舗装面の熱収支と蓄熱特性について

浅枝 隆*・藤野 毅**

Heat flux and Heat storage Properties of the Paved ground Takashi ASAEDA and Takeshi FUJINO

The heat fluxes from bare soil surface and paved surface, together with the subsurface temperature distribution were measured in hot summer non-windy days. The surface temperature of the asphalt pavement rose up to 57 degrees, resulting the infrared radiation flux of 670 W/m² which corresponds to 220 W/m² surplus to the atmospheric radiation. The sensible heat transfer amounted to more 300 W/m² at highest, and is mainly transported by convection. Therefore under such condition, the turbulent heat transport should be estimated not with bulk equation only but as the sum of the transports due to convection and shear turbulence.

A hysteresis loop was observed in the relationship between the net radiative flux and the heat conduction into the ground. Characteristics of the loop were analyzed.

Key words: Pavement, Groundheat flux, Sensibleheat flux, Thermal convection

夏期においてアスファルトとコンクリート舗装の熱収支を調べるために野外観測を行った。その結果、アスファルトの表面温度は57°Cまで達し、表面から放出される赤外放射量も670W/m²を記録した。これは、その時の下向き大気放射量450W/m²と比較すると実質上向きに220W/m²も放出されることになる。また、顕熱量も昼間は300W/m²以上になり、これらは都市域の温暖化を考える際に大きな熱源となるものといえる。一方、コンクリートではアルベドが大きいために表面温度は高くならず、同じ舗装面でもむしろアスファルトよりも土に近い傾向を示した。それぞれの地表面における熱収支では、日中アルベドがほぼ等しいアスファルトと土についても、熱伝導率・熱容量などの物性の違いや水分蒸発の有無による影響を受け、大きく異なった特性を示した。さらに顕熱量の算定に当たっては、アスファルトのように表面が非常に高温になり、風速が小さいときにはバルク式だけでは十分に見積もることができず、対流による熱輸送を考慮して見積もる必要があることがわかった。さらに、それぞれの地表面での正味放射フラックスと地中熱フラックスの時間的な関係をループの形、大きさで表し、それぞれの蓄熱特性の違いを特徴的に表現することができた。このように表すことにより、その土地の熱的特性を知ることができる。

キーワード： 舗装, 地中熱フラックス, 顕熱輸送量, 熱対流

I. はじめに

都市域が郊外と比べて高温となることは“ヒートアイランド現象”と呼ばれよく知られている。都市の熱環境を形成する主な要因としては人工排熱の増加や地表面変化、大気汚染等が挙げられるが、それらの要因がどの程度都市大気に影響を及ぼしているのかを見積もった例は少ない。地表面が変化することによる影響は、現象が面的に生じてくるため、点源からの人工排熱等に比べ、影響が大きいと考えられよう。筆者らはこれまで夏場、アスファルトで舗装された地表面は土と比べて非常に高温

になることを示した。これが大気の加熱に大きく影響していることは容易に理解できよう。こうしたことをふまえ、ここでは夏場における野外観測からその熱収支特性について検討し、舗装された地表面の蓄熱特性を明確に表すとともに大気に及ぼす影響について考察を加えた。

II. 観測概要

観測は、91年8月26日に埼玉大学構内(35°53'N, 139°36'E)において行った。周囲に遮るものがないグラウンドの端に縦横3×3m、厚さ10cmのアスファルトとコンクリート舗装を埋設した。さらに舗装の周りを10cm厚の断

*埼玉大学工学部 Faculty of Engineering, Saitama University

**埼玉大学大学院 Graduate Student, Saitama University

図一 観測期間中の気象条件

熱材で囲み、周囲の熱や水分の影響を受けないように配慮した。グラウンドの土、及びそれぞれの舗装内部とその下の土中には温度センサーを埋設して地中の温度分布が求められるようにし、さらに、舗装面では20cmの深さに熱流計を設置して鉛直方向に流れる熱量を求めた。地上では、1.5mの高さにおいて気温、湿度、風速を計測し、日射計、アルベド計により日射量とそれぞれの地表面のアルベドを計測した。また、それぞれの地表面から出される赤外放射量をサーモフロー（英弘精機）で計り、大気放射量をこれらの放射量と放射収支計の値から見積り、さらに大気放射の算定式（例、山本・Bruntの式）と比較し、妥当な値を得た。また、6時間ごとに地表付近と10cm下方の土を採取し土の含水比を求めた。さらに容器に水を入れて放置し、可能蒸発量の測定を行った。

III. 供試体の物性

物性を計る供試体として、観測に用いた舗装、及び土と全く同じ材質のものをを用いて外径25.6cm、内径10.4cm、厚さ5cmの円筒をつくり、室内実験によりそれぞれの供試体の熱伝導率、熱容量を測定した。表一にその物性値を示す。これらは施工法により最大2倍程度は異なるものもあるが、本実験ではアスファルトの熱伝導率はコンクリートの1/2以下という結果を得た。土については、水分条件によって物理特性は大きく異なることが考えられ、湿潤状態と乾燥状態の2通りについて測定を行った。

IV. 観測結果及び考察

1. 夏の舗装面熱収支の一般特性

図一2はそれぞれの地表面が放つ赤外放射量の日変化を示したものである。この日は日中全く雲がなく、どの地表面も日射の増加と共に放射量が増し、午後1時から2時にかけてピークになる。その後は減少していくが日

図一2 地表面温度と赤外放射量の日変化

表一 供試体の物性

種 類 (含水比)	熱伝導率 λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	熱容量 C_p ($J \cdot cm^{-3} \cdot K^{-1}$)	アルベド A (12時)
asphalt	0.74	1.42	0.10
concrete	1.69	2.07	0.45
soil(dry)	0.04	1.15	—
soil(0.35)	0.17	1.94	0.15

没後は減少傾向が緩やかになっている。供試体別に見ると、まずアスファルトでは午前中表面温度が極めて高くなり、赤外放射量も670W/m²まで達する。また、ピーク後日射が弱くなると、放射量も大きく減ずるが日没後は緩やかになり、深夜でも土より40W/m²前後多くの放射量が存在する。次にコンクリートでは、アルベドが大きいため日変化の振幅は小さく、その最高値も土より少ない。しかし昼間の10時から14時を除いては土よりも多くの放射量を放ち、深夜から明け方まではアスファルトの値に近づく。土では昼の14時頃までコンクリートと同じ程度に増加するがそれ以降放射量が急激に減少する。これは日射の減衰に加えて表面付近での水分の蒸発に伴い表面温度が大きく下がったことによっている。

図一3(a)-(d)は、それぞれの供試体における地中温度分布の変化を示す。午前6時の時点ではどの供試体も温度は深さと共にわずかながら増えていることから大気中に熱を放出していることがわかる。また、舗装内部だけでなく、その下の土中の温度も舗装の種類によって異なっており、30cmの深さにおいてもアスファルト舗装のものの方がコンクリートのそれより4℃も高くなっている。この時点でも、アスファルト舗装体内には多くの熱を蓄えているのがわかる。次に表面温度が最高となる14時の分布を見ると、それぞれの供試体の蓄熱特性の違いがよくわかる。この時アスファルトでは表面温度が57℃にまで達し、高温部分は深いところまで及んでいる。ま

図一3 地中温度分布

図一4 舗装面下20cmの熱流量の日変化

た、温度分布も大きな勾配を有し、20cmの深さにおいてもなお 86W/m^2 の熱量が地中に入っている(図一4)。コンクリートは表面のアルベドが土やアスファルトに比べて大きいために日射による加熱の影響はその分小さいが、熱伝導率が高いので舗装面下の部分において温度上昇の傾向が大きい。一方、土はコンクリートとは対象的にアルベドは小さいために日射の影響は強く受けるものの、その熱の多くが潜熱として輸送されるために全体に蓄えられる熱量はコンクリートより少なくなる。しかし熱伝導率が小さいので表面付近だけがよく温められ、表面温度はコンクリートと同程度になる。次に、18時の分布図を見ると、どの供試体も表面付近では温度勾配が負になり、大気中へ向け熱を放出している。アスファルトやコンクリートの舗装部分より下では、まだ大きな正の勾配を持ったままであり、地中のより深い部分に熱が移動している。ここで朝6時から14時まで、14時から18時までの間にそれぞれの地表面から入ったもしくは出ていった地中熱フラックスを見積もると、それぞれ前者で

はアスファルトが 4.58MJ/m^2 、コンクリートが 2.29MJ/m^2 、土が 2.02MJ/m^2 入り、後者ではアスファルトが 1.05MJ/m^2 、コンクリートが 0.26MJ/m^2 、土が 0.35MJ/m^2 出ていったという結果であった。翌朝の6時には、どの供試体も温度勾配は負となり、昼間蓄えられていた熱が放出されるが、この量を18時から翌朝6時までの中で見積もると、アスファルトが 3.52MJ/m^2 、コンクリートが 1.79MJ/m^2 、土が 1.20MJ/m^2 であり、このことより、昼間最も温度が高くなる時間までに熱は吸収され、その後日没までにアスファルトでは23%、コンクリートでは11%、土では17%の熱が失われることが分かった。残りは夜間失われる。

このように、地表面を舗装することによって昼間多量の熱が地中に入り、地表面の温度を上げており、夕方から夜間にかけてその熱が放出されていることが分かる。それではその収支を形態別に分析してみよう。

地表面熱収支は次の式で表される。

$$S(1-A) + L - \sigma T_s^4 = H + IE + G \quad (1)$$

ここで、 S :日射量、 A :地表面のアルベド、 L :大気放射量、 σT_s^4 :地表面からの席外放射量、 H :顕熱輸送量、 IE :潜熱輸送量、 G :地中熱フラックスを示す。

また、 $\Phi = S(1-A) + L - \sigma T_s^4$ とし、今後 Φ を正味放射フラックスとする。

ここで、各放射量は観測値から得られたものであり、地中熱フラックスは次式より見積もった。

$$G = C\rho_s \int_0^z \frac{\partial T}{\partial t} dz + (-\lambda \frac{\partial T}{\partial t})_z \quad (2)$$

但し、 z は熱流計の置かれた深さで、右辺第2項は熱流計の実測値を用いた。また、舗装面における顕熱輸送の算定は、表面が十分乾いており潜熱輸送はほぼ零であるため、正味放射フラックス Φ -地中熱フラックス G として求めた。それぞれの地表面における熱収支の日変化を

図一五 地表面熱収支の日変化

図一五 (a)-(c) に示す。これらのグラフより、アスファルトでは日中気温と表面温度の差が非常に大きくなるため顕熱量は (1) 式の熱収支法で求めた結果最高 350 W/m²にも及び、夜間においても表面温度は気温より高く、21時頃でも 70 W/m²出している。この顕熱量の算定にはしばしばバルク式 ((3) 式) が用いられるが、これによる見積りでは 90 W/m²程度にとどまってしまう。

この理由は、この日は地表付近での風速が 1 m/s 以下と非常に小さく (図一 1)、地表面は強く加熱されていることから、このような条件のもとではせん断層内の熱輸送よりも自然対流による熱輸送の方が支配的になるためである。

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (3)$$

ここで、 $C_p \rho$: 空気の熱容量、 T_s : 地表面温度、

U, T : 基準高度の風速と気温、

C_H : 顕熱のバルク係数 ($C_H = 4.0 \times 10^{-3}$) である。

そこで、Asaeda と Watanabe (1986) が提案した熱対流中の熱輸送式 ((4) 式) を用いてこの量を見積もると 270 W/m² となり、これにせん断層内の輸送としての寄与分としてバルク式で見積もった量を加えると観測値とほぼ同様な値となる。一般に、自然対流分とせん断層内の熱輸送分を単純に加えることは、大きめの値を与えることが指摘されているが、このように風速が極めて小さく、しかも地表面が極度に加熱されている状態ではほぼ満足できる値を与えることができる。

$$F = \frac{1}{2.08} C_p \rho (\alpha g)^{1/3} \Delta T^{4/3} (\kappa^2 \nu)^{1/9} \quad (4)$$

ここで、 F : 熱フラックス、 α : 熱膨脹係数、 g : 重力加速度、 κ : 熱拡散係数、 ν : 動粘性係数、 ΔT : 温度差を示す。

土の場合でもアスファルトと同じく熱対流輸送式を用いて熱フラックスを算定すると 79.7 W/m² であり、実測値に近いことが示される。また、土では夜間になると地表面の温度は気温とほぼ等しくなり、地表面での熱の出入りは生じなくなる。コンクリートではアルベドが大きく正味放射フラックスが小さいので、顕熱量は土と同程度にとどまった。このことは一般に、舗装というアスファルトとコンクリートを同列に扱いがちであるが、場合によってはコンクリートの性質はアスファルトよりもむしろ土の方に近くなることを示しているといえよう。

2. 地表面熱収支のヒステリシス評価

前節で示したように、舗装の有無や舗装の性質により地中に流入する熱量や地中から流出する熱量は様々に変化することがわかった。こうした特性は地上の大気環境にも大きく影響することになる。従ってこの熱の流れの特性をできるだけ特徴的に表現することが必要となろう。そこで、それぞれの舗装体及び土の正味放射フラックス Φ と地中熱フラックス G の関係を解析してみた。このような地表面の熱収支の特性は Camuffo と Bernardi (1982) により単純に次のような関係式で表すことが提案されている。

$$G = a_1 \Phi + a_2 \frac{\partial \Phi}{\partial t} + a_3 \quad (5)$$

ここで、 a_n は地表面の性質によって決まる定義である。

地中熱フラックスを (5) 式のように表すことで、以上のような特徴が簡単に表現できる。この定数を用いればそれぞれの土地の熱的特性の分類に有効であることが伺える。それではこの式に沿って地表面特性の違いの特性を議論してみよう。図一 6 (a)-(c) に Φ と G の時間変化を

図一六 正味放射フラックス Φ と地中熱フラックス G

示す。まず、それぞれ時計回りにヒステリシスを持ったループを描いているが、これは、放射収支に大きく影響する日射量が同じであっても、地中の温度が低いために午前中のほうが午後よりも地中に入る熱量が大きいことを示している。 a_1 は直線の勾配、 a_2 はヒステリシスの幅、 a_3 は直線の切片となるが、これらは表一2のようになる。これらを比較するとアスファルトとコンクリートの勾配は土と比べて大きく、熱を吸収しやすい物性であることを示している。ヒステリシスの幅はアスファルトが最も大きく、午前中に舗装の温度が非常に高温になり、午後には大気中への放熱が大きいことを表している。逆にコンクリートのそれは最も小さく、これはコンクリートの熱

表一2 ヒステリシス評価に用いられる定数

	a_1	a_2	a_3
asphalt	0.58	0.57	-77
concrete	0.52	0.31	-28
baresoil	0.31	0.34	-28

容量が大きく、またアルベドも大きいために吸収する日射も少なく舗装の温度の日変化が小さいためであることによる。切片についてもアスファルトがその絶対値では最も大きく、舗装内部とその下の地中において多量の熱が蓄えられていることを示している。

IV. むすび

アスファルト、コンクリートより舗装された面と、自然のままの土の状態の場所とで、地表面の熱収支特性、地中熱特性を測定した。元来よく、アスファルトとコンクリートは同じ舗装として同列に扱われがちであるが、実際は場合によってはコンクリートはむしろアスファルトより土に近く、この2つの舗装材料が必ずしも同列ではないことを裏付けることとなった。

この地表面の舗装は、大気の加熱に重要な働きをすることは近年よく指摘されていることであるが、これはとりもなおさず、大気―地表面系の水分移動にも大きな役割を果たす。こうした点をふまえて、今後舗装の持つ特性を見直してみる必要がある。

謝 辞

最後に、野外観測及びデータの整理については埼玉大学学生の新原千浩君(現埼玉大学大学院)と 飛田孝久君(現日本道路)に手伝ってもらった。また、清水建設技術研究所の和氣亜紀夫、前垣内正記両氏のご好意により舗装を作成して頂いた。さらに本研究を行うに当たって文部省科学研究費の援助を受けた。ここに深く感謝の意を表します。

引 用 文 献

- 1) 浅枝 他 (1991): 都市域の温暖化における舗装の蓄熱効果, 水工学論文集, 35, 591-595
- 2) Asaeda, T. and K. Watanabe (1989): The mechanism of heat transport in thermal convection at high Rayleigh numbers, Phys.Fluids A, 1, 861-867
- 3) Camuffo D. and A. Bernardi (1982): An observational study of heat fluxes and their relationships with net radiation, Boundary Layer Meteorol., 23, 359-368

(1992年5月6日受付, 1992年10月1日受理)