

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560508

研究課題名（和文） スケール依存性のない分布型流出解析モデルの構築

研究課題名（英文） Construction of scale-independent distributed hydrological model

研究代表者

舛谷 敬一（MASUTANI KEIICHI）

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授

研究者番号：30173743

研究成果の概要（和文）：一般に、降雨分布から河川流量を算出する分布型流出解析では、空間の最小単位、すなわち数値標高地図の解像度を変えると、モデルパラメータを再調整しなければならないという欠点がある。本研究では、流出発生（降雨が地表面を流れたり地中に浸透したりした後に河道に流入するまでの過程）のモデルとしてTOPMODELを選び、その簡単な粗視化法を提案して、このスケール問題を解決した。我々が既に作成済の河道水追跡の粗視化法と組み合わせると、スケール依存性のない分布型流出解析モデルが完成する。

研究成果の概要（英文）：Distributed hydrological models usually have cell-size dependence: model parameters must be readjusted when the digital elevation model (DEM) resolution is changed. In this work, we propose a simple scaling algorithm for TOPMODEL, a conceptual rainfall-runoff model. Combining it with the routing method, we finally obtain a scale-independent distributed hydrological model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：擬河道網、流出解析、地形指標、粗視化、DEM、TOPMODEL

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年のコンピュータの急速な進歩に伴い、分布型モデルによる流出解析が広く行われるようになり、その解析対象の大きさも小流域から大陸・地球規模まで様々である。しかし、モデルの空間解像度（最小領域単位）を変更したときに、同一の解析対象に対してもモデルパラメータを再調整しなければならないという問題、いわゆるスケール問題が解決すべき重要な課題として残されたまま

であった（図1）。

(2) 既往の研究では、空間解像度を変化させたときに最適パラメータがどのように変化するか、どのパラメータをどのように補正すれば誤差をなくすことができるか等について、コンピュータ・シミュレーションを用いて数値的に調べることに重点が置かれてきた。すなわち、解像度変更にとまらぬ最適パラメータ変化の原理的な探求や、スケール問

題が生じないような分布型モデル構築の追求には大きな努力が払われてきたとは言いがたい。このような状況下で、我々は数年前から、大規模流域にも適用できる、スケール依存性のない分布型流出解析モデル構築の可能性を探ってきた。

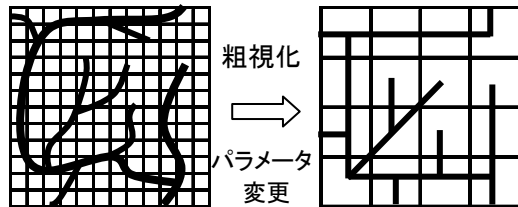


図1 分布型モデルのスケール依存性

(3) 分布型流出解析モデルの重要な構成要素に数値標高モデル (DEM) がある。また、この DEM から作成される格子状の河道網 (擬河道網) も、DEM の高精度化・高解像度化に伴って精密なものが作られるようになった。しかしながら、その高解像度 DEM や高解像度擬河道網を分布型モデルにいつでもそのまま利用できるわけではない。地理情報システム (GIS) からの降雨量・土地利用情報などの入力情報の解像度や各種サブモデルの解像度との整合性、大流域および全球といった広大な対象を扱う場合の計算処理量 (時間) の増大とその対処に必要なコンピュータの能力等、考慮しなければならない問題が多い。つまり、高解像度で得られる情報を空間的に粗視化 (スケールアップ) することがこれらのモデルを有効に利用するうえで必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

(1) 典型的な分布型水文モデルは主として流出発生モデル (降雨が地表面を流れたり地中に浸透したりした後に河道に流入するまでを扱う) と河道水追跡モデル (河道に入った水の上流から下流への流れを扱う) から構成される。この2つのサブモデルはともに DEM と河道網を用いることから、スケール問題の解決には2つのサブモデルの DEM 解像度依存性を解決する必要がある。

(2) 河道水追跡に関しては、近年我々は高解像度の擬河道網をどのような低解像度にもスケール変換できる簡単な方法 (最大集水河道追跡法) を提案し (舛谷ら、水文・水資源学会誌 19, pp.139-150 (2006))、その方法により作成した粗視化擬河道網を使って改良 Muskingum-Cunge 法による河道水追跡計算を行い、スケール問題解決への有効性を検証

した (舛谷・馬籠、水文・水資源学会誌 21, pp. 242-247 (2008)。舛谷・馬籠、水文・水資源学会誌 22, pp. 294-300 (2009))。なお、その際には、流出発生に関するスケール問題と分離するため、降雨は直ちに河道に入るものとした。高解像度から低解像度へ粗視化した後の擬河道網は、高解像度擬河道網の形状を良く再現するだけでなく、高解像度擬河道網の河川特性量 (河道長及び標高差、勾配等) を異なる解像度の擬河道網であっても精度良く保持するので、河川流量に対する擬河道網スケール変換の影響がほとんど無いことが示された (図2、図3)。

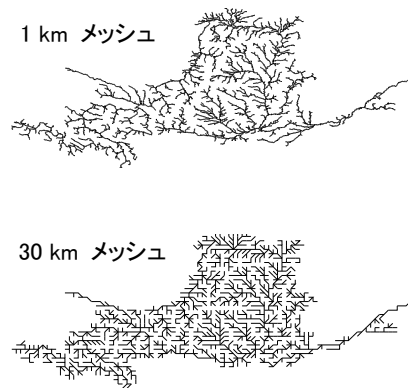


図2 黄河の河道網の粗視化

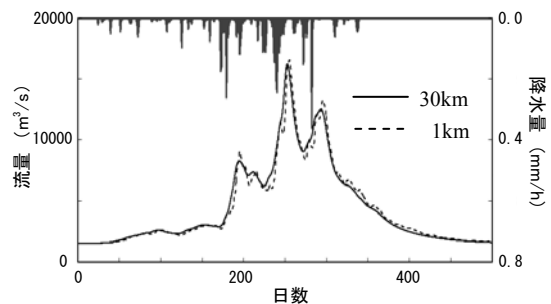


図3 鄭州 (黄河) での河川流量の例

(3) 本研究では、流出発生に関するスケール問題に取り組む。流出発生モデルの粗視化法を提案し、これを擬河道網の粗視化法及び改良 Muskingum-Cunge 法による河道水追跡 (舛谷・馬籠、2009) と結びつけて、最終的にスケール依存性のない分布型流出解析モデルを完成させる。

## 3. 研究の方法

(1) 最初に、擬河道網の粗視化について残っ

ていた問題を検討する。我々の提案したスケール変換では、高解像度から低解像度へ粗視化した後の擬河道網が高解像度擬河道網の河川特性量（河道長及び標高差、勾配等）を精度良く保持することは定量的に確認できたが、高解像度擬河道網の形状を再現することの確認は目視判定に頼っていた。本研究では、粗視化した擬河道網が高解像度擬河道網の形状をどの程度よく再現しているのかについて、定量的な指標を与えて擬河道網の類似性を判定する方法を開発する。その際、通常行われるように弾性マッチング（基準となる画像パターンに一致するように画像パターンを変形させ、その変形の程度を以って類似性を判定する方法）等を使って擬河道網の形状を直接比較するのではなく、位相幾何学的な観点を取り入れる。

(2) 我々の開発した擬河道網粗視化法を用いて、いくつかの空間解像度で全球の擬河道網を整備し、水文・水資源等にかかわる多くの研究者に提供できるようにする。

(3) 流出発生に関するスケール問題に関しては、例として、小流域スケールでの降雨-流出モデルである分布型 TOPMODEL を用いる。降雨が河道に流入するまでの流出発生過程で重要な要素は土壌中の水分量であり、これに密接に関係する地形指標（斜面勾配や上流面積の大きさで決まる）のスケール依存性を研究の中心に据える。まず初めに、粗視化倍率が小さく、低解像度 DEM から直接計算して得られる地形指標が使用可能な場合について調べる。次いで、粗視化倍率が大きく、低解像度 DEM が各地点の斜面勾配を表すことができなくなり、低解像度 DEM から得られる地形指標が使えなくなるような場合について検討を進める。なお、具体的な解析対象領域として早川（富士川支流）を選ぶ。

#### 4. 研究成果

(1) 河道網の類似性に関する定量的な解析法を提案した（舩谷ら、2010）。

木状図形である河道網の外周を河口から反時計回りに辿って分岐点を順次探索し、河道網特徴量として分岐点  $i$  の位置座標  $(X_i, Y_i)$  とそこでの上流分岐枝の集水面積  $S_i$  を一列に並べる（図4）。2つの河道網に対して、このような1次元データをそれぞれ作成した後、特徴量の違いを表わす分岐点間距離を

$$D_{ij} = (|X_i - X_j| + |Y_i - Y_j|) + k(|\log S_i - \log S_j|)$$

と定義し、対応する分岐点全てについて分岐点間距離の和  $\sum D_{ij}$  を求める。なお上式では、分岐点の実空間距離と集水面積  $S$  の常用対数の差という2つの量を適当な重み  $k$  で加え

合わせた。また、集水面積の対数を使うのはそのままでは値の範囲が広すぎて極端な変動がでること、河道網に関するホートン則によれば河道位数と集水面積にべき乗則があること、位数を使う河道網の解析が多いこと等を考慮したためである。

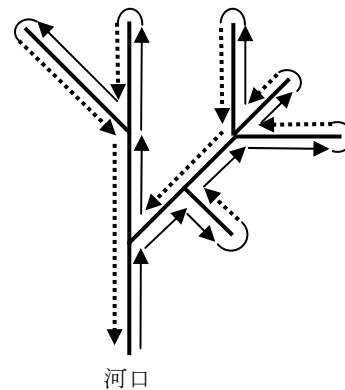


図4 河道網の特徴量の抽出位置

この分岐点間距離の和  $\sum D_{ij}$  を、音声認識で開発されたダイナミック・プログラミング (Dynamic Programming) を使った DP マッチングを使って最小化し、分岐点数で除して正規化したものを河道網間距離、すなわち非類似度とする。DP マッチングは比較するデータの個数が違う場合にも有効であるという利点をもつ。

この方法を使って、高解像度 DEM から作成した河道網と、それを粗視化した河道網の類似性を調べた。目視による定性的な河道網の類似性と、この方法による定量的な類似性の指標が概略一致することが認められた。また、非類似度の定義に使われる、分岐点間の実空間距離と分岐枝の集水面積に関する相対的な重みについては、最終的な類似性の判定にはあまり影響がないことも分かった。

ここで提案した方法は、流出解析において重要な情報である分岐点の特徴量（位置や上流集水面積）を擬河道網の間で比較するとい

うもので、計算量も少なく類似性判定にも有効である。

(2) 擬河道網粗視化法である最大集水河道追跡法を使って数種類の空間解像度で全球の擬河道網を整備し、全球洪水解析システム (GFAS-Streamflow) プロトタイプを作成や、アジアの主要な大規模流域 (74 流域) を対象にした長期間 (44 年間) の流出解析の実施に利用できるようにした。この成果については、アジア太平洋水文水資源学会第5回会議 (ハノイ、2010) において報告した。

(3) 本研究で用いるTOPMODELでは、地形指標

$$\gamma_i = \ln\left(\frac{a}{\tan\beta}\right)_i$$

の空間分布を使って地下水面の局地的な変動を記述する。上式で、 $a$  は地点  $i$  から排出される等高線単位長さ当たりの上流流域面積、 $\tan\beta$  はその位置での斜面勾配を表す。

通常、地形指標はDEMを使って求められ、その大きさはDEM解像度に強く影響を受ける。したがって、DEM解像度はTOPMODELによる水文計算にも大きな変化をもたらす。この流出発生過程におけるスケール問題については、粗視化倍率の大小によって分けて議論する。

① 粗視化倍率が小さく、粗視化後のDEMの解像度がある程度高いときには、流域面積と勾配を直接使って求めた地形指標は、地形斜面形状の性質を表現していると考えられるからその地形指標をそのまま使うことができる。既往の研究により、TOPMODELのパラメータを適当に変更することでDEM解像度にあまり依存しない流出計算が可能となることが知られていた。すなわち、DEM解像度が変わると地形指標の分布も変わるが、その分布形の変化は全体としての移動のみであり、これを土壤の飽和透水量係数  $T_0$  を調整することだけで相殺することができる。この方法は簡便であるが、その根拠は不明であった。我々は、これを明確にした。ここでは、DEMが持つ全格子点数  $n_{\max}$  が十分に大きいとして、簡単に説明する。

あるDEMにおいて、ある格子点での上流格子数を  $n$  で表す (DEMが  $N$  倍に粗視化してあれば、上流面積は  $nN^2$  に比例する)。格子数  $n$  の確率分布  $f(n)$  について、流路網にフラクタル性を仮定して、べき乗則が成り立つとすれば、

$$f(n) = (\alpha - 1)n^{-\alpha}$$

となり、その累積確率分布は

$$F(n) = \int_n^{n_{\max}} f(n)dn$$

$$= n^{1-\alpha}$$

となる。また、勾配  $\tan\beta$  に関しても、べき乗則を仮定し、同じ上流面積をもつ格子に関する勾配の対数の平均値  $\langle \ln(\tan\beta) \rangle$  について、次式が成り立つとする ( $B$  は定数)。

$$\langle \ln(\tan\beta) \rangle = \ln(B(nN^2)^{-\delta})$$

この条件下で、地形指標  $\gamma$  の累積確率関数は以下のようになる ( $L$  は最小格子長)。

$$\ln F(\gamma) = \frac{1-\alpha}{1+\delta} (\ln(B/L) - (1+2\delta)\ln N + \gamma)$$

このことから、DEMの粗視化により地形指標の分布が全体として移動し、この影響を次式のような飽和透水量係数  $T_0$  の調整で相殺できることが分かる。

$$\ln(T_0^N/T_0^1) = (1+2\delta)\ln N$$

我々は、数か所の流域について上記の仮定や結論が成立することを具体的に示し、議論の有効性を明らかにした。図5に那珂川上流域の例を示す。図中の曲線はDEMから求めた地形指標分布であり、直線は上記の近似直線である ( $\alpha=1.47$ ,  $\delta=0.21$ )。50mメッシュのDEMを基準とし、 $N=2, 5, 10$ 倍の粗視化を行った。

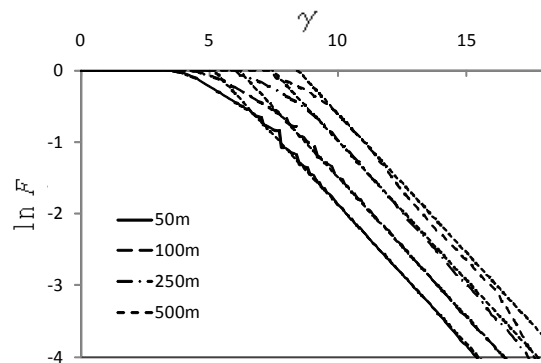


図5 那珂川上流での地形指標分布

② 粗視化倍率が大きく、格子長を数km以上に粗視化した低解像度DEMについては、詳細な地形斜面形状を表現しないことは明らかであり、流域面積と勾配を直接使って求めた地形指標をTOPMODELに使うことはできない。つまり、上に述べたパラメータを変更する方法は適用できない。そこで本研究では、粗視化倍率が大きい場合に適用可能な新しい方法を開発した。具体的には、粗視化後も元になる高

解像度DEMで求めた地形指標を利用する方法を提案し、これをTOPMODELに組み込むことでDEM解像度に依存しない流出発生モデルを作った。

本研究で採用したTOPMODELは小流域スケールでの降雨 - 流出モデルであるので、大規模流域に適用するため、まず全体の流域をいくつかのサブ流域に分割して、このサブ流域についてTOPMODELを使う。

TOPMODELによる流出解析では、各地点の地形指標と流域内での地形指標の累積確率分布が必要である。まず、高解像度DEMで各小格子の地形指標及びその累積分布を求める。粗視化した後の低解像度DEMにおける大格子の地形指標については、その値を新たに計算し直すのではなく、大格子に含まれる多数の小格子の地形指標の情報をそのまま利用する。つまり、その大格子中の地形指標の累積分布を使う。このとき、前に述べた河道網のフラクタル性が役立つ。大格子中でも地形指標の累積分布がべき乗則を満たすことが確認できるので、大格子での累積分布をわずか2つのパラメータで表すことができる。すなわち、各大格子の地形情報を1つの地形指標で表すのではなく、この2つのパラメータをもつ分布関数で表す。このとき、サブ流域全体の累積分布には高解像度DEMで作成したものをそのまま使える。

このようにして、流出発生に関して原理的にスケール依存性のないTOPMODELができるので、これを擬河道網の粗視化法及び改良したMuskingum-Cunge法による河道水追跡と結びつけて、最終的にスケール依存性のない分布型流出解析モデルを完成させる。

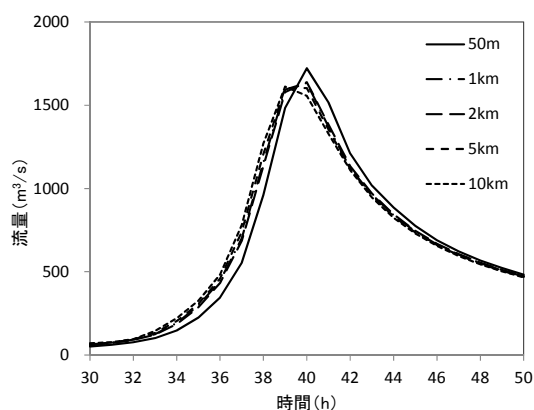


図6 早川での流出解析の例

図6には、早川流域（富士川支流）で、50mメッシュの高解像度DEMを1~10kmメッシュに粗視化したときのハイドログラフの計算例を

示した。粗視化しても基本になる50mDEMによるものとはほぼ一致し、スケール依存性は極めて弱いことが分かる。なお、図に見られる違いは河道水追跡の部分から生じるものであり（舛谷ら、2008）、50mDEMから得られる河道勾配が空間離散化のために不自然に大きな変動をもつことや、大格子中の降雨を1点に集中させるので河道水が大格子内部で主河道へ流入するのに要する時間を考慮していないことに起因する。これらの点については改良の余地が残されている。

(4) 通常、空間解像度を変えたときにモデルパラメータを適当に調整すれば、分布型流出モデルの計算結果を変えないようにすることは不可能ではない。しかし、この方法では、解析対象の違いやスケールの違いをその時々で考慮する必要がある。それに対し、本研究で作成したスケール依存性のない分布型モデルであれば、一般的で、汎用的な利用が可能になる。また、同一の解析対象領域についても、小流域で行った高解像度で詳細な解析を、大流域での低解像度の解析に無理なく接続して利用することができる。つまり、高解像度でも低解像度でも同じ基盤の上での流出解析が可能になる。

(5) 今後は、実測流量と計算値を直接比較し、パラメータを決定して、モデル全体の有効性や精度を調べるという作業を当面の課題とする。また、擬河道網の粗視化だけでなく、降雨量・土地利用情報などの入力データのスケール変換法も開発する必要がある。さらに大陸規模の大流域への適用を視野に入れれば、ダムや湖沼、分流等をDEM以外のデータを利用して擬河道網に取り込み、更に粗視化法を改良しなければならない。最後に、水資源問題が喫緊の課題となっている、黄河やメコン河などの東アジアの大規模河川に対して、このモデルを実際に適用し、その有効性を検証したい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 舛谷敬一、馬籠純、DEM解像度に依存しないTOPMODELによる流出解析、水文・水資源学会誌、査読有、26巻、2013、26-37
- ② 舛谷敬一、馬籠純、TOPMODELにおける地形指標のDEM解像度依存性への対策、GIS—理論と応用、査読有、19巻、2011、91-101

- ③ 舛谷敬一、石平博、馬籠純、解像度の異なる河道網の類似性解析法、GIS—理論と応用、査読有、18巻、2010、63—71

〔学会発表〕（計3件）

- ① Shiro HISHINUMA, Kuniyoshi TAKEUCHI and Jun MAGOME, Application of a Distributed Hydrological Model in the Karun River Basin, Iran, PUB SYMPOSIUM 2012, "Completion of the IAHS decade on Prediction in Ungauged Basins and the way ahead", Oct. 23-25, 2012, Delft (Netherlands)
- ② Jun MAGOME, Kazuhiko FUKAMI and Kuniyoshi TAKEUCHI, Development of the "Global Flood Alert System-Streamflow (GFAS-Streamflow)" Prototype, Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources, Nov. 8, 2010, Hanoi (Vietnam)
- ③ Jun MAGOME, Hironori INOMATA and Kazuhiko FUKAMI, Kuniyoshi TAKEUCHI, Long term daily discharge simulation for Asian major river basins using gridded precipitation dataset APHRODITE, 日本地球惑星科学連合, 2010年5月28日, 幕張メッセ

〔その他〕

ホームページ等

<http://titan2.cee.yamanashi.ac.jp/~2kou/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

舛谷 敬一 (MASUTANI KEIICHI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授

研究者番号：30173743

### (2) 研究分担者

馬籠 純 (MAGOME JUN)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教

研究者番号：70377597

### (3) 連携研究者

なし