

広域熱収支植生モデルによる 接地境界層気温の推定と地上実測

Field Observation and Estimation of Urban Air Temperature in Surface Boundary Layer Using Vegetation Model for Regional Surface Energy Balance

金子大二郎*

By Daijiro KANEKO

Air temperature of the surface boundary layer in urban and its suburb areas are determined using a vegetation model by TM for regional surface energy balance. The model is based on the assumption that evapotranspiration in urban areas is due primarily to vegetation and there is Monin-Obukhov similarity in urban areas. In this model, evapotranspiration is controlled by the evapotranspiration area index, i.e., effective leaf area index, vapor pressure deficit at leaf temperature and stomatal opening. Moderation effect due to vegetation on air temperature in urban areas can be determined from the relation between NDVI and air temperature indicated by the vegetation model. The moderation effect is 1°C for an increase of 0.1 in NDVI.

Keywords: evapotranspiration, heat island, Remote Sensing,
vegetation, air temperature, NDVI

1. まえがき

ヒートアイランド現象については古くから多数の研究があるが、植生による気温の緩和効果については、広域における観測の困難性から研究例が少ない。すなわち、神田・日野によるモデルケース¹⁾についてのシミュレーションと、実測を中心とした研究²⁾である。また、都市域に混在した植生を表現する指標として緑被率を用い、LANDSAT TMによる地表面温度への影響の研究例³⁾はあるが、本論文のような地表気温についての研究は無い。リモートセンシングを用いた都市熱環境についての研究には、一次元熱収支モデルによる熱収支解析例として、Carlsonら⁴⁾のHCMM (Heat Capacity and Mapping Mission) を用いた Los Angeles と St.Louis の例や、Taconet⁵⁾らによる NOAA AVHRR を用いたフランスの Beauce における植生を考慮したモデルの例がある。しかし、Carlson の場合は植生の有無が考慮されず、Taconet の場合は良く茂った様な穀物の植生とした場合の熱収支である。このため、植生の非一様性による効果を考慮した現地の熱収支の解析例は見あらず、また現地の非一様な植生分布を考慮した都市における地表気温の算定とその実測による緩和効果の評価は無い。リモートセンシングを用いた潜熱フラックスに関する従来の算定方法は、地表面温度を介して得られる顕熱フラックスを純放射から差し引いて得る間接的方法であった。しかし本論文では、蒸発散についての植生モデルによって潜熱を直接に算定することから、植生が及ぼす都市域における気温緩和の効果を評価することが可能となった。

* 正会員 工修 松江高専助教授 土木工学科
(〒690 松江市西生馬町14-4)

Monin-Obukhov相似則が成立するとして⁶⁾、TMによる植生指標を用いた、広域蒸発散のための植生モデルによる潜熱・顕熱フラックスの算定法については既に報告した⁷⁾。本論文では、植生によって緩和の影響を受ける都市域の地表気温を以下のように求めた。LANDSAT TMから得られる植生指標を用いた蒸発散植生モデルとMonin-Obukhov相似則に基づいて、接地境界層の摩擦速度とObukhov長を得た。ついで、これを用いて摩擦温度と地表気温を求めた。算定された地表気温とTMによる植生指標の関係から、ヒートアイランドの地表気温に及ぼす植生による気温緩和の効果の評価した。植生による気温緩和効果は、蒸発散面積率⁷⁾と共に増大する。もし地表面熱収支の中で移流の影響が小さいと仮定できる場合には、植生による気温緩和作用は植生指標が0.1増す毎に(言い換えれば蒸発散面積率が1%増す毎に)、約1°Cの気温緩和効果があった。

2. 都市域における接地境界層の気温の算定

2・1 TMデータとMonin-Obukhov相似則による顕熱フラックスの算定法

(a) 顕熱フラックスの求め方

地表面熱収支における潜熱フラックスEと顕熱Hの算定は、式(1)、(2)によって求めた。

$$E = -\rho_l U \cdot q \cdot \dots \dots \dots (1)$$

ここに ρ : 空気密度, U : 摩擦速度

l : 水の気化熱, q : 摩擦比湿

$$H = -C_p \rho U \cdot \theta \cdot \dots \dots \dots (2)$$

ここに C_p : 定圧比熱, θ : 摩擦温度

摩擦速度 U 、摩擦比湿 q 、摩擦温度 θ は、LANDSAT TM データから定義された植生による蒸発散面積率⁷⁾と気象台のルーチンデータを用いた広域熱収支植生モデルにより求めた。逐次計算による摩擦速度 U の算定法および葉温飽差と蒸発散面積率による摩擦比湿 q の算定法を用いた潜熱フラックスEの詳細な求め方については、参考文献7)を参照されたい。

接地境界層における気温・風速・比湿に係る関係式は以下の8個の式である。無次元高さ z と普遍関数の関係は式(3)である。

$$z = B \cdot \phi_n^2(z) / \phi_h(z) \cdot \dots \dots \dots (3)$$

ここに ϕ_n : 平均風速の鉛直分布を表す普遍関数

ϕ_h : 平均気温の鉛直分布を表す普遍関数

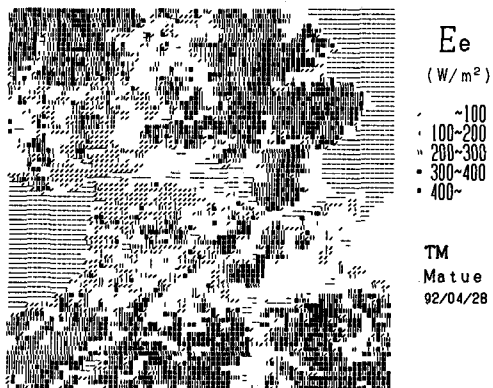


図-1 松江市街周辺における潜熱フラックスの平面分布



図-2 顕熱フラックスの平面分布

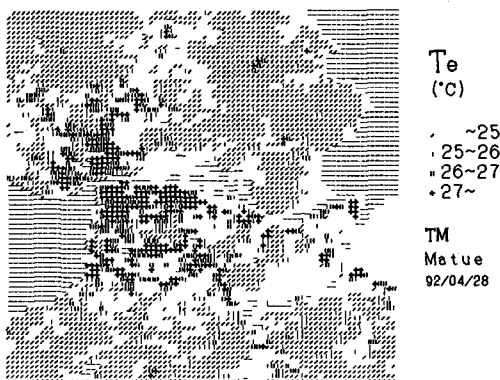


図-3 算定された地表気温 T_e の平面分布

バルク・リチャードソン数Bは式(4)で表される。

$$B = g(T_a - T_s) / \bar{\theta} U^2 \cdot (z - d_0) \dots\dots\dots(4)$$

ここに g : 重力加速度, T_a : 気温 ($z=26.7\text{m}$)

κ : カルマン定数, T_s : 地表面温度

$\bar{\theta}$: 平滑地表面温度, U : 風速,

z : 風速 U , 気温 T_a , 比湿 q を測定した

高さ, d_0 : ゼロ面変位

無次元高さ ζ は, Obukhovの長さ L によって式(5)で表される。

$$\zeta = (z - d_0) / L \dots\dots\dots(5)$$

Monin-Obukhovの長さ L は, 式(6)で表される。

$$L = T_s U^2 / \kappa g \theta. \dots\dots\dots(6)$$

気温 T_a , 風速 U , 比湿 q とMonin-Obukhov相似則による普遍関数の積分との関係は式(7)~(9)である。

$$T_a - T_s = \frac{\theta_*}{\kappa} \Psi_h(\zeta) \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{ここに } \Psi_h = \int_{\zeta_{0h}}^{\zeta} \frac{\phi_h}{\zeta} \cdot d\zeta$$

$$\zeta_{0h} = z_{0h} / L$$

T_s : 地表面温度, z_{0h} : 熱の粗度長

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \Psi_m(\zeta) \dots\dots\dots(8)$$

$$q - q_0 = \frac{q_*}{\kappa} \Psi_h(\zeta) \dots\dots\dots(9)$$

ここに q_0 : 地表面における比湿

空気と地表面比湿との差($q - q_0$)は, 葉温飽差($q - q_c$)と気孔開度 β_s によって式(10)でモデル化されている。

$$q - q_0 = a_c \alpha_{NDVI} \beta_s (q - q_c) \dots\dots\dots(10)$$

ここに a_c : 変換係数, α_{NDVI} : 蒸発散面積率

これらの変数の中で, TMから得られる既知変数は, 平滑地表面温度 $\bar{\theta}$, 地表面温度 T_s , 葉温での飽和比湿 q_c である。一方, 気象台のルーチンデータから得られる既知変数は, 風速 U と比湿 q である。また, TMと気象台データから得られる気孔開度 β_s ⁷⁾も既知変数である。未知数はバルク・リチャードソン数 B , 無次元高さ ζ , Obukhov長さ L , 摩擦速度 U_* , 摩擦比湿 q_* , 摩擦温度 θ_* , 地表面比湿 q_0 , および気温 T_a の8個である。従って, 8個の関係式に対し未知変数8個であることから, 第1次近似として用いる3種の気象台データの風速 U ・気温 T_a ・比湿 q のうち, U と q を対象地域について一様と近似することにより, 高さ $z=26.7\text{m}$ における気温 T_a の非一様な平面分布が算定可能となる。

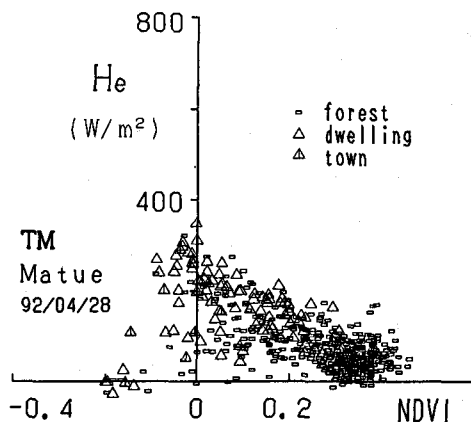


図-4 顕熱フラックスと植生指標の関係

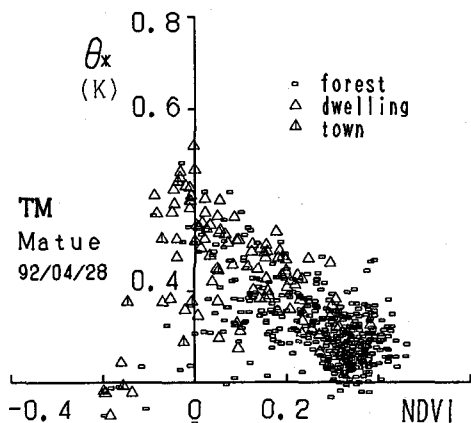


図-5 摩擦温度と植生指標との関係

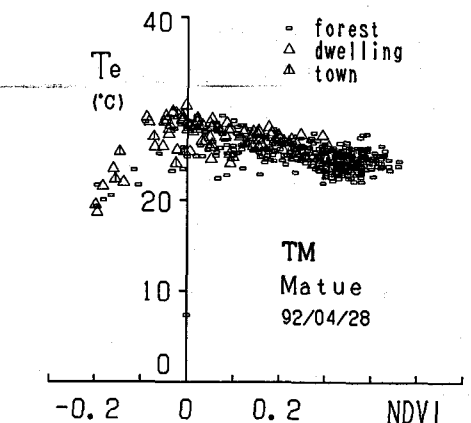


図-6 算定された気温と植生指標の関係

(b) 潜熱E_e・顕熱H_e両フラックスの平面分布

都市熱環境問題の対象となる松江市の市街・住宅地および都市域と熱的に正反対となる森林域について、式(1)により算定された潜熱フラックスE_eの平面分布を図-1に示した。松江市の郊外にある森林域では、潜熱フラックスが400W/m²以上と大きい一方、市街域では、植生が乏しいことから100W/m²以下の値となっている。図-4によれば、植生指標の減少と共に顕熱フラックスが増しており、市街化による植生の減少によって地表気温が上昇することになる。なお、正規化植生指標NDVIは、式(11)で定義される。

$$NDVI = (ch4 - ch3) / (ch4 + ch3) \dots\dots\dots (11)$$

ここに ch4 : 近赤外チャンネルのカウント

ch3 : 赤色チャンネルのカウント

TMに対応して式(2)により算定された松江市周辺の顕熱フラックスの平面分布を図-2に示した。

2・2 摩擦温度の算定

摩擦温度θ_sは、式(6)より求めた。計算手順は以下の通りである。対象地域の地表気温T_sは、一様と近似して初期値にTMの1992年4月28日10時における松江气象台の一定値を用いる。式(3)、(4)より求められたバルク・リチャードソン数Bと、無次元高さzよりObukhov長さLを求める。次に、この値と式(8)から得られたU_sを式(6)に代入して摩擦温度θ_sを求めた。

普遍関数φにはBusinger-Dyerの式を採用した。

$$\begin{aligned} \phi_m &= (1 - 16\zeta)^{-1/4} \\ \phi_h &= (1 - 16\zeta)^{-1/2} \quad \zeta < 0 \dots\dots (12) \\ \phi_m &= \phi_h = 1 + 5\zeta \quad \zeta \geq 0 \end{aligned}$$

2・3 気温の算定

式(6)より求められた摩擦温度θ_sとTMデータより得られた各地点の地表面温度T_sを用い、式(7)より各地点の非一様な気温T_eを算定した。普遍関数の積分値Ψ_hは、式(5)よりObukhovの長さLが求められていることから、式(12)を用いて事前に数値積分し、Ψ_hを計算した。

2・4 摩擦温度と植生指標との関係

植生からの蒸発散に伴う潜熱フラックスによって地表温度が低下する。この温度低下が摩擦温度θ_sに及ぼす影響を図-5に示した。植生指標NDVIの増大と共に摩擦温度θ_sが低下しており、植生による気温上昇の抑制の源となっている。

2・5 算定された気温の平面分布

松江市周辺について式(7)によって算定された地表気温の平面分布を図-3に示した。松江市郊外の森林域は23℃以下であるのに対し、市街は28℃以上の地表気温となり、郊外よりも6℃程度高温になっている。最も高温となった市街の特徴は、市中心部のビル街・商店街と住宅の密集した旧市街であった。

2・6 気温算定値とTMによる地表温度の関係

算定された松江市内各地点の気温T_eとTMによる地表温度T_sとの関係を図-7に示した。気温は、顕熱を介し

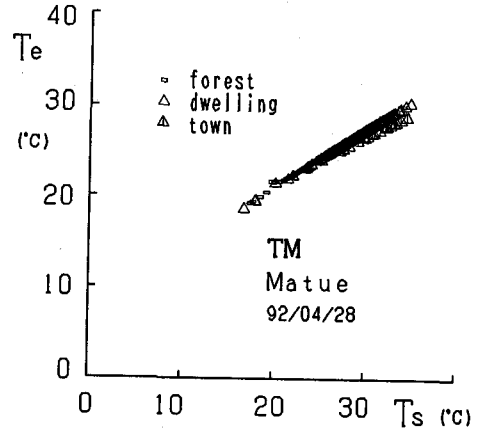


図-7 気温算定値とTMによる地表温度との関係

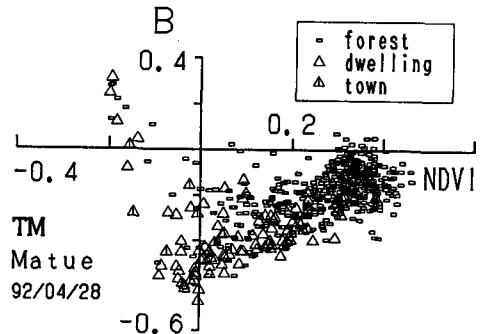


図-8 バルク・リチャードソン数と植生指標の関係

地表温度と直接的な関係になっており、地表面温度と共に高くなっている。

2・7 算定された気温と植生指標との関係

ヒートアイランド現象に及ぼす植生の気温緩和効果を評価するために、松江市周辺について式(7)により算定された気温と植生指標との関係を調べ、図-6に示した。植生が最も茂った植生指標NDVI = 0.4程度の地域では、気温が23℃以下となり、市街域の29℃以上の値より気温が約6℃低くなっている。植生によるこの気温緩和の効果は、市街と住宅域において、植生指標が小さくなると共に減少している。このことは図-1に示すように、植生からの蒸発散作用の減退による潜熱フラックスの減少によって気温緩和の効果が減じることから、市街の地表気温が上昇していることを意味する。この気温緩和は市街・住宅地においても、植生指標が0.1程度の大きさになると約2℃の効果を持っている。即ち、植生の無いNDVI = -0.1からNDVIが0.1増す毎に（言い換えるならば蒸発散面積率が17%増す毎に）地表気温を1℃緩和する効果があることになる。

2・8 バルク・リチャードソン数と植生指標の関係式(4)から得られるバルク・リチャードソン数Bと植生指標NDVIの関係を図-8に示した。大気の安定度に及ぼす植生指標の影響を以下に分析する。植生指標が0.4に近い十分に茂った極く一部の植生地域において、リチャードソン数Bがプラスとなり安定である。植生指標が小さくなると共に地表温度の上昇によって浮力が増し、市周辺の大部分の地域において、大気は不安定となっていた。式(5)から得られる無次元高さ z は、平均の普遍関数値が $\phi_m = 1.016$ 、 $\phi_h = 0.832$ であることから $\phi_m(z)/\phi_h(z) = 1.19$ となり、バルク・リチャードソン数 $B = -0.156$ とあまり変わらぬ値 $z = -0.209$ となっていた。

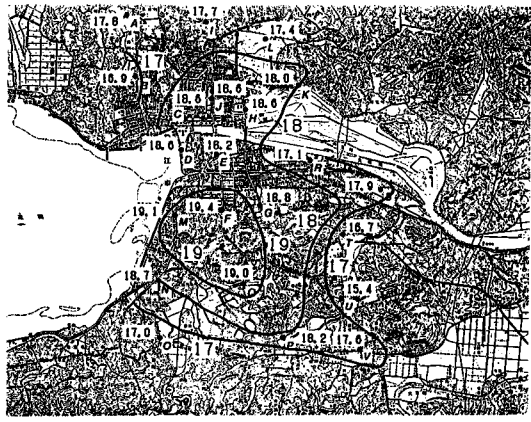


図-9 現地観測による地表気温の平面分布

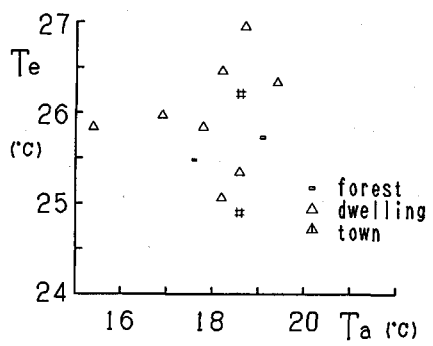


図-10 気温の観測値($z=1.5m$) T_a と算定値($z=26.7m$) T_e の比較

3. ヒートアイランドにおける気温の現地観測

3・1 観測地域と観測方法

図-9に示す松江市街の周辺22地点において、気温・比湿をアスマン乾湿計により同時測定した。観測の高さは地上1.5mである。観測は5台の乾湿計を使用し、複数の測定地点を移動することにより30分間の同時間帯内に測定した。図-9に示した観測地点の位置は、地形図を用いて緯経度を読み取り、国土数値情報及びTMの画像座標に変換し、土地利用と地表温度のデータに関連づけた。

3・2 現地観測による松江市の地表気温平面分布

1993年5月15日10時に上記の方法により観測した松江市街周辺における気温の平面分布を図-9に示した。松江气象台における気象観測値は風向W、風速3.1m/s、気温17.6℃であった。松江市中心部である市街の地表気温は19℃以上と、郊外における田畑の地域に比較し、約2℃高温になっていた。現地観測の気温分布は、宍道

湖からの西風による移流の影響を受け、高い等温線が風下側である市の東にやや広がる傾向を示した。

3・3 気温の実測値と算定値の比較

1992年4月28日について式(3)により算定した気温 T_c と、1993年5月15日に現地観測によって地表気温を測定した値との関係を図-10に示した。市街の地表気温は、算定値・現地観測値とも郊外より2~3°C高温になっており、傾向は大筋で一致している。しかし高温部の地域が、算定値と現地観測値とで西風4m/sにより風下側へ位置ずれていることから、気温の算定値と観測値に比例関係が認められない。気温上昇が2~3°Cと小さく市街部の面積も狭いことから、地表気温は、海水温が17.7°Cと低い日本海と宍道湖面からの移流によって気温低下する影響を強く受けていると考えられる。

4. おわりに

TMによる広域熱収支植生モデルを用いて、都市域における接地境界層の熱収支解析により地表気温を算定し、植生による気温緩和を評価した。結論を要約すると以下の通りである。

- 1) 都市域における植生分布を考慮した現地の広域に及ぶ地表気温が、LANDSAT TMから得られる地表温度と植生指標を用いたMonin-Obukhovの相似則に基づく広域熱収支植生モデルにより、算定可能となった。
- 2) 植生の混在した都市域について、植生指標と共に潜熱フラックスによって地表気温が低下する関係から、植生がヒートアイランドの気温に及ぼす緩和効果を評価することができた。
- 3) 植生指標と地表温度の平面分布から、現地市街域の地表温度と地表気温分布を平面的に捉えることができ、土地利用と地表気温の関係を知ることができた。
- 4) 植生による気温緩和効果は、十分に茂った森林で最大6°Cの効果を持ち、植生の無いNDVI = -0.1からNDVIが0.1増す毎に1°Cの気温緩和効果がある。NDVIが0.1増すことの意味は、蒸発散面積率で表すと17%となり、その物理的意味は地域全体で植生が覆っている面積が17%増すことである。
- 5) 小都市における地表気温の平面分布は、移流によって風上の気温の影響を受けており、地表気温の評価には移流を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 神田学・日野幹雄： 大気-植生-土壌系モデル(NEO SPAM)によるシミュレーション(2)植生の気候緩和効果の数値実験，水文・水資源学会誌，第3巻3号，PP47~55, 1990。
- 2) 神田学・稲垣聡・日野幹雄： 夏季に森林・水面が果たす気候緩和効果に関する実測とその周辺への影響伝達機構に関する数値解析による検討，水工学論文集，第35巻，PP585~590, 1991。
- 3) 本條毅・高倉直： 緑地が都市内熱環境に及ぼす影響(2)リモートセンシングによる緑地の抽出と表面温度の解析，農業気象，Vol. 43, No. 1, pp31~36, 1987。
- 4) Carlson, T. N., J. K. Dodd, S. G. Benjamin and J. N. Cooper : Satellite estimation of the surface energy balance, moisture-availability and thermal inertia, Journal of Applied Meteorology, Vol. 20, pp67~87, 1981。
- 5) Taconet, O., R. Bernard and D. V. Madjar : Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data, Journal of climate and Applied Meteorology, Vol. 25, pp284~307, 1986。
- 6) Brutsaert, W. and M. B. Parlange : The unstable surface layer above forest, Regional evaporation and heat flux, Water Resources Reserch, Vol. 28, NO. 12, pp3129~3134, 1992。
- 7) 金子大二郎・日野幹雄： TM植生指標と気象台ルーチンデータを用いた広域森林における熱収支の算定法の提案と検討，水文・水資源学会誌，Vol. 7, No. 1, pp10~21, 1994。