

屋外都市スケールモデルにおける 降雨中遮断蒸発実験

PRELIMINARY RESULTS OF RAINFALL INTERCEPTION OVER THE OUTDOOR URBAN SCALE MODEL

仲吉信人¹・森脇 亮²・神田 学³

Makoto NAKAYOSHI, Ryo MORIWAKI, Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1石川台4号館)

²正会員 博(工) 東京工業大学助手 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

³正会員 工博 東京工業大学助教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

The interception of rainfall was observed at an outdoor urban scale model site. The model dimensions were 50 x 100 m, with 1.5-m cubic roughness blocks arranged uniformly. The amounts of rainfall and runoff within the area of 6 x 6 m were measured. In this study, we introduced the specification of the facility and preliminary results of rain events which were obtained in September 2006. Mean rainfall intensity of the rainfall events ranged from 0.6 to 1.4 mm hour⁻¹. Under these rain events, the ratio of runoff to rainfall decreased as the rainfall decreased. This tendency was commonly found in both the total rainfall and the real-time rainfall intensity.

Key Words : *Splash droplet evaporation, Interception of rainfall, Out door scale model experiment, Dependency on Rainfall intensity, 7-hour moving-average*

1. はじめに

集中豪雨など都市スケールの水文気象において、都市の存在が直接的・間接的に重要な影響を及ぼしていることは明らかである。これまで都市の地表面から供給される水蒸気は無視できるとされてきたが、大規模ビル街からは地域冷暖房により、また住宅地域からは庭木などによって、予想以上に多くの水蒸気が放出されていることがわかってきた(神田ほか, 1997¹⁾; Moriwaki and Kanda, 2004²⁾)。一方で、降雨中に生じる遮断蒸発はその量が無視し得ないほど大きいと言われているにも関わらず(例えば森林などでは降雨中の遮断蒸発量が年間の総降雨量に対して 30-50%にも相当することが知られているが)、そのメカニズムは十分に把握されていない。最近、森林分野では、遮断蒸発は樹体表面に保水される量だけでは説明できず水滴が飛沫化することによる飛沫蒸発仮説が提案され始めている(例えば、Murakami, 2006³⁾)。都市域では表面がアスファルト・コンクリート・建材などの

人工被覆面で覆われているため、雨滴の衝突による飛沫蒸発が非常に大きくなることも予想される。降雨中の遮断蒸発によって大気中にフィードバックされた水蒸気は積雲クラスターの維持・形成メカニズムに重要な役割を担っている可能性もあり、都市域の遮断蒸発量の把握は重要である。そこで著者らは、降雨一流出過程を完全に閉じることが可能な屋外スケールモデル実験サイト上において、降雨一流出の残差から遮断蒸発量を計測するための装置を整備し、都市域の降雨中遮断蒸発量の実験を2006 年夏季から開始している。本実験施設は、浸透をほぼ無視でき、降雨中にリアルタイムで高精度に降雨一流出過程が計測できる、という大きな特長をもっている。本報ではこれまで得られたデータをもとに、1) 本実験施設における貯留量・初期浸透量の評価、2) 降雨一流出特性(履歴効果)の検討、3) いくつかの降雨イベントから算出された流出率と降雨強度の関係、を示す。実験データの蓄積は十分ではないが、本論文集の速報性を鑑みて報告することにする。

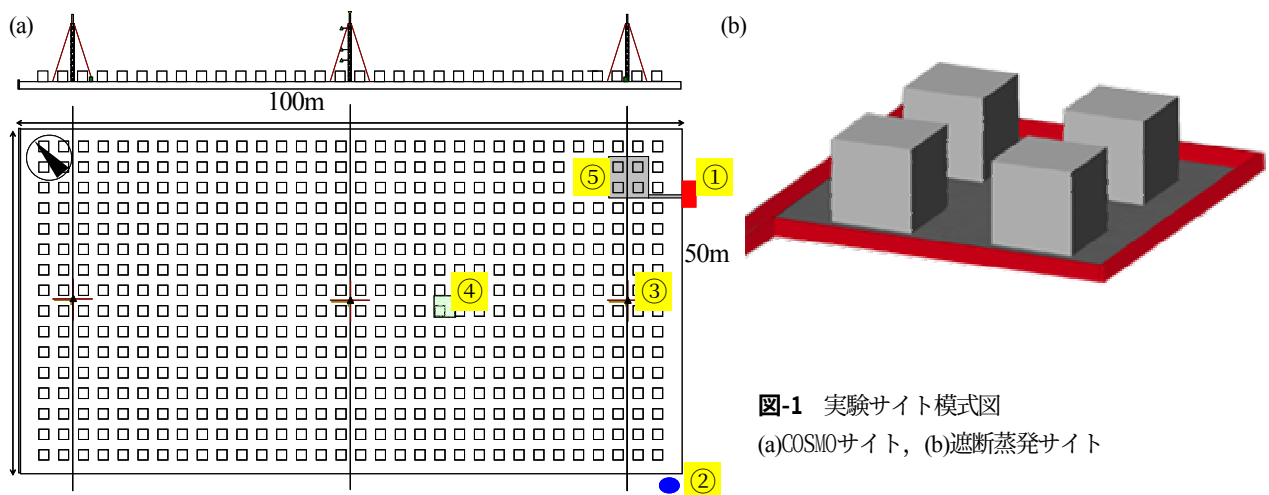


図-1 実験サイト模式図
(a)COSMOサイト, (b)遮断蒸発サイト

表-1 測定機器一覧

	測定項目	測器	型番、製造元	サンプリング周期
①	流出量	転倒マス型量水計	UIZ-TB1000、株式会社ウイジン	—
②	雨量	転倒マス型雨量計	TR-525M、Texas Electronics, inc.	—
	気温	Humidity and Temperature transmitter	Hummitter50U/50Y(X)、Vaisala	1Hz
	相対湿度			1Hz
③	風速	風向風速センサー	03001-L、Campbell	1Hz
④	表面温度	熱流板	HF-300T、Captec	1Hz

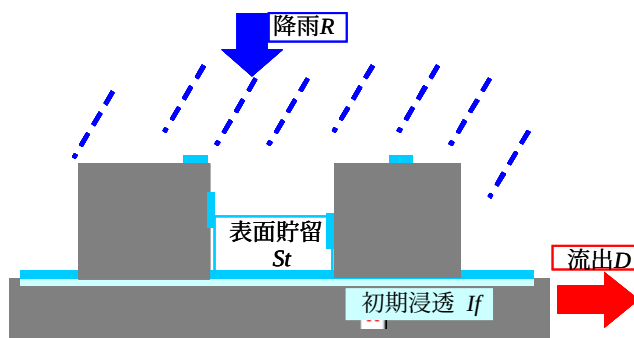


図-2 水収支概念図

状態となっており、降雨中にリアルタイムで高精度な降雨一流出過程が計測できる。

図-1中の丸囲み数字は順に、①量水計の設置箇所、②雨量計・気温計・相対湿度計の設置箇所、③風向風速計の設置箇所（2Hの高さで計測、Hはキャノピー高さを表す）、④熱流板の設置箇所、そして⑤遮断蒸発実験サイト（6m×6m四方、図-1(b)）の位置を示している（対応する計測器の一覧は表-1に示す）。

2. 実験施設の紹介と水収支の考え方

(1) 実験施設紹介

図-1に屋外都市スケールモデルサイト（以下COSMOサイトと呼ぶ）の模式図を示す。北北東から南南西に向かい1/200の下り勾配を持つ基盤（50m×100m）上に1.5m角のコンクリート立方体が建蔽率0.25、表面積率2.0で整然と並んでいる。この中の一画（図-1(a)中の灰色部分）に遮断蒸発実験施設（6m×6m四方）を整備した。十分広い範囲に渡ってコンクリートブロックが配置されているため、水平方向一様性を仮定でき、横方向からの移流の影響を無視できる。遮断蒸発実験サイトの縁には遮水板を設置し、コンクリートブロック、床面ともに防水塗装を施している。これによりサイト内への水の流入は降雨のみ、また水の流出は完全に量水計で計測可能な

(2) 水収支の考え方

COSMOサイトにおける水収支の概念図を図-2に示す。本サイトでは植物の気孔を介する蒸散など水収支における不明確なプロセスを排除することができ、完全に「降雨 R =流出 D +遮断蒸発 I 」という式を満足させることができる。遮断蒸発量について諸説定義はあるが⁴⁾、ここでは「遮断蒸発量 I =初期損失量 L_i （表面貯留量 St +初期浸透量 If ）+降雨中蒸発量 EDR (Evaporation During Rainfall)」とする。一降雨イベントを対象とする場合（4(1)で議論）は初期損失を考える必要があるが、降雨開始後ある程度時間経過したあと（4(2)で議論）は初期損失は飽和に達するため無視できる。

3. 遮断蒸発実験サイトの諸検定

本サイトの浸透性能と表面貯留量、つまり初期損失量

表-2 遮断蒸発実験サイトの検定結果

	表面貯留 [L]	表面貯留 [L m ⁻²]=[mm]	初期浸透量 [L]	初期浸透量 [L m ⁻²]=[mm]
屋根	6.0	0.67	1.0	0.11
床	12.0	0.44	3.0	0.11
壁	0.5	0.01	4.0	0.11
排水溝	1.5	—	0.0	0.00

について検定を行った。防水塗装を施したとはいえ、完全防水になっているとは考えにくく、屋根、壁、床、排水溝について浸透、貯留を調べた。表-2に検定結果を、検定方法を以下に記す。表-2において色付けされた部分は測定値を表す。定性的にはあるが検定作業での誤差の入りやすさを考慮し、0.5 L精度とした。またmm換算時には数値丸め誤差の蓄積を防ぐため雨量計の精度(0.1 mm)より一桁多い値とした。

(1) 屋根面

a) 浸透

浸透量は開口円筒内の水の損失量から算出した。使用器具はパテ、直径317 mmの塩化ビニール製開口円筒、スポンジ、ラップ用ビニール袋、バケツ、電子ばかり(精度1 g)、水2000 gである。縁にパテをつけた開口円筒を屋根面に密着させ、中に水を注入し、ある時間放置する。その間の蒸発による損失を防ぐため開口円筒上部をビニール袋でラップする。ある時間放置後、開口円筒内の水をスポンジによりバケツへと移し変えその残差より浸透量を求めた。もちろん、使用器具の前後の重量も併せて測り浸透量を求めている。またバケツへの水の移し変えに3分程度要しており、その間の蒸発を考慮するため浸透のないステンレス板上で同検定を行い、移し変え時の蒸発量を求めた。なお本検定における放置時間として30分を基本としているが、浸透の時間依存性を見るため60分、180分でも行ってみた。結果、時間依存性はほとんど見られず本サイトにおいては初期浸透のみを考慮すれば良いと言える。7回の検定により求めた浸透量の平均値より屋根面浸透量を求めた。

b) 表面貯留

屋根面に水をまき、目視にて屋根面からの溢れ出しがなくなったと判断できる状態で貯留水を素早くタオル、スポンジで吸水し、電子ばかりで吸水量を測った。2つのコンクリートブロックについて5回検定を行いそれぞれの平均値より屋根面貯留量を求めた。

(2) 壁面

浸透量については屋根面の値を面積比率換算し用いた。

表面貯留検定方法については屋根面とほぼ同じである。壁面上端より水を流し、壁面から床面への流れ出しがなくなったと判断できる状況でタオルにて壁面付着水を迅速に吸水し電子ばかりを用いて測った。計9回の検定に

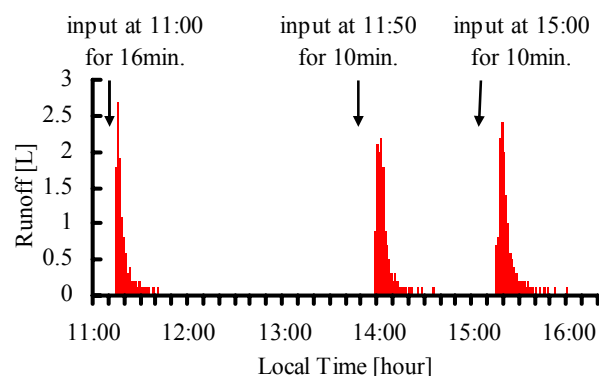


図-3 サイト流出特性

よる平均値より壁面貯留量を求めた。

(3) 床面

浸透については同じく屋根面の値を換算し用いた。

表面貯留は床面に既知量の水を流し、量水計により計測した流出量との残差より求めた。計5回の検定による平均値を床面貯留量とする。水を撒く際に飛沫が形成され蒸発が促進される状況を作らないように配慮し、また流出過程における蒸発を抑えるため検定は朝早く、夕方の涼しい時間帯、または曇りの日に行った。代表的な流出特性について図-3に示す。それによれば本サイトにおける入力開始から量水計に出力されるまでのタイムラグは十数分程度であり、また入力終了から出力終了までには1時間弱要することが言える。

(4) 排水溝

排水溝上端(排水溝長さ12m)より3 Lの水を15分かけて流した。その際スポイトを用い十分にゆっくり流し意図的に浸透されやすい状況を作った。量水計により流出量を計測し、かつ流出後の排水溝表面貯留量をタオルで吸水しそれらの合計がインプットと一致するか調べた。

4. 結果と議論

(1) 降雨イベントから算出された流出量と総雨量の関係

2006年9月6日から9月18日までの降雨の様子を図-4に示す。本研究における一降雨の取り扱いとしては、雨量計・量水計ともに移動する降雨であることを条件とし、雨量計・量水計のカウントが無くなり2時間以上経過した段階で降雨終了とする。また流出率については従来の定義式(1)とは別に本研究において新たに定義し直した式(2)を適宜用いる。式(2)は総流出量 D と表面貯留量 St を足し合わせたものを総降雨量で除したものである。これは著者らの最も関心の高い項目の一つである。総降雨量と降雨中の総蒸発量の割合 $(1-f)$ を議論する際に有用である。

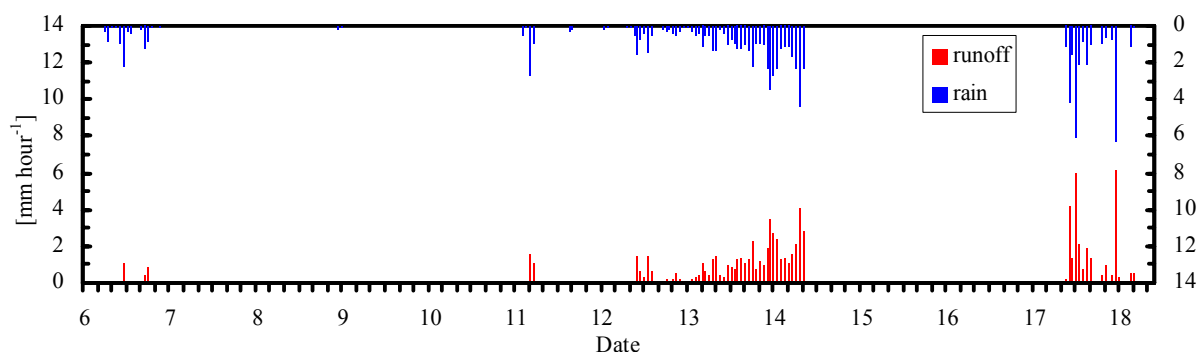


図-4 観測期間中の降雨イベント

表-3 降雨イベント毎の総降雨量，総流出量

Event number	Total rainfall [mm]	Maximum rainfall intensity [mm hour ⁻¹]	Rainfall duration [hour]	Mean rainfall intensity [mm hour ⁻¹]	Total runoff [mm]	storage [mm]	Total output [mm]	Runoff rate	
								f	f'
① 9/6	5.1	2.6	8	0.6	1.10	0.78	1.88	0.22	0.37
② 9/6	2.4	1.9	5	0.5	1.33	0.00	1.33	0.55	0.55
③ 9/11	4.2	3.1	4	1.0	2.61	0.78	3.39	0.62	0.81
④ 9/12-9/14	52.0	4.6	49	1.1	49.95	0.45	50.40	0.96	0.97
⑤ 9/17-9/18	28.8	6.4	20	1.4	27.46	0.78	28.24	0.95	0.98

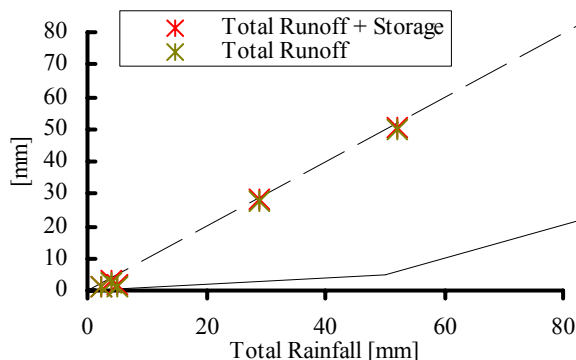


図-5 総降雨量と総流出量の関係。図中の実線は安藤・高橋（1982）による実流域の結果⁵⁾。

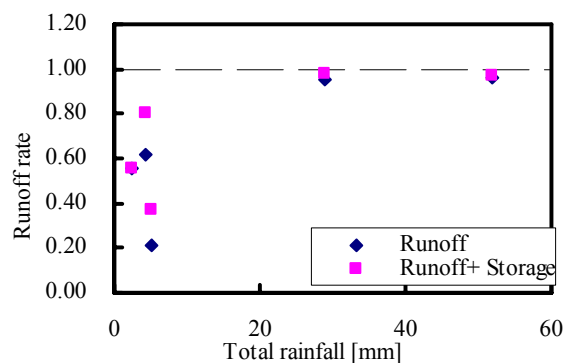


図-6 流出率の総降雨量依存性（7時間移動平均値）

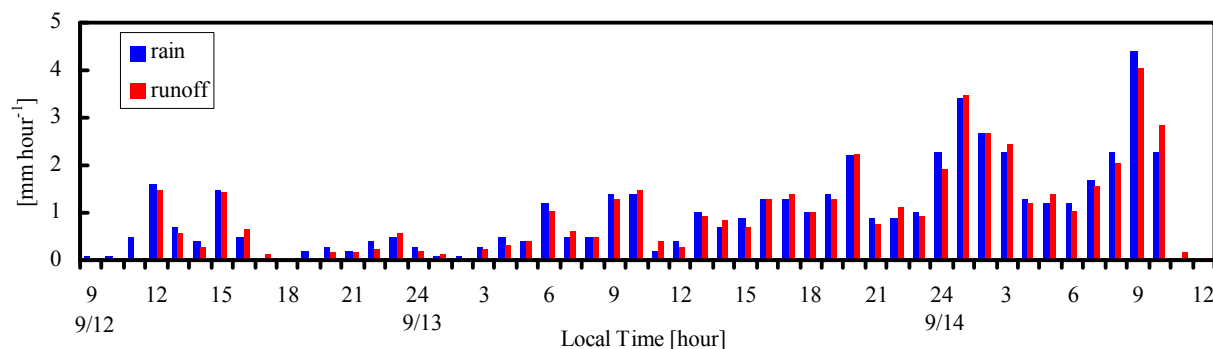


図-7 9/12から9/14の降雨イベント

従来の定義： $f = D/R$ (1)

本稿の定義： $f' = (D + St)/R$ (2)

期間中の各降雨イベントにおける総降雨量，流出量などを表-3に示す。また総降雨量と流出量の関係を図-5に示す。但し，イベント番号②は前回のイベントから2時

間という短時間経過後のイベントであり，相対湿度も90%以上と高かったので，初期損失分は飽和していると仮定し計算した。4番目のイベントについてはそれ以前に時間雨量0.2 mm程度の雨が漸続的に降っており，初期浸透分は完全に飽和に達していると仮定し計算した。表-3から明らかなように本研究で得られた降雨イベントは全体的に弱く，最大降雨強度でも6.4 mmまでしか計測

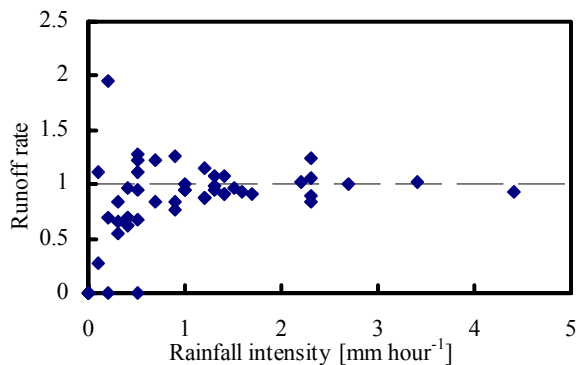


図-8 流出率の降雨強度依存性（1時間値）

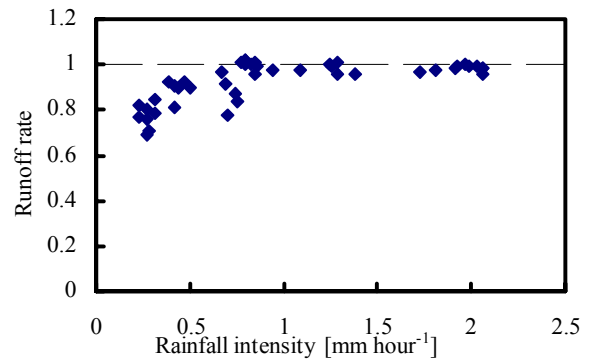


図-9 流出率の降雨強度依存性（7時間移動平均値）

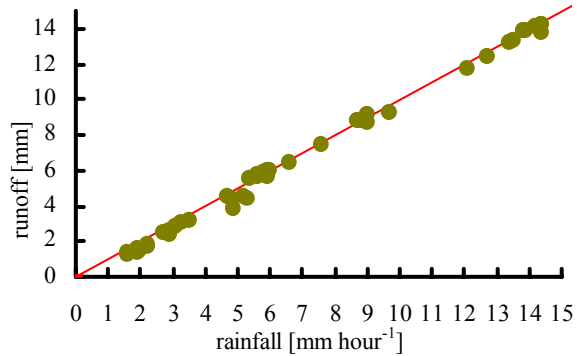


図-10 流出量と降雨強度の関係（7時間移動平均値）

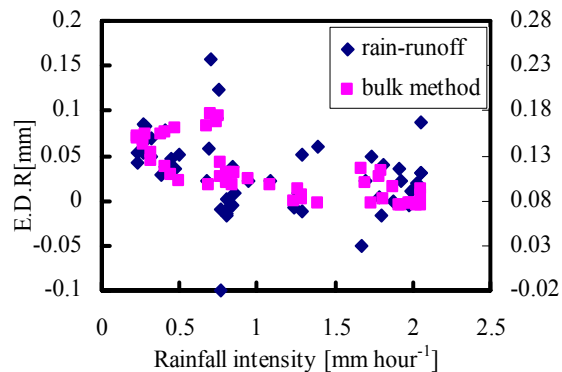


図-12 降雨中蒸発量の降雨強度依存性（7時間移動平均値）
右軸：バルク法によるEDR 左軸：残差によるEDR

されていない。図-5において、実流域（塩沢流域：安藤・高橋，1982⁵⁾）における降雨量－直接流出量の関係も参考までに示した。実流域では初期損失量が大きく、総雨量の小さい降雨イベントにおいては直接流出量が極めて小さい。それに比べ本実験施設では総雨量と総流出量がほぼバランスしているように見える（図-5）。しかし、流出率と総降雨量の関係（図-6）をみると、総雨量が小さいときは流出率が相対的に低下しており遮断蒸発の寄与が大きくなっていることがわかる。浸透がほぼ無視し得る本サイトにおいても、流出率の降雨依存性が見られることは興味深い。

(2) 降雨中の流出率と降雨強度の関係

次に降雨中のリアルタイムでの流出率の変化を見るた

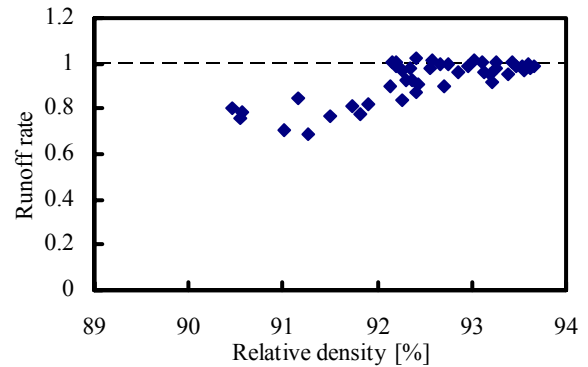


図-11 流出率の相対湿度依存性（7時間移動平均値）
最大降雨強度4.6mm，平均降雨強度1.1mmの降雨イベント

め、総降雨量が最も大きくかつ長く続いた9/12-9/14の降雨イベントについて着目する。9/12-14の降雨強度の時系列を図-7に示す。また1時間データを用いた流出率と降雨強度の関係を図-8に示す。図-8を見ると流出率が1を超えるプロットが多数見られる。これは図-3に示したような遮断蒸発サイトが持つ降雨と流出の位相差に他ならない。理論上降雨が定常であるならば、あるいは降雨－流出過程にタイムラグが存在しなければ降雨と流出の位相差は無くなるはずである。しかし、本サイトは図-3に示したような流出特性を有しており、また図-7を見ても降雨強度は時々刻々と変化している。そのため降雨強度が右肩上がりに強くなるときは流出量が小さく、右肩下がりときには流出量が降雨量より大きくなってしまっているのである。しかし降雨強度の変化は、絶対量こそ異なるものの、ある周期を持ち変化しているようにも見える。そこである時刻を中心とした7時間移動平均値をその時刻の降雨強度、時間流出量と見なすことで履歴の効果を弱めることを試みた。ここでは様々な時間での移動平均値を算出した結果、流出率が1を越えるデータが少なく、かつ降雨のダイナミクス性を損なわないことを考慮し7時間値を採用した（図-9）。図-10は7時間移動平均した流出量－降雨強度の関係図である。これまでに、降雨ごとの流出率と降雨強度の関係は研究されているが、図-9によれば降雨中においても流出率は降雨強度と密接な関係があり、降雨強度が十分に弱い場合（ $R < 1 \text{ mm hour}^{-1}$ ）

¹⁾は流出率が1より小さくなる。流出率が小さくなる原因として、1) 飛沫蒸発または飛沫フラックスによる損失、2) 地表面からの蒸発による損失、の二つが挙げられる。本降雨イベントは平均降雨強度で1.1 mm hour⁻¹、最大降雨強度でも4.6 mm hour⁻¹と非常に弱いため、この降雨強度の範囲では、1)の飛沫による損失よりも、むしろ2)の地表面蒸発による損失の可能性が考えられる。その一つの根拠として、流出率の相対湿度依存性を挙げる。**図-11**は流出率と相対湿度の関係を示した図である。降雨中においても相対湿度は100%を下回っており、相対湿度が小さいときに流出率も低下する。飽差によって蒸発が促進されることが一つの原因であろう。そこで次に降雨中蒸発量EDRについて検討するため、降雨一流出の残差から求めた蒸発量とバルク法⁶⁾から求めた蒸発量を比較する。バルク法による算出には表面温度、風速、相対湿度などのデータを使用した。**図-12**は上記二つの方法から得られたEDRと降雨強度の関係をプロットしたものである。絶対量は異なるものの、降雨強度が小さくなるにつれEDRが大きくなる傾向が共通しており、この範囲の降雨では地表面からの蒸発（バルク法）でEDRを説明できそうである。ここでバルク法による蒸発量の絶対量がずれていることに関して触れておく。絶対量がずれる要因として次のことが考えられる。バルク法に使用した気温・相対湿度計はCOSMOサイト脇の草原上に設置しており、実験サイト上に比べ気温を過小評価している可能性が高い。それがバルク法による算出値を実際のEDRより過大評価した要因の一つと考えられる。

既往の研究（例えばMarshall and Palmer, 1948⁷⁾）によれば、降雨強度が大きくなるほど、雨滴粒径、単位面積あたりへの雨滴粒子流入フラックスが大きくなり、路面衝突時の運動量が増加する。飛沫形成プロセスは完全には解明されていないが、降雨強度の増加により雨滴の飛沫化が促進されることは想像に難くない。またMurakami (2006³⁾)により、降雨時の気象条件下で半径25 μmの飛沫は十分短い時間（終端速度で3 m程度落下するのに要する時間）で完全に蒸発しうること、遮断蒸発量が降雨強度に比例するという結果が紹介されている。つまり降雨強度の増加が飛沫形成を促進し、それが蒸発することで大きな遮断蒸発量が生じ、その結果として流出率の減少が期待される。しかし、本研究でこれまで得られた降雨一流出データは、時間最大雨量でも6.4 mmであり、上記のような飛沫蒸発による損失を示唆する結果は今のところ得られていない。今後は、強い降雨イベントを含む様々な季節・降雨条件下でデータを蓄積し、飛沫量の計測も同時に行うことで、都市域における降雨・流出特性の研究をさらに推進していく予定である。

5. まとめ

屋外スケールモデルサイトにおいて、降雨量一流出量の残差から都市域における降雨中の遮断蒸発量を計測した。これまでのところ得られた結果は以下の通りである。

- 1) 遮断蒸発実験サイトにおける表面貯留量・初期浸透量は合計で0.78 mm程度であり、実際の降雨に対してほぼ無視し得る。
- 2) 本サイトにおいては降雨の流入から流出までのタイムラグは十数分程度で、長くても1時間程度である。
- 3) 総雨量が小さいときは流出量が低下し遮断蒸発の寄与が大きくなる。浸透がほぼ無視し得る本サイトにおいても、流出率の降雨依存性が見られることは興味深い。
- 4) 降雨中においても流出率は降雨強度と密接な関係がある。

実都市では遮断蒸発サイトに比べ被覆面の凹凸が多く（水たまりがしやすい）表面貯留量（つまり降雨後蒸発量）が大きくなっていると考えられる。また実都市では、スケールが大きいため屋根面などで生じた飛沫が落下しながら蒸発するために利用できる空間が遮断蒸発サイトに比べて大きく、飛沫蒸発量が大きくなる可能性も考えられる。しかし実都市における遮断蒸発量の高精度観測が不可能である今、本サイトで得られた結果を実都市へ換算し気象モデルに適用することは実用上有用である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金若手研究（B）（課題番号：18760371）、科学技術振興機構・戦略的創造研究（代表：神田学）による財政的援助を受けた。また実験施設の構築には、福島大学の木内豪助教教授および科学技術振興機構の宮本守氏に多大なご協力とご助言をいただいた。ここに合わせて謝意を表す。

参考文献

- 1) 神田 学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮：銀座オフィスビル街における熱収支特性, 水文・水資源学会誌, Vol.10, pp.329-336, 1997.
- 2) Moriwaki, R. and Kanda, M. : Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area. *J. Appl. Meteorol.*, Vol.43, pp.1700-1710, 2004.
- 3) Murakami S.: A proposal for a new forest canopy interception mechanism: splash droplet evaporation, *J. Hydrol.*, Vol.319, pp.72-82, 2006.
- 4) 日野幹雄, 長谷部雅彦：水文流出解析, 森北出版株式会社, 1985.
- 5) 安藤義久, 高橋裕：山地河川の長期流出解析に関する一考察, 土木学会論文報告集, No.318, pp.93-105, 1982.
- 6) 近藤純正：水循環の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 1994.
- 7) Marshall, J.S., Palmer, W.K. : The distribution of raindrops with size. *J. Meteorol.* Vol.5, pp.165-166, 1948

(2006.9.30受付)