

学 位 論 文 題 名

土壌の熱伝導機構に関する研究

—粗粒火山灰土の熱伝導特性と凍結・融解過程における凍土の熱伝導率—

学位論文内容の要旨

土壌中のエネルギー移動や地温変動は、地域環境学的、農地工学的、地盤工学的に重要な現象であり、この現象を解析するためには、土壌の熱伝導率を定量的に把握し、その機構について解明することが不可欠である。土壌の熱伝導特性は、土壌を構成する要素それぞれの熱伝導率とそれらの体積割合、および土壌構造によって特徴づけられる。北海道に広く分布する火山灰土のうち、粗粒火山灰土については、熱伝導特性と、それを特徴づける土壌構造の研究が十分ではなかった。また土壌の凍結、凍上を解析し、予測する際、凍土の熱伝導率は重要な因子となるが、凍結・融解過程における熱伝導率のヒステリシス現象については未解明であった。そこで本論文では、まず粗粒火山灰土を対象に熱伝導特性を調べ、土壌の固相、液相、気相の体積割合とそれぞれの熱伝導率、とくに固相の熱伝導率およびその構造が熱伝導におよぼす影響について検討した。次に、固相、不凍水、氷、気相の 4 相系となる凍土を対象に、熱伝導率のヒステリシスが現れる条件と傾向、およびその原因について、凍結・融解過程における凍土中の不凍水量の変化、および水と氷の熱伝導率の違いを考慮することによって解析した。

1. 粗粒火山灰土の構造と熱伝導特性

道央に分布する粗粒火山灰土の樽前-d(Ta-d)、恵庭-a(En-a)を試料として用い、非火山性の粗粒土である砂丘未熟土(Sand)と火山灰土である黒ボク土(Kuroboku)と比較することにより、これらの粗粒火山灰土の熱伝導特性の機構を明らかにした。Sand の熱伝導率は、水分飽和に近い状態で水の熱伝導率の 2 倍以上の値を示したのに対し、Ta-d、En-a の熱伝導率は Kuroboku に類似し、水分飽和に近い状態でも水の熱伝導率に近い値を示した。また Sand と Kuroboku では、熱伝導率の水分依存性が変化する土壤水分量が認められたのに対し、Ta-d、En-a では熱伝導率の水分依存性が直線的であった。熱伝導率が小さい原因として 2 つが明らかになった。第 1 の原因は、粗粒火山灰土の間隙が構成粒子である軽石の孔隙特性に起因して多く、土壌の構成要素のうち熱伝導率が相対的に大きい固相の割合が少ないことであった。軽石の孔隙を、表面孔隙、内部に存在し外部から遮断された閉塞孔隙、外部と連続する活性孔隙に区分し、形態の観察、定量化を行ったところ、Ta-d、En-a では、直径 20~30 μm の表面孔隙や直径 10~50 μm の活性孔隙が存在し、これらの孔隙は 2 種の粗粒火山灰土では異なった形態や分布を有していた。軽石の孔隙量は、軽石粒子の体積の 75~85% を占め、固体部分はわずか 15~25% であった。そのため粗粒火山灰土の自然堆積状態である不攪乱状態における全間隙は、Ta-d では 90%、En-a では 70% と著しく多く、全間隙のうち、閉塞孔隙はほとんど存在しなかった。

が、約 50%は粒子内の活性孔隙によるものであった。第 2 の原因は、固相(軽石の固体部分)の熱伝導率が非火山性の土壌に比べて小さいことである。固相の熱伝導率は、Sand の場合、 $3.20 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であったのに対し、これらの粗粒火山灰土では $1.4 \sim 1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ と Sand の半分以下の値を示し、これは Kuroboku($1.00 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)よりもわずかに大きい値であった。軽石の表面孔隙や活性孔隙は保水性に関与するため、粗粒火山灰土は不攪乱状態で多様な間隙組成を有し、低いマトリックポテンシャルにおいても多量の水分を保持した。このことが熱伝導率の水分依存性が低く、直線的となる原因であり、土壌水分が変化しても熱伝導経路が急激に変化しないためであると結論づけられた。

2.凍結・融解過程における凍土の熱伝導率

凍結・融解過程における凍土の熱伝導率の変化を調べ、ヒステリシスの有無、および傾向について整理し、その原因を明らかにした。はじめに、熱伝導率の正確な測定方法を検討したところ、ヒートプローブの温度上昇を 1°C 未満とする条件で測定する限り、凍土、未凍土ともに、測定値は発熱量、熱供給時間の影響を受けなかった。次に、上記の条件で褐色低地土(Hokudai)、黒ボク土(Kuroboku)、砂丘未熟土(Sand)について、 -10°C を境界とした凍結・融解過程の熱伝導率を測定したところ、熱伝導率は、水分が多いものほど大きい値を示し、その傾向は未凍結状態よりも凍結状態で顕著であった。凍結による熱伝導率の増加の程度や、凍結後の温度低下に伴う熱伝導率の増加量もまた、水分が多い試料の方が大きかった。これは氷の割合が凍結前の水分量が増えるほど増大し、温度低下に伴って氷の熱伝導率が増大するためである。さらに Hokudai と Kuroboku では、凍結・融解過程で熱伝導率のヒステリシスが認められ、融解過程では凍結過程よりも大きい熱伝導率を示したが、Sand ではヒステリシスは生じなかった。これらの土壌の不凍水量を TDR 土壌水分計で測定したところ、同一温度における不凍水量は Sand が最も少なく、凍結前の土壌水分量による違いは認められなかったが、Hokudai や Kuroboku では、不凍水量が凍結前の土壌水分量の増加に伴って増加する傾向を示した。その傾向は、同一の土壌であれば固相率の多い方が、また Hokudai と Kuroboku では、Kuroboku の方が固相率が少ないにも拘らず大きかった。そのため Sand では、水分特性曲線や凝固点降下度による熱力学的に求めた不凍水量の推定値が実測値とほぼ一致したが、Hokudai と Kuroboku では一致しなかった。さらに、Hokudai と Kuroboku では、融解過程の不凍水量が凍結過程よりも少なくなるヒステリシスを示し、Sand ではヒステリシスは認められなかった。Hokudai を対象に、熱伝導率のヒステリシスの傾向として、同一温度における凍結・融解過程の熱伝導率の差を検討したところ、水分量がゼロ付近ではその差はほぼゼロに等しいが、土壌水分量の増加に伴って大きくなった。熱伝導率の差は凍結過程の熱伝導率の $2 \sim 8\%$ の値であった。不凍水量のヒステリシスの傾向として、同じく Hokudai を対象に、同一温度における凍結・融解過程の不凍水量の差を検討したところ、不凍水量の差もまた土壌水分量の増加に伴って大きくなった。不凍水量の差は凍結過程の不凍水量の $3 \sim 10\%$ の値であった。熱伝導率のヒステリシスの要因には不凍水量のヒステリシスが強く関与している。これは融解過程では不凍水量が少ない、つまり氷の体積割合が多く、氷の熱伝導率が水の 4 倍となるためである。熱伝導率のヒステリシスの傾向は、水分量の増加とともに不凍水量の差が増大することから説明づけられた。

以上のように、本論文では粗粒火山灰土と凍結・融解過程における凍土を対象とし、これらの熱伝導機構について、土壌の構成要素それぞれの熱伝導率とそれらの体積割合、および土壌構

造の面から明らかにした。本論文で得られた成果は、土壌における熱移動現象の解明に大きく貢献するものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷川 周 一

副 査 教 授 長 澤 徹 明

副 査 教 授 柏 渕 辰 昭 (山形大学農学部生物生産学科)

副 査 助教授 相 馬 尅 之

学 位 論 文 題 名

土壌の熱伝導機構に関する研究

—粗粒火山灰土の熱伝導特性と凍結・融解過程における凍土の熱伝導率—

本論文は 8 章からなる頁数 114 の和文論文で、図 30、写真 3、表 13、引用文献 91 を含んでいる。他に、参考論文 1 編が添えられている。

土壌中のエネルギー移動や地温変動を解析する際、土壌の熱伝導率を定量的に把握し、その機構について解明することが不可欠である。粗粒火山灰土については、熱伝導特性とそれの特徴づける土壌構造の研究が十分ではなかった。また凍土については、凍結・融解過程における熱伝導率のヒステリシス現象が未解明であった。そこで本論文では、粗粒火山灰土の熱伝導特性と凍土の熱伝導率のヒステリシス現象について、土壌の構成要素それぞれの熱伝導率とそれらの体積割合、および土壌構造の面から明らかにした。

1.粗粒火山灰土の構造と熱伝導特性

粗粒火山灰土の樽前-d(Ta-d)、恵庭-a(En-a)を試料として用い、非火山性の粗粒土である砂丘未熟土(Sand)と火山灰土である黒ボク土(Kuroboku)と比較した。Ta-d、En-a の熱伝導率は Sand よりも小さく、Kuroboku に類似し、水分飽和に近い状態でも水の熱伝導率に近い値を示した。また熱伝導率の水分依存性が直線的であった。熱伝導率が小さい第 1 の原因は、構成粒子である軽石の孔隙特性に起因して粗粒火山灰土の間隙が多いことであった。軽石の孔隙を、表面孔隙、内部に存在し外部から遮断された閉塞孔隙、外部と連続する活性孔隙に区分し、形態の観察、定量化を行ったところ、Ta-d、En-a では直径 20~30 μm の表面孔隙や直径 10~50 μm の活性孔隙が存在し、これらの孔隙は 2 種の粗粒火山灰土では異なった形態や分布を有していた。孔隙は軽石粒子の体積の 75~85%を占め、固体部分は 15~25%であった。そのた

め粗粒火山灰土の自然堆積状態である不攪乱状態における全間隙は、Ta-d では 90%、En-a では 70%と著しく多く、全間隙のうち閉塞孔隙はほとんど存在しなかったが、約 50%は粒子内の活性孔隙によるものであった。第 2 の原因は、固相(軽石の固体部分)の熱伝導率が小さいことであった。固相の熱伝導率は、Sand の場合、 $3.20 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であったのに対し、これらの粗粒火山灰土では $1.4 \sim 1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ と Sand の半分以上の値を示し、これは Kuroboku($1.00 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)よりもわずかに大きい値であった。軽石の表面孔隙や活性孔隙は保水性に関与するため、粗粒火山灰土は不攪乱状態で多様な間隙組成を有し、低いマトリックポテンシャルにおいても多量の水分を保持した。このことが熱伝導率の水分依存性が低く、直線的となる原因であり、土壤水分が変化しても熱伝導経路が急激に変化しないためであると結論づけられた。

2.凍結・融解過程における凍土の熱伝導率

はじめに、熱伝導率の正確な測定方法を検討したところ、ヒートプローブの温度上昇を 1°C 未満とする条件で測定する限り、測定値は発熱量、熱供給時間の影響を受けなかった。次に、上記の条件で褐色低地土(Hokudai)、黒ボク土(Kuroboku)、砂丘未熟土(Sand)について、凍結・融解過程の熱伝導率を測定したところ、Hokudai と Kuroboku では、凍結・融解過程で熱伝導率のヒステリシスが認められ、融解過程では凍結過程よりも大きい熱伝導率を示したが、Sand ではヒステリシスは生じなかった。これらの土壤の不凍水量を TDR 土壤水分計で測定したところ、Sand の不凍水量には凍結前の土壤水分量による違いが認められず、水分特性曲線や凝固点降下度から求めた推定値とほぼ一致したが、Hokudai や Kuroboku では、測定値が凍結前の土壤水分量の増加に伴って増加する傾向を示し、推定値とは一致しなかった。さらに Hokudai と Kuroboku では、融解過程の不凍水量が凍結過程よりも少なくなるヒステリシスを示し、Sand ではヒステリシスは認められなかった。同一温度における凍結・融解過程の熱伝導率の差を検討したところ、水分量がゼロ付近ではその差はほぼゼロに等しいが、土壤水分量の増加に伴って大きくなった。同一温度における凍結・融解過程の不凍水量の差を検討したところ、不凍水量の差も土壤水分量の増加に伴って大きくなった。熱伝導率のヒステリシスの要因には、融解過程では不凍水量が少ない、つまり氷の体積割合が多く、氷の熱伝導率が水の 4 倍となることが強く関与し、熱伝導率のヒステリシスの傾向は、水分量の増加とともに不凍水量の差が増大することによるものと説明づけられた。

本論文で得られた成果は、土壤における熱移動現象の解明に大きく貢献するとともに、学術的にも高く評価される。よって審査員一同は、鈴木伸治が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。