農研機構
NARO 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

バイオ炭混入による砂質土壌の物理性の変化 —保水性・透水性・肥料成分の移動への影響について—

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 公開日: 2026-07-10 キーワード: 作成者: 岩田, 幸良, 宮本, 輝仁, 亀山, 幸司 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002001709

(c) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
National Agriculture and Food Research Organization, Japan

〔農工研技報　215
113～121，2014〕

バイオ炭混入による砂質土壌の物理性の変化

―保水性・透水性・肥料成分の移動への影響について―

岩田幸良*　宮本輝仁*　亀山幸司**

*農地基盤工学研究領域畑地工学担当
**企画管理部業務推進室

キーワード：砂質土壌，バイオ炭，土壌改良，有効水分量，硝酸イオン

Ⅰ　緒　言

福井県北部を流れる九頭竜川の左右岸に広がる福井・坂井平野において、平成 11 年度より、老朽化した開水路のパイプライン化によって生み出される余剰水を，これまで質と量ともに不安定な水源に依存していた地域の水源に充て，灌漑用水の安定供給を図ることを目的とする国営農業用水再編対策事業「九頭竜川下流地区」が実施されている。この事業対象地域の一部である三里浜地域には約 320 ha の砂丘畑があり，園芸作物を中心に栽培が行われている。この地域は，これまで灌漑水を塩分が混じった地下水に依存し，塩害を避けるために十分な灌漑が実施できない場合があったが，本事業の実施により，良質な農業用水が供給される予定である。そのため，三里浜特産農業協同組合や JA 花咲ふくいを中心に，事業実施後に潅漑水を有効利用した営農を実現するための営農実証試験が行われている。しかし，対象土壌が砂質土壌であるため，保水性や保肥性に乏しく，肥料抜けの対策を行っているが，有効な手立てがまだ確立されていない状況にある。

土壌の保水性や保肥性を改善するための方法として，バイオ炭を用いた土壌改良が考えられる。バイオ炭（Biochar）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。これまでに，バイオ炭を土壌に混入することで，作物の生産性が向上することが報告されている（陳ら, 2007; Chan et al., 2007;陳ら, 2008; Asai et al., 2009; Hunt et al., 2010）。これは，バイオ炭を混入することで土壌の物理性や化学性，微生物活動が変化することに起因している（Lehmann and Joseph, 2009; Steinbeiss et al., 2009）。特に，バイオ炭混入による物理性の改善効果については，保水性の向上（Kameyama et al., 2010; Abel et al., 2013）や熱伝導率の低下（亀山ら, 2013）が報告されている。また，肥料成分の保持能力の向上についての報告がある（Laird et al., 2010）。これらの結果は，保水性や保肥性の乏しい土壌にバイオ炭を混入することで，土壌の保水性・保肥性が改善されることを示唆している。

本研究で対象とする九頭竜川流域では，土壌改良材として地元の九頭竜森林組合が木材のリサイクルで生産しているバイオ炭が販売されている。そこでこのバイオ炭を活用して，三里浜砂丘地の砂質土壌の物理性を改善できないか検討することとした。土壌改良を行うためには多量な資材を必要とするため，その近隣地域で生産されたバイオ炭を用いる方が輸送面等から合理的と考えられるためである。物理性の改善による肥料抜けの対策としては，土壌改良資材を投与することにより，土壌の保水性を向上させて水溶性の肥料成分の滞留時間を長くすること，および肥料成分を吸着する特性を向上させること等が考えられる。そこで，本研究では，九頭竜森林組合で製造されているバイオ炭の混入による保水性の改善と肥料成分の移動への影響について実験室レベルで試験を行い，バイオ炭の混入による保水性・保肥性の改善の可能性について検討した。

Ⅱ　試験方法

2.1　供試試料と物性評価

畑地灌漑を予定している福井県三里浜地区の典型的な砂質土壌畑の作土層（0～15 cm 深）から採取した土壌を供試土とした。土性は砂 99%，シルト 1%の砂土である（谷口ら，印刷中）。

土壌に混入させるバイオ炭は 2 種類とし，バーク炭（森もり炭；九頭竜森林組合）と，比較対象として木炭（農業用みのり炭素；奈良炭化工業株式会社）を用いた。バーク炭は製紙用チップ製造の際に出る樹皮を原料とし，平窯により炭化したものであるが，温度管理はしていないようであった。木炭は広葉樹を原料とし，土釜により炭化温度 600～700℃で炭化したものである。バイオ炭の理化学性を **Table 1** に示す。

試験に使用したバーク炭と木炭を **Fig. 1** に示す。木炭は粒状で粒径が 5～10 mm 程度であるのに対し，バーク炭は粉状で粒径は数 mm 程度と細かい。土壌に混入したバイオ炭は，農業現

Table 1　実験に用いたバイオ炭の理化学性
Physicochemical properties of biochar used in this experiment

	真比重 ($Mg\ m^{-3}$)	炭素 (%)	水素 (%)	窒素 (%)	硫黄 (%)
バーク炭	1.67	63.7	1.5	1.5	< 0.3
木炭	1.54	69.3	2.0	1.0	< 0.3

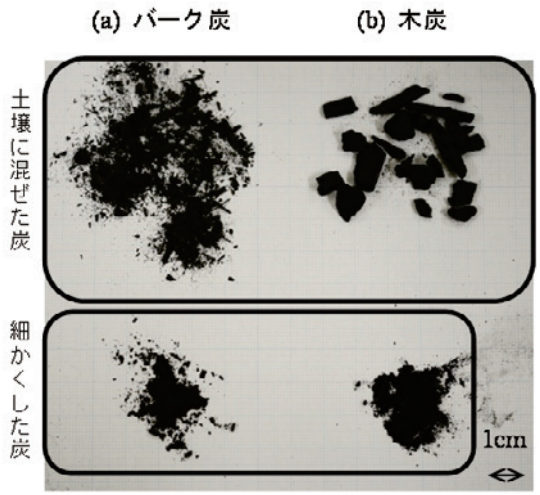


Fig. 1 試験に使用したバーク炭と木炭
Biochars made from bark (a) and wood (b), which were used in this experiment.

場で作土に混入する場合を想定し，粒度の調整をせず，購入したものをそのまま使用した。一方，後述の水銀圧入法で間隙分布を求める試験では，粗大な間隙の影響を避けるため，粉砕機でバイオ炭を粉砕後，0.5 mm の篩を通過し，0.2 mm の篩に残ったものを使用した。

2.2 バイオ炭混入試料の準備

バイオ炭の施用についてのこれまでの研究をみると，混入割合が 0.5～5%の範囲で土壌に施用し，その効果が確認されているものが多い（陳ら, 2007; Chan et al., 2007; 陳ら, 2008; Asai et al., 2009; Hunt et al., 2010; Laird et al., 2010; Zheng et al., 2013）。そのため，本研究でも既存の研究に倣い，乾燥重量割合が 1%，3%，5%となるように土壌にバイオ炭を混入した。土壌の乾燥密度（ρ_{ds}）とバイオ炭の乾燥密度（ρ_{dc}）は次式で計算される。

$$\rho_{ds} = W_{ds} / V_{ds} \quad (1)$$

$$\rho_{dc} = W_{dc} / V_{dc} = r_c \times W_{ds} / V_{dc} \quad (2)$$

ここに，W_{ds} と W_{dc} は土壌とバイオ炭の重さ，V_s と V_c は土壌とバイオ炭の容積，r_c は土壌に対するバイオ炭の混入比（上記の乾燥重量割合の 1/100）である。一方，土壌とバイオ炭を混ぜた試料の乾燥密度（$\rho_{d(c+s)}$）は次式で表現される。

$$\rho_{d(c+s)} = (W_{ds} + W_{dc}) / (V_{ds} + V_{dc}) = (1+r_c) \times W_{ds} / (V_{ds} + V_{dc}) \quad (3)$$

式(3)の V_{ds} と V_{dc} に式(1)と式(2)を代入することで，$\rho_{d(c+s)}$ を ρ_{ds} と ρ_{dc} と r_c から計算する式(4)が得られる。

$$\rho_{d(c+s)} = (1 + r_c) / (1/\rho_{ds} + r_c / \rho_{dc}) \quad (4)$$

谷口ら（印刷中）を参考にし，100 cm^3 円筒ステンレス容器に乾燥密度が約 1570 kg m^{-3} になるように土壌を充填し，コントロール（土壌のみの試料）とした。同様に，100 cm^3 円筒ステンレス容器にバイオ炭を密に詰め，105℃で 48 時間以上乾燥させることで ρ_{dc} を測定した。コントロールの乾燥密度（ρ_{ds}）と式(4)から $\rho_{d(c+s)}$ を計算し，この値を用いて 100 cm^3 円筒容器にバイオ炭を混入した試料を充填した。コントロール，バイオ炭を重量比で 1%，3%，5%混入した試料をそれぞれ 8 個ずつ，バイオ炭を密に充填した試料（バーク炭，木炭）を 5 個ずつ用意した。

2.3 バイオ炭混入の透水性・保水性への影響評価

バイオ炭混入による透水性の変化について評価するため，コントロールとバイオ炭を混入した試料の各処理からそれぞれ 3 サンプルを任意に抽出し，定水位法（土壌物理性測定法委員会, 1972）により飽和透水係数を求めた。

また，バイオ炭混入による保水性の変化について評価するため，各処理について 5 個のサンプルを用いて水分特性曲線を求めた。pF1.0（–0.98 kPa）～pF1.5（–3.10 kPa）は砂柱法（Jamison, 1958），pF1.8（–6.18 kPa）～pF4.2（–1553 kPa）は加圧板法（土壌物理性測定法委員会, 1972）にて測定を行った。

得られた土壌水分特性データから，圃場容水量（pF1.8 のときの土壌水分量），成長有効水分量（pF1.8 の水分量から pF3.0 の水分量を差し引いた値，$\theta_{3.0}$），有効水分量（F1.8 の水分量から pF4.2 の水分量を差し引いた値，$\theta_{4.2}$）を求めた（駒村, 1992）。バイオ炭混入割合による保水性の向上効果を検証するため，有意差検定を行った。有意差検定は，①コントロールと各試料の間，②バーク炭と木炭それぞれにおける炭の混入割合が異なる試料の間，③混入割合が同じバーク炭と木炭の混入試料の間の 3 段階で平均値の差の有意性を t 検定により判定した。

混入するバイオ炭の水分特性が事前にわかっている場合，混入割合に応じた保水性の変化が予測できると便利である。そこで，土壌とバイオ炭の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ からバイオ炭混入試料の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を推定することを試みた。

式(3)で示したように，バイオ炭を混入した試料の重さ（$W_{d(s+c)}$）は W_{ds}＋W_{dc} なので，W_{ds} と W_{dc} は土壌に対する炭の混入比（r_c）を用いて次式で計算される。

$$W_{ds} = W_{d(s+c)} / (1 + r_c) \quad (5)$$

$$W_{dc} = W_{d(s+c)} - W_{ds} = W_{d(s+c)} \times \{ r_c / (1 + r_c) \} \quad (6)$$

ここで，土壌とバイオ炭を混入したことによりそれぞれの水分特性は単体のときと変わらないと仮定する。この仮定の下で，コントロールの水分特性曲線から求めた土壌の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ をそれぞれ $\theta_{s3.0}$ と $\theta_{s4.2}$，バイオ炭の水分特性曲線から求めた $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ をそれぞれ $\theta_{c3.0}$ と $\theta_{c4.2}$ とすると，バイオ炭混入時の試料の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ は次式であらわされる。

$$\theta_{3.0\text{or}4.2} = (\theta_{s3.0\text{or}4.2} / \rho_{ds}) \times W_{ds} + (\theta_{c3.0\text{or}4.2} / \rho_{dc}) \times W_{dc} = W_{d(s+c)} \times [\theta_{s3.0\text{or}4.2} / \{\rho_{ds} \times (1 + r_c)\} + (\theta_{c3.0\text{or}4.2} \times r_c) / \{(\rho_{dc} \times (1 + r_c)\}] \quad (7)$$

式(7)により計算した値を実測値と比較することで，計算結果の妥当性を検討した。

$\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を式(7)により計算する際，100 cm^3 円筒ステンレス容器にバイオ炭を詰めて求めた $\theta_{c3.0}$ と $\theta_{c4.2}$ の代わりに，水銀圧入法により求めた微細間隙構造を用いる方法も検討した。バイオ炭自体は水につけた時，撥水性を示す場合がある。そのため，撥水性に影響されず間隙分布を得られる水銀圧入法の測定結果も比較検討した。水銀圧入法により得られた間隙分布から

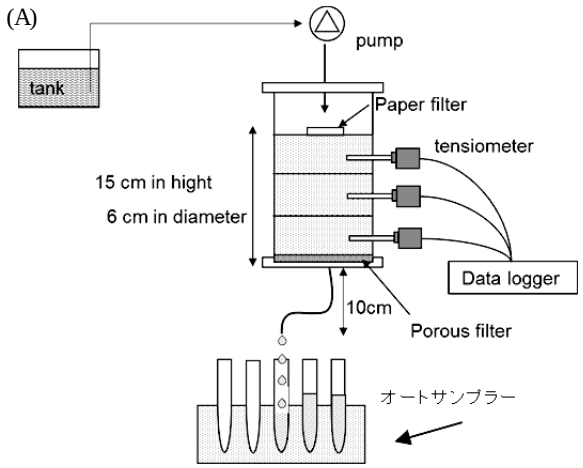
$\theta_{c3.0}$ と $\theta_{c4.2}$ を求めるため，間隙径を等価毛管直径と等しいとみなし，以下のジュレンの式により相当する圧力水頭（pF 値）に換算した（成岡, 1989）。

$$h = 0.3/d \quad (8)$$

ここに，h は毛管上昇高さ，d は等価毛管直径（共に単位は cm）である。水銀圧入法による間隙分布の測定には，0.3 kPa ～ 400 kPa を Carol Erba Institute 社の Pascal140 を，0.1 MPa ～ 400 MPa を同社の Pascal440 を使用した。

2.4　バイオ炭混入の硝酸イオンの流出への影響評価

畑地に施肥された窒素は，土壌中に生息する硝酸化成菌の作用を受けて，そのほとんどが最終的には硝酸態窒素になる（田淵ら, 1998）。そのため，土壌中の肥料成分の移動を評価するために硝酸イオンの流出に着目した。



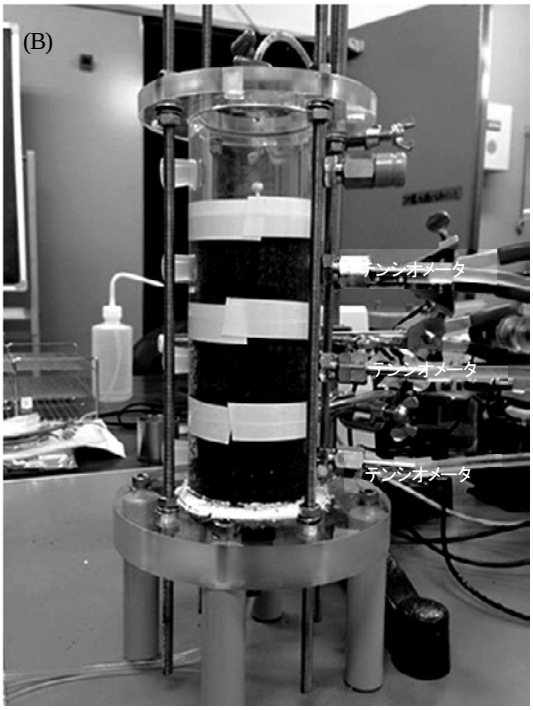


Fig. 2　実験装置の概要図（A）と作成した土壌カラム（B）
Schematic diagram of the experiment setup (A), and photo of soil column (B).

バーク炭の混入が肥料成分の移動に与える影響を評価するため，コントロール（土壌のみ）とバーク炭を 3%，5%混入した試料について，カラム試験を実施した。三里浜砂丘地で実施された営農実証試験では 10a 当たり 28 kg N の基肥を施用した実績があり，その量（87.5 mg N kg^{-1}）よりわずかに多い施肥を想定し，硝酸カリウム 478mg をそれぞれの試料に均一になるように混ぜた試料を用意した。これは土壌に対して 100 mg N kg^{-1} を施用したことに相当する。各試料を内径 6 cm，高さ 15 cm の容器に，少量ずつできるだけ均等になるように詰めてカラムを作成した（**Fig. 2**）。カラム下端から蒸留水を毛管上昇させながら土壌試料へ給水を行った。24 時間以上かけてカラム下端からの給水を終了することで土層内の水ポテンシャルの初期条件を各処理で同じにした。試験開始と同時にカラム上端から一定フラックス（4.4 mm h^{-1}）で水を供給した。この量は現地で実施されている約半分の灌漑強度に相当する。水フラックスの調整には送液ポンプ（Masterflex, Cole-Parmer Instrument Company）を用いた。カラム下端から 10 cm 低い位置を自由水面とし，流出水をオートサンプラー（CHF161RA，ADVANTEC）で 1 時間毎に採水した。実験終了後，イオンクロマトグラフ（DIONEX, ICS-1500）により流出水に含まれる硝酸イオン濃度を測定した。実験中，カラム下端から高さ 2.5，7.5，12.5 cm の 3 地点でテンシオメータによりマトリックポテンシャルを測定した。テンシオメータの圧力センサー（PA-500-102V, Copal electronics）からの出力を 1 時間間隔でサンプリングし，データロガー（CR1000, Campbell Sci. Inc.）に記録した。得られた結果から硝酸イオンの流出量を求め，バーク炭の混入が硝酸イオンの移動に与える影響を評価した。供試土壌が砂質土であり保肥性が低いことと，作物栽培期間ではないときに土壌をサンプリングしていることから，元々の窒素はほとんど無いと考え，試験前に添加した硝酸態窒素の量を基準に流出率を計算した。

Ⅲ　結果と考察

3.1　バイオ炭混入が透水性と保水性に与える影響

飽和透水係数の測定結果を **Fig. 3** に示す。バーク炭は混入量の増加に伴い透水係数が低下する傾向がみられたのに対し，木炭は混入量の増加に伴い透水係数が増加する傾向がみられた。混入量の異なる各試料とコントロールとの間に有意な差が認められたものは，木炭を 5%加えた試料のみであった。また，バーク炭は，混入量 1%と 5%の試料の間に有意な差が認められた。一方，木炭は，混入量 1%と 3%の試料間および混入量 1%と 5%の試料間に有意な差が認められた。バイオ炭の種類の違いについては，混入量 5%のときに有意な違いが認められた。

一般に大きな間隙ほど間隙内を流れる水の流速が速くなるため，粗大な間隙が多いほど飽和透水係数が高くなる傾向がある（例えば，安中ら，1992）。従って，木炭を加えたことで粗大な間隙が増加したことが，コントロールよりも木炭 5%で有意に透水係数が増加し，木炭を入れた試料との比較では木炭を入れるほど透水係数が増加傾向にあった要因として挙げられる。このような違いが認められたものの，本試験では各処理間で飽和

透水係数にオーダーレベルの違いは認められず，バイオ炭投入による明確な改善効果は期待できないと考えられる。陳ら（2008）は島尻マージにバイオ炭を投入しても透水係数に明確な違いがみられなかったことを報告している。また Uzoma et al.（2011）が砂質土壌にバイオ炭を投入したときに透水係数が低下していることを示している。Laird et al.（2010）は，壌土でもバイオ炭投入による飽和透水係数の増加効果はみられなかったことを報告している。これらのことを考慮すると，本来の透水性が良好な土壌の場合，バイオ炭投入による透水係数の顕著な増加は期待できないと考えられる。

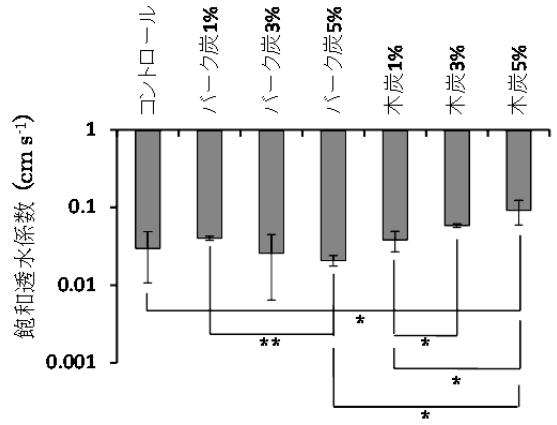


Fig. 3 飽和透水係数の平均値 (n = 3)。エラーバーは標準偏差を意味する。*は 5%水準で，**は 1%水準で処理区間の平均値に有意な差があったことを意味する。

Averaged saturated hydraulic conductivity (n = 3). Error bars mean standard deviations. * and ** mean respectively that there are significant differences with significance levels of 5 % and 1% between mean values.

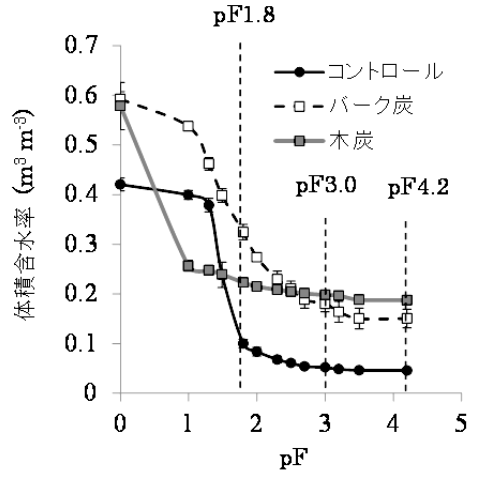


Fig. 4 土壌試料のみ（コントロール）・バーク炭のみ（バーク炭）・木炭のみ（木炭）の水分特性曲線。エラーバーは標準偏差（n=5）を意味する。

Soil water characteristic curves of soil (solid circle) and charcoals made by bark (open square) and wood (solid square). Error bars mean the standard deviations (n = 5).

コントロールとバーク炭・木炭を詰めた試料の水分特性曲線を **Fig. 4** に示す。コントロールは pF1.3 から pF1.8 にかけて急激に土壌水分量が低下するが，pF1.8<の範囲では土壌水分量の変化が少ない，典型的な砂質土壌の水分特性曲線を示した（中野，1991）。バーク炭は pF1.0 から水分量が下がりはじめ，pF3.0<の範囲では顕著な減少はみられなかった。木炭は毛管飽和時（pF0.0）から pF1.0 にかけて急激に水分が低下したが，その後は pF の増加に伴い水分量が緩やかに減少した。バーク炭・木炭共に飽和時と pF4.2 の水分量は土壌（コントロール）よりも大きかった。水分特性曲線から求められた $\theta_{3.0}$ は，コントロールが 0.048 $m^3 m^{-3}$ に対し，バーク炭と木炭はそれぞれ 0.14 $m^3 m^{-3}$ と 0.025 $m^3 m^{-3}$ であった。同様に $\theta_{4.2}$ は，コントロールが 0.054 $m^3 m^{-3}$ に対し，バーク炭と木炭の $\theta_{4.2}$ はそれぞれ 0.17 と 0.034 $m^3 m^{-3}$ であった。バーク炭の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ はコントロールの 3 倍程度だったのに対し，木炭はコントロールよりも小さな値である。

バイオ炭混入試料の成長有効水分量（$\theta_{3.0}$）の測定結果を **Fig. 5A** に示す。バイオ炭混入試料とコントロールを比較すると，木炭 5%混入試料を除き，コントロールとバーク炭・木炭混入試料との間にそれぞれ 1%・5%水準で有意な差が認められた。一方，バーク炭・木炭ごとに混入量の違う試料間で比較すると，バーク炭・木炭いずれも，炭混入量の違いによる有意差は認められなかった。混入量が同じバイオ炭混入試料間で比較すると，資材の違いについては，混入量 5%の試料間に 1%水準で有意な差が認められた。

バイオ炭混入試料の有効水分量（$\theta_{4.2}$）の測定結果を **Fig. 5B** に示す。バイオ炭混入試料とコントロールを比較すると，バーク炭を混入したすべての試料で有意な差が認められた。一方，木炭を混入した試料ではコントロールと 1%混入試料の間に 5%水準で有意な差が認められた。しかし，それ以外の試料では有意な差が認められなかった。バーク炭・木炭ごとに混入量の違う試料間で比較すると，バーク炭を 1%混入した試料と 5%混入した試料との間に 1%水準で，3%混入した試料と 5%混入した試料の間に 5%水準で有意な差が認められたバイオ炭の混入割合が等しい試料間の比較では，混入割合が 1%の試料が 5%水準で，混入割合 3%と 5%の試料が 1%水準で有意な差が認められた。

以上の結果から，全てのバーク炭の混入試料で $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ が増加したことから，バーク炭は保水性を増加させるための土壌改良資材として有望であると考えられた。この結果は，島尻マージにバガス炭を混ぜたときの結果（Kameyama et al., 2010）や，砂質土壌に木炭を混ぜたときの結果（Uzoma et al., 2011）と一致している。一方，木炭を混入した試料については，1%の混入でコントロールよりも有意に増加したものの，それ以上混入量を増やすと逆に有意な差がなくなった。そのため，木炭を粒度の調整をせずに混入すると，保水性の向上効果があまり現れない場合があることが確認された。本試験と同じ砂質土壌で木炭を用いたにもかかわらず，Uzoma et al.（2011）では木炭投入により保水性の増加が期待できるという結果を示している。Uzoma et al. の結果と本試験の結果が異なる理由として，前者が炭を細

かくすりつぶしているのに対し，本試験では木炭をそのまま使用したことが考えられる。この結果から，混入する木炭の粒径によって保水性の改善効果が異なる可能性が示唆されるが，本試験ではこれを検討するための十分なデータは得られておらず，これについては今後検討する必要がある。

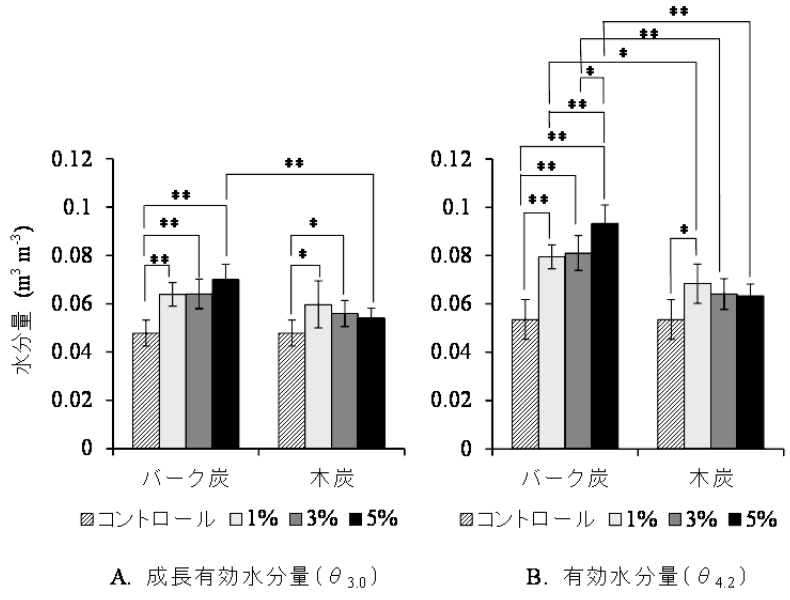


Fig. 5　成長有効水分量と有効水分量。エラーバーは標準偏差(n = 5)を意味する。*は 5%水準で，**は 1%水準で処理区間の平均値に有意な差があったことを意味する。

Depletion of moisture content for optimum growth and available soil moisture. Error bars mean standard deviations (n = 5). * and ** mean respectively that there are significant differences with significance levels of 5 % and 1% between mean values.

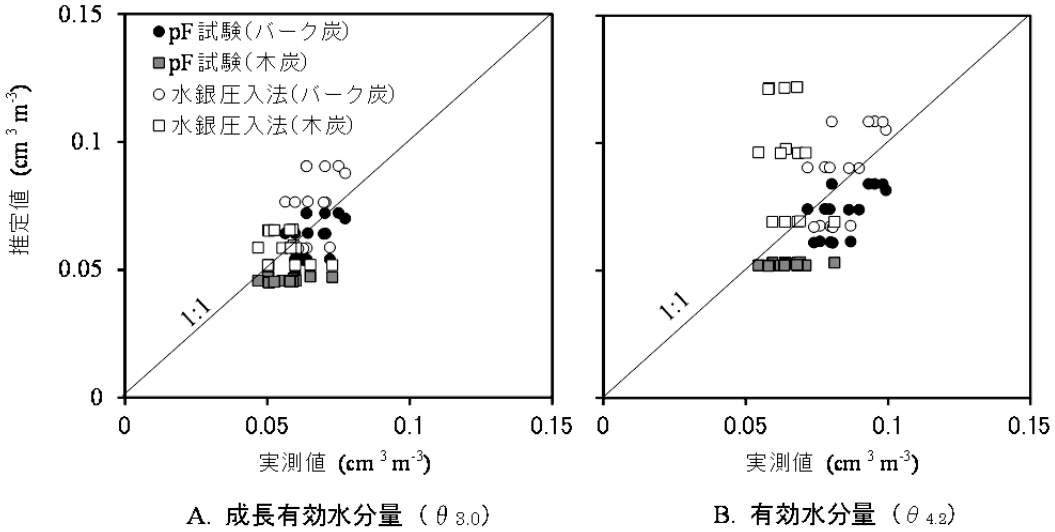


Fig. 6　成長有効水分量と有効水分量のモデルによる推定値と実測値の比較。pF 試験と水銀圧入法により求めたバーク炭と木炭の成長有効水分量と有効水分量の比較。図中の黒丸は pF 試験から得られたバーク炭の，灰色の四角は木炭の成長有効水分量と有効水分量を（**Fig. 5** 参照）、白丸と白四角はそれぞれ水銀圧入法により得られたバーク炭と木炭の成長有効水分量と有効水分量を意味する。

Scatter diagrams between measured and estimated values of moisture content for optimum growth (A) and available soil moisture (B). Values in vertical axis of black circles and gray squares were respectively estimated using dataset obtained from the water retention curves of biochars by pF experiment . Values in vertical axis of open and solid squares were calculated using dataset obtained from the pore space volume, which was measured by mercury press-in method. Values of biochars made from bark and wood were shown as circles and squares, respectively.

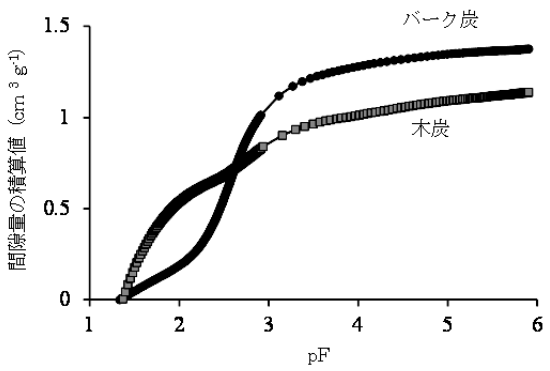


Fig. 7 水銀圧入法によるバーク炭と木炭の間隙構造の違い
Distribution of pore space volume of charcoals made by bark and wood, which were measured by mercury press-in method.

コントロールとバーク炭・木炭を詰めた試料の水分特性曲線から求めた $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を用いて式(7)により推定したバイオ炭混入試料の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を実測値と比較した結果を **Fig. 6** に示す。$\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ の推定値と実測値の間の平均自乗誤差（RMSE）はそれぞれ 0.010 と 0.014 であった。これらの値は，それぞれ実測した $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ の 17%と 19%であり，推定誤差は大きくはなかった。しかし，$\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ 共に過小評価の傾向がみられ，特に $\theta_{4.2}$ でこの傾向が顕著だった。

水銀圧入法による間隙分布の結果から間隙量と pF の関係を求めた結果を **Fig. 7** に示す。バーク炭では単位重量当たりの $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ はそれぞれ 0.93 $m^3 m^{-3} g^{-1}$，1.17 $m^3 m^{-3} g^{-1}$ であり，水分特性曲線から得られるものより 0.31～0.42 $m^3 m^{-3} g^{-1}$ 大きい値となった。また，木炭ではさらに分析法による $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ の違いが顕著であり，pF 試験により求めた $\theta_{3.0}$ = 0.079 $m^3 m^{-3} g^{-1}$ と $\theta_{4.2}$ = 0.11 $m^3 m^{-3} g^{-1}$ に対し，水銀圧入法により求めた値は $\theta_{3.0}$ = 0.39 $m^3 m^{-3} g^{-1}$，$\theta_{4.2}$ = 0.59 $m^3 m^{-3} g^{-1}$ であった。

上と同様に水銀圧入法から求めた $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を用いて式(7)により推定したバイオ炭混入試料の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ を実測値と比較した結果，$\theta_{3.0}$ は実測値と推定値の RMSE が 0.013 $m^3 m^{-3}$，$\theta_{4.2}$ は RMSE = 0.029 $m^3 m^{-3}$ となり，特に $\theta_{4.2}$ では pF 試験で得られたバイオ炭の値を使用した方が実態をよく反映すると考えられた。水銀圧入法で測定する際に試料を細かくしたことが，バイオ炭の保水性を過大評価した要因の一つと考えられる。

Fig. 5 から，木炭の混入量の増加に伴い，有意な差は認められないものの，$\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ が減少する傾向がみられた。一方，コントロールと木炭を 1%混入した試料の間には $\theta_{3.0}$・$\theta_{4.2}$ 共に有意な差が認められた。これらを同時に満たすよう評価するためには，土壌と木炭の保水性を別々に加算するだけでなく，土壌と木炭の境界にできる間隙による保水性も考慮する必要があることが示唆される。木炭の混入試料の $\theta_{3.0}$ と $\theta_{4.2}$ が式(7)で推定した値よりも大きかった理由の一つには，こうした効果を式(7)では表現できていないことに原因があると考えられる。しかし，これについては今回の実験では明らかにすることができず，今後の課題として残されている。

3.2 バイオ炭が硝酸イオンの流出に与える影響

保水性の向上に向けた試験で用いた 2 種類のバイオ炭のうち，現地での施用が期待されるバーク炭について，その混入が硝酸イオンの移動に与える影響を試験した（**Fig. 2**）. その結果を **Fig. 8** および **Fig. 9** に示す.

Fig. 8 を見ると，コントロールはバーク炭混入試料に比べて流出ピークと流出の低下が早いことがわかる。バーク炭混入試料の硝酸イオンの流出ピークはコントロールに比べておよそ 4 時間半遅く現れた。また，硝酸イオンの流出量が 1 mg 以下になる時間は，コントロールでおよそ 25 時間，バーク炭 3%でおよそ 35 時間，5%でおよそ 40 時間であった。バーク炭を混入することで硝酸イオンの流出が遅れることが確認されたが，顕著な差ではなかった。この理由として，今回用いたバーク炭は硝酸イオンの吸着があまり期待できないものであったことが考えられる。バイオ炭は炭化温度により性質が異なり，固相表面の吸着能力は，炭化温度が高いバイオ炭ほど大きい。木炭，竹炭，バガス炭では炭化温度 600～700℃以上の高温で生成された場合に硝酸イオンの吸着能力を有するものとなる（伴野ら，2009;

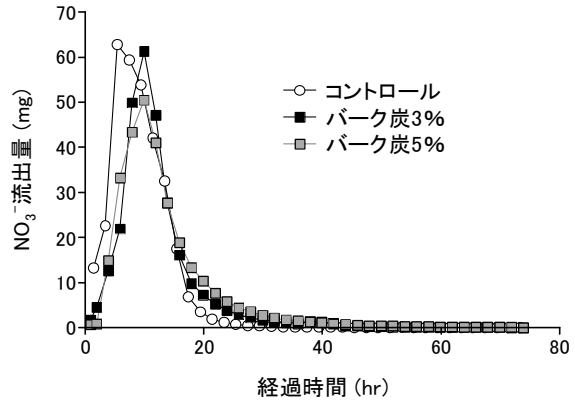


Fig. 8 バーク炭混入による硝酸イオンの流出量の違い
Nitrate leachate from soil columns with different biochar contents (0, 3, 5% [w/w])

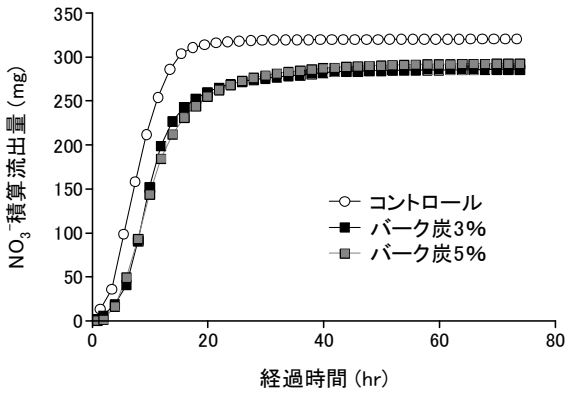


Fig. 9 バーク炭混入による硝酸イオンの積算流出量の違い
Cumulative nitrate leachate from soil columns with different biochar contents (0, 3, 5% [w/w])

Dempster et al., 2012; Kameyama et al., 2012)。今回用いたバーク炭は炭化温度を管理して製造されたものではなく，固相表面の吸着能力が発揮される 600～700℃以上で炭化されたものではなかったものと推察される。また，硝酸イオンの流出の低下がバーク炭で遅れた理由として，バーク炭の混入によって間隙率が増加したことが挙げられる。間隙率はコントロールでは 0.40 であったが，バーク炭 3%で 0.47，バーク炭 5%で 0.50 と増加した。しかし，4.4 mm hr^{-1} 前後の潅漑強度で連続的に給水を行ったため，間隙率の違いに比べて給水量が十分大きく，顕著な遅れは現れなかった。

一方，バーク炭の混入は硝酸イオンの積算流出量を減少させる傾向があった（**Fig. 9**）。今回のカラム試験では全ての試料に，硝酸カリウムを 478mg（土壌に対して 100 mg N kg^{-1} 相当）混入した。この場合，混入した硝酸イオンは 388mg となる。流出率はコントロールで 83%，バーク炭混入試料で 75%であった。今回のカラム実験では給水強度を一定とし，下端の負圧も小さかったため，浸透水量の経時変化やポテンシャル分布はコントロールとバーク炭混入試料で同様のものとなった。また，測定期間（73 時間）における積算浸透量も全ての試料で 900 ml 以上あった。そのため，硝酸イオンの積算流出量の違いは，浸透量の違いによるものではなく，実験初期に硝酸イオンがバーク炭の微細間隙中に不動水として保持されたことや不溶化・脱窒等により硝酸が減少したことに起因していると考えられた。Zheng et al. (2013)や Yao et al. (2012)も類似の結果を得ているが，メカニズムについては不明な点が多い。硝酸イオンの流出量の減少についての詳細なメカニズムの解明については今後の課題であるが，今回の試験でバーク炭混入による肥料成分の移動特性に関する概略は得られたものの考えている。

Ⅳ　結　言

国営農業用水再編対策事業「九頭竜川下流地区」の対象地区の一部である三里浜砂丘地では，事業実施後に潅漑水を有効利用した営農を実現するための営農実証試験が行われている。しかし，土壌が砂質土壌のため，保水性の確保や肥料持ちの改善が必要とされている。そこで，地元の九頭竜森林組合が木材のリサイクルで生産しているバイオ炭に注目し，これを地産地消の観点から活用できないかどうか検討した。特に，これまでの営農実証試験の中で問題となっている肥料抜けに対しては，土壌の保水性を向上させて水溶性の肥料成分の滞留時間を長くすること，および肥料成分を吸着する特性を向上させること等が重要となる。そのため，本研究では，九頭竜森林組合で製造されているバイオ炭（バーク炭）の混入による保水性の改善と肥料成分の移動への影響について実験室レベルで試験を行い，バイオ炭の混入による保水性・保肥性の改善の可能性について検討した。

バイオ炭の混入による保水性の改善については，バーク炭を混入した土壌の成長有効水分量と有効水分量は，すべての混入割合（1%，3%，5%）の試料について，コントロールよりも有意に値が大きくなった。一方，比較対象とした木炭を 1%混入した試料ではコントロールよりも有意にこれらの値が上昇したが，木炭を 3%と 5%混入した試料ではコントロールとの間に有意な差が認められなかった。バーク炭は土壌の約 3 倍の成長有効水分量と有効水分量を持つのに対し，木炭は土壌よりもこれらの値が小さかった。このことが，木炭を混入した試料で明確な保水性の増加効果が認められなかった要因と考えられた。バイオ炭と土壌の成長有効水分量と有効水分量を足し合わせたものが混合試料の各水分量になると仮定したモデルで計算した値は，実測値よりも若干小さかった。このことから，土壌とバイオ炭の保水特性から混合土壌の保水特性を精度良く推定するためには，土壌とバイオ炭との間に形成される問題も考慮する必要があることが示唆された。

硝酸イオンの移動については，使用したバーク炭は硝酸イオンを吸着する能力は期待できないが，バーク炭を入れると間隙構造の変化により土壌のみの場合よりも溶脱のタイミングが遅くなることが明らかになった。また，バーク炭を混入することにより，バーク炭の微細間隙中の不動水として硝酸イオンの保持や脱窒・不溶化等の促進により，下層への溶脱量は減少することを示唆する結果も得られた。ただし，その差は小さく，効果の発現には降雨条件等も十分考慮する必要がある。

以上のことから，九頭竜川流域で製造されているバーク炭の混入は保水性を向上させて水溶性の肥料成分の滞留時間を長くする効果が期待できる材料であることが明らかになった。しかし，肥料成分を吸着して肥料抜けを抑える効果は期待できないことも示唆された。ただし，今回の溶脱試験は土壌が比較的飽和に近い状況のもと，潅漑強度 4.4 mm hr^{-1} 前後で 300 mm 以上の潅漑を行った場合に相当する。そのため，現地条件でバイオ炭を用いた保水性の改善が肥料抜けの対策としてどのくらい有効であるかは，今後，現地での実証試験等も踏まえて確認していく予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり，北陸農政局九頭竜川下流農業水利事業所の倉田進氏と大塚直輝氏から試料提供の便宜を受けた。中谷美喜子氏に実験とデータ整理の一部を担当いただいた。ここに記して感謝いたします。本研究は，農研機構農村工学研究所研究活動強化費（課題化可能性検討費）の補助を受けて実施した。

参考文献

Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. (2013): Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil, *Geoderma*, **202–203**, 183–191

安中武幸, 井上久義, 成岡市 (1992): 圃場土壌の水移動を支配する粗間隙構造, 土壌の物理性, **66**, 3－9

Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., Horie, T. (2009): Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield, *Field Crops Research*, **111**, 81–84

伴野雅之, ・久場隆広・市川瞬平・酒井雄介・佐野弘典 : 河野直哉 (2009): 竹炭における硝酸イオン吸着能とその機構, 水環境学会誌, 32, 369-374

Chan, K. Y., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. (2007):

Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment, *Australian Journal of Soil Research*, **45**, 629–634

陳 嫣・平良正彦・川満芳信・凌 祥之 (2007): サトウキビの品質向上および硝酸態窒素汚染の抑制に対する試みー宮古島におけるバイオマス炭化物の有効利用ー，農業農村工学会論文集, 251, 25-30

陳 嫣・平良正彦・上野正実・凌 祥之 (2008): 島尻マージ土壌における消化液やバガス炭の施用効果についてー地下水質を考慮したサトウキビ，ソルガムの輪作栽培ー，農業農村工学会論文集, **254**, 31-37

Dempster, D.N., Jones, D.L., Murphy, D.V, (2012): Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil, *Soil Research*, **50,** 216–221

土壌物理性測定法委員会 (1972): 土壌物理性測定法, 養賢堂, 505p.

Hunt, J., DuPonte, M., Sato, D., Kawabata, A. (2010): *The basics of biochar: A natural soil amendment*, SCM-30, Cooperative Extension Service, University of Hawai'i at Manoa.

Jamison, V.C. (1958): Sand-siult suction column for determination of moisture retention., *Soil Science Society of America Proceedings*, **22**, 82–83

Kameyama, K., Miyamoto, T., Shinogi, Y. (2010): Increase in available water content of soils by applying bagasse-charcoals, *19th World Congress of Soil Science Proceedings*, 105–108

Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T., 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

亀山幸司・宮本輝仁・塩野隆弘 (2013): バイオチャーを混入した土壌の熱伝導率, 土壌の物理性, 123, 81–88

駒村正治 (1992): IV畑地の灌漑・排水, 穴瀬真, ・安富六郎, ・多田敦編著, 新版農地工学, 129-131, 文永堂出版, 344p.

Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. (2010): Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil, *Geoderma*, **158**, 436–442

Lehmann, J., Joseph, S. (2009): *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, London.

中野政詩 (1991)：土の物質移動学, 東京大学出版社, 193p.

成岡市(1989): 土壌の孔隙の計測法とその物理機能に関する研究, 東京農業大学総合研究所紀要, **1**, 1–56

Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M. (2009): Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity, *Soil Biology & Biochemistry*, **41**, 1301–1310

田淵俊雄・安楽 敏・中曽根英雄・柚山義人 (1998)：清らかな水のためのサイエンスー水質環境学ー，地域環境工学シリーズ 4, 農業土木学会, 207p.

谷口邦仁・中村俊治・山本忠史・宮本輝仁・弓削こずえ (印刷中): 風洞実験による三里浜砂丘地土壌の風食発生条件の検討, 畑地農業

Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., Nishihara, E. (2011): Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention, *Journal of Food, Agriculture & Environment*, **9**, 1137–1143

Yao, Y., Zhang, M., Inyang, M., Zimmerman, A.R. (2012): Effects of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate , ammonium, and phosphate in a sandy soil, *Chemosphere*, **89**, 1467-1471

Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Herbert, S., Xing, B. (2013): Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil, *Geoderma*, **206**, 32-39

受理年月日 平成 25 年 12 月 6 日

Effect of Biochar Application on Soil Physical Properties of Sandy Soil

IWATA Yukiyoshi*, MIYAMOTO Teruhito* and KAMEYAMA Kohji*

Agricultural Environment Engineering Research Division, Farmland Soil and Water Management*

Summary

Adding biochar to soil is one means to improve soil physical properties. To examine the effects of biochar on soil physical properties, biochar of two types was mixed in sandy soil. Soil was taken from farmland in Sanrihama in the Kuzuryu river basin, a main irrigation area in Japan. Biochar made from bark (Bark-char), manufactured in this basin, was used as one type of biochar. Charcoal was used for the other biochar samples. Biochars of 1, 3, and 5% of the soil weight were mixed with the soil and were packed into cylindrical containers of 100 cm^3 in volume. The soil without biochar was also repacked into the container as control. Saturated hydraulic conductivity (*ks*), moisture content for optimum growth ($\theta_{3.0}$) and available soil moisture of these samples ($\theta_{4.2}$) were determined. $\theta_{3.0}$ and $\theta_{4.2}$ of biochars were also determined using biochar samples repacked densely into the 100 cm^3 container. No significant change of *ks* was found from adding Bark-char. In contrast, *ks* of the sample with 5% added charcoal was slightly larger than that of the control, probably because of numerous macrospores in the charcoal. $\theta_{3.0}$ and $\theta_{4.2}$ increased significantly by adding Bark-char, irrespective of the added amount. In contrast to the Bark-char, no significant difference of $\theta_{3.0}$ was found between control and soil samples with 5% added charcoal. Moreover, $\theta_{4.2}$ increased only when 1% charcoal was added to the soil. These results coincided with significantly larger $\theta_{3.0}$ and $\theta_{4.2}$ of Bark-char compared with those of charcoal. To examine nitrate movement, three samples were packed into a 150-mm-height cylindrical column of 60 mm in diameter: no biochar, 3% Bark-char mix, and 5% Bark-char mix. Before packing into the column, KNO_3 of 100 mgN kg^{-1} was mixed with the samples. NO_3^- leaching from the soil column was delayed slightly by the addition of Bark-char. From this leaching experiments, we speculated that Bark-char was not considered to absorb substantial amount of nitrate. It is more likely that nitrate solution in soil water stayed longer in the soil column resulting from improved water holding capacity by adding Bark-char.

Keywords: sandy soil, biochar, soil amelioration, available soil moisture, nitrate