J. Jpn. Soc. Soil Phys., March 2013, Vol. **123**, 81−88

バイオチャーを混入した土壌の熱伝導率

亀山幸司[1]・宮本輝仁[1]・塩野隆弘[1]

Thermal conductivity of soils amended by sugarcane bagasse-derived biochar

Koji KAMEYAMA[1], Teruhito MIYAMOTO[1] and Takahiro SHIONO[1]

Abstract：Incorporation of biochar, i.e. charcoal produced by the pyrolysis of biomass, into agricultural soils affects the physical properties of the soils, and thus may alter moisture and heat conditions in agricultural soils. However, the effects of biochar incorporation on the thermal properties of soils have yet to be investigated. Therefore, we investigated the influence of biochar incorporation on the thermal conductivity of Shimajiri Maji soil and Toyoura sand. Sugarcane bagasse, i.e. the residue obtained by pressing sugarcane stalks to extract juice, was air-dried and heated in a batch-type carbonization furnace at three different pyrolysis temperatures (400, 600 and 800 ℃) with a holding time of 2 h. Incorporation of the biochar decreased the thermal conductivity at a given volumetric water content of each soil. It decreased the estimated thermal conductivity of the solid phase and the volumetric solid content of soils, and increased the porosity of soils. Calculation results using the de Vries model suggested that the thermal conductivity of the Shimajiri Maji soil is affected by decreasing volumetric solid content and increasing porosity regardless of soil water content, and by decreasing thermal conductivity of the solid phase only at higher soil water content. In addition, the calculation results suggested that the thermal conductivity of the Toyoura sand was mostly influenced by decreases in the volumetric solid content and increases in porosity, and to a small extent by decreases in the thermal conductivity of the solid phase. These results showed that the thermal conductivity of agricultural soils is affected by rates of changes in the thermal conductivity of solid phase, the volumetric solid content and the porosity, when the biochar is incorporated into the soils.

Key Words：biochar, soil thermal conductivity, pyrolysis temperature, solid phase, porosity

[1]National Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization (NARO) Kannondai 2−1−6, Tsukuba 305−8609, Japan.
Corresponding auther：亀山幸司, [1](独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所
2012年4月2日受稿, 2012年11月26日受理
土壌の物理性123号, 81−88 (2013)

1. はじめに

「バイオチャー」は有機物（バイオマス）の熱分解生成物のうち土壌改良資材として利用される炭のことをいう（Lehmann and Joseph, 2009）．ここで，熱分解とは，有機化合物などを酸素が存在しない状態で加熱することによって行われる化学分解のことであり，主に①急速熱分解（Fast pyrolysis），②ガス化（Gasification），③炭化（Slow pyrolysis）に分類される（International Energy Agency, 2007）．これらの熱分解の方法（時間，温度など）と原料となるバイオマスの組み合わせにより，異なった性質のバイオチャーが得られる（例えば，Lehmann and Joseph, 2009；Sohi et al., 2010）．そのため，バイオチャーを用いる場合，その原料や熱分解方法を明示する必要がある．

バイオチャーを土壌改良資材として用いる利点は，混入によって土壌の保水力，保肥力などが改善され，その改善効果が長期的に持続することが期待できる点である（例えば，Laird, 2008；Lehmann et al., 2006）．これは，バイオチャーには微生物分解に対する耐性があり（Baldock and Smernik, 2002），土壌中で安定的に存在するためである（例えば，Laird, 2008；Lehmann et al., 2006）．また，バイオチャーは重金属などの有害物質を吸着保持することも報告されている（例えば，Namgay et al., 2010）．このため，バイオチャーを用いて土壌改良することにより，農産物の生産性や安全性を向上させながら，地中への炭素貯留が達成される可能性がある．

我が国でもバイオチャーを用いて土壌改良する試験が行われている．南西諸島に広く分布する「島尻マージ」にさとうきびバガスから生成したバイオチャーを混入する試験である（例えば，Chen et al., 2010）．対象とされた島尻マージは腐植含量が低く粘土含量が高いため，有効水分量が小さいことが知られている（Kubotera, 2006）．さとうきびバガス由来のバイオチャーを島尻マージ土壌へ混入することにより，土壌の乾燥密度の減少（間隙率の増加）が生じ，有効水分量が増加することが報告されている（Chen et al., 2010）．

バイオチャーの土壌混入により水分保持特性が変化する際には，乾燥密度，間隙率，および孔隙径分布も同時に変化しているため，その他の物理的特性（比熱，熱伝

導率，ガス拡散係数等）についても同様に変化していると考えられる．特に土壌の熱環境は，農作物の生育（種子の発芽，根の生育等）や土壌微生物の活動などに大きく影響することが知られている（例えば，Jury and Horton, 2004）．しかし，バイオチャーの土壌混入が水分保持特性以外の物理的特性に及ぼす影響について検討されたものは少ない．そのため，バイオチャーの混入が土壌の熱伝導率などの熱特性に与える影響について知見を増やしていくことは，今後，バイオチャーの土壌混入による熱環境への影響予測をしていくために必要である．

バイオチャーは，有機物（バイオマス）の熱分解により生成されるが，有機物の土壌への混入は，土壌の熱伝導率を低下させることが報告されている（Abu-Hamadeh and Reeder, 2000；山崎，2004；Gupta et al., 1976）．Ekwue et al.（2005）は，土壌への有機物混入による土壌の熱伝導率の低下は，乾燥密度の減少に起因することを示唆している．

前述したように，バイオチャーの土壌混入は土壌の乾燥密度，間隙率，および孔隙径分布を変化させる．空気の熱伝導率は0.025 W m^{-1} K^{-1}であり，水（0.596 W m^{-1} K^{-1}）や土壌鉱物（2.5 W m^{-1} K^{-1}）よりもはるかに低いため（Campbell and Norman, 1998），土壌の熱伝導率は間隙率によって大きく影響される．Ochsner et al.（2001）は，土壌の熱伝導率は気相率の増加に伴い直線的に低下することを報告している．

そこで，本研究では，さとうきびバガス由来のバイオチャーの混入が土壌の熱伝導率に与える影響を明らかにすることを目的とした．まず，バイオチャーの生成温度が土壌の熱伝導率に与える影響を明らかにするため，3種類の異なる炭化温度で生成したバイオチャーを島尻マージに混入し土壌の熱伝導率の測定を行った．次に，バイオチャーの混入量が土壌の熱伝導率に与える影響を明らかにするため，混入量を4段階に変えて島尻マージ土壌に混入し，土壌の熱伝導率の測定を行った．更に，比較のため，豊浦砂についても同様の測定を行った．豊浦砂は，単一粒径で，様々な実験において用いられる標準的な試料であり，熱伝導率の測定にも良く用いられている（例えば，望月ら，1998；山崎ら，2003）．豊浦砂には，土壌の構成物質の中で高い熱伝導率を示す石英を多く含んでおり，他の土壌よりも高い熱伝導率を示すなどの熱特性が知られている（例えば，山崎ら, 2003）．

2. 試料と方法

2. 1 試料

島尻マージは，沖縄県宮古島市のサトウキビ栽培圃場の深さ0－20 cmから採土し，風乾した後に2 mm篩を通過したものを使用した．島尻マージは石灰岩風化土壌であり，USDA土壌分類（Soil Survey Staff, 2010）ではTypic Hapludalfsに分類される（Kameyama et al., 2012）．島尻マージの粒度組成は，砂（0.05－2 mm）が7.7 %，シルト（0.002－0.05 mm）が19.0 %，粘土（< 0.002 mm）が73.3 %であった．USDAの分類ではclayに相当する．また，土粒子密度は2.75 Mg m^{-3}であった．

豊浦砂は，豊浦硅石鉱業株式会社から購入したものを使用した．豊浦砂の粒度組成は，砂が97.5 %，シルトが1.0 %，粘土が1.5 %であった．また，土粒子密度は2.64 Mg m^{-3}であった．

実験に供試したバイオチャーは，製糖工場から入手したさとうきびバガスをバッチ式炭化炉において，3つの炭化温度（400，600，800 ℃），昇温速度2 ℃ min^{-1}，最高温度保持2時間，自然冷却の条件で熱分解を行って作成した後に，2 mm篩を通過したものを実験に使用した．800 ℃で生成したバイオチャー（100サンプル）の形状をマイクロメータにより測定した結果，平均長さ，幅，厚さはそれぞれ，3.48 ± 1.34 mm，0.82 ± 0.36 mm，0.36 ± 0.15 mmであった．また，400 ℃，600 ℃，800 ℃で生成されたバイオチャーの粒子密度は，それぞれ1.50，1.57，1.86 Mg m^{-3}であった．

2. 2 熱伝導率の測定方法

バイオチャーの炭化温度および混入割合の影響を解明するため，供試サンプルを次のように準備した．バイオチャーの炭化温度の影響を解明するため，3種類の異なる炭化温度で生成したバイオチャーを質量比0，3 %で風乾土壌に混入した．また，混入割合の影響を解明するため，800 ℃で生成されたバイオチャーを質量比0，1，3，5 %で風乾土壌に混入した．更に，400 ℃，600 ℃，800 ℃で生成されたバイオチャー単体も測定のために準備した．なお，バイオチャーの混入割合（R）は以下の式で定義される．

$$R = \frac{M_2}{M_1} \tag{1}$$

ここで，M_1：混入前の土壌の質量（g），M_2：バイオチャーの質量（g）を示す．

サンプルに脱イオン水を加えて風乾から0.30 m^3 m^{-3}の範囲内で体積含水率を調整し，数日間静置して供試サンプルと水分が十分馴染んだ後，内径4 cm，高さ8 cmのアクリル円筒カラムに7 cmの高さまで充填した．なお，各供試サンプルの乾燥密度は，風乾状態においてタッピングしながら充填した場合の測定値を基準とした．また，バイオチャー混入土壌の固相率，間隙率，気相率は，乾燥密度と土壌，バイオチャー単体の粒子密度を用いて以下の（2），（3），（4）式により推定した．

$$\sigma = \rho_d \frac{\left(\frac{1}{1+R}\right)}{\rho_{s1}} + \rho_d \frac{\left(\frac{R}{1+R}\right)}{\rho_{s2}} \tag{2}$$

$$n = 1 - \sigma \tag{3}$$

$$\phi = 1 - \sigma - \theta \tag{4}$$

ここで，σ：固相率（m^3 m^{-3}），ρ_d：サンプルの乾燥密度（Mg m^{-3}），ρ_{s1}：土粒子密度（Mg m^{-3}），ρ_{s2}：バイオチャー

単体の粒子密度（Mg m^{-3}），n：間隙率（m^3 m^{-3}），ϕ：気相率（m^3 m^{-3}），θ：体積含水率（液相率）（m^3 m^{-3}）を示す．各供試サンプルの充填時の乾燥密度，固相率，間隙率をTable 1 に示した．

熱伝導率の測定は，望月ら（2003）の方法を参考にDecagon 社 KD2 を用いて行った．まず，KD2 プローブ（直径 1.27 mm，長さ 6 cm）をサンプルに挿入し，20 ℃に設定した恒温チャンバー内で一晩静置した後，熱伝導率の測定を行った．測定は 30 分間隔で 3 回行い，3 回の平均値を測定値とした．なお，カラムにはラップフィルムを被せ，測定中のサンプルからの蒸発をできるだけ防ぐよう配慮した．

2. 3 固相の熱伝導率の推定方法

バイオチャーの混入が固相の熱伝導率に与える影響を検討するため，Ochsner et al.（2001）に倣い，熱伝導率の測定結果に以下に示す de Vries モデルを適用し，バイオチャー単体，無混入土壌，バイオチャー混入土壌の固相の熱伝導率の推定を行った．

$$\lambda = \frac{K_w \lambda_w \theta + K_a \lambda_a \phi + K_s \lambda_s \sigma}{K_w \theta + K_a \phi + K_s \sigma} \quad (5)$$

ここで，λ：サンプルの熱伝導率（W m^{-1} K^{-1}），λ_i：各相の熱伝導率（W m^{-1}K^{-1}），K_i：各相の重み係数，w：液相，a：気相，s：固相を示す．また，重み係数 K_i は，以下の式より求められる．

$$K_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{3} \left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} - 1 \right) g_j \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{3} g_j = 1 \quad (7)$$

ここで，λ_0：流体の熱伝導率（W m^{-1} K^{-1}），g_j：形状係数を示す．形状係数 g_1，g_2，g_3 は土壌粒子の形状に依存するが，g_1 と g_2 が等しいと仮定した場合，g_3 は $g_3 = 1 - 2g_1$ から計算できる（Campbell and Norman, 1998）．g_1 は，土壌（島尻マージ，豊浦砂），バイオチャー単体，バイオチャー混入土壌でそれぞれ異なる値をとるため，今回の計算では未知数として取り扱った．また，流体の熱伝導率 λ_0 は，乾燥土壌では空気の値であり，湿潤土壌では水の値となる．λ_0 は，次式により求めた（Campbell et al., 1994）．

$$\lambda_0 = \lambda_a + f_w (\lambda_w - \lambda_a) \quad (8)$$

ここで，f_w：土壌の含水率に依存する無次元量を示しており，次式により算定される（Campbell et al., 1994）．

$$f_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{-q}} \quad (9)$$

ここで，θ_0：土壌内水分フローのカットオフ含水率（m^3 m^{-3}），q：カットオフがどの程度早く生じるかを規定する定数，を示す．θ_0 は，土性に依存し，土壌の平均粒子径や粘土含量から推定することが可能であるが，バイオチャー単体やバイオチャー混入土壌では推定が不可能であるため，未知数として取り扱った．同様に，q も土性に依存する定数であるため，未知数として取り扱った．

(5)－(8) 式において，液相の熱伝導率 λ_w は 0.596 W m^{-1} K^{-1}（20 ℃）を用いた．また，気相の熱伝導率 λ_a は，θ が θ_0 よりも低い場合は空気の熱伝導率である 0.025 W m^{-1} K^{-1}（20 ℃）を用い，θ が θ_0 よりも高い場合は水蒸気で飽和された空気の熱伝導率 0.074 W m^{-1} K^{-1}（20 ℃）を用いた（Ochsner et al., 2001）．なお，固相の熱伝導率 λ_s は未知数とした．

したがって，固相の熱伝導率 λ_s，形状係数 g_1，水分フローのカットオフ定数 θ_0，q をフィッティングパラメータとして，熱伝導率の測定値に de Vries モデル（(5)－(9) 式）を適用し，非線形最小自乗法を用いて無混入土壌（島尻マージ，豊浦砂），バイオチャー単体，バイオチャー混入土壌の固相の熱伝導率の推定を行った．

3. 結果と考察

3. 1 炭化温度の異なるバイオチャーおよび土壌の熱伝導率

異なる炭化温度（400，600，800 ℃）で生成されたバイオチャー単体，島尻マージおよび豊浦砂の体積含水率と熱伝導率の関係を Fig. 1 に示した．風乾から 0.30 m^3 m^{-3} の範囲内において，400，600，800 ℃で生成されたバイオチャーの熱伝導率の変動は，それぞれ 0.0－0.2，0.1－0.2，0.1－0.2 W m^{-1} K^{-1} であり，島尻マージ（0.2－0.5 W m^{-1} K^{-1}），豊浦砂（0.2－1.5 W m^{-1} K^{-1}）と比較すると体積含水率の増加に対する増加量が小さい．また，炭化温度の違いによる体積含水率と熱伝導率の関係の違

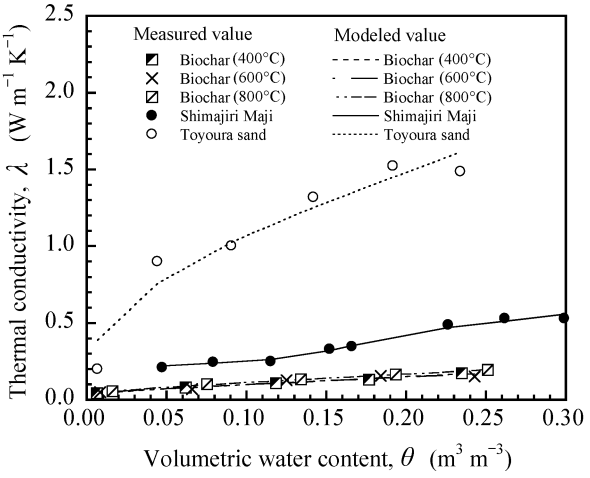


Fig. 1　炭化温度の異なるバイオチャー単体，島尻マージ，豊浦砂における体積含水率と熱伝導率の関係．
Relationship between volumetric water content and thermal conductivity of biochar formed at three different pyrolysis temperatures, Shimajiri Maji soil and Toyoura sand.

いは小さかった.

熱伝導率の測定結果（Fig. 1）に de Vries モデル（(5)－(9) 式）を適用し，バイオチャー単体，島尻マージ，豊浦砂の固相の熱伝導率の推定を行った．de Vries モデルによる予測結果は，測定値と概ね良好に一致した（Fig. 1）．400，600，800 ℃で生成されたバイオチャー単体の固相の熱伝導率は，それぞれ 1.5，1.3，1.5 W m^{-1} K^{-1} と推定され，炭化温度による影響は小さかった．また，島尻マージ，豊浦砂の固相の熱伝導率の推定値はそれぞれ 2.6，6.7 W m^{-1} K^{-1} であり，豊浦砂の方が約 2 倍高い値を示した．土壌とバイオチャー単体で比較した場合，バイオチャー単体の固相の熱伝導率は，島尻マージの約 1/2 倍，豊浦砂の 1/5－1/4 倍と低い値を示した．

3. 2 炭化温度の異なるバイオチャーの土壌混入が熱伝導率に及ぼす影響

炭化温度の異なるバイオチャーを 0，3 %（w/w）で土壌混入した場合の体積含水率と熱伝導率の関係を Fig. 2 に示した．島尻マージでは，0.1－0.3 m^3 m^{-3} の水分領域でバイオチャー混入土壌の熱伝導率は，無混入土壌よりも 0.1－0.2 W m^{-1} K^{-1}（6－51 %）低くなった（Fig. 2 (a)）．一方，豊浦砂では，0.0－0.3 m^3 m^{-3} の水分領域でバイオチャー混入土壌の熱伝導率は，無混入土壌よりも 0.2－0.7 W m^{-1} K^{-1}（11－52 %）低くなった（Fig. 2(b)）．また，炭化温度の異なるバイオチャー混入土壌で熱伝導率を比較した場合，違いは小さかった．

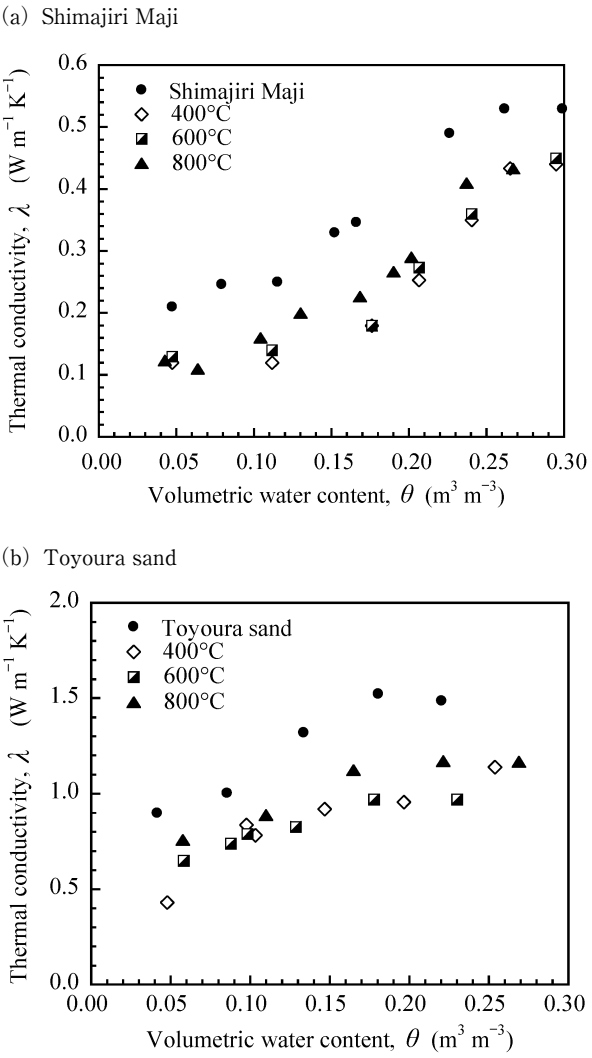


Fig. 2 炭化温度の異なるバイオチャーを 3 %（w/w）で混入した土壌における体積含水率と熱伝導率の関係：(a) 島尻マージ，(b) 豊浦砂.
Relationship between volumetric water content and thermal conductivity of soils amended with biochar formed at three different pyrolysis temperatures at 3 %（w/w）：(a) Shimajiri Maji soil；(b) Toyoura sand.

熱伝導率の測定結果（Fig. 2）に de Vries モデルを適用し，バイオチャー混入土壌の固相の熱伝導率の推定を行った．その結果は Table 2 に示した通りである．土壌と比較して固相の熱伝導率が低いバイオチャーの 3 %（w/w）の混入により，固相の熱伝導率は島尻マージで約 3 割，豊浦砂で 3－4 割低下した．また，バイオチャーの炭化温度が混入土壌の固相の熱伝導率に与える影響は小さかった．

また，バイオチャー混入土壌では，無混入土壌と比較して固相率が減少し，間隙率が増加する（Table 1）．バイオチャーの 3 %（w/w）の混入により，島尻マージでは固相率が 0.39 m^3 m^{-3} から 0.34 m^3 m^{-3}，豊浦砂では 0.57 m^3 m^{-3} から 0.48 m^3 m^{-3} に低下する（Table 1）．このため，土壌にバイオチャーを混入した際の熱伝導率の低下は，固相の熱伝導率が低下したことに加え，熱伝導率が高い固相の割合が減少し，熱伝導率の低い気相の割合が増加したことに起因していると考えられる．

島尻マージ（無混入土壌）に対して de Vries モデルを適用した際のフィッティングパラメータを用いて，固相の熱伝導率が 2.6 W m^{-1} K^{-1} から 1.6，1.8，1.9 W m^{-1} K^{-1} に変化した場合の土壌の熱伝導率の低下割合を試算したところ，10－24，8－19，7－16 %（θ = 0.1－0.3 m^3 m^{-3}）であった．また，体積含水率が増加するにつれて，低下割合も増加する傾向を示した．一方，固相率を 0.39 m^3 m^{-3} から 0.34 m^3 m^{-3} に変化した場合の熱伝導率の低下割合は 15－16 %（θ = 0.1－0.3 m^3 m^{-3}）であり，体積含水率に関わらず一定の値を示した．このため，島尻マージにおいてバイオチャーを 3 %（w/w）で混入した際の熱伝導率の低下には，体積含水率に関わらず固相率の減少（間隙率の増加）が一定に寄与しており，体積含水率が増加するにつれて固相の熱伝導率の低下の寄与が増加すると推察された．

同様に，豊浦砂（無混入土壌）に対して，固相の熱伝導率が 6.7 W m^{-1} K^{-1} から 4.3，4.9 W m^{-1} K^{-1} に変化した場合の土壌の熱伝導率の低下割合を試算したところ，3－14，2－9 %（θ = 0.0－0.3 m^3 m^{-3}）であった．島尻マージと同様に，体積含水率が増加するにつれて，低下割合が増加する傾向を示した．一方，固相率を 0.57 m^3 m^{-3} から 0.48 m^3 m^{-3} に変化した場合の熱伝導率の低下割合は 26 %（θ = 0.0－0.3 m^3 m^{-3}）であり，体積含水率に関わらず一定の値を示した．このため，豊浦砂においてバイオチャーを 3 %（w/w）で混入した際の熱伝導率の低下には，固相率の減少（間隙率の増加）の寄与が大きい

Table 1 熱伝導率を測定したサンプルの乾燥密度と間隙率：(a) バイオチャー単体と無混入土壌，(b) バイオチャー混入島尻マージ土壌，(c) バイオチャー混入豊浦砂.
Composition of samples used for thermal conductivity measurements：(a) Biochar and non-amended soils；(b) Shimajiri Maji soil amended by biochar；(c) Toyoura sand amended by biochar.

(a) Biochar and non-amended soils

Sample		Biochar			Shimajiri Maji	Toyoura sand
		400 ºC	600 ºC	800 ºC	−	−
Dry bulk density	(Mg m^{-3})	0.16	0.16	0.16	1.07	1.50
Volumetric solid content	(m^3 m^{-3})	0.11	0.10	0.09	0.39	0.57
Porosity	(m^3 m^{-3})	0.89	0.90	0.91	0.61	0.43

(b) Shimajiri Maji soil amended by biochar

Pyrolysis temperature		400 ºC	600 ºC	800 ºC		
Biochar content	(% (w/w))	3	3	1	3	5
Dry bulk density	(Mg m^{-3})	0.91	0.92	1.02	0.93	0.86
Volumetric solid content	(m^3 m^{-3})	0.34	0.34	0.37	0.34	0.32
Porosity	(m^3 m^{-3})	0.66	0.66	0.63	0.66	0.68

(c) Toyoura sand amended by biochar

Pyrolysis temperature		400 ºC	600 ºC	800 ºC		
Biochar content	(% (w/w))	3	3	1	3	5
Dry bulk density	(Mg m^{-3})	1.23	1.24	1.40	1.26	1.10
Volumetric solid content	(m^3 m^{-3})	0.48	0.48	0.53	0.48	0.42
Porosity	(m^3 m^{-3})	0.52	0.52	0.47	0.52	0.58

と推察された.

島尻マージと豊浦砂で比較した場合，バイオチャー混入による熱伝導率の低下割合は豊浦砂の方が大きかった (Fig. 2 (a)，(b))．また，試算の結果から，島尻マージと豊浦砂では，土壌の熱伝導率の低下に対する固相率減少（間隙率の増加）と固相の熱伝導率低下それぞれの寄与度が異なる傾向が見られた．これらの結果は，豊浦砂の方が，①固相率の減少割合（間隙率の増加割合）が大きいこと，②固相の熱伝導率が高いため，固相率の減少に伴う固相から気相への置換の影響が大きいことに起因していると考えられる．島尻マージでは，固相率の減少割合 (間隙率の増加割合) がそれぞれ 13 % (6 %) であるのに対して，豊浦砂では，固相率の減少割合（間隙率の増加割合）がそれぞれ 16 % (21 %) であった (Table 1)．これは，バイオチャーを質量比で混入したため，乾燥密度の高い豊浦砂への混入量が，島尻マージへの混入量よりも多かったことに起因している.

3. 3 バイオチャーの混入量が熱伝導率に及ぼす影響

800 ℃で生成されたバイオチャーを 0，1，3，5 % (w/w) で土壌混入した場合の体積含水率と熱伝導率の関係を Fig. 3 に示した．島尻マージの場合，混入量の違いによる熱伝導率への影響は小さかった (Fig. 3 (a))．一方，豊浦砂の場合，混入量の増加に伴い熱伝導率が低下する傾向が見られた (Fig. 3 (b))．

熱伝導率の測定結果 (Fig. 3) に de Vries モデルを適用し，バイオチャー混入土壌の固相の熱伝導率の推定を行った．その結果は Table 2 に示した通りである．両方の土壌において，バイオチャーの混入割合の増加と共に

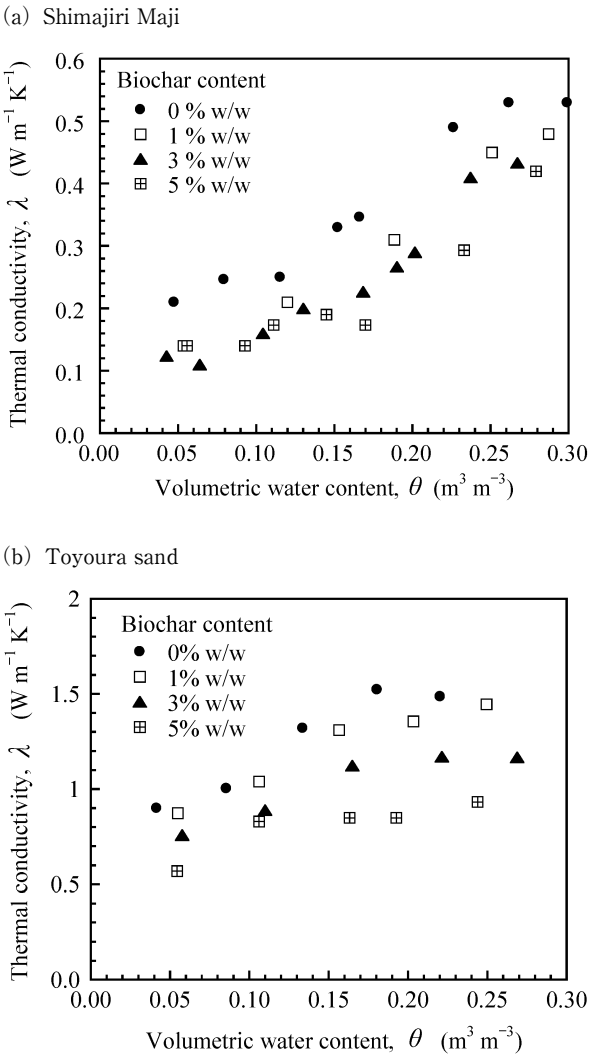


Fig. 3 バイオチャー（800 ℃）を異なる割合で混入した土壌における体積含水率と熱伝導率の関係：(a) 島尻マージ，(b) 豊浦砂.
Relationship between volumetric water content and thermal conductivity of soils amended with biochar formed at 800 ℃ at four different contents：(a) Shimajiri Maji soil；(b) Toyoura sand.

固相の熱伝導率が低下する傾向が見られた.

また，混入割合の変化により，固相率の減少割合（間隙率の増加割合）が変化するため，土壌の熱伝導率の低下に影響していると考えられる．バイオチャーの1，3，5 %（w/w）の混入により，島尻マージでは固相率が0.39 $m^3\ m^{-3}$ から0.37，0.34，0.32 $m^3\ m^{-3}$，豊浦砂では0.57 $m^3\ m^{-3}$ から0.53，0.48，0.42 $m^3\ m^{-3}$ に減少する（Table 1）.

島尻マージ（無混入土壌）に対して de Vries モデルを適用した際のフィッティングパラメータを用いて，固相の熱伝導率が2.6 W $m^{-1}\ K^{-1}$ から2.0，1.9，1.6 W $m^{-1}\ K^{-1}$ に変化した場合の土壌の熱伝導率の低下割合を試算したところ，低下割合は5－14，7－16，10－24 %（θ ＝0.1－0.3 $m^3\ m^{-3}$）であった．一方，固相率を0.39 $m^3\ m^{-3}$ から0.37，0.34，0.32 $m^3\ m^{-3}$ に変化した場合の熱伝導率の低下割合は7，15－16，21－22 %（θ ＝0.1－0.3 $m^3\ m^{-3}$）であった.

同様に，豊浦砂（無混入土壌）に対して，固相の熱伝導率が6.7 W $m^{-1}\ K^{-1}$ から5.1，4.9，4.0 W $m^{-1}\ K^{-1}$ に変化させた場合の土壌の熱伝導率の低下割合を試算したところ，1－8，2－9，3－16 %（θ ＝0.0－0.3 $m^3\ m^{-3}$）であった．一方,固相率を0.57 $m^3\ m^{-3}$ から0.53, 0.48, 0.42 $m^3\ m^{-3}$ に変化した場合の熱伝導率の低下割合は13, 26, 40 %（θ ＝0.0－0.3 $m^3\ m^{-3}$）であった.

試算の結果から，混入割合が増加するにつれて，固相の熱伝導率変化による土壌の熱伝導率の低下割合，固相率変化による土壌の熱伝導率の低下割合共に増加した．島尻マージにおける土壌の熱伝導率の低下には，体積含水率に関わらず固相率減少（間隙率増加）が一定に寄与しており，体積含水率が多くなるにつれて固相の熱伝導率の低下の寄与が増加すると推察された．また，豊浦砂における土壌の熱伝導率の低下には，固相率減少（間隙率増加）の寄与が大きいと推察された.

4. おわりに

バイオチャーは土壌改良資材として有望な材料である．これまで，保水力や保肥力の改善，重金属の吸着保持に関する研究が報告されている．しかし，農作物の生育や土壌微生物の活動などに大きく影響する熱環境への影響を検討したものはほとんどない．そのため，本研究では，さとうきび由来のバイオチャーの島尻マージと豊

Table 2 バイオチャー混入土壌の固相熱伝導率の推定値.
Estimated thermal conductivities of solid phases of soils amended by biochar.

Pyrolysis temperature		−	400°C	600°C		800°C	
Biochar content	(% (w/w))	0	3	3	1	3	5
Estimated thermal conductivities of solid phases of Shimajiri Maji soil	($Wm^{-1}\ K^{-1}$)	2.6	1.6	1.8	2.0	1.9	1.6
Estimated thermal conductivities of solid phases of Toyoura sand	($Wm^{-1}\ K^{-1}$)	6.7	4.3	4.3	5.1	4.9	4.0

浦砂への混入が土壌の熱伝導率に与える影響について検討した．

バイオチャー単体および土壌に水を加えながら熱伝導率を測定した結果，同じ体積含水率では，バイオチャー単体は土壌よりも低い熱伝導率を示すことが明らかとなった．de Vries モデルを用いてバイオチャー単体および土壌の固相の熱伝導率を推定したところ，バイオチャー単体は 1.3－1.5 W m^{-1} k^{-1}，島尻マージは 2.6 W m^{-1} k^{-1}，豊浦砂は 6.7 W m^{-1} k^{-1} となった．そのため，バイオチャー単体の固相の熱伝導率は，島尻マージの約 2 分の 1，豊浦砂の 1/4－1/5 であると推定された．

3 種類の炭化温度で生成したバイオチャーを 3％（w/w）混入した供試サンプルを作成し，熱伝導率を測定したところ，炭化温度の違いによる熱伝導率の違いは小さいことがわかった．また，土壌に関わらず，バイオチャーの 3％（w/w）の混入は，土壌の熱伝導率を低下させる結果となった．

de Vries モデルを用いてバイオチャー混入土壌の固相の熱伝導率を求めると，島尻マージで 1.6 － 1.9 W m^{-1} k^{-1}，豊浦砂で 4.3－4.9 W m^{-1} k^{-1} となり，バイオチャーの混入により固相の熱伝導率は低下した．また，バイオチャー混入土壌では，無混入土壌と比較して固相率が減少し，間隙率が増加する．このため，バイオチャーを混入した場合の熱伝導率の低下は，固相の熱伝導率が低下したことに加え，熱伝導率が高い固相の割合が減少し，熱伝導率の低い気相の割合が増加したことに起因すると考えられる．

de Vries モデルを用いた試算結果から，島尻マージにおいてバイオチャーを混入した際の土壌の熱伝導率の低下には，体積含水率に関わらず固相率減少（間隙率増加）が一定に寄与しており，体積含水率が多くなるにつれて固相の熱伝導率低下の寄与が増加すると推察された．また，豊浦砂における土壌の熱伝導率の低下には，固相率減少（間隙率増加）が大きく寄与していると推察された．この土壌による違いは，豊浦砂の方が，① 固相率の減少割合（間隙率の増加割合）が大きいこと，② 固相の熱伝導率が高いため，固相率の減少に伴う固相から気相への置換の影響が大きいことに起因していると考えられた．

これらの結果から，バイオチャー混入による土壌の熱伝導率の低下に対しては，固相率（空隙率）変化と固相の熱伝導率変化が寄与しており，その寄与度は土壌の固相の熱伝導率，固相率，空隙率の変化の大きさによって異なることが示唆された．

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 19780185，23780254 の助成を受けたものです．ここに記して感謝の意を表します．

引用文献

Abu-Hamdeh, N.H. and Reeder, R.C.（2000）：Soil Thermal Conductivity：Effects of Density, Moisture, Salt Concentration and Organic Matter.Soil Science Society of America Journal, 64：1285–1290.

Baldock, J.A and Smernik, R.J.（2002）：Chemical composition and bioavailability of thermally altered Pinusresinosa（red pine）wood. Organic Geochemistry, 33：1093–1109.

Campbell, G.S., Jungbauer, J.D., Jr., Bidlake, W.R., and Hungerford, R.D.（1994）：Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. Soil Science, 158：307–313.

Campbell, G.S. and Norman, J.M.（1998）：An introduction to environmental biophysics. 2nd ed. p.286, Springer, New York.

Chen, Y., Shinogi, Y. and Taira, M.（2010）：Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. Soil Research, 48：526–530.

Ekwue, E.I., Stone, R.J., Maharaj, V.V. and Bhagwat, D.（2005）：Thermal Conductivity and Diffusivity of Four Trinidadian Soils as Affected by Peat Content. Transaction of the ASAE, 48：1803–1815.

Gupta, S.C., Dowdy, R.H. and Larson, W.E.（1976）：Hydraulic and Thermal Properties of a Sandy Soil as Influenced by Incorporation of Sewage Sludge. Soil Science Society of America Journal, 41：601–605.

International Energy Agency（2007）：IEA Bioenergy 2007 Annual Report. p.122, www.ieabioenergy.com.

Jury, W.A. and Horton, R.（2004）：Soil Physics. 6th ed. p.384, John Wiley. & Sons. Inc., New York.

Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T. and Shinogi, Y.（2012）：Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcaric dark red soil, Journal of Environmental Quality, 41：1131–1137.

Kubotera, H.（2006）：The factors and assumed mechanisms of the hardening of Red soils and Yellow soils in subtropical Okinawa Island, Japan. Japan Agricultural Research Quarterly, 40：197–203.

Laird, D.A.（2008）：The Charcoal Vision：A Win–Win–Win Scenario for Simultaneously Producing Bioenergy, Permanently Sequestering Carbon, while Improving Soil and Water Quality. Agronomy Journal, 100：178–181.

Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M.（2006）：Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11：403–427.

Lehmann, J. and Joseph, S.（2009）：Biochar for Environmental Management - Science and Technology. p.416, EarthScan, London.

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 . 農業土木学会論文集 , 198：939–944.

望月秀俊 , 坂口巌 , 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.

Namgay, T., Singh, B. and Singh, B.P.（2010）：Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize（Zea mays L.）. Soil Research, 48：638–647.

Ochsner, T.E., Horton, R. and Ren, T.（2001）：A New Perspective on Soil Thermal Properties. Soil Science Society of America Journal, 65：1641–1647.

Soil Survey Staff（2010）：Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. p.338, USDA -Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Sohi, S.P., Lopez-Capel, E., Bol, R. and Krull, E.（2010）：A review of biochar and its use and function in soil. Advances in Agronomy, 105：47–82.

山崎祐樹（2004）：石英および有機物を含む凍結土と未凍結土の熱伝導率推定モデルの検証（岩手大学大学院連合農学研究科博士論文）.p.97.

山崎祐樹 , 土谷富士夫 , 辻修（2003）：石英を含む凍結土および未凍結土の熱伝導率測定と推定モデル . 農業土木学会論文集 , 226：43–51.

要　　旨

本研究では，さとうきび由来のバイオチャーの島尻マージおよび豊浦砂への混入が土壌の熱伝導率に与える影響について検討した．
バイオチャー混入土壌と無混入土壌を準備し，それぞれを加水調整しながら，体積含水率と熱伝導率の関係を測定したところ，土壌に関わらず，バイオチャーの混入により熱伝導率が低下する結果となった．各土壌ともに，バイオチャーの混入により de Vries で推定される固相の熱伝導率は低下し，固相率は減少（間隙率は増加）した．de Vries モデルを用いた試算結果により，島尻マージにおける土壌の熱伝導率の低下に対しては，固相率の減少（間隙率の増加）が一定に寄与しており，体積含水率が多くなるにつれて固相の熱伝導率の低下の寄与が増加することが推察された．また，豊浦砂における土壌の熱伝導率の低下に対しては，固相率の減少（間隙率の増加）の寄与が大きいと推察された．
これらの結果から，バイオチャー混入による土壌の熱伝導率の低下に対しては，固相率（間隙率）変化と固相の熱伝導率変化が寄与しており，その寄与度は土壌の固相の熱伝導率，固相率，間隙率の変化の大きさによって異なることが示唆された．

キーワード：バイオチャー，土壌の熱伝導率，熱分解，固相，間隙