

地形情報の分解能が流出計算に与える影響

THE IMPACT OF RESOLUTION OF TOPOGRAPHIC INFORMATION FOR RUNOFF ANALYSIS

里見佑三¹・田中岳²

Yuzoh SATOMI and Gaku TANAKA

¹学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西八丁目)

²正会員 博士(工学) 北海道大学助手 大学院工学研究科 (同上)

Spatial resolution of topographic information gives influence to runoff analysis. In general, geophysical phenomena are considered as random process.

In this paper, the Kinematic Wave model is used as a runoff system, and simultaneous equations for the first- to fourth-order moments of water depth and concentration time under the impact of rectangular rainfall inputs and slope-distribution are theoretically derived. The validity of the proposed equations is cross-checked by results of a simulation. It is possible to estimate the probability density functions of water depth and concentration time by using the first- to fourth- order moments.

Key Words : kinematic wave model, spatial resolution, random process

1. はじめに

近年, 国土数値情報を活用した分布型流出モデルの開発が著しい。我が国では, 人口と社会資本が河川下流域に集中しているため, 河川防災計画, 流域一環としての流出解析が必要とされる背景がある。しかし, 数値標高データの整備や地質・植生情報の充実がなされても, 流出解析上では, 本来, 流出システムの応答特性としてシステムが固有に持つ分解能で計算されることが望ましく, 分解能変化と流出特性の関係を明らかにする必要がある。

分解能を変化させることで, 河道長, 斜面勾配の分布形などの地形特性量に変化が生じ, 流出計算に影響を与えることが, 河道の縦断面形状の再現性から多田¹⁾が, パラメーターの空間分布から立川²⁾が, 述べている。

本論文では, 札幌市豊平川上流部定山溪ダム流域10mメッシュ標高値より斜面要素と(模擬)河道網を作成し, 分解能10, 50, 100mの変化が, 斜面特性量(斜面面積, 斜面勾配分布)に与える影響を統計的に評価する。さらに一般に地理的事象は確率変数として扱われることを考慮して, 斜面勾配が特性の既知である確率変数である場合の, 流出システム(Kinematic Waveモデル)からの応答特性(斜面末端水深および到達時間の1~4次モーメント)を与える方程式を理論的に導く。

2. 分解能と地形特性量の関係

本論文では, 定山溪ダム流域10mメッシュ標高値より, 流域を11流域に細分化した標高値データを用いる。50m, 100mメッシュ標高値は, 各流域の出口を固定して作成している。斜面要素と(模擬)河道網との分離について

は, 以下の手順に従った。

- ① 周囲8点のうち, 最急勾配方向に流れを仮定し, 落水線図を作成。
- ② 50000分の1地形図の河道本数から, 閾値(落水線図より計算された集水域のメッシュ個数)を試行錯誤的に決定し, 模擬河道網図を作成。
- ③ 模擬河道に流入する落水線を全て斜面要素と定義。これらは, 定山溪ダム流域10mメッシュ標高値を作成し, メッシュサイズと模擬河道網の特性とを議論した中村, 道口³⁾の手法に準拠する。

表-1は, 朝里岳沢川流域のメッシュサイズ(分解能)と流域面積の関係を示している。流域面積は分解能が変動しても, おおよそ一定であると言える。このことは他の10流域においても同様の結果が得られている。

分解能の変化に伴い, 朝里岳沢川流域の模擬河道網に流入する斜面の総面積と流入位置の関係を図-1に示す。図-1中の丸囲みは, 斜面の総面積が1km²以上を示し, その総面積は流域面積の約64%を占める。多田¹⁾が述べているように, 分解能が粗くなるにつれて模擬河道長が短く再現される傾向にある。また図-1から, 広い集水面積を持つ斜面の面積はほぼ一定と考えられる。このような集水面積の広い斜面が, 模擬河道に対して数箇所に集中する傾向は, 他の10流域にも同様に見られる。

図-2(a), (b)は, 斜面勾配の分布特性((a):平均値, (b):分散)を分解能ごとに比較した結果を示している。なお, 斜面勾配は,

$$i_0 = \frac{(\text{標高差})}{\sqrt{(\text{標高データ間距離})^2 + (\text{標高差})^2}} \quad (1)$$

表-1 朝里岳沢川における分解能(m)の変化による流域面積(km²)の変化

分解能	10	50	100
流域面積	16.5731	16.57	16.53

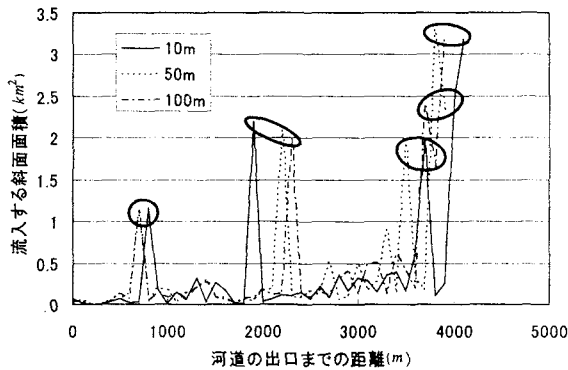


図-1 河道に流入する斜面の面積と位置(朝里岳沢川)

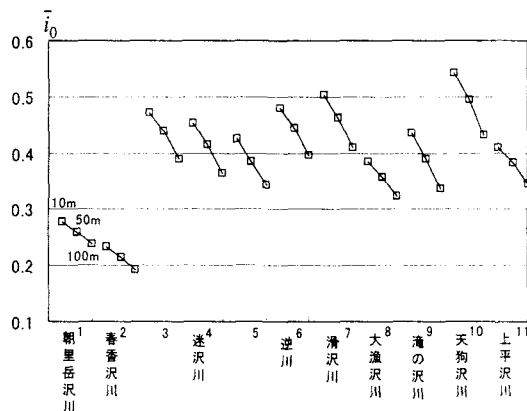


図-2(a) 分解能の違いによって変動する定山溪ダム11流域の斜面勾配の平均(左から10m, 50m, 100m分解能)

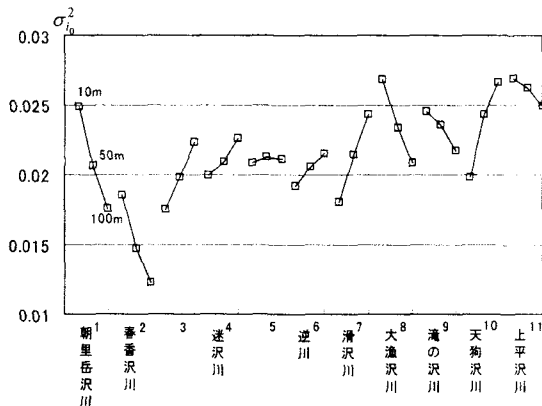


図-2(b) 分解能の違いによって変動する定山溪ダム11流域の斜面勾配の分散(左から10m, 50m, 100m分解能)

により求めた。小口ら⁴⁾によると、分解能の細かい標高値ほど計算された斜面勾配の平均値と標準偏差が大きいとされているが、図-2(a), (b)に示されているように、分解能が細かいほど斜面勾配の平均値が増加する傾向は、11流域全流域に見られるものの、分散に関しては、減少傾向にある流域、増加傾向にある流域、両方が見られる。また、斜面勾配の確率密度は図-3のように表され、流域によってその分布形は異なってくる。図-4は、斜面勾配の分布形推定結果を示している。図中の数字は図-2の流

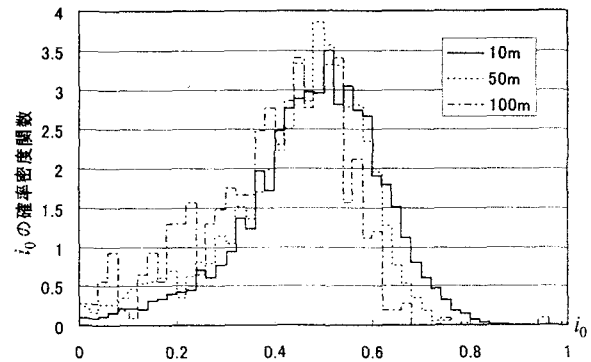
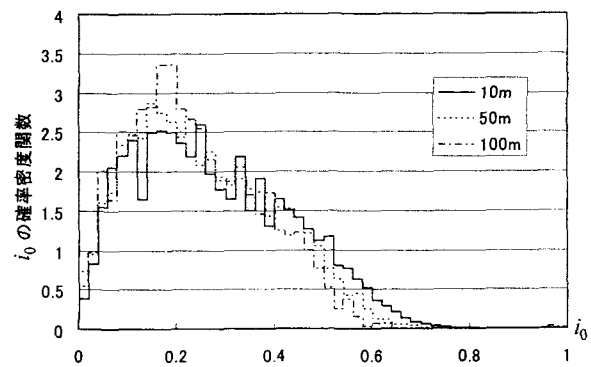


図-3 斜面勾配の分布(上:朝里岳沢川, 下:逆川)

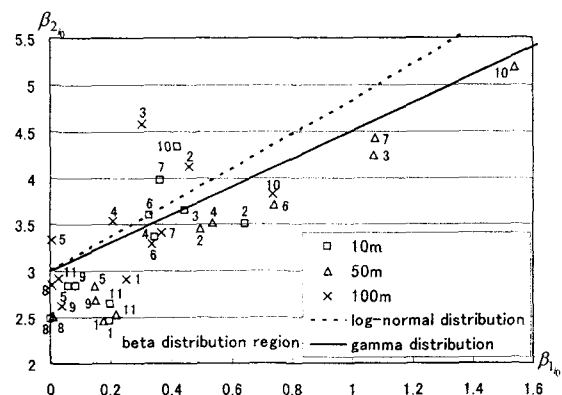


図-4 分解能ごとの斜面勾配の分布形(定山溪ダム11流域)

域名に対応している。なお、パラメータ β_1 , β_2 は、次の式から定義される。

$$\beta_{1_{i_0}} = \frac{\mu_{i_0,3}^2}{(\sigma_{i_0}^2)^3} \quad \beta_{2_{i_0}} = \frac{\mu_{i_0,4}}{(\sigma_{i_0}^2)^2} \quad (2)$$

$\sigma_{i_0}^2$: 斜面勾配の分散

$\mu_{i_0,3}, \mu_{i_0,4}$: 斜面勾配の3, 4次モーメント

β_1 , β_2 平面上で取る値によって、その分布がどのような分布形であるか推定することができる。その結果、11流域、各分解能での斜面勾配分布の特性量($\beta_{1_{i_0}}$, $\beta_{2_{i_0}}$)が、様々な形状を持つベータ分布の領域(beta distribution region)に多く分布し、その確率分布形が、ベータ分布に従うことがわかる。

このように、分解能の違いが流出計算に与える影響として、特に次の2点について検討する必要があると考えられる。

- ・ 集水面積の広い斜面が集中的に模擬河道へ流入する効果。

・ 斜面勾配の分布特性として、平均や分散に加え、分布形の変動が流出に与える影響。
本論文では、後者について次の章から扱っていく。

3. 基礎式とその検証

(1) 基礎理論

ここでは、 n 個の斜面要素が一直線に連結された模擬的な斜面において、地形・地質特性を表す斜面流定数 α_i ($i=1,2,\dots,n$) の変動が、斜面末端での水深 h_i 及び到達時間 t_c に与える影響を、定常降雨を条件に考察する。ただし、斜面勾配の変化に伴う跳水（またはエネルギー損失）現象は考慮しないとした。

斜面要素 i の、斜面流に対する kinematic wave 方程式は、次式で表される。

$$\frac{\partial q_i}{\partial x} + \frac{\partial h_i}{\partial t} = \bar{r} \quad (3)$$

$$q_i = \alpha_i h_i^m \quad (4)$$

$$(i-1)\Delta x \leq x \leq i\Delta x$$

ただし、 $i=1,2,\dots,n$ 、 q_i ：単位幅流量

x ：斜面上流端からの距離、 h_i ：水深、 t ：時間

$\bar{r}$ ：降雨強度、 α_i, m ：斜面流定数、 $n\Delta x$ ：斜面長
初期条件、境界条件は次のように定める。

初期条件： $h_i(x,0) = 0$

境界条件： $h_i((i-1)\Delta x, t) = h_{i-1}((i-1)\Delta x, t)$

$$h_i(0, t) = 0$$

式(3)、(4)より、 q_i を消去すると次のように得られる。

$$\alpha_i m h_i^{m-1} \frac{\partial h_i}{\partial x} + \frac{\partial h_i}{\partial t} = \bar{r} \quad (5)$$

式(5)より、次の特性方程式が得られる。

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_i m h_i^{m-1} \quad (6)$$

$$\frac{dh_i}{dt} = \bar{r} \quad (7)$$

式(6)、(7)から、斜面要素 i の到達時間 t_{c_i} と斜面末端水深 h_{i_i} は次式で表すことができる。

$$t_{c_i} = \left(t_{c_{i-1}}^p + \frac{\Delta x}{\bar{r}^p} \beta_i \right)^{1/p} \quad (8)$$

$$h_{i_i} = \left(h_{i_{i-1}}^p + \Delta x \bar{r} \beta_i \right)^{1/p} \quad (9)$$

初期条件： $t_{c_0} = 0$ 、 $h_{i_0} = 0$

ただし、 $p = \frac{1}{m}$ 、 $\beta_i = \frac{1}{\alpha_i}$

よって、定常降雨条件下の斜面末端での到達時間と斜面末端水深は次式で表される。

$$t_c = \Delta x^p \bar{r}^{p-1} z^p \quad (10) \quad h_i = (\Delta x \bar{r})^p z^p \quad (11)$$

$$\text{ただし、} z = \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (12)$$

α_i が確率変数であれば、 z 、 t_c 、 h_i 、 β_i も確率変数として扱うことができる。ここで解析の都合上、平均値 $\bar{z}$ 、 $\bar{t}_c$ 、 $\bar{h}_i$ 、 $\bar{\beta}$ と偏差 $\tilde{z}$ 、 $\tilde{t}_c$ 、 $\tilde{h}_i$ 、 $\tilde{\beta}_i$ を用いて、次のように表す。

$$z = \bar{z} + \tilde{z} \quad (13) \quad t_c = \bar{t}_c + \tilde{t}_c \quad (14)$$

$$h_i = \bar{h}_i + \tilde{h}_i \quad (15) \quad \beta_i = \bar{\beta} + \tilde{\beta}_i \quad (16)$$

さらに Bras ら⁵⁾ によって提案された z^p の近似式、

$$z^p = a\bar{z} + b\tilde{z} \quad (17)$$

を用いて、式(10)に(14)を、式(11)に(15)をそれぞれ代入すると、次のように展開される。

$$\bar{t}_c + \tilde{t}_c = \Delta x^p \bar{r}^{p-1} (a\bar{z} + b\tilde{z}) \quad (18)$$

$$\bar{h}_i + \tilde{h}_i = (\Delta x \bar{r})^p (a\bar{z} + b\tilde{z}) \quad (19)$$

Bras ら⁵⁾ の提案によると、 a 、 b は、

$$a = \bar{z}^{p-1} \left\{ 1 + p \frac{\tilde{z}}{\bar{z}} + \frac{1}{2} p(p-1) \frac{\tilde{z}^2}{\bar{z}^2} + \dots \right\} \quad (20)$$

$$b = \frac{\bar{z}^p}{E(\tilde{z}^2)} \left\{ p \frac{E(\tilde{z}^2)}{\bar{z}} + \frac{1}{2} p(p-1) \frac{E(\tilde{z}^3)}{\bar{z}^2} + \dots \right\} \quad (21)$$

E ：期待値演算子

と表される。式(18)の期待値を取り、式(18)と比較することで、

$$\bar{t}_c = \Delta x^p \bar{r}^{p-1} a\bar{z} \quad (22)$$

$$\tilde{t}_c = \Delta x^p \bar{r}^{p-1} b\tilde{z} \quad (23)$$

同様に、式(19)より、

$$\bar{h}_i = (\Delta x \bar{r})^p a\bar{z} \quad (24)$$

$$\tilde{h}_i = (\Delta x \bar{r})^p b\tilde{z} \quad (25)$$

式(23)を2～4乗して期待値を取ると、

$$\sigma_{t_c}^2 = E(\tilde{t}_c^2) = \Delta x^{2p} \bar{r}^{2p-2} b^2 \sigma_z^2 \quad (26)$$

$$\mu_{t_c,3} = E(\tilde{t}_c^3) = \Delta x^{3p} \bar{r}^{3p-3} b^3 \mu_{z,3} \quad (27)$$

$$\mu_{t_c,4} = E(\tilde{t}_c^4) = \Delta x^{4p} \bar{r}^{4p-4} b^4 \mu_{z,4} \quad (28)$$

σ_z^2 ： z の分散

$\mu_{z,3}, \mu_{z,4}$ ： z の3、4次モーメント

$\sigma_{t_c}^2$ ：到達時間の分散

$\mu_{t_c,3}, \mu_{t_c,4}$ ：到達時間の3、4次モーメント

同様に式(25)より、

$$\sigma_{h_i}^2 = E(\tilde{h}_i^2) = (\Delta x \bar{r})^{2p} b^2 \sigma_z^2 \quad (29)$$

$$\mu_{h_i,3} = E(\tilde{h}_i^3) = (\Delta x \bar{r})^{3p} b^3 \mu_{z,3} \quad (30)$$

$$\mu_{h_i,4} = E(\tilde{h}_i^4) = (\Delta x \bar{r})^{4p} b^4 \mu_{z,4} \quad (31)$$

$\sigma_{h_i}^2$ ：斜面末端水深の分散

$\mu_{h_i,3}, \mu_{h_i,4}$ ：斜面末端水深の3、4次モーメント

式(22)、(26)～(28)、式(24)、(29)～(31)より、 z の1～4次モーメントを与えることで、 t_c 及び h_i の1～4次モーメントを求めることができる。ここで、式(12)に、式(13)と(16)を代入すると、

$$\bar{z} + \tilde{z} = \sum_{i=1}^n (\bar{\beta} + \tilde{\beta}_i) \quad (32)$$

式(32)より、

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^n \bar{\beta} = n\bar{\beta} \quad (33)$$

$$\tilde{z} = \sum_{i=1}^n \tilde{\beta}_i \quad (34)$$

式(34)を2～4乗して期待値を取ると、 z の2～4次モーメントは、

$$\sigma_z^2 = E(\tilde{z}^2) = E\left\{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{\beta}_i\right)^2\right\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E(\tilde{\beta}_i \tilde{\beta}_j) \quad (35)$$

$$\mu_{z3} = E(\tilde{z}^3) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n E(\tilde{\beta}_i \tilde{\beta}_j \tilde{\beta}_k) \quad (36)$$

$$\mu_{z4} = E(\tilde{z}^4) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n E(\tilde{\beta}_i \tilde{\beta}_j \tilde{\beta}_k \tilde{\beta}_l) \quad (37)$$

のように表される。 z の2～4次モーメントを求め推定するには、 β_i の2～4次のキュムラント関数を求めなければならない。ここで本論文では、 $\beta_i (=1/\alpha_i)$ が独立な確率変数であると仮定し、次式を採用する。

$$E(\tilde{\beta}_i \tilde{\beta}_j) = \sigma_\beta^2 \delta(i-j) \quad (38)$$

$$E(\tilde{\beta}_i \tilde{\beta}_j \tilde{\beta}_k) = \mu_{\beta 3} \delta(i-j) \delta(j-k) \quad (39)$$

$$\begin{aligned} E(\tilde{\beta}_i \tilde{\beta}_j \tilde{\beta}_k \tilde{\beta}_l) &= (\mu_{\beta 4} - 3\sigma_\beta^4) \delta(i-j) \delta(j-k) \\ &\quad \times \delta(k-l) + \sigma_\beta^4 \{ \delta(i-j) \delta(k-l) \\ &\quad + \delta(i-k) \delta(j-l) + \delta(i-l) \delta(j-k) \} \end{aligned} \quad (40)$$

δ : デルタ関数

式(35), (38)より、

$$\sigma_z^2 = n\sigma_\beta^2 \quad (41)$$

同様に、 z の3, 4次モーメントは、

$$\mu_{z3} = n\mu_{\beta 3} \quad (42)$$

$$\mu_{z4} = n\{\mu_{\beta 4} + 3\sigma_\beta^4(n-1)\} \quad (43)$$

のようになる。従って、 $\beta_i (=1/\alpha_i)$ の1～4次モーメントを与えれば、式(22), (24), (26)～(31), (33), (41)～(43)より、到達時間と斜面末端水深の1～4次モーメントを求めることができる。

(2) 検証 (シミュレーション)

(1) で求めた斜面末端での到達時間及び水深の1～4次モーメントを与える式は、近似式(17)を用いることで導出されている。ここではそれらの妥当性をシミュレーションに基づいて検証する。

斜面流がChezy則やManning則に従うとすれば、一般に β_i は、

$$\begin{aligned} \beta_i &= f(\gamma) \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{i_0}} \end{aligned} \quad (44)$$

と表される。図-5, 6, 7は11流域の各10, 50, 100m分解能での $\bar{\beta}$, σ_β^2 の変化と β の分布形推定結果(式(2), 斜面勾配の分布形の推定結果を参照されたい。)を示している。図-7より、定山溪ダム11流域の各分解能における β の分布形を表す特性量($\beta_{1\beta}$, $\beta_{2\beta}$)が、ガンマ分布(実線)もしくは、この実線に近いベータ分布の領域に位置することから、 β の分布形が、ガンマ分布も

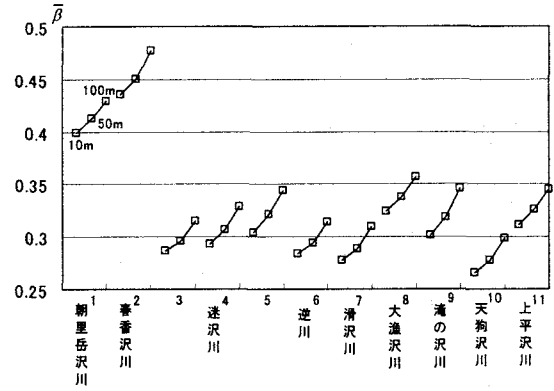


図-5 分解能ごとの β の平均(定山溪ダム11流域)
(Manning則 $n_s = 0.20$)

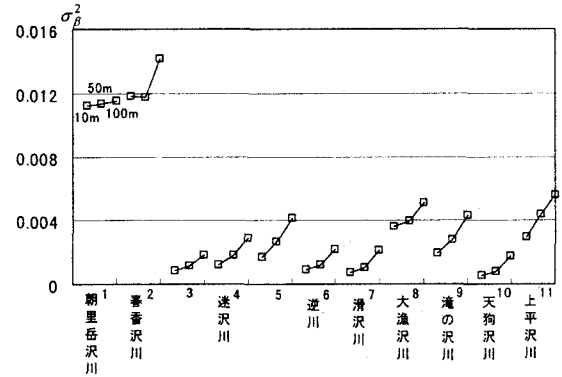


図-6 分解能ごとの β の分散(定山溪ダム11流域)
(Manning則 $n_s = 0.20$)

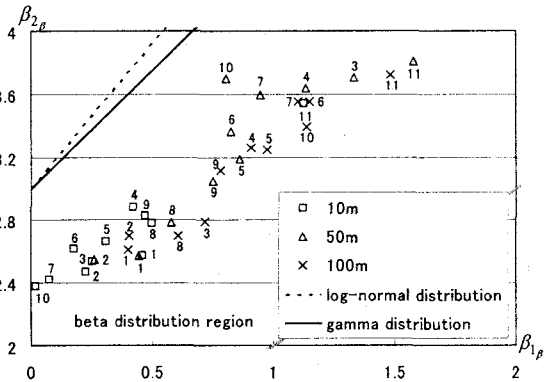


図-7 分解能ごとの β の分布形(定山溪ダム11流域)

しくは、ガンマ分布の形状に近いベータ分布で表されることがわかる。そこで、 β の分布形をガンマ分布に近似できると仮定し、 β の2～4次モーメントをパラメータ k , v を用いて表すと、

$$\sigma_\beta^2 = \frac{k}{v^2} \quad (45)$$

$$\mu_{\beta 3} = \frac{2k}{v^3} \quad (46)$$

$$\mu_{\beta 4} = \frac{3k(k+2)}{v^4} \quad (47)$$

のようになる。 t_c , h_i の1～4次モーメントをシミュレーションに基づいて求める際、上式で表されるガンマ分布に従う乱数 β_i を模擬的に発生させ、式(10), (11)

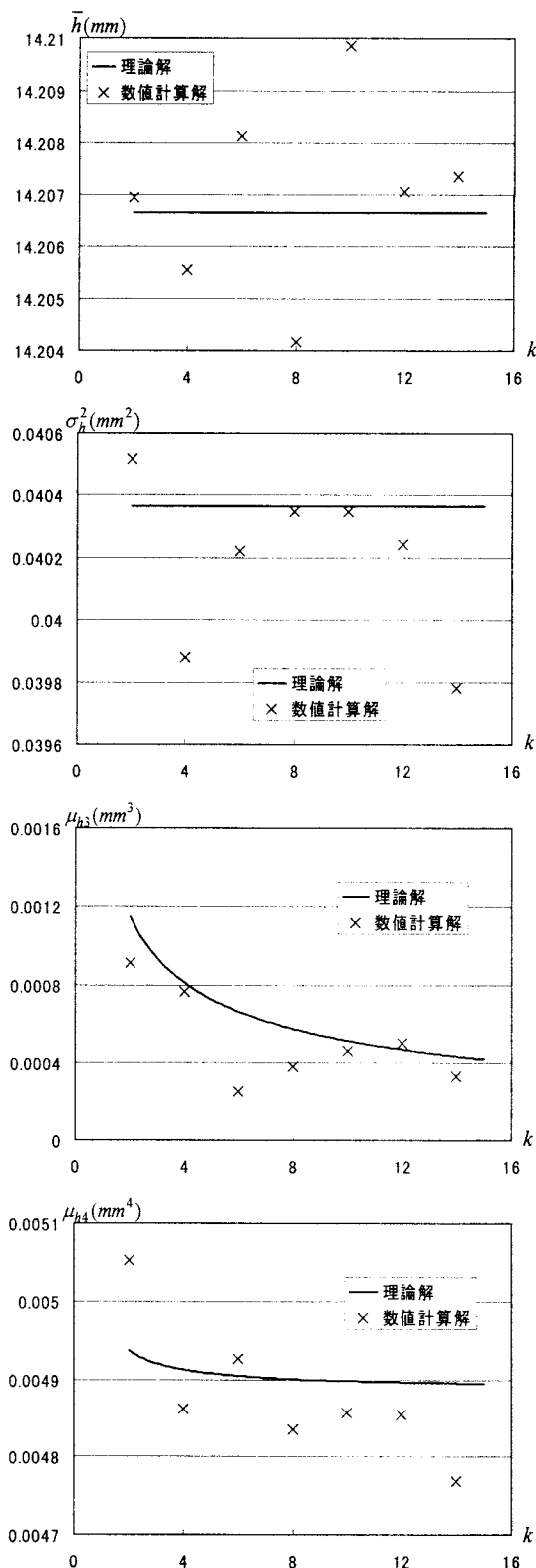


図-8 展開した式の検討, 斜面末端水深 (上から, 平均, 分散, 3次モーメント, 4次モーメント)

に直接与える。計算条件は, 定山溪ダム11流域の β の分布特性を考慮して, 平均値, 分散にそれぞれ, $0.3(\text{sec}/m^{1/3})$, $0.005(\text{sec}^2/m^{2/3})$ を与え, パラメータ $k(=2 \sim 14)$ を変化させている。他の計算条件は以下の通りである。

$$\bar{r}=10(\text{mm/hr}), p=0.6, l=1000(\text{m}), \Delta x=10(\text{m})$$

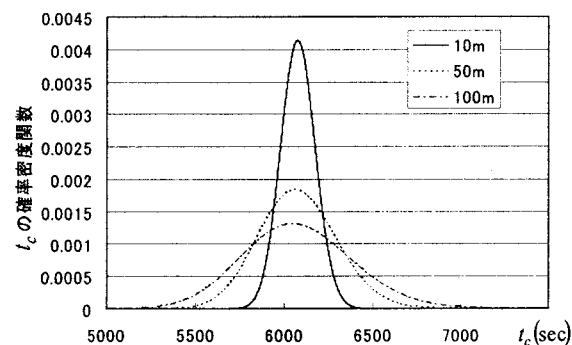


図-9 分解能の違いが到達時間に与える影響

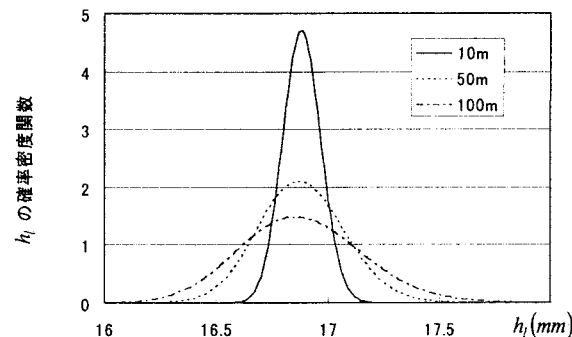


図-10 分解能の違いが斜面末端水深に与える影響

表-2 メッシュサイズ(m)と β の分散($\text{sec}^2/m^{2/3}$)

Δx	10	50	100
σ_β^2	0.0112	0.0113	0.0115

なお, $\mu_{\beta 3}$, $\mu_{\beta 4}$ は式(46), (47)より与える。

図-8は, シミュレーション結果と, 本論文が提案する理論式(式(24), (29)~(31), (33), (41)~(43))の計算結果との比較を示している。3次モーメントの比較結果に若干の差が見られるが, 平均値, 2次及び4次モーメントにおいては, 良好な一致が見られる(理論式で基準化した相対誤差が0.02以下)。Brasら⁵⁾が提案する指数型の確率変数の近似式(17)のパラメータ a , b が, 式(17)両辺の誤差において, その平均値を0, 分散を最小にするように決められており, 3次モーメントの近似値が他のモーメントに比べると劣る傾向は, これまでも報告されている⁶⁾。然しながら, 3次モーメントを含めても, シミュレーション結果と理論式の計算結果との適合度は, 概ね良好と言える。

4. 分解能の違いが流出に与える影響

3. で得られた到達時間と斜面末端水深の1~4次モーメントを与える理論式の精度が証明されたので, 次にこれらの式を用いて, 一斜面で扱えると仮定し, 様々な地形特性量の条件の下, 計算をする。

図-9, 10は, β の分布形がガンマ分布であるとして, メッシュサイズ(分解能) Δx の変化に伴い, β の分散が変動する傾向を反映させ(表-2), Δx の増加とともに β の分散を増加させた場合の到達時間及び斜面末端水深の確率密度を, 理論式に基づき推定した結果を示している(式(10), (11), 以下, 確率密度の推定は同様に行う)。なお, 他の計算条件は, 以下の通りである。

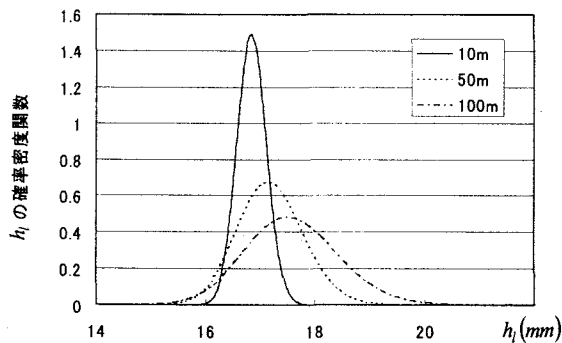


図-11 分解能の変化に伴う β の平均の変化が斜面末端水深に与える影響の検討

表-3 メッシュサイズ(m)と β の平均(sec/m^{1/3})

Δx	10	50	100
$\bar{\beta}$	0.3989	0.4125	0.4284

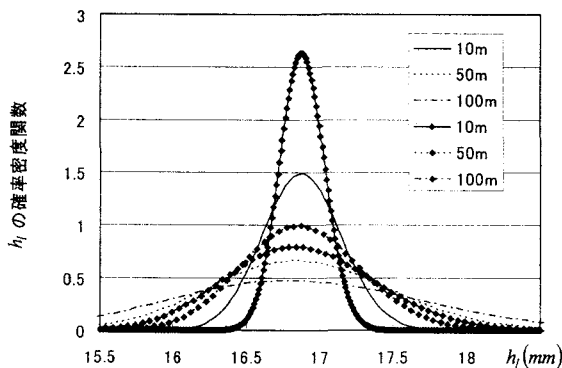


図-12 β の分散の違いが斜面末端水深に与える影響の検討

表-4 メッシュサイズ(m)と β の分散(sec²/m^{2/3})

Δx	10	50	100
$\sigma_{\beta}^2 (-)$	0.01119	0.01133	0.01150
$\sigma_{\beta}^2 (\diamond)$	0.00358	0.00398	0.00507

$$\bar{\beta} = 0.4(\text{sec}/\text{m}^{1/3}), \quad k = 9, \quad r = 10(\text{mm}/\text{hr})$$

$$p = 0.6, \quad l = 1000(\text{m})$$

Δx が大きくなるに従い、 t_c 、 h_l の確率密度は広がる(分散が大きくなる)傾向にある。式(26)、(29)からもわかるように、 Δx が大きくなることで分割数 n が減少、あるいは β の分散が大きくなっても t_c 、 h_l の分散は大きくなる。この場合、実流域での β の分散の変動(図-6)に比して、 Δx が大きくなることによる n の減少する効果が強く表れている。

図-11は、 Δx に伴い、 $\bar{\beta}$ の変動を考慮した場合(表-3)での h_l の確率密度の推定結果を示している。なお、図-11も β の分布形をガンマ分布とし、他の計算条件は以下のように与えている。

$$k = 9, \quad \sigma_{\beta}^2 = 0.011(\text{sec}^2/\text{m}^{2/3}), \quad r = 10(\text{mm}/\text{hr})$$

$$p = 0.6, \quad l = 1000(\text{m})$$

図-11より、 Δx が大きくなるに従って、 h_l の確率密度は、 h_l の正方向に移動しつつ広がる傾向にある。この傾向は、到達時間にも同様に見られ、 Δx の減少に伴い h_l

(t_c) は、小さく(早く)かつその分散は極めて小さくなる傾向にある。図-5、6から、定山溪ダム流域において多く表れる。

図-12が示すように、表-4と以下の計算条件、

$$k = 9, \quad \bar{\beta} = 0.4(\text{sec}^2/\text{m}^{2/3}), \quad r = 10(\text{mm}/\text{hr})$$

$$p = 0.6, \quad l = 1000(\text{m})$$

を用いて、 Δx を固定し β の分散を変化させると、図-11同様に h_l の分散が大きくなる傾向にある。しかし、 β の分散と Δx の大きさとの関係によっては、 Δx が大きくなることによる分割数 n の減少よりも β の分散の変化に依存し、 h_l の分散が大きくなる場合もある。

以上より、メッシュサイズ Δx と、これにより変化する地形特性量 β の分布特性が、到達時間および斜面末端水深の確率密度を推定する上で重要であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、分解能の違いによる斜面勾配の分布形が流出計算に与える影響について、斜面勾配の特性量の変化を調べた上で、斜面勾配を確率変数として扱えると仮定して、検討した。その結果、次の点が判明したと言える。

- ・ 斜面の河道に対する流入面積は、分解能による影響をほとんど受けない。
- ・ 分解能が粗くなるにつれて、斜面勾配の平均は減少するが、分散は必ずしも減少するとは言えない。
- ・ 斜面勾配を確率変数として扱うことで、流出計算の分布形の推定と密度関数を決定することが可能となる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、北海道大学大学院工学研究科、道口敏幸技官のご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 多田毅, 古賀肇, 重村利幸, 林建二郎, 藤間功司: 地形情報の空間解像度が流出計算に与える影響に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.151-156, 2001.
- 2) 立川康人, 福満匡高, 市川温, 椎葉充晴, 宝馨: パラメータの空間分布が流出シミュレーション結果に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第44巻, pp.217-222, 2000.
- 3) 中村興一, 道口敏幸, 榎国男, 藤田睦博, 村上泰啓: 定山溪ダム10mメッシュ地形情報と国土数値情報を用いた河道網と流出解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 平成3年度, pp.499-504.
- 4) 小口高, 勝部圭一: 細密DEMを用いた地形解析, 『デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析 —東京大学空間情報科学研究センター公開シンポジウム—』, 杉盛啓明ほか編, 地域環境GIS研究会, pp.15-18, 2000.
- 5) Bras, R.L. and K.P. Georgakakos: Real time non-linear filtering techniques in streamflow forecasting, a statistical linearization approach, Proc. of the third international symposium on stochastic hydraulics, Tokyo, Japan, 1980.
- 6) 田中岳: Kinematic Waveモデルの確率応答特性に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.229-234, 2003.

(2003. 9. 30受付)