

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：23303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14830

研究課題名(和文)土のヒートパイプ現象を利用した地表-地中間の熱輸送装置の開発

研究課題名(英文) Use of soil heat-pipe phenomenon to develop a heat transport device between soil surface and underground

研究代表者

百瀬 年彦 (MOMOSE, Toshihiko)

石川県立大学・生物資源環境学部・准教授

研究者番号：40742515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：適度な水分条件と減圧条件で、土の熱伝導率は金属と同程度にまで劇的に増加する。この土の熱伝導率の劇的な増加は、土の中の個々の間隙がヒートパイプとして機能し、土全体にひとつながりのヒートパイプ現象を引き起こすことに起因する。本研究では、土が大きな熱輸送を行える新素材となりうることに着目して、土と水の混合物を充填した小型の熱輸送装置を製作した。夏を想定した温室模型で性能試験を行い、この熱輸送装置による新しい地中熱利用技術の可能性を見いだした。

研究成果の概要(英文)：When soil contains an appropriate amount of water, its thermal conductivity increases dramatically under reduced air pressure. The dramatic increase in the thermal conductivity results from that individual soil pores function as micro heat-pipes, leading to a sequence of heat-pipe in the whole soil. Focusing on the possibility of the soil as a new material to transfer a large amount of heat, this study tries to develop a miniature heat-transfer device that contains a mixture of soil and water. To evaluate the performance of the developed heat-transfer device, this study also makes a miniature greenhouse model that supposes summer. The performance evaluation reveals a possibility of the developed heat-transfer device to be a new technology for utilization of shallow geothermal energy.

研究分野：土壌物理

キーワード：ヒートパイプ 土の熱伝導率 地中熱利用

### 1. 研究開始当初の背景

常識的には、土の熱伝導率は金属よりも小さい。これは土が空気を含むことと関係する。では、土から空気を抜いたらどうなるだろうか。私はこれまでの研究で、減圧下における土の熱伝導率が、最大で、ステンレス鋼と同程度にまで劇的に大きくなることを見いだした (Momose & Kasubuchi, 2002)。さらに、この大きな熱伝導率が得られる土の中では、高温側から低温側への水蒸気による大きな潜熱輸送があり、それと同時に、低温側から高温側への液状水の戻りがあることを突き止めた (Momose et al., 2008)。高温側と低温側とで、水が相変化をしながら循環し、熱を伝える現象は、工学分野でよく知られるヒートパイプの作動原理と同じである。そこで、土の熱伝導率の劇的な増加を土のヒートパイプ現象と結論づけた (Sakaguchi et al., 2009; 粕淵ら, 2011)。これら一連の研究成果は、土が大きな熱輸送を行う新素材となりうるという発想を生み出した。

### 2. 研究の目的

本研究では、土が大きな熱輸送を行う新素材となりうることに着目し、下記2つを目的として、新しい地中熱利用技術としての可能性を探ることとした。

- (1) 土を充填した、小型の熱輸送装置を製作する。
- (2) 夏を想定した温室模型をつくり、熱輸送装置の性能評価を行う。

### 3. 研究の方法

熱輸送装置に充填する土は、これまでの研究を踏まえ、減圧下で最大の熱伝導率を得た赤黄色土を用いることとした。石川県農林総合研究センター・能登分場の赤黄色土を採取し、風乾し 2mm 篩を通過したものを試料とした。Momose & Kasubuchi (2002) が報告した実験装置と同じものを製作し (図 1)、能登・赤黄色土を用いて、幅広く水分調整した試料の熱伝導率を 15 の室温条件かつ減圧条件で測定した。なお、固相率は 0.35 とした。減圧下で最大の熱伝導率となる体積水分率を、熱輸送装置の充填条件とした。

熱輸送装置は以下のようにして製作した。円筒アクリル容器 (外径 50mm, 内径 44mm, 長さ 200mm) に赤黄色土 (固相率 0.35, 体積水分率 0.25) を充填し、アクリル容器上下面をアルミ丸板 (直径 70mm, 板厚 2mm) で挟み、シリコンボンドで接着した。アクリル容器に 1mm 径の穴をあけ、容器内気圧を制御できるようにした。気圧制御は、真空ポンプとレギュレータで行った。

性能評価を行うため、夏を想定した温室模型を製作した (図 2)。縦・横・高さがそれぞれ 40cm, 30cm, 30cm のアクリル箱を作り、底面はアルミ板とし、上面はアクリル板とした。このアクリル箱の中央に、熱輸送装置を垂直に設置し、底面から 0cm, 5cm, 10cm,

15cm, 20cm に熱電対を取り付け、熱輸送装置の温度分布を測定することにした。また、熱輸送装置が埋設されるよう、アクリル箱の底面から高さ 20cm まで発泡スチロール材を充填した。このアクリル箱の底面を、15 に設定した水槽に接触させ、一定温度にした。熱輸送装置を熱伝導率の低い発泡スチロール材に埋設した理由は、横方向の熱の流入流出を抑えて熱輸送装置の性能を把握しやすくするため、底面を 15 に設定した理由は、夏における地中 2m 付近の温度を想定したためである。この温室模型を、室温 27 および 40 に設定した空気恒温槽 (LU-114, Espec Corp.) に入れた。

熱輸送装置の各位置における温度を、熱電対とデータロガー (CR1000, Campbell Scientific Inc.) を用いて 10 分間隔で計測した。計測開始から約 8 時間後に真空ポンプを作動して、熱輸送装置を 15 の飽和水蒸気圧 (1.7 kPa) まで減圧し、その 13 時間後に大気圧に戻した。

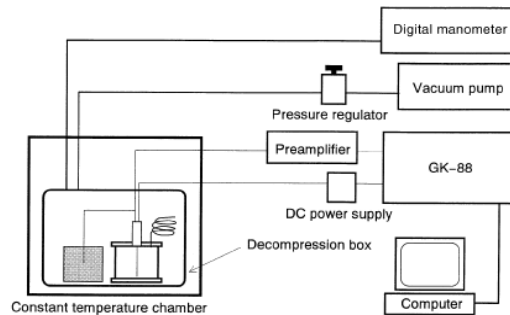


図 1 減圧下の熱伝導率測定装置 (Momose & Kasubuchi, 2002)

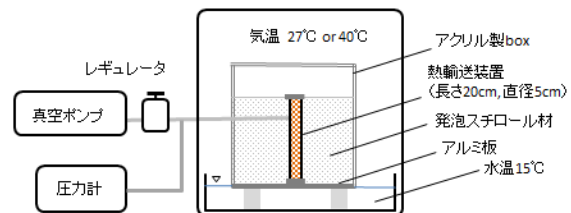


図 2 熱輸送装置とその性能試験装置

### 4. 研究成果

能登・赤黄色土の熱伝導率の水分依存性を図 3 に示す。水分増加とともに熱伝導率は増加する。この結果から、体積水分率 0.20, 0.25, 0.30 の範囲で、減圧下で最大の熱伝導率になると予想し、これら 3 つの試料について減圧下の測定を行った。能登・赤黄色土の熱伝導率の気圧依存性を図 4 に示す。体積水分率 0.25 の試料が、減圧下で最大の熱伝導率を得ることが明らかとなった。充填条件を固相率 0.35 および体積水分率 0.25 として、熱輸送装置を製作し、性能試験を行った。

性能試験の結果を図 5 に示す。温室模型の気温は約 27 でほぼ一定であり、熱輸送

装置の底面の温度 (Bottom) も約 15 で一定であった。熱輸送装置の上面の温度 (Top) は、大気圧下で 25 であったのに対し、減圧するとともに急激に低下し、20 で定常状態となった。底面から 15cm, 10cm の温度もまた、減圧とともに低下し、20 付近で定常状態となった。5cm の温度は、真空ポンプ作動後にわずかな上昇が見られ、その後、元の温度に近づいた。大気圧および 1.7 kPa における定常状態の温度分布を図 6 に示す。大気圧の温度勾配に比べ、1.7 kPa では底面 5cm から 20cm にかけて温度勾配が小さくなった。

これらの結果から、本装置はヒートパイプとして機能することが裏付けられた。つまり、本装置上面の急激な温度低下の結果から、上面から下面への大きな熱輸送が生じること、その熱輸送は減圧下で増大する結果から、熱輸送の正体は水蒸気による潜熱輸送であること、その潜熱輸送の恒常性がみられたことから、下面から上面への液状水の戻りがあることが示された。

今回の温室模型実験で、室温 27 の場合、熱輸送装置の上面温度は室温よりも約 7 低くなることが明らかとなった。室温 40 度の場合、熱輸送装置上面は 25 となることも確認した。実際の温室内に冷熱源を作り出せる可能性が示唆された。今後の課題としては、

熱輸送装置を真空ポンプ系統から独立させる技術 (真空密閉技術) の確立、本装置の大型化と実際の農業ハウスでの実証試験、さらに高い熱伝導率が得られる素材の探求、などが上げられる。

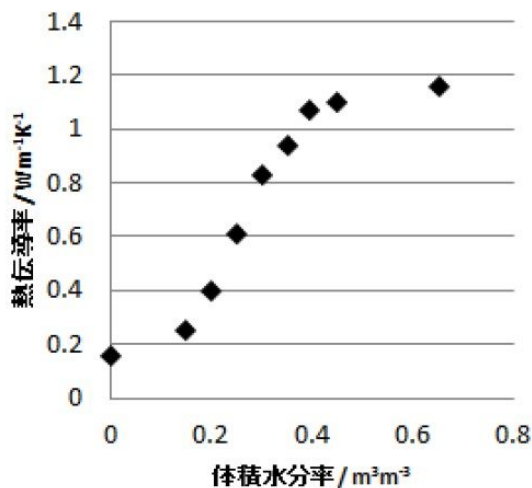


図 3 土の熱伝導率の水分依存性 (赤黄色土: 固相率 0.35, 温度 15°C, 大気圧)

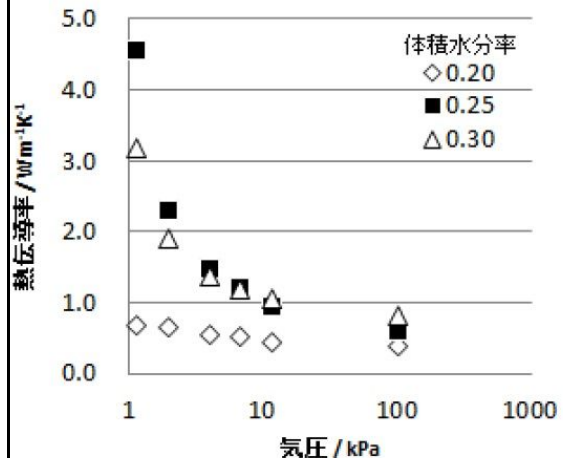


図 4 土の熱伝導率の気圧依存性 (赤黄色土: 固相率 0.35, 温度 15°C)

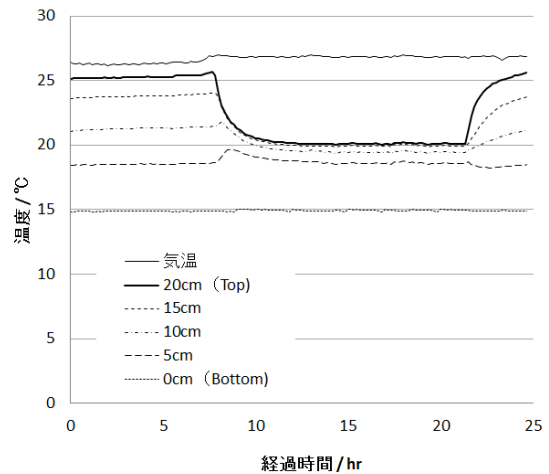


図 5 大気圧下および減圧下における熱輸送装置の温度分布

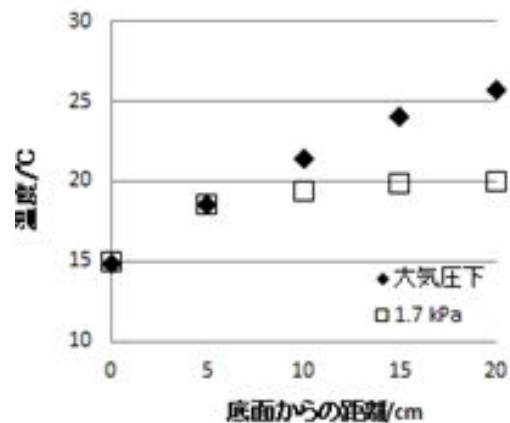


図 6 大気圧下および減圧下、かつ定常状態における熱輸送装置の温度分布

#### 参考文献

T. Momose & T. Kasubuchi (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.

T. Momose, I. Sakaguchi & T. Kasubuchi (2008). Development of an apparatus for measuring one-dimensional steady-state heat flux of soil under reduced air pressure. European Journal of Soil Science, 59: 982-989.

I. Sakaguchi, T. Momose, H. Mochizuki & T. Kasubuchi (2009). Heat pipe phenomenon in soil under reduced air pressure. European Journal of Soil Science, 60: 110 – 115.

粕淵辰昭 百瀬年彦 坂口巖 (2011), J. R. Philip and D. A. de Vries 著「温度勾配下における多孔体中の水分移動」を基にした研究展開 - 液島モデルからマイクロ・ヒートパイプモデルへ, 土壌の物理性, 119: 53 - 64

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

百瀬年彦、土壌物理からみた土壌中の水分環境、石川県土壌肥料懇話会、2015.8.28 (金沢市商工会議所会館(石川県・金沢市))

百瀬年彦、土のヒートパイプ現象を利用した地表 - 地中間の熱輸送装置、北陸産業活性化センター、2015.12.17 (金沢都ホテル(石川県・金沢市))

百瀬年彦、土のヒートパイプ現象を利用した地表 - 地中間の熱輸送装置の開発、土壌物理学会、2016.10.29(京都大学(京都府・京都市))

青山真也、百瀬年彦、現場における土壌の熱伝導率計測センサーの開発、土壌物理学会、2016.10.29(京都大学(京都府・京都市))

百瀬年彦、土のヒートパイプ現象を利用した地表 - 地中間の熱輸送装置の開発、マッチングハブ in 金沢、2016.11.2 (ホテル日航金沢(石川県・金沢市))

百瀬年彦、土のヒートパイプ現象を利用した地表 - 地中間の熱輸送装置の開発、石川県立大学シーズ発表会、2017.1.29 (小松市公会堂(石川県・小松市))

百瀬年彦、土のヒートパイプ現象を利用した地表 - 地中間の熱輸送装置の開発、マッチングハブ in 熊本、2017.2.28 (熊本大学(熊本県・熊本市))

〔図書〕(計 1 件)

百瀬年彦、北陸産業活性化センター、HIAC News、2015、Vol.96、p.6

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：ヒートパイプ及び該パイプを含む熱輸送装置

発明者：百瀬年彦

権利者：石川県公立大学法人

種類：特許

番号：特願 2015-160255

出願年月日：2015年8月17日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

百瀬年彦 (MOMOSE, Toshihiko)

石川県立大学・生物資源環境学部・准教授

研究者番号：40742515

### (2)研究分担者

### (3)連携研究者

### (4)研究協力者

青山真也 (AOYAMA, Shinya)