

## 海岸林を対象にした地中レーダによる土壌探査に関する研究

工藤勝輝<sup>1</sup>・西川 肇<sup>2</sup>・藤井壽生<sup>2</sup>

### Research concerning soil profiling using ground penetrating radar in coastal forests

Katsuteru Kudoh<sup>1</sup>, Hajime Nishikawa<sup>2</sup> and Hisao Fujii<sup>2</sup>

**Abstract:** Remote sensing technology using earth observation satellites and ground penetrating radar are employed as a method for surveying the growth and soils of coastal forests. Surveys of vegetation and forest soil using these technologies use data in which the physical quantities of the reflection characteristics of above ground and underground electromagnetic waves are the criteria. These technologies not only enable objective surveys founded on a scientific basis, they also offer the advanced capability to provide information in a visual format for evaluation. This research evaluated the results of explorations of forest soils in the Kujukuri coastal black pine forests using ground penetrating radar compared with the results of onsite research into soil structure and for root system distribution.

**Keywords:** Coastal forest, ground penetrating radar, a root system

#### 1 はじめに

海岸林の生育状態は気象などの自然的条件や密度管理などの人為的条件によって左右されるが、林地土壌の過湿化、病虫害および臨海開発などに起因する樹勢の衰退などにより、海岸林が本来持つ防災機能や景観的価値の保持が懸念される林分も増えつつあるように思える。このような現状に対処するには、適切な海岸林の生育状態や林地土壌をモニタリングする継続的な現地調査が必要である。しかしながら、線形的に長く分布する海岸林を対象にした生育や土壌の調査には、現在の労働環境や経費の面からもかなり困難な作業になるうへ、経験的に養われた専門的技術も要求される。近年、海岸林の樹木の生育や土壌の状態を調査する手法として、地球観測衛星や地中レーダを利用したリモートセンシング技術が活用され始めている<sup>1,2,3</sup>。これらの技術を利用した植生や林地土壌に関する調査は、地表や地下の電磁波反射特性という物理量を尺度とした情報を利用しており、コンピュータ処理による迅速で機械的に判読する点においては既往の調査法とは異質である。さらに、この技術は光学的特性という科学的根拠

に基づいた客観的な視点で調査するだけではなく、必要な情報を可視化して評価するという先進性も有している。

本研究は、これまで事例の少ない地中レーダによる地中探査を九十九里海岸クロマツ林で試み、現地調査で把握した土壌構造や根系分布データをもとに、林地土壌を地中レーダで探査し、その結果を評価した。

#### 2 研究の方法

図1は、地下水の上昇によって過湿化している白子町付近の九十九里海岸クロマツ林の林地土壌を対象にした、地中レーダによる土壌探査に関する本研究のフローチャートを示したものである。本研究では、地中レーダで探査した土壌断面の媒質境界面の電磁波反射波

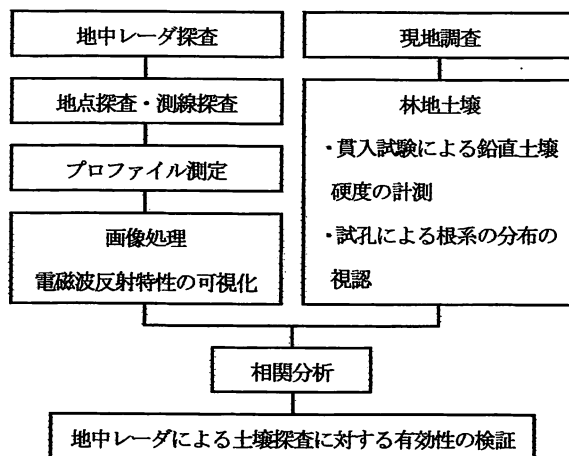


図1 本研究のフローチャート

<sup>1</sup> 日本大学生産工学部准教授 Associate Professor, College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumityo, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

<sup>2</sup> 日本大学生産工学部教授 Professor, College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumityo, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

形と現地調査で計測した鉛直硬度分布と根系分布とを対比・分析する手法によって、林地土壌に対する地中レーダ探査の実用性を検証した。本研究で対象にした海岸林、地中レーダ探査および現地調査などの概要は、以下のとおりである。

## 2.1 研究対象海岸林

写真1は2006年8月4日に日本のALOS衛星(だいち)が観測した研究対象海岸林の衛星画像を示したものである。

本研究で対象にした九十九里海岸クロマツ林は、千葉県房総半島外房の飯岡町から一宮町まで南北に約56kmにわたって90から130mの林帯幅で分布する我が国では有数の長い砂浜海岸である。ALOSは我が国が打ち上げた最新の地球観測衛星で、本衛星画像を作成したAVNIR2データの地表解像度は10mと高く、植生調査などへの利用価値が高い衛星データである。

衛星画像の赤系統に発色している地域は裸地や建物などに対応し、緑系統に発色している地域は植生に対応しており、海岸に沿って線形的に分布している植生域が海岸林である。海岸林の色調の変化を詳細に見ると、緑の濃い部分と薄い部分に発色している個所が判読できる。濃い緑域は疎林していないクロマツの林分であるが、薄い緑域は林地土壌の過湿化によって疎林化あるいは無立木地に生育している湿生植生である。

白子町付近の海岸はごく一部の凹地で未分解の植物遺体の堆積からなる低位泥炭が不透水層あるいは難透

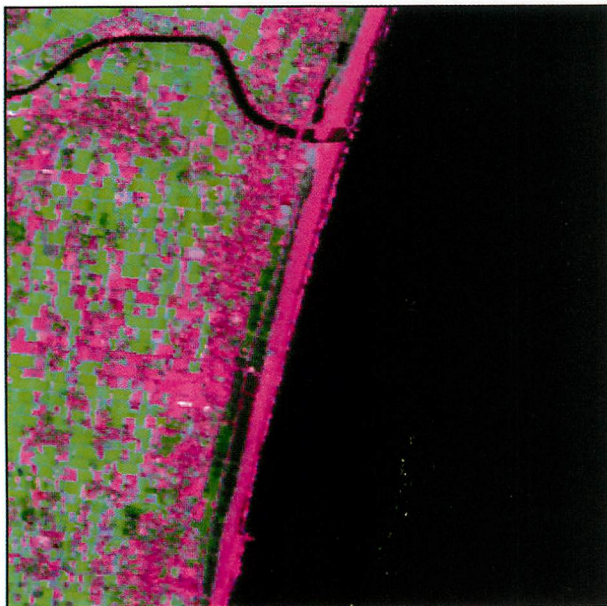


写真1 九十九里海岸林のALOS画像

水層を形成しており、いずれも均質な粗砂あるいは細砂で構成されていることから、地表面の滞水は地下水の水頭が地表に現れ<sup>4)</sup>、湿地化による無立木地や大雨後の滞水現象が生じ、1980年代から集団枯損の発生が顕著となった<sup>5)</sup>。この集団枯損は、高い地下水位のために酸素不足に起因した根腐れによって根系分布が著しく制限されるために生じ<sup>6)</sup>、陸側林縁は湿地帯となっており現況以上の伸長成長は期待できないと考えられている<sup>7)</sup>。

写真2および図2は、過湿化によって無立木地化して湿地植生などが生育している状況および現地調査で対象にした林地土壌の位置を赤丸と赤線で示したものである。図2赤丸は根系の分布が存在している立木に接した林地土壌に設置した調査地点であり、赤線は事前の地中レーダ探査で点状反射物の存在が認められなかった海岸林内を横断している道路に設定した調査測線の位置である。



写真2 九十九里海岸林(白子町付近)の疎林

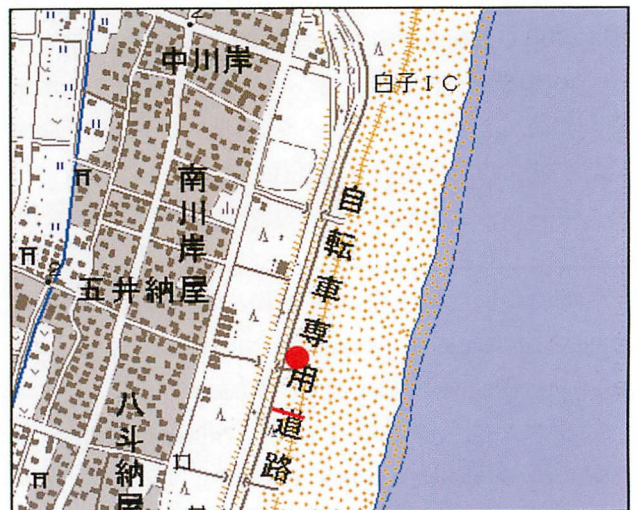


図2 調査地点および調査測線の位置

## 2.2 地中レーダ探査

地中レーダは地表面から地中に電磁波を放射し、電磁波の反射・屈折・透過などの物理学的現象を利用して地中の状態を探査する非破壊検査の手法である<sup>8)</sup>。地中を伝搬する電磁波は、主に誘電率の変化する媒質境界において反射する。このような境界面は砂質地層と粘性土層、地下浸潤面、断層面などの地層面が考えられ、これらの媒質境界面が地中レーダで捉えられることになる。地中レーダによる地中探査では、媒質の誘電率が最も重要なパラメータになっている。誘電率は媒質の種類、含水状態により大きく変化し、水の比誘電率は81と他の物質に比べて大きい値であるため、含水量の変化が媒質の比誘電率を大きく変化させることが特徴的である<sup>9)</sup>。なお、海岸林地を構成している砂質土壌の比誘電率は、乾燥した砂が4から6、湿潤の砂が15から30である。本研究で用いた地中レーダはGSSI社製のSIR3000システムで、送信アンテナと受信アンテナを内蔵した一体型のケース、地中の媒質境界面から反射してくる反射波を表示するディスプレイ、などから構成されている。また、地中レーダで探査したデータの解析ソフトとしては、RADAN Windows版、Ver6.5を利用した。図3は、地中レーダの基本的なシステム構成の概要を示したものである。

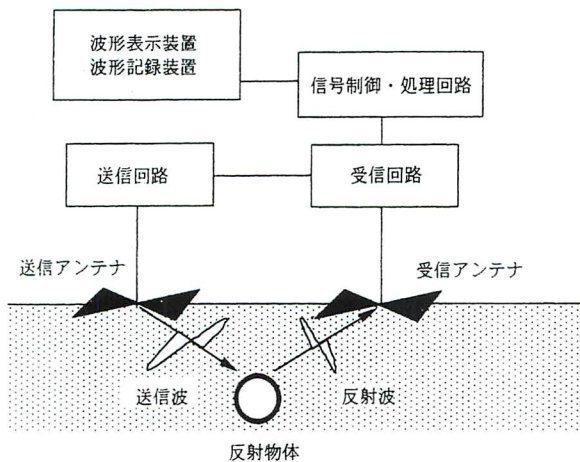


図3 地中レーダのシステム構成

### (1) 探査手法

地表面から地中を探査する手法は、送・受信アンテナ間隔を一定に保ちながら移動させて電磁波の反射特性を記録するプロファイル測定と送・受信アンテナ間隔を離しながら電磁波の反射特性を記録するワイドアングル測定がある。本研究では、900MHz アンテナを使った

プロファイル測定によって林地土壌内の媒質境界面から反射してくる電磁波の反射率(振幅)を探査した。プロファイル測定では、土壌構造を反映した反射断面記録(時間断面)が可視化して記憶媒体に記録される。写真3は、地中レーダによって海岸クロマツ林で林地土壌を探査している状況を示したものである。



写真3 地中レーダの現地探査状況

### (2) 探査記録の見方

写真4は、クロマツの根系の分布が認められる地盤(東京都江戸川区・善養寺境内)の地中レーダによるプロファイル測定記録例を示したものである。

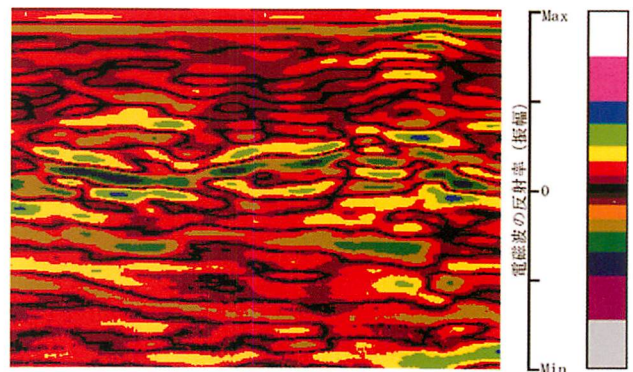


写真4 地中レーダの探査記録例

反射断面記録に現れる反射波形は波のアンテナリング(方形波などの急峻な変化をする信号が回路網を通過したときに生じる波打った波形)があるので、3,4波を1組としての連続性から、連続した反射波を境界面(反射面)と解釈する。この連続した反射波は、空洞・埋設物などの点状反射体が地中に存在する場合は途切れた上向き双曲線波形などの強い反射パターンとなり、地盤に層構造が存在する場合は途切れず連

続いて緩慢な波動を示す反射パターンとなって反射断面記録に現れる。媒質境界面からの反射波形は、反射波の大きさ、形状、および深さに応じて記録され、利用したレーダの反射波の反射率(振幅で表示される受信電圧)の絶対値の大きさに応じた16段階のカラー色でラインスキャン表示される。

## 2.3 現地調査

### (1) 貫入試験による土壌の鉛直硬度分布の計測

貫入試験は、土壌の硬さを連続的に計測する試験で、樹木の生育に関わる根系の発達に必要な有効土層の厚さを調べるものである。

本研究では、大島造園土木(株)製の長谷川式土壌貫入計を用いて林地土壌の鉛直硬度分布を計測した。図4は長谷川式土壌貫入計の概略図を示したもので、2kgの落錘を50cm落下させ、そのエネルギーで先端のコーンを土中に貫入させた時の貫入値(cm/drop)を直読する構造となっている。

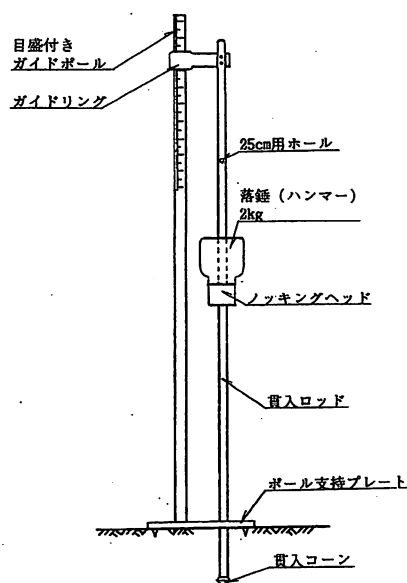


図4 長谷川式土壌貫入計

樹木は林地に根を張って土壌内の養水分や酸素を得て成長しているので、樹木の生育にとって林地土壌の厚さや硬さは大変重要である。生育が良好な海岸林が維持されるためには、林地土壌の生育に必要な根系が伸長し得る硬さを持つ土層厚がなくてはならず、このような土壌層を有効土層と言う<sup>11)</sup>。表1は、長谷川式土壌貫入計で計測された「土壌への貫入値」と「根系の発達状態との関係」を示したものである<sup>12)</sup>。本研究では、この関係を基に1.5から4.0(cm/drop)の貫入量(軟

表1 土壌硬度と根系発達の関係

貫入値(cm/drop)	根系の発達状況
0.7 以下	多くの根が侵入困難
0.7 から 1.0	根系発達に阻害あり
1.0 から 1.5	根系発達阻害樹種あり
1.5 から 4.0	根系発達に阻害なし
4.0 以上	膨軟過ぎ

らかさ)を持つ土層を細根が発達する有効土層と定義した。

### (2) 試坑による根系分布の計測

林地土壌を地中レーダで探査した個所で垂直に掘削した試坑から見た土壌断面を対象に、林地土壌内の根系の分布形態を計測した。

## 3 本研究の結果と考察

九十九里海岸クロマツ林を対象にした現地調査および地中レーダ探査の結果は以下のとおりである。

### 3.1 根系が存在する林地土壌の現地調査データ

図5は、「根系の分布が認められる調査測線を地中レーダで探査した林地土壌の反射断面記録」、「貫入試験で計測した林地土壌の鉛直硬度分布」および「地中レーダ探査した土壌断面の試坑における根系分布」を示したものである。なお、地中レーダ探査による反射断面記録は媒質境界面から反射してくる微細な電磁波を自動増幅してあるので、電磁波反射特性を波形で分類評価は可能であるが、振幅の違い(色調の違い)で分類評価することはできない。

#### (1) 地中レーダ探査記録

地中レーダ探査で得られた断面反射記録から判読した媒質境界面からの電磁波反射波形は、以下のとおりである。

- ① 地表から5cm深の土層に、線状の反射波形が密に分布した。
- ② 5から30cm深の土層に、上向きの大きな双曲線波形や線状の反射波形が混在して分布した。
- ③ 30から85cm深の土層に、上向きの途切れた双曲線波形や線状の反射波形が混在して分布した。
- ④ 85cm以深の土層に、粒状のノイズを含んだ波動する反射波形が密に分布した。

なお、土壌深部に現れた粒状のノイズは、媒質境界から反射してくる電磁波の振幅を自動増幅して探査する際に探査限界深付近に現れるもので、土壌の物理量には関係しない。

## (2) 林地土壌の鉛直硬度分布

長谷川式土壌貫入計で計測した林地土壌の鉛直硬度分布は、以下のとおりである。

- ① 地表から 10cm 深までの土層は、土壌内で最も軟らかい 6.0 (cm/drop) の貫入値を示した。
- ② 10 から 30cm 深までの土層は、根系発達に阻害なしと判定される 1.5 から 4.0 (cm/drop) の貫入値を示した。

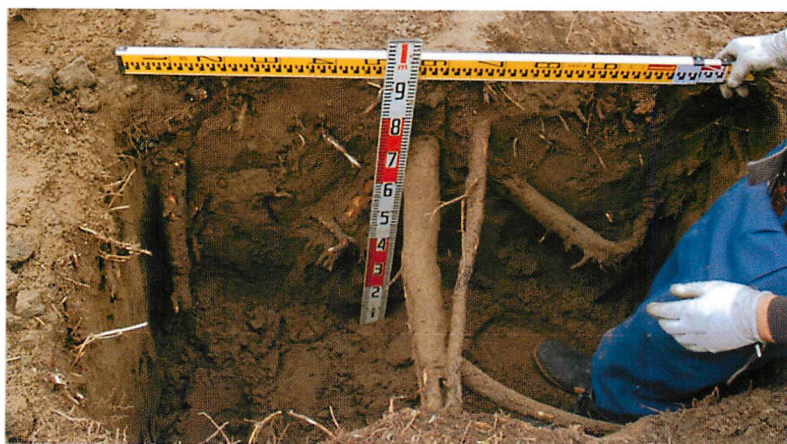
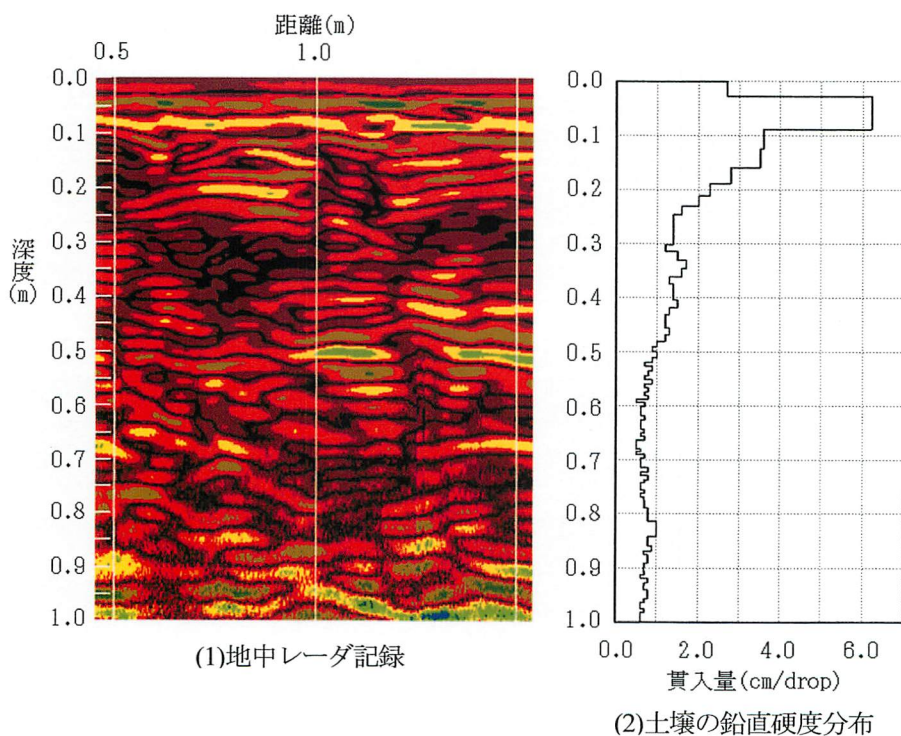
③ 30 から 50cm 深までの土層は、根系発達阻害樹種ありと判定される 1.0 から 1.5 (cm/drop) の貫入値を示した。

④ 50cm 以深の土層は、85cm 深付近を除いて多くの根が侵入困難と判定される 0.7 (cm/drop) 以下の貫入値を示した。

## (3) 林地土壌の根系の分布

林木に接して掘削した試孔で確認した土壌断面の根系の分布は、以下のとおりである。

① 地表から 25cm 深の土層に、1cm 以下の根を含めた 2mm 以下の細根が密集した分布が認められた。なお、細根の最深分布は 85cm 深付近であった。



(3) 土壌断面

図5 調査地点における地中レーダ探査結果

② 25 から 70cm 深の土層に、最大直径が約 15cm 以下の水平根が 6 本伸長している状態と僅かな細根の分布が認められた。

レーダ探査で地中に根系の分布の存在を示す電磁波反射記録が得られなかったため、試孔による根系の分布の確認は実施しなかった。

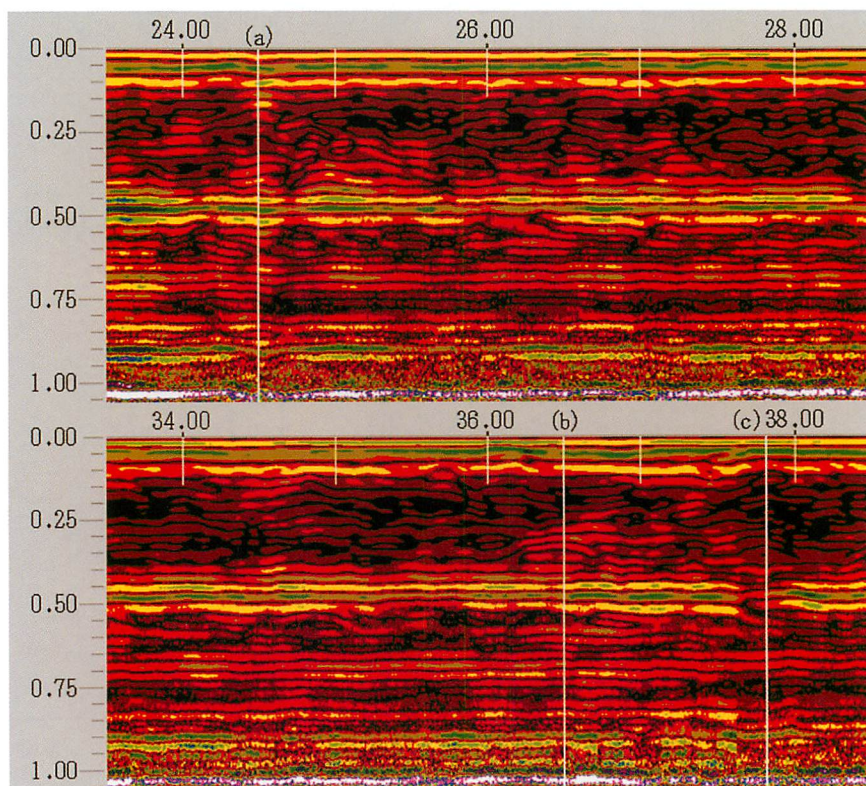
### 3.2 根系が存在しない林地土壌の現地調査データ

図 6 は「根系の分布が認められない調査測線を地中レーダで探査した林地土壌のプロファイル測定記録」および「調査測線上に設定した 3 地点(a, b, c 点)において貫入試験で計測した林地土壌の鉛直硬度分布」を示したものである。なお、調査測線において事前の地中

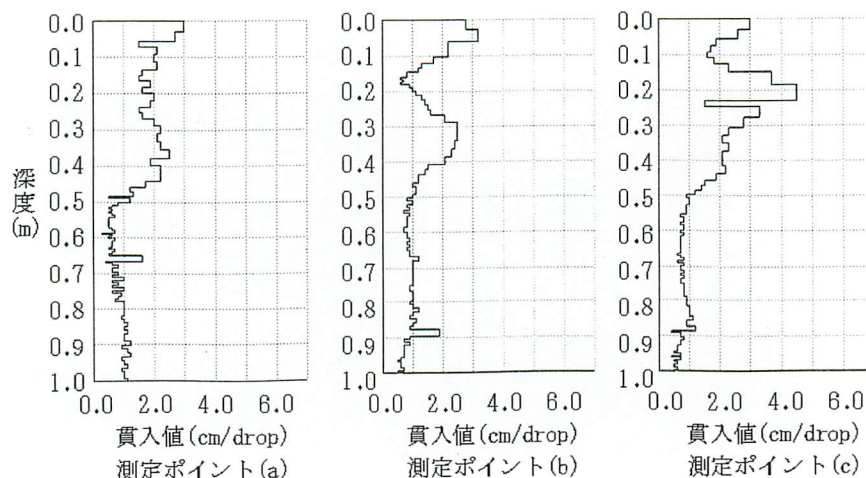
#### (1) 地中レーダ探査記録

地中レーダ探査記録に現れた林地土壌の電磁波反射波形は、以下のとおりである。

- ① 地表から 10cm 深の土層に、線状の反射波形が密に分布した。
- ② 10 から 45cm 深の土層に、非連続的な反射波形や波



(1)地中レーダ記録



(2)土壌の鉛直硬度分布

図 6 調査側線における地中レーダ探査結果

動する連続的な反射波形が混在して分布した。

③ 45 から 55cm 深の土層に、線状の 3, 4 波が 1 組となった反射波形が密に分布した。

④ 55 から 85cm 深の土層に、線状の反射波形が密に分布した。

⑤ 85cm 以深の土層に、粒状のノイズを含んだ直線的な反射波形が分布した。

## (2) 林地土壌の鉛直硬度分布

長谷川式土壌貫入計で計測した林地土壌の鉛直硬度分布は、以下のとおりである。

①地表から 5cm 深の土層は、土壌内で最も軟らかい 3.0(cm/drop)の貫入値を示した。

②5 から 45cm 深の土層は、1.5 から 3.0(cm/drop)の貫入値を示した。

③45 から 65cm 深の土層は、0.5(cm/drop) の貫入値を示した。

④65cm 深付近の土層は、周辺より軟らかい 1.5(cm/drop)の貫入値を示した。

⑤85cm 以深の土層は、1.0(cm/drop) の貫入値を示した。

## 3.3 地中レーダ探査のまとめ

図7は、「林地土壌の地中レーダ探査記録」に「現地調査で計測した土壌構造」および「試杭で計測した根

系分布」をオーバーラップさせて示したものである。

本図から読取った地中レーダ探査で記録される「媒質境界面の電磁波反射波形」と「土壌構造および根系分布」との関係は、以下のとおりである。

(1)途切れた上向きの変曲線波形は、水平根系の位置を示す。

(2)上向きの変曲線波形および線状の反射波形が密に混在している層は、細根が集中して分布する土層(有効土層)を示す。

(3)周辺の電磁波と振幅が強い線状の反射波形は、土壌硬度が異なる境界面を示す。

## 4 まとめ

地下水位が高く停滞水によって過湿になりやすい砂地では、通気不良と水分過剰によって根系の生長は阻害され、根系は深部から腐朽する<sup>13)</sup>。また、低湿地の下層では、地下水位の変化にともなって根端の生長と枯損が繰り返され、地下水位が高くて過湿なところでは垂下根の発達が阻害され、通気が良い表層の水平根の生長が著しい<sup>14)</sup>。過湿化した林地土壌において樹根が横および分岐して伸長している様子は、根系分布が存在する土壌断面で確認できる(図5参照)。白子町付近の九十九里海岸クロマツ林の加湿土壌を対象にした地中レーダによる探査結果をまとめる。

(1) 過湿化した海岸林の土壌構造や根系分布を地中レ

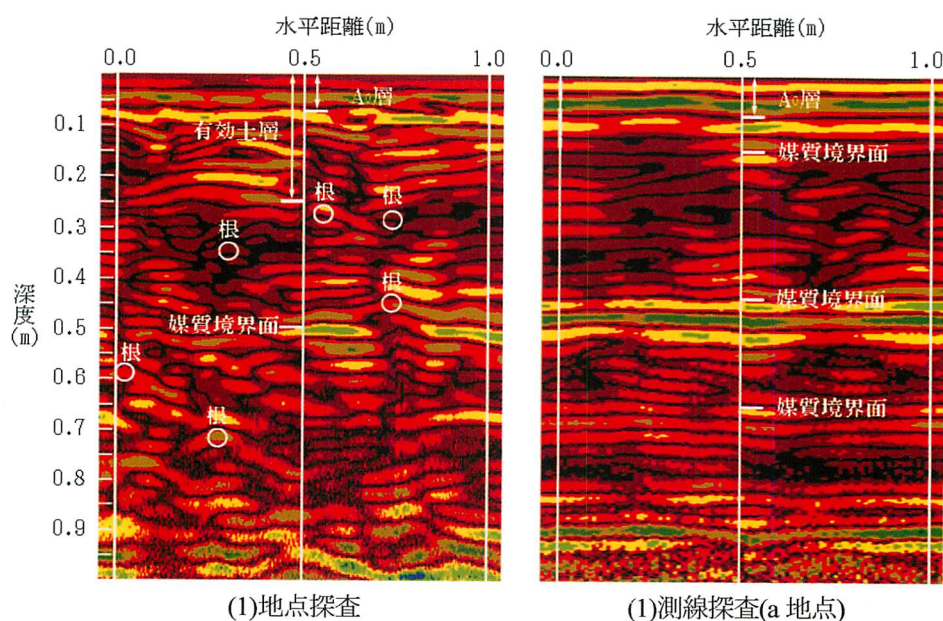


図-7 地中レーダの反射波形から判読した土壌構造

ーダで探査する場合は、媒質境界面から反射してくる電磁波の振幅を強調した電磁波反射波形の記録する手法が適する。

(2) 土壌硬度の異なる土層の境界面は連続する直線状の緩慢な波動、根のような点状反射体は上向きの途切れた双曲線状の波動する電磁波反射波形となる。

(3) 根系が存在する林地土壌の地中レーダ探査の反射断面記録は、連続する直線状の緩慢な波動や途切れた上向きの双曲線状の波動が混在した分布が現れる (図5 参照)。

(4) 根系が存在しない林地土壌の地中レーダ探査記録の反射断面記録は、連続する緩慢な波動が平行した分布が現れる (図6 参照)。

(5) 地中レーダ探査による反射断面記録は、現地調査で計測した林地土壌の土壌構造(特に有効土層)や根系分布と良く一致した。

以上の探査結果から、地中レーダ探査は均一な砂質地層で形成されている海岸林の林地土壌の状態を調査する手法として利用できる有効性を検証することができた。地中レーダは土壌水分の状態を高精度で探査できることも知られており、地中レーダで探査した過湿土壌における鉛直含水分布を基に、地下水位上昇が根系伸長に及ぼす影響を今後の研究課題としたい。

## 謝辞

本研究で行なった地中レーダ探査ならびに現地調査にあたり、千葉県北部林業事務所のご協力を頂いた。また、日本大学生産工学部土木工学科河川・測量研究室スタッフに多大なご協力を頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

## 引用文献

[1] 西川 肇・藤井壽生・工藤勝輝・近田文弘：衛星

データを用いた房総半島スギ林と地質の相関解析, 土木学会論文集, NO. 671/IV18, (2001)

[2] 工藤勝輝・西川 肇・藤井壽生・近田文弘：房総半島クロマツ海岸林の衛星リモートセンシングに関する研究, 海岸林学会論文集, 第 5 巻, 第 2 号, pp. 714, (2006)

[3] 露木延夫・近藤 勉・西川 肇・木田哲量・藤井壽生・今野 誠：地中レーダで探査した電磁波反射特性に基づく森林土壌特性の評価, 土木学会論文集, No. 79, /VII32, pp. 1118, (2004)

[4] 千葉県森林研究センタ：千葉・山武：海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と樹林帯造成法に関する研究, 千葉県森林研究センタ特別研究報告書, pp. 34, (2001)

[5] 千葉県農林部林務課：海岸林保安管理基本計画, pp. 131, 175, (1997)

[6] 小田隆則：九十九里浜クロマツ林における集団枯損の立地要因, 日本砂丘学会誌, pp. 9, (2001)

[7] 千葉県農林部林務課：海岸林保安管理基本計画, pp. 43, (1997)

[8] 地盤工学会：地盤工学への物理探査技術の適用と事例, pp. 384, (2001)

[9] 地盤工学会：地盤工学への物理探査技術の適用と事例, pp. 385, (2001)

[10] 大島造園土木緑化・土研究所：長谷川式土壌貫入計取扱い説明書, pp. 2

[11] 小橋済治, 村井 宏, 亀山 章, 編：環境緑化工学, 朝倉書店, pp. 127, (1992)

[12] 長谷川秀三, 他：日本造園学会春期大会研究発表要旨, pp. 43, 44, (1981)

[13] 苅住 昇：新装版 樹木根系図説, 誠文堂新光社, pp. 250, (1987)

[14] 久馬一毅, 編：土壌の辞典, 朝倉書店, pp. 283, (1993)

[受付 平成19年1月19日, 受理 平成19年6月23日]