J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 124, p.11 ～ 16 (2013)

JpGU 特集
論　文
Original Paper

異なる水分条件を有する砂の熱特性：粒子の粒径・形状，および石英含有率の影響

鴨志田剛久 [1]・濱本昌一郎 [1,2]・川本　健 [1,2]・榊　利博 [3]・小松登志子 [1,2]

Thermal properties of sands at variably-saturated condition: Effects of particle size and shape, and quartz content

Takahisa KAMOSHIDA[1], Shoichiro HAMAMOTO[1,2], Ken KAWAMOTO[1,2], Toshihiro SAKAKI[3], and Toshiko KOMATSU[1,2]

Abstract: Thermal properties of sands with different particle size and shape were measured. All sands showed the similar trend for the change in heat capacity, increasing with increasing in water content (θ).The gradient of the thermal conductivity (λ) to θ under the dry region ($\theta < 0.05 \sim 0.10$) increased with increasing particle size for sands with rough shape, indicating an increase in contact points per soil particle highly enhanced thermal conduction. Oppositely, for the wet region ($\theta > 0.05 \sim 0.10$), the gradient of λ to θ were similar for sands with different particle size. Equations of λ at completely dry condition and water saturation were derived from obtained relationships between quartz content and λ in this study. By inserting these equations, existing models for thermal conductivity were modified, which markedly improved model performances.

Key Words : thermal properties, sand, particle size, particle shape, quartz content

1. はじめに

土壌中の熱移動現象の理解は，農地における適切な作物管理，廃棄物処分場における安定化促進，汚染土壌の原位置熱処理の最適化などの観点から非常に重要である．土壌中の熱移動現象は，熱伝導率や体積熱容量といった熱特性によって表現される．土壌の熱特性は，水分量や乾燥密度などの土壌の物理特性に大きく影響を受ける．一般的に，土壌の熱伝導率および体積熱容量は水分量の増加とともに増加し，特に熱伝導率は，絶乾状態から一定水分領域までで急激に増加することが知られている．また，固相は液相・気相に比べ熱伝導率が非常に高く，乾燥密度の上昇にともなう固相率の増加は熱伝導率を増加させる（van Rooyen and Winterkorn, 1959; Abu-Hamdeh and Reeder, 2000）．一方，体積熱容量においては，固相は液相よりも比熱が小さいため，乾燥密度（固相率）の増加は同体積含水率で体積熱容量の低下を導く（de Vries, 1963）．土性の違いも熱伝導率に大きく影響し，同体積含水率条件で，砂分が多い試料ほど熱伝導率は高く，粘土分や有機物含有量が高いほど熱伝導率が低いことが知られている（van Duin, 1963）．

土壌の物理特性に加え，土粒子の微細構造や土粒子の鉱物組成，すなわち土粒子の粒径・形状や石英含有率も土壌中の熱特性，特に熱伝導率に大きく影響を与える要因の一つである．粕淵（1982）は 2 種類の粒径のガラスビーズにおける熱伝導率の水分依存性について調べ，低含水域では粒径の大きなガラスビーズの方が熱伝導率は高い一方で，高含水域では粒径の小さなガラスビーズの方が熱伝導率は高くなることを示した．Smits et al.（2008）は，粒径の異なる 4 種類の均質な砂試料を用いて熱伝導率の水分依存性を調べ，乾燥密度の違いに比べ粒径の違いが熱伝導率に与える影響は小さいことを報告した．Midttomme and Roaldset（1998）は，粒径の異なる石英砂を用いて熱伝導率を測定し，粒径が小さくなるに従い熱伝導率が低下する結果を得た．この理由として粒径が小さい試料ほど，熱移動の抵抗となる土粒子間の接触が増加するためと説明している．土粒子の粒子形状の違いは，土粒子同士の接点数や連結性に影響を与える．また，石英などの一次鉱物は，粘土鉱物などの二次鉱物に比べ熱伝導率が高いため，石英含有率の増加は試料中の熱伝導率を増加させる．このような粒子の粒子形状や石英含有率の影響については，既往の熱伝導率予測モデルの中でモデルパラメータとして組み込まれている（de Vries, 1963; Johansen, 1975）．

上記のように，土粒子の粒径・形状，石英含有率は土壌の熱特性に大きく影響を与えるものの，これらの要因が熱伝導率に与える複合的な影響については十分理解され

[1]Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama 338-8570, Japan. Corresponding author : 鴨志田剛久，埼玉大学大学院理工学研究科
[2]Institute for Environmental Science and Technology, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama 338-8570, Japan.
[3]National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Hardstrasse 73, 5430 Wettingen, Switzerland.
2012 年 10 月 16 日受稿　2013 年 1 月 28 日受理

Table 1 砂試料の物理特性.
Physical properties for sands.

Sample	Particle size d_{50} (mm)	Porosity Φ (m^3 m^{-3})	Particle density ρ_s (Mg m^{-3})	Dry bulk density ρ_b (Mg m^{-3})	Quartz content Q (%)	Roundness R	Sphericity S
Glass beads	0.22	0.40	2.55	1.53	-	1.00	1.00
	0.53	0.40	2.62	1.57			
Accusand	0.36	0.33	2.66	1.77	99.8	0.80	0.80
	0.53	0.33	2.65	1.79			
	0.71	0.32	2.65	1.80			
	1.11	0.32	2.65	1.81			
Narita	0.18	0.40	2.70	1.62	33.7	0.30	0.73
	0.34	0.40	2.63	1.58			
	0.64	0.40	2.60	1.56			
Granusil	0.20	0.40	2.65	1.60	77.4	0.20	0.70
	0.31	0.39	2.66	1.61			
	0.50	0.39	2.66	1.61			
	0.72	0.39	2.65	1.62			
Toyoura	0.19	0.40	2.64	1.58	75.0	0.25	0.74

ていない．これらの影響を正確に把握することは，土壌の物理的特性に加え土粒子の微細構造を考慮した，より精度の高い熱特性予測モデルの構築を目指す上で非常に重要である．従って本研究では，粒径，形状，石英含有率の異なる砂試料を用いて砂の熱特性を測定し，土粒子の微細構造や鉱物組成の違いなどの様々な要因が熱特性の水分依存性に与える影響を調べることを目的とした．また，実測データに既往の予測モデルを適用するとともに，そのモデルに改良を加えその適合性を検討した．

2. 方法

2.1 試料

本研究では，形状および粒径の異なる砂試料として，ガラスビーズ（平均粒径 0.22，0.53 mm），Accusand（平均粒径 0.36, 0.53, 0.71, 1.11 mm），成田砂（平均粒径 0.18, 0.34, 0.64 mm），Granusil（平均粒径 0.20, 0.31, 0.50, 0.72 mm），および豊浦砂（平均粒径 0.19 mm）を用いた（Table 1）．

Table 1 に Accusand, 成田砂，Granusil，豊浦砂の石英含有率 Q を示した．Accusand, 成田砂，Granusil の石英含有率は，偏光顕微鏡を用いて試料中の石英粒子数を観察することで得た．豊浦砂の石英含有率は，Oda（1972）による文献値である．Table 1 の R，S はそれぞれ土粒子の Roundness（円磨度），Sphericity（真球度）を示す．R は Youd（1973）に従い，各試料の最大間隙比または最小間隙比と粒径分布の均等係数から間接的に求めた．その結果，成田砂，Granusil，豊浦砂は R 値が低く，粗い粒子形状を有しており，ガラスビーズ，Accusand は R 値が高く滑らかな粒子形状を有する試料と分類した．S は土粒子を楕円形と見なし，その長軸と短軸の比を表す．S は各試料に対してランダムに選抜した土粒子（100 個程度）に対して，Scion Image （Scion corporation）を用いた画像解析から得られた．S 値は試料間で顕著な違いがみられなかった．

2.2 実験方法

風乾状態の試料を Table 1 に示す乾燥密度で，内径 5.6 cm，長さ 4.1 cm，容積 100 cm^3 のステンレス製円筒容器に充填した．充填は，円筒容器に漏斗を用いて試料を入れ，タッピングによる突き固め操作を 8 回に分けて行った．各試料を水で飽和させた後，所定のサクション（cm）で試料中の土壌水を段階的に排水させた（70 cm まで）．各試料につき実験は 3 反復行った．各サクション段階で，試料の熱特性を測定した．熱特性の測定には，KD2-Pro（Decagon 社製）の 2 線式プローブ（SH-1）を用いた．2 線式プローブは片方のプローブから熱を発生させ，もう一方のプローブで熱応答（熱の到達時間，温度変化）を計測することで熱特性を測定するものである．測定は室温 20 °C の恒温室内で行った．

3. 結果および考察

3.1 土粒子の粒径・形状及び石英含有率の影響

全ての砂試料における熱伝導率 λ と体積含水率 θ の関係および体積熱容量 C と体積含水率の関係を Fig. 1 に示した．一般的な挙動として、熱伝導率は絶乾状態のときには小さいが体積含水率の増加にともなって急激に増加する．また，体積含水率 0.05 ～ 0.10 を境に体積含水率の上昇にともなう熱伝導率の増加率が低下した．この熱伝導率の増加率が変化する点を熱伝導率の変曲点 θ^* と定義した．ガラスビーズは他の砂試料に比べ熱伝導率が低かった．一方で，石英含有率の高い Accusand は，異なる水分条件で他の試料よりも高い熱伝導率を示した．

Fig. 1b に示すように体積熱容量は，試料によらず体積含水率の増加にともない一様に増加した．一般に体積熱容量は各相（固相，液相，気相）の存在割合と比熱の積から求められる．既往の文献値から固相，液相，気相の体積熱容量をそれぞれ 2.1, 4.2, 0 MJ m^{-3} K^{-1} とし（宮崎ら，2005），固相率を 0.6 とした場合の体積含水率に対する体積熱容量の計算結果を実線で表した．絶乾状態，

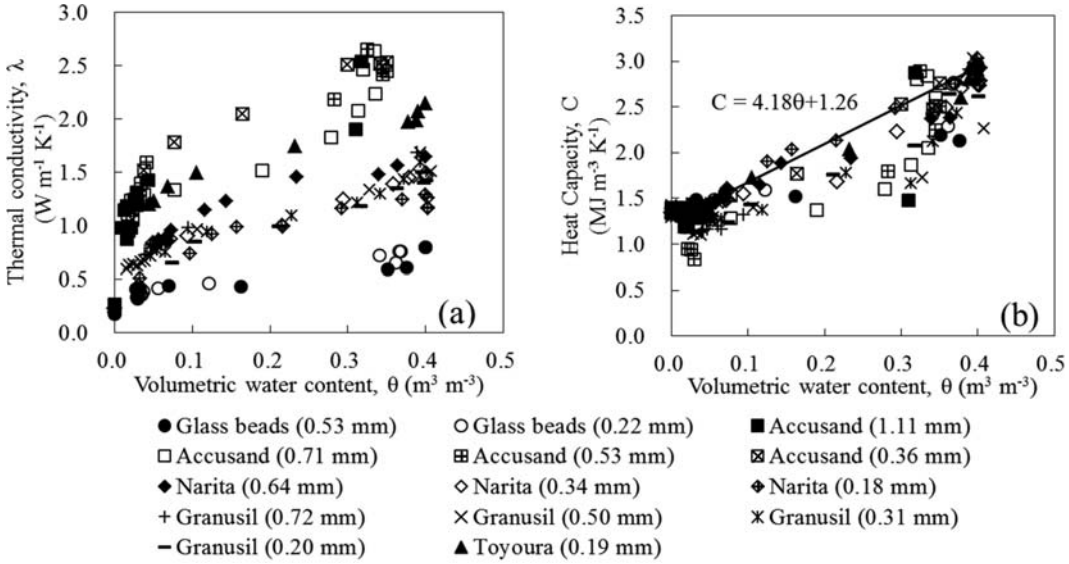


Fig. 1 全試料の (a) 熱伝導率と (b) 体積熱容量.
(a) Thermal conductivity and (b) heat capacity as a function of volumetric water content for all samples.

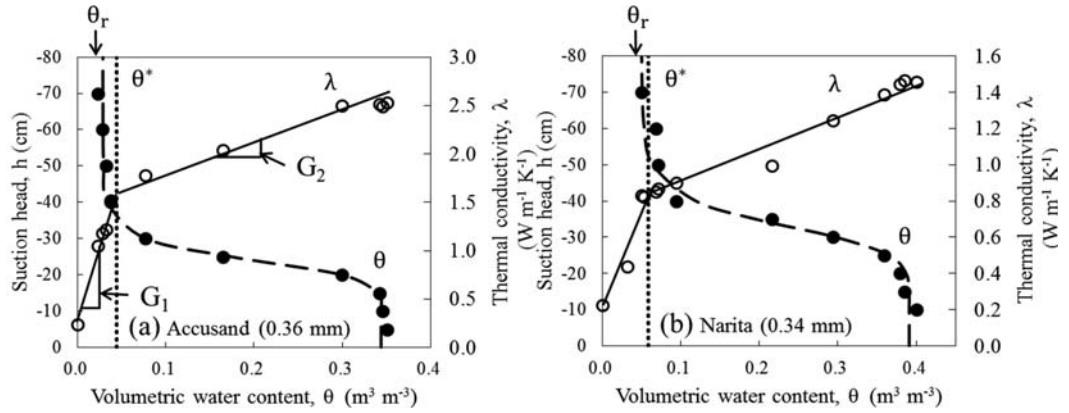


Fig. 2 (a) Accusand (0.36 mm) と (b) 成田砂 (0.34 mm) における熱伝導率の水分依存性と水分特性曲線.
Thermal conductivity as a function of volumetric water content and water retention curves for (a) Accusand (0.36 mm) and (b) Narita (0.34 mm).

飽和状態では実験値と計算値はほぼ同じ値を示したが，体積含水率 0.3 付近では計算値よりも低い値を示している．このことから，周囲の気相の存在により液相の連結性が阻害され，熱移動に寄与しない土壌水が存在することが示唆された．またプローブと試料間の接触が不完全である可能性など，これらの理由についてはさらに検討が必要である．

各試料に対して得られた水分特性曲線と熱伝導率の水分依存性の一例として，Accusand（0.36 mm）と成田砂（0.34 mm）の水分特性曲線と，熱伝導率と体積含水率の関係を Fig. 2 に示す．図中の破線は，水分特性曲線に対する van Genuchten（VG）モデルのフィッティング結果を表す．体積含水率の上昇にともなう熱伝導率の増加率を G とし，$\theta \leq \theta^*$（Region 1），$\theta^* < \theta$（Region 2）領域における G を，それぞれ G_1，G_2 とすると，各水分領域に対する熱伝導率は次式で表すことができる．

$$\lambda = \lambda_{dry} + G_1 \times \theta \qquad (\theta \leq \theta^*) \qquad (1)$$

$$\lambda = G_2(\theta - \theta^*) + \lambda^* \qquad (\theta^* < \theta) \qquad (2)$$

G_1, G_2, θ^* をフィッティングパラメータとし，上式を各試料の熱伝導率測定値に対して適用した．λ^* は $\theta = \theta^*$ 時の熱伝導率である．Fig. 2 中の点線は，Accusand（0.36 mm）と成田砂（0.34 mm）に対して得られた θ^* を表している．水分特性曲線に対して VG モデルを適用し得られた残留水分率 θ_r と θ^* の関係を Fig. 3a に示す．θ_r と θ^* の関係は試料によらず明瞭な線形関係（θ^*=1.26θ_r）にあることが分かった．粒径と θ^* の関係を Fig. 3b に示す．平均粒径が大きいほど θ^* は低下する傾向がみられた．土粒子間のメニスカス水の存在は，土粒子間を通した熱伝導を飛躍的に促進させる．従って得られた結果から，粒径が大きく比表面積が小さい土粒子で構成される砂試料では，土粒子間のメニスカス水を形成するための水分量が少ないと考えられる．

体積含水率の上昇にともなう熱伝導率の増加率 G と平均粒径の関係を Fig. 4 に示す．$\theta \leq \theta^*$ 領域では，全試料において粒径が大きくなるにつれて G_1 値は増加した（Fig. 4a）．その増加率は表面が粗い（R 値が低い）試料において高くなる結果が得られた．一方で，表面が滑

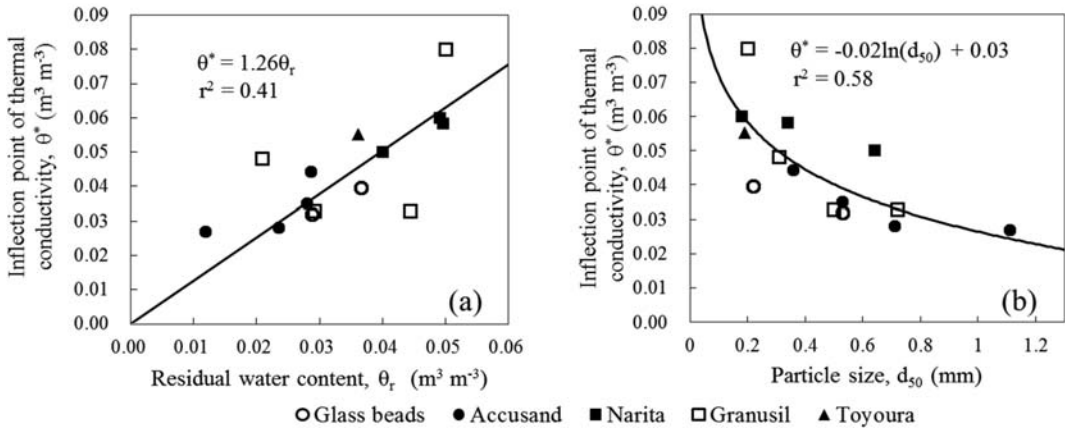


Fig. 3 熱伝導率の変曲点と (a) 残留含水率および (b) 平均粒径との関係.
(a) Inflection point of thermal conductivity as a function of residual water content. (b) Inflection point of thermal conductivity as a function of particle size.

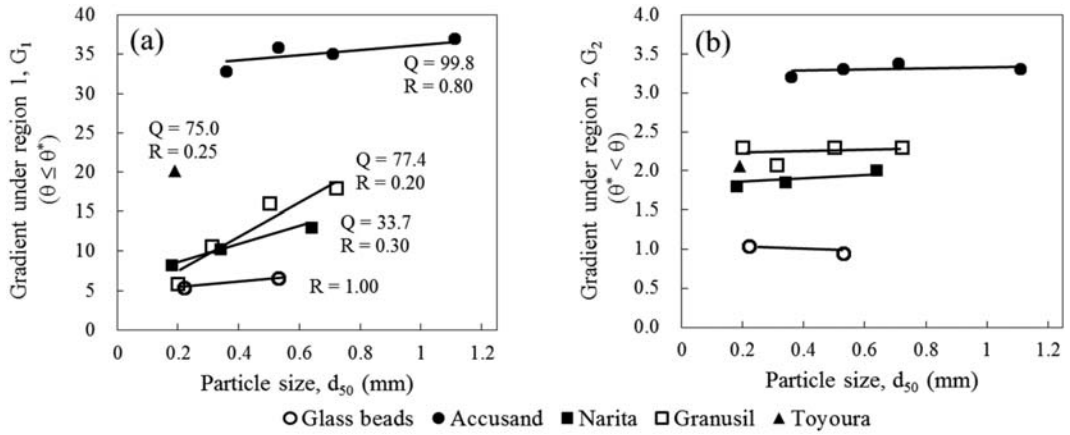


Fig. 4 (a) $\theta \leq \theta^*$ 領域と (b) $\theta^* < \theta$ 領域の水分量の増加にともなう熱伝導率の増加率.
Gradient of thermal conductivity with volumetric water content for different sands under (a) region 1 ($\theta \leq \theta^*$) and (b) region 2 ($\theta^* < \theta$).

らかな（R 値が高い）試料では粒径による G_1 値の変化は小さかった．このことから，表面が粗い試料では，粒径の増大により土粒子一個当たりの接点数が増加することで，水分増加にともなう見かけの土粒子間の接触面積の増加，すなわち土粒子—水—土粒子を介した熱伝導が促進されたことが考えられる．また，石英含有率の高い Accusand では，粒径によらず高い G_1 値が得られた．

$\theta^* < \theta$ 領域における G_2 に関しては，Fig. 4b に示すように，同類の試料における差は顕著にみられなかった．しかし，G_1 と同様に，石英含有率の多い試料ほど G_2 が高くなる結果が得られた．湿潤領域では熱伝導の経路が土粒子—メニスカス水—土粒子に支配される低含水領域と異なり，土粒子と水の混合体をより平均的に熱が伝導するメカニズムが卓越すると考えられるため，$\theta \leq \theta^*$ 領域でみられたような接点数の違いによる熱伝導率増大効果は小さいと考えられる．

3.2 既往のモデル式の検証

単位固相率 V_s 当たりの熱伝導率と石英含有率の関係を Fig. 5 に示す．Fig. 5a, 5b はそれぞれ絶乾状態，飽和状態の値を示している．絶乾状態での単位固相率当たりの熱伝導率は，すべての試料においてほぼ一定値を示した．

$$\lambda_{dry}/V_s = 0.38 \tag{3}$$

一方で，飽和状態では石英含有率の増加とともに単位固相率当たりの熱伝導率は増加した．

$$\lambda_{sat}/V_s = 0.02Q + 1.67 \tag{4}$$

このことから，間隙中の土壌水の存在が，熱伝導率の高い石英を通した熱移動を促進させると考えられる．

本研究にて得られた熱伝導率の測定結果に対して，まずは既往の予測モデル式を適用し，その妥当性を検討した．既往のモデルとして Johansen（1975）と Côté and Konrad（2005）に提案されたモデル式を適用した．Johansen モデルは次式で表される．

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) K_e + \lambda_{dry} \tag{5a}$$

$$K_e \cong 0.7 \log S_r + 1.0 \qquad (S_r > 0.05) \tag{5b}$$

ここで K_e は熱伝導率の水分依存性を表し，飽和度（S_r）の関数として表される．また，飽和状態，絶乾状態の熱

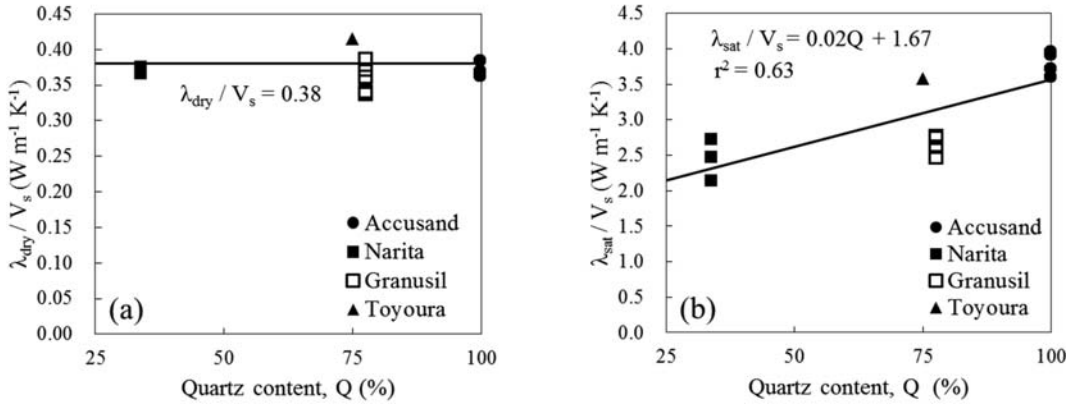


Fig. 5 (a) 絶乾状態，および (b) 飽和状態の固相率当たりの熱伝導率と石英含有率の関係．Normalized thermal conductivity by volumetric solid content as a function of quartz content for sands under (a) completely dry condition and (b) water saturation.

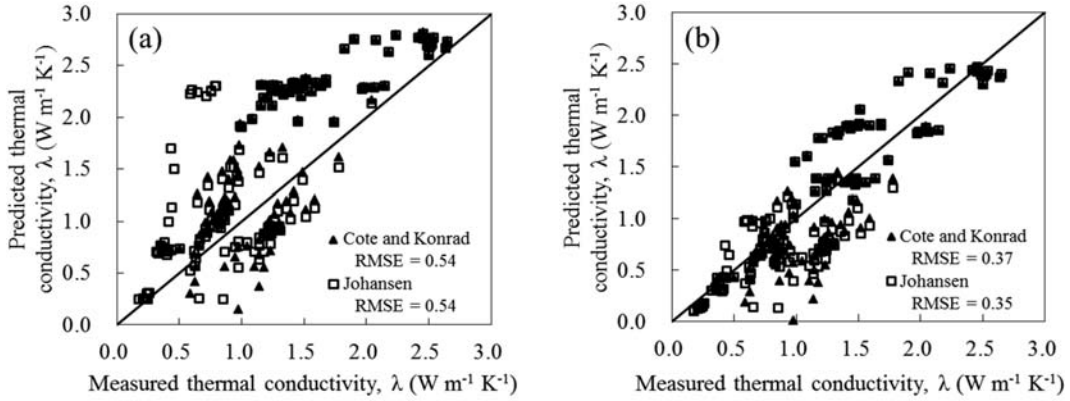


Fig. 6 (a) 既往の熱伝導率モデルによる予測値と実験値との比較，(b) 修正熱伝導率モデルによる予測値と実験値との比較．
(a) Scatter plots for comparison of model performances for existing models for thermal conductivity. (b) Scatter plots for comparison of model performances for modified existing models for thermal conductivity.

伝導率（λ_{sat} および λ_{dry}）は次式で表現される．

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-\Phi)} \lambda_w^{\Phi} \tag{6}$$

$$\lambda_{dry} = (0.135\rho_b + 64.7) / (2700 - 0.947\rho_b) \tag{7}$$

ここで，Φ は全間隙率，ρ_b は乾燥密度，λ_s は固相の熱伝導率，λ_w は液相（水）の熱伝導率 （= 0.594 （W m^{-1}K^{-1}）, 20 °C，Lu et al., 2007）である．λ_s は，石英含有率（Q %），石英の熱伝導率（$\lambda_q = 7.7$ W m^{-1}K^{-1}），および石英以外の鉱物成分の熱伝導率 λ_o によって次式で表される．

$$\lambda_s = \lambda_q^{0.01Q} \lambda_o^{(1-0.01Q)} \tag{8}$$

本研究では，λ_o として 2.0 （W m^{-1}K^{-1}）を用いた（Johansen, 1975）．

Côté and Konrad モデルは Johansen モデルを元に式（5b）を次式のように表した．

$$K_e = kS_r / [1 + (k-1)S_r] \tag{9}$$

ここで，k は試料の土性に依存する係数であり，本研究では Côté and Konrad（2005）に従い 3.55 を用いた．また，Côté and Konrad（2005）では，λ_{sat} として次式を提案している．

$$\lambda_{sat} = \chi 10^{-\eta\Phi} \tag{10}$$

ここで，χ （W m^{-1}K^{-1}）と η は，粒子形状を代表する係数であり，Côté and Konrad（2005）では砂試料においてそれぞれ 0.75 W m^{-1}K^{-1}, 1.20 を提案している．Côté and Konrad モデルにおける λ_{dry} は式（7）を用いた．

Johansen モデルと Côté and Konrad モデルによる予測値と本研究で得られた全ての実測値との比較を Fig. 6a に示す．両モデルともに，熱伝導率 λ が 1.5 (W m^{-1}K^{-1}) 以上の高含水比条件では，予測値が実測値よりも過大評価となった．また，熱伝導率 λ が 1.0 (W m^{-1}K^{-1}) 以下の試料の一部については，予測値が実測値を 3 倍以上過大評価する結果が得られた（平均二乗誤差, RMSE = 0.54）．

次に，本研究で得られた絶乾状態，飽和状態における熱伝導率の経験式（式（3），式（4））を Johansen モデル（式（6），式（7））および Côté and Konrad モデル（式（7），式（10））に導入した．その結果，Fig. 6b に示すように Johansen および Côté and Konrad モデルの適用性は大幅に改善された（RMSE = 0.35，0.37）．

以上の通り，異なる粒径，粒子形状，石英含有率を有する砂試料においても，絶乾・飽和状態の正確な熱伝導

率を考慮することで，両モデルは体積含水率増加にともなう熱伝導率の変化を適切に評価し，精度の高い予測が可能であることが示された．

4. まとめ

本研究では粒子の粒径および形状・石英含有率が砂の熱特性に与える影響について明らかにすることを目的とし，粒径・形状の異なる砂試料を用いて異なる水分条件で熱特性の測定を行った．その結果，土粒子の粒径，形状ならびに石英含有率が体積熱容量に与える影響は小さいことが明らかになった．一方，体積含水率の増加にともなって急激に熱伝導率が上昇する低含水領域では，粗い粒子形状の試料において平均粒径が大きいほど体積含水率の上昇にともなう熱伝導率の増加が高い結果が得られた．このことから，粒径の増大により土粒子一個あたりの接点数が増加し熱伝導が促進したことが示唆された．湿潤領域では，体積含水率の上昇にともなう熱伝導率の増加は，粒径によらず同試料で一様であった．また，増加率は石英含有率の高い試料ほど高い結果が得られた．本研究で得られた絶乾・飽和状態における熱伝導率の経験式を導入することで，既往の熱伝導率の予測モデルの適用性は大幅に改善された．

謝辞

本研究は，文部科学省科学研究費（No. 24760375），日本学術振興会 二国間共同研究（アメリカ），独立行政法人科学技術振興機構 CREST プロジェクト の補助を受けた．また，本研究で使用した砂試料の一部は米国コロラド鉱山大学より提供して頂いた．ここに記して厚くお礼申し上げます．

引用文献

Abu-Hamdeh, N.H. and Reeder. C.R. (2000): Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1285–1290.

Côté, J. and Konrad J.-M. (2005): A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. Can. Geotech. J., 42: 443–458.

de Vries, D.A. (1963): Thermal properties of soils. pp. 210–235. In van Wijk W.R. (ed). Physics of plant environment, North Holland publishing company, Amsterdam, The Netherlands.

Johansen, O. (1975): Thermal conductivity of soils. Ph.D. diss. Norwegian Univ. of Science and Technol., Trondheim (CRREL draft transl. 637, 1977).

粕淵辰昭 (1982): 農業技術研究所報告 B, 33: 1–54.

Lu, S., Ren, T., Gong, Y. and Horton R. (2007): An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. Soil Scie. Soc. Am. J. 71: 8–14.

Midttomme, K. and Roaldset E. (1998): The effect of grain size on thermal conductivity of quartz sands and silts. Petroleum Geoscience 4: 165–172.

宮崎毅, 長谷川周一, 粕淵辰昭 (2005): 土壌物理, p.74，朝倉書店, 東京.

Oda, M. (1972): Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular materials. Soils and Foundation 12: 17–36.

Smits, K.M., Sakaki, T., Limsuwat, A. and Illangasekare T. H. (2008): Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles, Vadose Zone Journal, 9: 172–180, doi: 10.2136/vzj2009.0095.

van Duin, R.H.A. (1963): The influence of soil management on the temperature wave near the surface. Technical Bulletin 29, Institute for land and water management research, Wageningen, The Netherlands.

van Rooyen, M. and Winterkorn H.F. (1959): Structual and textual influences on thermal conductivity of soils. In Proc. Annu. Meet. 38th, Highway Res. Board, Nath. Res. Council, 576–621.

Youd, T.L. (1973): Factors controlling and minimum densities of sands. In: Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils. pp.98-112, ASTM STP 523. ASTM Int., West Conshohohocken, PA.

要　　旨

粒径・形状の異なる砂試料を用いて異なる水分条件で熱特性を測定した．体積熱容量は，土粒子の粒径・形状及び石英含有率によらず，同体積含水率で比較した場合，試料間で顕著な差はみられなかった．乾燥領域では，粗い粒子形状の砂試料において平均粒径が大きいほど体積含水率の上昇にともなう熱伝導率の増加率が高くなる結果が得られた．一方湿潤領域での熱伝導率の増加率は，同種の試料であれば粒径によらずほぼ一定であり，同粒径の試料で比較すると石英含有率の高い試料ほど高くなる結果が得られた．本研究で得られた絶乾・飽和状態における熱伝導率の経験式を既存の熱伝導率予測モデルに考慮することで，熱伝導率の予測精度は改善された．

キーワード：熱特性，砂，土粒子の粒径，土粒子の形状，石英含有率

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 124, p.17 ～ 24 (2013)

JpGU 特集
論　文
Original Paper

多周波数電磁探査法による森林の管理が土壌環境に与える影響評価

宮本珠未[1]・川原まどか[2]・森　也寸志[1]・宗村広昭[2]・井手淳一郎[3]・
高橋絵里奈[2]・米　康充[2]・末継　淳[1]

Evaluation of management practices in forest soil environments using a multi-frequency electromagnetic sounding system

Tamami MIYAMOTO[1], Madoka KAWAHARA[2], Yasushi MORI[1], Hiroaki SOMURA[2], Jun'ichiro IDE[3], Erina TAKAHASHI[2], Yasumichi YONE[2], and Atsushi SUETSUGU[1]

Abstract: A multi-frequency electromagnetic sounding system (MFEM) enables non-destructive and instantaneous measurements of soil electrical conductivity (EC) profiles. Because agricultural and forest lands are possible sources of pollutant loads transported to aquatic environments, we applied MFEM to develop a procedure for conducting efficient soil environmental surveys for evaluation of management practices on forested lands. We investigated two types of forested sites: thinning sites (TS) and delayed thinning sites (DTS). The MFEM-EC data collected from surface soils were well correlated with the EC data collected by a conventional sensor. MFEM-EC mapping revealed higher EC values in surface soils of DTS. Delayed thinning had reduced understory vegetation and hydraulic conductivity of surface soils. Therefore, low plant uptake and shallow infiltration of soluble salts would have allowed them to remain in the surface soils of DTS. Forest sites that had been fertilized as farmlands could also be distinguished with an MFEM system. The proposed MFEM system would be a useful tool for screening surveys of forested sites prior to detailed analysis of a wider area.

Key Words: multi-frequency electromagnetic sounding, electrical conductivity, infiltration, soil environment

1. はじめに

近年，日本では農耕作の衰退と地域住民の高齢化が進行しており，それにともない，管理放棄される農林地が増え始めている（農林水産省, 2012; 大原, 2007）．水田や畑地が放置されると，集約的農業によって土壌中に蓄積した肥料成分が作付けに利用されないまま，強雨とともに河川に流出する可能性がある．また，圃場から栄養塩を含む土砂が流亡する課題が報告されており，農林地管理のあり方が議論されている（大澤ら, 2004a, 2004b）．森林においては，昔は定期的に行われていた間伐に遅れなどが見られるようになり，林床への光の遮断から下層植生が貧弱化している例が報告されている（清野, 1988; 恩田, 2008; 及川, 1977; 湯川ら, 1995）．

土地の利用状況に影響される面源負荷については，これまで流域の水環境を中心に調査されてきた（国土交通省河川局, 2006）．流域全体の調査においては，河川水を採取・分析することによって，河川の汚濁負荷量を計測し，汚濁負荷源を推定することが多く行われており，大きな成果を得ている（武田, 2002; 伊藤ら, 2004）．しかし，河川水を中心とする水環境のデータは面源負荷発生の結果であるため，森林や田畑からの発生の過程を考察することは難しい．また，水が存在する場所でなければ試料の採取自体ができない．そのため，万遍なく流域全体を調査することは困難である．

汚濁負荷発生の過程を調べる方法として，一般的には土壌調査が行われている（史ら, 2002）．しかし，農林地での土壌調査は調査範囲が広域であるため，大変な労力と時間が必要である．また，土壌調査でアクセスできるのは地表からせいぜい数十 cm までである（森ら, 2010a）．さらに，私有地の圃場を掘る土壌調査には地権者の理解が得にくい場合もあり，多点での調査を実現できないことがある．

そこで，面源負荷の源である土壌環境の調査を，多周波数電磁探査法（McNeil, 1980; Ward and Hohmann, 1987）を用いて，広範囲を効率的かつ短時間に行うことを考えた．この探査法では，異なる複数の周波数ごとに電気伝導度と帯磁率（Won et al., 1996; 光畑ら, 2005）が得られ，これらの地盤中の情報は，地面にふれることなく非破壊的に得ることができる．さらに，これらの数値は秒単位で得られるため迅速に土壌・地盤環境を調査することが可能である（Huang and Won, 2000）．比抵抗法

[1]Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Okayama 700-8530, Japan. Corresponding author：森　也寸志，岡山大学大学院環境生命科学研究科
[2]Graduate School of Life and Environmental Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue 690-8504, Japan.
[3]Joensuu Research Unit, Finnish Forest Research Institute, P.O. Box 68, 80101 Joensuu, Finland.
2012 年 8 月 29 日受稿　2013 年 4 月 5 日受理

では到達深度を得るために広い電極間距離が必要である（Keller and Frischknecht, 1966）が，多周波数電磁探査法では周波数を変えることで必要な到達深度の情報が得られるため，少人数で調査が実施できる．また電磁波を侵入させた地点で同時にデータを取得しているため，ポイント毎に全てのデータが単独で得られ，比抵抗トモグラフィーのような逆解析を必要としない．

これまでに，人工地盤内への漏水という水分量の大きな違いを抽出するために電気伝導度約 100 mS m^{-1} の変化を探査する実験が（光畑ら, 2005），また海岸平野では，塩水と真水といった可溶性塩類の濃度の大きな違いを検出するために電気伝導度約 1000 mS m^{-1} の変化について探査が（Mitsuhata et al., 2006）行われている．本研究で対象とする農地や森林は電気伝導度が数十 mS m^{-1} 以下で，これまで報告されてきた現場より伝導度が低く，その水分の変動幅も小さい．また，地質学分野で扱われる数十から百 m というオーダーよりも 1 m 未満の表層の土壌に注目する必要がある．平井ら（2008）は，装置の最高周波数である 48 kHz に注目すると，水田では水分の変動が観察でき，また畑地や果樹園では施肥の影響と見られる電気伝導度の高い部分が表層付近に観察されることを報告している．また，森ら（2010a）は，表層部分の電気伝導度と近くを流れる排水や疏水の電気伝導度に高い相関があることを報告している．地質調査などに使われる電磁探査では本来ボーリングなどによる深さ方向のデータの検証が欠かせないが，私有地である農林地では非常に難しい．ところが灌漑や施肥といった農林地における人間活動の影響は比較的浅いところに観察されることが明らかになってきた．従って，土壌環境調査に限定すれば，浅い層に注目する限りにおいては検証が比較的容易になり，電磁探査による土壌環境調査の可能性を拡げられる．

本研究では，日本の面積の大部分を占め，流域における上流部を形成する森林に着目した．前述したように，土砂の流亡や下層植生の貧弱化が報告されており，土壌環境の特徴を効果的に抽出し，考察できれば大変有効である．また，私有地が大多数を占める土地でスクリーニング的に非接触で調査ができれば，その後の詳細調査の効率が上がる．

本研究の目的は，間伐遅れの見られる森林において，(1) 多周波数電磁探査機を用いて，土壌環境の特徴抽出を試み，(2) 土壌の特性を示す他のデータから原因を探り，(3) 森林の管理が土壌環境に与える影響を評価することである．

2. 電磁探査の測定原理

EM 探査とは，Electro-Magnetic-methods（電磁法）と呼ばれる電磁探査の一種で，地中における誘導電磁場の応答から，地盤の比抵抗値の逆数である伝導率（conductivity）および帯磁率（magnetic susceptibility）を測定する方法である．EM 探査は，電磁波や周波数の違いによって侵入深度が異なることを利用し，深度方向の伝導率の変化を調べることができる．一般に，周波数と深度の関係は，周波数が高い電磁波は浅層部分の地盤状況を，周波数が低い電磁波は深層部分の地盤の状況を反映する．ただし地質の影響も同時に反映されることと，抵抗値が大きい場合には値の変化をとらえにくいため注意が必要である．

調査には多周波数電磁探査法（McNeil, 1980; Ward and Hohmann, 1987）を用いた．これは電極間距離を変化させる代わりに，1 秒以内に最大 5 つの周波数を地面に侵入させる．周波数毎に電磁波の到達深度が異なるため，その地盤からの応答である電気伝導度をもって多深度の土壌・地盤環境を考察するものである（Huang and Won, 2000; 光畑ら, 2005）．なお，計測では同時に帯磁率が得られるが本研究では使用していない．

電極間を変える手間を取らずに，短時間で多深度の情報を得ることができるため，可搬性と迅速性に優れ，面積的に大きな広がりを持つ場所の調査には適した装置であるといえる（光畑, 2006; 森ら, 2010b）．本研究で用いた多周波数電磁探査機は，米国 Geophex 社の GEM-2 broadband EMI sensor である．このシステムは，小さな送信コイルと受信コイルを用いて，電気伝導度と帯磁率計測を可能にしている．つまり，送信ループから変動磁界を発生させると，土壌・地盤中にレンツの法則により起電力が発生し，土壌の比抵抗に応じて誘導電流（渦電流）が発生する．そして，その誘導電流によって新たに生じる二次磁場 H_s と一次磁場 H_p を受信ループにて地表からのセンサー高さ h で観測し，既知である一次磁場 H_p を地盤への入力信号とし，二次磁場 H_s を受信信号として観測する．その差から土壌・地盤中の比抵抗値の逆数である電気伝導度および帯磁率を測定する探査法である（Fig. 1）．この測定システムは，一般的にループ・ループ法（Won et al., 1996; Mitsuhata et al., 2006）と呼ばれる探査法を利用している．送信・受信ループの間隔は 1.66 m で，同一の板に固定されており，330 Hz ～ 47970 Hz の最大 15 の周波数の送受信が可能である．一般的に，3 ～ 5 つの周波数を用いて測定する．前述のように，周波数と深度の関係は，周波数が高い電磁波は浅層部分の地盤状況を，周波数が低い電磁波は深層部分の地盤の状況を反映する（Won et al., 1996; Huang, 2005）．本研究で

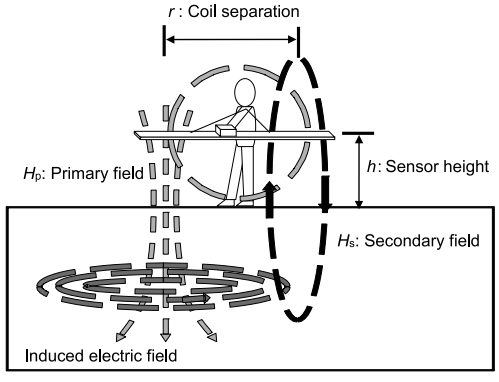


Fig. 1 多周波数電磁探査法の測定原理.
Theory for multi-frequency electromagnetic sounding method.

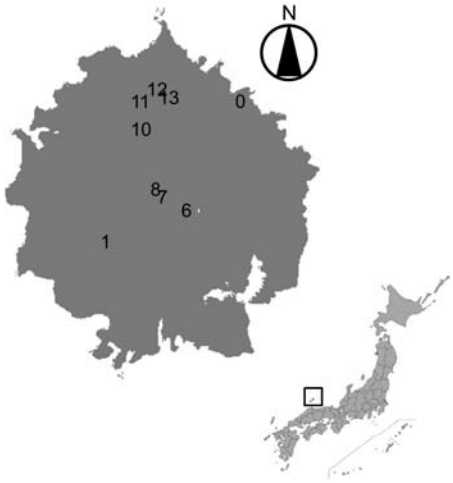


Fig. 2 調査地：島根県隠岐郡隠岐の島.
Location of investigated sites: Oki-island in Shimane, Japan.

は，調査対象とする深さはおよそ 0.5 ～ 10 m であることより，電磁探査における探査深度である表皮深度（Spies, 1989）を考慮して，調査周波数を 47970 Hz，24510 Hz，7950 Hz，3870 Hz，2310 Hz に設定した.

3. 調査地の概要および実験方法

3.1 現地概況と調査地の選定

調査は島根県隠岐郡隠岐の島町（Fig. 2）で行った．隠岐の島は北東部に位置する隠岐片麻岩類と西部を広く覆う隠岐アルカリ火山岩類を代表とし，その間には新第三紀層が広く分布しており（小林ら, 2002），地盤的に脆弱な場所がいくつかある（村田ら, 1997）．県の地滑り地帯としても登録されている地域では，飽和帯の水を抜くための施設が埋設されていた．この調査地は 2007 年 8 月 31 日に記録的な豪雨となった地域である（気象庁, 2007; 足立ら, 2009）．その際に大規模な土砂災害が発生したため，島の面積の 8 割をしめる森林の状態とその土壌環境について，現場調査を行うこととなった．最初に現場調査を行った 2008 年にはまだ現場での復旧作業が行われていた．2009 年に流域内の森林を踏査し，森林管理，土壌環境，地形情報に対して 15 点の調査対象地を選定した．ついで 2009 年 9 月，2010 年 8 月に，間伐の実施の程度の違いで調査サイトを選定し，サイトナンバー 1，6，7，8，10，11，12，13，0 の 9 地点を対象とした土壌調査を行い，農林地の管理が土壌環境に与える影響について評価した．土壌は細粒褐色森林土である．また，樹種はスギである．なお，サイトナンバーが不連続であるが，森林管理および地形情報の調査サイトナンバーとの整合性を取るため，本論文内での番号の付け替えはしていない．また，現地は非常に傾斜が険しい所も多いため，地権者の同意の範囲と合わせて，合理的に調査が行える場所としてサイトを選定した.

3.2 多周波数電磁探査法を用いた電磁探査

周波数電磁探査法を用いた電気伝導度の測定は，島内の 9 サイト（Fig. 2）において行った．電磁探査機には GPS（BR-355, SiRFstar III, GlobalSat, CSR plc., Cambridge, UK）を搭載し，位置情報と併せてデータを取得した．本研究では，水平での伝導度分布に併せて，平井ら（2008）のように各サイトの鉛直断面の伝導度分布も考察対象とするため，矩形状に調査サイトを設定し，2, 3 m 間隔でいくつも平行線を描くように歩きながら計測を行った．なお，本論文では，地盤や土壌の固液気相総体の電気伝導度（bulk EC）または見かけの電気伝導度を計測している．取得したデータは CSV ファイルとして提供されるため，USB シリアルケーブルを通じてパソコンに取り込み，データを変換した後，グラフデザインソフト（Surfer8, Golden software, USA）で見かけの電気伝導度の等濃度線図を作成し，管理状態が土壌環境に与える影響を評価した．さらに，土壌センサー（Hydra Probe II, Stevens Water Monitoring Systems, Portland, OR, USA）を用いて電気伝導度と土壌温度の測定も行った．土壌センサーによる電気伝導度計測と土壌温度計測は各サイト内の 3 地点で行い，平均値を取った.

3.3 土壌炭素量計測，透水性試験

また，各サイトにおいて 3 地点の 10, 30, 50 cm の深さから土壌採取を行い，採取した土壌の全炭素量を C·N コーダ（MACRO CORDER JM1000CN, ジェイ・サイエンス・ラボ, 京都）を用いて調べた.

現地では各サイトにおいて 3 地点から 100 ml コアサンプラーを使って土壌採取も行い，変水位法によって表層土壌の透水性を調べ，間伐による水や溶質などの下方浸透への影響を考察した．なお，透水性試験試料を採取した 2009 年はサイト 1 と 0 に到達できなかったため，透水性については 1，0 を除いて考察した.

4. 結果と考察

4.1 現地概況

現地調査と聞き取りによってサイト 1，8，12，13，0 は 10 年以内に間伐が行われたサイトであり，6，7，10，11 は 10 年以上間伐が行われていないサイトであることがわかった（Table 1）．間伐の違いによる森林の外観の例を Fig. 3 に示した．調査サイトの地点が特定されることは地権者の理解が得られない場合があるので，全ての地点についての位置情報や写真等の掲載は割愛した.

間伐の行われているサイトでは，林床に十分な光が届くため下層植生が観察されるが，間伐遅れが見られると林床が非常に暗くなり，下層植生が貧弱であることがわかる．なお，カメラ撮影の際には，絞りについて自動でなくマニュアル設定を行い，人間の目視に近い写真となるようにした．したがって，林床の明るさは目視に近い撮影結果となっている.

サイト 7，8 は隣接する森林であったが 7 が非常に暗く，8 は比較的明るく，林床の明るさに違いがあった．サイト 10，11 は聞き取りによって前歴が農地であることがわかっており，中でも 11 は段々畑状の形が残っていた．また，サイト 12，13 は山頂に近い所で，サイト 12 では 3 残 2 伐（3 列残して，2 列間伐する）という列状間

Table 1 調査サイトの概観.
General characteristics of the survey sites.

調査サイト	直近の間伐年*	下層植生**	傾斜（度）	母材***
0	2008	旺盛	19	ミグマタイト質片麻岩
1	2009	有り	8	礫，泥，含礫泥及び火山灰
6	＞10	希少	18	礫岩砂岩泥岩互層
7	＞10	無し	39	安山岩溶岩
8	1999	有り	34	安山岩溶岩
10	＞10	無し	21	礫，泥，含礫泥及び火山灰
11	＞10	希少	21	玄武岩溶岩
12	2007	旺盛	13	礫，泥，含礫泥及び火山灰
13	2008	旺盛	18	礫，泥，含礫泥及び火山灰

*：>10 は間伐年は特定出来ないが，10 年以上間伐されていないもの.
**：旺盛 > 有り > 希少 > 無し，の順に少なくなる.
***：山内ら（2009）より

伐が行われた跡が観察された．サイト 12，13，0 については，林床が非常に明るいのが特徴であった．なお，サイト 1 については間伐有りの側に分類されているが，間伐から間もないことを付記しておく．

4.2 多周波数電磁探査

多周波数電磁探査機を用いて，1，6，7，8，10，11，12，13，0 の 9 サイトにおいて電気伝導度を測定した．最初に，5 つの周波数で測定した電気伝導度の値を，平井ら（2008）に従って，ラインに対して鉛直に連ねた鉛直分布図を作成し，サイト 6 と 13 の例を Fig. 4 に示した．図を見ると，下層に比べて表層の方が電気伝導度が高いことが分かる．降雨の到達，浸透・蒸発，落葉，分解などを考えれば，表層の方が最も変化に富み，土壌環境の違いは表層近くに特徴的に表れると解釈できる．Fig. 4 を間伐のあるなしの違いから比較すると，間伐遅れの見られる方が，間伐がされた方より表層における電気伝導度が高いことがわかる．そこで地面にもっとも近いデータと考えられた 47970 Hz の伝導度分布について，従来型土壌センサーで値の検証を行った．まず，47970 Hz で測定した電気伝導度の結果をサイト毎に平均化し，温度補正（基準温度 25 ℃）を行い，その結果を従来型の土壌センサーと比較し，Fig. 5 に示した．その結果，47970 Hz の周波数による電磁探査の電気伝導度と土壌センサーの電気伝導度の間には決定係数が 0.891 と強い正の相関がみられた．従って 0.5 ～ 1 m の電気伝導度を計測していると考えられる電磁探査の値は表層土壌の計測をする土壌センサーの値に近いと見なせるとわかった．電磁探査は非接触であるが，従来の土壌水分・塩分センサーと近似した値を示すことから，本サイトにおいては表層土壌環境の計測に用いて差し支えないと考えられた．なお，これは平井ら（2008）と同様の結果であるが，地下構造や地質構造に左右されるようなサイトではこの関係が崩れる可能性があり，各サイトにおける検証を常に行う必要がある．

表層土壌環境の調査を考えたとき，土壌センサーではせいぜい計測が数点に限られるが，電磁探査では非接触で広範囲の様子を探査できる．従来型センサーでは陥りがちな空間変動をとらえることができるため，値の検証に注意する必要があるが，多点計測という点では，むしろ有利と判断された．



Fig. 3 調査地における土壌環境の外観．左:間伐されたサイト（No. 0）．右:間伐遅れのサイト（No. 7）.
Appearance of soil environment. Left: The thinning site (No. 0). Right: The delayed thinning site (No. 7).

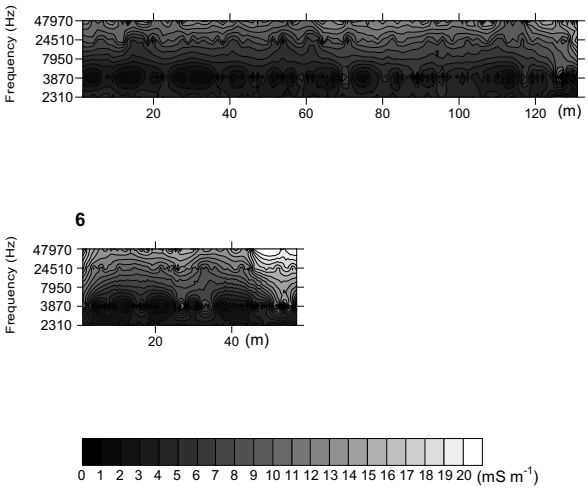


Fig. 4 間伐の違いによる見かけの電気伝導度の鉛直分布の違い．No. 13 間伐された土地，No.6 間伐遅れが見られる土地.
Vertical profiles of electric conductivity differed by thinning. No. 13 The thinning site, No. 6 The delayed thinning site.

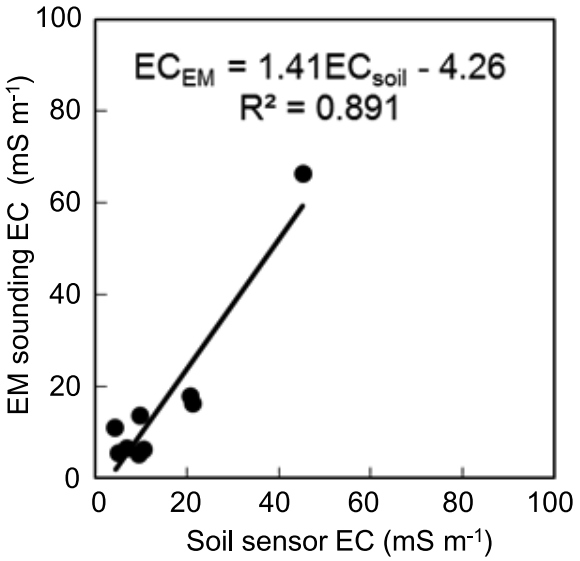


Fig. 5　電磁探査と土壌センサーの見かけの電気伝導度の比較.
Relationship between electromagnetic sounding EC and soil sensor EC.

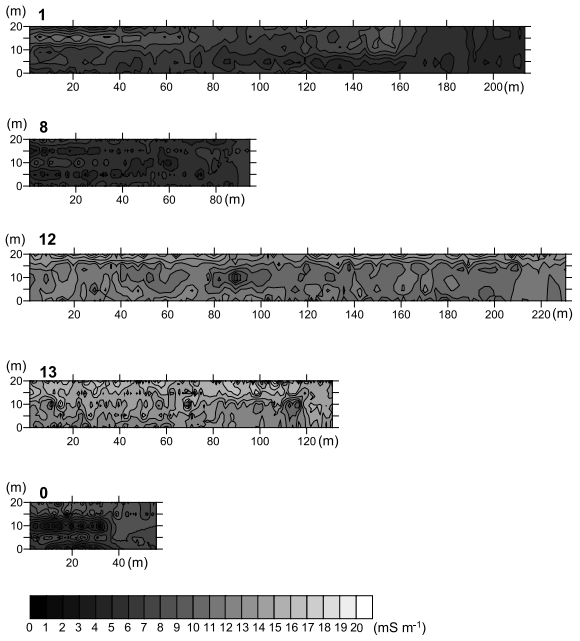


Fig. 6　間伐の行われているサイトの見かけの電気伝導度の水平分布（周波数 47973 Hz）.
Horizontal distribution of electrical conductivity data at the thinning sites (Frequency 47970 Hz).

次いで，47970 Hz の周波数から得られた伝導度について，水平分布図を作成した．間伐管理と間伐遅れや，下層植生の有無について明らかな違いがあったため，図では 10 年以内に間伐されたサイト（間伐あり）（Fig. 6），10 年以内に無間伐のサイト（間伐遅れ）（Fig. 7）と分けて表示した．色が薄いほど伝導度が高く，色が濃いほど伝導度は低い図を作成している．全体的に電気伝導度が高いサイトは 6，10，11 であり，電気伝導度が低いサイトは 1，7，8，12，13，0 である．間伐の行われているサイト（Fig. 6）の中では，サイト 12，13 は少し電気伝導度が高めであるが，間伐の遅れているサイト（Fig. 7）の 6，10，11 と比較すると電気伝導度が高い白い部分があまり見られないことがわかる．Fig. 6 と 7 の比較により，間伐の行われているサイトの方が，間伐が遅れているサイトよりも表層土壌の電気伝導度が低い傾向が強いことが分かった．

さらに，現在は森林として利用されているサイトでも，過去に農地として利用されていたサイト 10，11 では，電気伝導度が高くなる傾向があり，10 はスケールを変えなければならないほど高い伝導度を示した．過去の施肥の影響が続く期間については明らかでないが，現在の管理状態以外にも過去の利用履歴が土壌環境に影響していることが推測される．

なお，サイト 7 は斜面が 39 度と非常に急であり，踏査の際に表土がぼろぼろと崩れ落ちてくるほどもろい特徴があったため，他のサイトのような特徴が表れにくかった可能性がある．

4.3 土壌の透水性

表層土壌の飽和透水係数を 3 反復で計測し，その値を比較すると（Fig. 8），サイト 6，8，10，11 は透水性が比較的低く，7，12，13 は高めであることがわかった．6，10，11 に間伐遅れが見られ，12，13 は 10 年以内に間伐がされていることを考えると，先の土地管理の状況は透水性の違いにも表れていると推察された．そこで間

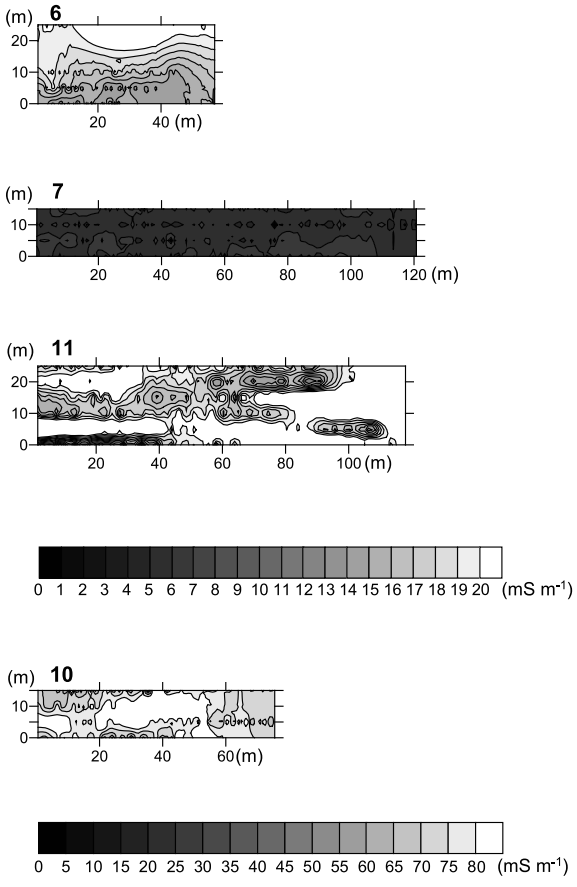


Fig. 7　間伐の遅れているサイトの見かけの電気伝導度の水平分布（周波数 47973 Hz）．No. 10 の EC は別スケールで表示.
Horizontal distribution of electrical conductivity data at the delayed thinning sites (Frequency 47970 Hz). EC scale was separately added to No. 10.

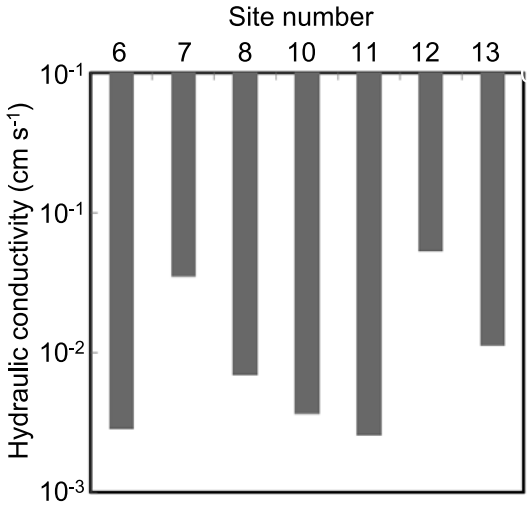


Fig. 8 サイト毎の平均透水係数.
Average hydraulic conductivity at each site.

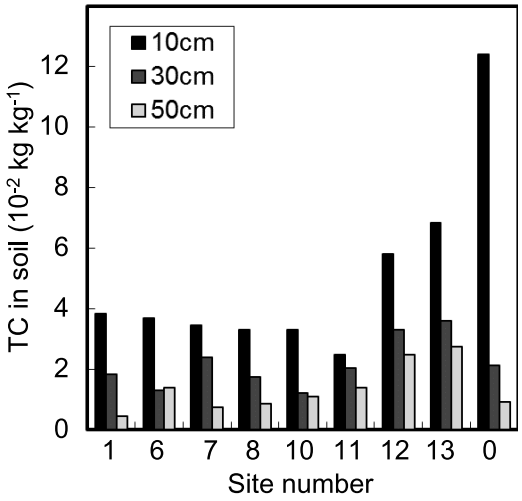


Fig. 9 深さ毎の全炭素量（TC）.
Vertical profiles of total carbon contents.

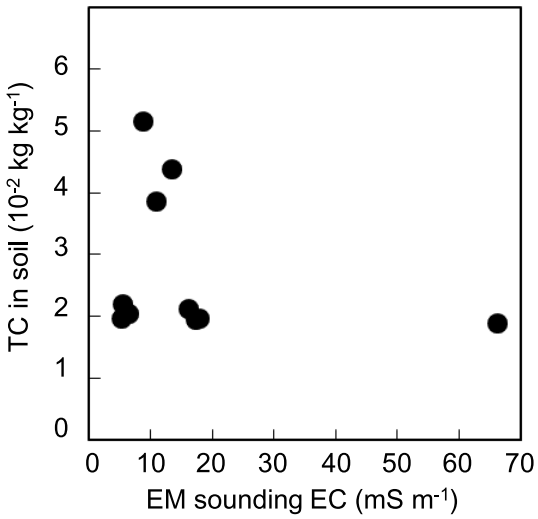


Fig. 10 電磁探査の電気伝導度と有機物量の比較.
Relationship between electromagnetic sounding EC and total carbon contents.

伐管理が行われているサイトと間伐遅れが見られるサイトは透水性が異なるという仮説を立てて，t 検定を行った．7，8 を除くと間伐管理 · 間伐遅れによる両者の透水性は危険率 1 % で異なると言えることがわかったが，7，8 の透水性は，間伐管理で小さく，間伐遅れで大きく逆の傾向を示したため，調査サイト全体として透水性が有意に異なるとは言えなかった．7，8 は隣接する森林であるが，他のサイトに比べて斜面が 7 は 39 度，8 は 34 度と非常に急であり，前述のように表土が非常にもろかったため，他のサイトのような特徴が表れにくかった可能性がある．

4.4 土壌の全炭素量

Fig. 9 に各サイトの 10，30，50 cm の深さから採取した土壌の全炭素量（Total Carbon, TC）を示した．いずれのサイトにおいても全炭素量は最表層の 10 cm が最も多く，続いて 30 cm，50 cm の順に少なくなっていた．また，間伐の行われているサイト 12，13 では，各深さともに全炭素量が他のサイトより明らかに多く，深い所まで有機物が存在する傾向が認められた．ただし，1，8 は間伐遅れが見られるサイトとあまり有機物量が変わらない．1 は間伐が十分でなく，間伐後も林分が過密であること，8 は行われた間伐の時期が 10 年前で，次の間伐時期を迎えているサイトであることがわかっている（高橋ら, 2012）．1 は間伐から間もないこともあり，同じ間伐でも 12，13，0 のように林床が明るくなるほどの間伐を行わないと，おそらくそれにともなう植生の回復と，続く有機物の蓄積の履歴が残りにくいと考えられた．他の間伐遅れが見られるところは有機物が少ない傾向が見られた．

降雨による水の移動や有機物また微細土壌粒子の運搬の結果では，山頂に近い所ほど有機物層は鉛直方向に薄くなりやすいと推定されたが，サイト 12，13 のように山頂に近いサイトでも鉛直方向への有機物の蓄積が見られ，間伐などの人為的維持管理の影響が結果に表れたと考えられた．一方，間伐の遅れているサイトでは，鉛直方向への有機物量の蓄積が少ない傾向があることが分かった（Fig. 9）．前述のようにサイト 7，8 は非常に急斜面であったため，間伐の有無に関わらず有機物が蓄積されにくくなっていたものと推察された．

なお，ここでサイト毎に深さ 10，30，50 cm から採取した土壌の全炭素量とそのサイトにおける電磁探査の電気伝導度の相関を検査し，Fig. 10 に示した．図より相関は認められず，電磁探査は有機物の影響を受けていないことが分かる．

4.5 表層土壌環境と水環境への影響

ここで先の伝導度の値の大小について現時点で考えられることを整理してみた．間伐の遅れているサイト（Fig. 7）では，Fig. 3 にも示した通り林内が暗く，下層植生があまり見られなかった．人工林からの落葉については間伐管理 · 間伐遅れ両者同等と考え，有機物が分解される過程で生じる可溶性塩類について考える．緯度経度が変わらず，温度環境が近いことから有機物分解の程度が同じであると仮定すれば，下層植生の多い間伐管理が行われている方が栄養塩としての量は多くなるはずで

ある．しかしながら，実際は逆の傾向であった．間伐遅れの森林土壌で伝導度成分が大きくなる傾向があるとするとその多寡に影響を及ぼしているのは植物の成長による栄養塩の消費と考えればこの矛盾に一定の考察を与えることができる．

今回の調査地は，管理の粗放化によって森林における間伐遅れが見られ，下流域に与える影響が懸念されたところである．因果関係とその発生の順序までは言及できないが，これまでの調査結果を総覧すると，間伐の有無，下層植生の繁茂，下方浸透の促進と有機物の蓄積が一定の傾向を持って発生していると推測できる．つまり，間伐，植生の繁殖，下方浸透の促進があれば，可溶性塩類が土壌表層に集積することはなく，少なくとも 50 cm 程度まで十分な量の有機物が観察されると解釈できる．逆に間伐遅れ，貧弱な光環境，貧弱な植生，そして透水性不良が発生すれば，有機物が表層にしか観察されず，可溶性塩類が表層に集積しやすくなると解釈できる．しかしながら傾斜の大きな斜面では透水性に逆転傾向があったり，伝導度成分の多寡については，その原因について推定の域を出ない部分があり，さらなる調査と検証が必要と考えている．

間伐と下層植生についてはこれまでも言及されてきたが，それが土壌環境に及ぼす影響を電磁探査によって，鉛直プロファイルまた平面図として特徴づけることができた．伝導度成分が可溶性塩類の蓄積からもたらされたものであれば，下流側への過剰供給を防ぐ目的から，間伐とそれに続く下方植生の繁茂がおそらく効果的な対処法であると推測できるし，透水性の改善と有機物量の蓄積からも間伐の効果は大きいと推測された．

従来型土壌センサーと相関のあるデータが得られたことから，電磁探査は調査手法としては妥当であると判断した．逆に従来型土壌センサーは地面にプローブを挿入する労力，それを繰り返し行う時間が必要であることから，電磁探査の方が効果的な調査が行えると判断した．なお，今回は土壌表層に土地利用の特徴が見られたことから地表用の従来型センサーでその妥当性が評価でき，効果的な調査が行えたが，これより深い部位の考察が必要な場合には，電磁探査のデータについて同様な検証が必要であることを付記しておく．

加えて，電磁探査は地面に非接触で迅速に調査ができ，また，土地の攪乱が最小限であるため，地権者の理解を得ながら調査が可能であった．農林地の調査では，営林，営農者の利益を損なわないように，立坑を掘る前に調査対象地を絞っておくことが重要である．土地の攪乱をともなう詳細調査の前のスクリーニングとして電磁探査は大きな効果を発揮すると考えられた．

5. 結論

本論文で得られた結果を整理すると，以下のようになった．

（1）電磁探査の結果を鉛直プロファイルで表示すると，土壌環境の違いは表層近くに特徴的に現れることが分かった．また，電磁探査の最表層の電気伝導度と土壌 EC センサーによる従来法の電気伝導度には高い相関が認められたため，表層の土壌環境計測の妥当性が確認された．但し，電気伝導度の不均一性を与える他の要素があるときにはこの限りではなく，常に検証を行うことが必要である．

（2）調査地には，間伐の行われているサイトと間伐の遅れているサイトが存在し，間伐が遅れているサイトの方が表層土壌の電気伝導度が比較的高いことが分かった．

（3）全炭素量の測定結果から，間伐の遅れているサイトでは，有機物が浅いところだけに観察され，他方，間伐の行われているサイトでは 50 cm の深さでも比較的多くの有機物が観察された．これは下層植生の量と浸透性の善し悪しから説明が可能であった．

間伐の行われていない森林では，下層植生があまり見られず，人工林の落葉・落枝にともなう有機物分解の過程で生ずる可溶性塩類が残存すると推測すると，結論の（2）で高い電気伝導度が観測されたことに一定の解釈を与えることができた．

（4）現在は森林として利用されているサイトでも，過去に農地として利用されていた場所では，電気伝導度が高くなる傾向があり，現在の管理以外にも過去の利用履歴が土壌環境に影響していることが分かった．

（5）多周波数電磁探査機を用いることによって，土地管理や利用履歴を電気伝導度の違いとして面的に評価する可能性を示すことができた．電磁探査は非接触で短時間に広範囲の土壌調査が可能であり，詳細調査の前のスクリーニングに役立つと考えられた．

謝辞

現地の調査では，島根県土地改良連合の前川氏の案内のもと，隠岐の島の方々に多大な協力と理解を賜り，これに深く感謝する．また，調査に協力してくれた学生たちにも感謝する．なお，本研究の一部は，日本学術振興会「最先端・次世代研究開発支援プログラム」，島根県土地改良事業団体連合会共同研究費，島根大学重点研究プロジェクトの補助を受けて行われた．併せて感謝する次第である．

引用文献

足立　誠, 瀬古　弘 (2009): 2007 年 8 月 31 日の島根県隠岐の大雨について. 天気, 56(10): 826–830.

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.

Huang, H. (2005): Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors. Geophysics, 70: G135–G142.

Huang, H. and Won, I.J. (2000): Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 5: 31–41.

伊藤優子, 三浦 覚, 加藤正樹, 吉永秀一郎 (2004): 関東・中部地方の森林流域における渓流水中の NO_3^- 濃度の分布. 日本森林学会誌, 86: 275–278.

Keller and Frischknecht (1966): Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon, Oxford.

気象庁予報部予報課: 日々の天気図. 気象庁, 67: 2007(8).

清野嘉之 (1988): ヒノキ人工林の下層植物群落の被度・種数の動態に影響を及ぼす要因の解析. 日本林学会誌, 70: 455–460.

国土交通省河川局, 都市・地域整備局下水道部, 農林水産省農村振興局, 林野庁森林整備部, 環境省水・大気環境局 (2006): 湖沼水質のための流域対策の基本的考え方—非特定汚染源からの負荷対策 —.

小林伸治, 沢田順弘, 吉田武義 (2002): 隠岐島後における末期中新世, 隠岐アルカリ火山岩類の地質とマグマ供給系. 岩石鉱物科学 31: 137–161.

McNeill, J.D. (1980): Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Limited, Ontario.

光畑裕司 (2006): 電磁探査法による海岸平野における高塩分地下水調査 —九十九里浜平野における例 —. 地学雑誌, 115: 416–424.

光畑祐司, Kwon Hyoung Seok, 横田俊之, 内田利弘, 清水智明, 成本和俊 (2005): 人工地盤内漏水探査実験 — ループ・ループ電磁探査法の適用 —. GREEN Report 2005, pp.72–73.

Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A. and Kusunose, K. (2006): Various-scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain, Geophysics, 71(6) : 167-173.

森也寸志, 井手淳一郎, 宗村広昭, 森澤太平 (2010a): 多周波数電磁探査による土壌環境の特徴抽出と潜在的汚濁負荷の推測. Soil Moisture Workshop 2010, March, 2010.

森也寸志, 宗村広昭, 井手淳一郎, 森澤太平 (2010b): 多周波数電磁探査法による人工林の土壌環境の特徴抽出. 水文・水資源学会 2010 年度研究発表会, 72p.

村田秀一, 森脇武夫 (1990): 2. 中国地方の土質工学的諸問 1. 中国地方の地盤災害. 社団法人地盤工学会, 土と基礎, 38(3): 47–53.

農林水産省 (2012):平成 23 年度食料・農業・農村白書. 第 3 章: 217–234.

恩田裕一 (2008): 人工林荒廃と水・土砂流出の実態. pp. 1–7, 岩波書店, 東京.

大原偉樹 (2007): スギ人工林の間伐にともなう林床植生の変化と水土保全機能に関する研究の必要性. 森林総合研究所報告, 6: 127–134.

大澤和敏, 酒井一人, 吉永安俊, 田中忠次, 島田正志 (2004a): 農業流域での多点同時観測による浮遊土砂動態の検討. 農業土木学会論文集, 229: 101–108.

大澤和敏, 酒井一人, 田中忠次, 島田正志, 吉永安俊 (2004b): 降雨毎の侵食予測における USLE および WEPP の検証. 農業土木学会論文集, 232: 43–50.

及川 修 (1977): 斜面に生育するヒノキ林の土と有機物の地表面移動量, 日本林学会誌, 59: 153–158.

史 秀華, 浮田正夫, 樋口隆哉, 今井 剛, 関根雅彦 (2002): 面源負荷としての土壌の富栄養化ポテンシャルに関する研究. 水環境学会誌, 25(2): 112–118.

Spies, B.R. (1989): Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. Geophysics , 54: 872–888.

高橋絵里奈, 米 康充, 森也寸志, 宗村広昭, 井手淳一郎, 佐藤利夫, 竹内典之 (2012): 島根県隠岐の島町のスギ人工林における間伐の現状. 森林応用研究, 21(2): 9–16.

武田育郎 (2002): 針葉樹人工林の間伐遅れが面源からの汚濁負荷量に与える影響 (II). 水利科学, 266: 47–71.

Ward, S.H. and Hohmann, G.W. (1987): Electromagnetic theory for geophysical applications. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, pp. 131–311, Tulsa, Oklahoma.

Won, I.J., Keiswetter, D.A., Fields, G.R.A. and Sutton, L.C. (1996): GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1: 129–138.

山内靖喜, 沢田順弘, 高須 晃, 小室裕明, 村上 久, 小林伸治, 田山良一 (2009): 西郷地域の地質, 地域地質研究報告, 産業技術総合研究所.

湯川典子, 恩田裕一 (1995): ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (I) 散水型浸透計による野外実験, 日本林学会誌, 77: 224–231.

要　　旨

農林地は流域面積の中で大きな割合を占め，広大な土壌環境を効果的に調査できればその効果は非常に大きい．本研究では，多周波数電磁探査機を用いて土壌の電気伝導度を測定し，森林の管理が土壌環境に与える影響を調べた．電磁探査の結果を鉛直プロファイルで表示すると，土壌環境の違いは表層近くに特徴的に現れており，間伐が遅れている森林では表層土壌の電気伝導度が高くなる結果が得られた．同サイトでは土壌の透水性が低い傾向があり，有機物も浅部のみに見られることから，浸透性の悪さが表層への物質の集中を促していると推測された．また農地としての履歴のある森林では，表層土壌の電気伝導度が高くなる傾向があり，過去の利用履歴が土壌環境に影響していた．多周波数電磁探査法は非接触で短時間に広範囲の土壌調査が可能であり，詳細調査の前のスクリーニングに役立つと考えられた．

キーワード：電磁探査，電気伝導度，下方浸透，土壌環境