

5. 遮熱性舗装における熱輸送量の観測結果

Field Observations of Heat fluxes above Solar Heat-blocking Pavement

技術支援課 小作好明、山本憲之

1. はじめに

ヒートアイランド現象は、都市化の進展に伴い、舗装やコンクリートで地表面が被覆されたことが原因の一つとして指摘されている。東京都ではヒートアイランド対策を重点事業の一つとして位置づけており、建設局ではヒートアイランド現象を抑制する取り組みとして、近赤外領域の波長の日射を反射して舗装温度の上昇を抑制する遮熱性舗装を施工している。しかし、遮熱性舗装による対策効果について、実際の道路における定量的な観測が少ないのが現状である。

そこで、遮熱性舗装の効果を確認するため、熱量について調査を行った。熱量のうち、大気を温める熱となる顕熱について、実際に遮熱性舗装が施工されている道路において実測を試みた。顕熱の観測方法は、熱の移動量である熱輸送量を観測する上で観測精度が良いとされる渦相関法である。また、遮熱性舗装と同時に、比較用としての低騒音舗装においても熱輸送量の観測を実施したので、その結果を報告する。

2. 遮熱性舗装の熱収支

図-1 に熱収支の概念図を示し、次式に熱収支式を示す。

熱収支式

$$(S - \text{ref}S) + (L_{\text{下向}} - L_{\text{上向}}) = H + \iota E + G \equiv R_n$$

ここに

- S : 下向日射 (全天日射量)
- refS : 上向日射 (日射量の反射量)
- ref : アルベド (日射量の反射率)
- $L_{\text{下向}}$: 下向赤外 (大気放射)
- $L_{\text{上向}}$: 上向赤外 (地表面放射)

H : 顕熱 (顕熱によって空気が温まる)
 ιE : 潜熱 (気化熱によって熱が奪われる)
 G : 蓄熱 (熱伝導)
 R_n : 正味放射
 である。

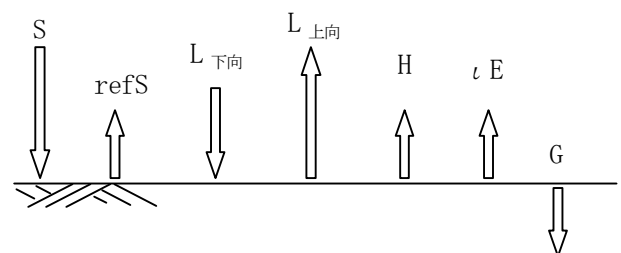


図-1 熱収支

地表面では、日射と大気放射のエネルギーが加えられ、上向日射と地表面放射によってエネルギーが放出する。この差し引きのエネルギーのことを正味放射という。熱収支の式は、この差し引きのエネルギー(正味放射)が顕熱と潜熱、蓄熱に配分されることを表している。このうち顕熱は、地表面付近の大気に熱を輸送し、気温を上昇させる効果を持ち、潜熱は水が液体から気体に相変化する際に熱を奪って気温の上昇を抑制する効果をもつ。残りの熱は蓄熱となるが、昼間は熱伝導によって地中に蓄えられ、夜間は蓄熱した熱が顕熱と地表面放射として大気に放出されることになる。

遮熱性舗装は、近赤外領域の波長の日射を反射して舗装温度の上昇を抑制し、大気を温める熱を削減することが期待されている。つまり、舗装路面に加えられる正味放射の量を減らすことで顕熱や蓄熱に配分される熱を抑制するというものである。このことから、熱輸送量の観測では、気温を上昇させる顕熱を観測する

ことを主な目的として実施した。なお、舗装から水分が蒸発しないことから、降雨日でない場合は潜熱がないものとした。

3. 熱輸送量観測の概要

観測場所を図-2 に示す。観測場所は、皇居外苑内の遮熱性舗装が施工されている都道 406 号線と、比較用の低騒音舗装である都道 301 号線である。皇居外苑は、広い敷地内のほとんどが樹木と芝生である。そのため、調査路線沿道には建物がなく、車道の路面には日射が一日中当たる場所となっている。

熱輸送量の観測は、車道での観測と中央分離帯での観測に分けて行った。図-3 に観測状況の概念図を示し、表-1 と表-2 に車道における観測と中央分離帯での観測の観測項目を示す。

車道観測では、長短波放射計を用いて、下向日射、上向日射、大気放射、地表面放射の観測を行った。特に上向日射と地表面放射は、舗装路面を直接測定することを考慮し、敢えて長短波放射計を路面近づけ、観測高さを 20cm に下げた。そのため、全 6 車線のうち、歩道側 1 車線に作業帯を設置して観測を行った。また、車道観測では、放射温度計で路面温度、熱流計で熱伝導を測定し、遮熱性舗装でのみ、顕熱輸送量の観測も行った。

道路の中央分離帯では、超音波風速温度計を街路灯に設置し、顕熱輸送量の観測を高さ 3.2m で行っ

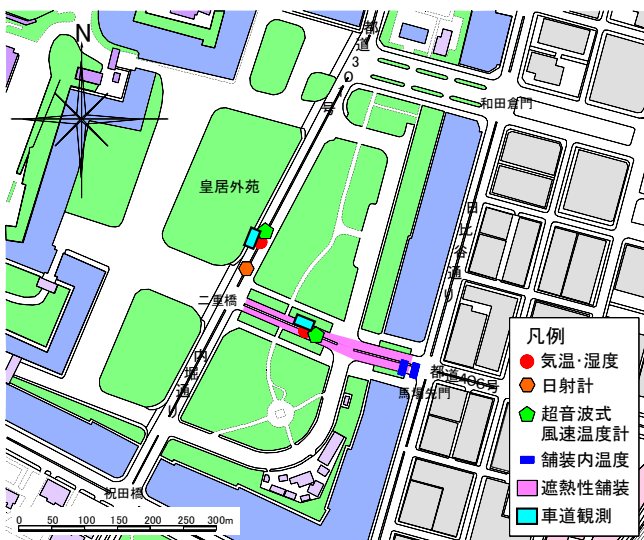


図-2 観測場所

た。その他に気温、全天日射、舗装内温度も観測した。観測状況と観測機器を写真-1 から写真-7 に示す。

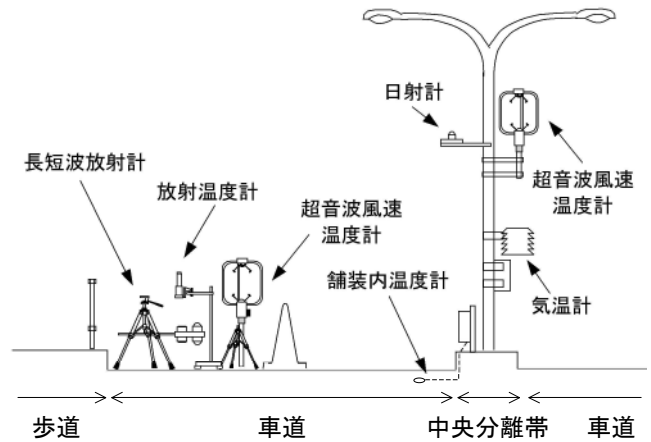


図-3 観測状況の概念図

表-1 観測項目と観測機器 (車道観測)

観測項目	観測機器	記録間隔	観測高	備考
下向日射	長短波放射計	1分	20cm	
上向日射				
大気放射				
地表面放射				
顕熱輸送量	超音波風速温度計	0.05s	1m	遮熱性舗装のみ観測
地表面温度	放射温度計	1分	50cm	
地表面熱流	熱流計	1分	路面接着	
気温	サーミスタ温度計	1分	3cm, 21cm 54cm, 1.0m	高さ別に観測

表-2 観測項目と観測機器 (中央分離帯設置)

観測項目	観測機器	記録間隔	観測高	備考
顕熱輸送量	超音波風速温度計	0.1s	3.2m	
風向風速	超音波風速温度計	0.1s	3.2m	
全天日射量	全天日射計	2分	2.5m	
舗装内温度	サーミスタ温度計	10分	深さ1cm埋設	
気温	サーミスタ温度計	10分	1.5m	自然通風式

表-3 観測期間

場所	舗装種別	熱輸送量の観測期間
車道	遮熱性	2010年8月24日5:00~25日5:00 2010年8月31日5:00~9月1日5:00
	低騒音(比較)	2010年8月24日5:00~8月25日5:00 2010年8月31日5:00~18:00
中央分離帯	遮熱性	2010年8月2日18:00~9月10日9:50 ※8/5~8/10、8/23超音波風速温度計で欠測
	低騒音(比較)	2010年8月2日18:00~9月10日9:50 ※8/23超音波風速温度計で欠測



写真-1 観測状況（車道観測）



写真-2 観測状況（中央分離帯）



写真-3 長短波放射計



写真-4 放射温度計



写真-5 熱流計



写真-6 超音波風速温度計

表-3 に熱輸送量の観測期間を示す。車道観測は2010年8月24日と8月31日の2回行い、中央分離帯での観測は、2010年8月2日から9月10日まで行った。ただし、観測期間途中で遮熱性舗装の路線に設置した超音波風速温度計の記録計が故障したため、8月5日から8月10日まで欠測した。また、8月23日でも一部欠測となった。

4. 放射量の観測

図-4 から図-8 に2010年8月24日5:00から翌25日5:00にかけて車道上で観測した下向日射量、上向日射量、アルベド、下向赤外放射量、上向赤外放射量、正味放射量の時刻変化を示す。下向日射は、遮熱性舗装と低騒音舗装の観測場所が近いことからほとんど同じ値である。上向日射は、遮熱性舗装が近赤外領域の波長の日射を反射することを反映して、 $150\text{W}/\text{m}^2$ を超えることもあり、路面に加える熱を削減している。このときの8:00から16:00のアルベドの平均値は、低騒音舗装で0.046、遮熱性舗装で0.196となり、遮熱



写真-7 観測状況（舗装内温度）

性舗装は、4倍程度反射していることになる。下向赤外放射は、大気から放射される赤外線なので、舗装種別とは関係がなくほぼ同じ値となっている。上向赤外放射は路面から放射され、遮熱性舗装で路面温度が抑制された分だけ上向赤外放射量が少なくなっている。これらの差し引きの放射量である正味放射量は、遮熱性舗装で少ないことが分かる。

表-4 に8月24日における放射量の積算値を示す。遮熱性舗装は、昼間5:00~18:00積算値の場合、

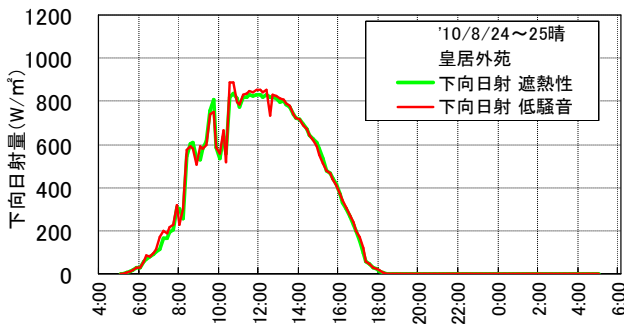


図-4 下向日射の時刻変化

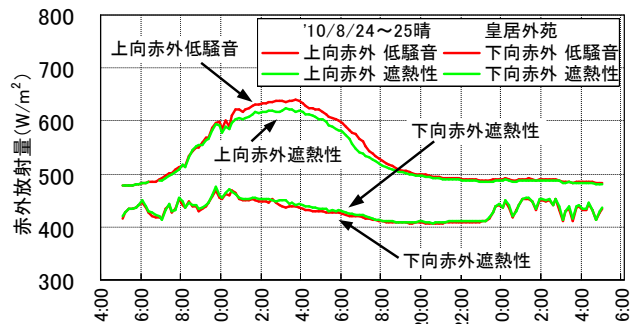


図-7 赤外放射の時刻変化

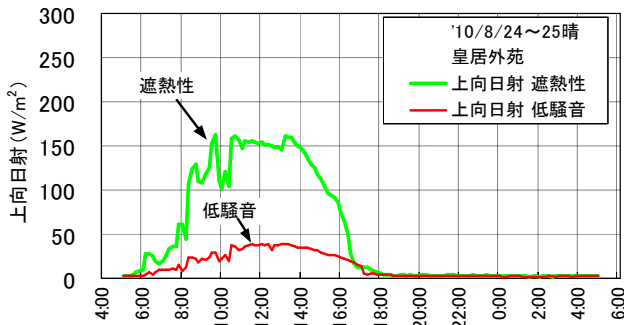


図-5 上向日射（反射日射）の時刻変化

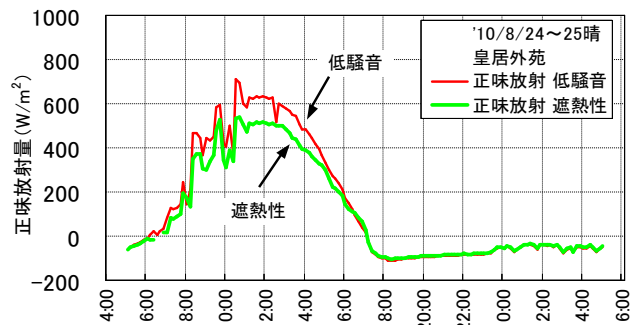


図-8 正味放射量の時刻変化

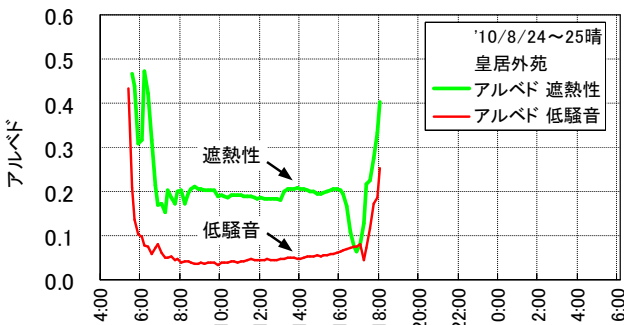


図-6 アルベドの時刻変化

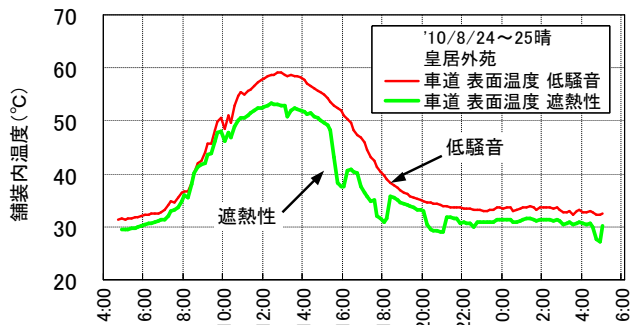


図-9 地表面温度の時刻変化

反射する日射量が多くなる分と、路面温度が下がって上向赤外放射量が少なくなる分があり、結果として低騒音舗装より正味放射量が 2.73 MJ/m^2 少なくなった。夜間(18:00~翌 5:00)の場合は、遮熱性舗装と低騒音舗装で正味放射量にほとんど差がない。

表-5 に 8 月 31 日の放射量積算値を示す。この日の場合、アルベドの平均値は、低騒音舗装で 0.040、遮熱性舗装で 0.173 であり、遮熱性舗装の正味放射量は、低騒音舗装よりも 2.44 MJ/m^2 少ない値となった。なお、低騒音舗装では車道での観測を夜間で実施しなかったため 18:00~翌 5:00 の観測値が欠測である。

5. 路面温度の観測

図-9 に放射温度計で測定した車道の地表面温度を示す。遮熱性舗装の地表面温度は、明らかに低騒音舗

表-4 放射量の積算値(2010/8/24)

10/8/24	舗装種別	日射		アルベド 8~16時 平均値	赤外放射		正味放射
		下向	上向		下向	上向	
		MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	
5:00~	遮熱性	21.59	4.18	0.196	20.58	26.33	11.66
18:00~	低騒音	21.82	1.04	0.046	20.43	26.82	14.39
昼間	差	-0.22	3.14	—	0.16	-0.49	-2.73
18:00~	遮熱性	0.00	0.12	—	16.82	19.40	-2.70
翌5:00	低騒音	0.00	0.11	—	16.77	19.51	-2.85
夜間	差	0.00	0.01	—	0.06	-0.10	0.15

表-5 放射量の積算値(2010/8/31)

10/8/31	舗装種別	日射		アルベド 8~16時 平均値	赤外放射		正味放射
		下向	上向		下向	上向	
		MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	
5:00~	遮熱性	23.50	4.12	0.173	20.35	26.67	13.06
18:00~	低騒音	23.50	0.96	0.040	20.26	27.30	15.50
昼間	差	0.00	3.15	—	0.10	-0.63	-2.44
18:00~	遮熱性	0.00	0.14	—	16.22	19.67	-3.59
翌5:00	低騒音	—	—	—	—	—	—
夜間	差	—	—	—	—	—	—

装よりも低いことが分かる。低騒音舗装の 10 分平均値での最高地表面温度は、12:40 に 59.1°C 、遮熱性舗

装では、12:20 に 53.3℃となった。なお、遮熱性舗装で 15:30 以降に地表面温度が下がっているのは、車道上に観測機器を配置する際、西日の入射角度が低くなり、他の観測機器の陰ができたので、放射温度計の位置を移動したためである。車道上での観測の場合、観測機器の配置を工夫していく必要がある。

図-10 に放射温度計による地表面温度と深さ 1cm にセンサを埋設した舗装内温度を示す。測定方法の違いと、観測場所が異なることから、温度に違いが見られる。そこで、8 月 24 日と 31 日の車道での観測値を用いて長期的に観測している舗装内温度を補正した。

図-11 に放射温度計による値と埋設 1cm 舗装内温度の対比を示す。ただし、陰の影響等による特異なデータは除外している。両者の値の対応関係は非常に良く、十分に補正できるので、車道での観測日以外では補正した路面温度を使用する。

6. 顕熱輸送量の観測

顕熱輸送量を算出するための渦相関法では、応答速度が非常に速い観測機器を用いて気温 T 、鉛直風速 w を観測し、共分散を算出して顕熱輸送量を求める。顕熱輸送量は、次式で表される。

$$H = \rho C_p \overline{T'w'}$$

$\overline{w}=0$ を仮定すると下式を仮定していることと同じになる。

$$H = \rho C_p \overline{T'w} = \rho C_p \overline{T'w'}$$

ここで、

H : 顕熱輸送量 $W \cdot m^{-2}$

w : 鉛直風速 $m \cdot s^{-1}$

ρ : 空気の密度 $kg \cdot m^{-3}$

C_p : 空気の定圧比熱 $1004.7 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

T : 気温 $K, ^\circ C$

$\overline{T'w}$: T と w の積の時間平均

ただし、 $w' = w - \overline{w}$ $T' = T - \overline{T}$ である。なお、 $\overline{T'w'}$ が共分散を表している。

渦相関法の場合、0.1 秒より速くデータを取得して記録する必要があるため、データ量が膨大になる。車道観測では、0.05s (1 秒間に 20 データ) ごとに、中央分離帯では 0.1s (1 秒間に 10 データ) ごとに記録し、10 分間分を用いて顕熱輸送量を算出した。

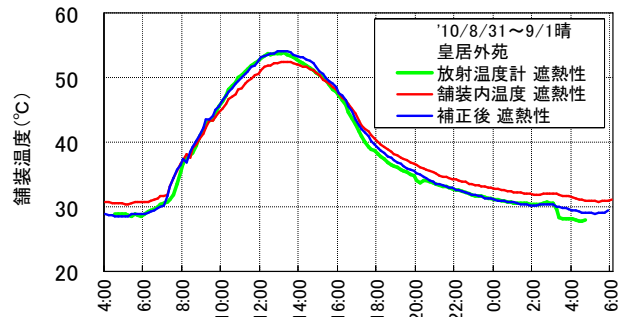


図-10 舗装温度の時刻変化

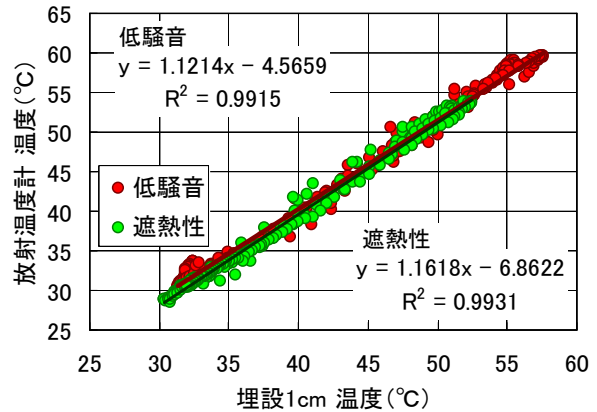


図-11 舗装温度の対比

(1) 顕熱輸送量

図-12 から図-15 に中央分離帯の街路灯に設置した超音波風速温度計による水平風速と顕熱輸送量の時刻変化を示す。水平風速が大きい場合、大気の混合が促進されて顕熱輸送量が多くなるので、遮熱性舗装と低騒音舗装での顕熱輸送量を比較する場合、水平風速の条件を揃える必要がある。8 月 24 日の場合、低騒音舗装での風速がやや大きく、水平風速の条件が揃っていないので顕熱輸送量を比較しにくい。遮熱性舗装での顕熱輸送量は概ね少なくなっている。8 月 31 日の場合、同程度の水平風速になっており、遮熱性舗装と低騒音舗装で顕熱輸送量を比較すると遮熱性舗装で小さいことが分かる。

(2) 観測高さによる顕熱輸送量の比較

次に、遮熱性舗装では車道と中央分離帯で顕熱輸送量を同時に観測したので、図-16 と図-17 に 8 月 31 日の水平風速と顕熱輸送量の時刻変化を示す。車道観測では観測高さが 1.0m であるのに対し、中央分離帯での観測の場合、観測高さが 3.2m である。水平風速は、車道と中央分離帯でほとんど差がないにもかかわらず

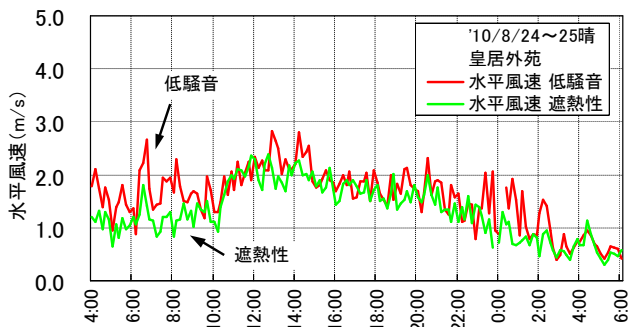


図-12 水平風速の時刻変化(8/24)

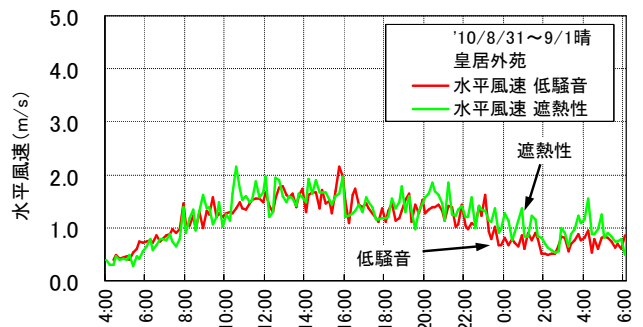


図-14 水平風速の時刻変化(8/31)

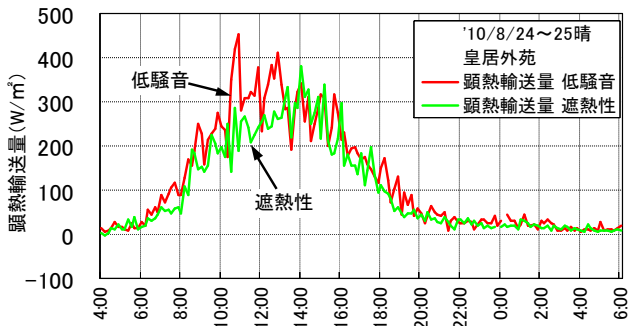


図-13 顕熱輸送量の時刻変化(8/24)

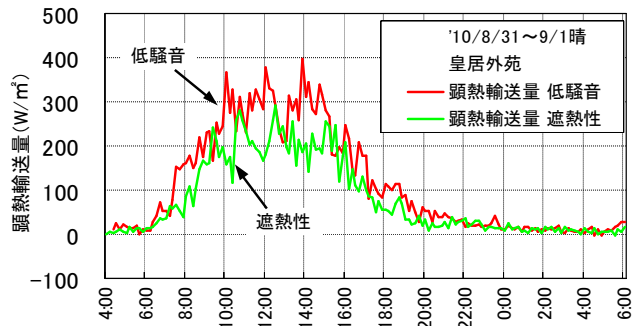


図-15 顕熱輸送量の時刻変化(8/31)

らず、車道で観測した顕熱輸送量は、中央分離帯での観測値に比べて値が小さくなった。これは、観測高さが3.2mの場合、交通車両よりも高い位置なので、交通車両によって鉛直方向の大気の混合が促進されているためと考えられ、遮熱性舗装と低騒音舗装の顕熱を比較する場合、観測高さを合わせておく必要があると思われる。

(3) 顕熱の積算値と日射量・路面温度

図-18 と図-19 に昼間(5:00~18:00)と夜間(18:00~翌5:00)について顕熱の積算値を示す。ほとんどの日で、昼間と夜間ともに顕熱が低騒音舗装よりも遮熱性舗装で少なくなった。つまり、遮熱性舗装は、低騒音舗装よりも大気に熱を加えていないことになる。

図-20 と図-21 に昼間(5:00~18:00)と夜間(18:00~翌5:00)の顕熱積算値と全天日射量の関係を示す。日射量が多いほど昼間では顕熱が多くなる傾向がある。夜間については顕熱の値がそのものが小さいため、値のばらつきに隠れてしまい、その関係が明確ではない。

図-22 と図-23 に昼間(5:00~18:00)と夜間(18:00~翌5:00)の顕熱積算値と平均路面温度の関係を示す。路面温度が高いほど顕熱が多くなる傾向があるが、そのような傾向にない観測値も多くあり、ばらつきが大

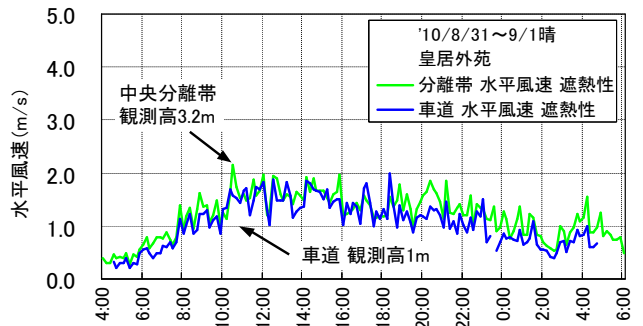


図-16 水平風速の時刻変化

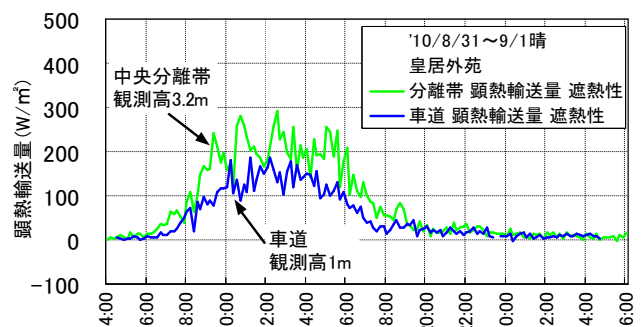


図-17 顕熱輸送量の時刻変化

きくなっている。赤外放射や風向風速、大気の混合の程度など多くの要因が考えられ、路面温度だけで顕熱の値が一意的に決まらないことを示している。夜間の場合も路面温度が高いほど顕熱が多くなる傾向があるようにも見えるが、顕熱の値や路面の温度範囲が小さいこともあって、値のばらつきに隠れてしまい、その関係は不明確である。

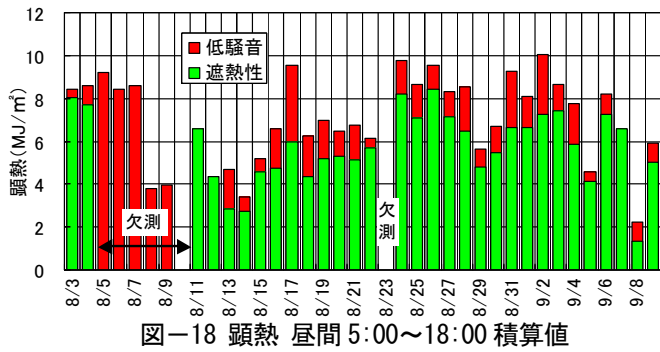


図-18 顕熱 昼間5:00~18:00 積算値

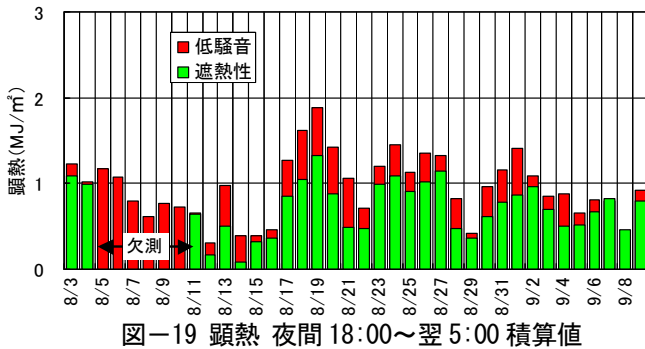


図-19 顕熱 夜間18:00~翌5:00 積算値

(4) 遮熱性舗装と低騒音舗装での顕熱の比較

雨天や曇天の場合、日射量が少なく、顕熱も小さくなるので遮熱性舗装と低騒音舗装で比較しにくい。また、水平風速が大きい場合、大気の流れが促進されて顕熱輸送量が多くなるので、水平風速の条件を揃えて比較する必要がある。

そこで日射条件と風速条件を満たした日について表-6 に昼間の顕熱を示す。日射条件は、日射量 5:00~18:00 積算値が 18MJ/m²以上とし、風速条件は、低騒音舗装と遮熱性舗装における 5:00~18:00 平均水平風速の差が 0.2m/s 以下とした。この二つの条件を満たした昼間の低騒音舗装と遮熱性舗装での顕熱の差は、0.87~3.61MJ/m² まであり、その平均は 1.76 MJ/m² となった。低騒音舗装での顕熱の平均値が 8.23 MJ/m² なので、21%程度である。1.76 MJ/m² という値は、5:00 から 18:00 の 13 時間で W/m² に換算すると 37.6 W/m² となり、4 車線の車道幅 15m 程度と想定すれば 564W/m、道路延長 1m 当り 550W 以上の熱量を抑制しているといった値である。

表-7 に夜間において日射条件と風速条件を満たした日の顕熱を示す。低騒音舗装と遮熱性舗装での顕熱の差は、0.11~0.41MJ/m² まであり、その平均値は、0.23 MJ/m² となった。低騒音舗装での顕熱の平均が 0.88 MJ/m² なので、26%程度である。

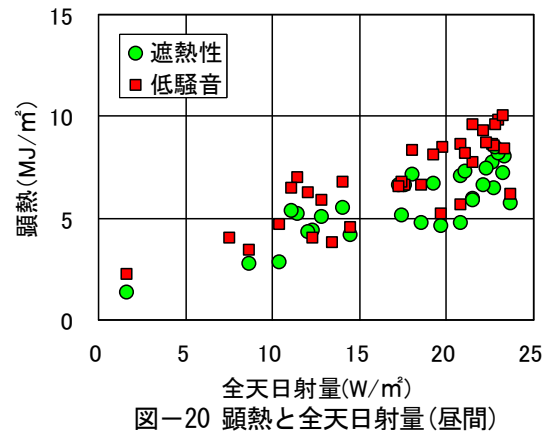


図-20 顕熱と全天日射量(昼間)

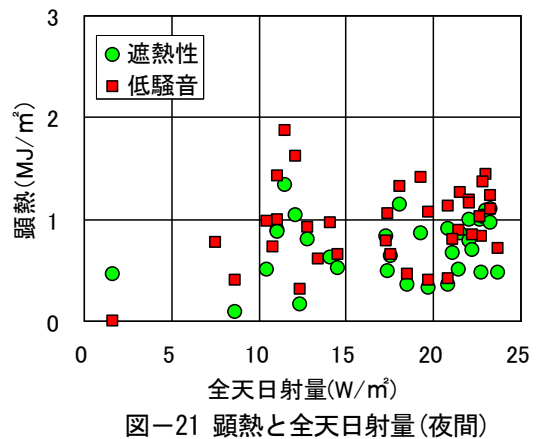


図-21 顕熱と全天日射量(夜間)

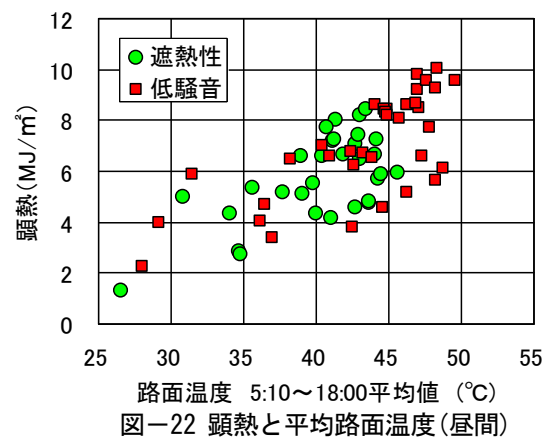


図-22 顕熱と平均路面温度(昼間)

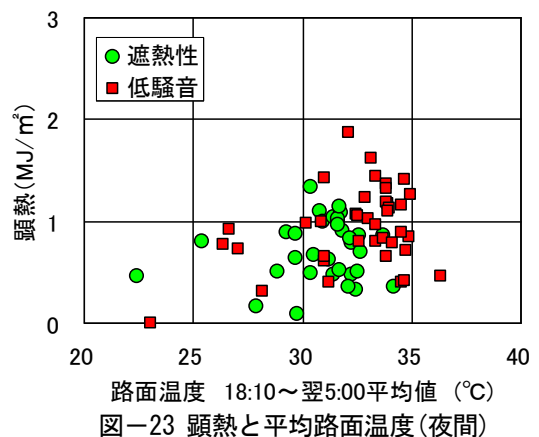


図-23 顕熱と平均路面温度(夜間)

表-6 顕熱の積算値(5:00~18:00)

日付	日射量 MJ/m ²	平均風速		差 °C	顕熱積算値		差 MJ/m ²
		遮熱性 m/s	低騒音 °C		遮熱性 MJ/m ²	低騒音 MJ/m ²	
8/16	18.5	1.12	1.21	0.08	4.73	6.58	1.85
8/17	21.5	1.69	1.55	-0.14	5.95	9.56	3.61
8/25	20.8	1.41	1.54	0.13	7.06	8.64	1.57
8/26	22.8	1.40	1.59	0.20	8.45	9.56	1.11
8/27	18.1	1.31	1.47	0.16	7.16	8.32	1.16
8/28	22.7	1.46	1.57	0.11	6.47	8.52	2.05
8/29	20.8	1.23	1.28	0.05	4.78	5.65	0.87
8/31	22.1	1.31	1.29	-0.01	6.63	9.25	2.62
9/1	19.3	1.30	1.47	0.16	6.66	8.07	1.42
9/3	22.3	1.46	1.62	0.16	7.44	8.66	1.21
9/4	21.5	1.60	1.62	0.02	5.86	7.73	1.87
平均	21.0				6.47	8.23	1.76

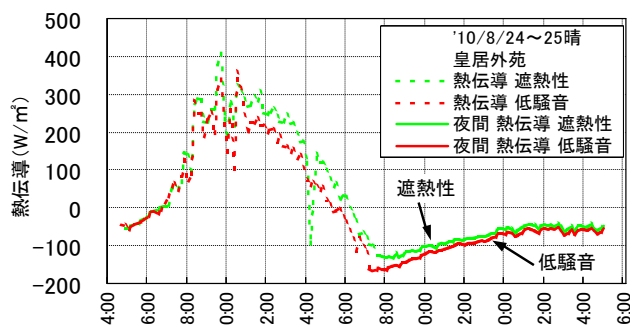


図-24 熱流量の時刻変化

表-7 顕熱の積算値(18:00~翌5:00)

日付	日射量 MJ/m ²	平均風速		差 °C	顕熱積算値		差 MJ/m ²
		遮熱性 m/s	低騒音 °C		遮熱性 MJ/m ²	低騒音 MJ/m ²	
8/15	19.7	0.73	0.63	-0.10	0.32	0.40	0.07
8/16	18.5	0.74	0.86	0.13	0.36	0.47	0.11
8/17	21.5	1.11	1.26	0.15	0.86	1.27	0.41
8/25	20.8	0.88	0.90	0.02	0.91	1.13	0.22
8/26	22.8	1.08	1.01	-0.07	1.02	1.36	0.34
8/29	20.8	0.80	0.70	-0.10	0.36	0.42	0.06
8/31	22.1	1.17	0.99	-0.18	0.78	1.15	0.37
平均	20.9				0.66	0.88	0.23

7. 熱伝導の観測

熱流計は本来であれば舗装内に埋め込んで測定すべきであるが、実際の測定では、熱流計をパテで舗装表面に接着して測定した。熱流計と舗装は熱伝導率や比熱が異なり、路面には舗装の凸凹がある。日射がある場合、熱流計自体が温まってしまい、熱流計の観測値は、正確な値になるとは考えられない。しかし、夜間の場合は日射がないので、低騒音舗装と遮熱性舗装の蓄熱量の大小を比較することはできる。図-24に8月24日における熱流計の観測値を示す。熱伝導の負の値は舗装内から路面に向かう熱流量を表す。遮熱性舗装は、低騒音舗装に比べて夜間の熱流量が少なく、遮熱性舗装の方が、蓄熱していないことを示している。参考値として18:00~翌5:00の積算値は、低騒音舗装で-3.49MJ/m²、遮熱性舗装で-2.95MJ/m²、その差が0.54 MJ/m²となり、その値は15%程度である。

8. まとめ

- ①低騒音舗装のアルベド(日射量の反射率)が0.046と0.040であったのに対して遮熱性舗装では0.196と0.173となり、遮熱性舗装は低騒音舗装よりも4倍程度反射していた。
- ②昼間(5:00~18:00)の正味放射量は、遮熱性舗装が低騒音舗装よりも2.73 MJ/m²と2.44 MJ/m²少なかった。
- ③観測期間の昼間と夜間の顕熱は、ほとんどの日で低騒音舗装よりも遮熱性舗装で少なかった。
- ④日射量が多い日ほど昼間の顕熱が多くなる傾向があった。夜間については、昼間に日射量が多くても夜間の顕熱が多くなる傾向が明確ではなかった。
- ⑤路面温度が高いほど顕熱が多くなる傾向があるが、そのような傾向にない観測値も多くあり、赤外放射や風向風速、大気の混合の程度など多くの要因があり、路面温度だけで顕熱の値が一意的に決まらなないと考えられた。
- ⑥日射量18MJ/m²以上、平均風速の差0.2m/s以内の日について遮熱性舗装と低騒音舗装で顕熱を比較した結果、昼間の顕熱は平均で1.76 MJ/m²、夜間は0.23 MJ/m² 遮熱性舗装で少なかった。
- ⑦舗装路面に接着させた熱流計の観測値で比較すると、夜間の蓄熱量が低騒音舗装よりも遮熱性舗装で少ないことが確認できた。

参考文献

- 1) 日本気象学会(2001)、気象研究ノート第199号地表面フラックス測定法、19-55
- 2) 小作好明、廣島 実(2006)、丸の内の保水性舗装に散水した場合の気温・湿度と熱輸送量、平18.都土木技術センター年報、181-192
- 3) 小作好明、春日井哲夫、橋本一郎、古賀 睦、高根澤浩二(2007)、保水性舗装に散水した場合の熱輸送量への効果、平19.都土木技術センター年報、165-176