

II-24

送風下での砂層カラムからの定常蒸発現象

福井大学工学部 学生員 篠野 正樹
福井大学工学部 正 員 福原 輝幸

1. 緒論

砂漠化に関する研究は農業土木, 土木工学, 土壌物理学などの広範囲な分野にまたがり、その対策が検討し始められている。砂漠においては風が強いために、この風が砂漠の乾燥化にいかに関与するかは大変興味深い。また、防風林による表土の安定のみならず蒸発抑制という観点からも、風による蒸発の助長の程度は検討されなければならない水文学的課題である。

そこで本研究では、砂層表面上に風を送り、風速変化に伴う砂層内および砂層上空気の温度、相対湿度、水蒸気密度分布の変化と蒸発量の関連性について検討する。

2. 実験概要

実験には幅 0.5m, 高さ 0.3m, 長さ 2.6m の風洞を使用し、所定の風速が砂層カラム表面に送られる。環境は温度 25℃, 相対湿度 50% で一定とし、実験条件は地下水位が地表面下 0.4m の CASE 1 (乾燥層あり) および 0.0m の CASE 2 (乾燥層なし) の 2 種類とする。砂層内の温度および相対湿度は温・湿度センサーにより、蒸発量は砂層カラムを載せた重量計により、それぞれ測定される。また、砂層カラム内のガス圧は差圧計により測定される。なお、実験を通して地下水位は一定に保たれる。

3. 実験結果および考察

Fig.1 に蒸発フラックス密度比 M_v/M_{v0} (M_v : 送風時の蒸発フラックス密度, M_{v0} : 自然対流時の蒸発フラックス密度) と風速 V_e の関係を示す。風速の増加に伴って蒸発フラックス密度比は $0 \leq V_e \leq 2 \sim 3 \text{ m/s}$ の間で線形的に増大するが、それ以上の風速になると M_v/M_{v0} の増加は鈍化するように思われる。特に、この傾向は CASE 2 で顕著である。当然ながら M_{v0} 自体、Fig.1 中に示されるように CASE 2 (砂層表面蒸発) の方が CASE 1 (砂層内蒸発) に比べて約 130 倍大きい。

砂層表面と大気との間の熱的相互作用は本実験に関しては、蒸発潜熱 L と顕熱 S による。顕熱 S は次式で表される。

$$S = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (1)$$

ここに、 α_c : 熱伝達率, T_s : 砂層表面の温度, T_a : 空気温度, である。 α_c は Fig.2 で示すように V_e の関数となり、砂層表面の湿潤状態に依存しない。この熱的相互作用は Fig.3 で示すような空気温度と砂層内温度の差 (空気温度を基準とし、以下では温度差と呼称する) の鉛直 (z) 方向分布から明確になる。まず、CASE 2 では風速の増大につれて温度差が大きくなっている。これは風速の増大に伴い蒸発量が多くなり、潜熱 L による砂層表面の温度低下が著しくなるためである。顕熱 S が潜熱 L に比べ

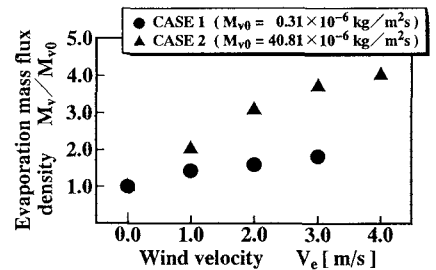


Fig.1 風速の違いによる蒸発フラックス密度の変化

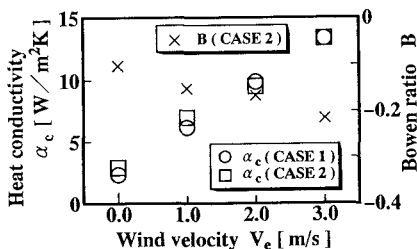


Fig.2 熱伝達率・ボーエン比と風速の関係

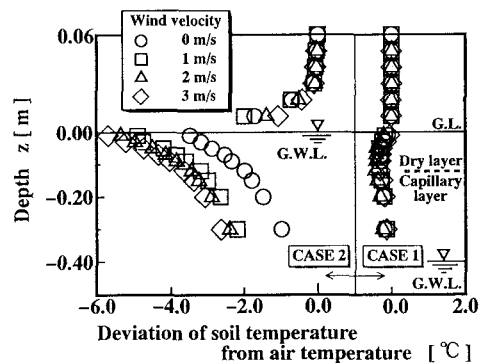


Fig.3 温度分布と風速の関係

小さいことは Fig.2 のボーエン比 $B(=S/L)$ と風速 V_e の関係から支持される。一方、CASE 1 では風速による $T(z)$ の差異はなく、水蒸気移動による顕熱の影響は無視できることが知れる。

蒸発フラックス密度 M_v はマス・フロー・ファクターを 1 とみなすとき、式 (2) のような乾燥層における水蒸気密度勾配 $\nabla \rho_v$ およびガス圧勾配 ∇P による水蒸気の拡散フラックスの和として表される。

$$M_v = -\xi D_{atm}^* (\nabla \rho_v - \nabla P / R_v T) \quad (-D \leq z \leq 0) \quad (2)$$

ここに、 ξ ：蒸発面補正係数 ($=4.5$)、 D_{atm}^* ：空隙中の水蒸気拡散係数、 $\nabla(= \partial/\partial z)$ ：微分演算子、 ρ_v ：水蒸気密度、 P ：砂層内ガス圧、 R_v ：水蒸気のガス定数、 T ：温度、 D ：乾燥層厚 ($=0.12m$)、である。Fig.4 に CASE 1 の風速 $3m/s$ におけるガス圧 P と大気圧 P_{atm} との差圧の鉛直 (z) 方向分布を示す。砂層内を通じてガス圧は一定であり、式 (2) の右辺第 2 項は無視できる。よって、 M_v は式 (2) の右辺第 1 項で規定されることになる。すなわち、

$$M_v = -\xi D_{atm}^* \nabla \rho_v \quad (-D \leq z \leq 0) \quad (3)$$

式 (3)、すなわち M_v と乾燥層の $\nabla \rho_v$ の関係を検討するために、Fig.5 に水蒸気密度の鉛直 (z) 方向分布 $\rho_v(z)$ が示される。なお、CASE 2 の $z=0$ での ρ_v ($=1.7 \times 10^{-2} \sim 1.9 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$) は砂層表面温度から推算された値である。

Fig.5 に基づいて CASE 1 における水蒸気密度勾配比 (乾燥層の水蒸気密度勾配 $\nabla \rho_v$ を、風速 $0m/s$ のそれ $\nabla \rho_{v0}$ で除した値) と蒸発フラックス密度比の関係を図 6 に示す。水蒸気密度勾配比と蒸発フラックス密度比は 1:1 の関係にあり、風速の増加に伴い乾燥帯での水蒸気密度勾配 $\nabla \rho_v$ が大きくなるために、蒸発フラックス密度は増加することが知れる。従って、式 (3) は風動時でも適用可能である。

次に、CASE 2 の砂層表面蒸発について考察する。Fig.7 は式 (4) で表わされる Film theory の境界層厚 δ を各風速 V_e について示したものである。

$$M_v = \xi D_{atm} (\rho_{vs} - \rho_{va}) / \delta \quad (4)$$

ここに、 D_{atm} ：大気中の水蒸気拡散係数、 ρ_{vs} ：砂層表面の水蒸気密度、 ρ_{va} ：空気の水蒸気密度、である。式 (4) では $\xi=1$ であり、境界層厚 δ は風速 V_e の陽関関数となる。 V_e が増加するに伴い、 δ は指数関数的に減少する。 V_e の増加による δ の減少は、Fig.5 に示される地上の $\rho_v(z)$ から理解される。すなわち、風速の増大に伴う砂層表面からの蒸発フラックス密度 M_v の増加は、空気流の乱れによって地表面上の水蒸気密度勾配 $\nabla \rho_v$ が増加するためと考えられる。

4. 結論

砂漠の乾燥の進行に及ぼす風の影響を調べるために風洞実験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 砂層内蒸発において、風速の増大に伴い乾燥帯での水蒸気密度勾配が大きくなり、蒸発フラックス密度の増加を生む。また、表面蒸発における蒸発フラックス密度の増加は風速の影響 (乱れ) による地表面上の水蒸気密度勾配の増加に起因する。
- 2) 風による蒸発フラックス密度の増加は、砂層内蒸発より砂層表面蒸発の方で顕著となる。

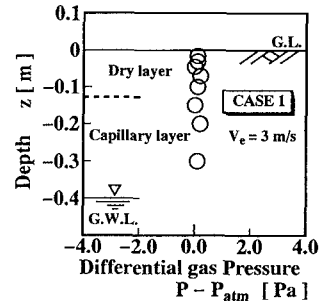


Fig.4 砂層内差圧分布

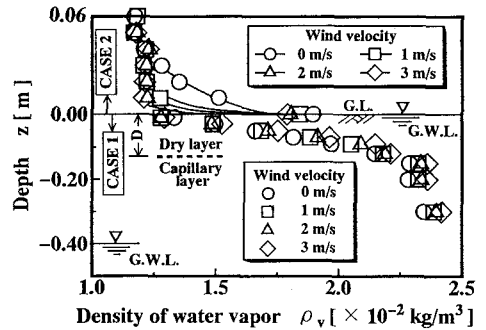


Fig.5 砂層内水蒸気密度分布

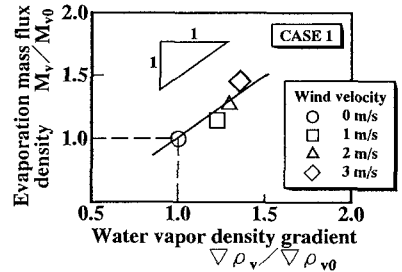


Fig.6 水蒸気密度勾配比と蒸発フラックス密度比の関係

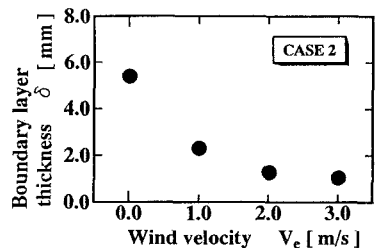


Fig.7 風速の違いによる境界層の変化