

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

FUNDAMENTAL STUDY ON SPATIAL RESOLUTION OF TOPOGRAPHIC INFORMATION FOR RUNOFF ANALYSIS

多田毅¹・古賀肇²・重村利幸³・林建二郎⁴・藤間功司⁵

Tsuyoshi TADA, Hajime KOGA, Toshiyuki SHIGEMURA, Kenjiro HAYASHI and Kouji FUJIMA

¹ 正会員 博(工) 防衛大学校助手 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

² 学生会員 防衛大学校 理工学研究科 (同上)

³ 正会員 Dr. Eng. 防衛大学校教授 建設環境工学科 (同上)

⁴ 正会員 Ph.D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (同上)

⁵ 正会員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (同上)

Spatial resolution of topographic information gives a great influence to distributed runoff analysis. The objective of this study is to evaluate the effects of spatial resolution of DEM (Digital Elevation Model) on flood analysis with 1-D main flow channel. Kinematic wave propagation is simulated through real and imaginary river channel data sets having various resolutions. This study reveals that (1) Low resolution of DEM shortens delayed time of peak discharge, because small horizontal curves of river channel are omitted and channel elements become shorter; (2) Vertical curves in channel profile have also significant influence to discharge. An accuracy of discharge analysis greatly depends on the correlation between spatial resolution and wavelength of topographic vertical curve; and (3) Sufficient resolution is about 1/50 of the wavelength.

Key Words : distributed runoff analysis, spatial resolution, grid size, digital elevation model, kinematic wave

1. はじめに

近年, 計算機の加速度的な進歩にともない, 分布型モデルによる流出解析が広く行われるようになってきている。解析対象のスケールも小流域から大陸規模まで(たとえば, 鼎ほか¹⁾ など)様々である。しかし一方では, 分布型モデルが解析対象とする領域の最小単位, それが有限の, しかもかなりの大きさを持つことによって生じる問題, いわゆるスケール問題が, 流出解析の分野でも不可避な問題としてクローズアップされている(たとえば Wood *et al.*²⁾, Jens³⁾, 高棹ほか⁴⁾, 福井ほか⁵⁾ など)。

本論文では, 地形をモデル化する際の河道の縦断面形状の再現性に着目し, 様々な空間解像度の地形情報から作成した実際の河川の河道縦断面データを用い, 地形情報の空間解像度と洪水波の伝播特性との関係について検討を加える。また, 様々な縦断面形状を持つモデル河川を想定し, 河道の起伏の特徴と地形情報の空間解像度に起因する誤差との関係を明らかにする。

2. 実河川による計算

(1) 河道縦断面データの作成

本研究は, 東北地方の阿武隈川幹川を対象河川として解析を行う。まず, 国土数値情報の標高データを元に 5 種類のグリッドサイズの DEM (Digital Elevation Model) を作成した。グリッドは緯度方向と経度方向とで辺長が同一ではないが, 本論文では便宜上, 500m, 1000m, 2000m, 4000m, 8000m と呼ぶ。各グリッドサイズの特徴を表-1 に示す。次に, 最急勾配方向にのみ水が流下すると仮定して落水線網を作成し, そこから河道幹川上での下流端からの距離と標高との関係を抽出した。今回は地形情報の空間解像度の影響について検討することが目的であるので, それ以外の特徴を統一するため, 標高の範囲を 0m から 1000m の間に限定した。しかし, 上流端および下流端の位置は, グリッドが粗くなるにしたがい真の位置から大きく離れ標高も不正確になることから, 下流端は標高 0m に相当する位置を補外により, 上流端

表-1 グリッドサイズの詳細

呼称	緯度幅		経度幅		河道長
	角度	距離	角度	距離	
500m	15"	361 m	22.5"	692 m	210 km
1000m	30"	721 m	45"	1384 m	184 km
2000m	1'	1442 m	1'30"	2768 m	188 km
4000m	2'	2884 m	3'	5536 m	168 km
8000m	4'	5768 m	6'	11072m	151 km

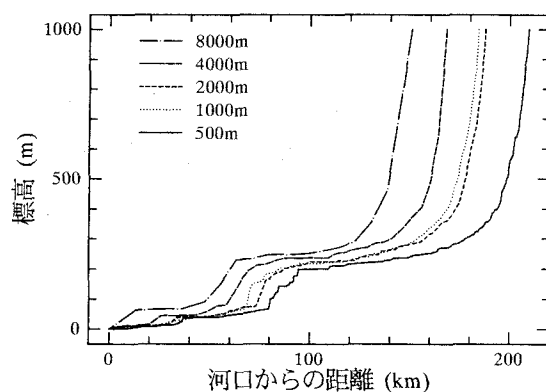


図-1 各グリッドサイズで再現された縦断面形状

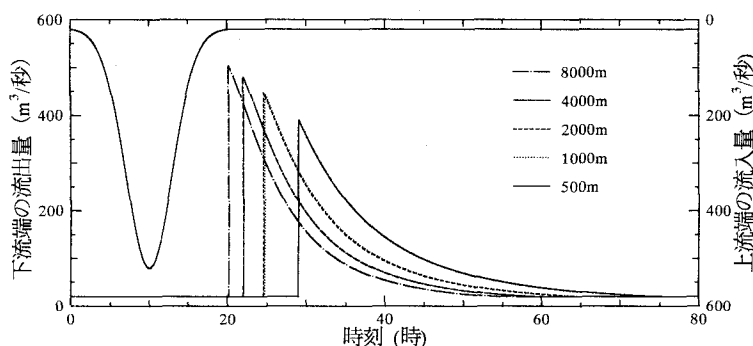


図-2 流出計算結果

は標高 1000m に相当する位置を補外または補間により決定した。各グリッドサイズでの河道幹川の縦断面形状を図-1 に示す。また、河道の総延長を表-1 に併せて示す。

図-1 より、DEM の空間解像度が粗くなるにしたがい、河道長が短く再現される傾向があることが判る。ただし、1000m グリッドと2000m グリッドとでは、2000m グリッドの方が河道長が長いという逆転現象が起きている。この現象は地形図から手作業で河道を読み取った場合⁹⁾ にも起きており、河道の蛇行のスケールとグリッドの大きさが近い場合に発生すると考えられる。

(2) 実河道データによる流出計算

前節で作成した河道縦断面形状を一次元開水路にみたて、kinematic wave の伝播計算を行った。河道の幅は本来場所により異なるものであるが、本研究の目的は阿武隈川の流出特性を調べるのではなく、阿武隈川の地形を例として DEM の空間解像度の影響を検討することであるため、全ての斜面で一律 30m とした。雨水の流入は上流端からのみとし、河道側方からの流入は与えない。これは、標高 1000m 以上の小流域において集中豪雨が発生し、その洪水波が本川を伝播してゆくといった状況を想定している。降雨継続時間 20 時間、ピーク発生時刻 10 時間後、ピーク流量 500(m³/s) の正規分布型の流入量を与えた。kinematic wave の計算には連続の式とマ

ニングの式を用い差分計算を行った。差分の空間刻みは 50m、時間刻みは 2 秒とし、マンニングの粗度係数 n とし て 0.04 を用いた。計算結果を図-2 に示す。

これらの図より、DEM の空間解像度が粗くなるにしたがい、ピークの現出は早く、ピーク流量は多くなることがわかる。最も解像度の高い 500m グリッドでの結果を真の値と仮定すると、最も粗い 8000m グリッドではピーク発生時刻で約 9 時間、ピーク流量で 110(m³/s)もの誤差(いずれも約 30%)が発生しており、到底容認できるものではない。空間解像度の低い DEM しか利用できない場合、この誤差を補正する方法を考えることが不可欠である。

(3) 粗度係数による誤差補正

kinematic wave の場合、地表面の属性としてのパラメータには斜面長、勾配、そして粗度係数の三つが挙げられる。一般に、斜面形状を単純化して計算することにより切り捨てられる地表面の複雑さの影響については、相当粗度と呼ばれる概念を導入することにより補正されており、実験室的な意味での粗度係数よりも大きな値をとることが知られている。そこで、最も粗い 8000m グリッドに対し、粗度係数を調整することにより 500m グリッドの結果に近づけるよう試みた。その結果、 $n=0.09$ から 0.10 の間で、ほぼハイドログラフが一致することが確認された(図-3)。このことから、相当粗度を適切

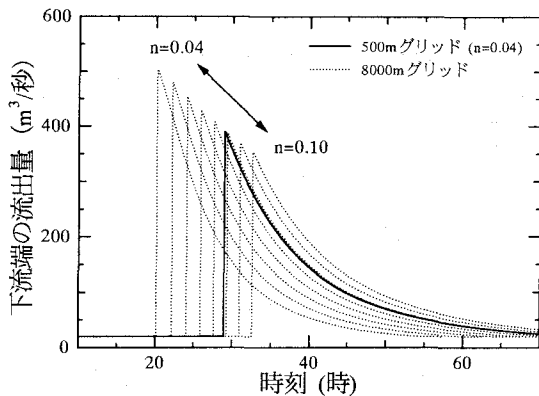


図-3 粗度係数を変化させた場合のハイドログラフ

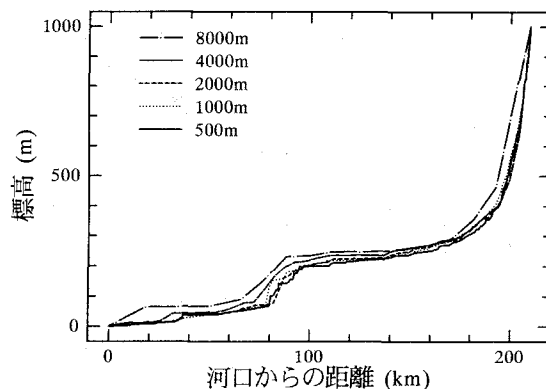


図-4 河道長を補正した河道縦断面形状

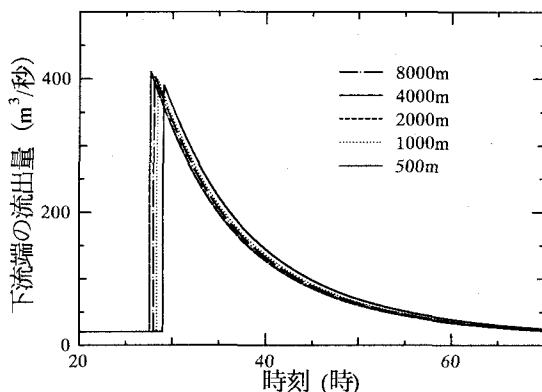


図-5 河道長を補正した場合のハイドログラフ

に設定することにより、地形データの空間解像度の粗さに起因する誤差を補正することが実用上可能であるといえる。しかし、どの程度の相当粗度を設定すればよいかについては、真の結果に一致するよう試行錯誤を繰り返す必要がある。

(4) 河道長による誤差補正

第(3)節での結果をみると、ピーク発生時刻、ピーク流量ともに河道の総延長の影響が大きいことが予想される。そこで、全てのグリッドサイズにおける河道の総延長が 500m グリッドのものと一致するよう、グリッドサイズ毎に、一定の倍率を全ての斜面要素に掛けることにより河道長を補正し、再び流出計算を行った。計算条件はこれまでと同じである。補正された河道縦断面形状を図-4に、計算結果を図-5, 6に示す。

河道の形状は、どのグリッドサイズにおいてもおおむね一致している。それに対応するように、流出計算結果もピーク発生時刻、ピーク流量ともに、全てのグリッドサイズにおいてほぼ一致している。したがって、河道長を補正することにより、地形データの空間解像度の粗さに起因する誤差を補正することが実用上可能であるといえる。グリッド型 DEM から作成された擬河道網の河道長が DEM の空間解像度によって大きく変化する原因は、

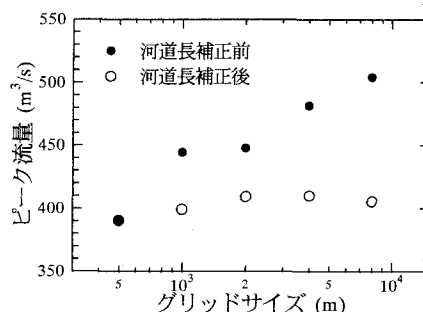
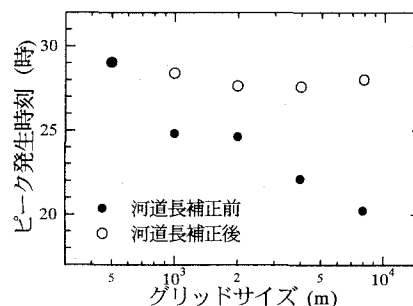


図-6 グリッドサイズとピーク発生時刻・ピーク流量との関係

グリッドが粗くなるにしたがい、河道の水平方向の屈曲が正しく再現されず切り捨てられるという点にある。したがって、河道長を補正するための係数は、対象地域の地形の複雑さ、河道の屈曲の程度などによって決まることが予想される。今後、地形の複雑さと河道長の再現性との関係を、より一般化した形で整理することにより、河道長の補正係数を地域ごとに決定するといったことが可能となることが期待される。

図-6を見ると、河道の総延長と標高差を統一した場合でも、洪水波の伝播特性にまだ若干の差が存在する。これは、河道の水平方向の屈曲の再現性とは別に、鉛直方向の形状、すなわち起伏の再現性の差が影響を与えていると思われる。そこで、次章では、モデル河道を想定し、河道の水平長と高低差を一定としたまま縦断面形状の複雑さを様々に変化した場合の洪水波の伝播特性について検討を加える。

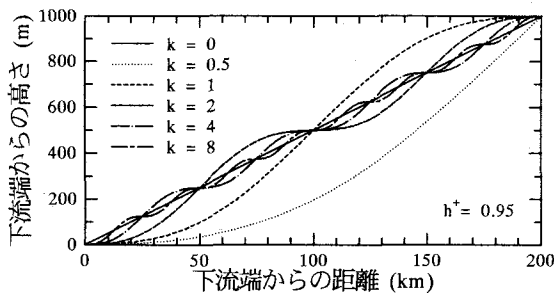


図-8 波数 k を変化した場合の河道縦断面

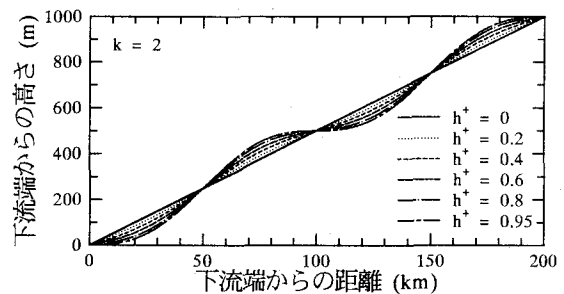


図-9 振幅 h^* を変化した場合の河道縦断面

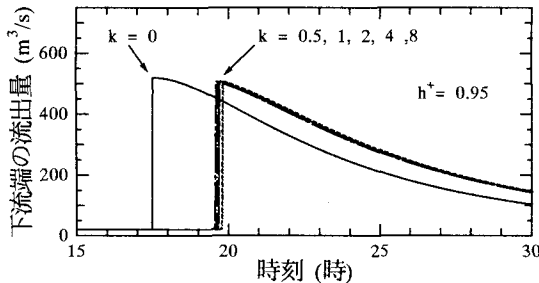


図-10 波数 k を変化した場合のハイドログラフ

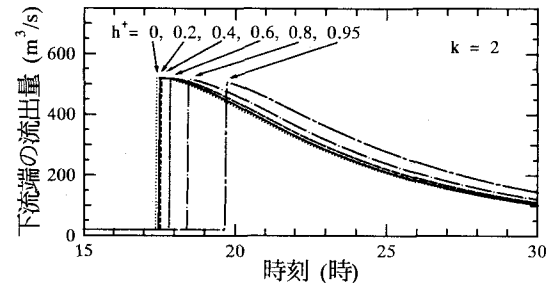


図-11 振幅 h^* を変化した場合のハイドログラフ

3. モデル河道による計算

(1) モデル河道の作成

前章において、河道の鉛直方向の起伏が洪水波の伝播特性に影響を与えることが示唆された。そこで本章では、上流端と下流端との間の水平長と高低差を一定とした開水路を想定し、その間の縦断面形状を様々な場合の洪水波の伝播特性、および水路形状の空間解像度を変化させた場合の影響について検討を加える。

河道の起伏を一般化するため、モデル河道を次の式により定義した。

$$y = \frac{z}{l}x - \frac{l}{2k|\pi|} \left(\frac{z}{l}h^* \right) \sin\left(\frac{2k\pi}{l}x\right) \quad (1)$$

ここで、 x は下流端からの距離、 y は下流端からの高さ、 l は河道の水平長、 z は河道の高低差、 k は底面の起伏の波数、 h^* は起伏の振幅の指数である。起伏の波数 k は 0, 0.5, 1.0, 1.5 と 0.5 刻みの値をとり、0 の時は直線斜面、0.5 の時は下に凸のゆるやかな曲線、1 以上のときはその数だけの正弦曲線を含む曲線となる。また k が負の時は、正の場合と上下逆の振幅を持つ。振幅の指数 h^* は 0 から 1 の値をとり、0 の時は振幅ゼロで直線斜面となる。また 1 の時は振幅最大で、局所的な勾配が負となる点が生じない限界である。阿武隈川にならい、モデル河道の水平長は 200km、高低差は 1000m とした。モデル河道の波数 k と振幅 h^* を変化した場合の河道縦断面形状の例を図-8 と図-9 にそれぞれ示す。

(2) モデル河道の流出特性

本節では、モデル河道のパラメータを様々な場合に変化させ流出計算を行い、地形の起伏が洪水波の伝播に与える影響について検討する。雨水の流入、河道幅、差分計算の条件などは、特に断らないかぎりすべて前章と同一である。また、斜面の形状を数値化する際、空間解像度の粗さが問題とならないだけの十分な細かさ確保している。

1) 波数の影響

モデル河道における波数 k すなわち地形の起伏の細かさを変化させた場合(図-8)の流出計算の結果を図-10 に示す。この結果から、地形の起伏の細かさの違いは洪水波の伝播には全くと言ってよいほど影響を与えないことがわかる。ここでは h^* が 0.95 の場合を示したが、 h^* が他の値の場合でも同様に、 k による影響は皆無であった。また、 k を負とした場合にも、正の場合と全く同じ結果が得られた。

2) 振幅の影響

モデル河道における振幅の指数 h^* すなわち地形の起伏の大きさを変化させた場合(図-9)の流出計算の結果を図-11 に示す。この結果から、地形の起伏の大きさは洪水波の伝播に直接影響を与え、起伏が大きいほどピークの発生は遅れ、ピーク流量は小さくなることがわかる。ここでは k が 2 の場合を示したが、 k が他の値の場合でも全て同様の傾向を示した。

3) 斜面長の影響

流下距離の変化が洪水波の伝播に直接影響を与えることは前章でも確認された。そこで、モデル河道において厳密な流下距離、すなわち縦断面をあらわす曲線の斜面

表-2 モデル河道のパラメータと斜面長との関係
数値は200km との差分 (m)

$k \backslash h^+$	0.0	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
0.00	+2.50	+2.50	+2.50	+2.50	+2.50	+2.50
0.20	+2.50	+2.55	+2.55	+2.55	+2.55	+2.55
0.40	+2.50	+2.70	+2.70	+2.70	+2.70	+2.70
0.60	+2.50	+2.95	+2.95	+2.95	+2.95	+2.95
0.80	+2.50	+3.30	+3.30	+3.30	+3.30	+3.30
0.95	+2.50	+3.63	+3.63	+3.63	+3.63	+3.63

長で結果を整理する。波数 k 、振幅 h^+ と斜面長との関係を表-2 に、斜面長とピーク発生時刻との関係を図-12 に示す。

表-2 より、波数 k を変化させても斜面長が全く変化しないことがわかる。また、 h^+ の変化は斜面長の変化をひきおこし、その結果洪水波の伝播が遅れているように見える。以上の事実と、 k と計算結果とが無関係であるという事実から、地形の起伏が洪水波の伝播に与える影響の主たるものは、流下距離の変化であるように考えられる。しかし、200,000m の流下距離に対しわずか1.13m の違いが、3 時間もの洪水波の遅れをひきおこすのであろうか。

もし仮に、流下距離の増加が洪水波遅延の主たる原因であるのであれば、前章で用いた手法と同様、流下距離を調整することにより補正することが可能なはずである。そこで、 $k=4$ 、 $h^+=9.5$ の曲線と同じ斜面長を持ち、かつ平均勾配も同じとなる直線斜面を用いて計算を行った(図-13)。その結果、斜面長を補正したにもかかわらず、同じ斜面長を持つ曲線よりもむしろ短い斜面長を持つ直線斜面に一致する結果となっている。したがって、斜面長の影響は受けないと考えられる。

(3) 地形の特徴と流出特性との関係

これまでの結果から、地表面の起伏が洪水波の伝播に与える影響は、起伏の流化方向の大きさ、起伏に起因する斜面長の変化よりむしろ、起伏の鉛直方向の大きさが主たる原因となっていると考えられる。したがって、地表面の複雑さを正確に反映した計算を行うためには、起伏の大きさをパラメータとして導入する必要がある。あるいは、この起伏の大きさこそが相当粗度により補正されるべきものであるかもしれない。

波数の影響を受けない理由については今後さらなる解析を要するが、波数を変えても変化せず振幅を変えると変化する量として、斜面長、最大勾配、最小勾配などが考えられる。ただし前節の結果は斜面長の変化は起伏の大きさの変化に伴う副次的な現象であるということを示していることから、最大勾配、最小勾配などが洪水波の伝播に大きな影響を与えている可能性が示唆される。

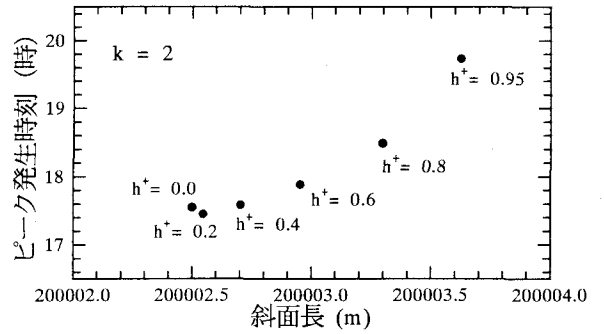


図-12 斜面長とピーク流量発生時刻との関係

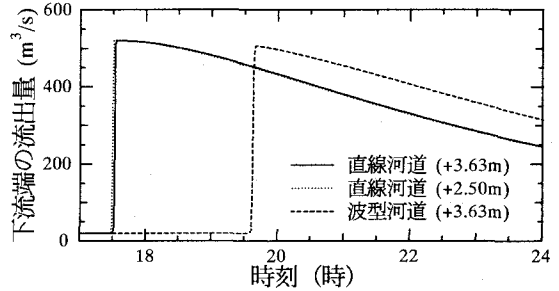


図-13 斜面長を補正した直線河道のハイドログラフ

(4) 地形をモデル化する場合の空間解像度の影響

前節では、モデル河道を数値化するにあたり十分に細かな解像度を採用し、斜面形状の持つ特性を正確に反映するよう留意して計算を行った。本節では、モデル河道の持つ流出特性を再現するためにはどの程度の空間解像度が必要であるか検討する。

図-14, 15 は、横軸にはモデル河道全体を複数の直線斜面で近似する場合の一波長あたりの斜面分割数を、縦軸には下流端でのピーク流量およびピーク発生時刻の相対誤差をとり、斜面分割数(空間解像度に相当する)と誤差との関係を示したものである。ピーク流量の相対誤差は次のように定義した。

$$E_Q = \frac{Q_p - Q_{pa}}{Q_{pf} - Q_{pa}} \quad (2)$$

ここで、 E_Q はピーク流量の相対誤差、 Q_p は対象としている河道でのピーク流量、 Q_{pa} と Q_{pf} はそれぞれ、十分に解像度が高い場合と、単一の直線斜面の場合のピーク流量である。同様に、ピーク発生時刻の相対誤差は次のように定義した。

$$E_T = 1 - \frac{T_p - T_{pf}}{T_{pa} - T_{pf}} \quad (3)$$

ここで、 E_T はピーク流量発生時刻の相対誤差、 T_p は対象としている河道でのピーク発生時刻、 T_{pa} と T_{pf} はそれぞれ、十分に解像度が高い場合と、単一の直線斜面の

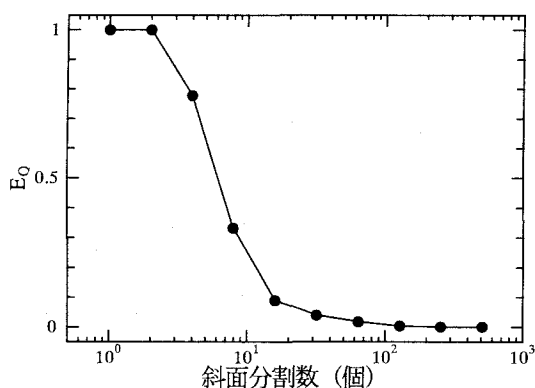


図-14 地形の起伏一波長あたりの斜面分割数とピーク流量の相対誤差との関係

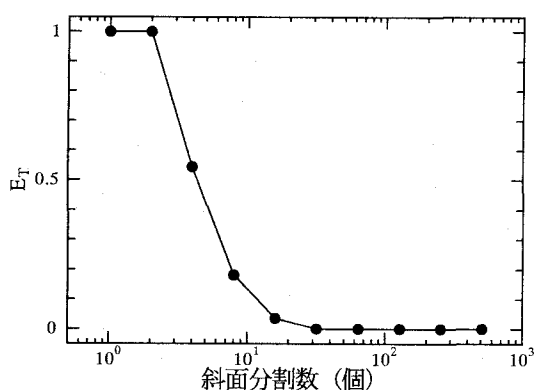


図-15 地形の起伏一波長あたりの斜面分割数とピーク流量発生時刻の相対誤差との関係

場合のピーク発生時刻である。いずれの相対誤差も、斜面の分割数が十分に大きい場合、すなわち空間解像度が十分に高い場合は 0 に近づき、逆に解像度が低く直線斜面に近づくにしたがい 1 に近づく。

あらためて図-14, 15 を見ると、ピーク流量、ピーク発生時刻ともに、斜面の分割数の増加にともない急速に誤差が低下し、地形の起伏一波長につき 32 分割から 64 分割に達した時点で、ほぼ誤差がゼロとなっている。分割数 2 でも誤差が 1.0 のままであるのは、2 つの斜面の接続点がちょうど波形の節にあたることが原因である。以上の傾向は、いずれの k および h においても同様であった。したがって、ある細かさを持つ地形の起伏の特徴を正確に反映した解析結果を得るためには、その起伏の波長の $1/50 \sim 1/100$ 程度のグリッドサイズを用いれば十分であると言える。言い換えれば、あるひとつのゆるやかな盛り上がり、またはあるひとつのゆるやかな窪みの影響を正確に再現するためには、その大きさのおよそ $1/25 \sim 1/50$ のグリッドサイズがあれば十分である。

4. 結論

本研究は、地形情報の空間解像度が、河道の縦断面形状の再現性および洪水波の伝播計算に与える影響について検討し、以下の結論を得た。

1) 異なる空間解像度を持つ DEM を用いて阿武隈川の河道幹川をモデル化し、洪水波の伝播計算を行った。その結果、地形情報の空間解像度の粗さに起因する誤差の主原因は河道長の誤差であること、河道長または相当粗度を調整することにより解像度の粗さによる誤差を補正できることが確認された。

2) 河道長の調整だけでは補正できない誤差について検討するため、モデル河道を想定し、様々な縦断面形状での洪水波の伝播計算を行った。その結果、起伏の細かさよりも、起伏の大きさの方が洪水波の伝播への影響が大きいこと、ある大きさの起伏または窪地の特徴を正確に反映した流出解析を行うためには、その起伏の大きさの約 $1/50$ のグリッドサイズを用いれば十分であることが確認された。

謝辞

本研究は河川懇談会の援助を受けて行われたことをここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鼎 信次郎, 西尾 健, 沖 大幹, 虫明 功臣: AGCM - 流路網モデルによる世界の大河川の流出ハイドログラフ, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.97-102, 1995.
- 2) Wood, E.F., Sivapalan, M., Beven, K., and Band, L.: Effect of spatial variability and scale with implication to hydrologic modeling, *J. Hydrol.*, Vol.102, pp.29-47, 1988.
- 3) Jens, C.R.: Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models, *J. Hydrol.*, Vol.198, pp.69-97, 1997.
- 4) 高棹 琢馬, 椎葉 充晴, 市川 温: 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.809-810, 1994.
- 5) 福井 史広, 砂田 憲吾: 流出応答特性の評価に与える流域要素スケールの効果について, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.205-210, 1998.
- 6) 古賀 肇, 多田 毅, 重村 利幸: 分布型流出モデルの空間解像度が河道の縦断面形状と流出に与える影響, 水文・水資源学会 2000 年研究発表会要旨集, pp.84-85, 2000.

(2000. 10. 2 受付)