

(42) 舗装面が地表付近の大気の加熱に及ぼす影響

HEAT STORAGE EFFECT OF PAVEMENT ON SURFACE ATMOSPHERE

浅枝 隆*, 藤野 毅**, 北原正代***, 和氣亜紀夫****, 窪田陽一*

Takashi ASAEDA, Takeshi FUJINO, Masayo KITAHARA, Akio WAKE, Yoichi KUBOTA

Abstract

Energy budgets at the air/ground interface were measured and analyzed for various pavement materials on summer days. The surface temperature, heat storage, and its subsequent emission to the atmosphere were significantly greater for asphalt than for concrete or bare soil. At the maximum, asphalt pavement emitted as additional 150W/m^2 in infrared radiation and 50W/m^2 in sensible transport compared to a bare soil surface.

Analysis based on a parallel layer model indicated that most of the infrared radiation from the ground was absorbed within 200m of the lower surface layer, affecting the air temperature near the ground. With a large temperature gap across the ground surface, in addition to a high surface temperature, the rate of infrared absorption over asphalt was greater by 60W/m^2 than the rate over soil or concrete, a figure comparable to the absorption by sensible transport.

KEYWORD Heat island Sensible heat Longwave-radiation Absorption

1. はじめに

近年都市域での温暖化が深刻になっているが、その原因としては人工排熱の増加や地表面変化、大気汚染等の様々な影響が指摘されている。ところが、これらの影響がどの程度であるかという点については依然不明であると言ってよからう。地表面をアスファルト舗装すると日中高温となり多量の熱が放出されることは道路の上に立ち登る陽光を見ても明かである。この放熱は一般に、空気の乱流輸送によって熱が運ばれる。すなわち、顕熱輸送として考えられがちである。ところがこれと共に熱せられた地表面から放出される赤外放射量も極めて大きい量であることが指摘されてきている¹⁾。本研究ではこうした背景を考慮し、地表面での熱の収支を測定し、さらにそれがどのようにして大気を加熱するかについて論じたものである。

* 埼玉大学工学部 Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama Univ.

** 埼玉大学大学院 Graduate Student, Saitama Univ.

*** (株) 東京電力 Tokyo Electricity Co. Ltd.

**** (株) 清水建設 Institute of Simizu Co. Ltd.

2. 観測概要

観測は、大きさ3m×3m、厚さ10cmのコンクリート及びアスファルトの舗装を作成し、91年8月26日に埼玉大学構内(35°53'N, 139°36'E)において行われた。この日は日中雲が殆どなく、気温は最高32.3℃を記録した典型的な夏日であり、比湿も0.013±0.002で、これは夏の東京の標準値である。それぞれの舗装内部には温度センサーを埋設し、さらにその下の地中には熱流計を設置して地中における熱の出入りを測定した。地上では、気温、風速、湿度、日射量、大気放射量、地表面からの長波放射量、アルベドを1時間毎に観測した。さらに6時間毎に表面と10cm下の土を採取してその含水比を求め、さらに容器に水を入れておき、可能蒸発散量を求めた。それぞれの試験体の物性を表1に示す。

3. 観測結果と考察

3-1. 舗装面の放射特性

図1はそれぞれの地表面から放たれる長波放射の日変化を示したものである。アスファルトでは、日中その表面温度が57℃まで達し650W/m²の長波放射を放っている。またそれは夕方には急激に減ってはいるものの、夜間でさえも大気放射と比べて50W/m²多く放射を放っている。一方コンクリートではそのアルベドが大きいために最高値は530W/m²に留まり、これは全ての地表面のなかで最も小さい。しかしながら熱容量が大きいためにその日変化は最も小さく、夜間でもわずかながら大気よりも多く放射を放っている。このように、同じ舗装面でも材質によってはその放射特性は大きく異なっている。土では、熱伝導率が小さいので日中表面付近だけがよく温められるが、日射が弱くなると急激に温度は下がり、放射量も夕方以降は大気よりも小さくなる。

表1 Physical properties of the materials

material (water content)	heat conductivity (W/m°C)	heat capacity (J/cm ³ °C)	albedo (12:00)
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

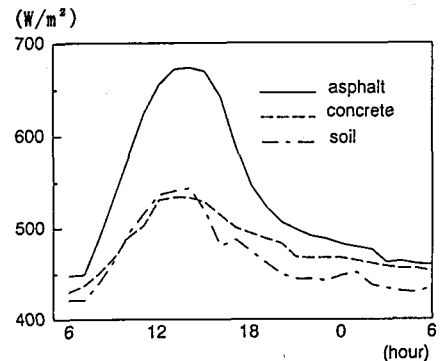


図1 Diurnal variation of the longwave emission by the ground surface.

3-2. 顕熱量の評価

次に、地表面は日中日射を吸収し、その温度が上がると対流が生じて大気加熱がもたらされる。加えて土では水分蒸発に伴い表層付近の熱が奪われ、その熱は乱流によって輸送される。これらの乱流による熱輸送量を地表面の熱収支より次の式で見積もった。

$$H + 1E = R_{\text{down}} - R_{\text{up}} + G \quad (1)$$

ここで、 R_{down} は下向き放射の収支、 R_{up} は地表面からの長波放射、 G は地中への伝導熱(下向きを正)、 H は顕熱、 $1E$ は潜熱を示す。

各放射量は観測値により、また G は地中の温度分布と熱流計の値からそれぞれ独自に見積もられる。図2(a)-(c)にそれぞれの地表における熱収支の日変化を示す。ここで、舗装面は充分に乾いていたため潜熱は生じないとして見積もった。これよりアスファルトからの顕熱輸送量は日中最高360W/m²となり、これは工業地からの人工排熱量の2倍以上に相当する¹⁾。また、夜の9時においても50W/m²近く放出してお

り、夜間の気温上昇に大きく寄与していることが予測される。コンクリートでは、表面で受ける正味の放射量が小さく、気温と表面温度の差が小さいために顕熱量はアスファルトの半分以下となった。また、夜間での放出もごくわずかであり、殆ど夜間の気温上昇には寄与しないことがいえる。土では表面で受ける正味の放射量は最も大きい、その大部分は水分蒸発によるものであり、気温上昇には寄与しない。しかし、日中の表面温度はコンクリートとほぼ同程度にまで上昇し、顕熱輸送量も同程度の大きさとなる。しかし、熱が表面近くのみ蓄積し、夜間には急速に冷却し熱の放出はなくなる。

3-3. 長波による下層大気の加熱

一般に、大気を加熱（あるいは冷却）させる要因としてはこうした乱流による熱輸送が挙げられるが、それと同時に大気から受けるものよりも多量の長波量を放射している。このことは、長波放射全体でみると地表面から大気に向けてのエネルギー輸送によることを示している。従って、アスファルトのように非常に多量の長波放射を伴うものは、この効果を見積もる必要がある。そこで、地表面から全体として大気に向かう長波放射量が、熱放出量全体、すなわちこの長波放射量と乱流輸送量との和に占める割合を見積もった（図3）。これによると、日中アスファルトでは放射の占める割合が全体の3割以上に達し、平均して土の場合のそれと比べて約3倍にもなる。このことは、よく加熱された舗装面では多量の顕熱を生じさせるだけでなく、長波放射収支でも多量のエネルギーを大気に放出しており、2重の効果によって大気を加熱していることが示される。ところが、長波放射量そのものは大気の加熱に寄与するわけではなく、大気に吸収されて初めて大気を加熱することになる。そこで、長波放射の吸収量を見積もってみよう。

4. 放射吸収のモデリング

大気の放射吸収のモデリングの詳細は他報告^{2) 3)}に譲るが、ここではその概略のみを示す。長波放射の算定には平行平板大気を仮定し、吸収量（あるいは射出量）はその平板間における放射収支の差によって評価される。

長波はその波長を分割して計算を行った。放射伝達の方程式を以下に示す。

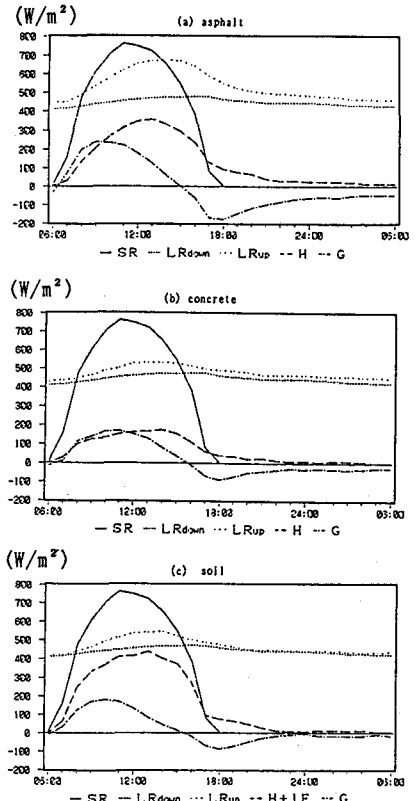


図2 日中の地表でのエネルギー収支の成分の日変化

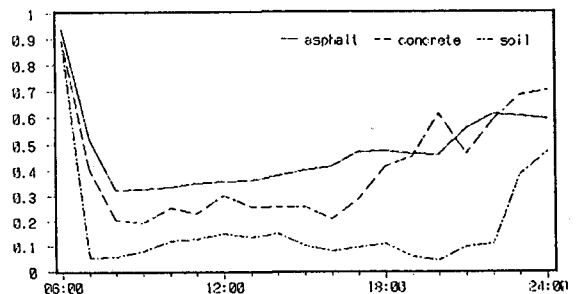


図3 $LR / (LR + H + 1E)$

$$\begin{aligned}
F_{up}(z) &= \pi \sum_{\Delta\lambda} B_{\Delta\lambda}(0)(1 - \epsilon_1(z, 0)) \\
&+ \pi \sum_{\Delta\lambda} \int_z^0 B(z')_{\Delta\lambda} \frac{d\epsilon_1(z, z')}{dz'} dz' \\
&- 200\pi \int_z^0 B_{667}(z') \frac{d}{dz'} (\epsilon_{CO_2}(z, z') T_{H_2O}(z, z')) dz' \\
&- \pi B_{\Delta}(0)(1 - \epsilon_{\Delta}(z, 0)) \\
&- \pi \int_z^0 B_{\Delta}(z') \frac{d\epsilon_{\Delta}(z, z')}{dz'} dz' \\
F_{down}(z) &= \pi \sum_{\Delta\lambda} \int_z^{\infty} B(z')_{\Delta\lambda} \frac{d\epsilon_2(z, z')}{dz'} dz' \\
&+ 200\pi \int_z^{\infty} (B_{667}(z') \frac{d}{dz'} \epsilon_{CO_2}(z, z') T_{H_2O}(z, z')) dz' \\
&- \pi \int_z^{\infty} (B_{\Delta}(z') \frac{d\epsilon_{\Delta}(z, z')}{dz'}) dz'
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\tag{3}$$

ここで、 F_{up} , F_{down} はそれぞれ上向き、下向きの放射量、 $B_{\Delta\lambda}(z')$ は高さ z' におけるプランク関数の $\Delta\lambda$ 成分、 ϵ_1 , ϵ_2 は長波スペクトル全体の水蒸気の射出率、 ϵ_{Δ} は窓領域(8.75-12.25 μ m)における水蒸気の射出率、 ϵ_{CO_2} は CO_2 の射出率、 B_{Δ} は窓領域でのプランク関数、 T_{H_2O} は水蒸気、 CO_2 の連続吸収帯における水蒸気透過関数を示す。

5. 結果及び考察

図4 (a)-(c)は、それぞれの地表付近における単位高さ当たりでの長波放射吸収量を表している。長波の吸収物質として水蒸気密度及び CO_2 濃度をそれぞれ16.7g/m³、350ppmとして与えた。朝6時では、まだ地表は日射の影響を受けないが、アスファルト表面の温度はこの時点でも気温より高いため、表層の大気はわずかであるが吸収されていることがわかる。高い位置における大気はその射出分のほうが卓越するので冷やされることになるが、地表近傍の層の大気は加熱されていることを示している。土では表面温度が気温より低く、吸収よりも射出のほうが大きいため、全ての層にわたって冷却される。その後はどの地表でも午後2時まで表面温度が上昇し続け、地表から出される長波の吸収量の方が大気から放出されてくる量に比べて多くなる。特にアスファルトでは、5mの高さで1m厚の気柱当たり3W/m²も吸収され、加熱域は800mの高さにまで及ぶ。一方、土とコンクリートではその加熱域は300m程度に留まっている。それ以後は、地表の温度は下がり、吸収量は減少していく。しかしながらアスファルトでは、日中に蓄えられていた熱のために表面温度が下がらず、夕方18時でさえも1W/m²/mの吸収が生じており、夕方の”暑さ”に寄与している。コンクリートではこの時既に低い値となるが、夜間でも表面温度が気温よりも高いので吸収は続く。土ではこの頃から表面温度が気温よりも低くなっており、射出の方が卓越し、大気を冷却することになる。この過程は加熱されたアスファルトは一日中表層の大気を加熱させることを示しているといえよう。朝6時から夕方18時の間に30m以下の大気において、放射により吸収される熱量が大気からの放射を上回る量の総量は1.25MJ/m²になる。

他のエネルギー源との比較はこれらを積分量で表した形で行われる。図5 (a) (b)はそれぞれの時間における積分値を表したものである。午後2時ではアスファルトにおいて500mの高さまでに吸収された量から放出した量を差し引いた放射量は80W/m²となり、これは乱流輸送の4分の1に相当するが、住宅地の人工排熱量よりもはるかに大きくなり、東京23区の平均人工排熱量を上まわることになる。夕方の18時では、積分量の最大値と加熱域の高さは小さくなるが、他の地表面と比べて吸収量は大きく、夜間でも明らかに大気を加熱させていることが分かる。

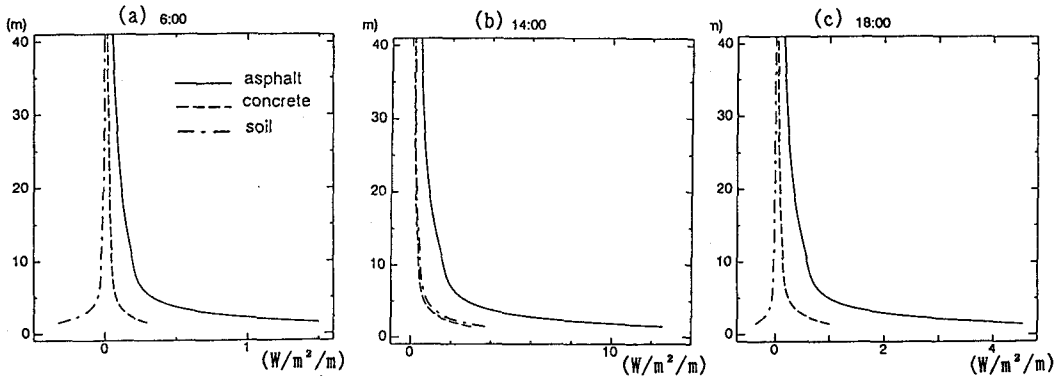


図4 単位高さ当たりの長波放射の吸収量

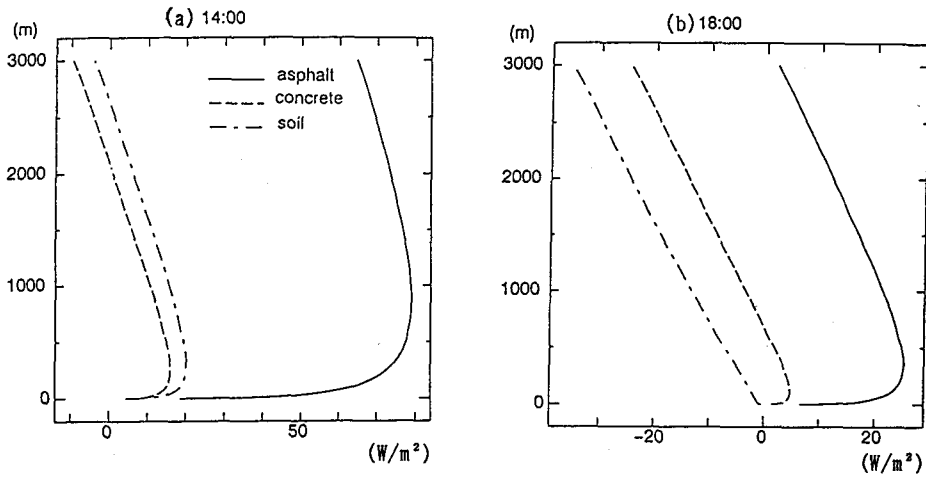


図5 長波放射の吸収量（積分値）

6. おわりに

アスファルト舗装は多量の熱を吸収しやすい。表面温度が極めて高くなることはよく知られた事実であるが、これが大気の加熱に及ぼす影響について見積もった。加熱した表面から大気に向けて輸送される顕熱輸送量は、東京近郊でも夏期 300W/m^2 越えることが示され、またそこから放出される長波放射量が大気に吸収される割合は、大気から放出される量を一日中上回り、日中では 1m 厚当たり 3W/m^2 も熱し、それによって加熱される高さは 800m にも及ぶことが分かった。なお、本研究は文部省科学研究費（一般研究(C)）の補助を受けた。

参考文献

- 1) 浅枝隆他(1991)：道路舗装の熱環境に及ぼす影響、環境システム研究, Vol.19, 89-93.
- 2) T.Asaeda & A.Wake : Solar Heating of Pavement and its Effect on Lower Atmosphere, Boundary-Layer Meteorology (submitted).
- 3) 浅枝隆、北原正代、藤野毅、和氣亜紀夫：加熱した舗装面上空の大気加熱過程の解析、土木学会論文報告集（準備中）。