

多周波数電磁探査法による土壌環境モニタリング

平井優也*・森 也寸志*・宗村広昭*・江草直和*・森澤太平**

Soil Environment Monitoring by Multi-frequency Electromagnetic Sounding

Yuuya HIRAI*, Yasushi MORI*, Hiroaki SOMURA*, Naokazu EGUSA* and Taihei MORISAWA**

* Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University,
1060 Nishikawatsu, Matsue 690-8504, Japan

** The United Graduate School of Agricultural Sciences, Tottori University,
4-101 koyama-minami, Tottori 680-8553, Japan

Abstract

Surface soil environment was surveyed and characterized using a multi-frequency electromagnetic wave (EM) sensor. Traditional resistivity method needs multiple point electrodes in the field to investigate the deeper points, however, this method uses broadband electromagnetic data to obtain the apparent conductivity from different depth, i.e., the higher the frequency, the shallower data we can obtain. It is non-invasive and rapid, therefore, appropriate for wide area environmental survey. Five frequencies of 2310, 3870, 7950, 24510 and 47970 Hz were applied so that we obtained vertical profile of the domain. Forest under different management, winter-ponded paddy field, orchard and tea farm in hilly mountainside and orchard in plain field were investigated using a broadband electromagnetic wave sensor sounding. Surface electrical conductivity (EC) obtained by Wenner array has the highest correlation with 47970Hz data, showing it is the appropriate frequency for surface soil investigation. Moreover, EC in the order of several tens milli-Siemens obtained by EM sounding corresponded very well with the EC obtained by traditional method. Conductivity data successfully showed management induced changes in soil environment by conductivity map along with vertical conductivity profile, which is advantage of broadband EM survey. Water content changes in forest after rainfall, effect of ponding management in paddy field, and the differences in fertilizer application practice in hilly farm, were clearly demonstrated by the broadband EM sensor.

Key words : Electromagnetic wave sounding, nondestructive investigation, Electrical conductivity.

1. はじめに

土壌・地盤・地下水を取り扱う分野では、対象とする媒体の中を見ることが出来ないという根本的な課題から、しばしば非破壊検査が望まれる。地下水および地熱・温泉調査では比抵抗法探査の割合が高く、土木・建築に関する調査では弾性波探査の割合が高い。従来、電磁探査法は主に深部探査に用いられてきたが、土木分野を対象とした浅部探査機器が開発され、適用分野に広が

りを見せている（中里・黒田，1999）。

本研究では、物理探査が望まれる一つの場面として、森林や農地の管理を考えた。健全な水循環と持続可能な水利用は科学技術基本計画（総合科学技術会議，2006）にもあげられた重要課題で、河川水質のみならず、流域全体の特性を調査・管理することが望まれる。河川水は一般に採水調査によってその特性を把握することができるが、面源負荷源である森林、畑地、水田では土壌調査のためにその土地に入らなければならない。しかし、こ

* 島根大学生物資源科学部 〒690-8504 松江市西川津町 1060

** 鳥取大学大学院連合農学研究科 〒680-8553 鳥取市湖山町南 4 丁目 101

キーワード：電磁探査法，非破壊探査，電気伝導度

これらのフィールドは一般に私有地であるため、鉛直立坑を掘るなど破壊的調査は望まれない。また、同じ物理探査でも、多数の電極を打ち込み、その距離を変えながら多深度を探査する比抵抗法は多数のフィールド調査には向かない。電磁探査を利用すれば、多点における土壌採取という労力は改善されるが、塩類集積調査等で使用される単周波数調査(例えば Corwin *et al.*, 2003)は、一深度のデータしか得られず、水分や肥料成分の鉛直方向への影響を調べることが出来ない。

そこで本研究では、多周波数電磁探査法による調査を考えた。電磁波は周波数が低いほど地中深い部位まで到達し、逆に高周波は地中浅い部位にしか到達しない(2.1測定原理を参照)。従っていくつかの周波数を連続的に発生させて地盤内に発射し、2次的に発生する電磁場を計測すれば、電極間距離を変えずに多深度の土壌環境を同時に計測できる。すなわち水平方向への可動性という点で比抵抗法より、また、鉛直方向への多深度調査という点で単深度電磁探査より有利である。もし、土壌の水分状態や、施肥管理の影響が非破壊で迅速に得られるならば、フィールド調査の一つのツールとして大変有効である。

電磁探査を行う場合、電磁波の到達深度や得られたデータの妥当性をボーリング調査などによって検証することが多い。これまでに、人工地盤内において地盤への漏水という水分量の大きな違いを抽出するために電気伝導度約 100 mS m^{-1} の変化を探査する実験が行われている(光畑ら, 2005)。また、海岸平野における高塩濃度地帯の電磁探査では、塩水と真水といった可溶性塩類の濃度の大きな違いを検出するために、電気伝導度約 $1,000 \text{ mS m}^{-1}$ の変化について探査が行われている(Mitsuhashi *et al.*, 2006)。本研究で対象とする農地や森林は電気伝導度が数十 mS m^{-1} 以下で、これまで報告されてきた現場よりずっと塩濃度が低く、その水分の変動幅も小さい。また、地質学分野で扱われる数十から百 m というオーダーよりも 1 m 未満の表層の土壌に注目する必要がある。従って、電磁波の探査深度や電気伝導度の絶対値の正確さなど、土壌環境の保全や管理に有用な情報をどのように抽出できるか吟味する必要もある。

本研究の目的は、多周波数電磁探査法によって、農地や森林を調査し、流域の面源負荷削減を目指した環境評価・維持・管理のための非破壊土壌環境モニタリング技術の可能性を探ることである。具体的には、①土壌表層探査のための適正周波数の評価、②土壌電気伝導度の正確さの評価、③電磁探査における土地利用毎の特性の抽出、を行った。

2. 方 法

2.1 測定原理

本研究では電磁探査システムとして米国 Geophex 社の GEM-2 broadband EMI sensor を使用した。この測定システムは、小さな送信コイルと受信コイルを用いて、土壌中の電気伝導度や帯磁率分布を計測することができる。送信ループから変動磁界を発生させると、土壌中にレンツの法則により起電力が発生し、土壌の比抵抗に応じて誘導電流(渦電流)が発生する。その誘導電流によって新たに生じる二次磁場 H_s と一次磁場 H_p を受信ループにて地表からのセンサー高さ h で観測し、その値から地下の電気伝導度や帯磁率の値を推定する(ループ・ループ法, 図-1)。送信・受信ループ間隔 r は 1.66 m で、同一の板に固定されており、330 Hz ~ 47,970 Hz の最大 15 の周波数の送受信が可能である。一般的に、3~5 の周波数を用いて測定する(光畑ら, 2005)。

電磁探査法の探査深度は、使用する電磁波の周波数 f と大地の透磁率 μ 、導電率 σ に依存する。高周波数ではより浅層の情報が、低周波数ではより地下深部の情報が得られる。導電媒質中の電磁波は $e^{-\alpha z}$ (α : 減衰定数 z : z 軸方向距離)で減少する。この値が $e^{-1}=0.368$ になる z の値(電磁場の強さが地表面の $1/e$ (約 37%) になる深度)を δ と表し、表皮深度(skin depth)と呼ぶ。表皮深度(skin depth) δ は、

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad \omega = 2\pi f \quad (1)$$

で求められる(Huang, 2005)。ここで、 δ : 表皮深度(m)、 ω : 角周波数(rad s^{-1})、 μ : 透磁率(H m^{-1})、 σ : 導電率(S m^{-1})、 f : 周波数(Hz)である。この式から、周波数 f が高いほど、透磁率 μ が大きいほど、また、導電率 σ が大きいほど、電磁波が伝わる深度は浅くなることわかる。この表皮深度は理論的なものであり、実際の探査深度(depth of investigation, DI)は、目的とする媒体の状態によって異なるため、多分に経験的なものになる。Huang (2005)はこの経験的な探査深度を図解的に求め、

$$DI = \alpha \delta^\beta \quad (2)$$

とした。ここに α, β は経験的係数でそれぞれ 0.94, 0.53 であるとしている。本研究では式(1), (2)を使って探査深度と考えた。

次いで得られるデータについて考える。電磁探査機と地面が水平状態で、コイル間隔 r 、センサー高さ h の場合、垂直な均一半空間に一次磁場 H_p をかけると、渦電流

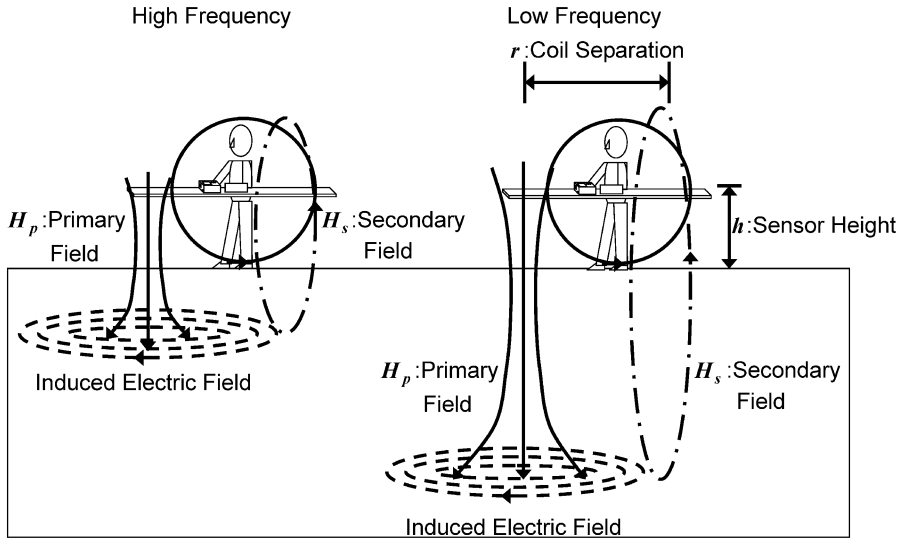


図-1 多周波数電磁探査法の測定原理

Fig. 1 Schematic representation of multi-frequency electromagnetic wave sensor measurement.

が生じ、その渦電流からさらに二次磁場 H_s が発生し、それが検出器で検出される (図-1)。これは次式で表される (Won *et al.*, 1996)。

$$\frac{H_s}{H_p} = r^3 \int_0^\infty \lambda^2 R(\lambda) \exp(-2\lambda h) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3)$$

$$R(\lambda) = \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + i2\pi f \mu \sigma}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + i2\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

ここで、 H_s ：受信コイルでの二次磁場、 H_p ：受信コイルでの一次磁場、 r ：コイル間隔 (m)、 h ：センサー高さ (m)、 J_0 ：ゼロ次のベッセル関数、 f ：制御装置周波数 (Hz)、 μ ：透磁率 (H m^{-1})、 σ ：電気伝導度 (S m^{-1}) である。

上の方程式を解くと μ と σ が未知数として残るが、Huang and Won (2000) は低周波を使用すると伝導成分に影響されない透磁率が計測されることを示し、ここから地盤の透磁率を求め、次いで伝導度成分を計測する方法を紹介している。実際はこの計算はソフトウェア的に行われ、ユーザーは変換後の電気伝導度を読み取るようになっている。なお、このとき計測される実数成分を In-phase、虚数成分を Quadrature とよんでおり、同様にデータの中に表示されるようになっている。これらが周波数、透磁率、電気伝導度の関数となることから、感度の高いデータ値を得るために、伝導度成分の求め方がいくつか考案されている (Huang and Won, 2000)。

2.2 調査概要

農地や森林等の環境評価・管理のための非破壊土壌環境モニタリング技術として、土壌水分状態や施肥の多寡の指標となりうる電気伝導度に注目し、様々な土壌環境が多周波数電磁探査法でどのようにモニタリングされるのかを検証した。調査対象としたのは、森林2斜面、水田、果樹園2面、茶畑である。

本研究における表層土壌の対象深度は、表層から約1~2m程度である。表層土壌を含む多深度調査を行うため、測定深さがおよそ10m未満となるように、前述の表皮深度と探査深度 (式(1)、(2)) を用いて、多周波数電磁探査機の調査周波数を2,310, 3,870, 7,950, 24,510, 47,970 Hzの5つに設定した。これらの電磁波は1秒以内にすべて段階的に自動発生、自動データ取得されるため、ユーザーは探査機を肩にかけて圃場をゆっくり歩くだけでよい。水田など定形を持つ圃場については、2,3メートル間隔でラインを描くように歩き、不定形の果樹園や山林ではGPS (BR-355, SiRFstarIII, GlobalSat) を使って位置情報と併せてデータを取得するようにした。取得したデータはCSVファイルとして提供されるため、RS-232Cを通じてこれをパソコンに取り込み、専用ソフトで変換の後、グラフデザインソフト (Surfer8, Golden software) で電気伝導度および帯磁率の等高線図を作成し、土壌環境の評価を行った。また併せて土壌硬度 (山中式) も調査した。

電磁探査の妥当性を評価するための土壌調査として、

表-1 調査圃場の土壌物理性

Table 1 Soil physical properties of examined field.

Land Management	Forest West	Forest South	Paddy field	Tea farm	Orchard (hilly)	Orchard (plain)
Soil	Brown forest soils	Brown forest soils	Gley paddy soils	Red-Yellow soils	Red-Yellow soils	Red-Yellow soils
Sampling point	20	21	21	25	21	12
Sampling Depth (cm)	10	10	10	10	10	10
EC _{1:5} (mS m ⁻¹)	14.73 (4.66)	17.82 (1.73)	15.07 (3.29)	41.53 (4.96)	11.84 (0.37)	3.05 (0.09)
Moisture ratio (g g ⁻¹)	0.38 (0.18)	0.46 (0.10)	0.41 (0.05)	0.53 (0.16)	0.31 (0.01)	0.33 (0.04)
VWC (m ³ m ⁻³) ⁺	0.39 (0.14)	0.43 (0.11)	0.42 (0.11)	0.58 (0.15)	0.29 (0.05)	0.32 (0.04)
Bulk density (Mg m ⁻³)	1.07	0.95	1.42	0.95	0.95	1.08
Soil Hardness (kg cm ⁻²)	1.09 (0.65)	1.97 (0.92)	—	1.66 (0.46)	3.62 (1.44)	5.36 (1.42)

+ VWC ; Volumetric water content

() ; Standard Deviation

不攪乱土壌を採取し、含水率、含水比、乾燥密度、1:5法土壌溶液電気伝導度を計測した。また、1:5法によって得られた土壌抽出水をイオンクロマト (PIA-1000, Shimadzu) によって分析し、肥料成分の多寡の参考とした。さらに電磁探査と同時に、Wenner array (1916)法により深度5~10 cm程度の土壌の電気伝導度を調査し、データ比較が行えるようにした。各調査地点の土壌の特性は表-1に示すとおりで、各サイトの調査方法を以下に記す。

(a) 森林調査

島根県松江市宍道町馬鞍山の西側斜面と南側斜面の隣接する人工林にて降雨前後の森林土壌環境モニタリング調査を行った。森林調査の目的として、①森林土壌環境の特徴抽出、②隣接する人工林二斜面 (西側, 南側)での土壌環境の差異のモニタリング、③降雨前・後の土壌環境の変化の抽出、の3点について検証を行うこととした。

(b) 水田調査

島根県安来市宇賀荘町には渡り鳥が飛来する水田があり、特にコハクチョウのために冬の間湛水管理を行っている。そこで湛水前 (10月30日)と湛水後 (12月11日)、渡り鳥飛来後 (1月22日)、渡り鳥北帰行直前 (2月21日)の4つの状態の水田土壌調査を行った。湛水期には筏をつくり、その上に探査機を搭載して、水田面を曳航させて電磁探査を行った。水田調査の目的は、①湛水・非湛水の違いの検出、②湛水による土壌環境の変化の検出、また、③渡り鳥の飛来が水田土壌環境に及ぼす影響を検証した。水田は、長辺108m、短辺65mであり、前述したように2、3m間隔の平行のラインを描くように歩いて、また筏を曳航させて調査した。

(c) 果樹園・茶畑調査

島根県松江市本庄町にある島根大学生物資源科学部附

属生物資源教育研究センターの果樹園 (カキ・ウメ畑)と茶畑においても森林や水田と同様の調査を行った。果樹園・茶畑調査の目的は、①施肥環境の異なる果樹園と茶畑の土壌環境の違いを検出すること、②それらと森林、水田との違いの検出、すなわち土地利用の違いが土壌環境に与える影響を調査すること、の2点である。果樹園と茶畑においては、電磁探査ではGPSユニットと一体になった調査を行い、位置情報を簡便に取り込める工夫をした。

また、上記2圃場は丘陵地にあるが、島根大学内における平地果樹園においても電磁探査を行い、比較対象とした。

3. 結果と考察

3.1 表皮深度による探査深度

多周波数電磁探査においては、前述した5つの周波数で現場を走査しているので、それぞれの周波数について対応した探査深さがある。式(1)によって理論的な電磁波の到達深度を、また式(2)から経験的に探査深度を推定することができるが、農地のような電気伝導度の低いサイトで、これらの式が適用できるという保証はない。

そこでまず、表層土壌の調査と最も相関の強い探査周波数を抽出するために、各圃場で行った従来法であるWenner array法と多周波数電磁探査法による電気伝導度を比較し、図-2にまとめた。また、それぞれの周波数について、従来法であるWenner array法と多周波数電磁探査法の相関を表す決定係数をグラフ隅に示した。図-2では、調査サイトに関係なく周波数毎に従来法との相関を表している。低周波数ではプロットがまとまらず、高周波になるに従って徐々にひとつの近似直線で代表されるグラフに近づくことがわかる。代表として47,970 Hzについて回帰直線を描画した。決定係数0.9750から

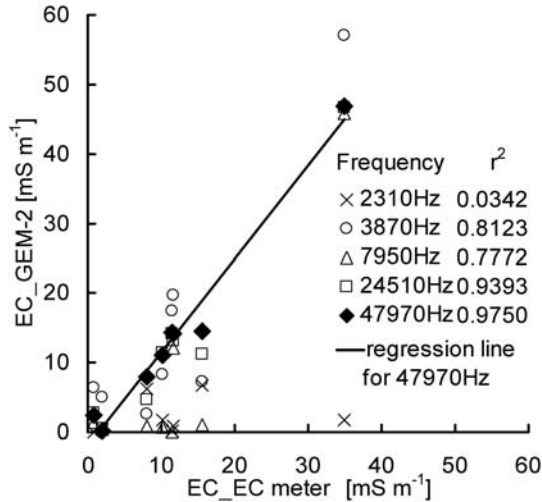


図-2 表層土壌探査のための適正周波数の評価

Fig. 2 Appropriate frequency for surface soil monitoring.

47,970 Hz が最も強い相関を示すことが明らかになった。また、低周波数になるに従って決定係数が小さくなっており、表層の伝導度の影響を徐々に受けなくなっていることがわかる。すなわち表皮深度（式(1)）から、低周波ほど深い部位にまで到達するため、表層の影響が小さくなると解釈できる。本装置において、表層土壌の特徴を捉えるためには、周波数 47,970 Hz を用いることが最も妥当であると判断した。

さらに各周波数をもつ電磁波が探査する深さについて考察する。図-2の縦軸は各サイトにおける電磁探査の結果得られた電気伝導度である。この値と使用した各周波数を使って、式(1)、(2)から計算上の探査深度を算出し表-2に示した。数十メートルまでを対象とする地質学の理論的な計算からは 47,970 Hz は探査深度 3~5 m（森林をのぞく）と計算されるが、決定係数 0.9750 から考えると 1 m 未満の表層土壌の影響をかなり受けながら値が得られていると考えられる。従って電磁波が到達する深度は計算値に近いにしても、環境計測としてはより表層に視点を置いて合理性を失わない。すなわち本探査機を使って表層土壌環境を適切にモニタリングできると判断した。また森林土壌については電気伝導度が小さいため電磁波の到達深度が深く表層の探査とは言い難い。

表層土壌探査の情報としては 47,970 Hz で妥当と判断したが、地盤の電気伝導度によってこの値は変わるため、後に示す鉛直方向の探査マップでは周波数を表示し、括弧内に探査深度を記載することにした。

3.2 多周波数電磁探査法と従来法によって得られた電気伝導度の比較

現場では、従来法である Wenner array 法と電磁探査による電気伝導度調査を同じ場所で行っている。そこで表層探査として妥当と判断された 47,970 Hz の探査データと従来法伝導度調査データをそれぞれの場所で比較し、図-3に描画した。グラフは各圃場で横方向に散乱する形を見せており、図中に示した標準偏差から判断して、従来法である Wenner array 法によるばらつきが大きい場合が多いとわかる。また、ポイントごとにおける比較は相関が高いとは言えない。ここで従来法である Wenner array 法において明らかに異常値と見られる 2, 3 点を排除して算術平均を取る（図-3の◆）と非常に相関の良いグラフとなった。すなわち電磁探査は、ポイントレベルでは従来法である Wenner array 法と相関がとれないものの各圃場毎に平均化すれば相関のとれた計測が出来ていることがわかった。むしろ電極と土壌間の接触の影響を受ける Wenner Array 型の従来型電気伝導度計測にばらつきが見られると考えられた。森林については、表-2に示したように探査深度が 10 m 内外であるため、調査地点の直下としての土壌内データは必ずしも表層と一致しない可能性がある。ただし森林土壌から得られる数 mS m^{-1} 未満の値は非常に小さく、絶対値が一致することはそもそも難しいと考える。

総じて、前述した従来成果である海水と真水、空隙への漏水などといった違いよりはずっと小さな値の違いを議論することが可能であると考えられた。従来法とのば

表-2 土壌の伝導度計測から推測される探査深度

Table 2 Depth of investigation estimated from soil conductivity.

Land Management Electrical conductivity (mS m ⁻¹)	Forest West	Forest South	Paddy field	Tea farm	Orchard (hilly)	Orchard (plain)
	0.21	2.36	13.18	14.59	7.90	46.82
Frequency (Hz)	Unit : m					
47970	13.83	7.26	5.27	4.60	4.48	3.29
24510	16.52	8.67	6.29	5.50	5.35	3.93
7950	22.27	11.68	8.48	7.41	7.21	5.29
3870	26.95	14.14	10.26	8.96	8.72	6.41
2310	30.89	16.21	11.77	10.28	10.00	7.34

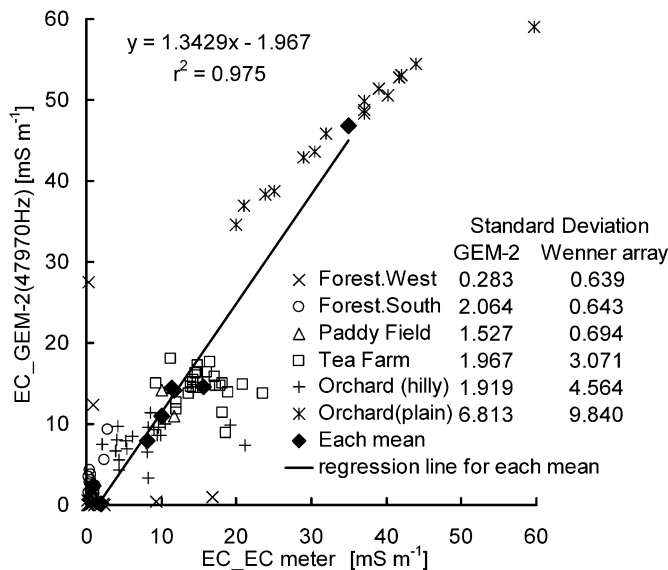


図-3 従来法と電磁探査法の電気伝導度の比較

Fig. 3 Comparison of EC between traditional Wenner array measurement and multi-frequency EM survey

らつきの程度に注意する必要があるものの中央値としての比較は良好な相関を得ている。電気伝導度について数十 mS m⁻¹ 以下の低濃度の値を持つ農林地で従来法とのデータの一致を見た例はおそらく初めてで、多周波数電磁探査機による土壌環境計測へ可能性を示すことが出来た。

3.3 平面的な土壌環境評価

送信・受信コイル間隔が近い本探査機では、多周波数のデータはそのまま点のデータと解釈できるので、電極間を大きく取る比抵抗法などとは違って、作図の際には、最適化同定による点データの逆解析などは必要がない。図-4に各圃場の47,970 Hzの調査結果を示した。(先のグラフでも現れたように平地果樹園だけは伝導度が非

常に高かったので別のスケールを使った。)一般的な電気伝導度の大小は、森林<丘陵地果樹園<水田<茶畑<平地果樹園となった。イオンクロマトによる陰イオン分析結果と照らし合わせると概略、平地果樹園の場合を除いて、おおよそ施肥状況の多寡が反映された結果と判断することが出来る。従来法であるWenner array法と47,970 Hzにおける電磁探査の圃場毎の平均が、決定係数0.9750という極めて良い相関にあることから、これら圃場毎の多周波数電磁探査結果としての濃度の違いは実際の現場の値の違いを示していると考えて良い。

3.4 森林土壌環境

森林では水源涵養効果が重視されるので、鉛直断面での水分分布がわかると非常に有効である。図-5には多周

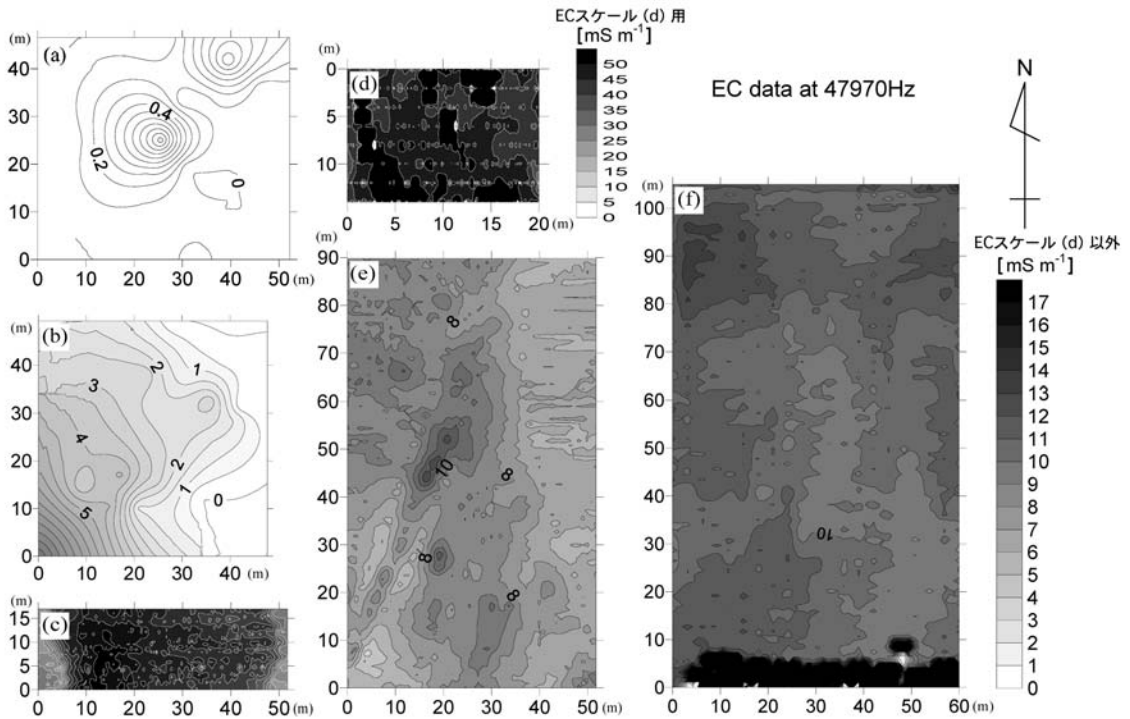


図-4 電磁探査法によって得られた土地利用毎の電気伝導度の平面図
 (a) 森林西側, (b) 森林南側, (c) 茶畑, (d) 果樹園 (平地), (e) 果樹園 (丘陵地), (f) 水田
 Fig. 4 Horizontal EC map obtained by multi-frequency EM survey.
 (a) Forest West, (b) Forest South, (c) Tea farm, (d) orchard (plain), (e) orchard (hilly), (f) Paddy field

波数電磁探査の結果である深さ方向の電気伝導度分布を表示した。多周波数電磁探査では探査結果として鉛直断面を出すことができるのが特徴である。西側斜面である図-5 (a) と南側斜面である図-5 (b) を比較すると、南側斜面である (b) の電気伝導度が高い様子がわかる。また、伝導度の高い部位は表層ではなく、十数 m あたりの深い層であることがわかる。西側と南側の両斜面では降雨前後に電磁探査を行っているため、その結果を図-6 に新たに表示した。斜面上方から調査のための採水をしている堰に向けて断面を作成した。概略図の右側が上流部、左側が採水をしている堰近くとなっている。降雨前後の図を比較すると降雨後には深さ十数 m 程度の所に伝導度の増加帯が見られ、肥料などの可溶性塩類が突然加わる可能性はないため、これが水分の増加を示しているものと判断した。電気伝導度の高いところは降雨前後で似通っており、浸透の発生しやすいところや水分のたまりやすい所がある程度決まっていることが伺える。また、西側斜面である図-6 (a), (b) と南側斜面である図-

6 (c), (d) を比べると西側で水分の増加と思われる場所の割合が高く、雨水の下部浸透については西側の方が多いと観察できる。実際に西側に比べて南側のほうが1オーダー程度土壌の透水性が低いことがわかっており(高田ら, 2006) 地上で得ていたデータを合理的に示している。さらに、TOCやTNなど汚濁負荷の割合も南側で高いことがわかっており(武田, 2002), 本調査結果は雨水浸透の悪さが表面流出を促しているという水質分析からの考察を支持する。

ここで、伝導度分布の平面図である図-4のデータについて表層土壌のデータを抽出しその変化を表-3にまとめた。水分量や電磁探査の結果については図-3同様に算術平均を求めた。両森林とも5%程度の水分上昇があり、それぞれ同程度の電磁探査結果の上昇が認められる。電磁探査の方が従来法電気伝導度より深い部位を捉えていると考えられるが、森林全体としての水分上昇を的確に捉えていると判断した。南側斜面の水分が多く計測されているが、西側では浸透水の発生によって雨水が

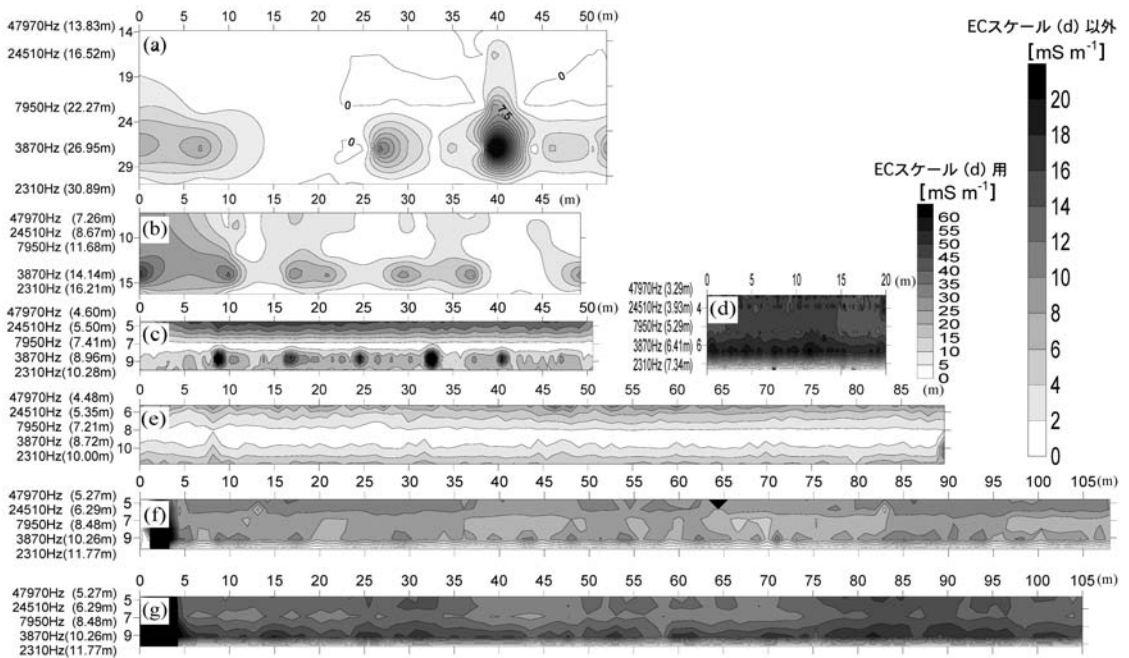


図-5 電磁探査法によって得られた土地利用毎の電気伝導度の鉛直断面図

(a) 森林西側, (b) 森林南側, (c) 茶畑, (d) 果樹園 (平地), (e) 果樹園 (丘陵地), (f) 水田 (非湛水), (g) (湛水)

Fig. 5 Vertical EC map obtained by multi-frequency EM survey.

(a) Forest West, (b) Forest South, (c) Tea farm, (d) orchard (plain), (e) orchard (hilly), (f) Paddy field (Before Inundation), (g) Paddy field (After Inundation)

表層から失われていると解釈することが出来る。さて、西側斜面の降雨後の水分量が南側の降雨前の水分量とほぼ等しくなった場合でも電気伝導度の大小を変えるほどの変化がないことから、数値そのもののオーダーの違いは、土壌組成の電気伝導度の違いであると考えられる。一般に粘土鉱物量は土壌の電気伝導度の増加に寄与する。粒度分析によって粘土粒子成分を計測すると南側斜面は31.7%、西側斜面は26%と違いがあり、これが計測結果に現れたものと考えられる。同じ地質の起源を持つ隣接する森林土壌であったが、図-4 (a), (b) を見ると電気伝導度にはわずかな大小があり、粘土鉱物量の多少がこれを表していると考えた。また、前述のように西側 (a) に比べて南側 (b) のほうが1オーダー程度土壌の透水性が低いこと、さらに聞き取りによって、図-4 (b) の左下に当たる下流部ではかつては雨水を集めて小さな水田として利用していたことが明らかになり、電磁探査の結果を裏付けることが出来た。

今回、森林においては降雨前後の電気伝導度の調査を行ったが、週間隔での調査を継続することで雨水による

水分量変動を調べることが出来ると考えられる。また、森林では表層土壌が柔らかい場合が多く、突き刺し型である Wenner Array 従来型センサーでは、電極と土壌間の接触不良による問題から調査が難航したが、完全非接触である多周波数電磁探査機では、電極と土壌間の接触問題がなく、数値のなめらかな変化を描くことができていた。

3.5 水田土壌環境

水田は圃場整備により、下層から上層まで均一な土壌環境が形成されている。今回の調査では、湛水前、湛水後、渡り鳥飛来後、渡り鳥北帰行直前の4つの状態すべてにおいて、水田全体でほぼ均一な値が測定され、圃場整備の結果が反映された図が得られた。(変化が小さいため図は省略した。) 代表として図-4 (f) には湛水後2月21日のデータを示した。水田土壌の伝導度は等濃度線間隔が他のフィールドに比べて広く、変動幅は8~12 mS m⁻¹ と小さい。

湛水期間3調査日 (12月11日, 1月22日, 2月21日) のデータを用いて、従来法と多周波数電磁探査機による

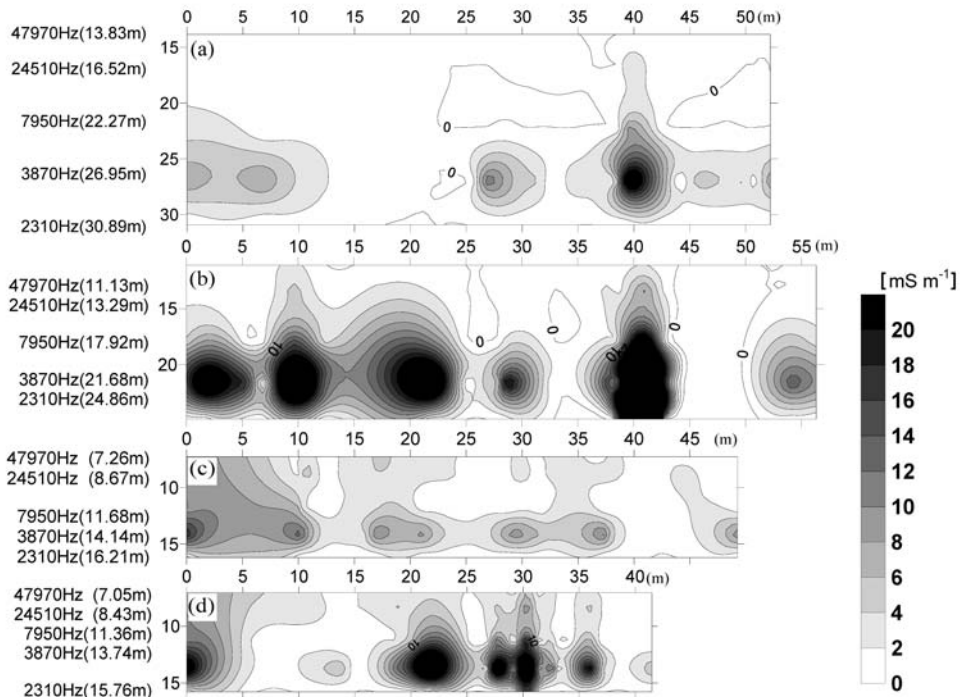


図-6 電磁探査法によって得られた森林の降雨前後の電気伝導度の鉛直断面図
 (a) 森林西側 (降雨前), (b) 森林西側 (降雨後), (c) 森林南側 (降雨前), 森林南側 (降雨後)

Fig. 6 Vertical EC map of before and after rain in the forest obtained by multi-frequency EM survey.
 (a) Forest West (Before rain), (b) Forest West (After rain), (c) Forest South (Before rain), (d) Forest South (After rain)

表-3 森林の降雨前後での体積含水率変化

Table 3 Volumetric water content changes before and after rainfall.

Site	Rainfall	Sampling Depth (cm)	θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]	GEM-2—EC data at 47970 Hz [mS m^{-1}]
West	before	10	0.186 (0.176)	0.207 (0.283)
	after	10	0.229 (0.130)	0.470 (0.589)
South	before	10	0.207 (0.051)	2.362 (2.064)
	after	10	0.253 (0.069)	2.626 (2.031)

() ; Standard Deviation

電気伝導度の比較を行うと、図-3のグラフで示したとおり、ほとんどが直線上に載っている。湛水条件のため従来法である Wenner array 法計測が水田の場合は水溶液で行えているという幸運はあるが、非常に精度の高い計測が行えた。

渡り鳥飛来後の水田土壌の電気伝導度は、図-4 (f) に示すとおりで、小さいながらも左上に濃度の高い部分が見られた。ここは道路から遠くコハクチョウが羽を休め

ている様子が観察されていた場所であるが、この値の具体的な由来については本調査の範囲では明らかにできなかった。

図-5 (f), (g) には鉛直断面図を示した。多周波数電磁探査ではこの鉛直断面を出すことができるのが特徴である。湛水前 (10/30, 図-5 (f)) と湛水後 (12/11, 図-5 (g)) で電気伝導度は全体的に 2.5 mS m^{-1} 程度高くなっており、この間に施肥などが無いことを考えるとこれは

表-4 1:5 法土壌抽出水の陰イオン分析結果

Table 4 Ion chromatography of 1:5 soil extracted water.

Sampling Depth (cm)	Forest West 10	Forest South 10	Paddy field 10	Tea farm 10	Orchard (hilly) 10	Orchard (plain) 10
PO ₄ ³⁻	18.92	19.91	23.05	83.5	19.7	19.6
F ⁻	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.3
Cl ⁻	6.42	5.12	1.4	2.8	1.5	0.5
NO ₂ ⁻ Unit: mg L ⁻¹	1.70	N.D.	0.2	N.D.	N.D.	N.D.
Br ⁻	0.48	0.58	N.D.	0.3	0.6	N.D.
NO ₃ ⁻	5.76	0.42	15.7	25.4	0.6	2.5
SO ₄ ²⁻	10.87	20.53	24.2	45.9	18.7	2.7

水分量の増加によるものと解釈することが出来る。水分の増加による土壌電気伝導度の増加は、深い深度まで伝導度の高い部分が観察されることで解釈でき、10/31から12/11の間にコハクチョウの越冬用に湛水管理が行われている影響を観察することが出来た。

3.6 果樹園・茶畑土壌環境

図-4, 5における茶畑(c), 果樹園(e)は丘陵地の隣接する圃場であり、地質、土壌環境は同じと考えられる。茶畑に高い電気伝導度が観察され(図-4(c)), 明らかに施肥の影響が現れている。実際、茶畑では表-4に示すイオンクロマトの分析でも他の圃場よりはるかに高い濃度の可溶性塩類が検出されている。お茶の施肥量は、窒素・リン酸・カリを合わせて、10a当たり90kgで、稲は30kg, 果樹では40kg程度である。茶畑の電気伝導度が最も高く測定されたのは、他の作物と比較して3倍も施肥量が多いためと考えられる。また、図-5(c)に示す鉛直分布では表層に高い伝導度の集中が見られる。先の水田では湛水による影響のため、水分の増加として深い部分にまで伝導度の上昇が見られたが、畑土壌への施肥の場合、可溶性塩類による伝導度の上昇が起こり、表層にその影響が強く表れることがわかる。なお、図-5(c)の深さ8m付近で等間隔に伝導度の高いところが観察されるが、パイプライン、暗渠など計測に影響する地下施設があるのかどうかは明らかにすることができなかった。

一方、図-5(d)は、平地にある果樹園であるが、地下水位が非常に高い(1, 2メートル前後)ことがわかっており、暗渠による排水が行えない圃場である。全圃場の中で最も高い伝導度を示す結果となった。これは従来法である Wenner array 法でも電磁探査でも同じであった(図-3)が、イオンクロマトグラフでは非常に低い濃度のイオン群しか検出されなかった(表-3)。電磁探査法で測定された電気伝導度は、従来法である Wenner array 法で測定された電気伝導度の値とほぼ整合し、イオンクロマトデータと不整合になる理由については明ら

かに出来なかった。

3.7 電磁探査の農林地土壌環境調査への適用性

一般に電磁探査による電気伝導度の計測では、水分と塩濃度の影響を区別せずに表示することが多い(Corwin *et al.*, 2003)。しかしながら、例えば Roades *et al.* (1976)の式で表されるとおり、伝導度とは少なくとも水分と塩濃度の関数である。農林地の環境の変化を促すのは、既述したように降雨、灌漑などの水分供給と、肥料、有機物、汚染などの化学物質の表層への投入であると考えられ、電気伝導度の測定結果からは、それらの区別ができない。本調査では鉛直方向の探査も同時に行える(図-5)ため、この違いを観察すると、水分の上昇については表層から深部にわたる伝導度の上昇、施肥などの影響は表層に集中した伝導度の上昇で表されることがわかった。加えて、多周波数電磁探査の可搬性を活かして、調査する圃場を増やすことによって、隣接する(地質条件に近い)場所の変動との違いを観察することによって、それが水分による変動なのか、施肥による変動なのかをおよそ推測することが出来る。

多周波数電磁探査法は、すなわち、その可搬性、簡便さ、迅速性に加えて、探査点一つ一つについて多深度探査が行えるため、最適化同定などの複雑な計算を経ることなく3次元空間的な情報を捉えることができる。従って単なる伝導度調査にとどまらず表層土壌環境のモニタリングに大きな威力を発揮すると考えられた。

4. おわりに

本研究では、ループ・ループ法を利用した多周波数電磁探査機を用いて、土壌の電気伝導度を測定し、農地や森林等の土壌環境のモニタリングに対する適用の可能性を検証した。その結果、以下のような結論が得られた。

① 計算による探査深度は最高周波数でも3~5m程度とされるが、決定係数0.9750から表層1m未満の値に強く影響された計測をしていると判断された。本研究

で使用した多周波数電磁探査機を用いて農地や森林の土壌環境調査を行う場合には装置の最大周波数である47,970 Hzを使うのが適当であると考えられた。

② Wenner array による従来法を用いた電気伝導度計測と多周波数電磁探査機による計測の傾向はほぼ一致した。ばらつきの原因の一つは、従来法である Wenner array 法における電極と土壌間の接触不良の問題に由来すると考えられた。数十 mSm^{-1} 以下の低濃度の値を持つ農林地でその検証を行った例はおそらく初めてで、多周波数電磁探査機の土壌環境計測への可能性を示すことが出来た。

③ 降雨前後の水分量の違いを伝導度の差異として表すことができ、深部での水分増加を表示することが出来た。またももとの土壌構成成分の違いをおよそ推測することが出来た。

④ 水田では湛水・非湛水の違いを示すことが出来た。また、同じ伝導度の多寡でも水田のように水分量が多い場合は、土壌深部まで伝導度が上昇し、畑地のように施肥量が多い場合は、土壌表層部で伝導度が上昇するという違いがあり、鉛直方向のデータを得ることの出来る多周波数計測の利点を示すことが出来た。

⑤ 土地利用の違いを、伝導度の違いとして表すことができ、流域全体で土地状態の管理を行う場合に非常に有効であることを示すことが出来た。これらのデータは土壌とは非接触で得られているため、私有地や国立公園といった制限を受ける地域でも調査を継続することが可能である。

謝 辞

本研究の成果の一部は、学術振興会科学研究費(19201017 (國井), 18510074 (森)), 島根大学プロジェクト研究推進機構「汽水域の自然・環境再生研究拠点形成プロジェクト」, (財)クリタ水・環境科学振興財団, また国土交通省と島根大学の包括協定に基づく調査, の補助を受けて行われた。圃場調査の際には、島根県安来市宇賀荘町の地区営農組合の方々, 島根大学生物資源科学部附属生物資源教育研究センターの山岸主門先生, 太陽計器の藤田親昭さんにお世話になった。本研究の遂行に対する種々の支援に対し感謝する次第である。

引用文献

- Corwin, D.L., Kaffka, S.R., Hopmans, J.W., Mori, Y., van Groenigen, J.W., van Kessel, C., Lesch, S.M. and Oster, J.D. (2003) : Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil, *Geoderma*, **114** (3) : 231-259.
- Huang, H. (2005) : Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors, *Geophysics*, **70** (6) : G135-G142.
- Huang, H. and Won, I.J. (2000) : Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **5** (4) : 31-41.
- Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A. and Kusunose, K. (2006) : Various-scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain, *Geophysics*, **71** (6) : 167-173.
- Rhoades, J.D., P.A.C. Raats and R.J. Prather. (1976) : Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **40** : 651-655.
- Wenner, F. (1916) : A Method of Measuring Earth Resistivity, *Bulletin of the US Bureau of Standards Science Paper* 12 (3).
- Won, I.J., Keiswetter, D.A., Fields, G.R.A. and Sutton, L.C. (1996) : GEM-2 : A new multifrequency electromagnetic sensor, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **1** (2) : 129-138.
- 高田 直・森 也寸志・東 直子・井上光弘・武田育郎 (2006) : 流域水物質循環解明のための土壌浸透水直接採取法の開発. 第 48 回土壌物理学会講演要旨集 72-73.
- 武田育郎 (2002) : 針葉樹人工林の間伐遅れが面源からの汚濁負荷量に与える影響 (II), *水利科学*, **266** : 47-71.
- 中里裕臣・黒田清一郎 (1999) : 電磁探査法の農業土木分野への展開, *農業土木学会誌*, **67** (11) : 57-63.
- 光畑裕司・Kwou Hyoung Seok・横田俊之・内田利弘・清水智明・成木和俊 (2005) : 人工地盤内漏水探査実験—ループ・ループ電磁探査法の適用—, *GREEN Report* 2005, 72-73.

要 旨

流域管理において、面源負荷源たる森林、畑地、水田の広域調査では、迅速かつ非破壊の試験方法が望まれる。そこで、非破壊土壌環境モニタリング技術として、森林、水田、果樹園、茶畑で多周波数電磁探査を行い、水分の増減や施肥による電気伝導度の変化、また土地利用の違いを面的に、かつ鉛直方向に調査した。従来法による表層電気伝導度は最高周波数から得られる値とほぼ一致し、森林での降雨前後や水田での湛水前後の変化、畑地での施肥の影響を示すことができた。圃場の水分の増加は深部にわたる伝導度の増加、施肥による影響は表層付近の伝導度の増加として区別することができ、多深度調査ができる利点が得られた。土地管理の違いを伝導度の違いとして表すことができ、流域全体での管理を行う場合に非常に有効であることを示すことが出来た。これらの値の変化は数十 mSm^{-1} 以下で生じており、従来示されてきた探査よりずっと低濃度である。このような低濃度を示す農林地で、多周波数による検証を行った例は恐らく初めてで、圃場管理や流域水管理など多周波数電磁探査機の土壌環境計測への可能性を示すことが出来た。

受稿年月日：2007年9月18日

受理年月日：2008年3月31日