

GISを結合した複合流域モデルにおける一般化貯留関数法の総合化

Integration of Generalized Storage Function Method by Coupling GIS based on Distributed Basin model

早川 博¹

Hiroshi HAYAKAWA

¹北見工業大学工学部社会環境工学科准教授

要 旨

近年, GISの整備が進み, 従前より分解能の高いGISデータが公開されてきた. 流出解析においても空間的に変動している流域の植生や土地利用などの影響を取込むことのできる分布型流出モデルの利用が進んでいる. しかしながら, 洪水流出予測に分布型流出モデルを適用するには計算処理能力の問題があり, 集中型流出モデルが利用されている. また, 降雨観測では気象レーダの整備も進み, 時・空間変動する降雨予測も信頼性が高まっている. このような状況の下, 集中型と分布型流出モデルの利点を生かして, 集中型流出モデルの貯留関数法を流域分割した単位流域に分布・配置する複合流域モデルが星ら(2001)によって開発された. この複合流域モデルでは, 各単位流域の同定すべき未知定数をすべて同じと仮定して, 未知定数の同定作業の軽減・簡略化を図っている. 本研究は, 詳細なGISデータをこの未知定数を同定作業なしに一義的に決定することを目的にして, 一般化貯留関数法の未知定数と流域特性量の関係を調べている. その結果, 単位流域毎に未知定数が変動する場合の流出への影響の程度を明らかにすると共に, 一般化貯留関数法の総合化に向けた課題を示している.

《キーワード : GIS ; 複合流域 ; 一般化貯留関数法 ; 総合化》

1. はじめに

河川流域は降水から流出への変換の場であり、流域が果たす最も重要な機能である。この降雨－流出現象は、変換の場である流域の地形、地質、植生などの流域特性と、入力である降雨強度の時間的変動や空間的な分布特性に密接に関係している。近年、社会・経済活動の発展に伴って地球温暖化の傾向がみられ、我が国においても全国各地で集中豪雨が頻発し、洪水による多大な被害を被っている。洪水災害を軽減するには河道の築堤、護岸などのハード施設対策と洪水予測に基づく洪水予警報などのソフト対策があり、いずれの場合もある程度の精度を持った洪水の再現・予測が不可欠であり、そのために種々の流出モデルが開発・提案されてきた¹⁾。流出モデルは流域を単一のモデル単位として扱う集中型モデル（概念モデル）と流域を分割して各部分ごとに計算しそれらを組み合わせる分布型モデルに大別できる¹⁾。

集中型モデルである木村の貯留関数法²⁾は、流出現象の非線形性を遅れ時間の概念を導入することによって巧みに表現し、計算手法も容易なことから河道計画の基本高水流量の算定や洪水予測に多用されてきた。しかし、流出モデル定数の物理的意味が不明確であるため、地表面の雨水流出機構を水理学的にモデル化したKinematic Wave（等価粗度）法と貯留関数法とを関連付け、流域特性量ないし降雨特性量と流出モデル定数の定量化が図られている³⁾⁴⁾⁵⁾。

一方、分布型モデルは流域を分割し、各部分ごとに流域特性量や降雨特性量の空間分布を流出モデル定数に反映させることができる。近年、国土交通省国土政策局では国土数値情報、国土画像情報、街区レベル位置参照情報などのGISで利用可能なデータを公開⁶⁾しており、流域の標高値、土地利用などの流域特性量を入手して詳細なGIS解析が可能になっている。また、地球資源観測衛星「ランドサット」のTM画像、ETM画像が一部無償で公開⁷⁾されており、流域の正規化植生指数（NDVI）データを算出して植物の生育量把握などに利用されている⁸⁾。このように流域のGISデータの整備が進み、流出解析においても流域特性量の空間的な分布特性と流出モデル定数との関係を明らかにできる解析環境が整ってきた。ただし、本研究では流域を分割し、地表流、中間流、地下水流などの降雨流出機構毎にモデル化する本来の分布型モデルではなく、流域を分割してそれぞれのサブ流域を集中型モデルで表現し、それらを空間的に組み合わせることによって、水文学の空間的な変動を考慮する複合流域モデルを採用する。具体的には星らが単一流域を対象に開発した集中型の一般化貯留関数法（星モデル）を分布型モデルに拡張した複合流域モデルである⁹⁾。

この複合流域モデルによる一般化貯留関数法では、各単位流域の流出モデル定数の同定を簡略化するために、未知パラメータは単位流域毎に一定値をとるものと仮定している。しかしながら本来、単位流域の流域形状や地質、植生、土地利用等は空間的に変動しているために、この仮定が成り立たない場合が多々ある。したがって、本研究の目的は詳細なGIS解析から複合流域モデルの未知パラメータを、流域特性量のGISデータから一義的に決定しようとするものである。その結果、水文観測データが未整備の流域における流出解析（PUB）が可能になり、更には土砂流出や栄養塩類の流出モデルを組み込むことによって、例えば、ArcSWAT¹⁰⁾と同様なGISを結合した統合型流出モデルの開発が可能となる。

2. 複合流域モデルにおける一般化貯留関数法

星らが開発した一連の一般化貯留関数法には、①有効雨量を用いた貯留関数法、②損失項を含む貯留関数法、③地下水流出成分を含む貯留関数法がある⁹⁾¹¹⁾¹²⁾。本研究では流出率と有効雨量の算定が不要で観測雨量と観測流量を直接取り込むことのできる②の損失項を含む貯留関数法を対象として、詳細なGIS解析から得られた流域特性量と複合流域モデルの未知パラメータを明らかにする。なお、この結果は①と③の貯留関数法にも適用できる。この損失項を含む貯留関数法は参考文献⁹⁾に詳述されているので、ここでは本研究で取り扱う流域特性量との関連について以下に述べる。

損失項を含む貯留関数法は、図-2.1に示す斜面域での地表面の雨水流出過程を水理的にモデル化したKinematic Wave法を集中化した貯留関数法⁴⁾であり、主観的な要素が入り易い直接流出成分と基底流出成分の分離作業を必要とする有効雨量を用いず、タンクモデルと同様に観測雨量を用いる、図-2.2に示す蒸発散や窪地貯留などの損失機構を付加した1段タンク型の貯留関数法である⁹⁾。この場合の貯留量の連続式と貯留方程式は以下のようになる。

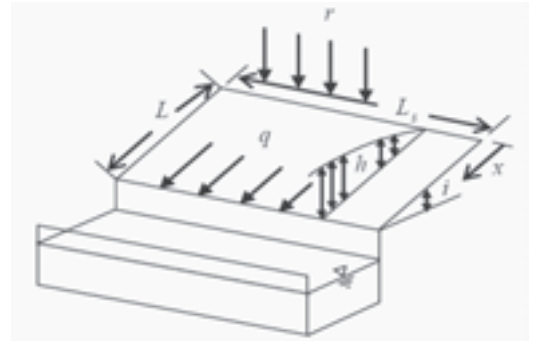


図-2.1 斜面におけるKW法の貯留関数法への集中化⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= r - q - b + q_b \\ s &= k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ b &= k_{13}q \\ q_b &= q_{in} \exp(-\lambda t) \end{aligned} \right\} (2.1)$$

ここで、 s ：貯留高(mm)， r ：観測雨量(mm/h)， q ：流出高(mm/h)， b ：損失高(mm/h)， q_b ：基底流出高(mm/h)， q_{in} ：初期流出高(mm/h)， k_{11}, k_{12} ：貯留係数， p_1, p_2 ：貯留指数， k_{13} ：損失係数， λ ：基底流出高の逓減係数である。式中の貯留係数 k_{11}, k_{12} と貯留指数 p_1, p_2 は、表面流が卓越する比較的大きな出水を対象としてManning則を適用すると、次のように集中化できる。

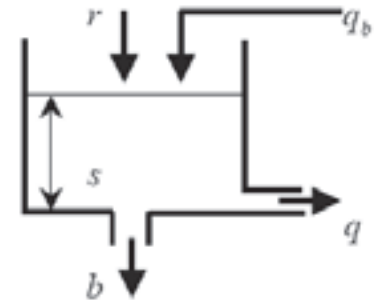


図-2.2 損失項を含む貯留関数法⁹⁾

$$\left. \begin{aligned} q &= \alpha h^m \quad (\text{Manning則 } m = 5/3, \alpha = \sqrt{i}/n) \\ k_{11} &= \frac{m}{m+1} (10^{3m-6}/3.6)^{1/m} (L/\alpha)^{1/m} = 7.28 \times 10^{-2} (n/\sqrt{i})^{0.6} L^{0.6} \\ k_{12} &= \frac{m^{1/5}}{10} \left(\frac{m+1}{m} \right)^2 k_{11}^2 (\bar{r})^{2/m-1-p_2} = 0.2835 k_{11}^2 (\bar{r})^{-0.2648} \\ p_1 &= 1/m = 0.6 \\ p_2 &= (1/m)^{3/2} = 0.4648 \end{aligned} \right\} (2.2)$$

ここで、 h ：水深， i ：斜面勾配， L ：斜面長， L_s ：斜面幅， n ：等価粗度係数， \bar{r} ：平均雨量強度(mm/h)である。貯留係数 k_{11} は斜面地形量と地被状態によって定まる等価粗度係数の流域特性量に依存し， k_{12} は斜面と降雨特性量に依存する。星らは更に斜面域の貯留係数 k_{11} を流域規模にスケールアップし，斜面長 L を流域面積 A で置き換えるために流域を長方形に単純化し，流域面積 A と河道長 L_s のHackの関係式を適用して

$$L = 0.6W, A = WL_s, L_s = 1.35A^{0.6} \quad (2.3)$$

と仮定し，貯留係数 k_{11} を次式に変形している⁴⁾。

$$k_{11} = 2.8235 \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{0.6} A^{0.24} \quad (2.4)$$

この貯留係数を流域規模にスケールアップすると，貯留係数の未知定数は以下のように C_{11}, C_{12} となる。

$$\left. \begin{aligned} k_{11} &= C_{11} A^{0.24}, \quad \text{ここで, } C_{11} = \omega \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{0.6} = \omega \times f_c \\ k_{12} &= C_{12} k_{11}^2 (\bar{r})^{-0.2648} \end{aligned} \right\} (2.5)$$

ここで未知定数 C_{11} は、等価粗度係数 n と斜面勾配 i がGIS等から与えられるとすると、斜面規模から流域規模にスケールアップする際に用いる式(2.3)のHackの関係式は、流域面積 A と河道長 L の平均的な関係から得られたものなので、Hackの関係式から外れるような、例えば細長い特異な形状の流域に対しては、この流域形状等による補正係数 ω が未知量となる。つまり、この補正係数には流域スケールの効果も含むことになる。一方、貯留係数 k_{12} の未知定数 C_{12} は、流域特性量の影響が k_{11} に含まれると考えると、 C_{12} は降雨特性量の影響が強く関与していることになる。また、損失項を含む貯留関数法では、図-2.2に示す1段タンク底部からの損失高 b を算定する損失係数 k_{13} を

$$C_{13} = k_{13} - 1 \quad (2.6)$$

とおき、 C_{13} を未知定数とする。この C_{13} は流域の土壌や地質条件に規定される浸透能や湿潤度などの場の状態や、流域の蒸発散などによる降雨損失が関係している。

本研究では流域特性の空間的な変動特性を考慮するために、流域を任意の単位流域に分割した複合流域モデルを適用する。流域を分割する方法として、①流域を等間隔のメッシュに分割する方法(メッシュ分割)と、②流域の河道網構造に基づいて分割する方法(河道網分割)がある。メッシュ分割の場合は、単位流域の形状は全て同じであり、その流域サイズはメッシュサイズに依存する。メッシュ分割はGISのラスタデータ(メッシュ形式)との対応付けが容易であるが、実際の河道網構造と無関係に流域分割されるので、本研究の複合流域モデルには適さない。一方、河道網分割の場合は、単位流域の形状、大きさは河道網構造に依存しており、実河道の本川・支川の合流に対応した分割手法なので、本研究の複合流域モデルに適している。

この複合流域モデルは時・空間的に分布する降雨量の受け皿である単位流域を図-2.3に示すように河道で連結した樹枝状の河道網構造をしている。河道網分割手法では、単位流域のモデル定数は単位流域毎に異なっており、単位流域数が多くなるとモデル定数の同定作業は不可能である。そのため、星らの複合流域モデルでは、単位流域の流域面積 A_i の違いだけを考慮し、各単位流域の未知定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} は全て同じと仮定して、この未知定数を同定している⁹⁾。それに対し、本研究では各単位流域の未知定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} はそれぞれ異なることを前提として、 C_{11} の等価粗度係数 n と斜面勾配 i を与え、GISデータを利用して流域形状から規定される補正係数 ω を求める。ここで、河道網分割手法の場合、単位流域の最適な流域スケールを与える指標として早川¹³⁾は流域特性量が均質と見なせる流域サイズを検討し、国土数値情報⁹⁾の表層地質と地形分類を組み合わせることで流域が均質とみなせる流域面積、約5(km²)を導いている。本研究でもこの指標を参考にして河道網分割手法による流域分割を行っている。

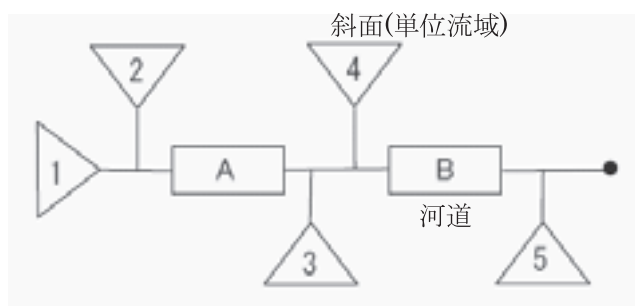


図-2.3 複合流域モデルの流域・河道ネットワーク⁹⁾

また、複合流域モデルにおける単位流域からの流出量を運搬・合成する河道モデルは、図-2.4に示すように横流入量のない場合の河道流を前述の流域モデルと同様にKinematic Wave法を集中化した貯留関数法である⁹⁾。集中化した貯留関数法の基礎式は、河道内の貯留量 S_s と流量 q_s の連続式と貯留方程式が以下ようになる。

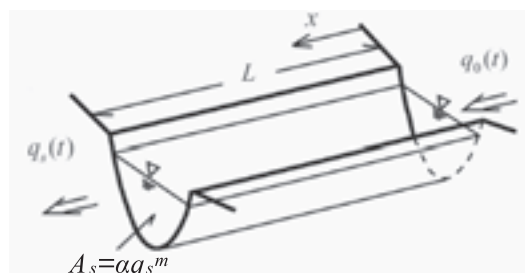


図-2.4 河道モデル⁹⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S_s}{\partial t} &= q_o - q_s \\ S_s &= k_3 q_s^{p_3} + k_4 \frac{d}{dt} (q_s)^{p_4} \\ A_s &= \alpha q_s^m \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ここで、 q_o ：上流端流入量、 k_3, k_4 ：河道の貯留係数、 p_3, p_4 ：河道の貯留指数である。対象河道区間の河道断面積 A_s と流量 q_s の関係式 $A_s = \alpha q_s^m$ は予め不等流計算等で河道定数（ α と m ）を求めておき、更に上流端流入量 q_o を三角形波形で近似すると、河道の貯留係数 k_3, k_4 、貯留指数 p_3, p_4 の近似式が提案されている^{9),12)}。なお、この近似式の詳細は参考文献¹²⁾を参照されたい。本研究では、河道定数（ α と m ）はGIS解析ソフトArcGIS¹⁴⁾上の拡張ツールであるArcHydroツール¹⁵⁾を用いて解析した河道地形データから算出する。

3. 複合流域モデルにおける一般化貯留関数法の総合化

本研究では一般化貯留関数として損失項を含む貯留関数法を複合流域モデルに適用して、流域特性量と単位流域の未知定数 C_{11}, C_{12}, C_{13} との関係を明らかにして一般化貯留関数の総合化を検討する。その際に流域をどの程度の単位流域スケールに分割してから複合流域モデルの総合化を図るべきか、が問題となる。そこでどの程度まで単位流域を細分化していくと、単位流域の流域特性量が均質とみなせるのか、また、単位流域の流域スケールの違いが流出特性へ及ぼす影響はどの程度なのか、について検討した。

3.1 単位流域スケールと地形特性量の均質性

複合流域モデルを構築する場合に、単位流域として流域をどの程度まで細分化すれば良いのかが問題となる。本研究では分割された単位流域の流域特性量が流域一様で均質とみなせる流域スケールを明らかにする。単位流域の流域特性量が均質であると、流出モデルの未知定数を流域特性量から決定することができ、モデルの総合化が容易となる。流域特性量の解析はArc GISを用い、ここではオホーツク海に注ぐ二級河川、藻琴川を対象とした解析結果を示す。

(1) 単位流域の抽出

流域を単位流域に分割する方法は、前述の河道網構造に従って分割する河道網分割手法である。流域の河道網構造はArcGISの拡張機能Spatial Analysis¹⁶⁾の水文解析ツールを利用し、流域の標高データ（DEM 10mメッシュ¹⁷⁾を12.5mに補間）を基にして擬似河道網を作成する。図-3.1が藻琴川流域のDEMデータを表示した図であり、図中の青線が2万5千分の1地形図の河道を示している。山里観測所で水位と雨量を観測しているの、本研究の解析範囲は山里観測所までの流域（流域面積160.3km²）とする。

擬似河道網は河道の発端となる水源の定義によって、細密な河道網から主要な河道だけからなる粗い河道網を任意に作成することができる。本研究では水源となる地点より上流の流域面積、寄与面積を水源の閾値として与え、図-3.2は寄与面積が1, 3, 5, 10 (km²)の場合の擬似河道網を2006年の土地利用状況¹⁸⁾に重ねて示している。寄与面積が大きくなる従い粗い河道網となり、それに則して単位流域が流域分割されている。藻琴川流域は大半が畑地と森林で占められ、単位流域の土地利用が一様となるには更なる流域分割が必要であると見て取れる。

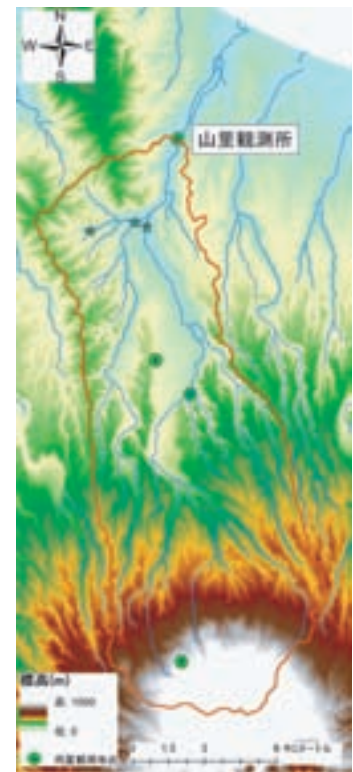


図-3.1 藻琴川のDEMデータ

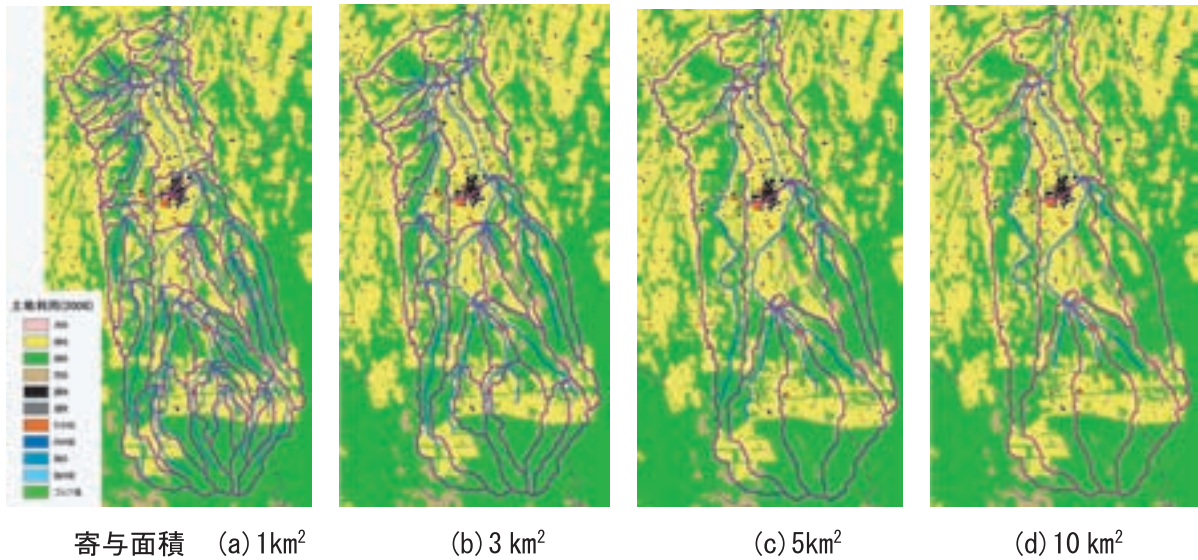


図-3.2 擬似河道網

(2) 単位流域の流域特性量

流域特性量として、①植生（環境省2万5千分の1植生図¹⁹⁾）、②地質（産業技術総合研究所統合地質図データベース5万分の1地質図²⁰⁾）、③土地利用（国土数値情報100m細分メッシュデータ¹⁸⁾）を対象に、単位流域に占める流域特性量の割合を算出した。表-3.1～表-3.3は藻琴川流域における各流域特性量の占める割合を示している。植生分類では、畑地と草地の合計が、土地利用分類の畑地に対応している。植生分類と土地利用分類から流域の大半が森林と畑地で占められており、特に畑地の利用率が周辺の流域より高い。地質は非アルカリ火砕流、いわゆる軽石や火山灰が流域の70%近くを占めている。

表-3.4は図-3.2に示すように各単位流域に占める流域特性量の第1位の項目の割合を示している。流域を分割して単位流域のサイズが小さくなるに従い単位流域の特性量が一つの特性量で占める割合を増加させているものの、単位流域のサイズを約2(km²)まで細分化しても、その割合

表-3.1 植生(1999年)

	割合(%)
カラマツ	30
ササ類	0
マツ類	7
ヨシ原	1
宅地・工場	1
水域	1
水田	0
畑地	30
草地	13
落葉低木	5
落葉高木	10
針広混交林	2
高山植物	0

表-3.2 地質分類

分類	割合(%)
鮮新世(N3)の海成または非海成堆積岩類	0
前期更新世(Q1)の非アルカリ苦鉄質火山岩類	9
後期更新世(Q3)の中位段丘堆積物	2
中期中新世-後期中新世(N2)の非アルカリ苦鉄質火山岩類	2
後期更新世(Q3)の低位段丘堆積物	5
中期更新世(Q2)の火山岩類(非アルカリ火砕流)	1
河川・湖沼・海域など	1
後期更新世-完新世(H)の非アルカリ火砕流	0
後期更新世-完新世(H)の海成または非海成堆積岩類	11
後期更新世(Q3)の火山岩類(非アルカリ火砕流)	67
後期中新世-鮮新世(N2)の海成または非海成堆積岩類	1

表-3.3 土地利用(2006年)

分類	割合(%)
水田	0
畑地	43
森林	50
荒地	3
建物	2
道路	1
その他	1
内水域	0

は地質の75%程度が最大で、植生の様に空間的な変動が大きい特性量は50%を占めるに止まっている。なお、単位流域を流域特性量の元データサイズ、例えば土地利用の100mメッシュサイズまで細分化すれば、当然ながら単位流域は特定の特性量に均質化されることになる。

以上の検討から、単位流域における流域特性量の均質化は流域スケールをより小さくすれば可能であるものの、単位流域の流域スケールが小さくなると、数多くの単位流域から構成される複合流域モデルを構築することになり、実際の流出解析に適用するのは現実的ではない。したがって、次節では単位流域サイズをどの程度に細分化すべきかを流出モデルの応答特性から検討する。

3.2 単位流域の流域スケールと流出特性

複合流域モデルにおいて、単位流域の流域スケールをどの程度にするかは、同一流域を対象としても流出特性に単位流域スケールの影響が現れる。本研究で適用した損失項を含む一般化貯留関数法では、式(2.2)に示すように貯留係数 k_{11} が単位流域の斜面勾配 i と等価粗度係数 n 、そして斜面長 L の関数になるが、流域スケールは斜面長 L に強く関係し、次いで斜面勾配 i が関係し、等価粗度係数 n は地表面の被覆状態によって定まるので、流域スケールの影響は受けないと考えられる。そこで、星らは流域スケールの指標として単位流域面積 A を斜面長と関連付け、式(2.5)に示すようにモデル未知定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} を流域スケールに依らず一定と仮定して、最適なモデル定数を同定した⁹⁾。ただし、観測流量に適合するようにモデル定数を調整する場合、斜面長 L に応じて等価粗度係数 n の値も変化することが指摘されている²⁰⁾ので、本研究では未知定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} は流域スケールの影響を受けるものと考え、流域特性量と C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} の対応関係を検討し、流出特性が大きく変化する流域スケールを、一般化貯留関数法の最適な単位流域スケールと判断する。

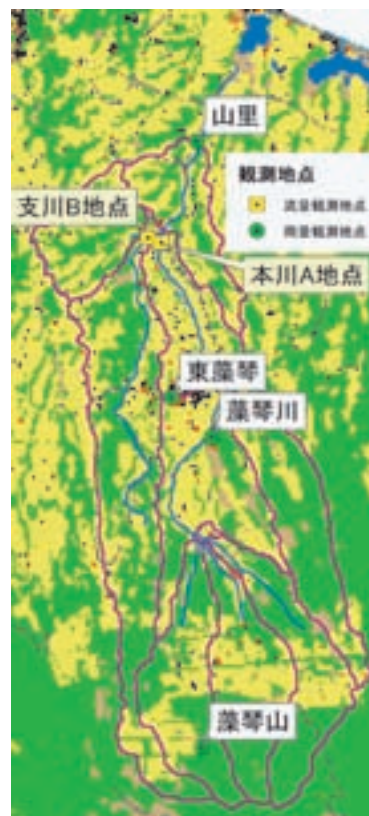


図-3.3 藻琴川の流量計算地点

(1) 各単位流域のモデル定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} が一定の場合

損失項を含む一般化貯留関数法による複合流域モデルの未知定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} が単位流域の流域スケールに依らず、各単流域で同じ値を与えた場合の最適値を求める。寄与面積が3、5、10(km²)の3ケースについて、藻琴川流域の既往最大流量(山里観測地点 $Q=111.6$ m³/s、網走建設管理部 $H-Q$ 式より算出)を観測した2006年10月7日~14日の流域平均雨量247.4(mm)の出水を対象に、図-3.3に示す山里観測地点の観測流量について未知定数を最適同定した。未知定数の同定結果を表-3.5に、図-3.4に同定されたハイドログラフを示す。未知定数を各単位流域で一定値としても図のように再現結果は良好である。しかしながら、図-3.3に示す山里観測地点より上流の位置する水位観測

表-3.5 未知定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} の同定結果

寄与面積(km ²)	C_{11}	C_{12}	C_{13}
3	28.9643	0.2235	1.7519
5	20.2432	0.3492	1.7093
10	20.2870	0.2986	1.6833

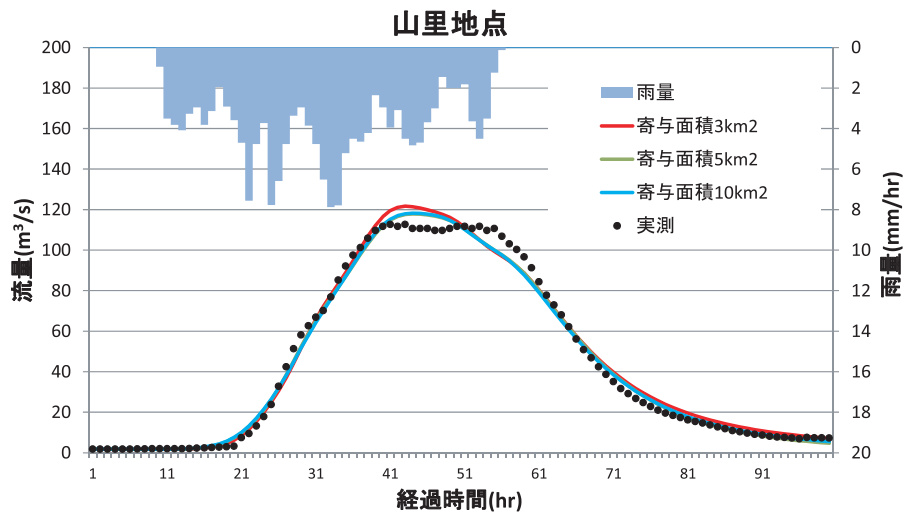


図-3.4 山里観測地点の流量で同定した結果

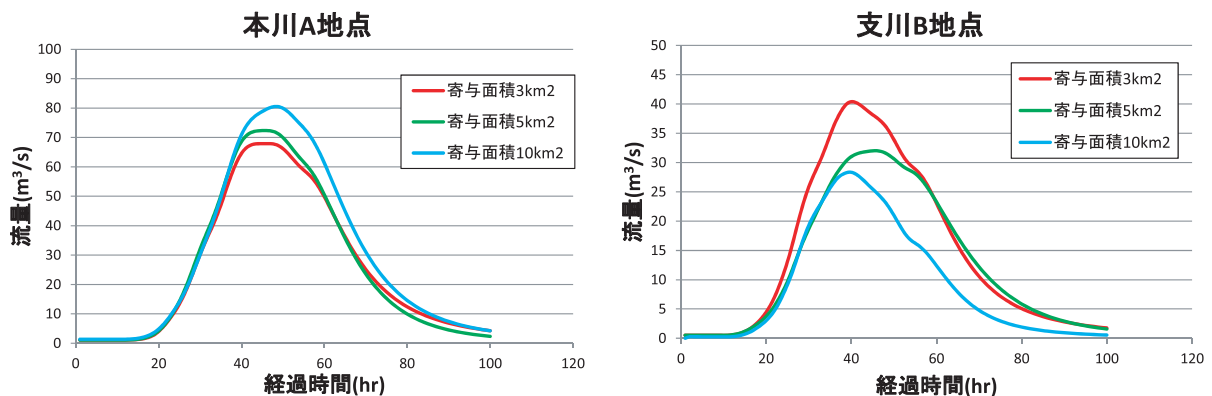
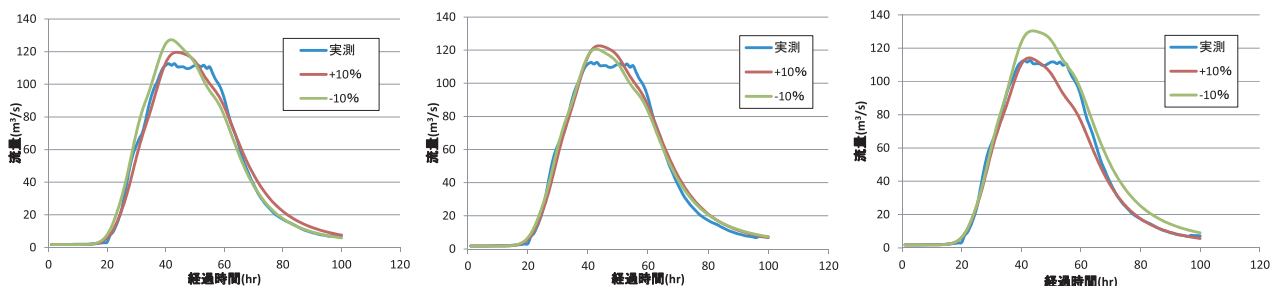


図-3.5 流域内の本川A地点と支川B地点のハイドログラフ

地点、本川A地点と支川B地点におけるハイドログラフを示したのが図-3.5である。寄与面積3 (km²) の場合、本川A地点の流量が少ない分、支川B地点の流量が多く、寄与面積10 (km²) の場合は逆に本川A地点の流量が多く、支川B地点の流量が少なくなるようにモデル未知定数 C_{11}, C_{12}, C_{13} が最適同定されている。この結果は、各単位流域でモデル定数を同じ値とした影響と考えられる。

(2) 単位流域のモデル定数 C_{11}, C_{12}, C_{13} の感度分析

単位流域のモデル定数 C_{11} は式(2.5)に示されるように、単位流域の斜面勾配 i と流域形状の補正係数 ω は流域スケールの影響を受けると考えられるので、未知定数 C_{11}, C_{12}, C_{13} の感度分析を行った。ここでは、同定した C_{11}, C_{12}, C_{13} の値を基準に、各々 $\pm 10\%$ 変動させた場合の流出への影響を図-3.5~3.7に示す。その結

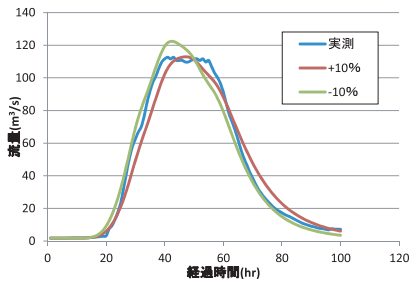


(a) C_{11} を $\pm 10\%$, C_{12}, C_{13} は固定

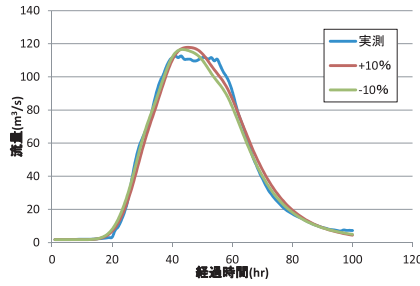
(b) C_{12} を $\pm 10\%$, C_{11}, C_{13} は固定

(c) C_{13} を $\pm 10\%$, C_{11}, C_{12} は固定

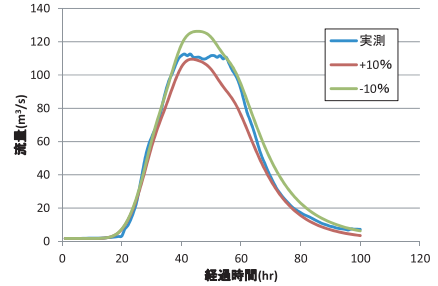
図-3.5 寄与面積 3km²の場合



(a) C_{11} を±10%, C_{12}, C_{13} は固定

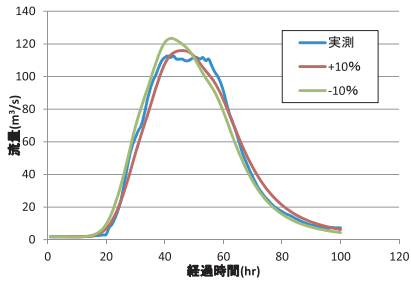


(b) C_{12} を±10%, C_{11}, C_{13} は固定

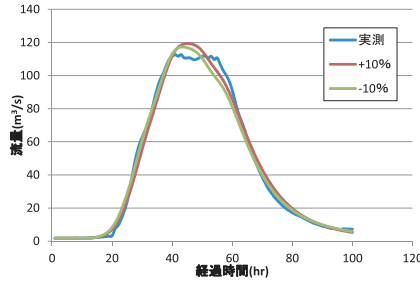


(c) C_{13} を±10%, C_{11}, C_{12} は固定

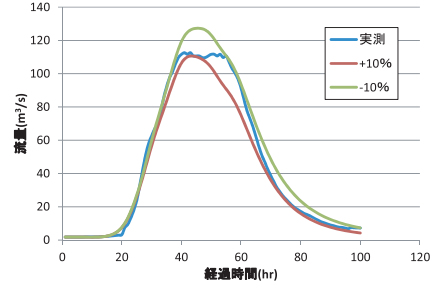
図-3.6 寄与面積 5km²の場合



(a) C_{11} を±10%, C_{12}, C_{13} は固定



(b) C_{12} を±10%, C_{11}, C_{13} は固定



(c) C_{13} を±10%, C_{11}, C_{12} は固定

図-3.7 寄与面積 10km²の場合

果、流域スケールの影響を受けるであろう C_{11} と降雨損失に関係する C_{13} は±10%の変動によってピーク流量に差が生じているものの、降雨の時・空間変動の影響を受けると考えられる C_{12} は流出に対する影響は小さい。したがって、 C_{12} は流域スケールの違いによらず一定値と考えられる。

(3) 単位流域のモデル定数 C_{11}, C_{13} と流域特性量の関係

単位流域のモデル定数 C_{12} は流域スケールに関わらず一定値と仮定し、 C_{11}, C_{13} を流域特性量と関連付けて流出特性の違いを検討する。式(2.5)より

$$C_{11} = \omega \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{0.6} = \omega \times f_c, \quad \text{ここで, } f_c = \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{0.6} \quad (3.1)$$

C_{11} は斜面勾配 i と等価粗度係数 n からなるフリクションファクター²²⁾ f_c と、流域形状の補正係数 ω の関数となる。星らは河道長と流域面積の関係を表すHack式から流域形状の補正係数 ω を一定とおいて、フリクションファクター f_c が変動するものとして f_c の最適値を求めていた²³⁾。本研究では流域のGIS解析から単位流域の斜面勾配 i を計測し、等価粗度係数 n を表-3.6のように土地被覆状態として土地利用区分に応じて与える²³⁾と、フリクションファクター f_c は算出できることになる。なお、各単位流域の等価粗度係数は、単位流域に占める土地利用区分の面積比を重みとする等価粗度係数の荷重平均によって算定した。その結果、各単位流域のフリクションファクター f_c の平均値は寄与面積が異なる場合でも $f_c = 1.0 \sim 1.3$ の範囲であった。したがって、単位流域の流域形状の補正係数 ω にKinematic Wave法から貯留関数法へのモデル定数の集中化の効果を含むものと解釈できる。そこで、

表-3.6 土地利用区分と等価粗度係数 n

水田	畑地	森林	荒地	建物	道路
2.0	0.30	0.60	0.30	0.05	0.02
その他の用地	内水域	海浜	海水域	ゴルフ場	
1.00	3.00	3.00	3.00	0.10	

(1)で同定した C_{11} を標準値と仮定して、各単位流域の補正係数 ω を逆算すると、 $\omega = 16 \sim 19$ の範囲で変動し、平均値は $\omega = 17.3$ 前後であった。今回は各寄与面積の補正係数 ω を一定と仮定して、各単位流域の f_c を与えて C_{11} を設定した。

次に C_{13} は式(2.6)のように土壌の浸透能と関係があるので、表-3.2の地質分類の中で河川・湖沼部分の C_{13} を同定結果の1.2倍に設定した。

以上のように C_{11} と C_{13} を単位流域の流域特性量から設定して、各々の寄与面積の河道網による複合流域モデルの計算結果を図-3.8~3.10に示す。結果的には、 C_{11} と C_{13} の変動の幅が小さく、(1)で得られた C_{11}, C_{12}, C_{13} を一定とした同定結果と大きな流出の違いは見られない。また、流域内部の本川A地点と支川B地点の流量ハイドログラフも単位流域のスケールが異なる場合に、異なる流出形態を示す点は改善されていない。したがって、この原因は単位流域からの流出特性の影響ではなく、河道網による運搬・合成過程の影響が考えられる。図-3.2に示す河道網構造を比較すると、水源を定義する寄与面積が $5 \text{ (km}^2\text{)}$ を境にして $10 \text{ (km}^2\text{)}$ になると支川の河道長が短くなるために、単位流域からの流出量が集まり難いと考えられる。

最後に、今回の検討結果は藻琴川流域の一流域を対象として得られた結果であり、他の流域規模の異なる流域についても同様の解析を進め、一般化貯留関数法のモデル定数の総合化を進める必要がある。

4. おわりに

本研究は近年、整備が進んできたGISデータを流出解析に適用すべく、一般化貯留関数法による複合流域モデルの未知定数 C_{11}, C_{12}, C_{13} を、流域特性量から一義的に決定しようと試みたものである。従来、この未知定数は複合流域モデルの単位流域では同定作業の煩雑さから全て同じ値を仮定していたので、GISデータによる流域特性量を基に未知定数 C_{11}, C_{12}, C_{13} が変動するものとして、流出特性の違いを検討した。その結果、流域特性量を考慮しても C_{11}, C_{12}, C_{13} の変動幅が小さかったために、明確な流出の違いが見られなかった。ただし、未知定数 C_{11} は流域形状の違いによる補正係数 ω をGISデータから算出できると、単位流域毎に C_{11} の値がもっと変動し、流出へ影響すると考えられる。

また、複合流域モデルでは河道網構造の違いによる河道部の影響が大きくなっていく。本研究ではGIS解析によって得られた河道部の川幅、河床勾配、横断形状などの計測結果を利用しているので、実河道との比較・検証していない。この点も含め、今後は他の流域でも解析例を増やし、一般化貯留関数法の総合化を進める予定である。

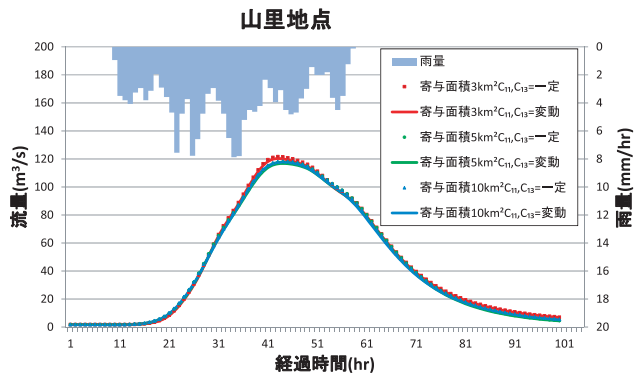


図-3.8 山里観測地点の流量ハイドログラフ

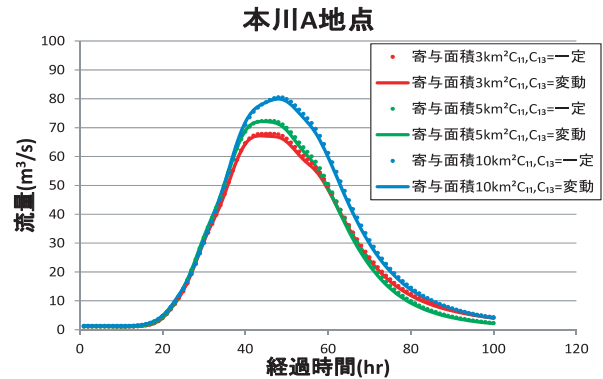


図-3.9 本川A地点の流量ハイドログラフ

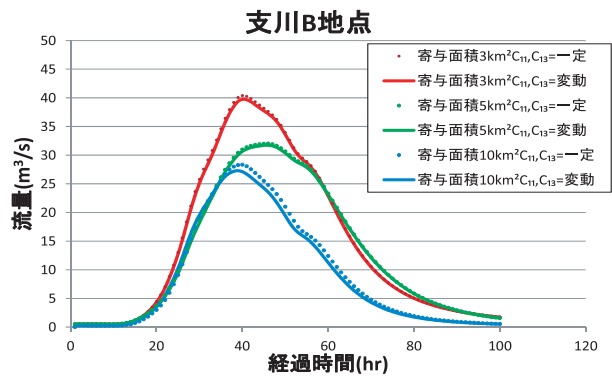


図-3.10 支川B地点の流量ハイドログラフ

参考文献

- 1) 日野幹雄・太田猛彦・砂田憲吾：洪水の数値予測—その第一歩—，森北出版，1989.
- 2) 木村俊晃：貯留関数法（Ⅱ），土木技術資料，Vol.4, No.1, pp.41-51, 1962.
- 3) 藤田睦博：斜面長の変動を考慮した貯留関数法に関する研究，土木学会論文報告集、第314号，pp.75-86，1981.
- 4) 星清・山岡勲：雨水流法と貯留関数法の相互関係，第26回水理講演会論文集，pp.273-278，1982.
- 5) 永井明博・角屋睦・杉山博信・鈴木克英：貯留関数法の総合化，京都大学防災研究所年報，第25号B-2，1982.
- 6) 国土交通省国土政策局GISホームページ：
URL - <http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/gis/guidance/index.html>（2011/07/01）
- 7) GLCF (ESDI) (メリーランド大学)：ランドサット衛星画像，
URL - <http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>（2011/07/01）
- 8) 国土交通省北海道開発局：北海道農業のためのリモートセンシング実利用マニュアル改訂版，
URL - http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_nogyo/remote/（2011/07/01）
- 9) (財)北海道河川防災研究センター・編集・発行：一般化貯留関数法による流域流出解析・河道洪水追跡実用計算法，2001.
- 10) ArcSWAT：Official SWAT Website, USDA Agricultural Research Service,
URL - <http://swatmodel.tamu.edu/software/arcsbat>（2011/07/01）
- 11) (財)北海道河川防災研究センター・編集・発行：対話式洪水流出計算マニュアル（第2版），2005.
- 12) (財)北海道河川防災研究センター・研究所・編集・発行：「複合流域系洪水予測システム理論」解説書，2009.
- 13) 早川博：流域の地形構造を考慮した降雨流出系の確率応答と流域スケールに関する研究，北海道大学博士論文，1997.
- 14) ArcGIS Desktop：ESRI社，
URL - <http://www.esri.com/>（2011/07/01）
- 15) 川崎昭如・吉田聡・佐土原聡：水資源GISアプリケーションArc Hydroの概説と米国における事例紹介，GIS-理論と応用，Vol.15, No.1, pp.29-37，2007.
- 16) ArcGIS Spatial Analyst：ArcGIS10 Desktopヘルプ，ESRI.
- 17) 基盤地図情報ダウンロードサービス，10mメッシュ（標高），国土地理院
URL - <http://fgd.gsi.go.jp/download/GsiSecondMeshCreateServlet>（2011/07/01）
- 18) 国土数値情報ダウンロードサービス，土地利用細分メッシュデータ，国土交通省国土政策局
URL - <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>（2011/07/01）
- 19) 自然環境保全基礎調査：植生調査，環境省。
URL - http://www.biodic.go.jp/kiso/vg/vg_kiso.html（2011/07/01）
- 20) 産業技術総合研究所：統合地質図データベース5万分の1地質図
URL - <http://iggis1.muse.aist.go.jp/ja/top.htm>（2011/07/01）
- 21) 椎葉充晴・立川康人・市川温：例題で学ぶ水文学，p.132，森北出版，2010.
- 22) 星清・村上泰啓：小流域における総合貯留関数法の開発，第31回水理講演会論文集，pp.107-112，1987.
- 23) 橋本健・森田正：土地利用変化を評価する洪水流出モデルに関する研究，土木学会論文集，第325号，pp.45-50，1982.