

灌漑緑化による砂漠域の微気象改善効果に関する検討 -その2-

The effect of the irrigation on the modification of micro-meteorological condition in desert area -Part 2-

藤野 毅*・ヴ タン カ**・浅枝 隆*・和氣亜紀夫***

Takeshi FUJINO, Vu Thanh Ca, Takashi ASAEDA and Akio WAKE

ABSTRACT ; Modelling of heating and evapo-transpiration processes in the plant canopy requires knowledge about plant physiology, which includes water uptake by the root, water transport in the stem to the leaf, and transpiration at the leaf; and also the knowledge of radiation and heat transfer processes in the plant canopy. The temperature and water content of the soil are also important for the root water uptake. Thus, the model for heating and vapor transfer in the plant canopy in this paper consists of a submodel for radiation transfer in the plant canopy, a submodel for the heating of the canopy, a submodel for the transport of water in the root-stem- leaf system, and a submodel for the evapo-transpiration in the plant.

Key Words; desert, green-belt, evapotranspiration, numerical simulation

1. はじめに

砂漠域内における植林は、防風林としての役割だけでなく、景観改善としての役割や日射の遮断および蒸発散による微気象緩和効果の役割を果たす。現地住民にとっては、特に夏季の酷暑を和らげる微気象緩和効果の期待が大きい、その定量化についてはほとんどなされていないばかりか、実測例も極めて少ないのが現状である。

前報(藤野ら,1995)では、クウェート科学研究所(K I S R)で目下構想中のクウェート緑化プロジェクトがもたらす局地微気象の改善度を、3次元メソスケール大気モデルを利用して定量的に示した。この低層気象の改善は、灌漑による蒸発散と樹幹による日射の遮断効果に起因し、かつそれが空間的にある程度の規模に達する場合に期待出来ることが予測されている。

今回は、既存の人工緑地であるクウェート国アーマディ住宅街を対象に、夏季において気象観測を行い、その結果を基に植生キャノピー層の数値モデルによって植林されたユーカリ等の熱・水分移動特性を推測し、微気象緩和効果について評価することを試みた。

*埼玉大学理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

**埼玉大学工学部

Faculty of Engineering, Saitama University

***清水建設技術研究所

Institute of Shimizu Corporation

2. 気象観測

2.1 観測概要

Ahmadi 住居地区 (東経 $48^{\circ}.05'$ ・北緯 $29^{\circ}.05'$) はクウェート市の南約 30km の内陸砂漠に位置し、小規模であるが、クウェートでは最も緑化が進んでいる集落である (図-1)。図-2 に、住居地区の概略と観測地点を示す。約 3 km^2 の住居地区には道路沿いと公園に主にプロソピス (*Prosopis juliflora*) とユーカリ (*Eucalyptus*) からなる高さ 10m 程度の中木が植えられ、2 次処理生活排水を搭載した散水車が巡回して必要最低限の間欠的灌漑が行われている。植樹は地区の北部に偏在しているが、地区全体での植樹ピッチは平均約 30m 程度にすぎない。

観測は 1995 年 9 月 5 日と 6 日の 2 日間、図-2 中の F-1 から F-4, P-1, G-1 の 6 地点と、地区外部の砂漠地の基準観測地点 (D-1) において、全天日射 (MR-22,EKO)・気温 (TH- 10,TABAI ESPEC)・風速 (MAKINO)、および葉面温度を測定した。これらの樹幹の下地表面状態はアスファルト道路か砂であるが、G-1 地点は例外としてスプリンクラーで間欠的に灌漑された約 50m^2 の局所的な芝地のほぼ中心に位置し、日射は上部の樹幹群により 1 日を通じて遮断されている。風速は、地区中央に位置する公園の中 (P-1) と砂漠基準点 (D-1) で測定した。さらに、葉面温度は F-1 地点で地上 10m のクレーンから赤外放射計 (Thermo Flow,EKO) により放射量を測定し、ステファン-ボルツマンの式により換算した。

2.2 観測結果

図-3 に公園内の地点 (P-1) と砂漠基準点 (D-1) における低層風速の比較を示す。公園内の風速は砂漠地点より平均 6m/s 以上も低く、樹木や住宅などの抗力効果が顕著に現れている。図-4 に砂漠基準点と住宅地内部の各点での気温の比較を示す。住宅地内の樹幹内部気温場所による変動は小さく、砂漠地点と比較すると最高で 1.5°C 程度低いことが分かる。一方、樹幹下の芝地上 1.5m (G-1) では、砂漠地点よりも最大で 3°C も低く、アルファルファ農場の場合と同様に灌漑水分の蒸散効果が大いことを示している (藤野ら,1996)。図-5 は、ユーカリとプロソピスの葉面温度の比較である。日中のユーカリの葉面温度はプロソピスよりも約 1.5°C 低く、近傍の気温よりも最大 5°C 程度低い。この樹木の種類による葉面温度の違いが、直接蒸散量の差を反映しているかは現状の限られたデータのみからでは不明である。

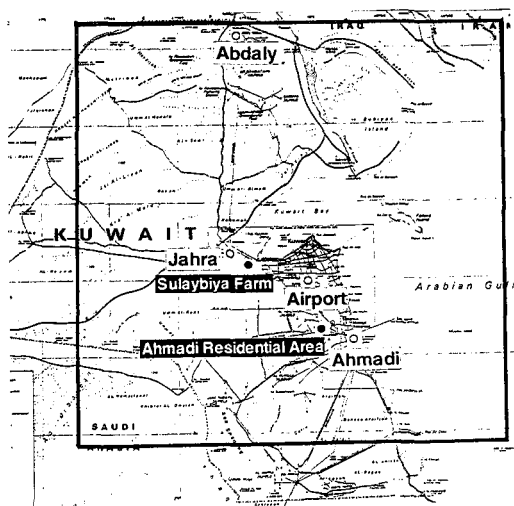


図-1 観測地点図

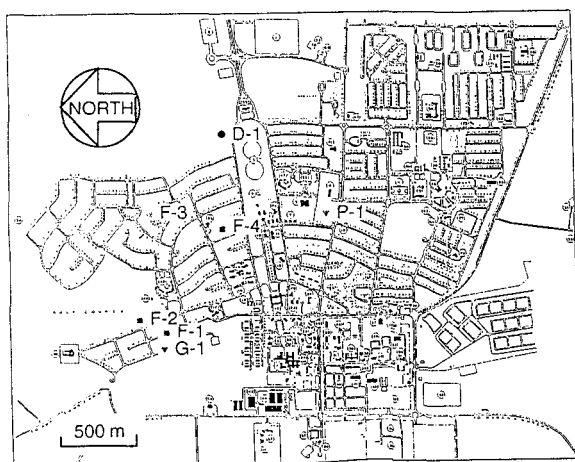


図-2 Ahmadi 住居地区の概要と観測地点

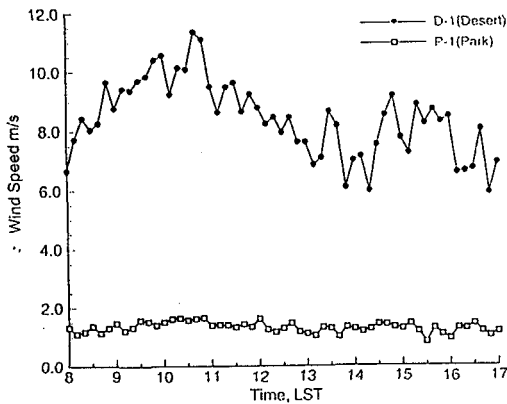


図-3 低層風速の日変化

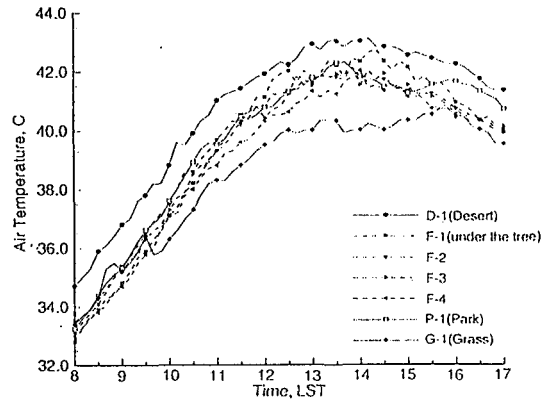


図-4 気温の日変化

3. 数値計算

3.1 モデルの概要

数値モデルは非定常の鉛直1次元モデルであり、神田・日野(1990)およびKondo and Watanabe(1992)により提唱された植生モデルと、Asaeda and Vu(1993)による土壌内の熱・水分同時移動モデルを基礎とした植生-土壌系の一体モデルである。また、植物キャノピー内での放射は、基本的にはGoudriaan(1977)によっている。このモデルでは、キャノピー、地面表面システムの反射に対して影響の大きい、葉の角度、入射光の角度の分布を考えた葉による多重反射を評価している。主な方程式を以下に記す。

3.2 計算条件

外部条件として、日射・風速・気温・湿度を毎正時ごとにAhmadiでの観測値を与えて解く。他に、初期条件として、葉面温度・地中温度・地中土壌水分が必要になるが、今回の観測ではデータが得られていないものもあり便宜推測した。

さらに、本計算で用いられる多くのパラメータについては、ほとんど分かっていないため、適当と思われる範囲の値を用いた。これらの値を表-1に示す。

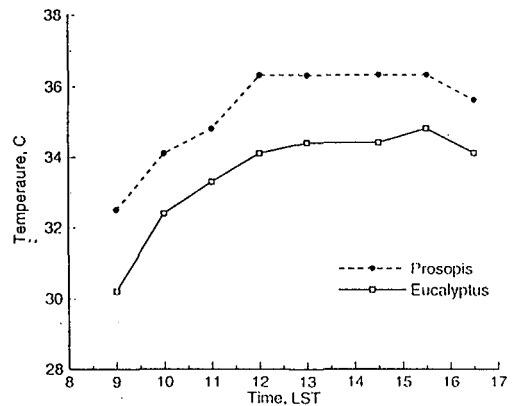


図-5 葉面温度の日変化

表-1 計算に用いたパラメータ	
トータル LAI (m^2/m^2)	2.0
キャノピー高さ (m)	8.0
キャノピーベース高さ (m)	2.0
茎の透水係数 (m/s)	$0.052e-3$
木の保水力 (kg/m^3)	600.
根の水分浸透性 (1/m/s)	$9.4e-13$
単位体積当りの根の長さ (m/m^3)	$6.4e4$
根の半径 (m)	0.005

群落内の葉面の熱収支式：

$$\rho_{cp} c_{cp} \frac{dT_{cp}}{dt} = R_n - a(z)H_c(z) - a(z)Le_c(z), \quad (1)$$

顕熱輸送および潜熱輸送：

$$H_c(z) = c_p \rho_a c_h u (T_{cp} - T_a), \quad (2)$$

$$Le_c(z) = L \rho_a c_e (q_{*cp} - q_a), \quad (3)$$

ρ_{cp} 、 c_{cp} および T_{cp} はそれぞれ葉の密度、比熱、および温度； t :時間； R_n :放射収支； $a(z)$:葉面積密度（片面）； $H_c(z)$:顕熱輸送； $Le_c(z)$:潜熱輸送； ρ_a 、 c_p および T_a はそれぞれ空気密度、比熱、および気温； u :風速； c_h および c_e :葉面と大気間における熱および水蒸気交換係数； L :蒸発の潜熱； q_{*cp} :葉面温度 T_{cp} における飽和水蒸気圧を示す。
熱および水蒸気の交換係数：

$$c_h = 0.0145(\text{一定}), \quad (4)$$

$$c_e = \beta u^{1/2} O_p^{1/2}, \quad (5)$$

$$O_p = O_{pmax} f(R_{sn}) f(T_{cp}) f(\theta V), \quad (6)$$

β は植物の種類によって定まる定数； O_p は気孔開度で日射、葉温および葉内の水分の関数 (Jones, 1992)； O_{pmax} は気孔の最大開度； R_s :日射； θV :葉内水分； $f(R_s)$ 、 $f(T_{cp})$ および $f(\theta V)$:気孔開度への影響関数 (0~1 の値)。
茎および根内の水分移動方程式：

$$C_p \frac{\partial \psi_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_p \frac{\partial (\psi_p + z)}{\partial z} \right) - S_p(z), \quad (7)$$

根の水分ソース項および蒸散のシンク項：

$$S_p = \frac{\theta}{\theta_s} \zeta_r l_r (\psi_s - \psi_r) \quad z < 0, \quad (8)$$

$$S_p = c_e (q_{*cp} - q_a) \quad z > 0, \quad (9)$$

C_p は植生の比水分容量 ($\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{cm}$)； ψ_p :根・茎系におけるオスモティック圧力 (cm)； z :鉛直座標； K_p :根・茎系における透水係数 (cm/s)； $S_p(z)$:根の吸水による水分ソース項 (逆に葉面からの蒸散によるシンク項； θ は土の含水比； θ_s :土の再湿潤における最大含水比； ψ_s と ψ_r :土と根の膜組織での水分ポテンシャル； ζ_r :根の単位長さ当りの膜組織の透水係数； l_r :土の単位体積当りの全根の長さ (m/m^3) をそれぞれ示す。

植生キャノピー層内外における風速の鉛直分布：

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \begin{cases} -c_d a(z) u^2 & 0 \leq z \leq h_c \\ 0 & z > h_c. \end{cases} \quad (10)$$

同気温分布：

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h(z) \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = \begin{cases} a(z) H_c(z) / c_p \rho_a & 0 \leq z \leq h_c \\ 0 & z > h_c, \end{cases} \quad (11)$$

同水蒸気分布：

$$\frac{\partial q_a}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h(z) \frac{\partial q_a}{\partial z} \right) = \begin{cases} a(z) e_c(z) / \rho_a & 0 \leq z \leq h_c \\ 0 & z > h_c, \end{cases} \quad (12)$$

K_m および K_h :渦動粘性係数および熱・水蒸気の乱流拡散係数； c_d :抵抗係数； h_c :キャノピーの高さを示す。
渦動粘性係数および熱・水蒸気の乱流拡散係数 (Kondo and Watanabe, 1992)：

$$K_m = \Lambda^2(z) \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|, \quad (13)$$

$$K_h = \frac{K_m}{Pr}, \quad (14)$$

$\Lambda(z)$:混合距離； Pr :乱流プラントル数である。

3.2 計算結果

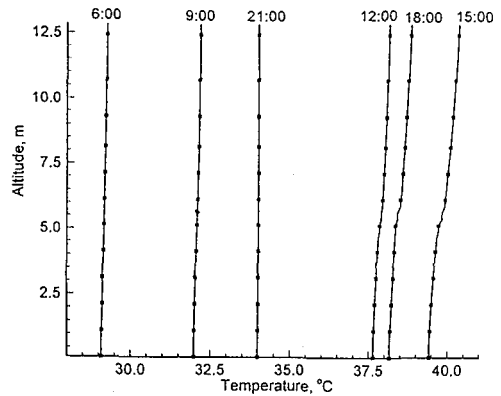
図－6 に高さ 13m までの植生キャノピー内外の鉛直気温分布の日変化を示す。これより、外部条件として与えた気温に対し、日中は 2 度程度下がった。特に地上気温がキャノピー外の気温とほぼ同じか低いのは、植生の日射の遮断効果の現れである。

図－7 に植生の葉面温度の日変化を示す。葉面温度もまた外部条件の気温よりも低く、また、植生キャノピー内の気温よりも低い。この結果については LAI、蒸発効率、土壌水分による影響が支配的であり、詳細のメカニズムについては観測では得られていないが、計算は観測値と矛盾しない結果が得られた。

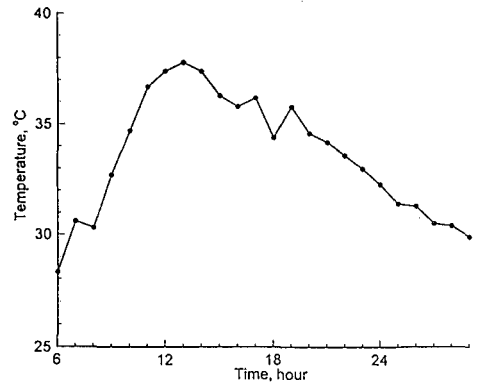
図－8 に土壌および植生内のマトリックポテンシャルの日変化を示す。ここでは、初期条件として同じ値のプロファイルを与えているが、外部における高温・低湿状態に反応して、1 日中地中から上方へ水分が輸送されることが示されている。夜間では、気孔が閉じるためにフィードバックが生じて、植生上部で負値が小さくなる。

この場合の葉面の熱収支を図－9 に示す。これより、葉面からの潜熱フラックスは日射よりも大きく、最大 $900\text{W}/\text{m}^2$ 程度にも及ぶ。これは、葉面温度が気温よりも低いために大気から受けた潜熱フラックスも水分蒸発に寄与した結果である。この値は、我が国のような湿潤で温暖な気候では得られないが、事実、ほぼ同じ時期に行われたアルファルファ農場における熱収支観測でも同様の値が算定されているため(藤野ら, 1996)、熱収支としては異常な値ではない。また、気候開度日射が無い場合にはゼロになるため、日没後は蒸発散は起こらず、加熱もないためフラックスに変動は見られない。

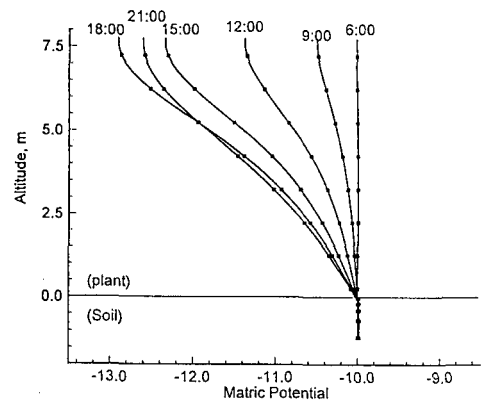
次に、植生のパラメータはそのままにして、気温・湿度を我が国のような湿潤温暖気候で与えて計算した熱収支の結果を図－10 に示す。これより、潜熱フラックスは $400\text{W}/\text{m}^2$ 程度に留まり、また顕熱フラックスも生じている。実際には、砂漠気候と湿潤温暖気候に生息する植生の種類とその生態については必ずしも一致しないため、根からの吸収や茎の透水係数等、未知のパラメータが多く、



図－6 気温の鉛直分布 (計算値)



図－7 葉面温度の日変化 (計算値)



図－8 マトリックポテンシャルの日変化 (計算値)

それぞれの植生に対して同じ値が用いられるとは限らないが、周囲の気象条件の応答としてこの値は夏季では妥当な値であり、計算モデルは植生の水分移動・熱収支についてのメカニズムをある程度捉え、定量的にも良い結果が得られていると言える。

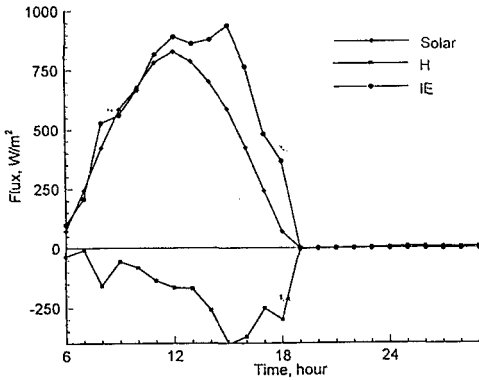


図-9 葉面の熱収支 (砂漠気候)

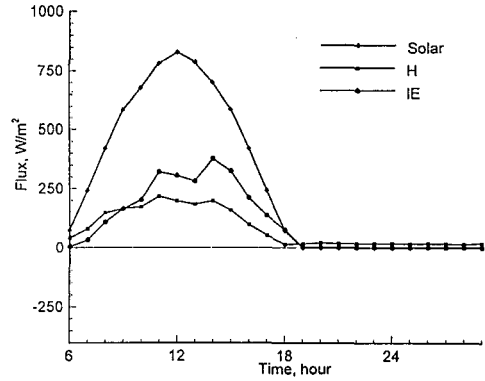


図-10 葉面の熱収支 (湿潤温暖気候)

4. おわりに

砂漠緑化による微気象緩和効果を実証するための現地観測を行い、さらに数値モデルによって水分移動、および熱収支特性について検討した。まず、現地観測では、乾燥地帯に生息する2つの種類の樹木の葉面温度が日中では気温よりも低く、盛んな蒸発散が生じていることが予測された。数値モデルによる検証は、周囲の気象条件に対して熱収支が敏感に変化し、これまで得られた砂漠内の灌漑緑地の熱収支特性と矛盾の無い結果が得られた。今後の課題としては、樹木の種類によるパラメータ値について検討する必要がある。

参考文献

- [1] 藤野毅・浅枝隆・和氣 亜紀夫：灌漑緑化による砂漠域の微気象緩和効果に関する検討, 環境システム研究, No.23, pp.198-203, 1995.
- [2] 藤野毅・浅枝隆・和氣 亜紀夫：夏季の乾燥地における大規模灌漑緑地の気象観測と環境評価, 水工学論文集, 第40巻, pp.261-267, 1996.
- [3] Asaeda T. and Vu T. Ca : The subsurface transport of heat and moisture and its effects on the environment: a numerical model. Boundary-Layer Meteorol. 65, pp.159-179, 1993.
- [4] 神田学・日野幹雄：Numerical simulation of soil-plant-air system (1) Modeling of plant system, 水文・水資源学会誌, 3, pp.37-46, 1990.
- [5] 神田学・日野幹雄：Numerical simulation of soil-plant-air system (2) Numerical experiment on the effect of plant on meteorological environment, 水文・水資源学会誌, 3, pp.47-55, 1990.
- [6] Kondo J. and Watanabe T. : Studies the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model, J. Atmos. Sci., 49, pp.2183-2199, 1992.
- [7] Watanabe T. and Kondo J. : The influence of canopy structure and density upon the mixing length within and above vegetation, J. Meteor. Soc. Japan, 68, pp.227-235, 1990.
- [8] Goudriaan, J. : Crop micrometeorology: a simulation study PUDOC, Wageningen, 1977.
- [9] Kaufmann M.R. and J.D. Weathered : Determination of Potential Direct Beam Solar Irradiance. U.S. Dept. of Agr. For. Serv., Fort Collins Co., Res. Pap. RM-242, 1982.