

土木研究所資料

中山間地河川における洪水予測手法の開発

—洪水氾濫をもたらすような大雨を対象として—

平成30年4月

国立研究開発法人土木研究所
水災害研究グループ

Copyright ©(2018) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

中山間地河川における洪水予測手法の開発

—洪水氾濫をもたらすような大雨を対象として—

水災害研究グループ 上席研究員 伊藤弘之
研究・研修指導監 江頭進治
主任研究員 菊森佳幹
専門研究員 原田大輔
交流研究員 中村要介
東京大学大学院工学研究科 教授 池内幸司

要旨：

本資料は、中山間地河川沿川における河川水位に基づいた洪水予警報システムの構築に資するための技術資料である。中山間地河川では降雨から流出までの時間が短く、流量や水位等に関する観測データの蓄積がほとんど見られない。そのため、降雨流出予測に際して流出モデルのパラメータ同定が難しい。このような事情を鑑み、本報告では降雨データとして気象庁解析雨量・降水短時間予報データを用い、流出モデルとして集中型の合理式またはRRI (Rain-Runoff-Inundation) モデルを用い対象地点の洪水流量を予測し、その上で、流量を当該河道断面の水位－流量関係から水位に変換する手法を提案している。本資料の中で提案した手法を小本川（東北地方）、花月川（九州地方）等の豪雨事例で検証した結果、避難に要するリードタイムを確保する観点から有効であることが示された。

キーワード：中山間地河川、洪水予測、リードタイム、合理式、RRI、H-Q式

目次

1. はじめに	1
1.1 目的	1
1.2 洪水予測とリードタイム	1
2. 洪水予測システム	3
3. 降雨流出解析モデル	4
3.1 合理式と RRI モデルの特徴	4
3.2 合理式による流出解析	5
3.3 RRI モデルによる流出解析	10
4. 流量－水位の変換モデル	18
4.1 H-Q 関係式	18
4.2 流量～水位変換の手順	18
5. その他の留意事項	22
5.1 本手法の適用できる流域について	22
5.2 水位計の活用について	22
5.3 実況雨量および予測雨量の入手について	23
6. まとめ	24
[参考文献]	24

1. はじめに

1.1 目的

2016年8月岩手県小本川流域において発生した洪水災害は、降雨流出時間が短く、しかも災害の増大要因となる流砂・流木を伴う中山間地河川特有の洪水と地域の土地利用などの社会的条件が相まって引き起こされたもので、岩泉町において死者・行方不明者合わせて21人もの尊い人命が失われた¹⁾。同様の災害は、2011年紀伊半島豪雨災害、2012年九州北部豪雨災害、2014年8月豪雨災害、2015年関東・東北豪雨災害、においても見られ、近年中山間地におけるこのような洪水災害が顕在化している。

国内にはこのような中山間地河川が数多くあり、気候変動の影響等により今後さらに水災害が頻発し、多くの人々が危険に曝されることが予想される。このような状況を改善するためには、少なくとも、洪水による犠牲者を出さないよう、早めの避難を支援する洪水情報を提供する仕組み作りが必要である。ところが、現状においては、流域面積が大きい等の河川で洪水により国民経済上重大な損害を生ずるおそれがあるものとして指定された洪水予報の仕組みや洪水により相当な損害を生ずるおそれがあるものとして指定された河川における水位周知は行われているものの、比較的規模の小さい中山間地河川については、水位観測や降雨予測に基づく水位予測やこれらを提供する仕組みがない。このような地域において、豪雨に伴う洪水位を予測し、危機的状況がどのように迫っているかをリアルタイムで評価し、これらを地域住民に伝達するシステムを構築することが求められている。

本研究グループは、中山間地河川における洪水災害の頻発に鑑み、避難行動を起こす目安となる水位を予測し、これを提供する仕組み作りを目指している。このため、洪水氾濫を引き起こすような大雨を対象として、流域の異なるいくつかの中山間地河川を抽出し、各河川において危機的状況をもたらす洪水位をどの程度のリードタイムをもって予測できるか検討している。ここでは、小本川において、解析および予測降雨データ、降雨流出モデル、ならびに流量・水位変換モデルを用いて洪水位予測を行った結果を報告する。

不幸にも、昨年7月の九州北部豪雨災害、9月の台風18号に伴う災害は、本研究の取りまとめ最中の災害であって、中山間地域における洪水予測システム構築は論を俟たない問題になっている。

1.2 洪水予測とリードタイム

洪水予測システムの有効性を確認する指標として、リードタイムを用いることとする。ここで、リードタイムとは、河川水位が危険な状態(例えば、氾濫危険水位や堤防の整備が十分でない場所では堤防越水が発生する水位や氾濫原の地盤高に達する水位等を超える状態)に達すると予測された時刻とそれを予測した時刻の時間差もしくは実際に危険な状態に達した時刻と予測した時刻の時間差の短い方と定義する。沿川住民が安全に避難できるためには、危険な状態に至ることをより早期に予測して、できるだけリードタイムを長く確保することが有効である。例えば図1-1において、地盤高に水位が達する状態を危険な状態とすると、14:00時点で19:30頃にこの水位に達する

ことが予測された。一方、実際に危険な状態の水位に達したのは 20:00 であることから、リードタイムは 5 時間 30 分程度となる。

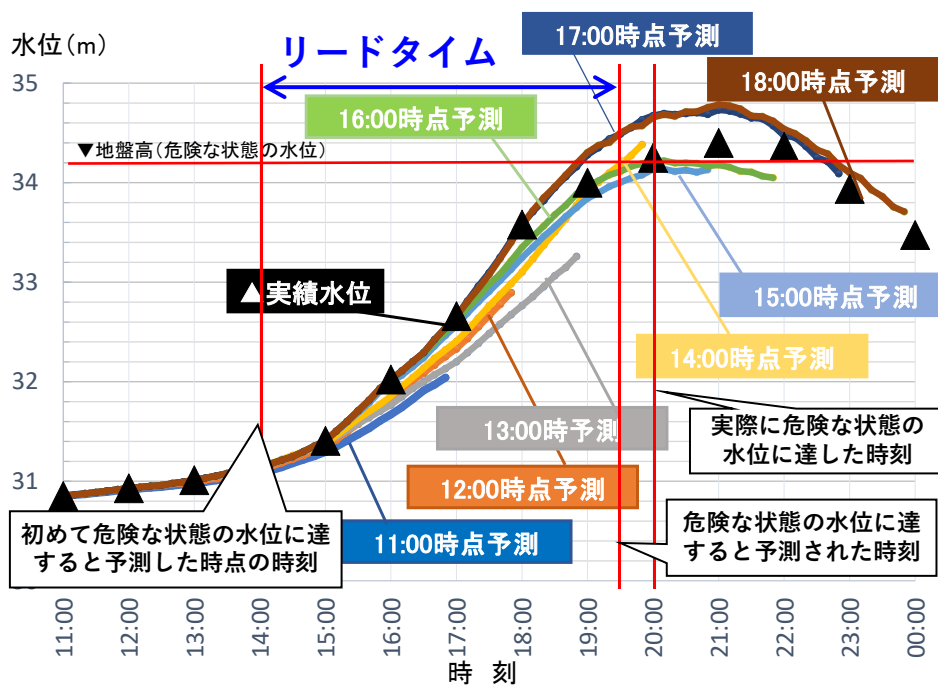


図 1-1 リードタイムの定義

2. 洪水予測システム

本手法による洪水位の予測システムを図 2-1 に示す。洪水予測システムは、降雨データインポート、降雨流出解析システム、および流量—水位変換システムから構成される。降雨データインポートは、10 分間隔に送信される実況雨量、30 分間隔に送信される解析雨量、10 分間隔に送信される1時間降雨予測(降水ナウキャスト)、および 30 分間隔に送信される降水短時間予報(6 時間予測)のデータを収集・保存し、これらを降雨流出解析システムに送信する役割を担う。

ところで、すべての降雨データを利用すれば、洪水予測の精度は向上するものと推察されるが、解析システムは複雑になる。洪水予測においては、解析システムをなるべく単純化して、予測を確実に行うことが重要である。したがって、ここでは解析雨量で流域の状態量を更新し、その上で降水短時間予報のデータを用いて 6 時間先までの洪水予測を行うものとする。

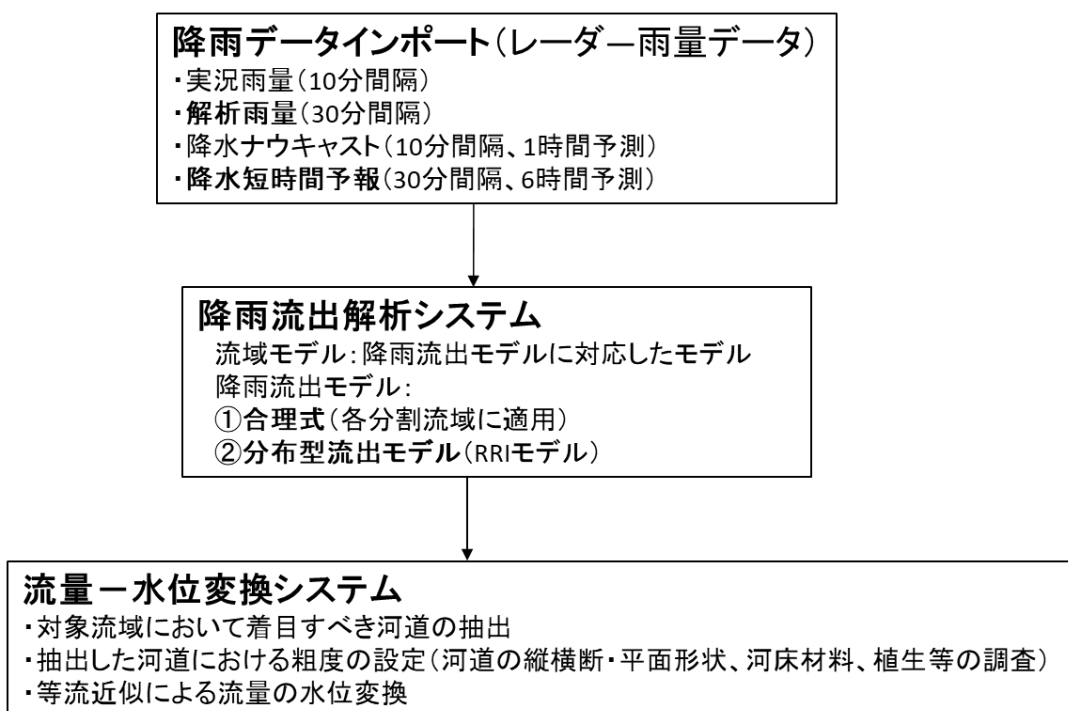


図 2-1 洪水予測システム

流量—水位変換システムは、降雨流出解析システムから得られる流量を水位への変換するところである。ここでは、流量が河道の流下能力を大幅に上回るような洪水流が実際に流れる断面(谷底平野等の氾濫域を含む)をいくつか抽出し、各断面において河床材料、断面形状および植生等の条件を用いて粗度を設定し、中山間地河川では河川勾配が比較的急であることを考慮して、等流近似によって流量を水位に変換する。

3. 降雨流出解析モデル

3.1 合理式と RRI モデルの特徴

降雨流出解析システムは、受信した降雨データをインプットとして所定の場所における洪水流量を算定するところであって、降雨流出モデルから構成される。降雨流出モデルとして、モデルパラメータの設定が容易な合理式、および流域の任意の地点においてハイドログラフが求められる RRI モデル (Rainfall Runoff Inundation Model) を採用する。なお、RRI モデルは、佐山らによって開発された分布型流出モデルの一つである²⁾。合理式と RRI モデルの概要を表 3-1-1 に示している。合理式は、流域平均降雨と流域面積からピーク流量を容易に推算するために開発され、RRI モデルは、流域斜面や河道における流れの追跡に着目して開発されたものである。これらは、目的に応じて使い分けられているが、ここでは洪水予測のために、二つのモデルを独立に採用する。

表 3-1-1 合理式と RRI モデルの概要

	合理式	RRI モデル
流出モデル	集中型概念モデル	分布型物理モデル
モデルのパラメータ	流出係数、角屋式の流域によって定まる定数	水文パラメータ等のキャリブレーションが必要
演算時間	極めて短時間	メッシュ数に依存
流量の出力地点	各分割流域の下流端	任意に設定

3.2 合理式による流出解析

合理式を用いた洪水予測は、パラメータ調整が容易であって、出水履歴が入手できず、パラメータ調整が困難な中山間地河川においては有効な方法の一つである。とくに、洪水氾濫による災害がもたらされるような大雨を対象にすると、流域は湿潤状態となり、表流水が卓越するため、合理式の適用性は良くなる。一方、合理式は対象流域における降雨の空間的な一様性を仮定しているため、大雨であっても流域面積が大きく降雨が空間的に大きく偏る場合には適用できない。この場合には適宜流域を分割し各分割流域の流出量を河道の洪水流下時間を考慮して合成することにより、所定の地点における流量を算出することができる。

すなわち、対象流域を降雨の空間分布の影響を無視できる程度の大きさに分割する(分割された個々の流域を分割流域と呼ぶことにする。)。個々の分割流域において、合理式により下流端の流量を計算してから、それぞれの流量を足し合わせ、対象流域全体の下流端(対象地点)流量ハイドログラフとする。ただし、流量を足し合わせる際に、上流の分割流域の洪水波が河道を流下して対象地点に到達するまでに要する時間(洪水流下時間と呼ぶ)を考慮して、洪水流下時間分遅らせて足し合わせる。

3.2.1 解析に関する留意事項

・流域分割

一般に合理式の流域面積の適応は 100km^2 以下とされているが、ここでは河道に沿って、分割流域がおおむね 50km^2 以下になるように分割する。流域分割には、標高メッシュデータを用いるが、 1000m 程度の解像度があれば十分である。図 3-2-1 は、小本川(流域面積:約 730km^2)を河道に沿って 11 分割した例である。メッシュ解像度は約 500m である。

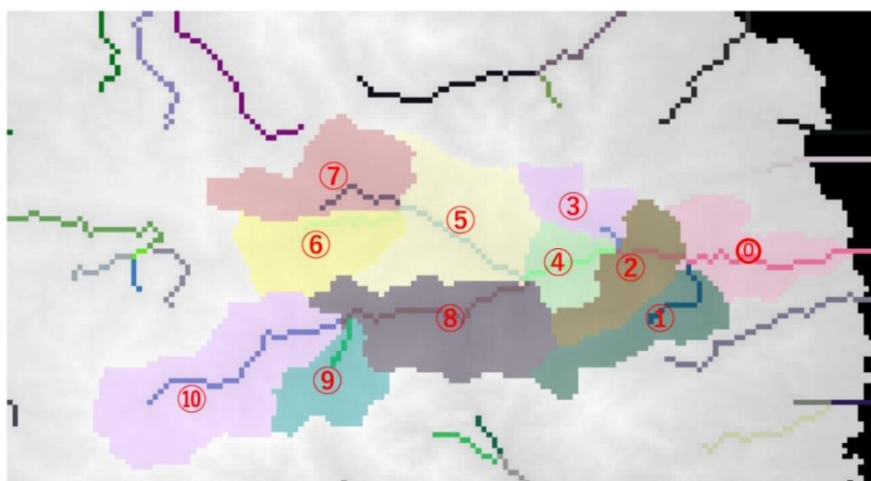


図 3-2-1 小本川流域の分割(流域面積約 730km^2 の流域を 11 個の小流域に分割)

・流域(河道)ネットワークの作成

上記流域分割に対して、河道の連結を考慮して下記のようにネットワークを作成する。赤色の矩形の分割流域(河道)では、当該流域より上流の分割流域に対して洪水流下時間を考慮する必要がある。

ある(図 3-2-2)。

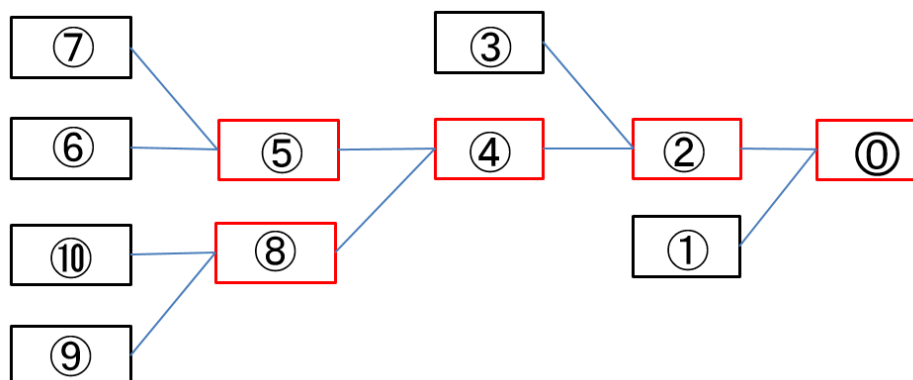


図 3-2-2 河道(流域)ネットワークの作成例

・降雨時系列データの作成

分割流域ごとに合理式流出モデルに与えるための流域平均雨量強度の時系列データを作成する。

・分割流域の流量算出

合理式による流量算出のためには、洪水到達時間内の有効降雨強度を用いる必要がある。有効降雨強度は洪水到達時間の設定により変化するが、角屋式や土研式等の複数の洪水到達時間の算定式が提案されている。ここでは、雨量強度の影響を考慮できる角屋式を用いることとする。角屋式の洪水到達時間式およびピーク流量式は下記のとおりである。

洪水到達時間(分):
$$t_c = C \cdot A^{0.22} \cdot r_e^{-0.35}$$

ピーク流量(m³/s):
$$Q_p = \frac{1}{3.6} \cdot r_e \cdot A$$

ここに、

C:流域により定まる定数(山林:290、放牧地・ゴルフ場 190~210、市街地:60~90)

A:集水面積(km²)

r_e:有効降雨強度(洪水到達時間内の平均降雨強度(mm/h)×流出係数(=0.7))(mm/h)

角屋の洪水到達時間式から、洪水到達時間を求めるには有効雨量強度が必要であり、有効降雨強度を求めるには、洪水到達時間を定める必要があることがわかる。そこで、到達時間を仮定して有効降雨強度を求め、これと角屋式から洪水到達時間を求める。

実際には、**図 3-2-3**(左図)のとおり、当該時刻(計算開始時刻)において、十分細かい時間間隔(ここでは 10 分)で洪水到達時間を想定し、有効降雨強度を計算する。想定した洪水到達時間ごとにそれらに対応する有効雨量強度を用いて洪水到達時間を計算する。想定した洪水到達時間を横軸、洪水到達時間式により求めた洪水到達時間を縦軸にとり、プロットすると一価関数になるので、両者が等しくなった点が求めるべき洪水到達時間である(**図 3-2-3**(右図))。

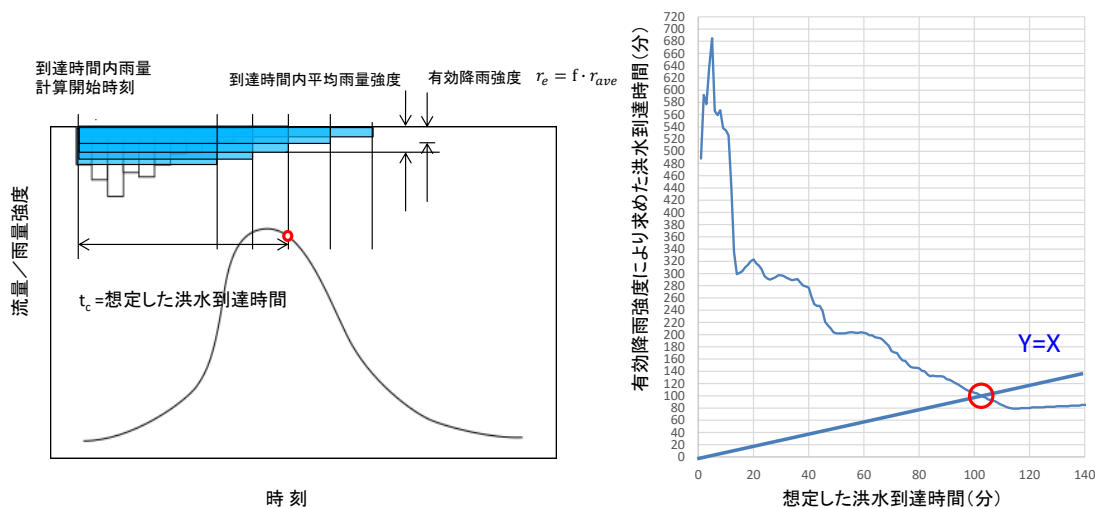


図 3-2-3 洪水到達時間の求め方

各時刻において洪水到達時間が求まったら、対応する有効降雨を用いてピーク流量式により流量を計算する。計算開始時刻に洪水到達時間を加えた時刻にピーク流量をプロットしたものが流量の計算結果となる。

・分割流域の流量の合成

各分割流域の流量を求めたら、それらを河道の洪水波の流下時間を考慮して足し合わせる。河道の洪水波の流下時間の算定には、クラークヘン式による流下速度を用いる(**表 3-2-1**)。分割流域ごとにクラークヘン式により洪水流下速度を求め、河道長を流下速度で割ることにより流下に要する時間を求めることができる(**図 3-2-4**)。

表 3-2-1 洪水波の流下速度(クラークヘン式)

平均河道勾配	流下速度 (m/s)
1/100 以上	3.5
1/100~1/200	3.0
1/200 以下	2.1

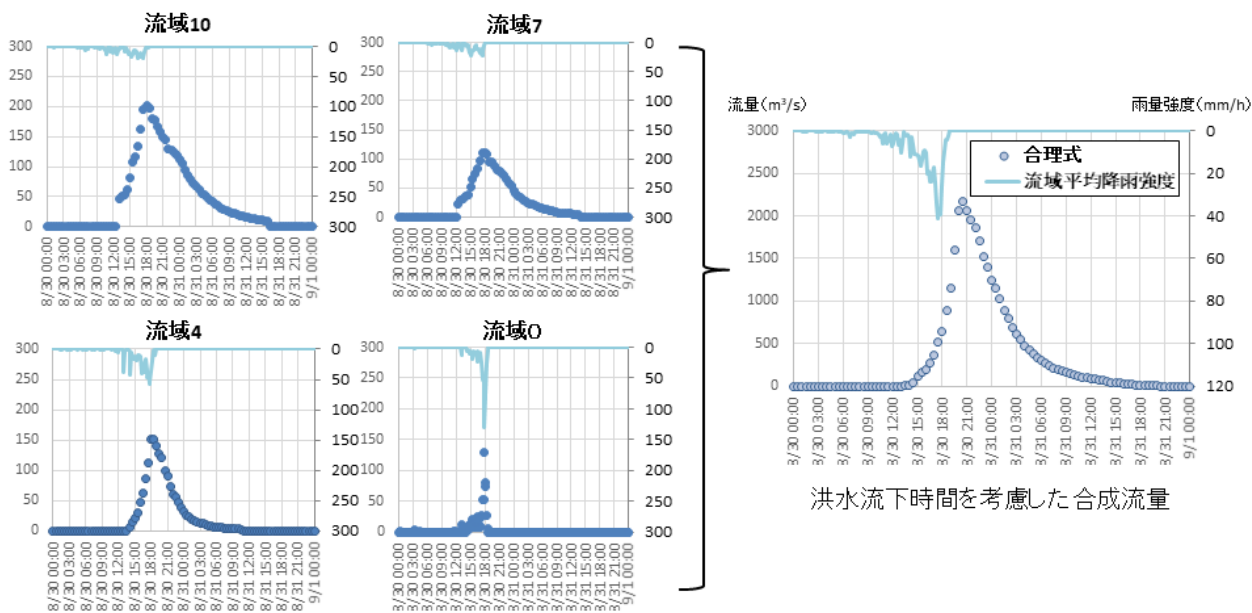


図 3-2-4 分割流域の流量の合成

参考:ソースコード (Java)を提供可能である。

3.2.2. 合理式による洪水水位予測とリードタイム

2016年8月台風10号豪雨による小本川の洪水に対して、合理式を適用した結果を示す。図3-2-5は、算出された流量を後述するH-Q式により水位に変換した結果で、図3-2-6はその拡大図である。これらによれば、11時の時点において、5時間50分後の16時50分には予測水位が地盤高に達しており、洪水災害の発生が懸念されることから、この時点で避難等に係る情報を出すことができる。実際には17時30分頃に駐車場が浸水し始めており、この場合のリードタイムは、5時間50分となる。

このように、深刻な洪水災害の発生は、ある程度のリードタイムをもって予測することが可能であり、それぞれの地域においてこのような洪水予測システムを整備できれば、災害情報の発信ばかりでなく、地域住民の避難行動を起こす動機付けのツールとしても活用できる。

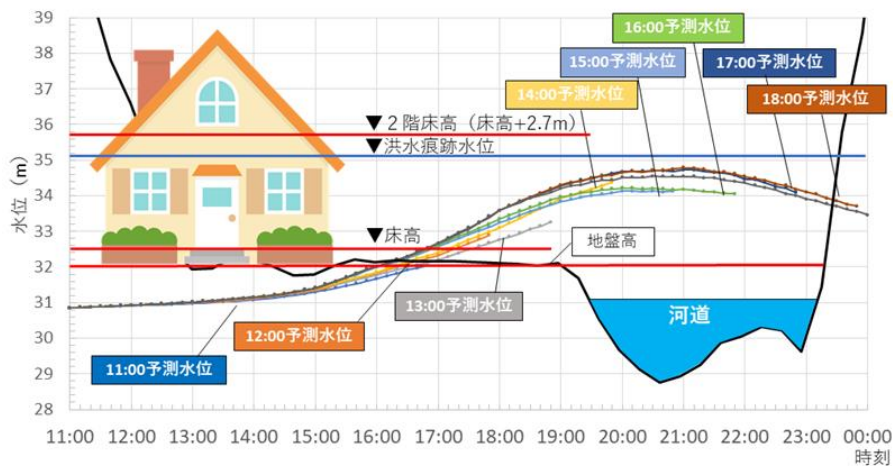


図 3-2-5 岩手県小本川を対象とした合理式による洪水水位予測。場所は、2016 年 8 月台風 10 号豪雨に伴う洪水災害で被災した福祉施設のところである。

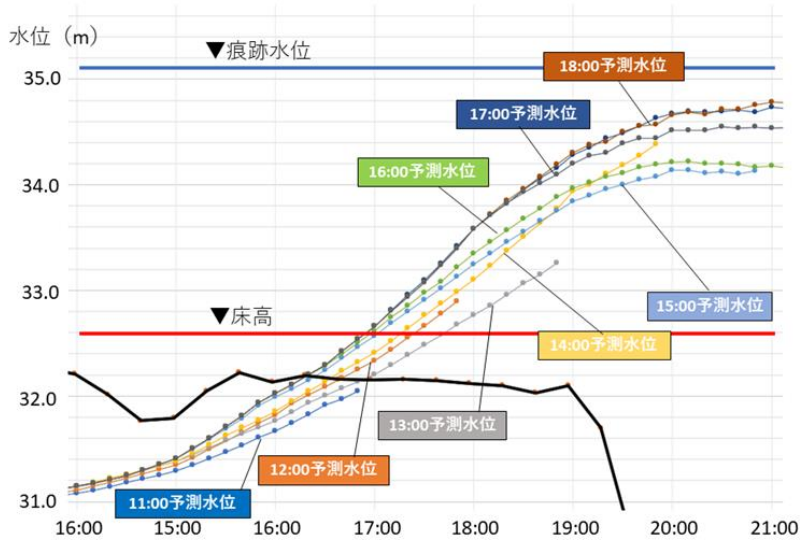


図 3-2-6 拡大図 (図 3-2-5 の洪水水位)

3.3. RRI モデルによる流出解析

RRI(Rainfall-Runoff-Inundation)モデルは降雨を入力条件とし、河道流量から洪水氾濫までを流域スケールで一体的に解析できる分布型モデルの一つである。本モデルは、メッシュ標高データを用いて表層地形を表現し、降雨流出も平面二次元流れとして解析するものである。そのため、降雨流出特性をメッシュ単位で表現でき、降雨の時空間分布の影響も考慮できる。

斜面流出過程については、山地のように側方地中流が卓越する区域と平地のように鉛直浸透流が卓越する区域を土地利用条件等から選択することができる。ただし、中山間地河川では流域の大半が山地であると考えられるため、ここでは土地利用の分類はすべて山地として取り扱っている。また、本モデルでは、斜面や河道の流出過程は移流項を省略した運動方程式において、Diffusive wave 法による近似式によって追跡され、斜面と河道の水交換が考慮されている。RRI モデルは分布型モデルの一種であり、任意地点において流量の出力が容易にできるため、水位流量関係式さえ作成されていれば、水位観測所だけでなく任意地点において洪水危険度を直接的に評価することができる。

なお、RRI モデルの実行ファイルやソースコード、モデル構築をサポートする RRI-GUI は、土木研究所 ICHARM のホームページから常に最新版をダウンロードできるようになっている。

3.3.1 解析における留意事項

・空間解像度

RRI モデルはリアルタイム氾濫予測シミュレーションに主眼を置いて開発された経緯があるため、適応時間ステップレンゲクッタ法の適用や OpenMP による並列化プログラミングが実装されており、計算負荷を小さくする設計がなされている。そのため、空間的に高解像度のメッシュサイズでの解析が可能である。表 3-3-1 には、小本川(岩手県岩泉町)や花月川(大分県日田市)を例として、RRI モデルの空間解像度と6時間先までの予測シミュレーションに要した最大演算時間を示す。なお、この時間には実況レーダー雨量や予測雨量のデータ抽出・展開時間は含まれていないが、1分程度の時間をみれば十分なレベルである。

表 3-3-1 空間解像度と予測シミュレーション時間

対象河川	流域面積	空間解像度	メッシュ数	最大演算時間 (6時間先まで)	備考
小本川	731[km ²]	4s(≒100m)	61,985	65秒	地理座標系
花月川	136.1[km ²]	2s(≒50m)	39,489	44秒	地理座標系

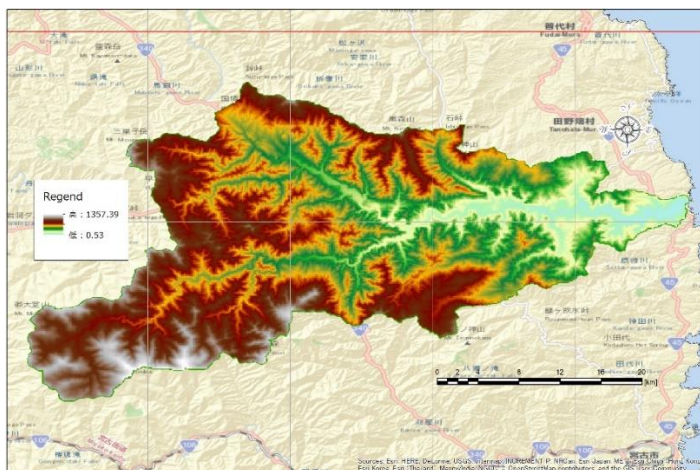
PC スペック: Intel Core i7 CPU 3.10GHz (最大 3.4GHz), Memory 16GB

・地形データの準備

RRI モデルの基本的な地形データは①DEM(Digital Elevation Model)、②DIR(Direction)、③ACC(Accumulation)の3種類である。

- ① DEMは標高データである。DEMデータは地盤高情報を平面的な配列として格納したファイルであり、国土地理院から取得できる基盤地図情報 数値標高モデル(5m・10m)⁴⁾のデータを基本とするのが良い。任意のメッシュサイズからファイルを作成するにあたり、RRI-GUIを活用することでGIS等を活用するより容易な作業を実現できる。

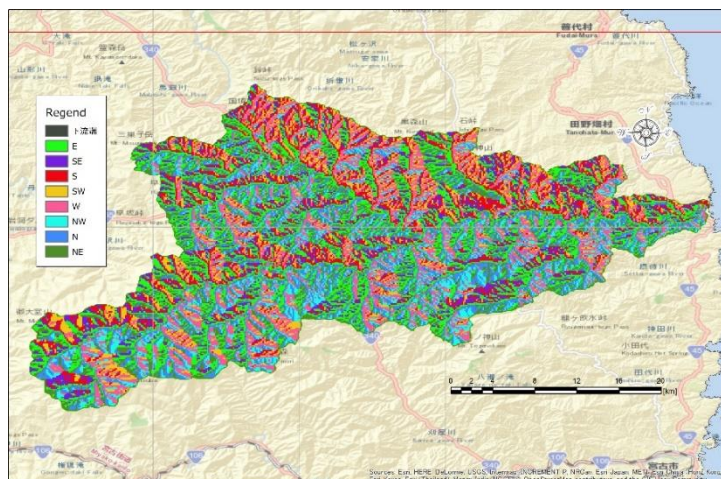
参考:国土地理院ダウンロードサイト:<http://www.gsi.go.jp/kiban/>



Sources (base map): Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

図 3-3-1 DEM(標高)データ

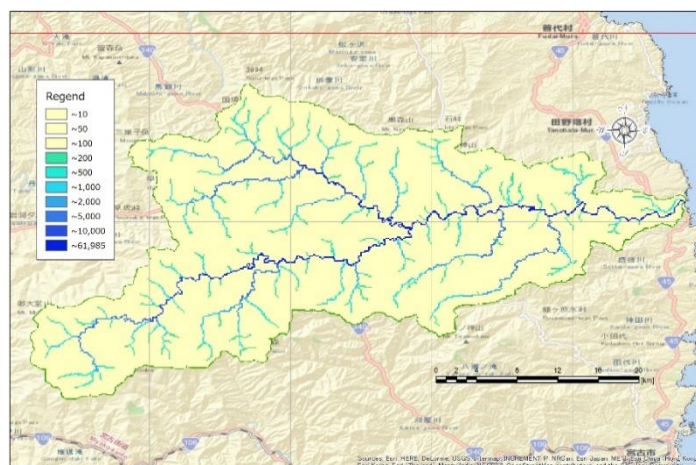
- ② DIRは、メッシュに対する流下方向を平面的な配列として格納したファイルである。流下方向は4方向か8方向かを選択できるが本書では8方向を基本としている。RRIモデルは二次元浅水方程式を基本としているためDIRは計算上必要なファイルではなく、河道モデルの位置を特定する基礎情報として使われる。なお、Kinematic wave法を指定した場合にはDIRに応じた地形勾配で斜面の洪水流が追跡される。



Sources (base map): Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

図 3-3-2 DIR(流下方向)データ

- ③ ACCは当該メッシュより上流のメッシュ数を二次元配列として格納したファイルである。②DIRから当該メッシュより上流に存在するメッシュ数をカウントし、この情報を元に河道メッシュの位置を特定することに利用される。逆に言えば、河道メッシュがあるかないかの判定にはDIRの設定が重要と言える。最後に、窪地処理や逆勾配を修正する処理を必要とし、これについても作成プログラム(demAdjust2.exe)が同梱され、主に①DEMをaDEMとしてファイル出力する。



Sources (base map): Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

図 3-3-3 ACC データ

・土地被覆・土質データ

降雨浸透、斜面流出、河道流出に関わる計算において設定される幾つかのパラメータは、土地被覆および土質データに基づいて、これらの一般的な値を入力する。本書では中山間地域を対象としているため土地利用は山地のみとして検討したが、土地利用を詳細に分類すべきと判断される場合には、国土数値情報土地利用細分メッシュ(100m メッシュの土地利用)の情報をもとに山地と平地に区分されたい。国土数値情報ダウンロードサイト:<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>

・降水量データの準備

時系列毎に平面的な配列として雨量データを作成する必要がある。RRI-GUI では、複数の観測点データから Thiessen 法によって 2 次元データを作成するプログラムが用意されている。本書で示す洪水予測のように、レーダー雨量を用いる場合には国土交通省や気象庁等から XRAIN や解析雨量等を収集し、これらを RRI モデルの雨量データフォーマットに変換する必要がある。構造格子であれば計算領域のメッシュ形状と雨量メッシュの形状は異なっても RRI モデル内部で処理されるため問題は生じない。例えば、計算領域が 100m メッシュの正方形であり、雨量データは標準地域メッシュに準拠した 1km メッシュの長方形であっても問題ない。

•境界条件の設定:任意データ

ダム、上流端における流量・水位、下流端における河川の水位等は、境界条件として設定できる。

•河道の横断形状:必須データ

RRI モデルでは、Kinematic wave 法と異なり、河道と洪水氾濫領域の間の水の流れが解析できるようになっている。この場合には、河道の情報が重要となる。河道形状(河道幅・深さ)の与え方については3種類が用意されている。

1)経験式(Regime 則)による与え方

河道幅や河道深さは、流域面積の関数として決定される。すなわち、河道幅と河道深さを流域面積のべき関数として数値化し、これらは ACC と空間解像度から求まる。このとき、堤防高はある流域面積以上の場合に一樣の高さとして与えられる。

$$W = C_W A^{S_W}$$

$$D = C_D A^{S_D}$$

ここに、 W :河道幅[m]、 D :河道深さ[m]、 C_W , S_W , C_D , S_D :河道形状係数、 A :流域面積[km²]である。

2)河道幅・深さを直接指定する与え方

河道幅、河道深さ、堤防高をDEMファイルと同様のフォーマットで平面的な配列として与える。河道の狭窄や河床変動が著しい場合にはこの方法が推奨される。

3)断面特性としての与え方

測量断面やLPデータがある場合には水深に応じた断面特性を事前に計算しておき、河道の横断形状として与えることができる。外水氾濫が頻発するような河川では河道内の水位上昇を正確に解くことが求められるため、このような詳細なモデリングが求められる。

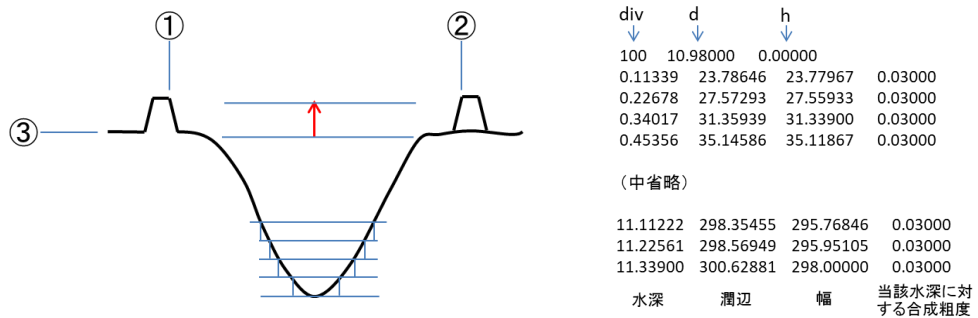


図 3-3-4 河道断面の設定方法

本書では、1)経験式による手法を標準としたが、河道特性や浸水実績を鑑みて適切な河道モデルを構築する必要がある。

・流量ハイドログラフの抽出

RRI モデルは、分布型モデルであるため任意地点で流量ハイドログラフが抽出でき、出力時間間隔も任意で設定できる。図 3-3-5 には小本川における主要河川の下流端で抽出したハイドログラフを一例として示した。

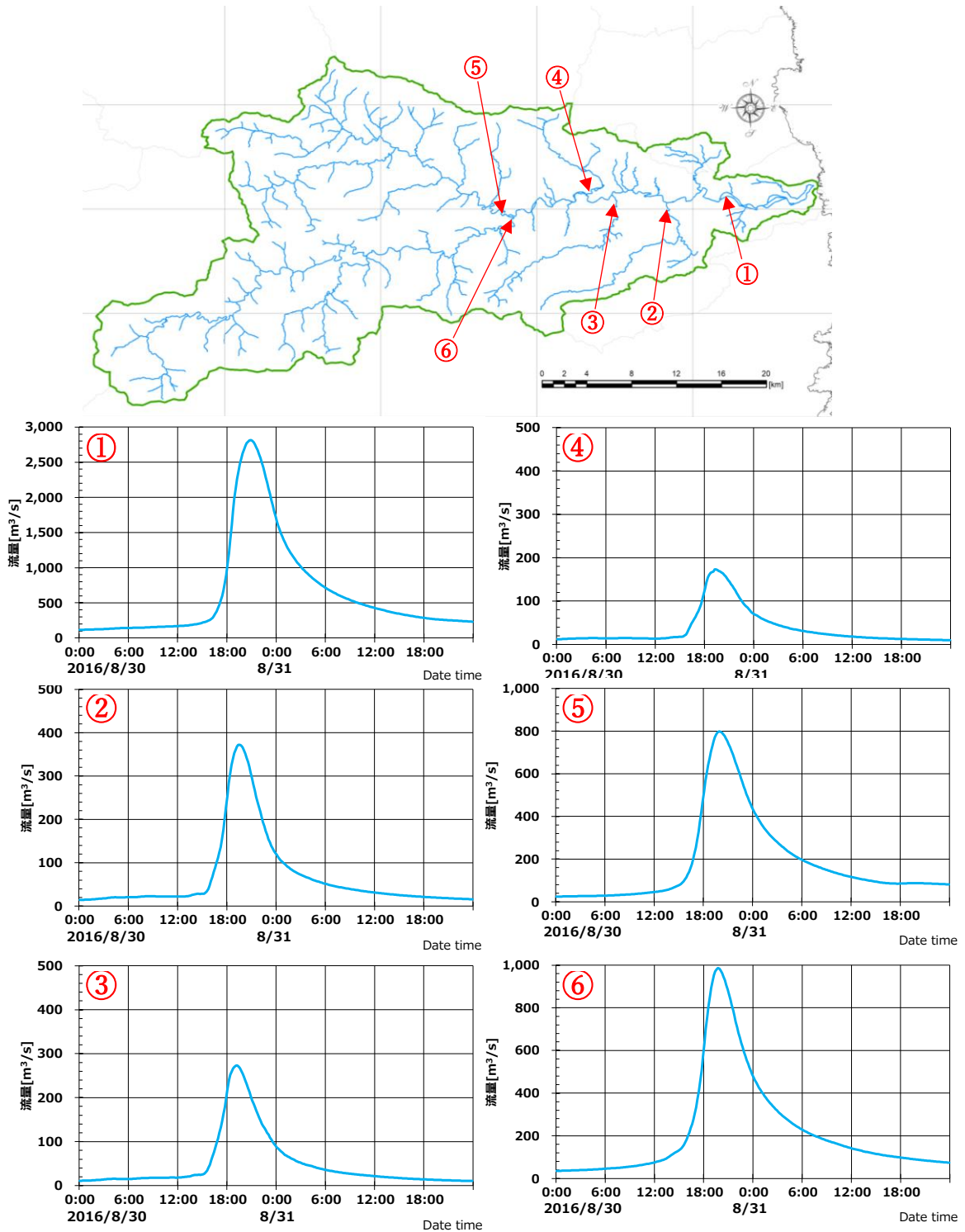


図 3-3-5 任意地点での流量ハイドログラフ

3.3.2. RRI モデルによる洪水水位予測とリードタイム

2016 年 8 月台風 10 号豪雨による小本川の洪水に対して、RRI モデルを適用した結果を示す。

図 3-3-6 は、流域平均した解析雨量の降雨強度データを時系列で示した図である。15 時頃から雨が強くなり、雨量のピークは概ね 17 時半から 18 時頃に発生し、累加雨量は 138mm 程度である。実際の洪水予測には、それぞれ 30 分間隔で更新される解析雨量および降水短時間予報のメッシュデータが用いられるが、煩雑さを避けるためにここでは 1 時間間隔に省略する。

図 3-3-7 は、降雨データのうち、解析雨量と降水短時間予報に対する洪水流量(ハイドログラフ)を RRI モデルによって算定し、前述の H-Q 関係を用いて洪水水位に変換した予測水位である。同図によれば、12 時の時点の予測において、16 時 50 分には水位が地盤高を越え、17 時 15 分頃には家屋床を超えていくことが予測されている。実際には、17 時 30 分頃に高齢者福祉施設の駐車場が浸水し始めており、18 時頃には家屋の床高まで浸水したとの報告がある。地盤高を越える水位を災害発生の危険水位とし、家屋床高を越える水位を深刻な災害発生の危険水位とすれば、災害発生および深刻な災害の発生に対するリードタイムは、それぞれ 4 時間 50 分及び 5 時間 15 分となり、本解析は洪水予測の目的に叶う結果が得られていると判断できる。

なお、このような計算では、実際の洪水のピークが近づくと予測水位の精度は上がるが、その分リードタイムは短くなり、例えば、14 時及び 15 時の水位予測における災害発生のリードタイムは、それぞれ 3 時間および 2 時間 10 分のように予測されている。

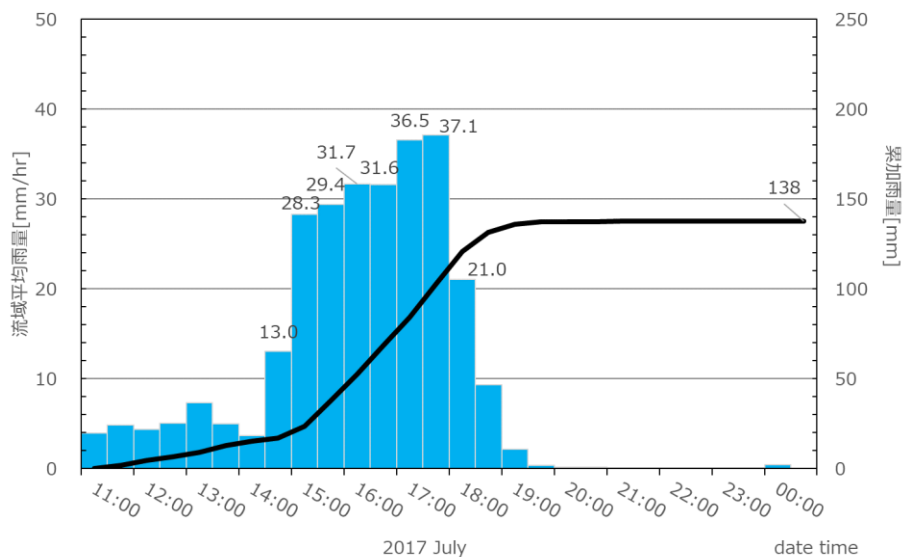


図 3-3-6 小本川流域における流域平均雨量のハイトグラフと累加雨量

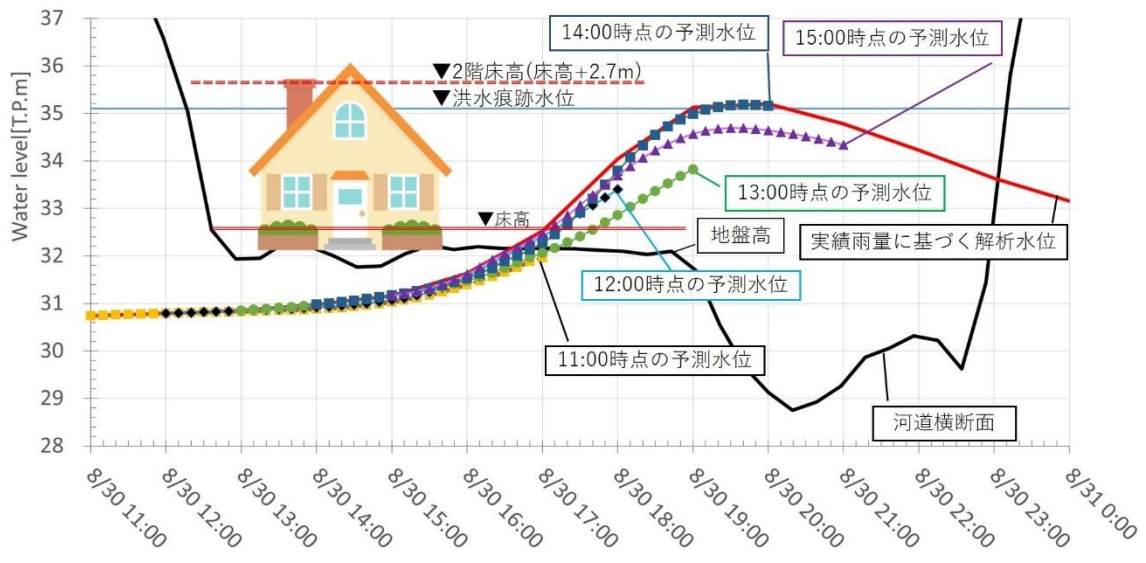


図 3-3-7 岩手県小本川を対象とした RRI モデルによる洪水水位の予測。場所は、2016 年 8 月台風 10 号豪雨に伴う洪水災害で被災した乙茂地区の福祉施設のところである。

4. 流量—水位の変換モデル

4.1 H-Q 関係式

図 4-1-1 は、洪水予測の基礎となる水位—流量関係 (H-Q 関係) である。ここでは、国土地理院の基盤地図情報(5m メッシュ DEM)²⁾を用いて、9 人の犠牲者を出した乙茂地区の高齢者福祉施設を含む小本川谷底の横断面を抽出し、河床材料や植生等の状況から、低水路の粗度係数を 0.031 あるいは 0.035 とし、それ以外の領域の粗度係数を 0.06 とし、一般断面等流計算を行って H-Q 関係を求めている。降雨流出計算により算出される流量は、この H-Q 関係を用いて水位に変換される。

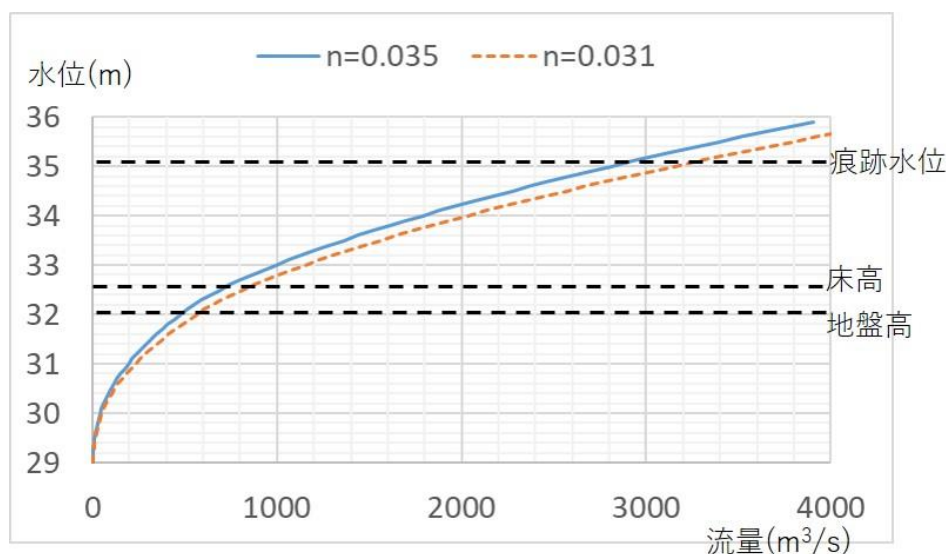


図 4-1-1 乙茂地区の横断面における水位—流量関係 (H-Q 関係)

4.2. 流量～水位変換の手順

水位—流量カーブは、地域における洪水災害の発生を予見する重要な指標である。水位—流量観測が定期的に行われている観測所があれば、算出した流量を過去の水位—流量関係に基づいて決定することができるが、中山間地河川ではそのような観測所が十分に存在するとは限らない。水位—流量観測所がない場合に、等流計算によって流量を水位に変換する手順について、以下に示す。

- ・集落や施設の分布、河道の平面形状、縦断形状に着目して、断面を抽出する。抽出する断面の数は、それぞれの集落に対する水位情報の代表性を勘案して定める。

- ・河道断面を抽出するにあたり、定期横断測量結果があれば、それを用いる。それが無い場合には、地方整備局による既往の LP 測量結果の利用や、十分な河道幅があるのであれば、国土地理

院の基盤地図情報数値標高モデル(5m)等の DEM データから河道断面を推計することもできる。ただし、DEM データからの河道断面推計は必ずしも精度が良好でないため、一断面でも地形測量を行うことが望ましい。

・河道の横断形状、河床材料、植生等を勘案して河川の粗度係数を設定する。設定に当たっては、次の断面分割法(井田の方法⁵⁾)を用いることができる。たとえば、**図 4-2-1** のような横断形状が得られたものとし、各領域の流水断面積、潤辺、粗度係数をそれぞれ、 A_1, s_1, n_1 のようにすると、断面の合成粗度 n は、各断面に Manning 則を適用し、各断面の流量の和と全断面の流量を等値することによって求められる。これは次式のようなものである。

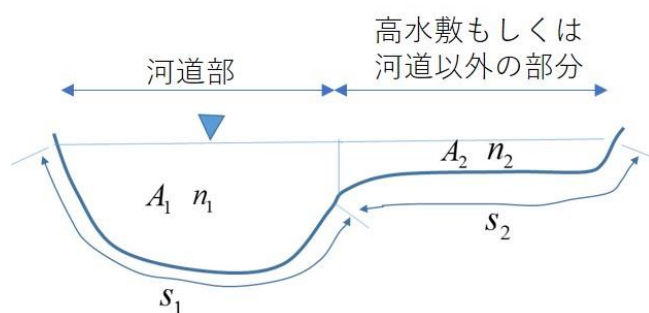


図 4-2-1 断面分割と合成粗度の算出

$$n = \frac{R^{2/3} A}{\frac{1}{n_1} R_1^{2/3} A_1 + \frac{1}{n_2} R_2^{2/3} A_2} \quad (1)$$

$$R_1 = A_1 / s_1 \quad R_2 = A_2 / s_2 \quad R: \text{径深、} R = A / s \quad (A = A_1 + A_2, s = s_1 + s_2)$$

河道部の粗度係数 n_1 については、マニング・ストリクラーの式により、

$$n_1 = 0.0417 k_s^{1/6} \quad (2)$$

として、相当粗度 k_s については中山間地河川であることを考慮して、以下のように与える。

$$k_s = 2 d_{84} \quad (3)$$

ここで、 d_{84} は河床材料の粒度分布調査により算出した 84% 通過粒径とするが、河床材料粒度分布調査が難しい場合には、**表 4-2-1** を参考にして n_1 を決定する。

表 4-2-1 河床部の代表粒径と粗度係数の関係

d _R : 代表粒径	n : 粗度係数		AとBの区分法
	A	B	
岩 盤	0.035~0.050		A : 河床が平坦で砂州が目立たない。また表層に突出する粒径の大きな石が目立たない。 B : 河床の凹凸が大きく粒径の大きな石が突出する。
玉石 (40cm~60cm)	0.037 ¹⁾	0.042 ²⁾	
〃 (20cm~40cm)	0.034 ¹⁾		
〃 (10cm~20cm)	0.030 ¹⁾		
粗礫[大] (5cm~10cm)	0.035 ²⁾		
〃 [小] (2cm~5cm)	0.029 ²⁾	0.034	

注：1)はマンゲ・ストリカーの式より求めた値。

2)は $\tau_*-\psi$ グラフより求めた値。

高水敷もしくは氾濫が想定される領域の粗度係数 n_2 については、植生や地被状況に応じて決定する。植生が多く繁茂している場合、一般的には図 4-2-2 のような資料を参考にして設定する。なお、本予測手法が想定するような急勾配の中山間地河川においては、著者らの検討によれば、 $n_2 = 0.06$ としても良い。

上記の粗度の設定にあたっては、河川砂防技術基準 計画編、河川砂防技術基準(案)設計編 (I・II)、中小河川計画の手引き(案)、美しい山河を守る災害復旧基本方針、等が参考になる。

各領域において粗度を設定し、断面形状を用いて、水位と流水断面積、水位と潤辺の関係を作成しておけば、式(1)によって合成粗度が求められる。

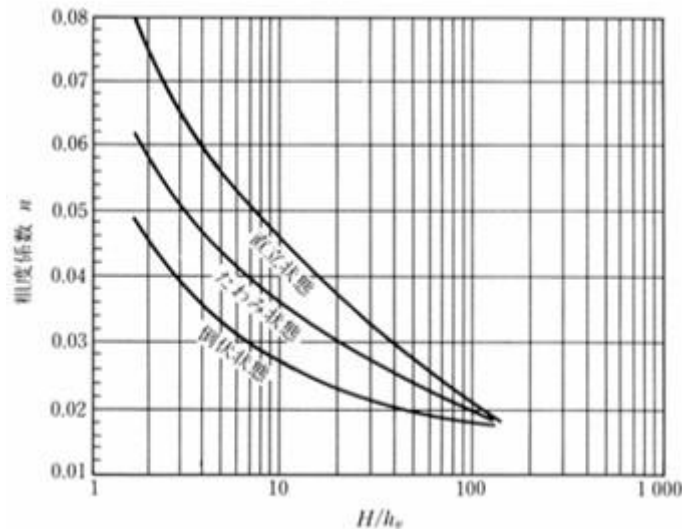


図 4-2-2 流水中の草の状態と粗度係数の関係 (H : 水深, h_v : 植生の高さ)

•Manning 則によれば、流量は次式によって与えられる。

$$Q = \frac{1}{n} i^{1/2} R^{2/3} A \quad (4)$$

ここに、 i :エネルギー勾配あるいは河床勾配である。

径深 R および流水断面積 A は、水位(水深)の関数であるから、式(4)より任意の水位に対する流量が定められる。すなわち水位-流量カーブが求められる。

•RRI モデルは河道情報を内包しているため、直接水位を算出することができる。ただし、河道断面の抽出とその確認、河道内の粗度設定等を考慮すると、RRI モデルでは流量のみを算出して、別途水位への変換を行うことを推奨する。

•水位観測している観測所があれば、本予測手法による水位予測精度の向上に用いることができる。

5. その他の留意事項

5.1 本手法の適用できる流域について

本手法は、簡易な予測手法によって中山間地河川の洪水予測を行うものであり、適用できる河川流域および水位予測地点について、以下のような制約がある。

- ・対象流域の河道に大規模なダム・湖沼等の貯留効果を発揮する施設等がないこと
- ・水位評価地点の河道において、急拡・急縮、大きな湾曲、堰等の横断構造物等の等流条件を阻害する要因がないこと

ただし、上記に該当する河川であっても、別途貯留効果を評価するモデルの整備や適切な水理モデルによって評価することで実現象を再現できるモデリングが可能である。

また、対象河川の流域面積が非常に小さい場合、予測水位の精度は予測雨量の精度により依存するため、そのような河川では必ずしも本予測手法が有効でない場合もある。

一般的にリードタイムは、流域面積や流域形状ばかりでなく降雨の時空間分布にも依存するが、先行して検討した河川において、流域面積とリードタイムとの関係は表 5-1 に示す通りである。

表 5-1 評価地点における流域面積とリードタイムとの関係

	出水年 (要因)	流域面積 (km ²)	リードタイム (RRI)	リードタイム (合理式)	リードタイム の判断基準
小本川 (二級河川)	2016 (台風性)	658	5 時間 50 分	6 時間	家屋床高 超過
花月川 (筑後川水系 指定区間)	2017 (前線性)	126	2 時間 10 分	1 時間 30 分	氾濫危険水位 超過
桧沢川 (阿賀野川水 系指定区間)	2015 (前線性)	61	20 分	—	氾濫発生

表 5-1 は、異なる降雨イベントを対象としていることに注意を要するものの、これらの情報を参考にして、本予測手法を運用するにあたって適切な流域を選定することが望ましい。

5.2 水位計の活用について

現在、全国的に安価で簡易に設置できる水位計が各河川に導入されており、そのデータは本予測手法の精度向上に活用することができる。具体的には、過去に生じた出水イベントに対して本予測手法を用いて洪水予測を行い、その結果と水位計のデータとを対応させることによって、河床粗度係数の決定や、RRI モデルのパラメータ調整を行うことができる。

また、水位データがリアルタイムで利用できる場合には、予測計算において観測結果をデータ同化することにより、予測精度の向上が期待される。

5.3 実況雨量および予測雨量の入手について

現時点で国土交通省や気象庁から入手可能な実況雨量と予測雨量を表 5-2 に示す。

表 5-2 実況雨量と予測雨量

区分	降雨プロダクト名	データ形式	空間解像度	配信頻度	予測時間
実況	国土交通省/気象庁 地上雨量	WSF形式	—	10分	—
	気象庁 全国合成レーダー	GRIB2形式	1km	5分	—
	気象庁 高解像度降水ナウキャスト	GRIB2形式	250m	5分	—
	気象庁 解析雨量	GRIB2形式	1km	30分	—
	国土交通省 Cバンドレーダ	binary形式	1km	5分	—
	国土交通省 XRAIN	CSV形式/binary形式	250m	1分	—
予測	気象庁 降水ナウキャスト	GRIB2形式	1km	5分	1時間先
	気象庁 高解像度降水ナウキャスト	GRIB2形式	250m	5分	30分先
	気象庁 降水短時間予報	GRIB2形式	1km	30分	6時間先
	国土交通省 移動解析レーダ	binary形式	1km	10分	3時間先

本書では、統一河川情報システムから実況雨量および予測雨量を取得することを前提とする。

図 5-1 には、リアルタイム運用にあたっての雨量データの伝送および変換プロセスイメージを示す。

まず、国土交通省や気象庁が観測・解析したデータは、統一河川情報システムにアーカイブされる。河川管理者は、統一河川情報システムとの Socket 通信の専用線や NFS サーバーを用いてデータを取得する必要がある。

レーダー雨量はそのほとんどがバイナリデータとして圧縮されているため、中間ファイルとしてテキストファイルに変換し、その後、流出モデル毎の雨量データフォーマットに変換する。

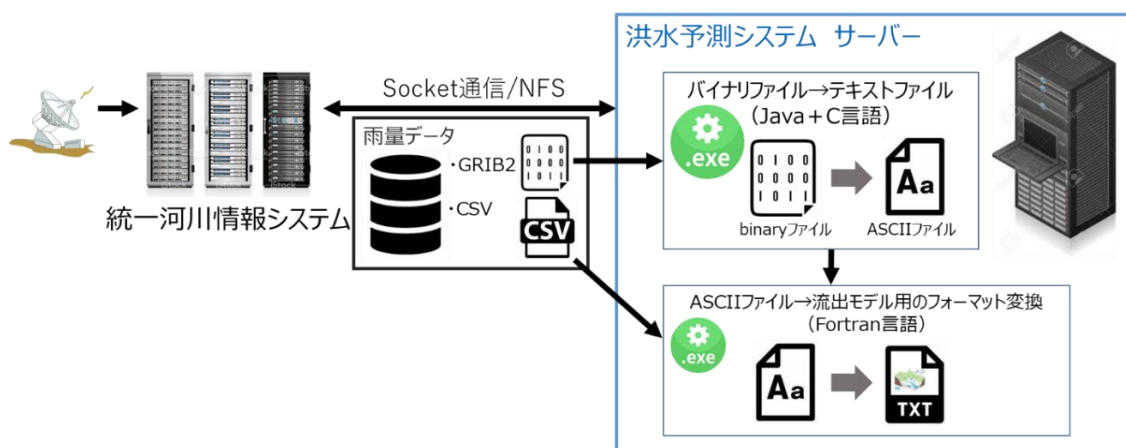


図 5-1 雨量データの変換プロセスイメージ図

6. まとめ

中山間地河川を抱えた地域の避難予警報システムの基礎を構築するため、それぞれ分布型流出モデルおよび合理式を適用して、豪雨に伴う洪水水位をいち早く予測するシステムについて検討するとともに、2016年8月豪雨を対象として岩手県小本川の洪水予測を行い、その結果を紹介した。本報において示したように、いずれの方法においても、小本川程度の流域を持つところでは、予測降雨を用いて災害の発生や深刻な災害をもたらすような洪水を事前に予測できるとともに、その情報によって避難行動を起こすためのリードタイムが得られることが示されている。

洪水災害に係る危険水位予測のリードタイムは、対象となる地点の流域の大きさ、流域斜面の特性、および雨の降り方や予測雨量の精度等に依存する。そのため、ここで提案している洪水予測手法の適用性をさらに検討するため、2012年7月および2017年7月筑後川上流の花月川(126km²)⁶⁾、2015年9月阿賀川上流の桧沢川(79km²)等において洪水予測を行っている。これらによれば、小本川よりさらに小さな流域においても、水位が地盤高を越える時点や家屋床高を越える時点を含めて、洪水ハイドログラフの予測結果は良好であることが確認されている。

[参考文献]

- 1) 江頭進治, 小関博司, 山崎祐介, 南雲直子, 原田大輔, 萬矢敦啓, 工藤 俊 : 平成 28 年 8 月台風 10 号豪雨による岩手県小本川洪水災害調査報告, 土木研究所資料第 4348 号, 2016 年 11 月.
- 2) Sayama, Takahiro, et al. : Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, *Hydrological Sciences Journal*, 57.2 (2012): 298-312.
- 3) 角屋睦 : 流出解析手法 (その 8) - 洪水到達時間と合理式 -, 農業土木学会誌 48.8 (1980), 587-592.
- 4) 国土地理院: 基盤地図情報, <http://www.gsi.go.jp/kiban/>.
- 5) 井田至春: 広巾員水路の定常流-断面形の影響について, 土木学会論文集, 第 69 号 別冊(3-2), 1960.
- 6) 中村 要介, 池内 幸司, 阿部 紫織, 小池 俊雄, 江頭 進治 : 中山間地河川における洪水予測と予測水位誤差 -平成 29 年 7 月九州北部豪雨を例として-, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, I_1177-I_1182, 2018.

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4376 April 2018

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754