

## 環境緩和効果を総合的に組み込んだ新しい3次元樹木モデルの開発

—屋外環境共生空間の数値解析—

Development of New Plant Canopy Model for Coupled Simulation of Convection, Radiation and Moisture Transport  
—CFD Study on Evaluation of Human Comfort of Outdoor Symbiotic Environment—

市街地空間の気流・温熱環境予測に適合可能な新しい3次元樹木モデルの開発を行った。本モデルでは、①樹木の流体力学的影響（風速低下と乱れの増加）、②樹木による放射減衰の効果、③樹木からの潜熱発生を含む熱収支の影響の3つの環境緩和効果を組み込んだ。次に、開発した3次元樹木モデルを用いて、市街地空間内における樹木の気流分布への影響や温熱環境の緩和効果について検討した。

吉田 伸治\*・村上 周三\*・持田 灯\*\*・大岡 龍三\*\*\*・富永 禎秀\*\*

Shinji YOSHIDA, Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Ryoza OOKA and Yoshihide TOMINAGA

## 1. 研究目的

従来、街路樹等を用いた緑化による屋外温熱環境緩和手法が建築計画・都市計画に取り入れられている。これに伴い、建築・都市環境工学分野において緑化の屋外温熱環境の緩和効果を数値解析により予測する研究が数多く行われている<sup>文1-5)</sup>。しかしその多くは、緑地の効果として蒸発効率や表面温度などの地表面パラメータを変化させるのみにとどまるなど表面的な取り扱いをする場合が多い<sup>文1)</sup>。2) 一方、3次元空間に適用可能な樹木のモデル化を行い樹木周辺の熱環境の数値計算を行った過去の例として、大岡・中村・平岡<sup>文3)</sup>や高ら<sup>文4)</sup>、萩島ら<sup>文5)</sup>の研究がある。しかし、これらは1) 日射を含む放射に対する樹冠の透過率に関する考察が無い、又は、極めて簡易な数値を仮定して与えている。2) 樹冠を構成する葉群の表面温度に関して、熱収支を解かず実測値やそれに準ずる値を用いており、樹木の物理的特性に基づく予測モデルとなっていない。3) 3次元対流計算による気流解析と連成していない。等の問題点を有する。樹木による環境緩和効果を取り入れた建築計画・都市計画を行うためには、樹木による気候緩和効果の定量的な予測が必要とされる。本報では、既報<sup>文1,6)</sup>で開発された市街地空間の3次元対流・放射・湿気輸送連成解析コードを基に、それに組み込む3次元樹木モデルを開発する。

## 2. 環境緩和効果を総合的に組み込んだ3次元樹木モデルの開発 (図1)

樹木が屋外の温熱環境に及ぼす効果としては次の3つが考えられる (図1)。

- ①樹木の流体力学的影響（風速低下と乱れの増加）
- ②樹木による短波・長波の放射減衰の効果
- ③樹木からの潜熱発生を含む熱収支の影響

従来、樹木並びに植生のこれらの効果をモデル化した研究は農業気象、生態学の分野で主に行われてきた<sup>文7,8)</sup>。しかし、これらは局地気象をはじめとする広領域を対象としているため、水平方向の空間分布の様な1次元モデルであり、そのまま3次元性の強い市街地空間内へ適用することは不可能である。

本報では、前述の建築・都市環境工学分野の樹木モデル、並びに農業気象分野の植生モデル<sup>文7,8)</sup>を参考に、上述の①～③の効果の効果を全てを組み込んだ樹木モデルを開発し、筆者らが既に開発した市街地空間の3次元対流・放

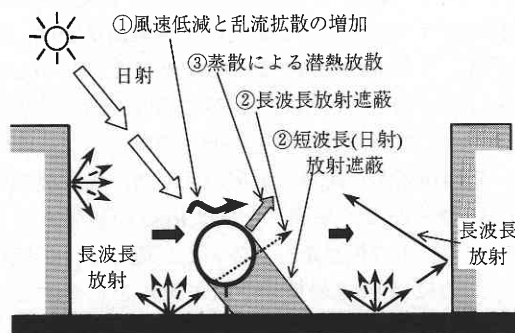


図1 環境緩和効果を組み込んだ樹木モデルの概念図

\*東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*新潟工科大学

\*\*\*福井大学

射・湿気輸送連成解析コードに組み込み、街路樹による緑化が屋外温熱環境に与える影響の解析を行った。

## 2.1 樹木の流体力学的影響の組み込み

植生の流体力学的影響を組み込んだ例は、気象分野の数値モデルに多く見られる<sup>文7-9)</sup>。これらの多くは上述したように水平方向に空間平均を施した1次元モデルであるが、近年、建築分野においては、平岡ら<sup>文10)</sup>は3次元流れ場に対する植生の流体力学的影響を定式化している。これらの研究を参考として、著者らの改良k-εモデルに基づく3次元市街地対流計算コード(文献6参照)に、樹木の流体力学的影響を組み込む。但し、本報では簡単のために、樹木の幹や葉が本当に占有する体積は非常に小さいと考え、樹木の存在するメッシュにおいても流体占有率 $G = 1.0$ としている。

樹木の風速に対する流体力学的抵抗を(1)式でモデル化し、運動方程式の*i*方向成分の右辺に付加する。

$$-\eta C_d a(x_1, x_2, x_3) \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_i \rangle^2} \dots\dots\dots (1)$$

$C_d$ : 樹冠の抵抗係数 ( $C_d = 0.2$ <sup>文8)</sup>) [-]

$a(x_1, x_2, x_3)$ : 樹冠の葉面積密度 [1/m]

$\eta$ : 緑被率(樹木を含むメッシュの水平面積のうち樹木で覆われている水平面積の割合) [-]

また、樹木による乱れの増大の効果を再現するため、乱流エネルギー*k*の方程式、粘性消散率εの方程式の右辺にも、各々に示す項が<sup>3</sup>付加される。

$$k: 2\eta C_d a(x_1, x_2, x_3) \left( \langle u_i \rangle^2 \right)^{3/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon: \frac{\varepsilon}{k} \left\{ 2\eta C_d a(x_1, x_2, x_3) \left( \langle u_i \rangle^2 \right)^{3/2} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

## 2.2 樹木による放射減衰効果の組み込み

樹冠内を放射が通過する場合、その強度は減衰する。もし樹冠を均質なフィルターと仮定するならば、放射減衰はフィルター内の通過距離に比例するものとして与えられる。本モデルでは、この均質フィルターの仮定に基づき、放射減衰のパラメータを、①樹冠の平均葉面積密度、②樹冠通過距離、③葉群の消散係数の3つとした。しかしながら、本来は樹冠の構造は極めて複雑であり、およそ均質とは見なされず、放射減衰は樹冠の通過距離のみならず葉面積密度、葉の傾斜角と配置、放射の入射角、吸収波長帯等の複雑な関数となる。平岡ら<sup>文11)</sup>はRossの植生放射モデルを用いてこれらの検討を行っている。従って、正確な解析を行うためにはRossの植生放射モデルを利用することが望ましいが、計算の簡易さと、第1次近似としては十分な予測精度であることを勘案して、本モデルでは均質フィ

表1 樹木の規模と葉面積密度(文13～16)。

樹種(植物種)	樹高 [m]	葉の繁る範囲 [m]	葉面積密度[1/m]
①イチョウ <sup>文13)</sup>	20	6 ̄ 20	0.4
②キク <sup>文14)</sup>	0.5	0 - 0.5	1.4
③コナラ、クヌギ、シラカシ、ポプラ <sup>文15)</sup>	13	-	4
④ヒノキ <sup>文16)</sup>	10.3	5.5 - 10.3	2.2
⑤マツ <sup>文7)</sup>	20	8 ̄ 20	0.4

(※②は樹木ではないが、植物の場合の例として示す。)

ルターの仮定を採用した。

本報における放射に対する樹木モデルの定義を以下に示す。

- (1) 球体の樹冠で構成。葉と空気層よりなる半径*r*の球(樹冠)が中空に浮いている状態(これを支える幹や枝は存在しない)を想定<sup>注1)</sup>。
- (2) 樹冠を含むメッシュは樹冠の直径2*r* [m]を一辺とする立方体。
- (3) 放射束が樹冠に入射した場合、減衰するものとする。その減衰率は長波短波共に放射粒子1個につき $\{1 - \exp(-k'Fl)\}$ の割合で減衰すると仮定<sup>文7,12)</sup>。

ここで、

$k'$ : 消散係数 [-]

$l$ : 樹冠を含むメッシュに到達した放射粒子が樹冠部分を通る距離 [m]

$F$ : 平均葉面積密度 [1/m]

以上の仮定に基づき、樹木を含んだメッシュ並びに建物や地表面等の各構成要素の形態係数をモンテカルロ法により算出し、放射計算を実行する。

本モデルにおいて、樹木による放射減衰効果を予測する上で、対象とする樹木の種類に応じた適切な葉面積密度、葉群の消散係数のパラメータ値を設定することが、重要である。そこで、街路樹に用いられる樹種の葉面積密度並びに消散係数について文献調査を行った。表1にいくつかの樹種に対する規模と葉面積密度を示す。葉面積密度は樹種の違いにより0.4 [1/m]～4.0 [1/m]の値を示す。一方、消散係数の具体的数値に言及している論文は、非常に少ない。内嶋<sup>文12)</sup>によると、消散係数の値は鉛直方向に細長い葉によって覆われた植生の消散係数は0.4程度の値を示し、逆に水平方向に広がった葉で覆われた植生の消散係数の値は1.0に近い値を示す。本報の計算では、イチョウ、松等の樹木の値を参考に葉面積密度*F*に0.4 [1/m]、消散係数*k'*に0.6 [-]という値を用いる。今後、引き続き文献調査を行い、各種の樹木に対する樹木モデルのパラメータ値を同定していく予定である。

## 2.3 樹冠を構成する葉表面<sup>注2)</sup>における熱収支の組み込み

樹冠を構成する葉表面上で熱収支を解き、平均葉群表面

温度  $T_p$  を算出する。尚、本モデルでは葉の熱容量は十分小さいものと仮定し、熱収支式の中で熱伝導項を省略している。

$$S_p + R_{DP} + H_p + LE_p = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$H_p = A_p \alpha_c (T_{ap} - T_p) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$LE_p = A_p \alpha_w (f_{ap} - f_{sp}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$S_p$  : 樹冠を構成する葉群に吸収される短波長 (日射) 放射伝熱 [W]

$R_{DP}$  : 樹冠を構成する葉群に吸収される長波長放射伝熱 [W]

$H_p$  : 樹冠を構成する葉群に流入する顕熱 [W]

$LE_p$  : 樹冠を構成する葉群に流入する潜熱 [W]

$L$  : 蒸発潜熱 ( $2.5 \times 10^{-6}$  [J/kg])

$A_p$  : 樹冠を構成する葉群の表面積の合計 [m<sup>2</sup>]

( $A_p$  = 樹冠体積  $\times$  平均葉面積密度)

$\alpha_c$  : 対流熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>K]

$T_{ap}$  : 樹冠を含むメッシュ内の平均空気温度 [K]

$T_p$  : 樹冠を構成する葉群表面の平均温度 [K]

$\alpha_w$  : 湿気伝達率 [kg/m<sup>2</sup>sPa] ( $\alpha_w = 7\beta\alpha_c$ , ( $\beta$  : 蒸発効率 [-]))

$f_{ap}$  : 樹冠を含むメッシュ内の平均水蒸気分圧 [kPa]

$f_{sp}$  : 樹冠を構成する葉群表面の平均飽和水蒸気圧 [kPa] ( $T_p$  の関数)

(4) 式の各項の符号は樹冠への流入を正、樹冠からの流出を負としている。本来 (6) 式における湿気伝達率  $\alpha_w$  は光合成による葉の気孔開度と密接に関連しており、日射受熱量をパラメータとして含む複雑な関数形となるが、今回は第 1 次近似として単純にルイスの関係と蒸発効率  $\beta$  を用いて、対流熱伝達率  $\alpha_c$  に比例するものとして (7) 式より与えた。

$$\alpha_w = 7\beta\alpha_c \left( 7 \left[ Kkg / JkPa \right] : \text{ルイス数} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

本来、植生からの蒸散量は、葉の気孔開度等、植物生理作用の影響を強く受ける。農業気象分野等では、この植物生理作用を考慮した植生モデルも開発されている<sup>文 8,17)</sup>。このような植物生理に基づく水分蒸散モデルを用いた場合の利点としては、日射量の変化や土壌水分量の変化等の影響を組み込むことが可能であり、時々刻々と変化する気象条件や土壌条件に対する非定常解析が可能となる。しかしながら、入力パラメータが増大し、計算が煩雑となる。又、樹種に応じた入力パラメータの同定が必要となる等の取り扱いの難しさも生じる。本報では、ある一定の気象条件下

での樹木の温熱環境緩和効果を調べることを主目的としているため、第 1 次近似として、植生の生理作用はモデルに組み込まなかった。しかしながら今後は、本報で開発された樹木モデルを気象条件や土壌条件が非定常に変化する環境においても適応可能なモデルに拡張すべく、植生の生理作用の効果を組み込む予定である。2.5 節で蒸散過程に植生の生理作用を組み込んだ他の研究例について紹介する。

## 2.4 対流計算への影響

式 (5), (6) より樹冠を構成する葉群から流出する顕熱フラックス  $-H_p$ 、潜熱フラックス  $-LE_p$  が算出される。対流計算では、この潜熱及び顕熱フラックスより、樹冠を含むメッシュ内で発生する温度フラックス  $-H_p/\rho C_p$ 、水蒸気フラックス  $-LE_p/\rho L$  を算出し、温度の輸送方程式 ((8) 式)、及び絶対湿度 (総水分混合比) の輸送方程式 ((9) 式) に組み込む。

$$\frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \langle u_i \theta \rangle + \frac{1}{\rho C_p} \frac{-H_p}{V} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial \langle q_w \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle q_w \rangle}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \langle u_i q_w \rangle + \frac{1}{\rho L} \frac{-LE_p}{V} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$V$  : 樹冠を含むメッシュの体積 [m<sup>3</sup>]

## 2.5 植生の水分移動モデルのレビュー

農業気象分野等では、植生の水分移動モデルとして、植物生理に基づく土壌-植生-大気的水分移動についても検討が行われており、これをもって土壌-植生-大気 (SPAC; Soil-Plant-Atmosphere Continuum) 系を包括するモデルは完結する。この SPAC の主な研究としては、Cowan<sup>文 18)</sup>、Goudriaan<sup>文 19)</sup>、Herkelrath<sup>文 20)</sup>、Waggror. P. E<sup>文 21)</sup>、井上<sup>文 22)</sup>、堀江<sup>文 23)</sup> 等の研究が有る。又、これらの研究を踏まえ数値気候モデル等で利用するために開発された 1 次元植生モデルとして Seller P. J. らの SiB モデル<sup>文 8)</sup>、神田らの NEO-SPAM<sup>文 17)</sup> 等が有る。以下この 2 つのモデルについて解説する。

### (1) 植生内 (茎内) での水分移動

NEO-SPAM では、植生内の水分移動を次の植生内の水分ポテンシャル ( $\Psi_p$  の 1 次元拡散方程式を解くことにより与える。

$$C_p \frac{\partial \Psi_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left( K_p \frac{\partial (\Psi_p - x_3)}{\partial x_3} \right) - W_p \quad \dots\dots\dots (10)$$

$C_p$  : 植生の比水分容量 [1/m]

$K_p$  : 植生内の透水係数 [m/s]

$W_p$  : 水分ポテンシャル移動方程式の生成項 [s]

(根の場合は吸収、葉の場合は蒸散となる)

更に SiB モデルでは、拡散方程式を解かず、次の伝熱モ

デルに類した移動モデルを用いて、植生内の水分移動量  $E_d$  を与える.

$$E_d = \left( \frac{\Psi_r - \Psi_i - h_a}{\frac{r_{plant}}{r_{plant} - r_{soil}}} \right) \rho_w \dots\dots\dots (11)$$

$\rho_w$ : 水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\Psi_r$ : 根の水分ポテンシャル [m]

$\Psi_i$ : 葉の水分ポテンシャル [m]

$h_a$ : 蒸発個所の高さ [m]

$\frac{r_{plant}}{r_{plant} - r_{soil}}$ : 地表から上の茎部分での水分移動抵抗 [s]

$\frac{r_{plant}}{r_{plant} - r_{soil}}$ : 地表から下の根の部分での水分移動抵抗 [s]

## (2) 土壌から根への水分吸収

NEO-SPAM では (10) 式中の、土壌から根への水分吸収を表す  $W_p$  を次式で与えている.

$$W_p = - \left( \frac{\omega}{\omega_s} \right)^n \xi l (\Psi_s - \Psi_r) (n = 2/3) \dots\dots\dots (12)$$

$\Psi_s$ : 土壌の水分ポテンシャル [m]

$\omega$ : 土壌水分量 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$\omega_s$ : 飽和土壌水分量 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$\xi$ : 単位根長あたりの膜浸透率 [m<sup>2</sup>/ms],

$l$ : 土壌の単位体積あたりに存在する根の長さ [m/m<sup>3</sup>]

SiB モデルでは根の水分ポテンシャル  $\Psi_r$  を各土壌層深さにおける土壌水分ポテンシャル  $\Psi_i$  の土壌層厚さによる重み付けで与える.

$$\Psi_r = \frac{1}{z_d} \sum_0^{z_d} \Psi_i D_i \dots\dots\dots (13)$$

$\Psi_i$ : 地中第  $i$  層の土壌水分ポテンシャル [m],

$D_i$ : 地中第  $i$  層の厚み [m]

$z_d$ : 根の最高深さ [m]

(11) 式と (3) 式を連成することにより土壌から植生 (茎) への水分移動量が与えられる.

## (3) 葉から大気への水分の蒸散

NEO-SPAM では (10) 式において葉から大気への蒸散量  $W_p$  を次式で与えている.

$$W_p = \kappa_h u A_p (H_s - H) \dots\dots\dots (14)$$

$$\kappa_h u = \beta u^{1/2} O_p^{2/3} \dots\dots\dots (15)$$

$\kappa_h$ : 水蒸気交換率 [-]

$H_s$ : 葉表面の飽和比湿 [kg/kg']

$u$ : 風速 [m/s]

$H$ : 大気の比湿 [kg/kg']

ここで、 $O_p$ : 葉の気孔開度であり、日射  $S'_p$ , 葉温  $T'_p$ ,

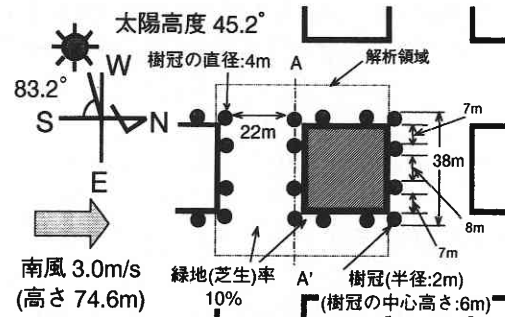


図2 解析対象

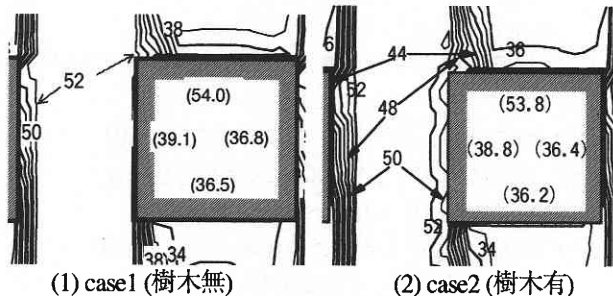


図3 地表面温度分布 [°C]

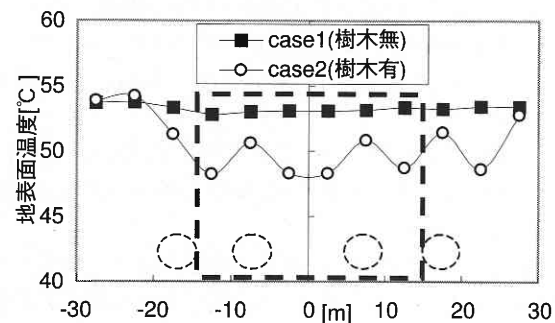


図4 地表面温度分布 (A-A'ライン上)

葉内水分  $\Theta$  の関数と考え、以下のようにモデル化している.

$$O_p = \left[ \frac{S'_p}{c_1 + c_2 S'_p} + c_3 \right] \left( c_4 T'_p + c_5 \right) \exp(-c_6 \Theta) \dots\dots\dots (16)$$

$S'_p$ : 葉面に吸収される日射量

$T'_p$ : 葉温

$\Theta$ : 葉内水分

$c_1 \sim c_6$ : 経験常数

このように、NEO-SPAM では植生からの蒸散に植物生理作用を組み込んだモデルとなっている.

一方、SiB モデルでは (11) 式と同様な移動モデルにより、葉から大気への蒸散量  $E_c$  を与える.

$$E_c = (f_c - f_a) \left( \frac{w_c}{r_b} + \frac{1 - w_c}{r_b - r_c} \right) \dots\dots\dots (17)$$

$f_c$  : 気孔内の飽和水蒸気圧 [Pa]

$f_a$  : 大気の水蒸気圧 [Pa],  $w_c$  : 葉表面の濡れ率 [-]

$\bar{r}_c$  : 気孔内部から葉表面までの水分移動抵抗の平均値 [s/mPa]

$\bar{r}_b$  : 葉表面から境界層外側までの水分移動抵抗 [s/mPa]

$\bar{r}_c$  は個々の葉の気孔抵抗  $r_s$  を用いて次式で表される.

$$\frac{1}{\bar{r}_c} = V_c N_c f(T_p) f(\delta f) f(\Psi_i) \int_0^{L_t} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{O(\xi, \eta)}{r_s} \sin \eta d\xi d\eta dL \cdots (18)$$

$$r_s = \frac{a}{b + P \cdot n} + c \cdots \cdots (19)$$

$L_t$  : 葉面積指数

$V_c$  : 植生キャノピーの占める割合

$N_c$  : 全ての葉のうち光合成が可能な葉の割合

$O(\xi, \eta)$  : 葉の向きの分布関数

$T_p$  : 葉温

$\xi, \eta$  : 葉の方位角と傾き

$\Psi_i$  : 葉の水分ポテンシャル

$d_f$  : 大気の水蒸気圧と飽和水蒸気圧の差 ( $= f_{as} - f_a$ ),

$f(T)$ ,  $f(\delta f)$ ,  $f(\Psi_i)$  : 各々  $T$ ,  $\delta f$ ,  $\Psi_i$  に関わる気孔抵抗に対する影響因子

$P$  : PAR (光合成が活発となる  $0.4 \sim 0.72 [\mu m]$  の波長の日射) フラックス

$n$  : 葉表面の法線ベクトル

$a \sim b$  : 植物種によって異なる経験常数

(18), (19) 式から分かるように SiB モデルの蒸散課程も植物生理に基づくモデルとなっている. 今後はこれらのモデルを参考として, 植物生理機能を組み込んだ樹木モデルへの改良を行う予定である.

### 3. 市街地の対流・放射・湿気輸送連成解析における樹木モデルの組み込み

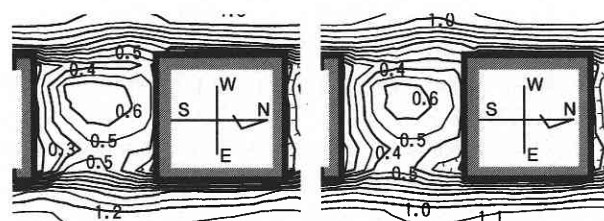
本章では, 前章 (2 章) で開発された 3 次元樹木モデルを組み込んだ市街地を対象とした対流・放射・湿気輸送連成解析を行い, 街路樹による緑化が屋外温熱環境に与える影響を解析する.

#### 3.1 計算対象 (図 2)

既報<sup>文16)</sup>と同じく同一形状の立方体建物モデル (1 辺 30 m) で構成される均等街区. 計算ケースは 2 ケース. case1 は解析領域内に樹木が無い場合であり, case2 では図 5 に示す様に半径 2 m の樹冠を有する樹木モデルを配置した場合を想定している. 地表面の被覆状況は両ケース共に緑被率 10 % (芝生のような丈の低い植物が全土地表面のうちの 10 % を覆っている) を想定し, 地表面の蒸発効率を 0.03 としている.

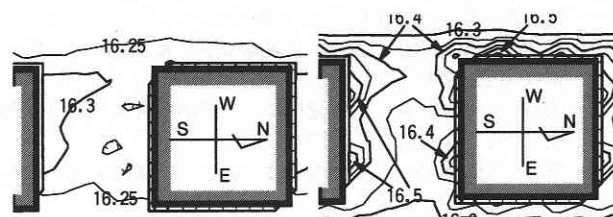
#### 3.2 計算条件

乱流モデルは乱流熱フラックスの評価に浮力効果を組み



(1) case1 (樹木無) (2) case2 (樹木有)

図 5 スカラー風速分布 (高さ 3 m) [m/s]



(1) case1 (樹木無) (2) case2 (樹木有)

図 6 絶対湿度分布 (高さ 3 m) [g/kg]

込んだ改良 k-ε モデル<sup>文24)</sup>, 並びに, 建物風上側での乱流エネルギー k の過大生産を抑制する改良 Launder-Kato モデル<sup>文25,26)</sup>を併せて組み込んだモデルを使用. 放射計算方法, 境界条件等については両ケース共に既報<sup>文16)</sup>と同じ.

#### 3.3 計算結果 (図 3 ~ 6)

図 3 に地表面温度分布を示す. また図 4 に図 2 の A-A' ライン上の地表面温度分布を示す. 樹木のある case2 は, 樹木の無い case1 に比べて, 木陰になっている部分において, 最大約 5℃ の地表面温度低下が見られる. 図 5 に高さ 3 m における水平断面のスカラー風速分布を示す. case2 は, case1 に比べて, 全般に風速が低下しており, 樹木による風速低減効果が再現されている. 図 6 に図 5 と同じく高さ 3 m における絶対湿度の水平分布を示す. case2 は case1 に比べ, 樹木から発生する潜熱フラックスのため, 樹木位置において大きな湿度を示す.

## 4. 結 論

- (1) 樹木の①流体力学的影响, ②放射減衰の効果, ③潜熱発生を含む熱収支の影響をトータルに考慮した 3 次元対流・放射・湿気輸送解析に組み込み可能な 3 次元樹木モデルの開発を行った.
- (2) 本樹木モデルを用いた計算では, 樹木による日射減衰効果, 風速低減効果, 放湿効果が再現された.
- (3) 今後, 実験・実測結果を参考にして, 各種の樹木に対する樹木モデルのパラメータ値を同定していくと共に, 植物生理作用を考慮した土壌-植生-大気の水分移動モデルを組み込む予定である.

(1998 年 11 月 6 日受理)

## 注

- 注1) 即ち、本報で定義する樹冠とは、樹木の葉群とその空隙の空気より構成される。
- 注2) ここで葉表面とは、個々の葉の表面を示すものではなく、樹冠を構成する葉群の合計としての葉の表面を示す。

## 参考文献

- 1) 吉田, 村上, 持田, 富永, 大岡, 足永, 生産研究, 第 50 巻, 第 1 号, pp. 1265-1268, 1997 年 8 月.
- 2) 伊藤, 洞田, 森川, 西村, 日本建築学会大会学術講演会講演梗概集 (環境工学), pp. 957-958, 1996 年 9 月.
- 3) 大岡, 中村, 平岡, 日本建築学会大会学術講演会講演梗概集 (D), pp. 859-860, 1989 年 10 月.
- 4) 高, 三浦, 尾島, 日本建築学会大会学術講演会講演梗概集 (D), pp. 1329-1330, 1994 年 9 月.
- 5) 萩島, 片山, 林, 池沢, 香川, 日本建築学会大会学術講演会講演梗概集 (D), pp. 617-618, 1995 年 8 月.
- 6) 吉田, 村上, 大岡, 持田, 富永, 日本建築学会大会学術講演会講演梗概集 (D-2), 939-940, 1998 年 9 月.
- 7) Yamada, T., J. Meteorol. Soc. Japan 60, pp. 439-454, 1982.
- 8) p., J., Sellers, T., Mintz, Y., C., Sud, A., Dalcher, J. of The Atmospheric Science, Vol. 43, No. 6, 505-531, 1986. 3.
- 9) Wilson, N. R. and Shaw, R. H. A Higher Order Closure Model for Canopy Flow, J. App. Meteorol. 16, pp. 1197-1205, 1977.
- 10) 平岡, 丸山, 中村, 桂, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 406 号, pp. 1-9, 1989 年.
- 11) 平岡, 中村, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 416 号, pp. 17-24, 1990 年 10 月.
- 12) Uchijima, Z., Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., Vol. A, 243-263.
- 13) 神田, 森脇, 横山他, 天気, Vol. 44, No. 10, 713-731, 1997. 10.
- 14) 古川, 佐々木, 森田, 国立公害研究所研究報告, 第 82 号, 1985, 123-136.
- 15) 久野, 今月の農業, 12 月号, 1991, 44-48.
- 16) A. Higashihara, K. Yamaji, Ecological Research, 8, 313-318, 1993.
- 17) 神田学, 日野幹雄, 水文・水資源学会誌, 第 3 巻 3 号, 1990, 37-46.
- 18) Cowan I. R., 1968, J. Roy. Meteorol. Soc. 94: pp. 523-544.
- 19) Goudriaan J., 1977, Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- 20) Herkelrath W. N., Miller E. E. and Garder W. R., Soil Sci. Am. J. vol. 41, pp. 1039-1043, 1977.
- 21) Waggoner p. E., 1975, Micro meteorological models in Vegetation and the Atmosphere, vol. 1, edited by Monteith, J. L., pp. 205-228.
- 22) 井上君夫, 1985, 耕地環境におけるエネルギーと物質の交換に関する農業気象学的研究, 学位論文.
- 23) 堀江武, 1981, 農業技術研究所報告, A 第 28 号.
- 24) 野口, 村上, 持田他, 建築学会大会梗概集 (環境), 1994. 9, 65-66.
- 25) B. E. Launder, M. Kato, ASME Fluid Eng. Conference, 1993.6, 20-24.
- 26) 土谷, 村上, 持田他, 建築学会大会梗概集 (構造), 1994. 8, 167-168.

## (本論文で用いた主な記号)

<> : 時間平均又はアンサンブル平均  
 $u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) : 風速 [m/s]  
 $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) : 空間 3 方向の座標 ( $i = 1$  : 主流方向,  $i = 2$  : 主流に直交方向,  $i = 3$  : 鉛直方向)  
 $C_d$  : キヤノピーの抵抗係数 ( $C_d = 0.2$ ) [-]  
 $a(x, y, z)$  : 樹冠の葉面積密度 [1/m],  
 $F$  : 平均葉面積密度 [1/m]  
 $\eta$  : 緑被率 (樹木で覆われている領域の割合) [-]  
 $l$  : 樹冠を含むメッシュに到達した放射粒子が樹冠部分を通してする距離 [m]  
 $S_p$  : 樹冠を構成する葉群に吸収される短波長 (日射) 放射伝熱 [W]  
 $R_{DP}$  : 樹冠を構成する葉群に吸収される長波長放射伝熱 [W]  
 $H_p$  : 樹冠を構成する葉群に流入する顕熱 [W]  
 $LE_p$  : 樹冠を構成する葉群に流入する潜熱 [W]  
 $A_p$  : 樹冠を構成する葉群の表面積の合計 [m<sup>2</sup>]  
 ( $A_p$  = 樹冠体積  $\times$  平均葉面積密度)  
 $\alpha_c$  : 対流熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>K]  
 $T_{ap}$  : 樹冠を含むメッシュ内の平均空気温度 [K]  
 $T_p$  : 樹冠を構成する葉群表面の平均温度 [K]  
 $\alpha_w$  : 湿気伝達率 [kg/m<sup>2</sup>skPa]  $\alpha_w = 7\beta\alpha$ , ( $\beta$  : 蒸発効率 [-])  
 $f_{ap}$  : 樹冠を含むメッシュ内の平均水蒸気分圧 [kPa]  
 $f_{sp}$  : 樹冠を構成する葉群表面の平均飽和水蒸気圧 [kPa] ( $T_p$  の関数)  
 $L$  : 蒸発潜熱 ( $2.5 \times 10^{-6}$  [J/kg])  
 $\theta$  : 温度 [°C],  
 $q_w$  : 絶対湿度 [g/kg]  
 $V$  : 樹冠を含むメッシュの体積 [m<sup>3</sup>]  
 $C_p$  : 植生の比水分容量 [1/m]  
 $K_p$  : 植生内の透水係数 [m/s]  
 $W_p$  : 水分ポテンシャル移動方程式の生成項 (根の場合は吸収, 葉の場合は蒸散となる) [s]  
 $\Psi_r$  : 根の水分ポテンシャル [m],  
 $\Psi_l$  : 葉の水分ポテンシャル [m],  $h_a$  : 蒸発個所の高さ [m]  
 $r_{plant}$  : 地表から上の茎部分での水分移動抵抗 [s]  
 $r_{plant}$  : 地表から下の根の部分での水分移動抵抗 [s]  
 $\Psi_i$  : 地中第  $i$  層の土壌水分ポテンシャル [m]  
 $D_i$  : 地中第  $i$  層の厚み [m]  
 $z_d$  : 根の最高深さ [m]  
 $\Psi_s$  : 土壌の水分ポテンシャル [m]  
 $\omega$  : 飽和土壌水分量 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 $\xi_s$  : 単位根長あたりの膜浸透率 [m<sup>2</sup>/ms]  
 $\ell$  : 単位体積土壌中の根長 [m/m<sup>3</sup>]  
 $\kappa_h$  : 水蒸気交換率 [-]  
 $H_s$  : 葉表面の飽和比湿  
 $H$  : 大気の水蒸気 [kg/kg]  
 $O_p$  : 葉の気孔開度  
 $u$  : 風速 [m/s]  
 $S'_p$  : 葉面に吸収される日射量  
 $T'_p$  : 葉温  
 $\Theta$  : 葉内水分  
 $c_1 \sim c_6$  : 経験定数  
 $w_c$  : 葉表面の濡れ率 [-]  
 $f_c$  : 気孔内の飽和水蒸気圧 [Pa]  
 $f_a$  : 大気の水蒸気圧 [Pa]  
 $r_c$  : 気孔内部から葉表面までの水分移動抵抗の平均値 [s/mPa]  
 $r_b$  : 葉表面から境界層外側までの水分移動抵抗 [s/mPa]  
 $r_s$  : 個々の葉の気孔抵抗  
 $V_c$  : 植生キヤノピーの占める割合  
 $L_r$  : 葉面積指数  
 $O(\xi, \eta)$  : 葉の向きの分布関数  
 $T_a$  : 気温  
 $N_c$  : 全ての葉のうち光合成が可能な葉の割合  
 $\xi, \eta$  : 葉の方位角と傾き  
 $\Psi_l$  : 葉の水分ポテンシャル [m]  
 $\delta_s$  : 大気の水蒸気圧と飽和水蒸気圧の差 ( $= f_a - f_c$ ),  
 $f(T), f(\delta_f), f(\Psi_l)$  : 各々  $T, \delta_f, \Psi_l$  に関わる気孔抵抗に対する影響因子  
 $n$  : 葉表面の法線ベクトル  
 $P$  : PAR (光合成が活発となる  $0.4 \sim 0.72$  [ $\mu m$ ] の波長の日射) フラックス  
 $a \sim b$  : 植物種によって異なる経験定数