

# 招待論文 「熱環境の側面からながめたコンクリート」

浅枝 隆\*1・藤野 毅\*2

**要旨:** コンクリートは様々な形で自然環境を変化させる。その中で、周辺の熱環境を悪化させることは都市生活を営む上で大きな問題である。ここでは、舗装を例にして、コンクリート舗装とアスファルト舗装、裸地面について、夏および冬についてそれぞれの面におけるエネルギーの収支特性を比較した。その中で、コンクリートは、夏には日中には日射の反射が大きく、その一方で大量の熱を蓄えてそれを夜間に放熱する。また、冬にはより冷却されるなどの欠点がある。こうした欠点の緩和としては、単に空隙をもった材料では十分でなく、空隙サイズに広範な分布があり、保水力をもった材料でなければならない。また、植物で建材の表面を覆うことは、日射や天空への赤外放射量を制御するために、夏冬ともに建材の温度緩和に有効である。

## 1. はじめに

コンクリートが自然に対して人工構造物の代名詞として捉えられていることからわかるように、コンクリート構造物は様々な面で自然環境に影響を及ぼしている。主なものを拾いあげると表-1のようになり、これらは元あった自然からみればマイナスに作用している。そのため、最近では、こうした性質をいかに自然と調和させるかが一つの重要な課題になっている。その中には、エココンクリートにみられるように植生の生育可能なコンクリートの開発、自然な形状を有する構造物など様々なものがあるが、コンクリートに代表される非透水性の構造物や地面が都市のヒートアイランド現象の主因になっていることでもわかるように熱環境にやさしいコンクリートの開発も重要なテーマといえよう。ここでは、こうした側面について考えることにする。

## 2. 地表面での熱収支

さて、コンクリート舗装や構造物が熱環境に与える影響を考えるには、まず、エネルギーの収支について知っておく必要がある。図-1は地表面のエネルギー収支を概念的に示したものである。まず、放射収支については短波である日射とその反射、大気

および地面や構造物からの赤外放射がある。その他に、熱が直接伝わる顕熱輸送、温度は変化しないものの液相、気相、固相との間で相変化する際に周辺との間でエネルギーがやりとりされる潜熱輸送、地盤内に伝わる伝導量、動物の発熱や人間の活動で排出される熱量がありこれらで概ねバランスされている。なお、放射はすべての物体や大気分子からほぼその表面の絶対温度の4乗に比例する量が射出されており、温度が高いほどより大量のエネルギーが射出され、また、顕熱輸送量は表面温度と外気温度の差に概略比例し、潜熱輸送量は表面の水分量と大気中の水分量との差に概略比例する。

それでは、様々な舗装や裸地面を例にとりてこれらの地面の違いによるこれらの量的変化を考えてみる。図-2(a)-(c)は、典型的な材料として、アス

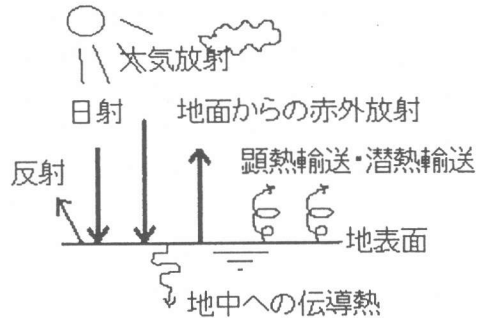


図-1 熱収支の概念図

\*1 埼玉大学助教授 大学院理工学研究科 工博

\*2 埼玉大学助手 大学院理工学研究科 学博

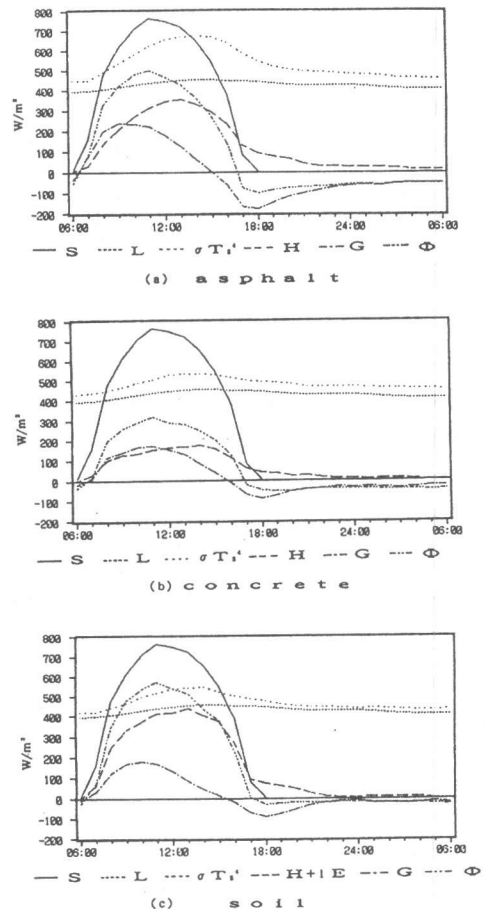
表一 自然環境に影響を与えるコンクリートの主な特徴

人工的	自然の中での不調和な景観、野生動物の回避
稠密性、連続性	植物が生育できない、微生物が生息できない、動物がとまれない、地下水が浸透しない、熱環境の悪化、貧酸素化、騒音の発生
高耐久性	建設廃材
高熱伝導性	熱環境の悪化
色彩	紫外線の増加、冬の寒冷化
高強度	土壌の浸食がなくなる
材料の組成	アルカリ化

ファルト面、コンクリート面、裸地面について、真夏の晴れた日におけるこうしたエネルギーフラックスの実験結果である<sup>20)</sup>。色の濃いアスファルトはアルベドとよばれる反射率が小さく、大量の日射を吸収し、舗装内の熱量や表面の温度が増加し、気温との間の温度差が大きくなることから大量の顕熱が大气に輸送される。その一方で、高温の表面から上向きに射出される赤外放射量は大气からの赤外放射量を大幅に上まわり、この差の一部は大气に吸収される<sup>21)</sup>。主としてこの顕熱輸送量と大气に吸収された赤外放射が大气を加熱する。この量は通常の都市の人工廃熱量の数倍から数十倍にあたるものである。さらに、ここを歩いている歩行者はこの赤外放射量の差に近い量を余分に体に吸収している。

それにひきかえ色の薄いコンクリートの場合には日射の多くを反射させてしまうために蓄熱量も少なく、表面温度も裸地面のそれと大差はない。ただし、もしここでコンクリート表面を着色しておけば、アスファルト舗装の場合と同様な結果が得られる。コンクリート舗装の場合には、表面温度はあまり上昇せず、その瞬間における大气の加熱率も路上の通行人が受ける赤外放射量も裸地面と同程度である。そのため、一見裸地面と同様な機能を有しているように思われがちである。しかし、いくつかの点で裸地面とは全く異なる性質を有している。

まず、コンクリート舗装の表面温度が上昇しない理由は日射の反射量が多いことに起因している。これは、コンクリートの舗装に限らず、白っぽいアスファルト舗装についても同様なことが言え、日中の



図一2 地表面の熱収支

(S : 日射 ; L : 大气放射 ;  $\sigma T_s4$  : 地面からの赤外放射 ; H : 顕熱輸送 ; IE : 潜熱輸送 ; G : 地中への伝導熱 ;  $\Phi$  : 正味放射)

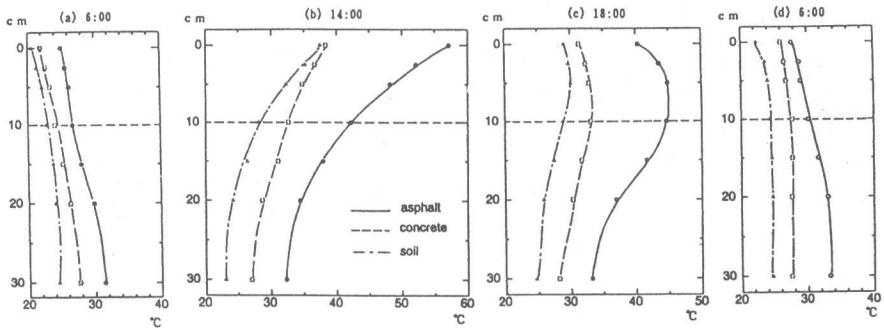


図-3 地中温度の日変化(91年8月26日)

「照り返し」が大きいことである。そのため、歩行者は大量の紫外線を含む日射の反射光を受けることになり決して好ましいことではない。次に、コンクリート舗装は熱伝導係数が大きいにより多くの熱を蓄熱する。裸地の場合には、常に地下より水分が供給されるため、これが蒸発する際に潜熱に利用されることと、熱容量の大きい水が加熱されるためにより多量の熱が利用されることから、たとえ表面がコンクリートと同程度に加熱されたとしても、地中の温度上昇は極めて僅かである。ところが、水分のない密なコンクリートの場合には表面で吸収された熱量はそのまま舗装を加熱されることに利用される。この熱は夜間の気温が低下した期間に表面に伝導し、表面温度の低下を妨ぐばかりでなく、主として顕熱の形で大気を加熱する。これは夕方から夜間にかけての熱帯夜の形成に寄与する。

図-3(a)-(d)は、地中温度の分布について、アスファルト舗装、コンクリート舗装、裸地面を比較したものである(2,5)。裸地面では表層にしか温度上昇が生じていないが、コンクリートではアスファルトほどではないにしても大量の熱が蓄えているのがわかる。この熱の大部分は特に夜半までに大気に放熱される。

それでは次に冬季の場合を見てみよう。図-4は、舗装表面および裸地面から射出される赤外放射量である。上述のように表面の絶対温度はほぼこの4乗根に比例するので、赤外放射量もこの順番である。歩行者はこの赤外放射を浴びることになる。ここに

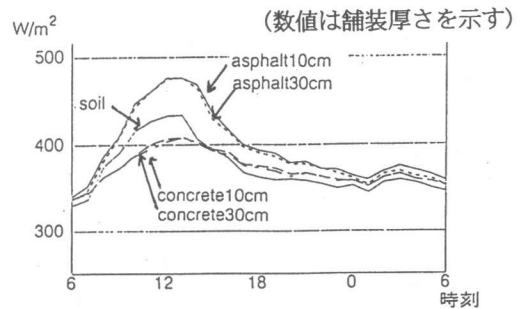


図-4 赤外放射量の日変化(91年12月4日)

示されるように、コンクリートは、アルベドが小さいために日射の吸収量が少なく、昼夜ともにアスファルト舗装よりは低く、日中はアルベドの小さい裸地面よりもさらに低い値となっている。熱伝導係数が大きいために昼間蓄熱した熱を夜間放出し、夜間は裸地面よりも多少高くなっているものの目立った差ではなく、一日を通じて必ずしもいい条件にはならない。

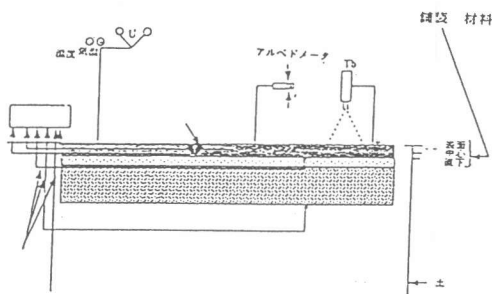
このように、コンクリート舗装は、夏季には温度上昇は少ないものの夜間放熱すること、また、反射光が大きいこと、また、冬季にはアルベドが低く温度が上昇しないことのために熱環境の観点には必ずしも好ましい材料ではない。

### 3. 保水性を持つ材料

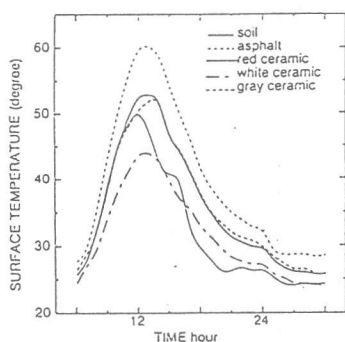
このように、コンクリートは熱環境にとって必ずしもいい材料ではないが、冬の低温化は、例えば色を濃くすることで解決できる。ところがその場合には夏季にアスファルトと同様に高い温度になって



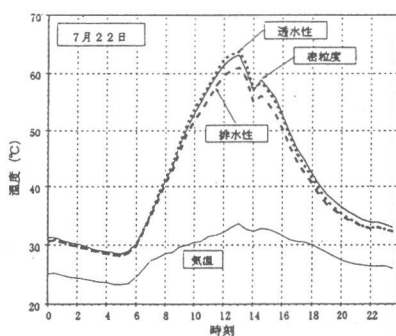
図一五 各種舗装面における観測風景



図一六 舗装内部の構造



図一七 各種舗装表面温度変化



図一八 透水性と通常のアスファルト表面温度

しまう。すなわち、最大の問題点はその体内に水分を蓄えることができないことにある。これはアスファルト舗装の真夏の高温化についても同様である。こうしたことを考慮して、近年、水分を通過させる舗装や建材が提案されてきている。現段階では必ずしもコンクリート材料ではないが、必要な特性を把握するためにその効果を見てみよう。

図一五はこうした保水性舗装を含む様々な舗装を用いた実験を行っている風景である<sup>4)</sup>。埼玉県久喜市の障害物のない開発前の住宅地を利用して、10種類の舗装を作成し、日射、アルベド、大気放射、地面からの赤外放射、地温、気温、湿度、風速、グローブ温度などを測定したものである。舗装内部の構造は図一六に示される通りである。図一七はこの結果の1例であり、晴天の8月1日の表面温度について、密なアスファルト、裸地面、保水性をもったグレーおよび白色のセラミック舗装を比較したものである<sup>5)</sup>。アルベドの大きい白色の舗装の表面

温度が低いのは十分伺えるが、アルベドの値はほぼ裸地面と等しいグレーのセラミック面の温度も裸地面とほぼ同じで、かつアスファルト面に比較して10°C近く低くなっている。さらに、図一八に、最近よく話題になる透水性アスファルト舗装と、同じ透水性舗装ではあるが基盤の状態が若干異なる排水性アスファルト舗装、および通常の密なアスファルト舗装の表面温度を比較したものである。これから分かるように、透水性の場合は通常のものと同程度温度差が見られない。これは、透水性舗装は空隙が大きく、一旦散水などで吸水してもすぐに水が下層に流れてしまい、下層に流れこんだ水は舗装面が加熱されてもほとんど上昇してこないためである。

この単なる透水性と保水性の違いは次のようなところに由来する。まず、図一九はこの保水性舗装の空隙サイズの分布である<sup>6)</sup>。これをみると比較的小さい空隙が広い範囲に分布している。通常の透水

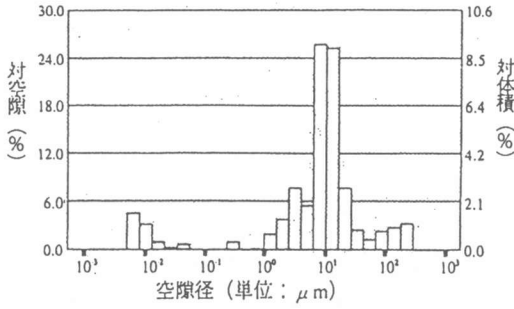


図-9 保水性セラミックの空隙径のヒストグラム

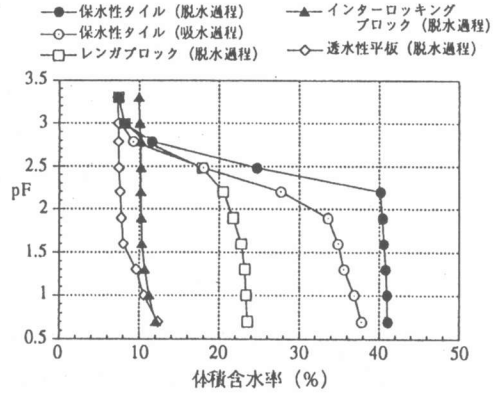


図-10 保水性セラミックの水分特性曲線

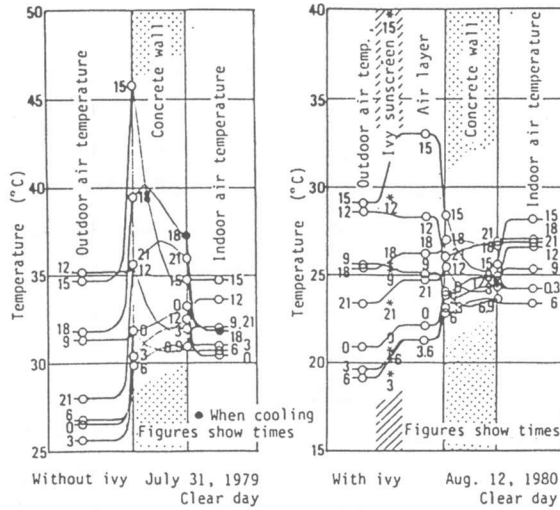


図-11 ツタのある場合と無い場合の外壁周りの断面温度分布(晴天日)

性舗装は比較的大きなサイズの空隙で構成されていることから、この材料では毛管力が大きく吸水能力が高いことがわかる。この点では土の空隙の分布に近い。そのため、図-10 に示すような保水性セラミックの水分特性曲線に見られるように、 $pF=2.5$ 程度の値に対しても比較的高い体積含水率を保持しており、この保水性のセラミックの下に水分を含んだ土壌が存在していれば、比較的深度のところからも水分を吸い上げることができる。

このように、自然の裸地に類似した性質をもたせるには、単に空隙が存在しているだけではなく、その空隙のサイズの分布が幅広いことが必要である。これは、先に示したコンクリートが自然環境に与え

る影響のうちの、微生物や植物の生息環境を提供することにもつながり、微生物や植物による有機物の腐食や分解、栄養塩除去などの効果も期待できる。さて、ここでは、わかりやすいように舗装を例にして話を進めてきたが、もちろんコンクリートの構造物や壁材などについても同様なことがいえることはいうまでもない。コンクリートでこうした材料の開発が可能かどうかは別としても、広く建設材料という観点にたった場合には、性質がより裸地に近い材料の開発は一度失った自然の状況を再び蘇らせるという点で重要であろう。

#### 4. 植物の利用

さて、このようなより土に近いような性質を持った材料を利用できない場合には、生物の力を利用することになる。よく利用される例は葡萄する植物で表面を覆うことである。この最大の効果は、植物面に日射があたり実際の建材表面は陰になることである。植物面の温度は蒸散作用のためにほとんど上昇することなく、建材面の温度は植物の葉面積が十分であればほぼ気温程度に保たれる。図-11は梅干野ら(1985)によるツタのある場合無い場合の外壁の周りの温度を比較したものであり、外壁の内部以外はすべて実測値である。この結果によると、ツタのある場合には5~10℃温度が低くなっており、数値計算の結果によればこの差が部屋の中の室温にそのまま反映される。

冬季には、夜間常温の建物の外壁や屋根からはその温度に見合った赤外放射が天空に向けて射出され、逆に、上空の大気温度は極めて低く建物が受ける赤外放射量は極めて少なく極度に冷却される。いわゆる「放射冷却」である。ところが、こうした葉面が建物の外壁の周囲に存在すると、建物が受ける赤外放射は、葉面の温度に対応した葉面から射出される赤外放射であり上空大気からのものに比較して格段に大きい。そのため建材面の冷却は大きく抑えられる。冬の夜木の下にいと寒さが和らげられるのと同じ原理である。その他にもこうした植物で覆われた建物は視覚的な景観、生物の生息環境の提供などの面からも何倍ものメリットを期待できることはいうまでもない。ただし、十分な管理ができた場合についてである。

## 5. おわりに

コンクリートは人為的につくられた岩石であり、しかも稠密、高耐久性、高強度と人間が利用していくということでは都合がいい反面、自然にとっては必ずしも好ましくない性質もあわせもっている。しかしながら、様々な工夫を施すことにより、より自然に近づけることは十分可能である。ここに示した熱環境の側面は、可視光を捉える通常目ではなく、赤外線を捉える目で眺めた場合の結果である。生物の生息環境という面から自然に近づけることはな

かなか困難であるが、まずは、その生息環境を整えるという点から、赤外カメラの世界で「コンクリートジャングル」を本当の「ジャングル」に等価にする努力が必要であろう。

## 参考文献

- 1) Doll, D., Ching, J.K.S., and Kaneshiro, J. : Parameterization of subsurface heating for soil and concrete using net radiation data, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.17, pp.351-372., 1985
- 2) 梅干野晃・茶屋正洋・八木幸二 : ツタの西日遮へい効果に関する実験研究, *日本建築学会計画系論文報告集* 第351号, pp.11-19, 1985
- 3) Oke, T.R. and Cleugh, H.A. : Urban heat storage derived as energy balance residuals, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.39, pp.233-245, 1987
- 4) 浅枝隆・藤野毅 : 舗装面の熱収支と蓄熱特性について, *水文・水資源学会誌*, Vol.5, pp.3-7, 1992
- 5) Asaeda, T. and V.T.Ca : The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.65, pp.159-179, 1993
- 6) 藤野毅・柴原千浩・浅枝隆・村瀬範芳・和氣亜紀夫 : 浸透性舗装の水分・熱移動特性と冷却効果, *水工学論文集*, 第38巻, pp.235-240, 1994
- 7) ヴタンカ・浅枝隆・ユスフムハマドアブ : 地中水分の分散を利用した夏季の舗装表面の温度緩和・保水性舗装の利用, *水工学論文集*, 第38巻, pp.449-454, 1994
- 8) Asaeda, T., V.T.Ca and WAKE A. : Heat Storage of Pavement and its Effect on the Lower Atmosphere, *Atmospheric Environment*, Vol.30, No.3, pp.413-427, 1996
- 9) 福田萬大・深沢邦彦・荒木美民・藤野毅・浅枝隆 : 夏季自然状態での各種舗装面の熱環境緩和特性に関する実験的研究, *土木学会論文集*, No.571, V-36, pp.149-158, 1997
- 10) 尾崎哲二・鈴木義則 : 保水性セラミックタイルの熱環境改善に関する研究, *水工学論文集*, 第42巻, pp.61-66, 1998