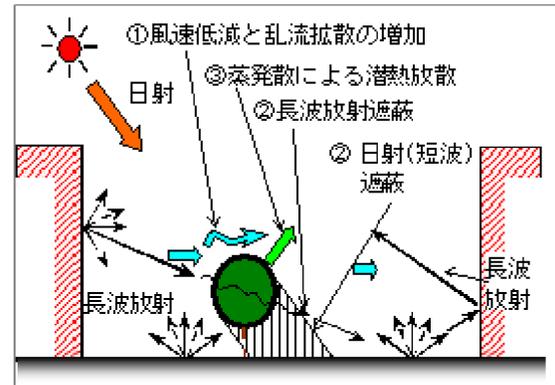


# 植生蒸散モデルの屋外温熱環境解析手法への組み込みに関する研究

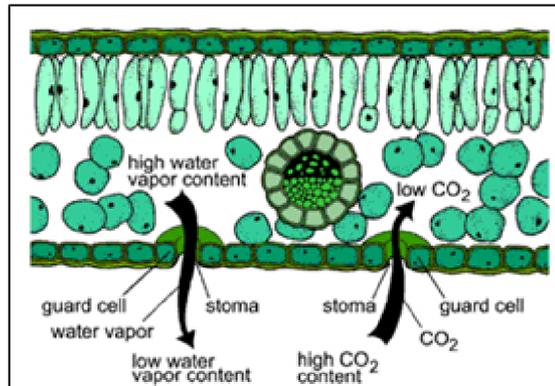
## 先行研究

ヒートアイランド現象による都市熱環境の悪化に対し、樹木による環境改善効果が期待されている。コンピュータを利用した数値予測手法により、樹木の効果をモデル化する多くの研究が行われている。



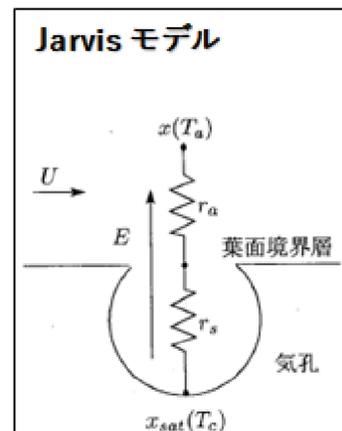
## 課題

しかしながら、植物蒸散に関する生理モデルはいくつか提案されているものの、街区における温熱環境の数値予測に利用されているものは殆ど少ない。



## 目的

したがって、既存の植物生理モデルの予測精度の検討をしてそれらを数値解析手法に組み込むため、実測により (1) 環境因子が樹木、特に街路樹の蒸散量に与える影響を説明し、(2) 既存の植物生理モデルの予測精度を検討する。



## 検討したモデル

### Jarvis と小杉モデル

$$E_1 = 18 \times E_j \quad (1)$$

$$E_j = \frac{(g_s \times g_a)}{(g_s + g_a)} (W_i - W_a) \quad (2)$$

$$g_s = g_{smax} \times f_Q(Q) \times f_T(T) \times f_D(D) \quad (3)$$

$$f_Q(Q) = \frac{Q}{Q + \left(\frac{g_{smax}}{a}\right)} \quad (4)$$

$$f_T(T_a) = \left(\frac{T_a - T_l}{T_o - T_l}\right) \left\{ \left(\frac{T_h - T_a}{T_h - T_o}\right)^{\frac{T_h - T_o}{T_o - T_l}} \right\} \quad (5)$$

$$f_D(D) = 1 - b_1 \times D \quad (6)$$

$$\text{or } f_D(D) = \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{b_1}\right)^{b_2}} \quad (7)$$

### 神田モデル

$$E_2 = K_H \times u \times (H_s - H) \quad (8)$$

$$K_H \times u = \beta \times (O_p)^{\frac{2}{3}} \times (u)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$O_p = O_{pmax} \times f_1(R_n) \times f_2(T) \times f_3(\theta_L) \quad (10)$$

$$f_1(R_n) = \frac{R_n}{(c_1 + c_2 \times R_n)} + c_3 \quad (11)$$

$$f_2(T) = c_4 \times T + c_5 \quad (12)$$

$$f_3(\theta_L) = \exp(-1 \times c_6 \times \theta_L) \quad (13)$$

$E_1$ : 蒸散速度 [ $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]  $W_i$ : 葉面上での飽和水蒸気分圧 [ $\text{mb}/\text{mb}$ ]  
 $W_a$ : 大気の水蒸気分圧 [ $\text{mb}/\text{mb}$ ]  $g_{smax}$ : 最大気孔コンダクタンス  
 $g_s$ : 気孔コンダクタンス [ $\text{mole}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]  $g_a$ : 葉面境界層コンダクタンス [ $\text{mole}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]  
 $Q$ : 光合成有効放射 [ $\mu\text{mole}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]  $T_a$ : 気温 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  $D$ : 飽差 [ $\text{kPa}$ ]  $T_o$ : 最適温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  $T_l$ : 最低限界温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_h$ : 最高限界温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  $E_2$ : 水蒸気交換量 [ $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]  $K_H$ : 水蒸気交換率 [-]  
 $\beta$ : 最大水蒸気交換率 [-]  $u$ : 風速 [ $\text{m}/\text{s}$ ]  $H_s$ : 葉温での飽和水蒸気量 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]  
 $H$ : 大気水蒸気量 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]  $c_1$ : 気孔状況による定数 [-]  $c_2$ : 気孔開度 [-]  $c_3$ : 最大の気孔開度 [-]  $c_4$ : 日射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  $c_5$ : 葉温 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  $c_6$ : 葉内水分 [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ]

# 植生蒸散モデルの屋外温熱環境解析手法への組み込みに関する研究

## 実測概要

### 時期：

2009年9月14日-22日

### 時間：

AM 9:00—PM 5:00

### 設置場所：

周囲の建物の日影にならないように、東京大学生産研究所千葉実験所内の比較的開けた敷地を選定した。

### 測定対象：

街路樹で良く使用される常緑広葉樹シラカシを選定しポットに植えた樹木（高さ2.4m、樹冠の幅0.44m）を測定対象。



## 測定項目

環境因子には気温、相対湿度、風速、及び光合成有効放射（PAR）がある。蒸散に関する因子には、気孔コンダクタンス、葉面温度、葉面周囲の湿度、樹木の蒸散量がある。

	測定項目	サンプル時間	測定機器
環境因子	1 温湿度	5分	超音波風速計、 気象観測ステーション
	2 風速	0.1秒	
	3 全天日射量	5分	
	4 PAR(光合成有効放射)	5分	PARセンサー
気孔蒸散	5 気孔コンダクタンス	30分	ポロメーター
	6 葉面温度	30分	
	7 葉面周囲の湿度	30分	電子秤
	8 樹木の蒸散量	30分	

## 測定方法

### 環境因子

風速は超音波風速計を用い10Hzで測定した。気温、相対湿度、全天日射量については、気象観測ステーションを用い5分毎に測定した。光合成有効日射量（PAR）は光合成量子センサーを用い5分毎に測定した。

### 蒸散に関する因子

リーフポロメーターを利用し樹木の各方位に位置する葉を1枚ずつ測定サンプルと選定し30分毎にそれぞれを測定した。

樹木蒸散量測定は、ポットに植えた樹木の重量の減少量を30分毎に測定し樹木全体の蒸散量とした。



超音波風速計



気象観測ステーション



PARセンサー



リーフポロメーター



樹木蒸散量の測定



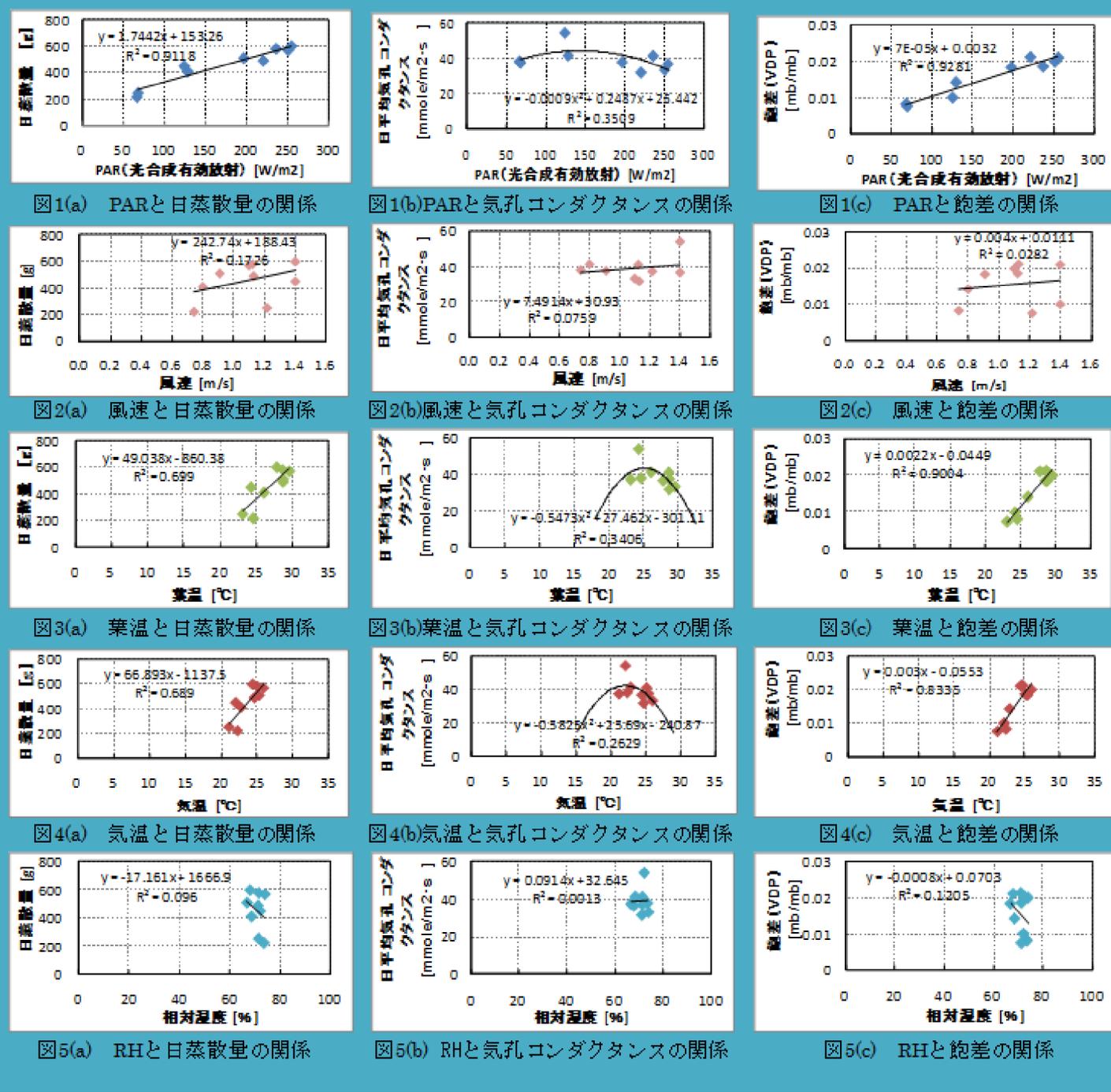
ポットの上に防水施設

# 植生蒸散モデルの屋外温熱環境解析手法への組み込みに関する研究

## 環境因子が樹木の蒸散量に与える影響の結果

蒸散作用理論式  $E = [1 / (1/g_a + 1/g_c)] \times [X_{sat}(T_c) - X(T_a)]$

蒸散速度 (単位面積・時間の蒸散量)      気孔コンダクタンス      飽差



### PARとの関係

増加関係が見られ決定係数も0.922であり、正相関は非常に顕著である。主な原因は葉が日射を受け光合成作用によって気孔を開放したと考える。しかし左式に示すように蒸散量は気孔開度に影響を受けるだけでなく飽差の影響もあり、PARの増加とともに飽差も増加するので蒸散量はPARとの増加関係が顕著となった。

### 風速との関係

増加関係は見られたが、決定係数は僅か0.173である。葉面境界層の理論により、葉の周囲風速が増加すると葉面付近の境界層の厚さは薄くなり、境界層抵抗が小さくなるため、蒸散量は増加する。更に、風速が気孔開度や飽差に与える影響も小さいのでそれら間の決定係数はPARの場合よりも小さくなると考えられる。

### 葉温及び気温との関係

増加関係が見られ決定係数は0.699であり比較的高いことがわかった。植物生理学により、温度の上昇は光合成作用に参与する酵素の活性を促進させ、間接的に気孔を広げるが、葉温と気孔の関係にはある最大値に達すると減少する傾向もあるが、葉温の増加による飽差の上昇効果が強いために、蒸散量は葉温の上昇に伴い増加する傾向が顕著になった。気温は葉温とほぼ同じ結果が見られ、原因も同じと考えられる。

### 相対湿度との関係

やや減少する傾向が見られたが、決定係数は0.096であり、非常に弱いであった。考えられる原因は空気中に相対湿度の増加による水蒸気量の増加 (同温度で)、葉の中における水蒸気量との差、すなわち飽差は減少し蒸散量も減少する。しかしその効果は弱い(図5(c))ため、この減少傾向も小さいと考えられる。

# 植生蒸散モデルの屋外温熱環境解析手法への組み込みに関する研究

## 既存の植物生理モデルの予測精度の検討

### モデル同定の結果

同定した結果は表1に示すように、小杉の $R^2$ （決定係数）は45%となりJarvisの42%より高いことが見られるので、全期間のデータに対して飽差関係式をS型曲線に修正した小杉モデルは確かに $g_s$ に対しての予測精度を向上した。更に、日毎に各モデルの推定値と実測値を比較すると（図6）、平均に言えば推定値は実測値とほぼ一致でありJarvisと小杉による推定値は全期間の平均で38.8、39.0mmole/m<sup>2</sup>・sとなり、実測値の39.1mmole/m<sup>2</sup>・sとの差は0.3mmole/m<sup>2</sup>・s以下であった。

神田モデルのパラメータの同定については、モデルの中に $g_s$ という変数はないため、直接に実測した積算蒸散量より同定した。また、秤より実測した30分毎の積算蒸散量はばらついているので、同定のデータは2時間間隔での積算蒸散量と環境因子の平均値を用いた。同定の方法にはJarvisと小杉モデルで使った方法と同じで求め、同定したの $R^2$ は表2に示すように21%であった。

		$g_{smax}$	a	$b_1$	$b_2$	$T_1$	$T_0$	$T_h$	$R^2$
Jarvis	初期値	0.1	0.00479	0.122	-	-	44	45	-
	同定値	0.091	0.00171	0.248	-	5.0	36.4	50.0	0.42
小杉	初期値	0.45	0.0045	4.58	4.1	-	44	45	-
	同定値	0.099	0.00203	2.23	2.86	5.0	41.9	46.3	0.45

		$\beta$	$O_{pmax}$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$R^2$
神田	初期値	4.3	$2.0 \times 10^{-6}$	144	0.77	0.2	0.0175	0.125	-
	同定値	4.3	$3.67 \times 10^{-6}$	144	0.77	0.2	0.0175	0.125	0.21

### モデルの予測精度の検討結果

三つのモデルの推定結果を図7に示す。Jarvisと小杉モデルの方は平均的に実測値より大きい傾向が見られたが、神田モデルの方は実測値より小さい傾向が見られた。Jarvisと小杉モデルの結果は殆ど一致している。各日の平均誤差の絶対値はJarvisと小杉の方は両者とも25%であり、神田モデルの29%より低いので、Jarvisと小杉のモデルは蒸散量の推定に対して若干予測精度が高いが、その差は殆どない。

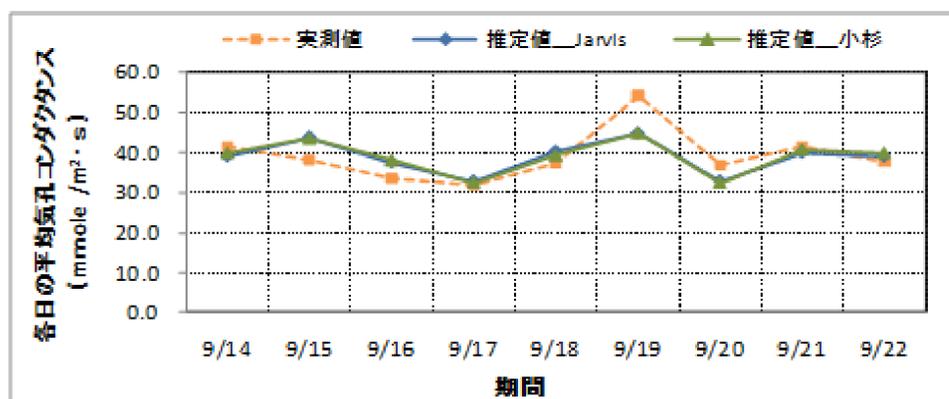


図6 Jarvisと小杉モデルによる $g_s$ の推定値と実測値の比較

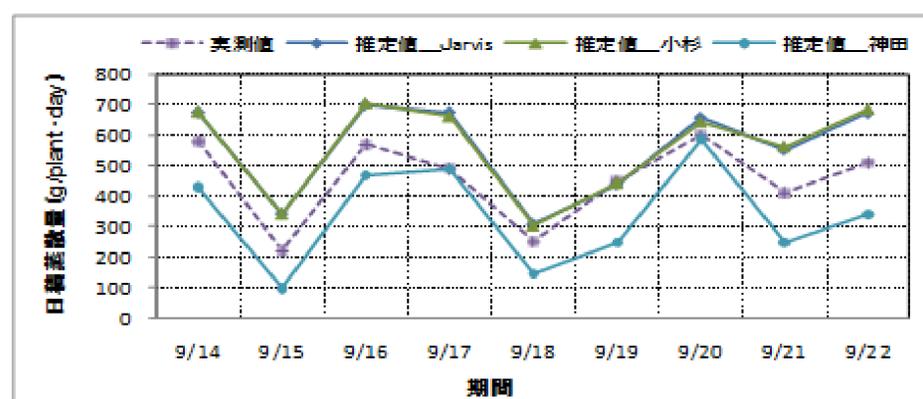


図7 三つのモデルによる日積蒸散量の推定値と実測値の比較

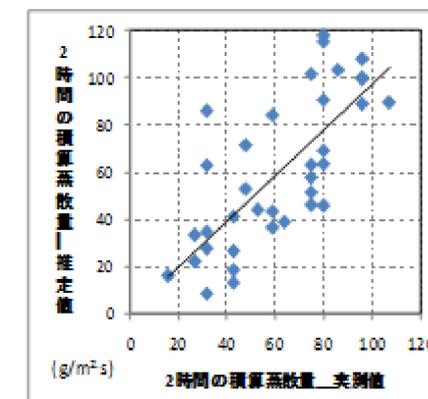


図8 神田モデルの同定による推定値と実測値の分布