平17.都土研技年報
Annual Repourt
I.C.E. of TMG 2005
ISSN 0387-2416

12. 屋上緑化の熱環境と流出抑制の特徴

Characteristics of Heat Environment and Runoff Control on Rooftop Greenings

技術部 岩屋 隆夫 竹垣 敏郎

1. はじめに

都市特有の環境問題の一つ、ヒートアイランド現象に対して、その対策の一手法として都が推進しているのが屋上緑化である。しかし、この屋上緑化には、本質的な課題が幾つか有る。緑化の対象域は、その基本がビル、マンションなど、遮水性が高くかつ土壌も存在しない屋上、つまり植物が生育するには過酷な条件下であるから、ここには緑化植物の種類、土壌の種類、灌水の有無、土壌層の厚さ、屋上部の遮水構造への影響有無、緑化ユニットの単位当たり重量、屋上緑化の付加価値の有無などを巡る課題がある。環境局の集計によると、都管内の屋上緑化は平成16年度末で42haを数えるという。しかし、その圧倒的多数は、新・増・改築に伴う屋上緑化であり、既存建築物への屋上緑化の展開は極めて少ない。

そこで、土木技術研究所では、既存建築物への屋上緑化の推進を図るべく、緑化ユニットの荷重と灌水の問題に着目して実験を繰り返してきた。すなわち、陸屋根構造の既存建築物の屋上部の一般的な載荷基準60kg/㎡を前提にした無灌水の屋上緑化ユニットの追求である。既存建築物へ屋上緑化を導入するには、60kg/㎡という載荷基準は達成する必要があるし、屋上の大多数には灌水施設などが存在しないからである。

以上のような諸点を考慮して、土木技術研究所の構内実験は、2002年3月に開始して以降、2004年までこれを継続している。途中の2003年には環境科学研究所と農業試験場の三者による共同研究をおこなっている。

一連の実験結果とその評価は、土研ならびに各機関によって、その一部が発表されているが[1),2),3),4),5)]、ここでは一連の評価実験で得られた各種データのなかから、2003年、環境科学研究所と農業試験場の三者でおこなった共同研究の成果を通して、無灌水仕様の屋上緑化ユニット（以下、これを「無灌水型屋上緑化システム」と言う。）の熱特性と降雨の直接流出抑制効果に限定してこれを解析し、得られた結果を通して無灌水型屋上緑化の問題点に言及する。こうした評価実験を継続的に実施することによって、屋上緑化の特性が理論的に解明されていくものと考えている。

2. 実験条件

(1)試験体と測定項目

土木技術研究所と環境科学研究所、農業試験場の三者による2003年の共同実験は、６つの試験体を用意して実験している。６試験体のうち無灌水型屋上緑化システムと関係するのは表－１に示す３試験体で、試験体の緑化植物は芝に限定している。芝は軽量でかつ夏季の高温や乾燥に耐え、日常の管理手間が殆ど不要である。これが芝を採用した最大の理由で、実際、芝は各地の屋上緑化のなかで多用されている。

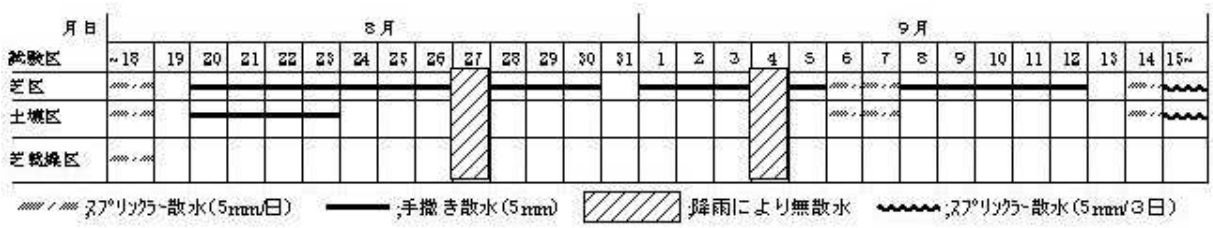
３試験体の内訳は、緑化植物を排除した土壌層だけの試験体が１（以下、これを「土壌区」と言

表－１　調査対象の試験体リスト

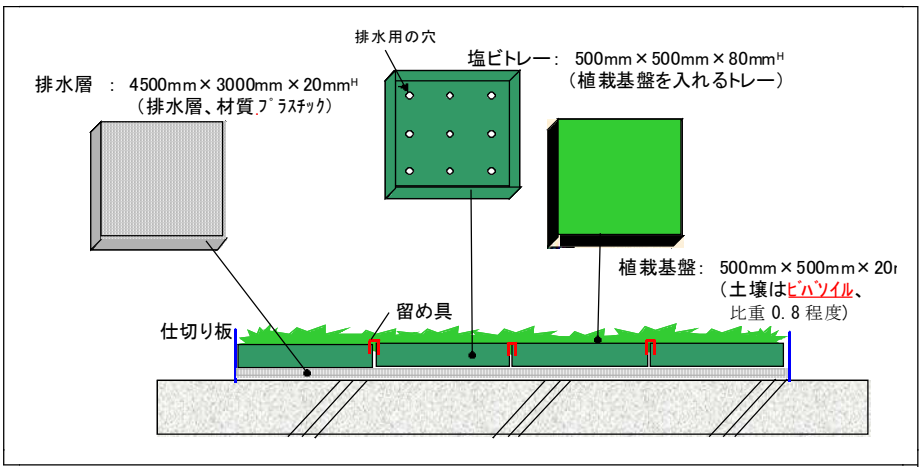
試験体名称	埴生	充填した土壌	単位当たりの試験体仕様	試験区の仕様	特別仕様
土壌区	芝	有機質人工土壌	塩ビ製ﾄﾚｲ植栽基盤	面積4000mm ×3000mm	ﾄﾚｲ底面に排水孔有
芝区	―	湿潤比重0.8程度	500mm ×500mm ×80mm ᴴ	左記試験体54個	ﾄﾚｲ底面に排水孔有
芝区(乾燥)	芝	ﾋﾞﾊﾞｿｲﾙ80mm	周囲はｱﾙﾐﾆｳﾑ製枠で固定	うち重量測定用ﾄﾚｲ1	ﾄﾚｲ底面に排水孔無 周囲枠に三角ﾉｯﾁ有

表－２　測定項目と測定機器

測定種類	測定項目	測定機器		点数	備考
外界条件	気温・湿度	温湿度計	*CVS-HMP-45D*	1	測定ダワーを設置して計測
	風向・風速	風車型風速計	*CVG-5103*	1	
	日射量(全天日射量)	全天日射計	*MS-402*	1	
	大気放射(長波放射)	精密赤外放射計	*MS-202*	1	
	雨量(給水量)	転倒ます式雨量計	*COT-34T*	1	
蒸発散・含水量	重量	電子天秤	*SB32000*	1	３試験体をスポット測定
放射特性 温熱環境	アルベド(上下短波放射) 放射率(上下長波放射)	長短波放射計	*MR-40*	1	３試験体に対し測定器を移動させて測定
	放射収支	放射収支計	*CPR-Q7*	1	３試験体
	表面温度	赤外線熱電対	*iR-t/c, SV-T-80*	1	３試験体
		サーモカメラ	*TH7102*	1	集中観測時にスポット測定
	地中温度	Ｔ型熱電対	*T-TCC*	3	３試験体，土壌上・下部＋躯体表面で３点
	伝導熱量	熱流計	*CPR-PHF-01*	3	３試験体，土壌上・下部＋躯体表面で３点
水収支	土壌水分	ＡＤＲ土壌水分計	*UIZ-SM-2X*	1	３試験体
		テンシオメータ	*UIZ-SMT10*	1	２試験体（芝区・芝乾燥区）
	表面流出量	三角堰		1	１試験体（芝乾燥区）
		超音波水位計	*UIZ-LS50*	1	
データ収録	データロガー	マイクロロガー	*C-CR10X*		連続計測項目
		データロガー	ｻｰﾓﾀﾞｯｸ *EF*		集中計測時

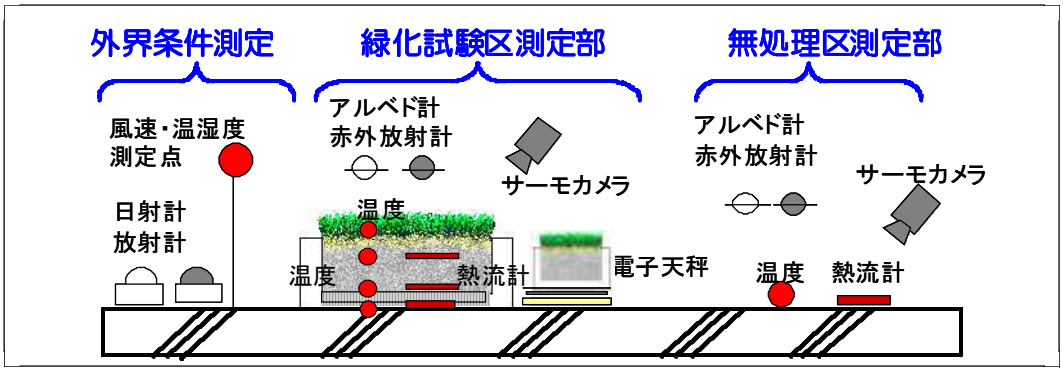


図－１　試験体への散水スケジュール

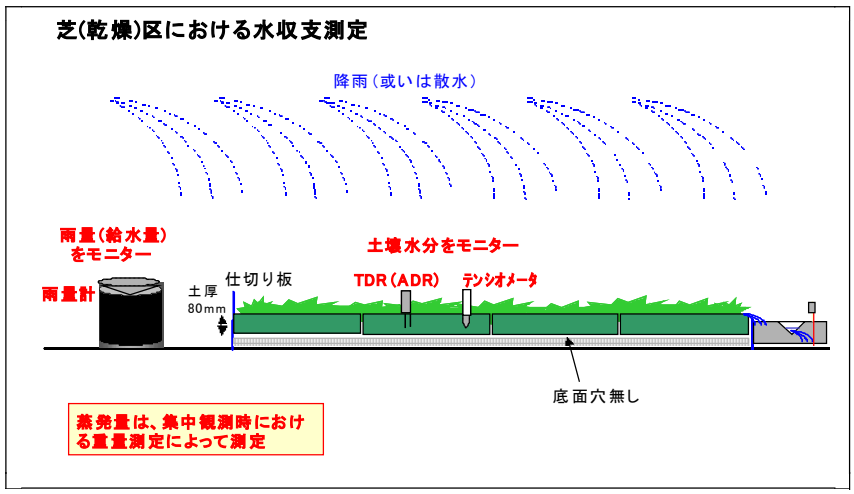


図－２　試験体の標準構造図

う。)、芝を植栽した試験体が２で、うち１体は根腐れの防止と土壌層の保水性を検証するために試験体底部に欠孔を開けた仕様（以下、これを「芝区」と言う。）とし、残る１体は試験体底部に欠孔を無くした仕様（以下、「これを芝乾燥区」と言う。これが無灌水型屋上緑化システムである。）で、かつ後述するように降雨後の直接流出を測定するための三角堰などを設けている。したがって、３試験体のうち芝乾燥区には初期養生を除いて人為的な灌水をおこなっていない。試験体への人為



図－３　試験体の測定機器の測定場所



図－４　芝乾燥区の水収支の測定概念図

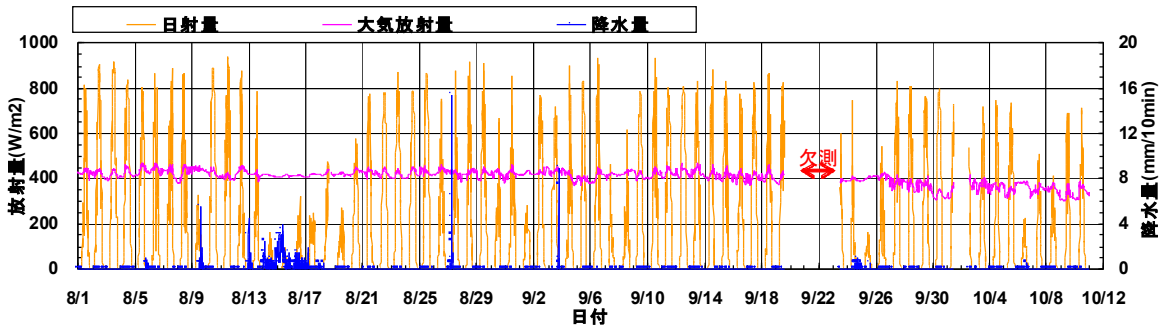
的な灌水は、降雨後を除き、図－１に見るように芝区と土壌区に限っている。他方、芝乾燥区における緑化植物の生育、維持に必要な水分は、全て降雨に求めている。無灌水型、言い換えれば天水型の屋上緑化システムである。以上の３試験区の違いを簡単に言えば、植生（芝）の有無、灌水の有無、そしてユニットの排水口の有無ということになる。図－２が各試験体の標準構造図である。

測定項目は、表－２に示すように大きく５項目としている。すなわち、試験体を取り巻く気象条件、試験体の重量から求められる蒸発散量と含水量、日射量の変化と特性を把握する目的の放射収支、試験体表面ならびに地中の温度、そして水収支である。各測定項目に使用した機器類は、これも表－２に示したとおりで、図－３は測定機器の測定場所の概念図である。なお、芝乾燥区は、先述したように、試験体末端に三角堰を設置し、これを越流する水を図－４のように超音波水位計で測定している。

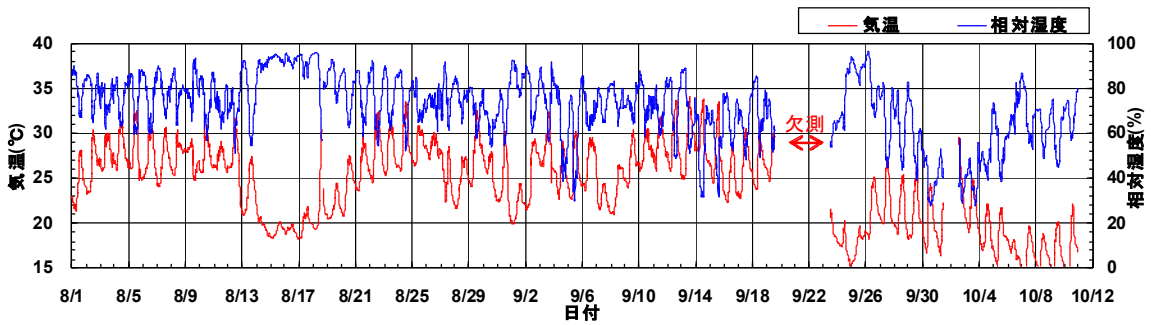
(2) 実験期間における自然条件

評価実験は、ヒートアイランド現象を考慮すべき時期、つまり夏期を中心におこなうのが適当であるから、これにしたがい試験体ならびに測定機器の設置は7月末までに完了している。その後、8月18日までは、緑化植物の養生期間として、全試験区に8時前後からスプリンクラーで5mm の散水をおこなって芝の生育と活着を促し、芝区と芝乾燥区の芝の生育状態の均一性を確認している。なお、芝乾燥区の試験体は、この養生期間に限ってユニットの底部に欠孔を設け、高温による成長阻害を防止しているが、養生完了後の実験スタート時には元の仕様に戻している。

以上の前段作業を経て試験体の各種測定は8月19日から9月20日におこなっている。したがって、今回の実験期間は1ヶ月間である。以下は、実験目標の熱特性の把握と密接に関係する水の問題で



図－５　実験期間中の気象条件



図－６　実験期間中の気象条件２

ある。

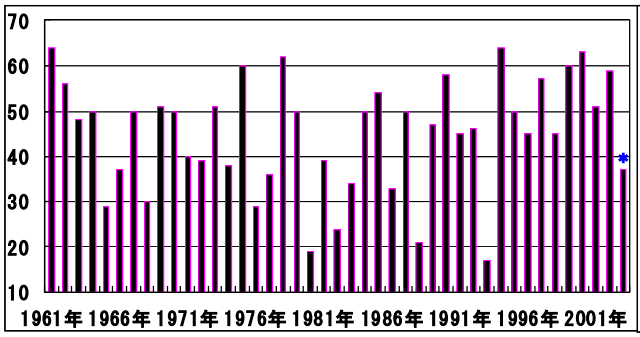
まず灌水の問題である。実験期間にあって、芝乾燥区には前述したように灌水をおこなっていない。このため、芝乾燥区の芝は何れ枯死することになる。しかし、芝乾燥区の熱特性を把握するには、これと対峙する比較対象の試験体はノーマルな状態を保つ必要がある。つまり、芝区の芝は枯死を防止する必要があるし、土壌区は乾燥を防ぐ必要があるのである。したがって、後者の２試験体には8月20日以降、前掲の図－１の散水スケジュールに見るように、降水日を除き、8時から手撒きで5mm に相当する散水をおこなっている。

次に、水の動態の問題がある。すなわち、試験体の内部を移動する水、また外部へと移動する水の問題で、これは試験体表面から外部へと流れ出る直接流出水、ユニットの底部排水口から排出される重力水、緑化植物や土壌表層からの蒸発、そして土壌中に保持される水の何れかに集約される。特に、芝区と土壌区の２試験体には、ユニット底部に排水口が存在するので、この排水口から排出される重力水は皆無ではないはずである。しかし、排水口からの排水は、灌水直後であったり、あるいは降雨直後の一時的な現象であると考えられるので、後述する蒸発散量の算出にあたっては、ユニット底部からの排出水を考慮していない。

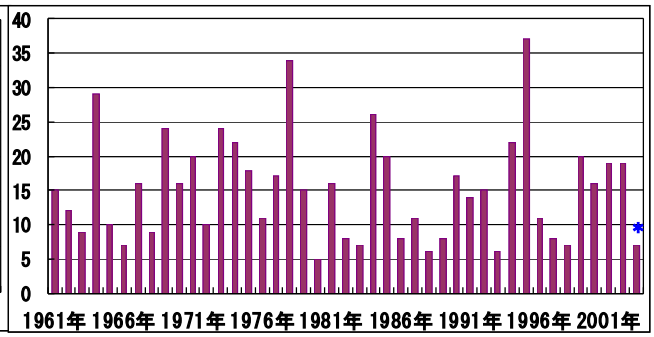
実験期間に測定した自然条件、すなわち日射量や大気放射量、降水量、気温、相対湿度の変動は図－５と図－６のとおりである。ここで気温に着目し、これを1961年から2003年に至る43年間の気象庁データ（大手町観測）からの各年夏季の真夏日の延べ日数、最高気温30℃以上の連続日数、熱帯夜の延べ日数過去の気温データと比較すると、実験年における夏季の特徴が判る。実験年の真夏日の延べ日数や最高気温30℃以上の連続日数は、図－７、図－８、図－９に見るように、平年に比べて少ない。2003年は低温傾向の夏季であったと言うことができる。

3.　無灌水型屋上緑化システムの熱特性

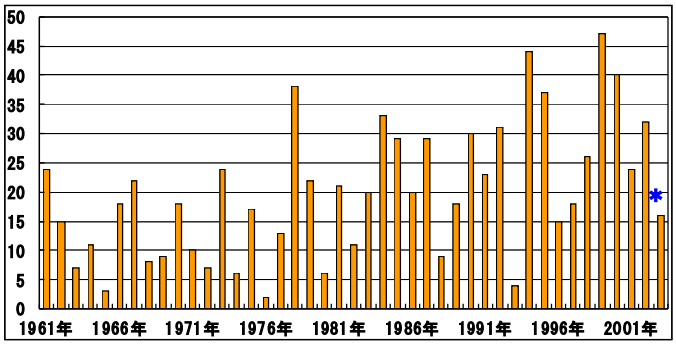
無灌水型屋上緑化システムは、どの程度のヒートアイランド緩和機能－温度の低減効果－が有るのか、またその限界はあるのか。今回の実験テーマの１つである。ここでは潜熱と顕熱という概念を用いて、以下、解析結果を潜熱、顕熱に分けて



図－７　真夏日の延べ日数



図－８　最高気温30℃以上の連続日数



図－９　熱帯夜の延べ日数

分析結果を記述する。

(1)屋上緑化システムによる外気熱の低減

屋上緑化システムによる温度低減効果を評価する手法の一つに潜熱の測定がある。緑化植物や土壌から外気へと水が蒸発散し気化することによって消費される熱、つまり気温を低減させる潜熱という熱量の測定で、これは潜熱の時間変動や試験体相互の較差を通して確認することができる。ただし、潜熱の評価をするには、これに適した日のデータを選別する必要がある。つまり、屋上緑化システムによる外気温低減効果が最も期待されるのは夏季高温時であるけれども、実験年の2003年夏季は前章で見たように、例年に比べて低温傾向であったから、冷涼な条件下におけるデータは評価の対象から外さなければならないのである。このため、ここでは図－10に示すように、実験期間にあって34.1℃という日最高気温を記録した9月13日、33.7℃という2位の気温を記録した翌14日の実験データを用いて潜熱の特徴をみていくことにする。ちなみに降雨は9月3日を最後にして、9月13日に至る10日間が無降雨であり、9月13日、14日の両日とも晴天である。

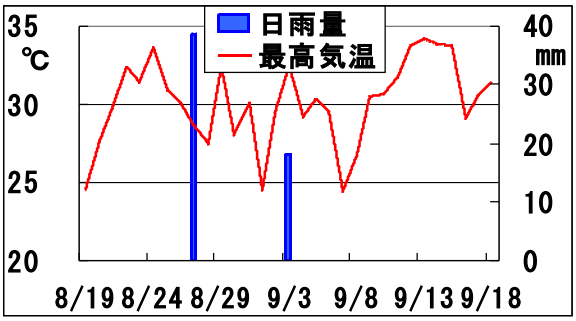
さて、潜熱は試験体の重力変化から導かれる蒸発散量 E(g/h・㎡)を用いて次式で算出することができる。得られる lE が潜熱フラックス(W/㎡)で、ワット単位の熱量として表現される。

$$lE = l \times E\ (g/h \cdot m^2)$$

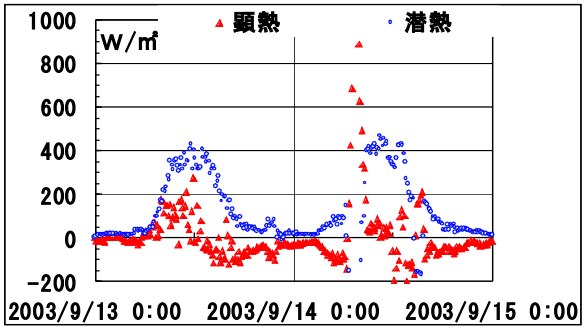
ここで l は水の蒸発潜熱(J/kg)で、これは試験体の表面温度 Ts(℃)から求められる。

$$l = 2.5 \times 10^6 - 2{,}400 \times Ts$$

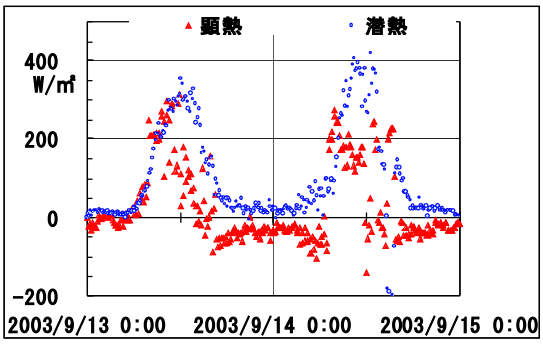
評価実験では、以上の数値のうち表面温度 Ts と E は1分間の連続計測を元にして、これを10分間平均値として求めている。図－11、図－12、図－13は、9月13日と14日を指標にして、以上の測定値とこれに基づく潜熱フラックスの計算結果を試験体ごとに図化したものである。各図を見て判ることは、３試験体は、何れも12時前後をピークにして潜熱フラックス値が高く、昼間にあって外気温低減という効果を発現していることが判る。しかし、各図の左側の潜熱フラックス値は目盛が異なり、また数値にもばらつきがあって、各試験体相互の比較が容易でないので、次に図－14、図－15、図－16を作成して、試験体ごとの潜熱フラックス値を相対比較してみる。



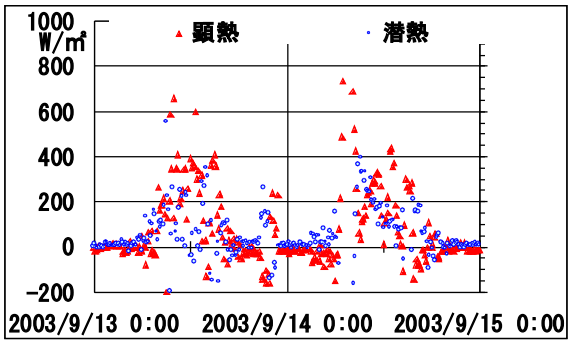
図－10　実験期間の日最高気温と日雨量



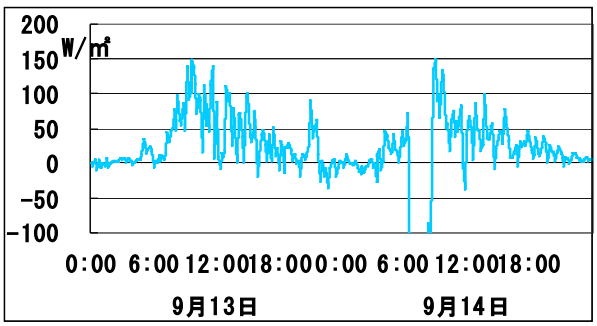
図－11　芝区の潜熱と顕熱の経時変化



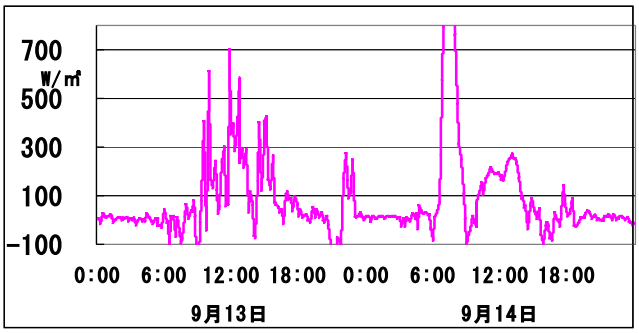
図－12　芝乾燥区の潜熱と顕熱の経時変化



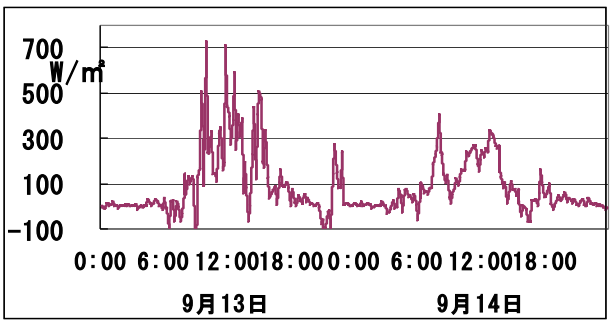
図－13　土壌区の潜熱と顕熱の経時変化



図－14　芝区と芝乾燥区の潜熱の較差

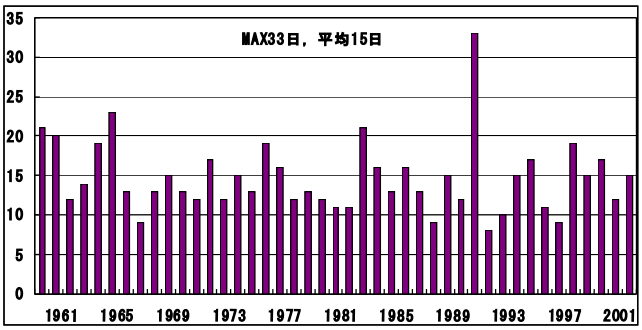


図－15　芝区と土壌区の潜熱の較差

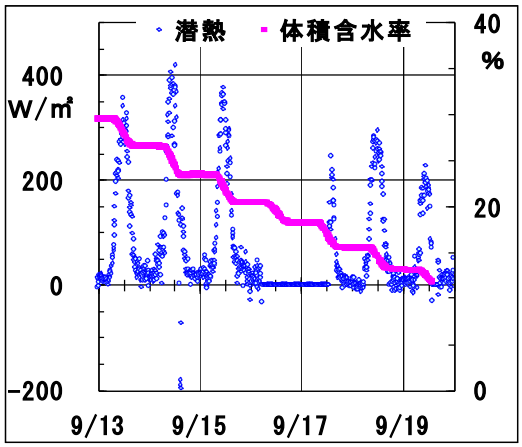


図－16　芝乾燥区と土壌区の潜熱の較差

３試験体の潜熱フラックス値は、図－14、図－15、図－16を一見して判るように、芝区＞芝乾燥区＞土壌区という序列で大きい。すなわち、適度の灌水を施した芝区が最も外気熱を低減させている。一方、屋上緑化システムにあって植生が枯死した状態と同義の土壌区は、小さいフラックス値ながらも一定程度の外気熱を低減させている。他方、灌水という日常の維持管理作業を廃した芝乾燥区は、灌水作業を継続した芝区よりも潜熱フラックス値が相対的に小さいけれども土壌区よりは大きく、絶対値として昼間ピークで芝区の85%内外の数値を示している。注目すべきは、この値が9月13日と14日、つまり連続干天が10日、11日と継続している日に記録されていることである。



図－17　1961年から2003年の間の連続干天日数



図－18　芝乾燥区／9月13日以降の潜熱の変化

そこで、連続干天の記録を過去にさかのぼって調べると、連続干天10日とか11日という日数は、1961年から2003年までの44年間、図－17に見るようにほぼ毎年のように発生していることが判る。したがって、今回の実験仕様の屋上緑化システム（土壌層厚80mm）は、無灌水であっても、毎年のように繰り返される10日とか11日という最低限の連続干天には枯死することなく耐えることが可能であると考えて良く、同時に夏季高温時における外気温低減という効果の発現が期待できると言える。実際、芝乾燥区の芝は、連続干天17日目に相当する実験終了の9月20日まで枯死することが無かった。しかし、芝乾燥区では9月13日以降、9月20日に至る間にあって、土壌含水比率と潜熱フラックス値が図－18に見るように一方向の低下傾向にあり、特に、9月17日を境にして潜熱フラックス値が急降下し、9月19日にはそれが昼間ピークで芝区の30％弱まで低下している。9月17日と言えば連続干天14日目のことである。潜熱フラックス値の急降下の境界とも考えられる9月17日正午の体積含水率は17％、pF 値（土壌の水分吸着保持力を示す数値）が2.93である。

以上の実験結果にしたがえば、無灌水型屋上緑化システム（土壌層厚80mm）では連続干天が17日間継続しようとも、緑化植物の芝は枯死することが無いけれども、体積含水率が17％、pF 値が2.93前後に至った段階で、屋上緑化システムに求められる役割、つまり夏季高温時における外気温低減という効果は激減する可能性が示唆されるのである。他方、過去の連続干天は図－17のとおり、33日という1992年の極値がある一方で、平均でも毎年15日あるから、無灌水型屋上緑化システムの効用と限界は、今後、継続的な調査研究をすすめるなかで見極めていく必要があると考えられる。

(2) 屋上緑化システムによる外気熱の上昇

屋上緑化システムは、外気の熱量を奪うのとは逆に、外気へと熱を放出することがある。屋上緑化システムによる逆効果、顕熱という外気温を上昇させる熱の発散である。屋上緑化システムを正当に評価するには、こうした顕熱の時間変動や試験体相互の較差を確認する必要がある。

潜熱フラックスと対峙される顕熱フラックス H (W/m^2)は、以下の熱収支式から算出される。

$$H=Rn-(lE+G)$$

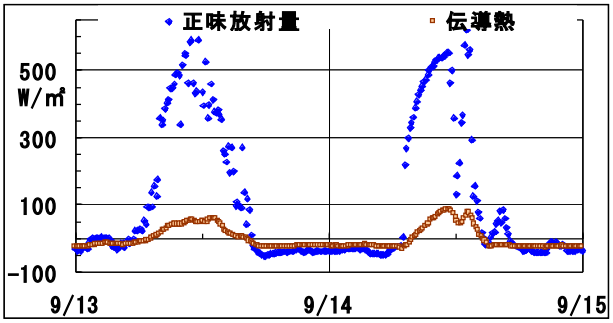
ここで Rn は正味放射量(W/m^2)、G は地中･建物への伝導熱フラックス(W/m^2)で、正味放射量 Rn は

$$Rn=(1-a)\times S\downarrow+L\downarrow-\varepsilon\cdot\sigma\ Ts^4$$

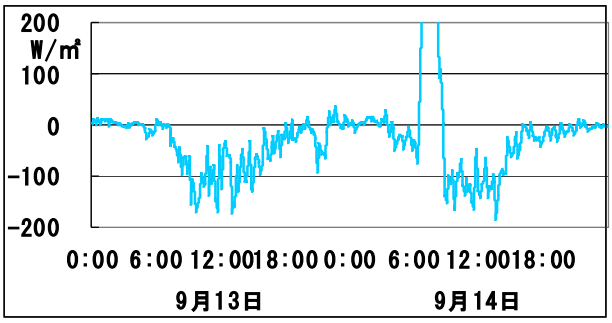
という放射収支式で算出される。a は試験体ごとの日射反射率（アルベド）を表し、試験体へと入射する日射量 $S\downarrow$（短波放射量）とこれを反射した短波反射量 $S\uparrow$ の割合から算出できる。

$$a=S\uparrow/S\downarrow$$

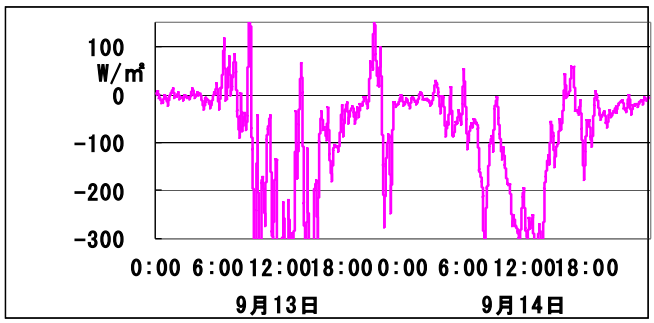
ε は試験体ごとの反射率で、日射の影響を受けない夜間にあって試験体表面の熱電対の表面温度の測定値から算出される長波放射量 $L\uparrow$ と、赤



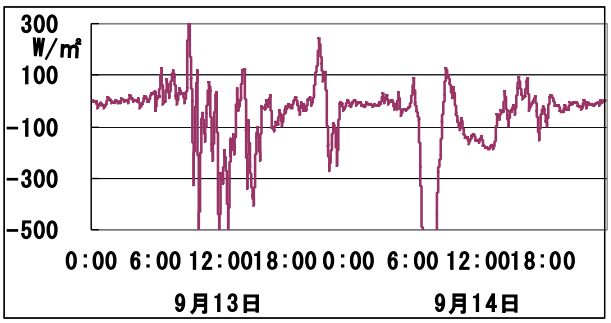
図－19　芝区の正味放射量と伝導熱の経時変化



図－20　芝区と芝乾燥区の顕熱の較差



図－21　芝区と土壌区の顕熱の較差



図－22　芝乾燥区と土壌区の顕熱の較差

外線熱電対で測定される表面温度 $Ts(K)$ から導かれる長波放射量の比から算出される。

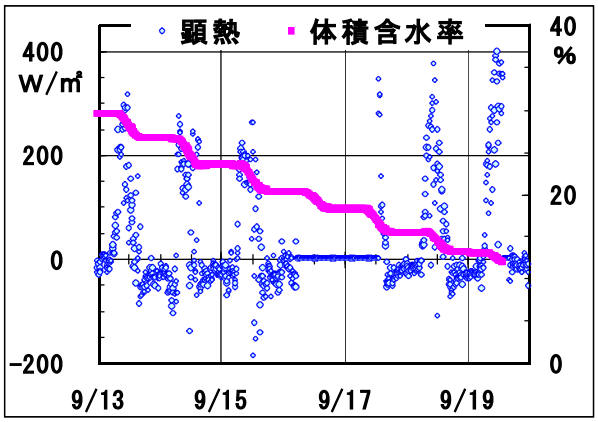
$$\varepsilon = L\uparrow / \sigma\ Ts^4$$

ただし、σ はステファン・ボルツマン定数（$5.670\times10^{-8}W/m^2\cdot K^4$）、伝導熱フラックス G は、各試験体の熱流計の測定値 G_f に熱流計の設置深さまでの蓄熱量 ΔS を加えて補正している。

評価実験では、以上の数値のうち $S\downarrow$、$S\uparrow$、$L\uparrow$、Ts、G_f は1分間の連続計測を元に、これを10分間平均値として求めている。そして、ここから得られる正味放射量と伝導熱フラックスの計算結果として、芝試験区における9月13日と14日の熱フラックス値を図－19に示す。正味放射量と伝導熱フラックス値は、このように時々刻々と変化しているけれども、伝導熱フラックス値は正味放射量に比べて振幅が小さいことが判る。

次に、以上の計算から導き出される顕熱フラックス、すなわち屋上緑化システムから外気へと発散される熱量を試験体ごとに図化したのが前掲の図－11から図－13である。屋上緑化システムは、潜熱という外気熱を奪う機能を持っている反面、このように外気へと熱を発散することがある。そして、この顕熱フラックス値は、各図に見られるように、潜熱フラックス値と概ね正と負の関係にあることが判る。しかし、潜熱フラックス値と顕熱フラックス値との関係は、厳密には必ずしも完全な逆比例の関係を保っていない。顕熱フラックス値は正味放射量と伝導熱フラックス値という変数に規定されるからである。そこで，前節と同様に各試験体の顕熱フラックス値を相対比較して、試験体の特徴をみていくことにする。

３試験体の顕熱フラックス値は、図－20、図－21、図－22に見るように、土壌区＞芝乾燥区＞芝区という序列で大きい。すなわち、緑化植物が存在しない土壌区の顕熱フラックス値が最も大きく、これに無灌水の芝乾燥区が続き、芝区が最も小さい。したがって、適度の灌水を施した芝区が外気への熱の発散が最も少ない。他方、灌水という日常の維持管理作業を廃した芝乾燥区は、芝区よりも顕熱フラックス値が相対的に大きいけれども、土壌区よりは小さい。加えて３試験体のなかで、芝区と芝乾燥区の相互較差が図－20のとおり -150W/m^2 と最も小さく、芝乾燥区は芝区の顕熱フラックス値に匹敵するような数値を示している。しかも、図中に示した観測日は、前項と同様、連続干天10日、11日という状況下にあるから、実験



図－23　芝乾燥区／9月13日以降の顕熱の変化

仕様の屋上緑化システム（土壌層厚80mm）は、無灌水であっても、毎年のように繰り返される10日とか11日という最低限の連続干天には、夏季高温時における外気への発熱現象を押さえることが期待できると言える。ただし、この顕熱フラックス値は9月13日以降、実験終了の20日至る間、図－23に見るように、一方向の増加傾向にあり、特に9月17日を境にして急増し、9月19日の昼間ピークでは芝区の6.5倍強まで増大している。顕熱フラックス値を指標にした場合であっても、潜熱のケースと同様、連続干天14日目の9月17日が芝乾燥区における顕熱フラックス値の急騰する境界になっているとみられる。この時の同日正午の体積含水率は17％、pF 値は2.93と潜熱の場合と同じである。

以上の実験結果にしたがえば、無灌水型屋上緑化システム（土壌層厚80mm）では、体積含水率が17％、pF 値が2.93前後に至った段階で、夏季高温時における屋上緑化システムからの熱発散という逆効果現象の激増する可能性が示唆されるのである。

4.　屋上緑化システムの直接流出抑制効果

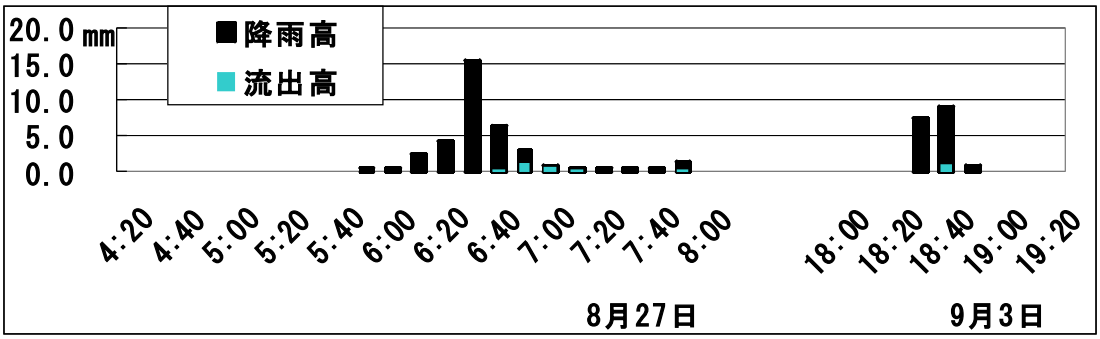
無灌水型屋上緑化システムには付加価値が有るのか無いのか。ここでは屋上緑化システムによる降雨の直接流出の抑制効果の確認を今回の実験におけるもう一つの大きなテーマとしている。

実験を通して判明した屋上緑化システムの水収支の特質は、以下の３点に要約される。流出パターンに若干の変化が見られたこと、初期降雨の降り方によって直接流出が降雨開始時間より10分から20分，遅延したこと、そして試験体では初期降雨の段階から降雨を貯留し、実験期間中の降雨では土壌層の44％相当部が貯留域になった点にある。

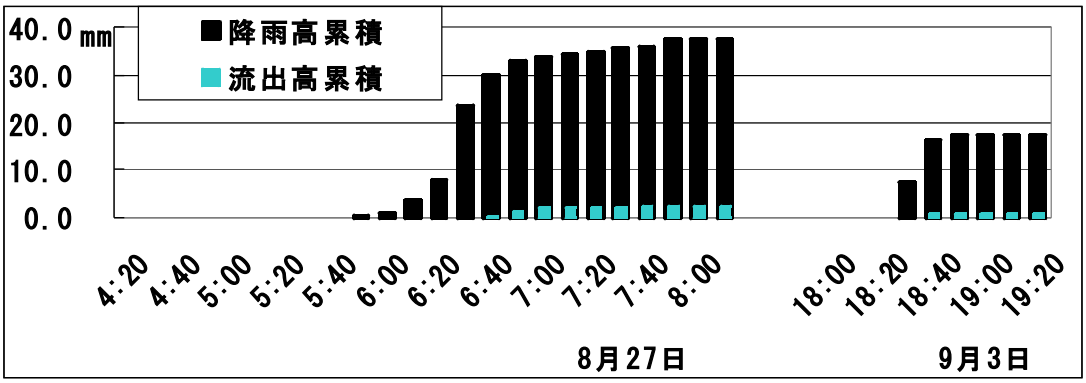
さて、実験期間中、降雨は２度にわたり記録している。8月27日4時30分から7時50分までの延べ3時間20分の間に記録された累計37.6mm の降雨、そして9月3日18時30分から20時10分までの延べ1時間40分の間に記録された累計19mm の降雨である。この２度の降雨に対し、無灌水型の芝乾燥区では直接流出を実測している。図－24は、上記の降雨とこれに伴う直接流出が記録された時間帯の前後10分から、各数値を図化したもので、図－25はその累積図である。

降雨と直接流出の関係を詳しく見ると、8月27日は、4時30分と4時50分の２度にわたり、0.05mm/10min という弱い雨が記録された後、5時50分から徐々に雨脚が強くなり、6時30分に15.50mm/10min という豪雨を記録した。時間雨量に換算すると93mm という極めて強い雨である。この時、試験体からの表面流出は、6時30分から始まった後、6時50分に1.14mm/10min という最大ピークの流出高を記録し、以降、徐々に減水して8時10分には流出が停止している。直接流出のピークは，降雨ピークの20分後に発生し、また直接流出の開始時間と強雨の開始時間との時間差は40分である。

他方、9月3日は、18時30分に突如として7.5mm/



図－24　8月27日と9月3日の降雨高と直接流出高の相関図



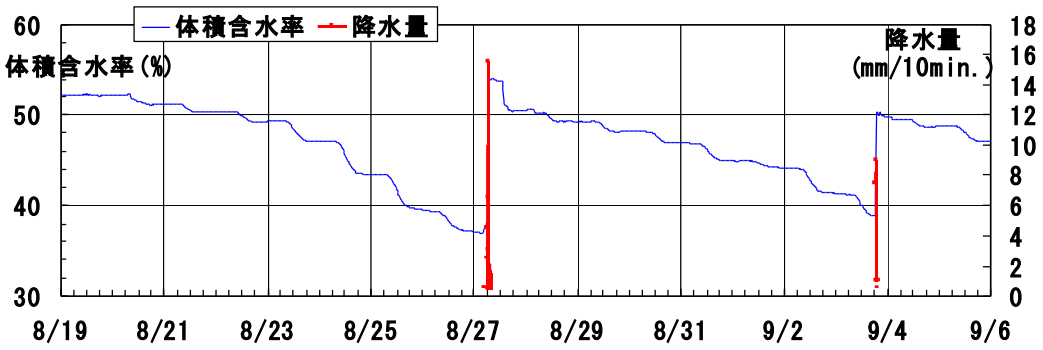
図－25　8月27日と9月3日の降雨高累計と直接流出高累計の相関

10min（時間換算45mm）という強雨が記録され、10分後の18時40分に9.0mm/10min（時間換算54mm）のピークとなって、直後の18時50分1.0mm/10min の記録を最後に降雨が終息している。この時の直接流出は、8月27日と異なり、降雨開始時の18時30分に0.01mm/10min の流出高を記録し、降雨ピークと合致するかたちで最大ピーク0.90mm/10min の流出高を記録してこれを最後に直接流出が停止している。直接流出の開始時間と強雨の開始時間との時間差は10分である。

芝乾燥区試験体では、このように、２度の豪雨に際し相異なる流出パターンが見られた。8月27日降雨では、降雨開始以降の初期流出の立ち上がりが緩慢であり、これに対し、9月3日降雨では、降雨後10分で初期流出と流出ピークが立ち上がったのである。こうした初期流出の出かたの違いの原因は、雨の降り方、つまり初期降雨の状態とこれにともなう地表部の変化にあるとみている。

これを芝乾燥区試験体の体積含水率に見ると、試験体には8月18日の灌水を最後に地表部への水分補給が絶たれ、これがため土壌層の体積含水率は図－26に見るように急降下して、降雨直前の8月27日4時20分には体積含水率が37％となっている。つまり、この時点で試験体の地表部は乾燥状態を示していたことになる。こうした状況は、9月3日の降雨時も同様で、試験体には8月27日の降雨を最後に地表部への水分補給が無く、降雨直前の9月3日18時10分に体積含水率が38％となっている。ところが、体積含水率の変化は、8月27日降雨時と9月3日降雨時とでは明らかに相違している。

8月27日の降雨では、体積含水率が降雨継続中の6時20分に45％、降雨ピークの6時30分に51％と徐々に上昇し、そして10分後の6時40分には飽和状態に近い54％近くに達している。他方、9月3日降雨では、降雨開始から10分間で試験体の体積含水率が50％という湿潤状態へと10％強上昇している。つまり、8月27日降雨では、4時30分以降、霧雨のような弱い雨が間断なく降り続き、この帰結として、試験体の地表部は弱い雨を受けて徐々に



図－26　芝乾燥区の体積含水率の変化と降雨状況

湿った状態に変化していたのである。ところが9月3日降雨には、8月27日降雨のような初期降雨が無く、このため試験体の地表部は乾燥した状態で急激な強雨を受けている。こうした地表部の乾燥状態、例えば、未舗装の地表部が長期間にわたって乾燥状態に置かれていると、急激な降雨に対して地表部には表面張力が働き、結果、降雨は容易に地下の土壌層へと浸透せずに、直接流出するようなことが発生する。9月3日降雨とこれに伴う直接流出の急激な立ち上がりは、この状況を如実に示していると考えて間違いない。これとは逆に、8月27日降雨では、初期降雨によって地表部の表面張力が解消され、この結果として、地表部が一定の飽和状態に達するまでの間は地下浸透が卓越し、直接流出が直ちに発生しなかったものとみられる。屋上緑化システムの地表部の乾燥状態は、流出パターンを規定する因子の一つになっていると言えるだろう。

一方、降雨開始から初期流出に至る時間差を考えれば、２つのケースの何れも、それが10分から20分あった。つまり、無灌水型屋上緑化システムは、豪雨に際して、10分から20分という初期流出の遅延効果を持っていたのである。

他方、無灌水型屋上緑化システムでは、このように２度の降雨によって、各々、異なる流出パターンを発生させたけれども、その直接流出高は累計で各々2.4mm、0.9mm であった。極めて小さい値である。

これが水収支の特質の３点目、無灌水型屋上緑化システムによる直接流出の抑制効果、言い換えれば降雨貯留特性である。すなわち、試験体の雨量高と直接流出高との差が貯留高で、8月27日と9月3日の２度にわたる累計37.6mm、19mm という短時間の強雨に対して、試験体では前者で35.2mm、後者で18.1mm という貯留高が示されたことになる。それは率にして93%、95%であるから、直接流出のカット率としては、大きな数値である。しかも降雨貯留は、初期降雨の段階から開始されているし、8月27日降雨では、今回の試験体の土壌層の44%相当部分が貯留容量として使われたことになる。

ところで、9月3日降雨は、短時間の強雨ではあったけれども、現実問題として、都内各地で浸水被害をもたらしている。例えば、港区白金台や高輪（古川流域）で一般家屋が床下・上浸水し、文京区千駄木や本駒込（隅田川流域）、向丘（神田川流域）では同様、一般家屋が床上浸水、渋谷区富ヶ谷（渋谷川流域）にあっても一般家屋に床下・上浸水被害を引き起こしている[6)]。

ここで、ある特定の河川流域に対し、今回の実験仕様と同様の屋上緑化システムが延べ10ha にわたり実施されたと仮定すると、上記の8月27日豪雨に際し、屋上緑化域には延べ3,520m^{3}という貯留量が得られる。50m ×35.2m ×2.0m のプール一杯分の容量である。したがって、これで河川洪水の流出ピークがカットされるとは言い難い容量ではあるけれども、様々な治水施設や治水策を総合的に実施する必要があるような河川であって、かつ密集市街地を流れる小河川流域－例えば渋谷川・古川の場合、下水道の直排区域を除く河

川集水面積22.84k㎡、市街化率83%－の治水計画を考える場合には、直接流出の抑制機能という点において、こうした屋上緑化システムによる降雨貯留が治水策に少なからず寄与できると考えられる。特に、屋上緑化システムによる降雨貯留は、豪雨の降り出しの段階－河川洪水のピーク流量の形成に敏感に反応する初期降雨－において開始されるから、これは屋上緑化システムの直接流出緩和効果を考える場合に重要な点である。

5. まとめ

本論で目標としたのは、無灌水型屋上緑化システムの熱特性と直接流出抑制効果の把握である。無灌水とは、これを繰り返せば、屋上緑化システムに対する人為的な灌水の排除を意味している。本論で得られた結論を整理すると以下のようになる。

① 無灌水型屋上緑化システム（土壌層厚80mm）では、連続干天が継続するにつれて、外気温の低減に寄与する潜熱フラックス値が低減し、また外気温を増大させる顕熱フラックス値が増大していくが、連続干天14日目までの間は、灌水を施した屋上緑化システムに匹敵するような効果－外気温の低減－が発現されていると考えられる。しかし、連続干天14日を過ぎると、潜熱フラックス値が急減し、顕熱フラックス値が急増する。各数値の変化点ともなる連続干天14日目における屋上緑化システムの体積含水率は17%、pF 値が2.93前後であるから、屋上緑化システムへの灌水は、こうした数値を目安として開始するのが最も効果的でかつ合理的であると推察される。

② 無灌水型屋上緑化システム（土壌層厚80mm）では、15.50mm/10min また7.5mm/10minという豪雨に際し、その初期流出の出かたは地表部の乾燥状態によって多少異なるけれども、各々、93%，95%に相当する降雨を貯留し、しかも初期流出は、降雨開始から10分から20分後に発生して、流出の発生時間も明らかに遅延している。そういう意味で、豪雨の降り出しの段階で降雨貯留を開始する屋上緑化システムの治水上の役割は過小評価すべきではないと考えられる。

なお、今回の評価実験は、前述したように、低温傾向の夏季におこなっている。加えて、試験体の重量は屋上部の一般的な載荷基準の60kg/㎡を超過している。このため、高温傾向の夏季に最大の効果が得られかつ軽量な無灌水型屋上緑化システムを再構築するなかで、今後、同等の屋上緑化システムの評価実験を継続し、この結果を通して、無灌水型屋上緑化システムへの灌水開始の目安－例えば連続干天の継続日数や体積含水率、pF 値－を見極めていく必要があると考えている。

謝辞

本実験の遂行には東京都環境科学研究所、農業試験場の協力を頂いた。各位には、ここに記して感謝する次第である。

参 考 文 献

1) 岩屋隆夫（2005）：無灌水を志向した屋上緑化システムの熱特性と降雨貯留特性、緑化に関する調査報告（その32）、東京都建設局、90-103
2) 竹垣敏郎(2005)：雨水保水型薄層屋上緑化への取組について、都市公園 vol168、(財) 東京都公園協会、8-32
3) 横山仁、山口隆子、石井康一郎（2004）：屋上緑化のヒートアイランド緩和効果－軽量薄層型屋上緑化に関する検討、平成16年東京都環境科学研究所年報、3-10
4) 竹垣敏郎、難波研二、増田信也、石丸仁（2003）：雨水保全型屋上緑化の取組について（その２）、平成15年東京都土木技術研究所年報、279-284
5) 石丸仁、増田信也（2002）：雨水保全型屋上緑化への取組について、平成14年東京都土木技術研究所年報、359-364
6) 東京都建設局河川部（2005）：平成１５年における水害記録、112-124