

夏の農業ハウス内に電力なしで冷熱源を作り出す技術の開発

研究代表者 石川県立大学生物資源環境学部 准教授 百瀬 年彦

共同研究者 (有) 日本土壌研究所 代表取締役 岡崎 正規

1. 緒言

夏の農業ハウスは過酷な温度環境となる。年間を通じて農業生産性を高めるためには、ランニングコストを抑えた冷却技術が求められる。農業ハウスの直下には、未利用エネルギーである地中熱が存在する。この地中熱は、夏は冷熱源となる。この冷熱源を地表に持ってくれば、ハウス冷房に利用できる。地表―地中間の熱交換を、いかにコストをかけずにスムーズに行えるかが重要なポイントとなる。

地中熱利用は、通常、液相ポンプを用いて地表―地中間の熱交換を行う。例えば、地下水をくみ上げる方法や、U字型チューブを地中に埋設し、そこに液体を循環させて地中から採熱したり地中へ排熱したりする方法が挙げられる。しかし、こうした熱交換方法には、電力を必要とする。本研究では、ヒートパイプとして機能させた土を用いるという、新しい熱輸送原理(特許第 6598357 号)を利用し、電力なしで農業ハウス内に冷熱源を作り出す技術の開発を目指す。

常識的には、土の熱伝導率は金属よりも小さい。しかし、適度な水分条件と減圧条件で、土の熱伝導率はステンレス鋼と同程度にまで劇的に増大することが見い出された。

(Momose & Kasubuchi, 2002)。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輸送(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。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、減圧下における土の熱伝導率の劇的な増加は、土のヒートパイプ現象と結論づけられた(Momose et al., 2008; Sakaguchi et al., 2009)。これら一連の研究成果は、土が熱輸送装置の新素材になりうるという発想を生み出した。

土のヒートパイプの最大の特徴は、トップヒート条件下(上が高温で下が低温)においても機能することにある。従来型ヒートパイプは中空構造のパイプで、内部を真空状態にし、そこへ揮発性液体(例えば、水)を封入して作られる。パイプ両端に温度差が生じると、高温部から低温部への蒸気流と逆向きの液体の戻りが生じ、パイプ両端の温度差がなくなるまで永続的に熱輸送を行う。液体が高温部へ戻る仕組みには2つある。1つは重力を利用する方法(サーモサイホン式ヒートパイプ)、もう1つは毛管力を利用する方法(ウィック式ヒートパイプ)である。どちらも熱輸送に電力を必要とせず、高い熱輸送能を持つため、地中熱を利用した融雪技術やノートパソコンのCPU冷却装置など、幅広い分野に応用されている。しかし、従来型ヒートパイプには共通した弱点がある。トップヒート条件下で、かつ数mという長い距離では機能しない。ここを開く技術が、土のヒート

パイプである。この熱輸送装置を農業ハウスに鉛直埋設すれば、地表と地中の温度差を駆動力にして鉛直下向きに熱が輸送され、電力なしで農業ハウス内に冷熱源を作り出せる可能性を持つ。

土のヒートパイプの熱輸送能は、土の種類と水分条件によって左右される。土の種類としては、固相の熱伝導率が高く、かつ毛管力の高いものが好ましい。具体的には、赤黄色土が挙げられる。古土壌もしくは化石土壌として知られる赤黄色土は、風化耐性の強い石英と酸化鉄を多く含むため、固相の熱伝導率は高く、また風化生成物である粘土も多く含むため、毛管力も高くなるからである。そこで本研究では、(1) 能登半島に分布する赤黄色土の中から、ヒートパイプ素材に利用するものを選抜し、(2) 適切な水分条件を決定したうえで、その土と水の混合物を充填して減圧密閉装置をつくり、(3) その装置を夏の農業ハウス内に設置して温度計測を行うこととした。

2. 試料および方法

2.1. 試料

能登半島の8地点から赤黄色土を採取し、風乾させて2mm篩を通過したものを試料とした。試料名と採取地を以下に示す。NTB(穴水町)、NTR(能登町)、NIB(能登島)、NTL(能登島)、ANN(穴水町)、WMI1(輪島市)、WMI2(輪島市)、NTA(能登島)。



図1. 赤黄色土
虎斑を観察できる

2.2. 化学的性質

本研究には石川県に分布する赤黄色土 Ultisols (農耕地土壌分類委員会, 1995) を採取し、それらの化学的性質を明らかにするために、以下の方法を用いて分析した。赤黄色土(図1)の特徴は、この土壌の有する土色と土性にある。土壌の有する色(土色)は、もっぱら土壌に含まれる鉄鉱物の色に依存しており、赤黄色土には、結晶構造を持つヘマタイト(赤鉄鉱) $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、ゲータイト(針鉄鉱) $\alpha\text{-FeOOH}$ 、レピドクロサイト(鱗鉄鉱) $\gamma\text{-FeOOH}$ など(図2)が含まれている。それら土壌

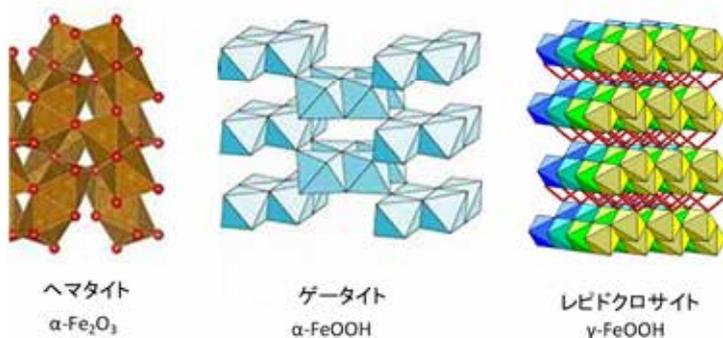


図2. 土壌中の主要鉄鉱物

鉄原子は酸素原子を頂点とする6面体構造をとり、酸素原子を共有して連結する。

中の鉄鉱物の結晶度は必ずしも良好ではないが、土壌の熱伝導に関与している。一方、土壌中には結晶構造を持たない鉄鉱物も存在しており、土壌の熱伝導率を規制している。また、赤黄色土には、石英、長石類などの多量の結晶構造を持つケイ酸塩鉱物が存在しており、それらも土壌の熱伝導率に関与する（表 1）とされている。

表 1. 物質の熱伝導率

物質	温度 T K	熱伝導率 λ W/m·K
鉄	300	80.3
ステンレス (SUS304)	300	16
石英ガラス	300	1.38
石灰岩	293	0.93
大理石	293	2.8
花崗岩	400	4.3
水	300	576.0
空気	300	22.07

<http://www.sensbey.co.jp/pdf/materialpropety.pdf>

2. 2. 1. 土壌試料の調製

採取した土壌を紙の上に広げ、乾燥して、風乾土を作製した。乳鉢中に風乾土を入れ、乳棒を用いて軽くつつき、2mm メッシュ篩を通過させ、一般的な化学分析用の風乾細土を得た。

2. 2. 2. 土壌の pH および電気伝導度 (electrical conductivity, EC) の測定

風乾細土 10g および 5g を 25mL 容ビーカーに採取し、蒸留水をそれぞれ 25mL 別々に加え、2 時間静置後、pH メータ (Horiba, コンパクト pH メータ LAQUAtwinpH-11B) および EC メータ (Horiba, コンパクト電気伝導度計 LAQUAtwin EC-33B) を用いて上澄み液の pH および EC を測定した。

2. 2. 3. 鉄の定量

土壌中の全鉄 Fet、ジチオナイト可溶鉄 Fed およびシュウ酸塩可溶鉄 Feo を東京大学農学部農芸化学教室 (1978)、Blakemore et al. (1987)、Nagatsuka (1973)、永塚 (1975) および Nagatsuka (1994) に従って分析した。6 mol/L 塩酸溶液を 500mL 容三角フラスコに秤りとった風乾細土 10g に加え、冷却管をたてたコルク栓をとり付け、ホットプレート上で加熱し、全鉄抽出液を得た。風乾細土 1~2g を用いて、Mehra and Jackson (1960) 法によって抽出を 2 回行った。抽出液に混酸 ($H_2SO_4 \cdot HNO_3 \cdot HClO_4$: 1: 10: 4) 5mL を加えて蒸発乾固して、有機物を分解し、残渣を希塩酸に溶解して、ジチオナイト可溶鉄抽出液を得た。風乾細土 2g に酸性シュウ酸アンモニウム溶液 100mL を加えて室温で 1 時間振とう抽出を 2 回行い、シュウ酸可溶鉄抽出液を得た。これら抽出液中の鉄を α -フェナントロリン比色法により定量した。

2. 2. 4. X線回折 (XRD) を用いたヘマタイトの結晶度測定

土壌中の粘土+シルト画分中のヘマタイト結晶度を XRD を用いて定量するために、風乾細土 10g を 200mL コニカルビーカーに秤りとり、30%過酸化水素水を用いて有機物を

分解した。粘土+シルト画分を得るために微酸性溶液に有機物分解試料を分散させ、4分48秒後に深さ10cmまでの試料分散溶液をサイフォンを利用して回収し、XRD分析用試料を得た。得られた粘土+シルト画分を乾燥した後、XRD分析用Si無反射試料板に乗せ、Rigaku Miniflex 600装置を用いてX線回折像を得た。X線回折の条件は、Cu管球、入射X線としてCuK α 線をNiフィルターを用いた。2 θ 範囲を3から60°とした。標準物質中のヘマタイト α -Fe $_2$ O $_3$ の主要3ピーク(2 θ : 24.4, 33.4, 35.9°)のピーク高を半値幅(ピーク高の1/2における幅)で除した値の合計値を結晶度と定義し、ヘマタイトの結晶度 crystalline index を次式で求めた。

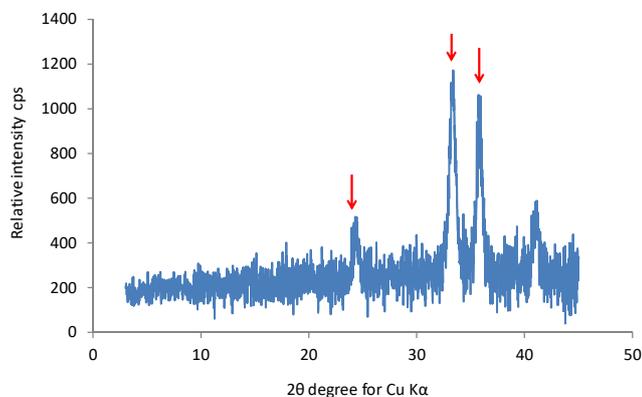


図3. ヘマタイトのX線回折パターン
ヘマタイトの主要3ピーク(2 θ : 24.4, 33.4, 35.9°)

$$\sum_{n=1}^3 (\text{main peak height} / \text{full width at half maximum})$$

人工合成したヘマタイト (Okazaki et al., 1986) (図3) を2次標準物質として用いた。

2.2.5. X線回折(XRD)を用いた石英の定量

標準添加法を用いて、石英標準試料のX線回折像より石英 quartz の主要3ピーク(2 θ : 20.9, 26.6, 39.5°) (図4a, b) のピーク高の合計値から検量線(図5)を作製した。土壤の粘土+シルト画分の石英含量(浜田・島津, 1959)を求めた。また、石英の主要3ピークのピーク高を半値幅で除した値を石英の結晶度とし、土壤試料中の石英の結晶度を求めた。

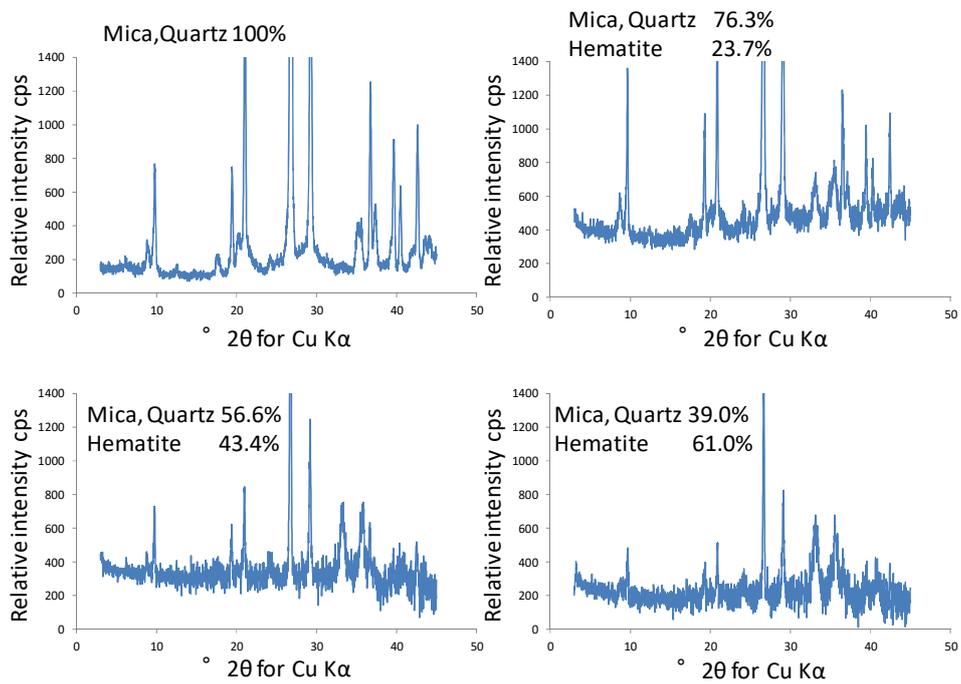


図4a. 石英、雲母およびヘマタイト合成試料のX線回折パターン

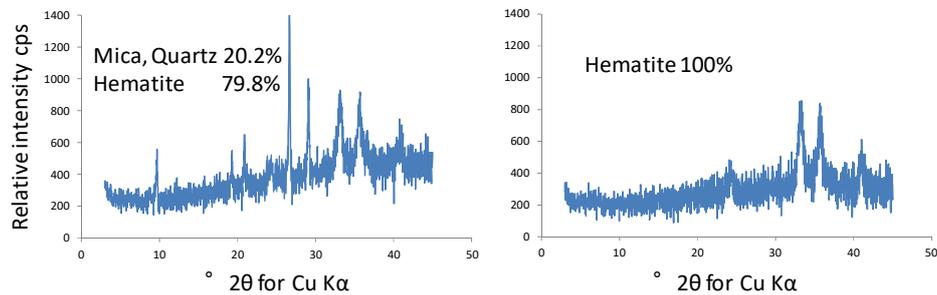


図4b. 石英、雲母およびヘマタイト合成試料のX線回折パターン

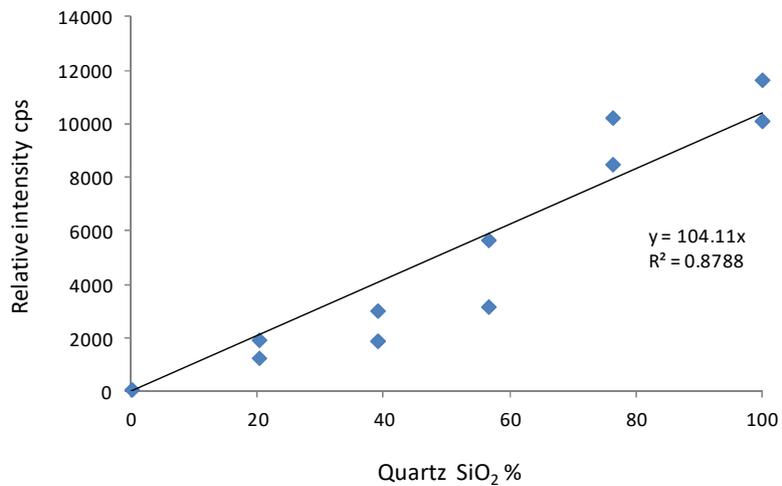


図5. 土壌中の石英検量線

2.2.6. 土壌の化学的性質と熱伝導率との関係

土壌試料の化学的性質と固相の熱伝導率との関係を明らかにするために、化学分析値を JMP による多変量解析（内田ら, 2002）を行った。

2.3. 固相の熱伝導率の推定方法

土壌の熱伝導率測定には、国際的に広く利用される非定常ヒートプローブ法 (Kasubuchi, 1992) を用いた。試料をアクリル容器（内径 50mm, 高さ 55mm）に充填し、Tarnawski et al. (2011) の手法に従って水分飽和試料を作製した。水分飽和試料の熱伝導率データと幾何平均モデルを用いて、各試料の固相の熱伝導率を求めた。

2.4. ヒートパイプ試験

ヒートパイプ試験には、固相の熱伝導率が最も高い、赤黄色土 (NTB) を用いることとした。この試料の熱輸送能を最大限に引き出す水分条件の決定方法については、Momose & Kasubuchi (2002) の手法を参考にした。具体的には、幅広い水分条件の試料を用意し、それらの熱伝導率を減圧下で測定し、最大の熱伝導率が得られた水分条件（体積含水率 0.25）を、最適条件とした。この赤黄色土と水をビニル袋に入れて混合し、その混合物をステンレス製の円筒容器（内径 150mm, 高さ 300mm）に充填し、上蓋（Oリング入り）をボルトとナットで取り付けた。この容器と真空ポンプを、真空バルブを介して接続した。真空ポンプを作動させ、容器内が飽和水蒸気圧になったことを確認し、バルブを閉じて容器内を密閉し、その後真空ポンプを停止して切り離れた。

ヒートパイプ試験は、石川県農業試験場内に小型ビニルハウス（縦 1m, 横 2m, 高さ 1m）を建てて行った。地下水（深さ約 20m, 水温 20°C）をポンプアップして、ビニルハウス内に設置したタライに給水し、その水にヒートパイプ底部を接触させて底部温度を一定に保つこととした。2018年9月14日に実験システムを完成させ、装置上部の温度を熱電対と熱画像で測定した。

3. 結果および考察

3.1. 試料の化学的性質

供試土壌は、我が国が現在よりも温暖であった間氷期に生成した「化石土壌」として知られている赤黄色土で、赤色土と黄色土をまとめて赤黄色土と呼ぶ（菅野・岩佐, 1962）。土壌中の有機物含量は低く、赤色あるいは黄色の次表層 (B 層) を持つ。B 層中に虎斑 tiger stripe と呼ばれる赤色土層中に白色筋状斑が認められることがある（菅野・岩佐, 1962）。現在、赤黄色土は西南日本や南西諸島に分布し、高位段丘面に存在していることが多く、環境変化とともに削剥が進行し、分布面積は必ずしも多くない（約 10%）。赤黄色土は、風化とともに粘土化、粘土のカオリナイト化が進み、粘土含量が高く、強い酸性を示す。土壌の母材が塩基性であるほど、土地が乾燥しているほど赤色になりやすいといわれている。

3. 1. 1. 土壌の pH(H₂O)および EC

土壌試料の pH(H₂O)は 4.6~6.2 に分布していた (表 2)。NTA は、水田として利用され、他の赤黄色土とはやや異なる pH(H₂O) である 6.2 を示した。EC は 61~122 μS/cm で、他の土壌 EC に比較して低い値であった。可溶性イオン含量が少ないといえる。

3. 1. 2. 鉄含量およびヘマタイトの結晶度

土壌試料の全鉄 Fet 含量 (Fe₂O₃) は、5.78~24.6%であった (表 2)。一般的な土壌の全鉄含量に比べて、明らかに高い値を示した。特に、WMI2 は高い全鉄含量を示した。

表2. 土壌の化学的性質と熱伝導率

土壌	熱伝導率 W/m・K	pH(H ₂ O)	電気伝導率 μS/cm	シュウ酸可溶 鉄 Feo Fe ₂ O ₃ %	ジチオナイト可溶 鉄 Fed Fe ₂ O ₃ %	全鉄 Fet Fe ₂ O ₃ %	鉄結晶化度 (Fed - Feo)/Fet	活性度 Fe _o /Fet	ヘマタイト 結晶度	石英含量 SiO ₂ %	石英 結晶度
NTB	4.1	4.6	122	0.44	3.15	7.52	0.36	0.14	22.8	31.4	7.45
NTR	3.2	5.1	62	0.41	4.15	7.13	0.52	0.10	12.2	41.2	7.67
NIB	2.6	4.7	72	0.81	4.85	9.38	0.45	0.17	25.8	14.8	1.51
NTL	2.5	5.3	118	0.68	7.12	12.9	0.50	0.10	20.1	14.8	1.64
ANN	3.6	4.8	62	0.87	8.11	16.9	0.43	0.11	10.5	47.8	9.19
WMI1	2.7	5.0	61	0.44	3.98	8.76	0.40	0.11	12.2	20.2	2.88
WMI2	2.8	4.8	62	0.97	11.8	24.6	0.44	0.08	7.3	16.1	1.94
NTA	3.2	6.2	101	0.31	2.56	5.78	0.39	0.12	10.5	13.5	1.34

ジチオナイト可溶鉄 Fed は、非晶質鉄および結晶質鉄の含量を表しており、3.22~9.32%であった。シュウ酸塩可溶鉄 Feo は非晶質鉄含量は 0.31~0.97%の範囲にあり、結晶質鉄に比べて低い値であった。

土壌試料 (粘土+シルト画分) の X 線回折パターンを図 6a, b に示した。主要 3 ピーク高を半値幅で除し、その合計値から求めた結晶度は、7.3~25.8 の範囲にあった。

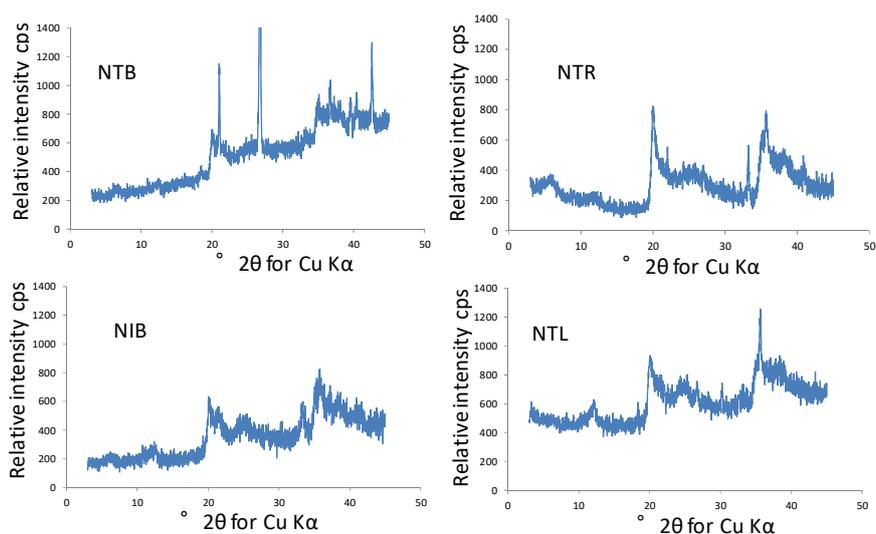


図6a. 赤黄色土のX線回折パターン (NTB, NTR, NIB, NTL)

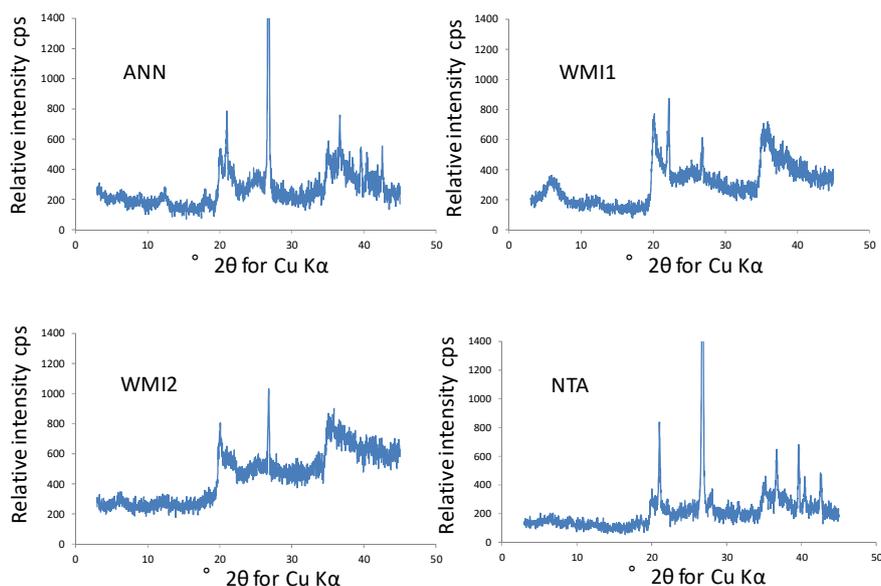


図6b. 赤黄色土のX線回折パターン(ANN, WMI1, WMI2, NTR)

3. 1. 3. ケイ素含量および石英の結晶度

標準試料に異なる重量の石英を添加して検量線に基づいて土壤試料中の石英含量を算出し、表 2 に示した。土壤試料の石英 SiO₂ 含量は、13.5~47.8%であった。一方、土壤試料中に含まれる石英の結晶度は 1.34~9.19 であった。

3. 2. 土壤の化学的性質と熱伝導率との関係

赤黄色土の化学的性質と熱伝導率の関係を解析するために、多変量解析を用いた。土壤の化学的性質は、正規分布せず、対数正規分布することが知られている。表 2 の土壤の化学的性質および熱伝導率を対数変換し、表 3 に示した。

表3. 対数変換後の土壤の化学的性質と熱伝導率

土壤	熱伝導率 W/m·K	pH(H ₂ O)	電気伝導率 μS/cm	シュウ酸可溶 鉄 Feo Fe ₂ O ₃ %	ジチオナイト可溶 鉄 Fet Fe ₂ O ₃ %	全鉄 Fet Fe ₂ O ₃ %	鉄結晶化度 (Fet - Feo)/Fet	活性度 Feo/Fe _t	ヘマタイト 結晶度	石英含量 SiO ₂ %	石英 結晶度
NTB	0.61278	0.6628	2.08635983	-0.3565473	0.498310554	0.8762	-0.443697499	-0.85387	1.357935	1.49693	0.8722
NTR	0.50515	0.7076	1.79239169	-0.3872161	0.618048097	0.8531	-0.283996656	-1	1.08636	1.6149	0.8848
NIB	0.41497	0.6721	1.8573325	-0.091515	0.685741739	0.9722	-0.346787486	-0.76955	1.41162	1.17026	0.179
NTL	0.39794	0.7243	2.07188201	-0.1674911	0.852479994	1.1106	-0.301029996	-1	1.303196	1.17026	0.2148
ANN	0.5563	0.6812	1.79239169	-0.0604807	0.909020854	1.2279	-0.366531544	-0.95861	1.021189	1.67943	0.9633
WMI1	0.43136	0.699	1.78532984	-0.3565473	0.599883072	0.9425	-0.397940009	-0.95861	1.08636	1.30535	0.4594
WMI2	0.44716	0.6812	1.79239169	-0.0132283	1.071882007	1.3909	-0.356547324	-1.09691	0.863323	1.20683	0.2878
NTA	0.50515	0.7924	2.00432137	-0.5086383	0.408239965	0.7619	-0.408935393	-0.92082	1.021189	1.13033	0.1271

土壤の熱伝導率は、花崗岩、大理石のように石英を含む岩石の熱伝導率と類似した値であり、相関分析の結果、石英結晶度および石英含量と高い関係を示した(表 4)。主成分分析の結果、固有値 1 以上の主成分は 3 つ存在し、熱伝導に関与するとみられる土壤中に存在する石英の含量と結晶度、鉄鉱物の含量と結晶化度であった。これらの主成分は、土壤

の熱伝導を決定する重要な性質を担っており、これら 3 つの累積寄与率は、80.6%であった (表 5)。土壌の分析値相互には強い関係を持たないとし、バリマックス展開を行った結果を表 6 に示した。第 1 主成分としては土壌の鉄鉱物が、第 2 主成分としては石英が重要な因子として明確となった。土壌の熱伝導率を従属変数とし、2 つの主成分から 1 変数を選択して、独立変数とするステップワイズ法による重回帰分析の結果を表 7 に示した。独立変数を 2 から 3 に変化させて、決定係数の違いが 5%未満であれば、独立変数の数を 2 として予測式 (1)

$$\log(\text{熱伝導率}) = 0.1604 - 0.6689\log(\text{鉄結晶化度}) + 0.1583\log(\text{石英結晶度})$$

$$[n = 88, r^2 = 0.79]$$

を得た。

熱伝導率は、土壌に存在する石英の結晶度と土壌中の多種類の鉄鉱物の結晶化度 ((Fed - Feo) / Fet) によって予測することができる。

表4. 土壌の化学的性質と熱伝導率の相関分析

	熱伝導率	pH(H ₂ O)	電気伝導率	シュウ酸可溶	ジチオナイト可溶	全鉄	鉄結晶化度	活性度	ヘマタイト	石英含量	石英
熱伝導率											
pH(H ₂ O)	-0.160										
電気伝導率	0.205	0.296									
シュウ酸可溶鉄	-0.311	-0.597	-0.342								
ジチオナイト可溶鉄	-0.338	-0.416	-0.400	0.903							
全鉄	-0.241	-0.440	-0.363	0.894	0.976						
鉄結晶化度	-0.482	0.065	-0.278	0.278	0.456	0.258					
活性度	0.174	-0.163	0.300	-0.176	-0.579	-0.556	-0.466				
ヘマタイト結晶度	-0.039	-0.282	0.553	-0.046	-0.355	-0.398	-0.092	0.771			
石英含量	0.692	-0.418	-0.304	-0.018	0.024	0.006	0.099	-0.067	-0.106		
石英結晶度	0.750	-0.469	-0.208	-0.063	-0.027	-0.022	-0.005	-0.042	-0.049	0.984	

表5. 土壌の化学的性質と熱伝導率の主成分分析(1)

	第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値		4.1	29.0
寄与率		37.0	26.3
累積寄与率		37.0	63.4

表6. バリマックス展開後の土壌の化学的性質と熱伝導率の主成分分析(2)

	第1主成分	第2主成分
熱伝導率	-0.39	0.80
pH(H ₂ O)	-0.37	-0.56
電気伝導率	-0.59	-0.24
シュウ酸可溶鉄	0.82	0.02
ジチオナイト可溶鉄	0.97	-0.01
全鉄	0.93	0.03
鉄結晶化度	0.52	-0.16
活性度	-0.66	0.05
ヘマタイト結晶度	-0.49	-0.05
石英含量	0.06	0.95
石英結晶度	-0.01	0.97

表7. 重回帰分析(ステップワイズ法)による解析

パラメータ	推定値	自由度	平方和	F値	p値(Prob>F)	R ²
切片	0.1604	1	0	0	1	
pH(H2O)	0	1	0.0024	1.76	0.25	
電気伝導率	0	1	0.0023	1.58	0.28	
シュウ酸可溶鉄	0	1	0.0072	0.39	0.57	
ジチオナイト可溶鉄	0	1	0.0005	0.26	0.64	
全鉄	0	1	0.0004	0.22	0.66	
鉄結晶化度	-0.6689	1	0.0089	5.49	0.07	0.79
活性度	0	1	1.40E-05	0.01	0.94	
ヘマタイト結晶度	0	1	8.72E-05	0.04	0.85	
石英含量	0	1	1.82E-05	0.01	0.93	
石英結晶度	0.1583	1	0.0218	13.43	0.01	0.56

3.3. ヒートパイプ試験

ヒートパイプ装置の全体を図7に示し、装置上部とその熱画像を図8a, bに示す。50℃を超えるハウス内で、装置上部は27℃を保つことが明らかとなった。一方、同時刻における熱電対の温度測定では、装置上部はハウス内室温(50℃)とほぼ同じであった。つまり、熱画像と熱電対の結果は大きく異なる。どちらが正しいのか手で触って見たところ、50℃のような高温になっておらず冷たさを感じたので、熱電対の温度測定が不正確であると確信した。熱電対で温度を正しく測れなかった要因としては、熱電対の素線(銅-コンスタantan)がハウス内温度と平衡して高温となり、熱電対の測温部へ熱流入したためと考えられる(図9a, b参照)。



図7 ヒートパイプ装置



図8a ヒートパイプ装置の上部

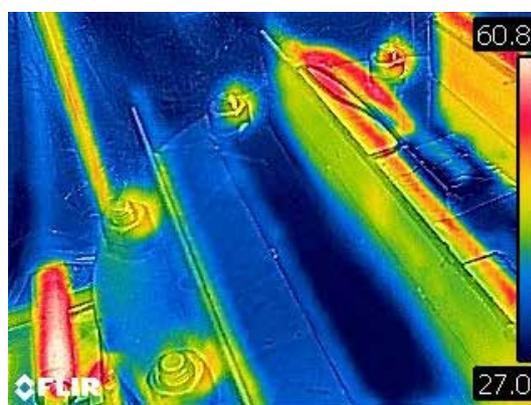


図8b 熱画像



図 9a ヒートパイプ装置の上部

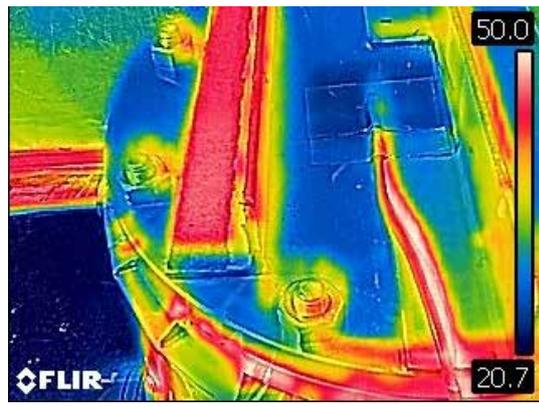


図 9b 熱画像

熱電対の素線から測温部への熱流入の影響を抑えるため、(1) 熱電対測温部と装置上部との熱接触をよくする（熱伝導性グリスを塗る）、(2) 熱電対測温部を極細線（0.1mm）に変えるなどしてみたものの改善しなかった。高温の中で、冷温の固体表面を正しく測ることの難しさを感じた。装置上部温度を経時的に計測するためには、放射温度計を用いて表示される温度データをインターバル撮影するなど、新たな測定システムが必要になると考えられた。

4. 結言

能登地方に分布する 8 種類の赤黄色土について、化学的性質および熱的性質を明らかにし、ヒートパイプ素材に適した土を選抜した。その土を用いてヒートパイプをつくり、農業ハウス内で実証試験を行った。その結果、50°Cを超えるハウス内においても、装置上部には 27°Cの冷熱源を作り出せることが明らかとなった。本熱輸送装置は、トップヒート条件下（上が高温、下が低温）においてもヒートパイプとして機能し、十分な熱輸送能を持つ。今後の課題は以下のとおり。

- (1) 熱輸送装置の大型化（長さ 1m, 2m）
- (2) 地中埋設して実証試験
- (3) 装置上部とハウス空気との熱交換方法の検討

5. 謝辞

本研究は、「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成による支援を受けて実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

Blakemore, L. C., Searle, P. L. and Daly, BK. (1987) Extractable iron, aluminum and silicon. Blakemore, L. C. et al. (eds.) New Zealand Soil Bureau Scientific Report 80 Methods for chemical analysis of soils: 71 76, DISR, Lower Hutt.

浜田晃・島津正司 1959 微量粉塵中の石英に関する X 線回折定量分析について、日本鉱業

会誌, 75: 906-910

菅野一郎・岩佐安 1962 赤黄色土, 菅野一郎編, 日本の土壌型, p. 80-91, 農文協

Kasubuchi, T. (1992) Development of in-situ soil water measurement by heat-probe method. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 26: 178-181.

I. Sakaguchi, T. Momose, H. Mochizuki and T. Kasubuchi. (2009) Heat pipe phenomenon in soil under reduced air pressure. *Eur. J. Soil Sci.*, 60: 110-115.

V. R. Tarnawski, T. Momose, W. H. Leong. (2011) Thermal conductivity of standard Sands II. Saturated conditions. *Int. J. Thermophysics*, 32: 984-1005.

Mehra, O. P. and M. L. Jackson 1960 7th Nat. Conference., Clays and Clay Minerals, 317-327

Momose, T. and T. Kasubuchi. (2002) Effect of reduced air pressure on soil thermal conductivity over a wide range of water content and temperature. *Eur. J. Soil Sci.*, 53: 599-606.

Momose, T., I. Sakaguchi and T. Kasubuchi. (2008) Development of an apparatus to measure one-dimensional steady-state heat flux of soil under reduced air pressure. *Eur. J. Soil Sci.*, 59: 982-989.

Nagatsuka, S. 1973 On the feature of free iron oxides in Brown Forest, Yellow-Brown Forest and Red soils of Japan. *Pedologist*, 17: 70-83

永塚鎮男 1975 西南日本の黄褐色森林土および赤色土の生成と分類に関する研究, 農業技術研究報告 B 26, 133-257

Nagatsuka, S. 1994 Selective dissolution methods of iron. *Japan Association for Quaternary Research (ed.) A Handbook of Quaternary Research*, 2: 22-32, University of Tokyo Press. (in Japanese)

農耕地土壌分類委員会 1995 農耕地土壌分類 第3次改訂版, 農業技術研究所 資料第17号, pp. 79, 農林水産省農業技術研究所

農林水産省 2008 我が国における土壌保全調査事業 (1979-2003), pp. 485

Okazaki, M., Takamidoh, K. and Yamane, I. (1986) Adsorption of heavy metal cations on hydrated oxides and oxides of iron and aluminum with different crystalinities. *Soil Science and Plant Nutrition*, 32, 523-533

東京大学農学部農芸化学教室編 1978 実験農芸化学, 朝倉書店

内田治・松木秀明・上野真由美 2002 すぐわかる JMP による多変量解析, pp. 205, 東京図書