

市街地における広域雨水貯留とその流出抑制効果の簡易評価

Provisional Assessment of Effect of Expansive Rainwater Storage in Urbanized Area

砂田憲吾^{*}・久保憲弘^{**}

By Kengo SUNADA and Norihiro KUBO

Rainwater storage system is one of the effective measures for preventing serious flood damages in an urbanized area. In this paper, after discussing about the contribution of existence of the water storage to relieving extreme urban climate, a method for provisional assessment of effect of the storage system is presented. In order to get some fundamental information for a future plan of river channel construction and administrative arrangement in an urbanized catchment, a set of systematic simulations of runoff discharge in conditions of various distributed patterns of rainwater storage by using the kinematic-dynamic model are carried out. Keywords: river planning, runoff control, rainwater storage.

1. はじめに

従来から指摘されているように、都市化の進行につれた不浸透域の拡大に伴って、雨水の流出率が増加し到達時間が減少して最大流出量が増大する。こうした都市型洪水に対してはこれまでに各種の対策がとられているが、本研究では従来の雨水浸透・貯留より更に積極的に、直接的に強雨水を捕捉するためにビル屋上等を中心として地域の面的な雨水貯留（広域雨水貯留と呼ぶ）および流出調整・利用を考える。雨水対策が都市域ほど厳しい現状を考慮すれば、都市域ほど効果のある手法を取り入れることは都合がよく、水資源対策やヒートアイランド化などからの都市気候緩和にも貢献できる。都市における水循環・水熱環境の整備に視野にいたった、総合的な水管理計画¹⁾を実施して行く時期にきている。

本稿は、新たな視点に立つ都市型治水環境の整備と都市気候緩和のための方策を考察した後、流出抑制の観点からの河川施設計画のための簡易な評価方法を提示するものである。都市域において、完全な貯留を仮定し、仮に70%の達成を見込み、道路率、建ぺい率などを考慮すると、概略郊外で15%、都心部で25%の流出抑制が期待できそうである。定量的な評価については、各地区の土地条件、降雨条件に応じた詳細なシミュレーションが必要になる。しかしながら、計画を含めた検討段階では厳密な取扱いより簡便な包括的な視点から、予め雨水貯留の効果を評価することが効率的である。ここでは、そのための基礎的な考察を行った。

* 正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科
(〒400 甲府市武田 4-3-11)

** 正会員 西松建設(株)関西支店土木部
(〒540 大阪市中央区釣鐘町 2-4-7)

2. 広域雨水貯留による流出抑制と都市気候緩和

急速に進んだ都市化は、人口の集中に伴う都市用水の増加、異常気象に伴う少雨、大量消費型水利用は慢性的な水不足と水質の悪化をもたらした。その一方で、都市域ヒートアイランド化やそれに関係する集中豪雨、開発に伴う不浸透地表面面積率の増加、を背景とする都市型洪水浸水災害が増加してきている。流出抑制対策が水資源問題との関連で都市水循環の適正化の課題として具体的、実効的に施策が講じられてきたとはいえない。加藤¹⁾はこの問題について、「都市化による流出の変化を自然の変化ではなく人間による環境破壊ととらえ、都市に降る雨水資源の徹底した開発と自然の姿を基本にした流出管理を基本とする総合的な水管理計画が必要である。」と指摘している。

こうした背景をもとに、実効のある現実的な流出抑制策として、従来のポイント的な雨水貯留浸透施設に加えて広範な地域での強雨水の屋上貯留を推進することを考える。屋上貯留そのものは新しい発想ではなく、すでに例えば、新国技館における雨水利用、東京ドーム雨水流出増の抑制、住宅団地における雨水有効利用事例^{2), 3), 4)}などいくつかの施設で実施されているが、さまざまな屋根形式に応じた、雨水の直接貯留・流出抑制をさらに広範な面的に実現させる方向を目指す。屋上貯留・流出抑制は以下のような内容を持っている。

- ①ビル屋上・陸屋根を中心に、理想的には全ての屋上にできるだけオープンに貯水する。新築の場合はより耐久性の高い素材を当初より設備するが、既設の屋上では必要かつ効果的方法で補強する。
- ②斜面構造・瓦の屋根では流出抑制のために適当な位置に貯水層を設ける。陸屋根の場合でもこの方式でもよく、浸透方式など従来の流出抑制施設に接続することも考えられる。
- ③貯水・集水した水は、屋上に直接貯水の他、雑用水・中水道として利用する。屋上植栽／庭園の整備と給水などに向けるなどは設置者に任せるが、衛生昆虫の発生防止等には適切な指針を用意する。
- ④施設・建物管理者には、「都市雨水対策施設整備事業融資制度」に準じた優遇制度・ガイドライン・マニュアルを提示して早期の普及を図る。

ところで、水は相変化に伴って熱の収受を行うことから、地表面・大気中のエネルギーバランスに大きな役割を果たしている。都市域内での雨水の循環と水・熱環境の改善の方向についてすでにその可能性について検討されている。最近、吉野⁵⁾は都市気候緩和に対する雨水貯留浸透の役割について提言を行うと共に、都市緑地や水面の気候緩和効果の評価を試み、例えば、藤野ら⁶⁾による熱収支の観測結果と対比して図-1を示している。さらに、都市内での雨水貯留施設等の水面の果たす熱交換の役割を重視し、特に神田ら⁷⁾の研究結果を引用して、同一面積の緑地・水面を配置する場合、気候緩和のためには分散配置が効率的であることを紹介している。屋上貯留構想ではちょうど、分散、中小面積、3次元的配置による水面が存在することになるのでこうした効果は大きいものと期待され、屋上貯留がより効率的であることが推察される。

以上のように、屋上雨水貯留などの水循環の改善は、流出抑制と共に都市気候の緩和、水資源の確保などの3つの側面をもつ。この場合、気候緩和については現状では系統的な評価が困難であり、水利用については個別に得失が判断されることになろう。ここでは、まずはより直接的現実的と考えられる流出抑制の面から計画の評価を進めることを考える。

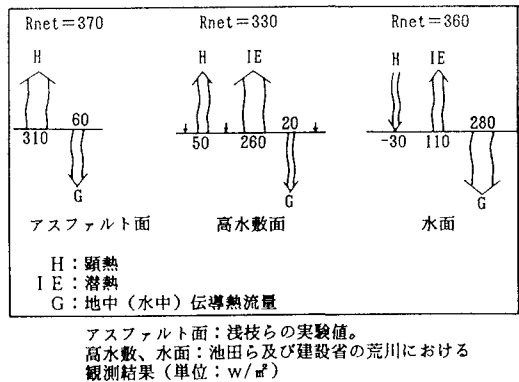


図-1 地表面条件と熱収支の例
(吉野⁵⁾による)

3. 代表的流出場と包括的流出条件

石川⁸⁾の雨水貯留の効果に関する検討や渡辺ら⁹⁾の下水管渠網の厳密な解析より簡潔に、路面・屋上からの流出を横流入とする幹線下水道の流出量をモデル化する。個々の施設の諸元・配置を厳密に考慮する立場ではなく、路面・屋上系からの流出を分布流入系とする場合の、種々の雨水貯留条件に対する下水道流出流量の応答の全体的かつ平易なシミュレーションを行う。すなわち、与えられた水文条件（降雨強度、継続時間）に対して、地域的な貯留条件、貯留施設の設置・不設置に対する下水道流量に及ぼす影響を検討する。図-2は札幌市の市街地と雨水集水の例であり、上述の条件の単純化が可能であることを裏付けている。



図-2 市街地と雨水集水の例

3.1 雨水流出の推定方法

路面・屋上からの雨水流出量を落下時間を無視し、等価粗度の成立を仮定して kinematic wave モデルにより計算する。懸案の区域内的の路面・屋上の長さ（斜面長）を、 l (m) と置き、一定の有効降雨強度 r_0 (mm/hr) のもとで、到達時間 t_c (s) は Manning の抵抗則を用いて次のように与えられる。

$$t_c = \left(\frac{l r_0^{1-m}}{\alpha} \right)^{1/m} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha : (\sin \theta)^{0.5} / n$ 、 n : 路面の平均勾配、 n : Manning の粗度係数、 $m : 5/3$ である。

降雨継続時間 t_r と到達時間 t_c の大小に応じて、路面末端すなわち下水道幹線地点での各時刻に対する単位幅流量 (q (m³/sec/m)) が解析的に容易に与えられる。

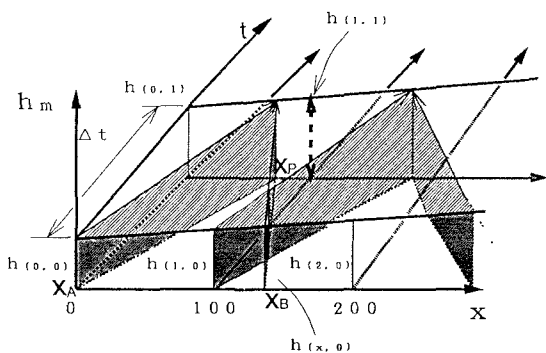


図-3 水路内の流れの計算

3.2 開水路内の流量の推定法

路面・屋上からの横流入 q が任意に与えられる場合の幹線下水道の流量を、長方形断面の開水路流れとして

Dynamic wave モデルで解析する。図-3を参照しながら、解析の要点は以下のである。

特性曲線 $\frac{dx}{dt} = v \pm \sqrt{gh}$ により、 $t = t_0$ 時点に2地点 x_A 、 x_B を発して x の正負方向に伝播する波が

Δt 秒後に x_P に至る場合、まず $t = t_0$ 時点の水理量を用いて、 x_A に対する x_P 、 x_P に対する x_B を近似的に求めれば、以下のように v_P 、 h_P が得られる。

$$v_P = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) + \sqrt{gh_1} - \sqrt{gh_2} + g(s_0 - s_f) \Delta t + \frac{q}{B} \left(\frac{v_1}{h_1} + \frac{v_2}{h_2} + \sqrt{\frac{g}{h_1}} + \sqrt{\frac{g}{h_2}} \right) \Delta t \quad (2)$$

$$h_P = \frac{1}{16g} \left\{ v_A - v_B + 2\sqrt{gh_A} + 2\sqrt{gh_B} + \frac{q}{B} \left(\frac{v_A}{h_A} - \frac{v_B}{h_B} + \sqrt{\frac{g}{h_A}} + \sqrt{\frac{g}{h_B}} \right) \Delta t \right\}^2 \quad (3)$$

ここに、 v は断面平均流速、 h は水深、 g は重力加速度、 s_0 は水路床勾配、 s_f はエネルギー勾配 ($= v^2 n^2 / R^{4/3}$ 、 R は径深である)。

上式より求めた v_P 、 h_P を用いて式(4)より再度 x_P' の位置を求め、その x_P' に一致するまで式(5)より x_B' を求める。

$$x_P' = \frac{1}{2} (v_P + \sqrt{gh_P} + v_A + \sqrt{gh_A}) \Delta t + x_A \quad (4)$$

$$\dot{x}_P = \frac{1}{2} (\dot{v}_P - \sqrt{g h_P} + \dot{v}_B - \sqrt{g h_B}) \Delta t + \dot{x}_B \quad (5)$$

上で求めた $\dot{x}_B$ より導かれる $\dot{v}_B$, $\dot{h}_B$ を用いて $\dot{v}_P$, $\dot{h}_P$ を求める。

$$\dot{v}_P = \frac{1}{2} (\dot{v}_A + \dot{v}_B) + \sqrt{g h_A} - \sqrt{g h_B} + g (s_0 - s_f) \Delta t + \frac{q}{B} \left(\frac{\dot{v}_A}{h_A} + \frac{\dot{v}_B}{h_B} + \sqrt{\frac{g}{h_A}} - \sqrt{\frac{g}{h_B}} \right) \Delta t \quad (6)$$

$$\dot{h}_P = \frac{1}{16g} \left\{ \dot{v}_A - \dot{v}_B + 2\sqrt{g h_A} + 2\sqrt{g h_B} + \frac{q}{B} \left(\frac{\dot{v}_A}{h_A} - \frac{\dot{v}_B}{h_B} + \sqrt{\frac{g}{h_A}} + \sqrt{\frac{g}{h_B}} \right) \Delta t \right\}^2 \quad (7)$$

式(4)～(7)を $\dot{v}_P = \dot{v}_P$, $\dot{h}_P = \dot{h}_P$ となるまで繰り返す。

以上の方法によれば、特性曲線法の厳密さを保持しながら、設定時間・空間ステップでの水理量が求まる。

4. 流出抑制シミュレーション

4. 1 条件設定

シミュレーションを実行するための計算条件は自由に設定できるが、ここでは具体的に、代表的な地域を仮定して検討する。まず、都市域市街地を念頭に、幹線下水道に沿う延長1000m片側 200mの区域を対象例として流出計算を行った。境界条件としては、路面上流端で水深・流量が0、水路では初期流量 0.1m³/sec に対応する等流水深を上流 7km地点で設定し、横流入量を含めた流量に対する等流水深を 7km下流で与えた。図-4を参照しながら、計算例では表-1のようなパラメータを与えた。

以上の地区に有効降雨強度 (r_0) 50mm/hr、降雨継続時間 (t_r) 1hr の水文条件を基準に、 $r_0 = 100$ mm/hr, $t_r = 1$ hr、および $r_0 = 50$ mm/hr, $t_r = 20$ min の場合について計算する。

雨水貯留の効果を見るために、図-4のように街区をA、B、C、Dの地区に区別し、それぞれ1地区で貯留を実施する場合(25%) 4通り、2地区で組み合わせて貯留を実施する場合(50%) 6通りについて計算した。

表-1 計算対象区域の設定

	路面・屋上面区域	開水路部
対象距離	200m	1000m
幅	(単位幅考慮)	3m
勾配	1/200	1/1000
粗度係数	0.05	0.018

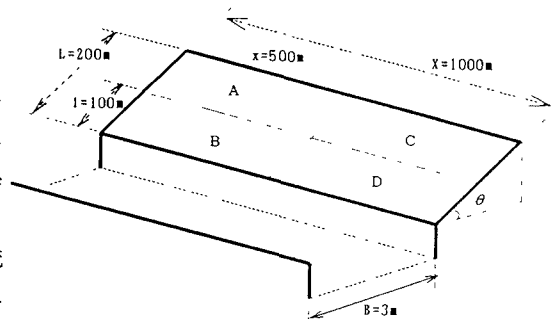


図-4 開水路および路面・屋上面のモデル化

一定降雨量 $r_0 = 50$ mm 降雨時間 $t_r = 1$ 時間
貯留地区なし

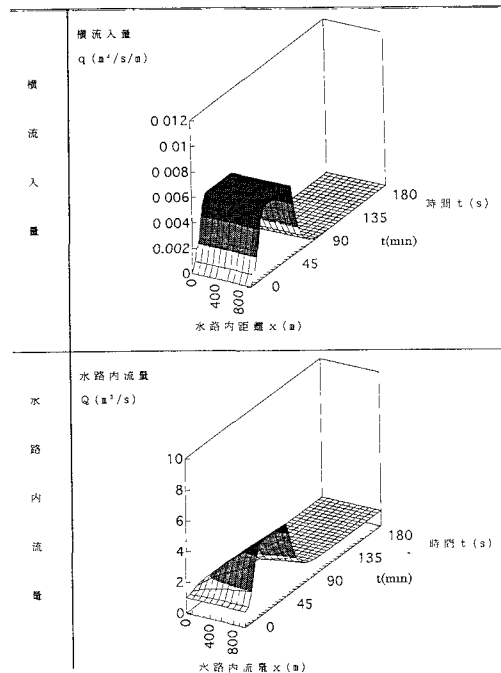


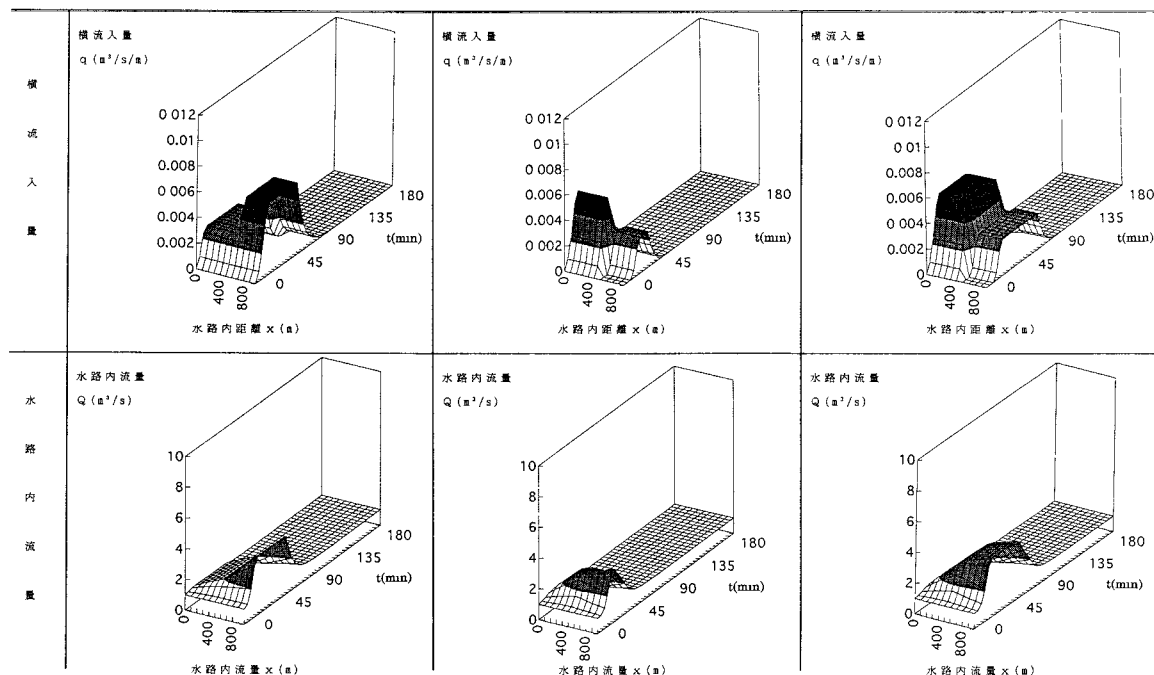
図-5 貯留区域なしとする場合の路面・屋上流出量、水路流量

$r_0 = 50 \text{ mm}$ $t_r = 1 \text{ 時間}$ $r_0 = 50 \text{ mm}$ $t_r = 20 \text{ 分}$ $r_0 = 50 \text{ mm}$ $t_r = 1 \text{ 時間}$

貯留地区 A

貯留地区 D

貯留地区 D

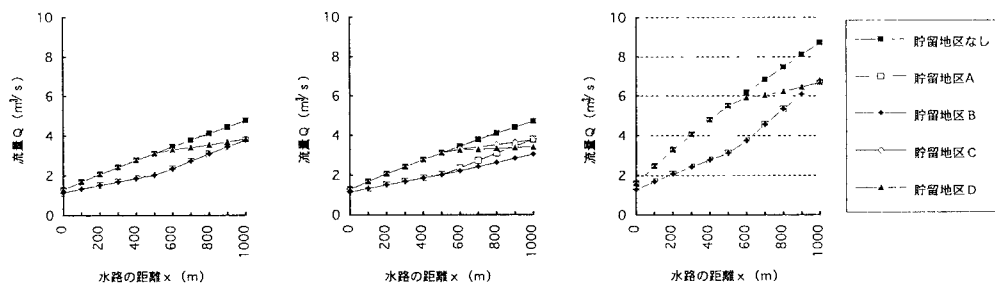
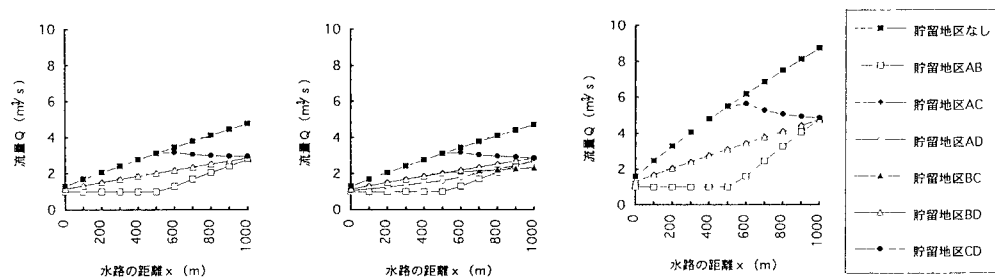


(a)

(b)

(c)

図-6 貯留区域を設定した場合の路面・屋上流出量、水路流量

 $r_0 = 50 \text{ mm}$ $t_r = 1 \text{ 時間}$ 貯留面積率25% $r_0 = 50 \text{ mm}$ $t_r = 20 \text{ 分}$ 貯留面積率25% $r_0 = 100 \text{ mm}$ $t_r = 1 \text{ 時間}$ 貯留面積率25% $r_0 = 50 \text{ mm}$ $t_r = 1 \text{ 時間}$ 貯留面積率50% $r_0 = 50 \text{ mm}$ $t_r = 20 \text{ 分}$ 貯留面積率50% $r_0 = 100 \text{ mm}$ $t_r = 1 \text{ 時間}$ 貯留面積率50%

(a)

(b)

(c)

図-7 設定貯留区域と水路における最大流量

4. 2 結果と考察

①貯留地区なしの場合：図－5 は貯留地区を設定しない基本的な流出流量として、降雨強度 $r_0=50\text{mm/hr}$ 、継続時間 $t_r=1\text{hr}$ の場合に得られる横流入量、水路内流量のハイドログラフであり、与えられた降雨条件に対して、当然のことながら水路対象区間末端で流量は最大を示す。

②部分地区貯留の場合：計算条件の組み合わせの中から、結果の一部例を示せば図－6 のようになる。(a) は $r_0=50\text{mm/hr}$ 、 $t_r=1\text{hr}$ の条件での A 地区で全面的に貯留させた場合の結果である。(b) は同じ降雨強度で継続時間が ($t_r=$) 20min の場合で、D 地区に貯留させた場合の結果であり、水路対象区間末端の流量は抑制されている。(c) は $r_0=100\text{mm/hr}$ 、 $t_r=1\text{hr}$ の強降雨条件に対して D 地区を貯留させた場合である。横流入量は定常状態に至っているが、水路に沿う流量の増加は低く、貯留効果が明らかである。

③最大流量の分布：全ての計算条件の組み合わせの場合について、生起時間を無視する場合の水路に沿う最大流量の分布を包絡線で示せば図－7 のようになる。(a) は $r_0=50\text{mm/hr}$ 、 $t_r=1\text{hr}$ とする場合の 50%貯留では、C D 地区の貯留の場合に水路区間中間点で最大流量が発生し得ることが示されている。(b) は(a)と同じ降雨強度で継続時間が ($t_r=$) 20min の場合の結果であり、定常状態に至らない降雨－流出条件では最大流量の分布が変化する。(c) は $r_0=50\text{mm/hr}$ 、 $r_0=100\text{mm/hr}$ に対する結果であるが、A B 地区の貯留がこの場合も効果的であることが知れる。

言うまでもなく、降雨継続時間と到達時間との関係で、最大流量の値、生起位置が決められる。実際の市街地での地理的条件、降雨条件の組み合わせを十分考慮したさらに系統的なシミュレーションが必要なようである。

5. おわりに

本稿では市街地での具体的な施設配置に基づく厳密な再現計算の立場ではなく、一様均質な場における水文条件と街路面・屋上の条件を理想化した形式で、雨水貯留が流出に及ぼす効果をより簡潔に抽出することを目的とした。当然のことながら、降雨の継続時間と洪水到達時間との関係で流出量は様々に変化する。今後は、このシミュレーションの定量的な検証を目指すと共に、より多くの実現可能な流出の場を再現して必要がある。実流域では、ここで取り上げたような流出場がさらに「入れ子」の様な形態になっており、さらに複雑な取扱いも用意されなければならないが、本稿での方法を容易に発展的に応用することができる。定量化に向けて、さらに検討を重ねる予定である。

〔謝辞〕本研究の一部は、建設省下水道部・土木学会委託研究「下水道の雨水対策の方向性に関する調査」の補助を受けて実施されたものであり、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤 迪：総合水管理計画の提案、雨水技術資料、Vol. 5, pp. 225-232, 1992.
- 2) 田中英夫・佐藤正章：新国技館における雨水利用設備、雨水技術資料、Vol. 3, pp. 73-77, 1992.
- 3) 建設省河川局都市河川室：都市雨水対策施設整備事業融資制度の活用、雨水技術資料、Vol. 3, pp. 214-218, 1992.
- 4) 坂口 哲：豊四季台第 2 団地における雨水有効利用事例について、雨水技術資料、Vol. 4, pp. 129-135, 1992.
- 5) 吉野文雄：都市の熱環境の改善に向けて－都市の熱汚染の現状と雨水貯留浸透の役割－、雨水技術資料、Vol. 10, pp. 33-43, 1993.
- 6) 藤野 毅・浅枝 隆：舗装面からの赤外放射の吸収による表層大気の加熱効果、水文・水資源学会 1992 年研究発表会要旨集、1992.
- 7) 神田 学・稲垣 聡・日野幹雄：夏期に森林・水面が果たす気候緩和効果に関する実測とその周辺域への影響伝達機構に関する数値解析による検討、水工学論文集、Vol. 35, pp. 585-590, 1991.
- 8) 石川忠晴：宅内貯留施設の普及可能性に関する研究、下水道の雨水対策の方向性に関する調査－、建設省都市局下水道部・(社)土木学会、pp. 15-23, 1994.
- 9) 渡辺政弘・栗原 崇：下水道管渠における遷移流れ(開水路流れ 圧力流れ)の数値計算法、水工学論文集、Vol. 37, pp. 523-528, 1993.
- 10) 日野幹雄・太田猛彦・砂田憲吾・渡辺邦夫：洪水の数値予報、森北出版、p. 252, 1989.