

## 都市域の温暖化における舗装の蓄熱効果

Ground Heat Storage of Surface Materials in the Urban Area

浅枝 隆<sup>\*</sup>、永沼崇彦<sup>\*\*</sup>、鈴木水弘<sup>\*\*</sup>、塩崎修男<sup>\*\*</sup>

by Takashi Asaeda, Takahiko Naganuma, Mitsuhiro Suzuki & Nobuo Shiozaki

The variability of surface heat flux depends strongly on the materials heat absorption and storage rates. During summer days, the temperature in the materials and long-wave radiation from the surface were measured together with surface long-wave radiation, atmospheric and solar radiation etc.. Among materials, asphalt slabs absorb highest radiation energy, and increase their temperature. Eventually, they radiate heat as high as  $700\text{W/m}^2$ , which is  $150\text{W/m}^2$  higher than that of concrete slabs. In addition, the heat absorbed during daytime is released into the atmosphere during night and causes so-called "tropical nights".

Keywords: Urban Environment, Heat Island, Pavement, Heat Storage, Radiation

### 1. はじめに

地球温暖化現象は様々な方面に影響を及ぼすといわれている。その中でも、都市のヒートアイランド現象を助長することは、極めて重要な問題の一つである。都市域が周辺より高温になることは、従来より多くの報告にみられ<sup>1)2)3)</sup>、その原因には、人工排熱の増加、舗装された地域の増加や植生の変化によるアルベドや潜熱輸送の変化、大気中の温暖化ガスやエアロゾルの増加などが指摘されてきている。これらは、どれも重要なファクターであることは間違いないが、それぞれがどれほど重要であるのかは未十分明かになっているとは言えない。一方、首都圏の都市化の波は怒濤のごとく周辺地域に押し寄せ、東京、埼玉、神奈川、千葉といった地域では自然のままの地表面が急速に舗装されつつある。ちなみに、舗装されている割合をみると、埼玉県浦和市における舗装された街路の面積は約10%であり、住宅等の周辺の舗装を含めるとこの量は無視し得ない値となる。しかも、こうした地域が非常に勢いで広がっているわけであるから深刻な問題といえる。従って、地域の舗装がどの程度熱環境に影響するかということは、今後の都市計画の上からも極めて重要な事であるといえよう<sup>4)5)</sup>。

従来、舗装された地表面と未舗装の面との間の熱環境の違いは、おもに、地表の気象要素の観測やリモートセンシング等によって行われてきた<sup>6)</sup>。しかし、これでは、自動車の排気ガスなどのような影響を

\* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科

\*\* 埼玉大学学生 工学部建設基礎工学科

( 341 埼玉県浦和市下大久保255)

取り除けない、一日のうちの熱収支を把握できない、舗装の種類の違いによる影響などの詳細な部分の解析ができないなどの多くの問題を抱えていた。従って、舗装による熱の増加はあってもそれがどの様に影響しているかは不明なままである。本研究はこうした背景を考慮して、地面に施されたいくつかの舗装を対象にし、外部の熱環境とともに舗装中の熱の出入を観測し、舗装が熱環境に及ぼす影響を調べたものである。

2. 実験方法

実験では、埼玉県浦和市にある埼玉大学構内の風通しがよく日射を遮るものがない地面に広さ1mx1m、厚さ30cmのもの一カ所と、10cmのもの二カ所のアスファルトの舗装、厚さ10cmのコンクリート舗装三カ所、厚さ30cmの直径約2cm程度の砂利舗装、同じく、標準砂による舗装、および、未舗装の土の部分を設定した。これに、異なる深さ3-5カ所程度の場所に、直径約1mmの銅管を中心に達するまで埋め込んだ（施工上、銅管の位置は正確に決められないので、施工後その深さを確かめた）。観測は記録的な暑い夏となった1990年8月23日から26日にわたり行い、次のような項目を測定した。

\*\*\*\*\*

舗装（地面）中の温度分布：サーミスタ温度計で1-2時間おきに測定

日射：日射計により常時測定

大気放射：サーモフローにより天頂、東西南北45度の角度のものを測定し全天の値に変換

気温、湿度、風速：30分おきに地面から1cmと3cmとの2点および1.5mの高さの温度、湿度、大気圧を常時観測

地面からの逆放射：サーモフローにより30分おきに観測

土の水分含有量：数時間おきにサンプルをとり乾燥させ重量を測定

水面蒸発量：日向に水をいれたパンを置き数時間おきに水の減少量より換算

\*\*\*\*\*

ここで、アスファルトについては、サンプルにしたアスファルトの代表性をチェックするために、25年前に施工されたアスファルトの道路での結果と比較し、同じ値になることを確かめた。

次に、舗装材料の物理特性を求めるために、20cmx20cmx5cmの大きさの実際に用いた舗装と同じ材質のサンプルをつくり、低温のオイルタンクの上にのせ、さらに、その上に底面が銅板でできている水の入った器をおき、水温上昇が定常になった後の水温の変化率とサンプル内の温度分布の測定により熱伝導率を求めた。また、熱したサンプルを水中にいれ、水温の上昇より比熱を求めた。これらより求めた地面構成材料の物性を表-1に示す。

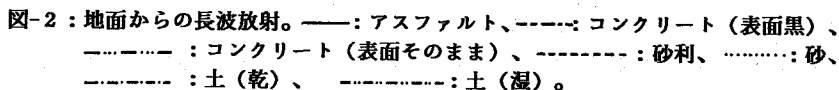
表-1. 地面構成材料の物性

| 材 料    | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 比熱<br>(J/g. deg) | 熱伝導率<br>(J/cm. deg. s) | 空隙率<br>(%) |
|--------|----------------------------|------------------|------------------------|------------|
| コンクリート | 2.23                       | 0.910            | 0.0218                 | ***        |
| アスファルト | 2.03                       | 0.915            | 0.00904                | 8.98       |
| 土      | 1.56                       | 0.762            | 0.01260                | 16.5       |
| 砂      | 1.72                       | 0.588            | 0.00619                | 30.0       |
| 砂利     | 1.62                       | 0.589            | 0.00653                | 38.4       |

観測した3日間は猛暑といわれた平成2年の夏の中でも特に暑かった日のうちの3日間で典型的な真夏日、熱帯夜である。観測期間の温度、湿度、風速を図-1に示す。



図-2に地表面からの長波放射を示す。全体としては、日の出にあたる5時頃から放射量が多くなり始め、11-15時に最大となる。コンクリートとアスファルトとを比較すると、日の出から16時ころまではアスファルトの方が表面を黒くしたコンクリートよりも約30-90W/m<sup>2</sup>も大きくなっている。コンクリートどうしについていえば、表面が黒いものの方がそのままのものよりも約40-50W/m<sup>2</sup>大きくなっており、これらを合わせると、日中の最も日差しの強い時間帯にはアスファルト舗装の方がコンクリートの舗装よりも70-140W/m<sup>2</sup>も長波放射が多いことがわかる。これは、全体の量が約600W/m<sup>2</sup>であること、一日の内での最高と最低の差が約180W/m<sup>2</sup>であることを考慮すると極めて大きい量である。しかも、アスファルトと表面を黒くしたコンクリートの比較からわかるように、これは単に色による違いだけではなく材質の物理的特性による。夕方になると、アスファルトからの放射の減少の方が大きく、19時頃にはコンクリートからのものとほぼ同じ値となり朝まで続く。従って、一日を通してみると、コンクリートよりもアスファルト舗装の面から長波放射の方が約61MJ/m<sup>2</sup>も大きいことになる。砂、砂利による舗装からの放射は日中にはコンクリートよりやや大きい程度であるが夜間には小さくなる。これは、後に示す内部での温度分布からわかるように、表面の部分だけが温まるためである。未舗装の面や植生が熱環境を和らげることはよく知られている事実であるが、今回の測定においても表面からの長波放射量はコンクリート舗装と比較して、最も日差しの強い時期において約130W/m<sup>2</sup>、夜間においても30W/m<sup>2</sup>少ないことが解った。



—593—

の長波放射の方が大気からのものより大きい値を示している。

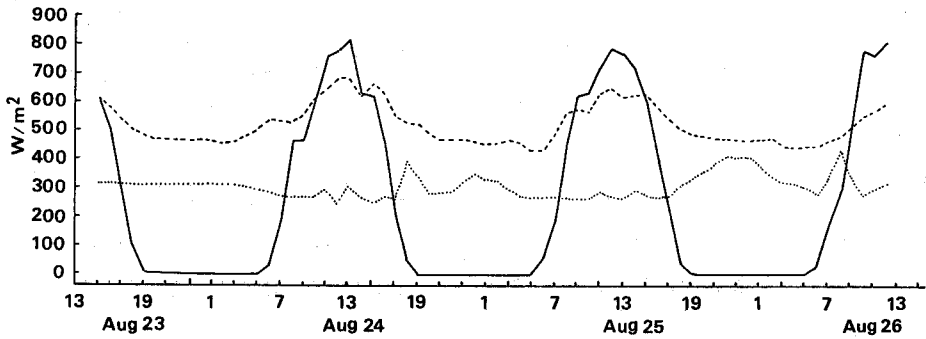


図-3：日射、大気および地面からの長波放射。——：日射、……：長波放射（大気）、-----：地面（平均）からの放射。

#### 4. 地中の温度分布

図-4は8/25の一日の間のそれぞれの舗装中の温度分布の変化である。温度が最も低くなる日ので前の5:00、日差しが最も強い13:00、太陽が西に傾き冷却の過程にある17:00のものを示している。なお、この結果は3日間の間の他の日についてもほぼ同じ結果であり、この夏の他の時期についても同じ傾向が得られたので、この程度の暑さの日における代表値といってよからう。この温度分布と他の図との比較から次のようなことが言える。

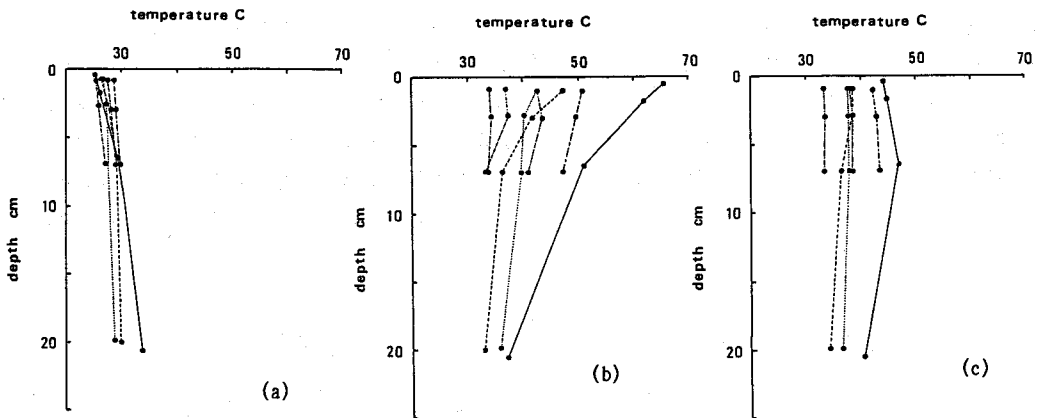


図-4：舗装中の温度分布の変化（8/25）(a)5:00、(b)13:00、(c)17:00、  
——：アスファルト、-----：コンクリート（黒）、  
-----：コンクリート（そのまま）、-----：砂利、  
.....：砂、-----：土。

まず、日の出前の5:00においては、前日多くの熱を吸収していたアスファルトの温度は地中部では表面に比べて高く、この時間帯においても外部に温度を放出しているのがわかる。しかし、コンクリート（表面そのまま）や砂利、砂についてはほぼ均一な温度分布になっている。長波放射全体では上向きになっているが、温度については、0:00-5:00には大気の方が高くなっており、顕熱輸送は地面に向いていた事がわかる。

地面が温まり始めると、コンクリートどうしても、日射を吸収しやすいために（アルベドが小さいために）、表面を黒くぬったものの方がそのままのものより早く温まるのは言うまでもないが、アスファルトが表面を黒く塗ったコンクリートよりもより多くの熱を吸収することは注目に値する。。しかも、13:00頃になると表面での温度差は10度にも達する。コンクリートとアスファルトの熱容量（比熱と密度の積）はほぼ同じであるので、この差はこの部分に蓄積されている熱量（これまでに吸収された熱量）そのものに差があるとい

うことになる。この原因の一つとしてアスファルト表面の凹凸によるアルベドの変化、アスファルトを構成しているコルタルなどの影響による流入熱量そのものの変化がある。しかし、今回の測定ではアルベドは正確には測っていないのでこの確証はできない。もう一つ考えられることとして、コンクリートの熱伝導率がアスファルトのものの約2倍あるので、同じ熱量が流入しても、コンクリートの場合より多く熱量が地中に伝導していったことがあげられる。アスファルトの表面付近の温度勾配がコンクリートのものの約2倍であることはこれを裏付けているといつてよい。舗装厚さは10cm（アスファルトのうち一つについては厚さ30cmであるが厚さの影響はほとんどみられなかった）であるので舗装下端に達した熱はその下の土の部分を温めるかもしくはそこに含まれている水分の蒸発に寄与したと考えられる。しかも、夜間のアスファルトの表面からの放射がコンクリートのものとほぼ等しいのでこの熱は地面の深い部分を温めるのに使われたか潜熱に形を変えたものと考えられる。

日中の砂や砂利の温度はアスファルトやコンクリートに比較すると小さくなっている。これは、砂、砂利の熱容量がこれらの材料のものより小さいので、この部分での熱量自体が小さいことを示している。砂の場合には幾らかの付着水を含んでおり表-2で示される値、含水比にして0.88%（8/24での値）が蒸発すると温度を23度減少させることになるため、熱はこの水の一部が蒸発するために使われたものと考えてよいだろう。一方、砂利の場合にはこうした付着水は存在せず、潜熱の効果も考えにくい。しかも、表面近くに極めて強い温度勾配が作られており熱の伝達が遅かった事がわかる。空気は熱容量は極めて小さいので、この間隙の空気は砂利と同じ温度と考えてよく、温まって密度の小くなった空気が間隙をぬって大気中に抜けていったものと考えられる。

表-2 含水比(%)

|       | 8/24        | 8/25       | 8/26       |
|-------|-------------|------------|------------|
|       | 4:30-14:00  | 4:30-14:00 | 4:30-12:00 |
| 砂 表面  | 1.77-0.89   | 1.49-0.90  | 3.68-1.24  |
| 10cm下 | 5.64        | 5.91       | 5.09       |
| 土 表面  | 16.27-11.17 | *****      | 14.47-4.04 |
| 10cm下 | 32.0        | 29.3       | 33.6       |

## 5. 舗装内温度分布のシミュレーション

アスファルトやコンクリートは十分乾燥していたと考えられるので、外部との熱の収支を用いれば舗装内の温度分布を予測できる。逆に、この予測値からも観測の精度を予測することも可能であろう。

3日間の日射S、大気放射 $R_a$ 、地面からの逆放射 $R_s$ は図-3に与えられている。従って、アルベドと顕熱輸送を見積ってやる必要がある。アルベドについては、概略の実測よりアスファルトについて0.1、コンクリート（表面そのまま）について0.4とした。この値は一日のうちでも太陽の高度によって変化するものであるが、ここではそうしたデータがないために一定値とした。舗装面と大気との間の顕熱輸送は概略次のような式で見積られる。

$$H = \alpha (T_s - T_a) \quad \alpha = 5.3 + 3.6u \quad \begin{matrix} \text{上向き} \\ \text{下向き} \end{matrix} \quad (1)$$

ここで、 $T_s$ は地表面温度を、 $T_a$ は大気温度を、 $u$ は平均風速を示す。また、表面付近の空気の温度分布の観測から求めた温度勾配より下向き熱輸送の方が上向き熱輸送の2倍程度大きい値になっていたため、下向きのものを上向きの2倍とした。実際には顕熱輸送量は他の量と比較すると数分の1以下なので、これによ

って予測値が全く違ってしまいうものではない。これらの量を利用すると、舗装内の温度分布  $T(z)$  は次式に示される熱伝導方程式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c (1-V)} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

ただし、 $\rho$  は舗装材料の密度、 $c$  は比熱、 $k$  は熱伝導率、 $V$  は空隙率を表す。地表面の境界条件は

$$\frac{k}{\rho c (1-V)} \frac{\partial T}{\partial z} = S + R_a + H - R_s \quad (3)$$

で与えられ、地下30cmのところでは、ほとんど地温の日変化が観測されなかったのでここでの値を実測に基づいて一定値とした。

図-5 はアスファルトとコンクリート（表面そのまま）について8月23-24日の計算結果を示す。夜間において計算値の方がやや低い値となっているが、実験結果を概略再現できており、このことは今回の計測が信頼できることを示している。

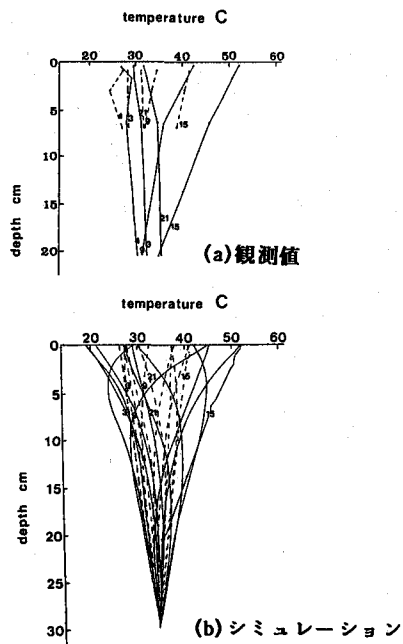
## 6. まとめ

夏季に種々の舗装内に蓄えられる熱を野外において観測し、特にアスファルトには昼間に非常に多くの熱が蓄えられることを示した。その熱は昼間ばかりか夜間にも大気中に逆放射

され大気温度を上げ、熱帯夜の大きな原因となっている。今回の計測より得られた値で見積ってみると、昼間、アスファルト舗装とコンクリート舗装との間に現れる長波放射量の違いでさえ  $100 \text{ W/m}^2$  にも達し、これは1haあたり1000kWにあたる。これは小さな発電所にも値する量である。昨今の研究によると人口排熱を平均すると  $10 \text{ W/m}^2$  程度といわれているので、舗装特にアスファルト舗装の影響がいかに甚大なものであるかが理解できよう。もしここで、地球の温暖化が現実のものとなったりするとこの上にプラスされることになり都市域での人間の生活環境を著しく不快なものにしてしまうことになる。このことは、都市計画の際には十分注意すべき問題であるといえよう。

## 参考文献

- 1) Lowry, W.P.: The Climate of Cities, Scientific American, Vol. 217, 15-23, 1967.
- 2) Oke, T.R. and East, C.: The Urban Boundary Layer in Montreal, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 1, pp. 411-437, 1971.
- 3) 尾島俊雄、森山正和: 地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究、日本建築学会計画系論文報告集、No. 245, pp. 101-111, 1976.
- 4) Doll, D., Ching, J.K.S. and Kaneshiro, J.: Parametarization of Subsurface Heating for Soil and Concrete Using Net Radiation Data, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 32, pp. 373-399, 1985.
- 5) Terjung, W.H. and O'Rourke, P.A.: Influences of Physical Structures on Urban Energy Budget, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 19, pp. 421-439, 1980.
- 6) 梅干野晃、飯野秋成: 航空機MSSの熱赤外画像を用いた夜間の道路交通情報の計量化、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1123-1124, 1988.



— アスファルト、---コンクリート  
図-5 シミュレーション結果(8/23-24)  
図中の数値は時間