

砂塵発生の指標となる摩擦速度と土の粒の密度 Friction velocity and density of aggregates as indexes of sand-dust

○鈴木 純*・細田風音*

Jun SUZUKI and Kazane HOSODA

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(Suzuki and al., 2020)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ので報告する。

2. 研究の方法

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。

2.2. 風の対数則と摩擦速度

図 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)のおくと式(3)に書き換えられる。 κ 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。

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。

3. 結果と考察

3.1. 土粒の密度

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_M} \quad (1)$$

$$u_* = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_M} \quad (2)$$

$$1 = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_M} \quad (3)$$

$$\ln \frac{z}{z_M} = \kappa = 0.4 \quad (4)$$

$$e^\kappa = e^{0.4} = \frac{z}{z_M} \quad (5)$$

$$z = e^\kappa z_M = 1.5 z_M \quad (6)$$

$$u_{(1.5z_M)} = u_* \quad (7)$$

$$u_{*crit} = A \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_a) g D_p}{\rho_a}} \quad (8)$$

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

図 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 $\gamma_{a(\omega AD)}$ は、粒径ごとに 1.05 から 1.21gcm⁻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 2.49gcm⁻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。

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 $z_M=0.001m$ が得られた。したがって裸地では、式(7), (8)のとおり高さ $1.5z_M=0.0015m(1.5mm)$ 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, 1.6gcm⁻³, 砂または土粒子密度として 2.5gcm⁻³ を採用して検討する。

図 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ときの摩擦速度は土粒密度が 1.1gcm⁻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 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} で土粒は動き始めると考える。図 4 によると、 $u(1.8)$ が 2ms⁻¹ では粒径が 0.05~1.0mm 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 1.1~2.5gcm⁻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 1.6~2.5gcm⁻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 1.6~2.5gcm⁻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い。また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。本研究の一部は科研

費 18K05877「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」によって遂行された。

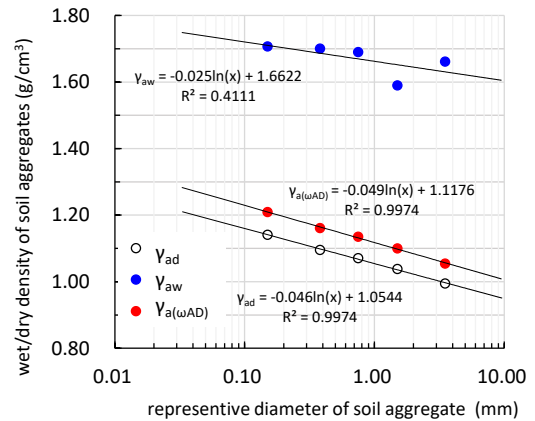


図 2. 飽和、風乾および絶乾土粒密度
Soil aggregate density with soil water

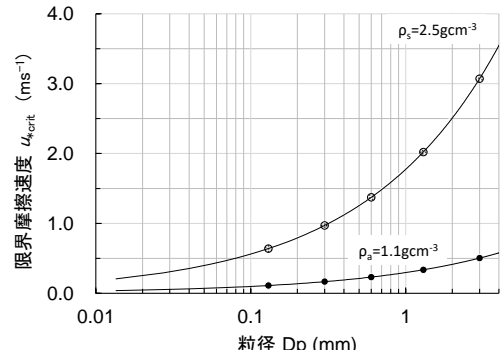


図 3. 土粒の粒径と限界摩擦速度の関係
Relationship between aggregate density and critical friction velocity

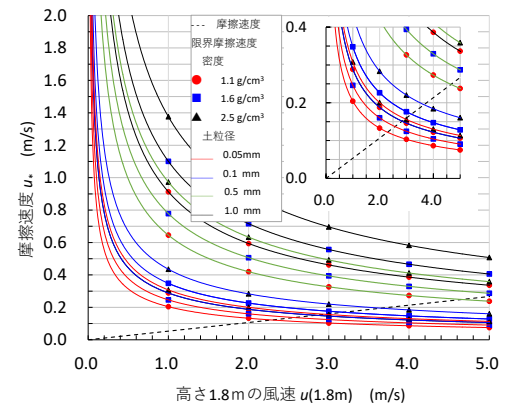


図 4. 風速と土粒密度、粒径と限界摩擦速度
Wind velocity and Soil aggregate density, diameter and critical friction velocity