

植生による気候緩和効果に関する基礎的研究
Laboratory and Numerical Experiments on the Effect of Plant
on Urban Meteorological Environment

東京工業大学 神田 学 Manabu.kanda
東京工業大学 日野 幹雄 Mikio.Hino

Two sets of lysimeter with wind tunnel were constructed, one of which was bared and the other of which was grassed. Relationships among air flow mean velocity, insolation and fluxes of CO_2 -consumption, humidity, heat loss in air flow, moisture flux in soils were correlated each other to determine the predominant factors in the evapotranspiration process.

The bio-meteoro-hydrological process is modeled by three sets of equations totaling to 7 variables ($u, v, p, \rho, T, \text{CO}_2, \text{hum}, T_{\text{soil}}$); i.e. the Navier-Stokes equations with density variations for air flow, equations for flux conservation of CO_2 , humidity and heat with sink and/or source term due to photosynthesis, and the energy budget equations between net radiation, sensible and latent heat within canopy of grass leaves and on the soil surface. Numerical simulation (two dimensional time dependent process) has been performed with the interesting results as shown in figures. Keywords: vegetation, evapotranspiration, lysimeter, numerical simulation

1. はじめに

植生の葉系、根茎系はその蒸発散作用、あるいは機械的作用によって土壌の水文環境および大気の大気環境に大きな影響をあたえる。流出素過程の研究分野に於ては、根系が不飽和土壌帯の水分変化に及ぼす影響などの観点から研究が進められている。一方、環境問題の観点からは植生がもたらす気候緩和効果の重要性が認識されてきている。実際都市内の緑地が市街地に較べて数度低温化している実測値などの報告もなされており、植生がコンクリートの多い都市域において大きな気候緩和効果を及ぼすこと（ある場合には降雨の少ない乾燥帯などにおいて雲量や降雨量も増加するとの報告もある）が期待されているが、その物理的メカニズムについての研究は不十分であると考えられる。

このような植生の気候緩和効果を解明するには、植生と大気の間での各種物理量の交換量を把握することが必要である。そのためにはまず植生群落の中の微気象に目を向け、そのなかで植生が周辺空気や土壌にどのような働き掛けをしているか、あるいは逆にそういった周囲の環境によってどう生物活動が影響されるかなどを調べ、植生内微気象の形成されているメカニズムから研究を進めなくてはならないと考える。

そこで本研究では、まず植物キャノピー内微気象の各ファクターの相互依存関係を調べる目的から風洞付ライシメーターを2体用いて、草地・裸地での比較実験を行い、植生の活動の諸因子の関係-日射・気温と植生内の CO_2 ・湿度・温度フラックス変化、土壌水分量変化-を明らかにした。

一方実験では各葉レベルでの熱収支を空間的に詳細に把握することは実際上困難であると同時に制御できるパラメーターにもおのずと限界がある。そこで、植生内の運動量方程式、連続式、熱拡散方程式、水蒸気拡散方程式、 CO_2 拡散方程式、熱収支式などをもとにコンピュータ内で植生内微気象を再現し、2次元非定常の差分計算を行い、植生の無い場合と比較することによって植生の影響に付いて考察した。

2. 風洞付ライシメーターによる気候緩和効果実験

2-1 実験概要

図-1に示したように、長さ4m、幅0.3m、土壌部深さ0.5m、大気部高さ0.5mの風洞付きラ

イシメーターを2体作成しこれを東京工業大学構内の野外に設置した。土壌部は一樣に締め固められた関東ローム土が敷き詰められており、2体のうち1体は雑草が植えられ高さ40cmに成長している。また降雨は降雨装置によって、また風速はファンで送風することによりその強さを制御した。

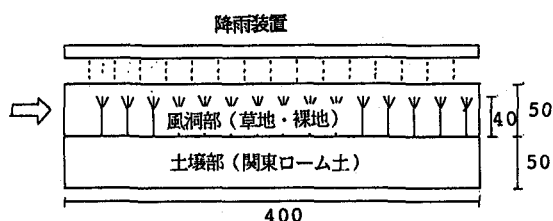


図-1 実験装置

測定項目は風洞の入口、出口、中間での気流の温度分布、湿度分布、 CO_2 濃度分布の変化および日射量、土壌中の水分量、地中温度の変化である。

測定期間は1988の夏期である。

2-2 実験結果及び考察

生データをみると植生の風洞の出入口では、大きいときで温度で3~4℃、絶対湿度で5 (g/m^3)、 CO_2 濃度で10~20 (ppm)と、予想以上に大きな差を生じていた。そこで、まず風洞内の出口と入口における各物理量のフラックスの鉛直積分値の差から群落全体として大気に放出され、あるいは大気から吸収している物質の収支量を求めてみた。図-2は各物理量のフラックスの時間変化を表したものである。図-3は群落全体による CO_2 シンク量と日射量の関係を表したもので、数日分の時系列データをまとめてプロットしてある。 CO_2 シンク量は群落全体としての光合成速度と考えることができる。これを見ると日射及び風速が CO_2 交換量を大きく支配していることがわかる。日射量が大きくなってくると同一日射、風速でも多少ばらつきがでてくるが、その原因を調べてみるとおもに土壌の水分状況の違いに起因しているものとおもわれる。

つぎに植生群落内の物理量の鉛直分布について考察してみる。

図-4に裸地、草地の日中の典型的な鉛直分布を示す。これによれば群落内に於て下方に行くに連れて温度が低下、水蒸気量が増加する傾向が認められる。また CO_2 は群落上方で最小値を持つような分布になり、これは植物が光合成により CO_2 シンクになる分と地面からの CO_2 のバランスで形成されているものと考えられる。

図-5は植生内の温度勾配と水蒸気勾配の関係を示したものであるが両者の間には強い相関がみられ植生内の温度低下が蒸散による潜熱と密接な関係があることを示唆しているように思われる。

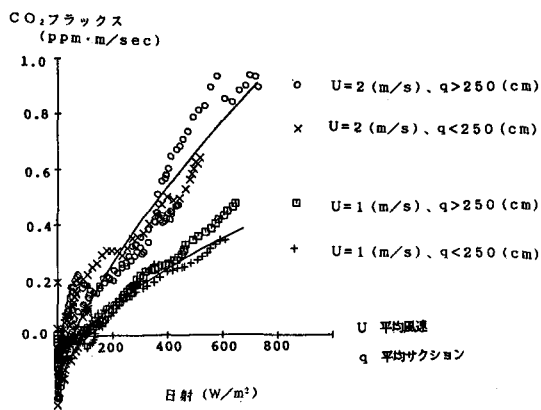


図-3 日射- CO_2 フラックス

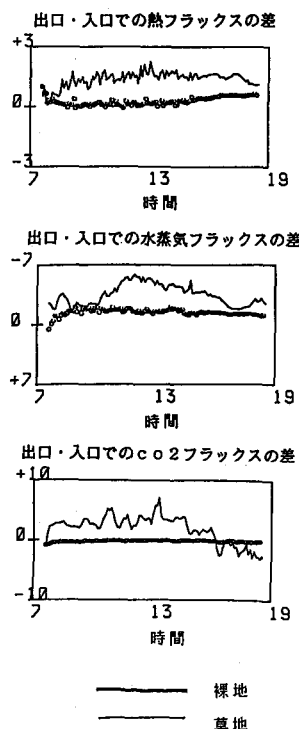


図-2 各フラックスの時間変化 (裸地・草地)

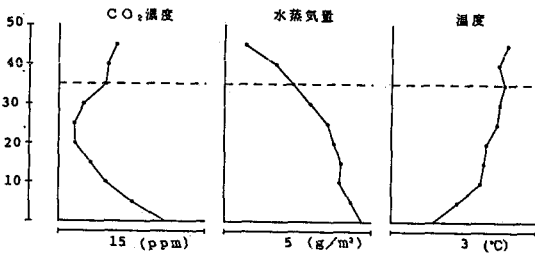


図-4 各物理量の鉛直分布

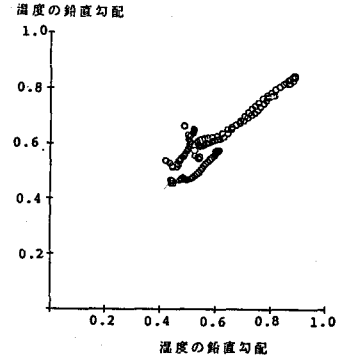


図-5 温度勾配-湿度勾配

3、植生群落内の微気象の数値実験

3-1 計算概要

ここでは植生を含む2次元場をBFG(BOUNDARY FITTED GRID)差分格子により分割し、各グリッドポイントで、個葉の熱収支式および気流の運動量、熱拡散、水蒸気拡散、 CO_2 拡散の6個の二次元非定常基礎方程式を解くことによって植生のもたらす気候緩和効果をよりダイナミカルに捉えてみることを試みた。式及び各係数は(表1)に示す通りである。運動方程式は(1)(2)式のように表され、最後の項は葉による抵抗をあらわしている。圧力は、(1)(2)(3)より導かれる(4)のポアソン方程式を解かせ、最後の項 DL/DT の評価で連続式が満たされるようにした。熱拡散方程式(5)の最後の項は葉から気流への顕熱移動を表している。これは、葉と気流の温度差および熱交換量の積で表される。熱交換率 κ_T は葉の形状及びレイノルズ数、グラフホッフ数、プラントル数の関数となる。水蒸気拡散方程式(6)の最後の項は葉から気流への水蒸気移動を表している。これは、葉と気流の比湿差と水蒸気交換量の積で表される(気孔内は葉温で飽和状態にあると仮定)。水蒸気交換率 κ_H は風速、気孔開度の関数となり、気孔開度は、日射、土壌水分、気温、飽差等の影響を受けると考えられるがここでは日射が気孔開度がおもな制限因子になると仮定し日射のみの関数とした。 CO_2 拡散方程式(7)のシンク項についても水蒸気と同様に考えた。なほ、熱・水蒸気・ CO_2 の拡散係数は運動量拡散係数と同じ値を用いた。

下面境界は以下のようにした。地温は地表面で(8)と同様な熱収支式を解かせることによってあたえた。また水蒸気量はそのときの地温で飽和しているものとして与えた。 CO_2 は実測に基づき一定のフラックスを与えた。図-6に計算に用いた差分格子(63×33)を示す。

計算は植生のある場合、裸地の場合、植生と同じ形状を有するが蒸発散などの生物活動を行わない抵抗が存在する場合の3通りについて夏の快晴時を想定して行った。

3-2 計算結果及び考察

植生がある流れ場の様子を図-7に示す。植生がある場合は、その抵抗により入口付近で一度上昇し再付着する。植生内では指数関数的な風速分布になっている。気温の等温線を図-8にしめす。鉛直方向でみると植生群落の下方に行くほど温度が低下するような分布がえられている。流下方向でみると植生の前縁部1/3位までは温度が次第に低下しそれ以降は流下方向に大きな温度低下はみられなくなる。すなわち、植生の距離が長いほど気温低下がおおきいということには必ずしもならない。植生と裸地の温度差をとったのが図-9である。最大で植生の方が裸地より4℃も温度が低下しており植生による気候緩和効果の大きさがわかる。次に湿度分布を図-10に示す。植生内で蒸発散が行われるため群落下方につれて水蒸気量が増加している。また CO_2 の濃度分布を図-11にしめす。植生内では光合成活動のために CO_2 が消費され、一方地面からは一定の CO_2 が放出されるため群落内で最小値を持つような鉛直分布になる。葉温と周辺気温との差の分布を図-12に示す。群落の極上方では気温に比べ葉温の上昇がみられ、それより下方では葉温は周辺気温に比べていずれも低くその差はあるとこれで最大値を持つ。葉温は(8)に示した通り純放射量と潜熱、顕熱のバランスで決まるが、群落上方では受熱量過多のため葉温の上昇がおり、それより群落下方

表1

運動量方程式

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial u}{\partial y}) - c_s u^2 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial v}{\partial y}) - c_s v^2 - \rho \frac{1}{Fr_2} \quad (2)$$

圧力のポアッソン方程式

$$\nabla^2 p = \text{div} D_x + \text{div} D_y - 2 c_s u \cdot \text{grad} u - \text{div} (u \cdot \nabla) u \quad (3)$$

$$-\frac{\partial L}{\partial t} - \text{grad} \rho \cdot \frac{Du}{Dt}$$

ただし $L = \text{div} u$

(4)

$$u = (u, v), \quad Dx = \left(\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial u}{\partial x}), \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial v}{\partial x}) \right)$$

$$Dy = \left(\frac{\partial}{\partial x} (K_y \frac{\partial u}{\partial x}), \frac{\partial}{\partial x} (K_y \frac{\partial v}{\partial x}) \right)$$

熱拡散方程式

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_{Tx} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{Ty} \frac{\partial T}{\partial y}) + \kappa_T s (T_L - T) \quad (5)$$

水蒸気拡散方程式

$$\frac{DH}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_{Hx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{Hy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \kappa_H s (H_s - H) \quad (6)$$

CO₂拡散方程式

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} (K_{Cx} \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{Cy} \frac{\partial C}{\partial y}) + s (F - \gamma) \quad (7)$$

葉における熱収支式

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_L}{\partial t} = (\sigma T_L^4 + R_n - c_s \rho \kappa_T (T_L - T) - L \rho \kappa_H (H_s - H)) \quad (8)$$

$$K_x = \lambda^2 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) (1 + \varepsilon R_i) \quad (9) \quad \lambda = \frac{2 \kappa \alpha}{C_s S} \quad , \text{但し } \lambda < \kappa \alpha y \quad (10)$$

$$R_n = R_n 0 \cdot \exp(-\delta \int S dz) \quad (11)$$

※ 各変数は無次元化されている

u, v (x, y) x, y 方向の風速

p (x, y) 圧力

T, T_L (x, y) 気流温度、葉温H, C (x, y) 気流の比湿、CO₂ 濃度K_x, K_y (X, Y) x, y 方向の運動量拡散係数K_{Tx}, K_{Ty} (X, Y) x, y 方向の熱拡散係数K_{Hx}, K_{Hy} (X, Y) x, y 方向の水蒸気拡散係数K_{Cx}, K_{Cy} (X, Y) x, y 方向のCO₂ 拡散係数s, c_s (X, Y) 葉面積密度、抵抗係数R_i リチャードソン数c_s, c_s 気流の定圧比熱、葉の比熱R_n (X, Y) 純放射量ρ, ρ_s 気流、葉の密度

L 水蒸気の潜熱

H_s (X, Y) 葉温での飽和比湿κ_T, κ_H (X, Y) 熱、水蒸気バルク係数

F, γ (X, Y) 光合成、呼吸速度

λ (X, Y) 混合距離

σ ステファンボルツマン定数

κ カルマン定数

ではおもに純放射量の減少と蒸発散による潜熱がきいて熱収支が負になったものと考えられる。

さて植生内の気温低下の原因としては非生物的效果として光の遮蔽効果と、生物活動に関連した蒸発散による潜熱が主であると考えられる。そこで両者の気温低下に及ぼす影響を明かにするため、植生と同じ形状と物理的性質を有するが蒸発散、光合成などの生物活動を行わないようなモデル抵抗が存在する場合を計算を行った。そのときの温度分布を図-13に示す。これを見ると地表面ごく近傍では遮蔽効果による温度低下効果がみられるがほとんどの領域で逆に昇温を招いており、特に群落上方ではその傾向が著しい。すなわち植生群落による気温低下には蒸発散による潜熱移動が大きな役割を果たしていると考えられる。

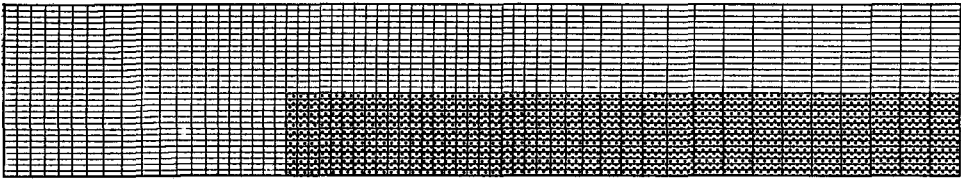


図-6 差分格子図 (63*33) ハッチは植生を表す

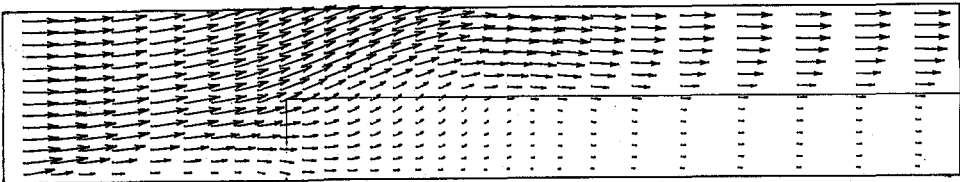


図-7 流速分布 (植生有り)

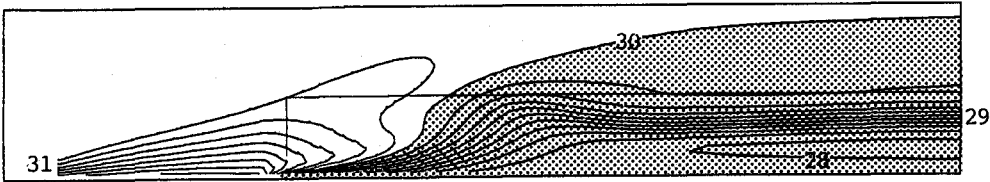


図-8 温度分布 (植生有り) ハッチは t_2 (30°C) より低温部

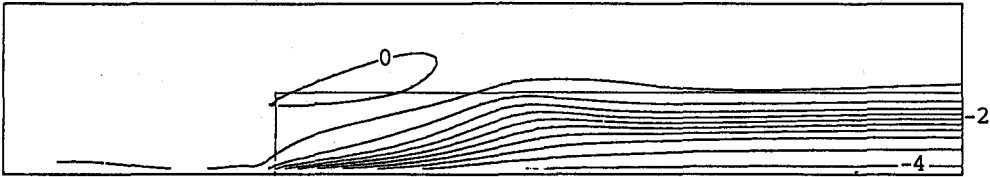


図-9 植生と裸地の温度差分布

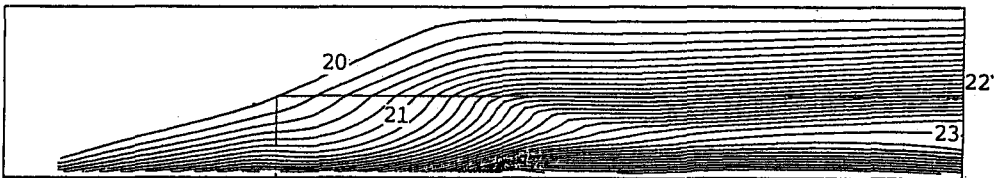


図-10 水蒸気量分布 (植生有り)

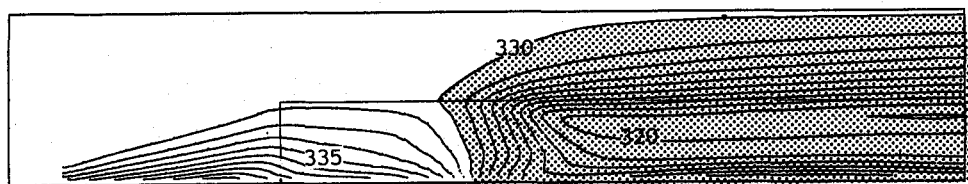


図-11 CO_2 濃度分布(植生有り) ハッチは CO_{20} (330ppm) より低濃度部

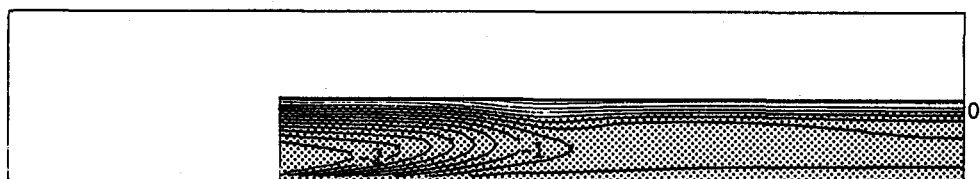


図-12 葉温と気温の温度差分布(植生有り) ハッチは $T > T_L$

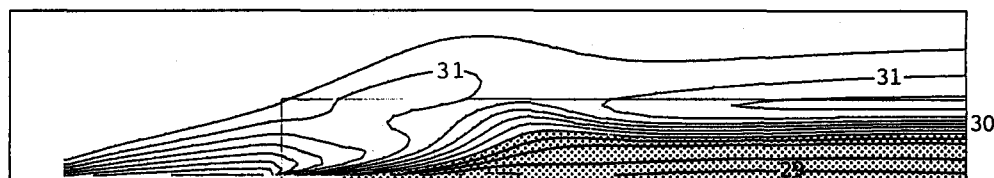


図-13 人口植生(非生物)の温度分布 ハッチは t_a (30°C) より低温部

4. おわりに

今回実験と数値計算により植生群落内の微気象について物理的考察を行うことが出来た。今後は気孔からの物質拡散の機構など、よりミクロな視点からのアプローチを進める一方、植生を含む都市域の気象など群落内気象を踏まえた上でのマクロ的な視野にたった研究を進めている段階である。

なほ、今回の実験に多大な興味を寄せ、夏期休みを利用して自発的に実験の手伝いをしてくれた静岡大学農学部4年生の渡辺満君、長谷川敬君に心から謝意を表したい。

また、本研究は科学研究費「一般研究(A) 63420042」(代表者 日野幹雄)の補助を受けたものであり、深く感謝したい。

(参考文献)

MONTETH, J. L. (1973): PRINCIPLES OF ENVIRONMENTAL PHYSICS

MUNN (1966): DESCRIPTIVE MICROMETEOROLOGY

井上君夫(1985): 水田微気象のシミュレーションモデル、農業気象

近藤純正(1984): 大気境界層の科学、東京堂出版

堀江武(1981): 気象と作物の光合成、蒸散、そして生長に関するシステム生態学的研究、農技研報

矢吹萬(1985): 植物の動的環境、朝倉書店