

# 電磁探査法による津波浸水農地の土壌電気伝導度迅速調査法

冠 秀昭<sup>1</sup>・関矢博幸<sup>1</sup>・遊佐隆洋<sup>2</sup>・大谷隆二<sup>1</sup>

Rapid survey method for soil electrical conductivity in tsunami-inundated farmlands using electromagnetic measurements

Hideaki KANMURI<sup>1</sup>, Hiroyuki SEKIYA<sup>1</sup>, Takahiro YUSA<sup>2</sup> and Ryuji OTANI<sup>1</sup>

**Abstract** : An electromagnetic measurement with GEM-2 was examined as a simple and rapid method for measuring soil electrical conductivity (EC) in tsunami-inundated farmlands. The apparent soil electrical conductivity (ECa) ascertained using GEM-2 was too high according to the increase in the application rate of potassium chloride in a pseudo-seawater inundated field of which the EC had been adjusted using potassium chloride spraying. Furthermore, results for ECa were correlated with those obtained using a soil EC sensor. These results showed that differences in ECa values were obtainable through nondestructive and noncontact sensing with GEM-2 in tsunami-inundated farmland. The overlying contour plot measured using GEM-2 on the map, such as Google Earth, was able to easily provide more information about the relation between ECa and terrain condition. Measuring ranges in the depth direction according to the GEM-2 measurement at 80 kHz frequency were regarded as affecting all layers from the field surface to at least 1 m below without limited to only the field surface. We can compare EC1:5 and ECa by using the soil EC sensor together with GEM-2, thereby rapidly investigate for salt leaching while working in tsunami-inundated farmlands.

**Key Words** : Tsunami-inundated farmlands, Electromagnetic measurement, Soil EC, Salt injury

## 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による大津波により、2万ヘクタールを超える広大な農地が浸水等の被害を受けた。被災農地において営農を再開するには、海水の浸水により多量の塩分が流入した農地から、過剰な塩分を取り除くことが必要となる。除塩作業には、除

塩前後における農地の塩分濃度の把握が不可欠である。

除塩現場における農地の塩分濃度の把握には、土壌中の塩素濃度を測定することにより行われる(農林水産省, 2011)。一般的に土壌中の塩素濃度と土壌の電気伝導度(EC)には相関関係が見られることから、現場では土壌の電気伝導度の測定により塩分濃度を把握している。土壌の電気伝導度測定には測定の簡便性から、乾土1に対して蒸留水5を加えた懸濁液の電気伝導度を測定する1:5水浸出法(土壌環境分析法編集委員会, 1997)が用いられている。しかし1:5水浸出法によるEC(EC1:5)の測定には、土壌の採取、乾土相当量の計測、加水、振とう作業を必要とする。簡便法と言うものの、多くの農地においてEC1:5を計測するのは多大な労力を要する。除塩の現場では、多様な水田条件に応じた水田一筆ごと対応が求められており、広大な面積の被災農地における塩分濃度を効率的に把握するには、より簡便な手法が求められる。

一方、震災直後に除塩作業を行い、営農が開始された場合において、水稲作では塩分濃度の低い灌漑水を供給することにより、更なる除塩が進行し、中干し等の田面乾燥を行わない限り、圃場下層に流下した塩分が表層付近に再度上昇する懸念は少ない。実際、除塩が行われた圃場における水稲生育への悪影響はあまり報告されていない。しかし、水田転換畑での大豆栽培においては、除塩により表層の塩分濃度が低下した場合でも、下層に残留した塩分が夏期の乾燥により上昇し、大豆が枯死する圃場が見られており、下層を意識した除塩対応の必要性が報告されている(星・遊佐, 2012)。下層土の土壌ECを把握する場合には、更なる労力が必要とされる。また、最も水田の被害面積が多かった宮城県の大豆栽培面積は約1万haと全国的にも多く、そのほとんどが水田転換畑で栽培されており、海水が浸水した農地でも塩害を回避するための技術的対応が求められている。よって、面的に広範囲かつ農地の下層の状況をも把握することができる簡便な土壌のEC計測法が求められる。

今回の震災のような大津波による被災農地での塩分濃度測定や除塩に関する国内の報告は極めて少ないが、海外での事例に2004年のインド洋スマトラ沖地震の報告がある。Kume et al. (2009)は、津波被災後の衛星画像

<sup>1</sup> NARO Tohoku Agricultural Research Center

4 Akahira, Simokuriyagawa, Morioka Iwate

<sup>2</sup> Miyagi Prefecture Furukawa Agricultural Experiment Station  
88 Fukoku, Furukawa-Osaki, Osaki Miyagi

Corresponding author : 冠 秀昭<sup>1</sup>(独) 農研機構 東北農業研究センター

<sup>2</sup> 宮城県古川農業試験場

2012年2月28日受稿, 2012年7月31日受理

土壌の物理性 121号, 19-28 (2012)

から植生の変化を捉え、広域的な水田の復旧状況を確認している。同津波災害による被災水田の広域的な調査には、非接触、非破壊で土壌塩分濃度の計測が可能な電磁探査法 (EM38, Geonics 社) による塩分濃度のモニタリングが行われている (McLeod et al., 2010)。この調査においては被災地の自然条件に応じた除塩プロセスが報告されており、広域津波災害における電磁探査法の活用例が示されている。国内では、平井ら (2008) が多周波数電磁探査法 (GEM-2, Geophex 社) による農耕地土壌の電気伝導度のモニタリングを行っており、農地における適用性の検証がなされている。

このような電磁探査法の利用は、広範囲における土壌 EC の把握に効果的と考えられる。しかし、今回のような被災農地における電磁探査法の具体的な利用方法や適用性は示されていない。被災農地で電磁探査法を利用するには、作物生育に影響を及ぼす深度 1 m 以浅の土層における EC 計測の検証や、除塩現場で求められる EC1 : 5 と電磁探査法による計測値の対比が必要とされる。

そこで本研究では、広大な津波浸水農地における簡易かつ迅速な土壌電気伝導度測定法を提供するため、津波浸水農地における電磁探査法の計測特性を調査し、電磁探査法の利用法について検討した。具体的には、第一として電磁探査法による圃場内の EC 計測の可能性を実験的に調べた。第二として、津波浸水農地における現地調査を行い、電磁探査法の計測特性及び電磁探査法の効果的な利用方法について検討した。第三として、深さ 1 m 以浅において、数十 cm 毎などの特定土層の EC の測定の可能性を確認するため、電磁探査法による深さ方向の計測範囲について検討した。

## 2. 方法

### 2.1 電磁探査装置の利用

本研究では、電磁探査装置として Geophex 社「GEM-2」を使用した。本装置による測定状況を Fig. 1 に示す。本装置では、小型の送信および受信ループを利用して測定を行う。また、本装置は多周波数型の電磁探査装置であり、300 Hz ~ 96 kHz の周波数で最大 15 周波数の送受

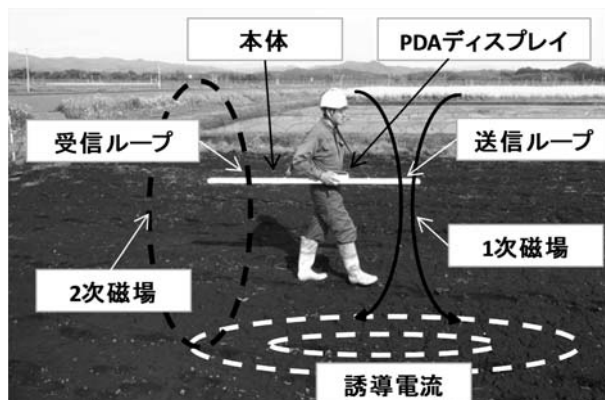


Fig. 1 GEM-2 による測定状況。  
Measurement with GEM-2.

信が同時にできる。本装置では送信周波数の違いによって、地盤内での影響範囲が異なる特性を利用し、地盤から送信周波数に応じた反応を得ることができる。本装置により土壌の電気伝導度は次のように計測される (光畑・稲崎, 2008)。①送信ループより 1 次磁場が発生、②地盤内誘導電流が発生、③②により 2 次磁場が発生、④ 2 次磁場を受信ループにより計測する。2 次磁場の受信信号には、一次磁場に対して同じ位相をもつ同相成分と、ファラデーの電磁誘導の法則により 1 次磁場に対して 90 度ずれた離相成分がある。この同相成分と離相成分が基本出力となり、測定と同時に PDA 画面に表示、記録される。PDA 画面には、離相成分等の値がグラフで示されるので、その場で測定値の変化を見ることができる。測定は 1 秒間におよそ 8 回行われ、記録された同相、離相の値は付属のソフトウェアにより、見かけの電気伝導度 (ECa) に変換できる。測定は、本装置の使用方法に従い、本装置を地表上 1 m の高さに保持して圃場内を歩行しながら行った。

GEM-2 による座標値の取得法については、本装置の使用マニュアルで推測航法と示されている方法、および GPS を利用し測定と同時に地理座標を取得する方法がある。推測航法では、あらかじめ等間隔の測線を決定し、測線距離を測線上の全測定データ数で除することで測線方向の測定間隔が補間され、測線方向の座標値が決定される。区画形状が既知の圃場における調査であれば、推測航法による計測が可能である。しかし、調査圃場の情報を計測する必要がある場合や、数筆の圃場を一度に計測する場合等には、GPS によって地理座標を取得した方が効率となる。また、推測航法では、決められた方向に一定速度で歩行しなければ、位置的な誤差が生じる。しかし、地理座標を取得しながら計測することにより、詳細に調査したい位置では歩行速度を落として測定データ量を増やすことが可能である。また、進行方向に障害物等迂回したいものが存在しても、測定を中断することなく継続できるという利点があり、現地状況に即した利用ができる。

### 2.2 圃場調査

#### 2.2.1 疑似海水浸水圃場

岩手県盛岡市内の東北農業研究センター内の 7.5 a の水田 (15 m × 50 m) において試験を行った。試験圃場の土壌は多湿黒ボク土であり、土性が CL、塑性限界が 66 % である。試験圃場の概要を Fig. 2 に示した。試験圃場に 10 m × 5 m の連続した散布区を設置し、塩化カリウム (KCl) をそれぞれ 1.30 kgm<sup>-2</sup>、0.50 kgm<sup>-2</sup>、0.12 kgm<sup>-2</sup>、散布し、他は無散布とし、疑似海水浸水圃場とした。最大の散布量は海水の浸水を想定し、水深換算で 3 cm の海水 (塩分濃度を NaCl で 3.5 % と仮定) が浸透した場合の NaCl (1.05 kgm<sup>-2</sup>) を、KCl で代替 (NaCl : KCl モル比 1 : 1.28) したものとし、他はそのおよそ 1/2 および 1/10 の量として設定した。KCl 散布直後に圃場に入水し代かきを行った。

GEM-2 で測定する測線を圃場短辺方向 2.5 m 間隔と

し、圃場の落水後に測線を長辺方向に一定速度で歩行して ECa を計測した。測定位置座標は、推測航法で決定した。測定値と測定位置座標をもとに krigging 法 (Surfer, GoldenSoftware 社) により ECa の等高線図を作成した。計測に使用した周波数は、4 kHz, 8 kHz, 17 kHz, 37 kHz, 80 kHz, である。平井ら (2008) の実験において、高周波数ほど土層表層の特徴を捉えられていることが示されており、そこでは当時の GEM-2 の最大周波数である 47.97 kHz が使用されていることから、できるだけ高い周波数を使用することを考えた。しかし、本装置の最大周波数である約 90 kHz では、測定値の変動が大きかったことから、それよりやや低い 80 kHz を測定最大周波数として設定した。以下、80 kHz のおよそ 1/2 程度でかつ対数で等間隔となるような数値に設定した。

GEM-2 で計測した ECa と従来手法により計測した ECa を比較するため、地表下約 5 cm の ECa を Decagon 社「土壌水分・温度・EC センサ 5 TE」(以下、5 TE) により計測した。センサ上端の樹脂部分とケーブルとの接続部分を持ち、プローブ中程に装備されているビス状の金属端子部分が地表下 5 cm 程度となるように、地表面から鉛直に挿入した。圃場では短辺方向 6.25 m の位置を長辺方向 1 m おきに計測した。計測は各地点で 3 回行い平均値を地点代表値とした。

また、圃場の EC1:5 の値を確認するため、地表面から深さ 5 cm までの土壌を 100 cc 採土管を鉛直に挿入することにより採取した。各調査区および無散布部からそれぞれ任意に 4 箇所、合計 24 箇所から土壌を採取した。

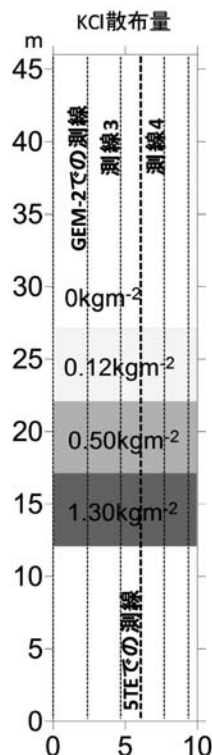


Fig. 2 疑似海水浸水圃場の概要. Schematic of the pseudo-seawater inundated field.

採取した土壌はその場でポリ袋に移し試験室に持ち帰った。それぞれの採取土壌全体から約 20 g の土壌を取り出し、105 °C で 24 時間炉乾燥後、EC1:5 を測定した。

2.2.2 現地圃場

GEM-2 の現地での適用性と効果的な利用法を検討するため、宮城県石巻市内の海水が浸水した圃場 2 筆 (圃場 A, および圃場 B) および近接する圃場 7 筆 (圃場 C ~ 圃場 I) からなる圃区において GEM-2 により ECa を測定した。圃場 A および B の区画は約 80 m × 125 m であり、面積がおおよそ 1 ha の大区画圃場である。調査地区の土壌は細粒灰色低地土に分類され土性は SiC である。圃場 A および B では 2011 年の 6 月に代かき除塩が行われ、その後大豆が栽培された。

GEM-2 による測定は 2011 年 5 月 31 日, 8 月 5 日および 11 月 1 日に行った。5 月 31 日の圃場 A, B での測定では、短辺方向の測定間隔を圃場 A では 5 m, 圃場 B では 2.5 m 間隔, 11 月 1 日の測定では、圃場 A, B ともに短辺方向の測定間隔を 5 m とした。位置座標は推測航法で決定することとし、GEM-2 を保持しながら一定速度で長辺方向に歩行して ECa を測定した。取得した測定値と位置座標をもとに Surfer により ECa の等高線図を作成した。

8 月 5 日の圃場 A, B の測定では ECa の測定と同時に、広範囲の連続的な計測を想定し GPS を用いて地理座標値を取得した。圃場 A, B での計測は、他の時期の調査で行った推測航法に準じて、圃場 A, B ともに短辺方向の測定間隔を 7.5 m とし長辺方向に歩行して行った。

5 月 31 日の圃場 7 筆 (圃場 C ~ 圃場 I) からなる圃区

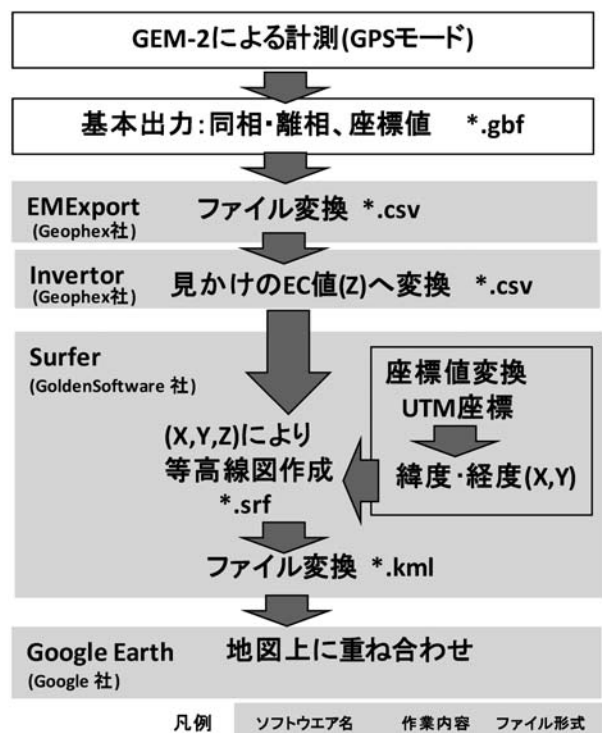


Fig. 3 等高線図の作成と地図上への重ね合わせ. Overlying contour plot on a map.

の測定においては、数筆の連続計測を行うため、ほ場短辺から5 m および15 m 離れた位置を圃場短辺に平行に歩行し測定し、GPSを用いて地理座標値を取得した。測定は畦畔を越えて7筆を連続して行い、約300 mを一往復して計測した。

現地圃場において計測に使用した周波数は、4 kHz, 8 kHz, 17 kHz, 37 kHz, 80 kHz, である。但し、11月1日の測定では、80 kHz 程度の高周波数による計測において深さ1 m 以浅のECの影響を把握することが可能かを確認するために、71 kHz および93 kHz を加えた合計7周波数を用いて測定を行った。

取得したデータを Fig. 3 に示した手法でファイル形式および座標系の変換を行い地図上 (Google Earth, Google 社) 上に示した。ここでは、基本出力はバイナリファイルであるため、まず本装置に付属されるソフトEMExportでアスキーファイルに変換する。またここでは、航測航法による計測の場合、測線の間隔及び延長を入力し、XY座標の割り振りがされ、GPSによる計測の場合は地理座標値が出力される。続いて、同じく付属ソフトのInvertorにより、同相及び離相値から各測点のECaを算出する。座標値およびECaを地図作成ソフトSurferに入力し、測定値の等高線図が作成される。等高線図を地図ソフト上に表示する場合には、地図ソフトに応じた座標系に変換する必要がある。Google Earth上に表示する場合は、UTM座標で得た地理座標値を緯度経度に変換する必要があるため、Surferのコンバー

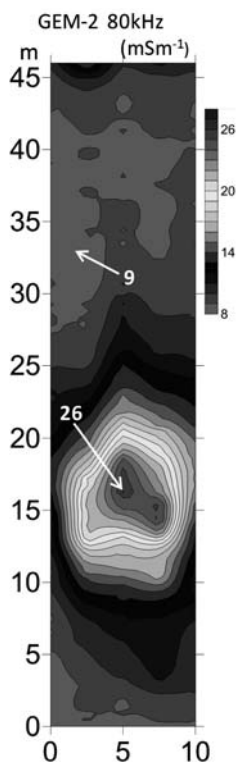


Fig. 4 疑似海水浸水圃場における見かけの電気伝導度 (ECa) の測定結果。  
Bulk EC (ECa) value in the pseudo-seawater inundated field.

ト機能により地理座標値を変換する。さらにGoogle Earth上に表示するにはファイルをkml形式に変換する必要があるためSurferでのファイル保存時にkml形式を選択する。

5月31日、8月10日および11月10日には圃場Aから土壌を採取し、試験室において105℃で24時間炉乾燥後、EC1:5を測定した。圃場の対角線交点1地点および対角線上でほ場短辺側からおおよそ20 m離れた4地点 (排水路側2地点、道路側2地点) の合計5地点より、オーガ ( $\phi$  6 cm) を用いて地表から深さ30 cm までの土壌を採取し、0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm のEC1:5を測定した。

5月31日の圃場C~圃場Iの7圃場においては、GEM-2による計測値と従来手法によるECの測定値を比較するため、5 TEプローブ上の金属端子部分が地表下5 cm程度となるように、地表面から鉛直に挿入しECaを測定した。また地表面から5 cm までの土壌を採取し、試験室において105℃で24時間炉乾燥後、EC1:5を測定した。5 TEとEC1:5の調査地点はGEM-2の測線付近で各圃場の短辺長の間中点とした。

11月1日の調査では、おおよそ1 m 以浅のECを把握するため、圃場内から土壌を採取しHANNA社「土壌EC計HI98331」(以下、HI98331)を用いて鉛直方向のEC分布を測定した。圃場内に20 m 区間の調査区を設定し5 m 毎に5地点で土壌を採取した。調査区は事前にGEM-2でECaを測定した結果から、ECaが高い地点が含まれるように、長辺方向に連続した20 m 区間を選定した (Fig. 6 (c) の短辺方向-60 m, 長辺方向40 m 付近)。1地点につき0~10 cm, 10~20 cm, のように地表から110 cm まで10 cm 毎にオーガ ( $\phi$  6 cm) によ

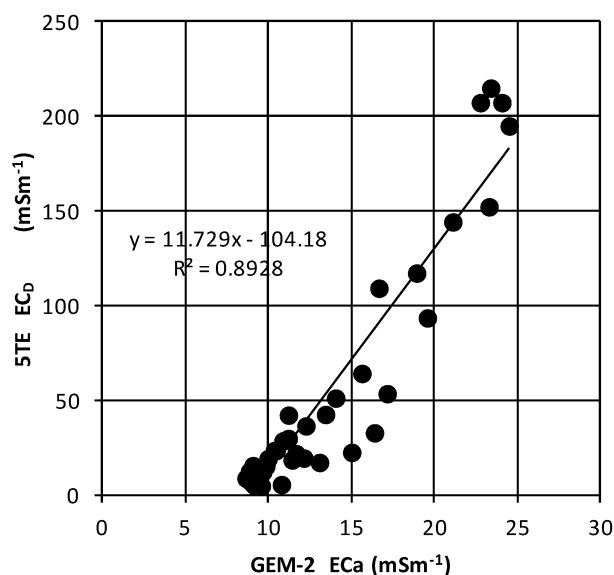


Fig. 5 見かけの電気伝導度 (ECa) と土壌水分・温度・EC センサ5 TE で測定した EC (EC<sub>D</sub>) の関係。  
Relationship between bulk EC (ECa) and EC measured by soil moisture, temperature, and EC sensor 5 TE (EC<sub>D</sub>).

り土壌を採取した。採取後直ちにオーガ内の土壌を押し固め HI 98331 の長さ 20 mm の電極部を試料側面から鉛直に挿入して ECa を測定した (関矢ら, 2012)。また、土壌の採取前には各地点で GEM-2 を約 30 秒間固定し ECa を測定し、得られたデータの中央値をその地点の ECa とした。ここでは GEM-2 による測定位置を正確に土壌採取地点とするため、また、歩行時の揺れによるノイズを低減するために本体を固定して測定した。その際測定値をモニターで確認し、おおむね数秒で一定値が得

られたが、余裕を見込み約 30 秒間の測定とした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 疑似海水浸水圃場

Fig. 4 に疑似海水浸水圃場における測定周波数 80 kHz による ECa の測定結果を示す。KCl の散布量が多い地点では ECa が高く、KCl 散布量の減少に従い ECa が低下した。圃場左右の試験区境界 (短辺 0 m, および 10 m, 付近) において ECa の値が低下しているのは、KCl を散布していない部分に測定範囲が及んだことにより、低い ECa が計測され平均化されたためと考える。

Fig. 5 に GEM-2 による ECa と 5 TE により測定した EC (EC<sub>D</sub>) の関係を示した。横軸の GEM-2 の ECa は、5 TE の測線の両側で計測した ECa (測線 3 および測線 4) から長辺方向 1 m 毎の値を抽出し、それらの平均値を用いた。ECa と 5 TE による EC<sub>D</sub> には、高い相関がみられた。

EC<sub>D</sub> は土壌水分量により変化するが、EC1:5 の測定のために採取した圃場内 24 点の土壌含水比の平均値および標準偏差はそれぞれ、90.0%、8.42% であり、代かき後ということもあり高い含水比であった。関矢ら (2012) は、中粗粒グライ土、中粗粒褐色低地土、黒泥土における土壌含水比と 5 TE で計測した ECa の関係を調べており、塑性限界以上の土壌水分においては、5 TE で計測した ECa の土壌含水比に対する変化が小さいことを示している。また、土壌を圧縮又は加水してペースト状に処理した後に 5 TE で計測した ECa は、処理前より EC1:5 との相関が高くなることを示している。今回、土壌が異なるものの、本土壌の塑性限界は 66% であり、それより高い含水比であった。また、圃場は代かき後で歩行が可能な程度に地表面がやや硬化した状態であり土壌が密な状態であったことから、土壌含水比の違いによる EC<sub>D</sub> への影響は少ないと考えられる。これらのことから GEM-2 により、圃場内 ECa の相対的な高低差を把握できると考えられた。

疑似海水浸水圃場から土壌を採取して測定した EC1:5 は、最大値が 176 mSm<sup>-1</sup>、最小値が 6 mSm<sup>-1</sup> であった。海水が浸水した農地の除塩作業は、水稲作の場合 EC1:5 の値が 60 mSm<sup>-1</sup> 以下を目標に行われている (星・遊佐, 2012)。本試験で行われた疑似海水浸水圃場の EC1:5 値はその目標値前後の値であり、現地で想定される EC1:5 の範囲内にあった。

#### 3.2 現地圃場

##### 3.2.1 平面的な ECa の把握および推移

Fig. 6 に現地圃場における 5 月 31 日、8 月 5 日、11 月 1 日の ECa の等高線図を示す。5 月 31 日の等高線図では、ECa が約 27~105 mSm<sup>-1</sup> の間で分布していた。圃場 A では、長辺 40 m と 110 m 付近に ECa が高い部分が帯状に見られた。圃場 B の ECa は長辺方向 100 m ~ 120 m 付近までの ECa がほぼ一様に高かった。ECa は 8 月 5 日、11 月 1 日と時間の経過と共に低下した。圃場内の ECa の高い部分は、その後の測定においても

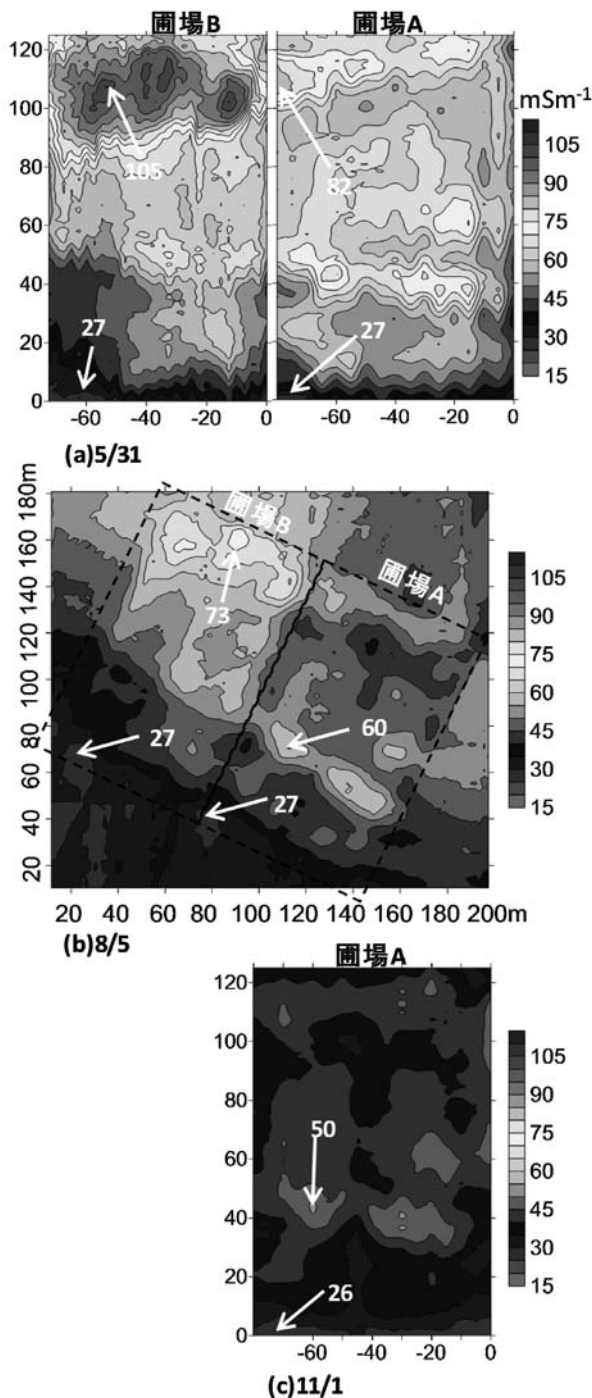


Fig. 6 現地圃場における見かけの電気伝導度 (ECa) の等高線図。  
Contour plot of bulk EC (ECa) with the field survey.

5月31日の結果とほぼ同様の位置に見られた。ECaは圃場内の特定位置で低下するのではなく、全体的に低下する傾向が見られた。

5月31日～11月10日の圃場Aにおける圃場全体のECaの平均値および地表下0cm～30cmまでの10cm毎のEC1:5とその平均値の推移をFig. 7に示す。0～10cmおよび10～20cmのEC1:5は11月までに約 $20\text{ mSm}^{-1}$ まで低下したが、20～30cmの11月のEC1:5は5月の値と同程度の $40\text{ mSm}^{-1}$ であった。0～30cmのEC1:5平均値で見ると、夏期に多少の増加がみられるものの、長期的には減少傾向にあった。他の津波浸水圃場でも降雨による除塩効果が報告されており(千葉・加藤, 2011), 本圃場においても、津波の浸水以降の降雨により、圃場の塩分濃度は低下傾向にあったと考えられる。GEM-2によるECaは測定時の土壤水分条件に影響されるものの、ECaはこの観測期間で減少傾向にあっ

た。よって、各測定時期の土壤水分条件の相違はECaに影響を与えない範囲内にあったものと推察され、GEM-2では圃場全体の塩分の低下傾向を捉えていると見られた。

Fig. 8にはGoogle Earth上に8月5日の等高線図を示した。8月5日の測定では、排水路側のECaが反対の給水側より高く示されており、地図上では容易にその関係を確認できた。8月10日に圃場Aにおいて土壌を採取して測定したEC1:5においても、排水路側と給水側の平均値がそれぞれ $94\text{ mSm}^{-1}$ ,  $49\text{ mSm}^{-1}$ であり、排水路側が高い傾向にあった。Fig. 9に5月31日の圃場7筆からなる圃区での測定結果をGoogle Earth上に示した。D圃場のECaが約 $90\text{ mSm}^{-1}$ と最も高く示され、E圃場が約 $70\text{ mSm}^{-1}$ , C圃場およびF圃場が約 $60\text{ mSm}^{-1}$ , G圃場およびH圃場が $50\text{ mSm}^{-1}$ , I圃場が $20\text{ mSm}^{-1}$ と、圃場Cを除いた圃場D～圃場Iについては

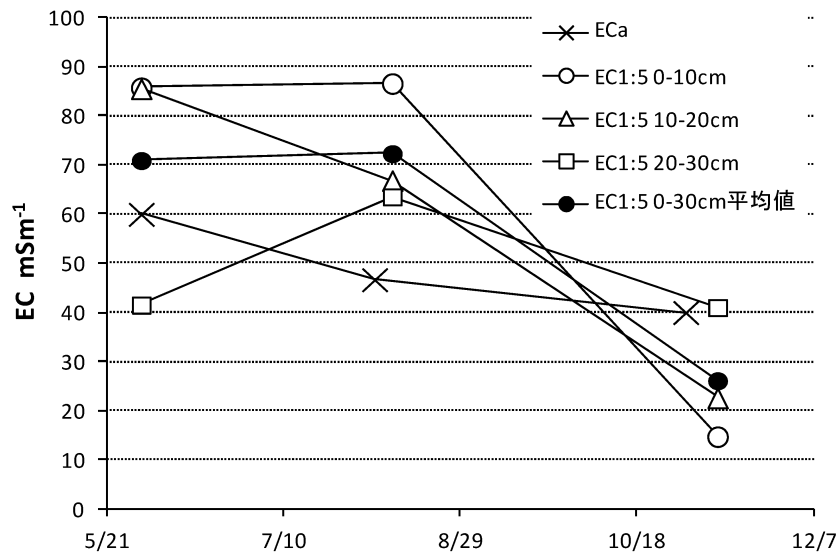


Fig. 7 見かけの電気伝導度 (ECa) および EC1:5 の推移。  
Changing of bulk EC (ECa) and EC1:5.

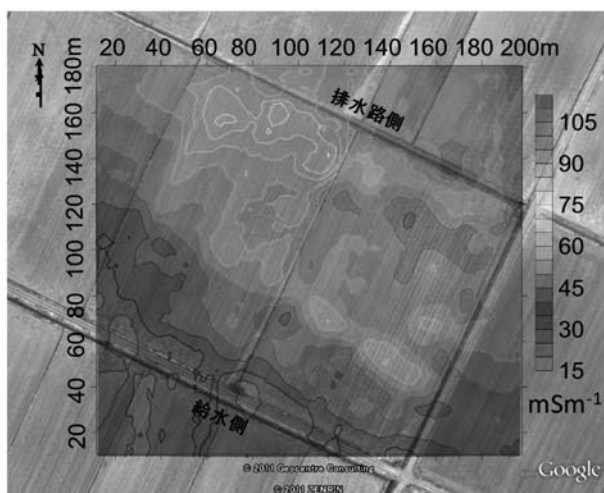


Fig. 8 8月5日の見かけの電気伝導度 (ECa) の等高線図。  
Contour plot of bulk EC (ECa) on August 5.

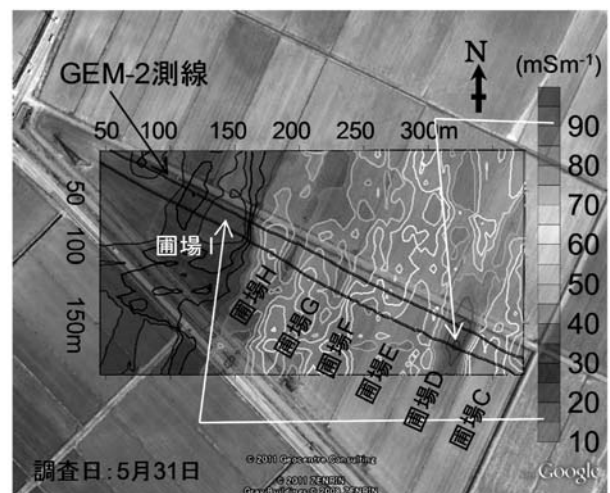


Fig. 9 圃区における見かけの電気伝導度 (ECa) の等高線図。  
Contour plot of bulk EC (ECa) in the field block.

西側の圃場ほど ECa が低かった。5月31日の同圃場における EC<sub>D</sub> と EC1:5 の値を Table1 に示した。EC<sub>D</sub> と EC1:5 の値は多少の増減があるものの、ECa の測定値と同様に西側の圃場の EC が低くなる傾向を示した。EC1:5 は I 圃場を除いて 60 mSm<sup>-1</sup> 以上であり、除塩が必要な水準にあると見られた。GPS を利用して測定することで、測定対象の圃場形状によらず、測定範囲をダイナミックに設定でき、かつ測定結果を地図上に表示することでその位置関係も把握することが可能であり、簡易な迅速測定に適した計測法と考えられる。この7筆の測定では、GEM-2 により測定された ECa が 50

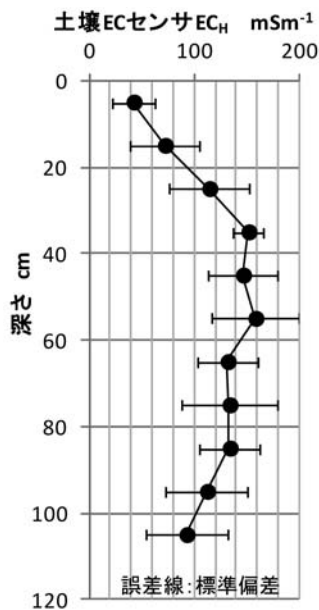
**Table 1** 土壌水分・温度・EC センサ 5 TE で測定した EC (EC<sub>D</sub>) と EC1:5。  
EC measured by soil moisture, temperature, and EC sensor 5TE (EC<sub>D</sub>) and EC1:5.

圃場	C	D	E	F	G	H	I
5TE EC <sub>D</sub> (mSm <sup>-1</sup> )	226	490	293	316	228	90	10
EC 1:5 (mSm <sup>-1</sup> )	64	114	90	111	115	71	17
ECa (mSm <sup>-1</sup> )	59	91	69	64	53	53	17
含水比 (%)	67.5	77.0	82.1	81.9	71.0	81.1	51.2

※調査日：5月31日

**Table 2** 見かけの電気伝導度 (ECa) と土壌 EC 計 HI 98331 で測定した EC (EC<sub>H</sub>) との相関係数。  
Correlation coefficient between bulk EC (ECa) and EC measured by soil EC sensor HI 98331 (EC<sub>H</sub>)

平均深さ	8 kHz	17 kHz	37 kHz	71 kHz
0-30 cm	-0.17	-0.07	-0.13	-0.11
0-60 cm	0.61	0.69	0.65	0.68
0-90 cm	0.90	0.94	0.92	0.94
0-110 cm	0.97	0.99	0.98	0.99

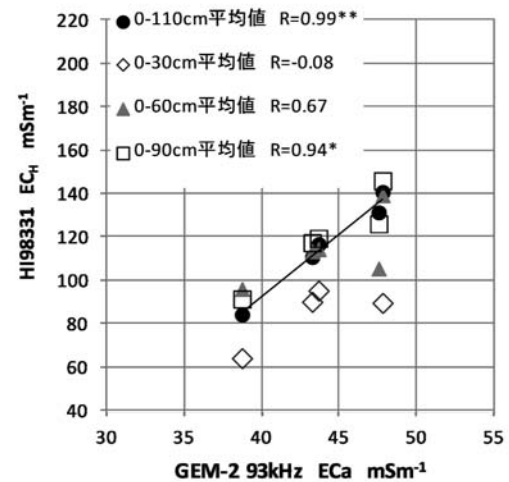
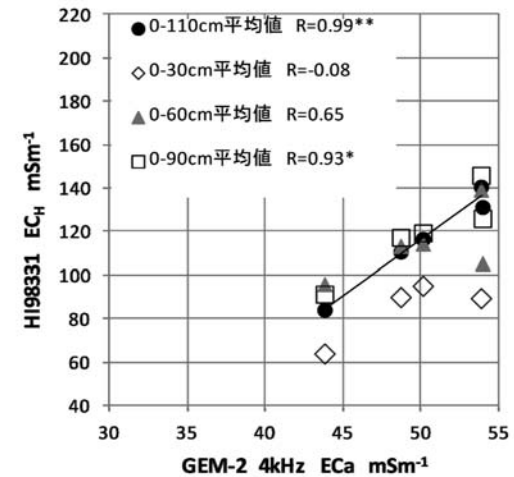
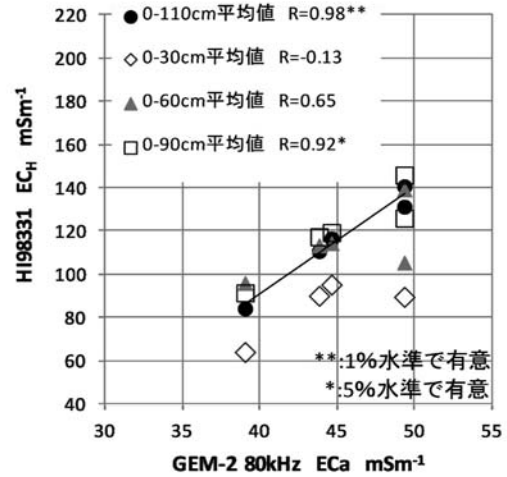


**Fig. 10** 土壌 EC 計 HI 98331 で測定した EC (EC<sub>H</sub>) の鉛直分布。  
Vertical distribution of EC measured by soil EC sensor HI 98331 (EC<sub>H</sub>).

mSm<sup>-1</sup> 以上となる圃場 I 以外の圃場で、除塩が必要な EC 水準にあるということが推察された。

**3. 2. 2 1m 以浅における EC 鉛直分布と GEM-2 による測定**

Fig. 10 に深度 1.1 m までの土壌を採取し HI 98331 により測定した EC (EC<sub>H</sub>) の鉛直分布を示す。11月の時



**Fig. 11** 見かけの電気伝導度 (ECa) と土壌 EC 計 HI 98331 で測定した EC (EC<sub>H</sub>) の関係。  
Relationship between bulk EC (ECa) and EC measured by soil EC sensor HI98331 (EC<sub>H</sub>).

点では、表層の  $EC_H$  が低く、深度の増加とともに  $EC_H$  が上昇し、60 cm 付近を最大として、さらに深くなると徐々に低下する傾向にあった。

GEM-2 の深度方向の測定影響領域を確認するため、GEM-2 による  $ECa$  と  $EC_H$  の深さ毎の平均値の関係を求めた。Fig. 11 に  $ECa$  に対して  $EC_H$  の値を地表を基準として深度方向に、0~30 cm, 0~60 cm, 0~90 cm, 0~110 cm までをそれぞれ平均した値をプロットした。

今回の調査で主に使用した 80 kHz においては、 $EC_H$  の値が比較的低い 0~30 cm の平均値と  $ECa$  との関係に直線関係はみられなかった。しかし、 $ECa$  と 0~30 cm, 0~60 cm, 0~90 cm, 0~110 cm の各平均値との一次回帰式を得た際の相関係数はそれぞれ、-0.13, 0.65, 0.92, 0.98 であり、より深い位置の数値が含まれるほど、相関係数が高くなった。GEM-2 による 80 kHz での測定では、表層 0~30 cm あるいは 0~60 cm のみに限定されることなく、少なくとも地表から 1 m 程度まで測定範囲が及んでいると考えられる。平井ら (2008) は GEM-2 を使用した調査結果から、測定値が表層 1 m 未満の土壌の影響を強く受けていると考察しており、本研究においても平井らの結果と同様であると考えられた。

3.1 での疑似海水浸水圃場における試験では、Fig. 5 に示したように地表付近で計測された  $EC_D$  と  $ECa$  の関係がよく一致していた。これは、KCl の散布および混和後まもなく計測したことから、地表付近の EC が高く、その地表付近の影響を受けたものと考えられる。

他の測定周波数における  $ECa$  と  $EC_H$  の深さ毎の平均値の関係について、4 kHz および 93 kHz においても  $ECa$  と  $EC_H$  の深さ毎の平均値の関係は 80 kHz による測定結果とほぼ同様の傾向であった (Fig. 11)。その他の周波数 (8 kHz, 17 kHz, 37 kHz, 71 kHz) における  $ECa$  と  $EC_H$  の深さ毎の平均値の関係についても、Table 2 に示した相関係数のように Fig. 11 に示したものと同様の傾向であった。高周波数ほど、0~30 cm あるいは 0~60 cm といった浅い位置の EC の影響を受けると予想し、深さ 1 m 程度の深さ方向の EC 分布の把握を試みようと考えたが、高周波数による測定でも、浅い位置の EC の影響が特段反映される結果とはならず、いずれの測定周波数ともに 1 m 程度までの EC の影響を同程度に受けていると考えられた。

各測定周波数によって測定された  $ECa$  の違いを確認するため、Fig. 12 に  $EC_H$  の平均値が最も高い調査地点において、30 秒間に計測した  $ECa$  の全測定値を示した。 $ECa$  の中央値は、周波数が低下するほど増加した。 $ECa$  の標準偏差は、80 kHz が最も小さく低周波数ほど大きくなり、また、93 kHz の標準偏差は 37 kHz, 71 kHz, 80 kHz の標準偏差よりも大きかった。これらの違いは、周波数による測定影響範囲の違いによるものと考えられるが、1 m 以深の影響範囲について明らかにするには、更なる調査が必要である。

### 3.3 津波浸水農地における電磁探査法の利用

電磁探査法による  $ECa$  の測定においては、簡易に相

対的な高低差が把握できる。一方、 $ECa$  と除塩の指標に用いられている  $EC1:5$  の値と比較するには、何らかの手法でそれらの関係を把握する必要がある。土壌をサンプリングし、 $EC1:5$  を計測すれば、比較が可能になるが、迅速性が失われることになる。関矢ら (2012) による海水浸水圃場から得られた調査結果によれば、土壌 EC 計による EC は、測定時の水分条件やセンサ計測部

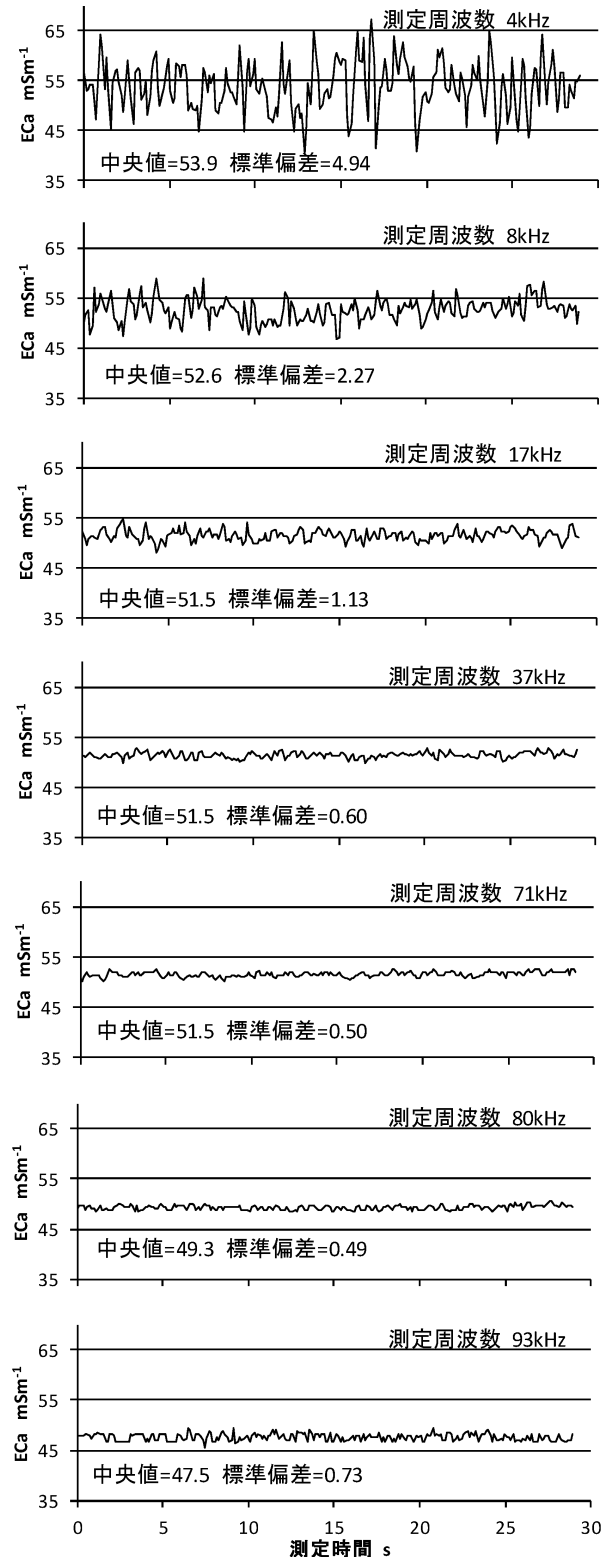


Fig. 12 定点における見かけの電気伝導度 ( $ECa$ ) の測定値。Bulk EC ( $ECa$ ) measured at fixed measurement point.



と土壌の接触環境を整えば、EC1:5と高い相関があることを示している。そこで、迅速に海水浸水農地のEC1:5を把握するため、電磁探査法と土壌EC計を併用した手法について検討する。本調査においては、例えばFig. 6(c)で矢印により最大値 $50 \text{ mSm}^{-1}$ が示されている地点は、鉛直方向のEC分布を調査した地点である(Fig. 10)。その前後を長辺方向にGEM-2で計測すると、PDA画面で離相値の最大値を確認できる。離相値が最大値を示した地点において土壌を採取し測定した $EC_H$ の値は、約 $40 \sim 200 \text{ mSm}^{-1}$ (Fig. 10)、平均で約 $130 \text{ mSm}^{-1}$ を示していた。関矢ら(2012)によれば、海水浸水農地の調査において、測定時の水分条件やセンサ計測部と土壌の接触環境を調整した状態で計測した $EC_H$ を0.4倍することにより、EC1:5を推定できることが示されており、ここで便宜的にその0.4倍という値を用いれば、 $EC_H$ の測定値はEC1:5で $16 \sim 80 \text{ mSm}^{-1}$ 、平均で $52 \text{ mSm}^{-1}$ 程度と推測される。本調査に限られるが、圃場内の他の地点の離相値が先に確認した最大値以下であれば、平均的にEC1:5で $50 \text{ mSm}^{-1}$ 以下であることが予想される。このように、あらかじめ調査区域において土壌EC計によるEC値とEC1:5の関係を得ておくことにより、土壌EC計を併用してGEM-2による測定値からEC1:5を推定できる。現地でEC1:5のおおよその値が把握できることは、重点的に調査が必要な地点の把握等、調査の効率化につながると考える。

本装置は多周波数型の電磁探査機であり、Mitsuhata et al. (2006)は、GEM-2による多周波数による測定と一次元逆解析手法を用いて深度 $1 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$ 付近までの比抵抗(ECの逆数)断面図を作成できることを示している。今回の津波浸水農地の調査では、深度方向に求められる調査範囲は農業に関わる $1 \text{ m}$ 程度の範囲である。今回、多周波数での測定において、7つの測定周波数による測定結果が同様の傾向を示し、 $1 \text{ m}$ 以浅の特徴を特に反映する測定周波数というのは得られず、すべての測定周波数が $1 \text{ m}$ 以浅のECの影響を受けた結果となった。そのため、 $1 \text{ m}$ 以浅の深度方向のプロファイルを作成するに至らなかった。Mitsuhata et al. (2006)の実験は、海水が浸水する砂浜で行われており、波打ち際の海水の浸透や、砂浜で深さ数 $\text{m}$ に埋設されていた金属製の廃棄物等の影響を確認している。この実験と比較すると、今回の測定では、EC値の水準が低いこと、測定対象が $1 \text{ m}$ 以浅と浅いことがあげられる。今回のような条件で $1 \text{ m}$ 以浅の特定深度のECを計測するには、測定方法自体を工夫するなど、更なる検討が必要であると考え。

#### 4. おわりに

津波浸水農地における簡易かつ迅速な土壌電気伝導度

測定法を提供するため、電磁探査法の計測特性を調査した。その結果以下のことが明らかになった。

KClの散布により塩分濃度を調整した疑似海水浸水圃場を設定し、GEM-2によりECaを測定した。KClの散布量に応じて、計測されたECaが高くなっており、また土壌ECセンサによる測定値と同様の傾向を示したことから、非破壊、非接触により津波浸水農地の相対的なECaの高低差を把握することができることが判った。

GEM-2によるECaの等高線図を作成することにより、津波浸水農地の広範囲におけるECa分布が容易に確認できることが判った。また、GPSを用いて地理座標を取得して計測した場合、等高線図をGoogle Earth等の地図上に重ねることにより、地形情報とECaの関係が容易に把握できた。

GEM-2による $80 \text{ kHz}$ での深度方向の計測範囲は、表層 $0 \sim 30 \text{ cm}$ あるいは $0 \sim 60 \text{ cm}$ のみに限定されることなく、少なくとも地表から $1 \text{ m}$ 程度まで測定範囲が及んでいると考えられた。

土壌ECセンサを併用することで、現地でECaとEC1:5を比較でき、迅速性を損なわずに除塩に必要な調査を行うことが可能である。

最後に本手法が被災農地の復旧の一助になれば幸甚であり、一刻も早い復興を祈願する。

#### 引用文献

- 千葉克己, 加藤徹 (2011): 雨水による塩害農地の除塩効果. 2011年度土壌物理学大会講演要旨, 70-71.
- 土壌環境分析法編集委員会 (1997): 土壌環境分析法, pp.202-204, 博友社, 東京.
- 平井優也, 森也寸志, 宗村広昭, 江草直和, 森澤太平 (2008): 多周波数電磁探査法による土壌環境モニタリング. 土壌の物理性, 109: 3-14.
- 星信幸, 遊佐隆洋 (2012): 宮城県における津波による水田への影響と除塩. 日本海水学会誌, 66 (2): 74-78.
- Kume, T., Umetsu, C., Palanisami, K. (2009): Impact of the December 2004 tsunami on soil, groundwater and vegetation in the Nagapattinam district, India. Journal of Environmental Management, 90: 3147-3154.
- McLeod, M.K., Slavicha, P.G., Irhas, Y., Moore, N., Rachman, A., Ali, N., Iskandar, T., Hunta, C., Caniogo, C. (2010): Soil salinity in Aceh after the December 2004 Indian Ocean tsunami. Agricultural Water Management, 97: 605-613.
- 光畑裕司, 稲崎富士 (2008): 電気・電磁探査法による浅層地盤の非破壊プロファイリング調査技術. 地質ニュース, 644: 14-24.
- Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A., Kusunose, K. (2006): Various-scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain. Geophysics, 71: B167-B173.
- 農林水産省 (2011): 農地の除塩マニュアル. p.5, 農林水産省ホームページ, <http://www.aff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf>
- 関矢博幸, 冠秀昭, 大谷隆二, 吉住佳与, 武田純一 (2012): 海水進入農地の土壌電気伝導度の測定における土壌ECセンサの利用法. 日本土壌肥科学会誌, 83 (3): 292-295.

## 要 旨

津波浸水農地における簡易かつ迅速な土壌電気伝導度測定法を提供するため、電磁探査装置 GEM-2 による電磁探査法について検討した。KCl の散布により土壌電気伝導度を調整した疑似海水浸水圃場では、KCl の散布量の増加に応じて、計測された見かけの土壌電気伝導度 (ECa) が高くなった。また、ECa は土壌水分・温度・EC センサ 5 TE による測定値と相関関係を示した。よって、GEM-2 により非破壊、非接触で津波浸水農地の相対的な ECa の高低差を把握することができることが判った。GEM-2 により測定された等高線図を GoogleEarth 等の地図上に重ねることにより、地形条件と ECa の関係を容易に把握できた。GEM-2 での計測周波数 80 kHz による深度方向の計測域は、表層付近のみに限定されることなく、少なくとも地表から 1m 程度まで測定範囲が及んでいると考えられた。土壌 EC センサを併用することで、現地で ECa と EC1 : 5 を比較でき、津波浸水農地において迅速に除塩作業のための調査が可能である。

キーワード：津波浸水農地，電磁探査法，土壌電気伝導度，塩害