

アスファルト舗装面における熱収支の実測 —(試験体を用いた野外実験)都市地表面における日射エネルギーの変換機構に関する研究・その1—

正会員 成田健一*・関根 毅**・三寺光雄***

1. はじめに

都市の昇温化については、人工熱の放出をはじめいくつかの要因があげられてきたが、地表面の改変に伴なり熱収支特性の変化もその大きな要因の一つと言える。一般に都市域では不透水面の拡大により潜熱 flux が減少し、大気への顕熱 flux と地表面構造物への貯熱量が増大すると言われている。このような観点から、都市の気温分布を土地利用の分布と対応させる研究¹⁾やまた都市と郊外に異なる熱収支特性を設定したシミュレーションの研究等が数多く行なわれてきた。これらのシミュレーションは、いずれもパラメータとしての熱収支係数(透水面積率や地表面物質の熱容量・熱伝導率など)を任意に設定したものであり、各パラメータの寄与度を明らかにするという意味では評価されるが、種々の地表面に対して設定した係数の妥当性が計算結果を大きく左右する。しかしながら、都市は様々な土地利用空間のモザイクであり、都市を構成する各々の地表面構造物の熱収支特性は、測定方法の困難さから、これまで具体的に明らかにされていない。従って、これらシミュレーション結果の検証の意味からも、各種地表面における熱収支の具体的な実測を積み重ね

ていく必要がある。本研究はそのような研究の一環として、都市地表面の代表であるアスファルト舗装面を取りあげ、その熱特性と熱収支の実測を行なったものである。

一方、都市域の熱環境の評価方法として、近年リモートセンシングによる解析⁵⁾が盛んである。この手法は同時広域的資料が得られるという利点がある反面、情報は瞬時の値であるという点が問題となる。すなわち、熱画像による温度情報は様々に時間変化している一断面であり、従って対応させる地上データもその点を考慮した測定の方法が必要となるが、これまでの研究は物質の違いに注目したものが大半で、同一被覆物におけるデータのばらつきについては未解決の部分が多い。そこで本研究では熱収支の実測と合わせ、アスファルト舗装面の表面温度についてその履歴効果を考察し、実際の都市空間における建物による影や日射量の変動など、測定条件の変化の影響についても考察した。

2. アスファルト舗装面の熱特性及び熱収支

a. 測定方法

アスファルト舗装面は都市域の道路の大半を占め、典型的な土地利用形態の一つと言えるが、実際の道路に測器を埋設するのは具体的に困難である。そこで本研究では 300mm 四方・厚さ 50mm のアスファルトブロックを用い、それを重ね合わせることで図 1 に示すような実験装置を作成した。^(注1)装置は厚さの違いによる貯熱効果の差異をみるため、5層(250mm厚)と3層

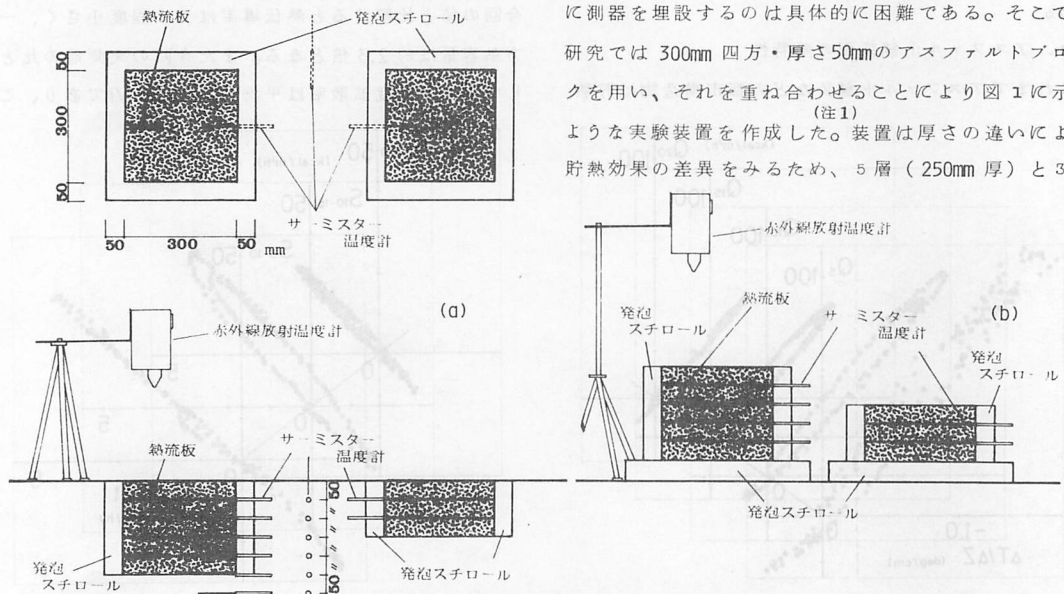


図1. 実験装置の概要

(注2)

(150mm厚)の2種を用意した。5層の方には各重ね面(50, 100, 150, 200 mm)にサーミスタ温度計(宝工業D611用センサーSXB-54)及び熱流素子(EKO CN-81)を、一方3層の方には50,100mmの位置に同じ温度計を埋め込んだ。センサーは、まずブロックの片面に数mmの溝を作り、加熱したストレートアスファルトを流し、固結する前に埋め込んで固定し、次にブロック相互をやはり加熱したストレートアスファルトを重ね面に薄く伸ばし接着した。さらに横方向の断熱のため、厚さ50mmの発泡スチロールを周囲に貼り付けた。実験は図1に示すように、刈取り後の水田土壤中に埋設した状態(a)と、底に発泡スチロールを敷いて断熱し建物屋上に露出したもの(b)の2条件で各々行なった。(a)については攪乱していない土壤断面にも同じ温度計を300mmまで50mm間隔に差込み、また5層のブロックの底面とその下50mmの土壤中にも温度計を設置した。一方(b)については周囲からの輻射を防ぐため、さらにアルミ箔で囲んだ。表面温度は赤外線放射温度計(National ER-2007)正味放射量^(注3)は示差計(EKO CN-40)で測定し、熱流と共にペンレコーダに記録し、サーミスタによる内部の温度は昼間は10分毎、夜間は1時間毎に直読した。また、表面上10mmでアスマン通風乾湿計により気温も適時測定した。測定日は(a)が1983年3月27・28日、(b)は1982年11月13・14日で、共に測定前約一ヶ月間その状態で放置しておいたものである。

b. アスファルト舗装面の熱特性

これまでアスファルト舗装などの都市構造物は貯熱

量が大きく、その放熱が明け方まで続くため都市域の最低気温を高める作用をしていると一般に説明されてきた。その貯熱量を左右するのは熱容量や熱伝導率であり、地中の温度分布はそれらの比で定義される温度拡散率によって決まる。

そこでまず熱伝導率を求めるため、各深さの熱流とその深さでの鉛直方向の温度勾配を取りプロットしたのが図2である。ただしここでは深さZmmの温度勾配は、 $Z \pm 50\text{mm}$ の温度差をその間隔で除したもので近似している。実際には非定常の伝導であり、昇温時には $\partial^2 T / \partial z^2 > 0$ 、降温時には $\partial^2 T / \partial z^2 < 0$ となるため、図はわずかながらループを描く。これらのプロットの傾きから熱伝導率を算出した結果は、深さ5,10,15,20cmで各々0.712, 0.676, 0.662, 0.675 kcal/m h degである。

次に熱容量の算出のため、上下両面で熱流を測定している各5cm層について、熱流の差から求めた貯熱量とその層の温度変化の関係をプロットした。その結果を示したのが図3で、各々の傾きより熱容量の値は各5-10, 10-15, 15-20 cm層で192, 232, 211 kcal/m³degが得られた。

以上は土壤中での測定結果であるが、露出状態での測定でも同程度の値(熱伝導率; 平均0.692 kcal/m h deg、熱容量; 平均203 kcal/m³deg)が得られた。

これまで多くの研究で引用されてきた熱特性値⁶⁾は、熱伝導率0.63 kcal/m h deg 熱容量は491 kcal/m³degで、今回の値と比較すると熱伝導率は7%程度小さく、一方熱容量は約2.3倍となる。また今回の実測値の比として求めた温度拡散率は平均 $3.2 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{h}$ であり、こ

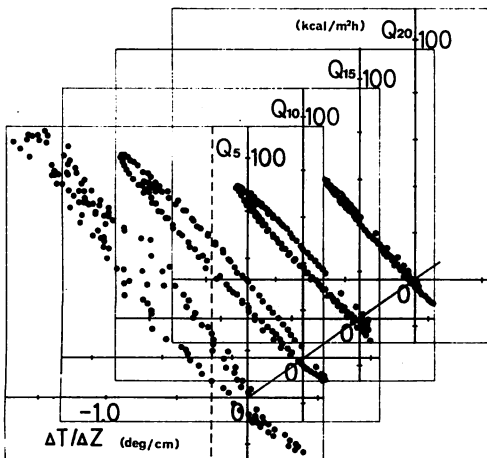


図2. 各深さにおける熱流と温度傾度の関係

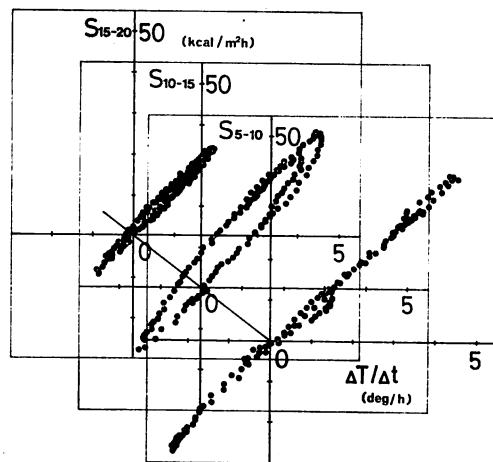


図3. 各層における貯熱量と温度変化の関係

れまでの値 $1.28 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ はその 40% 程度である。アスファルト舗装は本来均一な物質ではなく、骨材の種類や圧密の度合等によりその特性が変化するため、ある程度幅をもった補え方が必要と思われるが、その点を考慮しても既存の熱容量の値は大幅な過大評価であったと言える。

c. アスファルト舗装面の熱収支特性

図4に土壤中に埋設したアスファルトブロックの表面及び各深さの温度変化を示した。また図5にはその日

の正味放射量(Rn)及びアスファルトブロックの各深さの熱流($Q_5 - Q_{20}$)、さらに表面でのアスファルト層への伝導熱流(G)と顕熱フラックス(H)を示した。

放射温度計による表面温度の測定には、表面物質の射出率(ϵ)が問題となる。今回の測定では射出率を1としているが、その温度 T^* と真の温度 T の間には $T^* = \epsilon T$ の関係があり、従って

$$T - T^* = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\frac{1}{4}} - 1) T^*$$

の補正が必要である。

図2に示した深さ5cmの熱伝導率を求めるプロットにおいて、原点のずれがこの測定誤差によると仮定すると、その差は2.5℃となり、この温度差から逆にアスファルト表面の射出率を求めると0.97という値が得ら

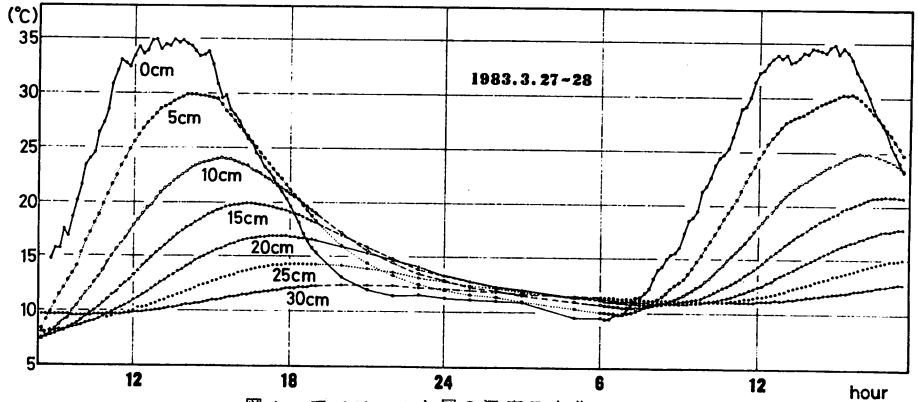


図4. アスファルト層の温度日変化

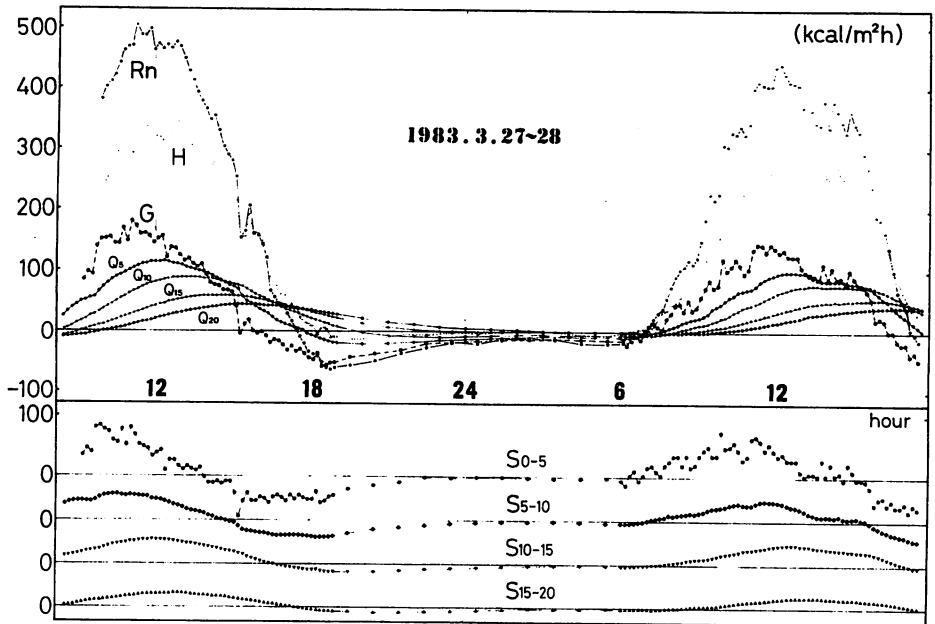


図5. アスファルト舗装面の熱収支及び貯熱量の日変化

れる。補正值は T^* によって変化するが、今回の測定温度域(10~35℃)での変化は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度であるため、本報では一律に補正を施している。(図中の破線は補正前の縦軸を表す。)

アスファルト表面での伝導熱流は次に従い、先に求めた熱容量の値を用い表面と深さ5cmの温度変化から表層5cmの貯熱量を求め、その値と深さ5cmの熱流を加えることにより求めた。

$$G = \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)_z + \int_0^z c_p \frac{\partial T}{\partial t} dz + \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)_z + c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} z$$

λ : 熱伝導率, c_p : 熱容量, \bar{T} : 0-Z層の平均温度
また、顕熱フラックスは潜熱フラックスがないと仮定し、正味放射量と伝導熱流の差として算出した。

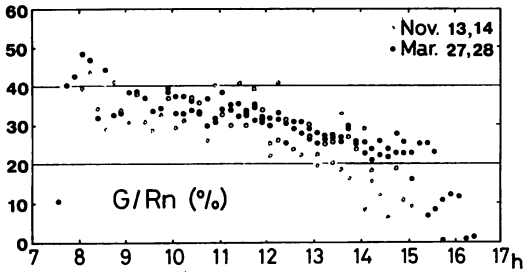


図6. 伝導熱流/正味放射量の時間変化

各フラックスの変化で注目すべき点は伝導熱流の大ききで、アスファルト舗装面では日中40%程度がアスファルト層の加熱に配分されている。図6はG/Rnの時間変化を示したもので、11月の観測では日没が3月の場合より早いためやや早めに減少しているものの、日中は両者ともかなりよく一致している。Gのピークは正午前に起こり、午後はHの割合が増大する。図5には各5cm層のアスファルトの貯熱量(S_{0-5} - S_{15-20})の変化も合わせて示したが、表層5cmでは14時頃から放熱が始まっていることがわかる。

d. 土壌表面との比較

以上述べてきたアスファルトについての測定結果を同時に測定した土壌層の温度変化と比較することにより、アスファルト舗装面での熱収支特性と都市気候における意味を考察する。

図7・8には、各々アスファルト層と土壌層の等温線図を示した。両者を比較すると、アスファルト層では表面の温度変化がすみやかに下方へ伝わり、温度変

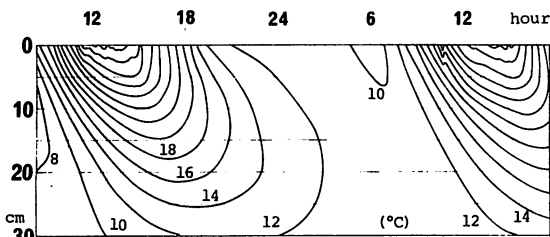


図7. アスファルト層の等温線図

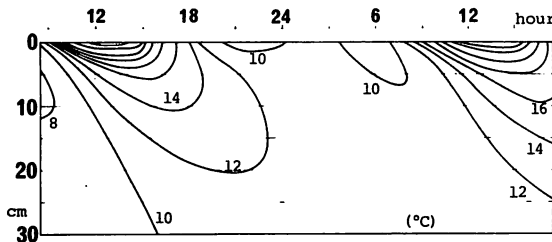


図8. 土壌層の等温線図

化が深層まで及んでいるのに対し、土壌層では温度拡散が小さいため等温線は表面近くだけが密となり、アスファルトに比べ全体的に横に倒れた形となっている。温度拡散率の値は、表面での温度変化を正弦曲線で近似することにより、較差の深さ方向の減衰の仕方から次式で求めることができる⁷⁾

$$k^2 = \frac{(z_2 - z_1)^2 (\log e)^2}{(\log R_1 - \log R_2)^2} \left(\frac{T}{T} \right)$$

T: 周期, R_1, R_2 : 各々深さ z_1, z_2 における較差。

これにより求めた温度拡散率の値は、アスファルトが 3.31×10^{-3} 、土壌が 1.32×10^{-3} (m^2/h) で、土壌の値はこれまでの研究例からみて妥当な値と言える。アスファルト層については先に熱伝導率と熱容量より算出した値とほぼ一致している。

以上のような温度拡散率の差は主に熱容量の差異によるものであり、アスファルト舗装の熱容量は土壌に比べかなり小さい。今回土壌については熱容量の直接測定は行なっておらず、また土壌の値はその種類及び水分条件で大きく変動するため単純な比較は困難であるが、少なくともアスファルト舗装面の熱容量が平均的な郊外の地表面より大きいという記述は誤りである。

これまで上述の議論は、主に夏期早朝のアスファルト面の高温を根拠として展開されてきた。すなわち、熱容量が小さい物質は夜間の冷却率が大きいにもかかわらず、アスファルトの場合は早朝まで高温が保たれている。そこで、この点を考察するため、アスファルト層(5層及び3層)と土壌層の温度プロファイルの変化を図9に示した。上段は放熱過程、下段は貯熱過程を示している。放熱過程を比較すると、温度拡散の小さい土壌が表層だけ冷却しているのに対し、アスファルトはかなり深層まで早くから冷却を開始する。このことは図5の貯熱量(S)の変化と対応しており、18

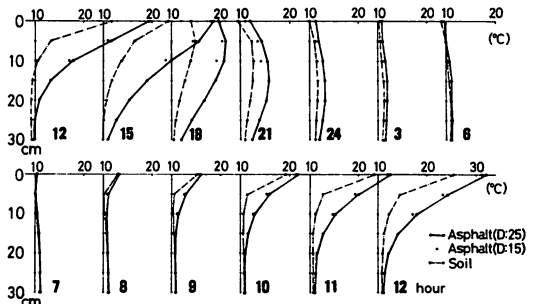


図9. アスファルト層と土壌層の温度プロファイル

時には15-20cm層(S₁₅₋₂₀)も放熱に転じ、ほぼ全層にわたって冷却が始まっている。同じ20cmで土壤層の温度が下がり始めるのは5時間後の23時である。単純に温度低下の絶対値を比較すれば、熱容量の小さいアスファルトの方が大きくなる。しかしながら、日中の昇温量が土壤に比べ極端に大きく、しかも深層からの熱の供給が早くから連続的に行なわれるため、早朝になってもアスファルト層は土壤層より冷えることはない。このことは3層のアスファルトと土壤層の温度差が5層の場合より早く消滅することからも裏付けられる。今回の例では日出前に温度差がほとんどなくなっているが、日中の貯熱量がより大きくなる夏期には、その放熱が早朝までに終了しなくなることが当然予想される。

e. シミュレーション結果との比較

最後に今回の実測結果とシミュレーションの結果との比較を試みる。例として尾島・森山の計算結果を参考にすると、G/Rnが50数%とその比には多少差異はあるものの、GとHのピークのずれも含め両者の熱収支成分の日変化は非常によく一致しており、シミュレーション結果はアスファルト舗装面の特性をよく表現していると言える。ただし、ここで注意すべきことは、彼らの設定した熱収支係数のうち少なくとも熱容量については今回の実測値と大幅に異なるという点である。従って、このことから逆にアスファルト面の熱収支を考える上で、熱容量など表面物質の熱特性はさほど重要ではないと言え、いわゆる蒸発に伴う潜熱フラックスの欠除がアスファルト舗装面の熱収支を主に特徴づけていると思われる。

3. アスファルト舗装面の表面温度と日射量

a. 測定方法

2と同じアスファルトブロック(300x300x50mm)10枚を使い、各ブロックについて図10に示すスケジュールに従い日影時間帯を設定し、表面温度の比較を行なった。測定は前述の放射温度計を使用し、同時に全天

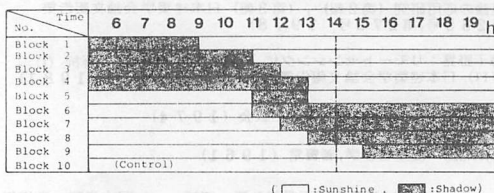


図10. 実験のスケジュール

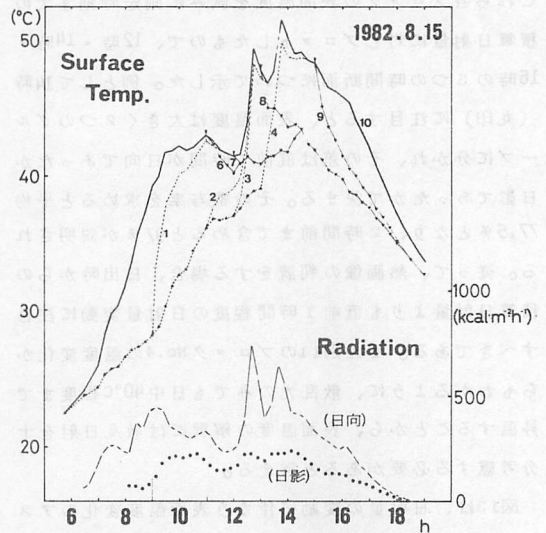


図11. 各ブロックの表面温度と日射量の変化

日射量及び日影面での日射量をペンレコーダで連続記録した。今回日影面として利用したのは白色塗装した高さ2mのベニヤ板の壁で、日影時間帯となったブロックを壁がつくる影面へ移動させるという方式をとった。本報で用いる日影日射とは、この影面で測定した日射量である。なお、測定場所は本学建物屋上である。

これとは別に、図1(d)と同じ土壤中に埋設した実験装置を用い、晴天日に日影時間を設定し、表面及び内部温度、各深さの熱流を測定した。

b. 結果

図11は各ブロックの表面温度と日射量の実測結果を示したもので、図中の番号は図10のBlock No.と対応している。日影から日向へ移動した各ブロックについて、終日日影に置いたNo.10との温度差をとって比較すると、いずれも3時間以内に温度差は解消している。図12は

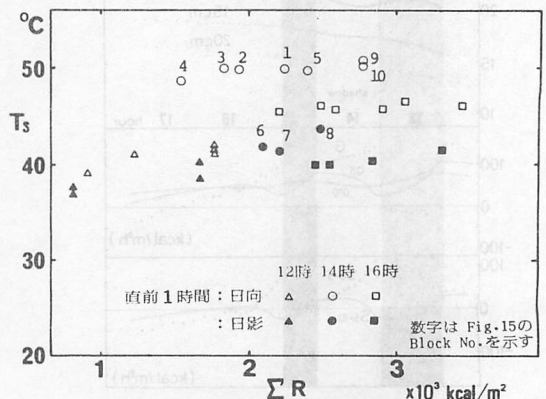


図12. 表面温度と積算日射量の関係

これら各ブロックの表面温度を試みに測定時刻までの積算日射量に対しプロットしたもので、12時・14時・16時の3つの時間断面について示した。例として14時(丸印)に注目すると、表面温度は大きく2つのグループに分かれ、その差は直前1時間が日向であったか日影であったかで決まる。その寄与率を求めると平均77.5%となり、2時間前まで含めると97%が説明される。従って、熱画像の判読をする場合、日出時からの積算日射量よりも直前1時間程度の日射量変動に注目すべきである。また図11のブロックNo.4の温度変化からもわかるように、散乱光のみでも日中40°C程度まで昇温することから、表面温度の解釈には散乱日射を十分考慮する必要があると言える。

図13は、日射量の変動に伴う表面温度変化のアスファルト層内への伝播状況と表面での伝導熱流及び深さ5・10cmでの熱流の変化、さらに表層5cm及び5-10cm層の貯熱量変化を示したものである。日中日影になると表面の伝導熱流は上向きに転じ、表層5cmの貯熱が急速に費やされる。このため5cm層の温度は4-5分の遅れですみやかに低下し始める。しかしながら、1時間程度の日影は大半が表層10cmまでの放熱でまかなわれており、それ以深の温度・熱流への影響は小さい。

4. まとめ

アスファルト舗装面での熱収支の実測から、熱伝導

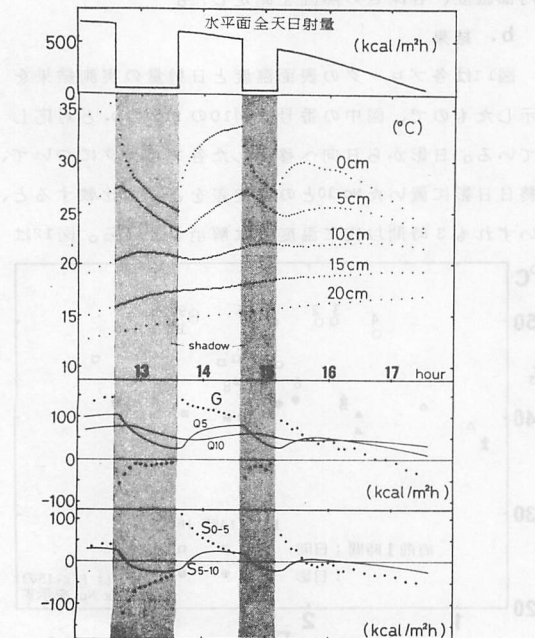


図13. 日射変動に伴う温度・熱流・貯熱量の変化

率: 0.68kcal/m hdeg、熱容量: 211kcal/m³deg、温度拡散率: 3.22x10⁻³m²/h が得られた。熱容量の値は一般土壌より小さく温度拡散率は大きい。日中の伝導熱流は正味放射の40%余に達する。そして温度変化が深層にまで及ぶため、アスファルト層自体の熱容量は小さいものの貯熱量は大きい。また放熱は深層までほぼ同時に起こり、日中の貯熱量の大きさと温度拡散が大きいことから、早朝まで高温が保たれる。

表面温度は熱容量が小さいことと対応して変動が激しく、直前の日射量の変化に大きく左右される。そのため、通常測定時刻の2時間以上前の日射量の差は無視しうると考えられる。

(注1) 本報で用いた試験体は中国察省道に用いられた舗装と同じもので、道路公団が主に強度・摩耗試験用に作成したものを譲り受けた。骨材: ホルフェンス6号(13~5mm) 3/1%、7号(5~2.5) 2.0%、Sc(2.5以下) 2.3%、及び海砂2.2%、石粉4%に対し、ストレートアスファルト(比重1.038、軟化点46.0°C) 6.1%、圧密の程度は理論密度2.493g/cm³、空けき率4.372%である。なお、試験体は作成後約1年間野外に放置したものである。

(注2) 実際の道路の舗装断面は表面から表層・基層・路盤に分けられるが、いわゆる加熱アスファルト混合物からなるのは表層と基層である。この部分の厚さは通常予想される交通量により決定され、アスファルト舗装要綱では交通量の少ない方から4段階に分け、各々5・10・15・20cmを最少厚さとしている。

(注3) 正味放射量Rnは次式で表わせる

$$R_n = (1 - \alpha) q - I$$

α: アルベド, q: 水平面全天日射量, I: 有効長波長放射。

(注4) 土壌に関しては一般に、深さ方向に熱特性が均一ではなく、また時間的にも変化する。特に表層については水分条件で大きく変動するため、今回アスファルトブロックに用いた方法をそのまま適用することはできない。

謝 辞

実験を実施するにあたり御便宜をいただいた、広島大学総合科学部福岡義隆助教、並びにアスファルトブロックを提供していただいた日本道路公団高速道路広島建設局広島工事事務所の方々に感謝を表する。また、実験・解析に際し本学院生徳岡利一君の多大なる協力を得た。ここに記して感謝する。

文 献

- 1) 福井英一郎: 都市における気温分布と緑地, 都市問題47 (1956)
- 2) Morgan, D., Myrup, L., Rogers, D. and Baskett, R.: Microclimates within an urban area., A.A.A.G. 67 (1977)
- 3) 木村建一, 宇田川光弘, 久保俊介: 都市化とヒートアイランド現象, 気象研究ノート119号 (1974)
- 4) 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 (第2報), (第3報) 日本建築学会論文報告集第265号, 第272号 (1978)
- 5) 梅干野晃: リモートセンシングによる住宅地の熱環境の解析 (I), (II) 日本建築学会論文報告集第303号, 第309号 (1981)
- 6) 小原俊平: 建築の熱設計, 鹿島出版会 (1974)
- 7) 八畝利助: 農業物理学, 養賢堂 (1961)

**広島大学工学部教授・工博 * 同大学院・学術修
***広島大学総合科学部教授・理博