

都市域の陸面パラメーターの算定

ESTIMATION OF LAND-SURFACE PARAMETERS IN URBAN BOUNDARY LAYER

森脇 亮¹・神田 学²・渡邊倫樹³・松永和章³

Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA, Tomoki WATANABE and Kazuaki MATSUNAGA

¹正会員 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

³学生会員 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

Land-surface parameters of urbanized terrain are evaluated based on the field measurement data. Following results are obtained; (1) The value of momentum roughness length (z_0) is 1.56m and it is greater than the heat roughness length (z_T) and water vapor roughness length (z_q). The ratios $kB_T^{-1} = \ln(z_0/z_T)$ and $kB_q^{-1} = \ln(z_0/z_q)$ are 8.0 and 20.5 respectively. (2) The value of evaporation efficiency (β) is 0.05-0.2. After precipitation β is significantly decreasing with time for a few weeks. Evaporations from vegetation and concrete material are estimated respectively. Vegetation has a potential to emit latent heat as much as net radiation due to the oasis effect. Concrete material has a potential to cover the β variation range over residential area. When horizontal wind velocity is large, β is decreased. (3) The averaged value of albedo is about 0.13. When there is rainfall, albedo is decreased. But the value is back to about 0.13 within 2-3 days.

Key Words : Roughness length, Evaporation efficiency, Albedo, Urban, Field measurement

1. はじめに

領域スケールの水文気象現象において、都市の存在が重要な影響を及ぼしていることは、ヒートアイランド・集中豪雨・高濃度大気汚染など多くの研究で指摘されている。しかしながら、局地気象モデルにとって必要不可欠な都市の陸面パラメーターについては、裸地・水面・植生面などに比べて研究が遅れている。

アスファルトやコンクリートなどの人工被覆面の熱収支・蓄熱特性の把握に関する研究としては、浅枝ら¹⁾が先駆的である。しかし、実際の都市は単純な水平面ではなく建物群による凹凸によって構成されているため、都市域のパラメタリゼーションは建物群の幾何構造を反映したものでなければならない。現況のメソ気象モデルでは植生面のパラメタリゼーションと同様なモデル及びパラメーターを都市域に拡張適用している場合が多いが、検証に耐えうる実測データが乏しいのが現状である。

著者らは、キャノピーと同じスケールの凹凸(建物群)で構成される都市の場合には、キャノピースケールに比べて十分小さな抵抗体(葉)の集合体と見なせる森林とは根本的に異なるパラメタリゼーションが必要であるとの認識に立ち、一連の研究を行っている(勝山ら²⁾、神田ら³⁾など)。

本研究では、密集住宅街における30mタワーを用いて行っている連続観測データに基づき、都市域の基本的な陸面パラメーターを算定することを目的としている。具体的には、2001年夏季3ヶ月間(6~8月)に着目し、代表的なマクロな陸面パラメーターである、①流体力学的粗度およびスカラ粗度(熱・水蒸気)、②蒸発効率 β 、③アルベド、の日単位・時間帯の挙動について報告する。

2. 都市境界層における長期観測概要

都市域の接地境界層における放射・熱・水・物質収支を包括的に把握することを目的として、気象観測用のタワーを低層住宅地内に建設し長期的な連続観測(久が原プロジェクト)を2001年3月より開始している。観測タワーの設置点は東京都大田区久が原である。位置ならびにその周辺の様子を航空写真にて示す(写真-1)。観測タワー周辺の地域は1km四方に渡り高さのほぼ均一な低層住宅地(平均高さ7.3m)が広がっている。

建物高さの測量にはレーザー距離計(JUNOPTIK社; LEM300-GEO)を用い、タワー周辺部の622戸の建物高さを測定した。また建蔽率・フロントルエリアインデックス・緑被率は航空写真より判別した。都市の幾何パラメーターを表-1に示す。都市表面からの顕熱フラッ

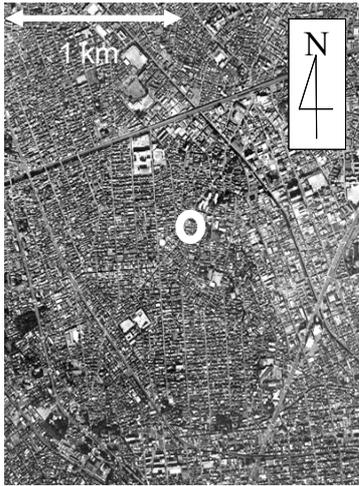


写真-1 観測地周辺の航空写真。
図中の白丸が観測地点。

表-1 都市の幾何パラメーター

建物高さ	z_h	平均	7.3m
		標準偏差	1.3m
建蔽率	λ_p		43.0%
フロントルエリ アインデックス	λ_f		47.1%
緑被率			21.9%

表-3 データの抽出条件

β, Z_0, Z_T, Z_d
① $H > 30(Wm^{-2}), IE > 30(Wm^{-2})$
② 降雨がない
③ $-2 < z'/L < 1$
(L: モニオプロフ長さ z' : 測定高度-ゼロ面変位)
アルベド
① 8時~16時
② 時間雨量が5mmを超えない

表-2 気象測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	サンプリング周波数・平均化時間・設置高度
風速3成分	三次元超音波風速温度計 (Metek社; USA-1)	8Hz 平均無し 21m & 29m
気温		
二酸化炭素濃度	赤外線式オープンパス濃度計 (Li-cor社; LI-7500)	
水蒸気濃度		
全天日射量	ネオ日射計(英弘精機, MS-42)	1Hz 20分平均 25m
反射短波放射	短波放射計(英弘精機, MS-62)	
大気放射	赤外放射計(英弘精機, MS-202)	
上向き長波放射	赤外放射計(英弘精機, MS-201)	
雨量	転倒ます雨量計	-

クスと潜熱フラックスの算定には渦相関法を用いている。都市の接地境界層内での計測を行うため、高度29.0mと21.0m(建物高さの約3倍と4倍)に計測機器を設置した。接地境界層高度の見積もり方法については、渡邊ら⁴⁾を参照されたい。

この2高度において、3次元超音波風速温度計(Metek社; USA-1)と赤外線式オープンパス濃度計(Li-cor社; LI-7500)を用いて、3次元風速・気温・CO₂濃度・水蒸気濃度を8Hzのサンプリング周期で計測している。乱流統計時間は60分で、バイアス除去のためMcMillen⁵⁾の傾度補正を行っており、また空気密度変化による誤差を補正するためにWebb et al.⁶⁾の密度補正を加えている。高度25mには、日射計・赤外放射計を設置して鉛直上向きと下向きの短波放射・長波放射を計測した。地上には降雨の有無を確認するための雨量計を設置した。測定項目と測定機器一覧を表-2に示す。

本論文に用いたデータは6月14日~8月28日までの76日分である。解析に不適切なデータを除去するため、表-3のような基準値を設定し、解析結果の品質を高めている。これらの抽出条件をクリアした1時間データセットを用いて日平均値を算出している。

3. 都市域の陸面パラメーターの算定

(1) 流体力学的粗度

植生・都市など粗度の大きな地表面においては、運動量粗度(z_0)およびゼロ面変位(z_d)といった基本的パラメーターがキャノピーを構成する抵抗体の幾何構造によって大きく変化するためこれらを正確に同定することが必要となる。

a) 幾何学的手法による同定

幾何学的手法(Morphometric method)とは、都市の幾何学パラメーターを入力条件として半理論的に導かれた診断式を基に流体力学粗度を算定する手法の総称である。

Grimmond et al.⁷⁾らは、既存の診断式を都市域の実測データに用いた上でそれらの相互比較を行ったが、算定されるパラメーターは同一地点でも大きなばらつきをもつことを指摘している。本研究では、比較的広範な幾何条件に適用できる式として彼らが推奨しているMacdonald et al.⁸⁾の定式化を用いることにする。

$$\frac{z_d}{z_h} = 1 + 4.43^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \quad (1)$$

$$\frac{z_0}{z_h} = \left(1 - \frac{z_d}{z_h}\right) \exp \left\{ - \left[0.5 \frac{c_d}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{z_h}\right) \lambda_f \right]^{-0.5} \right\} \quad (2)$$

ここで、 z_h は建物高さ、 c_d は抵抗係数1.2、 k はカルマン定数0.4である。屋根・敷地面積比(λ_p)と鉛直壁・敷地面積比(λ_f)には、表-1の幾何パラメーターを使用した。式(1)(2)を用いて流体力学的パラメーターを算定したところ、 $z_d=5.1m$ 、 $z_0=0.56m$ であった。 z_d/z_h にすると0.7であり、森林など植生面で使用される比率と同程度である。粗度 z_0 は建物の建ち込み具合(つまり λ_p や λ_f)によって変化する。彼の診断式によると、ある建物密度($\lambda_p=0.35$ 程度)のときに z_0 はピーク値をもつ。物理的には建物の背後に生ずるWakeが最も効率的に運動量を輸送する建物間隔があると解釈できる。本観測サイトの久が原($\lambda_p=0.43$)は運動量輸送の効率的な建物配列よりもいくぶん建物密度が高いようである。

b) 流体力学的方法

流体力学的手法により粗度を同定する方法も非常に数多く提案されているが、物理量の鉛直分布を用いる手法と、乱流計測情報を用いる手法に大別される。著者らは、摩擦速度などの乱流情報を基本に、長期観測によって統計的安定性を向上させることが重要であると考えている。

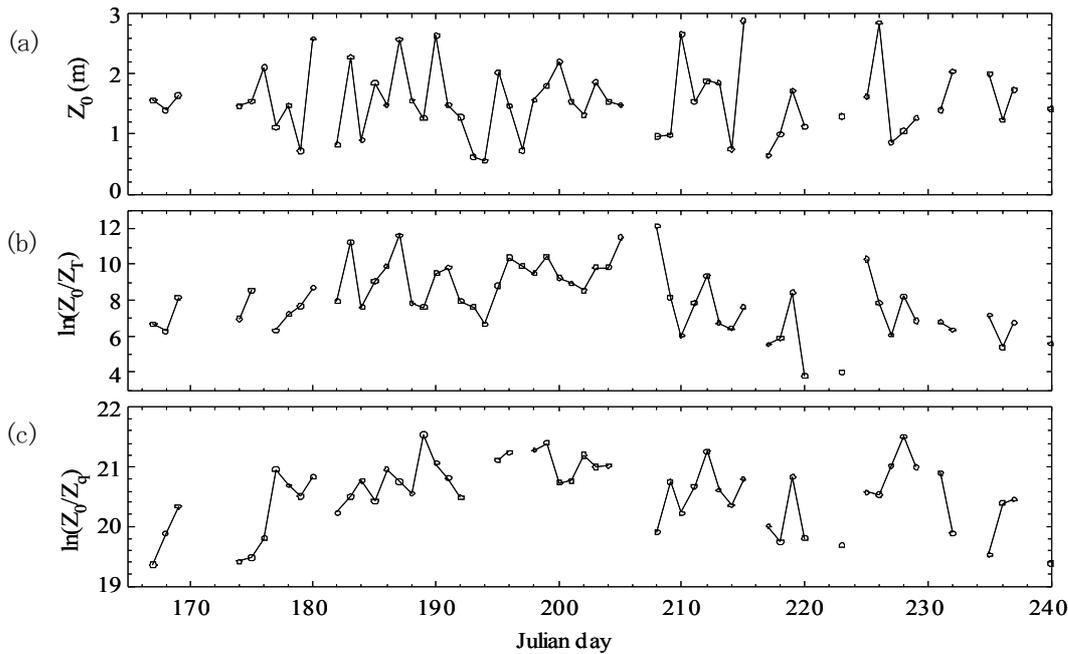


図-1 (a)粗度, (b)熱粗度, (c)水蒸気粗度の日変化

本研究では簡単化のため z_d には幾何学的手法による値を与え, 粗度 z_0 について検討した.

$$u_*^2 = C_M U^2 \quad (3)$$

$$C_M = \frac{k^2}{\Psi_M^2} \quad (4)$$

$$\Psi_M = \ln \frac{z - z_d}{z_0} + \beta_1(z, L, z_0, z_d) \quad (5)$$

計測値 u_* と U を式(3)に代入して運動量バルク係数 C_M を求め, 式(4)(5)を用いて z_0 を算出した. 式(5)の Ψ_M はプロファイル関数であり関数形には近藤⁹⁾を参考にした.

(2) スカラー粗度

都市域におけるスカラー粗度の算出結果は著者の知る限りない. 算出には顕熱フラックスや潜熱フラックスの計測が必要であり, 風洞実験などでは容易に得られないためであると考えられる. 本研究では, これらの測定も同時に行っており, 熱粗度(z_T)と水蒸気粗度(z_q)を求めた. 運動量粗度 z_0 と同様にして, 下式より求めた.

$$-u_* T_* = C_H (T_s - T) U \quad (6)$$

$$-u_* q_* = C_E (q_s - q) U \quad (7)$$

$$C_H = \frac{k^2}{\Psi_M \Psi_H} \quad (8)$$

$$C_E = \frac{k^2}{\Psi_M \Psi_E} \quad (9)$$

$$\Psi_H = \ln \frac{z - z_d}{z_T} + \beta_2(z, L, z_0, z_T, z_d) \quad (10)$$

$$\Psi_E = \ln \frac{z - z_d}{z_q} + \beta_2(z, L, z_0, z_q, z_d) \quad (11)$$

上向き長波放射から放射温度 T_r を算出し, 地表面温度 T_s は T_r と等しいと仮定した. q_s は地表における飽和比湿である. 計測値 $u_* T_*$ と T を用いて, 式(6),(8),(10)より

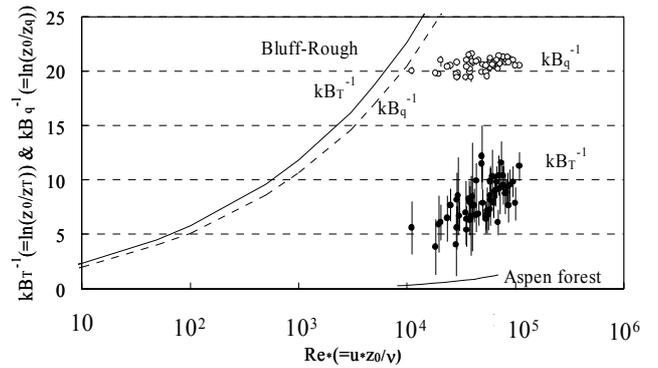


図-2 スカラー粗度と摩擦レイノルズ数. 誤差バーは放射温度を $\pm 1^\circ\text{C}$ 変化させたときの影響範囲を示す.

z_T を求め, 水蒸気も同様にして, 式(7),(9),(11)より z_q を求めている.

図-1(a)に z_0 の日中平均値を示す. z_0 は0.5~3mの間にあり日によってばらついている. 本観測期間(76日分)における z_0 の日中平均は1.56m, 標準偏差は0.56mであった. この値は形態学的手法で得られた値より大きくなった.

次に図-1(b)(c)スカラー粗度 z_T , z_q を示す. 運動量粗度 z_0 と比をとり, それぞれ $kB_T^{-1} = \ln(z_0/z_T)$, $kB_q^{-1} = \ln(z_0/z_q)$ をプロットした. kB_T^{-1} は平均8.0, 標準偏差1.8, kB_q^{-1} は平均20.5, 標準偏差0.6となった. 粗度を求める際に, 放射温度を代表温度に用いることはよく問題にされる. 特に植生などでは衛星から代表温度を算定する場合, 角度依存性があるので注意が必要である(例えば, 松島¹⁰⁾). ただし, 勝山ら²⁾の実験によれば都市($\lambda_p=0.44$)の場合, 放射温度が代表温度を精度よく表し, その差は 1°C 以内である. この誤差の影響は kB_T^{-1} が1.4, kB_q^{-1} が0.13であり, 傾向は大きくは変わ

らない。 kB_T^{-1} は草原などでは2.5の値をとることが知られているが（例えばGarratt¹¹⁾），岩場のような粗い表面ではもっと大きな値をとる（Brutsaert¹²⁾）。都市ではVoogt¹³⁾による $kB_T^{-1} \approx 3$ が唯一の報告例である。

kB^{-1} と摩擦レイノルズ数の関係を図-2に示した。本観測の結果は、森林や草原での値と、Brutsaertによる粗表面の予報式との間にプロットされている。住宅街では、建物、裸地、庭木などで構成されているため、このような中間的な値になったと考えられる。一方、 kB_q^{-1} は彼の予報式に近い値になっている。 z_T と z_q でこのような差が生じた理由は、熱・水蒸気の発生源に差異があることに起因していると考えられる。

(3) 蒸発効率 β

これまでに都市域の実測データに基づいて β を算定している研究例を著者らは知らない。顕熱と潜熱のバルク係数が等しいと仮定すると、潜熱・顕熱はそれぞれバルク式で式(12)，(13)のように表記され、これより β は式(14)となる。

$$H = c_p \rho C_H (T_S - T) U \quad (12)$$

$$E = \rho \beta C_H (q_S - q) U \quad (13)$$

$$\beta = \frac{c_p (T_S - T) E}{(q_S - q) H} \quad (14)$$

ここで、都市の代表表面温度 (T_S) の扱いが問題になる。ここでは、都市の代表表面温度として、上向きの長波放射成分より得られる放射温度を用いた。前節で述べたとおり、都市における放射温度は代表表面温度のよい近似になっている。

a) β の日変化

β の日変化を図-3に示した。この図から以下の興味深い事実が読みとれる。まず第1に、 β は1ヶ月以上にわたって0.2~0.05程度の値を維持している点である。平均的な森林の β は0.2~0.3でありこれらより小さい。第2に、無降雨状態が2週間続いた期間（図中の棒グラフは降雨の日積算値）に着目してみると、降雨後日数と共に β がゆっくりと低減していく。コンクリート・アスファルトなど主要な都市材料は降雨後数時間のオーダーで表面貯留を失い、その後は蒸発を0と仮定できるとする多くの既存研究（例えば、萩島ら¹⁴⁾）と明らかに傾向を異にしている。第3に、同じく無降雨期間に着目するとわかりやすいが、一方向的な乾燥過程とは別に日毎の変動を伴っている。第1~第2の傾向は、我々の先入観に反し、住宅街が意外に蒸発源としてのポテンシャル・時定数を備えていることを示唆している。以下、住宅街における潜熱の発生源について検討する。

b) 緑被（植栽）や裸地の影響

都市域の観測で有意な潜熱フラックスが得られると、それは庭木などの蒸散によるものとされることが多い。本観測のソースエリア内では緑被面積率は20%であり、運動場などの裸地も含めると、緑被・裸地面積の占める

割合は30%程度である。日中200(W/m²)に達する潜熱量（後章参照）が全て緑被・裸地から蒸発していると仮定すると、正味放射量Rnが全て潜熱に使われていることになる。神田らによる明治神宮の森での熱収支の実測例¹⁵⁾では潜熱はRnのせいぜい7割程度である。住宅街に点在する庭木などの植栽や裸地は、乾燥し高温化した環境下に曝露されるため、明治神宮のような大規模緑地に比べて高いオアシス効果を有することは十分あり得る。

c) 都市材料からの蒸発の可能性

次に、典型的な都市材料の1つであるコンクリートからの蒸発の可能性に着目して考察する。都市気候研究では、コンクリートからの蒸発は0と仮定されるが、中性化現象に取り組むコンクリート研究者は、精力的にコンクリートによる水分交換（浸水・蒸発）のメカニズムを調べている（残念ながらすべて室内実験で屋外での観測データが無い）。ここでは、佐伯¹⁶⁾の室内実験を基に考察を行う。彼はコンクリートの供試体を用いて、養生後の経過日数とコンクリートの蒸発特性を詳細に調べている（詳細は表-4）。コンクリート分野では、慣用的に α にほぼ相当するような蒸発定義がなされている。

$$E = f(\alpha - h) \quad (15)$$

ここで、E: 単位面蒸発量 (mm/day)，f 表面係数 (mm/day)，h: 周囲の相対湿度 である。fはバルク係数、風速、周囲（表面）温度、の関数となるが、コントロールされた室内では一定となり好都合である。 α は理論的に以下の式で蒸発効率 β に読み替えられる。

$$\beta = \frac{\alpha - h}{1 - h} \quad (16)$$

養生後の経過日数と β の変化を図-4にまとめた。データは初期養生の終了後2日目以降からプロットされている。現地のコンクリートと厳密な比較はもちろんできないが、初期養生直後（0日目）をある程度まとまった降雨の直後と見なして考察する。ちなみに、コンクリートの空隙率は約20%程度であり、絶乾状態の供試体を浸水させると10時間程度でほぼ70%~80%程度まで含水率が上昇する。従って継続時間が長くまとまった雨の降った後は、表面は飽和に近い状態になっているとしても差し支えなからう。図によれば、養生後2日目では、0.4~0.2と高い β を示しているが、ゆっくりと減少し、30日後には0.05~それ以下と非常に低いレベルになっている。また、住宅街では複雑な幾何構造が表面積を増加させている点にも注意を要する。久が原の場合、単位敷地面に対する構成建築材料の表面積比は約2.8倍である。従って局所的には β が0.05であっても、単位敷地面積あたりでは2.8倍の0.14を有することができる。直ちに観測と定量的に結びつけることはできないが、この結果はコンクリートそのものが住宅街における蒸発に支配的な影響を及ぼし得る湿潤度と変動幅を有することを示唆している。

以上より、住宅街における緑被とコンクリート面からの蒸発の可能性をそれぞれ検討した。両者を完全に分離するには数値モデルによる検討を行う必要がある。

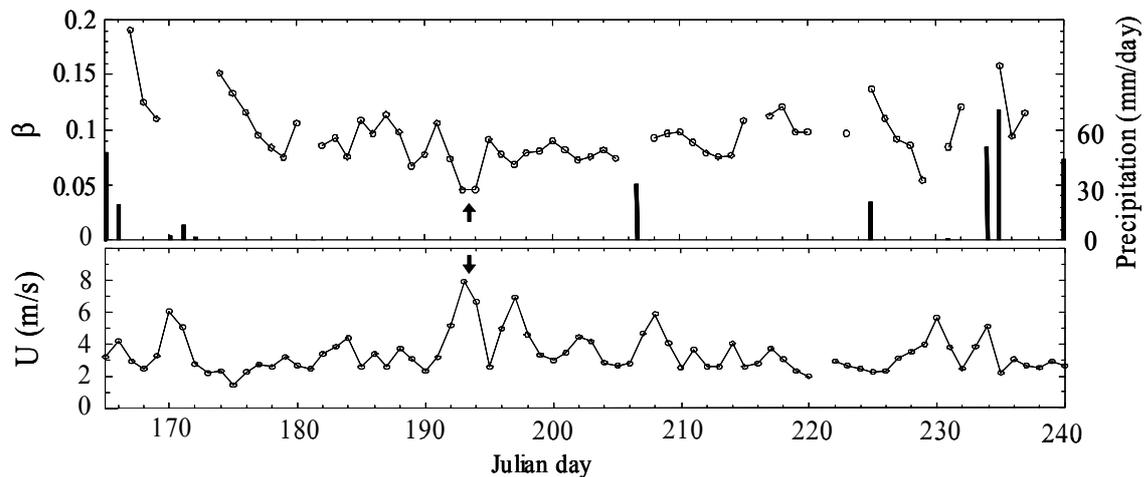


図-3 蒸発効率 β と日積算雨量(上図)と風速(下図)の日変化

表-4 コンクリートからの水分散逸試験の概要

供試体のサイズ(cm)	4×4×16
蒸発面(cm ²)	64(=4×16)
初期養生期間	28日
水セメント比 (W/C)	65%
乾燥条件	20°C-60%
(恒温恒湿槽を使用)	40°C-50%

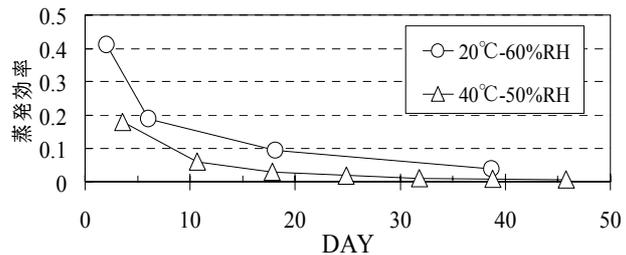


図-4 コンクリート素材 Day 効率 (佐伯から引用)

d) β の風速依存性

最後に、第3の特徴として指摘した β の日毎のばらつきについて説明する。 β は水平風速にも影響され風速が大きいと著しく低下する(図中の黒矢印)。これは乾燥帯の蒸発特性と定性的に類似している。近藤⁹⁾によれば、乾燥土壌面における β は風速に逆比例することが理論的に示される。土壌中の水蒸気輸送抵抗が大きい場合、風速の増大に対して水蒸気補給が間に合わず β の低下をもたらす。コンクリートや都市材料の水蒸気輸送抵抗は一般的に非常に大きいわけであるから、 β が風速に敏感に反応することが期待されるわけである。もちろん、風速変動に対する庭木の気孔反応なども一応考えらなくてはならないが、強風時を除けば通常これほど敏感ではない。

(4) アルベド

図-5にアルベドの日変化を示す。都市の主な構成素材であるコンクリートのアルベドは0.4程度であるが、これに比べて都市のアルベドは小さい。都市において、建物が建ち並ぶと地表面の凹凸が増し、入射された日射量は多重散乱によって都市キャノピーの中にトラップされ、コンクリート平面に比べてアルベドが下がる。アルベドは観測期日を通して約0.13の一定な値になる。晴天・曇天様々な条件のデータが混在しているが、その影響はほとんど見られない。この傾向は実験や高精度放射モデルと同様の結果が得られている(勝山²⁾、神田³⁾)。

しかし降雨があるとアルベドは低下する。コンクリートやアスファルトの表面が濡れることにより、反射特性が変わるためと思われる。裸地面ではよく知られていることだが、都市における実測によっても同様の傾向を確

かめられた。一度低下したアルベドは、降雨後2,3日で元の値に回復し、その時定数は β より短い。

図-6にはアルベドの経時変化を示した。アルベドは下に凸となる変化をしており、太陽高度と多重散乱の理論(神田³⁾)と一致した変化をしている。注目すべきは南中時刻を挟んでアルベドが左右非対称になっていることである。測定地点周辺の道路軸は南北線に対して5.5°傾いており、そのために多重散乱に偏りが生じる。この傾向についても実験(勝山²⁾)や数値モデル(神田³⁾)で確認されている。

4. 都市の熱収支

最後に本観測サイトの熱収支変化の特徴を紹介する。

図-7を見ると、正味放射量 R_n の約半分は顕熱 H に変換されている。潜熱 IE は日中のピーク時で $200W/m^2$ に達しており、都市では予想に反して大きい水蒸気が放出されている。残差($R_n - H - IE$)より求めた G は、 R_n や H に先だってピークになり16時ころには正負が逆転する。これは乾燥帯の変化特性と定性的に類似している。

5. 結論

低層住宅街における放射収支、フラックス計測にもとづいて、都市の陸面パラメーターを算定し、下記の結論を得た。

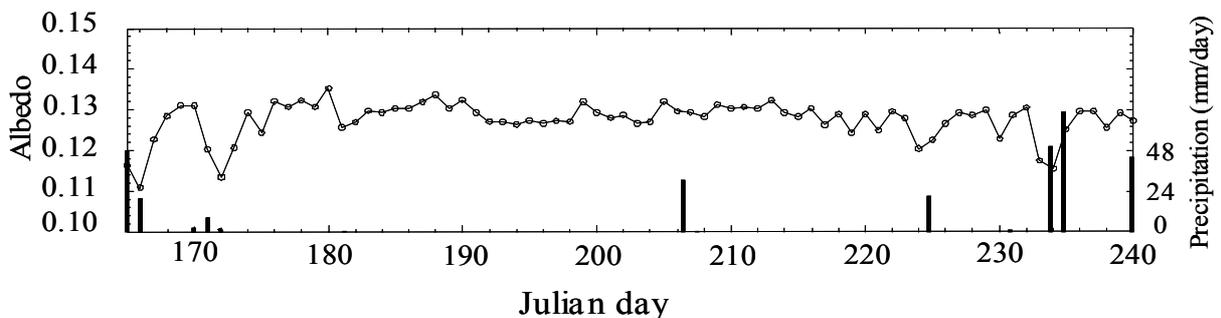


図-5 アルベドの日中平均値と日積算雨量の日変化

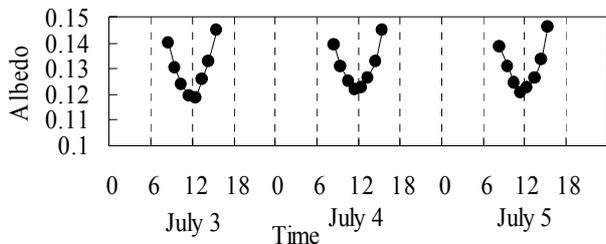


図-6 アルベドの経時変化

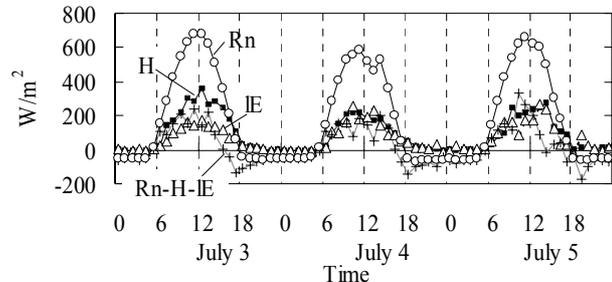


図-7 熱収支の経時変化

- (1)都市における日中の平均的な流体力学的粗度 z_0 は 1.56m, 熱粗度 kB_T^{-1} は 8.0, 水蒸気粗度 kB_q^{-1} は 20.5 と算出された。
- (2)蒸発効率 β は 0.05~0.2 の範囲にあり降雨後に数日~数十日のオーダーで低減していく。水蒸気の発生源として緑被とコンクリート素材についてそれぞれ定量的に検討し、両者とも単独で住宅街の水蒸気源となり得る可能性を指摘した。また β は風速への依存性があり、風速が大きい日に著しく低減する。
- (3)平均的なアルベドは約 0.13 である。降雨時にはアルベドが低下するが、降雨後 2,3 日で元の値に回復する。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究 (B) (2) (課題番号: 12450197) による財政的援助を受けた。また観測場所の提供には、宗教法人カトリックお告げのフランシスコ修道会 (代表: 白石幸子様) に多大なるご協力をいただいた。また建物高さの測定に使用したレーザー距離計は、東京工業大学国際開発工学専攻太田教授に、放射収支の測定に用いた放射計は、同大学土木工学専攻池田教授にお借りした。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 浅枝隆, 藤野毅: 舗装面の熱収支と蓄熱特性について, 水文・水資源学会誌, **5**, pp.3-7, 1992.
- 2) 勝山滋郎, 神田学, 河合徹, 中川清隆: 3次元都市キャノピーのスケールモデル実験, 水工学論文集, **46** (印刷中)
- 3) 神田学, 勝山滋郎, 中川清隆: 3次元都市キャノピーの熱収支モデル, 水文・水資源学会2001年要旨集, pp.268-291, 2001.
- 4) 渡邊倫樹, 森脇亮, 神田学, 松永和章: 都市域におけるコンスタント・フラックス層の存在条件について, 水工学論文集, **46** (印刷中)
- 5) McMillen, R.T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, **43**, pp.231-245, 1988.

- 6) Webb, E.K., Pearman, G.I. and Leuning, R.: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quart. J. of Roy. Met. Soc.*, **106**, pp. 85-100, 1980.
- 7) Grimmond, C.S.B. and T.R. Oke.: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *J. Appl. Meteorol.*, **38**, pp.1262-1292, 1999.
- 8) Macdonald, R.W., Griffiths, R.F. and Hall, D.J.: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, **32**, pp.1857-1864, 1998.
- 9) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 1994.
- 10) 松島大: 放射温度を使った植生地における顕熱・潜熱フラックスの推定, 小スケール放射環境研究会講演論文集, **1**, pp.9-21, 2001.
- 11) Garratt, J.R. and R.J. Francey: Bulk Characteristics of heat transfer in the unstable, baroclinic atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **15**, pp.399-421, 1978.
- 12) Brutsaert, W.: Evaporation into the atmosphere: Theory, History, and Applications, *Kluwer Academic Publishers*, pp.299, 1984.
- 13) Voogt, J.A. and T.R. Oke: Complete surface temperatures, *J. of Applied Meteorol.*, **36**, pp.1117-1132, 1997.
- 14) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 月松孝司, 降水後の人工被覆面からの蒸発量予測簡易モデルの構築, 日本建築学会計画系論文集 No.539, pp.83-88, 2001.
- 15) 神田学, 森脇亮, 高柳百合子, 横山仁, 浜田崇: 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(1)1996年夏期集中観測; 天気, **44**, pp.713-722, 1997.
- 16) 佐伯竜彦: コンクリートの中酸化および中性化に伴う劣化の進行予測に関する基礎的研究, 東京工業大学工学部土木工科学学位論文, 1995.

(2001. 10. 1受付)