

表層浸透能の変化を考慮した 多摩丘陵都市流域における水循環解析

ANALYSIS OF HYDROLOGICAL CYCLE IN AN URBAN BASIN IN THE TAMA HILLS CONSIDERING INFILTRATION VARIATION IN UPPER SOIL LAYER

藤村和正¹・安藤義久²

Kazumasa FUJIMURA and Yosihisa ANDO

¹正会員 博(工) 明星大学講師 理工学部土木工学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

²フェロー 工博 東京都立大学大学院教授 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

Infiltration models are used to estimate the effective rainfall for runoff analysis, and its role is important for the accurate simulation of a runoff hydrograph. Only a few infiltration models take rainfall intensities into account. The infiltration model proposed recently by Diskin and Nazimov (1995) takes into consideration the rainfall intensity variations, and it can also be used to calculate the variation of the infiltration capacity for unsteady rainfall. This infiltration model is a fairly simple conceptual model. In this paper, the Diskin-Nazimov infiltration model is applied to the actual runoff analysis, and validates the runoff model's applicability. Concretely, the lumped hourly hydrological model presented by Ando et al. (1981) is coupled with the Diskin-Nazimov infiltration model to calculate the effective rainfall. The study basin is the Kotta River basin which is located in Tama New Town, an urban development in the Tama hills, in the western suburbs of Tokyo. The results showed that the calculated hydrographs represent the observed hydrographs for long-term rainfall runoff events in the Kotta River basin.

Key Words : *Rainfall infiltration model, rainfall intensity variation, infiltration variation, lumped hydrological model, urban basin*

1. はじめに

流出解析を行う場合、有効降雨を正確に算定することは、解析精度を向上させる上で重要である。降雨を流出成分と浸透成分に分けることは雨水浸透モデルによって行われるが、降雨強度を考慮して浸透能計算を行う雨水浸透モデルは数少ない。実際の浸透現象は、降雨強度が大きくなれば土壌の水分量は増加し、それに従い浸透能は小さくなり、逆に、降雨強度が小さくなれば、あるいは無降雨時間が続けば土壌の水分量は減少し、浸透能は大きくなる。このように浸透能の変化は明らかに降雨強度と密接に関係していると言える。1970年代、Smith¹⁾やMein and Larson²⁾は降雨強度を考慮した浸透能式の開発を行った。1995年、Diskin and Nazimov³⁾は、降雨強度を考慮できる比較的簡単な構造の雨水浸透モデル(以下、Diskin-Nazimovモデルと呼ぶ)を提案した。彼らは、文献上の資料を用いて浸透能解析を行いモデルの妥当性を示している。藤村・安藤・山田・山中⁴⁾およびFujimura and Ando⁵⁾は散水浸透実験を行い、現地におけ

るDiskin-Nazimovモデルの妥当性を示した。

本研究では、Diskin-Nazimovモデルが比較的簡単な構造でありながら降雨強度の変化を考慮した浸透能計算ができ、そして、現地浸透実験によりその妥当性が示されたことから、本モデルを流出解析に適用することを行う。具体的には、安藤・虫明・高橋⁶⁾が開発した集中型の1時間単位計算の水循環モデルに有効降雨モデルとしてDiskin-Nazimovモデルを組み込み、多摩ニュータウン地域の都市河川流域である乞田川流域において1996年3月末から2001年2月にわたる約5年間を対象期間として水循環解析を行い、その適合性について検討することを目的とする。なお、本研究では、Diskin-Nazimovモデルについて、その構造と降雨強度の変化を考慮した浸透能計算の方法についても概要を説明する。

2. 対象流域の概要

(1) 乞田川流域の概要

本研究の対象流域は、多摩ニュータウン地区の乞田川流域であり、流域面積は14.1km²である。流域の形状は、図-1に示すように、南側の斜面が長く、何本もの支川

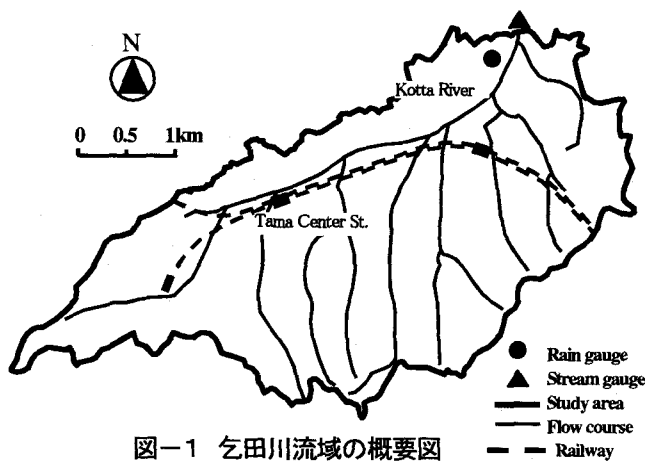


図-1 乞田川流域の概要図

表-1 土地利用別面積率と終期浸透能

	道路	屋根	芝地	グラント	造成地	林地
面積率(%)	35.4	21.2	22.5	5.2	6.7	9.0

が発達しているが、北側の斜面は短い。乞田川本川は、流域末端の水位観測地点から数百メートル下流で同じ丘陵地河川の大栗川と合流し、さらにその約1.5km下流で多摩川と合流している。流域は多摩丘陵に位置しており、地質構造は、表層部には関東ロームが数メートルから数十メートルの厚さで堆積しており、その下には層厚5m前後の御殿峠礫層があり、その下には層厚20m以上で稲城砂層があり、その下に連光寺互層がある。この連光寺互層が流域の帯水層の不透水性基盤となり地下水流出が発生していると考えられている⁷⁾。

本流域一帯は1965年頃より多摩ニュータウン事業として大規模な都市開発が進められた。現在では開発はほぼ完了している。表-1上段には土地利用別の面積率を示す。これは1/2500の地形図から交点法により読取った値であり、不浸透域は道路の35.4%と屋根の21.2%の合計で56.6%あり、浸透域は住棟間の芝地や林地などで43.4%である。このことから本流域は完全な都市流域であることが分かる。流域には分流式の下水道が整備され、乞田川の支川は矩形水路や暗渠に施工され雨水下水道として機能している。本川は両岸がコンクリートブロック護岸で整備され、河床は床止め工や落差工が施工され、河道の安定が計られている。

(2) 水文観測

雨量と気温のデータは、図-1●印に示す多摩市役所において観測しているデータであり、1時間雨量と日平均気温の値を用いた。水位観測は、図-1▲印に示す車橋地点に設置した10分間隔で自記録される圧力式水位計で行っている。ただし、水位計の不調により幾つかのデータが欠測していたので、その期間の水位データは同地点で東京都建設局が水位計測を行っているの、そのデータを用いた。

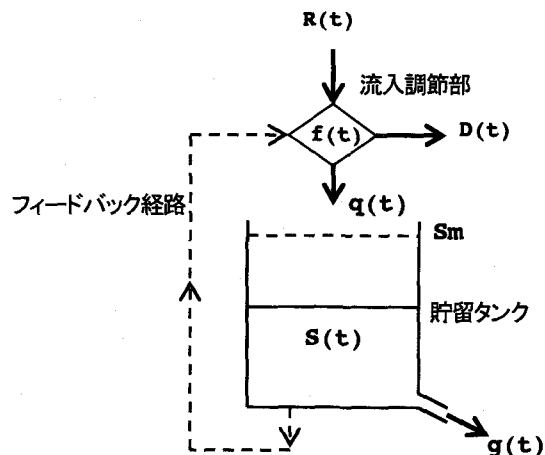


図-2 Diskin-Nazimovモデルの概要図

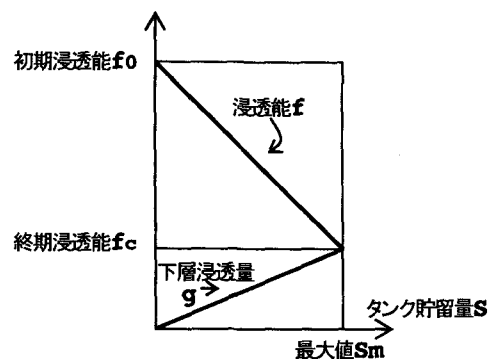


図-3 浸透能および地下水涵養と表層水分保留量の関係図

3. 降雨強度の変化を考慮した浸透能の計算方法

(1) Diskin-Nazimovモデルの構造

降雨強度の変化を考慮した浸透能変化の計算は、Diskin-Nazimovモデルによって行う。Diskin-Nazimovモデルの構造は、図-2に示すように、貯留タンク、フィードバック経路および流入調節部から構成される。貯留タンクの貯留量は表層土壌の水分保留状態を表す。貯留タンクへの流入量は、流入調節部で降雨強度(R)と浸透能(f)の関係から表層土壌への実浸透量(q)として算定される。貯留タンクに流入しない降雨成分は直接流出量(D)となる。以下に実浸透量(q)と直接流出量(D)を算定する条件式を示す。

$$\begin{aligned} \text{if } R(t) \leq f(t) \text{ then} \\ q(t) = R(t) \text{ and } D(t) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{if } R(t) > f(t) \text{ then} \\ q(t) = f(t) \text{ and } D(t) = R(t) - f(t) \end{aligned} \quad (2)$$

実際の降雨下での浸透現象は、表層土壌の水分量が増加すれば浸透能は減少し、同時に下層への浸透量が増加すると考えられる。この関係は図-3に示すように、タンクの貯留量(S)の関数として、初期浸透能(f_0)、終期浸透能(f_c)、表層水分保留量の最大値(S_m)の3つのパ

ラメータを用いて、浸透能(f)および下層への浸透量(g)を線形式として次のように表すことができる。

$$f(t) = f_0 - \frac{(f_0 - f_c)}{S_m} S(t) \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{f_c}{S_m} S(t) \quad (4)$$

また、貯留タンクの収支を表す連続式は次式となる。

$$\frac{dS(t)}{dt} = q(t) - g(t) \quad (0 \leq S(t) < S_m) \quad (5)$$

(2) 降雨強度の変化を考慮した浸透能の解析方法

浸透能および下層浸透量は、式(5)からタンク貯留量 $S(t)$ を求め、それを式(3)、式(4)に代入して算定する。解析は逐次計算により行う。従って、式(3)、式(4)、式(5)は時間刻みの添え字を用いて次のように表す。

$$\frac{f_b + f_e}{2} = f_0 - \frac{f_0 - f_c}{S_m} \cdot \frac{S_b + S_e}{2} \quad (6)$$

$$\frac{g_b + g_e}{2} = \frac{f_c}{S_m} \cdot \frac{S_b + S_e}{2} \quad (7)$$

$$\frac{S_e - S_b}{\Delta t} = \frac{q_b + q_e}{2} - \frac{g_b + g_e}{2} \quad (8)$$

ここに、 Δt ：時間ステップ、 b ：時間刻み始めの添え字、 e ：時間刻み終わりの添え字。

つまり、式(8)の貯留量の終値 S_e を求め、浸透能 f および下層浸透量 g を求め、再び貯留量の終値 S_e を求める繰り返し計算を行う方法である。浸透能計算は、降雨強度と浸透能の関係を次の3つの場合に分けて行う。

- ① 浸透能が降雨強度より小さい場合
- ② 浸透能が降雨強度より大きい場合
- ③ 浸透能が降雨強度より大きい値から小さい値に変化する場合

それぞれの場合について、浸透能計算の基礎式となるタンク貯留量 S_e 式の誘導について以下に記す。

a) 浸透能が降雨強度より小さい場合の計算式

この場合の浸透能と降雨強度の関係は図-4(a)で表され、その条件式は式(9)となる。この条件をもとに式(8)から式(10)が得られる。

$$\text{if } R \geq f_b \text{ and } R > f_e \text{ then} \\ q_b = f_b \text{ and } q_e = f_e \quad (9)$$

$$S_e - S_b = \frac{f_b + f_e}{2} \cdot \Delta t - \frac{g_b + g_e}{2} \cdot \Delta t \quad (10)$$

式(6)、式(7)、式(10)から次の貯留量 S_e 式が得られる。

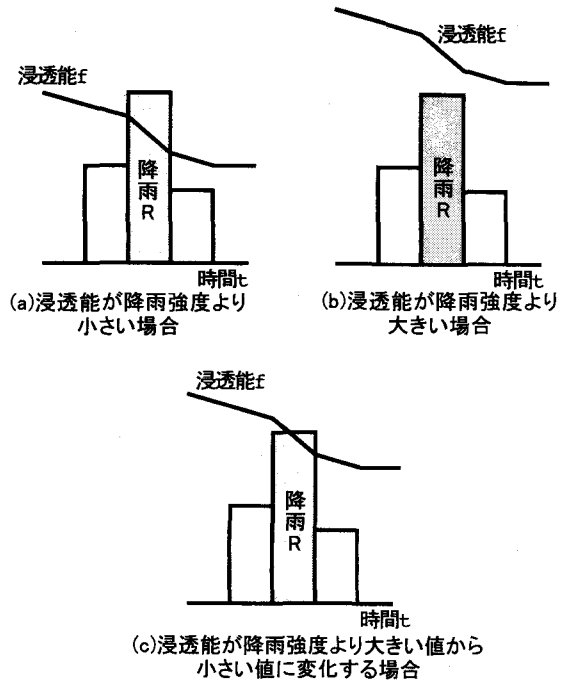


図-4 降雨強度と浸透能の関係による浸透能解析の3つの場合分け

$$S_e = \frac{1 - \frac{f_0 \cdot \Delta t}{2 S_m}}{1 + \frac{f_0 \cdot \Delta t}{2 S_m}} \cdot S_b + \frac{f_0 \cdot \Delta t}{1 + \frac{f_0 \cdot \Delta t}{2 S_m}} \quad (11)$$

逐次計算により、1つ前の時間ステップで得られたタンク貯留量 S_e の値を新たな時間ステップで入力値 S_b として貯留量 S_e 式に代入し、新規の S_e 値を得る。この S_e 値より浸透能 f と下層浸透量 g が計算できる。

b) 浸透能が降雨強度より大きい場合の計算式

この場合の浸透能と降雨強度の関係は図-4(b)で表され、その条件式は式(12)である。これより式(8)から式(13)が得られ、タンク貯留量 S_e の式(14)が得られる。

$$\text{if } R < f_b \text{ and } R \leq f_e \text{ then } \frac{q_b + q_e}{2} = R \quad (12)$$

$$S_e - S_b = R \cdot \Delta t - \frac{f_c}{S_m} \cdot \frac{S_b + S_e}{2} \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$S_e = \frac{1 - \frac{f_c \cdot \Delta t}{2 S_m}}{1 + \frac{f_c \cdot \Delta t}{2 S_m}} \cdot S_b + \frac{\Delta t}{1 + \frac{f_c \cdot \Delta t}{2 S_m}} \cdot R \quad (14)$$

c) 浸透能が降雨強度より大きい値から小さい値に変化する場合の計算式

この場合の浸透能と降雨強度の関係は図-4(c)で表される。時間ステップの始点から浸透能が降雨強度に等しくなるまでの時間を Δt_1 、 Δt_1 から時間ステップの終点までの時間を Δt_2 とする。まず、 Δt_1 時点の表層水分保留量 S_f を求める。そして、 Δt_1 時点での条件 $f(t) = R$ を式(3)に代入して式(15)が得られ、これを変形して貯留

量 S_r の式(16)が得られる。

$$R = f_0 - (f_0 - f_c) \frac{S_r}{S_m} \quad (15)$$

$$S_r = \frac{f_0 - R}{f_0 - f_c} \cdot S_m \quad (16)$$

Δt_1 区間の貯留量変化は、浸透能が降雨強度よりも大きい②の場合と同じであるので、式(13)の S_e を S_r とし、 Δt を Δt_1 として書き換え、 Δt_1 を求める。

$$S_r - S_b = R \cdot \Delta t_1 - \frac{f_c}{S_m} \cdot \frac{S_b + S_r}{2} \cdot \Delta t_1 \quad (17)$$

$$\Delta t_1 = \frac{S_r - S_b}{R - \frac{f_c \cdot (S_b + S_r)}{2 S_m}} \quad (18)$$

Δt_2 区間の貯留量変化は、浸透能が降雨強度よりも小さい①の場合と同じであるので、式(11)の S_b を S_r とし、 Δt を Δt_2 として、終点の貯留量 S_e の式(19)が得られる。

$$S_e = \frac{1 - \frac{f_0 \cdot \Delta t_2}{2 S_m}}{1 + \frac{f_0 \cdot \Delta t_2}{2 S_m}} \cdot S_r + \frac{f_0 \cdot \Delta t_2}{1 + \frac{f_0 \cdot \Delta t_2}{2 S_m}} \quad (19)$$

($\Delta t_2 = \Delta t - \Delta t_1$)

4. 乞田川流域における水循環解析

(1) 都市流域の1時間単位の水循環モデル

水循環モデルの構造は、Diskin-Nazimovの雨水浸透モデル、地下水涵養モデル、地下水流出モデルから構成される。これは安藤・虫明・高橋⁶⁾が多摩ニュータウン地区の都市小流域の永山試験流域において開発し、その後、安藤・藤村・荒井⁸⁾が国分寺試験流域に適用した1時間単位の水循環モデルにDiskin-Nazimovモデルを組み込んだモデルであり、図-5にそのフロー図を示す。

まず、Diskin-Nazimovモデルにより1時間雨量から土地利用別に表層浸透能(f)を算定し、そして不飽和帯への浸透量(g)と直接流出量(D)を算定する。次に、不飽和帯への補給量として浸透域の表層からの浸透量(g)と水道漏水(WS)を考え、消失量として蒸発散(E)と地下水涵養量(G)を考える。実際の蒸発散は表層から行われているが、蒸発散と土壌の浸透能との関係は解明されておらず、Diskin-Nazimovモデルに組み込むことは困難なので、従来のモデルの通り不飽和帯の水分量から蒸発散量を差し引く。蒸発散量の算定は、Hamon式により計算した日蒸発散量に永山試験流域で得られている24時間の蒸発散量の割合をかけて1時間当りの蒸発散量とした。不飽和帯からの地下水涵養は、不飽和帯の水分保留量(Ms')が最小容水量(Mn)より小さいときは行われず、大きいときにはその超過保留量($Ms' - Mn$)に比例定数 β を乗じた量とし、超過保留量がある一定値 h を超えたときには地下水涵養能(gg)で涵養されるとする。 h は5.0、

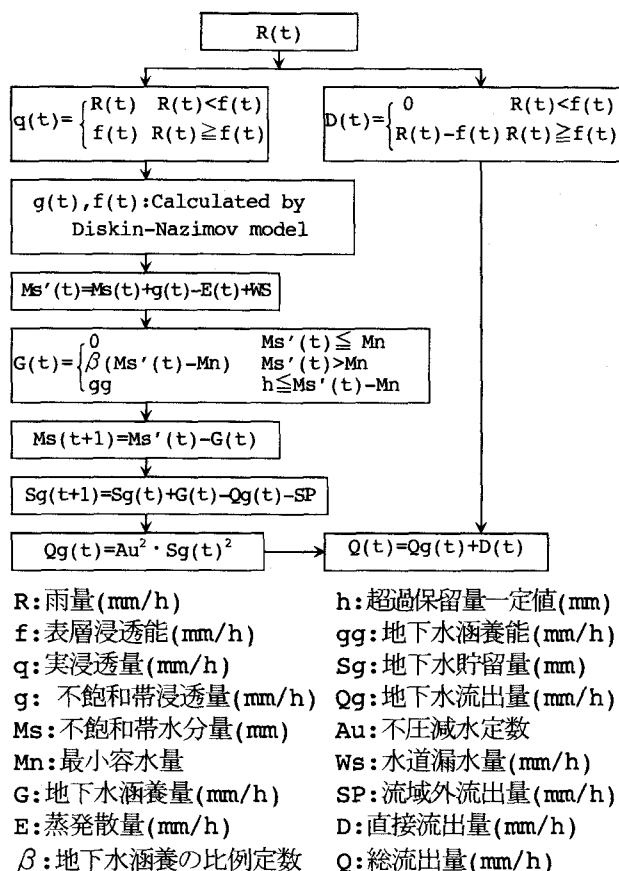


図-5 水循環モデルのフロー図

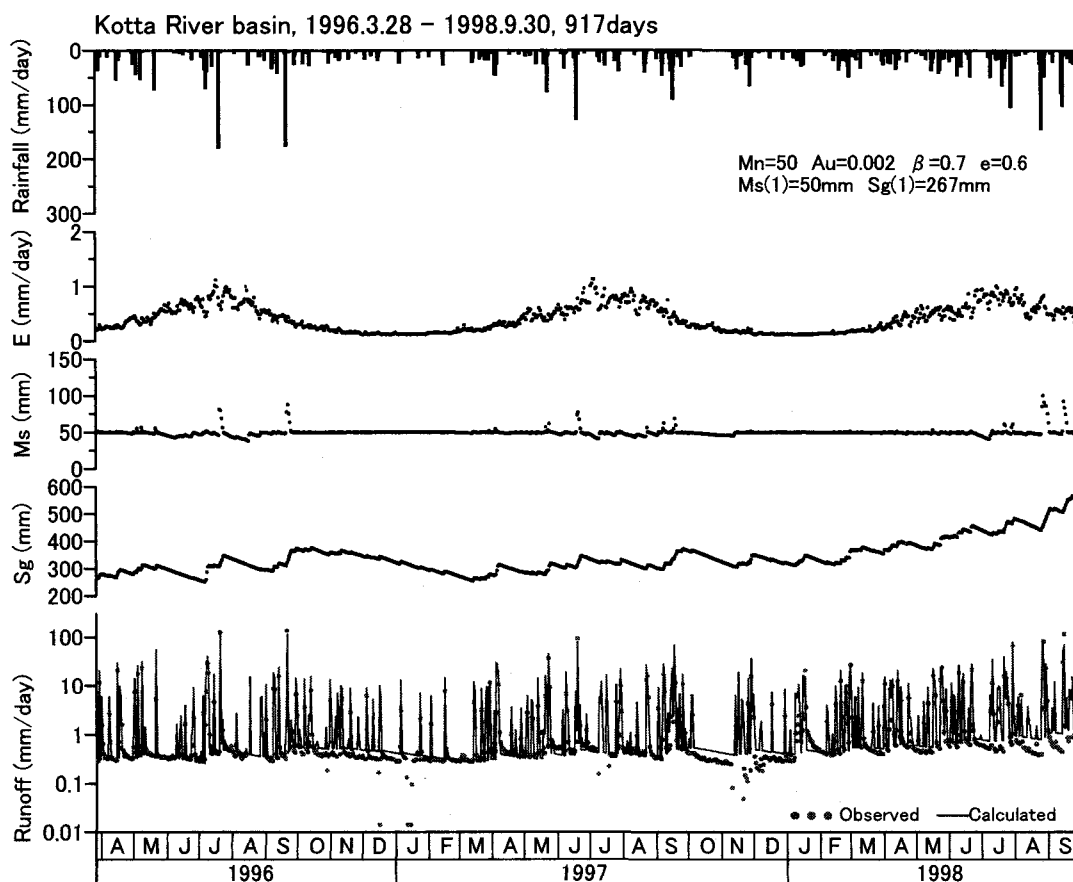
gg は0.5と設定した。地下水流出量(Qg)は不圧減水定数 Au の2乗を比例定数とし、地下水貯留量(Sg)の2乗に比例して流出する。地下水貯留量(Sg)には地下水涵養量(G)を加え、逆に流域外流出量や深層地下への漏水などの消失量(SP)を差し引く。結局、地下水流出量(Qg)に直接流出量(D)を加えたものが河川流出量(Q)となる。

(2) 生活雑排水と水道漏水量

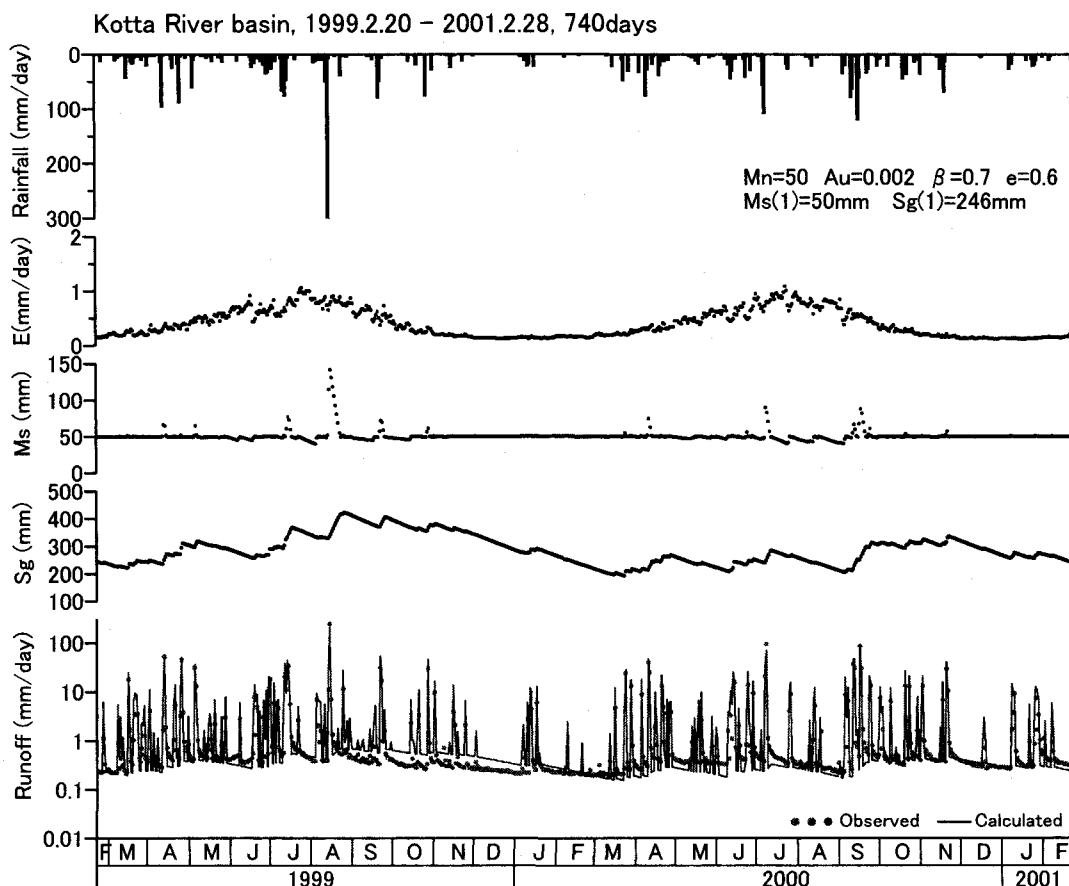
対象流域は都市流域であることから、生活雑排水量と水道漏水量を考慮する。乞田川流域は分流式下水道がほぼ100%整備されているが、無降雨期間において観測地点の水位に日周変動が見られる。このことは河川水に生活雑排水が混入していると考えられる。従って、無降雨期間において1日の最低流量を地下水流出と考え、それを上回る量を生活雑排水として考え、6つ無降雨期間について計算した結果、0.0356mm/dayと算定された。一方、水道漏水量については、多摩ニュータウン地域の漏水量は5.8%で1,829m³/dayと見積もられている。これを流出高に換算し、0.14mm/dayを不飽和帯に加えた。

(3) 解析結果と考察

1996年3月28日から2001年2月28日までの対象期間のうち、途中大幅な水位データの欠測があったため、対象期間を2つに分け、①1996年3月28日～1998年9月30日の917日間と ②1999年2月19日～2001年2月28日の740日間とした。



図一 6 対象期間①の解析結果(1996年3月28日～1998年9月17日、917日間)



図一 7 対象期間②の解析結果(1999年2月20日～2001年2月28日、740日間)

表-2 解析に用いたパラメータと初期値

不圧減水定数	Au	0.002	
最小容水量	Mn	50.0mm	
地下水涵養の定数	β	0.7	
蒸発散の補正係数	e	0.6	
水道の漏水	WS	0.14mm/day	
対象期間		①'96-'98	②'99-'01
流域外流出量	SP	1.1mm/day	1.5mm/day
不飽和帯水分量	Ms(1)	50.0mm	50.0mm
地下水貯留量	Sg(1)	267mm	246mm

表-3 初期浸透能と終期浸透能 (単位:mm/h)

	道路	屋根	芝地	グラント	造成地	林地
終期浸透能 f_c	0.01	0.01	22.2	7.1	5.3	100.0
水分保留量最大 S_m	2.0	2.0	19.5	8.4	10.0	100.0
初期浸透能 f_0	1.0	1.0	30.0	10.0	10.0	150.0

2つの対象期間の解析ハイドログラフを図-6と図-7に示す。いずれも計算ハイドログラフは実測ハイドログラフによく適合している。両図には蒸発散量の変化、不飽和帯水分量の変化、地下水貯留量の変化を同時に示す。地下水貯留量の変化と低水部のハイドログラフの傾向が近似しており、地下水流出は地下水貯留量に顕著に影響されていることが分かる。解析に用いたパラメータと初期値について表-2に示す。不圧減水定数Auは、実測ハイドログラフの低減部に計算ハイドログラフが適合するように試算により求め0.002とした。流域外流出量の値は2つの期間に対しそれぞれ適合したハイドログラフを得るため異なる数値を設定し、1.1mm/dayと1.5mm/dayとした。実際、乞田川流域の流域外流出のプロセスは明らかでないが、貯留された地下水が透水層である御殿峠礫層や稲城砂層を通じ流域外に流出しているか、あるいは深層地下へ浸出していることなどが考えられる。浸透能に関するパラメータを表-3に示す。終期浸透能 f_c と表層水分保留量の最大値 S_m の値は、土地利用別に散水浸透実験を行い得た値とその解析値を用いた^{4),9)}。また、両対象期間の解析した水収支量を表-4に示す。この表から乞田川流域の特徴として、直接流出のうち浸透域からの流出はそれほど多くはなく、また、流域外流出量が比較的多いことが分かる。

5. まとめ

本研究では、降雨強度の変化を考慮して浸透能計算が行える比較的簡単な構造のDiskin-Nazimovモデルについて説明した。そして、多摩ニュータウン地域の都市河川流域である乞田川流域を対象に、安藤ら⁶⁾の1時間単位の水循環モデルに有効降雨モデルとしてDiskin-Nazimovモデルを組み込み、降雨強度の変化に対する浸透能変化を考慮した水循環解析を約5年間の資料を用いて行い、その適合性について検討した。その結果、地下水流出のハイドログラフの再現性は良好であったことから、この

表-4 対象期間の水収支量 (単位:mm)

対象期間	①'96-'98, 917d	②'99-'01, 740d
総雨量	4848	3670
水道漏水量	128	104
直接流出量 (浸透域流出量)	2843 (165)	2138 (113)
地下水流出量	444	248
流域外流出量	1008	1110
蒸発散量	376	289
地下水貯留量差	307	-11

水循環モデルの実流域に対する適用可能性が示されたと考える。都市河川流域の低水流出について検討することは、親水計画等における環境維持流量を把握する上で重要であり、本研究はその基礎研究であると考えている。

今後の検討課題は、地下水位や蒸発散量などの実測値をそろえてモデル精度を多面的に検討すること、さらに、低水流出のみならず洪水流出の再現性についても同時に検討することである。

謝辞: 本研究を進めるに当り、雨量データと気温データを提供して頂いた多摩市役所環境部の関係各位、水位データを提供して頂いた東京都建設局土木技術研究所河川部の関係各位、また、プログラミングに協力して頂いた当時学生の奈良崎忍君に記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Smith, R. E.: The infiltration envelope: Results from a theoretical infiltrometer, *J. Hydrology*, Vol.17, pp.1-21, 1972.
- 2) Mein, R. G. and Larson, C. L.: Modelling infiltration during a steady rain, *Water Resources Res.*, Vol.9, No.2, pp.384-394, 1973.
- 3) Diskin, M. H. and Nazimov, N.: Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process, *J. Hydrology*, Vol.172, pp.313-330, 1995.
- 4) 藤村和正, 安藤義久, 山田富美夫, 山中理: 定常降雨による湛水発生時間及び浸透能に関する研究, 水工学論文集, 第44巻, pp.193-198, 2000.
- 5) Fujimura, K. and Ando, Y.: Analysis infiltration capacity of upper soil layer during unsteady rainfall, Proceedings of The Urban Drainage Modeling Symposium, CD-ROM, Florida, USA, 2001. (In Press)
- 6) 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.
- 7) 安藤義久: 丘陵地の水循環機構と都市化によるその変化に関する研究, 東京大学学位論文, p.235, 1981.
- 8) 安藤義久, 藤村和正, 荒井竜司: 武蔵野台地の湧泉の水循環解析と流域管理, 水工学論文集, 第40巻, pp.225-230, 1996.
- 9) 安藤義久: 都市域の浸透能と地形・地質・土地利用との対応関係, 水工学論文集, 第35巻, pp.123-128, 1991.

(2001. 10. 1受付)