

令和元年6月24日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02580

研究課題名(和文)複合的物理解査による農業用施設及び地盤中の流体・物質移動の高速可視化技術の開発

研究課題名(英文) Development of High speed visualization technique for subsurface dynamics using geophysical prospecting methods

研究代表者

黒田 清一郎 (Kuroda, Seiichiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・上級研究員

研究者番号：30343768

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,400,000円

研究成果の概要(和文)：頻発する豪雨に伴う農業用施設の構造物被害や周辺地盤災害への対策、農業用貯水施設の効果的な維持管理と機能診断などの農村地域における課題解決のためには、地盤中の浸透現象を原位置で明らかにする技術が必要である。

本課題では、多点送受信計測システムの開発と申請者らが開発してきた地震波・電磁波干渉法および波形解析技術等の導入によって、この技術の高分解能化、高速化そして汎用化を図り、地盤中の流体・物質移動といった動的な現象をリアルタイムで可視化する技術の開発を行った。また農業用施設および農地に関する原位置評価技術としての適用可能性と活用方法について明らかにするために、室内実験および野外実証試験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は総合的な物理解査技術の導入と応用によって、地盤等で発生するダイナミックな現象の可視化と追跡に特化した、新たな計測技術、原位置評価技術の開発を行ったものである。地盤等における流体や溶存物質の移動現象の把握は、農業用施設や農地に関わる研究者、技術者にとって基盤技術といえるものである。特にアレイ型アンテナによる電磁波計測に基づく地盤中浸透の高速可視化は従来例がなく新規性のある研究事例として米国作物・土壌学連合会のニュースレターにも掲載された。また本研究成果は農業分野だけではなく地盤や地盤構造物に関する土木工学、環境工学の研究者にとっても参照されうる技術となるといえる。

研究成果の概要(英文)：To solve problems in rural areas due to frequent heavy rain and surrounding ground disasters, or to propose effective maintenance methods for reservoirs, it is needed to develop the site characterization technique for dynamic phenomenon in subsurface such as seepage. We developed a visualization technique for dynamic phenomena such as fluid and mass transfer in real time, employing high-speed and high-repeatability monitoring system with simultaneous measurements with multi transmitter and receiver array, and applying developed analytical methods, such as seismic or electromagnetic interferometry or waveform inversion, to the observed waveform data. The laboratory tests and on-site experiments were conducted, in order to evaluate the applicability of proposal methods for agricultural facilities and agricultural fields.

研究分野：農業農村工学

キーワード：物理探査 地盤浸透 非破壊診断 可視化技術 農地 農業用施設

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

農地地盤およびため池や農業用フィルダム等の地盤構造物において、浸透現象およびそのでの物質移動現象の把握は極めて重要な技術的課題である。気候変動の影響で近年豪雨災害が頻発しており、ため池等の農業用施設の被害が相次いでいる。この被災機構の解明や対策技術の開発には内部の浸透状況の把握が必要である。このような状況は本年大きな被害がみられた河川堤防などの一般的な土木構造物においても同様である。農地が地下水環境や地球環境に与える影響を考える上でも、地盤中内部の浸透や間隙空気置換や移動現象、溶存物質の挙動などを把握する技術は必要である。また塩類集積による農地の生産性の低下は現在地球規模での深刻な問題となっており、津波災害による被害も記憶に新しいところである。リーチングによる対策の効率化等の対策まで含めて、地盤中での水・溶存物質動態を把握することが必要不可欠である。このように農業農村工学分野における、農地や農業用施設の基礎およびため池等の土構造物の内部において、浸透現象とそれに伴う物質移動の実態を原位置で評価する技術は、極めて重要な位置付けにあり、基幹的な技術と考えられる。

2. 研究の目的

頻発する豪雨に伴う農業用施設の構造物被害や周辺地盤災害への対策、農業用施設の長期供用における漏水対策のための効率的かつ効果的な維持管理と機能診断など、農業用施設および周辺地盤に関する諸問題の解決のためには、地盤中の浸透現象や封入気体および溶存する物質の挙動を原位置で明らかにする技術が必要である。筆者らは高い分解能と信頼ある物性値評価が可能である電磁波探査技術等の物理探査技術によってこれを実現してきた。

本課題では、多点送受信計測システムの開発と申請者らが開発してきた地震波・電磁波干渉法および波形解析技術等の導入によって、この技術の高分解能化、高速化そして汎用化を図り、地盤中の流体・物質移動といった動的な現象をリアルタイムで可視化する技術の開発を行う。また農業用施設および農地に関する原位置評価技術としての適用可能性と活用方法について明らかにするために、室内実験および野外実証試験を行う。

3. 研究の方法

浸透現象に対して複合的な物理探査技術によって浸透現象が把握できることを実証するために、地盤への浸透実験を実施し電気探査、電磁波探査、弾性波探査の適用とその繰り返し計測によるモニタリングを行った。農業用施設などの実規模の構造物や地盤への適用を想定し、そのような対象でも浸透現象の継続的な監視を行う方法として、人工的な震源を用いることなく自然の振動を用いて仮想的に弾性波探査を実施した時と類似の振動応答を再現する振動波形解析プログラムを、地震波干渉法に基づき開発し、農業用貯水池の浸透に伴う地震波伝播特性変化を追跡できることを実証した。一方で、地盤中に発生する選択的な流れをリアルタイム的に可視化できるように、地中レーダによる高速なモニタリングシステムを構築し、キャピラリバリアーと呼ばれる選択的な流れを発生させた実験に適用し、実証した。さらに高速にかつ再現性高く浸透現象を可視化できる手法として、アレイ型地中レーダによる多重送受信高速計測を解析する技術を開発し、浸透現象の高速可視化を行う野外実証試験を実施した。

4. 研究成果

高速にかつ再現性高く浸透現象を可視化できる手法として、アレイ型地中レーダによる多重送受信高速計測を解析する技術を開発し、浸透現象の高速可視化を行う野外実証試験を実施した。アレイ GPR とは、送信アンテナおよび受信アンテナがそれぞれ複数個並んだ配列構造を持つ GPR の総称である。アレイ GPR では、特定の周波数帯のパルス波形を放射するパルス方式 6) あるいは周波数を段階的に上げながら放射するステップ方式 7) が採用されている。本報では、3D-Radar 社の高精度ステップ方式のアレイ GPR システムを用いた 8) 。3D-Radar 社のアレイ GPR (DXG1820 アンテナの場合) は 150 mm 間隔で送信アンテナ (Tx) 10 個と受信アンテナ (Rx) 11 個がそれぞれ等間隔で並び、Tx と Rx が交互に配置されているアンテナアレイよりなる (図-1)。交互に隣り合う Tx と Rx の先端間の距離は約 113 mm である。アンテナアレイは複数の高周波同軸ケーブルから成るアンテナケーブルにより制御装置と接続される。さらにイーサネットケーブルを介して観測用 PC により制御される。また本システムは高精度 GPS 移動計測装置を搭載しており、測定結果を地図上に落とし込むことが可能となっている。

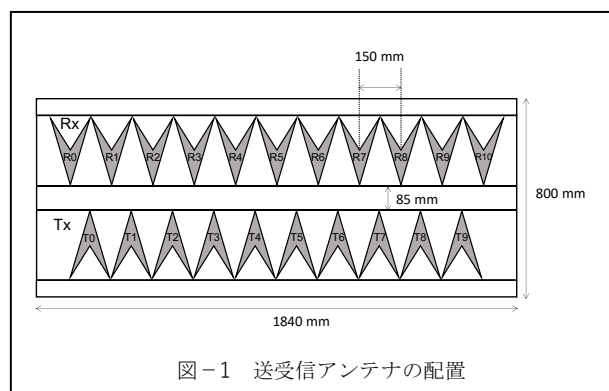


図-1 送受信アンテナの配置

本システムは、周波数 100 MHz から 3000 MHz の間で動作するステップ方式による GPR である。測定は、事前に入力した送受信アンテナの組合せ順に逐次送受信アンテナの組合せを切替えながら進める。ステップ方式 GPR では周波数領域のデータが得られるが、フーリエ逆変換により時間領域の波形データが生成され、パルス方式 GPR より得られる反射波形に相当する波形データが得られる。パルス方式の場合、高周波の電磁波であれば高解像度であるものの探査深度は得られず、低周波であれば探査深度は得られるものの低解像度となる。ステップ方式では、高周波領域と低周波領域いずれのデータも有し、一度の測定で複数のパルス方式の GPR を用いた場合と同様のデータを得ることができる。本システムでは 0.3 秒以内にアンテナ間距離を 113 mm で一定とするコモンオフセットギャザー (COG) を計 20 波形得ることができ (図-2(a))、複数の測線上を車両などで牽引することで、三次元データを短時間に作成することができる。なお、図-2(a)の白丸で示している送受信アンテナの中心点は 75 mm 間隔となり、COG を図示する際にはこの中心点の位置で波形を並べる。

アレイ GPR では、Tx と Rx を自由に組み合わせることができるが、これまでの多くの適用事例は COG の取得による地下構造の可視化であった。しかし、時間領域に変換された COG から、深度情報を推定するには、地下の電磁波速度構造が必要となる。GPR 探査において、電磁波速度構造を求めるためには、一般にマルチオフセット計測によるマルチオフセットギャザー (MOG) が必要となる。たとえば、送受信アンテナの中心位置を固定しアンテナ間隔を変えながら測定を行う、コモンミッドポイント (CMP) 計測により、地下の電磁波速度構造を推定することができる。パルス方式の地表型 GPR を用いて CMP 計測により電磁波伝播速度を正確に推定するためには、アンテナ間隔の変化量を小さくし測定回数を増やす必要があるが、それに伴い測定時間も増加する。そのため、浸潤過程のように動的現象に対してパルス方式の地表型 GPR で CMP 測定を実施することは難しい。また、Tx を固定し、Rx の位置を変えながら測定するワイドアングルリフレクション・リフラクション (WARR) 測定も MOG 計測の一つであるが、CMP 同様パルス方式の地表型 GPR では測定には時間がかかり、動的現象の測定には不向きである。

図-2(b)に示す組合せでは、すべての組合せにおいてアンテナ中心点が同一となり、CMP ギャザーが得られる。また、図-2(c)は、Tx を固定し Rx を R0 から R10 まで切り替える WARR ギャザーの一例を示す。さらに Tx を T0 から T9 へと変化させることで、10 種類の異なる WARR ギャザーを得ることができる。本システムでは 110 通りの組合せをすべて測定するのに約 1.5 秒を要する。しかし、それはすなわち CMP や WARR を 1.5 秒ごとに取得できること意味し、これまで時間を要するため不向きとされてきた動的現象に対する MOG 計測が、アレイ GPR によって可能になってきたことを示唆している。

CMP や WARR ギャザーは、その後速度解析に用いられる。速度解析には、NMO 補正後に波形を重合するセンブル法が一般的であるが、より正確な速度推定には、多くの波形つまり、多くの測定が必要である。アンテナ間隔を自由に定めることのできないアレイ GPR の場合、得られる波形の数はアンテナ数によって決まり、今回用いたアレイ GPR ではその数は 10 と、必ずしも十分ではない。そこでレーダグラム上の波形に直接的に、双曲線をフィッティングする方法で平均電磁波伝播速度を推定した。今、アンテナ距離 0 のときの往復走時を T_0 とすると、あるアンテナ距離 x における深さ D からの往復走時 T は、平均電磁波伝播速度 v より与えられる。

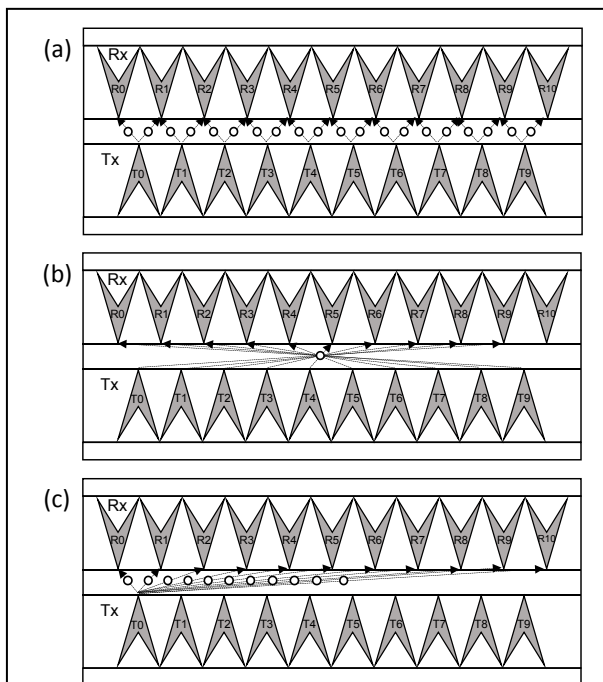


図-2 (a) COG, (b) CMP, (c) MOG を取得するための送受信アンテナの組合せ

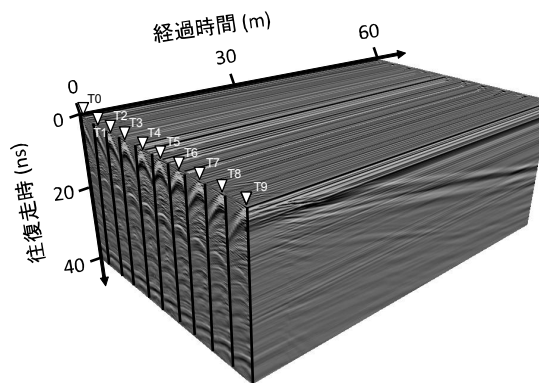


図-3 アレイ GPR より得られた三次元時空レーダグラム

そのとき T は双曲線を描く x の関数となり、CMP ギャザーで得られた反射局面に当てはめることで、最適な v を決めることができる。以上の方法により反射面までの平均電磁波伝播速度と反射面の深度を推定した。

ここでは、鳥取大学乾燥地研究センター内で実施した浸潤実験の結果について報告する。本実験では、地表面に長さ 2.5 m の多孔質チューブを 6 本、15 cm 間隔で平行に設置し、一定流量 (7000 cm^3/min) で給水し、アレイ GPR を用いて浸潤前線を測定した。このとき、アレイ GPR は測線上を牽引することなく、多孔質チューブ上に静置し測定した (三次元時空 GPR 探査)。本実験では、送受信アンテナの 110 通りの組合せを繰り返し連続的に測定し、測定終了後に波形を並び替え、COG、WARR、CMP を再構成した。

図-3 は、アレイ GPR によって得られた浸潤開始後 60 分までの三次元時空レーダグラムである。三次元時空レーダグラムは、アンテナ中心点の位置と往復走時からなる二次元のレーダグラムを 1.5 秒ごとに並べてできたもので、長軸は経過時間 t (分) である。図-3 は、110 通りの組合せを Tx 毎に区切って示したものである。初期断面 ($t=0$) には直達波や反射波形が明瞭に現れている。一方で時間の経過とともに、明瞭な反射面が現れ往復走時が経過時間とともに増加し、反射面の位置が深くなっていく様子を確認することができる。この連続的な反射面は浸潤前線からの反射面であり、アレイ GPR により浸潤前線の位置を明確に捉えられていることが確認できる。

図-4 に、三次元時空レーダグラムより切り出し再構成した、初期、30 分後および 60 分後の CMP および COG の二次元レーダグラムを示す。30 分後、60 分後のレーダグラムには浸潤前線からの明瞭な反射面を確認できる。このときの、浸潤前線の位置を同定するためには、電磁波伝播速度が必要となる。図-5 に、60 分後の CMP レーダグラムとともに上述の速度解析方法による報復走時 T を白線で示す。レーダグラムの反射波形と式 (1) による曲線はよく一致しており、このとき反射面までの平均速度 v を正確に推定できていることがわかる。このようにアレイ GPR により MOG を含む三次元時空データを得ることで、任意の経過時間 t において、推定した v と COG の往復走時から、浸潤前線の深さを求めることができる。これは、これまでのパルス方式の地表型 GPR では困難であり、アレイ GPR の導入によって計測の高速化を行うことにより、浸透現象をリアルタイムで可視化する現位置評価技術を開発することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

① [Hirotaka Saito](#), [Seiichiro Kuroda](#), [Toshiki Iwasaki](#), [Nobuhito Nagai](#), [Haruyuki Fujimaki](#) Tracking Infiltration Front Depth Using Time-lapse Multi-offset Gathers Collected with Array Antenna Ground Penetrating Radar, Journal of Visualized Experiments, 査読有, Vol. 135, 2018, e56847

DOI: 10.3791/56847

② [黒田清一郎](#), [北谷康典](#), [田頭秀和](#), [中村康明](#), [吉野英和](#), [増川晋](#), 農業用ダムの振動特性監視のための地震観測記録解析システム, 農業農村工学会誌, 査読有, Vol. 85, No. 3, 2017, pp. 3-6

③ [斎藤広隆](#), [黒田清一郎](#), [永井延史](#), [Jacopo Sala](#), アレイアンテナ地中レーダによる地盤中水分分布およびその動態の評価監視, 地盤工学会誌, 査読有, Vol. 65, No. 1, 2017, pp. 28-31

④ [黒田清一郎](#), [田頭秀和](#), [増川晋](#), [相澤隆生](#), 高速多点振動計測による農業用ダムの地震波伝播特性評価, 農業農村工学会誌, 査読有, Vol. 85, No. 3, 2017, pp. 7-10

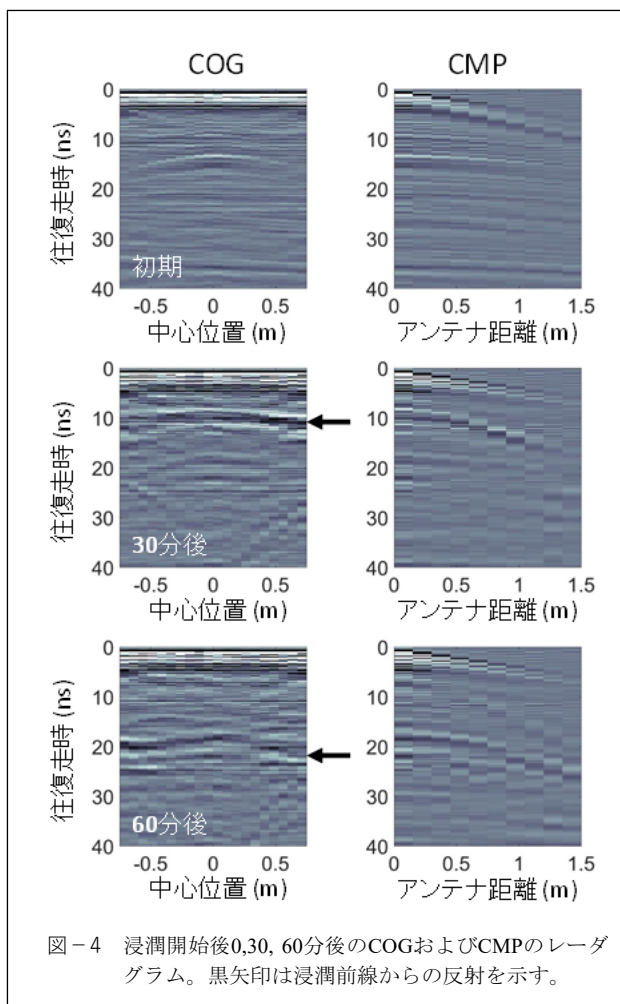


図-4 浸潤開始後0,30, 60分後のCOGおよびCMPのレーダグラム。黒矢印は浸潤前線からの反射を示す。

⑤Toshiki Iwasaki, Seiichiro Kuroda, Hiroataka Saito, Yukio Tobe, Kohei Suzuki, Haruyuki Fujimaki, Mitsuhiro Inoue, Monitoring Infiltration Process Seamlessly Using Array Ground Penetrating Radar, Agricultural & Environmental Letters, 査読有, vol.1, 2016, 160002
DOI:10.2134/ael2016.01.0002

〔学会発表〕（計 8 件）

①Seiichiro Kuroda, Nobuyuki Ishii, Toshihiro Morii, GPR MONITORING NON-UNIFORM INFILTRATION PROCESS INTO VADOSE ZONE IN SAND BOX TEST, Annual Meeting/Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2019), 2019

② Seiichiro Kuroda, Hiroataka Saito, Yukuo Tobe, Nobufumi Nagai, Toshihiro Morii, Haruyuki Fujimaki, Characterization of partially and non-uniform infiltration process using time-lapsed GPR measurements, AGU Fall meeting Abstracts, 2018, NS13B-0595

③Seiichiro Kuroda, Nobuyuki Ishii, Toshihiro Morii, Characterization for capillary barriers effects in a sand box test using time-lapsed GPR measurements, AGU Fall meeting Abstracts, 2017, NS33A-0048

④Seiichiro Kuroda, Nobuyuki Ishii, Toshihiro Morii, GPR monitoring for non-uniform infiltration through a high permeable gravel layer in the test sand box, EGU General Assembly 2017, Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, 2017, EGU2017-18450-2

⑤Chisato Konishi, Kunio Aoike, Takayuki Kawai, Seiichiro Kuroda, NMR and GPR sounding to characterize groundwater aquifer in sand dunes area, Annual Meeting/Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2017), 2017

⑥Toshiki Iwasaki, Kohei Suzuki, Seiichiro Kuroda, Hiroataka Saito, Yukuo Tobe, Haruyuki Fujimaki, Mitsuhiro Inoue, Tracking Wetting Front Seamlessly during Infiltration using Array Ground Penetrating Radar, 日本地球惑星物理学連合大会講演要旨集, 2017, AGE05-P22

⑦石井伸幸、森井俊広、黒田清一郎、地中レーダによるキャピラリーバリア機能の原位置評価の試み、物理探査学会春季学術講演会論文集、2017

⑧石井伸幸、森井俊広、黒田清一郎、キャピラリーバリア機能の原位置評価への地中レーダの適用、平成 29 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2017

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等：

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：斎藤 広隆

ローマ字氏名：Hiroataka Saito

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：(連合)農学研究科(研究院)

職名：教授

研究者番号（8桁）：70447514

研究分担者氏名：藤巻 晴行
ローマ字氏名：Haruyuuki Fujimaki
所属研究機関名：鳥取大学
部局名：乾燥地研究センター
職名：教授
研究者番号（8桁）：90323253

研究分担者氏名：森井 俊廣
ローマ字氏名：Toshihiro Morii
所属研究機関名：新潟大学
部局名：自然科学系
職名：教授
研究者番号（8桁）：30231640

研究分担者氏名：佐藤 源之
ローマ字氏名：Motoyuki Sato
所属研究機関名：東北大学
部局名：東北アジア研究センター
職名：教授
研究者番号（8桁）：40178778

研究分担者氏名：塩谷 智基
ローマ字氏名：Tomoki Shioani
所属研究機関名：京都大学
部局名：工学研究科
職名：特定教授
研究者番号（8桁）：40443642

研究分担者氏名：河合 隆行
ローマ字氏名：Takayuki Kawai
所属研究機関名：鳥取大学
部局名：乾燥地研究センター
職名：プロジェクト研究員
研究者番号（8桁）：40443642

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。