

分布型流出モデルBTOPMCを大流域へ適用する場合の 地形解析に関する研究

TOPOGRAPHIC ANALYSIS FOR DISTRIBUTED RUNOFF MODEL BTOPMC WHEN APPLIED TO LARGE RIVER BASINS

敖 天其¹・吉谷純一²・深見和彦³・松浦直⁴・竹内邦良⁵・石平博⁶

Ao Tianqi, Junichi Yoshitani, Kazuhiko Fukami, Tadashi Matsuura,
Kuniyoshi Takeuchi and Hiroshi Ishidaira

- ¹正会員 工博 JSPS外国人特別研究員 (独)土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 つくば市南原1-6)
²正会員 工修 上席研究員 (独)土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 つくば市南原1-6)
³正会員 工修 主任研究員 (独)土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 つくば市南原1-6)
⁴正会員 工修 研究員 (独)土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 つくば市南原1-6)
⁵正会員 工博 教授 山梨大学大学院工学研究科自然機能開発専攻 (〒400-8511 甲府市武田4-3-11)
⁶正会員 工博 助教授 山梨大学大学院工学研究科自然機能開発専攻 (〒400-8511 甲府市武田4-3-11)

Topography has dominant effects in hydrological modeling. The purpose of this study is to explore a proper subdivision level for distributed hydrological model BTOPMC (Block-wise use of TOPMODEL with Muskingum-Cunge method), so that simulation uncertainty due to basin subdivision could be reduced to quite a low level. The Pfafstetter subdivision algorithm was successfully integrated into the model and related problems and solutions were discussed. Using this BTOPMC, the effects of sub-basin scale on runoff simulations were investigated for the Fuji-kawa and the Nakagawa basin, respectively. It was found that as the average area of sub-basins becomes smaller, the simulated total runoff usually tends to be increased in flood/wet period and decreased in dry period, this is considered as the effect of averaging scale of the topographic index in the model. However, the results indicated that model performance appears stabilized when average sub-basin scale is about 1/150 of the entire basin.

Key Words: Pfafstetter numbering system, sub-basin scale, runoff, physically based distributed hydrological model BTOPMC, large river basin

1. はじめに

分布型モデルにおける地形表現は、モデルの実用上の簡便性やパラメータの値及びシミュレーション結果の安定性と信頼性に重要な影響を及ぼす。また、モデルの適用に際しては、必要に応じて標高データの空間分解能の選択、窪地の処理、擬河道網の構築などの基本作業のみならず、用いる水文モデルの構造と対象流域によって流域を分割することやモデル特有の地形特性量を求めることが必要となる場合も少なくない。現在ではこれらの作業の大部分は汎用のGISソフトウェアで自動的に行うことができるが、実用上から見ると、地形解析の入出力データのフォーマットと水文モデルとの対応が必ずしも容易ではないなどのこともあるため、モデルと容易に統

合できる地形自動解析コンポーネントを作成することが望ましい。

また、手法や手段を問わず、地形解析におけるスケール問題は、分布型モデルの共通課題の一つとしてまだ解決されておらず、更に検討しなければならない。例えば、これまでにモデルのパラメータなどに及ぼすグリッドサイズの影響は盛んに検討され、多数の成果が得られているが^{1),2),3),4),5),6)}、解析条件などの制限により明らかにされていない点も多い。また、グリッドに分けられた流域を更に支川毎或いは矩形ブロックのサブ流域に分割することが必要である場合、その分割方法や分割程度(レベル)・スケールの影響についての検討はまだ遅れている。流域分割方法の一つである、Pfafstetter法^{7),8)}は既に市販のGISソフトウェアにも応用されているが、分布型水文モデルに導入する場合の適用性や長短所などはまだ明

らかにされていない。また、流域分割レベルの影響に関しては、Wood らの研究⁹⁾などがあるが、まだ検討例は少なく未解明の点も多い。特に、筆者らが開発してきた分布型モデルBTOPMC (Block-wise use of TOPMODEL with Muskingum-Cunge method)^{10),11)} においては、この流域分割程度が流出発生機構の支配要因の一つとなり得ることから、その流出解析に及ぼす影響を明らかにすることが必要である。

そこで本研究では、BTOPMCを大流域へ適用する場合の問題点の一つである流域分割スケールの影響について検討することを目的とし、以下のような検討を行う。第一に、BTOPMCにおける地形解析手法の充実から始め、Pfafstetter流域分割法を分布型モデルへ導入する際の手法を開発しメコン等複数の実流域へ適用することにより、その手法の有効性並びに分割手法そのものの実用上の問題点と対策などを検討する。第二に、Pfafstetter法を取り込んだBTOPMCを用いて、富士川と那珂川流域をそれぞれ一連の異なる分割レベルで自然型サブ流域に分割し、洪水と年間流出シミュレーションを行い、流出解析結果に及ぼすサブ流域スケールの影響を検討し、流出解析結果の安定性とモデル応用上の簡便さが両立できるような分割レベルの探索を試みる。

2. BTOPMCモデルにおける地形解析の概要

BTOPMCは大流域の水循環を解析するために開発されてきた物理的分布型モデルである。その主なコンポーネントとして、流出発生にはTOPMODEL¹²⁾が使われており、河道水の追跡にMuskingum-Cunge法が用いられる。また、BTOPMCにおける地形解析は、その結果が流出の追跡計算に使われるのみならず、流出の発生にも直接利用されており、モデルのシミュレーション結果に重要な影響を及ぼすと考えられる。ここでBTOPMCの地形解析サブモデルの概要と現状について簡単に述べる。

(1) 擬河道網の作成

BTOPMCにおける擬河道網の精度と信頼性を向上するために、筆者らはDEMにおけるグリッドサイズの拡大方法、数式を用いた窪地全自動処理方法の提案、落水線の与え方の比較、それぞれ擬河道網特性量と流出解析への影響などについての検討を行った。詳細については文献13)を参照されたい。

(2) 地形指標と平均地形指標の算定

TOPMODEL及びそれに基づいたBTOPMCにおける地形特性の定量評価方式として、まず、次の(1)式に示すようなグリッドごとに地形指標 $\lambda(i)$ が定義され、これは任意地点での集水能力を表す(本文では、地形影響しか考えないため、モデルにおける土壌—地形指標の代わりに、

地形指標を検討対象とする)。

$$\lambda(i) = \ln(a_i / \tan \beta_i) \quad (1)$$

ここで、 i , a (m), $\tan \beta$ はそれぞれグリッドの番号、グリッドの単位等高線当たりの集水面積、及びグリッドにおける落水線の勾配である。 $\lambda(i)$ の計算方法については、単方向法と多方向法¹⁴⁾ともBTOPMCに取り入れてあるが、実用上多数の場合は単方向法が使われている。また、 $\lambda(i)$ の値は算定方法とDEM分解能で決めた定数であるが、 $\lambda(i)$ の空間分布パターンに及ぼすグリッドサイズの影響はQuinnら¹⁴⁾が検討している。

さらに、もうひとつの地形特性評価量として、流域におけるある空間範囲内(ここでは、サブ流域内)の地形指標 $\lambda(i)$ の平均値を、平均地形指標 λ_{av} と定義している。この λ_{av} と上述した $\lambda(i)$ は、次の(2)式のように、各グリッドにおける飽和不足分 $S(i)$ ¹⁰⁾の計算に使われ、この中間変数 $S(i)$ を通して各セルの表面流出と地下流出の計算に直接関わっている^{10),11)}。

$$S(i) = \{S_{av} + m(\lambda_{av} - \lambda(i))\}^+ \quad (2)$$

ここで、 m は土壌飽和浸透量係数の通減率で、 S_{av} は λ_{av} と同じ空間範囲内の平均飽和不足分である。 $\{ \}^+$ は $\{ \}$ 内の値が負の場合は0とする。

また、この平均地形指標 λ_{av} は、流出発生量に影響を及ぼすだけでなく、既知流域の λ_{av} 、土壌飽和浸透量係数と未知流域の λ_{av} を用いて、未知流域の土壌飽和浸透量係数の推定にも用いられている⁴⁾。

(3) 流域の分割

上述した流出発生量に関わる平均地形指標 λ_{av} の値がその算定範囲に左右されるため、その空間範囲の形状とスケールが非常に重要となる。これまでのBTOPMCモデルにおいては、地形、土壌と被覆などの不均一性を総合的かつ簡単に考慮できるようにするために、 λ_{av} の値を矩形ブロックごとに算定している。この矩形ブロック分割方法は、GIS情報との対応上の利便性などの利点があるものの、分割形状とサイズの決定に客観性が不十分である。本研究では、分割形状の客観性が相対的に高いPfafstetter法をBTOPMCに導入することにより、分割スケールが流出解析に及ぼす影響を検討する。

3. Pfafstetter流域分割法の分布型モデルBTOPMCへの取込みとその問題点、対策

(1) Pfafstetter分割法の概要と適用手順の開発

Pfafstetter coding systemは、Pfafstetter(1989)により提案された流域分割法と番地付け法である。基本的に、対象流域は図-1に示すように常に9個の小流域に細分される。河口から源流への順で、本川沿いの4つの最大支流にそれぞれ2,4,6,8の番号を与え、支川サブ流域と定義する。それらの支川と本川との4個の合流点間の

領域は、それぞれ番号3,5,7を与え、残りの最上下流に位置する二つの区域に9と1の番号を付ける。その5個の奇数領域は残(中間)流域と定義される。前回分割で得られたサブ流域を再分割する場合の番号付け法として、再分前の番号を1~9のいずれかで一桁増やす。

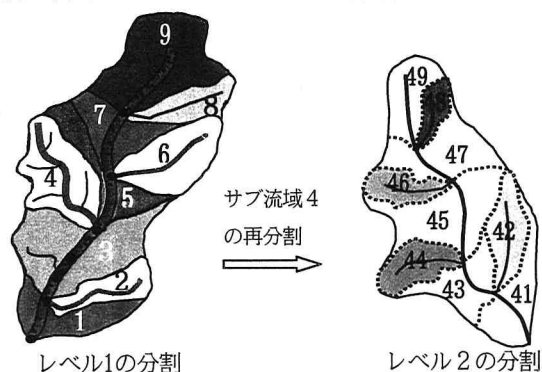


図-1 Pfafstetter流域分割法概念図

この方法は、他の手法と比べ流域番号の桁数が少ないこと、サブ流域の番号から相対地理位置が分かること、流域の自然境界を表現できること等の特徴があるが⁷⁾、その方法をどのように効率よく分布型モデルに活用するか、特にその方法の分割結果による地形特性量の妥当性などは、まだ十分に検討されていない。本研究では、次のような適用手法を開発することにより、Pfafstetter法をBTOPMCモデルと組み合わせる。具体的には、

- 1) DEM、窪地の全自動処理¹³⁾と落水線理論により、対象流域の擬河道網データを作成し入力値とする。
- 2) 必要に応じて分割程度を決める：最大分割レベル(対象となる全流域を走査して繰り返しサブ流域に分割する最大走査回数)及び、分割を終了させる時のサブ流域の最大許可面積(閾値)をパラメータとして入力する。
- 3) 分割する前の対象全流域(流域番号は0)を9個のサブ流域に分割する(一次あるいはレベル1の分割)。まず、河口から逆追跡し本川を認定する。次に支川サブ流域出口の認定と番号付けを行う。さらに、集水面積で本川に流入する4つの大支川を特定し、本川への最近流出点を各支川の出口とし、それぞれの河口までの距離により、下流から上流への順番で、その4箇所にそれぞれ2,4,6,8の番号を付ける。その後、流域出口の特定と番号付けを行う。対象流域の河口番地及び、その4つの支川と本川との合流点を、5個の残流域の出口とし、河口から上流への順番で、1,3,5,7,9の番号を、それぞれその5個のグリッドに与える。最後にサブ流域の特定を行う。確定された9個の出口に付いた番号をサブ流域番号とする。落水線の流れ方向の追跡により、各グリッドはどちらのサブ流域に属するかを判定する。
- 4) 閾値で判断し再分割が必要とされる全てのサブ流

域を検出し、ステップ3)と同じ手法で次の分割レベルに入り該当サブ流域を再分割する。ただし、再分割による各下位サブ流域の番号は、次の(3)式で与える：

$$N_r = 10 N_0 + N_c \quad (3)$$

ここで、 N_r は再分割後の流域番号で、 N_0 は再分割前の流域番号、 N_c は今回の分割における新出口番号(1~9)である。レベルnまで分割された領域における各サブ流域の番号はn桁になる。同時に、閾値より大きい4つの支川がないため再分割が不可となるサブ流域も判定して記憶する。

- 5) 分割終了時サブ流域総数 N_t の計算：

$$N_t = 9 + 8(N_{ir} - N_{in}) \quad (4)$$

ここで、 N_{ir} はこれまで再分割されたサブ流域総個数で、 N_{in} は再分割が不可となるサブ流域総個数である。

- 6) 得られた各サブ流域の平均地形指標、面積、平均勾配と平均標高、本川長さなどの地形特性量を算定しBTOPMCの入力データとして出力する。なお、必要に応じて全流域から任意サブ流域の擬河道網などの地形特性量を抽出することも可能である。

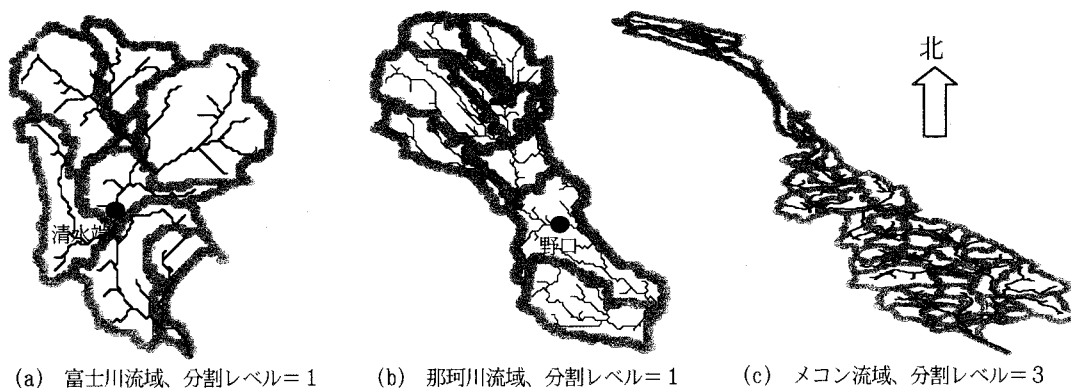
(2) 実用上の問題点と対策

ここで、上記の適用手法で構築した流域分割ツールを、メコン河、中国の黄河、インドネシアのKali Brantas、日本の富士川と那珂川などの大中流域へ適用することにより、本手法の有効性を確認した。一部の分割概要と結果を表-1と図-2に示す。

表-1 5流域の分割概要と結果

	メコン	黄河	Kali Brantas	富士川	那珂川
全流域の面積(1/km ²)	76.53	95.87	1.097	0.35	0.327
閾値(cells)	2000	2000	800	500	500
実分割レベル	3	4	3	3	2
サブ流域個数	57	177	73	49	33
平均面積(km ²)	13427.0	5416	150.2	71.4	100.1
再分割不可サブ流域	0	0	0	0	0
最小サブ流域面積(cells)と種類	6 残流域	2 流残域	1 残流域	6 残流域	4 残流域
最大サブ流域面積(cells)	1520	1986	750	492	500

一方、これらの適用において、つぎのような実用上の問題点も明らかになった。一つ目は、可能分割程度である。Pfafstetter法においては分割対象領域に常に4つ以上の支流(擬似河道)が必要であるため、実河道網構造やDEM分解能の影響でこの基本条件が満足できない場合は、再分割不可の領域が出て来る可能性がある。この現象は表-1には表されていないが、閾値を大きくするに伴っていずれの対象流域にも検出された。これは、この



(a) 富士川流域、分割レベル=1 (b) 那珂川流域、分割レベル=1 (c) メコン流域、分割レベル=3

図-2 BTOPMCモデルに取込んだPfafstetter流域分割法の適用例

分割法固有の短所だと言えるが、実用上の対策としては、高分解能DEMを使うこと及び閾値を小さく設定することにより、再分割不可の領域を減少することは可能である。二つ目の問題点は、サブ流域面積の過大と過小問題である。実水系構造特性や、分割レベルと閾値の設定などの制限のため、図-2に示すようにサブ流域特に残流域が過大あるいは過小だと考えられるケースがよく見られる。分割程度が粗い場合はこれを無視しても良いが、細かく分割して平均地形特性量を算定する時は、平均といった意味を保つためには、閾値を2セル以上に設定する必要がある。

4. 流域分割程度が流出解析に及ぼす影響

本章では、Pfafstetter法とBTOPMCモデルを用いた流域分割程度の流出解析に及ぼす影響について述べる。

(1) 対象地点、解析ケース、使用データと流域分割

まず、解析地点は、図-2の(a)と(b)に示すように、富士川における清水端と那珂川における野口であり、それぞれ2143 km²と2200 km²の流域面積を有する。解析ケースは、清水端の1993年9月洪水、1990～1991の年間流出、及び野口の1989年8月洪水である。降雨データは全てAMeDAS時間降雨量で、洪水と年間流出の実測流量データはそれぞれ時間単位と日単位である。地形解析に使う標高データは、入手しやすさと大中流域のデータ量を考慮した上で、GTOPO30の30" × 30" のDEMとした。また、本研究の重点は流域分割程度の影響であることから、各サブ流域に適用したモデルパラメータは、分割程度を問わず、土壌等の空間分布不均一性を無視し流域を分割せずに同定したものとした。清水端の場合は洪水と年間流出ともに同じパラメータを使用した。

流域分割の範囲は解析地点の上流域のみである。分割程度については、清水端はそれぞれレベル0から6まで(1～249サブ流域)、野口はレベル0から最大のレベル7まで(1～153サブ流域)分割した。分割程度による地形解析結果の違いについては、分割レベル毎に平均地

形指標 λ_{av} そして(2)式における $\lambda_{av} - \lambda(i)$ の空間分布が違っていると推測できる。本研究では、流出発生量の計算の視点からみれば、 $d\lambda(i) = \lambda_{av} - \lambda(i)$ が地形特性の影響を包括的に反映していることから、その $d\lambda(i)$ を有効地形指標と定義する。図-3は、清水端の集水域における分割レベル毎の有効地形指標の非超過確率分布曲線である。この図より、有効地形指標の空間分布は流域の分割レベルに左右されることが分かり、そして流出解析結果も分割レベルに影響されることが推測できる。

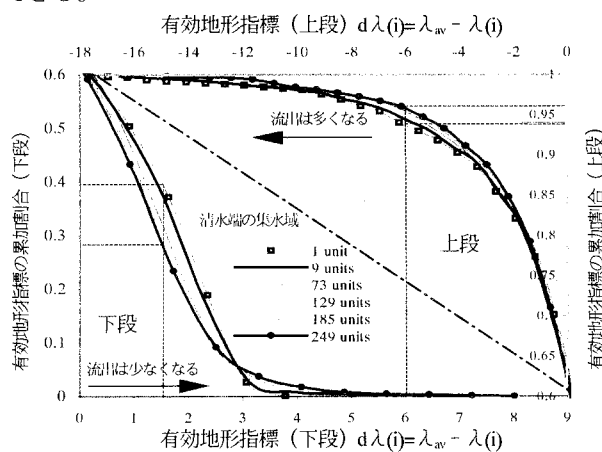


図-3 有効地形指標の非超過確率分布に対する流域分割レベルの影響(富士川における清水端の上流域; もとの図の $d\lambda(i)=0$ の左右を切断し重ねて、見やすいように変形してある)

(2) シミュレーションの結果と考察

ここで、各分割ケースに対応したハイドログラフを図-4、図-5と図-7に、モデル応答評価指標を図-8と図-9にまとめて示す。各図においては、分割スケールの変化に伴い、流出発生に計算に使われる各グリッドセルの有効地形指標が変化する可能性があるが、それ以外に、モデルパラメータ等の計算条件はすべて同じである。これらの図より、流出解析結果に及ぼす流域分割程度の主な影響は、次の通りである。

a) 各流量ピークの到達時刻への影響

流域分割レベルの増加に伴う到達時刻の違いはほぼ

無視できる。洪水の場合は、前後1時間ステップのずれがありうるが(図-4)、年間流出の場合は、ピークの高低を問わずその違いは現れなかった(図-5)。

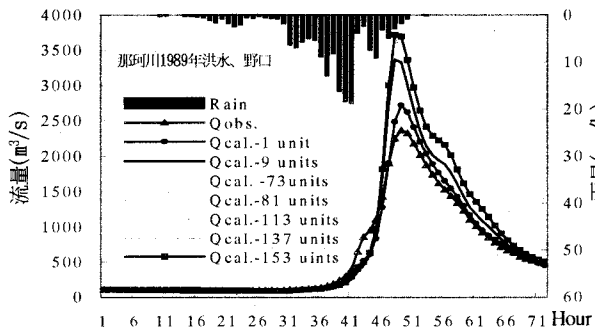


図-4 流域分割程度が洪水解析への影響(那珂川)

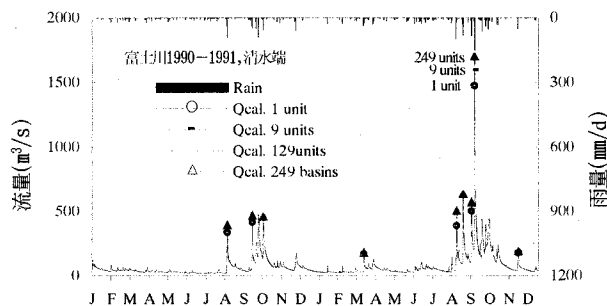


図-5 流域分割程度が年間流出解析に対する影響

b) 流出量に対する影響

まず、各時刻の流出量が分割程度に影響される。図-4、図-5、図-6と図-7からわかるように、高い降水強度の時、或いは湿潤期間において多くの場合は、分割程度が高いほど、計算流量が高くなる傾向がある。一方、図-6のように、少雨の乾期においては、多雨期間と逆の傾向となり、分割程度の低いほうの流出が高くなる。

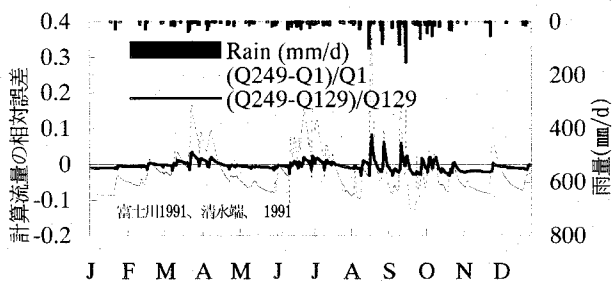


図-6 雨季と乾期における流出量に及ぼす地形分割の影響

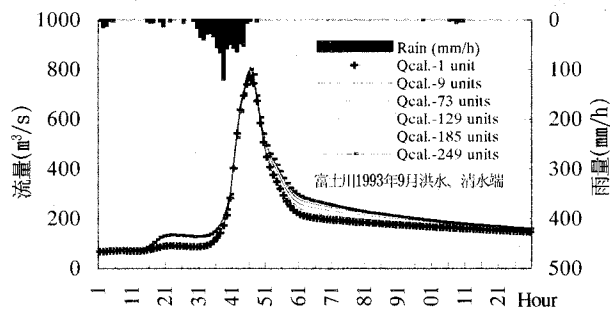


図-7 流域分割程度が洪水解析への影響(富士川)

また、その二つの傾向により、洪水の流出総量は分割程度の増加に伴って増加するが、年間流出の総量の違いは無視できるほど小さい(図-8、図-9)。

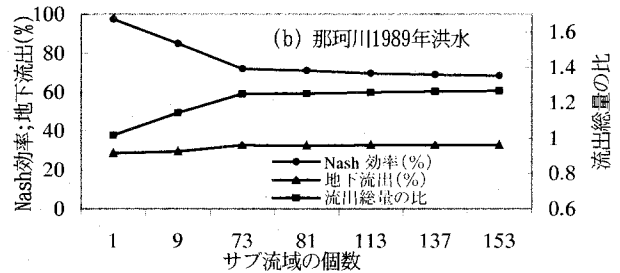
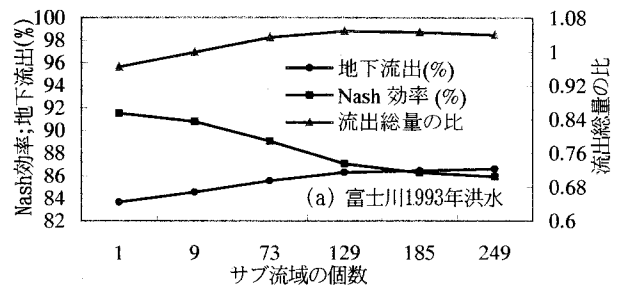


図-8 流域分割程度と洪水流出解析結果の安定性

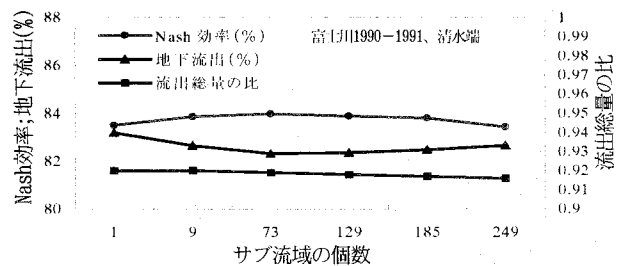


図-9 流域分割程度と年間流出解析結果の安定性

c) 流出成分に及ぼす影響

降水が多い期間は、流域を細かく分割するほど、地下水流出の割合がやや高くなる(3~7%)(図-8)。乾期においては、表面流出がほぼゼロであるため、流出量の低減は地下水流出の減少を意味する(図-6)。このような流出成分の増減交替の累加結果として、年間流出成分への影響はあまり見えなかった(<1%)(図-9)。

d) 流域応答過程への影響

図-10に示すように、分割によるサブ流域の個数が増えるほど、流域における各時刻での飽和メッシュの割合(飽和率)は少しずつ低くなり、これは表面流出成分の減少を示唆している。

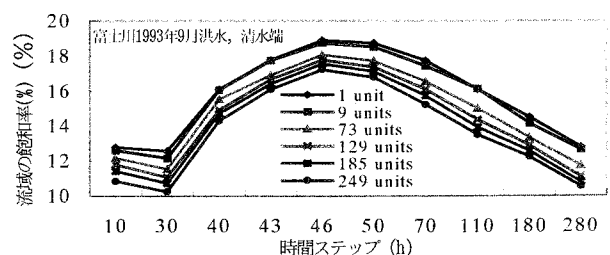


図-10 流域分割レベルと流域における飽和率との関係

e) 安定分割レベル

上記の分析より、流域の分割レベルが流出解析における流出量、流出成分と応答過程のそれぞれに影響を及ぼすことが分かった。しかし、図-6、図-8、図-9と、図-4、図-5、図-7のハイドログラフから見ると、流域がある程度まで分割されると、それ以上更に細かく分割されても、流出量と成分などの違いは無視できるほど小さくなる。即ち、流域分割程度が流出解析結果に与える影響を無視できるような分割レベルあるいは安定した分割程度が存在する。その値については、図-6、図-8と図-9によって、実用上のデータ処理量を減らすことと、ある程度の余裕を見込むことにより、サブ流域の平均面積が全面積の150分の1ぐらいまでとなる分割程度が適当と考えられる。

f) 原因分析

今回の検討では、諸計算条件において流域分割程度のみが異なることから、以上の諸影響及び安定スケールが存在する原因は、図-3のような有効地形指標の空間分布パターンの違いにあると考えられる。例えば、分割程度が高くなるに伴って、飽和しやすいメッシュがやや減少し(図-3の上段)、飽和率が下がり表面流出成分もやや低くなり、分布密度の高い有効地形指標の低下(図-3の下段)と雨季の地下水への補充との総合作用で地下水流出と流出総量は上がる。また、安定スケールとその前後の分割レベルの有効地形指標の分布がほぼ同じであるため、流出解析の結果も大体同じになる。

5. 結論

本研究では、流出解析における流域分割スケールの影響に関する検討を行った。まず、Pfafstetter流域分割法を分布型モデルに取り込むための手法を開発し、その有効性を検証し、適用における問題点と対策を明らかにした。これによりBTPMCモデルにおける流域分割方法が拡張された。また、BTPMCモデルを用いた流出解析により、流域分割程度が流出解析における到達時刻、流出量、流出成分、流域の応答過程などを与える影響が明らかになり、安定的な分割スケールが提案された。なお、大規模の対象流域を、サブ流域の平均面積が全面積の約1/150程度まで分割すれば流出解析結果が安定するという結果は、これからのBTPMCを用いた大流域水文シミュレーションと、分布型モデルにおけるパラメータの物理的与え方の研究への活用が期待できる。また、この安定的な分割スケールは、流出発生機構において考慮すべきユニットのスケールと見ることでもでき、流出素過程の面からみても興味深い結果であると言える。

今後は、DEMの分解能が30" × 30" より低い場合の

流域分割程度の影響、モデルパラメータの流域分割スケール依存性とスケール間の移転性などに関する研究が必要である。

参考文献

- 1) Saulnier, G.-M., Obled, C. and Beven, K.: Analytical compensation between DTM grid resolution and effective values of saturated hydraulic conductivity within the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes*, Vol.11 (9), pp. 1331-1346, 1997.
- 2) Quinn, P. F., Beven, K. J.: The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5, pp. 59-79, 1991.
- 3) Braun, P., Molnar, T., Kleeberg, H.-B.: The problem of scaling in grid-related hydrological process modeling. *Hydrological Processes*, Vol.11, 1219-1230, 1997.
- 4) Franchini, M., Wendling, J., Obled, c., and Todini, E.: Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL, *J. Hydrol.*, Vol.175, pp. 293-338, 1996.
- 5) Horritt, M. S., Bates, P. D.: Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, Vol.253, pp. 239-249, 2001.
- 6) 砂田 憲吾, 青木 謙治, 藤村 拓夫: 分布型流出モデルの応答に及ぼす流域要素スケールの影響について, 水工学論文集第45巻, pp. 145-150, 2001.
- 7) Verdin, K. L. and Verdin, J. P.: A topographical system for delineation and codification of the Earth's river basins, *Journal of Hydrology*, Vol. 218, pp. 1-12, 1999.
- 8) Yang, D., Musiak, K., Kanae, S. and Oki, T.: Use of the Pfafstetter Basin Numbering System in Hydrological Modeling, 水文・水資源学会 2000 年発表会要旨集, pp. 200-201.
- 9) Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K. and Band, L.: Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, Vol.102, pp. 29-47, 1988.
- 10) Takeuchi, K., Ao, T. Q., and Ishidaira, H.: Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of a large ungauged basin. *J. of Hydrological Sciences*, Vol.44 (4), pp. 633-646, 1999.
- 11) 敖 天其, 石平 博, 竹内 邦良: ブロック型TOPMODEL及びM-C追跡法による分布型流出解析モデルの検討, 水工学論文集第43巻, pp. 7-12, 1999.
- 12) Beven, K. J. and Kirkby, M. J.: A physically based, variable contributing area model of hydrology. *Hydrological Science-Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69, 1979.
- 13) 敖 天其, 竹内 邦良, 石平 博: 大河川の擬河道網作成における問題点およびその流出解析への影響, 水工学論文集第45巻, pp. 139-144, 2001.
- 14) Quinn, P. F., Beven, K. J., and Lamb, R.: The $\ln(a/\tan.)$ index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes*, Vol.9, pp. 161-182, 1995.

(2002. 9. 30受付)