

多摩ニュータウンの都市化に伴う流出変化とフラクタル

Runoff Change with Urbanization in Tama New Town Watershed and its Fractal Geometry

小川 進*

By Susumu OGAWA

Flood concentration time equations are derived from fractal theory for urban rivers and sewer network. To know the effect of urbanization on flood control, flood observation had been started in Tama New Town for the past fourteen years and its data were analyzed hydrologically. The major results are as follows; on the process of urbanization, concentration time has been shortened since impervious area, river improvement and sewer network increased in a watershed. However, the peak runoff coefficient only increased with impervious area and sewer network. These mechanism can be explained very clearly by the concentration time equations expressed by fractal.

Keywords: concentration time, fractal, open channel, urbanization

1. はじめに

流域の都市化により生ずる、いわゆる都市型水害の原因は、流域の不浸透域面積率、下水道整備率及び河川改修率の増加によるもので、洪水到達時間の短縮とピーク流量の増加をもたらす。これらの諸要因と現象との関係は実証的に既に確認されている¹⁻³⁾。ところで、数学及び非線形物理学の分野で不規則図形を取り扱う幾何学にフラクタルがある⁴⁾。河川はフラクタルの典型であり、河川の経験的地形則であるHackの法則⁵⁾はフラクタルにより理論式が導出される⁶⁾。一方、Kinematic Wave法により洪水到達時間は解析的に導出され、Hackの式と連立させることで、都市化に伴う河川の線形の変化とその洪水到達時間への影響を推定できる⁷⁾。都市河川は、河川改修と下水道整備事業とにより線形の変化が生じ、フラクタル次元が自然河川の1.1~1.3から河道で約1.0に、下水道で1.3~1.6とに分裂した構造であることが判明した⁸⁻⁹⁾。このことが、不浸透域の増加とともに都市型水害を生起させる主要な要因となっていると考えられる。さらに、この河川及び下水道事業の進捗をフラクタルで表現した理論式も提起した⁷⁾。本論では、近年、都市化の著しい多摩ニュータウンの大栗川及び乞田川流域 (Fig. 1) を対象に、過去14年間のデータを解析して、フラクタルに基づく河川線形と流出機構の変化について、理論式の検証と考察を試みたものである。

* 正会員 工博 東京都土木技術研究所技術部

(〒108 東京都港区港南1-1-18)

2. フラクタル次元解析

多摩ニュータウンの大栗川及び乞田川流域の河川及び下水道のフラクタル次元解析を試みた。地形図及び下水道管路図をもとに、被覆法⁹⁾によりフラクタル次元を算定した。これらの結果をTable 1 に示す。大栗川では、1970年から86年にかけて河道改修が進められ、それに伴いフラクタル次元が1.0に収束していく過程がわかる。乞田川では1975年までに河道改修事業は終了し、最終的なフラクタル次元は1.0になっている。下水道の幹線もまた1.0であるが、管路は1.3である。こうした傾向は他の都市河川と同様である⁹⁾。河川の線形とフラクタル次元との関係を模式的にFig.2 に示す⁷⁾。

Table 1 Fractal dimension of rivers

RIVERS	YEAR	FRACTAL DIMENSION
OHGURI RIVER	1970	1.05
	1975	1.03
	1980	1.02
	1986	1.01
KOTTA RIVER	1970	1.06
	1975	1.0
KOTTA SEWER MAINLINE	1982	1.01
KOTTA SEWER NETWORK	—	1.30
OHGURI SEWER NETWORK	—	1.29

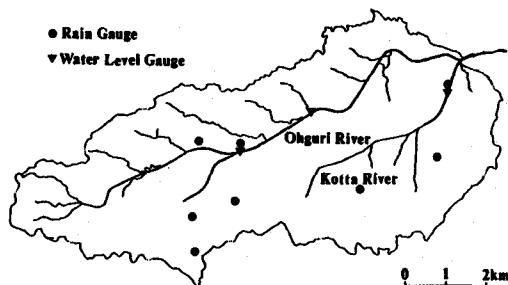


Fig.1 Ohguri and Kotta Rivers

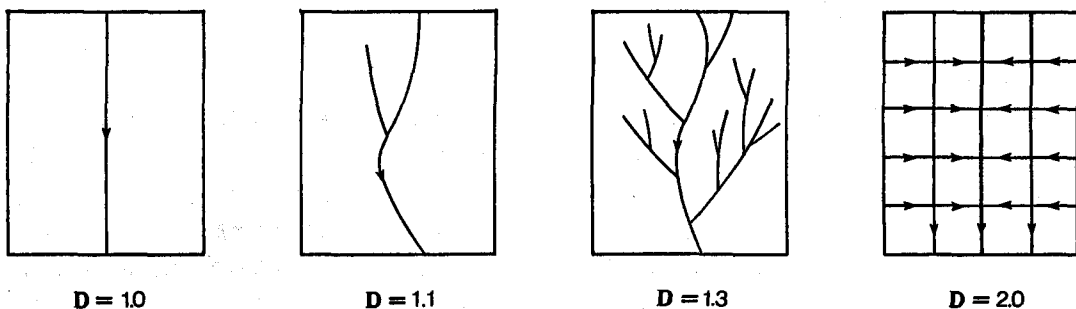


Fig.2 Alignment of rivers and their fractal dimension⁷⁾

3. フラクタルで表現された洪水到達時間

Hack⁵⁾ は、河道長 L と流域面積 A との関係に次式が成立つことを見出した。

$$L = u A^v \quad (1)$$

ここで、 u 、 v は定数である。いわゆるHackの法則といわれる式である。同式はフラクタルにより、次のように表現できる。

$$L = \phi^D \varepsilon^{1-D} A^{D/2} \quad (2)$$

ここで、 L は主河道長ないしは全河道長で、 ϕ は流域の形状係数で、 $\phi > 1$ 、 ε はフラクタルの自己相似性の下限に相当する長さ（フラクタル下限長）、 D は主河道ないしは支流のフラクタル次元である。上式を用

いて, Fig.3 をモデルとするKinematic Wave法により洪水到達時間 t_p は次のように求められる⁷⁾.

$$t_p = t_s + t_c \quad (3)$$

$$t_s = k (2 \phi^{D_1} \varepsilon^{1-D_1})^{-P} r_e^{P-1} A^{(1-D_1/2)P} \quad (4)$$

$$t_c = K \phi^{D_2} \varepsilon^{1-D_2} r_e^{P-1} A^{D_2/2+P-1} \quad (5)$$

ここで, t_s は斜面流の流達時間, t_c は下水道を含めた主河道の流達時間, k, p, K, P は斜面ないし河道の水理パラメータ, r_e は洪水到達時間内の有効降雨強度, D_1 は下水管路ないし河川支流, D_2 は主河道のフラクタル次元である.

4. 河道改修率と下水道整備率

自然河川では, ミクロからマクロのスケールまで自己相似性が保存され, フラクタル次元が1.1~1.3の範囲に分布する. ところが, 都市河川ではマクロでは河道が改修され, ミクロでは下水道が整備され, フラクタル次元はそれぞれ, 1.0~1.1, 1.3~1.6に変化する. また, Table 1 にみられるように河道改修ないしは下水道整備の過程では, フラクタル次元の遷移が認められ Fig.3 Kinematic wave model. そこで, 河道改修率 x_r , 下水道整備率 x_s が流域面積比で表わされたとき, (2)式を用いてフラクタル次元の導出を試みる. すなわち, 未改修, 未整備の流域面積 A_1 , 河道長 L_1 , フラクタル次元 D_1 , フラクタル下限長 ε_1 , 形状係数 ϕ_1 , 改修済, 整備済の流域の各パラメータを $A_2, L_2, D_2, \varepsilon_2, \phi_2$, 全流域を A, L, D, ϕ とすると,

$$L = L_1 + L_2$$

$$= \phi_1^{D_1} \varepsilon_1^{1-D_1} A_1^{D_1/2} + \phi_2^{D_2} \varepsilon_2^{1-D_2} A_2^{D_2/2} \quad (6)$$

$$A_1 = (1 - x_1) A \quad (7)$$

$$A = x_1 A \quad (8)$$

ここで, x_1 は $i = r$ のとき河道改修率, $i = s$ のとき下水道整備率である.

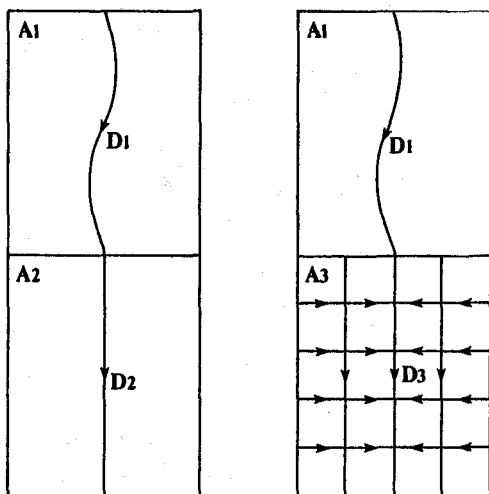


Fig.4 River improvement(left) and sewer network (right) fractal model⁷⁾

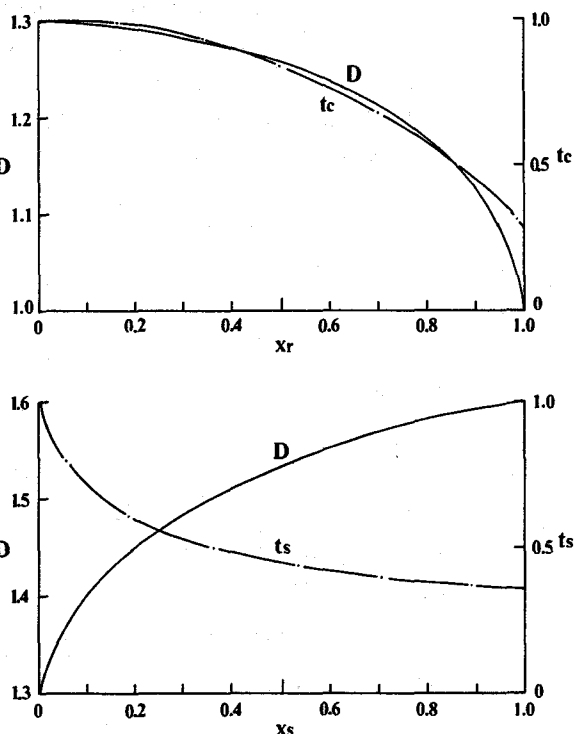
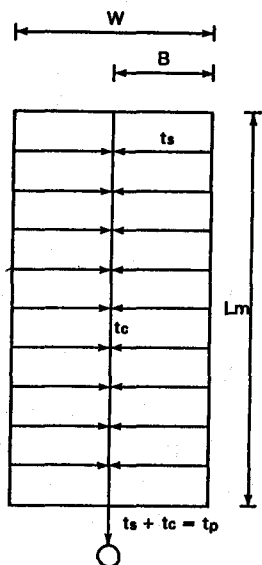


Fig.5 Fractal dimension and flood concentration with river improvement x_r and sewer network x_s ⁷⁾

(6)~(8)式より流域のフラクタル次元Dは次のようになる。

$$D = 1 / \ln(\phi \sqrt{A} / \varepsilon_1) \cdot \ln[\phi_1^{D_1} \varepsilon_1^{-D_1} \{(1 - x_1)\} A^{D_1/2} + \phi_2^{D_2} \varepsilon_1^{-1} \varepsilon_2^{1-D_2} (x_1 A)^{D_2/2}] \quad (9)$$

上式より、流域の水理パラメータが変化しないとの仮定で、(4),(5)式を用いて洪水到達時間の変化を計算したのがFig.5であり、河川改修と下水道整備とで洪水到達時間の短縮の状況が異なることがわかる⁷⁾。

5. 流出解析

大栗川と乞田川の流出解析を行い、流出の変化、特に洪水到達時間の短縮を調べた。

多摩ニュータウンの1969年~83年の洪水時の雨量・水位データを用いて、洪水到達時間、流出率、有効降雨等のパラメータを求めた。両河川とも20洪水を対象にした。観測期間中、大栗川(上流域)は主として河道改修が行われ(Fig.6)、乞田川は下水道整備が行われた(Fig.7)。従って、両河川の洪水到達時間の短縮は、河川改修と下水道整備によるものとみなせる³⁾。洪水到達時間は、ハイレート・ハイドログラフの比較から、流量のピーク時の降雨強度に等しい強度だけ遅る方法で求めた。流出率は、洪水到達時間内の降雨量と流量(有効降雨量)との比より算出した。河道の粗度係数は水位・流量曲線より、斜面の粗度係数はKinematic Wave法による解析から同定した。その他のデータは東京都建設局及び建設省の資料¹⁰⁾に基づいた。

以上より、各洪水の斜面流下時間及び河道流下時間を(4),(5)式から推定し、まとめたのが表2、3である。両河川とも洪水到達時間は年ごとに短縮していることがわかる。洪水到達時間はいうまでもなく、有効降雨 r_e により変動するので、(4),(5)式より明らかに r_e^{-1} ないし r_e^{-P-1} で除して規格化する必要がある。こうして、比較することで流域の流出機構の変化が推定できる。ところで、斜面流は下水道の影響をうけるので、下水から河川までの流下時間を有効降雨から推定して算出する必要がある。また、河道改修によって、河道の粗度は減少するので、流出解析の結果から推定する必要がある。

こうして、それぞれ修正し、規格化した大栗川の河道流下時間及び乞田川の斜面流下時間を、フラクタルより求めた理論解と比較したのがFig.8,9である。これらはいずれも有効降雨の項で規格化したものであり、Fig.8では粗度係数の修正が、Fig.9では下水道の流下時間の修正がなされている。いずれも、河川改修及び下水道整備が洪水到達時間の短縮に寄与し、しかもフラクタルによる理論解とも傾向が一致している。

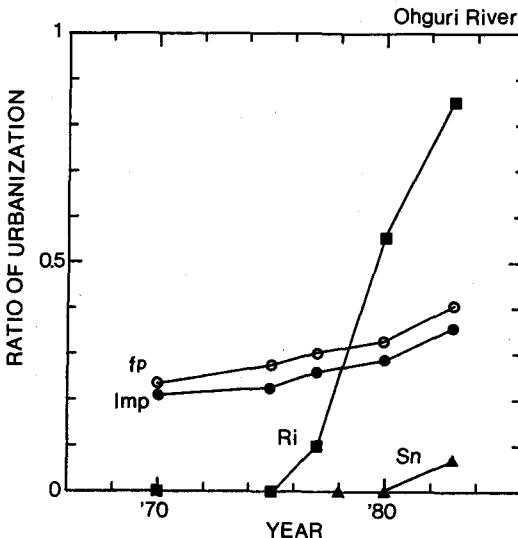


Fig.6 Urbanization index in Ohguri river

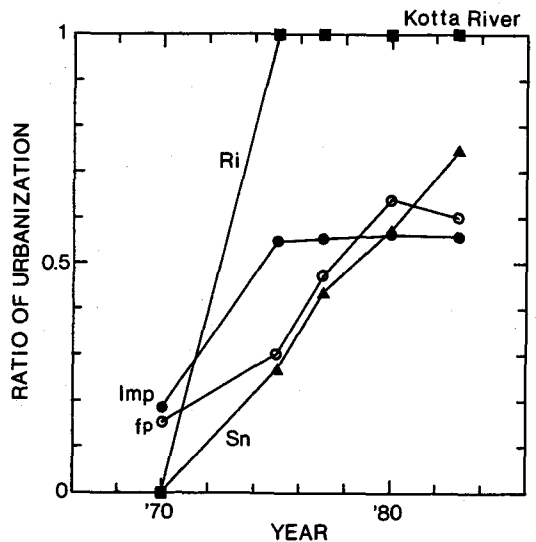


Fig.7 Urbanization index in Kotta river

Where Imp : impervious area, fp : peak discharge ratio, Ri : river improvement, Sn : sewer network.

Table 2 Concentration time of Ohguri river

year	re	tp	tp'	tc'	ts'
'69-71	2.02mm	155min	125min	95min	61min
'72-75	3.14	120	104	66	54
'76-78	12.91	80	125	45	35
'79-80	7.01	74	74	32	42
'81-83	10.08	60	55	22	38

Table 3 Concentration time of Kotta river

year	re	tp	tp'	tc'	ts'
69-71	1.39mm	180min	166min	104min	62min
72-75	5.99	76	72	45	27
76-78	16.59	40	42	30	12
79-81	15.05	42	42	31	11
82-83	14.61	40	42	32	10

Where re: effective rainfall(observed), tp:concentration time(observed), tp':concentration time (calculated), tc':channel propagation time(calculated), ts':slope propagation time(calculated).

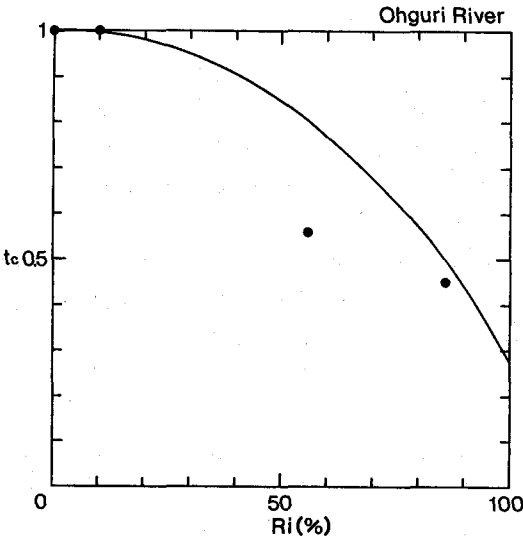


Fig.8 River improvement and concentration time

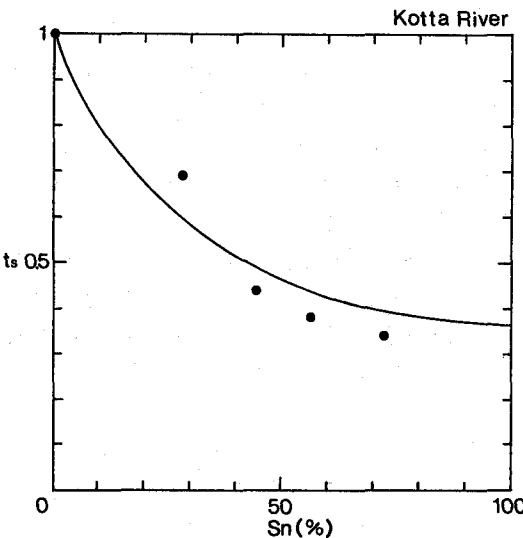


Fig.9 Sewer network and concentration time

6. 考察

6-1 洪水到達時間

従来、都市化に伴う流域の流出の変化は、主として、不浸透域の増加によるものとされてきたが、本論ではフラクタルによる解析から河川改修及び下水道整備の効果が簡潔かつ明瞭に示された。特に洪水到達時間の短縮への両者の寄与が実証的に説明された。このことは、Hackの法則からkinematic wave法を用いて導出した洪水到達時間の理論式の有効性を示すものと考えられ、この方面でのフラクタルの実用性を示唆している。特に、河川改修と下水道整備事業との進捗と洪水到達時間との関係は、行政的な意味で、従来の治水事業の進め方に問題を提起しているといえる。

6-2 ピーク流量

Kinematic Wave法に基づくピーク流量は次式で表わされる。

$$Q_p = r_e A \quad (10)$$

いうまでもなく、合理式と同型である。流出率は不浸透域面積率に比例するとすれば、ピーク流量は不浸透域面積率で規定されることになる。しかしながら、Fig.6,7 をみる限り、両河川とも不浸透域面積率が変化していない期間でも、ピーク流出係数が増加し、その傾向は下水道の整備が行われた乞田川の方が著しい。 r_e は洪水到達時間内の有効降雨であるから、降雨強度式から明らかに、洪水到達時間の短縮により増加する。その割合は、降雨強度式から推定して次式のように考えられる。

$$r_e \propto t_p^{-a} \quad (11)$$

ここで、 a は降雨強度式から推定される指数で、0.6~0.7である。

したがって、流域の都市化に伴うピーク流量の増加は、降雨の時空分布に依存する、洪水到達時間の短縮で増加する効果と次の"Diffusion効果"によると考えられる。すなわち、下水道の整備により、流域の集水(排水)時間が大幅に短縮され、浸透量が減少されるため、ピーク流出率が増加すると考えられる。これに対し、河川改修ではこうした効果(あるいは変化)が少ないと考えられるので、ピーク流出率の変化への寄与はほとんどないと推定される。

7. 結論

フラクタルによる流域の洪水到達時間の理論式の検証を行った。主な結論は次の通りである。

- (1) 河川改修ならびに下水道整備にともなう流域の洪水到達時間の短縮が、フラクタルによる理論式から推定される傾向と、多摩ニュータウンの観測結果とは、ほぼ一致し、同式の有効性を示すと考えられる。
- (2) 河川改修と下水道整備との進捗と洪水到達時間の関係は、両者の効果の時間的な差が発生することを示しており、これが都市型水害の一因となりうることが明らかになった。
- (3) ピーク流量の増加は、洪水到達時間の短縮に伴う有効降雨の増加によるものであり、またピーク流出率に対する下水道整備の影響は、すなわち、集水時間の短縮に基づく流域の浸透量の減少によるものと一連の理論式より推定されるが、これらの関係の直接的なフラクタルによる定式化が今後の課題となろう。

参考文献

- 1)和泉清・吉川秀夫・木下武雄：既成市街地流域における洪水流出の変化に対応する都市化の指標，土木学会論文集，第387号／Ⅱ-8，pp.67-75，1987.
- 2)和泉清・吉川秀夫：下水道整備が洪水流出現象に及ぼす影響，土木学会論文集，第399号／Ⅱ-10，pp.113-120，1988.
- 3)守田優：都市化と洪水流出変化の定量的分析，第29回水理講演会論文集，pp.19-24，1985.
- 4)Mandelbrot, B.B.: The fractal geometry of nature, W.H. Freeman and Company, 1982.
- 5)Hack, J.T.: Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland, Professional Paper 294-B, United States Geological Survey, Washington D.C., 1957.
- 6)小川進，和泉清：都市河川のフラクタル次元解析，土木学会第44回年次学術講演会，pp.146-147，1989.
- 7)小川進：都市河川のフラクタル次元解析と洪水到達時間：土木学会論文集（投稿中）。
- 8)小川進，和泉清：多摩ニュータウンの河道網のフラクタル次元解析と洪水到達時間，土木学会第45回年次学術講演会，pp.10-11，1990.
- 9)Richardson, L.F.: Functional box counting analysis, Beitr. Phys. Atmos., 15, 24, 1929.
- 10)建設省土木研究所：多摩ニュータウン試験地水文観測資料，土木研究所資料第225号，1985.