

令和 3 年 10 月 20 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05877

研究課題名(和文) 風食発生の指標となるごく薄い地表面の土壌水分モデルの開発

研究課題名(英文) Development of soil moisture model of extremely thin ground surface which is an indicator and influence for occurrence of wind erosion

研究代表者

鈴木 純 (SUZUKI, JUN)

信州大学・学術研究院農学系・准教授

研究者番号：40262696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：「風食発生の指標となるごく薄い地表面の土壌水分モデルの開発」によって、地表面に存在する砂塵のもととなる0.1～3.5mmの粒径の土の粒(以下では、土粒という)の土壌水分の変化を決定した。本研究課題によって土粒密度の決定法が確立され、それによって東日本各地の試料の乾燥状態(空気乾燥状態)の土粒の密度は1.10～1.35g/cm³程度であり、降雨直後には1.63～1.74g/cm³程度に増加することを明らかにされた。自然界では、雨量、大気湿度、日照などの気象条件により、この間、すなわち1.1～1.4g/cm³から1.6～1.8g/cm³の範囲で乾湿の変化に伴う土粒密度の変動が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東日本各地で冬から春にかけて発生する砂塵は、風の力によって地表から離脱した土の粒である。この現象は風食と呼ばれている。世界的にみると風食による土砂移動量は水食によるそれを上回るといわれている。砂塵は乾いた微細な粒であるが、その内部に空隙を有する包含密度envelope densityは、特殊な液体や水銀などを用いた方法によってしか特定されなかったため、発生メカニズムの検討や発生予測の精度に限界があった。本研究課題によって、微細な土粒の大きさごとの密度を乾燥、空気乾燥ならびに飽和の各状態に対して特定することが可能になった。これによって広く発生している砂塵の発生に対する技術開発が可能になる。

研究成果の概要(英文)：By "Development of soil moisture model of extremely thin ground surface which is an indicator and influence for occurrence of wind erosion", the change of soil moisture of soil grains (hereinafter called soil grains: SG) of size in 0.1 to 3.5 mm which is the source of dust present on the ground surface was determined. This study established a method for determining SG density, and it was clarified that the density of SGs in the dry condition (air dry) of samples in various parts of eastern Japan was about 1.10 to 1.35 g/cm³ and increased to about 1.63 to 1.74 g/cm³ immediately after rainfall. In nature, weather conditions such as rainfall, humidity and radiations revealed variations in SG density at any time. These changes in SG density create SG weight lighter depend on SG density vary 1.10 to 1.35 g/cm³ in dry and 1.63 to 1.74 g/cm³ in wet condition.

研究分野：農業農村工学

キーワード：砂塵 土粒 密度

1. 研究開始当初の背景

長野県松本盆地南西部に展開する畑地帯は、冬から春にかけて強風が吹くときに風食が発生してこれに伴う砂塵が一带を覆うように飛遊する。この砂塵は、農業の生産基盤である表土の亡失を意味することとともに、農住近接の個所では砂塵尾住居への侵入や人体への吸引など生活環境の悪化を意味し、さらには交通の安全を脅かす。この風食は季節的偏りがあり、初夏から年内いっぱいほとんど発生しない。この風食の発生しやすさは、土壌が受ける凍結融解で説明されるが、農地の地表面は干天時にも見かけ上乾湿を繰り返す、凍結融解に寄与する水はどこから来るのか、が明らかになっていない。地表面には様々な形状や大きさの土粒が存在している。これらの土粒は凍結融解の繰り返しでさらに飛遊しやすい微細な土粒となったり地表から分離したり、風の力により引きはがされ移動する。一方で土粒を移動させる風の力に対して、土粒に係る土壌水の量と界面に働く力は砂塵の発生を抑制する鍵であると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、風食に伴って農地から発生する砂塵を抑制するための技術開発につながる基礎的事項である「地表面の湿潤度」を表す薄層土壌水分モデルの開発を目的とする。申請者らの既往の研究により、土壌の粗細の程度ならびに強風の吹き方によって、風食の発生と砂塵のタイプは異なることがわかっている。土壌が比較的粗い群馬県太田市では冬季の強い季節風によって土粒は転動や跳躍によって移動する。これにより作物の幼苗などは埋もれ、道路部に土砂が流入したりする。また土壌が微細な土粒で構成される千葉県八街市では、秋から春にかけて強風が吹くときに、転動や跳躍とともに浮遊により土粒は移動する。これにより周囲一帯が砂塵に覆われ、農作物への影響のみならず家屋などの生活圏への砂塵の侵入や、ヒトの体内への取り込みなどの影響が考えられる。土壌の構成が細かい畑地上を強い風が吹く条件がそろって、風食が発生する指標となる土壌の乾燥状態であれば、砂塵の飛遊が始まる。すなわち、深さ 10cm 程度の表面土層の平均的な水分量（体積）ではなく、ごく薄い表面土層の水分量（体積）が風食発生指標にされるべきであり、そのための土壌水分センサは見当たらないことから、本申請で目指す表層土壌水分モデルが開発される意義がある。

3. 研究の方法

本研究の経過によって「土粒密度」が定量化できた。従来は水銀やケロシンを用いた特殊な方法によってのみ土粒密度が定量化されたが、本研究の成果によって粒径ごとの土粒密度を得ることが可能になった。この成果は土粒の空隙率とこの空隙の水による充填度から土粒の質量を特定できるようにした。このことで、本研究の key word である「ごく薄い地表」は、「土粒一粒ごとの」の意味に発展的に置き換えて検討する。

4. 研究成果

4.1 砂塵発生指標となる摩擦速度と土の粒の密度

(鈴木 純・細田風音・岩田拓紀・木村玲二・松岡延浩)

4.1.1. はじめに

風食による砂塵の発生は農業生産の基盤である表土の亡失を意味し、また生活環境等への影響が懸念される。関東甲信地方の各地の風食と農業の特徴が報じられており(鈴木ら, 2016), ここで砂塵になる土の団粒径や粒度は地域によって違いがあることも明らかにされている。砂塵は強風により地表から離脱した土の粒である。土の粒が地表から離脱して、転動、跳躍や浮遊(飛遊)の形態をとるかは、土の粒に働く力の釣り合いに起因する。この釣り合いには、土の粒の質量の影響が大きいと考えられる。また地表面で土の粒が動き始める駆動力は風によるせん断力であることは明らかである。本報告では、風の基本理論と砂塵となる土の粒(以下、土粒)の密度を用いて、土の粒が動き始める限界摩擦速度と土の密度について検討した。

4.1.2. 研究の方法

4.1.2.1. 風速の鉛直分布

信州大学農学部(長野県上伊那郡南箕輪村)構内農場の牧草

$$\begin{aligned} u_{(z)} &= \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_M} & (1) \\ u_* &= \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_M} & (2) \\ 1 &= \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_M} & (3) \\ \ln \frac{z}{z_M} &= \kappa = 0.4 & (4) \\ e^\kappa &= e^{0.4} = \frac{z}{z_M} & (5) \\ z &= e^\kappa z_M = 1.5z_M & (6) \\ u_{(1.5z_M)} &= u_* & (7) \\ u_{*crit} &= A \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_a)gD_p}{\rho_a}} & (8) \end{aligned}$$

図 I-1. 使用した風のモデル
Wind aerodynamic models

地において風速と風向の観測を行った。風速は地上高 0.8, 1.3, 1.8m に設置した 3 杯風速計(牧野応用測器, AF750)を, 風向は 2.1m に設置した風向計(VF016)の出力をデータロガ(CR-10X)で 2 秒毎にスキャンして, 10 分間の平均値, 最大値をセーブした。風の鉛直分布に影響する要素である, 植生の草高を適宜測定した。これらデータから Barneoud and Ek(2019)の方法で摩擦速度 u^* , 粗度 z_M , 地面修正量 d などの空気力学的諸量を求めた。

4.1.2.2. 風の対数則と摩擦速度

図 I-1 に本研究で検討した風速のモデルを表した。植生のない滑らかな平坦地の平均風速の鉛直分布 $u(z)$ は式(1)であらわされる。ここに u^* は摩擦速度, z_M は粗度である。式(1)の $u(z)$ が u^* に等しいとして式(2)のようにおくと式(3)に書き換えられる。□はカルマン定数なので式(4)の右辺は 0.4 とおくことができ, 式(5)のように書きかえて z について整理すると式(6)が得られる。そして式(7)のとおり u^* と等しい $u(z)$ の高さ z は粗度 z_M の 1.5 倍であることが導かれる。この関係から土粒が動き始めるときの風速を評価する。

4.1.2.2. 土の粒の密度

砂塵が発生する農業地帯である長野県松本市今井地籍の畑地から, 2016 年 8 月 10 日に深さ 10 cm で採取した土壌の粒径ごとの土の粒(団粒, 以下土粒と記す)の密度を, Suzuki and Matsuoka(2020)の方法で求めた。

4.1.3. 結果と考察

4.1.3.1. 土粒の密度

図 I-2 (Suzuki and Matsuoka, 2020)は, 内部に空隙を有する土粒の水分状態と粒径による密度の変化を表している。供試体の風乾の含水比は約 6% なので風乾の土粒密度 $\gamma_{a(\text{AD})}$ は, 粒径ごとに 1.05 から 1.21 gcm^{-3} となった。これが自然状態で最低の含水比と考えると, 砂塵の密度はこの程度であることが推測される。また供試体の土粒子密度 γ_s は 2.49 gcm^{-3} なので, 風乾土粒密度と土粒子密度の比 γ_a/γ_s は 50% 以下であることがわかる。

4.1.3.2. 限界摩擦速度 u^*_{crit}

風速の鉛直分布のデータから地表面上で風速がゼロになる高さ Y (切片)を求め, Y からゼロ面修正量 d (m)を差し引いて粗度 $z_M=0.001\text{m}$ が得られた。したがって裸地では, 式(7), (8)のとおり高さ $1.5z_M=0.0015\text{m}(1.5\text{mm})$ の平均風速 $u(0.0015)$ が u^* になる。ここでは簡単のために土粒径に関わらず $u^*=u(0.0015)$ が地表面の土粒に働くと考え。そして土粒に働く風に抵抗する効果を式(8)の限界摩擦速度 u^*_{crit} (Bagnold, 1941)で表現した。ここで式(8)の u^*_{crit} の算出に必要な粒の密度 D_p は, 風乾と飽和の畑土壌の土粒密度として 1.1, 1.6 gcm^{-3} , 砂または土粒子密度として 2.5 gcm^{-3} を採用して検討する。

図 I-3 は, 土粒の粒径と限界摩擦速度の関係を表している。土の粒が地表面で動き始める時の摩擦速度は土粒密度が 1.1 gcm^{-3} に対しては粒径による変化は小さいが, 2.5 gcm^{-3} に対しては大きい。図 I-4 は土粒の密度, 粒径と限界摩擦速度の関係を表したもので, 図中に摩擦速度 u^* が 0.4 までを拡大した。破線は高さ 1.8m の平均風速 $u(1.8)$ に対する裸地の u^* で, この線の下に位置する u^*_{crit} で土粒は動き始め

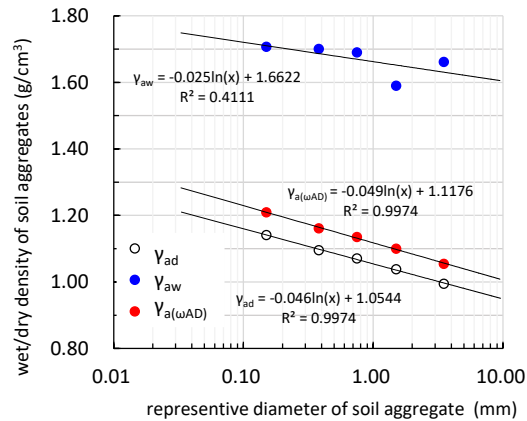


図 I-2. 飽和, 風乾および絶乾土粒密度
Soil aggregate density with soil water

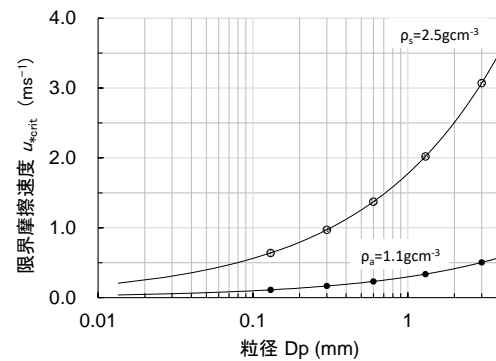


図 I-3. 土粒の粒径と限界摩擦速度の関係
Relationship between aggregate density and critical friction velocity

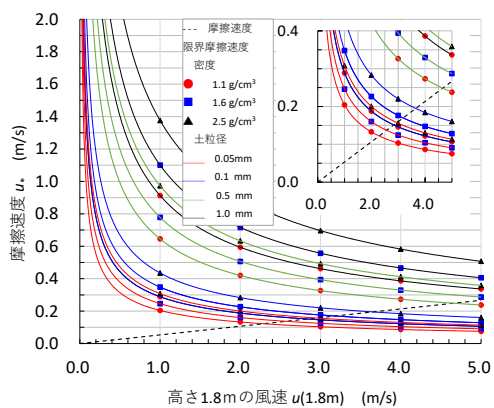


図 I-4. 風速と土粒密度, 粒径と限界摩擦速度
Wind velocity and Soil aggregate density, diameter and critical friction velocity

ると考える. 図 I-4 によると, $u(1.8)$ が 2ms^{-1} では粒径が $0.05\sim 1.0\text{mm}$ の土粒のいずれも動かないが, 2.5ms^{-1} を超えると 0.05mm の土粒は密度が $1.1\sim 2.5\text{gcm}^{-3}$ のいずれも動き始め, 0.1mm の土粒は風乾時で密度が 1.1gcm^{-3} の場合だけが動く. 4.0ms^{-1} では粒径が 0.1mm は密度が $1.6\sim 2.5\text{gcm}^{-3}$ もすべて動き始める. 5ms^{-1} では密度 1.1gcm^{-3} の 0.5mm の土粒も動き始めるが $1.6\sim 2.5\text{gcm}^{-3}$ の土粒は動かない.

以上の結果から, 次の2点が明らかになった. ①団粒構造の土粒密度は砂と比して小さく, 乾湿に伴う変化が大きい. ②乾燥した土粒の限界摩擦速度 u_{crit} は小さく, 砂より弱い風で動き始めることが評価できた. u_{crit} は土粒が動き始める摩擦速度であり砂塵の発生を直ちに説明しないが, 土粒密度の導入で受食性の定量的な評価が可能になった.

4.2 東日本の畑地から発生する砂塵の素因

(鈴木 純・酒井 優・小野 裕・松岡延浩)

4.2.1. はじめに

風食による砂塵の発生は農業生産の基盤である表土の亡失を意味し, また生活環境等への影響が懸念される. 関東甲信地方の各地の風食と農業の特徴が報じられており(鈴木ら, 2016), ここで砂塵になる土の粒径や粒度は地域によって違いがあることが明らかになっている. 東日本各地の畑地から砂塵が発生することは知られており, 一方で西日本ではあまり話題になることが多くはない. 砂塵は強風により地表から離脱した土の粒である. 土の粒が地表から離脱して, 転動, 跳躍や浮遊の形態をとるかは, 土の粒に働く力の釣り合いに起因する. この釣り合いには, 土の粒の質量の影響が大きい. Suzuki&Matsuoka (2020) (図 II-1) は団粒を含む土の粒 (以下, 土粒) の密度を求める方法 (土粒密度測定法) を提案している. 本報告ではこの土粒密度測定法 (Suzuki (submitted)) によって求めた各地の土粒密度の差異について述べる.

4.2.2. 材料と方法

4.2.2.1. 試料 本研究に供試した試料は, 長野県松本市今井 (以下, 今井) はじめ, 群馬県太田市藪塚 (藪塚), 千葉県八街市八街 (八街), 北海道帯広市清川 (清川) の各地籍の畑地で採取した土壌である. また西日本の試料として和歌山県田辺市 (田辺) のミカン畑と鳥取砂丘砂 (鳥取砂丘) を供試した. 空隙率が小さい砂は, 土粒密度と土粒子密度が近くなるを考え, 既報データの多い豊浦砂を土粒密度測定法の評価のために供試した. 試料は採取後に室内において十分に風乾して測定に供した. 東日本の各地の土壌は火山灰土で土性は砂混じりシルト, 田辺の土壌は鈹質土壌でシルト混じり砂質土である.

4.2.2.2. 土粒密度測定法

(1) 土の粒の分級 試験は 20°C の恒温室内で実施した. 試料は 5mm ふるいでふるい, 残った土塊は軽くゴム塊でほぐした後に再度ふるった 5mm ふるい通過分である. 試料は, 蒸留水を約 18 時間毛管飽和させたのちに $2.0, 1.0, 0.5, 0.25$ 及び 0.105mm の 4 つの組ふるい (DIK-2001) で水中篩別した. 組ふるいを通過して水槽に通過した 0.105mm より小さな土粒を含む懸濁液は, 0.074 および 0.032mm を順次通過させた. この分級された土壌試料は粒径ごとにまとめて蒸留水中で養生し保全した. したがって本研究の土粒は耐水性団粒の密度を求めることになる.

(2) 土粒 (土の粒) 密度 (1)の操作で分級した土壌試料は, 構造を破壊しないよう水ごと注意深く直方体のアクリルケースに充填した. この時若干の余盛りとして, 約 18 時間静置した. この時間で試料の自重で圧密を期待した. この後ガラス板で試料の余盛りと表面張力で盛り上がった水を擦切り,

フタで封入した. そしてフタつきのアクリルケースと土壌試料, 水の合計質量を測定した. なお, 試料をアクリルケースに充填した後に -133Pa で脱気した場合の密度と脱気しない場合の密度との

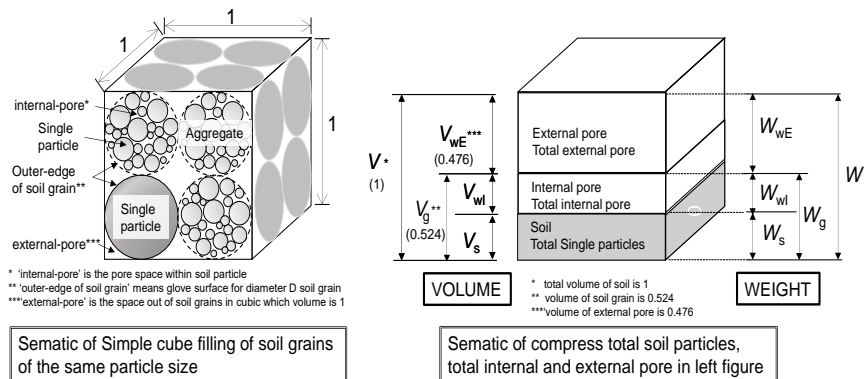


図 II-1. 土粒の充填と各要素の模式図 (Suzuki & Matsuoka, 2020, Suzuki(submitted)) schematics of soil packing model(L) and portion of soil(R)

平均値には、有意差が認められなかったため脱気はしないことにした。土粒密度は Suzuki & Matsuoka (2020) に従って求めた。

(3) 土壌有機物量の測定 一般的な土粒子密度は 2.6g/cm^3 程度であるのに対して有機物は 1.3g/cm^3 程度であり、有機物量の多少は土粒密度に影響することが考えられる。ここでは試料の土壌炭素量を C/N コーダー (JM100CN/HCN/TOC/TN) で測定した。

4.2.3. 結果と考察

4.2.3.1. 各地の土粒密度 各地の粒径ごとの土粒密度を示した図 II-2 によれば、東日本各地の粒径画分ごとの土粒密度は藪塚の 0.375mm ($=1.77\text{g/cm}^3$) と清川の 0.375mm ($=1.60\text{g/cm}^3$) を除き、 1.6g/cm^3 より小さい値が得られた。これに対して和歌山県田辺の土粒密度は $1.68 \sim 2.46\text{g/cm}^3$ が得られた。また鳥取砂丘は $3.63 \sim 3.71\text{g/cm}^3$ 、豊浦砂は $2.78 \sim 2.84\text{g/cm}^3$ となった。図中に示した通り、土粒子密度は全試料で 2.6g/cm^3 程度であり、土粒密度はこれを超えないと考えることができる。鳥取砂丘の値は本報告の土粒密度測定法の土粒の形状は球であるという仮定に起因した過大評価であると考えられる。本法で、土粒子密度 2.6g/cm^3 の丸みをおびた豊浦砂の土粒密度は 2.8g/cm^3 程度を得る。本法の適用には土粒の形状は確認すべき要素であるほか、土粒内空隙率が小さい砂質土の土粒密度には土粒子密度が適用されるべきである。鈴木ら (2020) は、高さ 1.5m の風速が 5m/s の時、密度が 1.6g/cm^3 以下の球形の物体は地表面を移動

しやすいと報告している。西日本の供試体は田辺の 1 体のみであるが、土粒密度の比較によって東日本の火山灰土壌の畑土は西日本に比べて風食を受けやすいといえる。

4.2.3.2. 土粒の炭素量と密度 次いで土粒の炭素量と土粒密度の関係について述べる。火山

灰土で団粒が発達した今井、藪塚、八街と、鉦質土壌の和歌山県田辺市の土壌炭素体積率と土粒密度の関係を図-3 に示した。図 II-3 に示されるとおり、火山灰土では土粒体積に占める土壌炭素の割合と土粒密度には明確な負の相関が認められた一方、田辺は前出の 3 地区とは外れていた。火山灰土でも、有機物が多い土粒は密度が小さく、より砂塵として地表面を離脱しやすいことが明らかである。

東日本を広く覆う、空隙率が大きく、有機物量が多い火山灰土は密度が西日本の鉦質土壌より明らかに軽く、これが砂塵の素因であると結論づけられる。

4.3 微細な土の粒の土壌水分モデル

(鈴木 純)

本研究課題「風食発生の指標となるごく薄い地表面の土壌水分モデルの開発」は、風食によって砂塵として地表を離脱する指標としての土粒、すなわち「ごく薄い」地表面の水分状態の予測に達することができた。これによって微細な土粒、例えば粒径が 0.1mm の土粒に関して、空気乾燥状態の場合は飽和した湿潤な場合よりも小さな風速の風で動き始めることを明らかにした。すなわち、自然界で発生しうる土粒の水分状態の下限値を空気乾燥状態 (風乾) とすれば、土粒の重量は、土粒密度が飽和の $1.6\text{--}1.7\text{g/cm}^3$ から風乾の $1.1\text{--}1.2\text{g/cm}^3$ の間で変動することが明らかになった。鉦質土壌でこの変動は起きにくく、地域性が確認された。粒径ごとの土粒の乾湿に伴う質量の変化が定量化されるに至ったことは風食研究の進展に寄与する成果である。

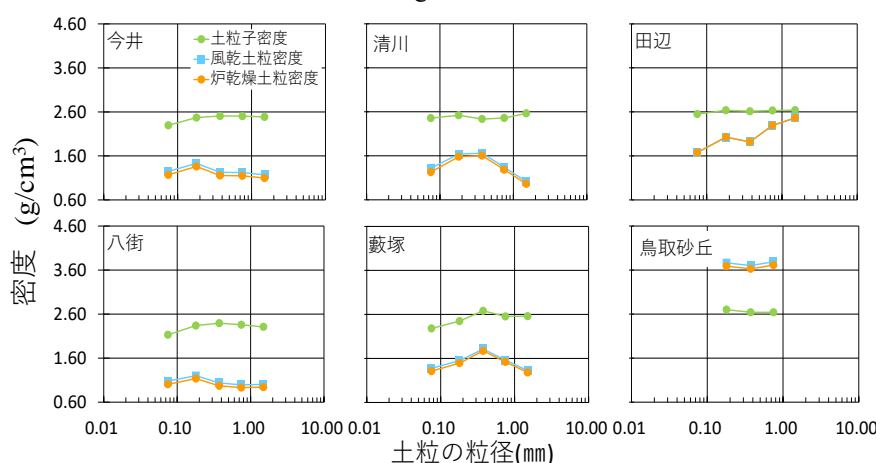


図 II-2. 各地の土粒子と土粒の粒径別密度 relation between soil grain size and its density

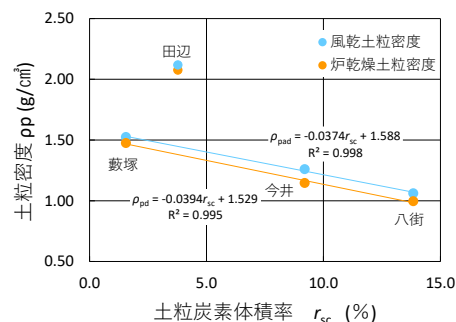


図 II-3. 土粒炭素体積率と土粒密度 relation between volumetric carbon rate and soil grain density

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Reiji KIMURA and Masao MORIYAMA	4. 巻 75 (3)
2. 論文標題 Determination by MODIS satellite-based methods of recent global trends in land surface aridity and degradation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 153-159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-19-00003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Jun SUZUKI and Nobuhiro MATSUOKA
2. 発表標題 Determination of soil aggregate density
3. 学会等名 Proceedings of Agricultural Meteorology 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 純・細田風音
2. 発表標題 砂塵発生の指標となる摩擦速度と土の粒の密度
3. 学会等名 農業農村工学会2020年度大会講演会要旨
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 純・横山空生
2. 発表標題 畑地から発生する砂塵のもとになる微細な土の粒の密度
3. 学会等名 2019年度農業農村工学会大会講演会要旨集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 純・酒井 優・小野 裕
2. 発表標題 東日本の畑地から発生する砂塵の素因
3. 学会等名 農業農村工学会2021年度大会講演会要旨
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 農地保全を目的とした風食の発生メカニズムの解明
2. 発表標題 鈴木 純
3. 学会等名 農業農村工学会2020年度大会講演会企画セッション農地保全部会要旨（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岩田 拓記 (IWATA HIROKI) (10466659)	信州大学・学術研究院理学系・准教授 (13601)	
研究分担者	木村 玲二 (KIMURA REIJI) (80315457)	鳥取大学・乾燥地研究センター・准教授 (15101)	
研究分担者	松岡 延浩 (MATSUOKA NOBUHIRO) (80212215)	千葉大学・大学院園芸学研究科・教授 (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------