

諸木川流出試験地における都市化による流出形態の変化  
Changes of Runoff Characteristics caused by Urbanization in Moroki experimental basin

|             |    |   |   |     |
|-------------|----|---|---|-----|
| 建設省太田川工事事務所 | 正員 | 清 | 水 | 佐   |
| 同　　上        | 正員 | 吉 | 野 | 清　文 |
| 同　　上        |    | 青 | 戸 | 生　治 |

1. はじめに

森林開発・市街地の増大、農業排水路の整備、水田・ため池の減少、下水道の整備等により洪水時における河川への流出量、ピーク流量の増大、洪水到達時間の減少等、流域の開発に伴い流出形態が変化することは以前から知られている。このような流域の開発による流出形態の変化に関する研究はかなり進められているが依然として問題を残しており、その変化の定量的把握は困難な状況にある。近年、河川の整備水準がまだまだ低位の状況下で開発的变化による流域治水機能の劣化は、いろいろなところで深刻な社会問題を引き起こしており、流域の開発による流出形態の変化を適確に把握、予測し、その対策を確立することが重要となってきた。

太田川工事事務所では、流域の土地利用変化に伴って流出形態がどのように変化してきたかを実態調査し、それを惹起させた影響因子を抽出するとともにその影響度を定量的に把握し、今後の治水計画に資するため太田川中流部二次支川諸木川に流出試験地を設け、昭和46年より雨量、水位の観測を行っている。当試験地付近では昭和46年頃より高陽ニュータウンの建設が進められており、現在宅地造成もほぼ完了し宅地開発前後のデータが収集された。

本研究は、当試験地において昭和46年から昭和57年までに得られたデータを用いて、有効降雨モデル、合理式法、貯留関数法、等価粗度法、準線形貯留型モデルにより、諸木川における流域の土地利用形態の変化による流出形態の変化を定量的に評価することを試みたものである。

## 2. 流域の概要

諸木川流出試験地のある落合川は、太田川本川に河口より16.5 km（高瀬堰直下流）で合流する。この落合川は流域面積7.5 km<sup>2</sup>、落合川本川とほぼ同形状流域をなす支川諸木川からなる羽状流域である。

流域内の地質は広島花崗岩と呼ばれるものである。広島花崗岩の岩体構成は岩相が粗粒の黒雲母花崗岩であるため風化が進んでおり、厚さ10mにわたってマサ化していると言われている。マサ状を程する区域の斜面、特に沢沿いには小崩壊が多数みられ、丘陵部の谷はマサ・岩屑等からなる扇状地や崖錐堆積物で堆積され平坦地を形成している。

諸木川流出試験地はこの落合川流域の北東に位置し、昭和46年の観測開始当初は流域面積1.24 km<sup>2</sup>、河道延長1.52 km、河床勾配1/18.3であったが、昭和46年頃から広島県及び民間企業により広島市のベッドタウンとして高陽ニュータウンの建設が始まり、諸木川流域は急速に造成、宅地化されていった。昭和52年から55年にかけて

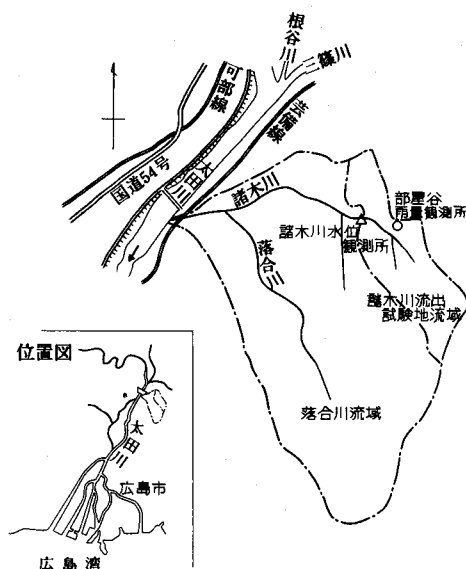


図-1 諸木川流出試験地位置図

諸木川も改修され、それに伴って試験地流域内の河道もコンクリートで三面張りされ、流域面積1.30 km<sup>2</sup>、河道延長0.45 km、河床勾配1/27.3と変化した。

(1) 土地利用状況の変遷

これまでの土地利用状況の変遷、下水道整備率及び都市化率を表-1に示す。

なお、工場、公園、宅地、造成地、道路の都市的土地利用の部分を市街地とし、道路、宅地の屋根面積（建ぺい率60%として算出）、浄水場を不透透域、造成地、庭、公園、グラウンドを浸透域とした。都市化を表す指標としての都市化率（T）は、流域全面積に対する市街地の面積率で表わす。また、土地利用の調査には1/5000、1/2500地形図及び航空写真を用いた。

(2) 水文観測施設、H-Q式及び主要洪水一覧表

表-2に水文観測施設の概要を、表-3にH-Q式を、表-4に主要洪水の一覧を示す。

表-1 土地利用状況の変遷（単位：％）

| 年度     |      | 47   | 49   | 51   | 55   | 56   |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| 地目     | 山    | 77.3 | 73.8 | 59.0 | 19.4 | 16.2 |
|        | 林    |      |      |      |      |      |
| 田      |      | 17.6 | 17.0 | 14.6 | 4.0  | 0.8  |
| 畑      |      | 1.4  | 1.1  | 0.7  | 0.0  | 0.0  |
| 市街地    | 浸透域  | 0.2  | 4.1  | 21.5 | 51.9 | 55.4 |
|        | 不透透域 | 3.5  | 4.0  | 4.2  | 17.5 | 27.6 |
| 下水道整備率 |      | 2.0  | 2.0  | 11.3 | 100  | 100  |
| 都市化率   |      | 4.0  | 7.0  | 20.0 | 76.0 | 81.0 |

表-2 観測施設の概要

| 種別 | 河川名 | 観測所名     | 設置年月    | 型式             | 自・警の別 | 摘要                     |
|----|-----|----------|---------|----------------|-------|------------------------|
| 雨量 | 諸木川 | 諸木雨量観測所  | 昭和46年7月 | 長期自記雨量計SR-1型   | 自     | 昭和55年廃止                |
| 雨量 | 諸木川 | 部隈谷雨量観測所 | 昭和46年6月 | 自記電接計数器        | 自・警   |                        |
| 水位 | 諸木川 | 諸木水位観測所  | 昭和46年7月 | 長期自記水位雨量計SR-1型 | 自     | 昭和53、54年欠測<br>昭和55年に移設 |

表-3 H-Q式の経緯

| 観測所名 | 使用開始    | 使用終了     | 式 形                           | 相関係数  | 相対誤差  |
|------|---------|----------|-------------------------------|-------|-------|
| 諸 木  | 昭和46年7月 | 昭和49年12月 | $Q = 10.820(H - 0.272)^{2.0}$ | 0.966 | 0.508 |
| 諸 木  | 昭和50年1月 | 昭和53年3月  | $Q = 10.114(H - 0.269)^{2.0}$ | 0.993 | 0.227 |
| 諸 木  | 昭和55年1月 | 昭和55年12月 | $Q = 92.338(H - 0.002)^{2.0}$ | 0.988 | 0.251 |
| 諸 木  | 昭和56年1月 | 昭和56年12月 | $Q = 93.402(H - 0.001)^{2.0}$ | 0.996 | 0.739 |

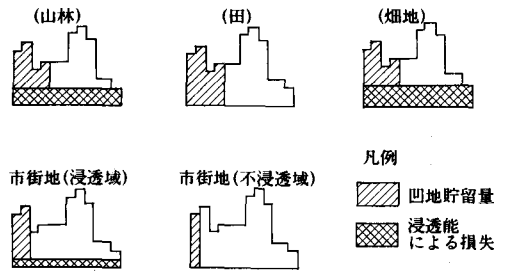
注) 昭和53年～54年は河道改修のため欠測。

表-4 主要洪水一覧表

| 試験地名 | 観測所 | 洪水No | 生起年月日                 | 総雨量<br>(mm) | ピーク雨量<br>(mm/10分) | 総直接<br>流出高<br>(mm) | ピーク流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | 基経流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | 前期5日<br>雨<br>量<br>(mm) | 前期10日<br>雨<br>量<br>(mm) | 総損失量<br>(mm) | 流出率   | 都市化率<br>(%) |
|------|-----|------|-----------------------|-------------|-------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|--------------|-------|-------------|
| 諸 木  | 諸 木 | 703  | 47.7.9.12<br>～7.13.12 | 280.5       | 13.5              | 124.88             | 2.792                        | 0.103                       | 109.0                  | 117.0                   | 155.57       | 0.445 | 4.0         |
|      | 諸 木 | 708  | 49.6.3.21<br>～6.5.9   | 88.2        | 5.7               | 27.53              | 2.028                        | 0.030                       | 1.4                    | 3.8                     | 60.63        | 0.312 | 7.0         |
|      | 諸 木 | 709  | 49.9.7.12<br>～9.9.8   | 180.1       | 10.0              | 69.65              | 2.369                        | 0.036                       | 1.1                    | 50.2                    | 110.45       | 0.387 | 7.0         |
|      | 諸 木 | 716  | 51.9.9.12<br>～9.12.0  | 125.9       | 7.0               | 47.31              | 2.438                        | 0.051                       | 26.8                   | 55.7                    | 78.62        | 0.376 | 20.0        |
|      | 諸 木 | 719  | 55.8.23.0<br>～8.23.12 | 79.6        | 12.0              | 36.67              | 17.182                       | 0.018                       | 196.3                  | 254.5                   | 42.93        | 0.461 | 76.0        |
|      | 諸 木 | 723  | 56.8.27.5<br>～8.27.17 | 51.0        | 10.0              | 22.53              | 11.698                       | 0.033                       | 0.0                    | 0.0                     | 28.47        | 0.442 | 81.0        |

3. 有効降雨モデルの検討

有効降雨モデルについては多くの方法が提案されているが、いずれも一長一短を有しており決定的なものではない。本研究では凹地貯留量～浸透能モデルを採用した。このモデルは各土地利用ごとに降雨から凹地貯留量と浸透能を差し引き、土地利用ごとの面積率で加重平均する方法である（図－2）。各土地利用ごとの凹地貯留量と浸透能については山口ら<sup>1)</sup> 豊国ら<sup>2)</sup> の研究や、総合治水特定河川での採用値があり、これらを参考にして一応の標準値を設定し（表－5）、これを目安にし、水平分離法により求めた総損失量と凹地貯留量～浸透能モデルにより求めた総損失量が同量に近くなるよう浸透能を決定した。



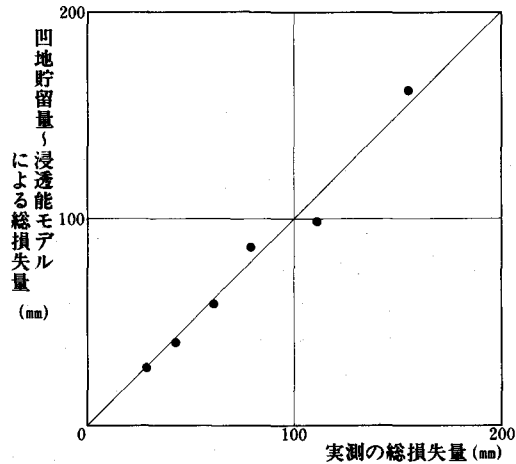
図－2 土地利用ごとの降雨損失

まず当流域において開発前の3洪水については畑と市街地の面積率は非常に小さいことから、畑と市街地における損失量は小さいと考え、畑の浸透能、市街地の浸透能を標準値と仮定して山林の浸透能を求めた。次に開発後の3洪水のデータを用いて山林の浸透能に開発前のデータで得られた値を用い、市街地と畑の浸透能を決定した。最後に当モデルによる総損失量が実積の総損失量に近くなるように各浸透量を微修正したところ、表－5のようになり、当モデルによる総損失量と実測の総損失量は図－3に示す通り、ほぼ同じになった。市街地の浸透能が非常に大きいのは、当試験地の土質特性のためとも考えられるが、山林の浸透能の2倍もあるということは実際には考えにくいことである。しかし、開発前後の全洪水のデータを用いて解析すると良い結果が得られず、今後検討が必要である。

表－5 凹地貯留量と浸透量

|         | 標準値           |               | 同定した値         |               |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|         | 凹地貯留量<br>(mm) | 浸透能<br>(mm/h) | 凹地貯留量<br>(mm) | 浸透能<br>(mm/h) |
| 山林      | 6             | 10            | 6             | 7             |
| 田       | 50            | —             | 50            | —             |
| 畑       | 6             | 10            | 6             | 10            |
| 市街地     | 6             | 3～6           | 6             | 14            |
| 浸透域不浸透域 | 2             | —             | 2             | —             |

\*は同定した値



図－3 実測による総損失量とモデルによる総損失量の関係

4. 流出モデルの検討

(1) 合理式法

合理式は次のように表わされる。

$$Qp = \frac{1}{3.6} f p r A$$

ここで、Qp：洪水ピーク流量(m<sup>3</sup>/s)、fp：流出係数、r：洪水到達時間内の平均降雨強度(mm/h)、A：流域面積(km<sup>2</sup>)である。本研究では、洪水到達時間を1) クラークン式、2) ピーク流量時とピーク降雨時

の時差の2倍とする方法, 3) ピーク流量時の降雨強度と同じ降雨強度の時点との時間差をとる方法の3通りで求めた。その結果、クラベン式では20分となり、2), 3)の方法では図-4に示す通り開発前で1時間程度だったものが開発後では10分程度に短くなった。

流出係数は、開発前で0.3程度だったものが、開発後には0.7程度となった。(図-5)  
 また、合理式では貯留効果を見逃し、雨水流が一定速度で地表を流下するとしている等の仮定により、都市化が進むほど合理式の適合度は良くなるはずである。実際、合理式法による推算ハイドログラフは、都市化の進んだ2洪水の方が実測に良く適合する結果を得ている。

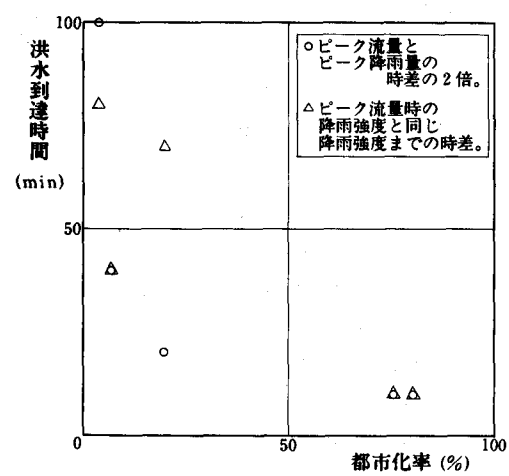


図-4 都市化率と洪水到達時間の関係

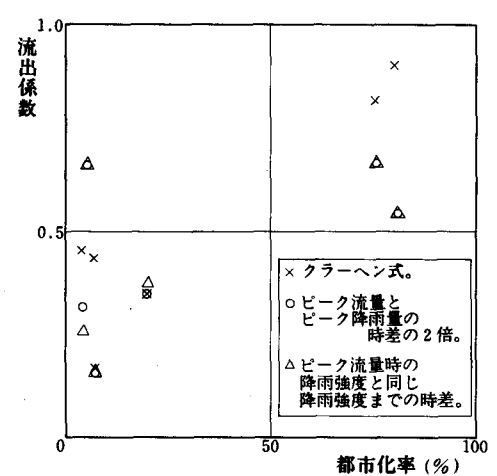


図-5 都市化率と流出係数の関係

(2) 貯留関数法

貯留関数法の基本式は次のように表わされる。

$$S = K_q P$$

$$re - q = \frac{dS}{dt}$$

ここで、S：貯留量(㎥), q：流出高(㎥/h), re：有効降雨強度(㎥/h), K、P：定数である。Kの値については流域面積、河道長、流域勾配や降雨特性により大きく変化することが知られている。

今回、Kの特性を検討するにあたり、P = 0.6に固定した時の最適K値を検討したところ、都市化に伴ってK値が10から2へと減少する傾向が見られた。(図-6)

また、最適K, Pを

$$S = K_q P$$

で貯留量Sに変換して都市化との関係を調べたところ、都市化に伴う貯留量の減少傾向を把握することができた。(図-7)

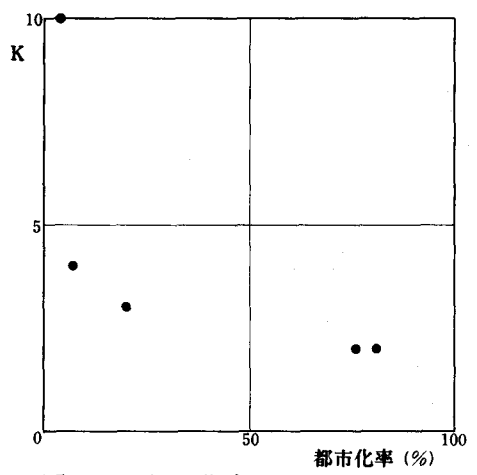


図-6 都市化率とP=0.6としたときのKの関係

### (3) 等価粗度法

等価粗度法の基本式は次のように表わされる。

$$h = k q^p$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e$$

ここで、 $h$ ：雨水流の水深（ $m$ ）， $q$ ：斜面単位幅流量（ $m^3/s$ ）， $r_e$ ：有効雨量強度（ $m/s$ ）， $k$ 、 $p$ ：定数である。雨水流がManning則に従うとすると、

$$K = (N/\sqrt{I})^p, \quad p = 0.6$$

ここで、 $N$ ：等価粗度， $I$ ：斜面勾配である。この等価粗度 $N$ については流出解析例が充実してきたこともあって標準値が示されている。諸木川試験地の $N$ 値は都市化される前までは1程度だったものが、都市化されることによって0.05以下に減少している。（図-8）

また、 $N$ 値は降雨によっても影響を受け、総降雨量の大きいものほど $N$ 値が大きくなっている。（図-9）これは、降雨規模が大きいほど山林等の粗度の大きい部分の影響が大きくなるためと考えられる。

### (4) 準線形貯留型モデル

準線形貯留型モデルの基本式は次のように表わされる。

$$S = K q$$

$$r_e - q = \frac{dS}{dt}$$

$$\text{ただし、} K = \frac{tc}{2}$$

ここで、 $S$ ：貯留量（ $mm$ ）， $q$ ：流出高（ $mm/h$ ）， $tc$ ：洪水到達時間（ $hr$ ）である。 $tc$ は角屋による洪水到達時間の経験式と実績の有効降雨強度曲線から決定される。

$$tc = CA^{0.22} r_e^{-0.35}$$

ただし、 $r_e$ ：降雨継続時間内の最大有効降雨強度（ $mm/h$ ）， $A$ ：流域面積（ $km^2$ ）， $tc$ ：洪水到達時間（ $min$ ）， $C$ ：土地利用形態によって定まる定数である。そして、ある流域からの流出波形は、その流域を1種類の土地利用形態として計算しておき、その後で土地利用比率によって加重平均して合成する方法をとった。

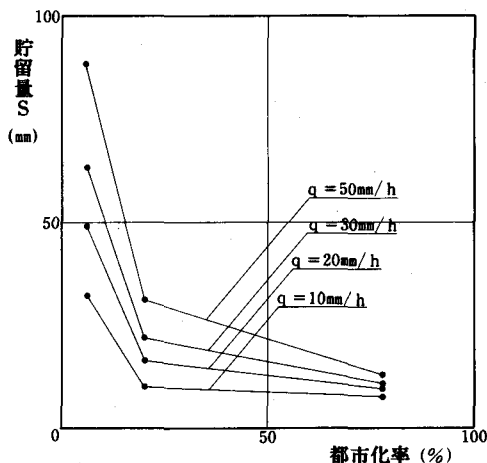


図-7 都市化率と貯留量の関係

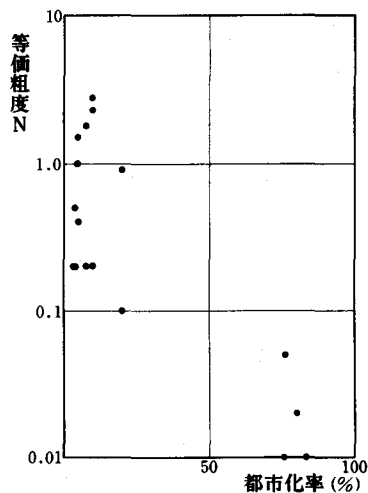


図-8 都市化率と等価粗度の関係

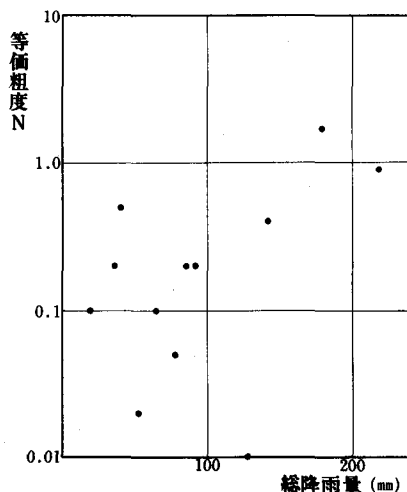


図-9 総降雨量と等価粗度の関係

この土地利用ごとのC値は、土研での標準値<sup>3)</sup>、総合治水特定河川での採用値があり、これを目安にして一応の標準値をつくり同定を行った。今回同定した値は表-6の通りであり、標準値よりいくぶん大きな値となっている。この点についてデータ数の不足は否めないが諸木川試験地の浸透性が高いことが一因として考えられる。

## 5. まとめ

都市化による流出形態の変化を、有効降雨モデルとして凹地貯留量～浸透能モデル、流出モデルとして合理式、貯留関数法、等価粗度法、準線形貯留型モデルについて検討した。

凹地貯留量～浸透能モデルでは、このモデルにより実績の総損失量を説明することができた。しかし、ここで求められた土地利用ごとの浸透能は、妥当と思われる数値を示しており、今後検討する必要がある。

合理式法では、洪水到達時間が開発前で1時間程度だったものが、開発後には10分程度となった。また、流出係数が開発前では0.3程度だったものが、開発後には0.7程度となった。

貯留関数法では、 $P = 0.6$ とした時のK値が都市化に伴って10から2へと減少した。また、流域の貯留量も都市化と共に減少した。

等価粗度法については、等価粗度Nが開発前は1程度だったものが、都市化によって0.05以下に減少した。また、N値は降雨量にも影響を受け、降雨量が大きいほどN値も大きくなった。

準線形貯留型モデルでは、土地利用ごとのC値が、山林で350、田1000、畑250、市街地70という値が得られた。

表-6 土地利用ごとのC値

|     | 標準値  | 同定した値 |
|-----|------|-------|
| 山林  | 290  | 350   |
| 田   | 1000 | 1000  |
| 畑   | 200  | 250   |
| 市街地 | 70   | 70    |

## 参考文献

- 1) 山口・松原・山守：都市における降雨流出調査（第1～第3報）、土木技術資料
- 2) 豊国・渡辺：都市流出に関する考察、農業土木学会、昭和53年
- 3) 橋本・長谷川：土地利用を評価するモデル、土木技術資料19-5、1977