

35. 勝連トラバーチン舗装工のヒートアイランド現象抑制効果の定量化研究

Mitigation of Thermal Environment by A Special Paving Material, Katsuren Travertine

一ノ瀬俊明¹・新津潔²・小野塚孝³・神野充輝⁴

ICHINOSE Toshiaki¹, NIITSU Kiyoshi², ONOZUKA Takashi³ and JINNO Mitsuteru⁴

ABSTRACT; A special material for pavement, “Katsuren Travertine” is produced from limestone (*foraminifera* rich) mined enough around Katsuren Town in the Okinawa Island. One advantage of “Katsuren Travertine” as a paving material comparing with others like concrete is saving the increase of surface temperature by solar radiation. To apply this “Katsuren Travertine” on pavement in urban area for thermal environmental mitigation, the saving mechanism has to be quantitatively evaluated. The authors have settled “Katsuren Travertine” with the size of 5m x 5m and comparative normal concrete blocks on a flat grassland with no sunshade, and monitored surface temperature, conductive heat flux, radiation balance, and other meteorological factors from July to November in 2003. As another comparative study, the high-albedo painting which fitted the reflection rate to “Katsuren Travertine” was applied on the surface of the concrete. Due to not only its high reflectance but also its thermal physical factors like specific heat capacity, the authors concluded “Katsuren Travertine” has a potential to mitigate urban thermal environment. But more examination is necessary about the physiological impact for pedestrians of the application.

KEYWORDS: Travertine, heat island, pavement material, heat budget, thermal environment

1 はじめに

沖縄県勝連町周辺で豊富に算出する有孔虫石灰岩を素材として、「勝連トラバーチン」という特殊舗装材料が開発・生産されている(株式会社三柱, 2002)。その主成分は炭酸カルシウムであり、多気孔質にして、比重は2.3である。特長として、コンクリートなどと比較した場合の日射による表面温度上昇に対する抑制効果が指摘されており、既に海岸など親水施設への施工例は多い。しかしその効果のメカニズム解明を含め、効果の定量的評価が課題となっていた。都市の暑熱対策として、トラバーチンを都心における歩行空間の舗装材料として実用化するためには、このような調査研究が必要である。

1 (独) 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba 305-8506, Japan
/ 千葉大学 Chiba University, Matsudo, Japan

2 (独) 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

3 (株) 三柱 Tripole Co. Ltd., Tokyo, Japan

4 (株) 三柱 Tripole Co. Ltd., Tokyo, Japan

2 観測の概要

国立環境研究所（つくば市小野川16-2）敷地南縁の日当たりのよい平地（草地；Fig.-1）を整地して、トラバーチン（5m四方；Fig.-2）及び対比実験用のコンクリートブロック（Fig.-3）を敷設し、躯体内温度、躯体底面熱流量、躯体表面の放射特性などを両者で比較するための観測実験を、気象観測とともに実施した。また、表面温度上昇に対する抑制効果のメカニズム解明を目的として、アルベドをトラバーチンに近づけるため、コンクリートの表面に高反射性塗料（長島特殊塗料製ミラクールF200クールグレー）を塗布しての対比実験を行った。

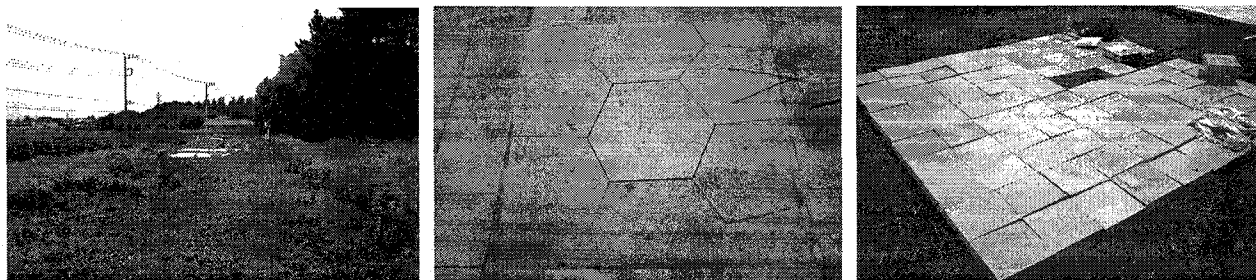


Fig.-1 実験地の概観（左） Fig.-2 トラバーチン（躯体中央部の1m角ユニット）の表面（中）

Fig.-3 対比実験用のコンクリートブロック（5m四方）（右）

コンクリートとトラバーチンの比較実験は、2003年7月10日0:00～2003年9月8日23:00に実施された。日雨量0mm以下、毎時日射量最大値 500W/m^2 以上、毎時日射量日積算値 4000W/m^2 以上という条件で、全61日中18日が晴天日として選択された。

一連の観測実験においては、下向き短波放射（全天日射）、上向き短波放射（躯体表面における反射）、下向き長波放射（大気放射）、上向き長波放射（躯体表面からの赤外放射）の4要素を放射収支計（Kipp&Zonen社製CNR-1）で、浅層（躯体中央付近表面より1cm）及び深層（同4cm）における躯体内温度をT型熱電対（プリード社製）で、躯体底面熱流量（下向きを正とする）を熱流計（Rebs社製PHF-01）で測定した。全期間を通じ測定は10秒間隔、データロガーでの記録（LSI社製BABUC 20ch）は1時間間隔（毎正時）で行った。ただし2003年8月8日12:50以降は10分間隔でも記録している。放射収支計は金属製のスタンドに固定して躯体表面の中央付近直上にセンサー部分が来るよう設置した（Fig.-4）。また熱電対は、躯体にコンクリートドリルで穿孔・挿入し、熱物性が変わらないよう切削せずで埋め戻している（Fig.-5）。さらに、熱流計も躯体底面と直下の土壌との間に設置するため、敷設施工時に設置した。加えて、観測場を代表する気象要素を観測するため、DAVIS社製気象計（気温、湿度、風向、風速、雨量、気圧）を2種類の躯体の近傍に設置した（Fig.-6）。ここで観測された気温を「場の気温」と定義する。

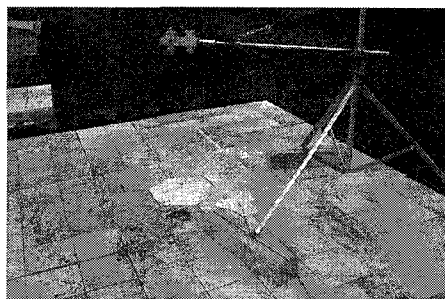


Fig.-4 躯体表面に設置された放射収支計（左）

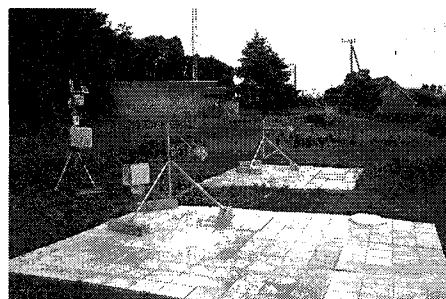


Fig.-6 2種類の躯体と気象計の位置関係（右）

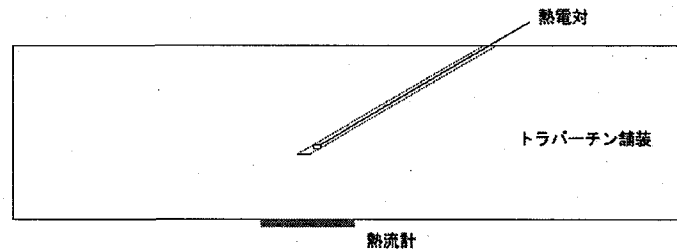


Fig.-5 熱電対及び熱流計設置位置（断面図）

一方、コンクリート表面のアルベドをトラバーチンのそれに近づけた条件での対比実験を、2003年11月1日0:00～2003年11月26日23:00に実施した。日雨量0mm以下、毎時日射量最大値500W/m²以上、毎時日射量日積算値2500W/m²以上という条件で、全26日中6日が晴天日として選択された。

3 コンクリートとトラバーチンの観測結果

全晴天日を平均した躯体内部温度及び気温の日変化を Fig.-7 に示す。躯体内部温度の極大・極小値はそれぞれ、コンクリートの1cm深で40.8℃（14時）、24.5℃（5～6時）であり、同4cm深では40.1℃（15時）、24.8℃（6時）であった。一方トラバーチンではそれぞれ、1cm深で34.2℃（15時）、21.1℃（5～6時）であり、4cm深では32.6℃（15時）、21.4℃（6時）であった。以上より、トラバーチンにおける躯体内部温度上昇抑制効果が明らかとなった。コンクリートでは深部で位相の進行が1時間ほど遅れている。また、トラバーチンではコンクリートに比べ昇温過程での2深度間の温度差が大きい。降温過程での温度差は両者とも同様の値を示している。さらに、トラバーチンでの日変化の振幅はコンクリートに比べ小さい。2深度間の温度差から読み取れる躯体内部熱流の向きは、コンクリートが7～16時に下向きであるのに対し、トラバーチンでは7～17時に下向きとなっていた。最高気温は29.3℃（14時）、最低気温は21.5℃（4～5時）であり、夜半以降極小値出現時刻まで、トラバーチンでは2深度ともほぼ気温に等しい推移を示していた。

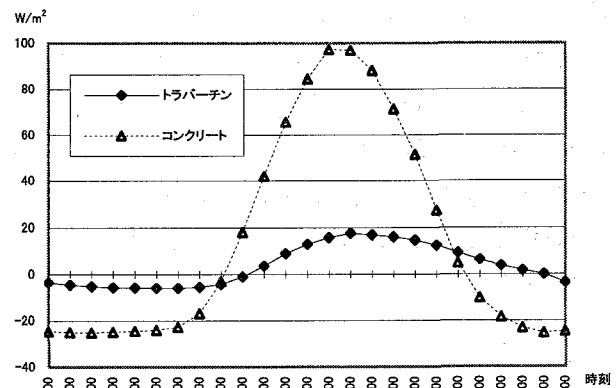
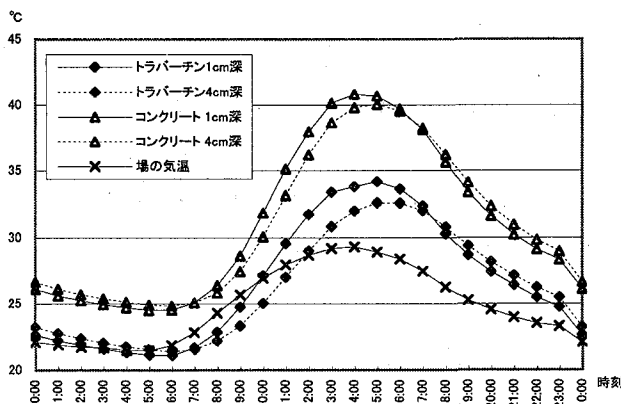


Fig.-7 晴天日における躯体内部温度の比較（左） Fig.-8 晴天日における躯体底面熱流量の比較（右）

1cm深における非晴天日との差については、コンクリートでは極大値出現時刻前後に9℃近い差が見られるのに対し、トラバーチンでは7℃程度であったが、夜半以降の降温過程ではそれぞれ1℃前後、1～0.5℃程度であって大差はない。4cm深ではこの差が若干小さくなっていた。以上より、コンクリートのほうが日射の影響が顕著に表れるといえる。

全晴天日を平均した躯体底面熱流量 G の値を Fig. -8 に示す。 G の極大・極小値はそれぞれ、コンクリートで 97.2W/m^2 (13 時)、 -25.3W/m^2 (23 時) であった。6 時以降躯体底面に向けて日射を受けた躯体表面からの熱が伝わり、8 時過ぎより躯体底面から直下の土壤に伝わる熱フラックス (G) は正に転ずる。19 時過ぎに躯体底面温度が土壤の温度を下回るまで低下し、熱フラックスは再び負に戻る。また 23 時以降は 5 時まで -25W/m^2 前後となっており、土壤から躯体に安定して熱が供給されている。一方トラバーチンではそれぞれ 17.7W/m^2 (14 時)、 -6.0W/m^2 (5 時) であり、日変化の振幅は非常に小さい。日中も躯体内温度の上昇は小さく、躯体底面から直下の土壤に伝わる熱フラックスは小さい。熱フラックスの正に転ずる時刻は 9 時過ぎであり、極大値出現時刻と同様コンクリートより 1 時間の遅れがある。熱フラックスが負に戻るのは 23 時と遅く、少ないながら土壤に向けて躯体より熱が供給され続ける。また、1~8 時は -5W/m^2 付近で安定している。以上より、コンクリートでは躯体直下の土壤にも大きな蓄熱があり、夜間はその熱が再び躯体に供給されると考えられる。

非晴天日との差については、コンクリートでは極大値出現時刻前後に 65W/m^2 程度の差が見られるのに対し、トラバーチンでは 11W/m^2 程度であったが、夜半の安定期ではそれぞれ 4W/m^2 前後、 0.5W/m^2 程度であった。非晴天日における熱フラックスが正である時間帯は、コンクリートが 9~18 時 (晴天日より前後 1 時間づつ短い) であるのに対し、トラバーチンでは 10 時過ぎ~20 時前 (コンクリートの事例よりさらに短い) であった。以上より、日射の影響はトラバーチンでは非常に小さくなっているといえる。また晴天日が非晴天日を上回る時間帯はそれぞれ 7~21 時、7~0 時であり、コンクリートでは晴天日の夜間は非晴天日に比べ若干大目の熱を土壤より吸収している。

躯体表面からの上向き顕熱フラックス H と躯体内蓄熱 Q の合計は、躯体周辺での熱の水平方向への輸送や躯体表面での潜熱輸送がないものと仮定すれば、式 (1) より正味放射収支 Rn から躯体底面熱流量 G を差し引いたものとみなせる。これを便宜的に $Rn-G$ と称する。

$$H + Q = Rn - G \quad (1)$$

全晴天日を平均した $Rn-G$ の値を Fig. -9 に示す。 $Rn-G$ の極大値はコンクリートで 290.7W/m^2 (12 時) であり、トラバーチンではさらに大きく 309.8W/m^2 (12 時) であった。また極小値はそれぞれ -78.2W/m^2 、 -69.0W/m^2 (ともに 19 時) であった。7~10 時の躯体内温度昇温過程では、両者の差は 10W/m^2 未満で推移した。10 時にトラバーチンがコンクリートを上回り、12~18 時は $20\sim40\text{W/m}^2$ 程度の優勢が続く。さらに 20 時には大小関係が逆転し、以降 6 時までは $10\sim15\text{W/m}^2$ 程度コンクリートが優勢となる。 $Rn-G$ の符号が入れ替わる時刻には 1 時間以内のずれがあり、コンクリートのほうが位相の進行が早い。

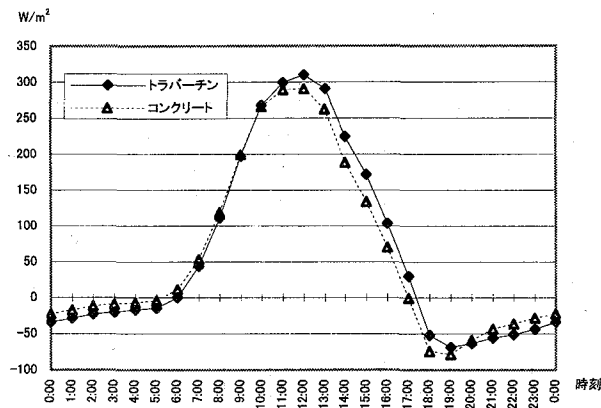


Fig.-9 晴天日における $Rn-G$ の比較

全晴天日を平均した正味放射収支 Rn 、躯体底面熱流量 G 及び $Rn-G$ の値を Fig.-10 に示す。 Rn の極大値はコンクリートで 375.2 W/m^2 (12 時) であり、トラバーチンでは 322.7 W/m^2 (12 時) であった。12~14 時における両者の差は $40 \sim 50 \text{ W/m}^2$ 程度で推移しており、この差は躯体表面温度を反映した上向き長波放射及びアルベドを反映した躯体表面における反射 (上向き短波放射) の違いに由来する。晴天日における躯体表面のアルベドは時間帯によって変化するものの、コンクリートでは約 33% (12 時)、トラバーチンでは約 44% (12 時) であり、トラバーチンの高い反射特性が伺える。また 12~14 時における G の差は $70 \sim 80 \text{ W/m}^2$ 程度で推移している。実際この時間帯に $20 \sim 35 \text{ W/m}^2$ 程度 $Rn-G$ がトラバーチンにおいて大きくなっている。コンクリートはトラバーチンに比べ、正味放射として $40 \sim 50 \text{ W/m}^2$ 程度大きな熱を受け取りながら、躯体底面から直下の土壤に $70 \sim 80 \text{ W/m}^2$ 程度大きな熱を逃がしている結果、躯体表面からの上向き顕熱フラックス H と躯体内蓄熱 Q に振り分けられるべきエネルギーが $20 \sim 35 \text{ W/m}^2$ 程度不足することになったと考えられる。一方、躯体表面温度に比較的近いと思われる 1cm 深の躯体内温度と場の気温との差より、コンクリート表面からの H は、トラバーチン表面からのそれを上回っていることが予想される。実際の H については躯体内温度変化と躯体の比熱 c ・密度 ρ ・熱伝導率 λ など熱物性値を用いて Q を求めた後、式 (1) の残差として与える必要があるが、今回は Q の算出には至らなかった。さらに、躯体内温度の 2 深度間の大小関係より推定される躯体内上層部の熱流の向きは、コンクリートで 7~16 時、トラバーチンで 7~17 時に下向きであると考えられる (Fig.-7 参照)。よって、この時間帯では G の小さなトラバーチンについていえば、 Q が増える傾向にあるものと予想される。以上より、 Q 自身の大小関係ではトラバーチンがコンクリートを上回っているものと考えられる。しかし、躯体内温度の比較ではトラバーチンのほうが低くなっており、一義的にはトラバーチンの比熱はコンクリートのそれよりも大きいものと考えられる。

また Rn の極小値はそれぞれ -73.2 W/m^2 、 -59.7 W/m^2 (ともに 19 時) であった。夏季の日没時刻から、アルベドの差に由来する影響が若干残ってはいるものの、基本的に両者の躯体表面温度差 (上向き長波放射の差) が効いた結果と思われる。夜間に $Rn-G$ に比べて G が小さいトラバーチンでは、躯体内上層部での熱流は上向きとなるため Q は減少し、1cm 深の躯体内温度の変化から躯体表面温度も低下しているものと考えられ、場の気温との関係よりトラバーチン表面からの H はコンクリート表面からのそれに比べて小さく、 $Rn-G$ がゆるやかに変化していることから、上向き長波放射の形で昼間蓄積した Q を大気にゆるやかに放出する様が見て取れる。一方コンクリート表面における H は終日正であると予想され、 Q は低下するものの、トラバーチンに比べ c が小さく、かつ直下の土壤からも熱の供給があるため、その分が H を持続させ、大気を冷やす力を弱めているものと考え

られる。

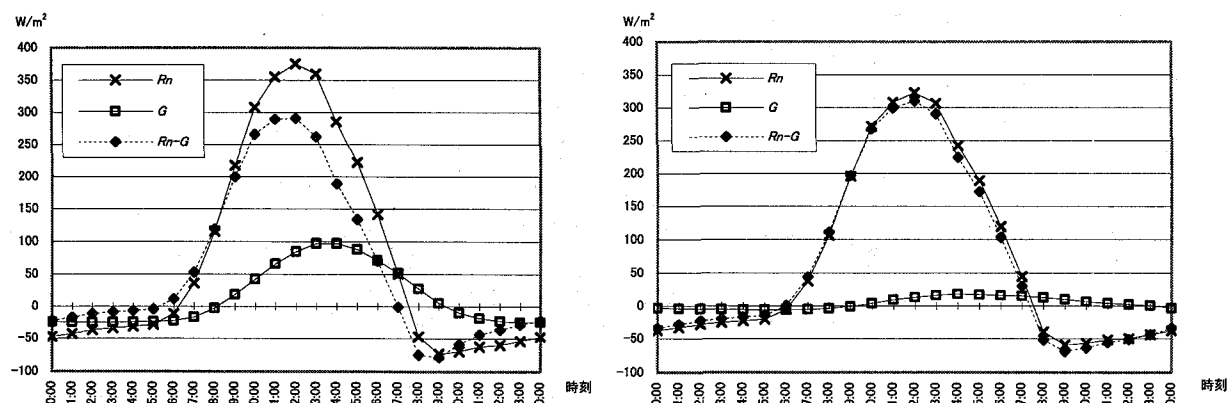


Fig.-10 晴天日における正味放射収支、躯体底面熱流量及び $Rn-G$ の比較
コンクリート (左) トラバーチン (右)

4 コンクリートのアルベドをトラバーチンに近づけた場合の観測結果

全晴天日を平均した躯体内温度及び気温の日変化を Fig. -11 に示す。躯体内温度の極大・極小値はそれぞれ、コンクリートの 1cm 深で 20.2°C (14 時)、 9.0°C (7 時) であり、同 4cm 深では 19.6°C (14~15 時)、 9.4°C (8 時) であった。一方トラバーチンではそれぞれ、1cm 深で 16.8°C (14 時)、 7.3°C (7 時) であり、4cm 深では 15.8°C (15 時)、 7.9°C (8 時) であった。また両者の日変化において、夏季の事例で観測された基本的な特徴がここでも認められた。2 深度間の温度差から読み取れる躯体内熱流の向きは、コンクリートが 9~15 時に下向きであるのに対し、トラバーチンでは 9~16 時に下向きとなっていた。最高気温は 16.8°C (12 時)、最低気温は 9.1°C (5 時) であり、夜半以降最低気温出現時刻まで、トラバーチンでは 4cm 深でほぼ気温に等しい推移を示していた。

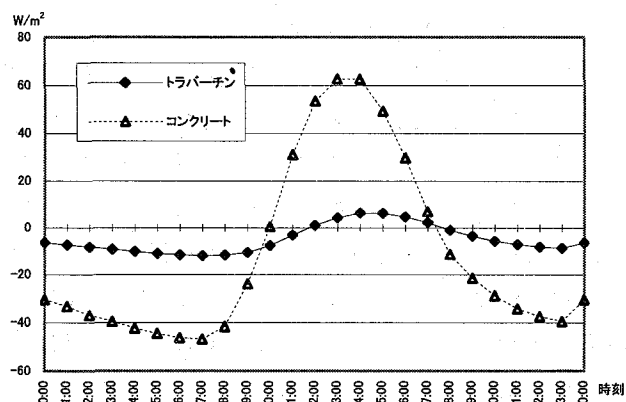
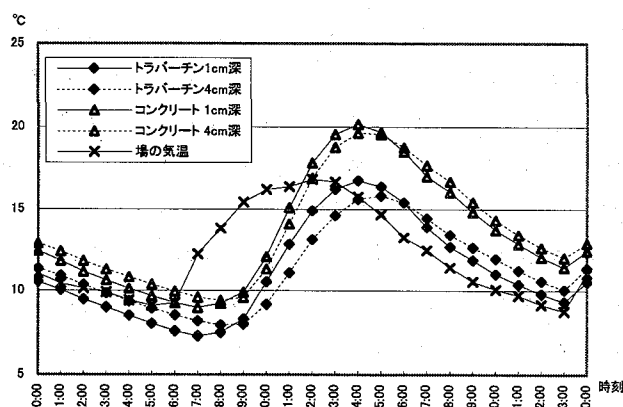


Fig.-11 晴天日における躯体内温度の比較 (左) Fig.-12 晴天日における躯体底面熱流量の比較 (右)

Fig.-11、Fig.-12 ともにコンクリートのアルベドをトラバーチンのそれに近づけた観測事例

全晴天日を平均した躯体底面熱流量 G の値を Fig. -12 に示す。 G の極大・極小値はそれぞれ、コンクリートで 62.7W/m^2 (13 時)、 -46.8W/m^2 (7 時) であった。また 10 時より、躯体底面から直下の土壤に伝わる熱フラックス (G) は正に転ずる。17 時過ぎに熱フラックスは再び負に戻る。さらに 4~8 時は -40W/m^2 を下回っており、土壤から躯体に夏季の事例よりも多くの熱が供給されている。一方トラバーチンではそれぞれ 6.3W/m^2 (14 時)、 -11.8W/m^2 (8 時) であった。熱フラックスの正に転ずる時刻は 12 時前であり、コンクリートより 2 時間の遅れがある。熱フラックスが負に戻るの

は 18 時前である。また、4～9 時は -10W/m^2 以下で安定している。以上より、夏季の事例同様コンクリートでは躯体直下の土壌にも大きな蓄熱があり、夜間はその熱が再び躯体に供給されと考えられる。日射の強さに応じ、夏季よりも G は日中減少し、躯体の冷却に応じて夜間の土壌からの吸熱 (G) は増加したものと考えられる。

非晴天日との差については、コンクリートでは極大値出現時刻前後に 30W/m^2 程度の差が見られるのに対し、トラバーチンでは 3W/m^2 程度であったが、夜半の安定期ではそれぞれ 20W/m^2 強、 5W/m^2 程度であった。日中の差は減少するも夜間の差は拡大しており、夏季の事例に比べ日射の影響が小さくなった反面、夜間の放射冷却による躯体の冷却に応じた土壌からの吸熱が顕著となっている。非晴天日における熱フラックスが正である時間帯は晴天日と大差ない。また晴天日が非晴天日を上回る時間帯はほぼ G が正の時間帯に限られる。

全晴天日を平均した $Rn-G$ の値を Fig. -13 に示す。 $Rn-G$ の極大値はコンクリートで 102.9W/m^2 (11 時) であり、トラバーチンではさらに大きく 176.7W/m^2 (11 時) であった。また極小値はそれぞれ -87.6W/m^2 、 -72.2W/m^2 (ともに 17 時) であった。夏季の事例より早く、8 時にはトラバーチンがコンクリートを上回り、10～15 時は夏季の事例より大きい $50\sim75\text{W/m}^2$ 程度の優勢が続く。さらに 18 時には大小関係が逆転し、21 時～7 時過ぎは 25W/m^2 程度コンクリートが優勢となる。

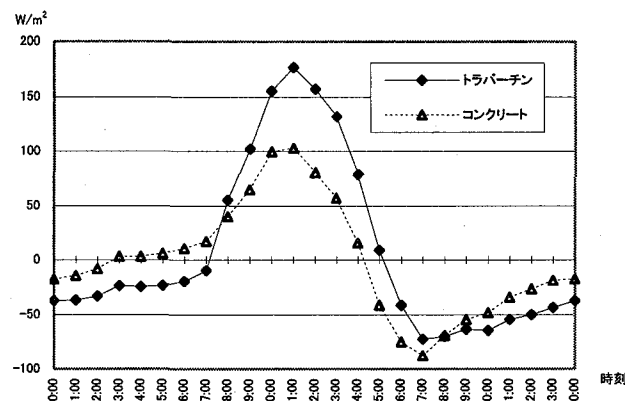


Fig.-13 晴天日における $Rn-G$ の比較

コンクリートのアルベドをトラバーチンのそれに近づけた観測事例

全晴天日を平均した正味放射収支 Rn 、躯体底面熱流量 G 及び $Rn-G$ の値を Fig. -14 に示す。 Rn の極大値はコンクリートで 134.0W/m^2 (11～12 時)、トラバーチンでは 173.4W/m^2 (11 時) であり、夏季の事例とは大小関係が逆転している。極大値出現時刻前後における両者の差は 40W/m^2 程度である。アルベドを近づけてあるため、この差は両者の躯体表面温度差（上向き長波放射の差）を反映した結果と思われる。晴天日の 12 時における平均値は、コンクリートが 52%、トラバーチンが 51% であった。表面温度の高いコンクリートのほうが、長波放射の形で多くの熱を失っている。また、この時間帯における G の差は 35W/m^2 程度である。実際この時間帯には、 75W/m^2 程度 $Rn-G$ がトラバーチンにおいて大きくなっている。コンクリートはトラバーチンに比べ、正味放射として 40W/m^2 程度少ない熱を受け取りながら、躯体底面から直下の土壌に 35W/m^2 程度大きな熱を逃がしている結果、躯体表面からの上向き顕熱フラックス H と躯体内部蓄熱 Q に振り分けられるべきエネルギーが 75W/m^2 程度不足することになったと考えられる。一方、躯体表面温度に比較的近いと思われる 1cm 深の躯体内部温度と場の気温との差より、コンクリート表面からの H (この時間帯では負の値、つまり大気からの吸熱の状態にあるものと思われる) に対し、トラバーチン表面からのそれはより大きな負の値を示していることが予想される。さらに、躯体内部温度の 2 深度間の大小関係より推定され

る躯体内上層部の熱流の向きは、コンクリートで9～15時、トラバーチンで9～16時に下向きであると考えられる (Fig.-11 参照)。よって、この時間帯では G の小さいトラバーチンについていえば、 Q が増える傾向にあるものと予想される。

また Rn の極小値はそれぞれ -80.6W/m^2 、 -70.0W/m^2 (ともに17時) であった。これらは基本的に両者の躯体表面温度差 (上向き長波放射の差) が効いた結果と思われる。夜間に $Rn-G$ に比べて G が小さいトラバーチンでは、躯体内上層部での熱流は上向きとなるため Q は減少し、1cm 深の躯体内温度の変化から躯体表面温度も低下しているものと考えられ、場の気温との関係よりトラバーチン表面からの H はコンクリート表面からのそれに比べて小さく、 $Rn-G$ がゆるやかに変化していることから、上向き長波放射の形で昼間蓄積した Q を大気へゆるやかに放出する様が見て取れる。

コンクリート表面のアルベドをトラバーチンに近づけた結果、夏季の事例で確認された両者の関係は、そのオーダーが変わりこそすれ基本的に確認されたことから、トラバーチンの熱的な特性は、その高いアルベドのみに由来するのではなく、比熱などの熱物性値にも大きく関係していることが示唆された。

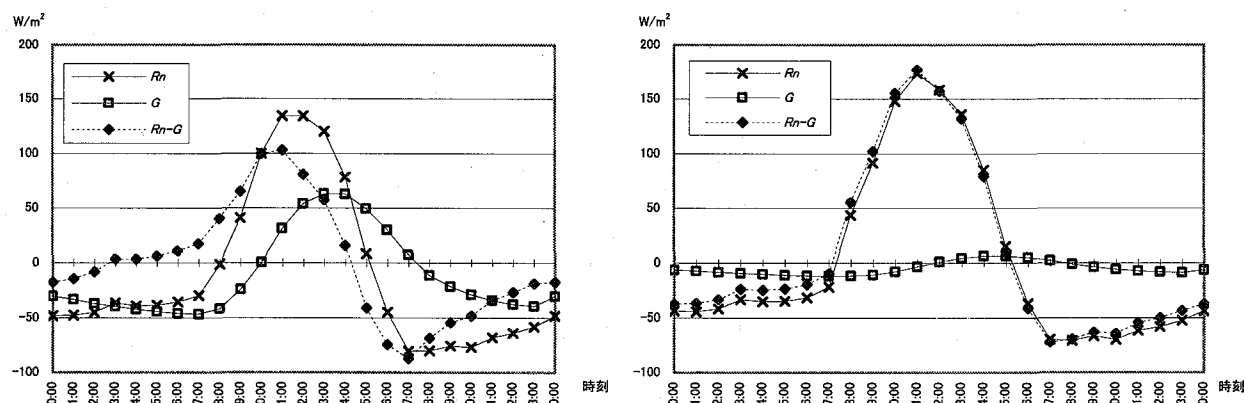


Fig.-14 晴天日における正味放射収支、躯体底面熱流量及び $Rn-G$ の比較

コンクリート (左) トラバーチン (右)

コンクリートのアルベドをトラバーチンのそれに近づけた観測事例

5 まとめ

日当たりのよい平地 (草地) を整地して、勝連トラバーチン及びコンクリートブロックを敷設し、躯体内温度、躯体底面熱流量、躯体表面の放射特性などを両者で比較するための観測実験を、気象観測とともに実施した。また、アルベドをトラバーチンに近づけるため、コンクリートの表面に高反射性塗料を塗布しての対比実験を行った。トラバーチンの高い表面反射特性と暑熱環境改善効果への可能性が示されたものの、直上を歩行する人体の受熱量の増大に関しては更なる検討が必要であるとされる。トラバーチンの熱的な特性は、その高いアルベドのみに由来するのではなく、大きな比熱などの熱物性値にも大きく関係していることが示唆された。

本研究は、株式会社三柱よりの研究奨励寄附金研究「勝連トラバーチン舗装工のヒートアイランド現象抑制効果の定量化研究」(代表・一ノ瀬俊明) の一部である。

参考文献

株式会社三柱 (2002) : 勝連トラバーチン, 地球環境シンポジウム講演論文集, 10, 310-310