GICHD)、ドナー各国が地雷除去機器の試験や評価を目的として設立した国際人道的地雷除去試験評価プログラム (International Test and Evaluation Program for Humanitarian Demi-

<sup>†</sup> 応用地質株式会社, さいたま市

OYO Corporation, 1-66-2 Miyahara-cho, Kita-ku, Saitama-shi, 331-0812 Japan

<sup>††</sup> 東北大学, 仙台市

Tohoku University, 41 Kawauchi, Aoba-ku, Sendai-shi, 980-8576 Japan

a) E-mail: takahashi-kazu@oyonet.oyo.co.jp

ning; ITEP) がドナーからの希望等を踏まえた協力を行う [2]. この選定過程の中では, テストサイトにおける機種間の比較試験がたびたび行われ [3], 様々な項目についての検討が行われる [4]~[7]. これは, 金属探知機を用いる国や地域の土壌において, 埋設された地雷を探知するのに十分な性能を有することを実証することを目的としている. この評価試験では, 研究機関や専門家などにより欧州標準化委員会 (European Committee for Standardisation; CEN) において合意文書 (CEN Workshop Agreement; CWA) としてまとめられた試験項目や方法に従うよう, IMAS において定められている [5]. 金属探知機の評価試験では, 土壌の影響を実践的ではあるが定量的に比較する項目として, 「Ground reference height (GRH)」及び「Maximum detection distance (MDD)」等が設けられている [4], [6]. このような試験により, 金属探知機に対する土壌の影響を実際に測定することができるが, 土質及びその電気・磁気的特性は各地雷原において異なるため, テストサイトに集められた特定の土壌を用いて行った試験で得られる結果が, その国や地域の全ての地雷原において当てはまるとは限らない. 実際の地雷除去作業の前には, 作業を行う場所の特定や現地状況を調査する予備調査 (テクニカルサーベイ/レベル 2 サーベイ) が行われるが [8], [9], その一部として土壌の特性を測定し, その地雷原で得られる機器の性能や効率を評価することで, 最適な地雷検知及び除去手法を選択することが提案されている [10], [11]. しかし, この予備調査段階では, 大がかりな計測を現地で行うことが困難であることから, 非常に簡便で迅速な土壌特性の測定, 及びその測定結果からの検知機器の性能評価手法が求められる.

そこで, 本報では 2 周波数で測定した土壌の帯磁率から金属探知機の応答をモデル化する手法について論じる. 2 周波数における帯磁率の測定は, 土壌サンプルを取得することにより非常に簡単に計測が行える. また, 市販されている測定装置も比較的小型であるため, 現地での測定も可能である. この手法を用いて計算した金属探知機の応答を, 探知機の試験において実際に得られた結果と比較することで, 本手法の有効性を示し, 金属探知機に対する土壌の影響について考察する.

## 2. 土壌による金属探知機の反応

金属探知機 (パルス・インダクション型の電磁誘導

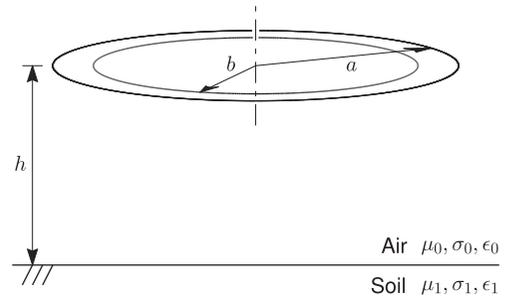


図 1 金属探知機コイルの配置  
Fig. 1 Configuration of metal detector coils.

センサ) を用いた地下埋設物検知を想定し, 図 1 に示すような送受信コイルが地表面から高さ  $h$  に位置している状況を考える. このとき, 半径がそれぞれ  $a$  及び  $b$  の円形のコイルが同心円状に配置されているものとする. また, コイル周辺に金属の対象物は存在しない. 自由空間での透磁率, 導電率及び誘電率をそれぞれ  $\mu_0, \sigma_0, \epsilon_0$  とし, 土壌中では  $\mu_1, \sigma_1, \epsilon_1$  とする. 角周波数  $\omega$  の電流  $I_0$  を巻数  $N_t$  の送信コイルに流したときに, 巻数  $N_r$  の受信コイルで観測される土壌のみによって誘起される電圧  $V^{soil}(\omega)$  は以下で与えられる [12].

$$V^{soil}(\omega) = j\mu_0\omega\pi abN_tN_rI_0 \int_0^\infty \Gamma(\lambda, u_1, \chi) \times J_1(\lambda a)J_1(\lambda b) \exp(-2\lambda h)d\lambda \quad (1)$$

ここで,

$$\Gamma(\lambda, u_1, \chi) = \frac{\lambda(1+\chi) - u_1}{\lambda(1+\chi) + u_1} \quad (2)$$

及び

$$u_1 = \sqrt{\lambda^2 + j\sigma_1\mu_0\omega} \quad (3)$$

また,  $\chi$  は土壌の帯磁率であり,

$$\mu_1 = \mu_0(1 + \chi) \quad (4)$$

$J_1$  は第 1 種ベッセル関数,  $\lambda$  は積分変数である.

### 2.1 非導電性及び周波数依存磁性土壌の場合

土壌が非導電性 ( $\sigma_1 = 0$ ) であり, 帯磁率が周波数依存性を示す場合, 上式は以下のように表せる.

$$V^{soil}(\omega) = j\mu_0\omega\pi abN_tN_rI_0 \left[ \frac{\chi(\omega)}{2 + \chi(\omega)} \right] m(h) \quad (5)$$

$$m(h) = \int_0^\infty J_1(\lambda a)J_1(\lambda b) \exp(-2\lambda h)d\lambda \quad (6)$$

一方、土壌の周波数依存帯磁率  $\chi(\omega)$  は以下のように表す [12], [13].

$$\begin{aligned}\chi(\omega) &= \chi'(\omega) + j\chi''(\omega) \\ &= \chi_0 \left( 1 - \frac{1}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \cdot \ln \frac{j\omega\tau_2 + 1}{j\omega\tau_1 + 1} \right) \quad (7)\end{aligned}$$

ここで、 $\tau_1$  及び  $\tau_2$  はそれぞれ第 1 及び第 2 磁気緩和時間、 $\chi_0$  は直流での帯磁率である。なお、複素帯磁率の虚数部  $\chi''$  は一般に負となる。自然に存在する土壌を想定し、土壌は十分に弱い磁性体である ( $|\chi| \ll 1$ ) とすると、式 (5) の括弧中は  $\chi(\omega)/2$  と近似できる。そのとき、時間  $t = 0$  において 0 となるようなステップ状の入力電流に対する時間応答は、逆ラプラス変換を用いて  $t > 0$  において以下のように表される。

$$\begin{aligned}v_{step}^{soil}(t) &\approx -\mu_0\pi ab N_t N_r I_0 m(h) \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{\chi(s)}{2} \right] \\ &= -\mu_0\pi ab N_t N_r I_0 m(h) \frac{\chi_0}{2 \ln(\tau_2/\tau_1)} \\ &\quad \times \frac{1}{t} \left[ \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right] \quad (8)\end{aligned}$$

ここで、観測時間  $t$  が第 1 緩和時間  $\tau_1$  に比べて十分大きく ( $t/\tau_1 \ll 1$ )、第 2 緩和時間  $\tau_2$  に比べて十分小さい ( $t/\tau_2 \gg 1$ ) 場合には、

$$v_{step}^{soil}(t) \approx \mu_0\pi ab N_t N_r I_0 m(h) \frac{\chi_0}{2 \ln(\tau_2/\tau_1)} \frac{1}{t} \quad (9)$$

と表すことができる [12], [14]。上式より、 $\chi_0$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$  で表される土壌の周波数依存磁気特性がわかれば、受信コイルにおける誘起電圧の時間応答が計算できる。

## 2.2 非磁性及び導電性土壌の場合

先に述べたように、金属探知機の原理である電磁誘導現象は、鉱山調査などの資源探査にも用いられている。このような物理探査分野では導電率が高い導電性の地下構造を検知することを目的としている。また、金属探知機は金属に反応することからも、導電率の影響を受ける。

土壌が非磁性 ( $\mu_1 = \mu_0$ ) であり、導電性 ( $\sigma_1 \neq 0$ ) である場合、 $\chi = 0$  となることから式 (1) から式 (3) は以下のようなになる。

$$\begin{aligned}V^{soil}(\omega) &= j\mu_0\omega\pi ab N_t N_r I_0 \int_0^\infty \frac{\lambda - u_1}{\lambda + u_1} \\ &\quad \times J_1(\lambda a) J_1(\lambda b) \exp(-2\lambda h) d\lambda \quad (10)\end{aligned}$$

送受信コイルが同一であって ( $a = b$ ) 巻数が  $N$ 、地

表面に置かれている ( $h = 0$ ) 場合には、積分内を漸近展開し、2.1 と同様の逆ラプラス変換、更にベッセル関数の近似を用いて、 $t > 0$  における時間応答は以下のように表せる [15].

$$\begin{aligned}v_{step}^{soil}(t) &= \pi a^2 N^2 I_0 \frac{\mu_0}{\sqrt{\pi a t}} \sqrt{\frac{\sigma_1 \mu_0 a^2}{t}} \\ &\quad \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!} \frac{(2m+2)!}{(m+1)!(m+2)!(2m+5)} \\ &\quad \times \left( \frac{\sigma_1 \mu_0 a^2}{4t} \right)^{m+1} \quad (11)\end{aligned}$$

時間  $t$  が  $\sigma_1 \mu_0 a^2$  に対して十分大きい場合には、 $m = 0$  の項のみを取ればよく、

$$v_{step}^{soil}(t) \approx N^2 \frac{a I_0 \mu_0 \sqrt{\pi}}{20t} \left( \frac{\sigma_1 \mu_0 a^2}{t} \right)^{3/2} \quad (12)$$

となる [15], [16].

## 2.3 周波数依存磁性土壌と導電性土壌による影響

前節で導出した周波数依存帯磁率と導電率による誘起電圧の時間応答を比較し、周波数依存磁性土壌と導電性土壌による金属探知機への影響について考察する。

式 (9) と式 (12) を比較すると、周波数依存帯磁率をもつ土壌による誘起電圧は時間の  $-1$  乗で減少するのに対し、導電性土壌によるものは時間の  $-2.5$  乗で減少する。したがって、導電性土壌による影響は非常に速く減少するが、周波数依存磁性土壌による影響は長く継続することがわかる。

更に導出した時間応答を表 1 に示す土壌に対して数値計算する。これらのパラメータはやや極端な場合も含むが、自然に存在し得る土壌を想定してある。入力電流  $I_0 = 1$  A、送受信コイル半径  $a = b = 10$  cm とし計算した結果を図 2 に示す。ここで、磁性土壌については式 (9) に至る条件 ( $t/\tau_1 \ll 1$  及び  $t/\tau_2 \gg 1$ ) を満たしていない場合もあることから、式 (8) を用いて時間応答を計算した。直流での帯磁率  $\chi_0$  により全体の高低が決定され、磁気緩和時間の分布によって減衰の度合いが変化していることがわかる。先に述べたように、導電性土壌による誘起電圧は磁性土壌によるものに比べて時間とともに急激に減少している。しかし、磁気緩和時間が短い時間に分布している場合は、磁性土壌による誘起電圧がより急激に減少するため、比較的遅い時間での応答では、導電性土壌の影響が磁性土壌の影響よりも大きくなる。後で詳しく述べるが、

表 1 金属探知機の時間応答を計算した土壌のパラメータ  
Table 1 Parameters of soils for modelling metal detector response.

	$\chi_0$ [ $10^{-5}$ SI]	$\tau_1$ [ $\mu$ s]	$\tau_2$ [ $\mu$ s]	$\sigma_1$ [mS/m]	
1	1,000	1	100	0	
2	1,000	0.01	1	0	
3	100	1	100	0	
4	10	1	100	0	
5	0			10,000	
6	0			1,000	海水混じりの砂
7	0			100	粘土質の土壌
8	0			10	一般的な土壌

表 2 モザンビークで採取した土壌サンプルの帯磁率測定結果  
Table 2 Measured magnetic susceptibilities of soil samples collected in Mozambique.

サンプル #	土性	帯磁率 @ 465 Hz [ $10^{-5}$ SI]	帯磁率 @ 4650 Hz [ $10^{-5}$ SI]	2 周波数での差 [ $10^{-5}$ SI]	帯磁率 @ 465 Hz で正規化した 2 周波数の差 [%]
2	壤質砂土 (Loamy sand)	13.3	13.0	0.3	_*
3	砂壤土 (Sandy loam)	111	106	5	4.5
4	埴土 (Clay)	1124	1098	26	2.3
5	埴土 (Clay)	1177	1147	30	2.6
6	埴土 (Clay)	561	518	43	7.7
7	砂壤土 (Sandy loam)	2774	2728	46	1.7

\* 値が小さく、信頼できる値となっていない

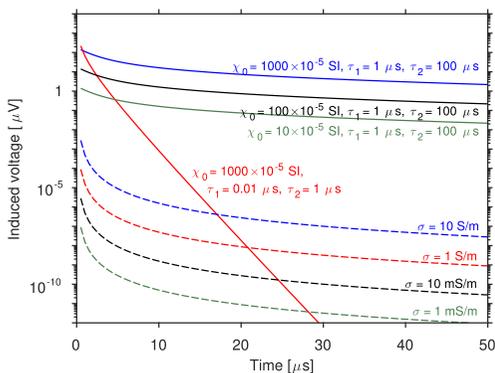


図 2 表 1 の土壌による誘起電圧の時間応答

Fig. 2 Modelled transient response of the voltage induced by soils shown in Table 1.

地雷探知に用いられる単純な金属探知機では、ステップ状の入力電流をオフにしてから一定時間後の誘起電圧値を計測し、その大きさにより金属の有無を知らせる。その観測時間は数十マイクロ秒に設定されており、一般的な土壌の場合には、時間的に応答が速く減衰する導電率よりも、応答が長く持続する周波数依存磁性土壌のほうが金属探知機により深刻な影響を与える。

### 3. 地雷被害国における土壌の帯磁率

金属探知機における磁性土壌の影響を観察するため、地雷被害国であるモザンビークにて採取した 6 種類の

土壌サンプルに対して帯磁率の測定を行った [17], [18]. 測定には Bartington 社製 MS2B を用いた。この装置は 465 Hz と 4650 Hz の 2 周波数において帯磁率を測定することができる。また、装置が小型であり、現場での測定も可能である。測定した結果を表 2 に示す。

この測定によって得られた 2 周波数における帯磁率から金属探知機の応答を求めることにより、各土壌の影響を観察する。しかし、式 (7) 及び式 (8) を用いて時間応答を計算するのに必要な周波数依存帯磁率のパラメータは三つ ( $\chi_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ) であるのに対し、この測定で得られた帯磁率は 2 周波数での値であるため、三つの未知数を決定できない。そこで周波数依存帯磁率の Cole-Cole モデル [19], [20]

$$\chi'(\omega) = \frac{\chi_0}{1 + (\omega\tau_0)^{2\delta}} \quad (13)$$

を用いる。ここで、 $\chi'$  は帯磁率の実数部、 $\delta$  は土壌に含まれるそれぞれの物質における緩和時間  $\tau$  の分布を表すパラメータである。式 (7) は Richter 型モデルと呼ばれ [21], [22],  $\ln \tau$  が  $\ln \tau_1$  と  $\ln \tau_2$  の間に分布していることを表している。一方、式 (13) の Cole-Cole モデルでは、 $\tau$  が  $\tau_0$  の位置にパラメータ  $\delta$  で示される幅で分布していることを表しており、表現方法が違うが両者は本質的に同じであると見ることができる。そこで、式 (7) における三つの未知数を決定する。このモデルにおいても未知数は三つ ( $\chi_0$ ,  $\tau_0$ ,  $\delta$ ) であ

表 3 測定した帯磁率より求めた式 (7) のパラメータ  
Table 3 Parameters in Eq. (7) estimated from the measured magnetic susceptibilities.

サンプル#	$\chi_0$ [ $10^{-5}$ SI]	$\tau_1$ [ $\mu$ s]	$\tau_2$ [ $\mu$ s]
2	13.3	0.569	10.221
3	111.7	0.932	17.514
4	1127.5	0.579	10.425
5	1181.2	0.620	11.251
6	565.5	1.289	26.503
7	2777.7	0.461	8.004

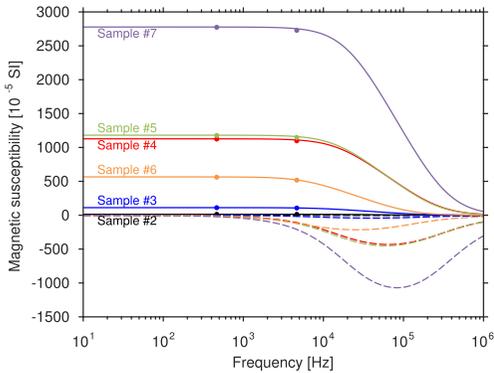


図 3 測定値より推定した帯磁率の周波数変化。●は2周波数での測定値、実線と破線は式(7)で与えられる帯磁率の実数部と虚数部

Fig. 3 Frequency-dependent magnetic susceptibility estimated from measurements at two frequencies. The circles show measured susceptibilities, and the solid and dashed lines are the real and imaginary parts of modelled susceptibility by Eq. (7), respectively.

るが、経験により一般的な土壌は  $\delta = 0.7$  程度であると報告されている [19]。緩和時間  $\tau$  の分布は、土壌の粒径分布に大きく依存し [23]、一般的な土壌の粒径においては  $\delta = 0.7$  で表される緩和時間分布がよく当てはまると考えられる。そこで、 $\delta$  を 0.7 と固定し、残りの二つの未知数を決定する。そして、それらのパラメータを用いた Cole-Cole モデルで与えられる周波数依存帯磁率に Richter 型モデルを当てはめて、式 (7) のパラメータ (直流での帯磁率  $\chi_0$ 、第 1 磁気緩和時間  $\tau_1$ 、第 2 磁気緩和時間  $\tau_2$ ) を求める。このようにして決定したパラメータを表 3 に、最終的に Richter 型モデルで与えられた周波数依存帯磁率を図 3 に示す。

#### 4. 土壌による金属探知機の時間応答

前章で求めた周波数依存帯磁率のパラメータ  $\chi_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  から式 (8) を用いてこれらの土壌による金属探知機の時間応答を求める。ここで、後に実測データと

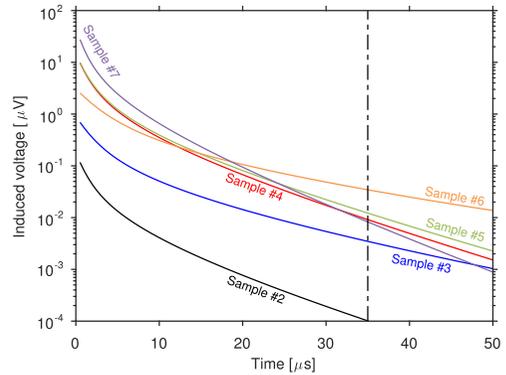


図 4  $h = 10$  cm としたときの各土壌における金属探知機の時間応答。一点鎖線は金属探知機が観測を行っている時間を示す

Fig. 4 Transient response of received voltage induced by each soil type. The dash-dot line indicates a time where the metal detector observes for alarming.

比較するため、測定に用いた金属探知機 Schiebel 社製 AN-19/2 の送信コイル半径  $a = 12$  cm, 受信コイル半径  $b = 9.025$  cm, 送信電流振幅  $I_0 = 3$  A を用いた [19]。また、ここで計算する誘起電圧は送受信コイル数が 1 のとき ( $N_t = N_r = 1$ ) のものである。図 4 に各土壌における時間応答の計算結果を示す。ここでは地面からの距離  $h$  を 10 cm とした。この図より、 $t = 0$  において送信電流を遮断した後、土壌によって受信コイルに誘起される電圧は時間とともに小さくなるが、その減衰の早さが土壌の帯磁率によって異なることがわかる。

地雷検知で用いられている金属探知機は、金属が検知されると音によって検知を知らせる。この警告は送信電流を遮断してから一定時間後の受信電圧がある値を超えたら出力されるようになっている。後に比較する実測に用いた金属探知機 Schiebel AN-19/2 の場合、観測を行う時間は  $t_0 = 35 \mu$ s である [3], [19]。しきい値については、次章で述べる土壌サンプル #4 における Ground reference height の値と他のパラメータより、送受信コイル巻数 1 あたりのしきい値として 3 nV と求めた。式 (8) における観測時間  $t$  を  $t_0 = 35 \mu$ s とし、地面からの距離  $h$  の関数として計算したものを図 5 に示す。全ての土壌において、送受信コイルが土壌から離れるにつれ受信電圧が小さくなっている。土壌サンプル #2 では、いくら土壌に近づいてもしきい値を超えることはなく、金属探知機は鳴らない、すなわち土壌の影響が非常に小さいことを示している。

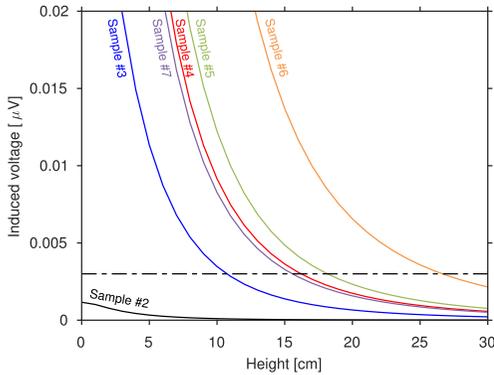


図5 高さ  $h$  に対する送受信コイル巻数 1 あたりの  $t_0 = 35 \mu\text{s}$  における受信電圧の変化. 一点鎖線は受信電圧のしきい値

Fig. 5 Induced voltage per turn at  $t_0 = 35 \mu\text{s}$  as a function of the coil height. The dash-dot line indicates the threshold for alarming.

一方、#6 の土壌では、地面から 26 cm 程度の距離で受信電圧がしきい値を超えてしまい、これよりも地面に近いところでは、金属探知機が土壌に反応してしまうことがわかる。したがって、この土壌は金属探知機に対する影響が大きいことがわかる。

### 5. 金属探知機性能の評価

地雷除去の分野では、金属探知機を用いて地雷の検知が行われるが、その作業は非常に危険であり、検知の失敗は重大な事故につながる。従来から金属探知機の性能を把握するために、金属探知機の試験が行われているが、その項目の一つに「Ground reference height (GRH)」と呼ばれるものがある [4]。これは、金属探知機のコイルを上から地面に近づけていき、警告が鳴り始めたときの高さ（地面までの距離）を表すものである。この試験は特定の種類の土壌（特に赤土）自体が金属探知機に反応してしまうことが経験的に知られており、その影響度を知るために行われる [6], [7]。また、「Maximum detection distance (MDD)」は、GRH と同様に金属探知機の性能を評価するためによく行われている試験であり、検知対象物を土壌に埋設した場合にどの深度まで検知可能であるかを測定する [6], [7]。

3. で帯磁率の計測を行った土壌についてもこの GRH と MDD を測定しており、その結果を表 4 に示す [24]。

前章にて計算した高さに対する受信電圧の変化において、しきい値を超えときの高さがこの GRH に相当している。そこで、各土壌において実際に測定され

表 4 モザンビークでの金属探知機試験において測定した各土壌での Schiebel AN-19/2 の GRH と MDD ([24])

Table 4 GRH and MDD of Schiebel AN-19/2 in each test soil measured during the trial in Mozambique [24].

サンプル#	GRH [cm]	MDD [cm]	
		PMN	PMN-2
2	0.9	39.13	35.88
3	8.3	49.88	31.98
4	16.6	30.96	23.92
5	18.0	39.99	28.08
6	21.1	37.41	26.26
7	21.0	24.08	26.00

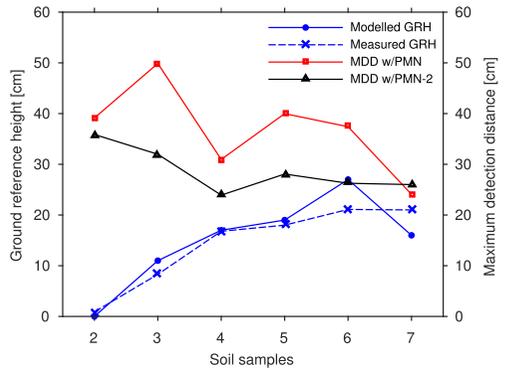


図6 測定と計算による Ground reference height, 及び PMN と PMN-2 に対する Maximum detection distance

Fig. 6 Measured and modelled GRH, and maximum detection distance with PMN and PMN-2.

た GRH と計算により求めた GRH を図 6 に示す。この図より、GRH の計算値と測定値がよく合致しており、2 周波数での帯磁率測定から金属探知機の応答を計算できていることがわかる。土壌サンプル#6 及び #7 については、計算値と測定値の差がやや大きい。サンプル#6 では、#4 及び#5 と同じ土性（埴土）にもかかわらず、測定した帯磁率の絶対値は半分程度、正規化後の 2 周波数の差は 3 倍程度となっている（表 2）ことから、特異な土壌であったことが推測される。更に、推定した第 2 緩和時間が他の土壌と比べて非常に大きくなっていることから、式 (13) 中の  $\delta$  の設定が適切ではなかったことも原因として考えられる。また、サンプル#7 は、測定した帯磁率の絶対値は非常に高いが、正規化後の 2 周波数の差は非常に小さく、この土壌もまた特異であったと考えられる。しかし、このような土壌に対しても、実用上は十分な精度で土壌帯磁率の測定値より GRH を計算することができている。

図6では、PMN及びPMN-2という2種類の対人地雷を用いて測定されたMDDも示してある。この図より、PMN-2に対するMDDは、GRHと線対称となっており、GRHを計算または測定することにより、MDDが推測できる可能性を示している。ここで、PMNに関してはGRHのきれいな線対称となっていない原因として、PMNは多くの金属部品を含んでおり、土壌の影響を受けずに大きな金属からの反応を得られるためであると考えられる。一方、PMN-2は含まれる金属部品が少量であり、土壌による影響が金属部品による反応と比べ大きいため、土壌の磁性を大きく反映した結果になったと考えられる。したがって、サンプル#7の土壌を除き、PMNのMDDはPMN-2のMDDよりも大きな値となっている。

## 6. む す び

本報では、土壌の周波数依存帯磁率及び導電率に起因する金属探知機の時間応答を導出した。周波数依存帯磁率に対して導出した時間応答では、最低3周波数での帯磁率の測定値より三つのパラメータを決定する必要があるが、他の周波数依存性の表現方法において一つのパラメータを典型な値として固定することで、2周波数における帯磁率の測定値より時間応答を計算する手法を示した。その2周波数において測定した土壌の帯磁率から誘導電圧及びGRHを計算し、実測したGRHとよく合致することを示した。また、GRHは比較的少量の金属を含む対象物に対するMDDと対称となっていることを示した。以上の結果より、土壌の周波数依存帯磁率を測定し、GRHを計算することで、その土壌における金属探知機の性能を推測することが可能である。現在は、GRHを実測することで、金属探知機の性能評価及び最適な機種を選択を行っているが、時間と手間を要するため、地雷被害国の代表的な数種類の土壌についてのみ行われている。2周波数での帯磁率測定は、市販の装置を用い非常に簡便に行うことができるため、本報で論じた手法を用いることで、実際に地雷除去活動が行われる各地域において金属探知機の性能評価や最適機種を選択が迅速に行える。その結果、地雷除去活動の効率化や安全性の向上が期待できる。

1999年に対人地雷の除去を求めたオタワ条約が発行し18年が経つが、未だ60以上の国と地域で地雷が確認されており、除去活動はまだまだ継続しなければならない。2011年には200 km<sup>2</sup>において388,000個

の対人地雷を除去しているが、2015年には171 km<sup>2</sup>において157,672個であった[25]。1 km<sup>2</sup>あたりの除去地雷数は1,940個から922個に減少している。これは、先に比較的埋設地雷の密度が高い地域での除去活動が行われ、密度の低い地域が残されていると考えられる。今後はこのような低密度の地雷原における除去活動が必要となる。また、除去が完了した面積が減少しているのは、ドナー各国からの援助の減少によるものである。このような状況の中、全ての地雷を除去し現地住民による旧地雷原の有効利用を実現させるために、今まで以上の効率化が求められている。本報で論じた手法の他にも、地雷除去に関わる機器開発の継続により、除去活動の更なる効率向上と地雷問題の早期解決を期待する。

謝辞 本研究の一部はInternational Test and Evaluation Program for Humanitarian Demining (ITEP)及び科学研究費補助金基盤研究(C)24612001によるものである。データの提供及び有益なご助言をいただいたGülle Mine Action ConsultingのDieter Gülle氏に感謝の意を示します。また、本研究のきっかけを与えていただいたドイツ連邦材料試験研究所のChristina Müller博士に感謝の意を示すとともに哀悼の意を示します。

## 文 献

- [1] United Nations Mine Action Service (UNMAS), Guide to the procurement of mine action equipment, International Mine Action Standards (IMAS) 03.10, 2013.
- [2] United Nations Mine Action Service (UNMAS), The procurement process, International Mine Action Standards (IMAS) 03.20, 2013.
- [3] D.M. Guelle, A.M. Lewis, and P. Ripka, Metal Detector Trials, JRC/European Commission, Luxembourg, 2006.
- [4] D. Guelle, A. Smith, A. Lewis, and T. Bloodworth, Metal Detector Handbook for Humanitarian Demining, JRC/European Commission, Luxembourg, 2003.
- [5] United Nations Mine Action Service (UNMAS), Test and evaluation of mine action equipment, International Mine Action Standards (IMAS) 03.40, 2013.
- [6] CEN, Humanitarian mine action – Test and evaluation – Part 1: Metal detectors, CEN Workshop Agreement CWA 14747-1, 2003.
- [7] CEN, Humanitarian mine action – Test and evaluation – Part 2: Soil characterization for metal detector and ground penetrating radar performance, CEN Workshop Agreement CWA 14747-2, 2008.
- [8] United Nations Mine Action Service (UNMAS),

- Technical survey, International Mine Action Standards (IMAS) 08.20, 2009.
- [9] Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD), A Guide to Mine Action, GICHD, Geneva, 2014.
- [10] K. Takahashi, H. Preetz, and J. Igel, "Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar – Soil characterisation and its verification by a field test," *J. Applied Geophysics*, vol.73, pp.368–377, 2011.
- [11] K. Takahashi, H. Preetz, and J. Igel, "Influence of soil properties on the performance of metal detectors and GPR," *J. ERW and Mine Action*, vol.17.1, pp.52–56, 2013.
- [12] Y. Das, "A preliminary investigation of the effect of soil electromagnetic properties on metal detectors," *Proc. SPIE*, vol.5415, pp.677–690, April 2004.
- [13] T. Lee, "The effect of a superparamagnetic layer on the transient electromagnetic response of a ground," *Geophys. Prospect.*, vol.32, pp.480–496, 1984.
- [14] Y. Das, "Effects of soil electromagnetic properties on metal detectors," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.44, no.6, pp.1444–1453, June 2006.
- [15] T. Lee and R. Lewis, "Transient EM response of a large loop on a layered ground," *Geophys. Prospect.*, vol.22, pp.430–444, 1974.
- [16] T. Lee, "The transient electromagnetic response of a magnetic or superparamagnetic ground," *Geophysics*, vol.49, no.7, pp.854–860, July 1984.
- [17] H. Preetz and J. Igel, "Analysis of physical properties of soil samples from test sites for landmine detection in Mozambique," Technical Report of JRC, 2006.
- [18] K. Takahashi, M. Pavlovic, M. Gaal, and C. Müller, "Soil measurements and modeling," Technical Report of ITEP, 2007.
- [19] A. Gregorovic, Soil reference distance, Technical report of JRC/European Commission, 2005.
- [20] T. Meglich, Y. Li, and R.L. van Dam, "Characterization of frequency-dependent magnetic susceptibility in UXO electromagnetic Geophysics," SEG Annual Meeting, pp.1248–1252, Las Vegas, USA, 2008.
- [21] S. Chikazumi, *Physics of Magnetism*, Wiley, New York, 1964.
- [22] G. Richter, "Über die mechanische und die magnetische Nachwirkung des Carbonyleisens," *Ann. Physik*, vol.29, pp.683–700, 1937.
- [23] J. Igel, H. Preetz, and S. Altfelder, "Magnetic viscosity of tropical soils: Classification and prediction as an aid for landmine detection," *Geophys. J. Int.*, vol.190, pp.843–855, 2012.
- [24] D. Guelle, A. Lewis, M. Pike, and C. Craill, Systematic Test & Evaluation of Metal Detectors Interim Report Field Trial Mozambique, Technical Report of JRC/European Commission, 2008.
- [25] International Campaign to Ban Landmines – Cluster

Munition Coalition (ICBL-CMC), *Landmine Monitor* 2016, Nov. 2016.

(平成 29 年 6 月 5 日受付, 11 月 13 日公開)



高橋 一徳 (正員)

2001 年山形大学工学部機械システム工学科卒, 2003 年東北大学大学院工学研究科地球工学専攻修士課程修了, 2006 年度同大学院環境科学研究科博士課程修了. 博士 (学術). 2006 年東北大学東北アジア研究センター助手, 2007~2009 年ドイツ連邦材料試験研究所学術研究員, 2009~2011 年ライプニッツ応用地球物理学研究所学術研究員, 2011~2013 年東北大学理学研究科地学専攻助教, 2013~2016 年同大東北アジア研究センター助教, 2016 年応用地質株式会社入社. 現在, 地中レーダをはじめとした応用地球物理学の研究に従事.



佐藤 源之 (正員: シニア会員)

1980 年東北大学工学部通信工学科卒業. 1985 年同大学院工学研究科博士課程了. 同大工学部助手, 助教授を経て現在, 同大東北アジア研究センター教授. 2008~2011 年東北大学ディスティンダッシュアウトプロフェッサー. 1988~1989 年ドイツ連邦地球科学資源研究所客員研究員. 電磁波応用計測, 人道的対人地雷検知除去の研究などに従事, 開発した ALIS はカンボジア地雷除去活動で活躍中. 工博. 2014 年 Frank Frischknecht Leadership Award (SEG) 受賞. 2017 年本会喜安善市賞受賞. 2015~2016 年電磁界理論研究専門委員会委員長. IEEE Fellow, 電気学会会員.