

打ち水による熱環境緩和作用

Mitigation Effects of Thermal Environment by Watering

加藤拓磨¹・手計太一²・土屋修一³・山田正⁴

Takuma KATO, Taichi TEBAKARI, Shuichi TSUCHIYA, and Tadashi YAMADA

¹正会員 工修 中央大学理工学部 (〒112-8551 文京区春日 1-13-27)

²正会員 博士(工学) 福岡大学工学部 (〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

³正会員 博士(工学) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部水資源研究室
(〒305-0804 つくば市大字旭 1)

⁴フェロー会員 工博 中央大学理工学部土木工学科 (〒112-8551 文京区春日 1-13-27)

We carry out the microclimate field observation collaborated closely with local residents in the downtown of Tokyo in order to study the effect of watering on urban climatic environment. Local residents sprinkled recycled water which was rainfall and/or bath water in summer. Then we measured air temperature, humidity, solar radiation, aerosol number, wind velocity and wind direction all the day. We could observe atmospheric phenomena before/after watering. The following conclusions were obtained: 1) Air temperature at almost all observation stations were started to decrease immediately after watering started. Area-averaged air temperature declined by 0.5 deg. C. After Watering, it took an average time of 60 minutes to relapse to the air temperature immediately before the sprinkling. 2) Surface temperature of roadway decreased from 50 deg. C to 40 deg. C compared between before and after Watering. Assuming the surface of roadway could be black body, long-wave radiation declined from 620 W/m² to 510 W/m² compared between before and after watering. Heat environment mitigation action by watering could be divided into "fall of air temperature" and "restraint of radiation".

Key Words : *Uchimizu , Watering , Heat Island , Thermal Environment , Micro Climate*

1. はじめに

地球温暖化現象とヒートアイランド現象に伴い世界の気温は上昇の一途をたどっていると多くの科学者が示唆している。気象庁は 2007 年 4 月より日最高気温 35 以上の日を猛暑日と定義した。2007 年 8 月 16 日には埼玉県熊谷市と岐阜県多治見市において最高気温 40.9 を観測し、国内最高気温の記録を更新するなど、熱環境の悪化は肌で体感できるものであるとともにメディア報道によりヒートアイランド現象は専門家だけの用語ではなく一般常識となってきた。

国土交通省¹⁾は都市の熱環境緩和を目的として人口排熱の低減、地表面被覆の改善、都市形態の改善、ライフスタイルの改善などのヒートアイランド現象対策を講じている。環境省は 2005 年より「地球温暖化防止のための国民運動」(愛称: チーム・マイナス 6%) を開始し、官民一体となり、クールビズの呼びかけや省エネ機器への買い替え促進など、国民のライフスタイル・ワークスタイルの改善キャンペーンを行っており、個々でできる対策の奨励をしている。これらの活動により熱環境問題に対する国民の意識は高まりつつある。

本稿で観測対象とした「打ち水大作戦」は個人レベルで熱環境を緩和させるという市民参加型イベントとして行われている。この「打ち水大作戦」という社会実験はNPO法人日本水フォーラムが主催し、2003年から5年間行われている。雨水や残り湯などの二次水を利用し、市民が各々で打ち水することによって気温を低下させようという試みである。年々、打ち水イベントの箇所、回数は増加し、2005年以降では日本のみではなくヨーロッパでも行われた。

著者ら²⁾³⁾は 2003 年より毎夏、打ち水の観測、数値計算を行っている。2003 年、2004 年には東京都墨田区東向島地区の住民の協力を得て打ち水実験が行われ著者らはその観測を行った。2003 年の観測では打ち水エリア全体における平均気温差は打ち水後の方が 0.5 程度低かった。数値計算では東京 23 区内の約 40%で打ち水を行う条件下で計算を行った結果、打ち水による気温低下量は 2~2.5 程度であることがわかった。2004 年の観測では打ち水継続時間、打ち水地点からの距離と気温低下量の関係を示した。本稿では 2004 年における打ち水実験を中心とした観測結果と打ち水の熱環境緩和効果のメカニズムについて言及する。

2. 観測概要およびデータ処理

(1) 観測概要

著者らは 2003 年より打ち水による熱環境緩和効果を評価するため表-1に示す打ち水イベントに参加するとともに計測を行ってきた。本稿では 2004 年 8 月 18 日から 25 日までの 8 日間、東京都墨田区東向島 1~3 丁目(実験対象エリア面積約 299000 m²)で行われた打ち水実験について示す。観測対象地域を図-1に示す。この地域は、いわゆる下町と呼ばれる地域で町会、商店街組合を中心として、打ち水に意欲的に参加・協力している。また、この地域は低層密集住宅地域で火災時に消防車が侵入することが困難であり、その一助として墨田区は雨水利用促進助成制度を設けて一般家庭に雨水貯留施設(天水樽)の設置を推進・支援している。熱環境問題を市民みんなで考えるという「打ち水大作戦」の趣旨から打ち水に使用する水は雨水などの 2 次水でなければならず、打ち水を行うのに適したこの地域を重点地区として実験が行われた。実験期間中の各日で打ち水が住民により道路、庭、マンションの屋上などで行われた。地元町内会、組合による事前の呼びかけ、当日の町内放送により実験地域内で最大限に打ち水をする事となった。実験期間中に打ち水が行われた時刻を表-2に示す。打ち水は、気温が上昇傾向にある午前中(9:00)、ピークあるいは高温となる正午(12:00)、下降傾向となる夕方(16:00)に行われ、それぞれの時間帯を各日で 1 回あるいは 2 回行われた。打ち水イベントとして 18 日、25 日に第一寺島小学校(Point-A)の校庭で打ち水が行なわれた。このイベントは小学校グラウンド内で行われ、小学生を含む約 200 人が参加し、打ち水とともに消防隊がポンプを用いて小学校のプールの水をグラウンドへ散水を行った。

観測は図-1に示すように打ち水の影響を受ける範囲内として第一寺島小学校(Point-A, 4 階建)、墨田高校(Point-B, 4 階建)、打ち水の影響範囲外として言問小学校(Point-C, 3 階建)、第二寺島小学校(Point-D, 4 階建)、第三寺島小学校(Point-E, 4 階建)のそれぞれの屋上、百葉箱で、総合的な気象観測を行い、打ち水実験期間中連続観測をした。各地点での観測項目を表-3に示す。また打ち水が行われると想定される地域内の 86 ヶ所に温湿度計を設置した。H で示す地点(48 ヶ所)では、連続観測を行い打ち水実験期間中、温湿度観測を行った。V で示す地点(38 ヶ所)では集中観測として 18 日、23 日、25 日に打ち水開始時刻の前後 1 時間 30 分、計 3 時間の温湿度の観測を行った。温度の計測には白金抵抗式、湿度は静電容量式のセンサーの Onset 社及び Vaisala 社製の温湿度計を用いた。温湿度計はいずれも地上 1.5m、街中の街頭、フェンス等に設置した。温湿度計は市販のラディエーションシールドを使用すると通風性が損なわれセンサーの感度が鈍くなり、打ち水の効果を計測することが困難になるとの判断より通風性に優れたシールドを作成した。測定インターバルは打ち水前後 2 時間では 5 秒、それ以外の時間帯では 1 分で計測した。

18 日 23 日及び 25 日には 打ち水実験地区内で散水量、

表-1 打ち水観測リスト

実験日	対象地域	参加人数(推定)
2003/8/25	東京都墨田区東向島 1~3 丁目	200 人
2004/8/18~25	東京都墨田区東向島 1~3 丁目	400 人
2005/8/10	東京都千代田区丸の内 1 丁目 丸の内仲通り	500 人
2005/8/19	東京都台東区浅草 雷門・仲見世通り周辺	50 人
2007/9/8	東京都江戸川区小松川第二小学校	30 人

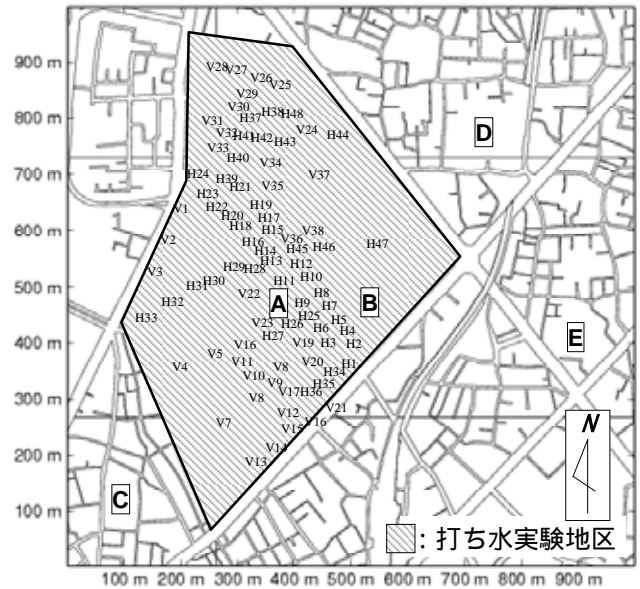


図-1 観測対象地域と観測ポイント

表-2 打ち水開始時刻

	2004 年 8 月							
	18 日	19 日	20 日	21 日	22 日	23 日	24 日	25 日
午前(9:00)								
昼間(12:00)								
午後(16:00)								

雨天により打ち水は中止、観測は実施

表-3 気象観測項目

	日射量	降雨量	風向・風速	大気圧	温湿度
Point-A					1
Point-B					
Point-C					2
Point-D					2
Point-E					2

1 通風式乾・湿球計

2 百葉箱内・外で白金抵抗式温度計・静電容量式湿度計
(百葉箱外には 8 月 23 日より設置)

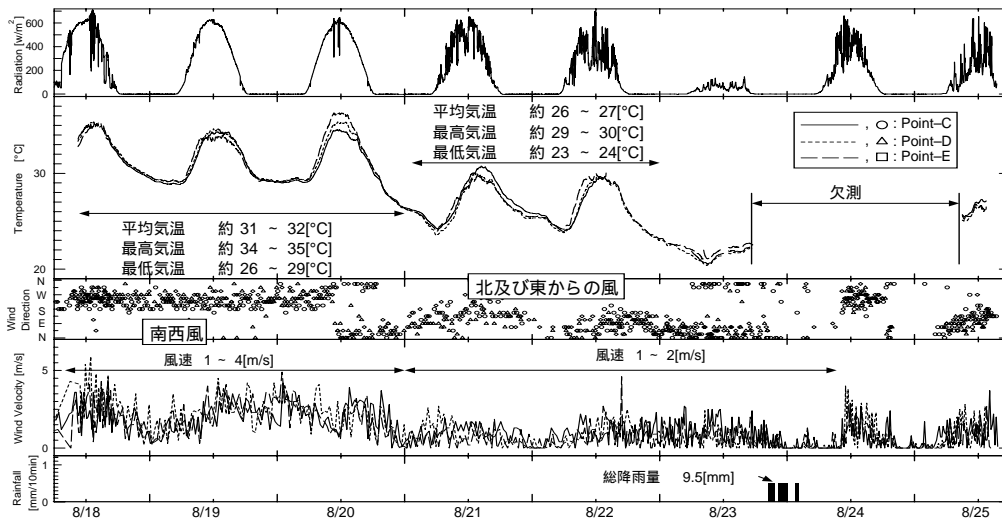


図 - 2 打ち水実験期間中の日射, 気温, 風向・風速, 降雨量の時系列(2004年8月18日から25日)

散水場所, 散水温度のヒアリング調査を行った。

(2) データ処理

解析データには測定値を1分間の移動平均化した値を使用した。これは気流の乱流変動を小さくすることと打ち水の効果の始まりが瞬間的であるため長すぎず短すぎない1分間とした。

打ち水による効果の解釈を単純化するため地表面を仮想的な厚さのない平らな面として考え, 以下の基本的な入射放射量, 熱収支式, 顕熱・潜熱 flux の次式を用いた⁴⁾。

$$R \downarrow = \sigma T_s^4 + H + IE + G \quad (1)$$

$$R \downarrow = (1 - rf)S \downarrow + L \downarrow \quad (2)$$

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (3)$$

$$IE = c_p \rho \beta C_H U (q_s - q_a) \quad (4)$$

ここで, rf はアルベド, $S \downarrow$ は下向き短波放射量, $L \downarrow$ は下向き長波放射量, $L \uparrow$ は上向き長波放射量, H は顕熱 flux, IE は潜熱 flux, G は貯熱量である。ここで σ はステファンボルツマン定数, c_p は空気の定圧比熱, ρ は空気の密度, C_H はバルク輸送係数, U は風速, T_a は気温, T_s は地表面温度, β は蒸発効率, q_s は飽和比湿, q_a は比湿である。

打ち水が人体に与える影響を見るために不快指数の式を用いた⁵⁾。

$$DI = 0.81T_a + \frac{H}{100} (0.99T_a - 14.3) + 46.3 \quad (5)$$

ここで, H は相対湿度である。

3. 観測結果と考察

(1) 天気概観

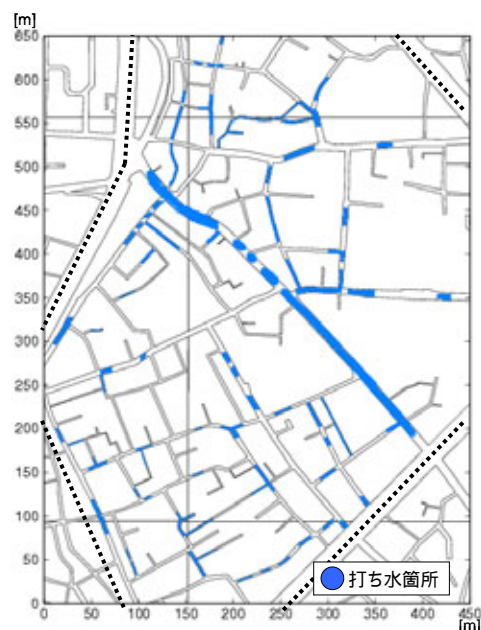


図 - 3 ヒアリング調査による打ち水散水箇所(2004年8月18日 12:00, 破線は打ち水エリア境界線)

打ち水実験期間中8月18日から25日までの日射量, 気温, 風向・風速, 降雨量の時系列を図-2に示す。風向・風速, 気温は打ち水影響範囲外の Point-C, D, E で計測したものである。気温は百葉箱内で計測した値である。18日から20日は快晴日であり日射量の変動は小さく, 21日から25日は曇りがちで日中を通して日射量の変動が大きい。風向・風速は18から20日の間, 日本海側にある台風の影響で南西あるいは西風で期間中の降雨は23日21時から24日2時まで5時間の間にあり総降雨量は9.5mmであった。雲による日射量の変動は大きく, 気温を大きく変化させる。その影響を避けて打ち水の気温低下効果を評価するため, 本稿では日中曇ひとつない快晴で日射量が打ち水開始前後1時間ほぼ一定であった2004年8月18日の解析結果を中心に示す。この日の打ち水は11:55頃より開始された。

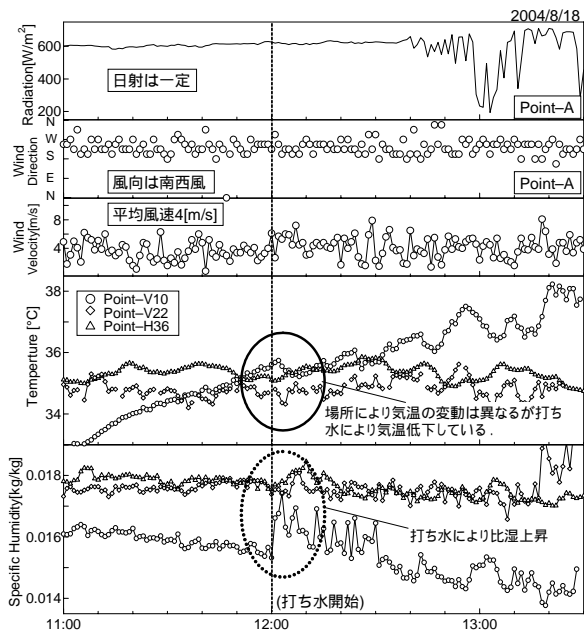


図-4 打ち水前後の日射、風向・風速、気温、比湿の時系列
(2004年8月18日 11:00~13:30)

(2) 打ち水による散水面積

ヒアリング調査より散水された箇所を示したものを図-3に示す。ヒアリング調査から得られた散水面積は約8500m²、散水量は約6.3m³、散水に使用した水の温度は平均で約30.0であった。実験地域内面積約299000m²に対する散水面積の割合は約3%、実験地域内道路面積約83200m²に対しては約11%であった。著者ら²⁾は打ち水の効果を算出するためメソスケールモデルを用いて数値解析を行った。打ち水の効果の算定条件として打ち水の対象範囲を東京23区全域とし、このうち、建物用地では敷地面積の40%相当分、道路用地のうち、不透水面の50%相当分を打ち水可能域と想定した。また、植生面・裸地面では、70%の面積に打ち水が可能と設定し、東京都23区全体のほぼ40%の面積において打ち水が正午に2日間行われる勘定とした結果、打ち水の実施の有無による気温差は大手町で2.2、練馬で2.4(いずれも2日分の平均)であった。打ち水実験では住民により最大限に散水されたが全体面積の約3%に対して我々の想定していた全体面積の約40%には到底及ばないことがわかる。それは2004年8月18日が水曜日であり平日12時頃では出勤のため自宅にいない、昼食の時間であることなどから想定したような打ち水ができないと考える。

(3) 打ち水による気温変化

打ち水開始1時間前から開始後1時間30分後までの日射、風向・風速、気温、比湿の時系列を図-4に示す。気温と比湿は打ち水地域内の86地点で代表的な挙動を示した3地点の観測値を示している。日射量はほぼ一定で、風向は南西風、風速は約4m/sであった。各地点で挙動は大きく異なり地点V22のように、打ち水開始直後から気温の低下が始まり5~15分間程で気温低下開始時の気温に戻る地点、地点H36のように打ち水箇所から離れた場所では打ち水に

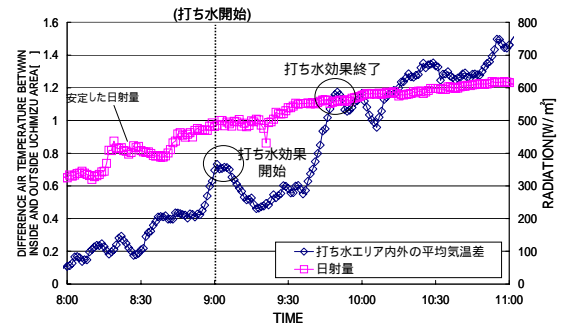


図-5 打ち水エリア内外の平均気温差と日射量の時系列
(2004年8月19日 8:00~11:00)

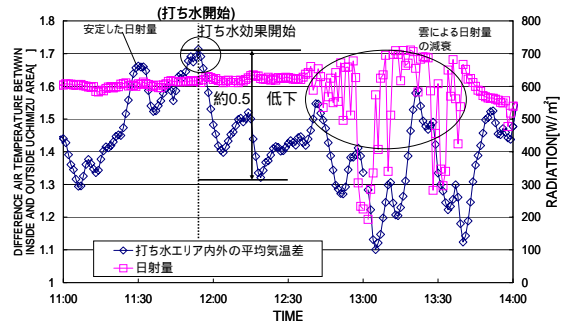


図-6 打ち水エリア内外の平均気温差と日射量の時系列
(2004年8月18日 11:00~14:00)

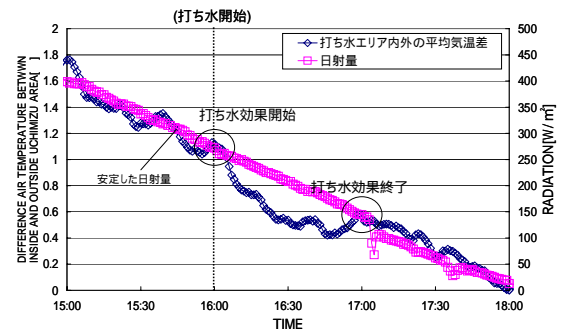


図-7 打ち水エリア内外の平均気温差と日射量の時系列
(2004年8月20日 15:00~18:00)

よる有意な温度変化が見られない地点もある。その他の温湿度観測地点でも、気温の低下量、気温低下の継続時間に差があるが、打ち水開始直後に気温の低下がみられた。また、打ち水開始後に比湿の増加が見られ0.005~0.015kg/kg増加した。

場所により打ち水による気温変動が異なるため、打ち水実験対象エリア全体でどの程度気温が低下したかを評価する。打ち水実験対象エリア内(全86地点)と打ち水対象エリア外(全3地点)で計測した気温をそれぞれ平均し比較する。図-5, 6, 7に9:00, 11:55, 16:00それぞれの時間帯に打ち水を行ったときの打ち水エリア内外の平均気温の差と日射量の時系列を示す。ただし、ここで打ち水実験対象エリア内の気温は打ち水による気温低下を感度よく捉えることを目的として通風性を上げたためセンサー部に地面等からの輻射熱が含まれるような気温になっているのに対

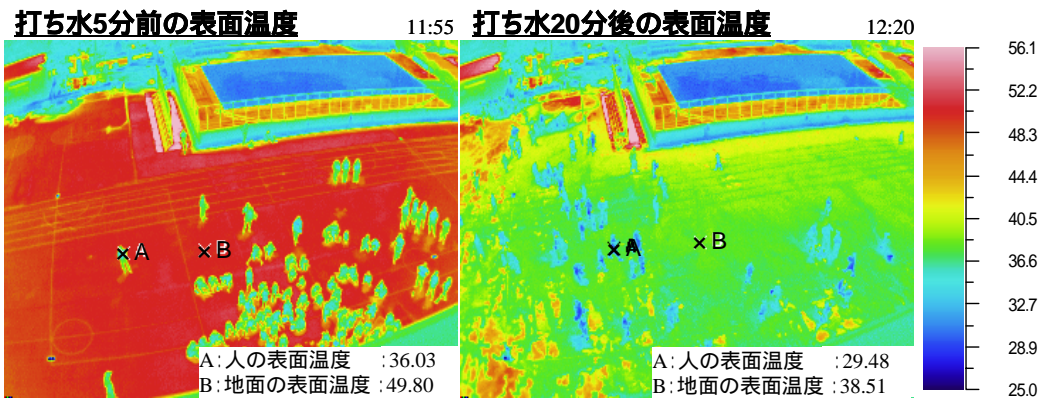


図 - 8 打ち水前後の熱画像(2004年8月18日)

して、打ち水エリア外で計測した気温は百葉箱内で計測したため輻射熱が含まれない気温となっているため、打ち水エリア内の方が平均気温は高い。打ち水がなされる前後で比較的安定的な日射量の日を示している。9:00に打ち水がなされると気温に変化が見られる。打ち水効果期間を打ち水直後から気温が安定するまでとするならば、あくまで目視であるが9:00から9:50までの間の50分間打ち水の効果があったといえる。しかし、何の効果があるかまじいがない。11:55頃の打ち水においては11:55頃より平均気温の差が0.5ほど低下している。この約0.5の低下が打ち水による効果である。日射量が雲の影響により12:45以降に乱れたため打ち水の効果時間はうかがい知れない。16:00においては16:00頃から17:00頃まで効果があったといえる。これらよりいずれの時間帯に打ち水をしても気温低下効果はあり、その冷却効果を得た大気は移流・拡散によりその場からなくなるため一時的である。観測された晴天時のデータから約1時間の効果があるものと考えられる。どの時間に散水を行っても打ち水効果期間がかわらないと仮定すれば、気温のピークを抑える日中に打ち水をするとう率が良い。

(4) 打ち水による輻射熱の変化

図 - 8にサーモグラフィで観測した打ち水前、打ち水後の人と地面の表面温度を示す。熱画像は小学校の屋上から校庭に向けてサーモグラフィで撮影したものである。熱画像右上の低温で四角いのはプールである。グランドはラバー状の材質であり、薄く見える線はトラックの線である。打ち水前、地面は約50、人の表面温度は約36である。打ち水後の状態を見ると地面の温度が約39、人の表面温度は約30となり地面の温度が10、人の表面温度が6以上低下していることがわかる。打ち水により人の表面温度が低下した。

地面からの放射量を黒体放射と仮定すると、打ち水前の地面からの長波放射量は約620W/m²、打ち水後の地面の長波放射量は510W/m²となり、その差は110W/m²となる。つまり水を撒くことにより地面から放出される熱エネルギーを抑制し、人の表面に与える熱エネルギーが減少したことにより人の表面温度が低下したと考えられる。

気温の低下が1程度以下に対して人の表面温度が6

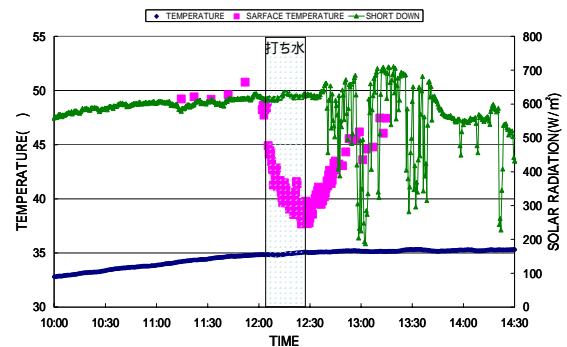


図 - 9 打ち水前後の気温(打ち水エリア内)、地表面温度、日射量の時系列(2004年8月18日 10:00~14:30)

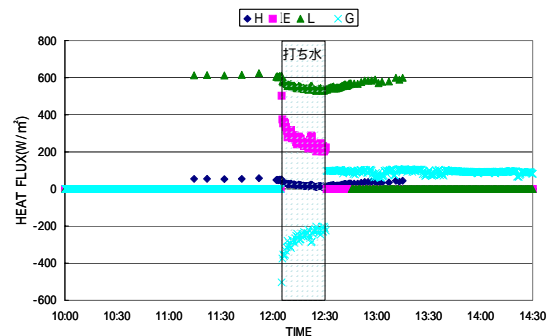


図 - 10 打ち水前後における顕熱・潜熱輸送量、地面放射量、地中伝熱熱の時系列 (2004年8月18日 10:00~14:30)

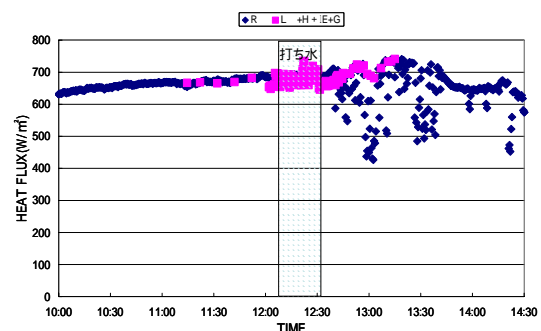


図 - 11 打ち水前後の入射放射量と顕熱・潜熱輸送量、地面放射量、地中伝熱熱の合計の時系列 (2004年8月18日 10:00~14:30)

程度大きく下がっていることから人の体感的には打ち水による気温の低下よりも地表面温度低下作用の方が大きな役

割を果たしていると考えられる。

(5) 打ち水による熱収支の変化

図-9に打ち水前後の気温(打ち水エリア内), 地表面温度, 日射量の時系列を示す。ここで気温は熱収支計算を行ううえで打ち水による気温低下は小さいものとして輻射熱の影響がない打ち水エリア外にある百葉箱内に設置した温度計の値, 地表面温度は図-8のサーモグラフィで観測された小学校の校庭の表面温度を用いる。この値を使用し熱収支計算を行った。図-10に打ち水前後における顕熱・潜熱輸送量, 地面放射量, 地中伝導熱の時系列, 図-11に打ち水前後の入射放射量と顕熱・潜熱輸送量, 地面放射量, 地中伝導熱の合計の時系列を示す。熱収支計算を行う上で 打ち水前, 打ち水の効果がある期間, 打ち水後の3パターンに分ける。においては熱収支を簡単にするため潜熱輸送量IEと地中伝導熱Gを0として与える⁶⁾。

では打ち水により地面を冷やすとともにG(マイナス, 貯熱ではなく放熱)を抑えることから $IE=G$ とおく。時間の経過とともに打ち水の効果はなくなるためGの値はIEよりも徐々に減少させる。では打ち水によりなくなったGを溜め込む作用に働く。この方法により打ち水は地面の貯熱を放出し, 地面の表面温度を冷やす熱収支のバランスの整合性が取れた。

(6) 打ち水による不快指数の変化

図-12に2004年8月18日11:00から13:00の不快指数の時系列を示す。この日の打ち水は11:55に実施された。潜熱により気温が下がると同時に水蒸気が増えるため相対湿度があがり不快指数が上がるとも考えられるが, 気温, 相対湿度どちらも微小な変化であるとともに, 気温の低下と相対湿度の増加による効果が相殺して不快指数が変化する傾向は見られなかった。

(7) 打ち水による熱環境変化のメカニズム

打ち水による熱環境緩和作用として大きく分けて「気温の低下もしくは上昇の抑制」と「輻射の抑制」の二つが挙げられる。打ち水をすることにより地表面での水の蒸発が起こる。水が蒸発するには熱エネルギーが必要であるため蒸発する瞬間に周りの大気・地面から熱を奪い, それに伴い気温が低下する。熱を奪われた地面と大気の熱交換が小さくなり気温上昇の抑制作用となる。また冷えた地面は輻射熱の放出が小さくなる。これらの様々な作用が相まって熱環境緩和の効果が生まれる。

4. まとめ

打ち水によるヒートアイランド現象緩和を目的とした社会実験が8月18~25日まで行われた。著者らは, 重点地区として打ち水が行われた東京都墨田区東向島において, 気象観測を行った。その観測結果より打ち水が都市の熱環境に与える影響について気温低減効果の評価を行った。本研

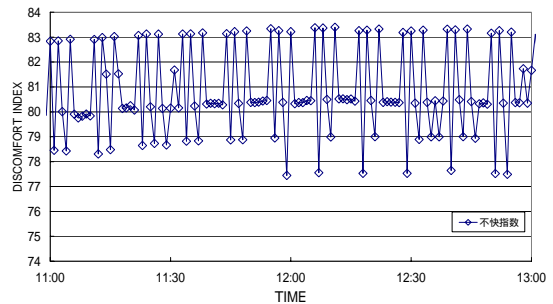


図-12 不快指数の時系列変化
(2004年8月18日11:00~13:00)

究より得られた知見を以下に示す。

- (1) 多数の地元住民の協力を得て打ち水を行い, 最大量ともいえる散水を行った結果, 散水面積は実験エリア全体に対して3%, 実験エリア内における道路面積に対して11%であった。
- (2) 日射変動の影響を避けるため, 日射量が打ち水開始前後1時間でほぼ一定であった8月18日を中心に解析対象とした, この日は11:55に打ち水が開始され, 打ち水エリア内と外で比較すると平均値で約0.5の気温低下効果が見られた。
- (3) 打ち水の効果時間はどの時間に散水しても1時間程度である。どの時間に巻いても効果が変わらないことから日中に打ち水をし, 気温のピークを抑えることが熱環境上効率がよいと考える。
- (4) 打ち水により地面からの長波放射量が減少し, 人の表面温度が36から30へと低下した。気温の変化が1以下に対して人の表面温度が6であることから, 打ち水により冷やされた地面からの長波放射量を激減させる効果が大きいことを示した。
- (5) 観測結果より打ち水による効果は大きく分けて「気温の低下もしくは上昇の抑制」と「輻射の抑制」があり, 大きな熱環境緩和効果がある。

謝辞: 本研究の遂行にあたり, 国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所, 東京都墨田区東向島中町会, 南町会, 宮元町会, 地蔵坂通り商店街振興組合の協力を得た。また近藤純正先生にご指導を賜ったことを併せてここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) ヒートアイランド対策関係府省連絡会議 ヒートアイランド対策大綱, 2007。
- 2) 狩野学・手計太一・木内豪・榊茂之・山田正: 打ち水の効果に関する社会実験と数値計算を用いた検証 水工学論文集 第48巻, pp.193-198, 2004。
- 3) 土屋修一・加藤石磨・手計太一・山田正: 打ち水による市街地の熱環境緩和効果, 水工学論文集, 第49巻, pp.367-372, 2005。
- 4) 近藤純正: 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書店, pp.350, 1996。
- 5) 国立天文台: 理科年表, 丸善株式会社
- 6) 近藤純正ホームページ: <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/index.html>

(2007.9.30 受付)