フィールド測定による都市キャニオンにおける熱輸送の研究*

吉田 篤正^{*1}, 富永 和秀^{*2}, 綿谷 茂^{*3}

Field Investigation on Heat Transfer in an Urban Canyon

Atsumasa YOSHIDA, Kazuhide TOMINAGA, and Shigeru WATATANI

Field measurements of the heat transfer in an east-west oriented urban canyon are performed in the summer and the winter seasons, as preliminary research of the heat transfer in the urban surface boundary layer. The canyon is made of concrete buildings (16 m in height) covered with windows, standing face to face across an asphalt road (17 m in width). The heat transfer in the urban canyon is represented by the energy balance at the imaginary surface named "the top surface", which is the plane above the canyon at the same level as the roof surface. The net amount of the transferred heat into the urban canyon is more than four times greater than that into the roof, and reaches about 50% of the net radiation heat transfer on a summer day regardless of the meteorological conditions. In the daytime, there is no significant difference in the convective heat transfer between the roof surface and the top surface.

Key Words: Environmental Engineering, Heat Transfer, Solar Energy, Field Measurement, Energy Balance, Urban Canyon, Large Scale Roughness, Surface Boundary Layer, Urban Climate

1. 緒 言

都市では広範囲の環境表面が人為的に改変され、コンクリートの高層ビルが建ち並び、道路はアスファルトで舗装されている。表面状態の変化は、人為的に排出される熱および汚染物質の増大とも相まって、都市域の熱構造を大きく変え、夏季の熱帯夜の増加、高濃度大気汚染の出現など市民生活を直接脅かしている。

その実態を把握し、現象を解明するため、さまざまな観点から研究が進められてきた。例えば、人工廃熱と表面温度との関係⁽¹⁾、大気中の汚染物質がふく射熱輸送に与える影響⁽²⁾、異なる地表面の被覆材料の表面温度あるいは熱収支の比較⁽³⁾⁽⁴⁾などが挙げられる。しかし、これまでの研究では、高層ビル群による大規模な凹凸構造(粗さ)が、都市大気熱構造を支配する接地境界層における熱輸送にどのような影響を与えるかについて十分に明らかになったとは言えない。この点に関して、鶴野ら⁽⁵⁾は建築物による抵抗係数の概念を導入した乱流モデルを提案したが、熱輸送の評価に問題点を残している。

都市の表面形状は、向かい合う2棟のビルおよびその壁面とそこにはさまれた舗装道路で形成されるいわゆる“都市キャニオン⁽⁶⁾”を最小のユニットとし、このユニットの繰返しであるとモデル化できる。そこでの熱輸送現象は、表面積の増大、風系の変化、放射の閉込め、建物の熱容量、場所による不均一な熱輸送などが絡み合い、平たんな面に比べると複雑である。

都市キャニオンにおける熱輸送に関する研究例は少なく、その実態は明らかにされていない。Nunetz-Oke⁽⁶⁾により、未舗装の道路を含む建物キャニオンでフィールド測定が行われたが、キャニオン全体の熱輸送を評価していない。中村ら⁽⁷⁾は、都市キャニオンで温熱環境を主たる研究対象として測定を行った。内藤ら⁽⁸⁾は、都市キャニオンにおける放射熱輸送を重視したモデル計算を中心にした研究を行った。また、三次元モデルによる検討がTerjung-O'Rourke⁽⁹⁾により行われた。

本研究を、大規模な凹凸構造を持つ複雑な表面形状を考慮に入れた都市域の熱輸送のモデルを確立するための基礎的研究として位置づけ、典型的な都市キャニオンの一つを取り上げ、フィールド測定により対象とした都市キャニオンにおける熱輸送の実態を明らかにする。その際、都市キャニオン全体の熱収支に注目す

* 原稿受付 平成元年8月21日。

^{*1} 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。^{*2} 京都大学大学院。^{*3} 学生員、京都大学大学院。

る。検査面としては建物の屋上の高さを考える。その高さと同じ高さにあるキャニオン空間の上面に仮想面 (Top 面) を導入する。都市キャニオン全体の熱収支はキャニオンの外部空間への熱の出入口である Top 面における熱収支で表すことができる。凹凸構造の影響が現れる Top 面と平たん面である建物の屋上面の測定結果を比較、検討し、都市キャニオンの熱収支の特性を明らかにする。

主 な 記 号

- A : 面積
 K : 太陽放射熱流束
 L : 大気および環境表面からの(赤外)放射熱流束
 Q^*, Q_g, Q_h : 環境表面における正味の放射熱流束, 伝導熱流束, 対流熱流束
 $Q_{g,in}$: 環境表面から内部へ向かう伝導熱流束
 $T, \Delta T_{air}$: 気温, 気温差
 T_s : 環境表面の温度
 ϵ : 全半球ふく射率
 σ : ステファン・ボルツマン定数
 添 字
 (East), (West): 測定断面から東, 西方向に離れたキャニオン内の地点における値
 (Road): 測定断面上のキャニオン内の地点における値
 (Roof), (Top): Roof 面, Top 面における値
 Σ : 積算量
 $\downarrow, \uparrow$: 環境表面へ向かう方向, 環境表面から出ていく方向

2. 測定場所と期間

測定は、京都市の北東部の市街地に位置する京都大学本部構内(南北 400 m, 東西 500 m)の中央よりやや東寄りの場所で行った。この構内の東側には標高約 100 m の小高い丘(吉田山)が住宅街をはさんで隣接する。他の方角は開けた平たん地である。本部構内ではほぼ同じ高さの建物が建ち並んでいる。この本部構内をはさんで北東から南西方向へ京都大学の他の構内が広がっている。その周辺の建物(主に住宅)には構内のそれに比べて高い建物は少ない。

図 1 に測定場所付近の概要を、図 2 にその測定断面を示す。建物高さや道路幅に比べて奥行き(東西方向)は十分に大きい。測定面の各面に図 2 に示す名前をつける。特に、屋上高さにある道路上方の部分を“Top 面”と呼ぶ。各実在表面の材質は次のとおりである。Roof 面は灰色の薄いラバーがはり付けられたコンクリートでできている。Wall 面は窓ガラス以外に南棟が主に

コンクリート、北棟が茶褐色のタイルで、Road 面は中央部がアスファルトでできている。

測定期間は、(夏季)1986 年 8 月 22 日～26 日、1987 年 8 月 14 日～9 月 10 日、(冬季)1986 年 12 月 30 日～1987 年 1 月 4 日である。

3. 各面の熱収支と測定方法

表 1 に測定項目と測定器を示す。各測定器の設置場所を図 2 に示す。Road 面ではそれぞれの壁面から 5 ～ 6 m 離して、Roof 面では縁から 2 ～ 3 m の場所に設置した。夏季(1986 年)および冬季の測定では、建物の 1, 3 階、道路中央にも測定点を設けた。測定期間中、10 s 間隔でデータを集録し、10 min 平均値を出力した。

3.1 Roof 面, Wall 面, Road 面 図 3 に Roof 面, Wall 面および Road 面における各熱流束成分を示す。ここで、 K は太陽放射熱流束(全天日射量)、 L は大気や環境表面からの(赤外)放射熱流束、 Q_g は固体表面における伝導熱流束、 Q_h は対流熱流束(顕熱)である。なお、 K は直達および散乱日射成分からなる。各面は乾いたコンクリート、タイル、防水用ラバー、アスファルトあるいはガラスにより構成されているので潜熱は無視できる。 $\uparrow, \downarrow$ はそれぞれ上向き、下向きを表す。図 3 に示す矢印の向きを各熱流束成分の正の

図 1 測定場所の概要

図 2 測定断面

表 1 測定項目と測定器

Item	Instrument	Symbol	Number
Surface Temperature	T[CC] Thermocouple	$\triangle$	11
Air Temperature and Humidity	Modified Wet- and Dry-bulb Thermometer	$\oplus$	4
Room Temperature	T[CC] Thermocouple	∇	4
Solar Radiation (Global Component)	Pyranometer	$\odot$	3
(Diffuse Component)	Pyranometer with Shade Ring	$\odot$	2
Infrared Radiation	Pyradiometer	$\odot$	2
Conductive Heat Flux	Heat Flux Plate	$\perp$	11
Conductive Heat Flux	Differential Thermocouple	$\perp$	4
Wind Direction and Velocity	Supersonic Anemometer	∇	2

図 3 表面での熱収支

向きとする。ただし、正味の放射熱流束 Q^* の正の向きは $K\downarrow$, $L\downarrow$ の正の向きと同じとする。表面における熱収支および放射熱流束はそれぞれ式(1), (2)で表される。

$$Q^* + Q_g + Q_h = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$Q^* = (K\downarrow - K\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow) \quad \cdots \cdots (2)$$

Roof 面では、 $K\downarrow$ (全天日射量) は全天日射計により測定した。 $K\downarrow$ のうち、散乱日射成分は遮光リングを付けた全天日射計で直達日射を遮って測定した。 $K\uparrow$ は、全天日射計を用いてあらかじめ実測した全半球反射率を $K\downarrow$ に乗じて求めた。 $L\downarrow$ は全天放射計による測定値 ($K\downarrow + L\downarrow$) から $K\downarrow$ を除いて求めた。 $L\uparrow$ は熱電対 ($\phi 0.1$ mm) により測定した表面温度から求めた。ただし、全半球ふく射率は 0.95 とした。熱電対は透明のセロハンテープで表面に密着させた。 Q_g は測定面の色に合せた灰色のビニールテープではり付けた市販の熱流束センサ ($75 \times 75 \times 0.7$ mm) により測定した。熱流束センサの裏面にはシリコングリースを薄く塗った。 Q_h は最後に式(1)より算出した。

Wall 面, Road 面では、 $K\downarrow$, $K\uparrow$ は Roof 面での $K\downarrow$ およびその散乱日射成分の測定値とあらかじめ測定しておいた各要素の全半球反射率を用い、キャニオン空間内の多重反射を考慮して得られた。ただし、表面は完全拡散面とした。 $L\uparrow$ は Roof 面と同様に求めた。 $L\downarrow$ は Roof 面での $L\downarrow$ の測定値と Wall

面, Road 面の表面温度分布より得られた。Wall 面の表面温度の測定はコンクリートあるいはタイルの壁と窓ガラスでそれぞれ行った。 Q_g は窓ガラスを除いて Roof 面の同様に、測定面と同系色のビニールテープではり付けた熱流束センサにより測定した。窓ガラスは太陽放射に対して透明であり、屋外と室内側表面温度の差が小さいため、示差熱電対 ($\phi 0.1$ mm) により温度差を測定し Q_g を求めた。 Q_h は式(1)より算出した。

3.2 Top 面 キャニオンを構成する各実在面の熱収支より、

$$\int_{\text{Wall, Road}} (Q^* + Q_g + Q_h) dA = 0 \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 $\int_{\text{Wall, Road}}$ は Wall 面, Road 面での総和を表す。放射による熱輸送に関しては、キャニオン空間内の吸収、散乱が無視できるので、

$$\int_{\text{Wall, Road}} Q^* dA = \int_{\text{Top}} Q^* dA = Q^*(\text{Top}) \cdot A(\text{Top}) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $Q^*(\text{Top})$ は Top 面における正味の放射熱流束、 $A(\text{Top})$ は奥行き方向に単位幅をとった Top 面の面積である。Top 面の伝導熱流束 $Q_g(\text{Top})$ は次式で定義する。

$$\int_{\text{Wall, Road}} Q_g dA \equiv Q_g(\text{Top}) \cdot A(\text{Top}) \quad \cdots \cdots (5)$$

Top 面の対流熱流束 $Q_h(\text{Top})$ は、キャニオン空間内の蓄熱が小さく、後述のとおりキャニオンに平行な向きの移流による熱輸送が無視できるので、次式が成り立つ。

$$\int_{\text{Wall, Road}} Q_h dA = Q_h(\text{Top}) \cdot A(\text{Top}) \quad \cdots \cdots (6)$$

したがって、キャニオン全体の熱収支を代表する Top 面においても、式(1)と同様の関係が成立する。

$$Q^*(\text{Top}) + Q_g(\text{Top}) + Q_h(\text{Top}) = 0 \quad \cdots \cdots (7)$$

なお、窓ガラスを透過して室内へ入射する太陽放射熱流束は $Q_g(\text{Top})$ に含める。

4. 結果と考察

4.1 気温、風速・風向 図4にキャニオン空間における気温差を示す。気温の測定には、感部に熱電対($\phi 0.3\text{ mm}$)を使用した二重円筒形通風式温湿度計を製作し、用いた。アースマン温湿度計により校正を行った。 $T_{\text{(Road)}}$, $T_{\text{(Roof)}}$ はそれぞれ道路上、屋上の高さ1.5 mの気温である。 $T_{\text{(East)}}$, $T_{\text{(West)}}$ は測定断面をはさんで東西方向に約40 m離れた地点(図1)の高さ4 mの気温である。キャニオン空間内の鉛直方向、水平方向の気温差はおおむね0.3 K以内と小さく、移流による熱輸送は無視できる。また、キャニオン外部空間との気温差も小さく、屋上気温によりキャニオン空間の気温を代表させることができる。

図5に屋上(高さ3.6 m)、道路上(高さ1 m)の風速・風向を示す。ただし、道路上の風速計は道路中央に設置されている。屋上の風速・風向は、その周辺が広く開けているため、上層の一般風に近い値が得られていると推測される。風が建物壁に当たりキャニオン内部へ巻き込んでいるのが明りょうに現れている。道路上の風速は、屋上風速の約2/3である。

4.2 日中と夜間の平均的な熱収支 次に、Roof面とTop面における日中(10~16時)と夜間(0~5時)をそれぞれ平均した熱収支について検討する。

図6に夏季の日中のRoof面とTop面の正味放射

図4 キャニオン空間における気温差

図5 キャニオン空間の風速・風向

熱流束 Q^* の比 $[Q^*_{\text{(Top)}}/Q^*_{\text{(Roof)}}]$ と $K\downarrow$ (全天日射量)の関係を示す。 $K\downarrow$ はRoof面における日中の平均値である。 Q^* はRoof面よりTop面のほうが大きい。これは、太陽放射に対する反射率が多重反射により低下することと、建物の影になるWall面、Road面の表面温度が上昇しないことによる。 Q^* の比は $K\downarrow$ が変化しても1.4~1.5とほぼ一定である。Roof面とTop面の Q^* の比は天候により変化しないと言える。また、図6には夏季の日中を平均した対流熱流束 Q_h とRoof面の Q^* の比の大きさと全天日射量 $K\downarrow$ との関係を併せて示す。値にはややばらつきは見られるが、 $K\downarrow$ に対する依存性は認められない。

図7に図6と同じ比の大きさ $[Q_h/Q^*_{\text{(Roof)}}]$ とRoof面上空の日中の平均風速・風向との関係を示す。風向は棟に垂直な向き(主に南風)と平行な向き(主に東風)を区別した。Roof面では Q_h/Q^* の大きさは、風速に比例して直線的に大きくなる。Top面においても同様の傾向があり、 Q_h/Q^* の大きさの風速に対する依存性

図6 Roof面とTop面の Q^* の比および Q_h/Q^* と全天日射量の関係(夏季の日中平均)

図7 Q_h/Q^* と屋上風速・風向の関係(夏季の日中平均)

は Roof 面と同程度である。風向による顕著な差は認められない。ただし、北風の場合は、屋上で吹く風が直接吹き付ける壁面が日影になっているため、Top 面における Q_h/Q^* の大きさは他の風向に比べると小さい。

図 8 に夏季の夜間の Roof 面と Top 面の正味放射熱流束 Q^* の比と $L\downarrow$ (大気からの放射熱流束) の関係を示す。 $L\downarrow$ は Roof 面における夜間の平均値である。また、図 8 には伝導熱流束 Q_g と Roof 面の Q^* の比の大きさも併せて示す。 Q^* の比 $[Q^*(\text{Top})/Q^*(\text{Roof})]$ は $L\downarrow$ が大きくなると、1 より小さくなる傾向を示すが、おおむね 1 に近い値である。このことは、次式で定義する Top 面の(仮想)表面温度 T_s が Roof 面とほぼ等しいことを意味する。

$$L\downarrow(\text{Top}) = \epsilon \sigma T_s^4 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、 ϵ は全半球ふく射率である。 Q_g と Q^* の比の大きさ $[Q_g/Q^*(\text{Roof})]$ は、 $L\downarrow$ が大きくなるにつれて、大きくなる傾向を示す。これは次のように説明できる。 $L\downarrow$ が大きくなる、すなわち、天候が悪くなるにつれて、放射冷却が小さくなり、夜間における表面温度の低下が妨げられる。このため気温との差が大きくなり、対流による熱輸送量が相対的に大きくなる。この $L\downarrow$ の影響は、Roof 面のほうが大きい。しかし、熱輸送が活発である $L\downarrow$ が小さい場合は、この比は 1 に近い。したがって、夏季の夜間においては、放射と伝導熱流束がほぼバランスしていると言ってよい。

図 9 に夏季と冬季における、測定期間中の日中および夜間平均の熱収支を模式的に示す。定量的に比較しやすいように、Roof 面での Q^* を 100 とした相対値で表す。日中は夜間に比べて、夏季と冬季においてその傾向に顕著な差はなく、Roof 面、Top 面で受けるそれぞれの正味の放射量 Q^* のうち 40 %前後が対流

により大気へ直ちに放熱され、残りが建物などに取り込まれる。対流による熱輸送量 Q_h は Roof 面と Top 面で大きな差は認められない。一方、Top 面で受ける正味の放射量は Roof 面より多いため、建物などに取り込まれる熱量(蓄熱量) Q_g は Top 面が Roof 面の約 1.5 倍多い。夏季と冬季を比較すると、Roof 面における Q^* に対する Q_h の比は冬季のほうが大きい。逆に、Top 面においてはその比は冬季のほうが小さい。これは冬季は夏季よりも風が強く、また、冬季は北風が卓越するためと考えられる。Roof 面に対する Top 面の Q^* の比は冬季のほうが小さい。これは、主に、冬季のほうが日射量が小さく、Roof 面と Top 面の表面温度の差が小さいためである。夜間は、冬季の Roof 面以外では放射と伝導による熱輸送がほぼ釣り合っている。夏季は Roof 面と Top 面で表面温度に大きな差がなく、気温に比べて等しいかやや高い値を示す。冬季は夏季と異なり Roof 面と Top 面で表面温度に差が現れ、Top 面の Roof 面に対する Q^* の比は 1 より大きい。Roof 面の表面温度は気温より低い、Top 面では気温よりやや高い。キャニオン構造による熱の放散の遅れが顕著に現れている。

4.3 1 日を通しての熱収支

図 10 に夏季の積算日射量と蓄熱量の関係を示す。 $\Sigma Q_{g,\text{in}}$ は主に日中、建物などの内部へ向かう熱流束の積算量、 ΣQ_g は 1 日を通しての Q_g の正味の積算量を表す。 $\Sigma Q_g / \Sigma Q_{g,\text{in}}$ は獲得した総熱量のうち内部へ取り込む割合を示す。図 10 から明らかなように、この値は積算日射量 $\Sigma K\downarrow$ の影響を受けない。Top 面と Roof 面を比較すると、Top 面で値が大きくなっている。この原因の一つとして考えられる窓ガラスを透過して室内へ入射する太陽放射の影響を考慮に入れても、Roof 面に比べると大きい値を示す。これは、キャニオン構造により放熱が

図 8 Roof 面と Top 面の Q^* の比および Q_g/Q^* と大気からの放射量の関係(夏季の夜間平均)

図 9 日中と夜間の平均的な熱収支

図 10 蓄熱量と積算日射量の関係

妨げられることを表す。

図 11 に夏季の測定期間中の 1 日を通しての平均的な熱収支を示す。Roof 面での Q^* を 100 とした相対値で表す。Top 面で受ける正味の放射量および蓄熱量は Roof 面に比べてそれぞれ 1.7 倍、4 倍以上と非常に大きい値を示す。しかし、対流による熱輸送量にはほとんど差がない。それぞれの面における正味の放射量に対する蓄熱量の割合も、Roof 面では 20 % であるのに対して Top 面では約 50 % と大きいのが特徴である。

5. 結 言

都市の表面形状を代表する都市キャニオンにおける熱輸送の実態を把握するためフィールド測定を行った。測定対象とした都市キャニオンはほぼ東西に延びており、建物高さと道路幅が 1 : 1 であった。その結果を解析し、建物の屋上面(Roof 面)とキャニオンの上面(Top 面)の熱収支を比較、検討した結果、次のことが明らかになった。

(1) 夏季の 1 日を通しての Top 面における蓄熱量は Roof 面の 4 倍以上多く、Top 面における正味の放射量の約 50 % である。これらの値は気象条件によら

図 11 夏季の 1 日を通しての平均的な熱収支

ない。

(2) 日中の正味放射量、蓄熱量は、夏季、冬季とも Roof 面より Top 面で明らかに大きい。対流による熱輸送量は Roof 面と Top 面で顕著な差は認められない。

(3) 夜間の Roof 面と Top 面における熱収支は、夏季はほとんど同じであるが、冬季は大きな違いがある。

終わりに、本研究を遂行するにあたって、京都大学中村泰人助教授のご援助を受けた。ここに記して謝意を表す。また、測定データの整理を行う際に助力を得た、京都大学の学生 長谷卓也、穴原俊哉の両君に感謝する。

文 献

- (1) Torrance, K. E. and Shum, J. S. W., *Atmos. Environ.*, **10**(1976), 329.
- (2) Viskanta, R., ほか 2 名, *J. Atmos. Sci.*, **34**(1977), 1091.
- (3) Ojima, T. and Moriyama, M., *Energy Build.*, **44**(1982), 99.
- (4) 片山・ほか 2 名, 日本建築学会論文報告集, 372(1987), 30.
- (5) 鶴野・ほか 3 名, 衛生工学研究論文集, **24**(1988), 125.
- (6) Nunetz, M. and Oke, T. R., *J. Appl. Meteor.*, **16**(1977), 11.
- (7) 中村・ほか 2 名, 日本建築学会論文報告集, 364(1986), 48.
- (8) 内藤・ほか 2 名, 空気調和・衛生工学論文集, **22**(1983), 41.
- (9) Terjung, W. H. and O'Rourke, P. A., *Boundary-Layer Meteor.*, **33**(1985), 245.