

畑地土壌面における水分状態の時間変化と風食量の関係

Relationship between temporal change of soil surface moisture condition and soil erosion by wind in agricultural fields

○弓削こずえ, 阿南光政
Kozue Yuge, Mitsumasa Anan

1. はじめに

畑地の風食防止手法の1つに土壌面に灌漑を行い、土壌の飛散を抑えるものがある。Yuge and Anan (2019) は、畑地を模した風洞実験を行って風食が顕著になる風速および土壌水分状態を明らかとし、風食防止に必要な灌漑の量やタイミングを求めている。しかし、風食防止目的で灌漑を行った後に風が続くと土壌面から水分が蒸発し、土壌水分状態が刻々と低下する。土壌水分の減少に伴って風食量も次第に増加し、ある一定の土壌水分状態に達すると再び風食が顕著になると考えられる。本研究では、一定風速が継続した条件下における畑地土壌面の水分状態の時間変化と風食量との関係を明らかにすることを目的とする。

2. シミュレーションモデルの構築

畑地における風況を予測するため、式(1)~(3)を用いて土壌面上の気流解析を行った。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_a \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_a \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_a \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_a \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

ここで、 u, v : 風速の水平および鉛直成分(m s^{-1})、 ρ : 空気の密度(g m^{-3})、 p : 空気の圧力($\text{g m}^{-1} \text{s}^{-2}$)、 K_a : 乱流拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)である。

本研究ではMAC法を採用し、スタッガード格子系を用いて基礎方程式を解いた。境界条件は、土壌面の速度成分を0として土壌面上内の仮想点における圧力を設定した。式(1)~(3)で求めた風速を用いて、次式の移流拡散方程式によって気層中の水蒸気圧および気温を予測した。

$$u \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial e}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) \quad (5)$$

ここで、 e : 水蒸気圧 (hPa)、 T_a : 気温 ($^{\circ}\text{C}$) である。

式(1)~(5)によって推定した土壌面上の風速、水蒸気圧および温度分布を用いて土壌面における熱収支を明らかにし、土壌面の水分状態と温度を求めた。これらを境界条件とし、次式を用いて土壌中における水分および熱同時輸送解析を行って、土壌面の水分状態の時間変化を推定した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (6)$$

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + L \rho_w \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{wv} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{wv} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right\} \quad (7)$$

ここで、 C_v : 体積熱容量($\text{J m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 D_0 : 水分勾配による拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 D_{0v} : 水蒸気勾配による拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 D_T : 温度勾配による拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 K : 不飽和透水係数(m s^{-1})、 L : 水の蒸発線熱(J kg^{-1})、 T : 地温($^{\circ}\text{C}$)、 λ : 熱伝導率($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 ρ_l : 水の密度(kg m^{-3})、 θ : 体積含水率($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)である。

3. 風洞を用いた風食の再現試験方法

Fig. 1 に示した風洞を用いて裸地状態の畑地を想定した風食の再現試験を行った。試験には、鹿児島県南薩地区の黒ボク土の畑地で採取した土壌を用いた。土壌水分状態が一般的な裸地状態の畑地を再現するために矩形のアクリルケース内に現地の乾燥密度(0.89g cm^{-3})と同程度になるように供試土壌を敷き詰めた。供試土壌の初期の体積含水率は約 $0.35 \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ に調整した。これは、pF2.0の水分状態に相当する。風速は、風洞内の高さ30cmにおいて 6.0m s^{-1} および 8.0m s^{-1} となるように設定してそれぞれ30時間通風した。また、シミュレー

シミュレーションモデルの初期条件を得るために、Fig. 1に示した地点において、深さ 0cm および 2cm の土壌水分状態と地温を測定した。地温については熱電対で測定し、深さ 2cm の土壌水分は土壌水分センサーを埋設して連続データを得た。土壌面の水分状態については土壌を採取して秤量法によって測定した。また、境界条件に入力するために風洞内で温湿度を測定し、飛散した粒子数を把握するために風洞末端に粒子センサーを設置した。

4. 結果と考察

Fig. 2 は、粒子センサーで測定した通風開始後の粒子数の積算値を示している。この図に示した通り、風速 6.0m s^{-1} の条件では粒子センサーで検知された粒子数は比較的少なく、時間が経過しても風食量の変動は小さいことが明らかである。一方、風速 8.0m s^{-1} の条件では風食量が多く、通風後 24 時間経過すると風食量が増加する傾向を示している。これは、通風後、蒸発によって土壌中の水分が徐々に失われ、24 時間経過した時点で風食が発生しやすい水分状態に達したためと考えられる。この時点における土壌面の土壌水分状態を求めるため、式(1)~(7)によって体積含水率の経時変化を推定した。その結果を Fig. 3 に示す。この図に示した通り、土壌面の水分状態は徐々に低下し、通風後 24 時間経過すると、土壌面の体積含水率は約 $0.18\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ (pF4.2) に到達している。

5. おわりに

本研究では、畑地における土壌面の水分状態の時間変化と風食量の関係を評価することを目的とし、まず、畑地気層中の風速、水蒸気および温度分布を明らかにした。これらを用いて土壌面上の熱収支を求め、この結果を境界条件として土壌面の水分状態の時間変化を予測するシミュレーションモデルを構築した。風洞を用いて風食の再現試験を行い、一定風速の条件下で風食量を測定した。この結果より、風速 8.0m s^{-1} (高度 10m に換算すると 20m s^{-1}) の条件下では、通風前は比較的土壌水分が高い状態であっても 24 時間経過すると風食が顕著になることが明らかとなった。また、シミュレーションモデルを用いることで、風食が顕著になる土壌水分の閾値を求めることができた。本研究で構築したモデルを用いることによって、様々な風速および初期土壌水分状態の下で風食が顕著となる土壌水分状態の閾値

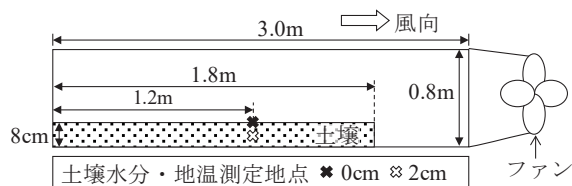


Fig. 1 風洞の模式図
Schematic view of wind tunnel

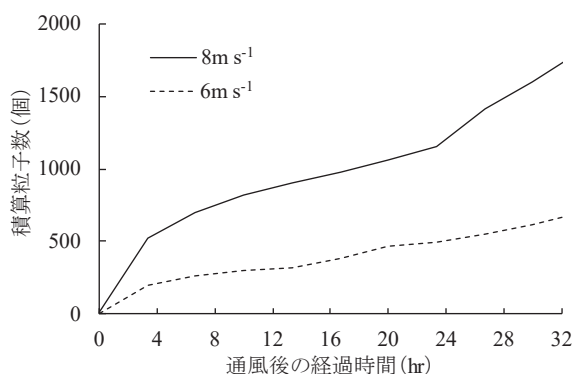


Fig. 2 風食量の経時変化
Temporal changes of soil erosion by wind

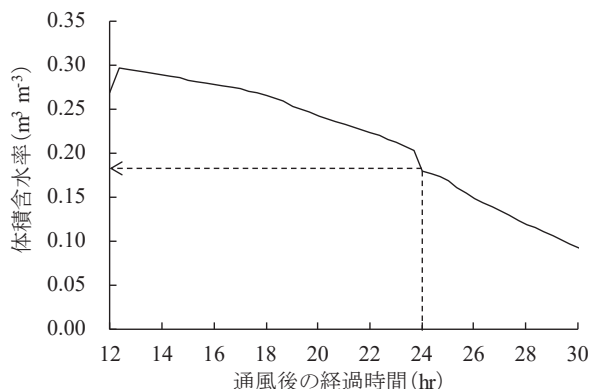


Fig. 3 土壌面における通風後の体積含水率の経時変化
Temporal change of simulated volumetric water content at soil surface

やその値に到達する時間を予測することができると考えられる。今後は、シミュレーションモデルで推定した土壌水分状態の精度を検証し、風食防止を目的とした灌漑スケジューリングを具体的に提案することを目指す予定である。

引用文献 : Yuge K., M. Anan: Evaluation of the effect of wind velocity and soil moisture condition on soil erosion in andosol agricultural fields (Model Experiment), Water, 11(1), 98, 2019