平 18.　都土木技術センター年報　　ISSN 0387-2416
Annual Report
C.E.C.,TMG 2006

17. 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

Air Temperature and Humidity, Heat Flux with Sprinkle Water on Water-apsorptive Pavement in Marunouchi

技術調査課　小作好明、廣島　実
道路管理部保全課　古賀　睦
第一建設事務所補修課　高根澤浩二

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、舗装の面からヒートアイランド現象を抑制する取り組みとして、水分を含むことができる保水性舗装を施工している。

2005 年の夏期には、丸の内の保水性舗装の都道において、道路管理部保全課が中心となり、第一建設事務所が散水車による下水再生水の散水を行った。旧土木技術研究所（現土木技術センター）では、散水の効果を確認するため、観測を実施した。散水日と散水しない日（非散水日）の気温や湿度、熱輸送量、舗装内温度の比較を行ったので、その結果を報告する。

2. 調査概要

(1) 観測期間

平成 17 年 7 月 15 日から 10 月 13 日の観測期間のうち、気温が高い 7 月 15 日から 9 月 30 日を調査対象期間とした。

(2) 散水路線および観測位置

図－1 に散水した路線と気温・湿度、舗装内温度、降雨量の観測位置を示す。気温計・湿度計は、散水する保水性舗装の沿道に設置した。また、散水路線の風上になり散水による影響がない日比谷公園や馬場先門交差点付近、風下にあたる鍛冶橋の交差点付近、その他に大手町と九段坂上にも気温計、湿度計を設置した。

図－1　散水路線と観測位置

図－2 に気温・湿度の観測状況の一例を示す。センサが日射に直接さらされるとセンサを温めてしまい、気温の測定ができないので、日除けとなるラディエーションシールド内にセンサを設置して観測を行った。

また、温度センサは、車道面から地上 1.5m と 0.3m の位置に設置し、湿度センサは、車道面から地上 1.5m 位置に設置した。気温及び湿度の記録間隔は 10 分とした。なお、温度及び湿度のセンサに機器差があるので、観測前に閉めきった室内で同時測定し、機器差を補正した。

図－3 に舗装内温度観測状況の一例を示す。センサは舗装面から約 1cm 位置に埋設している。舗装内温度の記録間隔は 10 分とした。

また、観測期間中の天候を確認するため、日射計を設置した。ただし、丸の内ではビルが多く、日陰になってしまうため、場所は離れてしまうが、樹木等の陰にならず、一日中日照がある千鳥ヶ淵の交差点付近の街路灯に地上 2.5m の高さで日射計を設置した。図－4 に日射計を示す。日射量の記録間隔は 2 分とし、10 分平均値を用いた。

図－2 気温・湿度観測状況の一例

図－3 舗装内温度観測状況の一例

図－4 日射計

(3) 散水路線及び散水状況

表－1 に夜間散水の散水状況を示す。散水は散水車によって概ね 23:00 から 3:00～4:00 の間に行われ、駐車車両があって散水できない場合を除き、全車線に散水している。散水量は、約 5ℓ /㎡を目標に行っている。総降雨量に換算すると 5㎜ 程度である。

表－1 夜間散水状況

散水時刻	散水時間 (時間)	散水量 (m^3)	散水路線	
7/20 23:00 ～ 7/21 4:33	5:33	75.09	402	407
7/24 23:00 ～ 7/25 3:55	4:55	74.79	402	407
7/29 23:00 ～ 7/30 4:05	5:05	73.96	402	407
8/2 23:00 ～ 8/3 3:50	4:50	83.27	402	407
8/6 23:00 ～ 8/7 3:30	4:30	73.92	402	407
8/10 23:00 ～ 8/11 4:00	5:00	73.74	402	407
8/18 23:00 ～ 8/19 3:23	4:23	77.47	402	407
8/22 23:00 ～ 8/23 3:20	4:20	73.56	402	407
8/29 23:00 ～ 8/30 3:21	4:21	73.80	402	407
9/2 23:00 ～ 9/3 3:25	4:25	74.00	402	407
9/14 23:00 ～ 9/15 3:25	4:25	75.07	402	407
9/17 23:00 ～ 9/18 3:15	4:15	73.58	402	407
9/23 23:00 ～ 9/24 3:15	4:15	73.53	402	407
9/27 23:00 ～ 9/28 3:15	4:15	74.70	402	407

３．丸の内の気温観測結果

(1) 散水による気温低下の評価方法

散水による気温の変化を評価するためには、散水した場合と散水しない場合を比べる必要がある。しかし、同じ場所で散水した場合と散水しない場合を同時に観測することは不可能である。また、気温は日々異なっており、散水した日の気温と散水しない日の気温を直接比較することもできない。そこで、散水とは無関係の位置における基準となる気温を設定して、その基準気温との気温差をとり、散水日と非散水日の平均気温差を算出して、さらにその差をとることによって散水による気温の変化を評価した。この評価方法は、気温の値に系統誤差が含まれていたとしても、最後に気温差の差をとるので打ち消し

てしまい、系統誤差が取り除かれてしまうという利点がある。気温差及び散水による気温低下の算出式を以下に示す。

［気温差］＝［対象地点の気温］－［基準気温］

［散水による気温低下］＝
［散水日の平均気温差］－［非散水日の平均気温差］

図－5 散水による気温低下のイメージ

(2) 基準気温の設定

散水によって基準となる地点の気温が変化してしまうと、散水による気温の低下量を算出することができない。そのため、散水による影響がない地点の気温を選定する必要がある。そこで、大手町と日比谷公園、丸の内の保水性舗装の風上にあたる馬場先門交差点付近の観測地点の 3 地点を基準気温(センサ設置高、地上 1.5m)に設定した。

(3) 気象条件が類似する日の抽出

散水した場合と散水しない場合で比較するためには、その他の条件をできる限り同じにする必要がある。2005 年 7 月 15 日から 9 月 31 日の期間で表－2 の条件を満たす散水日と非散水日を抽出した。降水があると保水性舗装に水を供給してしまうので、前日または当日に降水がある場合は、比較用のデータからは外した。気温については、気象官署(大手町)の最高気温が 30℃以上、最低気温が 22℃以上となる日を対象にした。風については、散水が前日の 23 時からなので、0 時～12 時の午前中の最多風向が南系または西系の場合を対象にした。日射については、日積算日射量が 20MJ/㎡以上の晴天日を対象とした。気象条件が類似する散水日と非散水日を抽出した結果、散水日は 5 日分、非散水日は 7 日分のデータが得られた。表－3 に条件を満たした散水日と非散水日の日付を示す。

表－2 気象条件

項目	条件	使用データ
降水	前日および当日 降水なし	設置した雨量計 (丸の内、半蔵門)
気温	最高気温 30℃以上 最低気温 22℃以上	気象官署 (大手町)
風	0～12時最多風向が 南系または西系	気象官署 (大手町)
日射量	日積算日射量 20MJ/㎡ 以上の 晴天日	設置した日射計 (千鳥が淵)

表－3 抽出日

	日付	最高気温	最低気温	最多風向	日積算日射量	散水車作業時刻	散水量
		℃	℃	0～12時	MJ/㎡		m^3
散水日	7/21	30.8	23.9	南西	20.9	23:00 ～ 4:33	75.1
	8/3	32.9	26.8	南西	20.3	23:00 ～ 3:50	83.3
	8/7	33.8	26.8	南西	23.0	23:00 ～ 3:30	73.9
	8/19	33.6	26.4	南西	24.2	23:00 ～ 3:23	77.5
	9/3	32.1	25.3	南西	22.4	23:00 ～ 3:25	74.0
非散水日	7/15	31.5	23.0	南西	25.2		
	7/18	32.9	25.6	西南西	26.4		
	7/29	31.6	25.2	南西	22.4		
	8/6	34.9	27.2	南西	25.1		
	8/20	34.3	26.6	南西	25.4		
	8/21	33.5	27.1	南西	23.3		
	9/14	33.0	25.6	南西	22.6		

(4) 散水による気温低下の統計的確認

散水によって気温が低下したのかを確認するため、基準気温との気温差をデータとして、散水日と非散水日の二つの母集団について平均の差の検定を行った。平均の差の検定をする場合、二つの母集団の分散が等しいと考えてよい場合と分散が異なる場合とでは検定方法が異なるので、等分散性の検定を行った上で平均の差の検定を行った。検定の手順を図－7 に示し、表－4、表－5 に両側検定、有意水準 5%の検定結果を示す。

表中の●は、検定の結果、基準気温 3 地点のいずれをとっても散水によって気温が低下したことを統計的に確認できたことを示す。都道 407 号線沿道の観測地点では、散水によって気温が低下していることが確認できなかった。これは、都道 407 号線の西側が高層ビルの建築工事中であり、高さが高いのに対し、東側が線路であるため低かったので、空気の流れが一定せず、

道路に沿った空気の気温を捉えていないことが原因と考えられる。

一方、都道 402 号線沿いの観測地点では、散水によって 3:00～6:00 の気温が低下していることが統計的に確認できた。また、総降雨量 5㎜ 相当の夜間散水によって気温の低下を統計的に確認できたのは、散水終了から約 3 時間程度であった。

等分散の検定　観測地点：丸の内銀行西

	仮説 H_0	$\sigma_A^2=\sigma_B^2$	
散水日	平均	$\overline{X_A}$	−0.43
	不偏分散	s_A^2	0.02
	データ数	n_A	95
非散水	平均	$\overline{X_B}$	−0.15
	不偏分散	s_B^2	0.07
	データ数	n_B	133
分散比 F_0 $F_0 \geqq 1$		$F=s_A^2/s_B^2$ $F=s_B^2/s_A^2$	3.84
自由度		$\nu_A=n_A-1$	94
自由度		$\nu_B=n_B-1$	132
有意水準		α	5%
F値		$F_{0.975}(\nu_A,\nu_B)$	1.448
$F_0<F_{0.975}(\nu_A,\nu_B)$ 棄却されない		$\sigma_A^2=\sigma_B^2$	―
$F_0>F_{0.975}(\nu_A,\nu_B)$ 棄却される		$\sigma_A^2\neq\sigma_B^2$	○
判定			異分散

仮説　散水日の基準気温との気温差の分散が散水しない日の気温差の分散と等しい。

⇩

有意水準５％で仮説が棄却されるか？

⇩ 仮説が棄却された → 等分散扱い

⇩ 仮説が棄却されない → 異分散扱い

⇩

仮説　散水日の基準気温との気温差の平均値が散水しない日の気温差の平均値と等しい。つまり、散水によって平均として気温が低下しないという仮説を立てる。

⇩

有意水準５％で仮説が棄却されるか？

⇩ 仮説が棄却された　⇩ 仮説が棄却されない

⇩

仮説が正しいという確率は５％以下
つまり、平均として気温は低下している。

母平均の差の検定(等分散)　丸の内銀行西

	仮説 H_0:	$\mu_A=\mu_B$	
散水日	平均	$\overline{X_A}$	−0.43
	不偏分散	s_A^2	0.02
	データ数	n_A	95
非散水	平均	$\overline{X_B}$	−0.15
	不偏分散	s_B^2	0.07
	データ数	n_B	133
共通標準偏差 s		$\left(\frac{(n_A-1)s_A^2+(n_B-1)s_B^2}{n_A+n_B-2}\right)^{1/2}$	0.22
t_0		$\frac{\overline{X_A}-\overline{X_B}}{s[1/N_A+1/N_B]^{1/2}}$	−9.56
自由度		$\nu=n_A+n_B-2$	226
有意水準		α	5%
t値		$t_{0.975}(\nu)$	2.256
$\lvert t_0\rvert<t_{0.975}(\nu)$ 棄却されない		$\mu_A=\mu_B$	―
$\lvert t_0\rvert>t_{0.975}(\nu)$ 棄却される		$\mu_A\neq\mu_B$	○
			###

母平均の差の検定(異分散)　丸の内銀行西

	仮説 H_0:	$\mu_A=\mu_B$	
散水日	平均	$\overline{X_A}$	−0.43
	不偏分散	s_A^2	0.02
	データ数	n_A	95
非散水	平均	$\overline{X_B}$	−0.15
	不偏分散	s_B^2	0.07
	データ数	n_B	133
t_0		$\frac{\overline{X_A}-\overline{X_B}}{[s_A^2/N_A+s_B^2/N_B]^{1/2}}$	−10.55
c		$\frac{s_A^2}{n_A(s_A^2/n_A+s_B^2/n_B)}$	0.27
自由度 ν		$\frac{1}{c^2/(n_A-1)+(1-c)^2/(n_B-1)}$	207
自由度		ν	226
有意水準		α	5%
t値		$t_{0.975}(\nu)$	2.258
$\lvert t_0\rvert<t_{0.975}(\nu)$ 棄却されない		$\mu_A=\mu_B$	―
$\lvert t_0\rvert>t_{0.975}(\nu)$ 棄却される		$\mu_A\neq\mu_B$	○
			散水効果あり

図―7 検定の手順

表－4 検定結果 （気温センサ設置高、地上 1.5m）

	散水路線						散水路線付近			
観測 地点名	丸の内 銀行前	丸の内 国際ﾌｫBﾎ	丸の内 国際ﾌｫCﾎ	丸の内 郵便局東	丸の内 東京ビル	有楽町 マリオン	丸の内 郵便局北	丸の内 馬場先門	丸の内 鍛冶橋	九段坂上
0:00～1:00	－	－	－	－	(－)	(－)	－	－	－	－
1:00～2:00	－	－	●	－	(－)	(－)	－	●	●	－
2:00～3:00	－	●	●	－	(－)	(－)	－	－	－	－
3:00～4:00	●	●	●	－	(－)	(－)	－	－	－	－
4:00～5:00	●	●	●	－	(－)	(－)	－	－	－	－
5:00～6:00	●	●	●	－	(－)	(－)	－	－	●	－
6:00～7:00	－	－	－	－	(－)	(●)	－	－	－	－
7:00～8:00	－	－	－	(－)	(－)	(－)	－	－	－	－
8:00～9:00	－	－	－	(－)	(－)	(－)	－	－	－	－
9:00～10:00	－	(－)	(－)	(－)	(－)	(－)	－	－	(－)	(－)
10:00～11:00	－	－	●	(●)	(●)	(－)	(－)	(－)	(●)	－
11:00～12:00	－	－	－	(－)	(－)	(－)	－	－	(－)	(－)

※括弧書きは、一部欠測があり参考値

表－5 検定結果 （気温センサ設置高、地上 0.3m）

	散水路線						散水路線付近			
地点番号 地点名	丸の内 銀行前	丸の内 国際ﾌｫBﾎ	丸の内 国際ﾌｫCﾎ	丸の内 郵便局東	丸の内 東京ビル	有楽町 マリオン	丸の内 郵便局北	丸の内 馬場先門	丸の内 鍛冶橋	九段坂上
0:00～1:00	－	－	－	－	(－)		(－)	－	－	－
1:00～2:00	－	－	－	－	(－)		(－)	●	●	－
2:00～3:00	●	－	●	－	(－)		(－)	－	－	－
3:00～4:00	●	●	●	－	(－)		(－)	－	－	－
4:00～5:00	●	●	●	－	(－)		(－)	－	－	－
5:00～6:00	●	●	●	－	(－)		(－)	－	－	－
6:00～7:00	－	－	－	－	(－)		(－)	－	－	－
7:00～8:00	－	－	－	(－)	(－)		(－)	(－)	－	－
8:00～9:00	－	－	－	●	(－)		(－)	－	－	－
9:00～10:00	－	－	－	(●)	(－)		(－)	(－)	(－)	－
10:00～11:00	－	－	●	(－)	(●)		(－)	(－)	(●)	－
11:00～12:00	(－)	－	－	(－)	(－)		(－)	－	(－)	(－)

※括弧書きは、一部欠測があり参考値

(5) 散水による気温低下量

都道 402 号線の観測地点で散水によって気温が低下していることが統計的に確認できたので、3:00～6:00 のデータを用いて平均値としての散水による気温の低下量を算出した。表－6、表－7 に算出結果を示す。散水による気温の低下の平均値は、－0.3 度程度になった。ただし、図-7 に示すように基準気温と散水路線の気温差のデータはばらつきが大きく、自動車排熱などの人工排熱や風の流れなどの影響を受けていると考えられ、気温の低下が過小評価されている可能性が残っている。

図－7 気温差の頻度分布の一例
観測地点：丸の内 国際ﾌｫｰﾗﾑ B ﾎｰﾙ
ｾﾝｻ設置高：地上 1.5m
基準気温：丸の内 馬場先門

表－6 散水による気温低下
（センサ設置高、地上 1.5m）

	散水路線			備考
地点番号 地点名	丸の内 銀行前	丸の内 国際ﾌｫB	丸の内 国際ﾌｫC	基準気温 地点
時間	3:00 ～6:00	3:00 ～6:00	3:00 ～6:00	
平均気温低下 (deg)	-0.28	-0.30	-0.30	馬場先門
平均気温低下 (deg)	-0.27	-0.29	-0.29	日比谷 公園
平均気温低下 (deg)	-0.26	-0.30	-0.29	大手町

表－7 散水による気温低下
（センサ設置高、地上 0.3m）

	散水路線			備考
地点番号 地点名	丸の内 銀行前	丸の内 国際ﾌｫB	丸の内 国際ﾌｫC	基準気温 地点
時間	3:00 ～6:00	3:00 ～6:00	3:00 ～6:00	
平均気温低下 (deg)	-0.32	-0.26	-0.29	馬場先門
平均気温低下 (deg)	-0.31	-0.25	-0.28	日比谷 公園
平均気温低下 (deg)	-0.29	-0.25	-0.28	大手町

４．丸の内の湿度観測結果

(1) 散水による湿度変化の評価方法

散水による湿度変化の評価方法は、気温の場合と同様に基準となる湿度を設定して、その基準湿度との湿度差をとって散水日と非散水日の平均湿度差を算出して、さらにその差をとることによって散水による湿度の変化を評価した。湿度差及び散水による湿度変化の算出式を以下に示す。

[湿度差]＝[対象地点の相対湿度]－[基準相対湿度]

[散水による湿度増加]＝
[散水日の平均湿度差]－[非散水日の平均湿度差]

(2) 基準湿度の設定

基準となる地点の湿度は、気温の場合と同様に大手町と日比谷公園内、馬場先門の観測地点の 3 地点を基準相対湿度(センサ設置高､地上 1.5m)とした。

(3) 気象条件が類似する日の抽出

気温の場合と同様に、条件を満たした散水日と非散水日は、表－3 のとおりである。

(4) 散水による湿度増加の統計的確認

気温の場合と同様に平均の差の検定を行った。表－8 に両側検定、有意水準 5%の検定結果を示す。表中の●は、検定の結果、基準気温 3 地点のいずれをとっても散水によって湿度が増加したことを統計的に確認できたことを示す。都道 402 号線の散水路線では、散水によって 1:00～6:00 の相対湿度が増加していることが統計的に確認できた。また、散水終了が 3 時から 4 時頃なので、総降雨量 5mm 相当の夜間散水によって湿度の増加を統計的に確認できたのは、散水終了から 3 時間程度であった。

(5) 散水による相対湿度増加量

都道 402 号線の散水路線では、散水によって相対湿度が増加していることが統計的に確認できたので 3:00～6:00 のデータを用いて平均値としての散水による相対湿度の増加量を算出した。表－9 に算出結果を示す。都道 402 号線の散水路線では、散水による相対湿度の増加の平均値は、2%程度になった。

表－8 検定結果 (湿度センサ設置高、地上 1.5m)

	散水路線						散水路線付近			
地点番号 地点名	丸の内 銀行前	丸の内 国際ﾌｫBﾎ	丸の内 国際ﾌｫCﾎ	丸の内 郵便局東	丸の内 東京ビル	有楽町 マリオン	丸の内 郵便局北	丸の内 馬場先門	丸の内 鍛冶橋	九段坂上
0:00～1:00	－	－	－	●	(－)	(－)	－	●	●	－
1:00～2:00	●	●	●	●	(－)	(－)	－	●	●	－
2:00～3:00	●	●	●	－	(－)	(－)	－	●	－	－
3:00～4:00	●	●	●	－	(－)	(－)	－	－	－	－
4:00～5:00	●	●	●	－	(－)	(－)	－	－	－	－
5:00～6:00	●	●	●	－	(●)	(－)	－	－	－	－
6:00～7:00	●	●	－	－	(－)	(●)	－	－	－	－
7:00～8:00	－	－	－	－	(－)	(－)	－	－	－	－
8:00～9:00	－	－	－	－	(－)	(－)	－	－	－	－
9:00～10:00	－	－	●	－	(●)	(－)	－	－	－	－
10:00～11:00	●	●	●	●	(●)	(－)	●	－	●	－
11:00～12:00	－	－	－	－	(－)	(－)	－	●	－	－

※括弧書きは、一部欠測があり参考値

表－9 散水による湿度増加
(センサ設置高、地上 1.5m)

	散水路線			備考
地点番号 地点名	丸の内 銀行前	丸の内 国際ﾌｫBﾎ	丸の内 国際ﾌｫCﾎ	基準気温 地点
時間	3:00 ～6:00	3:00 ～6:00	3:00 ～6:00	
平均湿度増加 (%)	2.2	1.9	1.9	馬場先門
平均湿度増加 (%)	2.0	1.7	1.7	日比谷 公園
平均湿度増加 (%)	2.0	1.8	1.8	大手町

図－8 湿度差の頻度分布の一例

５．熱輸送量観測結果

散水による効果を熱量という観点から評価するために熱輸送観測を行った。

(1) 観測期間および観測位置

現地観測は、散水後 2 回、非散水 1 回の合わせて 3 回実施した。観測期間を表－10 に示す。観測位置は保水性舗装施工箇所であり、丸の内三丁目の都道 407 号線の車道上である。

表－10 熱輸送量観測の観測期間

熱輸送量観測	散水状況	観測期間
(1回目)	散水後	平成17年8月19日(金) 4時30分～19時
(2回目)	非散水	平成17年8月27日(土) 4時30分～19時
(3回目)	散水後	平成17年9月 3日(土) 4時30分～19時

図－9 熱輸送量観測位置

(2) 観測項目と観測機器

熱輸送量観測における観測項目と観測機器を表－11 に示す。下向日射(短波放射)、上向日射(短波放射)、大気放射(長波放射)、地表面放射(長波放射)の観測には長短波放射計を用い、顕熱は超音波風速温度計、潜熱は超音波風速温度計と赤外線湿度計を用いた。この他に、地表面温度、気温、相対湿度、気圧、風速も測定した。

表－11 観測項目と観測機器

観測項目	観測機器	記録間隔	観測高
下向日射量	長短波放射計	1分	20cm
上向日射量		1分	
大気放射		1分	
地表面放射		1分	
顕熱量	超音波風速温度計	50ms	85cm
潜熱量	赤外線湿度計	50ms	85cm
	超音波風速温度計	50ms	
地表面温度	赤外線放射温度計	1分	65cm
気温	超音波風速温度計	50ms	85cm
	気温計	10分	1.5m
相対湿度	赤外線湿度計	50ms	85cm
	湿度計	10分	1.5m
気圧	気圧計	30分	地表
風速	超音波風速温度計	50ms	85cm

図－11 熱輸送量観測状況

(3) 日射量と舗装面温度

図－11 日射量の時刻変化を示す。3 回の現地観測のうち、2 回の散水日は晴天であったが、非散水日は曇りとなった。なお、今回の現地観測地点には西側に高層ビルがあって日陰となったため、12:00 からは日射量が急速に小さくなった。

図－12 に放射温度計で測定した保水性舗装の表面温度の時刻変化を示す。散水日は、晴天で非散水日は曇天であったため、散水日の方で舗装面温度が高くなる結果となった。

(4) 潜熱と顕熱の観測結果

顕熱と潜熱については、取得したデータの共分散をとり、渦相関法により算出した。データは 50ms（1 秒間に 20 ﾃﾞｰﾀ）ごとに記録し、10 分間分（12000 ﾃﾞｰﾀ）を用いて顕熱フラックスと潜熱フラックス（単位面積、単位時間当たりの熱輸送量のこと）を算出した。

$$\iota E = \iota \rho \overline{q w}$$

$$H = \rho C_P \overline{T w}$$

ιE：顕熱フラックス　W･m^{-2}
H：潜熱フラックス　W･m^{-2}
w：鉛直風速　m･s^{-1}
ι　：水の気化熱　$\iota = (2.501 - 0.00237 T_s) \times 10^6$ J･kg^{-1}
T_s：地表面温度　℃
ρ：空気の密度　kg･m^{-3}
q：比湿（湿潤空気質量に対する水蒸気質量の割合）
C_P：空気の定圧比熱　1004.7　J･kg^{-1}･K^{-1}
T：気温 K、℃
$\overline{q w}$：q と w の積の時間平均
$\overline{T w}$：T と w の積の時間平均

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

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

$$\iota E = \iota \rho \overline{q w} = \iota \rho \overline{q' w'}$$

ここで、$\overline{w'} = w - w$　　$\overline{T'} = T - T$

$\overline{q'} = q - q$　である。

$\overline{T' w'}$　　$\overline{q' w'}$　が共分散を表していることになる。

図－11 日射量

図－12 舗装面温度

図－13 に潜熱の時刻変化を示す。散水日では、非散水日に比べて潜熱が多くなっていることが明らかに分かり、保水性舗装に含まれる水分が蒸発していることが確認できた。なお、8 月 27 日は、非散水日であるが、8 月 25 日から 8 月 26 日早朝にかけて降雨があったため、量としては少ないが、2 日目の 8 月 27 日でも保水されおり、蒸発を継続していた。

図－13 潜熱の時刻変化

図－14 顕熱の時刻変化

図－14 に顕熱の時刻変化を示す。散水日の方が非散水日に比べて顕熱が多くなる結果となった。これは、散水日が晴天で非散水日は曇天であったためと考えられる。しかし、表－12 に示すように 5:00～19:00 の熱量を比較すると、非散水日では、正味放射量に対して顕熱量が 49%程度あるのに対し、散水日では、顕熱量が 37%と 42%程度、潜熱量が 9%程度となり、顕熱量の配分が潜熱量に移っていることが分かる。散水することによって大気を温める顕熱を減らしていることが確認できた。ただし、散水日では日射が多かったため、気温上昇を抑制する潜熱量より気温を上げる顕熱量の方がはるかに多かった。

表－12 散水日と非散水日の熱量比較
(5:00～19:00)

		8月27日 5:00～19:00 曇天 非散水	8月19日 5:00～19:00 晴天 散水日	9月3日 5:00～19:00 晴天 散水日
正味放射量 Rn	MJ・m^{-2} %	6.83 100%	8.71 100%	8.90 100%
顕熱量 H	MJ・m^{-2} %	3.33 49%	3.21 37%	3.71 42%
潜熱量 ιE	MJ・m^{-2} %	0.22 3%	0.79 9%	0.76 9%

図－15、図－16 に顕熱と日射量の関係、顕熱と舗装面温度の関係を示す。顕熱は日射との関係よりも、日射によって温められた舗装面の温度との関係が強いことが分かる。舗装表面の温度を下げることができれば顕熱を下げることができることを示している。

図－15 顕熱と日射量の関係

図－16 顕熱と舗装面温度の関係

散水日と非散水日の 8:00～9:30 について舗装面温度の上昇量について比較した。比較方法としては舗装面に 1MJ･m^2 の正味放射量が加えられたときの舗装面の温度上昇量を算出することとした。1MJ･m^2 は、約 278W･m^{-2} の放射が 1 時間続いた場合の熱量に相当する。表－13 に単位放射量当たりの舗装面温度上昇量を示す。非散水日のΔTs/Rn は 5.2 度程度で、散水日のそれは、2.7 度と 3.5 度なので、非散水日では舗装面温度が上昇しやすく、散水日では上昇しにくいことが分かる。

表－13 単位放射量当たりの舗装面温度上昇量

	8月27日 8:00～9:30 非散水	8月19日 8:00～9:30 散水日	9月3日 8:00～9:30 散水日
正味放射量 Rn (MJ･m^{-2})	2.39	2.40	2.55
8:00舗装面温度 Ts$_1$ (℃)	30.2	32.4	32.4
9:30舗装面温度 Ts$_2$ (℃)	42.7	38.9	41.4
温度上昇 ΔTs (deg)	12.5	6.5	8.9
ΔTs/Rn (deg･m^2･MJ^{-1})	5.2	2.7	3.5

６．舗装内温度観測結果

(1) 保水性舗装と密粒度舗装の温度

図－17 に千鳥が淵で観測した日射量と国際フォーラムの北側で観測した降雨強度の時刻変化、及び有楽町における保水性舗装と密粒舗装の舗装内温度の時刻変化について一例を示す。有楽町のセンサ設置地点では、保水性舗装と密粒度舗装の施工継ぎ目を境にして設置してあり、そのため、建物等による日向日陰の日射条件が近いものとなっている。

7/24 は曇天で日射量が少なく、保水性舗装、密粒度舗装ともに舗装内温度が高くなっていない。7/24 から 7/25 にかけて夜間散水が行われ、7/25 の昼間はやや曇りがちの天気であったが、保水性舗装と密粒度舗装の舗装内温度の最高値は、7.1 度の差があった。7/25 の夜から 7/27 の早朝にかけて雨となり、降雨後の保水性舗装と密粒度舗装の舗装内温度の最高値は、9.6 度の差があった。翌日の 7/28 では、最高値の差は、4.9 度となった。なお、7/26 22 時 30 分頃から 7/27 3 時 30 分頃の間に密粒度舗装の温度のみが上昇しているが、センサ設置地点には、深夜に客待ちのタクシーが並ぶことがあり、保水性舗装の温度だけが上昇する場合や密粒舗装の温度だけが上昇する場合がある。

図－17 降雨強度、日射量、舗装内温度の時刻変化

(2) 保水性舗装の路面温度上昇抑制効果

表－14～表－19 に有楽町と丸の内における保水性舗装と密粒度舗装について舗装内温度の最高値とその差を示す。気温条件と日射条件を合わせるため、気象官署(大手町)の最高気温が 30℃以上かつ千鳥が淵で観測した日射量の日積算値が 20MJ/㎡以上の晴天日について整理した。

有楽町では、夜間散水によって保水性舗装が密粒舗装よりも平均で 7.3 度、最大で 8.4 度、降雨後の晴天日の場合、平均で 8.0 度、最大で 9.6 度、低くなった。また、散水しない場合でも平均で 5.1 度、最大で 6.5 度、密粒舗装よりも低くなった。なお、備考欄の駐車可能性ありは、温度センサの上に駐車車両があったため温度が低下した可能性があることを示している。

丸の内では、夜間散水によって保水性舗装が密粒舗装よりも平均で 5.8 度、最大で 8.5 度、降雨後の晴天日の場合、平均で 4.4 度、最大で 5.4 度、密粒舗装よりも低くなった。また、散水しない場合でも、平均で 1.9 度、最大で 4.1 度、密粒舗装よりも低くなった。ただし、保水性舗装と密粒度舗装のセンサの位置が離れており、日射条件が異なっているので、直接的な比較ができないことに留意する必要がある。

表－14 路面温度上昇抑制効果
（有楽町　夜間散水）

夜間散水 晴天（日積算日射量 20MJ/㎡以上）				
日付	保水 最高温度	密粒 最高温度	差	備考
8/3	41.2	48.5	7.3	
8/7	43.1	50.8	7.7	
8/19	43.2	50.5	7.3	
9/3	40.4	48.8	8.4	
9/18	41.0	46.9	5.9	
平均	41.8	49.1	7.3	

表－15 路面温度上昇抑制効果
（有楽町　降雨後）

降雨後 晴天（日積算日射量 20MJ/㎡以上）				
日付	保水 最高温度	密粒 最高温度	差	国際ﾌｫｰﾗﾑ北 雨量計
7/27	43.9	53.5	9.6	総降雨量 72.2mm
8/14	40.1	47.9	7.8	総降雨量 22.4mm
9/12	41.4	48.1	6.7	総降雨量 25.2mm
平均	41.8	49.8	8.0	

表－16 路面温度上昇抑制効果
（有楽町　非散水）

非散水 晴天（日積算日射量 20MJ/㎡以上）				
日付	保水 最高温度	密粒 最高温度	差	備考
7/18	42.3	48.0	5.7	
7/28	45.7	50.6	4.9	
7/29	(42.8)	50.4	(7.6)	駐車可能性あり
8/4	47.0	51.1	4.1	
8/6	47.8	54.0	6.2	
8/17	(45.3)	(51.9)	(6.6)	前々日雷雨※1
8/20	45.7	52.1	6.4	
8/21	43.9	47.2	3.3	
8/29	43.9	47.4	3.5	
9/1	(45.7)	(50.0)	(4.3)	前々日小雨※2
9/8	(41.7)	(47.7)	(6.0)	前日小雨※3
9/14	41.2	47.7	6.5	
平均	44.7	49.8	5.1	

※1　国際ﾌｫｰﾗﾑ北側雨量計　総降雨量　15.2mm
※2　国際ﾌｫｰﾗﾑ北側雨量計　総降雨量　5.4mm
※3　国際ﾌｫｰﾗﾑ北側雨量計　総降雨量　2.6mm

表－17 路面温度上昇抑制効果
（丸の内　夜間散水）

夜間散水 晴天（日積算日射量 20MJ/㎡以上）				
日付	保水 最高温度	密粒 最高温度	差	備考
8/3	(41.0)	52.4	(11.4)	駐車可能性あり
8/7	47.9	55.3	7.4	
8/19	44.5	53.0	8.5	
9/3	48.8	51.3	2.5	
9/18	44.6	49.5	4.9	
平均	46.5	52.3	5.8	

表－18 路面温度上昇抑制効果
（丸の内　降雨後）

降雨後 晴天（日積算日射量 20MJ/㎡以上）				
日付	保水 最高温度	密粒 最高温度	差	国際ﾌｫｰﾗﾑ北 雨量計
7/27	48.4	53.2	4.8	総降雨量 72.2mm
8/14	47.0	52.4	5.4	総降雨量 22.4mm
9/12	46.4	49.5	3.1	総降雨量 25.2mm
平均	47.3	51.7	4.4	

表－19 路面温度上昇抑制効果
（丸の内　非散水）

非散水 晴天（日積算日射量 20MJ/㎡以上）				
日付	保水 最高温度	密粒 最高温度	差	備考
7/18	50.4	53.9	3.5	
7/28	51.3	53.9	2.6	
7/29	48.6	52.7	4.1	
8/4	(38.4)	53.4	(15.0)	駐車可能性あり
8/6	54.1	(57.3)	(3.2)	技術部密粒散水
8/17	(49.7)	53.9	(4.2)	駐車可能性あり 前々日雷雨※1
8/20	53.9	54.9	1.0	
8/21	49.7	51.2	1.5	
8/29	46.4	(47.6)	(1.2)	駐車可能性あり
9/1	(47.3)	51	(3.7)	駐車可能性あり 前々日小雨※2
9/8	(49.0)	51.2	(2.2)	駐車可能性あり 前日小雨※3
9/14	52.4	51	-1.4	
平均	51.1	52.9	1.9	

※1　国際ﾌｫｰﾗﾑ北側雨量計　総降雨量　15.2mm
※2　国際ﾌｫｰﾗﾑ北側雨量計　総降雨量　5.4mm
※3　国際ﾌｫｰﾗﾑ北側雨量計　総降雨量　2.6mm

７．まとめ

①散水とは無関係の位置における基準となる気温を設定して、その基準気温との気温差をとり、散水日と非散水日の平均気温差を算出し、さらにその差をとることによって散水による気温の変化を評価した。その結果、都道 402 号線の散水路線では保水性舗装への夜間散水によって、平均として気温の低下が－0.3 度程度という結果になった。ただし、基準気温と散水路線の気温差のデータはばらつきが大きく、自動車排熱などの人工排熱や風の流れなどの影響を含んだ結果と考えられ、気温の低下が過小評価されている可能性が残っている。

②散水によって気温が低下したのかを確認するため、基準気温との気温差をデータとして、散水日と非散水日の二つの母集団について両側検定、有意水準 5%で平均の差の検定を行った結果、都道 402 号線沿いの観測地点では、夜間散水によって 3:00～6:00 の気温が低下していることが統計的に確認できた。

③気温と同様の評価方法で夜間散水による湿度増加を算出した結果、402 号線の散水路線では、平均としての相対湿度の増加は、2%程度という結果となった。

都道 402 号線の散水路線では、散水によって 1:00～6:00 の相対湿度が増加していることが統計的に確認できた。

④渦相関法によって保水性舗装からの潜熱を観測した結果、散水日では、非散水日に比べて潜熱が多くなっており、保水性舗装に含まれる水分が蒸発していることが確認できた。また、降雨から 2 日目でも蒸発を継続していた。

⑤渦相関法による観測の結果、散水日では、顕熱量の配分が潜熱量に移っており、散水することによって大気を温める顕熱を減らしていることが確認できた。

⑥気象官署(大手町)の最高気温が 30℃以上かつ千鳥が淵で観測した日射量の日積算値が 20MJ/㎡以上の晴天日について、有楽町と丸の内における保水性舗装と密粒度舗装の舗装内温度の最高値を比較した。その結果、有楽町では、夜間散水によって保水性舗装が密粒舗装よりも平均で 7.3 度、最大で 8.4 度、降雨後の晴天日の場合、平均で 8.0 度、最大で 9.6 度、低くなった。また、丸の内では、平均で 5.8 度、最大で 8.5 度、降雨後の晴天日の場合、平均で 4.4 度、最大で 5.4 度、低くなった。

謝辞

本観測にあたり、観測場所の提供を日比谷公園管理所から頂きました。気象官署(東京)のデータは気象庁の気象月報を使用しました。ここに記して感謝いたします。

参　考　文　献

1) 小作好明、廣島実、松村真人、中村正明(2004)、保水性舗装を施工した汐留地区における観測及び測定結果、平 16.都土木技研年報、291-302

2) 小作好明、廣島実(2006)、汐留における気温観測、平 17.都土木技研年報、239-244

3) 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