

V-6 GISを活用した河川流況予測システムの研究開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 11～平 14
担当チーム：水理水文チーム
研究担当者：吉谷 純一、深見 和彦、
敷 天其

【要旨】

近年、中小河川や河川上流域における洪水・土砂災害が頻発している。しかし、一般に小さな流域スケールに対応できるだけのきめ細かな水文観測網が整備されておらず、長期水文資料が存在しない中小河川流域や河川上流域においても、幅広く適用できる洪水予測（洪水危険度評価）手法の開発が求められている。本研究は、雨量・流量観測所が十分整備されていない中小河川・河川上流域においても、全国で広く適用できる簡便で実用的な洪水予測手法を提案することを目的として実施したものである。その結果、GIS 解析技術等を基盤として、中小河川に特有の多様なニーズや観測施設・データの存在状況に柔軟に対応できる河川流況予測技術を開発することができた。

キーワード：中小河川、洪水予測、GIS、分布定数型流出解析モデル、レーダ雨量計

1. はじめに

近年、国が直接管理する比較的大きな河川においては、堤防の破堤等による広域での大規模な洪水氾濫災害は少なくなってきた。それとは対照的に、一級水系の上流域や、都市域の二級水系等の中小河川流域では、平成 10 年の余笹川・阿武隈川水害、広島土砂災害、福岡地下街水害、平成 12 年の東海豪雨災害等を初めとして、洪水災害が頻発し、国民の社会経済生活に依然として大きな負の影響を及ぼしている。これらの原因としては、1)何らかの気候変動に起因した集中豪雨の頻発、2)都市化の進展、3)大河川と比較してハード・ソフト両面での中小河川の治水整備水準の低さ、などが考えられる。このため、因果関係の実態究明と対策立案を図ることが喫緊の課題となっている。

平成 13 年に実施された水防法改正にあるように、洪水予報と情報伝達体制を強化・拡充するソフト対策は、迅速かつ効率的な水災害防止に対して極めて有効と期待される。その際、水防災担当者の立場からは、現況の気象・水文現象を正確に把握することはもちろん、今発生しつつある洪水がどの程度危険なものであるかを迅速かつ的確に判断することが求められる。したがって、全国の任意の中小河川で利用可能な、水防・避難活動支援や氾濫シミュレーション等の基盤となる河川流況（洪水）予測技術が必要である。

一般に中小河川において洪水予測を行う場合、洪水到達時間が短いことから、降雨－流出関係の把握と降雨予測が特に重要となる。しかしながら、一般に都道府県管理の二級河川や一級河川上流域等に多く見られる中小河川では、雨量・水位・流量観測所といった水文観測施設が、十分に設置されていない事例が多く、流域内の雨量分布のみならず流量についても資料が不足し、降雨－流出関係の定式化の障害となっている。

また、水位流量観測施設を網羅的に配置することが困難な中小河川では、重要基準点以外の地点や支川における出水状況を何らかの代替手段により予測・評価することにより、迅速かつ確かな水防体制の確立に結びつけることが重要である。

本研究の目的は、GIS 解析技術や数値シミュレーション技術等を活用することにより、雨量・流量観測所が十分整備されていない中小河川・河川上流域においても、柔軟に対応できる河川流況予測技術＝洪水流出解析モデル構築手法を提案することにある。

なお、洪水予報システム構築へむけての技術的課題を網羅的に挙げれば、降雨予測手法、雨量・水位流量観測体制、予測計算結果の評価・判断手法といった課題も存在する。本研究は、その諸課題の中でも、上記のような中小河川に特有の大きな技術的制約条件の一つと言える洪水流出解析手法に焦点をあてて研究を実施した。

2. 水文資料不備流域に対する簡便な洪水予測モデル＝メッシュ型合成合理式モデルの開発

2.1 研究方法

まず、水文観測施設が十分整備されていない中小河川流域を対象とし、過去の洪水事例や流域内各支川筋毎の相対的な洪水危険度をリアルタイムに評価することを可能にする洪水予測モデルの開発を試みた。

一般に、一級河川においては、過去の雨量・流量資料を基礎として貯留関数法等による洪水流出解析モデルのパラメータを同定し、予測に用いることが多いが、過去の水文資料が不備の流域においてこのような手法をとることは困難である。

そこで、中小河川においても定量的な雨量情報を確保する手段として、旧建設省により整備された26基のレーダ雨量計から全国的に利用可能なレーダ雨量を採用した。また、水文資料の無い流域で洪水流出解析モデルを構築するために、国土数値情報をベースにしたGIS技術の利活用を検討した。

そこで、まずレーダ雨量については、前時刻(1時間前)の地上雨量計値(mm/hr)とその直上メッシュのレーダ雨量計値(mm/hr)との比を補正係数として、現時刻のティーセン分割した対象メッシュ毎のレーダ雨量を補正することにより一定の雨量精度を確保することを試みた。なお、ここで地上雨量値とレーダ雨量値の差が大きい場合には、次時刻の補正の精度を逆に悪化させる場合があるため、補正係数には降雨強度帯別にトライアル計算して求めた上限値(閾値)を設定した。

次に、GISにより流出解析モデルパラメータを推定できる流出解析手法としては、原理的には、集中定数型の最も簡便な合理式から、流域を区分した細分メッシュごとに流出素過程をモデル化した物理的な分布定数型モデルまで多様なレベルがある。一般的には、流出解析手法の簡便さや適用範囲の広さと精度とはトレードオフの関係がある。ここでは、まずまずは全国へのシステム展開が最も容易と考えられる合成合理式によるハイドログラフの算定を試みた。また、合理式の本来の適用範囲より大きな流域への適用も考慮して、従来の流域全体に対しマクロに適用する「マクロ合成合理式」モデルに加えて、流域を多数のメッシュに分割し、落水線網で各メッシュ流出量を集計する方式の「落水線網+合成合理式」モデル＝「メッシュ型合成合理式」モデルを新

たに構築し、両者の精度比較を行った。ここで、後者の手法は、500mメッシュ標高データをもとに作成した落水線網から各メッシュ毎の洪水到達時間を計算し、その時間差を考慮に入れて、メッシュレーダ雨量の移動平均から合成合理式により評価地点のハイドログラフを算出するものである。流出係数は、国土数値情報の土地利用分類毎の係数を与えた。洪水到達時間については、流域全体に合理式をマクロに適用する方式では、各種経験式のうち下記の検討ケースで最も適合度の高い式(Kraven式)を採用し、落水線網と組み合わせる方式では、全メッシュを河道メッシュ(25,000分の1地形図において河道が含まれるメッシュ)とそれ以外の斜面メッシュに区分し、流下時間の計算式を別々に与えることとした。河道部メッシュについては、同様に下記の検討ケースで最も適合度が高いKraven式を採用することとした。また、斜面部メッシュについては、日野・砂田式¹⁾を用いて流下時間を算定した。

以上のように、合理式を母体として構築する特性上、モデルに必要な定数は、メッシュ分割、落水線・疑似河道網図の他に、流出係数と洪水到達時間のみである。しかしその計算結果は、毎時の流量・水位予測値が絶対的な意味を有するものではない。すなわち、本モデルは、過去の洪水事例や流域内各支川筋毎の「洪水危険度」をあくまで相対的に、かつ、リアルタイムに評価することを目指すものである。このため、その精度的限界を含めて的確に分かり易く表示・伝達するための手法に関しても検討を行った。

研究対象流域は、モデル検証のための水文資料が整備され、かつ、様々な流域スケールでのモデル適用性の比較・分析が可能なものとして、九州の遠賀川流域内の本川・支流域を選定した。具体的には、流域面積の大きい方から日の出橋地点上流域(686.8km²)、以下、勘六橋、中島、川島、赤池、秋松橋、伊田、春日橋、添田、夏吉、および大熊地点上流域(43.7km²)の計11サブ流域を対象に検討を実施した。レーダ雨量は、直交二偏波化する以前の釈迎岳レーダ雨量値を用いた。また、対象洪水は、1997～98年の様々な成因を持つ洪水6事例(総雨量:21.2～142.0mm)である。

2.2 研究結果

図-1にすべてのサブ流域を包含する遠賀川日の出橋地点上流域における落水線網図を示す。500mメッシュでの評価であるが、サブ流域毎の流域面積

の一致度は高いことを確認した。

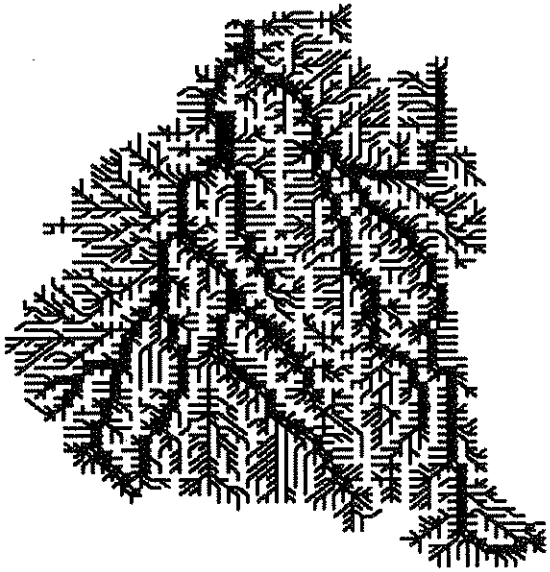


図-1 遠賀川(日の出橋上流)落水線網図

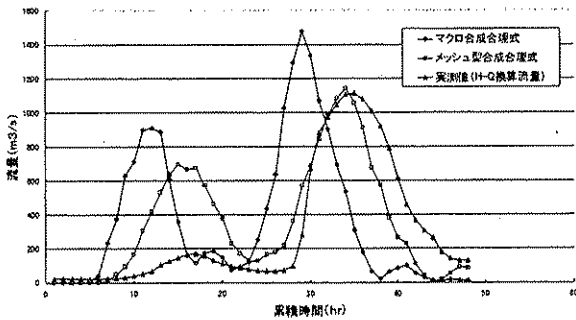


図-2 洪水流量再現計算ハイドログラフと
実測流量との比較
(1997.9.6~7洪水、日の出橋地点)

図-2に、計算結果の一例を示す。ちなみに、この

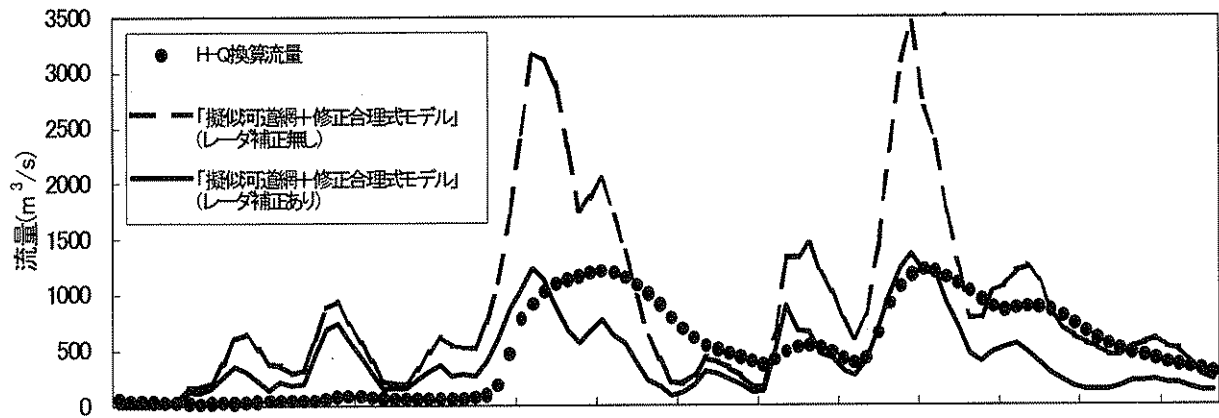


図-4 レーダ雨量を前1時間雨量比による簡易キャリブレーションにより補正した場合と補正しない
場合のメッシュ型合成合理式モデル算定値の実測値との適合度の変化
(1997.7.6~9洪水、日の出橋地点)

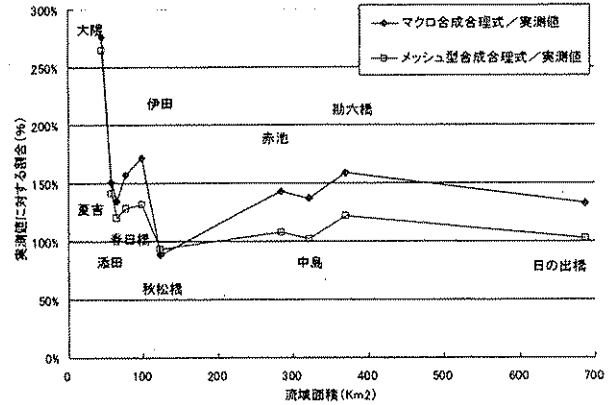


図-3 実測値に対する洪水ピーク流量再現値の割合
(1997.9.6~7洪水)

図に示した降雨においては、もともとレーダ雨量と地上雨量の適合性が高かったため、レーダデータのキャリブレーションは行っていない。この例では、一山目のピークは H-Q 換算流量を大きく上回っているものの、二山目のピークでは生起時刻、ピーク流量値とも、ほぼ表現できていることがわかる。他のサブ流域も同様であり、「メッシュ型合成合理式」モデルによる計算結果は「マクロ合成合理式」モデルよりも全般的に精度が改善されることがわかった(図-3参照)。また、通常合理式の適用限界を超えるとされる 200km² 以上のスケールにおいても、メッシュ型の場合安定した精度が確保されている点の特長と言える。²⁾

次に、図-4は、レーダ観測値と地上雨量値が大きく異なり計算精度が劣るケースでも、レーダデータを地上雨量によりキャリブレーションすることにより精度向上の可能性があることを示した例である。ここでは、前時刻(1h前)の地上雨量計値(mm/hr)とそ

の直上メッシュのレーダ雨量計値(mm/hr)の比(上限値を設定)を用いて、現時刻のティーセン分割した対象メッシュ毎のレーダ雨量を補正している。このような最も簡便なキャリブレーションでもピーク流量評価値を大きく改善することがわかる。なお、現在、全国の地方整備局において、地上雨量値の代表性を考慮した高度なオンラインキャリブレーションシステム(ダイナミックウィンドウ法)が順次導入されていることから、現在のレーダ雨量計データを用いれば、精度をさらに改善できる可能性がある

しかしながら、流出に対する降雨の初期損失量を正確に見積もれていない合理式特有の課題が残されており、降雨量の初期損失が大きい洪水の場合、水位流量を過大評価する傾向がある。合理式に依拠する限りその根本的な解決は困難である。本来水位・流量資料がない支川流域への応用を念頭においていることも併せ考えると、メッシュ型合成合理式モデルによる計算値は、ある出水イベントにおける最大ピーク流量規模の相対的な危険度とその生起時刻を予測する手段とみなすべきである。この観点から、現況の気象・水文状況とともに、本システムで予測計算した結果を分かり易く表示するための方法に関して図-5のような表示方法を検討した。ここでは、メッシュ型合成合理式モデルの洪水計算結果を指定

水位以下(安全水位)、指定水位以上(警戒水位以下)、警戒水位以上(計画高水位以下)、及び計画高水位以上の相対的な4レベルに区分して支川筋毎に面的に表示している。この4段階区分表示により、6洪水事例毎に、最も多くの地点で洪水ピークが生じた時間帯で11観測所の正答率を評価したところ、全体で67%に達し、誤答分についても危険側に評価したケースは3%に止まっていることがわかった。

以上より、メッシュ型合成合理式モデルは、従来の洪水流出解析モデルと同等の精度を確保することは困難ではあるが、レーダ雨量計と国土数値情報を活用することにより地上の雨量観測所や水位・流量観測所が未整備の中小河川流域においても真に危険な出水を相対的に判断する有効な手段であると考えられる。

3. 水文資料不備流域にも適用できる高精度の洪水予測モデル=UCD-PWRIモデルの開発

3.1 研究方法

3.1.1 概要

前節では、地上雨量、水位・流量観測所の整備が不十分な中小河川流域において、高精度は期待できなくても、簡便で相対的な洪水危険度を評価できる手法としてメッシュ型合成合理式モデルを提案した。

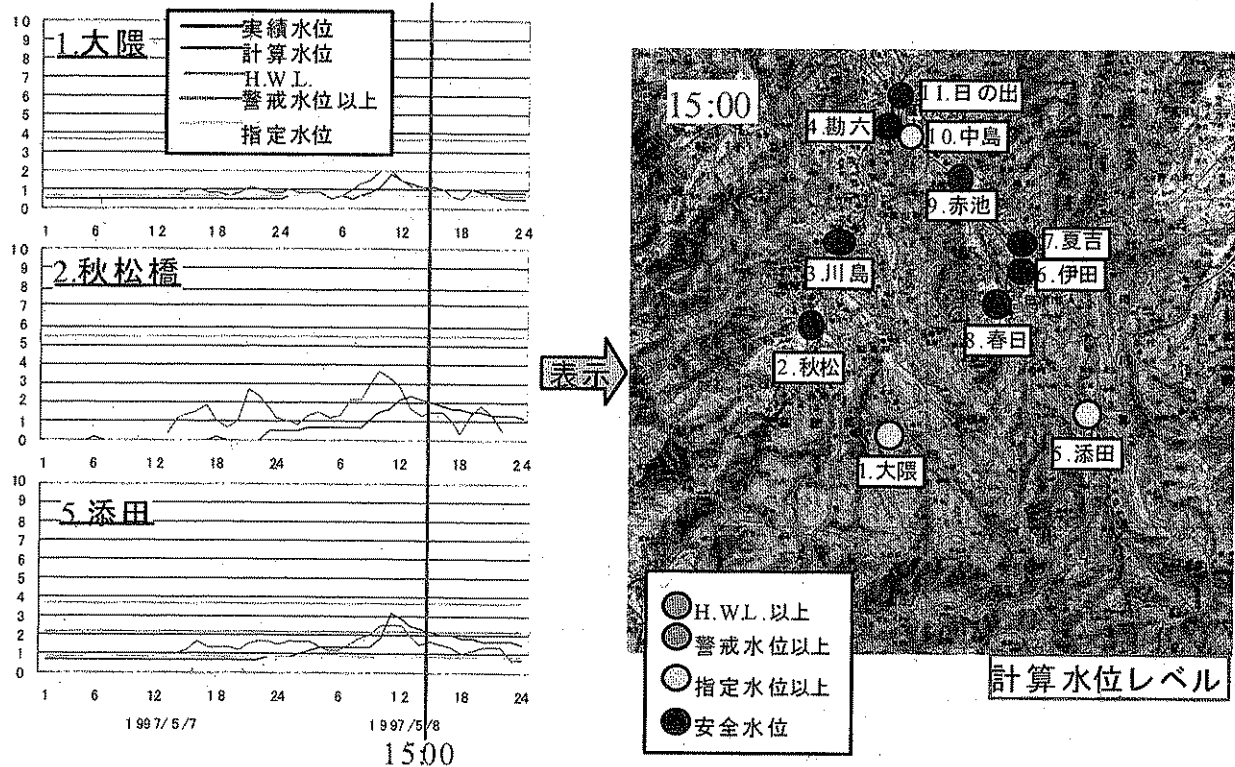


図-5 メッシュ型合成合理式算定値に基づく川筋毎の相対的な洪水危険度表示例(遠賀)

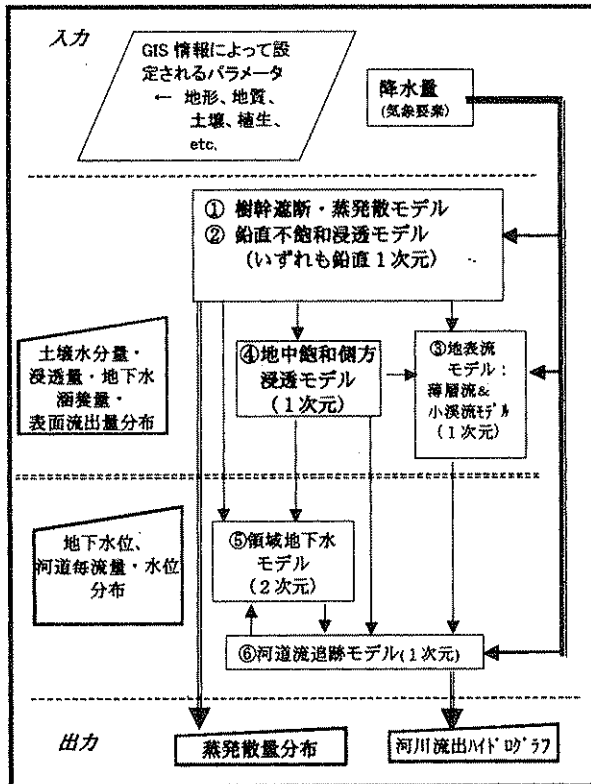


図-6 UCD-PWRI モデルの全体構成

しかし、例えばダム上流域、新たに設定する洪水予報・水防基準点等、過去水文資料の有無にかかわらず、流域・地点としての重要性から高精度の洪水予測を実施したいニーズも存在する。

そこで、水文資料の不足を補うために可能な限り洪水流出特性に関連する流域の面的な情報を収集してGIS上で解析することにより、最適設定に近いモデル定数を1次推定・評価できる分布定数型流出解析モデル(UCD-PWRIモデル)を開発することとした。なお、本研究は米国カリフォルニア大学デーヴィス校(UCD)土木環境工学科のM.L.Kavvas教授らのグループとの共同研究による成果である。

GISを活用したモデル定数評価の精度を高める必要性から、モデル基本構造は、メッシュ型合成合理式モデルのような概念的モデルではなく、流域スケールでの水循環素過程に立脚した物理的モデルである必要がある。従来の物理的モデルは、実験室レベルで確認されている諸運動方程式を広い流域スケールにおいても適用できると仮定して構築し、その代償として様々な誤差要因がモデル定数に転嫁されるケースが多い。この場合、流域GIS情報(例えば地形・地質・土壌・植生等の分布情報)から評価される定数推定値と最適モデル定数との乖離が生じることとなり、降雨-流出関係の実測資料に基づくパラ

メータ調整に大幅に依存した定数設定とならざるを得ない。そこで、ここでは、洪水流出素過程に重要なパラメータの空間的な不均質性を方程式内部で直接考慮できる空間平均確率統計的偏微分方程式³⁾を導入して、それぞれの流出素過程の基礎方程式を導出する手法を採用した。

3. 1. 2 モデルの構造

UCD-PWRIモデルの全体構成は図-6のとおりである。以下、それぞれの水文素過程モデルの概要を解説する。

(1) 樹冠遮断、蒸発散モデル

土木研究所とUCDで同様に共同開発を行ったメソスケール大気水文統合モデル(IRSHAM)と同じく、Penman-Monteith式を基盤としたNoilhan-Plantonスキームを採用した(詳細は、参考文献4),5)を参照)。

(2) 鉛直不飽和浸透モデル

鉛直方向の浸透基礎式=Darcy式においてGreen-Amptの仮定(浸透浸潤面から地表面までは一定の飽和度)を用いてDarcy式を浸潤面まで鉛直方向に積分した式を基礎式としている^{4),5)}。ここで、透水係数が空間的に分布していると考えて空間平均基礎式を導出した。

(3) 地表流(表面流)モデル

地表流は、斜面上を流れる薄層流過程と、その横流入を受けて発達し、河道まで表流水を運ぶ小溪流過程の2つに分けて考える。

薄層流モデルは、修正Chezy式を運動方程式とし、山腹斜面の局所的峰と局所小溪流間の小溪流間地域における2次元局所薄層流の連続式を組み合わせたKinematic waveモデルである。浸透余剰分と表流水上への有効降雨、もしくは後述する飽和側方浸透流の復帰流により形成され、洪水時の流出率変動を説明する重要な要因である「変動流出寄与域」の概念を組みこんでいる。ここでは、修正Chezy係数が1斜面内で空間的に分布しているとして斜面内を河道方向に積分することで1次元空間平均基礎式を導出した。

小溪流(細流)モデルも、小さな河道とみなした同じ1次元Kinematic waveモデルであり、小溪流に対し薄層流と中間流・有効降水量が流入するとし、修正Chezy係数と小溪流幅が空間的に分布するとし、河道方向に平均された1次元空間平均基礎式を導出した。

(4) 地中飽和側方浸透モデル(中間流モデル)

Darcy式を運動方程式とした2次元Kinematicモ

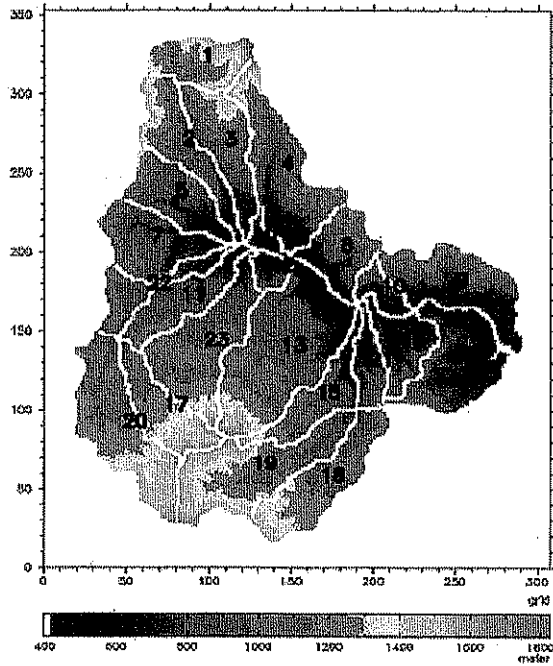


図-9 塩原ダム流域サブ流域分割図

ルである。河道方向に透水係数が変化するとし、河道方向に平均された1次元空間平均基礎式を導出した。

(5) 領域地下水モデル

Dupuitの仮定により準一様流としての2次元不圧地下水モデルである。

(6) 河道流追跡モデル

1次元拡散波近似モデルである。横流入としては、

表-1 UCD-PWRI モデル定数リスト

水文素過程	モデル定数 (パラメータ)
地表流 (薄層流、及び、小溪流)	山腹斜面長、山腹斜面幅 Chezyの粗度係数 (Cz) 小溪流の勾配 (S_{0x}, S_{0y}) 小溪流の長さ(l) 小溪流間(薄層流)地域の勾配 (S_x)、幅 (W_x) 地表面パラメータ間の共分散 Cz, S_{0x}, S_{0y} 及び l : 小溪流に対して Cz, S_x 及び W_x : 薄層流に対して 薄層流発生確率、受け入れ流路区間 ID
地中飽和側方浸透流 (中間流)	中間流出領域の長さ、幅 基礎岩盤までの深さ、勾配 透水係数 (平均/分散)、比産出量
鉛直不飽和浸透	透水係数 (平均/分散)、飽和含水率、 残留含水率、空隙寸法分布指数、間隙圧
地下水	地下水領域、位置座標、標高 透水係数 (平均)、比産出量
河道流	勾配、Manning (Chezy) の粗度係数 幅/長さ、流路区間の次数 地下水域座標における流れの位置
樹冠遮断・蒸発散	葉面積指数(LAI)、緑被率、空気力学的抵抗 (粗度長)、群落抵抗最小・最大値、光合成有効日射量上限値、圃場容水量

降水量、地表流、中間流出、及び領域地下水との相互作用が考慮される。

(7) 必要なモデル定数

流域(斜面)分割、河道網に加えて、表-1に示すとおりである。場合によっては、蒸発散モデルを単純化することができるが、流域内の地形・地質・土質・溪流等に関する詳細な分布情報とGIS解析評価が必要となる。

3. 1. 4 対象流域・検討ケース

対象流域は、那珂川水系対象流域は栃木県那珂川水系帯川上流部の塩原ダム上流域(夕の原地点上流域、面積:約100km²)である。図-7に示すように塩原ダム流域を23の斜面要素に分割し、それぞれにDEMや国土数値情報、衛星リモートセンシング情報から推定された水文地形・土壌・地質パラメータを1次推定し、1997~98年の4洪水に対して実測降水量を与えて洪水再現シミュレーションを実施した。

3. 2 研究結果

図-8に、UCD-PWRIモデルによる洪水再現結果を示す。ピーク流量規模が100m³/sスケールから1,000m³/sスケールまで1オーダー変化しているに

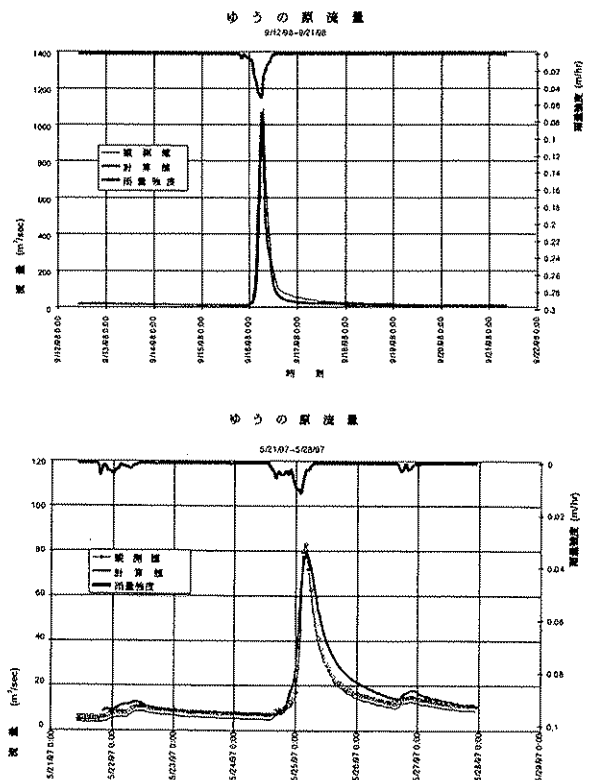


図-8 UCD-PWRIモデルによる塩原ダム流域洪水再現計算結果(夕の原地点)

(1998年9月12~21日、1997年5月21~28日)

も関わらず、中小洪水から大洪水に至るまで一貫して良好な精度を確保できることが確認された。また、ピーク生起時刻・ピーク流量のみならず、総流量を含めハイドログラフ全般をよく再現する能力を有している。各流出成分別に計算値を示すことができるため、直接流出率の変動メカニズムを分析することも可能である。洪水流出を支配するプロセスを的確にモデル化できたものと評価できる。

以上、本モデルは、非常に多くの流域条件資料とGIS解析を必要とするが、長期水文資料に基づくパラメータ調整の必要性を大きく軽減し、水文資料が不足する中小河川流域においても高精度を期待できると考えられる。

4. 分布定数型流出解析モデルのための河道網作成手法に関する研究

4.1 研究方法

以上、対象流域の水文資料・GIS情報整備条件と洪水予測ニーズの様々な組み合わせに柔軟に対応できる分布定数型洪水流出解析モデルの開発・検証を行ってきた。提案した2つのモデルは、その特性・構築コスト等大きく異なるが、いずれのモデルも疑似河道網（及び落水線網）のデータを整備する必要がある点が共通している。疑似河道網データは、今回提案の2モデルのみならず、全ての分布定数型モデルを構築するための共通インフラと言える。

従来より、いくつかの疑似河道網作成手法の提案が行われているが、実際に作成された疑似河道網と実河道網との対応関係の検証を定量的に実施した事例はほとんどなく、河道長勾配や流下方向・斜面面積等が現実と乖離することにより洪水再現計算結果に直接影響を及ぼすことも考えられる。また、メッシュサイズが粗い場合、現実に予測したい基準地点の位置を疑似河道網上で指定することも困難となる。したがって、疑似河道網の有効性を客観的に検証するために、疑似河道網作成の基準とするDEMの分解能と合致し、実河川区間の長さ・勾配などの情報を含めることのできる格子化ベクトル実河川データを作成し、疑似河道網の基準とすることは重要と考えられる。

ここでは、DEMの分解能に柔軟に対応しながら、国土数値情報における流路位置データ(KS-272)を格子化ベクトルデータに変換するための自動解析ツールを開発することとした。また、遠賀川、那珂川などの流域への適用によりそのツールの有効性を検証

することを試みた。

4.2 研究結果

実河川データを格子化ベクトルデータに変換するための今回開発した自動解析ツールの内容と活用手法は以下のとおりである。

- 1) 水系（あるいは支川）のコードを用いて対象流域の流路位置データと単位河川データを切り出す。格子化するための空間分解能を選択する。
 - 2) 経緯度座標への変換：個々の計測データ点の1次、2次メッシュ座標と正規化座標により各点の経緯度座標を算定する。また、抽出したデータが対象流域のデータであるかどうかを確認するために、経緯度データをExcel散布図などで図化し、地図と比較する。
 - 3) DEM四隅の経緯度とサイズの決定：これは別のデータソースから実河川データの空間範囲と対応したDEMを切り出して擬河道網を算出するためである。
 - 4) 経緯度座標の状態で各計測データ点の上下流関係を判定する。まず、各単位河川におけるデータ点の上下流関係を最短距離で確定する。つぎに、単位河川の上下流関係情報を用いて全ての単位河川をつなげる。
 - 5) 単位河川ごとに各計測データ点間の流路長と、任意点の単位河川の上流起点からの流路長を計算する。これらの値は、格子化する際落水線の長さの判定に使う。また、対象流域における実河川総長も計算する。
 - 6) 実河川データの格子化：四捨五入法で各データ点の経緯度座標を格子点座標（行、列番号、格子点番地）に変換する。
 - 7) 格子化されたデータ点のベクトル化を行う。各格子点の番地と定義した落水線の8方向により、格子点のベクトル座標を与える。過疎データ域の内挿、ベクトルの交差や対流とループなどのチェック・調整を行う。
 - 8) データ点の削除や内挿などの影響を反映した落水線の長さ（両格子点間の実流路の長さ）を算定する。流出解析に必要である。
 - 9) 総合チェックと出力を行う。繋がりがや流路長などの総合チェックをしてから、格子化した実河川網のベクトルデータと関連DEMの情報などを出力する。精度の高い擬河道網の作成・検証の基盤となる。
- 本自動変換ツールを遠賀川へ適用した結果を図一

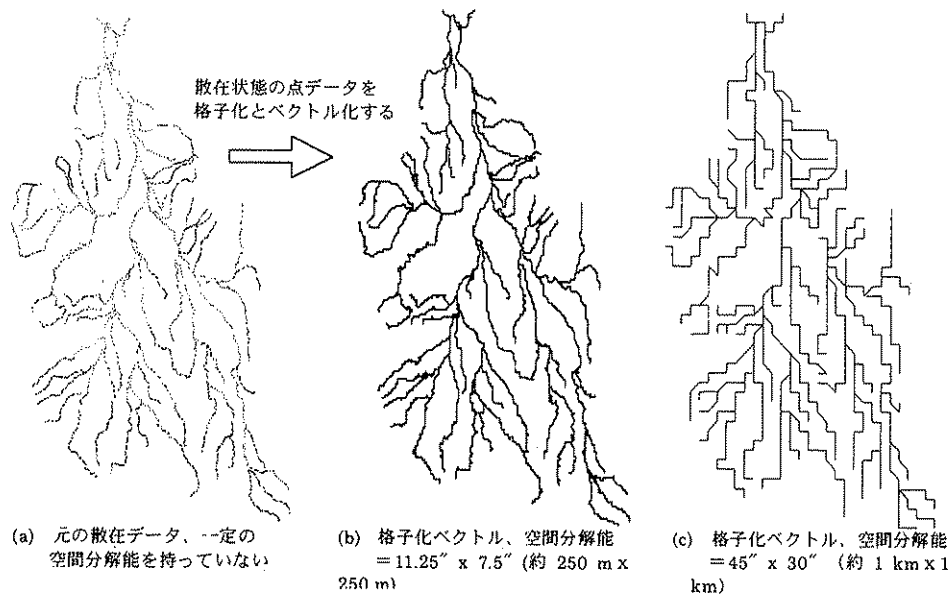


図-9 格子化実河川ベクトルデータ自動解析ツールによる国土数値情報実河川網データ (遠賀川)

9に示す。(a)は経緯度で表されているすべての実河川計測点の散布図で、(b)は250mの空間分解能をもつ格子化ベクトル図であり、データ点の削除と内挿を加えたものである。(a)と(b)を重ね合わせるにより、もともと散在していた実河川データが正しく格子化ベクトル実河川網へ変換されたことを確認できる。また、異なる空間分解能へ変換する例として、(c)に1kmメッシュの格子化ベクトル実河川網を示す。さらに、同ツールを富士川、那珂川等に適用したが、上記の7ステップにおいて、自動処理が困難となり手作業で大幅に補足するケースが多く発生した。これらは、流路位置データ(KS-272)そのもののエラー(流れのループ、交差、過密データ点の複雑なパターンの存在)によるものである。

本自動変換ツールは、疑似河道網の検証と精度向上の基盤となるものであるが、同時に、既存の実河川網に関するデータの問題点も明らかになった。

6. まとめ

本研究により開発・検証された洪水予測の基盤となる洪水流出解析手法を整理したのが表-2である

表2 本研究で開発した河川流況予測モデルの位置づけ

		水文観測施設・データ	
		不十分	十分
必要とされる 予測精度	相対危険度判断 (～従来)レベル	メッシュ型 合成合理式モデル	既存(研究不要)
	高精度レベル	UCD-PWRIモデル	(UCD-PWRIモデル)

る。本研究により、近年進展の著しい国土情報データベースとGIS解析技術を活用することにより、中

小河川に特有の多様なニーズや水文観測施設・データの存在状況に柔軟に対応できる洪水予測システムの基盤技術を開発することができた。

本研究では、多様なニーズ・条件に対応できる基盤技術メニューの充実を優先したため、個々の技術の幅広い条件下での実用化へ向けての検証・汎用化は今後の課題として残されている。具体的なニーズに対応したパイロット試験検討等を通じて、今後一般化・汎用化のための経験を積み重ね、技術マニュアルとして整備していく予定である。

参考文献

- 1) 日野幹雄, 砂田憲吾: 周期変動降雨に対する表面流出の応答特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 262号, pp.55-, 1977年6月
- 2) 深見和彦, 松浦直, 金木誠: 落水線網図を用いた合成合理式とレーダ雨量情報による中小河川リアルタイム洪水危険度評価, 2001年水文・水資源学会研究発表要旨集, pp.86-87, 2001年8月.
- 3) Chen, Z.-Q., R.S.Govindaraju and M.L.Kavvas, "Spatial averaging of unsaturated flow equations for areally heterogeneous fields: Numerical simulations", Water Resour. Res., vol.30, No.2, pp.534-544, 1994.
- 4) 建設省土木研究所河川部水文研究室: 地球温暖化が日本域における水文循環に及ぼす影響の予測に関する研究報告書, 土木研究所資料, 第3432号, 1996年8月.
- 5) Yoshitani, J., M.L.Kavvas, and Z.-Q. Chen: Regional-scale hydroclimate model, Chapter 7 in the "Mathematical Models of Large Watershed Hydrology," edited by V.P. Singh and D.K. Frevert, Water Resour. Publ., pp.237-318, 2002.
- 6) Ao Tianqi: Development of a Distributed Hydrological Model for Large River Basins and Its Application to Southeast Asian Rivers, 山梨大学博士学位論文, pp.1-132, March, 2001.