

(5) 都市熱環境における植物の役割に関する研究

— SiBモデルに基づく数値シミュレーション —

SIMULATION STUDY ON THE ROLE OF VEGETATION IN THE DETERMINATION OF URBAN LAND SURFACE TEMPERATURE: APPLICATION OF SIMPLE BIOSPHERE MODEL

大濱隆司* 上野賢仁* 井村秀文*

Takashi OHHAMA*, Takahito UENO*, Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; Thermal environment of urban areas is largely determined by the physical structure of their land surface. Green tracts, in particular, play an important role in the heat balance through evapotranspiration. In order to quantify the role of urban vegetation in the determination of surface temperature, this study conducts numerical simulations based on Simple Biosphere model(SiB) and analyzes the relationship between physical peculiarities of vegetated land surface and temperature distribution. SiB was originally developed for GCMs, in order to calculate the transfer of energy, mass and momentum between the atmosphere and the vegetated surface of the earth. The vegetation in each terrestrial model grid area is represented by two distinct layers. The upper layer represents the perennial canopy of trees or shrubs, and the lower layer represents the annual ground cover of grasses. SiB contains three temperature-related variables, each of which represents the temperatures of different components of the ground surface; i.e., canopy, ground cover and the air space in canopy. Thus the variation of temperatures at different parts of the vegetated ground surface is analyzed and the calculated values are compared with the brightness temperature measured by remote sensing.

KEYWORDS; thermal structure of urban areas, green tracts, evapotranspiration, Simple Biosphere model

1. はじめに

都市への人口、経済活動の集中とともに高層ビル化、コンクリート化、緑地の減少など地表面の改変が進み、これが都市の熱環境を大きく変化させている。特に、都市内の緑地は、水の蒸発散を通して地表面熱バランスに大きな役割を果たしており、都市気候を緩和させる上で緑地の整備とその適切な配置が大きな課題となっている。

筆者らは、地表面の被覆状態に着目し、熱収支モデルとリモセンデータとを組み合わせることにより、計算地表面温度とリモセン輝度温度との比較、検討を行ない、両者の間に一定の相関を確認した^[1]。しかし熱収支モデルでは、地表面の相対湿度（水の蒸発散が自由に行なえる面積の割合）及びアルベドが重要な役割を果たすが、これらのパラメータの値は樹木や草地の形態、種類等の緑地の条件によって大きく左右される。局地的な気象に及ぼす緑地の効果については、農業気象の分野で広く関心が持たれており^[2]、既に多数の報告もあるが、それらの主な関心は効率良く農作物を得るための気象調節に向けられている。これに対し、都市気象における緑地の効果については、各種のモデルが開発されているものの、パラメータ決定の困難などのため、数量的な検証は必ずしも十分行なわれていない。さらに農地や林地で成立するモデルが、多数の建築構造物と緑地の混合によって構成される都市域にどの程度適応できるかの問題がある。また、地表面の温度と一口に言っても、地面、植物キャノピー、空気とそれぞれ異なる値を持つ。これに対し、リモセンによって上空から観測される温度は、地表面付近の何らかの平均的温度である。従って、計算値と測定値のより詳細な比較のためには、都市内緑地の構造及び地表面の構成要素ごとの温度の違いについてのより精密な取り扱いが必要になる。

*九州大学工学部環境システム工学研究センター
Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

こうした現状を背景に、本研究ではSiBモデル(Simple Biosphere Model)によって緑地内部の温度を算出し、都市内緑地のリモセン輝度温度と比較することによって、緑地の物理的特性と都市の温度の関係についてモデル的な解析を行ない、地表の植生構造を考慮した温度の決定メカニズムについて考察する。

2. SiB モデルの概要

SiBモデルは、地表面植生と大気の間を移動するエネルギーや運動量を計算するモデルである。これは本来、大気循環モデル (General Circulation Models) に適用するために開発されたものであり、広範囲にわたる緑地について解析するモデルであるが、一次元熱収支モデルの枠内では、都市内の局地的な植生構造をより微細に記述するために利用可能である。本モデルでは、緑地を図1のような上下二つの異なった層によって表す。上層は多年生の木やスラブによって構成される「キャノピー」で、下層は主に一年生の草に覆われた地表面の部分「グランドカバー」である。植物層について考慮すべき物理的、生理的な特性は、①可視光線や熱、赤外線の放射、反射、伝導、②降雨の妨害や、それによる葉の表面からの蒸発、③土壤中の降雨の貯蔵や浸透、排水、④植物の気孔の機能による土壌水分の大気への放出(蒸散) ⑤土壌や植物からの水蒸気、熱、運動量の空力的な移動、などである。

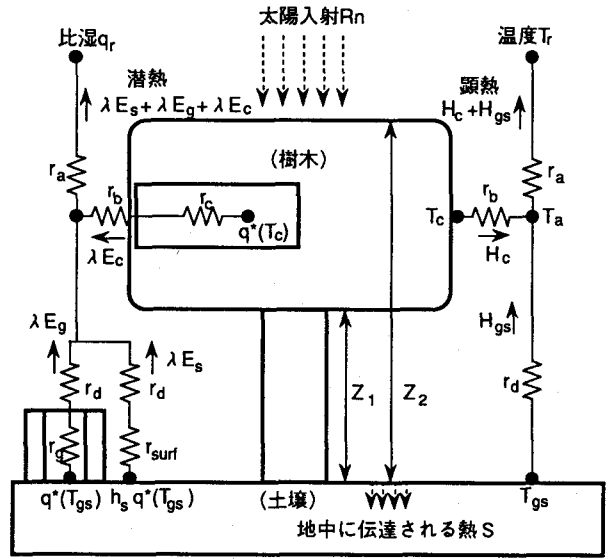


図1 モデルの構造及び諸変数

以下にこれらの要素をモデル化した計算方法を示す。

表1 モデルに用いる抵抗定数

地表面：キャノピーと地表面における熱収支式は次式(1),(2)で表される。

$$C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = R_{n,c} - H_c - \lambda E_c \quad (1)$$

$$C_{gs} \frac{\partial T_{gs}}{\partial t} = R_{n,gs} - H_{gs} - \lambda E_{gs} - S \quad (2)$$

ここで、変数Tは温度を表し、添字aは空気、

cはキャノピー、gsは地表面を意味する。 $R_{n,c}$ 、 $R_{n,gs}$ は長波放射を差し引いた正味の太陽入射で、キャノピーの緑被率 V_c に左右される。ここで、ステファン-ボルツマンの法則を用いると、

$$R_{n,c} = -2\sigma \epsilon V_c T_c^4 + \sigma \epsilon V_c T_{gs}^4 + V_c(1-a_c)T_s R_0(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma) \quad (3)$$

$$R_{n,gs} = -\sigma \epsilon T_{gs}^4 + \sigma \epsilon V_c T_c^4 + (1-V_c)T_s R_0(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma) \quad (4) \text{ である。}$$

また、地中への熱フラックスSは

$$S = C_s K_s \left(\frac{T_{gs} - T_{gr}}{h_s} \right) \quad (5)$$

で表す。

ここで図1に示されている様々な抵抗定数は、それぞれの関連部位ごとに

ポテンシャル差=抵抗定数×熱フラックス

の関係で定義されるものであり、表1に示す対応関係である。 r_a 、 r_b 、 r_d は空力的な抵抗で、風速によって変化する。風速は高度H (2000m) から Z_{01} まで対数分布をしていると仮定した風速分布1と、高度 Z_2 から Z_{02} まで対

熱フラックス	ポテンシャル差	抵抗定数
H_c	$(T_c - T_a) \rho C_p$	$r_a/2$
H_{gs}	$(T_{gs} - T_a) \rho C_p$	r_d
$H_c + H_{gs}$	$(T_c - T_a) \rho C_p$	r_a
λE_c	$(q^*(T_c) - q_a) \rho \lambda$	$f(r_c, r_b)$
λE_{gs}	$(q^*(T_{gs}) - q_a) \rho \lambda$	$f(r_g, r_d)$
λE_s	$(h_s q^*(T_{gs}) - q_a) \rho \lambda$	$f(r_{surf}, r_d)$
$\lambda E_c + \lambda E_{gs} + \lambda E_s$	$(q_a - q_c) \rho \lambda$	r_a

数分布しているとした風速分布 2 に分けた (図 2)。ここで、文献^[3]に基づき $Z_{01}=0.6Z_2$ とした。この仮定により、まず高度 Z_2 での風速 u_z を式(6)より求め、次の式(7),(8),(9)によって r_a, r_b, r_d を決定する。

$$u_z = U \frac{\log(Z_2/Z_{01})}{\log(H/Z_{01})} \quad (6) \quad r_a = \frac{\log(H/Z_{01}) \times \log(h/Z_2)}{U \times \kappa^2} \quad (7)$$

$$r_b = \frac{9.6}{V_c(Z_2 - Z_1) \sqrt{u_z}} \quad (8) \quad r_d = \frac{(\log(Z_2/Z_{02}))^2}{u_z \times \kappa^2} \quad (9)$$

表面抵抗 r_c, r_g, r_{surf} は、植物の生理的、形態的特性によって決定されるべき性質のものである。これらの値の精密な決定は植物生理学的な実験によらねばならないが、ここでは文献^[4]に報告された値の平均値をとり $r_c = r_g = r_{surf} = 5.0 \text{ s/m}$ とした。

空气中：次の方程式によって、上空での温度 T と比湿 q を計算する。

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_1 (R_i Z) \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \right] \quad (10) \quad \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_2 (R_i Z) \left(\frac{\partial q}{\partial z} \right) \right] \quad (11)$$

ここで、渦拡散係数 K_1, K_2 は Z のみの関数とし次式を用いる。

$$K_1 = K_2 = \kappa^2 \frac{U}{\log(H/Z_{01})} \quad (12)$$

地中：次の方程式によって、地中 20cm までの温度 T を計算する。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (13)$$

以上の式に基づいて数値計算を行う。計算上の仮定は以下である。

- (1) 全ての気象条件と地中パラメータは水平方向に一定とする。
- (2) 蒸散は土壌の状態に関係なく、常に行われるものとする。
- (3) 大気は中立状態であるとする。
- (4) 雲や大気中の汚染物質の影響は考えないものとする。

3. 感度解析

植物がもつ物理特性とモデルを支配するパラメータの関係を明らかにするために、感度解析を行なう。ここでも実際の植生状態と SiB モデルのパラメータの関係をまとめたものが表 3 である。

多数のパラメータがあるため、それら全てについて計算を行なうのは困難である。このため、これらパラメータのうち、実際のデータと比較が容易で値を決定しやすく、計算温度に影響を与える緑被率 V_c, V_g 、キャノピーの高さ Z_1, Z_2 の値を変化させて感度解析を行なった。境界条件は、リモセンデータの観測日の気象台のデータにより求めた (表 4)。地表面パラメータは、 $Z_2=5.0\text{m}, Z_1=1.0\text{m}, V_c=0.5, V_g=0.5$ を基本値とした。基本パラメータでの各温度の日変化を図 3 に示す。以下簡単のため、計算結果の検討は 1 日の最低温度、最高温度のみについて行なう。

表 3 SiB モデルのパラメータの関係

分類	木の緑被率	木の高さ	木の種類	地表面の状態	芝生の状態
例			広葉樹 落葉樹等	砂の種類 湿度等	緑被率 種類
パラメータ	緑被率 V_c	高さ Z_1 高さ Z_2	アルベド a_c 熱容量 C_c 高さ Z_1, Z_2	熱容量 C_g, C_s 蒸発能 h_f 熱拡散係数 K_s	緑被率 V_g 熱容量 C_g アルベド a_g

表 2 パラメータ表

C_c, C_g, C_s : キャノピー、地表面の熱容量、
T_r, q_r : 高度 $h(10\text{m})$ の温度、比湿、
C_p : 空気比熱、 a_c, a_g : アルベド、
T_c : 大気の透過率、 σ : ボルツマン係数、
ϵ : 射出率、 ϕ : 緯度、 δ : 赤緯、 γ : 時角、
R_0 : 太陽定数、 h_f : 蒸発能、 ρ : 空気密度、
λ : 水の潜熱、 T_{gr} : 地中 $h_g(5\text{cm})$ の地温、
C_s : 土の熱容量、 K_s : 土の熱拡散係数、
$q^*(T)$: T の飽和比湿、 Γ : 乾燥断熱減率、
U : 高度 $H(2000\text{m})$ の風速、
Z_{01}, Z_{02} : 風速分布 1, 2 の粗度長、
κ : カルマン定数、 R_i : リチャードソン数

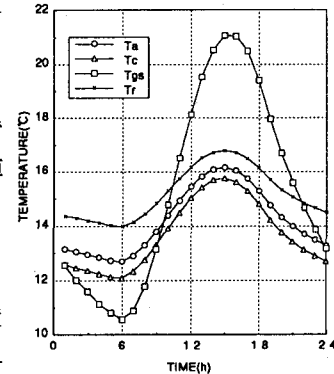


図 3 各温度の日変化

表 4 境界条件(1988年4月15日)

上空(2000m)	風速(m/s)	14.35
	比湿	8.35×10^{-4}
	温度(°C)	0.5
地中(20cm)	地温(°C)	15.4

(1) キャノピーの緑被率 V_c

V_c が増すにつれ、キャノピーの温度は徐々に低下する。これは植物からの蒸散が増加するからである。一方、地表面温度の日変化を見ると、最高温度は急激に低下し変化の幅が小さくなる。これは太陽入射をキャノピーに遮断されるため、地面への入射はほとんど0に近づくためと考えられる(図4(a))。

(2) グラウンドカバーの緑被率 V_g

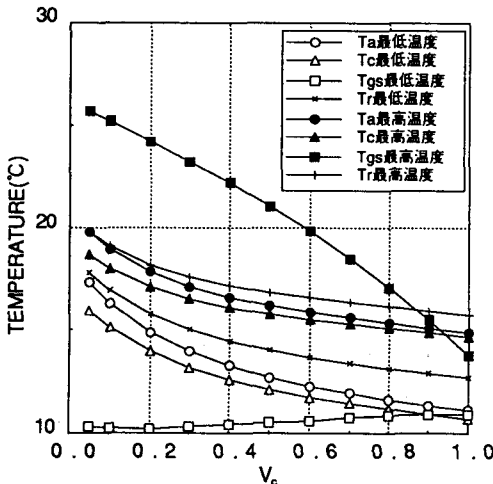
地表面の温度は、蒸発能が増すため最低温度、最高温度ともに低下する。キャノピーの温度は、抵抗 r_d が大きい、それほど影響を受けないことがわかる(図4(b))。

(3) キャノピー上端の高さ Z_2

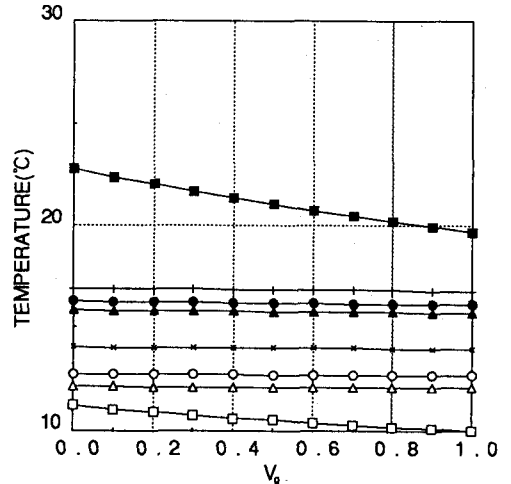
上端の高さが増すにつれ最初は蒸散が増し、どの温度も急激に低下する。 Z_2 が6mを越すと最低温度、最高温度ともに上昇してしまう。これは、熱容量が増すため温度が日変化をしなくなることで高度10mでの温度 T_r の影響が大きくなるためと考えられる(図4(c))。

(4) キャノピー下端の高さ Z_1

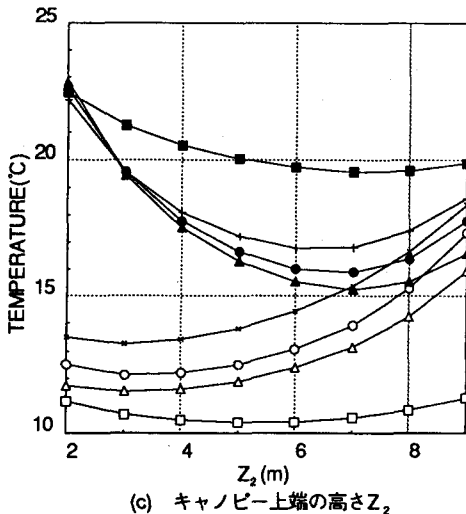
下端の高さが増すにつれ、どの温度も上昇している。これは蒸散が減少するため、地表面の影響も少なくなり Z_2 の場合とは効果が異なる(図4(d))。



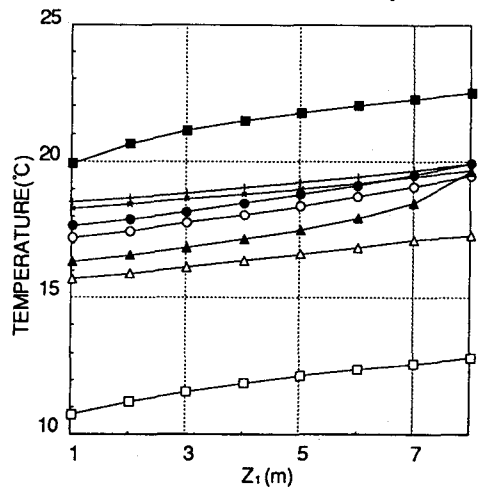
(a) キャノピーの緑被率 V_c



(b) グラウンドカバーの緑被率 V_g



(c) キャノピー上端の高さ Z_2



(d) キャノピー下端の高さ Z_1

図4 1日の最低温度と最高温度

4. 気温の鉛直分布

植生、風速の違いによって気温の鉛直分布にどんな変化、違いがでてくるかを調べた。植生の違いは一般的な林、耕地を想定してパラメータを設定した。

風速が3m/sの時、耕地での温度分布はキャノピー層で最高となり、両側へ遠ざかるにつれて低温になる。これはキャノピー層で吸収された太陽入射が顕熱に変換され、上下へ輸送されているからと考えられる。夜間になると、温度分布は日中と逆になり、キャノピー層で低温域が形成される。これは長波放射のため正味の太陽入射が負となり、上下から顕熱が流入して失われるエネルギーを補うタイプになるためである（図5(a)）。林内の気温の鉛直分布も本質的には耕地内のそれと差はない。しかし、耕地ほど気温の分布に上下の差がなく、はっきりしていない。これは、森林は植物密度が耕地と比較して低く、葉が覆っている部分と幹の部分に明瞭に別れているという特徴を持っているためと思われる（図5(b)）。

風速が15m/sの時の気温の鉛直分布は、風速3m/sの時とは微妙に異なる。一つに15m/sの時のように地表面とキャノピー層の温度差が顕著に現れていない。次に高度10mでの温度が、キャノピー層の温度より常になくなっていく。これは風速が大きくなったため、空力的抵抗が小さくなり顕熱、潜熱の移動量が増し、キャノピーでの温度が蒸散の効果で冷却されたためと考えられる（図5(c),(d)）。

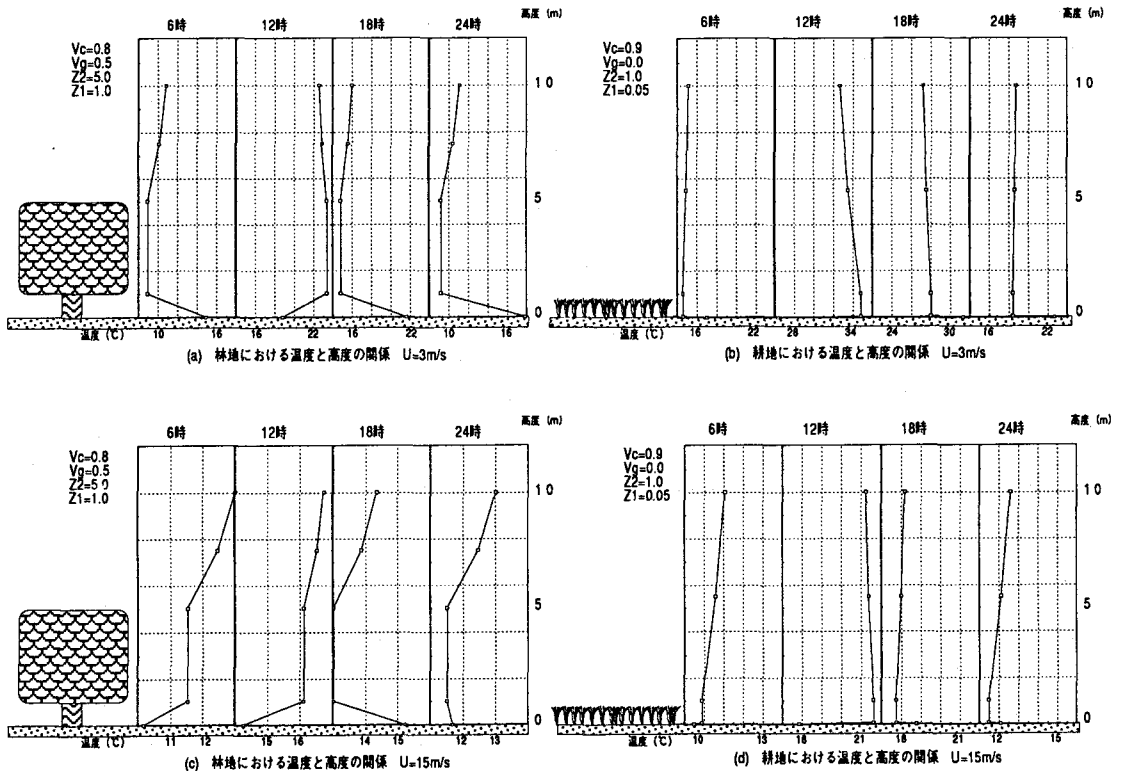


図5 気温の鉛直分布

5. 計算温度とリモセン輝度温度との比較

SiBモデルで計算した温度の意味を調べるため、前報告^[1]と同じ福岡市周辺地域を対象に、被覆分類カテゴリーごとに抽出した12の地域について、1988年4月15日午前10時のLANDSAT TMの輝度温度の頻度分布（中央値及び有意水準10%限界値）と計算温度の各パラメータ内の最低値、最高値との比較を行った（図6）。各パラメータは表5のように幅を持たせて設定した。リモセンによる温度データの問題点は、上空からの観測であるため、地表面付近の鉛直分布については何らかの平均的値しか観測できないことである。これはSiBモデルによって与えられる各温度のいずれか、又はそれらの平均値に対応するものと考えられる。両者のより詳しい関係については現在分析中であるが、こうした対比の手掛かりが与えられる点で、植生構造を取り入れたモデルの意義がある。

表5 パラメータ表

地区	種類	V _c	V _g	Z2(m)	Z1(m)
1	針葉樹林	0.5~1.0	0.5	9	3~7
2	広葉樹林	0.7	0.5	7	1~3
3	針葉樹林	0.3~1.0	0.5	6~8	3~5
4	果樹園	0.3~0.7	0.5	3	1
5	広葉樹林	0.5~1.0	0.5	4~8	1
6	植林中	0.1~0.2	0	0.5	0.2~0.3
7	伐採中	0.05	0.5	0.5	0.3~0.4
8	荒地	0.1~0.2	0.5	1.5	0.5~1.0
9	植林中	0.1~0.2	0	0.5	0.2~0.3
10	伐採中	0.05	0.5	0.5	0.3~0.4
11	竹林	0.3~0.5	0.5	6~8	5~7
12	人工林	0.1	0	1.5~2.0	0.5~1.5

6. 結論

緑地に関する熱収支モデルは、既に各種開発されてはいるが、現実の都市を想定して、緑地の微細構造、構成の違いによって生じる地表面温度の変化を数値的に解析した例は少ない。これに対し、本論文ではGCMsのために開発されたSiBモデルを適用し、都市の地表面温度決定に果たす緑地の効果をより詳しく検討するための手法を検討した。モデル中のパラメータ値を変化させた感度解析によって、樹種、樹木高さ、樹木と草地の構成等、植生の構造を考慮した場合の地表面温度分布をモデル的に解析した。これによって、植生の立体構造等を考慮した温度分布が解析でき、従前から筆者らが試みてきたリモセン等によって計測される輝度温度と地表面植生の関係の検証についても新しい比較の可能性が開けた。つまり、上空からのリモセンで計測されるのは鉛直方向についての何らかの平均的な温度であるが、それが植生キャノピーのどの部位の温度（あるいは、それらの平均値）に対応するのかと言った問題を検討するための理論的考察の手段として、本論文で提示した方法が有効性を持つものと期待される。

ただし、モデルと計測結果との比較のためには、パラメータ値の決定を中心に、多くの課題がある。たとえば、本論では行った比較では、各カテゴリーごとの輝度温度計測値には、感度解析によって得られた値の大小の差以上に大きな幅がある。この原因の第一として考えられるものは、パラメータの値を地図、文献等による平均的な、あるいは代表的な値を用いていることである。より精密な比較のためには、現地調査によって、地表面の状況や土壌の種類などを個別的に詳しく調査する必要がある。また、モデル自身についても、光合成や気孔の日変化、風向や風速の時間変動、地下水位の影響等を取り入れることなど、さらに改良の課題がある。

<参考文献>

- [1]上野賢ら：環境システム研究、Vol.20、pp.262~269、1992。
- [2]内嶋善兵衛：「農林・水産と気象」、pp.18~118（浅倉書店、1988）
- [3]P.J.Sellers："A Simple Biosphere Model(SiB) for Use within General Circulation Models", J.Atmospheric Science, Vol.43, No.6, pp.505-530, 1986。
- [4]P.J.Sellers："Testing the Simple Biosphere Model Using Point Micrometeorology and Biophysical Data", J.Climate and Applied Meteorology, Vol.26, No.6, pp.622-651, 1987。

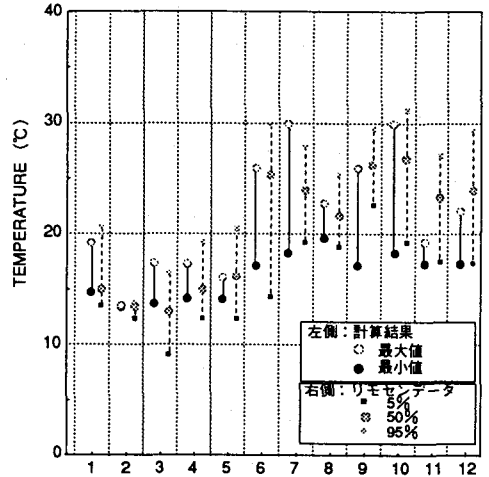


図6 計算結果とリモセンデータの比較