

3次元都市キャノピーのスケールモデル実験

EXPERIMENT USING 3D SMALL-SCALE MODEL IN URBAN CANOPY

勝山滋郎¹・神田学²・河合徹³・中川清隆⁴

Shigero Katsuyama, Manabu Kanda, Toru Kawai and Kiyotaka Nakagawa

¹ 学生員 東京工業大学 工学部土木工学科 (〒152-8852 目黒区大岡山 2-12-1)

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 (〒152-8852 目黒区大岡山 2-12-1)

³ 非会員 東京工業大学 工学部土木工学科 (〒152-8852 目黒区大岡山 2-12-1)

⁴ 非会員 理博 上越教育大学 自然系 (〒943-0815 新潟県上越市山屋敷町1)

The relation between the urban structures and radiation processes within 3D canopy layers has been investigated through the experiment by using small-scale models. Concrete blocks (15cm x15cmx15cm) were regularly arranged and the built-up densities were systematically controlled. As a consequence, the following results were obtained;

(1) Canopy albedo are significantly influenced by urban structures and seasons. There exists an urban density which gives a minimum values of canopy albedo in each season. (2) The four kinds of representative urban temperature, that is, complete temperature, radiation temperature, satellite temperature and aero-dynamic temperature are compared, and their dependency on canopy densities are discussed. (3) The contribution of heat transfer of each surface is shown.

Key Words : Urban canopy small-scale model, Albedo, Urban canopy temperature, Aero-dynamic temperature, Coefficient of sensitive heat flux

1. はじめに

領域スケールの水文気象において都市の存在は重要であり、その実態解明とモデル化が急務である。しかし、都市域での実測には多くの制約条件があるため¹⁾、極めて限られたデータしか存在せず、都市の幾何構造の違いがエネルギー・物質交換過程に与える影響については系統的理解が得られていない。都市キャノピーのモデル化も精力的に行われつつあるが^{2), 3)}、検証に用いられるデータベースがない。

このような場合、実測・モデル化とならぶ有力な研究手段としてスケールモデル実験が挙げられる。実際、キャノピー層の乱流構造についてはほとんどの知見が室内実験から得られている。実現象との相似性は厳密な意味では満足されない欠点があるものの、現象解明に果たした役割の重さは論を待たない。

本論では、スケールモデルにより都市幾何構造をシステムチックに変化させ、それが放射過程に及ぼす影響を検討すると同時にモデル検証用のデータベースを構築することを目的とする。

2. 既存のスケール実験と本論のねらい

スケールモデルによる放射実験としては唯一 Aida(1982)の研究⁴⁾が挙げられる。Aida(1982)は均

一なコンクリートブロックを建物と見立てて規則的に配置させた模型都市を作り、建物群では多重反射の影響により、Flat 面よりもアルベドが低下することを初めて証明した。アルベドモデルの検証に用いられるデータはこれしか存在しない。Aida(1982)データベースでは、(1) 3次元キャノピーについて、建蔽率 0.25 の場合のデータしか無いこと、(2) 南中時を境にアルベドが午前午後で大きく対称からはずれる等、不可解な点があること、など補足・拡充すべき点も多い。

本論では基本的に Aida の実験方法を踏襲しながらも、精度向上のための改善を加え、さらに複数の幾何構造の組み合わせに対して短波放射データベースを構築する。

日中の長波放射収支あるいは代表表面温度に関するスケールモデルは存在しない。本論では新しい試みとして、(1) 様々な幾何構造に対する表面温度分布および長波放射収支を計測し、データベース化する、(2) 都市の代表表面温度として用いられる完全表面温度、衛星観測温度、上向き放射温度(後述)、をそれぞれ相互比較し、それらの違いおよび幾何構造との関連性を検討する、(3) 熱収支解析からスケールモデル各要素面の熱輸送係数を逆算し、顕熱輸送に対して各要素面が果たす寄与割合を逆算する。

3. 実験モデル概要

本論の実験モデルは Aida(1982) の模型実験になっている。図 1 のように辺 15cm のコンクリートブロックを都市を構成する建物と見立てて規則的に配置された模型都市としている。コンクリートブロックと道路面を構成するコンクリートプレートとは同素材でできている。模型のサイズは 3.6m×3.6m であり、Aida のモデルより辺 0.6m ほど広げている。放射計は短波・長波ともに道路面から高さ 55cm のところに設置していることより、モデル外からの影響は最大でも 5% とビューファクターの理論より見積もられる。道路方位は南北軸から半時計回りに 9° 傾けており、日本の標準時間の正午よりも 30 分近く前に南中時を迎える。この実験を東京工業大学緑ヶ丘 1 号館の屋上で行った。

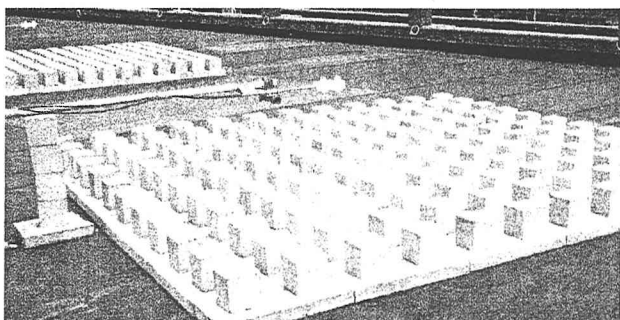


図-1 模型都市スケールモデル

本実験では図-1 のように同素材の模型都市を 2 つ作った。測定日が異なると気象条件（日射量や直散比など）が異なるため、純粋に幾何構造の違いで熱環境が変化するという事を議論できなくなる可能性がある。Aida は Build and Scrap という方法でその影響をカバーしていた。アルベドの測定のみならば、Build and Scrap によってカバーできる。また、アルベドには直散比の違いはそれほど影響しないことが解析により判明しているので気象条件が異なる別の日に測定してもさほど問題はない。しかし本論では長波放射にも着目している。長波放射の測定には気象条件が大きく影響することや周囲との調和が必要となることから測定の同時性が必要となる。そこで模型都市を 2 つ並べることで、2 つの異なる建蔽率で長波放射（温度）が互いに違うことを議論することを可能にした。

本実験では温度測定方法として長波放射計のほかには表面温度の測定にサーモグラフィーを用いている。本モデルではコンクリートブロックが規則的に配置されているので、ある一つのブロックに着目して、それを構成する各要素面（床面、各壁面、屋根面）の表面温度を測定した。

また、本論では熱収支にも着目しているため、短波・長波以外に貯留熱を測定する必要がある。貯留熱は熱流板で測定する。各要素面を薄く削って埋め込んでいる。

4. 短波放射実験結果

模型都市スケールモデルを用いて行った短波放射の実験結果をアルベドという形で整理した。実験は夏至点のデータは全て 7 月前半に、秋分点のデータは全て 9 月後半に行った。その結果を図-2 と図-3 に示す。図-2 と図-3 によれば、いずれの建蔽率についても Flat 表面に比べてアルベドが低下していることが確認できる。これは、従来より指摘されている通りに凹凸による多重反射の影響である。

全アルベドデータに共通する重要な点を指摘する。ただし、ブロックを 2 段に重ねて高さを変えることでキャノピー深さにも変化を与えたときの実験も行っているが、紙面の関係上建物を立方体としたときのみのデータを記載する。

(1) 第 1 に、図-2、図-3 には晴天・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。これは、天空からの日射の直達・散乱比率がアルベドに影響していないことを強く示唆している。高精度放射モデルを用いた計算でも同様の傾向が得られているし⁵⁾、現地におけるアルベド日平均データもほぼ一定の値を示しており⁶⁾、この実験結果を支持している。

(2) 第 2 に南中時を挟んだ午前午後アルベドの非対称性に着目していただきたい。これは道路軸が、南北線に対して 9° 傾いていることによる影響と考えられる。道路軸の傾きの影響はとりわけ低太陽高度の際に顕著に現れる。例えば、図-2 の建蔽率 0.11 で 7 時以前と 16 時以降のアルベドの変化は定性的にも逆の挙動を示している。Aida(1982) の設定では、道路軸が南北線と一致しているから、厳密に対称性が保たなければならないはずであるが、実際には低太陽高度時に顕著な非対称性が見られている。これ以後は建蔽率を λ で表現する。 λ は建物が立方体のときの建蔽率である。

(1) 夏至点でのアルベドについて

Flat 表面に対するキャノピーアルベドの低下する傾向は、とりわけ $\lambda=0.25$ より密になると著しく顕著になる。建蔽率の増加と共にアルベドは次第に低下するが、注意深く見ると、南中時におけるアルベドは $\lambda=0.44$ と $\lambda=0.52$ のときがほぼ同値で最小値をとっており、 $\lambda=0.69$ では逆に増加している。このことより、アルベドを最小化させる建蔽率が存在し、東京夏至点においては $\lambda=0.5$ 前後であると推測できる。

次に、建蔽率別のアルベドの時間変動を詳しく見てみよう。 $\lambda=0.25$ のとき、アルベドの時間変化（太陽高度依存性）は非常に小さく、ほぼ水平なグラフとなっている。この理由は、太陽高度が低くなると屋根面でのアルベドが高くなる反面、キャニオン内には日射が入射しやすくなり多重反射が増加してアルベドを下げる、この両者の効果がキャンセルするためであろう。建蔽率が 0.25 より密になるにつれて

キャニオンに入射する日射量の割合が減少し、屋根面の影響が大きくなるため Flat 表面のアルベドの挙動に近づく。 $\lambda=0.69$ になると Flat 表面のアルベドの挙動とかなり類似した挙動を示すようになり、その値は Flat 表面のアルベド $\times 0.69$ に近い値となる。これは屋根面での反射のみ影響してキャニオンに入り込んだ熱は上空に戻らずキャニオン内で吸収されるということを示している。

(2) 秋分点でのアルベドについて

まず、Flat 表面のアルベド自体は夏至時よりも全体的に少し高くなっている。ところがキャノピーアルベドにはその影響が見られない。むしろ南中時前後に注目すると夏至時よりもアルベドが低下している。この違いは、夏至点に比べて南中時太陽高度が低いいためキャニオンに入射しやすくなっているためである。また、南中時前後はほぼ一定値をとっていた夏至点に比べて、前後の時間帯に比べて南中時に少しアルベドが上がり、W型の時間変化を示しているのも秋分点の特徴である。

また、 $\lambda=0.44$ のときより $\lambda=0.52$ のときのほうがアルベドが高くなっていることから、秋分点のアルベドも夏至点と同様に Flat 表面から建蔽率が大きくなるにつれてアルベドは低くなり、ある建蔽率を境に再び Flat 表面のアルベドに近づいていくことがわかる。東京秋分時点での南中時のアルベドは $\lambda=0.45$ 前後のときに最小になると思われる。

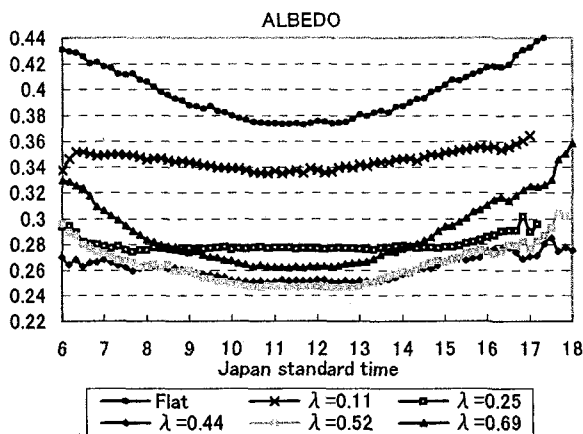


図-2 夏至点における各建蔽率のアルベド

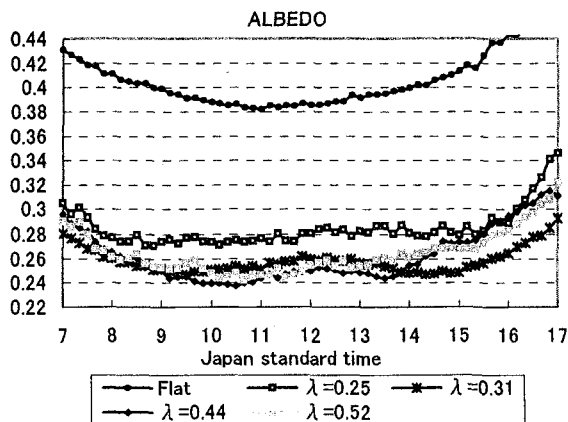


図-3 秋分点における各建蔽率のアルベド

5. 長波放射実験結果

本論では長波放射量を代表温度の視点で議論する。建蔽率が異なれば下向き長波放射量は同じでも表面温度の違いやその長波放射過程の違いから上向き長波放射量は異なるであろう。また、キャノピー構成面の各表面温度が同じであったとしても、凹凸面の代表温度を如何にして定義するかは議論の多いところである。本論ではまず代表的な4つの代表温度について述べてから、測定結果に基づいてそれらと比較検討する。7/11に(a) $\lambda=0.25$ と(b) $\lambda=0.44$ 、の同時比較実験を、9/18に(c) $\lambda=0.31$ (2倍高さ)の単独計測を、それぞれ行った。

(1) 各代表温度の定義

本論では都市キャノピー代表温度として、(1)完全表面温度 T_c 、(2)境界層上向き長波放射温度 T_r 、(3)衛星観測温度 T_s 、(4)空気力学的温度 T_a 、の4つを定義する。(1)完全表面温度とは各面の表面温度を面積で重み付けした平均温度のことである。(2)境界層上向き長波放射温度とは都市キャノピー上空に設置した放射計が受ける長波放射量を温度換算したもので、そこで受ける長波放射量は各表面から放出される長波放射量を面積とスカイビューファクター(天空率)で重み付けしたものである。(3)衛星観測温度とは(2)の放射計を十分に高度のある高さに設置したときの長波放射温度である。必ずしも直下視とは限らないが、通常、気象学分野ではこのときの長波放射温度を衛星観測温度としており、本論もそれに従う。(4)空気力学的温度とはバルク式で定義される理論上の代表温度であり、各要素面の面積とバルク係数で重み付けした温度である。(1)~(4)の温度を式で表現すると次のようになる。

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^6 S_i T_i}{\sum_{i=1}^6 S_i} \quad (1)$$

$$T_r = \left(\frac{\sum_{i=1}^6 S_i L_i V_i / \sigma}{\sum_{i=1}^6 S_i} \right)^{0.25} \quad (2)$$

$$T_s = \left(\frac{\sum_{i=5}^6 S_i L_i V_i / \sigma}{\sum_{i=5}^6 S_i} \right)^{0.25} \quad (3)$$

$$T_a = \left(\frac{\sum_{i=1}^6 S_i C_{H(i)} T_i}{\sum_{i=1}^6 S_i C_{H(i)}} \right) / C_H \quad \left(C_H = \sum_{i=1}^6 S_i C_{H(i)} \right) \quad (4)$$

ここで $i=1\sim 6$ は都市を構成する各表面番号とする。 $i=1\sim 4$ は建物の各壁面、 $i=5$ は床面、 $i=6$ は屋根面をそれぞれ示している。 S_i は各要素面の面積比率、 V_i は各要素面の天空率をそれぞれ示す。 L_i は各表面で最終的に放出されることになる長波放射量である。各表面では表面自身から放射率 ε に比例して赤外放射を放出しており、天空からの長波放射を $(1-\varepsilon)$ に比例して反射して放出している。本論の模型都市スケールモデルで用いたコンクリート素材の放射率は熱電対と放射計を用いて $\varepsilon=0.975$ を算出した。

(1)～(3)の代表温度は、表面温度・放射計測から容易に求まるが、(4) T_a の算定は非常に困難で熱収支情報を必要とする。これについては後述する。

量自体が小さいこと、乱流による輸送効率が $\lambda=0.44$ より小さいことなどが考えられる。

(2) 建蔽率の違いによる温度変化

代表温度についての議論の前に、建蔽率の違いによる温度変化を確認しておきたい。図-4 は $\lambda=0.25$ と $\lambda=0.44$ のスケールモデルを2つ並べて同時に T_r を測定した結果である。早朝・夕方は大差ないが、南中時で約 2°C ほど $\lambda=0.25$ の放射温度が高くなっている。これにより同じ素材でも建坪率でキャノピー温度が影響を受けることが明白である。 $\lambda=0.25$ のアルベドの方が高いにも関わらずより高温化する原因としては、単位敷地面あたりのコンクリート容

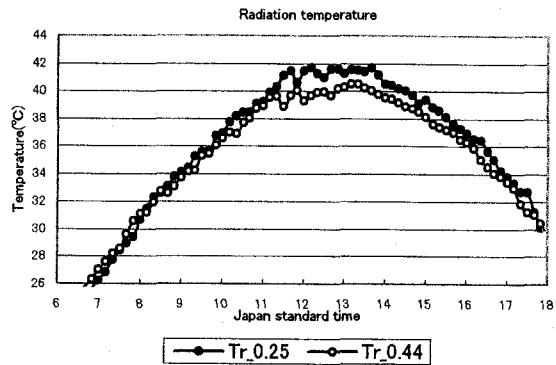


図-4 $\lambda=0.25$ と $\lambda=0.44$ のときの T_r

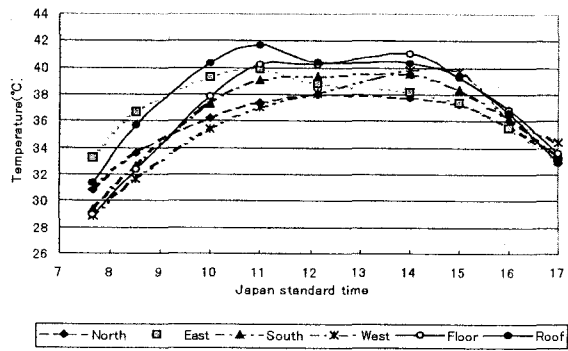
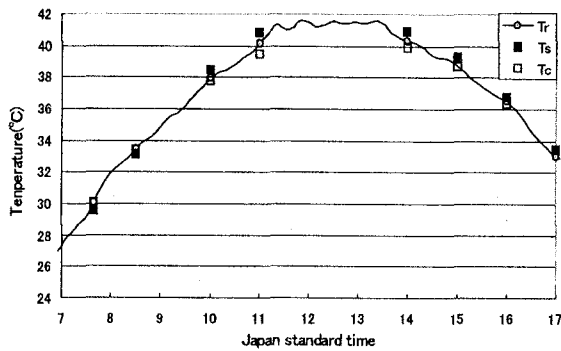


図-5 $\lambda=0.25$ のときの各代表温度 (左図) と各表面温度 (右図)

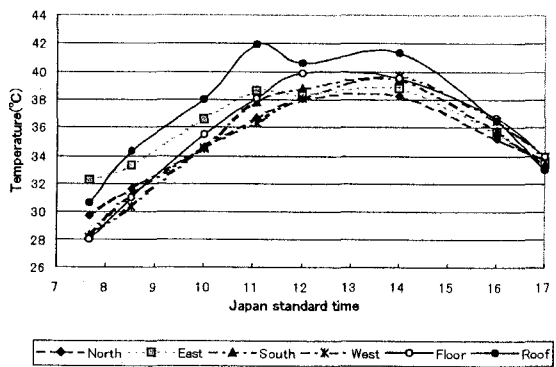
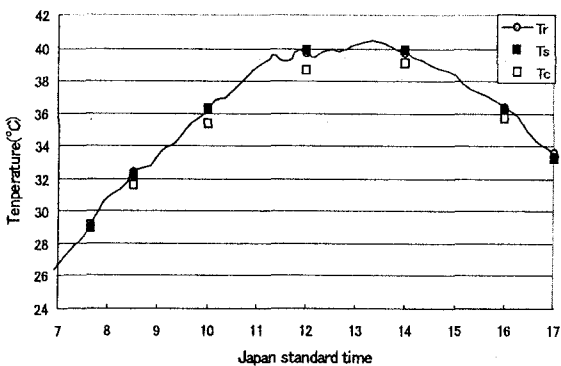


図-6 $\lambda=0.44$ のときの各代表温度 (左図) と各表面温度 (右図)

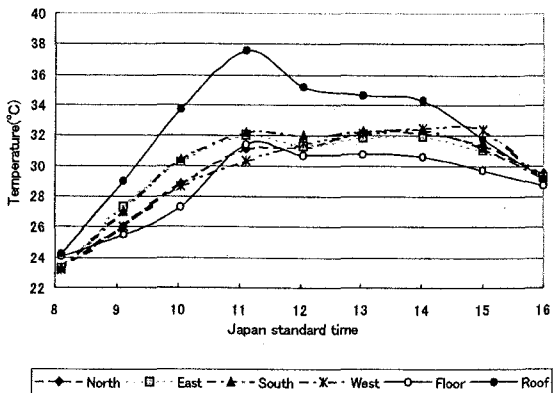
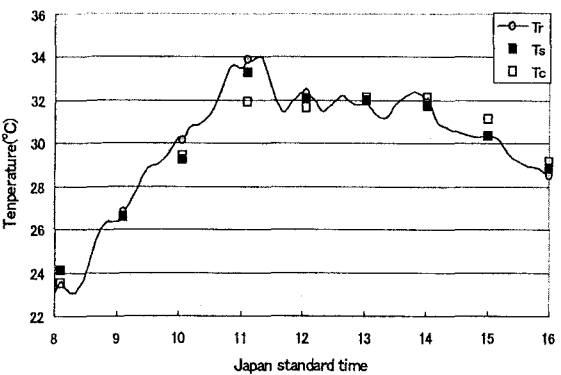


図-7 $\lambda=0.31$ (高さ2倍)のときの各代表温度 (左図) と各表面温度 (右図)

(3) 各代表温度の測定結果について

T_a を除く3つの代表温度の結果とそれらに対応した各表面温度の結果を図-5 ($\lambda=0.25$)、図-6 ($\lambda=0.44$) および図-7 ($\lambda=0.31$ で建物高さ2倍) に示す。図-7の測定日は11時まで晴天であったが、それ以降は曇天であった。晴天時において、代表温度を相互比較すると、大局的に次のように要約できよう。

(a) $\lambda=0.25$ の場合: $T_c < T_r < T_s$ 、

(b) $\lambda=0.44$ の場合: $T_c < T_r \cong T_s$ 、

(c) $\lambda=0.31$ で高さ2倍の場合: $T_c < T_s < T_r$ 、

いずれにおいても T_c がもっとも小さくなるのは、低温な日陰面を一律に面積比で分配するためである。 $\lambda=0.25$ のときは日射がキャニオンに入射しやすいため屋根面温度とキャニオン内の各表面温度との差は小さく、床面も比較的高温である(図-5)。そのなかで最も高温なのが屋根面であるため、 T_s が最も大きくなる。 $\lambda=0.44$ の場合は、キャニオン内に日射が入射しにくくなるため、床面温度が相対的に低下し、 T_s と T_r の差が縮まり、ほぼ同値となる(図-6)。 $\lambda=0.31$ 高さ2倍の場合は、 T_r が最も高くなっている。キャニオンが深いため、屋根面温度に対して床面や壁面の温度はかなり低くなるが(図-7)、そのような深いキャニオン内の低温面は天空率も低いので、長波放射がキャニオン外へ放出されないため、 T_r にはあまり寄与しないのである。従って図-7より T_r の変化は専ら屋根面の温度変化に追従し、屋根面以外とは連動していないように見える。

(4) 空気力学的温度について

空気力学的温度 T_a は熱収支理論に立脚しており、物理的意味のある真の代表温度と言えるが、通常観測が非常に困難である。今回は各面の熱収支式を用いて逆算した。

$$S \downarrow + L \downarrow - S \uparrow - L \uparrow = G + H + IE \quad (5)$$

コンクリート表面からの蒸発 IE をゼロと仮定し、貯熱量 G は測定による。各面の放射収支は、実測値と高精度放射モデル⁹⁾を組み合わせで算定し、その残差から各要素面の顕熱流 H_i を求めた。各要素面における顕熱流は以下ようになる。

$$\sum_{i=1}^6 H_i = c_p \rho C_{H(i)} U (T_i - T) \quad (6)$$

ここで T はリファレンスの温度である。キャノピー内の空気の貯熱量を無視すると、大気-都市キャノピー間全体での顕熱流(式(7))は各要素面からの顕熱流の和(式(8))に等しくなる。

$$H = c_p \rho C_H U (T_a - T) \quad (7)$$

$$H = \sum_{i=1}^6 H_i \quad (8)$$

(6), (7), (8) より次式が得られる。

$$\left(C_H - \sum_{i=1}^6 S_i C_{H(i)} \right) T = \left(C_H T_a - \sum_{i=1}^6 S_i T_i C_{H(i)} \right) \quad (9)$$

式(9)が任意のリファレンス気温 T について恒等的に成立する必要性から次式が得られ、キャノピー層全体としてのバルク係数 C_H と空気力学的温度 T_a がそれぞれ求まる。

$$C_H = \sum_{i=1}^6 S_i C_{H(i)} \quad (10)$$

$$T_a = \left(\sum_{i=1}^6 S_i C_{H(i)} T_i \right) / C_H \quad (11)$$

以上のように、 T_a を算出した。その結果を、 $\lambda=0.44$ の場合についてのみ図-8に示す。その他の建蔽率については G の計側が行われていないため算定できない。 T_a は代表温度のなかで最も低くしかも T_c に近い。このことは、 T_r と T_s に比べて T_a にはキャニオン内における壁面・床面の寄与がより強く反映されていることを意味している。放射フラックスでみると屋根面の寄与度が高いが、顕熱フラックスでみると壁面や床面の寄与が大きくなると言い換えることもできる。ラフネスの大きいキャノピー流では、キャニオン内に大きな乱流渦が形成される。このいわゆる Wake 効果によって、壁面の熱輸送が促進され、壁面の寄与度を向上させていると考えられる。

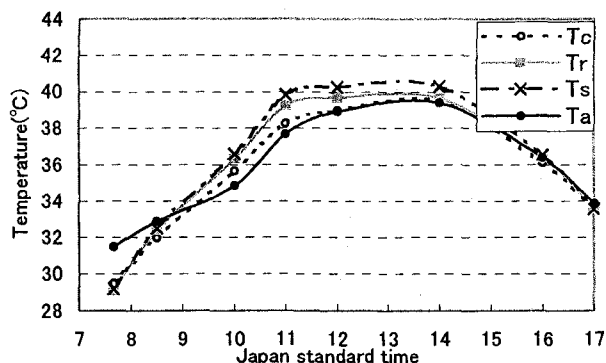


図-8 T_a を含む代表温度の比較 ($\lambda=0.44$)

6. 熱収支と顕熱輸送寄与率

以下では、各要素面の熱収支より熱輸送係数を逆算し、顕熱輸送に対して各表面が果たす寄与割合を算出した。

(1) 熱収支データ

$\lambda=0.44$ のときの熱収支の測定結果を図-9に示す。この熱収支データはキャノピー全体での熱収支を示している。この日が終日晴天であったというのも $S \downarrow$ の分布から確認できる。 G は日射が当たり始めるとプラスに転じ、9時頃に最大となる。そして15時頃に再びマイナスとなり、周囲に貯留していた熱を放出する。 H は潜熱ゼロの仮定の下で求めた。

$S\downarrow$ と似た挙動をしているが、 $S\downarrow$ が南中時の正午前に最大となっているのに対して、 H は正午より後に最大となっており、12時～13時に顕熱輸送量が最大となることがわかる。

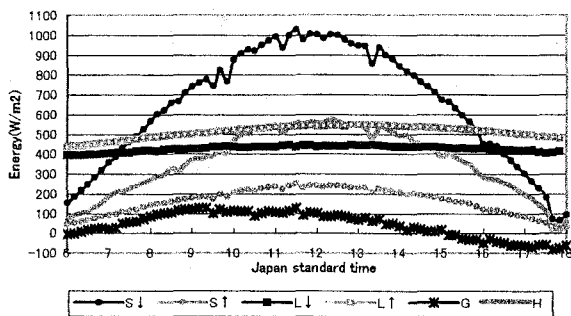


図-9 熱収支 ($\lambda=0.44$)

(2) 顕熱輸送寄与率

各要素面で熱収支式とバルク輸送式を用いて、各表面における顕熱輸送係数 $C_{H(i)}$ を求めた。図-10にその結果を示す。図-10の縦軸はキャノピー全体の C_H に対する各要素面の $C_{H(i)}$ の割合を表しており、顕熱輸送の寄与度となっている。早朝は風向が非常に不安定で信頼性に欠けるため、10時以降の $C_{H(i)}$ 率のデータを掲載した。午後になり海風が安定してくると、 $C_{H(i)}$ も安定した値となる。顕熱輸送に対する寄与率は一日を通じて屋根面が最も高く、午前中は東側壁面、午後は西側壁面が高くなっており、高温となる表面の寄与率が高くなっている。これはWake渦に加え、局所的な高温化による浮力の影響であると考えられる。そして16時から17時になると各要素面で寄与率の差が小さくなっていくのがわかる。

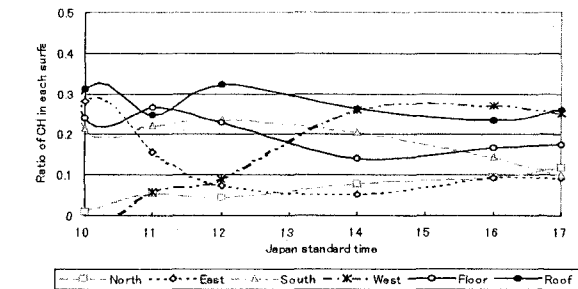


図-10 顕熱輸送寄与率 ($\lambda=0.44$)

$C_{H(i)}$ 率を一日平均(10時～17時)でみたときの値を表-11に示す。前述の通り最も高温となる屋根面が最も寄与率が高くなっており、顕熱流全体の4分の1以上が屋根面から放出されている。各壁面でみると南側壁面が北側壁面の約3倍の寄与率である。10時～17時の値を平均しているために東側壁面よりも西側壁面のほうが寄与率が高くなっている。床面がどの側壁よりも高い寄与率を示すこと、また4つの側壁でも表面温度によって寄与率がかなり変化すること、などの事実は、都市キャノピーに植生モデル型の鉛直一次元的パラメタリゼーションを

適用することの限界を強く示唆している。

表-11 顕熱輸送寄与率の日平均(10時～17時)

	North	East	South	West	Floor	Roof
$C_{H(i)}$ 率	0.067	0.125	0.187	0.145	0.202	0.274

7. 結論

本論では模型都市スケールモデルを用いた実験から以下の結論を得た。

- (1) キャノピーアルベドは建蔽率や季節によって挙動が異なる。同じ建蔽率であっても季節が異なればキャノピーアルベドの時間変動も異なる。さらに夏至、秋分ともにキャノピーアルベドの最小値を与える建蔽率が存在する。
- (2) 本論で定義した4つの代表温度の相互関係は都市の幾何形状によって異なる。2倍高さの $\lambda=0.31$ のようにキャニオンが深くなると、 T_r は屋根面の寄与度が高くなるため、4つの代表温度のなかで T_r が最も高くなる。 $\lambda=0.44$ のとき、空気力学的温度 T_a を最も忠実に表現するのは T_e である。
- (3) 都市キャノピーを構成する各要素面の顕熱輸送に対する寄与率について定量的に考察した。高温になる表面ほど寄与率が高く、 $\lambda=0.44$ のとき、一日で見ると屋根面は全体の4分の1以上の寄与率である。

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。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 渡辺倫樹，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，2001
- 2) 浅枝隆，藤野毅，ヴダンカ，足永靖信：都市キャノピーモデルの街区スケールへの適用；水文・水資源学会誌，vol10, 308-318, 1997
- 3) 田中賢治，池淵周一：都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用，京大防災研究所年報，第37号，B-1, 299-313, 1994
- 4) Aida, M. : Urban albedo as a function of the urban structure-a model expeiment, Boundary Layer Meteorology23, 405-413, 1982
- 5) 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；水文水資源要旨集 268-269, 2001
- 6) 森脇亮，神田学，渡辺倫樹，松永和章：都市域の陸面パラメータの算定；水工学論文集，2001
- 7) 中川清隆：都市地表面アルベドの表面形状依存性に関する数値実験；地理学評論，415-435, 1996

(2001. 10. 1受付)