

グリッド型DEMによる擬河道網の抽出手法の検討

Study on Extracting Drainage Networks from Square-grid DEMs

早川 博*・内島邦秀**・藤田睦博***

By Hiroshi HAYAKAWA, Kunihide UCHIJIMA and Mutsuhiro FUJITA

Recently, Digital Elevation Models (DEMs) can be often used in the analysis of catchment topography and hydrological process. Some methods that extract drainage networks from square-grid DEMs are proposed. They make use of the flow-accumulation-value threshold for extracting drainage networks from delineated overland flow paths, but the relationship between channel length, L , and catchment area, A , of the external link in the drainage network from DEMs is different from that of actual drainage networks. This paper proposes a new threshold, which is defined by the ratio of the width, w , to the penetrated length, l , in a contour line. As a result, it shows that this relation is improved. Furthermore, we examine the hydrologic response of both drainage networks, and represent effects of the threshold for this response.

Keywords: DEMs, drainage network, threshold, source of stream, runoff model

1. はじめに

近年の水文学や地理学においては、DEM (Digital Elevation Model) をベースにした地形量解析や流出解析が主流になりつつある。DEM の形式には、大別するとグリッド型 (square-grid network)、TIN 型 (Triangular Irregular Network) と等高線型 (contour-based network) の3種類があり、各々に長所、短所を有している¹⁾。グリッド型DEMは、コンピュータ処理の容易さと国土数値情報等の地理情報システム (GIS: Geographic Information System) やリモートセンシング情報等とのマッチングの利便性から広く利用されている。グリッド型DEMによる流出解析は、DEMから流域のモデリングや河道網の抽出を行い、この擬河道網構造に基づいた定数分布型流出モデルが適用されている。各グリッド点 (ピクセル) に落下した雨水が最急勾配方向に流下するものとして、全てのピクセルの落水線方向を流域の出口まで連ねたのが落水線図と呼ばれており、様々な作成手法が提案されている^{2~4)}。なお、TIN-DEMによる流域のモデル化は高棹・椎葉ら⁵⁾の論文を参照されたい。陸・小池ら⁶⁾の流出モデルはこの落水線図を河道と見なし、各ピクセルからの流出量を集水している。一方、伊藤・笹本ら⁷⁾や早川⁸⁾の流出モデルは、落水線図に適切な閾値を設定して地形図の河道網に類似する擬河道網を抽出し、各ピクセルをサブ流域に集約して、各サブ流域の流出量を算出・合成している。この抽出された擬河道網は流域の地形量解析も利用でき³⁾、流出特性に対する地形特性諸量の影響を定量的に評価することが期待できる。したがって、本研究は、この擬河道網抽出のための閾値、即ち水

* 正会員 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090 北見市公園町 165)

** 正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090 北見市公園町 165)

*** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

源の定義に着目した。従来の水源の定義は、水源までの集水面積 ΣA_s (グリッド点の累積値)を閾値にする方法が一般的である。伊藤・笹本⁷⁾の研究によると、河道判定の閾値は流出特性にほとんど影響しないことを示しているが、検討している閾値の範囲が狭い。また、多くの場合、この閾値は対象とする流域で空間的に一定の値が与えられているため、道口ら⁴⁾が指摘しているように上流域と下流域での河道網の粗密さの違いをうまく表現できていない。そこで、本論文では水源の定義として、従来の集水面積 ΣA_s を閾値にする方法以外に、河道と斜面の勾配の要素を考慮した閾値を提案し、その比較・検討結果について報告する。

2. 擬河道網の抽出方法

国土数値情報等のグリッド型 DEM データから擬河道網を抽出する方法は、第一に、グリッド点に落ちた雨水が隣接する 8 方向のグリッドの最急勾配方向に流下するものとして、その落水線方向を流域の出口まで連ねた落水線図を作成する。次に、この落水線図において、河道の水源となる点の基準を定義することによって擬河道網が抽出される。地形図に準じた擬河道網を得るためには、DEM データの精度やグリッドサイズが原因で生じる落水線の行き場を失った窪地の処理と、河道の水源の定義が重要になってくる。窪地処理については種々の方法が提案されている^{2~4)}ので、本論文では河道の水源の定義について言及する。

2.1 面積閾値による擬河道網

擬河道網の抽出に從來から良く利用されてきた水源の定義は、落水線図において、各々のグリッド点に流入してくる落水線の累積値 (グリッド点の累積値)、つまり水源まで集水面積 ΣA_s を計算し、この累積値がある値 (閾値) より大きな点を水源とする方法である。この定義は、いわゆるレジーム理論で、流量が集水面積に密接に関係することに基づいており、この定義を面積閾値と呼ぶことにする。著者らが国土数値情報の 250m メッシュ DEM データを基に、北海道の渚滑川 (滝上、立牛観測所)、網走川 (美幌、津別観測所)、常呂川 (置戸観測所)、留萌川 (河口地点) の 6 地点の流量観測所流域を解析対象として、1/25,000 の地形図の実河道網と、河道網のマグニチュード、すなわち、水源の個数をほぼ等しくする面積閾値による擬河道網の地形量解析結果を表 -1 に示す⁹⁾。各々の流域の地形図の河道網と擬河道網の地形量は、両者ともほとんど差はない。しかし、Hack の法則として知られる流域面積 (A) と河道長 (L) の関係 ($L = \alpha A^{\beta}$) は、図 -1, 2 に示すように水源を有する外部リンクだけが実河道網と傾向が異なり、リンク長が短くなっている。この理由として水源の定義が考えられ、実河道網は比較的尾根線付近まで延びた河道が存在するにもかかわらず、面積閾値による擬河道網は尾根線付近まで延びた河道が抽出され難いことを意味している。なお、総リンク

表 -1 1/25,000 地形図と擬河道網の地形量の比較⁹⁾

流域名	地図の種類	縮尺	Magnitude	総流域面積 (km ²)	平均サブ流域面積 (km ²)	平均サブ流域河道長 (km)	河川密度	分岐比	河道長比	面積比	勾配比
美幌	地形図	1/25000	28	203.8	3.775	2.914	0.772	3.158	1.643	1.831	-----
	擬河道網	面積 30	28	199.3	3.760	2.722	0.630	3.158	1.543	1.641	2.240
		w/1 0.2	30	199.3	3.436	2.228	0.648	3.187	1.630	1.784	2.004
置戸	地形図	1/25000	55	429.8	3.980	2.203	0.554	3.063	1.786	1.845	-----
	擬河道網	面積 36	55	421.7	3.978	2.021	0.508	3.908	1.677	1.672	1.999
		w/1 0.38	55	421.7	3.905	2.056	0.527	3.744	2.337	2.516	1.833
留萌	地形図	1/25000	56	274.8	2.476	1.934	0.781	3.903	2.013	1.879	-----
	擬河道網	面積 22	56	268.7	2.443	1.773	0.726	3.810	1.901	1.655	2.722
		w/1 0.21	55	268.7	2.465	1.704	0.691	3.853	1.959	1.857	2.480
滝上	地形図	1/25000	76	238.1	1.577	1.361	0.864	4.114	2.917	3.088	-----
	擬河道網	面積 15	75	236.7	1.621	1.191	0.734	4.139	2.651	2.581	2.115
		w/1 1.14	75	236.7	1.599	1.268	0.793	4.220	2.806	2.931	2.058
立牛	地形図	1/25000	53	165.1	1.588	1.192	0.751	3.968	1.315	1.429	-----
	擬河道網	面積 16	54	160.7	1.530	1.089	0.711	4.074	1.367	1.360	2.031
		w/1 0.46	53	160.7	1.575	1.236	0.785	3.810	1.358	1.274	2.017
津別	地形図	1/25000	105	573.2	2.756	1.808	0.656	3.160	1.736	1.764	-----
	擬河道網	面積 23	106	571.0	2.732	1.780	0.651	3.102	1.556	1.544	1.738
		w/1 0.33	106	571.0	2.732	1.736	0.635	4.583	2.344	2.359	1.979

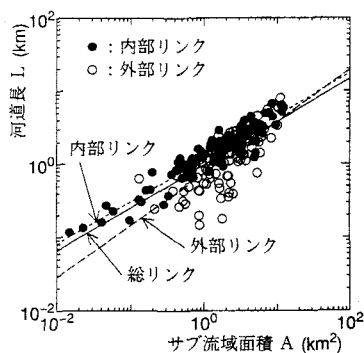


図 -1.a 1/25,000 地形図の
L-A の関係 (津別流域)

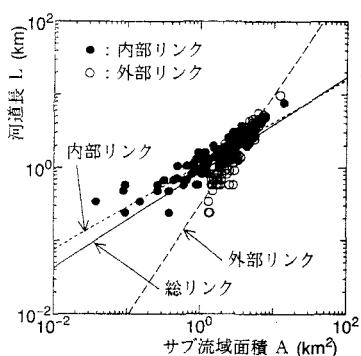


図 -2.a 面積閾値による擬河道網の
L-A の関係 (津別流域)

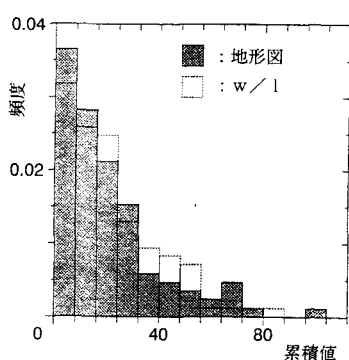


図 -3.a 水源における累積値 (集水
面積) のヒストグラム (津別流域)

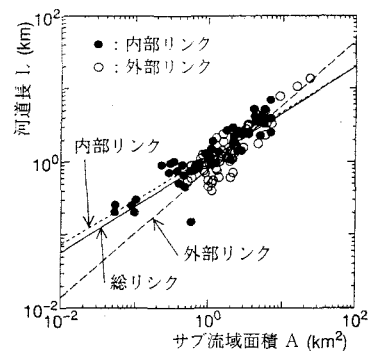


図 -1.b 1/25,000 地形図の
L-A の関係 (留萌川流域)

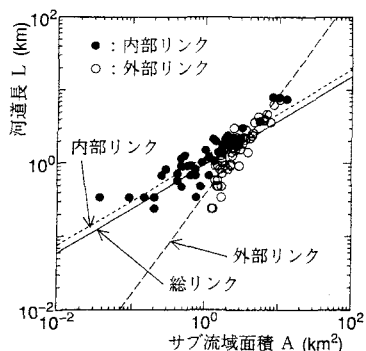


図 -2.b 面積閾値による擬河道網の
L-A の関係 (留萌川流域)

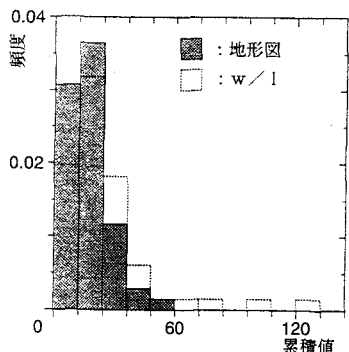


図 -3.b 水源における累積値 (集水
面積) のヒストグラム (留萌川流域)

の回帰式が内部リンクの式に近いのは、内部リンクに数多くある面積の小さなサブ流域に回帰式が引き寄せられたためである。また、図 -3.a は津別流域の実河道網に落水線図に重ね合わせ、実河道網の水源の位置に対応するグリッド点での累積値のヒストグラムを示している。ハッチング部分が実河道網である。面積閾値による水源は、当然、与えた閾値以外の値をとらないので、ヒストグラムはその値でのインパルス関数になるが、実河道網のヒストグラムは幅広く分布しており、水源となる地点の集水面積が水源毎に違うことを示している。このことは、地形図の実河道網を忠実に再現するためには、この閾値を上流域、中流域、下流域毎に変化させなければならない、と道口ら⁴⁾が指摘していることを裏付けている。これが面積閾値による擬河道網抽出の欠点である。

2.2 w/l 閾値による擬河道網

ここで提案する水源の定義は、角屋が地形図においてより実河川に近い河道網を得るために定義した図 -4 に示す等高線の谷の幅 w と谷のわん入長 l の比 w/l ¹⁰⁾ を、グリッド型 DEM データに適用したものである。図から、 w/l の値は谷が深くなるほど小さく、尾根線付近は逆に大きくなる性質がある。角屋は地形図において w/l の値が 1~2 となる地点を水源とするのが、流出解析にとって標準的な河道網を得るのに最適であるとしている¹⁰⁾。この w/l の値は、図 -5 の河道の縦断勾配 S と河道の法線方向の左右岸横断勾配 θ_L 、 θ_R を用いて、

$$w/l = (w_L + w_R) / l = S / \theta_L + S / \theta_R \quad (1)$$

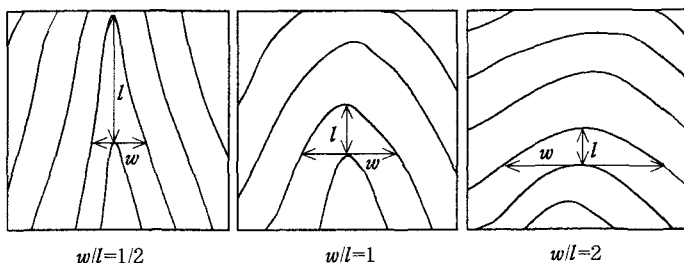
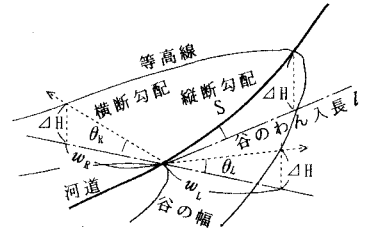


図 -4 谷の幅 w とわん入長 l の関係¹⁰⁾

ここで、 $S=\Delta H/l$ 、 $\theta_L=\Delta H/w_L$ 、 $\theta_R=\Delta H/w_R$ 、と変換することができる。したがって、DEMデータに適用する際には、対象とするグリッド点の落水線方向の縦断勾配と横断勾配からそのグリッド点の w/l を式(1)から計算し、この w/l の値が閾値より小さくなるグリッド点を水源と定義する。これは、勾配の要素から水源を定義しようとする考えである。ところで、擬河道網抽出のベースとなる落水線図は、最急勾配方向に雨水が流れるという考えに基づいているので、面積閾値による方法も全く勾配の要素を考慮していない訳ではない。また、図-5 w/l と河道の縦・横断勾配との関係 w/l による方法も、対象とするグリッド点に上流から複数の落水線が流入してくる場合の縦断勾配は、落水線の持つ累積値が最大となる点を選んでいるので、全く面積の要素を考慮していない訳でもない。したがって、面積閾値による擬河道網は集水面積に重みをおいているのに対し、 w/l は勾配に重みをおいて抽出した擬河道網であると考えられる。



まず、常呂川支川の富里ダム流域(6.8km²)を対象に、1/25,000地形図から作成した50mDEMデータを用いて、面積閾値と w/l とによる擬河道網を比較する。図-6、7は富里ダム流域の1/25,000地形図と現地踏査による河道網を示している。この流域の地形図の河道網はマグニチュードが2であるが、現地踏査による実河道網は図-7のようにマグニチュードが30で、尾根線付近まで延びた河道が存在している。 w/l の定義は本来、このような地形図の河道網を実際の河道網に近づけることを目的に提案されているので、このマグニチュードに一致させた面積閾値と w/l による擬河道網を図-8、9に示す。両者ともよく実河道網を再現しているが、この図から両者の違いは明確でない。 w/l はこの場合1.66で角屋が推奨する値の範囲にあり、DEMへの w/l の適用が妥当であることを示している。また、このときの河道長と流域面積の関係を見ると、図-10の面積閾値の擬河道網は外部リンクが短く、回帰式の勾配が急になっているが、図-11の w/l による擬河道網は面積に比して外部リンク長が伸びているために外部リンクも内部リンクに近い関係になっている。すなわち、 w/l は外部リンクのHackの法則の改善に効果的であることを示している。

次に、前節と同様に国土数値情報の250mDEMデータを用い、6流域の w/l による擬河道網の地形量を求めた結果が表-1に併記されているが、大きな違いは見られない。しかし、先に示した図-3の水源の累積

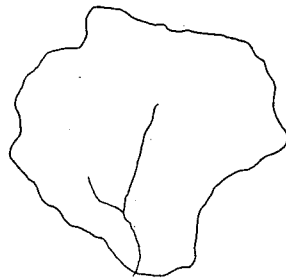


図-6 富里ダム流域の1/25,000地形図の河道網

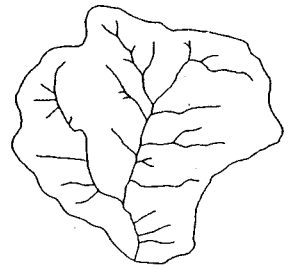


図-7 富里ダム流域の平水時の実河道網

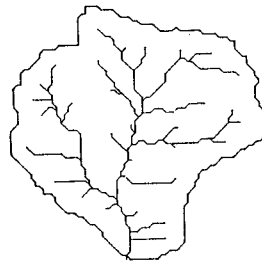


図-8 富里ダム流域の面積閾値による擬河道網

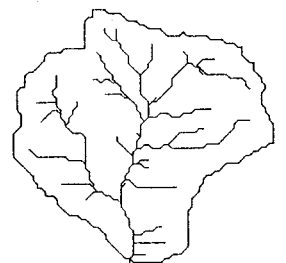


図-9 富里ダム流域のw/lによる擬河道網

して外部リンク長が伸びているために外部リンクも内部リンクに近い関係になっている。すなわち、 w/l は外部リンクのHackの法則の改善に効果的であることを示している。

次に、前節と同様に国土数値情報の250mDEMデータを用い、6流域の w/l による擬河道網の地形量を求めた結果が表-1に併記されているが、大きな違いは見られない。しかし、先に示した図-3の水源の累積

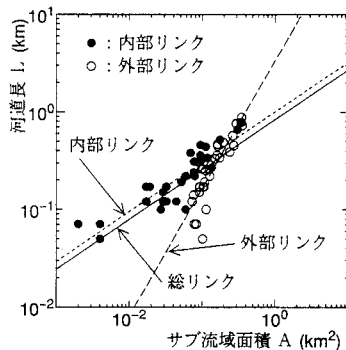


図-10 面積閾値による擬河道網のL-Aの関係(富里ダム流域)

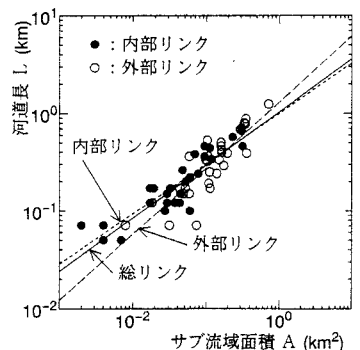


図-11 w/l による擬河道網のL-Aの関係(富里ダム流域)

値のヒストグラムは、津別流域、留萌川流域とも点線部分の w/l による擬河道網と地形図が良く似た分布をしている。流域面積と河道長の関係も、面積閾値 (図-2) では違いが目立った外部リンクが、図-12に示すように地形図 (図-1) と同じく内部リンクに類似した傾向を示している。津別流域、留萌川流域以外も同様な結果が得られている。ただし、各流域の

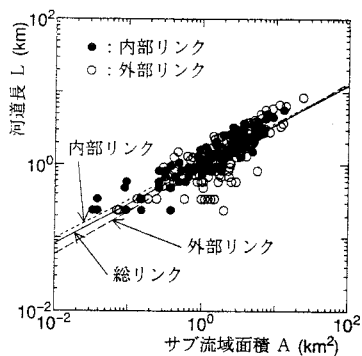


図-12.a w/l による擬河道網の $L-A$ の関係 (津別流域)

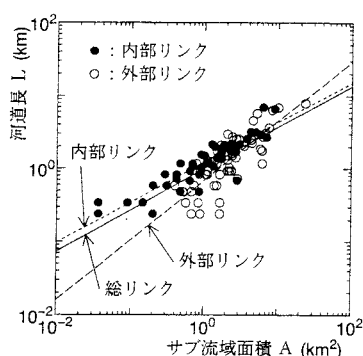


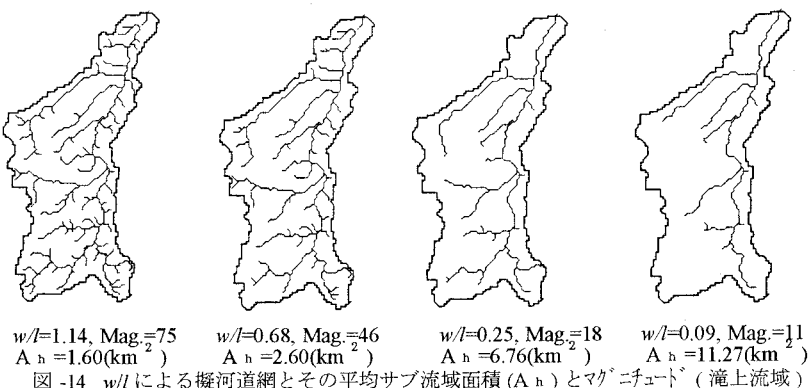
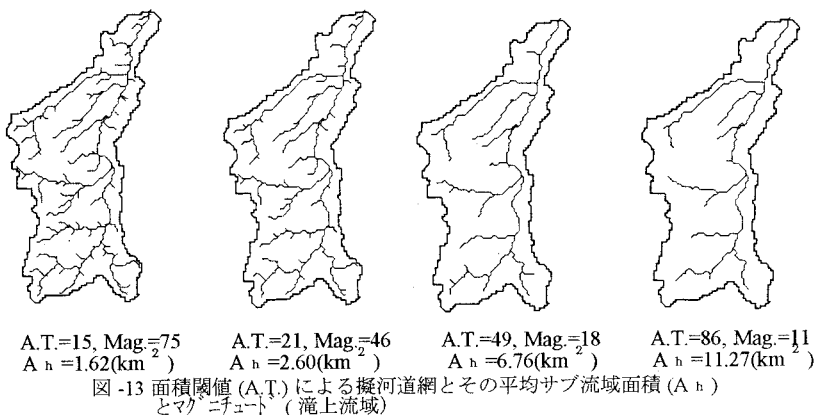
図-12.b w/l による擬河道網の $L-A$ の関係 (留萌川流域)

w/l の値は、渚滑川滝上流域以外が 0.2 ~ 0.4 と角屋の提案した 1 ~ 2 よりも小さくなっている。これは w/l を 1/25,000 地形図の河道網に合うように決めたためで、 w/l を 1 ~ 2 とすれば、現地踏査の実河道網に近づくことになる。なお、この w/l の方法は、面積閾値に比べ処理すべき項目が多くなるために、取り扱いが煩雑になるという欠点を有している。

3. 流出特性に対する水源の定義の影響

本節では流出特性の観点から、水源の定義の違いによる影響を検討する。流出モデルは、著者らが既に提案したサブ流域の流出量には貯留関数法、河道網の集水過程には河道網の合流点での各サブ流域の流出量に応じて流量の伝播速度を変化させて合成する準分布型流出モデルである⁸⁾。図-13は面積閾値、図-14は w/l 閾値による渚滑川滝上流域の擬河道網を種々の閾値で抽出した例である。両者は比較のためマグニチュードを揃えている。この擬

河道網を用いた流出計算結果が図-15、16に示されている。降雨の条件は三角形波形降雨を与え、サブ流域の斜面長は矩形に近似し、斜面の等価粗度は 0.1、斜面勾配は斜面部の DEM から求めた平均勾配とした。両図とも、サブ流域の流域面積が大きくなって河道網が粗くなるに従い、流量のピーク値が低下して扁平化する傾向を示している。その割合は w/l の方が大きく、他の流域の計算結果も同様であった。先に伊藤・笹本ら⁷⁾が検討した結果によると、面積閾値の違いが流出特性に及ぼす影響は小さいと結論付けている。今回の



結果も面積閾値が流出特性、ここでは流量のピーク値に及ぼす影響は、ある程度の範囲では小さいとみなすことが出来るが、サブ流域のスケールが変わる場合はその限りでない。また、前節では w/l の方がより実河道網に近い擬河道網であると結論付けたが、図-13、14 を詳細に比較するとマグニチュードが小さい場合、すなわち w/l が極端に小さくなると、河道網構造に差異が認められる。 w/l の方が本川の合流部付近から発生する河道長の短い外部リンクの割合が高い。今回採用した流出モデルは各サブ流域の貯留係数を矩形近似した斜面長の関数としているために、このように Hack の法則から外れた短い河道長を持つ外部リンクは斜面長が過大に評価され、ゆっくりとした流出特性を示す。その結果、図-16 のようにマグニチュードが小さくサブ流域面積が大きくなると、 w/l の方が面積閾値に比べハイドログラフが扁平化されている。

4. 結 論

本研究では、擬河道網を抽出するための水源部の定義を提案した。その検討結果を以下にまとめると、(1) 角屋の地形図の水源の再定義に提案した w/l が、グリッド型 DEM の擬河道網にも有効である、(2) 面積閾値と w/l の擬河道網は平面的には大差がないが、外部リンクの流域面積と河道長の Hack の法則や水源までの集水面積のヒストグラムに違いがあり、 w/l の方が地形図の河道網によく似た河道網を得ることできる、(3) w/l の値が極端に小さくなると、河道網構造に差異が生じ、本川の合流部付近から発生する河道長の短い外部リンクの割合が高い、(4) 水源の定義の違いは外部リンクの地形量特性に関係しているので、流出特性への影響は外部リンクからの流出特性に左右される。サブ流域の流域スケールを変化させた場合、面積閾値より w/l 閾値の方が流量のピーク形成に及ぼす影響が大きいことが示された。

【謝 辞】本研究にあたり、当時北見工大院生田中裕樹君（現在（財）日本気象協会北海道本部）には現地踏査や流出解析に助力を頂き、記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R. : Digital Terrain Modelling; A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications, Hydrological Processes, Vol.5, 3-30, 1991.
- 2) Jensen, S. K. and Domingue, J. O. : Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.54, No.11, 1594-1600, 1988.
- 3) 高埜・宝・溝淵・杉原：国土数値情報を用いた水文地形解析に関する基礎的研究，京大防災研年報，第 32 号，435-454, 1989.
- 4) 道口・藤田：国土数値情報による模擬河道発生手法について，土木学会北海道支部論文報告集，第 46 号，275-280, 1990.
- 5) 高埜・椎葉・立川・大江：TIN-DEM データ形式を用いた流域場情報システムの開発，水工学論文集，第 36 巻，677-684, 1992.
- 6) 陸・小池・早川：分布型水文情報に対する流出モデルの開発，土木学会論文集，第 411 号／II -12, 135-142, 1989.
- 7) 伊藤・笹本・堺・平山：国土数値情報とレーダー雨量情報を用いた流出解析の自動化，水工学論文集，第 36 巻，671-676, 1992.
- 8) 早川：分布型流出モデルのサブ流域スケールに関する一考察，水工学論文集，第 36 巻，555-560, 1992.
- 9) 早川・田中・内島：流域斜面の地形量特性に関する解析，土木学会北海道支部論文報告集，第 49 号，489-494, 1993.
- 10) 角屋：流出解析手法（その 1），農業土木学会誌，第 47 巻，第 10 号，63-73, 1979.

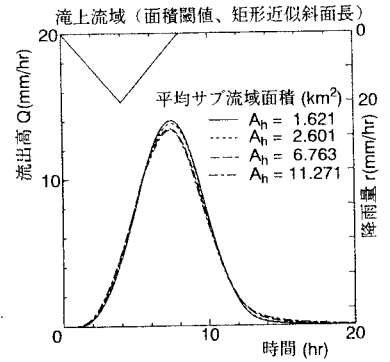


図-15 面積閾値による擬河道網の流出特性

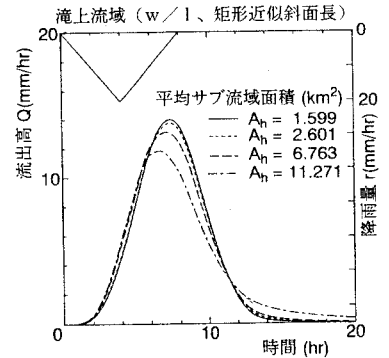


図-16 w/l による擬河道網の流出特性