

## ナタネ油を混合した洗浄鳥取砂丘砂の 熱伝導率とそのモデル化

望月秀俊\*・小岩崎真\*\*・須甲武志\*\*\*

### Thermal Conductivity of Washed Tottori Dune Sand with Rape Seed Oil and Modeling

Hidetoshi MOCHIZUKI\*, Makoto KOIWASAKI\*\* and Takeshi SUKO\*\*\*

\* Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori 680-0001, Japan

\*\* Graduate School of Agriculture, Tottori University, Koyama-cho 4-101, Tottori 680-8553, Japan

\*\*\* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Research Center for  
Deep Geological Environment, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

#### Abstract

Soil pollution with oil is a serious environmental problem. Although the oil movement in soil must be recognized, the thermal properties of oil-polluted soil, which are required for simulation, were less studied. In this report, we focused on thermal conductivity of the oil-polluted soil. The objectives of this study were to clarify the effects of liquid phase ratio, temperature and water-oil ratio on the thermal conductivity of oil-polluted soil. Washed Tottori dune sand and rape seed oil were used as experimental samples. The thermal conductivity of samples was measured by KD2 under several experimental conditions of the liquid phase ratio, temperature and water-oil ratio. The thermal conductivity of oil-polluted soil increased with the liquid phase ratio, even when the soil samples contained both of oil and water, and showed different trends according to the liquid phase ratio and water-oil ratio when the temperature increased. It was suggested that the thermal conductivity of soil polluted with organic oil might show the opposite trend to that of the non-polluted soil by increase in temperature. When the liquid phase ratio and temperature were fixed, the thermal conductivity of oil-polluted soil decreased linearly to the water-oil ratio. Finally, we proposed an empirical formula to predict the thermal conductivity of oil-polluted soil which contains water and oil by using the liquid phase ratio, water-oil ratio, and thermal conductivities of soil non-polluted and polluted with only oil.

**Key words** : Oil-polluted soil, Thermal conductivity, Effect of liquid phase ratio, Effect of water-oil ratio, Effect of temperature

#### 1. はじめに

近年、重油・ガソリンなどの油類による土壌や地下水の汚染が深刻な問題となっている。この油類による土壌・地下水の汚染の原因には、自然流出、輸送中の流出、

石油精製工場からの漏洩、都市・産業廃棄物からの漏出等がある。その汚染の過程は、輸送中の事故のように、短期間で多量の油によって汚染される場合と、ガソリンスタンドの地下タンクからの漏洩のように、少量ずつではあるが、長期間にわたって油が流出することによって

\* 鳥取大学乾燥地研究センター 〒680-0001 鳥取市浜坂 1390

\*\* 鳥取大学大学院農学研究科 〒680-8553 鳥取市湖山町南 4-101

\*\*\* 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第七

キーワード : 油汚染土壌, 熱伝導率, 液相率依存性, 温度依存性, 油混合率依存性

汚染される場合の2通りがある。(日本地盤環境浄化推進協議会, 2000) この様に油類による土壌・地下水汚染の広がり方は, 汚染物質や汚染原因, 汚染過程などによって, 多種多様である。

この様に, 油により多種多様な経緯で汚染された土壌を, 修復・浄化する技術や方法については, 様々な研究が行われている(例えば, 西垣, 1999; 地盤環境技術研究会, 2003)。しかし, 開発された浄化技術を効率的に利用するためには, 油類の土壌中での動態を把握し, 汚染範囲の特定と汚染の進行の的確な予測が必要である。そのためには, 土壌中での油類の移動特性を正確に把握しておく必要がある。Thomson *et al.* (1992) は, 水で飽和された一次元土壌カラム中における NAPL (non-aqueous phase liquids) の移動実験を行い, Darcy 則と連続式を連立して計算した数値解と実験結果が良く一致することを明らかにしている。しかし, これまでの油類の移動に関する研究は, 温度が一定である条件で行われている場合が多く, 温度が油類の移動特性に与える影響は, あまり考慮されていない。温度変化によって, 油類の粘性が大きく変化し, その変化が油類の移動特性に影響を与えるため(蔭田, 1975), 温度を考慮に入れた水・油類・熱同時移動解析が, 精密な油類の移動予測に不可欠である。そのためには, 油汚染土壌の物理的特性, 特に熱特性(熱伝導率, 熱容量, 熱拡散係数)を正確に把握しておく必要がある。

登尾(2005)は, サーモ TDR プローブを用いた不飽和土壌中の有機物質濃度の測定法を報告し, 砂質土壌とエタノールを用いて, 油汚染土壌の熱容量をすでに測定している。そこで, 本研究では熱移動の解析に必要なもう一つの熱特性, 熱伝導率に着目した。

土壌の熱伝導率についての既往の研究では, その水分依存性や温度依存性, 塩類依存性について多くの報告がなされているが(例えば, Momose and Kasubuchi, 2002), 油汚染土壌の熱伝導率に関する研究は, ほとんど見当たらない。

そこで本研究では, 油汚染土壌と未汚染土壌の熱伝導率を測定・比較することで, 油汚染土壌の熱伝導率の液相率依存性と温度依存性, 油混合率依存性を明らかにすることを目的とした。また本報では, 将来の油・水・熱の同時移動解析を行う際の利便性を鑑み, 油汚染土壌の熱伝導率の油混合率依存性のモデル化も試みた。なお, ここでいう液相率とは, 土壌中に含まれる水と油の体積割合の和のことであり, 油混合率とは, 液相率に占める油の体積割合である。

## 2. 試料と実験方法

### 2.1 試料

供試土には, 鳥取砂丘砂(土粒子密度:  $2.67 \text{ Mg m}^{-3}$ )を選んだ。シルト・粘土分と油類との相互作用の発生を抑えるため, 十分に洗浄して, シルト・粘土分を取り除いた鳥取砂丘砂をモデル土壌として用いた。また, モデル汚染物質としてナタネ油を用いた。ナタネ油は, オレイン酸 55-59%, リノール酸 21-23%, リノレン酸 10% (例えば上田, 2005) を主成分とする植物性の油で, 土壌汚染現場で確認される揮発性有機化合物やガソリン等の石油系炭化水素とは厳密には特性が異なる部分もあるが, 油汚染土壌の熱伝導率に関する研究の第一歩であることと, 揮発性の汚染物質を用いると, 汚染物質濃度を制御することが困難なため, 土壌中の水に溶解しないことや揮発性が低いこと, その安全性, 実験後の処理等を考慮した上で採用した。本研究のように, 植物油をモデル汚染物質に用いる手法は, 飽和 NAPL 汚染土壌の誘電率を用いた NAPL 濃度の測定を試みた佐々木ら(2005)の研究でも, 採用されている。水とナタネ油の物性値を表-1に示した。ナタネ油は水よりも密度が小さく, 熱伝導率も水の 1/4 程度である。

土壌サンプルは, 風乾した洗浄鳥取砂丘砂に, 所定量の水とナタネ油を添加し, ビニール袋中で充分攪拌して調製した。実際の油汚染土壌を考えると, 油だけが土壌間隙中に存在するのではなく, 降雨や地下水などの水分も含んでいることが予測される。そこで, 水と油を同時に供試土に添加して, 水と油の混合土壌を調整した。油混合率は, 0, 25, 50, 75, 100% の5段階を設定した。以後, 水のみを含む油混合率 0% のサンプルを水土壌, 水と油の両方を含む油混合率 25, 50, 75% の3サンプルを混合土壌, 油のみを含む油混合率 100% のサンプルを油土壌と呼ぶこととする。

### 2.2 実験方法

油汚染土壌の熱伝導率の測定は, 望月ら(2003)を参

表-1 水とナタネ油の物性値

Table 1 Physical properties of water and rape seed oil

	密度 $\text{Mg m}^{-3}$	熱伝導率 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
水	.998*	.592**
ナタネ油	.910-.920***	.160****

\*20°C, 日本化学会(2001), \*\*17°C, 日本化学会(2001), \*\*\* 20°C, オーム電気株式会社, \*\*\*\* 20°C, 熱物性学会(1990)。

考に、測定が簡便で、精度の高い測定値を得られる Decagon 社製の熱特性測定器 KD2 を用いて行った。液相率・油混合率を調製した各土壌を、アクリル製円筒カラム (内径 4.6 cm, 高さ 6.5 cm, 体積 108 cm<sup>3</sup>) に所定の乾燥密度で充填した。試料の乾燥密度は鳥取砂丘の実際の乾燥密度 (0–10 m の平均値) 1.49 Mg m<sup>-3</sup> (河合ら, 2006) よりも高い 1.57 Mg m<sup>-3</sup> に設定した。これは, KD2 プローブを挿し込んで熱伝導率を測定する際, プローブと土壌の接触をより確実にする, すなわち乾燥密度を高くすることで, 測定の再現性が高くなることが報告されているからである (望月ら, 1998)。KD2 プローブを, 土壌を充填したカラムに挿入した後, 恒温チャンパー内に一晚静置した。反復は 3 反復とした。測定は 30 分間隔で 3 回行い, 各サンプルの平均値を測定値とした。恒温チャンパーの温度は 5, 10, 20, 30, 40°C の 5 段階に設定した。液相率は 0.08, 0.16, 0.24 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> の 3 段階に設定した。これは, 上記の水分領域では, 鳥取砂丘砂の熱伝導率が水分量の増加にともなって緩やかかつ直線的に上昇することが, これまでの研究で明らかになっているため (望月ら, 2003), ナタネ油添加の影響を抽出しやすいと考えたためである。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 油汚染土壌の熱伝導率の液相率依存性

5, 20, 40°C における油汚染土壌の熱伝導率を図-1 に示した。縦軸は熱伝導率 ( $W m^{-1} K^{-1}$ ), 横軸は液相率 ( $m^3 m^{-3}$ ) である。エラーバーは個々のプロットごとの実

験結果に対して t 検定を行って求めた 95% 信頼区間を表す。以後のグラフにおいても, エラーバーは同様である。液相率が高く (0.16, 0.24 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), 油混合率の低い条件 (0, 25, 50%) での測定値のバラツキが他の条件に比べて大きかった。このような条件下では, 熱伝導率が大きくなると同時に, 不飽和透水係数が大きくなる。Shiozawa and Campbell (1990) は, 測定時の土壌サンプルの温度上昇が 2°C を超えると, 加熱によって形成される温度勾配によって, 液状水の移動が発生すると指摘している。本研究では, 測定時の温度上昇が 2°C を超えていないことを確認したが, バラツキが大きくなった一つの原因として, 水・油系下では液状水の移動が発生した可能性も今後, 検討する必要がある。

温度と油混合率に関わらず, 油汚染土壌の熱伝導率は液相率の上昇にともなって, 直線的に上昇した。この傾向は, 本論文中に結果を示していない温度についても確認された。水と油とがこの様な傾向を示すことは, 既往の研究 (例えば, 粕測, 1982; 望月ら, 2003) から明らかであったが, 混合土壌についても, 同様の傾向を示すことが確認された。本報で測定を行った液相率範囲においては, 全ての土粒子表面を液体が覆い, さらに全ての土粒子接点において液島 (water bridge (liquid island)): 土粒子表面に形成された水膜が, 土粒子接点周辺部で連結して形成されるメニスカス, Sakaguchi *et al.* (2007) が形成されており, 液相率の増加によって, 土壌間隙中の空気が液体に置換される (粕測, 1982)。本報の測定結果から, たとえ土壌中で分離することが予想され

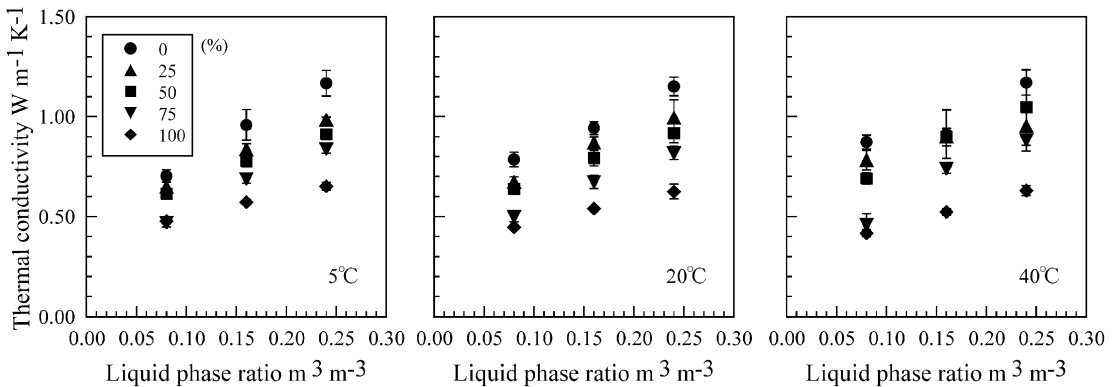


図-1 5, 20, 40°C (左から) における各油混合率の油汚染土壌の熱伝導率の液相率依存性。エラーバーは個々のプロットごとに実験結果を t 検定して求めた 95% 信頼区間を表す。油混合率 0% は水のみ, 100% は油のみを, 土壌を含むことを意味する。

Fig. 1 Effect of liquid phase ratio on thermal conductivity of oil-polluted sand of various water-oil ratios at 5, 20 and 40°C from left.

Error bars mean 95% significant level by t-test. The water-oil ratios of 0 and 100% mean that soil contains only water and oil respectively.

る水と油の混合液体であっても、本研究の液相率領域では水と油の場合と同様に、水とナタネ油が大きな相互作用を起こすことなく、間隙中の空気と置き換わっていることが新たに明らかになった。

### 3.2 油汚染土壌の熱伝導率の温度依存性

液相率 0.08, 0.16, 0.24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  の油汚染土壌の熱伝導率の温度依存性を図-2 に示した。縦軸は熱伝導率 ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ), 横軸は温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) である。

液相率を固定して考えると、液相率 0.08  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  では、温度の上昇にもなって、水と油の混合土壌の熱伝導率は直線的に上昇したが、油土壌の熱伝導率はわずかに低下した。混合土壌については、油混合率 25, 50% の熱伝導率はわずかに上昇したが、75% ではほとんど変化がなかった。

Hiraiwa and Kasubuchi (2000) は、水と油の混合土壌の温度依存性について、固相 (土粒子) の熱伝導率は温度にほとんど依存しないこと、水自身の熱伝導率は温度依存性が小さいこと (本研究の温度範囲,  $5^{\circ}\text{C}$  と  $40^{\circ}\text{C}$  における液状水の熱伝導率を較べると,  $40^{\circ}\text{C}$  のほうが  $5^{\circ}\text{C}$  の 1.11 倍。日本化学会, 2001), 温度勾配が存在する土壌中での水蒸気移動の駆動力となる、温度変化に対する飽和水蒸気密度勾配の温度依存性が大きいこと (同一温度変化に対する飽和水蒸気密度勾配は,  $40^{\circ}\text{C}$  では  $5^{\circ}\text{C}$  の 5.98 倍。日本化学会, 2001) から、水蒸気移動による熱移動量が、熱伝導率変化に大きく関与しているとしている。一方、揮発性の低いナタネ油を用いた本研究において、温度上昇にもなって油土壌の熱伝導率が低下したのは、ナタネ油の主成分であるオレイン酸などが、他の有機化合物の多

くと同様に温度の上昇にもなって熱伝導率が低下する性質を持つ (蒔田, 1975) ためであると考えられる。(本研究の温度範囲では, 7% 低下すると推定される。蒔田, 1975) 混合土壌については, Hiraiwa and Kasubuchi (2000) が論じた水蒸気移動による熱移動量の増加とナタネ油の熱伝導率の低下の影響が同時に現れたため、前述のような結果になったと考えられる。また、同一液相率条件下では、水蒸気による熱移動量の増加の影響は油混合率が低いほど大きく、ナタネ油の熱伝導率の低下の影響は油混合率が高いほど大きいため、油混合率によって異なる傾向を示したと考えられる。

液相率 0.16, 0.24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  の場合、水と油の混合土壌の熱伝導率は、温度変化にかかわらず、ほぼ一定の熱伝導率を示した。油土壌の熱伝導率は、液相率 0.16  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  では、温度上昇にもなって、わずかに低下したが、液相率 0.24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  ではほぼ一定であった。混合土壌については、液相率 0.16  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  では、温度上昇にもなってわずかに上昇したが、液相率 0.24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  では、水と油の場合と同様に、ほぼ一定であった。液相率が上昇すれば、気相率が低下するので、定容積の土壌中に存在する水蒸気量は低下する。そのため水蒸気の影響は小さくなり、水と油の混合土壌の場合、熱伝導率が変化しなくなったと考えられる。

以上の結果から、有機化合物を主成分とする油類による汚染土壌の熱伝導率が、未汚染土壌と全く逆の温度依存性を示す可能性が示唆された。

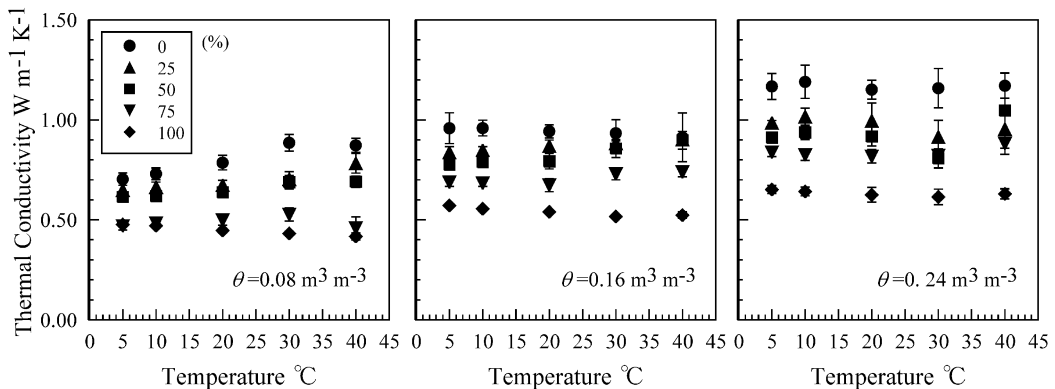


図-2 液相率 0.08, 0.16, 0.24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (左から) における各油混合率の油汚染土壌の熱伝導率の温度依存性  
エラーバーは個々のプロットごとに実験結果を t 検定して求めた 95% 信頼区間を表す。油混合率 0% は水のみ、100% は油のみを、土壌が含むことを意味する。

Fig. 2 Effect of temperature on thermal conductivity of oil-polluted sand of various water-oil ratios at 0.08, 0.16, and 0.24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  in liquid phase ratio from left.

Error bars mean 95% significant level by t-test. The water-oil ratios of 0 and 100% mean that soil contains only water and oil respectively.

### 3.3 油汚染土壌の熱伝導率の油混合率依存性

液相率 0.08, 0.16, 0.24 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup> の油汚染土壌の油混合率依存性を詳しく検討するため、図-1 で示した 20°C における測定結果について、横軸を油混合率 (%) に代えて、図-3 に示した。縦軸は熱伝導率 (W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) である。

温度・液相率条件に関らず、水と油とを比較すると、相対的に熱伝導率の高い水が、相対的に熱伝導率の低い油に置換されること (表-1) から予想されたとおり、水と油の熱伝導率の方が常に大きな値を示した (図-2)。

また、すべての混合土壌の熱伝導率は、同一温度・同一液相率条件下での水と油の熱伝導率よりも低く、油と油の熱伝導率よりも高い値を示し、油混合率の上昇にともなって直線的に低下した。この結果から、相対的に熱伝導率の高い水が、相対的に熱伝導率の低い油に置換される際、土壌の熱伝導率は、液相率や温度にかかわらず、置換された量に比例して変化することが新たに明らかになった。

### 3.4 油汚染土壌の熱伝導率の油混合率依存性のモデル化

油汚染土壌の熱伝導率のモデル化を試みる場合、その液相率依存性、温度依存性、油混合率依存性のいずれも

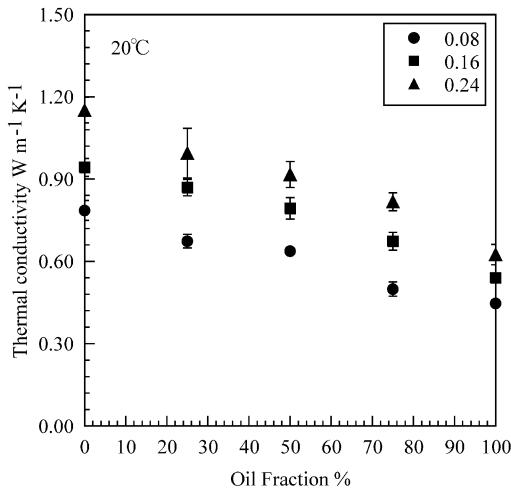


図-3 20°C における各液相率の油汚染土壌の熱伝導率の油混合率依存性

エラーバーは個々のプロットごとに実験結果を t 検定して求めた 95% 信頼区間を表す。油混合率 0% は水のみ、100% は油のみ、土壌が含むことを意味する。

Fig. 3 Effect of oil fraction on thermal conductivity of oil-polluted sand of various liquid phase ratios at 20°C.

Error bars mean 95% significant level by t-test. The water-oil ratios of 0 and 100% mean that soil contains only water and oil respectively.

重要であるが、液相率依存性モデル (例えば、de Vries, 1963) と土壌の熱伝導率の温度依存性モデル (例えば、Tarnawski *et al.*, 2000) については、すでに報告があるため、本研究では報告の見当たらない油混合率依存性を表現するモデルの提案を試みた。

図-3 のように、混合土壌の熱伝導率が直線的に低下したことは、本報で実験を行った液相率 0.08-0.24 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup> の範囲では、温度と液相率を固定した場合、混合土壌の熱伝導率が水と油の熱伝導率と油と油の熱伝導率、水-油混合比 (油混合率から算出する。) によって表すことができることも示している。そこで、温度と液相率  $\theta$  が一定の条件下での、混合土壌の熱伝導率を予測するモデル式 (Eq. (1)) を提案した。

$$\lambda_{p:q} = \frac{p\lambda_w + q\lambda_o}{p+q} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda_{p:q}$  は液相率  $\theta$  の時の水-油混合比  $p:q$  の混合土壌の熱伝導率、 $\lambda_w$  は液相率  $\theta$  の時の水と油の熱伝導率、 $\lambda_o$  は液相率  $\theta$  の時の油と油の熱伝導率である。本報では予測に用いる  $\lambda_w$  と  $\lambda_o$  を、測定を行った各温度について、液相率の一次関数として測定結果 (図-1) を近似して、それぞれ決定した。

Eq. (1) による混合土壌の熱伝導率の予測値と測定値を比較した結果を図-4 に示した。Eq. (1) が測定値をよく予測できていることがわかる。全測定値に対する自乗平均平方根誤差 (RMSE) は、0.06 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> であった。全測定値の平均値 0.77 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> に対して、7.7% の誤差であった。各温度別に見ると、5, 10, 20, 30, 40°C に対して 0.04, 0.03, 0.03, 0.07, 0.10 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> となり、高温側で RMSE が大きかった。これは高温側で測定値自身が大きかったことと、測定値のバラツキが大きかったことによる。また油混合率別で見ると、25, 50, 75% に対して 0.04, 0.07, 0.07 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> となり、油混合率の高混合率のほうが RMSE はわずかに大きかった。各混合率の測定値の平均 0.84, 0.80, 0.68 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> と併せて考えると、高油混合率の方が、誤差が大きいが明らかになった。これは、最小自乗法をもちいてフィッティングする際に、誤差を全体に分配するため、結果として測定値の小さい高油混合率の場合に、測定値に対する誤差の割合が高くなるからである。最後に、液相率別に見ると、0.08, 0.16, 0.24 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup> に対して、0.04, 0.06, 0.07 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> となり、各液相率の測定値の平均 0.61, 0.80, 0.91 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> と併せて考えると、大きな差はなかった。

## 4. おわりに

洗浄鳥取砂丘砂とナタネ油を用いて、油汚染土壌と未汚染土壌の熱伝導率を測定・比較した結果、以下のこと



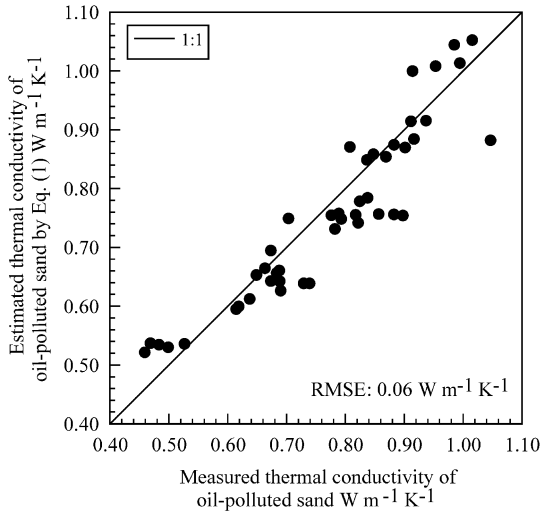


図-4 油汚染土壌の熱伝導率の測定値と Eq. (1) による予測値の比較

RMSE は自乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Percent Error) である。

Fig. 4 Comparison between measured thermal conductivity and estimated thermal conductivity by Eq. (1) of oil-polluted sand. The RMSE means the Root Mean Squared Error.

が明らかになった。

(1) 液相率依存性：測定を行った液相率  $0.08\text{--}0.24\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$  の範囲では、温度や油混合率に関らず、油汚染土壌の熱伝導率は液相率の上昇にともなって、直線的に上昇する。これは、この液相率域では、土壌中で分離することが予測される水と油の混合液体でも、水と油と油と油と同様に、水とナタネ油が相互作用を起こすことなく、間隙中の空気と置換されているためである。

(2) 温度依存性：液相率によって、その傾向は異なった。液相率  $0.08\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$  では、水と油の熱伝導率は温度の上昇にともなって直線的に上昇し、油と油の熱伝導率は逆に直線的にわずかに低下した。これは、水とナタネ油の熱伝導率の温度依存性の相違と水蒸気移動量の増加によるものである。混合土壌は、油混合率 25, 50% ではわずかに上昇したが、75% ではほとんど変化がなかった。これは、水と油と油の熱伝導率の温度依存性の原因となる、2つの事象が同時に発生したためである。また、これらの事象の大小は、油混合率に依存するため、混合率によって異なる傾向を示した。

液相率  $0.16, 0.24\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$  では、水と油の熱伝導率はほぼ一定だったが、油と油の熱伝導率は液相率  $0.16\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$  ではわずかに低下し、液相率  $0.24\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$  ではほぼ

一定だった。混合土壌の熱伝導率は、液相率  $0.16\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$  ではわずかに上昇したが、液相率  $0.24\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$  ではほぼ一定だった。これは、気相率の低下により、水蒸気移動量が低下したためである。以上から、有機化合物を主成分とする油類による汚染土壌の熱伝導率が、未汚染土壌と全く逆の温度依存性を有する可能性が示唆された。

(3) 油混合率依存性：温度と液相率を一定とすると、混合土壌の熱伝導率は、水と油と油のあいだの値を示し、油混合率の上昇にともなって、混合土壌の熱伝導率は直線的に低下する。この結果から、相対的に熱伝導率の高い水が、相対的に熱伝導率の低い油に置換される際、土壌の熱伝導率は液相率や温度にかかわらず、置換された量に比例して変化することが明らかになった。

(4) 油混合率依存性の結果から、温度と液相率を固定した場合、混合土壌の熱伝導率を、油混合率から算出される水-油混合比、水と油の熱伝導率、油と油の熱伝導率から予測するモデル式 Eq. (1) を提案した。このモデルによって、本研究の全測定結果 ( $n=45$ , 平均  $0.77\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ ) を予測した場合、RMSE は  $0.06\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$  と小さかった。

## 謝 辞

本研究の一部は、平成 16 年度 (社)農業土木学会学術基金の助成を賜った。ここに記して謝意を表します。

## 引用文献

- Hiraiwa, Y. and Kasubuchi, T. (2000) : Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature ( $5\text{--}75^\circ\text{C}$ ). *European Journal of Soil Science*, **51** : 211-218.
- 地盤環境技術研究会 (2003) : 土壌汚染対策技術, p. 192-195, 日科技連出版社, 東京.
- 柏測辰昭 (1982) : 土壌の熱伝導率に関する研究. *農業技術研究所報告 B*, **33** : 1-54.
- 河合隆行・神近牧男・木村玲二・多田泰之・小玉芳敬・佐倉保夫 (2006) : 集塵機を用いた砂地における簡易ボーリング法. *日本砂丘学会誌*, **52** (3) : 91-102.
- 蒔田 薫 (1975) : 粘度と熱伝導率データの検索と計算法-1, *ケミカルエンジニアリング・シリーズ 1*, p. 154, 培風館, 東京.
- 望月秀俊・宮崎 毅・中野政詩 (1998) : 豊浦砂の熱伝導率の塩類依存性. *農土論集*, **198** : 41-46.
- 望月秀俊・坂口 巖・井上光弘 (2003) : 土壌の熱伝導率測定法の比較. *土壌の物理性*, **93** : 47-50.
- Momose, T. and Kasubuchi, T. (2002) : Effect of reduced air pressure on soil thermal conductivity

- over a wide range of water content and temperature. *European Journal of Soil Science*, **53** : 599-606.
- 熱物性学会編 (1990) : 熱物性ハンドブック, p. 449, 養賢堂, 東京.
- 西垣 誠 (1999) : 土壌・地下水汚染と対策. 土と基礎, **47** (10) : 1-4.
- 日本地盤環境浄化推進協議会監修 (2000) : 土壌・地下水汚染の実態とその対策. pp. 28-29, 33-34, オーム社, 東京.
- 日本化学会 (2001) : 化学便覧 基礎編II 改訂4版 pp. II-3, II-67, II-68, 丸善, 東京.
- 登尾浩介 (2005) : サーモ TDR ブローブによる不飽和土壌中の有機汚染物質濃度の測定. 土木学会論文集, **783** (VII 34) : 33-38.
- オーム電気株式会社 : オーム電気株式会社 HP <http://www.ohmdenki.com/boxcool/tech/chara.htm>.
- Sakaguchi, I., T. Momose and T. Kasubuchi (2007) : Decrease in thermal conductivity with increasing temperature in nearly dry sandy soil. *European Journal of Soil Science*, **58** : 92-97.
- 佐々木裕美・諸泉利嗣・繁澤和佳子・三浦健志 (2005) : ADR 法による飽和砂土における NAPL 含有量の推定. 平成 17 年農業土木学会中四国支部講演会講演要旨集 : 191-192.
- Shiozawa, S. and G.S. Campbell (1990) : Soil thermal conductivity. *Remote Sensing Review*, **5** (1) : 301-310.
- Tarnawski, V.R., F. Gori, B. Wagner and G.D. Buchan (2000) : Modelling approaches to predicting thermal conductivity of soils at high temperatures. *International Journal of Energy Research*, **24** : 403-423.
- Thomson, N.R., D.N. Graham and G.J. Farquhar (1992) : One-dimensional immiscible displacement experiments, *Journal of Contaminant Hydrology*, **10** : 197-223.
- 上田泰久 (2005) : 食材事典, [http://www2.odn.ne.jp/shokuzai/Abura\\_shurui.htm](http://www2.odn.ne.jp/shokuzai/Abura_shurui.htm).
- de Vries, D.A. (1963) : Thermal properties of soils. In W.R. van Wijk, editor, *Physics of plant environment*, pp.210-235. North Holland Publ. Co. Amsterdam.

## 要 旨

油類による土壌汚染は深刻な環境問題であり, 土壌中での油類の動態を把握する必要がある。これには油汚染土壌の熱特性に関する研究が必要である。本報では, 油汚染土壌の熱伝導率に着目し, その液相率・温度・油混合率依存性を明らかにすることを目的とした。洗浄鳥取砂丘砂とナタネ油を用いて油汚染土壌を模擬し, KD2 を用いて, 様々な液相率・温度・油混合率条件のもと, 熱伝導率を測定した。その結果, 水と油の両方を混合した土壌でも, 熱伝導率が液相率の上昇にともなって直線的に上昇すること, 液相率や油混合率によって様々な温度依存性を示すこと, 有機化合物を主成分とする油類による汚染土壌の熱伝導率が, 未汚染土壌と正反対の傾向を示す可能性があること, 液相率と温度を固定すると, 熱伝導率は油混合率に比例して低下すること, が明らかとなった。また, 油混合率依存性の結果から, 油汚染土壌の熱伝導率の予測式を提案した。

受稿年月日 : 2005 年 8 月 5 日

受理年月日 : 2006 年 10 月 4 日