

◆ 流域水管理特集 ◆

# 都市河川流域の水循環解析 — モデルの開発と海老川流域への適用 —

河原能久\* 末次忠司\*\* 賈 仰文\*\*\* 倪 广恒\*\*\*\*

## 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、健全な水循環の保全対策を検討する上で必要な基礎資料を提供することである。ここでは、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<sup>1)</sup>を改良し、海老川流域の水循環に及ぼす都市化の影響を検討した結果を報告する。

## 2. 海老川流域の概要

千葉県海老川流域を図-1に示す。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となっている。流域面積は27km<sup>2</sup>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0~33mであり、第一透水層の厚さは2~17m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。海老川流域の現在と将来の土地利用を表-1に示す<sup>2)</sup>。市街化率は現在(1993年)では約60%であるが、将来(2035年)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。

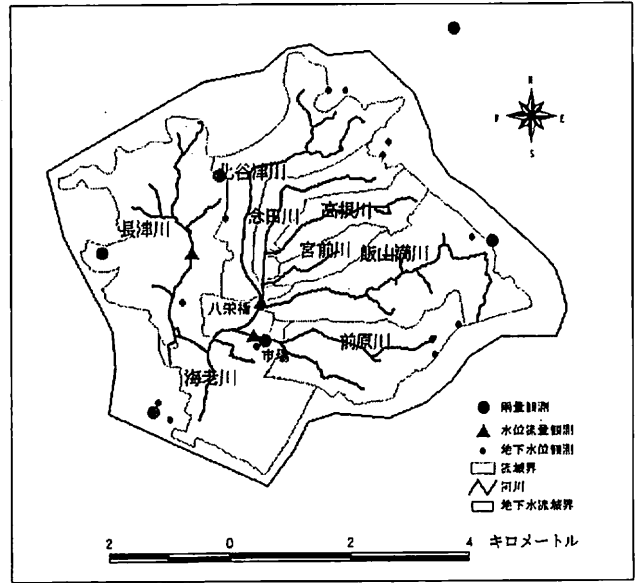


図-1 海老川流域

表-1 海老川流域の土地利用 (単位: 100m<sup>2</sup>)

	現在 (1993年)			将来 (2035年)		
	全流域	前原川	八栄橋地点	全流域	前原川	八栄橋地点
山林	17,018	1,832	8,700	5,750	258	4,740
水田	14,800	1,424	7,844	8,457	641	5,431
畑	59,189	9,124	21,570	25,621	2,130	14,487
造成中地	3,113	0	1,787	3,113	0	1,787
空地	24,302	3,396	6,432	24,301	3,396	6,432
工業	8,222	142	1,477	8,222	142	1,477
一般低層住宅	63,209	9,705	13,744	120,144	19,510	29,826
密集低層住宅	6,657	944	931	6,657	944	931
中高層住宅	12,053	1,999	3,938	12,053	1,999	3,938
商業	14,221	1,239	3,351	14,221	1,239	3,351
道路	16,582	1,865	3,935	16,582	1,865	3,935
公園・緑地	9,496	521	4,511	3,741	67	1,885
その他	19,022	1,357	4,227	19,022	1,357	4,227
公益施設	19,022	1,357	4,227	19,022	1,357	4,227
河川・湖沼	1,240	2	128	1,240	2	128
その他	2	0	0	2	0	0
合計	269,126	33,550	82,575	269,126	33,550	82,575

## 3. モデルの構造と検証

### 3.1 モデルの概要

図-2は、水・熱循環解析モデルの1計算メッ

Analysis of Hydrological Cycle in Urbanized Watershed Model Development and Application to Ebi River Basin

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-3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をもとに、水量の連続式と Manning の流速公式を用いる kinematic wave 法により解析した。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。

細密数値情報における土地利用と本研究での土地利用分類とを表-2のように関係付けた<sup>3)</sup>。例えば、山林は本モデル中では丈の高い植生域が8割で、残りの2割が丈の低い植生域からなっているとされている。土壌の水分特性曲線及び不飽和透水係数は Herath ら<sup>4)</sup>を参考にして決定した。

### 3.2 水循環過程のモデル化

ここでは、図-2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<sup>1)</sup>を参照されたい。

#### (1) 蒸発散

エネルギー収支に基づき、空気力学的抵抗と植生群落抵抗の概念を導入した Penman-Monteith 方程式<sup>5)</sup>を用いて算出した。

#### (2) 表面流出 (R1)

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

$$R1 = \begin{cases} 0 & H_{SV} \leq H_{SVmax} \\ H_{SV} - H_{SVmax} & H_{SV} > H_{SVmax} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $P$ :降水量、 $H_{SV}$ :土壌-植生域での窪地貯留、 $H_{SVmax}$ :最大窪地貯留、 $E_{SV}$ :蒸発散、 $f_{SV}$ :一般化した Green-Ampt モデル<sup>6)</sup>で算出される浸透速度である。なお、降雨浸透以外の時には、不飽和帯での鉛直浸透を、一般化された Darcy の法則と水分の保存式から導出される

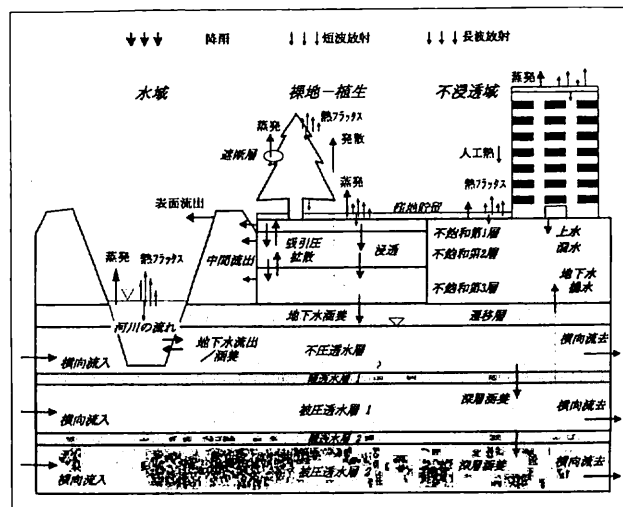


図-2 モデルの鉛直構造

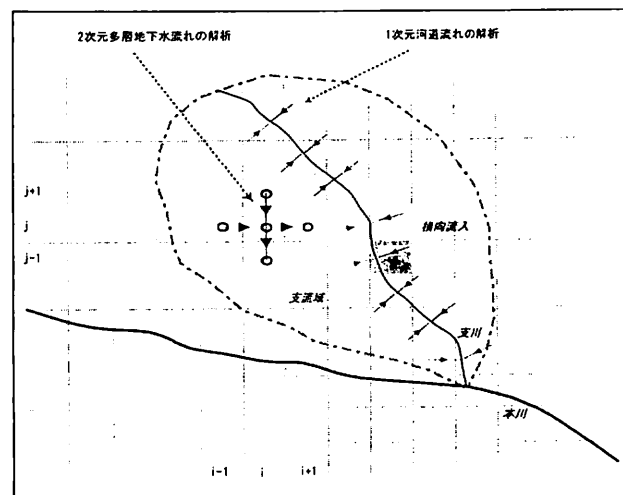


図-3 モデルの平面構造

表-2 土地利用分類

本研究 細密	水域	浸透域				不透透域		
		高い植物	低い植物	裸地	合計	低層都市	都市キャノピー	合計
山林	0.00	0.80	0.20	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
水田	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
畑など	0.00	0.20	0.80	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
造成中地	0.00	0.05	0.08	0.13	0.25	0.48	0.27	0.75
空地	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
工業	0.00	0.04	0.06	0.10	0.20	0.51	0.29	0.80
一般低層住宅	0.00	0.03	0.05	0.08	0.15	0.54	0.31	0.85
密集低層住宅	0.00	0.02	0.03	0.05	0.10	0.58	0.32	0.90
中高層住宅	0.00	0.04	0.30	0.50	0.20	0.51	0.29	0.80
商業	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.61	0.34	0.95
道路	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
公園・緑地	0.00	0.16	0.24	0.40	0.80	0.13	0.07	0.20
その他 公益施設	0.00	0.03	0.05	0.08	0.15	0.54	0.31	0.85
河川・湖沼	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
その他	0.00	0.14	0.21	0.35	0.70	0.19	0.11	0.30

Richards 方程式から算出した。

(3) 中間流出 (R2)

河川への中間流出を不飽和土壌層からの側方流れとして捉え、次式より計算した。

$$R2 = k(\theta) \sin(\text{slope}) Ld \quad (3)$$

上式中で、 $k(\theta)$ :体積含水率  $\theta$  の土壌の透水係数、 $\text{slope}$ :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。

(4) 地下水流れと地下水流出 (RG)

飽和地下水流れは不圧、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。

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

ここに、 $k_b$ :河床の土壌の透水係数、 $A_b$ :1メッシュ内の河床での浸透面積、 $d_b$ :河床での土壌厚である。

3.3 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。

$$RN + Ae = lE + H + G \quad (5)$$

上式において、 $RN$ :正味放射、 $Ae$ :人工熱排出、 $lE$ :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。詳細に関しては文献<sup>1),5)</sup>を参照されたい。

(1) 正味放射 (RN)

正味放射は次式により推定した。

$$RN = RS(1 - \alpha) + (RLD - RLU) \quad (6)$$

$RS$ :短波放射量、 $RLD$ :大気から地表への長波放射量、 $RLU$ :地表から大気への長波放射量、 $\alpha$ :アルベドである。短波及び長波放射量は位置、時

刻、日照、気温及び表面温度等から算出した<sup>5)</sup>。

(2) 潜熱フラックス (lE)

蒸発散と地表面温度の関数である水の潜熱を用いて算出した。

(3) 顕熱フラックス (H)

$$H = \rho_a C_p (T_s - T) / r_a \quad (7)$$

$\rho_a C_p$ :空気の熱容量、 $T_s$ :地表面温度、 $T$ :気温、 $r_a$ :空気力学的抵抗である。

(4) 人工排熱 (Ae)

土地利用別、時刻別に人工排熱を与えた<sup>7)</sup>。

(5) 地中熱フラックス (G)

$$G = (RN + Ae) - (lE + H) \quad (8)$$

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、熱伝導方程式の高速解法である Force-Restore 法<sup>5)</sup>を用いた繰り返し計算により地表面温度を算出した。

3.4 計算手順

地表面での水・熱輸送、地中での水分輸送、地下水流れ、河道内での流れの解析手順は、図-4のフローチャートに示すようであり、指定した年月日まで計算を進める。

4. モデルの検証

解析期間は1993年から1996年の4年間である。モデルのキャリブレーションは1993年の観測データを用いて行った。モデルの検証は河川流量と

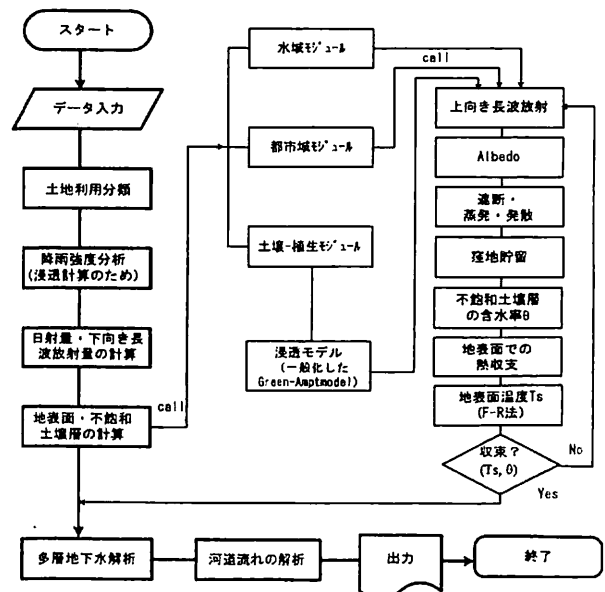


図-4 解析の手順

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4年間は降水量の平年値より少ない年である。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。

図-5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比較したものである。1996年の最大ピーク流量を除けば、出水時、低水時にかかわらず、計算結果と観測結果とは良好な一致を示している。1996年のピーク流量は降水量の割に大きな値を示しているが、その原因として、1996年に限って2地点での降水量データしか入手できておらず、正確な降水量分布を与えることができていないためと考えられる。

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-6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、本モデルは地下水に関してもほぼ妥当な結果を与えている。図-7は、地下水位の空間分布を比較したものである。地下水位の低い冬期に私有の井戸を利用して観測した結果と対比している。分布形は細部では差を生じているが、計算結果は全体的な分布形状を捉えている。

なお、熱輸送解析の妥当性は、観測データの不足のため、この流域では検証できていない。

### 5. 現状の分析と将来の予測

この流域では将来約5.7km<sup>2</sup>の市街地が新たに開発されるものと予測されている<sup>2)</sup>(表-1、図-8)。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、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た。なお、将来時点における気象条件は1993年と同一と仮定した。

水・熱輸送を時間単位で解析した結果をもとに、蒸発散量と顕熱フラックスの年間値を算出した。結果を図-9, 10に示す。現在においては、流域の中央部にて年間蒸発散量が600mmを越える地域

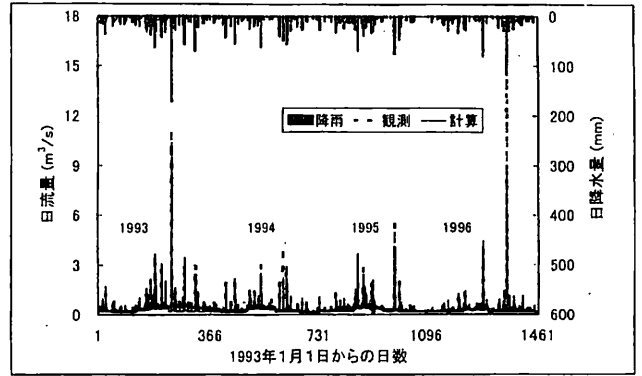


図-5 日流量の比較 (海老川八栄橋)

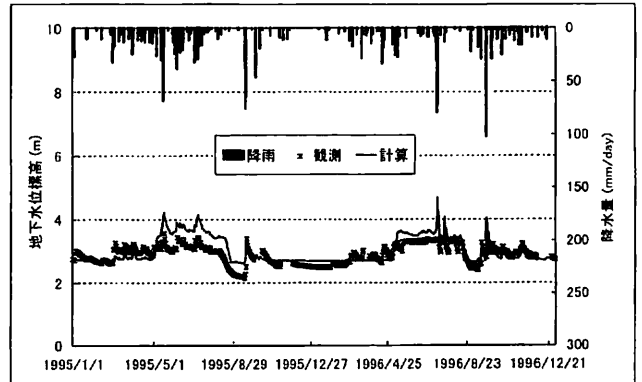


図-6 地下水位の比較 (前原川市場)

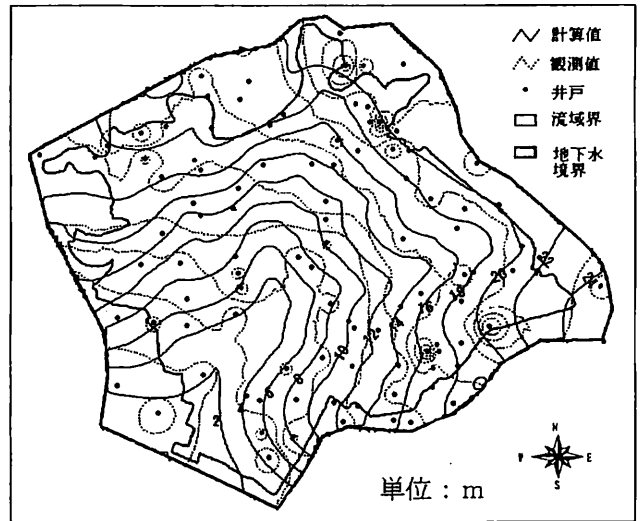


図-7 地下水位分布の比較 (1996年1月25日)

が広がっているが、将来においては、その地域は大幅に減少することが予想される。一方、気温上昇に関連する顕熱輸送の高い地域は、現在では流域の上流部と下流部の既成市街地であるが、将来ではさらに拡大すると考えられる。すなわち、都市化の進展により、表面流の増加や浸透量の減少、地下の水位低下とともに、ヒートアイランド現象の顕在化が懸念される。

流域全体での年間の水収支を検討した結果が図-11である。この流域では、現在、蒸発散、浸

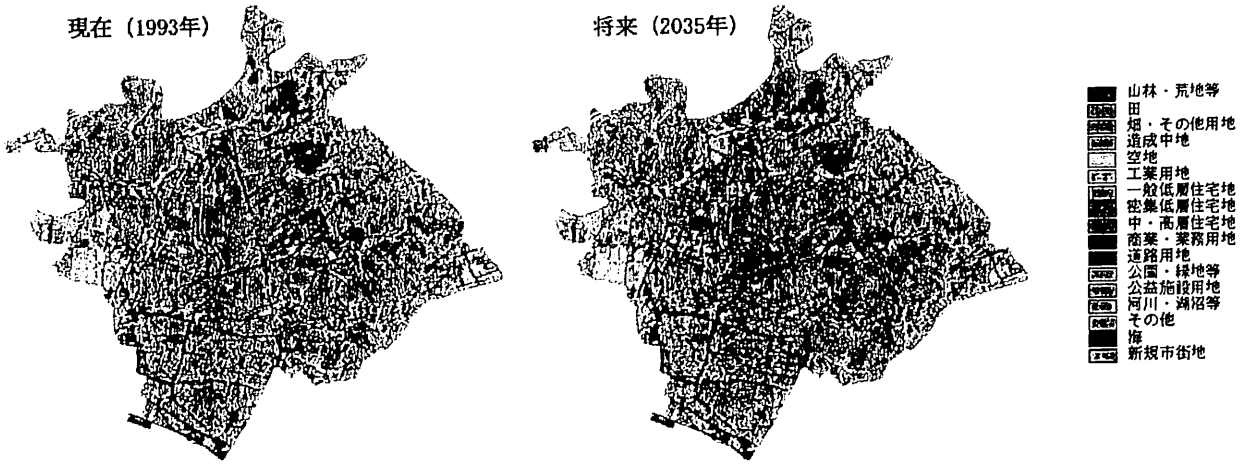


図-8 土地利用分布

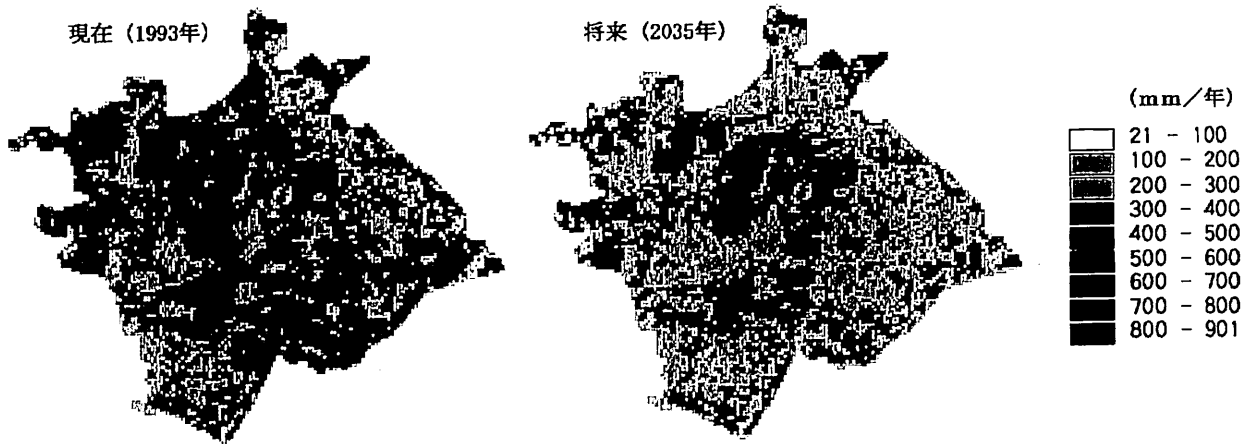


図-9 蒸発散量分布

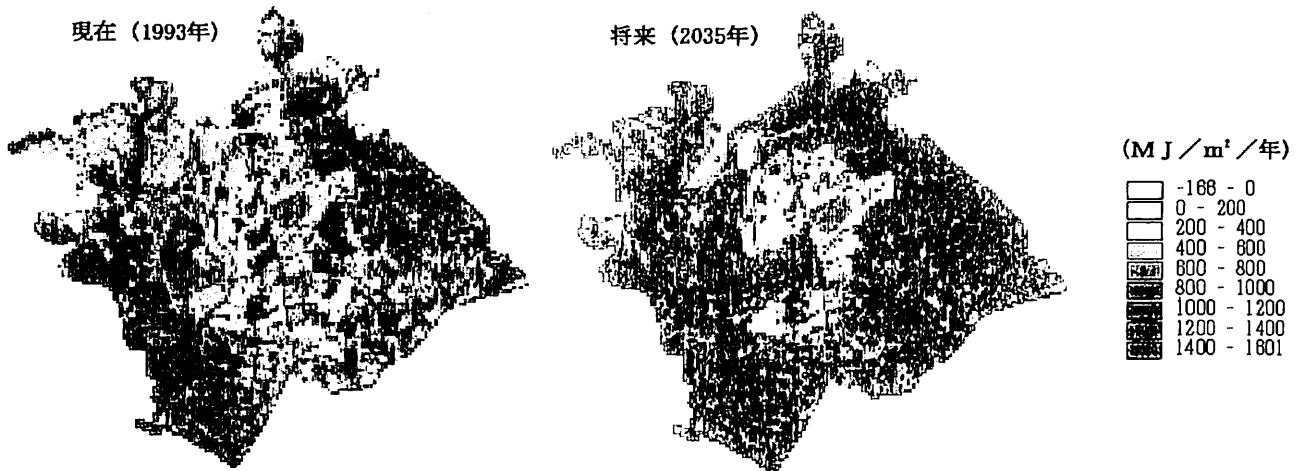


図-10 顕熱輸送量分布

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。なお、図中の上水は流域外からの上水と工業用水を、不浸透域での揚水も上水と工業用水を含んでいる。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減少するとともに、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。分流式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、水環境の保全を

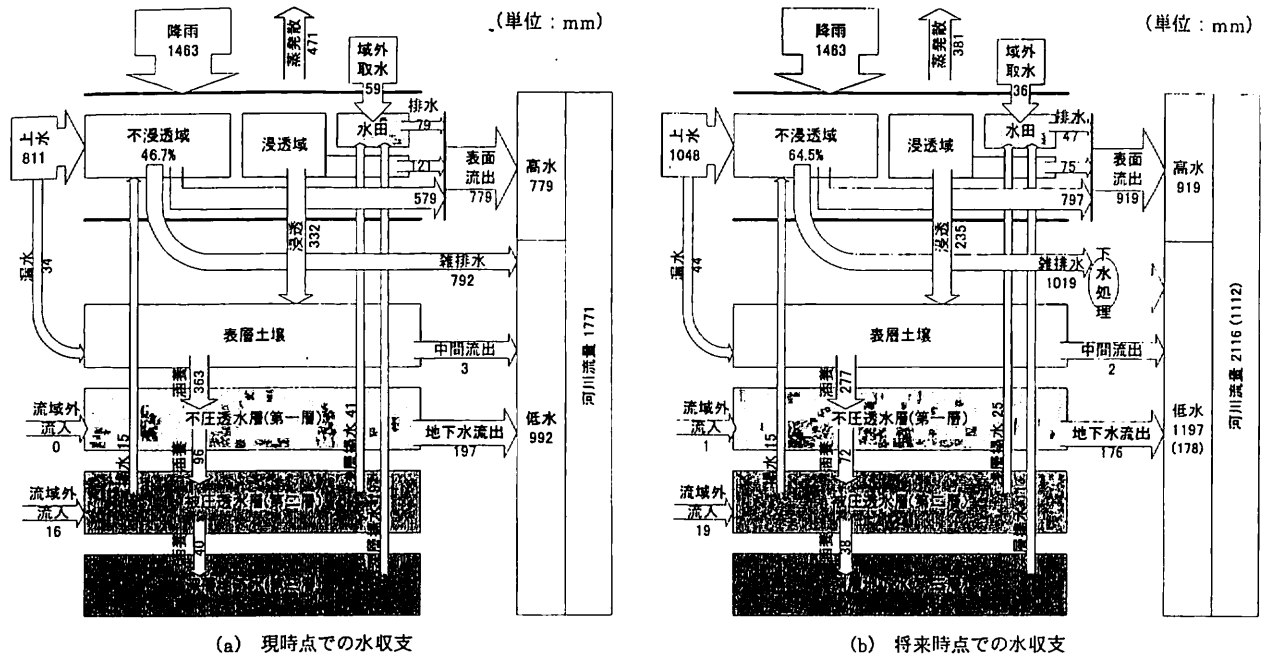


図-11 年間水収支の解析

図るための対策が不可欠であることが確認できる。

6. まとめ

都市河川流域を対象とした水・熱循環解析モデルを作成し、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、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が推測された。今後、モデルの改良を進めるとともに、雨水貯留浸透施設や下水処理水の再利用などの水循環改善対策の評価を行う予定である。

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教授、千葉県土木部都市河川課、社団法人雨水貯留浸透技術協会に感謝いたします。

参考文献

1) Jia, Y. and Tamai, N. : Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metro-polis with a dis-

tributed model, 水文・水資源学会誌第 11 巻, 第 2 号, pp.150-163, 1998.

2) 海老川流域水循環再生構想検討協議会：みんなでとり戻そう私たちの海老川 -海老川流域水循環再生構想検討-, 1997.  
 3) Muraoka, K. and Mahigashi, K. : hydrological cycle and water balance in urban area, Proc. 9th Congress of APD-IAHR, Vol.1, 219-224, 1994.  
 4) Herath, A. K., Mushiaki, K. and Hironaka, S. : Field estimation of saturated conductivity using borehole test, influence of unsaturated flow and soil anisotropy, Ann. J. Hy-draul. Eng., JSCE, vol.36, pp.435-440, 1992.  
 5) 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, 1994.  
 6) Jia, Y. and Tamai, N. : Modeling infiltration into a multi-layered soil during an un-steady rain, Ann. J. Hydraul. Eng., JSCE, Vol.41, pp.31-36, 1997.  
 7) 川又孝太郎：3次元都市熱環境解析モデルの開発, 東京大学土木工学専攻修士論文, 1994.

河原能久\*



建設省土木研究所河川部  
都市河川研究室  
主任研究員、工博  
Dr. Yoshihisa KAWAHARA

末次忠司\*\*



同 都市河川研究室長、  
工博  
Dr. Tadashi SUETSUGI

賈 仰文\*\*\*



同 都市河川研究室  
科学技術特別研究員、  
工博  
Dr. Yangwen JIA

倪 广恒\*\*\*\*



同 都市河川研究室  
交流研究員、工博  
Dr. Guangheng NI