鉛直電気伝導度センサの利用方法 —塩類集積地域における3次元塩類分布の把握—

洪 寧基・樹野淳也*・島田沢彦・中村貴彦・田島 淳・玉木浩二

東京農業大学地域環境科学部 156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1

*現在：近畿大学工学部 739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺 1

Application of a Vertically-employed Electrical Conductivity Probe —Measurement of 3D salt distribution on saline land—

Youngki HONG, Junya TATSUNO*, Sawahiko SHIMADA, Takahiko NAKAMURA,
Kiyoshi TAJIMA and Koji TAMAKI

*Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture,
1-1-1 Sakuragaoka, Setagaya, Tokyo 156-8502, Japan*

**Present address: School of Engineering, Kinki University,
1 Takyama Umenobe, Higashi-Hiroshima City, Hiroshima 739-2116, Japan*

Abstract

Numerous studies on the reclamation of saline land have been conducted in northeastern Thailand. Despite the importance of long-term evaluations of this phenomenon, relatively few studies on this have been reported in the scientific literature. Consequently, we propose a new method for understanding the 3D salt distribution in soil. The general technique employed for evaluating salt accumulation in soil is to measure the electrical conductivity of soil samples in the laboratory. However, the collection of soil samples can be difficult when groundwater levels increase such as they do during the rainy season in northeastern Thailand. We therefore developed an instrument capable of measuring electrical conductivity in saturated soils below groundwater level. The method for determining the 3D salt distribution in soil employs an electrical conductivity probe and measurement of the geographical location of the sample site by GPS. The probe is used to measure electrical conductivity at a point perpendicular to the ground surface, and these values are then combined with the horizontal 2D coordinates for the sample site. The combination of these data can be used to determine the 3D salt distribution in soil. A field experiment was conducted in northeastern Thailand during the rainy season. By measuring the electrical conductivity at specified depths and recording the corresponding 2D location data, we were able to determine of the 3D salt distribution in soil. In addition, the outputs obtained using the electrical conductivity probe were almost equivalent to electrical conductivity measurements obtained from soil solutions (EC_e) in the laboratory. We also demonstrated that it was possible to assess the 3D distribution of soil salts in a region in a day. The application of the proposed method thus makes it possible to continuously investigate the salt distribution at numerous sample sites spread across a region.

2006 年 3 月 2 日受付

2006 年 6 月 1 日受理

Corresponding author : Junya Tatsuno

(tatsuno@hiro.kindai.ac.jp)

Keywords: electrical conductivity, GPS, northeastern Thailand, shallow groundwater, soil salinization

緒 言

タイ国東北部は、面積、人口ともに国全体の約 30% を占めているが GNP は 20% に過ぎず、最も貧困な地域として知られており、さらに近年塩害が深刻化し、貧困の状況が一層悪化している。そこで、この地域における塩害地の修復のために、様々な取り組みが行われてきた。例えば、耐塩性が強く成長期に地下水を多く吸収するユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) を塩性地下水の涵養域に植林する方策が、この地域の低地部の塩類集積を軽減させた報告がある (Miura and Subhasaram, 1991)。また、工学的な取り組みとしては、土壌中の塩性地下水の毛管上昇を遮断するために、地中に砂利や粉殻のような資材を埋設した実験が報告されている (Anase *et al.*, 1997)。また、Tatsuno らは、圃場の地下水位を低下させるソーラーポンプと暗渠排水によるシステムを提案している (Tatsuno *et al.*, 2005)。

このような取り組みの効果を確かめるためには、対象地域における塩類集積の状況を経時的に把握する必要があると思われるが、そのような報告はほとんどない。土壌中の塩類を測定する一般的な方法は、対象地より土壌サンプルを採取し、その後実験室で必要な処理を施し、電気伝導度の測定をする方法である。しかし、この方法では、地下水位が高い地域ではサンプリングが困難であり、地下水位以下の土層における塩類集積の状況を直接知ることはできない。そこで、著者らは、地下水位以下の飽和土壌において、サンプリングを行わずに深さ方向の電気伝導度の測定が可能なセンサの開発を行った (Hong *et al.*, 2002)。さらに、塩類移動が起こり得る飽和土壌の設定を人工的に構築し、開発した電気伝導度センサにより土壌の塩類化が経時的に測定できる可能性を見いだした (Hong *et al.*, 2006)。

本研究の最終目標は、対象地域における土壌中の塩類集積の経時的变化を把握する手段を確立することである。そこで、本論文では、対象地域である東北タイの塩害地での土壌中の塩類集積状況を容易に把握できる手法を提案する。さらに、この提案した手法を用いて、東北タイの塩類集積地で現地実験を行い、その実験結果により、提案している塩類集積把握手法の有効性を議論する。

材料および方法

1. 塩類集積地域における3次元塩類分布把握方法の提案

Fig. 1 は、提案する塩類集積地域における3次元塩類分布把握方法の流れについて示したものである。この方法では、著者らが開発した電気伝導度センサによる深さ方向の電気伝導度情報と、GPS による2次元位置情報を組み合わせることにより、土壌中の3次元位置での塩類集積状況の把握が可能となる。

Fig. 2 は、開発した電気伝導度センサの外観である。このセンサは、水平方向に電極を並べた Edlefsen の方法 (Edlefsen and Anderson, 1941) を応用し、電極を同軸上の鉛直方向に配列することにより深さ方向の測定を可能にしている。Edlefsen の方法では、電極と土壌間の接触抵抗を計算式で打ち消すことが可能であるため、高い測定精度が得られることが知られている。このセンサの構造は、全長が 1160 mm であり、約 1 m の深さまで貫入できる。このセンサの軸長を延長することにより、測定深さを大きくすることが可能である。長さ 7 mm の電極を 7 mm の間隔で設置し、電極間を絶縁体であるエポキシ樹脂で成型した。また、電気伝導度の温度補正を可能にするため、センサの先端部に高精度サーミスタが取り付けられている。なお、塩類移動が起こり得る飽和土壌を設定したカラムに、このセンサを任意の深さ間隔で差し込みながら計測した電気伝導度の波形と、同様の深さから抽出した土壌溶液の電気伝導度 (EC_e) の波形を比較した結果、似

Fig. 1 Flowchart depicting a scenario in which the distribution of salt in soil can be investigated continuously at numerous sample sites across a region.

Fig. 2 Drawing of the vertically-employed electrical conductivity probe. Measurements are given in millimeters (mm) (Hong *et al.*, 2002).

た傾向が得られることを前報にて報告している (Hong *et al.*, 2006). このカラム実験の結果より、タイ東北部の塩害地のように、地下水位が高く土壌サンプリングが困難な地域においても、深さ方向の電気伝導度の把握への適用が期待できる。

一方、GPS は、位置情報の取得には、現段階では非常に有効なツールであると言える。特に、民事利用において測位精度を低下させる SA (Selective Availability) 信号が 2000 年 5 月に解除された以降、測位精度が飛躍的に向上し、単独測位の精度は 10 m 程度になっている。また、この単独測位の精度を向上させるために、ディファレンシャル補正が多く用いられている。この補正方式では、位置座標が既知の場所に固定局の GPS 受信機を設置し、移動局の測位結果に固定局で得た補正データを適用することにより、大部分の誤差の消去が可能になる。比較的安価な市販の GPS 受信機にも、この補正機能が搭載されている。以上のような観点から、本研究では、2 次元位置座標の取得にディファレンシャル GPS (DGPS) 方式による計測を導入することとした。

この提案している手法は、現場で目的とする計測値を得ることができ、また、その計測に掛かる時間も比較的短時間であるため、多くの地点での計測が容易となる。したがって、対象地域において、広く設定した計測地点をさらに経時的に計測することにより、対象地域における土壌中の塩類動態が把握できるものと考えている。

2. タイ国東北部の塩類集積地における現地実験

2.1 実験対象地域

実験対象地域として、タイ国東北部のコンケン (Khon Kaen) 市ノントンモン (Nong Thung Mon) 村の塩害が発生している実験区を選定した。Fig. 3 は、GPS を用いて測位し、

Fig. 3 Map showing the locations of the sample sites plotted using GIS software.

GISソフト (Pathfinder Office, Trimble Co. Ltd., USA) を用いて作成した実験区の概況を示している。本報にて対象とした実験区は、試験的に 200 m × 250 m の約 5 ha の広さに設定した。実験区の周囲には、塩害により裸地となった土地や水田、ユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) の植林地、草地、実験実施期間が雨期であったため自然にできた一過性の水溜りがあった。この実験区の地形は、周囲から水溜まりにかけて緩やかに傾斜しており、GPS 測位のデータによると、約 0.5% の勾配があった。

2.2 実験方法

まず、DGPS の固定局を実験区内に設置した。この実験では、UTM 座標 (N1800699.298, E249776.555) に固定局 (GeoExplorer3, Trimble Co. Ltd., USA) を設置した。次に、測定者は開発した電気伝導度センサと移動局 GPS (GeoXM, Trimble Co. Ltd., USA) を持ち、任意の測定地点に移動した。測定地点において、移動局 GPS を用いて位置座標を測定した後、開発したセンサによる電気伝導度 (以後 EC_s と定義する) の測定を行った。前述のように、試作した電気伝導度センサは深さ 1 m まで測定可能であり、本実験では 0.1 m の深さ毎に 1 m まで電気伝導度の測定を行った。開発したセンサの出力から電気伝導度への校正係数は、予め実験室にて、既知の塩濃度の塩化ナトリウム水溶液で飽和した土壌を、本センサおよび EC メータで測定し、式 (1) を用いて得た。

$$EC_{s25} = \frac{c_s}{R_{bc25}} \quad (1)$$

ここで、 EC_{s25} および R_{bc25} は、それぞれ 25℃ 補正の EC メータの測定値 ($dS\ m^{-1}$)、25℃ に補正したセンサの出力値 (Ω) である。 c_s は校正係数であり、タイ東北部の塩類土壌地帯の土壌と土性が似ている豊浦標準砂を用いて校正した結果、係数 c_s は 40.17 になった。

開発した電気伝導度センサによる測定値を評価するために、測定地点の近傍でオーガにより土壌サンプルを採取した。なお、土壌サンプルの採取も土壌表面から 1 m の土層まで 0.1 m ごとに行った。また、このオーガにより空けられた孔を利用し、地下水位の測定も行った。この一連の作業を、実験区内の 22 個所の測定地点 (Site 1 ~ Site 22) で実施した。一方、後日実験室にて、採取した土壌サンプルより溶液を抽出し、EC メータ (B-173, HORIBA Co. Ltd., Japan) で電気伝導度 (EC_e) の測定を行った。

この現地実験は、現地の気候が雨季の期間中であった 2003 年 8 月に、数日に渡り実施した。

結果 および 考察

1. 開発したセンサによる電気伝導度

Fig. 4 は、それぞれの測定地点における開発したセンサによる電気伝導度 (EC_s) と、土壌溶液の電気伝導度 (EC_e) の結果を示したグラフである。横軸と縦軸は、それぞれ電気伝導度値と測定深さを示している。図中の三角形のプロットは EC_s を示し、四角形のデータは EC_e である。また、それぞれの測定地点における地下水位をグラフ中に記載した。

Fig. 5 は、各地点で測定された地下水位データを元に作成した地下水位マップである。この図は、GIS ソフト (ArcViewGIS3. 2, ESRI Co. Ltd, USA) を使用し作成した。なお、データ補間には IDW 補間法を採用した。これらの結果からわかるように、対象区の西側のユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) の植林地周辺では、その植林の影響のため、地下水位が 1 GL-m より深くなっていた。一方、地形的な要因から、水溜まり周辺は、地下水位が 0 GL-m となっていた。また、対象区南側の水田内も、地下水位は数十 GL-cm と浅い状況であった。この地下水位と電気伝導度の傾向から、測定地点は Table 1 に示すように、次の四つに分類できそうである。ここで、それぞれ順に DN, SN, SG, SS とラベリングすることとする。

DN に分類された地下水位が深い測定地点では、Fig. 4 からわかるように、 EC_s と EC_e とともに、全層にわたり約 1 $dS\ m^{-1}$ 以下の値となった。開発した電気伝導度センサは、その特性上、測定対象とする土壌が飽和土壌であることが望ましい。Table 1 に示した結果より、 EC_s と EC_e では最大値が現れる深さに違いがみられるものの、このオーダーでは、 EC_s と EC_e の傾向に顕著な差があるとみなすことはできないと思われる。他方、本研究の目的は、塩類集積の状況を把握することであり、塩類集積発生の可能性が低い地域、言い換えれば、毛管が遮断される地下水位である地点は、議論の対象に含める必要がないとも言える。

SN に分類された地点は、DN に分類された地点と比較すると地下水位が浅いものの、Fig. 4 に示した EC_s と EC_e の結果から土壌中に塩類が集積していないことがわかる。これは、植生や地形などの影響によるものと推測される。なお、Site 4 および Site 5 では、高地下水位のため、90 GL-cm 以下の層において土壌のサンプリングを行うことができず、 EC_e 値を得ることができなかった。

一方、SG および SS の地点では、 EC_s と EC_e の結果ともに、高い電気伝導度値を示し、植生のある水田内での Site 10 においても、電気伝導度値が 16 $dS\ m^{-1}$ より高く、強塩類土壌 (Narioka and Anase, 1991) となっていることが認められ

Fig. 4 Electrical conductivity measured using a probe (ECs) and electrical conductivity measurements of the soil solution (ECe). Data points shown as $\blacktriangle$ and $\square$ indicate ECs and ECe, respectively.

Fig. 5 Groundwater level (GWL) contour map in the study area.

Table 1 Classification of sample sites

Label	Site No.	Ground water level (GL-cm)	Maximum EC _e (dSm ⁻¹)	Depth of the maximum EC _e (GL-cm)	Maximum EC _s (dSm ⁻¹)	Depth of the maximum EC _s (GL-cm)
DN	Site 1	100	0.5	10	0.1	100
	Site 2	98	1.1	10	0.3	100
	Site 6	98	0.2	10	0.1	100
	Site 7	100	0.3	10	0.1	100
	Site 11	98	0.3	10	0.2	90
	Site 12	81	0.2	10	0.1	10
	Site 16	98	0.6	20	0.1	30
	Site 21	100	0.4	70	0.3	80
	Site 3	66	0.4	100	1.7	90
	Site 4	23	0.2	40	0.3	30
SN	Site 5	33	0.1	20	0.1	100
	Site 8	58	0.4	80	0.1	40
	Site 9	20	0.3	50	0.3	20
	Site 13	55	0.5	80	0.2	50
	Site 10	38	22	40	27.9	20
	Site 14	40	38	30	19.2	20
SG	Site 15	38	15.9	40	11.3	50
	Site 17	83	52	50	65.8	60
	Site 19	37	34	20	23.3	20
SS	Site 18	6	62	20	49.2	20
	Site 20	39	78	10	41.2	10
	Site 22	30	94	10	69.6	100

Table 2 Particle size distribution of soil sampled at testing site

Layer	Depth (cm)	Soil texture	Particle size distribution (%)				
			Gravel	Coarse sand	Fine sand	Silt	Clay
Layer of old dressing	0~1	S	0.2	19.2	78.2	1.5	0.9
Layer A	1~5	LS	0.2	25.4	61.7	6.4	6.3
Layer of transition	5~10	LS	0.3	27.7	60.5	7.1	4.4
Layer B ₁	10~38	LS	0.2	26.1	63.4	7.1	3.2
Layer B ₂	38~	SL	0.3	26.5	59.2	8.2	5.8

た。SG に分類された地点では、土壤中の地下水位の周辺にて電気伝導度のピークが現れている。また、SS に分類された地点では、表層の電気伝導度が最も高く、土壤表面に塩類が集積していると推測される。深さ方向の電気伝導度の傾向について EC_s と EC_e の結果を比較すると、地下水位より深い土層では傾向が非常に似ているものの、地下水位より浅い土層の値に若干の差異がある測定地点がある。これは、前述のように開発した電気伝導度センサは、その特性上、飽和土壤であることが望ましいことに起因していると推測される。しかし、このセンサの最大の特徴は、従来把握し得なかった地下水位以下の塩類動態が把握可能になることであるので、地下水位より浅い層の電気伝導度値の取得が真に必要な場合は、従来の方法を併用すれなどの工夫を施せば良いであろう。一方、Site 22 では、土壤のサンプリングを行うことができ

なかった 90 GL-cm 以下の層において、EC_s の値が高くなっており、下層土に塩類が集積していることが、開発したセンサを用いたことにより明らかになったと言える。

これまでの議論では、EC_s の算出にあたり、その式中の校正係数 c_s は、現地の土性に比較的近い豊浦標準砂を用いて、あらかじめ算出した値であったが、現地の土壤から得られた EC_s と EC_e のデータから、対象地域の土壤の校正係数 c_s を求めることができる。なお、この実験対象地でサンプリングした土壤の粒度分析結果を Table 2 に示した。この結果より、この実験圃場周辺の土性は Sand (砂土) もしくは Loamy Sand (壤質砂土) に分類されることが分かる。さて、Fig. 6 は、EC_s と EC_e の全測定データをプロットし、相関を求めたグラフである。この結果が示すように、線形の関係が認められるものの、傾きが 1.182 となっている。このことは、豊浦標準砂

を用いて求めた校正係数は実際の校正係数より若干低いことを意味している。これらの結果をふまえ、実験対象地の校正係数 a_s は 47.48 と推測することができ、母集団が増えれば、さらに精度が上がると推測される。

2. 3次元マップによる塩類分布の可視化

前節の議論において、開発したセンサの現地対象地における電気伝導度測定への導入可能性について確認した。

次に、本実験により求められた電気伝導度データを用いて、対象地域の塩類集積状況を容易に把握するために、3次元マップの作成を試みた。Fig. 7(a) は開発したセンサーにより得た電気伝導度 (EC_s) を用いて作成したマップであり、Fig. 7

Fig. 6 The relationship between electrical conductivity determined using a probe (EC_s) against that of the soil solution (EC_e) determined in the laboratory.

(a) With EC_s data

(b) は EC_e によるものである。なお、 EC_e については、前節で求められた校正係数を用いて再度算出した。

データの可視化方法には、多様な種類があると思われるが、本報告では、土壌中の塩類集積状況を比較するために、レイヤ毎に2次元マップを作成し、重ねる方法を選択した。各レイヤの2次元マップの作成には、地下水位マップの作成と同様に、GISソフト(ESRI社製、ArcViewGIS 3.2)を使用し、データ補間にはIDW補間法を採用した。電気伝導度の分布は、電気伝導度の最大値であった 90 dS m^{-1} から 0 dS m^{-1} までグレイスケールのグラデーションで示した。

Fig. 7(a) と Fig. 7(b) を比較すると、 EC_s 算出のための校正係数を更新したこともあり、電気伝導度は似た傾向を示したと思われる。なお、土壌サンプリングから求めた EC_e のマップは、地下水位が高い地点にて深部の土壌サンプルの採取が行えなかったため、80 GL-cm 以深のマップが作成できず、表示していない。このことから、地下水位以下の電気伝導度が把握可能な開発したセンサの有効性が確認できる。このように3次元的な可視化方法を用いることにより、対象地域の塩類の集積状況が容易に把握できると考えられる。具体的には、ユーカリ植林地の東側の草地から水田にかけての地域は、非塩類土壌であることがわかる。また、水溜りの周囲は、深部に渡り強塩性土壌が分布しており、水田北側 (Site 20) 周辺では、表層に強塩類土壌が分布していることが見受けられる。

次に、現地での深さ毎の電気伝導度データおよび計測地点の位置データの取得から、この3次元マップ作成までに掛かる時間について考察する。本論文にて提案している手法では、前述のように深さ方向の電気伝導度の把握に、著者らが開発した電気伝導度センサを用いている。この手法は、土

(b) With EC_e data

Fig. 7 Comparison of salt distribution maps for electrical conductivity determined using the probe and from soil solutions.

壤サンプルを採取する方法とは異なり、現場にて値を得ることができることから、計測時間の面で大きなアドバンテージがある。具体的には、本実験では、各計測地点にて 10 cm ごとに 100 cm まで 10 層の電気伝導度を得る所要時間は、センサが試作段階であったものの、約 15 分であった。したがって、実験区内の 22 カ所の計測地点で電気伝導度データを得るために要する時間は、約 6 時間となる。その後、ラボにて、位置情報の補正を施し、深さ方向の電気伝導度と組み合わせ 3 次元マップを作成することになるが、おおよそ 1 日分の作業と見なすことができる。土壌サンプルを採取しラボにて測定した電気伝導度を用いても Fig. 7(b) のように同様のマップが作成可能であるが、費やされる作業時間の差があることは否めないと思われる。具体的には、EC_e の測定の際に飽和抽出液を作成する必要があるが、通常この作業は遠心分離機により 60 分間遠心力をかけることで実施される。ここで、遠心分離機に一度に設置できるサンプル数を 10 としても、本実験で議論したサンプル数 (22 地点×10 サンプル) の飽和抽出液を作成し、電気伝導度を得るには、少なくとも 24 時間程度の作業となる。その他、現地での土壌のサンプリング作業や、実験室での前処理などを考慮すると、作業時間だけでなく労力に大きな差があるのは歴然であろう。

以上のことから、本論文で提案している手法は、地域に広く設定された計測地点の電気伝導度の取得が容易であり、経時的な計測も可能であると言える。本論文で示したような対象地域の 3 次元塩類分布マップが経時的に作成できると、地域の土壌中における塩類動態の把握が容易になると考えられ、塩類集積状況の把握や、塩害対策技術の評価などに、大いに寄与することができると思われる。ある地域における塩類動態の把握を実際に実施することが、本研究の次のステージである。

摘 要

本研究では、地域レベルの 3 次元の塩類動態を経時的に把握することができる手法を提案した。この手法を用いて、東北タイの塩類集積が発生している地域にて現地実験を行った結果、以下の結果を得た。

(1) 試作した鉛直型電気伝導度センサは、地下水位以下の土層においても計測可能であり、さらに土壌サンプルから得た電気伝導度と比較すると、信頼性が高い値を出力していることが確認できた。

(2) 提案した手法をもちいて、実験地域の 3 次元電気伝導度マップが作成できることを示し、その結果から、地域の塩類集積の状況が確認できた。

(3) このマップ作成の時間について考察したところ、計測開始からマップ作成まで、おおよそ 1 日で作業を完了できることから、経時的な観測活動に適しているものと示唆された。

(4) 提案した手法により、地域の 3 次元の塩類動態が経時的に把握されれば、塩類集積の防止策や塩類土壌修復方法の評価や、塩類集積メカニズムの解析などに貢献できる可能性が示唆された。

謝 辞

おわりに、本研究の遂行にあたり甚大なご協力をいただいた東京農業大学学部生 岡田俊輔君 (現生研センター)、古屋圭章君 (現べんてる株式会社) および東北タイ農業開発センター (ADRC) の方々に感謝の意を捧げる次第であります。

引用文献

- Anase, M., Ai, F., Narioka, H., Fukumura, K., Sugi, S. 1997. Study on the production environment improvement for the saline soil area -The case of Khon Kaen, Northeastern Thailand- (in Japanese). Bulletin of NODAI Research Institute Tokyo University of Agriculture. 8: 8-21.
- Edlefsen, N.E., Aderson, B.G. 1941. The four-electrode resistance method for measuring soil moisture content under field conditions. Soil Sci. 51: 367-375.
- Hong, Y., Tatsuno, J., Nakamura, T., Tajima, K., Tamaki, K. 2006. Performance of a vertically-employed electrical conductivity probe-Measurement of electrical conductivity dynamics in saturated soils- (in Japanese). J. SHITA 18(1): 28-34.
- Hong, Y., Tatsuno, J., Tajima, K., Sekiyama, T., Tamaki, K. 2002. Development of an electric conductivity sensor for saturated saline soil and application to field measurement (in Japanese). Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn. 56(5): 393-401.
- Miura K., Subhasaram, T. 1991. Soil salinity after deforestation and control by reforestation in northeast Thailand. Trop. Agric. Res. Ser. 24: 186-196.
- Narioka, H., Anase, M. 1991. Circumstances and conservations of inland saline soils in Thailand (in Japanese). J. JSIDRE 59(11): 1257-1262.
- Tatsuno, J., Hashimoto, Y., Tajima, K., Oishi, T., Dissataporn, C., Yamcle, P., Tamaki, K. 2005. Reclamation of saline soil in northeastern Thailand using a solar-powered pump to control groundwater Levels. Environ. Control Biol. 43(3): 155-163.