

平成 28 年熊本地震が影響を及ぼした農地の地下部調査

井上敬資・若杉晃介¹⁾・脇山恭行²⁾・野見山綾介²⁾・古賀伸久²⁾・新美 洋²⁾・井原啓貴²⁾・
山口典子²⁾・山根 剛²⁾・中野恵子³⁾・田中誠司^{4),5)}

(2018 年 6 月 12 日 受理)

要 旨

井上敬資・若杉晃介・脇山恭行・野見山綾介・古賀伸久・新美 洋・井原啓貴・山口典子・
山根 剛・中野恵子・田中誠司：平成 28 年熊本地震が影響を及ぼした農地の地下部調査。九
州沖縄農研研究資料 95：18-29, 2019.

平成 28 年熊本地震により被害が発生した農地において、地震が農地の地下部に及ぼした
影響を調べるため、表面波探査、電気探査、電磁探査の物理探査を実施した。噴砂が発生し、
ビニールハウスの支柱が沈下した熊本市の野菜栽培施設では、沈下支柱周辺において表面波
探査による S 波速度や電気探査による比抵抗の値が相対的に高く、支柱直下のシルト層に
噴砂が混ざった可能性が示唆された。海沿いの干拓地に立地し、噴砂により塩害が生じた玉
名市の野菜栽培施設においては、地下水位が高い箇所ほど施設内の比抵抗が低く、塩害リス
クの高い箇所を推定できた。漏水が著しくなった阿蘇市の調査水田は外観上の損傷は認めら
れず、田面は概ね均平で土壌中に耕盤が確認されたが、減水深は一般的な水田よりも極めて
高い値を示した。湛水試験における電気探査では、湛水後 4 時間までの比抵抗は、水田の田
面内でその変化は小さかった一方、畦畔部で大きく低下した。この結果は、調査した水田の
漏水が田面そのものではなく、畦畔部において起こったことを示唆した。

キーワード：平成28年熊本地震，地下探査，表面波探査，電気探査，電磁探査，噴砂，地
下水，漏水

I. 緒 言

平成 28 年熊本地震（以下、熊本地震）では多くの農地・農業用施設が被災し、その後の営農に大きな被害を与えた。これらの被害は地盤が大きく揺れ、地中の状態が変化したことにより発生したため、地震発生後の地中の状態を把握することは、適切な復旧方法の提示や地震による被害発生メカニズムの解明に寄与できる。地中の状態を調べる方法として直接穴を掘り間隙率や水分量を測定する方法があるが、穴を掘った箇所の状態を乱す上、掘った箇

所の情報しか得られない。一方、表面波探査や電気探査などの物理探査による地下部調査は、地中の硬さ分布や電気伝導度分布などの地中の状態を非破壊で面的に推定することができる。解析結果は間接的に地下部の状態を推定したものであるが、不均一な地中の状態を推定するための有効な情報となる。これまで物理探査を用いた農地地下部の調査は様々な場面で行われているが（例えば、端慶村ら，2016；Inoue et al., 2017），地震や津波などの自然災害により被災した農地の地中状態を模型試験で再現するのは困難である。今回の震災のような場合、現地

農村工学研究部門施設工学研究領域：〒 305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

- 1) 農村工学研究部門農地基盤工学研究領域
- 2) 九州沖縄農業研究センター生産環境研究領域
- 3) 九州沖縄農業研究センター水田作研究領域
- 4) 熊本県農業研究センター生産環境研究所
- 5) 現，熊本県宇城地域振興局

で調査し結果を解釈することは（例えば，中矢ら，2013；中里ら，2008），被害状況を的確に把握し，適切な復旧対策を講じるだけでなく，今後も起こりうる地震被害に対応する上でも重要である。本報では，熊本地震で被災した農地において物理探査を用いた農地地下部の調査を実施したので，その結果を報告する。

熊本地震が農地の地下部に及ぼした影響に関する本調査の実施にあたり，調査にご協力いただいた生産者の皆さまに感謝申し上げます。また，現地調査でご支援いただいた農研機構九州沖縄農業研究センター業務第1科の青木亮氏，石松進一氏，本部観音台業務第3科の石島正人氏にお礼申し上げます。本調査は，農林水産省の平成28年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業の緊急対応研究課題として実施されました。

Ⅱ．探査手法

調査地は3か所で，噴砂が発生しビニールハウスの支柱が沈下した野菜栽培施設（熊本市，地震発生当時はナスを作付け），海沿いの干拓地に立地し噴砂が発生し塩害が生じた野菜栽培施設（玉名市，地震発生当時はトマトを作付け），漏水が著しくなった水田（阿蘇市，地震発生当時は飼料作物を作付け）である。熊本市の野菜栽培施設では，噴砂による地中の粒度分布の変化が想定されたため，表面波探査および電気探査により，それぞれ地中のS波速度および比抵抗の分布を推定した。玉名市の野菜栽培施設では，電気伝導度の高い地下水が噴出したことが想定され（古賀ら，2019），電気探査および電磁探査により地中の比抵抗分布の推定を行った。阿蘇市の漏水田（脇山ら，2019；丸山・伊川，2019）では，漏水箇所は土壌中の水分量の経時変化が大きくなると想定されるため，湛水の前後に電気探査を行い，比抵抗変化率の分布状況から漏水箇所の推定を行った。Ⅱ章では調査に用いた物理探査手法について述べ，各地点における調査方法についてはⅢ章～Ⅴ章で後述する。

1．表面波探査

表面波探査（林ら，2001）は，掛矢で地表を打撃することにより起振し，地面に設置した複数の地震計で地震波形を記録する。波長の短い地震波は表層

の状態を反映し，波長の長い地震波は深部の状態を反映することから，測定された地震データから周波数毎のS波速度（m/S）を計算し，深度毎のS波速度を推定する。地震計を線上に複数設置し，複数点で起振を行うことにより，測線下のS波速度分布を逆解析により推定する。地中のS波速度は土の固さ，柔らかさを反映しており，数値が大きいほど固く，小さいほど柔らかい。本調査では，応用地質社製 McSEIS-SXW で測定および解析を行った。

2．電気探査

電気探査（物理探査学会，1998）は，地表に設置した2本の電極に電流を流し，他の2本の電極で電位を測定することで，地中の平均的な比抵抗（電気伝導度（S/m）の逆数で，単位は Ωm ）を計測する。複数の電極を地表に設置し，電流電極，電位電極を任意に選択することにより，任意の場所と深さの比抵抗情報を取得できる。比抵抗分布は，電気探査により得られた電位分布をパソコン上でシミュレーションし，解析電位と測定電位データの誤差が小さくなるように比抵抗モデルを逆解析して求める。地中の比抵抗は，地中の電気的特性によって変化し，体積含水率，細粒分含有率，間隙水の電気伝導度等を反映する。細粒分含有率，体積含水率，電気伝導度が高くなると比抵抗は小さくなり，解析された比抵抗分布から地中の状態を推定できる。本調査では，応用地質社製 Profiler-4 で測定し，ダイヤコンサルタント社製 E-tomo で比抵抗分布を解析した。なお，阿蘇市での水田漏水調査では，4D GeoTek 社製瞬時電気探査装置でも測定した。

3．電磁探査

電磁探査では，送信コイルから電磁波を発生させ，地中の影響を受けた電磁波を受信コイルで記録する。電気探査と同様に，地中の電気的特性を反映し，地中の見掛けの電気伝導度を測定できる。電気探査より簡易に測定することができるため，浅部の電気伝導度の平面分布の測定等で用いられることが多い（中矢ら，2013；瑞慶村ら，2016）。本調査では，Geonics 社の EM38 で測定した。

Ⅲ. 噴砂が発生し支柱が沈下した野菜栽培施設 (熊本市) における地下部調査

1. 調査地概要

調査地は熊本市の野菜栽培施設で、地震発生当時は、ナスが作付けされていた。気象庁の推計震度では震度6強が推定された。気象庁の観測点で記録される計測震度は、調査地から離れている場合があり、実際の震度とは異なる可能性があるため、地盤の震動特性を考慮して計算された推計震度を利用した。施設内の一部では、噴砂が発生し、ビニールハウスの支柱が沈下しており、液状化が発生したと推定された。周辺の地質情報から、表層は盛土かシルト層で、その下位は砂混じり層と推定された（全国地質調査業協会連合会，2016）。

2. 調査方法

第1図に示すように、噴砂の発生により沈下したと想定される支柱を中心に東西・南北測線において、表面波探査および電気探査を実施した。表面波探査はそれぞれの測線で地震計24個を0.5m間隔で設置し、各測線長は11.5mであった。また、電気探査は電極を1m間隔で16個設置し、各測線長は15mであった。各測線において、2極法で測定した。

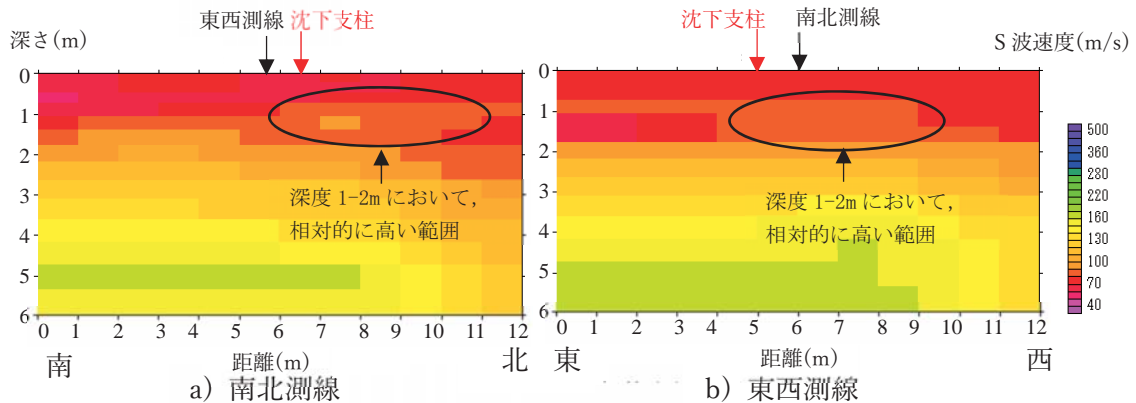


第1図 地震発生後支柱が沈下した野菜栽培施設（熊本市）での地下部調査における測線位置

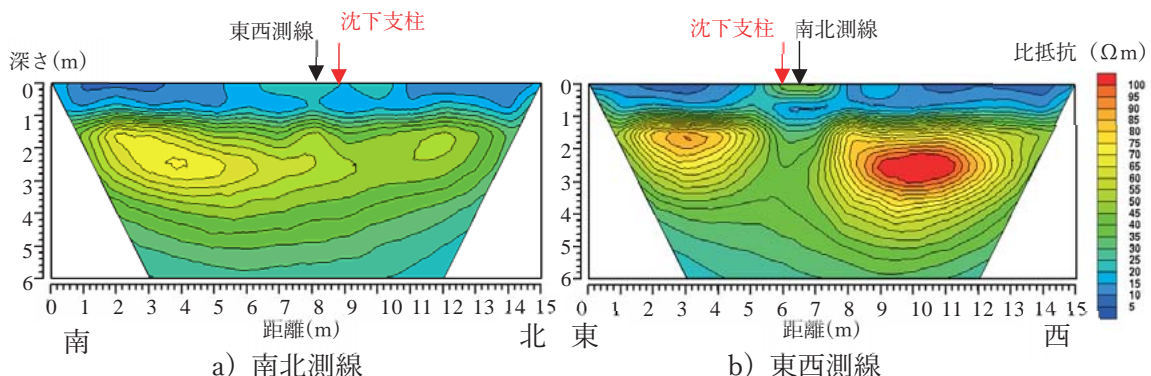
3. 解析結果

第2図に表面波探査結果を示す。全体的に表層のS波速度が低く、深度1.5m以深から若干S波速度が上昇していた。深度1～2mでは、沈下支柱の周辺のS波速度は相対的に高かった。緩層が締め固まったか相対的に密度の高い粒子が貫入している可能性が考えられた。深度1～2mでの相対的にS波速度の高い領域が噴砂と関係があるとする、沈下支柱の西側、北側にも広がっている可能性が考えられた。

第3図に電気探査の結果を示す。全体的に比抵抗



第2図 調査施設（熊本市）での表面波探査におけるS波速度分布（2016/7/15）



第3図 調査施設（熊本市）での電気探査における比抵抗分布（2016/7/15）

は深度0～1mで低く、深度1～3mで高かった。近傍のボーリングデータ（全国地質調査業協会連合会、2016）との参照より、深度0～1mは盛土かシルト混じり、1～3mは砂混じり層を反映している可能性が考えられた。深度0～1mにおいて沈下支柱の周辺では相対的に比抵抗が高く、シルト層に砂が混ざった可能性が考えられた。深度1～3mでは沈下支柱の周辺で比抵抗が低く、噴砂により下層と表層とつながり、水分が地表から供給され、比抵抗が下がった可能性や測線近傍の金属製の支柱の影響が考えられた。

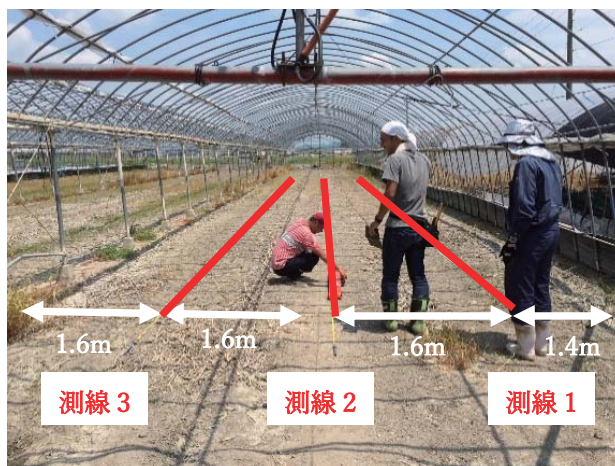
Ⅳ. 噴砂が発生し塩害が生じた野菜栽培施設（玉名市）における地下部調査

1. 調査地概要

調査地は玉名市の野菜栽培施設で、気象庁の推計震度では震度6弱が推定された。地震発生当時は、トマトが作付けされていた。地震後、電気伝導度が



第4図 調査施設（玉名市）横の道路沿いで実施された電気探査における測線位置（国土地理院の空中写真に加筆）



第5図 地震発生後塩害が発生した野菜栽培施設（玉名市）での地下部調査における測線位置

高く、砂を含む泥水が施設内に噴出し、この箇所では地震後の調査でも土壌の電気伝導度や塩素イオン濃度は高かった（古賀ら、2019）。海に面した干拓地内に位置し、堤防から近く、施設横に水路が位置する（第4図）。なお、ビニールハウス内測線後半（第5図の奥側）では電気伝導度の高い地下水の地下水位が高いことが調査前から確認されていた。

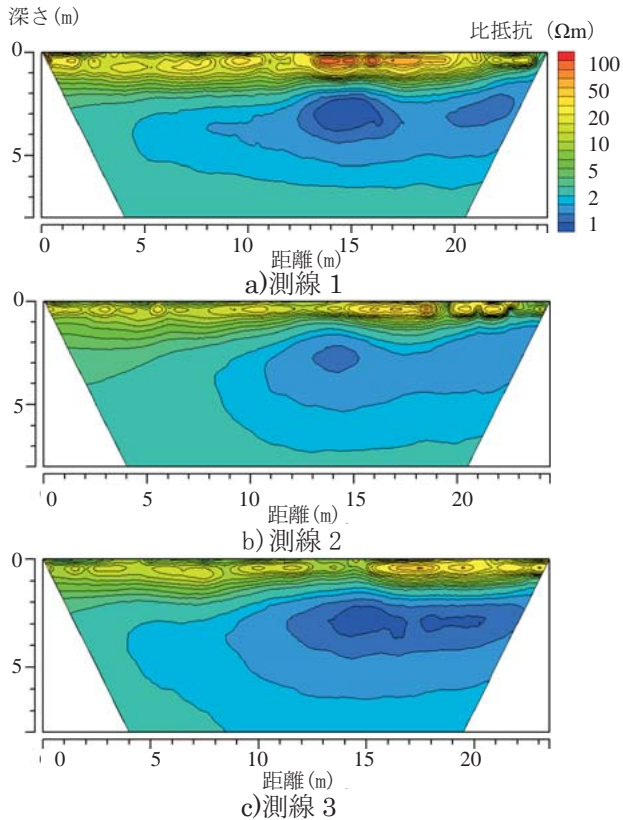
2. 調査方法

噴砂が確認されたビニールハウスで電気探査および電磁探査を実施した。電気探査は、ビニールハウス内の平行する3測線（第5図）で電極間隔0.5m、測線長24.5mで電極を設置し、2極法で測定した。また、ビニールハウス内で噴出した電気伝導度の高い泥水は、ビニールハウスと平行して流れる施設横の水路からの浸水が想定されたため、第4図に示すビニールハウスと水路との間の道路脇で、電極間隔1m、測線長99mの電気探査を行った。電磁探査は、ビニールハウス内の電気探査と同じ3測線（第5図）で2m間隔で測定を行い、電磁探査測線の10m地点が電気探査測線の始点に対応する。

3. 解析結果

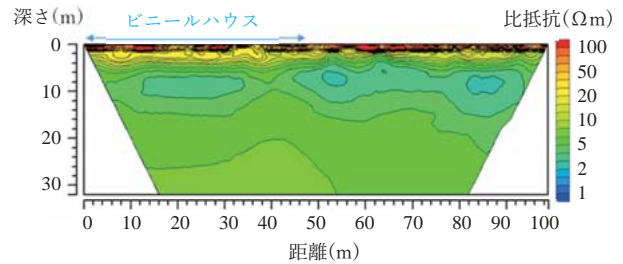
第6図にビニールハウス内での電気探査の結果を示す。深度1mまで相対的に比抵抗が高く、深度1mから深部に行くほど比抵抗が低くなった。深度3m程度では測線の前半部分（0～12m）と比べて後半部分（12～24.5m）の比抵抗が低く、測線後半の地下水位が高いことと同様な傾向を示した。第7図にビニールハウスと水路との間の道路脇での探査結果を示す。20Ωm程度の低比抵抗領域は、ビニールハウス後半（30～50m）で若干浅くなり、ビニールハウス北側の54m付近では10Ωm以下の低比抵抗領域が深度2mまで浅くなっていた。ビニールハウス内の電気探査の結果と合わせると、水路由来の電気伝導度の高い水がビニールハウスの北側から浸入している可能性が考えられた。電気伝導度の高い地下水の水位が高いと、噴砂が起こった場合には塩害が発生する恐れがあることから、電気探査によって塩害リスクの高い箇所を推定できる可能性が示唆された。

電磁探査による各測線の電気伝導度を第8図に示す。測定値のH0.5、V0.5、V1.0などは、測定時の計測機器の置き方の違いを示し、電気伝導度の反映する深度が異なっている。瑞慶村ら（2016）は、

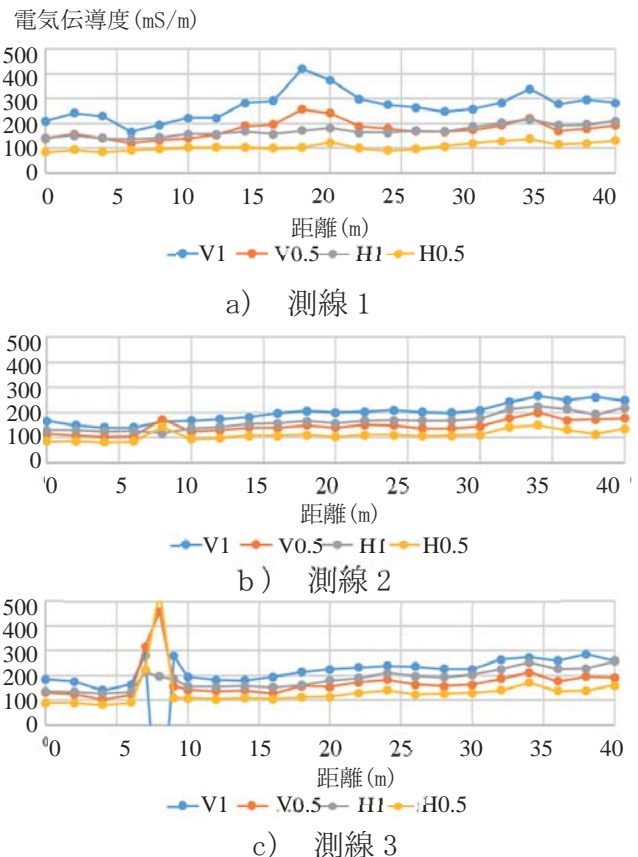


第 6 図 調査施設（玉名市）での電気探査における比抵抗分布（2016/7/28）

H0.5 は深さ 0-25cm, V0.5 は深さ 25-50cm, V1.0 は V0.5, H0.5, H1.0 の値によって異なる深さ 0.5-1.5m の電気伝導度の影響を受けていること示している。測線 3 の 8 m 地点で V1.0 m モードで -500 と異常値を検出した（第 8 図 c）。後日、該当箇所を掘削したところ鉄管が確認され、その影響により探査結果が異常値を示したと推測された。測線後半（第 5 図の奥側）は測線前半より相対的に高伝導度を示し、水路側に位置する測線 1 の深い箇所でも相対的に高電気伝導度（ 300mS/m 前後）を示した。測定値は全体的に高い値を示し、ビニールハウスの金属製支柱の影響が考えられるが、相対的な値の違いから、土壌の電気伝導度の傾向把握が可能と考えられた。測線の前半（0-10m）、後半（30-40m）で相対的に電気伝導度の違いが出ており、電気探査結果および電気伝導度の高い地下水位の傾向と同じであり、簡易に測定できる電磁探査でも同様の結果が得られ、既往の報告（中矢ら，2013）と同様に、塩害リスクの高い箇所を電磁探査で簡易に推定できた。



第 7 図 調査施設（玉名市）横の道路沿いで実施された電気探査における比抵抗分布（2016/7/29）



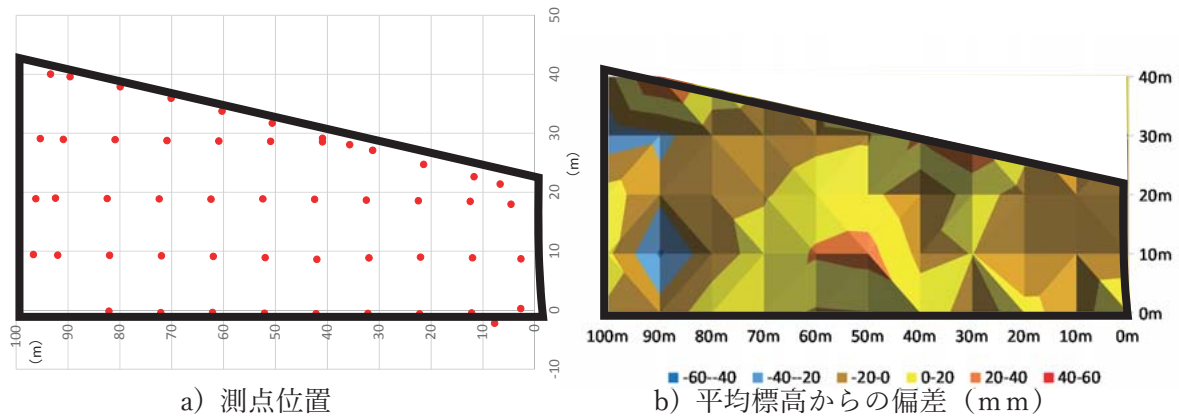
第 8 図 調査施設（玉名市）での電磁探査における電気伝導度（2016/7/30）

V1, V0.5, H0.5 の順に深い情報を反映。

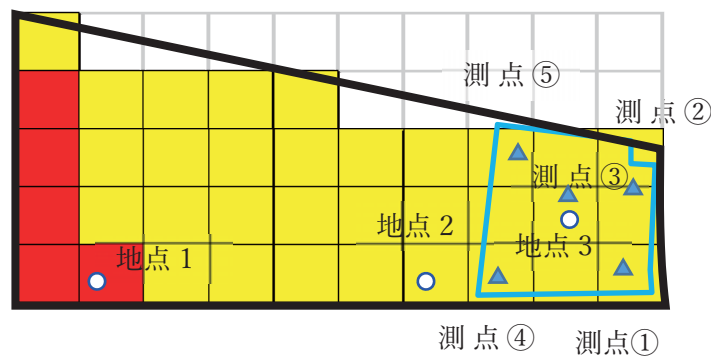
V. 漏水が著しくなった水田（阿蘇市）における地下部調査

1. 調査地概要

調査地は阿蘇中央火口の北側にある阿蘇カルデラ内の水田である。地表への断層の露出が確認されている布田川断層の北東部に位置する。地震発生当時は、水稻作付け前の非湛水で、飼料作物が作付されていた。気象庁による推計震度では震度 6 弱が推定された。Tsuji et al. (2017) は、DinSAR データ、ボアホールカメラ、現地調査から、内牧温泉周辺の



第9図 調査水田（阿蘇市）で実施された測量結果（2016/12/4）



■ 耕盤確認 ■ 耕盤未確認

地点1～3：土壌断面調査 測点①～⑤：減水深測定点

第10図 調査水田（阿蘇市）で実施された土壌硬度調査（2016/12/4）

地盤が北西方向へ水平移動したことを報告している。本調査地は、この北西方向へ移動したとされる地点の南東に位置し、調査地周辺では引張亀裂が多く確認された。本水田では、地表の観測から亀裂等は確認されていなかったが、水稻作付中の代掻き後の湛水では全面湛水に至らず、漏水が顕著であった（脇山ら，2019；丸山・伊川，2019）。本調査は水稻作付けが終了し、牧草が播種された12月に実施した。

2. 調査方法

1) 田面均平調査，土壌硬度調査，土壌断面調査

湛水不良の原因として田面の傾きが想定されたため、第9図に示すように2016年12月4日に測量調査を行った。部分的に±40mm程度の高低差があったが、均平率は88%と田面は概ね均平であった。また、貫入式土壌硬度計（大起理化工業：DIK-5531）を用いて10mメッシュで土壌硬度調査（計測範囲は表土～深さ60cm，コーン2cm³）を行った結果、第10図に示すように、ほとんどのメッシュにおい

て耕盤層（1Mpa以上）を地下20cmに確認した。第10図の表層3箇所（地点1～3）で土壌断面調査を実施し、室内透水試験を行った結果、第1表に示す結果が得られた。地点1，2の深さ25cmの表層においては、透水係数が 3.0×10^{-4} cm/sと透水性の高いエリアが確認された。

第1表 調査水田（阿蘇市）における土壌断面調査（表層）（2016/12/4）

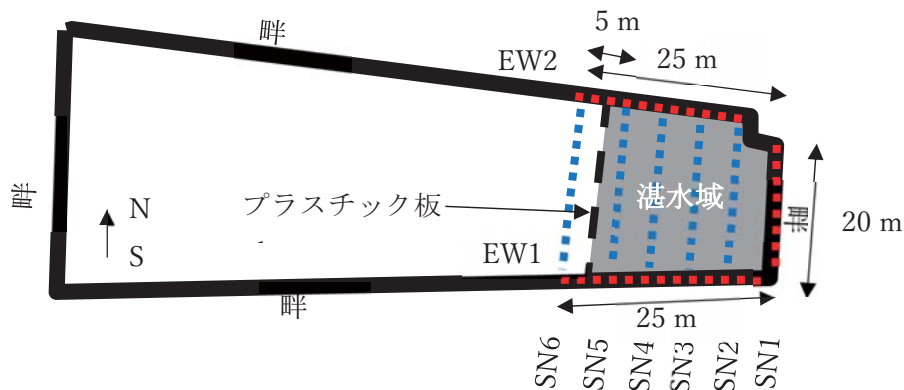
場所	深さ	透水係数	含水比	乾燥密度
地点1	5cm	6.4×10^{-4} cm/s	62.7%	0.92 g/cm ³
	25cm	3.0×10^{-4} cm/s	161.1%	0.45 g/cm ³
地点2	5cm	8.7×10^{-6} cm/s	82.9%	0.80 g/cm ³
	25cm	3.0×10^{-4} cm/s	67.6%	0.91 g/cm ³
	50cm	6.9×10^{-5} cm/s	86.8%	0.77 g/cm ³
地点3	5cm	1.6×10^{-5} cm/s	80.8%	0.82 g/cm ³

2) 湛水試験

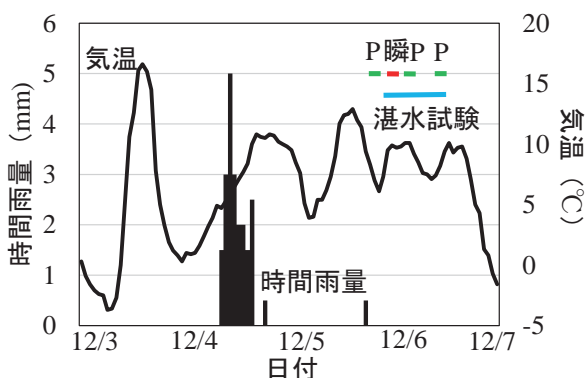
湛水試験は2016年12月6～7日に実施し、湛水前には代掻きは実施しなかった。第11図は調査水

田とその中に設けた湛水域の平面図である。湛水域は、3面の畔とプラスチックの板で囲み、湛水域の中心から13.5 L/sで給水した。供給水の電気伝導度は106 mS/m (9.43 Ω m) で、全給水時間は2時間であった。第12図に阿蘇乙姫（気象庁 AMeDAS）で2016年12月3日～7日に観測された気温と降水量を示す。試験日より前の2016年12月4日と5日にそれぞれ32.5mmと3.5mmの降雨があったが、12月6～7日に実施された湛水試験中に降雨はなかった。第13図に調査水田で測定した気温と累積供給水量を示す。試験中の気温は、最高気温と最低

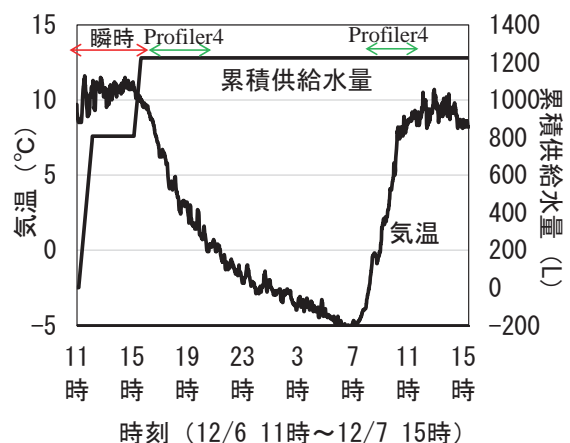
気温がそれぞれ11.6°Cと-5.0°Cと大きな変化があり、翌朝（12月7日6:00～10:00）の測定時には湛水面が凍結していた。第14図に減水深調査結果を示す。本調査は水稻作付け終了後の減水深を測っており、水稻作付け時の減水深ではないが、減水深は160 mm/dと一般的な水田よりも極めて高い値を示した。第10図の地点3の深さ5 cmでは透水係数 1.6×10^{-5} cm/sと高くはなかったことから、地点1, 2のように部分的に透水性の高い地点が存在しているか、畦畔部からの漏水の可能性が考えられた。



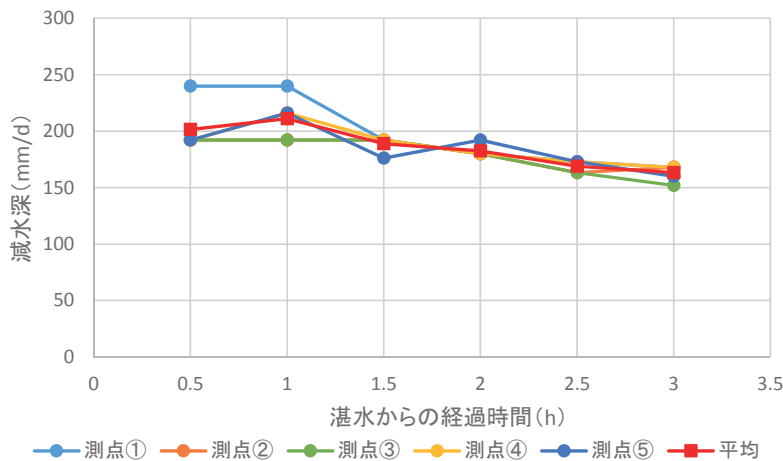
第11図 調査水田（阿蘇市）で実施された湛水試験における湛水域と探査測線の位置
黒の太線は水田の畦、黒の破線は湛水域を制限するために土壌中に差し込んだプラスチック板、灰色の領域は湛水域を示す。赤と青の破線は、それぞれ畦に設けた探査測線（EW1,EW2,SN1）と水田内に設けた探査測線（SN2～6）を示す。



第12図 阿蘇乙姫（気象庁AMeDAS観測地点）で観測された時間雨量および時間気温
P: Profiler-4 を用いた測定、瞬: 瞬時電気探査による測定。
2016年12月6～7日に湛水試験。



第13図 調査水田（阿蘇市）で観測された気温と累積供給水量



第14図 調査水田(阿蘇市)で実施された減水深調査結果(2016/12/6)

第2表 調査水田(阿蘇市)における電気探査のスケジュールおよび測定方法

時 間	使用測線数	電気探査装置
湛水開始前	8 測線	Profiler-4, 瞬時電気探査
5-10分後から245-252分後	8 測線	瞬時電気探査
5-8時間後と19-22時間後	SN6 測線を除く 7 測線	Profiler-4

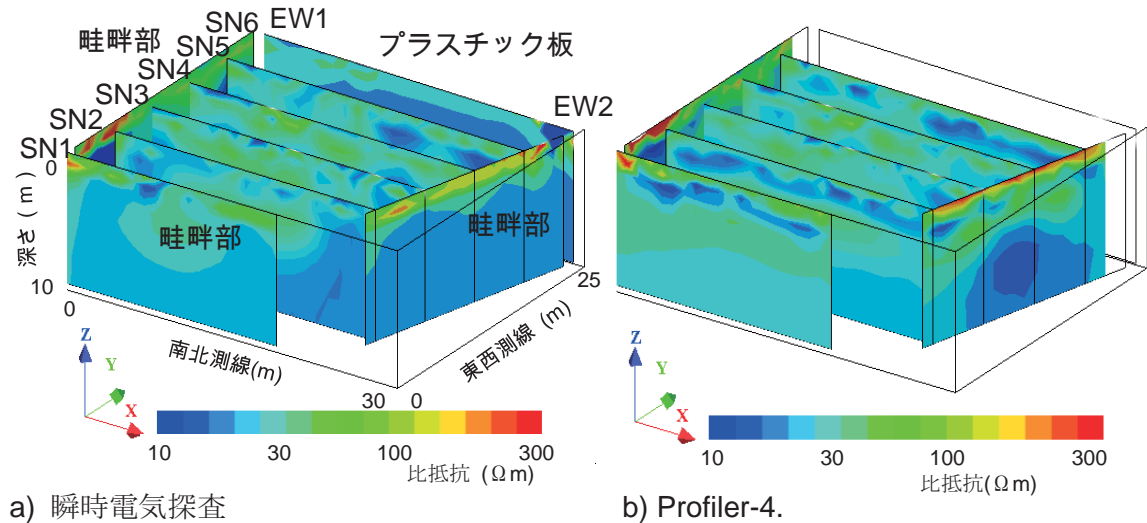
3) 電気探査

湛水試験中、第11図に示すすべての測線(8測線)において、2極法により電気探査を行った。漏水箇所を特定するため、畦に3測線(赤の破線)、水田内に5測線(青の破線)を設置した。交差測線より平行測線の方が異常場所を検出するには効率的であるため(Gharibi and Bentley, 2005; Inoue et al., 2018a)、水田内では平行測線を設置した。電極間隔は1 mで設置し、応用地質社製のProfiler-4および4D GeoTek社製の瞬時電気探査により測定した。Profiler-4は1組の電極に電流を流す際に4組の電極で同時に電位測定を行い、160電極の7測線を測定するのに約4時間かかるのに対して、瞬時電気探査(今村, 2007)は、24組の電極に同時に電流を流し、24組の電極で同時に電位測定を行い、192電極の8測線を約8分で測定する。第2表は電気探査のスケジュールおよび測定方法を示す。準備した探査システムの測定能力の関係から、瞬時電気探査はすべての測線で測定を行い、Profiler-4による探査では7測線EW1, EW2, SN1~5のみで測定を行った。早い浸透過程を観測するために湛水開始後(5~10分後から245~252分後)は瞬時電気探査を用いたが、瞬時電気探査は電流・電位電極を交互に設置することから電極間隔が2倍となり、空間解像度が低

下するため、十分に時間が経過した後(5~8時間後と19~22時間後)はProfiler-4を用いて測定した。

4) 2次元比抵抗逆解析

地中の比抵抗は、地中の電気的特性によって変化するため、解析された比抵抗分布から地中の状態を推定できるが、その変化には細粒分含有率、体積含水率、電気伝導度など多くの要因があり、比抵抗のみから推定するのは困難な場合がある。本調査の湛水試験中は地中の状態で体積含水率のみが変化すると想定されるため、比抵抗分布の変化を解析することで、浸透し水分量が増加する箇所を推定できると考えられる。そこで、湛水試験中の測定データの2次元比抵抗逆解析により比抵抗変化率の分布を求めた。ただし、湛水開始前後のそれぞれの比抵抗分布から変化率を求めると測定ノイズや解析の収束レベルが異なり、正確な変化率が得られなくなることがあるため、測定データをそのまま逆解析するのではなく、湛水開始前の比抵抗分布を初期値とし、湛水開始後の測定データを正規化した後に逆解析を行った(杉本, 1995; Inoue et al., 2017)。湛水試験中の比抵抗は、浸透による飽和度の増加のみが想定されるため、比抵抗は初期値より小さくなるように拘束条件を加えた。



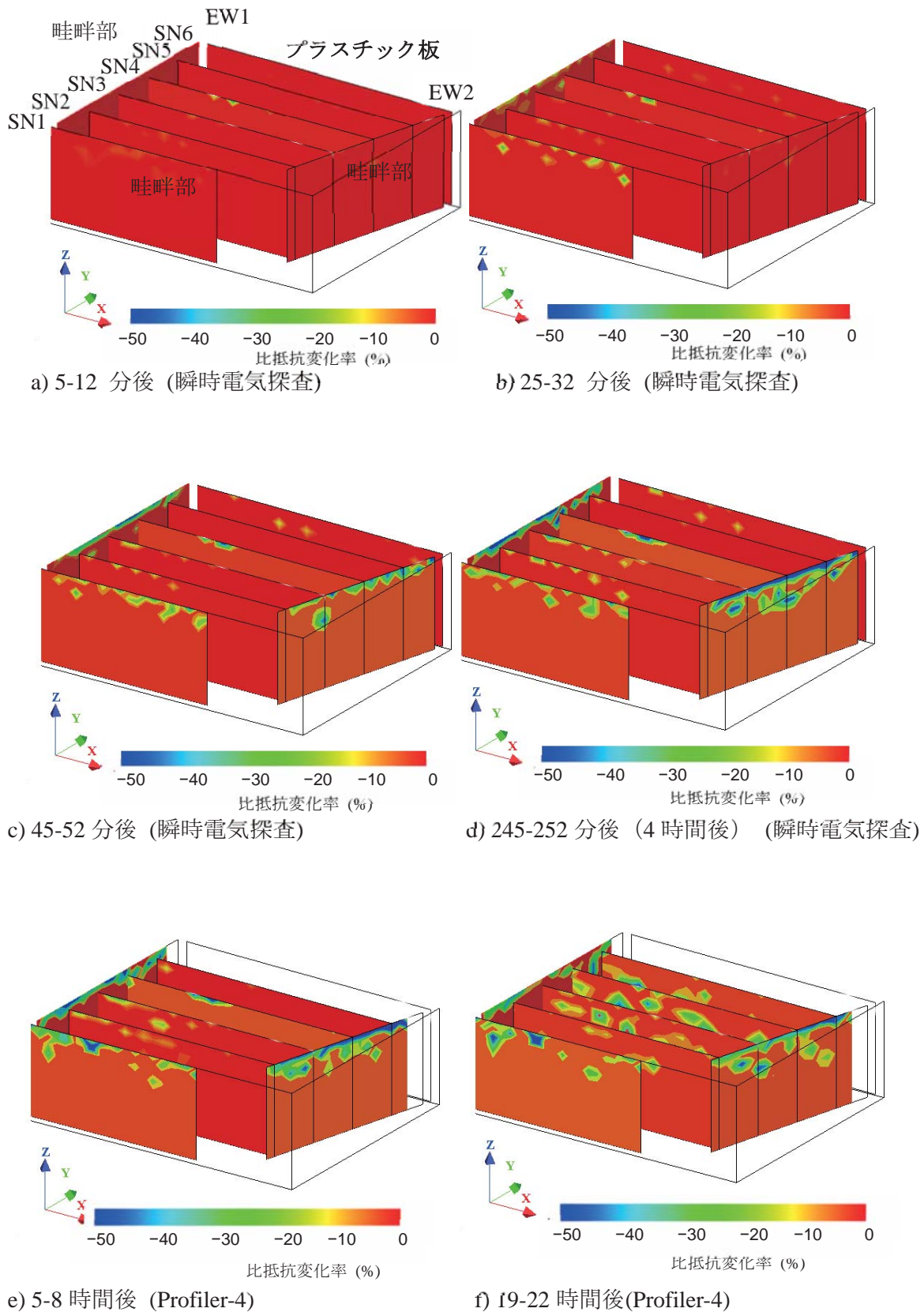
第15図 調査水田（阿蘇市）における湛水前の比抵抗分布

3. 解析結果

第15図に湛水試験前の比抵抗分布を示す。両探査システムで得られたデータの逆解析結果は同様な比抵抗構造を示し、比抵抗は、水田内で低く、畦畔部の浅部で高かった。水田内の低い比抵抗は、土壌中の細粒分の割合が高いことを反映しているか、調査前に36 mmの降雨があったことによる体積含水率の増加を反映している可能性がある。畦畔部の浅部の高い比抵抗は土壌の密度が低いことを示している可能性があるが、この時点の比抵抗分布からは漏水箇所を推定するのは困難である。

第16図に湛水試験前の比抵抗に対する湛水試験中の比抵抗変化率の分布を示す。第16図b～eに示すように、畦から地下方向に向けて明瞭な比抵抗の低下が見られ、その低下領域は25～32分後から5～8時間後まで徐々に増加していた。一方、水田内の比抵抗は8時間後（第16図e）まではほとんど変化していなかった。瞬時電気探査およびProfiler-4は電極間隔や電極配置が異なるが、それぞれのデータを用いた比抵抗変化は同様な解析結果を示しており（第16図d, e）、探査システムの違いによる結果の違いは小さかった。湛水試験前後では、体積含水率のみが変化しているため、比抵抗の低下は土中の水分量の変化を反映していると考えられ

る。これらの結果から、漏水箇所は水田内ではなく畦の下部であることが示唆された。一方、湛水試験前に降雨があったことから、田面直下の水分量は既に高い状態にあり、浸透したとしても水分量の変化は小さく、その結果比抵抗の変化が小さくなった可能性も考えられた。そこで、第16図fに示す湛水開始から19～22時間後の比抵抗変化を解析したところ、比抵抗の低下が水田内でも確認できる。この比抵抗低下は、地下への下方浸透により水分量が増加したことを示しており、少なくとも湛水開始後5～8時間後（第16図e）の水田内の土壌はまだ飽和していなかったと考えられる。これらの結果から、5～8時間後に水田内で比抵抗がほとんど低下しなかったのは、田面直下への水の下方浸透が少なかったため、このことから漏水は水田内よりも畦の下部で起こっている可能性が高いと推定された。本報告では、電気探査で測定されたデータを2次元比抵抗逆解析した結果を示した。しかし、浸透という現象は3次元構造であるため、解析結果に擬像を含むことがある（佐々木, 1993）。3次元比抵抗逆解析や浸透解析などを用いた推定（Inoue et al., 2018b）を行い、推定の精度を上げていく必要がある。



第16図 調査水田 (阿蘇市) における湛水後の比抵抗変化率の分布

引用文献

- 1) 物理探査学会 (1998) 物理探査適用の手引き .p.127-132.
- 2) Gharibi, M., and Bentley, L. R. (2005) Resolution of 3-D electrical resistivity images from inversions of 2-D orthogonal lines. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 10:339-349. doi:10.2113/JEEG10.4.339
- 3) 林 宏一・鈴木晴彦・斎藤秀樹 (2001) 人工振源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用 .*応用地質技術年報* 21:9-39.
- 4) 今村杉夫 (2007) CDMA 方式を用いた多チャンネル同時通電による瞬時電気探査の可能性 (その 1: 原理と基礎実験) .*物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集* :219-222.
- 5) Inoue, K., Nakazato, H., Kubota, T., Takeuchi, M., Sugimoto, Y., Kim, H. J., and Furue, K. (2017) Three-dimensional inversion of in-line resistivity data for monitoring a groundwater recharge experiment in a pyroclastic plateau. *Exploration Geophysics* 48 (3) :332-343. doi:10.1071/EG16035
- 6) Inoue, K., Nakazato, H., Takeuchi, M., Sugimoto, Y., Kim, H. J., Yoshisako, H., Konno, M., and Shoda, D. (2018a) Investigation of the line arrangement of 2D resistivity surveys for 3D inversion. *Exploration Geophysics* 49 (2) :231-241. doi:10.1071/EG17019
- 7) Inoue, K., Nakazato, H., Kubota, T., Furue, K., Yoshisako, H., Konno, M., and Shoda, D. (2018b) Estimating high hydraulic conductivity locations through a 3D simulation of water flow in soil and a resistivity survey. *Exploration Geophysics* 49 (3) :299-308. doi:10.1071/EG17054
- 8) 古賀伸久・身次幸二郎・富永純司・中野恵子・草場 敬・新美 洋・井原啓貴・山口典子・山根 剛 (2019) 平成 28 年熊本地震による液状化の発生が施設栽培土壌に及ぼした影響. *九州沖縄農研研究資料* 95:40-48.
- 9) 丸山篤志・伊川浩樹 (2019) 平成 28 年熊本地震により亀裂や不陸が生じた水田圃場の減水深の特徴. *九州沖縄農研研究資料* 95:10-17.
- 10) 中矢哲郎・丹治 肇・桐 博英 (2013) 農地・排水系施設の復旧状況からみる 2011 東日本地震津波による塩害長期化の実態 .*土木学会論文集 B1 (水工学)* 69 (4) :1471-1476.
- 11) 中里裕臣・井上敬資・海野寿康 (2008) 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震による地すべり災害と災害調査法 .*農工研技報* 208:33-42.
- 12) 佐々木 裕 (1993) 比抵抗法の 2 次元インバージョンにおける Pitfall - 3 次元構造に起因する偽像 - .*物理探査* 46 (5) :367-371.
- 13) 杉本芳博 (1995) 比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーのモニタリング- 数値的検討 - .*物理探査学会第 92 回学術講演会講演論文集* :57-62.
- 14) Tsuji, T., Ishibashi, J., Ishitsuka, K., and Kamata, R. (2017) Horizontal sliding of kilometre-scale hot spring area during the 2016 Kumamoto earthquake. *Scientific Reports*. 7, Article number:42947. doi: 10.1038/srep42947
- 15) 脇山恭行・榮 誠三郎・田中誠司・柴田昇平・野見山綾介 (2018) 平成 28 年熊本地震により被災した水田で栽培された稲の生育特性. *九州沖縄農研研究資料* 95:47-64.
- 16) 全国地質調査業協会連合会 (2016) 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震復興支援ボーリング柱状図緊急公開サイト . <http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/> (2017 年 7 月 19 日閲覧).
- 17) 瑞慶村知佳・原口暢朗・宮本輝仁・中矢哲郎 (2016) 電磁誘導探査機器 EM38-MK2 を用いた高塩分土層深さの判定方法の提案.*農業農村工学会論文集* 301:23-30.

Geophysical Investigation of Farmlands Damaged by the 2016 Kumamoto Earthquakes

Keisuke Inoue¹⁾, Kosuke Wakasugi¹⁾, Yasuyuki Wakiyama²⁾, Ryosuke Nomiya²⁾,
Nobuhisa Koga²⁾, Hiroshi Niimi²⁾, Hirotaka Ihara²⁾, Noriko Yamaguchi²⁾, Tsuyoshi Yamane²⁾,
Keiko Nakano³⁾, and Seiji Tanaka^{4),5)}

Summary

To investigate the underground portions of farmlands damaged by the 2016 Kumamoto Earthquake, resistivity survey, surface wave method, and electromagnetic survey were conducted. At a greenhouse where a column of the house sank because of liquefaction, the S-wave velocity and electrical resistivity of soil, which reflect soil conditions, were high around the column, which indicated that sand derived from the lower soil layer was mixed with the silty surface soil layer. The soil resistivity at a different greenhouse where the salinity damage to tomatoes occurred after liquefaction decreased as the groundwater level became higher. A paddy field where leakage occurred after the earthquake was roughly flattened, but the daily water-reduction rate was extremely higher than that in ordinary paddy fields. After water was supplied to the paddy field, the changes in the resistivity beneath the paddy field were small, whereas the resistivity beneath the bank of the paddy field rapidly decreased 5 to 8 h after the field was filled with water. These results suggest that the leakage occurred beneath the bank of the paddy field, instead of beneath the paddy field itself.

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, Resistivity survey, Surface wave method, Electromagnetic survey, Sand fraction, Groundwater, Leakage

Division of Facilities and Geotechnical Engineering, Institute of Rural Engineering
2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8609 Japan

1) Division of Agricultural Environment Engineering, Institute of Rural Engineering

2) Division of Agro-Environment Research, Kyushu Okinawa Agricultural Research Center

3) Division of Lowland Farming Research, Kyushu Okinawa Agricultural Research Center

4) Kumamoto Prefectural Agricultural Research Center

5) Currently, Kumamoto Prefectural Uki Area Promotion Bureau