

研究展望

都市化に伴う流出の変化

A REVIEW OF THE STUDY ON RUNOFF CHANGES DUE TO URBANIZATION

角屋 睦*

By Mutsumi KADOYA

1. ま え が き

都市化という単語は古い辞書にもあるから、昔からある用語であろう。しかし、これが流行語のように使われたのは、大都市近郊で丘陵山林地の開発・低平農地の盛土などによる宅地商工業地域の拡大が目立ち始めた昭和30年代以降のことである。特に、経済の高度成長政策が軌道に乗りだした40年代になると、各地の中小都市周辺でも開発行為が相次ぎ、都市化は一種のブームとさえみられるようになった。こうした急激な都市化現象は、必然的にいろいろな問題点をわれわれに提起した。水害問題もその1つであった。

昔から、流域を開発すると洪水は増えるといわれていた。しかしながら、“この河川流域が都市化したら、この川の洪水はどの程度大きくなるのか、という質問に対し、水文学者は無力である。これは、これまでの流出研究のほとんどが、流域の物理的性状や流れの法則を無視して、雨と流量の対応関係のみを見ていた、箱の中を調べずに箱を揺って出る音だけを聞いていた、に過ぎなかったためである”。これは、わが国において、流域の都市化に伴う流出の変化を、初めて総括的定量的に論及した木下の論文¹⁾の緒言を引用したものであるが、いい得て妙である。わが国で、都市化水文の研究が本格的に始まった昭和40年頃の、流出研究の一般動向を評言するとともに、都市化水文の研究は物理的に意味のあるものを志向すべきことを強調したものとえよう。

むろん、昭和40年頃でも、河川水文・森林水文・農業水文・都市水文など諸分野では、それぞれの計画設計

に必要な解析手法をもっていた。しかし、概して物理性に乏しく、分野間の関連も十分ではなかった。

しかしながら、その後の都市化水文の研究の進展はめざましく、流域の都市化に伴う流出変化の実用的予測手法の大綱は、昭和50年代初期までの第1期研究でほぼ完成し、現在は、さらに一步進んだ流出制御手法を中心とした第2期研究時代になっている。現在の都市化水文の研究が、箱の中味・流出機構に十分立入ったものかどうかは、後世の批判に委ねざるを得ないが、少なくとも昭和40年頃の手探りの時代では予想もし得なかったほど、充実したものとなっている。

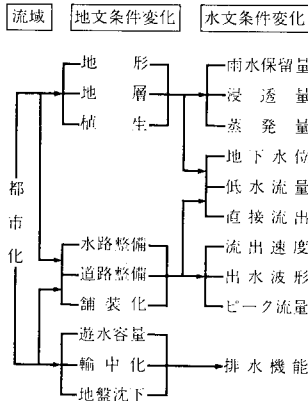
本稿では、流域の都市化に伴う流出変化の様相、研究の流れを概括的に眺めてみることにする。

2. 都 市 化

(1) 地文・水文条件の変化

都市化という用語の的確な定義は難しいが、水文学の立場から、“都市化とは地文条件の改変、地面の舗装化である”と割切れば、考え方が楽になる。すなわち、図1-1に示すように、丘陵地についてみると、長い自然の輪廻によって形成された地形地層は、開発行為によってブルドーザー地形地層へと変化し、植生形態も大きく変わる。次いで水路道路が整備され、地表の大部分が不透水面で覆われることになる。こうした地文条件の変化は、必然的に雨水の遮断・凹地貯留・浸透量を大幅に減少させ、地下水涵養・低水流量を減らすとともに、直接流出量を増加させ、洪水到達時間の短縮とあいまってピーク流出量を増大させる。地表の大部分が不透水面として残存する場合でも、施工機械の走行輾圧による難透水層の形成のため、地下水流動方向が大きく変わり、災害の原因

* 正会員 農博 京都大学防災研究所教授
(〒611 宇治市五ヶ庄)



図一 都市化に伴う水文条件の変化

になることもある。

低平地のほとんどは水田主体の農地として利用されてきた。そこでは、排水路断面を小さくしたり、小口径土管を排水系統に挿入したりするなど、雨水を一時に下流に集中させずに湛水を分担し、被害の軽減を図る工夫が各所でなされてきた。このような地帯の都市化はこうした排水調節機能の破壊、盛土による遊水容量の減少、あるいは輪中形成や地盤沈下招来の原因を作るなど、さまざまな水害要因をもたらす。

以上のほか、都市化に伴い熱収支系にも変化を生じ、気温が上昇するともいわれ、また降水量も増加するという説もある²⁾。しかしここでは、都市化に伴う洪水流出特性の変化に焦点を絞ることにする。

(2) 都市化示標

a) 都市化率・不浸透面率

流出問題の議論では、都市化の進行程度を表現する何らかの示標が必要である。都市化水文の研究の初期から比較的よく用いられているのは、都市化率あるいは開発率とよばれる示標で、対象流域面積の中に占める宅地・商工業用地・公園・道路など市街地的土地利用面積の割合を意味する。しかしこの概念はややあいまいであって、流域の雨水保留能の推定などには使いにくい。むしろ不浸透面率を取り上げる方が厳密である。

さて、不浸透域・浸透域の判別は、航空写真を用いて簡単にできると一般に考えられがちであるが、必ずしもそうではない。特に宅地区画内の判別は、大きく拡大された写真に立体鏡をかけるならばともかく、単なる目視では、縮尺数百分の1のカラー写真でも難しい。そこで許容建坪率を利用するなど、各種の便法が用いられている。これに関して角屋は³⁾次式を提案している。

$$P = \alpha H + \beta R + \gamma S \dots\dots\dots (1)$$

$$H + R + S \leq 1.0$$

ここに、 P ：地区不浸透面率（%）， H, R, S ：それぞれ

宅地、道路およびそれ以外の特殊用途地の面積比、 $\alpha \sim \gamma$ ：それぞれの不浸透面積率（%）。

H, R, S の値は、1/1 000～1/3 000程度の地形図・住宅精図あるいは航空写真から容易に計測できるが、 $\alpha \sim \gamma$ の係数、特に α の計測は厄介である。角屋は宇治・城陽両市の17地区延265 haの住宅地調査の結果、次の式および簡略値を示している。

$$\alpha = 0.42 D + 30 \dots\dots\dots (2)$$

$$\approx \begin{cases} 55 \text{ (許容建坪率 } 50 \% \text{ 住居専用地区)} \\ 66 \text{ (許容建坪率 } 60 \% \text{ 住居専用地区)} \\ 75 \text{ (許容建坪率 } 60 \% \text{ 住居地区)} \end{cases}$$

ここに、 D ：1 ha当たりの戸数。

上記の住居地区はかなり早く開けた住宅地で、商店・町工場も含まれている。また道路には未舗装のものもあるが、ほとんど $\beta = 100\%$ とみてよい。 γ は公園・学校その他公共・準公共用地の有無に大きく左右されるが、一般に S の値はかなり小さいのが普通である。またごく粗い近似として、市街地完成状態で次値が想定できる。

- $P = 60$ (50% 住居専用地区)
- 70 (60% 住居専用地区)
- 80 (60% 住居地区)

b) 都市化数

都市化の示標として、表面流モデルより導かれる次式ないし類似のものが、しばしば用いられる⁴⁾。

$$U = \frac{N_1}{N_2} \sqrt{\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \left(\frac{1 + \beta_{c1}}{1 + \beta_{c2}} \right)^{5/3}} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 N ：等価粗度、 $\sin \theta$ ：斜面平均勾配、 β_c ：雨水の流路流下時間の斜面伝播時間に対する比、添字1、2はそれぞれ都市化前後を意味する。

上式中 β_c は水路の整備状況に大きく依存する。最近、佐藤・和泉⁵⁾は実用的に理解しやすい次式を提案し、都市化数と名付けた。

$$U_n = w_1 \frac{P(X)}{P(70)} + w_2 \frac{S_d(X)}{S_d(100)} + w_3 \frac{C_d(X)}{C_d(100)} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $P(X)$ 、 $S_d(X)$ 、 $C_d(X)$ ：それぞれ不浸透面率、公共下水道整備率、50 mm/h級河道の整備率が $X\%$ の状態、 w ：それぞれのウェイトで、これまでの事例研究の結果 $w_1 = 50$ 、 $w_2 = 30$ 、 $w_3 = 20$ （%）としている。

c) SCS地表示数, CN

アメリカ農務省土壤保全局では、一雨流出量を地被条件・乾湿条件を考慮して定める地被合成法⁶⁾を提示している(1964)。これは各種の地目より構成される流域に対し、次式で定義される地表示数(Curve Number, CN)の加重平均で地表の状態を表現しようとするもので、CNは基本的には地被条件で定められ、前期降雨の有無により微補正されることになっている。

$$CN = \frac{25\,400}{S + 254} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 S ：可能浸透量 (mm)。

原文はインチで表現して $CN=1\,000/(S+10)$ というきれいな形になっている。なお、 $CN \leq 100$ となることは明白である。都市化域では、不浸透面率 $P=35 \sim 100\%$ に対し、 $CN=91 \sim 98$ が用いられている⁷⁾。近年、衛星写真資料から不浸透面積や CN を求める方法も実用化され^{8),9)}、この概念はかなり広範に利用されているようである。

3. 雨水保留能の変化

流域の開発都市化は、保水性に富んだ自然斜面・農地を切盛り整形した上に、さらに地表面のほとんどを不浸透面で舗装するから、従前流域がもっていた雨水の貯留浸透能力を大幅に減少させることは明白である。しかし、こうした保水能力の変化を定量的に表現することは難しい。これは、都市化域は浸透域が $20 \sim 30\%$ 以下となって流域保水能力の推定が比較的簡便になるのに対し、開発前のそれを的確に表現する方法が未確立のためである。

流域の雨水保留能は、洪水流出解析に必要な有効降雨の問題でもある。これに関連する研究の流れを、基礎研究のレベルまで考えると膨大なものとなるので、ここでは都市化前後の対比を念頭におきつつ、実用的手法を概括的に眺めるに止める。

(1) 定量法

降雨初期に一定量 IL を損失として差引く初期損失法、降雨強度 i から一定値 ϕ ($i < \phi$ のときは i) を差引く ϕ -index 法などがある。

自然流域では、初期損失法は他の方法と組み合わせてしばしば用いられるが、 ϕ -index 法は良透水性流域以外はあまり感心した方法ではない。

しかし都市化域では、これらの方法がよく用いられている、シカゴ法¹⁰⁾では、Linsley ら¹¹⁾の指数減少型の凹地貯留の概念を、最大貯留量 $S_a=25.4/4$ (浸透域)、 $25.4/16$ (不浸透域)、mm、として導入している。Viessman は¹²⁾この方法に疑問を抱き、Willeke¹³⁾が ϕ -index で良結果を得ていることを考慮して、 $IL+\phi$ とする組合せ法を提唱した。さらにその後誤差の点から、 $IL+\phi$ の組合せ法が最良、 ϕ -index 法が次善、Gardner-Horton の浸透能式を用いるときにも IL を考慮した方がよいと報告している¹⁴⁾。

Brater²⁾は、都市化域では初期損失と凹地貯留への配慮が重要であるとしている。凹地貯留をどういう形で考えるべきかは問題であるが、Willeke¹³⁾は不浸透域における流域保水量 F (mm) を次のように流域平均勾配 S 、

の関数として表現し、Viessman¹⁵⁾も同種の式を示している。

$$\left. \begin{aligned} F &= IL + S_a = 4.1 - 3.9 S_s \text{ (Willeke)} \\ &= 3.3 - 3.0 S_s \text{ (Viessman)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

日本でも凹地貯留という表現はよく用いられるが、一部のものを除くと、初期損失と同義語扱いのものが多い。豊國らは¹⁶⁾不浸透面には $S_a=2$ mm (和風屋根0、洋館・道路5 mm として算出)の指数減少型凹地貯留、浸透面には $S_a=6$ mm の同凹地貯留と初期・最終補給能 $f_{0s}=13$ 、 $f_c=2$ mm/h、低減係数 $\alpha=1.05 \text{ h}^{-1}$ の補給能モデルを用いている。わが国で初めて修正 RRL 法を導入した山口らは¹⁷⁾、不浸透域の一部を 100% 流出域、残りを $IL=2$ mm 域、浸透域では $\phi=10$ mm のみの地域とさらに $IL=6$ mm が加わる $IL+\phi$ 地域を設定している。これに類した報告は数多いが、不浸透域で $IL=2$ mm 前後、浸透域では $IL+\phi$ 方式を採用する例が多いようである^{18),19)}。こうした考え方の是非を検証できる観測データは、観測精度上ほとんど入手不可能に近く、今後とも簡便さが実用性を支えるものと思われる。

(2) 定率法

一雨またはある期間内の雨量に対する流出量の割合を流出率とよび、これを各種水工計画に利用する方法は昔から行われてきた。本来これは流域ごとに一定もしくは変化の小さいことを期待したものであろうが、決して単純なものではなく、一雨流出率は雨量の大きさに著しく依存することも、古い時代から指摘され^{20),21)}、実用にも考慮されていた^{22),23)}。金子は²⁴⁾これを降雨初期では道路など難透水性地表や水みち面から流出するが、やがて飽和浸透面が増大するためと指摘している。貯留関数法²⁵⁾でしばしば用いられている一次流出率・飽和流出率の概念も、金子の思想の延長上にあるとみられる。

最近安藤らは²⁶⁾、丘陵宅地試験流域の資料に基づいて、一雨流出率 f は、難透水面積率 I_d と水面など飽和面積率 I_s を用いて、 $f \leq I_d + I_s$ と表現され、雨量増加に伴い等号に近くなることを示している。また自然流域に対しては、雨量と流出量の関係を $2 \sim 3$ 本の折線で近似してそれぞれに相応する流出率を基本流出率、一次、二次付加流出率と名付け、基本流出率は金子らの指摘と同様、飽和面ないし難透水面積率に相応するとしている²⁷⁾。さらに多摩ニュータウン試験流域でもこの考え方を検証している²⁸⁾。

(3) 保留量曲線法

一雨ごとの雨量から直接流出高を差引いて得られる流域保水量を雨量に対してプロットすると、点群は図一2のような曲線の周縁にばらつく²⁹⁾。このばらつきの程度は流域の乾湿度のほか、流域平均雨量推定精度に大きく左右され、曲線の形状は流域表層部の土性・土地利用形

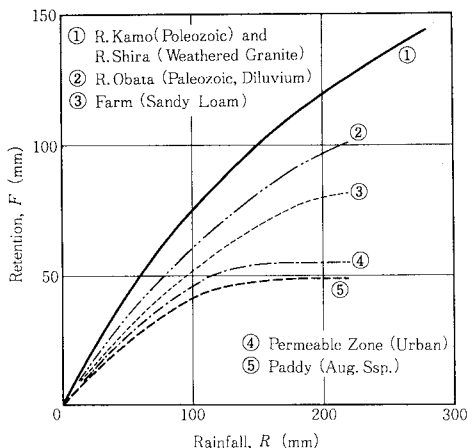


図-2 保留量曲線の例 (角屋)

態や直接流出高の推定法により異なる。

わが国で、初めてこの表現を千代川に用いた中安は²¹⁾、雨量の累増に伴い表土が飽和に近づき、雨量が100mmを超えると雨水保留量は上限値に達する、また前期降雨の影響は20mmとすることによりばらつきを減少できるとした。しかし山林流域では、雨量の累増に伴い保留量も漸増するデータの方が多いようである³⁰⁾。

豊國は³¹⁾、水田区画では欠口下空虚深の分布によって雨水保留量曲線が定まることを示唆しているが、田中ら^{32),33)}も同様の観点から、水田空虚分布は時期により異なるがいずれも正規分布で近似できることを確かめ、保留量に上限値をもつ保留量曲線を理論的実証的に示している。同様の理は都市化域の凹地貯留についても成立し、Linsley¹¹⁾らの式も凹地容積の分布から導かれる。最近山田らは³⁴⁾、Dunneタイプの雨水浸入過程を想定すると上記と同様の雨水保留機構が想定できることを示し、保水能分布として指数分布を想定して、次の保留量曲線、ないし流出率曲線を導いている。

$$F = IL + \frac{1}{\alpha} [1 - e^{-\alpha R - IL}] \dots\dots\dots (7)$$

$$f = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\alpha R} [1 - e^{-\alpha R - IL}] - \frac{IL}{R}, & R > IL \\ 0 & R < IL \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 F ：保留量、 R ：累加雨量、 IL ：初期損失、 α ：定数、 f ：流出率。

上式は浸透域に対する表現であるから、都市化域についての流域平均値を求める必要があるれば、不浸透面積率を考慮して換算すればよい。またこの式は指数型の保水能分布を想定したものであるが、実流域での具体的な分布も調べている³⁵⁾。図-2の保留量を直接流出高で表現することはもちろん可能である。アメリカ農務省が採用している地被合成法では次式を用いている⁷⁾。

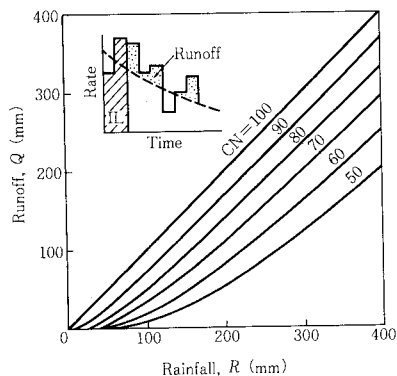


図-3 SCSのCN法による雨量～流出高の関係⁷⁾

$$Q = \frac{(R - IL)^2}{R - IL + S} = \frac{(R - 0.2S)^2}{R + 0.8S} \dots\dots\dots (9)$$

$$Q = 1.165(P - 0.17)(R - IL), P > 0.17, R < 50 \text{ mm} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 Q ：直接流出高、 R ：雨量、 IL ：初期損失、 S ：可能浸透量、 P ：不浸透面積比。

式(9)右辺の実用式は、 $IL = 0.2S$ としたものである。地被合成法によって定まったCNからSが求まり、 $R \sim Q$ の関係が図-4のように表現される。式(10)は、特に $P = 0.35 \sim 0.8$ の都市化域で $R < 50 \text{ mm}$ の場合について求めたもので、 $R \geq 50 \text{ mm}$ のときには式(9)を用いるとしている。

(4) 浸透能曲線法

一般にHorton³⁶⁾の式として通用しているGardner³⁷⁾の式やPhilip³⁸⁾の式で代表される浸透能の式によって降雨予剰を求め、有効降雨とする方法もしばしば用いられる。降雨直前の表層土の乾湿度が初期浸透能で表現されるなどの特徴があるが、その推定に工夫が必要である^{39)~41)}。

市街地浸透域の有効降雨推定に通称Horton式を用いている例は、シカゴ法¹⁰⁾以来、FWQAモデル⁴²⁾、UCURモデル⁴³⁾、豊國ら¹⁶⁾、Brasら⁴⁴⁾、その他かなりの数に上る⁴⁵⁾。もとより都市化に伴い地表の状態は著しく変わるから、モデル定数も大きく変わるものと予想されるが、これをうまく表現することは容易ではない。これについて、Narayamaらは⁴⁶⁾、浸透能定数のほか降雨遮断や凹地貯留も、不浸透面積率と水路特性比(=平均水路長/最大水路長)から推定する線形回帰式を示している。

(5) 表層土の乾湿度

流域の雨水保留能は、表層土性・地被条件のほかに、表層土の乾湿度に大きく左右される。長期間流出解析用モデルの多くは、これを表層土の土壤水分の変動として巧妙に処理しているが、洪水流出解析ではこれを別問題

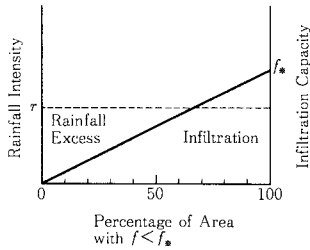


図-4 浸透能の面積分布

としているのが普通であり、浸透能曲線法以外はその取扱いが問題である。これに対処する一方法として、自然流域では降雨前低水流量（初期流量）を示標とする便法がしばしば利用されてきた^{47)~49)}。最近巖らは⁵⁰⁾初期流量を媒介として保留量曲線を関数表示することを試み、次式を提示している。

$$F = (S - q/k)(1 - e^{-\alpha R}) \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 F ：保留量 (mm)， S ：最大保留量 (mm)， q ：初期流量 (mm/d)， k ：低減係数 (1/d)， R ：雨量 (mm)， α ：定数 (1/mm)。

また日野・長谷部は⁵¹⁾、一雨流出率と初期流量の間に線形式が成立することを示している。

都市化域では、初期流量が下水流量のみになってしまう所が多いから、別途の工夫が必要となろう。

(6) 点浸透と面浸透

以上の諸方法はいずれも流域平均的な扱いをすることが多い。これは観測精度の点からもやむを得ないことであるが、反面どのような雨水追跡法を用いても、現象の再現精度に限界のあることを示唆している。これに対して、多少とも分布的扱いをしているものも皆無ではない。有名なスタンフォードモデルでは⁵²⁾、浸透能の面的確率分布を図-4のように直線と仮定し、 f_* を時々刻々変化させる方式をとっている。最近Alleyらは⁵³⁾、Philip式による表現を導入したモデルを提案している。

4. 流出ハイドログラフの変化

都市化に伴う流出変化を観測値の上で実証することは、学問的に最も価値ある方法であるが、現実には必ずしも簡単ではない。この実証法としては、開発前後で同一規模の降雨による出水を対比する方法と、隣接する開発・未開発両流域の出水を比較する方法がある。一般には後者の方が比較しやすいが、大雨の際には、隣接地でも1 km 以上も離れると、時間雨量はともかく、5~10分程度の短時間雨量まで一致する雨はほとんど期待できない。かつ現段階では、流量観測誤差を10%以内に押えることも至難である。すなわち、開発による流出変化を的確に実証することは、相当難しいことといえる。

流出解析によって開発前後のハイドログラフを対比す

ることは、よく行われている。これは、実用上十分な精度で現象が説明できることを前提としているが、さらに次のような配慮が必要である。i) 開発前後の流出モデルは、観念上・精度上同一レベルのものでなければならない。ii) モデルはできるだけ物理性の高いものであり、地目分布が反映できるような分布型モデルであることが望まれる。iii) 完全な実証を伴わない限り、精緻なモデルが必ずしも最良とはいえない。

都市化水文の研究は、1936年、Horner・Flynt⁵⁵⁾の単位図の研究が最初とみられるが、このような古典的な研究は別としても、アメリカではすでに1940年代に、Hicks⁵⁶⁾らの微水文的手法による市街地排水計画の研究が始まっており、1960年代になると都市化水文に関する報告もかなりの数になっている⁵⁷⁾。わが国では、市街地排水計画にかかわるものは別として、都市化水文の研究はやや遅れ、報告が出始めたのは1965年頃からである^{1),58)~61)}。

都市化域の流出現象が自然流域のそれと大きく異なる点は、浸透面が少なく、雨水流の水理学的性質が把握しやすいことであろう。そのため目ぼしい研究はほとんどミクロな攻究法を取っており、マクロな手法が主体の河川水文との対比は容易ではないが、主要なものについて概観してみると次のようである。

(1) 単位図法

古い話であるが、ASCE洪水調節委員会都市化洪水作業部会の調査によると⁵⁷⁾、1960年代アメリカでの洪水流出に及ぼす都市化の影響評価は、小流域では合理式で、13 km²以上の流域ではほとんど単位図の変化の形で扱われていたようである。その頃Eaglesonは⁶²⁾、25~1950 haの6市街地のデータを整理して単位図の総合化を図り、Espeyら⁶³⁾やBraterら⁶⁴⁾も同様の提案をしている。

概念モデルを扱ったものでは、March・Eaglesonら⁶⁵⁾は、Zoch, Nash, SinghなどのIUHの適応性やパラメーターを考察し、小流域では雨の観測精度が重要なことも指摘している。流入域法の研究から出発したViessmanは⁶⁶⁾、その後若干の経緯を経て^{12),15)}1分間単位のZochのIUHを作成し、水路内は流速一定として下流で流量を合成する方法で好結果の得られることを示している¹⁴⁾。またRao・Delleurは⁶⁷⁾、主としてNashのIUHが都市化に伴ってどう変化するかを調べ、小流域では概念上貯水池が1個のZochのIUHがよいとしている。しかしながら、単位図法が好んで用いられてきた欧米でも、近年この種の研究は下火になっているように思われる。

わが国では、橋本ら⁶⁸⁾がZochのIUHの貯留係数を角屋ら⁶⁹⁾の洪水到達時間式より定め、河道流をKW式

で追跡する方法、準線形貯留モデルを提示している。その後、Nash モデルによる同種の検討も行われている⁷⁰⁾。

(2) 微水文的手法

市街地の雨水の流下過程を、流出面・側溝・下水路(管)網に分けて準水理学的に追跡する、いわゆる微水文的手法は⁶⁶⁾、現象が水理学的に把握しやすいこともあって、ロスアンゼルス法⁵⁶⁾・シカゴ法¹⁰⁾の提示以来数多くの研究があり、都市水文ないし都市化水文の主流となっている。その主要なものについて、豊國⁴⁵⁾がその特徴をうまく整理している。

さて、微水文的手法を流出面の取扱いについてみると、シカゴ法にみられるように貯留型追跡法を取るものと、末石の等価粗度法⁷¹⁾以来数多くみられる kinematic wave (KW) 的流れ追跡法を取るものに大別される。

流出面は、屋根・道路・庭・公園・芝地・裸地など多種多様であり、側溝でもゴミ詰りがあったりして、流出現象が簡単に説明できるとは限らない。貯留型追跡法はその一種の平均化手法ともみられ、理論的あるいは実験的に得られる水深または貯留量と流量の間の関数式と連続式によって雨水を追跡する方法である。流出面での関数形は、ロスアンゼルス法では実験式、シカゴ法では Izzard の層流式、FWQA モデル⁴²⁾、UCUR モデル⁴³⁾などはスタンフォードモデル⁵²⁾と同様 Manning 式に基づいている。これらのモデルは側溝流にも貯留関数を設定しているが、ほとんど Manning 式を基礎にしている。

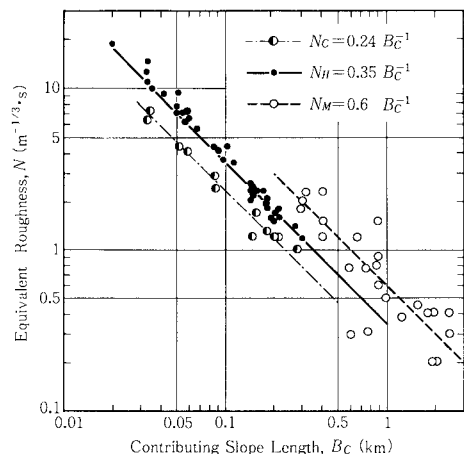
以上の貯留型追跡法は、河川水文の貯留関数法に対応するとみてよいが、側溝流まで追跡する点特徴で、これが微水文の名に値するのかもしれない。貯留関数法で都市化に伴う流出の変化やパラメーターの変化を扱った例は多くないが、石神井川流域を対象とした水越・尊田ら⁵⁹⁾の早い時期の研究、永井ら⁷²⁾の研究はその可能性を示唆している。スタンフォードモデルをこの種の分類に含めてよいかは問題であるが、James⁷³⁾はかなり早い時期にこのモデルをモリソン川に適用して都市化の影響を議論しており、その後パラメーター推定の自動化手法を開発して⁷⁴⁾都市化の議論を容易にしている。

微水文に分類するのは問題であるが、取扱いを極度に単純化したものとして、Watkins (1962) による RRL 法⁷⁵⁾がある。これは、満管時の流速を基礎として等流達地帯図を作成し、ハイドログラフ低減部または下水管の水深～流量関係から定めた貯留量～流量曲線と連続式を併用して、下流端流量ハイドログラフを算出する方法である。ただし原法では、貯留量～流量曲線の設定に際し、水深と管径の比が全流域で一定としている。この仮定を不合理として、山口らは¹⁷⁾、一定強度の有効降雨を想定したときの流れを等流とする修正法を提示した。また室田らは⁷⁶⁾、等流水深仮定のほかに、ポンプ排水の場合に

は加速流下を考慮して等流達地帯図を修正することを提案している。RRL 法は下水管網の整備された市街地を対象としたものであるが、等流達地帯図という古くからある概念⁷⁷⁾が1つの基礎となっているから、自然流域に対する類似手法⁷⁸⁾もいくつかみられる。しかし都市化の影響評価に利用するには、若干の工夫が必要となろう。

一方、市街地流出面の雨水表面流を、等流近似の運動の式と非定常の連続式によって追跡する非線形 KW 手法は、末石⁷¹⁾の提案以来多くの人によって研究されている。この場合、複雑な流出面のモデル化が1つの問題であって、Harley ら⁷⁹⁾の研究もあるが、豊國は⁸⁰⁾、複雑な市街地を少数工種の単位流出面の組合せとして規格化する方法を提案するとともに、流域のモデル化に相応する等価粗度の推定法を示し、その有用性を実証している^{81), 16)}。最近市川らは^{82)~85)}、市街地流域に 10 m のメッシュをかけ、メッシュ間ないしマンホールへの移動は、一部は Kerby 式による表面流、残りは一定流速の管流とする、下水管末ハイドログラフは時間遅れを考慮した線形合流とする、を骨子としたメッシュ法を提示している。これは線形 KW 法といえ、豊國らの非線形 KW 法と流出面・流れ追跡法の扱い方が対照的である。

非線形 KW 法は自然流域にもよく利用されているから、都市化に伴う流出変化は、有効降雨のほかに、等価粗度の変化を一要因として取り上げることができ^{4), 86)}。しかしこの等価粗度は地目別の固有値ではなく、流域モデルの構成単純化の程度にも大きく依存する。これについて、市街地では豊國ら^{80), 81)}の提案があり、自然流域については角屋ら^{87), 88)}の研究がある。すなわち、図—5は丘陵地流域で表面流モデルを単独適用したときの等価粗度の最適値 N_M 、中間流モデルを併用したときの最適値 N_C 、および各地の一級河川の洪水流出解析で用いられた表面流モデル単独適用時の等価粗度 N_M を、代



図—5 自然流域の代表斜面長と等価粗度 (角屋・福島)

表斜面長で整理したものである。ただし代表斜面長とは、河道より山頂方向に測定した斜面の長さが流域面積の50%に相応する値である。 N_M のばらつきが大きいのは、地形計測の差異・観測データの精度などのほか、最適値探索が行われていないためであろう。

なおKW法では、表面流単位幅流量 q と水深 h の間に、 $h=kq^p$ の関係を仮定し、Manning形式に相当する $p=3/5$ を用いることが多いが、これを非とする説もないではない。最近杉山・角屋は⁸⁹⁾、自然斜面の凹凸計測の結果に基づいて、層流または乱流の水みち流れを斜面全幅一様流と仮定することにより、 $p=0.42\sim 0.75\approx 0.6$ になることを示し、たまたまManning形式の値に近くなるにすぎないことを明らかにしている。

支線または幹線排水路(管)の流れは、不定流・不等流の式あるいはその簡略式、等流ないしは線形表現など、研究者によって各種様式のものを用いられているが、対象とする地域の特性に応じて適当なものを用いればよく、その優劣を問題にするわけにはいかない。しかし近年しばしば問題となるマンホール水害を扱うためには、下水管のサーチャージ現象を含むモデルが必要となる。これについて豊國らは^{45), 90)}不定流の式による厳密法と簡便法を提示している。

流域内に低平地を含み氾濫洪水を伴う場合には、非氾濫域にKWモデルを、氾濫域や河道の流れには不定流計算を行うのが普通であるが、洪水挙動の非正常性が特に強くなければ、連続性に重点をおいた低平地タンクモデル⁹¹⁾の利用が効率的で、都市化の議論にも利用されている⁹²⁾。

5. ピーク流出特性の変化

(1) 洪水到達時間

ピーク流出量の推定に、合理式がよく用いられる。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} r_e A \dots \dots \dots (12)$$

ただし、 Q_p :ピーク流量 (m³/s), A :流域面積 (km²), r_e :洪水到達時間 t_c 内の平均有効降雨強度 (mm/h)で、同観測平均降雨強度 r_m にピーク流出係数 f_p を乗じる式(13)の形で推定することが多い。

$$r_e = f_p r_m \dots \dots \dots (13)$$

この式の適用に際して問題になるのが、洪水到達時間の概念である。有効降雨強度が時間的空間的に一定であれば、流域最遠地点の雨水騒乱が下流端に伝播する時間と定義されるが、有効降雨強度が一定でない場合にはこの定義は疑問である。現今わが国では、降雨強度が時間的に変化する場合の洪水到達時間の現実的な推定法として、次のいずれかが実用にされている(図-6)。

i) ピーク流量発生時刻 t_3 における降雨強度と同値

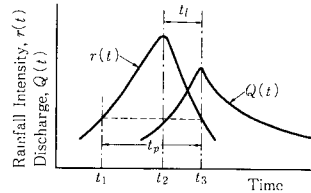


図-6 洪水到達時間説明図

を示す降雨ピーク前の時刻 t_1 との時間差、

$$t_c \approx t_p = t_3 - t_1 \dots \dots \dots (14)$$

ii) ピーク流量発生時刻 t_3 と降雨ピーク時刻 t_2 の時間差 t_1 の2倍、

$$t_c \approx 2 t_1 = 2(t_3 - t_2) \dots \dots \dots (15)$$

前者は、有効降雨強度の時間平均と距離平均が等しいという仮定の下で成立する石原・高棹ら⁹³⁾の理論と、有効降雨推定に定率法または定量法を是認した方法である。後者は一定有効降雨強度・線形流出の場合にはよいが、変動降雨条件下でこれを是認する理論は未開発であるから、1つの約束である⁹⁴⁾。もっとも、単位図の議論にしばしば用いられるハイトグラフ重心とハイドログラフ重心の時間差として定義される遅れ時間 T_l を用いて、

$$t_c = (5/3) T_l \dots \dots \dots (16)$$

とするMockusの提案⁹⁵⁾もあるので、式(15)が必ずしも不当というわけではない。なお実降雨について t_p , t_1 を求め両者の関係を調べると、点は $t_p = 2 t_1$ の線のまわりにばらつくが、これは各種波形の降雨がほどよく実在するため、 $t_p = 2 t_1$ を意味するものではない。

このように、洪水到達時間の概念はいまなお問題を残している。前述の2つの実用的推定法は概して過小値を与えるので、後方主山型降雨には式(14)を、前方主山型降雨には式(15)を用いる便法も考えられよう。しかし詳細は今後の課題である。

さて、洪水到達時間や遅れ時間を水文地形量の関数として表現しようとする試みはいくつかあるが、都市化の影響を評価できる形式にしたものはあまりない。

$$\left. \begin{aligned} \text{Anderson 式}^{96)} \\ \text{自然河川: } T_l &= 38(L/\sqrt{S})^{0.42} \\ \text{都市河川: } &= 2.8(L/\sqrt{S})^{0.52} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{土研式}^{94), 97)} \\ \text{自然河川: } t'_c &= 13(L/\sqrt{S})^{0.7} \\ \text{都市河川: } &= 1.8(L/\sqrt{S})^{0.7} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{角屋・福島式}^{69), 98)} \\ t_p &= CA^{0.22} r_e^{-0.35} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

ただし、 T_l , t'_c , t_p : (min), L :流域最遠点より下流端まで河道に沿う距離 (km), S :河道勾配, A :流域面積 (km²), r_e :有効降雨強度 (mm/h), C :土地利用形態により異なる係数で、本来次の意味をもつ。

$$C = \left(\frac{\delta N}{\sqrt{S_s}} \right)^{0.6} / [60\beta \times 10^{-2} / (3.6)^{0.4}] \dots\dots\dots (20)$$

N ：等価粗度 ($m^{-1/3} \cdot s$)， S_s ：斜面勾配， δ ：代表斜面長と $A^{0.37}$ の比， β ：洪水到達時間に占める斜面のウェイト。多くの場合，自然河川 $C \approx 290$ ，都市河川 $C \approx 70$ 。

土研式では，各河川についての数～10 数出水の t_i の平均値を，両対数紙上で (L/\sqrt{S}) に対してプロットし，点群の最小値を包絡する t_i の 2 倍を t_c としたもので，結果的には t_i のよい推定式になっている。なお，角屋らは⁹⁸⁾ (L/\sqrt{S}) を含む式も提示しているが，式 (19) よりばらつきが大きいこと，小流域では L の計測がしにくいことの原因によって，式(19)を実用式としている。

これらの式で都市化に伴う洪水到達時間や遅れ時間の変化をみると，その最大は Anderson の式で $1/7 \sim 1/11$ に短縮，最小は角屋らの式で $1/4 \sim 1/5$ の短縮ということになる。

市街地排水路の設計レベルでは，洪水到達時間を流入時間 t_i と，流下時間 t_f の和として表現する。流入時間を代表的な Kerby の式と末石の式でみると，

$$\text{Kerby}^{99)} : t_i = 1.44(NB/\sqrt{S_s})^{0.467} \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{末石}^{71)} : t_i = 6.9(NB/\sqrt{S_s})^{0.6} r_e^{-0.4} \dots\dots\dots (22)$$

ただし， t_i ：min， B ：斜面長 (m)，他は式 (19)，(20) と同様。

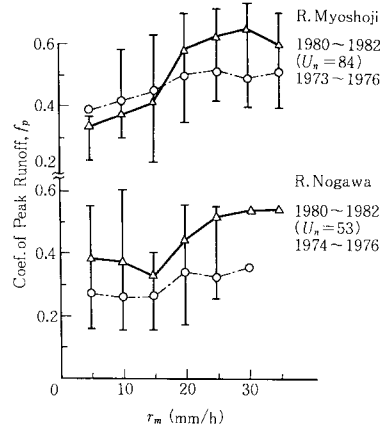
Kerby の式の N も等価粗度とみてよく，市街地：0.02，林草地 0.6～0.8 などが示されている。末石の式は KW 式より得られるもので，これをノモグラフ表示したものもある¹⁰⁰⁾。Kerby の式は r_e の項を含まないのを不備として単なる経験式扱いをする例も皆無ではないが，これは 75% 乱流として Horton 式より求めた時間～流量¹⁰¹⁾に基づいて作成した相関式である。

これらの式によると，都市化に伴って流入時間は $1/6 \sim 1/10$ に短縮すると概算されるが，市街地では $t_f \approx t_i$ となるので，洪水到達時間は $1/3 \sim 1/5$ に短縮化することが予想される。

(2) ピーク流出係数

合理式で，有効降雨推定によく用いられるピーク流出係数には，流出率に類似の側面と，降雨の時空間分布にかかわる側面がある。

図一7 は，東京都内 8 中小河川のピーク流出係数についての佐藤・和泉らの研究⁵⁾から，昭和 57 年時点で都市化数 U_n が最大の妙正寺川 (19.2 km²)，および最小の野川 (30.6 km²) の例を引用したものである。同図の r_m は式 (14) による洪水到達時間内観測降雨強度， f_p の範囲は昭和 55～57 年間のものである。都市化の初期段階とみられる野川流域では， f_p の変化がかなり明瞭にみられる。なお都市化数 U_n を用いた次式も提案されている⁵⁾。



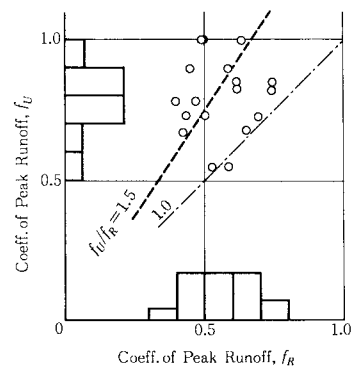
図一7 東京都妙正寺川・野川のピーク流出係数の平均値 (範囲は昭和 55～57 年， U_n ：昭和 57 年の都市化数) (佐藤・和泉)

$$f_p = 0.005 U_n + 0.20 \dots\dots\dots (23)$$

これらは一雨流出率の変化に相応する側面を示したものとみられる。

図一8 は，京都市天神川市街地流域 (2.6 km²，舗装率 68%) のピーク流出係数 f_v を 6 km 離れた下狩川丘陵林草地流域 (1.3 km²) のそれ f_R と対比した例である。ただし，洪水到達時間は式 (14) で定義し，ピーク流量は，自然流域では $1 m^3/s/km^2$ 以上，市街地流域では自然流域の流量ピーク直前にピーク値 $4 m^3/s/km^2$ 以上を示したものに限定してある。都市化に伴ってピーク流出係数が大きくなる傾向は何えるが，同程度のものもある。これは雨量の類同性の問題もあるが，むしろ降雨の時空間分布の影響も大きく，一雨流出率と同列に扱い得ないことを示唆している。

ピーク流出係数は，洪水到達時間の推定精度・短時間強雨の観測精度に著しく左右される。特に都市化域では 5 分程度の短時間の雨量が重要になることもあるが，こ



図一8 ピーク流出係数の対比

f_v ：天神川市街地， f_R ：下狩川自然丘陵地 (角屋)

これは現象(面)的にも観測精度(点)的にも問題が多い。本来ピーク流出係数を0.1以下のオーダーで議論することは難しく、観測値に基づく議論であれば $f > 1.0$ となっても不思議なことではない。

本来、合理式は現象説明に用いるものではなく、設計に役立てるための実用式であり、ピーク流出係数はそのための約束係数である。事実、たとえば複数地目よりなる流域のピーク流出係数として、地目別係数値の面積加重平均を算出して用いるなどの慣行は、上述のことを裏付けている。

ピーク流出係数を流域特性の表現として活用するとすれば、対象出水規模を限定したうえで、そこで起こり得るピーク流出係数最大値が、議論の対象とされるべきであろう。今後の検討事項でもある。

(3) ピーク流出量

流域が都市化すると洪水は何倍になるのか、という質問がよく聞かれる。これはほとんどピーク流量についてのことである。これに関連した報告は数多くみられるが、その取扱いに注意しないと物議の種にならぬとは限らない。何となれば、単に倍率で表現するならば小降雨時ほど大きく、極言すると、無限大になることもあり得るからである。倍率の議論は数年に1度の豪雨もしくはそれ以上の大出水に限定しておく必要がある。

さて、上述のようなマクロな議論では合理式で答えを

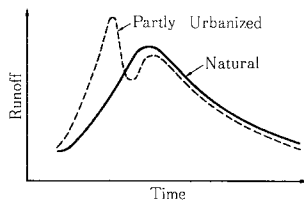


図-9 開発によるハイドログラフの変化説明図

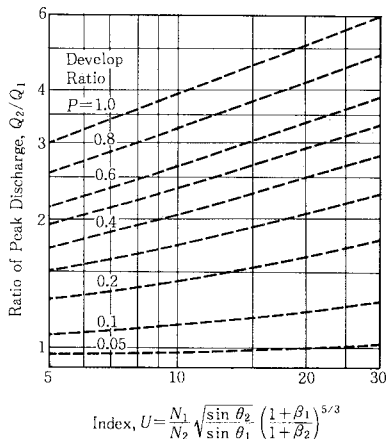


図-10 都市化(部分開発)に伴うピーク流出量の変化(角屋)

出して十分であって、洪水到達時間式と有効降雨強度式を連立して解けばよく、図解法も示されている⁴⁾。しかし都市化は多くの場合部分開発の形で進行するから厄介である。すなわち、図-9に示すように、1山波形の降雨であっても、部分開発によってハイドログラフは2山になり、開発面積の拡大に伴い、やがて市街地からの流出がピーク時に発生するピーク流量 Q_2 が、開発前のピーク流量 Q_1 を上回るようになる。この図はまた、面積加重平均で定めたピーク流出係数によるピーク流量推定が当を得ていないことも示唆している。図-10は、部分開発に伴うピーク流量変化を示した例である⁴⁾。ただしピーク流出係数 $f_u/f_R=1.5$ の場合の図で、図中 P は都市化面積比、横軸は式(3)で定義される都市化指標で、多くの場合 $U=10\sim 15$ とみてよい。 $P=1.0$ 、すなわち全流域が都市化されると、ピーク流量比は4~5倍になることを、同図は示している。

6. あとがき

都市化水文の研究は、過去20年の間に急速に進展した。20年前には、考え方や手法のうえで大きな隔差のあった都市水文と河川水文の内容は、今日ではほとんど同一レベルに接近し、議論はますます微細になってきている。河川水文から都市水文への架橋的な研究方法を取ってきた都市化水文は、ある意味では河川水文の研究を大きく進展させたことになる。そこではいくつかの問題も残されているが、たとえば有効降雨問題・合理式など、いずれの分野にも共通した基礎的問題が少なくない。

都市化水文の研究は大きく進展して、今日では流出制御問題が1つの主要テーマとなっている。これは、20年前、伝統的な計画設計技術によって、流出制御機能を具備するように作られてきた農地排水組織を破壊しつつ、スプロールの的に展開してきた新市街地の水害を、排水能力不足・農地排水組織の不合理性に起因させていた学者がいた昭和40年頃では、予想もできなかったことである。

本稿で、今日的課題である流出制御問題を取り上げなかったことは、片手落ちの感じがしないではない。しかしこの問題はきわめて広範であり、関連報文もかなりの数に上っている。そこでこの問題については、別途展望されることを期待して、ここでは意図的に取り上げなかった。今後はさらに、環境水文・総合治水・治水経済・地域計画などが積極的に攻究される時代に移行するものと確信している。

参考文献

- 1) 木下武雄：都市化による流出の変化，土木技術資料，9-9，pp.11~15，1967.
- 2) Brater, E. F. : Steps Toward a Better Understanding of

- Urban Runoff Processes, WRR 4-2, pp. 335~347, 1968.
- 3) 角屋 睦：新住宅地の不透透面率，京大防災研年報，26 B-2, pp. 225~230, 1983.
 - 4) 角屋 睦：都市化と流出，土木学会水理委員会水工学シリーズ 74-A-2, 1974.
 - 5) 佐藤一夫・和泉 清：都市化と降雨強度別ピーク流出係数の関係について，水講 28, pp. 471~476, 1984.
 - 6) SCS：National Engineering Handbook, Sec 4, 1964, ただし 9) による。
 - 7) Miller, C. R. and Viessman, W., Jr.：Runoff Volumes from Small Urban Watersheds, WRR 8-2, pp. 429~434, 1972.
 - 8) Ragan, R. M. and Jackson, T. J.：Runoff Synthesis using Landsat and SCS Model, Proc. ASCE, 106-HY 5, pp. 667~678, 1980.
 - 9) Jackson, T. J. and Rawls, W. J.：SCS Urban Curve Numbers from a Landsat Data Base, WRB 17-5, pp. 857~861, 1981.
 - 10) Tholin, A. L. and Keifer, C. J.：The Hydrology of Urban Runoff, Proc. ASCE, 85-SA 2, pp. 47~106, 1959.
 - 11) Linsley, R. K. et al.：Applied Hydrology, McGraw-Hill, p. 269, 1949.
 - 12) Viessman, W., Jr.：The Hydrology of Small Impervious Areas, WRR 2-3, pp. 405~412, 1966.
 - 13) Willeke, G. E.：Time in Urban Hydrology, Proc. ASCE, 92-HY 1, pp. 13~29, 1966.
 - 14) Viessman, W., Jr., Keating, W. R. and Srinivasa, K. N.：Urban Storm Runoff Relations, WRR 6-1, pp. 275~279, 1970.
 - 15) Viessman, W., Jr.：Runoff Estimation for Very Small Drainage Areas, WRR 4-1, pp. 87~93, 1968.
 - 16) 豊國永次・渡辺政広：都市流出に関する考察，愛媛大紀要工学 8-4, pp. 97~114, 1977, 土木年講 32-2, pp. 197~198, 1977.
 - 17) 山口高志・松原重昭・山守 隆：都市における降雨流出調査第 2 報—修正 RRL 法による流出推定，土技資料 14-11, pp. 34~39, 1972.
 - 18) 礪原 隆・市川 新・大口 豊：メッシュ法の都市河川流域への適用—その手法と実際—水講 29, pp. 55~60, 1985.
 - 19) 安藤義久・高橋 裕・和泉 清・金尾健司：土地利用別の浸透能特性を考慮した都市流域の洪水流出解析，水講 29, pp. 49~54, 1985.
 - 20) 川口武雄：地表流下流量に就て，森林治水試験彙報 20, pp. 9~27, 1944.
 - 21) 中安米蔵：雨量より洪水量の推定に就て，建設省直技研報 4, pp. 160~194, 1951.
 - 22) 農業土木学会：農業土木ハンドブック, pp. 506~513, 1957.
 - 23) 金子 良：農業水文学，土木雑誌社, pp. 60~71, 1957.
 - 24) 金子 良：ローム台地における流出の解析，農土研 20-5, pp. 296~307, 1953.
 - 25) 木村俊晃：貯留関数法，土木研究所, 1962.
 - 26) 安藤義久・高橋 裕・虫明功臣：丘陵地における洪水流出率と流域の地被条件，自然災害シンポ 17, pp. 201~204, 1980.
 - 27) 安藤義久・高橋 裕・有賀 茂・金尾健司：丘陵地の中小河川流域の水循環機構と都市化によるその変化，水講 26, pp. 251~260, 1982.
 - 28) 高橋 裕・和泉 清・安藤義久・金尾健司：丘陵地の中小河川流域の都市化に伴う洪水流出の変化，水講 26, pp. 261~266, 1982.
 - 29) 角屋 睦：流出解析手法（その 15），農土学会誌 49-6, p. 520, 1981.
 - 30) たとえば，文献 23) pp. 114~137.
 - 31) 豊國永次：低平地の流出，水理学水文学における最近の進歩，土木学会関西中部支部, pp. 132~148, 1967.
 - 32) 田中礼次郎：水田流域の損失雨量について，島大農研究 2, pp. 135~140, 1968.
 - 33) 角屋 睦・豊國永次・岡 太郎・福島 晟・田中礼次郎：低平水田主体流域の出水特性，流域の都市化に伴う洪水流出形態の変化予測，自然災害特別研究成果 A-52-5, pp. 52~58, 1977.
 - 34) 山田 正・山崎幸二：流域における保水能の分布が流出に与える影響について，水講 27, pp. 385~392, 1983.
 - 35) 山田 正・石井文雄・山崎幸二・岩谷 要：小流域における保水能の分布と流出特性の関係について，水講 29, pp. 25~30, 1985.
 - 36) Horton, R. E.：Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity, Proc. Soil Sci. Soc. 5, pp. 399~417, 1939.
 - 37) Gardner, W. and Widstore, J. A.：Movement of Soil Moisture, Soil Sci. 11, pp. 215~232, 1921.
 - 38) Philip, J. R.：The Theory of Infiltration, 1, Soil Sci. 83, pp. 345~357, 1957.
 - 39) 石原藤次郎・田中要三・金丸昭治：わが国における単位図の特性について，土木学会誌 41-3, pp. 18~23, 1956.
 - 40) 角屋 睦・豊國永次・犬達俊夫：山地小流域河川の低水解析（2），京大防災研年報 10-B, 1967.
 - 41) 角屋 睦：流出解析手法（その 9），農土学会誌 48-9, pp. 53~59, 1980.
 - 42) Chen, C. W. and Shubinski, R. P.：Computer Simulation of Urban Storm Water Runoff, Proc. ASCE, 97-HY 2, pp. 289~301, 1971.
 - 43) Papadakis, C. and Dreul, H. C.：Univ. Cincinnati Urban Runoff Model, Proc. ASCE, 98-HY 10, pp. 1789~1804, 1972.
 - 44) Bras, R. L. and Perkins, F. E.：Effects of Urbanization on Catchment Response, Proc. ASCE, 101-HY 3, pp. 451~466, 1975.
 - 45) 豊國永次：都市流出システムのモデリング，土木学会水理委員会水工学シリーズ 82-A-3, 1982.
 - 46) Narayana, V. V. D., Riley, J. P. and Israelsen, E. K.：Simulation of Runoff from Urban Watersheds, WRB, 7-1, pp. 54~68, 1971.
 - 47) 文献 11) p. 419.
 - 48) 立神弘洋：木曾川洪水の水文学的研究，学位論文，1954.
 - 49) 角屋 睦：山地小流域河川の低水解析（1），京大防災研年報 9, pp. 593~599, 1966.

- 50) 巖柄 鉉・小林慎太郎・丸山利輔：降雨前の低水流量を指標とした有効雨量分離，農土論集 91, pp.26~33, 1981.
- 51) 日野幹雄・長谷部正彦：流出率と湿潤指標としての洪水直前流量，土論集 328, pp.41~46, 1982.
- 52) Crawford, N. H. and Linsley, R. K. : Digital Simulation in Hydrology, Stanford Watershed Model IV, TR 39, CE, Stanford Univ., 1966.
- 53) Alley, W. M., Dawdy, D. R. and Schaake, J. C., Jr. : Parametric-Deterministic Urban Watershed Model, Proc. ASCE, 106-HY 5, pp.679~690, 1980.
- 54) 岡 太郎・角屋 睦・野口美具：宅地域の雨水浸透と流出特性，京大防災研年報 23B-2, pp.227~238, 1980.
- 55) Horner, W. W. and Flynt, F. L. : Relation between Rainfall and Runoff from Small Urban Areas. Trans. ASCE, 101, pp.140~183, 1936.
- 56) Hicks, W. L. : A Method of Computing Urban Runoff. Trans. ASCE, 109, pp.1217~1253, 1944.
- 57) Committee on Flood Control : Effect of Urban Development on Flood Discharge. Proc. ASCE, 95-HY 1, pp.287~309, 1969.
- 58) 豊國永次・角屋 睦・大橋行三：山科川流域の流出特性について，京大防災研年報 8, pp.297~306, 1965.
- 59) 水越三郎・尊田継明：都市域からの洪水流出計算，土技資料 8-9, pp.11~18, 1966.
- 60) 木下武雄・尊田継明：Change of Runoff due to Urbanization, Intern. Symp. Floods and Their Computation, Leningrad, UNESCO, 1967.
- 61) 豊國永次・角屋 睦：流域の都市化に伴う内水の変化について，京大防災研年報 11-B, pp.157~169, 1968.
- 62) Eagleson, P. S. : Unit Hydrograph Characteristics for Sewered Areas. Proc. ASCE, 88-HY 2, pp.1~25, 1962.
- 63) Espey, W. H., Windslow, D. E. and Morgan, C. W. : Urban Effects on the Unit Hydrograph. Moore, W. L. and Morgan, C. W. (Ed.) : Effects of Watershed Changes on Stream Flow, Univ. Teks, pp.215~228, 1969.
- 64) Brater, E. F. and Sangal, S. : Effects of Urbanization on Peak Flows, *ibid* pp.201~214.
- 65) March, F. and Eagleson, P. S. : Approaches to the Linear Synthesis of Urban Runoff Systems. MIT Hyd. Rep. 85, 1965.
- 66) Viessman, W., Jr. and Geyer, J. C. : Characteristics of Inlet Hydrograph. Proc. ASCE, 88-HY 5, pp.245~268, 1962.
- 67) Rao, R. A. and Delleur, J. W. : Conceptual Hydrologic Models for Urbanized Basin. Proc. ASCE, 98-HY 7, pp.1205~1220, 1972.
- 68) 橋本 健・長谷川正：土地利用変化を評価する流出モデル，土技資料 19-5, pp.11~16, 1977.
- 69) 角屋 睦・福島 晟：中小河川の洪水到達時間：京大防災研年報 19 B-2, pp.143~152, 1976.
- 70) 鮎川 登・北川善広：都市化流域の洪水流出モデル，土論集 325, pp.51~59, 1982.
- 71) 末石富太郎：Run-off Estimation in Storm Sewer System using Equivalent Roughness. 土論集 91, pp.41~54, 1963.
- 72) 永井明博・角屋 睦・杉山博信・鈴木克英：貯留関数法の総合化，京大防災研年報 25 B-2, pp.207~220, 1982.
- 73) James, L. D. : Using a Digital Computer to Estimate the Effects of Urban Development on Flood Peaks. WRR 1-2, pp.223~234, 1965.
- 74) James, L. D. : Hydrologic Modeling Parameter Estimation and Watershed Characteristics. J. Hydrology 17, pp.283~307, 1972.
- 75) Terstriep, M. L. and Stall, J. B. : Urban Runoff by RRL Method. Proc. ASCE, 95-HY 6, pp.1809~1834, 1969.
- 76) 室田 明・神田 徹：都市河川の内水解析と洪水追跡，自然災害シンポ 13, pp.299~302, 1976.
- 77) たとえば文献 11) pp.531~541.
- 78) Laurenson, E. M. : A Catchment Storage Model for Runoff Routing. J. Hydrology 2, pp.141~163, 1964.
- 79) Harley, B. M., Perkins, F. E. and Eagleson, P. S. : A Modular Distributed Model of Catchment Dynamics, MIT Rep-133, 1970.
- 80) 豊國永次：Some Considerations on Modeling of Urban Drainage Basin on Storm Water Runoff. IAHS Publ. 117, pp.405~414, 1975.
- 81) 豊國永次・中地映司・渡辺政広：都市流出の流域モデルに関する研究，愛媛大紀要工学 8-3, pp.105~122, 1976.
- 82) 市川 新・榊原 隆：メッシュ法による都市域の雨水流出機構の解析，水講 27, pp.55~60, 1983.
- 83) 市川 新・榊原 隆：メッシュ法による雨水流出抑制型下水道の評価の研究，水講 28, pp.483~488, 1984.
- 84) 市川 新・榊原 隆・藤田 壮：都市域における新しい雨水流出シミュレーションモデルの提案—メッシュ法—，水利科学 28-1, pp.23~49, 1984.
- 85) 市川 新・榊原 隆・大口 豊：メッシュ法の都市河川流域への適用—その手法と実際—，水利科学 28-6, pp.74~97, 1985.
- 86) 角屋 睦：Predictive Study on Urbanization Effect of Drainage Basin on Flood Runoff. Proc. 2nd ISH, pp.436~449, 1972, Floods and Droughts, WRP, 1973.
- 87) 角屋 睦・福島 晟・佐合純造：丘陵山地流域モデルと洪水流出モデル，京大防災研年報 21 B-2, pp.219~233, 1978.
- 88) 角屋 睦・福島 晟：自然丘陵山地の雨水流モデル定数，自然災害シンポ 15, pp.521~524, 1978.
- 89) 杉山博信・角屋 睦：山腹斜面における雨水の流下形態，農土論集 114, pp.15~20, 1984.
- 90) 豊國永次・渡辺政広：都市流出シミュレーションモデルとその調査流域への適用，水講 29, pp.43~48, 1985.
- 91) 角屋 睦・早瀬吉雄：流出解析手法（その 14），農土学会誌 49-4, pp.45~56, 1981.
- 92) 角屋 睦・早瀬吉雄：巨椋低平流域の都市化と内水（1）~（6），京大防災研年報 22 B-2, pp.237~256, 1979；23 B-2, pp.263~277, 1980；24 B-2, pp.197~221, 1981；25 B-2, pp.269~284, 1982；26 B-2, pp.231~243, 1983.

- 93) 石原藤次郎・高棹琢馬：単位図法とその適用に関する基礎的研究，土論集 60 別冊 3-3, pp.8~9, 1959.
- 94) 吉野文雄・米田耕蔵：合理式の洪水到達時間と流出係数，土技資料 15-8, pp.3~6, 1973.
- 95) Raudkivi, A.J. : Hydrology, Pergamon P., p.298, 1979.
- 96) Anderson, D.G. : Effects of Urban Development on Floods in Northern Virginia. USGS Water-Supply Paper, 2001-C, 1970.
- 97) 木下武雄・吉野文雄・橋本 健・米田耕蔵：都市化による流出の変化，水講 17, pp.97~102, 1973.
- 98) 角屋 睦・福島 晟：Concentration Time of Flood Runoff in Smaller River Basins. Proc. 3rd ISH, pp.75~88, 1977.
- 99) Kerby, W.S. : Time of Concentration for Overland Flow. Civil Eng. 29-3, p.60, 1959.
- 100) Ragan, R.M. and Duru, J.O. : Kinematic Wave Nomograph for Time of Concentration. Proc. ASCE, 98-HY 10, pp.1765~1771, 1972.
- 101) Hathaway, G.A. : Design of Drainage Facilities. Trans ASCE, 110, pp.697~730, 1945.

(1985.5.29・受付)
