

流域の都市化に伴う水文環境アセスメントに関する一考察

東京大学工学部土木工学科	正員	○安藤義久
東京大学工学部土木工学科	正員	高橋裕
東京都土木技術研究所	正員	和泉清
東京大学大学院	学生員	金尾健司

1. 緒 論

1-1. 都市開発の状況と水文環境アセスメント

わが国では、1955年頃から大都市の周辺で大規模な都市開発が行われてきている。田村¹⁾は、ニュータウンの立地は丘陵地と台地に集中しており、最近ではとくに丘陵地に多く、開発規模については 10km^2 以上のものであることを指摘している。従って、中小河川流域の場合には流域全体が開発の影響を受けると考えられる。ニュータウンなどによる大規模な都市化に伴う環境アセスメントは、様々な側面について実施されている。²⁾ その中の一側面として、「水文環境アセスメント」がある。³⁾ 本稿では、流域の都市化に伴う水文環境アセスメントに的を絞って検討する。なお、「水文環境」とは、「環境の中で水循環に係る範ちゅう」とここでは定義しておく。

1-2. 流域の都市化に伴う水文環境アセスメントのフレーム・ワーク

流域の都市化は、造成による地表の改変、建物・道路などの建設による土地被覆の変化、河道改修・下水道の整備などの用排水システムの変化を伴う。このインパクトは、図1に示すような水文環境の変化をもたらす。すなわち、流域の都市化は洪水流出機構を変化させ、洪水ピーク流量を増大させ、水害の危険を増加させるので、それを防衛するように治水計画を策定する必要がある。流域の都市化は低水流出機構を変化させ、流況を悪化させ、下流の農業用水不足や環境維持用水の不足をもたらす場合もあり、利水・親水計画の課題となる。流域の都市化は、地下水涵養機構を変化させ、地下水の減少、井戸の枯渇などを招き、地下水管理計画の課題を提供する。流域の都市化は、土砂流出機構を変化させ、特に造成中の流出土砂の増大をもたらす。河床の上昇などを招くので、砂防計画上の配慮が必要となる。さらに、流域の都市化は汚濁収支機構に変化を与え、河川の水質を変化させ、河川水の汚濁をもたらす場合が多く、水質管理計画としての検討が必要となる。以上のように、流域の都市化というインパクトは、水文環境全般に影響を与えるので、水文環境の変化を予測し、ある評価基準（または評価尺度）により評価するという手順で「水文環境アセスメント」を行う必要がある。

1-3. 水文環境アセスメントにおける日単位の水循環モデルの重要性とその要件

流域の都市化による洪水流出機構の変化に関する研究は多く、実用化したモデルもいくつかあり、治水計画の策定に用いられている。一方、下流側の農業用水の確保の必要のある地域では、低水流出が問題となり、流域の都市化を評価する日単位の水循環モデル（長期流出モデル、低水流出モデル）が必要となる。また近年、都市の中の河川空間の重要性・河川の親水機能の重要性が再認識されており、⁴⁾⁵⁾ 河川空間計画の基礎的情報としても流域の都市化に伴う低水流出の変化（流況の変化）を予測するモデルが重要となる。その上、流域の都市化による汚濁流出機構の変化を予測する場合にも、日流量の予測がまず必要となると考えられる。以上から、水文環境アセスメントにおける日単位の水循環モデルの重要性が高いことがわかる。筆者らは、流域の都市化に伴う水文環境アセスメントにおける日単位の水循環モデルの要件として次の2点が重要と考えている。

- (1) モデルのパラメーターが、流域特性と対応しており、モデルの構造が水循環の物理的過程を反映している。つまり、流域の都市化をモデルのパラメーターに組み入れられる。
- (2) モデルが簡単で、パラメーターの決定が容易であり、再現性がよい。

1-4. 事後評価の重要性

水文環境アセスメントだけでなく、環境アセスメント全体にイえることであるが、事前評価を行う前に、同種の開発行為の与える影響の事後評価を行うことが極めて肝要と考える。

1-5. 本研究の目的・対象・手順

本研究の目的は、流域の都市化に伴う水文環境アセスメントに有用な、日単位の水循環モデルを作成し、その適用性を示すことにある。対象は、多摩ニュータウン地区である。まず、多摩ニュータウン地区の自然流域（大栗川流域）と都市流域（乞田川流域）の水循環機構を検討し、両流域の水循環モデルの比較による都市化の影響の事後評価を行う。次に、自然流域である大栗川流域の将来の都市化を想定して、大栗川流域の都市化に伴う水文環境アセスメントへの水循環モデルの応用を検討する。

2. 流域の都市化に伴う水循環機構の変化のモデル化による事後評価

2-1. はじめに

安藤・虫明・高橋⁶⁾は多摩ニュータウン地区内に設置された自然小試験流域（長池流域）と都市小試験流域（永山流域）において雨量・流量だけでなく、不飽和帯水分量・地下水位・蒸発量といった水循環過程に沿って一貫した観測を行い、両流域の水循環機構を把握し、モデル化により丘陵地の水循環機構の都市化による変化を評価した。これをふまえて、安藤・高橋⁷⁾⁸⁾は雨量・流量データしかない山地と丘陵地の自然流域へ適用しうる汎用性のある水循環モデル（長期流出モデル）を開発した。本稿では、多摩丘陵の自然流域だけでなく、都市流域への応用について検討する。

2-2. 自然流域と都市流域の水循環過程

図2(a)には、自然流域の水循環過程の模式図を示す。流域は飽和流出域と浸透域に大別される。飽和流出域は河川の流水面とそれに近接する湿地・池沼などで構成され、小雨でも直接流出が生起すると考えられる。浸透域は、尾根・斜面など、通常は植生と土壌を有する領域で、小雨では浸透すると考えられる。飽和流出域への降水(P_s)は、そのまま直接流出(D_s)となる。浸透域の降水(P_i)の一部は樹冠遮断(I_c)となり、残りは土中への浸透(I)となる。 I の一部は不飽和帯水分量(M_s)を増大させ、一部は浸透域からの直接流出(D_i)と蒸発散(E_i)となり、残りが地下水涵養(G)となる。 G は地下水貯留(S_g)を増大させる。地下水流出(Q_g)は地下水貯留(S_g)に由来する。飽和流出域からの蒸発散(E_s)もある。総流出(Q)は、($D_s + D_i + Q_g - E_s$)に等しい。

図2(b)には、都市流域の水循環過程の模式図を示す。流域は不浸透域と浸透域に大別される。不浸透域は建物・道路などで構成され、小雨でも直接流出が生起すると考えられる。浸透域は林地・芝生地などで構成され、小雨では浸透すると考えられる。不浸透域への降水(P_{imp})は、初期損失(L)を除いて、そのまま直接流出(D_{imp})となる。浸透域への降水(P_i)の一部は窪地貯留(S_d)となり、残りは土中への浸透(L)となる。 L の一部は不飽和帯水分量(M_s)を増大させ、一部は浸透域からの直接流出(D_i)と蒸発散(E_i)となり、残りが地下水涵養(G)となる。 G は地下水貯留(S_g)を増大させる。地下水流出(Q_g)は地下水貯留(S_g)に由来する。総流出(Q)は、($D_{imp} + D_i + Q_g$)に等しい。

2-3. 対象流域の概要

図3には、対象流域の概要を示すが、大栗川流域（流域面積 20.9 km^2 ）はまだ都市化があまり進んでいないので、ここでは自然流域と考える。乞田川流域（流域面積 13.5 km^2 ）は、多摩ニュータウンによる都市開発がかなり進んでおり、都市流域とみなせる。なお、図中に示すように両流域には雨量・流量観測点がそれぞれ一ヶ所ずつある。また、表1には両流域の土地利用の内訳（出典は参考文献9）を示す。

2-4. 直接流出

図4には、大栗川流域と乞田川流域の一雨雨量と直接流出量の相関図を示す。図4中の大栗川流域の図中の点のバラツキは大きいですが、図中に示す折線で近似する。図4中の乞田川流域の図中の点は、直線で表されることがわかる。これらの直線を式で表示すると次のようにかける。単位は、 mm である。

$$\text{大栗川流域：} \begin{cases} D = 0.12P & 0 \leq P < 50 & \dots\dots\dots ① \\ D = 0.12P + 0.31(P - 50) & 50 \leq P & \dots\dots\dots ② \end{cases}$$

$$\text{乞田川流域：} \quad D = 0.58(P - 2) \quad \dots\dots\dots ③$$

なお、Dは一雨ごとの直接流出量を表し、Pは一雨雨量を表す。上記の式は、次のように一般化してかける。

$$\text{自然流域：} \begin{cases} D = f_0 P & 0 \leq P < P_1 & \dots\dots\dots ④ \\ D = f_0 P + f_1(P - P_1) & P_1 \leq P & \dots\dots\dots ⑤ \end{cases}$$

$$\text{都市流域：} \quad D = I_{\text{imp}}(P - L) \quad \dots\dots\dots ⑥$$

f_0 を基本流出率、 f_1 を1次付加流出率、 P_1 を1次遷移雨量と名付けた。自然流域ではPが P_1 未満の小雨の場合には、 f_0 に相当する谷部の飽和域の一部から直接流出が生起し、Pが P_1 以上の場合には f_1 に相当する谷部の飽和域全体から直接流出が生起すると解釈される。大栗川流域は完全な自然流域ではないので、直接流出の生起領域の一部には住宅地造成地内の不浸透域が含まれていると考えられる。但し、多摩ニュータウン地区の他流域についても示したように、林地からは直接流出は生起せず、林地は浸透域である。¹⁰⁾ 一方、都市流域に関しては、⑥式に示すように、一雨雨量Pから不浸透域の損失Lをひいたものに、不浸透域面積率 I_{imp} をかけたものが直接流出となる。⁶⁾ 乞田川流域の場合には、 $L = 2 \text{ mm}$ 、 $I_{\text{imp}} = 0.58$ である。

2-5. 地下水流出⁷⁾

無降雨期間のハイドログラフの通減部から地下水流出のパラメーターは決定される。即ち、通減部に被圧通減式(指数関数通減式)と不圧通減式(分数関数通減式)をあてはめ、適合度のよい方を選ぶ。⁷⁾

$$\text{被圧通減式} \quad Q_g = Q_0 \exp(-Ac \cdot t) \quad \dots\dots\dots ⑦$$

$$\text{不圧通減式} \quad Q_g = Q_0 / (1 + Au \cdot Q_0 t)^2 \quad \dots\dots\dots ⑧$$

但し、 Q_0 :初期流量、 Ac :被圧通減係数、 Au :不圧通減係数、 t :時間(日)である。

両式の適合度の判定基準は、相関係数の大小と、通減係数が初期流量に対して一定とみなせるかどうかである。実流域へ適用してみると、前者の基準より後者の基準の方が有効であることが判明している。⁷⁾ ⑦、⑧式から、それぞれ⑨、⑩式の貯留関数が導かれる。

$$\text{被圧地下水流出の貯留関数} \quad Q_g = Ac \cdot S_g \quad \dots\dots\dots ⑨$$

$$\text{不圧地下水流出の貯留関数} \quad Q_g = Au^2 \cdot S_g^2 \quad \dots\dots\dots ⑩$$

日本全国の山地河川流域へ⑦、⑧式をあてはめたところ、ほとんど全ての流域で不圧通減式が適合性が優れていることが判明している。¹¹⁾ そこで、本稿で対象とする2流域の場合には1年間の雨量・流量データしなく、⑦、⑧式の適合性を判定できないので、他の流域と同様に不圧通減式を採用する。図5には、大栗川流域と乞田川流域の不圧通減係数と初期流量の相関図を示す。地下水流出のパラメーターの代表値としては飽和域からの蒸発散の影響の小さい冬季不圧通減係数を採用する。即ち、大栗川流域と乞田川流域の地下水流出の通減係数の代表値は、それぞれ0.027と0.0030である。両流域の通減係数のオーダーが1ケタもちがう理由は、両流域の水文地質構造の相違のためと推察される。地下水流出に対する都市化の影響をみる場合にも流域の水文地質構造が大きく左右することはすでに指摘されている。¹²⁾ 本研究で対象とする大栗川流域と乞田川流域では、主要な帯水層と考えられる稲城砂層の層厚が乞田川流域では30m近くあるのに対して、大栗川流域では10m前後しかなく、両流域の地下水貯留能力が異なるため、両流域の地下水流出の通減係数に大差が生じたと推察される。

2-6. 地下水涵養

地下水涵養機構が、日単位では次式で表示できることは、すでに示されている。⁶⁾

$$G = \begin{cases} 0 & 0 \leq Ms < Mn \\ \beta(Ms - Mn) & Mn \leq Ms \end{cases} \quad \dots\dots\dots ⑪$$

但し、G:地下水涵養量、Ms:不飽和帯水分量、Mn:最小容水量、 β :地下水涵養の定数である。

多摩丘陵の小試験流域の自然流域である長池流域では $\beta = 1.0$ であり、都市流域である永山流域では $\beta = 0.7$ である。⁶⁾そこで、本研究の対象流域の中で、自然流域である大栗川流域では $\beta = 1.0$ とし、都市流域では $\beta = 0.7$ と仮定する。なお、最小容水量 Mn の大きさは、両流域とも小試験流域で得られた「浸透域換算で200 mm」という値をそのまま用いる。

2-7. 蒸発散

図6には、大栗川流域と乞田川流域の1979年の1年間の水収支結果を示す。この図をみると、都市流域（乞田川流域）の年蒸発量 $E_y(\text{Urban}) \approx 360 \text{ mm}$ であり、自然流域（大栗川流域）の年蒸発量 $E_y(\text{Natural}) \approx 610 \text{ mm}$ の60%程度にすぎず、小試験流域で得られた結果⁶⁾と符号する。筆者らは、自然流域は全域が蒸発散面であるのに対して、都市流域では浸透域では自然流域と同等の蒸発散があるが不浸透域では降雨毎に表面に保留された水分（直接流出の項で述べた L に当り、不浸透域換算で最大2 mm）が降雨中と降雨後に蒸発するだけであるためと考えている。即ち、都市流域の浸透域面積率を I_i 、不浸透域面積率を I_{imp} とすると次式が成り立つと考える。

$$E_y(\text{Urban}) = E_y(\text{Natural}) \times I_i + \Sigma L \times I_{imp} \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

乞田川、大栗川流域の場合には、(12)式の左辺は360 mm、右辺は356 mmとなり、(12)式が成り立っている。日単位の水循環モデルの適用に当っては、インプットとして日蒸発散量が必要である。年単位の水収支から求めた年蒸発散量をHamon式の月平均日蒸発散能により各月に比例配分し、それを更に小型蒸発計蒸発量により各日に比例配分して日蒸発散量を推定した。なお、本稿では、図3中に△印で示す東京農工大学波丘地利用実験実習施設の小型蒸発計蒸発量の値を用いた。

2-8. 水循環モデル

図7には、自然流域と都市流域の水循環モデルのフローを示す。日雨量 $P(t)$ と推定日蒸発散量 $E(t)$ が与えられる。直接流出量 $D(t)$ は図7(a)、(b)中の式で算定されるが、自然流域と都市流域ではこの部分が異なる。浸透量 $I(t)$ は、 $\{P(t) - D(t)\}$ である。 $I(t)$ は、不飽和帯水分量 $Ms(t)$ を増大させるが、浸透域からの蒸発散 $E_i(t)$ は $Ms(t)$ を減少させる。地下水涵養量 $G(t)$ は、超過保留量 $(Ms'(t) - Mn)$ に定数 β をかけて求まる。 $G(t)$ は地下水貯留量 $Sg(t)$ を増大させる。地下水流出量 $Qg(t)$ は、 $Sg(t)$ の2乗に比例する。自然流域の場合には、総流出量 $Q(t)$ は、 $\{D(t) + Qg(t) - Es(t)\}$ で算出される。ここに、 $Es(t)$ は飽和域からの蒸発散量であり、 $fo E(t)$ に等しい。他方、都市流域の場合には、 $Q(t) = Qg(t) + D(t)$ で算出される。

上記の水循環モデルによる計算流量と実測流量の比較を図8(a)、(b)に示すが、自然流域（大栗川流域）と都市流域（乞田川流域）の両方とも両者は対応しており、本稿で示した水循環モデルの妥当性が示せたといえる。

3. 流域の都市化に伴う水文環境アセスメントへの水循環モデルの応用

ここでは、現在のはほぼ自然流域に近い大栗川流域を対象にして、将来の都市化を想定した水文環境アセスメントへの水循環モデルの応用について検討する。

3-1. 大栗川流域の将来の都市化状況の想定

大栗川流域の将来の都市化状況として、次の2段階が想定される。

- (1) 流域内の多摩ニュータウン予定区域の都市化が完了し、大栗川左岸の市街化調整区域は緑地のままの状態であり、流域の不浸透面積率 $I_{imp} = 0.40$ と想定される。
- (2) 流域の全体に都市化が普及し、流域の不浸透面積率は乞田川流域と同程度の $I_{imp} = 0.60$ と想定される。

3-2. 大栗川流域の都市化に伴う河川流況の変化予測

大栗川流域の都市化に伴う河川流況の変化予測を行うため、図7(b)に示す都市流域の水循環モデルを用いる。パラメーターの値として、前述したように $I_{imp} = 0.40$ と $I_{imp} = 0.60$ 、 $L = 2 \text{ mm}$ 、 $\beta = 0.7$ 、地下水流出のパラメーター値は自然状態と変わらないと仮定して $Au = 0.027$ とする。雨量は、1979年の大栗川流域の雨量をそのまま用いる。こうして、 $I_{imp} = 0.40$ の場合と $I_{imp} = 0.60$ の場合の2通りについて、日流量を

予測し、その結果を流況曲線の形にまとめた（図9参照）。図9をみると、 $I_{imp} = 0.40$ の場合には、年最大流量・35日流量・豊水量の値は現状より大きくなるが、平水量以下では現状よりかなり小さな値となり、低水量・渇水量・年最小流量では現況の $\frac{1}{2}$ 程度になる。 $I_{imp} = 0.60$ の場合には、平水量以下で、 $I_{imp} = 0.40$ の場合より更に小さな値となる。いずれにしても、都市化に伴い、河川流況が悪化することが定量的に予測された。

4. 結 論

本稿で得られた主な成果を以下に列記する。

- (1) 流域の都市化（都市開発）に伴う水文環境アセスメントのフレーム・ワークを示し、水文環境アセスメントにおける都市化の影響を評価しうる日単位の水循環モデルの重要性を示した。
 - (2) 多摩ニュータウン地区の自然流域（大栗川流域）と都市流域（乞田川流域）の水循環機構を検討し、流域の都市化を評価しうる日単位の水循環モデル（図7参照）を作成し、その適用性を確めた。
 - (3) 現在ほぼ自然流域にちかい大栗川流域の将来の都市化を想定して、大栗川流域の都市化に伴う水文環境アセスメントへの上記の日単位の水循環モデルを応用し、河川流況の変化を予測しうる可能性を示した。
- なお、他の多くの流域へ水循環モデルを適用し、モデルを改良してその汎用性を高めることは、今後の課題としたい。

謝 辞

貴重な資料を提供された、日本住宅公団南多摩開発局の関係各位、東京農工大学の丹下 勲教授、東京都土木技術研究所の国分邦紀氏、および東京都南多摩新都市開発本部の松川安満氏に深謝の意を表します。

なお、本研究をまとめるに当たり、研究費の一部として、文部省科学研究費補助金 奨励研究(A)（課題番号 575319）の補助を受けたことを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田村俊和 他：地域開発論(I)，土木工学体系 19，彰国社，P.50，1977.
- 2) 井上 信 他：環境アセスメント，土木工学体系 14，彰国社，PP.254-293，1976.
- 3) 高見 寛：開発と水文環境アセスメント技法，鹿島出版会，1980.
- 4) ロイ・マン（相田武文訳）：都市の中の川，鹿島出版会，1975.
- 5) 窪田陽一：河川空間の計画に関する基礎的研究，東京大学工学部土木工学科卒業論文，1975.
- 6) 安藤・虫明・高橋：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，1981.
- 7) 安藤・高橋：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投稿中。
- 8) Y.Ando and Y.Takahasi : A hydrological model of hillslope basins, Journal of the Faculty of Engineering, the University of Tokyo B, (to appear).
- 9) 東京都土木技術研究所・三井共同建設コンサルタント：大栗川・乞田川流域調査報告書，P.73，1979.
- 10) 安藤・高橋・虫明：丘陵地における洪水流出率と流域の地被条件，第17回自然災害シンポジウム講演論文集，1980.
- 11) 安藤・高橋・伊藤：山地河川の地下水流出の通減特性とそれに対する流域地質の効果，第25回水理講演会論文集，1981.
- 12) 安藤義久：多摩丘陵の小河川の地下水流出に対する都市化の影響，日本地下水学会誌，第21巻第3号，1979.

注) 大栗川・乞田川の両流域の下水道は分流式である。

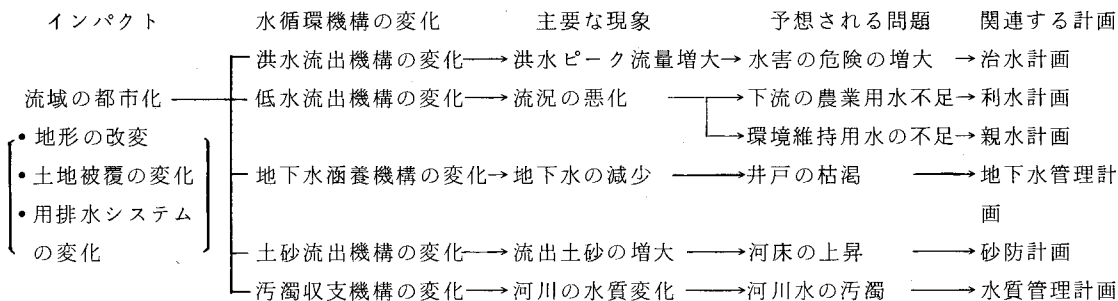


図 1. 流域の都市化に伴う水文環境アセスメントのフレーム・ワーク

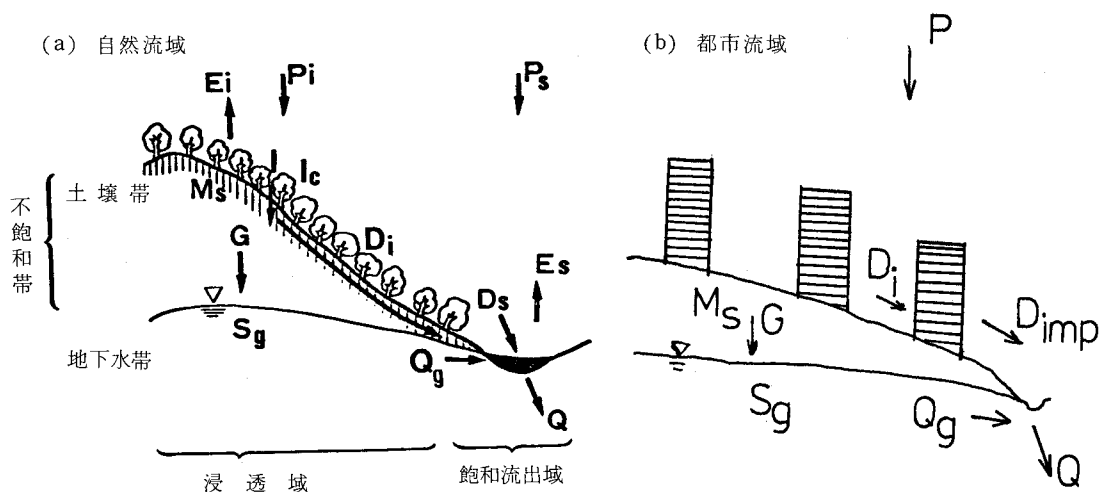


図 2. 丘陵地の自然流域と都市流域の水循環過程の模式図

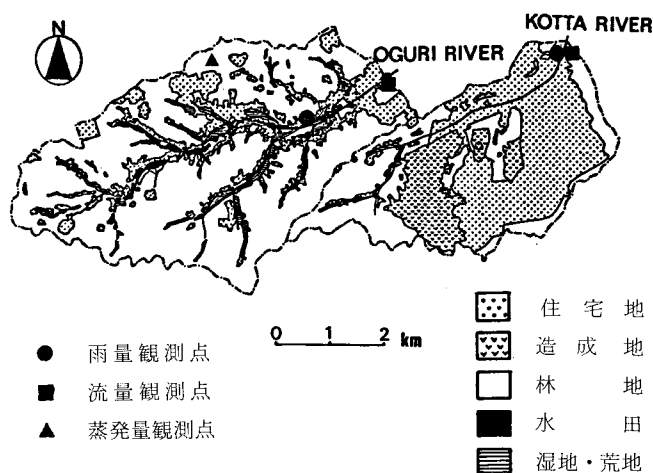


図 3. 対象流域の概要

表 1. 対象流域の土地利用

(a) 大栗川流域

土地利用	面積 km^2	面積率%
水田	1.41	6.7
畑・荒地	2.05	9.8
造成地	1.77	8.5
住宅地	4.46	21.2
山林	11.23	53.7
合計	20.92	100.0

(b) 乞田川流域

土地利用	面積 km^2	面積率%
住宅地	4.87	36.2
道路など	0.84	6.2
造成地	4.36	32.4
畑・荒地	0.40	3.0
山林	3.00	22.3
合計	13.47	100.0

(a) 自然流域（大栗川）

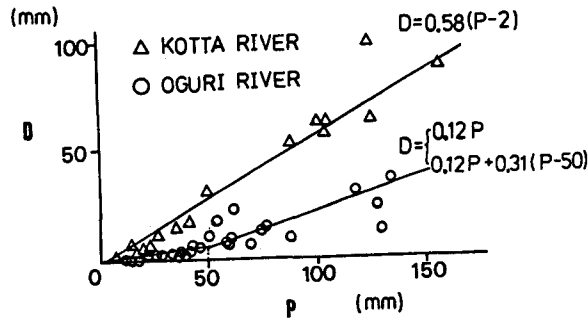


図 4. 一雨雨量と直接流出量の相関図

(b) 都市流域（乞田川）

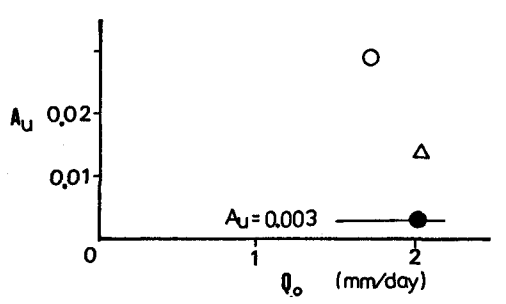


図 5. 地下水流出の通減係数と初期流量

(a) 自然流域（大栗川） (b) 都市流域（乞田川）

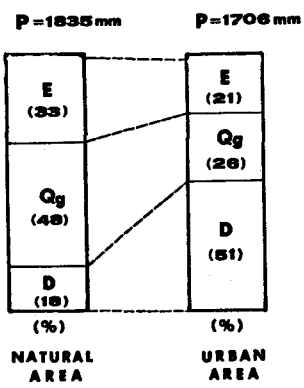
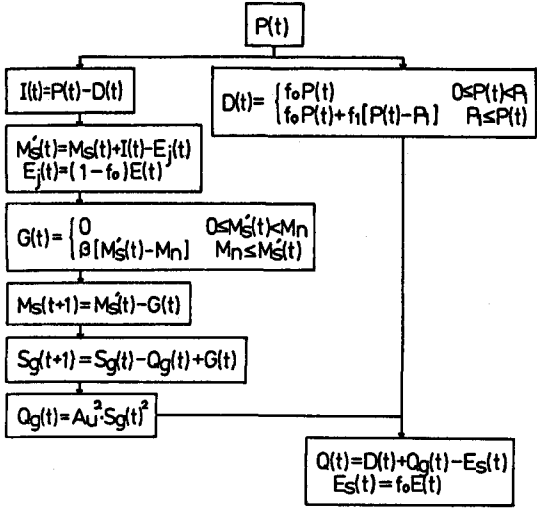


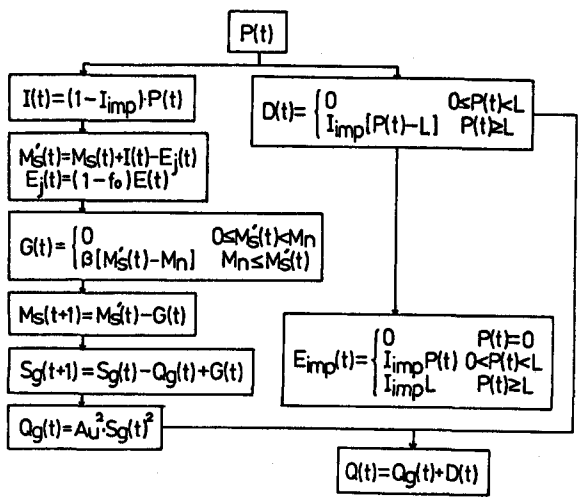
図 6. 自然流域と都市流域の年間水収支の比較

(a) 自然流域



$f_0 = 0.12, f_1 = 0.31, P_1 = 50 \text{ mm}$
 $\beta = 1.0, A_u = 0.027$

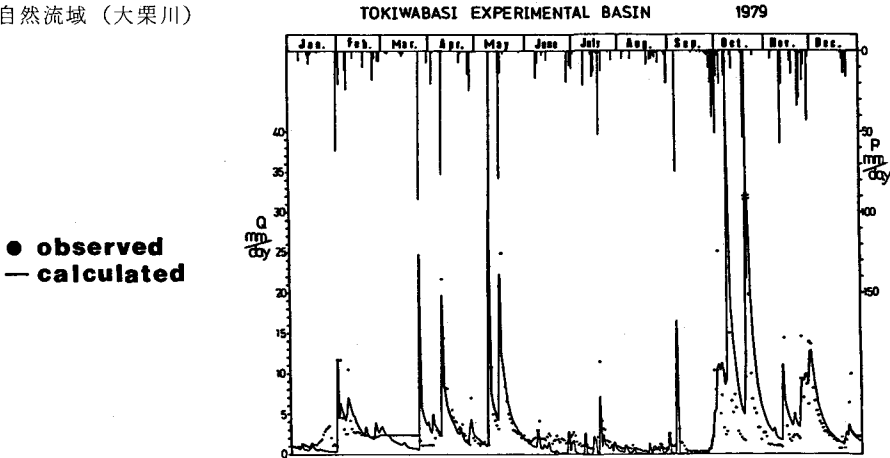
(b) 都市流域



$I_{imp} = 0.58, L = 2 \text{ mm}$
 $\beta = 0.7, A_u = 0.0030$

図 7. 自然流域と都市流域の水循環モデル

(a) 自然流域（大栗川）



(b) 都市流域（乞田川）

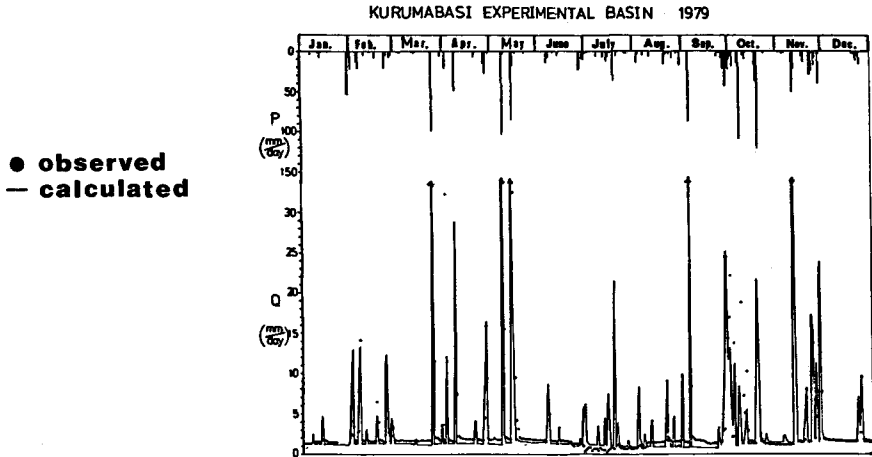


図 8. 自然流域と都市流域の水循環モデルによる計算流量と実測流量の比較

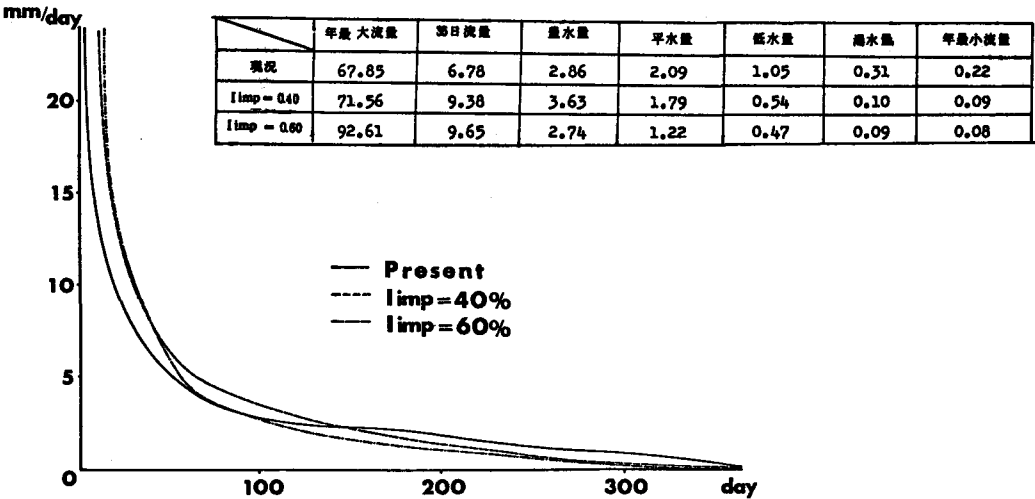


図 9. 大栗川流域の都市化に伴う流況曲線の変化・予測