

論文の内容の要旨

生物・環境工学専攻

平成9年度博士課程 進学

氏 名 望 月 秀 俊

指導教官名 宮 崎 毅

論文題目 砂および粘土の熱伝導率の水分・塩類濃度依存性に関する研究

現代の重大な環境問題には、地球温暖化と土壌の塩類化がある。土壌の塩類化が解決されれば、農地を大量に回復することができ、食糧を増産することができる。土壌の塩類化に関する基礎研究に、土壌中の水・熱・塩類の同時移動解析がある。同時移動の解析は各要素の連立微分方程式を構築し、それを解くことによつてなされる。連立微分方程式を解くには、それぞれの移動係数を正確に把握する必要がある。本研究では、土壌中の水・熱・塩類の同時移動解析に必要な移動係数の中から土壌の熱伝導率に着目した。

土壌の熱伝導率は、土壌に固有の物性値で、水分・温度・乾燥密度などに依存する。また、土壌溶液中に溶解している塩類やその濃度にも依存する。土壌の熱伝導率の水分依存性については、多くの研究がなされているが、塩類濃度依存性に関する研究は少なく、特に土壌中の微生物や有機物の影響のない単純な系を仮定した研究は見当たらない。この単純な系は、試料に砂と粘土を用いることで構築できる。そこで、本研究の目的を、砂および粘土の熱伝導率の水分・塩類濃度依存性を明らかにすること、とした。また、Cass et al. (1984)の方法を用いて、圧力依存性から見かけの熱伝導率を伝導成分と水蒸気成分に成分分離し、それぞれの成分の水分・塩類濃度依存性を評価した。本研究では塩類化土壌で確認される代表的塩類、NaClを用いることとした。

本研究では、恒温恒湿チャンバー内に設置した加圧チャンバー内に試料を静置し、ガスボンベで圧力を調整し、試料が設定した温度になるのを待った後、Kasubuchi (1977)の開発した双子型プローブ法を用いて熱伝導率を測定した。実験試料には、以前に日本の標準砂であった豊浦砂と、豊浦砂の粒径分布の最頻値と同じ粒径を持つガラスビーズ(以下GB015)、代表的非膨潤性粘土カオリンと代表的膨潤性粘土モンモリロナイトを含むクニゲルV1を用いた。

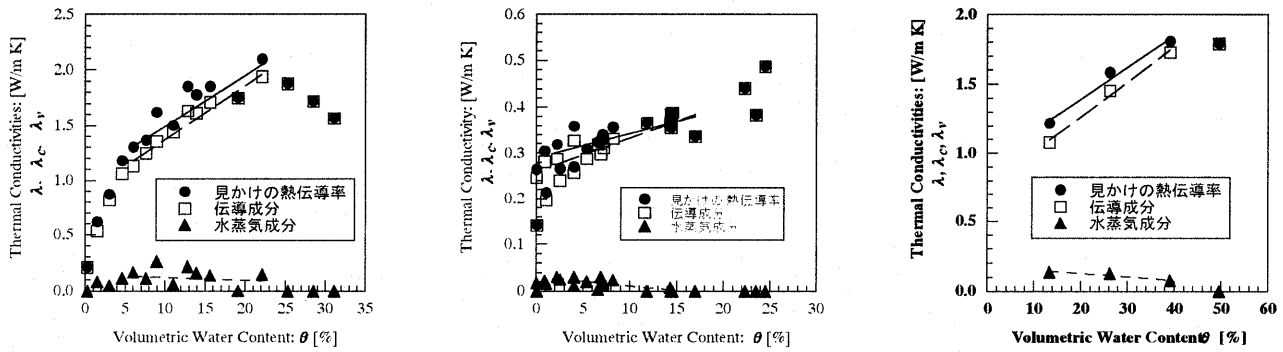


Fig. 1 豊浦砂(左), GB015(中), カオリン(右)の熱伝導率の水分依存性

測定を行った結果、豊浦砂、GB015、カオリンについてはよく似た水分・NaCl濃度依存性が確認されたが、クニゲルV1については、全く異なる依存性が確認された。

豊浦砂・GB015・カオリンの熱伝導率の水分依存性

豊浦砂、GB015、カオリンの熱伝導率の水分依存性をFig. 1に示した。豊浦砂、GB015、カオリンの見かけの熱伝導率は伝導成分が非常に大きく、水蒸気成分は小さかった。このため、見かけの熱伝導率の水分依存性は伝導成分の水分依存性によって決定されることがわかった。

伝導成分は水分量の増加に伴って三段階の上昇を示し、試料によって各段階に含まれる水分域が異なることがわかった。風乾からある体積含水率 θ_1 までは、伝導成分は水分量の増加に伴って急激に上昇する。(第一段階)体積含水率 θ_1 - θ_2 では、伝導成分は水分量の変化に対して直線的に上昇した。(第二段階) θ_2 以上の高水分域は、見かけの熱伝導率の測定結果のバラツキが非常に大きく、統一した傾向は明らかにできなかった。(第三段階)水分依存性の傾向はNaCl濃度が高くなっても同様の傾向を示した。

一方、水蒸気成分は、NaClを含まない場合、風乾状態の試料では確認されないが、水分量が増加するのに伴って直線的に上昇し、 θ_{vMax} で最大値を取ると、それ以上の水分量では直線的に低下し、 θ_{vLmt} 以上になると確認されなかった。また、NaCl濃度が高くなるにつれて、水蒸気成分は小さくなった。

Table 1 各試料の体積含水率の代表値 (%)

	θ_1	θ_2	θ_{vMax}	θ_{vLmt}
豊浦砂	6	22	9	25
GB015	2	17	2	15
カオリン	< 10	40	12	50

各試料の θ_1 、 θ_2 、 θ_{vMax} 、 θ_{vLmt} はTable 1に示したとおりである。

豊浦砂・GB015・カオリンの熱伝導率のNaCl濃度依存性

本研究では、含水比を一定にした時の、豊浦砂、GB015、カオリンの熱伝導率のNaCl濃度依存性は、水分依存性で示した第二段階のみについて詳しく検討した。なぜなら、第一段階は水分量変化に対する熱伝導率の変化が大きく、第三段階は測定値のバラツキが非常に大きかったためである。

豊浦砂の熱伝導率のNaCl濃度依存性をFig. 2に示した。水分依存性の第二段階に相当する含水比では、NaCl濃度依存性は二つのパターンに分けられる。豊浦砂の場合、第二段階の低水分域では伝導成分は上昇する。これはNaClを豊浦砂に加えると体積含水率が增大するためであると考えられる。水蒸気成分は、NaCl添加による相対湿度の低下や、体積含水率の増大による気相率の低下によって低下するが、見かけの熱伝導率への寄与が非常に小さいために、見かけの熱伝導率は上昇した。第二段階の高水分域では、伝導成分はNaCl濃度が高くなるのに伴って低下する。これはNaCl水溶液の熱伝導率の濃度依存性によると考えられた。また、水蒸気成分は、低水分域と同様に低下する。両成分の依存性を合わせ、見かけの熱伝導率はNaCl濃度の上昇に伴って低下する。GB015とカオリンの場合は、豊浦砂の場合と逆に、低水分域で見かけの熱伝導率は

低下し、高水分域で上昇した。しかし、全ての試料の熱伝導率は、第二段階に相当する含水比では、NaCl濃度の上昇に対して直線的に変化した。Noborio and McInnes (1993)が、含水比一定の熱伝導率のNaCl濃度依存性を曲線で表現したのとは、対照的な結果となった。また、Noborio and McInnesは土壌の熱伝導率は、水分量に依らずNaCl濃度が高くなると、低下することを示したが、本研究では逆に上昇することがわかった。

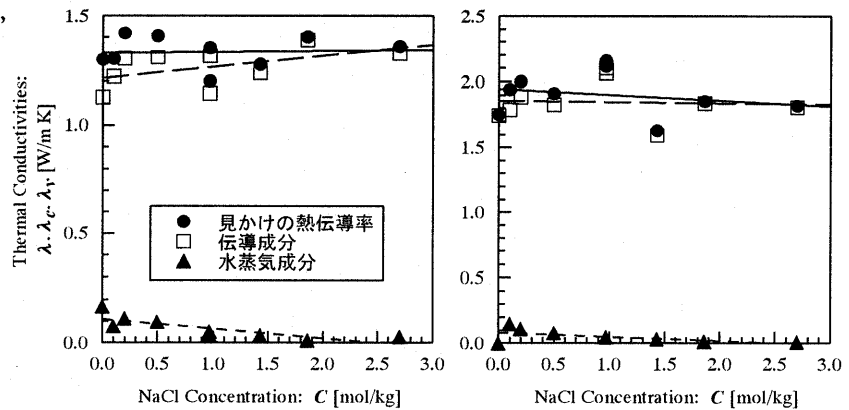


Fig. 2 豊浦砂の熱伝導率のNaCl濃度依存性
(左: $\omega = 4\%$, 右: $\omega = 12\%$)

クニゲルV1の熱伝導率の水分依存性

クニゲルV1は膨潤性粘土で、豊浦砂などとは同様の実験条件を設定することができず、水分飽和に近い高水分量 ($\omega = 100 - 1000\%$)と粘土が凝集・沈降しない低濃度に限定して測定を行った。その結果、クニゲルV1では水蒸気成分がほとんど確認されず、見かけの熱伝導率は伝導成分のみで構成されることがわかった。

クニゲルV1の伝導成分は含水比に反比例して低下し、水の熱伝導率に漸近した。クニゲルV1の水分量は飽和に近い高水分量であるため、伝導成分は固相率(すなわち乾燥密度)に大きく依存することがわかった。測定を行った水分域では、クニゲルV1の熱伝導率は含水比の逆数と直線関係にあり、直線近似により外挿したY切片、すなわち乾燥密度 0 Mg/m^3 のときは、水の熱伝導率 (0.620 W/m K)と非常に近い値を示した。得られた近似直線はEq.(1)である。

$$\lambda = \frac{.332}{\omega} + .643 \quad (1)$$

クニゲルV1の熱伝導率のNaCl濃度依存性

クニゲルV1の熱伝導率はNaCl濃度に関わらず、ほぼ一定であった。これは、実験を行うことができたNaCl濃度の幅が狭く、NaCl水溶液の熱伝導率の変化は非常に小さいことや、水分飽和状態に近い水分量では熱伝導率は土壌溶液よりの熱伝導率よりも乾燥密度に大きく依存することによると考えられる。

熱伝導率の水分・NaCl濃度依存性のモデル化

クニゲルV1は他の三試料と全く異なる熱伝導率の水分・NaCl濃度依存性を示したため、モデル化はEq.(1)で行った。水分依存性の第二段階では、豊浦砂、GB015、カオリンの熱伝導率は、NaCl濃度の上昇にともなって直線的に変化したので、

この特性を利用したモデル化を試みた。熱伝導率 λ は直線的に変化したので、傾き m とNaCl濃度 C 、NaCl濃度が 0 mol/kg の時の熱伝導率 λ' を用いて、Eq.(2)で表現される。

$$\lambda = m \times C + \lambda' \quad (2)$$

傾き m と λ' の含水比依存性を調

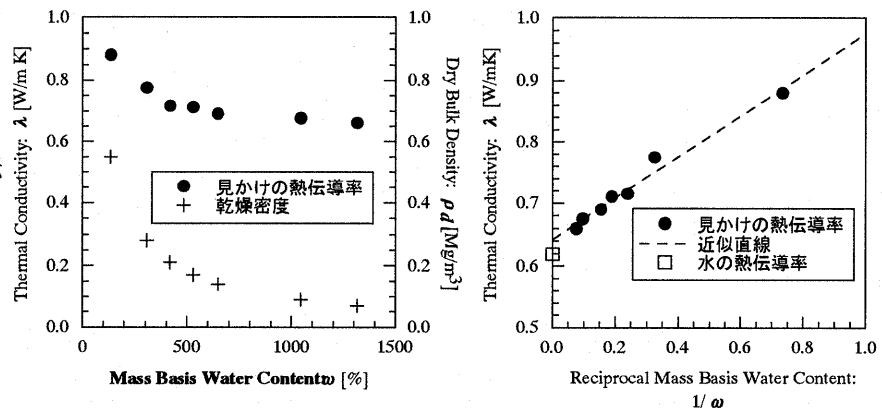


Fig. 3 クニゲルV1の熱伝導率の水分依存性

べたところ、 m と λ' も第二段階にあたる含水比では直線的に変化したため、Eq.(2)はEq.(3)となり、含水比： ω とNaCl濃度： C を変数とした、非常に簡単なモデルを構築することができた。各パラメータはTable 2に示した。

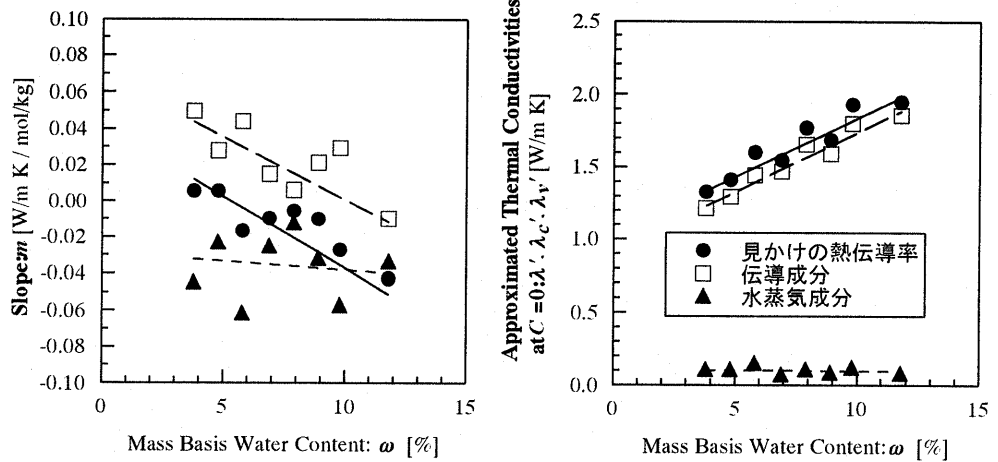


Fig. 4 m と λ' の含水比依存性(豊浦砂)

このモデルと既存の熱

伝導率予測モデルを用いて熱伝導率の予測値と測定値を比較したところ(Fig. 5)、新モデルは、試料に関わらず、既存のモデルと同等以上によく測定値をよく再現することがわかった。Table 3に豊浦砂の場合の相関係数を示した。また、既存のモデルに比べて、計算が簡便で、かつ汎用性が高いことを示すことができた。

$$\lambda = (a \times \omega + b) \times C + (a' \times \omega + b') \quad (3)$$

本研究で熱伝導率の水分・NaCl濃度依存性を表現するモデルを構築したことによって、これまでよりも簡便かつ正確に熱伝導率を予測できる。また、このモデルを用いれば、土壌中の水・熱・塩類の同時移動を以前より簡便かつ正確に解析できると考えられる。低・高含水比の水分・NaCl濃度依存性を明らかにし、全水分域での依存性を明らかにすることや本研究のモデルを用いてシミュレーションを行うことは今後の課題として残す。

Table 2 新モデルのパラメータ

	a	b	a'	b'
豊浦砂	-.00794	.04250	.08070	1.0310
GB015	.00579	-.01837	.01068	.28707
カオリン	.00651	-.17664	.02799	.91439

Table 3 モデルの相関係数(豊浦砂)

C mol/kg	New	Noborio	de Vries	ESP
0.0	.869	.929	.798	.816
1.0	.936	.928	.933	.936
2.0	.892	.919	.883	.894

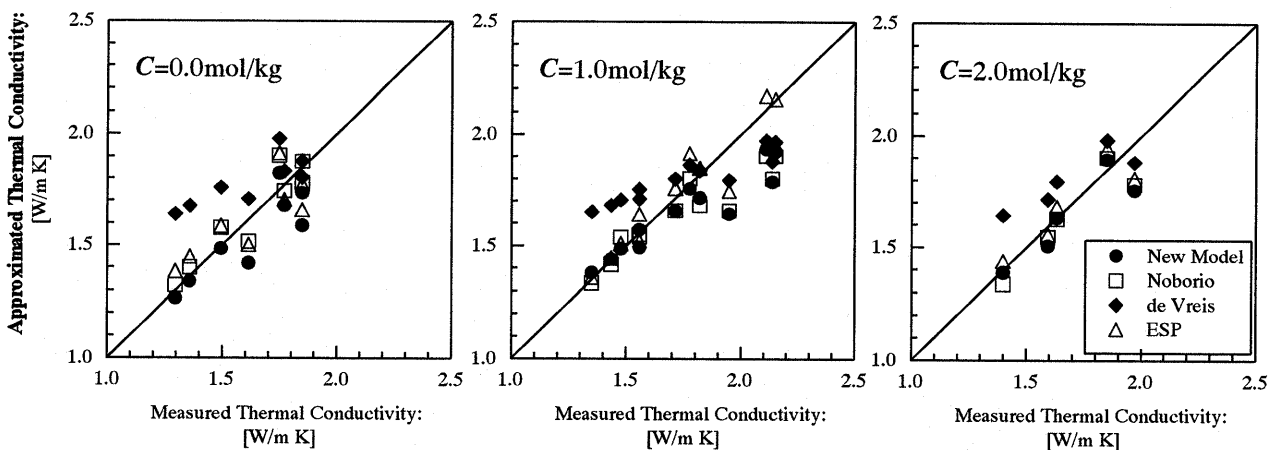


Fig. 5 モデルの予測値と実測値の比較(豊浦砂)