

土地利用形態と出水特性

——ゴルフ場・放牧草地の場合——

角屋 睦・四方田 穆・永井 明博

EFFECTS OF LAND USE CONDITIONS ON FLOOD RUNOFF CHARACTERISTICS

——Golf Course and Pastureland——

By *Mutsumi KADOYA, Atsushi YOMOTA and Akihiro NAGAI*

Synopsis

The characteristics of flood runoff in the Taiko-daira golf course, Kyoto, of 0.051 km² and the Tsudaka pastureland, Okayama, of 0.23 km² are examined in this paper, to get fundamental data for establishing the methodology for the prediction of runoff changes due to the development of watersheds. The results obtained are summarized as follows.

(1) The retention capacity of rainwater in the golf course is almost the same as or larger than those in forest watersheds. This characteristics is regarded as the effect of spiked golf shoes beyond the influence of surface geology. The characteristics of rainfall retention in the pastureland, one third of which is occupied by groves yet, is similar to that in the golf course.

(2) The land use coefficient C in the Kadoya-Fukushima's formula for estimating the time of flood concentration in the golf course is $C=120$ which is near to the standard value, but the one in the pastureland $C=140$ to be smaller than the standard value.

(3) The maximum values of the peak runoff coefficient are regarded as 0.60~0.65 in both areas.

(4) The values of the parameter k of the kinematic runoff model in both areas are almost the same, and they correspond nearly to one fourth of the ones in natural mountain watersheds.

1. ま え が き

近年、都市の周縁部や近郊において、様々な形の流域開発ないし土地利用形態変化が見られる。流域の土地利用形態の変化に伴って出水特性がどのように変化するかを予測することは、水工計画上重要なことであるが、その実態はまだよく分かっていない。すなわち、これまで自然丘陵地流域・市街地流域についての調査検討例はいくつかあるが、その他の土地利用形態の出水特性についてはほとんど不明のまま残されている。この理由として、適切な流域を設定しにくい、観測計器の維持管理に多大の労力を要する、あるいは土地所有者の協力が得にくい、などいろいろなことが挙げられるが、いずれにせよ、その基礎データの集積が肝要である。

ここでは、全国的にも観測のあまり行われていないゴルフ場流域および放牧草地流域の出水特性を検討した結果を報告する。

2. 研究対象流域と解析対象出水

2.1 ゴルフ場流域

研究対象の一つである太閤坦ゴルフ場流域 (Fig. 1) は、京都市東部の東南側丘陵地の山頂付近に位置している 9 ホールコースで、流域面積は 0.051km^2 である。この流域の地層は秩父古生層に属している。ゴルフ場という特殊な土地利用形態となっているために、地表の一部には砂地 (バンカー) もあるが、大部分は芝地で覆われている。地表の平均勾配は、谷線法で $s=0.134$ である。

この流域の雨水は、まず流域の排水条件を良好に保つ目的でいたるところに埋設されている集水暗渠 (直径300~500mm) に流入し、その中を流下して末端の貯水池 (676m^2) に流集する。この貯水池には、水位がある高さ以上になると、雨水を流域外に排除する余水吐が上下 2 段に設けられている。またこの池には、こ

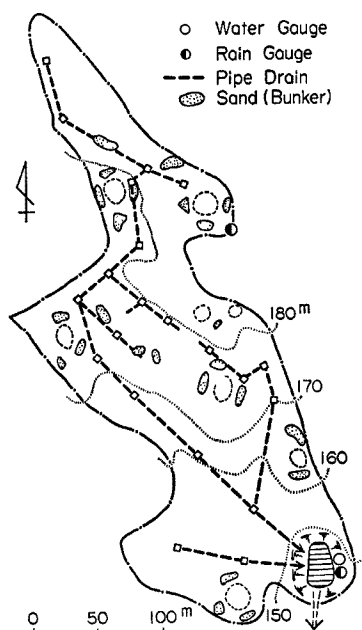


Fig. 1 Physiographical map of the Taiko-daira golf course.

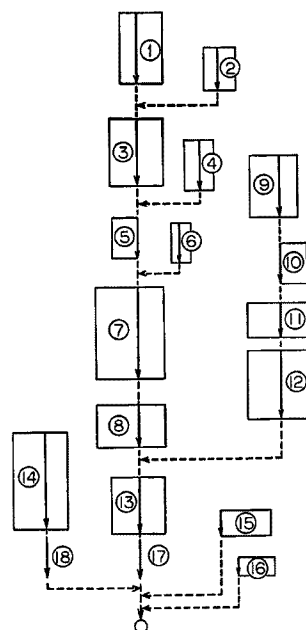


Fig. 2 Watershed model of the Taiko-daira golf course.

Table 1 Flood runoff data in the Taiko-daira golf course

No.	Occurrence	Peak discharge ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$)	Total rainfall (mm)	Retention (mm)
1	Aug. 27, 1976	1.8	19.0	13.1
2	Oct. 9, 1976	1.1	24.0	18.3
3	July 5, 1977	2.2	30.0	23.9
4	July 16, 1977	3.1	30.5	23.0
5	Nov. 17, 1977	1.1	60.5	49.9
6	Feb. 23, 1979	2.8	29.5	19.6
7	Mar. 30, 1979	4.5	35.0	25.2
8	June 27, 1979	9.6	97.0	65.3
9	Nov. 21, 1980	2.7	83.0	53.6

の流域の流出量を推定するため、最小感度 1 cm の気泡式水位計（紙送り速度 18mm/h）が設置され、実験的に定めた余水吐水位－流量曲線も用意されている。

解析には1976～1980年の間に観測された出水時の10分ごとの降雨および池水位から得られた流量資料を用いる。後述の表面流モデルによる解析にはピーク比流量 $q_p=1\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ 以上の9出水（Table 1）を対象とする。このときの流域モデルを Fig. 2 に示す。

2.2 放牧草地主体流域

もう一つの研究対象は、岡山市北部に所在する、岡山大学津高牧場を含む放牧草地主体流域（Fig. 3）である。流域面積は 0.230km^2 、地質は古生層であり、流域の高低差は約 120m である。全流域に占める放牧草地の割合は63%で、他は山林34%、道路・建物等3%となっている。この流域では、主に3月下旬から11月にかけて牛の放牧が行われており、放牧頭数の年平均値は1ha 当り延309頭である。

次に、1/2500の地形図の等高線の幅奥行比 $w/l=2$ までの凹地を自然河道とみなし、これに道路側溝も河道として流域地形4則を調べたところ、小流域であるためか河道長則は疑問であるが、他の地形則はほぼ成立していると判断された。このように河道網を定義すると、後述の表面流モデル適用時のブロック数は、1, 2, 3次流域モデルについてそれぞれ35, 3, 1個となる。ただし、 u 次流域モデルの河道長は、これまでの流域モデル構成法の成果²⁾を参考に、 $u \geq 2$ のとき（ u 次河道長）+（ $u-1$ 次主河道長）とした。この流域の平均勾配は、谷線法で $s=0.238$ である。

解析には、1979～1983年における10分ごとの四角堰水位および雨量の観測記録を用いる。後述の表面流出モデルによる解析には $q_p=3\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ 以上の代表的3出水（Table 2）を対象とする。

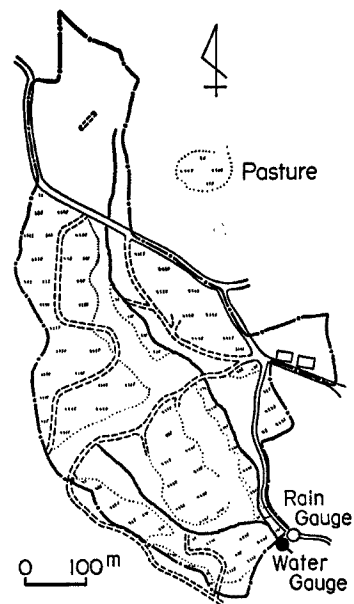


Fig. 3 Physiographical map of the Tsudaka pastureland.

Table 2 Flood runoff data in the Tsudaka pastureland

No.	Occurrence	Peak discharge ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$)	Total rainfall (mm)	Retention (mm)
1	Oct. 19, 1979	4.4	118	71.8
2	June 28, 1980	3.9	57	43.0
3	July 29, 1982	3.4	29	21.2

3. 雨水保留特性

いくつかの出水について、各流域の雨水保留特性を調べた。保留量曲線の作成に用いた直接流出高の推定は、ゴルフ場流域では、無降雨時に基底流量に相当する流水は見られないので、流出成分のほとんどが直接流出と判断し、かつ流量精度をも勘案して、単純に $0.001\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量を直接流出とした。放牧草地流域では、地下水流出は指数関数的に減水するものとして、これを降雨終了時まで逆挿した後、この点と立ち上がり点を結ぶ方法を用いた。

ゴルフ場流域の雨水保留量（Fig. 4）は、一般の山地流域の値に比べると大きめの値となっている。同図には、筑波大学 杉山博信氏が調査している別のゴルフ場流域の雨水保留量曲線も破線で併示しているが、

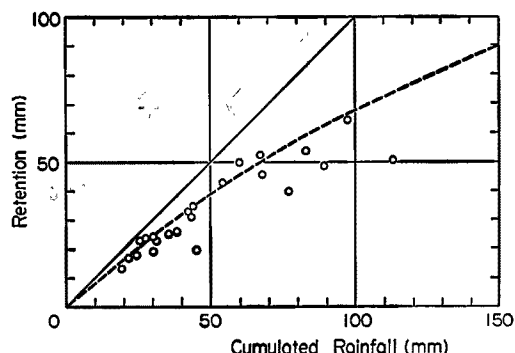


Fig. 4 Rainfall retention in the Taiko-daira golf course.

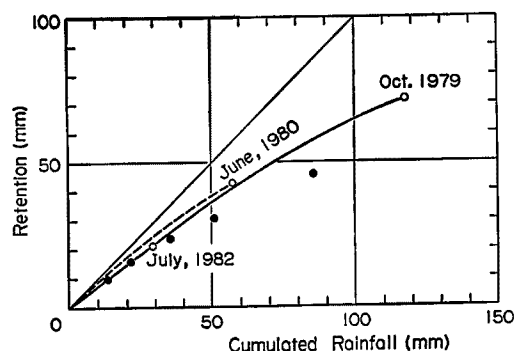


Fig. 5 Rainfall retention in the Tsudaka pastureland.

ここで対象とする太閤垣流域とはほぼ同じ保留特性を持っていることが分かる。太閤垣ゴルフ場流域は、京都では表層土に多くの粘土分を含むことで知られている稲荷山の続きにあり、本来は降雨時の流出量の多い流域とみられるにもかかわらず、図のように雨水保留量が大きいのは、造成時に十分土層改良が行われている筈であるから、その効果とも考えられるが、単にそれだけではない。一般にゴルフ場へはスパイクを履いて入ることになっているが、このことが、表層地質とはあまり関係なく表層の透水性を大きくしている、ないしは良好に維持している理由ではないかと考えられる。

放牧草地流域の雨水保留特性を Fig. 5 に示すが、ゴルフ場流域のそれとよく類似したものとなっている。これは山林面積が約 1/3 もあることのほか、表層土性の特性に依存するものともみられる。

なお、後述の表面流モデル適用時の有効降雨はこの雨水保留量曲線から推定する。

4. ピーク流出特性

4.1 洪水到達時間

角屋・福島³⁾の洪水到達時間式は次式で示される³⁾。

$$t_p = CA^{0.22} r_e^{-0.35} \dots\dots\dots (1)$$

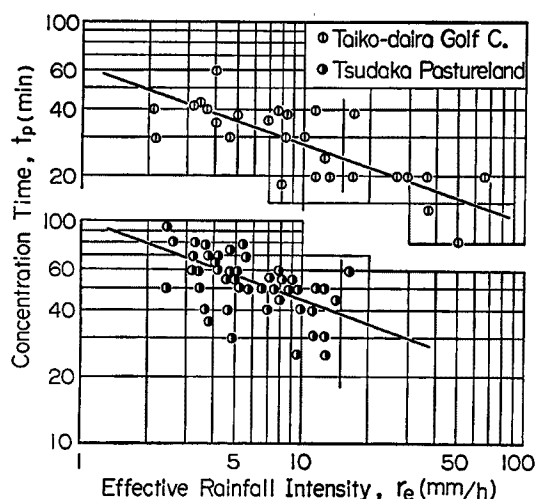


Fig. 6 Relation between the effective rainfall intensity and the concentration time.

ここに、 t_p : 洪水到達時間 (min), C : 土地利用条件に応じて異なる係数, A : 流域面積 (km^2), r_e : 洪水到達時間内の平均有効降雨強度 (mm/h) であり、ピーク流量を $Q_p (\text{m}^3/\text{s})$ とすると、 $r_e = 3.6Q_p/A$ 。

t_p と r_e の関係を Fig. 6 に示す。ゴルフ場流域では $C=120$ 、放牧草地流域では $C=140$ の平分線を挿入してある。放牧草地の C の値が、これまでに提示されている値 $C=190\sim 210$ に比べてやや小さいようであるが、これは道路・水路の整備状況に依存するものと思われる。

4.2 ピーク流出係数

(1) 式の r_e は次式のように表現できる³⁾。

$$\left. \begin{aligned} r_e &= f_p r \\ \text{または} \\ r_e &= r - f_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 r : 洪水到達時間内の平均降雨強度 (mm/h), f_p : ピーク流出係数, f_c : 洪水到達時間内の平均浸入強度 (mm/h)。

簡便であるため実用上しばしば用いられるピーク流出係数 f_p についてみると、ゴルフ場では、 $f_p = 0.3 \sim 0.6$ で、 $f_p = 0.5$ 前後のものが多く、前記 9 出水についての最大値は $f_p = 0.6$ である。また放牧草地では、前期条件などの違いによりかなりバラついているが、 $f_p = 0.4 \sim 0.6$ の範囲にあるものが多く、その最大値は $f_p = 0.64$ となっている。なお $f_c = 4 \sim 8 \text{ mm/h}$ でその最小値は $f_c = 2.3 \text{ mm/h}$ であった。

5. 表面流モデル定数

5.1 基礎式

基礎式は周知のように次式である。

$$\text{斜面流: } h = kq^p, \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r, \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{河道流: } W = KQ^p, \quad \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_w, \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 h : 水深, q : 斜面単位幅流量, r : 有効降雨強度, W : 河道流積, Q : 流量, q_w : 河道単位幅当りの横流入量, t : 時間, x : 距離, k, p, K, P : 定数。

河道流定数 K, P は現地踏査による河道横断面測量結果等に基づいて決定した。斜面流定数 k, p は Manning 型表面流を想定すると、斜面勾配 s , 等価粗度 N を用いて、次式で表せる。

$$k = (N/\sqrt{s})^p, \quad p = 3/5 \quad \dots\dots\dots (5)$$

5.2 斜面流定数

ゴルフ場流域では Table 1 の 9 出水を対象に、Manning 型表面流を想定して等価粗度 $N (\text{m}^{-1/3}\text{s})$ を調べ、 $N = 0.2 \sim 0.3$ を得た。Fig. 7 に $N = 0.2$ のときの計算結果を実測値と対比するが、まずまずの結果となっている。このときの k の値は、 $k = 0.7 \sim 0.9$ ($\text{m}^{-1/5}\text{s}^{3/5}$) である。

放牧草地については、Table 2 の 3 出水を対象として、斜面流定数 k, p を流域一様と仮定してその最適値を調べると、 p については $p = 0.6$ として十分と判断された。そこであらためて $p = 0.6$ とするときの斜面流定数 k の最適値を調べると、流域モデル構成の違いにより異なるが、1 ブロックに集中化した流域モデルの場合、 $k = 0.57 \sim 0.69 (\text{m}^{-1/5}\text{s}^{3/5})$ を得た。これから等価粗度 N を逆算すると、 $N = 0.19 \sim 0.26 (\text{m}^{-1/3}\text{s})$ である。解析結果の一例を Fig. 8 に示す。実測値と計算値はよく一致している。

なお、この放牧草地流域では山林が全体の約 1/3 を占めているため、上述の k の中には山林の影響も含まれていることが予想される。そこで、放牧草地と山林では k の値が異なり得るものとした扱いも検討したが、両者の相違を検出することはできなかった。

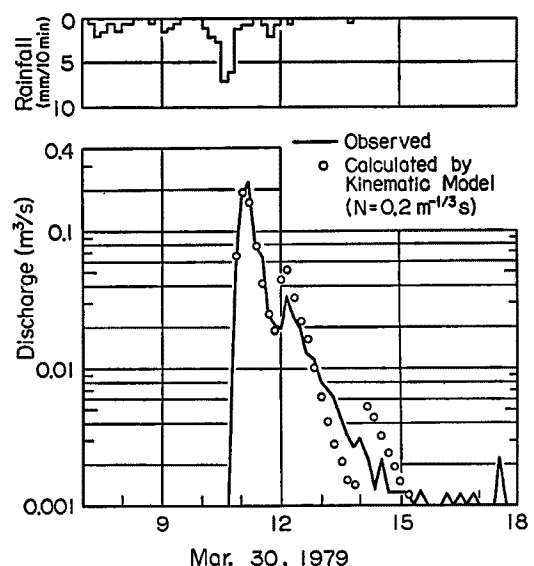


Fig. 7 An example of simulated hydrographs in the Taiko-daira golf course.

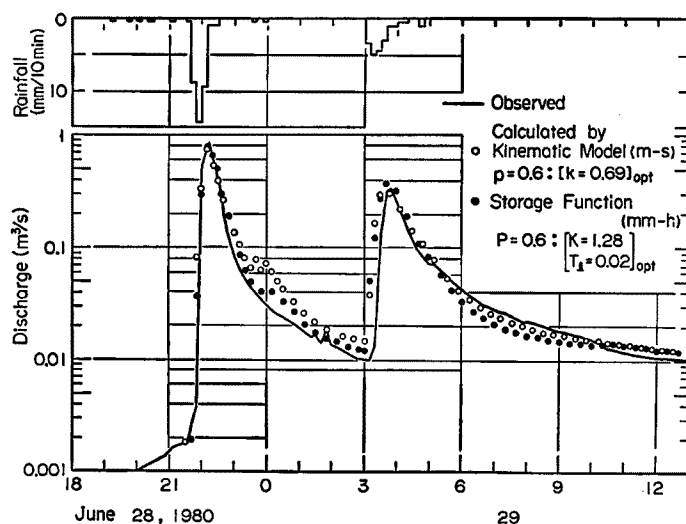


Fig. 8 An example of simulated hydrographs in the Tsudaka pastureland.

た⁴⁾。

6. 考 察

斜面流定数は流域モデルの構成法によっても変化することがこれまでの研究で知られている⁵⁾。したがって、土地利用形態によってモデル定数がどの程度異なるかを議論するには、流域モデルの構成法についても考慮する必要がある。

Fig. 9 に、いくつかの流域について、 $p=0.6$ としたときの斜面流定数 $k(m^{-1/5} \cdot s^{3/5})$ の最適値と平均斜面長 $B_m(km)$ の関係を調べた結果を示す。これには、筑波大学杉山博信氏のゴルフ場流域および運動場流域での観測検討結果もプロットしている。図中の破線は、流域を1ブロック、またはこれが困難なときには2ブロックに集中化した場合の k に対する平分線であり、杉山ら⁶⁾ は次式の関係をあてはめている。

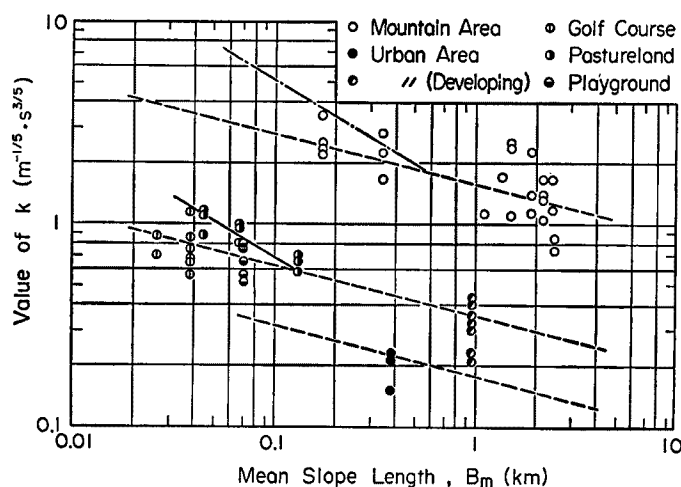


Fig. 9 Relation between the parameter k of the kinematic runoff model and the mean slope length of the lumped watershed model.

$$k = \lambda B_m^{-\delta} \dots\dots\dots (6)$$

図中の破線は、上式の指数を $\delta = \delta_1 = 0.25$ とおき、流域の土地利用状態に応じて、比例定数 λ の値を次のようにしたものである⁶⁾。

自然丘陵山地	: $\lambda = 1.6$
ゴルフ場・放牧草地・半市街地	: $\lambda = 0.36$
ほぼ完全な市街地	: $\lambda = 0.18$

この図から、自然丘陵地をゴルフ場または放牧草地に開発したとすると、表面流定数 k の値は $1/4 \sim 1/5$ 程度に減少することが予想できる。

ここで、(6) 式の指数 δ について考えてみる。斜面流定数 k が (6) 式のように表現できるかどうかは議論のあるところであるが、角屋ら⁶⁾ は、下狩川流域丘陵林草地 (1.3 km^2) を対象として 22 種類の流域モデルの k の最適値を (6) 式と類似の式にまとめている。これを $\delta_n = 0.6$ として再整理すると、Fig. 9 の一点鎖線となる。また同様に、前記放牧草地流域を対象に 3 種の流域モデルを構成し、流域一様の k の最適値を求めた結果が Fig. 9 の実線である。いずれも、観測値は一応 $\delta = \delta_n = 0.6$ とした (6) 式の傾向を是認している (下狩川観測値は省略) ように見受けられる。

しかしながら、Fig. 9 に破線で示した種々の流域の k を表現する $\delta_1 = 0.25$ の線と、特定の流域を対象として、これを細分化して複数ブロックの流域モデルを構成したときの $\delta_n = 0.60$ との差は大きい。前者は Fig. 9 のばらつきを考慮すると $\delta_1 = 0.35$ 程度に大きくなる可能性があり、また後者は、河道効果を考慮すると $\delta_n = 0.55 \sim 0.50$ 程度に小さくなる可能性はあるが、 $\delta_1 = \delta_n$ とはなり得ないようである。

これについては次のように考えることができる。すなわち、 $\delta = \delta_1$ の破線は、対象流域を 1 個のブロックに集中化したとき、地表条件の類似した流域の定数を与える。これに対し特定の流域を複数個のブロックで表現したときの平均斜面長に対する値が、前記 1 ブロックの値を起点として、 $\delta = \delta_n$ の線上を変化する値で表現される。すなわち、ある特定の大きな流域をいくつかの支流域に細分化すれば、支流域の k は、大きな流域に対する集中化した流域モデルの k を利用して、 $k \propto B_m^{-\delta}$ の関係式から推定できる。Fig. 9 は $\delta_1 = 0.25$, $\delta_n = 0.6$ の極端な場合を示したものと解釈できる。

7. む す び

ここでは、全国的にもあまり観測の行われていないゴルフ場流域および放牧草地流域について出水特性を考察した。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) ゴルフ場流域の雨水保留特性は山地のそれとほぼ同程度でかなり大きい。これは、ゴルフ場ではスパイク着用という特殊な慣習の効果とみられる。またここで調べた放牧草地の雨水保留特性も意外に大きく、ゴルフ場流域のそれと類似していた。

(2) 角屋・福島の水害到達時間式における土地利用係数 C の値は、ゴルフ場流域で $C=120$ 、放牧草地流域で $C=140$ となっている。

(3) ピーク流出係数 f_p の値は、ゴルフ場流域では $f_p = 0.3 \sim 0.6$ 、放牧草地流域では $f_p = 0.4 \sim 0.6$ の範囲にあるものが多い。

(4) Manning 型表面流を想定するときの斜面流定数 $k (\text{m}^{-1/5} \text{s}^{3/5})$ または等価粗度 $N (\text{m}^{-1/3} \text{s})$ をみると、ゴルフ場流域では $k = 0.7 \sim 0.9$, $N = 0.2 \sim 0.3$ であり、放牧草地流域では流域を一ブロックに集中化した場合、 $k = 0.6 \sim 0.7$, $N = 0.2 \sim 0.3$ となっている。ゴルフ場流域・放牧草地流域における k の値は、流域モデル構成が同一であれば、自然丘陵地流域の値の $1/4 \sim 1/5$ 程度と判断される。

(5) 最後に k を表現する一般式についても議論したが、これはなお今後の検討にまつべき点が少ない。

本研究に際し、筑波大学農林工学系 杉山博信氏より貴重な研究成果引用の快諾を得たこと、および京都大学工学部学生であった中村敬二・妹尾嘉之、岡山大学農学部学生であった白神裕之・横山一孝の諸氏の協

力を得たことを記して謝意を表す。また、本研究の計算および資料の整理は、京都大学化学研究所 FACOM 230-48, FACOM M-160AD, および岡山大学農学部データ集録処理装置 MS-50 を用いたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 角屋 睦：流出解析手法（その1）—1. 雨水流出現象とその計測・解析—, 農土誌47(10), 1979, pp. 63-73.
- 2) 角屋 睦：流出解析手法（その6）—3. 雨水流法—表面流出モデルによる洪水流出解析—, 農土誌48(6), 1980, pp. 37-43.
- 3) 角屋 睦・福島 晟：中小河川の洪水到達時間, 京都大学防災研究所年報, 第19号 B-2, 1976, pp. 143-152.
- 4) 永井明博・四方田 穆・奥谷順彦：洪水流出モデル定数の相互関係—放牧草地主体流域を対象として—, 農業土木学会論文集（掲載予定）
- 5) 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, 京都大学防災研究所年報, 第21号 B-2, 1978, pp. 219-233.
- 6) 杉山博信・角屋 睦・永井明博：総合貯留関数に関する研究, 農業土木学会論文集（投稿中）