

II-32

流域斜面の地形量特性に関する解析

北見工業大学工学部 正 員 早川 博
北見工業大学大学院 学生員 田中裕樹
北見工業大学工学部 正 員 内島邦秀

1. はじめに

従来から出水現象に関与する様々な水文地形量の解析が行われてきたが、特に流域斜面の地形量は流域の降雨流出特性に重要な役割を果たしている。従来の斜面地形量の解析はほとんどが手作業により地形図を測定しているために、比較的小流域を対象とした解析が多かった（例えば、角屋ら¹⁾、藤田²⁾）。近年、流域の地形情報等が地理情報システムによって整備され、コンピュータによる一括処理が可能となり、立川ら³⁾は流域斜面の地形量の解析手法を報告している。著者らもこれまで国土数値情報を基に作成した模擬河道網を介して、分布型流出モデルによる流出解析を行ってきた。しかし、斜面地形量は直接計測することなく、流域をモデル化して矩形近似した斜面長を解析に用いていた。実際の流域では、雨水は斜面のいろいろな経路を通過して河道に到達するため、様々な流出の形態を生み出している。そこで、本研究では斜面の雨水経路を計測しその統計的な性質を解析すると共に、流域の空間スケールの変化に伴う斜面地形量の変動特性について言及する。

2. 斜面地形量の計測

2.1 計測方法

斜面地形量は立川ら³⁾と同様に国土数値情報の250mメッシュ標高データを基に作成した模擬河道網を解析対象とした。模擬河道網はまず国土数値情報の250mメッシュ標高データを基に、対象とする点の周り8方向の最も低い点に雨水が流れるものとして、その方向を落水線方向とする。同様に各々の点について落水線方向を決定してその方向をたどっていけば、やがて河口に到達することになる。この様にして流域の全ての点における落水線図が完成する。この図をもとに各々のメッシュ点に流入してくる落水線の累積値（つまりメッシュ点の累積値）を計算し、この累積値がある値（閾値）より大きな点を抽出したものが模擬河道である。

表-1 2万5千分の1の地形図と模擬河道網の地形量計測結果

流域名	美幌		置戸		滝上		立牛		津別	
地図の種類	地形図	模擬河道	地形図	模擬河道	地形図	模擬河道	地形図	模擬河道	地形図	模擬河道
縮尺	1/25000	閾値 25	1/25000	閾値 30	1/25000	閾値 12	1/25000	閾値 15	1/25000	閾値 25
Magnitude	28	29	55	59	76	76	53	52	105	96
総流域面積 (km ²)	203.8	199.3	429.8	421.7	238.1	236.7	165.1	160.7	573.2	571.0
平均サブ流域 面積 (km ²)	3.775	3.497	3.980	3.604	1.577	1.599	1.588	1.591	2.756	2.990
平均サブ流域 河道長(km)	2.914	3.063	2.203	2.164	1.361	1.380	1.192	1.309	1.808	2.077
分岐比	3.158	3.065	3.063	3.870	4.114	4.125	3.968	3.726	3.160	3.027
河道長比	1.643	1.767	1.786	1.724	2.917	2.859	1.315	1.342	1.736	1.597
面積比	1.831	1.759	1.845	1.679	3.088	2.718	1.429	1.194	1.764	1.503
勾配比	-----	1.990	-----	2.076	-----	2.333	-----	1.919	-----	1.776

Quantitative Analysis of Basin Slope Geomorphology
by Hiroshi HAYAKAWA, Yuuki TANAKA and Kunihide UCHIJIMA

表-2 5つの流域についての回帰式 $L=cA^d$ の回帰係数 c 、 d の値

流域名	地図の種類	c			d		
		総リンク	内部リンク	外部リンク	総リンク	内部リンク	外部リンク
美幌	地形図	1.342	1.491	0.826	0.576	0.539	0.898
	模擬河道	1.191	1.481	0.412	0.707	0.675	1.412
置戸	地形図	0.983	1.162	0.655	0.575	0.554	0.795
	模擬河道	0.835	1.146	0.210	0.671	0.614	1.535
滝上	地形図	1.022	1.206	0.862	0.633	0.647	0.705
	模擬河道	0.911	1.172	0.627	0.718	0.657	1.616
立牛	地形図	0.926	1.228	0.639	0.496	0.573	0.767
	模擬河道	0.903	1.307	0.446	0.585	0.623	1.353
津別	地形図	0.977	1.185	0.741	0.588	0.585	0.710
	模擬河道	0.828	1.136	2.767	0.749	0.706	1.545

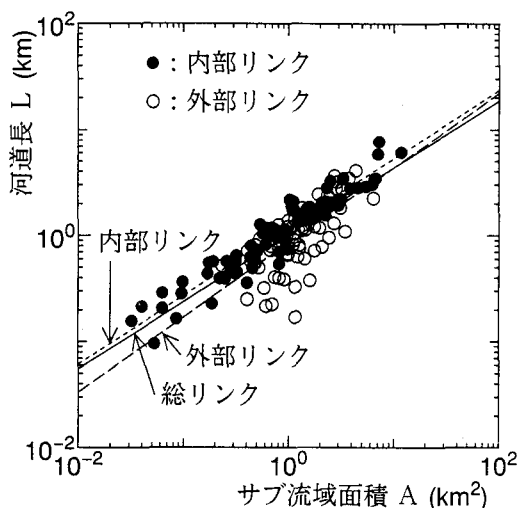


図-1 1/25,000地形図の $L-A$ の関係（滝上）

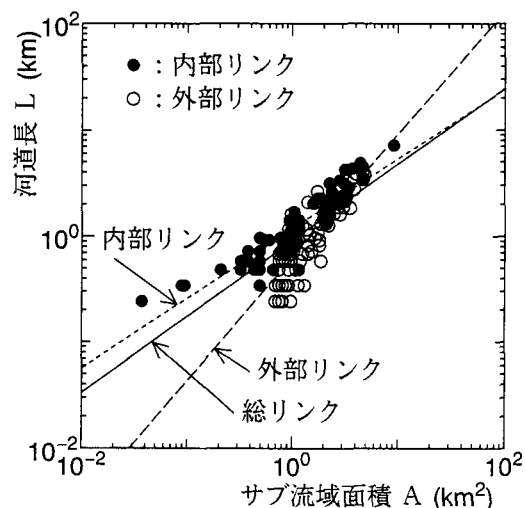


図-2 模擬河道網の $L-A$ の関係（滝上）

ここで閾値は地図の縮尺に対応し、閾値が小さいほど大縮尺となる。河道となる点が決定されると、それ以外の点は斜面としてこの点から河道へ流入する落水線に沿った長さを雨水経路長と定義する。計測は斜面の全ての点からの経路長を測定し、河道部分には左右岸に斜面長62.5mの斜面が付随していると考えた。また流域を矩形近似した時の斜面の長さを斜面長と定義する。斜面勾配は雨水経路の落差を経路長で除して算出するが、サブ流域の平均斜面勾配は加重平均勾配 $s = \sum h / \sum l$ (h : 落差、 l : 経路長) を用い、河道部分に付随する斜面の雨水経路勾配は無視している。

2.2 地形図と模擬河道網の地形量算

解析対象流域は渚滑川、網走川、常呂川の5地点の流量観測所流域で、2万5千分の1の地形図と、この地形図の河道網に等しいマグニチュードをもつ模擬河道網の地形量計測結果を表-1に示す。どの地形量も両者の値がほぼ等しく、国土数値情報から作成した模擬河道網は地形図を良く再現していると言える。次に図-1, 2は滝上流域の地形図と模擬河道網のサブ流域面積(A)と河道長(L)の関係で、表-2は各々の流域の回帰式 $L=cA^d$ の回帰係数 c 、 d の値を示す。両者の内部リンクの c 、 d はおおよそ等しい値であるが、外部リンクの c 、 d の値はかなり異なっている。また地形図の外部リンクは流域面積が幅広い範囲にあるのに対し、模擬河道網の方

はあまり散らばっていない。これは模擬河道網が、ある閾値より大きい部分を河道としているため、閾値によって定まる面積以下の流域が発生し得ないからである。ここで滝上流域の場合、閾値=12であるからこの最小面積は $12(\text{閾値}) \times (0.25 \times 0.9676)^2$ (補正済み単位メッシュ面積) $= 0.70(\text{km}^2)$ である。これが模擬河道網によって河道を再現するときの欠点となろう。またこのことは、外部リンクにおいて本来、河道であるべき部分が斜面と考えられ、河道が短く計測されてしまう。このため模擬河道網を流出解析に利用する際には、サブ流域をモデル化して矩形近似した斜面長が極端に長くなってしまうのでこの点を注意する必要がある。特に外部リンクにおいてどこまでを河道と定義するかが問題になってきそうである。表-2 で示されるように、他の流域でも同様の結果が得られた。

3. 斜面地形量の特徴

3.1 雨水経路長と経路勾配の特徴

ここでは、表-1 に示した 2 万 5 千分の 1 地形図の河道網とほぼ等しいマグニチュードを持つ模擬河道網の雨水経路長とその勾配の統計的性質を調べる。図-3、4 は立牛流域の雨水経路長とその勾配のヒストグラムである。図中、ハッチング部分は内部リンクに流入する経路長の割合を示している。雨水経路長の分布形は他の流域も同様であるが指数分布に近い形状を呈している。図中の実線は経路長の平均値からパラメータを推定して描いた指数分布であるが、比較的良好に一致しているようである。しかし、カイ 2 乗検定の結果からは必ずしも適合度は良好ではなかった。内部リンクに流入する経路長の分布は 0 付近の割合が大きく、より指数分布に近い分布をしているが、外部リンクに流入する経路長の方は 1km 付近の割合が大きく、指数分布と言うよりは対数正規分布に近い様相を呈している。立川らの計測結果では経路長は指数分布になることが報告されているが、角屋らや藤田の地形図を計測した斜面長は、ガンマ分布、あるいは対数正規分布になるとの報告もある。このことから、雨水経路長の分布形はその斜面が内部リンクに付随しているのか、外部リンクに付随しているのかによってかなり異なっているものと考えられる。この点については今後それぞれのヒストグラムに分けて検討する必要がある。一方、経路勾配の分布形は図-4 に示すように対数正規分布やガンマ分布の様に左に歪んだ分布形をしている。図中の実線は経路勾配の平均値と分散からパラメータを推定して描いた対数正規分布であるがあまり適合度は良くない。しかしこれも経路長と同じく内部、外部リンクで分布形が異なっているため、滝上や美幌流域では内部リンクは指数分布のように一様に減少する分布形を、外部リンクは対数正規分布かあるいはもっと正規分布に近い分布形をしていそうである。

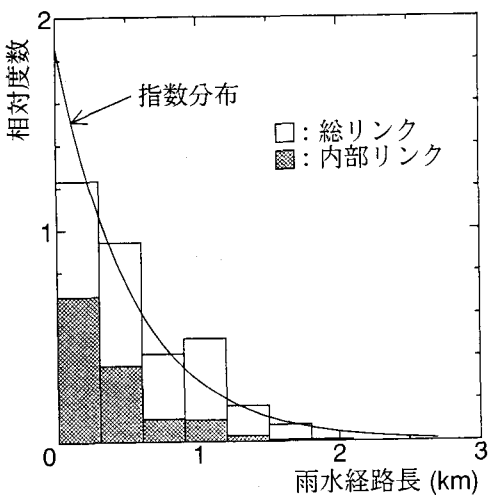


図-3 雨水経路長のヒストグラム（立牛）

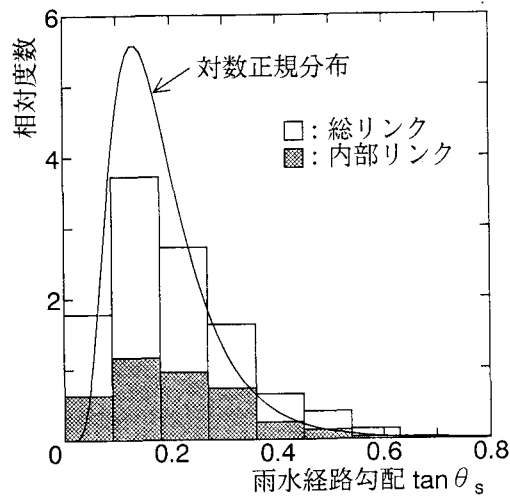


図-4 雨水経路勾配のヒストグラム（立牛）

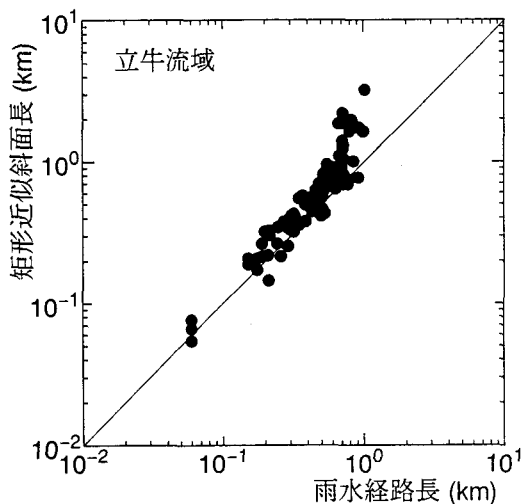


図-5 雨水経路長と矩形近似斜面長の関係（立牛）

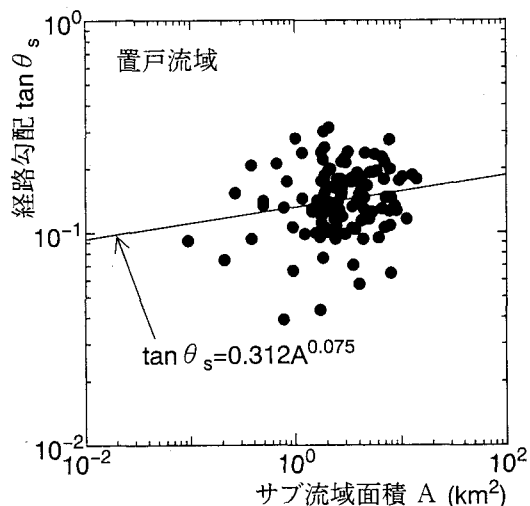


図-6 雨水経路勾配とサブ流域面積の関係（置戸）

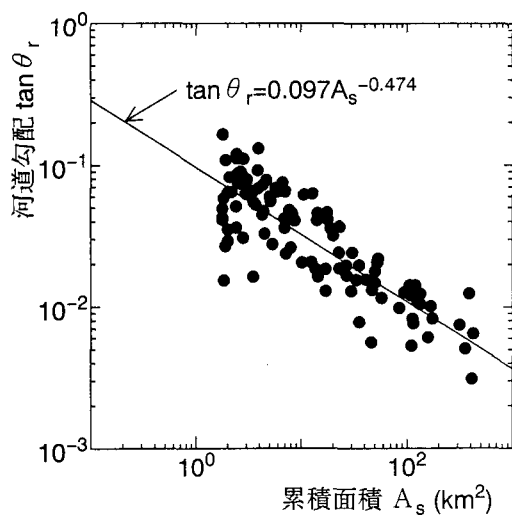


図-7 河道勾配と累積流域面積の関係（置戸）

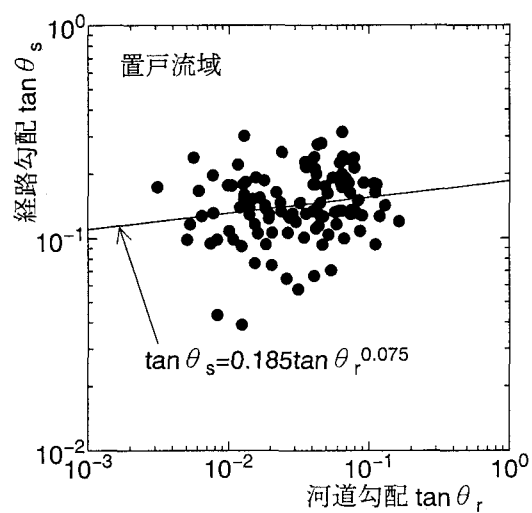


図-8 雨水経路勾配と河道勾配の関係（置戸）

次に、各サブ流域毎に平均雨水経路長、経路勾配を求め他の地形量との相関を明らかにする。図-5 は立牛流域における平均経路長と流出解析で良く行う流域をモデル化して矩形近似した斜面長をプロットした図で、両者が一致すると図中の直線上にのる。図を見るとデータは直線の上側にほぼ平行に並んでいる。つまり斜面長のほうが常に経路長より長いことを示している。雨水経路は必ずしも河道に真っ直ぐに流入せず斜めから流入したり、斜面を蛇行する経路を取るはずである。それにもかかわらず斜面長より短いということは、前節でも述べたように単純に流域を矩形近似して求める斜面長が過大に評価されていると考えるべきで、流域をモデル化する際には河道長の定義に気をつける必要がある。次に、経路勾配とサブ流域面積の関係を見てみる。図-6 は置戸流域の場合であるが、サブ流域面積の増加と共に勾配が急になる傾向がみられる。この傾向は美幌流域でも同様であるが、津別、滝上、立牛流域は逆に勾配が緩くなる傾向にあり経路勾配と流域面積の相関はあまり良くないようである。河道勾配についても同様にサブ流域面積との相関を見てもあ

まり相関は良くない。そこで次に河道勾配と水源からその流域まで占める累積した流域面積との関係を見てみたい。図-7 は置戸流域の場合であるがサブ流域面積より相関はかなり良く回帰式の傾きは約-0.5である。他の流域も傾きは-0.4~-0.5の範囲にありかなり普遍的な関係であると言えそうである。また図-8 は置戸流域の経路勾配と河道勾配の関係を示している。相関はそれほど良くないように見えるが経路勾配が河道勾配に左右されていることが理解できる。最後に経路勾配と経路長の関係を見てみる。角屋らは下狩川流域において $\tan \theta_s = 1.6 Q_s^{-0.38}$ という関係を得ている。各々の流域の解析結果を見ると、傾きが負になる傾向は同じであるが回帰係数、指数とも流域ごとにかなりばらついている。これも普遍的な関係とは言えず流域の特性に左右される関係である。

3.2 空間スケールの変化にともなう地形量の変動特性

模擬河道網は、閾値を変化させることによって任意の空間スケールの河道網を作ることができる。すなわち閾値は地図の縮尺に対応している。したがって種々の閾値の河道網から経路長と勾配を計測し空間スケールの変化に伴う変動特性を検討する。ただし以下の検討では空間スケールの指標としてサブ流域の平均流域面積を用いる。

図-9 は滝上流域の平均雨水経路長及び平均斜面長と平均サブ流域面積の関係を示す。流域面積が小さいときには斜面長は経路長より長い、その後経路長の値の方が次第に長くなる。経路長は流域面積の増大と共に一様な増加傾向を示すが、斜面長は途中サブ流域面積が増大しても斜面長がそれほど変化しない、あるいは逆に短くなるという現象を経て、再び斜面長が長くなるという動きをしている。このような斜面長の変化はどの流域でも見られ、平均サブ流域面積が10km²付近で起こり易い。この原因として考えられるのは、閾値の増加につれて徐々に河道の長さが短くなり、例えば今まで合流点を境に2分されていた河道が、支川の河道の消滅によって2本が1本の河道となり、河道長が一時的に長くなるという現象を繰り返すためであろう。この部分より更に面積が大きくなると、河道網構造はあまり変化せず河道だけが短くなっていく一方なので、斜面長が急激に増大するのである。図-10 は5つの流域の斜面長と経路長の比と平均サブ流域面積の関係を示す。経路長が徐々に増加していくのに対し、斜面長は経路長に比して変動しながら増加して行くため、このような曲線が描かれる。比が1より小さい場合は斜面長が経路長より長く、これは内部リンクより、外部リンクの河道長の影響が大きいと思われる。この場合、外部リンクの河道長を再定義することにより経路長に近い長さを得ることができるであろう。また比が1より大きい場合は矩形近似した斜面長が実際の経路長

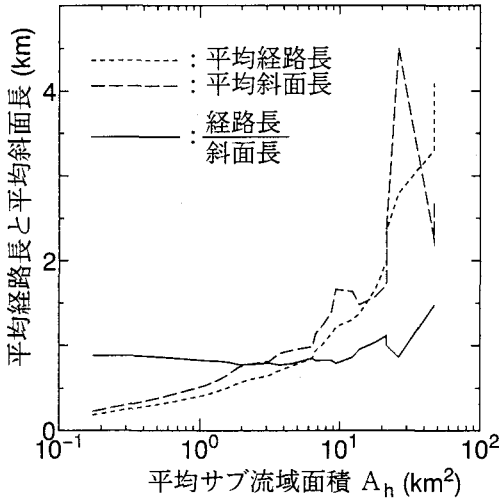


図-9 平均雨水経路長及び平均斜面長と平均サブ流域面積の関係（滝上）

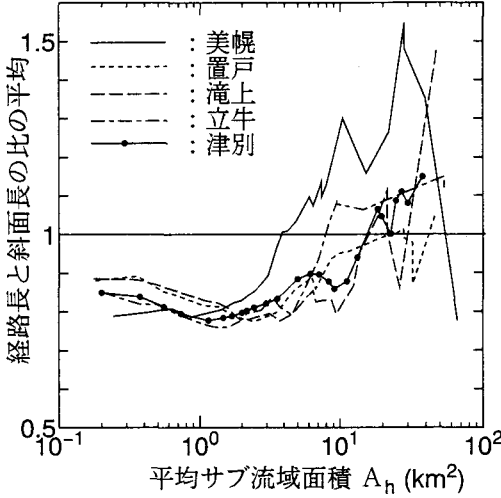


図-10 5つの流域の斜面長と経路長の比と平均サブ流域面積の関係

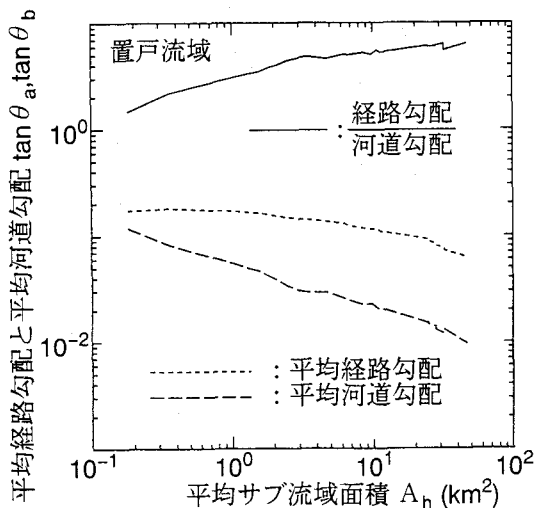


図-11 平均経路勾配及び平均河道勾配と平均サブ流域面積の関係(置戸)

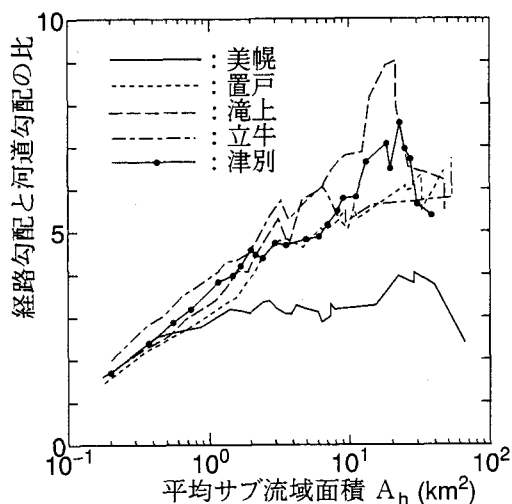


図-12 5つの流域の斜面勾配と経路勾配の比と平均サブ流域面積の関係

より短いために流出現象を再現できないので、この場合の斜面長を流出計算に使用すべきではないと考えられる。

次に図-11は置戸流域の平均経路勾配及び平均河道勾配と平均サブ流域面積の関係を示す。経路勾配は面積が 1km^2 以下の部分で平衡に達している。それは面積が小さいとき、すなわち閾値が小さいときは経路勾配の大部分が尾根線付近の勾配であるためであろう。河道勾配は面積が小さいうちは斜面の要素が含まれ急勾配となっているが、面積が大きくなるにしたがって河道本来の勾配になり最終的には本川のみ勾配になっていると思われる。図-12に5つの流域の経路勾配と河道勾配の比と面積のグラフを示す。美幌流域を除いて他の四流域に対しては平均面積が大きくなると比の値も大きくなる傾向がある。しかしある程度面積が大きくなると河道勾配が一定の値となるが経路勾配は減少していくので比の値が小さくなって行く傾向がうかがえる。また美幌流域は他の流域よりも比が小さくこれはこの流域の斜面勾配が緩いために雨水経路が蛇行し易く、図-10を見てわかるように他の5つの流域よりも斜面長と経路長の比が1を超えるのが早くなるために多いと思われる。

4. 結論

本研究では斜面の雨水経路の統計的な性質を解析すると共に流域の空間スケールの変化にともなう斜面地形量特性の変動について検討した。その結果をまとめると、(1)雨水経路長の分布形は指数分布に雨水経路勾配の分布形は対数正規分布に類似している。また内部リンクと外部リンクに分布の違いがみられた。

(2)経路長に対し斜面長は外部リンクにおける河道長の変動が激しいため極端に長い斜面長が発生する可能性がある。また流出解析をする際は斜面長と経路長の比が1より小さくなる場合外部リンクの河道を斜面長が経路長と一致するよう再定義すべきであり、比が1より大きくなる場合では斜面長が実際の経路長より短いために流出現象を再現できないのでこの1を超える辺りの平均サブ流域面積が流域を矩形流域にモデル化できる限界と考えることもできる。

今後の課題として内部リンク、外部リンク毎に経路長、経路勾配の分布形やこれらに対する斜面長、斜面勾配の特性量との比較検討をしていきたい。

【参考文献】

- 1) 角屋・福島・佐合：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。
- 2) 藤田：流域の地形構造を考慮した貯留関数法に関する研究，北海道大学学位論文，1982。
- 3) 立川・高棹・椎葉・杉原・農田：流域斜面の流下距離分布について，土木学会第46回年次学術講演会Ⅱ，1991。