

都市河川流域の水循環解析と 雨水浸透施設の効果の評価

SIMULATION OF HYDROLOGICAL CYCLE IN AN URBANIZED CATCHMENT
AND EFFECT EVALUATION OF INFILTRATION FACILITIES

賈 仰文¹・倪 广恒²・河原能久³・末次忠司⁴

Yangwen JIA, Guangheng NI, Yoshihisa KAWAHARA and Tadashi SUETSUGI

¹正会員 工博 JST特別研究員 建設省土木研究所都市河川研究室 (〒305-0804 つくば市大字旭1番地)

²正会員 工博 交流研究員 建設省土木研究所都市河川研究室 (〒305-0804 つくば市大字旭1番地)

³正会員 工博 主任研究員 建設省土木研究所都市河川研究室 (〒305-0804 つくば市大字旭1番地)

⁴正会員 工博 室長 建設省土木研究所都市河川研究室 (〒305-0804 つくば市大字旭1番地)

A distributed hydrological model is applied to simulate water balance in the Ebi river catchment (27km²) with a grid size of 50m and a time step of 1 hour. The simulation of 5 years from 1992 to 1996 is performed. The model is verified through comparisons of simulated river discharges and groundwater levels with the observed values. The comparison of water balance at present (1993) with that in future (2035) is also conducted and it shows the impact of urbanization. To conserve hydrological cycle in the catchment implementation of infiltration facilities is thought to be highly required. The effect of infiltration trench is studied. It is found that the hydrological cycle can be improved at same level or even better in future than now if infiltration trench is implemented to infiltrate drainage from urban canopies.

Key Words : Hydrological cycle, groundwater, urbanization, Ebi river, distributed model, infiltration trench

1. はじめに

都市河川流域では、地表面の改変や生活様式の変化などに伴って、水循環が大きく変貌しつつある。河川では、洪水時の流量が増加し、流出時間が短くなる一方で、平常時の水量が減少したり水質が悪化している。また、都市域での微気象も変化し、高温化や乾燥化が顕在化しつつある。今後の都市の健全な発展のためには、流域全体における水・熱収支の実態の把握とそれに基づいた体系的かつ効率的な対策の実施が不可欠である。

本研究の目的は、都市河川流域を対象とした分布物理型の水・熱循環解析モデルを改良し、都市化が急速に進展した千葉県海老川流域における水循環の現在と将来の姿を明らかにすること、また、将来時点において雨水浸透施設を導入した場合の水循環の保全に与える効果を把握することである。なお、本研究では流域における水・熱輸送を同時に解析しているが、ここでは水循環に関する結果のみを述べる。

2. モデルの構造

(1) モデルの概要

本研究における水・熱循環解析モデルはJiaら¹⁾のモデルを基に改良を加えたものである。図-1は、本モデルの1計算メッシュ内で考慮される水・熱輸送過程を示している。計算メッシュ内の混在化した土地利用の影響を表現するために、各土地利用の面積占有率を考慮するネスティング法(モザイク法)を採用した。土地利用はまず3種類(水域、土壌-植生域、不浸透域)に大分類した。土壌-植生域はさらに裸地、丈の低い草地および農耕地、丈の高い樹木に細分類した。また、不浸透域はさらに低層都市域と都市キャノピーとに分類した。

図-2にモデルの平面構造を示す。河道内の流れは、河川に接するメッシュ毎に算出した流出量に基づき、kinematic wave法により計算した。また、地下水流れに関しては、2次元多層地下水流れの方程式を解き、地下水位の表面流出に与える影響などを検討できるようにした。

(2) 水循環過程のモデル化

図-1に示した水の輸送過程のうち、土壌-植生域を例として、蒸発散、表面流出、中間流出、地下水流出の取り扱い方法を略述する。詳細やその他の土地利用に対する取り扱いについては、Jiaら¹⁾を参照されたい。

a) 蒸発散

Penman-Monteith 方程式により算出した。

b) 表面流出 (R1)

$$\partial H_{SV} / \partial t = P - E_{SV} - f_{SV} - R1 \tag{1}$$

$$R1 = \begin{cases} 0 & H_{SV} \leq H_{SV \max} \\ H_{SV} - H_{SV \max} & H_{SV} > H_{SV \max} \end{cases} \tag{2}$$

ここで、 P ：降水量、 H_{SV} ：土壌-植生域での窪地貯留、 $H_{SV \max}$ ：最大窪地貯留、 E_{SV} ：蒸発散、 f_{SV} ：一般化したGreen-Ampt モデル²⁾で算出される浸透速度である。なお、降雨浸透時以外では、不飽和帯での鉛直浸透はRichards方程式より算出した。

c) 中間流出 (R2)

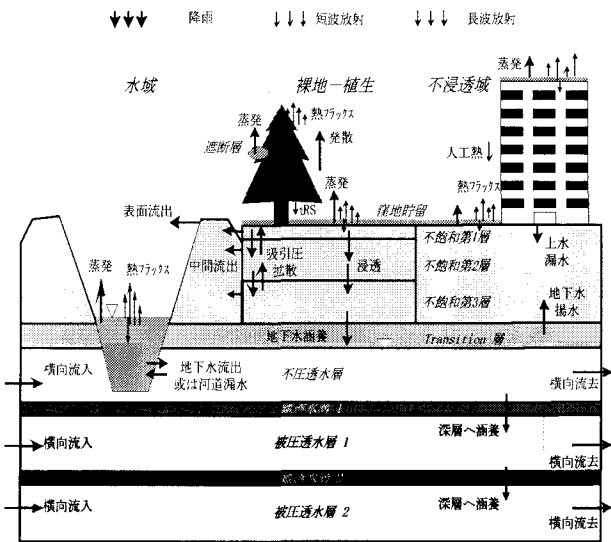


図-1 モデルの鉛直構造

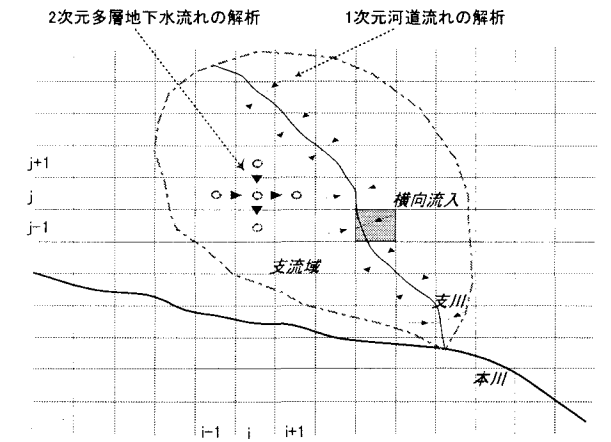


図-2 モデルの平面構造

河川を含むメッシュでは、河川への中間流出を不飽和土壌からの側方流れとし、次式から算出した。

$$R2 = k(\theta) \sin(slope) L d \tag{3}$$

上式中で、 $k(\theta)$ ：体積含水率 θ の土壌の透水係数、 $slope$ ：地表面の勾配、 L ：1メッシュ内の河川の長さ、 d ：不飽和土壌層の厚さである。

d) 地下水流れと地下水流出 (RG)

地下水流れは不圧、被圧地下水に分け、準一様流の仮定を用いて定式化した。また、被圧帯水層は流域の地質条件に応じて2層に分けた。各帯水層においては、上方からの涵養量、下方への浸透量、井戸の揚水量の影響を考慮した。また、河川の存在するメッシュにおける不圧帯水層の流れの解析では、河川と地下水との間の水分移動である地下水流出 (RG) を考慮した。地下水流出は地下水位 (h_u) と河川水位 (H_r) との高さ関係に応じ、次式により算出した。

$$RG = \begin{cases} k_b A_b (h_u - H_r) / d_b & h_u \geq H_r \\ -k_b A_b & h_u < H_r \end{cases} \tag{4}$$

ここに、 k_b ：河床材料の透水係数、 A_b ：1メッシュ内の河床での浸透面積、 d_b ：河床材料の厚さである。

(3) 熱輸送過程のモデル化

本モデルでは地表面での熱輸送を水分輸送と連成させて解析している。地表面における熱収支式は次のように表される。

$$RN + Ae = IE + H + G \tag{5}$$

上式中において、 RN ：正味放射、 Ae ：人工熱排出、 IE ：潜熱フラックス、 H ：顕熱フラックス、 G ：地中熱フラックスであり、それぞれの輸送過程に対してモデル化を行っている。人工排熱以外の熱フラックスはいずれも地表面温度の関数となっており、しかも方程式は非線形である。このため、地表面温度は、Force-Restore法³⁾を用いて効率良く計算するとともに、繰り返し計算を行った。詳細に関しては文献^{1), 3)}を参照されたい。

(4) 浸透トレンチのモデル化

浸透トレンチの浸透計算は次のように行った⁵⁾。

$$\partial S_i / \partial t = Q_m - Q_{inf} - Q_{ovf} \tag{6}$$

$$S_i = nLWH \tag{7}$$

$$Q_{inf} = K_0 L (aH + b) \tag{8}$$

$$Q_{ovf} = cL (H - H_m)^{3/2} \tag{9}$$

ここに、 S_i ：貯留量、 Q_m ：流入量、 Q_{inf} ：浸透量、 Q_{ovf} ：越流量、 n ：空隙率、 L ：長さ、 W ：幅、 H ：水深、 H_m ：計画水深、 K_0 ：トレンチ下の土壌の飽和透水係数である。定数 a と b は文献⁶⁾に従い定めた。また、定数 c は堰頂越流を想定して $0.4\sqrt{2g}$ と評価されている。

3. 海老川流域への適用

(1) 流域の概要と既往の研究

上記のモデルを千葉県海老川流域（図-3）へ適用した。この流域は船橋市と鎌ヶ谷市を含み、建設省の水循環再生構想の対象流域の1つである。流域面積は27km²であり、海老川本川及び前原川など7つの支川が流れている。流域内や流域界の近くには、6ヶ所の雨量観測所（アメダス船橋観測点を含める）、3ヶ所の河川水位流量観測点及び14ヶ所の地下水位観測点がある。流域内の地表標高は0～33 mであり、第一透水層の厚さは2～17 mである。また、この流域には4種類の土壌（関東ローム、沖積土、常総粘土と成田砂）が分布している。海老川流域の市街化率は現在（1993年時点）では約60%であるが、将来（2035年時点）では山林や農地が市街地に転換され、都市化が一層進展するものと予想されている。

海老川流域の水循環研究については、これまでにいくつかの論文、報告が発表されている。例えば、高橋ら⁷⁾は観測データや統計資料に基づいて、流域全体の水収支と河川流量を分析した。Herathら⁸⁾は、分布型モデルを用いて、支川の前原川の流域で水循環を検討した。しかし、水循環の複雑性のため、数多くの課題がまだ残されている。例えば、水循環解析の妥当性をさらに検証することや、水循環改善対策の効果を評価できる物理モデルを開発することが必要である。

(2) 入力データ

標高及び土地利用には50mメッシュ数値地図、1994年の首都圏細密数値情報を用いた。降水量、地下水位、土壌、地質及び上水、下水のデータは千葉県土木部都市河川課から提供されたものである。また、気温、日射、風速、湿度についてはAMeDAS観測データと千葉県環境部大気保全課のデータを使用した。さらに、河川流量には東京大学生産技術研究所虫明研究室と千葉工業大学工学部高橋研究室の観測データを用いた。

(3) モデルの検証

解析では流域メッシュサイズを50m、時間刻みを1時間とした。解析期間は1992年から1996年の5年間である。初期条件の影響を考えるために、1992年の観測データでウォーミングアップを行い、1993年の観測データを用いてモデルのキャリブレーションを行った。

モデルパラメータの値は次のように決定した。まず、参考文献に基に流域の特性を考慮して初期値を与えた。具体的には、植生・アルベド・空気力学的抵抗パラメータ及び都市域の不浸透率についてはJiaら¹⁾を、土壌の水分特性曲線及び不飽和透水係数についてはHerathら⁹⁾を参考にして決定した。なお、透水層の透水係数は土壌の飽和透水係数とした。次に、流量と地下水位の再現性に着

目してモデルのキャリブレーションを行い、都市域の不浸透率、透水層・難透水層及び河床材料の透水係数などの最適化を図った。

モデルの検証は河川流量と地下水位に対して行った。なお、船橋における年降水量は1993年で1,463mm、1994年で980mm、1995年で1,119mm、1996年で1,123mmであり、検証の対象とした3年間は降水量の平年値(1360mm)より少ない年である。

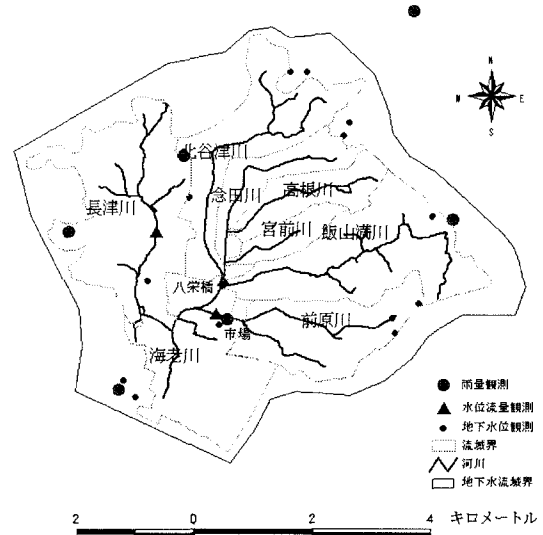


図-3 海老川流域

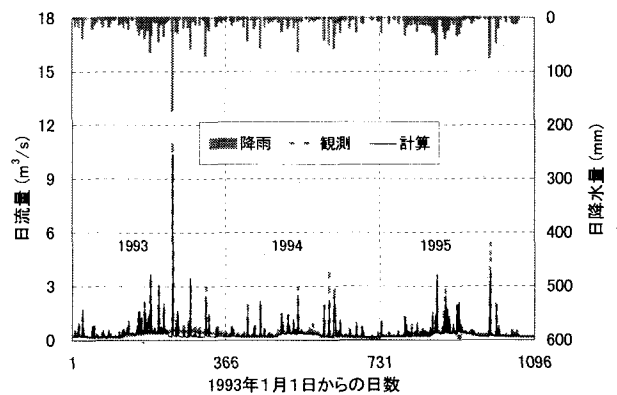


図-4 日流量の比較（海老川八栄橋）

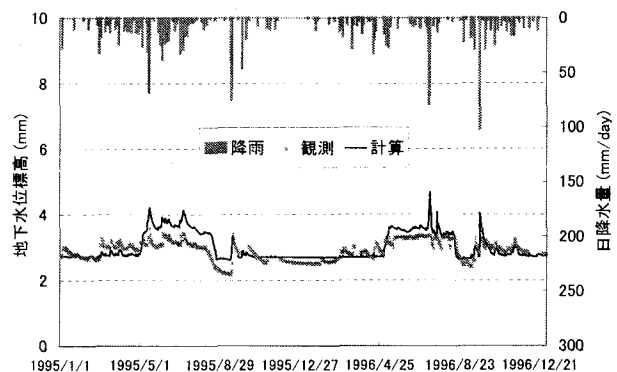


図-5 地下水位の比較（前原川市場）

図-4は海老川中流部に位置する八栄橋流量観測点での日流量を1993年から1995年までの3年間にわたり比較したものである。計算結果と観測結果とは良好な一致を示している。

モデルの検証は河川流量のみでは不十分であるため、地下水位についても行った。前原川市場での2年間にわたる地下水位に対して、観測結果と計算結果とを比較したものが図-5である。計算結果は観測結果をかなり上回る時期があるものの、変動パターンを捉えており、地下水に関してもほぼ妥当な結果を与えている。

(4) 現在と将来の水収支

この流域では将来約5.7km²の市街地が新たに開発されるものと予測されている(図-6)。これに伴い、人口は現在の20.3万人から26.1万人へ増加し(図-7)、用水量が増大する。また、下水道の人口普及率は現在の約10%から将来は100%になるものと予測されている。ここでは、現在および将来における水循環を比較し、今後の都市化の影響を明らかにすることを試みる。なお、将来時点における気象条件は1993年と同一と仮定する。

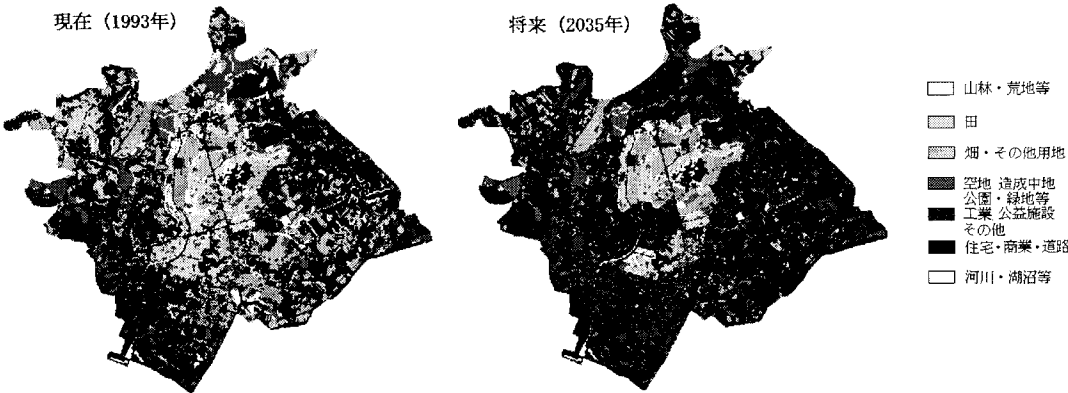


図-6 土地利用分布

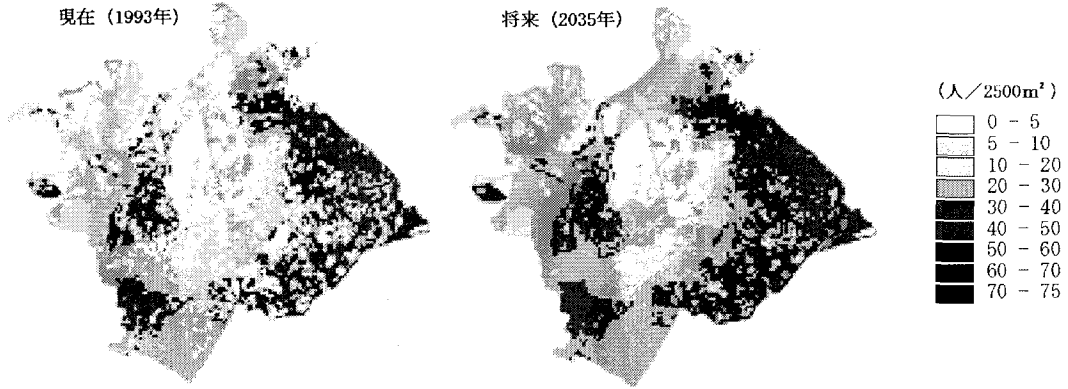


図-7 人口密度分布

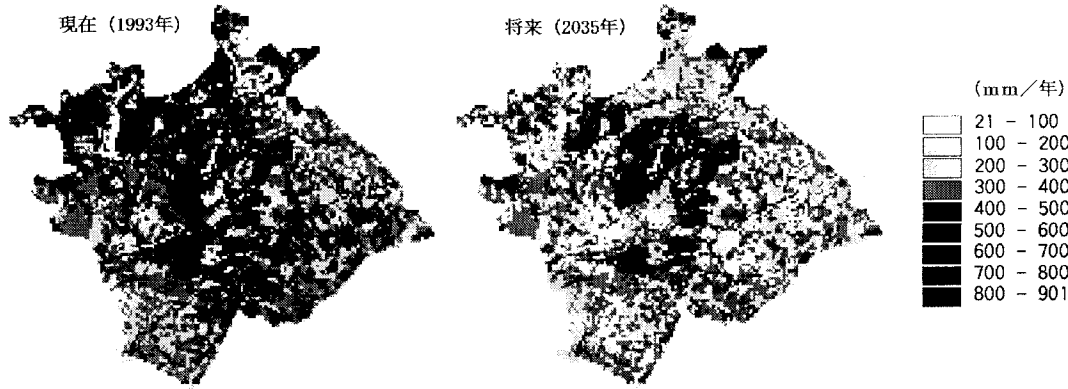
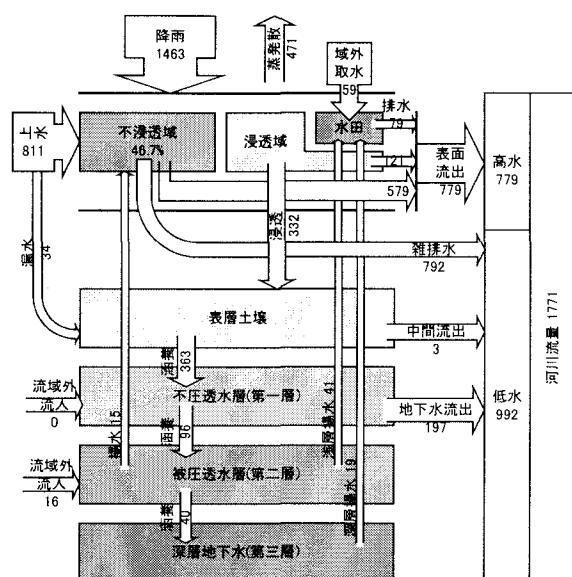
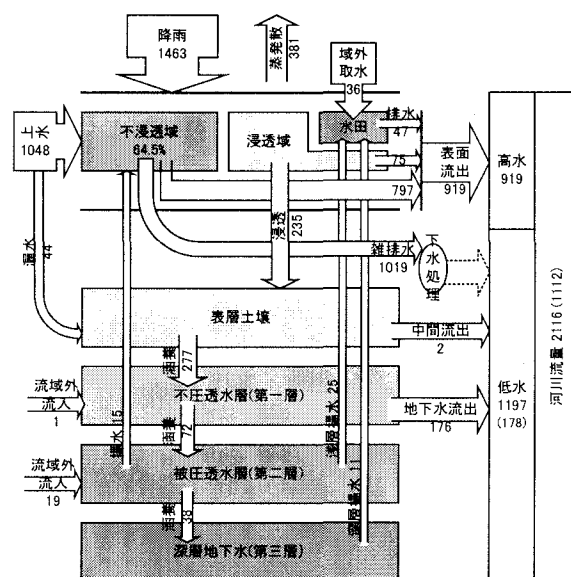


図-8 蒸発散量分布



(a) 現時点での水収支



(b) 将来時点での水収支

図-9 年間水収支の解析 (単位: mm)

水・熱輸送を時間単位で解析した結果をもとに、蒸発散量を年間値として算出した。それらの結果を図-8に示す。年蒸発散が市街地の約300mmから水田・山林の約800mmまで変化している。今後の都市化につれ、流域の中央部を除く広い範囲で、蒸発散量が減少することが予想される。

流域全体での年間の水収支を検討した結果が図-9である。この流域での現在の水収支の特徴として次のことが挙げられる。蒸発散、浸透、表面流出(水田からの排水を含む)が年間降雨量のそれぞれ約32%, 23%, 53%であり、自然流域と比べると浸透量が少なく、表面流出が大きくなっている。河川への雑排水量は中間流出と地下水流出の約4倍になっている。また、将来においては、蒸発散は90mm減少、浸透は97mm減少、地下水流出は21mm減少する。一方で、表面流出は140mm増加し、河川の流況は大きく変化することが予想される。分流通下水道の整備により、処理水を直接海へ放流する場合には、図中の河川流量の括弧内に示すように、平常時の河川流出が178mmと激減することになり、河川環境は急激に悪化することが懸念される。水環境の保全を図るために、雨水浸透施設の設置や下水処理水の再利用など効果的な対策を推進することの必要性が確認される。

(5) 雨水浸透施設導入の効果の評価

将来において、流域内の屋根排水を浸透トレンチに導入する場合を対象に、浸透トレンチの設置が水循環に及ぼす影響を検討する。浸透トレンチの設置条件は文献⁶⁾を参照して以下のようにした。

- ・ 土地利用: 屋根あり。
- ・ 地 形: 勾配が10%以下。
- ・ 土 壤: 粘土以外。
- ・ 地質, 地下水位: 難透水層と地下水位が地表面

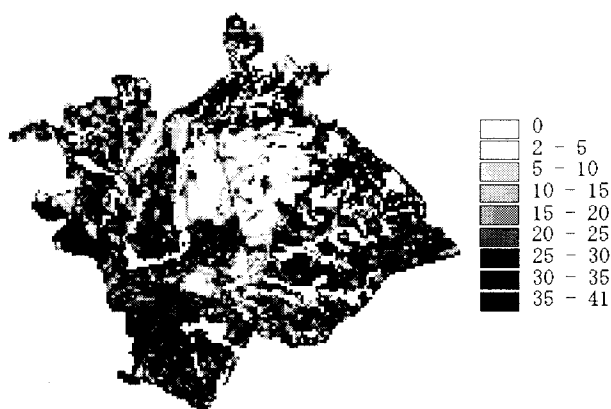


図-10 浸透トレンチ長さの分布 (単位: m)

2m以下。

- ・ 浸透トレンチ長さ: 2m以下ならば設置しない。

浸透トレンチの設置数量を450m/ha、幅 × 計画水深 = 1.5m × 1.0m⁶⁾と仮定して浸透トレンチの設置長さを計算した。メッシュサイズが50m × 50mであるので、各メッシュ内浸透トレンチ長さは、450 × 0.25 × 屋根の面積率となる。求められた各メッシュ内浸透トレンチ長さの分布を図-10に示す。

浸透トレンチの計算を前述の方程式(9)～(12)に基づいて行った。図-11では、浸透施設の有無による海老川八栄橋地点での河川流量の差を、1週間わたる時間流量について示している。浸透トレンチの導入により、出水時の流量ピークが浸透施設なしの場合に比較して抑制されており、現在と同程度になると予想される。

図-12に浸透施設の有無による前原川市場地点での不圧地下水位の差を示す。浸透トレンチの導入により、渇水期の地下水位を現況レベルに回復できることが明らかである。

図-13に浸透トレンチ導入後の全流域の水収支を

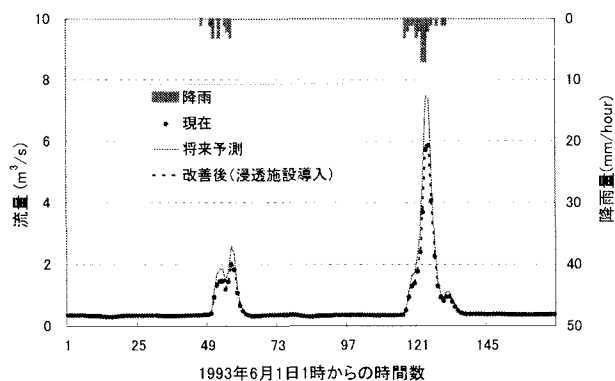


図-11 浸透施設有無による河川流量の比較
(八栄橋地点)

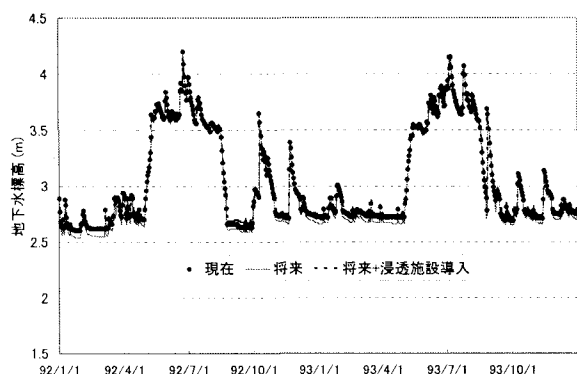


図-12 浸透施設有無による地下水位の比較 (市場地点)

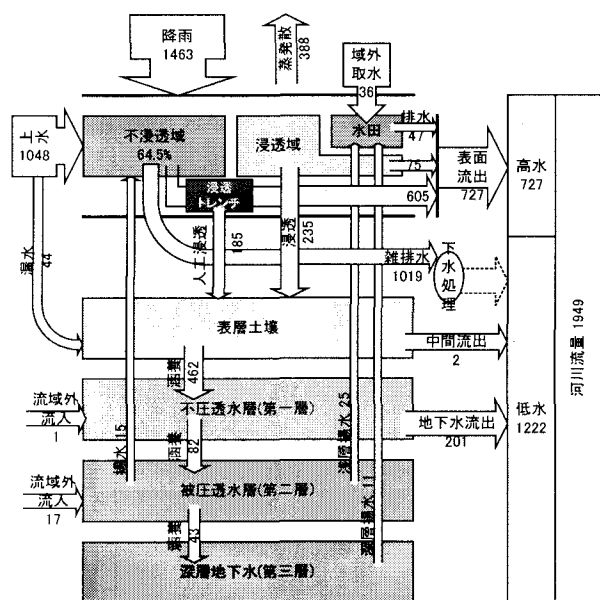


図-13 浸透トレンチ導入後将来時点での水収支
(単位: mm)

示す。導入により蒸発散はあまり変化しないが、浸透量は増加し、表面流出は約200mm減少し、河川への地下水流出も25mm増加すると推計される。全体的に言えば、水循環は現在の状況と同じ程度に保全、あるいは現況より少し改善され则认为られる。

4. 結論と今後の課題

本研究は、流域管理技術として都市化の著しい流域に適用可能な水・熱循環解析モデルを開発し、千葉県海老川流域に適用したものである。得られた成果を要約すると以下のようになる。

- 1) 地下水解析モデルの改良や浸透施設モデルを組み込んだ分布物理型の水・熱循環解析モデルを作成した。
- 2) モデルにより海老川流域における現在と将来の水循環を検討した。その結果、今後の都市化により水循環が大きく変化し、河川の流況も著しく変化することを明らかにした。
- 3) 将来における海老川流域の水循環を改善するために、雨水浸透施設の導入効果を検討した。屋根排水対策として浸透トレンチを導入することにより、河川流量と地下水位が現在の状況と同じ程度以上に維持されることを示した。

今後、他の水循環改善対策の効果を評価していく予定である。また、河川水質モデルを組み込み、都市化が河川水質に及ぼす影響を検討する予定である。

謝辞 観測データを提供していただいた東京大学生産技術研究所虫明功臣教授、千葉工業大学高橋彌教授、千葉県土木部都市河川課、千葉県環境部大気保全課、社団法人雨水貯留浸透技術協会に深謝いたします。

参考文献

- 1) Jia, Y. and Tamai, N.: Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model, 水文・水資源学会誌第11巻, 第2号, pp.150-163, 1998.
- 2) Jia, Y. and Tamai, N.: Modeling infiltration into a multi-layered soil during an unsteady rain, Ann. J. Hydraul. Eng., JSCE, Vol.41, pp.31-36, 1997.
- 3) 近藤純正編著: 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書房, 350p., 1994.
- 4) 川又孝太郎: 3次元都市熱環境解析モデルの開発, 東京大学修士論文, 80p., 1994.
- 5) Herath, S.: 都市域における雨水貯留浸透システムの設計, 雨水技術資料, pp.131-139, Vol.12, 1994.
- 6) 雨水貯留浸透技術協会編: 雨水浸透施設技術指針[案] - 調査・計画編, 1998.
- 7) 高橋彌・本多直紀・虫明功臣・弘中貞之: 都市河川海老川の上水道給水量を考慮した河川流量成分の分離について, 水文・水資源学会1995年研究発表会要旨集, pp.166-167, 1995.
- 8) Herath, S., Musiake, K. and Hironaka, S.: Development and application of a GIS based distributed catchment model for urban areas, Proc. of 7th int. Conf. on Urban Storm Drainage, pp.1695-1700, 1996.
- 9) Herath, S., Musiake, K. and Hironaka, S.: Field estimation of saturated conductivity using borehole test, influence of unsaturated flow and soil anisotropy, Ann. J. Hydraul. Eng., JSCE, vol.36, pp.435-440, 1992.

(1999. 9. 30受付)