

熱収支および土壌水分を考慮した蒸発散モデルを用いた土地利用種別による蒸発散量の推定

首都大学東京	都市環境学部	学生員	○菅沼大輔
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	河村明
株式会社建設技術研究所		正会員	古賀達也
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	天口英雄
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	中川直子
首都大学東京	都市環境科学研究科	学生員	高塚亮丞

1. はじめに

都市流域では山地流域とは異なり、雨水が浸透しない建物・道路などの不浸透域と公園・グラウンドなどの浸透域が複雑に分布している。都市流域の水循環過程を解明するには、浸透・不浸透域の分布状況を正確に表現可能であることが重要であり、このような土地利用情報を入力データとして利用できる分布型水循環モデルが必要である。しかし、これまで地表面地物要素毎の蒸発散量の違いを表現できるモデルは見あたらない。また、蒸発散量の計算に一般的に用いられるHamon式¹⁾、Thornthwaite式²⁾等を用いた手法は熱収支的側面についても考慮しておらず、蒸発散量の算定を精度良く行うためには、熱収支式を用いて求まる潜熱・顕熱により蒸発散量の推定を行う必要がある³⁾。

著者らは、高度に都市化が進展した神田川上流域を対象として、都市流域において複雑に形成された個々の建物、道路などの不浸透域、および公園、畑地などの浸透域を正確に表現できる高度な地物データGISを作成をしている⁴⁾。また、その高度な地物データGISを活用し、地表面地物要素毎の浸透特性と土壌水分量の違いを考慮し、熱収支式より蒸発散量を算出できる蒸発散モデル(TETモデル:Tokyo EvapoTranspiration)を提案している⁵⁾。

本研究では神田川上流域にTETモデルを適用し、2011年1年間の地表面地物要素毎の日蒸発散量の推定を行い、実測値との比較によりモデルの妥当性を検証するとともに、土壌水分量が地表面地物要素毎の蒸発散量の推定に与える影響について評価した。

2. TETモデルの概要⁵⁾

(1) 熱収支式による潜熱、顕熱評価

地表面の熱収支式を用いて、潜熱、顕熱を評価し、求められた潜熱より蒸発散量の推定を行う⁶⁾。式(1)は熱収支式の基礎方程式、式(2)はステファン・ボルツマンの法則から与えられる式、式(3)は入力放射 R の定義式、式(4)は R で示される熱収支式、式(5)は式(1)~(3)の変形式である。式(6)および(7)はバルク式より与えられる式、式(8)および(9)はTetensの式⁷⁾である。

ここに、 R_n : 正味放射量(W/m²)、 H : 顕熱伝達量(W/m²)、 ℓE : 潜熱伝達量(W/m²)、 G : 地中熱伝達量(W/m²)、 L_{soil} : 地表面放射量(W/m²)、 σ : ステファン・ボルツマン定数(5.67×10⁻⁸W/m²・K⁻⁴)、 T_s : 地表面温度(K)、 ε : 射出率(無次元)、入力放射 R (W/m²)、 α : 地表面の反射率アルベド(無次元)、 R_{glob} : 全天日射量(W/m²)、 L_{sky} : 大気放射量(W/m²)、 c_p : 空気定圧比熱(1005J/kg/K)、 ρ : 空気密度(kg/m³)、 C_H : 顕熱輸送のバルク係数(無次元)、 U : 観測地点の風速(m/s)、 T : 大気気温(K)、 ℓ : 水の気化潜熱(2.5×10⁶J/kg)、 β : 蒸発効率(無次元)、 q_{SAT} : 地表面温度 T_s に対する飽和比湿(無次元)、 q : 大気の比湿(無次元)、 e_{SAT} : 地表面温度 T_s (°C)の時の飽和水蒸気圧(hPa)、 p : 気圧(hPa)である。

$$R_n = H + \ell E + G \quad (1)$$

$$L_{soil} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2)$$

$$R = R_n + L_{soil} \quad (3)$$

$$R = (1 - \alpha) R_{glob} + L_{sky} \quad (4)$$

$$R = \varepsilon \sigma T_s^4 + H + \ell E + G \quad (5)$$

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (6)$$

$$\ell E = \ell \rho \beta C_H U (q_{SAT} - q) \quad (7)$$

$$q_{SAT} = 0.622 e_{SAT} / (p - 0.378 e_{SAT}) \quad (8)$$

$$e_{SAT} = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 T_s}{T_s + 237.3}} \quad (9)$$

G は陸地面において毎日同じような気象条件が続いている場合は日中・夜間でプラス・マイナス0となる⁶⁾。本研究でも日平均状態を対象とするため、 G については0としている。

R_n は通常観測されていないため、式(1)の代わりに式(3)で定義される入力放射 R を用いた熱収支式(4)を用いる。また、 R は式(1)および式(2)を変形すると式(5)で表現される。式(4)の右辺は観測値等から算出されるため R は既知となり、式(8)および(9)より式(6)および(7)は T_s だけの関数と表され、 T_s について解くことにより ℓE と H を求めることができる。式(5)より算出された ℓE より蒸発散量 E の推定を行う。

キーワード 熱収支 蒸発散 土壌水分 高度な地物データGIS 神田川上流域

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1 首都大学東京 E-mail suganuma-daisuke@ed.tmu.ac.jp

また、推定される蒸発散量は、観測地点の高度および風速を用いて算定される $C_H U$ 、地表面地物要素毎の土壌水分量から逐次算定される蒸発効率 β 、および土地利用種別毎に与えたアルベド α によって、TETモデルでは土地利用の違いを表現できるモデルとしている。

(2) SMPTモデルによる土壌水分量評価

実現現象の蒸発散量は土地利用や土壌の水分状態、および気象条件に影響されている。これらの現象を表現するため、TETモデルは図-1に示すような地表面地物要素の浸透特性と土壌水分量の違いによる蒸発散量を表現できる蒸発散モデルとしており、表層土壌への浸透過程を表現するモデルとしてはSMPTモデル(Soil Moisture Parameter Tank Model)⁸⁾による浸透域モデルとし、不浸透域においては窪地貯留を考慮した不浸透域モデルとしている⁹⁾。SMPTモデルにおける浸透域モデルは表層土壌モデルと地下水層モデルの2つから構成されているが、TETモデルでは表層土壌モデルのみを採用し、簡易な表層土壌浸透モデルとしている。そして、表層土壌浸透モデルからの浸透量は、系外に放出するものとしている。

(3) 土壌水分量を考慮した蒸発散量の推定

TETモデルは、浸透域に対して蒸発効率 β を計算し、これから求まる潜熱、顕熱を算定することにより、土地利用種別毎の違いによる土壌水分量を考慮した蒸発散量の推定を行うモデルである。式(7)における蒸発効率 β は可能蒸発散能 E_p と実蒸発散量 E の比(E/E_p)として定義される。なお、 β については竹下らが提案している関係式⁹⁾を参考とし、値が0~1となるように式(10)および(11)を用いて算出した。

$$\beta = 1 - \frac{2}{1 + \exp(-k \times \lambda_x)} \quad (10)$$

$$\lambda_x = 1 - \frac{1}{(1 - \lambda_w)} \quad (11)$$

ここに、 k ：土地利用種別毎の蒸発散係数、 λ_x ：土壌水分係数、 λ_w ：地表面地物要素毎の土壌水分率(飽和土壌水分量 $S_{sat}(\text{mm})$ に対する土壌水分量 $S(\text{mm})$)である。

すなわち、TETモデルはSMPTモデルによる簡易な表層土壌浸透モデルをもとに土地利用種別毎の飽和土壌水分量 S_{sat} を設定し、時間(t)における地表面地物要素毎の土壌水分量 $S(t)$ から土壌水分率 $\lambda_w(t)$ を求めることで、蒸発効率 $\beta(t)$ を算出している。なお、不浸透地物においては、 $\beta=1$ の場合の蒸発散量である可能蒸発散能 $E_p(t)$ に補正係数の0.6(鴨下ら¹⁰⁾を参考に設定)を乗じた量を実蒸発散量 $E(t)$ とするが、窪地貯留の水量がそれより小さい場合は窪地貯留の水量を実蒸発散量 $E(t)$ とした。

3. 対象流域と計算条件

本研究では図-2に示す神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの上流域約11.5km²、流路延長約9kmを対象流域として設定した。図-3に対象とする神田川上流域の高度な地物データGISを示すが、本流域の全地物を20の土地利用種別に分類している。

2011年の1月~12月を対象に、TETモデルを用いて日単位の個別地物の蒸発散量の推定を行った。バルク式に用いる日平均気温、風速については対象流域近傍の気象庁アメダス「府中」における観測値を用いた。全天日射量については府中観測所では観測されていないが、空間スケールは20km~30kmの範囲⁶⁾とされるため、対象流域から約15km離れた、アメダス「東京」の観測値を用いた。大気放射量については、近藤の提案する手法⁶⁾により算出した。高度な地物データGISでは、表-1に示す通り20の土地利用種別に分類しており、それぞれに浸透域または不浸透域の設定を行っている。

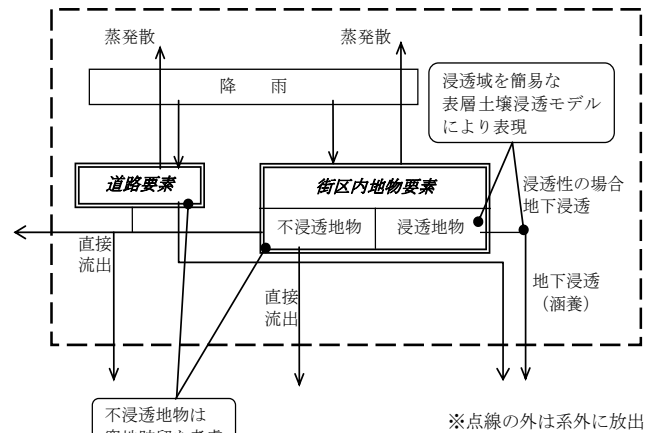


図-1 本研究における蒸発散モデルの概要

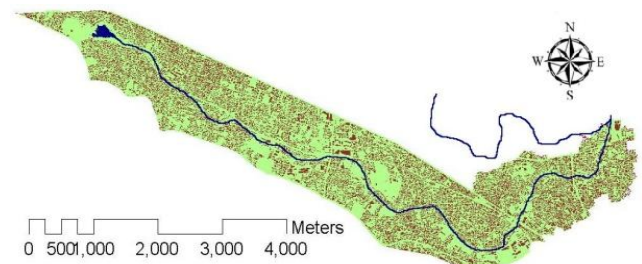


図-2 対象とした神田川上流域位置図

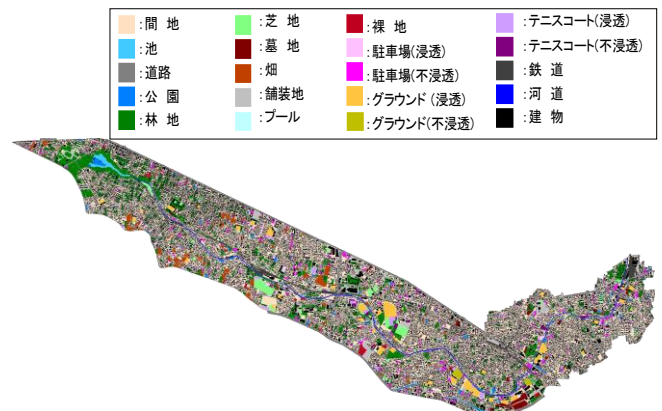


図-3 神田川上流域の高度な地物データGIS

浸透域についての蒸発散のパラメータ(表-1)については、土地利用種別毎の実測蒸発散量を用いたキャリブレーションにより設定することが望ましいが、ここでは流域全体の蒸発散量が妥当なものとなるように竹下ら⁹⁾、藤田ら¹¹⁾および荒木ら¹²⁾の値を参考として、20の土地利用種別のうち浸透域である10種の土地利用種別について蒸発散のパラメータを設定した。なお、浸透域の土地利用種別は10種存在するが大きく4グループされ、それぞれのグループ内の土地利用種別毎のパラメータは同様とした。グループ1は林地のみ、グループ2は畑のみ、グループ3は駐車場(浸透)、グラウンド(浸透)、芝地、公園、墓地、テニスコート(浸透)、間地(浸透域分)の7種別、グループ4は裸地とした。また、不浸透域である建物、駐車場(不浸透)、グラウンド(不浸透)、舗装地、鉄道、間地(不浸透域分)、テニスコート(不浸透)、プール、道路、池、河道についてはグループ5とし窪地貯留高は一般的な値¹³⁾の2mmと設定した。

4. 蒸発散量の結果

図-4に、入力条件として与えた府中観測所の日雨量、日平均気温と各グループの蒸発散量時系列を示す。浸透域については蒸発散のパラメータが同値であれば同様の蒸発散量であるため、図-4には浸透域の4グループと不浸透域の5土地利用種別の蒸発散量時系列を示している。また、熱収支より算定されるグループ1の可能蒸発散能についても併記している。府中観測所の日平均気温は、7月～8月が約30℃とピークであり、熱収支式より算定される可能蒸発散能は最大で約7mm/dayとなっている。図-4より7月中旬では林地の蒸発散量は可能蒸発散能に対して小さい。これは7月は降雨が少なく蒸発により土壌水分が減少していくことにより、蒸発効率 β が小さくなるからである。図-5には、土地利用種別毎の蒸発散量の累積図を示す。この図では、蒸発散ボリュームが大きい間地、道路、林地、建物の4種の土地利用種別とその他16種別は合計とし計5種を示している。間地、道路、林地、建物の4土地利用で、全地物の合計蒸発散ボリュームの85%を占めており、その内訳はそれぞれ間地(28%)、道路(10%)、林地(28%)、建物(19%)となっている。道路および建物は不浸透域であり単位面積あたりの年間蒸発量は170mm/yearと小さいが、それぞれの面積率が道路(16%)、建物(29%)と大きい結果として蒸発散ボリュームが大きくなっている。間地についても単位面積あたりの年間蒸発散量は252mm/yearであるが面積率が29%と大きくこのような結果となっている。また、林地については面積率は9%と小さいが、単位面積あたりの年間蒸発散量が817mm/yearと大きい結果として蒸発散量が大きな割合を占めている。この図のように、単位面積当たりの蒸発散量が同値でも土地利用種別毎に面積が異なっているため、それに伴い蒸発散量は変化する。

表-1 土地利用種別毎面積率、蒸発散のパラメータ

No	土地利用種別	浸透特性	面積 (km ²)	面積率 (%)	飽和土壌 水分量 (mm)	最小 容水量 (mm)	地下水 涵養定数 (1/s)	初期 水量 (mm)	蒸発散 係数	アル ベド	定数が 同値の グループ※
1	建物	不浸透	3.38	29.39	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
2	駐車場(浸透)	浸透	0.06	0.52	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
3	駐車場(不浸透)	不浸透	0.21	1.80	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
4	グラウンド(浸透)	浸透	0.23	1.96	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
5	グラウンド(不浸透)	不浸透	0.02	0.20	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
6	林地	浸透	1.04	9.05	138	110	0.8	97	4.38	0.15	グループ1
7	芝地	浸透	0.17	1.49	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
8	畑	浸透	0.19	1.64	104	83	0.8	73	0.55	0.23	グループ2
9	公園	浸透	0.10	0.91	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
10	墓地	浸透	0.07	0.61	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
11	舗装地	不浸透	0.38	3.30	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
12	鉄道	不浸透	0.15	1.30	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
13	間地	50%浸透	3.43	29.83	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
14	テニスコート(浸透)	浸透	0.05	0.47	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
15	テニスコート(不浸透)	不浸透	0.03	0.26	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
16	裸地	浸透	0.05	0.46	80	64	0.8	56	0.13	0.10	グループ4
17	プール	不浸透	0.01	0.10	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
18	道路	不浸透	1.79	15.52	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
19	池	不浸透	0.04	0.31	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
20	河道	不浸透	0.10	0.87	-	-	-	-	-	0.12	グループ5

※グループ5は不浸透域で、直接流出開始高を2mmに設定

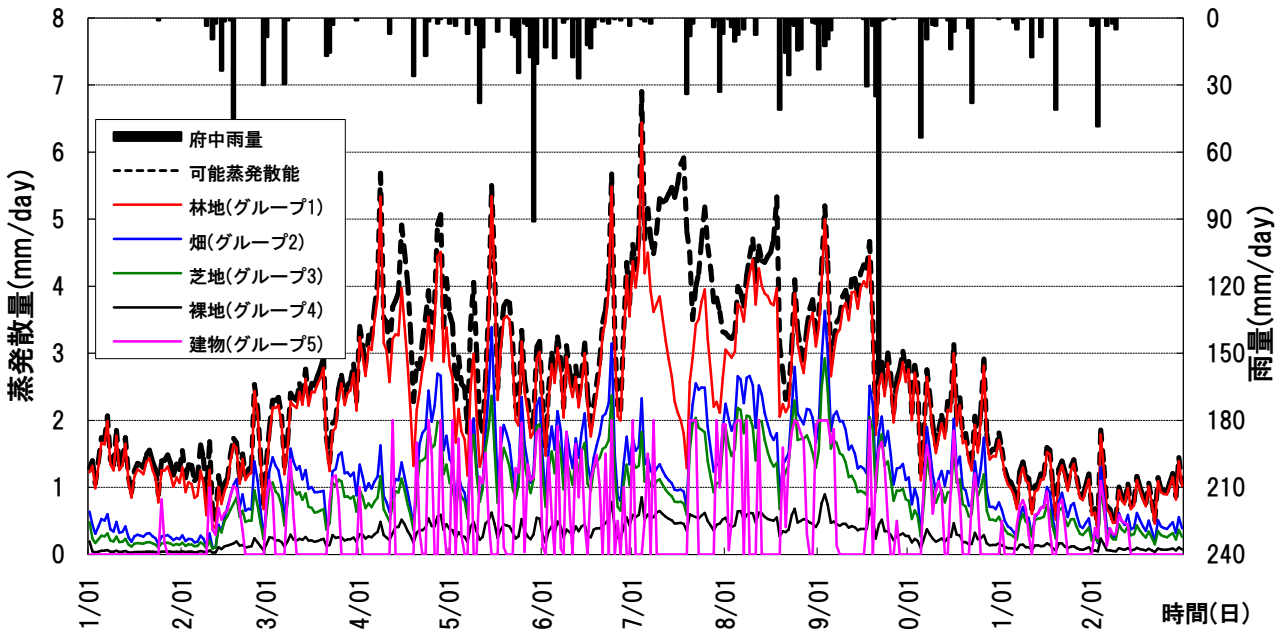


図-4 土地利用種別毎の蒸発散量

以上の結果から、TETモデルで算定した蒸発散量の妥当性について検証を行う。まず神田川上流域の全体の水収支の観点から推定を試みる。府中の2011年の年間総雨量は1,428mmであり、流域全体の総雨量ボリュームに換算すると1,683万 m^3 となる。これに対し、TETモデルで算出された全地表面地物要素からの年間総蒸発散ボリュームは図-5に示す通り307万 m^3 となった。すなわち、蒸発散の割合は約20%となる。一方、神田川全流域の流域平均雨量と年間蒸発散量は1,512mm/yearおよび231mm/year程度¹⁴⁾、東京都全域の年間雨量と蒸発散量は1,405mm/yearおよび412mm/year程度¹⁵⁾となっており、雨量に対する蒸発散の割合は15%および29%程度のオーダーであると考えられ、TETモデルで算出された蒸発散比20%は妥当な値となっている。次に、林地の蒸発散量について検討してみると、日本の森林の一般的な蒸発散量は500~1,100mm/year⁵⁾のオーダーと推定されているが、TETモデルで算定した林地の蒸発散量は982mm/yearであり、妥当な結果となっている。これによりTETモデルでは従来評価されていなかった土地利用毎の浸透特性および土壌水分量を考慮した蒸発散量の推定が可能であると考えられる。

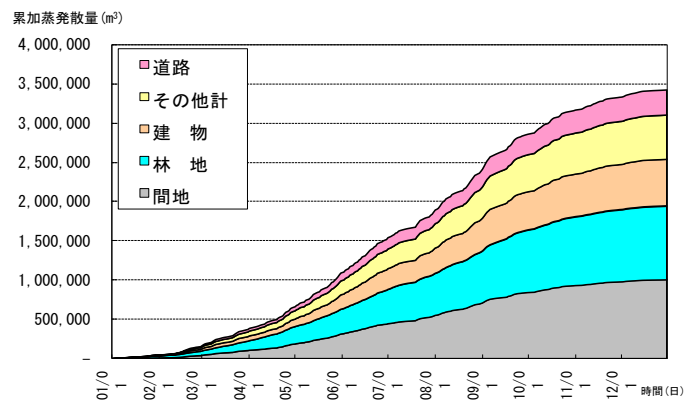


図-5 土地利用種別毎の蒸発散量累積図

5. むすび

都市流域において非常に複雑に形成された個々の建物、道路などの不浸透域、および公園、畑地などの浸透域を正確に表現できる高度な地物データ GIS を活用し、バルク式による熱収支式を用いて地表面地物毎の土地利用の違いおよび土壌水分量の状態を考慮した蒸発散量が算定可能な神田川上流域において 2011 年の 1 年間の地表面地物毎の潜熱、顕熱および蒸発散量の算定を行った。その結果、地表面地物毎の潜熱、顕熱および蒸発散量を推定できることを確認し、実測値との比較によりその妥当性を確認した。また、神田川流域での空間的な蒸発散量の違いおよび地物表面温度の空間分布について把握することができた。

参考文献

- 1) Hamon, W.R. : Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961
- 2) Thornthwaite, C.W. : An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review, Vol. 38,
- 3) 古賀達也, 河村明, 天口英雄 : 高度な地物データ GIS を用いた都市流域における蒸発散モデルの構築とその適用, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.1771-1776, 2013.
- 4) 天口英雄・河村明・荒木千博・高崎忠勝 : 神田川上流域の地物データを用いた洪水流出モデルの構築とその適用, 河川工学), Vol.68, No.4, pp.505-510.
- 5) 古賀達也, 河村明, 天口英雄 : 熱収支及び土壌水分を考慮した地表面地物要素毎の蒸発散モデルの構築と実流域への適用, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.70, 2014.(掲載予定)
- 6) 近藤純正 : 地表面に近い大気の科学
- 7) 水文・水資源学会 : 水文・水資源ハンドブック, p.43, 1997.
- 8) 安藤義久・虫明功臣・高橋裕 : 丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響, 第25回水理講演会論文集, pp.197-208, 1981
- 9) 竹下伸一・高瀬恵次 : 蒸発散サブモデルを導入した長期間流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.1, pp. 23-32, 2003.
- 10) 鴨下泰典, 藤村和正, 高崎忠勝 : 井の頭池における水文観測地下水位解析 : 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第63巻, No.02, pp.11-12, 2008.
- 11) 藤田光一・伊藤弘之・小路剛志・安間智之 : 国土技術政策総合研究所資料第299号水物質循環モデルを活用した水環境政策評価〜霞ヶ浦とその流域を対象として〜, p.34, 2006.
- 12) 荒木千博・河村明・天口英雄・高崎忠勝・須藤正大 : 神田川流域の地物データGISを用いた地下水涵養モデルの構築とその適用, 河川技術論文集, 第15巻, pp.371-376, 2009
- 13) 都市小流域における雨水浸透, 流出機構の定量的解明」研究会 : 都市域における水循環系の定量化手法ー水循環系の再生に向けてー, 第二編 技術解説, p.58, 2000.
- 14) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議 : 神田川流域水循環系再生構想検討報告, p.5, 2003.
- 15) 東京都都市計画局都市づくり政策部広域調整課 : 東京都水循環マスタープランの概要, p.2.